

Το νέο κβαντικό σύμπαν

2η έκδοση, επηυξημένη και πλήρως αναθεωρημένη

κάτοπτρο

Tony Hey και Patrick Walters

Η ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ μάς βοηθά να κατανοήσουμε όχι μόνο τα άτομα και τους πυρήνες αλλά και όλα τα χημικά στοιχεία, ακόμα και τα άστρα. Καθιστά δυνατή την κατασκευή των τοιπ πυριτίου όπως και των μυριάδων εφαρμογών των λέιζερ, ερμηνεύει τη δομή του πλανήτη Δία και εξηγεί το μηχανισμό παραγωγής ενέργειας του Ήλιου και των υπόλοιπων άστρων. Η κβαντική μηχανική μάς έχει χαρίσει βαθιά γνώση της δομής του Σύμπαντος και μας υπόσχεται απεριόριστη ενέργεια χάρη στις πυρηνικές αντιδράσεις, ενώ παράλληλα έδωσε υπόσταση στο τρομακτικό ενδεχόμενο της αυτοκαταστροφής μας μέσω των πυρηνικών όπλων.

Την επιτυχία που γνώρισε *Το κβαντικό σύμπαν*, το οποίο πρωτοεκδόθηκε το 1987, ακολούθησε ένα πλήθος συναρπαστικών ανακαλύψεων στο πεδίο της κβαντικής μηχανικής. Το *Νέο κβαντικό σύμπαν* αποτελεί μια προσιτή εισαγωγή στις θεμελιώδεις ιδέες της κβαντικής φυσικής, και παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν την καθημερινότητά μας. Σε αυτό εξηγούνται διάφορα κβαντικά παράδοξα όπως η περιπετειώδης ζωή της γάτας του Schrödinger, το παράδοξο Einstein-Podolsky-Rosen και η ανισότητα Bell. Το βιβλίο αναγγέλλει την επερχόμενη επανάσταση της νανοτεχνολογίας, περιγράφει την κβαντική κρυπτογραφία, την κβαντική υπολογιστική και την κβαντική τηλεμεταφορά, ενώ τελειώνει με έναν απολογισμό της κβαντικής μηχανικής και της επιστημονικής φαντασίας.

Το νέο βιβλίο αποτελεί προσιτή και συναρπαστική εισαγωγή σε έναν από τους πιο σημαντικούς επιστημονικούς κλάδους του 21ου αιώνα, και τον παρουσιάζει με απλό, μη μαθηματικό τρόπο. Είναι κατάλληλο για τελειοφοίτους λυκείου, φοιτητές θετικών επιστημών, και οποιονδήποτε επιθυμεί να κατανοήσει τη σύγχρονη επιστημονική σκέψη αλλά και τον τρόπο με τον οποίο η φυσική κατέστησε εφικτές τις νέες τεχνολογίες που αλλάζουν τη ζωή μας.

ΕΙΚΟΝΑ ΕΞΩΦΥΛΛΟΥ: Τρισδιάστατη γραφική παράσταση που δείχνει τα αποτελέσματα της άρσης της συνεκτικότητας (της αποσυγκρότησης) στην κατάσταση του κβαντικού μπιτ (q-μπιτ).

Ο TONY HEY απέκτησε το διδακτορικό του δίπλωμα στη θεωρητική φυσική από το Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης και εργάστηκε ως ερευνητής στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καλιφόρνιας και το CERN. Σήμερα είναι καθηγητής ηλεκτρονικής και υπολογιστών στο Πανεπιστήμιο του Σαουθάμπτον (νότια κεντρική Αγγλία), και διευθυντής του βρετανικού προγράμματος «e-science». Είναι εταίρος της Βασιλικής Ακαδημίας Μηχανολογίας.

Ο PATRICK WALTERS έλαβε το διδακτορικό του δίπλωμα στη θεωρητική φυσική από το Πανεπιστήμιο του Ντάραμ (βορειοανατολική Αγγλία). Διδάσκει φυσική σε ενήλικες, εντάσσοντάς τη στο ευρύτερο πολιτιστικό και ιστορικό πλαίσιο, και αυτή την περίοδο είναι λέκτορας στο Τμήμα Επιμόρφωσης Ενηλίκων του Πανεπιστημίου της Ουαλίας στο Σουόνσι.

ΤΟ ΝΕΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΣΥΜΠΙΑΝ

Tony Hey

Πανεπιστήμιο του Σαουθάμπτον

Patrick Walters

Πανεπιστήμιο της Ουαλίας, Σουόνσι

Συγγραφείς: Tony Hey, Patrick Walters
Τίτλος: *Το νέο κβαντικό σύμπαν*
Τίτλος πρωτοτύπου: *The New Quantum Universe*
Copyright © 2003, Tony Hey, Patrick Walters
Έκδοση: Cambridge University Press

Copyright © για την ελληνική γλώσσα: Εκδόσεις Κάτοπτρο
—Αλ. Μάμαλης και Σία Ο.Ε.
Πρώτη έκδοση: Ιούνιος 2005

ISBN: 960-7778-86-3

Μετάφραση και επιστημονική επιμέλεια:
Γιώργος Κατσιλιέρης, φυσικός (κεφ. 5, 6, 7, 8, 11, 12)
Νίκος Σιμάτος, φυσικός (κεφ. 1, 2, 3, 4, 10, 13)
Βαγγέλης Βιτωράτος, καθηγητής φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών (κεφ. 8, 9)
Γλωσσική επιμέλεια και τυπογραφικές διορθώσεις: Νίκος Ντάικος
Επιμέλεια έκδοσης: Αλέκος Μάμαλης

Στοιχειοθεσία, σελιδοποίηση: Κάτοπτρο / Λ. Μαντζαβίνος
Φιλμ, μοντάζ: Γ. Κεραμάς
Εκτύπωση: Δεκάλογος / Ν. Πουλόπουλος - Α. Μπινίκος
Βιβλιοδεσία: Libro d' oro / Χ. Βασιλειάδης - Ι. Μπουντάς

Κεντρική διάθεση: ΚΑΤΟΠΤΡΟ
Εκδόσεις: Κορυζή 8, 117 43 Αθήνα,
τηλ.: 210 9244852, 210 9244827, fax: 210 9244756
Βιβλιοπωλείο: Στοά του Βιβλίου (Πανεπιστημίου και Πεσμαζόγλου 5),
105 64 Αθήνα, τηλ.: 210 3247785
Internet site: www.katoptro.gr e-mail: info@katoptro.gr

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή ή η ανατύπωση μέρους ή όλου του βιβλίου
με οποιονδήποτε τρόπο ή μέσο χωρίς την έγγραφη άδεια των εκδοτών.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	11
Πρόλογος	15
«Οδικός» χάρτης	17
1 Κύματα εναντίον σωματιδίων	19
Επιστήμη και πείραμα	19
Φως και κβαντική μηχανική	23
Το πείραμα της διπλής σχισμής	26
2 Ο Heisenberg και η αβεβαιότητα	35
Παρακολουθώντας τα ηλεκτρόνια	35
Η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg	39
Αβεβαιότητα και φωτογραφία	42
Οι κβαντικές διαδρομές του Feynman	46
Φράκταλ: ένα μαθηματικό αξιοπερίεργο	49
3 Ο Schrödinger και τα υλικά κύματα	53
Τα υλικά κύματα του de Broglie	53
Η εξίσωση του Schrödinger	55
Οπτική με ηλεκτρόνια και νετρόνια	58
4 Άτομα και πυρήνες	67
Το άτομο του Rutherford	67
Κβάντωση της ενέργειας	74
Το άτομο του υδρογόνου	81
Κυματοσυναρτήσεις και κβαντικοί αριθμοί	86
Παγίδες ατόμων και φως	89
5 Το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας	93
Διαπέραση φράγματος	93
Κυματικό φαινόμενο σήραγγας	95
Εφαρμογές του κβαντικού φαινομένου σήραγγας	97
Πυρηνική φυσική και διάσπαση α	106
Πυρηνικές αντιδράσεις και η σχέση μάζας-ενέργειας του Αϊνστάιν	113
Ραδιενέργεια, πυρηνική σύντηξη και η ατομική βόμβα	115
6 Ο Pauli και τα χημικά στοιχεία	127
Το spin του ηλεκτρονίου και η απαγορευτική αρχή	127
Τα χημικά στοιχεία	132

	Μέταλλα, μονωτές και ημιαγωγοί	136
	Τρανζίστορ και μικροηλεκτρονική	143
7	Κβαντική συνεργασία και υπερρευστά	153
	Φως λέιζερ	153
	Συμπύκνωση Bose και υπερρευστό ήλιο	162
	Ψυχρά άτομα	166
	Υπεραγωγιμότητα	172
	Το κβαντικό φαινόμενο Hall	177
8	Κβαντικά άλματα	181
	Ο Max Born και οι κβαντικές πιθανότητες	181
	Φωτόνια και πολωμένο φως	185
	Ο John Bell και το παράδοξο EPR	191
	Η γάτα του Schrödinger	198
	Η ερμηνεία των πολλών κόσμων	200
	Άρση της συνεκτικότητας	203
9	Κβαντική τεχνολογία	207
	Ο Richard Feynman και η νανοτεχνολογία	207
	Από το νόμο του Moore στις κβαντικές κουκκίδες	211
	Κβαντική πληροφορία	220
	Κβαντικοί υπολογιστές	225
	Κβαντική τηλεμεταφορά και τα σχετικά	233
10	Ο θάνατος ενός άστρου	237
	Ένα αποτυχημένο άστρο	237
	Η καύση του υδρογόνου	240
	Ερυθροί γίγαντες και λευκοί νάνοι	246
	Αστέρες νετρονίων και μαύρες τρύπες	250
11	Κανόνες Feynman	257
	Ο Dirac και τα αντισωματίδια	257
	Διαγράμματα Feynman και δυνάμει σωματίδια	264
	Κίνηση μηδενικού σημείου και διακυμάνσεις κενού	267
	Ακτινοβολία Hawking και μαύρες τρύπες	270
12	Ασθενή φωτόνια και ισχυρά γλοιόνια	277
	Το πείραμα της διπλής σχισμής και πάλι	277
	Η γέννηση της σωματιδιακής φυσικής	284
	Ασθενή φωτόνια και το κενό Higgs	293
	Κουάρκ και γλοιόνια	299
	Υπεραγωγοί, μαγνητικά μονόπολα και εγκλωβισμός των κουάρκ	303
	Πέρα από το Καθιερωμένο Μοντέλο	311
13	Κβαντική φυσική και επιστημονική φαντασία	319
	Προοίμιο: το άτομο και ο πυρήνας	319
	Πυρηνική ενέργεια και η «χρυσή εποχή» της επιστημονικής φαντασίας	323

Σημεία Jonbar, πολλαπλά σύμπαντα και η γάτα του Schrödinger	329
Νανοτεχνολογία και κβαντικοί υπολογιστές	335
Εν κατακλείδι	344
Επίλογος	347
<i>Παράρτημα 1 Το μέγεθος των πραγμάτων</i>	349
<i>Δυνάμεις του 10</i>	349
<i>Η κλίμακα μαζών</i>	350
<i>Η κλίμακα αποστάσεων</i>	350
<i>Η κλίμακα ταχυτήτων</i>	350
<i>Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα</i>	350
<i>Χρονικά διαστήματα</i>	353
<i>Παράρτημα 2 Επιλύοντας την εξίσωση του Schrödinger</i>	354
<i>Γλωσσάριο</i>	357
<i>Παραθέματα από τον R.P. Feynman</i>	371
<i>Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη</i>	373
<i>Ευρετήριο όρων και ονομάτων</i>	375

Εισαγωγή

Η εκλαίκευση της επιστήμης αποτελεί πλέον μια εδραιωμένη δραστηριότητα για βιβλιοπώλες και εκδότες. Η παραδοσιακή συνταγή για ένα «εμπορικό» βιβλίο εκλαίκευσης της επιστήμης προβλέπει κείμενο 100.000 περίπου λέξεων (γύρω στις 200 σελίδες) με σχετικά λίγα διαγράμματα ή εικόνες και στοχεύει σε ένα κοινό που το απαρτίζει ο μορφωμένος αναγνώστης ο οποίος διακατέχεται από γενικό ενδιαφέρον για την επιστήμη. Στο άλλο άκρο της κλίμακας βρίσκονται τα δημοφιλή επιστημονικά βιβλία αναφοράς, όπως είναι οι εγκυκλοπαιδείες και οι άτλαντες. Το κοινό στο οποίο απευθύνεται το παρόν βιβλίο κείται μεταξύ των δύο άκρων. Προσωπικά, επιθυμούσαμε το βιβλίο να μην προσελκύσει μόνο τον «μορφωμένο αναγνώστη», αλλά —και το θεωρούμε σημαντικότερο— να κεντρίσει το ενδιαφέρον και τη φαντασία των νέων ανθρώπων. Πιστεύουμε ότι έχει ζωτική σημασία να προσφέρουμε στους νέους ανθρώπους μια γεύση του πόσο συναρπαστική είναι η φυσική, ώστε να παρακινηθούν να αναλάβουν και οι ίδιοι πλέον την πρόκληση της ενασχόλησης μαζί της. Στις ημέρες μας, οι νέοι έχουν πολύ περισσότερες εναλλακτικές δυνατότητες, ενώ επικρατεί η γενική αίσθηση ότι οι φυσικές επιστήμες και τα μαθηματικά είναι «σκληρά» αντικείμενα. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι, για να γίνουν κατανοητά αυτά τα γνωστικά αντικείμενα, πρέπει να καταβληθεί προσπάθεια, ενώ η απόκτηση της πραγματικής και εις βάθος γνώσης ίσως απαιτήσει χρόνια προσπάθειας. Συνεπώς, δεν μπορούμε να υποσχεθούμε την άμεση ικανοποίηση. Μπορούμε όμως να εγγυηθούμε ότι η μελέτη των φυσικών επιστημών και των μαθηματικών θα ανοίξει το δρόμο προς μια βαθύτερη κατανόηση ενός υπέροχου σύμπαντος —του Σύμπαντός μας, το οποίο είναι ένα κβαντικό σύμπαν. Και, παραδόξως, καθώς ο κόσμος μας εξαρτάται ολοένα και περισσότερο από τους θαυμαστούς καρπούς της επιστήμης και της τεχνολογίας, καθίσταται συν τω χρόνω όλο και πιο εύθραυστος τεχνολογικά, αφού όλο και λιγότεροι άνθρωποι κατανοούν την τεχνολογία, από την οποία όλοι μας εξαρτόμαστε. Η πρόοδος του πολιτισμού μας επιβάλλει να εμπνεύσουμε και να παροτρύνουμε τις νέες γενιές να επωμισθούν την πρόκληση της επιστήμης. Σε αυτό το κοινό στοχεύει το βιβλίο μας. Ευελπιστούμε, πάντως, ότι το κείμενό μας, καθώς και η ευρεία παράθεση διαγραμμάτων, έγχρωμων εικόνων και βιογραφικών στοιχείων των μεγάλων επιστημόνων θα φανούν εξίσου ενδιαφέροντα και ψυχαγωγικά και στον «μορφωμένο» αναγνώστη!

Η πρώτη έκδοση του βιβλίου μας —το *Κβαντικό σύμπαν*— δημοσιεύθηκε το 1987 [ελληνική έκδοση, 1990]. Εκείνη την εποχή νιώθαμε την αδήριτη ανάγκη να κοινοποιήσουμε τις παράξενες

ιδέες της κβαντικής μηχανικής σε ένα ευρύτερο κοινό, αφού πάνω σε αυτή τη θεωρία στηρίζεται η λειτουργία πολλών προϊόντων «υψηλής τεχνολογίας» που χρησιμοποιούμε σε καθημερινή βάση. Έτσι λοιπόν, στο βιβλίο εκείνο, αφού εκθέταμε τις βασικές έννοιες, επικεντρωνόμασταν στον τρόπο με τον οποίο η κβαντική μηχανική μάς βοηθά να κατανοήσουμε όχι μόνο τα άτομα και τους πυρήνες αλλά και όλα τα χημικά στοιχεία, ακόμα και τα άστρα. Η κβαντική μηχανική καθιστά εφικτή την κατασκευή των τσιπ από πυρίτιο, όπως και τις μυριάδες εφαρμογές των λέιζερ που συναντάμε σήμερα. Δεν εξηγεί μόνο τη δομή του πλανήτη Δία, αλλά μάς βοηθά να κατανοήσουμε το μηχανισμό παραγωγής ενέργειας του Ήλιου μας και των άλλων άστρων. Λόγω της εγγενούς παραδοξότητας της κβαντικής θεωρίας σε θεμελιώδες επίπεδο, αγνοήσαμε σκοπίμως όλα τα φιλοσοφικά θέματα που ανακύπτουν και υιοθετήσαμε τη συμβουλή του Richard Feynman για την τήρηση μιας πιο πραγματιστικής στάσης. Για το λόγο αυτό, κύρια μέριμνά μας ήταν να δείξουμε ότι η θεωρία, άσχετα με το πόσο παράξενη φαίνεται, στην πράξη λειτουργεί ξεκάθαρα. Μιας και η κβαντική θεωρία αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1920 από τους Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Paul Dirac και άλλους, κυριαρχούσε η αντίληψη ότι, εκτός από νέες εφαρμογές, δεν απέμεναν και πολλά άλλα για να ανακαλυφθούν.

Προς έκπληξή μας, τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια σημειώθηκε μεγάλη πρόοδος στην κβαντική τεχνολογία. Μολονότι δεν προέκυψαν νέα στοιχεία που να αμφισβητούν την παντοδυναμία της υποκείμενης κβαντικής θεωρίας, παρουσιάστηκαν πολλές συναρπαστικές νέες ανακαλύψεις. Οι νέες αυτές εξελίξεις αποκαλύπτουν κυρίως τον ολοένα αυξανόμενο έλεγχο που αποκτούμε επί των κβαντικών συστημάτων, έναν έλεγχο ο οποίος φτάνει σε τέτοιο βαθμό ώστε πιστεύουμε ότι γινόμαστε μάρτυρες της ανάδυσης ενός νέου επιστημονικού κλάδου —της «κβαντικής τεχνολογίας». Ο όρος αυτός δηλοποιεί την πεποίθησή μας ότι κατά τον αιώνα που διατρέχουμε θα αποκτήσουμε πληρέστερο έλεγχο στο χειρισμό της ύλης σε κβαντικό επίπεδο, γεγονός που θα οδηγήσει σε νέες θεαματικές εφαρμογές της λεγόμενης «νανοτεχνολογίας». Σίγουρα θα υπάρξουν σημαντικές επιπτώσεις στη βιομηχανία ημιαγωγών. Πρόκειται να δούμε το τέλος του «νόμου του Moore» —της πρόβλεψης ότι το πλήθος των τρανζίστορ που περιέχονται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα θα διπλασιάζεται κάθε δεκαοκτώ μήνες, συνεπώς το ίδιο και η υπολογιστική τους ταχύτητα και χωρητικότητα της μνήμης τους. Σε δέκα χρόνια περίπου, οι διαστάσεις των χαρακτηριστικών σε ένα τσιπ πυριτίου θα έχουν συρρικνωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε πρωτεύοντα και καθοριστικό ρόλο θα παίζουν πια οι ιδιότητες μεμονωμένων ατόμων και ηλεκτρονίων. Τέτοια κβαντικά αντικείμενα δεν συμπεριφέρονται με κλασικά περιγράψιμο τρόπο. Αν οι κβαντικοί τεχνολόγοι δεν καταφέρουν να εφεύρουν μια νέα ανταγωνιστική τεχνολογία, ο νόμος του Moore θα πάψει να ισχύει —ομοίως, θα εξαλειφθεί και η ανάγκη αναβάθμισης των προσωπικών υπολογιστών μας κάθε δεκαοκτάμηνο! Στον οριζοντα αρχίζει να διαφαίνεται, ως πιθανή νέα τεχνολογία, η «κβαντική υπολογιστική».

Αντί να περιοριζόμαστε σε μπιτ πληροφορίας που παίρνουν τις τιμές «1» ή «0», όπως συμβαίνει στους τωρινούς μας «κλασικούς» υπολογιστές, ένας κβαντικός υπολογιστής θα επιτρέπει τη δυνατότητα επεξεργασίας αλγορίθμων που χρησιμοποιούν κβαντικά μπιτ —τα λεγόμενα «q-μπιτ»—, τα οποία μπορούν τρόπον τινά να παίρνουν τις τιμές «1» και «0» ταυτόχρονα! Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ολόκληρου νέου ερευνητικού κλάδου —της θεωρίας της κβαντικής πληροφορίας—, για την οποία υπάρχει ήδη η δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής στην κρυπτογραφία. Αν και στο παρόν βιβλίο διατηρούμε τον αρχικό τρόπο προσέγγισης της κβαντικής μηχανικής, τα κεφάλαια σχετικά με τις κβαντικές εφαρμογές έχουν γραφεί εκ νέου και ενημερωθεί εκτενώς. Επιπλέον, ένα νέο κεφάλαιο για την κβαντική τεχνολογία εισάγει τις ιδέες και τεχνικές της νανοτεχνολογίας και της κβαντικής πληροφορίας.

Όπως αναφέραμε και στην πρώτη έκδοση, ακολουθήσαμε το παράδειγμα του Feynman και αποφύγαμε τη διατύπωση ερωτημάτων του τύπου «Μα πώς μπορεί να γίνεται έτσι;». Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια, όμως, γίναμε μάρτυρες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος σχετικά με την κατανόηση του τι συνεπάγεται η κβαντική μηχανική για τη φυσική πραγματικότητα του κόσμου που ενοικούμε. Προς τούτο, συμπεριλάβαμε ένα κεφάλαιο «κβαντικών παραδόξων», στο οποίο εισάγουμε τον αναγνώστη στην ημιτελή συζήτηση που διεξήχθη μεταξύ Niels Bohr και Άλμπερτ Αϊνστάιν. Στον Bohr οφείλεται η διατύπωση της λεγόμενης «ερμηνείας της Κοπεγχάγης», που θεωρείται η ορθόδοξη άποψη περί κβαντικής μηχανικής και της οποίας υπήρξε ο πιο ένθερμος και σθεναρός υπερασπιστής. Σύμφωνα με την ερμηνεία του Bohr, η αβεβαιότητα και η μη προβλεψιμότητα αποτελούν εγγενείς ιδιότητες της κβαντικής θεωρίας, ενώ ελέγχεται και αυτή ακόμα η αυθύπαρκτη φυσική πραγματικότητα των κβαντικών αντικειμένων. Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν, επί μακρόν φίλος και συνεργάτης του Bohr, αντιτάχθηκε για το υπόλοιπο της ζωής του σε μια τέτοια «ορθόδοξη» άποψη. Το απόσταγμα της εναντίωσής του συμπυκνώνεται στη μνημειώδη του φράση «ο Θεός δεν παίζει ζάρια!». Κατόπιν μιας μακράς και ατελέσφορης συζήτησης, ο Αϊνστάιν πέθανε παραμένοντας πιστός αρνητής της κβαντικής θεωρίας. Λίγο μετά το θάνατό του, ο Ιρλανδός φυσικός John Bell ανακάλυψε έναν τρόπο να διακρίνει τον σωστό δρόμο μεταξύ της ορθόδοξης κβαντικής μηχανικής του Bohr και της ντετερμινιστικής προσέγγισης που προτιμούσε ο Αϊνστάιν. Τα πειράματα που έγιναν τελευταία για να ελέγξουν την «ανισότητα Bell» ευνοούν την κβαντική μηχανική, οπότε ο Αϊνστάιν θα έπρεπε να το ξανασκεφτεί! Η ανακάλυψη του Bell είναι τόσο σημαντική για την κβαντική μηχανική ώστε κρίναμε απαραίτητο να συμπεριλάβουμε μια διαισθητική ερμηνεία της ανισότητάς του. Η παρουσίασή μας αναπαράγει αρκετά πιστά την αντίστοιχη που έκανε ο ίδιος ο John Bell σε μια συνάντηση στη Γενεύη. Το έτερο εξώκοσμο πλάσμα που πρωταγωνιστεί σε κάθε συζήτηση σχετικά με την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής είναι η «γάτα του Schrödinger». Το παράδοξο που σχετίζεται με αυτή επιδεικνύει γλαφυρά το αποκαλούμενο «μετρικό πρόβλη-

μα» της κβαντικής μηχανικής. Συζητάμε το πώς επιλύεται —κατά το μάλλον ή ήττον— στο πλαίσιο της πάντοτε δημοφιλούς ερμηνείας των «πολλών κόσμων» της κβαντικής μηχανικής, η οποία διατυπώθηκε από τον Hugh Everett, ή στο πλαίσιο του μηχανισμού «αποσυγκρότησης» που προτιμά ο Wojteł Zurek και άλλοι.

Τέλος, εν είδει διασκεδαστικού «επιμυθίου», παρουσιάζουμε πώς χειρίζεται την κβαντική μηχανική η επιστημονική φαντασία. Πρωτοπόρος υπήρξε ο H.G. Wells, ο οποίος στο βιβλίο του *The World Set Free* περιέγραψε την ολοκληρωτική καταστροφή τύπου Αρμαγεδδώνα που επιφέρει μια ατομική βόμβα. Στα πρώτα χρόνια της κβαντικής μηχανικής, οι συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας πάσχιζαν να εντάξουν στα έργα τους τις νέες γνώσεις σχετικά με το άτομο, ενώ οι σύγχρονοι έχουν προοδεύσει και περιλαμβάνουν πια τα πολλαπλά σύμπαντα και τη νανοτεχνολογία ως μέρος του καθιερωμένου τεχνολογικού υποβάθρου. Εν κατακλείδι, στο νέο βιβλίο του Michael Crichton *Timeline*, κβαντικοί υπολογιστές, τηλεμεταφορά και ταξίδια στο χρόνο συνυφαίνονται δίνοντας στην επιστημονική φαντασία μία ακόμα νέα διάσταση προς εξερεύνηση.

Ο διακεκριμένος θεωρητικός φυσικός και συγγραφέας Paul Davies έκανε την ακόλουθη πρόβλεψη:

Ο 19ος αιώνας είναι γνωστός ως η εποχή της μηχανής.
Ο 20ός θα καταγραφεί στην ιστορία ως η εποχή της
πληροφορίας. Πιστεύω ότι ο 21ος αιώνας θα αποτελέσει
την κβαντική εποχή.

Τις επόμενες δεκαετίες, θα διαπιστώσουμε το βαθμό υλοποίησης αυτού του οράματος. Είμαστε σίγουροι, φυσικά, ότι η επίδραση που θα έχει στην κοινωνία μας η επικείμενη επανάσταση της νανοτεχνολογίας, η οποία στηρίζεται στην κβαντική μηχανική, θα είναι τουλάχιστον τόσο συνταρακτική όσο τα επακόλουθα της έκρηξης στη βιοπληροφορική που σημειώνεται επί των ημερών μας. Ευελπιστούμε ότι το παρόν βιβλίο θα συνδράμει στη διέγερση της φαντασίας μιας νέας γενιάς κβαντικών τεχνολόγων.

Κλείνοντας, αρμόζουν κάποιες ευχαριστίες. Για μία ακόμη φορά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την ανεκτίμητη συμπαράσταση και ανοχή τους —τη Marie Walters καθώς και τους Jonathan, Jessie, Nancy και Christopher Hey. Είμαστε επίσης ευγνώμονες προς τους συναδέλφους μας που διάβασαν και σχολίασαν τα «χειρόγραφα», ειδικά τους Phil Charles, Malcolm Coe, Jeff Mandula και Steve King. Από το Πανεπιστήμιο του Σαουθάμπτον, ας δεχτούν τις ευχαριστίες μας οι Maggie Bond και Juri Paray για την πολύτιμη βοήθειά τους στην απόκτηση του νέου φωτογραφικού υλικού και των σχετικών αδειών. Από τις Πανεπιστημιακές Εκδόσεις τού Καίμπριτζ, είμαστε ευγνώμονες προς τους Rufus Neale και Simon Mitton οι οποίοι ξεκίνησαν το εκδοτικό εγχείρημα, καθώς και προς τους Simon Capelin και Jacqueline Garget που με την πρόσηχη διάθεσή τους μας βοήθησαν στην ολοκλήρωση ενός τόσο περρίπλοκου έργου.

Πρόλογος

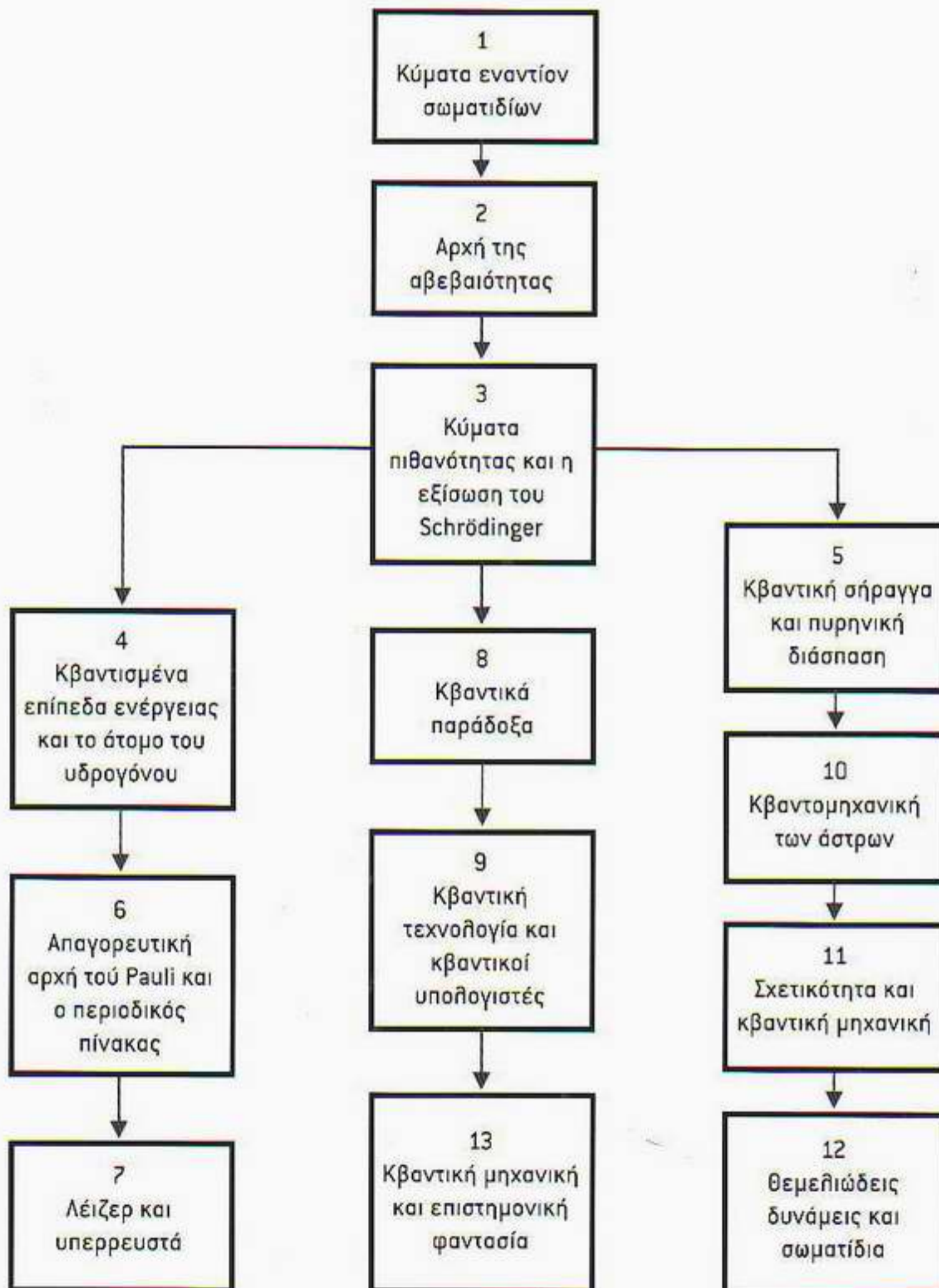
Οι ποιητές λένε πως η επιστήμη σε απομακρύνει από την ομορφιά των άστρων —συσσωματώματα ατόμων αερίων, όλο κι όλο. Τίποτε δεν είναι «όλο κι όλο». Μπορώ και εγώ να κοιτάξω τα άστρα μια ήρεμη νύχτα και να τα νιώσω. Αλλά εγώ βλέπω το ίδιο ή βαθύτερα; Οι απέραντοι ουρανοί ξετυλίζουν τη φαντασία μου —σε αυτή την πανδαισία, το μικρό μάτι μου μπορεί να συλλάβει φως ηλικίας ενός εκατομμυρίου ετών... Η βλέπω τα άστρα με το μεγάλο μάτι τού Ραλοματ και διαπιστώνω ότι απομακρύνονται από ένα κοινό σημείο εκκίνησης όπου ίσως κάποτε βρίσκονταν όλα συγκεντρωμένα. Ποια είναι η δομή, η βαθύτερη ουσία, το αίτιο; Δεν νομίζω πως θα μειώνει το μυστήριο λίγη γνώση γι' αυτό. Διότι η αλήθεια είναι πιο θαυμαστή απ' ό,τι θα μπορούσε να φανταστεί ένας καλλιτέχνης του παρελθόντος! Γιατί οι σημερινοί ποιητές δεν μιλούν γι' αυτό;

Εν κατακλείδι, επιτρέψτε μου να προσθέσω ότι κύριος σκοπός της διδασκαλίας μου δεν ήταν να σας προετοιμάσω για κάποιες εξετάσεις —ούτε βέβαια για να δουλέψετε στη βιομηχανία ή για λογαριασμό του στρατού. Πάνω απ' όλα, ήθελα να σας μεταδώσω μια αίσθηση του θαυμάσιου κόσμου μας και τον τρόπο με τον οποίο τον βλέπουν οι φυσικοί, ο οποίος αποτελεί, πιστεύω, σημαντικότερο τμήμα της πραγματικής πολιτισμικής κληρονομιάς της σύγχρονης εποχής. (Πιθανότατα κάποιοι καθηγητές από άλλα γνωστικά αντικείμενα θα εξέφραζαν αντιρρήσεις, ωστόσο πιστεύω ότι οι θέσεις τους είναι τελείως εσφαλμένες.) Ίσως να μην αρκεστείτε απλώς στην εκτίμηση αυτής της πολιτισμικής κληρονομιάς. Δεν αποκλείεται να θελήσετε να συμμετάσχετε στη μεγαλύτερη περιπέτεια που ξεκίνησε ο άνθρωπος νους.

Richard Feynman



«Οδικός» χάρτης



Οι τρεις κύριες «οδοί» διασυνδεδεμένων θεμάτων που καθύπτονται στο βιβλίο. Σε γενικές γραμμές, η αριστερή οδός ασχολείται με την κβαντική μηχανική της στερεάς κατάστασης, η δεξιά εστιάζει στην κβαντική μηχανική των άστρων και των στοιχειωδών σωματιδίων, ενώ η μεσαία διερευνά τα κβαντικά παράδοξα και την κβαντική τεχνολογία, για να θίξει εν τέλει το θέμα της ενσωμάτωσης των ιδεών αυτών στην επιστημονική φαντασία.

1 Κύματα εναντίον σωματιδίων

[...] Νομίζω πως μπορώ να πω με σιγουριά ότι κανένας δεν καταλαβαίνει την κβαντική μηχανική.

Richard Feynman

Επιστήμη και πείραμα

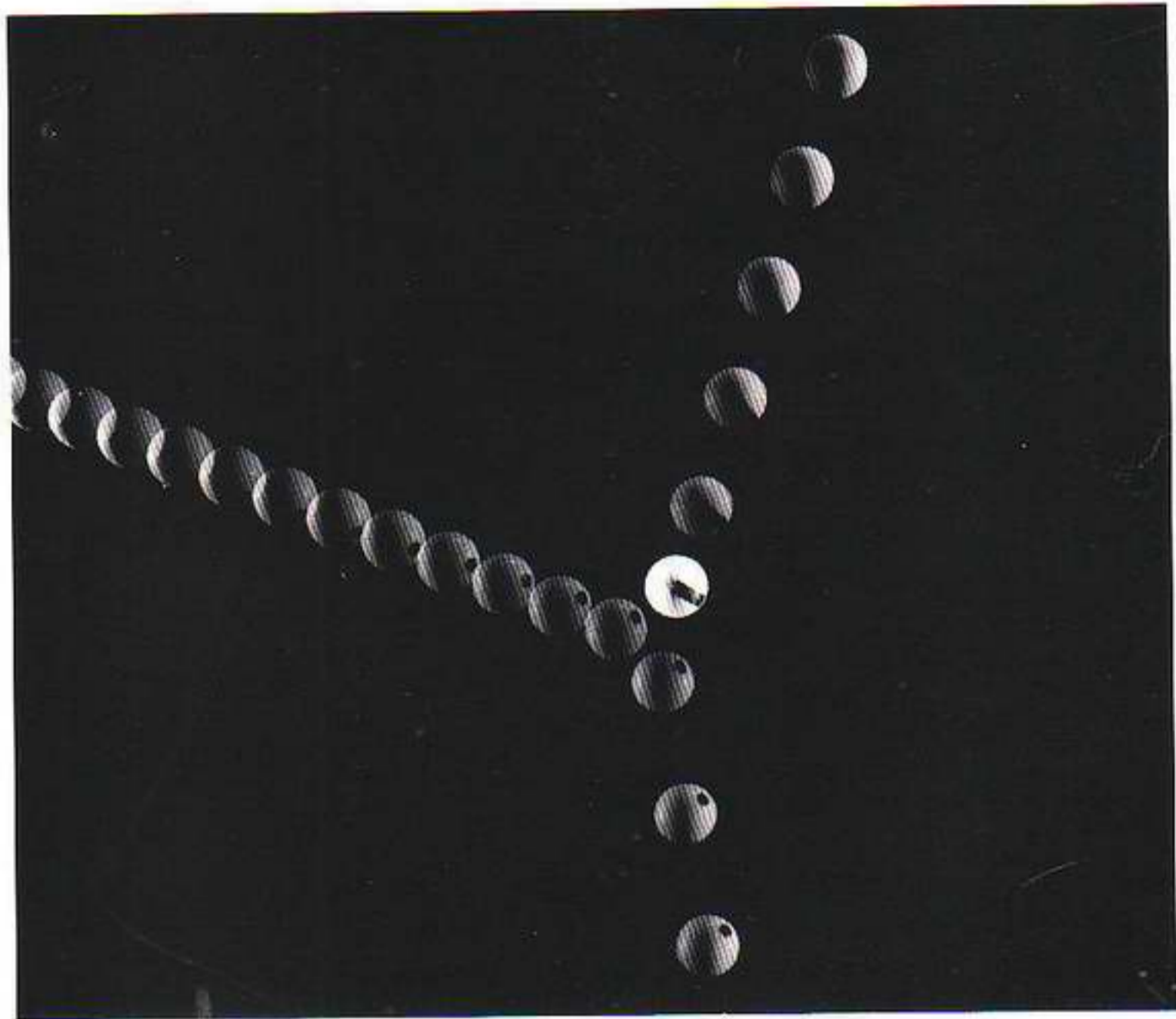
Η επιστήμη συνιστά ένα ιδιαίτερο είδος εξήγησης των πραγμάτων που βλέπουμε γύρω μας. Ξεκινάει με ένα πρόβλημα και με περιέργεια. Κάτι φαίνεται παράξενο στον επιστήμονα· δεν συμφωνεί με τη συνηθισμένη εξήγηση. Κάποτε, μια επίμονη σκέψη ή μια πιο προσεκτική παρατήρησή του μπορεί να λύσει το πρόβλημα. Αν το αίνιγμα παραμένει, τότε ερεθίζεται η φαντασία του επιστήμονα. Χρειάζεται ίσως ένας εντελώς νέος τρόπος θέασης των πραγμάτων; Οι επιστήμονες συνέχεια προσπαθούν να βρουν καλύτερες εξηγήσεις —καλύτερες με την έννοια ότι κάθε νέα εξήγηση πρέπει όχι μόνο να εξηγεί το νέο αίνιγμα, αλλά και να είναι συνεπής με όσες από τις προηγούμενες εξηγήσεις εξακολουθούν να είναι χρήσιμες. Το τεκμήριο ποιότητας κάθε επιστημονικής εξήγησης ή «θεωρίας» είναι ότι πρέπει να μπορεί να κάνει επιτυχημένες προβλέψεις. Με άλλα λόγια, κάθε ικανοποιητική θεωρία οφείλει να μπορεί να πει τι θα συμβεί σε κάθε δεδομένο σύνολο καταστάσεων. Κάθε νέα θεωρία λοιπόν θα καταλήξει γενικά αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα μόνο εφόσον μπορεί όχι απλώς να εξηγεί τις παρατηρήσεις που έχουν κάνει κιόλας οι επιστήμονες, αλλά και να προαναγγείλει τα αποτελέσματα νέων, δηλαδή ανεκτέλεστων ακόμα, πειραμάτων. Αυτός ο αυστηρός έλεγχος των νέων επιστημονικών ιδεών αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει την επιστήμη από τα άλλα πεδία διανοητικής προσπάθειας —όπως η ιστορία ή ακόμα και η οικονομία— ή από τις ψευδοεπιστήμες —όπως η αστρολογία.

Τον 17ο αιώνα, ο Ισαάκ Νεύτων και αρκετοί άλλοι μεγάλοι επιστήμονες έδωσαν μια εκπληκτικά πετυχημένη εξήγηση για το πώς κινούνται τα σώ-



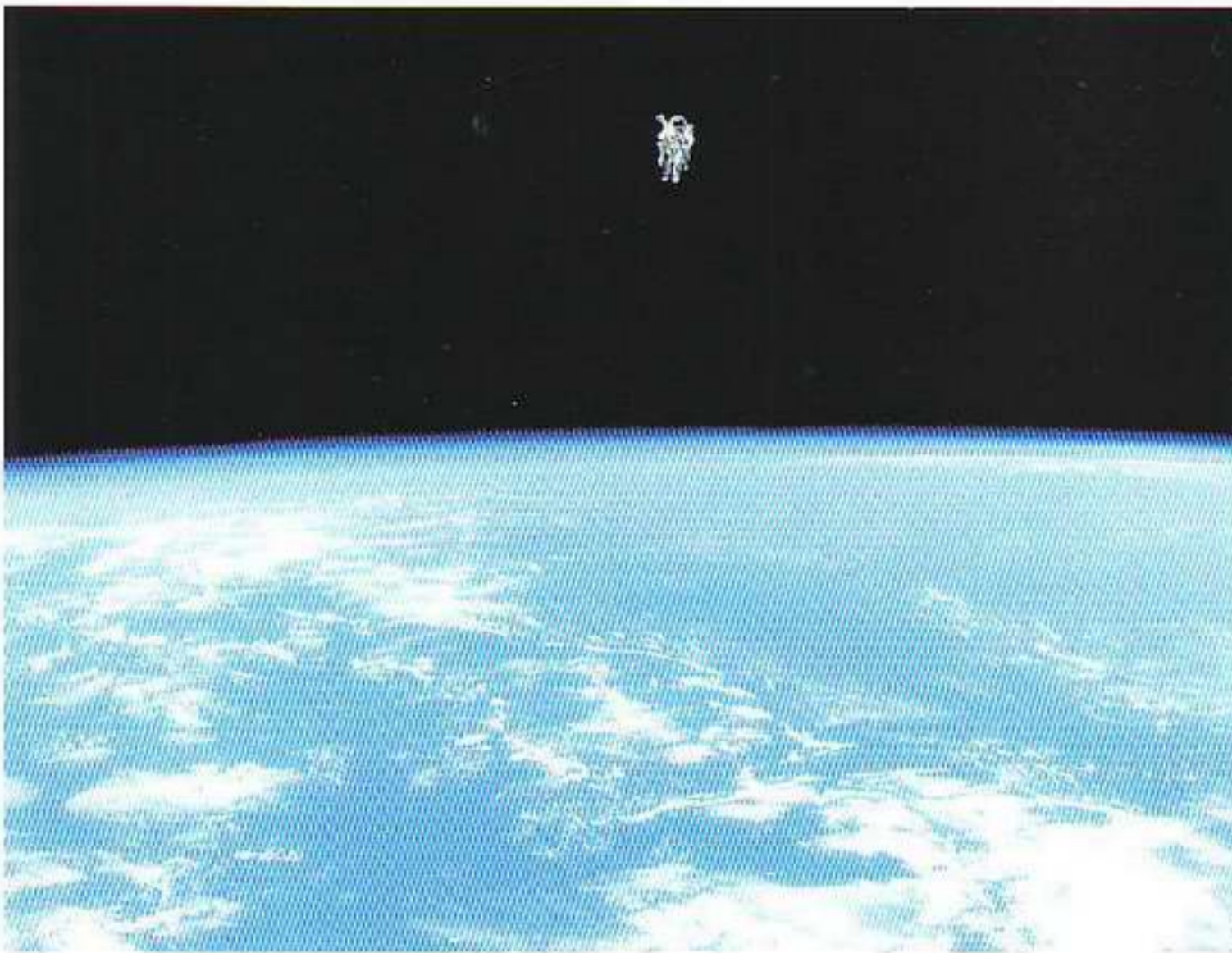
Ο Ισαάκ Νεύτων (1642-1727) δημοσίευσε το 1704 το βιβλίο του *Οπτική*, στο οποίο ερμήνευσε το ουράνιο τόξο και εισηγήθηκε τη «σωματιακή» θεωρία του φωτός. Το 1687, στο βιβλίο του *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Μαθηματικές αρχές της φυσικής φιλοσοφίας) διατύπωσε τις αρχές της μηχανικής και της βαρύτητας που καθοδήγησαν την επιστήμη μέχρι το μέσα του 19ου αιώνα.

Εικόνα 1.1 Ειδική φωτογράφιση των διαδοχικών θέσεων μιας μπίλιας μπιλιάρδου πριν και μετά τη σύγκρουσή της με μια άλλη. Μπορούμε να υπολογίσουμε την κίνηση κάθε μπίλιας εφαρμόζοντας τους νόμους του Νεύτωνα, έχουμε όμως μια ιδέα για τον τρόπο κίνησης επειδή παρακολουθούμε παιχνίδια μπιλιάρδου στην τηλεόραση ή παίζουμε οι ίδιοι.



ματα. Αυτό το θεωρητικό πλαίσιο ονομάστηκε *κλασική μηχανική* και περιλαμβάνει τις κινήσεις όλων των σωμάτων, από τις μπίλιες του μπιλιάρδου μέχρι τους πλανήτες. Η εξήγηση του Νεύτωνα για την κίνηση με τη χρήση των εννοιών της δύναμης, της ορμής και της επιτάχυνσης εμπεριέχεται στους νόμους της κίνησης που διατύπωσε. Οι αρχές αυτές έχουν ενσωματωθεί σε τόσο πολλές μηχανές και παιχνίδια, ώστε η κλασική μηχανική μάς είναι οικεία από την καθημερινή μας εμπειρία. Όλοι ξέρουμε τι περιμένουμε όταν συγκρούονται δύο μπίλιες του μπιλιάρδου. Την πιο θεαματική εφαρμογή της κλασικής μηχανικής τη βλέπουμε ίσως στην εξερεύνηση του Διαστήματος. Στις μέρες μας δεν ξαφνιάζουν κανέναν οι «διαστημικοί περιπάτοι», όπου ο αστροναύτης και το διαστημόπλοιο «γλιστρούν» πλάι πλάι χωρίς να πέφτουν στη Γη. Πριν από εκατό χρόνια, αυτό δεν ήταν τόσο προφανές, και στην περίφημη ιστορία του Ιουλίου Βερν *Από τη Γη στη Σελήνη* οι επιβάτες του διαστημοπλοίου έμειναν κατάπληκτοι όταν διαπίστωσαν ότι το σώμα του σκύλου που ψόφησε κατά την απογείωση και το είχαν πετάξει έξω από το διαστημόπλοιο «γλιστρούσε» πλάι τους σε όλη τη διαδρομή προς τη Σελήνη. Σήμερα ίσως να μη γνωρίζετε τις λεπτομέρειες της θεωρίας του Νεύτωνα, αλλά μπορείτε να διαπιστώσετε ότι ισχύει: αποτελεί μέρος της καθημερινής μας εμπειρίας.

Όλα τούτα μας οδηγούν στο πρόβλημα που έχουν οι περισσότεροι από μας να συμβιβαστούν με την *κβαντική μηχανική*. Το ζήτημα είναι ότι στις κλίμακες των πολύ μικρών αποστάσεων, με τις οποίες ασχολούμαστε κατά τη μελέτη των ατόμων και των μορίων, τα πράγματα δεν συμπεριφέρονται με τον γνωστό μας τρόπο. Η κλασική μηχανική είναι ανεπαρκής· χρειαζόμαστε ένα εντελώς νέο εξηγητικό πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό, η κβαντική μηχανική, είναι



Εικόνα 1.2 Ο αστροναύτης Bruce McCandless κατά τον πρώτο διαστημικό του περίπατο έξω από το διαστημόπλοιο στις 7 Φεβρουαρίου 1984. Ο αστροναύτης είναι ουσιαστικά ένα ανεξάρτητο «διαστημικό σκάφος» σε τροχιά κοντά στο διαστημόπλοιο. Ο McCandless έκανε το εξής σχόλιο: «Λοιπόν, για τον Neil (Armstrong) αυτό μπορεί να ήταν ένα μικρό βήμα σπλην, διάβολε, για μένα ήταν άλμα και μεγάλο μόλις!»

επιδέξια δομημένο ώστε να περιλαμβάνει όχι μόνο τις μικρές κλίμακες αλλά και τις μεγαλύτερες, όπου οι προβλέψεις της είναι ίδιες με εκείνες του Νεύτωνα. Το άτομο αποτελεί τυπικό παράδειγμα κβαντικού αντικειμένου —δεν μπορούμε να το κατανοήσουμε από τη σκοπιά της κλασικής φυσικής. Μια πολύ γνωστή αλλά απλοϊκή αναπαράσταση του ατόμου το παρουσιάζει σαν το ηλιακό μας σύστημα —όπου οι πλανήτες κινούνται γύρω από τον Ήλιο—, με μερικά ηλεκτρόνια να περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα. Στην πραγματικότητα, το άτομο στο μοντέλο αυτό δεν μπορεί να είναι σταθερό, διότι, σύμφωνα με την κλασική φυσική, τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα θα πρέπει να ακολουθήσουν μια σπειροειδή τροχιά προς το κέντρο, και έτσι το άτομο θα καταστραφεί. Το ωραίο και βολικό αυτό μοντέλο του ατόμου δεν μπορεί λοιπόν να εξηγήσει ούτε καν την ύπαρξη των πραγματικών ατόμων, πόσω μάλλον να προβλέψει την αναμενόμενη συμπεριφορά τους. Είναι σημαντικό να ξέρουμε από την αρχή ότι δεν υπάρχει απλή εικόνα που να μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων στα άτομα. Αυτό είναι το πρώτο εμπόδιο που αντιμετωπίζει όποιος πρωτοασχολείται με την κβαντική χωροκράτεια: το αναπόφευκτο και δυσάρεστο γεγονός ότι η συμπεριφορά των κβαντικών αντικειμένων δεν μοιάζει καθόλου με οτιδήποτε έχετε δει ως τώρα.

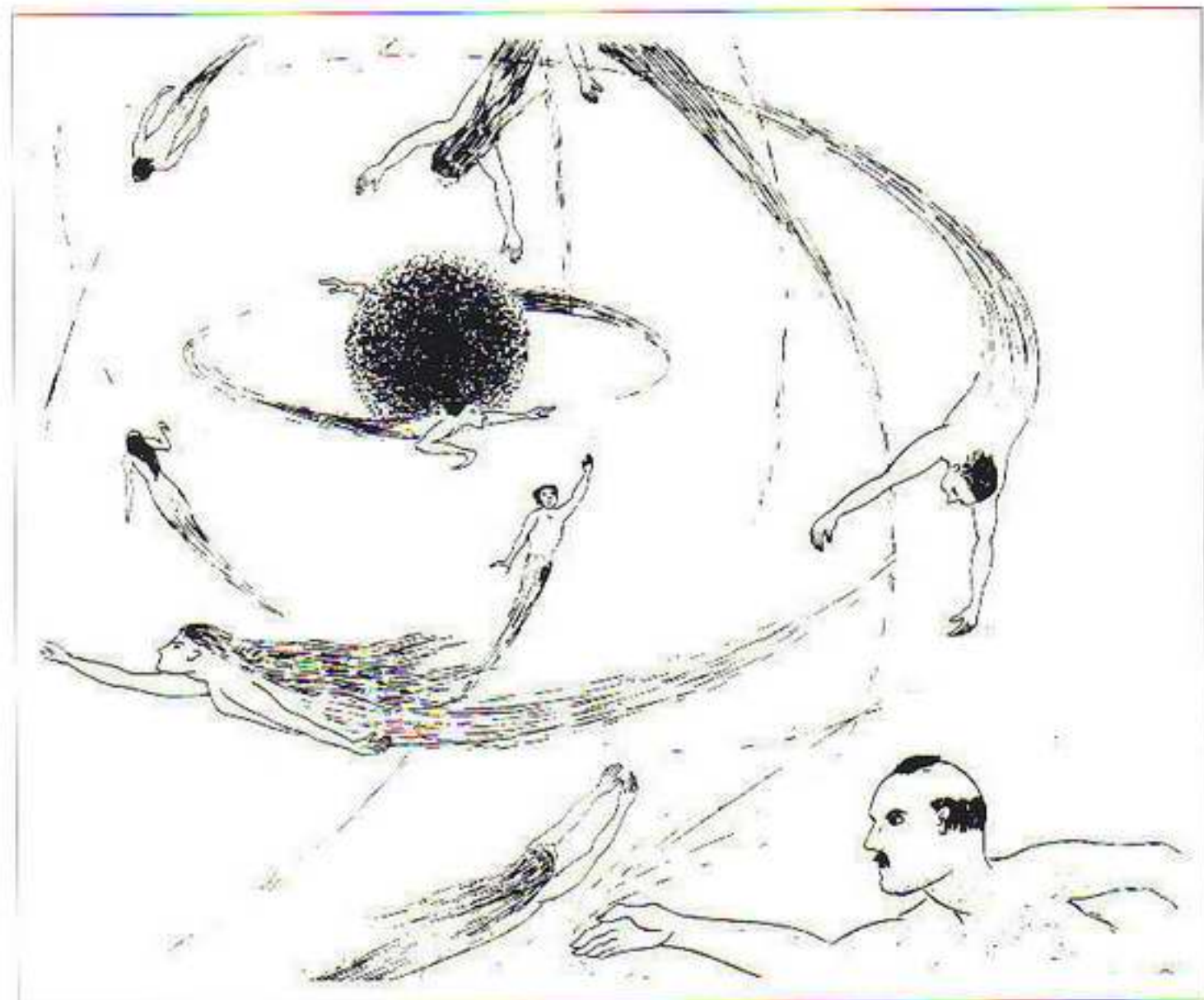
Πώς μπορούμε να σας πείσουμε ότι η κβαντική μηχανική είναι και αναγκαία και χρήσιμη; Λοιπόν, ένας φυσικός, σαν καλός ντετέκτιβ, εξετάζει εξονυχιστικά τα δεδομένα που έχει, και θυμάται πάντα το παλιό αξίωμα του Σέρλοκ Χολμς: «Όταν έχετε αποκλείσει το αδύνατο, αυτό που απομένει, έστω και απίθανο, πρέπει να είναι αληθινό.» Έτσι λοιπόν οι φυσικοί του 20ού αιώνα, αν και χωρίς μεγάλη προθυμία, πείστηκαν ότι το μεγαλοπρεπές οικοδόμημα της κλασικής φυσικής δεν ήταν «σχεδόν σωστό» —όπως πίστευαν μέχρι τότε— για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ατόμων· έπρεπε να οικοδο-



Εικόνα 1.3 Στην ιστορία του Ιουλιού Βερν Από τη Γη στη Σελήνη, που δημοσιεύθηκε το 1865, ο σκύλος-δορυφόρος ψόφησε κατά την απογείωση και τον πέταξαν έξω από το διαστημόπλοιο. Προς μεγάλη έκπληξη των επιβατών, το σώμα του σκύλου τούς ακολουθούσε σε όλη τη διαδρομή ως τη Σελήνη!



Εικόνα 1.4 Εικόνα συμβολής υδάτινων κυμάτων που προκαλούνται στην επιφάνεια του νερού από δύο ταλαντούμενες πηγές.



Εικόνα 1.5 Μια μάλλον ιδιόρρυθμη άποψη του George Gamow για το «ηλιαστικό μοντέλο» του ατόμου, στο έργο του *Mr Tompkins Explores the Atom*.

μήσουν μια ριζικά νέα θεωρία. Η γενική σύγχυση που προκάλεσε αυτή η οδυνηρή συνειδητοποίηση πουθενά αλλού δεν ήταν πιο εμφανής απ' ό,τι στις προσπάθειές τους να κατανοήσουν τη φύση του φωτός.

Φως και κβαντική μηχανική

Πολύ παλιότερα, τον 17ο αιώνα, ο Ισαάκ Νεύτων διατύπωσε την άποψη ότι το φως μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα ρεύμα σωματιδίων, κάπως σαν τις σφαίρες που εκτοξεύονται από ένα πολυβόλο. Ο Νεύτων είχε τέτοια φήμη ώστε η άποψή του διατηρήθηκε, εκτός από μερικούς μεμονωμένους θύλακες αντίδρασης, ως τον 19ο αιώνα. Τότε, ο Thomas Young και άλλοι έδειξαν πειστικά ότι η σωματιδιακή εικόνα του φωτός πρέπει να ήταν λανθασμένη. Υποστήριξαν την ιδέα ότι το φως ήταν ένα είδος κύματος. Μια ιδιότητα των κυμάτων οικεία σε όλους μας είναι η *συμβολή* τους, για να χρησιμοποιήσουμε τον όρο των φυσικών γι' αυτό που συμβαίνει όταν συναντώνται δύο κύματα. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 1.4 φαίνεται η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής που προκαλείται από δύο δονούμενες πηγές κυμάτων στην επιφάνεια του νερού. Χρησιμοποιώντας την περίφημη διάταξη της «διπλής σχισμής» για να δημιουργήσει δύο πηγές φωτός, ο Thomas Young παρατήρησε παρόμοιες εικόνες συμβολής χρησιμοποιώντας φως.

Δυστυχώς, οι φυσικοί δεν μπόρεσαν να χαρούν για πολύ. Πειράματα στο τέλος του 19ου αιώνα αποκάλυψαν φαινόμενα που έμεναν ανεξήγητα από την κυματική θεωρία του φωτός. Το πιο γνωστό από αυτά αφορά το λεγόμενο *φωτοπλεκτρικό φαινόμενο*. Υπεριώδης ακτινοβολία που πέφτει πάνω σε μια αρνητικά φορτισμένη μεταλλική επιφάνεια την κάνει να χάνει το ηλεκτρικό της φορτίο, ενώ όταν πέφτει ορατό φως δεν παρατηρείται κανένα παρόμοιο φαινόμενο. Αυτό το αίνιγμα το εξήγησε πρώτος ο Άλμπερτ Αϊνστάιν, την ίδια χρονιά που διατύπωσε τη *θεωρία της σχετικότητας*, για την οποία αργότερα έγινε διάσημος. Η δική του εξήγηση για το φωτοπλεκτρικό φαινόμενο έκανε να αναβιώσει η άποψη της σωματιδιακής φύσης του φωτός. Η εκφόρτιση της μεταλλικής πλάκας οφειλόταν σε ηλεκτρόνια που εκδιώκονταν από το μέταλλο όταν πάνω τους προσέπιπτε φωτεινή ενέργεια συγκεντρωμένη σε μικρά «πακέτα» —αυτά τα οποία έκτοτε ονομάζουμε *φωτόνια*. Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία του Αϊνστάιν, τα φωτόνια της υπεριώδους ακτινοβολίας έχουν περισσότερη ενέργεια από τα φωτόνια του ορατού φωτός και, συνεπώς, όσο μεγάλο πλήθος φωτονίων ορατού φωτός κι αν πέφτει πάνω στη μεταλλική επιφάνεια, κανένα φωτόνιο δεν θα έχει αρκετή ενέργεια για να εκδιώξει ένα ηλεκτρόνιο.

Έπειτα από αρκετές δεκαετίες σύγχυσης στο χώρο της φυσικής, τη δεκαετία του 1920, με την ανάδυση της κβαντικής μηχανικής, πρωτοπόροι φυσικοί όπως ο Heisenberg, ο Schrödinger και ο Dirac φώτισαν έναν νέο δρόμο. Η νέα θεωρία μπορούσε να εξηγήσει επιτυχώς την παράδοξη φύση του φωτός, τα άτομα και πολλά άλλα. Η επιτυχία αυτή έχει όμως και κάποιο κόστος. Πρέπει να εγκαταλείψουμε κάθε ελπίδα ότι μπορούμε να περιγράψουμε την κίνηση των σωμάτων στην κλίμακα αποστάσεων του ατόμου με καθημερινές έννοιες, όπως κύματα ή σωματίδια. Ένα φωτόνιο δεν συμπεριφέρεται σαν τίποτε από αυτά που μπορούμε να βλέπουμε. Τούτο όμως δεν σημαίνει ότι η κβαντική μηχανική είναι γεμάτη ασαφείς ιδέες και ότι δεν έχει δυνατότητα πρόβλεψης. Αντίθετα, είναι η μόνη θεωρία που μπορεί να κάνει συγκε-



Ο Thomas Young (1773-1829) ήταν ένα παιδί-θαύμα που διάβαζε από δύο ετών. Στα νεανικά του χρόνια έμαθε να μιλά δώδεκα γλώσσες. Τη φήμη του την οφείλει κυρίως στο έργο του για την όραση, αλλά και στη θεμελίωση της κυματικής θεωρίας του φωτός. Ήταν επίσης και ο πρώτος που σημείωσε πρόοδο στην αποκρυπτογράφηση της ιερογλυφικής γραφής των αρχαίων Αιγυπτίων.



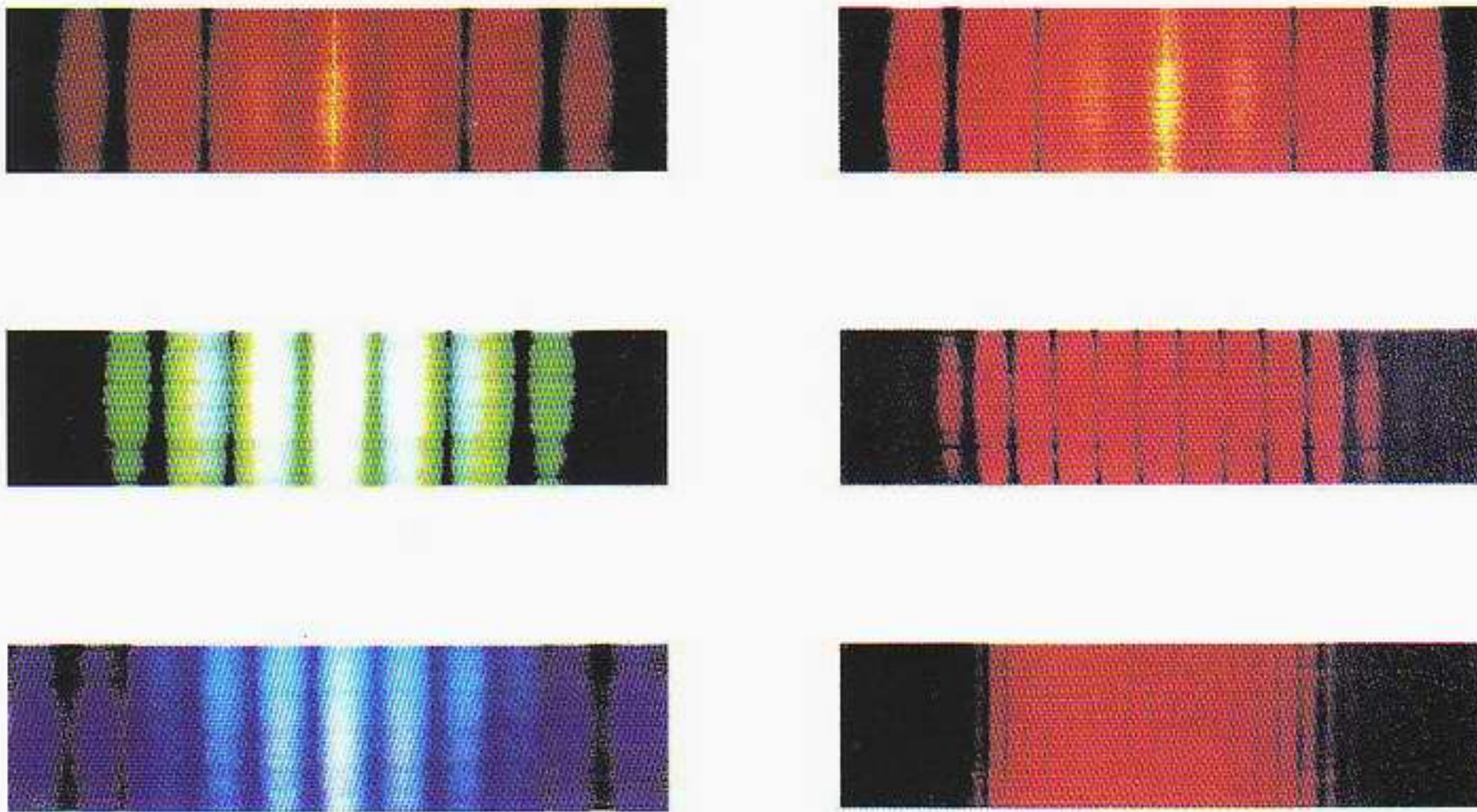
Ο J.J. Thomson (1856-1940) μέτρησε το λόγο του φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου, καθιερώνοντας το έτσι ως ένα νέο στοιχειώδες σωματίδιο. Το 1906 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ.

κριμένες και επιτυχείς προβλέψεις για ουστίματα στην κλίμακα μεγέθους των ατόμων ή και μικρότερα, ακριβώς όπως η κλασική μηχανική κάνει προβλέψεις για το πώς κινούνται οι μπίλιες του μπιλιάρδου, οι πύραυλοι και οι πλανήτες. Η δυσκολία με τα κβαντικά αντικείμενα όπως τα φωτόνια συνίσταται στο ότι, αντίθετα από τις μπίλιες του μπιλιάρδου, η κίνησή τους δεν μπορεί να απεικονιστεί με κανέναν ακριβή παραστατικό τρόπο. Το μόνο που μπορούμε να κάνουμε για να αποδώσουμε συνοπτικά την έλλειψη κάποιας παραστατικής απεικόνισης είναι να πούμε ότι το φωτόνιο συμπεριφέρεται κατά έναν ουσιωδώς κβαντομηχανικό τρόπο.

Κατά μία έννοια, η φύση είναι ευγενική μαζί μας. Από τη σκοπιά της κλασικής φυσικής, τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια φαίνονται τελείως διαφορετικά είδη αντικειμένων. Αντίθετα, στην περιοχή των κβαντικών φαινομένων, και τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια —στην πραγματικότητα όλα τα κβαντικά αντικείμενα— συμπεριφέρονται με τον ίδιο παράξενο κβαντομηχανικό τρόπο. Αυτή είναι τουλάχιστον μια παρηγοριά για την αδυναμία μας να απεικονίζουμε τα κβαντικά αντικείμενα! Στην ιστορία των προσπαθειών μας να κατανοήσουμε τη φύση των ηλεκτρονίων, υπάρχει και μια περίεργη μικρή ειρωνεία. Το 1897, ο J.J. Thomson μέτρησε το λόγο του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου και αναγνώρισε το ηλεκτρόνιο ως νέο στοιχειώδες σωματίδιο της φύσης. Τριάντα χρόνια αργότερα, ο γιος του G. Thomson, και επίσης οι Davisson και Germer στις ΗΠΑ, εκτέλεσαν μια σειρά όμορφων πειραμάτων, από τα οποία αποκαλύφθηκε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται επίσης σαν κύματα. Ο ιστορικός Max Jammer έγραψε: «Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο πατέρας Thomson πήρε το βραβείο Νόμπελ επειδή απέδειξε ότι το ηλεκτρόνιο είναι σωματίδιο, και ο γιος Thomson επειδή απέδειξε ότι το ηλεκτρόνιο είναι κύμα.»

Η πρόθεσή μας σε τούτο το βιβλίο είναι να τονίσουμε και στον πιο δύσπιστο αναγνώστη την τεράστια έκταση και ποικιλία των επιτυχών προβλέψεων της κβαντικής μηχανικής. Οι φαινομενικά παράλογες ιδέες των de Broglie, Schrödinger και Heisenberg έχουν οδηγήσει σήμερα σε εντελώς νέες τεχνολογίες, η ύπαρξη των οποίων εξαρτάται από τις ανακαλύψεις αυτών των πρωτοπόρων της κβαντικής μηχανικής. Η σύγχρονη ηλεκτρονική βιομηχανία, με την τεχνολογία των *τσιπ πυριτίου*, στηρίζεται εξ ολοκλήρου στην κβαντική θεωρία των υλικών που ονομάζονται *ημιαγωγοί*. Επίσης, οι τόσες εφαρμογές των λέιζερ είναι δυνατές μόνο επειδή κατανοούμε, στο βασικό επίπεδο των κβαντικών φαινομένων, το μηχανισμό εκπομπής ακτινοβολίας από άτομα, ο οποίος εντοπίστηκε για πρώτη φορά από τον Αϊνστάιν το 1916. Ακόμα, κατανοώντας πώς συμπεριφέρεται μεγάλος αριθμός κβαντικών αντικειμένων όταν βρίσκονται περιορισμένα σε μια μικρή περιοχή, οδηγούμαστε στην κατανόηση όλων των διαφορετικών τύπων της ύλης, από τους *υπεραγωγούς* ως τους *αστέρες νετρονίων*. Επιπλέον, η κβαντική μηχανική, αν και αρχικά επινοήθηκε για την επίλυση βασικών προβλημάτων σχετικά με την ύπαρξη των ατόμων, στη συνέχεια βρέθηκε να εφαρμόζεται με την ίδια επιτυχία στους μικροσκοπικούς πυρήνες στην καρδιά των ατόμων, και αυτό οδήγησε στην κατανόηση της ραδιενέργειας και των πυρηνικών αντιδράσεων. Όπως ξέρουμε όλοι, όμως, «ουδέν καλόν αμιγές κακού». Σήμερα, όχι μόνο γνωρίζουμε τι κάνει τα άστρα να λάμπουν, αλλά ξέρουμε και πώς να καταστρέψουμε ολόκληρο τον τεχνολογικό πολιτισμό μας με την τρομακτική δύναμη των πυρηνικών όπλων.

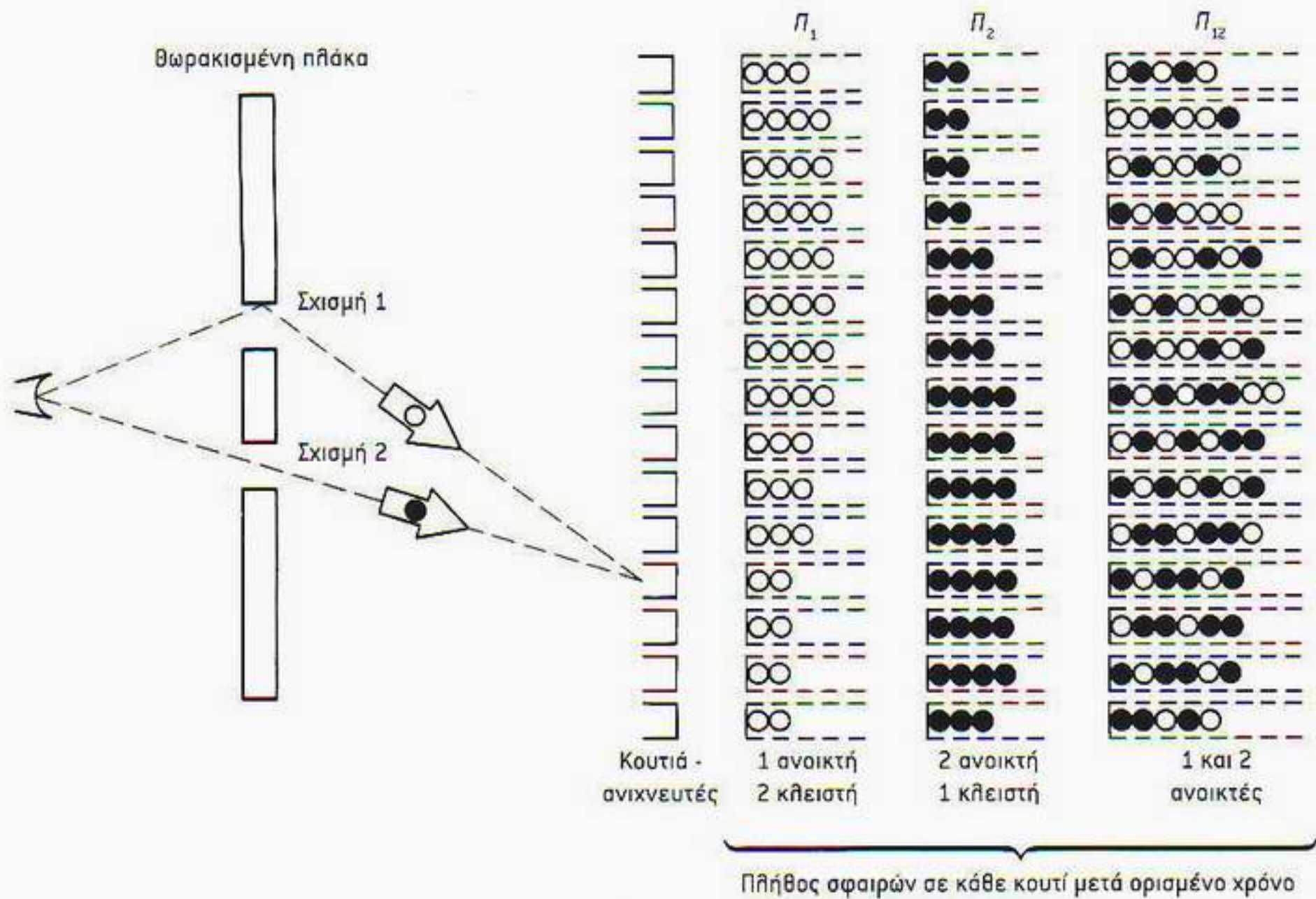
Πριν εξηγήσουμε όμως πώς η κβαντική μηχανική κατάφερε όλα τού-



Εικόνα 1.6 Η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής του φωτός στο πείραμα της διπλής σχισμής, την οποία συνήθως χρησιμοποιούμε για να καταδείξουμε τον κυματικό του χαρακτήρα. Στις αριστερές εικόνες, καθώς το μήκος κύματος του φωτός ελαττώνεται και το χρώμα αλληλλάζει από κόκκινο σε μπλε, οι κροσσοί συμβολής πλησιάζουν ο ένας και πιο πολύ μεταξύ τους. Δεξιά, για το κόκκινο φως, η μείωση της απόστασης μεταξύ των κροσσών προκαλείται από την αύξηση της απόστασης μεταξύ των σχισμών.

τα, πρέπει πρώτα να προσπαθήσουμε να περιγράψουμε την παράξενη κβαντομηχανική συμπεριφορά των αντικειμένων στις κλίμακες μεγέθους των ατόμων. Πρόκειται ασφαλώς για δύσκολο έργο, αφού λείπει κάθε ακριβής αναλογία για τη μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς αυτής. Εντούτοις, μπορούμε να προχωρήσουμε αν χρησιμοποιήσουμε ένα μείγμα αναλογίας και σύγκρισης. Στο πείραμα της διπλής σχισμής, ο Young χρησιμοποίησε ένα διάφραγμα με δύο σχισμές, για να έχει κύματα φωτός από δύο πηγές τα οποία θα μπορούσαν να συμβάλουν και να παραγάγουν τους περίφημους *κροσσούς συμβολής* — μια εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών γραμμών (Εικόνα 1.6). Θα περιγράψουμε τα αποτελέσματα όμοιων πειραμάτων διπλής σχισμής τα οποία διεξήχθησαν με χρήση σφαιρών πολυβόλου, υδάτινων κυμάτων και πλεκτρονίων. Συγκρίνοντας και αντιπαραβάλλοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν με αυτά τα τρία διαφορετικά υλικά, θα μπορέσουμε να σας δώσουμε μια ιδέα των βασικών χαρακτηριστικών της κβαντομηχανικής συμπεριφοράς. Τα εγχειρίδια φυσικής περιέχουν λεπτομερειακές συζητήσεις για πολλούς τύπους πειραμάτων, αλλά το πείραμα της διπλής σχισμής είναι αρκετό για να αποκαλύψει όλο το μυστήριο της κβαντικής μηχανικής. Σε αυτό το πείραμα και μόνο μπορούν να αναδειχθούν όλα τα προβλήματα και τα παράδοξα της κβαντικής φυσικής.

Μια προειδοποίηση πριν αρχίσουμε: Για να αποφύγετε διάφορα ενοχλητικά ψυχολογικά αδιέξοδα, προσπαθήστε να αρκεστείτε στο να αποδεχθείτε την ύπαρξη των πειραματικά διαπιστωμένων φυσικών φαινομένων που παρατηρούμε. Μην αρχίσετε να ρωτάτε «Μα πώς μπορεί να γίνεται έτσι;». Όπως λέει ο Richard Feynman, «κανένας δεν κατανοεί την κβαντική μηχανική».



Εικόνα 1.7 Το πείραμα της διπλής σχισμής με σφαίρες. Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος, τα δε αποτελέσματα των τριών διαφορετικών πειραμάτων στο δεξιό. Οι σφαίρες που περνούν από τη σχισμή 1 αναπαριστώνται με λευκούς κύκλους και αυτές που περνούν από τη σχισμή 2 με μαύρους. Η στήλη η οποία σημειώνεται με Π_1 δείχνει την κατανομή των σφαιρών που φτάνουν στα κουτιά-ανιχνευτές όταν είναι κλειστή η σχισμή 2 και ανοικτή μόνο η σχισμή 1. Η στήλη Π_2 δείχνει μια ανάλογη κατανομή με τη σχισμή 1 κλειστή και τη 2 ανοικτή. Όπως βλέπουμε, ο μεγαλύτερος αριθμός σφαιρών εμφανίζεται στα κουτιά που βρίσκονται ακριβώς απέναντι από την ανοικτή σχισμή. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε και με τις δύο σχισμές ανοικτές φαίνεται στη στήλη Π_{12} . Το από ποια σχισμή θα περάσει κάποια σφαίρα είναι θέμα τύχης, και αυτό δείχνεται με το μείγμα των ανάκατων λευκών και μαύρων σφαιρών που συγκεντρώνονται σε κάθε κουτί. Το κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να προσέξουμε είναι ότι το σύνολο των σφαιρών σε κάθε κουτί όταν και οι δύο σχισμές είναι ανοικτές ισούται με το άθροισμα των σφαιρών όταν είναι ανοικτή τη μια φορά μόνο η σχισμή 1 και την άλλη μόνο η σχισμή 2. Αυτό είναι προφανές στην περίπτωση των σφαιρών, αφού ξέρουμε ότι οι σφαίρες πρέπει να περνούν μέσα από μία από τις σχισμές για να φτάσουν στα κουτιά-ανιχνευτές.

Το μόνο που μπορούμε να σας δώσουμε είναι ένας απολογισμός του τρόπου με τον οποίο φαίνεται να λειτουργεί η φύση. Ουδείς γνωρίζει κάτι περισσότερο. Μόνο αφότου σας πείσουμε ότι η κβαντική μηχανική πράγματι «δουλεύει στην πράξη», θα εξετάσουμε τι έχει να μας πει για την ίδια τη φύση της πραγματικότητας, στο πλαίσιο της συζήτησής μας για τη γάτα του Schrödinger, τον Αϊνστάιν και τα ζάρια.

Το πείραμα της διπλής σχισμής

Το θέμα αυτό μπορεί να φανεί κάπως δύσκολο σε κάποιον που το αντιμετωπίζει για πρώτη φορά. Αν είναι έτσι, ρίξτε μια γρήγορη ματιά στις εικόνες και περάστε στο επόμενο κεφάλαιο!

Με σφαίρες

Πηγή: Ένα πολυβόλο που τραντάζεται καθώς εκπυρσοκροτεί και εκτοξεύει τις σφαίρες σε μια κωνοειδή περιοχή, όλες με το ίδιο μέτρο ταχύτητας αλλά με τυχαίες κατευθύνσεις.

Διάφραγμα: Θωρακισμένη πλάκα με δύο παράλληλες σχισμές πάνω της.

Ανιχνευτής: Μικρά κουτιά γεμάτα άμμο για να συγκρατούν τις σφαίρες.

Αποτελέσματα: Το όπλο εκτοξεύει σφαίρες με σταθερό ρυθμό, και εμείς μπορούμε να μετρήσουμε τον αριθμό των σφαιρών που φτάνουν σε κάθε συγκεκριμένο κουτί σε ορισμένη χρονική περίοδο. Οι σφαίρες που περνούν διάμεσου των σχισμών μπορούν είτε να συνεχίζουν να κινούνται στην αρχική τους κατεύθυνση είτε να προσκρούουν στις άκρες των σχισμών, πάντα όμως θα καταλήγουν σε ένα από τα κουτιά. Οι σφαίρες που χρησιμοποιούμε είναι κατασκευασμένες από αρκετά σκληρό μέταλλο ώστε να μη θρυμματίζονται —δεν μπορούμε να έχουμε ποτέ μισή σφαίρα σε ένα κουτί. Επιπλέον, ποτέ δεν φτάνουν δύο σφαίρες ταυτόχρονα —έχουμε μόνο ένα πολυβόλο, και κάθε σφαίρα αποτελεί το μοναδικό αναγνωρίσιμο αντικείμενο.

Αν αφήσουμε το πείραμα να εξελίσσεται επί μία ώρα και μετά μετρήσουμε τις σφαίρες που έφτασαν σε κάθε κουτί, μπορούμε να δούμε ότι η πιθανότητα άφιξης μιας σφαίρας μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του κουτιού-ανιχνευτή. Ο συνολικός αριθμός σφαιρών που φτάνουν σε κάθε θέση είναι ασφαλώς το άθροισμα του αριθμού σφαιρών που περνούν από τη σχισμή 1 (και φτάνουν σε αυτή τη θέση) συν τον αριθμό των σφαιρών που περνούν από τη σχισμή 2 (και φτάνουν και αυτές στην ίδια θέση). Η Εικόνα 1.7 δείχνει πώς αυτή η πιθανότητα άφιξης μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση των κουτιών. Ας συμβολίσουμε τούτο το αποτέλεσμα —την πιθανότητα άφιξης των σφαιρών όταν και οι δύο σχισμές είναι ανοικτές— Π_{12} . Στην Εικόνα 1.7 δείχνουμε επίσης τα αποτελέσματα όταν η σχισμή 2 είναι κλειστή —ας τη συμβολίσουμε Π_1 — και τα αποτελέσματα όταν η σχισμή 1 είναι κλειστή —ας τη συμβολίσουμε Π_2 . Παρατηρώντας τα σχήματα, είναι φανερό ότι η καμπύλη Π_{12} προκύπτει αν προσθέσουμε τις καμπύλες Π_1 και Π_2 . Αυτό μπορούμε να το εκφράσουμε μαθηματικά με την εξίσωση:

$$\Pi_{12} = \Pi_1 + \Pi_2.$$

Για λόγους που θα γίνουν φανεροί σε λίγο, ονομάζουμε αυτό το αποτέλεσμα περίπτωση μη συμβολής.

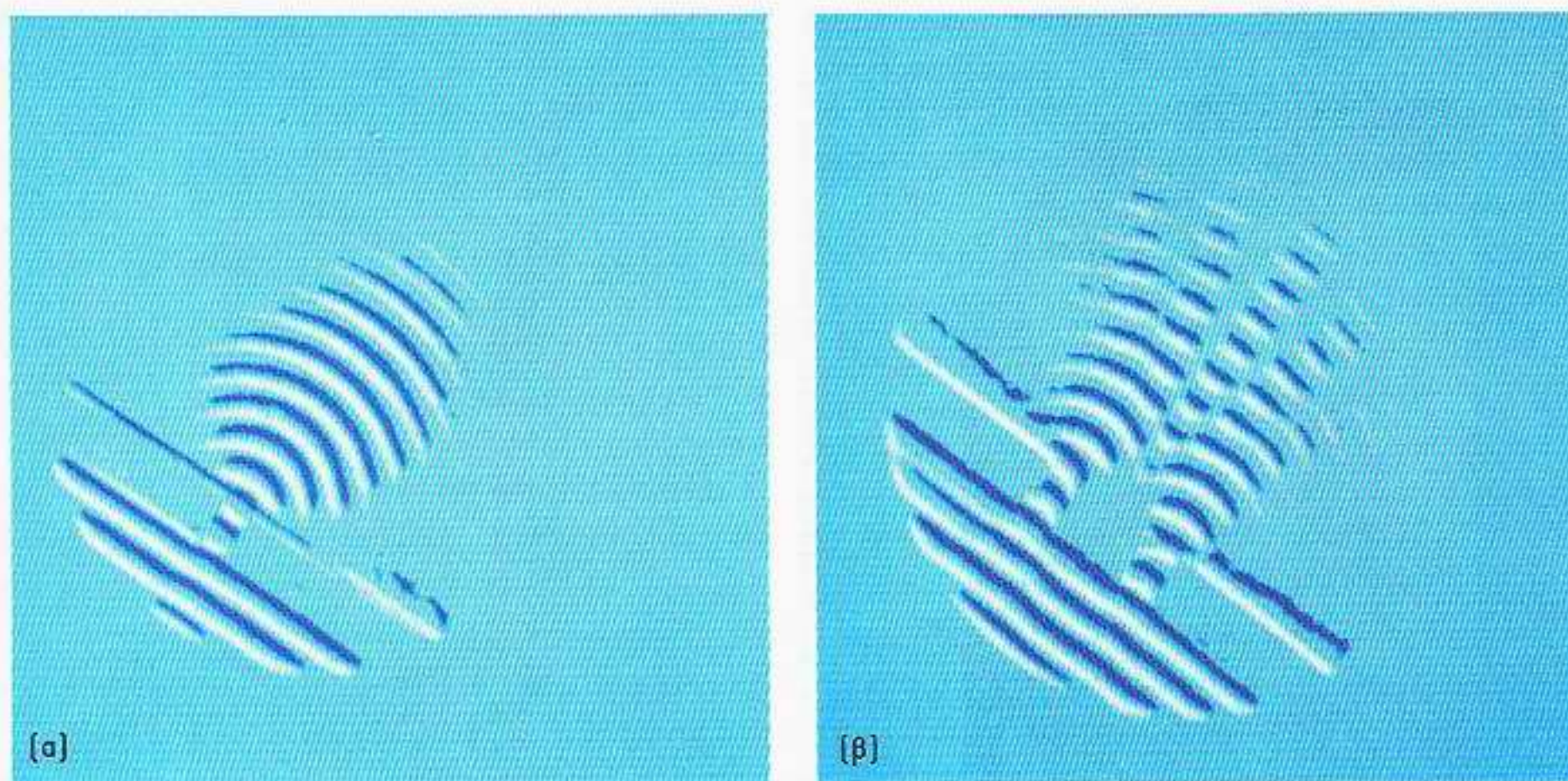
Με υδάτινα κύματα

Πηγή: Μια πέτρα που πέφτει στην επιφάνεια μιας λίμνης.

Διάφραγμα: Κυματοθραύστης με δύο ανοίγματα.

Ανιχνευτής: Μια σειρά από μικρές σημαδούρες, για τις οποίες το πόσο έντονα κινούνται πάνω-κάτω αποτελεί μέτρο της ενέργειας του κύματος σε αυτή τη θέση.

Αποτελέσματα: Μικρά κύματα ξεκινούν από την πηγή και χτυπούν στον κυματοθραύστη. Στην άλλη πλευρά του κυματοθραύστη, από τα δύο ανοίγματα ξεκινούν και εξαπλώνονται μικρά κύματα. Στον ανιχνευτή, η διαταραχή του νερού δίνεται από το άθροισμα των διαταραχών των μικρών κυμάτων που



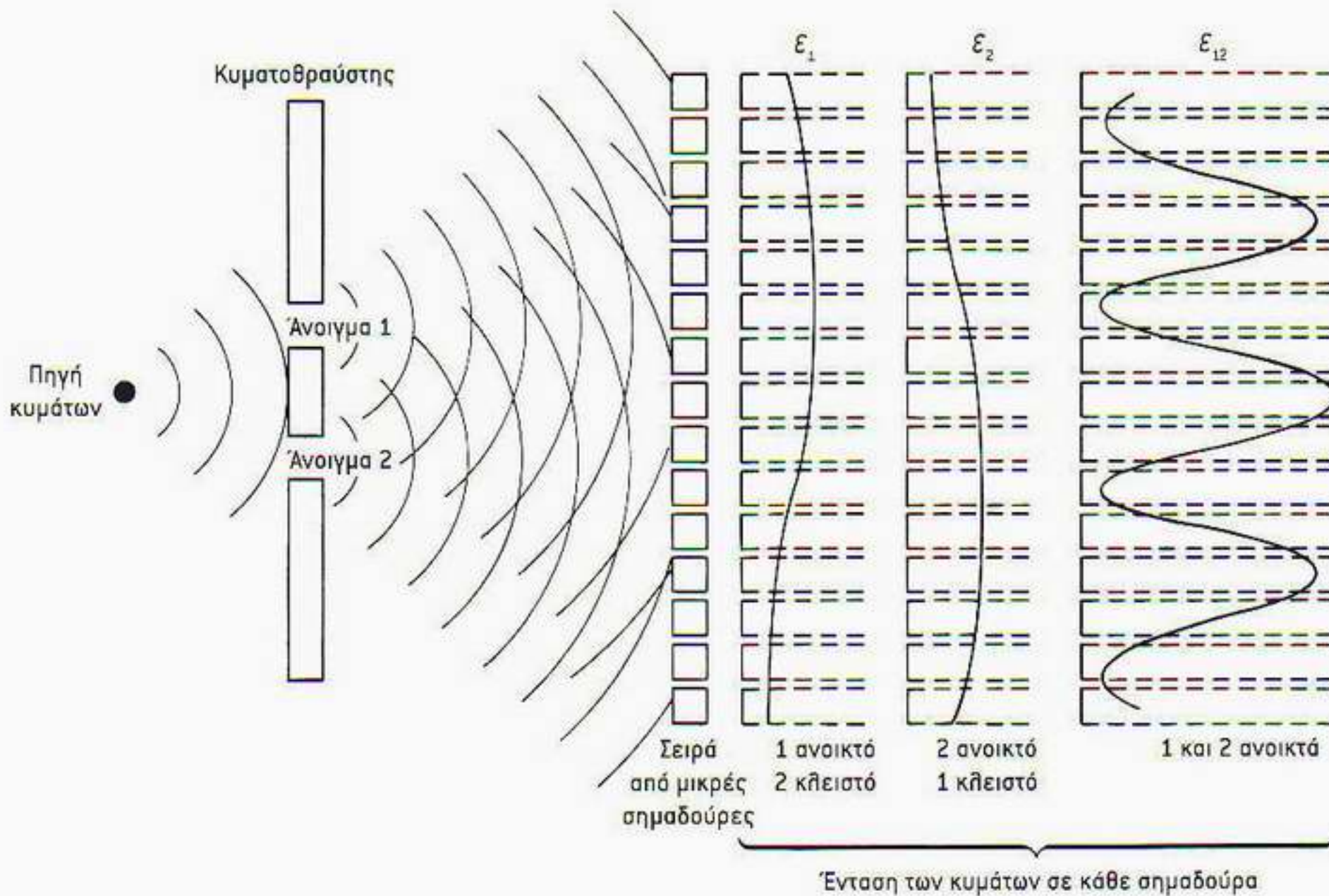
Εικόνα 1.8 Διάδοση υδάτινων κυμάτων επιφανείας. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το κύμα που διέρχεται από μία μόνο σχισμή και διαδίδεται, ενώ στη δεξιά βλέπουμε το φαινόμενο συμβολής των κυμάτων που προκύπτουν από δύο σχισμές.

φτάνουν από τα δύο ανοίγματα. Καθώς κοιτάζουμε τις σημαδούρες, θα δούμε κάποια σημεία όπου το όρος ενός κύματος που φτάνει από το άνοιγμα 1 συμπίπτει με το όρος ενός άλλου κύματος που φτάνει στο ίδιο σημείο από το άνοιγμα 2, με αποτέλεσμα οι σημαδούρες να κινούνται πολύ έντονα πάνω-κάτω. Σε κάποια άλλα σημεία, το όρος ενός κύματος από το ένα άνοιγμα θα συμπίπτει με την κοιλάδα ενός κύματος από το άλλο άνοιγμα, και σε αυτές τις θέσεις οι σημαδούρες δεν θα κινούνται καθόλου. Σε άλλα σημεία, πάλι, οι σημαδούρες θα κινούνται μεν αλλά λιγότερο έντονα. Για τα υδάτινα κύματα, είναι αρκετά εύλογο ότι η ενέργειά τους σε μια δεδομένη θέση έχει σχέση με το «πόσο μεγάλα» είναι στη θέση αυτή. Πράγματι, μπορεί να αποδειχθεί ότι η ενέργεια ενός κύματος εξαρτάται από το τετράγωνο του «μέγιστου ύψους» του κύματος. Ας ονομάσουμε την ποσότητα ενέργειας που φτάνει ανά δευτερόλεπτο *ένταση* και ας τη συμβολίσουμε με E . Εάν συμβολίσουμε το μέγιστο ύψος του κύματος με v , μπορούμε να γράψουμε τη σχέση μεταξύ E και v με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = v^2$$

ένταση ίσον ύψος στο τετράγωνο.

Αντίθετα απ' ό,τι στο πείραμα με τις σφαίρες, βλέπουμε ότι η ενέργεια των κυμάτων δεν φτάνει στον ανιχνευτή κατά ορισμένη ποσότητα —όπως οι σφαίρες που έφταναν σε μία μόνο θέση κάθε χρονική στιγμή. Εδώ βλέπουμε ότι η ενέργεια του αρχικού κύματος κατανέμεται κατά μήκος του ανιχνευτή, αφού το ύψος του κύματος που προκύπτει στον ανιχνευτή μεταβάλλεται ομαλά από μηδέν μέχρι κάποια μέγιστη τιμή. Στην Εικόνα 1.9 η καμπύλη δείχνει πώς μεταβάλλεται η ένταση της κυματικής διαταραχής κατά μήκος του ανιχνευτή όταν είναι ανοικτά και τα δύο ανοίγματα —ας την ονομάσουμε $E_{1,2}$. Αυτή η εικόνα διακύμανσης της έντασης επιδέχεται μια πολύ απλή μαθηματική εξήγηση. Η συνολική διαταραχή του νερού σε κάθε θέση



Εικόνα 1.9 Το πείραμα της διπλής σχισμής με υδάτινα κύματα. Οι ανιχνευτές είναι μια σειρά από μικρές σηματοδούρες· το πόσο έντονα κινούνται πάνω-κάτω στην επιφάνεια του νερού δίνει το μέτρο της ενέργειας των κυμάτων. Συγκρίνετε τα μέτωπα των κυμάτων που διαδίδονται από κάθε άνοιγμα με εκείνα της Εικόνας 1.8. Η στήλη που σημειώνεται με E_1 δείχνει την ομαλά μεταβαλλόμενη ένταση των κυμάτων όταν μόνο το άνοιγμα 1 είναι ανοικτό. Παρατηρήστε ότι η εικόνα αυτή μοιάζει πολύ με την I_1 στην Εικόνα 1.7 όταν ήταν ανοικτή μόνο η σχισμή 1. Και εδώ έχουμε τη μέγιστη ένταση στον ανιχνευτή ακριβώς απέναντι από το άνοιγμα 1 και την πηγή. Η στήλη E_2 δείχνει μια ανάποδη εικόνα με το άνοιγμα 1 κλειστό και το 2 ανοικτό. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε με ανοικτά και τα δύο ανοίγματα φαίνεται στη στήλη E_{12} . Είναι τελείως διαφορετική από την αντίστοιχη εικόνα των σφαιρών. Προφανώς, η E_{12} δεν ισούται με το άθροισμα των E_1 και E_2 . Αυτή η καμπύλη που αναπαριστά την ταχεία μεταβολή της κυματικής έντασης ονομάζεται εικόνα συμβολής.

κατά μήκος του ανιχνευτή δίνεται από το άθροισμα των διαταραχών τις οποίες προκαλούν τα κύματα που προέρχονται από τα ανοίγματα 1 και 2. Αν συμβολίσουμε το ύψος του κύματος από το άνοιγμα 1 με v_1 , το ύψος του κύματος από το άνοιγμα 2 με v_2 , και το συνολικό ύψος που παίρνουμε και από τα δύο ανοίγματα με v_{12} , μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση:

$$v_{12} = v_1 + v_2.$$

Θυμηθείτε ότι καθένα από αυτά τα ύψη μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, ανάλογα με το αν η αντίστοιχη κυματική διαταραχή ανεβάζει ή κατεβάζει το επίπεδο του νερού. Η ένταση που προκύπτει είναι ακριβώς το τετράγωνο αυτού του ύψους (ή πλάτους, με αυστηρότερη διατύπωση) του κύματος:

$$E_{12} = v_{12}^2$$

και έτσι

$$E_{12} = (v_1 + v_2)^2.$$

Τώρα, θα μπορούσαμε να επαναλάβουμε το πείραμα κλείνοντας το ένα από τα ανοίγματα. Στην Εικόνα 1.9 φαίνονται τα αποτελέσματα για κάθε τέτοια περίπτωση. Συμβολίζουμε την εικόνα της έντασης για την περίπτωση όπου το άνοιγμα 1 είναι ανοικτό και το άνοιγμα 2 κλειστό με E_1 . Η καμπύλη E_1 εκφράζει το τετράγωνο της διαταραχής που προκαλείται από το κύμα το οποίο διέρχεται από το άνοιγμα 1:

$$E_1 = v_1^2.$$

Με τον ίδιο τρόπο, η καμπύλη E_2 αναπαριστά την ένταση στην περίπτωση όπου το άνοιγμα 2 είναι ανοικτό και το άνοιγμα 1 κλειστό, οπότε, όπως πριν, θα ισχύει:

$$E_2 = v_2^2.$$

Είναι φανερό ότι οι δύο αυτές καμπύλες παρουσιάζουν πολύ λιγότερες διακυμάνσεις από την E_{12} . Ακόμα, την εικόνα της έντασης E_{12} όταν και τα δύο ανοίγματα είναι ανοικτά δεν την παίρνουμε απλώς προσθέτοντας τις χαρακτηριστικές εικόνες εντάσεως E_1 και E_2 , τις οποίες πήραμε όταν καθένα από τα ανοίγματα είναι κλειστό. Μαθηματικά, μπορούμε να το διαπιστώσουμε αυτό με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_{12} = (v_1 + v_2)^2 = v_1^2 + 2v_1v_2 + v_2^2,$$

το οποίο προφανώς δεν ισούται με το άθροισμα των E_1 και E_2

$$E_1 + E_2 = v_1^2 + v_2^2.$$

Στην περίπτωση των υδάτινων κυμάτων, λοιπόν, λέμε ότι λαμβάνει χώρα *συμβολή*. Αντίθετα από την περίπτωση των σφαιρών, τώρα δεν μπορούμε να πάρουμε τη χαρακτηριστική εικόνα όταν «και οι δύο σχισμές είναι ανοικτές» προσθέτοντας τις εικόνες όταν κάθε φορά «η μία σχισμή είναι ανοικτή και η άλλη κλειστή». Η παρατήρηση αντίστοιχων εικόνων συμβολής του φωτός ήταν εκείνη που έπεισε τον Thomas Young ότι το φως συνιστά κυματική κίνηση. Στην πραγματικότητα, η ζωή δεν είναι τόσο απλή! Τώρα θα περιγράψουμε τα αποτελέσματα του πειράματος της διπλής σχισμής όταν εκτελείται με ηλεκτρόνια —παρόμοια αποτελέσματα θα παίρναμε και αν χρησιμοποιούσαμε φωτόνια.

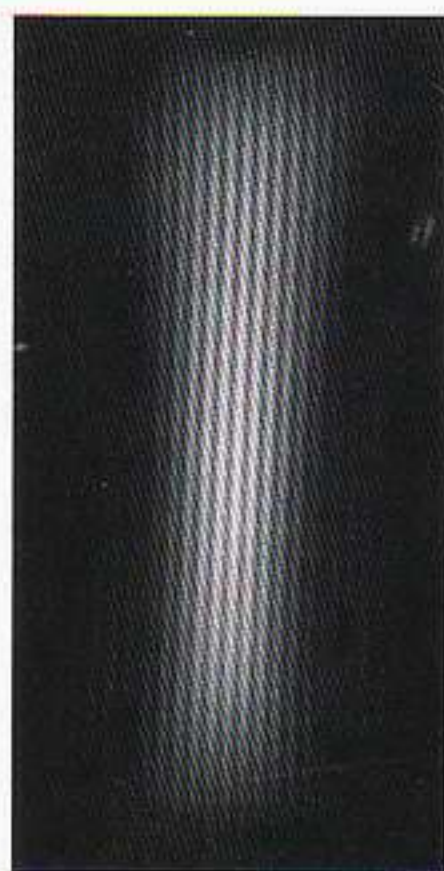
Με ηλεκτρόνια

Πηγή: Ένα «πολυβόλο» ηλεκτρονίων, που αποτελείται από θερμαινόμενο σύρμα έτσι ώστε από την επιφάνεια του μετάλλου να εκτοξεύονται ηλεκτρόνια, μαζί με μια ηλεκτρική τάση, για να επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια.

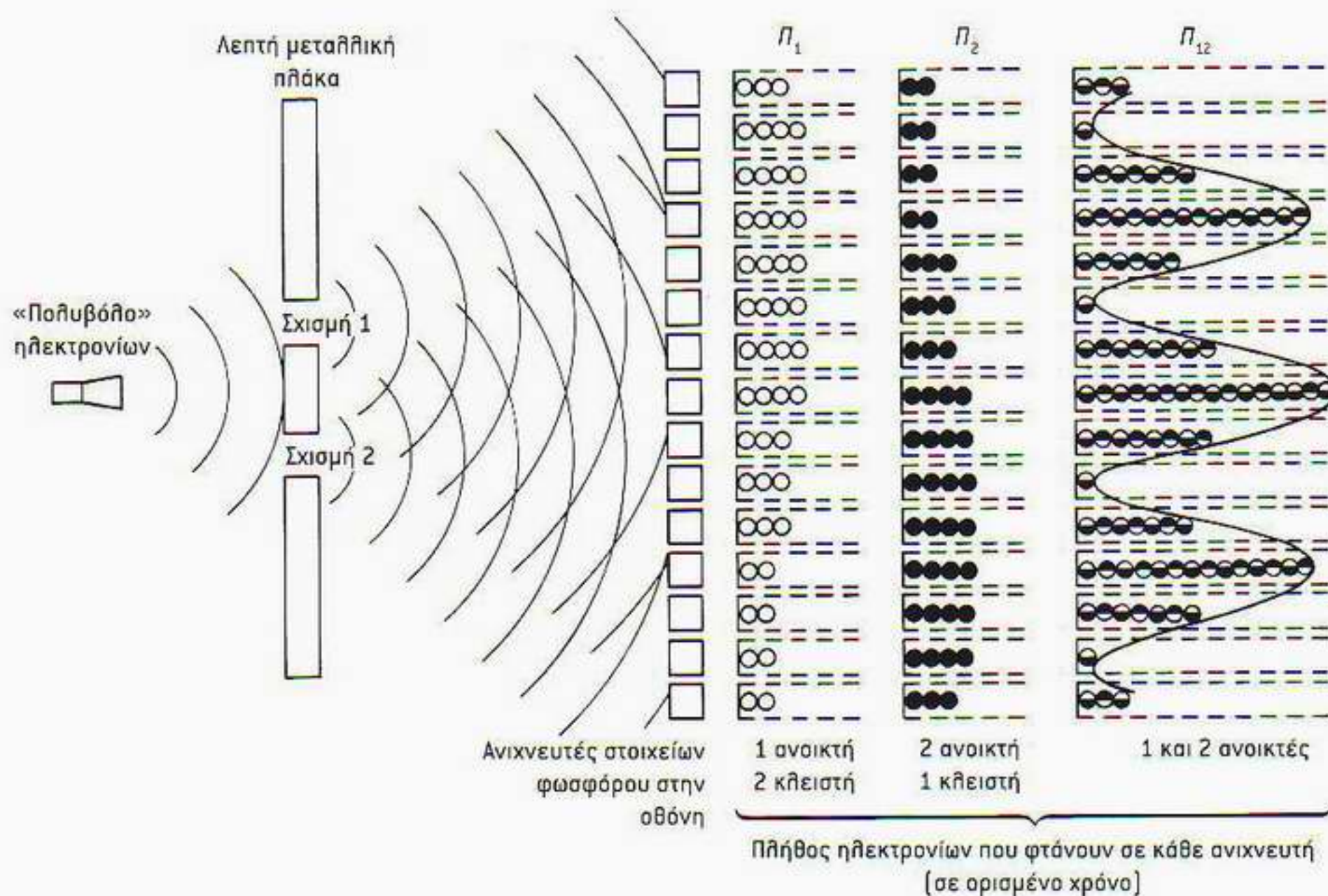
Διάφραγμα: Λεπτή μεταλλική πλάκα με δύο πολύ στενές σχισμές.

Ανιχνευτής: Ένα πέτασμα επικαλυμμένο με ένα στρώμα φωσφόρου, το οποίο παράγει μια αναλαμπή κάθε φορά που προσκρούει πάνω του ένα ηλεκτρόνιο.

Αποτελέσματα: Αναλαμπές δείχνουν ότι στον ανιχνευτή φτάνουν ηλεκτρόνια. Όπως και με τις σφαίρες, διαπιστώνουμε ότι τα ηλεκτρόνια φτάνουν ένα ένα, κατά ορισμένα ποσά ίδιου μεγέθους, σε μία μόνο συγκεκριμένη θέση κάθε χρονική στιγμή. Αν μειώσουμε την ένταση του πολυβόλου ηλεκτρο-



Εικόνα 1.10 Φωτογραφία που δείχνει την εικόνα συμβολής στο πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια.



Εικόνα 1.11 Το πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια, κατά την άφιξή τους σε ένα σημείο του ανιχνευτή, προκαλούν εκπαγή μιας αναλαμπής —ίδια με τις σφαίρες που προσπίπτουν στα κουτιά-ανιχνευτές και δεν διαχέονται, όπως συμβαίνει με την ενέργεια των υδάτινων κυμάτων. Η στήλη η οποία σημειώνεται με Π_1 δείχνει την εικόνα που παίρνουμε μόνο με τη σχισμή 1 ανοικτή. Τα ηλεκτρόνια που περνούν από τη σχισμή 1 παριστάνονται με λευκούς κύκλους, όπως και οι σφαίρες της Εικόνας 1.7. Η στήλη Π_2 δείχνει το ίδιο πράγμα, μόνο με τη σχισμή 2 ανοικτή. Τα ηλεκτρόνια που περνούν από τη σχισμή αυτή παριστάνονται με μαύρους κύκλους. Αυτές οι δύο χαρακτηριστικές εικόνες είναι ακριβώς ίδιες με τις αντίστοιχες στην περίπτωση των σφαιρών. Η διαφορά βρίσκεται στη στήλη Π_{12} , η οποία δείχνει την προκύπτουσα εικόνα για τα ηλεκτρόνια όταν και οι δύο σχισμές είναι ανοικτές. Αυτή όμως μοιάζει με την εικόνα συμβολής των υδάτινων κυμάτων, οπότε καθίσταται σαφές ότι κάποιο είδος κυματικής κίνησης πρέπει να προκύπτει από κάθε σχισμή, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Η Π_{12} δεν ισούται με το άθροισμα των Π_1 και Π_2 , επομένως δεν μπορούμε να πούμε από ποια σχισμή περνάει κάθε ηλεκτρόνιο. Εκφράζουμε αυτό το κενό της γνώσης μας αναπαριστώντας τα ηλεκτρόνια με κύκλους κατά το μισό άσπρους και κατά το μισό μαύρους. Αυτό το γεγονός, ότι δηλαδή κβαντικά αντικείμενα όπως τα ηλεκτρόνια έχουν ιδιότητες και σωματιδιακής και κυματικής κίνησης, αλλά δεν συμπεριφέρονται ούτε ως σωματίδια ούτε ως κύματα, είναι το κεντρικό μυστήριο της κβαντικής μηχανικής.

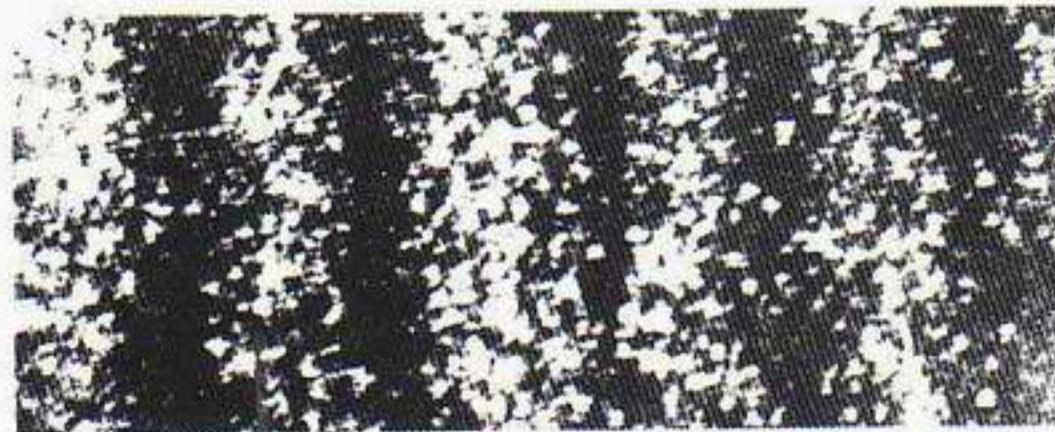
νίων επιβάλλοντας να εκπέμπονται λιγότερα ηλεκτρόνια ανά λεπτό, τότε θα δούμε να παράγονται αναλαμπές ίδιας έντασης στον ανιχνευτή αλλά λιγότερες, επειδή πάνω του προσπίπτουν λιγότερα ηλεκτρόνια ανά λεπτό. Ακόμα, όπως ακριβώς και με τις σφαίρες, μπορούμε να μετρήσουμε τον αριθμό των αναλαμπών σε κάθε θέση του ανιχνευτή σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Αυτό, όπως και με τις σφαίρες, μας επιτρέπει να μετρήσουμε πώς μεταβάλλεται η πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων κατά μήκος του ανιχνευτή. Και τώρα αποκαλύπτεται η μαγεία της κβαντικής μηχανικής. Η καμπύλη που παίρνουμε, και φαίνεται στην Εικόνα 1.11, είναι η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής για κύματα, αν και έχουμε πει ότι τα ηλεκτρόνια φτάνουν στον ανιχνευτή όπως ακριβώς οι σφαίρες! Αυτό είναι πράγματι πο-



0,02 s



10 s



60 s



120 s

Εικόνα 1.12 Περισσότερες λεπτομέρειες για το πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια. Μολονότι η εικόνα συμβολής θεωρήθηκε, με μια πρώτη ματιά, σαφής ένδειξη κυματικής κίνησης, μια πιο λεπτομερειακή εξέταση έδειξε ότι τα ηλεκτρόνια φτάνουν στον ανιχνευτή ως πλήρη σωματίδια. Η πάνω φωτογραφία δείχνει το πέτασμα-ανιχνευτή σε ένα αρχικό στάδιο του πειράματος· μέχρι τότε έχουν προσπέσει πάνω του τόσο λίγα ηλεκτρόνια, ώστε να παρατηρούμε μια εικόνα σχεδόν τυχαίων κρούσεων. Οι κάτω εικόνες δείχνουν τι συμβαίνει στη συνέχεια: όλο και πιο πολλά ηλεκτρόνια καταφτάνουν, ώσπου τελικά γίνεται ορατή η γνωστή χαρακτηριστική εικόνα συμβολής.

λύ περίεργο, αλλά τα πράγματα γίνονται ακόμα πιο μυστηριώδη καθώς εξετάζουμε λεπτομερέστερα το εν λόγω αποτέλεσμα.

Ας παρατηρήσουμε τις θέσεις του ανιχνευτή όπου η εικόνα συμβολής εμφανίζει κοιλότητες («ελάχιστα»), στην περίπτωση όπου είναι ανοικτές και οι δύο σχισμές. Σε αυτές τις θέσεις βρίσκουμε πιο λίγα ηλεκτρόνια απ' όσα θα βρίσκαμε αν επαναλαμβάναμε το πείραμα με τη μία σχισμή ανοικτή και την άλλη κλειστή! Αν εκτελούσαμε, λοιπόν, το πείραμα με ηλεκτρόνια και τη μία σχισμή κλειστή, θα είχαμε τη χαρακτηριστική εικόνα που φαίνεται στην Εικόνα 1.11 —ίδια ακριβώς με τα κύματα. Αφού όμως τα ηλεκτρόνια φτάνουν όπως οι σφαίρες, πώς μπορεί να συμβαίνει αυτό; Μήπως το ηλεκτρόνιο χωρίζεται με κάποιον τρόπο στα δύο, και από κάθε σχισμή περνάει το μισό; Όχι βέβαια! Τα ηλεκτρόνια δεν παρουσιάζονται ποτέ μισά· όπως οι σφαίρες, ή υπάρχουν ακέραια ή δεν υπάρχουν καθόλου. Από την εποχή της ανακάλυψης της κβαντικής μηχανικής, πολλοί προβληματίζονται και προσπαθούν να

βρουν μια απάντηση σε τούτο το δίλημμα. Ακόμη και σήμερα, το πρόβλημα εξακολουθεί να υφίσταται. Τα ηλεκτρόνια φεύγουν από την πηγή ως σωματίδια και φτάνουν στον ανιχνευτή επίσης ως σωματίδια· ωστόσο, από την εικόνα άφιξης των ηλεκτρονίων στον ανιχνευτή, φαίνεται ότι στον ενδιάμεσο χώρο κινήθηκαν ως κύματα!

Είδαμε ότι μαθηματικά η καμπύλη συμβολής μπορεί να περιγραφεί με μια πολύ απλή εξίσωση. Επίσης, στην περίπτωση των υδάτινων κυμάτων είδαμε ότι η καμπύλη συμβολής προέκυψε από άθροιση των υψών (πλατών) των κυμάτων που προέρχονταν από την πηγή και διέρχονταν από τις σχισμές 1 και 2. Η ένταση ή η ενέργεια του κύματος δε συσχετίστηκε με το τετράγωνο του αθροίσματος αυτών των πλατών. Οι ίδιες μαθηματικές σχέσεις πρέπει να ισχύουν και για την εικόνα συμβολής των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των ηλεκτρονίων, όμως, δεν μετράμε την ένταση μιας πραγματικής κυματικής κίνησης αλλά μάλλον την πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων. Από τα απλά μαθηματικά της καμπύλης συμβολής βλέπουμε ότι πρέπει να υπάρχει κάτι σαν το ύψος του κύματος και στην περίπτωση των ηλεκτρονίων. Αλλά ποια είναι η σημασία του «ύψους» σε ένα ηλεκτρονιακό κύμα; Εφόσον το τετράγωνό του πρέπει να δίνει την αντίστοιχη πιθανότητα, αυτό το «ύψος» θα πρέπει να το ονομάσουμε *κβαντικό πλάτος πιθανότητας*. Θα συμβολίζουμε τέτοια κβαντικά πλάτη με a . Έτσι, η εξίσωσή μας για την πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων θα έχει ακριβώς την ίδια μορφή όπως και για τα υδάτινα κύματα, με τη διαφορά ότι αντί του συμβόλου E , που χρησιμοποιήσαμε για την ένταση, τώρα θα χρησιμοποιούμε το Π για την πιθανότητα, και αντί του v για το ύψος θα χρησιμοποιούμε το a για το κβαντικό πλάτος. Επομένως, οι εξισώσεις για την πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων με τις «δύο σχισμές ανοικτές» και με τη «μία σχισμή ανοικτή και την άλλη κλειστή» θα πάρουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}\Pi_{12} &= (a_1 + a_2)^2 \\ \Pi_1 &= a_1^2 \\ \Pi_2 &= a_2^2\end{aligned}$$

και, όπως πριν, το Π_{12} δεν ισούται με το άθροισμα των Π_1 και Π_2 :

$$\Pi_{12} \neq \Pi_1 + \Pi_2.$$

Πρέπει να συμπεράνουμε, λοιπόν, ότι τα ηλεκτρόνια, κατά την άφιξή τους στον ανιχνευτή, εμφανίζουν κυματοειδή συμβολή, παρότι σε αυτόν φτάνουν ως πλήρη σωματίδια, ακριβώς όπως οι σφαίρες. Γιού αυτή την έννοια, μπορούμε να πούμε ότι τα κβαντικά αντικείμενα μερικές φορές συμπεριφέρονται ως κύματα και μερικές ως σωματίδια. Αυτό μάλλον θα σας φαίνεται μυστηριώδες —και όντως είναι! Δεν μπορούμε να κάνουμε τίποτα περισσότερο για να εξηγήσουμε τη μαγεία της κβαντικής μηχανικής· μπορούμε απλώς να περιγράψουμε πώς συμπεριφέρονται τα κβαντικά αντικείμενα. Και αυτή η περιγραφή συνιστά τη θεωρία που αποκαλούμε κβαντική μηχανική.

2 Ο Heisenberg και η αβεβαιότητα

Ένας φιλόσοφος είπε κάποτε: «Είναι αναγκαίο, για την ίδια την ύπαρξη της επιστήμης, οι ίδιες συνθήκες να δίνουν πάντοτε τα ίδια αποτελέσματα.»

Λοιπόν, δεν τα δίνουν!

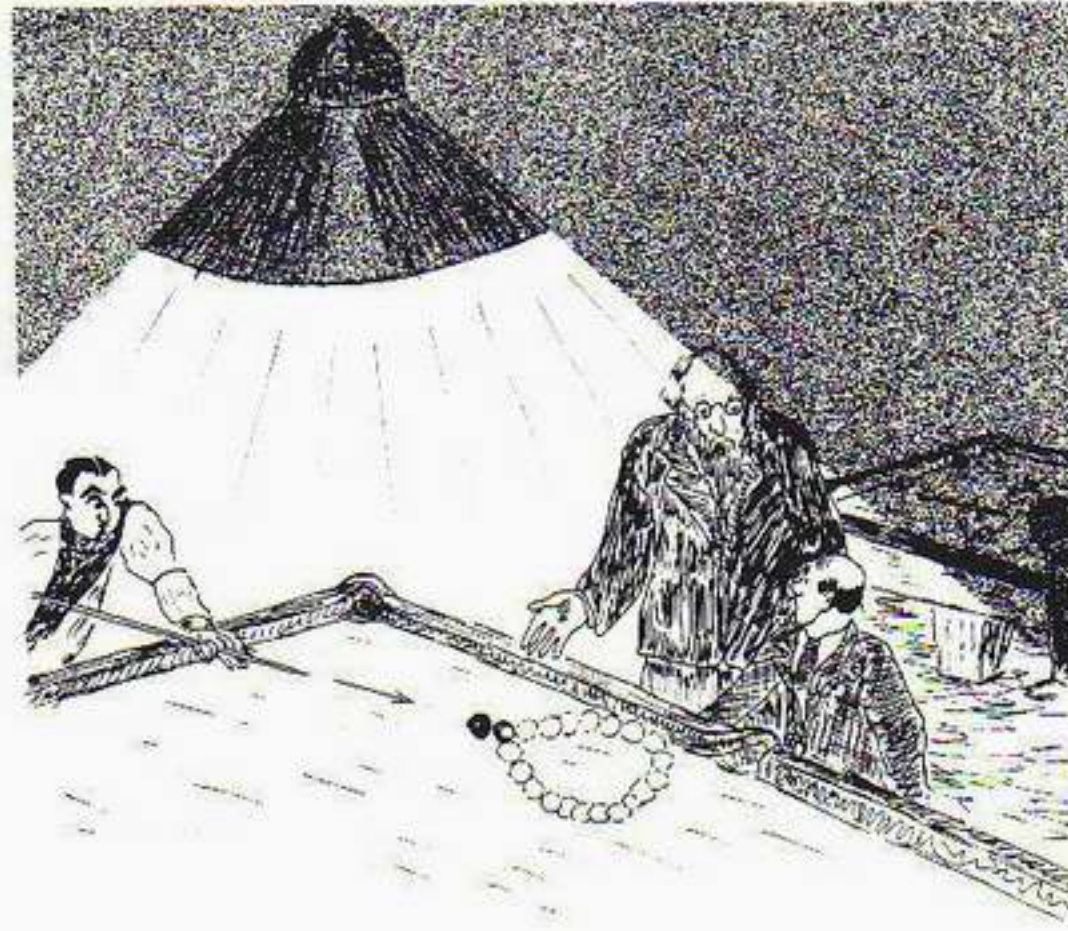
Richard Feynman

Παρακολουθώντας τα ηλεκτρόνια

Είδαμε ότι η κβαντική μηχανική δεν μας επιτρέπει την ευκολία μιας παραστατικής απεικόνισης της κίνησης των κβαντικών σωματιδίων. Σε ένα συνηθισμένο παιχνίδι μπιλιάρδου μπορούμε να φανταστούμε τις διαδρομές που ακολουθεί κάθε μπίλια (Εικόνα 1.1). Η Εικόνα 2.1 δείχνει την απόπειρα του φυσικού George Gamow να μας δώσει την εντύπωση που ίσως σχηματίζαμε αν το ίδιο παιχνίδι παιζόταν με κβαντικά σωματίδια. Πέρα από το ότι καθιστά φανερό πως η έννοια της διαδρομής δεν έχει πια ισχύ στην κβαντική μηχανική, το σχέδιο αυτό φωτίζει και μια άλλη σημαντική διαφορά ανάμεσα στον κβαντικό και τον κλασικό κόσμο: η ακριβής θέση της λευκής μπίλιας δεν είναι γνωστή. Η αβεβαιότητα εισήλθε στη φυσική και αντικατέστησε τον υπεροπτικό ντετερμινισμό της νευτώνειας μηχανικής.

Ώς τον 19ο αιώνα, οι φυσικοί μπόρεσαν να εξηγήσουν ένα τεράστιο σύνολο πειραματικών παρατηρήσεων για αντικείμενα τόσο διαφορετικά όσο οι πλανήτες και οι μπίλιες του μπιλιάρδου. Αν μια παρατήρηση διέφερε από τις προβλέψεις της κλασικής φυσικής, για να εξηγήσουν την απόκλιση έψαχναν να βρουν τι είχαν παραβλέψει. Το 1864, η εμπιστοσύνη των φυσικών σε ολόκληρο το οικοδόμημα της κλασικής φυσικής φάνηκε να επαληθεύεται θεαματικά από την εξήγηση μερικών ανωμαλιών στην τροχιά του πλανήτη Ουρανού. Οι ανωμαλίες αυτές αποδίδονταν στην ύπαρξη ενός πλανήτη, του πλανήτη Ποσειδώνα, που τότε δεν είχε ανακαλυφθεί ακόμα. Η ανακάλυψη που ακολούθησε υπήρξε πράγματι ένας θρίαμβος για τη νευτώνεια φυσική. Έτσι, ως το γύρισμα του αιώνα, φαινόταν πως ολόκληρη η φυσική διεπόταν από τους νόμους του Νεύτωνα. Αν έδιναν σε κάποιον ένα δοχείο που περιείχε ο-

Εικόνα 2.1 Ο George Gamow δείχνει τον κύριο Τόμπκινς να παίζει μπιλιάρδο με κβαντικές μπίλιες. Η λεζάντα του πρωτοτύπου λέει: «Η λευκή μπίλια πήγε προς όλες τις κατευθύνσεις!» Σε έναν τέτοιο κόσμο, η κβαντική αβεβαιότητα θα ήταν μια συνηθισμένη εμπειρία.



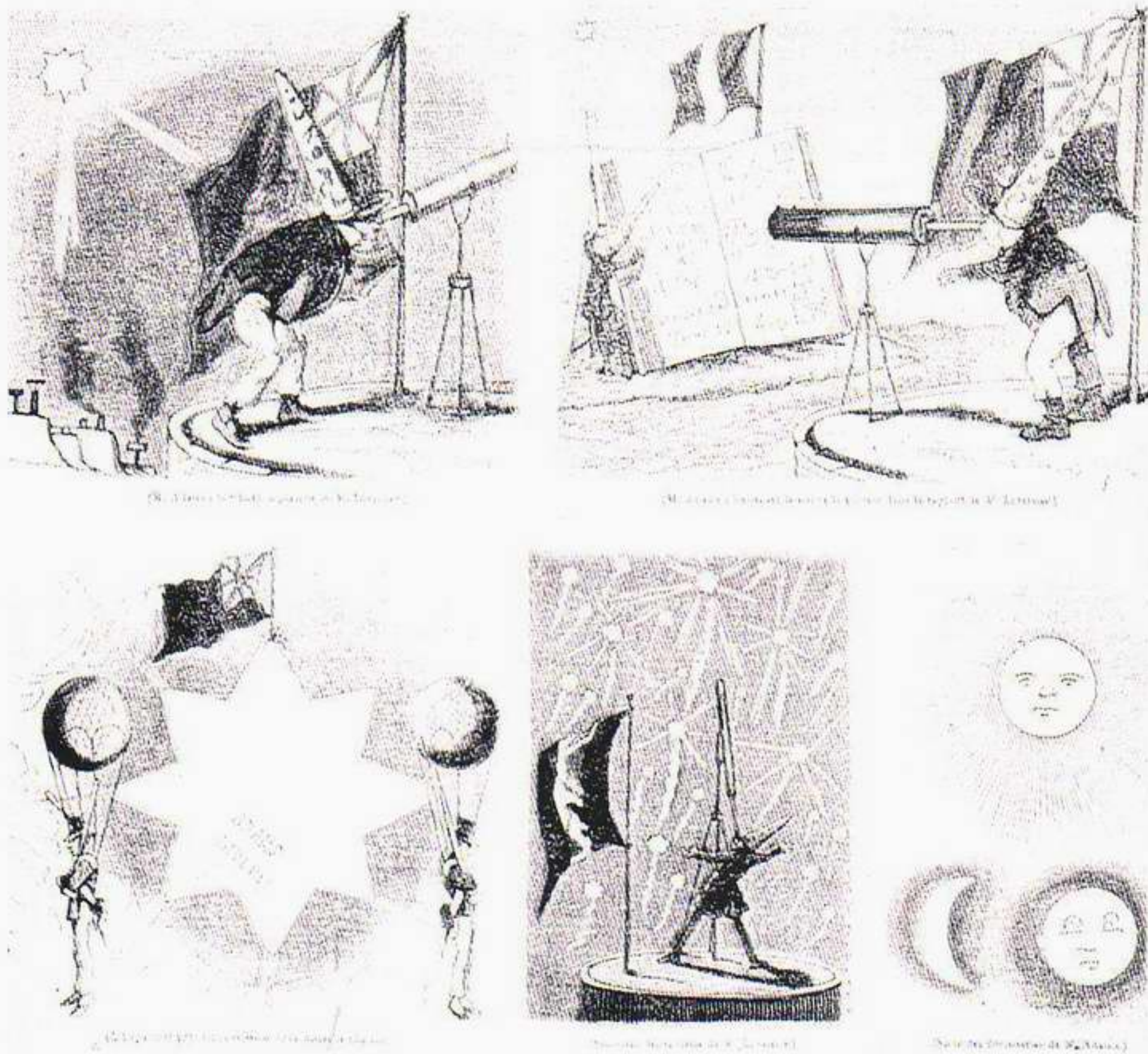
ρισμένο αριθμό σωματιδίων, το μόνο που θα έπρεπε να κάνει για να προβλέψει τις κινήσεις κάθε σωματιδίου κάθε χρονική στιγμή στο μέλλον ήταν να μετρήσει τις τωρινές θέσεις και τις ταχύτητες όλων των σωματιδίων. Μετρώντας τις θέσεις και τις ταχύτητες με «αρκετή ακρίβεια», οι προβλέψεις θα μπορούσαν να είναι επίσης ακριβείς. Αυτή ήταν η ντετερμινιστική θεώρηση της φύσης που ενθαρρύνθηκε από την επιτυχία της κλασικής φυσικής. Δεν φαινόταν πολύ αναγκαία η προειδοποίηση ότι απαιτούνταν «αρκετή ακρίβεια». Σε τελευταία ανάλυση, ήταν «ευνόητο» ότι κάποιος μπορούσε να μετρήσει οτιδήποτε, χωρίς ουσιαστικά όριο στην ακρίβεια της μέτρησης, αρκεί μόνο να διαθέτετε το επαρκώς ακριβές όργανο μέτρησης.

Η κβαντική μηχανική ξεφορτώνεται μια για πάντα αυτή την ντετερμινιστική θεώρηση του μέλλοντος και εισάγει ένα ουσιαστικό στοιχείο αβεβαιότητας στις προβλέψεις της φυσικής. Πώς συμβαίνει αυτό; Η αβεβαιότητα εμφανίζεται επειδή η φαινομενικά ακίνδυνη πίστη των κλασικών φυσικών ότι μπορούσαν να μετρήσουν και τη θέση και την ταχύτητα ενός σωματιδίου με όση ακρίβεια ήθελαν είναι λάθος! Στην κβαντική μηχανική υπάρχει ένα θεμελιώδες όριο στην ακρίβεια την οποία μπορούμε να πετύχουμε, όσο ακριβή και αν είναι τα μετρητικά όργανά μας.

Για να φωτίσουμε αυτό το σημείο, ας ξαναγυρίσουμε άλλη μία φορά στο πείραμα της διπλής σχισμής. Θυμηθείτε ότι μιλούσαμε με βάση την πιθανότητα που έχει το ηλεκτρόνιο να χτυπήσει το πέτασμα. Αυτό το κάναμε επειδή δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πού θα χτυπήσει κάθε ξεχωριστό ηλεκτρόνιο. Μπορούμε να προβλέψουμε μόνο τη σχετική πιθανότητα να χτυπήσει σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του πετάσματος.

Τώρα ξαναθυμηθείτε το πείραμα με τις σφαίρες. Και αυτό περιγράφηκε με όρους πιθανοτήτων. Υπάρχει όμως μια κρίσιμη διαφορά ανάμεσα στις σφαίρες και στα ηλεκτρόνια. Στην περίπτωση των σφαιρών, η πιθανοκρατική περιγραφή χρησιμοποιήθηκε επειδή δεν γνωρίζαμε την ακριβή αρχική κατεύθυνση της σφαίρας —το πολυβόλο τρανταζόταν κατά την εκपुरοοκρότηση.

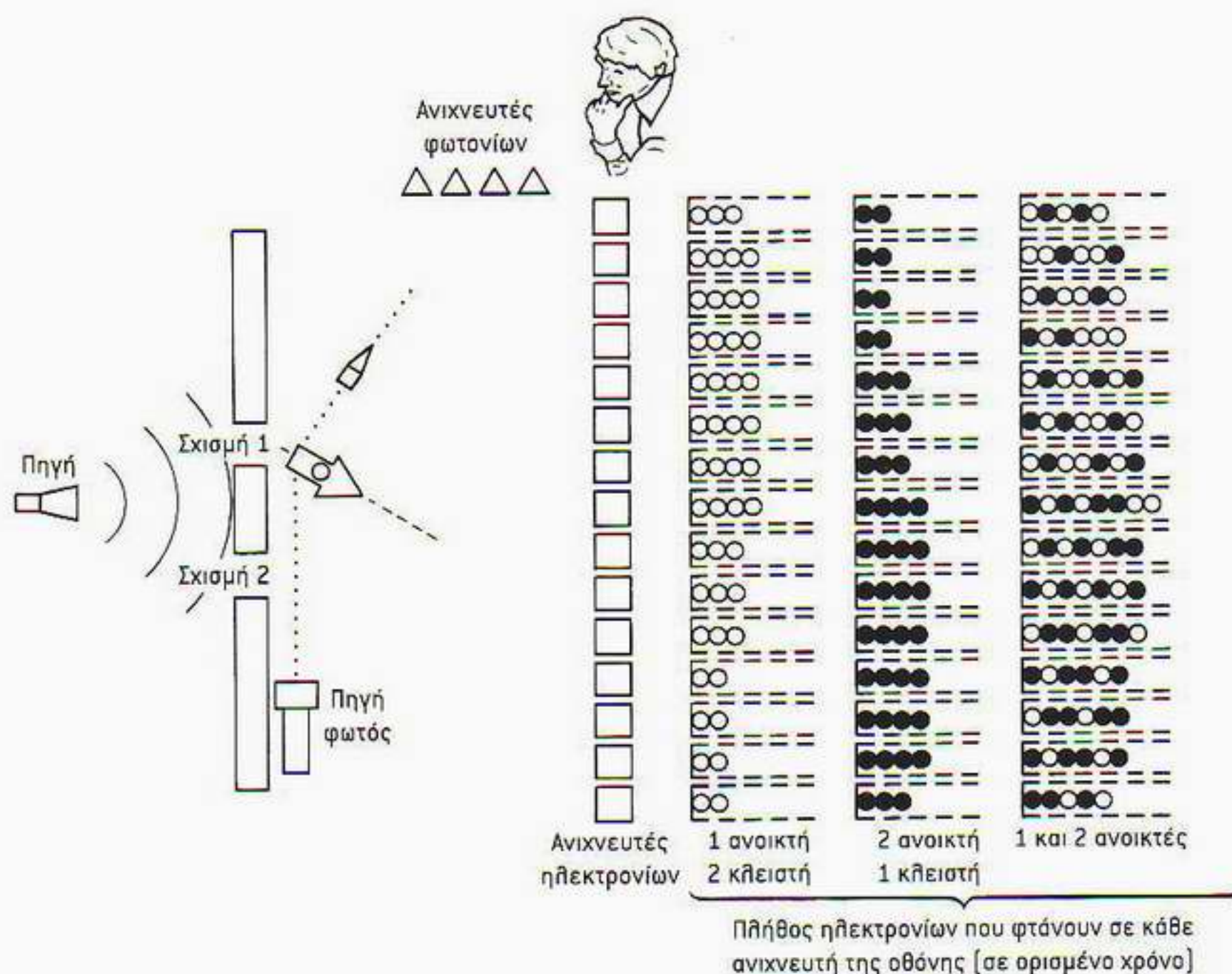
Αν θέλαμε, όμως, μπορούσαμε να μαγνητοσκοπήσουμε την εκτόξευση της κάθε σφαίρας και μετά να παρακολουθήσουμε την τροχιά της προς το



Εικόνα 2.2 Η ύπαρξη του πλανήτη Ποσειδώνα προβλέφθηκε από τον Adams στην Αγγλία και τον Le Verrier στη Γαλλία την ίδια περίπου εποχή. Μετά την ανακάλυψη, ξέσπασε η γνωστή διαμάχη Άγγλων και Γάλλων για το ποιος τα κατάφερε πρώτος, και αυτό το γαλλικό σκίτσο απεικονίζει τον Adams να κλέβει τα αποτελέσματα του Le Verrier. Ο Le Verrier προσπάθησε να επαναλάβει την επιτυχία του για να προβλέψει την ύπαρξη ενός άλλου πλανήτη, του Vulkan, πιο κοντά στον Ήλιο, χρησιμοποιώντας μια ανωμαλία στην τροχιά του Ερμή. Φυσικά, αυτή δεν ήταν η σωστή ερμηνεία της ανωμαλίας, η οποία σήμερα εξηγείται με τη βοήθεια της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Αϊνστάιν.

πέτασμα σε αργή κίνηση. Ακόμα κι αν βλέπαμε ένα μόνο μέρος της διαδρομής της σφαίρας, αυτό θα αρκούσε, σύμφωνα με τον Νεύτωνα, για να προσδιορίσουμε το υπόλοιπο της διαδρομής. Προφανώς, η σφαίρα πρέπει να περάσει μέσα από τη μία από τις σχισμές, εμείς δε μπορούμε να προσδιορίσουμε από ποια κοιτάζοντας την ταινία.

Γιατί δεν μπορούμε να κάνουμε το ίδιο με τα ηλεκτρόνια; Ας φανταστούμε πώς θα δρούσαμε αν προσπαθούσαμε να προσδιορίσουμε από ποια σχισμή περνάει το ηλεκτρόνιο. Για να δούμε το ηλεκτρόνιο αμέσως μόλις περάσει από τη μία σχισμή, πρέπει να ρίξουμε κάποιο φως πάνω του και να πα-



Εικόνα 2.3 Η πειραματική διάταξη που χρειαζόμαστε για να παρατηρήσουμε από ποια σχισμή περνά το ηλεκτρόνιο στο πείραμα της διπλής σχισμής. Φως, με τη μορφή φωτονίων, κατευθύνεται προς τις σχισμές. Στο σχήμα, ένα φωτόνιο, που παριστάνεται σαν μικρή σφαίρα, έχει χτυπήσει ένα ηλεκτρόνιο πίσω από τη σχισμή 1. Η κίνηση του ηλεκτρονίου διαταράσσεται ελαφρά, και το ανακλώμενο φωτόνιο παρατηρείται στους ανιχνευτές φωτονίων. Η χαρακτηριστική εικόνα που παίρνουμε για το ηλεκτρόνιο όταν μένει ανοικτή μόνο η μία από τις σχισμές είναι σχεδόν η ίδια με πριν, όταν δεν παρατηρούσαμε το ηλεκτρόνιο πίσω από τις σχισμές. Και νά η έκπληξη: Όταν μένουν ανοικτές και οι δύο σχισμές, δεν έχουμε εικόνα συμβολής. Οι μικρές ωθήσεις που δέχονται τα ηλεκτρόνια κατά τη σύγκρουσή τους με τα φωτόνια αρκούν πάντα για να εξαλείψουν εντελώς την εικόνα συμβολής! Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα από ποια σχισμή πέρασε το ηλεκτρόνιο, αλλά τώρα τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται ακριβώς όπως οι σφαίρες. Η χαρακτηριστική εικόνα που παρατηρούμε είναι ακριβώς το άθροισμα των εικόνων συμβολής για τη σχισμή 1 και τη σχισμή 2 χωριστά.

παρατηρήσουμε το ανακλώμενο φως. Λοιπόν, ας τροποποιήσουμε κάπως την πειραματική μας συσκευή τοποθετώντας μια φωτεινή πηγή πίσω από τις σχισμές (Εικόνα 2.3) έτσι ώστε, αν ένα ηλεκτρόνιο περνά διαμέσου της σχισμής 1, να βλέπουμε μια λάμψη πίσω από τη σχισμή αυτή· και το ίδιο με τη σχισμή 2. Αν εκτελέσουμε τώρα το πείραμα, τι θα δούμε; Λοιπόν, το πρώτο σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι ποτέ δεν βλέπουμε ένα είδος μισής λάμψης πίσω και από τις δύο σχισμές ταυτόχρονα. Υπάρχει πάντοτε μία ολόκληρη λάμψη είτε πίσω από τη σχισμή 1 είτε πίσω από τη σχισμή 2. Επομένως, τώρα μπορούμε να χωρίσουμε σε δύο ομάδες τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στον ανιχνευτή, σύμφωνα με το αν περνούν διαμέσου της σχισμής 1 ή της σχισμής 2. Τι είναι τότε όλες τούτες οι κβαντικές παραξενιές; Το ηλεκτρόνιο ολοφάνερα θα περνά είτε μέσα από τη σχισμή 1 είτε μέσα από τη σχισμή 2. Και πράγματι αυτό

γίνεται όταν παρακολουθούμε τα ηλεκτρόνια. Αλλά, αν κοιτάξουμε την εικόνα που παίρνουμε από την άφιξη των ηλεκτρονίων στο πέτασμα, δεν θα παρατηρήσουμε καμιά εικόνα συμβολής! Το αποτέλεσμα είναι ακριβώς το ίδιο με εκείνο των σφαιρών!

Είναι εκπληκτικό! Έχουμε διαφορετικό αποτέλεσμα, ανάλογα με το αν ανάψαμε το φως ή όχι για να παρακολουθήσουμε τα ηλεκτρόνια! Η απάντηση σε τούτο το φαινομενικά παράδοξο γεγονός βρίσκεται στην κβαντική φύση του ίδιου του φωτός. Θυμηθείτε τη συζήτησή μας για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στο Κεφάλαιο 1. Όποτε το φως αλληλεπιδρά με την ύλη, εμφανίζει τον σωματιδιακό χαρακτήρα του. Το φως, όπως τα ηλεκτρόνια, φτάνει κατά ορισμένα «πακέτα» ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια. Για να δούμε επομένως ένα αντικείμενο, πρέπει να υποχρεώσουμε ένα τουλάχιστον φωτόνιο να ανακλαστεί πάνω του. Τώρα φτάσαμε στην ουσία του θέματος! Όταν φωτίζουμε μια σφαίρα, η κίνησή της δεν διαταράσσεται σημαντικά, επειδή η ποσότητα ενέργειας ενός μεμονωμένου φωτονίου είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με εκείνη της σφαίρας. Από την άλλη, τα ηλεκτρόνια είναι πολύ «ευαίσθητα» κβαντικά αντικείμενα. Όταν φωτίζονται, τα ηλεκτρόνια δέχονται ένα τράνταγμα που διαταράσσει σημαντικά την κίνησή τους. Μια πιο λεπτομερειακή ανάλυση αποκαλύπτει ότι αυτή η διαταραχή είναι πάντα αρκετή για να εξαλείψει τη χαρακτηριστική εικόνα συμβολής!

Ίσως σκέφτεστε ότι μπορούμε να μειώσουμε την ένταση του φωτός και να κάνουμε τη διαταραχή τόσο μικρή ώστε να μην καταστραφεί η εικόνα συμβολής. Η συγκεκριμένη ιδέα αγνοεί το πώς συμπεριφέρεται το φως. Αν μειώσουμε την ένταση του φωτός, απλώς μειώνουμε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο· δεν μειώνουμε την ενέργεια κάθε φωτονίου. Οπότε τώρα με τα λίγα φωτόνια υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να περάσει απαρατήρητο, χωρίς να το δούμε. Άρα πρέπει να σχηματίσουμε και μια τρίτη ομάδα με τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στο πέτασμα. Είναι εκείνα που «χάσαμε» και αδυνατούμε να πούμε με σιγουριά αν πέρασαν από τη μία ή από την άλλη σχισμή. Αν κοιτάξουμε την εικόνα που παίρνουμε από την άφιξη αυτών των «χαμένων» ηλεκτρονίων, βλέπουμε ότι για άλλη μία φορά εμφανίζεται η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής!

Αυτό ακριβώς ονομάζει ο Feynman «λογική σχοινοβασία της κβαντομηχανικής σκέψης». Αν μέσω ενός πειράματος καταφέρουμε να ανιχνεύσουμε από ποια σχισμή περνά το ηλεκτρόνιο, τότε μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι το ηλεκτρόνιο πέρασε από τη μία ή από την άλλη σχισμή. Αν, ωστόσο, δεν έχουμε κάποιον τρόπο για να ανιχνεύσουμε από ποια σχισμή περνά το ηλεκτρόνιο, τότε δεν μπορούμε να πούμε ότι το ηλεκτρόνιο πέρασε είτε από τη μία είτε από την άλλη σχισμή!

Η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η κβαντική μηχανική είναι μια πολύ όμορφη και κομψή θεωρία. Στο πείραμα της διπλής σχισμής είδαμε ότι, μόλις προσδιορίσουμε από ποια σχισμή πέρασε το ηλεκτρόνιο, η εικόνα συμβολής καταστρέφεται. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ενδεικτικό μιας πολύ γενικής αρχής της κβαντικής φυσικής, η οποία φέρει το όνομα του επιστήμονα που την ανακάλυψε, του Werner Heisenberg. Ο Heisenberg έδειξε πρώτος ότι οι νέοι νόμοι της κβαντικής μηχανικής συνεπάγονται έναν θεμελιώδη περιορισμό



Ο Werner Heisenberg [1901-1976] ήταν λίγο παραπάνω από είκοσι ετών όταν ολοκλήρωσε τη βασική του εργασία στην κβαντική θεωρία. Το 1932 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για την ανακάλυψη της αρχής της αβεβαιότητας.

στην ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων. Στον καθημερινό μας κόσμο μπορούμε βέβαια να φανταζόμαστε ότι κάνουμε μετρήσεις με έναν αρκετά «αβρό» τρόπο, η δε πράξη της μέτρησης δεν διαταράσσει το μετρούμενο μέγεθος. Στον κόσμο της κβαντικής φυσικής, όμως, τα πράγματα είναι διαφορετικά. Η φωτεινή ενέργεια μεταφέρεται κατά ορισμένα διακριτά ποσά. Εκτελώντας δε μια μέτρηση, αναγκαστικά διαταράσσουμε σημαντικά το αντικείμενο στο οποίο κάνουμε τη μέτρηση. Ακόμα, δεν υπάρχει πρακτικός ή και θεωρητικός τρόπος να μειώσουμε τη διαταραχή αυτή στο μηδέν. Για αντικείμενα μικροσκοπικών διαστάσεων, τέτοιες διαταραχές δεν είναι αμελητέες. Αυτή είναι η ουσία της αρχής της αβεβαιότητας (ή της απροσδιοριστίας) του Heisenberg.

Η αρχή της αβεβαιότητας μπορεί να διατυπωθεί σε ακριβή μαθηματική μορφή. Συζητώντας για την ντετερμινιστική φύση της κλασικής φυσικής, φανταστήκαμε ότι μετράμε τη θέση και την ταχύτητα κάθε σωματιδίου μέσα σε ένα δοχείο. Αυτή τη συλλογή των σωματιδίων και το δοχείο που τα περιέχει θα τα αναφέρουμε συχνά ως *σύστημα*, και θα λέμε ότι κάνουμε μετρήσεις «στο σύστημα». Οι φυσικοί συνήθως παριστάνουν τη μέτρηση της θέσης ενός σωματιδίου με το σύμβολο x : μάλιστα, αντί για ταχύτητα, προτιμούν να μιλούν για το φυσικό μέγεθος που ονομάζεται *ορμή*. Το μέτρο της ορμής ισούται με το γινόμενο της μάζας του σωματιδίου επί την ταχύτητά του. Έτσι, ένα αυτοκίνητο που κινείται με ταχύτητα 10 χιλιόμετρα ανά ώρα έχει μεγαλύτερη ορμή από μια μπάλα ποδοσφαίρου που κινείται με την ίδια ταχύτητα (συνεπώς, σε μια σύγκρουση το αυτοκίνητο προκαλεί μεγαλύτερη ζημιά). Οι φυσικοί συνήθως παριστάνουν το μέτρο της ορμής με το σύμβολο p . Κάνοντας τώρα μετρήσεις σε ένα κβαντικό σύστημα, δεν είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε τις ποσότητες x και p με όση ακρίβεια θέλουμε. Υπάρχει πάντοτε ένα ελάχιστο σφάλμα, ή αβεβαιότητα — Δx και Δp , αντίστοιχα—, το οποίο έχει σχέση με τη μέτρησή τους. Αυτό που ανακάλυψε ο Heisenberg, και το οποίο πραγματικά προφυλάσσει την κβαντική μηχανική από μια εγγενή ασυνέπεια, είναι ότι η αβεβαιότητα Δx στη μέτρηση της θέσης και η αβεβαιότητα Δp στην ορμή συνδέονται αδιάσπαστα μεταξύ τους. Αν θέλετε να μετρήσετε τη θέση ενός σωματιδίου με μεγάλη ακρίβεια, καταλήγετε αναπόφευκτα να προκαλέσετε στο σύστημα μια μεγάλη διαταραχή και, κατά συνέπεια, να εισαγάγετε μια μεγάλη αβεβαιότητα στην ορμή του σωματιδίου. Γιατί γίνεται αυτό; Λοιπόν, για να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια τη θέση, πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιήσουμε φως με πολύ μικρό μήκος κύματος —αφού το μήκος κύματος του φωτός καθορίζει το ελάχιστο διάστημα μέσα στο οποίο μπορούμε να εντοπίσουμε το σωματίδιο. Φως με πολύ μικρό μήκος κύματος έχει πολύ μεγάλη συχνότητα. Ας δούμε τι σημαίνει αυτό: Η ενέργεια ενός φωτονίου εξαρτάται από τη συχνότητά του, σύμφωνα με τη σχέση που επινόησε πρώτος ο Max Planck. Η σχέση αυτή είναι πολύ απλή: μας λέει ότι η ενέργεια του φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητάς του. Μπορούμε να γράψουμε αυτή τη σχέση, η οποία συσχετίζει την ενέργεια E του φωτονίου με τη συχνότητα ν του φωτός ως εξής:

$$E = h \cdot \nu$$

ενέργεια φωτονίου ίσον σταθερά τού Planck επί συχνότητα.

Η σταθερά h της αναλογίας ονομάζεται σταθερά τού Planck. Εφοδιασμένοι με αυτό το αποτέλεσμα, μπορούμε τώρα να επανέλθουμε στο πρόβλημα ακριβούς μέτρησης της θέσης. Παρατηρούμε ότι, για να εντοπίσουμε το σωμα-



Ο Max Planck (1858-1947) γύρω στο 1900. Με τη ριζοσπαστική λύση που έδωσε στο πρόβλημα της θερμικής ακτινοβολίας, εισήγαγε στη φυσική για πρώτη φορά κβαντικές ιδέες. Η σημασία του έργου του αναγνωρίστηκε όταν του απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ, το 1918, αλλά ο Planck δεν ήταν ευχαριστημένος με την κβαντική επανάσταση την οποία εγκαινίασε το έργο του.

τίδιο με μεγάλη ακρίβεια, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε φως με μεγάλη συχνότητα, με μεγάλη τιμή του ν . Φως με τέτοια μεγάλη συχνότητα σημαίνει όμως φωτόνια με πολύ μεγάλη ενέργεια, τα οποία προκαλούν μεγάλη διαταραχή στο κβαντικό σύστημα —δηλαδή, μεγάλη αβεβαιότητα στη μέτρηση της ορμής. Αντίστροφα, εάν θέλουμε να μετρήσουμε την ορμή με μεγάλη ακρίβεια, πρέπει να προκαλέσουμε στο σύστημα μια πολύ μικρή διαταραχή. Σύμφωνα με τη σχέση του Planck, αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε φως με μικρή συχνότητα. Μικρή συχνότητα όμως σημαίνει μεγάλο μήκος κύματος· και αυτό, με τη σειρά του, σημαίνει μεγάλη αβεβαιότητα στη μέτρηση της θέσης! Φαύλος κύκλος.

Η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg συνδέει τις αβεβαιότητες στις μετρήσεις της θέσης και της ορμής με τον ακόλουθο τρόπο:

$$(\Delta x) \cdot (\Delta p) \approx h$$

η αβεβαιότητα στη θέση επί την αβεβαιότητα στην ορμή ισούται περίπου με τη σταθερά του Planck.

Αυτή η εξίσωση αποτελεί τη μαθηματική μορφή της εν λόγω αρχής. Αν θέλετε να μειώσετε πολύ την αβεβαιότητα στη θέση (Δx), τότε η αβεβαιότητα στην ορμή (Δp) δεν μπορεί να παραμείνει μικρή. Αν και οι δύο ήταν μικρές, το γινόμενο των Δx και Δp δεν θα ικανοποιούσε την εξίσωση του Heisenberg —σύμφωνα με την οποία το γινόμενο αυτών των αβεβαιοτήτων πρέπει πάντα να είναι περίπου ίσο με τη σταθερά του Planck (h). Σημειώστε ότι τούτη είναι η δεύτερη εξίσωση της κβαντικής μηχανικής που βρήκαμε να περιέχει αυτή τη μυστηριώδη σταθερά.

Η σταθερά του Planck μπορεί να μετρηθεί σε πειράματα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η τιμή της αποδεικνύεται τόσο μικρή ώστε οι περιορισμοί του Heisenberg σχετικά με την ακρίβεια των μετρήσεων έχουν αμελητέα επίδραση στις παρατηρήσεις της καθημερινής μας ζωής (όπως η κίνηση ενός αυτοκινήτου ή μιας μπίλιας του μπιλιάρδου). Για παράδειγμα, υποθέστε πως μια σφαίρα βάρους 50 γραμμαρίων έχει μετρούμενη ταχύτητα 300 μέτρα ανά δευτερόλεπτο με αβεβαιότητα 0,01%. Αν πολλαπλασιάσουμε αυτή την αβεβαιότητα με τη μάζα της σφαίρας, η προκύπτουσα αβεβαιότητα στην ορμή μάς οδηγεί, μέσω της αρχής της αβεβαιότητας του Heisenberg, σε έναν αναπόφευκτο περιορισμό στην ακρίβεια μέτρησης της θέσης, ώστε η καλύτερη ακρίβεια που μπορούμε να επιτύχουμε να είναι 1 τρισεκατομμύριο φορές μικρότερη της διαμέτρου του ατομικού πυρήνα. Στην περίπτωση ενός αντικειμένου όπως η σφαίρα, ο περιορισμός αυτός είναι ουσιαστικά αμελητέος. Ας αντικαταστήσουμε τώρα τη σφαίρα του προηγούμενου παραδείγματος με ένα ηλεκτρόνιο, διατηρώντας τις ίδιες τιμές για την ταχύτητα και την αβεβαιότητα. Για να βρούμε την αβεβαιότητα στην ορμή του, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την αβεβαιότητα της ταχύτητάς του επί τη μάζα του. Από τη στιγμή όμως που η μάζα του ηλεκτρονίου είναι τόσο πολύ μικρότερη αυτής της σφαίρας (βλ. Παράρτημα 1), η σταθερά του Planck και η σχέση αβεβαιότητας του Heisenberg θέτουν τώρα σημαντικούς περιορισμούς στην ακρίβεια μέτρησης της θέσης του ηλεκτρονίου. Από τον τύπο του Heisenberg, λοιπόν, βρίσκουμε ότι το όριο στην ακρίβεια μέτρησης της θέσης υπερβαίνει κατά 1 εκατομμύριο φορές τη διάμετρο του ατόμου, γεγονός που αποτελεί ξεκάθαρα έναν πολύ σημαντικό περιορισμό στις ατομικές κλίμακες.

Υπάρχει ένα διασκεδαστικό περιστατικό στην ιστορία του Heisen-



Εικόνα 2.4 Αυτή η σειρά φωτογραφιών δείχνει πώς εξαπλώνονται τα κύματα καθώς περνούν διαμέσου μιας σχισμής. Η συγκεκριμένη εξαπλώση είναι γνωστή ως *περίθλαση* και παρατηρείται κυρίως για μεγάλα μήκη κύματος. Το εν λόγω φαινόμενο περιορίζει τις λεπτομέρειες που μπορούμε να παρατηρήσουμε με τα οπτικά όργανα.

berg και της αρχής που διατύπωσε. Λίγα χρόνια πριν από την εργασία του για την αρχή της αβεβαιότητας, τελείωνε το διδακτορικό του στο Μόναχο υπό την επίβλεψη ενός διάσημου θεωρητικού φυσικού, του Arnold Sommerfeld. Κατά την προφορική του εξέταση, προκάλεσε την αντιπάθεια ενός από τους εξεταστές του, του διακεκριμένου καθηγητή πειραματικής φυσικής Wilhelm Wien, επειδή δεν μπόρεσε να απαντήσει σε ερωτήσεις τελείως στοιχειώδους επιπέδου σχετικά με τη διακριτική ικανότητα των οπτικών οργάνων. Ως αποτέλεσμα, ο Wien μόνο κατόπιν παρακλήσεως του Sommerfeld τον πέρασε, και μάλιστα με τον μικρότερο δυνατό βαθμό. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Heisenberg ξαναπλήρωσε την άγνοιά του για ένα τέτοιο βασικό θέμα της κλασικής οπτικής. Εξηγούσε την αρχή της αβεβαιότητας θεωρώντας ένα «μικροσκόπιο ακτίνων γ» —ένα υποθετικό μικροσκόπιο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην παρατήρηση των ηλεκτρονίων «φωτίζοντάς τα» με ακτίνες γ, οι οποίες έχουν πολύ μικρό μήκος κύματος (βλ. Παράρτημα 1). Δυστυχώς, ο Heisenberg ξέχασε το μάθημα που είχε πάρει από την άτυχη προφορική του εξέταση, και στην ανάλυση αυτού του προβλήματος δεν έλαβε υπόψη του τη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου! Ένας άλλος μεγάλος φυσικός, ο Niels Bohr, υπέδειξε ευγενικά την παράλειψη στον Heisenberg, και έτσι απαλείφθηκε αυτό το ασθενές σημείο του επιχειρήματός του.

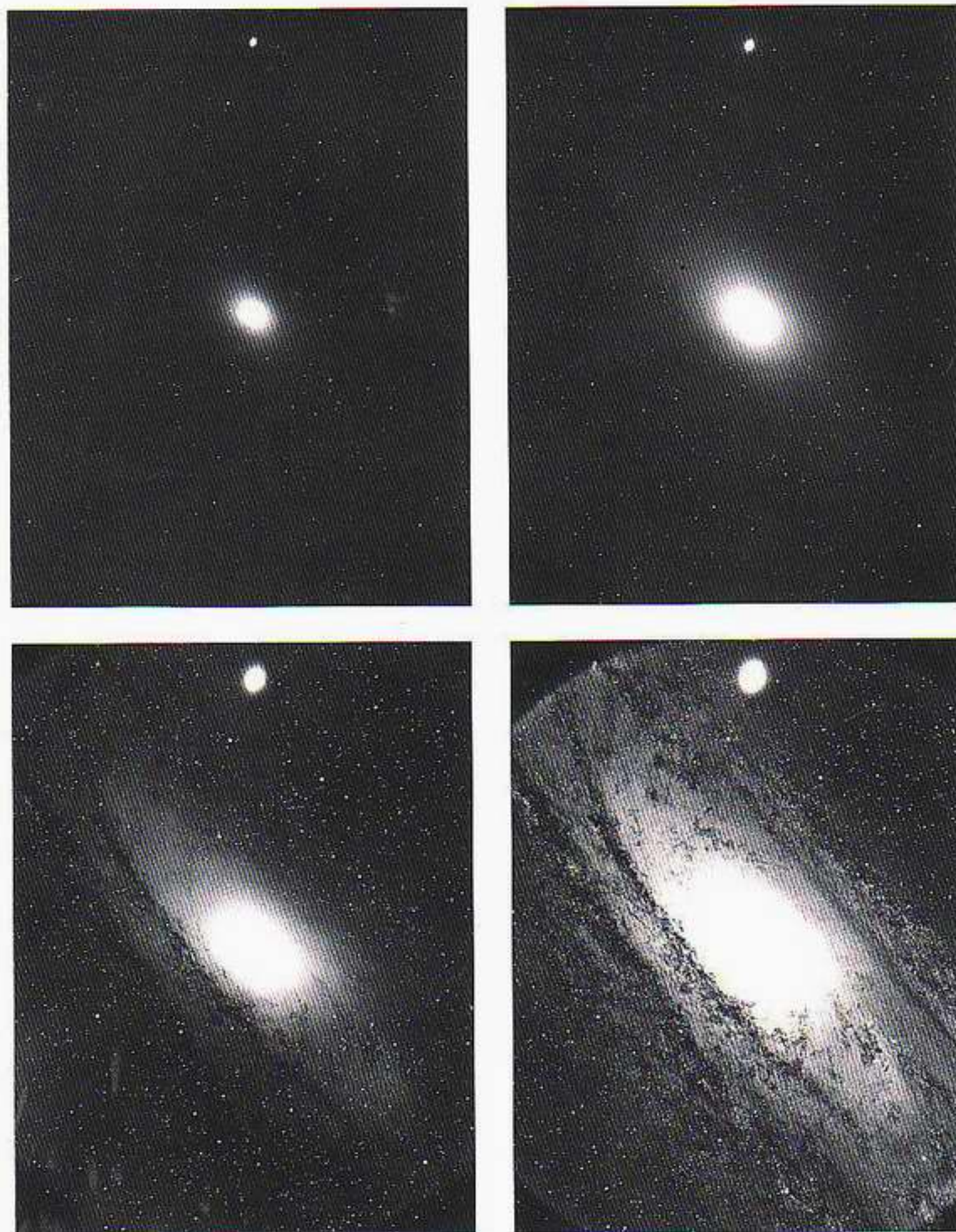
Αβεβαιότητα και φωτογραφία

Τον πιθανοκρατικό χαρακτήρα των κβαντικών διαδικασιών μπορούμε να τον διαπιστώσουμε όχι μόνο με τα ηλεκτρόνια αλλά και με το φως. Ας φανταστούμε ότι μια ασέληνη νύχτα κοιτάζουμε ένα αμυδρό άστρο. Μπορούμε να βλέπουμε το άστρο επειδή το φως που προέρχεται από αυτό προκαλεί χημικές αντιδράσεις στα κύτταρα του αμφιβληστροειδούς φακού μας. Για να συντελεστούν αυτές οι χημικές αντιδράσεις, είναι απαραίτητο η φωτεινή ενέργεια να φτάνει κατά ορισμένα εντοπισμένα «πακέτα», τα φωτόνια. Το μάτι μας είναι πολύ καλός ανιχνευτής φωτός: ένα μοναδικό φωτόνιο μπορεί να διεγείρει κάποιο κύτταρο του αμφιβληστροειδούς. Γενικότερα, όμως, πολλά φωτόνια απορροφώνται από το μάτι δίχως να φτάνουν σε κάποιο φωτοευαίσθητο κύτταρο. Γι' αυτό, από κάθε εκατοντάδα φωτονίων που εισέρχονται

στον οφθαλμό, μόνο λίγα ανιχνεύονται. Προφανώς, οι χημικές μεταβολές που συμβαίνουν όταν κοιτάζουμε κάτι θα πρέπει να είναι αναστρέψιμες —και όντως, το κύτταρο επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση έπειτα από περίπου 1/10 του δευτερολέπτου. Ακριβώς αυτή η σύντομη περίοδος αποθήκευσης του φωτός περιορίζει την ευαισθησία του ματιού να ανιχνεύει αμυδρά αντικείμενα. Η φωτογραφία, από την άλλη, καταφέρνει να υπερβαίνει τούτο τον περιορισμό αποθηκεύοντας στη χημική επίστρωση του φωτογραφικού φιλμ τις εν λόγω μεταβολές με μόνιμο τρόπο.

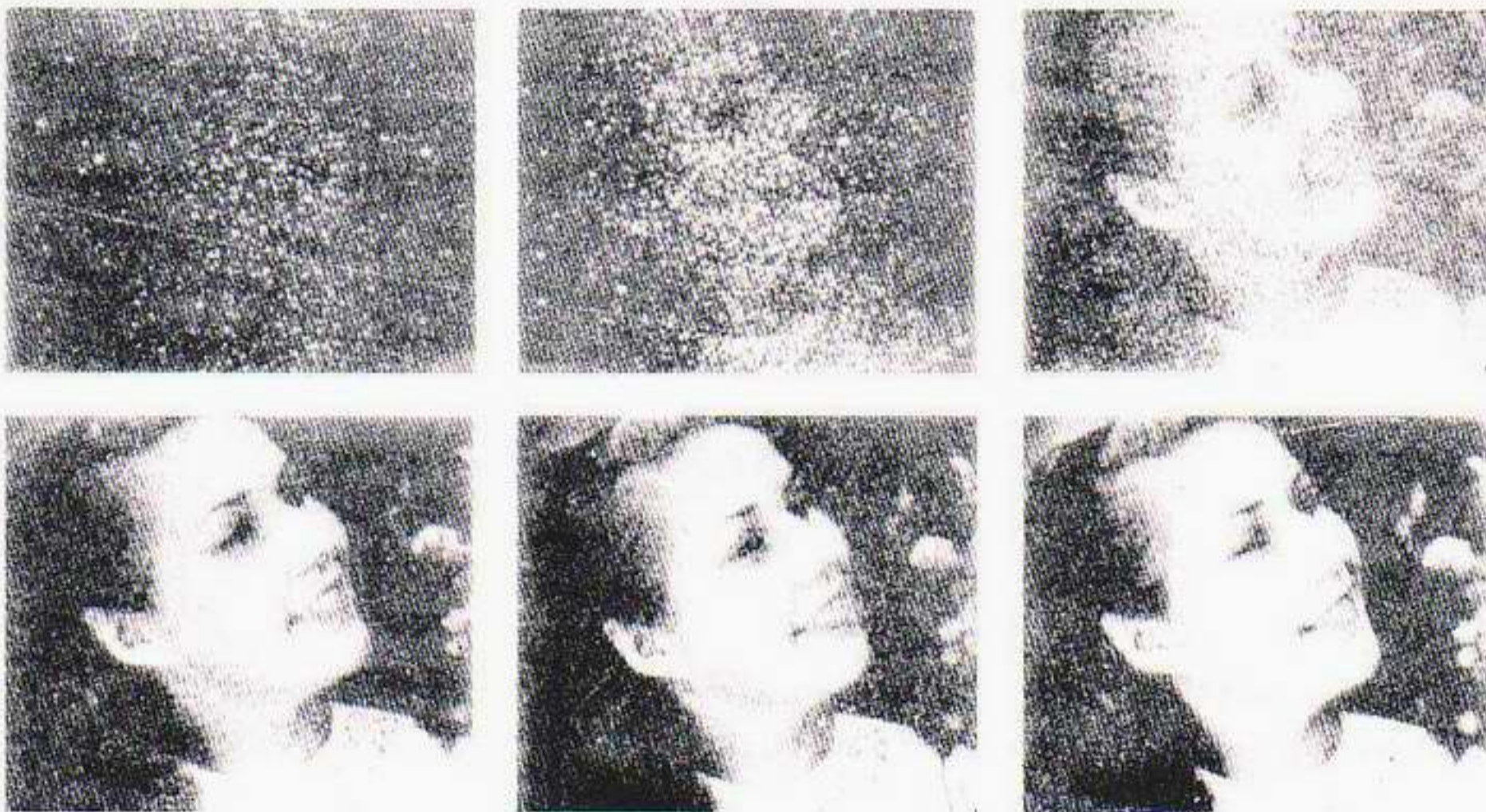
Όπως στο μάτι, τα φωτόνια μπορούν να προκαλέσουν χημικές αλλοιώσεις και στην επιστρωμένη με ειδική φωτοπαθή ουσία επιφάνεια του φιλμ. Ξέρετε ποιο είναι το ενεργό χημικό στοιχείο της επίστρωσης αν μπορείτε να απαντήσετε στην εξής ερώτηση γενικών γνώσεων: Ποια πολυεθνική εταιρεία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής αργύρου; (Απάντηση: η Kodak.) Η χημική επίστρωση του φιλμ αποτελείται από πολλούς μεμονωμένους κόκκους μιας ένωσης του αργύρου, στην οποία τα άτομα του αργύρου είναι «ιονισμένα». (Το ιόν αργύρου είναι άτομο αργύρου που έχει χάσει ένα από τα ηλεκτρόνια του.) Όπως γνωρίζουμε, στα ουδέτερα άτομα το συνολικό αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων είναι ακριβώς ίσο με το συνολικό θετικό φορτίο του πυρήνα. Επομένως, ένα ιόν αργύρου θα έχει πάντα θετικό φορτίο. Όταν ένα φωτόνιο απορροφάται από τη χημική επίστρωση του φιλμ, μερικές φορές εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο —με τον ίδιο τρόπο που εκπέμπονται ηλεκτρόνια από το μέταλλο στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τώρα, το ηλεκτρόνιο αυτό μπορεί να το έλξει κάποιο ιόν αργύρου, και έτσι να σχηματιστεί ένα ουδέτερο άτομο αργύρου. Το άτομο αυτό, που περιβάλλεται από την ένωση του αργύρου, είναι από μόνο του ασταθές· έτσι, θα αποβάλει τελικά το ηλεκτρόνιο και θα επανέλθει στην κατάσταση του ιόντος. Αν ωστόσο, πριν συμβεί αυτό, άλλα φωτόνια έχουν δημιουργήσει αρκετά άλλα ουδέτερα άτομα αργύρου στον γύρω χώρο, μπορεί να σχηματιστεί ένα σταθερό «κέντρο συγκέντρωσης» αυτών των ουδέτερων ατόμων. Βεβαίως, κάθε κόκκος της ένωσης επίστρωσης του φιλμ περιέχει δισεκατομμύρια ιόντα αργύρου. Κι όμως, όταν το φιλμ εισαχθεί στο υγρό εμφάνισης, η μικρή αυτή ομάδα των ουδέτερων ατόμων αργύρου παραούρει όλα τα ιόντα αργύρου που απομένουν στον κόκκο να κατακαθίσουν ως αδιαφανής μεταλλικός άργυρος. Αλλά πώς μας βοηθάει η φωτογραφία να δούμε τα πολύ αμυδρά άστρα; Λοιπόν, για τέτοια πολύ αμυδρά αντικείμενα, η πιθανότητα να σχηματιστούν κέντρα συγκέντρωσης είναι μάλλον περιορισμένη, διότι ο αριθμός των φωτονίων που φτάνουν από τα άστρα στη Γη είναι μικρός. Αν όμως περιμένουμε πιο πολύ και αυξήσουμε το χρόνο έκθεσης του φωτογραφικού φιλμ στο φως, η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο θα αυξηθεί. Στην Εικόνα 2.5 φαίνονται φωτογραφίες του γαλαξία της Ανδρομέδας οι οποίες έχουν τραβηχτεί με διαφορετικούς χρόνους έκθεσης. Οι λεπτομέρειες των σπειροειδών βραχιόνων δεν είναι ορατές διά γυμνού οφθαλμού, αποκαλύπτονται όμως σε φωτογραφίες με μεγάλο χρόνο έκθεσης.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση όπου τραβάμε φωτογραφία με μια κοινή φωτογραφική μηχανή. Η Εικόνα 2.6 δείχνει διάφορες φωτογραφίες του ίδιου προσώπου που παίρνουμε με διαφορετικό χρόνο έκθεσης. Για τη φωτογραφία πάνω αριστερά εισέρχονται στη φωτογραφική μηχανή περίπου 3.000 φωτόνια. Τα περισσότερα από αυτά απορροφώνται χωρίς να προκαλούν σταθερή αλλοίωση της χημικής επίστρωσης του φιλμ. Είναι φανερό ότι 3.000 φωτόνια δεν επαρκούν για να μας δώσουν ένα αναγνωρίσιμο είδωλο, οπότε η



Εικόνα 2.5 Τέσσερις φωτογραφίες του γαλαξία της Ανδρομέδας που δείχνουν πώς αυξάνεται ο αριθμός των ορατών λεπτομερειών καθώς αυξάνεται ο χρόνος έκθεσης.

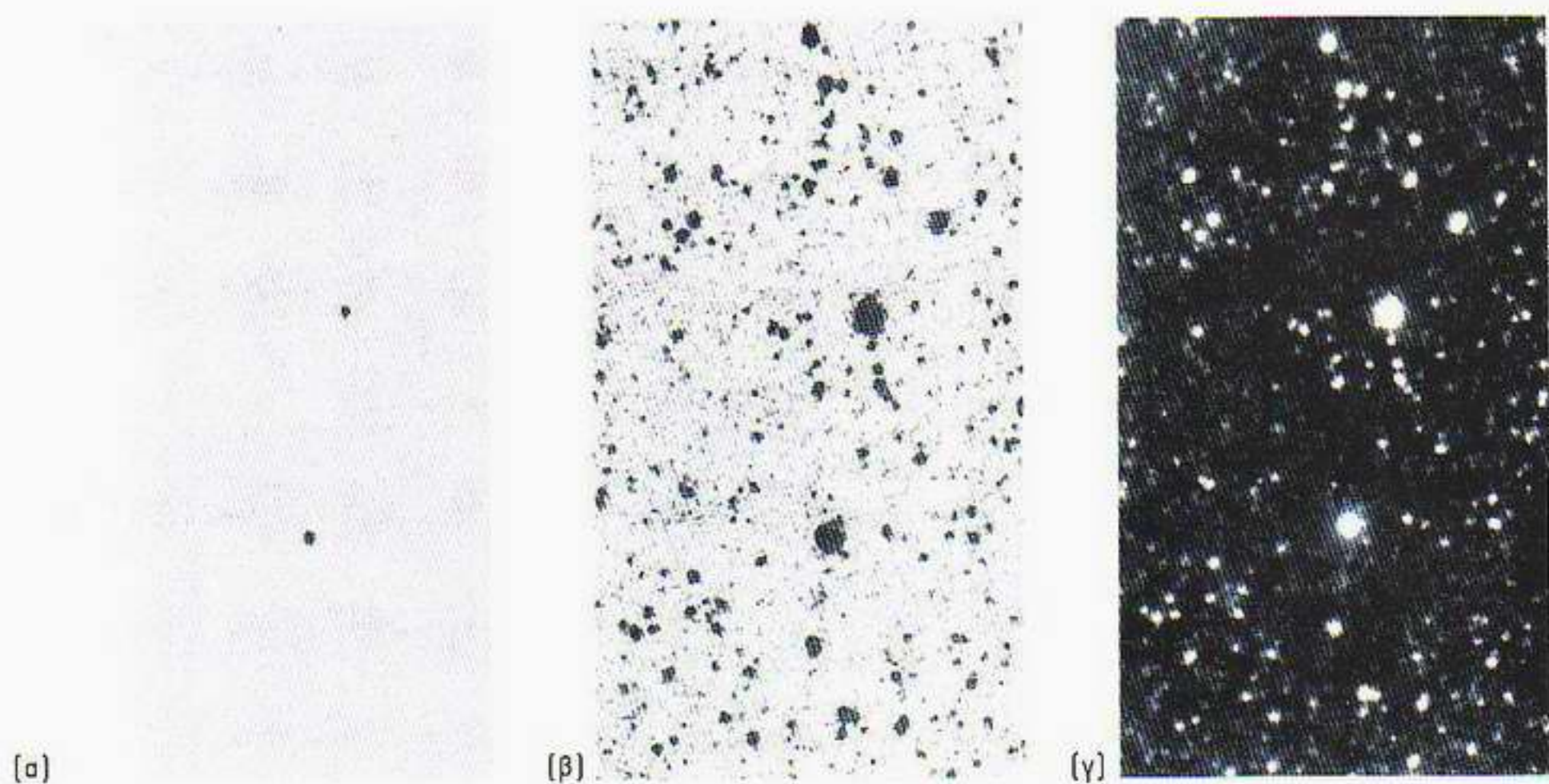
φωτογραφία μοιάζει με μια λίγο-πολύ τυχαία σειρά κουκκίδων. Καθώς αυξάνουμε το χρόνο έκθεσης, ο αριθμός των φωτονίων που εισέρχονται στη μηχανή αυξάνεται. Για τη φωτογραφία πάνω δεξιά εισέρχονται στη μηχανή 10.000 φωτόνια, οπότε ήδη αρχίζει να εμφανίζεται ένα ασαφές, όχι καθαρό, είδωλο. Η βελτίωση συνεχίζεται καθώς αυξάνεται το πλήθος των φωτονίων, και η τελευταία φωτογραφία αντιστοιχεί σε περισσότερα από 30.000.000 φωτόνια. Σε τούτη, η αμαύρωση του ειδώλου φαίνεται να μεταβάλλεται ομαλά από θέση σε θέση, ενώ στην πραγματικότητα ξέρουμε ότι αυτό έχει προκύψει από τα μεμονωμένα κέντρα συγκέντρωσης που σχηματίζονται με την άφιξη των μεμονωμένων φωτονίων. Ακόμα, στη φωτογραφία που αντιστοιχεί στον πιο μικρό χρόνο έκθεσης, παρότι οι λευκές κουκκίδες φαίνεται να σχηματίζονται σε εντελώς τυχαίες θέσεις, παρατηρούμε ότι αυτό δεν ισχύει. Είναι πιο πιθανό τα κέντρα συγκέντρωσης να εμφανίζονται σε θέσεις όπου το είδωλο είναι τελει-



Εικόνα 2.6 Αυτή η σειρά φωτογραφιών του προσώπου ενός κοριτσιού δείχνει ότι η φωτογράφιση είναι μια κβαντική διαδικασία. Η πιθανοκρατική φύση των κβαντικών φαινομένων γίνεται εμφανής από τις πρώτες φωτογραφίες, στις οποίες ο αριθμός των φωτονίων είναι πολύ μικρός. Καθώς ο αριθμός των φωτονίων αυξάνεται, το πρόσωπο γίνεται όλο και πιο ευδιάκριτο, ώσπου καταλήγουμε στον καλύτερο δυνατό χρόνο έκθεσης. Ο αριθμός των φωτονίων που αντιστοιχεί σε αυτές τις φωτογραφίες αρχίζει από 3.000 [μικρότερος χρόνος έκθεσης] και φτάνει στα 30.000.000 [βέλτιστος χρόνος έκθεσης].

κά φωτεινό. Έτσι, ακόμα και στις πιο κοινές δραστηριότητές μας όπως το τράβηγμα μιας φωτογραφίας, μπορούμε να διακρίνουμε την κβαντομηχανική, πιθανοκρατική φύση του φωτός. Δεν μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα πού θα πέσει κάθε ξεχωριστό φωτόνιο ή σε ποιον κόκκο θα δημιουργηθεί ένα κέντρο συγκέντρωσης. Μπορούμε να μιλήσουμε μόνο με πιθανότητες.

Όπως είδαμε, η επιστροφή του φωτογραφικού φιλμ δεν είναι ευαίσθητη στα μεμονωμένα φωτόνια —αρκετά ουδέτερα άτομα πρέπει να παραχθούν για να σχηματίσουν ένα κέντρο συγκέντρωσης. Στην αστρονομία σήμερα, ένας νέος τύπος ανιχνευτή αντικαθιστά τα φωτογραφικά φιλμ. Πρόκειται για τη λεγόμενη *διάταξη συζευγμένων φορτίων* (CCD), μέσω της οποίας μπορεί να ανιχνευτεί η άφιξη ενός και μόνο φωτονίου. Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 2.7, δρα πολύ πιο αποτελεσματικά από το φωτογραφικό φιλμ στην ανίχνευση των πολύ αμυδρών άστρων. Το CCD αποτελείται από μια σειρά μικρών «ανιχνευτών φωτονίων» πάνω σε ένα τσιπ πυριτίου. Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, το πυρίτιο είναι ένα υλικό που ανήκει στην ομάδα των επονομαζόμενων ημιαγωγών. Χοντρικά μιλώντας, οι ημιαγωγοί είναι υλικά που οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες βρίσκονται ανάμεσα σε αυτές των μετάλλων (τα οποία επιτρέπουν στο ηλεκτρικό ρεύμα να τα διαρρέει με ευκολία) και των μονωτών (οι οποίοι δεν επιτρέπουν καθόλου τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος από μέσα τους). Το πυρίτιο έχει επίσης την ιδιότητα να απαιτεί πολύ λίγη ενέργεια για την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τα άτομά του. Ρυθμίζοντας προσεκτικά τη θερμοκρασία λειτουργίας τού CCD, το πυρίτιο μπορεί να ευαισθητοποιηθεί στο πέρασμα ενός και μόνο φωτονίου. Κάθε «ανιχνευτής» είναι στην πραγ-



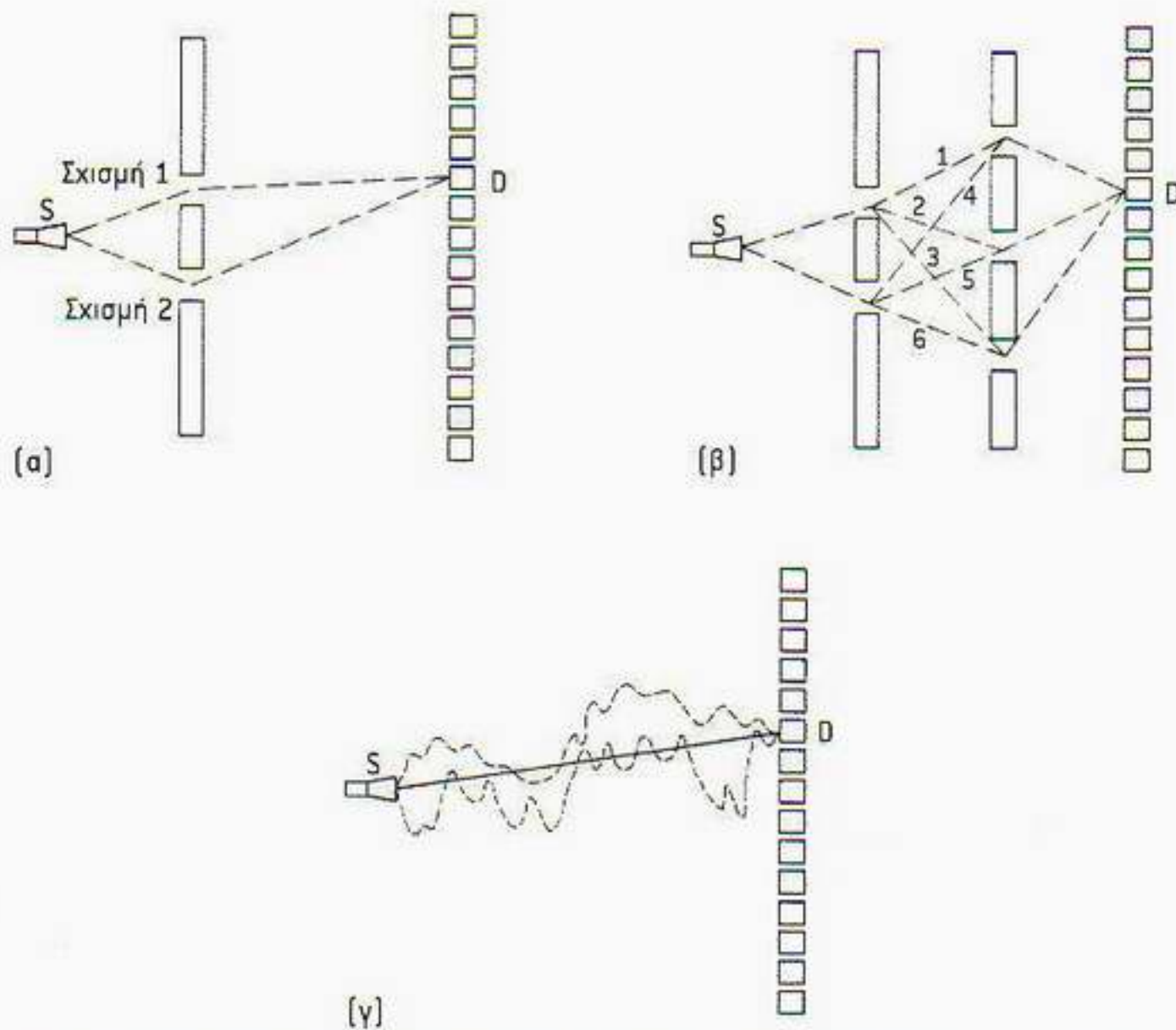
Εικόνα 2.7 Σύγκριση μιας φωτογραφίας και μιας εικόνας από CCD της ίδιας περιοχής του ουρανού και οι δύο έχουν ληφθεί από το ίδιο τηλεσκόπιο 4 μέτρων. (α) Εκτύπωση αρνητικού στην οποία τα άστρα φαίνονται μαύρα ενώ ο ουρανός άσπρος. (β) Εικόνα CCD στην οποία διακρίνονται πολύ περισσότερα άστρα και γαλαξίες. (γ) Έγχρωμη άποψη της ίδιας περιοχής που παρήχθη με συνδυασμό εικόνων που ελήφθησαν με CCD και έγχρωμα φίλτρα. Η παραπάνω ακολουθία εικόνων καθιστά εμφανή την τεράστια βελτίωση όσον αφορά την ευαισθησία που επιτυγχάνεται με τη χρήση διατάξεων CCD.

ματικότητα μια μικρή περιοχή πυριτίου, όπου μπορούν να συλλεγούν όσα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται από την άφιξη των φωτονίων. Η μέτρηση του συσσωρευμένου φορτίου σε κάθε θέση πάνω στο τσιπ πυριτίου αντιστοιχεί στον αριθμό και τη θέση των φωτονίων που προσκρούουν στο CCD. Τα CCD έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν τα φιλμ στις νέες «ψηφιακές κάμερες». Ακόμα όμως και αυτή η καινοφανής τεχνολογία του CCD δέχεται την πρόκληση των νέων ηλεκτρονικών φωτονικών ανιχνευτών —τεχνολογία CMOS. Η κατασκευή των συγκεκριμένων διατάξεων είναι φθηνότερη, αφού βασίζεται στην ίδια επεξεργασία πυριτίου που χρησιμοποιείται για τους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές. Ως τώρα, όμως, οι εν λόγω διατάξεις δεν έχουν φτάσει στο ίδιο επίπεδο ποιότητας με τους ανιχνευτές CCD.

Είδαμε πώς εκδηλώνεται η κβαντική αβεβαιότητα σε κάτι πολύ απλό όπως το τράβηγμα μιας φωτογραφίας μέσω φιλμ ή μιας σύγχρονης ηλεκτρονικής διάταξης απεικόνισης. Ο Feynman πρότεινε και έναν άλλον τρόπο προσέγγισης στην κβαντική αβεβαιότητα. Ο τρόπος αυτός στηρίζεται στις «κλασικές» και «κβαντικές» διαδρομές ενός σωματιδίου —μια σύλληψη που έμελλε να έχει μεγάλη σημασία στη σύγχρονη κβαντική θεωρία.

Οι κβαντικές διαδρομές του Feynman

Υπάρχει ένας άλλος ενδιαφέρων τρόπος να δούμε τις ομοιότητες και τις διαφορές της κλασικής και της κβαντικής φυσικής. Ας θυμηθούμε ξανά το πείραμα της διπλής σχισμής και ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα να φύγει ένα ηλεκτρόνιο από την πηγή (S) και να φτάσει



Ο Richard Feynman (1918-1988) μεγάλωσε στο Φαρ Ρόκγουεϊ, μια μικρή πόλη στο Λονγκ Άιλαντ, λίγο έξω από τη Νέα Υόρκη. Η συνεισφορά του είναι μεγάλη σε πολλούς τομείς της θεωρητικής φυσικής. Η προσέγγισή του που λέγεται «άθροιση ιστοριών» παίζει βασικό ρόλο στη σύγχρονη κβαντική θεωρία πεδίου. Την εποχή του πολέμου εργάστηκε στο Πρόγραμμα Manhattan, στο Λας Άλamos, το οποίο οδήγησε στην κατασκευή της πρώτης ατομικής βόμβας. Μια από τις μεγάλες φυσιογνωμίες της κβαντικής μηχανικής, ο Niels Bohr, επέλεξε τον Feynman για να του εκθέσει τις νέες του ιδέες, διότι ήταν το μοναδικό πρόσωπο στο Λας Άλamos που δεν θα αντιμετώπιζε με δέος τη φήμη του και, αν οι ιδέες του ήταν απαράδεκτες, θα του το έλεγε!

Εικόνα 2.8 Το κβαντικό πλάτος προκύπτει από πρόσθεση των πλάτων που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές διαδρομές ανάμεσα στην πηγή S και τον ανιχνευτή D. (α) Το αρχικό πείραμα της διπλής σχισμής με δύο δυνατές διαδρομές για το ηλεκτρόνιο. (β) Με δύο διαφράγματα ανάμεσα στην πηγή και τον ανιχνευτή και ένα σύνολο πέντε σχισμών, υπάρχουν τώρα έξι δυνατές διαδρομές. (γ) Προσθέτοντας πιο πυκνά διαφράγματα και ανοίγοντας πιο πυκνές σχισμές, οδηγούμαστε σε μια κατάσταση όπου δεν έχουμε καθόλου διαφράγματα! Επομένως, το κβαντικό πλάτος για ένα ηλεκτρόνιο που ταξιδεύει από το S στο D μπορεί να θεωρηθεί ως άθροισμα των πλάτων όλων των δυνατών διαδρομών. Στο σχήμα απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές δύο από το άπειρο πλήθος δυνατών κβαντικών διαδρομών. Η διαδρομή που αντιστοιχεί στο κλασικό σωματίδιο απεικονίζεται με συνεχή γραμμή.

σε κάποια θέση στον ανιχνευτή (D) (Εικόνα 2.8). Προκειμένου να υπολογίσουμε την εικόνα της άφιξης των ηλεκτρονίων που παρατηρούμε, βρήκαμε ότι, για να πάρουμε το ολικό κβαντικό πλάτος a , πρέπει να προσθέσουμε τα πλάτη πιθανότητας για τις διαδρομές 1 και 2:

$$a = a_1 + a_2.$$

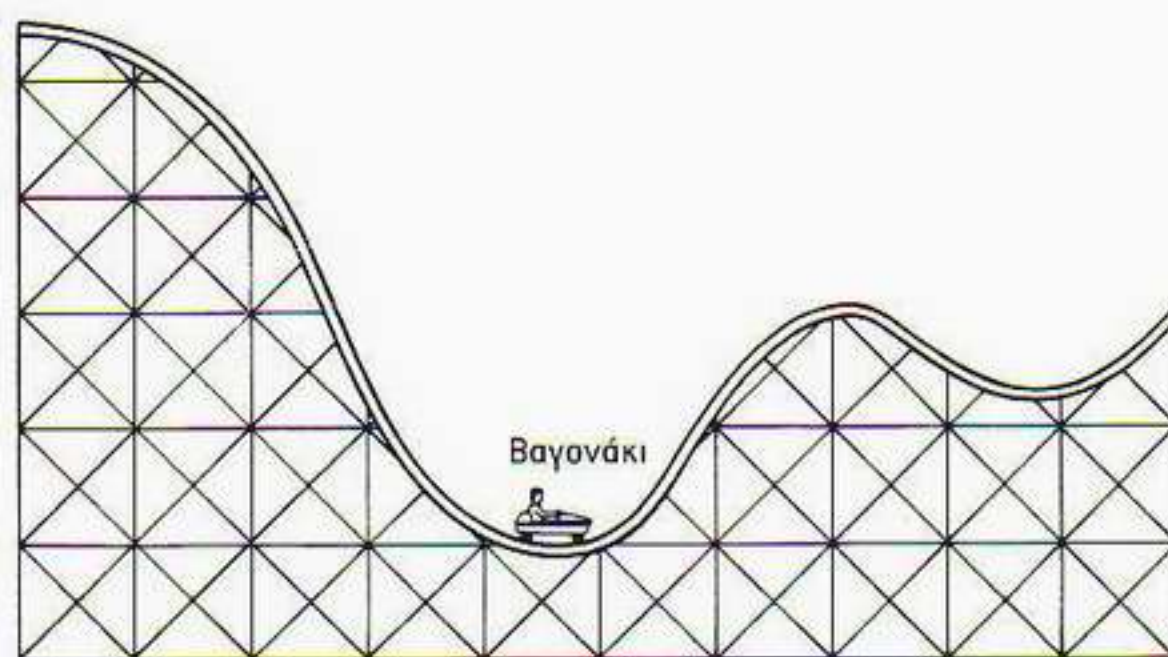
Τότε, η πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων σε κάθε σημείο προκύπτει αν υψώσουμε αυτό το πλάτος στο τετράγωνο:

$$P = (a_1 + a_2)^2.$$

Αυτή είναι η απαιτούμενη κβαντομηχανική συνταγή για να ερμηνευθεί η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής που παρατηρούμε πειραματικά. Θα επιστρέψουμε στο ερώτημα πώς ακριβώς προσδιορίζουμε τα κατάλληλα πλάτη για κάθε διαδρομή όταν θα συζητήσουμε την εξίσωση του Schrödinger στο επόμενο κεφάλαιο.

Για την ώρα, ας δεχτούμε αυτό τον κανόνα και ας εξετάσουμε τι συμβαίνει αν κάνουμε το πείραμα πιο περίπλοκο, τοποθετώντας και ένα δεύτερο διάφραγμα, με άλλες τρεις σχισμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8(β). Τώρα

Εικόνα 2.9 Τμήμα της μεταλλικής τροχιάς με το βαγονάκι να ηρεμεί στο κατώτερο σημείο της. Η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg δεν επιτρέπει σε ένα «κβαντικό βαγονάκι» να παραμένει ακίνητο· αυτό, αντίθετα, θα χοροπηδάει συνέχεια μπρος-πίσω, γύρω από το χαμηλότερο σημείο τροχιάς.



υπάρχουν έξι δυνατές διαδρομές από το S στο D και, σύμφωνα με τον κβαντομηχανικό κανόνα μας, προκειμένου να πάρουμε το ολικό πλάτος πιθανότητας, πρέπει να προσθέσουμε τα πλάτη για όλες αυτές τις διαδρομές:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$$

το ολικό πλάτος ισούται με το άθροισμα των πλατών που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές διαδρομές.

Η πιθανότητα άφιξης είναι ξανά το τετράγωνο αυτού του πλάτους. Ας φανταστούμε τώρα τι θα συμβεί αν τοποθετήσουμε μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή όλο και περισσότερα διαφράγματα με όλο και περισσότερες σχισμές. Για να πάρουμε το ολικό πλάτος πιθανότητας, θα πρέπει να προσθέσουμε όλα τα πλάτη που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές διαδρομές. Αν συνεχίσουμε να τοποθετούμε διαφράγματα, στο τέλος θα γεμίσουμε με αυτά όλο το χώρο μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή. Αν μάλιστα ανοίγουμε όλο και περισσότερες σχισμές σε κάθε διάφραγμα, στο τέλος δεν θα έχουμε καν διαφράγματα! Αυτή η συλλογιστική οδήγησε τον Feynman να διατυπώσει μια μαθηματική σχέση για το ολικό πλάτος πιθανότητας για τη μετάβαση από το S στο D όταν δεν υπάρχουν διαφράγματα ή σχισμές· αυτό ισούται με το άθροισμα των πλατών που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές διαδρομές μεταξύ S και D. Στην Εικόνα 2.8(γ) σημειώνονται δύο τέτοιες δυνατές «κβαντικές διαδρομές», αλλά και η ευθύγραμμη τροχιά, που θα ακολουθούσε μια σφαίρα πηγαίνοντας από το S στο D χωρίς να παρεμβάλλονται διαφράγματα με σχισμές. Στην κλασική φυσική υπάρχει μόνο μία δυνατή διαδρομή· στην κβαντική φυσική, όμως, για να πάρουμε τη σωστή πιθανότητα άφιξης πρέπει να εξετάσουμε όλες τις δυνατές διαδρομές μεταξύ S και D.

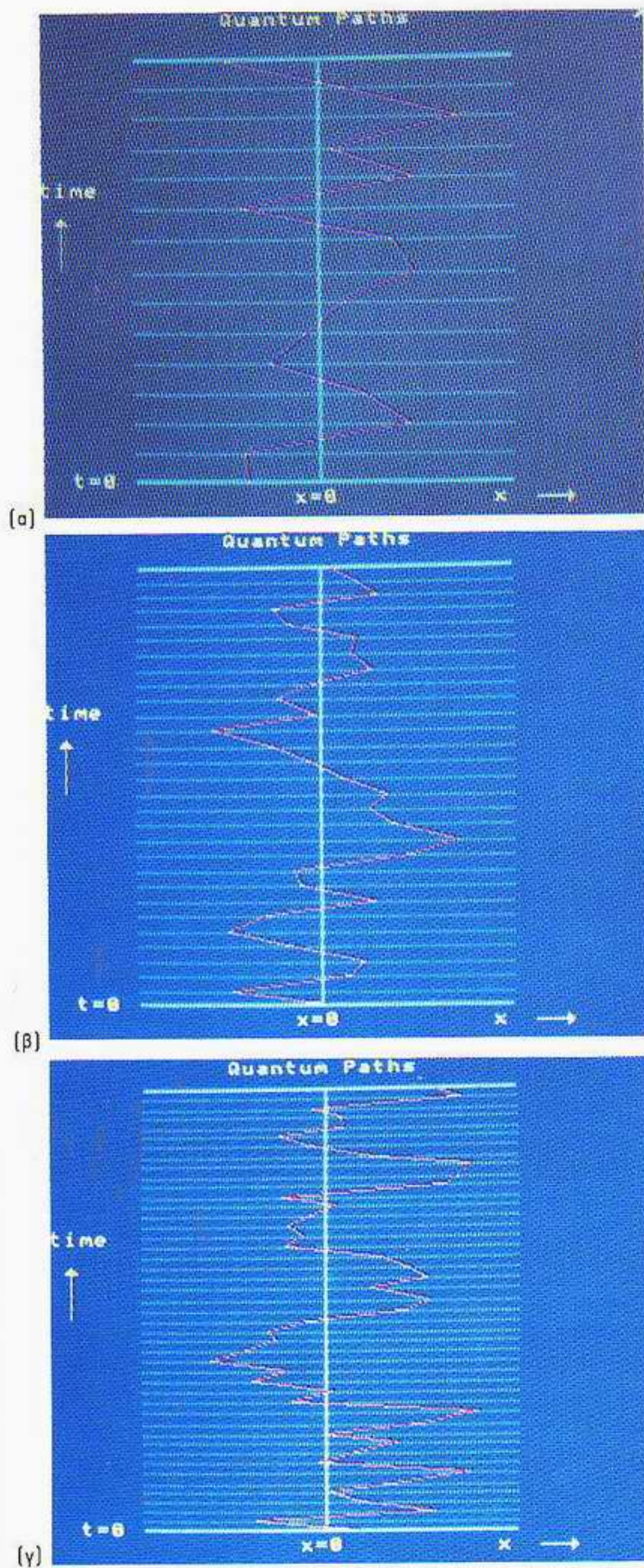
Μπορούμε επίσης να δούμε ότι υπάρχει μια σχέση ανάμεσα στην άθροιση όλων των κβαντικών διαδρομών και στην κβαντική αρχή της αβεβαιότητας. Ας εξετάσουμε πρώτα μια περίπτωση κλασικής κίνησης. Στην Εικόνα 2.9 απεικονίζεται ένα τμήμα της τροχιάς που ακολουθεί το γνωστό «βαγονάκι ιλίγγου» του λούνα-παρκ. Αν τοποθετήσουμε το βαγονάκι στο κατώτερο σημείο της τροχιάς, τότε, σύμφωνα με την κλασική φυσική, αυτό θα παραμείνει ακίνητο επ' αόριστον, εκτός κι αν του ασκήσουμε κάποια δύναμη. Για να διευκολύνουμε τη σύγκριση με το κβαντικό ανάλογο που θα εξετάσουμε στη συνέχεια, είναι χρήσιμο να αναπαραστήσουμε γραφικά το γεγονός ότι το βαγονάκι δεν κινείται. Φανταστείτε ότι σημειώνουμε τη θέση του βαγονιού σε έναν οριζόντιο άξονα που αναπαριστά όλες τις δυνατές θέσεις. Ομοίως, αναπαρι-

στούμε τις διαφορετικές χρονικές στιγμές με σημεία πάνω σε έναν κατακόρυφο άξονα. Τότε, σε τούτο το διάγραμμα χρόνου-θέσης, το ακίνητο βαγόνι θα περιγράφεται από μια ευθεία γραμμή κάθετη στον οριζόντιο άξονα.

Τι συμβαίνει όμως με τα κβαντικά αντικείμενα όπως τα ηλεκτρόνια; Όπως θα περιγράψουμε λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο, μπορούμε να εφαρμόσουμε κατάλληλα ηλεκτρικά πεδία τα οποία επενεργούν στα ηλεκτρόνια με τον ίδιο τρόπο που επενεργεί η μεταλλική τροχιά πάνω στο βαγονάκι. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, όμως, ένα ηλεκτρόνιο δεν επιτρέπεται να παραμένει ακίνητο στο κατώτερο σημείο της τροχιάς του. Σε διαφορετική περίπτωση, θα γνωρίζαμε ταυτόχρονα και τη θέση και την ορμή του ηλεκτρονίου — η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg μάς λέει ότι αυτό δεν είναι δυνατό. Τι συμβαίνει τότε; Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, το ηλεκτρόνιο πρέπει να «χοροπηδάει» συνεχώς γύρω από το κατώτερο σημείο της τροχιάς· ποτέ δεν μπορεί να βριόκεται σε ηρεμία. Τι μορφή θα έχει τότε η γραφική παράσταση της θέσης του ηλεκτρονίου ως προς το χρόνο; Προφανώς, δεν θα είναι η απλή κατακόρυφη γραμμή που είχαμε για το βαγονάκι. Αντίθετα, θα είναι μια περίπλοκη, οδοντωτή καμπύλη που θα αντιστοιχεί σε όλα τα «κβαντικά χοροπηδήματα» του ηλεκτρονίου. Πράγματι, χρησιμοποιώντας την κβαντομηχανική προσέγγιση της *άθροισης διαδρομών* του Feynman, μπορούμε με προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή να κατασκευάσουμε μερικές τυπικές «κβαντικές διαδρομές». Παραδείγματα κατασκευής τέτοιων διαδρομών σε υπολογιστή παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.10.

Φράκταλ: ένα μαθηματικό αξιοπερίεργο

Εδώ θα ξεφύγουμε λίγο από το κύριο θέμα μας και θα κάνουμε μια σύντομη συζήτηση γύρω από κάποιες μάλλον περίεργες μαθηματικές καμπύλες. Οι κβαντικές διαδρομές στην Εικόνα 2.10 απεικονίζουν «στιγμιότυπα» της θέσης ενός ηλεκτρονίου σε δεδομένη χρονική περίοδο. Πηγαίνοντας από το (α) στο (β) και μετά στο (γ), διαιρέσαμε την ίδια χρονική περίοδο σε όλο και πιο μικρά διαστήματα. Αυτό είναι σαν να αυξάνουμε τη μεγέθυνση στην οποία παρατηρούμε τις καμπύλες κίνησης του ηλεκτρονίου. Όπως μπορούμε να δούμε, η μορφή αυτών των κβαντικών διαδρομών φαίνεται η ίδια σε όσο μεγάλη μεγέθυνση κι αν τις κοιτάζουμε. Το επίπεδο λεπτομέρειας που επιδεικνύεται στη διαδρομή (β) είναι διπλάσιο αυτού της διαδρομής (α), σημειώστε όμως ότι, αν το μισό του γραφήματος (β) μεγεθυνθεί και αποδοθεί στην ίδια κλίμακα με το (α), αυτά θα μοιάζουν πάρα πολύ μεταξύ τους. Ομοίως, το γράφημα (γ) περιέχει τρεις φορές μεγαλύτερη λεπτομέρεια, όμως αν κάποιο τμήμα του μεγεθυνθεί στο τριπλάσιο, η καμπύλη που θα προκύψει θα μοιάζει πάρα πολύ με εκείνη του (α). Αυτό εννοούμε όταν λέμε «φαίνεται το ίδιο σε όλες τις κλίμακες μεγέθυνσης», τούτο δε αποτελεί μια χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ενδιαφέροντος τύπου μαθηματικών καμπυλών. Έχουμε συνηθίσει στην ιδέα ότι κάθε γραμμή έχει ένα ορισμένο μήκος. Για παράδειγμα, μπορούμε να μετρήσουμε το μήκος της διαδρομής ενός δρομέα σε μέτρα. Με τον ίδιο τρόπο, το εμβαδόν μιας επιφάνειας συνδέεται με «κάποιο μήκος στο τετράγωνο». Για παράδειγμα, ο αγωνιστικός χώρος ενός γηπέδου έχει εμβαδόν που μετρείται σε «τετραγωνικά μέτρα». Μπορούμε επομένως να πούμε ότι μια γραμμή ή μια επιφάνεια χαρακτηρίζονται από ένα μέγεθος που εκφράζεται ως «μήκος υψωμένο σε δύναμη D », όπου το D — η *διάσταση*, όπως λέγε-



Εικόνα 2.10 Τυπικές διαδρομές για ένα «κβαντικό βαγονάκι». Οι προιονωτές καμπύλες προκύπτουν από τη σύνδεση των θέσεων του βαγονιού όπως φαίνονται έπειτα από ισόχρονα διαστήματα. Καθώς αναλύουμε την κίνηση σε όλο και πιο μικρά χρονικά διαστήματα, η διαδρομή γίνεται όλο και περισσότερο τεθλασμένη. Αυτή η ιδιότητα, να είναι τεθλασμένη σε όλες τις χρονικές κλίμακες, αποτελεί χαρακτηριστική των φράκταλ. Οι συγκεκριμένες κβαντικές διαδρομές έχουν διάσταση φράκταλ 1,5.



Εικόνα 2.11 Ένα φράκταλ τοπίο κατασκευασμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, που δείχνει μια εντυπωσιακά ρεαλιστική ομιχλώδη εικόνα. Πολλά γνωρίσματα της φύσης μπορούν να προσεγγισθούν ως φράκταλ, και τέτοια τεχνητά τοπία χρησιμοποιούνται συχνά πλέον στις ταινίες επιστημονικής φαντασίας.

ται— είναι 1 για τη γραμμή και 2 για την επιφάνεια. Αλλά οι καμπύλες που έχουμε εδώ συμβαίνει να είναι τόσο πολύ ακανόνιστες και τεθλασμένες ώστε «καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο» από μια συνηθισμένη γραμμή. Τέτοιες καμπύλες τις ονομάζουμε *φράκταλ* (ή *μορφοκλασματικά* ή *θρύμματα*) και μπορούν να έχουν διάσταση μεγαλύτερη από 1!

Ένα πολύ ωραίο παράδειγμα που μας δίνει μια ιδέα της περίεργης φύσης των φράκταλ είναι η μέτρηση του μήκους των ακτών της Μεγάλης Βρετανίας από τον Lewis Richardson. Θεωρήστε πως μετράτε το μήκος μιας ευθείας γραμμής χρησιμοποιώντας ένα διαστημόμετρο, ένα είδος διαβήτη του οποίου τα άκρα μπορούμε να σταθεροποιήσουμε έτσι ώστε να απέχουν ορισμένη απόσταση μεταξύ τους: υπολογίζουμε το μήκος μιας γραμμής μετρώντας τα «βήματα» του διαστημομέτρου που χωράνε στο μήκος αυτό. Εύλογα ασφαλώς, το μήκος μιας ευθείας γραμμής δεν εξαρτάται από το πόσο ορίσαμε να απέχουν τα άκρα του διαστημομέτρου. Αλλά αυτό δεν ισχύει για το μήκος των ακτών της Μεγάλης Βρετανίας. Ακόμη κι αν έχουμε μπροστά μας έναν πολύ μεγάλο και ακριβή χάρτη και μετρήσουμε πάνω του την ακτή, όταν η απόσταση των άκρων του διαστημομέτρου μας είναι σχετικά μεγάλη, όσο προσεκτικοί κι αν είμαστε, θα καταλήξουμε σαν να είχαμε έναν λιγότερο ακριβή και μικρότερο χάρτη: πολλές λεπτομέρειες θα μας διαφεύγουν. Η απόστα-

ση ανάμεσα στα άκρα του διαστημομέτρου θα είναι πολύ μεγάλη για να παρακολουθήσουμε με ακρίβεια όλους τους κόλπους και τα ακρωτήρια. Μπορούμε να μετρήσουμε αυτές τις λεπτομέρειες μόνο αν τα άκρα του διαστημομέτρου απέχουν πολύ λιγότερο μεταξύ τους. Είναι φανερό ότι το μήκος της ακτής ανάμεσα σε δύο σημεία ξεπερνά την απόσταση μεταξύ τους, αλλά είναι εξίσου φανερό ότι το μήκος που μετράμε θα γίνεται όλο και πιο μεγάλο όσο πιο μικρή θα είναι η κλίμακα με την οποία θα το μετράμε. Η ακτή φαίνεται πάντα να είναι ελικοειδής, ότι κλίμακα κι αν διαλέξουμε, το δε μήκος της θα αυξάνεται όσο θα την κοιτάζουμε με όλο και μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Αυτό το φαινόμενο ίσως να εξηγεί εν μέρει γιατί διάφορες εγκυκλοπαίδειες δίνουν διαφορετικούς αριθμούς για το μήκος των συνόρων διάφορων χωρών. Για παράδειγμα, οι ισπανικές και οι πορτογαλικές εγκυκλοπαίδειες για το μήκος των συνόρων ανάμεσα στις δύο χώρες δίνουν αριθμούς που διαφέρουν ακόμα και κατά 20%!

Είναι, βέβαια, κάπως δυσάρεστο ο ορισμός του μήκους να εξαρτάται από την κλίμακα στην οποία γίνεται η μέτρηση. Τη σύγχρονη θεωρία των φράκταλ ανέπτυξε, αλλά και δημοσιοποίησε στο ευρύ κοινό, ο Benoit Mandelbrot, ένας επιστήμονας του Τμήματος Έρευνας της IBM, ο οποίος εμπνεύστηκε από την περίεργη ιδιότητα του μήκους των ακτογραμμών να εξαρτάται από την κλίμακα που χρησιμοποιούμε για τη μέτρησή του, με αποτέλεσμα μικρές κλίμακες να αποδίδουν μεγαλύτερο μήκος ακτογραμμής. Η ακτογραμμή μοιάζει με πριονωτή, τεθλασμένη γραμμή σε οποιαδήποτε κλίμακα μήκους κι αν την εξετάσουμε: ιδωμένη από απόσταση, μπορούμε σχεδόν να τη φανταστούμε ως μια «ασαφή» γραμμή με μη μηδενικό πάχος. Ο Mandelbrot έδωσε σε αυτή τη διαισθητική ιδέα της ασάφειας ακριβή μαθηματική υπόσταση. Εισήγαγε την έννοια της «διάστασης φράκταλ», η οποία εκφράζει το πόσο «πριονωτή» είναι μια καμπύλη. Μια ομαλή καμπύλη έχει διάσταση φράκταλ $D = 1$, όση είναι δηλαδή και η συνήθης διάστασή της· όμως, όσο πιο τεθλασμένη γίνεται τόσο περισσότερο η διάστασή της κατά Mandelbrot προσεγγίζει την τιμή $D = 2$ —οπότε πρόκειται πια για καμπύλη τόσο τεθλασμένη που καλύπτει όλο τον διδιάστατο χώρο. Από τα στοιχεία για τη δυτική ακτή της Μεγάλης Βρετανίας που είχε συλλέξει ο Richardson, ο Mandelbrot εξήγαγε το συμπέρασμα ότι η ακτογραμμή χαρακτηριζόταν από διάσταση φράκταλ περίπου $D = 1,2$. Οι κβαντικές διαδρομές της Εικόνας 2.10 αποδεικνύεται ότι έχουν διάσταση φράκταλ $D = 1,5$ —τιμή ενδιάμεση αυτής μιας απλής γραμμής και ενός φράκταλ που γεμίζει όλο το χώρο. Ο Mandelbrot έγραψε ένα υπέροχο βιβλίο για τις φράκταλ μορφές, με πολλές ωραίες εικόνες κατασκευασμένες σε υπολογιστή· από αυτές αναδεικνύεται η ομοιότητα ανάμεσα σε φυσικές μορφές, όπως οι νιφάδες του χιονιού ή τα σύννεφα, και ορισμένους τύπους φράκταλ. Η κατασκευή τοπίων σε υπολογιστή με χρήση φράκταλ είναι σήμερα ένα από τα συνηθισμένα οπτικά εφέ της κινηματογραφικής βιομηχανίας. Το εντυπωσιακό παράδειγμα ενός φράκταλ «σεληνιακού τοπίου» φαίνεται στην Εικόνα 2.11.

3 Ο Schrödinger και τα υλικά κύματα

Από πού την πήραμε αυτή την εξίσωση;
Από πουθενά. Δεν προκύπτει από τίποτε
από αυτά που ξέρουμε. Βγήκε από το μυαλό
τού Schrödinger.

Richard Feynman

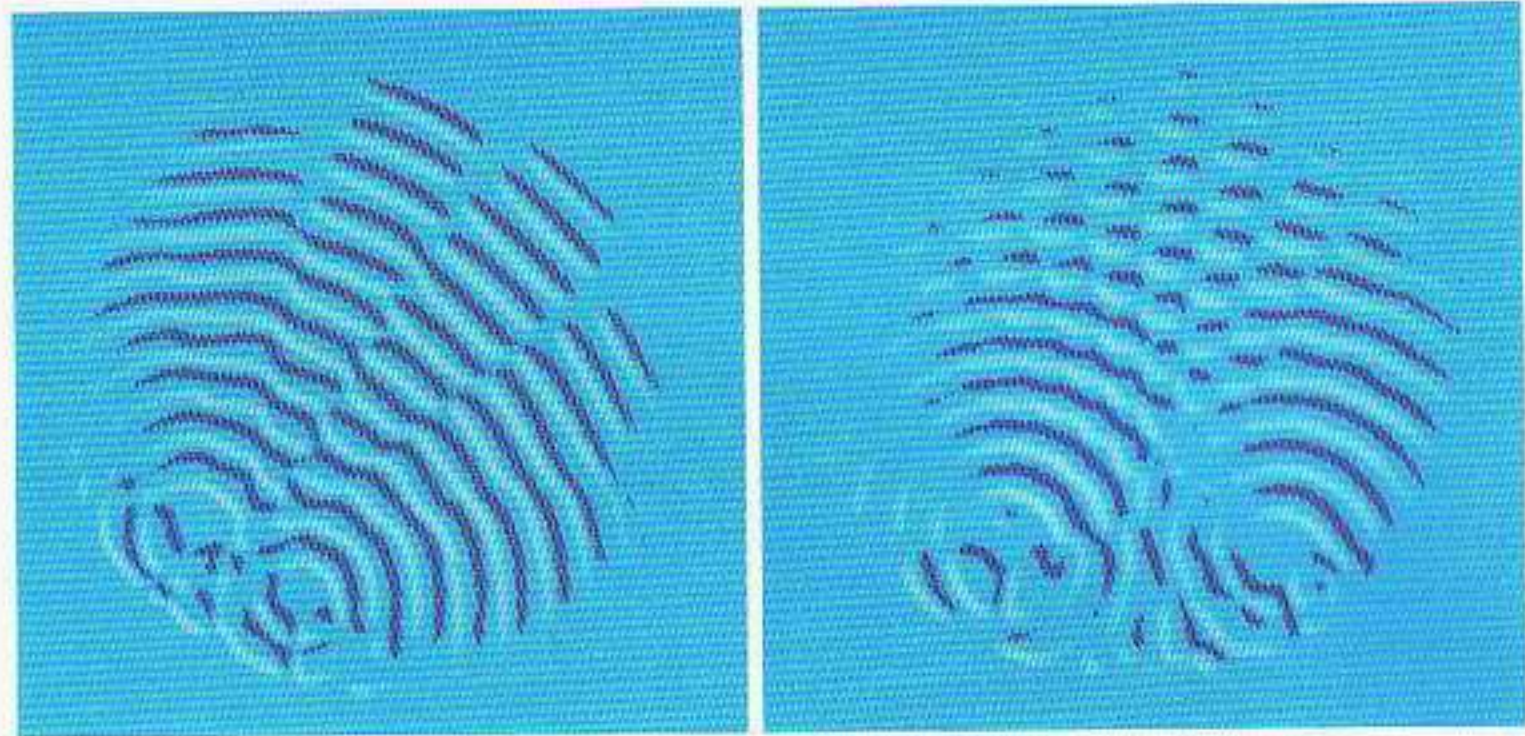
Τα υλικά κύματα του de Broglie

Οι φυσικοί, κατά τα πρώτα βήματά τους προς την κβαντική θεωρία, προσπάθησαν κυρίως να κατανοήσουν τη φύση του φωτός. Η παραδοσιακή εικόνα του φωτός ως κυματικής κίνησης είχε αμφισβητηθεί από τον Planck και τον Αϊνστάιν· είχαν ήδη δείξει ότι ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ ήταν αδύνατο να κατανοηθούν με βάση την κυματική εικόνα, μπορούσαν να εξηγηθούν εύκολα αν το φως θεωρούνταν ως ρεύμα σωματιδίων —φωτονίων, όπως τα ονομάζουμε έκτοτε. Ο William Bragg, στον οποίο το 1915 απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής με χρήση των ακτίνων Χ, συνόψισε αυτό το δίλημμα της φυσικής λέγοντας με απόγνωση ότι δίδασκε τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός κάθε Δευτέρα, Τετάρτη και Παρασκευή και την κυματική θεωρία κάθε Τρίτη, Πέμπτη και Σάββατο! Κι ενώ οι φυσικοί αγωνίζονταν ακόμα με τις φαινομενικά αντιφατικές αυτές ιδιότητες του φωτός, το 1924, ο πρίγκιπας Louis de Broglie διατύπωσε την άποψη ότι η ύλη στο σύνολό της, ακόμα και τα αντικείμενα που συνήθως τα θεωρούμε στοιχειώδη σωματίδια —όπως τα ηλεκτρόνια— θα έπρεπε να εμφανίζουν επίσης κυματοειδή συμπεριφορά! Παρά το ότι η επαναστατική αυτή ιδέα ήταν τελείως απροσδόκητη, ο de Broglie την περιέλαβε στη διδακτορική διατριβή του. Οι φυσικοί, όπως όλοι οι άνθρωποι, είναι κάπως απρόθυμοι να δεχτούν κάθε νέα ιδέα έξω από τα καθιερωμένα, ιδιαίτερα αν δεν υπάρχουν πειραματικά στοιχεία που να τη στηρίζουν. Έτσι, όπως ήταν αναμενόμενο, η επιτροπή που εξέταζε τον de Broglie στο Παρίσι δεν ήξερε τι να κάνει με τη διατριβή του. Πράγματι, ένα από τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, ο καθηγητής Langevin, εξέχων φυσικός της εποχής εκείνης, «μάλλον



Ο πρίγκιπας Louis de Broglie (1892-1987) καταγόταν από οικογένεια γάλλων ευγενών: ο προ-προπάππος του πέθανε στην γκιλιτίνη κατά τη Γαλλική Επανάσταση. Αρχικά πήρε πτυχίο στην ιστορία, αλλιά, ενώ υπηρετούσε στον γαλλικό στρατό κατά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, άρχισε να ενδιαφέρεται για τη φυσική. Για την απλή μαθηματική σχέση του που συνδέει τις κυματικές και τις σωματιδιακές ιδιότητες της ύλης τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1929.

Εικόνα 3.1 Αυτές οι δύο φωτογραφίες δείχνουν πώς μεταβάλλεται η εικόνα συμβολής όταν αυξάνεται η απόσταση των πηγών. Πιο μεγάλες αποστάσεις έχουν ως αποτέλεσμα οι ζώνες συμβολής να πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους.



ξαφνιάστηκε από το νεωτερισμό των ιδεών μου», σύμφωνα με τον ίδιο τον de Broglie. Ζήτησε μάλιστα άλλο ένα αντίγραφο της διατριβής, το οποίο έστειλε στον Αϊνστάϊν ζητώντας τη γνώμη του. Ο Αϊνστάϊν εντυπωσιάστηκε από την εργασία: «Πιστεύω πως είναι μια πρώτη αμυδρή ακτίνα φωτός στο πιο δύσκολο αίνιγμα που αντιμετωπίζουμε στη φυσική.» Η εξεταστική επιτροπή πήρε, ευτυχώς γι' αυτή, τη σωστή απόφαση και απένημε στον de Broglie το διδακτορικό του. Λίγα μόνο χρόνια αργότερα, το 1927, αποδείχθηκε η κυματική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων —από τον Davisson και τον Germer στις ΗΠΑ και τον G.P. Thomson στη Σκωτία—, ο δε de Broglie το 1929, καθώς και οι Davisson και Thomson το 1937, πήραν το βραβείο Νόμπελ για την εργασία τους στα υλικά κύματα.

Αν όλα τα «σωματίδια» μπορούν να συμπεριφέρονται σαν κύματα, γιατί οι φυσικοί χρειάστηκαν τόσο καιρό για να παρατηρήσουν τα κύματα αυτά; Γιατί δεν βλέπουμε κυματική συμπεριφορά στις σφαίρες, στις μπίλιες του μπιλιάρδου, ή ακόμα και στα αυτοκίνητα; Η απάντηση σε τούτα τα ερωτήματα βρίσκεται και πάλι στην πολύ μικρή τιμή της σταθεράς του Planck. Σύμφωνα με τον de Broglie, το μήκος κύματος των υλικών κυμάτων τέτοιων αντικειμένων είναι πάρα πολύ μικρό. Ο ίδιος υποστήριξε επίσης ότι σε κάθε σωματίδιο κινούμενο με ορισμένη ορμή p αντιστοιχεί ένα υλικό κύμα με μήκος κύματος λ που δίνεται από την έκφραση

$$\lambda = h/p \text{ (εξίσωση του de Broglie)}$$

μήκος κύματος ίσον σταθερά του Planck διά ορμή.

Όπως είδαμε στη συζήτησή μας για την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg, η σταθερά του Planck χαρακτηρίζει το μέγεθος όλων των κβαντικών φαινομένων. Πώς όμως η εξαιρετικά μικρή τιμή της εξηγεί το γιατί δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε κυματική συμπεριφορά στα αντικείμενα της καθημερινής μας ζωής; Λοιπόν, εκείνο που δεν είπαμε όταν συζητούσαμε για το πείραμα της διπλής σχισμής είναι ότι, για να δούμε φαινόμενα κυματικής συμβολής, η απόσταση ανάμεσα στις δύο σχισμές πρέπει να έχει περίπου το ίδιο μέγεθος με το μήκος κύματος των αντικειμένων —των φωτονίων ή των ηλεκτρονίων— που συμβάλλουν. Αφού το μήκος κύματος de Broglie μιας σφαίρας που εκτοξεύεται από ένα πολυβόλο είναι πολύ πιο μικρό ακόμα και από τις αποστάσεις ανάμεσα στα άτομα, δεν μπορούμε να επινοήσουμε ένα πείραμα που



Ο Erwin Schrödinger (1887-1961) σπούδασε στη Βιέννη και κατά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο υπηρέτησε ως αξιωματικός του πυροβολικού. Μετά τον πόλεμο αποφάσισε να εγκαταλείψει τη φυσική και να ασχοληθεί με τη φιλοσοφία, αλλά η πόλη στην οποία ήλπιζε να πάρει πανεπιστημιακή θέση δεν ανήκε πια στην Αυστρία. Ευτυχώς, ο Schrödinger παρέμεινε φυσικός και ανακάλυψε τη βασική εξίσωση της κβαντικής μηχανικής το 1926. Το 1928 διοδέχθηκε τον Max Planck ως καθηγητής στο Βερολίνο. Όταν ο Χίτλερ ανήλθε στην εξουσία, εγκατέλειψε τη Γερμανία και τελικά έγινε καθηγητής θεωρητικής φυσικής στο Ινστιτούτο Ανώτερων Σπουδών του Δουβλίνου, στην Ιρλανδία.



Εικόνα 3.2 Μια άλλη άποψη της χώρας των θαυμάτων του κυρίου Τόμπκινς, στην οποία η σταθερά του Planck είναι πολύ πιο μεγάλη απ' ό,τι στον κόσμο μας. Ο σερ Richard ήταν έτοιμος να πυροβολήσει, όταν ο καθηγητής τον σταμάτησε και του εξήγησε ότι: «Υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα να χτυπήσεις ένα ζώο όταν κινείται πάνω σε μια χαρακτηριστική εικόνα περιθλάσης.»

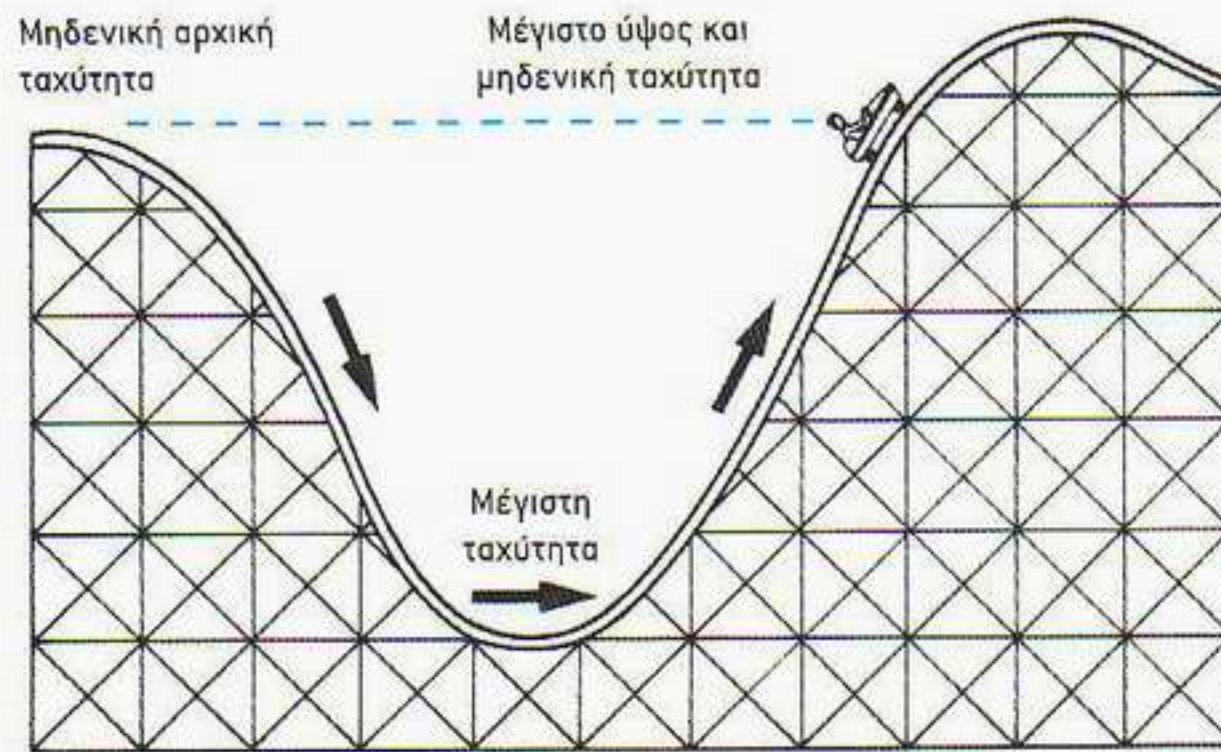
θα δείχνει την κυματική συμβολή σφαιρών πολυβόλου ή και οποιοσδήποτε άλλου καθημερινού αντικειμένου. Αν από την άλλη μπορούσαμε να αυξήσουμε την τιμή της σταθεράς του Planck, τα πράγματα θα φαίνονταν πολύ διαφορετικά, όπως στους εφιάλτες του κύριου Τόμπκινς.

Η εξίσωση του Schrödinger

Όταν ο Erwin Schrödinger ανακάλυψε την πασίγνωστη σήμερα εξίσωσή του, ήταν ένας μεσόκοπος, μέτρια πετυχημένος αυστριακός φυσικός, που εργαζόταν στη Ζυρίχη. Ο καθηγητής Debye, επί κεφαλής της ερευνητικής ομάδας του Πανεπιστημίου της Ζυρίχης, είχε ακούσει γι' αυτά τα περίεργα κύματα de Broglie και ζήτησε από τον Schrödinger να τα εξηγήσει στην υπόλοιπη ομάδα. Ο Schrödinger το έκανε και, όταν τελείωσε τη διάλεξή του, ο Debye σχολίασε ότι όλα αυτά φαίνονταν μάλλον παιδαριώδη, μιας και για να εξετάσει κανείς ολοκληρωμένα τα υλικά κύματα, θα έπρεπε πρώτα πρώτα να έχει μια κυματική εξίσωση που να περιγράφει πώς κινούνται από σημείο σε σημείο. Παρακινημένος από αυτή την παρατήρηση, ο Schrödinger μπόρεσε τελικά να ανακαλύψει την εξίσωση η οποία σήμερα φέρει το όνομά του. Η ανακάλυψη αυτή ήταν ιδιαίτερα σημαντική διότι έδωσε τη δυνατότητα στους φυσικούς να υπολογίσουν πώς κινούνται τα κβαντικά κύματα πιθανότητας, ε-



Αναμνηστική πλάκα στο αρχικό κτήριο του Ινστιτούτου Ανώτερων Σπουδών του Δουβλίνου. Λένε ότι ο Eamon De Valera, πρόεδρος της Δημοκρατίας της Ιρλανδίας, βρήκε πιο εύκολο να φτιάξει ένα νέο ινστιτούτο για τον Schrödinger παρά να πείσει τους συναδέλφους του στο Trinity College να τον κάνουν καθηγητή. Προσέξτε ότι η επιγραφή, αντί για «κβαντική μηχανική», χρησιμοποιεί τον παρωχημένο όρο «κυματική μηχανική».



Εικόνα 3.3 Η ιδεατή διαδρομή που ακολουθεί το βαγονάκι του λούνα-παρκ πάνω στη μεταλλική τροχιά του απεικονίζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Στην αριστερή κορυφή, απ' όπου το βαγονάκι ξεκινά την κίνησή του από κατάσταση ηρεμίας, έχει μηδενική κινητική ενέργεια και μέγιστη βαρυτική δυναμική ενέργεια. Καθώς το βαγονάκι κατεβαίνει, η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική· έτσι, όταν φτάσει στο πιο χαμηλό σημείο της τροχιάς, έχει μηδενική δυναμική ενέργεια και μέγιστη κινητική. Στη συνέχεια, το βαγονάκι επιβραδύνεται καθώς ανεβαίνει στην άλλη πλευρά, οπότε η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σταδιακά σε δυναμική. Σε μια ιδεατή σιδηροτροχιά χωρίς απώλεια ενέργειας λόγω θερμότητας, θορύβου κ.λπ., το βαγονάκι θα καταφέρει να φτάσει στο ίδιο ακριβώς ύψος από το οποίο ξεκίνησε.

πομένως να κάνουν ακριβείς προβλέψεις συγκρίσιμες με τα πειραματικά δεδομένα. Όπως ο Νεύτων επινόησε τους απλούς νόμους που περιγράφουν ολόκληρη την κλασική φυσική, έτσι και ο Schrödinger επινόησε το νόμο που περιγράφει την κίνηση των κβαντικών αντικειμένων. Πριν γράψουμε την εξίσωση Schrödinger, και για να μη φανεί σαν κανένα κουνέλι που βγαίνει από το καπέλο, θα βοηθούσε να αναφέρουμε εδώ την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Μπορούμε να το κάνουμε εξετάζοντας την κίνηση συνηθισμένων αντικειμένων του καθημερινού μας κόσμου.

Ας φανταστούμε πως βρισκόμαστε ξανά στο «βαγονάκι ιλίγγου» του λούνα-παρκ. Αν ξεκινήσουμε με το βαγονάκι μας από κατάσταση ηρεμίας στην αριστερή κορυφή της τροχιάς, καθώς θα γλιστράμε προς τα κάτω το βαγονάκι θα κινείται όλο και πιο γρήγορα, ώσπου να φτάσει στο κατώτερο σημείο. Υστερα θα αρχίσει να ανεβαίνει στην άλλη πλευρά, οπότε σταδιακά θα επιβραδύνεται, ώσπου να σταματήσει. Η κίνηση του βαγονιού μας βοηθά να κατανοήσουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Πριν ξεκινήσουμε την κίνησή μας, ψηλά στην κορυφή, βρισκόμαστε σε κατάσταση ηρεμίας και δεν έχουμε καθόλου κινητική ενέργεια. Στο κατώτερο σημείο της τροχιάς, όταν θα τρέχουμε με τη μέγιστη ταχύτητα, θα έχουμε και τη μέγιστη κινητική ενέργεια. Καθώς θα ανεβαίνουμε στην άλλη πλευρά, η κινητική μας ενέργεια θα μειώνεται συνεχώς, ώσπου θα καταλήξουμε και πάλι (έστω στιγμιαία) σε κατάσταση ηρεμίας. Αυτή τη στιγμή, τι έχει απογίνει η κινητική μας ενέργεια; Στη φάση της ανόδου, πρέπει να δαπανήσουμε ενέργεια προκειμένου να ανυψωθεί και το βάρος του βαγονιού και το δικό μας μέχρι τό ανώτερο σημείο. Στην περίπτωση αυτή, λέμε ότι έργο καταναλώνεται προκειμένου να υπερνικηθεί η έλξη της βαρύτητας· έτσι, όσο ανερχόμαστε σε όλο και μεγαλύτερο ύψος, λέμε ότι αποκτάμε βαρυτική δυναμική ενέργεια. Τη στιγμή που ξεκινή-

οσαμε την κίνησή μας με το βαγονάκι, δεν είχαμε κινητική ενέργεια· ωστόσο, επειδή βρισκόμασταν σε ορισμένο ύψος, είχαμε βαρυτική δυναμική ενέργεια, μπορούσαμε δε να μετατρέψουμε αυτή τη δυναμική μας ενέργεια σε κινητική κυλώντας προς τα κάτω και χάνοντας ύψος. Κάθε στιγμή, σε κάθε θέση της τροχιάς, η συνολική ενέργειά μας παραμένει σταθερή, η μορφή της όμως μπορεί να αλλάζει. Θεωρητικά, επομένως, το βαγονάκι κατά την άνοδό του θα καταφέρει να φτάσει στο ίδιο ακριβώς ύψος με αυτό από το οποίο ξεκίνησε. Στην πραγματικότητα, βέβαια, ένα τέτοιο βαγονάκι ποτέ δεν καταφέρνει να φτάσει στο ίδιο ύψος, διότι κάποιο μέρος της αρχικής δυναμικής του ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον με τη μορφή ενέργειας που θερμαίνει τις σιδηροτροχιές, που προκαλεί θόρυβο κ.λπ. Για να συνεχίσουμε να μιλάμε απλά, θα αγνοήσουμε τέτοιες απώλειες και θα φανταστούμε πως η σιδηροτροχιά μας είναι εξαιρετικά λεία και γλιστερή. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας στο παράδειγμά μας μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Η ολική ενέργεια του συστήματος βαγόνι-επιβάτες (την οποία συμβολίζουμε με E) παραμένει σταθερή, κάθε στιγμή δε ισούται με το άθροισμα της κινητικής (K) και της δυναμικής ενέργειας (Δ) του συστήματος. Ως εξίσωση, αυτή γράφεται:

$$E = K + \Delta$$

ολική ενέργεια ίσον κινητική ενέργεια συν δυναμική ενέργεια.

Πριν αφήσουμε αυτό το παράδειγμα, θα γράψουμε την παραπάνω σχέση με διαφορετικό τρόπο, ο οποίος θα μας φανεί χρήσιμος αργότερα. Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ορμή p ενός σώματος έχει μέτρο που δίνεται από το γινόμενο της μάζας του επί την ταχύτητά του:

$$p = m \cdot u$$

ορμή ίσον μάζα επί ταχύτητα.

Σύμφωνα με τους νόμους του Νεύτωνα, η κινητική ενέργεια και η ορμή συνδέονται με την εξίσωση:

$$K = p^2 / (2m)$$

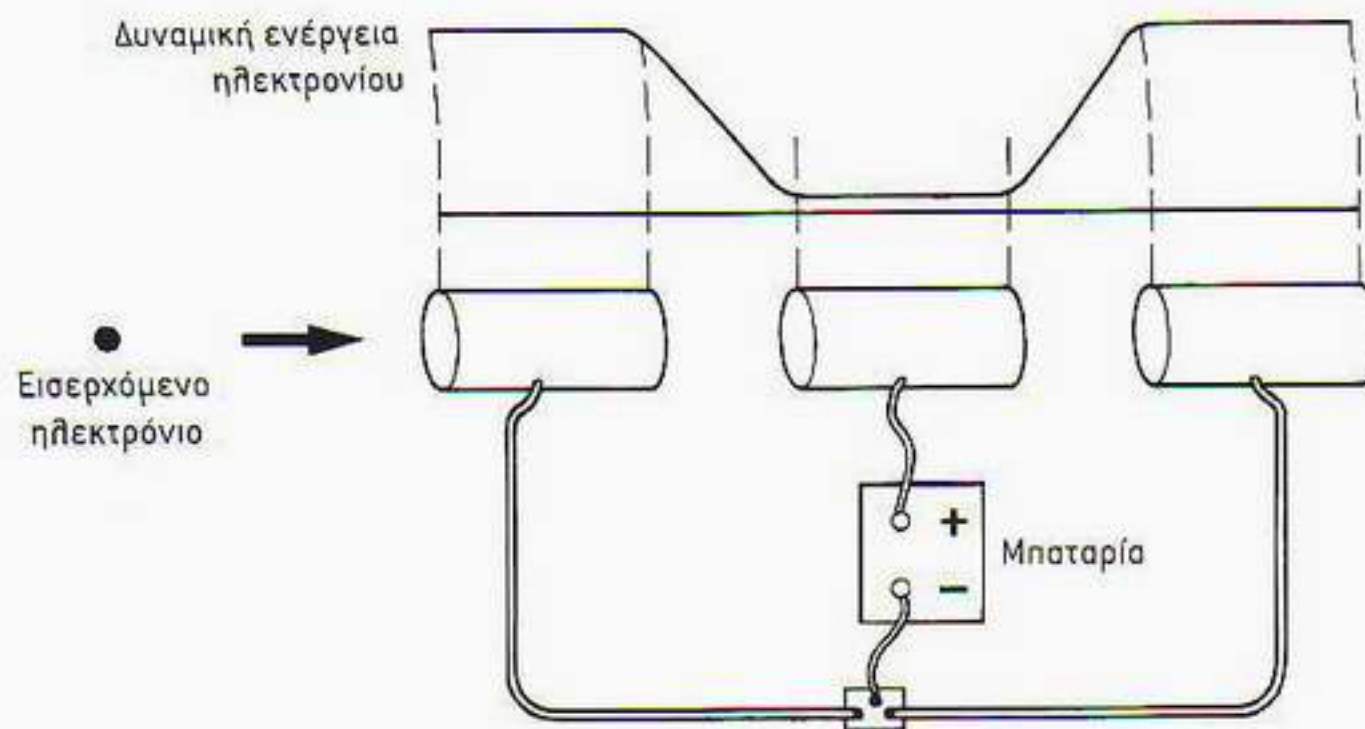
κινητική ενέργεια ίσον ορμή στο τετράγωνο διά το διπλάσιο της μάζας.

Έτσι, η σχέση διατήρησης της ενέργειας μπορεί να γραφτεί και στη μορφή:

$$E = K + \Delta = p^2 / (2m) + \Delta.$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση συνδέει την ολική ενέργεια, την ορμή και τη δυναμική ενέργεια του σώματος.

Τι σχέση έχουν όλα τούτα με τα ηλεκτρόνια και την εξίσωση του Schrödinger; Στο προηγούμενο κεφάλαιο επισημάνσαμε ότι μπορούμε να θεωρήσουμε μια ανάλογη «σιδηροτροχιά» για τα ηλεκτρόνια. Τα κβαντικά αντικείμενα, όπως τα ηλεκτρόνια, υπακούουν και αυτά στην αρχή διατήρησης της ενέργειας —δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε ενέργεια εκ του μηδενός ούτε να την εξαφανίσουμε, ακόμα και στο κβαντικό επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, όπως και στο παράδειγμα με το πραγματικό βαγονάκι, η ενέργεια των ηλεκτρονίων μπορεί να μετατρέπεται από μια μορφή σε κάποια άλλη. Στην περίπτωση του ηλεκτρονίου, βέβαια, η ανάλογη μορφή της δυναμικής ενέργειας δεν οφείλεται στη βαρυτική αλλά στην ηλεκτρική έλξη. Τα ηλεκτρόνια, με το αρνητικό ηλεκτρικό τους φορτίο, έλκονται προς μια περιοχή θετικού φορτίου. Έτσι,



Εικόνα 3.4 Μια πειραματική διάταξη όπου ένα ηλεκτρόνιο ακολουθεί τροχιά ανάλογη αυτής του παραδείγματος με το βαγονάκι. Ένα σύστημα μεταλλικών κυλίνδρων συνδεδεμένων με μια μπαταρία προσδίδουν στο ηλεκτρόνιο που κινείται στο εσωτερικό τους ηλεκτρική δυναμική ενέργεια, η μεταβολή της οποίας παριστάνεται από την καμπύλη στο πάνω μέρος του σχήματος.

μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια μπαταρία και μια διάταξη μεταλλικών κυλίνδρων για να διαμορφώσουμε μια καμπύλη ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας που έχει περίπου το ίδιο σχήμα με αυτό της μεταλλικής τροχιάς του βαγονιού. Τα κινούμενα διαμέσου των κυλίνδρων ηλεκτρόνια θα έλκονται αρχικά από τον θετικά φορτισμένο κύλινδρο, και συνεπώς θα επιταχύνονται κερδίζοντας όλο και περισσότερη κινητική ενέργεια. Τώρα πάλι, όπως και για το βαγονάκι, η αύξηση της κινητικής ενέργειας θα αντισταθμίζεται από ίση μείωση της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας. Όπως και πριν, μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας ως εξής:

$$E = p^2/(2m) + \Delta,$$

όπου Δ είναι τώρα η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια. Αυτή η απλή εξίσωση υπήρξε το αφετηριακό σημείο για τον Schrödinger. Χρησιμοποιώντας τη σχέση ορμής και μήκους κύματος που είχε διατυπώσει ο de Broglie, μπόρεσε να επινοήσει την κυματική εξίσωση για ένα κβαντικό αντικείμενο κινούμενο μέσα σε κάποιο δυναμικό. Παραθέτουμε την εξίσωση του Schrödinger στη διπλανή σελίδα, μέσα σε πλαίσιο. Δεν είναι απαραίτητο να καταλαβαίνετε τα μαθηματικά της εξίσωσης για να προχωρήσετε στο υπόλοιπο βιβλίο. Δεν σκοπεύουμε να σας τρομοκρατήσουμε, αλλά να σας πείσουμε ότι όλη η κάπως γενικόλογη περιγραφή των κβαντικών φαινομένων που θα βρείτε στα υπόλοιπα κεφάλαια του βιβλίου στηρίζεται σε μια ακριβή μαθηματική βάση.

Οπτική με ηλεκτρόνια και νετρόνια

Όταν το 1926 δημοσιεύτηκε η διάσημη εργασία του Schrödinger, η ύπαρξη των υλικών κυμάτων δεν είχε επιβεβαιωθεί πειραματικά. Σήμερα, η παρατήρηση της κυματικής συμπεριφοράς των «σωματιδίων» είναι κοινός τόπος και αποτελεί τη βάση για νέους τρόπους αποκάλυψης των φαινομένων του κβαντικού κόσμου. Η πιο γνωστή διάταξη που αποκαλύπτει τη δυαδική φύση (σωματιδιακή και κυματική) της ύλης είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Στο όργανο αυτό, αντί για γυάλινους φακούς, όπως στα κοινά οπτικά μι-

Η εξίσωση του Schrödinger

Για την κίνηση ενός σωματιδίου με ολική ενέργεια E , το οποίο κινείται σε μία διάσταση x σε περιοχή όπου υπάρχει δυναμικό V , η εξίσωση του Schrödinger γράφεται:

$$E\psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi$$

Η παράσταση των πλατών πιθανότητας με το ελληνικό γράμμα ψ αποτελεί απλώς σύμβαση. Το m είναι η μάζα του σωματιδίου και το \hbar η σταθερά h του Planck διαιρεμένη διά 2π . Οι εξοικειωμένοι με τον απειροστικό λογισμό αναγνώστες μπορούν να παρακολουθήσουν τη λύση της εξίσωσης αυτής για το πρόβλημα ενός ηλεκτρονίου σε απλό δυναμικό στο Παράρτημα 2.

κροσκόπια, μπορεί να τοποθετηθεί μια διάταξη ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων η οποία λειτουργεί για τα ηλεκτρόνια των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων όπως οι γυάλινοι φακοί για το φως των οπτικών μικροσκοπίων. Και γιατί αυτό είναι χρήσιμο; Επειδή το πόσες λεπτομέρειες είναι ορατές σε ένα αντικείμενο που εξετάζουμε εξαρτάται από το μήκος κύματος που χρησιμοποιούμε για την παρατήρηση. Γενικά μιλώντας, το μήκος κύματος πρέπει να είναι μικρότερο από το μέγεθος της κάθε λεπτομέρειας που θέλουμε να διακρίνουμε. Όσο μικρότερο δε είναι το μήκος κύματος τόσο πιο μικρή η διακρινόμενη λεπτομέρεια. Τα οπτικά μικροσκόπια δεν μπορούν να διακρίνουν λεπτομέρειες μικρότερες από το μήκος κύματος του ορατού φωτός. Έτσι, χαρακτηριστικά μικρότερα από το 1 εκατομμυριοστό του μέτρου (1 μικρόμετρο), δεν μπορούν να διακριθούν με ορατό φως (βλ. Παράρτημα 1). Από την άλλη, το αντίστοιχο κύμα στην περίπτωση του ηλεκτρονίου έχει μήκος κύματος που εξαρτάται από την ορμή του ηλεκτρονίου, σύμφωνα με τη σχέση του de Broglie. Επιπλέον, το μήκος κύματος ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η ορμή. Μπορούμε επομένως να μεταβάλλουμε τη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου μεταβάλλοντας απλώς την ταχύτητα με την οποία επιταχύνουμε τα ηλεκτρόνια. Ένα κοινό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορεί να λειτουργεί σε μήκη κύματος 1 εκατομμύριο φορές μικρότερα από τα οπτικά μήκη κύματος. Τέτοια μήκη κύματος είναι μικρότερα από το μέγεθος των ατόμων, και έτσι μπορούμε, μέσω ειδικών τεχνικών, να δούμε ορισμένα άτομα με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Στην πράξη, η διακριτική ικανότητα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου περιορίζεται από τεχνικά προβλήματα, όπως ατέλειες στα συστήματα των ηλεκτρομαγνητικών φακών και κραδασμούς της συσκευής και των ίδιων των ατόμων. Παρ' όλα αυτά, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μας δίνει μια εντυπωσιακή εικόνα ενός κόσμου τελείως αόρατου με τα οπτικά μικροσκόπια. Στις Εικόνες 3.5 έως και 3.7 υπάρχουν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα φωτογραφιών από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

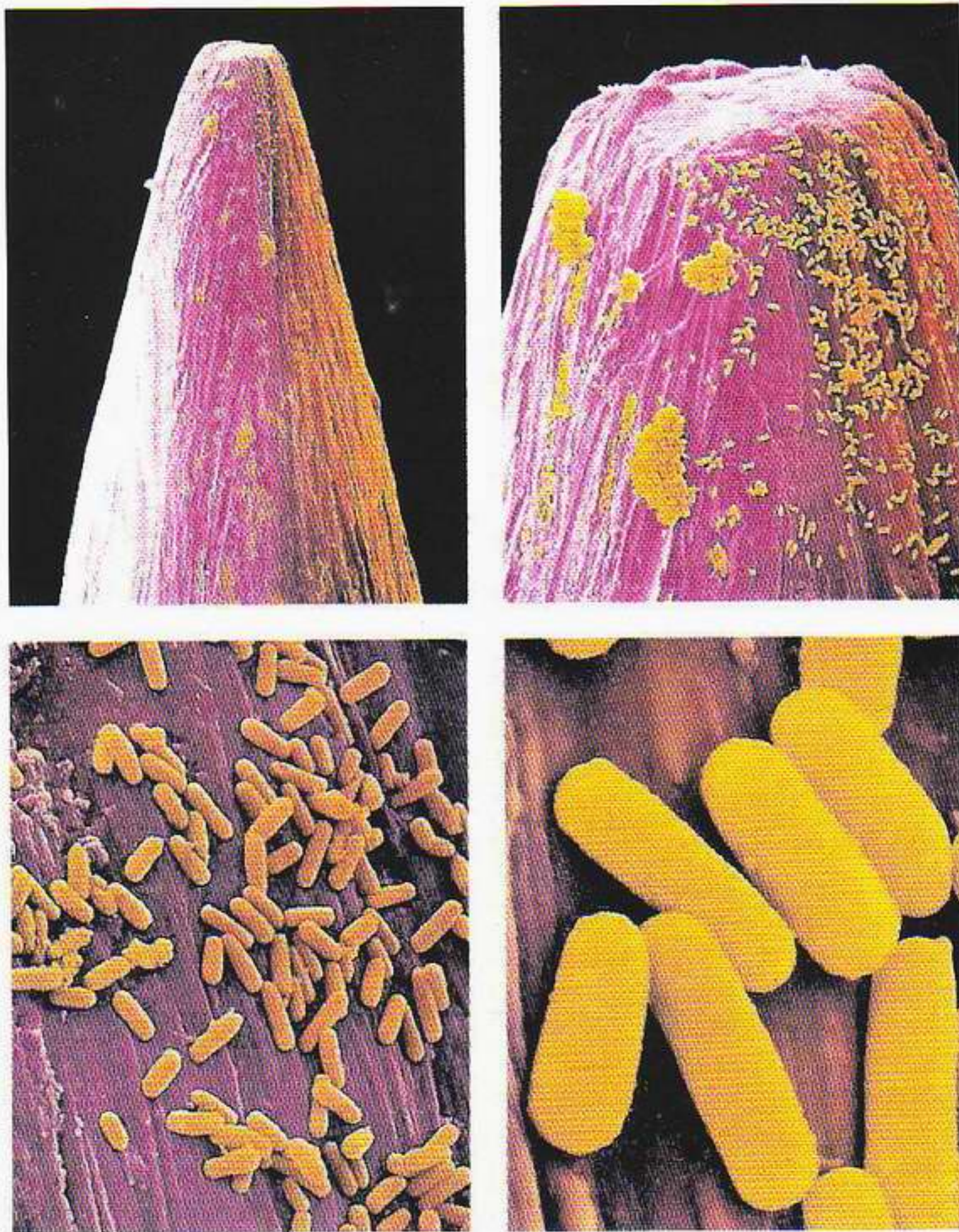
Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια μας προσφέρουν ένα είδωλο του υπό εξέταση αντικειμένου, οπότε τέτοιες «φωτογραφίες» μπορούμε να τις ερμηνεύουμε σχετικά εύκολα. Δέσμες ηλεκτρονίων, όμως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να εξετάσουμε εις βάθος την εσωτερική δομή της ύλης



Ο Murray Gell-Mann γεννήθηκε το 1929 και άρχισε να φοιτά στο Πανεπιστήμιο Yale σε ηλικία δεκαπέντε ετών. Πήρε το διδακτορικό του δίπλωμα από το MIT στα είκοσι δύο του χρόνια, και από το 1955 βρίσκεται στο Caltech. Στον Gell-Mann απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ το 1969 για τις εργασίες του στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων, μια από τις οποίες ήταν η ιδέα των κουάρκ ως θεμελιωδών συστατικών της ύλης.



Ο George Zweig σπούδασε στο Caltech και αφού τελείωσε τη διδακτορική διατριβή του πήγε στο CERN, στη Γενεύη. Εκεί, ανεξάρτητα από τον Gell-Mann, επινόησε αυτό που για τα στοιχειώδη σωματίδια είναι γνωστό ως μοντέλο των κουάρκ. Σήμερα εργάζεται πάνω σε προβλήματα βιοφυσικής στο Λος Άντζελες.



Εικόνα 3.5 Φωτογραφίες που δείχνουν την ενοχλητική παρουσία βακτηρίων στην άκρη μιας καρφίτσας. Μεγεθύνσεις 20, 100, 500 και 2.500 φορές.

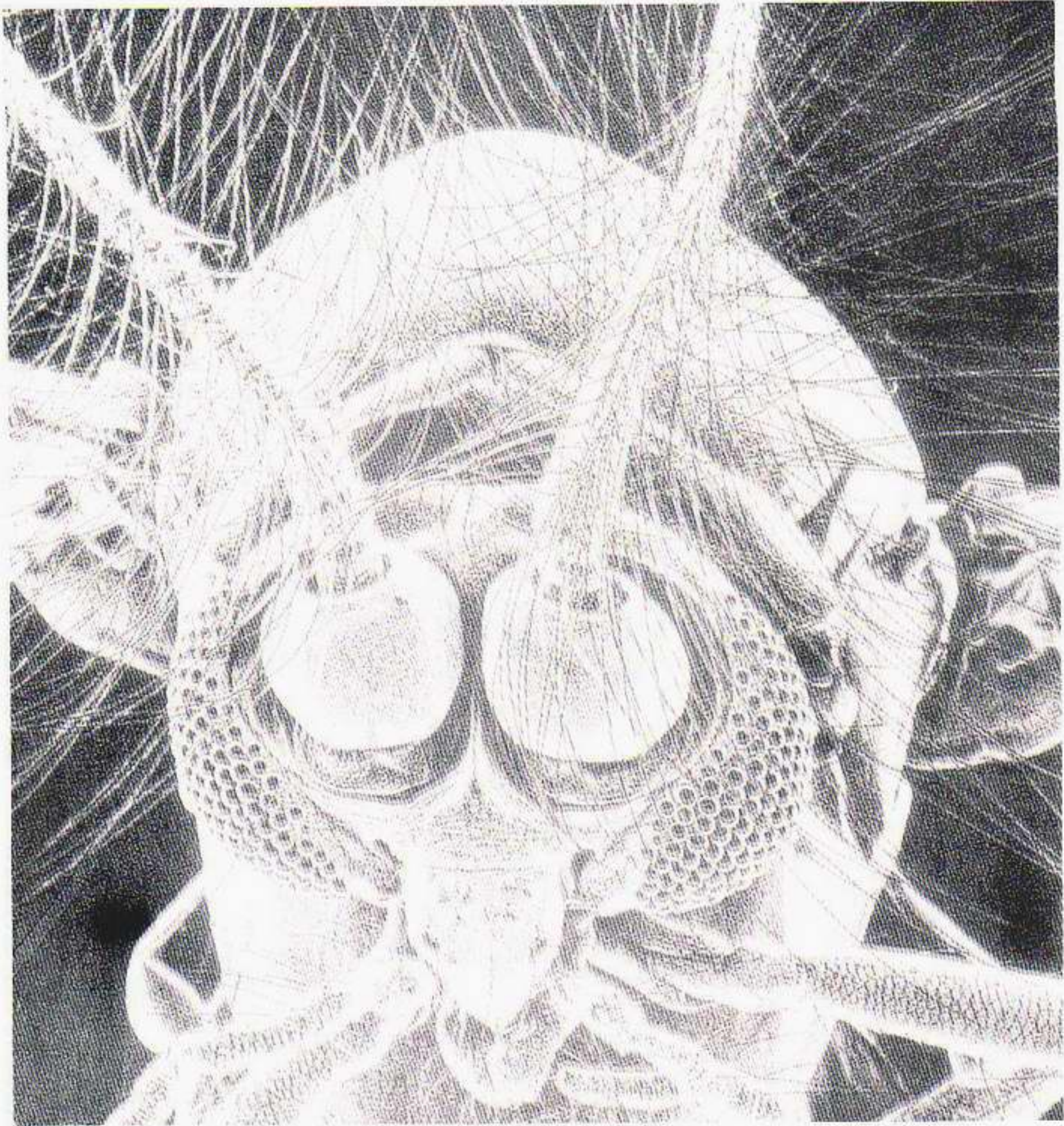
χωρίς να πάρουμε ένα απευθείας είδωλο του αντικειμένου. Σε κάποιους επιταχυντές σωματιδίων, τα ηλεκτρόνια μπορούν να επιταχύνονται σε ταχύτητες λίγο μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός. Τέτοια ηλεκτρόνια με πολύ μεγάλη ορμή μπορούν να εξερευνήσουν πολύ μικρές κλίμακες αποστάσεων. Παρατηρώντας την εικόνα συμβολής των ηλεκτρονίων που έχουν σκεδαστεί από ένα πρωτόνιο-στόχο, μπορούμε να συναγάγουμε λεπτομερειακά συμπεράσματα για τη δομή του πρωτονίου. Τέτοια πειράματα σκέδασης ηλεκτρονίων, που για πρώτη φορά διεξήχθησαν στον Γραμμικό Επιταχυντή του Stanford στην Καλιφόρνια (SLAC, βλ. Εικόνες 3.8 και 3.9), μας έδωσαν τη δυνατότητα να κοιτάζουμε βαθιά «μέσα» στα πρωτόνια. Τα αποτελέσματα προκάλεσαν μεγάλη έκπληξη. Αντί να βρεθεί ολόκληρο το θετικό φορτίο του πρωτονίου κατανεμημένο ομοιόμορφα σε όλο του τον όγκο, από τα πειράματά μας αποκαλύφθηκε ότι το φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε κάποια μικρότερα συστατι-



Εικόνα 3.6 Αυτή η φωτογραφία με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δείχνει μια οικογένεια από ακάρεα που ζουν ανάμεσα σε μόρια σκόνης· φαίνονται σαν ζώα τα οποία βόσκουν ήσυχα σε ένα χωράφι. Μεγέθυνση περίπου 200 φορές.

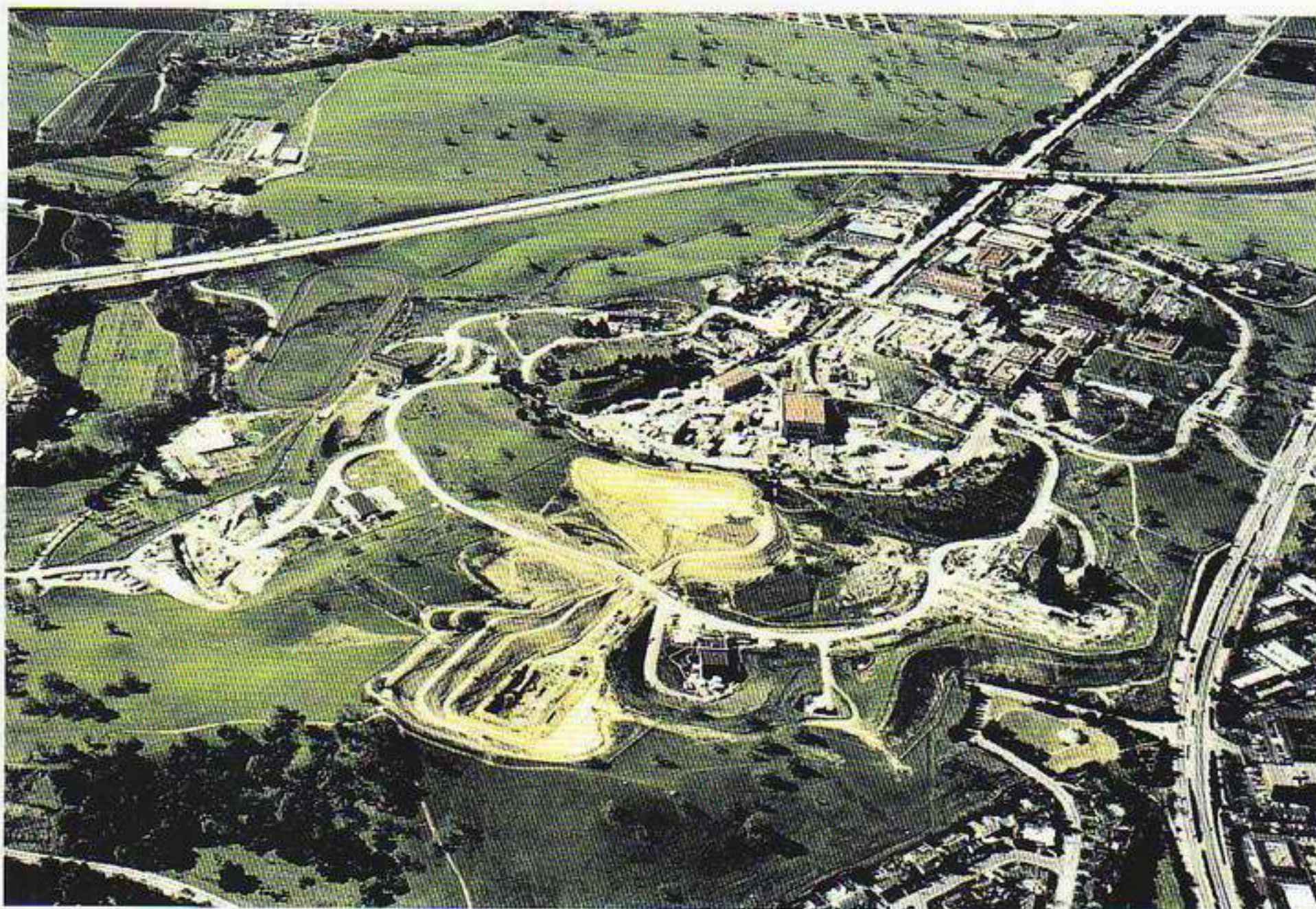
κά μέσα στο πρωτόνιο. Επιπλέον, αντί αυτά τα συστατικά να φέρουν ηλεκτρικό φορτίο όσο τα ηλεκτρόνια ή τα πρωτόνια, βρέθηκαν να έχουν φορτίο ίσο με το $1/3$ ή τα $2/3$ του φορτίου του ηλεκτρονίου! Τούτα τα πολύ μικρά συστατικά σωματίδια των πρωτονίων με τα περίεργα φορτία τους ονομάζονται *κουάρκ*. Αρχικά προτάθηκαν ως στοιχειώδη δομικά συστατικά της ύλης από τον Murray Gell-Mann, έναν ήδη διάσημο φυσικό στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καλιφόρνιας (Caltech), και ταυτόχρονα από τον George Zweig, έναν σχεδόν άγνωστο ως τότε αμερικανό φυσικό που εργαζόταν στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN) στη Γενεύη της Ελβετίας. Στο πρωτοποριακό άρθρο του, ο Zweig ονόμασε αυτά τα συστατικά σωματίδια «άσσοις», αλλά ο Gell-Mann εισήγαγε τη λέξη *κουάρκ* από μια χωρίς νόημα λέξη που βρήκε στο μυθιστόρημα *Finnegan's Wake* του James Joyce. Μιας και στη θεωρία των κουάρκ για την ύλη το πρωτόνιο αποτελείται από τρία κουάρκ, η φράση από τον Joyce «Three quarks for Muster Mark!» ήταν πολύ εύστοχη, οπότε η επιλογή τού Gell-Mann καθιερώθηκε διεθνώς —παρόλο που στα γερμανικά *quark* σημαίνει μαλακό τυρί από αποβουτυρωμένο γάλα και στην καθομιλουμένη σημαίνει σκουπίδι! Θα ασχοληθούμε και πάλι με τα κουάρκ στο Κεφάλαιο 10, όταν θα συζητήσουμε για τη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων και τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις.

Υπάρχει και άλλη μια ενδιαφέρουσα ιστορία για τα κουάρκ, ή μάλλον για τους «άσσοις», που δείχνει ότι εμείς οι φυσικοί δεν είμαστε τόσο απαλλαγμένοι από προκαταλήψεις όσο μας αρέσει να νομίζουμε. Όταν ο Gell-Mann και ο Zweig εισηγήθηκαν τη θεωρία τους, σύμφωνα με την οποία μέσα στα πρωτόνια υπήρχαν νέα, ακόμα πιο θεμελιώδη σωματίδια, ήταν στη μόδα μια άλλη θεωρία, που θα μπορούσε γενικά να ονομαστεί «πυρηνική δημοκρατία». Στην αντίπαλη αυτή θεωρία, κανένα σωματίδιο δεν ήταν πιο θεμελιώδες από κάποιο άλλο· οι φυσικοί δε παρέμεναν τόσο παγιδευμένοι σε τούτο τον τρόπο σκέψης, ώστε θεωρούσαν κάτι σαν αίρεση οποιοδήποτε άλλο μοντέλο



Εικόνα 3.7 Φωτογραφία με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μιας κοινής ακνίπας, σε μεγέθυνση περίπου 500 φορές. Μεγάλα αμήνη από αυτές βλέπουμε το καλοκαίρι, αλλά ευτυχώς το πραγματικό τους μέγεθος είναι μόνο 2 χιλιοστά του μέτρου.

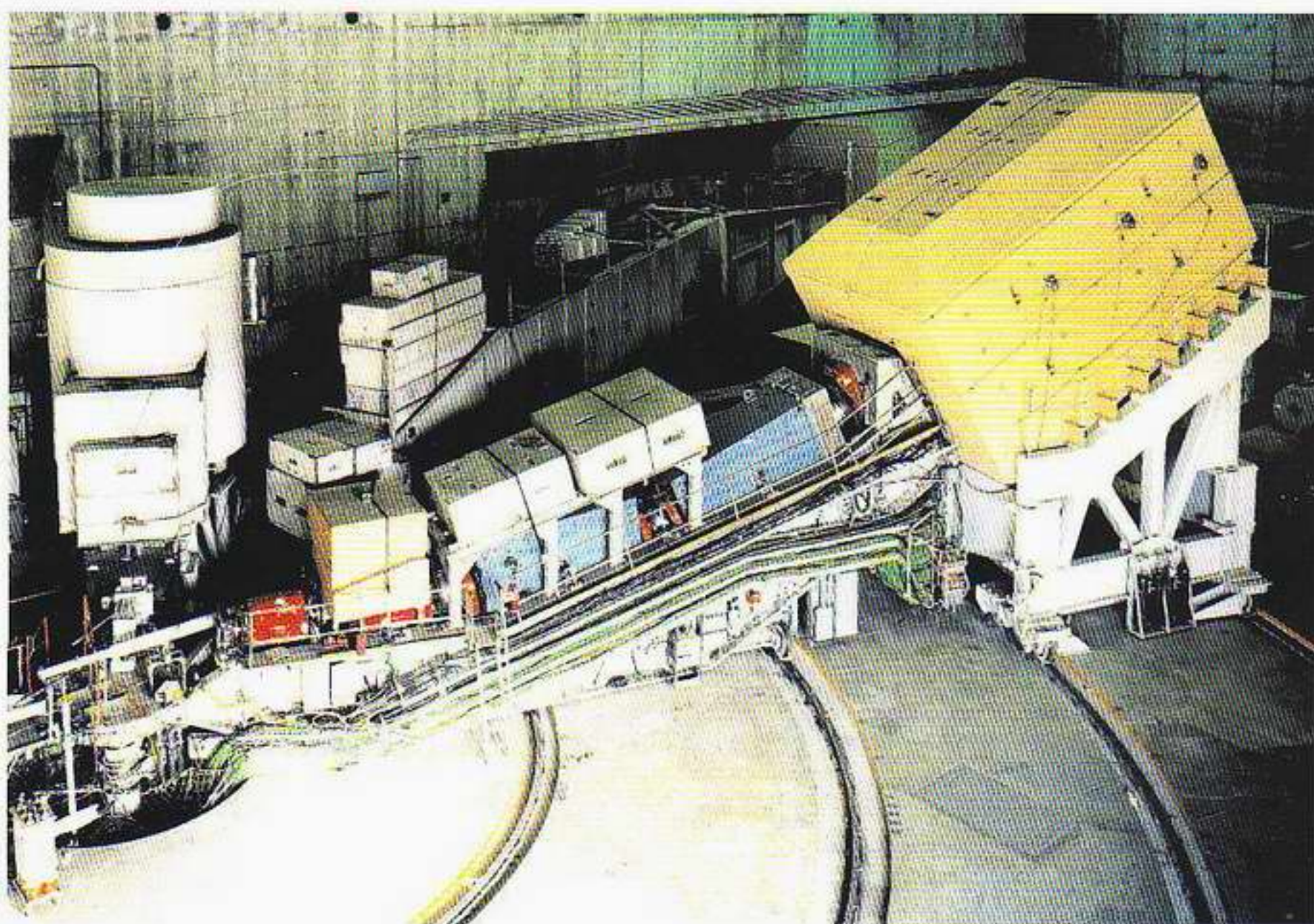
δεχόταν την ύπαρξη νέων θεμελιωδών σωματιδίων! Ο Gell-Mann συνειδητοποίησε πράγματι ότι θα συναντούσε μεγάλη αντίδραση στην ιδέα των κουάρκ, και πήρε την απόφαση να δημοσιεύσει το άρθρο του σε ένα ευρωπαϊκό περιοδικό —η προκατάληψη στην Ευρώπη δεν ήταν τόσο μεγάλη όσο στις ΗΠΑ. Ο Zweig, από την άλλη, ζούσε στην Ευρώπη, αλλά —σωστά ή όχι— ήθελε να δημοσιεύσει την έρευνά του σε αμερικανικό περιοδικό. Έπειτα από αγώνα και αφού κέρδισε μια μακρόχρονη διαμάχη με τη διοικητική διεύθυνση του CERN για να μπορέσει να στείλει το άρθρο του σε αμερικανικό περιοδικό, τελικά το άρθρο του στις ΗΠΑ κρίθηκε μη δημοσιεύσιμο· μερικοί αμερικανοί



Εικόνα 3.8 Ο SLAC, ο μήκους 2 μιλίων γραμμικός επιταχυντής στο Stanford της Καλιφόρνιας, ξεκινά από τους λόφους του Σαν Αντρέας, περνά κάτω από τον αυτοκινητόδρομο Σαν Χοσέ-Σαν Φρανσίσκο, και καταλήγει σε ένα συγκρότημα εργαστηρίων στο κάτω μέρος της εικόνας. Το διάσπασμα σεισμικό ρήγμα περνά κάτω από τους λόφους του Σαν Αντρέας, και γι' αυτό υπάρχουν μηχανήματα ασφαλείας για να διακόψουν τη λειτουργία του επιταχυντή σε περίπτωση μεγάλου σεισμού. Ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια επιταχύνονται σε μήκος 2 μιλίων, κινούμενα περίπου με την ταχύτητα του φωτός, και κατευθύνονται σε διάφορους στόχους, όπου συγκρούονται και γίνονται οι ανάλογες παρατηρήσεις.

φυσικοί, μάλιστα, τον χαρακτήρισαν τσαρλατάνο. Έτσι, η εργασία του Zweig υπήρξε ένα από τα διάσπασμα «αδημοσίευτα άρθρα» στη φυσική. Χρειάστηκαν να περάσουν σχεδόν είκοσι χρόνια για να συμπεριληφθεί η εργασία του σε μια συλλογή σημαντικών άρθρων σχετικά το μοντέλο των κουάρκ. Σήμερα, στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων η ιδέα των κουάρκ ως θεμελιωδών συστατικών του πρωτονίου είναι γενικά αποδεκτή ως «προφανής αλήθεια», ενώ η «πυρηνική δημοκρατία» φαίνεται πια ως μια τολμηρή —αλλά παραπλανημένη— απόπειρα.

Οι κυματικές ιδιότητες έχουν αποδειχθεί πια και για αρκετά άλλα σωματίδια πλην των ηλεκτρονίων. Συγκεκριμένα, μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1970 διεξήχθησαν μια σειρά από ωραία πειράματα με νετρόνια, τα οποία στηρίχτηκαν στον κυματικό χαρακτήρα των τελευταίων. Τα νετρόνια, όπως υποδηλώνεται και από το όνομά τους, δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο. Έχουν μάζα περίπου ίση με αυτή των πρωτονίων, και αμφότερα αποτελούν τα συστατικά στοιχεία του πυρήνα. Τα νετρόνια παράγονται κατά τις πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Το μόνο που χρειάζεται να ξέρουμε εδώ είναι ότι μπορούν να παραχθούν δέσμες νετρονίων, και ότι με τέτοιες δέσμες έχουμε



Εικόνα 3.9 Φωτογραφία ενός από τους αρχικούς ανιχνευτές ηλεκτρονίων στον SLAC. Η δέσμη των ηλεκτρονίων εισέρχεται από αριστερά και συγκρούεται με πρωτόνια που αποτελούν το στοχο. Τα σκεδασμένα ηλεκτρόνια εκτρέπονται από ισχυρά μαγνητικά πεδία και οδηγούνται σε συσκευές μέτρησης της διεύθυνσης και της ορμής τους.

τη δυνατότητα να εκτελέσουμε το ανάλογο πείραμα με αυτό της διπλής σχισμής. Στη συγκεκριμένη παραλλαγή του πειράματος, κρατάμε έναν ανιχνευτή νετρονίων σε σταθερή θέση, παρατηρούμε δε το φαινόμενο της συμβολής μεταβάλλοντας το ενεργό μήκος διαδρομής της μίας από τις δύο συμβάλλουσες δέσμες νετρονίων. Αυτό επιτυγχάνεται διά της παρεμβολής ενός θαλάμου αερίου στη μία από τις δύο δέσμες. Μεταβάλλοντας τότε την πυκνότητα του αερίου στο θάλαμο, καταφέρνουμε να μεταβάλουμε το ενεργό μήκος διαδρομής των νετρονίων μέχρι τον ανιχνευτή. Τα πειράματα με νετρόνια έχουν γίνει σήμερα τόσο ευαίσθητα, ώστε είναι εφικτό να παρατηρούμε το αποτέλεσμα ενός πολύ μικρού όρου βαρυτικού δυναμικού στην εξίσωση του Schrödinger για τα νετρόνια.

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, διεξάγονται πειράματα συμβολής με άτομα. Στο πρώτο πείραμα, μια δέσμη ατόμων πλίου κατευθύνθηκε προς ένα μικροσκοπικό πέτασμα χρυσού όπου είχαν εγχαραχθεί δύο σχισμές τις οποίες χώριζε απόσταση μόλις 1 εκατομμυριοστού του μέτρου —απόσταση που αντιστοιχεί χοντρικά στο μήκος κύματος του ορατού φωτός (βλ. Παράρτημα 1). Ένας κινητός ανιχνευτής κατέγραφε την άφιξη των μεμονωμένων ατόμων πλίου, ενώ σταδιακά εμφανιζόταν η οικεία εικόνα συμβολής. Το εν λόγω πείραμα είναι ακριβώς ανάλογο εκείνου της συμβολής ηλεκτρονίων που συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 1. Έχουν γίνει επίσης παρόμοια πειράματα με άτομα μεγαλύτερης μάζας από του πλίου. Αν και για την πλή-

ρη πειραματική επαλήθευση της ιδέας του de Broglie περί υλικών κυμάτων χρειάστηκαν εβδομήντα χρόνια, η επιτροπή της διδακτορικής διατριβής του έλαβε αναμφισβήτητα τη σωστή απόφαση!

Μια συναρπαστική καινούργια εξέλιξη είναι η χρήση φωτός λέιζερ (θα τη συζητήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο) για να ασκηθούν δυνάμεις σε άτομα. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται εφικτή η κατασκευή του ισοδυνάμου των συσκευών «διπλής» ή «πολλαπλής» σχισμής χωρίς να καταφεύγουμε στη χρήση υλικών πετασμάτων. Η δυνατότητα χειρισμού και ελέγχου της κβαντικής κίνησης των ατόμων θέτει τα θεμέλια ενός νέου ερευνητικού πεδίου στην «ατομική οπτική». Θα επανέλθουμε σε αυτές τις εξελίξεις στη συνέχεια του βιβλίου.

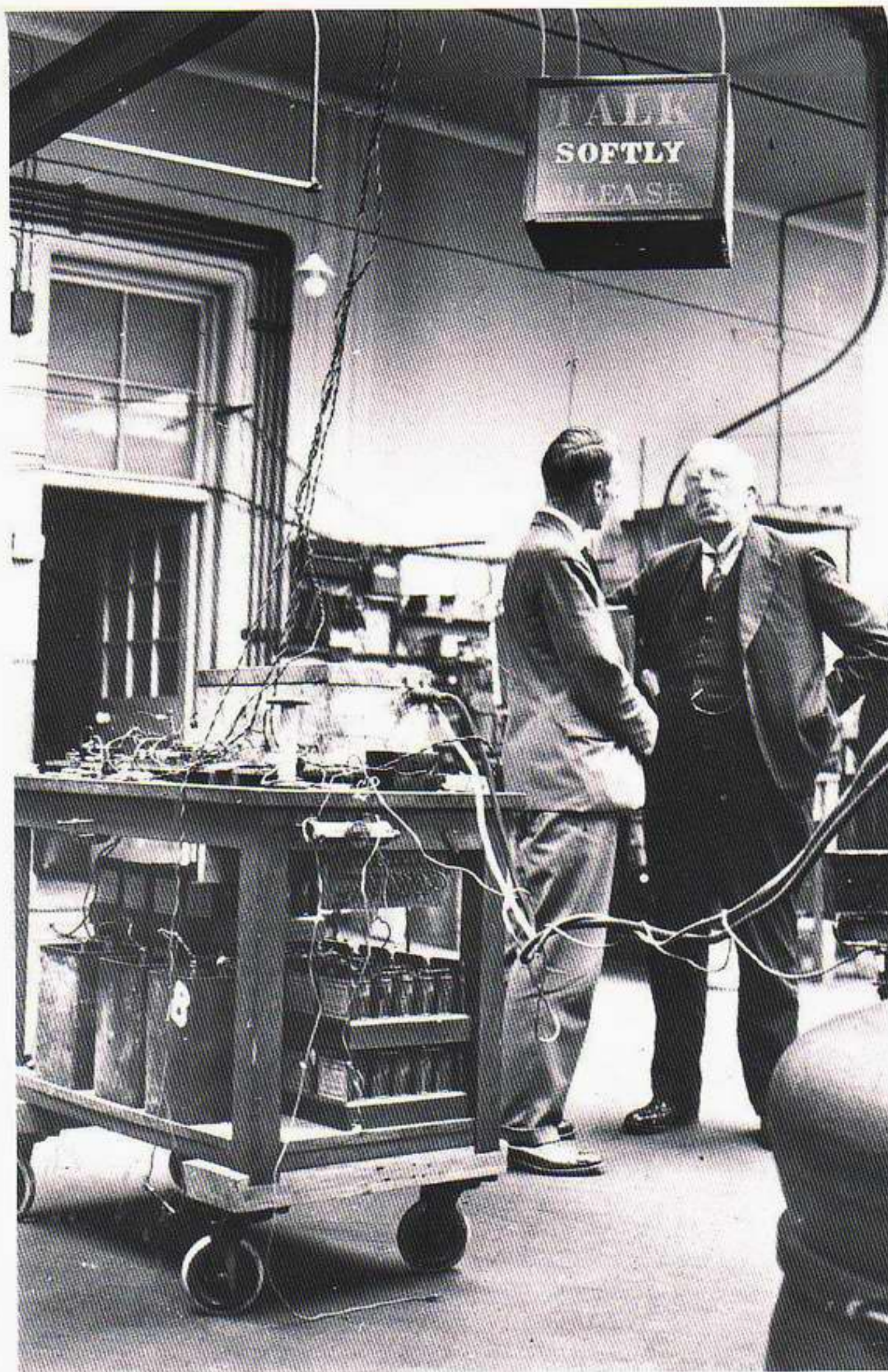
4 Άτομα και πυρήνες

Τα άτομα είναι τελείως αδύνατο να υπάρχουν από την άποψη της κλασικής φυσικής.

Richard Feynman

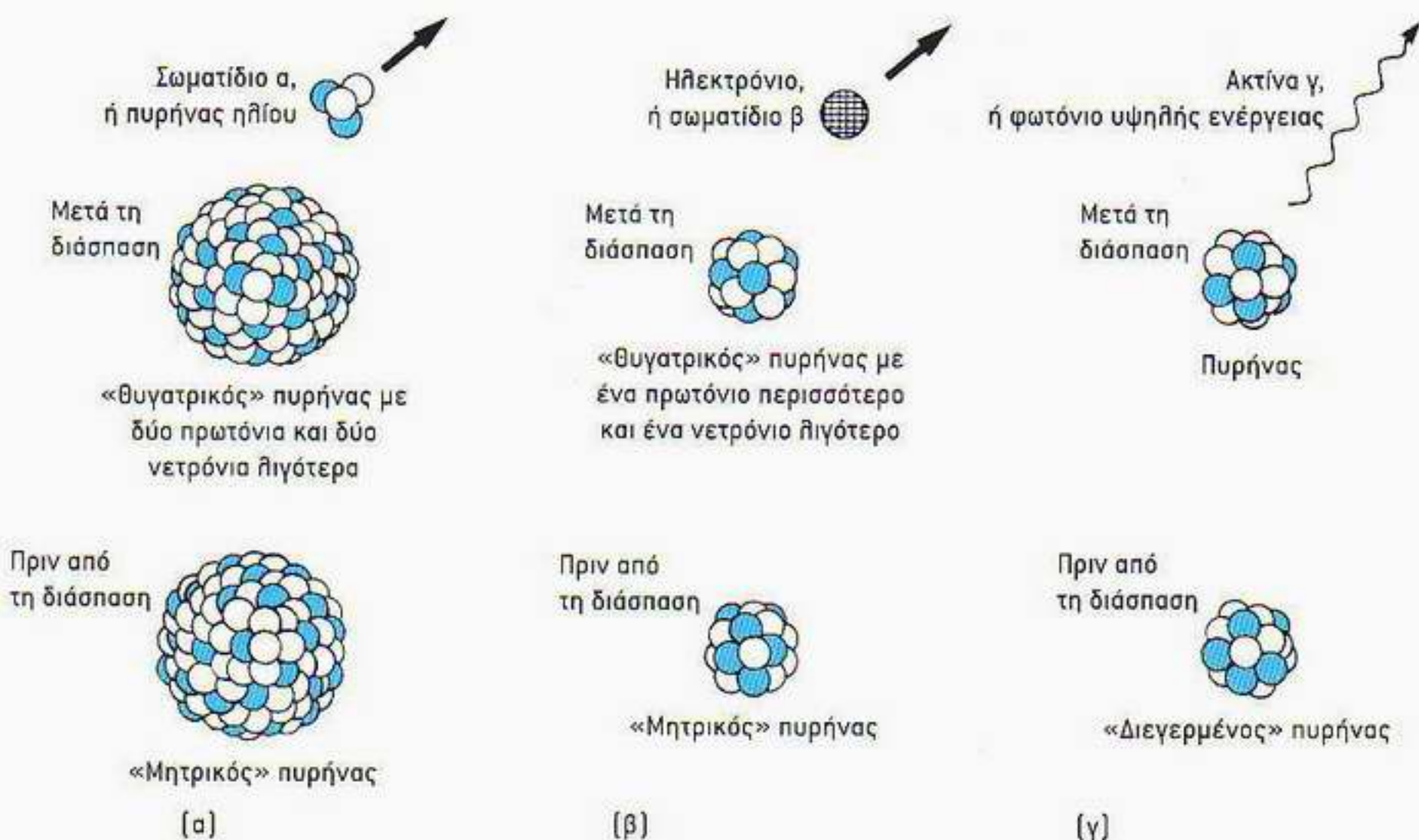
Το άτομο του Rutherford

Πριν από την κβαντική μηχανική, η κλασική φυσική δεν μπορούσε να εξηγήσει ούτε το μέγεθος ούτε τη σταθερότητα των ατόμων. Από τα πειράματα που άρχισε να διεξάγει το 1911 ο διάσημος νεοζηλανδός φυσικός Ernest Rutherford προέκυψε ότι όλη σχεδόν η μάζα και όλο το θετικό φορτίο του ατόμου βρίσκονται συγκεντρωμένα σε μια μικρή κεντρική περιοχή του ατόμου, την οποία ο Rutherford αποκάλεσε *πυρήνα*. Άρα, το μεγαλύτερο μέρος του ατόμου είναι κενός χώρος! (Στο Παράρτημα 1 υπάρχουν τα σχετικά μεγέθη των ατόμων, των πυρήνων και άλλων κβαντικών και κλασικών αντικειμένων.) Ο Rutherford, για τις εργασίες του στη ραδιενέργεια είχε τιμηθεί με το βραβείο Νόμπελ ήδη από το 1908. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η ραδιενέργεια οφείλεται στη «διάσπαση» του ασταθούς πυρήνα ορισμένων χημικών στοιχείων, κατά την οποία εκπέμπεται ακτινοβολία με τη μορφή ακτίνων α, β ή γ και προκύπτει ο πυρήνας ενός άλλου χημικού στοιχείου (Εκόνα 4.1). Όπως μπορείτε να φανταστείτε, οι φυσικοί χρειάστηκαν αρκετό χρόνο για να ξεδιαλύνουν τι ακριβώς συνέβαινε· ο δε Rutherford μπόρεσε να δείξει ότι οι θετικά φορτισμένες, βαριές, διεισδυτικές ακτίνες α ήταν στην πραγματικότητα άτομα ηλίου που είχαν χάσει τα δύο ηλεκτρόνιά τους. Επίσης διαπιστώθηκε ότι οι ακτίνες β δεν ήταν παρά ηλεκτρόνια, οι ακτίνες γ δε φωτόνια μεγάλης ενέργειας. Την εποχή εκείνη, κάθε εργασία που αναφερόταν στα διάφορα χημικά στοιχεία θεωρούνταν αρμοδιότητα των χημικών, και έτσι ο Rutherford βρέθηκε ξαφνικά να τιμάται με το Νόμπελ χημείας. Στο λόγο του, κατά την απονομή του βραβείου, σχολίασε ότι στη δουλειά του είχε παρακολουθήσει πολλούς μετασχηματισμούς σχετικούς με τη ραδιενέργεια, αλλά κανέναν τόσο ραγδαίο όσο ο δικός του από φυσικό σε χημικό!



Ο Ernest Rutherford (1871-1937), πρώτος βαρόνος Rutherford της Νέβσον, γεννήθηκε στη Νέα Ζηλανδία το 1871. Εδώ εικονίζεται να μιλάει με τον J. Ratcliffe στο Εργαστήριο Cavendish. Ο Rutherford είχε βροντερή φωνή που μπορούσε να απορρυθμίσει τα ευαίσθητα πειραματικά όργανα, και η επιγραφή «ΠΑΡΑΚΑΛΩ, ΟΜΙΛΕΙΤΕ ΣΙΓΑ» απευθυνόταν χάριν αστεϊσμού σε αυτόν. Ο Rutherford υπήρξε ένας από τους μεγαλύτερους πειραματικούς φυσικούς του 20ού αιώνα. Εκτός από τις επιτυχημένες έρευνές του στη ραδιενέργεια και την πυρηνική φυσική, επηρέασε και μια ολόκληρη γενιά βρετανών πειραματικών φυσικών.

Με ποιον τρόπο ο Rutherford ανακάλυψε την ύπαρξη του ατομικού πυρήνα; Χρησιμοποίησε την παραδοσιακή μέθοδο των φυσικών: εκτοξεύουμε ένα αντικείμενο πάνω σε κάποιο άλλο και μετά παρατηρούμε τι θα συμβεί. Ο Rutherford και οι συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ στην Αγγλία εκτόξευαν σωματίδια α από μια ραδιενεργό πηγή προς ένα πολύ λεπτό φύλλο χρυσού. Ταυτόχρονα παρακολουθούσαν προσεκτικά προς ποιες



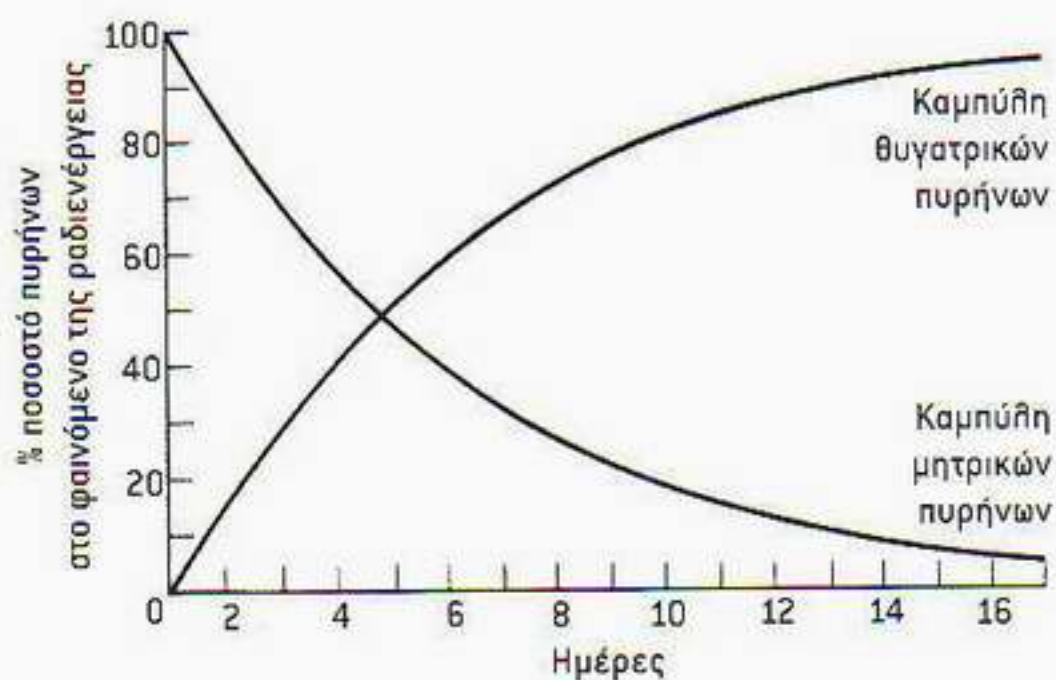
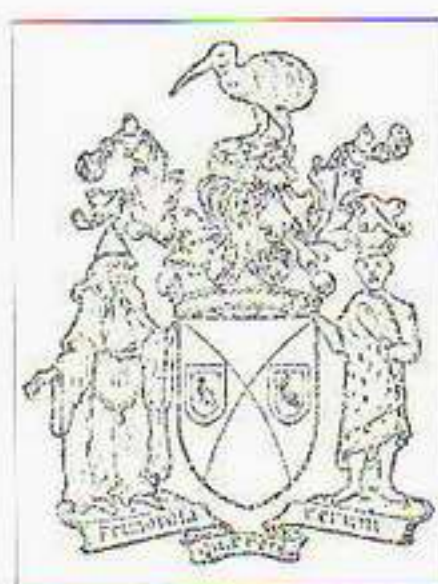
Εικόνα 4.1 Είδη ραδιενέργειας. (α) Οι ακτίνες α είναι πυρήνες ηλίου που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση ενός ασταθούς πυρήνα. Ο τελικός «θυγατρικός» πυρήνας έχει δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια λιγότερα από τον αρχικό «μητρικό». Στο σχήμα αυτό οι γαλάζιοι κύκλοι αναπαριστούν τα πρωτόνια και οι λευκοί τα νετρόνια. (β) Το σωματίδιο β είναι ένα ηλεκτρόνιο που απελευθερώνεται από έναν ασταθή πυρήνα καθώς αυτός διασπάται. Ο πυρήνας που προκύπτει μετά τη διάσπαση του «μητρικού» πυρήνα έχει ένα επιπλέον πρωτόνιο και ένα λιγότερο νετρόνιο. (γ) Οι ακτίνες γ δεν είναι παρά φωτόνια μεγάλης ενέργειας που απελευθερώνονται κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από μια «διεγερμένη» κατάσταση σε μια ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση. Ο αριθμός των πρωτονίων και των νετρονίων του πυρήνα παραμένει αμετάβλητος.

κατευθύνσεις σκεδάζονταν τα σωματίδια. Τον περισσότερο χρόνο, τα σωματίδια απέκλιναν πολύ λίγο από την αρχική τους διεύθυνση· κάπου κάπου, ωστόσο, ανακλώνταν κατά μεγάλες γωνίες. Ο Rutherford περιέγραψε την έκπληξή του για τα αποτελέσματα πολύ χαρακτηριστικά:

Ήταν το πιο απίστευτο γεγονός που μου συνέβη σε όλη μου τη ζωή. Ήταν τόσο απίστευτο όσο το να εκτοξεύατε ένα βλήμα 15 ιντσών προς ένα τοιγαρόχαρτο, και αυτό να επέστρεφε και να έσκαγε στο κεφάλι σας!

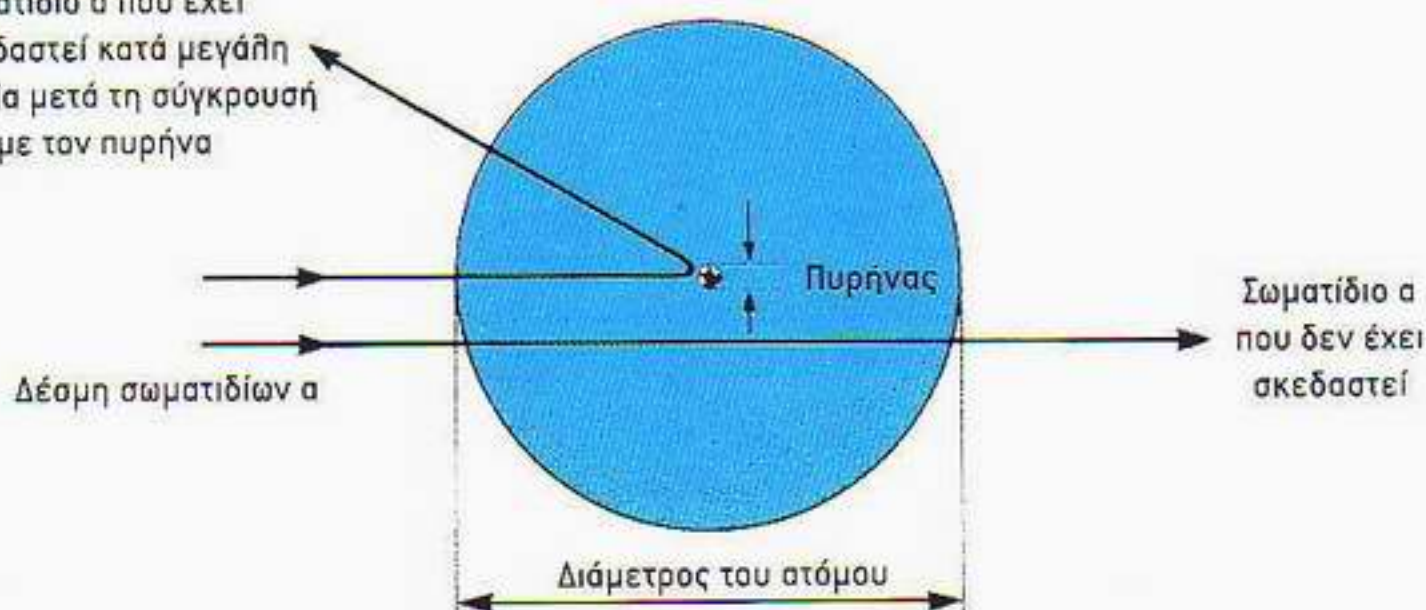
Ο Rutherford προβληματίστηκε με τα αποτελέσματα αυτά για αρκετές εβδομάδες, και τελικά κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα σωματίδια α θα μπορούσαν να σκεδαστούν κατά τόσο μεγάλες γωνίες μόνο αν συγκρούονταν με μια πολύ μικρή και συμπαγή περιοχή ύλης στο εσωτερικό του ατόμου —δηλαδή, τον πυρήνα του.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι ο πυρήνας του ατόμου συνίσταται από σωματίδια που ονομάζονται *πρωτόνια* (έχουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο ίσο και αντίθετο από το φορτίο του ηλεκτρονίου) και *νετρόνια* (είναι ηλεκτρικά ουδέτερα). Και τα δύο είναι 2.000 φορές περίπου βαρύτερα από το ηλεκτρόνιο, οπότε το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του ατόμου βρίσκεται στον πυρήνα. Η ύπαρξη διάφορων χημικών στοιχείων εξηγείται από τους διαφορετικούς α-



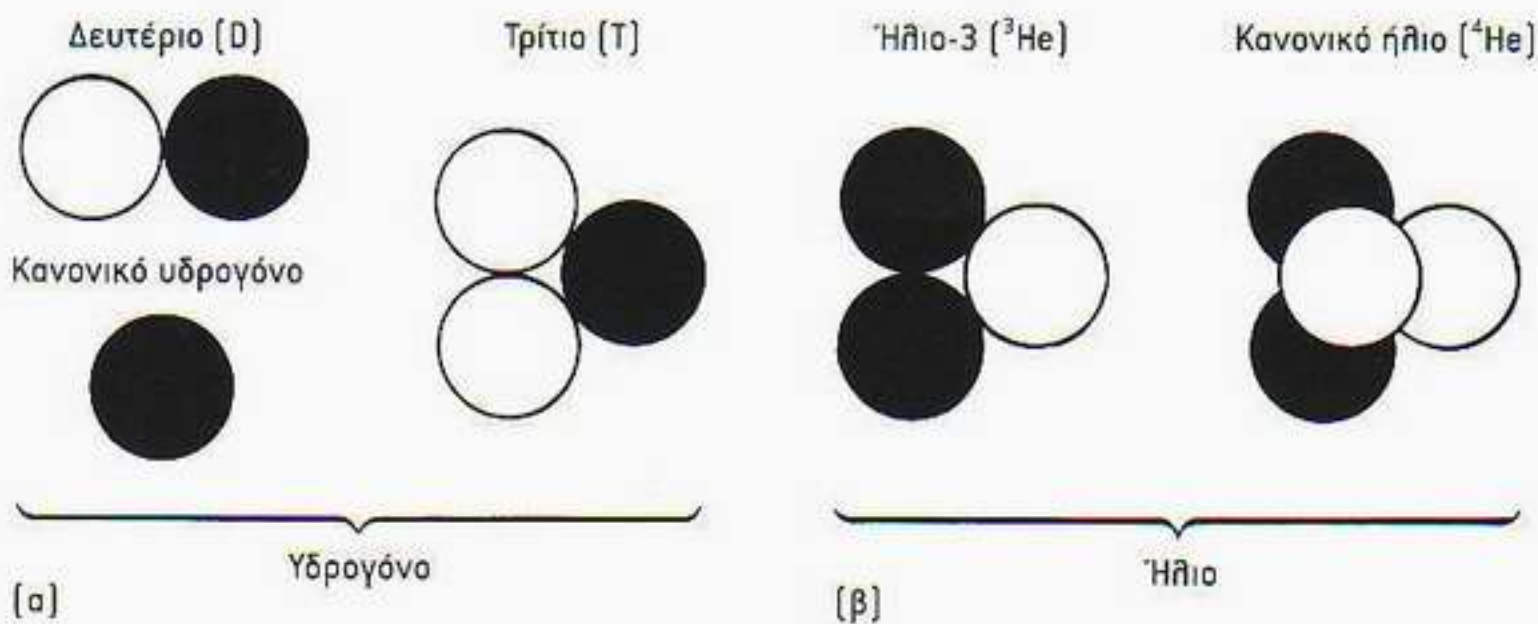
Το οικόσημο του λόρδου Rutherford. Ο Rutherford έγινε βαρόνος το 1931 και αποφάσισε να συνδέσει το όνομά του με την πόλη Νέησον της Νέας Ζηλανδίας, τη γενέτειρά του. Το πουλί κίονι στο πάνω μέρος και ο ιθαγενής Μαορί δεξιά, με το ρόμπο στο χέρι, μαρτυρούν την αγάπη του για τη Νέα Ζηλανδία. Παρατηρήστε τις δύο καμπύλες πάνω στην ασπίδα. Προέρχονται από ένα γράφημα του διάσημου άρθρου του για τη ραδιενέργεια. Αριστερά της ασπίδας απεικονίζεται ο Ερμής ο Τριαμέγιστος, όπως ονομαζόταν ο θεός θωβ των αρχαίων Αιγυπτίων, ο οποίος θεωρούνταν υπεύθυνος για μυστηριώδη πράγματα, όπως η αλχημεία. Και όλα αυτά ταιριάζουν εδώ, αφού, υπό μια έννοια, ο Rutherford τιμήθηκε με το Νόμπελ για κάποιο είδος σύγχρονης αλχημείας. Το ρητό κάτω σημαίνει: «Να αναζητούμε τις απαρχές των πραγμάτων.»

Σωματίδιο α που έχει σκεδαστεί κατά μεγάλη γωνία μετά τη σύγκρουσή του με τον πυρήνα



Εικόνα 4.2 Η εικόνα εξηγεί το πείραμα του Rutherford για τη σκέδαση των σωματιδίων α. Ο πυρήνας είναι περίπου εκατό χιλιάδες φορές μικρότερος από το άτομο [εδώ παρουσιάζεται μεγεθυσμένος, αλλά και πάλι φαίνεται καλά ότι το άτομο είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος του κενός χώρος]. Μόνο αν ένα σωματίδιο α τύχει να συγκρουστεί με τον πολύ μικρό πυρήνα θα σκεδαστεί κατά μεγάλη γωνία —και αυτό συμβαίνει πολύ σπάνια.

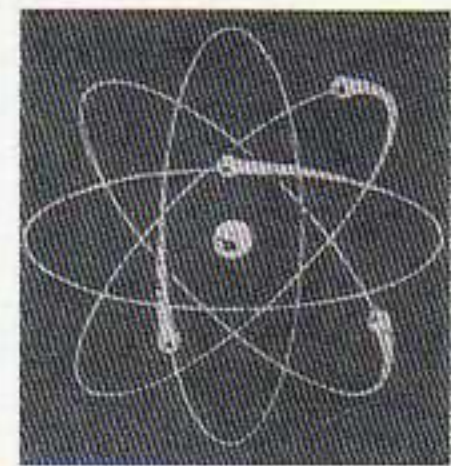
ριθμούς πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα. Ακόμη, τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται μέσα στον πολύ μικρό όγκο του πυρήνα από δυνάμεις που είναι πάρα πολύ μεγαλύτερες από την ηλεκτρική άπωση μεταξύ των πρωτονίων. Αυτές οι «ισχυρές δυνάμεις» επιτρέπουν το συνδυασμό μόνο ορισμένου αριθμού νετρονίων με ορισμένο αριθμό πρωτονίων προκειμένου να σχηματιστούν σταθεροί πυρήνες. Ο πιο απλός πυρήνας είναι αυτός του υδρογόνου, αφού αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο. Οι επόμενοι πιο απλοί πυρήνες είναι αυτοί του πλίου (τα σωματίδια α), με δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Σε ένα ουδέτερο άτομο το θετικό ηλεκτρικό φορτίο του πυρήνα εξισορροπείται από το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο των ηλεκτρονίων. Το άτομο



Εικόνα 4.3 Ισότοπα του υδρογόνου και του ηλίου. Οι μαύροι κύκλοι αναπαριστούν πρωτόνια και οι λευκοί νετρόνια. [α] Δευτέριο και τρίτιο. [β] Ήλιο-3 (^3He) και κανονικό ήλιο (^4He).

του υδρογόνου έχει ένα ηλεκτρόνιο, ενώ του πλίου δύο. Αυτό που προσδιορίζει τον χημικό χαρακτήρα των ατόμων είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων τους —αριθμητικά, το πλήθος των ηλεκτρονίων κάθε ατόμου ισούται με το πλήθος των πρωτονίων του. Έτσι, αν και οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις συχνά επιτρέπουν στον πυρήνα ενός χημικού στοιχείου να υπάρχει με διαφορετικές μορφές —οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς αριθμούς νετρονίων—, όλα αυτά τα «ισότοπα» έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, ο πυρήνας των ατόμων του αερίου νέου, τις πιο πολλές φορές έχει πυρήνα με δέκα πρωτόνια και δέκα νετρόνια. Στη φύση, ωστόσο, υπάρχουν και δύο άλλες ποικιλίες αυτού του χημικού στοιχείου με πυρήνες που φέρουν έντεκα και δώδεκα νετρόνια. Επειδή όμως αυτά τα ισότοπα νέου έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων —επομένως και τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων—, έχουν και τις ίδιες χημικές ιδιότητες. Ομοίως, υπάρχουν μερικά σπάνια ισότοπα υδρογόνου με ένα πρωτόνιο και ένα ή δύο νετρόνια στον πυρήνα. Αυτά τα ισότοπα υδρογόνου ονομάζονται «δευτέριο» και «τρίτιο», αντίστοιχα, και αργότερα θα δούμε ότι είναι σημαντικά στις πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό των άστρων και στα πυρηνικά όπλα. Μερικά ισότοπα, ιδιαίτερα των βαρέων στοιχείων, είναι ασταθή και υφίστανται ραδιενεργό διάσπαση μεταπίπτοντας σε πιο σταθερά άτομα. Θα επιστρέψουμε στα ειδικά αυτά θέματα σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο Rutherford απεικόνισε το άτομο ως μια μικρογραφία του ηλιακού συστήματος, με τα ηλεκτρόνια να περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο. Οι σχετικά μεγάλες τροχιές των ηλεκτρονίων θα μπορούσαν λοιπόν να εξηγήσουν το μεγάλο μέγεθος του ατόμου σε σύγκριση με το μέγεθος του πυρήνα. Το άτομο ως σύνολο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, και τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται σε τροχιές από την ηλεκτρική έλξη ανάμεσα σε αυτά και τον θετικά φορτισμένο πυρήνα. Δυστυχώς για την κλασική φυσική, όλη αυτή η διάταξη δεν μπορεί να λειτουργήσει. Τα ηλεκτρόνια, για να παραμένουν σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα, πρέπει να αλλάζουν συνεχώς διεύθυνση. Δεν μπορούν λοιπόν να κινούνται ευθύγραμμα. Με άλλα λόγια, πρέπει να επιταχύνονται συνεχώς «με κατεύθυνση προς τον πυρήνα». Σύμφωνα όμως με τους καλά θεμελιωμένους νόμους του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού, ένα φορτισμένο σωματίδιο που επιταχύνεται θα πρέπει να ακτινοβολεί φως. Επομένως, η κλασική φυσική προβλέπει ότι τα ηλεκτρόνια, ακτινοβολώντας συνεχώς, θα χάσουν την ενέργειά τους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, οπότε, έχοντας ακολουθήσει σπειροειδή τροχιά, θα πέφτουν τελικά πάνω στον πυρήνα!



Εικόνα 4.4. Το έμβλημα της Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ, που δείχνει σχηματικά το μοντέλο του ατόμου των Rutherford και Bohr. Ηλεκτρόνια διαγράφουν τροχιές γύρω από έναν πυρήνα, όμοιες με τις τροχιές των πλανητών στο ηλιακό μας σύστημα.



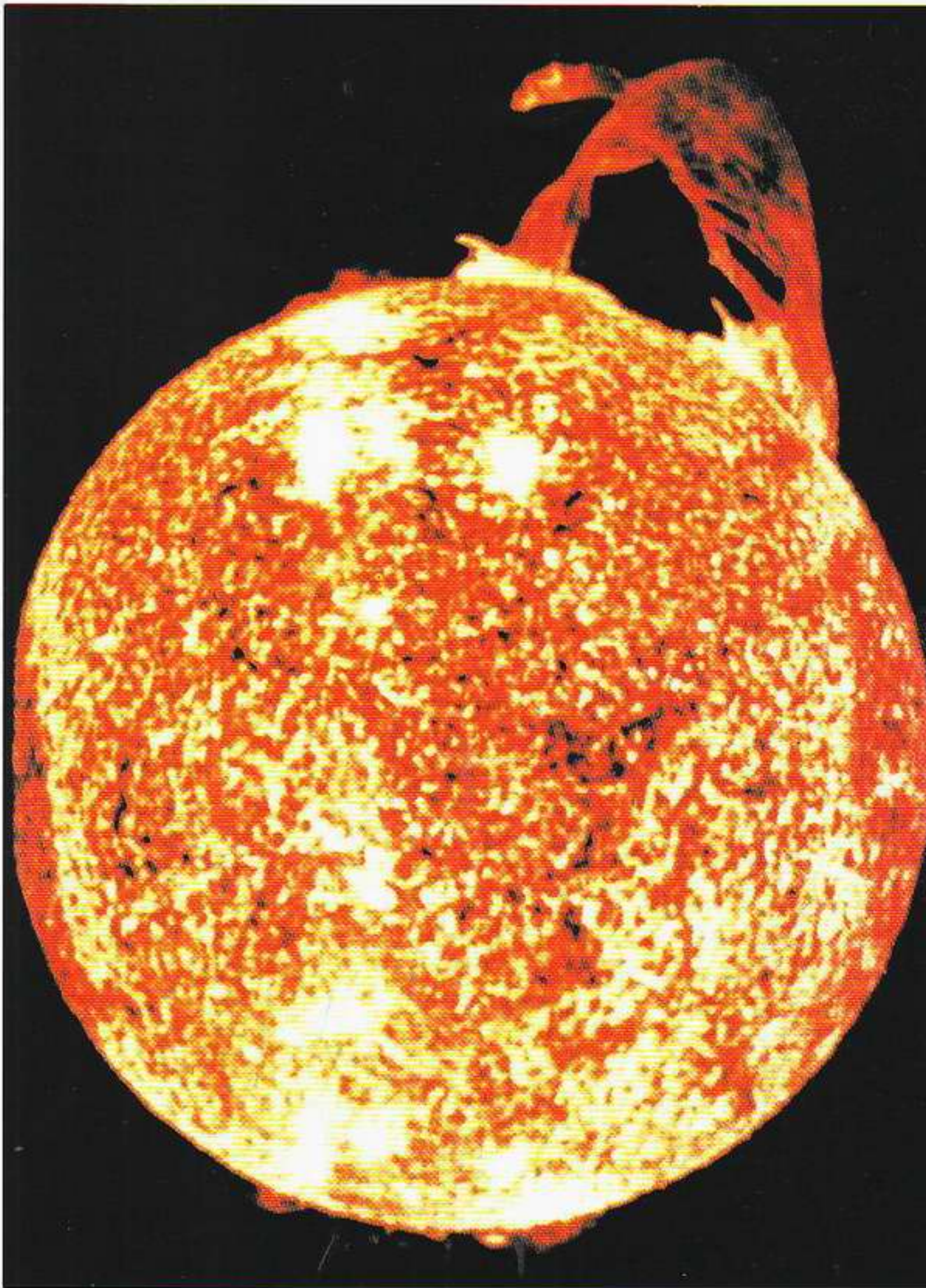
Ο Niels Bohr (1885-1962) επηρεάστηκε πάρα πολύ από τον Rutherford και συνεργάστηκε μαζί του όταν οικοδομούσε το δικό του μοντέλο για το άτομο. Ο Bohr προσπαθούσε πάντα να είναι πολύ σαφής όταν αναφερόταν στην κβαντική θεωρία. Κατά παράδοξο τρόπο, αυτό τον έκανε να φαίνεται πολύ σκοτεινός σε όποιον τον πρωτάκουγε! Εντούτοις, υπήρξε χωρίς αμφιβολία ένας από τους σημαντικότερους επιστήμονες του 20ού αιώνα. Θεωρούνταν αυθεντία σε ζητήματα ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής. Είναι επίσης πασίγνωστη η πολύχρονη διαμάχη του με τον Αϊνστάιν για τη φιλοσοφική βάση της κβαντικής μηχανικής. Ο Bohr αντέκρουσε επανειλημμένως τα επιχειρήματα του Αϊνστάιν, ο οποίος όμως έμεινε αμετάλυστος ως το τέλος της ζωής του.

Στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής δεν υπάρχει απάντηση σε τούτα τα προβλήματα. Λίγο μετά τον Rutherford, ο νεαρός δανός φυσικός Niels Bohr έριξε και άλλο λάδι στη φωτιά που κατέκαιε τη φυσική του 19ου αιώνα. Ο Bohr, ο οποίος βρισκόταν στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ μαζί με τον Rutherford, αναγνώρισε με τόλμη ότι, παρ' όλες τις δυσκολίες, θα πρέπει να υπήρχε κάποια δόση αλήθειας στο «πλανητικό μοντέλο» του ατόμου. Επινόησε λοιπόν τότε ένα είδος «συνταγολογίου», με κανόνες για τον υπολογισμό ορισμένων σταθερών ηλεκτρονιακών τροχιών, για τις οποίες οι νόμοι της κλασικής φυσικής ήταν «αναποτελεσματικοί». Για να καταλάβουμε τι οδήγησε τον Bohr στους κανόνες αυτούς και γιατί οι φυσικοί τούς πήραν στα σοβαρά, θα πρέπει πρώτα να αποκαλύψουμε ένα άλλο πρόβλημα της κλασικής φυσικής και να αναφερθούμε σε έναν ελβετό δάσκαλο των μαθηματικών ονόματι Johann Jakob Balmer.

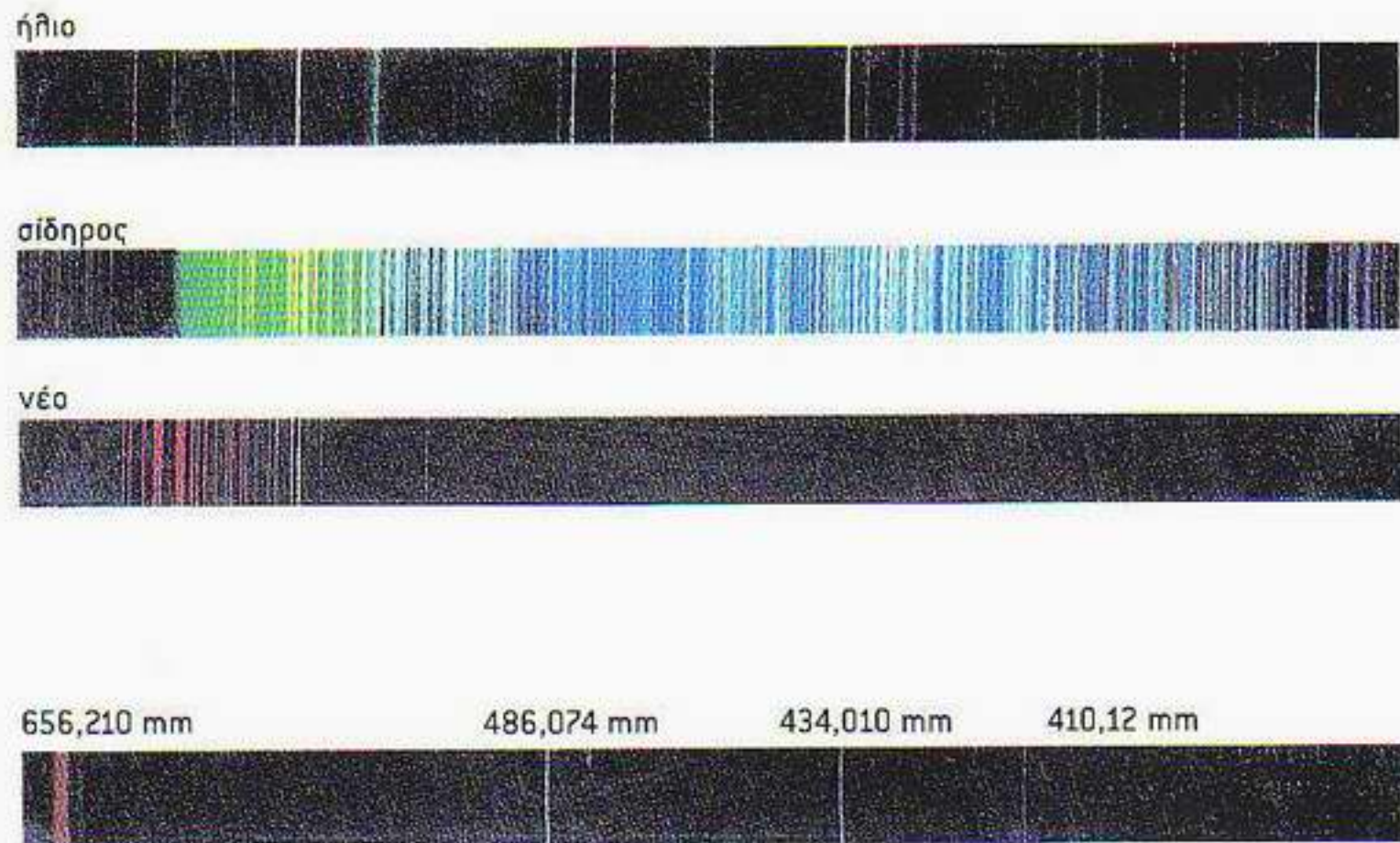
Οι φυσικοί συνήθιζαν «να διασκεδάζουν» δημιουργώντας ηλεκτρικούς σπινθήρες σε σωλήνες που περιείχαν διάφορα αέρια. Βρήκαν λοιπόν ότι κάθε αέριο εκπέμπει φως με ένα χαρακτηριστικό φάσμα —με ορισμένα μόνο μήκη κύματος. Τα φάσματα αυτά ονομάζονται *γραμμικά*, χρησιμοποιούνται δε για την ταυτοποίηση των διάφορων χημικών στοιχείων. Πράγματι, το στοιχείο ήλιο ανακαλύφθηκε αρχικά στο ηλιακό φως: η Εικόνα 4.5 δείχνει μια άποψη του Ήλιου σε φως πλίου. Μερικά γραμμικά φάσματα εξηγούνται απλά, όπως το φάσμα του υδρογόνου, του πλίου και των αλκαλικών στοιχείων, αλλά τα περισσότερα είναι περίπλοκα (Εικόνα 4.6). Η κλασική φυσική αδυνατεί να εξηγήσει ακόμη και τη σταθερότητα των ατόμων, πόσω μάλλον τις λεπτομέρειες των φασμάτων τους. Στο σημείο αυτό, λοιπόν, κάνει την εμφάνισή του ένας περίεργος άνθρωπος, ο ελβετός μαθηματικός Johann Jakob Balmer (1825-1898), ο οποίος και κέρδισε μια θέση στην αιωνιότητα με τη συμβολή του που θα μνημονεύεται εσαεί στα εγχειρίδια φυσικής. Ο Balmer πίστευε ότι ο κόσμος διεπόταν από κάποια «ενοποιημένη αρμονία», και έκανε σκοπό της ζωής του να βρει τρόπο να εκφράσει αυτές τις αρμονικές σχέσεις αριθμητικά. Καυχιόταν ότι, αν του δώσουν τέσσερεις οποιουσδήποτε αριθμούς, μπορούσε να βρει μια σχέση που να τους συνδέει. Το 1865, ο Balmer, σε ηλικία σαράντα ετών, έγραψε ένα άρθρο στο οποίο εξηγούσε το όραμα του ναού που είχε δει ο προφήτης Ιεζεκιήλ. Είκοσι χρόνια μετά, το 1885, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις τού Anders Jonas Angstrom για τις συχνότητες των πρώτων τεσσάρων φασματικών γραμμών του υδρογόνου, ο Balmer επινόησε τον περίφημο τύπο που φέρει το όνομά του:

$$\lambda = \frac{(364,5)n^2}{(n^2 - 4)},$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος σε νανόμετρα (δισεκατομμυριοστά του μέτρου), ενώ το n παίρνει τις τιμές 3, 4, 5 και 6! Ο τύπος αυτός λειτουργούσε με απίστευτη ακρίβεια, αλλά παρέμενε μυστηριώδης ώσπου τον απέδειξε ο Niels Bohr μαζί με το φίλο και συνεργάτη του Hans Marius Hansen. Όπως είπε ο ίδιος αργότερα, «το καθετί έγινε ξεκάθαρο», οι δε επιτρεπόμενες τροχιές των ηλεκτρονίων τού Bohr όχι μόνο εξηγούνταν από τη σχέση τού Balmer, αλλά μπορούσαν να προβλεφθούν και νέες φασματικές γραμμές στο γραμμικό φάσμα του υδρογόνου. Τα μήκη κύματος των γραμμών αυτών δίνονται από μια σχέση όμοιας μορφής με τη σχέση τού Balmer, αν εξαιρέσουμε τον παρονομαστή που τώρα έγινε $(n^2 - m^2)$, με το m να παίρνει οποιαδήποτε ακέραια τιμή



Εικόνα 4.5 Ο Ήλιος εκπέμπει φως σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Διαφορετικά μέρη του φάσματος μας πληροφορούν για διαφορετικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών που επιτελούνται στον Ήλιο. Είναι ιδιαίτερα αποκαθυστικό το να χρησιμοποιήσουμε ένα φίλτρο το οποίο αφήνει να περνά φως με μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε μια φασματική γραμμή ενός συγκεκριμένου στοιχείου. Στη φωτογραφία αυτή έχουμε μια εικόνα του Ήλιου με φως μήκους κύματος που αντιστοιχεί σε μια υπεριώδη γραμμή του φάσματος του ηλίου. Η εικόνα έχει χρωματιστεί με υπολογιστή και οι κίτρινες περιοχές αναπαριστούν τα μέρη όπου υπάρχει η πιο ισχυρή εκπομπή. Η φωτογραφία ελήφθη από τον διαστημικό σταθμό Skylab και απεικονίζει μια περιοχή της κατώτερης ηλιακής ατμόσφαιρας με θερμοκρασία 10.000 με 20.000 βαθμούς Κελσίου. Δείχνει τον Ήλιο με κηλίδες, αλλά τονίζει και μια εντυπωσιακή ασπίδα από υλικό που απωθείται από μαγνητικές δυνάμεις.



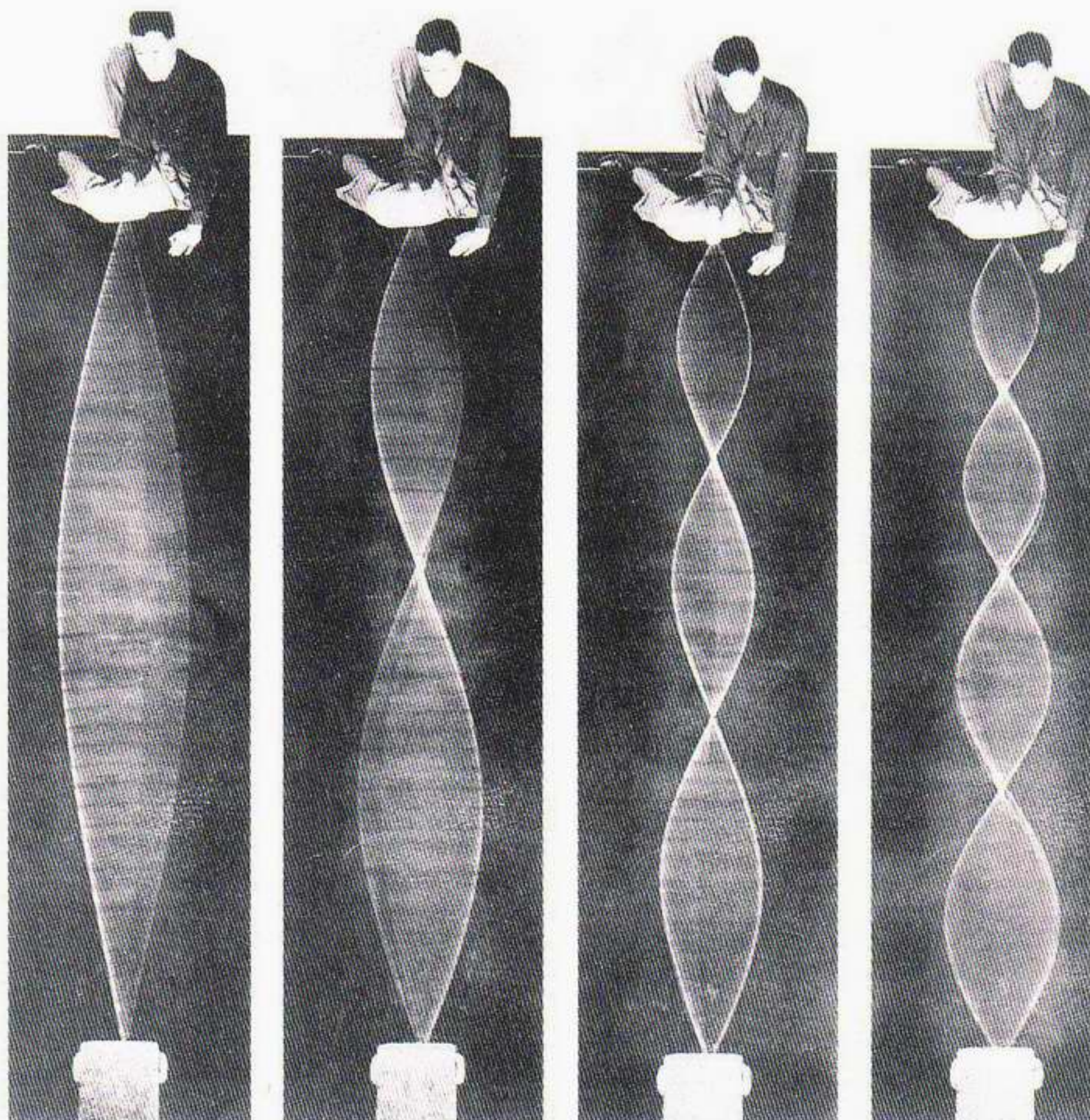
Εικόνα 4.6 Από κάθε στοιχείο σε αέρια μορφή παίρνουμε ένα χαρακτηριστικό φάσμα απορρόφησης όταν συμβεί μια ηλεκτρική εκκένωση στο εσωτερικό του. Το φως της εκκένωσης που φτάνει σε μας μπορούμε να το διαχωρίσουμε σε διαφορετικά μήκη κύματος, διοχετεύοντάς το στο πρίσμα ενός φασματογράφου. Κάθε στοιχείο έχει τη δική του μοναδική σειρά φασματικών γραμμών, που μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα είδος «δακτυλικών αποτυπωμάτων» για την παρουσία του. Στο κάτω μέρος της εικόνας υπάρχει το φάσμα του υδρογόνου. Προσέξτε πόσο πιο απλό είναι από το φάσμα του σιδήρου.

(και όχι μόνο το 2, όπως στον αρχικό τύπο του Balmer). Αφού επιβεβαιώθηκαν πειραματικά όλες οι νέες γραμμές, οι φυσικοί αναγκάστηκαν να λάβουν σοβαρά υπόψη τους το μοντέλο του Bohr, παρόλο που σε αυτό οι νόμοι της φυσικής «αναστέλλονταν» με φανερά αυθαίρετο τρόπο. Ο Bohr ανέπτυξε το μοντέλο του το 1913. Αλλά μόλις το 1926 ο Schrödinger μπόρεσε να εξηγήσει τους νόμους του Bohr χρησιμοποιώντας τη νέα θεωρία, την κβαντική μηχανική.

Κβάντωση της ενέργειας

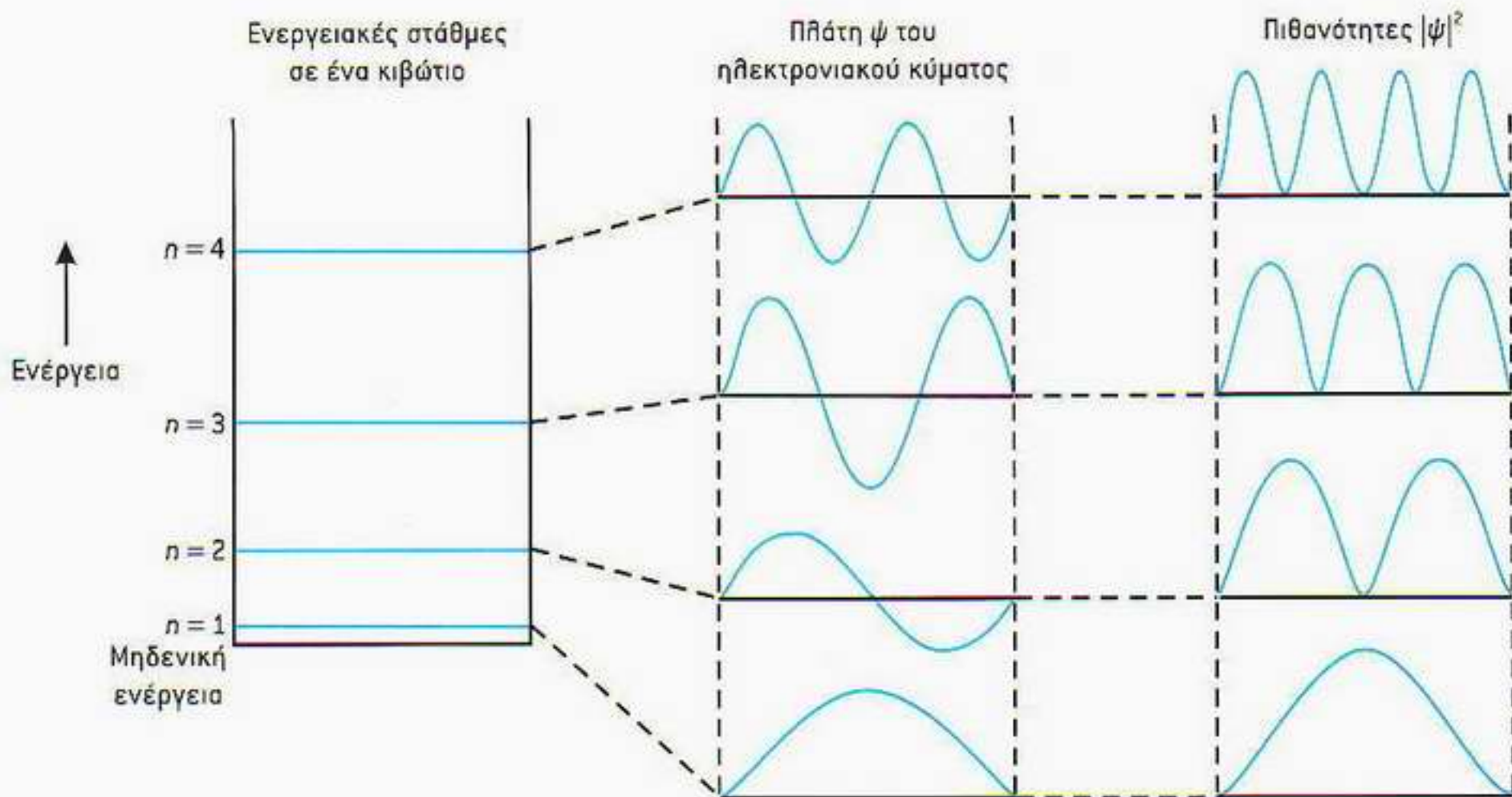
Η ιδέα που οδήγησε τον Bohr στην κατανόηση του γραμμικού φάσματος του υδρογόνου ήταν ότι τα ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τον πυρήνα επιτρέπεται να βρίσκονται μόνο σε ορισμένες τροχιές. Αν αγνοήσουμε προς στιγμήν το πρόβλημα ότι όλες οι τροχιές θα έπρεπε να είναι ασταθείς αφού τα ηλεκτρόνια όφειλαν να ακτινοβολούν ενέργεια, τότε καθεμία από αυτές τις τροχιές αντιστοιχεί σε ορισμένη ενέργεια για τα ηλεκτρόνια —λέμε μάλιστα ότι η ενέργεια είναι *κβαντωμένη*. Αυτό δεν συμφωνεί καθόλου με την καθημερινή μας εμπειρία. Στο παράδειγμα που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το βαγονάκι ανεβοκατεβαίνει στη οδηροτροχιά ξεκινώντας από όποιο ύψος θέλουμε —όπερ σημαίνει ότι η ολική ενέργεια του βαγονιού μπορεί να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή (Εικόνα 3.3). Πώς τότε η κβαντική μηχανική οδηγεί στην κβάντωση της ενέργειας και στις σταθερές τροχιές;

Η απάντηση και στα δύο προβλήματα έγκειται στις κυματικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, οι ενέργειες που



Εικόνα 4.7 Στάσιμα κύματα σε μια χορδή. Ο χρόνος λήψης της φωτογραφίας είναι πιο μεγάλος από την περίοδο της δόνησης, και έτσι η φωτογραφία καταγράφει πιο καθαρά τις θέσεις όπου η χορδή κινείται βραδύτερα. Προσέξτε ότι υπάρχουν θέσεις (δεσμοί) όπου η χορδή παραμένει συνεχώς ακίνητη.

επιτρέπεται να έχουν τα ηλεκτρόνια βρίσκονται αν λύσουμε την κυματική εξίσωση του Schrödinger με τον κατάλληλο όρο δυναμικής ενέργειας Δ . Ευτυχώς, μπορούμε να δούμε πώς προκύπτει η κβάντωση της ενέργειας χωρίς να μπούμε στη φασαρία να λύσουμε την εξίσωση του Schrödinger. Φανταστείτε ένα δυναμικό σαν του παραδείγματός μας με το βαγονάκι, αλλά όπου τώρα οι πλευρές είναι πολύ υψηλές και κατακόρυφες και η περιοχή του κατώτερου σημείου πλατιά και επίπεδη, σαν να έχουμε ένα «ψηλό κιβώτιο» (ένα «πηγάδι», ή «φρέαρ») μέσα στο οποίο να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο. Το πρόβλημα εύρεσης των «επιτρεπόμενων ενεργειών» αυτού του κβαντικού συστήματος είναι τώρα ίδιο με το κλασικό πρόβλημα εύρεσης των λύσεων της κυματικής εξίσωσης σε μια χορδή με τα δύο άκρα της πακτωμένα (βλ. Εικόνα 4.7). Στην



Εικόνα 4.8 Οι ενεργειακές στάθμες για ένα κβαντικό σωματίδιο εγκλωβισμένο σε ένα κιβώτιο δηλώνονται με τον κβαντικό αριθμό n . Η μεσαία εικόνα δείχνει τις αντίστοιχες κυματικές εικόνες και η δεξιά τις διαμορφώσεις πιθανότητας για το σωματίδιο —αυτές είναι ακριβώς τα τετράγωνα των κυματικών πλάτων.

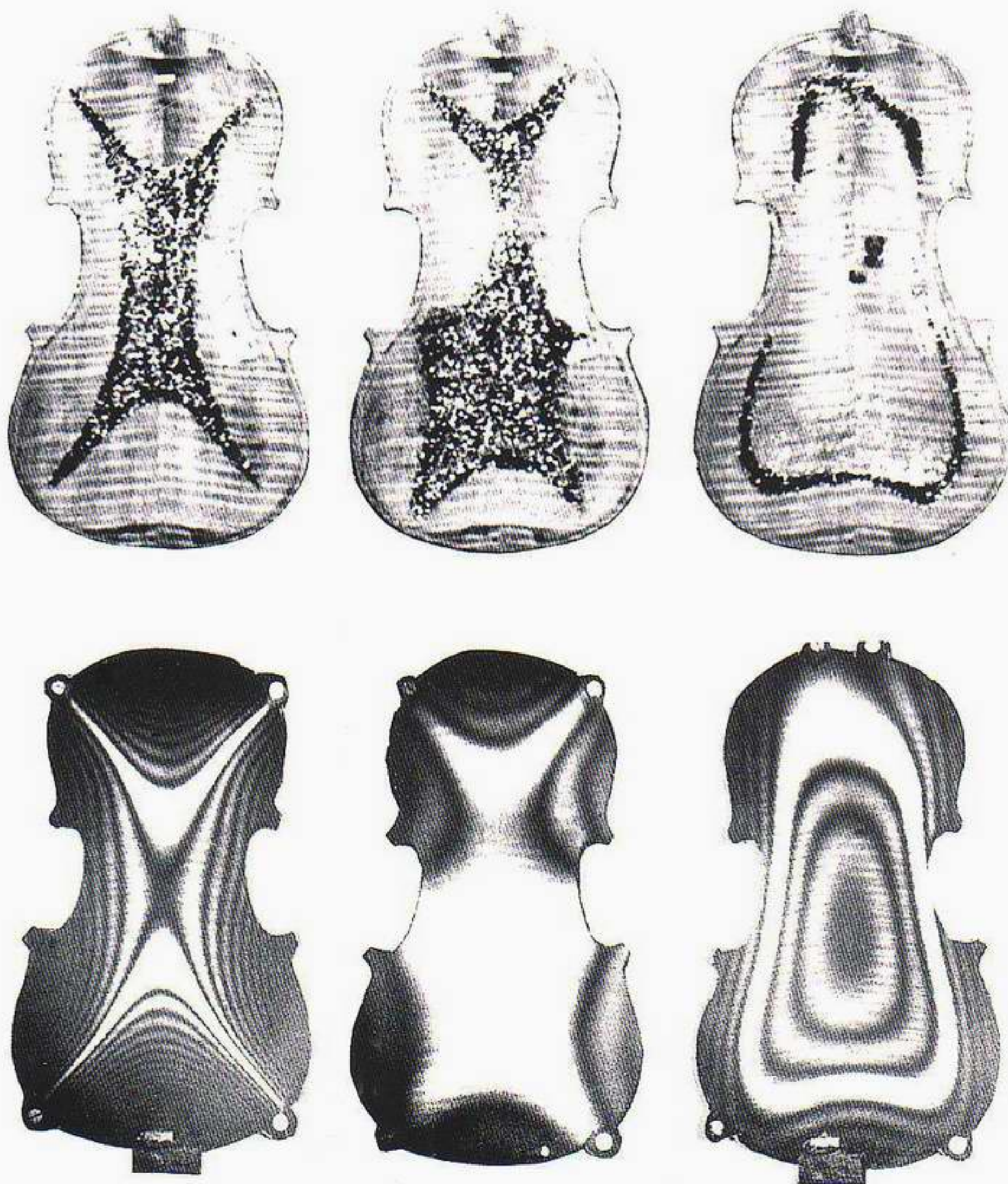
περίπτωση του ηλεκτρονίου, τα απότομα τοιχώματα του κιβωτίου δυναμικού δρουν σαν τα στερεωμένα άκρα της δονούμενης χορδής αλλά, αντί των συνήθων κυμάτων που έχουμε στη χορδή, τώρα έχουμε κύματα πιθανότητας. Για τη χορδή —όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.7—, μόνο συγκεκριμένα μήκη κύματος μπορούν να «χωρέσουν» επακριβώς μεταξύ των στερεωμένων άκρων της. Αυτά τα μήκη κύματος —το «θεμελιώδες» και οι «ανώτερες αρμονικές», όπως λέμε— καθορίζουν τους ήχους που παράγουν τα έγχορδα όργανα. Ανάλογα στην κβαντική μηχανική, επιτρέπεται να έχουμε ορισμένα μόνο πλάτη πιθανότητας με το καθένα να αντιστοιχεί σε ορισμένη ενέργεια του ηλεκτρονίου. Αυτή είναι η αφετηρία των κβαντωμένων ενεργειών του Bohr. Από την κλασική άποψη, μια μπάλα μέσα σε ένα κιβώτιο μπορεί να κινείται με οποιαδήποτε ενέργεια· από την άποψη όμως της κβαντικής μηχανικής, ένα ηλεκτρόνιο μέσα σε ένα κιβώτιο δυναμικού επιτρέπεται να έχει μόνο ορισμένες τιμές ενέργειας.

Το συγκεκριμένο παράδειγμα φωτίζει αρκετά γενικά χαρακτηριστικά της κβαντικής μηχανικής. Οι μαθηματικές λεπτομέρειες περιέχονται στο Παράρτημα 2, αλλά μπορούμε να φανταστούμε τις μορφές των πλάτων πιθανότητας του ηλεκτρονίου από την αναλογία με το παράδειγμα της χορδής. Στην Εικόνα 4.8 φαίνονται αυτές οι «κυματοσυναρτήσεις» μαζί με μια κλίμακα που δείχνει σε ποια ενέργεια του ηλεκτρονίου αντιστοιχούν. Το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε είναι ότι η μικρότερη ενέργεια του ηλεκτρονίου δεν ισούται με μηδέν. Εφόσον η απροσδιοριστία στη θέση του ηλεκτρονίου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος του κιβωτίου, η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg απαιτεί ορισμένη ελάχιστη ενέργεια. Ακόμα και όταν το ηλεκτρόνιο έχει τη μικρότερη δυνατή ενέργειά του —όταν βρίσκεται στην επωνομαζόμενη *θεμελιώδη κατάσταση*—, δεν μπορεί να είναι ακίνητο —πρέπει

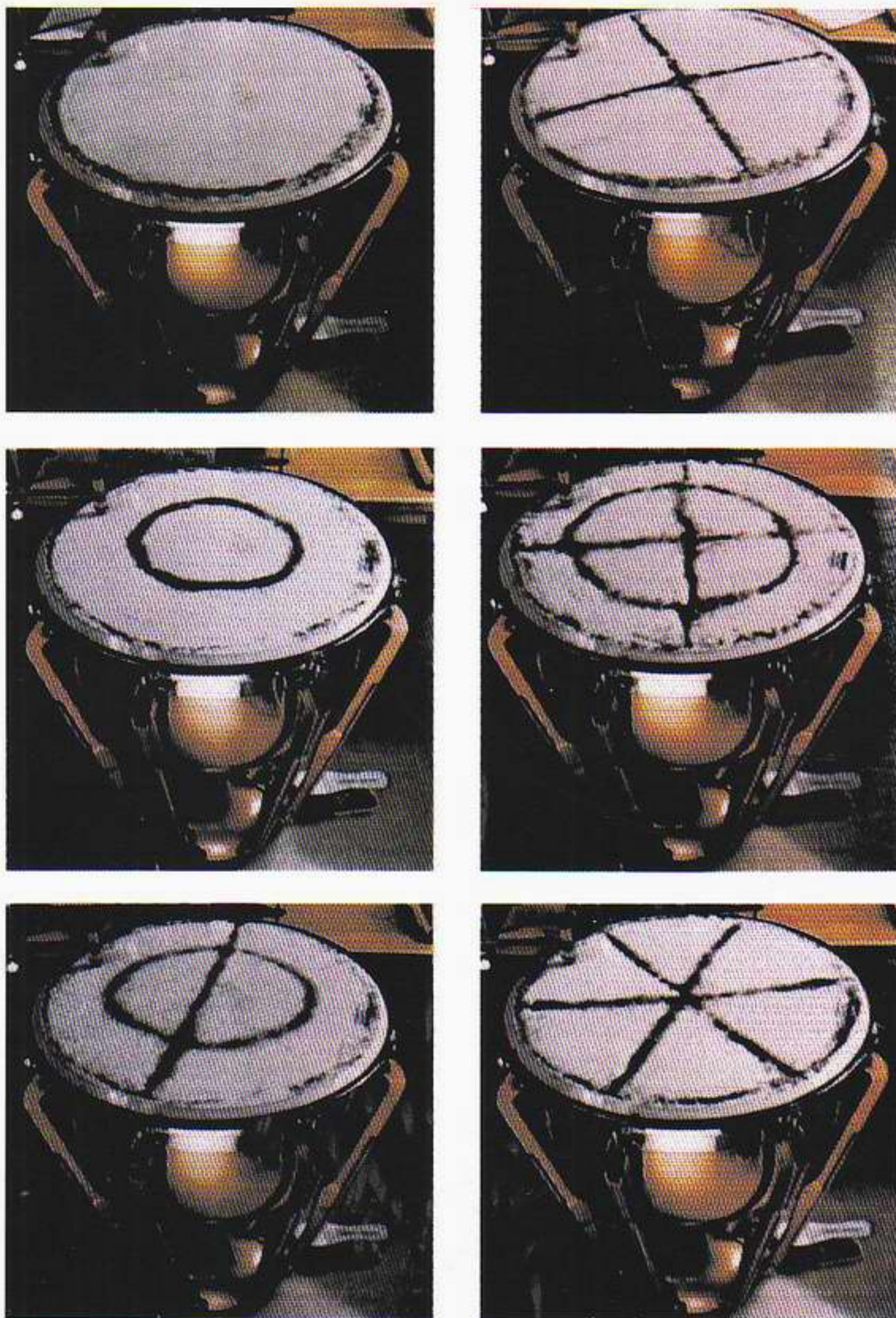
να «στριφογυρνάει» συνεχώς! Στο συγκεκριμένο φαινόμενο αναφερθήκαμε ήδη στο Κεφάλαιο 2, όταν γνωρίσαμε τις κβαντικές διαδρομές του Feynman και την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg. Αυτή η κίνηση, η λεγόμενη *κίνηση μηδενικού σημείου*, αποτελεί μια γενική ιδιότητα των κβαντικών συστημάτων· εξηγεί δε γιατί το υγρό ήλιο δεν στερεοποιείται ακόμα και σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν. Σε αντίθεση με άλλα αέρια, τα άτομα του ηλίου δεν «αισθάνονται» σχεδόν καθόλου δυνάμεις μεταξύ των μορίων, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 6. Λόγω αυτών των ασθενικών ατομικών δεσμών, αρκεί και μόνο η κβαντομηχανική κίνηση των ατόμων κοντά στο απόλυτο μηδέν για να αποτρέψει το πάγωμα και τη στερεοποίηση του ηλίου.

Το επόμενο πράγμα που παρατηρούμε στην Εικόνα 4.8 είναι ότι το πλάτος πιθανότητας του ηλεκτρονίου δεν μηδενίζεται μόνο στα άκρα του κιβωτίου, αλλά, για πιο μεγάλες ενέργειες —σε υψηλότερες «ενεργειακές καταστάσεις»—, και σε θέσεις ανάμεσα σε αυτά. Στην περίπτωση της δονούμενης χορδής, οι εν λόγω «δεσμοί» (θέσεις όπου η χορδή μένει ακίνητη) δεν μας ξαφνιάζουν. Για το ηλεκτρόνιο όμως, αυτοί οι δεσμοί αντιστοιχούν σε θέσεις όπου δεν υπάρχει πιθανότητα να εντοπίσουμε το ηλεκτρόνιο! Η σχετική πιθανότητα να βρούμε το ηλεκτρόνιο σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο κιβώτιο δίνεται ακριβώς από το τετράγωνο του πλάτους πιθανότητας (βλ. Εικόνα 4.8). Διαπιστώνουμε, επομένως, ότι όχι μόνο οι επιτρεπόμενες ενέργειες για το ηλεκτρόνιο είναι κβαντωμένες, αλλά επίσης ότι η πιθανότητα εντοπισμού του ηλεκτρονίου μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του μέσα στο κιβώτιο· είναι δε διαφορετική για διαφορετικές ενέργειες του ηλεκτρονίου. Όλα αυτά βέβαια βρίσκονται σε ολοφάνερη αντίθεση με την καθημερινή εμπειρία μας για τα υλικά αντικείμενα, αλλά έχουν λογική συνέπεια αν δεχτούμε πως τα ηλεκτρόνια έχουν κυματικές ιδιότητες.

Από το παραπάνω παράδειγμα προκύπτει άλλο ένα δίδαγμα: Όταν μιλάμε για τις «στάθμες ενέργειας» των κβαντικών αντικειμένων και για τις αντίστοιχες κυματοσυναρτήσεις, είναι σωστό να τις συμβολίζουμε με κάποιον τρόπο. Έτσι λοιπόν δηλώνουμε τη θεμελιώδη κατάσταση με τον «κβαντικό αριθμό» $n = 1$, με $n = 2$ την πρώτη διεγερμένη κατάσταση κ.ο.κ. Ο συμβολισμός σε αυτό το παράδειγμα ίσως να φαίνεται ασήμαντος, αλλά η χρησιμοποίηση *κβαντικών αριθμών* για να δηλώνουμε τις *ενεργειακές στάθμες* (ισοδύναμα λέμε τα *ενεργειακά επίπεδα*) και τα κβαντικά πλάτη πιθανότητας αποτελεί γενικό χαρακτηριστικό της κβαντικής μηχανικής. Τα περισσότερα προβλήματα με σημασία για τις εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο δεν είναι τόσο απλά όσο το παράδειγμα του ηλεκτρονίου στο κιβώτιο, και συνήθως πολύ δύσκολα μπορούν να βρεθούν οι ενέργειες και οι κυματοσυναρτήσεις. Παρ' όλα αυτά, ισχύουν οι ίδιες γενικές αρχές, και το να λύσουμε την εξίσωση του Schrödinger για πραγματικές καταστάσεις είναι ανάλογο με το να βρούμε τις χαρακτηριστικές κυματικές εικόνες όταν δονούνται αντικείμενα πιο περίπλοκα από τις χορδές. Τέτοιες κυματικές εικόνες ορισμένων γνωστών αντικειμένων φαίνονται στις Εικόνες 4.9 και 4.10. Από τούτες τις πιο περίπλοκες δονήσεις πρέπει να διδαχτούμε κάτι ακόμα, το οποίο δεν φαίνεται στο προηγούμενο παράδειγμα του κιβωτίου. Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζονται οι τρόποι δόνησης της επίπεδης μεμβράνης ενός τυμπάνου. Το ανάλογο κβαντικό πρόβλημα ενός ηλεκτρονίου σε ένα κιβώτιο δύο διαστάσεων έχει ακριβώς τις ίδιες λύσεις. Αν τώρα προσπαθήσουμε να δηλώσουμε τις κυματοσυναρτήσεις με βάση την ενέργειά τους, έχουμε πρόβλημα. Για την κατάσταση της πιο μικρής

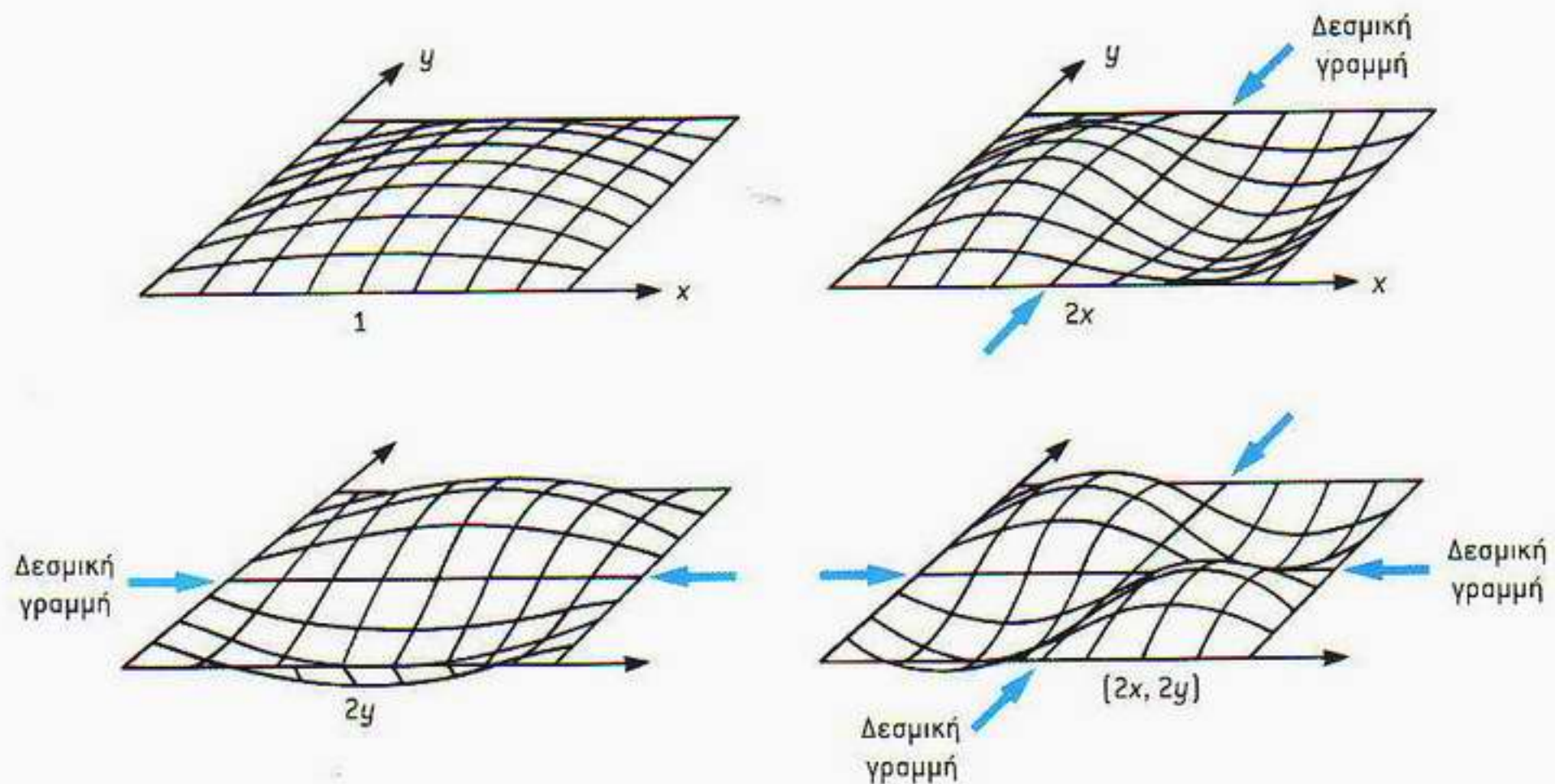


Εικόνα 4.9 Χαρακτηριστικές εικόνες ταλάντωσης της επιφάνειας ενός βιολιού. Στις τρεις πάνω φωτογραφίες φαίνονται οι περιοχές όπου συγκεντρώνεται η πούδρα, την οποία έχουμε διασκορπίσει στην επιφάνεια του βιολιού, καθώς σε αυτές υπάρχει μικρή ή μηδενική ταλάντωση. Στις φωτογραφίες της δεύτερης σειράς φαίνονται οι ίδιες χαρακτηριστικές εικόνες, τώρα όμως έχουν προκύψει με μια μέθοδο συμβολής φωτός λέιζερ. Οι λευκές επιφάνειες αντιστοιχούν σε περιοχές μικρής ταλάντωσης. (Η μέθοδος του λέιζερ είναι προφανώς πολύ πιο ευαίσθητη.)



Εικόνα 4.10 Τύμπανο, στην επιφάνεια του οποίου έχουμε διασκορπίσει πούδρα - φαίνονται έξι από τους πολλούς τρόπους ταλάντωσης της μεμβράνης. Οι κόκκοι της πούδρας συγκεντρώνονται κοντά στις δεσμικές γραμμές, όπου η ταλάντωση είναι πολύ ασθενής. Αυτές οι χαρακτηριστικές εικόνες είναι ανάλογες με τις κβαντικές εικόνες πιθανότητας για ηλεκτρόνια μέσα σε ένα κιβώτιο δύο διαστάσεων.

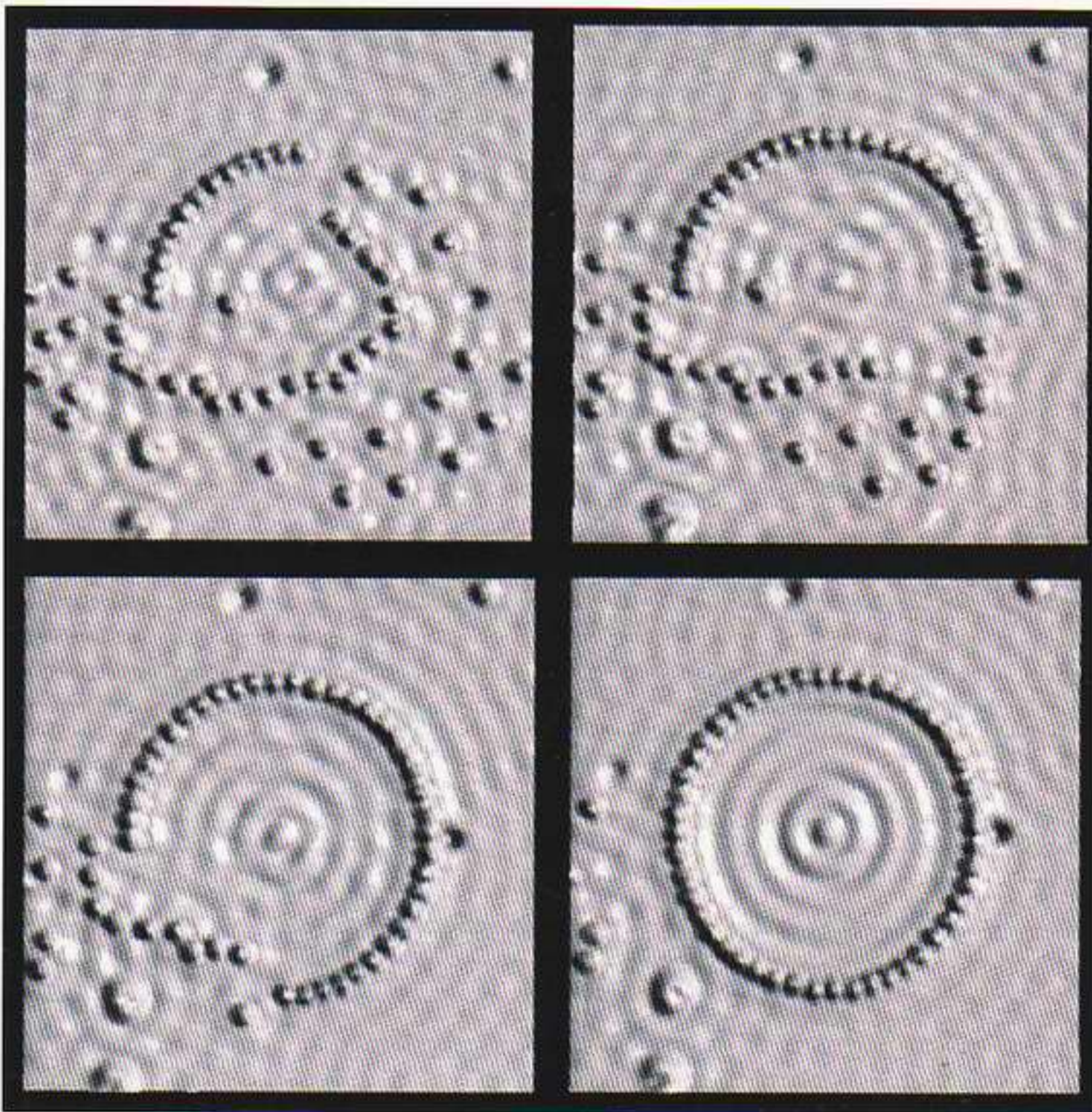
ενέργειας υπάρχει μία μόνο δυνατή κυματοσυνάρτηση, την οποία μπορούμε ξανά να συμβολίσουμε με τον κβαντικό αριθμό $n = 1$. Για την πρώτη διεγερμένη κατάσταση, ωστόσο, υπάρχουν δύο δυνατότητες. Αν συμβολίσουμε τις δύο διευθύνσεις με x και y , βλέπουμε ότι μπορούμε είτε να διεγείρουμε την κίνηση κατά τη διεύθυνση x στην πρώτη αρμονική και να αφήσουμε την κίνηση κατά τη διεύθυνση y στη θεμελιώδη (βλ. Εικόνα 4.11, πάνω δεξιά) είτε να αφήσουμε την κίνηση κατά τη διεύθυνση x στη θεμελιώδη και να διεγείρουμε την κίνηση κατά την y στην πρώτη αρμονική (βλ. Εικόνα 4.11, κάτω αριστε-



Εικόνα 4.11 Εικόνες ταλάντωσης της τετράγωνης μεμβράνης ενός τυμπάνου. Η μεμβράνη εμφανίζεται σαν ένα πυκνά πλέγμα κορδών για να γίνει σαφής η αντιστοιχία ταλάντωσης της με τους τρόπους ταλάντωσης μιας κορδής.

ρά). Και στις δύο δυνατότητες αντιστοιχεί η ίδια ακριβώς ενέργεια. Χρειαζόμαστε επομένως και έναν δεύτερο κβαντικό αριθμό, για να δηλώσουμε τις δύο δυνατές κυματοσυναρτήσεις που αντιστοιχούν σε αυτή την ενέργεια. Έτσι, συμβολίζουμε και τις δύο με $n = 2$ και προσθέτουμε τον ενδείκτη x ή y για να προσδιορίσουμε ποια διεύθυνση (x ή y) είναι «διεγερμένη». Οπότε δηλώνουμε τις κυματοσυναρτήσεις ως $2x$ ή $2y$. Οι φυσικοί λένε ότι αυτή η κατάσταση (στην οποία έχουμε περισσότερες από μία δυνατές κβαντικές καταστάσεις με την ίδια ενέργεια) είναι «εκφυλισμένη» —άλλη μία περίπτωση όπου οι φυσικοί χρησιμοποιούν μια καθημερινή λέξη με ειδική τεχνική σημασία! Θα βρούμε ανάλογες καταστάσεις όταν θα μιλήσουμε για τις κυματοσυναρτήσεις του ατόμου του υδρογόνου. Στις τρεις διαστάσεις, βέβαια, δεν μας εκπλήσσει η προοπτική ότι θα χρειαστούμε τρεις κβαντικούς αριθμούς για να συμβολίσουμε όλες τις δυνατές κβαντικές καταστάσεις.

Η αναλογία που χρησιμοποιήσαμε μεταξύ ηλεκτρονίων περιορισμένων σε ένα κιβώτιο και στάσιμων κυμάτων σε χορδές ίσως φαίνεται επιτηδευμένη. Είναι αξιοσημείωτο όμως ότι οι πρόσφατες πρόοδοι στην ικανότητά μας να χειριζόμαστε άτομα μας επιτρέπουν τώρα να κατασκευάσουμε τέτοια ακριβώς κιβώτια δυναμικού για ηλεκτρόνια στην επιφάνεια υλικών. Με την ανακάλυψη του Σαρωτικού Μικροσκοπίου Σήραγγας (STM), το οποίο περιγράφουμε λεπτομερέστερα στο Κεφάλαιο 5, οι φυσικοί είναι σε θέση να μετακινούν άτομα πάνω σε μια επιφάνεια. Ένας από τους πρωτοπόρους αυτής της τεχνολογίας είναι ο Don Eigler, ερευνητής στα Εργαστήρια της IBM στο Άλμαντιν της Καλιφόρνιας. Ο Eigler και η ομάδα του χρησιμοποίησαν ένα STM για να κατασκευάσουν έναν «κυκλικό φράκτη» από ηλεκτρόνια, διατάσσοντας άτομα σιδήρου κυκλικά πάνω σε μια επιφάνεια χαλκού (Εικόνα 4.12). Το «κυκλικό κιβώτιο» είχε διάμετρο 7 περίπου ατομικές διαμέτρους και περιόριζε τα επιφανειακά ηλεκτρόνια όπως ακριβώς συνέβαινε και στο παράδειγμα του



Εικόνα 4.12 Ο φράκτης από ηλεκτρόνια που κατασκεύασε ο Don Eigler και η ομάδα του στην IBM. Οι εικόνες δείχνουν τα ενδιάμεσα στάδια δημιουργίας ενός κυκλικού φράκτη από άτομα σιδήρου πάνω σε μια επιφάνεια χαλκού.

τυμπάνου. Μέσω του STM κατάφεραν επίσης να απεικονίσουν την ηλεκτρονική πυκνότητα πιθανότητας εντός του «κυκλικού φράκτη», η οποία δείχνει ακριβώς τις διαμορφώσεις στάσιμων κυμάτων που αναπτύσσονται στην κυκλική μεμβράνη ενός τυμπάνου (βλ. Εικόνα 4.13). Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούμε διεξοδικότερα στις πρόσφατες προόδους σχετικά με το χειρισμό ατόμων και τη *νανοτεχνολογία*.

Το άτομο του υδρογόνου

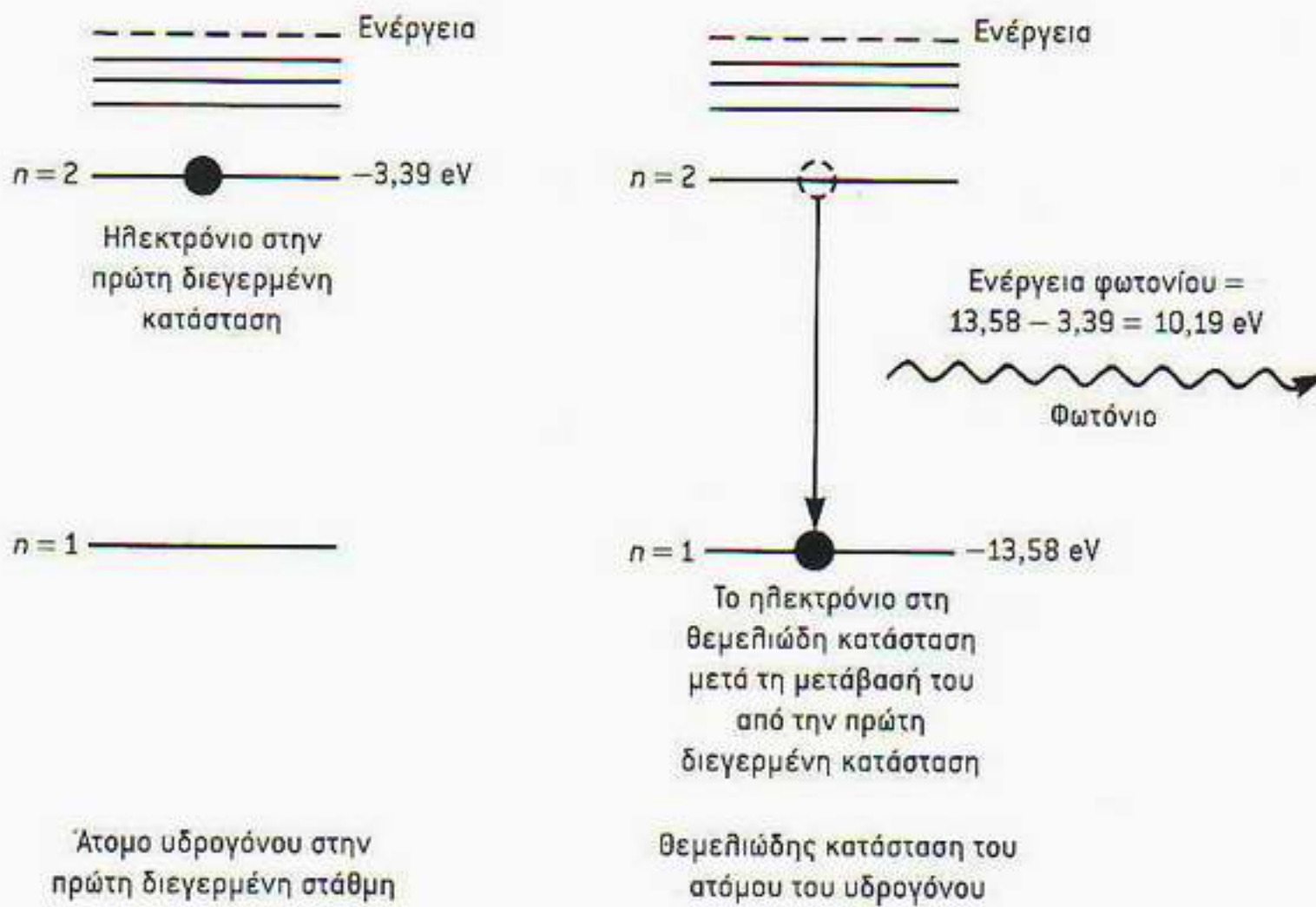
Ένας από τους λόγους που η εξίσωση του Schrödinger έγινε σχεδόν αμέσως αποδεκτή από όλους ήταν ότι, έπειτα από δεκαετίες αναζήτησης στο σκοτάδι, οι φυσικοί είχαν ξανά τη δυνατότητα να εκτελούν υπολογισμούς με γνωστές μαθηματικές τεχνικές. Αντί να είναι υποχρεωμένοι να ακολουθούν τους μυστηριώδεις κανόνες του Bohr, θεώρησαν φυσιολογικό να υπολογίζουν τις ενεργειακές στάθμες στο άτομο του υδρογόνου, όπως έκαναν και με τις επιτρεπόμενες συχνότητες σε ένα δονούμενο αντικείμενο στις τρεις διαστάσεις. Εξάλλου, η σημαντική ακρίβεια των προβλέψεων που γίνονταν με τις τεχνικές αυτές αποτέλεσε μεγάλη έκπληξη. Ο διάσημος ιταλός φυσικός Enrico Fermi, όταν έδινε διαλέξεις για τη νέα κβαντική μηχανική, συνήθιζε να λέει: «Δεν χρειαζόταν να είναι τόσο ακριβής.» Εντούτοις είναι, και σήμερα μπο-



Εικόνα 4.13 Κύματα ηλεκτρονιακής πυκνότητας πιθανότητας στο εσωτερικό ενός κβαντικού φράκτη. Σε αυτή την εικόνα STM διακρίνονται 48 άτομα σιδήρου τοποθετημένα κυκλικά πάνω σε μια επιφάνεια χαλκού. Ο χαλκός αποτελεί καλό αγωγό του ηλεκτρισμού, και τα ηλεκτρόνια της επιφάνειας περιορίζονται από το δακτύλιο των ατόμων σιδήρου. Η εικόνα δείχνει ότι η ηλεκτρονιακή πυκνότητα πιθανότητας στο εσωτερικό του κυκλικού φράκτη έχει τη μορφή στάσιμων κυμάτων.

ρούμε να κατανοούμε τόσο τους κανόνες του Bohr όσο και τη σταθερότητα των ατόμων.

Το άτομο του υδρογόνου είναι το κβαντικό σύστημα που αποτελείται από ένα σχετικά βαρύ πρωτόνιο, με θετικό φορτίο, και από ένα πολύ ελαφρύ, αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο έλκεται από το πρωτόνιο με δύναμη όλο και πιο μεγάλη όσο πιο κοντά του βρίσκεται. Σύμφωνα με την κλασική άποψη, τίποτα δεν θα μπορούσε να αποτρέψει τη μείωση της ενέργειας του ηλεκτρονίου στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, ώσπου αυτό να έρθει και να πέσει πάνω στο πρωτόνιο. Στην κβαντική μηχανική, ωστόσο, η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg δεν επιτρέπει κάτι τέτοιο. Έτσι, βρίσκουμε τις ενεργειακές στάθμες λύνοντας την εξίσωση του Schrödinger, με το δυναμικό που αντιστοιχεί στην ηλεκτρική έλξη μεταξύ πρωτονίου και ηλεκτρονίου (δυναμικό Coulomb). Μολονότι δε τα μαθηματικά είναι πιο περίπλοκα, το προκύπτον φάσμα των ενεργειακών σταθμών μοιάζει με εκείνο του ηλεκτρονίου μέσα σε ένα κιβώτιο (βλ. Εικόνα 4.14). Με τη βοήθεια της περί-



Εικόνα 4.14 Μετάβαση του ηλεκτρονίου του υδρογόνου από την πρώτη διεγερμένη κατάσταση ($n = 2$) στη θεμελιώδη ($n = 1$) με εκπομπή ενός φωτονίου. Οι υπόλοιπες γραμμές του διαγράμματος αναπαριστούν μερικές άλλες διεγερμένες ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου. Οι διεγερμένες ενεργειακές στάθμες (δεν σημειώνονται όλες στο διάγραμμα) πλησιάζουν όλο και περισσότερο μεταξύ τους, έως ότου φτάσουν την ενέργεια ιονισμού (διακεκομμένη γραμμή). Σε αυτό το επίπεδο, το ηλεκτρόνιο διαθέτει την απαραίτητη ενέργεια να υπερνικήσει την έλξη του πρωτονίου και να διαφύγει από το άτομο (αφήνοντας πίσω του το θετικά φορτισμένο ιόν του υδρογόνου —το πρωτόνιο).

φνημης σχέσης τού Planck, η οποία συνδέει την ενέργεια ενός φωτονίου με τη συχνότητά του

$$E_{\text{φωτ.}} = h \cdot \nu$$

(Κεφάλαιο 2), μπορούμε τώρα να κατανοήσουμε τη μαγική σχέση τού Balmer. Αν δεν διαταράξουμε το άτομο του υδρογόνου, το ηλεκτρόνιό του προτιμά να έχει τη μικρότερη δυνατή ενέργεια· βρίσκεται επομένως στη θεμελιώδη κατάσταση, η οποία αντιστοιχεί στον κβαντικό αριθμό $n = 1$. Αν όμως το άτομο διαταραχθεί —αν πέσει πάνω του κάποιο άλλο άτομο ή φως—, το ηλεκτρόνιο μπορεί να διεγερθεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη μεγαλύτερης τιμής n . Επειδή σε αυτή την κατάσταση το άτομο έχει περισσότερη ενέργεια από τη συνηθισμένη, έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα θα επανέλθει στη θεμελιώδη κατάσταση. Σχηματικά, μπορούμε να πούμε ότι το ηλεκτρόνιο «μεταπηδά» σε μια χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη (ισοδύναμα, επίπεδο, φλοιό ή στιβάδα). Οπότε, για να διατηρείται η ενέργεια, το ηλεκτρόνιο αποβάλλει την πρόσθετη ενέργειά του εκπέμποντας ένα φωτόνιο με ενέργεια η οποία δίνεται από τη σχέση

$$E_{\text{φωτ.}} = E_{\text{αρχ.}} - E_{\text{τελ.}}$$

Αφού η συχνότητα και το μήκος κύματος του φωτός συνδέονται με την κλασική σχέση

$$c = \nu \cdot \lambda$$

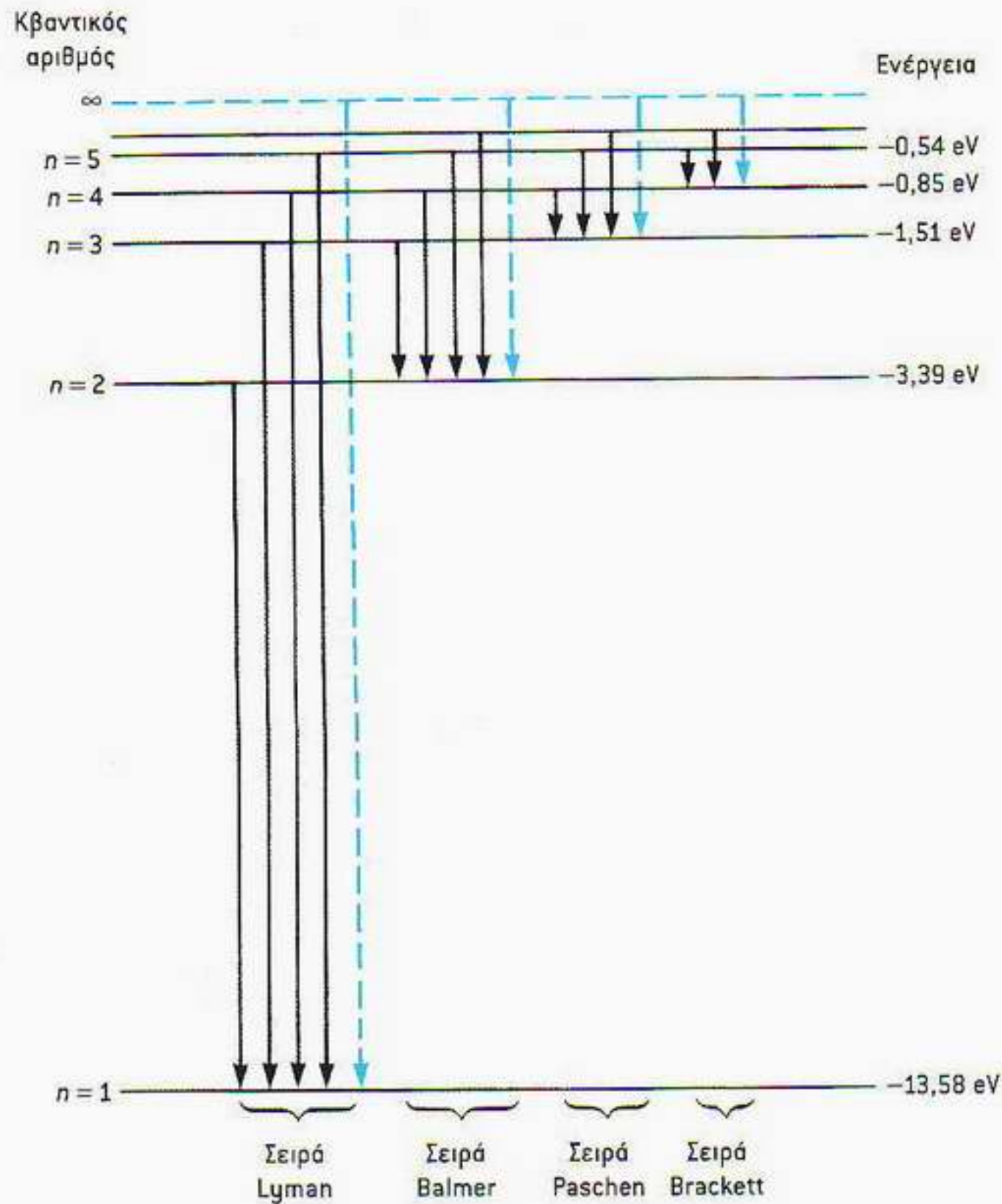
ταχύτητα του φωτός ίσον συχνότητα επί μήκος κύματος,

έχουμε τώρα μια πρόβλεψη για τα μήκη κύματος των φασματικών γραμμών. Το αποτέλεσμα του Schrödinger ήταν ακριβώς το ίδιο με του Balmer και του Bohr, δηλαδή

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Εικόνα 4.15 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για το άτομο του υδρογόνου, όπου φαίνεται πώς δημιουργούνται οι διάφορες σειρές φασματικών γραμμών. Κάθε βέλος αναπαριστά και μία δυνατή ηλεκτρονική μετάβαση, η οποία συνοδεύεται από εκπομπή ενός φωτονίου με ενέργεια όση η ενεργειακή διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης. Μόνο στη σειρά Balmer, η οποία αντιστοιχεί σε μεταβάσεις προς την ενεργειακή στάθμη $n = 2$, εκπέμπονται φωτόνια με συχνότητες στην ορατή περιοχή.

Η σειρά Lyman περιλαμβάνει ηλεκτρονικές μεταβάσεις προς τη θεμελιώδη κατάσταση $n = 1$, με ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων υψηλής ενέργειας και αντίστοιχες φασματικές γραμμές στην υπεριώδη περιοχή. Οι σειρές Paschen και Brackett περιλαμβάνουν φωτόνια πολύ χαμηλότερης ενέργειας και αντιστοιχούν σε φασματικές γραμμές στην περιοχή του υπέρυθρου. Μεταβάσεις που αντιστοιχούν στη σύλληψη ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου, δηλαδή μετάβαση από την ενέργεια ιονισμού σε μια δέσμια υδρογονική κατάσταση, αναπαρίστανται με διακεκομμένες γραμμές.



όπου το R είναι μια σταθερά που προκύπτει από το συνδυασμό της μάζας και του φορτίου του ηλεκτρονίου, της σταθεράς του Planck και της ταχύτητας του φωτός· οι n_f και n_o είναι οι κβαντικοί αριθμοί που αντιστοιχούν στην τελική και στην αρχική στάθμη. Η Εικόνα 4.15 δείχνει πώς προκύπτουν οι διάφορες φασματικές γραμμές στο άτομο του υδρογόνου. Για την αρχική σχέση του Balmer αντιστοιχεί $n_f^2 = 4$, περιγράφονται δε οι μεταβάσεις προς την ενεργειακή στάθμη $n = 2$ · σε αυτές μάλιστα τις μεταβάσεις εκπέμπονται φωτόνια με ενέργειες που βρίσκονται στην ορατή περιοχή του φάσματος (βλ. Παράρτημα 1). Την εποχή της ανακάλυψης του Balmer, μόνο αυτή η «ορατή σειρά» ήταν γνωστή. Για τις μεταβάσεις στη θεμελιώδη κατάσταση $n = 1$, οι εμπλεκόμενες ενέργειες φωτονίων είναι πολύ μεγάλες, οπότε και οι αντίστοιχες φασματικές γραμμές βρίσκονται στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος, είναι δε γνωστές ως σειρά Lyman. Αντίστοιχα, οι σειρές Paschen και Brackett (βλ. Εικόνα 4.15) βρίσκονται στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος.

Η ίδια εικόνα των ενεργειακών σταθμών εξηγεί επίσης πώς απορροφάται το φως από τα άτομα. Για να απορροφηθεί το φως, πρέπει όχι μόνο να έχουν τα φωτόνια ενέργεια ίση με τη διαφορά κάποιων ενεργειακών σταθμών, αλλά και να βρίσκεται ένα ηλεκτρόνιο στην αντίστοιχη κατάσταση για να μπο-



Εικόνα 4.16 Φωτογραφία του νεφελώματος του Ωρίωνα, ενός ψαμπερού νεφελώματος υδρογόνου, με πολλά νεοσχηματισμένα άστρα μέσα του. Η ερυθρή απόχρωση του νεφελώματος οφείλεται στις ηλεκτρονικές μεταβάσεις ατόμων υδρογόνου από την ενεργειακή στάθμη $n = 3$ στη $n = 2$.

ρεί να απορροφήσει ένα φωτόνιο με αυτή την ενέργεια. Σε κανονικές θερμοκρασίες, η ενέργεια από τις συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων σε ένα αέριο συνήθως δεν επαρκεί για να διεγείρει πολλά άτομα, αφού υπάρχει μεγάλη ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στο επίπεδο της θεμελιώδους και της πρώτης διεγερμένης κατάστασης. Επομένως, σε θερμοκρασία δωματίου τα περισσότερα άτομα βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Οι διαφορές των ενεργειακών επιπέδων από τη θεμελιώδη σε οποιαδήποτε διεγερμένη κατάσταση είναι τόσο μεγάλες ώστε τα αντίστοιχα φωτόνια έχουν συχνότητες στην υπεριώδη και όχι στην ορατή περιοχή. Έτσι, το ορατό φως μπορεί να περάσει μέσα από πολλά αέρια χωρίς να απορροφηθεί. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο τα περισσότερα αέρια είναι διαφανή στο ορατό φως.

Μπορούμε επίσης να εξηγήσουμε τα υπέροχα χρώματα των νεφελωμάτων που παρατηρούμε στις αστρονομικές φωτογραφίες. Στην Εικόνα 4.16 βλέπουμε το νεφέλωμα του Ωρίωνα, ένα μεγάλο νέφος αερίων στον Γαλαξία μας. Μέσα στο νεφέλωμα, άστρα με μεγάλη θερμοκρασία εκπέμπουν σταθερά μεγάλα πλήθη υπεριωδών φωτονίων. Αυτά τα φωτόνια έχουν τόσο μεγάλες ενέργειες ώστε μπορούν, όταν συγκρούονται με ηλεκτρόνια, να τα απομακρύνουν εντελώς από τα μητρικά τους άτομα, παράγοντας θετικά ιόντα. Καθώς τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με τους πυρήνες, χάνουν την ενέργειά τους, εκπέμποντας τα αντίστοιχα φωτόνια. Το κόκκινο χρώμα του νεφε-

λώματος αντιστοιχεί στην ηλεκτρονιακή μετάβαση από το επίπεδο $n = 3$ στο $n = 2$ της σειράς Balmer.

Κυματοσυναρτήσεις και κβαντικοί αριθμοί

Μέχρι τώρα, συζητήσαμε μόνο για τους κβαντικούς αριθμούς που εμφανίζονται σε πολύ απλές καταστάσεις. Για μια λεπτομερειακή όμως κατανόηση της κβαντικής μηχανικής των χημικών στοιχείων —την οποία θα πραγματευθούμε στο Κεφάλαιο 6—, πρέπει να γνωρίζουμε πιο πολλά για τις κυματοσυναρτήσεις και τους κβαντικούς αριθμούς σχετικά με το άτομο του υδρογόνου. Επειδή κάτι τέτοιο προϋποθέτει μια μάλλον λεπτομερή συζήτηση, για να μην κουραστείτε ίσως θα ήταν καλύτερο να μην επιμείνετε ιδιαίτερα σε τούτη την ενότητα. Έπειτα από αυτή την προειδοποίηση, ας δούμε τα πλάτη πιθανότητας των ηλεκτρονίων —τις κυματοσυναρτήσεις του υδρογόνου— που αντιστοιχούν στις διάφορες ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου. Η κυματοσυνάρτηση της θεμελιώδους κατάστασης, η οποία αντιστοιχεί σε ενεργειακή στάθμη με κβαντικό αριθμό $n = 1$, είναι τελικά πολύ ομαλή και συμμετρική προς όλες τις κατευθύνσεις. Η πιθανότητα να βρούμε ένα ηλεκτρόνιο είναι ανάλογη με το τετράγωνο αυτής της κυματοσυνάρτησης, και η Εικόνα 4.17 μας δίνει μια ιδέα για το πώς η εν λόγω πιθανότητα μεταβάλλεται γύρω από το κέντρο του ατόμου του υδρογόνου. Επιπλέον, αυτές οι εικόνες της πυκνότητας πιθανότητας δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Έτσι λύνεται το πρόβλημα γιατί τα ηλεκτρόνια δεν ακτινοβολούν όσο κινούνται σε μια «τροχιά Bohr». Το ηλεκτρόνιο δεν περιγράφεται ως σωματίδιο που περιφέρεται γύρω από το πρωτόνιο, αλλά μάλλον ως μια στάσιμη εικόνα πιθανότητας στην οποία τίποτα δεν επιταχύνεται.

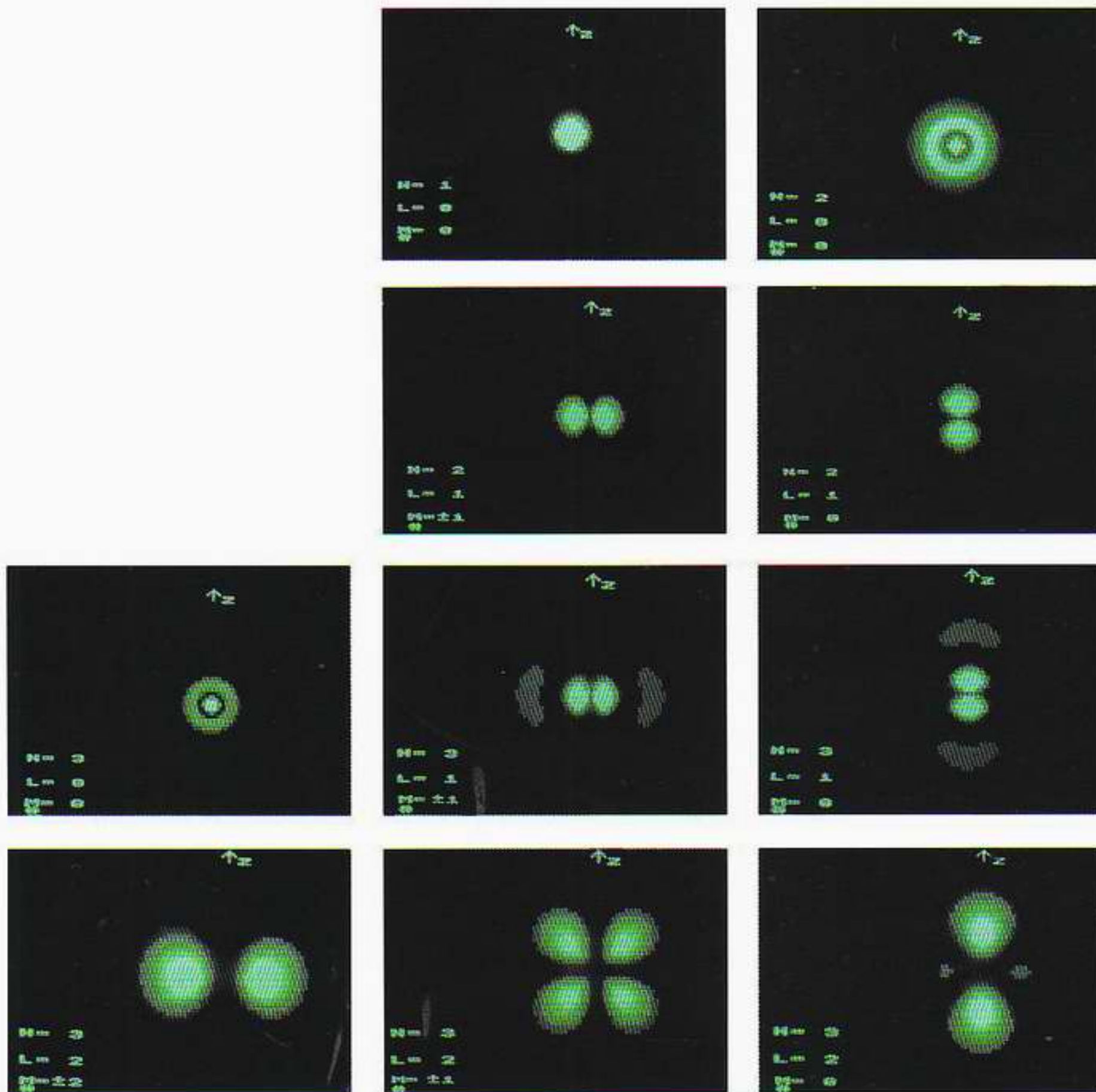
Αν εξετάσουμε τις διεγερμένες ενεργειακές στάθμες πιο λεπτομερειακά, θα διαπιστώσουμε, όπως και στο παράδειγμα της μεμβράνης του τύμπανου, ότι υφίσταται ένας εκφυλισμός —αρκετές κυματοσυναρτήσεις αντιστοιχούν στην ίδια ενέργεια. Περιμένουμε λοιπόν ότι θα χρειαστούμε αρκετούς κβαντικούς αριθμούς για να δηλώσουμε καθεμιά από αυτές τις κυματοσυναρτήσεις. Οι «επιπλέον» κβαντικοί αριθμοί αντιστοιχούν στην κβάντωση μιας άλλης κλασικής ποσότητας —της *στροφορμής*. Στις αμέσως επόμενες παραγράφους θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε τούτους τους νέους κβαντικούς αριθμούς κάπως πιο λεπτομερειακά. Αν αυτό σας φανεί πολύ κουραστικό, τότε περάστε στο επόμενο κεφάλαιο!

Η στροφορμή, όπως μαρτυρά και το όνομά της, έχει σχέση με τη γνωστή μας ορμή, εμφανίζεται όμως σε προβλήματα όπου τα σώματα κινούνται γύρω από κάποιο κέντρο —όπως, φέρ' ειπείν, οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο. Ας φανταστούμε ότι δένουμε ένα μπαλάκι στην άκρη ενός σπάγκου και το περιστρέφουμε κρατώντας την άλλη άκρη του σπάγκου. Η στροφορμή που έχει το μπαλάκι ισούται αριθμητικά με την ορμή επί το μήκος του σπάγκου:

$$L = p \cdot l$$

μέτρο στροφορμής ίσον μέτρο ορμής επί μήκος σπάγκου.

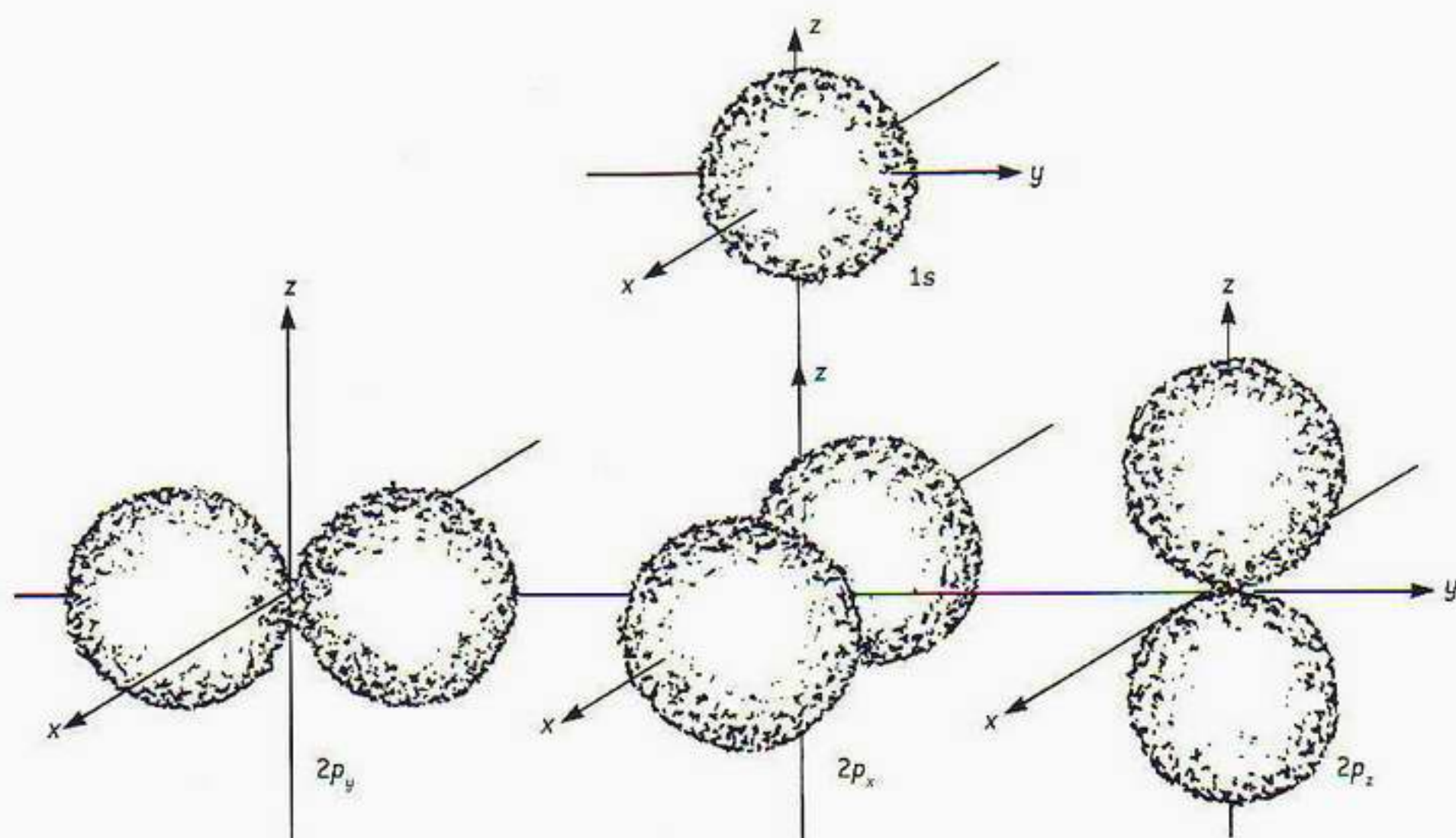
Για σταθερό μήκος σπάγκου, όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχει το μπαλάκι τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η στροφορμή του. Η στροφορμή είναι σημαντική διότι, όπως η ενέργεια, διατηρείται και στα κλασικά και στα κβαντικά συστήματα. Στην περίπτωση του παραδείγματός μας, ας φανταστούμε ότι μικραίνου-



Εικόνα 4.17 Διαμορφώσεις πυκνότητας πιθανότητας για το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου. Οι εικόνες, που έχουν δημιουργηθεί με υπολογιστή, δείχνουν τμήματα στην κατανομή της πυκνότητας πιθανότητας για τις κατώτερες ενεργειακές στάθμες (οι φωτεινές περιοχές αντιστοιχούν σε μεγάλη πιθανότητα εντοπισμού του ηλεκτρονίου). Δηλώνονται βάσει των κβαντικών αριθμών N , L και M , ενώ φαίνονται επίσης και οι κατανομές πιθανότητας για όλες τις καταστάσεις με $n = 1$, $n = 2$ και $n = 3$. Σημειώστε ότι οι εικόνες για $M = \pm 1$ και $M = \pm 2$ είναι ίδιες.

με το μήκος του σπάγκου καθώς το μπαλάκι περιστρέφεται. Η στροφορμή του διατηρείται, οπότε, καθώς το μήκος του σπάγκου θα ελαττώνεται, η ορμή p που έχει το μπαλάκι θα πρέπει να αυξάνεται· και αυτό σημαίνει ότι το μπαλάκι θα κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Στην κβαντομηχανική αντιμετώπιση του ατόμου του υδρογόνου, η στροφορμή διατηρείται ακριβώς όπως στο κλασικό μας παράδειγμα. Τώρα, όμως, δεν επιτρέπεται να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή. Η στροφορμή στην κβαντική μηχανική είναι κβαντωμένη, όπως η ενέργεια.

Στην πραγματικότητα, σε αυτό στηρίχτηκε ο Bohr για να επινοήσει τις σταθερές τροχιές του: η στροφορμή επιτρεπόταν να πάρει μόνο τιμές που



Εικόνα 4.18 Τρισδιάστατη αναπαράσταση των επιφανειών ίσης πιθανότητας για τις κατώτερες ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου. Η κατάσταση $1s$ είναι σφαιρικά συμμετρική και έχει μηδενική στροφορμή ($L = 0$). Οι τρεις καταστάσεις $2p$ έχουν όλες την ίδια ενέργεια και μία μονάδα κβαντικής στροφορμής ($L = 1$). Οι άξονες των δύο λοβών πιθανότητας μπορούν να προσανατολιστούν κατά τους άξονες x , y ή z , οι προσανατολισμοί δε αντιστοιχούν στις καταστάσεις p_x , p_y και p_z .

ήταν ακέραια πολλαπλάσια της σταθεράς του Planck διαιρεμένης διά 2π . Κατά περίεργο τρόπο, αν και ο Bohr προσδιόρισε σωστά τις ενεργειακές στάθμες, η λύση της εξίσωσης του Schrödinger για το άτομο του υδρογόνου έδειξε ότι η πρόβλεψή του για τη στροφορμή δεν ήταν εντελώς σωστή — η θεμελιώδης κατάσταση έχει μηδενική στροφορμή. Παρ' όλα αυτά, η στροφορμή είναι όντως κβαντωμένη, περιγράφεται δε με δύο νέους κβαντικούς αριθμούς, τους L και M . Έτσι, στην ενεργειακή στάθμη $n = 2$ υπάρχουν τέσσερις εκφυλισμένες κυματοσυναρτήσεις, οι οποίες, στην Εικόνα 4.17, μοιάζουν με «λοβούς πιθανότητας». (Η κατανομή πιθανότητας για τις κυματοσυναρτήσεις με $n = 2$, $L = 1$, $M = +1$ και $M = -1$ είναι ίδια, οπότε απεικονίζονται στην ίδια φωτογραφία.) Η κατανομή με $n = 2$, $L = 0$, $M = 0$ έχει στροφορμή μηδέν (δεύτερη φωτογραφία). Σε αυτή έχουμε την ίδια κυκλική συμμετρία με την κυματοσυνάρτηση της θεμελιώδους κατάστασης, όπου $n = 1$, $L = 0$, $M = 0$ (πρώτη φωτογραφία), και πάλι στροφορμή μηδέν. Οι άλλες τρεις κυματοσυναρτήσεις έχουν μία μονάδα στροφορμής και κβαντικό αριθμό στροφορμής $L = 1$. Για $L = 1$, υπάρχουν τρεις δυνατές τιμές του δεύτερου κβαντικού αριθμού στροφορμής M : οι $M = +1$, -1 (τρίτη φωτογραφία) και 0 (τέταρτη φωτογραφία). Αυτές οι τρεις δυνατές τιμές αντιστοιχούν γενικά στις τρεις δυνατές κατευθύνσεις των αξόνων περιστροφής του ηλεκτρονίου. Ας φανταστούμε ξανά το μπαλάκι με το σπάγκο να περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο θετικό ημιάξονα z — όπως σημειώνεται στις φωτογραφίες. Το μπαλάκι θα κινείται, επομένως, πάνω στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες x και y . Για την κβαντική μηχανική, η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην κατάσταση $M = +1$, για την ο-

ποία οι λοβοί πιθανότητας βρίσκονται (κυρίως) στο επίπεδο $x-y$. Η κατάσταση $M = -1$ αντιστοιχεί στον άξονα περιστροφής κατά μήκος του αρνητικού ημιάξονα z , και οι λοβοί πιθανότητας θα βρίσκονται πάλι στο επίπεδο $x-y$. Η κατάσταση $M = 0$, με τους λοβούς πιθανότητας να βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης z , αντιστοιχεί σε έναν άξονα περιστροφής με κατεύθυνση κάπου επί του επιπέδου $x-y$. Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τη χημεία των μορίων, είναι συχνά πιο κατάλληλο να χρησιμοποιούμε έναν κάπως διαφορετικό συμβολισμό για τις παραπάνω τρεις καταστάσεις με $L = 1$. Έτσι, αντί για τον κβαντικό αριθμό M , θα αναφερόμαστε συχνά στις τρεις καταστάσεις με τα σύμβολα L_x , L_y και L_z . Στην Εικόνα 4.18 γίνεται μια απόπειρα απεικόνισης των κατανομών πιθανότητας για τις τρεις αυτές καταστάσεις.

Στην επόμενη ενεργειακή στάθμη, εμφανίζονται καταστάσεις με δύο μονάδες στροφορμής, $L = 2$, μαζί με τις καταστάσεις $L = 1$ και $L = 0$. Για τις κυματοσυναρτήσεις με $L = 2$, υπάρχουν πέντε δυνατές τιμές του M : οι $M = +2, +1, 0, -1, -2$ (τελευταίες τρεις φωτογραφίες), οι οποίες αντιστοιχούν γενικά σε άξονες περιστροφής που «πηγαίνουν κυκλικά» από τον θετικό στον αρνητικό ημιάξονα z . Έχει σημασία να κατανοήσουμε ότι οι τρεις κβαντικοί αριθμοί μας παρέχουν σχεδόν οτιδήποτε χρειαζόμαστε για να κατανοήσουμε τον περιοδικό πίνακα των στοιχείων του Mendeleev (βλ. Κεφάλαιο 6). Το άτομο του υδρογόνου, βέβαια, με το μοναδικό του ηλεκτρόνιο, αποτελεί μια μάλλον ειδική περίπτωση. Για άτομα με περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια, οι ενεργειακές καταστάσεις με την ίδια τιμή του n αλλά διαφορετικές τιμές του L δεν είναι ίδιες: η ενέργεια εξαρτάται και από το n και από το L .

Λίγα λόγια ακόμα για το συμβολισμό. Τα αλκαλικά μέταλλα λίθιο, νάτριο και κάλιο έχουν γραμμικά φάσματα παρόμοια με αυτό του υδρογόνου. Όμως, σε αντίθεση με το υδρογόνο, οι ενεργειακές στάθμες με ίδια τιμή του n αλλά διαφορετική του L δεν είναι ίδιες. Τα αλκαλικά στοιχεία έχουν πολλαπλές υδρογονοειδείς σειρές φασματικών γραμμών οι οποίες αντιστοιχούν στις διαφορετικές τιμές της στροφορμής. Επειδή οι φυσικοί που μελέτησαν πρώτοι αυτά τα φάσματα δεν γνώριζαν την προέλευσή τους, δόλωσαν τις εν λόγω σειρές με αυθαίρετο τρόπο: s, p, d, f (αρχικά γράμματα των λέξεων sharp, principal, diffuse, fundamental). Σήμερα ξέρουμε ότι αυτές οι σειρές φασματικών γραμμών προκύπτουν από μεταβάσεις σε τελικές καταστάσεις με διαφορετικές τιμές στροφορμής: η s σε $L = 0$, η p σε $L = 1$, η d σε $L = 2$ και η f σε $L = 3$. Παρά το γεγονός ότι η προέλευση των συγκεκριμένων γραμμών είναι πια κατανοητή, οι φυσικοί και οι χημικοί, αντί να αναφέρονται στις καταστάσεις στροφορμής βασιζόμενοι στις πραγματικές τιμές της, $L = 0, L = 1, L = 2$ και $L = 3$, επιμένουν να χρησιμοποιούν το απίστευτα ασαφές παραδοσιακό σύστημα συμβολισμού: s, p, d και f !

Παγίδες ατόμων και φως

Στο παρόν κεφάλαιο συζητήσαμε τον τρόπο με τον οποίο η κβαντική μηχανική περιγράφει μεμονωμένα άτομα, ως τώρα όμως έχουμε περιγράψει μόνο παρατηρήσεις ακτινοβολίας που προέρχονται από ομάδες τέτοιων ατόμων. Το βραβείο Νόμπελ φυσικής για το 1989 απονεμήθηκε στους Hans Dehmelt και Wolfgang Paul, δύο επιστήμονες που γεννήθηκαν στη Γερμανία, για την ανάπτυξη τεχνικών παρατήρησης μεμονωμένων ατόμων.

Ο Hans Dehmelt, στα μέσα της δεκαετίας του 1950, συνέλαβε την ι-



Ο Hans Dehmelt τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ φυσικής το 1989 για την παγίδευση ενός μόνο ηλεκτρονίου και την απομόνωση ενός μόνο ατόμου. Παγίδευσε επίσης και ένα μόνο ποζιτρόνιο —το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου— και το εξανάγκασε σε διατεταγμένα άλματα εντός της παγίδας για περισσότερο από τρεις μήνες. Για να διασκεδάσει τη διάχυτη επικρατούσα εντύπωση ότι η ουσία του κβαντικού κόσμου είναι το ασαφές κύμα πιθανότητας, ο Dehmelt αρεσκόταν να τονίζει την πραγματική ύπαρξη και ατομική ιδιαιτερότητα των παγιδευμένων του στοιχειωδών σωματιδίων, δίνοντάς τους και από ένα όνομα —όπως «το άτομο Astrid» και «το ποζιτρόνιο Priscilla»! Αφότου κέρδισε το βραβείο Νόμπελ, επισημαίνει ότι «ο δρόμος της ζωής μου είναι πια σπαρμένος με ροδοπέταλα».



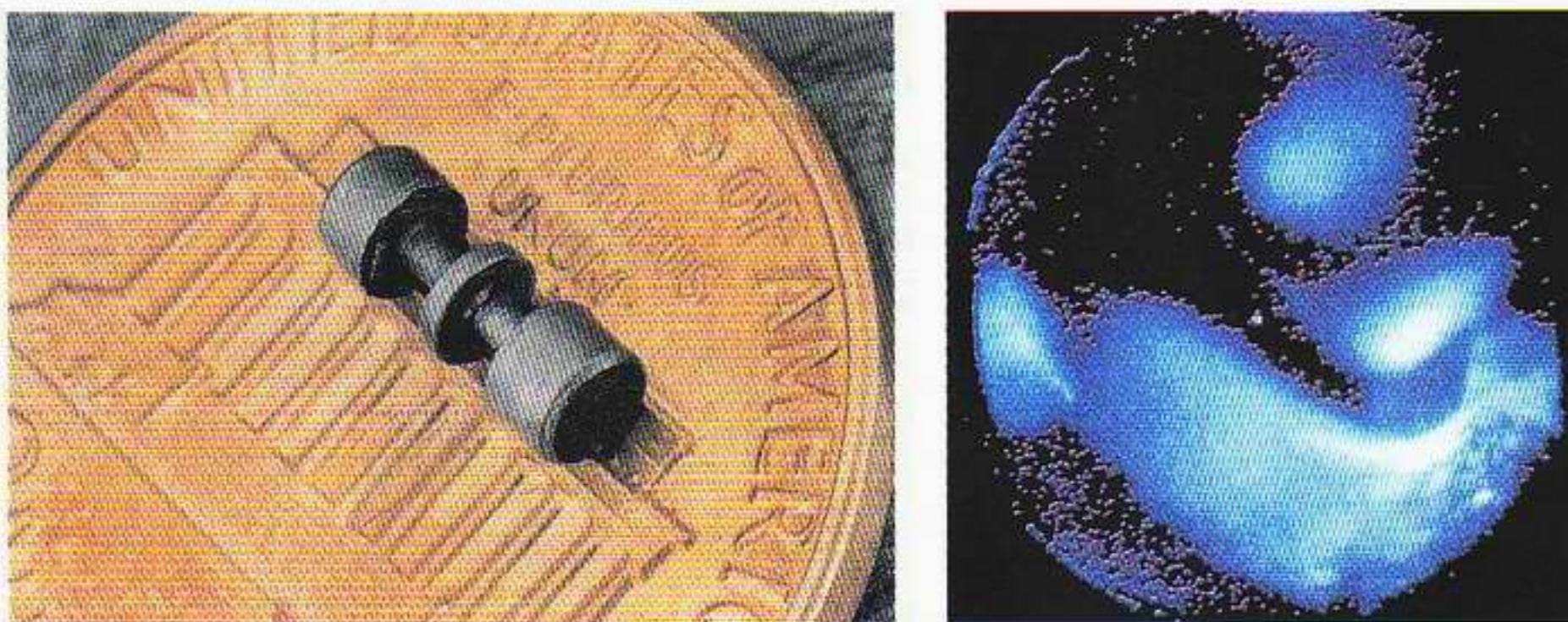
Ο Wolfgang Paul (1913-1993) γεννήθηκε στη Σαξονία της Γερμανίας και σπούδασε θαυτικά για εννέα χρόνια και αρχαία ελληνικά για έξι στο γυμνάσιο του Μονάχου. Στη συνέχεια αποφάσισε να γίνει φυσικός και ζήτησε τη συμβουλή του μεγάλου γερμανού θεωρητικού φυσικού Arnold Sommerfeld. Ο Sommerfeld του πρότεινε να ξεκινήσει τη μαθητεία του στη μηχανική. Το 1989, ο Paul μαζί με τον Dehmelt έλαβαν το βραβείο Νόμπελ φυσικής για το ρόλο τους στην ανάπτυξη της τεχνικής παγίδευσης ιόντων.

δέα να παγιδεύσει ένα και μόνο ηλεκτρόνιο. Τη δεκαετία του 1940, ο Richard Becker, καθηγητής του στο Πανεπιστήμιο του Γκέτινγκεν, του είχε ενσταλάξει πρώτος την ιδέα, όταν αναπαράστησε στο μαυροπίνακα το ηλεκτρόνιο ως μια μικρή λευκή κουκκίδα. Ο Dehmelt είχε μάθει στις διαλέξεις κβαντικής μηχανικής ότι κανένα κβαντικό σωματίδιο δεν μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, οπότε αυτή η «ήπια αντίφαση» τον βασάνιζε για τα επόμενα πενήντα χρόνια! Μόλις το 1973, μετά την πάροδο περισσότερων από είκοσι χρόνων, ο Dehmelt πέτυχε να απομονώσει ένα και μοναδικό κβαντικό σωματίδιο χρησιμοποιώντας μια διάταξη που ονομάζεται «παγίδα του Penning», και η οποία αναπτύχθηκε από τον ολλανδό φυσικό Frans Penning το 1936. Μια παγίδα του Penning περιορίζει ηλεκτρόνια μεταξύ δύο αρνητικά φορτισμένων μεταλλικών πλακών που βρίσκονται εν κενώ. Ένα μαγνητικό πεδίο περιβάλλει τις πλάκες κατά τρόπο ώστε να αποτρέπεται η διαφυγή των ηλεκτρονίων από τις πλευρές της παγίδας. Τα ηλεκτρόνια εισάγονται στο εσωτερικό της παγίδας με τη βοήθεια μιας αρνητικά φορτισμένης μεταλλικής ακίδας, και τα εγκλωβισμένα σωματίδια μπορούν να παρατηρηθούν καθώς παλινδρομούν μέσα στην παγίδα. Ο Dehmelt και η ομάδα του στο Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον επέτρεψαν σε μεμονωμένα ηλεκτρόνια να διαφύγουν, ώσπου στο τέλος παρέμεινε μόνο ένα. Στην αρχή ήταν σε θέση να διατηρήσουν εγκλωβισμένο το ηλεκτρόνιο μόνο για μερικές ημέρες, στη συνέχεια για λίγες εβδομάδες και μετά για μερικούς μήνες. Τελικά, κατάφεραν να παρατηρούν έναν «μονοηλεκτρονιακό ταλαντωτή», ένα και μόνο ταλαντούμενο ηλεκτρόνιο, επί σχεδόν ένα έτος προτού διαφύγει από την παγίδα! Το γεγονός αυτό τους επέτρεψε να μετρήσουν τις μαγνητικές ιδιότητες του ηλεκτρονίου με ακρίβεια άνευ προηγουμένου. Το 1987 διεξήχθη μια παραλλαγή του παραπάνω πειράματος, αυτή τη φορά όμως χρησιμοποιώντας αντιύλη —συγκεκριμένα, ποζιτρόνια, το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου (βλ. Κεφάλαιο 11). Για να τονίσει το γεγονός ότι όντως κατάφερε να παγιδεύσει ένα και μόνο ποζιτρόνιο και να του «προσδώσει πραγματική υπόσταση», ο Dehmelt τού έδωσε ένα όνομα: το ονόμασε «ποζιτρόνιο Priscilla». Όπως ανέφερε:

Σε αυτό ακριβώς το σημείο, ετούτη τη στιγμή, σε μια μικρή κυλινδρική περιοχή διαμέτρου 30 μm και μήκους 60 μm περίπου, στο κέντρο της παγίδας του Penning, διαμένει το ποζιτρόνιο Priscilla, το οποίο, τους τελευταίους τρεις μήνες, δίνει παραστάσεις μπαλέτου κβαντικών αλμάτων, άλλοτε αυθόρμητα και άλλοτε επί παραγγελία.

Όταν κέρδισε το βραβείο Νόμπελ, το 1989, ο Hans Dehmelt δήλωσε ότι «είχε διάθεση να χορέψει»!

Ο Dehmelt ενδιαφερόταν επίσης και για την παγίδευση ατόμων. Για να το επιτύχει, χρησιμοποίησε μια διάταξη που είχε εφεύρει ο Wolfgang Paul, του Πανεπιστημίου της Βόννης. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αποσπάται από ένα άτομο, αφήνει πίσω του ένα θετικά φορτισμένο κατάλοιπο, το οποίο ονομάζουμε ιόν (κατιόν, εν προκειμένω). Η παγίδα ατόμων του Paul ήταν παρόμοια με αυτήν του Penning, με τη μόνη διαφορά ότι αντί μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούσε ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο, ώστε να αποτρέπει τα άτομα να έρχονται σε επαφή με τα «τοιχώματα». Ο Dehmelt τράβηξε την πρώτη φωτογραφία ενός μεμονωμένου ατόμου το 1979, ενώ βρισκόταν στο Πανεπιστήμιο της Χαϊδελβέργης. Το κατάφερε ακτινοβολώντας το παγιδευμένο ιόν



Εικόνα 4.19 Φορτισμένα ιόντα είναι δυνατόν να εγκλωβιστούν σε μια «παγίδα» με τη βοήθεια ενός συνδυασμού ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Ακτινοβολώντας το ιόν με φως λέιζερ κατάλληλης συχνότητας, μπορούμε να «δούμε» αυτό το απομονωμένο ιόν. Στο αριστερά, μια παγίδα ιόντων αντιπροβάλλεται με ένα νόμισμα του ενός πεντά για να τονιστεί η κλίμακα αυτής της διαστάσεως· στα δεξιά, η φωτεινή κουκκίδα στο κέντρο είναι ένα παγιδευμένο ιόν υδραργύρου.

με μια δέσμη λέιζερ κατάλληλου μήκους κύματος για να απορροφή το ιόν ένα φωτόνιο. Προφανώς, το διεγερμένο ιόν στη συνέχεια επανεκπέμπει ένα φωτόνιο προς κάποια διεύθυνση. Έτσι, το μεμονωμένο αυτό ιόν μπορεί να διεγερθεί και αποδιεγερθεί από μια δέσμη λέιζερ ώστε τελικά να εκπέμπει εκατοντάδες εκατομμύρια φωτόνια ανά δευτερόλεπτο, καθιστώντας εφικτή τη φωτογράφησή του (βλ. Εικόνα 4.19). Το 1980, ο Dehmelt, χρησιμοποιώντας ένα πολύπλοκο σύστημα λέιζερ (βλ. Κεφάλαιο 7), κράτησε παγιδευμένο ένα και μόνο άτομο για διάστημα αρκετών ημερών. Συνεπώς στην τακτική του, θέλησε πάλι να τονίσει την πραγματικότητα της ύπαρξης ενός μεμονωμένου ατόμου, οπότε έδωσε και σε αυτό ένα όνομα· το ονόμασε Astrid! Όπως είπε:

Η καλά προσδιορισμένη ταυτότητα του συγκεκριμένου στοιχειώδους σωματιδίου αποτελεί γεγονός θεμελιακά καινοφανές, και αυτό οφείλουμε να το αναγνωρίσουμε μέσω μιας «βάφτισης» —έτσι όπως δίνουμε ονόματα ανθρώπων στα κατοικίδια μας.

5 Το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας

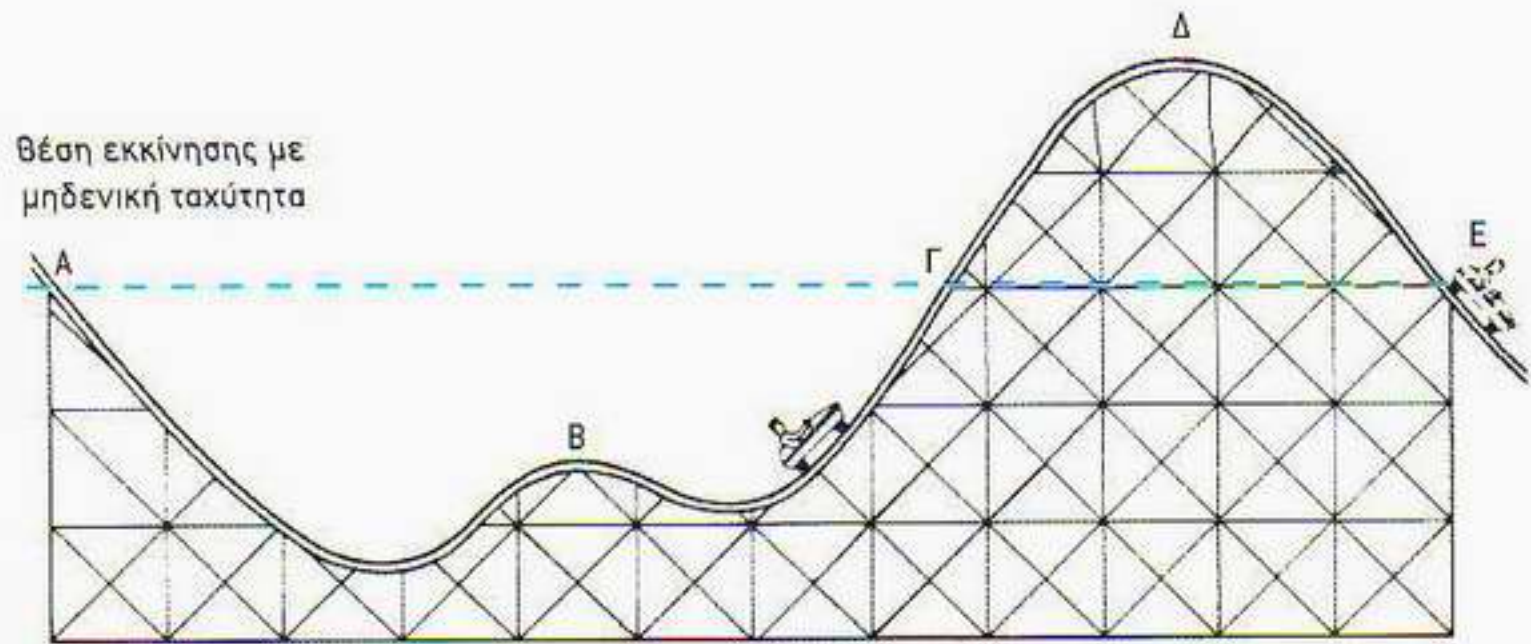
Στην κβαντική μηχανική, γλιστρώντας γρήγορα, είναι δυνατόν να διασχίσεις μια ενεργειακά απαγορευμένη περιοχή.

Richard Feynman

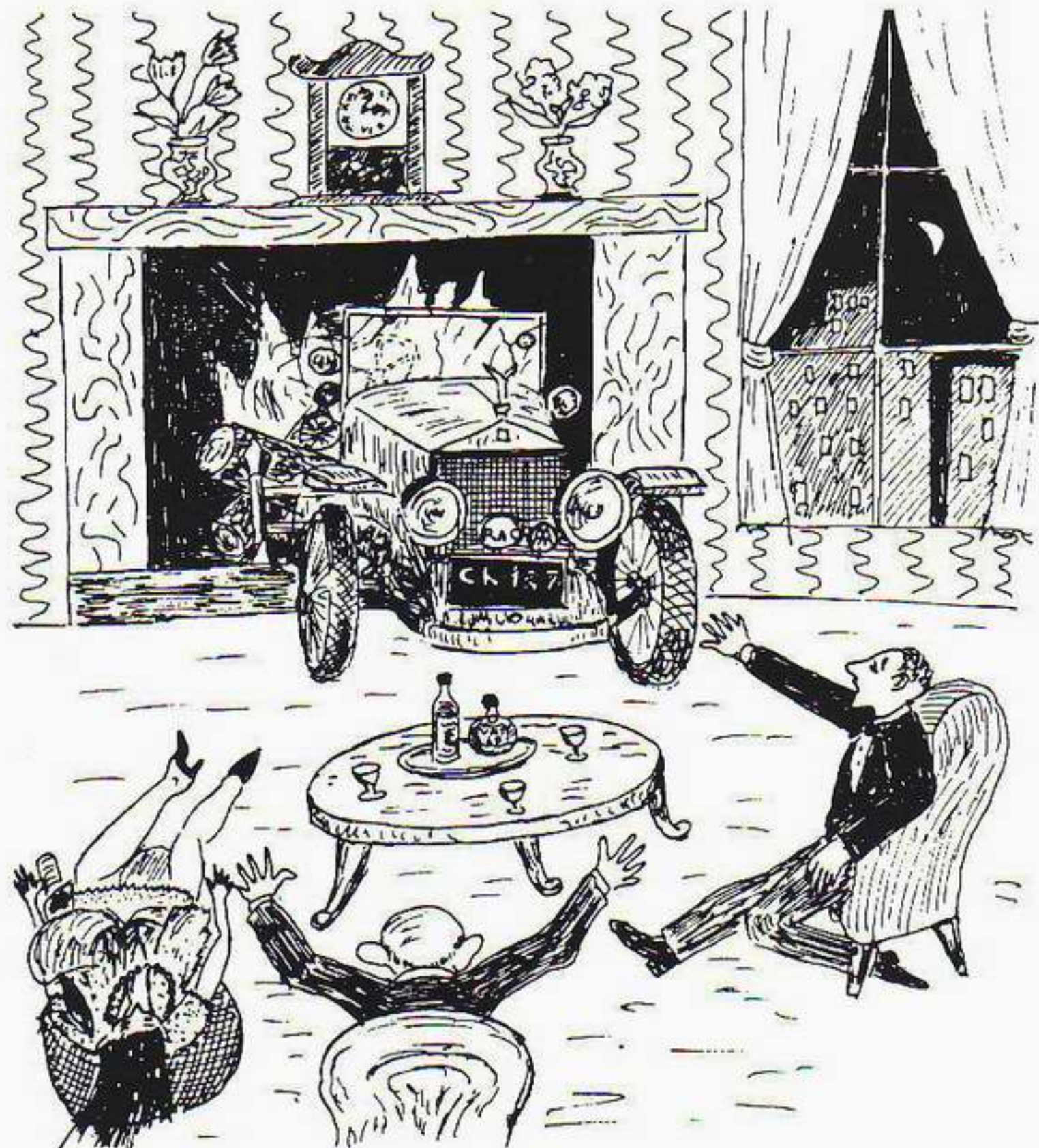
Διαπέραση φράγματος

Μία από τις πιο εκπληκτικές συνέπειες της κυματικής υπόθεσης του de Broglie και της εξίσωσης του Schrödinger υπήρξε η ανακάλυψη ότι τα κβαντικά αντικείμενα μπορούν να διαπερνούν φράγματα δυναμικής ενέργειας τα οποία απαγορεύεται να διαπεράσουν τα κλασικά σωματίδια. Για να σχηματίσουμε μια ιδέα για το τι εννοούμε όταν μιλάμε για φράγματα δυναμικής ενέργειας (ή απλώς για φράγματα δυναμικού), ας ξαναφέρουμε στη μνήμη μας το παράδειγμα του βαγονιού και ας κοιτάξουμε ένα μεγαλύτερο τμήμα της οιδηροτροχιάς, όπως αυτό στην Εικόνα 5.1. Αν αφήσουμε το βαγονάκι μας που ηρεμεί να κυλήσει από ψηλά στα αριστερά —από το σημείο Α—, και αγνοήσουμε τις μικροαπώλειες ενέργειας λόγω τριβών, ξέρουμε από την αρχή διατήρησης της ενέργειας ότι θα φτάσουμε στην απέναντι πλευρά και στο ίδιο ύψος από το οποίο ξεκινήσαμε, δηλαδή στο σημείο Γ. Όταν ανεβαίναμε τον μικρό λόφο Β, στο κάτω μέρος της κοιλάδας, το όχημα επιβραδύνθηκε, καθώς ένα μέρος της κινητικής μας ενέργειας μετατράπηκε σε δυναμική. Επειδή, όμως, ξεκινήσαμε από πολύ ψηλότερα, μας περίσσευε άφθονη ενέργεια ώστε να φτάσουμε στο Β. Αν όμως αφήσουμε το βαγόνι να κυλήσει από το Α, δεν διαθέτουμε αρκετή ενέργεια για να ανεβούμε στην κορυφή Δ και να φτάσουμε στο Ε. Εδώ έχουμε ένα παράδειγμα «φράγματος δυναμικής ενέργειας», και μπορούμε να λέμε ότι η περιοχή από το Γ ως το Ε είναι «κλασικά απαγορευμένη».

Το αξιοσημείωτο με τα κβαντικά σωματίδια είναι ότι δεν συμπεριφέρονται όπως τα κλασικά αντικείμενα. Ένα ηλεκτρόνιο που ταξιδεύει με ένα «κβαντικό τρενάκι» λούνα-παρκ παρόμοιο με εκείνο της Εικόνας 5.1 μπορεί να διαπεράσει την απαγορευμένη περιοχή και να φτάσει στην απέναντι πλευ-



Εικόνα 5.1 Απεικόνιση του τι θα σήμαινε το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας για ένα πραγματικό βαγονάκι. Αν το βαγονάκι ξεκινήσει από την ηρεμία στη θέση Α, η αρχή διατήρησης της ενέργειας δεν του επιτρέπει να φτάσει ψηλότερα από τη θέση Γ, στην απεναντι πλευρά της κοιλάδας. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, ωστόσο, υπάρχει η πιθανότητα ένα «κβαντικό βαγονάκι» να μπορέσει να διαπεράσει την απαγορευμένη περιοχή μεταξύ των Γ και Ε και να εμφανιστεί στην άλλη πλευρά του «θόλου». Για το πραγματικό μας βαγονάκι, η τέτοιου είδους διαπέραση του θόλου είναι, βέβαια, εξαιρετικά σπάνη!



Εικόνα 5.2 Στη χώρα των θαυμάτων του κυρίου Τόμπκινς, όπου η σταθερά του Planck είναι πολύ μεγαλύτερη, το αυτοκίνητο του ήρωα θα μπορούσε να διαπεράσει τον τοίχο «όπως τα παιδιά καλά φαντάσματα του Μεσσίανο».

ρά! Αυτό εννοούμε όταν μιλάμε για *διαπέραση φράγματος*, ή για *κβαντικό φαινόμενο σήραγγας*. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που αποτελεί τη βάση αρκετών σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών, όπως η δίοδος σήραγγας και η επαφή Josephson, για τις οποίες θα αναφέρουμε περισσότερα αργότερα. Για να κατανοήσουμε, σε αδρές γραμμές, πώς συμβαίνει μια τέτοιου είδους διαπέραση, θα χρησιμοποιήσουμε ένα επιχείρημα που βασίζεται στην αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάσαμε και αναλύσαμε τη σχέση που συνδέει τις αβεβαιότητες στις μετρήσεις της θέσης και της ορμής. Υπάρχει όμως και μια άλλη ανάλογη σχέση: μεταξύ των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις του χρόνου και της ενέργειας

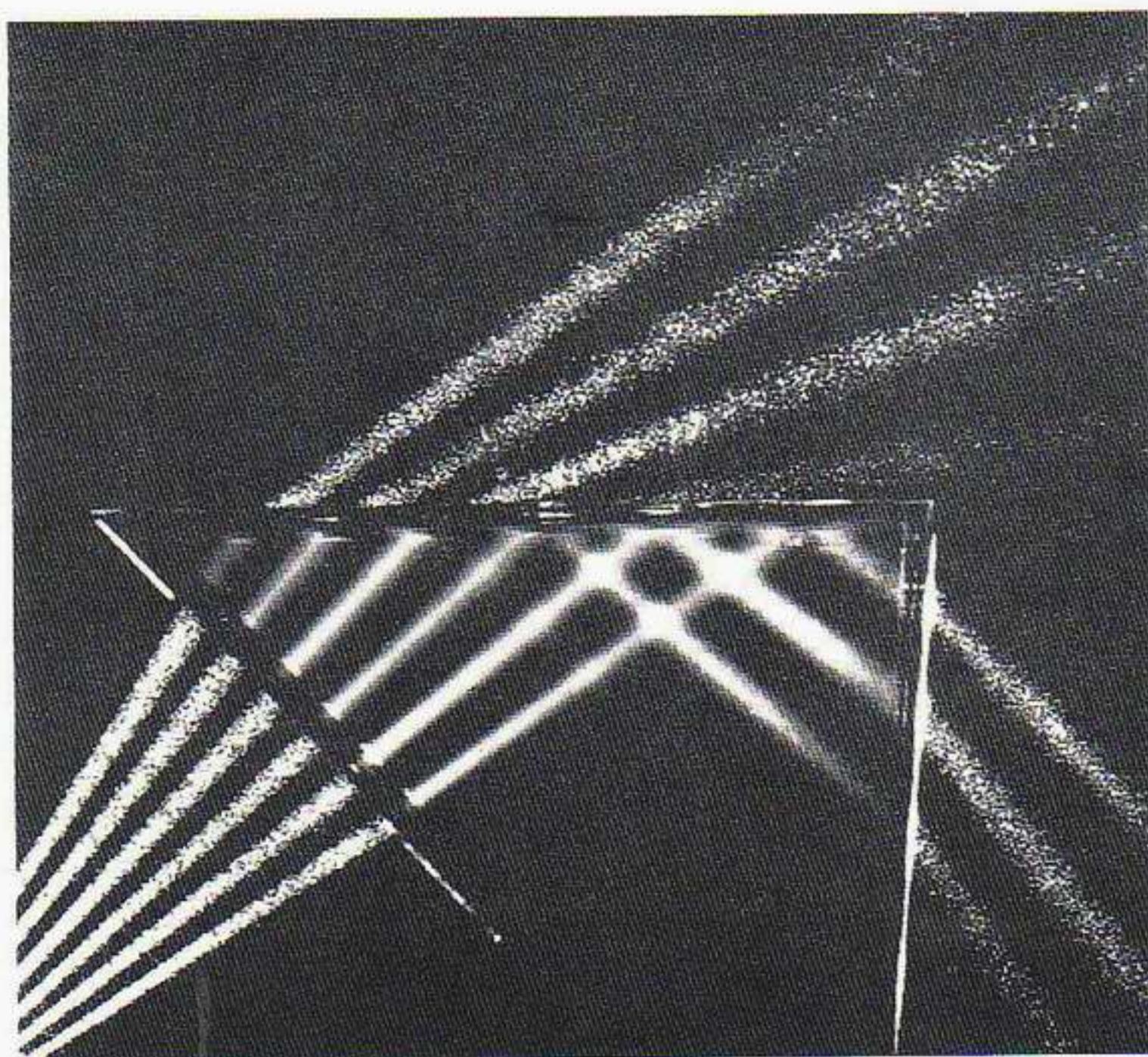
$$(\Delta E) \cdot (\Delta t) \approx h.$$

Έτσι, παρότι στην κλασική μηχανική δεν μπορούμε να μεταβάλουμε ποτέ την ολική ποσότητα ενέργειας χωρίς να παραβούμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας, στην κβαντική μηχανική, αν η χρονική αβεβαιότητα είναι Δt , δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την ποσότητα ενέργειας με σφάλμα μικρότερο από την αβεβαιότητα $\Delta E = h/\Delta t$. Συνεπώς, χοντρικά μιλώντας, μπορούμε να «δανειστούμε» ενέργεια ΔE για να υπερπηδήσουμε το φράγμα, υπό τον όρο ότι θα την επιστρέψουμε μέσα σε χρόνο $\Delta t = h/\Delta E$. Αν, όμως, το φράγμα έχει μεγάλο ύψος ή μεγάλο πλάτος, η διαπέραση γίνεται λίαν απίθανη, όλα δε τα ηλεκτρόνια θα ανακλαστούν —όπως ακριβώς συνέβη και με το βαγονάκι μας. Περιττεύει, βεβαίως, να πούμε ότι ένα ποιοτικό επιχείρημα του τύπου αυτού πρέπει να ελεγχθεί ποσοτικά με λεπτομερείς υπολογισμούς βασιζόμενους στην εξίσωση του Schrödinger, ωστόσο τέτοια επιχειρήματα μας παρέχουν μια διαισθητική αντίληψη για τους λόγους στους οποίους οφείλεται το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. Μια άλλη προσέγγιση συνίσταται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς πιο οικείων κυμάτων. Εν προκειμένω, διαπιστώνουμε ότι το φαινόμενο σήραγγας αποτελεί μια γενική ιδιότητα της κυματικής κίνησης —δεν μας εκπλήσσει παρά μόνο όταν συνδέεται με την υπόθεση του de Broglie ότι όλα τα κβαντικά σωματίδια έχουν κυματικές ιδιότητες.

Κυματικό φαινόμενο σήραγγας

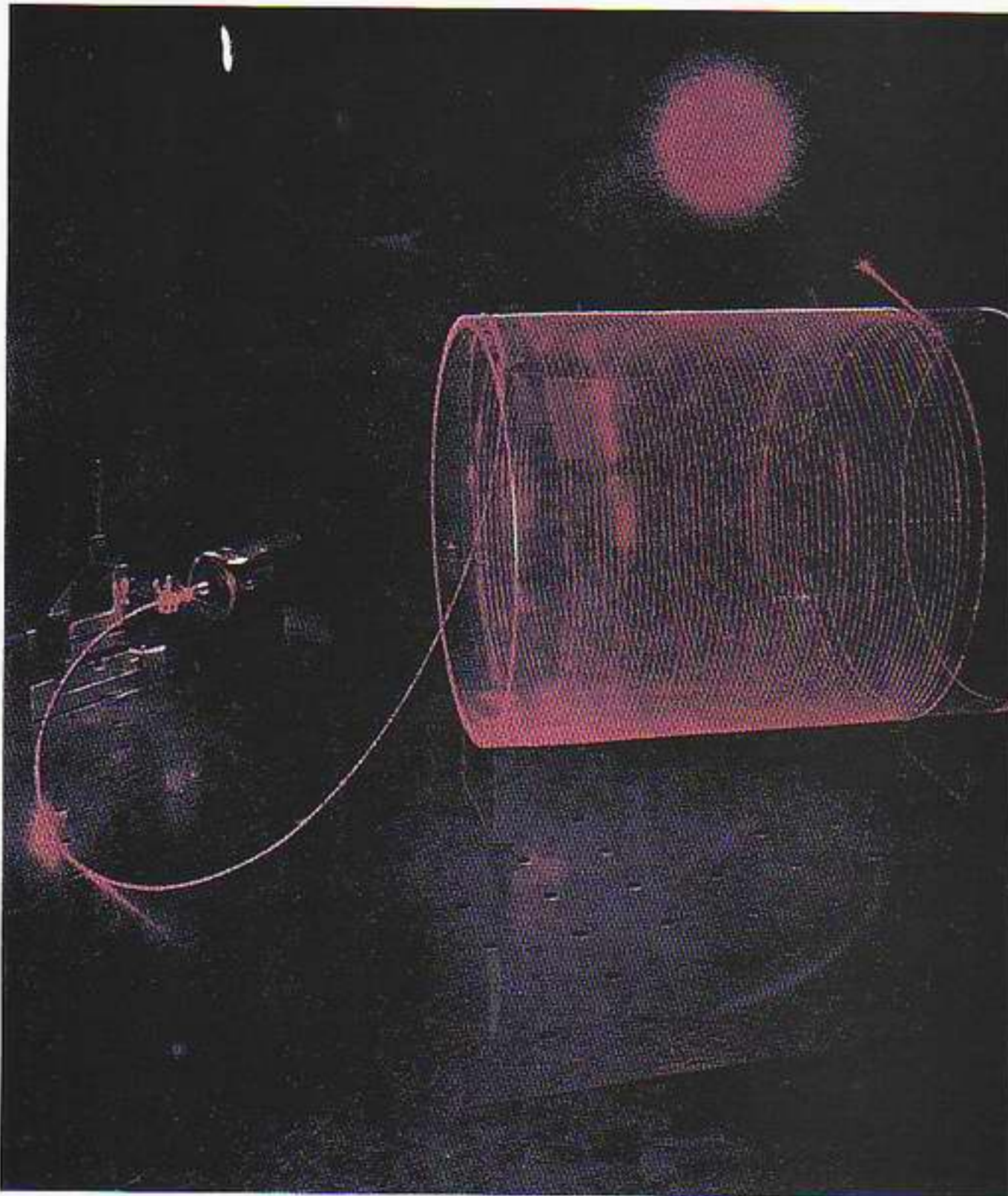
Μολονότι μπορούμε να κάνουμε να εμφανιστεί «κυματικό φαινόμενο σήραγγας» τόσο στα κύματα μιας χορδής όσο και στα υδάτινα κύματα, το πιο οικείο ίσως παράδειγμα το προσφέρει το φως στην κυματική του μορφή. Ας εξετάσουμε τι συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από τον αέρα σε ένα κομμάτι γυαλί. Όπως δείχνει η Εικόνα 5.3, επειδή το φως κινείται στο γυαλί βραδύτερα απ' ό,τι στον αέρα, το μέτωπο κύματος στρέφεται κάπως, και το φως αλλάζει κατεύθυνση διάδοσης. Το φαινόμενο «κάμψης του φωτός» στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων είναι πασίγνωστο και ονομάζεται *διάθλαση*. Ας παρατηρήσουμε τώρα το φως καθώς διαδίδεται από το γυαλί στον αέρα. Αντί να κλίνει προς την κάθετο στη διεπιφάνεια γυαλιού-αέρα, το φως απομακρύνεται από αυτήν. Αν αρχίσουμε να αυξάνουμε βαθμιαία τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός, θα φτάσουμε σε μια γωνία —τη λεγόμενη *ορική γωνία*— για την οποία το φως εξέρχεται στον αέρα σχεδόν παράλληλα προς την επιφάνεια. Τι θα συμβεί αν αυξήσουμε τη γωνία πρόσπτωσης ακόμη περισσότερο; Προφανώς, αναμένουμε τώρα όλο το φως να ανακλάται στη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού-αέρα, χωρίς να διαφεύγει καθόλου στον αέρα. Το φαι-

Εικόνα 5.3 Στη φωτογραφία βλέπουμε αρκετές ακτίνες φωτός να προσπίπτουν σε ένα πρίσμα υπό διαφορετικές γωνίες. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, πέρα από μια ορισμένη «οριική γωνία», οι φωτεινές ακτίνες ανακλώνται πλήρως και δεν διαδίδεται καθόλου φως προς τον αέρα. Η ακραία δεξιά ακτίνα ανακλάται πλήρως, ενώ οι υπόλοιπες διαχωρίζονται σε ανακλώμενες και διαθλώμενες.



νόμμο αυτό ονομάζεται *ολική εσωτερική ανάκλαση*. Η ολική εσωτερική ανάκλαση, η οποία καθιστά δυνατή την αποτελεσματική και χωρίς μεγάλες απώλειες διάδοση του φωτός μέσω μιας γυάλινης οπτικής ίνας, αποτελεί τη βάση της σύγχρονης οπτικής ινών.

Πώς, όμως, συνδέονται όλα τούτα με το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας; Ε, λοιπόν, παρότι καμία φωτεινή ακτίνα δεν διαπερνά τη διεπιφάνεια όταν το φως προσπίπτει υπό γωνία μεγαλύτερη της οριικής, στον αέρα εντούτοις δεν παύει να υπάρχει κάποιο είδος κυματικής διαταραχής. Δεν πρόκειται όμως για ένα κύμα που μεταφέρει ενέργεια, όπως τα συνηθισμένα οδεύοντα κύματα, αλλά για ένα είδος «στάσιμης» κυματομορφής η οποία δεν μεταφέρει καθόλου φωτεινή ενέργεια. Οι κυματομορφές σε μια χορδή πακτωμένη και στα δύο άκρα της αποτελούν παραδείγματα στάσιμων κυμάτων. Ωστόσο, ο τύπος του στάσιμου κύματος για τον οποίο γίνεται λόγος εδώ —το λεγόμενο *φθίνον κύμα*— διαφέρει κατά το ότι η διαταραχή εξασθενεί πολύ γρήγορα όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια. Η σύνδεση του φαινομένου αυτού με το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας φαίνεται αν τοποθετήσουμε άλλο ένα κομμάτι γυαλιού παράλληλα στο πρώτο. Καθώς, λοιπόν, πλησιάζουμε τα δύο κομμάτια, το φθίνον κύμα αρχίζει να διαπερνά το δεύτερο, οπότε αποκαλύπτεται η εκπομπή μιας ακτίνας φωτός! Όσο πιο κοντά φέρνουμε τα δύο κομμάτια τόσο αυξάνεται η φωτεινή ενέργεια που επανεμφανίζεται και εκπέμπεται. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλάτος του στάσιμου κύματος στο «απαγορευμένο» διάκενο αέρα ανάμεσα στα δύο κομμάτια γυαλιού δεν έχει περιθώριο να μειωθεί τόσο πολύ. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οι φυσικοί το ονομάζουν

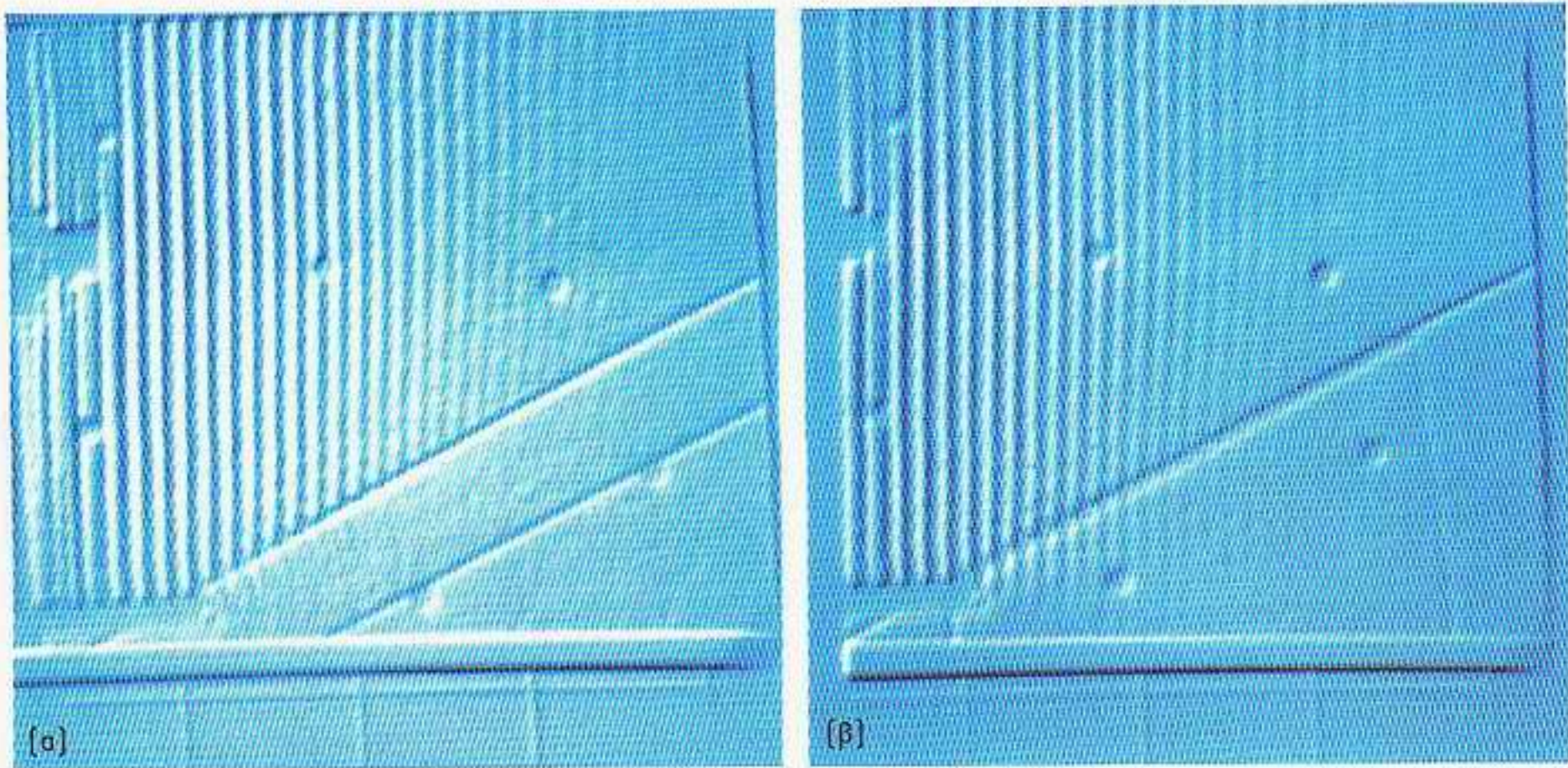


Εικόνα 5.4 Στη φωτογραφία φαίνεται μια οπτική ίνα, τυλιγμένη γύρω από κυλινδρικό τύμπανο, η οποία μεταφέρει φως από λέιζερ ηλίου-νέου. Το φως περιορίζεται στο εσωτερικό της ίνας λόγω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης που υφίσταται στα τοιχώματά της. Η ίνα έχει μήκος 100 μέτρα περίπου και είναι σκόπιμα κακοφτιαγμένη ώστε να διαφεύγει αρκετό φως από τα πλευρικά της τοιχώματα και να τη βλέπουμε κόκκινη. Σε μια ίνα καλής ποιότητας, σχεδόν όλο το φως θα έβγαινε από το άκρο της. Στην προκειμένη περίπτωση, το φως που εξέρχεται από το άκρο της ίνας κατευθύνεται πάνω σε ένα πέτασμα, και έτσι σχηματίζεται εκεί η κόκκινη φωτεινή κηλίδα. Πρωτοποριακό έργο στο πεδίο των οπτικών ινών για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς πραγματοποίησαν οι Alec Gambling και David Payne, του Πανεπιστημίου του Σουθάμπτον στην Αγγλία.

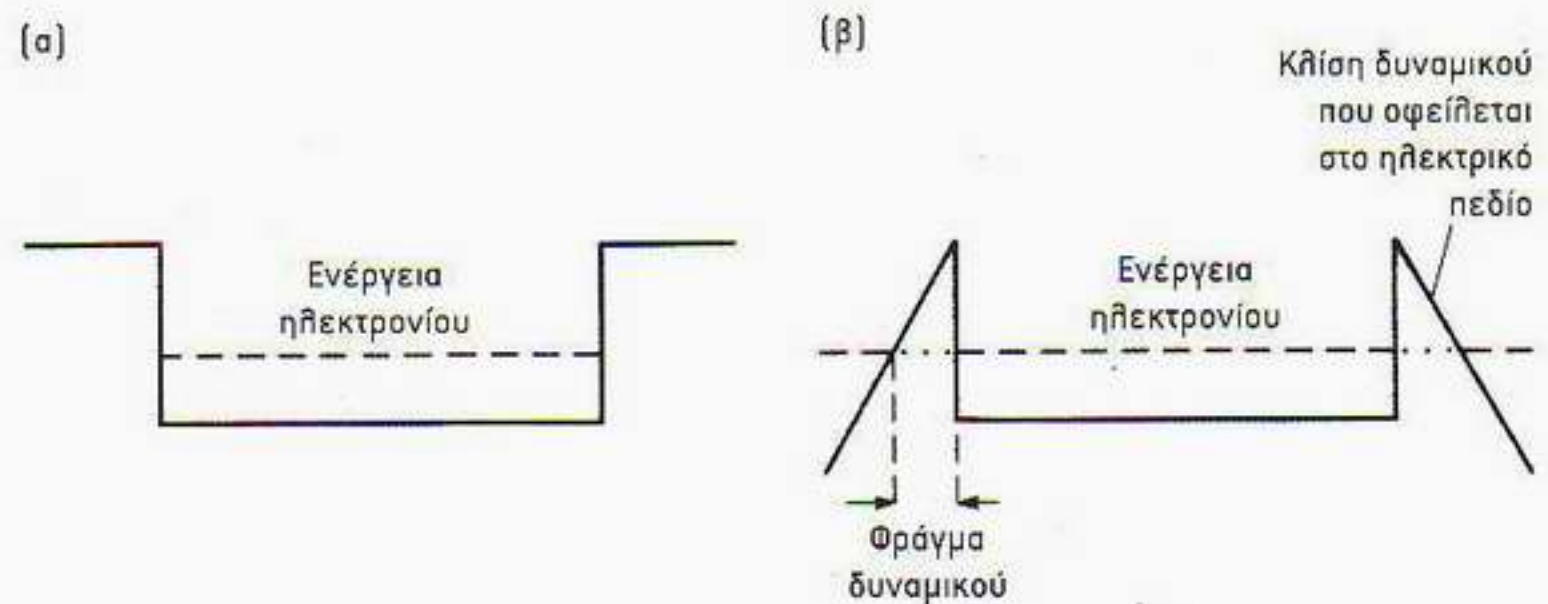
ματαιωμένη εσωτερική ολική ανάκλαση, αλλά πρόκειται για ένα ακριβές οπτικό ανάλογο του κβαντικού φαινομένου σήραγγας για τα κύματα de Broglie. Το φαινόμενο που μόλις περιγράψαμε αξιοποιείται στη σύγχρονη οπτική ως η βάση για ένα «διαχωριστή δέσμης». Το πόσο φως διαδίδεται ή ανακλάται από μια τέτοια διάταξη μπορεί να ελεγχθεί με τη ρύθμιση του πλάτους του απαγορευμένου διακένου. Το κυματικό φαινόμενο σήραγγας είναι επίσης δυνατόν να επιδειχθεί και με άλλους τύπους κυμάτων. Η Εικόνα 5.5 δείχνει τη διαπέραση φράγματος από υδάτινα κύματα.

Εφαρμογές του κβαντικού φαινομένου σήραγγας

Σήμερα, πολλές οικείες ηλεκτρονικές συσκευές στηρίζονται στην ικανότητα των κβαντικών σωματιδίων να διαπερνούν φράγματα. Το παράδειγμα που θα περιγράψουμε εδώ περιλαμβάνει ηλεκτρόνια, αλλά υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις, τις οποίες θα συναντήσουμε αργότερα, όπου στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας συμμετέχουν ακτίνες α και ζεύγη ηλεκτρονίων. Στα μέταλλα, τα ηλεκτρόνια που δρουν ως φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος μπορούν να κινούνται στο εσωτερικό τους σχετικά ελεύθερα. Σε ένα απλουστευμένο μοντέλο της δομής των μετάλλων, μπορούμε να φανταζόμαστε τα πλε-



Εικόνα 5.5 Φαινόμενο σήραγγας με υδάτινα κύματα. [α] Η ταχύτητα των υδάτινων κυμάτων εξαρτάται από το βάθος του νερού. Στη φωτογραφία, τα υδάτινα κύματα φαίνονται ως μια σειρά από ευθύγραμμα όρη που κινούνται από τα αριστερά προς τα δεξιά. Οι δύο κεκλιμένες γραμμές δείχνουν την παρουσία μιας γυάλινης πλάκας βυθισμένης στα νερά, κάτι το οποίο έχει ως συνέπεια να μεταβάλλεται το βάθος του νερού. Όπως βλέπουμε, μέσω αυτής της ρηχής περιοχής δεν διαδίδονται κύματα· τα κύματα υφίστανται «ολική εσωτερική ανάκλιση» στο όριο της περιοχής όπου αλλάζει το βάθος του νερού. Σημειώτεον ότι στην απαγορευμένη περιοχή πέραν του φράγματος υπάρχει μια ασθενής διαταραχή, η οποία όμως σαφώς δεν αντιστοιχεί σε συνηθισμένο υδάτινο κύμα. [β] Εδώ το ίδιο σκηνικό, αλλά τώρα με το πλάτος της απαγορευμένης περιοχής κατά πολύ μειωμένο. Φαίνεται καθαρά ότι το κύμα μπορεί να «υπερπηδήσει το χάσμα» και να περάσει απέναντι. Πρόκειται για ένα κυματικό φαινόμενο που το κατανοούμε αρκετά καλά και το οποίο χρησιμεύει ως βάση για την κατανόηση του κβαντομηχανικού φαινομένου σήραγγας.



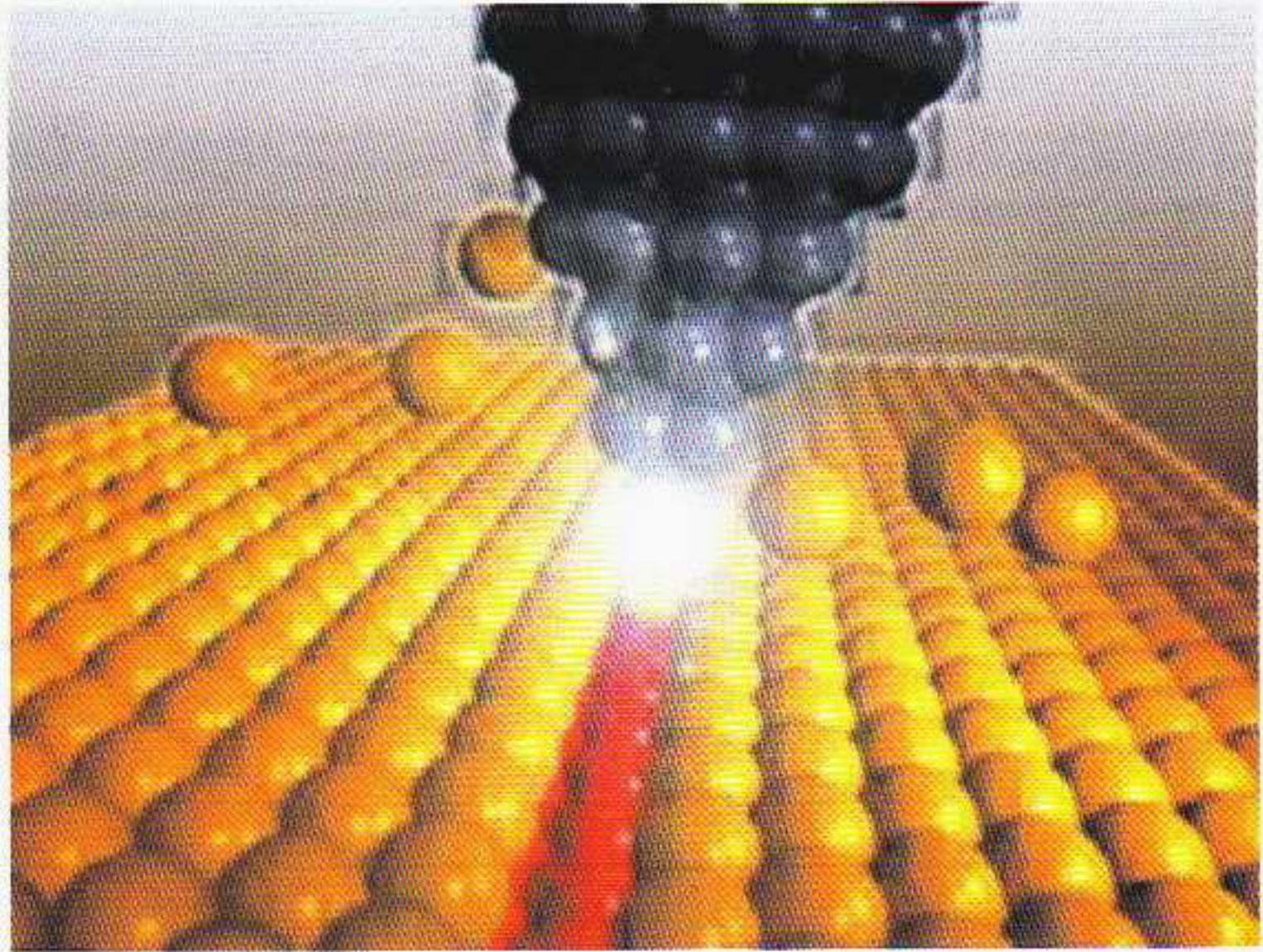
Εικόνα 5.6 [α] Απλοστευμένη εικόνα φρέατος δυναμικού για ηλεκτρόνια σε ένα μέταλλο. Η διακεκομμένη γραμμή παριστάνει την ενέργεια των τυπικών ηλεκτρονίων «αγωγιμότητας» των ηλεκτρονίων που ευθύνονται για την εμφάνιση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ενέργεια αυτή είναι χαμηλότερη από το ύψος του φράγματος, και έτσι δεν επαρκεί για να διαφύγουν τα ηλεκτρόνια από το φρέαρ. [β] Το διάγραμμα δείχνει πώς τροποποιείται το ηλεκτρικό δυναμικό παρουσία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Εξακολουθεί να υφίσταται φράγμα, το οποίο όμως τώρα είναι αρκετά λεπτό, ώστε τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να έχουν πλέον τη δυνατότητα να διαφύγουν από το μέταλλο χάρη στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας.



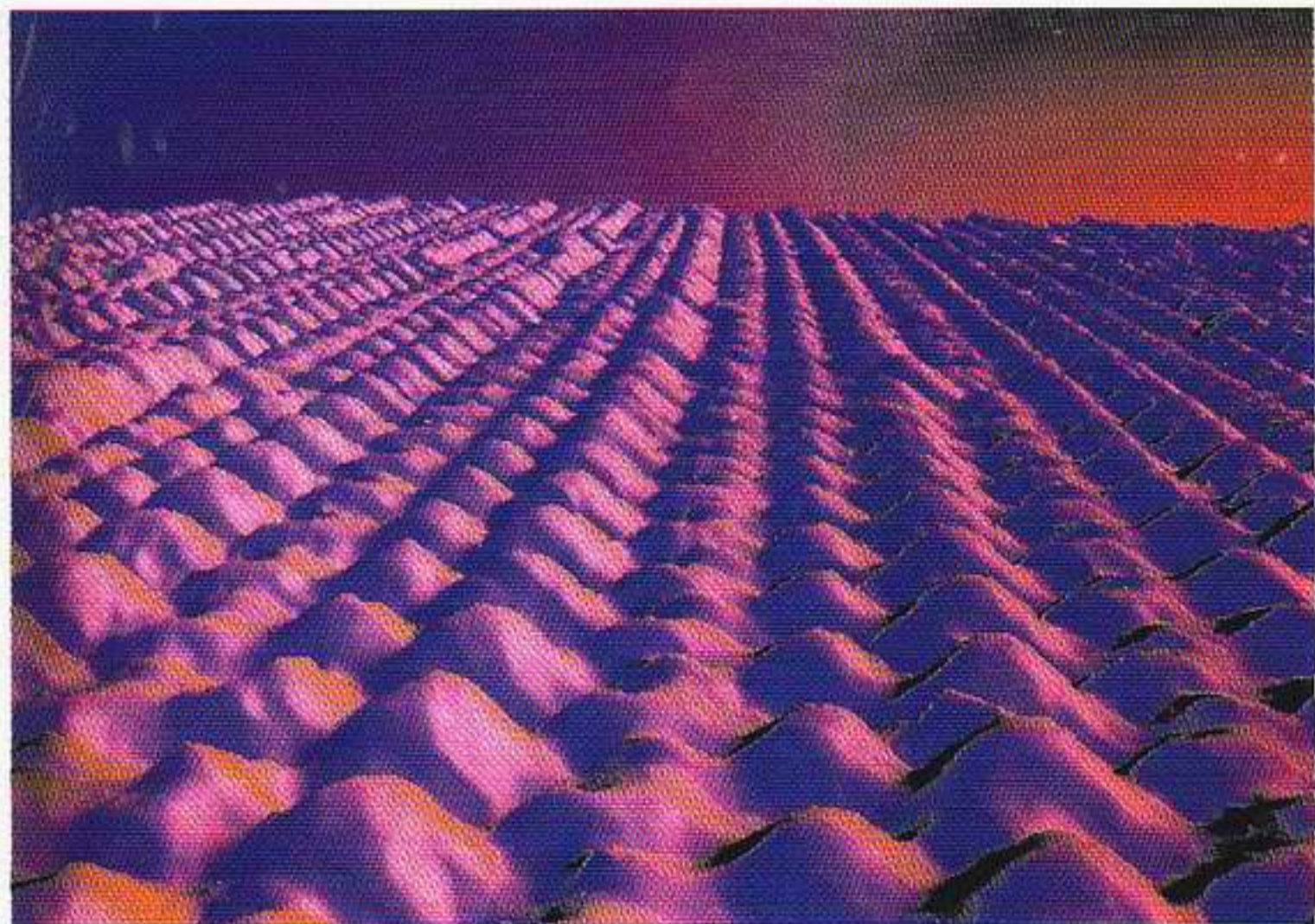
Το 1986, το βραβείο Νόμπελ φυσικής απονεμήθηκε στους Gerd Binnig (αριστερά) και Heinrich Rohrer για την ανακάλυψη του Σαρωτικού Μικροσκοπίου Σήραγγας (STM). Ο Rohrer γεννήθηκε στην Ελβετία και εκπόνησε τη διδακτορική διατριβή του στη φυσική στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας (ETH) στη Ζυρίχη, διακόπτοντάς τη κατά καιρούς για να συμπληρώσει τη βασική του εκπαίδευση στο ορεινό ελβετικό πεζικό. Επειδή η πειραματική του διάταξη παρουσίαζε εξαιρετική ευαισθησία στις δονήσεις, έμαθε να εργάζεται μετά τα μεσάνυχτα, όταν η πόλη κοιμόταν. Το 1963, ο Rohrer έγινε μέλος του Ερευνητικού Εργαστηρίου της IBM, στο γειτονικό Ρούσθικον της Ελβετίας. Ο Binnig γεννήθηκε στη Γερμανία και αρχικά θεωρούσε τη φυσική πολύ τεχνική, στερούμενη φιλοσοφικής διάστασης και ξένη προς τη δημιουργική φαντασία. Αφού αποδέχτηκε μια θέση εργασίας στο Ερευνητικό Εργαστήριο της IBM το 1978, η συνεργασία του με τον Rohrer αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον του για τη φυσική. Σε αυτό βοήθησε σσφαρώς και το βραβείο Νόμπελ!

κτρόνια να κινούνται μέσα σε ένα ελκτικό «φρέαρ δυναμικού», το οποίο οφείλεται στο πλέγμα των θετικών ιόντων του μετάλλου. Εφόσον απαιτείται ενέργεια για να απομακρυνθούν τα ηλεκτρόνια από το μέταλλο, θα πρέπει να υπάρχουν κάποια ηλεκτρικά «τοιχώματα», ή φράγματα, στα άκρα του που να τους απαγορεύουν να διαφύγουν (βλ. Εικόνα 5.6(α)). Αν, τώρα, εκθέσουμε το μέταλλο σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, τότε το ηλεκτρικό δυναμικό θα τροποποιηθεί και θα αποκτήσει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 5.6(β). Όπως παρατηρούμε, ενώ εξακολουθεί να υπάρχει ένα φράγμα δυναμικού που αποτρέπει τα ηλεκτρόνια να εγκαταλείψουν ανεμπόδιστα το μέταλλο, αυτά μπορούν πλέον να το διαπεράσουν και να διαφύγουν. Σε τούτη την κβαντομηχανική διαδικασία διαπέρασης βασίζεται η αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Εκπομπής Πεδίου. Την τελευταία δεκαετία, ωστόσο, οι συσκευές αυτές παραγκωνίστηκαν από το επαναστατικό Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας (STM) με τις εκπληκτικές του δυνατότητες, το οποίο ανέπτυξαν οι Gerd Binnig και Heinrich Rohrer.

Το 1978, ο Binnig είχε μόλις προσληφθεί από τον Rohrer ως νέος ερευνητής στο Ερευνητικό Εργαστήριο της IBM στη Ζυρίχη. Κατόπιν συζητήσεων με τον Rohrer, ο Binnig είχε την ιδέα να εκμεταλλευθεί το φαινόμενο διαπέρασης του κενού με ηλεκτρόνια για να μελετήσει τις επιφάνειες υλικών. Η βασική ιδέα είναι πολύ απλή. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, τα ηλεκτρόνια ενός στερεού έχουν μια μικρή αλλά μη μηδενική πιθανότητα να βρεθούν έξω από την επιφάνεια του μετάλλου. Όπως και στην περίπτωση του φθίνοντος φωτεινού κύματος της προηγούμενης ενότητας, η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο προβλέπεται να μειώνεται εξαιρετικά δραστικά με την αύξηση της απόστασης από την επιφάνεια. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική



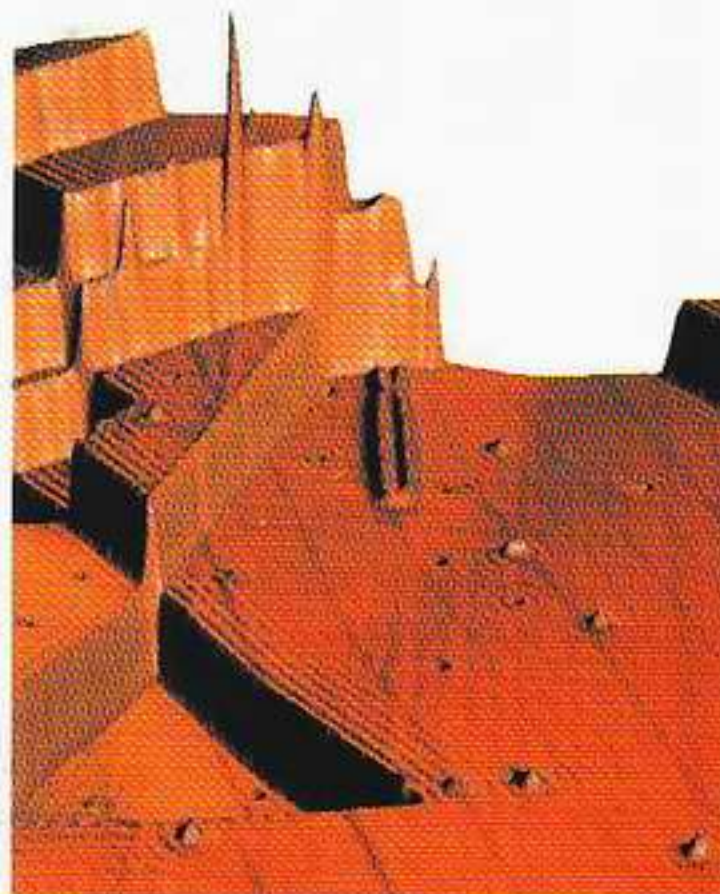
Εικόνα 5.7 Το STM αποτελείται από μια πολύ αιχμηρή ακίδα η οποία ερευνά την επιφάνεια του δείγματος με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Όταν μεταξύ της ακίδας και της επιφάνειας εφαρμοστεί υψηλή τάση, τότε, χάρη στο φαινόμενο σήραγγας, ηλεκτρόνια μπορούν να περάσουν από την αιχμή της ακίδας προς το υπό εξέταση δείγμα. Αυτό το ρεύμα σήραγγας παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στο ύψος της ακίδας πάνω από την επιφάνεια. Στο μικροσκόπιο, αυτό το ύψος μπορεί να ρυθμιστεί καθώς η ακίδα κινείται πάνω από την επιφάνεια κατά τέτοιον τρόπο ώστε το ρεύμα να διατηρείται σταθερό. Έτσι, οι ανοδικές και καθοδικές κινήσεις της ακίδας χαρτογραφούν λεπτομερώς τις ισούψείς καμπύλες της επιφάνειας. Στην εικόνα φαίνεται μια απλή αναπαράσταση των ατόμων της ακίδας και της επιφάνειας μαζί με μερικά «αδέσποτα» άτομα.



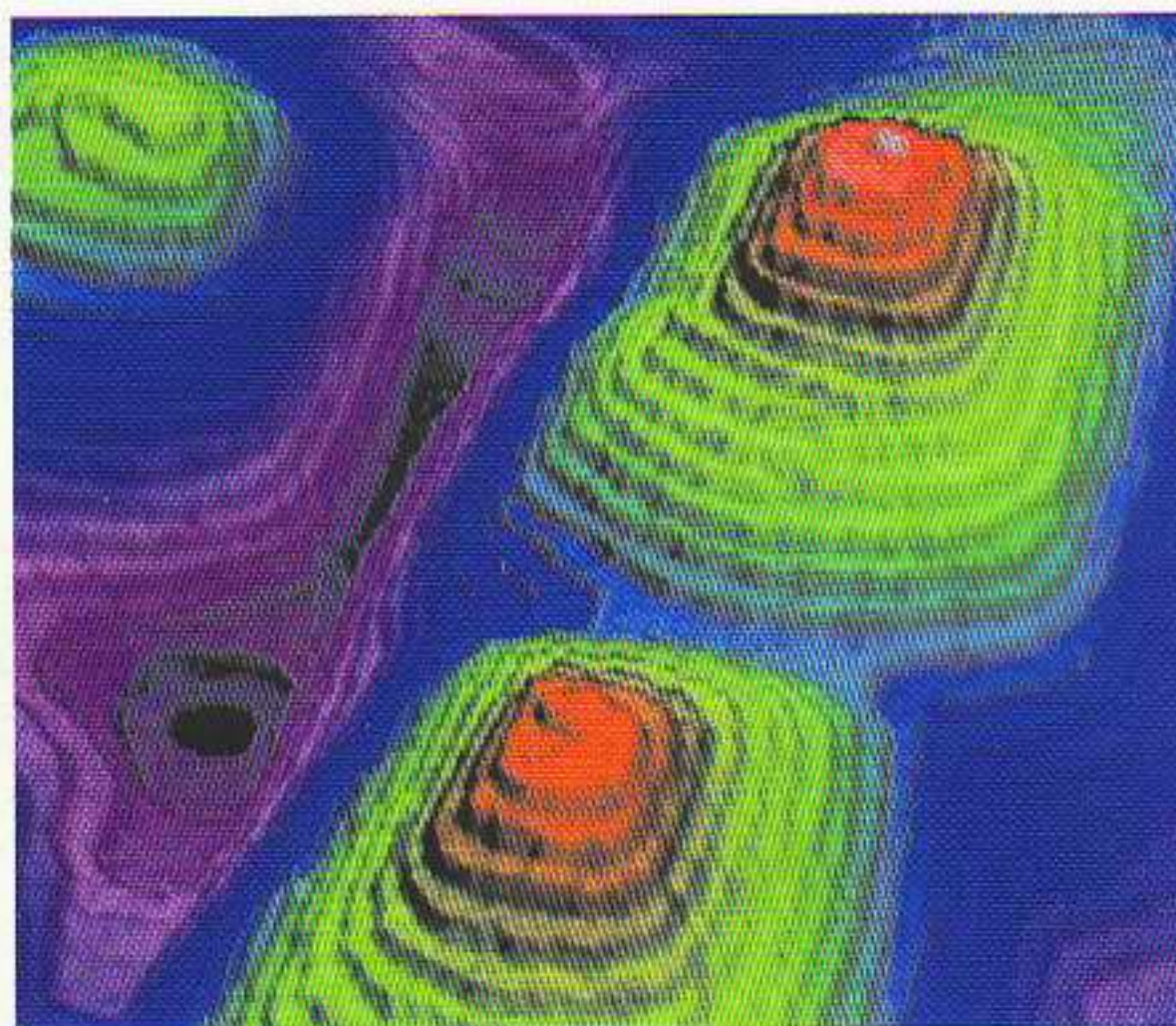
Εικόνα 5.8 Εικόνα της επιφάνειας ενός τεμαχίου πυριτίου που ελήφθη με STM. Οι σειρές των ατόμων απέχουν η μία από την άλλη λιγότερο από 2 νανόμετρα, ενώ δύο γειτονικά άτομα σε μια σειρά τα χωρίζει απόσταση μικρότερη από 1 νανόμετρο.

κή, αν φέρουμε μια αιχμηρή ακίδα πολύ κοντά στη μεταλλική επιφάνεια και εφαρμόσουμε μεταξύ τους μια ηλεκτρική τάση, τότε ένα ρεύμα σήραγγας θα διαρρέυσει το χάσμα ακόμα και στο κενό. Μιας και η κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου φθίνει τόσο γρήγορα, η ένταση του ρεύματος σήραγγας θα εξαρτάται εξαιρετικά ευαίσθητα από τις αυξομειώσεις της απόστασης που χωρίζει την ακίδα από το μέταλλο. Αν καταστεί δυνατόν να ελεγχθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια η απόσταση της αιχμής της ακίδας από την επιφάνεια, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ένταση του ρεύματος για να μετρήσουμε το μέγεθος διάφορων χαρακτηριστικών πάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Οι Binnig και Rohrer δεν άργησαν να αντιληφθούν ότι, αν κατάφερναν να αναπτύξουν κάποιο όργανο ικανό να σαρώνει συστηματικά και με ακρίβεια την επιφάνεια ενός μετάλλου, τότε θα ήταν σε θέση να εκμεταλλευθούν το παραπάνω φαινόμενο για να κατασκευάσουν ένα «χάρτη ισοϋψών» για ολόκληρη την επιφάνεια. Ενώ θεωρητικά κάτι τέτοιο φαινόταν εφικτό, χρειάστηκε να υπερπηδηθούν πολλά πειραματικά εμπόδια ώσπου να μετουσιωθεί η ιδέα αυτή σε ένα εργαλείο χρήσιμο για τη μελέτη των επιφανειών. Πρώτα απ' όλα, οι Binnig και Rohrer έπρεπε να λύσουν το πρόβλημα της κατασκευής ακίδων με εύρος αιχμής μόλις μερικών ατόμων. Εν συνεχεία, έπρεπε να κατασκευάσουν μια διάταξη ικανή να τοποθετεί και να ελέγχει αξιόπιστα την αιχμή έτσι ώστε η απόστασή της από την επιφάνεια να μην παρουσιάζει σφάλμα μεγαλύτερο από μερικές ατομικές διαμέτρους. Ιδού πώς περιέγραψε ο Binnig τη στιγμή που είδαν για πρώτη φορά να εκδηλώνεται το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας, και την οποία ανέμεναν με τόσο ενδιαφέρον:

Κάνοντας τις μετρήσεις μας νύχτα και σχεδόν μη μπορώντας να αναπνεύσουμε από την έξαψή μας, κυρίως όμως για να μην προκαλούμε μικροδονήσεις, τελικά λάβαμε τις πρώτες ξεκάθαρες ενδείξεις εκθετικής εξάρτησης της έντασης του ρεύματος σήραγγας I από την απόσταση s που χώριζε την αιχμή της ακίδας



Εικόνα 5.9 Ένα «τοπίο» χαλκού που τραβήχτηκε με STM. Η διακριτική ικανότητα είναι επαρκής ώστε να διακρίνονται τα μεμονωμένα ατομικά «σκαλοπάτια».



Εικόνα 5.10 Η συγκεκριμένη εικόνα από STM αποκαλύπτει πώς αναπτύχθηκαν ελικοειδείς δομές αντιμονιδίου του γαλλίου πάνω σε υπόστρωμα αρσενικούχου γαλλίου. Η ικανότητα ανάπτυξης δομών σε ατομικό επίπεδο με τέτοια ακρίβεια θα καταστήσει δυνατή τη δημιουργία μιας νέας γενιάς ηλεκτρονικών και φωτονικών διατάξεων.

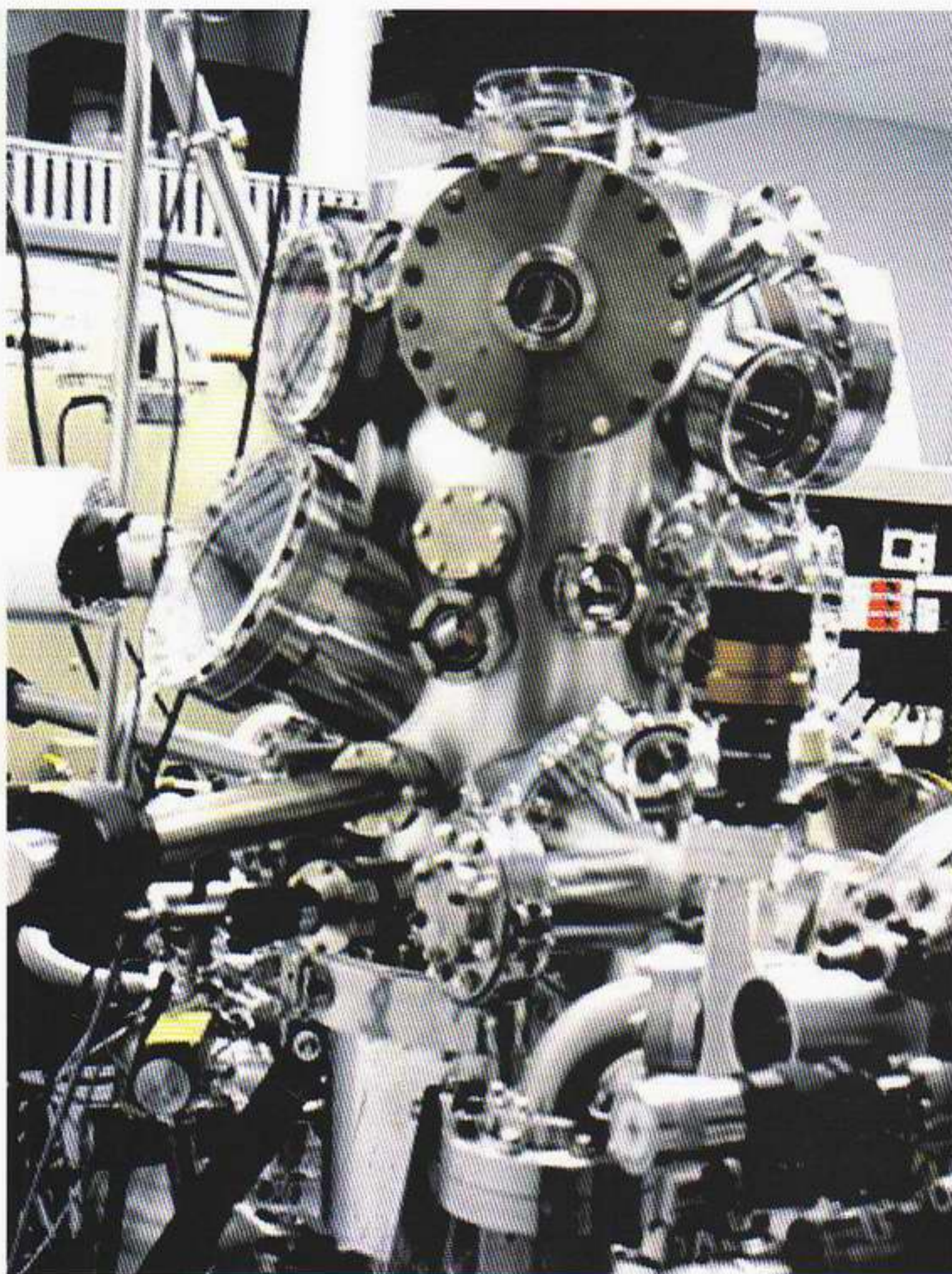
από το δείγμα, εξάρτηση η οποία αποτελεί διακριτικό γνώρισμα του φαινομένου σήραγγας. Ήταν η σημαδιακή νύχτα της 16ης Μαρτίου του 1981.

Το εντυπωσιακό χαρακτηριστικό τού STM ήταν η απίστευτη ευαισθησία του. Οι Binnig και Rohrer ανέφεραν ότι «μεταβολή της απόστασης κατά μία μόνο ατομική διάμετρο προκαλεί μεταβολή στο ρεύμα σήραγγας κατά έναν παράγοντα 1.000 περίπου». Με το νέο τους όργανο, βεβαίωναν ότι «το μικροσκόπιό μας είναι σε θέση να “παρατηρεί” τις επιφάνειες άτομο προς άτομο. Μπορεί ακόμα και να διακρίνει χαρακτηριστικά μεγέθους μόλις 1/100 περίπου του ατόμου.» Πιθανώς επειδή η συσκευή περιελάμβανε μια τόσο εξωτική τεχνολογία —αφού βασιζόταν στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας—, η εφεύρεσή τους δεν αναγνωρίστηκε αμέσως ως το επαναστατικό νέο εργαλείο που αποδείχθηκε ότι ήταν στο διάστημα το οποίο διέρρευσε έκτοτε. Η επιστημονική κοινότητα δεν πείστηκε για την ισχύ τού STM παρά μόνο μετά το 1982, όταν οι Binnig και Rohrer επέλυσαν ένα μακροχρόνιο πρόβλημα σχετικά με τη διάταξη των ατόμων στην επιφάνεια του πυριτίου (βλ. Εικόνες 5.7 και 5.8). Το Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας ανοίγει τώρα ολόκληρα νέα πεδία έρευνας στο επίπεδο του ατόμου, με εικόνες από τον ατομικό κόσμο που κόβουν την ανάσα (Εικόνες 5.9-5.12). Για το έργο του πάνω στο STM, ο Binnig δώλωσε:

Δεν μπορούσα να πάρω τα μάτια μου από τις εικόνες. Ήταν σαν να έμπαινα σε έναν καινούργιο κόσμο. Μου φαινόταν πως είχα φτάσει στο αξεπέραστο ζενίθ της επιστημονικής μου σταδιοδρομίας, και ως εκ τούτου, υπό μία έννοια, στο τέλος της.

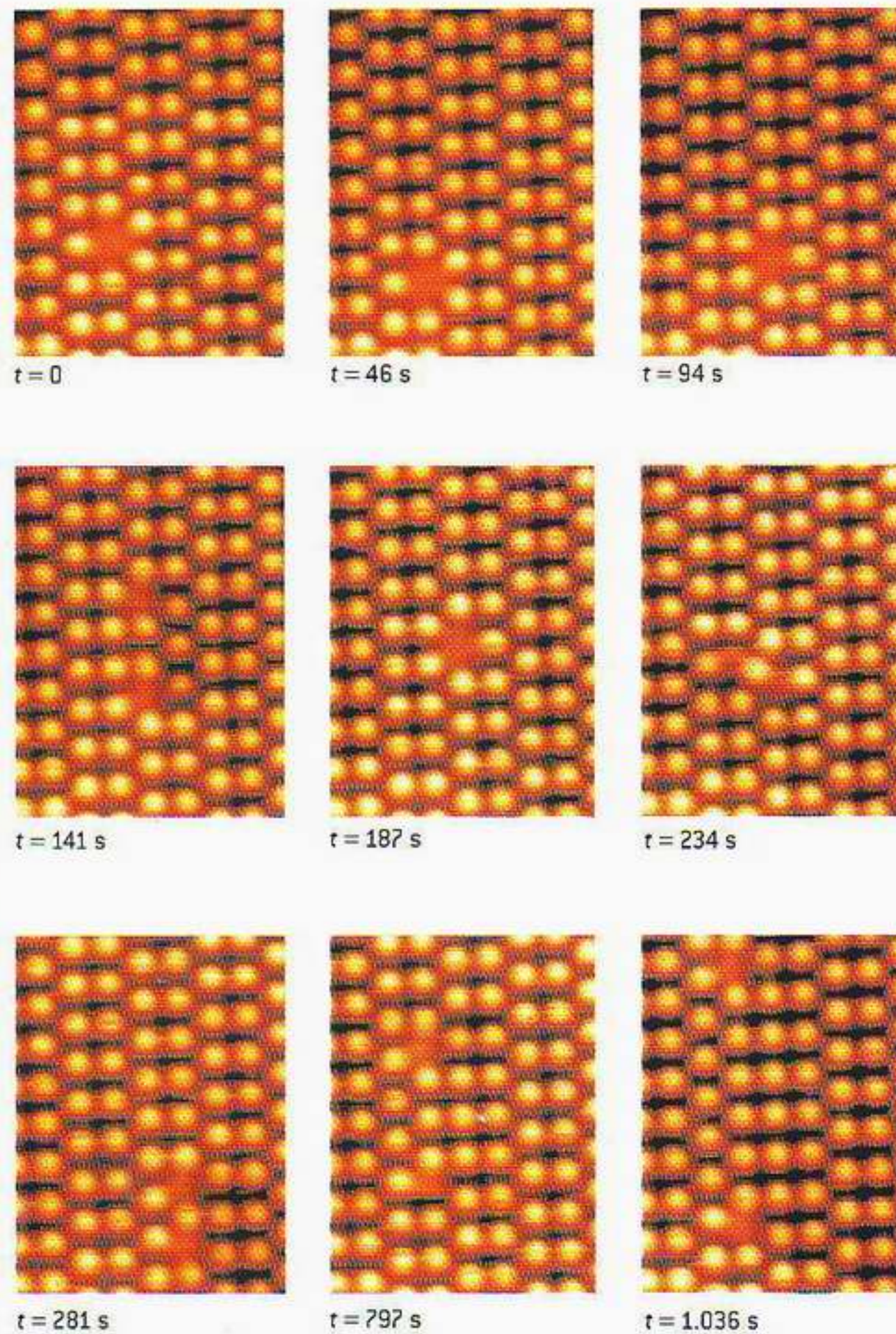
Το 1986, οι Binnig και Rohrer τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής.

Καθώς πειραματιζόνταν με το STM, οι Binnig και Rohrer παρατήρησαν ότι περιστασιακά η αιχμή της ακίδας προσείλκυε μεμονωμένα άτομα. Μετακινώντας την αιχμή πέρα-δώθε, ανακάλυψαν ότι μπορούσαν να μετακινούν άτομα πάνω στην επιφάνεια. Η ικανότητα του STM να μετακινεί άτομα



Εικόνα 5.11 Σύγχρονο Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας.

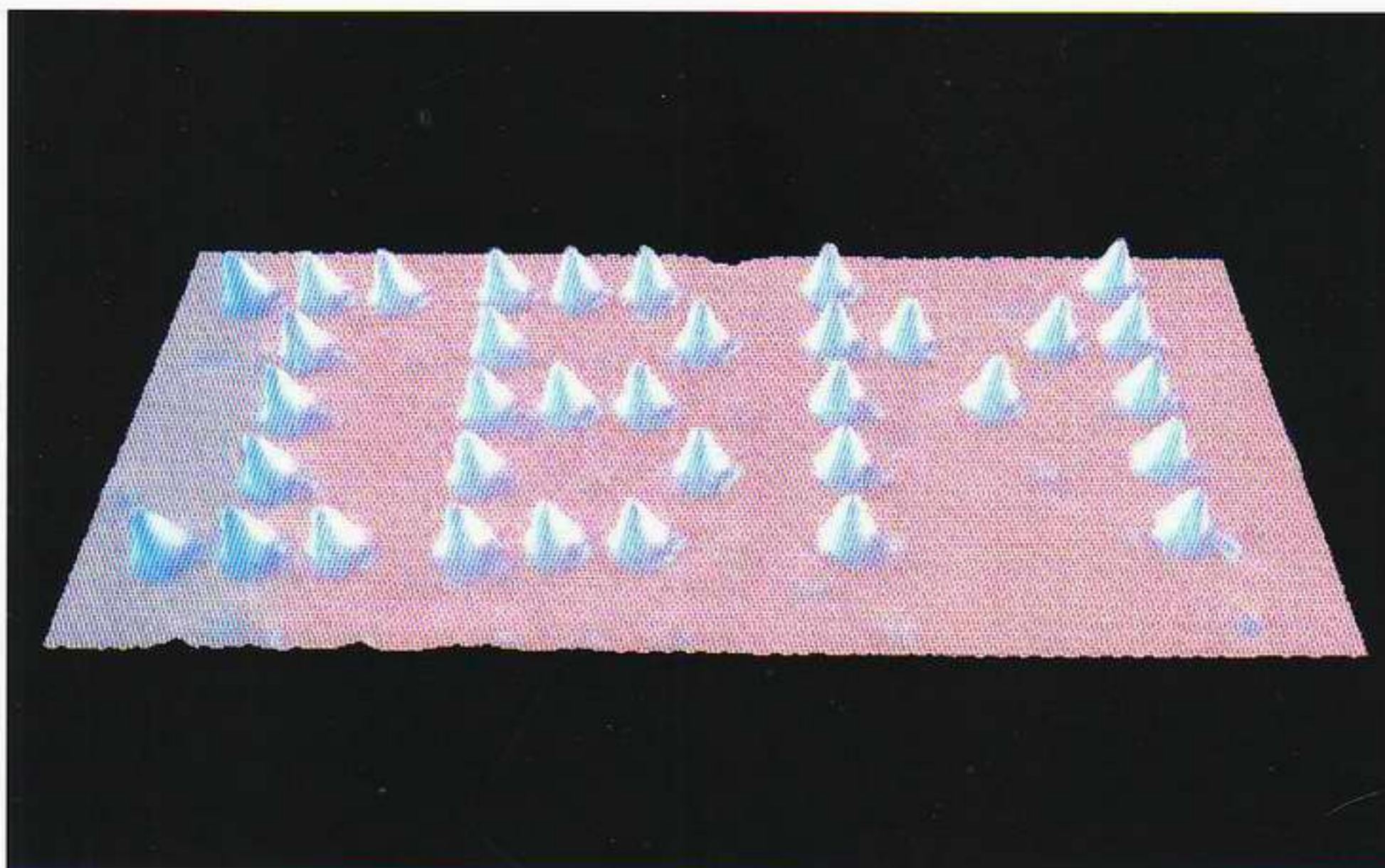
μετεξελίχθηκε σε έναν συναρπαστικό νέο τεχνολογικό κλάδο από μια ομάδα των Εργαστηρίων της IBM στο Άλμαντιν της Καλιφόρνιας. Τα ονόματα των Don Eigler και Erhard Schweizer απασχόλησαν πρώτη φορά τα πρωτοσέλιδα του Τύπου όταν οι δύο ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα STM για να κατασκευάσουν μια εκδοχή του λογοτύπου της IBM στο ατομικό επίπεδο (Εικόνα 5.13). Στην αρχή τοποθέτησαν μια καθαρή επιφάνεια νικελίου σε κενό και ψύχραναν το σύστημα στους 4 περίπου βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν χρησιμοποιώντας υγρό ήλιο για να ελαχιστοποιήσουν τις όποιες θερμικές διαταραχές. Εν συνεχεία, οι Eigler και Schweizer εισήγαγαν στη συσκευή μια μικρή ποσότητα ξένου και, με τη βοήθεια του STM, εντόπισαν άτομά του προσκολλημένα στην επιφάνεια του νικελίου. Κατόπιν, σύροντάς τα, διέταξαν 35 από αυτά με τον κατάλληλο τρόπο ώστε να σχηματιστούν τα αρχικά IBM —εννέα



Εικόνα 5.12 Το STM μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παρακολούθηση της κίνησης των ατόμων. Σε αυτή τη χρονική ακολουθία στιγμιότυπων (όπου το t συμβολίζει το χρόνο και το s τη μονάδα μέτρησής του, το δευτερόλεπτο) βλέπουμε διαδοχικές εικόνες της επιφάνειας ενός κρυστάλλου γερμανίου. Τη στιγμή $t = 0$, παρατηρούμε ότι υπάρχει μια κενή θέση, από όπου λείπει ένα άτομο γερμανίου. Σε θερμοκρασία δωματίου, τα άτομα γερμανίου διαθέτουν αρκετή θερμική ενέργεια ώστε στην κενή θέση να μεταπηδήσει ένα άλλο άτομο, αφήνοντας πίσω του κενή τη θέση που κατείχε προηγουμένως. Αυτή η εκπληκτική ακολουθία εικόνων, που ελήφθησαν με ένα STM, δείχνει πώς η κενή θέση φαίνεται να περιπλανάται πάνω στην επιφάνεια.

άτομα για το γράμμα «I», και από δεκατρία για τα «B» και «M». Οι δύο ερευνητές χρειάστηκαν περί τη μία ώρα για να σχηματίσουν κάθε γράμμα και ανακάλυψαν ότι, παρά τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η συσκευή ήταν τόσο σταθερή ώστε «θα μπορούσαν να διεξαγάγουν πολυήμερα πειράματα σε ένα και μόνο άτομο». Ο Eigler και οι συνεργάτες του κατασκεύασαν επίσης τον κβαντικό «φράκτη» που συναντήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα έχουμε την ευκαιρία να θαυμάσουμε και άλλα παραδείγματα της δουλειάς τους στο Κεφάλαιο 9, όπου και θα ασχοληθούμε με την κβαντική τεχνολογία. Περισσότερα παραδείγματα παρουσιάζονται στον ιστότοπο της IBM.

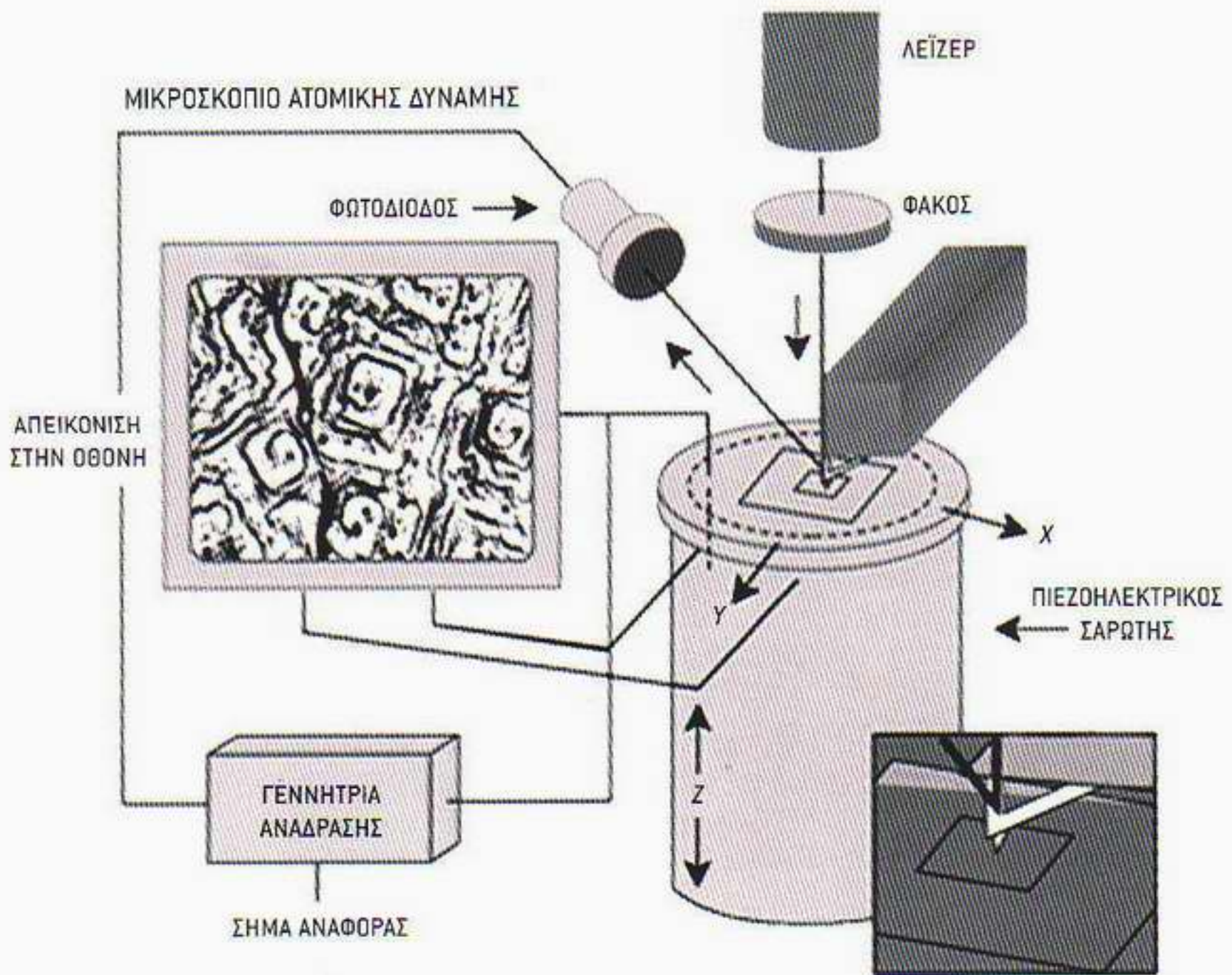
Εδώ επιβάλλεται να αναφερθεί και μία ακόμη τεχνολογική εξέλιξη που προέκυψε από την εργασία των Binnig και Rohrer. Η εικόνα που παίρνουμε από ένα STM εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας, οι οποίες ενδέχεται να είναι αρκετά περίπλοκες, με αποτέλεσμα η προκύπτουσα εικόνα να μην επιδέχεται εύκολη ερμηνεία. Το 1985, ενώ ο Binnig ε-



Εικόνα 5.13 Η περίφημη ατομική εκδοχή του λογοτύπου της IBM, από τους Don Eigler και Erhard Schweizer. Οι δύο ερευνητές ξεκίνησαν με μια καθαρή επιφάνεια νικελίου σε συνθήκες πολύ υψηλού κενού και εισήγαγαν μια μικρή ποσότητα Ξένου. Το σύστημα ψύχθηκε έως τους 4 κέλβιν, για να ελαχιστοποιηθεί η οποιαδήποτε θερμική κίνηση, και στη συνέχεια άρχισε η διαδικασία εντοπισμού και τοποθέτησης των μεμονωμένων ατόμων Ξένου: όποτε ο Eigler και ο Schweizer έβρισκαν ένα άτομο Ξένου, το έσυραν χρησιμοποιώντας την αιχμή της ακίδας του STM στη σωστή θέση, ώστε να σχηματιστεί το λογότυπο. Χρειάστηκαν περίπου μία ώρα για να σχηματίσουν το κάθε γράμμα.



Ο Carl Quate, ο Gerd Binnig και ο Christoph Gerber απολαμβάνουν ένα ποτήρι κρασί στο Ρουσθικόν τον Μάιο του 2000. Το 1986, οι τρεις τους συνέγραψαν ένα άρθρο για έναν νέο τύπο μικροσκοπίου —το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM). Το AFM σαρώνει την υπό εξέταση επιφάνεια από πολύ κοντά με μια ακίδα, όπως και το STM. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, δεν μετρά το ρεύμα σήραγγας αλλά τις σπειροειδέστες ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της αιχμής της ακίδας και της επιφάνειας. Η ακίδα τοποθετείται στην ελεύθερη άκρη ενός προεξέχοντος βραχίονα, οι μικρές αποκλίσεις του οποίου μπορούν να μετρηθούν.

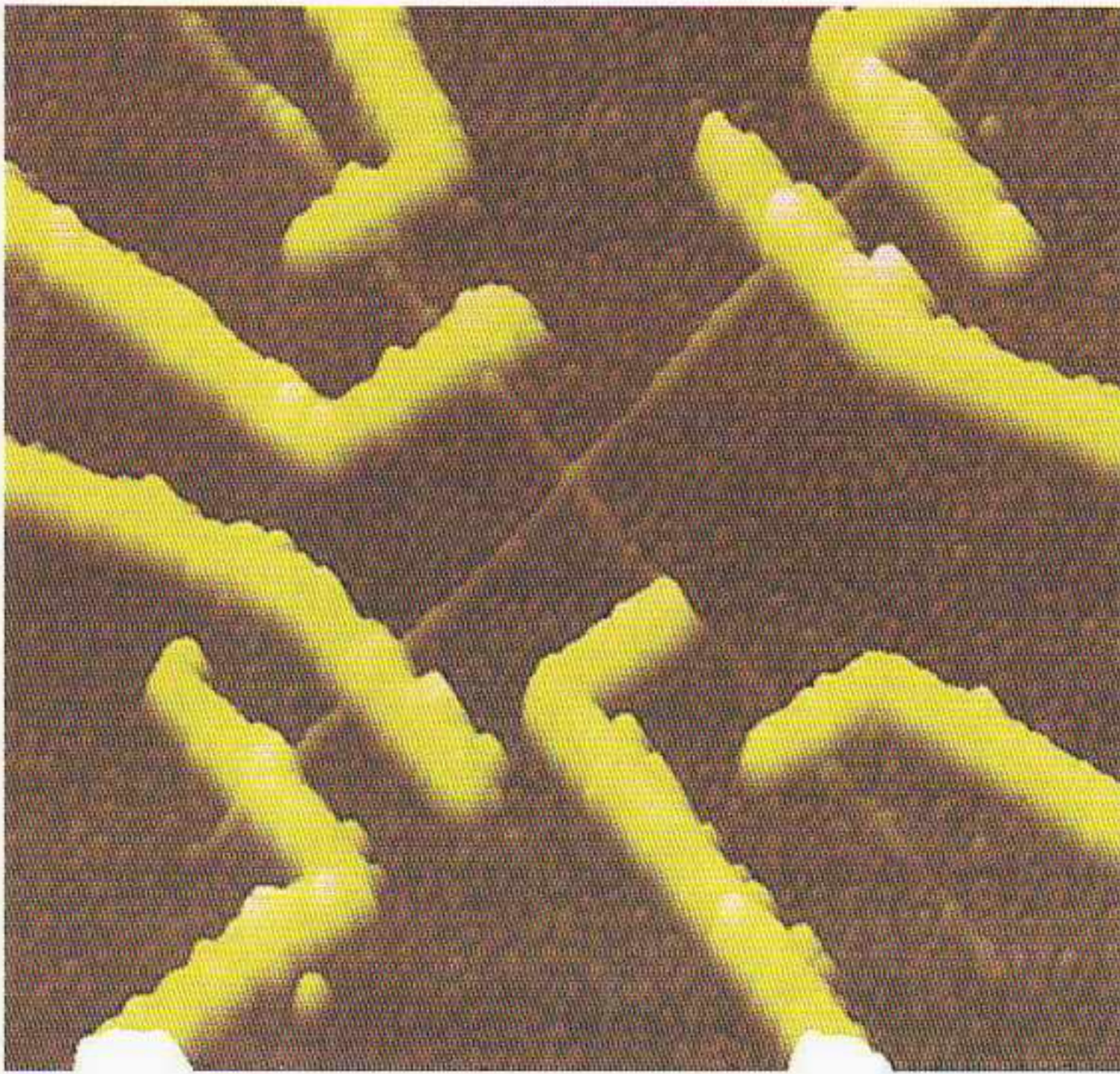


Εικόνα 5.14 Το AFM εφευρέθηκε το 1986. Μια αιχμή τοποθετείται στο ελεύθερο άκρο ενός μικροσκοπικού προεξέχοντος βραχίονα, ο οποίος στη συνέχεια σαρώνει μια επιφάνεια με τρόπο παρόμοιο με εκείνον του STM. Καθώς σαρώνεται το δείγμα, οι ασθενείς δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της αιχμής και της επιφάνειας αναγκάζουν το βραχίονα να αποκλίνει. Με τη μέτρηση αυτής της απόκλισης αποκαθύπτεται μια τρισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας.

πισκεπτόταν συναδέλφους του στην Καλιφόρνια, ανέπτυξαν από κοινού έναν καινούργιο τύπο σαρωτικού μικροσκοπίου —το Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (AFM). Αντί να χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα σήραγγας, το AFM χρησιμοποιεί μια αιχμηρή αδαμάντινη ακίδα τοποθετημένη σε έναν προεξέχοντα βραχίονα (βλ. Εικόνες 5.14 και 5.15). Καθώς η αδαμάντινη αιχμή σαρώνει την υπό εξέταση επιφάνεια, ασθενείς ατομικές δυνάμεις κάμπτουν το βραχίονα προκαλώντας του ανιχνεύσιμες μετατοπίσεις που μπορούν να μετρηθούν με ποικίλες μεθόδους. Ο ίδιος ο Binnig χρησιμοποίησε ένα STM για να μετρήσει αυτές τις απειροελάχιστες κινήσεις του βραχίονα. Το AFM έχει πια καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο μελέτης επιφανειών και είναι συμπληρωματικό του STM.

Πυρηνική φυσική και διάσπαση α

Ένα από τα μεγάλα αινίγματα στην πρώτη φάση ανάπτυξης της πυρηνικής φυσικής αφορούσε τη διάσπαση α. Το αίνιγμα συνίστατο στο εξής: Οι φυσικοί μέτρησαν την ενέργεια του σωματιδίου α που εκτοξευόταν από τον πυρήνα κατά τη ραδιενεργό διάσπαση του ουρανίου, και τη βρήκαν περίπου 4 Mev. Εδώ χρειάζεται να πούμε δυο λόγια για τις μονάδες μέτρησης της ενέρ-



Εικόνα 5.15 Σε τούτη την εικόνα, που ελήφθη με μικροσκόπιο AFM, φαίνονται τεθλασμένοι νανοσωληνές άνθρακα διαμέτρου 1 νανομέτρου διατεταγμένοι πάνω σε μια επιφάνεια πυρτίου. Οι νανοτεχνολόγοι πειραματίζονται με αυτά τα συστήματα αποσκοπώντας στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων εξαιρετικά μικρών διαστάσεων.

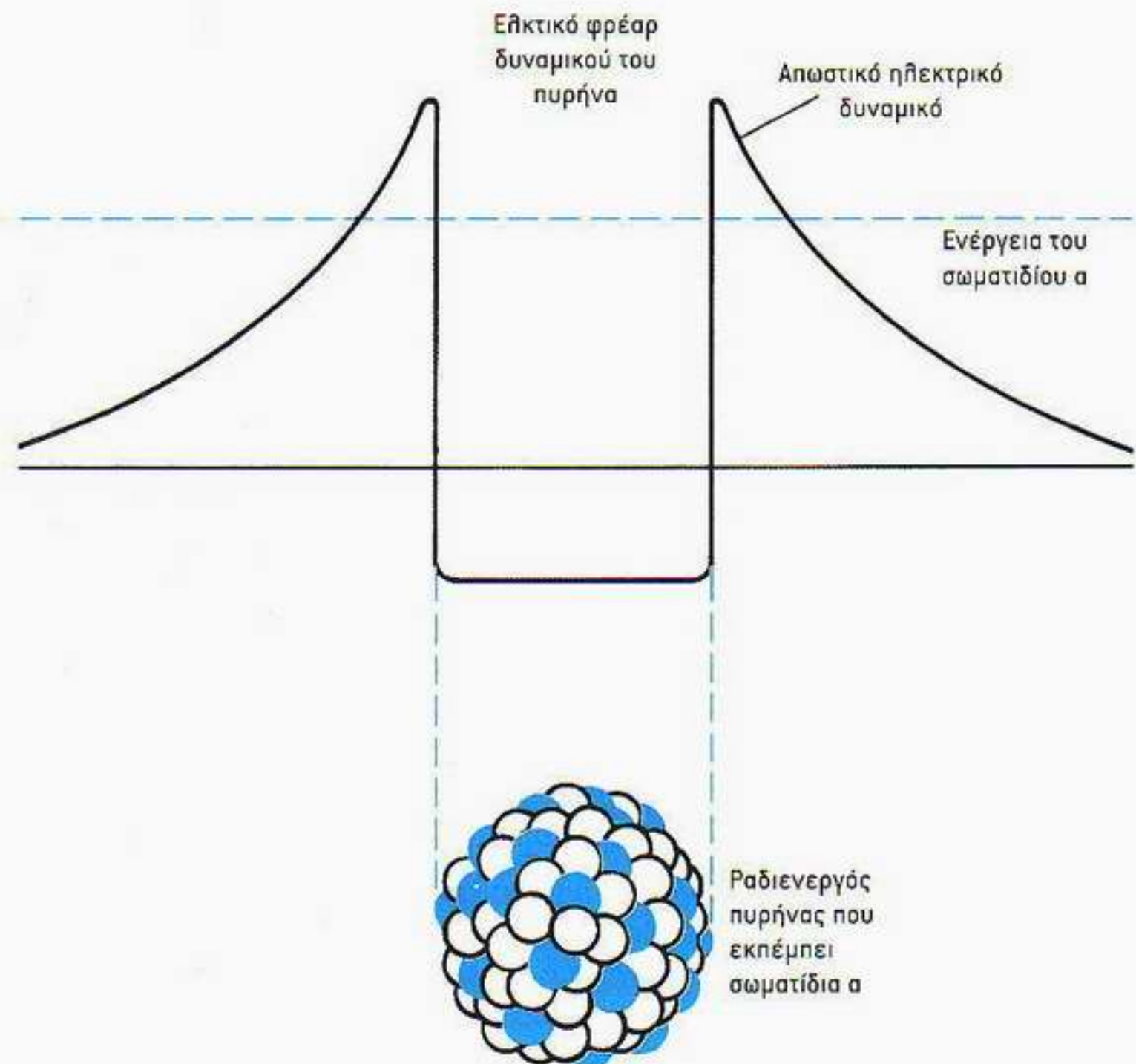
γεια. Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV) ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν κινηθεί μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού 1 βολτ. Ανάλογες ενέργειες συναντάμε στις ηλεκτρονιακές ενεργειακές στάθμες των ατόμων. Από την άλλη, οι διαδικασίες που σημειώνονται στον πυρήνα έχουν ενέργειες πολύ μεγαλύτερες, οπότε ως μονάδα ενέργειας προσφέρεται το 1 εκατομμύριο ηλεκτρονιοβόλτ, ή μεγαηλεκτρονιοβόλτ (MeV). Αλλά ας επιστρέψουμε στο θέμα μας. Εκτός από την ανακάλυψη του πυρήνα, την οποία περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4, ο Rutherford είχε πραγματοποιήσει και πολλά άλλα πειράματα βάλλοντας σωματίδια α κατά ατόμων, και διαπίστωσε, μεταξύ άλλων, ότι τα σωματίδια αυτά, με ενέργεια περίπου 9 MeV, απωθούνται έντονα από το θετικό φορτίο του πυρήνα. Με άλλα λόγια, για να εισχωρήσουν μέσα στον πυρήνα, τα σωματίδια α απαιτείται να έχουν ενέργεια περισσότερη από τα 4 MeV που παρατηρήθηκε στα εκπεμπόμενα κατά τη ραδιενεργό διάσπαση σωματίδια α . Για να παρουσιάσουμε το πρόβλημα πιο παραστατικά, ας εξετάσουμε την ανάλογη κατάσταση με το βαγονάκι. Είναι σαν να στέκεστε πάνω στη σιδηροτροχιά, στη μέση της διαδρομής μεταξύ ανώτερου και κατώτερου σημείου, και ξαφνικά να νιώθετε ένα βαγονάκι να σας σπρώχνει. Το μόνο μέρος από το οποίο θα μπορούσε να έχει έρθει το βαγονάκι είναι η κορυφή της τροχιάς. Αλλά αν είχε πέσει πάνω σας ένα βαγονάκι κατακλυδώντας με ορμή από την κορυφή, ασφαλώς θα σας είχε τραυματίσει σοβαρά. Αντίθετα, όμως, εσείς δεν νιώσατε παρά μόνο μια πολύ ελαφρά ώθηση!

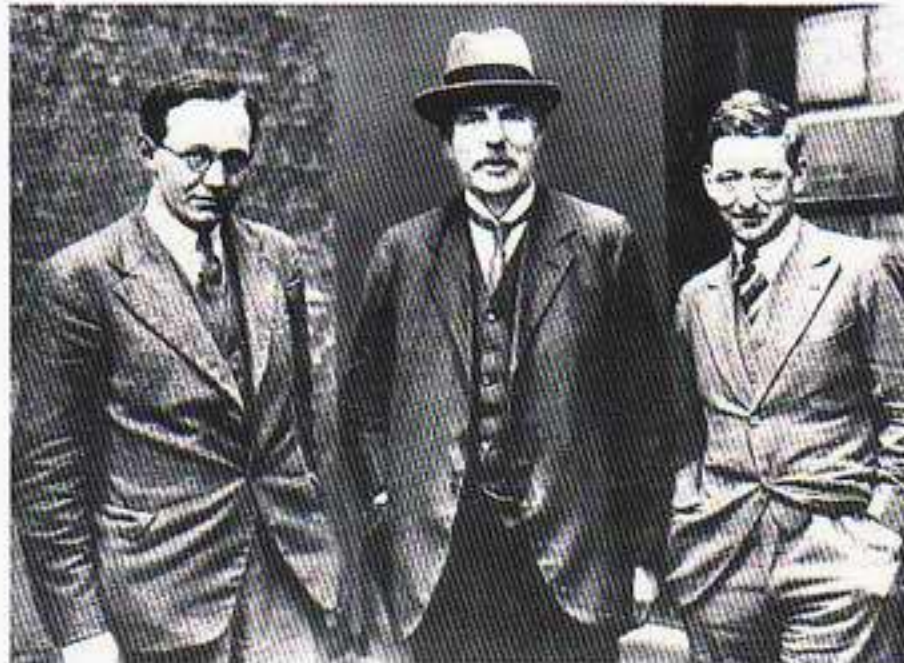


Ο George Gamow (1904-1968) υπήρξε ο δημιουργός του ατρόμητου εξερευνητή κυρίου Τόμπκινς. Ο Gamow ήταν εγγονός ενός στρατηγού του τσάρου και έλαβε το διδακτορικό δίπλωμά του από το Πανεπιστήμιο του Λένινγκραντ. Αφού εργάστηκε στα περισσότερα σημαντικά επιστημονικά κέντρα της Ευρώπης, εγκαταστάθηκε τελικά στις ΗΠΑ. Εκτός από το ότι υπήρξε ένας από τους γνωστότερους εκδαικτετές της επιστήμης, ο Gamow συνέβαλε σημαντικό στην ανάπτυξη της πυρηνικής φυσικής, της κοσμογονίας και της μοριακής βιολογίας.

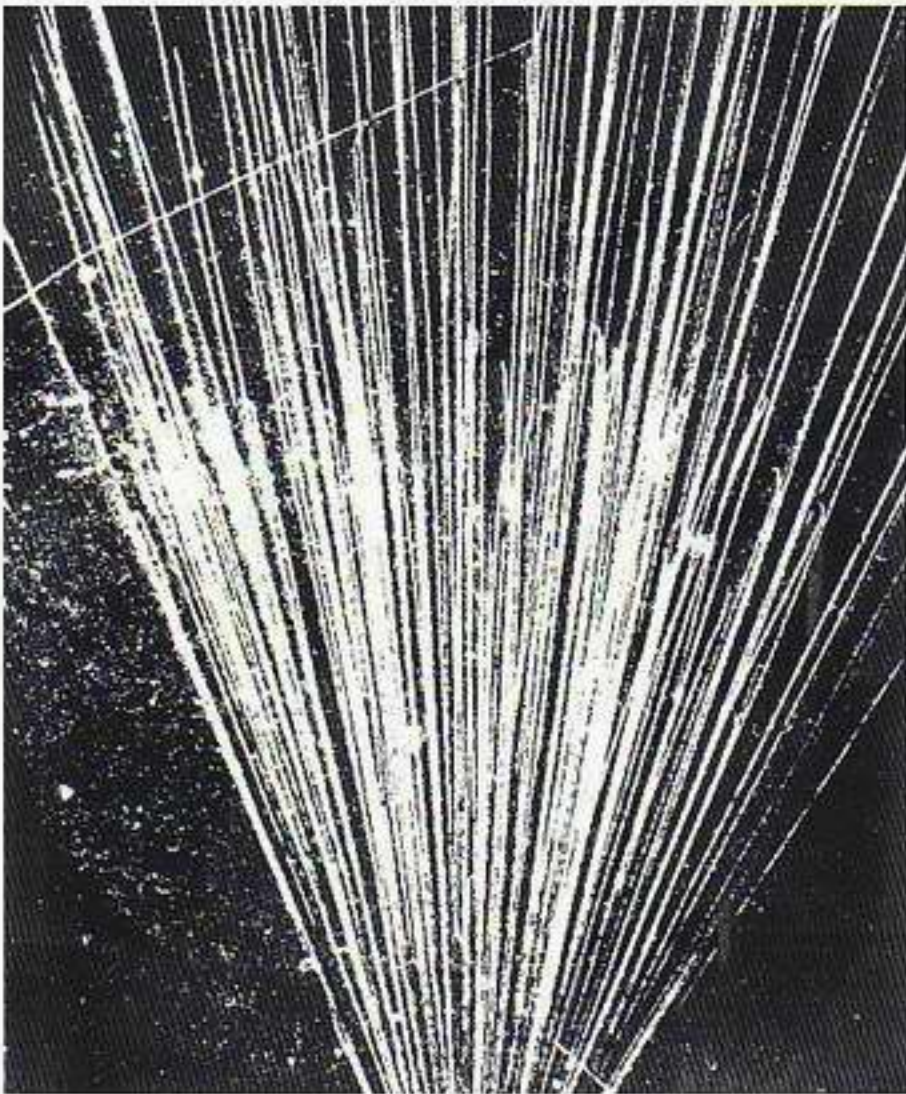
Εικόνα 5.16 Ο Gamow πρωτοεφάρμοσε τη φυσική του κβαντικού φαινομένου σήραγγας στη διαδικασία της διάσπασης α. Επειδή τα σωματίδια α χαρακτηρίζονται από ασυνήθιστη σταθερότητα, μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκονται μέσα σε ένα φρέαρ δυναμικού το οποίο οφείλεται σε όλα τα υπόλοιπα σωματίδια του πυρήνα. Ένα σωματίδιο α είναι δυνατόν, χάρη στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας, να διαπεράσει το φράγμα και να διαφύγει από τον πυρήνα, προκαλώντας έτσι τη διάσπασή του.

Με βάση τα όσα έχουμε ήδη πει για το φαινόμενο σήραγγας, η απάντηση στο παράδοξο των σωματιδίων α είναι τώρα αρκετά προφανής. Το 1928, όμως, όταν προτάθηκε το φαινόμενο σήραγγας ως εξήγηση της διάσπασης α από τον ρώσο φυσικό George Gamow και δύο αμερικανούς φυσικούς, τον Edward Condon και τον Ronald Gurney, αποτελούσε εντελώς νέα ιδέα και μια από τις πρώτες εφαρμογές της κβαντικής μηχανικής στον πυρήνα. Στον πυρήνα του κοινού ισότοπου ουρανίου, του ^{238}U , υπάρχουν 92 πρωτόνια και 146 νετρόνια, και όλα αυτά συνωστίζονται σε μια πολύ μικρή περιοχή. Οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις ανάμεσα στα *νουκλεόνια* —όπως ονομάζονται τα πρωτόνια και τα νετρόνια συλλήβδην— μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργούν ένα ελκτικό φρέαρ δυναμικού που τα κρατά όλα μαζί μέσα στον πυρήνα, σχεδόν όπως συγκρατούνται μέσα στο μέταλλο τα ηλεκτρόνια στο απλουστευμένο μοντέλο που παρουσιάσαμε στην Εικόνα 5.6(α). Μέσα στον πυρήνα, όμως, δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια ενίοτε ενώνονται και σχηματίζουν ένα σωματίδιο α. Το προκύπτον δυναμικό, το οποίο «αισθάνεται» το σωματίδιο α, φαίνεται στην Εικόνα 5.16. Αυτό το πυρηνικό δυναμικό μοιάζει τώρα πολύ με εκείνο το οποίο «αισθάνεται» ένα ηλεκτρόνιο μέσα σε ένα μέταλλο παρουσία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου (Εικόνα 5.6(β)). Αν και το ύψος του φράγματος είναι περίπου 30 MeV, το σωματίδιο α μπορεί να διαφύγει από τον πυρήνα και να εμφανιστεί ως ελεύθερο σωματίδιο με ενέργεια μόλις 4 MeV. Σήμερα ξέρουμε πολύ περισσότερα για τις πυρηνικές δυνάμεις και μπορούμε να κάνουμε υπολογισμούς χρησιμοποιώντας πολύ ρεαλιστικότερα πυρηνικά δυναμικά.





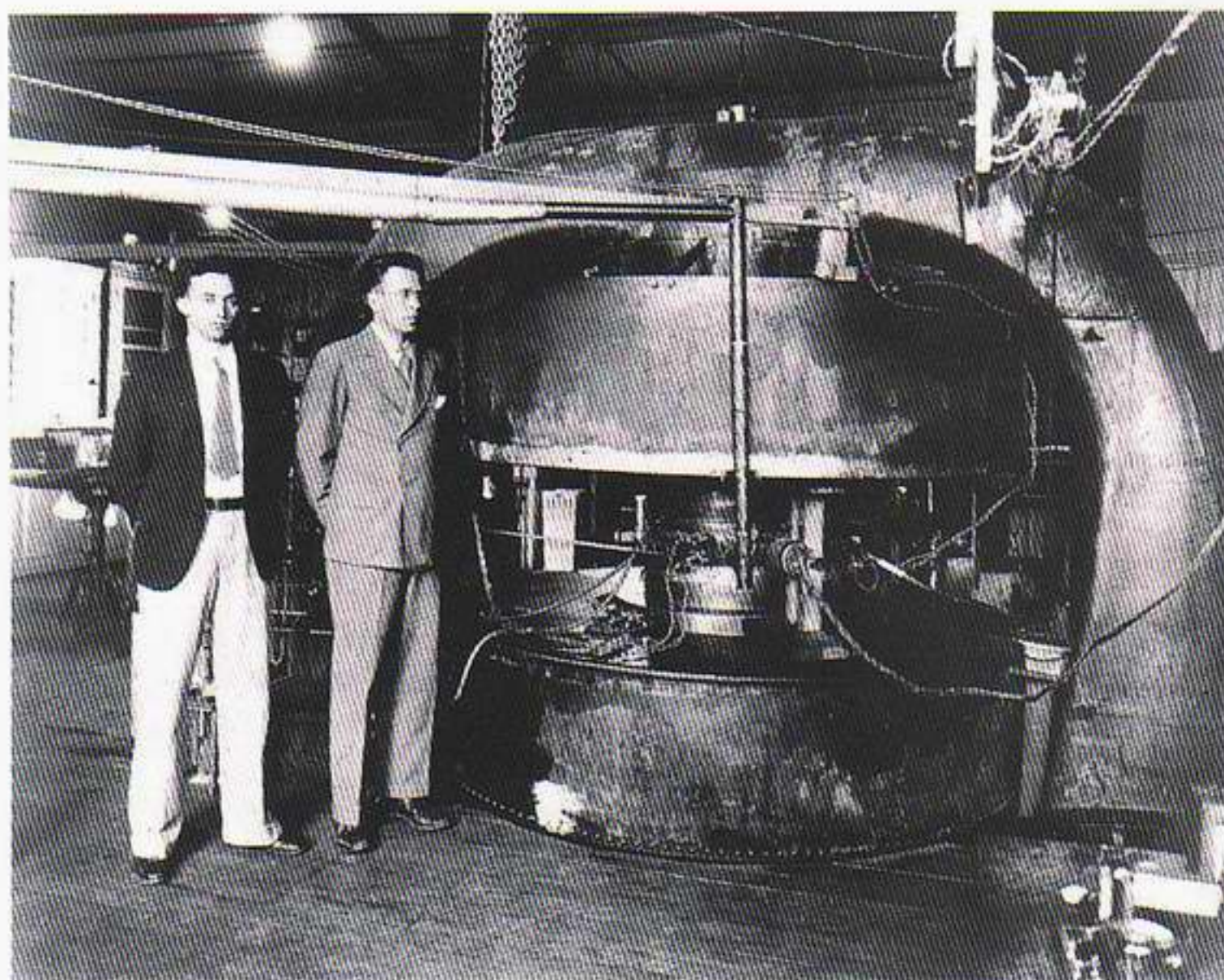
Ο Cockcroft (δεξιά) και ο Walton (αριστερά), εκατέρωθεν του Rutherford.



Εικόνα 5.17 Ίχνη τροχιών σωματιδίων α σε ένα θάλαμο νέφους. Τα ίχνη αυτά αποτελούνται από μικροσκοπικά σταγονίδια νερού που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα συμπύκνωσης κατά μήκος της τροχιάς ενός σωματιδίου α . Εφόσον ένα σωματίδιο α έχει πολύ μικρή πιθανότητα να συναντήσει τον πυρήνα ενός από τα άτομα του αερίου, τα ίχνη είναι σχεδόν ευθείες. Στο πάνω μέρος της εικόνας, όμως, βλέπουμε μια τροχιά που διασπαιρώνεται με τις υπόλοιπες και η οποία φαίνεται να αναδύεται από έναν μικρό κόμμο στην τροχιά ενός από τα σωματίδια α . Στην πραγματικότητα, εδώ έχουμε μια πυρηνική αντίδραση: ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο παράγονται από τη σύγκρουση του πυρήνα του ηλίου με έναν πυρήνα αζώτου. Η τροχιά που κατευθύνεται «πιο ξα» είναι του πρωτονίου, ενώ η σύντομη τροχιά με φορά προς τα εμπρός ανήκει σε έναν πυρήνα οξυγόνου που δημιουργήθηκε κατά την πυρηνική αντίδραση.

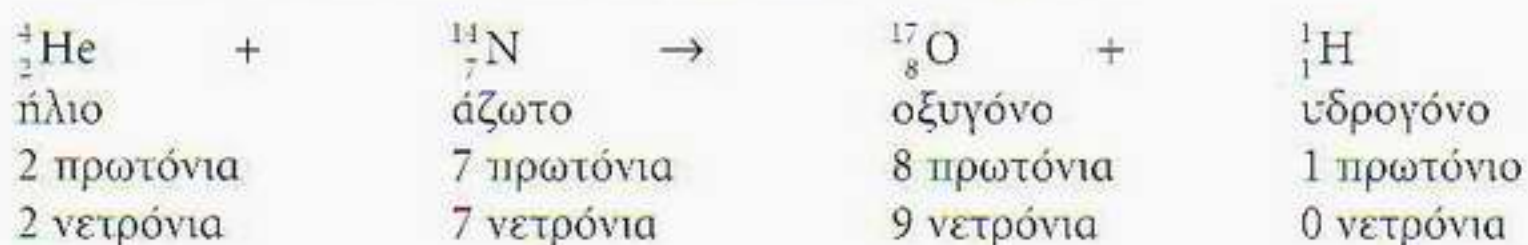
Μολαταύτα, η εξήγηση της διάσπασης α με τη βοήθεια του φαινομένου σήραγγας παραμένει έγκυρη ως προς τα βασικά της σημεία.

Υπάρχει ένα ενδιαφέρον «αντίστροφο» πρόβλημα, για τη λύση του οποίου ο Cockcroft και ο Walton κέρδισαν το βραβείο Νόμπελ. Το 1919, ο Rutherford, και πάλι στα πειράματά του με τα σωματίδια α , παρατήρησε την πρώτη τεχνητά παραχθείσα πυρηνική αντίδραση. Καθώς έβαλλε σωματίδια α



Ο Livingstone και ο Lawrence δίπλα στο κύκλοτρό τους. Με τη διάταξη αυτή παρήχθη το 1937 το πρώτο τεχνητό χημικό στοιχείο, το τεχνητίο. Το τεχνητίο έχει 43 πρωτόνια, αλλά δεν το συναντάμε στη φύση επειδή όλη του τα ισότοπα είναι ραδιενεργά με μικρούς χρόνους ημιζωής.

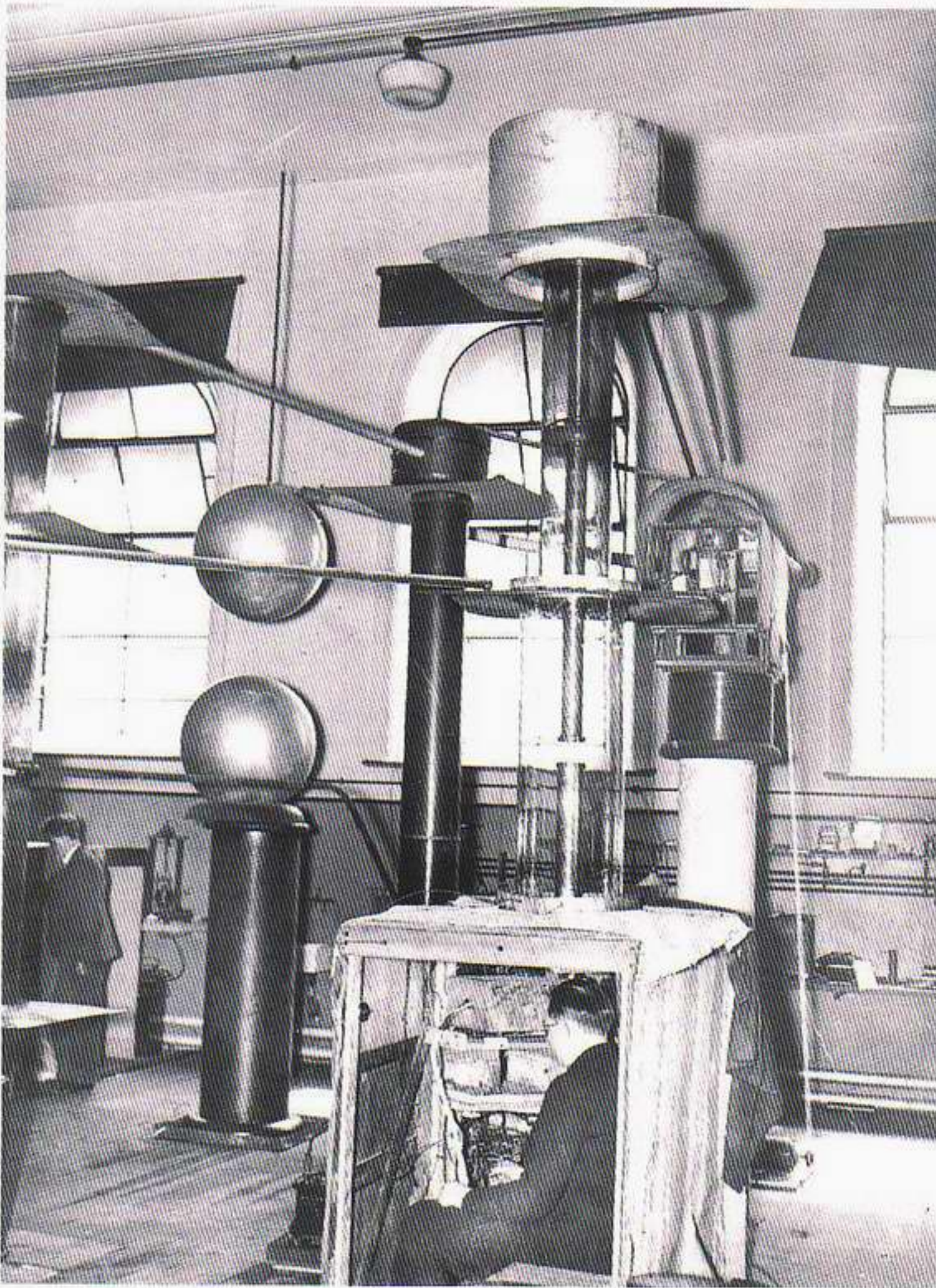
κατά ατόμων αζώτου, διαπίστωσε ότι σε μερικές περιπτώσεις παράγονταν πρωτόνια. Έτσι, ο Rutherford συμπίερανε ότι είχε δει μια «πυρηνική διάσπαση». Την αντίδραση αυτή θα τη γράφαμε σήμερα ως εξής:



Στην Εικόνα 5.17 βλέπουμε μια παλιά φωτογραφία της εν λόγω αντίδρασης. Ο Rutherford έκλεινε το επιστημονικό του άρθρο για την παρατήρηση αυτή με το εξής σχόλιο

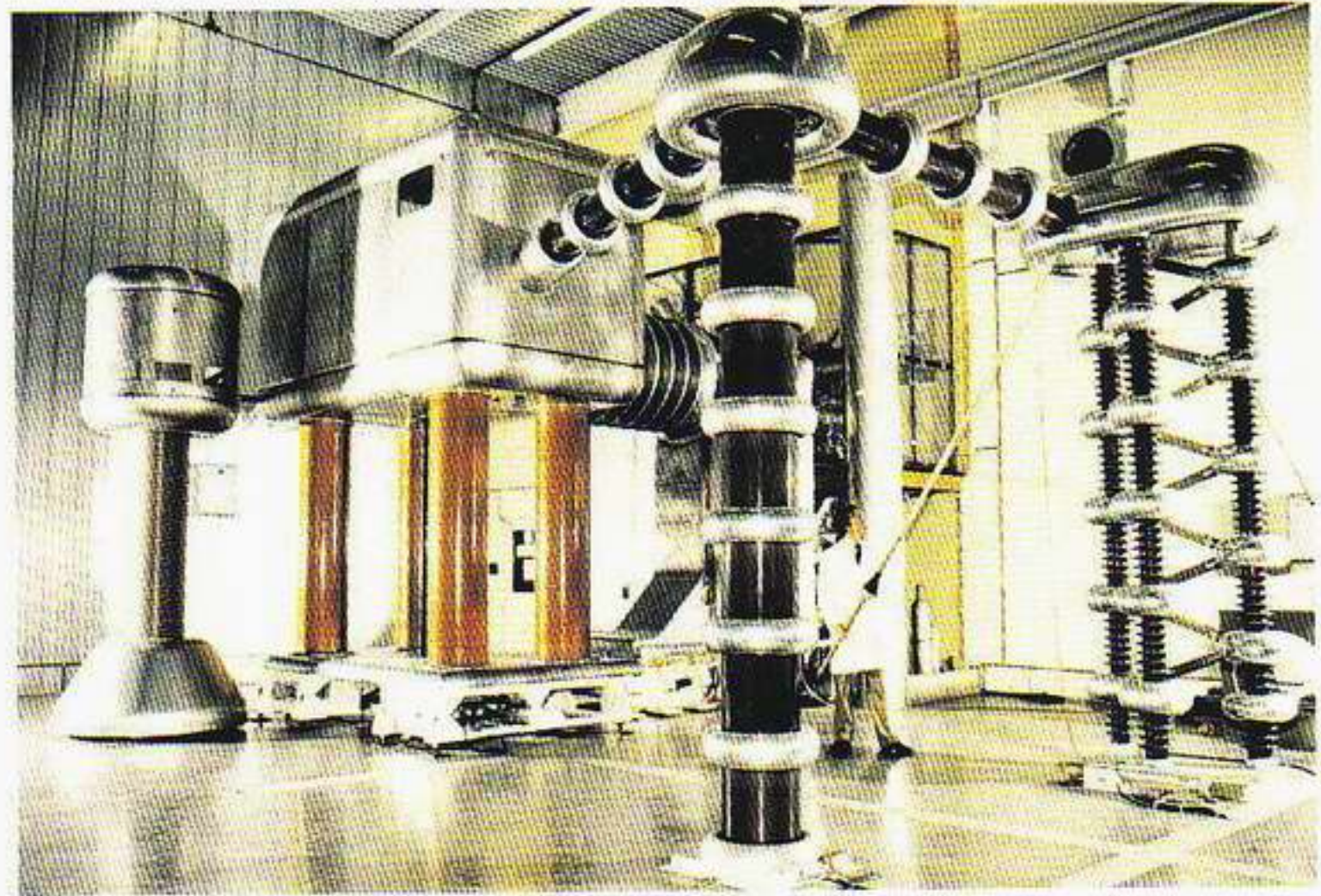
Αν για το πείραμα είχαμε στη διάθεσή μας σωματίδια α —ή άλλα παρόμοια βλήματα— με ακόμα μεγαλύτερη ενέργεια, θα μπορούσαμε να ελπίζουμε ότι θα διασπούσαμε την πυρηνική δομή πολλών από τα ελαφρότερα άτομα.

Αυτή η δυνατότητα έγινε πραγματικότητα όταν εφευρέθηκαν νέοι τύποι επιταχυντών σωματιδίων. Το 1932, την ίδια χρονιά που ο Chadwick ανακάλυψε το νετρόνιο, ένας αμερικανός φυσικός ονόματι Ernest Lawrence κατασκεύασε μια μηχανή που ονομάστηκε *κύκλοτρο*, και η οποία μπορούσε να επιταχύνει σωματίδια σε ενέργειες αρκετών μεγαηλεκτρονιοβόλτ. Αλλά εκείνη την εποχή ήταν διαδεδομένη η πεποίθηση ότι, για να διεισδύσουν τα φορτισμένα σωματίδια στην καρδιά του πυρήνα, θα έπρεπε να έχουν ενέργειες πολλών μεγαηλεκτρονιοβόλτ έτσι ώστε να υπερνικήσουν το φράγμα δυναμικού. Συνεπεία τούτου, τον άθλο της «διάσπασης του ατόμου» τον επέτυχαν πρώτοι οι Cockcroft και Walton, οι οποίοι εργάζονταν στο Πανεπιστήμιο του Καί-



Εικόνα 5.18 Η ηλεκτροστατική γεννήτρια των Cockcroft και Walton. Στον κλωβό κάτω από τη διάταξη κάθεται ο Cockcroft.

μπριτζ, με έναν πολύ πιο πρωτόγονο επιταχυντή, χρησιμοποιώντας πρωτόνια με ενέργεια μικρότερη από 1 MeV! Πρωτόνια χαμηλής ενέργειας όπως αυτά κατορθώνουν περιστασιακά να εισχωρήσουν στον πυρήνα, διαπερνώντας το φράγμα δυναμικού, και να εκκινήσουν μια αντίδραση. Λέγεται πως ο Cockcroft, σε μια σπάνια επιδεικτική χειρονομία, θεάθηκε να περιφέρεται στους δρόμους του Καίμπριτζ φωνάζοντας σε όλους αδιακρίτως: «Διασπάσαμε το άτομο!» Φυσικά, το όνομα «θραύστης ατόμων» ανήκει στον λαϊκό Τύπο. Εκείνο που είχαν παρατηρήσει οι Cockcroft και Walton ήταν η πρώτη τεχνητά προκληθείσα πυρηνική αντίδραση — μια σύγχρονη εκδοχή των παλιών ονείρων των αλχημιστών για τη μεταστοιχείωση των χημικών στοιχείων. Είχαν μετατρέψει το λίθιο σε ήλιο μέσω της αντίδρασης



Εικόνα 5.19 Η εικονιζόμενη γεννήτρια υψηλής τάσης τροφοδοτούσε με σωματίδια τον επιταχυντή NIMROD στο Εργαστήριο Rutherford, κοντά στο Χάργουελ της Αγγλίας.



Το πείραμά τους θα μπορούσε να το είχε πραγματοποιήσει ο Lawrence σχεδόν ένα χρόνο νωρίτερα, αλλά εκείνος δεν πίστευε ότι άξιζε τον κόπο να αναλάβει ένα τέτοιο εγχείρημα, διότι νόμιζε πως τα «βλήματα» έπρεπε να έχουν αρκετή ενέργεια για να υπερπηδήσουν το ηλεκτρικό απωστικό φράγμα που περιβάλλει τον πυρήνα. Όταν το επίτευγμα των Cockcroft και Walton έγινε πρωτοσέλιδο δημοσίευμα στις εφημερίδες, ο Lawrence περνούσε το μήνα του μέλιτος σε ένα σκάφος στο Κονέκτικατ. Έσπευσε αμέσως να στείλει στο συνεργάτη του James Brady, στο Μπέρκλεϊ της Καλιφόρνιας, το εξής τηλεγράφημα: «Ο Cockcroft και ο Walton διέσπασαν το άτομο του λιθίου. Προμηθεύσου λίθιο από το τμήμα χημείας και άρχισε τις προετοιμασίες για να επαναλάβουμε το πείραμα με το κύκλοτρο. Επιστρέφω σύντομα.» Ο Brady έδειξε το τηλεγράφημα στη μνηστή του σχολιάζοντας: «Νά τι σκέφτονται οι φυσικοί το μήνα του μέλιτος.»

Υπάρχει και ένα σημαντικό «υστερόγραφο» στο πείραμα των Cockcroft και Walton. Οι δύο ερευνητές μπόρεσαν να προβλέψουν τις ενέργειες των δύο σωματιδίων α που παρατήρησαν στην αντίδραση, στηριζόμενοι στην αρχή διατήρησης της ενέργειας την οποία όμως επεξέτειναν καταλλήλως ώστε να περιλαμβάνει και τις διαφορές πυρηνικών μαζών βάσει της περίφημης σχέσης του Αϊνστάιν για την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας

$$E = mc^2$$

ενέργεια ίσον μάζα επί ταχύτητα του φωτός στο τετράγωνο.

Η εν λόγω σχέση ορίζει ότι η μάζα μπορεί να θεωρείται ως μια άλλη μορφή ενέργειας, και ότι η ποσότητα της ενέργειας E που ισοδυναμεί σε δεδομένη μάζα m υπολογίζεται από τον παραπάνω τύπο. Ας τον εφαρμόσουμε λοιπόν στην πυρηνική αντίδραση των Cockcroft και Walton. Γράφουμε και στα δύο μέλη της εξίσωσης τις ενέργειες μάζας —ή τις ενέργειες ηρεμίας, όπως ανα-

φέρονται συνήθως— των σωματιδίων και σε αυτές προσθέτουμε τις αντίστοιχες κινητικές ενέργειες των σωματιδίων. Για μια δέσμη πρωτονίων που προσπίπτει σε έναν σταθερό στόχο λιθίου, παίρνουμε τότε μια εξίσωση «μάζας-ενέργειας» με την εξής μορφή:

$$\begin{aligned} &(\text{μάζα πρωτονίου}) + (\text{μάζα λιθίου}) + (\text{κινητική ενέργεια πρωτονίου}) = \\ &= 2 \times (\text{μάζα ηλίου} + \text{κινητική ενέργεια ηλίου}). \end{aligned}$$

Εισάγοντας τις μάζες και την κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος πρωτονίου, συμπεραίνουμε ότι η κινητική ενέργεια των δύο πυρήνων ηλίου θα πρέπει να ανέρχεται σε 8,5 MeV. Σημειωτέον ότι η τιμή αυτή υπερβαίνει κατά πολύ την αρχική κινητική ενέργεια του πρωτονίου και συμφωνεί ικανοποιητικά με τις πειραματικές μετρήσεις. Τούτη η αρχή του ισοζυγίου μάζας-ενέργειας έχει θεμελιώδη σημασία για την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας σε ολόκληρη την πυρηνική φυσική.

Πυρηνικές αντιδράσεις και η σχέση μάζας-ενέργειας του Αϊνστάιν

Η σχέση μάζας και ενέργειας, στην οποία στηρίχτηκαν οι Cockcroft και Walton για να προβλέψουν τις ενέργειες των δύο σωματιδίων α στην πρώτη τεχνητή πυρηνική αντίδραση, οδηγεί ευθέως στην κατανόηση των ενεργειών σύνδεσης των πυρήνων. Ο απλούστερος πυρήνας μετά τον πυρήνα του υδρογόνου είναι εκείνος του δευτερίου —ένα σπάνιο ισότοπο του υδρογόνου το οποίο περιέχει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Γιατί παραμένουν μαζί αυτά τα δύο σωματίδια περιορισμένα στον μικρό όγκο του πυρήνα; Σήμερα γνωρίζουμε ότι ανάμεσα στο πρωτόνιο και το νετρόνιο αναπτύσσονται ελκτικές ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις που τα συγκρατούν μαζί έτσι ώστε να έχουν μικρότερη ενέργεια όταν βρίσκονται συνδεδεμένα σε έναν πυρήνα δευτερίου (δευτερόνιο) παρά όταν υπάρχουν ως χωριστά σωματίδια. Μπορούμε να υπολογίσουμε αυτή την ενέργεια σύνδεσης E_0 χρησιμοποιώντας το ίδιο είδος εξίσωσης μάζας-ενέργειας όπως και πριν:

$$E_0 = m_p c^2 + m_n c^2 - m_d c^2$$

ενέργεια σύνδεσης ίσον ενέργεια μάζας του πρωτονίου συν ενέργεια μάζας του νετρονίου μείον ενέργεια μάζας του δευτερίου.

Εισάγοντας τις πειραματικά μετρούμενες τιμές των μαζών, βρίσκουμε ότι η ενέργεια σύνδεσης είναι περίπου 2 MeV. Τόση ενέργεια θα απελευθερωνόταν αν μπορούσαμε να πάρουμε ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο και να τα βάλουμε μαζί για να σχηματίσουν ένα δευτερόνιο. Ευτυχώς, οι πυρηνικές δυνάμεις έχουν πολύ μικρή εμβέλεια, και έτσι δεν σπεύδουν όλα τα πρωτόνια και τα νετρόνια να συνωστιστούν για να απελευθερώσουν τη δυναμική ενέργεια σύνδεσής τους. Μετρώντας τις μάζες όλων των διαφορετικών πυρήνων, μπορούμε, κατά τον ίδιο τρόπο, να υπολογίσουμε την ενέργεια σύνδεσης για τον καθένα. Αν συμβολίσουμε με Z και N αντίστοιχα τον αριθμό των πρωτονίων και των νετρονίων που περιέχει ένας πυρήνας, λέμε ότι ο ολικός αριθμός των νουκλεονίων, A , του πυρήνα ισούται με το άθροισμά τους, δηλαδή

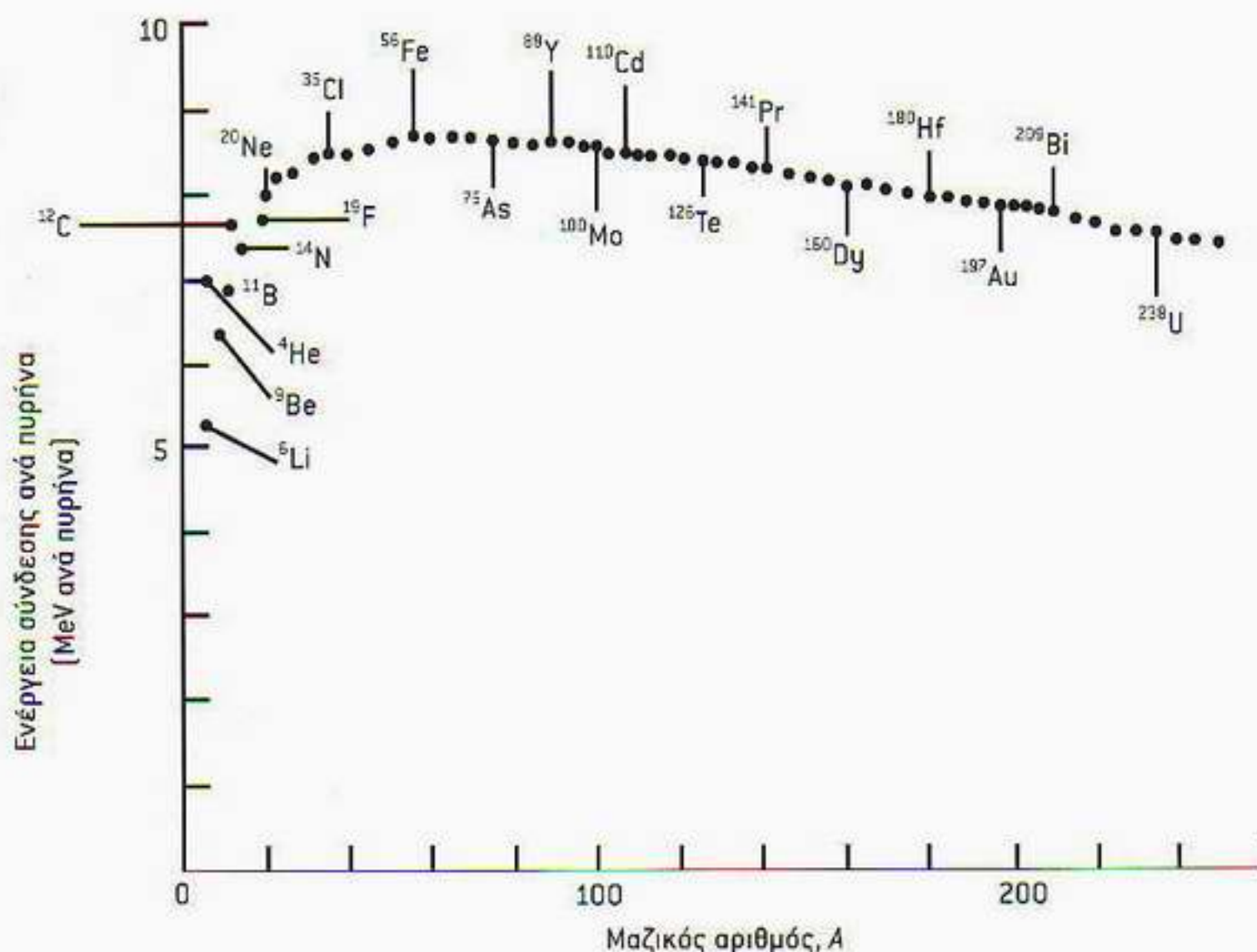
$$A = Z + N.$$

Στην Εικόνα 5.20 έχει σημειωθεί η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για όλα τα στοιχεία. Βλέπουμε ότι η μέση ενέργεια σύνδεσης ανεβαίνει από την τιμή των 2 MeV περίπου που υπολογίσαμε για το δευτερόνιο και φτάνει σε ένα μέγιστο περίπου 8,8 MeV για τον πυρήνα του σιδήρου (Fe), για να πέσει βαθμιαία στα 7,5 περίπου MeV για τους βαρείς πυρήνες μέχρι το ουράνιο και πέρα από αυτό. Σημειωτέον ότι τα σωματίδια α (οι πυρήνες ηλίου) είναι ιδιαίτερα σταθερά σε σύγκριση με τους πυρήνες των γειτονικών χημικών στοιχείων. Γι' αυτό και μέσα στους βαρείς πυρήνες σχηματίζονται μερικές φορές τέτοια σωματίδια, τα οποία, όταν διαφύγουν διαπερνώντας το φράγμα δυναμικού των πυρήνων, προκαλούν τη ραδιενεργό διάσπασή τους. Το γεγονός ότι ο σίδηρος κατέχει τη θέση του ισχυρότερα συνδεδεμένου πυρήνα δείχνει ότι υπάρχουν δύο τρόποι για να απελευθερωθεί ενέργεια από έναν πυρήνα. Ο πρώτος είναι η διαδικασία της *σύντηξης*, κατά την οποία δύο πυρήνες ελαφρότεροι από τον πυρήνα σιδήρου συνδυάζονται για να σχηματίσουν έναν βαρύτερο πυρήνα· ο δεύτερος είναι η *σχάση*, κατά την οποία ένας πολύ βαρύς πυρήνας διασπάται σε δύο ελαφρότερους. Η ενέργεια σύνδεσης που απελευθερώνεται σε αυτές τις δύο διαδικασίες εμφανίζεται ως κινητική ενέργεια των τελικών σωματιδίων.

Ας εξετάσουμε τώρα μια συγκεκριμένη περίπτωση αντίδρασης σύντηξης. Μελετώντας όλες τις διαφορετικές ενέργειες σύνδεσης, μπορούμε να βρούμε πολλές δυνατές αντιδράσεις τέτοιου τύπου. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγεται η αντίδραση δευτερίου-τριτίου, η οποία πιθανώς προσφέρεται περισσότερο από κάθε άλλη για έναν αντιδραστήρα σύντηξης. Το τρίτιο είναι ένα άλλο ισότοπο του υδρογόνου, με ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Τούτα τα δύο σπάνια ισότοπα υδρογόνου αλληλεπιδρούν μέσω της αντίδρασης



Εικόνα 5.20 Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του μαζικού αριθμού, A , δηλαδή του ολικού αριθμού των νουκλεονίων στον πυρήνα. Η λέξη «νουκλεόνια» σημαίνει συλλήβδην τα σωματίδια από τα οποία συνίσταται ο πυρήνας, είτε πρόκειται για πρωτόνια είτε για νετρόνια. Σε αδρές γραμμές, η ενέργεια σύνδεσης είναι η ενέργεια που απαιτείται για να απομακρυνθεί ένα νουκλεόνιο από τον πυρήνα. Το διάγραμμα δείχνει ότι ο πυρήνας του σιδήρου έχει τη μέγιστη σταθερότητα και ότι το ήλιο είναι πολύ σταθερότερο από άλλα γειτονικά του στοιχεία.



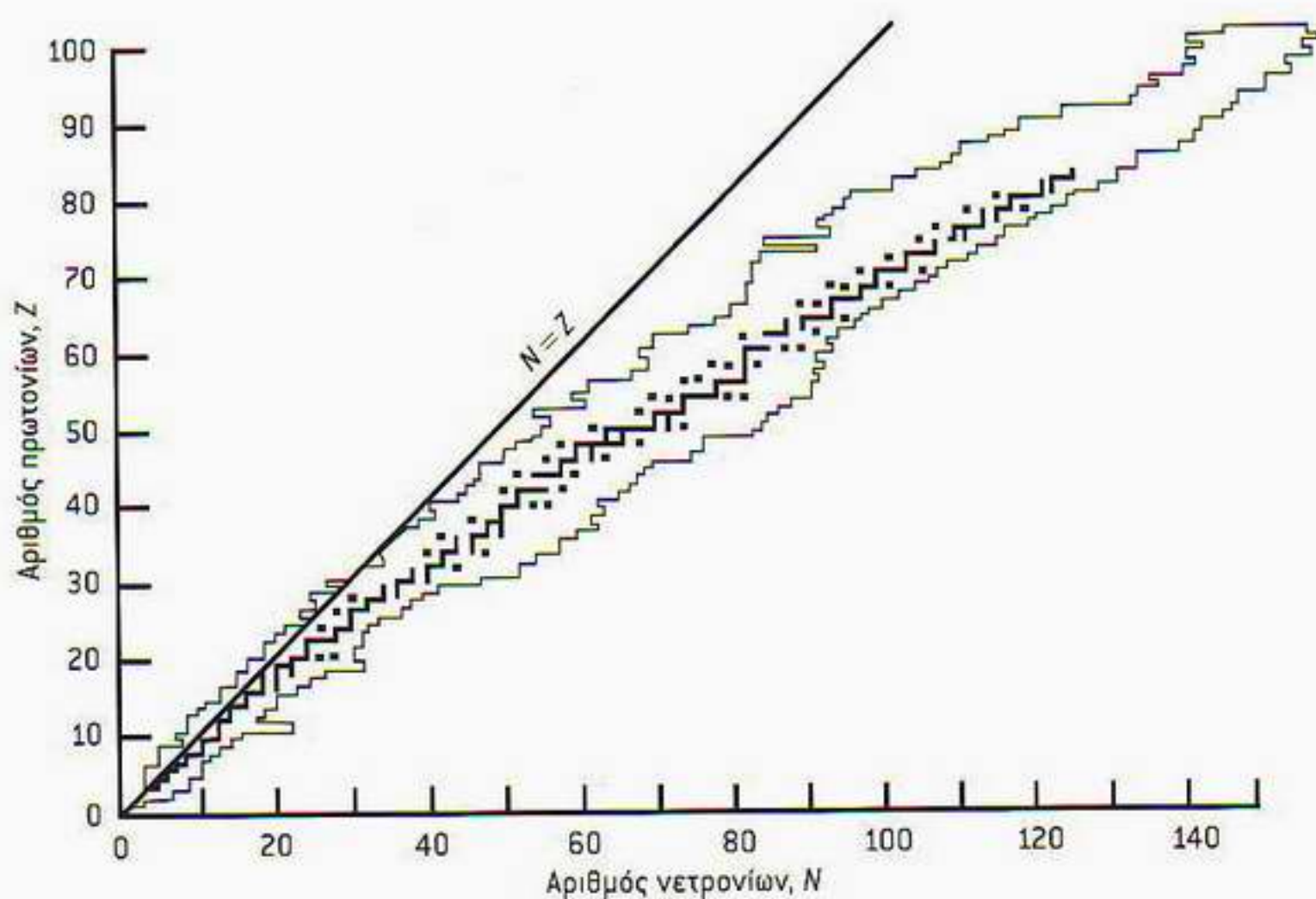
η οποία δυνητικώς απελευθερώνει ενέργεια 17,6 MeV. Το πρόβλημα που παρουσιάζει η παραγωγή ενέργειας με αυτό τον τρόπο έγκειται στο ότι είναι δύσκολο να φτιάξουμε ένα περιβάλλον στο οποίο να μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτοσυντηρούμενη αντίδραση. Και τούτο λόγω του οικείου ηλεκτρικού φράγματος Coulomb, που απωθεί τα σωματίδια καθώς εκείνα προσπαθούν να πλησιάσουν το ένα το άλλο. Ενώ είναι εύκολο να επιτύχουμε αυτή την αντίδραση χρησιμοποιώντας δέσμες δευτερονίων τα οποία έχουν επιταχυνθεί σε ενέργειες μεγαλύτερες από το απωστικό φράγμα Coulomb, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν προσφέρεται ως οικονομικά βιώσιμος τρόπος παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Αντ' αυτής, στην έρευνα για φτηνή ενέργεια από σύντηξη ακολουθείται μια πολύ διαφορετική προσέγγιση. Η βασική ιδέα είναι να θερμανθούν τα αρχικά συστατικά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες έτσι ώστε στις συνηθισμένες συγκρούσεις των ατόμων ή ιόντων του θερμού αερίου, ή *πλάσματος*, να υπάρχει κινητική ενέργεια ικανή γι' αυτή την αντίδραση. Η δημιουργία τέτοιων υψηλών θερμοκρασιών και ο περιορισμός τού τόσο θερμού πλάσματος παρουσιάζουν τρομερές τεχνικές δυσκολίες οι οποίες φαίνεται απίθανο να ξεπεραστούν προτού περάσουν πολλά χρόνια. Η ελπίδα ότι η σύντηξη θα προσφέρει μια φτηνή, φιλική προς το περιβάλλον και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας εξακολουθεί να απέχει πολύ από το να γίνει πραγματικότητα.

Με δεδομένες τις δυσκολίες που παρουσιάζει η παραγωγή ενέργειας από σύντηξη με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, πιθανόν να μας ξαφνιάζει κάπως το ότι τέτοιες ακριβώς αντιδράσεις σύντηξης αποτελούν τη βασική διαδικασία με την οποία τα άστρα παράγουν την ενέργειά τους. Και μάλιστα, αυτό ηχεί ακόμα πιο απίστευτο αν ληφθεί υπόψη ότι οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό των άστρων αντιστοιχούν σε κινητικές ενέργειες πολύ χαμηλότερες από το φράγμα Coulomb! Η σύντηξη στα άστρα καθίσταται δυνατή σε αυτές τις χαμηλές θερμοκρασίες αποκλειστικά και μόνο χάρη στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας που επιτρέπει τη διαπέραση του φράγματος δυναμικού. Έτσι, δεν θα υπερβάλλαμε αν λέγαμε ότι οφείλουμε ακόμα και την ίδια την ύπαρξή μας στην ικανότητα των κβαντικών σωματιδίων να διαπερνούν κλασικά απαγορευμένες περιοχές!

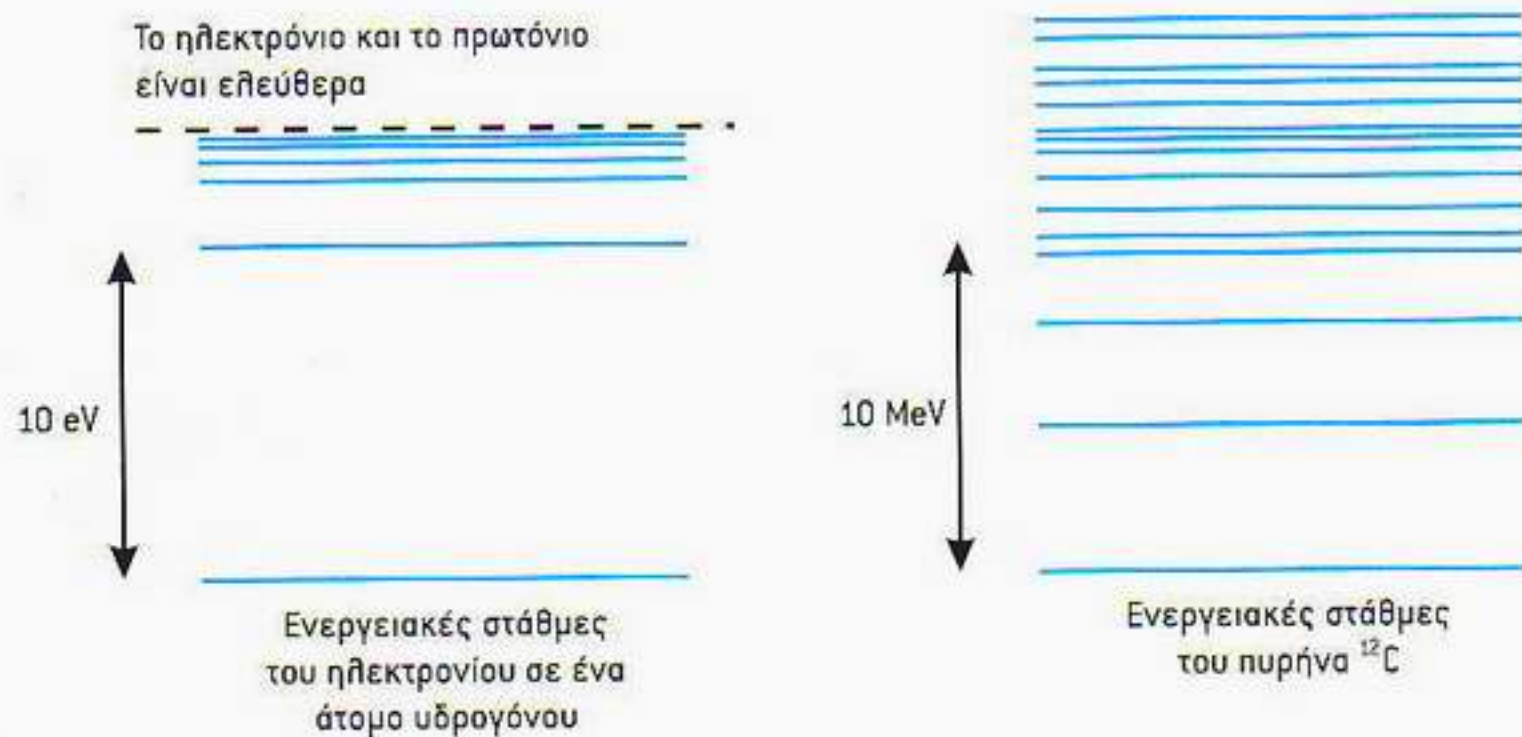
Ραδιενέργεια, πυρηνική σύντηξη και η ατομική βόμβα

Η ραδιενέργεια είναι μια διαδικασία με την οποία ένας πυρήνας με Z πρωτόνια και N νετρόνια μπορεί να μετατραπεί σε έναν άλλο πυρήνα με διαφορετικά Z και N . Πολλοί πυρήνες χαρακτηρίζονται από σταθερότητα και δεν διασπώνται καθόλου. Στην Εικόνα 5.21 βλέπουμε ένα διάγραμμα όπου είναι σημειωμένοι όλοι οι γνωστοί σταθεροί πυρήνες, μαζί με τους ραδιενεργούς. Οι τρεις τύποι ακτινοβολίας που εκπέμπονται από τους ραδιενεργούς πυρήνες ονομάστηκαν ιστορικά ακτίνες α , β και γ . Τα σωματίδια α γνωρίζουμε ότι είναι πυρήνες ηλίου. Ένας πυρήνας που εκπέμπει ένα σωματίδιο α μετατρέπεται στον πυρήνα ενός νέου στοιχείου που έχει και τον Z και τον N μειωμένους κατά 2 και τον νουκλεονιακό αριθμό, τον A , μειωμένο κατά 4. Αντίθετα, η διάσπαση β αφήνει αμετάβλητη την τιμή τού A , αλλά εδώ έχουμε τη μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο με την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου (και ενός αντινετρίνου, όπως θα εξηγήσουμε αργότερα). Είναι επίσης δυνατόν ένα πρωτόνιο να μετατραπεί σε νετρόνιο με την εκπομπή ενός αντιπλε-

Εικόνα 5.21 Συγκεντρωτικό διάγραμμα όπου σημειώνονται όλοι οι ως τώρα παρατηρηθέντες πυρήνες. Στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τον αριθμό των πρωτονίων του πυρήνα και στον οριζόντιο τον αριθμό των νετρονίων. Οι σταθεροί πυρήνες σημειώνονται με μαύρο χρώμα, ενώ οι ασταθείς κείνται εντός της περιγεγραμμένης περιοχής. Οι πυρήνες με τη μεγαλύτερη μάζα περιέχουν περισσότερα νετρόνια παρά πρωτόνια. Τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα και η μεταξύ τους απώση τείνει να καταστήσει τον πυρήνα ασταθή.



κτρονίου, ή ποζιτρονίου, η οποία συνοδεύεται από την εκπομπή ενός νετρίνου. Η αντιύλη και οι διαδικασίες της διάσπασης β θα μας απασχολήσουν με περισσότερες λεπτομέρειες στο Κεφάλαιο 11. Τέλος, οι μυστηριώδεις ακτίνες γ, οι τόσο προσφιλείς στους δημιουργούς των κόμικ, δεν είναι τίποτε άλλο παρά πολύ ενεργητικά φωτόνια, τα οποία εμφανίζονται επειδή κάποια άλλη διαδικασία ραδιενεργού διάσπασης —διάσπαση α ή β— έχει αφήσει τον νέο πυ-



Εικόνα 5.22 Σύγκριση των ενεργειακών σταθμών για το άτομο του υδρογόνου και για τον πυρήνα του άνθρακα ¹²C. Η ενέργεια σύνδεσης ενός ηλεκτρονίου σε ένα άτομο είναι περίπου 1 εκατομμύριο φορές μικρότερη από την ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα. Όταν τα ηλεκτρόνια των ατόμων μεταπηδούν από τη μία στάθμη στην άλλη, οι ενέργειες των φωτονίων που εκπέμπονται ή απορροφούνται αντιστοιχούν συνήθως σε εκείνες του ορατού φωτός. Στους πυρήνες, όμως, λείπει η σαφής διάκριση που έχουμε στα άτομα μεταξύ των περιφερόμενων ηλεκτρονίων και του ελκτικού πυρήνα. Κάθε νουκλεόνιο μπορεί να θεωρηθεί ότι κινείται εντός ενός μέσου ελκτικού δυναμικού που παράγουν όλα τα υπόλοιπα νουκλεόνια. Όταν ένα νουκλεόνιο μεταβαίνει από μια διεγερμένη κατάσταση σε μια άλλη κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας, εκπέμπονται φωτόνια πολύ υψηλής ενέργειας, τα οποία συνήθως χαρακτηρίζονται ως ακτίνες γ.

ρήνα σε διεγερμένη κατάσταση. Οι διεγερμένες καταστάσεις των πυρήνων μοιάζουν με εκείνες του ατόμου του υδρογόνου αν εξαιρέσουμε τις διαφορές ενέργειας μεταξύ των ενεργειακών σταθμών. Για τα άτομα, οι διαφορές μεταξύ των ενεργειακών σταθμών και οι ενέργειες των φωτονίων τυπικά μετρούνται σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV) —για τους πυρήνες, τα αντίστοιχα μεγέθη ανέρχονται σε εκατομμύρια ηλεκτρονιοβόλτ (MeV).

Γιατί, άραγε, υπάρχουν μερικοί πυρήνες σταθεροί και άλλοι ραδιενεργοί; Πρόκειται για ένα ερώτημα που, για να απαντηθεί λεπτομερειακά, απαιτείται εις βάθος γνώση των πυρηνικών δυνάμεων. Ωστόσο, μερικά γενικά χαρακτηριστικά μπορούν να γίνουν κατανοητά μάλλον εύκολα. Οι ελκτικές ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις δεν δρουν παρά μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις, τυπικά μικρότερες από τη γραμμική διάσταση ενός βαρέος πυρήνα. Γι' αυτό, άλλωστε, και δεν παρατηρούμε άμεσες εκδηλώσεις τούτης της τρομακτικά ισχυρής δύναμης στην κλίμακα των αντικειμένων της καθημερινής μας εμπειρίας. Αντίθετα, η ηλεκτρική δύναμη, καίτοι πολύ ασθενέστερη από την ισχυρή πυρηνική δύναμη, δρα σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από τη γραμμική διάσταση του πυρήνα, και έτσι τα αποτελέσματά της διακρίνονται παντού γύρω μας. Μεταξύ των πρωτονίων και των νετρονίων εντός του πυρήνα, υπάρχει ανταγωνισμός ανάμεσα στη μικρής εμβέλειας πυρηνική δύναμη, που τείνει να συγκρατεί τα νουκλεόνια μαζί, και στην ηλεκτρική άπωση των πρωτονίων, η οποία τείνει να διασπάσει τον πυρήνα. Στους ελαφρούς πυρήνες, η πυρηνική δύναμη αναδεικνύεται νικήτρια, αλλά στους βαρείς πυρήνες υπάρχει μια πολύ λεπτότερη ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δύο αντίθετες δυνάμεις. Αν συνεχίσουμε να προσθέτουμε πρωτόνια και νετρόνια σχηματίζοντας όλο και βαρύτερους πυρήνες, η εμβέλεια των ηλεκτρικών δυνάμεων είναι αρκετά μεγάλη ώστε όλα τα πρωτόνια να απωθούνται αμοιβαία. Για την πυρηνική δύναμη, αντίθετα, ο πυρήνας αποκτά τώρα τόσο μεγάλες διαστάσεις —και η πυρηνική δύναμη έχει τόσο μικρή εμβέλεια— ώστε κάθε δεδομένο νουκλεόνιο να αισθάνεται τις ελκτικές ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις που του ασκούν μόνο τα γειτονικά του νουκλεόνια. Συνεπώς, η ασθενέστερη απωστική δύναμη Coulomb, η οποία ασκείται ανάμεσα σε όλα τα πρωτόνια του πυρήνα, μπορεί να γίνει συγκρίσιμη ή και ισχυρότερη από την ελκτική πυρηνική δύναμη. Αυτός είναι ο λόγος που οι σταθεροί βαρείς πυρήνες με πολύ μεγάλες τιμές του A έχουν περισσότερα νετρόνια απ' ό,τι πρωτόνια: το πλεόνασμα των νετρονίων προσφέρει μεγαλύτερη ελκτική ενέργεια σύνδεσης που δεν συνοδεύεται από παράλληλη αύξηση της άπωσης Coulomb. Τι θα συμβεί αν πάρουμε έναν ασταθή πυρήνα με μεγάλο A και μετατρέψουμε ένα από τα πρωτόνια του σε νετρόνιο με τη διαδικασία της διάσπασης β ή απομακρύνουμε ένα σωματίδιο α ; Θα καταλήξουμε σε έναν νέο πυρήνα με λιγότερα πρωτόνια και λιγότερη απωστική ενέργεια Coulomb. Ο νέος πυρήνας θα είναι συνεπώς πιο σταθερά συνδεδεμένος. Τούτες οι αρχές αποτελούν τη βάση της «καμπύλης πυρηνικής σταθερότητας».

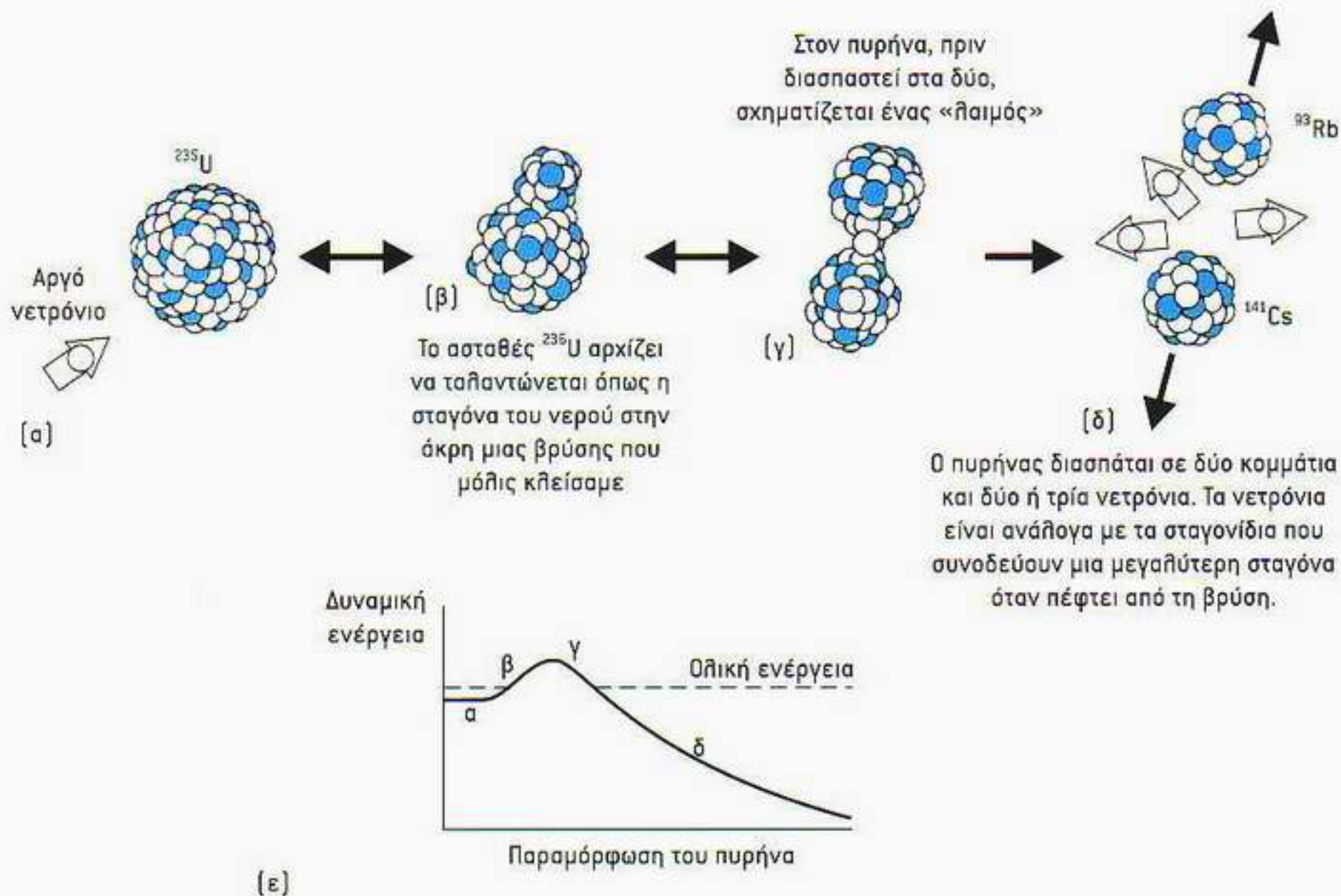
Αυτή η εικόνα μάς δείχνει επίσης ότι υπάρχει η δυνατότητα ένας βαρύς πυρήνας να μειώσει την ενέργειά του με τρόπο εντυπωσιακότερο από τη διάσπαση β . Ο Bohr είχε διατυπώσει την άποψη ότι τους βαρείς πυρήνες θα έπρεπε να τους φανταζόμαστε μάλλον ως «υγρές σταγόνες» παρά ως ψαθυρό στερεό. Σε έναν βαρύ πυρήνα, επικρατεί μια εξόχως λεπτή ισορροπία ανάμεσα στην άπωση Coulomb και στις ελκτικές πυρηνικές δυνάμεις. Αν, λοιπόν, προσθέσουμε στον πυρήνα ένα ακόμη νετρόνιο, μήπως υπάρχει περίπτωση η



Η Lise Meitner και ο Otto Hahn στο εργαστήριό τους στο Βερολίνο το 1920. Αφού εργάστηκε μαζί με τον Hahn επί περισσότερα από είκοσι χρόνια, η Meitner εγκατέλειψε τη Γερμανία το 1938, όταν ο Χίτλερ κατέλαβε την Αυστρία. Η πίστη της στην ορθότητα των εκπληκτικών αποτελεσμάτων τού Hahn οδήγησε στην ανακάλυψη της πυρηνικής σχόσης.

σταγόνα να διαχωριστεί σε δύο μικρότερες; Μελετώντας την καμπύλη των ενεργειών σύνδεσης (Εικόνα 5.20), διαπιστώνουμε ότι μια τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να αποφέρει ενεργειακά κέρδη. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια στους δύο ελαφρότερους πυρήνες είναι δυνατόν να έχουν ενέργεια μάζας μικρότερη απ' ό,τι όταν βρίσκονται μαζί σε έναν πολύ βαρύ πυρήνα. Πρόκειται για δυνατότητα που την επεσήμανε πρώτη μια γυναίκα χημικός, η Ida Noddack, η οποία τόλμησε να ασκήσει κριτική στον τρόπο με τον οποίο ερμήνευαν ο διάσημος ιταλός φυσικός Enrico Fermi και η ομάδα του στη Ρώμη κάποια πειράματά τους. Η ομάδα του Fermi είχε βομβαρδίσει ουράνιο με νετρόνια και πίστευε πως είχε παραγάγει νέα *υπερουράνια* στοιχεία με Z μεγαλύτερο από το 92 του ουρανίου. Η Noddack προέβλεψε την αντίρρηση ότι η ομάδα του Fermi δεν είχε αποδείξει πως το ουράνιο δεν είχε διασπαστεί σε δύο μεγάλα θραύσματα. Δυστυχώς για τη Noddack —αλλά μάλλον ευτυχώς για τον υπόλοιπο κόσμο εν όψει του επικείμενου Β' Παγκόσμιου Πολέμου—, ουδείς υιοθέτησε την υπόδειξή της. Απεναντίας, ο διάσημος γερμανός χημικός Otto Hahn εξέφραζε τον ενθουσιασμό του που είχε μια πηγή νέων υπερουρανίων στοιχείων τα οποία προσφέρονταν για μελέτη! Προς μεγάλη τους κατάπληξη, όμως, ο Hahn και ο μαθητής του Fritz Strassmann αναγκάστηκαν τελικά, παρά τη θέλησή τους, να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι, αντί για κάποιο νέο χημικό στοιχείο βαρύτερο του ουρανίου, το μόνο που είχαν καταφέρει να βρουν ήταν μερικά ισότοπα βαρίου με $Z = 56$. Η συγκεκριμένη ανακάλυψη έγινε στο τέλος του 1938, στις παραμονές του Β' Παγκόσμιου Πολέμου. Λόγω της εχθρότητας που επικρατούσε εναντίον των Εβραίων, η επί τριακονταετία συνεργάτιδα του Hahn, η Lise Meitner, την οποία ο Αϊνστάιν ονόμασε κάποτε «γερμανίδα μαντάμ Curie», αναγκάστηκε να καταφύγει στη Σουηδία. Ο Hahn έστειλε στη Meitner μια επιστολή όπου της περιέγραφε τα αινιγματικά αποτελέσματά του. Κατά την περίοδο των Χριστουγέννων εκείνης της χρονιάς, στη διάρκεια μιας επίσκεψης του ανιψιού της Otto Frisch, η Meitner έμαθε από τον Hahn ότι είχε βρει βάριο στα προϊόντα της αντίδρασης. Η Lise Meitner ήταν πεπεισμένη ότι ο Hahn ήταν πολύ καλός χημικός για να σφάλλει και, σε έναν περίπατό τους στα χιονισμένα δάση, εκείνη και ο Frisch βρήκαν τη λύση του αινίγματος. Ο Fermi δεν είχε κατορθώσει να παραγάγει νέα υπερουράνια στοιχεία με το βομβαρδισμό νετρονίων· αντιθέτως, ο βαρύς πυρήνας είχε υποστεί σχάση, διασπώμενος σε δύο ελαφρότερα στοιχεία! Η εργασία η οποία περιέγραφε τα συμπεράσματά τους γράφτηκε μερικές ημέρες αργότερα μέσω υπεραστικών τηλεφωνημάτων μεταξύ Στοκχόλμης και Κοπεγχάγης, ενώ τα κρίσιμα πειράματα που απαιτούνταν για να επιβεβαιωθεί η ιδέα τους ο Frisch τα έκανε μέσα σε δύο μόλις ημέρες! Τον όρο *σχάση* τον εισήγαγε ο Frisch υιοθετώντας το όνομα που χρησιμοποιούν οι βιολόγοι για να περιγράψουν τη διαδικασία με την οποία κάποια απλά κύτταρα διαιρούνται στα δύο.

Η διαδικασία της πυρηνικής σχάσης μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως διαδικασία κβαντικού φαινομένου σήραγγας, παρόμοια με τις άλλες που έχουμε συζητήσει στο παρόν κεφάλαιο. Η ενέργεια του πυρήνα που υφίσταται σχάση μπορεί να παρασταθεί ως ένα δυναμικό παρεμφερές με εκείνο του βαγονιού στην Εικόνα 5.1. Υπάρχουν δύο κοιλάδες —δηλαδή, ελάχιστα της ενέργειας— αλλά η μία βρίσκεται χαμηλότερα από την άλλη. Κλασικά, ένα σωματίδιο που ηρεμεί στην ψηλότερη κοιλάδα θα παραμείνει εκεί εσαεί. Κβαντομηχανικά, μια τέτοια κατάσταση δεν είναι απολύτως ευσταθής —το σύστημα έχει τη δυνατότητα να μεταπέσει στην κατάσταση της «πραγματικά ε-

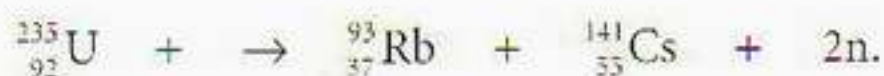


Εικόνα 5.23 Σχηματική παράσταση του μοντέλου της υγρής σταγόνας για την πυρηνική σχάση —[α] ως [δ]— και της σχέσης του με το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας [ε].

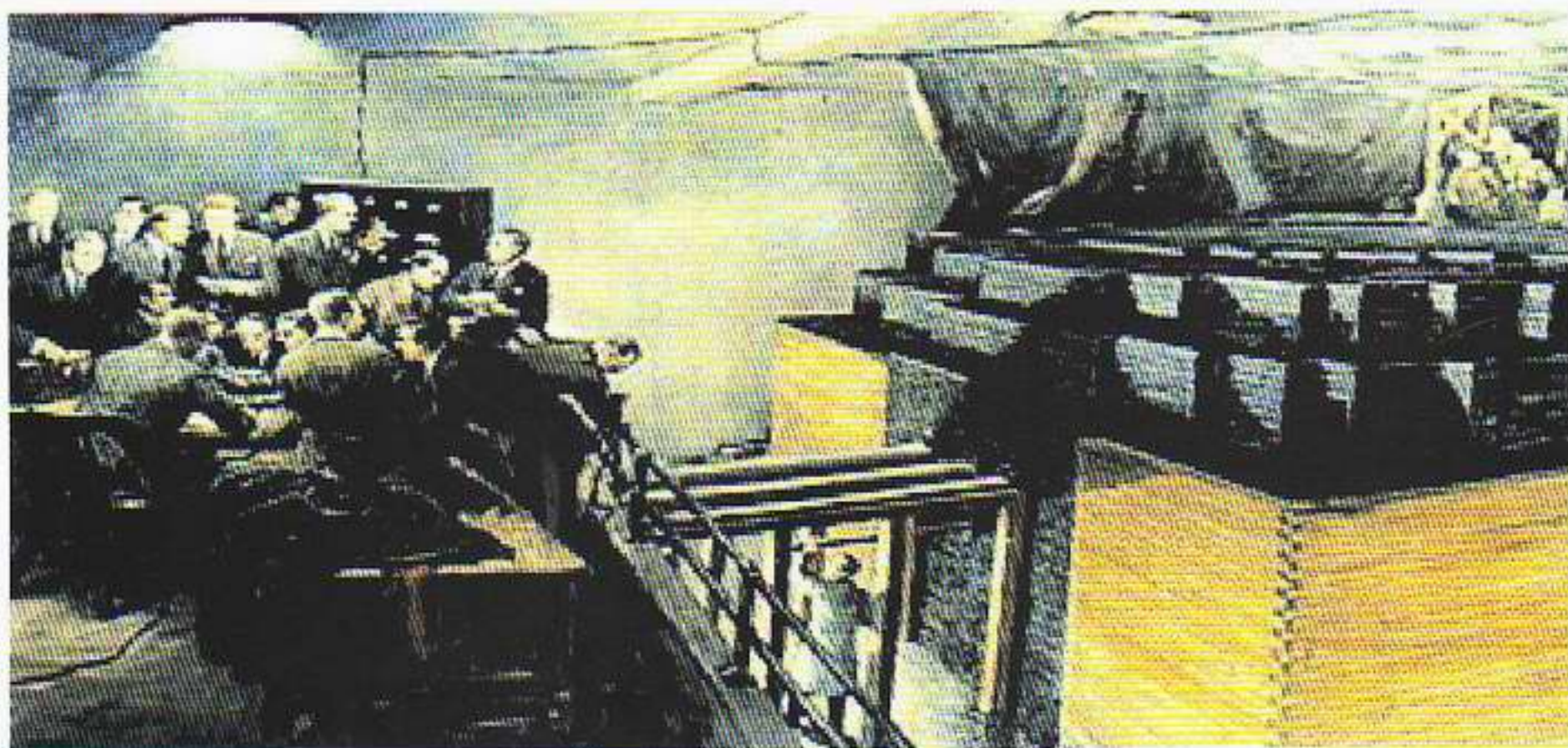
λάχιστης» ενέργειας διαπερνώντας το φράγμα που χωρίζει τις δύο κοιλάδες. Το «ψευδοελάχιστο» της ενέργειας ονομάζεται *μετασταθής κατάσταση*, και η σχάση μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία κβαντικής μετάπτωσης από τη μετασταθή στη θεμελιώδη κατάσταση που πραγματοποιείται χάρη στο φαινόμενο σήραγγας (Εικόνα 5.23).

Στην ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης επιβάλλεται να προστεθούν δύο υστερόγραφα. Το πρώτο αφορά την ανακάλυψη πραγματικά υπερουράνιων στοιχείων. Τέτοια στοιχεία ανακάλυψε πρώτη φορά στις αρχές του 1940 ο Ed McMillan χρησιμοποιώντας το κύκλοτρο του Lawrence. Επειδή οι πλανήτες Ποσειδώνας και Πλούτωνας βρίσκονται πέρα από τον πλανήτη Ουρανό, αυτά τα πρώτα υπερουράνια στοιχεία, με $Z = 93$ και $Z = 94$, ονομάστηκαν αντίστοιχα *ποσειδώνιο* και *πλουτώνιο*. Και τα δύο ήταν ασταθή, αλλά το ένα, το πλουτώνιο, αργότερα θα είχε ολέθριες εφαρμογές στην παραγωγή των πυρηνικών όπλων.

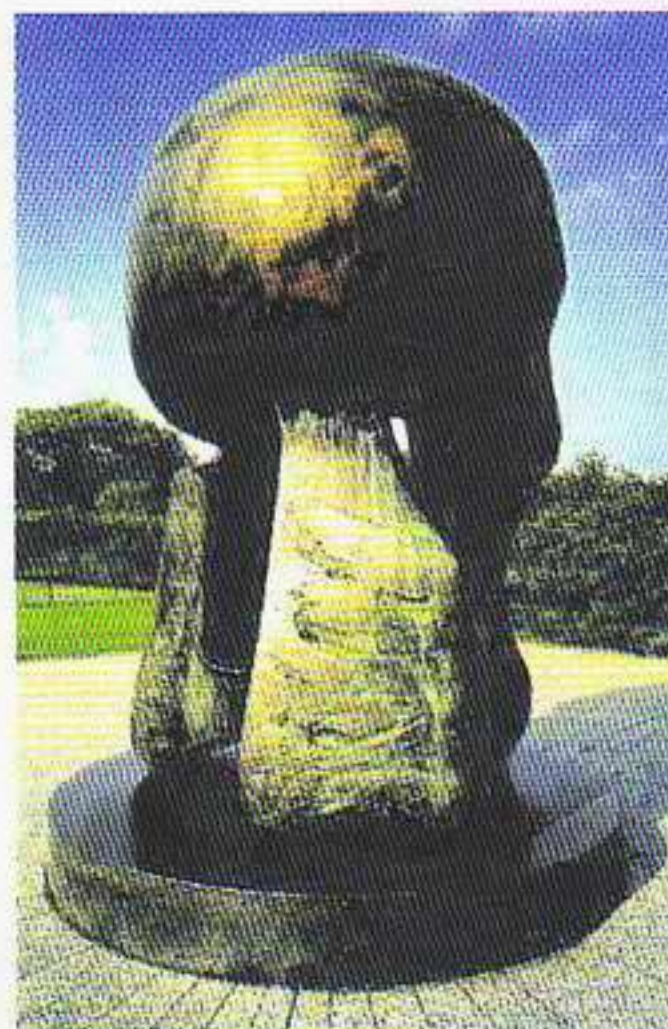
Το πώς δημιουργήθηκαν τα πυρηνικά όπλα σχετίζεται με το δεύτερο υστερόγραφο. Οι πυρηνικές αντιδράσεις, στις οποίες η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη μετατροπή της μάζας υπερβαίνει κατά περίπου 100 εκατομμύρια φορές την ενέργεια την οποία μπορούμε να πάρουμε από τις χημικές αντιδράσεις, έχουν σαφώς τεράστιες δυνατότητες και ως πηγή ενέργειας και ως όπλο. Ένα σημαντικό σημείο σχετικά με τη σχάση, το οποίο παρέλειψαν να αναφέρουν η Meitner και ο Frisch, είναι η δυνατότητα μιας *αλυσιδωτής αντίδρασης*. Μια τυπική αντίδραση σχάσης απελευθερώνει, εκτός από τα δύο μεγάλα θραύσματα της σχάσης, και μερικά ελεύθερα νετρόνια:



Το σπάνιο ισότοπο του ουρανίου, ${}^{235}\text{U}$, διασπάται σε ρουβίδιο, καίσιο και δύο νετρόνια. Οι Hahn και Strassmann παρατήρησαν βάριο προερχόμενο από τη ραδιενεργό διάσπαση του ασταθούς ισότοπου του καισίου. Το καθένα από τα δύο νετρόνια που παράγονται σε αυτή την αντίδραση μπορεί να προκαλέσει μια άλλη αντίδραση σχάσης, και τα νέα νετρόνια που παράγονται από τούτες τις αντιδράσεις προκαλούν με τη σειρά τους ακόμα περισσότερες σχάσεις, έτσι ώστε τελικά εμφανίζεται μια χιονοστιβάδα σχάσεων — μια αλυσιδωτή αντίδραση. Μια τέτοια αντίδραση μπορεί να απελευθερώνει ενέργεια είτε με ελεγχόμενο τρόπο, όπως συμβαίνει στους πυρηνικούς αντιδραστήρες όπου ο αριθμός των νετρονίων που προκαλούν τις σχάσεις μπορεί να ρυθμιστεί, είτε



Εικόνα 5.24 Ζωγραφικός πίνακας που απεικονίζει την τελετή έναρξης της λειτουργίας του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα στον κόσμο. Ο αντιδραστήρας του Fermi λειτουργούσε με ελεγχόμενη αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αντίδραση που στηριζόταν στο ουράνιο και το γραφίτη. Λόγω απεργίας των οικοδόμων, η κατασκευή του ειδικά σχεδιασμένου κτηρίου για τη «Στήλη του Σικάγου Αριθμός Ένα», όπως λεγόταν ο αντιδραστήρας του Fermi, καθυστέρησε, οπότε ο Fermi έλαβε την άδεια να τον κατασκευάσει σε ένα πρώην γήπεδο σκουός, κάτω από τις δυτικές εξέδρες του σταδίου φουτμπού Stagg Field. Στο ιστορικό αυτό μέρος σήμερα βρίσκεται ένα αναμνηστικό γλυπτό του Henry Moore (δεξιά).



Most terrifying weapon in history: Churchill's warning

THIS revelation of the secrets of nature, long mercifully withheld from man, should arouse the most solemn reflections in the mind and conscience of every human being capable of comprehension. We must indeed pray

that these awful agencies will be made to conduce to peace among the nations, and that instead of wreaking measureless havoc upon the entire globe they may become a perennial fountain of world prosperity." 1945

ATOMIC BOMB: JAPS GIVEN 48 HOURS TO SURRENDER

Radios threaten Tokio: 'You can expect annihilation'

Churchill tells Britain's King: Spies and commandos WE BEAT in battle of wits

JAPAN is faced with ultimatum by the new British-American atomic bomb - mightiest destructive force the world has ever known - unless she surrenders unconditionally in a few days. Already Japan has felt the icy blast of one of the bombs. Now the new weapon will be brought to bear on the Pacific. Spies and commandos have already attacked the atomists' news of the atomic bomb this afternoon, reliable sources here said that a new ultimatum is to be sent to Japan. The ultimatum will give the Japanese 48 hours to surrender or face the prospect of the most annihilating of all Japanese cities.

ZERO HOUR CAME ON JULY 16
Blind girl 'saw' the first big flash

NAZIS BY FEW MONTHS
JAP TOWN IS WIPED OUT

Εικόνα 5.25 Τίτλος εφημερίδας που ανακοινώνει το τηλεσίγγραφο προς την Ιαπωνία για την ατομική βόμβα.



Εικόνα 5.26 Ένας στρατιώτης που εκτελούσε περιπολία στο Ναγκασάκι εξασερώθηκε από την έκρηξη αν και βρισκόταν 3,5 χιλιόμετρα μακριά από το σημείο της ρίψης.

Εικόνα 5.27 Φωτογραφία δοκιμής πυραβολικού με πυρηνικές οβίδες που διεξήχθη στην έρημο της Νεβάδας το 1953. Η οβίδα, η οποία εκτοξεύτηκε από ένα πυροβόλο των 280 mm, ήταν ελαφρώς ισχυρότερη από τη βόμβα που κατέστρεψε τη Χιροσίμα.



Εικόνα 5.28 Το βομβαρδιστικό B-29 που έριξε την πρώτη ατομική βόμβα στη Χιροσίμα το κυβερνούσε ο Paul Tibbets, ο οποίος του είχε δώσει το όνομα της μητέρας του Enola Gay.

με μια καταστροφική έκρηξη, όπως στην πυρηνική βόμβα σχάσης. Για να επιτύχουμε μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση, χρειάζεται να διαθέτουμε ένα κατάλληλο σχάσιμο υλικό. Ενώ το κοινότερο ισότοπο του ουρανίου είναι το ^{238}U , μόνο το σπάνιο ισότοπο ^{235}U προσφέρεται για την κατασκευή πυρηνικών βομβών· επίσης, κατάλληλο για το σκοπό αυτό είναι και το πλουτώνιο, το οποίο παράγεται σε πυρηνικές αντιδράσεις του κοινού ισότοπου ουρανίου ^{238}U . Η πρώτη «ατομική βόμβα» που εξερράγη στη θέση Τρίνιτι στην έρημο του Νιου Μέξικο ήταν βόμβα πλουτωνίου· το ίδιο και η βόμβα «Fat



Εικόνα 5.29 Μια τρομακτική φωτογραφία του «μανιτοριού» δοκιμαστικής πυρηνικής έκρηξης.

Man» που ρίχτηκε στο Ναγκασάκι στις 9 Αυγούστου 1945. Η βόμβα «Little Boy» που ρίχτηκε στη Χιροσίμα στις 6 Αυγούστου 1945 ήταν βόμβα ουρανίου, κατασκευάστηκε δε από ^{235}U το οποίο παρήχθη στο εργοστάσιο διαχωρισμού ουρανίου Όουκ Ριτζ στο Τενεσί.

Η ανάπτυξη ενός αντιδραστήρα με ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης είχε ζωτική σημασία για την παραγωγή πλουτωνίου στη διάρκεια του Β΄ Παγκόσμιου Πολέμου. Τον πρώτο τεχνητό αντιδραστήρα στην ιστορία τον κατασκεύασε ο Fermi στο Σικάγο το 1942. Ο Glen Seaborg, ο άνθρωπος ο οποίος είχε ανακαλύψει το πλουτώνιο, το ενενηκοστό τέταρτο στοιχείο, επιφορτίστηκε με το καθήκον της εξαγωγής πλουτωνίου από τόνους ^{238}U αναμειγμένου με άλλα ραδιενεργά προϊόντα διάσπασης. Το έργο που έπρεπε να φέρει εις πέρας ισοδυναμούσε με την ανεύρεση μιας δεκάρας από πλουτώνιο σε κάθε δύο τόνους προϊόντων του αντιδραστήρα ουρανίου, αφού η μέγιστη

Ραδιοχρονολόγηση

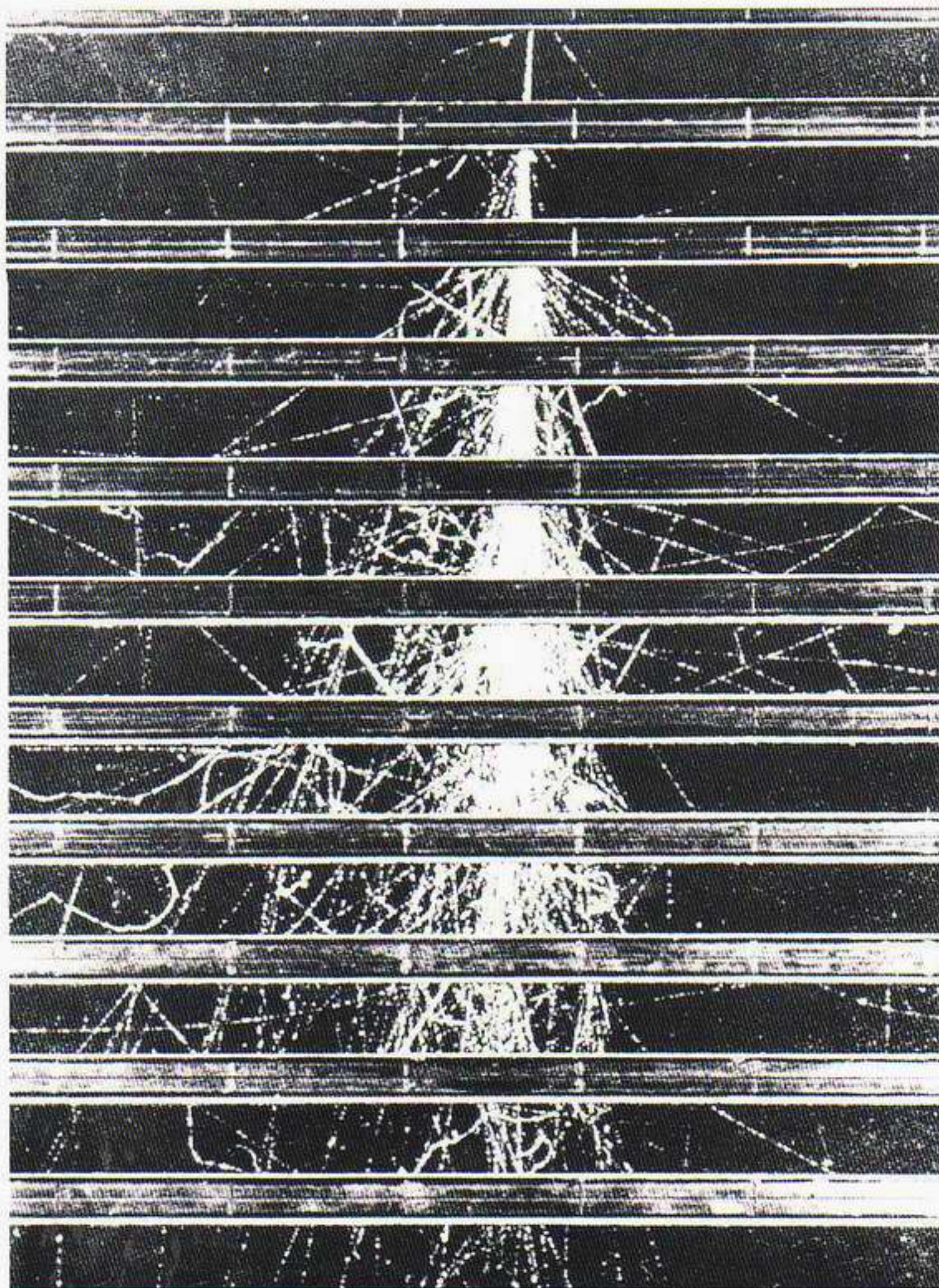
Σχεδόν τα πάντα γύρω μας είναι ελαφρώς ραδιενεργά. Ο αέρας που αναπνέουμε, το χώμα στους κήπους μας, τα περισσότερα δομικά υλικά, ακόμα και τα ίδια μας τα σώματα, όλα περιέχουν ραδιενεργά στοιχεία. Μεγάλο μέρος αυτής της ραδιενέργειας πηγάζει από το αυτοφυές ουράνιο και θόριο. Ο φλοιός της Γης έχει, κατά μέσο όρο, 3 τόνους ουρανίου και 5 τόνους θορίου ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο εντός βάθους 30 περίπου εκατοστών από την επιφάνεια. Τόσο το ουράνιο όσο και το θόριο αποτελούν το ένα άκρο δύο πολύπλοκων αλυσίδων διασπάσεων ραδιενεργών στοιχείων, οι οποίες τελικά καταλήγουν σε σταθερά ισότοπα μόλυβδου. Οι εν λόγω αλυσίδες παράγουν ραδιενεργά αέρια που είναι ισότοπα του ραδονίου και τα οποία, εφόσον εισπνευσθούν και φτάσουν στους πνεύμονες, μπορεί να αποβούν λίαν επικίνδυνα και να προκαλέσουν καρκίνο. Λέγεται ότι «κάθε μεταλλωρύχος που έχει εργαστεί στα μεταλλεία ουρανίου Joachimstal στην Τσεχοσλοβακία επί περισσότερο από μία δεκαετία έχει πεθάνει από καρκίνο των πνευμόνων». Τα σύγχρονα μεταλλεία έχουν πλέον ισχυρά συστήματα εξαερισμού για να απάγουν τα συγκεκριμένα αέρια. Αυτός είναι ένας λόγος που επιβάλλει τα σπίτια μας να μη γίνονται υπερβολικά «αεροστεγή».

Αν μας δοθεί ένα δείγμα που περιέχει μεγάλο πλήθος ταυτόσημων ραδιενεργών πυρήνων, αδυνατούμε να προβλέψουμε πότε θα διασπαστεί κάθε συγκεκριμένος πυρήνας. Μετρώντας, εντούτοις, το πλήθος των διασπάσεων που σημειώνονται στο δείγμα σε δεδομένο χρόνο, μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα που έχει ένας πυρήνας να διασπαστεί το επόμενο δευτερόλεπτο. Συχνά ποσοτικοποιούμε αυτή την πιθανότητα χρησιμοποιώντας το *χρόνο ημιζωής* —πρόκειται για το χρόνο που χρειάζεται ώστε το μισό δείγμα να διασπαστεί σε άλλα στοιχεία. Οι χρόνοι ημιζωής κυμαίνονται εντός τεράστιας περιοχής τιμών: από τα 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια για το ^{238}U στα 1.600 χρόνια για το ράδιο, τις 3,8 ημέρες για το ραδόνιο και σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο για το πολώνιο. Όταν λέμε ότι το ουράνιο έχει χρόνο ημιζωής 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια, εννοούμε ότι, αν κάποιο υλικό που σχηματίστηκε πριν από 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια περιείχε καθαρό ουράνιο, τότε το εν λόγω υλικό θα περιείχε σήμερα τη μισή μόνο ποσότητα ουρανίου, το υπόλοιπο δε θα είχε μεταστοιχειωθεί σε μόλυβδο. Μετρώντας τις σχετικές περιεκτικότητες των διάφορων ισότοπων σε μικρά δείγματα πετρωμάτων, μπορούμε να εκτιμήσουμε την ηλικία τους. Αυτή η τεχνική έχει εφαρμοστεί για τη χρονολόγηση σεληνιακών πετρωμάτων και μετεωριτών, όπως επίσης και γήινων πετρωμάτων. Χρησιμοποιώντας δείγματα πετρωμάτων από πολλές διαφορετικές περιοχές της Γης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ηλικία της Γης ανέρχεται σε περίπου 4 δισεκατομμύρια χρόνια. Το ουράνιο και το θόριο που υπήρχαν κατά την περίοδο σχηματισμού της Γης προήλθαν από τις τεράστιες αστρικές εκρήξεις οι οποίες ονομάζονται *υπερκαινοφανείς*.

Υπάρχει μία ακόμα σημαντική πηγή ακτινοβολίας, οι λεγόμενες *κοσμικές ακτίνες* από το εξώτερο Διάστημα. Στην επιφάνεια της Γης, περίπου 10 δισεκατομμύρια νετρίνα περνούν μέσα από το νύχι κάθε δακτύλου των χεριών σας (περίπου ένα τετραγωνικό εκατοστό) ανά δευτερόλεπτο. Ευτυχώς, τα νετρίνα αλληλεπιδρούν τόσο σπάνια ώστε δεν αποτελούν απειλή για την υγεία μας! Δυστυχώς επιβλαβέστερα είναι τα μόνια των κοσμικών ακτίνων —σωματίδια που μοιάζουν με βαρέα ηλεκτρόνια—, και στη στάθμη της θάλασσας διέρχεται από κάθε τετραγωνικό εκατοστό περίπου 1 μόνιο ανά δευτερόλεπτο. Αυτά τα μόνια δημιουργούνται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας από συγκρούσεις των πρωτογενών σωματιδίων των κοσμικών ακτίνων (πρωτονίων πολύ υψηλών ενεργειών) με μόρια του αέρα. Σχεδόν όλες οι πρωτογενείς ακτίνες απορροφούνται από την ατμόσφαιρα και μόνο τα σχετικά αβλαβή μόνια φτάνουν στην επιφάνεια της Γης. Παρά ταύτα, ο διαρκής βομβαρδισμός από τις κοσμικές ακτίνες ευθύνεται για μέρος της ραδιενέργειας σε όλα τα έμβια όντα. Και τούτο επειδή οι άνθρωποι και όλα τα υπόλοιπα έμβια όντα περιέχουν άνθρακα, και το διοξείδιο του άνθρακα του αέρα που αναπνέουμε περιέχει το ραδιενεργό ισότοπο άνθρακα-14 (^{14}C). Εφόσον το εν λόγω ισότοπο έχει χρόνο ημιζωής 5.730 έτη, θα είχε διασπαστεί και εκλείψει από μακρού αν δεν αναπληρωνόταν διαρκώς από τις συγκρούσεις των κοσμικών ακτίνων. Σε όλους μας ενυπάρχει μια μικρή ποσότητα ραδιενεργού ^{14}C . Όταν τα ζώα ή τα φυτά πεθαίνουν, παύει να απορροφάται νέος ^{14}C —ο ραδιενεργός άνθρακας διασπάται και χάνεται χωρίς να αναπληρώνεται. Αυτό αποτελεί τη βάση της αρχαιολογικής ραδιοχρονολόγησης για χρονικές κλίμακες αρκετών δεκάδων χιλιάδων ετών. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε από τον William Libby περί το 1948 και προκάλεσε την «πρώτη επανάσταση του ραδιάνθρακα», καθόσον πολλά γεγονότα χρονολογήθηκαν σε εποχές πολύ παλιότερες απ' ό,τι πιστευόταν νωρίτερα. Η μέθοδος παρουσιάζει το πρόβλημα ότι ο ρυθμός βομβαρδισμού της Γης από τις κοσμικές ακτίνες δεν διατηρήθηκε σταθερός σε αυτές τις χρονικές κλίμακες. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, η ποσότητα του ραδιενεργού άνθρακα που ήταν παρών σε δεδομένο χρόνο βαθμονομείται μέσω σύγκρισης με τις ηλικίες που συνάγονται από τους ετήσιους δακτυλίους των παλιότερων ζώντων δέντρων —που πιστεύεται ότι είναι τα πεύκα του είδους *Pinus aristata* τα οποία φύονται στα Λευκά Όρη της Καλιφόρνιας. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων οδήγησε στη «δεύτερη επανάσταση του ραδιοάνθρακα», καθόσον ορισμένα γεγονότα χρονολογήθηκαν σε εποχές ακόμα παλιότερες απ' ό,τι προηγουμένως. Ο ραδιενεργός άνθρακας εξυπηρετεί τις ανάγκες της αρχαιολογικής χρονολόγησης για γεγονότα που έλαβαν χώρα έως και πριν από περίπου 35.000 έτη. Για τη μέτρηση ηλικιών που ανέρχονται σε εκατομμύρια έτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διάσπαση του ραδιενεργού ισότοπου του καλίου σε αργό.



Εικόνα 5.31 Το υπεραιωνόβιο πεύκα *Pinus aristata*, που φύονται στα ξηρά και αφιλόξενα Λευκά Όρη της Καλιφόρνιας, θεωρούνται οι μακροβιότεροι ζωντανοί οργανισμοί. Μερικά από αυτά τα δέντρα έχουν ηλικία που υπερβαίνει τα 4.000 έτη.



Εικόνα 5.30 Φωτογραφία καταιγισμού κοσμικών ακτίνων από θάλαμο νέφους. Τα πρωτογενή σωματίδια εισέρχονται στο πάνω μέρος και δημιουργούν έναν καταιγισμό δευτερογενών σωματιδίων καθώς περνούν μέσα από μια σειρά ορεικόηκινων πηλακών στο θόλαμο.

συγκέντρωση πλουτωνίου ανερχόταν περίπου σε 1 μέρος στα 250 εκατομμύρια. Για την ακρίβεια, ο πυρηνικός αντιδραστήρας του Fermi πιθανόν δεν ήταν ο πρώτος του κόσμου. Η φύση είχε προηγηθεί! Υπάρχουν πειστικά τεκμήρια ότι πριν από 2 δισεκατομμύρια χρόνια λειτουργούσε στην Αφρική ένας φυσικός αντιδραστήρας σχάσης καταναλώνοντας φυσικά αποθέματα ουρανίου!

6 Ο Ραυλί και τα χημικά στοιχεία

Το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να πέσουν το ένα πάνω στο άλλο εξασφαλίζει τη σταθερότητα των τραπεζιών και όλων των άλλων στερεών σωμάτων.

Richard Feynman

Το σπιν του ηλεκτρονίου και η απαγορευτική αρχή

Περισσότερο από έναν αιώνα πριν, ο ρώσος χημικός Dimitri Mendeleev επινόησε ένα βοηθητικό μέσο διδασκαλίας για τους σπουδαστές που μελετούσαν την ανόργανη χημεία. Παρατήρησε ότι οι ιδιότητες των 63 χημικών στοιχείων που τότε ήταν γνωστά επαναλαμβάνονταν περιοδικά καθώς αυξανόταν το ατομικό τους βάρος. Με άλλα λόγια, τα στοιχεία με παρόμοιες χημικές ιδιότητες δεν είχαν παρόμοια μάζα· αντίθετα, αυτή, καθώς αυξανόταν, διέφερε κατά κανονικά ποσά. Για παράδειγμα, το λίθιο, ένα αρκετά δραστικό, μαλακό, αργυρόλευκο αλκάλιο, διαθέτει 3 πρωτόνια στον πυρήνα του. Το επόμενο αλκάλιο είναι το νάτριο, με 11 πρωτόνια στον πυρήνα του· μετά ακολουθεί το κάλιο, με 19 πρωτόνια —και ούτω καθεξής, καθένα με μεγαλύτερη μάζα. Ο Mendeleev λοιπόν κατάφερε να ομαδοποιήσει όλα τα χημικά στοιχεία σε ξεχωριστές «οικογένειες», και το σχήμα του αυτό έγινε γνωστό ως ο *περιοδικός πίνακας των στοιχείων*. Όλες οι καλές θεωρίες πρέπει να είναι ικανές να κάνουν προβλέψεις, και η θεωρία του Mendeleev δεν θα μπορούσε να αποτελεί εξαίρεση. Από τις κανονικότητες που είχε παρατηρήσει, ο Mendeleev διαπίστωσε ότι ο κατάλογος των τότε γνωστών στοιχείων δεν ήταν πλήρης. Έτσι άφησε στον πίνακά του κενά για όσα στοιχεία δεν είχαν ανακαλυφθεί ακόμα —και μάλιστα είδε με ικανοποίηση να ανακαλύπτονται, ενόσω ζούσε, το γάλλιο, το σκάνδιο και το γερμάνιο. Ωστόσο, η εξήγηση της εν λόγω περιοδικότητας παρέμεινε ένα μυστήριο για πάνω από πενήντα χρόνια, μέχρις ότου ο αυστριακός φυσικός Wolfgang Pauli πρότεινε την περίφημη *απαγορευτική αρχή του*. Η αρχή αυτή δεν έδωσε μόνο στους φυσικούς τη δυνατότητα να κατανοήσουν καλύτερα τα διάφορα είδη των στερεών —μέταλλα,



Ο Dimitri Mendeleev (1834-1907) ήταν το μικρότερο παιδί μιας παθιασμένης οικογένειας [η περιλάμβανε 14, και κατά μια άλλη εκδοχή, 17 παιδιά]. Η φήμη του ως χημικού τού επέτρεψε να γλυτώσει τις συντησμένες παινές που επέσυρε η ανορθόδοξη συμπεριφορά του, ενώ η κυβέρνηση της τσαρικής Ρωσίας έδειξε ανοχή για τις φιλελεύθερες ιδέες του και την υποστήριξη από μέρος του των φοιτητικών σπημάτων. Το 1876, μόλις, μπόρεσε να πάρει διαζύγιο από τη σύζυγό του και να παντρευτεί μια νεαρή σπουδαστριά των καλών τεχνών χωρίς να διωχθεί από τις αρχές. Η πιο χαριτωμένη εκκεντρικότητά του ήταν ίσως ότι κουρευόταν μόνο μια φορά το χρόνο.

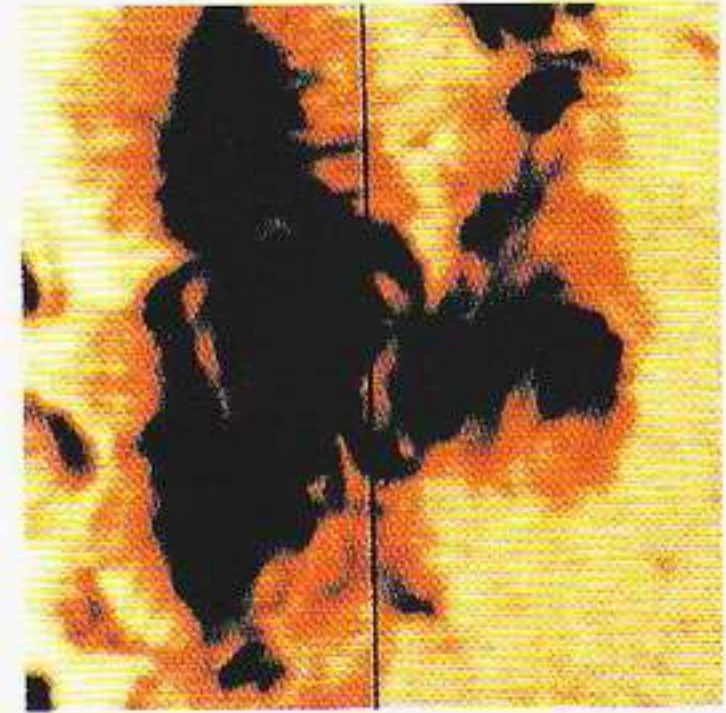
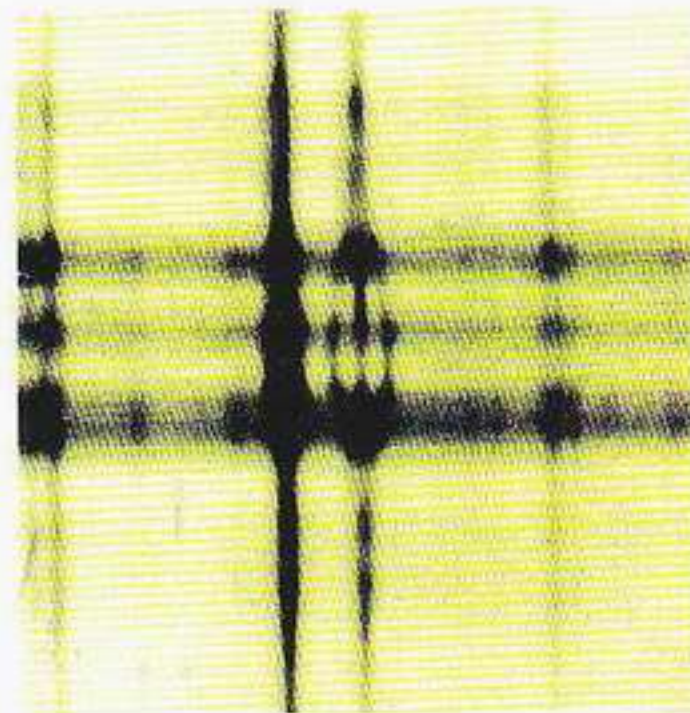
Εικόνα 6.1 «Πειραματικό Σύστημα Στοιχείων» —η επιστημονική εργασία που έστειλε ο Mendeleev σε ρώσους φυσικούς και χημικούς το 1869. Η κύρια διαφορά ανάμεσα σε αυτό το σύστημα και στον σημερινό «περιοδικό πίνακα» των χημικών στοιχείων (πέραν του διαφορετικού προσανατολισμού) οφείλεται στο ότι ο Mendeleev αγνοούσε την ύπαρξη των αδρανών στοιχείων —όπως το ήλιο και το νέο.

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

	Ti = 50	Zr = 90	? = 180.		
	V = 51	Nb = 94	Ta = 182.		
	Cr = 52	Mo = 96	W = 186.		
	Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.		
	Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198		
	Ni = 59	Pd = 106,6	Os = 199.		
H = 1	Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200		
Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
B = 11	Al = 27,4	? = 68	U = 116	Au = 197?	
C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

Εικόνα 6.2 Με το φαινόμενο Zeeman μπορούμε να αποδείξουμε την ύπαρξη μαγνητικών πεδίων στον Ήλιο. Όταν το τηλεσκόπιο κατευθύνεται στην ομάδα των ηλιακών κηλίδων που διακρίνονται δεξιά, η διάσπαση Zeeman των φασματικών γραμμών φαίνεται καθαρά στο αντίστοιχο φάσμα φωτός που παριστάνεται αριστερά.



μονωτές και ημιαγωγούς—, αλλά βοήθησε επίσης τους πυρηνικούς φυσικούς να εξηγήσουν παρόμοιες περιοδικότητες στις ιδιότητες των πυρήνων. Αυτές οι πυρηνικές περιοδικότητες εκφράζονται με την ύπαρξη ασυνήθιστα σταθερών πυρήνων σε σχέση με τη ραδιενεργό διάσπαση. Βρέθηκε ότι οι εν λόγω πυρήνες περιέχουν 2, 8, 20, 28, 50, 82 και 126 πρωτόνια ή νετρόνια —χαρακτηρίζονται δηλαδή από τους λεγόμενους *πυρηνικούς μαγικούς αριθμούς*. Αλλά πριν εξετάσουμε πώς η κβαντική μηχανική μάς δίνει τη δυνατότητα να κατανοήσουμε τις περιοδικότητες των στοιχείων του Mendeleev, πρέπει να αναφερθούμε σε μια άλλη ανακάλυψη, στην οποία και πάλι συνέβαλε ο Pauli, αλλά τούτη τη φορά με αρνητικό τρόπο!

Είναι γνωστό από την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού ότι ένας ρευματοφόρος βρόχος συμπεριφέρεται σαν μικρός μαγνήτης. Τα ηλεκτρόνια που κινούνται στις τροχιές του Bohr αντιστοιχούν σε μικρούς ρευματοφόρους βρόχους, και εξ αυτού κατέστη δυνατόν να υπολογιστούν οι αναμε-



Ο Wolfgang Pauli (1900-1958) έγραψε μια κλασική εργασία πάνω στη γενική σχετικότητα όντας ακόμα έφηβος. Γεννήθηκε στην Αυστρία και ήταν γιος ενός καθηγητή της χημείας. Η απαγορευτική αρχή του, που προτάθηκε το 1925, εξήγησε ένα μεγάλο μέρος της χημικής συμπεριφοράς αλλά και τον περιοδικό πίνακα των στοιχείων. Η σημαντική συνεισφορά του Pauli στην κβαντική μηχανική αναγνωρίστηκε μάλλον καθυστερημένα, με την απονομή του βραβείου Νόμπελ μόλις το 1945. Ο Pauli, για να εξηγήσει κάποια περίεργα χαρακτηριστικά των ραδιενεργών διασπάσεων, πρότεινε επίσης την ύπαρξη των νετρίνων. Ως την εποχή που επιβεβαιώθηκε πειραματικά η ύπαρξη των νετρίνων, περισσότερα από είκοσι χρόνια αφότου ο Pauli είχε διατυπώσει την εικασία του, οι περισσότεροι φυσικοί είχαν ήδη αποδεχτεί την αναγκαιότητά της. Στη φωτογραφία, ο Pauli και η σύζυγός του κατά την τελετή απονομής του βραβείου Νόμπελ στη Στοκχόλμη.

νόμενες μαγνητικές τους ιδιότητες. Το 1894, πολύ πριν από το ατομικό μοντέλο του Bohr, ένας ολλανδός φυσικός, ο Pieter Zeeman, είχε ανακαλύψει ότι οι φασματικές γραμμές των ατόμων διαχωρίζονται όταν το άτομο βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Τα πρώτα αποτελέσματα του Zeeman μπορούσαν να εξηγηθούν με βάση τη διαφορετική στροφορμή των ηλεκτρονίων στις τροχιές του Bohr. Υπήρξαν, όμως, κατοπινά αποτελέσματα —πέρα πολλές φασματικές γραμμές— τα οποία δεν μπορούσαν να εξηγηθούν με τον ίδιο τρόπο. Στο γλωσσικό ιδίωμα των φυσικών, αυτό το μυστήριο ονομάστηκε τότε *ανώμαλο φαινόμενο Zeeman*. Για να δείξουμε πόση αμχανία γεννούσε το εν λόγω θέμα και πόσο μυστηριώδες ήταν, παραθέτουμε μία από τις πολλές γνωστές ιστορίες στις οποίες εμπλέκεται ο Pauli: Ένας φίλος του τον είδε κάποτε να κάθεται σε ένα παγκάκι σε κάποιο πάρκο της Κοπεγχάγης και τον ρώτησε γιατί έδειχνε τόσο αποκαρδιωμένος. Ο Pauli απάντησε: «Πώς μπορεί να μην απελπίζεται κανείς όταν σκέφτεται το ανώμαλο φαινόμενο Zeeman;»

Την απάντηση στο πρόβλημα την έδωσαν ο George Uhlenbeck και ο Sam Goudsmit. Διατύπωσαν την άποψη ότι, εκτός από τη στροφορμή που οφείλεται στην τροχιακή κίνηση γύρω από τον πυρήνα, το ηλεκτρόνιο διαθέτει και στροφορμή λόγω ιδιοπεριστροφής —σαν την ιδιοπεριστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της καθώς αυτή περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο. Η ιδέα αυτή διατυπώθηκε το 1925, ένα χρόνο προτού ο Schrödinger δημοσιεύσει την κυματική εξίσωσή του. Εκείνη την εποχή, η ατομική θεωρία εξακολουθούσε να αποτελεί ένα συνονθύλευμα της κλασικής φυσικής και των κβαντικών κα-

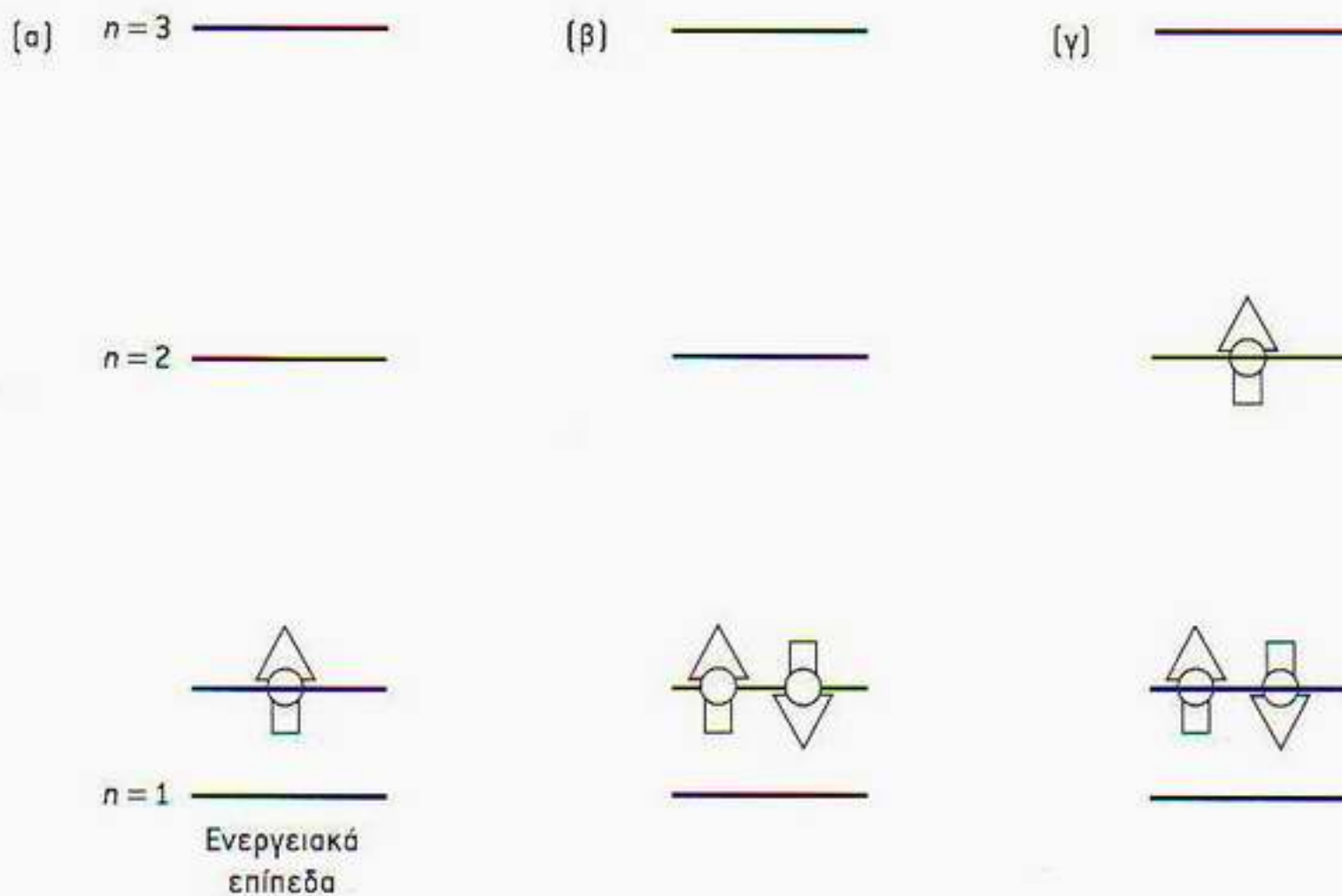


Ο Enrico Fermi (1901-1954) ξεχώριζε από τους φυσικούς της γενιάς του εξαιτίας της θαμνής συνεισφοράς του τόσο στη θεωρητική όσο και στην πειραματική φυσική. Στα πρώτα στάδια του πειραματικού του έργου χρησιμοποίησε τα άρτι ανακαλυφθέντα νετρόνια, για να προκαλέσει τεχνητή ραδιενεργό διάσπαση. Η βράβειυσή του με το Νόμπελ φυσικής το 1938 του έδωσε τη δυνατότητα να διαφύγει από τη φασιστική Ιταλία και να εγκατασταθεί στις ΗΠΑ. Στο πλαίσιο του προγράμματος για την κατασκευή της ατομικής βόμβας στη διάρκεια του πολέμου, ο Fermi ήταν υπεύθυνος για το σχεδιασμό και την κατασκευή του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα. Η πραγματοποίηση της πρώτης αυτοσυντηρούμενης αλυσιδωτής αντίδρασης ανακοινώθηκε με ένα κρυπτογραφημένο τηλεγράφημα που έστειλε ο Compton: «Ο ιταλός θαλασσοπόρος πέρασε στον νέο κόσμο.» (Σημείωση για ειδικούς: εντοπίστε το ήθος στο μωροπίνακα!)

νόμων του Bohr, γεγονός που δημιουργούσε ιδιαίτερη σύγχυση. Οι Uhlenbeck και Goudsmit έδωσαν την εργασία τους στον καθηγητή τους Ehrenfest για να τη σχολιάσει, και εκείνος τους σύστησε να απευθυνθούν στον μεγάλο ειδήμονα Lorentz. Ο Lorentz, αφού σκέφτηκε την ιδέα για περισσότερο από μία εβδομάδα, τους υπέδειξε ευγενικά πολλές σοβαρές δυσκολίες που προέκυπταν από την κλασική εικόνα του περιστρεφόμενου ηλεκτρονίου. Οι Uhlenbeck και Goudsmit στράφηκαν τότε ξανά στον Ehrenfest ώστε να αποσύρουν την εργασία τους, αλλά έκπληκτοι τον άκουσαν να τους λέει: «Την έχω ήδη στείλει για δημοσίευση. Είσαστε και οι δύο τόσο νέοι που σας επιτρέπετε να διαπράξετε και μερικές ανοησίες!» Στο τέλος, βέβαια, αποδείχθηκε ότι η ιδέα τους ήταν σωστή, και ότι όλα τα μυστηριώδη αποτελέσματα του φαινομένου Zeeman οφείλονταν στο γεγονός ότι το ηλεκτρόνιο όντως διαθέτει μια επιπλέον στροφορμή, το επονομαζόμενο σπιν. Ωστόσο, όπως και με τις τροχιές του Bohr, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την κλασική εικόνα του περιστρεφόμενου ηλεκτρονίου για να περιγράψουμε με ακρίβεια την επιπλέον στροφορμή της κβαντικής μηχανικής. Οι Uhlenbeck και Goudsmit στάθηκαν πιο τυχεροί από έναν άλλο νεαρό φυσικό, τον Kronig, ο οποίος συνέλαβε την ίδια ιδέα περίπου την ίδια εποχή. Εκείνος, όμως, είχε την ατυχία να ζητήσει τη γνώμη του Pauli για το θέμα, και ο Pauli τον έπεισε πως μια τέτοια κλασική εικόνα δεν μπορούσε να είναι σωστή!

Υπάρχει άλλη μία ανακάλυψη που σχετίζεται με το σπιν, την οποία πρέπει να αναφέρουμε πριν καταπιαστούμε με την απαγορευτική αρχή του Pauli και τον περιοδικό πίνακα. Όπως περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4, η στροφορμή είναι «κβαντωμένη» και ο άξονας περιστροφής μπορεί να έχει ορισμένες μόνο κατευθύνσεις. Αυτός που πρότεινε τούτη την κβάντωση του χώρου ήταν ο Pauli, και η πρότασή του επαληθεύτηκε από το περίφημο πείραμα των Stern και Gerlach. Για ένα ηλεκτρόνιο, η εν λόγω κβάντωση έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν δύο μόνο δυνατοί τρόποι περιστροφής: η περιστροφή κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού ή κατά την αντίθετη. Συνήθως, όταν η περιστροφή του ηλεκτρονίου εκτελείται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, λέμε ότι το ηλεκτρόνιο έχει «σπιν πάνω»· όταν έχει αντίθετη φορά, «σπιν κάτω». Αυτή η ιδιότητα του ηλεκτρονίου έδωσε στον Pauli το κλειδί για την κατανόηση της δομής των ατόμων.

Ο Niels Bohr είχε εντοπίσει το ουσιώδες πρόβλημα που έπρεπε να εξηγηθεί. Αν οι ενέργειες των ηλεκτρονίων στα άτομα είναι πράγματι κβαντωμένες, τότε γιατί όλα τα ηλεκτρόνια δεν καταλαμβάνουν την κατώτερη ενεργειακή κατάσταση του ατόμου; Ήταν φανερό ότι όλα τα ηλεκτρόνια δεν μπορούσαν να βρίσκονται στην κατώτερη κατάσταση, αφού, αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, όλα τα χημικά στοιχεία θα συμπεριφέρονταν με παρόμοιο τρόπο. Επιπλέον, όπως θα δούμε, αυτό που δίνει στα άτομα τη δυνατότητα να συνδυάζονται και να σχηματίζουν μόρια είναι η μορφή των κυματοσυναρτήσεων των διεγερμένων καταστάσεων. Αν όλα τα ηλεκτρόνια βρίσκονταν στη συμμετρική, κατώτερη ενεργειακή κατάσταση, δεν θα υπήρχαν μόρια και, βέβαια, δεν θα υπήρχε η ζωή όπως την ξέρουμε! Ο Pauli έδωσε τη λύση στο πρόβλημα με την εισαγωγή της απαγορευτικής αρχής του. Σύμφωνα με αυτή, σε κάθε κβαντική κατάσταση επιτρέπεται ένα μόνο ηλεκτρόνιο. Ας εξετάσουμε τι σημαίνει αυτό για τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα σε ένα κιβώτιο (Εικόνα 6.3) —οι κβαντωμένες ενεργειακές στάθμες (φλοιοί, ή επίπεδα, ισοδύναμα) συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Αν έχουμε ένα ηλεκτρόνιο μέσα στο κιβώτιο, η κα-



Εικόνα 6.3 Ηλεκτρόνια μέσα σε κιβώτιο. Τα ηλεκτρόνια συμπληρώνουν τις ενεργειακές στάθμες σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli. (α) Ένα ηλεκτρόνιο μέσα στο κιβώτιο — μπορεί να έχει σπιν ή «πάνω» ή «κάτω». (β) Δύο ηλεκτρόνια μέσα στο κιβώτιο — και τα δύο μπορούν να βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση, ωστόσο τα σπιν τους πρέπει να είναι αντιπαράλληλα. (γ) Τρία ηλεκτρόνια μέσα στο κιβώτιο — η θεμελιώδης κατάσταση είναι συμπληρωμένη, οπότε το τρίτο ηλεκτρόνιο είναι υποχρεωμένο να μεταβεί στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση.

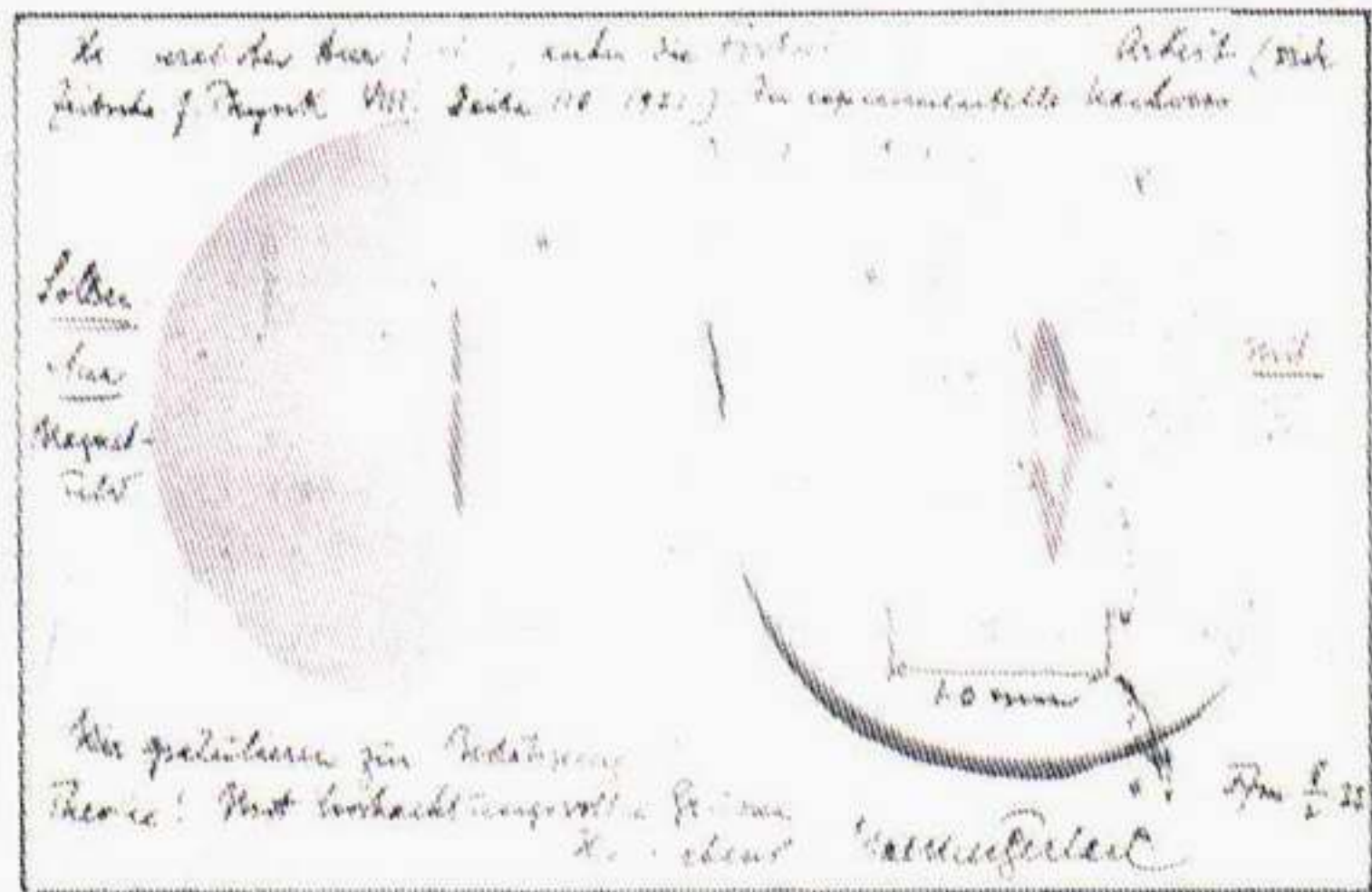
τώτερη ενέργεια του συστήματος (η θεμελιώδης κατάσταση) είναι αυτή στην οποία το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη στάθμη $n = 1$, με το σπιν του είτε «πάνω» είτε «κάτω». Όταν, όμως, προσθέσουμε και δεύτερο ηλεκτρόνιο στο κιβώτιο, πρέπει να σεβαστούμε την απαγορευτική αρχή του Pauli. Μπορεί και αυτό να βρεθεί στη στάθμη $n = 1$, με την προϋπόθεση όμως ότι το σπιν του θα είναι αντιπαράλληλο με εκείνο του πρώτου ηλεκτρονίου. Ωστόσο, αν εισαγάγουμε και τρίτο ηλεκτρόνιο στο κιβώτιο, δεν μπορεί και αυτό να πάει στη στάθμη $n = 1$, αφού η συγκεκριμένη είναι πια πλήρης. Το να το τοποθετήσουμε εκεί (με το σπιν «πάνω» ή «κάτω») θα σήμαινε ότι δύο ηλεκτρόνια θα είχαν ακριβώς τους ίδιους κβαντικούς αριθμούς, και τούτο, σύμφωνα με την αρχή του Pauli, απαγορεύεται. Πρέπει επομένως να συμβιβαστεί με τη δεύτερη καλύτερη λύση και να καταλάβει την επόμενη χαμηλότερη διαθέσιμη ενεργειακή στάθμη που παραμένει κενή — στην περίπτωση αυτή, τη μία από τις δύο δυνατές καταστάσεις σπιν της στάθμης $n = 2$. Όταν και αυτή η στάθμη συμπληρωθεί, πρέπει να πάμε στην επόμενη κ.ο.κ. Όπως λέει ο Feynman στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, για το γεγονός ότι τα πράγματα είναι στερεά και σκληρά ευθύνεται η απαγορευτική αρχή του Pauli. Στην ουσία, η αρχή αυτή ορίζει ότι η ύλη δεν μπορεί να συμπιεστεί σε μηδενικές διαστάσεις, αλλά πρέπει να καταλαμβάνει έναν ορισμένο ελάχιστο χώρο. Όλα τα κβαντικά σωματίδια ύλης υπακούουν στην απαγορευτική αρχή. Αυτά τα σωματίδια ονομάζονται *φερμιόνια*, προς τιμήν του Enrico Fermi, ο οποίος υπήρξε από τους πρώτους που εξέτασαν τις συνέπειες της αρχής του Pauli. Στην πραγματικότητα, υπάρχει και μια άλλη τάξη κβαντικών σωματιδίων, τα σωματίδια αλληλεπιδράσεων (για παράδειγμα τα φωτόνια), για τα οποία δεν ισχύει η αρχή του Pauli. Αυτά τα σωματίδια είναι γνωστά ως *μποζόνια*, από το όνομα του ινδού φυσικού Satyendra Bose, του πρώτου που εξέτασε αυτή την πιθανότητα. Αντίθετα με τα φερμιόνια, τα μποζόνια προτιμούν να βρίσκονται, εφόσον τούτο είναι δυνατόν, όλα μαζί στην κατώτερη ενεργειακή κατάσταση. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε μερικές παρατηρήσιμες συνέπειες τέτοιων «μποζονικών συμπυκνωμάτων».



Ο Otto Stern (1888-1969) ήταν ένας από τους μεγαλύτερους πειραματικούς φυσικούς του 20ού αιώνα. Στο πιο σημαντικό έργο του χρησιμοποίησε μοριακές δέσμες για να καταδείξει τις κβαντικές ιδιότητες των ατόμων. Το 1933 αναγκάστηκε να εγκαταλείψει τη ναζιστική Γερμανία και μετονόμασε στις ΗΠΑ. Τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1943.



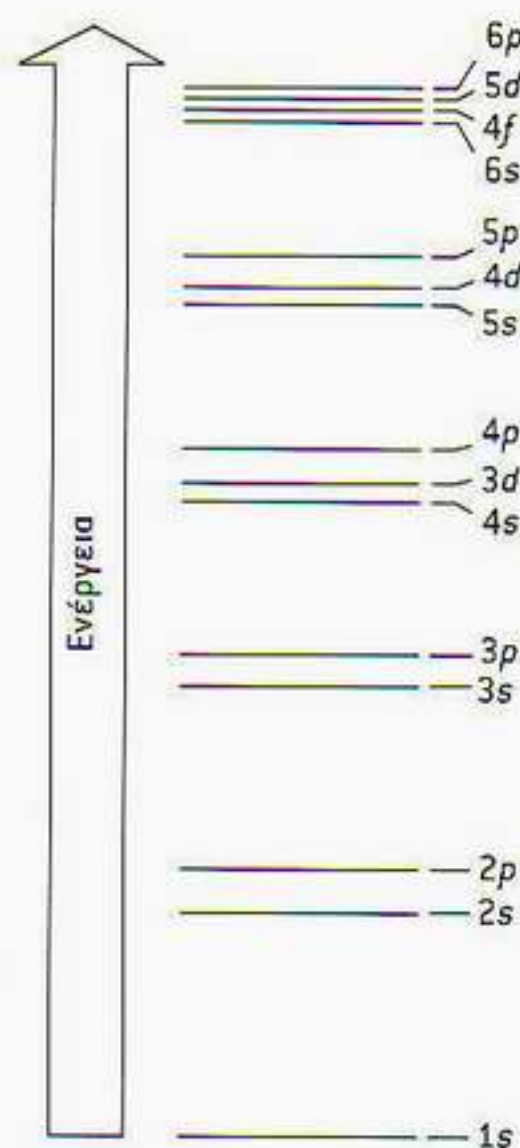
Η κάρτα που έστειλε ο Gerlach, συνεργάτης τού Stern στο διάσημο πείραμά τους για την κβάντωση του χώρου, στον Niels Bohr για να του ανακοινώσει την ανακάλυψή τους.



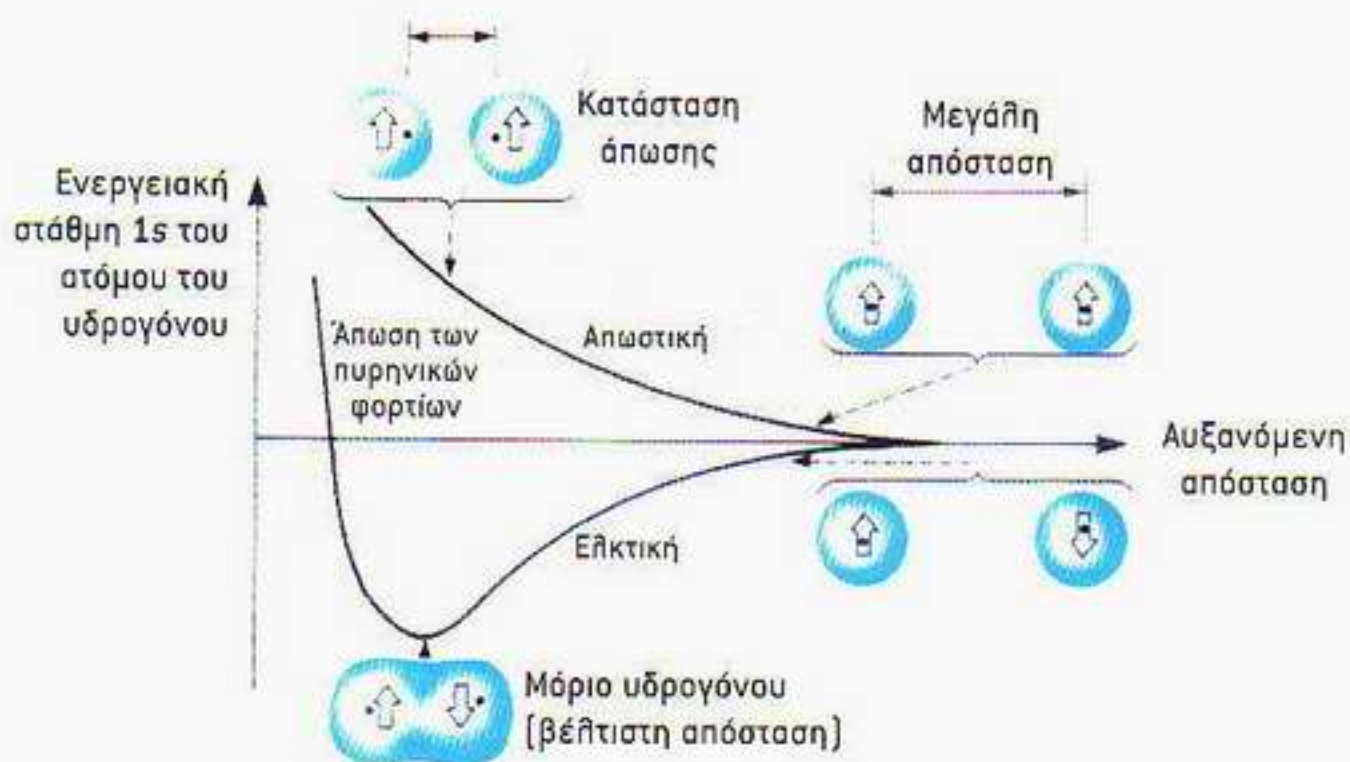
Τα χημικά στοιχεία

Είμαστε τώρα σε θέση να κατανοήσουμε όχι μόνο την ποικιλία των στοιχείων που βρίσκονται στη φύση αλλά και τις χημικές τους ιδιότητες. Ωστόσο, η λεπτομερειακή κατανόηση του περιοδικού πίνακα απαιτεί κάποιες γνώσεις για τις κυματοσυναρτήσεις και τους κβαντικούς αριθμούς. Αυτές αναπτύχθηκαν στην τελευταία ενότητα του Κεφαλαίου 4 και, όπως εκεί, έτσι και εδώ ίσως δημιουργούν κάποιες δυσκολίες σε πρώτη ανάγνωση. Γι' αυτό ίσως είναι προτιμότερο να ρίξετε μια γρήγορη ματιά σε εκείνη την ενότητα χωρίς να σας απασχολήσουν οι λεπτομέρειες. Στο παρόν κεφάλαιο προσπαθούμε να εξηγήσουμε πώς η απαγορευτική αρχή τού Pauli μπορεί να εξηγήσει τους διαφορετικούς τύπους χημικών δεσμών και πώς τα πλεκτρόνια συ-

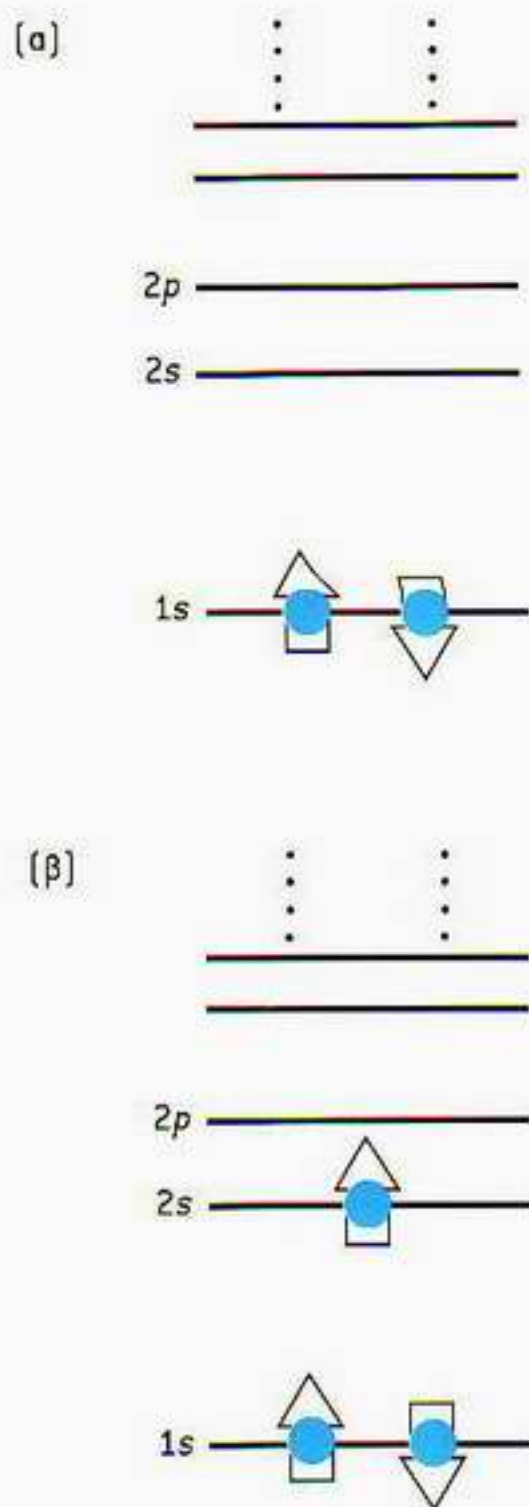
μπληρώνουν τις διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες για να προκύψουν τα διάφορα χημικά στοιχεία. Στο Κεφάλαιο 4 είδαμε πώς η εξίσωση του Schrödinger για το υδρογόνο οδήγησε στις κβαντωμένες ενεργειακές στάθμες του Bohr. Τα ηλεκτρόνια των μεγαλύτερων ατόμων, των οποίων ο πυρήνας περιέχει Z πρωτόνια —άρα και Z ηλεκτρόνια, για να είναι το άτομο ουδέτερο—, σύμφωνα με την αρχή του Pauli δεν μπορούν να βρεθούν όλα στην κατώτερη ενεργειακή κατάσταση. Αντίθετα, θα συμπληρώσουν διαδοχικά τις ενεργειακές στάθμες εκκινώντας από την κατώτερη, $n = 1$. Σε κάθε κατάσταση επιτρέπεται να βρίσκονται δύο ηλεκτρόνια, ένα με σπιν «πάνω» και ένα με σπιν «κάτω» (και αυτή δηλώνεται με τον κβαντικό αριθμό n και τους δύο κβαντικούς αριθμούς τροχιακής στροφορμής L και M). Στην πραγματικότητα, το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών ενός ατόμου με πολλά ηλεκτρόνια που απεικονίζει το βαθμό πλήρωσής τους δεν θα μοιάζει με το αντίστοιχο διάγραμμα του υδρογόνου. Και αυτό διότι, εκτός από την ελκτική δύναμη που ασκείται μεταξύ των ηλεκτρονίων και του πυρήνα, κάθε ηλεκτρόνιο θα υφίσταται απωστικές δυνάμεις από όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε κάποια από τις στάθμες με μεγαλύτερο n —το οποίο αντιστοιχεί σε τροχιά Bohr μεγάλης ακτίνας— να «αντιλαμβάνεται» μόνο ένα κλάσμα του φορτίου του πυρήνα. Το θετικό φορτίο του πυρήνα «θωρακίζεται» από τα αρνητικά φορτία των άλλων ηλεκτρονίων που βρίσκονται πλησιέστερά του. Επιπλέον, τα ηλεκτρόνια της κατάστασης με $L = 0$ (κατάσταση s) έχουν κατανομές πιθανότητας που είναι πιο μεγάλες κοντά στον πυρήνα από οποιαδήποτε ηλεκτρόνια της κατάστασης με $L = 1$ (κατάσταση p) ή $L = 2$ (κατάσταση d) —βλ. Εικόνα 4.18. Συνεπώς, τα ηλεκτρόνια της κατάστασης s θα «αντιλαμβάνονται» μεγαλύτερο μέρος του φορτίου του πυρήνα και θα συνδέονται ισχυρότερα με αυτόν. Έτσι αναμένουμε ότι το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών για τα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια θα μοιάζει με αυτό της Εικόνας 6.4. Το μόνο που απομένει να κάνουμε τώρα για να εξηγή-



Εικόνα 6.4 Ενεργειακές στάθμες ενός τυπικού ατόμου. Αυτό το διάγραμμα, μαζί με την απαγορευτική αρχή του Pauli, καθορίζει τη μορφή του περιοδικού πίνακα των στοιχείων.



Εικόνα 6.5 Γραφική παράσταση της δυναμικής ενέργειας δύο ατόμων υδρογόνου συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης. Τα άτομα αλληλοσπωθούνται όταν τα σπιν τους είναι παράλληλα, και έλκονται όταν είναι αντιπαράλληλα. Επομένως, οι στάθμες $1s$ των ατόμων υδρογόνου διασπώνται σε δύο, όπως φαίνεται στην εικόνα. Αν τα άτομα πλησιάσουν πολύ κοντά το ένα στο άλλο, τα πρωτόνια των πυρήνων τους θα αρχίσουν να απωθούνται σημαντικά. Αυτό σημαίνει ότι, στην περίπτωση που τα δύο σπιν είναι αντιπαράλληλα, υπάρχει μια «βέλτιστη απόσταση» για την οποία σχηματίζεται ένα μόριο υδρογόνου.



Εικόνα 6.6 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για το ήλιο (α) και το λίθιο (β).

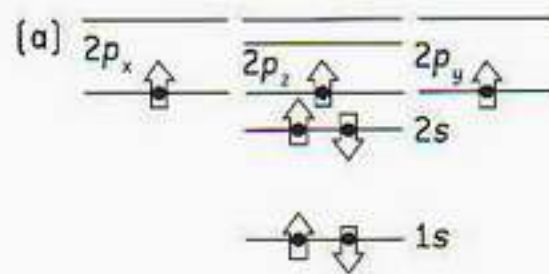
σομε τον περιοδικό πίνακα είναι να τοποθετήσουμε τα ηλεκτρόνια σε αυτά τα επίπεδα σύμφωνα με τη «στεγαστική πολιτική» του Pauli. Δεν ήταν λοιπόν τυχαίο που ο Pauli είχε το παρατσούκλι «διευθυντής της στεγαστικής υπηρεσίας των ατόμων».

Ένα ουδέτερο άτομο υδρογόνου έχει ένα ηλεκτρόνιο, που κανονικά βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση $n = 1$ και $L = 0$: την κατώτερη ενεργειακή στάθμη $1s$. Το ηλεκτρόνιο αυτό μπορεί, συγκρουόμενο με άλλα σωματίδια ή απορροφώντας φωτόνια, να διεγερθεί σε μια ανώτερη ενεργειακή στάθμη. Έπειτα από πολύ λίγο χρόνο, το ηλεκτρόνιο θα επανέλθει στη θεμελιώδη κατάσταση, εκπέμποντας ένα φωτόνιο με ενέργεια που θα αντιστοιχεί σε μία από τις φασματικές γραμμές του ατόμου. Ίσως να μας εκπλήσσει, αλλά και στην περίπτωση του υδρογόνου η απαγορευτική αρχή του Pauli έχει να παίξει κάποιο ρόλο. Τι συμβαίνει, λόγου χάρη, αν φέρουμε ένα άλλο άτομο υδρογόνου κοντά στο πρώτο; Αν και τα δύο ηλεκτρόνια βρίσκονται στην κατάσταση σπιν «πάνω» —και τούτο σημαίνει ότι τα δύο ηλεκτρόνια βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση—, τότε η απαγορευτική αρχή θα πρέπει να εμποδίζει τα δύο άτομα να πλησιάσουν αρκετά κοντά έτσι ώστε να επικαλυφθούν οι κυματοσυναρτήσεις των δύο ηλεκτρονίων. Αντίστροφα, αν τα δύο σπιν είναι αντιπαράλληλα, τότε τα δύο άτομα θα μπορούν να προσεγγίσουν περισσότερο, και πράγματι τον περισσότερο χρόνο τα δύο ηλεκτρόνια παραμένουν στο χώρο μεταξύ των δύο πυρήνων υδρογόνου. Αυτό συνεπάγεται την εμφάνιση μιας δύναμης σύνδεσης μεταξύ των δύο ατόμων υδρογόνου, γεγονός που σημαίνει το σχηματισμό ενός σταθερού μορίου υδρογόνου. Αυτού του είδους ο χημικός δεσμός, κατά τον οποίο τα δύο ηλεκτρόνια «μοιράζονται» και στους δύο πυρήνες του μορίου, ονομάζεται *ομοιοπολικός δεσμός*. Η απαγορευτική αρχή του Pauli εξηγεί, λοιπόν, γιατί το υδρογόνο είναι χημικά ενεργό και γιατί δύο άτομα μπορούν να σχηματίσουν ένα σταθερό μόριο υδρογόνου (H_2). Σημειώστε ότι η ίδια αρχή απαγορεύει σε ένα τρίτο άτομο να σχηματίσει ομοιοπολικό δεσμό με το μόριο του υδρογόνου, αφού οι δύο θεμελιώδεις ενεργειακές στάθμες είναι ήδη κατειλημμένες.

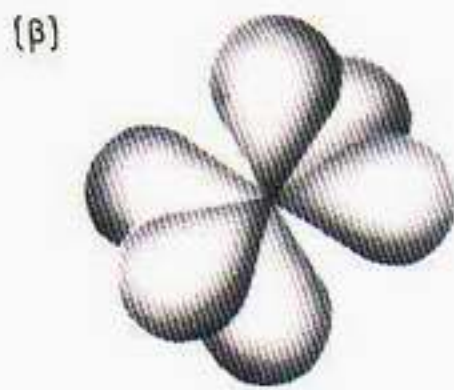
Το αμέσως επόμενο απλό χημικό στοιχείο είναι το ήλιο, με δύο ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα του, ο οποίος έχει διπλάσιο θετικό φορτίο σε σχέση με τον πυρήνα του υδρογόνου. Αμφότερα αυτά τα ηλεκτρόνια μπορούν να καταλάβουν την κατώτερη στάθμη $1s$, με την προϋπόθεση ότι τα σπιν τους είναι αντιπαράλληλα (Εικόνα 6.6(α)). Αφού τώρα δεν υπάρχει πια θέση για άλλα ηλεκτρόνια στην κατάσταση $1s$, η απαγορευτική αρχή του Pauli εμποδίζει άλλα ηλεκτρόνια να πλησιάσουν το άτομο του ηλίου —όπως ακριβώς και στο μόριο του υδρογόνου. Έτσι, αναμένουμε ότι το ήλιο είναι χημικά ανενεργό —μέλος της οικογένειας των αδρανών αερίων. Το επόμενο στοιχείο, το λίθιο, έχει τρία ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα του και παρόμοια διάταξη ενεργειακών σταθμών με το ήλιο (Εικόνα 6.6(β)). Τα δύο πρώτα ηλεκτρόνια μπορούν να καταλάβουν την κατάσταση $1s$, με τα σπιν τους αντιπαράλληλα, και έτσι να δημιουργηθεί ένας χημικά ανενεργός κλειστός φλοιός σαν του ηλίου. Το τρίτο ηλεκτρόνιο πρέπει να καταλάβει την κατώτερη μη συμπληρωμένη ενεργειακή στάθμη, που τώρα είναι η $2s$. Έτσι, το λίθιο έχει ένα ηλεκτρόνιο στη στάθμη $L = 0$, κατάσταση s , και αυτό εξηγεί γιατί έχει παρόμοιες χημικές ιδιότητες με το υδρογόνο. Για παράδειγμα, το λίθιο σχηματίζει σταθερά μόρια Li_2 , με ομοιοπολικό δεσμό, κατά τον ίδιο τρόπο που τα άτομα του υδρογόνου συνδέονται για να σχηματίσουν τα μόρια υδρογόνου.

Αν συνεχίζουμε να προσθέτουμε ηλεκτρόνια, συμπληρώνουμε όλο και πιο υψηλές ενεργειακές στάθμες. Το άζωτο, για παράδειγμα, έχει επτά ηλεκτρόνια. Δύο από αυτά συμπληρώνουν τη στάθμη 1ψ σχηματίζοντας έναν κλειστό φλοιό. Δύο ακόμα ηλεκτρόνια συμπληρώνουν τη στάθμη $2s$, σχηματίζοντας έναν δεύτερο κλειστό φλοιό, αφήνοντας τρία ηλεκτρόνια για τη στάθμη $2p$. Οι καταστάσεις s έχουν σφαιρικά συμμετρικές κατανομές πιθανότητας—δεν ευνοείται δηλαδή καμία κατεύθυνση (βλ. Εικόνα 4.18). Στην κατάσταση $2s$, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται πιο μακριά από τον πυρήνα σε σχέση με την κατάσταση $1s$, πράγμα που σημαίνει ότι στη διεγερμένη κατάσταση τα ηλεκτρόνια συνδέονται με τον πυρήνα πιο χαλαρά απ' ό,τι στη θεμελιώδη. Οι κατανομές πιθανότητας της κατάστασης p , όμως, δεν είναι σφαιρικά συμμετρικές. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, υπάρχουν τρεις δυνατές καταστάσεις p , τις οποίες μπορούμε να συμβολίσουμε με x , ψ ή z . Τα σύμβολα αυτά δείχνουν αν οι λοβοί της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας του ηλεκτρονίου είναι προσανατολισμένοι στις κατευθύνσεις των αξόνων x , ψ ή z (βλ. Εικόνα 4.18). Τα τρία ηλεκτρόνια του αζώτου, για να απομακρυνθούν κατά το δυνατόν περισσότερο και, επομένως, για να ελαχιστοποιηθεί η μεταξύ τους άπωση, προτιμούν να καταλαμβάνουν τρεις διαφορετικές καταστάσεις p (αντί να καταλαμβάνουν την ίδια κατάσταση p με τα σπιν τους αντιπαράλληλα). Οι μορφές αυτών των κυματοσυναρτήσεων των καταστάσεων p μάς επιτρέπουν επίσης να κατανοήσουμε το σχηματισμό πιο πολύπλοκων μορίων. Ένα άτομο υδρογόνου μπορεί να προσεγγίσει ένα άτομο αζώτου και να προσκολληθεί σε οποιοδήποτε από τους τρεις λοβούς των καταστάσεων p , με την προϋπόθεση ότι το σπιν του ηλεκτρονίου του υδρογόνου είναι αντίθετο από το σπιν του ηλεκτρονίου του αζώτου της αντίστοιχης κατάστασης p . Γίνεται φανερό ότι το άζωτο μπορεί να συνδεθεί με τρία το πολύ άτομα υδρογόνου, έτσι ώστε ο φλοιός p να συμπληρωθεί με έξι ηλεκτρόνια που μοιράζονται εξίσου και στους δύο πυρήνες. Η Εικόνα 6.7 παρουσιάζει τη γεωμετρία του μορίου της αμμωνίας (NH_3), το οποίο σχηματίζεται με ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ ενός ατόμου αζώτου και τριών ατόμων υδρογόνου. Βλέπουμε ότι το άζωτο είναι χημικά ενεργό και μπορεί να σχηματίσει πολλές άλλες χημικές ενώσεις. Μετά το άζωτο, αν προσθέσουμε ένα ακόμα ηλεκτρόνιο, πηγαίνουμε στο οξυγόνο που έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στο φλοιό p . Τώρα, ένα από τα τρία «τροχιακά» p συμπληρώνεται, και επομένως το άτομο του οξυγόνου μπορεί να συνδεθεί με δύο μόνο άτομα υδρογόνου. Στην Εικόνα 6.8 απεικονίζεται η κυματοσυναρτηση του μορίου του νερού.

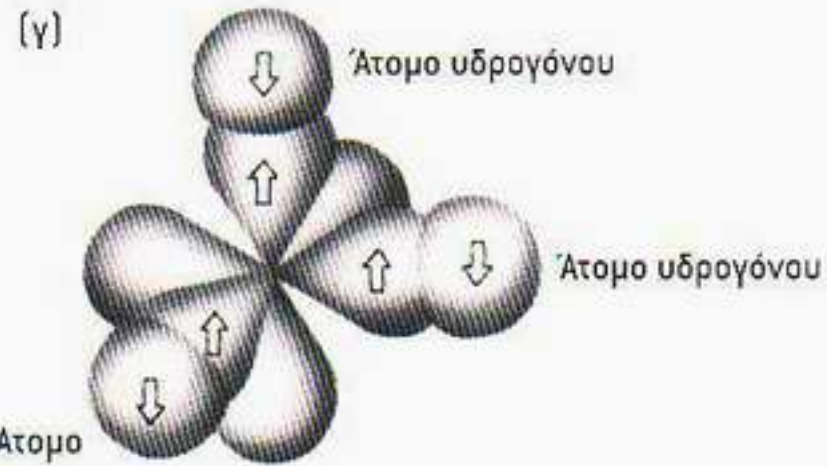
Ας συνεχίσουμε τώρα την περιήγησή μας στον περιοδικό πίνακα, στο στοιχείο νέο. Αυτό έχει δέκα ηλεκτρόνια, τα οποία πρέπει να κατανεμηθούν στις ενεργειακές στάθμες σύμφωνα με την αρχή του Pauli. Οι φλοιοί $1s$, $2s$ και $2p$ είναι τώρα πλήρως κατειλημμένοι. Καταλαβαίνουμε επομένως γιατί και το νέο, όπως και το ήλιο, είναι χημικά ανενεργό, και γιατί επανεμφανίστηκε η ιδιότητα της χημικής αδράνειας. Από τις ενεργειακές στάθμες στην Εικόνα 6.4 φαίνεται ότι, αν συμπληρώνονταν πλήρως και οι στάθμες $3s$ και $3p$, θα προέκυπτε ένα άλλο χημικά ανενεργό στοιχείο. Δύο ηλεκτρόνια στο φλοιό s και έξι στο φλοιό p αντιστοιχούν στο στοιχείο με αριθμό πρωτονίων $Z = 18$, το οποίο είναι το αδρανές αέριο αργό. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να κατανοήσουμε ολόκληρο τον περιοδικό πίνακα. Τα στοιχεία έχουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες όταν διαθέτουν τον ίδιο αριθμό εξωτερικών ηλεκτρονίων σε παρόμοιες κβαντικές καταστάσεις. Έτσι, το λίθιο συνδέεται με το οξυγόνο σχηματίζοντας



Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του αζώτου· τα ηλεκτρόνια της θεμελιώδους κατάστασης αναπαριστώνται ως μαύροι κύκλοι, ενώ ο προσανατολισμός τού σπιν με βέλη.

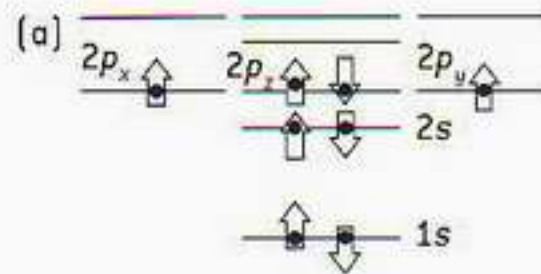


Άτομο αζώτου· φαίνονται μόνο οι επιφάνειες ίσης πιθανότητας των καταστάσεων 2p.

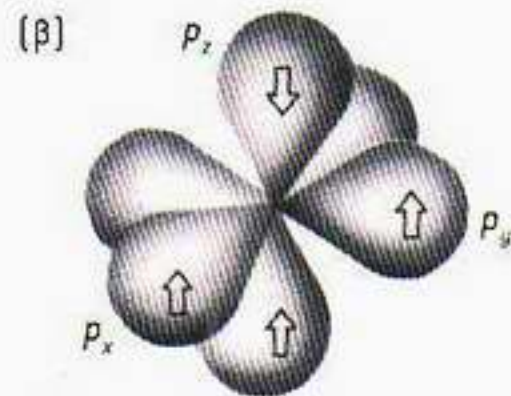


Άτομο υδρογόνου
Άτομο υδρογόνου
Μόριο αμμωνίας

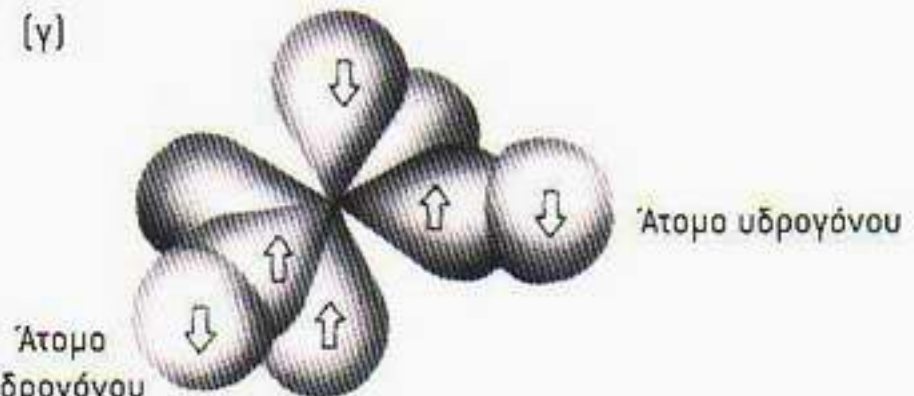
Εικόνα 6.7 Απεικόνιση της δομής του μορίου της αμμωνίας [NH₃]. (α) Ενεργειακές στάθμες του ατόμου του αζώτου. (β) Απεικόνιση των επιφανειών ίσης πιθανότητας των καταστάσεων 2p για το άτομο του αζώτου. (γ) Διάταξη των επιφανειών ίσης πιθανότητας των ηλεκτρονίων στο μόριο της αμμωνίας.



Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του οξυγόνου· τα ηλεκτρόνια της θεμελιώδους κατάστασης αναπαριστώνται ως μαύροι κύκλοι, ενώ ο προσανατολισμός τού σπιν με βέλη.



Άτομο οξυγόνου· φαίνονται οι επιφάνειες ίσης πιθανότητας των καταστάσεων 2p.



Άτομο υδρογόνου
Άτομο υδρογόνου
Μόριο νερού

Εικόνα 6.8 Απεικόνιση της δομής του μορίου του νερού. (α) Ενεργειακές στάθμες του ατόμου του οξυγόνου. (β) Απεικόνιση των επιφανειών ίσης πιθανότητας των καταστάσεων 2p για το άτομο του οξυγόνου. (γ) Διάταξη των επιφανειών ίσης πιθανότητας των ηλεκτρονίων στο μόριο του νερού.

το οξείδιο του λιθίου (Li₂O), με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που το υδρογόνο συνδέεται με το οξυγόνο σχηματίζοντας το μόριο του νερού.

Μέταλλα, μονωτές και ημιαγωγοί

Μια από τις μεγαλύτερες επιτυχίες της κβαντικής φυσικής υπήρξε η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διάφοροι τύποι στερεών άγουν τον ηλεκτρισμό. (Στα στερεά, ηλεκτρικό ρεύμα είναι η ροή ηλεκτρονίων.) Μεγάλο θρίαμβο της κβαντικής μηχανικής αποτέλεσε το γεγονός ότι μπόρεσε να εξηγήσει πού οφείλεται ο διαχωρισμός των υλικών σε μέταλλα, μονωτές και ημιαγωγούς. Πράγματι, δεν είναι υπερβολή να ισχυριστούμε ότι η κβαντομηχανική εξήγηση του παραπάνω διαχωρισμού οδήγησε άμεσα στη σημερινή τεχνολογική επανάσταση (και στον επακόλουθο κατακλυσμό μας με σωρεία νέων και φτηνών συσκευών, από στερεοφωνικά συγκροτήματα και έγχρωμες

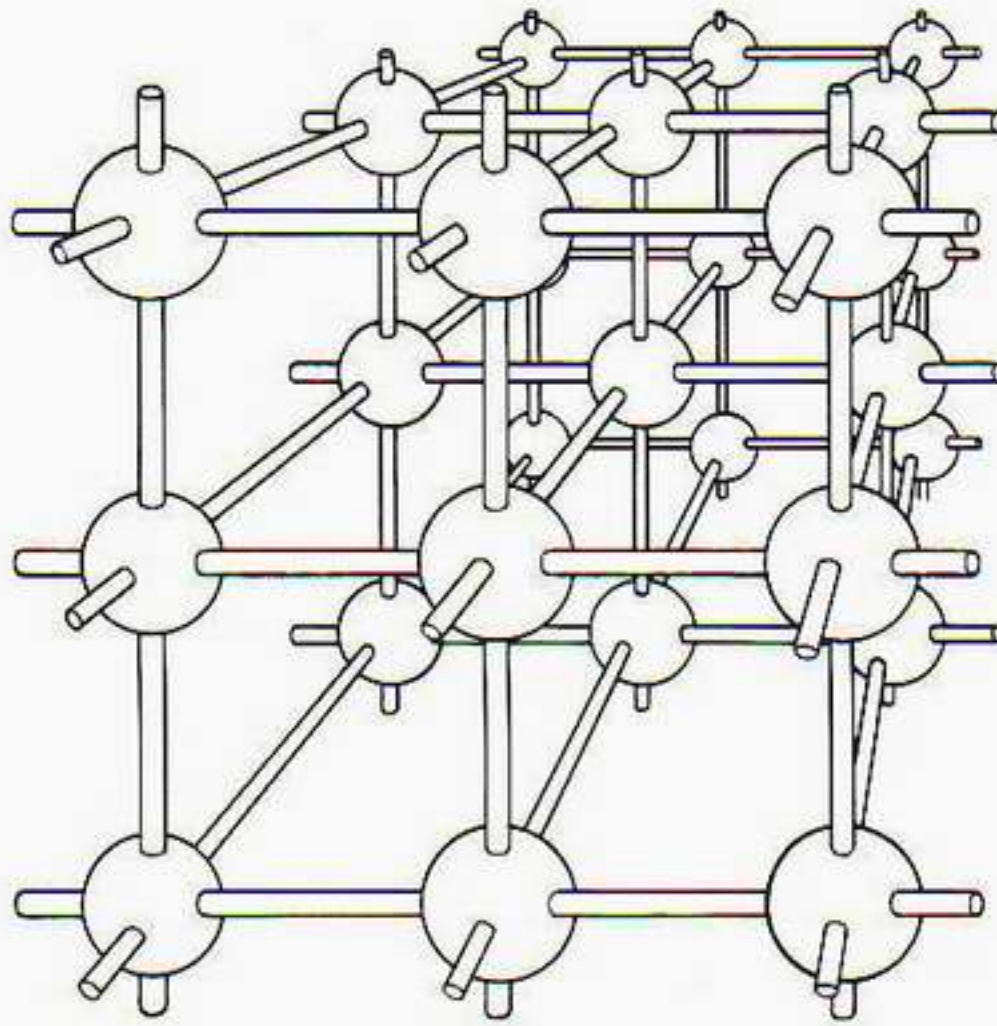


Εικόνα 6.9 Η φωτογραφία αυτή, που ελήφθη από το δορυφόρο Landsat, δείχνει τον κόλπο του Σαν Φρανσίσκο με τη Σίθικον Βόθει και το Σαν Χοσέ κάτω δεξιά. Στη μέση οριστερό διακρίνονται καθαρά οι λίμνες Σαν Αντρέας, που διατάσσονται κατά μήκος του διαβόητου τεκτονικού ρήγματος, παράλληλα με την ακτή.

τηλεοράσεις μέχρι ηλεκτρονικούς υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα). Πολλές ιδιότητες των στερεών μπορούν να γίνουν κατανοητές χάρη στην κβαντική μηχανική, όπως είναι το χρώμα, η σκληρότητα, η υφή κ.ά., εμείς όμως θα περιοριστούμε στην ικανότητά τους να άγουν τον ηλεκτρισμό. Ένας καλός αγωγός, όπως ο χαλκός, διαθέτει πολλά ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, τα οποία, εάν εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού στα άκρα του, τίθενται σε κίνηση (ηλεκτρικό ρεύμα). Από την άλλη μεριά, όμως, ένας μονωτής, όπως το γυαλί ή το πολυαιθυλένιο, φαίνεται να μη διαθέτει τέτοια ηλεκτρόνια —αφού, όταν στα άκρα του εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού, δεν εμφανίζεται ρεύμα. Υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία υλικών που άγουν τον ηλεκτρισμό πολύ καλύτερα από τους μονωτές, αλλά πολύ χειρότερα από τα μέταλλα. Είναι φυσικό, λοιπόν, τέτοια υλικά να ονομάζονται *ημιαγωγοί*. Παραδείγματα ημιαγωγών αποτελούν το γερμάνιο και το πυρίτιο, και η μεγάλη σημασία των στοιχείων αυτών για τη νέα τεχνολογία φαίνεται από τη μετονομασία σε «κοιλιάδα του πυριτίου» της περιοχής γύρω από το Σαν Χοσέ της Καλιφόρνιας.

Οι ιδιότητες των στερεών δεν εξαρτώνται μόνο από τη σύστασή τους αλλά και από τη διάταξη των ατόμων και των μορίων του. Πολλά υλικά έχουν τα άτομά τους διατεταγμένα με κανονικό τρόπο, όπως τα τούβλα σε έναν τοίχο. Αυτή η κανονική διάταξη των ατόμων ονομάζεται *κρυσταλλικό πλέγμα*, και τα σώματα με τέτοια δομή ονομάζονται *κρυσταλλικά στερεά*. Υπάρχουν υλικά που δεν έχουν κρυσταλλική δομή, ωστόσο —όπως και ένας σωρός από τούβλα— διαθέτουν και αυτά μια κάποια σκληρότητα και αντοχή. Μάλιστα, οι

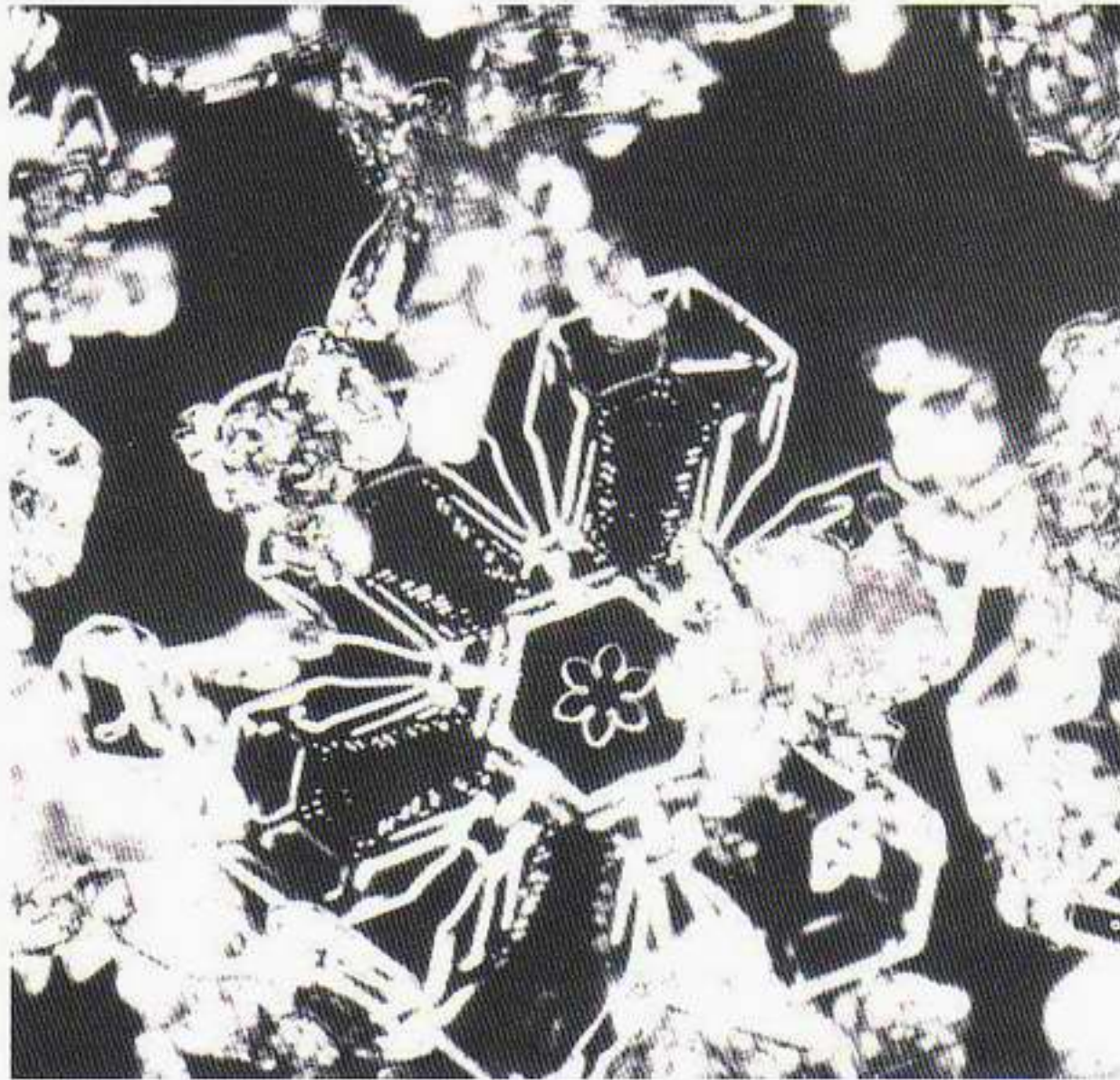
Εικόνα 6.10 Η διάταξη των ατόμων σε ένα κυβικό κρυσταλλικό πλέγμα. Οι σφαίρες παριστάνουν τις θέσεις των ατόμων, ενώ οι σωλήνες που τις συνδέουν τη διεύθυνση των δεσμών μέσω των οποίων συγκρατούνται τα άτομα του υλικού. Στην περίπτωση του κοινού επιτραπέζιου αλατιού, οι σφαίρες αντιστοιχούν εναλλάξ σε κατιόντα νατρίου (άτομο νατρίου που έχουν χάσει ένα ηλεκτρόνιο) και ανιόντα χλωρίου (άτομο χλωρίου που έχουν προσλάβει ένα ηλεκτρόνιο), και απέχουν μεταξύ τους 2,8 άγκστρεμ (10^{-10} μέτρα).



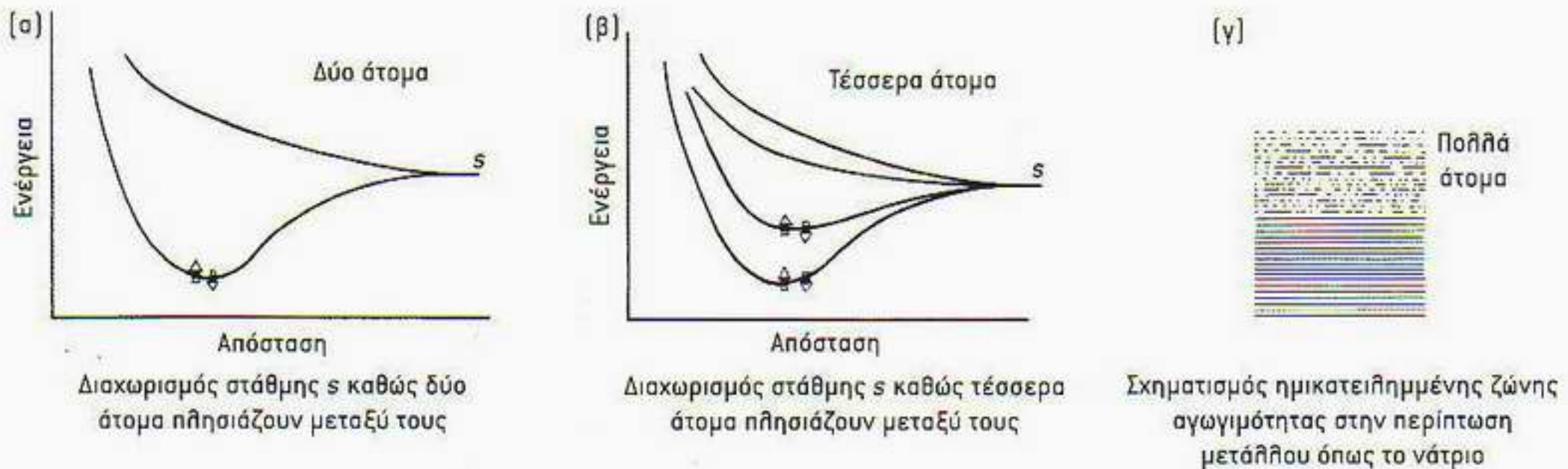
Εικόνα Β.11 Το κοινό επιτραπέζιο αλάτι, μεγεθυμένο 50 φορές με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Οι εμφανείς κυβικές μορφές αντικατοπτρίζουν την υποκείμενη πλεγματική δομή.

ιδιότητες τούτων των «άμορφων» στερεών ποικίλλουν πολύ περισσότερο από τις ιδιότητες των κρυσταλλικών υλικών που θα εξετάσουμε σε αυτό το κεφάλαιο. Όπως θα δούμε, η τοποθέτηση όλων των ατόμων σε κανονική διάταξη επιδρά καταλυτικά στις επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες των πλεκτρονίων των ατόμων.

Μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα για τη δομή των ενεργειακών σταθμών μιας κανονικής διάταξης ατόμων εξετάζοντας τι συμβαίνει στις ενεργειακές στάθμες δύο μόνο ατόμων όταν αυτά πλησιάζουν μεταξύ τους. Στην περίπτωση του υδρογόνου, είδαμε ότι η απαγορευτική αρχή του Pauli οδηγεί στη σύνδεση δύο ατόμων και το σχηματισμό ενός μορίου μόνο όταν τα σπιν των δύο πλεκτρονίων είναι αντιπαράλληλα. Όταν τα σπιν είναι παράλληλα, λόγω της αρχής του Pauli τα πλεκτρόνια διατηρούνται σε απόσταση και δεν επιτρέπεται η σύνδεση των ατόμων. Από πλευράς ενέργειας βλέπουμε ότι, στην πρώτη περίπτωση, τα δύο πλεκτρόνια έχουν λιγότερη ενέργεια απ' ό,τι τα δύο μεμονωμένα άτομα (και αυτό οδηγεί στο σχηματισμό μορίου μέσω ομοιοπολικού δεσμού), ενώ στην άλλη περίπτωση τα δύο πλεκτρόνια έχουν περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι τα δύο άτομα —οπότε αυτά δεν συνδέονται (βλ. Εικόνα 6.5). Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται με τα εξωτερικά πλεκτρόνια του νατρίου στη στάθμη $3s$, όταν πλησιάζουν μεταξύ τους δύο άτομα νατρίου. Όσο δε προστίθενται όλο και περισσότερα άτομα νατρίου, ανακαλύπτουμε ότι ο διαχωρισμός των σταθμών $3s$ αυξάνεται μέχρις ότου απομένει μια «ζώνη» πολύ πυκνών ενεργειακών σταθμών (Εικόνα 6.13). Αυτή η ζώνη ονομάζεται ζώνη $3s$, αφού σχηματίζεται από τις στάθμες $3s$ του ατόμου του νατρίου. Για N άτομα, η ζώνη $3s$ θα περιέχει N στάθμες, καθεμία από τις οποίες θα μπορεί να φιλοξενήσει το πολύ δύο πλεκτρόνια, ένα με σπιν «πάνω» και ένα με σπιν «κάτω». Οι κατώτερες ενεργειακές στάθμες αντιστοιχούν σε ισχυρότερα συνδεδεμένα πλεκτρόνια με περισσότερο εντοπισμένες κυματοσυναρτήσεις, οι οποίες δεν επικαλύπτονται τόσο πολύ όσο εκείνες των καταστάσεων $3s$. Οι προκύπτουσες ενεργειακές ζώνες είναι πολύ πιο στενές. Οι ζώνες $1s$ και $2s$ μπορούν να δεχτούν $2N$ πλεκτρόνια και, για το νάτριο, θα είναι πλήρως κατειλημμένες. Η ζώνη $2p$ μπορεί να δεχτεί $6N$ πλεκτρόνια (τρεις διαφορετικές καταστάσεις p επί δύο διαφορετικές καταστάσεις σπιν για καθένα από τα N άτομα) και θα είναι επίσης συμπληρωμένη. Ωστόσο, το άτομο του νατρίου διαθέτει ένα μόνο πλεκτρόνιο στην κατάσταση $3s$, οπότε στην περίπτωση μετάλλου με N άτομα, η ζώνη $3s$ θα περιέχει N μόνο πλεκτρόνια και θα είναι ημικατειλημμένη. Αυτά τα πλεκτρόνια της στάθμης $3s$ αποτελούν τα πλεκτρόνια αγωγιμότητας. Αν εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού στις άκρες ενός σύρματος από νάτριο, τα εν λόγω πλεκτρόνια αποκτούν πρόσθετη ενέργεια και επιταχύνονται κατά μήκος του σύρματος —μπορούμε να τα φανταστούμε να πηδούν στις κενές υψηλότερες ενεργειακές στάθμες της ζώνης $3s$. Αυτή ακριβώς η εικόνα για τις ενεργειακές στάθμες των πλεκτρονίων αγωγιμότητας ενός μετάλλου μάς βοηθά να καταλάβουμε γιατί πολλές ιδιότητές τους μπορούν να εξηγηθούν με το απλό μοντέλο των πλεκτρονίων μέσα σε ένα κιβώτιο, το οποίο εξετάσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Κατά το σχηματισμό ομοιοπολικού δεσμού στο μόριο του υδρογόνου, τα δύο πλεκτρόνια μοιράζονται ανάμεσα και στα δύο άτομα υδρογόνου. Συνεπώς, τα μέταλλα μπορούν υπό μία έννοια να θεωρηθούν ακραία περίπτωση σχηματισμού ομοιοπολικού δεσμού, κατά την οποία τα πλεκτρόνια αγωγιμότητας μοιράζονται ανάμεσα σε όλα τα άτομα του μετάλλου.

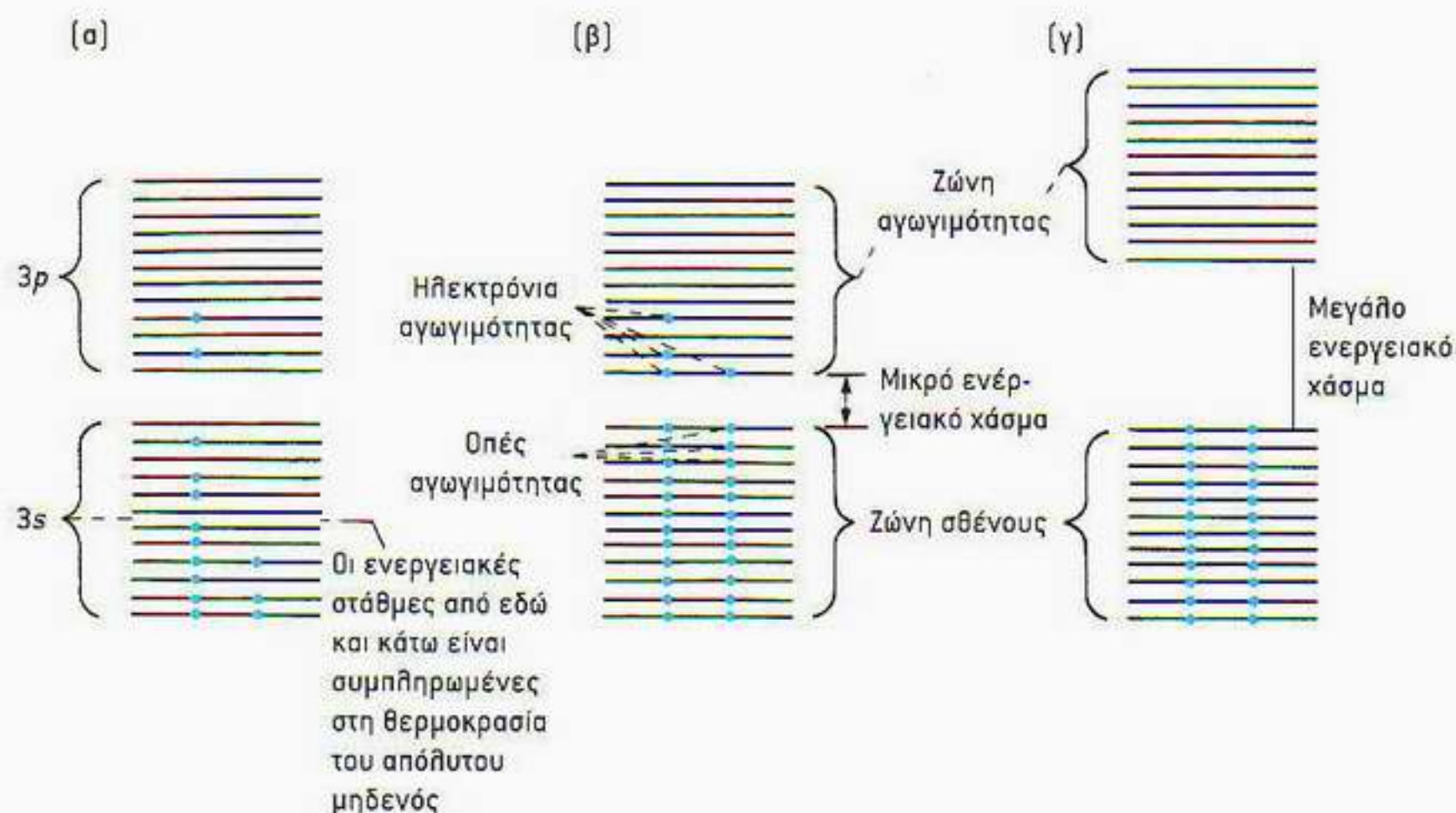


Εικόνα 6.12 Η υπέροχη συμμετρία αυτής της νιφόδας χιονιού αντικατοπτρίζει την εξαγωνική δομή που συγκροτείται από τους δεσμούς μεταξύ των μορίων νερού κατά το σχηματισμό του πάγου.



Εικόνα 6.13 Διαχωρισμός ενεργειακών σταθμών σε ένα στοιχείο όπως το νάτριο, που διαθέτει ένα μόνο ηλεκτρόνιο κατάσταση s στον εξωτερικό του φλοιό. (α) Διαχωρισμός καθώς δύο άτομα πλησιάζουν μεταξύ τους. (β) Διαχωρισμός σταθμών καθώς τέσσερα άτομα πλησιάζουν μεταξύ τους. (γ) Σχηματισμός μιας ημικατελημένης ζώνης αγωγιμότητας, καθώς πολλά άτομα προσεγγίζουν το ένα το άλλο.

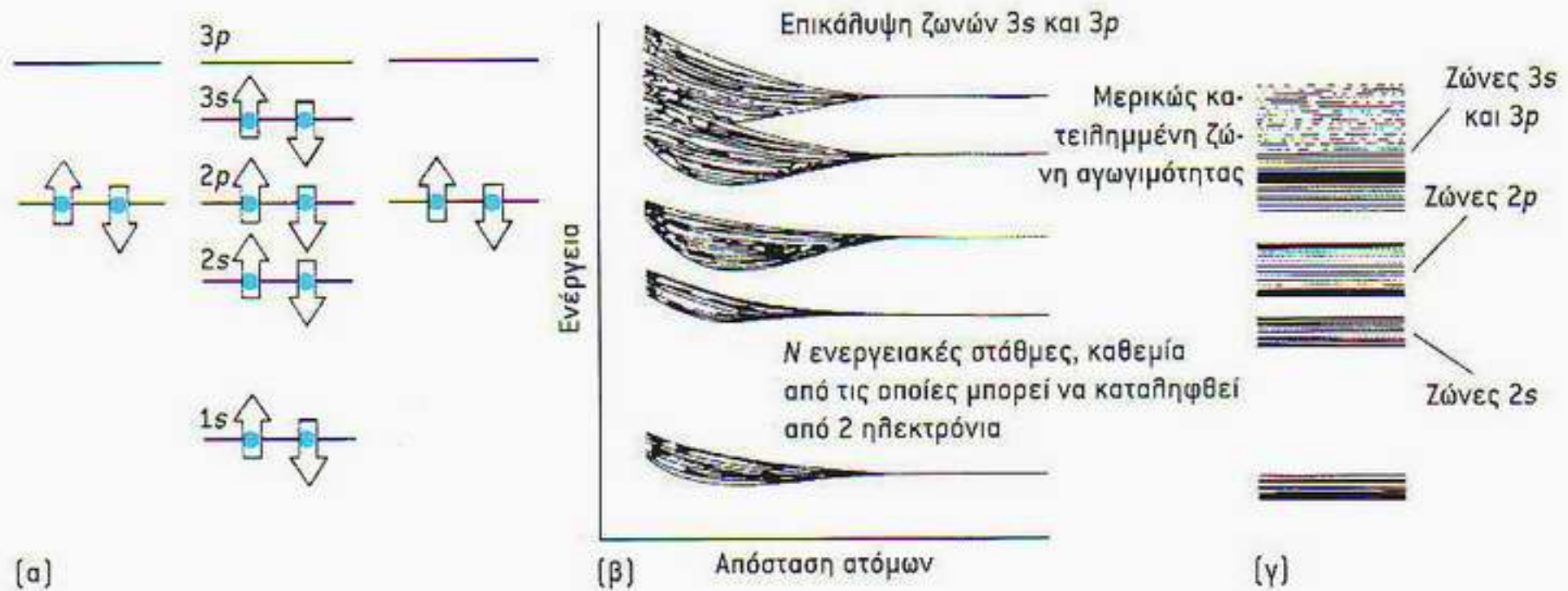
Η κατάσταση πραγμάτων που μόλις περιγράψαμε αντιστοιχεί στη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση του νατρίου, του οποίου τα ιόντα είναι «καρφωμένα» σε μια κρυσταλλική πλεγματοειδή δομή. Σε θερμοκρασία δωματίου, όμως, τα ιόντα του πλέγματος διαθέτουν κάποια θερμική κινητική ενέργεια η οποία αντιστοιχεί σε δονήσεις των ιόντων γύρω από τις κεντρικές θέσεις τους στο κρυσταλλικό πλέγμα. Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν επομένως να κερδίσουν και να χάσουν ενέργεια κατά τις συγκρούσεις τους με τα ιόντα του πλέγματος και μεταξύ τους. Έτσι, αντί τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας να συμπληρώνουν ακριβώς το κάτω ήμισυ της ζώνης των ενεργειακών



Εικόνα 6.14 Μέταλλα, ημιαγωγοί και μονωτές. (α) Δομή ενεργειακών ζωνών ενός χαρακτηριστικού μετάλλου, του νατρίου. Υπάρχουν πολλές ασυμπλήρωτες ενεργειακές στάθμες στις οποίες μπορούν να μετακινηθούν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, οπότε σε κανονικές θερμοκρασίες μερικά ηλεκτρόνια θα διεγερθούν στη σχεδόν ασυμπλήρωτη στάθμη 3p. (β) Σε έναν ημιαγωγό, η ζώνη σθένους είναι συμπληρωμένη και τη χωρίζει ένα μικρό ενεργειακό χάσμα από τις κενές ενεργειακές στάθμες της ζώνης αγωγιμότητας. Σε κανονικές θερμοκρασίες, μερικά από τα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να υπερβούν το ενεργειακό χάσμα. (γ) Σε ένα μονωτή, το ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στις ζώνες είναι πολύ μεγάλο, οπότε ο αριθμός ηλεκτρονίων που μπορεί να το υπερβεί είναι ασήμαντα μικρός. Επομένως, ο μονωτής δεν άγει τον ηλεκτρισμό σχεδόν καθόλου, ή έστω πολύ λίγο.

σταθμών 3s —με το άνω ήμισυ να μένει κενό—, μερικά από αυτά θα διεγερθούν θερμικά, καταλαμβάνοντας κάποιες από τούτες τις υψηλότερες στάθμες. Φυσικά, έτσι εκκενώνονται κάποιες από τις κατώτερες ενεργειακές στάθμες της ζώνης 3s. Μολονότι η ενέργεια μιας τυπικής σύγκρουσης σε θερμοκρασία δωματίου δεν αντιπροσωπεύει παρά ένα μικρό κλάσμα του ηλεκτρονιοβόλτ, τα ενεργειακά χάσματα μεταξύ των ζωνών του νατρίου είναι αρκετά μικρά ώστε κάποια ηλεκτρόνια αγωγιμότητας της ζώνης 3s να διεγείρονται και να ε-ποικίζονται τη μέχρι τότε κενή ζώνη 3p.

Η περιπλοκή της θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων δεν αλλάζει σημαντικά την εικόνα μας για την ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων, αλλά θα αποβεί κρίσιμης σημασίας για την κατανόηση των μονωτών και των ημιαγωγών. Ας δούμε πρώτα πώς αυτή η απλή εικόνα των ενεργειακών ζωνών, σε συνδυασμό με την απαγορευτική αρχή του Pauli, μπορεί να μας δώσει μια εξήγηση για τους μονωτές. Ας εξετάσουμε, λοιπόν, τι συμβαίνει εάν έχουμε ένα υλικό που η βασική του κατάσταση αποτελείται από δύο ζώνες, εκ των οποίων η μεν κάτω είναι πλήρως κατειλημμένη, η δε πάνω εντελώς κενή. Αν υπάρχει ένα μεγάλο ενεργειακό χάσμα μεταξύ των δύο ζωνών, κανένα σχεδόν ηλεκτρόνιο δεν πρόκειται να αποκτήσει αρκετή ενέργεια από τις συγκρούσεις για να μεταβεί στην κενή ζώνη. Έτσι, όταν εφαρμόζεται μια τάση στο υλικό, δεν υπάρχουν κοντινές κενές ενεργειακές στάθμες στις οποίες θα μπορούσαν να μεταβούν τα ηλεκτρόνια ώστε να κερδίσουν ενέργεια —καθόσον η αρχή του Pauli δεν επιτρέπει σε δύο ηλεκτρόνια να καταλαμβάνουν την ίδια κβα-



Εικόνα 6.15 Επικάλυψη ζωνών στο μαγνήσιο. (α) Ενεργειακές στάθμες ενός μεμονωμένου ατόμου μαγνησίου. (β) Διάγραμμα της μεταβολής των ενεργειακών σταθμών N ατόμων μαγνησίου συναρτήσει της απόστασής τους. (γ) Δομή των ενεργειακών ζωνών για το άτομο του μαγνησίου.

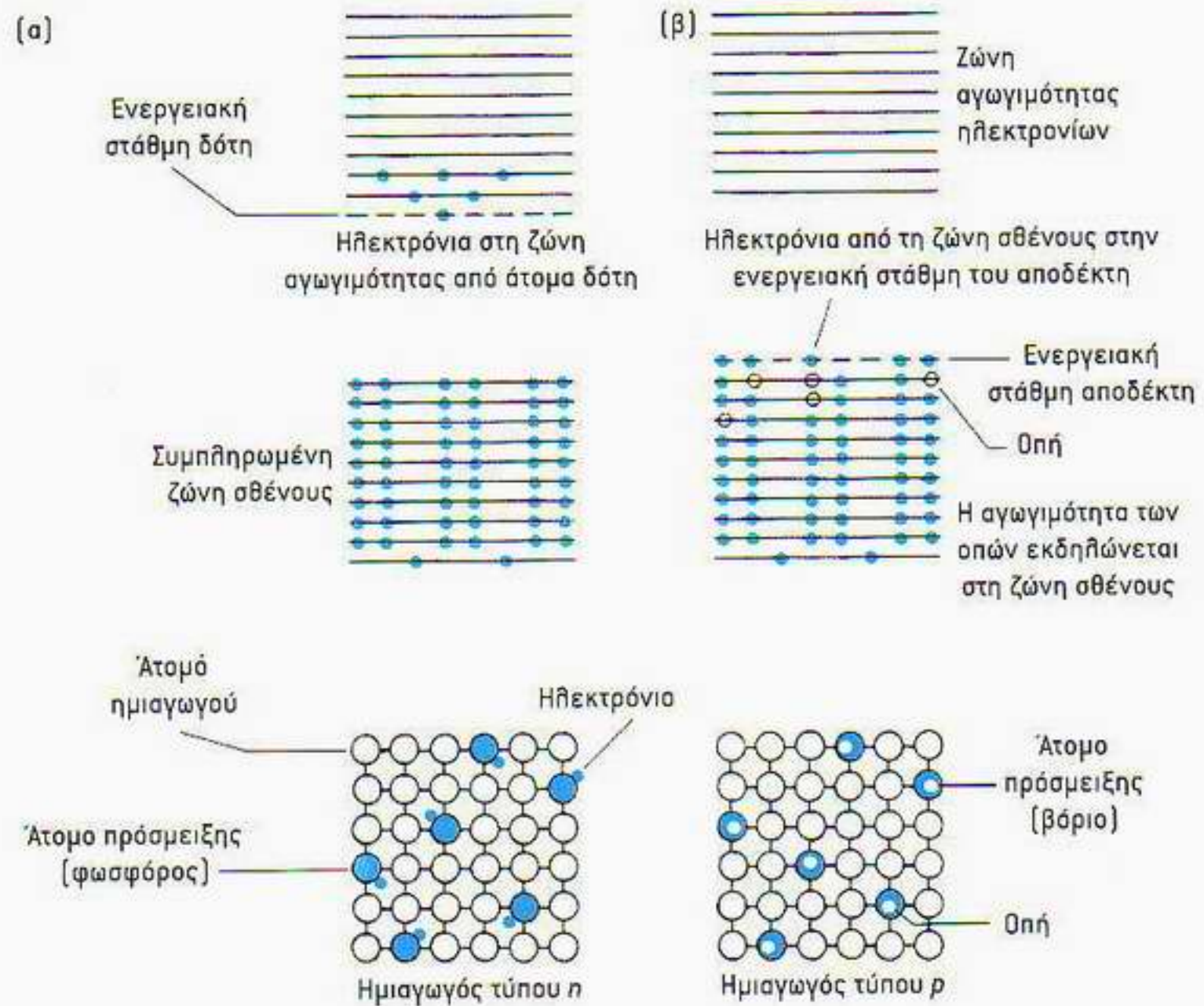
ντική κατάσταση. Η κατώτερη ζώνη είναι ήδη συμπληρωμένη, ενώ το πολύ μεγάλο ενεργειακό χάσμα που τη χωρίζει από την ανώτερη κενή ζώνη καθιστά ανέφικτη τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων στη δεύτερη. Η ίδια ακριβώς κατάσταση επικρατεί σε ένα μονωτή: ουσιαστικά, δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας για να συνεισφέρουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στην ανώτερη ζώνη αγωγιμότητας. Σε σύγκριση, τώρα, με τους μονωτές, οι ημιαγωγοί είναι υλικά με παρόμοια δομή ζωνών, μεταξύ των οποίων όμως παρεμβάλλονται πολύ μικρότερα ενεργειακά χάσματα. Ως εκ τούτου, στις συνήθεις θερμοκρασίες ένας σημαντικός αριθμός ηλεκτρονίων διεγείρεται σε ενεργειακές στάθμες της ανώτερης ζώνης αγωγιμότητας. Όταν, λοιπόν, εφαρμοστεί μια τάση, στην ανώτερη ζώνη υπάρχουν κενές θέσεις προς τις οποίες μπορούν να κινηθούν αυτά ώστε να κερδίσουν ενέργεια. Ταυτόχρονα, όμως, υπάρχουν κενές καταστάσεις και στην κατώτερη ζώνη, με αποτέλεσμα η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος να καθίσταται δυνατή και εκεί. Έτσι, οι ημιαγωγοί άγουν ηλεκτρισμό αρκετά εύκολα, ενώ η αγωγιμότητά τους εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στα μέταλλα και τους μονωτές.

Η εικόνα των ζωνών που παρουσιάσαμε παραπάνω δίνει μεγάλη βαρύτητα στις ενεργειακές στάθμες των ατόμων του υλικού. Βάσει αυτής, θα αναμέναμε τα μέταλλα να έχουν τόσα ηλεκτρόνια ώστε να μένει κάποιος φλοιός σε μεγάλο βαθμό ασυμπλήρωτος, ενώ οι μονωτές και οι ημιαγωγοί θα έπρεπε να αντιστοιχούν σε στοιχεία με συμπληρωμένους φλοιούς. Στην πραγματικότητα, όμως, το μαγνήσιο, το οποίο έχει συμπληρωμένο το φλοιό 3s, είναι ένας καλός αγωγός, ενώ ο άνθρακας, με δύο μόνο ηλεκτρόνια στο φλοιό 2p, είναι μονωτής! Η απάντηση σε αυτές τις αινιγματικές περιπτώσεις βρίσκεται στις λεπτομέρειες που αφορούν το πώς μερικές ζώνες μπορεί να επικαλύπτονται και να μην αφήνουν ενεργειακό χάσμα. Στο μαγνήσιο, οι ζώνες 3s και 3p επικαλύπτονται δίνοντας μία ενιαία ζώνη ικανή να στεγάσει $2N + 6N = 8N$ ηλεκτρόνια (Εικόνα 6.15). Εφόσον μόνο $2N$ από αυτές τις στάθμες είναι συμπληρωμένες, το μαγνήσιο είναι καλός αγωγός. Για τον άνθρακα, από την άλλη, καθώς τα N άτομα πλησιάζουν το ένα το άλλο, οι ζώνες 2s και 2p ενώνονται σχηματίζοντας μια ενιαία ζώνη με $8N$ καταστάσεις, όπως και στο μαγνήσιο.

Ωστόσο, καθώς τα άτομα του άνθρακα πλησιάζουν μεταξύ τους όλο και περισσότερο, αυτή η σύνθετη ζώνη διασπάται σε δύο, που η καθεμία τους περιέχει $4N$ καταστάσεις. Στον άνθρακα η κατώτερη ζώνη είναι πλήρως κατειλημμένη, ενώ η ανώτερη εντελώς κενή, κάτι το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό των μονωτών. Οι ενεργειακές στάθμες του γερμανίου και του πυριτίου συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο, αλλά εδώ τις δύο ζώνες τις χωρίζει ένα πολύ μικρότερο ενεργειακό χάσμα, με αποτέλεσμα και τα δύο στοιχεία να είναι ημιαγωγοί και όχι μονωτές. Τον τρόπο με τον οποίο γίνεται κατανοητή η λεπτομερής δομή των ζωνών των υλικών τον ανακάλυψε ο ελβετός φυσικός Felix Bloch, λύνοντας την εξίσωση του Schrödinger για ηλεκτρόνια κινούμενα σε δυναμικό το οποίο αντιστοιχεί σε ένα κανονικό πλέγμα θετικών ιόντων. Η λύση αυτή οδηγεί στις δομές των ενεργειακών ζωνών που περιγράφηκαν παραπάνω και αποτελεί τη μαθηματική βάση για την κβαντική θεωρία των ζωνών των στερεών.

Τρανζίστορ και μικροηλεκτρονική

Οι καθαροί ημιαγωγοί δεν έχουν αυτοί καθαυτούς μεγάλη πρακτική σημασία, αφού μόνο ένα άτομο στο 1 δισεκατομμύριο περίπου συνεισφέρει στην ηλεκτρική αγωγιμότητα —στα μέταλλα, σχεδόν κάθε άτομο συνεισφέρει από ένα ή και περισσότερα ηλεκτρόνια. Το φαινομενικό αυτό μειονέκτημα για τους ημιαγωγούς αποτελεί στην ουσία μεγάλο πλεονέκτημα, δεδομένου ότι η αγωγιμότητα των ημιαγωγών μπορεί να τροποποιείται κατά βούληση μέσω εισαγωγής σε αυτούς κατάλληλων ατόμων «πρόσμειξης», σε ποσοστό της τάξεως του 1 στο εκατομμύριο. Και το γερμάνιο και το πυρίτιο έχουν από τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους, με τα οποία συμπληρώνουν τις περισσότερες από τις $4N$ καταστάσεις της ζώνης σθένους, η οποία βρίσκεται κάτω από τη σχεδόν κενή ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, αν εμπλουτίσουμε έναν τέτοιο ημιαγωγό με ένα άτομο πρόσμειξης —για παράδειγμα φωσφόρο, ο οποίος έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους—, τότε, αφού το άτομο χρειάζεται μόνο τέσσερα ηλεκτρόνια για ισάριθμους ομοιοπολικούς δεσμούς στο πλέγμα του ημιαγωγού, θα του περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο που θα μπορεί εύκολα να αποσπαστεί και να συμβάλει στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Ανάλογα, αν εμπλουτίσουμε τον ημιαγωγό με ένα άτομο πρόσμειξης που διαθέτει τρία μόνο ηλεκτρόνια σθένους —για παράδειγμα βόριο—, τότε το άτομο αυτό θα συγκροτήσει τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς στο πλέγμα του ημιαγωγού αλλά θα υπάρχει και ένα κενό (λόγω έλλειψης ηλεκτρονίου) στον τέταρτο δεσμό, το οποίο θα τείνει να αποσπάσει κάποιο ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, αφήνοντας εκεί μια κενή θέση η οποία θα συμβάλει στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Αυτές οι δύο καταστάσεις παριστάνονται στο διάγραμμα ενεργειακών σταθμών της Εικόνας 6.16. Τα άτομα του φωσφόρου δημιουργούν επιπρόσθετες καταστάσεις ακριβώς κάτω από τη ζώνη αγωγιμότητας· αυτές λειτουργούν ως δότες ηλεκτρονίων (στάθμες προσμείξεων), αφού τα ηλεκτρόνια που τις εποικίζουν χρειάζονται μικρή μόνο ποσότητα ενέργειας για να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Οι ημιαγωγοί στους οποίους έχουμε εισαγάγει τέτοιες προσμείξεις ονομάζονται *ημιαγωγοί τύπου n* (εκ του negative), εξαιτίας της επιπρόσθετης συνεισφοράς στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού από τα (αρνητικά) ηλεκτρόνια στις καταστάσεις που δημιουργεί η πρόσμειξη-δότης. Οι ημιαγωγοί με προσμείξεις βορίου ονομάζονται *ημιαγωγοί τύπου p* (εκ του positive). Τα άτο-

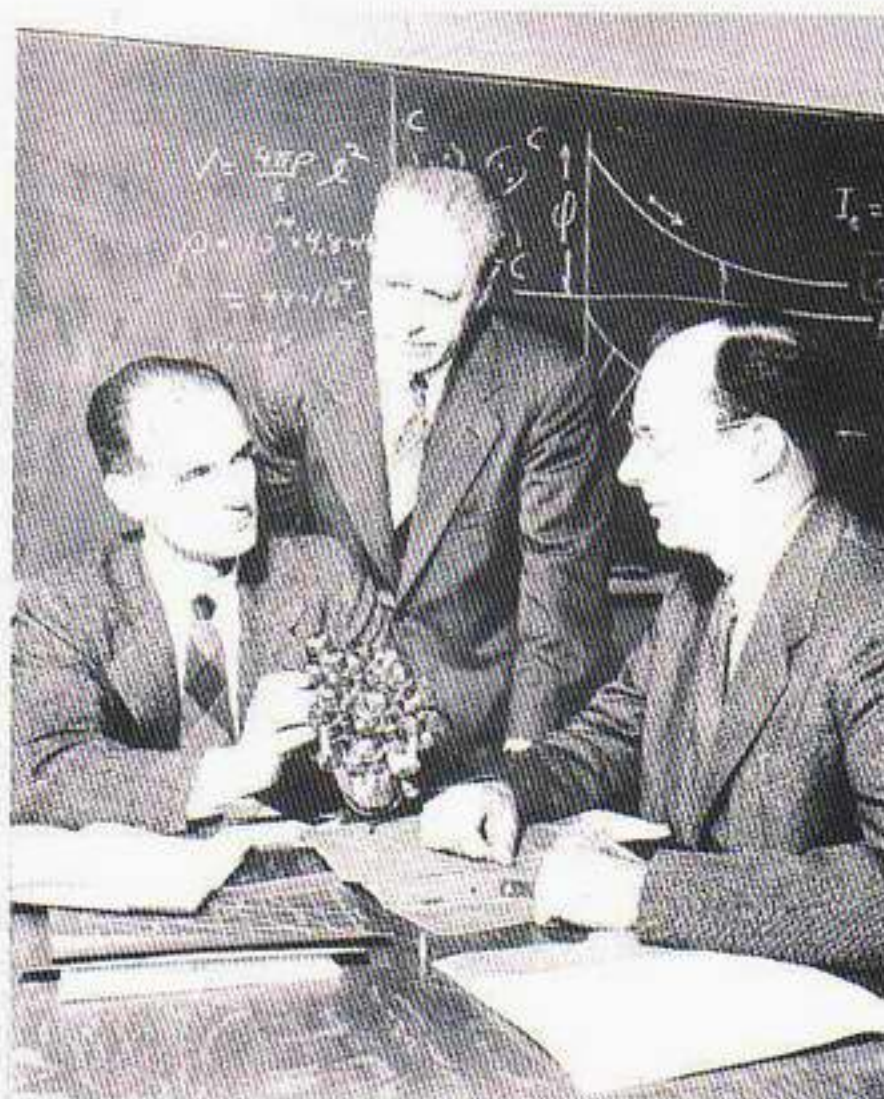


Εικόνα 6.16 Ημιαγωγοί, στο πλέγμα των οποίων έχει εισαχθεί μικρός αριθμός ατόμων πρόσμειξης. (α) Ημιαγωγός τύπου n , στον οποίο τα άτομα πρόσμειξης έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο. Σε αυτόν αντιστοιχεί το διάγραμμα ενεργειακών σταθμών που παρουσιάζεται στο πάνω μέρος της εικόνας. (β) Ημιαγωγός τύπου p , στον οποίο τα άτομα πρόσμειξης έχουν ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται «οπές» ηλεκτρονίων. Το διάγραμμα ενεργειακών σταθμών που αντιστοιχεί σε αυτή την κατάσταση εμφανίζεται στο πάνω μέρος της εικόνας.

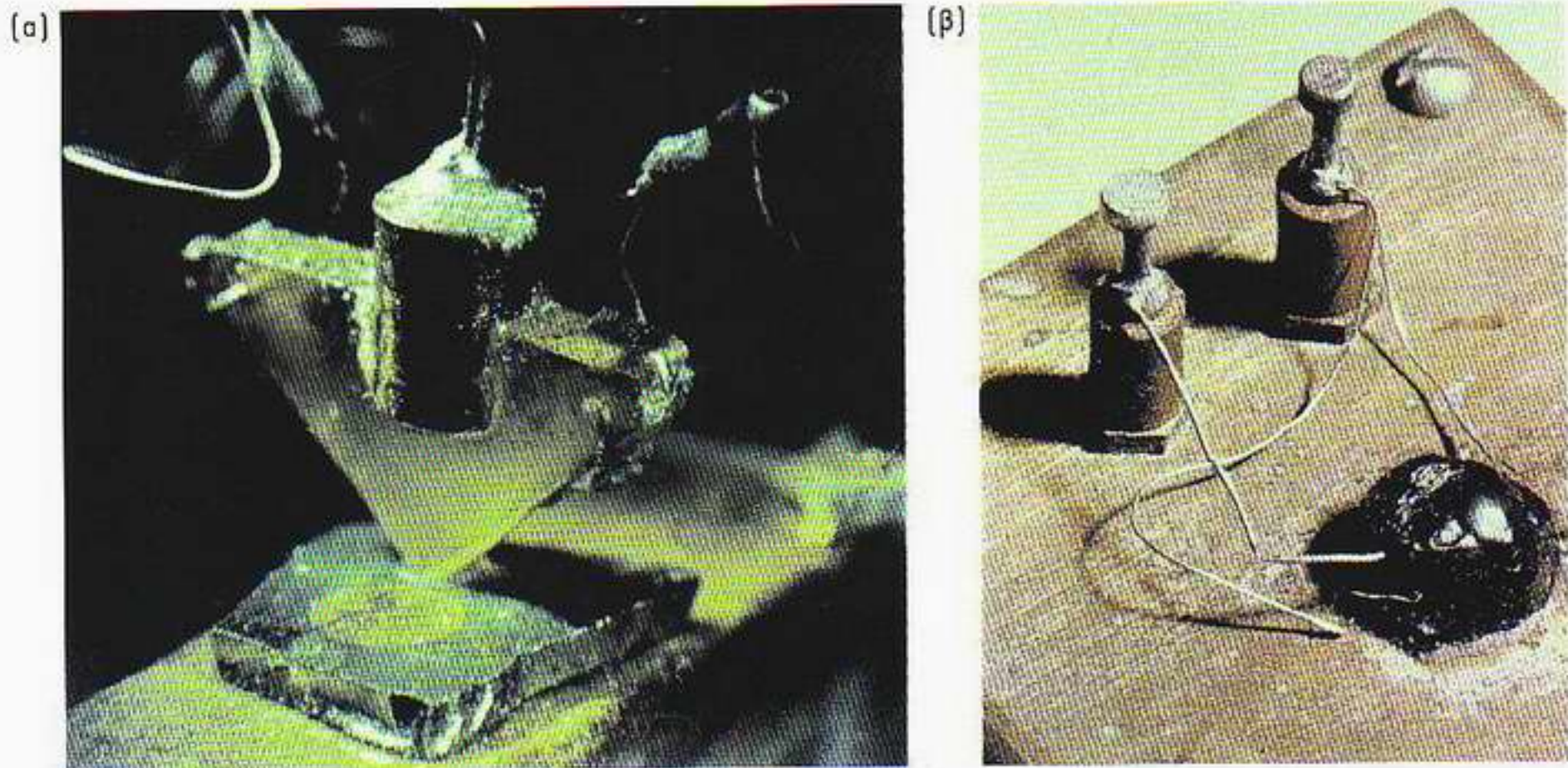
μα του βορίου δημιουργούν ακριβώς πάνω από τη σχεδόν πλήρη ζώνη σθένους καταστάσεις που λειτουργούν ως αποδέκτες, με αποτέλεσμα στη θερμοκρασία δωματίου τα ηλεκτρόνια να διεγείρονται εύκολα προς αυτές. Αλλά γιατί «ημιαγωγοί τύπου p »; Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η αγωγιμότητα στη σχεδόν πλήρη ζώνη σθένους οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια έχουν τη δυνατότητα μετάβασης προς τις λίγες μη κατειλημμένες θέσεις. Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 6.16, αντί για την κίνηση του ηλεκτρονίου προς μια κατεύθυνση, μπορούμε εξίσου καλά να θεωρήσουμε την κίνηση μιας «οπής» προς την αντίθετη. Εφόσον η κίνηση ενός αρνητικού φορτίου προς τα αριστερά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του θετικού φορτίου προς τα δεξιά, μπορούμε να θεωρήσουμε το ρεύμα όχι ως αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια) κινούμενα προς τα αριστερά αλλά ως θετικά φορτισμένες οπές κινούμενες προς τα δεξιά. Στη ζώνη σθένους ενός ημιαγωγού τύπου p έχουν δημιουργηθεί επιπλέον οπές, με αποτέλεσμα να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αυξημένη αγωγιμότητα οφείλεται στις θετικά φορτισμένες οπές τις οποίες έχουμε προσθέσει στο υλικό.

Γιατί όλα τούτα είναι χρήσιμα; Επειδή οι ημιαγωγοί τύπου p και n μπορούν να τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλο και να σχηματίσουν ένα διακόπτη που θα ελέγχει τη διέλευση του ρεύματος. Η πιο απλή ανάλογη διάταξη ημιαγωγών είναι η δίοδος επαφής $p-n$, η οποία, όταν στα άκρα της ε-

φαρμόζεται κάποια τάση, επιτρέπει στο ρεύμα να περνάει προς μία μόνο κατεύθυνση. Η επαφή $p-n$ μπορεί επομένως να ανορθώσει μια εναλλασσόμενη τάση. Η εφαρμογή, όμως, των ημιαγωγών που έχει επηρεάσει τη ζωή των ανθρώπων πιο άμεσα είναι το τρανζίστορ, το οποίο ανακαλύφθηκε από τους John Bardeen, Walter Brattain και William Shockley των Εργαστηρίων Bell, στις ΗΠΑ. Το τρανζίστορ δεν ανακαλύφθηκε τυχαία. Αντίθετα, υπήρξε το αποκορύφωμα ενός εκτεταμένου ερευνητικού προγράμματος. Όπως ανέφερε ο Bardeen στη διάλεξη που έδωσε όταν πήρε το βραβείο Νόμπελ, «ο γενικός σκοπός του προγράμματος ήταν να κατανοήσουμε όσο το δυνατόν πληρέστερα τα φαινόμενα των ημιαγωγών, όχι εμπειρικά, αλλά στη βάση της κβαντικής θεωρίας των ατόμων». Η απόσταση από τα κύματα πιθανότητας του de Broglie ως τους σύγχρονους υπολογιστές φαίνεται μεγάλη! Το πρώτο τρανζίστορ σημειακής επαφής κατασκευάστηκε το 1947 —ένα ομοίωμά του φαίνεται στην Εικόνα 6.17(α)—, ενώ σύντομα, το 1951, ακολούθησε η κατασκευή του όχι ιδιαίτερα εμφανίσιμου αλλά περισσότερο αξιόπιστου τρανζίστορ $p-n-p$ (βλ. Εικόνα 6.17(β)). Το τρανζίστορ αυτό αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού τύπου n (ονομάζεται *βάση*) που παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δύο περιχέες ημιαγωγού τύπου p μεγαλύτερου πάχους (ονομάζονται αντίστοιχα *εκπομπός* και *συλλέκτης*). Η λειτουργία του τρανζίστορ συνίσταται στη ρύθμιση του ρεύματος που διαπερνά το συλλέκτη μέσω ενός μικρού ρεύματος το οποίο διοχετεύεται στη βάση. Στην περίπτωση τρανζίστορ $p-n-p$, το μεγάλο ρεύμα που διαπερνά την υψηλής αντίστασης επαφή $p-n$ μεταξύ συλλέκτη και βάσης ελέγχεται από ένα μικρό ρεύμα που διαπερνά τη χαμηλής αντίστασης επαφή $n-p$ μεταξύ βάσης και εκπομπού. Την ακριβή λειτουργία μπορούμε να την κατανοήσουμε με λεπτομερή ανάλυση των ενεργειακών σταθμών καθώς και των ρευμάτων ηλεκτρονίων και οπών διαμέσου των δύο επαφών $p-n$. Ο όρος τρανζίστορ αναφέρεται σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο και προήλθε από συνδυασμό των λέξεων transfer (διέλευση) και resistor (αντίσταση).



Οι τρεις εφευρέτες του τρανζίστορ, περίπου την εποχή που έκαναν την ανακάλυψή τους. Από αριστερά προς το δεξιό: Shockley, Brattain και Bardeen. Ο Bardeen τιμήθηκε για δεύτερη φορά με το βραβείο Νόμπελ για την εργασία του στην υπεραγωγιμότητα. Κανένας άλλος δεν έχει τιμηθεί με δύο βραβεία Νόμπελ φυσικής.

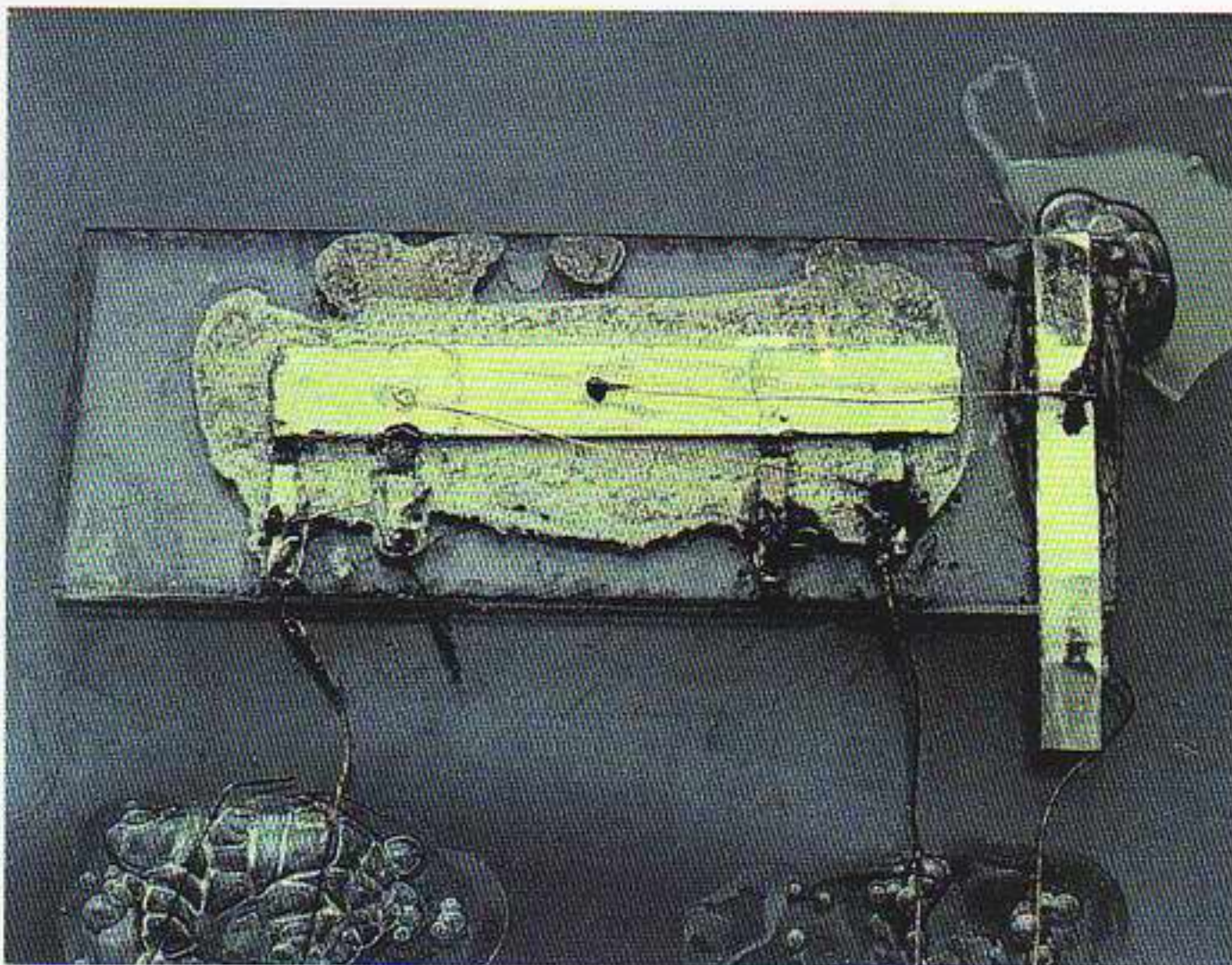


Εικόνα 5.17 Τα πρώτα τρανζίστορ. (α) Ομοίωμα του τρανζίστορ σημειακής επαφής που εφεύραν οι Bardeen και Brattain. Η κάθε πλευρά του σφηνοειδούς σχήματος ημιαγωγού, που παίζει το ρόλο της βάσης, έχει μήκος περίπου 3 εκατοστά. (β) Το τρανζίστορ επαφής του Shockley φαίνεται πολύ ακαθαίσθητο, ωστόσο μπορούσε να κατασκευαστεί ευκολότερα με αξιοπιστία.

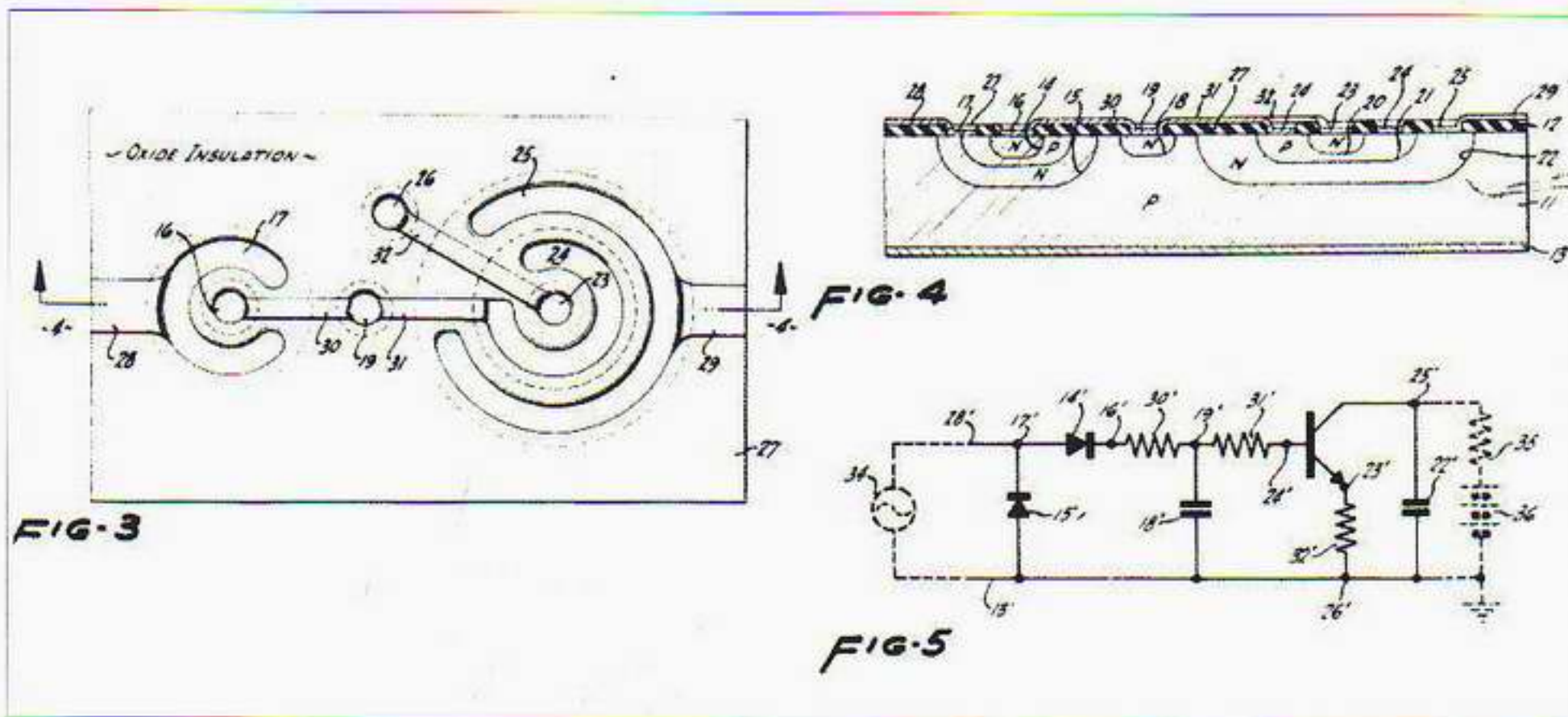
Τα τρανζίστορ αποδείχθηκαν ιδανικά για τη δυαδική λογική «0-1» των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επιπλέον, η αξιοπιστία τους και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μαζί με μια σειρά από θεαματικές τεχνικές βελτιώσεις τα έχουν καταστήσει σήμερα το βασικό δομικό στοιχείο της σύγχρονης μικροηλεκτρονικής. Η βασική ιδέα της μικροηλεκτρονικής φαίνεται ότι διατυπώθηκε αρχικά από έναν βρετανό μηχανικό, τον G.W.A. Dummer, ο οποίος εργαζόταν στο Βασιλικό Ίδρυμα Ερευνών Ραντάρ στο Μάλβερν του Γούστερσερ. Ήταν ειδικός σε προβλήματα αξιοπιστίας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ασχολιόταν με τη συμπεριφορά εξαρτημάτων ραντάρ υπό ακραίες συνθήκες. Ο Dummer συνειδητοποίησε τελικά ότι δεν ήταν αναγκαίο να κατασκευάζονται όλα τα εξαρτήματα ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος σε ξεχωριστά κομμάτια —τρανζίστορ, αντιστάσεις, πυκνωτές. Το κύκλωμα θα μπορούσε να γίνει πολύ πιο μικρό, ανθεκτικό και αξιόπιστο αν όλες αυτές οι διατάξεις περιέχονταν στο ίδιο κομμάτι ημιαγωγού! Το Μάιο του 1952, ο Dummer έγραψε:

Με την εμφάνιση του τρανζίστορ και την πρόοδο στους ημιαγωγούς γενικά, φαίνεται ότι τώρα είναι δυνατή η συγχώνευση των διάφορων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε ένα ενιαίο κομμάτι υλικού χωρίς σύρματα σύνδεσης. Το κομμάτι αυτό μπορεί να αποτελείται από στρώματα μονωτικών, αγωγικών, ανορθωτικών και ενισχυτικών υλικών, ενώ η σύνδεση μεταξύ των διάφορων ηλεκτρικών λειτουργιών μπορεί να επιτυγχάνεται άμεσα, αφαιρώντας τμήματα από τα αντίστοιχα στρώματα.

Ο Dummer στην ουσία συνέλαβε με εκπληκτική ακρίβεια το σύγχρονο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το 1952, όμως, υπήρχαν ακόμα πολλά δύσκολα τεχνικά προβλήματα που έπρεπε να ξεπεραστούν πριν η ιδέα του Dummer μπορέσει να υλοποιηθεί. Δυστυχώς, αν και ο Dummer κατασκεύασε ένα μη λειτουργι-

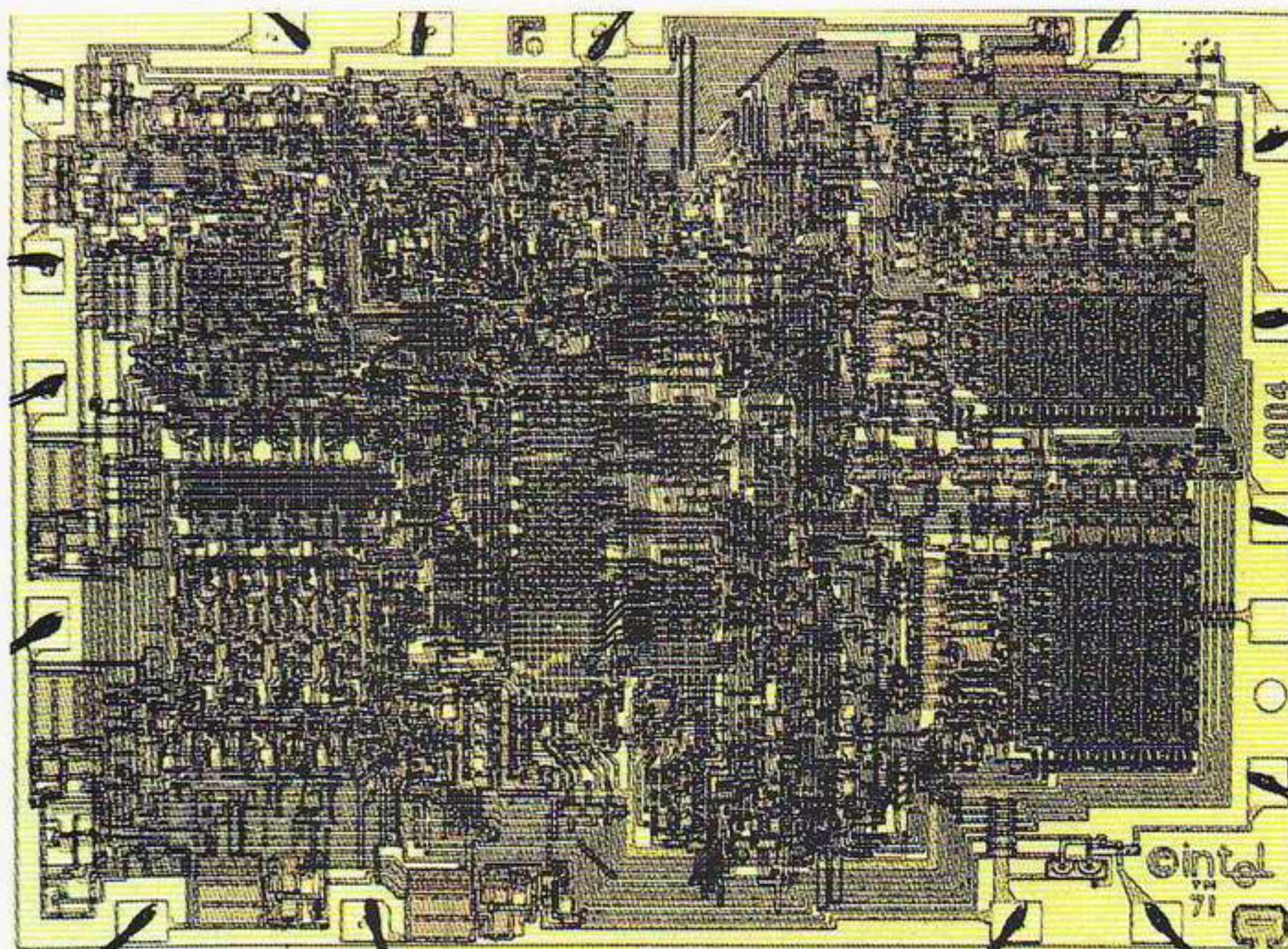


Εικόνα 6.18 Το πρώτο «ολοκληρωμένο κύκλωμα», ή τσιπ. Ο Jack Kilby, αντί να κατασκευάσει τα διάφορα εξαρτήματα του κυκλώματος ξεχωριστά, ενσωμάτωσε ένα τρανζίστορ, έναν πυκνωτή και μερικές αντιστάσεις στο ίδιο κομμάτι γερμανίου.



Εικόνα 6.19 Διαγράμματα από την παρουσίαση της ευρεσιτεχνίας του Noyce για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων επίπεδου τύπου, η οποία αποτέλεσε μια επαναστατική τομή στη μαζική κατασκευή τσιπ.

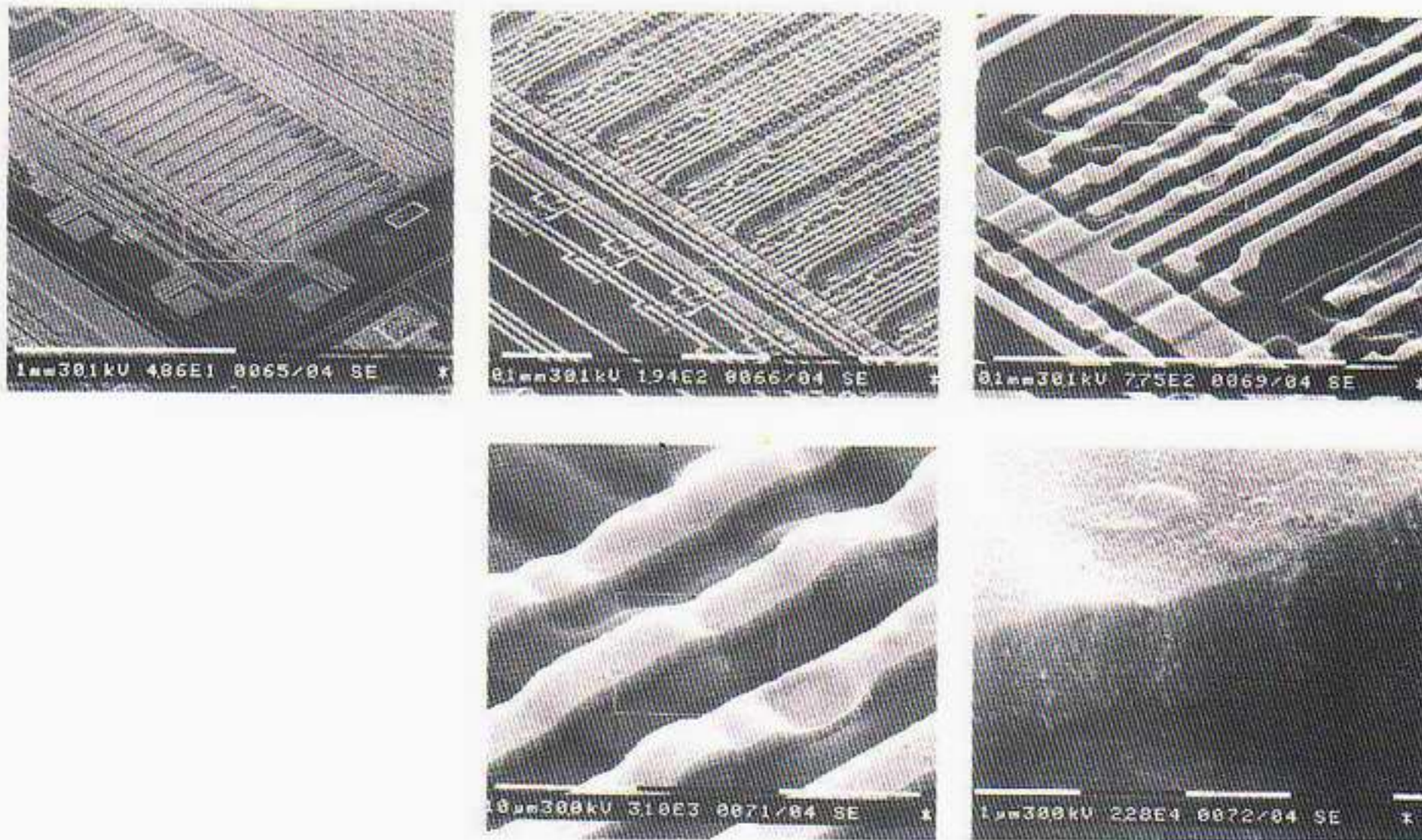
κό κύκλωμα από πυρίτιο το 1957, οι δυνατότητες της συγκεκριμένης εξέλιξης δεν εκτιμήθηκαν στη Μεγάλη Βρετανία. Έτσι, το αποφασιστικό άλμα προς αυτή την κατεύθυνση έγινε το καλοκαίρι του 1959 από έναν Αμερικανό που εργαζόταν στην Texas Instruments, τον Jack Kilby, ο οποίος έφτιαξε το πρώτο λειτουργικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) (Εικόνα 6.18). Μιας και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα κατασκευάζονται από λεπτές φέτες πυριτίου, στο εμπόριο είναι γενικά γνωστά ως τσιπ. Η χρησιμότητα, όμως, των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αποκαλύφθηκε πλήρως μόνο μετά την ανακάλυψη μιας νέας μεθόδου για την κατασκευή «τρανζίστορ επίπεδου τύπου». Ο συγκεκριμένος



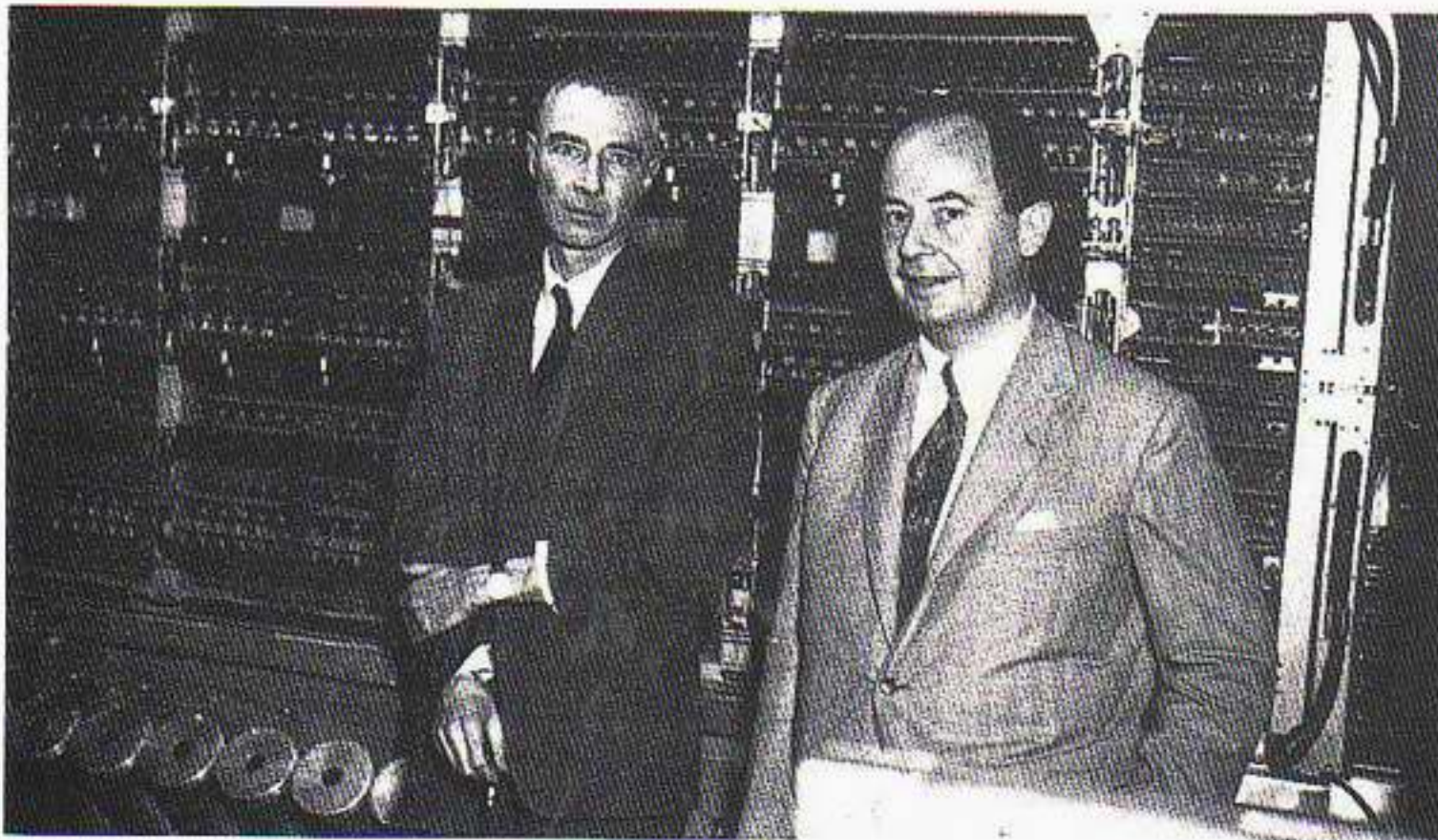
Εικόνα 6.20 Ο πρώτος μικροεπεξεργαστής. Ο Ted Hoff, μηχανικός της Intel, είχε την ιδέα να τοποθετήσει όλα τα στοιχεία ενός προγραμματιζόμενου υπολογιστή σε ένα τσιπ. Το τσιπ έχει διαστάσεις περίπου 3 επί 4 χιλιοστόμετρα και περιέχει πάνω από 2.000 τρανζίστορ.

τύπος τρανζίστορ ανακαλύφθηκε προς το τέλος του 1958 από τον ελβετό φυσικό Jean Hoerni, ένα από τα ιδρυτικά μέλη της Fairchild Semiconductor. Με αυτή την ανακάλυψη, ο Robert Noyce, εκ των ιδρυτικών μελών της Fairchild, σχεδίασε και κατασκεύασε ένα πραγματικά ανθεκτικό και αξιόπιστο ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο θα μπορούσε να παραχθεί μαζικά (Εικόνα 6.19). Χρησιμοποιώντας αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, η Fairchild προώθησε στην αγορά μια ολόκληρη οικογένεια λογικών τσιπ —τις «μονάδες λήψης αποφάσεων» των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Εκείνο το χρόνο, το 1962, άρχισε η μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Την ίδια χρονιά σημειώθηκε ένα ακόμη τεχνολογικό άλμα, με την ανακάλυψη ενός νέου τύπου τρανζίστορ το οποίο μπορούσε να ενσωματωθεί ευκολότερα στη μαζική παραγωγή τσιπ. Ήταν το MOSFET, το οποίο ανακαλύφθηκε από δύο νέους μηχανικούς, τον Steven Hofstein και τον Frederic Heiman, στο ερευνητικό εργαστήριο της RCA, στο Νιου Τζέρσι. Στο μεταξύ, η εξέλιξη των τσιπ συνεχιζόταν με γοργό ρυθμό, με αποτέλεσμα ολοένα αυξανόμενα επίπεδα ομίκρυνσης και πολυπλοκότητας. Ήδη το 1967 κατασκευάζονταν τσιπ αποτελούμενα από χιλιάδες τρανζίστορ.

Τα διάφορα στάδια ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών μπορούμε σε αδρές γραμμές να τα κατατάξουμε σε γενιές. Η πρώτη γενιά άρχισε τη δεκαετία του 1950 με τον πρώτο επιτυχημένο βιομηχανικό υπολογιστή,



Εικόνα 6.21 Σειρά φωτογραφιών ενός τσιπ, με αυξανόμενη μεγέθυνση, που ελήφθησαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

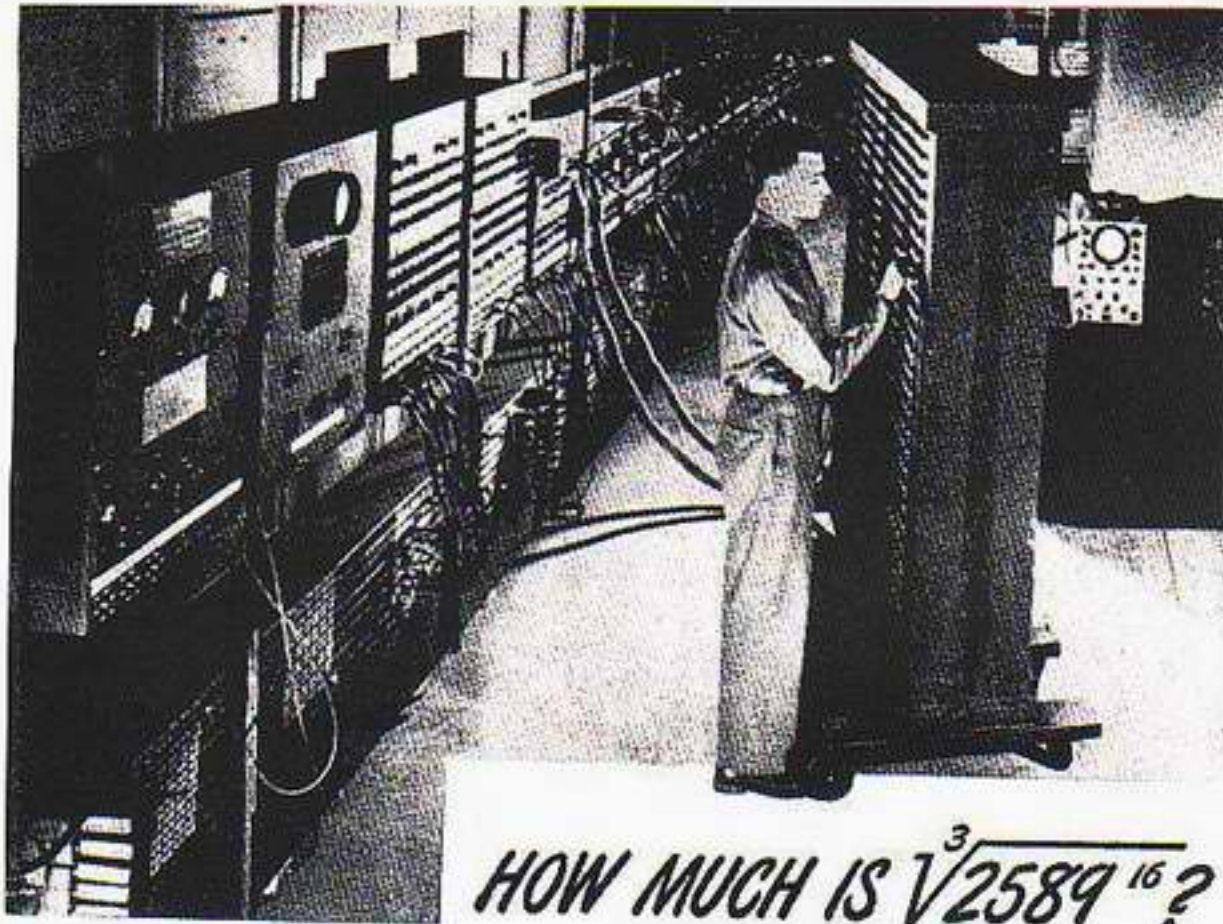


Ο Robert Oppenheimer και ο John von Neumann στα ετήσια εγκαίνια του κτηρίου υπολογιστών του Ινστιτούτου Ανώτερων Σπουδών του Πρίνστον, το 1952. Ο Oppenheimer διετέλεσε επί κεφαλής του Προγράμματος Manhattan στο Λος Άντζελες, κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Ο von Neumann ήταν ένας ιδιοφυής σύγχρονος μαθηματικός που μετανάστευσε στις ΗΠΑ πριν από τον πόλεμο. Χρησιμοποίησε τον υπολογιστή ENIAC στην εκτέλεση ζωτικής σημασίας υπολογισμών για το σχεδιασμό του μηχανισμού έκρηξης των πρώτων ατομικών βομβών. Προδιέγραψε επίσης τα χαρακτηριστικά ενός υπολογιστή με δυνατότητα αποθήκευσης του προγράμματος στη μνήμη, πράγμα που βοήθησε σημαντικά στην ανάπτυξη των ισχυρών σύγχρονων υπολογιστών. Την εποχή του μακαρθισμού, ο Oppenheimer ανακρίθηκε ως επικίνδυνος για την εθνική ασφάλεια, κυρίως επειδή ήταν αντίθετος με την ανάπτυξη της βόμβας υδρογόνου. Κατά την ακροαματική διαδικασία, ο von Neumann κατέθεσε ως μάρτυρας υπέρ της νομιμοφροσύνης και ακεραιότητας του χαρακτήρα του Oppenheimer.



Ο Jack Kilby τιμήθηκε το 2000 με το Νόμπελ φυσικής για την επινοήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Ήταν η εφεύρεση που οδήγησε στην επανάσταση πυριτίου, πάνω στην οποία στηρίζεται ο νόμος του Moore.

Ο Kilby ήταν γιος ενός ηλεκτρολόγου μηχανικού από το Κάνσας και σπούδασε μηχανολογία στο Πανεπιστήμιο του Ιλινόις, αφού είχε αρχικά απορριφθεί από το MIT. Στην πρώτη του δουλειά μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ο Kilby έστησε μια μικρή γραμμή παραγωγής τρανζίστορ. Τον Μάιο του 1958 έγινε μέλος της Texas Instruments, επειδή όμως είχε μόλις προσληφθεί στην εταιρεία, οπότε δεν δικαιούνταν ακόμα άδεια, κατά τη διάρκεια της δεκαπενθήμερης περιόδου των θερινών διακοπών του Ιουλίου βρέθηκε σχεδόν ολομόναχος σε ένα άδειο εργαστήριο. Ωστόσο, εκείνη την περίοδο της επιβεβλημένης απομόνωσης από τους συναδέλφους του, ο Kilby συνέλαβε την ιδέα της κατασκευής των μονολιθικών ολοκληρωμένων διατάξεων ημιαγωγών.



HOW MUCH IS $\sqrt[3]{2589^{16}}$?

The Army's ENIAC can give you the answer in a fraction of a second!

Think that's a stumper? You should see some of the ENIAC's problems! Brain twisters that if put to paper would run off this page and feet beyond... addition, subtraction, multiplication, division—square root, cube root, any root. Solved by an incredibly complex system of circuits operating 18,000 electronic tubes and tipping the scales at 30 tons!

The ENIAC is symbolic of many amazing Army devices with a brilliant future for you! The new Regular Army needs men with aptitude for scientific work, and as one of the first trained in the post-war era, you stand to get in on the ground floor of important jobs

YOUR REGULAR ARMY SERVES THE NATION AND MANKIND IN WAR AND PEACE

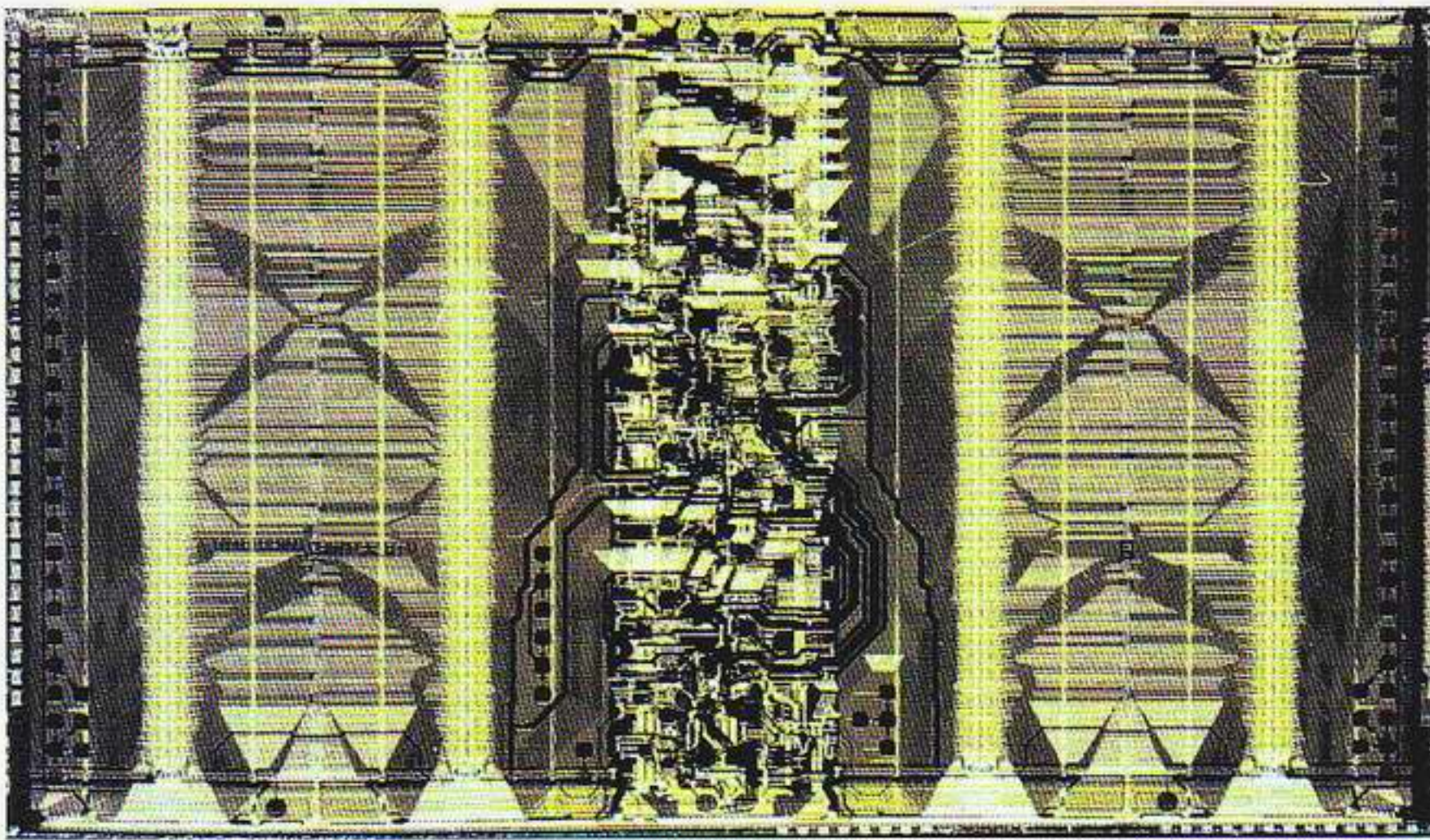
which have never before existed. You'll find that an Army career pays off.

The most attractive fields are filling quickly. Get into the swim while the getting's good! 1½, 2 and 3 year enlistments are open in the Regular Army to ambitious young men 18 to 34 (17 with parents' consent) who are otherwise qualified. If you enlist for 3 years, you may choose your own branch of the service, of those still open. Get full details at your nearest Army Recruiting Station.

A GOOD JOB FOR YOU
U. S. Army
CHOOSE THIS
FINE PROFESSION NOW!

Εικόνα 6.22 Αφίσα που διαφημίζει τον υπολογιστή ENIAC. Ο ENIAC κατασκευάστηκε για την εκτέλεση βλητικών υπολογισμών για λογαριασμό του αμερικανικού στρατού.

τον UNIVAC I, στην κατασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικές λυχνίες. Ο πρώτος υπολογιστής IBM, ο IBM 701, κυκλοφόρησε το 1953. Ός το 1956, η IBM είχε ήδη γίνει ο μεγαλύτερος και πλέον κερδοφόρος κατασκευαστής υπολογιστών, παράγοντάς τους κατά εκατοντάδες! Η γενικευμένη αντικατάσταση των δαπανηρών και μη αξιόπιστων λυχνιών από τα ευρέως διαθέσιμα πια τρανζίστορ σηματοδότησε την αρχή της δεύτερης γενιάς υπολογιστών, περίπου το 1959. Εν τω μεταξύ, οι εξελίξεις στο «υλικό μέρος» συνοδεύτηκαν και από βελτιώσεις στο «λογισμικό»: στην τέχνη προγραμματισμού των υπολογιστών—ουσιαστικά, του πώς να κάνουμε τον υπολογιστή να εκτελέσει την εργασία που θέλουμε! Γύρω στο 1966, ακολουθώντας κατά πόδας τη δεύτερη γενιά υπολογιστών, ήρθε η τρίτη γενιά, με κύρια καινοτομία την ενσωμάτωση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτή η εξέλιξη είχε ως αποτέλεσμα οι υπολογιστές τρίτης γενιάς να είναι μικρότεροι, φθηνότεροι και πολύ πιο αξιόπιστοι από τους προηγούμενους. Το πιο εξελιγμένο ολοκληρω-



Εικόνα 6.23 Φωτογραφία ενός εντυπωσιακού τσιπ μνήμης της IBM.

μένο κύκλωμα περιείχε τώρα δεκάδες χιλιάδες τρανζίστορ· αυτό το επίπεδο πολυπλοκότητας των τσιπ ονομάστηκε *ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας* (LSI). Ίσως διερωτηθεί κανείς τι θα μπορούσε να γίνει ακόμα! Ο καλύτερος τρόπος για να επισημάνουμε τη διαφορά ανάμεσα στην τρίτη και την τέταρτη γενιά υπολογιστών είναι να αναφερθούμε στην ανακάλυψη του μικροεπεξεργαστή. Το 1968, οι Robert Noyce και Gordon Moore εγκατέλειψαν την Fairchild και ίδρυσαν την Intel. Στο πλαίσιο διεκπεραίωσης του συμβολαίου τους για την κατασκευή ενός συνόλου τσιπ για μια νέα σειρά ηλεκτρονικών αριθμομηχανών, ένας από τους εργαζόμενους στην Intel, ο Ted Hoff ο νεότερος, είχε τη λαμπρή ιδέα να σχεδιάσει ένα προγραμματιζόμενο ολοκληρωμένο κύκλωμα (Εικόνα 6.20). Αντί να απαιτείται ο σχεδιασμός ενός ειδικού τσιπ για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας, το εν λόγω τσιπ του μικροεπεξεργαστή μπορούσε να προγραμματίζεται κάθε φορά για την εκάστοτε ειδική εφαρμογή. Πέρασε αρκετός καιρός μέχρι να συνειδητοποιήσουν τελικά στην Intel ότι η ιδέα τους ήταν χρυσωρυχείο. Ενώ αρχικά ο μικροεπεξεργαστής θεωρούνταν ότι προοριζόταν μόνο για αριθμομηχανές και μικροϋπολογιστές, τώρα βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς τομείς: σε πλυντήρια, γραφομηχανές, θερμοστάτες, παιχνίδια βίντεο, προσωπικούς υπολογιστές, για να αναφέρουμε μόνο μερικούς. Ο πρώτος μικροεπεξεργαστής κυκλοφόρησε στην αγορά το 1971 και περιείχε περίπου 2.000 τρανζίστορ, ενώ οι σημερινοί φτάνουν τα 7 εκατομμύρια. Αυτή η τεχνική πολύ μεγάλης σμίκρυνσης ονομάζεται *ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας* (VLSI). Υπάρχει άραγε όριο σε αυτή την απίστευτη σμίκρυνση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων; Στο Κεφάλαιο 9 θα δούμε ότι υπάρχει, και ενδέχεται τούτη η περίοδος εκθετικής βελτίωσης να λάβει σύντομα τέλος —εκτός κι αν ανακαλύψουμε νέες κβαντικές τεχνολογίες που θα αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες ημιαγωγών.

7 Κβαντική συνεργασία και υπερρευστά

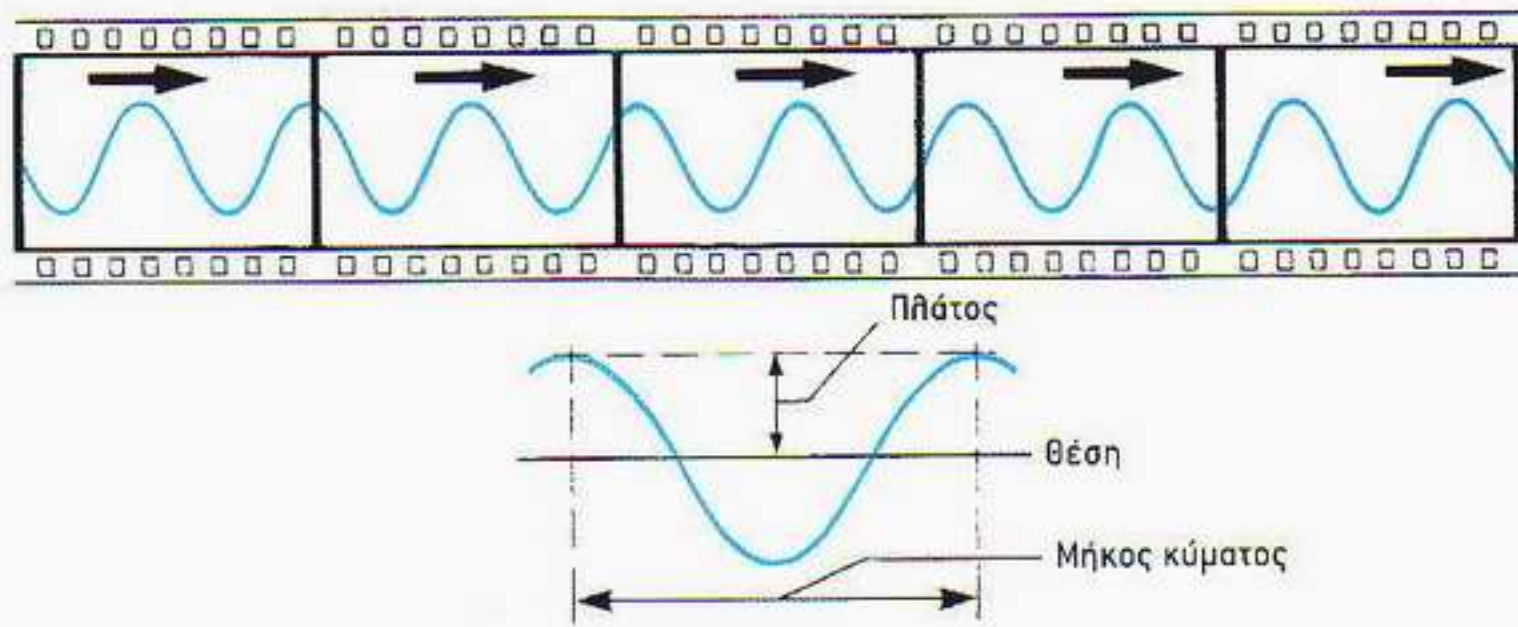
...υπάρχουν ορισμένες καταστάσεις στις οποίες οι ιδιομορφίες της κβαντικής μηχανικής μπορούν να εκδηλωθούν με ιδιαίτερο τρόπο σε μεγάλη κλίμακα.

Richard Feynman

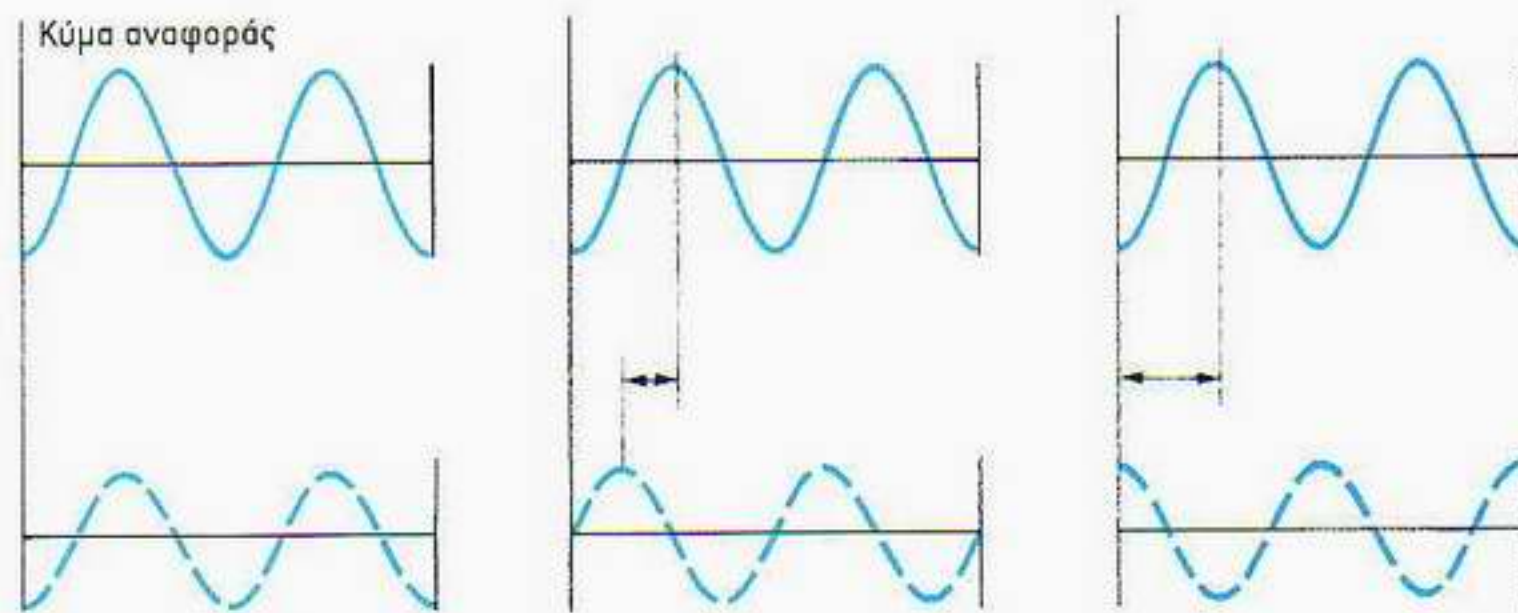
Φως λέιζερ

Σήμερα, οι πιο πολλοί άνθρωποι έχουν ακούσει για τα λέιζερ. Φως λέιζερ χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία οπτικών εφέ στις σύγχρονες συναυλίες ροκ μουσικής. Το φως λέιζερ έχει πλήθος εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, από την αστρονομία ως τη σύντηξη του υδρογόνου. Ποιο είναι, όμως, το ειδικό χαρακτηριστικό του φωτός αυτού του είδους που το καθιστά τόσο χρήσιμο; Η απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα έχει να κάνει με μια ιδιότητα της κυματικής κίνησης που είναι γνωστή ως *συμφωνία*, και η οποία σημαίνει ότι τα φωτόνια δρουν από κοινού σε μια ειδικής μορφής κβαντική συνεργασία. Το συγκεκριμένο είδος κβαντικής συνεργασίας θα αποδειχθεί σημαντικό για την κατανόηση της παράδοξης συμπεριφοράς των κβαντικών *υπερρευστών*. Ωστόσο, για να κατανοήσουμε την ειδική φύση του φωτός λέιζερ, πρέπει να εξηγήσουμε αρχικά τι εννοούμε με τον όρο «συμφωνία».

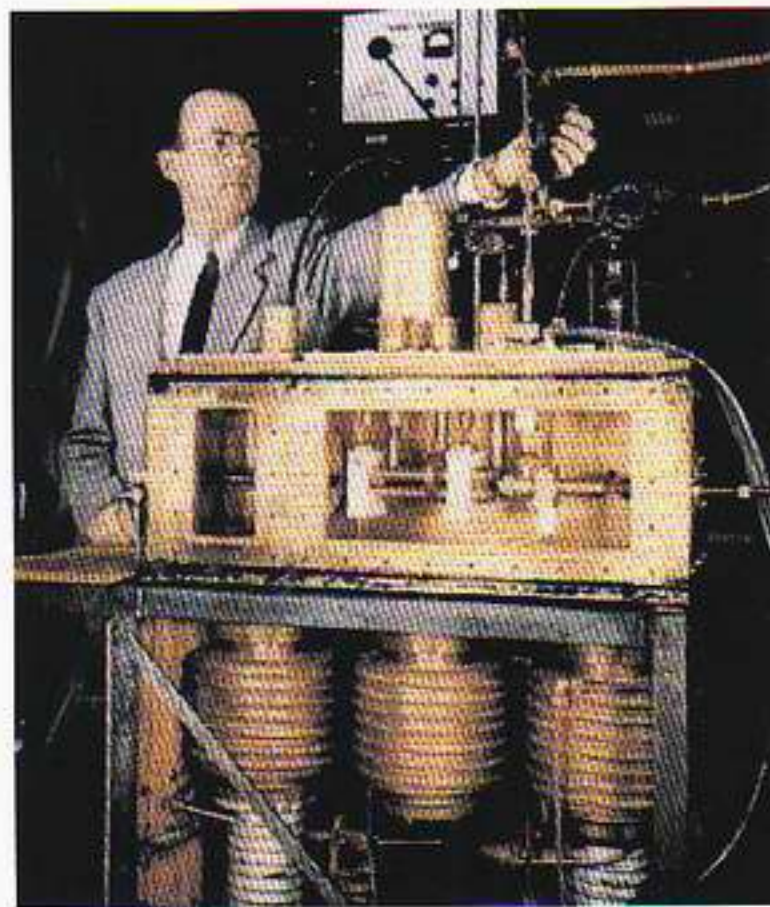
Ας εξετάσουμε την απλή κυματική κίνηση που φαίνεται στην Εικόνα 7.1. Όπως βλέπουμε, ο σχηματισμός επαναλαμβάνεται έπειτα από κάθε ένα «μήκος κύματος», και η «συχνότητα» της κυματικής κίνησης αντιστοιχεί στον αριθμό των μηκών κύματος που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο. Αν το κύμα αυτό παριστάνει μια κυματική κίνηση πάνω σε χορδή, κάθε σημείο της χορδής απλώς κινείται πάνω-κάτω με ένα ορισμένο «πλάτος» —την πιο μεγάλη απομάκρυνση του σημείου από τη θέση ισορροπίας του. Μέχρις εδώ, αυτό είναι το μόνο που χρειάζεται να γνωρίζουμε για τα κύματα. Ας θεωρήσουμε τώρα δύο κύματα τα οποία έχουν ίδιο μήκος κύματος και ξεκινούν με μια πολύ μικρή διαφορά χρόνου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.2. Στην πρώτη περίπτωση, και τα δύο κύματα εμφανίζουν τα όρη και τις κοιλάδες τους στο



Εικόνα 7.1 Μια διαδοχή «φωτογραφιών» ενός διερχόμενου κύματος. Ο «φωτογράφος» μένει ακίνητος —τα βέλη βρίσκονται σε όλη τα καρέ πάνω από τα ίδια όρη και δείχνουν ότι το κύμα κινείται προς τα δεξιά. Το σκαρίφημα κάτω δείχνει πώς ορίζονται το πλάτος και το μήκος κύματος μιας τέτοιας κυματικής κίνησης.



Εικόνα 7.2 Τρία ζεύγη κυμάτων με το ίδιο μήκος κύματος —τα πάνω είναι κύματα αναφοράς, ενώ τα κάτω έχουν διαφορετικούς χρόνους έναρξης.

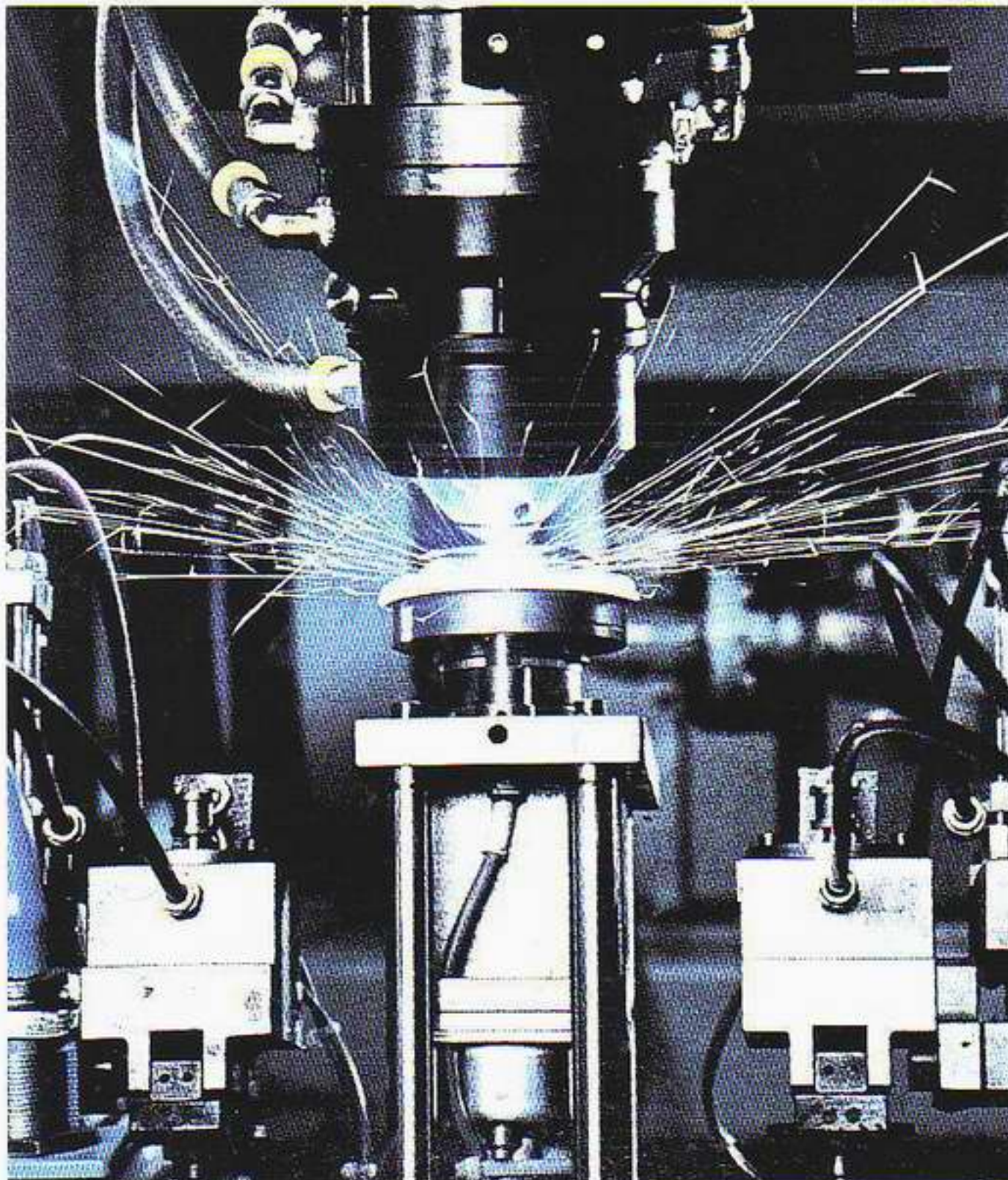


Ο Charles Townes γεννήθηκε στη Νότια Καρολίνα το 1915. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου ασχολήθηκε με τη σχεδίαση συστημάτων ραντάρ για λογαριασμό των Εργαστηρίων Bell. Κάποιο πρωινό του 1951, ενώ περίμενε να ανοίξει ένα εστιατόριο για να πάρει το πρωινό του, του ήρθε η ιδέα να χρησιμοποιήσει μόρια αντί για ηλεκτρονικά κυκλώματα για να δημιουργήσει μικροκύματα —ραδιοκύματα με μικρό μήκος κύματος. Το 1953 κατασκεύασε το μείζερ {ακρωνύμιο των λέξεων «microwave amplification by stimulated emission of radiation», που σημαίνουν ενίσχυση μικροκυμάτων με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας}. Στη συνέχεια, ο Townes έστρεψε το ενδιαφέρον του στη δημιουργία μιας παρόμοιας συσκευής για παραγωγή ορατής ακτινοβολίας.

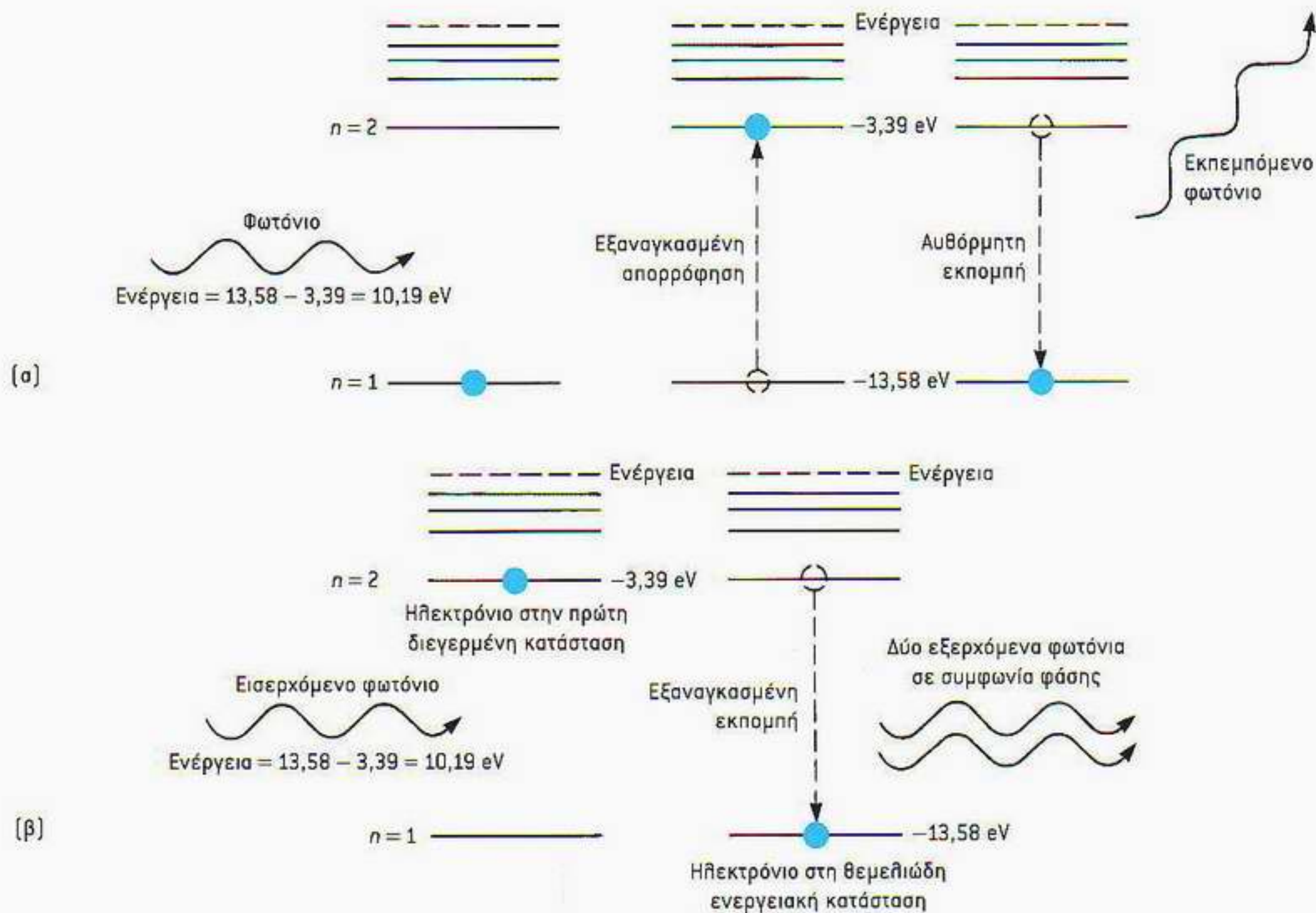
ίδιο σημείο. Στη δεύτερη περίπτωση, το κύμα που παριστάνεται με τη διακεκομμένη γραμμή έχει αρχίσει να κατέρχεται προτού το άλλο εμφανίσει την κορυφή του. Και τέλος, το επόμενο σχήμα δείχνει την ακραία περίπτωση όπου το όρος τού ενός κύματος συμπύπτει χρονικά με την κοιλάδα του άλλου. Λέμε ότι οι δύο κυματικές κινήσεις έχουν διαφορετικές «διαφορές φάσης» στις τρεις αυτές περιπτώσεις. Η φάση ενός κύματος μας πληροφορεί για το πού βρίσκεται κάθε στιγμή ένα σημείο του κατά την κίνησή του. Αν μεταξύ δύο κυμάτων υπάρχει πάντα ορισμένη, σταθερή διαφορά φάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα, λέμε ότι τα δύο αυτά κύματα είναι σύμφωνα και έχουμε ως αποτέλεσμα τα γνωστά φαινόμενα συμβολής. Δύο διαφορετικές ατομικές πηγές φωτός, από την άλλη, δεν δίνουν φαινόμενα συμβολής και λέμε ότι είναι *ασύμφωνες*. Ο λόγος για τον οποίο δεν έχουμε φαινόμενα συμβολής είναι ότι το φως από τις δύο πηγές παράγεται από πολλά διαφορετικά άτομα, και το καθένα τους εκπέμπει φωτόνια σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τα άλλα. Έτσι, κάθε πηγή εκπέμπει φως αποτελούμενο από πολλά κύματα, με διαφορετική φάση το καθένα. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει ορισμένη διαφορά φάσης ανάμεσα στα φωτεινά κύματα που προέρχονται από τις δύο πηγές, οπότε όλα τα ευαίσθητα φαινόμενα συμβολής εξαφανίζονται. Αντίθετα, το αξιοσημείωτο στο φως λέιζερ έγκειται στο ότι αυτό, αν και προέρχεται από πολλά



Ο Theodore Harold Maiman, γιος ηλεκτρολόγου μηχανικού, γεννήθηκε το 1927. Κατά τη διάρκεια των σπουδών του επισκεύαζε ηλεκτρικές συσκευές για να πληρώσει το δίδακτρό του. Ενώ εργαζόταν στο ερευνητικό εργαστήριο της Howard Hughes, ενδιαφέρθηκε για το μείζερ που είχε επινοήσει ο Townes και καταπίεστη με το πρόβλημα της κατασκευής μιας παρόμοιας συσκευής για το φως. Ο Maiman κατασκεύασε το πρώτο λέιζερ το 1960.



Εικόνα 2.3 Συγκόλληση με λέιζερ στο εργοστάσιο αυτοκινήτων Mirafiori της Fiat στο Τορίνο. Η δέσμη λέιζερ, η οποία είναι αόρατη, εκπέμπεται από το κινητό ακροφύσιο στο κάτω μέρος της κεφαλής συγκολλήσεων, ακριβώς πάνω από τους σπινθήρες. Η δέσμη παράγεται από μια συσκευή λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα ισχύος 2,5 kW.



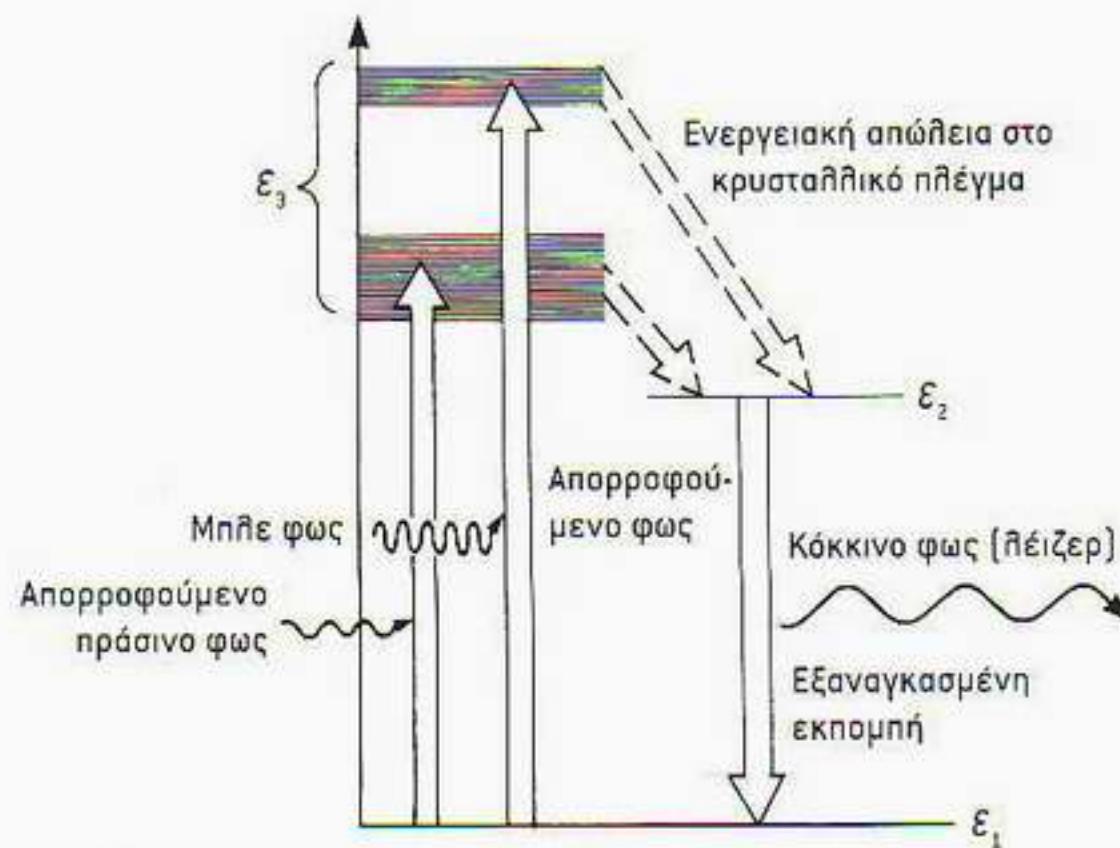
Εικόνα 7.4 Οι τρεις δυνατές διαδικασίες μετάβασης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια σε ένα άτομο. (α) Οι διαδικασίες της εξαναγκασμένης απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής. Στην πρώτη περίπτωση, ένα φωτόνιο με την κατάλληλη ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, το οποίο αναγκάζεται έτσι να μεταβεί σε μια διεγερμένη ενεργειακή στάθμη. Έπειτα από λίγο, το ηλεκτρόνιο αυτό θα επιστρέψει στην κατώτερη ενεργειακή στάθμη, εκπέμποντας ένα φωτόνιο που θα έχει την ίδια ενέργεια με εκείνο το οποίο απορροφήθηκε προηγουμένως. Η δεύτερη αυτή διαδικασία ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή. (β) Εξαναγκασμένη απορρόφηση ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα όταν κατευθύνονται φωτόνια προς ένα άτομο το οποίο βρίσκεται ήδη σε διεγερμένη κατάσταση. Το φωτόνιο που προκαλεί την εξαναγκασμένη απορρόφηση, καθώς και εκείνο που ακτινοβολείται, έχουν την ίδια ενέργεια και την ίδια φάση.

διαφορετικά άτομα, εκπέμπεται «σε φάση». Και ακριβώς χάρη σε αυτή την ιδιότητα της συμφωνίας που διαθέτει, έχουμε τη δυνατότητα να εστιάζουμε μια δέσμη λέιζερ σε μια πολύ μικρή κηλίδα, με αποτέλεσμα εκεί να επιτυγχάνεται πολύ υψηλή συγκέντρωση φωτεινής ενέργειας. Έτσι, λοιπόν, μια δέσμη λέιζερ μικρότερης ισχύος από έναν κοινό λαμπτήρα μπορεί να ανοίξει τρύπα και σε μεταλλική πλάκα.

Ο όρος λέιζερ αποτελεί μεταγραφή στα ελληνικά του αγγλικού laser, το οποίο είναι ακρωνύμιο των λέξεων «light amplification by stimulated emission of radiation» (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Η εξαναγκασμένη εκπομπή συνιστά μια διαδικασία αλληλεπίδρασης ενός ατόμου με το φως, την οποία δεν έτυχε να τη συναντήσουμε ως τώρα. Ωστόσο, έχουμε ήδη δει ότι, αν ακτινοβολήσουμε ένα άτομο με φωτόνια που η ενέργειά τους αντιστοιχεί ακριβώς στη διαφορά δύο ενεργειακών σταθμών του ατόμου, ηλεκτρόνια ευρισκόμενα στη χαμηλότερη από τις δύο ενεργειακές κα-

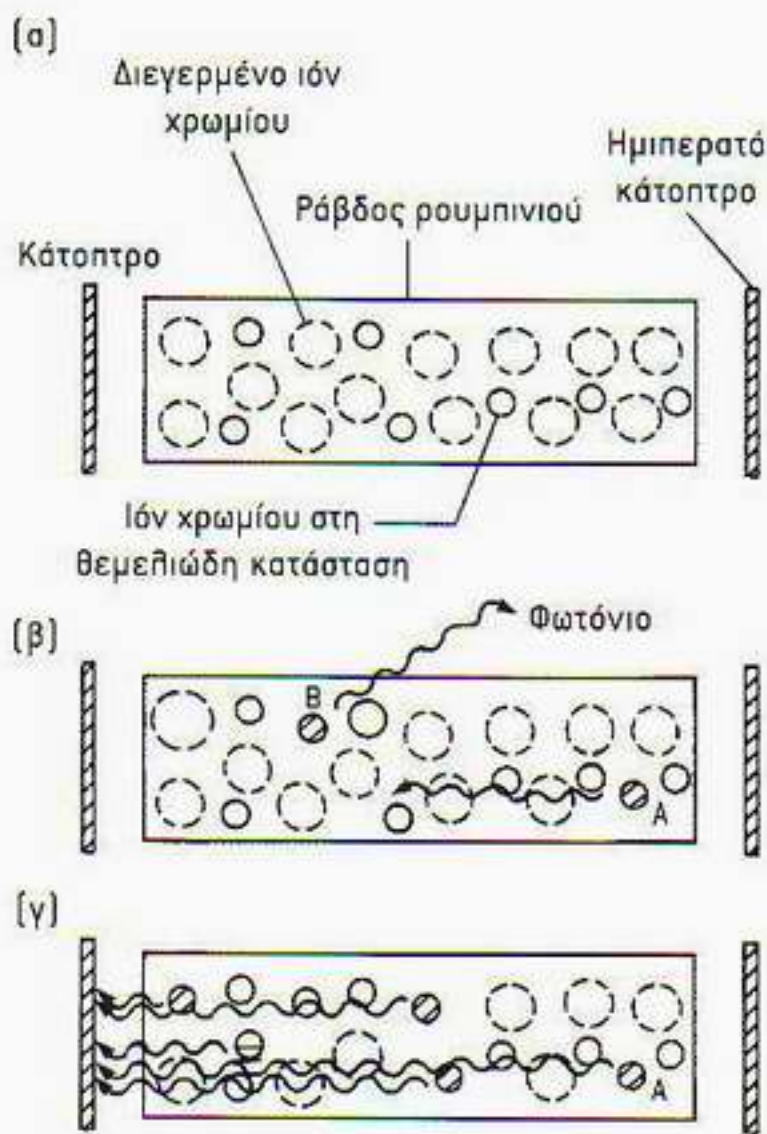
ταστάσεις «εξαναγκάζονται» να μεταβούν στην υψηλότερη. Πρόκειται για μια διαδικασία η οποία ενίοτε αναφέρεται με το όνομα *εξαναγκασμένη απορρόφηση* (Εικόνα 7.4). Γνωρίζουμε επίσης ότι ένα άτομο ευρισκόμενο σε διεγερμένη κατάσταση μπορεί να εκπέμψει αυθόρμητα ένα φωτόνιο με τόση ενέργεια ώστε το ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει στη θεμελιώδη ενεργειακή του κατάσταση. Αυτή η διαδικασία μετάβασης ενός διεγερμένου ατόμου ονομάζεται *αυθόρμητη εκπομπή*. Ένα τρίτο είδος διαδικασίας στην οποία παίρνουν μέρος φωτόνια ανακαλύφθηκε από τον Αϊνστάιν, ήδη από το 1916. Τον Νοέμβριο του χρόνου εκείνου, ο Αϊνστάιν έγραψε στον Michele Angelo Besso, με τον οποίο συνδεόταν με πολύχρονη φιλία: «Μου κατέβηκε μια υπέροχη ιδέα για την απορρόφηση και την εκπομπή της ακτινοβολίας.» Όταν ο Αϊνστάιν πρωτοπήγε στο Γραφείο Ευρεσιτεχνιών στη Βέρνη, ο Besso λειτούργησε ως «φερέφωνό» του· ο Αϊνστάιν τον ξεχώρισε εκφράζοντάς του θερμές ευχαριστίες στην περίφημη εργασία του για την ειδική σχετικότητα. (Όταν πέθανε ο Besso, το 1955, ο Αϊνστάιν έγραψε στην οικογένειά του: «Ό,τι θαύμαζα πιο πολύ σε αυτόν ως ανθρώπινη ύπαρξη είναι ότι κατάφερε να ζήσει επί πολλά χρόνια όχι μόνο εν ειρήνη αλλά και σε διαρκή αρμονία με μια γυναίκα, εγχείρημα στο οποίο εγώ απέτυχα δις μάλλον οικτρά.») Ο Αϊνστάιν είχε διαπιστώσει ότι, αν ακτινοβολήσουμε ένα άτομο που βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση με φωτόνια ενέργειας τέτοιας ώστε να αντιστοιχεί ακριβώς στη διαφορά δύο ενεργειακών σταθμών του ατόμου, τότε το άτομο μπορεί να «εξαναγκαστεί» να μεταβεί στην κατάσταση μικρότερης ενέργειας εκπέμποντας ταυτόχρονα ένα νέο φωτόνιο. Είναι φυσικό να ονομάσουμε τη διαδικασία αυτή *εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας*. Βεβαίως, το διεγερμένο άτομο θα μετέβαινε αργά ή γρήγορα στην κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας —τη μετάβαση όμως την επιταχύνει η παρουσία της διεγείρουσας ακτινοβολίας. Για περισσότερα από 35 χρόνια, η διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής δεν προκάλεσε τίποτα περισσότερο από κάποια πρόχειρα σχόλια στα βιβλία της κβαντικής μηχανικής, αφού δεν φαινόταν να έχει κάποια πρακτική εφαρμογή. Είχε παραβλεφθεί, όμως, η ειδική φύση του φωτός που εκπέμπεται με αυτό τον τρόπο. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια έχουν ακριβώς την ίδια φάση με όσα επάγουν τη μετάβαση. Τούτο συμβαίνει επειδή τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία των φωτεινών κυμάτων που χρησιμοποιούμε για την ακτινοβολήση εξαναγκάζουν την κατανομή φορτίου του διεγερμένου ατόμου να ταλαντώνεται σε φάση με αυτά. Τα εκπεμπόμενα φωτόνια, λοιπόν, βρίσκονται όλα σε συμφωνία φάσης —είναι σύμφωνα— και, επιπλέον, κινούνται στην ίδια κατεύθυνση με τα φωτόνια που προκάλεσαν την εκπομπή.

Παρότι έχουμε μια πολλά υποσχόμενη θεωρία, υπάρχουν αρκετά πρακτικά προβλήματα που πρέπει να λυθούν για να μπορέσουμε να παραγάγουμε ισχυρές φωτεινές δέσμες λέιζερ. Σε κανονικές θερμοκρασίες, τα περισσότερα άτομα βρίσκονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση. Πρέπει να αναζητήσουμε έναν τρόπο να διοχετεύσουμε ενέργεια στο ενεργό μέσον του λέιζερ έτσι ώστε να κατορθώσουμε να φέρουμε τα περισσότερα άτομά του σε διεγερμένη κατάσταση. Το να υπάρχουν, όμως, περισσότερα άτομα σε μια διεγερμένη κατάσταση απ' ό,τι στη θεμελιώδη είναι κάτι το ασυνήθιστο —και ονομάζεται *αντιστροφή πληθυσμών*. Εάν μπορέσουμε να πετύχουμε μια τέτοια αντιστροφή πληθυσμών, τότε η διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής θα υπερिσχύσει της διαδικασίας της εξαναγκασμένης απορρόφησης και θα προκύψει μια καθαρή ενίσχυση της αρχικής διεγείρουσας ακτινοβολίας.

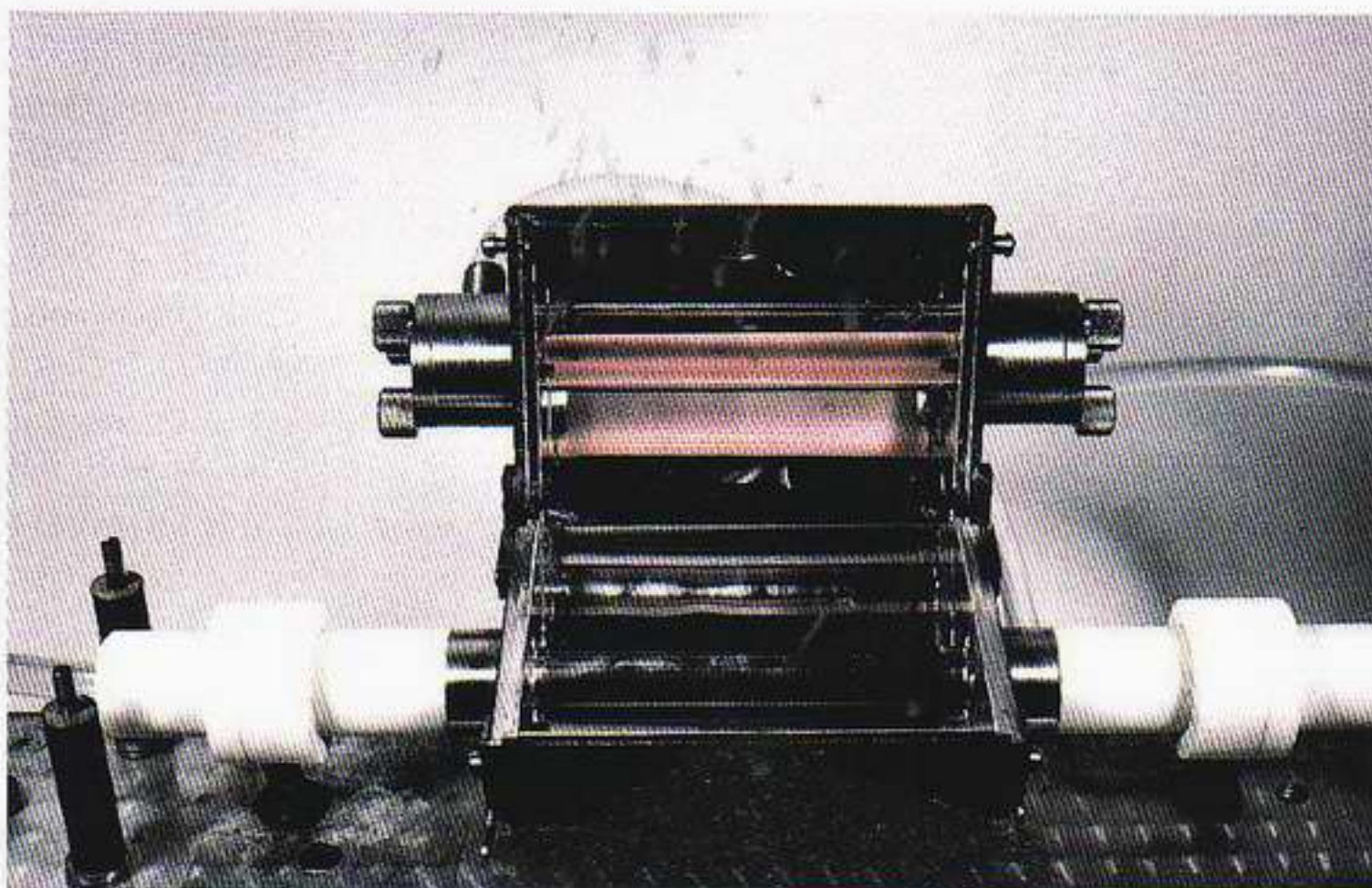


Εικόνα 7.5 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για ένα λείζερ ρουμπινιού. Τα άτομα του χρωμίου στο ρουμπίνι «αντλούνται» στις δύο ευρείες διεγερμένες ενεργειακές ζώνες απορροφώντας πράσινο και μπλε φως. Αυτά τα διεγερμένα άτομα γρήγορα χάνουν ενέργεια, η οποία αποδίδεται στο κρυσταλλικό πλέγμα, και τα ηλεκτρόνια πέφτουν στη μακρόβια «μετασταθή» ενεργειακή στάθμη η οποία στην εικόνα δηλώνεται ως E_2 . Στη συγκεκριμένη στάθμη θα συγκεντρωθούν περισσότερα ηλεκτρόνια απ' ό,τι στη θεμελιώδη στάθμη, και έτσι δημιουργείται «αντιστροφή πληθυσμών». Η εξαναγκασμένη εκπομπή κατά τη μετάβαση από αυτή τη στάθμη στη θεμελιώδη κατάσταση παράγει κόκκινο φως λείζερ.

Για το πρώτο λείζερ που κατασκευάστηκε στην ιστορία χρησιμοποιήθηκε ένας κρύσταλλος ρουμπινιού, δηλαδή οξειδίου του αργιλίου, στον οποίο μερικά από τα άτομα του αργιλίου είχαν αντικατασταθεί από προσμείξεις ατόμων χρωμίου. Οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων του χρωμίου που μας ενδιαφέρουν στο σύστημα αυτό φαίνονται στην Εικόνα 7.5. Αν ακτινοβολήσουμε τώρα τα άτομα του χρωμίου με φωτόνια των οποίων η ενέργεια αντιστοιχεί στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ των E_1 και E_3 , τότε αυτά διεγείρονται και μεταβαίνουν στην ευρεία και βραχύβια ανώτερη στάθμη E_3 . Τα διεγερμένα άτομα στη συνέχεια μεταβαίνουν πολύ γρήγορα στη σχετικά μακρόβια ενεργειακή στάθμη E_2 , και έτσι επιτυγχάνεται η αντιστροφή πληθυσμών. Όταν μερικές από αυτές τις καταστάσεις E_2 μεταπέσουν αυθόρμητα, δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να προκαλέσουν διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής σε άλλα διεγερμένα άτομα. Η αρχή λειτουργίας ενός λείζερ ρουμπινιού παρουσιάζεται διαγραμματικά στην Εικόνα 7.6. Τα φωτόνια εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις, όσα όμως δεν κινούνται κατά μήκος του άξονα της ράβδου του ρουμπινιού διαφεύγουν μέσω των πλευρικών τοιχωμάτων προτού μπορέσουν να προκαλέσουν εξαναγκασμένη εκπομπή σε σημαντική έκταση. Αντίθετα, όσα φωτόνια κινούνται κατά μήκος του άξονα της ράβδου θα ανακλαστούν αρκετές φορές στα κάτοπτρα που βρίσκονται στα άκρα της, δεξιά και αριστερά. Κατ' αυτό τον τρόπο, όλο και περισσότερα άτομα θα διεγείρονται για να εκπέμπουν φωτόνια δημιουργώντας μια ισχυρή σύμφωνη δέσμη φωτός λείζερ, η οποία θα εξέλθει από το μερικώς ανακλαστικό άκρο του κρυστάλλου. Σε αυτού του είδους το λείζερ, η απαιτούμενη για την επίτευξη της κρίσιμης αντιστροφής πληθυσμών άντληση δημιουργήθηκε από μια φωτεινή δέσμη βραχείας διάρκειας, ενώ για τη διατήρηση της αντιστροφής χρειάζεται μια ειδική μακρόβια «μετασταθής»



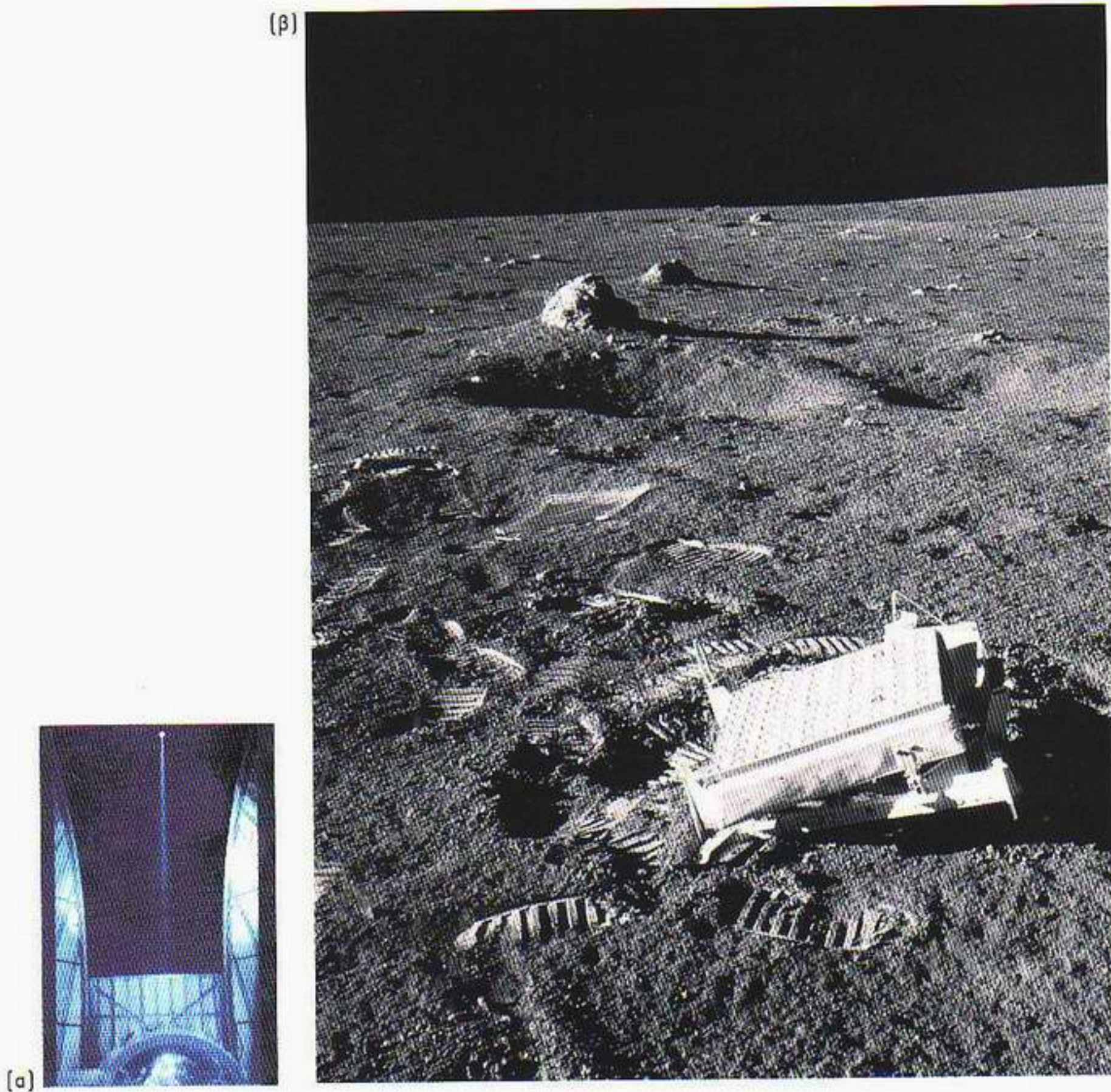
Εικόνα 7.6 Μια σειρά στιγμιότυπων που δείχνει πώς εξελίσσεται η διαδικασία παραγωγής φωτός λέιζερ. (α) Η εικόνα του κρυστάλλου μετά την επίτευξη της αντιστροφής πληθυσμών. Οι μικρότεροι κύκλοι αναπαριστούν τα άτομα χρωμίου που βρίσκονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση και οι μεγαλύτεροι, με τη διακεκομμένη γραμμή, τα διεγερμένα άτομα. (β) Στην εικόνα αυτή δύο άτομα επέστρεψαν στη θεμελιώδη τους κατάσταση. Στην περίπτωση όπου το φωτόνιο φεύγει από τις πλευρικές επιφάνειες του ρουμπινιού, δεν μπορεί να προκαλέσει εξαναγκασμένη εκπομπή. Στην άλλη περίπτωση, όπου το φωτόνιο εκπέμπεται κατά μήκος του άξονα του κρυστάλλου, μπορεί να προκαλέσει την παραγωγή όμοιων και περισσότερων φωτονίων μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, που όμοια θα έχουν την ίδια φάση. (γ) Τα κάτοπτρα στα άκρα της ράβδου του ρουμπινιού βοηθούν να δημιουργηθεί μια δέσμη παράλληλη προς τον άξονα του κρυστάλλου. Αρκετά φωτόνια θα ανακλαστούν στο αριστερό κάτοπτρο και στη συνέχεια θα προκαλέσουν και άλλες μεταβάσεις καθώς θα διατρέχουν τη ράβδο κατά την αντίθετη κατεύθυνση.



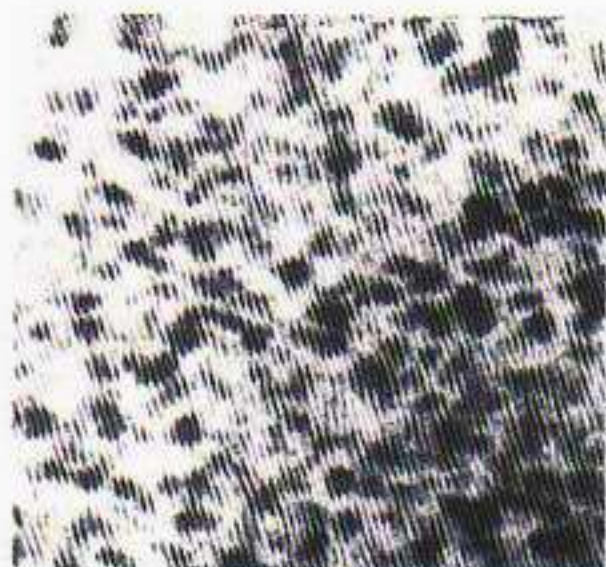
Εικόνα 7.7 Το εσωτερικό ενός λέιζερ ρουμπινιού. Ο ροζ κύλινδρος στο πάνω τμήμα της συσκευής είναι το ρουμπίνι, ενώ ο κύλινδρος στο κάτω μέρος είναι η πυκνή εκκλάμψεων που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της αντιστροφής πληθυσμών. Και οι δύο ψύχονται με νερό εισερχόμενο στη συσκευή από τους δύο σωλήνες που διακρίνονται στη φωτογραφία.

ενεργειακή κατάσταση (η E_2 της Εικόνας 7.5). Στα σύγχρονα λέιζερ, η άντληση μπορεί να γίνεται συνεχώς, και η μετασταθής κατάσταση δεν απαιτείται να είναι ιδιαίτερα μακρόβια.

Το ότι πολλά φωτόνια σε μια δέσμη λέιζερ βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση γίνεται εφικτό μόνο και μόνο επειδή τα φωτόνια είναι μποζόνια. Για τα φερμιόνια, η απαγορευτική αρχή του Pauli επιβάλλει το κάθε, φέρ' ειπείν, ηλεκτρόνιο να έχει διαφορετικούς κβαντικούς αριθμούς από τα



Εικόνα 7.8 (α) Η Σελήνη όπως φαίνεται από το Αστεροσκοπείο Lure, που βρίσκεται στο Μάουσι της Χαβάης. Μέσω του τηλεσκοπίου εκπέμπεται προς τη Σελήνη ένας παλμός φωτός λέιζερ. Μέχρι να φτάσει ο παλμός στη Σελήνη, η φωτεινή δέσμη έχει «ανοίξει», οπότε καλύπτει μια περιοχή με εύρος μεγαλύτερο από 3 χιλιόμετρα. Στη συνέχεια, μέρος της δέσμης ανακλάται προς τη Γη από ειδικούς ανακλαστήρες που τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια της Σελήνης από το πλήρωμα του Apollo 14. Το σήμα που επιστρέφει λαμβάνεται στη Γη και υπολογίζεται με ακρίβεια ο χρόνος που χρειάστηκε η φωτεινή δέσμη για να καλύψει τη διαδρομή Γη-Σελήνη-Γη. Ο χρόνος αυτός είναι περίπου 2,5 δευτερόλεπτα. Μετρήσεις τέτοιας ακρίβειας μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε την απόσταση Γης-Σελήνης με σφάλμα μερικών εκατοστών του μέτρου. (β) Οι ειδικοί σεληνιακοί ανακλαστήρες.



Εικόνα 7.9 Η πάνω αριστερά φωτογραφία, που φαίνεται σαν μουντζουρωμένη, είναι ένα ολόγραμμα. Οι άλλες τρεις φωτογραφίες δείχνουν τρεις διαφορετικές όψεις του ίδιου ολογράμματος. Όχι μόνο μπορεί κανείς να δει τα αντικείμενα από διαφορετικές πλευρές, αλλά και οι ίδιες οι φωτογραφίες, αν και με κάποια ελάττωση της ευκρίνειας, μπορούν να παραχθούν από ένα μικρό μόνο τμήμα του αρχικού ολογράμματος. Αυτό είναι δυνατόν λόγω του μηχανισμού της συμβολής που αποτελεί τη βάση της ολογραφίας.

υπόλοιπα· τα φωτόνια όμως, που είναι μποζόνια, μπορούν να συσσωρευτούν όλα μαζί στην ίδια κβαντική κατάσταση. Με την ιδιότητα τούτη των μποζονίων θα ασχοληθούμε λεπτομερέστερα στην επόμενη ενότητα. Κλείνουμε την παρούσα ενότητα για τα λέιζερ με μια σύντομη αναφορά σε δύο πολύ διαφορετικές εφαρμογές του φωτός τους.

Οι μοναδικές ιδιότητες του φωτός λέιζερ μας δίνουν τη δυνατότητα να συγκεντρώνουμε φωτεινή ενέργεια σε μεγάλης έντασης βραχείς παλμούς φωτός. Χρησιμοποιώντας τέτοιες δέσμες λέιζερ, μπορούμε να μετρήσουμε την απόσταση της Σελήνης από τη Γη με εκπληκτική ακρίβεια. Η Εικόνα 7.8 δείχνει τα ίχνη των αστροναυτών του διαστημοπλοίου Apollo 14 κοντά σε έναν ειδικό ανακλαστήρα που είχαν τοποθετήσει στην επιφάνεια της Σελήνης. Κατευθύνοντας έναν παλμό φωτός λέιζερ μέσω τηλεσκοπίου προς τη Σελήνη και μετρώντας το χρόνο της διαδρομής των φωτονίων τα οποία ανακλώνται από την επιφάνειά της, μπορούμε να προσδιορίσουμε —με σφάλμα μερικών εκατοστών του μέτρου— την απόσταση Γης-Σελήνης, η οποία ανέρχεται στα 400.000 περίπου χιλιόμετρα.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή του φωτός λέιζερ είναι η τρισδιάστατη φωτογραφία, ή *ολογραφία*. Το φως ενός λέιζερ διαχωρίζεται σε δύο δέσμες από ένα ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο. Η μία δέσμη φωτίζει το αντικείμενο, και το σκεδαζόμενο φως πέφτει πάνω στη φωτογραφική πλάκα. Η άλλη δέσμη κατευθύνεται στη φωτογραφική πλάκα χωρίς να σκεδαστεί από το αντικείμενο. Επειδή το φως λέιζερ είναι σύμφωνο, οι δύο δέσμες συμβάλλουν. Έτσι, η φωτογραφική πλάκα καταγράφει τη χαρακτηριστική εικόνα συμβολής που προκύπτει από την επανασύνδεση των δύο αυτών δεσμών. Η φωτογραφική αυτή καταγραφή της εικόνας συμβολής ονομάζεται *ολόγραμμα*, από την ελληνική λέξη «όλος». Και τούτο επειδή το ολόγραμμα, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στην κοινή φωτογραφία —στην οποία καταγράφεται μόνο η έντα-



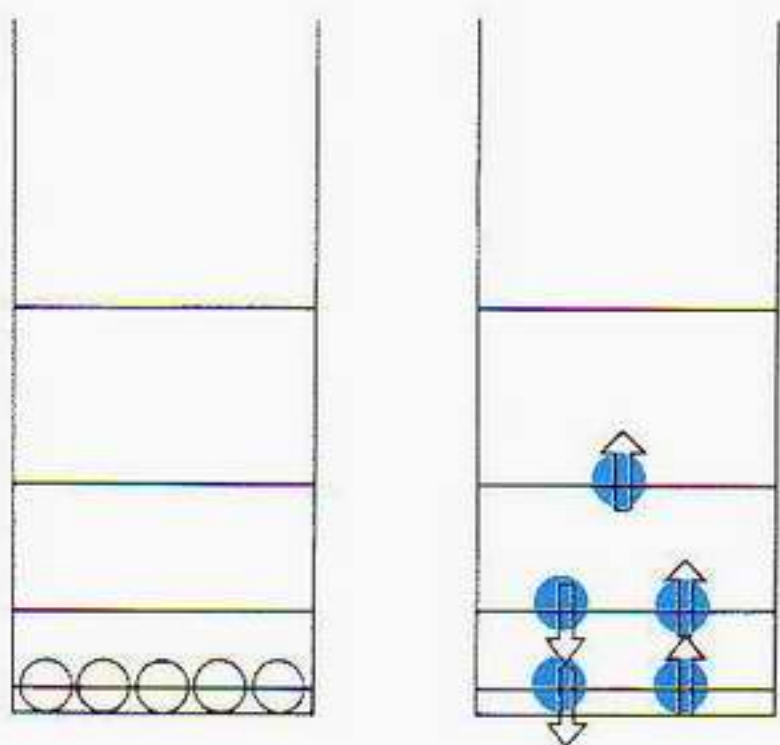
Ο Dennis Gabor (1900-1979) γεννήθηκε στη Βουδαπέστη, σπούδασε όμως στη Γερμανία. Με την άνοδο του Χίτλερ στην εξουσία, μετανάστευσε στην Αγγλία και εργάστηκε ως ερευνητής μηχανικός για παγίωση της εταιρείας ηλεκτρικών κατασκευών Thomson-Houston στο Ράγκμπι. Η αρχική του εργασία στην ολογραφία, το 1948, αφορούσε την ηλεκτρονική οπτική, η δε ιδέα του δεν έτυχε της δέουσας προσοχής παρά μόνο αφού εφευρέθηκε το λέιζερ. Το 1971 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ φυσικής.

ση του φωτός που πέφτει πάνω στη φωτογραφική πλάκα—, περιέχει πληροφορία και για τη φάση του σκεδασθέντος φωτός, καθότι συνιστά καταγραφή της εικόνας συμβολής. Κατά συνέπεια, το ολόγραμμα περιέχει το σύνολο της οπτικής πληροφορίας που προέρχεται από το φωτογραφιζόμενο αντικείμενο. Το ολόγραμμα δεν έχει καμιά ομοιότητα με το φωτογραφιζόμενο αντικείμενο—θυμίζει μάλλον μια τυχαία εικόνα με μουντζουρωμένες κηλίδες. Ωστόσο, όταν το ολόγραμμα φωτίζεται με μια δέσμη φωτός λέιζερ, ανακατασκευάζεται ένα τέλειο τρισδιάστατο είδωλο του αρχικού αντικειμένου. Αν παρατηρήσουμε το είδωλο από διαφορετικές γωνίες, βλέπουμε τις σχετικές θέσεις των διάφορων μερών του ακριβώς όπως θα τις βλέπαμε στο πραγματικό αντικείμενο. Συγκεκριμένα, ό,τι δεν φαίνεται από μια θέση μπορούμε να το δούμε κοιτάζοντας το ολογραφικό είδωλο από μια άλλη θέση. Η ολογραφία εφευρέθηκε από τον ουγγρικής καταγωγής Dennis Gabor, ο οποίος το 1947 εργαζόταν στο Ράγκμπι της Βρετανίας, αλλά παρέμεινε απλώς ένα «επιστημονικό παράδοξο» επί δεκαπέντε περίπου χρόνια. Μετά την ανακάλυψη όμως των σύμφωνων δεσμών λέιζερ, η ολογραφία έχει εξελιχθεί σε μεγάλη βιομηχανία, βρίσκοντας εφαρμογές σε πολλούς τομείς, που εκτείνονται από την ιατρική διάγνωση ως τον έλεγχο των ελαστικών επισώτρων.

Συμπύκνωση Bose και υπερρευστό ήλιο

Είδαμε, στο Κεφάλαιο 6, με ποιον τρόπο μπορούμε να εξηγήσουμε τον περιοδικό πίνακα των στοιχείων του Mendeleev εφαρμόζοντας την απαγορευτική αρχή του Pauli στα ηλεκτρόνια των ατόμων. Όλα τα βασικά σωματίδια ύλης—ηλεκτρόνια, πρωτόνια και νετρόνια—υπακούουν στην αρχή του Pauli. Δύο ταυτόσημα *φερμιόνια*, όπως ονομάζονται τα σωματίδια ύλης, δεν μπορούν ποτέ να βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση. Επομένως, αν θεωρήσουμε ότι τοποθετούμε ηλεκτρόνια σε ένα κιβώτιο δυναμικού, δεν μπορούν όλα τους να πάνε στην κατώτερη ενεργειακή στάθμη. Αντίθετα, συμπληρώνουν τις κβαντωμένες ενεργειακές στάθμες σχηματίζοντας ζεύγη με αντίθετο spin, έτσι ώστε να μην υπάρχουν δύο ηλεκτρόνια με ίδιους όλους τους κβαντικούς αριθμούς. Αυτό ακριβώς συμβαίνει με όλα τα σωματίδια ύλης. Τα σωματίδια ακτινοβολίας, όμως, όπως είναι τα φωτόνια, συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά, και στην πραγματικότητα προτιμούν να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση! Τέτοια σωματίδια ονομάζονται *μποζόνια*, προς τιμήν του ινδού φυσικού Satyendra Bose.

Το 1924, ο Bose ήταν ένας νεαρός φυσικός από τη Βεγγάλη, ουσιαστικά άγνωστος στον επιστημονικό κόσμο. Η έκτη του επιστημονική δημοσίευση αφορούσε μια νέα απόδειξη της διάσημης σχέσης με την οποία ο Planck είχε εισαγάγει στη φυσική τόσο την έννοια των φωτονίων όσο και την πασίγνωστη κβαντική σταθερά h . Κυκλοφορούν πολλές ιστορίες στη φυσική για εργασίες που, αφού συνάντησαν την απόρριψη όταν υποβλήθηκαν προς δημοσίευση, αργότερα έγιναν διάσημες. Ε, λοιπόν, μία από αυτές ήταν και η εργασία του Bose. Αλλά ο Bose είχε την καλή τύχη ή την προνοητικότητα να στείλει ένα αντίγραφο της στον Αϊνστάιν, ζητώντας του, αν μπορούσε, να φροντίσει για τη δημοσίευσή της σε κάποιο γερμανικό περιοδικό, «εφόσον θεωρούσε πως είχε κάποια αξία». Εκείνο τον καιρό, ο Αϊνστάιν ήταν πολύ απορροφημένος στην έρευνά του για μια ενοποιημένη θεωρία όλων των δυνάμεων της φύσης, αλλά η επιστολή του Bose τον έκανε να αφήσει για λίγο το κύριο



Εικόνα 7.10 Τα μποζόνια και τα φερμιόνια σε ένα κβαντικό κιβώτιο. Τα φυσικά συστήματα τείνουν να έχουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Για τα μποζόνια, αυτό μπορεί να επιτευχθεί όταν όλα βρίσκονται στην ίδια ενεργειακή στάθμη, τη θεμελιώδη. Τα φωτόνια συμπεριφέρονται ως μποζόνια. Τα φερμιόνια, από την άλλη, είναι σωματίδια που, όπως τα ηλεκτρόνια, πρέπει να υπακούουν στην απαγορευτική αρχή του Pauli. Συνεπώς, κάθε ενεργειακή στάθμη μπορεί να καταληφθεί από δύο το πολύ φερμιόνια, τα οποία αντιστοιχούν στις δύο αποδεκτές καταστάσεις ενός ηλεκτρονίου (σπιν άνω και σπιν κάτω).

ερευνητικό του έργου. Μετέφρασε ο ίδιος στα γερμανικά την εργασία του Bose και την έστειλε σε ένα γερμανικό περιοδικό, σημειώνοντας ότι κατά τη γνώμη του αποτελούσε «σημαντική πρόοδο». Τους επόμενους μήνες, ο Αϊνστάιν δημοσίευσε αρκετές εργασίες με τις οποίες επέκτεινε και διασαφήνιζε την εργασία του Bose. Συγκεκριμένα, ο Αϊνστάιν υπήρξε ο πρώτος ο οποίος επισήμανε το ενδεχόμενο τα σωματίδια Bose, τα σημερινά μποζόνια, να έχουν την ιδιότητα να «συμπυκνώνονται» όλα στην κατώτερη ενεργειακή κατάσταση. Για να κατανοήσουμε τι ακριβώς σημαίνει αυτό, ας επιστρέψουμε στο κβαντικό πρόβλημα των σωματιδίων που βρίσκονται μέσα σε ένα κιβώτιο δυναμικού. Αν στο κιβώτιο τοποθετήσουμε φωτόνια αντί για ηλεκτρόνια, τότε η κατώτερη ενεργειακή κατάσταση προκύπτει όταν όλα τα φωτόνια βρεθούν στην κατώτερη ενεργειακή στάθμη. Σε κανονικές θερμοκρασίες, ωστόσο, μια συνηθισμένη κρούση μπορεί να μεταφέρει αρκετή ενέργεια ώστε περισσότερα μποζόνια να βρίσκονται σε διεγερμένες καταστάσεις. Εντούτοις, εάν μειώσουμε τη θερμοκρασία, τόνισε ο Αϊνστάιν, «από μια κρίσιμη θερμοκρασία και πέρα, τα μόρια “συμπυκνώνονται” χωρίς ελκτικές δυνάμεις». Και συνέχισε λέγοντας: «Η θεωρία είναι όμορφη, υπάρχει όμως τίποτα το αληθινό σε αυτή;» Αυτά συνέβησαν τον Δεκέμβριο του 1924· ο Bose τού είχε γράψει τον Ιούνιο του ίδιου χρόνου.

Η συμπύκνωση των μποζονίων, την οποία πρότεινε ο Αϊνστάιν — τώρα πια ονομάζεται συμπύκνωση Bose ή Bose-Einstein—, αρχικά θεωρήθηκε πως είχε έναν «καθαρά θεωρητικό χαρακτήρα» και δεν μπορούσε να παρατηρηθεί στον πραγματικό κόσμο. Και μόνο το 1938, ο Fritz London διατύπωσε την άποψη ότι μερικά παράξενα φαινόμενα που παρατηρούνταν στο υγρό ήλιο μπορούσαν να γίνουν κατανοητά με βάση τη συμπύκνωση Bose των ατόμων του ηλίου. Προτού, όμως, προχωρήσουμε στην περιγραφή των περιέργων αυτών ιδιοτήτων του ηλίου, πρέπει να απαντήσουμε σε ένα βασικότερο ερώτημα. Όπως είπαμε, τα σωματίδια ύλης, όπως το ηλεκτρόνιο, το πρωτόνιο και



Satyendra Bose (1894-1974). Απεθισμένος που δεν ενέκριναν για δημοσίευση την εργασία του πάνω στην κβαντική θεωρία του φωτός, ο Bose έστειλε ένα αντίγραφο της στον Αϊνστάιν. Ο Αϊνστάιν μετέφρασε προσωπικά την εργασία από το αγγλικό στα γερμανικά και φρόντισε να δημοσιευθεί. Το αποτέλεσμα ήταν ο άγνωστος μέχρι τότε Bose να γίνει ξαφνικά ένας διεθνώς περιώνυμος φυσικός.



Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν (1879-1955), στο απόγειο της δημιουργικής εργασίας του το 1916. Μόλις είχε ολοκληρώσει τη γενική θεωρία της σχετικότητας καθώς και τη σπουδαία εργασία του πάνω στην απορρόφηση και εκπομπή του φωτός από τα άτομα, την οποία εξετάζουμε στο παρόν κεφάλαιο. Στον Αϊνστάιν απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ το 1921 για την εργασία του στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο —μια άλλη ζωτικής σημασίας συμβολή του στην κβαντική μηχανική. Παρό τον σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισε στη διαμόρφωση της κβαντικής θεωρίας, ο Αϊνστάιν δυσανασχετούσε με τη συμβατική ερμηνεία της θεωρίας όπως τη διατύπωσαν ο Heisenberg και ο Bohr. Δεν εννοούμε βεβαίως ότι αμφισβητούσε την κβαντική μηχανική, αλλά θεωρούσε ότι η θεωρία υπό την παρούσα μορφή της, με την αβεβαιότητα να παίζει σημαντικό ρόλο, δεν ήταν πλήρης. Σε μια επιστολή του προς τον Bohr, ο οποίος πρώτος εισήγαγε την πιθανοκρατική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης του Schrödinger, ο Αϊνστάιν έκανε και την ξακουστή παρατήρησή του ότι ο θεός «δεν παίζει ζόρια» (βλ. Κεφάλαιο 8).

το νετρόνιο, είναι όλα φερμιόνια· γιατί, λοιπόν, θα πρέπει το ήλιο να θεωρείται μποζόνιο; Ο λόγος είναι ότι το συνηθισμένο άτομο του ηλίου (^4He) περιέχει άρτιο αριθμό φερμιονίων: δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια στον πυρήνα, και δύο ηλεκτρόνια. Τα πειράματα μας λένε ότι στοιχεία με άρτιο αριθμό φερμιονίων συμπεριφέρονται ως μποζόνια. Έτσι, το υγρό ήλιο ^4He μπορεί να υφίσταται συμπύκνωση Bose στις χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός το οποίο εξηγεί την αξιοσημείωτη συμπεριφορά «υπερρευστού» που εμφανίζει. Από την άλλη, τα στοιχεία με περιττό αριθμό φερμιονίων διαπιστώνεται ότι υπακούουν στην απαγορευτική αρχή του Pauli και δρουν ως φερμιόνια. Έτσι, το υγρό ήλιο ^3He , το οποίο έχει μόνο ένα νετρόνιο στον πυρήνα του, είναι φερμιόνιο, και επομένως δεν υφίσταται συμπύκνωση ανάλογη με εκείνη του ηλίου ^4He , έχει δε πολύ διαφορετικές ιδιότητες από αυτό στις χαμηλές θερμοκρασίες, παρά τη χημική τους ομοιότητα!

Το ήλιο έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού από όλα τα αέρια και ήταν το τελευταίο που υγροποιήθηκε. Στη φυσική χαμηλών θερμοκρασιών, οι θερμοκρασίες δίνονται συνήθως σε κέλβιν (συμβολίζονται με K) και όχι σε βαθμούς Κελσίου. Το απόλυτο μηδέν ορίζεται ως το μηδέν της κλίμακας Κέλβιν και αντιστοιχεί στους περίπου -273 βαθμούς Κελσίου. Δεν υπάρχουν θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτή του απόλυτου μηδενός. Προς το τέλος του 19ου αιώνα, μερικοί φυσικοί στο Παρίσι, το Λονδίνο και την Κρακοβία ανταγωνίζονταν ποιος θα παραγάγει τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Επί μεγάλο χρονικό διάστημα φαινόταν πως η υγροποίηση του υδρογόνου θα αποτελούσε το τελευταίο βήμα της πορείας προς το απόλυτο μηδέν. Ο σερ James Dewar ανακοίνωσε την υγροποίηση του υδρογόνου για πρώτη φορά στη Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου το 1898. Στα πειράματά του είχε φτάσει στους 12 K περίπου. Εκείνο τον καιρό, όμως, είχε ανακαλυφθεί το σπάνιο αέριο ήλιο, και είχε καταστεί πλέον σαφές ότι η υγροποίησή του αποτελούσε τον πραγματικό στόχο των φυσικών. Το 1904, ο Dewar υπολόγισε ότι η απαιτούμενη θερμοκρασία ήταν περίπου 6 K, αλλά μόνο τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1908, κατόρθωσε τελικά ο ολλανδός φυσικός Kamerlingh Onnes, στο Λέιντεν, να υγροποιήσει το ήλιο. Όπως διαπιστώθηκε, το σημείο βρασμού του ηλίου ήταν στην πραγματικότητα περίπου 4 K.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι το υγρό ήλιο έχει πολλές αξιοσημείωτες ιδιότητες. Παραμένει υγρό ακόμη κι αν ψυχθεί σε θερμοκρασίες όσο το δυνατόν πλησιέστερες στο απόλυτο μηδέν. Τούτο οφείλεται στη μεγάλη κίνηση μηδενικού σημείου των ατόμων του ηλίου —την αναγκαία, δηλαδή, κβαντική ταλάντωση που απαιτείται για να ικανοποιείται η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg. Επιπλέον, στους 2 K περίπου συμβαίνει μια δραματική αλλαγή. Ο βρασμός παύει, και το υγρό παραμένει τελείως ακίνητο. Και άλλες ιδιότητες αλλάζουν επίσης απότομα. Η Εικόνα 7.11 δείχνει πώς μεταβάλλεται η ειδική θερμότητα —η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για να ανυψωθεί η θερμοκρασία 1 γραμμαρίου ηλίου κατά 1 K— ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Επειδή η μορφή της καμπύλης αυτής μοιάζει με το ελληνικό γράμμα λάμδα, η θερμοκρασία των περίπου 2 K είναι γνωστή ως *σημείο λ*. Κάτω από το σημείο λ, το ιξώδες του ηλίου πέφτει απότομα, μειούμενο κατά 1 εκατομμύριο φορές. Το πιο εντυπωσιακό ίσως από όλα είναι η ικανότητα που αποκτά το υγρό ήλιο σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο λ να «έρπει» ως λεπτό υμένιο πάνω στα τοιχώματα του δοχείου που το περιέχει (Εικόνα 7.12). Αν βυθίσουμε ένα κύπελλο μέσα σε δοχείο με υγρό ήλιο, τότε σχηματίζεται

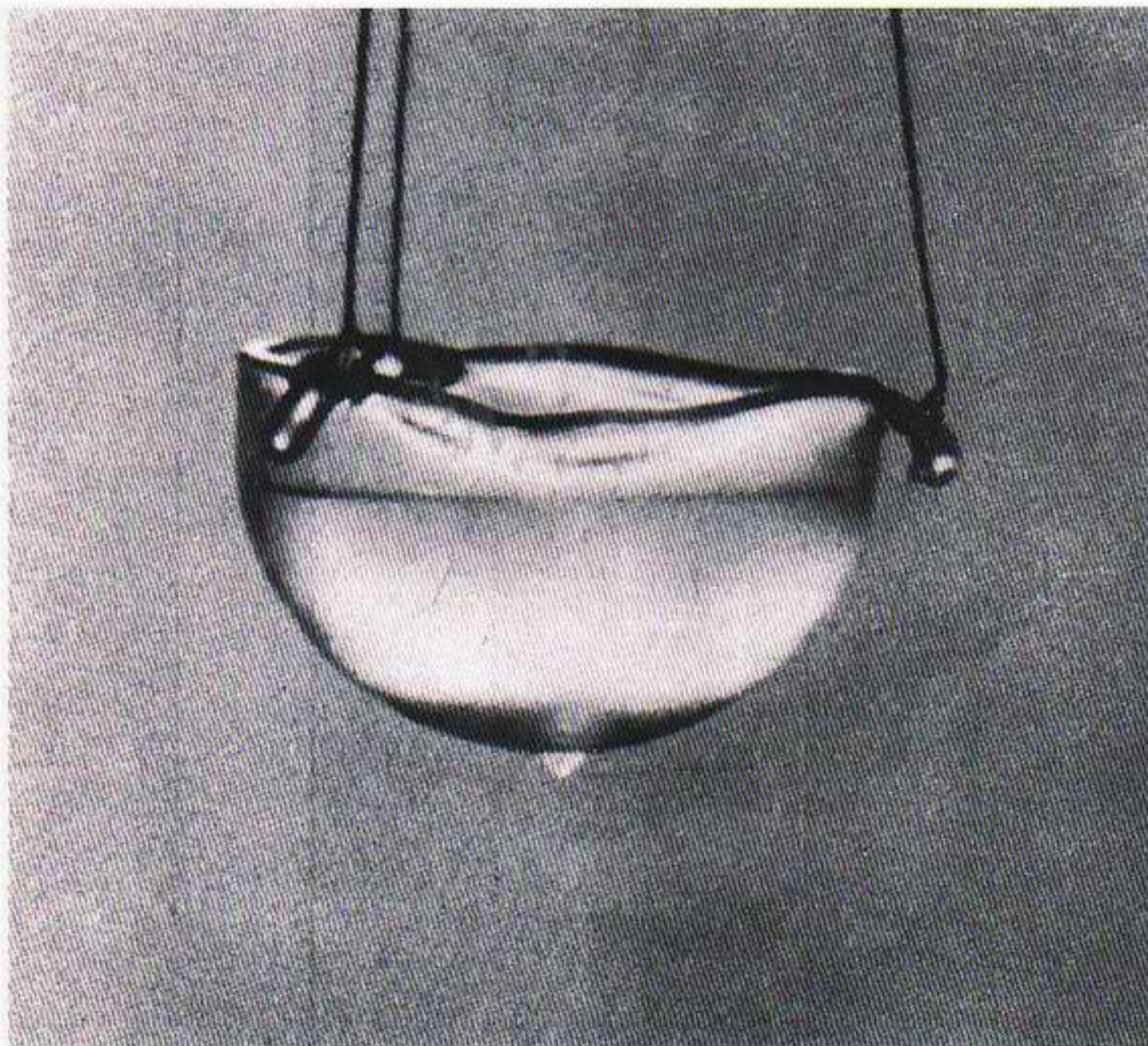
ένα λεπτό υμένιο ηλίου σε όλη την επιφάνεια του κύπελλου. Το στρώμα αυτό δρα μάλιστα ως σίφωνας διαμέσου του οποίου το ήλιο ρέει με σχεδόν μηδενική εσωτερική τριβή. Έτσι, ανεξάρτητα από τη διαφορά που έχουν αρχικά οι στάθμες του υγρού μέσα και έξω από το κύπελλο, το ήλιο ρέει μέχρι αυτές να βρεθούν στο ίδιο ύψος! Ο Kurt Mendelssohn θυμάται την ανακάλυψη αυτού του φαινομένου «μεταφοράς μέσω υμενίου» στο Εργαστήριο Clarendon της Οξφόρδης:

Όταν το κύπελλο ανυψώνεται από το δοχείο με το υγρό ήλιο, η στάθμη μέσα σε αυτό πέφτει μέχρι να φτάσει τη στάθμη του ηλίου στο δοχείο. Όταν βγάλουμε το κύπελλο τελείως έξω από το δοχείο, η στάθμη θα εξακολουθεί να πέφτει, και μπορεί κανείς να δει να σχηματίζονται μικρές σταγόνες ηλίου στον εξωτερικό πυθμένα του κύπελλου και να πέφτουν πάλι στο δοχείο. Πρόκειται για ένα από τα φαινόμενα εκείνα που κάνουν τον καθένα να κοιτάζει και να ξανακοιτάζει, να τρίβει τα μάτια του και να απορεί αν πράγματι είναι αληθινό. Θυμάμαι καλά το βράδυ που παρατηρήσαμε πρώτη φορά αυτή τη μεταφορά μέσω υμενίου. Ήταν αρκετή ώρα μετά το δείπνο· ψάξαμε στο κτήριο και τελικά βρήκαμε δύο πυρηνικούς φυσικούς που εργάζονταν ως εκείνη την ώρα. Όταν και εκείνοι είδαν τις σταγόνες, αισθανθήκαμε κάπως καλύτερα.

Όλες αυτές οι παράδοξες ιδιότητες του υγρού ηλίου οφείλονται στο ότι τα άτομα του ηλίου «συμπυκνώνονται» στη χαμηλότερη ενεργειακή κατά-



Εικόνα 7.11 Το σημείο Η για το υγρό ήλιο. Πρόκειται για μια ρίζαν ασυνήθη μεταβολή η οποία συμβαίνει στους 2,2 βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν, και ο ασυνήθης χαρακτήρας της καθίσταται εμφανής από αυτή την όμοια με Η καμπύλη που προκύπτει από μετρήσεις της ειδικής θερμότητας του ηλίου.



Εικόνα 7.12 Το υγρό ήλιο κάτω από το σημείο Η είναι υπερρρευσιμό και εμφανίζει μερικές αξιοσημείωτες ιδιότητες. Η φωτογραφία δείχνει πώς το υγρό ήλιο μπορεί να αναρριχάται έρποντας στα τοιχώματα ενός δοχείου, να περνάει πάνω από το χείλη του, να ρέει πάνω στην εξωτερική επιφάνειά του και να συλλέγεται υπό μορφή σταγόνων στο κάτω μέρος του.



[α]



[β]



[γ]

Ο Douglas Osheroff (α), ο Robert Richardson (β) και ο David Lee (γ) τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 1996 για την ανακάλυψη του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας στο ήλιο-3. Το φαινόμενο αυτό είναι από μόνο του εκπληκτικό, καθώς το άτομο του ήλιου-3 περιέχει περιττό αριθμό σωματιδίων και φυσιολογικά συμπεριφέρεται ως φερμιόνιο. Σε θερμοκρασίες όμως περί τους 0,002 K —χίλιες φορές χαμηλότερες εκείνων όπου το ήλιο-4 καθίσταται υπερρευστό—, ζεύγη ατόμων ήλιου-3 «συνωμοτούν» και φέρονται ως μποζόνια, καθιστώντας εφικτή τη συμπύκνωση που οδηγεί στην υπερρευστότητα.

σταση, σχηματίζοντας ένα κβαντικό υπερρευστό. Επειδή ουσιαστικά όλα τα άτομα βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση, στη συμπεριφορά τους εμφανίζεται μια μορφή συνεργασίας, και αυτό δίνει στο υπερρευστό τις ασυνήθιστες ιδιότητές του. Όπως λέει ο Feynman στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, η περίπτωση του ηλίου αποτελεί ένα εντυπωσιακό παράδειγμα των ιδιομορφιών της κβαντικής μηχανικής που παρατηρούνται στο μακρόκοσμο. Χωρίς την κβαντική μηχανική, τον de Broglie, τον Heisenberg, τον Schrödinger και όλους τους άλλους, δεν θα μπορούσαμε να εξηγήσουμε αυτά τα περίεργα φαινόμενα!

Υπάρχει ένα σύντομο υστερόγραφο στην ιστορία του υγρού ηλίου, το οποίο αποτελεί καλό εισαγωγικό σχόλιο για τη συζήτησή μας σχετικά με την υπεραγωγιμότητα. Όπως είπαμε, το υγρό ^3He αναμένεται να συμπεριφέρεται διαφορετικά από το υγρό ^4He , επειδή τα άτομά του συμπεριφέρονται σαν φερμιόνια και δεν μπορούν να υποστούν συμπύκνωση Bose. Μολονότι το πείραμα επιβεβαιώνει αυτή την προσδοκία, μια νέα μορφή συμπύκνωσης Bose παρατηρείται σε πολύ μικρότερη θερμοκρασία, στους περίπου 0,002 K! Στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, οι ασθενείς ελκτικές δυνάμεις ανάμεσα σε δύο άτομα ^3He είναι αρκετά ισχυρές για να σχηματιστεί ένα δέσμιο ζεύγος ατόμων ^3He που δρα ως μποζόνιο. Αυτά τα ζεύγη των ατόμων ^3He μπορούν τότε να υποστούν συμπύκνωση Bose ανάλογη με εκείνη των μεμονωμένων ατόμων ^4He . Όπως θα δούμε, για την υπεραγωγιμότητα ευθύνεται ένας παρεμφερής μηχανισμός σχηματισμού ζευγών. Οι David Lee, Douglas Osheroff και Robert Richardson του Πανεπιστημίου Cornell τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 1996 για την ανακάλυψη αυτή.



Εικόνα 7.13 Η θεαματική αυτή φωτογραφία του φαινομένου του *πίδακα* αποτελεί ένα ακόμη παράδειγμα για την παράδοση συμπεριφορά του υγρού ηλίου.

Ψυχρά άτομα

Στο υπερρευστό ήλιο έχουμε κβαντική συνεργασία μεταξύ των ατόμων πλίου. Αυτού του είδους η συμπύκνωση Bose-Einstein λαμβάνει χώρα σε άτομα ευρισκόμενα ήδη σε υγρή κατάσταση. Μπορεί, όμως, να συμβεί συμπύκνωση Bose-Einstein σε αέρια προτού αυτά υγροποιηθούν σε σταγόνες ή παγώσουν και στερεοποιηθούν; Για να συμβεί κάτι τέτοιο, τα άτομα πρέπει να απέχουν αρκετά μεταξύ τους ώστε να καθίσταται αδύνατη η συνήθης συμπύκνωσή τους στην υγρή κατάσταση, αλλά όχι και τόσο πολύ ώστε να εμποδίζεται η συμπύκνωση Bose-Einstein. Η βασική απαίτηση είναι η ύπαρξη υπερψυχρών θερμοκρασιών —χαμηλότερων από 1 εκατομμυριοστό του βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν. Το 1995, ο Eric Cornell, ο Carl Wieman και οι συνάδελφοί τους κατάφεραν να ψύξουν ένα αραιό ατομικό αέριο σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία ώστε να λάβει χώρα συμπύκνωση Bose-Einstein. Όλα τα άτομα συμπεριφέρονταν ως μία και μοναδική οντότητα με συλλογικό κβαντομηχανικό τρόπο. Πώς, όμως, είναι δυνατόν να επιτυγχάνονται τόσο χαμηλές θερμοκρασίες ώστε μεμονωμένα άτομα να κινούνται βραδύτερα από μια χελώνα; Η απάντηση είναι ότι, με την εφαρμογή μιας αναπάντεχης και καίριας σημασίας τεχνικής, τα άτομα αιχμαλωτίζονται μεταξύ διασταυρούμενων δεσμών φωτός λέιζερ.

Θυμηθείτε ότι τα άτομα απορροφούν και εκπέμπουν φως μόνο όταν η ενέργεια του φωτονίου ισούται ακριβώς με την ενεργειακή διαφορά μεταξύ δύο επιτρεπτών ηλεκτρονιακών καταστάσεων. Η φωτονική εικόνα του φωτός υποδηλώνει ότι η διαδικασία εκπομπής του μοιάζει μάλλον με τη βολή σφαίρας από όπλο, ενώ η απορρόφηση μοιάζει με την πρόσκρουση σφαίρας σε στόχο. Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, προβλέπεται —και ορθά— ότι, κατά την απορρόφηση ή εκπομπή ενός φωτονίου, το άτομο υφίσταται ανάκρουση. Σε θερμοκρασία δωματίου, το αέριο αποτελείται από ένα σύνολο ατόμων κινούμενων σε τυχαίες κατευθύνσεις με διαφορετικές ταχύτητες. Σύμφωνα με την καθιερωμένη κινητική θεωρία των αερίων, η θερμοκρασία είναι το μέτρο της μέσης ταχύτητας των ατόμων του αερίου. Αν μπορούσαμε να ψύξουμε το αέριο ως το απόλυτο μηδέν, η τυχαία κίνηση μηδενικού σημείου των ατόμων του θα συνιστούσε την ελάχιστη απαίτηση για να ικανοποιείται η αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg. Είναι προφανές ότι, για να κατανοήσουμε την αλληλεπίδραση του φωτός με τα αέρια, χρειάζεται να λάβουμε υπόψη και την κίνηση των ατόμων του.

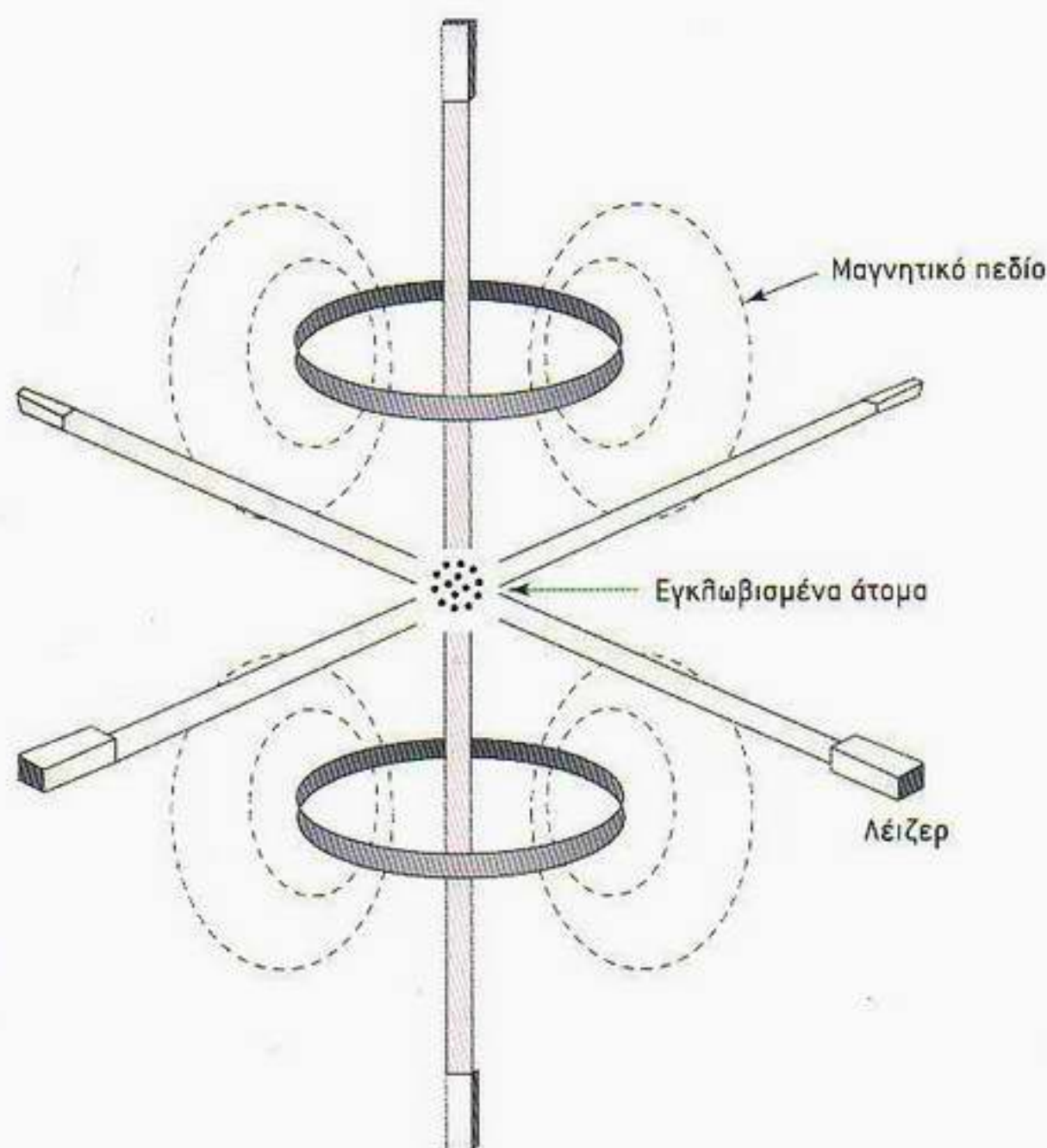
Φανταστείτε ένα άτομο κινούμενο προς ένα φωτόνιο που πλησιάζει. Από την καθημερινή μας ζωή έχουμε εξοικειωθεί με το φαινόμενο Doppler για τον ήχο. Για παράδειγμα, αν σταθούμε πλάι στις ράγες ενός τρένου, ο ήχος της σειρήνας του ακούγεται οξύτερος καθώς αυτό μας πλησιάζει, ενώ ακούγεται πιο βαρύς όταν το τρένο απομακρύνεται. Ένα παρόμοιο φαινόμενο Doppler ισχύει επίσης για τα φωτόνια και το φως. Αν το άτομο κινείται προς το μέρος του φωτονίου που πλησιάζει, η φωτονική συχνότητα θα είναι υψηλότερη εξαιτίας του οπτικού φαινομένου Doppler. Εφόσον τα άτομα του αερίου κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες, το καθένα τους θα συντονίζεται σε διαφορετική φωτονική συχνότητα. Φανταστείτε ένα άτομο του αερίου κινούμενο ακριβώς με την ταχύτητα η οποία απαιτείται για να απορροφήσει ένα φωτόνιο της δέσμης λέιζερ που το πλησιάζει. Όταν το απορροφήσει, θα επιβραδυνθεί ελαφρώς από τη σύγκρουση. Φυσικά, τελικά το φωτόνιο θα επα-



Ο Daniel Kleppner άρχισε να ερευνά τα συμπυκνώματα Bose-Einstein τη δεκαετία του 1970. Δεν ήταν ο πρώτος που πέτυχε συμπύκνωση Bose-Einstein, αλλά και οι τρεις ομάδες που πραγματοποίησαν πρώτες αυτό τον όθλο είχαν ως επί κεφαλής παλιούς φοιτητές του.

νεκπεμφθεί, αλλά προς κάποια τυχαία κατεύθυνση. Δεδομένου ότι η δέσμη λέιζερ συγκροτείται από πολλά φωτόνια, η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές. Βλέποντας το φαινόμενο στο σύνολό του, θα λέγαμε ότι το άτομο μοιάζει να κινείται εν μέσω ενός «καταιγισμού από σφαίρες». Ως τελικό καθαρό αποτέλεσμα, η κίνηση του ατόμου θα επιβραδυνθεί στη διεύθυνση της δέσμης του λέιζερ και θα προστεθεί μια μικρή τυχαία κίνηση στις υπόλοιπες κατευθύνσεις.

Ας υποθέσουμε ότι ρυθμίζουμε τη συχνότητα της δέσμης λέιζερ έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε ενέργεια μόλις μικρότερη από κάποιο ενεργειακό χάσμα του ατόμου. Τα κινούμενα προς τη δέσμη άτομα «βλέπουν» τη φωτονική συχνότητα μετατοπισμένη κατά Doppler, γεγονός που επιτρέπει την απορρόφηση φωτονίων και οδηγεί σε επιβράδυνση της κίνησης του ατόμου στη διεύθυνση της δέσμης του λέιζερ. Εφόσον τα άτομα του αερίου κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις, αν θέλουμε να μειώσουμε αποτελεσματικά την ταχύτητά τους, πρέπει να περικυκλώσουμε τα άτομα με έξι δέσμες λέιζερ διατεταγμένες σε τρία ζεύγη, με τα μέλη κάθε ζεύγους να έχουν αντίθετη κατεύθυνση όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.14. Η προκύπτουσα διάταξη των ακτίνων λέιζερ έχει ονομαστεί *οπτική μελάσα*, αφού τα άτομα δέχονται δυνάμεις που τα επιβραδύνουν προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς τα άτομα επιβραδύνονται, πρέπει να προσαρμόζουμε τη συχνότητα της δέσμης λέιζερ έτσι ώστε τα πιο βραδυκίνητα άτομα να συνεχίζουν να απορροφούν φωτόνια και να εξακολουθούν να επιβραδύνονται. Η πρώτη επίδειξη τέτοιας ψύξης με λέιζερ πραγματοποιήθηκε το 1985 από τον Stephen Chu και τους συνεργάτες του στα Εργαστήρια Bell της AT&T στο Χόλμντιλ του Νιου Τζέρσι. Κατάφεραν να



Εικόνα 7.14 Σχηματικό διάγραμμα μιας μαγνητοοπτικής παγίδας. Τα παγιδευμένα άτομα επιβραδύνονται με τη βοήθεια έξι δεσμών λέιζερ. Τα άτομα κρατιούνται εγκλωβισμένα μέσω των ειδικά σχεδιασμένων μαγνητικών πεδίων.

ψύζουν άτομα νατρίου στην πολύ χαμηλή θερμοκρασία των 240 εκατομμυριοστών του βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν. Η θερμοκρασία αυτή παραμένει ακόμα πολύ υψηλή για το σχηματισμό ενός αέριου συμπυκνώματος Bose-Einstein. Επιπλέον, η δράση της βαρύτητας έχει ως αποτέλεσμα τα ψυχθέντα άτομα να ξεφεύγουν από την παγίδα έπειτα από ένα περίπου δευτερόλεπτο. Αυτό το πρόβλημα εγκλωβισμού το έλυσαν ο William Phillips και η ομάδα του στο Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας στο Μέριλαντ χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό μαγνητικών πεδίων.

Πολλά άτομα συμπεριφέρονται σαν μικροί μαγνήτες όταν βρεθούν εντός μαγνητικού πεδίου. Εντός μη ομογενούς μαγνητικού πεδίου, ένας μαγνήτης δέχεται διαφορετική δύναμη στον νότιο και τον βόρειο μαγνητικό του πόλο. Ο Phillips και η ομάδα του τροποποίησαν τη διάταξη της οπτικής μελάσας περιλαμβάνοντας σε αυτή μαγνητικά πεδία τέτοιου είδους πάνω και κάτω από την παγίδα ατόμων. Η τροποποιημένη αυτή οπτική παγίδα ήταν σε θέση να κρατά εγκλωβισμένα τα άτομα επί αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επιτυγχάνοντας έτσι ψύξη ατόμων στα περίπου 40 εκατομμυριοστά του κέλβιν. Επρόκειτο για ένα αποτέλεσμα αινιγματικό —αφού η χαμηλότερη θερμοκρασία που αναμενόταν να επιτευχθεί μέσω ψύξης Doppler ήταν περίπου 240 εκατομμυριοστά του κέλβιν. Οι θεωρητικοί φυσικοί δεν άργησαν να εξηγήσουν πώς λειτουργεί αυτός ο επιπρόσθετος μηχανισμός ψύξης που οδηγούσε σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και από την ψύξη Doppler. Ο Claude Cohen-Tannoudji και οι συνεργάτες του στη Γαλλία έδειξαν ότι στην απορρόφηση και την εκπομπή φωτός μπορούν να συμμετέχουν πολλαπλές ηλεκτρονιακές στάθμες. Η θεωρία τους προβλέπει ότι με τη βοήθεια της ψύξης με λέιζερ τα άτομα είναι δυνατόν να επιβραδυνθούν μέχρις ότου αποκτήσουν την ταχύτητα ανάκρουσης που προσδίδεται στο άτομο από ένα και μόνο φωτόνιο. Στηριζόμενη στη νέα θεωρητική ερμηνεία της διαδικασίας, η γαλλική ομάδα κατάφερε να ψύξει άτομα ηλίου στα 0,18 εκατομμυριοστά του κέλβιν.



(α)



(β)



(γ)

Τον Οκτώβριο του 2001, η Βασιλική Σουηδική Ακαδημία σπένειμε το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 2001 στον Wolfgang Ketterle του MIT (α), τον Carl Wieman του Πανεπιστημίου του Κολλοράντο (β) και τον Eric Cornell του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας στο Μπόουλντερ του Κολλοράντο (γ). Οι τρεις φυσικοί μοιράστηκαν το χρηματικό βραβείο των 952.738 δολαρίων. Συνεργαζόμενοι το 1995, ο Cornell και ο Wieman επέτυχαν να ψύξουν περί τα 2.000 άτομα σε θερμοκρασία πολύ κοντά στο απόλυτο μηδέν και να δημιουργήσουν το πρώτο συμπύκνωμα Bose-Einstein. Πρόκειται για μια περίεργη κατάσταση της ύλης στην οποία μεμονωμένα άτομα συμπυκνώνονται σε μία και μοναδική κβαντική κατάσταση. Τέσσερις μήνες αργότερα, ο Ketterle χρησιμοποίησε ένα νέφος από άτομα νατρίου για να δημιουργήσει ένα συμπύκνωμα Bose-Einstein με ακόμα περισσότερα άτομα. Το κατόρθωσε ψύχοντας τα άτομα στα 200 δισεκατομμυριοστά του βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν με τη βοήθεια μιας νέας διάταξης λέιζερ.



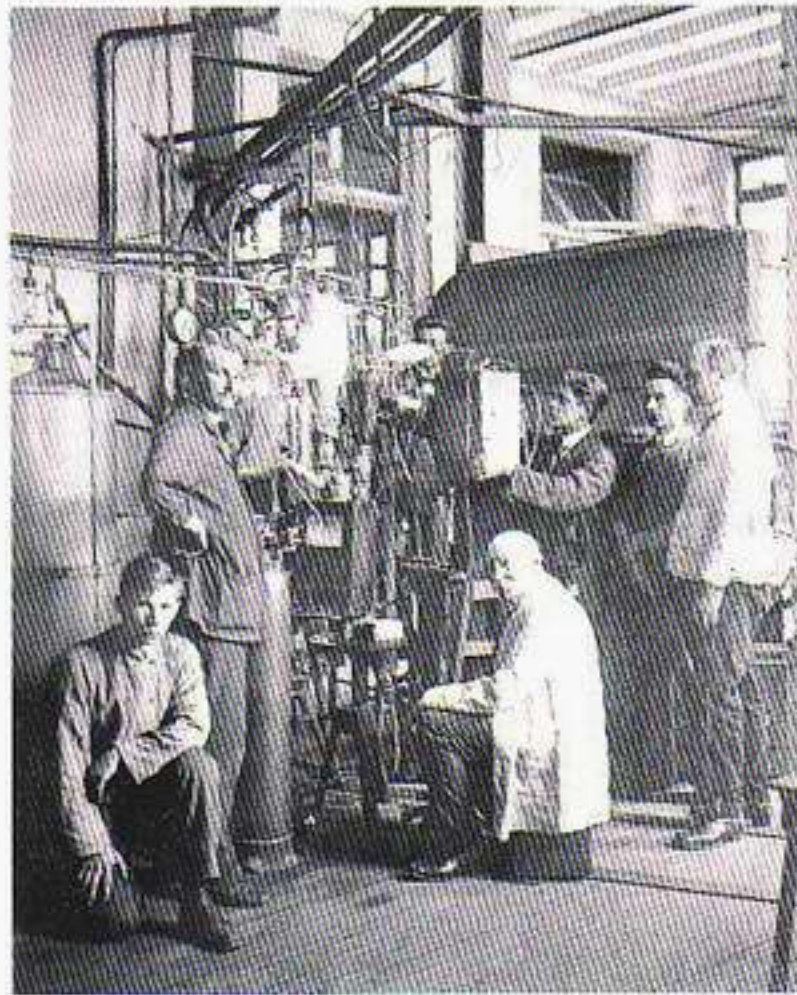
Το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 1997 απονεμήθηκε στους Stephen Chu (α), William Phillips (β) και Claude Cohen-Tannoudji (γ), για την ανάπτυξη της μεθόδου ψύξης και παγίδευσης ατόμων με τη βοήθεια φωτός λέιζερ.

Και ακολούθησε, τον Ιούνιο του 1995, η επαναστατική ανακάλυψη. Μια ομάδα φυσικών από το Πανεπιστήμιο του Κολοράντο, με επί κεφαλής τους Eric Cornell και Carl Weiman, έψυξε μια ομάδα ατόμων στα 200 δισεκατομμυριοστά του βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν, δημιουργώντας μια νέα κβαντική κατάσταση της ύλης. Περί τα 2.000 άτομα είχαν σχηματίσει ένα συμπύκνωμα Bose-Einstein και είχαν πάψει πλέον να συμπεριφέρονται ως ξεχωριστά κλασικά σωματίδια. Υπό μία έννοια, το συμπύκνωμα αυτό αποτελεί ένα ατομικό αντίστοιχο του σύμφωνου φωτός λέιζερ. Οι πλήρεις συνέπειες της ανακάλυψης αυτών των συμπυκνωμάτων διερευνώνται ακόμα.

Το 1997, οι Stephen Chu, Claude Cohen-Tannoudji και William Phillips τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής για το ρηζικέλευθο έργο τους στα υπέρψυχρα άτομα. Η δουλειά τους έχει πολλές δυνατές εφαρμογές πέραν των συμπυκνωμάτων Bose-Einstein. Το βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας που ανέπτυξαν έγκειται στην ικανότητά της να χειρίζεται την ύλη με τη βοήθεια του φωτός, καινοτομία η οποία έχει ήδη οδηγήσει στην κατασκευή ατομικών ρολογιών μεγαλύτερης ακρίβειας, ενώ ανοίγει το δρόμο για την κατασκευή διατάξεων συμβολής ατόμων και την ανάπτυξη «οπτικών λαβίδων», οι οποίες ελέγχουν και χειρίζονται αντικείμενα μεγαλύτερα από τα απλά άτομα όπως αλυσίδες DNA.

Υπεραγωγιμότητα

Αμέσως μετά την ανακάλυψη των πλεκτρονίων έγινε αντιληπτό ότι πολλά χαρακτηριστικά της ικανότητας των μετάλλων να άγουν τον ηλεκτρισμό μπορούσαν να εξηγηθούν με βάση την κίνηση των πλεκτρονίων τους. Η αντίσταση στη ροή του ρεύματος οφείλεται στη σκέδαση που υφίστανται τα πλεκτρόνια συγκρουόμενα με ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου και στην αλληλεπίδρασή τους με τις ταλαντώσεις των ατόμων του κρυστάλλου. Καθώς όμως η θερμοκρασία μειώνεται, τα άτομα θα δονούνται όλο και λιγότερο, οπότε κανείς θα περίμενε η αντίσταση του μετάλλου να τείνει να σταθεροποιηθεί. Κάτι τέτοιο πράγματι συμβαίνει σε πολλά μέταλλα. Έτσι, προκάλεσε βαθύτατη έκπληξη το γεγονός ότι υπάρχουν μέταλλα που η ηλεκτρική τους αντίσταση πέφτει στο μηδέν όταν αυτά ψύχονται κάτω από μια ορισμένη κρίσιμη θερμοκρασία. Η ηλεκτρική αντίσταση των κανονικών μετάλλων προκαλεί απώλεια ενέργειας και παραγωγή θερμότητας. Στα παρα-

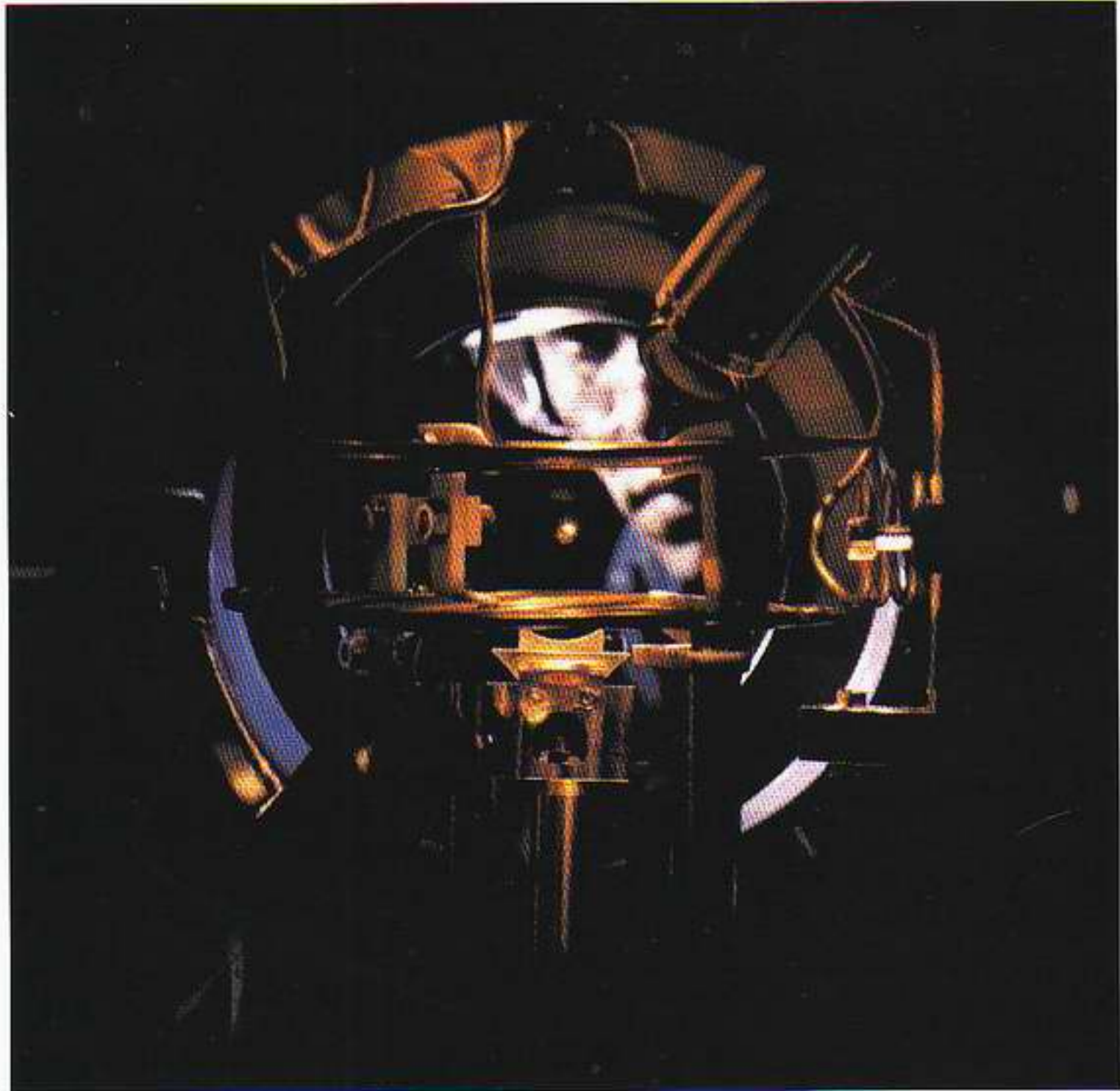


Ο Kamerlingh Onnes (1853-1925) στο κρυογονικό εργαστήριό του στο Λέιντεν της Ολλανδίας. Ο Onnes ήταν ο πρώτος που υγροποίησε το ήλιο, και για το επίτευγμά του αυτό τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ του 1913. Υπήρξε επίσης ο πρώτος που παρατήρησε το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας —το μηδενισμό της ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζουν ορισμένα μέταλλα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

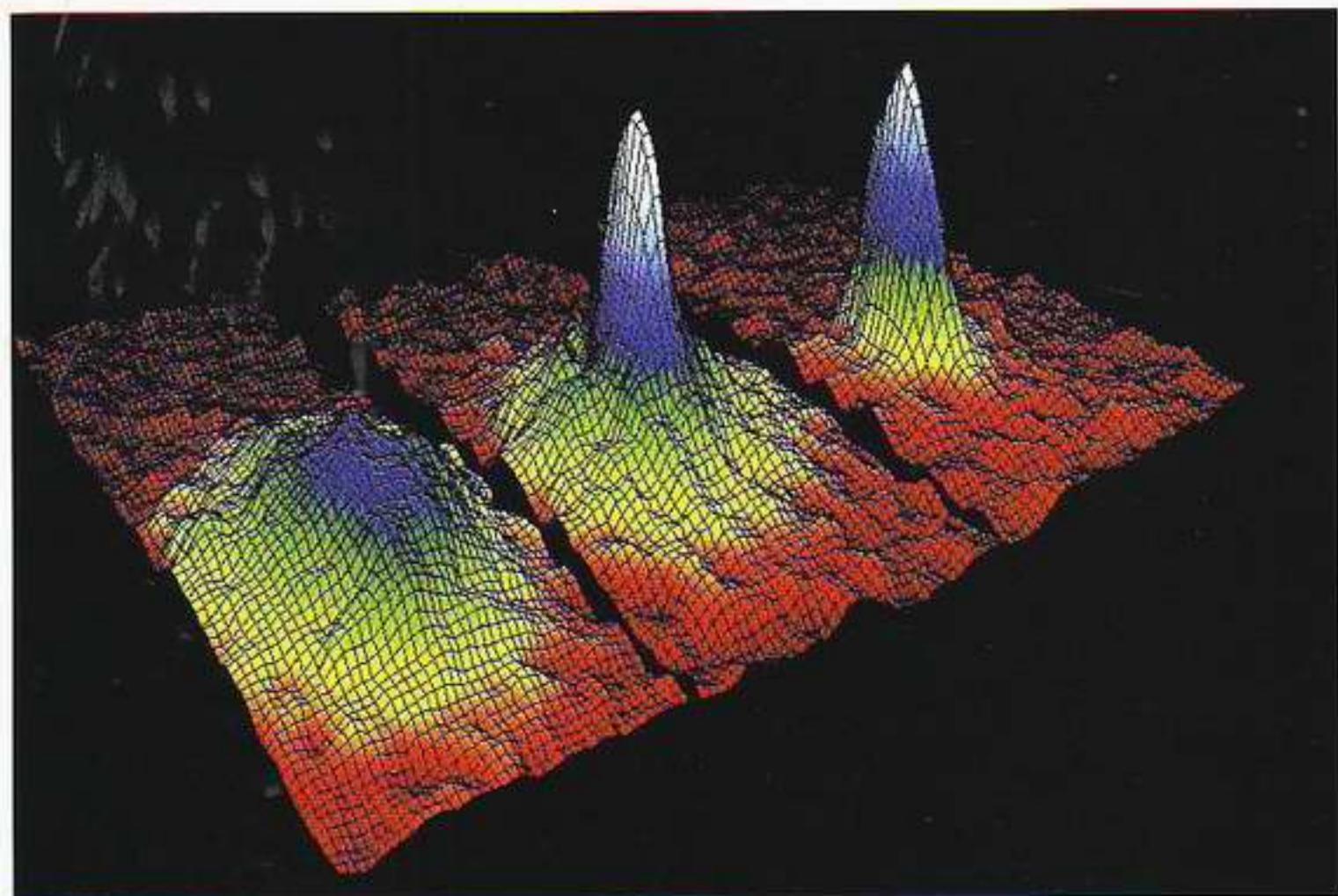
πάνω μέταλλα, όμως, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ηλεκτρικά ρεύματα διατηρούμενα επί χρόνια. Τα μέταλλα αυτού του είδους, λοιπόν, δικαίως χαρακτηρίζονται *υπεραγωγοί*.

Το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας ανακαλύφθηκε από τον Kamerlingh Onnes, τον «κύριο του απόλυτου μηδενός», στο εργαστήριό του στο Λέιντεν το 1911. Η Εικόνα 7.19 δείχνει μια γραφική παράσταση της αντίστασης του υδραργύρου συναρτήσει της θερμοκρασίας παρμένη από την πρωτότυπη εργασία. Το 1933 ανακαλύφθηκε μια άλλη μαγευτική ιδιότητα των υπεραγωγών. Αν υποβάλουμε τον υπεραγωγό στην επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, δημιουργούνται στο μέταλλο ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία «συνωμοτούν» για να εξουδετερώσουν ακριβώς το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται πάνω του. Η εξουδετέρωση είναι δυνατή μόνο και μόνο επειδή τα ηλεκτρικά ρεύματα δεν υφίστανται αντίσταση στο εσωτερικό του υπεραγωγού. Αυτό οδηγεί σε μερικά εξόχως εντυπωσιακά αποτελέσματα. Αν τοποθετήσουμε έναν μικρό μαγνήτη πάνω από κάποιο υπεραγωγίμο υλικό με σχήμα δίσκου, ο μαγνήτης θα αιωρείται εξαιτίας των ρευμάτων τα οποία δημιουργεί στον υπεραγωγίμο δίσκο. Μάλιστα, η «υπεραγωγίμη αιώρηση» έχει μελετηθεί σοβαρά ως μέθοδος εξασφάλισης πολύ ομαλής στήριξης για τρένα κινούμενα με πολύ μεγάλες ταχύτητες.

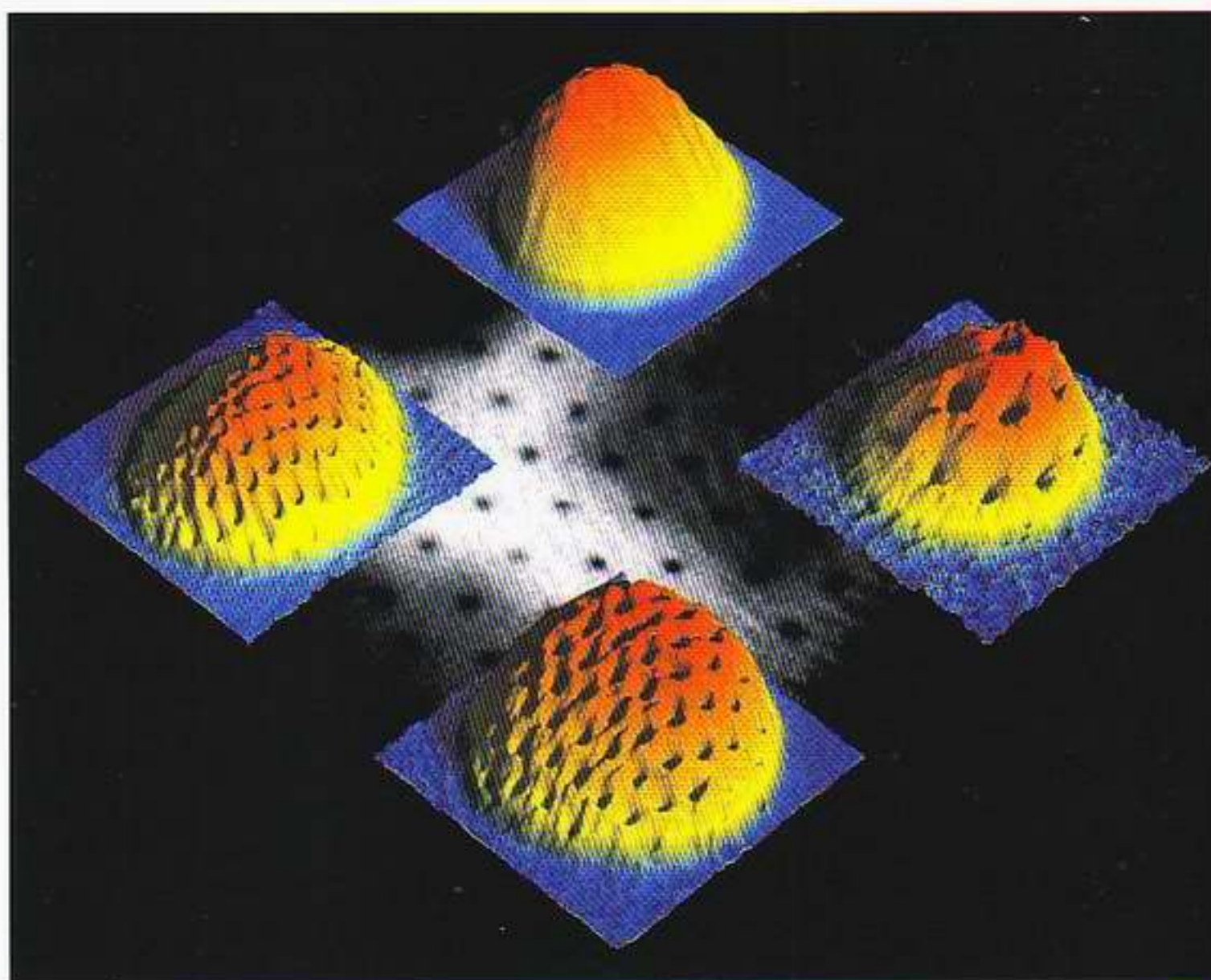
Πώς μπορούμε να κατανοήσουμε την υπεραγωγιμότητα; Από το 1935 ακόμα, στην Οξφόρδη, οι αδελφοί Heinz και Fritz London —οι οποίοι διεξήγαγαν μεγάλο μέρος της πειραματικής και θεωρητικής εργασίας πάνω στους υπεραγωγούς κατά την πρώιμη φάση του πεδίου— κατάλαβαν ότι η κβαντική μηχανική πρέπει να συνιστά το βασικό στοιχείο για την εξήγηση των φαινομένων αυτών. Μόνο το 1956, όμως, έκανε ο Leon Cooper την καίρια παρατήρηση. Συγκεκριμένα, ο Cooper έδειξε ότι, ενώ δύο ηλεκτρόνια κανονικά αποθούνται εξαιτίας του ηλεκτρικού τους φορτίου, στα μέταλλα υπάρχει και μια ελκτική δύναμη μεταξύ τους η οποία προκαλείται από την έλξη των θετικά φορτισμένων ιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος. Μιλώντας χοντρικά, ένα ηλεκτρόνιο ευρισκόμενο μεταξύ δύο θετικών ιόντων του πλέγματος φέρνει



Εικόνα 7.15 Άτομα νατρίου που φωτοβολούν εγκλωβισμένα σε μαγνητοοπτική παγίδα. Μέσα από τη διάταξη διακρίνεται το πρόσωπο του Kristian Helmersen από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων.



Εικόνα 7.16 Ψευδοχρωματικές απεικονίσεις που αναπαριστούν τις κατανομές ταχυτήτων ενός νέφους παγιδευμένων ατόμων ρουβιδίου. Η εικόνα στο αριστερό άκρο δείχνει το νέφος ακριβώς προτού λάβει χώρα η συμπύκνωση Bose-Einstein σε θερμοκρασία γύρω στα 400 δισεκατομμυριοστά του κέλβιν. Η κεντρική εικόνα δείχνει το ίδιο νέφος ακριβώς μετά τη συμπύκνωση, σε θερμοκρασία 200 δισεκατομμυριοστών του κέλβιν, ενώ η εικόνα στο δεξιό άκρο το δείχνει έπειτα από περαιτέρω ψύξη στα 50 δισεκατομμυριοστά του κέλβιν, οπότε τα περισσότερα από τα άτομα του νέφους συμμετέχουν στο συμπύκνωμα Bose-Einstein.



Εικόνα 7.17 Πλέγματα δινών σε ένα αναδευόμενο συμπύκνωμα ατόμων ρουβιδίου. Η περιστροφή γίνεται έτσι ώστε σε κάθε άτομο να αντιστοιχεί ένα μόνο «κβάντο περιστροφής». Κάθε εικόνα δείχνει περισσότερες δίνες από την προηγούμενή της, τις λιγότερες τις έχει η κορυφαία, ακολουθούμενη από τη δεξιά, ενώ οι υπόλοιπες δύο έχουν πιο ποθύλησες διαμορφώσεις που αντιστοιχούν σε ακόμη περισσότερες δίνες.

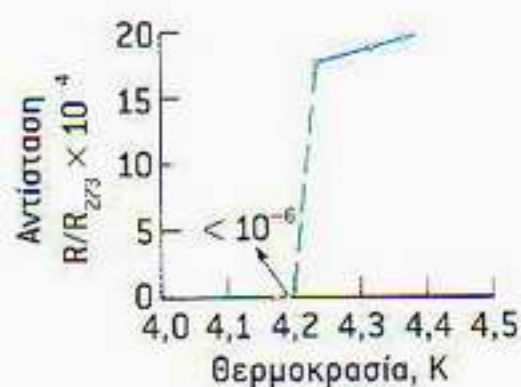
αυτά τα ιόντα λίγο πιο κοντά μεταξύ τους απ' ό,τι θα ήταν κανονικά· έτσι, ένα άλλο πλεκτρόνιο θα υφίσταται συνολικά από τα δύο ιόντα μια μικρή έλξη. Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα τα δύο αυτά πλεκτρόνια να «συζευχθούν» και να σχηματίσουν ένα ζεύγος Cooper. Τα ζεύγη Cooper είναι μάλλον παράξενα κατά το ότι αποτελούνται από πλεκτρόνια με αντίθετες ταχύτητες, και άρα ορμές, οι οποίες προστιθέμενες δίνουν μηδενική ολική ορμή για το ζεύγος. Επιπλέον, σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg, εφόσον η ορμή του ζεύγους προσδιορίζεται επακριβώς, τα πλεκτρόνια του ζεύγους πρέπει να είναι πολύ απλωμένα στο χώρο. Το κάθε ζεύγος καταλαμβάνει μια περιοχή κατά αρκετές χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από το μέγεθος του κάθε ατόμου, και ο ίδιος αυτός χώρος καταλαμβάνεται από εκατομμύρια άλλα αλληλεπικαλυπτόμενα ζεύγη.

Αν θυμηθούμε τη συζήτησή μας σχετικά με τη συμπύκνωση Bose του ^3He , δεν θα δυσκολευτούμε πολύ να μαντέψουμε το επόμενο βήμα του επιχειρήματος. Τα ζεύγη Cooper δρουν ως μποζόνια και συμπυκνώνονται, σχηματίζοντας έτσι την υπεραγώγιμη κατάσταση. Ωστόσο, ενώ πρόκειται για έναν ισχυρισμό που εύκολα μπορεί να τον προβάλει κανείς, αποδείχθηκε εξαιρετικά δύσκολο να διατυπωθεί μια θεωρία που να τον στηρίζει προβλέποντας και περιγράφοντας ποσοτικά αυτή τη συμπύκνωση. Το τελικό βήμα έγινε το 1956 από μια τριάδα φυσικών που σήμερα είναι παγκοσμίως γνωστοί ως «BCS» —από τους John Bardeen, Leon Cooper και John Schrieffer. Και οι τρεις εργάζονταν στο Πανεπιστήμιο του Ιλινόις και, λόγω ελλείψεως χώρου, ο Bardeen και ο Cooper μοιράζονταν το ίδιο γραφείο. Ο Schrieffer ήταν μεταπτυχιακός σπουδαστής του Bardeen και είχε γραφείο σε ένα διπλανό κτήριο, μαζί με άλλους σπουδαστές της θεωρητικής φυσικής. Προσπαθούσαν να επεκτείνουν την ιδέα του Cooper για το σχηματισμό ενός μεμονωμένου ζεύγους πλεκτρο-

Εικόνα 7.18 Αιώρηση με τη βοήθεια υπεραγωγού. Ένας μικρός μαγνήτης αιωρείται πάνω από έναν υπεραγωγό δίσκο. Υπερρεύματα που ρέουν μέσα στο δίσκο παράγουν δυνάμεις οι οποίες απωθούν το μαγνήτη και εξισορροπούν τη δύναμη της βαρύτητας.



Οι τρεις δημιουργοί της θεωρίας BCS για την υπεραγωγιμότητα — ο John Bardeen (κέντρο), ο Leon Cooper (αριστερά) και ο John Schrieffer (δεξιά). Με την απονομή του βραβείου Νόμπελ του 1972 στους τρεις εικονιζόμενους φυσικούς για το έργο τους, ο Bardeen έγινε ο μοναδικός φυσικός που έχει τιμηθεί με δύο βραβεία Νόμπελ στην ίδια επιστήμη [είχε βραβευτεί και το 1956 μαζί με τους Brattain και Shockley για την ανακάλυψη του τρανζίστορ]. Ο Bardeen υπήρξε μαθητής ενός αλλήλου διάσημου θεωρητικού φυσικού, του Eugene Wigner, που κι αυτός είχε κερδίσει το βραβείο Νόμπελ [1963]. Υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα ζευγών δασκάλου-μαθητή στην ιστορία του βραβείου Νόμπελ.

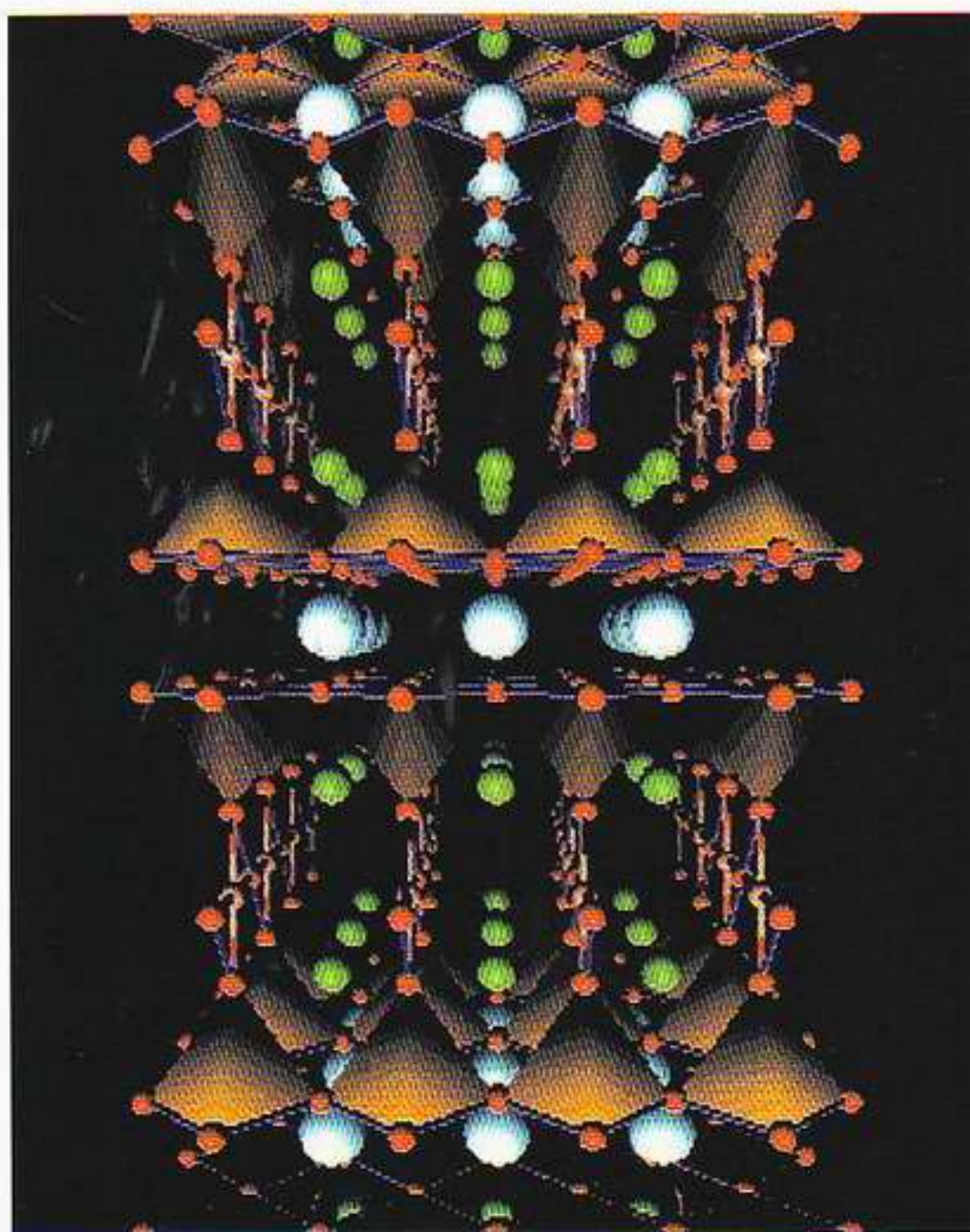


Εικόνα 7.19 Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας από τον Kamerlingh Onnes το 1911. Μια συνταρακτική γραφική παράσταση που δείχνει πώς ξαφνικά μηδενίζεται η ηλεκτρική αντίσταση του υδραργύρου καθώς η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 4,2 κέλβιν.

νίων σε όλα τα ηλεκτρόνια του υπεραγωγίου υλικού. Αργότερα, ο Schrieffer περιέγραψε αυτό που προσπαθούσαν να κάνουν ως αναζήτηση «μιας κβαντικής κυματοσυνάρτησης η οποία θα χορογραφούσε το χορό για περισσότερα από 1 εξάκις εκατομμύριο ζεύγη». Το πρόβλημα φαινόταν τόσο δύσκολο ώστε ο Schrieffer σκεφτόταν να αλλάξει το θέμα της διδακτορικής διατριβής του με ένα άλλο στο μαγνητισμό. Την κρίσιμη αυτή στιγμή, ο Bardeen έπρεπε να πάει στη Στοκχόλμη για να παραλάβει το μερίδιό του από το βραβείο Νόμπελ για την ανακάλυψη του τρανζίστορ, και προτού φύγει προέτρεψε τον Schrieffer να ασχοληθεί με το πρόβλημα επί έναν ακόμα μήνα. Μέσα σε εκείνο το μήνα,

ο Schrieffer βρήκε μια εύχρηστη μορφή για την κυματοσυνάρτηση του συμπυκνώματος Bose των ζευγών Cooper. Κατά τον επόμενο μήνα, οι B, C και S κατάφεραν να δείξουν ότι η θεωρία τους εξηγούσε όλα τα πειραματικά δεδομένα. Παραδόξως, διαπιστώνουμε ότι μέταλλα που είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού σε κανονικές θερμοκρασίες παρουσιάζουν πολύ μικρή αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων και ιόντων, και επομένως δεν θα είναι υπεραγωγοί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μάλλον οι κακοί αγωγοί στις κανονικές θερμοκρασίες καταλήγουν να γίνουν υπεραγωγοί.

Την άνοιξη του 1986, ο Johannes Georg Bednorz και ο Karl Alexander Müller έκαναν μια εκπληκτική ανακάλυψη. Ένα κεραμικό υλικό —ένα οξειδιο λανθανίου-βαρίου-χαλκού— έγινε υπεραγωγίμο στους 35 βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν. Πρόκειται για αποτέλεσμα που πιθανόν να μη φαίνεται τόσο σημαντικό, αλλά η θερμοκρασία στην οποία σημειώθηκε η μετάβαση στην υπεραγωγίμη κατάσταση είναι κατά 10 βαθμούς υψηλότερη από εκείνη των κλασικών υπεραγωγίμων υλικών που κατασκευάζονται από μέταλλα ή κράματα. Μετά την αρχική ανακάλυψη, μάλιστα, δεν άργησαν να ανακαλυφθούν και άλλοι υπεραγωγοί από μεταλλικά οξειδία με βάση το χαλκό με θερμοκρασίες υπεραγωγίμης μετάβασης που φτάνουν μέχρι και τους 135 βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν. Αυτοί οι, όπως λέγονται, υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών προσφέρουν την προοπτική μιας αρκετά διαφορετικής οικονομίας και πολλών νέων εφαρμογών. Συγκρινόμενη με την ψύξη μιας ουσίας με υγρό ήλιο, η ψύξη με υγρό άζωτο μπορεί να παραβληθεί με τη χρησιμοποίηση νερού αντί σαμπάνιας!



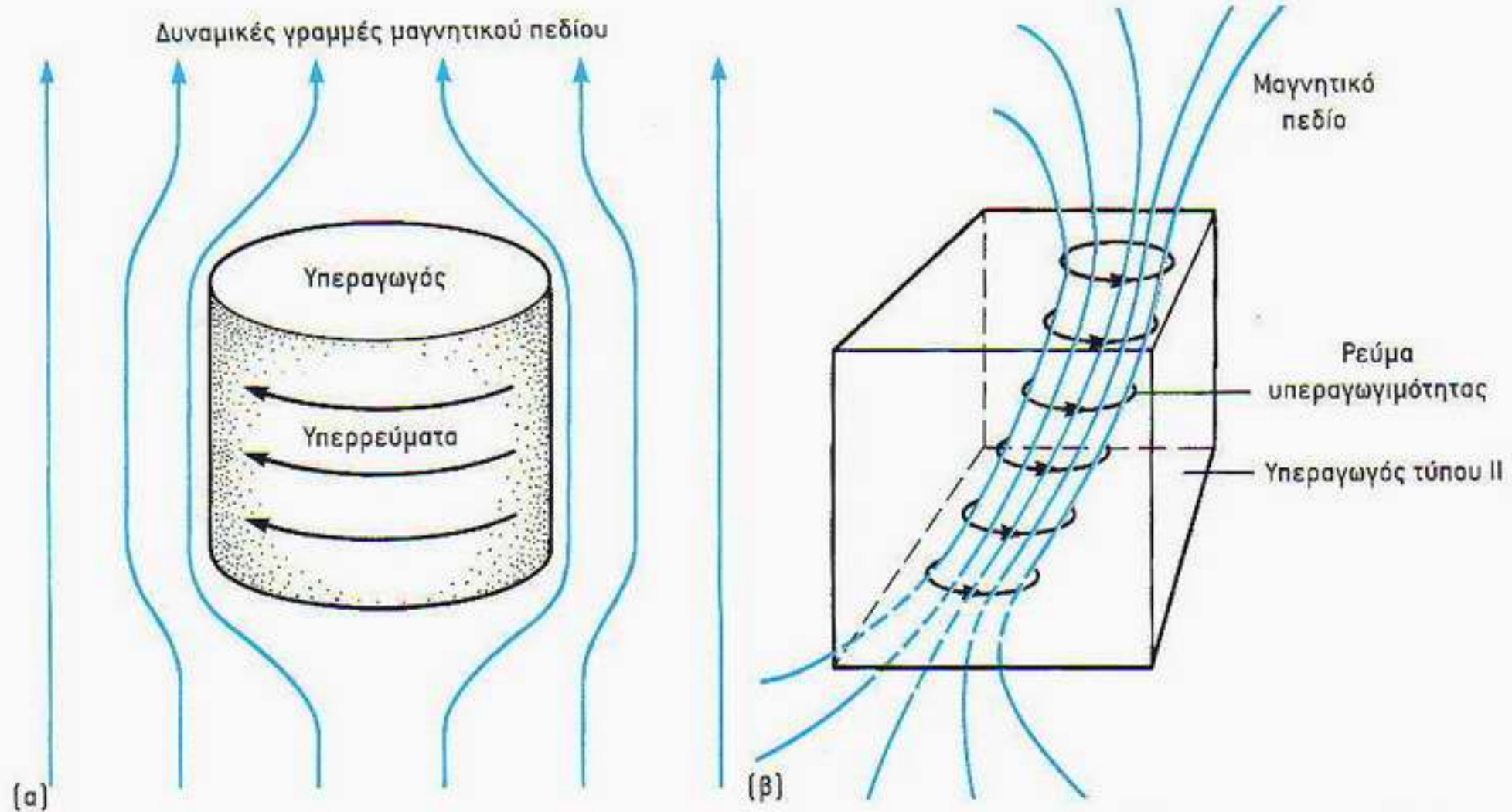
[α]



[β]

Ο J.G. Bednorz (α) και ο K.A. Müller (β), δύο φυσικοί που εργάζονταν στο Ερευνητικό Εργαστήριο της IBM στο Ρόσλινγκον, κοντά στη Ζυρίχη, τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 1987 για την ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας σε κεραμικό υλικά. Η από μέρους τους ανακάλυψη μιας νέας κατηγορίας υλικών που γίνονται υπεραγωγίμα σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες απ' ό,τι οι συμβατικοί υπεραγωγοί BCS ήλθε έπειτα από χρόνια ανεπιτυχών πειραματισμών με διάφορα υλικά.

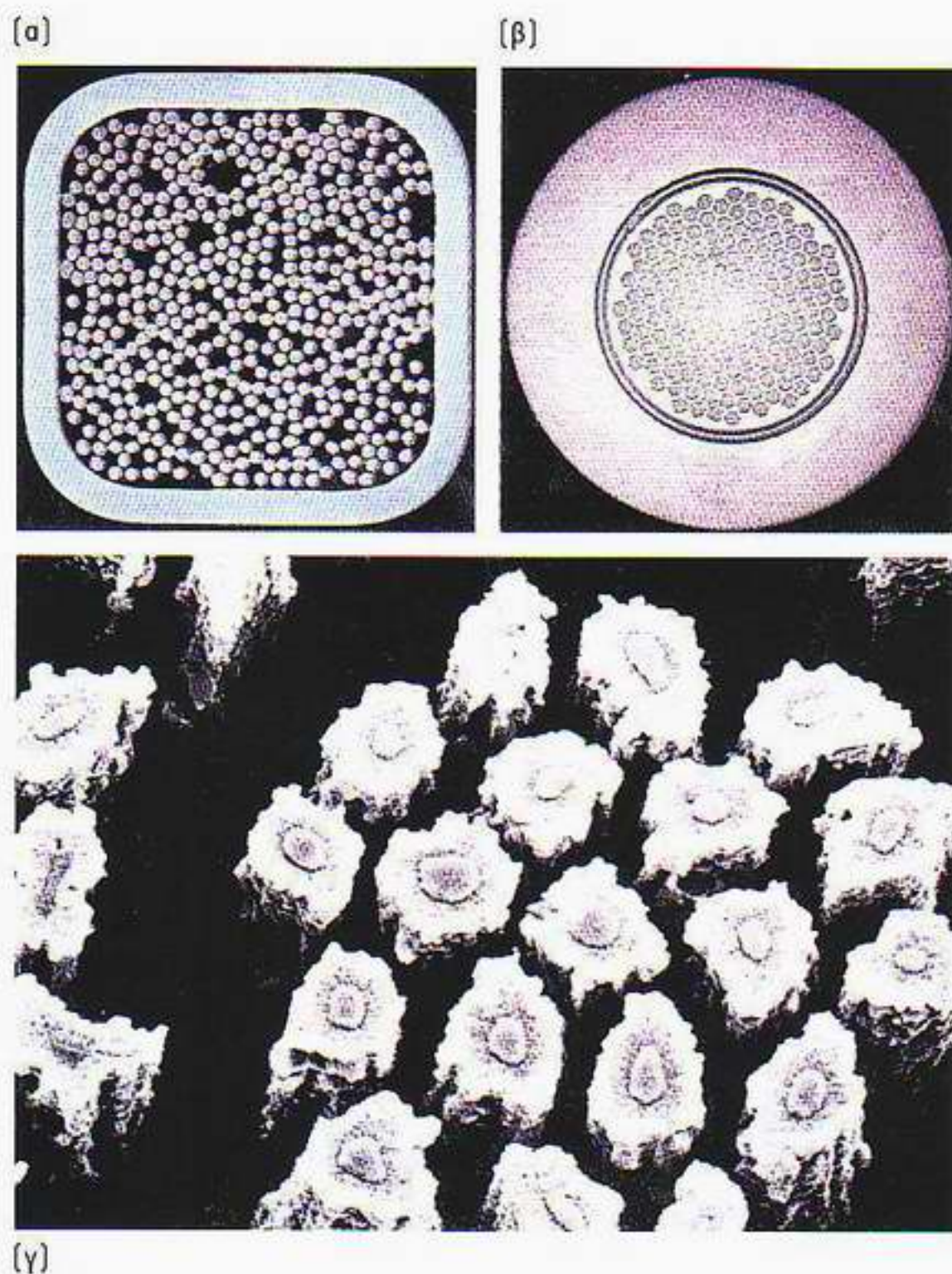
Εικόνα 7.20 Εικόνα της πολυπλοκής δομής ενός υπεραγωγού υψηλής θερμοκρασίας κατασκευασμένη από υπολογιστή.



Εικόνα 7.21 Τα μαγνητικά πεδία αποκλείονται από τους υπεραγωγούς. (α) Στους υπεραγωγούς τύπου I, όπως είναι ο μόλυβδος ή ο κασσίτερος, τα μαγνητικά πεδία αποβάλλονται εντελώς από το μέταλλο από τα κυκλοφορούντα υπερρεύματα που επάγει το πεδίο. (β) Αντίθετα, στους υπεραγωγούς τύπου II, τα μαγνητικά πεδία μπορούν και διαπερνούν το μέταλλο υπό μορφή μικροσκοπικών «κυλινδρίσκων».

Οι υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών ανακαλύφθηκαν μέσω του πειραματισμού με υλικά που χαρακτηρίζονταν από ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρονίων και ιόντων. Μολονότι το χαρακτηριστικό αυτό φαίνεται να συνηγείται υπέρ μιας εξήγησης με όρους ζευγών Cooper, πρόσφατα πειράματα έδειξαν ότι ο μηχανισμός λειτουργίας των υπεραγωγών υψηλών θερμοκρασιών είναι θεμελιακά διαφορετικός από την κλασική θεωρία BCS. Η αγωγιμότητα εμφανίζεται κατά μήκος φύλλων από ατομικά επίπεδα οξειδίου του χαλκού που περιβάλλονται από μονωτικά στρώματα σε μια διάταξη τύπου σάντουιτς. Στις περισσότερες ενώσεις με οξείδια του χαλκού, οι φορείς φορτίου είναι σπές (βλ. Κεφάλαιο 6), και δύσκολα μπορεί να εξηγηθεί πώς σχηματίζονται ζεύγη Cooper από οποιαδήποτε συμβατική αλληλεπίδραση οπών. Προς το παρόν, ο ακριβής μηχανισμός παραμένει αδιευκρίνιστος.

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας. Σήμερα χρησιμοποιούμε υπεραγωγίμους ηλεκτρομαγνήτες ώστε να παράγουμε ισχυρά μαγνητικά πεδία χωρίς τις γνωστές απώλειες ισχύος των ηλεκτρομαγνητών, στους οποίους οι περιελίξεις των πηνίων είναι κατασκευασμένες από κοινούς αγωγούς. Καθώς όμως προσπαθούμε να επιτύχουμε πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία, ανακύπτει ένα πρόβλημα. Στις περιελίξεις του ίδιου του μαγνήτη τείνει να αναπτύσσεται εξ επαγωγής μαγνητικό πεδίο, και ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο μπορεί να καταστρέψει την υπεραγωγιμότητα του πηνίου. Τούτο το πρόβλημα μπορεί να αμβλυθεί αν χρησιμοποιήσουμε τους λεγόμενους υπεραγωγούς «τύπου II» (Εικόνα 7.21). Πρόκειται για υπεραγωγούς όπου τα μαγνητικά πεδία δεν αποκλείονται τελείως από το μέταλλο, αλλά μπορούν να εισδύουν στον υπεραγωγό με τη μορφή «κυλινδρίσκων» ροής. Μπορούμε να παράγουμε πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνή-

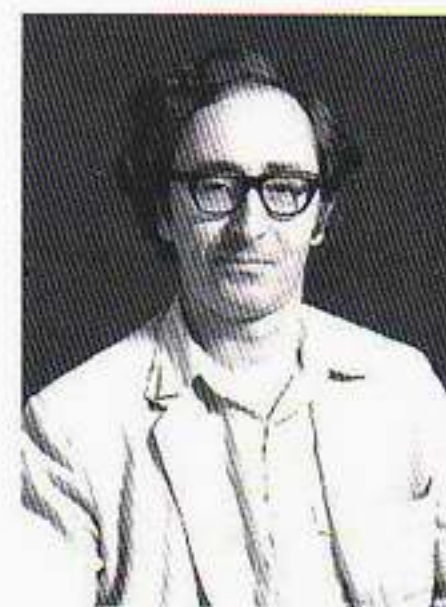


Εικόνα 7.22 Φωτογραφίες υπεραγωγίων καλωδίων τα οποία σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν πολύ ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα. (α) Χαλύβδινος σωλήνας που περιέχει εκατοντάδες υπεραγωγίμα σύρματα. Μέσα στο σωλήνα διοχετεύεται υγρό ήλιο για να διατηρούνται οι χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται ώστε τα σύρματα να συμπεριφέρονται ως υπεραγωγοί. (β) Μεγεθυσμένη φωτογραφία ενός μόνο σύρματος, η οποία δείχνει πώς χιλιάδες υπεραγωγίμα νήματα τακτοποιούνται σε εξαγωνικές ομάδες που είναι όλες κλεισμένες σε ένα χάλκινο περιβήκημα. (γ) Φωτογραφία μίας μόνο ομάδας από τέτοια νήματα τραβηγμένη με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

τες με τέτοια υπεραγωγίμα σύρματα. Η ιδιότητα των υπεραγωγών να εξουδετερώνουν μαγνητικά πεδία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή βελτιωμένων ηλεκτρονικών μικροσκοπιών.

Οι γνωστότερες ίσως εφαρμογές των υπεραγωγών είναι η «επαφή Josephson» και μια συσκευή που ονομάζεται SQUID —ακρωνύμιο των λέξεων «superconducting quantum interference device», οι οποίες σημαίνουν υπεραγωγίμη διάταξη κβαντικής συμβολής. Και οι δύο στηρίζονται σε μια ανακάλυψη που πραγματοποίησε το 1962 ένας βρετανός μεταπτυχιακός φοιτητής, ο Brian Josephson. Ο Philip Anderson, νομπελίστας και αυτός, θυμάται τη σειρά διαλέξεων στη φυσική στερεάς κατάστασης που έδωσε στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ το 1962, και στις οποίες είχε τον Josephson στο ακροατήριο:

Κάθε ομιλητής θα ένιωθε ανησυχία, σας διαβεβαιώνω, διότι το καθετί έπρεπε να είναι σωστό, ειδικά θά εμφανιζόταν μετά το μάθημα ο Josephson και θα μου επεσήμαινε το λάθος.



Ο Brian Josephson ήταν μόλις είκοσι ετών όταν έκανε την ανακάλυψη για την οποία επρόκειτο να κερδίσει ένα μέρος του βραβείου Νόμπελ φυσικής του 1973. Ως φοιτητής, ο Josephson παρακολουθούσε μια σειρά διαλέξεων που έδινε στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ ένας άλλος μεγάλος φυσικός και νομπελίστας, ο Philip Anderson. Κάποια μέρα, αφού είχε τελειώσει το μάθημα, ο Josephson έδειξε στον Anderson τους υπολογισμούς του για το φαινόμενο σήραγγας που παρουσιάζουν τα υπεραγωγά ζεύγη ηλεκτρονίων Cooper. Η ιδέα του Josephson άνοιξαν το δρόμο για τη συμβολομετρία μέσω υπεραγωγών, η οποία έχει πλήθος εφαρμογές στη φυσική και την τεχνολογία.



Ο Klaus von Klitzing τιμήθηκε με τα βραβεία Νόμπελ φυσικής του 1985 για την ανακάλυψη του κβαντικού φαινομένου Hall.

Ο Josephson μελετούσε την κβαντική θεωρία για μια διάταξη «σάντουιτς» υπεραγωγού-μονωτή-υπεραγωγού, στην οποία το γέμισμα, ο μονωτής, δεν ήταν παρά ένα πολύ λεπτό φιλμ. Ο βρετανός φυσικός έδειξε, λοιπόν, ότι τα ζεύγη Cooper μπορούσαν να διέρχονται μέσα από την επαφή και να προκαλούν μερικά λίαν ενδιαφέροντα φαινόμενα. Μια από τις προβλέψεις του ήταν ότι θα υπήρχε ρεύμα ακόμα και αν δεν εφαρμοζόταν τάση στην επαφή! Βρήκε επίσης τι θα συνέβαινε αν τοποθετούσαμε την επαφή σε μαγνητικό πεδίο ή σε μια εναλλασσόμενη τάση πολύ μεγάλης συχνότητας σε συνδυασμό με μια σταθερή τάση. Αυτή η τελευταία διάταξη επιτρέπει την ακριβέστερη δυνατή μέτρηση του λόγου των θεμελιωδών σταθερών h/e (της σταθεράς του Planck διαιρεμένης διά του φορτίου του ηλεκτρονίου). Το φαινόμενο Josephson έχει ακόμη χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση απίστευτα μικρών διαφορών δυναμικού, καθώς και ως ευαίσθητος ανιχνευτής ακτινοβολίας. Συνδέοντας μία η περισσότερες επαφές Josephson σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, είναι δυνατόν να φτιάξουμε μια διάταξη ικανή να μετρά μαγνητικά πεδία με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια. Πρόκειται για τα προαναφερθέντα SQUID, τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στους πιο διαφορετικούς τομείς, από την ιατρική ως τη γεωλογία. Όλες τούτες οι εφαρμογές είναι δυνατές επειδή η συμπύκνωση Bose των ζευγών Cooper στους υπεραγωγούς μάς επιτρέπει να παρατηρούμε κβαντικά φαινόμενα που εκδηλώνονται σε μεγάλη κλίμακα και δεν περιορίζονται σε χώρους ατομικών διαστάσεων.

Το κβαντικό φαινόμενο Hall

Με την υπεραγωγιμότητα συνδέονται περισσότερα βραβεία Νόμπελ απ' ό,τι με οποιοδήποτε άλλο πεδίο φυσικής. Κλείνουμε το παρόν κεφάλαιο με μία ακόμα ανακάλυψη —το κβαντικό φαινόμενο Hall—, η οποία πιθανώς έχει στενή σχέση με την υπεραγωγιμότητα. Το κλασικό φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε τον 19ο αιώνα από τον αμερικανό φυσικό Edwin Hall, ο οποίος έδειξε ότι, όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο στον κρύσταλλο ενός υλικού που διαρρέεται από ρεύμα, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας εκτρέπονται προς τα πλάγια και στον κρύσταλλο αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού κάθετα προς τη διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Καθώς το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται, αυξάνεται και η τάση Hall.

Το 1980, ο Klaus von Klitzing και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν ένα πείραμα στο οποίο παγίδευσαν ηλεκτρόνια μεταξύ δύο κρυσταλλικών ημιαγωγών, περιορίζοντας έτσι την κίνηση των ηλεκτρονίων σε ένα και μοναδικό επίπεδο. Η κατάσταση αυτή θυμίζει τους υπεραγωγούς υψηλών θερμοκρασιών. Όταν το σύστημα ψύχθηκε σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη του 1 ή 2 βαθμών πάνω από το απόλυτο μηδέν, ο von Klitzing και οι συνεργάτες του διαπίστωσαν ότι η τάση Hall μεταβαλλόταν ασυνεχώς και σε διακριτά βήματα καθώς το μαγνητικό πεδίο αυξανόταν ομαλά. Επιπλέον, σε αυτά τα διακριτά βήματα της τάσης Hall, το υλικό μετατρέπεται σε σχεδόν τέλειο αγωγό. Για να ακριβολογούμε, από τεχνικής πλευράς δεν τρέπεται σε υπεραγωγό, διότι το μαγνητικό πεδίο δεν αποβάλλεται από το εσωτερικό του, όμως υπάρχουν ομοιότητες που ίσως φανερώνουν κάποια σύνδεση με την υπεραγωγιμότητα. Μεγαλύτερης πιθανώς σημασίας ενδέχεται να αποδειχθεί η ανακάλυψη ότι η αντίσταση Hall —ο λόγος της τάσης Hall προς την ένταση του ρεύματος— εί-

ναι κβαντωμένη. Η μονάδα κβάντωσης είναι ανάλογη της σταθεράς του Planck διαιρεμένης με το τετράγωνο του φορτίου του ηλεκτρονίου και αποτελεί μια μονάδα αντίστασης η οποία συνδέεται με μια θεμελιώδη ποσότητα της ατομικής φυσικής —τη λεγόμενη *σταθερά λεπτής υφής*.

Η ανακάλυψη αυτού του φαινομένου στην Εθνική Υπηρεσία Έρευνας του Μαγνητικού Πεδίου στην Γκρενόμπλ της Γαλλίας οδήγησε στην απονομή του βραβείου Νόμπελ φυσικής στον Klaus Klitzing το 1985. Η κβαντωμένη αντίσταση Hall έχει πλέον υιοθετηθεί ως το καθιερωμένο πρότυπο για τη βαθμονόμηση διατάξεων μέτρησης αντίστασης. Από τότε που ήρθε στο φως, το κβαντικό φαινόμενο Hall υπήρξε ένα συναρπαστικό ερευνητικό πεδίο όπου ανακαλύφθηκαν ποικίλα νέα φαινόμενα, έστω κι αν δεν διαθέτουμε προς το παρόν πλήρη εξήγηση όλων των πτυχών τους.

8 Κβαντικά άδηλα

Είχαμε πάντοτε μεγάλες δυσκολίες να κατανοήσουμε την κοσμοαντίληψη που αντιπροσωπεύει η κβαντική μηχανική. Τουλάχιστον έτσι έχουν τα πράγματα για μένα, διότι, αν και βρίσκομαι ήδη σε αρκετά προχωρημένη ηλικία, δεν αξιώθηκα να φτάσω στο σημείο όλα τούτα να μου είναι προφανή [...]. Δεν μου έχει γίνει ακόμη προφανές ότι δεν υφίσταται πραγματικό πρόβλημα. Αδυνατώ να προσδιορίσω το πραγματικό πρόβλημα, οπότε υποπτεύομαι ότι δεν υφίσταται πραγματικό πρόβλημα, όμως δεν είμαι βέβαιος ότι δεν υφίσταται πραγματικό πρόβλημα.

Richard Feynman

Ο Max Born και οι κβαντικές πιθανότητες

Στο παρόν κεφάλαιο θα κάνουμε ένα σύντομο διάλειμμα στην επισκόπηση των επιτυχών εφαρμογών της κβαντικής μηχανικής, για να εξετάσουμε προσεκτικότερα τα θεμέλια αυτού του μεγάλου οικοδομήματος της σύγχρονης φυσικής. Κατά μία έννοια, αναλαμβάνοντας τούτο το εγχείρημα, αγνοούμε την προειδοποίηση του Feynman όσον αφορά τα αποτελέσματα του πειράματος της διπλής σχισμής που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 1. Θα τολμήσουμε τώρα να θέσουμε το απαγορευμένο ερώτημα του Feynman: «Μα πώς μπορεί να γίνεται έτσι;» Ουδείς αμφισβητεί ότι η κβαντική μηχανική έχει σταθεί αξιοθαύμαστα επιτυχής, επιτρέποντάς μας να εκτελούμε σωστούς ποσοτικούς υπολογισμούς για τα ατομικά και τα πυρηνικά φαινόμενα. Εντούτοις, σε ό,τι αφορά τις συνέπειες της κβαντικής μηχανικής για τη φύση της ύλης και, εν τέλει, της ίδιας της πραγματικότητας, οι γνώμες διίστανται σε σημαντικό βαθμό. Έτσι, για να αποφύγουμε να παγιδευτούμε σε ένα καθαρώς φιλοσοφικό τέλμα, θα εστιάσουμε την προσοχή μας σε δύο περίφημα παράδοξα. Το πρώτο από αυτά είναι το *παράδοξο Einstein-Podolsky-Rosen*, το οποίο φέρει το όνομα εκείνων που το πρωτοσυνέλαβαν —του Άλμπερτ Αϊνστάιν, του Boris Podolsky και του Nathan Rosen, μιας τριάδας που συχνά δηλώνεται συντομογραφικά με τα αρχικά EPR. Το δεύτερο παράδοξο είναι γνωστό ως *παράδοξο της γάτας του Schrödinger*. Και τα δύο αυτά παραδείγματα αφήνουν να καταφανεί η αμηχανία την οποία ένιωθαν ο Αϊνστάιν και ο Schrödinger —δύο από τους ιδρυτές της κβαντικής μηχανικής— όταν στοχάζονταν τα θεμέλια της θεωρίας.

Το γεγονός ότι η κβαντική μηχανική είναι εγγενώς πιθανοκρατική α-

νέκαθεν δυσαρεστούσε τον Αϊνστάιν, και το νοπτικό πείραμα EPR αποσκοπούσε στο να καταδείξει ότι η κβαντική μηχανική αποκλείεται να αντιπροσωπεύει τη λεπτομερέστερη δυνατή γνώση μας για την πραγματικότητα. Σχεδόν τριάντα χρόνια αργότερα, ο ιρλανδός φυσικός John Bell έδειξε πώς μπορούν να υποβληθούν στη βάσανο του πειραματικού ελέγχου οι περί πραγματικότητας ιδέες του Αϊνστάιν, και έτσι το «νοπτικό» πείραμα των EPR μετετράπη σε «πραγματικό» πείραμα. Δυστυχώς για τον Αϊνστάιν, τα αποτελέσματα που έδωσαν διάφορες εκδοχές του πειράματος EPR οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οποιαδήποτε προσπάθεια να εξαλειφθούν οι μη ντετερμινιστικές, πιθανοκρατικές όψεις της κβαντικής μηχανικής θα απαιτούσε να τροποποιηθεί η κβαντική θεωρία κατά τρόπους που ασφαλώς δεν θα χαροποιούσαν τον Αϊνστάιν!

Το δεύτερο παράδοξο αφορά την περίεργη περίπτωση της γάτας του Schrödinger. Μολονότι το παράδειγμα των EPR άσκησε διεγερτική επίδραση στον Schrödinger, το νοπτικό πείραμα του τελευταίου στην πραγματικότητα υπογράμμισε ένα διαφορετικό πρόβλημα: τα κβαντικά άλματα. Σήμερα, η φράση «κβαντικό άλμα» χρησιμοποιείται ευρέως στον καθημερινό λόγο. Ας δούμε τι ακριβώς σημαίνει στο αρχικό πλαίσιο συμφραζομένων της, εκείνο της κβαντικής μηχανικής. Επιστρέφουμε στο πείραμα των δύο σχισμών και κανονίζουμε έτσι τα πράγματα ώστε από τη διάταξη να διέρχεται μόνο ένα ηλεκτρόνιο τη φορά. Προτού καταγράψουμε την άφιξη αυτού του ηλεκτρονίου, η θέση του είναι απροσδιόριστη και, σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, όλη η διαθέσιμη γνώση μας εξαντλείται σε ένα κύμα πιθανοτήτων το οποίο απλώνεται σε όλους τους ανιχνευτές. Μόλις όμως παρατηρήσουμε μια λάμψη σε έναν συγκεκριμένο ανιχνευτή, ξαφνικά μαθαίνουμε τη θέση του ηλεκτρονίου. Αντί μιας εκτεινόμενης εν χώρω κυματοσυνάρτησης, το πλάτος πιθανότητας έχει κατά τα φαινόμενα «καταρρεύσει» με ταυτόχρονη αναγωγή όλων των δυνητικών θέσεων του ηλεκτρονίου σε μία και μοναδική. Αυτό είναι το περίφημο κβαντικό άλμα. Μολονότι η κυματική εξίσωση του Schrödinger περιγράφει με κάθε ακρίβεια πώς απλώνεται το κβαντικό κύμα πιθανότητας του ηλεκτρονίου, δεν προβλέπει διόλου το κβαντικό άλμα του ηλεκτρονίου σε μια ορισμένη θέση ή κβαντική κατάσταση. Εδώ βρίσκεται ο πυρήνας του λεγόμενου *προβλήματος της κβαντικής μέτρησης*. Παρά την εξόφθαλμη σπουδαιότητα του συγκεκριμένου προβλήματος για την πλήρη κατανόηση της κβαντικής θεωρίας, ανάμεσα στους φυσικούς δεν έχει διαμορφωθεί γενική ομοφωνία όσον αφορά το μηχανισμό μέσω του οποίου προκαλεί η μέτρηση το άλμα που φέρνει το ηλεκτρόνιο σε μια δεδομένη κατάσταση. Μέχρι πρόσφατα, οι περισσότεροι ενεργοί φυσικοί προτιμούσαν να εθελουφλούν μπροστά σε τέτοια προβλήματα. Αισθάνονταν προφανώς ευτυχείς πιστεύοντας πως η κβαντική μηχανική ήταν αρκούντως καλά ορισμένη «για όλους τους πρακτικούς σκοπούς», όπως συνήθιζε να λέει ο John Bell. Όπως θα δούμε, όμως, κάποιες νέες εξελίξεις στην κβαντική υπολογιστική αναγκάζουν τους φυσικούς να εγκύψουν και πάλι στα εν λόγω ζητήματα.

Προτού εξετάσουμε αυτά τα παράδοξα λεπτομερώς, θα έπρεπε να αποτίσουμε τον οφειλόμενο φόρο τιμής στον φυσικό που πρώτος αντιλήφθηκε ότι το κύμα του Schrödinger πρέπει να ερμηνεύεται ως κύμα πιθανότητας. Ας επιστρέψουμε ακόμη μία φορά στο πείραμα της διέλευσης ηλεκτρονίων μέσω της διπλής σχισμής. Όπως είδαμε, η μαθηματική μορφή της εικόνας συμβολής για ηλεκτρόνια δίνεται από το τετράγωνο του αθροίσματος των δύο πλατών που αντιστοιχούν σε δύο ηλεκτρονιακά κύματα, εκ των οποίων το ένα



Ο Max Born (1882-1970) στη βιβλιοθήκη της κατοικίας του στο Μπαντ Πίρμοντ της Γερμανίας μόλις προτού του απονεμηθεί το βραβείο Νόμπελ, σε ηλικία 72 ετών. Υπήρξε επί κεφαλής μιας από τις κορυφαίες ομάδες θεωρητικής φυσικής στο Γκέτινγκεν ως το 1933, οπότε και αναγκάστηκε να εγκαταλείψει τη Γερμανία. Έλαβε τη βρετανική υπηκοότητα και κατείχε την Έδρα Θεωρητικής Φυσικής Tait στο Εδιμβούργο από το 1936 έως το 1953.

διέρχεται μόνο μέσω της σχισμής 1 και το άλλο μόνο μέσω της σχισμής 2. Εφόσον η εικόνα των κροσσών συμβολής συνδέεται άμεσα με το πλήθος των ηλεκτρονίων που έφτασαν σε κάθε δεδομένη θέση, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το ίδιο το κύμα πρέπει να παριστά κάποιο «κβαντικό πλάτος πιθανότητας». Την ιδέα ότι τα κύματα του Schrödinger αντιπροσωπεύουν κύματα πιθανότητας την οφείλουμε στον γερμανό φυσικό Max Born. Παρά το γεγονός ότι ο Born υπήρξε ο συγγραφέας μερικών από τις πρωιμότερες εργασίες στο πεδίο της κβαντικής μηχανικής, ο ρόλος που διαδραμάτισε στην ερμηνεία αυτών των κβαντικών κυμάτων παραδόξως αγνοήθηκε στα πρώιμα συγγράμματα κβαντικής μηχανικής. Την ίδια παράβλεψη μπορούμε να καταλογίσουμε και στην Επιτροπή του Βραβείου Νόμπελ. Οι περισσότεροι από τους πνευματικούς πατέρες της κβαντικής μηχανικής πήραν τα βραβεία τους και οι συμβολές τους αναγνωρίστηκαν πανηγυρικά. Αντίθετα, ο Born χρειάστηκε να περιμένει επί μία σχεδόν τριακονταετία ώσπου να του απονεμηθεί το βραβείο Νόμπελ για την πιθανοκρατική ερμηνεία που έδωσε στην κβαντομηχανική κυματοσυνάρτηση.

Οι πρώτες εργασίες του Heisenberg πάνω στην κβαντική μηχανική απαιτούσαν από τους φυσικούς να κατανοούν τα κβαντικά φαινόμενα με όρους κάποιων μαθηματικών αντικειμένων που ονομάζονταν *μήτρες* (ή *πίνακες*). Οι μήτρες είναι ορθογώνιες διατάξεις αριθμών με την περίεργη ιδιότητα ότι το γινόμενο της μήτρας A επί τη μήτρα B δεν ισούται κατ' ανάγκην με το γινόμενο της μήτρας B επί τη μήτρα A. Εκείνη την εποχή, οι μέθοδοι του λογισμού μητρών, αν και ευρέως γνωστές στους μαθηματικούς, ήταν για τους περισσότερους φυσικούς *terra incognita*. Και τότε εμφανίζεται στο προσκήνιο ο Schrödinger, ο οποίος δείχνει πώς μια κυματική εξίσωση —και τα οικεία στους φυσικούς μαθηματικά των διαφορικών εξισώσεων— μπορούσε να εξηγήσει την κβαντική συμπεριφορά. Δεδομένης της κατάστασης, λοιπόν, ουδεμία έκπληξη προκαλεί το γεγονός ότι η εξίσωση του Schrödinger έτυχε ευμενέστατης υποδοχής από το μεγαλύτερο μέρος της κοινότητας των φυσικών. Αλλά ποια ήταν η φυσική σημασία των κβαντικών κυμάτων του Schrödinger; Ο Schrödinger επιθυμούσε διακαώς να βρει μια πραγματική φυσική ερμηνεία για τα κβαντικά του κύματα, αλλά τελικά αναγκάστηκε να παραδεχτεί την ήττα του. Το ένα πρόβλημα συνίστατο στο ότι η κυματοσυνάρτηση για ένα διηλεκτρονιακό άτομο, όπως εκείνη του ηλίου, εξαρτάται από έξι συντεταγμένες —τις τιμές των x, y, z για αμφότερα τα ηλεκτρόνια του ατόμου—, οπότε δυσκολευόταν κανείς να καταλάβει πώς ένα τέτοιο μαθηματικό αντικείμενο θα μπορούσε ποτέ να αντιστοιχεί σε κίνηση φυσικού κύματος. Μια άλλη δυσκολία που αντιμετώπιζε ο Schrödinger συνίστατο στο ότι στην εξίσωσή του, και κατ' αντιδιαστολή προς τις κυματικές εξισώσεις για τα κλασικά κύματα, εμφανιζόταν το σύμβολο i , το οποίο ως γνωστόν παριστάνει την τετραγωνική ρίζα του -1 . Βεβαίως, η χρήση των λεγόμενων «μιγαδικών» αριθμών στη φυσική είναι κάτι το μάλλον κοινότοπο, αποτελεί δε ισχυρό όπλο για την επίλυση πολλών διαφορετικών κατηγοριών προβλημάτων. Ωστόσο, τα πειραματικά μετρούμενα μεγέθη λαμβάνουν πάντοτε «πραγματικές» τιμές, και εδώ δεν υπάρχει καθόλου χώρος για μιγαδικούς αριθμούς με «φανταστική» συνιστώσα, όπου υπεισέρχεται το i . Απεναντίας, οι κυματοσυναρτήσεις του Schrödinger μπορεί κάλλιστα να λαμβάνουν μιγαδικές τιμές, οπότε προφανώς αποκλείεται να συνιστούν άμεσα μετρήσιμα μεγέθη. Μολονότι κατά τη δεκαετία του 1920 η τεχνολογία των επικοινωνιών βρισκόταν σε ένα σχετικά πρωτόγο-

νο στάδιο ακόμη —δεν υπήρχαν τότε ούτε Διαδίκτυο ούτε Παγκόσμιος Ιστός για να μεταδίδονται αμέσως οι ανακαλύψεις σε ολόκληρη την υφήλιο—, οι εξελίξεις κατά την πρώτη φάση ανάπτυξης της κβαντικής μηχανικής έτρεχαν με εκπληκτικά ραγδαίο ρυθμό. Η πρώτη εργασία του Schrödinger γράφηκε τον Ιανουάριο του 1926· ώς τον Ιούνιο του ίδιου έτους, ο Born είχε διατυπώσει την πιθανοκρατική ερμηνεία της κβαντικής κυματοσυνάρτησης. Έχοντας το πλεονέκτημα της εκ των υστέρων σοφίας, εμείς σήμερα αντιλαμβανόμαστε ότι αυτό το βήμα του Born αντιπροσωπεύει μια θεμελιώδη ρήξη με την κλασική φυσική. Οι πιθανότητες εγκαθίστανται τώρα στη φυσική ως ουσιώδης, εγγενής περιορισμός της κβαντικής θεωρίας. Βεβαίως, πιθανότητες συναντούμε και στην κλασική φυσική, εδώ όμως πρόκειται για έναν «πρακτικό» μόνο περιορισμό —όχι για μια θεμελιώδη, για μια «κατ' αρχήν» περιστολή τού τι θα μπορούσαμε ποτέ να μάθουμε για ένα σύστημα. Πάρτε ως παράδειγμα το στρίψιμο ενός νομίσματος. Συνήθως δεχόμαστε ότι το νόμισμα έχει ίσες πιθανότητες να προσγειωθεί δείχνοντας κορόνα ή γράμματα. «Στην πράξη», δεν μπορούμε να ξέρουμε εκ των προτέρων ποιο από τα δύο αποτελέσματα θα έρθει. «Κατ' αρχήν», όμως, και σύμφωνα με την κλασική φυσική, εάν διαθέταμε αρκούντως λεπτομερή γνώση των ακριβών αρχικών συνθηκών του νομίσματος, και εφόσον υπολογίζαμε με ακρίβεια την επίδραση όλων των δυνάμεων που ασκούνται στο νόμισμα, θα μπορούσαμε να προβλέψουμε το αποτέλεσμα με απόλυτη βεβαιότητα. Αντίθετα, σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, δεν έχουμε καμία ελπίδα να απαλλαγούμε από τις πιθανότητες. Ο Αϊνστάιν ουδέποτε είδε με καλό μάτι την εισαγωγή των πιθανοτήτων στη φυσική, και σε μια επιστολή του προς τον Born έκανε το περίφημο σχόλιό του πως «ο Θεός δεν παίζει ζάρια». Ο Neils Bohr φέρεται να απάντησε στον Αϊνστάιν ότι δεν είναι δουλειά των φυσικών «να υπαγορεύουν στον Θεό πώς πρέπει να κυβερνά τον κόσμο».

Όπως θα θυμάστε, στο πείραμα της διπλής σχισμής τα ηλεκτρόνια, παρότι «έμοιαζαν να ταξιδεύουν σαν κύματα», τελικά «έφταναν υπό μορφή βόλων, σαν σφαίρες». Το τετράγωνο του μέτρου της κυματοσυνάρτησης δίνει την πιθανότητα άφιξης οπουδήποτε στη διάταξη ανιχνευτών. Εάν στείλουμε πολυάριθμα ηλεκτρόνια να περάσουν από την πειραματική διάταξη, μπορούμε να προβλέψουμε τη στατιστική κατανομή αυτών των ηλεκτρονίων ως προς το πού θα ανιχνευθούν. Εναλλακτικά, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε το πείραμα με δέσμη ηλεκτρονίων τόσο χαμηλής έντασης ώστε να είναι εξαιρετικά απίθανο να υπάρχουν μέσα στην πειραματική διάταξη περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια κάθε φορά. Η κβαντική κυματοσυνάρτηση προβλέπει και την πιθανότητα άφιξης αυτού του ενός ηλεκτρονίου σε διάφορες θέσεις. Έτσι, η θέση όπου θα αφιχθεί ένα μονήρες ηλεκτρόνιο είναι εγγενώς απρόβλεπτη: δεν επιτρέπεται να αποφαινόμαστε παρά μόνο για τις σχετικές πιθανότητες άφιξης του ηλεκτρονίου. Όταν η λάμψη σε έναν από τους ανιχνευτές μάς πληροφορεί ότι καταγράφηκε η άφιξη κάποιου ηλεκτρονίου σε αυτόν, η προηγουμένως εκτεινόμενη εν κώρω κυματοσυνάρτηση του εν λόγω ηλεκτρονίου προφανώς καταρρέει μηδενιζόμενη παντού εκτός από την περιοχή που καταλαμβάνει ο ανιχνευτής. Το πώς συντελείται αυτή η κατάρρευση δεν το καθορίζει η εξίσωση του Schrödinger. Η κατάρρευση, ή «αναγωγή», της κυματοσυνάρτησης αποτελεί το μέγα μυστήριο της κβαντικής μηχανικής. Για να καταλάβετε πόσο παράδοξη είναι, αντιπαραβάλετέ τη με τη συμπεριφορά ενός κλασικού σωματιδίου που περιγράφεται από τους νόμους του Νεύτωνα. Ένα

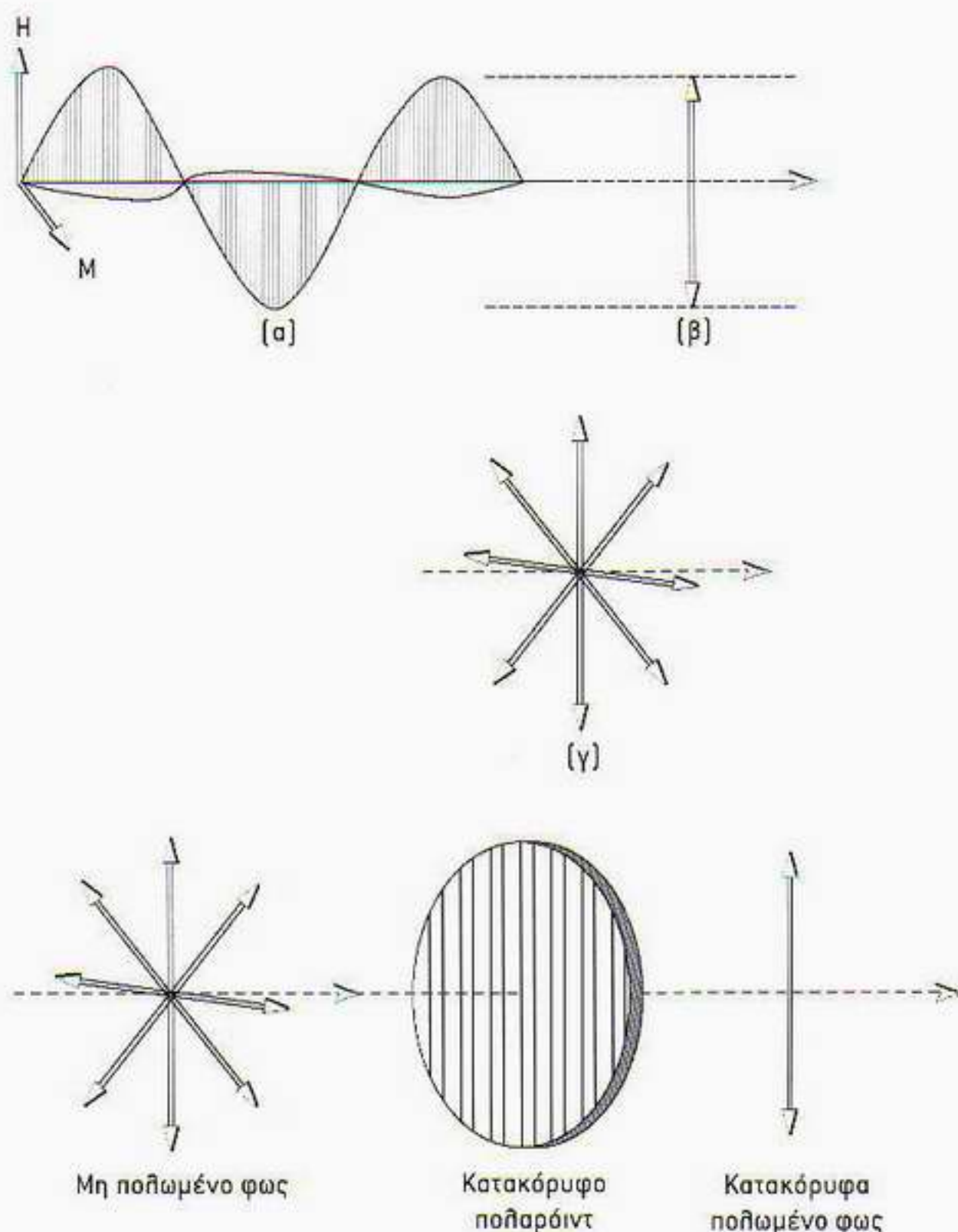
τέτοιο σωματίδιο ακολουθεί μια κλασική τροχιά σε όλη του την πορεία ως τον ανιχνευτή. Θεωρητικά, μόλις κλάσματα του δευτερολέπτου προτού φτάσει το σωματίδιο, θα μπορούσαμε να κοιτάξουμε και να το δούμε να κατευθύνεται προς τον επλεγέντα ανιχνευτή. Δεν ισχύει καθόλου το ίδιο στην κβαντική μηχανική! Προτού φτάσει το ηλεκτρόνιο σε κάποιον ανιχνευτή, δεν μπορούμε να πούμε τίποτε συγκεκριμένο για τη θέση του, και πολύ περισσότερο ότι κατευθύνεται προς τον τάδε ή τον δείνα ανιχνευτή. Μία από τις βασικές δυσκολίες που αντιμετωπίζει η κβαντική φυσική έγκειται στο πώς αναδύονται μέσα από την πιθανοκρατική ομίχλη του Max Born τα κλασικά μεγέθη όπως οι συντεταγμένες που συγκροτούν τις τροχιές των σωματιδίων —για παράδειγμα, των ιχνών που αφήνει κάποιο σωματίδιο σε ένα θάλαμο φουσαλίδων.

Φωτόνια και πολωμένο φως

Ας εξετάσουμε τώρα προσεκτικότερα πώς περιγράφει η κβαντική μηχανική τα ποικίλα κβαντικά «αντικείμενα», όπως είναι τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια. Αντί να καταπιαστούμε με τα ηλεκτρόνια και τις κβαντικές καταστάσεις τού σπιν τους, στο παρόν κεφάλαιο θα διαλέξουμε ως θεμελιώδες κβαντικό σύστημά μας το φως και την περιγραφή του με όρους φωτονίων, ελπίζοντας ότι το φως και οι σχετικές με την πόλωση ιδιότητές του ίσως είναι πιο οικείες στον αναγνώστη απ' ό,τι τα ηλεκτρόνια και τα σπιν τους. Ούτως ή άλλως, τα προβλήματα ερμηνείας παραμένουν τα ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό ακριβώς είχε κατά νουν ο Feynman όταν είπε: «Σε ένα σημείο στεκόμαστε τυχεροί ωστόσο: τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται ακριβώς όπως το φως.»

Το 1865, ο James Clerk Maxwell ενοποίησε τη θεωρία των φαινομένων του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού και συνόψισε όλες τις πειραματικές παρατηρήσεις σε ένα σύνολο εξισώσεων που σήμερα είναι γνωστές ως *εξισώσεις τού Maxwell*. Σύμφωνα με τη θεωρία τού Maxwell, το φως κατανοείται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο οποίο το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ταλαντώνονται σε ένα επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης. Εάν συγκεντρώσουμε την προσοχή μας στη συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου, αυτό μπορεί να ταλαντώνεται σε οποιαδήποτε διεύθυνση του εν λόγω επιπέδου (βλ. Εικόνα 8.1). Το συνηθισμένο φως μπορούμε να το φανταστούμε ως ένα σύνολο ταλαντούμενων ηλεκτρικών πεδίων προσανατολισμένων κατά τυχαίο τρόπο σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις. Το φως αυτού του είδους λέγεται *μη πολωμένο* —το ηλεκτρικό πεδίο δεν «δείχνει» σε καμία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει αν φορέσουμε ένα ζευγάρι γυαλιά πολαρόιντ. Η εκτυφλωτική ένταση που έχει το ανακλώμενο στη θάλασσα ή στο χιόνι φως μειώνεται κατά πολύ. Τούτο συμβαίνει επειδή το γυαλί πολαρόιντ έχει την ιδιότητα να επιτρέπει σε μία μόνο διεύθυνση ταλαντώσεων του ηλεκτρικού πεδίου να το διαπεράσει. Στην Εικόνα 8.2 αναπαριστάται διαγραμματικά το φαινόμενο για το οποίο μιλάμε: μη πολωμένο φως διέρχεται από ένα πλακίδιο πολαρόιντ προσανατολισμένο κατά τρόπο ώστε το φως να πολώνεται κατακόρυφα. Την κατάσταση πόλωσης στην οποία βρίσκεται το φως όταν το ηλεκτρικό του πεδίο ταλαντώνεται κατά την κατακόρυφο θα τη δηλώνουμε ως «Κ». Για να έχουμε μια νοητική εικόνα, μπορούμε να θεωρούμε ότι το πολαρόιντ συμπεριφέρεται σαν γραμματοκιβώτιο, όπου η διεύθυνση της «σχισμής» υπαγορεύει τον προσανατολισμό που πρέπει να έχει ένας φάκελος για να μπορέσει να ριχτεί μέσα. Φυσικά, μπορούμε να περιστρέψουμε το πο-

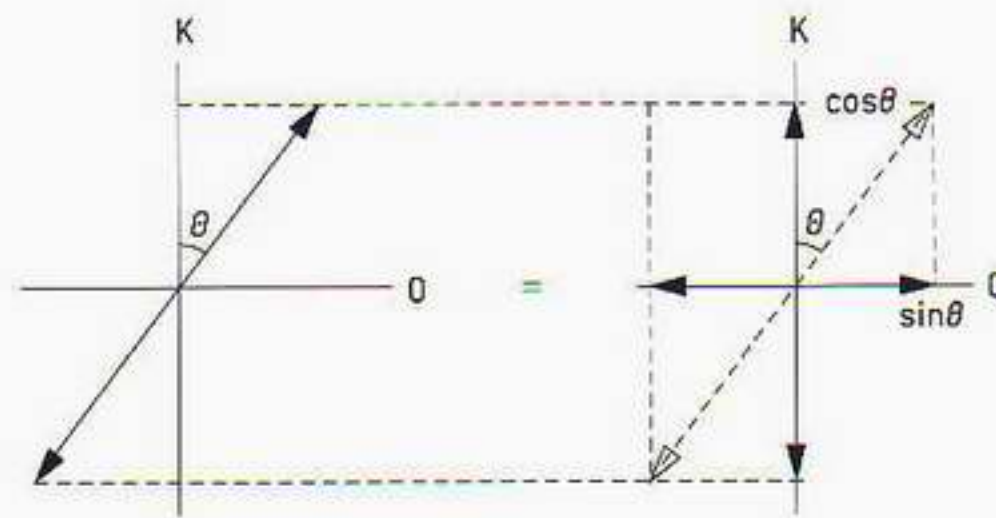
Εικόνα 8.1. Πολωμένο και μη πολωμένο φως. (α) Ένα κατακόρυφα πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα με το ηλεκτρικό πεδίο (H) να ταλαντώνεται στην κατακόρυφη διεύθυνση και το μαγνητικό πεδίο (M) στο οριζόντιο επίπεδο. (β) Αναπαράσταση του κατακόρυφα πολωμένου ηλεκτρικού φωτός η οποία αναφέρεται μόνο στο ηλεκτρικό πεδίο. (γ) Διαγραμματική αναπαράσταση μη πολωμένου φωτός, το οποίο αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα πολωμένο καθ' όλη τις δυνατές διευθύνσεις.



Εικόνα 8.2 Μη πολωμένο φως προσπίπτει σε πολάριντ με κατακόρυφο προσανατολισμό (δηλαδή, με χαρακτηριστικό επίπεδο κατακόρυφο), παράγοντας πολωμένο φως.

λαρόντ έτσι ώστε να διέρχεται μόνο το φως που έχει το ηλεκτρικό πεδίο του πολωμένο κατά την οριζόντια διεύθυνση —θα τη συμβολίζουμε ως «Ο»— ή και κατά οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση.

Μερικά απλά πειράματα που είναι δυνατόν να εκτελεστούν με ένα ζευγάρι πλακιδίων πολαρόντ θα πείσουν γρήγορα τον σκεπτικιστή αναγνώστη. Για παράδειγμα, σύμφωνα με όσα έχουμε πει, αν κατευθύνουμε κατακόρυφα πολωμένο φως, Κ, σε ένα «οριζόντια προσανατολισμένο» πολαρόντ (δηλαδή, με το χαρακτηριστικό του επίπεδο οριζόντιο), Ο, περιμένουμε ότι από την άλλη πλευρά δεν πρόκειται να βγει καθόλου φως. Χρησιμοποιώντας τα δύο πλακίδια πολαρόντ, κανείς εύκολα επαληθεύει αυτή την πρόταση. Αν τα δύο πλακίδια τοποθετηθούν έτσι ώστε να έχουν τις «διευθύνσεις των σχισμών» τους (τα χαρακτηριστικά τους επίπεδα) σχεδόν κάθετα, τότε δεν περνάει παρά ελάχιστο μόνο φως· μάλιστα, μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς αυξάνεται η ένταση του διερχόμενου φωτός καθώς το δεύτερο πολαρόντ περιστρέφεται αργά ώσπου να γίνει «παράλληλο» με το πρώτο. Αυτά είναι τα πειραματικά διαπιστωμένα γεγονότα· τώρα ακολουθεί το δύσκολο μέρος. Για να εξηγήσουμε μία από τις πλέον σημαντικές ιδιότητες των κβαντομηχανικών συστημάτων, πρέπει να ζητήσουμε από τον αναγνώστη να «υπομείνει» τη μαθηματική περιγραφή τούτων των πειραμάτων. Ας πάρουμε την περι-



Εικόνα 8.3 Το φως που είναι πολωμένο υπό γωνία θ ως προς την κατακόρυφο μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα μιας οριζόντια και μιας κατακόρυφα πολωμένης συνιστώσας. Στην περίπτωση του μονήρους φωτονίου, αυτός ο τρόπος θεώρησης προσφέρει ένα παράδειγμα εφαρμογής της αρχής της κβαντικής υπέρθεσης, σύμφωνα με την οποία μια κατάσταση μπορεί να αναλυθεί σε γραμμικό συνδυασμό δύο συνιστωσών καταστάσεων.

πτωση που φαίνεται στην Εικόνα 8.3. Εδώ δείχνουμε πώς είναι δυνατόν να αναλυθεί πολωμένο φως, που σχηματίζει γωνία θ με την κατακόρυφο, σε ισοδύναμο άθροισμα συνιστωσών πολωμένου φωτός K και O . Με όρους ηλεκτρικών πεδίων, τούτη η ισοδυναμία μπορεί να λάβει τη μορφή της «διανυσματικής» εξίσωσης

$$\psi = K \sin \theta + O \eta \theta,$$

όπου με ψ συμβολίζουμε το αρχικό ηλεκτρικό πεδίο που σχηματίζει γωνία θ με την κατακόρυφο. Πρόκειται για διανυσματική εξίσωση υπό την έννοια ότι αφορά κατευθύνσεις σε ένα επίπεδο. Αν ερμηνευθεί γεωμετρικά, η εξίσωση σημαίνει ότι μπορείτε να φτάσετε στο ίδιο σημείο του επιπέδου είτε κινούμενοι ευθύγραμμα κατά μία μονάδα απόστασης στην κατεύθυνση $\theta(\psi)$ είτε διανύοντας πρώτα απόσταση $\sin \theta$ στην κατακόρυφη κατεύθυνση (K) και εν συνεχεία απόσταση $\eta \theta$ στην οριζόντια (O). Η σπουδαιότητα αυτής της εξίσωσης έγκειται στο ότι μας επιτρέπει να υπολογίζουμε την ένταση του φωτός που διαδίδεται όταν φως πολωμένο υπό γωνία θ περνά από πολαρόιντ κατακόρυφου ή οριζόντιου προσανατολισμού. Εφόσον η ένταση του φωτός είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ηλεκτρικού πεδίου, η ένταση του φωτός που διαδίδεται μέσω ενός πολαρόιντ K μεταβάλλεται ως $(\sin \theta)^2$. Ομοίως, η ένταση του φωτός που διαδίδεται μέσω ενός πολαρόιντ O μεταβάλλεται ως $(\eta \theta)^2$. Μέχρι στιγμής, συζητήσαμε το πολωμένο φως στηριζόμενοι στην κλασική έννοια του ηλεκτρικού πεδίου. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, όμως, στο μικροσκοπικό επίπεδο το φως θα έπρεπε να αντιμετωπίζεται ως ρεύμα μικροσκοπικών σβώλων φωτεινής ενέργειας, οι οποίοι ονομάζονται φωτόνια. Πώς συνταιριάζονται τούτες οι δύο περιγραφές —ηλεκτρικό πεδίο από τη μια, φωτόνια από την άλλη; Η ανάλυση που κάναμε με όρους ηλεκτρικού πεδίου για το πώς μεταβάλλεται η ένταση του διαδιδόμενου φωτός πρέπει να κατανοηθεί ως πρόβλεψη για το ποσοστό του πλήθους των φωτονίων που διέρχονται από το πολαρόιντ.

Η ουσιώδης πιθανοκρατική πλευρά της κβαντικής μηχανικής καθίσταται εμφανής όταν προσπαθούμε να εξετάσουμε τι συμβαίνει σε ένα μεμονωμένο φωτόνιο. Κατ' αρχήν, δεν υπάρχει τίποτε που να μας εμποδίζει να μειώσουμε την ένταση του φωτός τόσο ώστε τα φωτόνια να φτάνουν στο πολαρόιντ ένα ένα. Η εξίσωσή μας για το ηλεκτρικό πεδίο ψ αναπαριστά τώρα το κβαντικό κύμα πιθανότητας ενός μονήρους φωτονίου. Ας εξετάσουμε προσεκτικά το νόημά της:

$$\psi = K \sin \theta + O \eta \theta.$$

Η εξίσωση μας δείχνει ξεκάθαρα την ουσία του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης. Όταν το φωτόνιο φτάνει στο «κατακόρυφο» πολαρόντ, αδυνατούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα αν θα διέλθει ή δεν θα διέλθει. Το μόνο που μπορεί να πει η κβαντική μηχανική είναι ότι το φωτόνιο έχει πιθανότητα $(\text{συν}\theta)^2$ να διέλθει και πιθανότητα $(\text{ημ}\theta)^2$ να μη διέλθει. Με άλλα λόγια, πρέπει να θεωρούμε ότι, υπό κάποια έννοια, το φωτόνιο βρίσκεται ταυτόχρονα και στην κατάσταση Κ και στην κατάσταση Ο! Το φωτόνιο λέγεται τότε ότι βρίσκεται σε μια *κβαντική υπέρθεση* των δύο καταστάσεων Κ και Ο. Οι υπερθέσεις κλασικών κυμάτων όπως τα υδάτινα κύματα είναι οικείες και δεν προκαλούν καμία έκπληξη. Αν εξαιρέσουμε τον όρο «συμβολή» που μεταχειρίζονται οι φυσικοί για να αναφερθούν στο φαινόμενο, το τι συμβαίνει όταν δύο ομάδες ρυτιδώσεων διασταυρώνονται στην επιφάνεια μιας ήρεμης λιμνούλας είναι κάτι που το ξέρουν οι πάντες. Ομοίως, στο πείραμα των δύο σχισμών προσθέτουμε τα υδάτινα κύματα που εξέρχονται από την κάθε σχισμή ξεχωριστά για να βρούμε τη συνολική κυματική κίνηση. Οι παραξενιές της κβαντικής μηχανικής απορρέουν από τον μυστηριώδη κυματοσωματιδιακό δυισμό. Στο κβαντικό πλαίσιο, η εξίσωσή μας περιγράφει όχι ένα φυσικό κύμα, αλλά το πλάτος πιθανότητας ενός μεμονωμένου φωτονίου. Αυτό το φωτόνιο δεν βρίσκεται ούτε στην κατάσταση Κ ούτε στην κατάσταση Ο, αλλά σε μια υπέρθεσή τους· και όταν φτάνει στο πολαρόντ, «πρέπει να κάνει μια επιλογή» και να «πηδήσει» ή στην Κ ή στην Ο! Στη φαινομενικά αθώα φράση «πρέπει να κάνει μια επιλογή» βρίσκεται ο πυρήνας του προβλήματος. Πώς γίνεται αυτή η επιλογή; Το φωτόνιο δεν μπορεί να την κάνει —η κβαντική υπέρθεση εξελίσσεται σύμφωνα με την εξίσωση του Schrödinger, και η συγκεκριμένη εξίσωση δεν περιγράφει την κατάρρευση που οδηγεί στη μία ή την άλλη κατάσταση. Πρέπει με κάποιον τρόπο να είναι η πράξη της παρατήρησης με το πολαρόντ εκείνη που προκαλεί την κατάρρευση και φέρνει το φωτόνιο σε μία από τις δύο καταστάσεις πόλωσης. Πώς ακριβώς γίνεται όμως και κάποια «κλασική» μετρητική διάταξη, όπως ένα κομμάτι πολαρόντ, προκαλεί την περίφημη «κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης»; Σε τελική ανάλυση, όλες οι λεγόμενες «κλασικές» μετρητικές διατάξεις αποτελούνται στην πραγματικότητα από άτομα και ηλεκτρόνια, τα οποία διέπονται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής και την εξίσωση του Schrödinger ακριβώς όπως και το φωτόνιο. Ιδού, λοιπόν, η ουσία του μετρητικού προβλήματος στην κβαντική μηχανική, το οποίο έβαλε σε ανησυχία πολλούς από τους ιδρυτές της θεωρίας. Και για να δώσουν απάντηση σε αυτές ακριβώς τις προκλήσεις, ο Bohr και οι συνεργάτες του στο ινστιτούτο του στην Κοπεγχάγη συγκρότησαν με πολλούς κόπους την ορθόδοξη «κοπεγχαγιανή» ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Η κοπεγχαγιανή ερμηνεία προσφέρει μια εξαιρετικά λιτή και αφηρημένη άποψη για τον κόσμο. Ο Bohr πίστευε ότι η γλώσσα της κλασικής φυσικής δεν επαρκούσε για την περιγραφή των φαινομένων στο κβαντικό επίπεδο της πραγματικότητας. Οι συνηθισμένες λέξεις είναι ανίκανες να μας δώσουν έναν ικανοποιητικό και απαλλαγμένο από αμφισημίες ορισμό της κβαντικής υπέρθεσης. Ο Bohr δεν προσφέρει κάποιο μηχανισμό για να εξηγήσει την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης που επέρχεται με τη μέτρηση. Αντί τούτου, και για να εξαγάγει από την κβαντική θεωρία αποτελέσματα συγκρίσιμα με το πείραμα, ο Bohr μάς υποδεικνύει να χωρίσουμε το πειραματικό σύστημα σε δύο μέρη: σε έναν κλασικό κόσμο που περιέχει τις κλασικές μετρητικές συσκευές και σε ένα δεύτερο μέρος που περιέχει το υπό παρατήρηση κβαντικό

σύστημα. Αυτή η κοπεγχαγιανή διάκριση ανάμεσα σε κλασικά και κβαντικά συστήματα ονομάζεται ενίοτε *διαίρεση Heisenberg*. Μολονότι μια τέτοια διαίρεση πάσχει κατ' αρχήν από αμφισημία, είναι ασφαλώς αρκούντως σαφής ώστε να τη χρησιμοποιούν οι φυσικοί στην πράξη με μεγάλη επιτυχία. Εντούτοις, υπάρχουν μερικοί φυσικοί, από τους οποίους ιδιαίτερη μνεία αξίζει ο εσχάτως εκλιπών John Bell, οι οποίοι κρίνουν ολωσδιόλου μη ικανοποιητική μια τέτοια προσέγγιση τύπου «τσελεμεντέ» στη θεμελιωδέστερη θεωρία μας περί ύλης. Θα μας δοθεί στο παρόν κεφάλαιο η ευκαιρία να δούμε ακριβώς γιατί απεχθανόταν ο John Bell αυτή την πονηρή διαίρεση ανάμεσα στις «κυματώδεις κβαντικές καταστάσεις» του Schrödinger, από τη μία, και στην «κλασική διάταξη» του Bohr, από την άλλη. Αν μάλιστα κανείς τύχαινε να ανοίξει συζήτηση μαζί του, ο Bell προχωρούσε ακόμη παραπέρα και επέμενε ότι, στο βάθος της, η κβαντική θεωρία ήταν «σάπια»!

Σε αυτή την ιστορία υπάρχει μία ακόμη «ανατροπή» που δείχνει με απτό τρόπο μια άλλη προβληματική ιδιότητα των κβαντικών συστημάτων και συνάμα ρίχνει φως στο τι έχει να μας πει η κβαντική μηχανική για τη φύση της πραγματικότητας. Θεωρήστε ένα κατακόρυφα πολωμένο φωτόνιο το οποίο πλησιάζει προς ένα πλακίδιο πολαρόιντ που παίζει ρόλο «μετρητικής» συσκευής. Αν το πολαρόιντ τεθεί στην κατακόρυφη θέση «Κ», το φωτόνιο ασφαλώς θα περάσει ανενόχλητο. Αν το πολαρόιντ τεθεί στην οριζόντια θέση «Ο», τότε το φωτόνιο μετά βεβαιότητας θα απορροφηθεί και δεν θα διαδοθεί. Τι θα συμβεί αν αρχίσουμε με ένα φωτόνιο πολωμένο κατά γωνία 45 μοιρών ως προς την κατακόρυφο; Με τη βοήθεια του τύπου που εξετάσαμε νωρίτερα, η αρχική κατάσταση του φωτονίου μπορεί να γραφεί ως υπέρθεση των φωτονικών καταστάσεων Κ και Ο:

$$\psi = K_{\text{συν}45} + O_{\text{νη}45}.$$

Εφόσον το $(\text{συν}45)^2$ και το $(\text{νη}45)^2$ ισούνται αμφότερα με 1/2, το εισερχόμενο φωτόνιο έχει πιθανότητες 50% να περάσει ένα πολαρόιντ που έχει τεθεί είτε στη διεύθυνση Κ είτε στη διεύθυνση Ο. Προσέξτε όμως τι συμβαίνει αν οι διευθύνσεις του μετρητικού πολαρόιντ επιλεγούν «διαγώνιες», σχηματίζοντας με την κατακόρυφο γωνία είτε 45 μοιρών (οπότε θα τη συμβολίζουμε ως «ΔΚ») είτε 135 μοιρών (οπότε θα τη συμβολίζουμε ως «ΔΟ»). Το φωτόνιο τώρα έχει 100% πιθανότητα να περάσει από ένα πολαρόιντ ΔΚ και καμία πιθανότητα να περάσει από ένα πολαρόιντ ΔΟ. Όλα αυτά φαίνονται απολύτως προφανή. Τι θα μπορούσαν να μας αποκαλύψουν για τη φύση της πραγματικότητας; Αν διαλέξουμε να μετρήσουμε την πόλωση κατά την κατεύθυνση ΔΚ, φαίνεται ότι μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι η πόλωση του φωτονίου κείται επί του άξονα που σχηματίζει γωνία 45 μοιρών με την κατακόρυφο. Αν όμως διαλέξουμε να μετρήσουμε την πόλωση του φωτονίου σε κάποια από τις διευθύνσεις Κ και Ο, γνωρίζουμε ότι θα βρούμε πως έχει κατεύθυνση ή Κ ή Ο. Στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, δεν επιτρέπεται να πούμε ότι το φωτόνιο ήταν μετά βεβαιότητας σε κάποια από τις καταστάσεις Κ και Ο. Γενικότερα, αν ξεκινήσουμε με ένα φωτόνιο σε άγνωστη αρχική κατάσταση, μπορούμε να επιλέξουμε να μετρήσουμε την πόλωσή του είτε με ένα ζευγάρι πολαρόιντ Κ και Ο είτε με ένα ζευγάρι διαγώνιων πολαρόιντ ΔΚ και ΔΟ. Όσπου να αποφασίσουμε σε ποια κατεύθυνση θα θέσουμε το μετρητικό πολαρόιντ, φαίνεται ότι δεν επιτρέπεται να λέμε πως το φωτόνιο έχει κάποια συγκεκριμένη πόλωση. Δημιουργείται έτσι η εντύπωση ότι επιλέγοντας την

κατεύθυνση της «μετρητικής συσκευής» επηρεάζουμε κάπως την πόλωση του φωτονίου! Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, ωστόσο εκτελέσουμε κάποια μέτρηση, η κατεύθυνση της πόλωσης του φωτονίου είναι όχι απλώς άγνωστη αλλά πραγματικά απροσδιόριστη. Ο Pascual Jordan, συγγραφέας μερικών από τις πρωιμότερες εργασίες πάνω στην κβαντική μηχανική, έφτασε μέχρι του σημείου να ισχυριστεί ότι «οι παρατηρήσεις δεν διαταράσσουν απλώς εκείνο που πρόκειται να μετρηθεί —το παράγον».

Παρουσιάσαμε μερικά από τα δύσκολα ερωτήματα που εγείρει η πιθανοκρατική φύση της κβαντικής μηχανικής. Ο Niels Bohr είχε σαφή επίγνωση των προβλημάτων του είδους αυτού. Εδώ ακριβώς, εξάλλου, πρέπει να αναζητηθεί ο λόγος για τον οποίο το κοπερχαγιανό δόγμα του έδινε τόση έμφαση στις κβαντομηχανικές προβλέψεις για τα παρατηρήσιμα μεγέθη παρά στις εικασίες σχετικά με το τι συνεπαγόταν η κβαντική μηχανική για την ακριβή φύση της πραγματικότητας. Μάλιστα, ο Bohr έφτασε στο σημείο να διακηρύξει ότι η κβαντική μηχανική έπρεπε να αντιμετωπίζεται μάλλον σαν συνταγή από τσελεμεντέ:

Ολόκληρος ο φορμαλισμός πρέπει να θεωρείται ως ένα εργαλείο για την εξαγωγή προβλέψεων, σαφώς καθορισμένου ή στατιστικού χαρακτήρα, σχετικά με την πληροφορία που μπορούμε να πάρουμε υπό πειραματικές συνθήκες περιγραφόμενες με κλασικούς όρους.

Ο Aage Petersen, ωστόσο, ένας από τους βοηθούς του Bohr, προχώρησε ακόμη παραπέρα και επεχείρησε να συνοψίσει τη θέση του Bohr με τούτες τις λέξεις:

Δεν υπάρχει καθόλου κβαντικός κόσμος. Υπάρχει μόνο μια αφηρημένη κβαντομηχανική περιγραφή. Κάνουμε λάθος αν σκεφτόμαστε ότι η φυσική έχει αποστολή να ανακαλύψει πώς είναι η φύση. Η φυσική αφορά το τι μπορούμε να πούμε για τη φύση.

Ο Heisenberg, ο οποίος βοήθησε τον Bohr και τους συναδέλφους του να αναπτύξουν τούτη την κοπερχαγιανή αντίληψη για τον κόσμο, διατύπωσε επίσης την άποψη ότι τα κβαντικά αντικείμενα δεν είναι «τόσο πραγματικά» όσο τα καθημερινά αντικείμενα:

Όταν πειραματιζόμαστε με ατομικά συμβάντα, έχουμε να κάνουμε με πράγματα και γεγονότα, με φαινόμενα τα οποία είναι ακριβώς τόσο πραγματικά όσο οποιαδήποτε φαινόμενα της καθημερινής ζωής. Τα άτομα ή τα στοιχειώδη σωματίδια, όμως, δεν είναι στον ίδιο βαθμό πραγματικά· αποτελούν μάλλον έναν κόσμο δυναμικότητας ή δυνατοτήτων παρά έναν κόσμο πραγμάτων ή γεγονότων.

Μια τέτοια αφηρημένη προσέγγιση του μικροσκοπικού κόσμου μάς επιτρέπει ίσως να διατυπώνουμε επιτυχείς προβλέψεις για τα πειράματα που διεξάγουμε, πλην όμως φαίνεται να αντιφάσκει προς όλη μας την καθημερινή εμπειρία. Τα αντικείμενα που παρατηρούμε γύρω μας έχουν όλα τους μια ανακουφιστική, στέρεα πραγματικότητα. Δεν φαίνεται να αποκτούν αίφνης ύπαρξη μόνο όταν εμείς αποφασίζουμε να τα προσέξουμε και να εκτελέσουμε κάποια μέτρηση! Ουδόλως μας εκπλήσσει το γεγονός ότι ένας Αϊνστάιν δεν θα ανεχόταν ποτέ μια τέτοια κατάσταση. Τον δυσαρεστούσε η από μέρους του Bohr άρνηση μιας βαθύτερης φυσικής πραγματικότητας και πίστευε παθιασμένα

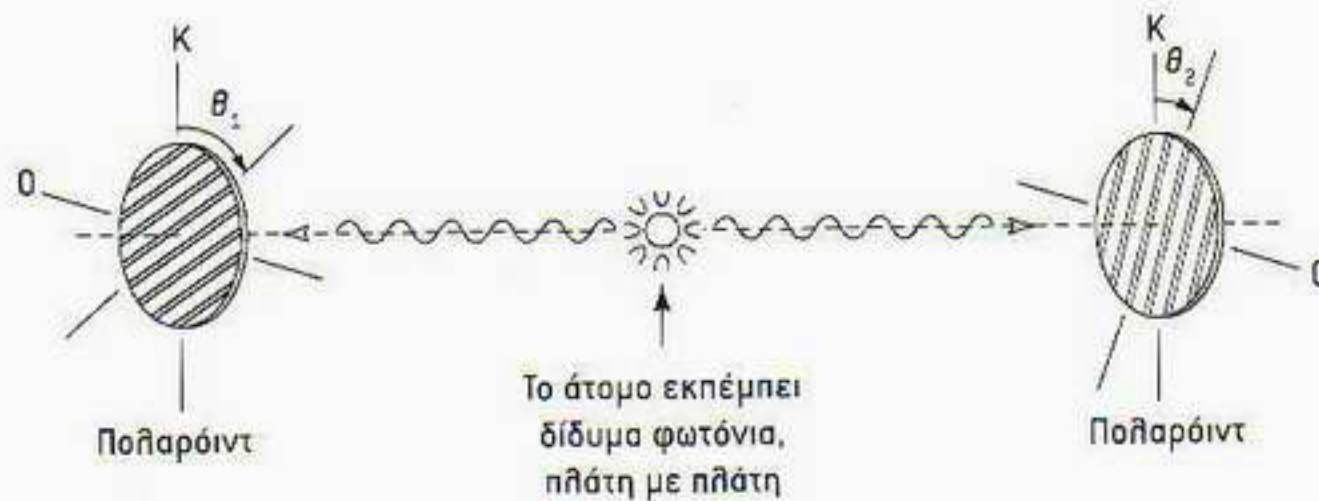
ότι τα φυσικά αντικείμενα έχουν πραγματικές, φυσικές ιδιότητες είτε βρισκόμαστε εκεί κοντά για να τα υποβάλλουμε σε μετρήσεις είτε όχι. Σε μια συζήτησή του με τον Abraham Pais, ο Αϊνστάιν υπογράμμισε αυτό που θεωρούσε ως το άτοπο της κατάστασης ρωτώντας το συνομιλητή του: «Το φεγγάρι άραγε υπάρχει μόνο όταν το κοιτάς;» Και ακριβώς για να επιτεθεί στην μποριανή αντίληψη του κόσμου, ο Αϊνστάιν επινόησε το περίφημο νοητικό του πείραμα μαζί με δύο νεαρούς συναδέλφους του στο Πρίνστον, τον Boris Podolsky και τον Nathan Rosen. Ας δούμε τώρα πώς κατόρθωσε ο John Bell να αποκρυσταλλώσει τέτοια εμφανώς φιλοσοφικά ερωτήματα σε μια μορφή επιδεκτική πειραματικού ελέγχου.

Ο John Bell και το παράδοξο EPR

Μολονότι ο Αϊνστάιν υπήρξε ένας από τους πατέρες της κβαντικής μηχανικής, δεν συμφιλιώθηκε ποτέ με τη θεμελιωδώς πιθανοκρατική της φύση. Σε μια ονομαστή ανταλλαγή επιχειρημάτων με τον Niels Bohr, γνωστή ως διαμάχη Bohr-Αϊνστάιν, ο Αϊνστάιν επινόησε μια σειρά προκλήσεων για την ορθόδοξη κοπεγχαγιανή κοσμοαντίληψη. Ο πρώτος και ο δεύτερος γύρος της διαμάχης έλαβαν χώρα αντίστοιχα κατά τα περίφημα Συνέδρια Solvay του 1927 και του 1930 στις Βρυξέλλες. Καθώς προγευμάτιζε με τον Bohr, ο Αϊνστάιν παρουσίασε μερικά νοητικά πειράματα που έμοιαζαν να δείχνουν ότι ήταν δυνατόν να εκτελεστούν μετρήσεις με ακρίβεια μεγαλύτερη από εκείνη την οποία επέτρεπε η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg. Αφού πέρασε μερικές άγρυπνες νύχτες, ο Bohr κατόρθωσε να εντοπίσει από μία λογική αδυναμία σε καθένα από τα επιχειρήματα του Αϊνστάιν και, κατά κοινή ομολογία, εξήλθε νικητής και από τους δύο πρώτους γύρους της αναμέτρησης. Πέντε χρόνια αργότερα, ο Αϊνστάιν έθεσε μια νέα πρόκληση. Και πάλι, η πρόθεσή του ήταν να δείξει ότι υπάρχουν φυσικά μεγέθη, όπως η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου, τα οποία θα μπορούσαν, κατ' αρχήν, να γίνουν γνωστά με ακρίβεια μεγαλύτερη από εκείνη που επιτρέπει η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg. Στην εργασία των EPR, ο Αϊνστάιν επεδίωκε να προσφέρει ερείσματα στην πίστη του για ύπαρξη μιας «αντικειμενικής πραγματικότητας», μιας πραγματικότητας ολωσδιόλου ανεξάρτητης από τις όποιες μετρήσεις. Ήταν πεπεισμένος ότι η κβαντική μηχανική αντιπροσωπεύει μια μη πλήρη περιγραφή του μικρόκοσμου και ότι οι πιθανότητες εμφανίζονται σε αυτή μόνο και μόνο εξαιτίας της περιορισμένης γνώσης μας. Ουσιαστικά, ο Αϊνστάιν επιθυμούσε ο κόσμος να είναι όπως στο παράδειγμα του στριψίματος του κλασικού κέρματος. Εκεί, αν μπορούσαμε να μετρήσουμε και να υπολογίσουμε τα πάντα πολύ προσεκτικά, θα είχαμε κατ' αρχήν τη δυνατότητα να προβλέψουμε το αποτέλεσμα με πλήρη βεβαιότητα. Κατ' αναλογία, λοιπόν, δεν αποκλείεται να υπάρχουν κάποιες κρυμμένες μεταβλητές στην κβαντική μηχανική που, αν τις ξέραμε, θα μας επέτρεπαν να προβλέψουμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων με απόλυτη βεβαιότητα. Η εργασία των EPR κλείνει με το εξής συμπέρασμα:

Ενώ λοιπόν αποδείξαμε ότι η κυματοσυνάρτηση δεν προσφέρει πλήρη περιγραφή της πραγματικότητας, έχουμε αφήσει ανοικτό το ερώτημα κατά πόσον υφίσταται μια τέτοια περιγραφή ή όχι. Πιστεύουμε, ωστόσο, ότι μια τέτοια θεωρία είναι δυνατή.

Εικόνα 8.4 Τη συγκεκριμένη εκδοχή του πειράματος EPR την οφείθουμε στον αμερικανό φυσικό David Bohm. Στο κέντρο, ένα άτομο ευρισκόμενο σε κατάσταση ηρεμίας διασπάται εκπέμποντας δύο φωτόνια σε αντίθετες κατευθύνσεις. Ανιχνευτές-πολαρόιντ τοποθετημένοι κατά μήκος των τραχιών των δύο φωτονίων καθιστούν δυνατή τη μέτρηση των πολώσεων τους.



Μολονότι στο παράδοξο EPR ο Αϊνστάιν έθετε υπό αμφισβήτηση τις αβεβαιότητες της κβαντικής μηχανικής, το περίφημο νοητικό του πείραμα φωτίζει και την πλέον παράξενη όψη της κβαντικής θεωρίας — αυτό στο οποίο είχε αναφερθεί ο Αϊνστάιν ως «υπερφυσική δράση εξ αποστάσεως». Για ορισμένες κβαντικές καταστάσεις — ο Schrödinger τις ονόμαζε *διαπλεγμένες καταστάσεις* —, η κβαντική μηχανική φαίνεται να απαιτεί κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ απομακρυσμένων τμημάτων ενός κβαντικού συστήματος η οποία διαδίδεται ταχύτερα από το φως.

Θα περιγράψουμε μια σύγχρονη εκδοχή του πειράματος EPR την οποία ανέπτυξε ο αμερικανός φυσικός David Bohm. Στην εκδοχή τού Bohm, ένα άτομο σε ηρεμία διεγείρεται και εκπέμπει δύο φωτόνια ταυτόχρονα (βλ. Εικόνα 8.4). Αυτά τα φωτόνια απομακρύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, και οι καταστάσεις πόλωσής τους μπορούν να προσδιοριστούν αν περάσουν από ένα ζευγάρι φίλτρων πολαρόιντ. Εφόσον τα φωτόνια κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, τα δύο πολαρόιντ που λειτουργούν ως ανιχνευτές πόλωσης μπορεί να απέχουν μεγάλη απόσταση. Μολονότι αρχικά προτάθηκε ως νοητικό πείραμα, οι πρόοδοι της φωτονικής τεχνολογίας κατέστησαν δυνατή την εκτέλεση του πειράματος στην πραγματική ζωή. Λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:

- Αν και τα δύο πολαρόιντ έχουν τεθεί στην κατακόρυφη διεύθυνση K, και τα δύο φωτόνια διέρχονται πάντοτε.
- Αν και τα δύο πολαρόιντ έχουν τεθεί στην οριζόντια διεύθυνση O, και τα δύο φωτόνια διέρχονται πάντοτε.
- Αν το ένα πολαρόιντ έχει τεθεί στη διεύθυνση K και το άλλο στη διεύθυνση O, ουδέποτε βλέπουμε να διέρχονται ταυτόχρονα και τα δύο φωτόνια.

Με άλλα λόγια, βλέπουμε ζευγάρια φωτονίων KK και OO, αλλά όχι KO ή OK. Εφόσον η απόσταση μεταξύ των δύο πολαρόιντ-ανιχνευτών μπορεί να είναι όσο μεγάλη θέλουμε, έχουμε τη δυνατότητα να παίξουμε κάθε λογής «παιχνίδια» όσον αφορά την επιλογή του ακριβούς χρόνου κατά τον οποίο θέτουμε τις διευθύνσεις των πολαρόιντ. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να αποφασίσουμε να θέσουμε τη διεύθυνση του δεύτερου πολαρόιντ μόνο αφού το φωτόνιο έχει ξεκινήσει το ταξίδι του προς τα εκεί αλλά προτού παρέλθει αρκετός χρόνος ώστε να προλάβει να φτάσει σε μας κάποιο σήμα που να μας πληροφορεί τι αποτέλεσμα ελήφθη στο πρώτο πολαρόιντ. Τα αποτελέσματα παραμένουν πάντοτε τα ίδια. Μολονότι αδυνατούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα κατά πόσον θα παρατηρήσουμε K ή O, διαπιστώνουμε πάντοτε απόλυτη συμφωνία μεταξύ των πολώσεων των δύο φωτονίων. Παρατηρούμε πάντοτε KK ή OO, τίποτε άλλο. Πώς είναι δυνατόν να εξηγηθεί αυτή η τέ-

λεια συσχέτιση; Ο Αϊνστάιν θα επιθυμούσε να ερμηνεύσει αυτά τα αποτελέσματα ως ένδειξη ότι στην πραγματικότητα οι πολώσεις των φωτονίων πρέπει να είχαν προκαθοριστεί ευθύς εξ αρχής. Αν βρούμε ότι το ένα φωτόνιο είναι Κ, τότε το γεγονός ότι και το άλλο είναι Κ δεν μας εκπλήσσει καθόλου εάν οι πολώσεις είχαν καθοριστεί εξ αρχής. Κάθε εναλλακτική εξήγηση μοιάζει να προϋποθέτει πως μεταξύ των δύο φωτονίων αναπτύσσεται κάποια μυστηριώδης αλληλεπίδραση τύπου «δράσεως εξ αποστάσεως», η οποία καθορίζει την πόλωση του δεύτερου φωτονίου ευθύς μόλις η μέτρηση επί του πρώτου δώσει το αποτέλεσμα Κ ή Ο.

Η δράση εξ αποστάσεως δεν αρέσει ιδιαίτερα στους φυσικούς που πιστεύουν στις κατηγορίες της αιτίας και του αποτελέσματος. Στον ηλεκτρομαγνητισμό του Maxwell, οι δυνάμεις διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός μέσω του ηλεκτρικού πεδίου. Αν έχουμε μια κατανομή φορτίων πολύ απομακρυσμένων μεταξύ τους και σείσουμε κάποια φορτία στο ένα μέρος, η επίδραση της ενέργειάς μας μεταδίδεται στα υπόλοιπα φορτία μέσω μεταβολών στο ηλεκτρικό πεδίο οι οποίες ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός. Η ιδέα ότι το να τεθούν κάποια φορτία σε κίνηση στο ένα μέρος μπορεί να επηρεάσει ακαριαία άλλα φορτία σε κάποιον πολύ μακρινό τόπο δεν θεωρείται σοβαρή. Ο Αϊνστάιν ένιωθε βαθιά απέχθεια γι' αυτή τη συνέπεια της κβαντικής μηχανικής και ήθελε πάση θυσία να αποφύγει κάθε είδους «υπερφυσικά» σήματα διαδιδόμενα με ταχύτητες μεγαλύτερες από εκείνη του φωτός. Η αντίδραση του Bohr στην πρόκληση του Αϊνστάιν δεν βοήθησε καθόλου. Στην ουσία, ο Bohr επανέλαβε τη συμβατική κοπεγχαγιανή άποψη ότι το κβαντικό σύστημα πρέπει να θεωρείται ως μία ενιαία ολότητα —τα δύο φωτόνια μαζί με τους δύο ανιχνευτές ως ένα ενιαίο κβαντικό σύστημα—, και ότι επομένως δεν έχει νόημα να μιλά κανείς για την επίδραση της μίας μέτρησης πάνω στην άλλη. Πρόκειται για μια όχι ιδιαίτερα ικανοποιητική «εξήγηση», η οποία οπωσδήποτε δεν ικανοποίησε τον Αϊνστάιν. Μέσα στην εξήγηση του Bohr υπολανθάνει ο υπαινιγμός ότι η κβαντική μηχανική πρέπει να έχει περίεργες ιδιότητες «δράσεως εξ αποστάσεως».

Το 1964, σχεδόν τριάντα χρόνια μετά την εργασία των EPR και εννέα χρόνια μετά το θάνατο του Αϊνστάιν, ο John Bell ήρθε να δώσει νέα τροπή στην ιστορία του παραδόξου EPR. Ο Bell ήταν Ιρλανδός και αγαπούσε τα ιρλανδέζικα αστεία. Συχνά χαρακτήριζε τη συμβολή του στη συζήτηση για το παράδοξο με τα εξής λόγια: «Ο Αϊνστάιν και ο Bohr εξέτασαν τις συσχετίσεις (των πολώσεων) στις 0 και στις 90 μοίρες. Εγώ εξέτασα τι γινόταν στις 37 μοίρες!» Ο Bell κάποτε παρομοίασε τα δύο φωτόνια EPR με δύο μονοωικά δίδυμα. Αν χωρίσετε δύο μονοωικά δίδυμα μόλις γεννηθούν και αργότερα διαπιστώσετε ότι το ένα έχει κόκκινα μαλλιά, δεν εκπλήσσεστε καθόλου που και το άλλο έβγαλε κόκκινα μαλλιά. Μια τέτοια συσχέτιση είναι γενετικά προκαθορισμένη —δεν τίθεται ζήτημα κάποιου παράξενου σήματος που διαδίδεται ταχύτερα από το φως. Ο David Lindley, στο εξαιρετικό βιβλίο του *Where does the Weirdness Go* (Πού πηγαίνει η αλλοκοτιά), αναλύει το πρόβλημα με τη βοήθεια ενός ζευγαριού γαντιών. Αν κάποιος αγοράσει ένα ζευγάρι γάντια και αποστείλει ταχυδρομικώς το ένα γάντι σε ένα φίλο στο Χονγκ Κονγκ και το άλλο σε ένα φίλο στη Νέα Υόρκη, μπορούμε πολύ εύκολα να καταλάβουμε τι θα συμβεί όταν οι αποδέκτες ανοίξουν τα δώρα τους. Όταν ο φίλος στο Χονγκ Κονγκ βρει στο πακέτο το αριστερό γάντι, θα γνωρίζει αυτόματα ότι ο άλλος φίλος στη Νέα Υόρκη θα έχει το δεξιό. Εδώ δεν υπάρχει καμία μυστηριώδης



Ο John Stewart Bell (1928-1991) γεννήθηκε στο Μπέλφαστ της βόρειας Ιρλανδίας, μέσα σε μια οικογένεια χωρίς ακαδημαϊκές παραδόσεις. Παρότι δεν κατάφερε να κερδίσει υποτροφία ώστε να παρακολουθήσει κάποια σχολή μέσης εκπαίδευσης, μπόρεσε να εγγραφεί στο Τεχνικό Κολλέγιο του Μπέλφαστ όπου εκτός από ακαδημαϊκά μαθήματα διδάχθηκε ξυλουργική και πλινθοδομική. Μετά την αποφοίτησή του από το Queen's University του Μπέλφαστ, ήρθε στο CERN, αφού προηγουμένως είχε εργαστεί στη σχεδίαση επιταχυντών σωματιδίων στο Μάιλβερν (δυτική Αγγλία), όπου γνώρισε τη σύζυγό του Mary, και αφού είχε διεξαγάγει έρευνα στην ονομαστή ομάδα θεωρητικής φυσικής του Rudolf Peierls στο Μπίρμιγχαμ. Την περίφημη εργασία του για την ανισότητά του την έγραψε ενώ βρισκόταν σε επίσκεψη στο Πανεπιστήμιο Stanford (ΗΠΑ)· τη δημοσίευσε σε ένα άσημο περιοδικό ώστε να μην υποχρεωθεί να ζητήσει από το πανεπιστήμιο να πληρώσει τα έξοδα δημοσίευσης.

δράση εξ αποστάσεως. Η συσχέτιση —αριστερό γάντι στο Χονγκ Κονγκ, δεξιό στη Νέα Υόρκη— είναι προκαθορισμένη εξ αρχής. Αυτού του είδους η στιγμή «κατάρρευση γνώσης» μάς είναι οικεία από την καθημερινή ζωή. Η ανεκτίμητη συμβολή του John Bell συνίσταται στο ότι έδειξε πως η κβαντική μηχανική προβλέπει συσχέτιση *ισχυρότερη* από τις τέτοιου είδους εξόφθαλμες προκαθορισμένες «κλασικές» συσχετίσεις.

Ο John Bell πραγματοποίησε αυτό τον άθλο εξάγοντας μια «ανισότητα» για τις συσχετίσεις που προκύπτουν από προκαθορισμένες συνθήκες σύμφωνες με τον κοινό νου και αποδεικνύοντας εν συνεχεία ότι η εν λόγω ανισότητα παραβιάζοταν από τις συσχετίσεις τις οποίες προβλέπει η κβαντική μηχανική. Η ύπαρξη αυτής της ανισότητας έδωσε στους φυσικούς τη δυνατότητα να ελέγξουν κατά πόσον η φύση ακολουθεί την κβαντική μηχανική —με τις διαδιδόμενες ταχύτερα από το φως επιδράσεις της— ή τις ντετερμινιστικές θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών όπως θα προτιμούσε ο Αϊνστάιν. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να εξαχθεί μαθηματικώς η ανισότητα του Bell, και δεν σκοπεύουμε να τους αναπαραγάγουμε εδώ. Αντί τούτου, θα επιχειρήσουμε να παρουσιάσουμε μια μη μαθηματική, «δαισθητική» απόδειξη της ανισότητας που ακολουθεί μια προσέγγιση την οποία σκιαγράφησε ο Bell σε κάποια από τις τελευταίες «εκλαϊκευτικές» διαλέξεις του πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Δεδομένου ότι, για να παρακολουθήσει κανείς το επιχείρημα, χρειάζεται να καταβάλει κάποια προσπάθεια, όσοι αναγνώστες είναι πρόθυμοι να μας εμπιστευθούν και να δεχτούν καλή τη πίστει αυτό το αποτέλεσμα μπορούν να παραλείψουν τα επόμενα και να συνεχίσουν το διάβασμα από την τελευταία παράγραφο αυτής της ενότητας. Από την άλλη, όμως, υποστηρίζουμε ότι αξίζει τον κόπο να μελετήσετε λεπτομερώς το επιχείρημα, καθώς πρόκειται για μία από εκείνες τις σπάνιες για τη φυσική περιπτώσεις όπου ένα θεμελιακό και πανίσχυρο αποτέλεσμα μπορεί να κατανοηθεί χωρίς τη χρήση προχωρημένων μαθηματικών.

Αρχίζουμε με την κατά Bohm εκδοχή του πειράματος EPR (βλ. Εικόνα 8.4) και συγκεντρώνουμε την προσοχή μας στο πλήθος των ζευγών φωτονίων που οι πολώσεις τους *δεν* συμφωνούν. Όταν τα δύο πολαρόντ τα οποία λειτουργούν ως ανιχνευτές πόλωσης είναι αμφοτέρα κατακόρυφα, έχουμε τέλεια συμφωνία: δεν υπάρχουν περιπτώσεις όπου το ένα από τα φωτόνια του ζεύγους διέρχεται από το πρώτο πολαρόντ ενώ το άλλο δεν καταφέρνει να διέλθει από το δεύτερο παράλληλο πολαρόντ-ανιχνευτή. Ως εδώ, κρατούσαμε και τα δύο πολαρόντ-ανιχνευτές προσανατολισμένα ακριβώς παράλληλα. Τώρα όμως θα αφήσουμε τα πολαρόντ να περιστραφούν και να εκτραπούν από την κατακόρυφο —κατά γωνία θ_1 το πολαρόντ 1 και κατά γωνία θ_2 το πολαρόντ 2. Περιμένουμε ότι το πλήθος N των ζευγών φωτονίων που βρίσκονται σε ασυμφωνία —το ένα διέρχεται, το άλλο όχι— θα εξαρτάται και από τις δύο αυτές γωνίες. Δείχνουμε ρητά αυτή την εξάρτηση συμβολίζοντας το εν λόγω πλήθος ως $N(\theta_1, \theta_2)$. Όταν και τα δύο πολαρόντ είναι παράλληλα, έχουμε $\theta_1 = \theta_2 = 0$ και, όπως είδαμε, δεν υπάρχουν ασύμφωνα ζεύγη. Αυτή η κατάσταση πραγμάτων μπορεί να συνοψιστεί στην εξής εξίσωση:

$$N(0, 0) = 0.$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση απλώς δηλώνει ότι τα ζεύγη φωτονίων βρίσκονται πάντοτε σε τέλεια συμφωνία.

Θα προσπαθήσουμε τώρα να σας εξηγήσουμε τι περιμένουμε να



Οι συμμετέχοντες στο Συνέδριο Solvay του 1927, στο Ξενοδοχείο Μετροπόλ των Βρυξελλών. Το συνέδριο αυτό χρηματοδοτούνταν από τον Ernest Solvay, ο οποίος είχε επινοήσει μια μέθοδο βιομηχανικής παραγωγής σόδας, και το πρώτο διοργανώθηκε το 1911. Οι συμμετοχές περιορίζονταν σε περίπου τριάντα κορυφαίους επιστήμονες, και κατά παράδοση η βασιλική οικογένεια του Βελγίου παρέθετε στους συνέδρους δείπνο. Μέσω αυτών των κοινωνικών εκδηλώσεων συνδέθηκαν ο Αϊνστάϊν και η Βασίλισσα Ελισάβετ του Βελγίου με ακατόλητους δεσμούς φιλίας.

βρούμε όταν περιστρέφουμε τον έναν ή και τους δύο ανιχνευτές εκτρέποντάς τους από την κατακόρυφο. Για να καταλάβουμε τι πρέπει να περιμένουμε στην περίπτωση όπου έχουμε να κάνουμε με μια κατάσταση προδιαγεγραμμένη κατά τρόπο σύμφωνο με τον κοινό νου, θα επιμείνουμε πως ό,τι συμβαίνει στον έναν ανιχνευτή δεν επηρεάζει διόλου το τι συμβαίνει στον άλλο. Φανταζόμαστε επίσης, όπως ο Αϊνστάϊν, ότι τα φωτόνια του ζεύγους πρέπει πραγματικά να είναι πολωμένα σε παράλληλες διευθύνσεις από την αρχή. Όταν το κάθε φωτόνιο φτάνει στον ανιχνευτή, δεχόμαστε ότι ισχύει η κβαντική μηχανική μόνο στο βαθμό που μας το επιβάλλει το γεγονός ότι θα χρησιμοποιήσουμε το προηγούμενό μας «διανυσματικό μοντέλο» για να αναλύσουμε τις πιθανότητες διάδοσης των φωτονίων. Ας θεωρήσουμε ένα δείγμα δώδεκα ζευγών φωτονίων δημιουργημένων με πόλωση ΚΚ. Αν στρέψουμε το δεξιό πολαρόνιτ κατά 30 μοίρες, το κλάσμα των φωτονίων που περνά τώρα από τον ανιχνευτή δίνεται από το $(\sin 30)^2$, ή $3/4$ (Εικόνα 8.5). Βρίσκουμε επομένως ότι το $1/4$ των ζευγών φωτονίων —ή τρία στα δώδεκα— θα βρίσκονται τώρα σε ασυμφωνία: τα αριστερά φωτόνια περνούν πάντα από το αριστερό πολαρόνιτ Κ, αλλά τρία από τα δεξιά φωτόνια δεν περνούν από το στραμμένο πολαρόνιτ στη δεξιά πλευρά. Αυτή την κατάσταση μπορούμε να την περιγράψουμε με την ακόλουθη εξίσωση:

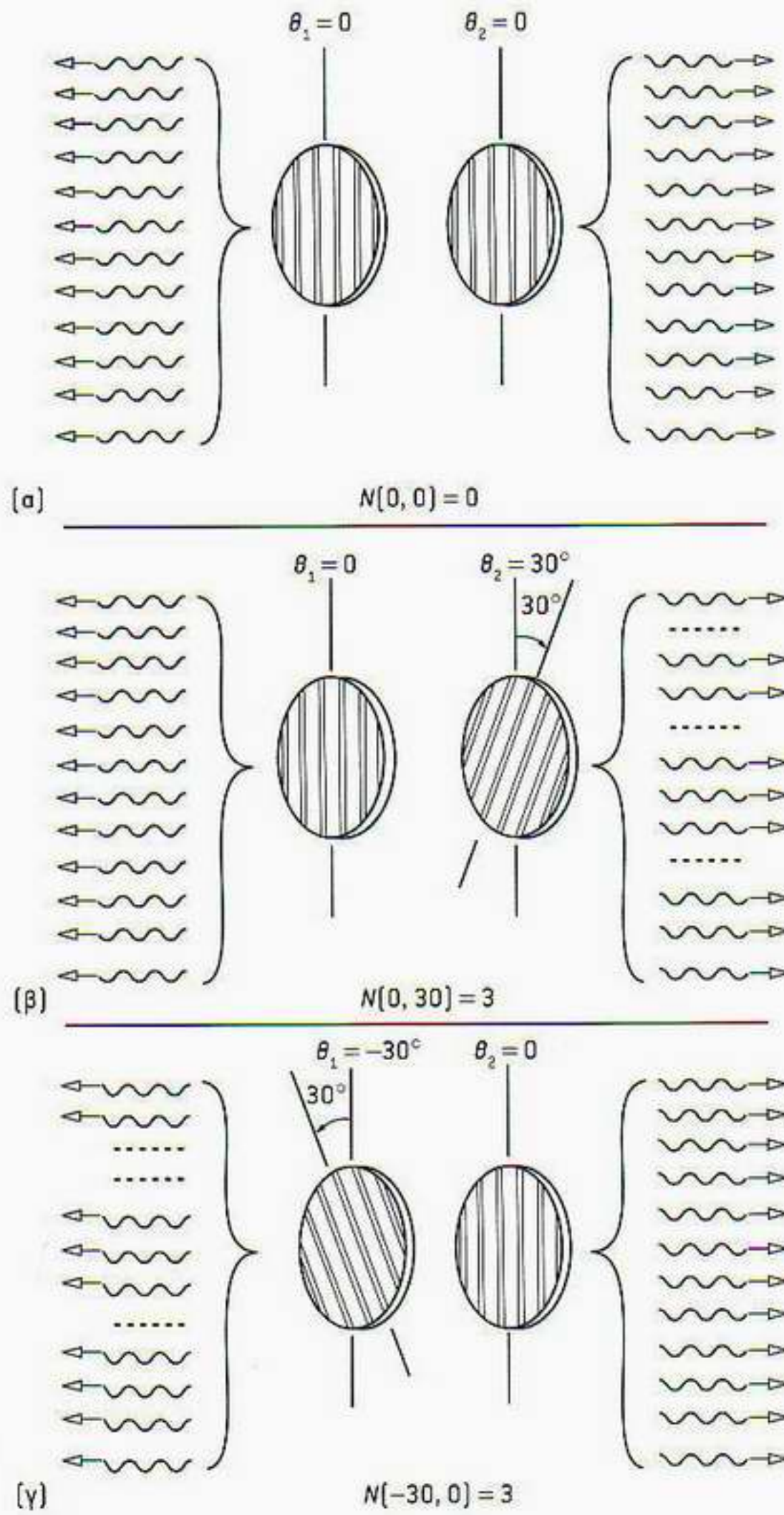
$$N(0, 30) = 3.$$

Εκτελούμε τώρα ένα άλλο πείραμα επαναφέροντας τα δεξιά πολαρόνιτ στην κατακόρυφη διεύθυνση και στρέφοντας το αριστερό κατά 30 μοίρες κατά την αντίθετη φορά. Με την ίδια συλλογιστική, καταλήγουμε στο αποτέλεσμα:

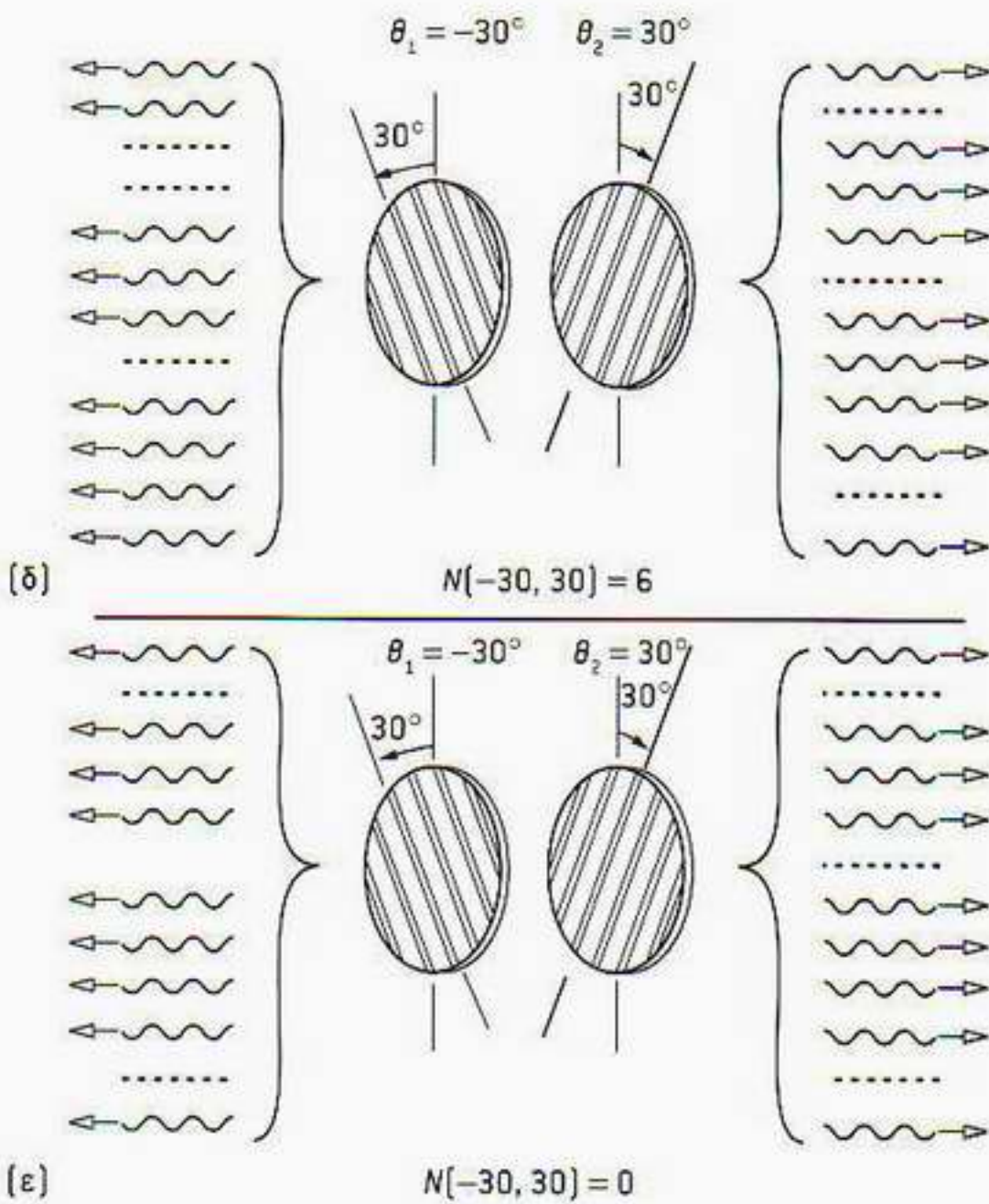
$$N(-30, 0) = 3.$$



Μολονάτι ο David Bohm (1917-1992) υπήρξε ο συγγραφέας ενός οξυδερκούς και προσεγμένου συγγράμματος που δισηνεόταν από την κοπεγκασιανή ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής, αργότερα μετετρήθη σε έναν από τους δριμύτερους επικριτές αυτής της ορθοδοξίας. Οι συζητήσεις που είχε με τον Αϊνστάϊν ενόσω βρισκόταν στο Πρίνστον τον οδήγησαν να απορνηθεί την ορθόδοξη άποψη. Ο Bohm αναγκάστηκε αργότερα να εγκαταλείψει τις ΗΠΑ λόγω των αριστερών φρονημάτων του την εποχή των διαβόητων ακράσεων Μακ Κάρθι. Μετέπειτα ανέπτυξε τη θεωρία των «οδηγών κυμάτων», μια εναλλακτική διατύπωση της κβαντικής μηχανικής που εισηγήθηκε ο De Broglie.



Εικόνα 8.5 Οι τρεις πειραματικές διευθετήσεις που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της ανισότητας Bell μαζί με δειγματοληπτικά αποτελέσματα για δώδεκα διαφορετικές επαναλήψεις του πειράματος στη βάση της παραδοχής ότι αρχικώς τα δώδεκα ζεύγη φωτονίων είναι πολωμένα κατακόρυφα. Η κυματιστή γραμμή δηλώνει ότι το φωτόνιο διέρχεται από τον ανιχνευτή, ενώ η εστιγμένη γραμμή ότι δεν περνά. (α) Και τα δύο πολυρόντ τοποθετούνται κατακόρυφα, έτσι ώστε $\theta_1 = \theta_2 = 0$. (β) και (γ) Η κατάσταση με το ένα πολυρόντ στραμμένο κατά ± 30 μοίρες. (δ) και (ε) Πιθανά αποτελέσματα που λαμβάνονται με τα πολυρόντ στραμμένα αμφότερα κατά 30 μοίρες με αντίθετη φορά: το (δ) δείχνει πώς μπορεί να προκύψει ο μέγιστος δυνατός αριθμός ασυμφωνιών, το δε (ε) πώς μπορεί να προκύψει ο ελάχιστος αριθμός ασυμφωνιών. Τούτα τα «αποτελέσματα» που προβλέπει η κοινή λογική στηρίζονται στην παραδοχή ότι τα φωτόνια δρουν ανεξάρτητα. Η κβαντική μηχανική προβλέπει ότι θα υπάρξουν περισσότερες ασυμφωνίες απ' όσες δείχνει το (δ).



Εικόνα 8.5 Συνέχεια.

Ας εξετάσουμε τώρα τι περιμένουμε να συμβεί όταν εκτελούμε το πείραμα και με τα δύο πολαρόιντ στραμμένα. Υποθέτουμε ότι και τα δύο φωτόνια βρίσκονται αρχικά στην κατάσταση K και ότι οι μετρήσεις στον ένα ανιχνευτή δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις στον άλλο. Στα δεξιά πρέπει να βρούμε, όπως και προηγουμένως, ότι τρία φωτόνια δεν περνούν. Ομοίως και στα αριστερά, τρία φωτόνια δεν περνούν. Εφόσον το αν θα περάσει ή δεν θα περάσει κάθε συγκεκριμένο φωτόνιο από τον κάθε ανιχνευτή θεωρείται ζήτημα πιθανοτήτων, τούτες οι μη διελύσεις μπορεί να αφορούν φωτόνια από διαφορετικά ζεύγη. Αν αυτές οι μη διελύσεις συμβούν σε έξι διαφορετικά ζεύγη, θα βρίσκαμε ότι έχουμε το πολύ έξι ασυμφωνίες. Ωστόσο, αν οι έξι μη διελύσεις συνέβαιναν σε τρία ζεύγη φωτονίων, τότε δεν θα βρίσκαμε καθόλου ασυμφωνίες —εφόσον εννέα ζεύγη περνούν και από τους δύο ανιχνευτές και τρία ζεύγη δεν περνούν από κανέναν ανιχνευτή. Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων περιπτώσεων μπορούν να υπάρξουν και ενδιάμεσες. Βλέπουμε ότι η ταυτόχρονη στροφή και των δύο πολαρόιντ μπορεί να μετατρέψει μερικές από (ή και όλες) τις αναμενόμενες ασυμφωνίες σε συμφωνίες —στις περιπτώσεις όπου και τα δύο φωτόνια δεν περνούν από τα αντίστοιχά τους πολαρόιντ. Τούτη η σύμφωνη με τον κοινό νου πρόβλεψη σχετικά με τις πολώσεις μπορεί να συνοψιστεί με τη μορφή μιας ανισότητας:

$$N(30, -30) \leq N(30, 0) + N(0, -30).$$

Αυτή είναι η ανισότητα Bell —σημειωτέον δε ότι η κβαντική μηχανική την παραβιάζει! Στην περίπτωση που εξετάσαμε, η κβαντική μηχανική δεν προ-

καθορίζει τη διεύθυνση της βάσης πόλωσης, οπότε, χρησιμοποιώντας το διανυσματικό μας τρίγωνο με $\theta = 60$, προβλέπουμε ότι το αριστερό μέλος της ανισότητας ισούται με $(\eta\mu 60)^2 = 3/4$. Με ανάλογο επιχειρήμα με $\theta = 30$ και για τους δύο όρους του δεξιού μέλους, βρίσκουμε το αριστερό μέλος ίσο με $2(\eta\mu 30)^2 = 1/2$. Και επειδή το $3/4$ προφανώς δεν είναι μικρότερο ή ίσο του $1/2$, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η κβαντική μηχανική παραβιάζει την ανισότητα Bell.

Η ανισότητα Bell καθιστά δυνατό τον πειραματικό έλεγχο της κβαντικής μηχανικής. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ο Alain Aspect και η ομάδα του πραγματοποίησαν στο Παρίσι μια σειρά όμορφων πειραμάτων που αποσκοπούσαν στη μέτρηση των συσχετίσεων EPR. Αυτά τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι η ανισότητα Bell όντως παραβιάζόταν και ότι οι προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής βρίσκονταν σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Μολονότι δεν αναπαρήγαν τέλεια όλες τις συνθήκες του νοπτικού πειράματος —στον πραγματικό κόσμο, για παράδειγμα, οι ανιχνευτές φωτονίων δεν έχουν απόδοση 100%—, οι περισσότεροι φυσικοί αποδέχονται πλέον ότι η κβαντική μηχανική πέρασε με επιτυχία τούτο τον έλεγχο. Και τι μας λένε τα εν λόγω πειράματα για τη φύση της πραγματικότητας; Η παρατηρούμενη παραβίαση της ανισότητας Bell σημαίνει ότι καμία θεωρία κρυμμένων μεταβλητών —χωρίς κάποια εμφανή ή υπολανθάνουσα δυσάρεστη ιδιότητα δράσεως εξ αποστάσεως— δεν έχει ελπίδα να συμφωνήσει με το πείραμα. Ο Αϊνστάιν, αν και κατά πάσαν πιθανότητα θα προτιμούσε κάποια εξήγηση της κβαντικής μηχανικής στη βάση υποκείμενων, ντετερμινιστικών κρυμμένων μεταβλητών, αναμφίβολα δεν θα έσπευδε να αποδεχθεί την ύπαρξη τέτοιων φαινομένων «υπερφυσικής δράσης εξ αποστάσεως».

Η γάτα του Schrödinger

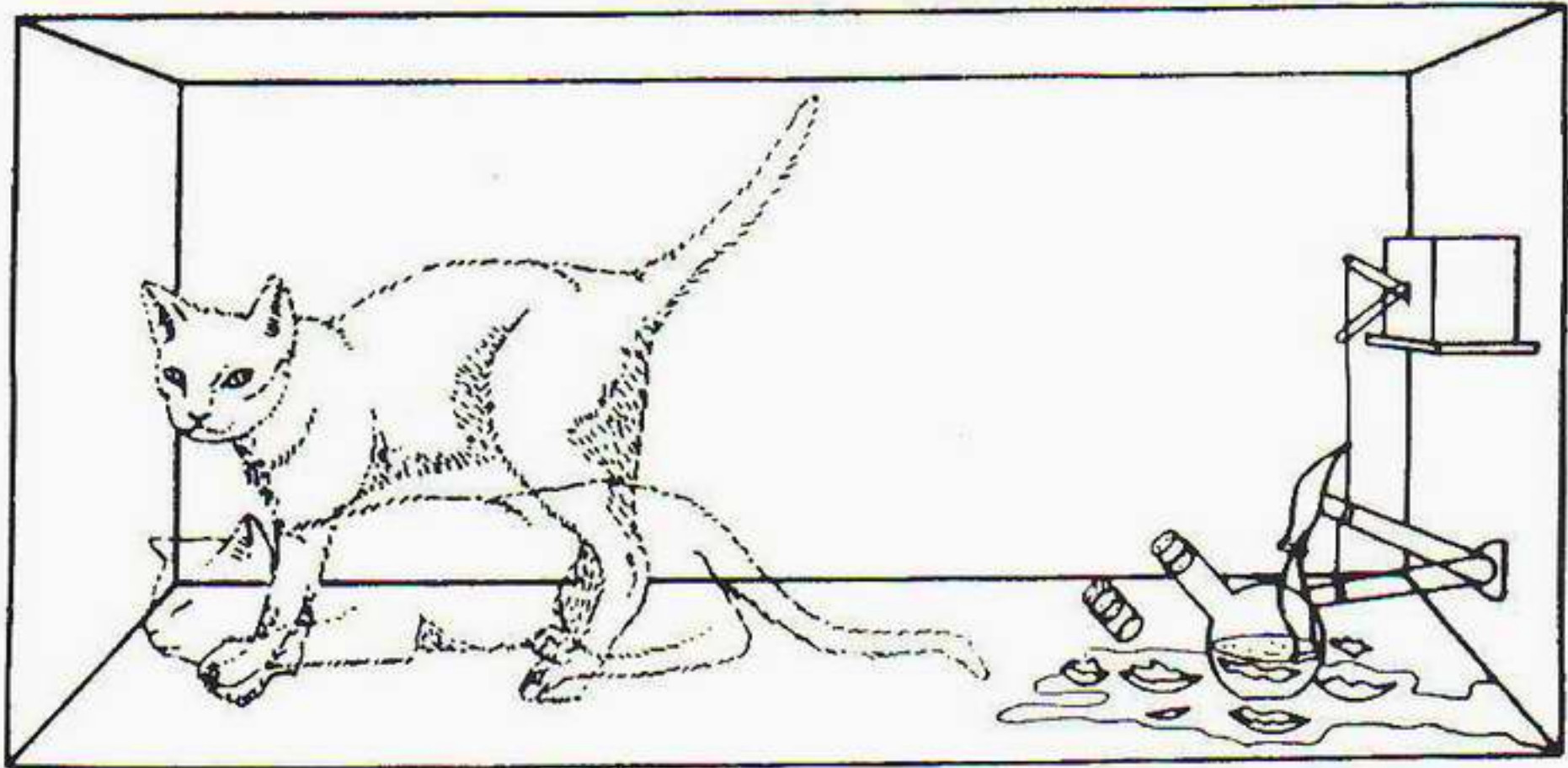
Ο Schrödinger, ένας από τους πατέρες της θεωρίας, έμεινε βαθιά δυσαρεστημένος με την μποριανή ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Το παράδοξο που εισήγαγε, γνωστό ως παράδοξο της γάτας του Schrödinger, αποσκοπούσε στο να δώσει έμφαση στο καίριο πρόβλημα της μέτρησης. Σύμφωνα με τον Bohr, ο κόσμος μπορεί να διαιρεθεί από τη μια σε *κβαντικά συστήματα*, τα οποία αλληλεπιδρούν και εξελίσσονται σύμφωνα με την εξίσωση του Schrödinger, και από την άλλη σε κλασικά συστήματα, όπως οι απαριθμητές και οι δείκτες, τα οποία υπακούουν στους νόμους του οικείου καθημερινού κόσμου. Σε αντίθεση με τα κλασικά αντικείμενα, ένα κβαντικό σύστημα μπορεί, όπως έχουμε δει, να υπάρχει σε μια υπέρθεση αρκετών κβαντικών καταστάσεων. Είναι η διαδικασία της μέτρησης που υποτίθεται ότι με κάποιον τρόπο προκαλεί την κατάρρευση της κβαντικής υπέρθεσης και την αναγωγή της σε μια καθορισμένη κλασική κατάσταση —η οποία μπορεί να καθορίζεται από την κατάσταση ενός κλασικού απαριθμητή ή από τη θέση ενός κλασικού δείκτη. Άρα, στον *παρατηρητή* και μόνο σε αυτόν εναπόκειται να αποφασίσει ποιες ιδιότητες θα μετρήσει και πότε θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση. Μόνο μετά τη μέτρηση επιτρέπεται να αποδώσουμε καθορισμένες ιδιότητες στο κβαντικό σύστημα. Εδώ εντοπίζουμε μια βαθιά διαφορά σε σχέση με τα ισχύοντα στην κλασική φυσική, για την οποία οι ιδιότητες ενός κλασικού αντικειμένου υποτίθενται υπάρχουσες ανεξαρτήτως παρατηρητή ή μετρητικής διάταξης.

Ο Schrödinger δυσφορούσε από την αρχή. Ήδη από το 1926 θρηνολογούσε: «Αν όλο τούτο το καταραμένο κβαντικό χοροπηδητό πρόκειται στ' αλήθεια να διαρκέσει για πάντα, τότε θα μετανιώσω που ανακατεύτηκα στην κβαντική θεωρία.» Πού βρίσκεται το πρόβλημα; Στο ότι τα πάντα είναι κβαντομηχανικά. Παρά τη φαινομενική στερεότητα του κόσμου γύρω μας, τα πάντα αποτελούνται από άτομα και ηλεκτρόνια, τα ίδια άτομα και ηλεκτρόνια που υποτίθεται ότι είναι περίεργα κυματοσωματιδιακά κβαντικά αντικείμενα τα οποία διέπονται από την εξίσωση του Schrödinger και όχι από τους νόμους του Νεύτωνα. Γιατί να χρειάζεται τάχα να χωρίζουμε τον κόσμο σε κβαντικά συστήματα και σε κλασική μετρητική διάταξη; Και πώς μπορεί ένας παρατηρητής, που σε τελική ανάλυση και αυτός από άτομα και ηλεκτρόνια αποτελείται, να θέτει εαυτόν εκτός συστήματος ώστε να εκτελέσει τη μέτρηση; Πρόκειται για προβλήματα τα οποία προσλαμβάνουν όλως ιδιαίτερη οξύτητα όταν κανείς θελήσει να στοχαστεί την έννοια της κυματοσυνάρτησης του Σύμπαντος.

Για να φωτίσει τέτοιας φύσεως ερωτήματα, ο Schrödinger δεν δίστασε να θυσιάσει τη γάτα του στο βωμό της επιστήμης. Ιδού πώς περιέγραψε την κατάσταση (Εικόνα 8.6):

Μια γάτα κλείνεται σε έναν χαλύβδινο θάλαμο, μαζί με την εξής διαβολική συσκευή: σε έναν απαριθμητή Geiger υπάρχει μια εξαιρετικά μικρή ποσότητα ραδιενεργής ουσίας, τόσο μικρή ώστε μέσα σε μία ώρα να μπορεί να διασπαστεί ένα το πολύ άτομο, αλλά να είναι εξίσου πιθανό να μη διασπαστεί και κανένα· εάν συμβεί διάσπαση, ο απαριθμητής εκφορτίζεται και μέσω ενός ρελέ απελευθερώνει ένα σφυρί, το οποίο σπάζει ένα φιαλίδιο με υδροκυανικό οξύ. Αν τώρα άφηνε κανείς όλο αυτό το σύστημα μόνο του επί μία ώρα, θα έλεγε ότι η γάτα συνεχίζει να ζει εάν εν τω μεταξύ δεν διασπάστηκε κανένα άτομο. Η πρώτη διάσπαση ατόμου θα την είχε δηλητηριάσει. Η συνάρτηση ψ ολόκληρου του συστήματος θα εξέφραζε αυτή την κατάσταση πραγμάτων με το να εμπεριέχει τη ζωντανή και τη νεκρή γάτα (συγχωρήστε μου την έκφραση) αναμεμιγμένες ή συμφυρμένες σε ίσα μέρη.

Με άλλα λόγια, ώσπου να ανοίξουμε το θάλαμο έπειτα από μία ώρα και να παρατηρήσουμε τη γάτα, η κβαντική μηχανική μοιάζει να βεβαιώνει ότι η γάτα βρίσκεται σε μια κβαντική υπέρθεση. Αδυνατούμε να φανταστούμε πώς θα μπορούσε να βρίσκεται σε κβαντική υπέρθεση δύο διαφορετικών καταστάσεων ταυτόχρονα κάποιο κλασικό αντικείμενο, πόσω μάλλον ένα ζώο όπως η γάτα. Μπορεί στ' αλήθεια να λέει η κβαντική μηχανική ότι είναι η πράξη της παρατήρησης της γάτας που προκαλεί την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης και την αναγωγή της σε νεκρή ή ζωντανή γάτα; Το πρόβλημα αυτό ενέβαλε σε ανησυχία δύο από τους μεγάλους θεωρητικούς της κβαντικής μηχανικής του περασμένου αιώνα, τον John von Neumann και τον Eugene Wigner. Τελικά και οι δύο προσχώρησαν στην άποψη ότι η συνείδηση του παρατηρητή πρέπει να διαδραματίζει βασικό ρόλο στην κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης. Πρόκειται για μια άποψη που μας πηγαίνει αμέσως σε πιο βαθιά νερά. Μπορεί ένα ζώο με συνείδηση όπως η γάτα να προκαλέσει την κατάρρευση της ίδιας της κυματοσυνάρτησης; Τι θα συμβεί αν κατασκευάσουμε έναν ακόμη αστάλινο θάλαμο και τον ενώσουμε με εκείνον που περιέχει τη γάτα με ένα παράθυρο παρατήρησης μεταξύ τους; Αν αφήσουμε τη «φίλη του Wigner»



Εικόνα 8.6 Η πειραματική διάταξη για το περίφημο νοητικό πείραμα του Schrödinger με την ατυχή γάτα του. Η διάσπαση ενός ραδιενεργού πυρήνα θα προκαλέσει τη θραύση φιαλιδίου που περιέχει υδροκυανικό οξύ. Το πείραμα έχει προετοιμαστεί προσεκτικά, και το ραδιενεργό υλικό είναι τόσο ώστε να υπάρχει ακριβώς 50% πιθανότητα να διασπαστεί ένας πυρήνας στη διάρκεια μίας ώρας. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, όταν θα έχει παρέλθει η μία αυτή ώρα, η γάτα θα περιγράφεται από μια υπέρθεση που θα περιέχει σε ίσο βαθμό τις κυματοσυναρτήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε μια ζωντανή και σε μια νεκρή γάτα! Όταν ανοίξουμε το θάλαμο, θα βρούμε τη γάτα ή νεκρή ή ζωντανή. Το μυστήριο έγκειται στο πώς συντελείται μια τέτοια «μέτρηση» και πώς καταρρέει η κυματοσυναρτηση αναγόμενη σε μια καθορισμένη κατάσταση της υγείας της γάτας.

να παρακολουθεί τη γάτα ώσπου να περάσει η μία ώρα, τότε μπορούμε να τη ρωτήσουμε αν η γάτα πέθανε όταν διασπαστηκε το άτομο ή όταν ανοίξαμε το θάλαμο για να δούμε τι έγινε. Ή μήπως η μέτρηση και η κατάρρευση συμβαίνουν νωρίτερα επειδή βάλαμε τη φίλη του Wigner να παρακολουθεί; Αν η συνείδηση αποτελεί τη μοναδική μη κβαντομηχανική πλευρά του κόσμου, γιατί τότε συμφωνούν διαφορετικοί παρατηρητές στην ίδια εικόνα του φυσικού κόσμου; Ήταν πολύ φυσικό να ρωτά ο Αϊνστάιν αν η Σελήνη συνεχίζει να υπάρχει στη θέση της όταν δεν την κοιτάζουμε! Ας περάσουμε σε δύο προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος της μέτρησης: τους «πολλούς κόσμους» και την «άρση της συνεκτικότητας».

Η ερμηνεία των πολλών κόσμων

Η παραδοσιακή περιγραφή σύνολης της κβαντικής μηχανικής του κόσμου μέσω μιας Κυματοσυναρτησης-Τέρατος (η οποία περιλαμβάνει και όλους τους παρατηρητές) που υπακούει σε κάποια εξίσωση του Schrödinger συνεπάγεται μια απίστευτα πολύπλοκη απειρία ιλατών πιθανότητας. Αν εγώ τζογάρω στο Λας Βέγκας, και αν σκέφτομαι να βάλω μερικά λεφτά στο είκοσι δύο της ρουλέτας, και αν η κοπέλα δίπλα μου χύσει το ποτό της επειδή είδε κάποιον γνωστό της, με αποτέλεσμα να χάσω την ευκαιρία να ποντάρω, και αν τελικά έρθει είκοσι δύο, τότε καταλαβαίνω ότι ολόκληρη η πορεία του Σύμπαντος σε ό,τι αφορά εμένα κρεμόταν από

το γεγονός ότι κάποιο μικρό φωτόνιο χτύπησε τις νευρικές απολήξεις του αμφιβληστροειδούς της. Έτσι διακλαδίζεται ολόκληρο το Σύμπαν σε κάθε ατομικό συμβάν. Τώρα, όσοι επιμένουν να παίρνουν όλη την κβαντική μηχανική κατά γράμμα είναι ικανοποιημένοι με μια τέτοια εικόνα· εφόσον δεν υπάρχει εξωτερικός παρατηρητής για μια κυματοσυνάρτηση που περιγράφει ολόκληρο το Σύμπαν, υποστηρίζουν πως η σωστή περιγραφή του κόσμου περιλαμβάνει όλα τα πλάτη πιθανότητας τα οποία διακλαδίζονται κατ' αυτό τον τρόπο από κάθε ατομικό συμβάν.

Richard Feynman

Πολλοί φυσικοί πρότειναν διάφορες «ερμηνείες» της κβαντικής μηχανικής με σκοπό να παράσχουν μια συνεπή εξήγηση του προβλήματος της μέτρησης καθώς και μια κατανόηση της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης. Την πιο παράξενη ίσως από όλες αυτές τις προτάσεις τη διατύπωσε το 1957 ο Hugh Everett στη διδακτορική διατριβή του. Ακόμη και ο John Wheeler, μολονότι ο Everett ήταν φοιτητής του στο Πανεπιστήμιο του Πρίνστον, βρήκε το πρώτο σχεδιάσμα της διατριβής «μετά δυσκολίας καταληπτό». Αν και ο Wheeler ήταν βέβαιος ότι η διατριβή περιείχε μια εξαιρετικά πρωτότυπη ιδέα, θεώρησε πρόπον να γράψει ο ίδιος μια συνοδευτική εργασία που θα καθιστούσε τη διατριβή του Everett «πιο εύπεπτη» για τους εξεταστές του! Η ιδέα του Everett έτυχε ελάχιστης προσοχής έως ότου, δέκα χρόνια αργότερα, ένας συνεργάτης του Wheeler, ο Bryce DeWitt, έγραψε ένα άρθρο όπου περιέγραφε την πρόταση του Everett ως *ερμηνεία των πολλών κόσμων* για την κβαντική μηχανική. Κατά τη συμβατική κοπεγχαγιανή αντίληψη, όταν ένας παρατηρητής χρησιμοποιεί κάποια κλασική μετρητική διάταξη για να εκτελέσει κάποια μέτρηση σε μια κβαντική υπέρθεση, πραγματώνεται ένα μόνο από τα δυνατά αποτελέσματα. Η μυστηριώδης μετρητική διαδικασία με κάποιον τρόπο προκαλεί την κατάρρευση όλων των διαφορετικών δυνατών εκβάσεων και την αναγωγή τους στη μία και μοναδική παρατηρούμενη έκβαση. Ο Everett και ο DeWitt εξάλειψαν το πρόβλημα με έναν συναρπαστικά ρηξικέλευθο τρόπο: διατύπωσαν την άποψη ότι οι δυνατότητες πραγματώνονται όλες, αλλά η καθεμία τους σε ένα διαφορετικό αντίγραφο του Σύμπαντος. Επιπλέον, κατά τον DeWitt, το καθένα από αυτά τα συμπαντικά αντίγραφα διαρκώς πολλαπλασιάζεται έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η πραγμάτωση όλων των δυνατών εκβάσεων κάθε μέτρησης. Όπως λέει ο DeWitt, «κάθε κβαντική μετάβαση που συντελείται σε κάθε άστρο, σε κάθε γαλαξία και σε κάθε απομακρυσμένη γωνιά του Σύμπαντος διαχωρίζει τον τοπικό μας κόσμο σε μυριάδες αντίγραφα του εαυτού του». Σε αυτή την εικόνα δεν υπάρχει κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης —τη θέση του Σύμπαντος την παίρνει ένα «πολυσύμπαν» από παράλληλα σύμπαντα.

Παρά την αξιόλογη ελκυστικότητα της συγκεκριμένης ιδέας, μια τέτοια προσέγγιση κρύβει αρκετά προβλήματα. Και πρώτα απ' όλα, αν αυτά τα ξεχωριστά σύμπαντα δεν μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους, δεν είναι διόλου σαφές κατά πόσον υπάρχει κάποιος τρόπος για να ελεγχθεί η πρόταση του Everett. Μια λύση του μετρητικού προβλήματος η οποία δεν παράγει καινούργιες προβλέψεις και δεν μπορεί να ελεγχθεί μοιάζει να είναι κενή περιεχομένου. Ακόμη και ο John Wheeler κατέληξε τελικά στο συμπέρασμα ότι η άποψη του Everett δεν κατάφερε τίποτε περισσότερο παρά να προσφέ-

ρει κάποιες νέες διαισθητικές ιδέες. Επίσης, η προσπάθεια λεπτομερούς διατύπωσης της θεωρίας ενδέχεται να προσκρούσει σε ορισμένα πραγματικά προβλήματα. Τον Feynman τον ανησυχούσε το γεγονός ότι στο καθένα από τα διαφορετικά σύμπαντα θα πρέπει να υποθέσουμε ότι υπάρχουν αντίγραφα του καθενός από εμάς. Ο καθένας από εμάς γνωρίζει με ποιον τρόπο διαιρέθηκε ο κόσμος για τον ίδιο, και μπορεί να ακολουθήσει την πορεία του παρελθόντος του. Όταν παρατηρούμε την πορεία μας κατά το παρελθόν, παίρνουμε άραγε ένα αποτέλεσμα «πραγματικό» κατά τον ίδιο τρόπο που θα ήταν πραγματικό αν την παρατήρηση την είχε κάνει ένας εξωτερικός παρατηρητής; Και πέραν τούτων, αν και μπορούμε να θεωρήσουμε τους εαυτούς μας ως εξωτερικούς παρατηρητές όταν κοιτάζουμε τον υπόλοιπο κόσμο, ο υπόλοιπος κόσμος περιέχει παρατηρητές που μας παρατηρούν. Θα συμφωνούμε άραγε πάντοτε σχετικά με το τι βλέπουμε; Όπως λέει ο Feynman, «αυτά είναι πολύ παρακινδυνευμένες εικασίες, και πολύ λίγα έχουμε να κερδίσουμε αν συνεχίσουμε να τις συζητάμε».

Ο John Bell επίσης ανησυχούσε για κάποιες συνέπειες της ερμηνείας των πολλών κόσμων. Τόσο ο Everett όσο και ο DeWitt υποστηρίζουν ότι η διακλάδωση της κυματοσυνάρτησης σε πολλά διαφορετικά σύμπαντα σχηματίζει μια δένδροειδή δομή —το μέλλον ενός δεδομένου κλάδου είναι αβέβαιο, αλλά για το παρελθόν του δεν ισχύει καθόλου το ίδιο. Ο Bell πίστευε ότι, στο μικροσκοπικό επίπεδο, η θεωρία «δεν συνδέει κάποιον συγκεκριμένο κλάδο κατά τον παρόντα χρόνο με κάποιον συγκεκριμένο κλάδο κατά το παρελθόν καθόλου περισσότερο απ' ό,τι με οποιονδήποτε συγκεκριμένο κλάδο στο μέλλον». Σύμφωνα με τον Bell, στη θεωρία του Everett δεν υφίσταται καμία σύνδεση του συγκεκριμένου παρόντος με οποιοδήποτε συγκεκριμένο παρελθόν. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχουν ούτε και τροχιές, και η διάταξη του κόσμου, ημών των ιδίων συμπεριλαμβανομένων, μεταβάλλεται κατά έναν παντελώς ασυνεχή τρόπο. Πώς γίνεται λοιπόν να έχουμε την ψευδαίσθηση ότι ο κόσμος μεταβάλλεται κατά συνεχή τρόπο; Στην κατά Bell ερμηνεία των ιδεών του Everett, αυτή η συνέχεια πρέπει να προκύπτει από τις μνήμες μας, οι οποίες αποτελούν φαινόμενα του παρόντος. Ο Bell παρομοιάζει τούτη την κατάσταση πραγμάτων με μια θεωρία περί Δημιουργίας η οποία επέμενε ότι ο κόσμος δημιουργήθηκε το 4004 π.Χ. Η αυξανόμενη γνώση της δομής της Γης, η οποία έδειχνε ότι ο κόσμος υπάρχει επί σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από όσο ισχυριζόταν η εν λόγω θεωρία, δεν προκάλεσε το παραμικρό πρόβλημα στους αληθινούς πιστούς. Υποστήριξαν ότι το 4004 π.Χ. ο Θεός πρέπει προφανώς να είχε δημιουργήσει έναν κόσμο ευρισκόμενο ήδη σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης: τα δέντρα είχαν ήδη ετήσιους δακτυλίους, παρότι ο αντίστοιχός τους αριθμός ετών δεν είχε παρέλθει, και τα πετρώματα ήταν τυπικά πετρώματα, μερικά από τα οποία υπήρχαν κατά στρώματα και περιείχαν απολιθώματα πλασμάτων που δεν έζησαν ποτέ. Και όσον αφορά τη θεωρία του Everett, ο Bell καταλήγει: «Εάν παίρναμε στα σοβαρά μια τέτοια θεωρία, τότε δύσκολα θα μπορούσαμε να πάρουμε στα σοβαρά οτιδήποτε άλλο.»

Παρά τις ποικίλες ενστάσεις, οι οποίες δεν εξαντλούνται σε αυτές που μόλις εκθέσαμε, η ερμηνεία των πολλών κόσμων —ή του πολυσύμπαντος, όπως λέγεται ενίοτε— ασκεί διπνεκή γοητεία στο ευρύ κοινό. Επίσης, μπορεί να αποβεί υπέρ της το γεγονός ότι έχει την υποστήριξη αρκετών διακεκριμένων φυσικών, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται και οι David

Deutsch και Stephen Hawking. Ο Deutsch, μάλιστα, προτείνει μια παραλλαγή της ερμηνείας των πολλών κόσμων στην οποία το πλήθος των κόσμων, αν και μεγάλο, δεν συνεχίζει να αυξάνεται επί άπειρον. Επίσης, ο Deutsch πιστεύει ότι η θεωρία μπορεί να ελεγχθεί. Ο έλεγχός του στηρίζεται σε ένα πείραμα κβαντικής συμβολής όπου δύο κβαντικές καταστάσεις εξελίσσονται επί κάποιο διάστημα χωριστά και κατόπιν επανασυνδέονται. Ένας τεχνητός εγκέφαλος, με κάποιου είδους μικροσκοπική κβαντική μνήμη, παρατηρεί το σύστημα και διχάζεται σε δύο αντίγραφα που ανήκουν σε διαφορετικούς κόσμους. Ο έλεγχος τότε «εξαρτάται από το αν θα παρατηρηθεί κάποιο φαινόμενο συμβολής μέσα στο νου αυτού του τεχνητού παρατηρητή». Δεν πρόκειται να παρακολουθήσουμε τούτες τις εικασίες περαιτέρω, αλλά τον David Deutsch θα τον συναντήσουμε ξανά όταν θα πραγματευθούμε τα της ανάπτυξης των κβαντικών υπολογιστών.

Άρση της συνεκτικότητας

Μια λιγότερο υπερβολική και μάλλον πεζή προσπάθεια να λυθεί το μετρητικό πρόβλημα ακούει στο όνομα *άρση της συνεκτικότητας*, ή *αποσυγκρότηση*. Τούτη η προσέγγιση υποστηρίζει ότι τα κβαντικά συστήματα δεν μπορεί ποτέ να είναι πλήρως απομονωμένα από το ευρύτερο περιβάλλον τους και ότι, συνεπώς, η εξίσωση του Schrödinger θα έπρεπε να εφαρμόζεται όχι μόνο στο κβαντικό σύστημα αλλά και στο συζευγμένο με αυτό κβαντικό περιβάλλον. Στην πραγματική ζωή, η «συνεκτικότητα» μιας κβαντικής κατάστασης —οι λεπτές σχέσεις των φάσεων μεταξύ των διάφορων συνιστωσών μιας κβαντικής υπέρθεσης— διαβρώνεται τάχιστα από τις αλληλεπιδράσεις με τον υπόλοιπο κόσμο που βρίσκεται εκτός του κβαντικού συστήματος. Ο Wojciech Zurek, ένας από τους πλέον επιφανείς οπαδούς της προσέγγισης της άρσης της συνεκτικότητας για την επίλυση του μετρητικού προβλήματος, λέει χαρακτηριστικά ότι η συνεκτικότητα «διαρρέει» στο περιβάλλον. Ο Zurek υποστηρίζει ότι κατά τα τελευταία χρόνια γίναμε μάρτυρες μιας ολοένα ευρύτερης συναίνεσης όσον αφορά το ότι η τυχαιοποίηση των φάσεων των κβαντικών υπερθέσεων προκαλείται από την αλληλεπίδραση των κβαντικών συστημάτων με το περιβάλλον τους. Ό,τι μένει μετά την τυχαιοποίηση των φάσεων δεν είναι παρά μια συνηθισμένη, μη κβαντική επιλογή μεταξύ καταστάσεων με κλασικές πιθανότητες, χωρίς καθόλου παράδοξα φαινόμενα συμβολής. Πρόκειται για μια λύση του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης που φαίνεται στ' αλήθεια πολύ πεζή! Πώς συντελείται η άρση της συνεκτικότητας από το περιβάλλον; Και παρέχει πραγματικά απάντηση σε όλα τα προβλήματα; Ας εξετάσουμε ένα πείραμα που υπόσχεται να δείξει την άρση της συνεκτικότητας των καταστάσεων της γάτας του Schrödinger εν δράσει.

Ο Serge Haroche και ο Jean-Michel Raimond, εργαζόμενοι στο Παρίσι με την ερευνητική τους ομάδα, πραγματοποίησαν προσφάτως μερικά συναρπαστικά πειράματα που παρέχουν στήριξη στην εικόνα της άρσης της συνεκτικότητας. Σε κάθε πείραμα διακρίνουμε τρία διαφορετικά μέρη τα οποία μπορεί όλα τους να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους: το κβαντικό σύστημα, την κλασική μετρητική διάταξη και το περιβάλλον. Στο πείραμα των Haroche και Raimond, το κβαντικό σύστημα είναι ένα άτομο που μπορεί να προετοιμαστεί σε δύο διαφορετικές καταστάσεις. Η κβαντική κατάσταση μετρείται με την εισαγωγή του ατόμου σε μια κοιλότητα και με τη χρησιμοποίηση του η-

λεκτρομαγνητικού πεδίου της «κοιλότητας» ως κλασικού «δείκτη». Τι συμβαίνει αν προετοιμάσουμε το άτομο σε μια κβαντική υπέρθεση των δύο καταστάσεων; Αν αντιμετωπίσουμε την κοιλότητα ως ένα δεύτερο κβαντικό σύστημα όπως και της πρέπει, διαπιστώνουμε ότι ο υποτιθέμενος κλασικός δείκτης προβλέπεται ότι τώρα βρίσκεται σε μια κατάσταση τύπου γάτας του Schrödinger —σε μια κβαντική υπέρθεση δύο κλασικών καταστάσεων του δείκτη. Με το νοητικό του πείραμα, ο Schrödinger αιχλώς τόνισε την παραδοξότητα της κατάστασης χρησιμοποιώντας τη γάτα του ως κλασικό δείκτη. Πώς να ξεφύγουμε από αυτό το ολοφάνερο παράδοξο; Σύμφωνα με την εικόνα της άρση της συνεκτικότητας, πρέπει να συνυπολογίσουμε και την αναπόφευκτη σύζευξη του δείκτη με το περιβάλλον. Ο δείκτης —ή η κοιλότητα— βομβαρδίζεται διαρκώς από τυχαίως παραγόμενα φωτόνια, από μόρια αέρα κ.ο.κ., που συνιστούν το «περιβάλλον». Μοντέλα αυτής της τυχαίας διαδικασίας ως τρίτου κβαντικού συστήματος δείχνουν ότι όλη η πληροφορία για τις φάσεις μεταξύ των δύο αρχικών καταστάσεων του ατόμου με τις αντίστοιχές τους θέσεις του δείκτη χάνεται εξαιρετικά γρήγορα. Στην περίπτωση των συνήθων κλασικών πεδίων-δεικτών που έχουν πληθώρα φωτονίων, προβλέπεται ότι η άρση της συνεκτικότητας συντελείται σε χρόνο τόσο μικρό ώστε να μην επιδέχεται μέτρηση. Και το πιο αξιοσημείωτο, χρησιμοποιώντας ως δείκτη πεδία κοιλότητων αποτελούμενα από λίγα μόνο φωτόνια, ο Haroche και ο Raimond κατάφεραν να παρατηρήσουν και να μετρήσουν το χρόνο άρσης της συνεκτικότητας του συστήματος. Τούτο το πέτυχαν εισάγοντας ένα δεύτερο άτομο μέσα στην κοιλότητα σε διάφορους χρόνους μετά την εισαγωγή του πρώτου ατόμου και μετρώντας φαινόμενα συμβολής τα οποία εξαρτώνται από το κατά πόσον εμμένει η συνεκτικότητα της κυματοσυνάρτησης του πρώτου ατόμου. Παρατηρώντας μάλιστα πόσο γρήγορα φθίνουν αυτά τα φαινόμενα συμβολής συναρτήσει του χρόνου που μεσολαβεί ανάμεσα στις διελύσεις από την κοιλότητα του πρώτου και του δεύτερου ατόμου, οι δύο πειραματιστές έφτασαν να ισχυριστούν ότι «συνέλαβαν την άρση της συνεκτικότητας επ' αυτοφώρω».

Το πρόβλημα του Αϊνστάιν με το φεγγάρι μπορεί επίσης να εξηγηθεί με ένα παρόμοιο επιχείρημα άρσης της συνεκτικότητας. Το φεγγάρι δεν είναι αδρανές σύστημα —όχι μόνο το κάθε ξεχωριστό μόριό του αλληλεπιδρά συνεχώς με τους γείτονές του, αλλά και η επιφάνειά του τελεί υπό διαρκή βομβαρδισμό από σωματίδια και ακτινοβολία, κυρίως από τον Ήλιο. Η συνεκτικότητα οποιασδήποτε κατάστασης τύπου γάτας του Schrödinger αφορά το φεγγάρι θα καταστρεφόταν ταχύτατα από αυτές τις συνεχείς αλληλεπιδράσεις. Σύμφωνα με ανάλογα επιχειρήματα άρσης της συνεκτικότητας, μπορούμε να μένουμε ήσυχοι ότι εν τέλει το φεγγάρι είναι πραγματικά εκεί, ακόμη και όταν δεν το κοιτάζουμε. Ο βομβαρδισμός από τα ηλιακά φωτόνια είναι αρκετός ώστε να συνιστά μέτρηση και να καταστρέφει οποιαδήποτε κβαντική συνεκτικότητα.

Θα είχαν ικανοποιήσει άραγε αυτά τα επιχειρήματα άρσης της συνεκτικότητας τον John Bell ως εξήγηση του προβλήματος μέτρησης; Μάλλον όχι! Περιγράψαμε όχι μόνο το υπό παρατήρηση κβαντικό σύστημα αλλά και τη μετρητική διάταξη ως κβαντικό σύστημα. Η κβαντική κυματοσυνάρτηση για το σύνθετο σύστημα θα βρίσκεται σε μια υπέρθεση καταστάσεων που αντιστοιχούν σε διάφορες κλασικές καταστάσεις της μετρητικής διάταξης, όπως στο πείραμα των Haroche και Raimond. Το επιχείρημα άρσης της συ-

νεκτικότητας λέει ότι πρέπει να συμπεριλάβουμε το περιβάλλον ως τρίτο κβαντικό σύστημα που αλληλεπιδρά με τη μετρική μας διάταξη. Ως αποτέλεσμα, η τυχαιοποίηση των φάσεων επέρχεται ταχέως, και η κβαντική υπέρθεση ουσιαστικά ανάγεται σε ένα άθροισμα διαφορετικών δυνατών εκβάσεων με κλασικές πιθανότητες. Δύο προβλήματα αντιμετώπιζε ο Bell με αυτή την προσέγγιση. Κατά πρώτον, όλες οι κβαντικές καταστάσεις —για το σύστημα, τη μετρική διάταξη και το περιβάλλον— εξελίσσονται σύμφωνα με την εξίσωση του Schrödinger. Είναι μαθηματικώς αδύνατο μια τέτοια εξέλιξη να μετατρέψει μια συνεκτική κβαντική υπέρθεση σε μη συνεκτικό πιθανοτικό άθροισμα. Μολονότι ασφαλώς αληθεύει ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις που συνήθως επιλέγει κανείς να εκτελέσει παρουσιάζουν ελάχιστη ή και καθόλου κβαντική συνεκτικότητα, ο Bell ισχυρίζεται ότι *κατ' αρχήν* τίποτε δεν μας εμποδίζει να θεωρήσουμε διαφορετικούς τύπους μετρήσεων για τους οποίους δεν θα ισχύει κάτι τέτοιο. Όπως είπε ο ίδιος:

Εφόσον τίποτε δεν απαγορεύει, κατ' αρχήν, τη θεώρηση τέτοιων αυθαίρετα περίπλοκων παρατηρησίμων, δεν επιτρέπεται να μιλάμε για αναγωγή του κυματοδέματος. Ενώ για κάθε δεδομένο παρατηρήσιμο μπορούμε να βρούμε ένα χρόνο κατά τον οποίο η ανεπιθύμητη συμβολή γίνεται όσο θέλουμε μικρή, για κάθε δεδομένο χρόνο μπορούμε να βρούμε ένα παρατηρήσιμο για το οποίο η συμβολή είναι όσο *δεν* θα θέλαμε μεγάλη.

Κατά την άποψη του Bell, κάθε μηχανισμός για την κατάρρευση θα έπρεπε να είναι εφαρμόσιμος και σε μικρά συστήματα και να μην εξαρτάται από τους «νόμους των μεγάλων αριθμών». Το δεύτερο πρόβλημα του Bell αφορούσε την ίδια την πραγματική μέτρηση. Ακόμη και αν δεχτεί κανείς ότι η άρση της συνεκτικότητας ανάγει το πρόβλημα σε μια πιθανοκρατούμενη επιλογή μεταξύ εκβάσεων, πουθενά δεν μας εξηγεί η άρση της συνεκτικότητας πώς πραγματώνεται κάποια συγκεκριμένη έκβαση. Ο Bell δεν διαφωνούσε σχετικά με το ρόλο που παίζει στην πράξη η μέτρηση στην κβαντική μηχανική, αλλά ένιωθε έντονα ότι, αν δεν γνωρίζουμε «ακριβώς πότε και πώς αυτή [η αναγωγή της κυματοσυνάρτησης] αναλαμβάνει τα ηνία από την εξίσωση του Schrödinger, δεν διαθέτουμε μια ακριβή και απαλλαγμένη από αμφισημίες διατύπωση της πλέον θεμελιώδους φυσικής μας θεωρίας».

Σχετικά με το θέμα της μέτρησης στην κβαντική μηχανική, πολλά ακόμη μπορούν να ειπωθούν. Μεγάλοι φυσικοί από την πρώιμη περίοδο της κβαντικής μηχανικής όπως ο John von Neumann και ο Eugene Wigner έφτασαν μέχρι του σημείου να διατυπώσουν την άποψη ότι για την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης ευθύνεται σε τελική ανάλυση η συνείδηση του παρατηρητή. Ο Rudolf Peierls τασσόταν υπέρ μιας προσέγγισης βασιζόμενης στη γνώση και την πληροφορία, ενώ ο Roger Penrose πιστεύει ότι την αναγωγή του κυματοδέματος την προκαλεί η κβαντική βαρύτητα. Ο Robert Griffiths, ο Murray Gell-Mann, ο James Hartle και ο Roland Omnès ακολουθούν διαφορετική προσέγγιση και προτιμούν να περιγράφουν το πρόβλημα με όρους «κβαντικών ιστοριών». Στη σύντομή μας πραγμάτευση του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης, μόλις και καταφέραμε να ψαύσουμε την επιφάνεια της διεξαγόμενης αντιπαράθεσης απόψεων. Θέλουμε να ελπίζουμε ότι ο αναγνώστης, αντί να θορυβηθεί από τη διαφορετικότητα των απόψεων, θα ενθαρρυνθεί από τις διαφωνίες μεταξύ τόσο μεγάλων φυσικών! Η κβαντική μηχανική

δεν έχει γίνει ακόμη ένα κλειστό βιβλίο, και δεν αποκλείεται ο 21ος αιώνας να μας επιφυλάσσει αρκετές εκπλήξεις. Στο επόμενο κεφάλαιο θα περιγράψουμε την απαρχή ενός νέου πεδίου —της κβαντικής τεχνολογίας—, για το οποίο η κβαντική φύση της ύλης κρίνεται υψίστης σημασίας.

9 Κβαντική τεχνολογία

Εκείνο για το οποίο θέλω να μιλήσω είναι το πρόβλημα του χειρισμού και του ελέγχου των πραγμάτων σε μικρή κλίμακα [...]. Υπάρχει ένας συγκλονιστικά μικρότερος κόσμος. Το 2000, όταν θα ρίχνουν το βλέμμα στο παρελθόν, θα απορούν για ποιο λόγο χρειάστηκε να φτάσει το 1960 για να αρχίσουν κάποιοι να κινούνται σε αυτή την κατεύθυνση.

Richard Feynman

Ο Richard Feynman και η νανοτεχνολογία

Το 1959, στην ομιλία που έδωσε μετά το δείπνο σε μια συνάντηση της Αμερικανικής Φυσικής Εταιρείας στην Πασαντένα, ο Richard Feynman διέγραψε ένα θαυμαστό όραμα του μέλλοντος. Η διάλεξή του —η οποία έφερε τον τίτλο «Υπάρχουν πολλά περιθώρια για κάτι μικρότερο» και τον υπότιτλο «Μια πρόσκληση να εισέλθουμε σε ένα νέο πεδίο της φυσικής»— σηματοδότησε την αρχή του κλάδου που είναι σήμερα γνωστός ως *νανοτεχνολογία*. Η νανοτεχνολογία ασχολείται με το χειρισμό της ύλης στην κλίμακα του νανομέτρου —του 1 δισεκατομμυριοστού του μέτρου. Ο Feynman τόνιζε ότι ένα τέτοιο εγχείρημα δεν απαιτούσε νέα φυσική:

Δεν εφευρίσκω την αντιβαρύτητα, κάτι το οποίο πιθανόν να γίνει κάποτε εφόσον οι νόμοι δεν είναι αυτοί που νομίζουμε. Σας λέω τι θα μπορούσε να γίνει αν οι νόμοι *όντως είναι* αυτοί που νομίζουμε· δεν το κάνουμε τώρα, επειδή απλώς δεν καταπιαστήκαμε με αυτό.

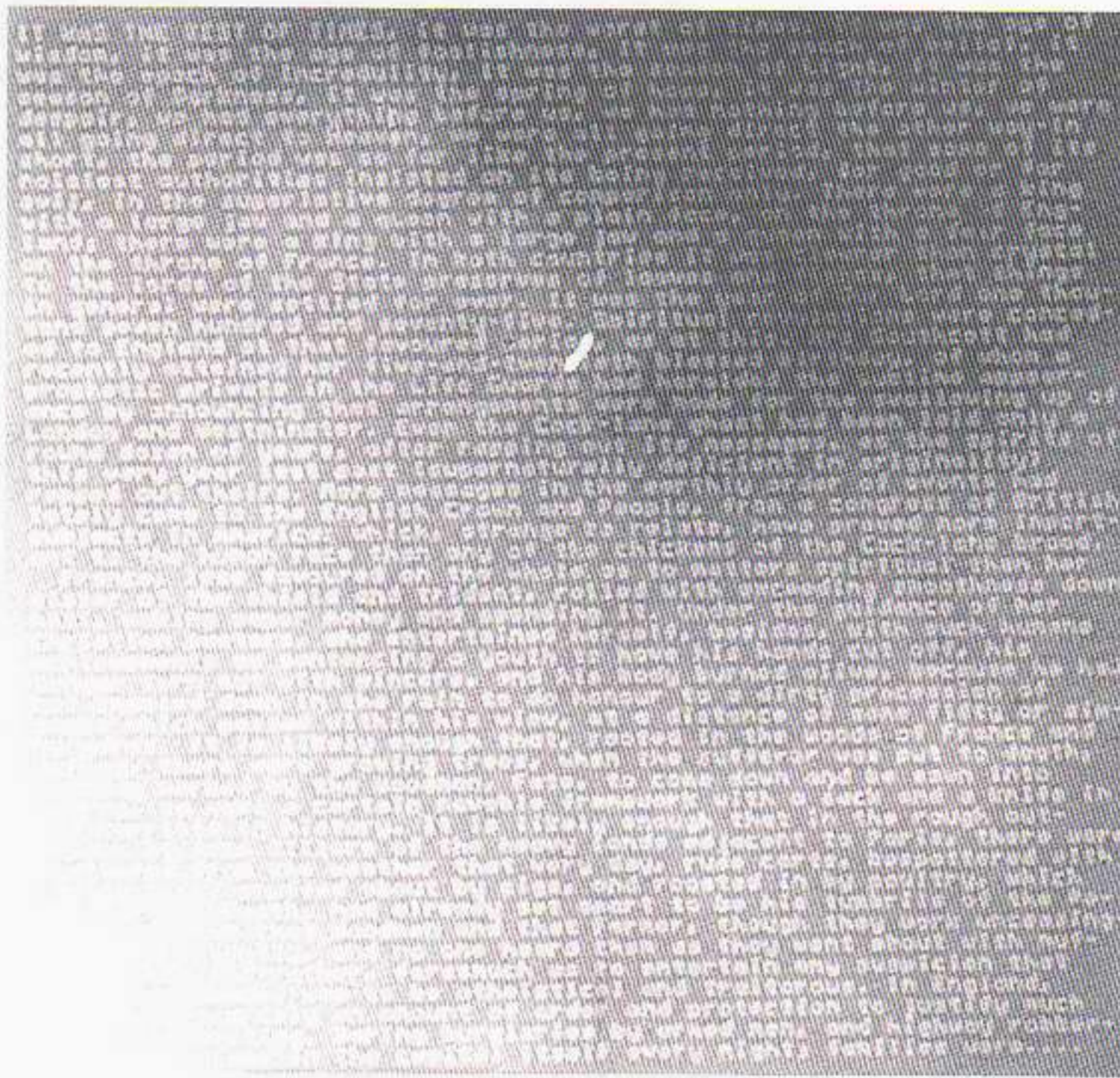
Στη διάλεξή του, ο Feynman αθλοθέτησε δύο βραβεία των 1.000 δολαρίων έκαστο: ένα «για όποιον θα κατασκευάσει πρώτος έναν ικανό να λειτουργεί ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος θα έχει όγκο μόνο 1/64 της κυβικής ίντσας», και ένα «για τον πρώτο που θα πάρει την πληροφορία από τη σελίδα ενός βιβλίου και θα τη βάλει σε επιφάνεια με εμβαδόν 25.000 φορές μικρότερο». Ο μεγάλος αμερικανός φυσικός αναγκάστηκε να πληρώσει και τα δύο βραβεία —το πρώτο μάλιστα, προτού καλά καλά περάσει ένας χρόνος, στον Bill McLellan, απόφοιτο του Caltech. Ο McLellan έφερε μαζί του ένα μικροσκόπιο για να δείξει στον Feynman τον μικροσκοπικό κινητήρα που παρήγε ισχύ 1 εκατομμυ-

Εικόνα 9.1 Ο Richard Feynman ενώ εξετάζει τον μικροσκοπικό κινητήρα του Bill McLellan με μικροσκόπιο. Έχοντας αθλοθετήσει ένα βραβείο για τον πρώτο που θα κατασκεύαζε έναν μικροσκοπικό κινητήρα συγκεκριμένων προδιαγραφών, ο Feynman ήταν υποχρεωμένος να δέχεται πλήθος ανθρώπων οι οποίοι ήθελαν να του επιδείξουν τα αποτελέσματα των προσπαθειών τους. Ο Feynman αντελήφθη ότι ο McLellan διέφερε από όλους τους άλλους επίδοξους νικητές όταν τον είδε να βγάζει πρώτα πρώτο από το κουτί ένα μικροσκόπιο με το οποίο θα μπορούσε να δει κανείς τον κινητήρα.



ριστού του ίππου. Μολονότι ο Feynman πλήρωσε το βραβείο, ο κινητήρας τον απογοήτευσε, διότι δεν είχε απαιτήσει καμία νέα τεχνική πρόοδο —δεν είχε κάνει την πρόκληση αρκετά δύσκολη! Σε μια νέα εκδοχή της ομιλίας του που δόθηκε είκοσι χρόνια αργότερα, ο Feynman διατύπωσε την εικασία ότι με τη σύγχρονη τεχνολογία θα ήταν δυνατόν να παραχθούν μαζικά κινητήρες με ακμή 40 φορές μικρότερη απ' ό,τι ο αρχικός κινητήρας του McLellan. Επίσης, ο Feynman οραματίστηκε την παραγωγή μιας αλυσίδας μηχανών-«σκλάβων» —που η καθεμία θα παρήγε εργαλεία και μηχανές σε κλίμακα υποτετραπλάσια από τη δική της—, ακριβώς για να καταστεί δυνατή η κατασκευή τέτοιων μικρομηχανών. Εκείνη την εποχή, ο Feynman ένιωθε άσχημα επειδή αδυνατούσε να διανοηθεί κάποια χρήση για τόσο μικροσκοπικές μηχανές και επέμενε να εξερευνά το ζήτημα από καθαρά ακαδημαϊκό ενδιαφέρον. Σαράντα χρόνια μετά την πρώτη ομιλία του Feynman, περιμένουμε οσονούπω να δούμε —ή, μάλλον, δεν θα δούμε— μικροουστήματα σε κάθε λογής εφαρμογές, από ιατρικούς αισθητήρες μέχρι διατάξεις μικρότατων οπτικών κατόπτρων. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές θα τις περιγράψουμε στη συνέχεια.

Χρειάστηκε να περάσουν είκοσι έξι χρόνια από την πρώτη του ομιλία για να υποχρεωθεί ο Feynman να πληρώσει και το δεύτερο βραβείο. Η κλίμακα της πρόκλησης ισοδυναμούσε με το να γραφούν και οι 24 τόμοι της *Encyclopedia Britannica* στην κεφαλή μίας καρφίτσας. Το 1985, ο Tom Newman, τότε μεταπτυχιακός φοιτητής στο Πανεπιστήμιο Stanford, χρησιμοποιούσε μια τεχνική η οποία ονομαζόταν *λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων* προκειμένου να εγχαράσσει στο πυρίτιο τα μορφώματα που απαιτούνταν για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Κάποιος φίλος έδειξε στον Newman ένα αντίτυπο της ομιλίας του Feynman και του επεσήμανε το κομμάτι που αναφερόταν στο βραβείο για τη «μικρογραφία». Ο Newman υπολόγισε ότι θα χρειαζόταν να σμικρύνει το κάθε γράμμα σε τέτοια κλίμακα ώστε να έχει πλάτος 50 ατόμων. Αν προγραμματίζε τη μηχανή ηλεκτρονικής δέσμης που χρησιμοποιούσε, πίστευε ότι θα τα κατάφερνε. Για να εξακριβώσει αν το βραβείο



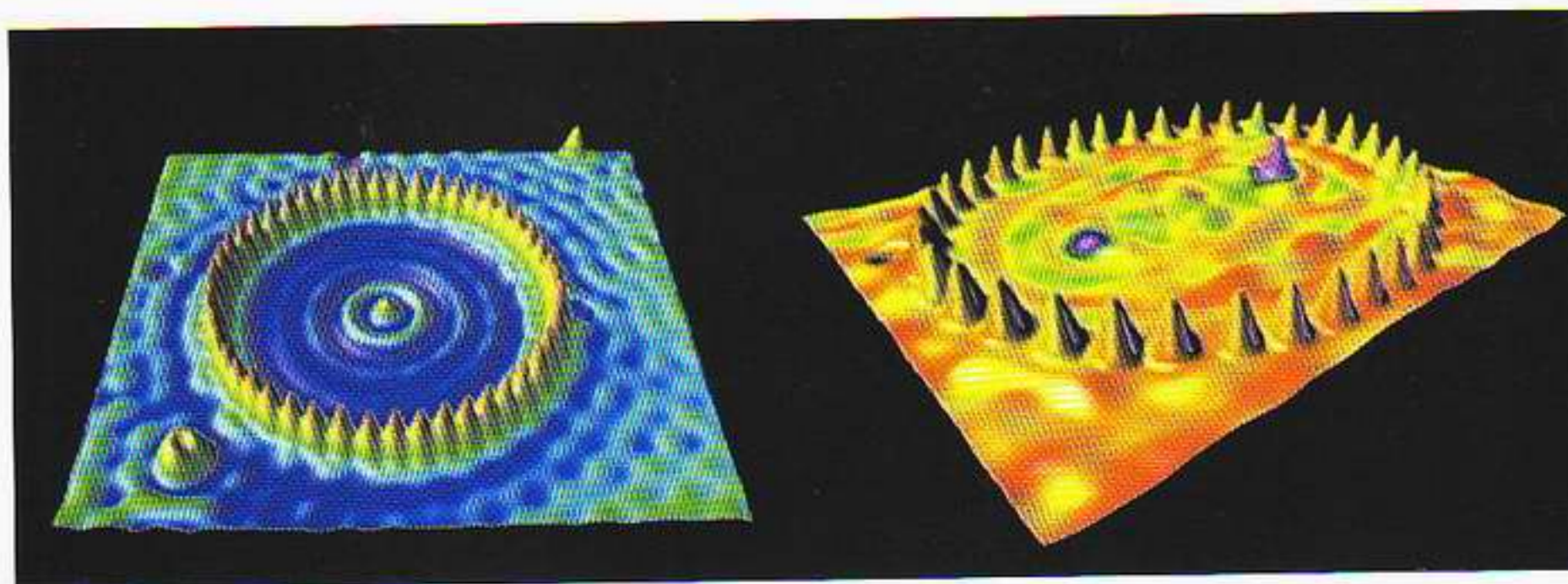
Εικόνα 9.2 Φωτογραφία της σελίδας-μινιατούρας του Tom Newman. Αφού ο Newman κατόρθωσε να εγχαράξει την πρώτη σελίδα του μυθιστορήματος του Καρόλου Ντίκενς *Ιστορία δύο πόλεων* σε τόσο μικρή κλίμακα ώστε το πλάτος του κάθε γράμματος να είναι μόλις 50 άτομα, η μεγαλύτερη δυσκολία που αντιμετώπισε ήταν να εντοπίσει το μικροσκοπικό κείμενο πάνω στην επιφάνεια της πλάκας πυριτίου.

εξακολουθούσε να ισχύει έπειτα από τόσο καιρό, ο Newman έστειλε ένα τηλεγράφημα στον Feynman. Εξεπλάγη όταν δέχτηκε στο εργαστήριο ένα τηλεφώνημά του για να τον πληροφορήσει ότι το βραβείο ίσχυε ακόμη. Ο Newman, λοιπόν, παρότι έπρεπε να εργάζεται πυρετωδώς για να ολοκληρώσει τη διδακτορική του διατριβή, παρέμεινε για λίγες ημέρες άπραγος επειδή ο επιβλέπων καθηγητής του έλειπε στην Ουάσινγκτον. Αμέσως μετά προγραμματίσε τη μηχανή για να γράψει την πρώτη σελίδα από το μυθιστόρημα του Καρόλου Ντίκενς *Ιστορία δύο πόλεων*. Όπως τελικά αποδείχθηκε, η μεγαλύτερη δυσκολία του συνίστατο στο να βρει τη μικροσκοπική σελίδα πάνω στην οποία είχε γραφτεί το κείμενο! Ο Newman δικαίως έλαβε την επιταγή του Feynman τον Νοέμβριο του 1985.

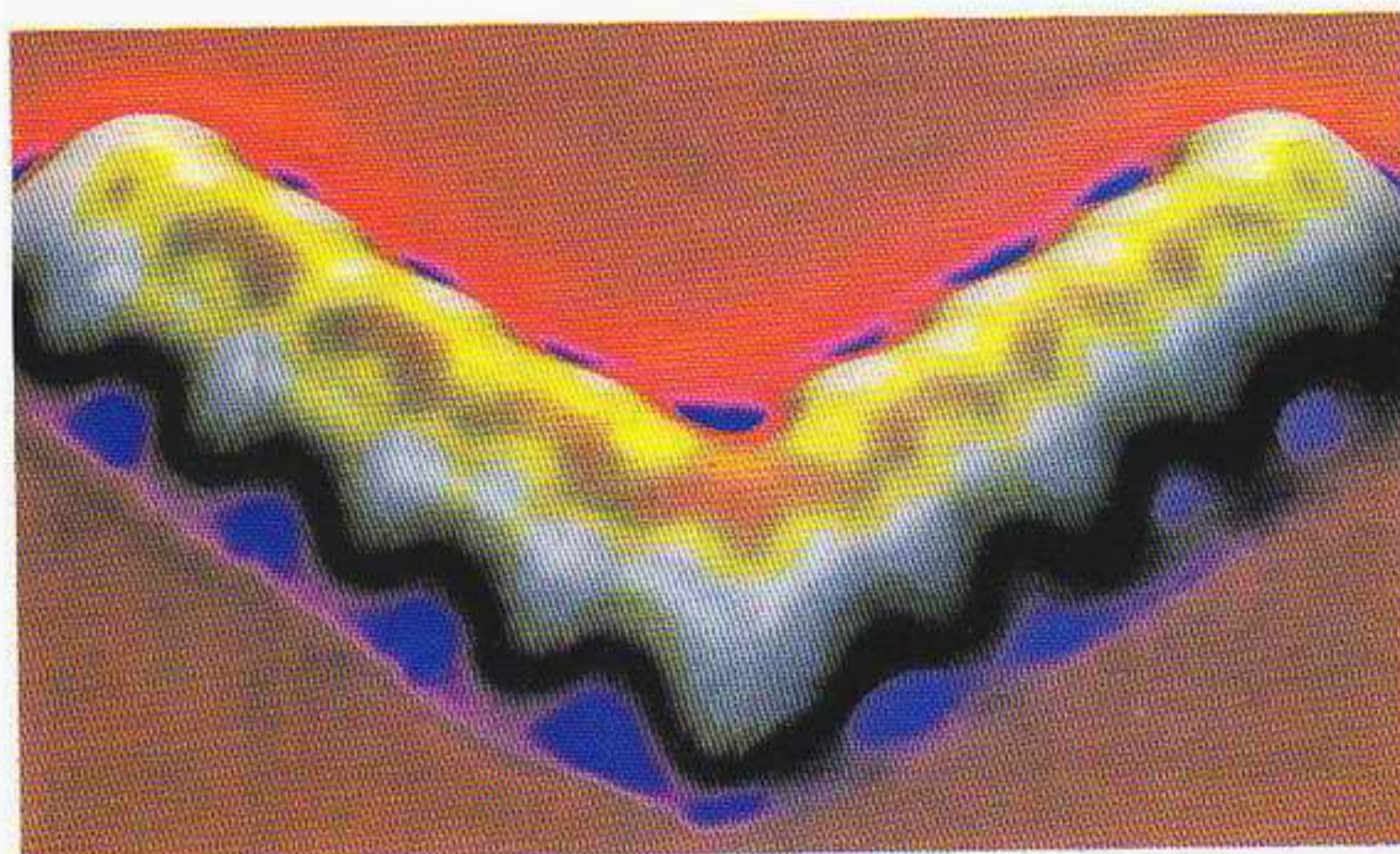
Στη διάλεξή του, ο Feynman δεν παρέλειψε να επεκτείνει τις εικασίες του ως το ατομικό επίπεδο. Οραματιζόταν μια εποχή κατά την οποία τα άτομα θα μπορούσαν να αναδιαταχθούν κατά παραγγελία. Δεν θα υπήρχε πλέον ανάγκη να συντίθενται οι χημικές ενώσεις με τον παραδοσιακό τρόπο:

...θα ήταν, κατ' αρχήν, δυνατόν (νομίζω) ο φυσικός να συνθέτει οποιαδήποτε χημική ουσία γράφει ο χημικός. Δώσε τις οδηγίες, και ο φυσικός θα συνθέσει ό,τι του ζητήσεις. Πώς; Μα, βάλε τα άτομα όπου σου λέει ο χημικός, και έτοιμη η ουσία.

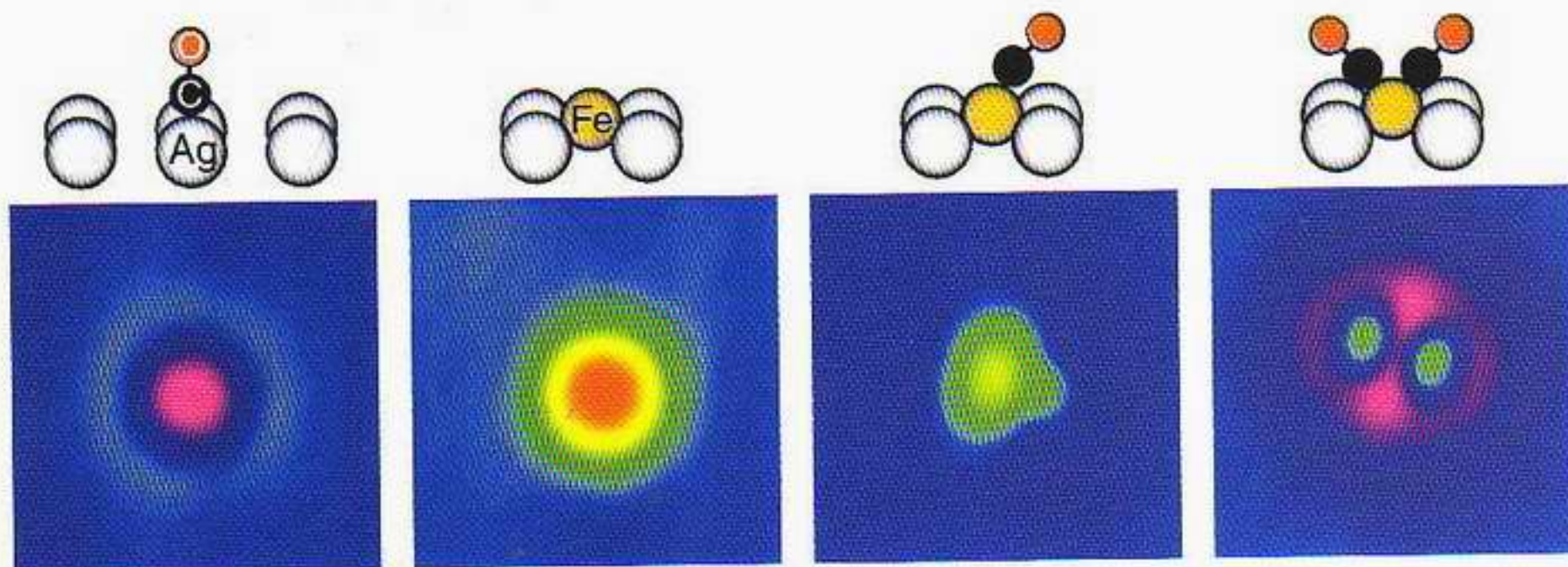
Το όνειρο αυτό αρχίζει τώρα να γίνεται πραγματικότητα. Ο Don Eigler και οι συνεργάτες του στο Κέντρο Ερευνών της IBM, στο Αλμίντεν της Καλιφόρνια-



Εικόνα 9.3 Ένα κβαντικό κοράλλι, το οποίο δείχνει τα επιφανειακά ηλεκτρονικά κύματα των περιορισμένων ηλεκτρονίων.



Εικόνα 9.4 Ένα τεχνητό μόριο που δημιουργήθηκε με τη μετακίνηση ενός ατόμου τη φορά. Το μόριο αποτελείται από 8 άτομα κασίου και από 8 άτομα ιωδίου.



Εικόνα 9.5 Ακόμη ένα «χειροποίητο» μόριο που αποτελείται από σίδηρο και μονοξείδιο του άνθρακα $\{Fe(CO)\}$.

ας, επέτυχαν να χειριστούν μεμονωμένα άτομα χρησιμοποιώντας το Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας το οποίο ανακάλυψαν συνάδελφοί τους στην IBM Ζυρίχης. Πέραν του ότι δημιούργησαν τον μικρότερο λογότυπο της IBM στον κόσμο (Εικόνα 5.13) και θεαματικά κβαντικά «κοράλλια» (Εικόνες 9.3 και 4.13), ο Eigler και η ομάδα του έφτιαξαν «τεχνητά» μόρια, τοποθετώντας τα άτομα στις θέσεις τους ένα ένα (Εικόνα 9.4). Με τον ίδιο τρόπο κατάφεραν να δημιουργήσουν μόρια και ο Wilson Ho με την ερευνητική του ομάδα στο Πανεπιστήμιο Cornell. Συνένωσαν ένα μόριο μονοξειδίου του άνθρακα με ένα άτομο σιδήρου και μελέτησαν τους τρόπους ταλάντωσης του προκύψαντος μορίου (Εικόνα 9.5). Μολονότι η κατασκευή μορίων με τέτοιες μεθόδους είναι ομολογουμένως εντυπωσιακή, κατά πάσαν πιθανότητα θα χρειαστεί να ανακαλύψουμε διαφορετικές τεχνικές για να κατασκευάσουμε οργανικά μόρια υπολογίσιμης πολυπλοκότητας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε ορισμένα βήματα που έγιναν προς την πραγματοποίηση του οράματος του Feynman. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των εξελίξεων έγκειται στην αναγνώριση του γεγονότος ότι στο βάθος η ζωή είναι θεμελιωδώς κβαντομηχανική. Από αυτή τη συνειδητοποίηση τροφοδοτήθηκαν οι εξελίξεις στη θεωρία της κβαντικής πληροφορίας και την κβαντική υπολογιστική. Προτού, όμως, συζητήσουμε τις συγκεκριμένες εφαρμογές, αξίζει τον κόπο να ρίξουμε ακόμη μία ματιά στο μέλλον της βιομηχανίας ημιαγωγών. Και τούτο επειδή στις προσπάθειες των μηχανικών της οφείλεται ο ριζικός μετασχηματισμός της κοινωνίας μας κατά το τελευταίο ήμισυ του 20ού αιώνα. Τι προβλέπεται για τα επόμενα πενήντα χρόνια;

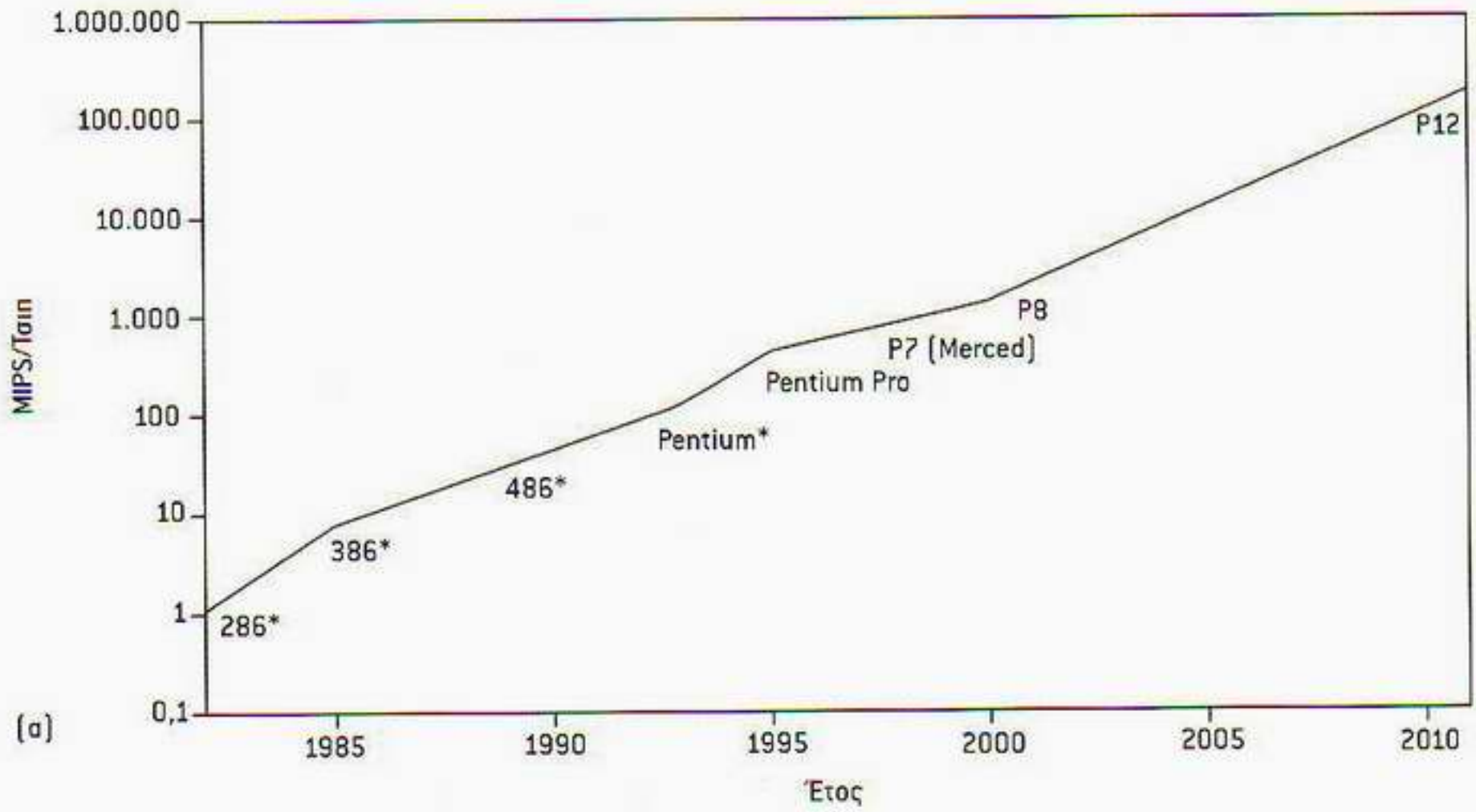
Από το νόμο του Moore στις κβαντικές κουκκίδες

Στο Κεφάλαιο 6 συναντήσαμε τον Robert Noyce, το φυσικό από το MIT ο οποίος πρώτος απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια τεχνολογία που καθιστούσε δυνατή τη μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το 1957, ο Noyce και ο Gordon Moore, ένας φυσικοχημικός από το Caltech, υπήρξαν μεταξύ των πρώτων προσληφθέντων στο Εργαστήριο Ημιαγωγών Shockley, της πρώτης πρώτης εταιρείας υψηλής τεχνολογίας που ξεφύτρωσε στη Σίλικον Βάλεϊ, πολύ προτού η περιοχή γίνει γνωστή με αυτό το όνομα. Δυσανεκτικοί από τον τρόπο διοίκησης και τις στρατηγικές αποφάσεις του ιδρυτή της εταιρείας, του νομπελίστα William Shockley, ο Noyce και ο Moore αποχώρησαν μαζί με έξι άλλους εργαζομένους —όπως φημολογείται, ο Shockley τους αποκάλεσε οι «οκτώ προδότες»— για να ιδρύσουν μια νέα εταιρεία με την επωνυμία Fairchild Semiconductors. Το 1961, χρησιμοποιώντας την επίπεδη επεξεργασία του Noyce για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η Fairchild παρουσίασε τα πρώτα εμπορικά ολοκληρωμένα κυκλώματα πυριτίου. Όπως είπε ο Noyce χρόνια αργότερα:

Όταν αυτή [η επίπεδη επεξεργασία] ολοκληρωνόταν, είχαμε την επιφάνεια ενός πλακιδίου πυριτίου καλυμμένη με έναν από τους καλύτερους μονωτές που γνωρίζει ο άνθρωπος, οπότε μπορούσες να ανοίξεις τρύπες με διαβρωτικό για να αποκατασταθεί η επαφή με το πυρίτιο από κάτω. Προφανώς, με αυτό τον τρόπο είχες ένα σύνολο τρανζίστορ εντεθειμένων στη μονωτική επιφάνεια, και στη συνέχεια, αντί να τα κόψεις και να τα χωρίσεις φυσικά, τα

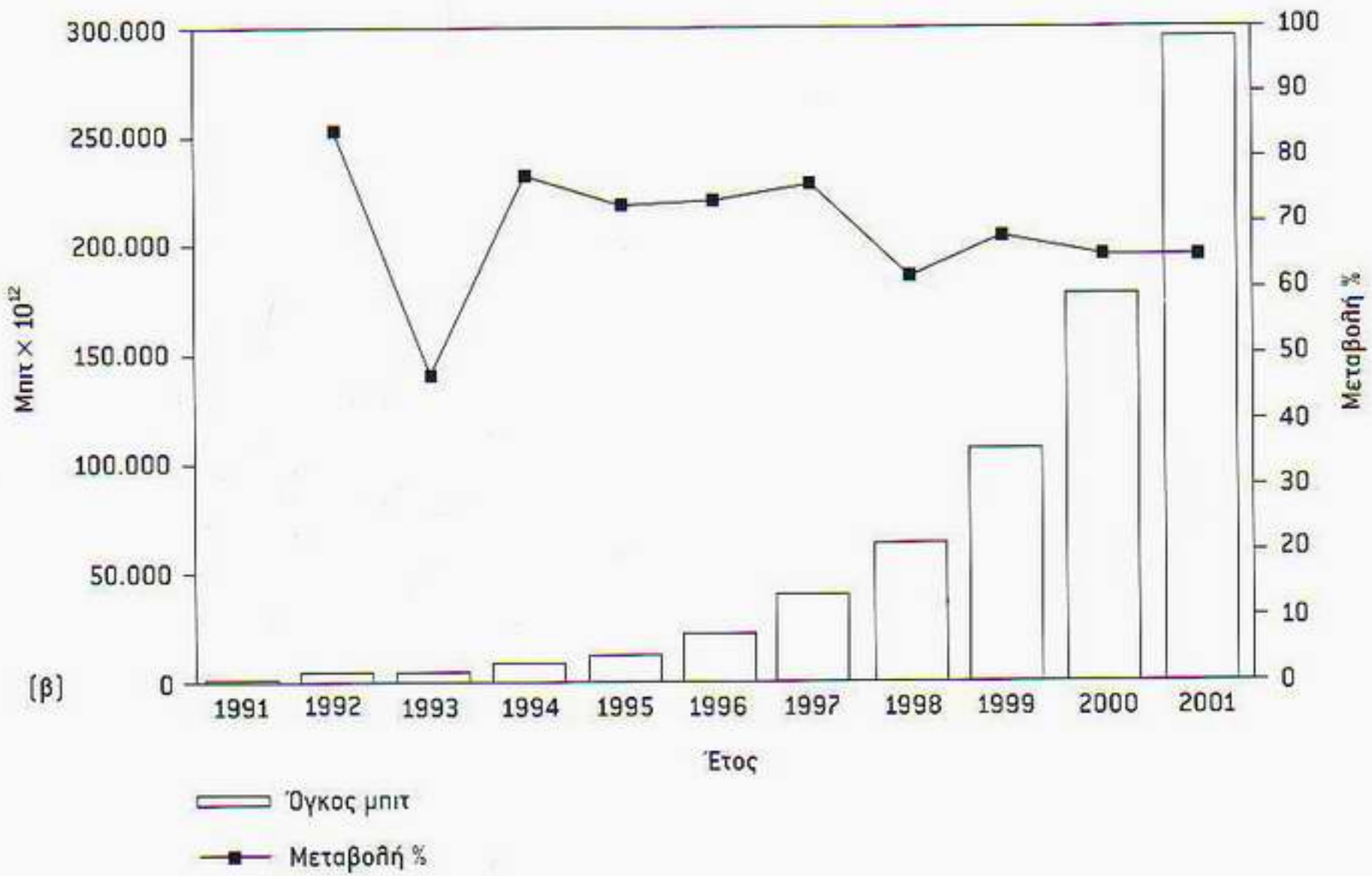


Ο Gordon Moore, ένας από τους ιδρυτές της Intel και πρωτοπόρος κατά την πρώτη φάση της τεχνολογίας των ημιαγωγών. Ο Moore, με πτυχίο χημείας από το Caltech, στρατολογήθηκε από τον Shockley το 1956 για να στελεχώσει τη νεοσύστατη τότε πρώτη εταιρεία της Σίλικον Βάλεϊ. Σε ένα άρθρο του για το περιοδικό *Electronics*, ο Moore παρατήρησε ότι μεταξύ 1962 και 1965 ο αριθμός των συστατικών στοιχείων πάνω σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιαζόταν κάθε χρόνο, για να φτάσει το 1965 στα 50 στοιχεία ανά τσιπ. Έτσι διατύπωσε την παρακινδυνευμένη πρόβλεψη ότι αυτός ο ετήσιος διπλασιασμός θα συνεχιζόταν επί μία ακόμη δεκαετία, ώσπου το 1975 τα τσιπ θα περιείχαν περίπου 65.000 συστατικά στοιχεία. Το 1977, ο Robert Noyce, συνεργάτης του Moore, έγραψε στο *Scientific American* ότι μέχρι τότε δεν είχε διαπιστωθεί σοβαρή απόκλιση από το «νόμο του Moore». Μολονότι σήμερα γενικώς εκτιμάται πως το δωδεκάμηνο που απαιτούνταν για το διπλασιασμό των συνιστώντων στοιχείων έχει γίνει δεκαετάμηνο, τούτη η τάση προς την αύξουσα πολυπλοκότητα διατηρείται και στις μέρες μας.



MIPS - Εκατομμύρια εντολών ανά δευτερόλεπτο

* Pentium, 286, 386 και 486 είναι σήματα κατατεθέντα της Intel Corp.



έκοβες και τα κώριζες ηλεκτρικά, προσέθετες όσα άλλα στοιχεία χρειαζόσουν για τα κυκλώματα και, τέλος, την καλωδίωση διασύνδεσης.

Το 1968, ο Νoyce και ο Moore εγκατέλειψαν τη Fairchild για να δημιουργήσουν την Intel με την πρόθεση να εξειδικευθούν στα τσιπ μνήμης. Είχαν τόσο μεγάλη φήμη ώστε ακόμη και με ένα ασαφές επιχειρηματικό σχέδιο μίας μόλις σελίδας κατάφεραν να προσελκύσουν επενδυτές. Το 1965, ο Moore είχε γράψει ένα άρθρο με τίτλο «Στριμώνοντας περισσότερα στοιχεία πάνω στα ολοκληρωμένα κυκλώματα» για το επετειακό τεύχος του περιοδικού *Electronics*, που έκλεινε τριάντα πέντε χρόνια ζωής. Στο συγκεκριμένο άρθρο επισημαινόταν ότι από το 1962 και εντεύθεν η πολυπλοκότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διπλασιαζόταν κάθε χρόνο, διατυπωνόταν δε η τολμηρή εικασία ότι το ίδιο θα συνέβαινε επί μία ακόμη δεκαετία. Ο Moore εξέφρασε επίσης την άποψη ότι αυτά τα τσιπ θα είχαν τεράστιες συνέπειες, όχι μόνο για τη βιομηχανία αλλά και για τους επιμέρους καταναλωτές:

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα θα οδηγήσουν σε θαύματα όπως είναι οι οικιακοί υπολογιστές —ή τουλάχιστον τα τερματικά τα συνδεδεμένα με έναν κεντρικό υπολογιστή—, τα αυτόματα συστήματα ελέγχου για τα αυτοκίνητα ή τα φορητά μέσα επικοινωνίας.

Τούτα ειπώθηκαν μία δεκαετία και πλέον προτού οι Steven Jobs και Stephen Wozniak παραγάγουν τον πρώτο προσωπικό υπολογιστή για τη μαζική αγορά και δεκαέξι χρόνια προτού κάνει την εμφάνισή του ο προσωπικός υπολογιστής της IBM. Η πρόβλεψη του Gordon Moore έχει γίνει γνωστή ως *νόμος τού Moore*, και αυτή η ραγδαία αύξηση της πολυπλοκότητας με την πάροδο κάθε έτους συνεχίζεται επί μία τριακονταπενταετία και πλέον (Εικόνα 9.6). Το 1975, ο Moore προσαρμόσε το νόμο του στις τελευταίες εξελίξεις υποστηρίζοντας ότι θα ήταν ρεαλιστικότερο να μιλούμε για διπλασιασμό της πολυπλοκότητας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κάθε διετία. Στις μέρες μας, ο νόμος τού Moore συνήθως εννοείται ως διπλασιασμός του πλήθους των τρανζίστορ που περιέχει ένα τσιπ ανά δεκαοκτώ έως είκοσι τέσσερις μήνες.

Ο διπλασιασμός που προβλέπει ο νόμος τού Moore οφείλεται εν μέρει στο ότι τα τρανζίστορ γίνονται μικρότερα και το μέγεθος ελάχιστου χαρακτηριστικού των εξαρτημάτων πάνω στο τσιπ ελαττώνεται. Εκείνο που δεν είχε αποσαφηνιστεί το 1965 ήταν το αν το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας θα απέβαινε μείζων περιοριστικός παράγοντας σε ό,τι αφορούσε το πόσο θα μπορούσαν να μικρύνουν τα τρανζίστορ. Σχετικά με αυτό το πρόβλημα, ο Moore προσέφυγε στον Carver Mead στο Caltech ζητώντας τα φώτα του. Η έρευνα

Εικόνα 9.6 Γραφική παράσταση του νόμου τού Moore (α) για τους μικροεπεξεργαστές και (β) για τα τσιπ μνήμης. Όπως βλέπουμε, τα τελευταία είκοσι ή τριάντα χρόνια η επίδοση των μικροεπεξεργαστών —των «υπολογιστών πάνω σε ένα τσιπ»— διπλασιαζόταν κάθε δεκαοκτώμηνο περίπου. Παρόμοια αύξηση έχει σημειωθεί και στη μνήμη των υπολογιστών· για παράδειγμα, κατά το έτη 2001 και 2002 προβλέπεται ότι θα εγκατασταθεί σε αυτό τον πλανήτη περισσότερη μνήμη απ' ό,τι εγκαταστάθηκε σε όλη την προηγούμενη ανθρώπινη ιστορία. Την ασυγκράτητη αύξηση στην επίδοση και τη χωρητικότητα μνήμης τη συνόδευσε και μια πτώση των τιμών για δεδομένη ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων ή δεδομένη χωρητικότητα μνήμης. Ο νόμος τού Moore είναι ο λόγος για τον οποίο οι υπολογιστές μας χρειάζονται αντικατάσταση έπειτα από μερικά χρόνια, και αυτή η τάση αναμένεται να διατηρηθεί και τα επόμενα δέκα τουλάχιστον χρόνια. Για το τι θα συμβεί εν συνεχεία, ο καθένας μπορεί να κάνει τις υποθέσεις του.

που διεξίγαγε ο Mead απέφερε αποτελέσματα πράγματι καταπληκτικά. Ιδού πώς περιέγραψε ο Mead την πρώτη δημόσια παρουσίαση της ανάλυσής του:

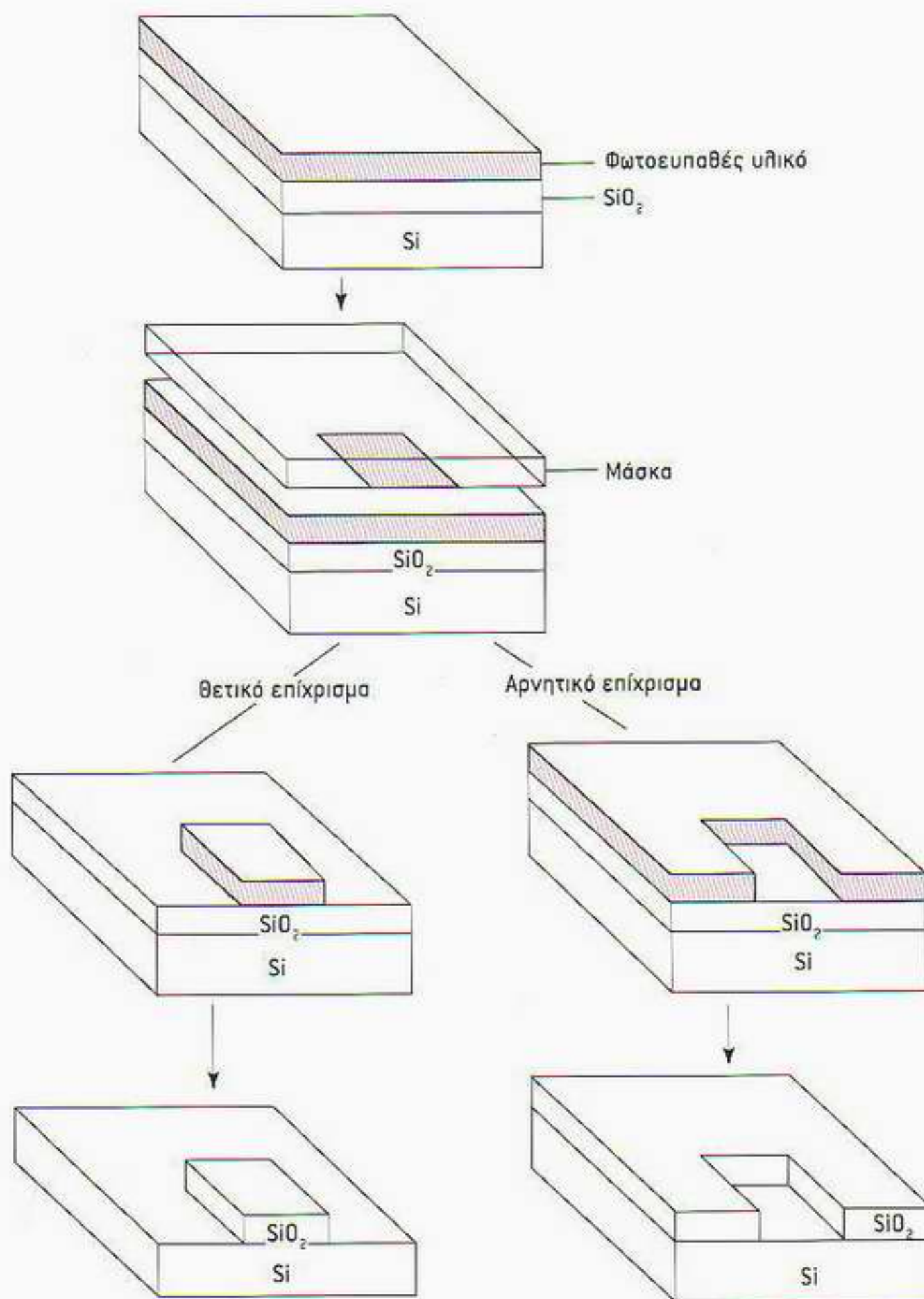
Το 1968 προσκλήθηκα να δώσω μια ομιλία σε κάποιο εργαστήριο στη λίμνη Όζαρκ με αντικείμενο τις ημιαγωγίμες διατάξεις. Εκείνη την εποχή, αρκούσε μία αίθουσα για να χωρέσουν όλοι όσοι διεξήγαν την πλέον προωθημένη έρευνα, και έτσι τα εργαστήρια ήταν τα μέρη όπου εκτυλισσόταν όλη η δράση. Μιας και μελετούσα επί αρκετό διάστημα το ερώτημα του Gordon Moore, αποφάσισα να το επιλέξω ως θέμα της ομιλίας μου. Καθώς προετοιμαζόμουν για τη διάλεξη, άρχισα να έχω σοβαρές αμφιβολίες για την πνευματική μου υγεία. Οι υπολογισμοί μου έλεγαν ότι, σε αντίθεση με ό,τι εκείνη την περίοδο αποτελούσε παραδεδομένη σοφία στο πεδίο, θα μπορούσαμε να οδηγήσουμε την τεχνολογία σε μικρότερες κλίμακες έτσι ώστε *όλα να γίνουν καλύτερα*: τα κυκλώματα θα γίνονταν πολυπλοκότερα, θα λειτουργούσαν καλύτερα και θα καταλάωναν λιγότερη ισχύ —Θεέ μου! Κάτι τέτοιο συνιστά παραβίαση του νόμου τού Murphry που είναι άτεγκτος! Όσο περισσότερο όμως μελετούσα το πρόβλημα τόσο περισσότερο πειθόμουν ότι το αποτέλεσμα ήταν σωστό· έτσι, προχώρησα και έδωσα την ομιλία, γράφοντας τον Murphry στα παλαιότερα των υποδημάτων μου. Αυτή η ομιλία προκάλεσε σοβαρή αντιπαράθεση απόψεων, και εκείνο τον καιρό οι περισσότεροι δεν πίστευαν το αποτέλεσμα. Όταν έφτασε η ώρα της επόμενης συνάντησης, όμως, αρκετές ομάδες είχαν μελετήσει το πρόβλημα για λογαριασμό τους, και είχε επιτευχθεί ικανοποιητική συμφωνία. Οι συνέπειες αυτού του αποτελέσματος για τη σύγχρονη πληροφορική τεχνολογία υπήρξαν, φυσικά, καταλυτικές.

Το σημαντικότερο, καθώς τα τσιπ συρρικνώνονταν, όχι μόνον ήταν δυνατόν να σχεδιαστούν πιο πολύπλοκα τσιπ, αλλά επίσης μπορούσαν να παραχθούν σε μεγαλύτερες ποσότητες με το ίδιο κόστος. Προς γενική κατάπληξη, καθώς η υπολογιστική ισχύς και η χωρητικότητα μνήμης των τσιπ αυξανόταν εκθετικά, το κόστος της χρήσης υπολογιστή και της μνήμης μειωνόταν επίσης εκθετικά. Αν ο προσωπικός σας υπολογιστής γίνεται παρωχημένος μέσα σε ένα με δύο χρόνια, την αιτία πρέπει να την αναζητήσετε στο νόμο τού Moore —καθόσον κάθε δεκαοκτώ μήνες μπορείτε να αγοράσετε με τα ίδια χρήματα υπολογιστές με τη διπλάσια ισχύ και μνήμη! Και αν το λογισμικό έγινε πιο πολύπλοκο και ισχυρό, τούτο κατέστη δυνατόν επειδή τόσο η μνήμη των υπολογιστών όσο και η υπολογιστική ισχύς είναι ικανές να αντεπεξέλθουν σε μεγαλύτερες προκλήσεις.

Ο νόμος τού Moore παραμένει ισχυρός επί μία τριακονταετία και πλέον, τροφοδοτώντας την τεράστια ανάπτυξη των συσκευών επεξεργασίας πληροφοριών. Θα έχουν κάποια στιγμή ένα τέλος όλα τούτα; Στη βιομηχανία του πυριτίου προωθείται μέσω διεθνούς συνεργασίας η κατάρτιση ενός «οδικού χάρτη» για τις μελλοντικές γενιές των τσιπ πυριτίου. Το 1970, η Intel παρήγαγε το πρώτο τσιπ DRAM (δυναμικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης) 1.024 μπιτ (1 κιλομπίτ). Ένα χρόνο αργότερα, παρήχθη ο πρώτος μικροεπεξεργαστής —ο Intel 4004—, ο οποίος αποτελούνταν από περίπου 2.300 τρανζίστορ χαραγμένα σε κυκλώματα πλάτους 10 μικρομέτρων (Εικόνα 6.20). Εί-

κοσι πέντε χρόνια αργότερα, το 1995, η βιομηχανία παρήγαγε τοιπ DRAM 64 εκατομμυρίων μπιτ (64 μεγαμπίτ) και μικροεπεξεργαστές με 4 εκατομμύρια τρανζίστορ ανά τετραγωνικό εκατοστό και με μέγεθος χαρακτηριστικού 0,35 μικρομέτρων. Στο γύρισμα της χιλιετίας, η βιομηχανία είχε προχωρήσει στην παραγωγή τοιπ DRAM 1 δισεκατομμυρίου μπιτ (1 γιγαμπίτ) και οι επεξεργαστές έχουν 13 εκατομμύρια τρανζίστορ ανά τετραγωνικό εκατοστό, με μέγεθος χαρακτηριστικού 0,18 μικρομέτρων. Ός το 2010 περίπου, ο οδικός χάρτης προβλέπει ότι θα υπάρχουν τοιπ μνήμης με περίπου 100 δισεκατομμύρια μπιτ —περισσότερα από τα άστρα του Γαλαξία μας! Όσο για το μέγεθος ελάχιστου χαρακτηριστικού, αυτό προβλέπεται να έχει μειωθεί στα 0,07 μικρόμετρα ή, ισοδύναμα, στα 70 νανόμετρα. Έτσι, δεν είναι καθόλου παράξενο ότι η βιομηχανία υποχρεώθηκε να αναπτύξει εξελιγμένο λογισμικό σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή για να τα βγάλει πέρα με τέτοια πολυπλοκότητα. Για τη σχεδίαση κάθε νέας γενιάς τοιπ χρειάζονται όλο και ισχυρότεροι υπολογιστές. Οι σχεδιαστικές προκλήσεις που θέτει η εκπλήρωση των προβλέψεων του οδικού χάρτη είναι τρομερές. Μολονότι στους χάρτες ενσωματώνεται η τολμηρή υπόθεση ότι ο νόμος του Moore θα συνεχίσει να ισχύει και πέραν του 2010, παραμένουν άλυτα πολλά τεχνικά προβλήματα. Ένα εμπόδιο είναι οικονομικής φύσεως —αυτό καθαυτό το κόστος της κατασκευής των εγκαταστάσεων παραγωγής για κάθε νέα γενιά τοιπ. Για εργοστάσια τοιπ 0,25 μικρομέτρων, ο Moore υπολογίζει το κόστος σε 2 έως 2,5 δισεκατομμύρια δολάρια για τοιπ 0,18 μικρομέτρων, το κόστος ανεβαίνει σε 3 έως 4 δισεκατομμύρια δολάρια. Στον Arthur Rock, τον σπουδασμένο στο Harvard χρηματοδότη επιχειρήσεων που βοήθησε τους Moore και Noyce να συγκεντρώσουν κεφάλαια για να ξεκινήσουν την Intel, αποδίδεται ο νόμος του Rock: «Ένα αυθεντικό συμπλήρωμα του νόμου του Moore το οποίο λέει ότι το κόστος του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού για την κατασκευή ημιαγωγίων διατάξεων θα διπλασιάζεται κάθε τέσσερα χρόνια.»

Επίσης, υπάρχουν και τεχνολογικά εμπόδια που πρέπει να υπερνικηθούν ώστε να επιτευχθούν οι σκοπούμενες βάσει του νόμου του Moore επιδόσεις για το 2010. Στις τωρινές γενιές τοιπ χρησιμοποιείται μια τεχνική που ονομάζεται *φωτολιθογραφία* (Εικόνα 9.7) για να φτιάχνονται «μάσκες», οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα να προστατεύονται τα σχέδια των διάφορων στρωμάτων —του πυριτίου, του μονωτή, του μετάλλου— του τοιπ. Όταν ολοκληρώνεται ένα στάδιο, το άχρηστο υλικό αφαιρείται σε ένα λουτρό οξέος. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι, καθώς το μέγεθος ελάχιστου χαρακτηριστικού όλο και μειώνεται, κανείς αναγκάζεται να χρησιμοποιεί φως όλο και βραχύτερων μηκών κύματος. Παλιότερα πιστευόταν πως ένα ελάχιστο πλάτος κυκλωματογραμμής 1 μικρομέτρου αποτελούσε το όριο για τη χρήση της οπτικής λιθογραφίας. Με φως στο βαθύ υπεριώδες καταφέρνουμε σήμερα να φτάσουμε ως τα 0,13 μικρόμετρα. Από εκεί και πέρα, όπως λέει ο Gordon Moore, «η ζωή γίνεται πολύ ενδιαφέρουσα». Οι δύο τεχνολογίες που θέτουν υποψηφιότητα είναι η φωτολιθογραφία ακτίνων X και η λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων, αλλά και οι δύο έχουν τα ιδιαίτερα τους προβλήματα. Ένα δεύτερο πρόβλημα αφορά τη μεταλλική «ενδοσύνδεση»: ο οδικός χάρτης λέει ότι «η ενδοσύνδεση έχει περιγραφεί ως η τεχνολογική προσπάθεια με τα περισσότερα πιθανά τεχνολογικά χάσματα». Ένα μόνο τετραγωνικό εκατοστό σύγχρονου τοιπ τυπικά περιέχει δεκάδες μέτρα ενδοσύνδεσης σε πολλαπλά στρώματα καλωδίωσης. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι, καθώς τα σύρματα γίνονται

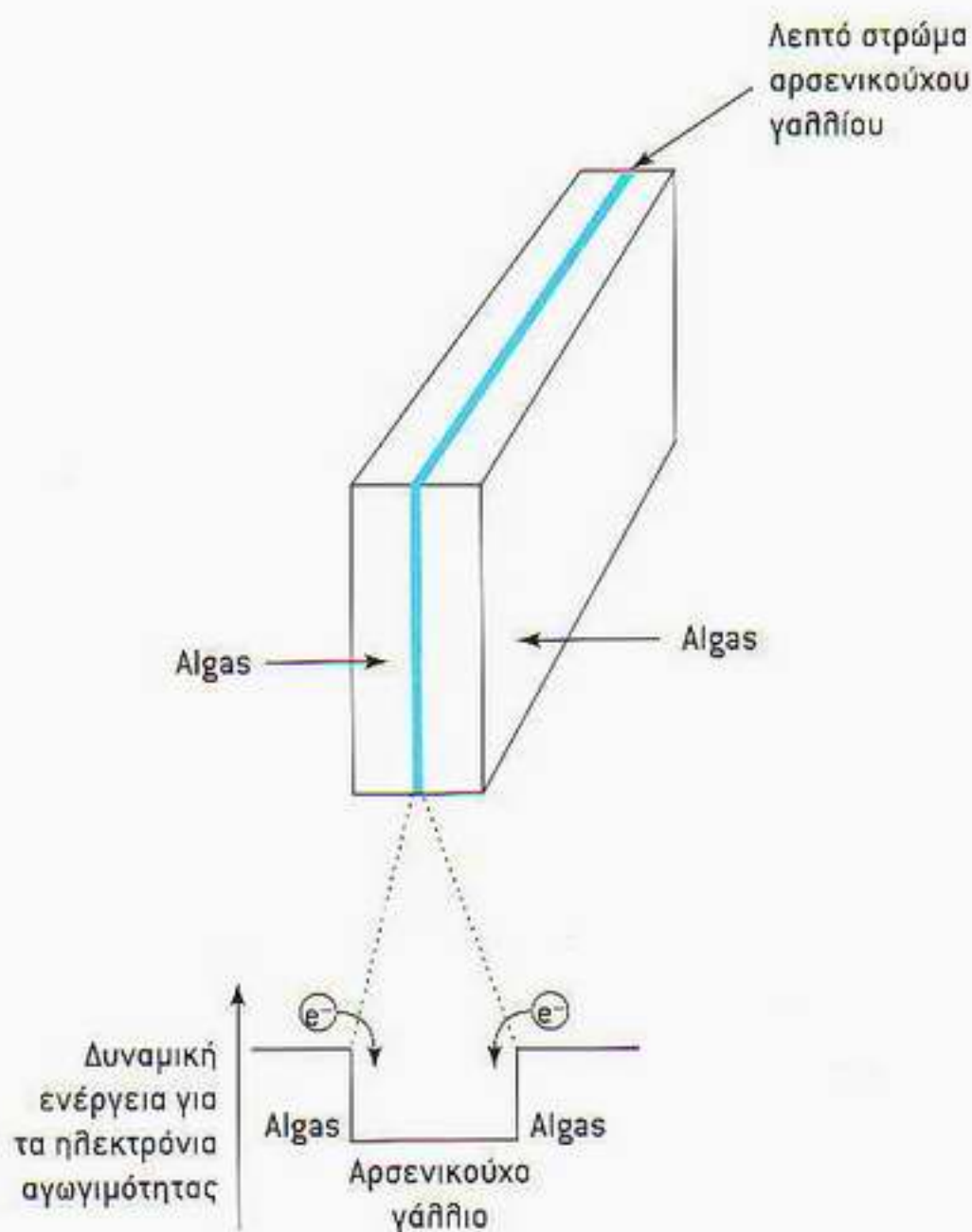


Εικόνα 9.7 Σχηματική αναπαράσταση της ακολουθίας των βημάτων που απαιτούνται για να παραχθεί ένα τσιπ πυριτίου με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας. Το τσιπ αποτελείται από πολλά διαφορετικά στρώματα συστατικών στοιχείων που δημιουργούνται από «σάντουιτς» ημιαγωγού, μονωτικού οξειδίου και μετάλλου. Τα σχέδια είναι τόσο πολύπλοκα ώστε καθίστανται εφικτά μόνο εάν κανείς χρησιμοποιήσει εργαλεία σχεδίασης με βοήθεια υπολογιστή για να δημιουργήσει φωτομάσκες που επιτρέπουν την αποτύπωση των μορφωμάτων πάνω στο τσιπ.

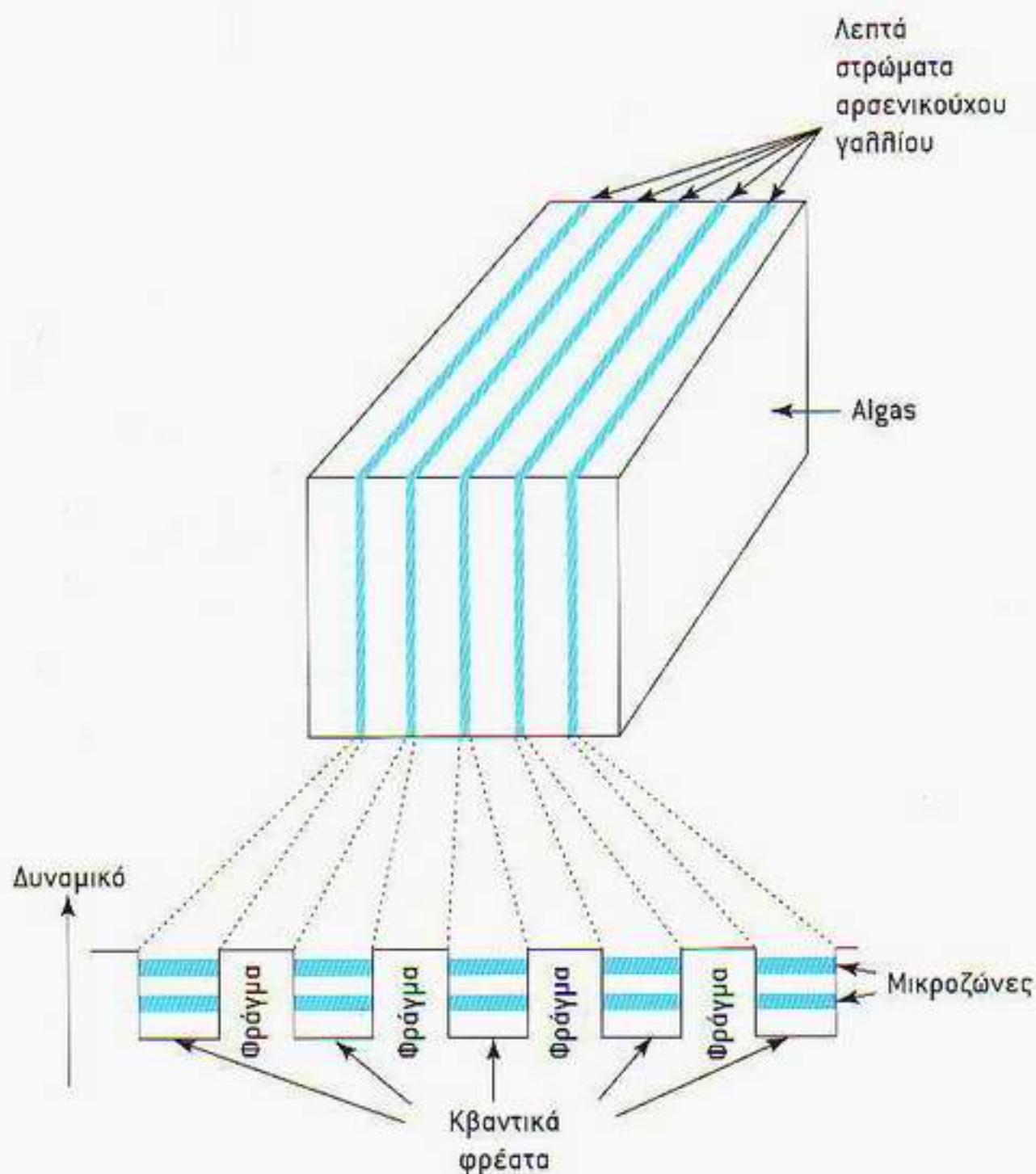
Λεπτότερα, η αντίστασή τους αυξάνεται και άγουν λιγότερο ρεύμα. Παρότι το ρεύμα μειώνεται, η παραγόμενη στο σύρμα θερμότητα αυξάνεται και μπορεί να οδηγήσει σε μετανάστευση του ηλεκτρικού πεδίου. Σε αυτή την κατάσταση, τα ιόντα του πλέγματος αποσπώνται από τις θέσεις τους δημιουργώντας κενά στη μεταλλική ενδοσύνδεση που δεν επιδέχονται διόρθωση. Για λόγους σαν κι αυτούς, η IBM και άλλοι κατασκευαστές αντικαθιστούν τώρα στις ενδοσυνδέσεις το αλουμίνιο με χαλκό, ο οποίος έχει υψηλότερη αγωγιμότητα. Καθώς τα σύρματα έρχονται πλησιέστερα, εμφανίζεται επίσης χωρητικότητα μεταξύ των συρμάτων και του μονωτικού διοξειδίου του πυριτίου. Αυτού του είδους τα φαινόμενα μπορεί να οδηγήσουν σε λογικά σφάλματα και σε κακή λειτουργία τού τσιπ. Οι κατασκευαστές αναζητούν τώρα ένα υποκατάστατο του διοξειδίου του πυριτίου με μικρότερη διηλεκτρική σταθερά έτσι ώστε να αποθηκεύει λιγότερο φορτίο. Οι χρονικές καθυστερήσεις που σημειώνονται κατά την αποστολή σημάτων από τη μία άκρη τού τσιπ στην άλλη θα αποτε-

λέσουν επίσης πηγή προβλημάτων. Στο μέλλον, οι σχεδιαστές των τσιπ θα χρειαστεί να επιδείξουν μεγάλη επινοτικότητα για να υπερνικήσουν τα τέτοιου είδους τεχνικά προβλήματα και να παραμείνουν εντός των προβλέψεων του νόμου του Moore.

Παρότι το πυρίτιο κυριαρχεί στη μαζική αγορά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, για ορισμένες συγκεκριμένες εφαρμογές προσφέρονται περισσότερο κάποιοι άλλοι ημιαγωγοί. Το αρσενικούχο γάλλιο, παραδείγματος χάρη, έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τρανζίστορ υψηλής ταχύτητας, ενώ μπορεί μάλλον εύκολα να υποβληθεί σε μια διαδικασία γνωστή ως μηχανική «ενεργειακών χασμάτων». Στο αρσενικούχο γάλλιο, τα άτομα του γαλλίου και του αρσενικού εναλλάσσονται σχηματίζοντας μια κρυσταλλική δομή που μοιάζει αρκετά με εκείνη του διαμαντιού. Μπορούμε επίσης να φτιάξουμε κράματα στα οποία ορισμένα άτομα γαλλίου υποκαθίστανται από άτομα αργιλίου και που αναφέρονται ως αρσενικούχο αργίλιο-γάλλιο, ή «algas». Εφόσον οι αποστάσεις μεταξύ των ατόμων σε αυτό το κράμα είναι σχεδόν οι ίδιες με εκείνες του καθαρού αρσενικούχου γαλλίου, μπορούμε να φτιάξουμε έναν κρύσταλλο με εναλλασσόμενες περιοχές algas και αρσενικούχου γαλλίου. Με τη χρησιμοποίηση μιας τεχνικής που ονομάζεται *απόθεση χημικού ατμού* (CVD), είναι δυνατόν να παραχθεί ένας κρύσταλλος όπου οι παρεμβαλλόμενες περιοχές αρσενικούχου γαλλίου έχουν πάχος μερικών μόνο στρώσεων ατόμων. Αυτό αποδεικνύεται χρήσιμο, διότι η απαιτούμενη ενέργεια για να υψωθεί ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας διαφέρει στα δύο υλικά. Μια λεπτή στρώση αρσενικούχου γαλλίου που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο περιοχών algas λειτουργεί ως «κβαντικό φρέαρ» στο οποίο μπορεί να παγιδευτούν ηλεκτρόνια (Εικόνα 9.8). Στην πραγματικότητα, τα ηλεκτρόνια περιορίζονται μόνο κατά τη μία διάσταση, ενώ είναι ελεύθερα να κινούνται παράλληλα προς τις πλευρές μιας τεχνητής «κοιλιάδας» που δημιουργείται στον ημιαγωγό. Αλλά όπως συμβαίνει και με τα κύματα σε μια χορδή, η μεταβολή του πλάτους του φρέατος αλλάζει τις επιτρεπόμενες κβαντικές καταστάσεις. Τούτο σημαίνει ότι έχουμε έναν τύπο τεχνητού ατόμου —ένα «υπεράτομο»—, του οποίου τις ενεργειακές στάθμες και τις ιδιότητες μπορούμε να τις τροποποιούμε κατάλληλα ώστε να προσφέρονται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Μια τέτοια εφαρμογή είναι το λέιζερ κβαντικού φρέατος, όπου μπορούμε να ρυθμίζουμε το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός. Τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται ήδη σε εκτυπωτές λέιζερ και συστήματα αναπαραγωγής οπτικών δίσκων. Μια άλλη συσκευή κβαντικού φρέατος είναι το τρανζίστορ συντονισμένης αγωγιμότητας σήραγγας, στο οποίο η ευκολία της διέλευσης με φαινόμενο σήραγγας ελέγχεται με το ταίριασμα των ενεργειακών σταθμών στο φρέαρ. Αν δημιουργήσουμε πολλές εναλλασσόμενες στρώσεις algas και αρσενικούχου γαλλίου, δημιουργούμε μια διάταξη υπερπλέγματος η οποία λειτουργεί ως τεχνητός κρύσταλλος, ή «υπερπλέγμα» (Εικόνα 9.9). Ακριβώς όπως και στον πραγματικό κρύσταλλο που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 6, οι χωριστές ενεργειακές στάθμες συνενώνονται δημιουργώντας στενές ζώνες επιτρεπτών ενεργειών, τις λεγόμενες «μικροζώνες». Υπερπλέγματα μπορούμε επίσης να κατασκευάσουμε χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενες περιοχές πυριτίου και γερμανίου με στρώματα πάχους μερικών μόνο ατόμων. Στρώματα με εκατό περίπου άτομα μπορούν να παραχθούν με απόθεση αερίου. Για να παραχθούν στρώματα πλάτους λίγων μόνο ατόμων, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική που ονομάζεται *επιταξία μοριακής δέσμης* (MBE).



Εικόνα 9.8 Ηλεκτρόνια μπορούν να περιοριστούν σε ένα επίπεδο στρώμα αρσενικούχου γαλλίου ώστε να σχηματιστεί ένα διαδιάστατο αέριο ηλεκτρονίων. Αυτό το κβαντικό φρέαρ σχηματίζεται επειδή οι καταστάσεις ελάχιστης ενέργειας που είναι διαθέσιμες στα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας βρίσκονται στα στρώμα του αρσενικούχου γαλλίου.

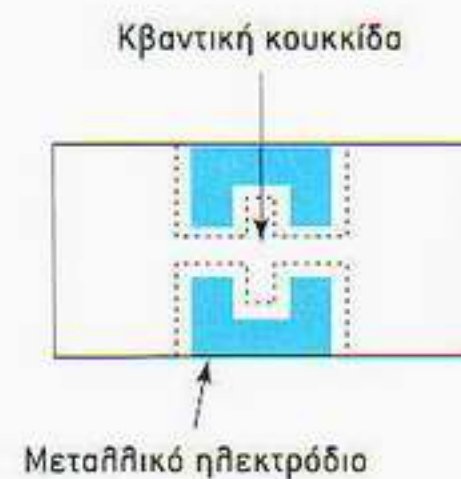


Εικόνα 9.9 Μια δομή «υπερηλέγματος» φτιαγμένη από εναλλασσόμενα στρώματα algas και αρσενικούχου γαλλίου. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κβαντικών φρεάτων παράγουν «μικροζώνες» επιτρεπόμενων ενεργειακών σταθμών όπως σε μια φυσική κρυσταλλική δομή.

Για τη διαδικασία της επιταξίας μοριακής δέσμης, το πυρίτιο ή το γερμάνιο θερμαίνεται σε φούρνο, και μια δέσμη ατόμων από μια μικρή οπή κατευθύνεται πάνω σε κάποια επιφάνεια. Τα άτομα κολλούν στην επιφάνεια με ελεγχόμενο ρυθμό —τυπικά, ένα επίπεδο ατόμων ανά δευτερόλεπτο. Τα υπερπλέγματα πυριτίου-γερμανίου που παράγονται κατ' αυτό τον τρόπο είναι «παραμορφωμένες» κρυσταλλικές δομές, διότι τα μεγέθη των ατόμων πυριτίου και γερμανίου διαφέρουν. Όπως αποδεικνύεται, αυτές οι παραμορφωμένες δομές έχουν καλύτερες οπτικές ιδιότητες σε ολοκληρωμένες οπτοηλεκτρονικές διατάξεις με συμβατικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Τέτοιες συνδυασμένες ηλεκτρονικές-οπτοηλεκτρονικές διατάξεις ενδέχεται να αποβούν πολύ μεγάλης σπουδαιότητας κατά την επόμενη φάση ανάπτυξης της τεχνολογίας των επικοινωνιών.

Στα κβαντικά φρέατα που έχουμε κατασκευάσει, τα ηλεκτρόνια περιορίζονται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, κάθετα στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Ωστόσο, τίποτε δεν θα μπορούσε να μας εμποδίσει να αφαιρέσουμε το υπερπλέγμα κατά τις δύο άλλες διευθύνσεις ώστε να δημιουργήσουμε μια ολόκληρη διάταξη μεμονωμένων κβαντικών φρεάτων. Αν οι δύο πλευρικές διαστάσεις αυτών των φρεάτων είναι αρκούντως μικρές, τα κβαντικά φαινόμενα γίνονται πάλι σημαντικά. Τούτο οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου τύπου κβαντικής ηλεκτρονικής διάταξης: της *κβαντικής κουκκίδας*. Στην πραγματικότητα, είναι ευκολότερο να κατασκευάσουμε κβαντικές κουκκίδες χρησιμοποιώντας μεταλλικές λωρίδες στην επιφάνεια της διαστρωματικής δομής του κβαντικού φρεάτος ώστε να περιορίσουμε τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας (Εικόνα 9.10). Αν εφαρμόσουμε αρνητικό φορτίο στο μέταλλο, τα ηλεκτρόνια στο κβαντικό φρέαρ κάτω από την επιφάνεια απωθούνται και συγκεντρώνονται κάτω από το κεντρικό τετράγωνο που ορίζουν τα ηλεκτρόδια. Εφόσον έχουμε τη δυνατότητα να ελέγχουμε τόσο το μέγεθος όσο και το σχήμα αυτών των κβαντικών κουκκίδων, οι επιστήμονες πειραματίζονται με τέτοια «σχεδιασμένα» άτομα προσπαθώντας να δημιουργήσουν νέους τύπους υλικών με μια σειρά εκπληκτικές ιδιότητες.

Μια άλλη συναρπαστική εξέλιξη στην τεχνολογία των ημιαγωγών στηρίζεται στο λεγόμενο *φαινόμενο σήραγγας μονήρων ηλεκτρονίων*. Αν κατασκευάσουμε μια δομή αποτελούμενη από δύο μικρά ηλεκτρόδια που τα χωρίζει ένα λεπτό στρώμα μονωτή, περιμένουμε ότι τα ηλεκτρόνια θα καταφέρουν να διέλθουν μέσω του φραγμού χάρη στο φαινόμενο σήραγγας. Τα ηλεκτρόδια απέχουν περίπου 1/10 του μικρομέτρου, και το σύστημα ψύχεται σε θερμοκρασία 1 περίπου βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν. Αν ένα ηλεκτρόνιο διαπεράσει την επαφή, η ηλεκτροστατική ενέργεια του συστήματος θα αυξηθεί. Εφόσον η χαμηλή θερμοκρασία εξασφαλίζει ότι το σύστημα βρίσκεται στη χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη του, μια τέτοια διέλευση πρέπει να είναι ενεργειακά απαγορευμένη. Τούτη η απαγόρευση ονομάζεται *αποκλεισμός Coulomb*. Αν συνδέσουμε τη δομή με τάση, στα δύο ηλεκτρόδια συσσωρεύονται ίσα και αντίθετα φορτία, και λαμβάνει χώρα φαινόμενο σήραγγας, με τα ηλεκτρόνια να διέρχονται ένα ένα. Ο μηχανισμός του αποκλεισμού Coulomb αποτελεί τη βάση στην οποία στηρίζονται οι διατάξεις περιστροφής μονήρων ηλεκτρονίων και τα τρανζίστορ μονήρων ηλεκτρονίων. Πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν πλέον δώσει συστήματα που παρουσιάζουν δράση ενός ή λίγων ηλεκτρονίων σε θερμοκρασία δωματίου. Υπάρχει πλέον η ρεαλιστική προοπτική να συνδυαστούν δομές μονήρων ηλεκτρονίων με συμβατικά



Εικόνα 9.10 Μια «κβαντική κουκκίδα» μπορεί να δημιουργηθεί με το σχηματισμό μεταλλικών πυλών στην επιφάνεια μιας ετεροδομής κβαντικών φρεάτων, όπως η εικονιζόμενη στην Εικόνα 9.8. Οι δύο μικρές στενώσεις αποτελούν «κβαντικές σημειακές επαφές» που απομονώνουν την κβαντική κουκκίδα όταν εφαρμόζεται τάση. Τότε, τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στην κουκκίδα μόνο μέσω κβαντικού φαινομένου σήραγγας.

ημιαγωγικά ηλεκτρονικά. Πέραν της δυνατότητας συσκευών μνήμης μονήρων ηλεκτρονίων, η εξαιρετική ευαισθησία αυτών των συσκευών στο τοπικό τους ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον θα τις καταστήσει χρήσιμες για πολυειδείς εφαρμογές αισθητήρων και ανιχνευτών.

Στο επίπεδο ολοκλήρωσης που προβλέπει η βιομηχανία ημιαγωγών για το 2010, στην αποθήκευση ενός μπιτ ή στη λειτουργία ενός τρανζίστορ θα συνεχίζουν να συμμετέχουν πολλές χιλιάδες ηλεκτρόνια. Οι προαναφερθείσες τεχνικές δίνουν τη δυνατότητα να φανταστεί κανείς διατάξεις οι οποίες θα δουλεύουν με πολύ μικρούς αριθμούς ηλεκτρονίων. Αυτή η εξέλιξη, με τη σειρά της, θα επιτρέψει να συνεχιστεί η αύξηση του πλήθους των τρανζίστορ πάνω σε ένα τσιπ χωρίς υπερβολική κατανάλωση ισχύος. Για να αποφευχθούν προβλήματα με τις διακυμάνσεις του πλήθους των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν σε τέτοιες διατάξεις, θα καταστεί αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί η αρχή του αποκλεισμού Coulomb για να ελέγχονται τα μεμονωμένα ηλεκτρόνια. Υπάρχουν ακόμη αρκετά τεχνολογικά προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν, αλλά η κβαντική τεχνολογία νέων ημιαγωγικών διατάξεων ίσως κατορθώσει να κρατήσει το νόμο του Moore εν ισχύ για άλλα τριάντα πέντε χρόνια.

Κβαντική πληροφορία

Στην ομιλία του 1959, ο Feynman υπολόγισε ότι το κάθε γράμμα απαιτεί την αποθήκευση έξι ή επτά «μπιτ» πληροφορίας —όπου το μπιτ εννοείται ως «1» ή «0», όπως στους υπολογιστές. Συνυπολογίζοντας την ανάγκη πλεονασμού που θα λειτουργούσε ως ασπίδα εναντίον πιθανών σφαλμάτων, φαντάστηκε ένα μπιτ πληροφορίας να αποθηκεύεται σε έναν μικρό κύβο αποτελούμενο από $5 \times 5 \times 5 = 125$ άτομα. Με βάση αυτές τις μάλλον συντηρητικές παραδοχές, ο Feynman εκτίμησε ότι:

...όλη η πληροφορία που προσεκτικά συσώρευσε ο άνθρωπος σε όλα τα βιβλία του κόσμου μπορεί να γραφεί σε έναν κύβο υλικού με πλευρά 127 μικρομέτρων —όσος είναι ο ελάχιστος κόκκος σκόνης τον οποίο μπορεί να διακρίνει το ανθρώπινο μάτι.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο Feynman τιλοφόρησε την ομιλία του *πολλά περιθώρια* για κάτι μικρότερο! Μάλιστα, σε μια ομιλία του το 1981, ο Feynman προχώρησε ακόμη παραπέρα και φαντάστηκε ότι θα μπορούσε να αποθηκεύσει ένα μπιτ πληροφορίας χρησιμοποιώντας τις κβαντικές καταστάσεις ενός μοναδικού ατόμου, ηλεκτρονίου ή φωτονίου. Στην περίπτωση του ατόμου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις δύο χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες του για να αναπαραστήσουμε το «1» και το «0»· στην περίπτωση του ηλεκτρονίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις καταστάσεις «σπιν πάνω» και «σπιν κάτω», ενώ στην περίπτωση του φωτονίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις δύο καταστάσεις πόλωσης, «K» και «O», τις οποίες συζητήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ός τώρα, δεν έχουμε παρά μια αναταξινόμηση της μνήμης του συμβατικού υπολογιστή. Το νέο χαρακτηριστικό της «κβαντικής πληροφορίας» απορρέει από τη δυνατότητα των κβαντικών συστημάτων να βρίσκονται σε κβαντική υπέρθεση και του «1» και του «0» ταυτόχρονα. Μιλήσαμε γι' αυτή τη δυνατότητα υπέρθεσης στο προηγούμενο κεφάλαιο, όταν συζητήσαμε τη συμπεριφορά των φωτονίων. Έπειτα από υπερηεντηκονταετή μελέτη των θεμελιωδών αρχών της θεωρίας του υπολογισμού, οι επιστή-

μονες των υπολογιστών διαπίστωναν κάπως έκπληκτοι ότι υπήρχαν ακόμη πολλά πράγματα να ανακαλυφθούν σχετικά με την πληροφορία! Ένα μπιτ πληροφορίας αποθηκευμένο σε ένα κβαντικό σύστημα απαιτεί νέο όνομα: *κβαντικό μπιτ*, ή q-μπιτ. Στις επόμενες ενότητες θα δούμε ότι τούτη η διαίσθηση (η ύπαρξη της κβαντικής πληροφορίας), σε συνδυασμό με την «υπερφυσική» (συντελούμενη με ταχύτητες μεγαλύτερες από εκείνη του φωτός) διάδοση σημάτων που συνεπάγεται το πείραμα EPR, οδηγεί σε συναρπαστικές νέες δυνατότητες για τη θεωρία της πληροφορίας και την επεξεργασία δεδομένων. Ας αρχίσουμε με μια άλλη εφαρμογή που στηρίζεται στην κβαντική φύση της πληροφορίας: την κβαντική κρυπτογραφία.

Η επιστήμη της κρυπτογραφίας έχει τις καταβολές της στους αρχαίους χρόνους. Πραγματεύεται τις τεχνικές για την κωδικοποίηση της πληροφορίας που περιέχει ένα μήνυμα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί μόνο από τον παραλήπτη για τον οποίο προορίζεται. Ο Ιούλιος Καίσαρ χρησιμοποιούσε τη λεγόμενη «μονοαλφαβητική αντικατάσταση» για να κωδικοποιεί τα απόρρητα μηνύματα που αφορούσαν τις κρατικές υποθέσεις. Η μέθοδος κρυπτογράφησης με μονοαλφαβητική αντικατάσταση συνίσταται σε έναν αριθμό-κλειδί, γνωστό μόνο στον αποστολέα και τον παραλήπτη, ο οποίος σας λέει κατά πόσες θέσεις πρέπει να προχωρήσετε στο αλφάβητο για να βρείτε με ποιο γράμμα πρέπει να αντικαταστήσετε το κάθε γράμμα τού προς κρυπτογράφηση κειμένου. Στις μέρες μας, οι κυβερνήσεις επιστρατεύουν πολύ πιο περίπλοκα σχήματα για να κωδικοποιούν τα απόρρητα μηνυματά τους, ενώ άλλες κυβερνήσεις συγκροτούν ομάδες κρυπτοαναλυτών και τους αναθέτουν να σπάζουν τους κώδικες. Υπάρχουν πολλά περίφημα σχετικά παραδείγματα από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Οι ΗΠΑ έσπασαν τον ιαπωνικό κώδικα PURPLE και υπέκλεψαν πληροφορίες που τους επέτρεψαν να κερδίσουν την αποφασιστική ναυμαχία τού Μίντγουεϊ. Στο Μπλέτσοι Παρκ της Μεγάλης Βρετανίας, ο Alan Turing, με τη βοήθεια των πολωνικών υπηρεσιών πληροφοριών και άλλων, κατασκεύασε έναν από τους πρώτους πρωτόγονους υπολογιστές για να σπάσει τους κώδικες ENIGMA του γερμανικού ναυτικού. Ο άθλος αυτός προσέφερε στον Ουίνστον Τσόρτσιλ υψίστης σημασίας πληροφορίες για τις θέσεις των γερμανικών υποβρυχίων και έδωσε στη Βρετανία τη δυνατότητα να διατηρήσει τις νηοπομπές της στον βόρειο Ατλαντικό, μέσω των οποίων προμηθευόταν η χώρα ζωτικής σημασίας εφόδια για τη διεξαγωγή του πολέμου. Σήμερα, χρειαζόμαστε την κρυπτογραφία για πιο καθημερινές εφαρμογές —όπως η κωδικοποίηση πληροφοριών σχετικών με τις πιστωτικές μας κάρτες και τις οικονομικές μας δόσοληψίες προτού τις αποστείλουμε όπου χρειάζεται μέσω Διαδικτύου. Τα κρυπτογραφικά συστήματα σίγουρα θα συνεχίσουν να έχουν μεγάλη σημασία τόσο για το κράτος όσο και για την οικονομία.

Υπάρχουν δύο βασικές κλάσεις κρυπτογραφικών συστημάτων, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με το αν το «κλειδί» διανέμεται μυστικά ή δημόσια. Το σύστημα μυστικού κλειδιού το πρότεινε ο Gilbert Vernam της AT&T το 1918. Είναι το μοναδικό σύστημα κρυπτογράφησης που παρέχει απόλυτη ασφάλεια. Το εν λόγω σύστημα απαιτεί ένα κλειδί ίσου μήκους με το μήνυμα που πρόκειται να αποσταλεί, και το κλειδί αυτό δεν χρησιμοποιείται ποτέ ξανά για την αποστολή άλλου μηνύματος. Τα χρησιμοποιούμενα κλειδιά μοιράζονταν στους κατασκόπους με τη μορφή μπλοκ αποσπώμενων φύλλων: μετά την αποστολή του μηνύματος, το φύλλο με το χρησιμοποιημένο κλειδί κοβό-

ταν και καταστρεφόταν. Γι' αυτό το λόγο το σύστημα ενίοτε αναφέρεται ως *μπλοκ μίας χρήσης*. Όταν ο βολιβιανός στρατός συνέλαβε τον μαρξιστή επαναστάτη Τσε Γκεβέρα το 1967, βρέθηκε ένας κατάλογος τυχαίων αριθμών τον οποίο χρησιμοποιούσε ο Γκεβέρα για να στέλνει μυστικά μηνύματα στον Φιντέλ Κάστρο στην Κούβα. Ο αργεντινός επαναστάτης μπορούσε με πλήρη ασφάλεια να κάνει κάτι τέτοιο μέσω μιας ανασφαλούς ραδιοζεύξης, διότι αυτός και ο Κάστρο χρησιμοποιούσαν το σύστημα κρυπτογράφησης μίας χρήσης του Vernam. Τα κρυπτογραφικά συστήματα κοινόχρηστου κλειδιού, από την άλλη πλευρά, στα οποία μέρος του κλειδιού δημοσιοποιείται, στηρίζουν την ασφάλειά τους στις λεγόμενες *μονόδρομες συναρτήσεις*. Πρόκειται για συναρτήσεις οι οποίες, ενώ προγραμματιστικά υπολογίζονται εύκολα κατά τη μία φορά, πολύ δύσκολα αντιστρέφονται ώστε από την αιπάντηση να συναχθεί η είσοδος της συνάρτησης. Ένα πρόσφορο παράδειγμα είναι το ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα RSA, το οποίο ανέπτυξαν οι Rivest, Shamir και Adelman στο MIT. Το εν λόγω σύστημα στηρίζεται στο γεγονός ότι ο πολλαπλασιασμός δύο μεγάλων πρώτων αριθμών γίνεται εύκολα από τον υπολογιστή, ενώ η εύρεση αυτών των πρώτων αριθμών με παραγοντοποίηση του αποτελέσματος παρουσιάζει τεράστια δυσκολία. Όπως θα δούμε, τα κρυπτογραφικά συστήματα κοινόχρηστου κλειδιού είναι κατ' αρχήν ευάλωτα στις επιθέσεις των κβαντικών υπολογιστών. Προς το παρόν, όμως, θα συγκεντρώσουμε την προσοχή μας στο να εξηγήσουμε πώς μπορεί να φανεί χρήσιμη η κβαντική πληροφορία στο κρυπτογραφικό σύστημα μυστικού κλειδιού του Vernam.

Ως γνωστόν, σε κάθε συζήτηση για την κρυπτογραφία συναντούμε τρία πρόσωπα: την Αλίκη, τον Μπομπ και την Εύα. Η Αλίκη είναι η αποστολέας που θέλει να κρυπτογραφήσει ένα μήνυμα και να το στείλει με ασφάλεια στον Μπομπ. Ο Μπομπ, ο αποδέκτης, λαμβάνει το μήνυμα και θέλει να το αποκρυπτογραφήσει για να ανακαλύψει το νόημά του. Όσο για την Εύα, πρόκειται για μια καιροφυλακτούσα ωτακούστρια, η οποία προσπαθεί να υποκλέψει το μήνυμα και να σπάσει τον κώδικα. Το μπλοκ μίας χρήσης παρέχει εγγυημένη ασφάλεια, διότι η Αλίκη κρυπτογραφεί το μήνυμα χρησιμοποιώντας ως κλειδί έναν τυχαίο αριθμό ίσου μήκους με το ίδιο το μήνυμα· ο δε Μπομπ έχει το ίδιο κλειδί και μπορεί εύκολα να αποκρυπτογραφήσει το μήνυμα. Ο συγκεκριμένος τυχαίος αριθμός χρησιμοποιείται ως κλειδί μόνο μία φορά. Μολονότι τούτο το σύστημα είναι κατ' αρχήν απολύτως ασφαλές, η αδυναμία που παρουσιάζει στην πράξη έγκειται στο γεγονός ότι η Αλίκη και ο Μπομπ πρέπει να μοιράζονται τα ίδια κλειδιά, και μάλιστα —εφόσον αυτά χρησιμοποιούνται μόνο μία φορά— πρέπει να έχουν μεγάλο απόθεμα. Τα κλειδιά, λοιπόν, πρέπει να διανέμονται στην Αλίκη και τον Μπομπ μέσω κάποιου ασφαλούς μηχανισμού —όπως μέσω ενός έμπιστου ταχυδρόμου ή σε προσωπική συνάντηση. Κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι Ρώσοι, φερόμενοι ανοήτως, μοίρασαν για δεύτερη φορά μερικά μπλοκ μίας χρήσης. Αυτή τους η απερισκεψία έδωσε στους κρυπτοαναλυτές των ΗΠΑ την ευκαιρία να αποκρυπτογραφήσουν πολλά μηνύματα τα οποία είχαν υποκλαπεί από παλιά και δεν είχαν αποκρυπτογραφηθεί. Τούτη η μεγάλης κλίμακας προσπάθεια αποκωδικοποίησης έφερε το συνθηματικό όνομα πρόγραμμα VENONA. Σε κάποιες από τις μεταφράσεις μηνυμάτων στα πλαίσια αυτού του προγράμματος οφείλεται η ταυτοποίηση του ατομικού κατασκόπου CHARLES με τον φυσικό τού Λος Άλαμος Klaus Fuchs. Πού μπαίνει στο παιχνίδι η κβαντική μηχανική; Κατ' αρχήν, η κβαντική μηχανική προσφέρει μια λύση στο πρόβλημα της δια-

νομής κλειδιών: επιτρέπει στην Αλίκη και τον Μπομπ να ανταλλάξουν μια ακολουθία τυχαίων κλειδιών με πλήρη ασφάλεια. Συνεπώς, η διαδικασία θα περιγραφόταν καλύτερα ως «κβαντική διανομή κλειδιών» παρά ως «κβαντική κρυπτογραφία». Η χρήση της κβαντικής πληροφορίας επιτρέπει στην Αλίκη και τον Μπομπ να αντιληφθούν την τυχόν παρουσία ωτακουστών και να απορρίψουν όσα κλειδιά έχουν περιέλθει σε γνώση τρίτων.

Το πρώτο σχήμα κβαντικής διανομής κλειδιών το επινόησαν οι Giles Brassard και Charles Bennett το 1984. Στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο στις ιδιότητες των καταστάσεων πόλωσης των φωτονίων, τις οποίες περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ας δούμε λοιπόν πώς μπορούμε να μεταδώσουμε ένα τυχαίο αριθμητικό κλειδί χρησιμοποιώντας φωτόνια. Η Αλίκη διαθέτει εξοπλισμό που της επιτρέπει να στέλνει στον Μπομπ φωτόνια σε καταστάσεις πόλωσης τις οποίες επιλέγει κατά τυχαίο τρόπο. Το μπιτ «0» αναπαριστάται από ένα φωτόνιο με κατάσταση πόλωσης K και το μπιτ «1» από ένα φωτόνιο με κατάσταση πόλωσης O. Μετρώντας την πόλωση των φωτονίων που λαμβάνει από την Αλίκη, ο Μπομπ μπορεί χωρίς την παραμικρή δυσκολία να ανασυγκροτήσει την τυχαία ακολουθία των 0 και 1 που του στέλνει η Αλίκη. Δυστυχώς, το ίδιο μπορεί να κάνει και η Εύα. Κάλλιιστα θα μπορούσε να έχει εγκαταστήσει τη δική της διάταξη λήψης για να υποκλέπτει τα φωτόνια από την Αλίκη, και εν συνεχεία να εκπέμπει μια πανομοιότυπη ακολουθία φωτονίων προς τον Μπομπ αφού πρώτα μετρήσει την πόλωσή τους. Ούτε ο Μπομπ ούτε η Αλίκη θα μπορούσαν ποτέ να ξέρουν ότι η Εύα γνωρίζει πλέον το μυστικό τους κλειδί, και η ασφάλεια του συστήματος Vernam θα είχε τρωθεί. Το σχήμα που μηχανεύθηκαν ο Bennett και ο Brassard ήταν άκρως ευφρές. Η Αλίκη μπορεί τώρα να στέλνει φωτόνια είτε στις καταστάσεις πόλωσης K ή O είτε, χρησιμοποιώντας έναν πολωτή στραμμένο κατά γωνία 45 μοιρών, στις καταστάσεις ΔK ή ΔO. Επιλέγει τη διάταξη πόλωσης —K-O ή ΔK-ΔO— κατά τυχαίο τρόπο. Παρομοίως, ο Μπομπ μπορεί τώρα να διαλέξει να μετρήσει την πόλωση είτε στις διευθύνσεις K και O είτε στις διευθύνσεις ΔK και ΔO. Το σημαντικό είναι ότι ο Μπομπ δεν γνωρίζει ποια εκλογή έκανε η Αλίκη όταν του έστειλε το «1» ή «0» φωτόνιό της! Έτσι, αν η Αλίκη έχει στείλει «1» στη διάταξη K-O, ο Μπομπ θα μπορούσε να διαλέξει τη διαγώνια διάταξη ΔK-ΔO για να το λάβει. Όπως είπαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το «1» της Αλίκης είναι τώρα μια κβαντική υπέρθεση του «1» και του «0» του Μπομπ. Ούτως έχοντων των πραγμάτων, η κβαντική μηχανική αποφαίνεται ότι είναι αδύνατο να προβλεφθεί ποιο αποτέλεσμα θα βρει ο Μπομπ. Ένα μόνο μπορούμε να πούμε: Αν το ίδιο πείραμα επαναλαμβανόταν πάρα πολλές φορές, οι μετρήσεις του Μπομπ θα έδειχναν ότι ένα τέτοιο φωτόνιο θα αντιστοιχούσε στο 50% των περιπτώσεων σε «1» και στο υπόλοιπο 50% σε «0». Στην Εικόνα 9.11 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα αποτελεσμάτων αυτής της διαδικασίας. Όπως βλέπουμε, όταν ο Μπομπ διαλέξει «λάθος» διάταξη, άλλοτε συμφωνεί με την Αλίκη και άλλοτε όχι. Με ποιον τρόπο μπορεί να χρησιμεύσει το γεγονός αυτό; Ιδού το τέχνασμα. Αφού στείλει μια ακολουθία μπιτ, η Αλίκη μπορεί να καλέσει τον Μπομπ μέσω μιας κανονικής τηλεφωνικής γραμμής και να τον πληροφορήσει για την ακολουθία των διατάξεων K-O ή ΔK-ΔO που χρησιμοποίησε —όχι όμως και τι μπιτ έστειλε. Ο Μπομπ συγκρίνει εν συνεχεία αυτές τις διατάξεις με εκείνες που χρησιμοποίησε ο ίδιος και κρατούν μόνο τα μπιτ για τα οποία οι διατάξεις πόλωσης συμπίπτουν. Αν όλη αυτή η διαδικασία σάς φαίνεται αδικαιολόγητα περίπλοκη, κοιτάξτε τι

(α)	1	1	1	1	1	0	0	1	Τυχαία ακολουθία
	×	+	×	×	×	×	×	+	Διάταξη πόλωσης της Αλίκης
	\	-	\	\	\	/	/	-	Αποσταθείσα πόλωση
(β)	\	-	\	\	\	/	/	-	Πραγματική αποσταθείσα πόλωση
	+	+	×	+	×	×	+	×	Διάταξη πόλωσης του Μπομπ
	0	1	1	1	1	0	0	0	Ληφθείσα ακολουθία μπιτ
(γ)		1	1		1	0			Έλεγχος των διατάξεων πόλωσης για να εντοπιστούν τα μπιτ για τα οποία αυτές συμπίπτουν
		+	×		×	×			
		+	×		×	×			
		1	1		1	0			

Εικόνα 9.11 Παράδειγμα κβαντικής κρυπτογραφίας επί το έργον όπου φαίνονται: (α) η τυχαία ακολουθία των μπιτ που θέλει να στείλει η Αλίκη, η επιλογή διάταξης πόλωσης για κάθε μπιτ (που συμβολίζεται με «+» για τη διάταξη Κ-Ο και με «×» για τη διάταξη ΔΚ-ΔΟ) και η πόλωση του φωτονίου το οποίο αποστέλλει· (β) η πραγματική κατάσταση του πολωμένου φωτονίου που λαμβάνει ο Μπομπ, η επιλογή διάταξης πόλωσης που χρησιμοποιεί αυτός για τη μέτρηση της πόλωσης και η ακολουθία των τυχαίων μπιτ την οποία συνάγει από τις μετρήσεις του· (γ) η Αλίκη τηλεφωνεί στον Μπομπ και του αποκαλύπτει ποια διάταξη πόλωσης χρησιμοποίησε σε κάθε περίπτωση, έτσι ώστε ο Μπομπ να μπορέσει να απορρίψει τα μπιτ όπου χρησιμοποίησαν διαφορετικές διατάξεις πόλωσης. Αν υπάρχει κάποιος ωτακουστής, η Αλίκη και ο Μπομπ θα διαπιστώσουν κάποιες διαφωνίες ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι διατάξεις τους συνέπιπταν.

θα συνέβαινε αν κάποιος ωτακουστής προσπαθούσε να υποκλέψει τα φωτόνια που στέλνει η Αλίκη. Εφόσον η Εύα δεν γνωρίζει ποια διάταξη πόλωσης χρησιμοποίησε η Αλίκη για να παραγάγει τα πολωμένα της φωτόνια, αναγκάζεται να μαντέψει ποια διάταξη πόλωσης οφείλει να χρησιμοποιήσει για να μετρήσει την πόλωση —είτε την Κ-Ο είτε τη ΔΚ-ΔΟ. Κατά μέσον όρο, θα μαντέψει λάθος στο 50% των περιπτώσεων. Έτσι, αν η Αλίκη στείλει ένα «1» στη διάταξη Κ-Ο, αλλά η Εύα μετρήσει ένα «1» στη διάταξη ΔΚ-ΔΟ, η δεύτερη θα μεταδώσει στον Μπομπ ένα «1» εσφαλμένου τύπου. Τι θα συμβεί τώρα αν ο Μπομπ αποφασίσει να μετρήσει την πόλωση αυτού του φωτονίου στη διάταξη Κ-Ο που χρησιμοποίησε αρχικά η Αλίκη; Ο Μπομπ έχει 50% πιθανότητα να το καταγράψει ως «0» —έστω κι αν χρησιμοποιεί τη «σωστή» βάση. Όταν η Αλίκη τηλεφωνεί στον Μπομπ για να του πει ποιες διατάξεις χρησιμοποίησε, έχουν τη δυνατότητα να ελέγξουν κατά πόσον η φωτονική επικοινωνία τους είναι ασφαλής. Εκτός από τη σύγκριση των διατάξεων, η Αλίκη και ο Μπομπ μπορούν να διαπιστώσουν κατά πόσον ο δεύτερος έλαβε τα φωτόνια όπως τα έστειλε η πρώτη στις περιπτώσεις όπου οι βάσεις τους συνέπιπταν. Αν παρεμβλήθηκε κάποιος ωτακουστής, τότε θα ανακαλύψουν ότι υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται ασυμφωνία, έστω κι αν οι βάσεις που χρησιμοποιούσαν ήταν οι ίδιες!

Πώς λειτουργεί στην πράξη όλη αυτή η διαδικασία όταν προστεθούν

όλες οι ατέλειες των πραγματικών πολωτών και ανιχνευτών; Το 1989, ο Bennett και ο Brassard κατασκεύασαν ένα στοιχειώδες σύστημα το οποίο χρησιμοποίησε επιτυχώς αυτό το κρυπτογραφικό πρωτόκολλο με πολωμένα φωτόνια για να μεταδώσει ένα τυχαίο κλειδί σε απόσταση 30 εκατοστωμέτρων στον ανοικτό αέρα. Εκτοτε, ερευνητικές ομάδες σε ολόκληρο τον κόσμο κατέδειξαν επιτυχώς ότι η χρήση αυτού του σχήματος πόλωσης —καθώς και άλλων πιο περίπλοκων σχημάτων διανομής κλειδιών που εκμεταλλεύονται τη διαπλοκή EPR— καθιστά δυνατή τη μετάδοση κλειδιών σε αποστάσεις δεκάδων χιλιομέτρων μέσω συνήθων τηλεπικοινωνιακών δικτύων οπτικών ινών. Υπάρχουν πολλές πρακτικές δυσκολίες οι οποίες πηγάζουν από το γεγονός ότι οι πηγές φωτονίων, οι ανιχνευτές και οι πολωτές δεν έχουν την ιδανική τελειότητα που τους αποδίδεται. Κανείς πρέπει να είναι ικανός να διακρίνει τα σφάλματα που οφείλονται στις πειραματικές ατέλειες από τα σφάλματα που προκαλεί η παρέμβαση ενός ωτακουστή. Ο Richard Hughes και η ομάδα του στο Λος Άλαμος (ΗΠΑ) πειραματίζονται με κλειδιά που αποστέλλονται σε μεγάλες αποστάσεις στον ελεύθερο χώρο. Ελπίζουν ότι μια τέτοια μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί κάποτε για την αποστολή κλειδιών σε τεχνητούς δορυφόρους που περιφέρονται γύρω από τη Γη. Πρόκειται για μια περίπτωση όπου η ανανέωση του αποθέματος των μυστικών κλειδιών με οποιονδήποτε άλλο τρόπο θα παρουσίαζε σοβαρότατες δυσκολίες.

Κβαντικοί υπολογιστές

Δεν είμαι ικανοποιημένος με όλες εκείνες τις αναλύσεις που περιορίζονται να ακολουθούν την κλασική θεωρία, διότι η φύση δεν είναι κλασική, ανάθεμά την· και αν θέλεις να κάνεις μια προσομοίωση της φύσης, καλύτερα να την κάνεις κβαντομηχανική· και όντως, είναι ένα υπέροχο πρόβλημα, επειδή δεν φαίνεται και τόσο εύκολο.

Richard Feynman

Η μελέτη των ορίων που θέτει η κβαντική μηχανική στους υπολογιστές απέκτησε «ευσηπληψία» ως ακαδημαϊκό πεδίο μετά το συνέδριο «Η φυσική του υπολογισμού» που διοργανώθηκε στο MIT το 1981 και παρακολούθησε ο Feynman. Στο συνέδριο αυτό τον είχε προσκαλέσει ο φίλος του Ed Fredkin για να δώσει την εναρκτήρια ομιλία. Τον Feynman, έναν φυσικό, και τον Fredkin, έναν επιστήμονα των υπολογιστών, τους συνέδεε μακρά φιλία στην πορεία της οποίας είχαν «υπέροχες, έντονες και ατέρμονες συζητήσεις». Ο Fredkin πέρασε κάποτε ένα χρόνο με τον Feynman στο Caltech, και έκαναν μια συμφωνία: Ο Feynman θα δίδασκε στον Fredkin κβαντική μηχανική και ο Fredkin θα δίδασκε στον Feynman την επιστήμη των υπολογιστών. Στην προσπάθειά του να εκπληρώσει την υποχρέωση που είχε αναλάβει, ο Fredkin πραγματικά δεινοπάθησε: «Ήταν πολύ δύσκολο να διδάξεις στον Feynman οτιδήποτε, επειδή δεν εννοούσε να αφήσει κανέναν να τον διδάξει τίποτε. Εκείνο που πάντα ήθελε ο Feynman ήταν να του δίνονται μερικά στοιχεία για το εκάστοτε πρόβλημα και στη συνέχεια να τον αφήνουν να το καταλάβει μόνος του. Όταν προσπαθούσες να του γλυτώσεις χρόνο λέγοντάς του εκείνο που ήθελε να μάθει, θύμωνε επειδή έτσι του στερούσες την ικανοποίηση να το μάθει μόνος του.» Ωστόσο, δεν του περνούσε πάντοτε του Feynman. Σε μία

από τις συζητήσεις τους, εξοργίστηκε τόσο πολύ με τον Fredkin ώστε διέκοψε τη συζήτηση και άρχισε να υποβάλλει στον Fredkin ερωτήσεις σχετικά με την κβαντική μηχανική. Έπειτα από λίγο σταμάτησε τις ερωτήσεις και είπε: «Το πρόβλημα με σένα δεν είναι ότι δεν καταλαβαίνεις κβαντική μηχανική!» Παρότι ο Feynman διαμαρτυρήθηκε ότι δεν ήξερε τι σημαίνει εναρκτήρια ομιλία, ο Fredkin κατάφερε να τον πείσει να πετάξει ανατολικά, στο MIT, για να παραστεί στο συνέδριο. Στην ομιλία του προς τους συνέδρους, ο Feynman διατύπωσε την πρόταση να κατασκευαστεί ένας υπολογιστής από κβαντομηχανικά στοιχεία που υπακούουν στους νόμους της κβαντικής μηχανικής:

Μπορείτε να το επιτύχετε [να προσομοιώσετε την κβαντική μηχανική] με ένα νέο είδος υπολογιστή —με έναν κβαντικό υπολογιστή; [...] Δεν πρόκειται για μηχανή Turing, αλλά για μια μηχανή διαφορετικού είδους.

Οι επιστήμονες των υπολογιστών χρησιμοποιούσαν τις μηχανές Turing ως ένα είδος ακαδημαϊκής στενογραφίας που συμπυκνώνει τις βασικές αρχές πάνω στις οποίες βασίζεται κάθε συμβατικός υπολογιστής. Όπως σωστά διείδε ο Feynman, ένας υπολογιστής που θα λειτουργούσε σύμφωνα με τους νόμους της κβαντικής μηχανικής θα συνιστούσε ένα τελείως διαφορετικό είδος υπολογιστή —και μάλιστα ένα είδος ικανό να εκτελεί υπολογισμούς αδύνατους για τους συμβατικούς υπολογιστές. Στην ομιλία του, ο Feynman αναφερόταν ειδικά στις προσομοιώσεις κβαντικών συστημάτων και κβαντικών πιθανοτήτων. Όπως θα διαπιστώσουμε, όμως, στην πραγματικότητα οι κβαντικοί υπο-



Ο Alan Turing (1912-1957) γεννήθηκε στο Πάντινγκτον της Αγγλίας και πήγε στο Καίμριτζ όπου σπούδασε μαθηματικά. Το 1936, ο Turing επινόησε τη διάταξη που σήμερα ονομάζεται «μηχανή Turing». Με την έννοια αυτή τέθηκαν τα θεμέλια του νέου πεδίου της επιστήμης των υπολογιστών και κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός των προβλημάτων που ήταν δυνατόν να υπολογιστούν. Ο Turing πέρασε τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο στο Μηλέτσι Παρκ της Αγγλίας προσπαθώντας να αποκωδικοποιήσει τα μηνύματα που στέλνονταν με τη γερμανική μηχανή ENIGMA. Συμμετείχε επίσης στην κατασκευή μερικών από τους πρώτους υπολογιστές: του Colossus, του ACE και του Manchester Mk 1, του πρώτου υπολογιστή στον κόσμο με αποθηκευμένο πρόγραμμα. Ο Turing υπήρξε αξιόλογος δρομέας και κάποτε σκέφτηκε να προπονηθεί για να λάβει μέρος στους προκριματικούς των Ολυμπιακών Αγώνων. Ενδιαφερόταν επίσης για την τεχνητή νοημοσύνη και εφηύρε την περίφημη «δοκιμασία Turing», η οποία επιτρέπει να διαπιστωθεί κατά πόσον είναι ικανοί οι υπολογιστές να σκεφτούν ή όχι. Πέθανε το 1957 τρώγοντας ένα μήλο δηλητηριασμένο με υδροκυάνιο.

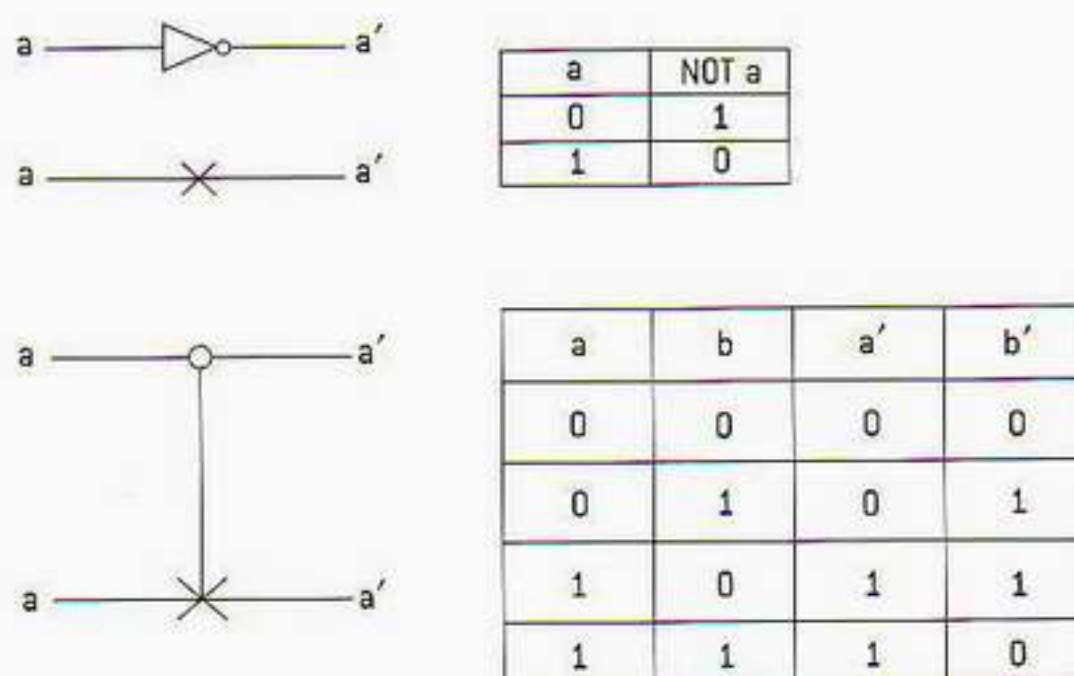
A	B	A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Εικόνα 9.12 Εδώ φαίνεται το σύμβολο μιας ηλεκτρονικής πύλης AND, με δύο εισόδους και μία έξοδο. Οι εισόδοι και η έξοδος σε κάθε σύρμα είναι δυαδικά σήματα «1» ή «0». Ο «πίνακας αληθείας» δείχνει την έξοδο της πύλης για κάθε δυνατό συνδυασμό εισόδων. Όπως βλέπουμε, αν η έξοδος είναι «0», η είσοδος θα μπορούσε να είναι ένα οποιοδήποτε από τα τρία πρώτα ζεύγη σημάτων.

Λογιστές μπορούν να εκτελούν και άλλους τύπους υπολογισμών ταχύτερα απ' ό,τι οι μηχανές Turing.

Το αντικείμενο της έρευνας του Fredkin κατά την επίσκεψή του στο Caltech πιθανόν να φαίνεται κάπως παράξενο. Ο Fredkin ήθελε να επινοήσει έναν *αντιστρεπτό* υπολογιστή. Πρόκειται για έναν τύπο υπολογιστή ο οποίος θα είχε τη δυνατότητα να οπισθοδρομεί «ξευπολογίζοντας», όπως ακριβώς υπολογίζει κατά τον συνήθη τρόπο. Οι συμβατικοί υπολογιστές δομούνται από στοιχειώδεις «λογικές πύλες» που υλοποιούνται σε τσιπ πυριτίου. Παράδειγμα τέτοιας πύλης αποτελεί η πύλη «AND», η οποία φαίνεται στην Εικόνα 9.12. Η πύλη AND έχει δύο εισόδους και μία έξοδο. Όλες οι δυνατές εισοδοί της μαζί με τις αντίστοιχες εξόδους συνοψίζονται στον «πίνακα αληθείας» που δίνεται στην εικόνα. Από αυτό τον πίνακα διαπιστώνουμε ότι η εν λόγω πύλη δίνει έξοδο «1» μόνο εάν και οι δύο εισοδοί της είναι «1»· για τους υπόλοιπους τρεις συνδυασμούς εισόδων, η πύλη δίνει έξοδο «0». Όπως εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς, η πύλη AND δεν είναι αντιστρεπτή —αν μας δοθεί η έξοδος, δεν μπορούμε να συναγάγουμε πάντοτε έναν μοναδικό συνδυασμό σημάτων εισόδου. Ο Fredkin επινόησε ένα νέο σύνολο λογικών πυλών που έχουν την ιδιότητα της αντιστρεπτότητας. Το απλούστερο παράδειγμα τέτοιας πύλης φαίνεται στην Εικόνα 9.13 μαζί με μια συμβατική πύλη NOT. Τούτη η νέα πύλη ονομάζεται πύλη «ελεγχόμενου NOT», ή πύλη CNOT. Από τον πίνακα αληθείας της πύλης CNOT βλέπουμε ότι η κάτω είσοδος δρα είτε ως «μην κάνεις τίποτε» είτε ως μια συμβατική πύλη NOT, αντιστρέφοντας το «1» σε «0», και τούμπαλιν. Το ποια από τις δύο αυτές δράσεις επιλέγεται κάθε φορά το καθορίζει το σήμα στην πάνω είσοδο. Αν η πάνω είσοδος είναι «0», η κάτω γραμμή δεν κάνει τίποτε· αν είναι «1», η κάτω γραμμή λειτουργεί ως πύλη NOT. Ο Fredkin απέδειξε ότι όλα όσα μπορούν να κάνουν οι συμβατικές λογικές πύλες είναι δυνατόν να αναπαραχθούν με τη χρήση αποκλειστικά και μόνο αντιστρεπτών πυλών (αν και όχι μόνο με πύλες CNOT). Όλα τούτα φαίνονται πολύ μυστηριώδη! Γιατί θα ενδιαφερόταν κανείς για αντιστρεπτές πύλες; Ένας πρακτικός λόγος είναι ότι ίσως απαιτούν λιγότερη ενέργεια απ' ό,τι οι συμβατικές πύλες για την πραγματοποίηση του ίδιου συμβατικού υπολογιστικού έργου. Ωστόσο, ο λόγος που καθιστά τις πύλες αυτού του είδους σημαντικές για την κβαντική υπολογιστική έγκειται στο ότι οι νόμοι της κβαντικής μηχανικής είναι αντιστρεπτοί στο χρόνο. Η αντιστρεπτικότητα ισχύει και για τα συμβατικά κύματα, όχι μόνο για τα κύματα πιθανότητας. Ένα κύμα που διαδίδεται σε μία κατεύθυνση πάνω σε μια χορδή, για παράδειγμα, μπορεί εξίσου εύκολα να διαδίδεται και στην αντίθετη κατεύθυνση. Όλα τούτα σημαίνουν ότι, αν επιθυμούμε να κατασκευάσουμε έναν κβαντικό υπολογιστή, πρέ-



Εικόνα 9.13 Η απλούστερη ηλεκτρονική πύλη είναι η NOT, η οποία έχει μία είσοδο και μία έξοδο. Όπως φαίνεται από τον πίνακα αληθείας της, η πύλη NOT απλώς αντιστρέφει το εισερχόμενο σήμα —το «1» σε «0», και αντιστρόφως. Εφόσον πρόκειται για μια σαφώς αντιστρεπτή πύλη, υπό την έννοια ότι από την έξοδό της μπορούμε αρέσως να συναγάγουμε την είσοδο, παριστάνεται, σε αντίθεση με ό,τι συνηθίζεται, με ένα «x». Η πύλη ελεγχόμενου NOT, ή CNOT, αποτελεί τη σημαντικότερη αντιστρεπτή πύλη. Έχει δύο εισόδους και δύο εξόδους και χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα ότι το σήμα στην κάτω έξοδο αντιστρέφεται μόνο αν το σήμα στην πάνω είσοδο είναι «1». Αν το σήμα στην πάνω είσοδο είναι «0», το σήμα στην κάτω είσοδο παραμένει αμετάβλητο. Η συμπεριφορά αυτή καταγράφεται στον πίνακα αληθείας.

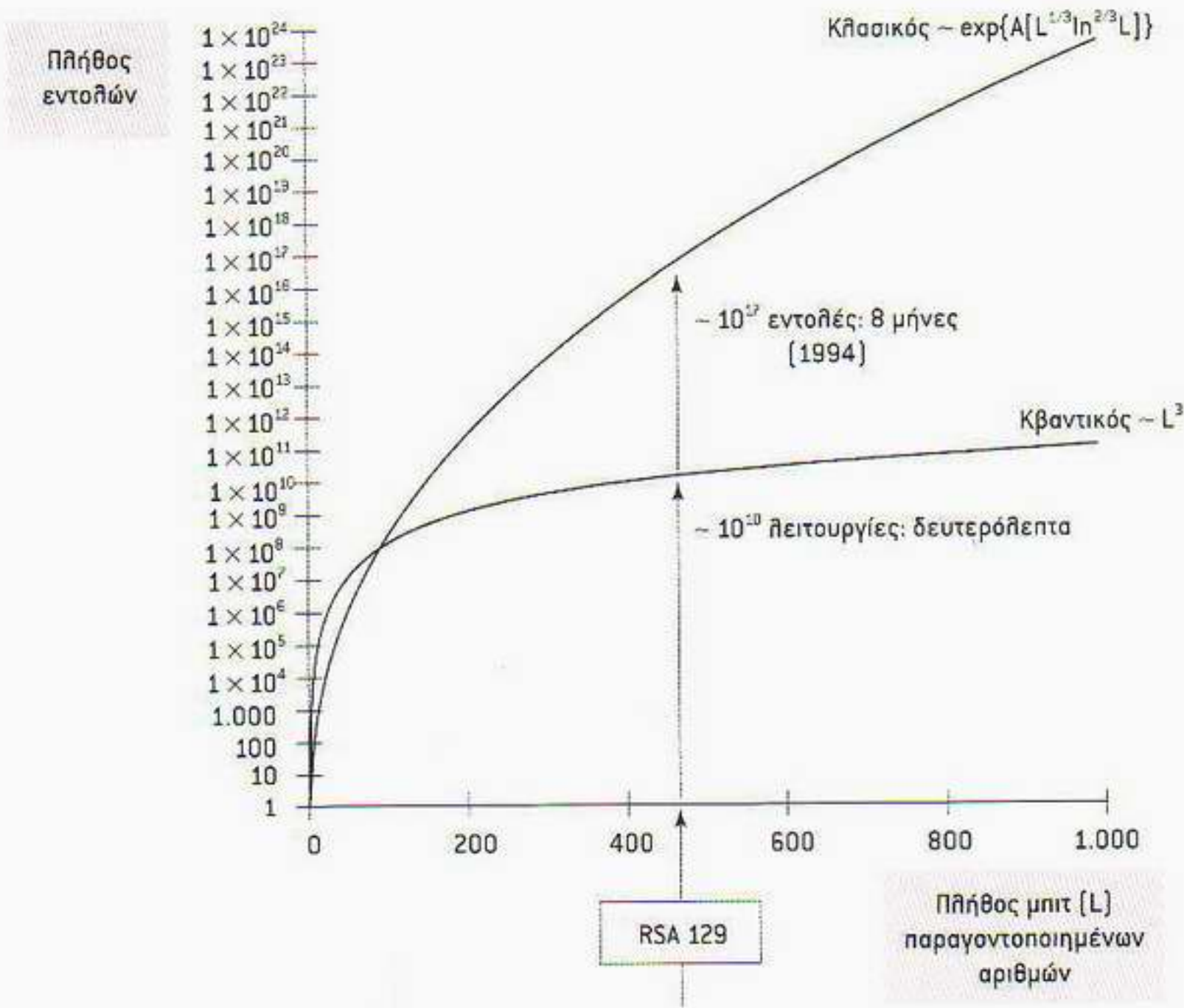
πει να χρησιμοποιήσουμε υπολογιστικά στοιχεία τα οποία θα είναι και τα ίδια αντιστρεπτά.

Το ερώτημα από ποια συστατικά στοιχεία θα δομηθεί ο κβαντικός υπολογιστής έχει πλέον αποσαφηνιστεί. Χρειαζόμαστε ένα φυσικό σύστημα για το οποίο η πληροφορία πρέπει να μπορεί να αποθηκευτεί ως q -μπιτ σε χωριστά κβαντικά συστήματα. Η πληροφορία δεν μπορεί να είναι μόνο «1» και «0» αλλά και κβαντικές υπερθέσεις του «1» και του «0». Για να κατασκευάσουμε έναν κβαντικό υπολογιστή, πρέπει να επινοήσουμε μηχανισμούς μέσω των οποίων τα q -μπιτ θα φέρονται σε αλληλεπίδραση και θα εκτελούν τις αντιστρεπτές λογικές πράξεις που πρότεινε ο Fredkin. Σημειωτέον ότι, εφόσον μπορούμε να διαλέξουμε να εκκινήσουμε τον κβαντικό υπολογιστή μας με κβαντική υπέρθεση όλων των δυνατών αρχικών καταστάσεων, ο υπολογιστής μπορεί να υπολογίσει τα αποτελέσματα για όλες αυτές τις δυνατές λογικές διαδρομές ταυτόχρονα! Ο David Deutsch, ο οποίος πρώτος απέδειξε ότι οι κβαντικοί υπολογιστές είναι, κατ' αρχήν, ισχυρότεροι από τους συμβατικούς υπολογιστές, το ονόμασε αυτό *κβαντική παραλληλία*. Η δυσκολία βρίσκεται στο ότι μια μέτρηση με κβαντική υπέρθεση δίνει μία μόνο από τις δυνατές καταστάσεις, οπότε απομένει να δούμε κατά πόσον μια τέτοια κβαντική παραλληλία θα μπορούσε να αποβεί χρήσιμη στην πράξη. Εξαντλούνται, άραγε, εδώ όλα τα περιθώρια της κβαντικής υπολογιστικής; Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό της κβαντικής μηχανικής που δεν το έχουμε τονίσει ως τώρα: η «κβαντική διαπλοκή». Η δισωματιδιακή κβαντική κατάσταση που ενέχεται στο πείραμα EPR, με το οποίο ασχοληθήκαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λέγεται «διαπλεγμένη», ή «κατάσταση διαπλοκής». Τον όρο «διαπλεγμένες» για το χαρακτηρισμό τέτοιων καταστάσεων τον πρωτοχρησιμοποίησε ο Schrödinger κατά την πρώτη περίοδο της κβαντικής μηχανικής:

Θα την αποκαλούσα όχι *ένα* αλλά *το* χαρακτηριστικό γνώρισμα της κβαντικής μηχανικής, εκείνο το οποίο επιβάλλει καθ' ολοκληρίαν την απόκλισή της από τις κλασικές γραμμές σκέψης. Με την αλληλεπίδραση οι αντιπρόσωποι (ή συναρτήσεις ψ) έχουν καταστεί διαπλεγμένες.

Στην περίπτωση του πειράματος EPR, αυτή η διαπλοκή οδήγησε στις «υπερφυσικές», μη τοπικές συσχετίσεις που τόσο απεχθανόταν ο Αϊνστάιν. Στην περίπτωση των κβαντικών υπολογιστών, επομένως, ίσως θα έπρεπε να θεωρήσουμε φυσικό ότι η διαπλοκή οδηγεί σε πρωτόγνωρες δυνατότητες που υπερβαίνουν εκείνες οποιουδήποτε κλασικού υπολογιστή. Πώς, όμως, δημιουργούνται τέτοιες διαπλεγμένες καταστάσεις στους κβαντικούς υπολογιστές; Ας εξετάσουμε ένα απλό παράδειγμα, τη δράση της κβαντικής πύλης CNOT σε μια κατάσταση δύο q-μπιτ. Όταν τα δύο q-μπιτ περιέχουν μόνο καθαρά «1» και «0», παίρνουμε το ακριβές ανάλογο του κλασικού αποτελέσματος (Εικόνα 9.13). Αλλά στους κβαντικούς υπολογιστές δεν υπάρχει τίποτε που θα μπορούσε να μας εμποδίσει να δράσουμε με μια κβαντική πύλη CNOT σε ένα q-μπιτ που βρίσκεται σε υπέρθεση του «1» και του «0». Εν τοιαύτη περίπτωση, ως έξοδο της πύλης CNOT παίρνουμε μια διαπλεγμένη κατάσταση δύο q-μπιτ ακριβώς όπως με την κατάσταση των δύο φωτονίων στο πείραμα EPR. Και ακριβώς τούτο το νέο, μη κλασικό χαρακτηριστικό της κβαντικής μηχανικής δίνει στους κβαντικούς υπολογιστές τις εξαιρετικές τους ιδιότητες και παράλληλα —όπως θα δούμε αργότερα— καθιστά δυνατή την κβαντική τηλεμεταφορά.

Μετά τη διάλεξη που έδωσε ο Feynman το 1981, το επόμενο βήμα το πραγματοποίησε ο David Deutsch, φυσικός του Πανεπιστημίου της Οξφόρδης. Το 1985 απέδειξε ότι οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν πράγματι να εκτελέσουν υπολογισμούς που είναι αδύνατο να κάνουν οι κλασικοί υπολογιστές. Ωστόσο, χρειάστηκε να φτάσει το 1994 για να σημειωθεί πραγματική έκρηξη του ενδιαφέροντος για την κβαντική υπολογιστική. Αιτία γι' αυτή την εξέλιξη στάθηκε το γεγονός ότι ο Peter Shor των Εργαστηρίων Bell ανακάλυψε έναν «κβαντικό αλγόριθμο» ικανό να κάνει κάτι χρήσιμο! Για να εκτιμήσουμε το επίτευγμα του Shor, θα πρέπει να το τοποθετήσουμε στο γενικότερο πλαίσιο των συνθηκών εκείνης της περιόδου. Οι συμβατικοί υπολογιστές τα καταφέρνουν θαυμάσια στους πολλαπλασιασμούς αριθμών. Επί παραδείγματι, ο χρόνος που χρειάζεται για να πολλαπλασιάσουν δύο αριθμούς N ψηφίων αυξάνεται ως το τετράγωνο του N . Αντιθέτως, ο χρόνος που χρειάζεται για να παραγοντοποιήσουν έναν αριθμό N ψηφίων αυξάνεται εκθετικά αυξανόμενου του N —ταχύτερα από οποιαδήποτε δύναμη του N . Εδώ έχουμε ένα παράδειγμα μονόδρομης συνάρτησης, έννοια για την οποία μιλήσαμε παραπάνω, όταν συζητούσαμε για την κρυπτογραφία κοινόχρηστου κλειδιού. Ο Peter Shor έδειξε ότι ο κβαντικός υπολογιστής μπορεί, κατ' αρχήν, να παραγοντοποιεί αριθμούς με την ίδια ευκολία που τους πολλαπλασιάζει, χωρίς να έχει ανάγκη εκθετικά αυξανόμενου χρόνου καθώς αυξάνονται τα ψηφία τού προς παραγοντοποίηση αριθμού. Πρόκειται για ένα εκπληκτικά δυναμικό αποτέλεσμα. Ολόκληρο το κρυπτογραφικό σύστημα RSA βασίζεται ακριβώς στην υπολογιστική δυσκολία της παραγοντοποίησης μεγάλων αριθμών. Το 1994, για παράδειγμα, για να παραγοντοποιηθεί ο γνωστός ως RSA-129 ακέραιος μήκους 129 ψηφίων, χρειάστηκαν οκτώ ολόκληροι μήνες, και για το έργο αυτό επιστρατεύθηκαν περισσότεροι από 1.000 υπολογιστές (Εικόνα 9.14). Αν

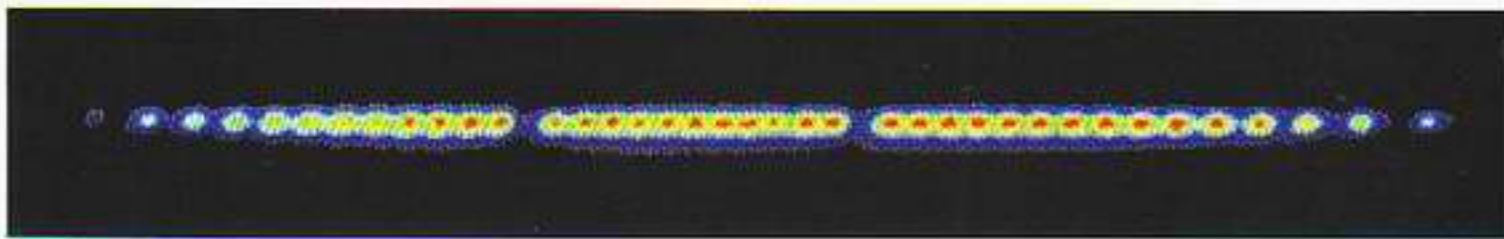


3490529510	3276913299	11438162575788886766
8476509491	3266709549	92357799761488120102
4784961880	9619881908	18290721242352562551
3898133417	3448141317	84293570693524573389
7646384933	7642967992	78305971235639587050
8784399082	9425397982	58989075147599280026
0577	88533	879543541

Εικόνα 9.14 Το γράφημα δείχνει την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος —μετρημένης σε πλήθος εντολών υπολογιστή— η οποία απαιτείται για την παραγοντοποίηση όλο και μεγαλύτερων αριθμών, το μέγεθος των οποίων μετρείται σε πλήθος μπιτ. Σύμφωνα με τη θεωρία της κλασικής πληροφορικής, η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται εκθετικά καθώς αυξάνει το πλήθος των μπιτ. Ο αλγόριθμος παραγοντοποίησης του Shor για τους κβαντικούς υπολογιστές προβλέπει ότι η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς θα αυξάνεται απλώς και μόνο ως ο κύβος του πλήθους των μπιτ, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Στο σχήμα φαίνεται επίσης ο 129-ψήφιος αριθμός, γνωστός ως RSA 129, μαζί με τους δύο πρώτους παράγοντές του. Το 1994, με την επιστράτευση πολλών διαφορετικών υπολογιστών, χρειάστηκαν οκτώ μήνες για να γίνει αυτή η παραγοντοποίηση. Ένας κβαντικός υπολογιστής που θα λειτουργούσε με την ίδια ταχύτητα θα παραγοντοποιούσε τον περίφημο αριθμό σε δευτερόλεπτα!

καταφέραμε να κατασκευάσουμε έναν κβαντικό υπολογιστή που θα είχε την ίδια περίπου ταχύτητα με έναν μόνο από τους υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διαδικασία, ο αλγόριθμος του Shor θα παραγοντοποιούσε τον RSA-129 σε λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα! Γι' αυτό το λόγο και μόνο, πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες σε ολόκληρο τον κόσμο χρηματοδοτούν προσπάθειες κατασκευής ενός κβαντικού υπολογιστή.

Το 1999, ο Charles Bennet των Ερευνητικών Εργαστηρίων τής IBM



Εικόνα 9.15 Σχηματική αναπαράσταση των πράξεων ενός κβαντικού υπολογιστή υλοποιημένου με ιοντικές παγίδες.

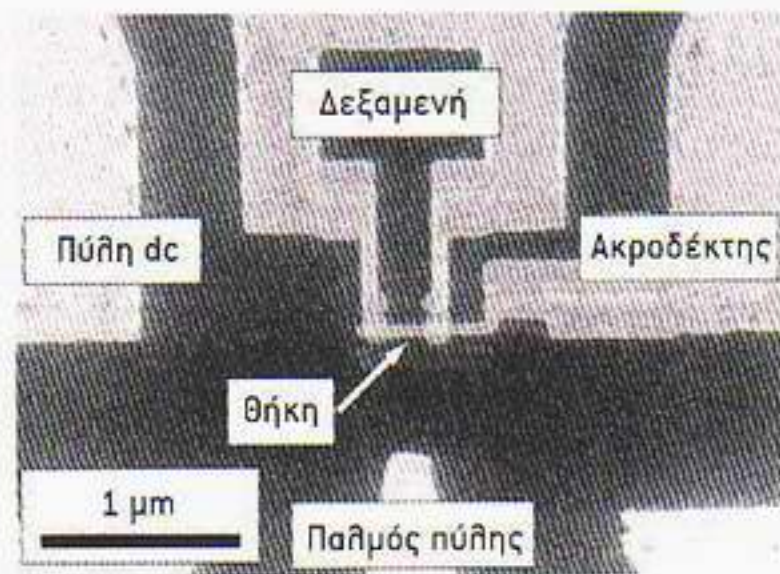
στο Γιόρκταουν Χάιτς, ένας από τους πρωτοπόρους στο πεδίο της κβαντικής υπολογιστικής και της θεωρίας της κβαντικής πληροφορίας, δήλωνε:

Μπαίνω στον πειρασμό να πω ότι η κβαντική υπολογιστική, ως θέμα βασικής επιστημονικής έρευνας, απέχει τόσο λίγο από το να είναι εξαντλημένη, ώστε έχει πάψει πλέον να προκαλεί ενδιαφέρον. Φυσικά, υπάρχουν ορισμένες πρακτικές λεπτομέρειες οι οποίες χρήζουν αντιμετώπισης, όπως η κατασκευή ενός πραγματικού κβαντικού υπολογιστή [...].

Ποιες πρόοδοι, αλήθεια, έχουν σημειωθεί στην κατεύθυνση της κατασκευής ενός κβαντικού υπολογιστή; Στο πεδίο αυτό, οι εξελίξεις είναι γοργές, και υπάρχουν πολλές ομάδες σε ολόκληρη την υφήλιο που μελετούν διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης και χειρισμού των q-μπιτ. Η ομάδα που επί του παρόντος οδηγεί την κούρσα χρησιμοποιεί ιόντα αποθηκευμένα σε παγίδα ιόντων ψυχόμενη με λέιζερ. Το 1995, οι Ignacio Cirac και Peter Zoller, του Πανεπιστημίου του Ίνσμπρουκ, έδειξαν πώς είναι δυνατόν να υλοποιηθεί η πύλη CNOT με τη βοήθεια τέτοιων παγιδευμένων ιόντων. Ως καταστάσεις q-μπιτ χρησιμοποιούνται δύο ενεργειακά επίπεδα των ιόντων. Τις καταστάσεις q-μπιτ μπορούμε να τις προετοιμάσουμε και να τις μετρήσουμε κατευθύνοντας δέσμες λέιζερ σε συγκεκριμένα ιόντα (Εικόνα 9.15). Η σύζευξη των ιόντων εξασφαλίζεται από τις δονητικές καταστάσεις των ιόντων στην παγίδα. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές, οι ερευνητές επέτυχαν να απομονώσουν συστήματα που περιέχουν μερικά q-μπιτ και να υλοποιήσουν μια κβαντική πύλη. Μια διαφορετική φυσική τεχνολογία που διερευνάται είναι η χρήση συμβατικών συστημάτων πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR), τα οποία επιτρέπουν το χειρισμό μοριακών σπιν σε διάλυμα. Και οι δύο αυτές τεχνολογίες, ωστόσο, πάσχουν από το ίδιο μειονέκτημα: αδυνατούν να δώσουν μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ή χιλιάδες πύλες και q-μπιτ. Θα περάσει πολύς καιρός, αν τα καταφέρουμε ποτέ, ώσπου να κατασκευάσουμε και να ελέγξουμε συστήματα ικανά να παραγοντοποιήσουν έναν τριψήφιο ακέραιο, για να μη μιλήσουμε για τον RSA-129.

Υπάρχουν, όμως, και άλλα προβλήματα τα οποία πρέπει να επιλύσουν οι επίδοξοι κατασκευαστές κβαντικών υπολογιστών. Οι μνήμες των συμβατικών υπολογιστών παρουσιάζουν το πρόβλημα ότι περιστασιακά κάποια μεμονωμένα μπιτ «αναστρέφονται». Οι κοσμικές ακτίνες, για παράδειγμα, αποτελούν μία από τις αιτίες που προκαλούν τέτοια σφάλματα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η βιομηχανία των υπολογιστών έχει αναπτύξει ολόκληρο οπλοστάσιο τεχνικών ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων. Ένα απλό παράδειγμα είναι ο έλεγχος «ισοτιμίας». Τα «1» και τα «0» προστίθενται πριν και μετά την αποστολή ενός μηνύματος. Αν κάποιο «1» έχει αλλοιωθεί σε «0» —ή αντιστρόφως—, αυτό θα αποκαλυφθεί αμέσως με έναν

Εικόνα 9.16 Μια διάταξη q-μπιτ με επαφή Josephson που κατασκευάστηκε από ερευνητές της NEC στην Ιαπωνία. Ένα ενδεχόμενο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για να λειτουργήσει μια τέτοια υπεραγώγιμη διάταξη.



Τον Δεκέμβριο του 1997, τα αποτελέσματα ενός πειράματος φυσικής που διεξήχθη στο Ίνσμπρουκ της Αυστρίας έγιναν πρωτοσέλιδο στον Τύπο ολόκληρου του κόσμου, και μάλιστα όχι μόνο στα επιστημονικά έντυπα αλλά και στα λαϊκά. Ο λόγος που προκάλεσε τον ενθουσιασμό των μέσων μαζικής ενημέρωσης ήταν η παρατήρηση του φαινομένου της «κβαντικής τηλεμεταφοράς» από τον Anton Zeilinger και την ομάδα του. Ο Zeilinger είναι ένας πληθωρικός και επιδέξιος ομιλητής σε ό,τι αφορά τους γρίφους της κβαντικής θεωρίας και ένας από τους λιγοστούς φυσικούς των τελευταίων χρόνων που καταφέρνει να γεφυρώνει το χάσμα ανάμεσα σε θεωρητικούς και πειραματικούς. Σε μια συνέντευξη που έδωσε στο CNN για το πείραμα της τηλεμεταφοράς, ο Zeilinger είπε: «Αν η έννοια της κβαντικής διαπλοκής σας προκαλεί ίλιγγο, μην αισθάνεστε άσχημα· ούτε εγώ την κατανοώ. Και μπορείτε να επικαθείστε τη δήλωσή μου.»



Το 1993, οι έξι φυσικοί που εικονίζονται στη φωτογραφία συνεργάστηκαν για να συγγράψουν μια εργασία με τίτλο «Τηλεμεταφέροντας μια άγνωστη κβαντική κατάσταση μέσω κλασικού καναλιού και καναλιού EPR». Οι επιστήμονες αυτοί είναι (πάνω σειρά, από τα αριστερά προς τα δεξιά) ο Richard Jozsa, ο William Wothers, ο Charles Bennett και (κάτω σειρά, από τα αριστερά προς τα δεξιά) ο Gilles Brassard, ο Claude Crepeau και ο Asher Peres. Μοιλονότι η κβαντική τηλεμεταφορά έχει επιβεβαιωθεί για πολύ μικρές αποστάσεις στο εργαστήριο, απέχουμε πολύ ακόμη από το όραμα «διακτινισέ με, Σκότι» του *Star Trek*.

έλεγχου ισοτιμίας. Μια παρόμοια τεχνική χρησιμοποιείται και για τους αριθμούς ISBN των βιβλίων. Οι μηχανικοί των υπολογιστών έχουν επινοήσει πιο περίπλοκες τεχνικές για την αντιμετώπιση καταστάσεων όπου έχουν συμβεί περισσότερα από ένα σφάλματα καθώς και τρόπους για να εντοπίζεται και να διορθώνεται το ανεστραμμένο μπιτ. Για τα συστήματα μνήμης όπου αποθηκεύονται q-μπιτ, έχουμε να αντιμετωπίσουμε όλα αυτά τα προβλήματα και ακόμη περισσότερα. Όχι μόνο μπορεί να συμβούν τυχαίες αναστροφές q-μπιτ, αλλά μπορεί και να επηρεαστεί η κρίσιμη διαφορά φάσης μεταξύ των καταστάσεων στις κβαντικές υπερθέσεις. Παρά πάσαν προδοκίαν, όμως, αυτά τα κβαντικά σφάλματα είναι κατ' αρχήν δυνατόν να ανιχνευθούν και να διορθωθούν. Εργαζόμενοι ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, ο Peter Shor της AT&T και ο Andrew Steane του Πανεπιστημίου της Οξφόρδης επινόησαν σχήματα για την προστασία και τη διόρθωση των κβαντικών δεδομένων τα οποία σπρίζονται στη διαπλοκή. Βεβαίως, μένει ακόμη να διαπιστώσουμε κατά πόσον τα σχήματα αυτά θα αποδειχθούν αποτελεσματικά στην πράξη. Όπως σαφώς υπαινίσσεται ο Bennett, το πρόβλημα της κατασκευής πραγματικών κβαντικών υπολογιστικών συστημάτων γίνεται πλέον πρόβλημα τεχνολογίας μάλλον παρά βασικής φυσικής. Προ των δυσκολιών που παρουσιάζει η κατασκευή

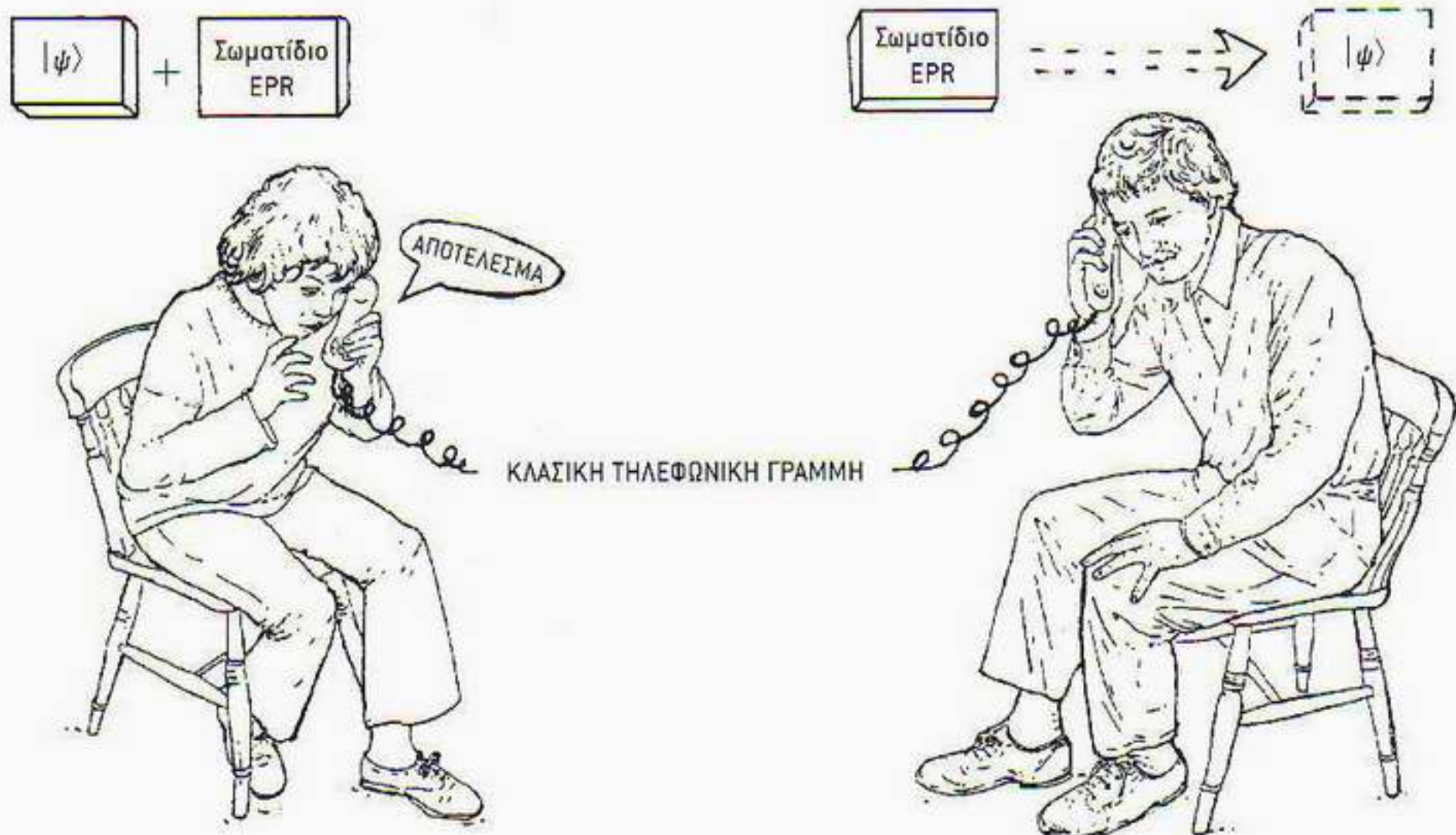
ουστημάτων q-μπιτ μεγάλης κλίμακας με παγίδες ιόντων και πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό, φαίνεται λογικό να διερευνηθούν οι δυνατότητες που προσφέρει η στερεά κατάσταση για υλοποίηση της κβαντικής λογικής, οι οποίες θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε πιο συμβατική τεχνολογία υπολογιστών. Μια ομάδα της NEC στην Ιαπωνία παρουσίασε προσφάτως ένα σύστημα q-μπιτ που στηρίζεται στην υπεραγώγιμη τεχνολογία των επαφών Josephson (Εικόνα 9.16). Φαίνεται πιθανό ότι παρόμοιες δυνατότητες ίσως αποτελούν τον πλέον ενδεδειγμένο δρόμο για να έχουμε ενδιαφέρουσες καινοτόμες κβαντικές συσκευές μέσα στην επόμενη δεκαετία.

Κβαντική τηλεμεταφορά και τα σχετικά

Το τεύχος Φεβρουαρίου 1996 της αμερικανικής έκδοσης του *Scientific American* περιείχε μια διαφήμιση που έγραφε με μεγάλα γράμματα: «Περιμένετε. Θα σας τηλεμεταφέρω λίγη γκούλας!» Φέρνοντας στο νου εικόνες από το *Star Trek*, η διαφήμιση ανακοίνωνε με μικρότερα στοιχεία: «Επιστήμονας της IBM και συνεργάτες τους ανακάλυψαν τρόπο να κάνουν ένα αντικείμενο να αποσυντίθεται σε κάποιο μέρος και να επανεμφανίζεται σε κάποιο άλλο.» Μια ηλικιωμένη κυρία απεικονιζόταν να μιλάει τηλεφωνικά με κάποια φίλη της η οποία υποσχόταν όχι να της δώσει τη συνταγή, αλλά να της στείλει διά τηλεμεταφοράς λίγη πραγματική γκούλας. Η υπόσχεσή της ίσως είναι «λίγο πρόωρη», συνέχιζε η διαφήμιση, αλλά «η IBM ασχολείται με το ζήτημα». Οι ισχυρισμοί αυτοί σχετικά με την έρευνά του έφεραν σε μεγάλη αμηχανία τον Charles Bennett, ο οποίος έγινε στόχος πολλών σκωπτικών σχολίων από την κοινότητα των ερευνητών. Ο Bennett δήλωσε αργότερα: «Σε κάθε οργανισμό υπάρχει ένταση ανάμεσα στον ερευνητικό και τον διαφημιστικό τομέα. Πάλεψα σκληρά μαζί τους γι' αυτό το θέμα, αλλά μπορεί και να μην πάλεψα αρκετά σκληρά!» Την έμπνευση για τη διαφήμιση την είχε δώσει μια εργασία την οποία δημοσίευσαν το 1993 ο Bennett και άλλοι και που έφερε τον τίτλο «Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels» (Τηλεμεταφέροντας μια άγνωστη κβαντική κατάσταση μέσω κλασικού καναλιού και καναλιού EPR). Στην πραγματικότητα, η τηλεμεταφορά για την οποία γίνεται λόγος στον τίτλο της εργασίας απέχει παρασάγγας από τις τηλεμεταφορικές δυνατότητες του αστρόπλοιου *Enterprise*. Παρά ταύτα, η κβαντική τηλεμεταφορά αποτελεί μια εκπληκτική και συναρπαστική εφαρμογή των κβαντικών καταστάσεων διαπλοκής.

Ας υποθέσουμε ότι η Αλίκη έχει ένα φωτόνιο σε μια άγνωστη κβαντική κατάσταση ψ και ότι θέλει να το στείλει στον Μπομπ. Πώς θα μπορέσει να τα καταφέρει; Αν τα φωτόνια συμπεριφέρονταν σαν κλασικά αντικείμενα, τότε η Αλίκη θα μπορούσε απλούστατα να στείλει στον Μπομπ ένα αντίγραφο του. Το 1992, όμως, οι William Wothers και Wojciech Zurek απέδειξαν ότι μια κβαντική κατάσταση ψ είναι αδύνατο να κλωνοποιηθεί —οπότε η Αλίκη δεν έχει τη δυνατότητα να κάνει ένα αντίγραφο της άγνωστης κβαντικής κατάστασης. Πρόκειται για ευκολονόητο αποτέλεσμα. Από την παλιότερη συζήτησή μας για τις υπερθέσεις των φωτονίων, γνωρίζουμε ότι, αν η Αλίκη επιχειρήσει να μετρήσει την άγνωστη πόλωση, κινδυνεύει να καταστρέψει την κατάσταση. Αν μετρήσει την πόλωση στις διευθύνσεις K-O και η κατάσταση ψ είναι μια καθαρή κατάσταση K ή O, τότε όλα βαίνουν καλώς. Αν όμως η κατάσταση ψ είναι κάποια υπέρθεση των καταστάσεων K και O, τότε η μέτρηση

θα της δώσει ένα φωτόνιο που βρίσκεται στην κατάσταση K ή O , και όλη η γνώση για την αρχική κατάσταση θα έχει απολεσθεί ανεπιστρεπτή. Σε αυτό συνίσταται το περίφημο κβαντικό θεώρημα περί «μη κλωνοποίησης». Πώς μπορεί εν τω μεταξύ να στείλει η Αλίκη στον Μπομπ πληροφορία για την άγνωστη κατάσταση ψ ; Σε τούτο το πρόβλημα έρχεται να δώσει λύση η κβαντική τηλεμεταφορά. Η διαδικασία γίνεται ως εξής (Εικόνα 9.17). Προετοιμαζόμενοι για την τηλεμεταφορά, η Αλίκη και ο Μπομπ πρέπει πρώτα να δημιουργήσουν ένα ζεύγος φωτονίων σε κατάσταση διαπλοκής EPR. Εν συνεχεία, ο καθένας τους παίρνει ένα από τα φωτόνια του ζεύγους, αποφεύγοντας όμως να προχωρήσει σε μέτρηση της κατάστασης πόλωσής του. Όταν η Αλίκη λαμβάνει το φωτόνιο στην άγνωστη κατάσταση ψ , υποβάλλει σε μέτρηση τη διφωτονική κατάσταση που προκύπτει από το συνδυασμό του άγνωστου φωτονίου με το δικό της φωτόνιο EPR. Αυτή η μέτρηση αυτομάτως επηρεάζει το φωτόνιο EPR του Μπομπ κατά συγκεκριμένο τρόπο, ο οποίος εξαρτάται από το αποτέλεσμα που έλαβε η Αλίκη. Κατόπιν, η Αλίκη τηλεφωνεί στον Μπομπ και του ανακοινώνει το αποτέλεσμα της μέτρησής της. Γνωρίζοντας το αποτέλεσμα αυτό, ο Μπομπ μπορεί να εκτελέσει μια απλή πράξη στο φωτόνιο EPR που έχει και να παραγάγει την άγνωστη κατάσταση ψ . Μολονότι το φωτόνιο EPR του Μπομπ επηρεάστηκε με τον ακαριαίο, διά δράσεως εξ αποστάσεως τρόπο του πειράματος EPR, ουδεμία χρήσιμη πληροφορία μεταδόθηκε με ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη του φωτός, διότι, για να μπορέσει ο Μπομπ να αναπαραγάγει την κατάσταση ψ , χρειαζόταν οπωσδήποτε και την



Εικόνα 9.17 Εξειδικευμένη εκδοχή ενός πειράματος κβαντικής τηλεμεταφοράς. Η Αλίκη και ο Μπομπ μοιράζονται μεταξύ τους τα σωματίδια μιας κατάστασης ζεύγους EPR χωρίς να εκτελέσουν μέτρηση της κατάστασης. Εν συνεχεία, η Αλίκη βάζει το δικό της σωματίδιο EPR να αλληλεπιδράσει με την άγνωστη κβαντική κατάσταση ψ και αναφέρει το αποτέλεσμα του πειράματος στον Μπομπ μέσω μιας συνηθισμένης κλασικής τηλεφωνικής γραμμής. Τώρα, ο Μπομπ έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει ένα πείραμα στο δικό του σωματίδιο του ζεύγους EPR προκειμένου να αναπαραγάγει την άγνωστη κβαντική κατάσταση ψ .

πληροφορία που του έδωσε τηλεφωνικώς η Αλίκη. Αρκετές ερευνητικές ομάδες σε ολόκληρο τον κόσμο έχουν πλέον αποδείξει ότι τέτοιες κβαντικές τηλεμεταφορές φωτονίων είναι εφικτές. Επιπλέον, μια ερευνητική ομάδα της IBM στο Αλμίντεν της Καλιφόρνιας προτείνει να χρησιμοποιηθεί η αρχή της κβαντικής τηλεμεταφοράς για να δημιουργηθεί «κβαντικό λογισμικό». Ένα τέτοιο λογισμικό θα αποτελούνταν από πράξεις «αποθηκευμένες» σε ένα ζεύγος EPR και θα μπορούσε να χρησιμοποιείται μόνο μία φορά, καθότι η όποια μέτρηση θα κατέστρεφε την εύθραυστη κβαντική κατάσταση. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, θα λέγαμε ότι ο μηχανισμός τηλεμεταφοράς δρα ως ένα είδος «κβαντικού διαδικτύου»!

Ποιες προοπτικές διαγράφονται για το μέλλον; Ως τώρα, τα πειράματα διανομής κβαντικών κλειδιών είναι τα πλέον προχωρημένα. Με τον τρόπο που τα περιγράψαμε εδώ, τα συστήματα αυτού του είδους δεν απαιτούν παρά δοκιμασμένες και ελεγμένες έννοιες σχετικά με τις κβαντικές καταστάσεις. Τουναντίον, η δύναμη των κβαντικών υπολογιστών και της κβαντικής τηλεμεταφοράς στηρίζεται αποφασιστικά στις διαπλεγμένες καταστάσεις EPR. Είναι στ' αλήθεια δυνατόν να έχουμε ακαριαία δράση εξ αποστάσεως σε μεγάλες αποστάσεις; Είτε οι κβαντικοί υπολογιστές οδηγήσουν στη δημιουργία ενός νέου βιομηχανικού κλάδου είτε όχι, είναι σαφές ότι η κατασκευή τέτοιων συστημάτων θα θέσει σε δοκιμασία την επινοητικότητα μιας νέας γενιάς κβαντικών μηχανικών. Δεν αποκλείεται επίσης και να ανακαλύψουμε κάποιο όριο στη μέχρι τούδε επιτυχία της κβαντικής θεωρίας. Όπως λέει ο Feynman:

Πρέπει να έχουμε διαρκώς κατά νουν ότι η κβαντική μηχανική μπορεί τελικά να αποδειχθεί αποτυχημένη, καθότι αντιμετωπίζει ορισμένες δυσκολίες με τις φιλοσοφικές προκαταλήψεις που έχουμε για τη μέτρηση και την παρατήρηση.

10 Ο θάνατος ενός άστρου

Μια από τις πιο εντυπωσιακές ανακαλύψεις υπήρξε η προέλευση της ενέργειας των άστρων, η οποία τα διατηρεί σε διάπυρη κατάσταση. Ένας από τους φυσικούς που πραγματοποίησαν αυτή την ανακάλυψη βγήκε για νυχτερινό περίπατο με τη φιλενάδα του αφού είχε συνειδητοποιήσει ότι, για να λάμπουν τα άστρα, πρέπει στο εσωτερικό τους να πραγματοποιούνται πυρηνικές αντιδράσεις. Εκείνη του είπε: «Κοίτα τι όμορφα λάμπουν τ' αστέρια!» Εκείνος της απάντησε: «Ναι, κι αυτή τη στιγμή είμαι ο μόνος άνθρωπος στον κόσμο που ξέρω γιατί λάμπουν.» Αυτή γέλασε μαζί του. Δεν εντυπωσιάστηκε που ήταν με τον μόνο άνθρωπο που ήξερε εκείνη τη στιγμή γιατί τα άστρα λάμπουν. Είναι βέβαια λυπηρό να νιώθει κανείς μόνος, αλλά έτσι γίνεται σε τούτο τον κόσμο.

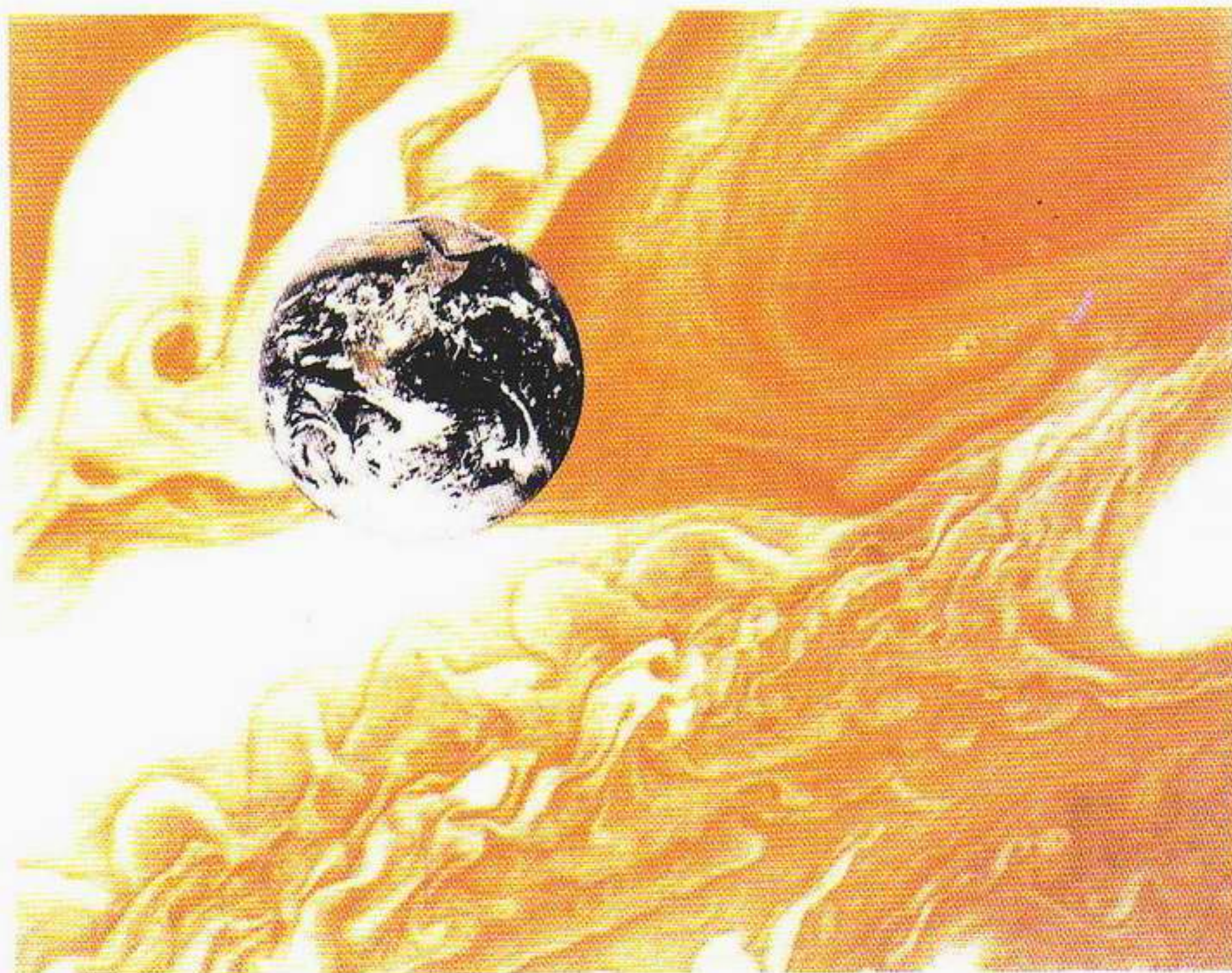
Richard Feynman

Ένα αποτυχημένο άστρο

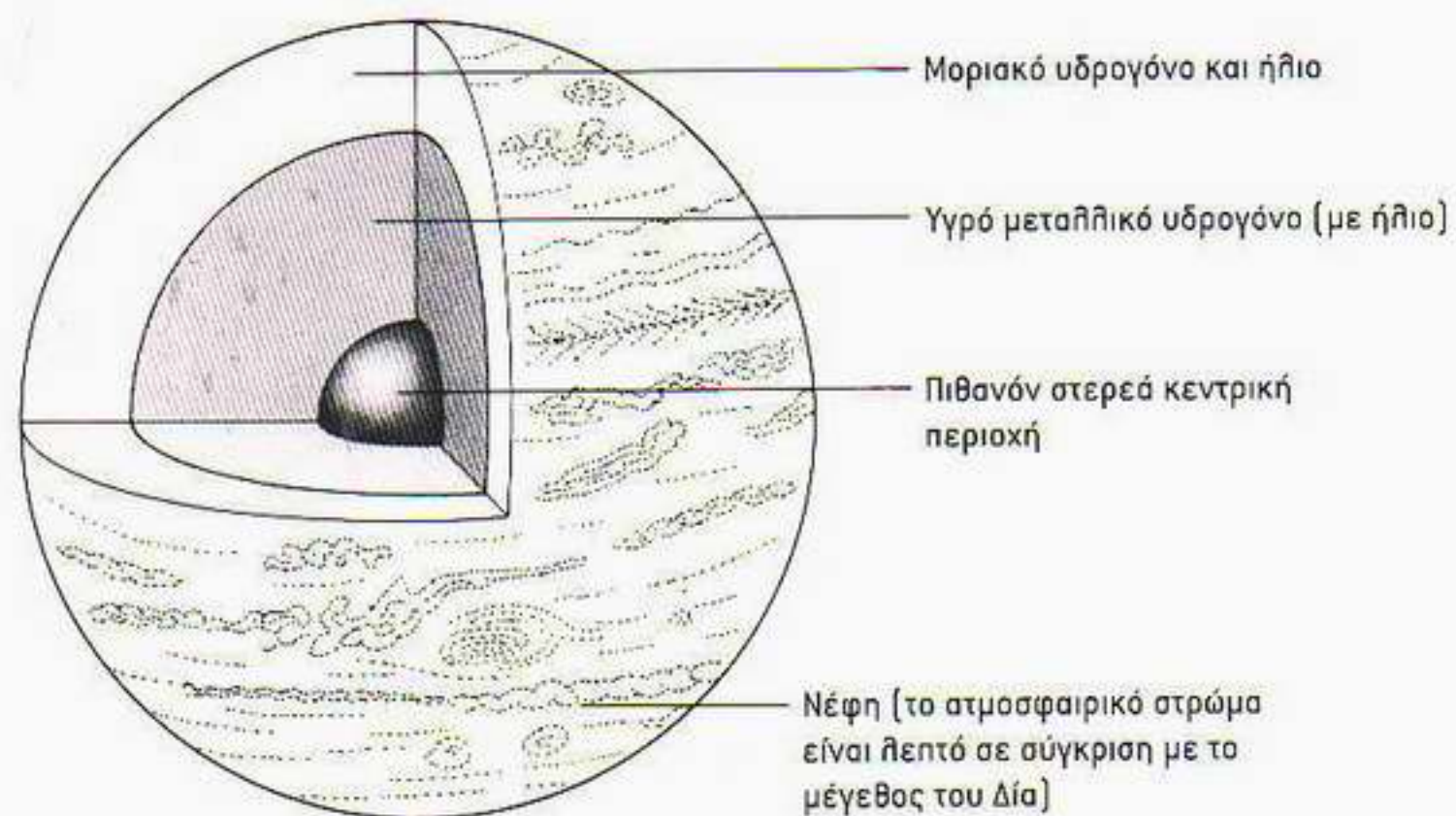
Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι η κβαντική μηχανική και η απαγορευτική αρχή του Pauli παρέχουν τις βασικές αρχές για την κατανόηση όλων των διαφορετικών τύπων ύλης που βλέπουμε γύρω μας. Το πιο εκπληκτικό, όμως, είναι ότι η κβαντική μηχανική και η απαγορευτική αρχή του Pauli παρέχουν και το κλειδί για την κατανόηση της εξέλιξης και της ποικιλίας των άστρων. Ωστόσο, πριν μελετήσουμε λεπτομερώς τα άστρα, ας ξεκινήσουμε με έναν πλανήτη, τον Δία, ο οποίος υπό μία έννοια μπορεί να θεωρηθεί ότι τελικά δεν τα κατάφερε να γίνει άστρο!

Ο Δίας είναι με διαφορά ο μεγαλύτερος από τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος. Μια ιδέα για το τεράστιο μέγεθός του μας δίνει το μοντάζ στην Εικόνα 10.1. Αν και ο Δίας φαίνεται τεράστιος συγκρινόμενος με τη Γη, εξακολουθεί να είναι πολύ μικρότερος από το άστρο του πλανητικού μας συστήματος, τον Ήλιο. Ωστόσο, παρά τη μεγάλη αυτή διαφορά στο μέγεθος, ο Δίας έχει δύο σημαντικά κοινά σημεία με τον Ήλιο: αμφότεροι αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και έχουν μέση πυκνότητα ελαφρώς μεγαλύτερη από του νερού. Δεδομένου λοιπόν ότι αποτελούνται λίγο-πολύ από τα ίδια συστατικά, γιατί τότε ο Δίας δεν είναι και αυτός μια διάπυρη σφαίρα αερίων όπως ο Ήλιος;

Ας φανταστούμε ότι κατερχόμαστε διαμέσου των σύννεφων του Δία (βλ. Εικόνα 10.2). Καθώς κατευθυνόμαστε προς το κέντρο του, η πίεση αυξάνεται, αφού το βάρος της υπερκείμενης στήλης των ατμοσφαιρικών αερίων μεγαλώνει. Σύντομα η πίεση γίνεται τόσο μεγάλη ώστε το αέριο μοριακό υδρογόνο συμπιέζεται σχηματίζοντας υγρό μοριακό υδρογόνο. Συνεχίζοντας



Εικόνα 10.1 Μοντόζ που δείχνει τη Γη με φόντο τα στροβιλωδή νέφη του Δία στην ίδια κλίμακα. Στο πάνω δεξιό μέρος της εικόνας διακρίνεται η γιγαντιαία ερυθρά κηλίδα.



Εικόνα 10.2 Τομή που δείχνει την εσωτερική δομή του Δία. Στο κέντρο η πίεση είναι 36 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από τη συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση πάνω στη Γη, ενώ η θερμοκρασία ανέρχεται στους 20.000 βαθμούς Κελσίου. Εντούτοις, οι συνθήκες αυτές δεν επαρκούν για να εξελιχθεί ο Δίας σε άστρο.

την κάθοδό μας, βουτάμε μέσα σε αυτό τον ωκεανό υδρογόνου, όπως ακριβώς κάνουμε και στους ωκεανούς της Γης, ενώ η πίεση εξακολουθεί να μεγαλώνει. Ωστόσο, καθώς εξακολουθούμε να βυθιζόμαστε, η πυκνότητα του υγρού δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου, αφού τα μόρια του υδρογόνου έχουν ορισμένο μέγεθος και η απαγορευτική αρχή του Pauli εμποδίζει τα άλλα μόρια να πλησιάσουν πολύ κοντά. Επομένως, αυτό το οποίο αντιστέκεται στις τεράστιες πιέσεις που αναπτύσσονται βαθιά μέσα στον ωκεανό υδρογόνου του Δία είναι η ισχύς των ομοιοπολικών μοριακών δεσμών του υδρογόνου. Καθώς συνεχίζουμε την κατάδυσή μας, η πίεση αυξάνεται φτάνοντας σε επίπεδα αδιανόπητα για τα γήινα δεδομένα. Οι μοριακοί δεσμοί του υδρογόνου διασπώνται τελικά, και ο ωκεανός απαρτίζεται τώρα από ατομικό υδρογόνο. Τα άτομα αυτού του υγρού πλησιάζουν μεταξύ τους αρκετά, ώστε από πλευράς ενεργειακών σταθμών να αναπτύσσεται μια ταινιωτή δομή. Αφού το υδρογόνο έχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο στη στάθμη 1s, ο ωκεανός ατομικού υδρογόνου θα συμπεριφέρεται σαν υγρό μέταλλο, σαν τον γνωστό μας υδράργυρο. Επομένως, σε αυτό τον μεταλλικό ωκεανό μπορούν να αναπτυχθούν ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία μάλιστα πιστεύουμε ότι ευθύνονται για το μεγάλο μαγνητικό πεδίο του Δία.

Η πίεση εξακολουθεί να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε προς το κέντρο του Δία, αλλά τα άτομα του υδρογόνου καταφέρνουν να αντέχουν στις τεράστιες πιέσεις που αναπτύσσονται. Αλλά τι εμποδίζει τη διάσπαση των ατόμων του υδρογόνου; Στην τεράστια βαρυτική πίεση η οποία επικρατεί στο εσωτερικό ενός πλανήτη σαν τον Δία αντιστέκεται η γνωστή μας ηλεκτρική ελκτική δύναμη ανάμεσα στο ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο. Και υπό ποία έννοια ο Δίας θεωρείται αποτυχημένο άστρο; Τα άστρα μοιάζουν πολύ με τον Δία, με τη διαφορά ότι έχουν μεγαλύτερη μάζα — η μάζα του Ήλιου είναι 1.000 φορές μεγαλύτερη από του Δία. Τούτο σημαίνει ότι η πίεση στο κέντρο ενός άστρου είναι ακόμα μεγαλύτερη από εκείνη στο κέντρο του Δία· μάλιστα είναι τόσο μεγάλη ώστε, καθώς τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια των ατόμων συμπιέζονται, τελικά διαχωρίζονται. Οι βαρυτικές δυνάμεις σε ένα άστρο είναι αρκούντως ισχυρές ώστε να υπερνικούν την ηλεκτρική έλξη η οποία ασκείται ανάμεσα στα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια «σούπα» ηλεκτρονίων και πρωτονίων που ονομάζεται *πλάσμα*.

Οι πλανήτες «στηρίζονται» από τα άτομά τους. Στα άστρα, όμως, τα άτομα συμπιέζονται σε τέτοιο βαθμό ώστε να σχηματίζεται πλάσμα, ενώ οι βαρυτικές δυνάμεις εξαναγκάζουν τα άστρα σε περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση. Καθώς το πλάσμα συμπιέζεται, τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια του κινούνται όλο και ταχύτερα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του πλάσματος να αυξάνεται. Εξαιτίας αυτής της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων αναπτύσσεται πίεση η οποία εμποδίζει περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση. Ωστόσο, το άστρο εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή φωτονίων, οπότε το πλάσμα θα αρχίσει να ψύχεται. Για να αποτραπεί περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση, το άστρο πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς με θερμότητα από το εσωτερικό του. Καθώς το άστρο καταρρέει, στο κέντρο του θα επικρατήσουν τελικά συνθήκες τόσο μεγάλης πυκνότητας και θερμοκρασίας ώστε να αρχίσουν να συντελούνται πυρηνικές αντιδράσεις. Για να δείξουμε ότι οι διάσημοι φυσικοί είναι και αυτοί άνθρωποι και κάνουν λάθη όπως ο καθένας μας, αξίζει να αναφέρουμε τις απόψεις τού Rutherford σχετικά με τις προοπτικές εκμετάλλευσης της πυρηνικής ενέργειας. Ο Rutherford είπε κάποτε: «Τα πο-



Ο σερ Arthur Eddington (1882-1944) καταγόταν από κουσκέρους και παρέμεινε πιστός κουσκέρος σε όλη του τη ζωή. Λόγω των θρησκευτικών του πεποιθήσεων, έγινε αντιρρησίας συνείδησης κατά τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Ήταν ένας από τους πρώτους φυσικούς που αναγνώρισαν τη σπουδαιότητα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Συμμετείχε μάλιστα στην αποστολή για την παρατήρηση της έκλειψης της Σελήνης το 1919, η οποία επιβεβαίωσε την πρόβλεψη του Αϊνστάιν για την καμπύλωση των ηθιακών ακτίνων. Το κύριο έργο του αφορούσε τη θεωρητική διερεύνηση του εσωτερικού των άστρων. Υπήρξε επίσης ονομαστός εκησάικευτής της αστρονομίας, ενώ το 1939 του απονεμήθηκε ο τίτλος του ιππότη.

σά ενέργειας που παράγονται από τη διάσπαση του ατόμου είναι πεινιχρά. Όποιος περιμένει ότι κάποτε θα παράγεται ενέργεια από τη διάσπαση του ατόμου απλά λέει ανοησίες.» Ανοησίες ή όχι, η πυρηνική ενέργεια είναι αυτή που κάνει τα άστρα να λάμπουν!

Η καύση του υδρογόνου

Για αιώνες ολόκληρους, φυσικοί και αστρονόμοι αναρωτιόνταν γιατί λάμπουν τα άστρα. Στοιχειώδεις υπολογισμοί είχαν δείξει ότι η ενέργεια που εκλύεται από τις συνήθειες χημικές «καύσεις» ήταν απελπιστικά ανεπαρκής για να καλύψει τις ανάγκες των άστρων καθ' όλη τη διάρκεια της μακράς ζωής τους, που φτάνει τα δισεκατομμύρια χρόνια. Η ενέργεια θα έπρεπε λοιπόν να προέρχεται από πυρηνικές αντιδράσεις. Ωστόσο, υπήρχε ένα πρόβλημα: ο διάσημος βρετανός αστρονόμος σερ Arthur Eddington είχε δείξει ότι οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό των άστρων ήταν πολύ χαμηλές για να μπορέσουν τα πρωτόνια να υπερνικήσουν το απωστικό ενεργειακό φράγμα και να πλησιάσουν μεταξύ τους ώστε να αρχίσουν οι πυρηνικές αντιδράσεις! Παρ' όλα αυτά, ο Eddington πίστευε ότι μόνο η πυρηνική ενέργεια ήταν δυνατόν να κάνει τα άστρα να λάμπουν και προκαλούσε όσους το αμφισβητούσαν με τα ακόλουθα λόγια: «Δεν αντιδικούμε με όποιον υποστηρίζει ότι τα άστρα δεν είναι αρκετά θερμά γι' αυτή τη διαδικασία. Απλά του λέμε να πάει να βρει ένα θερμότερο μέρος!» Τελικά αποδείχθηκε ότι ο Eddington είχε δίκιο, αλλά έπρεπε να έρθει η κβαντική μηχανική για να εξηγηθεί τι πραγματικά συμβαίνει. Ένας βρετανός αστρονόμος, ο Robert Atkinson, και ένας αυστριακός φυσικός, ο Fritz Houtermans, έλυσαν τελικά το πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας στα άστρα, χρησιμοποιώντας το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 5. Η επιστημονική τους εργασία άρχισε ως εξής: «Προσφάτως, ο Gamow έδειξε ότι θετικά φορτισμένα σωματίδια μπορούν να διεισδύσουν στον ατομικό πυρήνα, ακόμη κι αν η παραδοσιακή άποψη υποστηρίζει ότι η ενέργειά τους δεν επαρκεί.» Οι παραπάνω δύο επιστήμονες διατύπωσαν την άποψη ότι οι ελαφρείς πυρήνες μπορούσαν να λειτουργήσουν ως «παγίδες» πρωτονίων. Όταν συλλαμβάνονταν τέσσερα πρωτόνια, ήταν δυνατόν να σχηματιστεί ένα σωματίδιο α· στη συνέχεια, αυτό μπορούσε να αποβληθεί από τον πυρήνα με ταυτόχρονη απελευθέρωση της μεγάλης πυρηνικής ενέργειας σύνδεσης της διαδικασίας σύντηξης όπου οι τέσσερις πυρήνες υδρογόνου μετατρέπονται σε έναν πυρήνα ηλίου. Η εργασία τους αρχικά έφερε τον ασυνήθιστο τίτλο «Πώς μπορεί να μαγειρέψει κανείς πυρήνες ηλίου σε μια κατοσρόλα δυναμικού;». Τελικά, όμως, μετά και τις παραινέσεις του συντάκτη του επιστημονικού περιοδικού, προτίμησαν έναν συμβατικότερο τίτλο! Η εν λόγω εργασία αποτέλεσε τη βάση για τις σύγχρονες θεωρίες των αστρικών θερμοπυρηνικών αντιδράσεων, και δέκα χρόνια αργότερα, το 1939, ο Hans Bethe πρότεινε τον λεγόμενο κύκλο του άνθρακα, στον οποίο ο άνθρακας παίζει παρόμοιο ρόλο με την πυρηνική παγίδα πρωτονίων των Atkinson και Houtermans.

Ο Ήλιος περιέχει υδρογόνο, και η ενέργειά του πρέπει να προέρχεται από πυρηνικές αντιδράσεις, στις οποίες περιλαμβάνεται η σύντηξη του υδρογόνου και ο σχηματισμός ηλίου και βαρύτερων πυρήνων. Να αναφέρουμε εδώ ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται και από μια βόμβα υδρογόνου προέρχεται από αντιδράσεις σύντηξης υδρογόνου. Γιατί, τότε, ο Ήλιος δεν

εκρήγνυται σαν βόμβα υδρογόνου; Στην πραγματικότητα, ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας στον Ήλιο είναι τόσο μικρός ώστε μια περιοχή του Ήλιου με μέγεθος ανθρώπου καίει τα πυρηνικά της καύσιμα με πολύ πιο αργό ρυθμό απ' ό,τι ο άνθρωπος μετατρέπει την τροφή του σε ενέργεια! Η μεγάλη διαφορά στο ρυθμό παραγωγής ενέργειας σε μια βόμβα και σε ένα άστρο οφείλεται στο ότι συμβαίνουν διαφορετικού τύπου αντιδράσεις σύντηξης υδρογόνου. Ένα άστρο αποτελείται κυρίως από συνηθισμένους πυρήνες υδρογόνου, και καθένας τους περιέχει ένα μόνο πρωτόνιο, ενώ οι αντιδράσεις σύντηξης που συντελούνται κατά την έκρηξη μιας βόμβας υδρογόνου απαιτούν την παρουσία των δύο σπάνιων ισότοπων του υδρογόνου, του δευτερίου και του τριτίου, τα οποία εκτός από το πρωτόνιο περιέχουν επιπλέον ένα και δύο νετρόνια, αντίστοιχα. Αυτά τα ισότοπα υδρογόνου συντήκονται σχετικά εύκολα. Αντίθετα, η πυρηνική αντίδραση με το συνηθισμένο υδρογόνο χάρη στην οποία ο Ήλιος παράγει την ενέργειά του συμβαίνει πολύ σπάνια, ώστε δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ στο εργαστήριο! Αυτό οφείλεται στο ότι η βασική πυρηνική αντίδραση στον Ήλιο στηρίζεται στον ίδιο μηχανισμό με την πυρηνική διάσπαση β. Τέτοιες αντιδράσεις είναι γνωστές ως *ασθενείς αλληλεπιδράσεις*, και η ταχύτητά τους είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με τη σχετικά μεγάλη ταχύτητα των *ισχυρών* πυρηνικών αλληλεπιδράσεων, όπως είναι η σύντηξη δευτερίου-τριτίου.

Με τον όρο ασθενής αλληλεπίδραση αναφερόμαστε στη δύναμη που ευθύνεται για την ακτινοβολία β. Το απλούστερο παράδειγμα μιας τέτοιας αλληλεπίδρασης είναι η διάσπαση β των νετρονίων. Τα νετρόνια έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη μάζα από τα πρωτόνια και, αν βρεθούν μόνα τους έξω από τον πυρήνα, διασπώνται τελικά σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Αυτά τα δύο σωματίδια εξασφαλίζουν τη διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου —ξεκινάμε με ένα νετρόνιο χωρίς φορτίο και καταλήγουμε με δύο σωματίδια με ίσα και αντίθετα φορτία. Αποδείχθηκε πειραματικά, ωστόσο, ότι η ορμή και η ενέργεια σε αυτή τη διαδικασία δεν διατηρούνται, εκτός κι αν υποθέσουμε ότι κατά τη διάσπαση του νετρονίου παράγεται, εκτός από το πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο, και ένα άλλο ηλεκτρικά ουδέτερο σωματίδιο. Αυτή η τολμηρή ιδέα προτάθηκε από τον Pauli το 1931, ένα χρόνο πριν ο Chadwick ανακαλύψει το νετρόνιο. Για να ξεχωρίσει το «νετρόνιο του Pauli» από αυτό του Chadwick, ο Fermi βάφτισε το υποθετικό σωματίδιο του Pauli *νετρίνο* (στα ιταλικά σημαίνει: μικρό ουδέτερο σωματίδιο). Αφού αυτά τα περίεργα σωματίδια δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο, δεν «αισθάνονται» τις ηλεκτρικές δυνάμεις. Επιπλέον, μιας και όλες οι παλιότερες προσπάθειες ανίχνευσης των νετρίνων είχαν αποτύχει, ήταν προφανές ότι δεν «αισθάνονται» ούτε την [ισχυρή] πυρηνική δύναμη! Παρ' όλα αυτά, από τη στιγμή που στην παραγωγή τους εμπλέκεται η ασθενής δύναμη, τα νετρίνα πρέπει να αλληλεπιδρούν με την ύλη του πυρήνα μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Η δυσκολία παρατήρησης των νετρίνων έγκειται στον προβλεπόμενο ρυθμό των παραπάνω αντιδράσεών του —πιθανότητα αλληλεπίδρασης της τάξεως του 50% απαιτεί τη διέλευση ενός νετρίνου μέσα από πολλά «έτη φωτός» ύλης. Εφόσον η ταχύτητα του φωτός είναι 300 εκατομμύρια μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ενώ ένα έτος φωτός είναι η απόσταση που διανύει το φως σε ένα χρόνο (δηλαδή περίπου 30 εκατομμύρια δευτερόλεπτα), για να ελπίζετε ότι θα δείτε μια τέτοια αντίδραση νετρίνου θα πρέπει ή να διαθέτετε μια αφάνταστα μεγάλη ποσότητα ύλης στον ανιχνευτή σας ή μια δέσμη με έναν τεράστιο αριθμό νετρίνων. Επομένως, δεν



Ο Hans Bethe γεννήθηκε το 1906 στο Στρασβούργο, το οποίο τότε ανήκε στη Γερμανία. Με την άνοδο του Χίτλερ στην εξουσία, ο Bethe εγκατέλειψε τη Γερμανία και, μετά τη σύντομη παραμονή του στην Αγγλία, πήγε στο Πανεπιστήμιο Cornell στις ΗΠΑ. Σημαντική ήταν κατά τη διάρκεια του πολέμου η συμμετοχή του στην ανάπτυξη των πυρηνικών όπλων στο Λος Άλαμας, έλαβε δε μέρος και στις διαπραγματεύσεις στη Γενεύη της Ελβετίας για τον έλεγχο των πυρηνικών δοκιμών. Το 1967 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για την εργασία του σχετικά με τις πυρηνικές διαδικασίες που κάνουν τα άστρα να λάμπουν.



Οι ιδέες τού Fred Hoyle (1915-2001) για την εξέλιξη των άστρων, τις οποίες ανέπτυξε σε συνεργασία με τους Geoffrey και Margaret Burbidge και τον William Fowler το 1957, αποτελούν τη βάση για τη θεωρία σύνθεσης των βαρέων στοιχείων στις κεντρικές περιοχές των άστρων μεγάλης μάζας. Ο Hoyle υπήρξε ο κορυφαίος υπέρμαχος του μοντέλου της «σταθερής κατάστασης» για το Σύμπαν, το οποίο στις δεκαετίες του 1950 και του 1960 αποτελούσε το κύριο εναλλακτικό μοντέλο απέναντι στη γενικά αποδεκτή σήμερα θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης. Ο Hoyle έχει γράψει επίσης μερικά θαυμάσια εκπαιδευτικά βιβλία αστρονομίας, αλλά και μερικά πολύ διασκεδαστικά και διορατικά διηγήματα επιστημονικής φαντασίας. Πάντοτε αμφισβητίας, στα τελευταία του χρόνια προώθησε την ιδέα ότι η ζωή και οι ασθένειες μας έρχονται από το Διάστημα. Παρόμοιες ιδέες μόλις τώρα αρχίζουν να τυχάνουν κάποιας υποστήριξης.

εκπλήσσει το γεγονός ότι έπρεπε να φτάσουμε στο 1956, είκοσι πέντε χρόνια από τότε που ο Pauli πρότεινε την ύπαρξη του νετρίνου (και πολύ μετά από τότε που την αποδέχθηκαν οι άλλοι φυσικοί) για να μπορέσουν δύο αμερικανοί φυσικοί, ο Frederick Reines και ο Clyde Cowan, να ανιχνεύσουν ασθενείς αλληλεπιδράσεις στις οποίες συμμετείχαν νετρίνα. Πού βρήκαν, όμως, τόσο πολλά νετρίνα; Γνωρίζοντας ότι κάθε πυρηνική σύντηξη προκαλεί κατά μέσο όρο έξι διασπάσεις β , η πρώτη τους ιδέα ήταν να χρησιμοποιήσουν νετρίνα που απελευθερώνονται σε μια πυρηνική έκρηξη! Ευτυχώς, αντί γι' αυτό, μπόρεσαν να χρησιμοποιήσουν τα νετρίνα που παράγονται σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Αν και από τον αντιδραστήρα διαφεύγει τεράστιος αριθμός νετρίνων —περισσότερα από 1 τρισεκατομμύριο νετρίνα περνούν από κάθε τετραγωνικό εκατοστό ανά δευτερόλεπτο—, παρατηρήθηκαν περίπου τρεις αντιδράσεις νετρίνων την ώρα. Η βασική αντίδραση για τη διάσπαση β του νετρονίου είναι η εξής:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

Το σωματίδιο που παριστάνεται με το ελληνικό γράμμα ν θεωρείται κατά σύμβαση ότι είναι το αντινετρίνο —το αντισωματίδιο του νετρίνου. Θα αναφερθούμε περισσότερο στα αντισωματίδια στο επόμενο κεφάλαιο. Στο σημείο αυτό σημειώνουμε ότι, αν μεταφέρουμε ένα από τα σωματίδια στο άλλο μέλος μιας τέτοιας πυρηνικής αντίδρασης, προκειμένου να διατηρήσουμε το ισοζύγιο θετικών και αρνητικών φορτίων πρέπει να το θεωρήσουμε ως το αντισωματίδιό του. Έτσι, μια δυνατή ασθενής αλληλεπίδραση περιγράφεται από την αντίδραση

$$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu},$$

που περιλαμβάνει το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου —το ποζιτρόνιο. Στην πραγματικότητα, η αντίδραση που προσπάθησαν να ανιχνεύσουν ο Reines και ο Cowan ήταν η αντίστροφη, δηλαδή η

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+.$$

Ο Pauli πληροφορήθηκε τα νέα για την ανακάλυψη του νετρίνου λίγο πριν πεθάνει. Ο Frederick Reines τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για την παραπάνω ανακάλυψη το 1995. Σήμερα, αυτά τα περίεργα σωματίδια δεν μας εκπλήσσουν όταν τα παρατηρούμε στους μεγάλους επιταχυντές, ενώ οι τεχνητά παραγόμενες δέσμες νετρίνων και αντινετρίνων αποτελούν πια κοινό τόπο. Είμαστε πλέον σε θέση να παρατηρούμε αντιδράσεις νετρίνων όπως η ακόλουθη:

$$\nu + n \rightarrow p + e^-,$$

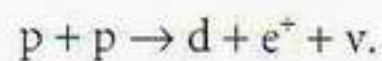
καθώς επίσης και την αντίδραση με το αντινετρίνο που ανίχνευσαν οι Reines και Cowan. Αργότερα θα πούμε περισσότερα για τα αντισωματίδια.

Στον Ήλιο υπάρχουν μεν πρωτόνια, αλλά τα πρωτόνια από μόνα τους δεν μπορούν να μετατραπούν σε νετρόνια μέσω της διάσπασης β

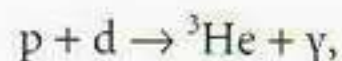
$$p \rightarrow n + e^+ + \nu,$$

διότι τα νετρόνια έχουν μεγαλύτερη μάζα. Ωστόσο, στο εσωτερικό ενός πυρήνα αυτή η διαδικασία μπορεί να συμβεί —και όντως συμβαίνει— αν ο νέος πυρήνας που θα παραχθεί από αυτή τη «διάσπαση» ενός από τα πρωτόνια

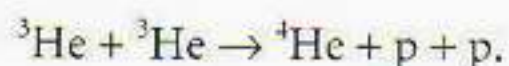
του είναι πιο σταθερός από τον αρχικό. Και τούτο διότι, σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας, το όλο σύστημα μπορεί να «δανεισθεί» την επιπλέον ενέργεια ώστε να πραγματοποιηθεί η διάσπαση —αφού τελικά το σύστημα θα καταλήξει σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Έτσι, αν και τα πρωτόνια δεν μπορούν από μόνα τους να μετατραπούν σε νετρόνια, αν βρίσκονται σε έναν κατάλληλο πυρήνα, τα καταφέρνουν! Αυτό είναι το κλειδί για την κατανόηση του μηχανισμού με τον οποίο ο Ήλιος παράγει την ενέργειά του. Ας εξετάσουμε τη σύγκρουση δύο πρωτονίων στο εσωτερικό του Ήλιου. Η ηλεκτρική άπωση δυσχεραίνει την προσέγγισή τους σε απόσταση που να «αισθάνονται» την επίδραση της (μικρής εμβέλειας) ισχυρής δύναμης. Κάπου κάπου όμως, εξαιτίας του κβαντικού φαινομένου σήραγγας, δύο πρωτόνια πλησιάζουν αρκετά μεταξύ τους και σχηματίζουν έναν ασταθή πυρήνα. Συνήθως, έπειτα από ένα εξαιρετικά μικρό χρονικό διάστημα, τα δύο πρωτόνια αποχωρίζονται ξανά. Όμως, εξαιτίας της ασθενούς αλληλεπίδρασης και της αρχής της αβεβαιότητας, υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα ένα από τα πρωτόνια αυτού του ασταθούς πυρήνα να μετατραπεί, μέσω διάσπασης β, σε νετρόνιο, και έτσι να σχηματισθεί ένας πυρήνας δευτερίου:



Για να συμβεί αυτό, για κάθε πρωτόνιο στο εσωτερικό του Ήλιου απαιτούνται κατά μέσο όρο πάνω από 1 δισεκατομμύριο χρόνια αλληπάλληλων συγκρούσεων! Και εδώ ακριβώς κρύβεται το μυστικό τού ότι η καύση στον Ήλιο γίνεται τόσο αργά: η δυσκολία τού εν λόγω βήματος. Άπαξ όμως και παραχθεί το δευτέριο, οι υπόλοιπες πυρηνικές αντιδράσεις που απαιτούνται για να σχηματιστεί το ήλιο προχωρούν πολύ πιο γρήγορα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα συνδυασμό ισχυρής και ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα p και d απ' όπου σχηματίζεται ${}^3\text{He}$:



ακολουθούμενο από μια αμιγώς ισχυρή αλληλεπίδραση από την οποία παράγεται ${}^4\text{He}$:

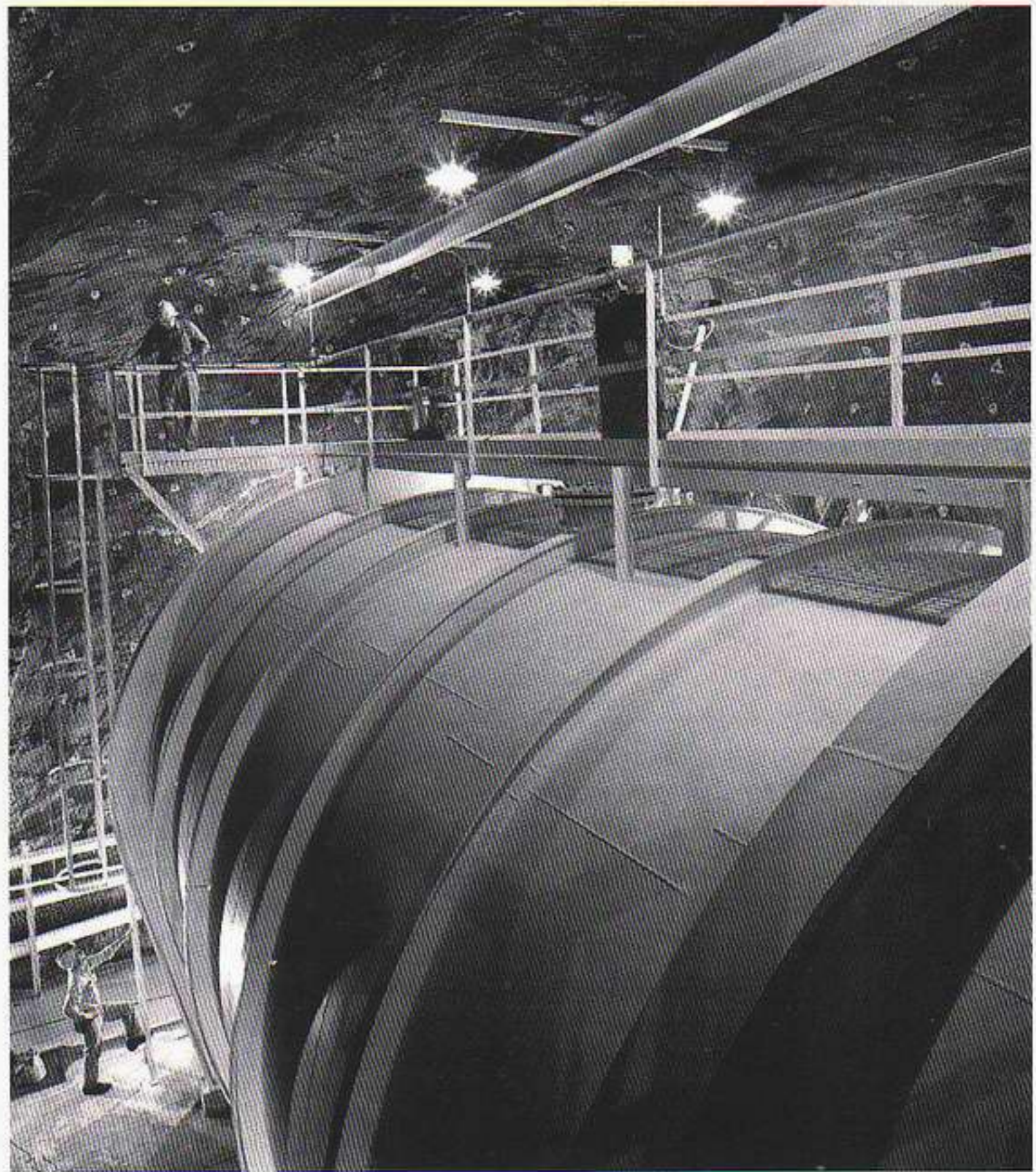


Η συγκεκριμένη ακολουθία αντιδράσεων ονομάζεται *κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου*, και πιστεύουμε ότι τέτοιες αντιδράσεις αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας του Ήλιου μας. Σε πολλά άστρα, όμως, οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές, οπότε η παραγωγή ενέργειας μπορεί να ακολουθήσει διαφορετική πορεία —τον *κύκλο του άνθρακα* που πρότεινε ο Bethe. Ο κύκλος αυτός δεν απαιτεί τη συμμετοχή της ασθενούς αλληλεπίδρασης κατά τη στιγμή της σύγκρουσης. Αντιθέτως, ο μηχανισμός τού Bethe στηρίζεται στην παρουσία πυρήνων άνθρακα οι οποίοι δρουν ως ένα είδος καταλύτη για να «μαγειρευτεί» τελικά το ήλιο.

Παρά τον μεγάλο θρίαμβο που αποτέλεσε για τους φυσικούς η εξήγηση της προέλευσης της ενέργειας του Ήλιου, παραμένει ακόμα άλυτο ένα μικρό αλλά ακανθώδες πρόβλημα. Θα το αναφέρουμε εν είδει προειδοποιητικού υστερογράφου. Πιστεύουμε ότι έχουμε κατανοήσει αρκετά καλά τις πυρηνικές αντιδράσεις στον κύκλο πρωτονίου-πρωτονίου. Όπως είδαμε, μερικές από αυτές παράγουν νετρίνα, τα λεγόμενα *ηλιακά νετρίνα*, η δε πρόβλεψη του ρυθμού με τον οποίο καταφθάνουν στη Γη είναι σχετικά εύκολη. Μάλι-

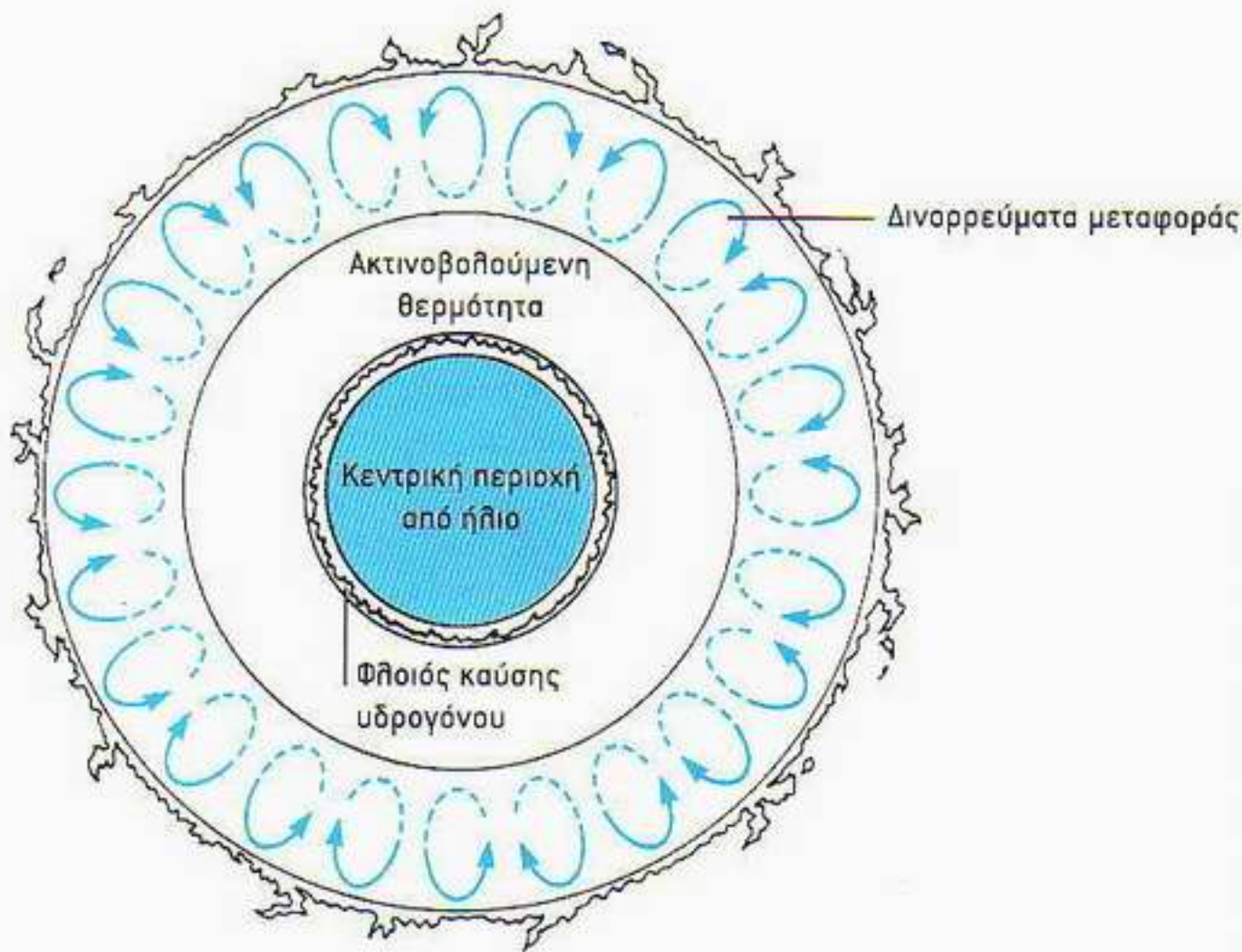


Ο Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) γεννήθηκε στη Λαχώρα της Ινδίας (σήμερα ανήκει στο Πακιστάν) και σπούδασε στο Πανεπιστήμιο του Μαδράς. Έλαβε το διδακτορικό του δίπλωμα από το Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ, υπό την καθοδήγηση του Dirac. Κατόπιν εργάστηκε στο Πανεπιστήμιο του Σικάγου και στο Αστεροσκοπείο Yerkes. Ο Chandrasekhar ανέπτυξε το πρώτο συνεπές μοντέλο για τους λευκούς νάνους, ενώ το 1983 τιμήθηκε, μαζί με τον William Fowler, με το βραβείο Νόμπελ.



Εικόνα 10.3 Το «τηλεσκόπιο νετρίνων» του Raymond Davis στο χρυσωρυχείο Homestake στη Νότια Ντακότα (ΗΠΑ).

στα, για την ανίχνευση των πλιακών νετρίνων πραγματοποιήθηκε από το 1968 ως το 1986 ένα πείραμα στο χρυσωρυχείο Homestake στη Νότια Ντακότα. Το πείραμα αυτό εκτελέστηκε βαθιά μέσα στη γη, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας που εισέρχονταν στα όργανα και προκαλούσαν αντιδράσεις τις οποίες μπορούσαμε να εκλάβουμε λανθασμένα ως αλληλεπιδράσεις πλιακών νετρίνων. Δυστυχώς, όμως, ακόμα και έπειτα από πολλούς προσεκτικούς ελέγχους, παρατηρήθηκε μόνο το 1/3 περίπου του θεωρητικά προβλεπόμενου αριθμού πλιακών νετρίνων. Τις δεκαετίες του 1980 και 1990 διεξήχθησαν νέα πειράματα με διαφορετικούς τύπους ανιχνευτών στην προσπάθεια να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα. Όλα τα νέα πειράματα διεξήχθησαν υπογείως —ένα ιαπωνικό πείραμα στο ορυχείο Kamioka, ένα ρωσοαμερικανικό στον Καύκασο και ένα ευρωπαϊκο-ισραηλινό στη σήραγγα Grand Sasso κοντά στη Ρώμη. Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων συμφωνούν με τα αρχικά αποτελέσματα του πειράματος του Raymond Davis στο χρυσωρυχείο Homestake, ενώ ο αριθμός των παρατηρούμενων πλιακών νετρίνων βρέθηκε ότι ήταν μόνο ο μισός περίπου του αναμενομένου. Υπάρχουν δύο δυνατές εξηγήσεις —ή ο τρόπος που αυτή τη στιγμή αντιλαμβανό-



Εικόνα 10.4 Το εσωτερικό ενός ερυθρού γίγαντα. Το διάγραμμα δεν έχει σχεδιαστεί υπό κλίμακα, αφού στην πραγματικότητα η κεντρική περιοχή του ερυθρού γίγαντα είναι μικρή και πολύ πυκνή· τα δε εξωτερικά στρώματα είναι εξαιρετικά αραιά και θα κάλυπταν μια περιοχή με διάμετρο 100 φορές μεγαλύτερη εκείνης του Ήλιου.



Εικόνα 10.5 Καλλιτεχνική απεικόνιση του Ήλιου, όπως ίσως θα φαίνεται έπειτα από 5 δισεκατομμύρια χρόνια. Ο Ήλιος θα μετατραπεί σε ερυθρό γίγαντα και τελικά θα «καταβροχθίσει» τη Γη.

μαστε τις φυσικές διεργασίες στο εσωτερικό του Ήλιου δεν είναι ολότελα σωστός ή κάτι συμβαίνει στα πλιακά νετρίνα καθ' οδόν προς τη Γη. Για την ώρα, οι φυσικοί στοιχηματίζουν στη δεύτερη εναλλακτική λύση. Σημειωτέον ότι η τρέχουσα αντίληψη που έχουμε για τους νόμους της φύσης επιτρέπει μια τέτοια πιθανότητα, σύμφωνα με την οποία τα νετρίνα ίσως τελικά αλλάζουν φύση κατά το ταξίδι τους από τον Ήλιο προς τη Γη! Ήδη από το 1998, τα αποτελέσματα ενός νέου πειράματος στο ορυχείο Καμίοκα υποστηρίζουν την ιδέα των «νετρινικών ταλαντώσεων». Μάλιστα, τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν πρόσφατα και από ένα άλλο πείραμα που διεξήχθη σε ένα ορυχείο νικελίου στο Σάντμπερι του Οντάριο. Σύμφωνα με μια σημαντική συνέπεια των αποτελεσμάτων αυτών, τα νετρίνα δεν έχουν μηδενική μάζα, όπως τα φωτόνια, αλλά διαθέτουν πολύ μικρή μάζα. Θα επανέλθουμε σε αυτές τις μυστηριώδεις νετρινικές ταλαντώσεις στο Κεφάλαιο 12.

Ερυθροί γίγαντες και λευκοί νάνοι

Ένα άστρο σαν τον Ήλιο διαθέτει αρκετά καύσιμα για να συνεχίσει να λάμπει επί αρκετά δισεκατομμύρια χρόνια. Τι συμβαίνει, όμως, όταν το υδρογόνο αρχίζει να εξαντλείται; Αφού στην κεντρική περιοχή (στον πυρήνα) του άστρου συντελούνται πυρηνικές αντιδράσεις, η περιοχή αυτή με τον καιρό θα αποτελείται κυρίως από ήλιο. Αλλά για να πραγματοποιηθούν οι πυρηνικές αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχει το ήλιο, απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις απ' ό,τι για εκείνες του υδρογόνου. Καθώς λοιπόν το άστρο αρχίζει να παράγει όλο και λιγότερη ενέργεια, αρχίζουν να επικρατούν οι βαρυτικές δυνάμεις, δίνοντας έτσι το έναυσμα για τη βαρυτική κατάρρευση του άστρου. Το παραπάνω γεγονός οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να καθίσταται τελικά δυνατή η πολύ πιο ταχεία καύση του υδρογόνου μέσω του κύκλου του άνθρακα. Οι συγκεκριμένες πυρηνικές αντιδράσεις του υδρογόνου αρχικά συμβαίνουν σε έναν λεπτό φλοιό γύρω από την κεντρική περιοχή του άστρου. Η αυξανόμενη παραγωγή θερμότητας αναγκάζει τα εξωτερικά στρώματα του άστρου να διασταλούν, έως ότου η ακτίνα του άστρου μεγαλώνει κατά εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές. Εφόσον η συνολική ενέργεια που παράγεται από το άστρο διανέμεται πια σε πολύ μεγαλύτερη περιοχή, η επιφανειακή του θερμοκρασία μειώνεται, και το άστρο, γίγαντας πλέον, φαίνεται πιο κόκκινο. Ένα τέτοιο άστρο ονομάζεται *ερυθρός γίγαντας*. Όταν ο Ήλιος φτάσει σε αυτό το στάδιο της εξέλιξής του θα μεγαλώσει τόσο πολύ ώστε θα καταπιεί τον Ερμή και την Αφροδίτη!

Τι συμβαίνει, όμως, στην κεντρική περιοχή ενός τέτοιου άστρου; Θα συνεχίσει να καταρρέει βαρυτικά και να αυξάνει η πυκνότητά της, καθώς όλο και περισσότερο ήλιο θα παράγεται από το φλοιό καύσης υδρογόνου. Όσο η πίεση μεγαλώνει, τα πλεκτρόνια συνωστιάζονται και οι μεταξύ τους αποστάσεις μειώνονται. Όπως πάντα, η απαγορευτική αρχή του Pauli δεν επιτρέπει σε δύο πλεκτρόνια με τους ίδιους κβαντικούς αριθμούς να καταλάβουν τον ίδιο χώρο. Το μέγεθος του ελάχιστου αυτού χώρου καθορίζεται από το μήκος κύματος de Broglie για το πλεκτρόνιο και, αφού αυτό μειώνεται όσο αυξάνεται η ορμή του πλεκτρονίου, τα πλεκτρόνια κινούνται όλο και πιο γρήγορα όσο αυξάνεται η πίεση. Όταν τα πλεκτρόνια ενός άστρου με μάζα όση και ο Ήλιος φτάσουν να κινούνται με ταχύτητες που προσεγγίζουν εκείνη του φωτός, λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli για τα πλεκτρόνια θα αποτρα-

πεί η περαιτέρω κατάρρευση της κεντρικής περιοχής. Ανάλογο φαινόμενο προκύπτει από την ισχύ της απαγορευτικής αρχής του Pauli τόσο για τα πρωτόνια όσο και για νετρόνια της κεντρικής περιοχής. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια, όμως, έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα από τα ηλεκτρόνια, οπότε τα αντίστοιχα μήκη κύματος de Broglie είναι πολύ μικρότερα —οπότε εδώ δεν εμποδίζεται σημαντικά η βαρυτική κατάρρευση λόγω της ισχύος της απαγορευτικής αρχής του Pauli, τουλάχιστον ώσπου να επικρατήσουν πολύ μεγαλύτερες πιέσεις. Κύριοι λοιπόν υπεύθυνοι για την αναστολή της περαιτέρω κατάρρευσης της κεντρικής περιοχής του άστρου στο παρόν στάδιο του κύκλου ζωής του είναι τα ηλεκτρόνια και η απαγορευτική αρχή του Pauli. Η κεντρική περιοχή του αποτελείται τώρα από ύλη απίστευτα υψηλής πυκνότητας —ένα κουταλάκι του γλυκού από αυτό το υλικό θα ζύγιζε αρκετούς τόνους!

Η κεντρική περιοχή ενός άστρου σαν τον Ήλιο θα αποκτήσει τελικά αρκετά υψηλή θερμοκρασία και πυκνότητα, ώστε να μπορεί να αρχίσει η καύση του πλίου. Οι αντιδράσεις του πλίου θα συντελεστούν με γοργό ρυθμό, μέχρις ότου θα σχηματιστεί μια θερμή κεντρική περιοχή άνθρακα, ενώ τα εξωτερικά στρώματα του άστρου θα εκτιναχθούν στο Διάστημα. Το αποτέλεσμα θα είναι ο σχηματισμός ενός πλανητικού νεφελώματος —ενός διαστελλόμενου κελύφους αποτελούμενου από αέρια του άστρου—, ένα παράδειγμα του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.6. Ο δακτύλιος συνεχίζει να λάμπει λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την κεντρική περιοχή του άστρου. Αυτό το κατάλοιπο της κεντρικής περιοχής ψύχεται και μετατρέπεται σε λευκό νάνο: ένα αντικείμενο με μεγάλη θερμότητα και πυκνότητα, η κατάρρευση του οποίου εμποδίζεται από την πίεση εκφυλισμού των ηλεκτρονίων λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli. Ένας τυπικός λευκός νάνος έχει σχεδόν το μέγεθος της Γης αλλά μάζα περίπου ίση με τη μάζα του Ήλιου. Ο λευκός νάνος είναι λευκός διότι έχει ακόμη πολύ υψηλή θερμοκρασία, και επομένως μπορεί να εκπέμπει φως. Όμως, επειδή δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν πια άλλες πυρηνικές αντιδράσεις, θα αρχίσει βαθμιαία να ψύχεται και να σκοτεινιάζει, μέχρις ότου εισέλθει στο τελικό στάδιο της εξέλιξής του και μετατραπεί σε μαύρο νάνο. Αυτή η διαδικασία ψύξης αναμένεται να διαρκεί 1 τρισεκατομμύριο χρόνια, περισσότερο δηλαδή και από τη σημερινή ηλικία του Σύμπαντος, και γι' αυτό μαύροι νάνοι δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ ως τώρα.

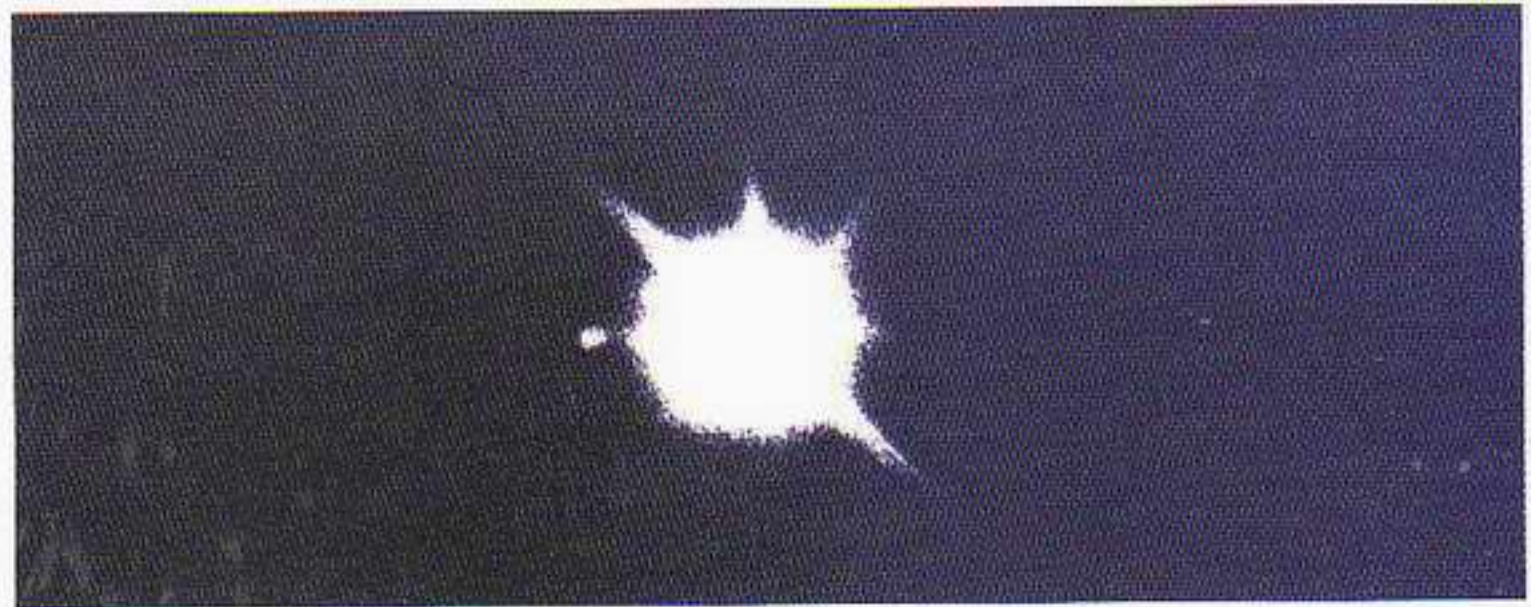
Πιο πολύπλοκη μπορεί να είναι η εξέλιξη λευκών νάνων που ανήκουν σε διπλά αστρικά συστήματα. Στην Εικόνα 10.7 παρουσιάζεται ο Σείριος με το συνοδό του —έναν λευκό νάνο. Εν προκειμένω πιστεύουμε ότι, όταν ο λευκός νάνος βρισκόταν στο στάδιο του ερυθρού γίγαντα, σημειώθηκε μεταφορά ύλης προς το συνοδό του. Εναλλακτικά, αν τα δύο άστρα του αστρικού συστήματος βρίσκονται αρκετά κοντά, μπορεί από έναν κοντινό ερυθρό γίγαντα να μεταφέρθηκε ύλη σε έναν λευκό νάνο. Ο λευκός νάνος με αυτό τον τρόπο συσσωρεύει υδρογόνο από το συνοδό του, διαδικασία η οποία ενδέχεται να οδηγήσει τελικά σε μια βίαιη πυρηνική έκρηξη. Μέσα σε μια σύντομη χρονική περίοδο, το διπλό αστρικό σύστημα μπορεί να γίνει αρκετές δεκάδες χιλιάδες φορές φωτεινότερο. Πριν από την ανακάλυψη του τηλεσκοπίου, ανάλογα φαινόμενα εκλαμβάνονταν ως γενέσεις νέων άστρων, τα οποία όμως σκοτεινιάζαν και τελικά έσβηναν μέσα σε λίγες εβδομάδες. Τέτοια άστρα ονομάζονται *καινοφανείς*, ή *νόβα* (στα λατινικά σημαίνει «νέο»).

Ο λευκός νάνος που ανήκει σε ένα διπλό αστρικό σύστημα μπορεί να δώσει και την πλέον βίαιη αστρική έκρηξη —την *υπερκαινοφανή έκρηξη*, ή



Εικόνα 10.6 Άστρα όμοια με τον Ήλιο αποβάλλουν κατά το τέλος του σταδίου του ερυθρού γίγαντα τα εξωτερικά τους στρώματα σχηματίζοντας πλανητικά νεφεληώματα. Η κεντρική περιοχή που απομένει ψύχεται, και το άστρο μετατρέπεται σε λευκό νάνο. Στη φωτογραφία φαίνεται το πλανητικό νεφέλωμα M27, το οποίο δημιουργήθηκε από την ύλη που εκτινάχθηκε πριν από περίπου 50.000 χρόνια. Το νεφέλωμα εξακολουθεί να λάμπει χάρη στη μεγάλη ένταση υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπει το κεντρικό άστρο.

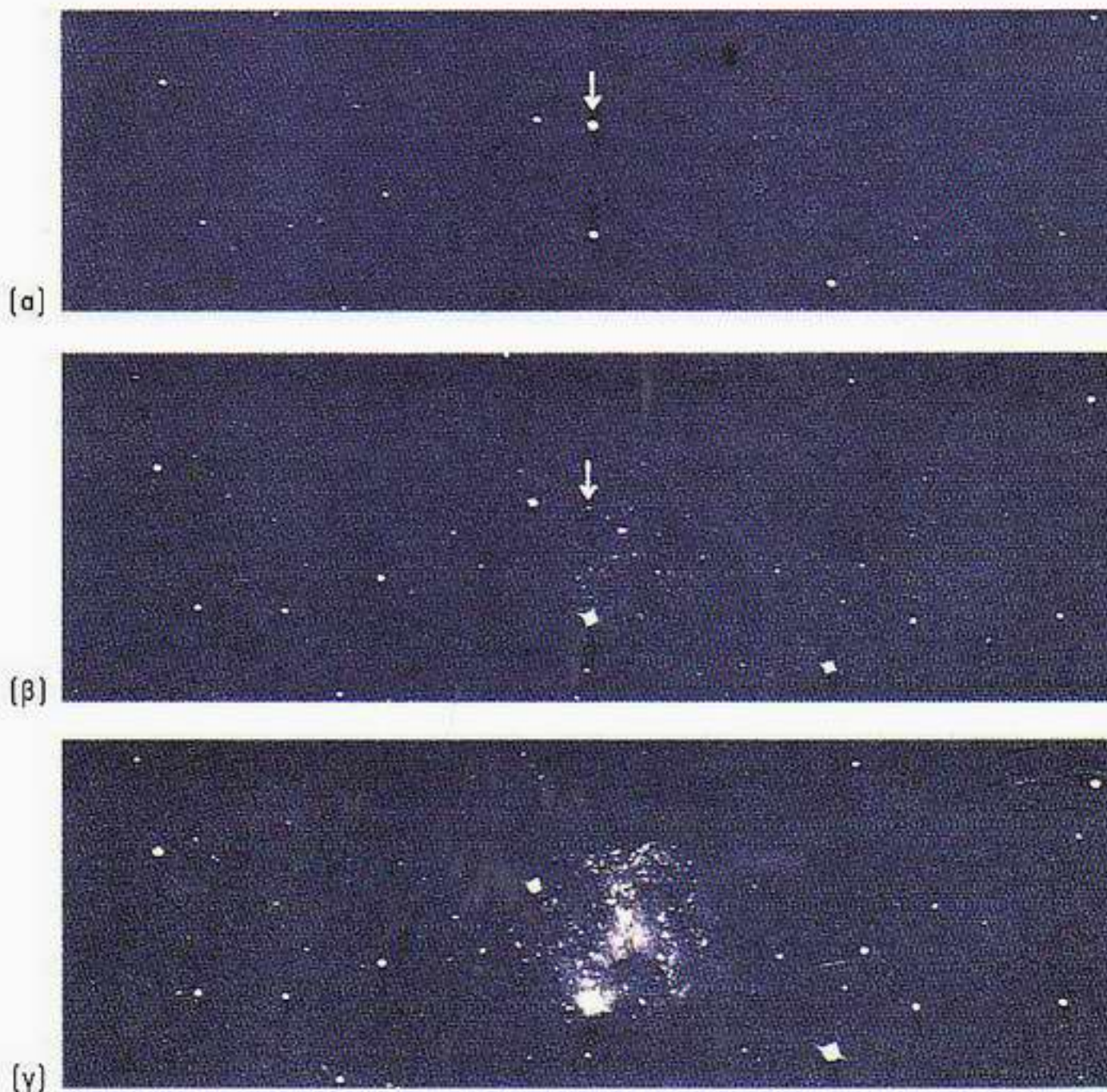
Εικόνα 10.7 Ο Σείριος Α, το φωτεινότερο άστρο στον νυχτερινό ουρανό, μαζί με τον συνοδό του Σείριο Β, έναν λευκό νάνο. Στην πραγματικότητα, ο λευκός νάνος είναι θερμότερος από τον Σείριο Α, αλλά, επειδή έχει μέγεθος όσο περίπου η Γη, η φωτεινότητά του είναι περίπου 10.000 φορές μικρότερη.



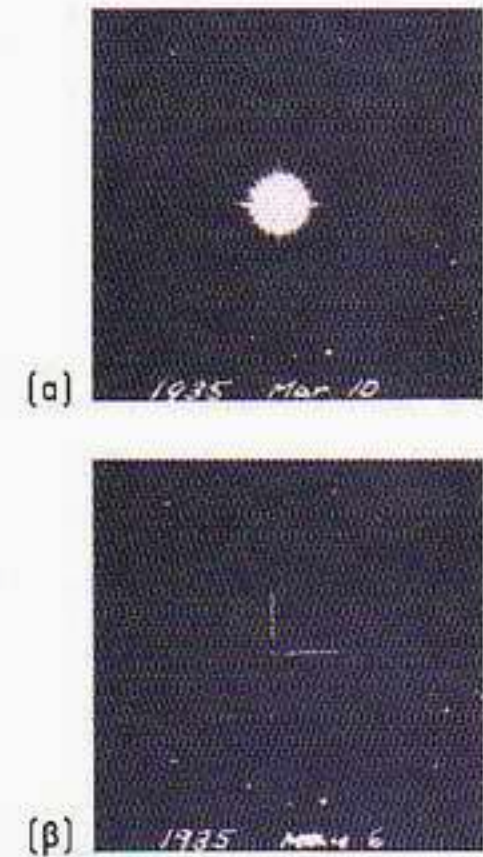
αλλιώς *συνπερνόβα*. Στην περίπτωση αυτή, το νέο άστρο μπορεί να λάμπει όσο ένας ολόκληρος γαλαξίας. Δυστυχώς, μετά την εφεύρεση του τηλεσκοπίου δεν έχουν παρατηρηθεί στο Γαλαξία μας υπερκαινοφανείς εκρήξεις. Ωστόσο, το 1054 μ.Χ., οι Κινέζοι κατέγραψαν την εμφάνιση ενός «απρόσμενου αστρικού επισκέπτη» ο οποίος ήταν τόσο φωτεινός ώστε διακρινόταν και κατά τη διάρκεια της ημέρας —για πολλές ημέρες, μάλιστα. Στη θέση εκείνης της έκρηξης βλέπουμε σήμερα το εντυπωσιακό νεφέλωμα του Καρκίνου, το οποίο δίχως άλλο μοιάζει με τα υπολείμματα μιας τεράστιας έκρηξης. Στην πραγματικότητα, αν η μάζα του άστρου είναι αρκετά μεγάλη, οι υπερκαινοφανείς εκρήξεις μπορούν να σημειωθούν χωρίς τη βοήθεια ενός άστρου-συνοδού. Πιστεύουμε ότι η υπερκαινοφανής έκρηξη που παρατήρησαν οι Κινέζοι ήταν αυτού του είδους. Στην επόμενη ενότητα θα δούμε ότι η κβαντική μηχανική

και η απαγορευτική αρχή του Pauli έχουν ακόμα πολύ περισσότερα να προσθέσουν όσον αφορά την εξέλιξη τέτοιων άστρων με ιδιαίτερη μεγάλη μάζα προς αντικείμενα ακόμα πιο εξωτικά από τους λευκούς νάνους. Η ευρύτητα των εφαρμογών της κβαντικής μηχανικής είναι πράγματι εκπληκτική!

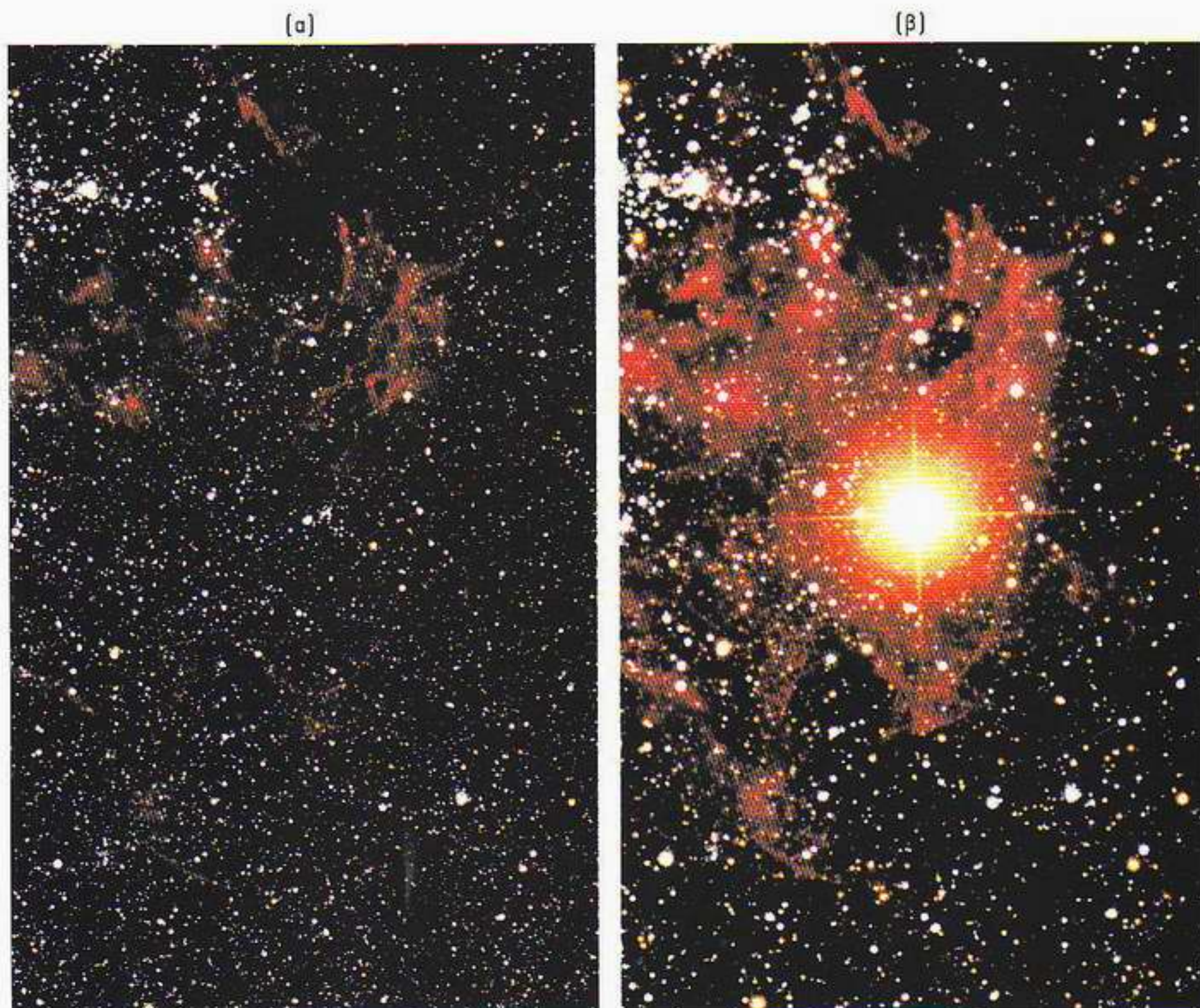
Κλείνοντας την ενότητα αυτή, θα πρέπει, για να ολοκληρώσουμε την παρουσίαση της οικογένειας των νάνων, να αναφερθούμε και στους καφέ νάνους. Πρόκειται για αντικείμενα στο ενδιάμεσο της κλίμακας μεταξύ των πλανητών τύπου Δία και των πραγματικών άστρων. Το εσωτερικό τέτοιων συστημάτων καταρρέει βαρυτικά όπως έχουμε περιγράψει, το πλάσμα όμως δεν θερμαίνεται αρκετά ώστε να λάβει χώρα η κύρια πυρηνική αντίδραση καύσης του υδρογόνου. Ο πρώτος καφέ νάνος, ο επονομαζόμενος Kelu 1, ανακαλύφθηκε το 1997.



Εικόνα 10.9 Τρεις φωτογραφίες μιας υπερκαινοφανούς έκρηξης που σημειώθηκε στο γαλαξία IC4182. (α) Σε αυτή τη φωτογραφία μικρού χρόνου έκθεσης, μόλις 20 λεπτών, που ελήφθη στις 23 Αυγούστου 1937, ο υπερκαινοφανής αστέρας διακρίνεται καθαρά, σε αντίθεση με το γαλαξία που είναι πολύ αμυδρός για να φανεί. (β) Σε τούτη τη φωτογραφία, με χρόνο έκθεσης 45 λεπτά, η οποία τραβήχθηκε ένα χρόνο αργότερα, στις 24 Νοεμβρίου 1938, ο υπερκαινοφανής είναι πολύ αμυδρότερος, στην ουσία μόλις διακρίνεται, ενώ ο γαλαξίας αρχίζει να γίνεται ορατός. (γ) Στις 19 Ιανουαρίου 1942, ο υπερκαινοφανής δεν φαίνεται πια. Στη φωτογραφία αυτή, χρόνου έκθεσης 85 λεπτών, ο γαλαξίας διακρίνεται πια καθαρά. Από τούτη τη σειρά των φωτογραφιών γίνεται εμφανής η εξαιρετική φωτεινότητα των υπερκαινοφανών εκρήξεων. Σήμερα παρατηρούμε περίπου 100 υπερκαινοφανείς εκρήξεις το χρόνο, ωστόσο η τελευταία που εμφανίστηκε στο Γαλαξία μας εξακολουθεί να είναι εκείνη την οποία παρατήρησε ο Kepler το 1604.



Εικόνα 10.8 (α) Φωτογραφία του καινοφανούς αστέρα που εμφανίστηκε το 1934 στον αστερισμό του Ηρακλή, όπως φαινόταν μερικούς μήνες αργότερα, δηλαδή τον Μάρτιο του 1935. (β) Ο ίδιος καινοφανής όπως φαινόταν οκτώ εβδομάδες αργότερα.

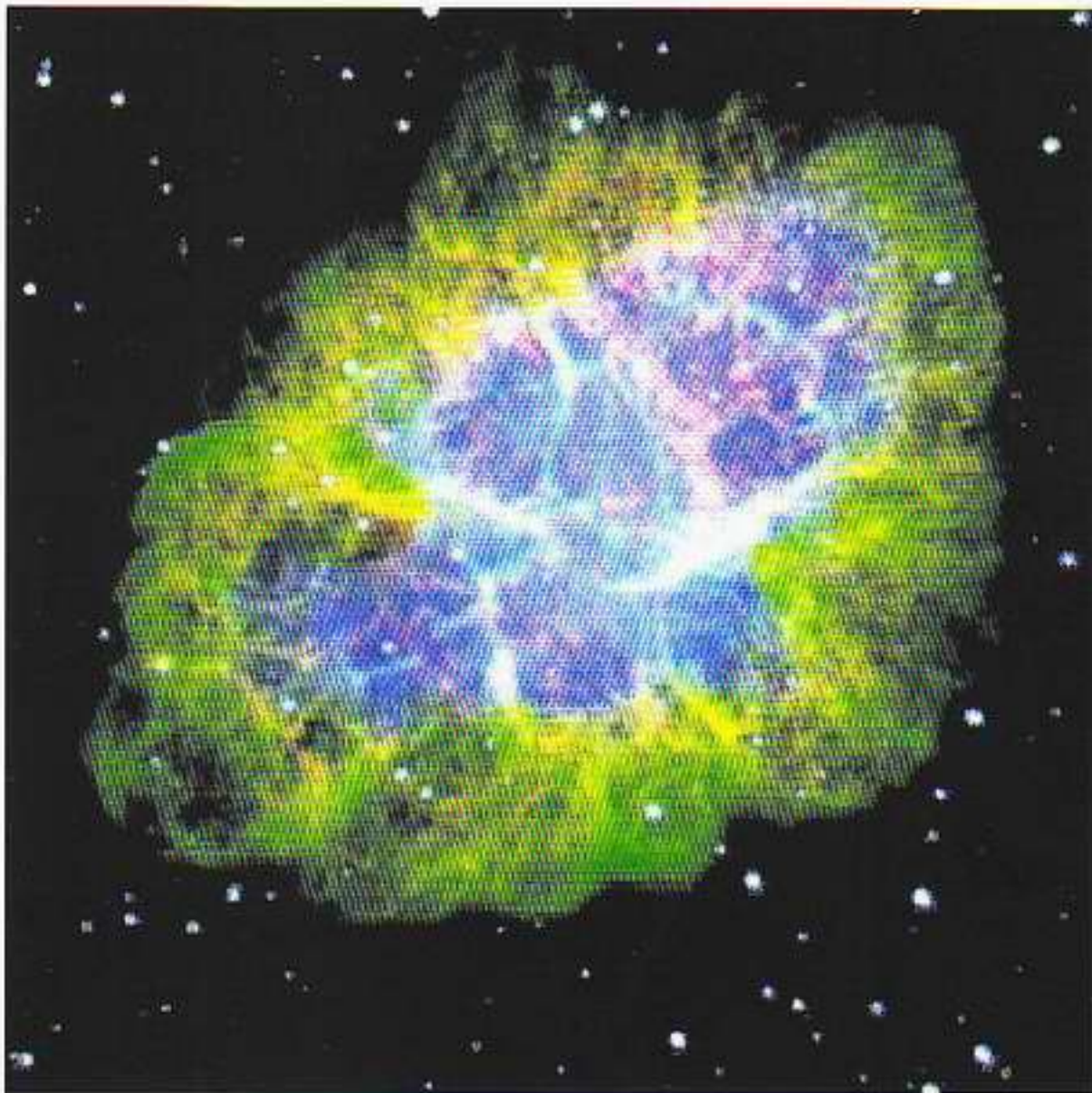


Εικόνα 10.10 Το 1987, στο Μεγάλο Νεφέλωμα του Μαγγελάνου —γαλαξίας-συνοδός του δικού μας—, παρατηρήθηκε η πρώτη, από την εποχή του Κεπλερ, υπερκαινοφανής έκρηξη που ήταν ορατή διά γυμνού οφθαλμού (μόνο από το νότιο ημισφαίριο). [α] Πριν από την έκρηξη. [β] Μετά την έκρηξη.

Αστέρες νετρονίων και μαύρες τρύπες

Στα άστρα με πολύ μεγάλη μάζα, οι πυρηνικές αντιδράσεις δεν σταματούν στην καύση του πλίου σε άνθρακα. Όταν η θερμοκρασία της κεντρικής περιοχής είναι επαρκώς υψηλή, μπορούν να λάβουν χώρα και νέες πυρηνικές αντιδράσεις. Μέσω μιας αρκετά πολύπλοκης σειράς αντιδράσεων παράγονται διαδοχικά βαρύτερα στοιχεία μέχρι το σίδηρο, ^{56}Fe . Μετά το σίδηρο, το άστρο δεν μπορεί να κερδίσει περισσότερη ενέργεια από αντιδράσεις σύντηξης, αφού ο σίδηρος έχει την υψηλότερη ενέργεια σύνδεσης από όλα τα στοιχεία. Έτσι, ο σίδηρος συσσωρεύεται στην κεντρική περιοχή του άστρου έως ότου το πυρηνικό καύσιμο αρχίσει να εξαντλείται. Συγχρόνως, η κεντρική περιοχή αρχίζει πάλι να συστέλλεται, ώσπου η περαιτέρω κατάρρευσή της εμποδίζεται από την απαγορευτική αρχή του Pauli.

Μπορεί, όμως, η ισχύς της απαγορευτικής αρχής του Pauli για τα ηλεκτρόνια να εξασφαλίσει την αναστολή της κατάρρευσης οποιουδήποτε άστρου ανεξαρτήτως μάζας; Η απάντηση είναι όχι. Υπάρχει μια κρίσιμη μάζα —που ονομάζεται *όριο Chandrasekhar*—, πέραν της οποίας η απαγορευτική



Εικόνα 10.11 Το νεφέλωμα του Καρκίνου σχηματίστηκε από τα υπολείμματα ενός άστρου, την έκρηξη του οποίου είχαν παρατηρήσει οι Κινέζοι. Δύο ώρες μετά τα μεσάνυχτα, το καλοκαίρι του 1054 μ.Χ., κινέζοι αστρονόμοι παρατήρησαν έναν «απρόσμενο αστρικό επισκέπτη» ανάμεσα στα «κέρατα» του αστερισμού του Ταύρου. Ήταν φωτεινότερος από τον Δία και την Αφροδίτη, ενώ εξακοιουβούσε να είναι ορατός ακόμα και κατά τη διάρκεια της ημέρας, επί τρεις εβδομάδες περίπου. Στο κέντρο του νεφελώματος του Καρκίνου υπάρχει ένας πάσσαρ —ένας ταχέως περιστρεφόμενος αστέρας νετρονίων που σχηματίστηκε κατά την έκρηξη.

αρχή τού Pauli για τα ηλεκτρόνια δεν μπορεί να αποτρέψει περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση. Πώς, όμως, γίνεται αυτό; Καθώς η κεντρική περιοχή σιδήρου ενός άστρου πολύ μεγάλης μάζα καταρρέει, τα ηλεκτρόνια τελικά συμπιέζονται μεταξύ τους τόσο ώστε ένας σημαντικός αριθμός τους έχει αρκετή ενέργεια για να αρχίσει μια διαδικασία που διέπεται από την ασθενή αλληλεπίδραση, κατά την οποία πρωτόνια μετατρέπονται σε νετρόνια ως ακολούθως:



Συνεπεία τούτης, ηλεκτρόνια και πρωτόνια απομακρύνονται από την κεντρική περιοχή, ενώ παράλληλα ενέργεια διαφεύγει από το άστρο υπό τη μορφή νετρίνων. Μόλις η παραπάνω διαδικασία αρχίσει να προκαλεί τη μείωση της πίεσης εκφυλισμού που ασκούν τα ηλεκτρόνια λόγω της απαγορευτικής αρχής τού Pauli, εκκινά μια απίστευτα γρήγορη και βίαιη κατάρρευση της κεντρικής περιοχής του άστρου. Οι λεπτομέρειες αυτής της κατάρρευσης και το πώς ακριβώς προκαλούνται οι θεαματικές υπερκαινοφανείς εκρήξεις είναι ζητήματα εξαιρετικά περίπλοκα που ακόμα προκαλούν διαμάχες μεταξύ των αστροφυσικών. Ωστόσο, αυτό που θεωρείται βέβαιο είναι ότι οι εν λόγω εκρήξεις αφήνουν πίσω τους μια συμπαγή σφαίρα θερμών νετρονίων —έναν *αστέρα νετρονίων*. Καθώς ο θερμός αστέρας νετρονίων ψύχεται, κάθε περαιτέρω



Εικόνα 10.12 Περισσότερες από 2.000 διπολικές κεραίες απάρτιζαν το ραδιοτηλεσκόπιο με το οποίο ανακαλύφθηκαν οι πάσσαρ. Οι ξυζές ράβδοι στηρίζουν ένα ανακλαστικό πλέγμα που αυξάνει την ευαισθησία της διάταξης. Αρχικά το όργανο προοριζόταν για τη μελέτη των αναπόσβεων διάφορων ραδιοπηγών του μεσοαστρικού διαστήματος.

κατάρρευση εμποδίζεται από τις συνέπειες της ισχύος της απαγορευτικής αρχής του Pauli, για τα νετρόνια αυτή τη φορά —εκτός κι αν η μάζα του άστρου είναι τόσο μεγάλη ώστε μπορεί να καταλήξει σε *μαύρη τρύπα*, όπως θα δούμε αργότερα. Από κατάλοιπα άστρου με μάζα περίπου διπλάσια από του Ήλιου θα προκύψει ένας αστέρας νετρονίων με διάμετρο περίπου 15 χιλιόμετρα. Η πυκνότητά του θα είναι πάνω από 1 τρισεκατομμύριο φορές μεγαλύτερη αυτής του νερού και περίπου ίδια με την πυκνότητα ενός ατομικού πυρήνα. Επομένως, υπό μία έννοια, ο αστέρας νετρονίων είναι ένα γιγαντιαίος πυρήνας!

Ίσως η εφαρμογή της κβαντικής μηχανικής στην περίπτωση των αστέρων νετρονίων να φαίνεται αμφιβόλου αξίας, ωστόσο η συγκεκριμένη ιδέα προτάθηκε 50 χρόνια πριν, από τον J. Robert Oppenheimer. Ο Oppenheimer ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρουσα προσωπικότητα και διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του μεταπολεμικού τρελού κόσμου μας, ώστε δεν μπορούμε να αντισταθούμε στον πειρασμό μιας σύντομης ιστορικής παρένθεσης. Ο αυστηρός, λόγιος επιστήμονας που προέβλεψε τους αστέρες νετρονίων ήταν ο ίδιος που αργότερα καθοδήγησε τους φυσικούς στο Πρόγραμμα Manhattan για την κατασκευή της πρώτης ατομικής βόμβας. Ο ίδιος επίσης, το

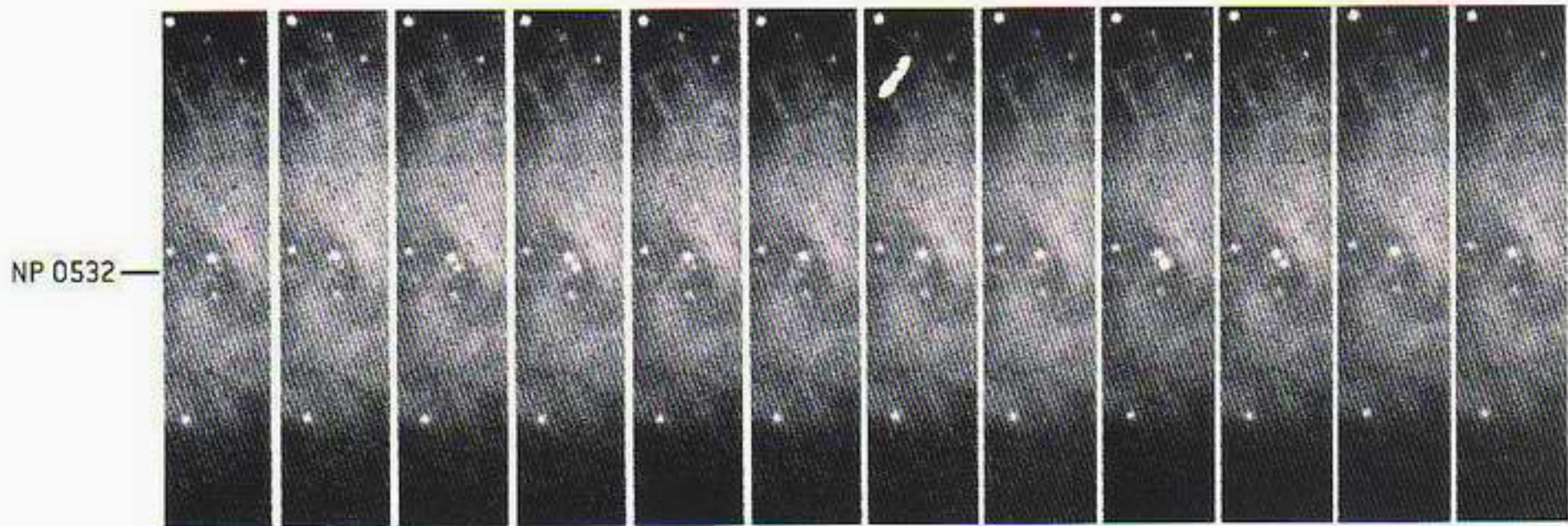
1954, στο απόγειο της αντικομμουνιστικής υστερίας, χαρακτηρίστηκε επικίνδυνος για την εθνική ασφάλεια και «ακατάλληλος να υπηρετήσει την πατρίδα του». Ο Edward Teller, συνεργάτης του στο Λος Άλαμος στη διάρκεια του πολέμου ο οποίος αργότερα έγινε γνωστός ως «ο πατέρας της υδρογονοβόμβας», ενέσπειρε το διχασμό στην επιστημονική κοινότητα καταθέτοντας ως μάρτυρας εναντίον του Oppenheimer. Το όλο κλίμα αυτής της περιόδου ήταν πολυτάραχο και συγκεχυμένο, με το μακαρθικό κυνήγι μαγισσών εναντίον των κομμουνιστών να κορυφώνεται. Ο Klaus Fuchs, ο οποίος είχε συνεργαστεί με τον Oppenheimer στο Λος Άλαμος και είχε γράψει με τον John von Neumann ένα άκρως απόρρητο κείμενο με τίτλο «Αποκάλυψη της εφεύρεσης» —ένα έγγραφο όπου παρουσίαζαν περιληπτικά κάθε σημαντική πρόοδο προς την κατεύθυνση της κατασκευής της βόμβας θερμοπυρηνικής σύντηξης—, είχε συλληφθεί το 1950 ως κατάσκοπος των Ρώσων. Η καταστροφική αυτή εξέλιξη είχε και συνέχεια, αφού τον Αύγουστο του 1953 οι Ρώσοι πραγματοποίησαν με επιτυχία την πρώτη στον κόσμο δοκιμή υδρογονοβόμβας, ενώ οι ΗΠΑ το κατόρθωσαν μόλις το 1956. Επομένως, ίσως δεν πρέπει να μας εκπλήσσει το γεγονός ότι η αναγνώριση του Oppenheimer άργησε έως το 1963, συγκεκριμένα ως το πρωί της 22ας Νοεμβρίου του 1963, όταν ο Λευκός Οίκος ανακοίνωσε ότι ο πρόεδρος Κένεντι θα τιμούσε προσωπικά τον Oppenheimer απονέμοντάς του το πολύ σημαντικό βραβείο Fermi. Ήταν το πρώτο βήμα προς μια δημόσια έκφραση συγγνώμης για την αντικομμουνιστική υστερία που είχε οδηγήσει στην εκτόξευση άδικων κατηγοριών εναντίον του δέκα χρόνια νωρίτερα. Όμως, το απόγευμα της ίδιας μέρας, ο Τζον Κένεντι δολοφονήθηκε, και η απονομή του βραβείου έγινε τελικά από τον πρόεδρο Τζόνσον, παρά τις αντιρρήσεις των πολιτικών του συμβούλων. Μάλιστα, ένας γερουσιαστής που είχε πρωτοστατήσει στη δυσφημιστική εκστρατεία εναντίον του Oppenheimer χαρακτήρισε την τελετή της απονομής «σκανδαλώδη και απδιαστική».

Επιστρέφοντας πάλι στους αστέρες νετρονίων, οφείλουμε να εξηγήσουμε γιατί οι αστρονόμοι πιστεύουν στην ύπαρξή τους. Τα διαθέσιμα παρατηρησιακά στοιχεία συνδέονται με την ανακάλυψη των *πάλσαρ* (παλλόμενων ραδιοπηγών) από την Jocelyn Bell, μια μεταπτυχιακή ερευνήτρια και συνεργάτιδα του Anthony Hewish στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ, το 1967. Οι πάλσαρ είναι αστρικά αντικείμενα που εκπέμπουν γρήγορους και εντυπωσιακά κανονικούς παλμούς ραδιοκυμάτων. Αμέσως μετά την ανακάλυψη του πρώτου πάλσαρ, βρέθηκε ένας ακόμα στο κέντρο του νεφελώματος του Καρκίνου, στη θέση της υπερκαινοφανούς έκρηξης που είχαν παρατηρήσει οι Κινέζοι. Ο πάλσαρ του νεφελώματος του Καρκίνου εκπέμπει 30 παλμούς ανά δευτερόλεπτο (Εικόνα 10.13), ακτινοβολώντας ενέργεια η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (βλ. Παράρτημα 1). Οι πάλσαρ αρχικά ονομάστηκαν LGM (το ακρωνύμιο των λέξεων Little Green Men —μικρά πράσινα ανθρωπάκια), διότι, λόγω της εξαιρετικής τους κανονικότητας, στην αρχή είχαμε την υποψία ότι προέρχονταν από κάποιον εξωγήινο πολιτισμό. Η αλήθεια όμως είναι λιγότερο ρομαντική —σήμερα πιστεύουμε ότι πρόκειται για αστέρες νετρονίων που περιστρέφονται με μεγάλη ταχύτητα!

Ο Tommy Gold, του Πανεπιστημίου Cornell, υπήρξε ο πρώτος που συνειδητοποίησε ότι οι πάλσαρ είναι περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων. Καταρχάς, η απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής των πάλσαρ ήταν πολύ μεγαλύτερη εκείνης των συνηθισμένων άστρων. Ωστόσο, όπως ένας παγοδρόμος μαζεύει τα χέρια του για να αυξήσει την ταχύτητα περιστροφής του —μια

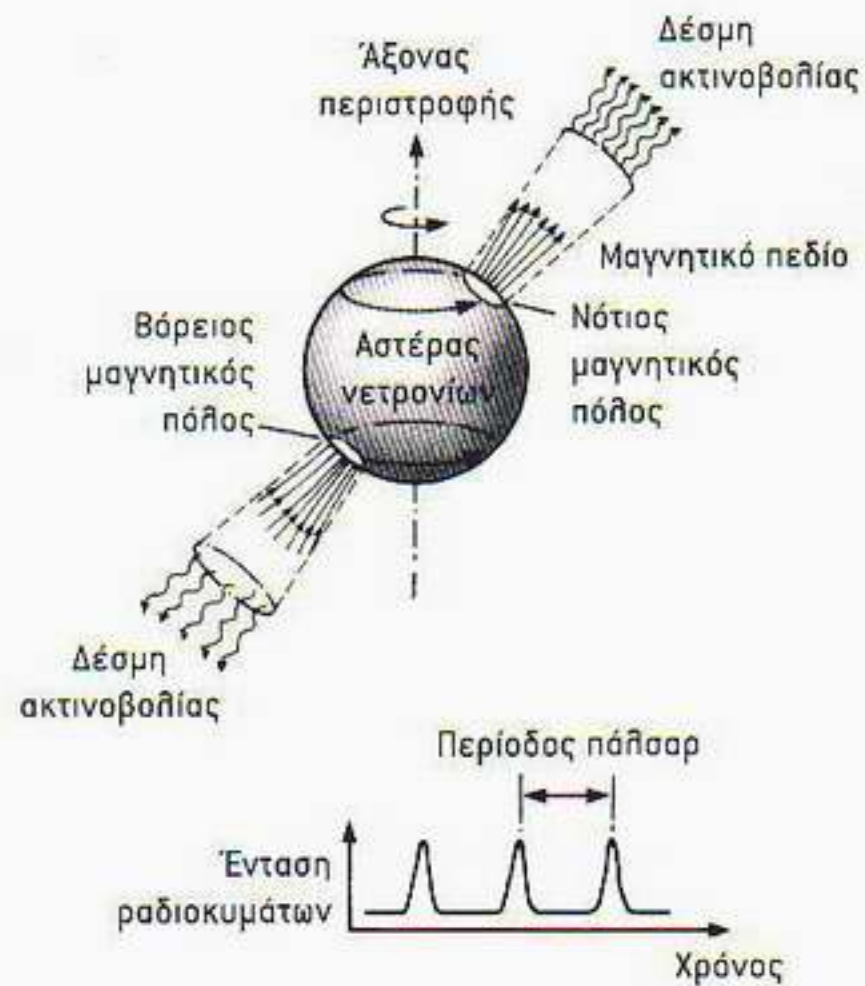


Η Jocelyn Bell Burnell εργαζόταν ως μεταπτυχιακή ερευνήτρια υπό την καθοδήγηση του Anthony Hewish στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ, όταν πρώτη παρατήρησε τα κανονικά επαναλαμβανόμενα σήματα των πάλσαρ. Η διατριβή της περιέχει αποτελέσματα για τη γωνιώδη διάμετρο περίπου 200 παλλόμενων ραδιοπηγών, ενώ λόγος περί πάλσαρ γίνεται μόνο σε ένα της παράρτημα! Ήτον Anthony Hewish, ο οποίος ανέπτυξε την τεχνική μέσω της οποίας παρατηρήθηκαν οι παραπάνω ραδιοπηγές και ήταν ο υπεύθυνος του ερευνητικού προγράμματος, απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ το 1974.



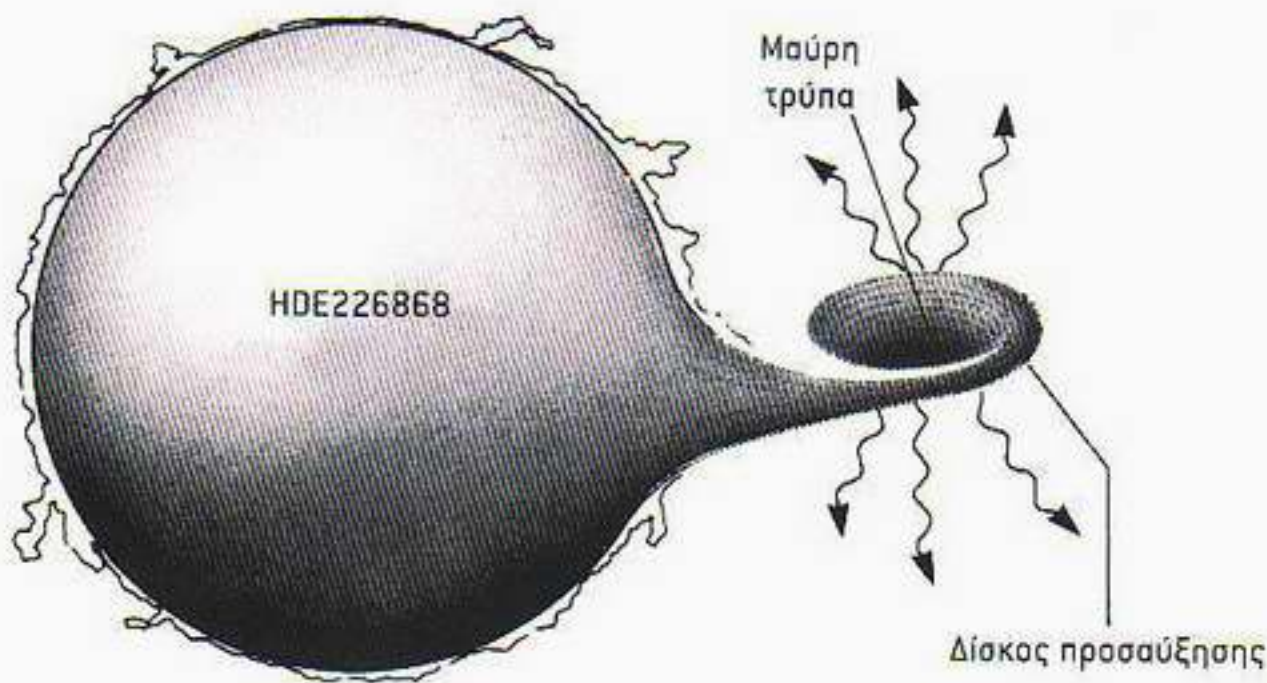
Εικόνα 10.13 Η σειρά φωτογραφιών παρουσιάζει έναν πλήρη κύκλο διαδοχικών αναπάσεων του πάλσαρ NP0532, ο οποίος βρίσκεται στο νεφέλωμα του Καρκίνου. Ολόκληρος ο κύκλος διαρκεί μόλις 1/30 του δευτερολέπτου· τούση είναι και η περίοδος περιστροφής του αστέρα νετρονίων.

Εικόνα 10.14 Οι πάλσαρ είναι ταχέως περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων με τεράστιο μαγνητικό πεδίο. Καθώς το άστρο περιστρέφεται, εκπέμπει από τις πόλικές του περιοχές μια στενή δέσμη ακτινοβολίας. Αν αυτή η δέσμη συναντά τη Γη, τότε μπορούμε να ανιχνεύσουμε τον πάλσαρ από την κανονικότητα των ραδιοπαλμών που λαμβάνουμε.

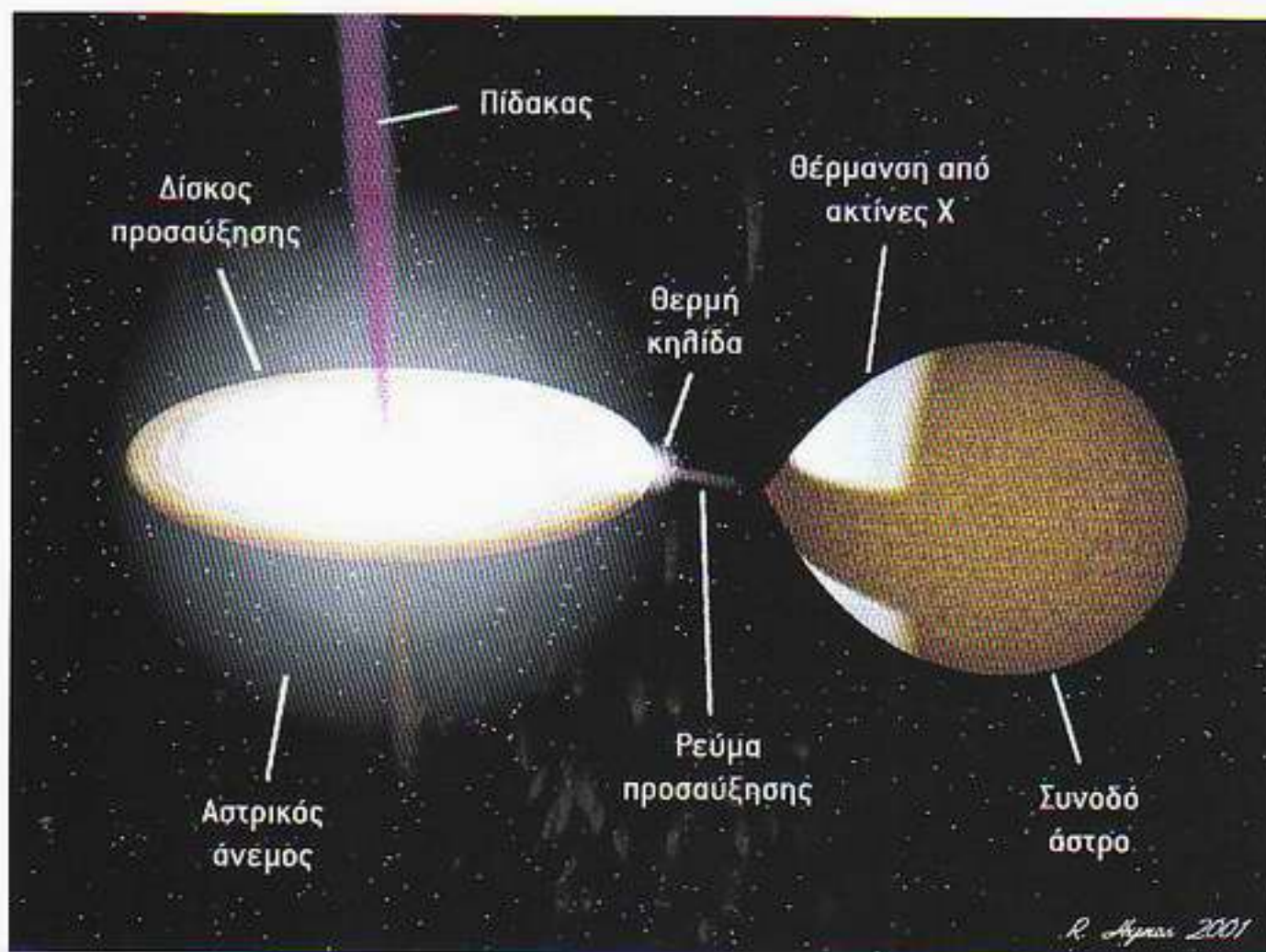


χαριτωμένη επίδειξη της αρχής διατήρησης της στροφορμής—, έτσι και η ταχύτητα περιστροφής ενός άστρου αυξάνεται όσο αυτό καταρρέει μετατρέπομενο σε αστέρα νετρονίων. Επιπλέον, λόγω της κατάρρευσης αυξάνεται εξαιρετικά και το μαγνητικό πεδίο του άστρου. Ακόμη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.14, οι μαγνητικοί πόλοι συνήθως δεν συμπίπτουν με τους πόλους του άξονα περιστροφής. Πιστεύουμε ότι, μέσω ενός αρκετά πολύπλοκου μηχανισμού στον οποίο εμπλέκεται τόσο το μαγνητικό όσο και το ηλεκτρικό πεδίο του αστέρα νετρονίων, παράγεται τελικά μια στενή δέσμη ακτινοβολίας μεγάλης έντασης κατά τη διεύθυνση του μαγνητικού άξονα. Αυτή η δέσμη, η οποία, καθώς περιστρέφεται ο αστέρας νετρονίων, σαρώνει με κανονικό ρυθμό ολόκληρη τη Γη, προκαλεί τους παλμούς του πάλσαρ που παρατηρούμε.

Οι αστέρες νετρονίων είναι εκπληκτικά συμπαγή και πυκνά αντικείμενα. Παρ' όλα αυτά, οι τεράστιες βαρυτικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στο εσωτερικό τους εξισορροπούνται από την πίεση των εκφυλισμένων νε-



Εικόνα 10.15 Γραφική αναπαράσταση μιας μαύρης τρύπας στην περίπτωση της πηγής ακτίνων Χ στον αστερισμό του Κύκνου, γνωστής ως Κύκνος Χ-1. Από τις μετρήσεις της περιόδου περιστροφής του συγκεκριμένου διπλού συστήματος προκύπτει ότι η μάζα της αθέατης πηγής ακτίνων Χ είναι μεγαλύτερη εκείνης ενός αστέρα νετρονίων. Η προτεινόμενη εξήγηση είναι ότι οι ακτίνες Χ παράγονται καθώς το υλικό που εκρέει από το άστρο-συνυπό πέφτει πάνω στο «δίσκο προσαύξησης», γύρω από τη μαύρη τρύπα, προτού εισέλθει τελικά στην περιοχή μη επιστροφής.



Εικόνα 10.16 Στις μέρες μας, οι καλύτεροι υποψήφιοι για μαύρες τρύπες πιστεύεται πως είναι οι επονομαζόμενες «παροδικές πηγές ακτίνων Χ». Εδώ, η προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος από τους Rob Bynes και Phil Charles του Πανεπιστημίου του Σουθάμπτον στην Αγγλία.

τρονίων λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli. Ωστόσο, αν ο αστέρας έχει επαρκώς μεγάλη μάζα (πάνω από τρεις φορές τη μάζα του Ήλιου), ακόμα και η απαγορευτική αρχή του Pauli για τα κουάρκ που δομούν τα νετρόνια (βλ. Κεφάλαιο 12) δεν μπορεί να αποτρέψει την κατάρρευση του άστρου και το σχηματισμό ενός ακόμα πιο αλλόκοτου αντικειμένου, μιας *μαύρης τρύπας*. Τέτοια περίεργα αντικείμενα επιτρέπονται στο πλαίσιο της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Αϊνστάιν — η οποία, στην ουσία, είναι μια θεωρία βαρύτη-

τας—, δεν αποτελούν όμως το κύριο θέμα του βιβλίου μας. Οι μαύρες τρύπες προκύπτουν ως ειδικές λύσεις των εξισώσεων του Αϊνστάιν, και ο σχηματισμός τους απαιτεί τεράστιες πυκνότητες. Για παράδειγμα, για να γίνει ο Ήλιος μας μαύρη τρύπα, θα πρέπει να συμπιεστεί στο μέγεθος μιας σφαίρας με διάμετρο περίπου 6 χιλιόμετρα. Αφ' ης στιγμής ένα άστρο συμπιεστεί ώστε η ακτίνα του να γίνει μικρότερη μιας κρίσιμης τιμής, της λεγόμενης *ακτίνας Schwarzschild*, τα βαρυτικά φαινόμενα γίνονται τόσο ισχυρά ώστε τίποτα, ούτε ακόμα και το φως, δεν μπορεί να διαφύγει από την επιφάνειά του. Το άστρο αυτό θα μοιάζει πραγματικά με ολόμαυρη τρύπα!

Προς το παρόν, δεν διαθέτουμε μια πλήρη θεωρία που να συνδυάζει την κβαντική μηχανική και τη γενική θεωρία της σχετικότητας με απολύτως ικανοποιητικό τρόπο. Έτσι, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για τις λεπτομέρειες της βαρυτικής κατάρρευσης ενός άστρου και της μετατροπής του σε μαύρη τρύπα, ούτε να είμαστε απόλυτα σίγουροι ότι πραγματικά υπάρχουν τέτοια αντικείμενα. Δεν θα είχαμε καμιά αμφιβολία για την ύπαρξή τους αν καταφέραμε να παρατηρήσουμε μια μαύρη τρύπα. Αφού, όμως, κανενός είδους ακτινοβολία δεν μπορεί ποτέ να διαφύγει από αυτήν, πώς θα μπορούσαμε να την παρατηρήσουμε; Μια προτεινόμενη λύση είναι να ψάξουμε σε διπλά αστρικά συστήματα. Στα συστήματα αυτά, τα δύο άστρα περιστρέφονται το ένα γύρω από το άλλο όπως ένα ζευγάρι που χορεύει στην πίστα. Αν όμως ένα από τα μέλη του συστήματος είναι μαύρη τρύπα, η μάζα της θα μπορεί να εκτιμηθεί από τη συμπεριφορά του ορατού συνοδού της. Και αυτό διότι η μαύρη τρύπα θα απορροφά ύλη από το συνοδό άστρο, και καθώς το υλικό αυτό θα την πλησιάζει θα εκπέμπει ακτίνες X—φωτόνια υψηλής ενέργειας. Η πρώτη υποψήφια μαύρη τρύπα εντοπίστηκε στον αστερισμό του Κύκνου (Εικόνα 10.15), αλλά έκτοτε οι αστρονόμοι έχουν ανακαλύψει περί τις 15 υποψήφιες (Εικόνα 10.16). Περισσότερα όμως για την κβαντική μηχανική και τις μαύρες τρύπες θα πούμε στο Κεφάλαιο 11.

11 Κανόνες Feynman

Είναι σαν αυτό που βιώνει ένας πιλότος βομβαρδιστικού ο οποίος, ενώ πετά χαμπλά πάνω από ένα δρόμο, βλέπει ξαφνικά τρεις δρόμους και, μόνο όταν δύο από αυτούς ενώνονται και γίνονται πάλι, αντιλαμβάνεται ότι απλώς πέρασε πάνω από μια μακριά φουρκέτα ενός μοναδικού δρόμου.

Richard Feynman

Ο Dirac και τα αντισωματίδια

Είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια ότι η κβαντική μηχανική, παρά τον εγγενή πιθανοκρατικό χαρακτήρα της, είναι σε θέση να κάνει πετυχημένες προβλέψεις για μια τεράστια περιοχή φαινομένων. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι στο μικρόκοσμο οι νευτώνειοι νόμοι της κλασικής μηχανικής πρέπει να παραχωρήσουν τη θέση τους στην κβαντική θεωρία. Ωστόσο, υπάρχει και ένα άλλο πεδίο φαινομένων όπου έχει αποδειχθεί ότι οι νόμοι του Νεύτωνα χρειάζονται τροποποίηση: όταν οι ταχύτητες των σωμάτων πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Εφόσον το φως ταξιδεύει με ταχύτητα περίπου 300.000 km/s, οι συνέπειες των τροποποιήσεων αυτών, όπως και εκείνων της κβαντικής μηχανικής, συνήθως δεν γίνονται φανερές στην καθημερινή ζωή, όπου δεν συναντούμε παρά ταχύτητες πολύ μικρότερες. Σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν, η ενέργεια E και η ορμή p ενός σωματιδίου συνδέονται μέσω της εξίσωσης

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4,$$

όπου με c συμβολίζεται η ταχύτητα του φωτός και με m η μάζα του σωματιδίου όταν αυτό βρίσκεται σε ηρεμία. Η πιο οικεία σχέση ανάμεσα στην ενέργεια και την ορμή

$$E = p^2/2m$$

μπορεί να εξαχθεί από τη σχετικιστική εξίσωση ως μια προσέγγιση που ισχύει όταν η ταχύτητα του σωματιδίου είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός. Συνηθίζεται επίσης να μη συμπεριλαμβάνεται η ενέργεια ηρεμίας,



Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν εργαζόταν στο Γραφείο Ευρεσιτεχνιών της Βέρνης, της πρωτεύουσας της Ελβετίας. Έπειτα από μια σημαντική συζήτηση που είχε με τον Michele Besso, φίλο και συνάδελφό του στο ίδιο γραφείο, ο Αϊνστάιν συνειδητοποίησε ότι απαιτούνταν μια ριζική αναθεώρηση της έννοιας του χρόνου, και επιχειρώντας την οδηγήθηκε στη διατύπωση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας. Ο Paul Dirac είχε κάποτε ότι, αν ο Αϊνστάιν δεν είχε δημοσιεύσει το 1905 τη θεωρία του αυτή, πολύ σύντομα θα το είχε κάνει κάποιος άλλος. Έσπευσε, όμως, να προσθέσει ότι, χωρίς τον Αϊνστάιν, πιθανότατα θα περιμέναμε ακόμη τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Και ο Αϊνστάιν είχε κάποτε για τον Dirac: « Έχω πρόβλημα με τον Dirac. Αυτή η ιλιγγιώδης ισορροπία του ανάμεσα στη μεγαλοφυΐα και την τρέλα με τρομάζει.»



Ο Paul Dirac και ο Werner Heisenberg το 1933. Ο πατέρας του Dirac ήταν Ελβετός, αλλά μετανάστευσε στην Αγγλία και έγινε καθηγητής ξένων γλωσσών στο Μπρίστολ. Ο Dirac μετέφρασε μιλώντας δύο γλώσσες, γαλλικά και αγγλικά, όμως παρέμεινε πάντοτε εξαιρετικά συγκρατημένος και στις δύο. Παντρεύτηκε την αδελφή του φυσικού Eugene Wigner και το 1933 μοιράστηκε το βραβείο Νόμπελ φυσικής με τον Schrödinger.

mc^2 , στη μη σχετικιστική αυτή έκφραση για την ενέργεια. Ο Αϊνστάιν, τεχνικός ειδήμων τρίτης τάξεως στο Ελβετικό Γραφείο Ευρεσιτεχνιών στη Βέρνη, ανέπτυξε την ειδική θεωρία της σχετικότητας το 1905. Τη θεωρία αυτή την κατανοούσε ικανοποιητικά και την αποδεχόταν η κοινότητα των φυσικών τη δεκαετία του 1920, όταν ανακαλυπτόταν η κβαντική μηχανική. Ήταν φυσικό, λοιπόν, ο Schrödinger να προσπαθήσει να αναπτύξει την κβαντική μηχανική ξεκινώντας από την παραπάνω σχετικιστική εξίσωση ενέργειας-ορμής. Αφού προσπάθησε χωρίς επιτυχία να κατασκευάσει μια σχετικιστική κυματική εξίσωση που να συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα, ο Schrödinger κατέφυγε στην προσεγγιστική μη σχετικιστική σχέση και βρήκε τη διάσημη εξίσωσή του, η οποία δημοσιεύθηκε τον Ιανουάριο του 1926. Παρά τη μεγάλη επιτυχία της εξίσωσης του Schrödinger, κατέστη φανερό ότι αυτή η εκδοχή της κβαντικής μηχανικής δεν ίσχυε για τα κινούμενα με μεγάλες ταχύτητες ηλεκτρόνια. Επιπλέον, το spin του ηλεκτρονίου έπρεπε να «προσκολληθεί» στη θεωρία με έναν *ad hoc* τρόπο μάλλον. Χρειαζόταν, λοιπόν, μια σχετικιστική εξίσωση.

Ο Paul Dirac γεννήθηκε στο Μπρίστολ της Αγγλίας το 1902 και πήρε το πτυχίο του ηλεκτρολόγου μηχανολόγου από το Πανεπιστήμιο του Μπρίστολ το 1921. Δώδεκα χρόνια αργότερα, κέρδισε μαζί με τον Schrödinger το βραβείο Νόμπελ «για την ανακάλυψη νέων και παραγωγικών μορφών ατομικής θεωρίας» και είχε ήδη προβλέψει την ύπαρξη της αντιύλης. Ο Dirac υπήρξε ιδιοφυής στοχαστής με πρωτότυπες και δημιουργικές ιδέες, αλλά ήταν και πάρα πολύ συνεσταλμένος και λιγομίλητος. Ο Heisenberg διηγήθηκε μια διασκεδαστική ιστορία για τον Dirac, η οποία φωτίζει και τις δύο αυτές πτυχές του χαρακτήρα του. Οι δυο τους ταξίδευαν κάποτε αεροπορικά από τις ΗΠΑ στην Ιαπωνία, και ο Heisenberg αρεσκόταν να συμμετέχει στις κοινωνικές εκδηλώσεις που διοργανώνονταν τα βράδια. Ένα βράδυ, λοιπόν, ενώ ο Heisenberg διασκεδάζε χορεύοντας, ο Dirac, ως συνήθως, καθόταν και παρακολουθούσε. Όταν ο Heisenberg γύρισε στη θέση του έπειτα από ένα χορό, ο Dirac τον ρώτησε: «Γιατί χορεύεις;» Ο Heisenberg απάντησε: «Κοίτα, όταν υπάρχουν όμορφα κορίτσια, είναι ευχάριστο να χορεύεις.» Ο Dirac το σκέφτηκε λίγο, και έπειτα από πέντε λεπτά του είπε: «Και πώς ξέρεις εκ των προτέρων ότι τα κορίτσια είναι όμορφα;»

$$E\psi = (-i\vec{a} \cdot \vec{\nabla} + \beta m)\psi$$

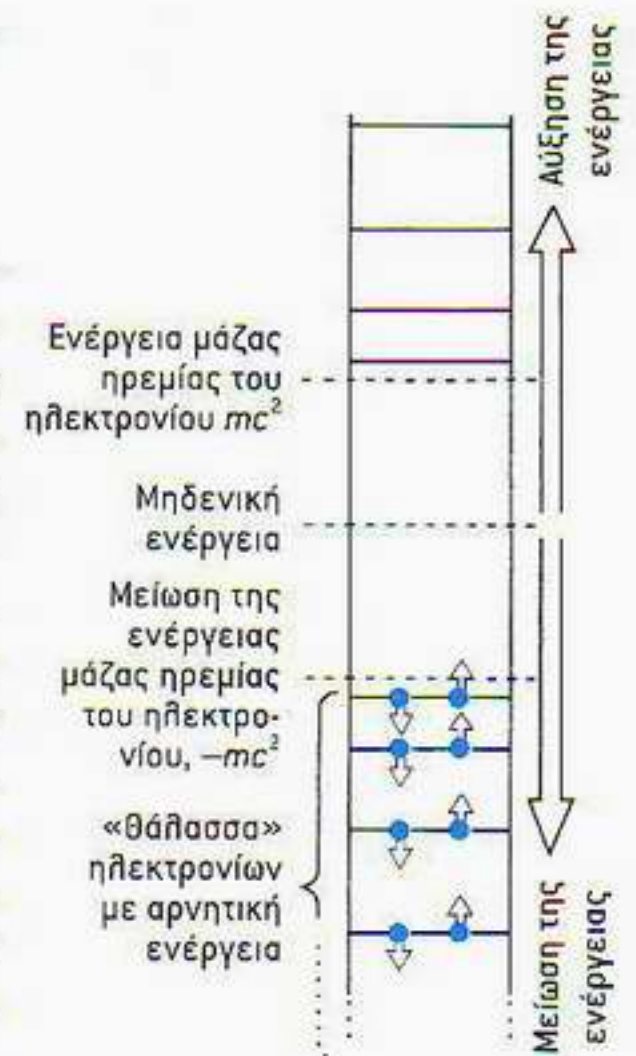
Η εξίσωση του Dirac για το σχετικιστικό ηλεκτρόνιο

Είναι μάλλον περίεργο που ο Dirac παραμένει ακόμα σχετικά άγνωστος στο πλατύ κοινό. Πρόκειται σίγουρα για έναν από τους μεγαλύτερους φυσικούς του 20ού αιώνα, και τα επιτεύγματά του δεν υστερούν έναντι των έργων μεγάλων φυσιογνωμιών όπως ο Νεύτων, ο Maxwell και ο Αϊνστάιν. Τι ακριβώς έκανε ο Dirac; Όπως λέει ο Feynman, «ο Dirac πήρε τις απαντήσεις του... μαντεύοντας μια εξίσωση». Η εξίσωση του Dirac δίνει την εντύπωση πως είναι απλή όταν τη βλέπουμε γραμμένη με τον γνωστό, πολύ συμπυκνωμένο μαθηματικό συμβολισμό (βλ. πλαίσιο). Για να έχουμε μια σχετικιστική εκδοχή της κβαντικής μηχανικής, οι λύσεις αυτής της εξίσωσης πρέπει να ικανοποιούν τη σωστή σχετικιστική σχέση ανάμεσα στο E και το p . Αλλά για δε-

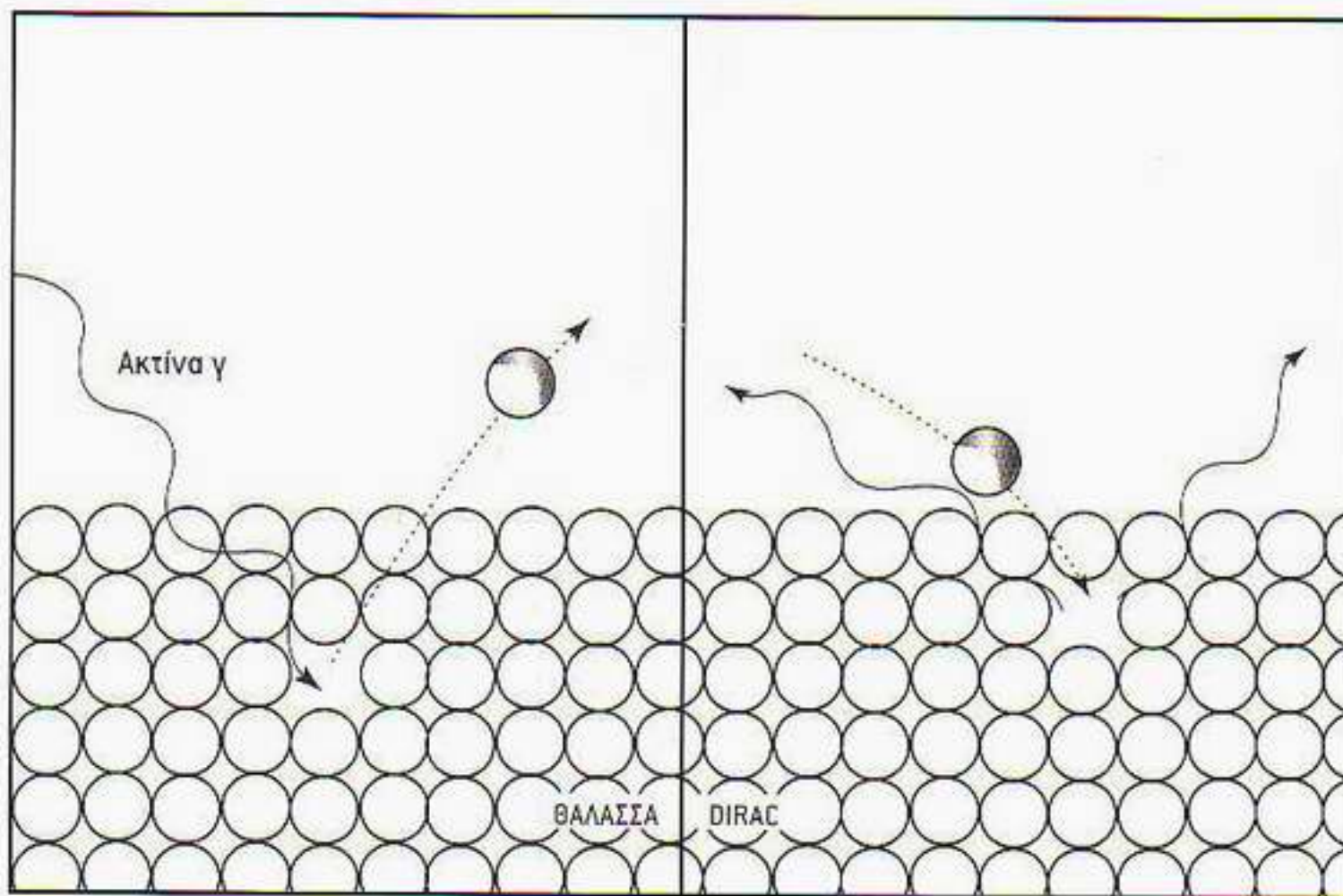
δομένη ορμή p , υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις για την ενέργεια, και συγκεκριμένα οι:

$$E = \pm \sqrt{(p^2 c^2 + m^2 c^4)}$$

Η μία λύση αντιστοιχεί σε θετική ενέργεια, όπως θα περιμέναμε, αλλά η δεύτερη φαίνεται να αντιστοιχεί σε αρνητική ενέργεια! Πώς μπορεί να έχουν φυσική σημασία οι λύσεις αρνητικής ενέργειας; Το μεγάλο επίτευγμα του Dirac συνίστατο στο ότι τις αντιμετώπισε σοβαρά και μετέτρεψε αυτές τις φαινομενικά ανεπιθύμητες λύσεις σε θρίαμβο της θεωρητικής φυσικής. Με ιδιοφυή έμπνευση υποστήριξε ότι οι στάθμες αρνητικής ενέργειας υπήρχαν, αλλά κανονικά ήταν ήδη κατειλημμένες από ηλεκτρόνια. Εν τωιαύτη περίπτωση, λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli, κανένα από τα συνηθισμένα ηλεκτρόνια θετικής ενέργειας δεν μπορεί να μεταβεί σε οποιαδήποτε από αυτές τις στάθμες. Σύμφωνα με τον Dirac, ένα κβαντικό κιβώτιο, που φαινομενικά είναι άδειο και δεν περιέχει κανένα ηλεκτρόνιο με θετική ενέργεια, στην πραγματικότητα έχει μια «θάλασσα» από ηλεκτρόνια αρνητικής ενέργειας (Εικόνα 11.1)! Η ιδέα αυτή δεν είναι τόσο γελοία όσο φαίνεται με την πρώτη ματιά. Αν τοποθετήσουμε μερικά ηλεκτρόνια θετικής ενέργειας μέσα στο κβαντικό κιβώτιο, το φορτίο και η ενέργεια του προκύπτοντος συστήματος μετρούνται σε σχέση με το φορτίο και την ενέργεια της κατάστασης του άδειου κιβωτίου. Το άπειρο αρνητικό φορτίο και η άπειρη αρνητική ενέργεια της θάλασσας Di-

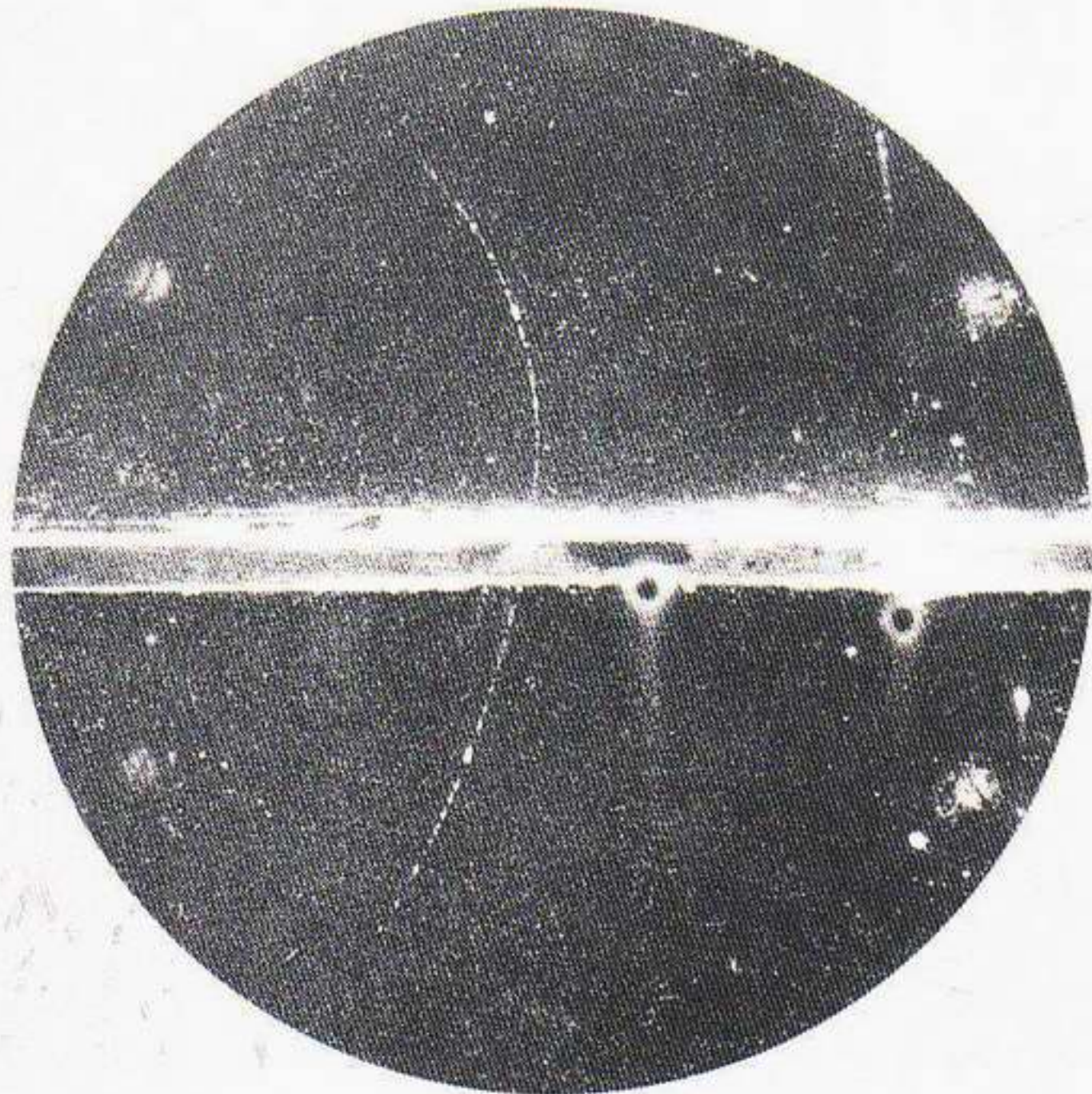


Εικόνα 11.1 Η εικόνα του Dirac για το κενό. Λύνοντας την εξίσωση του Dirac για τα σχετικιστικά ηλεκτρόνια σε ένα κιβώτιο, καταλήγουμε σε στάθμες τόσο θετικής όσο και αρνητικής ενέργειας. Ο Dirac έδωσε φυσικό νόημα στο αποτέλεσμα αυτό υποθέτοντας ότι σε ένα άδειο κιβώτιο —στην κατάσταση του κενού— όλες οι στάθμες αρνητικής ενέργειας είναι κατειλημμένες. Εν τωιαύτη περίπτωση, αν στο κιβώτιο τοποθετηθεί ένα ηλεκτρόνιο με θετική ενέργεια, τότε, σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, αυτό δεν μπορεί να χάσει ενέργεια πέφτοντας σε μια στάθμη αρνητικής ενέργειας.

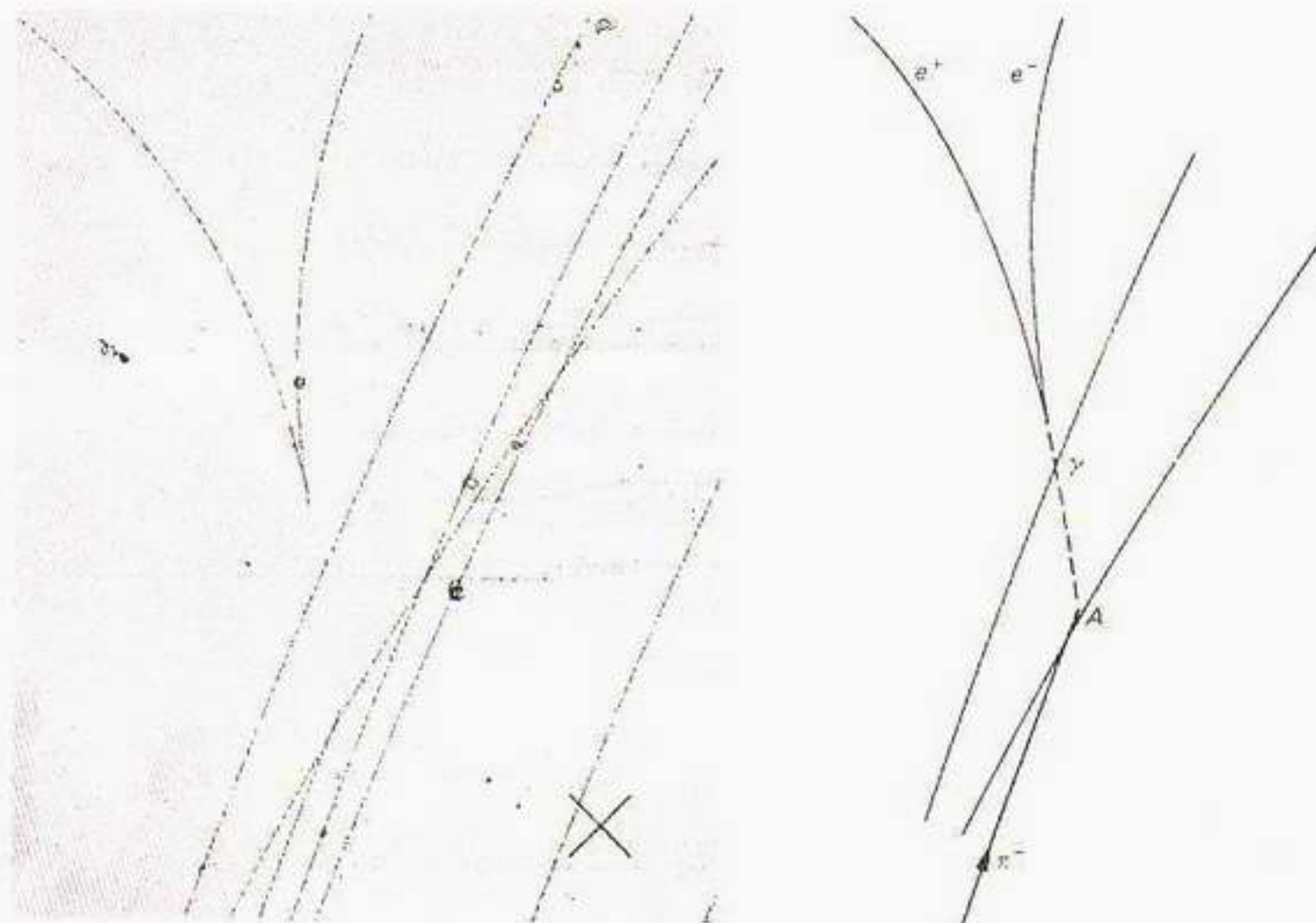


Εικόνα 11.2 Η θάλασσα Dirac των ηλεκτρονίων με αρνητικές ενέργειες έχει παρατηρήσιμες συνέπειες. Στην εικόνα αυτή των περιπετειών του κυρίου Τόμπκινς, βλέπουμε ότι ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας (ακτίνα γ) μπορεί να διεγείρει κάποιο ηλεκτρόνιο από μια στάθμη αρνητικής ενέργειας στη θάλασσα, με αποτέλεσμα αυτό να παρουσιαστεί ως ένα κανονικό ηλεκτρόνιο με θετική ενέργεια. Η «οπή» που δημιουργείται μέσα στη θάλασσα δρα σαν σωματίδιο θετικού φορτίου και ενέργειας ως προς την κανονική κατάσταση του κενού. Συνεπώς, το φωτόνιο έχει δημιουργήσει ένα ζεύγος σωματιδίου-αντισωματιδίου. Η δεύτερη εικόνα δείχνει ένα ηλεκτρόνιο να πηδά μέσα σε μια οπή στη θάλασσα. Αυτό αντιστοιχεί σε διαδικασία ακριβώς αντίστροφη της προηγούμενης, στη διαδικασία της εξαΰλωσης ενός ηλεκτρονίου και του αντισωματιδίου του, του ποζιτρονίου, η οποία παράγει φωτόνια υψηλής ενέργειας.

Στο δεξιό μέρος της φωτογραφίας εικονίζεται ο Carl Anderson, ο οποίος κέρδισε το βραβείο Νόμπελ για την ανακάλυψη του ποζιτρονίου, ενώ στο αριστερό ο μαθητής του Donald Glaser, ο οποίος τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για την εφεύρεση του θαλάμου φασαλλιδίων. Στο Αν Άρμπορ του Μίσιγκαν υπάρχει ένα μπαρ, όπου λέγεται ότι συνέλαβε την ιδέα του θαλάμου φασαλλιδίων ο Glaser πορατηρώντας τις φασαλλίδες σε ένα ποτήρι μπύρας.



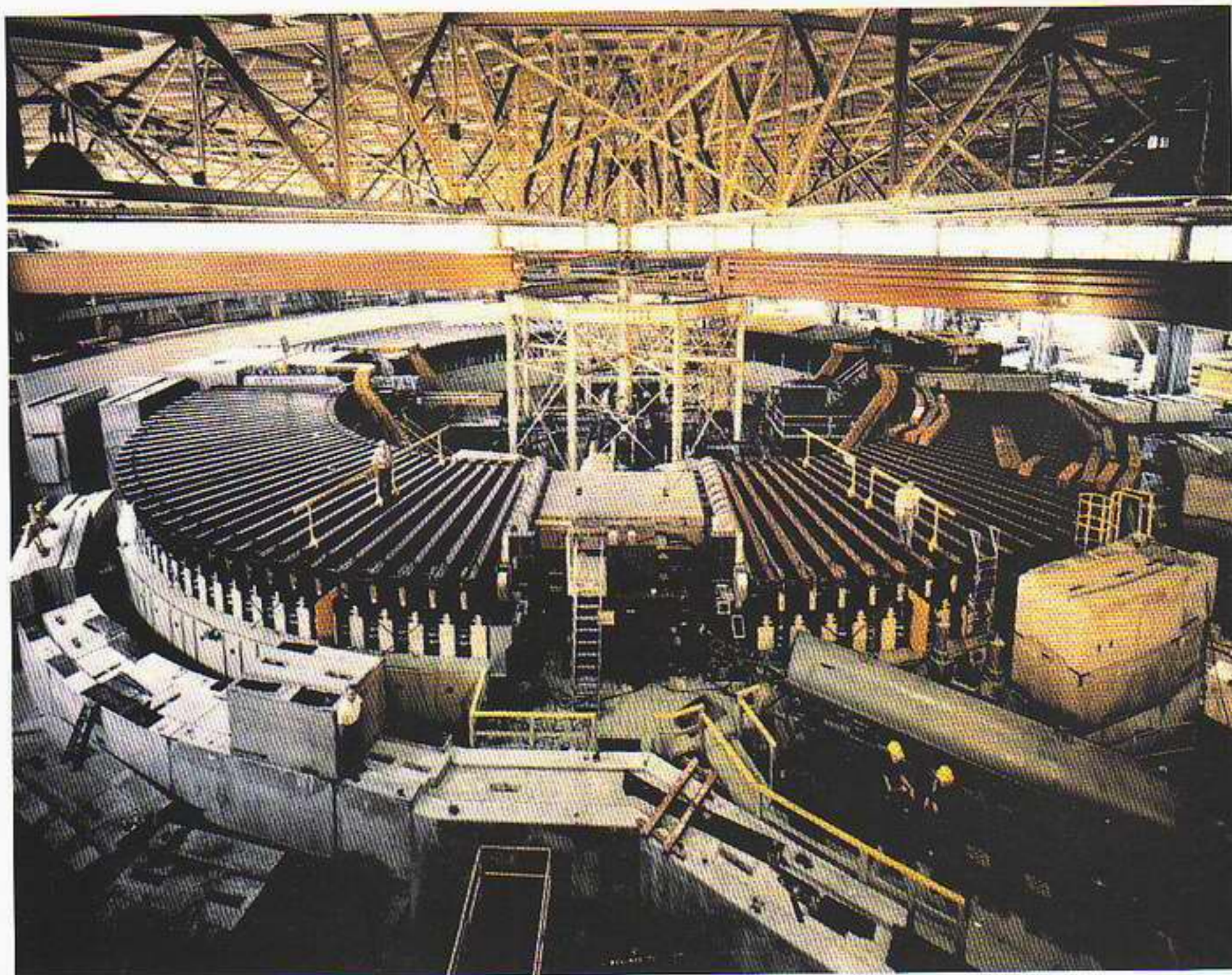
Εικόνα 11.3 Η καμπυλωμένη γραμμή των στογονιδίων αποκαλύπτει τη διέλευση ενός ποζιτρονίου διαμέσου ενός θαλάμου νέφους. Η καμπύλωση της τροχιάς οφείλεται στην ύπαρξη μαγνητικού πεδίου καθ' όλη την έκταση του θαλάμου, και η κατεύθυνση καμπύλωσης αποκαλύπτει το πρόσημο του ηλεκτρικού φορτίου. Η φωτογραφία τραβήχτηκε από τον Carl Anderson και επαληθεύει τελεσίδικα την πρόβλεψη του Dirac περί ύπαρξης της αντιύλης. Η μολύβδινη πλάκα στο μέσο του θαλάμου επιβράδυνε το διερχόμενο ποζιτρόνιο, με αποτέλεσμα η τροχιά πάνω από την πλάκα να είναι εντονότερα καμπυλωμένη. Αυτό βέβαια σημαίνει πως ο Anderson γνώριζε ότι το ίχνος της τροχιάς αντιστοικούσε σε ένα θετικό φορτίο που κινούνταν προς τα πάνω και όχι σε ένα συνηθισμένο ηλεκτρόνιο που κινούνταν προς τα κάτω. Ο Anderson χρειάστηκε να λάβει λίαν επιμελείς προφυλάξεις προκειμένου να είναι βέβαιος ότι κανείς από τους προπτυχιακούς φοιτητές του Caltech δεν του είχε κάνει κάποια ψάρσα αντιστρέφοντας τη φορά του μαγνητικού πεδίου.



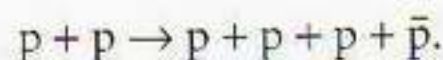
Εικόνα 11.4 Φωτογραφία δημιουργίας ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου από ένα θάλαμο φυσαλλίδων. Ίχνη αφήνουν στο θάλαμα μόνο τα φορτισμένα σωματίδια, ενώ το φωτόνιο δεν αφήνει άμεσα ίχνη.

ρας του άδειου κιβωτίου αποτελούν, συνεπώς, μεγέθη μη παρατηρήσιμα. Ός εδώ, ο αναγνώστης θα είχε κάποιο δίκιο να θεωρήσει πως όλα τούτα δεν είναι παρά μια αχαλίνωτη θεωρητική φαντασίωση· αλλά, όπως κάθε καλή θεωρία, η εικόνα του Dirac για το «κενό» —όπως ονομάζεται η κατάσταση του άδειου κιβωτίου— οδηγεί σε μερικές σημαντικές προβλέψεις. Ξέρουμε ότι, αν ακτινοβολήσουμε με φως ένα άτομο, τα ηλεκτρόνιά του μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από τα φωτόνια και να μεταβούν σε μια διεγερμένη κατάσταση. Τι θα συμβεί τώρα αν ακτινοβολήσουμε με φως το άδειο κιβώτιο του Dirac; Σύμφωνα με τον Dirac, θα μπορούσαμε να διεγείρουμε ένα από τα ηλεκτρόνια αρνητικής ενέργειας, αναγκάζοντάς το να μεταβεί σε κατάσταση θετικής ενέργειας. Τότε, αντί για ένα άδειο κιβώτιο, θα είχαμε ένα ηλεκτρόνιο θετικής ενέργειας μαζί με μία «οπή» στη θάλασσα Dirac. Σε σχέση με την κανονική κατάσταση του άδειου κιβωτίου, από ένα κιβώτιο με μία οπή στη θάλασσα Dirac λείπει ορισμένη αρνητική ενέργεια και το αρνητικό φορτίο ενός ηλεκτρονίου. Συνεπώς, σε σύγκριση με την άδεια κατάσταση κενού, μία οπή στη θάλασσα Dirac έχει θετική ενέργεια και θετικό φορτίο! Η φυσική διαδικασία που περιγράψαμε χρησιμοποιώντας τη θάλασσα αρνητικής ενέργειας του Dirac δεν είναι παρά η δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου από ένα φωτόνιο. Το ποζιτρόνιο είναι το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου, ένα σωματίδιο με την ίδια μάζα αλλά αντίθετο φορτίο.

Όπως συμβαίνει πάντα στη φυσική, μια θεωρία κρίνεται ορθή μόνο αν αποδειχθούν ορθές οι προβλέψεις της. Το ποζιτρόνιο ανακαλύφθηκε από τον Carl Anderson σε πειράματα κοσμικών ακτίνων το 1932, τέσσερα χρόνια αφότου ο Dirac είχε κατασκευάσει την εξίσωσή του. Το αντιπρωτόνιο —το αντισωματίδιο του πρωτονίου— ανακαλύφθηκε στο Μπέρκλεϊ της Καλιφόρνιας το 1955. Η ανακάλυψη του σωματιδίου αυτού έπρεπε να περιμένει ώσπου να κατασκευαστεί ένας επιταχυντής ικανός να προσφέρει αρκετή ενέργεια για τη δημιουργία των ζευγών πρωτονίου-αντιπρωτονίου μέσω της αντίδρασης



Εικόνα 11.5 Ο επιταχυντής Bevatron στο Μπέρκλεϊ της Καλιφόρνιας. Η μηχανή αυτή ήταν ο πρώτος επιταχυντής με αρκετή ενέργεια ώστε να παράγει αντιπρωτόνια.



Η αντίστροφη διαδικασία της δημιουργίας ζεύγους —ή, όπως λέγεται, της διδυμης γένεσης— είχε επίσης προβλεφθεί από τον Dirac. Αν έχουμε ένα ηλεκτρόνιο θετικής ενέργειας και ένα ποζιτρόνιο-οπή στο κβαντικό μας κιβώτιο, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει στη θάλασσα και να «γεμίσει» την οπή, αφήνοντας έτσι ένα άδειο κιβώτιο καθώς και δύο φωτόνια, των οποίων ο ρόλος συνίσταται στο να απομακρύνουν την ενέργεια εξαύλωσης. Έτσι, η αντίδραση παίρνει τη μορφή:



Η ιδέα τού Dirac για τη θάλασσα αρνητικής ενέργειας, αν και ιστορικά αποτέλεσε το πρώτο θεωρητικό πλαίσιο που επέτρεψε να προβλεφθεί η ύπαρξη της αντιύλης, συνιστά έναν μάλλον άκομψο, χωρίς συμμετρία τρόπο αντιμετώπισης των αντισωματιδίων. Το νέο χαρακτηριστικό της σχετικιστικής κβαντικής μηχανικής, το οποίο εκδηλώνεται με από τρόπο στις διαδικασίες παραγωγής και εξαύλωσης ζεύγους, είναι η δυνατότητα μετασχηματισμού της ενέργειας σε ύλη. Έτσι, σε αντίθεση με τη μη σχετικιστική κβαντική μηχανική των Schrödinger και Heisenberg, ο αριθμός των κβαντικών σωματιδίων μπορεί να αλλάζει. Η θάλασσα των ηλεκτρονίων αρνητικής ενέργειας που επικαλέ-

στηκε ο Dirac υπήρξε ένα τέχνασμα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιεί τη μονοσωματιδιακή κυματική εξίσωση σε μια περιοχή όπου απαιτούνταν μια γνήσια πολυσωματιδιακή θεωρία. Και επίσης, δεν είναι εποικοδομητική καθόσον στηρίζεται στην αρχή του Pauli προκειμένου να εμποδίζει τα σωματίδια θετικής ενέργειας να μεταβαίνουν σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας —και ως εκ τούτου αφήνει να εννοηθεί ότι τα μποζόνια θα συμπεριφέρονται διαφορετικά. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, όμως, υπάρχει ένα στοιχειώδες σωματίδιο που ονομάζεται *ουδέτερο πόνιο* (π^0) και είναι μποζόνιο με σπιν μηδέν. Οι θετικά και αρνητικά φορτισμένες παραλλαγές τού εν λόγω μποζονίου, το π^+ και το π^- , συμμετέχουν σε διαδικασίες δημιουργίας και εξαύλωσης ζεύγους κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια. Η θάλασσα Dirac, με τη φαινομενική της απειρία αρνητικού φορτίου και μάζας, εξαφανίζεται όταν η κβαντική θεωρία διατυπωθεί με τον αρμόζοντα formalισμό των πολλών σωμάτων, ο οποίος επιτρέπει ευθύς εξαρχής τις διαδικασίες δημιουργίας και καταστροφής σωματιδίων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, η οποία αντικαθιστά τη μονοσωματιδιακή κυματομηχανική, ονομάζεται *κβαντική θεωρία πεδίων*.

Η σχετικιστική κβαντική θεωρία πεδίων που περιγράφει την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων και φωτονίων είναι γνωστή ως *κβαντική ηλεκτροδυναμική* (QED). Η κβαντική ηλεκτροδυναμική συνδυάζει τις εξισώσεις τού Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό, την κβαντική μηχανική και τη σχετικότητα. Πρόκειται για την πιο επιτυχημένη θεωρία που έχουν οικοδομήσει μέχρι τώρα οι φυσικοί, και οι προβλέψεις της έχουν ελεγχθεί και επιβεβαιωθεί σε καταπληκτικό βαθμό ακρίβειας. Και για να αποδείξουμε ότι όλα τούτα δεν αποτελούν επιπόλαιο κομπασμό, ας εξετάσουμε το σπιν του ηλεκτρονίου, το οποίο τόσες και τόσες δυσκολίες προκάλεσε στον Schrödinger. Το σπιν του ηλεκτρονίου δρα σαν μικρός μαγνήτης, και το μέτρο της μαγνητικής ροπής του ηλεκτρονίου μπορεί να υπολογιστεί στην κβαντική ηλεκτροδυναμική. Το αποτέλεσμα εκφράζεται με τη βοήθεια του «γυρομαγνητικού λόγου», g , του ηλεκτρονίου. Κλασικά, το g προβλέπεται να έχει την τιμή

$$g_{\text{κλασικό}} = 1,0,$$

η οποία είναι μικρότερη από το μισό της τιμής που προβλέπει η κβαντική ηλεκτροδυναμική

$$g_{\text{κβαντικό}} = 2,002319304.$$

Όταν συγκριθεί η πρόβλεψη αυτή με την πειραματικά μετρούμενη τιμή

$$g_{\text{πειραματικό}} = 2,002319304,$$

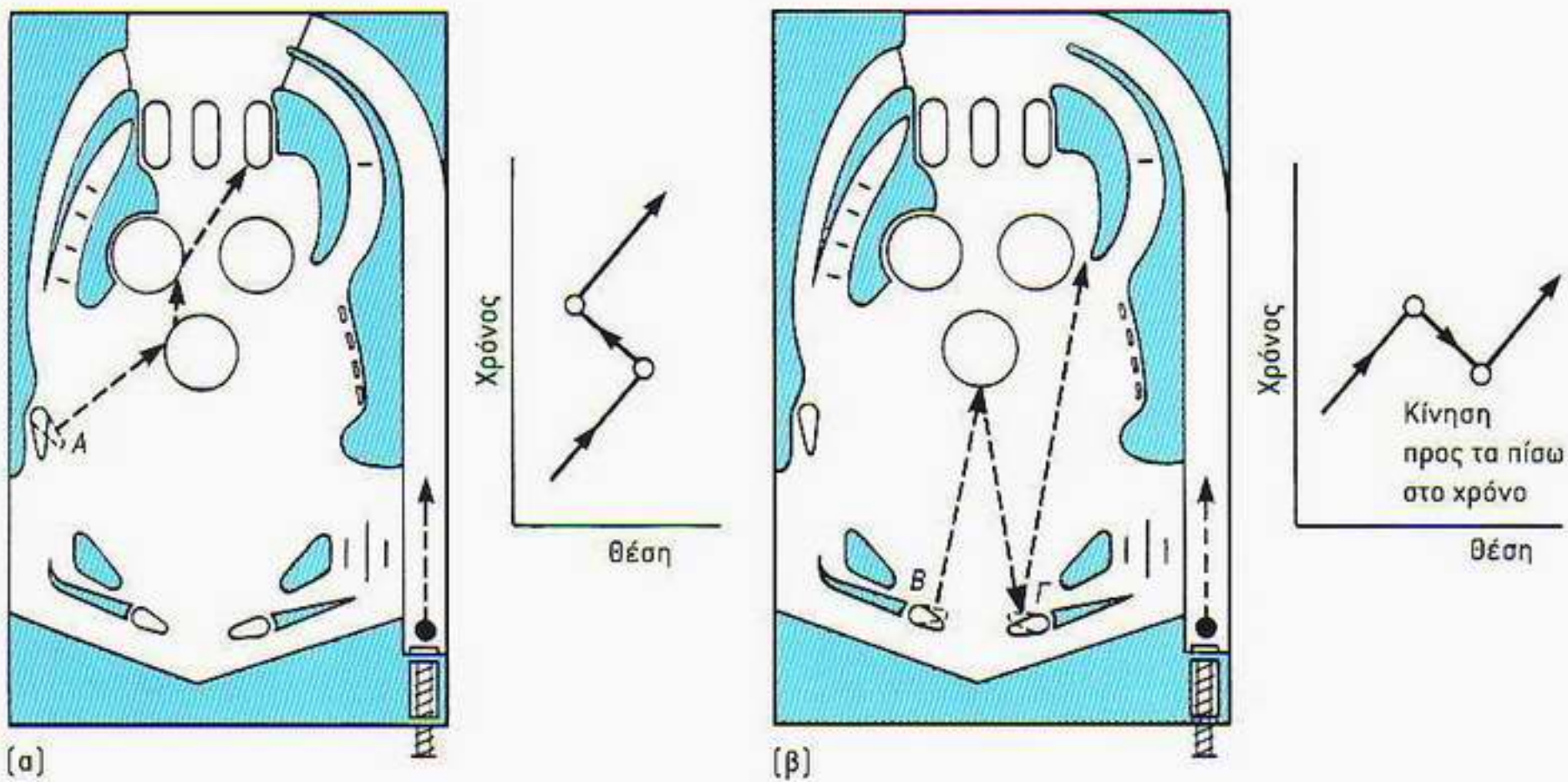
καθίσταται αμέσως φανερό η εντυπωσιακή συμφωνία μεταξύ κβαντικής ηλεκτροδυναμικής και πειράματος. Οι προσπάθειες για περαιτέρω επέκταση της συμφωνίας πέραν των εννέα δεκαδικών ψηφίων δυσχεραίνονται λόγω της ύπαρξης κάποιων αριθμητικών περιορισμών στις θεωρητικές προβλέψεις καθώς και εξαιτίας ορισμένων πειραματικών αβεβαιοτήτων. Η κυριότερη εξ αυτών συνδέεται με τη μέτρηση της λεγόμενης *σταθεράς λεπτής υφής*, από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια το φορτίο του ηλεκτρονίου. Δυστυχώς, κάθε λεπτομερειακή περιγραφή μιας κβαντικής θεωρίας πεδίων θα απαιτούσε τη χρήση προχωρημένων μαθηματικών τεχνικών, οι οποίες απέχουν πάρα πολύ από τους σκοπούς του παρόντος βιβλίου. Ευτυχώς για

μας, ο Feynman έχει προσφέρει έναν πολύ όμορφο διαισθητικό και παραστατικό φορμαλισμό για την κβαντική θεωρία πεδίων. Πρόκειται για το θέμα που θα μας απασχολήσει στην επόμενη ενότητα.

Διαγράμματα Feynman και δυνάμει σωματίδια

Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζει ο Feynman τις καταστάσεις αρνητικής ενέργειας, αν και ομολογουμένως απαιτεί κάποιο χρόνο για να εξοικειωθεί κανείς μαζί του, στο τέλος αποδεικνύεται πολύ χρήσιμος. Για να δούμε περί τίνος ακριβώς πρόκειται, ας θεωρήσουμε ένα πείραμα σκέδασης ηλεκτρονίων. Φανταστείτε ότι σε αυτό το πείραμα θα επιχειρήσετε με δύο προσπάθειες να χτυπήσετε μια μπίλια σε ένα φλίπερ κατά τρόπο ώστε στη διαδρομή της ως την κορυφή του ταμπλό να κάνει δύο κρούσεις (βλ. Εικόνα 11.6). Στην πρώτη προσπάθεια, και οι δύο κρούσεις είναι πλάγιες και απλώς εκτρέπουν ελαφρώς την μπίλια από την πορεία της, χωρίς όμως να τη σταματήσουν. Στη δεύτερη περίπτωση, η μπίλια υφίσταται μια πολύ ισχυρότερη κρούση που τη στέλνει πάλι στο κάτω μέρος του ταμπλό, όπου εν συνεχεία υφίσταται άλλη μία βίαιη κρούση που τη στέλνει και πάλι προς την κεφαλή του ταμπλό. Στην περίπτωση του πειράματος σκέδασης με τα ηλεκτρόνια, ο Feynman έδειξε ότι μπορούμε να χαράξουμε δύο ανάλογες τροχιές για το ηλεκτρόνιο, αλλά με τη βασική διαφορά ότι τώρα πρέπει να θεωρήσουμε τις τροχιές των ηλεκτρονίων στο ταμπλό μας ως ένα διάγραμμα της κίνησής τους στο χώρο και το χρόνο, με τον άξονα του χρόνου να εκτείνεται από το κάτω προς το πάνω μέρος του ταμπλό και με τον άξονα του χώρου να είναι παράλληλος προς την εγκάρσια διάσταση του ταμπλό —από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η τροχιά του ηλεκτρονίου για την πρώτη μας προσπάθεια φαίνεται τελείως κανονική —το ηλεκτρόνιο εκτρέπεται ελαφρώς και κατά τις δύο κρούσεις του, αλλά συνεχίζει την πορεία του γενικά προς την ίδια κατεύθυνση τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Η δεύτερη περίπτωση, όμως, φαίνεται πολύ περίεργη —το ηλεκτρόνιο μοιάζει να έχει σκεδαστεί προς τα πίσω στο χρόνο! Ο Feynman υποστήριξε πως η σχετικιστική κβαντική μηχανική επιτρέπει αυτή την παράξενη δυνατότητα, υπό την προϋπόθεση ότι το ηλεκτρόνιο που πηγαίνει «προς τα πίσω στο χρόνο» έχει αρνητική ενέργεια. Η φυσική ερμηνεία της κίνησης ενός ηλεκτρονίου αρνητικής ενέργειας προς τα πίσω στο χρόνο στηρίζεται πάλι στη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (Εικόνα 11.7). Η απορρόφηση αρνητικής ενέργειας και φορτίου «από το μέλλον» ελαττώνει την ολική ενέργεια και το αρνητικό φορτίο του κέντρου σκέδασης. Τούτο έχει το ίδιο αποτέλεσμα, σε ό,τι αφορά την ενέργεια και το φορτίο του κέντρου, με το να εκπέμπονταν προς το μέλλον θετική ενέργεια και φορτίο. Έτσι, η φαινομενικά παράλογη τροχιά του ηλεκτρονίου αντιστοιχεί στην παραγωγή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου στο χρονικά πρώτο κέντρο σκέδασης. Το ποζιτρόνιο κινείται τότε προς τα εμπρός στο χρόνο, προς το χρονικά δεύτερο κέντρο σκέδασης, όπου και εξαϋλώνεται συγκρουόμενο με το αρχικά εισερχόμενο ηλεκτρόνιο.

Τώρα που καταλαβαίνουμε τη σημασία του αποσπάσματος του Feynman που παρατίθεται στην αρχή του κεφαλαίου (εράνιομα από την πρωτότυπη εργασία του «Χωροχρονική προσέγγιση στην κβαντική ηλεκτροδυναμική», η οποία δημοσιεύθηκε στο *Physical Review* το 1949). Καταφέραμε και αποφύγαμε να ασχοληθούμε ρητά με την πολυσωματιδιακή φύση της διαδικασίας



Εικόνα 11.6 Δύο πιθανές διαδρομές μιας μπίλιας σε φλίπερ. (α) Το φλίπερ χτυπά με τέτοιο τρόπο την μπίλια ώστε αυτή κάνει μια ηλίθια κρούση στην πορεία της προς τα πάνω μέρος. Το διηλεκτρόνιο δείχνει μια παρόμοια διαδρομή ενός σκεδαζόμενου ηλεκτρονίου. Ο κατακόρυφος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στο χρόνο και ο οριζώντιος στη θέση. (β) Στην προκειμένη περίπτωση, το φλίπερ χτυπά την μπίλια έτσι ώστε αυτή να υποστεί μια πολύ ισχυρή κρούση και να ανακλαστεί προς τα κάτω πριν το φλίπερ την ξαναστείλει προς τα πάνω. Στη σχετικιστική μηχανική υπάρχει παρόμοια διαδρομή ενός ηλεκτρονίου σε ένα «χωροχρονικό» διάγραμμα. Ωστόσο, εδώ τα πράγματα φαίνονται πολύ περίεργα, καθώς η χρονικά δεύτερη σκέδαση δείχνει να αναγκάζει το ηλεκτρόνιο να κινηθεί προς τα «πίσω στο χρόνο»!



Εικόνα 11.7 Ο Feynman κατάλαβε ότι τα διαγράμματα που περιέχουν διαδρομές ή τμήματα διαδρομών ηλεκτρονίων με κατεύθυνση «προς τα πίσω στο χρόνο» μπορούσαν να κατανοηθούν ως η φυσική διαδικασία της δημιουργίας ζεύγους ακοιουθούμενη από εξαϋλίωση ζεύγους. Ηλεκτρόνιο με αρνητική ενέργεια κινούμενη προς τα πίσω στο χρόνο ισοδυναμούν με ποζιτρόνια θετικής ενέργειας κινούμενα προς τα εμπρός στο χρόνο.

παραγωγής ζεύγους αντιμετωπίζοντας την τροχιά του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου ως μία και μοναδική «κοσμική γραμμή» ενός ηλεκτρονίου, όπως ακριβώς ο δρόμος για τον οποίο γίνεται λόγος στο απόσπασμα είναι στην πραγματικότητα ένας και μοναδικός, αν και μερικές φορές εμφανίζεται διαφορετικά στον πιλότο του βομβαρδιστικού. Υπάρχει ένα μεγάλο πλεονέκτημα στον τρόπο με τον οποίο χειρίζεται ο Feynman τις σχετικιστικές καταστάσεις αρνητικής ενέργειας: Το να χρησιμοποιούμε τις καταστάσεις αρνητικής

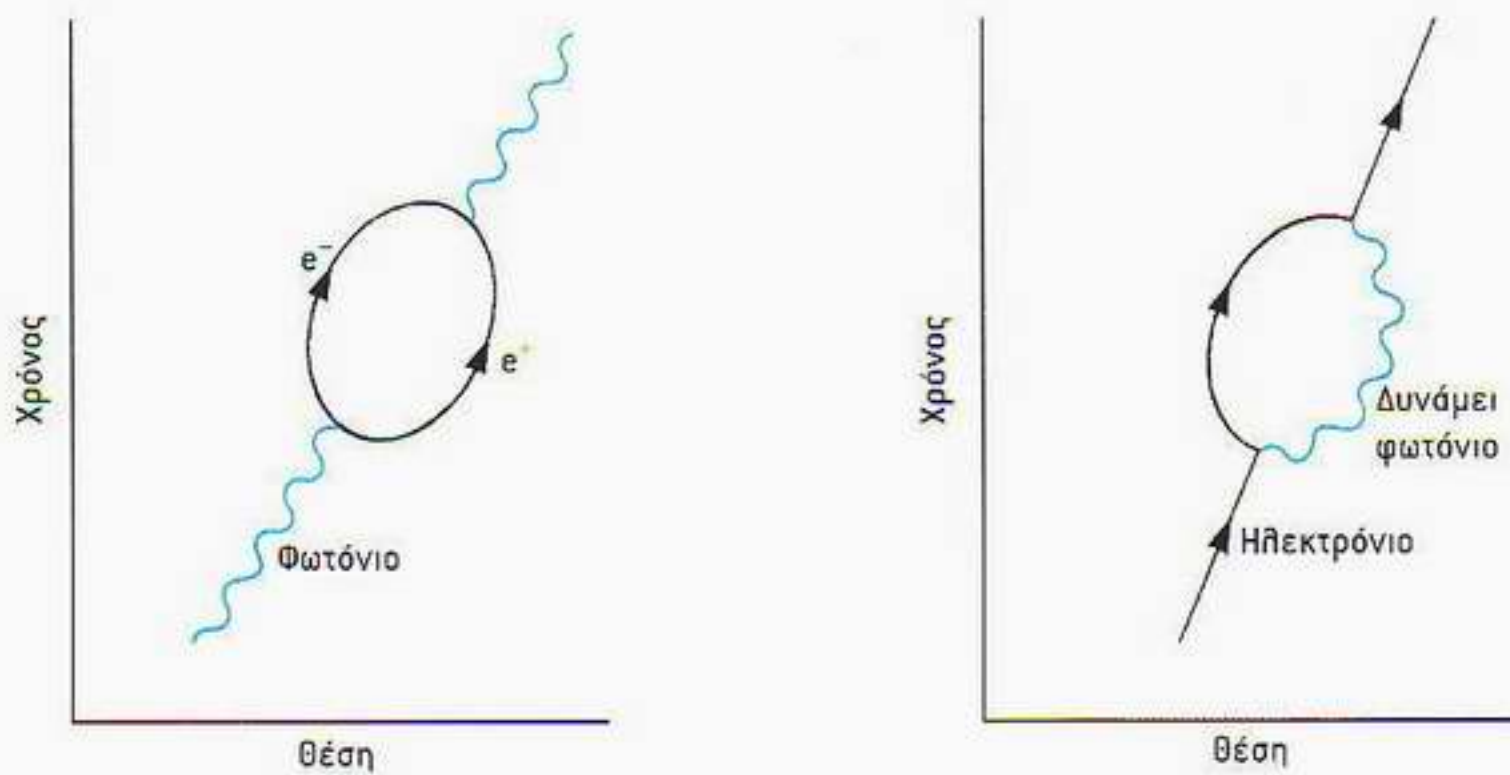
ενέργειας που κινούνται «προς τα πίσω στο χρόνο» ως αντιστοιχούσες σε αντισωματίδια θετικής ενέργειας που κινούνται προς τα εμπρός στο χρόνο λειτουργεί εξίσου καλά για τα μποζόνια όπως και για τα φερμιόνια. Βεβαίως, επιβάλλεται να τονιστεί ότι όλα αυτά δεν είναι παρά ένα επινόημα για να καταλήγουμε στη σωστή απάντηση χωρίς να υποχρεωνόμαστε να προσφεύγουμε στον περίπλοκο μηχανισμό της κβαντικής θεωρίας πεδίων. Απ' όσο γνωρίζουμε, τίποτα δεν ταξιδεύει πραγματικά προς τα πίσω στο χρόνο!

Υπάρχει, όμως, και μια άλλη βασική ιδέα που πρέπει να εισαγάγουμε σε αυτή την περιγραφή της σχετικιστικής κβαντικής μηχανικής. Πρόκειται για την ιδέα του «δυνάμει» σωματιδίου. Στη συζήτηση του Κεφαλαίου 5 περί του φαινομένου σήραγγας δείξαμε ότι ένας βολικός τρόπος για να πραγματευθούμε την κβαντική διείσδυση ήταν να στηριχτούμε στη σχέση αβεβαιότητας ενέργειας-χρόνου

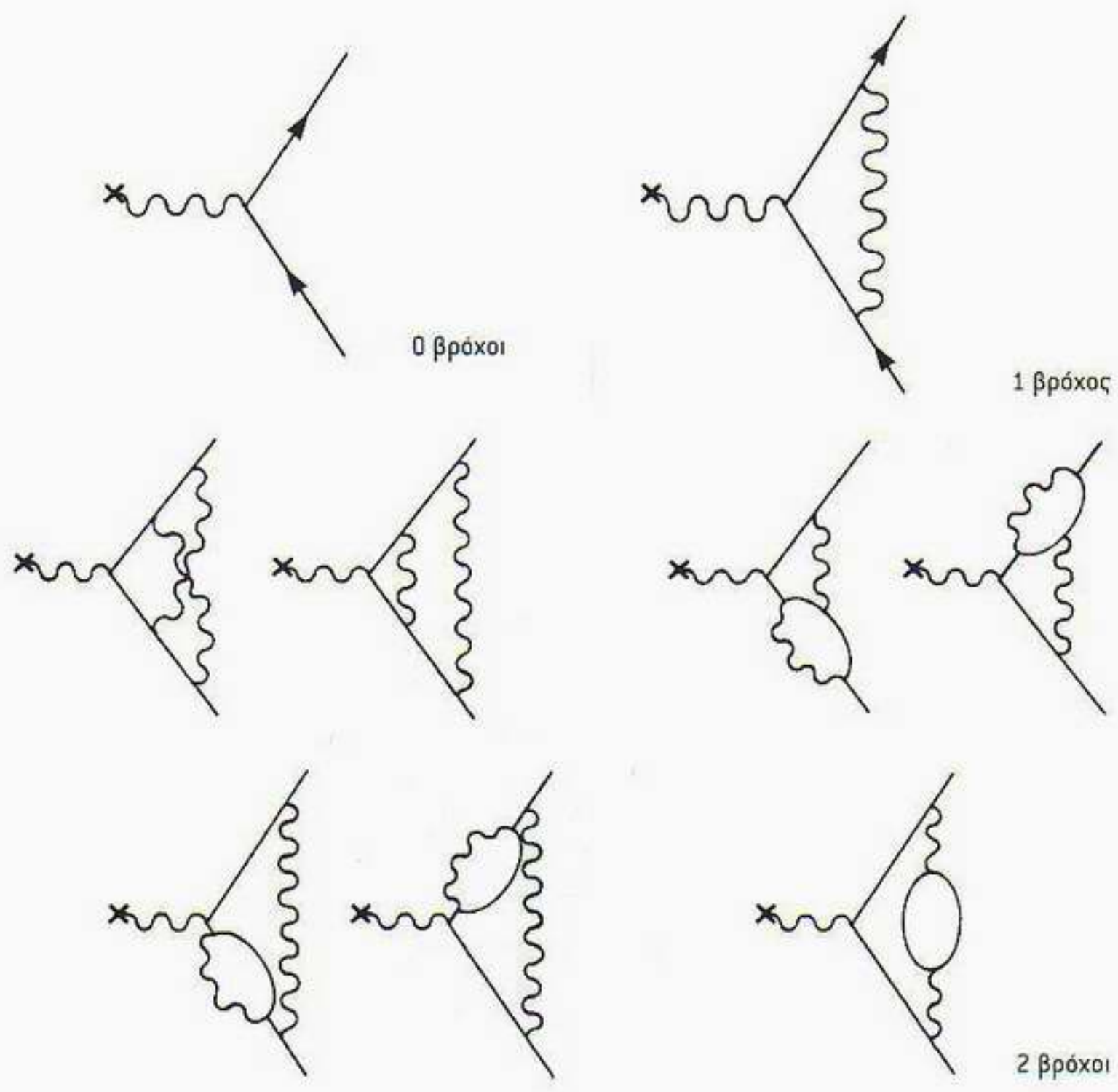
$$(\Delta E) \cdot (\Delta t) \approx h.$$

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, η εν λόγω σχέση σημαίνει ότι μπορούμε να «δανειστούμε» ενέργεια ΔE , και ότι αυτό το «δάνειο» θα μείνει απαραίτητο εφόσον το επιστρέψουμε μέσα σε χρόνο $\Delta t \approx h/\Delta E$. Δεδομένης της δυνατότητας δημιουργίας σωματιδίων στη σχετικιστική κβαντική μηχανική, τούτο με τη σειρά του σημαίνει ότι ένα σωματίδιο δεν είναι απαραίτητο να παραμένει πάντοτε το ίδιο σωματίδιο: Η δανεική ενέργεια θα μπορούσε να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δημιουργηθεί ένα άλλο σωματίδιο ή και ένα ζεύγος σωματιδίων, τα οποία όμως θα εκμετρήσουν το βίο τους πολύ σύντομα. Ένα φωτόνιο, για παράδειγμα, μπορεί να δανειστεί αρκετή ενέργεια ώστε να μετατραπεί σε ένα δυνάμει ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Τα σωματίδια του ζεύγους μπορούν να υπάρξουν για πολύ μικρό χρονικό διάστημα έως ότου ενωθούν πάλι για να σχηματίσουν ένα φωτόνιο. Οι βραχύχρονες διαδικασίες αυτού του είδους ονομάζονται *δυνάμει διαδικασίες* και τα σωματίδια που δημιουργούνται από τη δανεική ενέργεια *δυνάμει σωματίδια*. Στην κβαντική ηλεκτροδυναμική μπορούμε να υπολογίσουμε το πλάτος πιθανότητας τέτοιων δυνάμει διαδικασιών, και ο Feynman επινόησε ένα σύστημα διαγραμμάτων για τον υπολογισμό των πλατών αυτών (Εικόνα 11.8).

Η σπουδαιότητα των διαγραμμάτων Feynman έγκειται όχι μόνο στην παραστατική τους δύναμη, αλλά και στο γεγονός ότι ο Feynman έδωσε επίσης συγκεκριμένους κανόνες για τον υπολογισμό του πλάτους για κάθε διάγραμμα, όσο περίπλοκο κι αν είναι αυτό. Η Εικόνα 11.9 δείχνει μερικά από τα αναγκαία διαγράμματα για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροπής του ηλεκτρονίου που αναφέραμε πιο πάνω. Τα διαγράμματα Feynman διαθέτουν επίσης την κομψή ιδιότητα ότι το ίδιο διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαρασταθούν διαδικασίες όπου εμπλέκονται αντισωματίδια. Η Εικόνα 11.10 δείχνει το απλούστερο διάγραμμα για τη σκέδαση ηλεκτρονίου-κουάρκ με ανταλλαγή ενός δυνάμει φωτονίου. Στο διάγραμμα θεωρείται ότι ο άξονας του χρόνου δείχνει προς την κορυφή της σελίδας. Ας περιστρέψουμε τώρα το διάγραμμα και ας θυμηθούμε ότι οι γραμμές με βέλη που δείχνουν προς τα πίσω στο χρόνο πρέπει να ερμηνεύονται ως αντισωματίδια κινούμενα προς τα εμπρός στο χρόνο. Διαπιστώνουμε ότι το διάγραμμα παριστάνει τώρα τη φυσική διαδικασία εξαύλωσης ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου σε ένα δυνάμει φωτόνιο, το οποίο εν συνεχεία δημιουργεί ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ.



Εικόνα 11.8 Διαγράμματα Feynman για δυνάμει διαδικασίες. Σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας, η ενέργεια που απαιτείται για να καταστεί δυνατή η δημιουργία σωματιδίων μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω ενεργειακού δανείου, υπό την προϋπόθεση ότι αυτό θα «επιστραφεί» σε αρκούντως σύντομο χρονικό διάστημα.



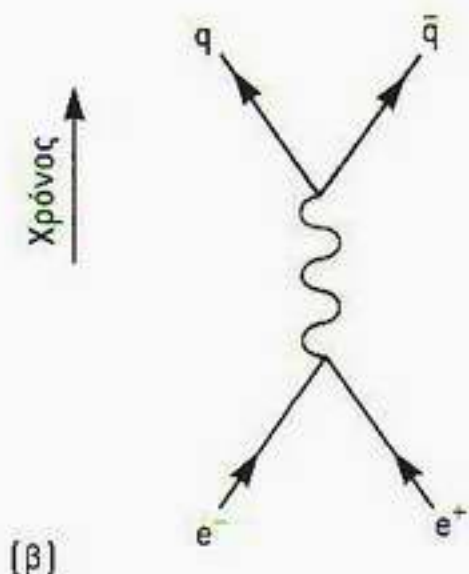
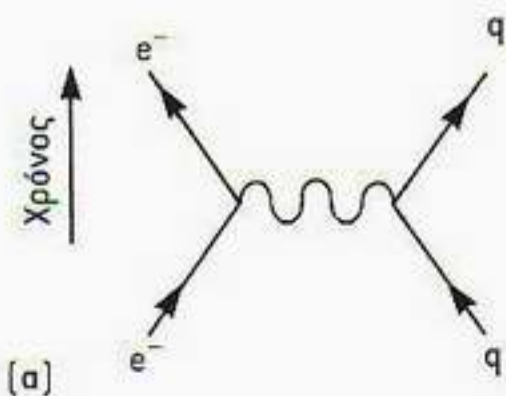
Εικόνα 11.9 Διαγράμματα Feynman απαραίτητα για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροπής του ηλεκτρονίου. Οι ευθείες γραμμές αναπαριστούν ηλεκτρόνια και οι κυματιστές φωτόνια. Τα «X» αναπαριστούν αλληλεπιδράσεις με ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Διαγράμματα τα οποία περιέχουν περισσότερες εσωτερικές γραμμές φωτονίων έχουν αριθμητικά μικρότερη συνεισφορά στο τελικό αποτέλεσμα απ' ό,τι διαγράμματα με λιγότερα φωτόνια. Κάθε διάγραμμα που έχει κλειστούς βρόχους συνεπάγεται τον υπολογισμό πολύπλοκων ολοκληρωμάτων.

Κίνηση μηδενικού σημείου και διακυμάνσεις κενού

Η εικόνα που εισήγαγε ο Dirac για το κενό φαινόταν αρκετά περίπλοκη, αλλά την έχουμε αντικαταστήσει με μία άλλη η οποία μοιάζει ακόμη πιο περίπλοκη. Τώρα, το άδειο κιβώτιο, αντί να είναι ένας χώρος όπου δεν συμβαίνει τίποτα, θα πρέπει να θεωρείται μια κοχλάζουσα σούπα με φυσαλίδες αποτελούμενες από ζεύγη δυνάμει σωματιδίων και αντισωματιδίων! Για



Ο Hendrik Casimir γεννήθηκε το 1909 στην Ολλανδία και υπήρξε μαθητής του Niels Bohr. Αργότερα έγινε διευθυντής ερευνών των εργαστηρίων Philips στο Άιντχοβεν [Ολλανδία].



Εικόνα 11.10 Το διάγραμμα Feynman (α) αναπαριστά τη σκέδαση ηλεκτρονίου-κουάρκ. Το ίδιο διάγραμμα, σπηρό περιστραμμένο κατά 90° , (β), αναπαριστά την εξαύλωση ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου που ακολουθείται από τη δημιουργία ενός ζεύγους κουάρκ-αντικουάρκ.

παράδειγμα, στην πρώτη μας συζήτηση για τη σκέδαση ηλεκτρονίου προς τα πίσω στο χρόνο, πιθανόν να φάνηκε ότι το ποζιτρόνιο που δημιουργήθηκε στην πρώτη σκέδαση έπρεπε να γνωρίζει εκ των προτέρων ότι επρόκειτο να εξαυλωθεί από το εισερχόμενο ηλεκτρόνιο στην επόμενη σκέδαση. Τώρα αντιλαμβανόμαστε ότι το κενό βρίθκει από τέτοια δύναμη ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων, που όλα τους υπάρχουν για λίγες μόλις στιγμές, και το ποζιτρόνιο της συζήτησής μας δεν ήταν παρά ένα μόνο από αυτά, το οποίο συνελήφθη από το εισερχόμενο ηλεκτρόνιο!

Το κενό της σχετικιστικής κβαντικής μηχανικής —ή, ακριβολογώντας, η θεμελιώδης κατάσταση της σχετικιστικής κβαντικής θεωρίας πεδίων— παρουσιάζει και άλλα ενδιαφέροντα παρατηρήσιμα φαινόμενα. Όταν εφαρμόζουμε την κβαντική μηχανική στις ταλαντώσεις των ατόμων ενός κρυστάλλου, τα κύματα των ταλαντώσεων που δημιουργούνται μέσα στον κρυστάλλο αποδεικνύεται ότι έχουν σωματιδιακά χαρακτηριστικά, ακριβώς όπως συμβαίνει και με τα φωτόνια. Αυτές οι κβαντικές ταλαντώσεις πλέγματος ονομάζονται *φωνόνια*. Αν ψύξουμε το κρυσταλλικό πλέγμα τόσο ώστε να μην έχουμε διεγερμένα φωνόνια, πρέπει ακόμα και τότε να απομένει κάποια κίνηση, η κίνηση μηδενικού σημείου των ατόμων, έτσι ώστε να ικανοποιείται η σχέση αβεβαιότητας του Heisenberg. Σε αυτήν ακριβώς την κίνηση οφείλεται το γεγονός ότι το υγρό ήλιο δεν στερεοποιείται ποτέ, όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 7. Τι σχέση έχει όμως το κρυσταλλικό πλέγμα με τη συζήτησή μας για το πραγματικό φυσικό κενό; Ε, λοιπόν, με τον ίδιο τρόπο που τα φωνόνια είναι κβαντικά αντικείμενα συνδεδεμένα με ταλαντώσεις των κρυσταλλικών θέσεων, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι και τα φωτόνια συνδέονται με ταλαντώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Παρατηρούμε τότε ότι, όπως στην περίπτωση των φωνονίων, πρέπει να υπάρχει και για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μια κίνηση μηδενικού σημείου. Και είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές οι διακυμάνσεις κενού του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου έχουν μερικές αρκετά σημαντικές συνέπειες που μπορούμε να τις ελέγξουμε πειραματικά.

Την πιο γνωστή εφαρμογή αυτών των ιδεών αποτελεί η λεγόμενη *μετατόπιση Lamb* στο φάσμα του υδρογόνου. Αν κοιτάξουμε προσεκτικά τις φασματικές γραμμές του υδρογόνου, παρατηρούμε ότι για $n = 2$ υπάρχουν δύο ελαφρώς διαχωρισμένες ενεργειακές στάθμες με στροφορμή $L = 1$ και $L = 0$, οι οποίες ενεργειακά διαφέρουν πάρα πολύ λίγο, και αυτό δεν ερμηνεύεται ακόμα κι αν λάβουμε υπόψη μας το σχετικιστικό σπιν του ηλεκτρονίου. Υπάρχει, όμως, ένα κβαντικό φαινόμενο το οποίο παραβλέψαμε. Οι διακυμάνσεις κενού του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προκαλούν ελαφρά ταλάντωση του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου. Το αποτέλεσμα της εν λόγω ταλάντωσης μπορεί να υπολογιστεί, και συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τις πειραματικές μετρήσεις του Lamb. Η ύπαρξη αυτών των διακυμάνσεων κενού έδωσε επίσης στον Dirac τη δυνατότητα να εξηγήσει πώς τα διεγερμένα ηλεκτρόνια μπορούν να υποστούν την «αυθόρμητη εκπομπή» ενός φωτονίου και να μεταβούν σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Τούτη η μετάβαση στην πραγματικότητα προκαλείται από την κίνηση μηδενικού σημείου του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Υπάρχει και ένα άλλο περίεργο παρατηρήσιμο φαινόμενο που οφείλεται στις διακυμάνσεις κενού και μπορούμε να το ονομάσουμε *δύναμη κενού*. Στο φυσικό κενό, οι διακυμάνσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επιτρέπεται να έχουν όλα τα δυνατά μήκη κύματος. Ας θεωρήσουμε ένα σύστημα α-

ποτελούμενο από δύο μεγάλες μεταλλικές πλάκες ευρισκόμενες η μία απέναντι στην άλλη. Για μια απομονωμένη μεταλλική πλάκα, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο πρέπει να μηδενίζεται εφόσον δεν ρέει ρεύμα. Έτσι, από όλες τις ταλαντώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κενού, μεταξύ των πλακών επιτρέπονται μόνο όσες μηδενίζονται στις πλάκες. Επομένως, εφόσον τώρα απουσιάζουν ορισμένες από τις ταλαντώσεις του κανονικού κενού, η ενέργεια μηδενικού σημείου του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται. Λεπτομερείς υπολογισμοί δείχνουν ότι αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μια εξαιρετικά μικρή ελκτική δύναμη μεταξύ των πλακών. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι γνωστό ως *φαινόμενο Casimir*, προς τιμήν του γνωστού ολλανδού φυσικού που πρώτος προέβλεψε την ύπαρξη μιας τέτοιας δύναμης.

Η ύπαρξη αυτής της δύναμης κενού επαληθεύτηκε πειραματικά το 1958. Τη δεκαετία του 1980 διεξήχθησαν πειράματα για να διαπιστωθεί ο τρόπος με τον οποίο οι διακυμάνσεις κενού επηρεάζουν τον λεγόμενο ρυθμό αυθόρμητης εκπομπής των διεγερμένων ατόμων. Στα εν λόγω πειράματα, διεγερμένα άτομα περνούσαν μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών Casimir. Ένα μαγνητικό πεδίο προσανατόλιζε τα άτομα έτσι ώστε η αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας να είναι πιθανότερο να λάβει χώρα σε διεύθυνση κάθετη προς τις πλάκες. Όταν οι πλάκες απέχουν πολύ η μία από την άλλη, δεν αναμένεται κανένα παρατηρήσιμο φαινόμενο. Αν όμως φέρουμε τις πλάκες τόσο κοντά ώστε να τις χωρίζει απόσταση μόνο μισού μήκους κύματος, τότε στο μεταξύ τους χάσμα μπορεί να χωρέσει μόνο ένα όρος ή μία κοιλάδα (βλ. Εικόνες 4.7 και 4.8). Στην προκειμένη περίπτωση, προβλέπεται ότι η αυθόρμητη εκπομπή περιστέλλεται. Το 1995 ήρθε η πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου από τον Daniel Kleppner και την ερευνητική του ομάδα, που κατάφεραν να επαληθεύσουν ότι οι πλάκες Casimir έχουν ως αποτέλεσμα να ελαττώνεται η αυθόρμητη εκπομπή ατόμων καισίου. Πρόσφατα επιβεβαιώθηκε και άλλη μία πρόβλεψη του Casimir. Το 1948, ο Casimir και ο συνεργάτης του Polder προέβλεψαν ότι η τροποποιημένη κατάσταση κενού που δημιουργείται από τις πλάκες Casimir θα έπρεπε να ασκεί κάποια δύναμη στα ουδέτερα άτομα. Και όντως, το 1993, ο Charles Sukenik και οι συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο Yale ανίχνευσαν επιτυχώς μια τέτοια δύναμη να ασκείται πάνω σε ουδέτερα άτομα νατρίου.

Ακτινοβολία Hawking και μαύρες τρύπες

Σήμερα πιστεύουμε ότι η δημιουργία ζευγών σωματιδίων-αντισωματιδίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και στη θεωρία των μαύρων τρυπών. Στο Κεφάλαιο 10 γνωρίσαμε τις μαύρες τρύπες ως το τελικό στάδιο στην εξέλιξη ενός άστρου πολύ μεγάλης μάζας. Αφότου γεννηθεί μια μαύρη τρύπα από ένα άστρο το οποίο πεθαίνει, είναι εύκολο να παρακολουθήσουμε τον τρόπο της ανάπτυξής της. Πράγματι, πολλοί γαλαξίες και τα μυστηριώδη αντικείμενα που ονομάζονται *κβάζαρ* —ημιαστρικές ραδιοπηγές με τεράστια ισχύ— θεωρείται ότι περιέχουν γιγαντιαίες μαύρες τρύπες. Πώς μπορούμε, λοιπόν, να δούμε τέτοια αντικείμενα, όταν οι μαύρες τρύπες απορροφούν όλη την ακτινοβολία που καταφθάνει σε αυτές; Στην πραγματικότητα, καθώς τα άστρα και η μεσοαστρική ύλη έλκονται προς τις μαύρες τρύπες, διάφορα φορτισμένα σωματίδια επιταχύνονται και εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε. Ωστόσο, καθώς η ύλη α-



Στη φωτογραφία εικονίζεται ο Stephen Hawking στο Καίμπριτζ. Εις πείσμα των φοβερών σωματικών μειονεκτημάτων του, ο Hawking προσέφερε πολλές αξιοσημείωτες συμβολές στην αστροφυσική και την κοσμολογία. Είναι, επίσης, ο συγγραφέας του *A brief History of Time* (Το χρονικό του Χρόνου), μίας από τις μεγαλύτερες εκδοτικές επιτυχίες όλων των εποχών στο χώρο της εκπαίδευσης της επιστήμης.

πορροφάται από τις μαύρες τρύπες στο εσωτερικό της λεγόμενης ακτίνας Schwarzschild, τίποτα, ούτε καν η ακτινοβολία, δεν μπορεί να υπερνικήσει τις βαρυτικές δυνάμεις και να διαφύγει από αυτές.

Τα όσα είπαμε παραπάνω αφορούν μαύρες τρύπες που έχουν μάζες τρεις ή τέσσερις φορές μεγαλύτερες από τη μάζα του Ήλιου μας έως και εκατοντάδες εκατομμύρια φορές πιο μεγάλες από εκείνη ενός κβάζαρ. Είναι πολύ δυσκολότερο να αντιληφθούμε πώς μπορούν να σχηματιστούν μαύρες τρύπες με πολύ μικρές μάζες. Ο Stephen Hawking, διάσημος κοσμολόγος στο Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ, διατύπωσε την άποψη ότι μαύρες τρύπες με πολύ διαφορετικές μάζες ίσως σχηματίστηκαν στα πρώτα πρώτα στάδια της δημιουργίας του Σύμπαντος. Για να πάρουμε μια ιδέα για τις συνθήκες που οι περισσότεροι κοσμολόγοι πιστεύουν ότι επικράτησαν αμέσως μετά τη δημιουργία του Σύμπαντος, θα χρειαστεί να κάνουμε μια σύντομη παρέκβαση και να συζητήσουμε κάποιες ενδείξεις για τη διαστολή του Σύμπαντος και τη θεωρία της «Μεγάλης Έκρηξης».

Την κοσμολογική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης την πρότειναν ο George Gamow και άλλοι για να εξηγήσουν την παρατηρούμενη διαστολή του Σύμπαντος όπως τη βλέπουμε σήμερα. Η Εικόνα 11.11 δείχνει τον κεντρικό πυρήνα ενός μεγάλου σμήνους γαλαξιών. Κάθε γαλαξίας περιέχει τεράστιο πλήθος άστρων, όπως άλλωστε και ο δικός μας. Στο Σύμπαν παρατηρούμε ότι τα σμήνη γαλαξιών είναι σε γενικές γραμμές ομοιόμορφα κατανεμημένα στο χώρο. Η Εικόνα 11.12 δείχνει γαλαξίες σε όλο και πιο απομακρυσμένα σμήνη, καθώς και τα φάσματα του φωτός το οποίο εκπέμπει ο κάθε γαλαξίας. Τα εν λόγω φάσματα μας προσφέρουν πληροφορίες για το πόσο γρήγορα ένας γαλαξίας απομακρύνεται από μας ή μας πλησιάζει. Όπως ο Ήλιος, έτσι και οι γαλαξίες αυτοί εκπέμπουν φως που περιέχει όλα τα μήκη κύματος —ένα συνεχές φάσμα. Καθώς το ηλιακό φως ταξιδεύει μέσα από τα εξωτερικά στρώματα της ατμόσφαιρας του Ήλιου, ορισμένα φωτόνια έχουν ακριβώς την απαιτούμενη ενέργεια ώστε να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια των αερίων που αποτελούν τα στρώματα αυτά. Ως εκ τούτου, από το φάσμα του φωτός που παρατηρούμε θα λείπουν τα φωτόνια με μήκη κύματος χαρακτηριστικά των στοιχείων στην ηλιακή ατμόσφαιρα. Αυτός ο τύπος γραμμικού



Ο George Gamow (1904-1968) είναι πιθανώς πιο γνωστός για το έργο του σχετικά με την κοσμολογική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης. Η φωτογραφία δείχνει τον Gamow να βγαίνει από ένα μπουκάλι YLEM —πρόκειται για τη ρέξη που χρησιμοποιούσε ο Gamow για να ονομάζει την αρχέγονη, κυριαρχούμενη από νετρόνια ύλη από την οποία πίστευε ότι δημιουργήθηκε το Σύμπαν. Σήμερα, οι φυσικοί δεν πιστεύουν πλέον ότι η πρωταρχική ύλη του Σύμπαντος αποτελούνταν κυρίως από νετρόνια, όμως η ιδέα του Gamow για ένα θερμό και πυκνό αρχικό Σύμπαν αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης κοσμολογίας.

φάσματος ονομάζεται *φάσμα απορρόφησης*, και τέτοια φάσματα μας επιτρέπουν να ταυτοποιήσουμε τα στοιχεία που υπάρχουν στον Ήλιο. Η Εικόνα 11.12 δείχνει παρόμοια φάσματα απορρόφησης διάφορων γαλαξιών. Το αξιοσημείωτο στα φάσματα αυτά είναι ότι οι χαρακτηριστικές γραμμές απορρόφησης των διάφορων στοιχείων εμφανίζονται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος —είναι μετατοπισμένες προς το ερυθρό. Πρόκειται για φαινόμενο όμοιο με την οικεία μετατόπιση Doppler που παρουσιάζει η συχνότητα του σφυρίγματος ενός τρένου όταν στην αρχή μάς πλησιάζει, για να μας προσπεράσει και έπειτα να απομακρυνθεί. Αυτές οι μετατοπίσεις προς το ερυθρό ερμηνεύονται ως ένδειξη ότι οι γαλαξίες απομακρύνονται τόσο από εμάς όσο και ο ένας από τον άλλο.

Το Σύμπαν, λοιπόν, μοιάζει να διαστέλλεται, και μάλιστα όσο πιο μακριά από εμάς βρίσκεται ένας γαλαξίας με τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα φαίνεται να κινείται. Τούτη η περίφημη παρατήρηση είναι γνωστή ως νόμος του Hubble:

$$v = H \cdot d$$

ταχύτητα απομάκρυνσης ίσον σταθερά του Hubble επί απόσταση από εμάς.

Φέρει το όνομα του διαπρεπούς αμερικανού αστρονόμου Edwin Hubble, ο οποίος και τον ανακάλυψε. Παρεμπιπτόντως, πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη παρατήρηση ουδόλως σημαίνει ότι βρισκόμαστε στο κέντρο του Σύμπαντος. Ας φανταστούμε ότι ψήνουμε ένα σταφιδόψωμο. Καθώς η ζύμη



Ο πίνακας αυτός του Robert Wimmer δείχνει τον Joseph Fraunhofer και το φασματοσκόπιό του. Ο Fraunhofer ανακάλυψε ότι το φάσμα του Ήλιου έχει πολλές σκοτεινές γραμμές. Πενήντα χρόνια αργότερα, ο Kirchhoff κατάφερε να ερμηνεύσει τις γραμμές αυτές ως γραμμικό φάσμα απορρόφησης χαρακτηριστικό των ατόμων της ατμόσφαιρας του Ήλιου. Πάνω στην ταφόπετρα του Fraunhofer υπάρχει η επιγραφή *Approximavit sidera* (Άγγιξε τα άστρα).



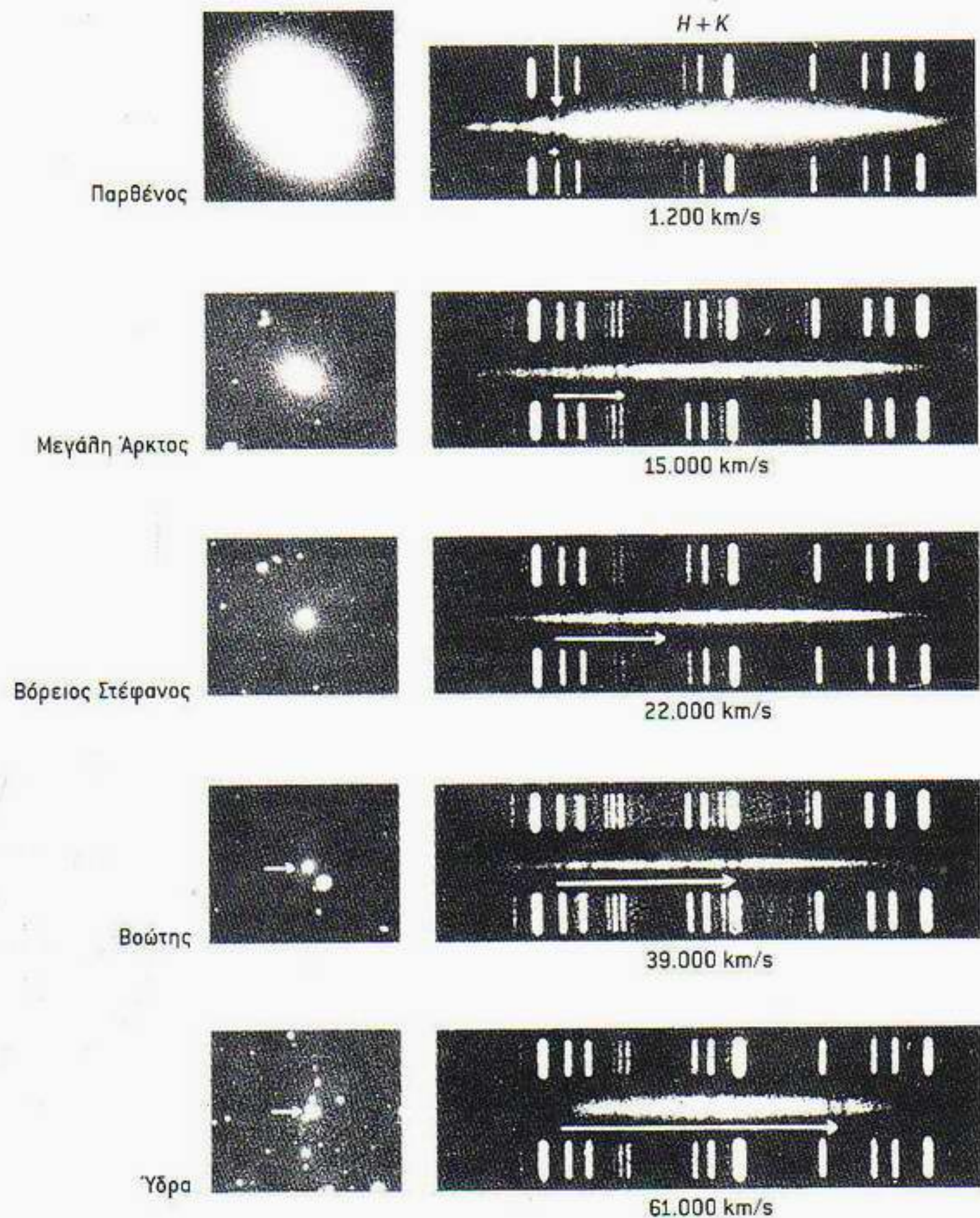
Εικόνα 11.11 Ο πυρήνας του σμήνους γαλαξιών στον αστερισμό Κόμη της Βερενίκης. Το πολύ φωτεινό αντικείμενο είναι ένα άστρο του δικού μας Γαλαξία, όλα όμως τα υπόλοιπα αντικείμενα της φωτογραφίας είναι γαλαξίες που απέχουν από εμάς περίπου 300 εκατομμύρια έτη φωτός.



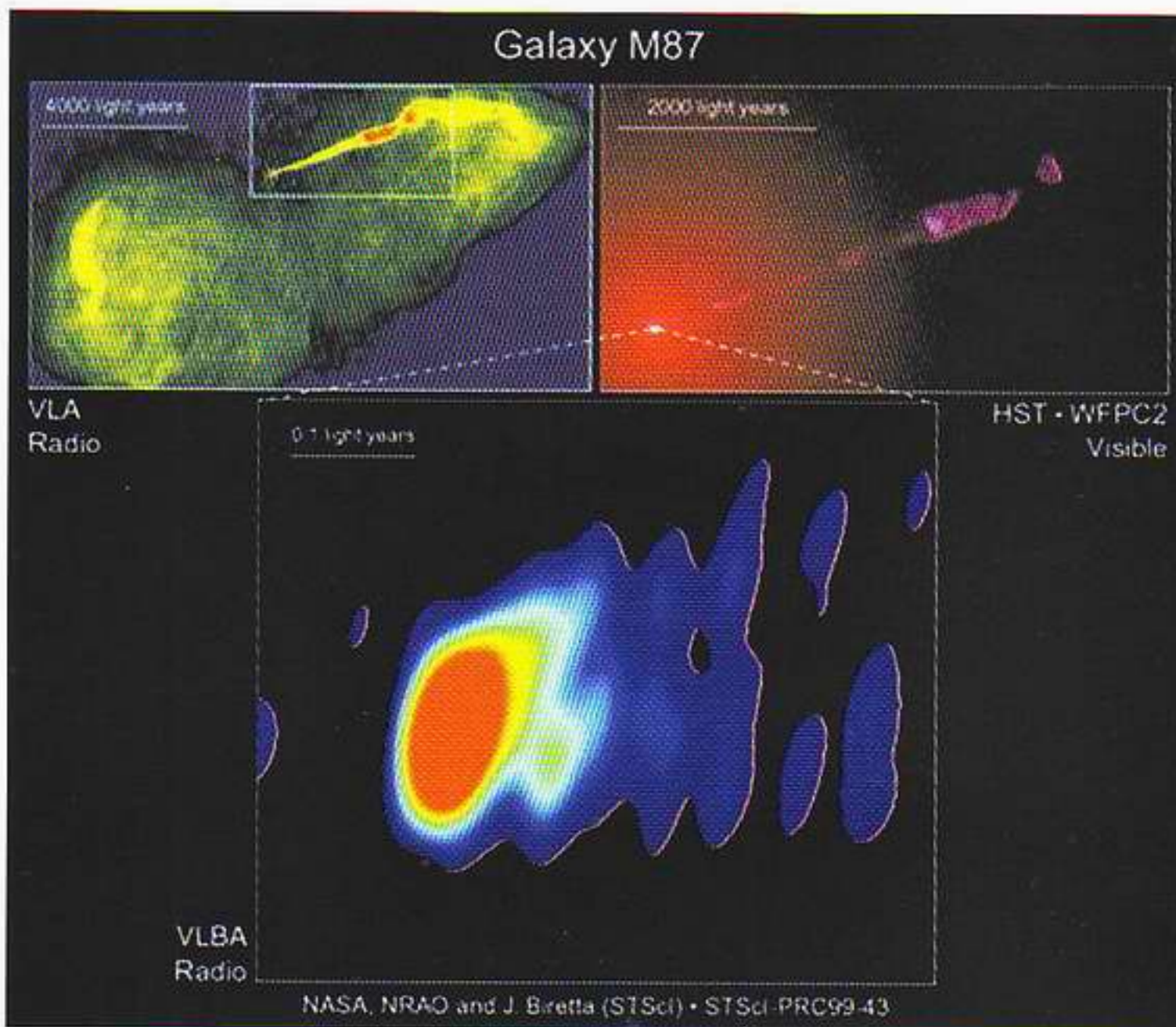
Στη φωτογραφία εικονίζεται ο Edwin Hubble (1889-1953) με τον γάτο του, τον Νικόλαο Copernicus. Ο Hubble γεννήθηκε στο Μισούρι και υπήρξε εξαιρετος αθλητής, τόσο μάλιστα ώστε να σταδιοδρομήσει ως πυγμάχος βαρέων βαρών. Αφού αρχικά ασχολήθηκε με τη νομική, ο Hubble ξαναγύρισε στην αστρονομία λέγοντας: «Δεύτερης ή τρίτης κατηγορίας, δεν με νοιάζει· σημασία για μένα έχει να είμαι αστρονόμος.»

φουσκώνει, κάθε σταφίδα «βλέπει» όλες τις άλλες να απομακρύνονται από αυτή, και όσο πιο πολύ απέχει μια σταφίδα με τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα απομακρύνεται.

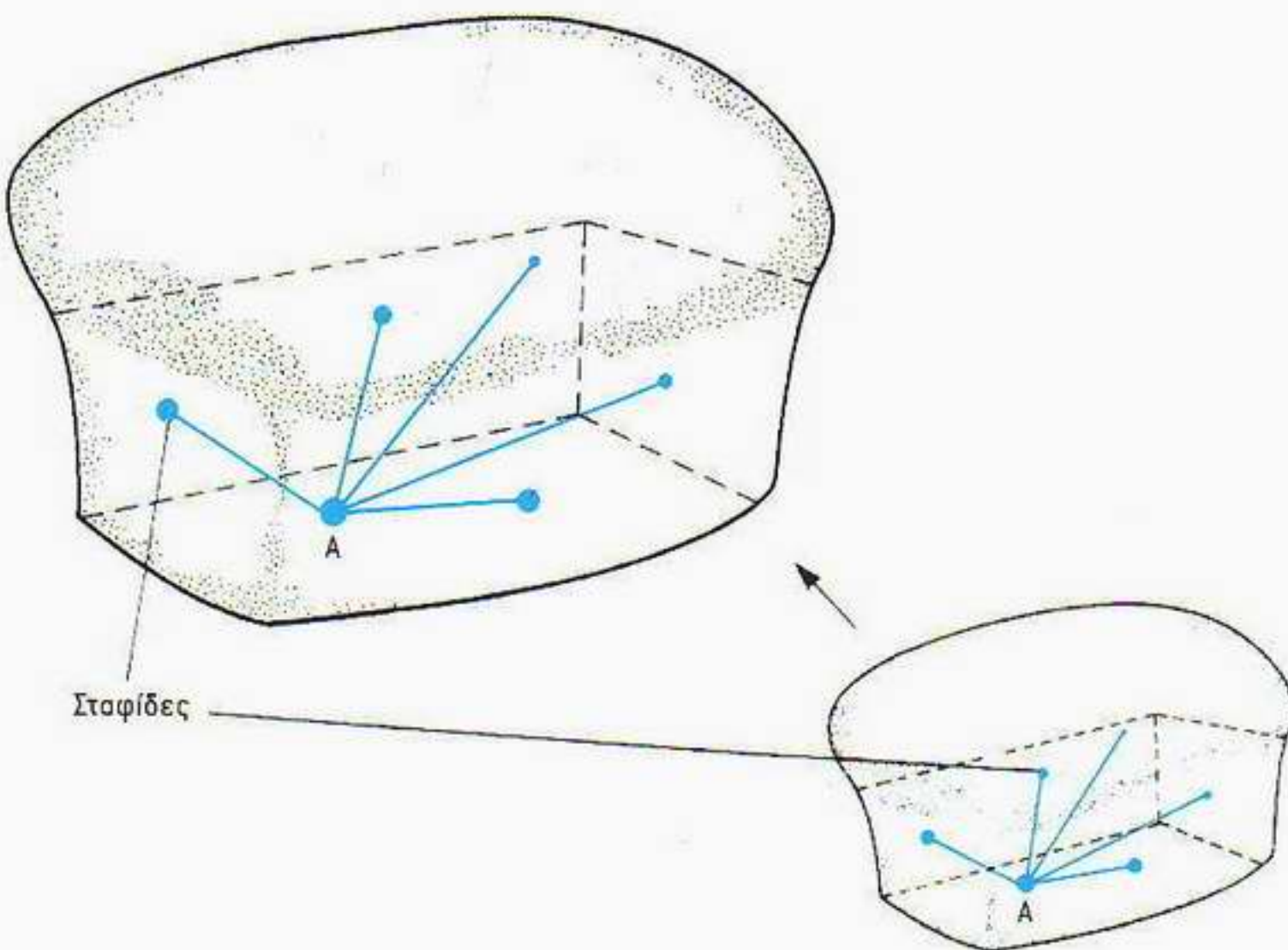
Τούτη η εικόνα —το Σύμπαν διαστέλλεται— μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε παλαιότερες εποχές όλοι οι γαλαξίες και η ύλη θα πρέπει να βρίσκονταν πολύ πιο κοντά. Και εδώ ακριβώς εντοπίζεται το κίνητρο για τη δημιουργία του κοσμολογικού μοντέλου της Μεγάλης Έκρηξης, το οποίο παρεκτείνει αυτή τη διαστολή προς τα πίσω στο χρόνο ως μια εποχή όπου όλη



Εικόνα 11.12 Πέντε γαλαξίες οι οποίες κατά σειρά —από πάνω προς τα κάτω— απέχουν όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις από εμάς, και τα αντίστοιχα γραμμικά φάσματα απορρόφησης τους. Συγκρίνοντάς τα με τα φάσματα αναφοράς που υπάρχουν πάνω και κάτω, διαπιστώνουμε ότι οι γραμμές απορρόφησης βρίσκονται τόσο δεξιότερα όσο πιο απομακρυσμένος είναι ο γαλαξίας. Επειδή δε αυτή η μετατόπιση Doppler πιστεύεται ότι οφείλεται στην ταχύτητα απομάκρυνσης του γαλαξία, προκύπτει ότι όσο πιο απομακρυσμένος είναι ένας γαλαξίας τόσο γρηγορότερα απομακρύνεται από εμάς. Και αυτός είναι ο νόμος του Hubble.



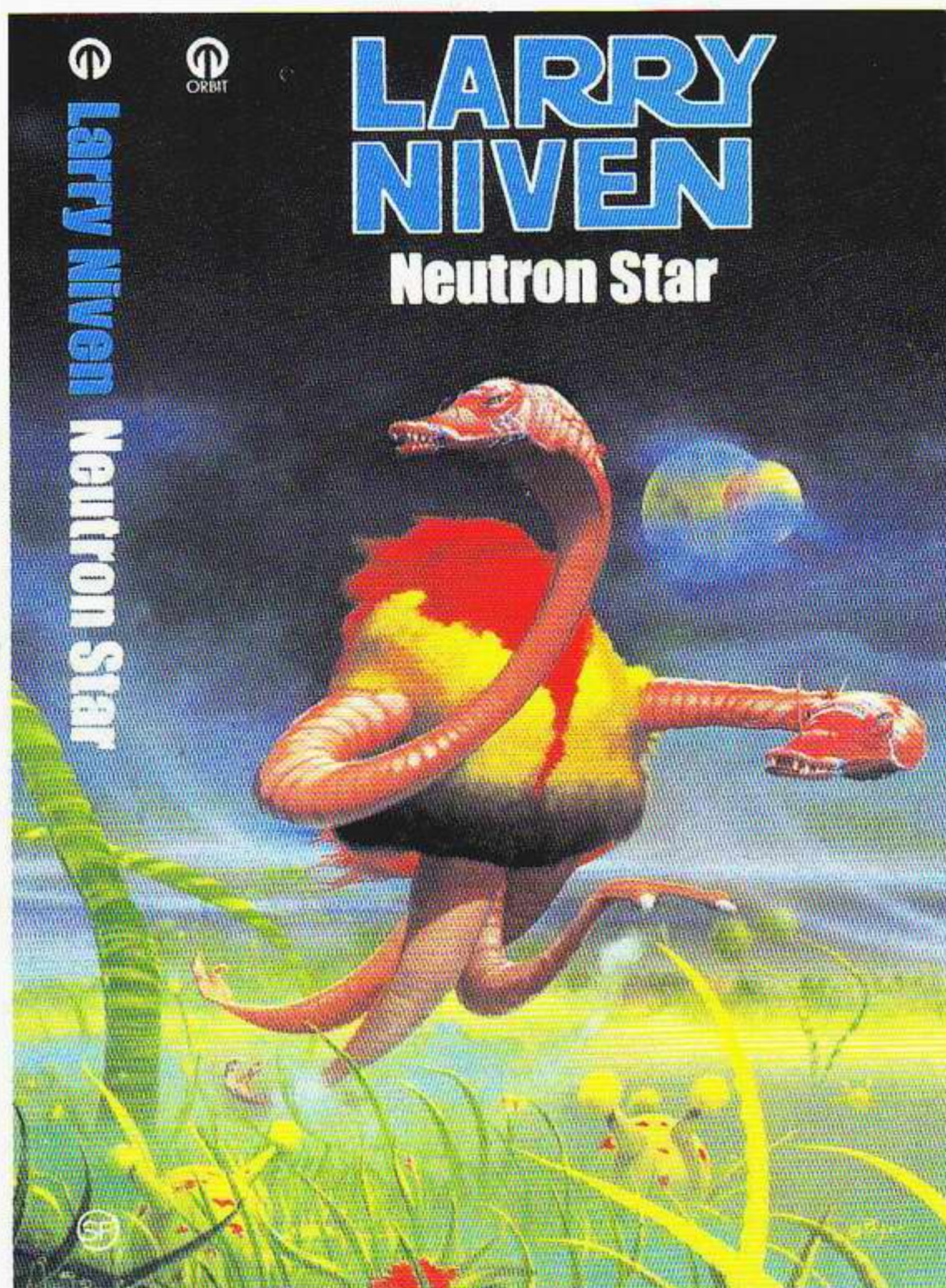
Εικόνα 11.13 Χρησιμοποιώντας ραδιοτηλεσκόπια στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ, συμπεριλαμβανομένης και της Διάταξης Πολύ Μεγάλης Βάσης (VLBA), η οποία αποτελείται από δέκα ραδιοτηλεσκόπια διασπαρμένα από το Νιου Χαμσάιρ ως τη Χαβάη, οι αστρονόμοι φωτογράφησαν το σχηματισμό ενός γιγαντιαίου κοσμικού πίδακα κοντά στη μαύρη τρύπα που πιστεύεται ότι υπάρχει στο κέντρο του γαλαξία M87.



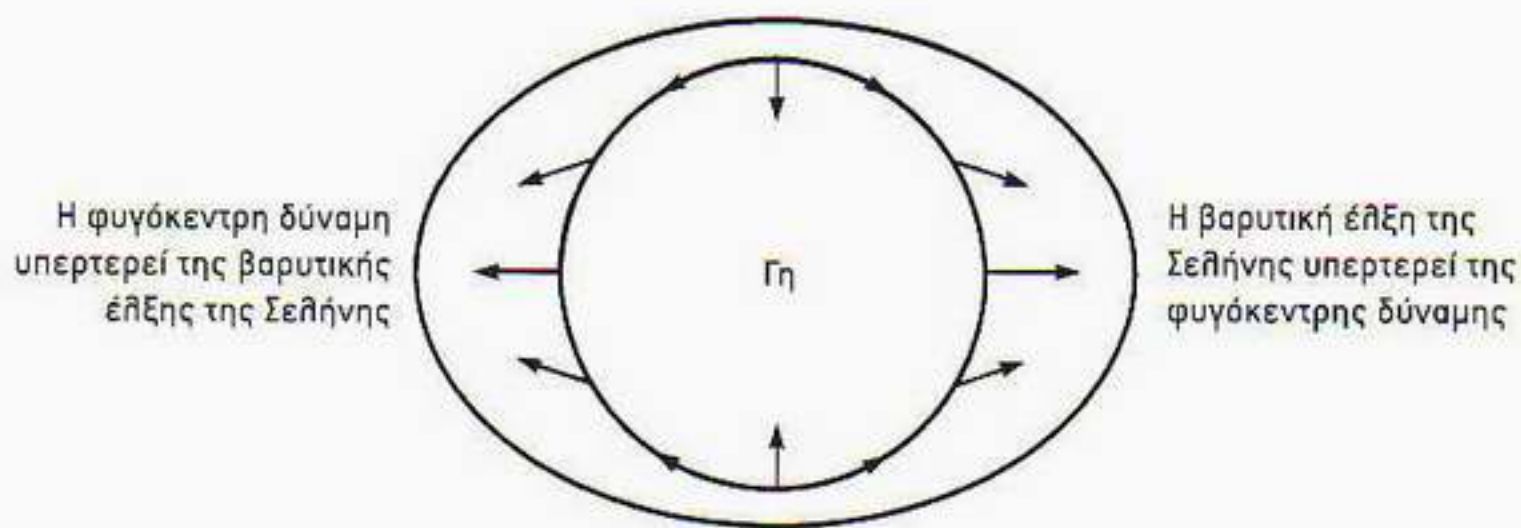
Εικόνα 11.14 Ένα μοντέλο σταφιδόψωμου για τη διαστολή του Σύμπαντος. Καθώς ψήνεται, ολόκληρο το σταφιδόψωμο φουσκώνει και διαστέλλεται, με αποτέλεσμα οι σταφίδες να απομακρύνονται η μία από την άλλη. Κάθε σταφίδα «βλέπει» όλες τις υπόλοιπες να απομακρύνονται.

η ύλη ήταν τρομακτικά συμπιεσμένη σε αούλληπτα μικρό χώρο. Οι τεράστιες πυκνότητες ενέργειας που υπήρχαν στα πρώτα στάδια της Μεγάλης Έκρηξης θα μπορούσαν να είχαν συμπιέσει την ύλη τόσο πολύ ώστε να δημιουργηθούν μαύρες τρύπες με πολύ μικρή μάζα. Τούτες οι μίνι μαύρες τρύπες ενδέχεται να έχουν μάζα που κυμαίνεται από μερικά γραμμάρια ως και τη μάζα ενός μικρού πλανήτη. Τα αντικείμενα αυτά ο Hawking τα ονόμασε «αρχέγονες» μαύρες τρύπες, και όλες οι παρατηρησιακές απόπειρες ανίχνευσής τους έχουν ως τώρα αποβεί άκαρπες.

Ο Hawking ανέπτυξε επίσης τη θεωρία της δημιουργίας σωματιδίων κοντά σε τέτοιες μαύρες τρύπες. Από την προηγούμενη συζήτησή μας για τα δυνάμει σωματίδια, γνωρίζουμε ότι το κενό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος



Εικόνα 11.15 Το εξωφύλλου του βιβλίου *Neutron Star* του Larry Niven. Η ιστορία πρωτοδημοσιεύθηκε το 1966 —ένα χρόνο πριν από την ανακάλυψη των πάλσαρ.



Σελήνη

Εικόνα 11.16 Απθουστευμένο διάγραμμα που εξηγεί παραστατικά τη δημιουργία των παθιρροϊών στη Γη.

κοχλάζουσας σούπας με φυσαλλίδες από δύναμει ζεύγη σωματιδίων-αντισωματιδίων. Ο Hawking, λοιπόν, υποστήριξε ότι το ένα μέλος ενός τέτοιου ζεύγους θα μπορούσε να συλληφθεί από μια μαύρη τρύπα και το άλλο να διαφύγει στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο. Πώς όμως θα συμβαίνει κάτι τέτοιο; Παρότι εκπλήσσεται κανείς όταν το ακούει, το κλειδί στο μηχανισμό της *ακτινοβολίας Hawking* είναι η κατανόηση των οικείων παλιρροϊκών δυνάμεων της βαρύτητας.

Υπάρχει ένα μικρό βιβλίο με τίτλο *Neutron Star*, γραμμένο από τον Larry Niven, συγγραφέα επιστημονικής φαντασίας αρκετά δημοφιλή στους σπουδαστές των Τεχνολογικών Ινστιτούτων της Μασαχουσέτης και της Καλιφόρνιας. Σε αδρές γραμμές, η υπόθεσή του έχει ως εξής. Οι κύριοι κατασκευαστές διαστημοπλοίων στο Γαλαξία — μια εξωγήινη φυλή γνωστή με το όνομα μαριονετίστες — ανησυχούν. Κάποια άγνωστη δύναμη κατάφερε να διαπεράσει έναν προηγμένο τύπο κελύφους το οποίο θεωρούνταν άτρωτο και να σκοτώσει τους επιβάτες ενός διαστημοπλοίου που πραγματοποιούσαν εξερευνητικό ταξίδι σε έναν αστέρα νετρονίων. Οι μαριονετίστες, όντας παθολογικά δειλοί, εκβιάζουν τον ήρωα, ονόματι Beowulf Schaeffer, να επαναλάβει το ίδιο ταξίδι. Περιττεύει να πούμε ότι ο ήρωας διασώζεται, και μάλιστα στην πορεία συνειδητοποιεί ότι οι μυστηριώδεις δυνάμεις δεν είναι άλλες από τις οικείες παλιρροϊκές δυνάμεις που οφείλονται στη βαρύτητα. Εφόσον οι μαριονετίστες αγνοούν το φαινόμενο της παλίρροιας, ο Schaeffer καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο μυστικός πλανήτης όπου κατοικούν δεν έχει δορυφόρο, εν συνεχεία δε εκβιάζει εκείνος πλέον τους μαριονετίστες και τους αναγκάζει να τον χρυσοπληρώσουν.

Αλλά τι είναι αυτές οι μυστηριώδεις παλιρροϊκές δυνάμεις, και πώς μπορούν να σκοτώνουν τους μαριονετίστες ή να προκαλούν την ακτινοβολία Hawking; Η Εικόνα 11.16 δείχνει μια εξιδανικευμένη εκδοχή του πλανήτη μας, ο οποίος περιβάλλεται από έναν συνεχή ωκεανό. Στην πλευρά της Γης απέναντι από τη Σελήνη, η βαρύτητα έλκει το νερό ισχυρότερα και υπερσχύει της φυγόκεντρης δύναμης λόγω περιστροφής του συστήματος Γης-Σελήνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επιφάνεια του νερού να εξογκώνεται προς την κατεύθυνση της Σελήνης. Στην άλλη πλευρά της Γης, την πιο απομακρυσμένη από τη Σελήνη, η βαρυτική έλξη που ασκείται στο νερό υστερεί της φυγόκεντρης δύναμης, οπότε η επιφάνεια του νερού πάλι εξογκώνεται αλλά τούτη τη φορά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στην ύπαρξη αυτών των δύο εξογκώσεων οφείλονται οι δύο πλημμυρίδες σε κάθε ημερήσια περιστροφή της Γης. Ός τώρα περιγράψαμε τα αποτελέσματα που έχει η βαρυτική έλξη της Σελήνης στη Γη. Ποια είναι άραγε τα αποτελέσματα της βαρυτικής έλξης

της Γης στη Σελήνη; Εφόσον η Σελήνη δεν περιστρέφεται σε σχέση με τη Γη, ένας βράχος στο πλησιέστερο προς τη Γη σημείο της Σελήνης και ένας άλλος βράχος στους αντίποδες του κινούνται σε δύο ομόκεντρες τροχιές με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Αν οι δύο βράχοι δεν αποτελούσαν μέρος της Σελήνης, θα κινούνταν σε διαφορετικές τροχιές —εφόσον θα ασκούσαν πάνω τους διαφορετικές βαρυτικές δυνάμεις. Έτσι, η παλιρροϊκή δύναμη που ασκεί η Γη στη Σελήνη τείνει να κατακερματίσει τη Σελήνη. Ομοίως, ένας αστροναύτης σε τροχιά γύρω από έναν αστέρα νετρονίων ή μια μαύρη τρύπα θα υφίσταται τεράστιες παλιρροϊκές δυνάμεις βαρυτικής φύσεως, οι οποίες θα τείνουν να τον διαμελίσουν. Ακριβώς οι ίδιες δυνάμεις προκαλούν και το διαχωρισμό ενός ζεύγους σωματιδίου-αντισωματιδίου, εφόσον το εν λόγω ζεύγος δημιουργείται στο τεράστιο βαρυτικό πεδίο μιας αρχέγονης μαύρης τρύπας. Ως εκ τούτου, ενδέχεται το μien ένα μέλος του ζεύγους να πέφτει στη μαύρη τρύπα, το δε άλλο να διαφεύγει στον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι, η μαύρη τρύπα θα φαίνεται ότι εκπέμπει σωματίδια.

Αυτή η, όπως λέγεται, ακτινοβολία Hawking από τις μικρές μαύρες τρύπες αντιστοιχεί στη μάζα-ενέργεια που ρέει από τη μαύρη τρύπα προς τον περιβάλλοντα χώρο. Επομένως, η μαύρη τρύπα «εξαερώνεται», και τα τελικά στάδια της διαδικασίας αυτής θα τα παρατηρούσαμε ως μια τρομακτική έκρηξη ενέργειας. Οι περισσότερες αρχέγονες μαύρες τρύπες που δημιουργήθηκαν κατά τη Μεγάλη Έκρηξη πρέπει να έχουν εκραγεί πολύ πριν από τη σημερινή εποχή. Ωστόσο, αν δημιουργήθηκαν αρχέγονες μαύρες τρύπες με όλες τις δυνατές τιμές μαζών, ορισμένες από αυτές θα πρέπει να εκρήγνυνται στις μέρες μας. Ός τώρα, ωστόσο, δεν έχουμε παρατηρήσει καμία τέτοια έκρηξη.

12 Ασθενή φωτόνια και ισχυρά γηιοόνια

Η κατάσταση της φυσικής στην οποία βρισκόμαστε σήμερα διαφέρει από οποιαδήποτε άλλη στην ιστορία (βέβαια, πάντοτε οι καταστάσεις είναι διαφορετικές!). Έχουμε μια θεωρία, [...] γιατί, λοιπόν, δεν μπορούμε να την ελέγξουμε αμέσως για να δούμε αν είναι σωστή ή λάθος; Διότι πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε τις προβλέψεις της θεωρίας αυτής για να την ελέγξουμε. Για την ώρα, η δυσκολία έγκειται σε αυτό το πρώτο βήμα.

Richard Feynman

Το πείραμα της διπλής σχισμής και πάθι

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις πρόσφατες προόδους που έχουν συντελεστεί στην κατανόηση των θεμελιωδών δυνάμεων της φύσης. Όπως είπαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, ο συνδυασμός του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού, της κβαντικής μηχανικής και της σχετικότητας εξασφαλίζει μια ιδιαίτερα επιτυχημένη περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Η θεωρία που προέκυψε από το συνδυασμό αυτό ονομάζεται *κβαντική ηλεκτροδυναμική* ή, χάριν συντομίας, QED. Πάνω από πενήντα χρόνια, οι φυσικοί αναζητούσαν ομοίως επιτυχημένες θεωρίες για να περιγράψουν όχι μόνο τις ασθενείς δυνάμεις που ευθύνονται για τη φυσική ραδιενέργεια, αλλά επίσης και τις ισχυρές δυνάμεις που εξασφαλίζουν τη συνοχή του πυρήνα. Πραγματική πρόοδος, ωστόσο, δεν σημειώθηκε παρά μόνο στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Και αυτή η πρόοδος είναι και το θέμα που θα πραγματευθούμε στο παρόν κεφάλαιο.

Οι σωματιδιακοί φυσικοί διαθέτουν σήμερα μια ενοποιημένη θεωρία που συνδυάζει τόσο τις ηλεκτρομαγνητικές όσο και τις ασθενείς δυνάμεις. Οι μείζονες προβλέψεις της εν λόγω θεωρίας επαληθεύτηκαν θεαματικά με τα πειράματα που έγιναν στο κέντρο φυσικής υψηλών ενεργειών του CERN στη Γενεύη. Στα επόμενα θα περιγράψουμε τη θεωρία και τα πειράματα αυτά με τις απαραίτητες λεπτομέρειες. Οι σωματιδιακοί φυσικοί πιστεύουν επίσης ότι, επιτέλους, ανακαλύψαμε την κατάλληλη θεωρία και για τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις. Έχουμε πια μια θεωρία για τα πρωτόνια και τα νετρόνια η οποία στηρίζεται στα συστατικά τους στοιχεία, τα κουάρκ (βλ. Κεφάλαιο 3). Η εν λόγω θεωρία ονομάζεται *κβαντική χρωμοδυναμική* ή, χάριν συντομίας, QCD.



Ο James Clerk Maxwell (1831-1879) προσέφερε πρωτοποριακές συμβολές σε πολλούς τομείς της φυσικής και υπήρξε ο πρώτος που διατύπωσε την άποψη ότι οι δακτύλιοι του Κρόνου αποτελούνταν από μυριάδες μικροσκοπικά σωματίδια. Το σπουδαιότερο έργο του ήταν ότι προσέδωσε ακριβή μαθηματική μορφή στις ιδέες του Faraday περί πεδίων και ενοποίησε τον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό σε μία ενιαία θεωρία, τον ηλεκτρομαγνητισμό. Οι εξισώσεις του Maxwell για το ηλεκτρομαγνητικά πεδία πρωτοδημοσιεύθηκαν το 1865 και, παρά την ανάπτυξη τόσο της κβαντικής μηχανικής όσο και της σχετικότητας, παραμένουν αναλλοίωτες μέχρι σήμερα. Ο Maxwell πέθανε από καρκίνο σχετικά νέος, χωρίς να προλάβει να δει τον Hertz να επαληθεύει την πρόβλεψή του σχετικά με την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Όπως μας προΐδεάζει ο Feynman στο απόσπασμα που παραθέσαμε στην αρχή του κεφαλαίου, οι υπολογισμοί που απαιτούνται για να διευκρινιστούν οι προβλέψεις της κβαντικής χρωμοδυναμικής παρουσιάζουν ιδιαίζουσες δυσκολίες. Το βασικό πρόβλημα έγκειται στο ότι η κβαντική χρωμοδυναμική περιγράφει τις ισχυρές δυνάμεις με βάση τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα κουάρκ, όμως ελεύθερα κουάρκ δεν έχουμε δει ποτέ, ούτε και περιμένουν οι φυσικοί να τα δουν στο μέλλον! Αντιθέτως, οι φυσικοί πιστεύουν ότι οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα κουάρκ είναι τεχνηέντως ρυθμισμένες έτσι ώστε να μην έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε παρά μόνο καταστάσεις τριών κουάρκ —όπως το πρωτόνιο και το νετρόνιο— ή καταστάσεις ενός κουάρκ και ενός αντικουάρκ —όπως τα μεσόνια που θα συναντήσουμε στην επόμενη ενότητα. Αυτή η ιδιότητα, η μη παρατηρησιμότητα των ελεύθερων κουάρκ, ονομάζεται *εγκλωβισμός* των κουάρκ. Είναι εντυπωσιακό ότι, παρά αυτή τη φαινομενικά ανυπέρβλητη δυσκολία, οι φυσικοί κατορθώνουν να κάνουν προβλέψεις οι οποίες επιδέχονται πειραματική επικύρωση και έχουν ήδη συγκροτήσει ένα σώμα λεπτομερειακών τεκμηρίων που συνηγορούν υπέρ της ύπαρξης των κουάρκ και της ισχύος της κβαντικής χρωμοδυναμικής. Η ενοποιημένη θεωρία της ασθενούς και ηλεκτρομαγνητικής δύναμης μαζί με την κβαντική χρωμοδυναμική για την περιγραφή της ισχυρής δύναμης συγκροτούν το λεγόμενο *Καθιερωμένο Μοντέλο*. Όπως θα δούμε, το Καθιερωμένο Μοντέλο έχει αποδειχθεί εξαιρετικά επιτυχές και έχει επιβιώσει των επί εικοσαετία διεξαγόμενων λεπτομερών και επισταμένων πειραματικών ελέγχων. Στις μέρες μας, επιτέλους, εμφανίστηκαν κάποιες ενδείξεις ότι επιβάλλεται να προχωρήσουμε πέραν του Καθιερωμένου Μοντέλου. Ένας τρόπος πρόοδου είναι να προσπαθήσουμε να συνδυάσουμε και τις τρεις δυνάμεις, την ασθενή, την ηλεκτρομαγνητική και την ισχυρή, σε μια Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία (GUT). Αν και δεν υφίσταται καμία άμεση πειραματική απόδειξη που να υποστηρίζει μια τέτοια ενοποίηση, οι θεωρητικοί φυσικοί εξακολουθούν να εργάζονται σε αυτό το πλαίσιο, ενώ ήδη κοιτούν με ζήλο και πέρα από τις Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες και διατυπώνουν νέες ιδέες όπως η *υπερσυμμετρία* και οι *χορδές*, ευελπιστώντας πως θα ανακαλύψουν μια θεωρία που θα εμπεριέχει τη βαρύτητα με τρόπο συνεπή προς την κβαντική μηχανική. Δεδομένου ότι η όποια λεπτομερής διερεύνηση αυτών των θεμάτων υπερβαίνει τους ορίζοντες του παρόντος βιβλίου, εδώ απλώς θα ψηλαφήσουμε την επιφάνεια αυτών των εξελίξεων. Ας επιστρέψουμε, λοιπόν, στο πείραμα της διπλής σχισμής, με το οποίο αρχίσαμε τη συζήτηση για την κβαντική μηχανική.

Τι σχέση έχει όμως το πείραμα της διπλής σχισμής με όλα αυτά; Ε, λοιπόν, φαίνεται πως η φύση είναι απίστευτα καλή μαζί μας. Και τούτο διότι όλες οι κβαντικές θεωρίες του Καθιερωμένου Μοντέλου στηρίζονται στην ίδια βασική αρχή, για την οποία εύκολα μπορούμε να σχηματίσουμε μια ιδέα αρκεί ξανακοιτάξουμε το πείραμα της διπλής σχισμής με τα ηλεκτρόνια που συζητήσαμε στα Κεφάλαια 1 και 2. Μολονότι αυτή η βασική αρχή αναφέρεται συνήθως με το μάλλον εκφοβιστικό όνομα «αναλλοίωτο βαθμίδας», εμείς θα προσπαθήσουμε να σας πείσουμε ότι στην πραγματικότητα είναι πολύ απλή και γοητευτική. Η Εικόνα 12.1 δείχνει το πείραμα της διπλής σχισμής με τα ηλεκτρόνια για μία ακόμη φορά. Όπως εξηγήσαμε στο Κεφάλαιο 1, η πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων στο πέτασμα προβλέπεται αν δεχτούμε ότι τα κύματα των ηλεκτρονίων από κάθε σχισμή επικαλύπτονται και συμβάλλουν. Το κατά πόσον σε κάποιο δεδομένο σημείο του πετάσματος έχουμε πολλά η-

λεκτρόνια ή κανένα εξαρτάται από το αν τα κύματα φτάνουν εκεί και τα δύο με τα όρη τους (σε συμφωνία φάσης) ή με το όρος του το ένα και με την κοιλάδα του το άλλο (σε αντίθεση φάσης). Ας υποθέσουμε τώρα ότι παρεμβάλλουμε ανάμεσα στις σχισμές και το πέτασμα ένα λεπτό φύλλο κάποιου υλικού, όπως δείχνει η εικόνα. Με ανάλογο τρόπο, όπως στο πείραμα της συμβολής με τα νετρόνια (βλ. Κεφάλαιο 3), το υλικό του φύλλου θα αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια και θα αλλάζει τη φάση των κυμάτων των ηλεκτρονίων που το διαπερνούν. Επομένως, οι φάσεις των κυμάτων καθώς αυτά θα φτάνουν στο πέτασμα θα είναι αλλαγμένες —όπου υπήρχε αρχικά όρος τώρα μπορεί να υπάρχει κοιλάδα κ.ο.κ. Το σημαντικό σημείο εν προκειμένω έγκειται στο ότι, αν οι φάσεις των κυμάτων από τις δύο σχισμές μεταβάλλονται αμφοτέρως κατά το ίδιο ποσό, η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής δεν θα αλλάξει. Και εφόσον η εικόνα συμβολής δεν αλλάζει όταν παρεμβληθεί το λεπτό φύλλο υλικού, οι φυσικοί λένε ότι αυτή αποτελεί ένα «αναλλοίωτο» του πειράματος της διπλής σχισμής. Ακόμη ακριβέστερα, αφού το λεπτό φύλλο υλικού δεν προκαλεί στα ηλεκτρόνια κανένα άξιο λόγου φαινόμενο εκτός από μετατόπιση στη φάση των κυμάτων τους, η ιδιότητα αυτή ονομάζεται *αναλλοίωτο φάσης*.

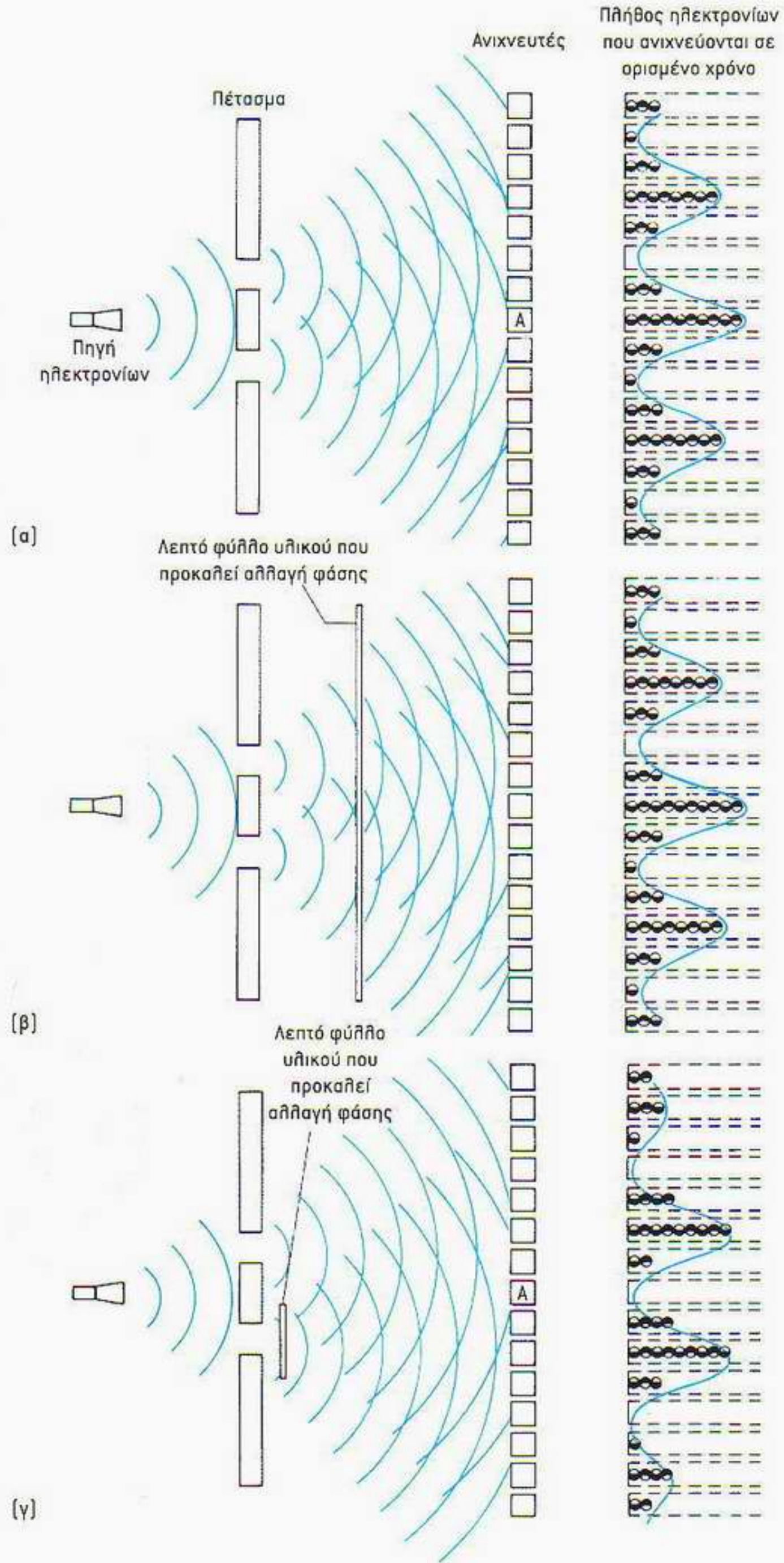
Υπάρχει και ένα άλλο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ιδιότητας αναλλοιώτου που πρέπει να τονιστεί. Ο τύπος αυτός του αναλλοιώτου φάσης απαιτεί το λεπτό φύλλο υλικού που παρεμβάλλουμε και αλλάζει τη φάση να καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του πετάσματος. Αν, όμως, τοποθετήσουμε ένα μικρό κομμάτι του φύλλου πίσω από τη μία μόνο σχισμή, τότε η εικόνα συμβολής αλλάζει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τώρα το υλικό επηρεάζει τη φάση των κυμάτων που προέρχονται μόνο από τη μία σχισμή. Ως εκ τούτου, στα σημεία του πετάσματος όπου πριν είχαμε δύο όρη, τώρα ενδέχεται να έχουμε ένα όρος και μια κοιλάδα. Όλα αυτά μπορούμε να τα συνοψίσουμε ως εξής: Αν επηρεάζουμε τη φάση των ηλεκτρονιακών κυμάτων πίσω από τη μία μόνο σχισμή —επιφέροντας μια *τοπική* αλλαγή φάσης—, η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής μεταβάλλεται λόγω της παρεμβολής του υλικού, και έτσι δεν υφίσταται αναλλοίωτο. Μόνο αν αλλάξουμε τη φάση παντού κατά το ίδιο ποσό —επιφέροντας μια *εκτεταμένη* αλλαγή φάσης—, μόνο τότε η εικόνα συμβολής παραμένει αμετάβλητη και έχουμε αναλλοίωτο. Άρα, διαπιστώνουμε ότι το πείραμα συμβολής της διπλής σχισμής με τα ηλεκτρόνια παρουσιάζει μόνο *εκτεταμένο* αναλλοίωτο φάσης. Το ότι η εικόνα συμβολής μεταβάλλεται αν πραγματοποιήσουμε μια τοπική αλλαγή φάσης σημαίνει ότι το πείραμα της διπλής σχισμής *δεν* διαθέτει *τοπικό* αναλλοίωτο φάσης.

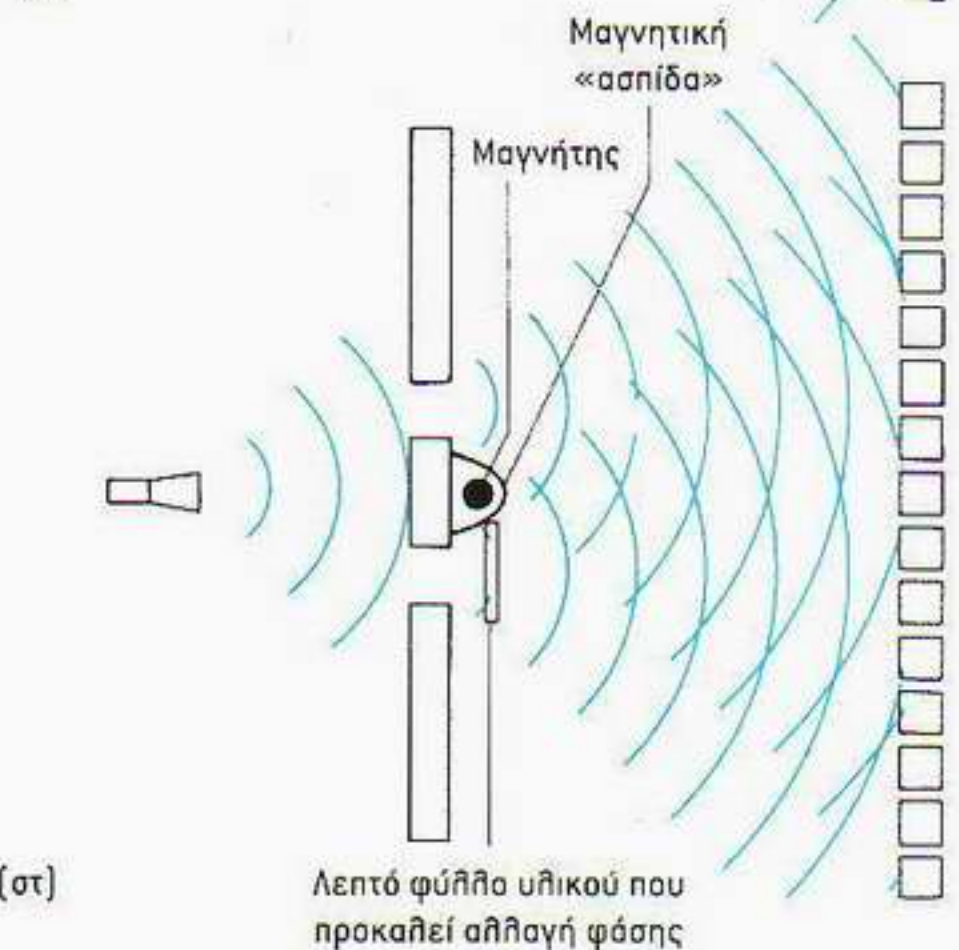
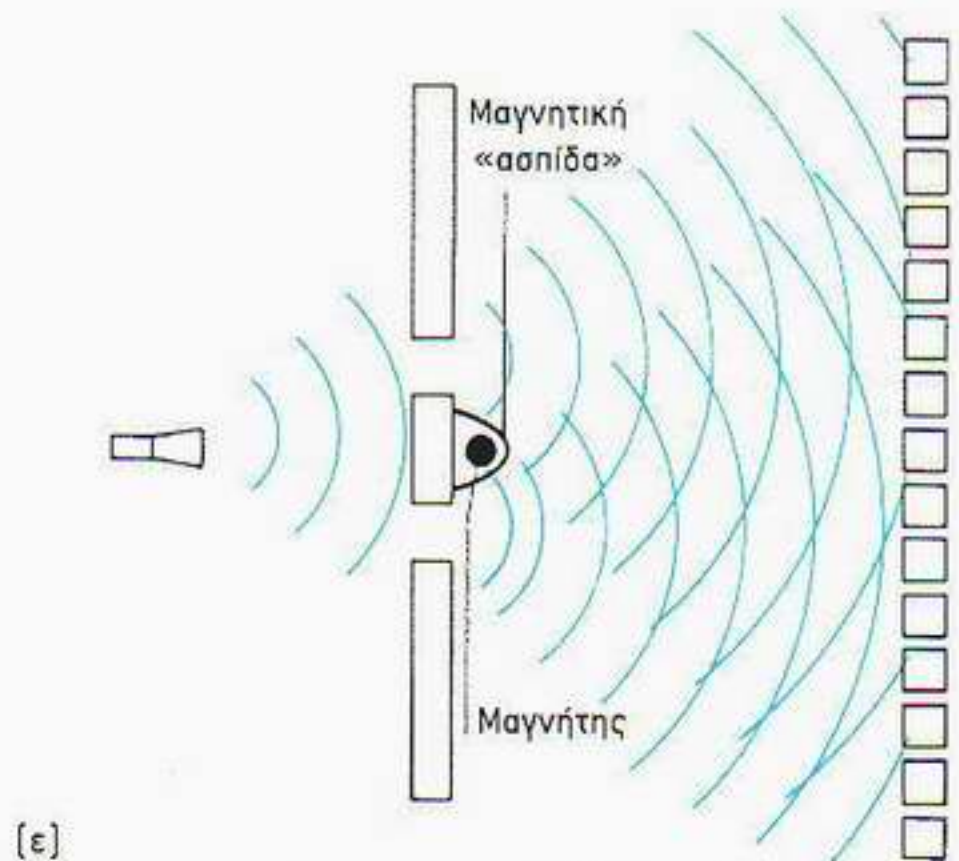
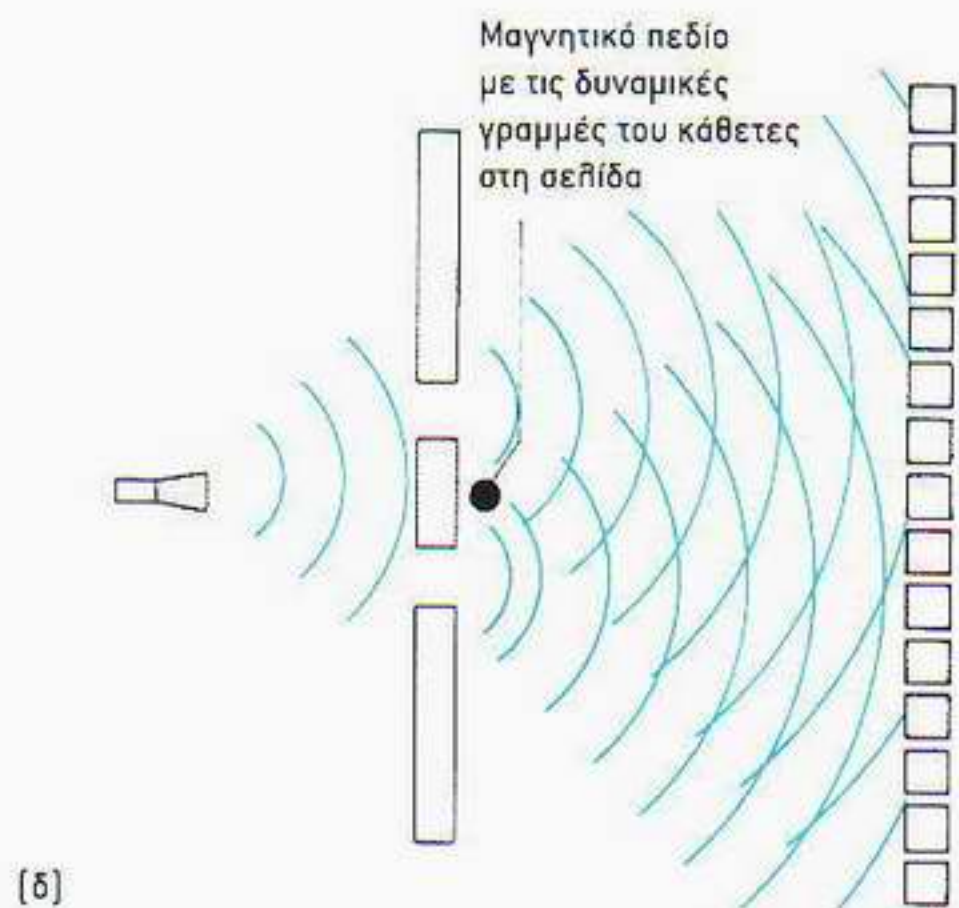
Προσπαθώντας να εξηγήσει με πιο παραστατικό τρόπο τη διαφορά ανάμεσα στο «εκτεταμένο» και το «τοπικό», ο Feynman έδωσε κάποτε το εξής παράδειγμα: Ας υποθέσουμε ότι μας ενδιαφέρει να ξέρουμε πόσες γάτες υπάρχουν συνολικά στον κόσμο σε κάθε δεδομένη στιγμή. Αν εξετάσουμε τον πληθυσμό των γατών επί χρονικό διάστημα αρκούντως μικρό ώστε κατά τη διάρκειά του να μη γεννηθεί ούτε να πεθάνει καμία γάτα, τότε ο συνολικός αριθμός των γατών παραμένει σταθερός. Μπορούμε να πούμε ότι ο αριθμός των γατών διατηρείται. Εκ πείρας, όμως, γνωρίζουμε ότι ο αριθμός των γατών διατηρείται και με τοπικό τρόπο. Για παράδειγμα, εάν πέντε γάτες εξαφανίζονταν στην Πασαντένα και επανεμφανίζονταν την ίδια στιγμή στο Σαουθάμπτον, αυτό θα αποτελούσε παράδειγμα εκτεταμένης διατήρησης των γατών. Ξέρουμε όμως ότι οι γάτες δεν συμπεριφέρονται με αυτό τον τρόπο! Ο αριθμός των γατών διατηρείται τοπικά, σε κάθε μικρή περιοχή, και αυτή ακριβώς

Εικόνα 12.1 Το πείραμα της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια:

(α) Υπόμνηση της χαρακτηριστικής εικόνας συμβολής που παρατηρείται στο συνηθισμένο πείραμα διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια φτάνουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο στον ανιχνευτή και αναπαριστώνται ως μαυρόσχημοι κύκλοι για να μας θυμίζουν ότι αδυνατούμε να πούμε από ποια σχισμή έχουν περάσει. Επισημαίνουμε ότι η εικόνα συμβολής παρουσιάζει μέγιστο στον κεντρικό ανιχνευτή, ο οποίος σημειώνεται με το γράμμα Α. (β) Η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής παραμένει αναλλοίωτη αν μεταξύ των δύο σχισμών και των ανιχνευτών τοποθετηθεί ένα λεπτό φύλλο υλικού. Τα ηλεκτρονικά κύματα που έρχονται και από τις δύο σχισμές υφίστανται την ίδια αλληλαγή φάσης. Έτσι, όταν φτάνουν στους ανιχνευτές, τα δύο κύματα εξακολουθούν να συμβάλλουν με τις ίδιες διαφορές φάσης σε όλα τα σημεία, δίνοντας το ίδιο μέγιστο και ελάχιστο πλάτους όπως και πριν, όταν δεν υπήρχε το φύλλο.

Στην προκειμένη περίπτωση πείραμα ότι υπάρχει ένα «εκτεταμένο» αναλλοίωτο φάσης, διότι η χαρακτηριστική εικόνα δεν αλλιάζει — παραμένει αναλλοίωτη — εφόσον το φύλλο καλύπτει ολόκληρη την περιοχή πίσω από τις σχισμές. (γ) Αν τοποθετήσουμε ένα λεπτό φύλλο υλικού πίσω από τη μία μόνο σχισμή, η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής αλλιάζει. Αντί ο ανιχνευτής στο Α να καταγράφει τον μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων, τώρα δείχνει ένα ελάχιστο πλάτους. Η εικόνα συμβολής αλλιάζει επειδή το φύλλο του υλικού μεταβάλλει τη φάση του ενός μόνο από τα δύο κύματα. Αυτό δείχνει ότι μια «τοπική» μεταβολή της φάσης δεν αφήνει «αναλλοίωτη» την εικόνα συμβολής. (δ) Η παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου προκαλεί επίσης αλληλαγή της χαρακτηριστικής εικόνας





συμβολής. Αν εξαιρέσουμε το ότι αδυνατούμε και πάλι να πούμε από ποια σχισμή πέρασε το ηλεκτρόνιο, τα πράγματα έχουν λίγο-πολύ όπως θα τα περιμέναμε, καθότι στην κλασική φυσική τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται από τα μαγνητικά πεδία. (ε) Το περίφημο πείραμα Bohm-Aharonov έδειξε ότι η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής υφίσταται μετατόπιση ακόμη κι όταν το μαγνητικό πεδίο είναι «σποκλεισμένο» από το χώρο μέσω του οποίου διέρχονται τα ηλεκτρόνια! Ο σποκλεισμός του μαγνητικού πεδίου στην πράξη επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός μακριού πηνίου με διάμετρο μικρότερη από μία ανθρώπινη τρίχα. (στ) Η μετατόπιση φάσης που προκαλεί η εισαγωγή ενός φύλλου υλικού πίσω από τη μία σχισμή μπορεί να εξουδετερωθεί με την κατάλληλη ρύθμιση του μαγνητικού πεδίου, κάτι από το οποίο προκύπτει ότι το τοπικό αναλλοίωτο μπορεί να επιτευχθεί εφόσον το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια με τον κατάλληλο ακριβώς τρόπο. Σε αυτό ακριβώς συνίσταται η βασική αρχή πάνω στην οποία στηρίζονται όλες οι θεωρίες «βοθμίδας».

η τοπική διατήρηση οδηγεί και στην εκτεταμένη διατήρηση του συνολικού αριθμού των γατών.

Η ιστορία με τις γάτες μάς αποκαλύπτει κάτι σημαντικό. Οι φυσικοί πάντα καταλαμβάνονται από ενθουσιασμό όταν βρίσκουν κάποιου είδους αρχή αναλλοιώτου, και αμέσως προσπαθούν να δουν αν μπορούν να βρουν μία ακόμα καλύτερη. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πειράματος της διπλής σχισμής με τα ηλεκτρόνια βρήκαμε ένα εκτεταμένο αναλλοίωτο φάσης. Πώς μπορούμε να βρούμε κάτι καλύτερο; Το ότι είμαστε υποχρεωμένοι να αλλάξουμε τη φάση των ηλεκτρονιακών κυμάτων παντού —την ίδια στιγμή και κατά το ίδιο ποσό— για να έχουμε αναλλοίωτο, φαίνεται σαν ένας ενοχλητικός και αφύσικος περιορισμός. Δεν θα ήταν φυσικότερο να είχαμε κάποια θεωρία που να μας επιτρέπει να επιφέρουμε μια τοπική αλλαγή φάσης σε μία ορισμένη μικρή περιοχή χωρίς να μας ενδιαφέρει τι θα συμβεί οπουδήποτε αλλού; Με άλλα λόγια, υπάρχει άραγε κάποιος τρόπος να ρυθμίσουμε τα πράγματα έτσι ώστε να αποκτήσουμε τη δυνατότητα να κάνουμε τοπικές αλλαγές φάσης και να συνεχίσουμε να έχουμε αναλλοίωτο; Υπάρχει και η θεωρία που προκύπτει είναι η κβαντική ηλεκτροδυναμική!

Για να αντιληφθεί ο αναγνώστης πώς γίνεται η σύνδεση με την κβαντική ηλεκτροδυναμική, πρέπει πρώτα να εξηγήσουμε τι συμβαίνει αν εκτελέσουμε το πείραμα της διπλής σχισμής παρουσία μαγνητικού πεδίου. Στην Εικόνα 12.1(δ) φαίνεται η πειραματική διάταξη με ένα μαγνήτη τοποθετημένο πίσω από τις σχισμές. Εφόσον ακόμα και στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό τα μαγνητικά πεδία προκαλούν καμπύλωση στην τροχιά των φορτισμένων σωματιδίων, δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει το γεγονός ότι η χαρακτηριστική εικόνα συμβολής αλλάζει λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, με βάση την κβαντομηχανική κυματική εικόνα των ηλεκτρονίων, ο λόγος στον οποίο οφείλεται η συγκεκριμένη αλλαγή δεν είναι τόσο προφανής. Εφόσον η εικόνα συμβολής πράγματι αλλάζει, η επίδραση του μαγνητικού πεδίου πρέπει να συνίσταται στην αλλαγή της φάσης των ηλεκτρονιακών κυμάτων. Όλα τούτα βρίσκονται κατά το μάλλον ή ήττον σε συμφωνία με τις κλασικές μας προσδοκίες, αλλά η κβαντική μηχανική μάς επιφυλάσσει μια έκπληξη: Ακόμη κι αν επιτύχουμε με κάποια θωράκιση να εμποδίσουμε το μαγνητικό πεδίο να διεισδύσει στην περιοχή όπου διαδίδονται και επικαλύπτονται τα κύματα των ηλεκτρονίων, η χαρακτηριστική εικόνα και πάλι αλλάζει! Το αξιοσημείωτο αυτό φαινόμενο φέρει το όνομα του Bohm και του Aharonov, των δύο φυσικών που το προέβλεψαν. Η πρόβλεψή τους ξεσήκωσε αρκετές διαμάχες ανάμεσα στους φυσικούς, έως ότου το φαινόμενο επιβεβαιώθηκε πειραματικά στις αρχές της δεκαετίας του 1960.

Η επίδραση των μαγνητικών πεδίων στη φάση των ηλεκτρονιακών κυμάτων την οποία μόλις περιγράψαμε δείχνει ότι υπάρχει η δυνατότητα να πετύχουμε ένα τοπικό αναλλοίωτο φάσης. Στο σημείο αυτό οφείλουμε να παραδεχτούμε ότι οι λεπτομέρειες για το πώς ακριβώς γίνεται κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά περίπλοκες για να εξηγηθούν εδώ. Έτσι, θα επιχειρήσουμε απλώς να δώσουμε στον αναγνώστη μια ιδέα σχετικά με το πώς μπορεί να επιτευχθεί αυτό το τοπικό αναλλοίωτο φάσης. Ας υποθέσουμε ότι εισάγουμε ένα λεπτό φύλλο υλικού πίσω από τη μία μόνο σχισμή. Όπως έχουμε πει, η εικόνα συμβολής θα αλλάξει. Τι θα συμβεί, όμως, αν την ίδια στιγμή που τοποθετείται το φύλλο πίσω από τη μία σχισμή βάλουμε και ένα μαγνήτη πίσω από τις σχισμές; Φαίνεται ασφαλώς πιθανό το ενδεχόμενο να μπορούμε να ρυθμίσου-



Ο Herman Weyl (1885-1955) υπήρξε διακεκριμένος μαθηματικός, ο οποίος είχε και σπουδαία συνεισφορά στη φυσική. Το 1933, στο απόγειο της σταδιοδρομίας του, παραιτήθηκε από την έδρα του στο Πανεπιστήμιο του Γκέτινγκεν εις ένδειξη διαμαρτυρίας για τις απολύσεις των εβραίων συναδέλφων του. Ο Weyl, όπως και τόσοι άλλοι γερμανοί επιστήμονες, μετανάστευσε στις ΗΠΑ και προσεδήφη στο Ινστιτούτο Ανώτερων Σπουδών του Πρίνστον, στο Νιου Τζέρσι. Κατά τη δεκαετία του 1920, όταν επεχείρησε ανεπιτυχώς να ενοποιήσει τη βαρύτητα με τον ηλεκτρομαγνητισμό, ο Weyl εισήγαγε μερικές από τις ιδέες των σύγχρονων θεωριών βαθμίδας. Και μάλιστα, τον ίδιο τον όρο «θεωρία βαθμίδας» τον κληρονομήσαμε από τις προσπάθειές του εκείνες — στο σημερινό εννοιολογικό πλαίσιο θα ήταν πολύ σωστότερο να χρησιμοποιούσαμε τον όρο «θεωρίες φάσης».

με κατάλληλα το μαγνητικό πεδίο έτσι ώστε η επίδρασή του να εξουδετερώσει την αλλαγή φάσης που προκαλεί το μικρό φύλλο. Εν τοιαύτη περιπτώσει, δεν θα παρατηρούσαμε καμιά απολύτως αλλαγή σε σχέση με την αρχική εικόνα συμβολής, και θα είχαμε επιτύχει ενός περίεργου είδους τοπικό αναλλοίωτο φάσης. Για να συνοψίσουμε: Προκαλούμε μια τοπική αλλαγή φάσης σε ένα από τα ηλεκτρονιακά κύματα και εντούτοις διατηρούμε το αναλλοίωτο της εικόνας συμβολής εισάγοντας ταυτόχρονα ένα μαγνητικό πεδίο. Η πλήρης εξήγηση του πώς ακριβώς συνδέονται το τοπικό αναλλοίωτο φάσης και τα μαγνητικά πεδία, αν και ασφαλώς αποτελεί θέμα λεπτότερο απ' ό,τι φαίνεται πως είναι από την περιγραφή αυτή, δικαιώνει τελικά το συμπέρασμα στο οποίο μοιάζει να οδηγεί το παράδειγμά μας. Το τοπικό αναλλοίωτο φάσης είναι δυνατό μόνο και μόνο επειδή τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με έναν πολύ συγκεκριμένο τρόπο με το μαγνητικό πεδίο.

Σε τούτη ακριβώς τη διαπίστωση έγκειται το κρίσιμο στοιχείο από την κβαντική ηλεκτροδυναμική που μας προσφέρει τη δυνατότητα να οικοδομήσουμε θεωρίες για τις ασθενείς και τις ισχυρές δυνάμεις. Η κβαντική ηλεκτροδυναμική είναι μια θεωρία όπου οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων και των φωτονίων είναι κατάλληλα «ρυθμισμένες» έτσι ώστε η θεωρία να παραμένει αμετάβλητη όταν η φάση της κυματοσυνάρτησης του ηλεκτρονίου υφίσταται τοπικές αλλαγές. Για κάποιους δυσσεξήγητους ιστορικούς λόγους, οι φυσικοί επιμένουν να χρησιμοποιούν τον όρο «αναλλοίωτο βαθμίδας» για να περιγράψουν αυτή την κατάσταση πραγμάτων, ενώ θα έπρεπε ασφαλώς να προτιμηθεί κάποιος πιο πληροφορητικός όρος, όπως «τοπικό αναλλοίωτο φάσης». Έτσι, η κβαντική ηλεκτροδυναμική είναι γνωστή ως «θεωρία βαθμίδας», χαρακτηρισμός που τείνει να συγκαλύπτει ότι στην πραγματικότητα πρόκειται για μια *θεωρία φάσης*. Αλλά ας αφήσουμε τα ζητήματα ορολογίας και ας στρέψουμε την προσοχή μας στο πραγματικά κρίσιμο ερώτημα: Με ποιον τρόπο θα μας βοηθήσει η ανάλυσή μας για την κβαντική ηλεκτροδυναμική να διατυπώσουμε μια θεωρία για τις ασθενείς ή τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις; Το τέχνασμα είναι να αντιστρέψουμε το επιχείρημα. Με άλλα λόγια, ας υποθέσουμε ότι δεν γνωρίζουμε πώς αλληλεπιδρούν τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια. Αν τώρα απαιτούσαμε κάθε θεωρία για τα ηλεκτρόνια να έχει απαραίτητα τοπικό αναλλοίωτο φάσης, τότε θα αναγκαζόμασταν να εισαγάγουμε μαγνητικά πεδία που αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια κατά έναν πολύ συγκεκριμένο τρόπο, και έτσι να επινοήσουμε την κβαντική ηλεκτροδυναμική! Η αντεστραμμένη μορφή του επιχειρήματός μας για το αναλλοίωτο ονομάζεται *αρχή της βαθμίδας*: Η απαίτηση να έχει μια θεωρία τοπικό αναλλοίωτο φάσης προσδιορίζει και τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων που περιλαμβάνει. Θα θέσουμε τώρα σε εφαρμογή αυτή τη θαυμάσια απλή ιδέα, για να δείξουμε πώς οικοδομούνται οι θεωρίες που ποτεύεται ότι περιγράφουν τις ασθενείς και τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις.

Η γέννηση της σωματιδιακής φυσικής

Για να μπορέσουμε να αρχίσουμε να περιγράφουμε την εφαρμογή της αρχής της βαθμίδας στις ασθενείς και τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις, πρέπει πρώτα να κάνουμε μια σύντομη ανασκόπηση των σημαντικότερων ανακαλύψεων στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων και να εισαγάγουμε την ορολογία που θα μας χρειαστεί. Το 1932, όταν ο Chadwick ανακάλυψε το νε-



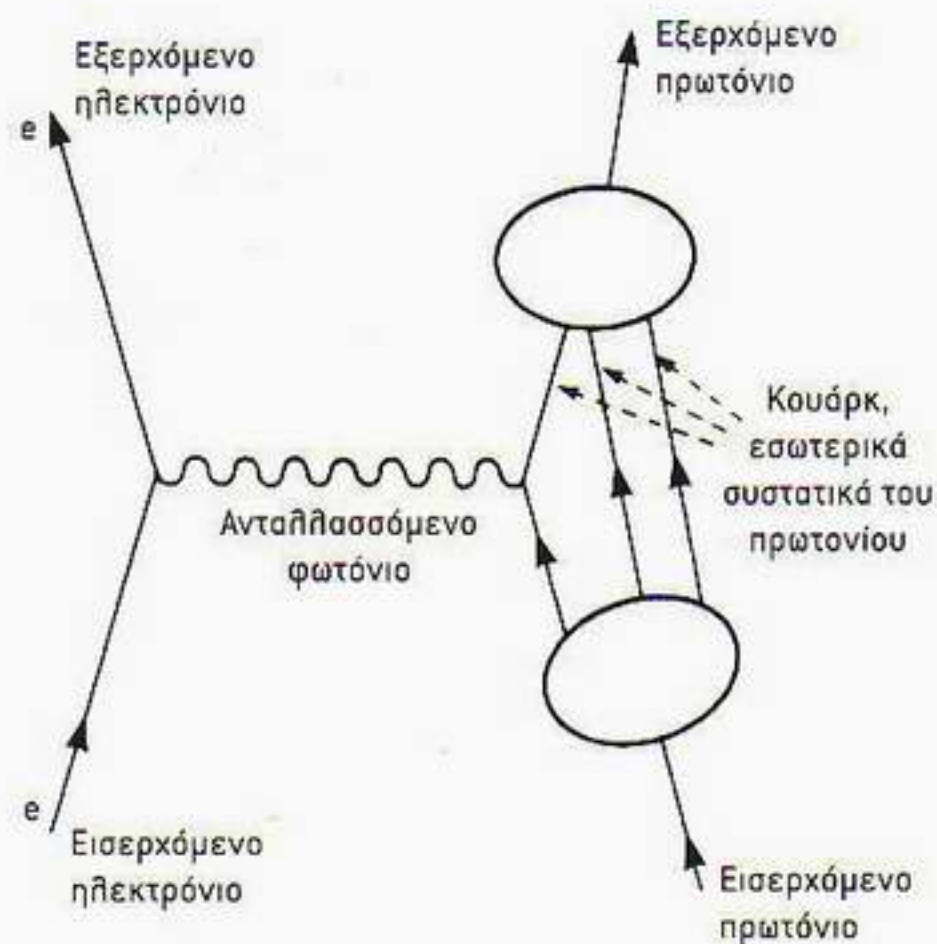
Ο Chen Ning Yang κέρδισε μαζί με τον T.D. Lee το βραβείο Νόμπελ το 1957 για την πρόβλεψη της παραβίασης της ομοτιμίας στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις. Νωρίτερα, το 1954, και σε συνεργασία με τον Robert Mills, είχε διατυπώσει μια γενίκευση της θεωρίας βαθμίδας του ηλεκτρομαγνητισμού. Την ίδια γενίκευση πρότεινε σχεδόν ταυτόχρονα και ανεξάρτητα από τους Yang και Mills ο Robert Shaw, μεταπτυχιακός φοιτητής του Abdus Salam στο Καίμπριτζ. Αυτές οι θεωρίες Yang-Mills στάθηκαν οι πρόδρομοι των σύγχρονων θεωριών βαθμίδας.



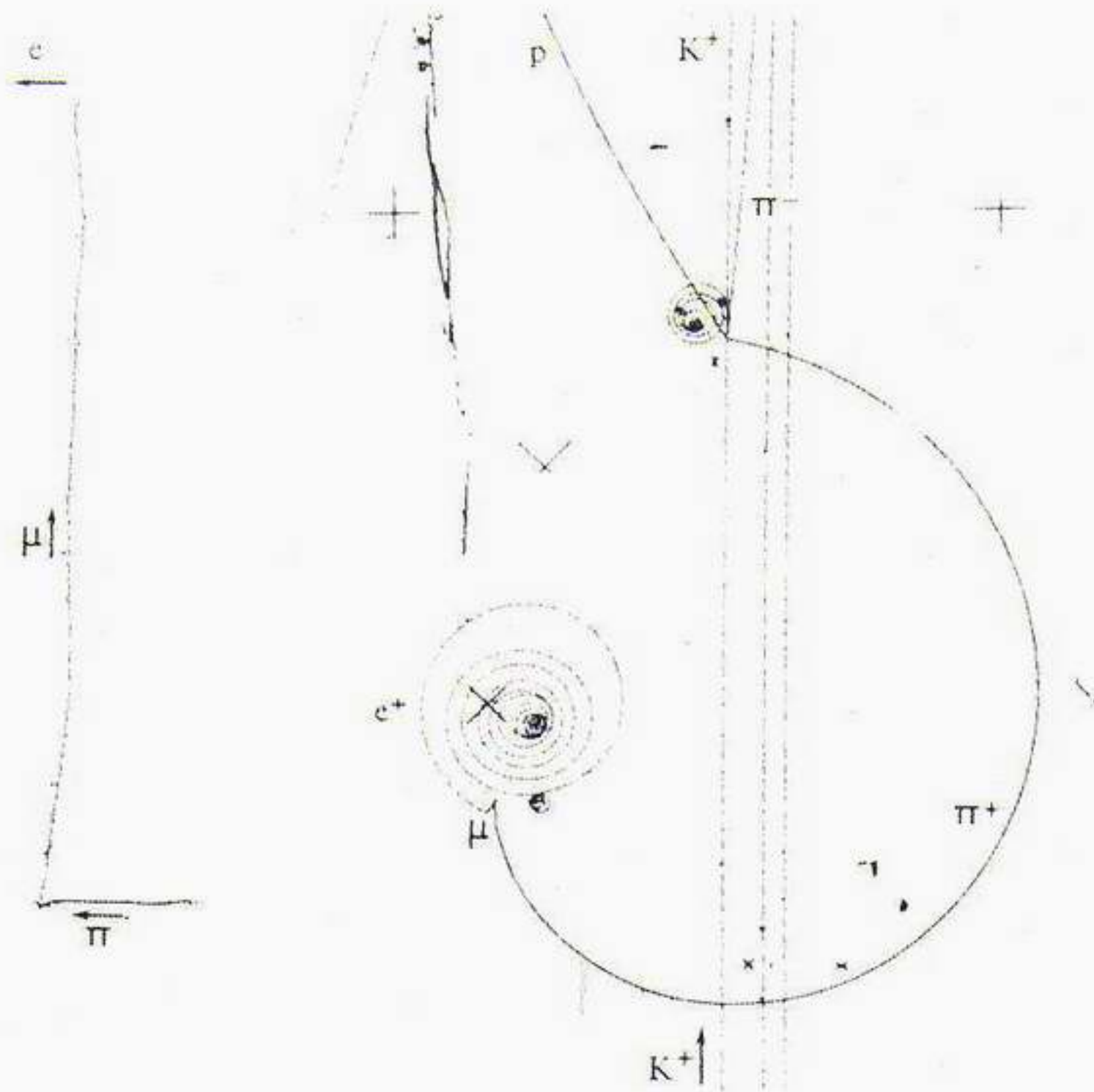
Ο Hideki Yukawa (1907-1981) κέρδισε το Νόμπελ φυσικής του 1949 για την πρόβλεψη της ύπαρξης των πιονίων, το οποίο δρουν ως φορείς της ισχυρής δύναμης. Ο Yukawa ήταν ο πρώτος Ιάπωνας επιστήμονας που τιμήθηκε με βραβείο Νόμπελ.

τρόνιο, όλα ήταν απλά: φαινόταν πως υπήρχαν μόνο τρεις στοιχειώδεις δομικοί λίθοι της ύλης: το πρωτόνιο, το νετρόνιο και το ηλεκτρόνιο. Το πρωτόνιο και το νετρόνιο έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα από το ηλεκτρόνιο και ονομάζονται βαρυόνια (από την ελληνική λέξη «βαρύς»). Και όπως γνωρίζουμε σήμερα, το ηλεκτρόνιο ανήκει σε μια οικογένεια σωματιδίων που έχουν το όνομα λεπτόνια (από την ελληνική λέξη «λεπτός» που στην αρχαιότητα σήμαινε, μεταξύ άλλων, και ελαφρός). Έχουμε ήδη συναντήσει έναν τύπο λεπτονίου. Πρόκειται για το νεutrίνο του Pauli, το μυστηριώδες σωματίδιο που «μπλέκεται» στη ραδιενεργό διάσπαση ενός νετρονίου σε πρωτόνιο, την οποία πραγματευθήκαμε στο Κεφάλαιο 10. Πιθανόν η ταξινόμηση σε βαρυόνια και λεπτόνια για την περιγραφή τεσσάρων μόνο σωματιδίων να φαίνεται λίγο εξεζητημένη ή και περιττή. Η χρησιμότητά της, όμως, γίνεται αμέσως φανερό όταν λάβουμε υπόψη μας ότι κατά την τελευταία πεντηκονταετία ανακαλύφθηκαν εκατοντάδες ακόμα «στοιχειώδη» σωματίδια. Ευτυχώς, έπειτα από πολλές δεκαετίες σύγχυσης, η εμφάνιση του Καθιερωμένου Μοντέλου αποκατέστησε σε μεγάλο βαθμό την τάξη στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων. Όπως θα δούμε, η νέα αυτή κατανόηση οφείλεται στην αναγνώριση των πρωταγωνιστικών ρόλων που παίζουν τα κουάρκ και το τοπικό αναλλοίωτο φάσης.

Στα προηγούμενα κεφάλαια γνωρίσαμε τα διαγράμματα Feynman ως έναν εποπτικό τρόπο αναπαράστασης των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων. Για παράδειγμα, η Εικόνα 12.2 δείχνει ένα διάγραμμα που εμφανίζεται στη σκέδαση ηλεκτρονίων από ένα πρωτόνιο. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, βλέπουμε το ηλεκτρόνιο και ένα από τα κουάρκ που συνιστούν το πρωτόνιο να «ανταλλάσσουν» ένα δυνάμει φωτόνιο. Η έννοια μιας δύναμης που προκύπτει από την ανταλλαγή δυνάμει σωματιδίων μάς δίνει μια ιδέα για το μέγεθος της εμβέλειάς της. Επιχειρηματολογώντας στη βάση της αρχής της αβεβαιότητας, μπορούμε να «δανειστούμε» ενέργεια ΔE για χρόνο $\Delta t \approx \hbar/\Delta E$ χωρίς να παραβιάσουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Αν πολλαπλασιάσουμε αυτό το χρόνο Δt επί την ταχύτητα v του σωματιδίου, παίρνουμε μια εκτίμηση για την τυπική απόσταση που μπορεί να διανύει ένα τέτοιο σωματίδιο και η οποία αποτελεί μέτρο της εμβέλειας της αντίστοιχης δύναμης:



Εικόνα 12.2 Διάγραμμα Feynman για τη σκέδαση ηλεκτρονίου-πρωτονίου. Η διαδικασία της σκέδασης αναπαριστάται με την «ανταλλαγή» ενός δυνάμει φωτονίου μεταξύ του ηλεκτρονίου και ενός από τα κουάρκ που υπάρχουν στο πρωτόνιο.



Εικόνα 12.3 Το πιόνιο διασπάται σε ένα μιονίο και ένα αθέατο νετρίνο. Το μιονίο, με τη σειρά του, διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο και δύο ακόμα νετρίνα. Το σχήμα στα αριστερά δείχνει το ίχνη που αφήνει η αλυσίδα των διασπάσεων στο φωτογραφικό γαλάκτωμα. Δεξιά φαίνεται η ίδια διαδικασία μέσα σε ένα βάζομο φασσολιτών. Λόγω της παρουσίας μαγνητικού πεδίου στο θάλαμο, οι τροχιές καμπυλώνονται, και το βραδέως κινούμενο ηλεκτρόνιο διαγράφει τροχιά που θυμίζει ελατήριο ρολογιού χειρός.

$$R = v \cdot (h/\Delta E)$$

εμβέλεια ίσον ταχύτητα επί χρόνος.

Η επιχειρηματολογία αυτή, εφαρμοζόμενη στη γνωστή πειραματικά εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων, οδήγησε τον ιάπωνα φυσικό Hideki Yukawa να προβλέψει την ύπαρξη ενός σωματιδίου με μάζα ενδιάμεση εκείνων του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου.

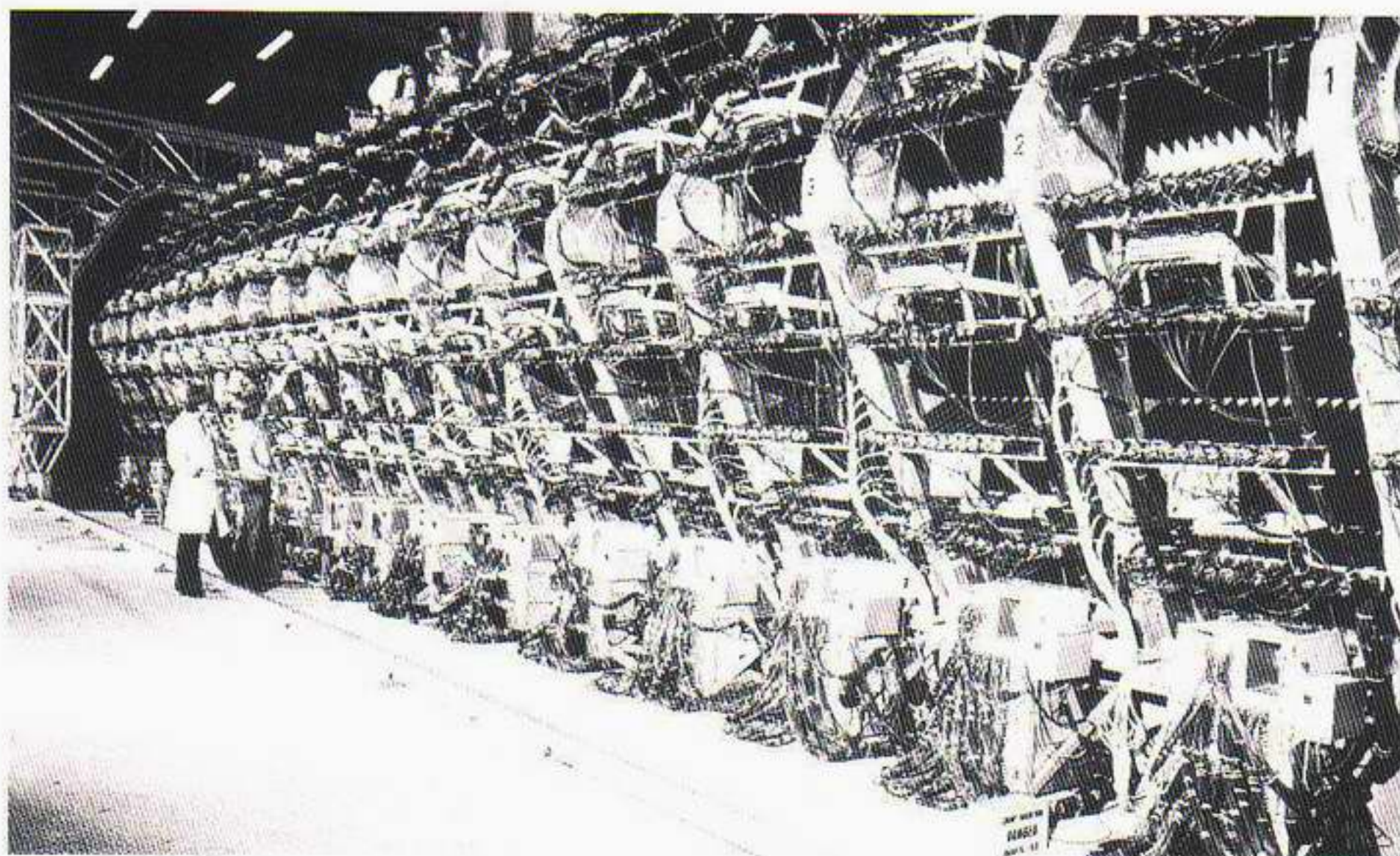
Ο Yukawa προέβλεψε ότι η μάζα τού εν λόγω σωματιδίου είναι περίπου 200 ή 300 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου. Το πρωτόνιο, όπως θα θυμάστε, έχει μάζα περίπου 2.000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του ηλεκτρονίου. Αυτή η πρόβλεψη έγινε το 1935, και μέχρι τότε κανένα τέτοιο σωματίδιο δεν είχε παρατηρηθεί. Δεν προκαλεί καμία έκπληξη, λοιπόν, το γεγονός ότι δύο χρόνια αργότερα, όταν στα πειράματα με κοσμική ακτινοβολία βρέθηκαν σωματίδια με την προβλεπόμενη περίπου μάζα, η νέα ανακάλυψη θεωρήθηκε ως εντυπωσιακή επιβεβαίωση της πρόβλεψης του Yukawa. Ο πόλεμος που μεσολάβησε επιβράδυνε την έρευνα για τα νέα αυτά σωματίδια, αλλά δεν τη σταμάτησε εντελώς. Τρεις νεαροί ιταλοί φυσικοί, ο Marcello Conversi, ο Ettore Pancini και ο Oreste Piccioni κρύβονταν από τους Γερμανούς για να αποφύγουν τα καταναγκαστικά έργα στη Γερμανία. Δουλεύοντας σε ένα υπόγειο στη Ρώμη, ανακάλυψαν ορισμένες πολύ περίεργες ιδιότητες αυτών των νέων σωματιδίων. Τα σωματίδια δεν συμπεριφέρονταν καθόλου ως φορείς της ισχυρής δύναμης. Αντί να αλληλεπιδρούν ισχυρά με τον

πυρήνα, έδειχναν να αλληλεπιδρούν όπως περίπου τα ηλεκτρόνια. Το μυστήριο δεν διαλευκάνθηκε παρά το 1947, όταν διατυπώθηκε η άποψη ότι ίσως υπήρχαν δύο νέα σωματίδια με την ίδια περίπου μάζα. Το ένα ήταν το σωματίδιο που είχε ήδη παρατηρηθεί και συμπεριφερόταν σαν ένα βαρύ ηλεκτρόνιο, ενώ το άλλο, το οποίο δεν είχε παρατηρηθεί ακόμα, θα ήταν ο φορέας της ισχυρής δύναμης του Yukawa. Αυτή η εικασία αποδείχθηκε ορθή όταν ο Cecil Frank Powell και ο Giuseppe Occhialini, στο Πανεπιστήμιο του Μπρίστολ στην Αγγλία, κατέγραψαν ίχνη κοσμικής ακτινοβολίας σε φωτογραφικό γαλακτώμα τα οποία απεδείκνυαν οριστικά την ύπαρξη των άπιαστων σωματιδίων του Yukawa. Έπειτα από κάποιες διαφωνίες για το αν τα νέα σωματίδια θα έπρεπε να ονομαστούν «γιουκόνια» προς τιμήν του Yukawa, αυτά τα σωματίδια με την ενδιάμεση μάζα ονομάζονται σήμερα *μεσόνια* (από την ελληνική λέξη «μέσος»). Το ελαφρότερο από τα μεσόνια ονομάζεται *π-μεσόνιο* ή, χάριν συντομίας, *πιόνιο*. Τα βαριά ηλεκτρόνια που ανακαλύφθηκαν πρώτα ονομάζονται σήμερα *μιόνια*. Οι λόγοι που ώθησαν τον Yukawa να διαλέξει τη σταδιοδρομία του θεωρητικού και όχι του πειραματικού φυσικού αντιπροσωπεύουν μια διασκεδαστική υποσημείωση σε όλα αυτά. Όπως είπε ο ίδιος, η απόφασή του οφειλόταν, εν μέρει, «στην αδυναμία του να κατακτήσει την τέχνη της κατασκευής απλών γυάλινων εργαστηριακών οργάνων»!

Η ανακάλυψη του μεσονίου του Yukawa σηματοδοτεί τη γέννηση της σύγχρονης σωματιδιακής φυσικής. Προέκυψε ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης νέων και αποτελεσματικότερων μεθόδων για την παρατήρηση των συγκρούσεων σωματιδίων με πολύ υψηλές ενέργειες. Η έρευνα για νέες μεθόδους συνεχίζεται ακατάπαυστα μέχρι σήμερα. Ο Powell και ο Occhialini συνεργάστηκαν με τα φωτογραφικά εργαστήρια της εταιρείας Ilford επιδιώκοντας την παραγωγή καλύτερων φωτογραφικών γαλακτωμάτων για την καταγραφή των τροχιών των σωματιδίων. Ο Occhialini μετέφερε μερικές από αυτές τις νέες φωτογραφικές πλάκες σε μια κορυφή των γαλλικών Πυρηναίων και τις εξέθεσε σε κοσμικές ακτίνες με πολύ υψηλή ενέργεια. Το τι συνέβη στις εν λόγω πλάκες το περιγράφει με τον καλύτερο τρόπο ο ίδιος ο Powell:

Όταν τις συγκεντρώσαμε και τις εμφανίσαμε στο Μπρίστολ, έγινε αμέσως φανερό ότι είχε αποκαλυφθεί ένας ολόκληρος νέος κόσμος. Στα ίχνη της τροχιάς ενός αργού πρωτονίου υπήρχαν τόσο πολλοί κόκκοι/«κέντρα συγκέντρωσης» ώστε η τροχιά φαινόταν σχεδόν σαν μια στερεή ασημένια ράβδος, ενώ ο μικροσκοπικός όγκος του γαλακτώματος φαινόταν στο μικροσκόπιο γεμάτος με «αποικοδομήσεις» τις οποίες είχαν προκαλέσει ταχεία σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργειες πολύ μεγαλύτερες από κάθε σωματίδιο που θα μπορούσε να παραχθεί τεχνητά εκείνη την εποχή. Ήταν σαν να είχαμε καταφέρει ξαφνικά να μπούμε σε έναν περιτοιχισμένο κήπο, όπου τα προστατευμένα δέντρα ήταν ανθισμένα και όπου είχαν ωριμάσει ανενόχλητα κάθε λογής εξωτικά φρούτα σε απίστευτη αφθονία.

Όσο μεγάλες θεωρητικές πρόοδοι και αν σημειώθηκαν στη σωματιδιακή φυσική κατά την τελευταία δεκαετία, ο βαθύτερος λόγος της ύπαρξης των μιονίων παραμένει μυστήριο. Λέγεται πως, όταν ο νομπελίστας Isidor Rabi πληροφορήθηκε την ανακάλυψη των μιονίων, αναρωτήθηκε: «Ποιος τα παρήγγειλε αυτά;» Το ερώτημά του μένει ακόμα αναπάντητο. Έχουμε ανακαλύ-



Εικόνα 12.4 Ένα από τα πειράματα με νετρίνα που διεξήχθη στο CERN της Γενεύης. Ο ανιχνευτής ζυγίζει 1.400 τόνους και αποτελείται από χοντρές σιδερένιες πλάκες, ανάμεσα στις οποίες υπάρχουν σπινθηριστές και θάλαμοι οδήγησης για να ανιχνεύουν τα φορτισμένα σωματίδια που δημιουργούνται από τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων.

πει, ωστόσο, ένα ακόμα στοιχείο που μπορεί να αποδειχθεί ζωτικής σημασίας για τη λύση του αινίγματος των πολλών ειδών λεπτονίων. Περιέργως, αυτή η ανακάλυψη συνοδεύτηκε με μια επανάληψη της σύγχυσης που δημιουργήθηκε γύρω από την ανακάλυψη του μιονίου και του μεσονίου του Yukawa. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, οι φυσικοί αναζητούσαν ένα νέο μεσόνιο προκειμένου να επιβεβαιώσουν τις θεωρίες τους σχετικά με έναν νέο τύπο κουάρκ (βλ. παρακάτω). Αντί γι' αυτό, όμως, βρήκαν ένα ακόμα βαρύ πλεκτρόνιο, με την ίδια περίπου μάζα που αναμενόταν να έχει το νέο μεσόνιο. Η ανακάλυψη του νέου λεπτονίου οφειλόταν, σε μεγάλο βαθμό, στις προσπάθειες του αμερικανού φυσικού Martin Perl, ο οποίος ονόμασε το νέο λεπτόνιο *tau*. Το προβλεπόμενο νέο μεσόνιο βρέθηκε λίγο αργότερα, και έτσι συμπληρώθηκε μια πολύ παράξενη επανάληψη της ιστορίας.

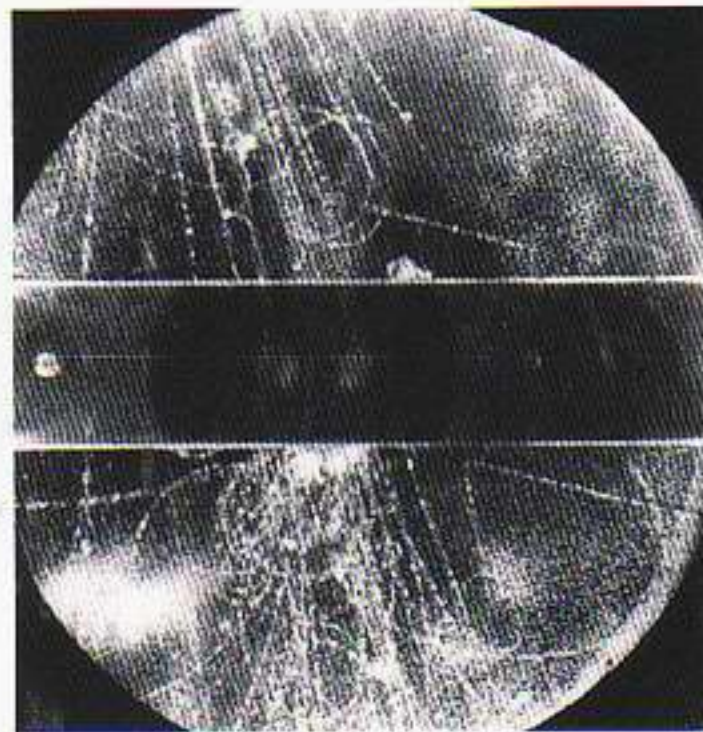
Την ίδια χρονιά, ωστόσο, ο George Rochester και ο Clifford Butler στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ της Βρετανίας ανακάλυψαν και άλλα παράξενα συμβάντα κοσμικών ακτίνων (βλ. Εικόνα 12.5). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των παράξενων νέων συμβάντων ήταν η ύπαρξη δύο «V» που έχουν την κορυφή τους στραμμένη προς το σημείο της αρχικής αλληλεπίδρασης. Εφόσον μόνο τα φορτισμένα σωματίδια αφήνουν ίχνη στον ανιχνευτή, συμπεραίνουμε ότι τα δύο V είναι τα φορτισμένα θραύσματα από τη διάσπαση δύο ουδέτερων σωματιδίων που δημιουργήθηκαν στο σημείο της αρχικής σύγκρουσης. Αυτά τα ουδέτερα σωματίδια, που σύντομα έγιναν γνωστά ως *παράδοξα σωματίδια*, στη συνέχεια διανύουν μια ορισμένη απόσταση ώσπου να διασπαστούν. Αν φωτογραφίσουμε τούτα τα συμβάντα παρουσία μαγνητικού

πεδίου και μετρήσουμε προσεκτικά την καμπυλότητα των τροχιών, μπορούμε να εφαρμόσουμε τους νόμους διατήρησης της ενέργειας και της ορμής για να βρούμε τις μάζες όλων των σωματιδίων που συμμετέχουν στο συμβάν. Με αυτό τον τρόπο, ανακαλύφθηκαν νέα παράδοξα βαρυόνια και μεσόνια. Γιατί, όμως, ονομάστηκαν παράδοξα τα νέα σωματίδια —αν εξαιρέσουμε βεβαίως την προφανή παραδοξότητα της παραγωγής τους σε ζεύγη V; Ας εξετάσουμε ένα τυπικό συμβάν διπλού V (βλ. Εικόνα 12.6), το οποίο αντιστοιχεί στην αντίδραση

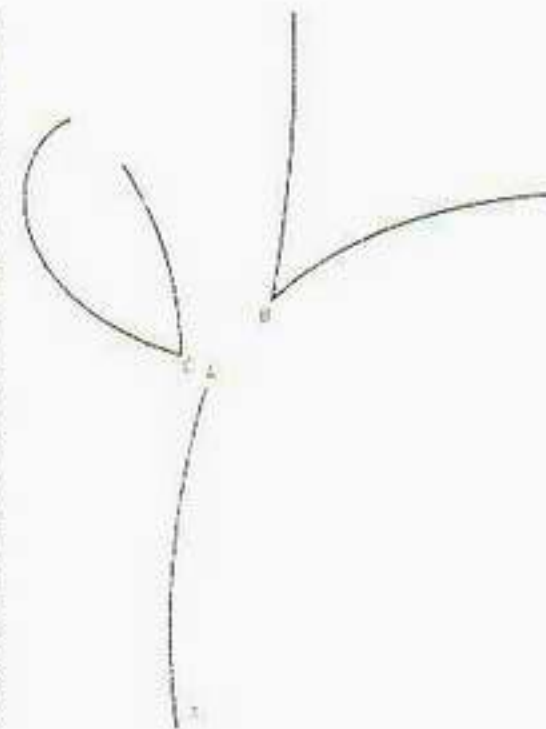


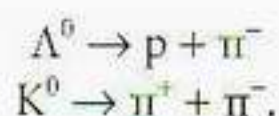
όπου το *λάμδα* (Λ) είναι ένα παράδοξο βαρυόνιο και το *καόνιο* (K) ένα παράδοξο μεσόνιο. Το πιο αινιγματικό σχετικά με αυτά τα παράδοξα συμβάντα ήταν ότι, ενώ εύκολα δημιουργούμε ζεύγη παράδοξων σωματιδίων από συγκρούσεις πιονίων και πρωτονίων, όταν τα αφήνουμε μόνα τους, τα παράδοξα σωματίδια δείχνουν μια αξιοσημείωτη απροθυμία να μετατραπούν και πάλι σε πρωτόνια και πιόνια. Με άλλα λόγια, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μεν παραγωγή ζευγών παράδοξων σωματιδίων συντελείται μέσω των ισχυρών αλληλεπιδράσεων, η δε διάσπαση μεμονωμένων παράδοξων σωματιδίων διέπεται από τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Εικόνα 12.5 Η ανακάλυψη των παράδοξων σωματιδίων. Ένα ουδέτερο K-μεσόνιο παράγεται από την σπληνική αντίδραση μιας κοσμικής ακτίνας με τη μορφή βιολόγου που βρίσκεται μέσα στο θαλάμο νέφους. Το εν λόγω μεσόνιο διασπάται σε φορτισμένα πιόνια τα οποία διακρίνονται με τη μορφή ενός V στο κάτω δεξιό τμήμα της φωτογραφίας.

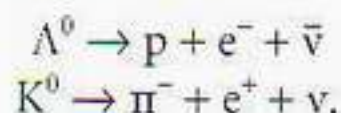


Εικόνα 12.6 Τα συμβάντα διπλού V αποτελούν σύνθετα φαινόμενα στους θαλάμους φουσαλλιδίων. Ένα αρνητικά φορτισμένο πιόνιο συγκρούεται στο σημείο A με ένα πρωτόνιο από το υδρογόνο που γεμίζει το θάλαμο. Από την αντίδραση αυτή παράγονται δύο παράδοξα σωματίδια, ένα ουδέτερο K-μεσόνιο και ένα ουδέτερο Λ -βαρυόνιο. Το Λ διασπάται στο σημείο B δίνοντας ένα πρωτόνιο και ένα π^- , ενώ το καόνιο διασπάται στο σημείο C δίνοντας ένα π^+ και ένα π^- .



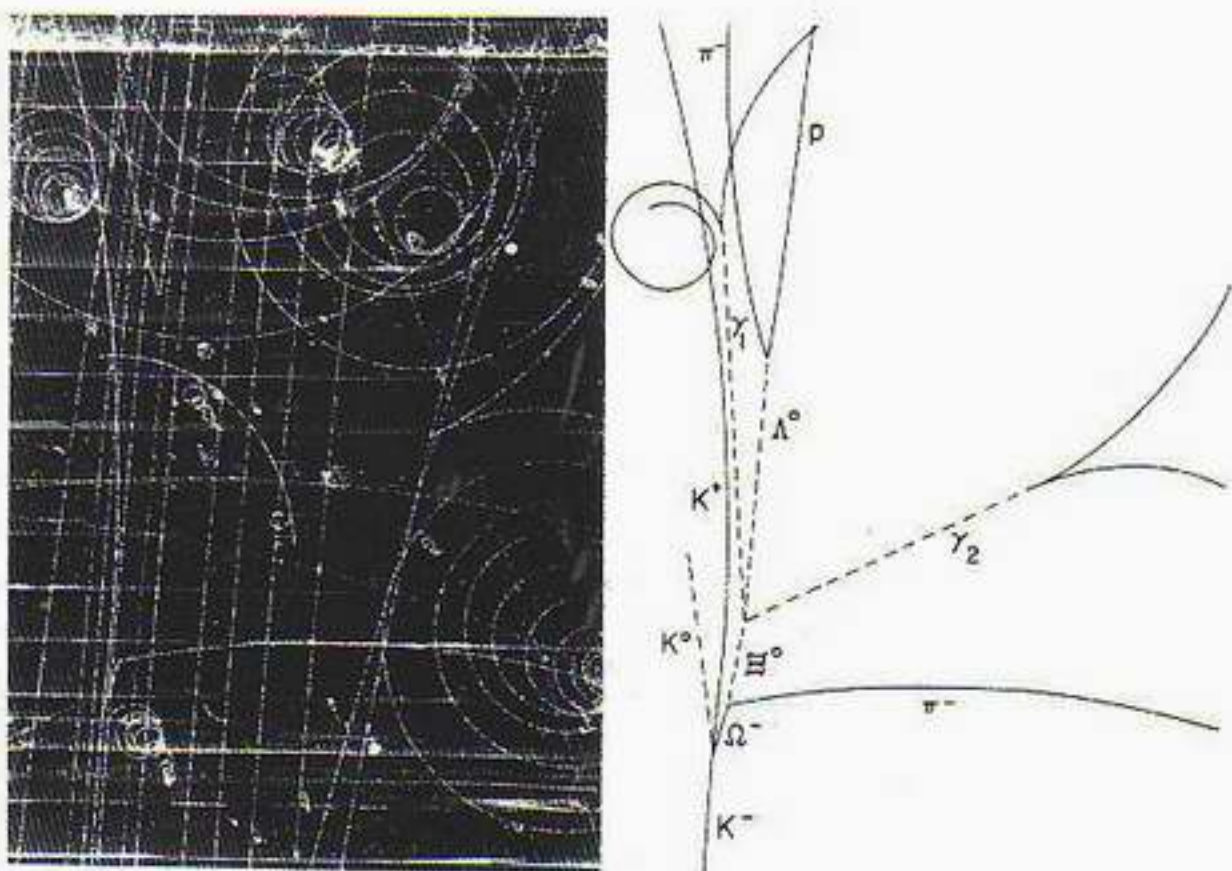


Πρόκειται για μια ερμηνεία η οποία έχει επιβεβαιωθεί από την παρατήρηση άλλων ασθενών «τρόπων» διάσπασης του λάμδα και του καονίου, όπως οι

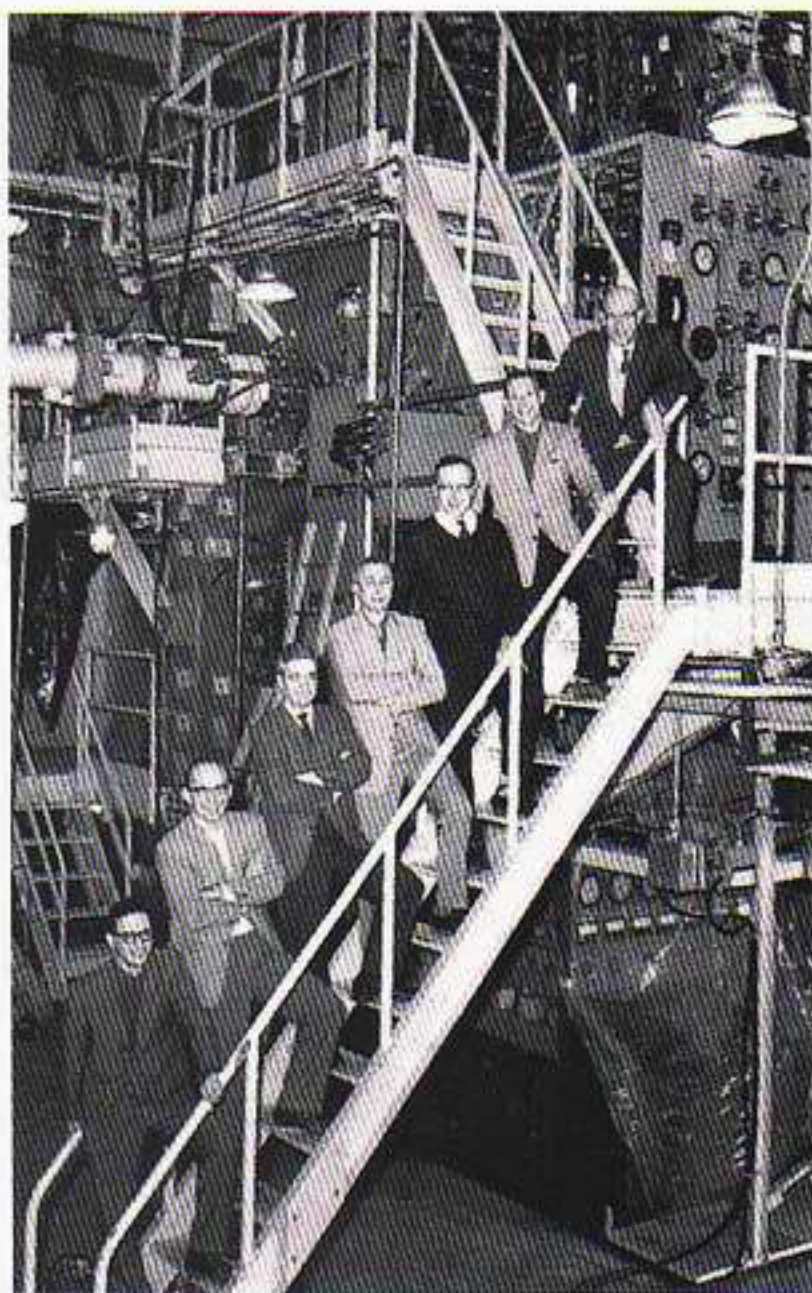


Σήμερα γνωρίζουμε ότι τα παράδοξα σωματίδια κατέχουν έναν νέο τύπο φορτίου που τα διακρίνει από τη «συνήθη» ύλη —τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα πιόνια. Στις αντιδράσεις ισχυρής αλληλεπίδρασης, οι αρχικές και τελικές καταστάσεις πρέπει να έχουν πάντοτε την ίδια «παραδοξότητα». Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα, αν στο καόνιο αποδώσουμε παραδοξότητα +1, τότε το λάμδα πρέπει να έχει παραδοξότητα -1: η τελική κατάσταση έχει ολική παραδοξότητα 0, όπως και η αρχική κατάσταση πιονίου-πρωτονίου. Στις διασπάσεις των παράδοξων σωματιδίων, ωστόσο, η παραδοξότητα δεν είναι ίση και στα δύο μέλη της αντίδρασης, κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι συγκεκριμένες διαδικασίες δεν επιτρέπεται να συντελεστούν μέσω των ταχειών ισχυρών αλληλεπιδράσεων· μπορούν μόνο να εξελιχθούν, «απρόθυμα», μέσω των βραδύτερων ασθενών αλληλεπιδράσεων που ευθύνονται για τη διάσπαση β.

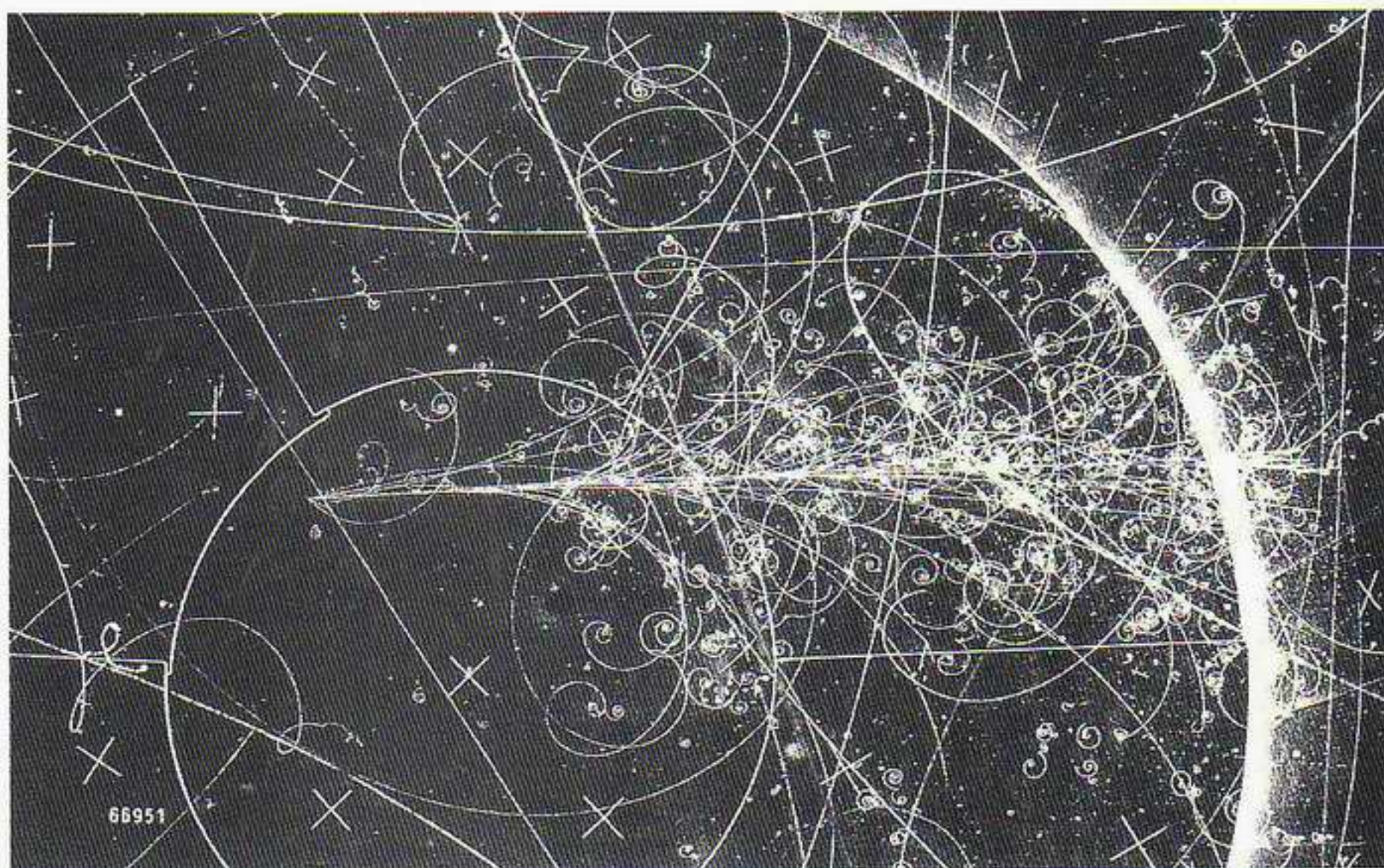
Εκ των υστέρων είναι σαφές ότι η ανακάλυψη των παράδοξων σωματιδίων αποτέλεσε σημείο καμπής στην κατανόηση των ισχυρών και των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Την εποχή που ο Rochester και ο Butler ανακάλυψαν



Εικόνα 12.7 Το πρώτο στον κόσμο συμβάν Ω^- . Το Ω^- περιέχει τρία παράδοξα κουάρκ και διασπάται μέσω μιας διαδικασίας τριών σταδίων: Αρχικά διασπάται προς ένα Ξ^0 , εν συνεχεία προς ένα Λ^0 , για να αποβάλλει τελικά την εναπομείνουσα παραδοξότητά του στη διάσπαση του Λ . Σε αυτή την αλυσίδα των διασπάσεων παράγεται και ένα ουδέτερο πιόνιο, το οποίο με τη σειρά του διασπάται σε δύο φωτόνια. Τα φωτόνια, όντας ουδέτερα, δεν αφήνουν ίχνη, και έτσι η αναπαράσταση του τι ακριβώς συνέβη κανονικά θα απέβαινε εξαιρετικά δυσχερές. Το συγκεκριμένο συμβάν είναι όληως αξιολογούμενο επειδή και τα δύο φωτόνια που προέρχονται από τη διάσπαση του πιονίου έχουν μετατραπεί μέσω στο θάλαμο φυσαλλιδίων σε ζεύγη ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Αυτή υπήρξε η ευτυχής σύμπτωση που επέτρεψε στο Μπρουκκίβεν να κερδίσει την κούρσα για την ανακάλυψη του σωματιδίου Ω^- . Η τύχη φαίνεται πως ξανατύπησε την ίδια πόρτα, διότι το Μπρουκκίβεν στάθηκε εξίσου τυχερό πολλά χρόνια αργότερα στην προσπάθεια ανακάλυψης ενός γοητευτικού βαρυονίου!



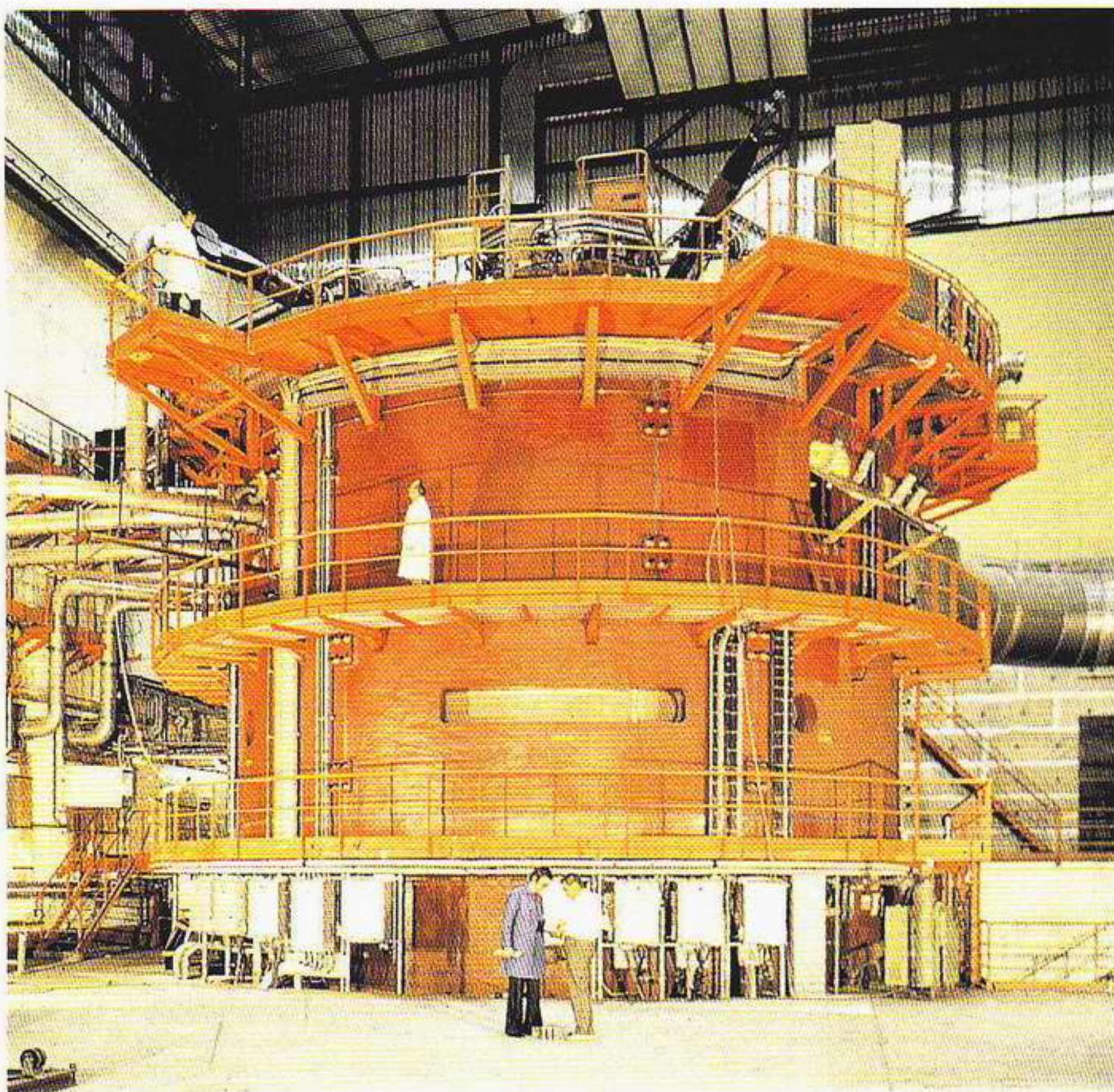
Εικόνα 12.8 Οι ανάγκες της πειραματικής σωματιδιακής φυσικής επιβάλλουν σήμερα τη συνεργασία μεγάλου αριθμού φυσικών από πολλές χώρες. Στη φωτογραφία αυτή εικονίζονται μερικοί από τους 114 ανθρώπους που συμμετείχαν στο κυνήγι του Ω.



Εικόνα 12.9 Φωτογραφία μιας αντίδρασης νετρίνου που τραβήχτηκε στον BEBC —τον Μεγάλο Ευρωπαϊκό Θάλαμο Φυσασθρίδων του CERN. Η δέσμη των νετρίνων εισέρχεται από κάτω και συγκρούεται με το κουάρκ ενός πρωτονίου δημιουργώντας έτσι έναν πολύπλοκο καταιονισμό σωματιδίων.

τα «σωματίδια V του Μάντσεστερ», επικρατούσε μεγάλη αμφισβήτηση, αντιγνωμία και σύγχυση. Όπως έγραψε ο ίδιος ο Rochester: «Μετά το 1947, ακολούθησε μια διετία βασανιστικής προσδοκίας και αμηχανίας για την ομάδα του Μάντσεστερ, μιας και δεν ανακαλύφθηκαν άλλα σωματίδια V.» Χρειάστηκε να φτάσει το 1950 για να επιβεβαιώσει μια ομάδα από το Caltech την ανακάλυψή τους με τη βοήθεια ενός θαλάμου νέφους τοποθετημένου στην κορυφή του γειτονικού Όρους Γουίλσον. Τον Απρίλιο του 1953, σωματίδια V παρατηρήθηκαν και σε φωτογραφίες από θαλάμους φουσαλλίδων τοποθετημένους σε επιταχυντές, και το γεγονός αυτό σήμανε την έναρξη της εποχής της σύγχρονης σωματιδιακής φυσικής. Δεδομένης της σπουδαιότητας της ανακάλυψης των Rochester και Butler και του αγώνα που έκαναν για να πείσουν την κοινότητα των σωματιδιακών φυσικών ότι είχαν δίκιο, φαίνεται μάλλον άτοπο ότι οι δύο φυσικοί ουδέποτε τιμήθηκαν με βραβείο Νόμπελ, πολύ δε περισσότερο αφού όσοι ανακάλυψαν κάποια νέα «γεύση» κουάρκ στη συνέχεια έλαβαν το βραβείο αυτό για το επίτευγμά τους.

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1950 και του 1960, οι πειραματικοί φυσικοί βρήκαν πολλές βραχύβιες διεγερμένες καταστάσεις —«συντονισμούς»— του πρωτονίου, του νετρονίου και του πιονίου, καθώς επίσης και των παράδοξων σωματιδίων. Πώς θα μπορούσαν ποτέ τόσο πολλά σωματίδια να είναι όλα θεμελιώδη; Στο χάος που διαμορφωνόταν, τάξη ήρθαν να βάλουν ο Gell-Mann και ο Zweig με την εισαγωγή των κουάρκ. Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ και τα μεσόνια από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Η δραματική επιβεβαίωση ότι ο Gell-Mann βρισκόταν στον σωστό δρόμο είχε έρθει περίπου ένα χρόνο πριν με την πρόβλεψή του ότι υπήρχε ένα μη παρατηρηθέν ως τότε σωματίδιο που το ονόμασε *ωμέγα* (Ω^-). Ενώ το πρωτόνιο και το νετρόνιο αποτελούνται από τους δύο τύπους των μη παράδοξων κουάρκ, το Ω^- , σύμφωνα με την πρόβλεψη του Gell-Mann, αποτελείται εξ ολοκλήρου από παράδοξα κουάρκ. Οι βραχύβιοι συντονισμοί ήταν πλέον δυνατόν να κατανοηθούν ως διεγερμένες καταστάσεις αυτών των συστημάτων κουάρκ, όπως ακριβώς κατανοούμε τις διεγερμένες καταστάσεις των ατόμων και των πυρήνων. Παρότι στις μέρες μας η προσέγγιση της αναγωγής των πολυάριθμων σωματιδίων σε κάποια πραγματικά στοιχειώδη συστατικά θα πρόβαλλε ως ο αυτονόητος δρόμος για τη λύση του προβλήματος, στις αρχές της δεκαετίας του 1960 επικρατούσε η μόδα να θεωρούνται όλα τα σωματίδια εξίσου στοιχειώδη, η οποία και εκφραζόταν συμπυκνωμένα στο σύνθημα «πυρηνική δημοκρατία». Πέρασε αρκετός καιρός για να μεταπειστούν οι φυσικοί ότι υπήρχαν πράγματι στοιχειώδη συστατικά της ύλης. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, μόνο λιγοστοί διορατικοί φυσικοί, όπως ο Dick Dalitz στο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης, επέμεναν στην ιδέα ότι οι διεγερμένες καταστάσεις πρέπει να εξηγούνται με βάση τα κουάρκ, συχνά μάλιστα κάτω από το ειρωνικό βλέμμα και τη δυσπιστία μερικών από τους συναδέλφους τους. Χρειάστηκε να φτάσουμε στο τέλος αυτής της δεκαετίας για να βρει η εικόνα των στοιχειωδών σωματιδίων με βάση τα κουάρκ εντυπωσιακή επιβεβαίωση μέσω των πειραμάτων σκέδασης ηλεκτρονίου-πρωτονίου που έγιναν στο Stanford της Καλιφόρνιας (βλ. Κεφάλαιο 3), καθώς τα εν λόγω πειράματα είχαν μια φυσική εξήγηση που στηριζόταν στη σκέδαση των ηλεκτρονίων από τα κουάρκ του πρωτονίου. Τα πρώτα αυτά πειράματα τα ακολούθησαν νέα πειράματα με ηλεκτρόνια και νετρίνα στο CERN στη Γενεύη, στο DESY στο Αμβούργο και στο Fermilab κοντά στο Σικάγο, τα οποία επίσης επιβεβαίωσαν την εικόνα των



Εικόνα 12.10 Ο Μεγάλος Ευρωπαϊκός Θάλαμος Φυσαλλίδων (ΒΕΒC) του CERN. Μπορεί να γεμίζει είτε με υγρό υδρογόνο είτε με μείγμα υδρογόνου και νέου. Ο θάλαμος περιβάλλεται από υπεραγωγίμια πηνία νιοβίου-τιτανίου, τα οποία δημιουργούν ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του.

Gell-Mann και Zweig. Σήμερα είναι γενικώς αποδεκτό ότι και τα βαρυόνια και τα μεσόνια περιέχουν κουάρκ —έστω και αν ουδείς παρατήρησε ποτέ κάποιο ελεύθερο, μεμονωμένο κουάρκ.

Θα κλείσουμε την παρούσα ενότητα εισάγοντας μία ακόμα καινούργια λέξη. Τα βαρυόνια και τα μεσόνια αλληλεπιδρούν κυρίως μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Τα λεπτόνια, από την άλλη, δεν «αισθάνονται» παρά μόνο τις ασθενείς και τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Τα σωματίδια εκείνα όσα αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής δύναμης ονομάζονται *αδρόνια*. Πρόκειται για έναν όρο που τον έπλασε ο ρώσος φυσικός Οκун από την ελληνική λέξη αδρός, η οποία, όντας ένα από τα αντίθετα του λεπτός, προσφέρεται απόλυτα για να υπηρετήσει την ανάγκη διάκρισης των σωματιδίων που «αισθάνονται» τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις από όσα δεν τις «αισθάνονται».

Ασθενή φωτόνια και το κενό Higgs

Το βραβείο Νόμπελ του 1979 για τη φυσική απονεμήθηκε σε τρεις φυσικούς, τον Sheldon Glashow, τον Abdus Salam και τον Steven Weinberg, για «τη συμβολή τους στην ενοποίηση της ασθενούς και της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, συμπεριλαμβανομένης της πρόβλεψης ενός ασθενούς ρεύματος». Επρόκειτο για μια τολμηρή κίνηση της επιτροπής του βραβείου Νόμπελ, καθότι η ενοποιημένη θεωρία των Glashow, Salam και Weinberg προέβλεπε την ύπαρξη δύο νέων σωματιδίων, του W και του Z, με μάζες 80 ή 90 φορές μεγαλύτερες από τη μάζα του πρωτονίου, και τέτοια σωματίδια δεν είχαν παρατηρηθεί ακόμη. Η επιτροπή πρέπει να ανακουφίστηκε όταν οι προβλέψεις αυτές επαληθεύτηκαν θεαματικά από πειράματα στον επιταχυντή συγκρουόμενων δεσμών πρωτονίων-αντιπρωτονίων στο CERN της Γενεύης (Εικόνα 12.23). Το βραβείο Νόμπελ του 1984 απονεμήθηκε στον Carlo Rubbia και τον Simon van de Meer, για το ρόλο που διαδραμάτισαν στην πραγματοποίηση των πειραμάτων αυτών. Πώς γίνεται η ενοποίηση των ασθενών και των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων, και τι σχέση έχουν όλα αυτά με την αρχή της βαθμίδας; Για να κατανοήσουμε τις απαντήσεις στα εν λόγω ερωτήματα, πρέπει να θυμηθούμε το επείγον του Yukawa για την εμβέλεια των δυνάμεων και να δούμε πώς σχετίζεται με τη μάζα των δυνάμει σωματιδίων που ανταλλάσσονται.

Ο Yukawa κατάφερε να υπολογίσει τη μάζα του πονίου από την παρατηρούμενη εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων. Όσο βαρύτερο είναι ένα σωματίδιο τόσο περισσότερη ενέργεια πρέπει να δανειστεί για να δημιουργηθεί, και τόσο μικρότερο διάστημα μπορεί να διανύσει στον δανεικό χρόνο που του παρέχει η αρχή της αβεβαιότητας. Όπως ξέρουμε, η ενέργεια E , η ορμή p και η μάζα m ενός σωματιδίου που κινείται με πολύ υψηλές, «σχετικιστικές» ταχύτητες συνδέονται μέσω της εξίσωσης

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4,$$

T
261503 IMPCOL G
22931 GNTC G
D970 LA989 UOP411
GXXX CO SWSM 094
STOCKHOLM 94/89 15 1145 PAGE 1/50

PROFESSOR ABDUS SALAM
IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY
PRINCE CONSORT ROAD
LONDON(SW7 2AZ)

DEAR PROFESSOR SALAM,
I HAVE THE PLEASURE TO INFORM YOU THAT THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES TODAY HAS DECIDED TO AWARD THE 1979 NOBEL PRIZE IN PHYSICS TO BE SHARED EQUALLY BETWEEN YOU, PROFESSOR SHELDON L. GLASHOW AND PROFESSOR STEVEN WEINBERG, BOTH AT HARVARD UNIVERSITY, FOR YOUR CONTRIBUTIONS TO THE THEORY OF THE UNIFIED WEAK AND ELECTROMAGNETIC INTERACTION BETWEEN ELEMENTARY PARTICLES, INCLUDING INTER ALIA THE PREDICTION OF THE WEAK NEUTRAL CURRENT.
C. G. BERNHARD
SECRETARY GENERAL

BY SENT 1200 JC
22931 GNTC G
261503 IMPCOL G

T

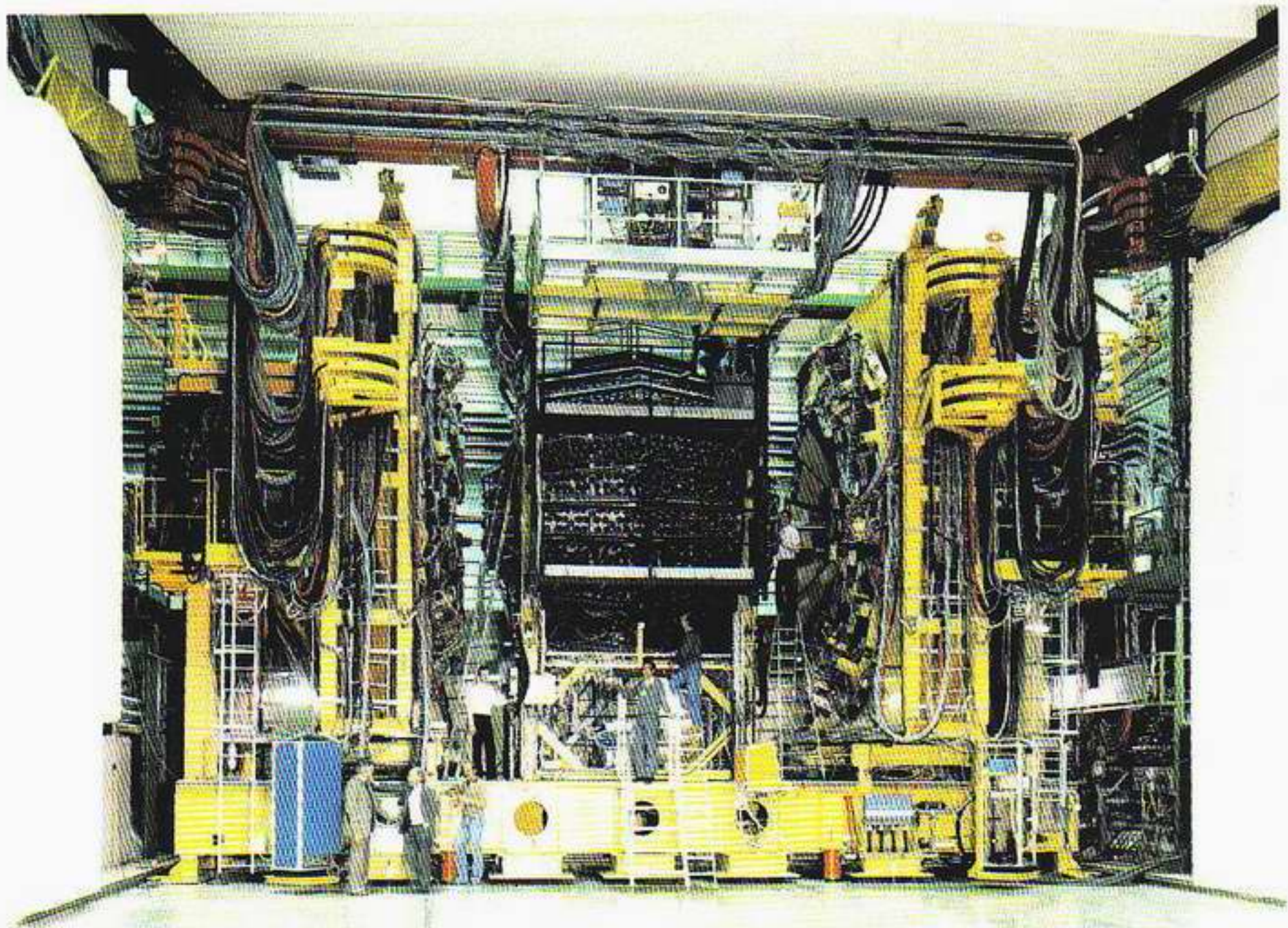
Εικόνα 12.11 Το τέλεξ που απέστειλε η Επιτροπή του Βραβείου Νόμπελ στον Abdus Salam πληροφορώντας τον ότι είχε κερδίσει το βραβείο Νόμπελ.



Στη φωτογραφία εικονίζονται ο Sheldon Glashow (αριστερά) και ο Steven Weinberg σε μια συνέντευξη τύπου στο Πανεπιστήμιο Harvard την ημέρα που κέρδισαν το βραβείο Νόμπελ. Οι δύο διάσημοι φυσικοί μοιράστηκαν το βραβείο με τον Abdus Salam για τη συμβολή τους στην ενοποίηση των ασθενών και των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων σε μία ενιαία θεωρία.



Ο Abdus Salam (1926-1996) γεννήθηκε στο Πακιστάν και σπούδασε μαθηματικά στο Πανεπιστήμιο της Λαχώρας. Αρχικά σκόπευε να γίνει δημόσιος υπάλληλος, τελικά όμως πήρε μια υποτροφία για το Πανεπιστήμιο του Καίμπριτζ για να σπουδάσει φυσική. Μέχρι το θάνατό του, ο Salam υπήρξε ένας από τους πιο διαπρεπείς επιστήμονες του ισλαμικού κόσμου. Το μερίδιό του από το βραβείο Νόμπελ το δώρισε στο ινστιτούτο του που εδρεύει στην Τεργέστη της Ιταλίας, και το οποίο υποστηρίζει επιστήμονες από τις αναπτυσσόμενες χώρες.

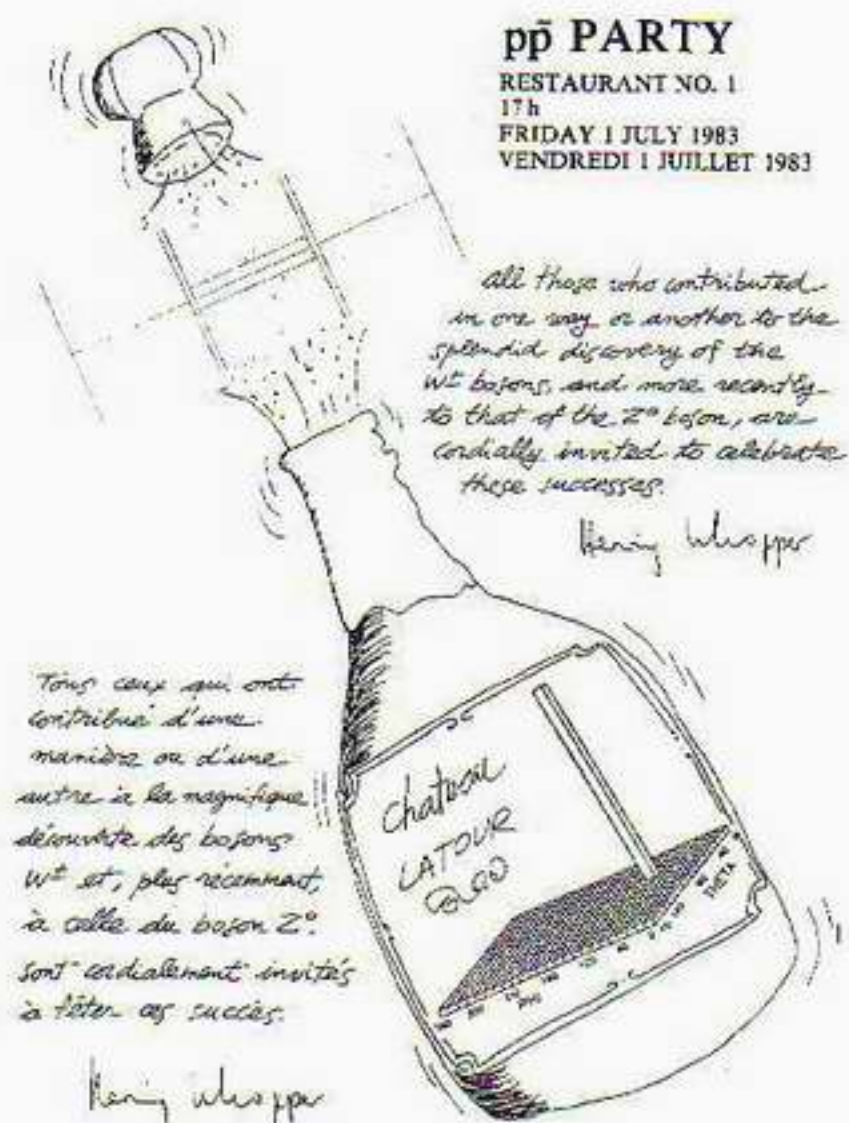


Εικόνα 12.12 Μια άποψη του τεράστιου ανιχνευτή UA2, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην «Υπόγεια Περιοχή 2» του CERN. Η διάταξη έχει τοποθετηθεί στη σήραγγα του Υπεραύχχρου Πρωτονίων (SPS). Τα πρωτόνια και αντιπρωτόνια που κυκλοφορούν στους δακτυλίους του SPS οδηγούνται στο εσωτερικό του ανιχνευτή όπου και συγκρούονται.

όπου c η ταχύτητα του φωτός. Για μικρές, μη σχετικιστικές ταχύτητες, η εξίσωση αυτή ανάγεται σε μια πιο οικεία έκφραση:

$$E = (p^2/2m) + mc^2.$$

Αυτή η εξίσωση λέει ότι η ολική ενέργεια ενός σωματιδίου που κινείται με μη σχετικιστικές ταχύτητες ισούται με τη γνωστή κινητική ενέργεια συν την ενέργεια της μάζας από την περίφημη ισοδυναμία μάζας-ενέργειας του Αϊνστάιν. Για τα φωτόνια, βέβαια, πρέπει να χρησιμοποιούμε πάντα τον σχετικιστικό τύπο, καθόσον τα φωτόνια κινούνται πάντα με την ταχύτητα του φωτός. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι τα φωτόνια έχουν μηδενική μάζα, όπερ απλώς σημαίνει ότι η ενέργεια και η ορμή τους συνδέονται μέσω της πρώτης από τις παραπάνω εξισώσεις, όπου θέτουμε το m ίσο με μηδέν. Αν τώρα επανέλθουμε στο επιχείρημα του Yukawa για τη δανεική ενέργεια, αυτό σημαίνει ότι τα δυνάμει φωτόνια με πολύ μικρή ορμή έχουν σχεδόν μηδενική ολική ενέργεια. Τα δυνάμει φωτόνια αυτής της κατηγορίας μπορούν να διανύουν σχεδόν όσο μεγάλες αποστάσεις θέλουν χωρίς να αντιμετωπίζουν προβλήματα με τη σχέση αβεβαιότητας ενέργειας-χρόνου. Συνεπώς, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις δρουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, γεγονός το οποίο και επιβεβαιώνεται από το πείραμα.



Εικόνα 12.13 Αφίσα για το πάρτι που διοργανώθηκε στο CERN ώστε να γιορταστεί η ανακάλυψη των μποζονίων W και Z.

Εκ πρώτης όψεως, το τοπικό αναλλοίωτο φάσης φαίνεται να απαιτεί τα ανταλλασσόμενα σωματίδια βαθμίδας να έχουν μηδενική μάζα, όπως το φωτόνιο. Και τούτο επειδή πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα να αντισταθμίζουμε τα αποτελέσματα μιας τοπικής αλλαγής φάσης σε όλες τις θέσεις του πετάσματος, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις. Στην πραγματικότητα, αυτή η απαίτηση της μηδενικής μάζας αποδεικνύεται ότι δεν ισχύει, αλλά τα σωματίδια βαθμίδας με μη μηδενική μάζα δεν καθίστανται δυνατά παρά με έναν αρκετά περίεργο τρόπο, τον οποίο και θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε. Ας επιστρέψουμε για λίγο στα μαγνητικά πεδία και τους υπεραγωγούς. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 7, τα μαγνητικά πεδία δεν διεισδύουν βαθιά στους υπεραγωγούς. Μόλις εισέλθει στον υπεραγωγό, το μαγνητικό πεδίο εξασθενεί πολύ γρήγορα εντός μικρής αποστάσεως. Το φαινόμενο οφείλεται σε επαγόμενα ρεύματα που δημιουργούνται στο εσωτερικό του υπεραγωγού όταν αυτός βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Τα εν λόγω ρεύματα παράγουν μαγνητικά πεδία, τα οποία τείνουν να εξουδετερώσουν το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του μετάλλου. Αυτή τη *διαμαγνητική* συμπεριφορά τη συναντούμε σε όλα τα μέταλλα, αλλά στους υπεραγωγούς —δεδομένου ότι σε αυτούς δεν υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση— τα επαγόμενα ρεύματα παράγουν μαγνητικό πεδίο που εξουδετερώνει σχεδόν τελείως το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του μετάλλου, εξαιρουμένου ενός πολύ λεπτού στρώματος στην επιφάνειά του. Αν προσπαθήσουμε τώρα να σκεφτούμε την κατάσταση από την άποψη της εμβέλειας του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υπεραγωγού, βλέπουμε ότι, αφού το μαγνητικό πεδίο διεισδύει σε πολύ μικρό βάθος, φαίνεται σαν τα φωτόνια στο εσωτερικό του υπεραγωγού να έχουν αποκτήσει πολύ μεγάλη μάζα.

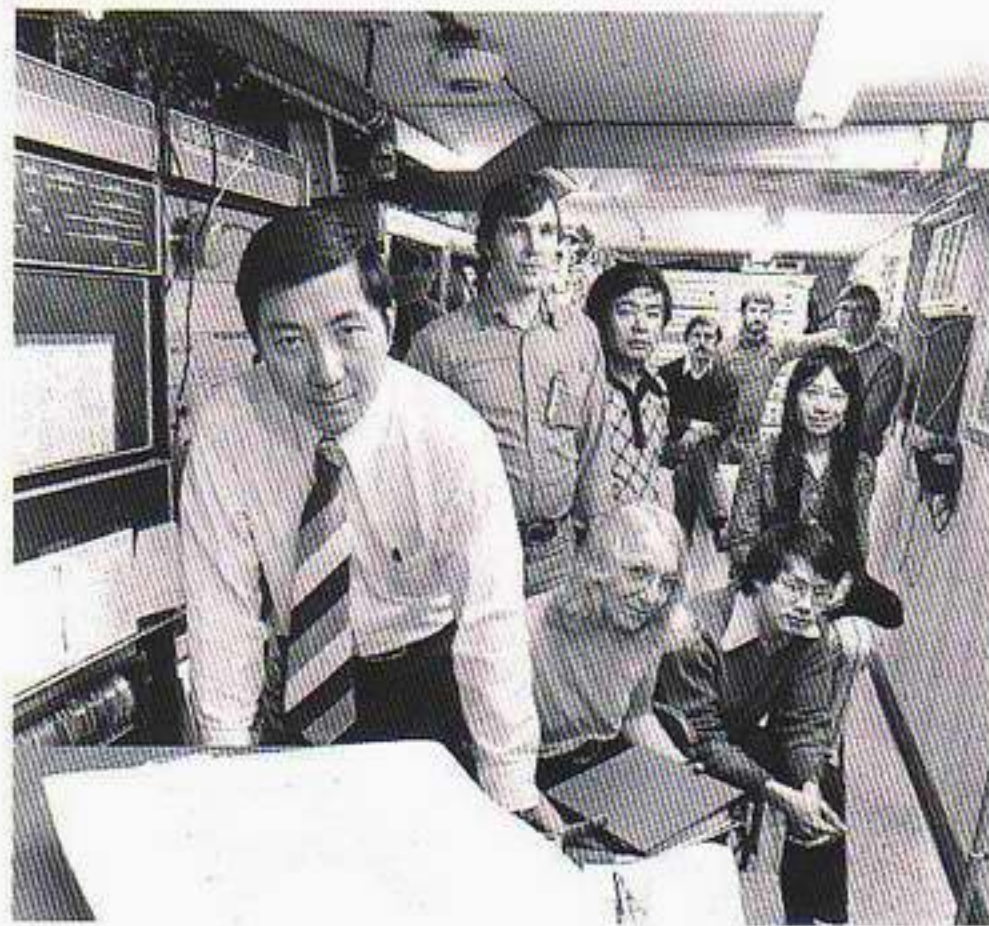
Στην προκειμένη περίπτωση, βέβαια, γνωρίζουμε ότι η ενεργός μάζα των φωτονίων οφείλεται στα ρεύματα θωράκισης που επάγει το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και ότι έξω από το μέταλλο τα φωτόνια έχουν μηδε-

νική μάζα. Ας προσπαθήσουμε όμως τώρα να φανταστούμε πώς θα φαινόταν ο κόσμος σε κάποια όντα αρκετά μικροσκοπικά ώστε να μπορούν να ζουν μόλις μέσα σε έναν τέτοιο υπεραγωγό. Αυτά τα όντα μπορεί να μη διέθεται την απαιτούμενη ευφυΐα για να συνειδητοποιήσουν πως ζουν μέσα ρεύματα τα οποία θωρακίζουν το χώρο από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αντί τούτου, ίσως συμπέραναν ότι τα φωτόνια έχουν μάζα η οποία σχετίζεται με την απόσταση που μπορούν τα μαγνητικά πεδία να διανύουν μέσα στο μέταλλο. Μόνο με αυτή την έννοια μπορούν τα σωματίδια βαθμίδας να αποκτήσουν μάζα και παράλληλα να συνεχίσει να διατηρείται το τοπικό αναλλοίωτο φάσης.

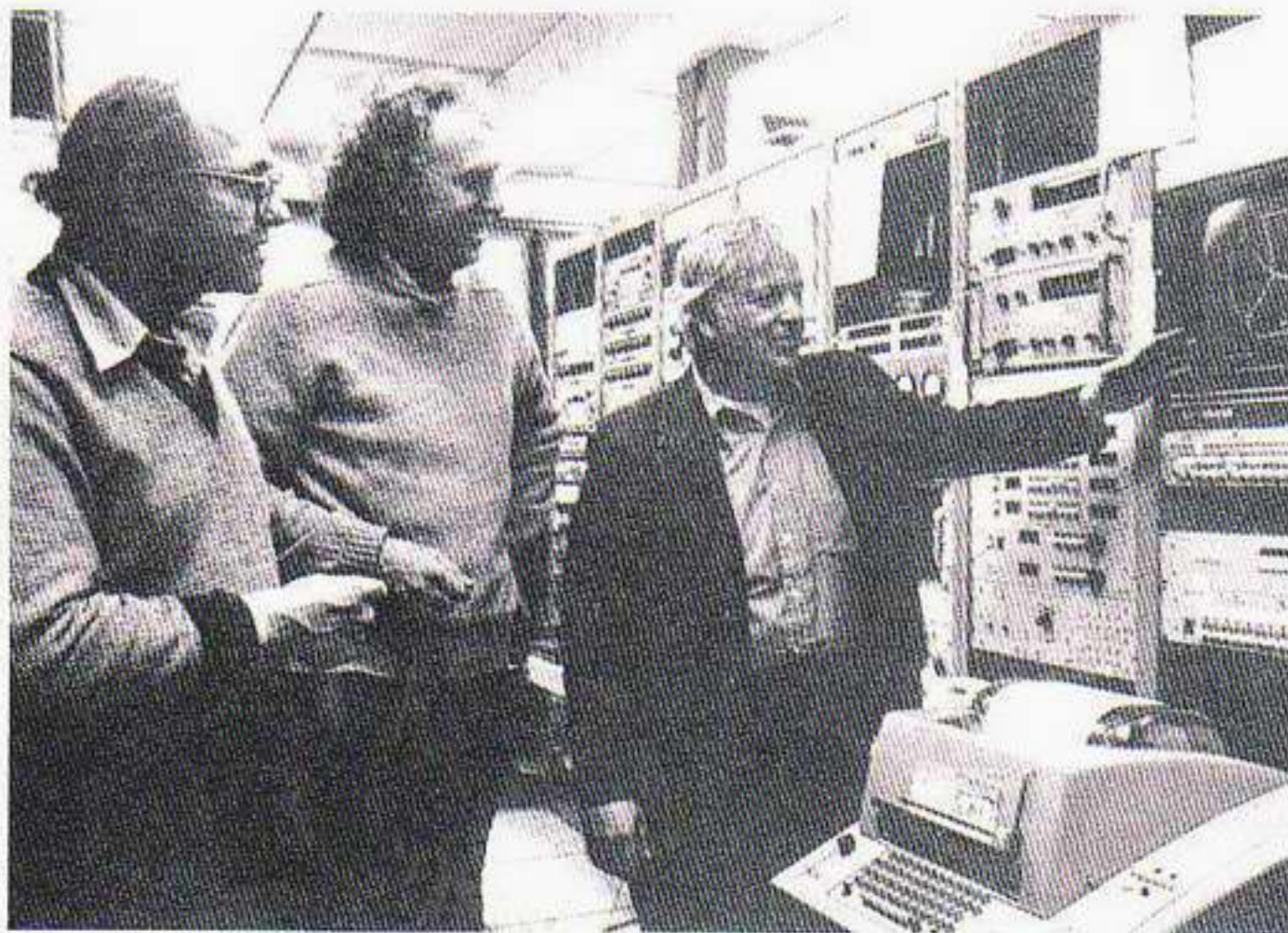
Αλλά τι σχέση έχουν όλα τούτα με τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις; Στο προηγούμενο κεφάλαιο σχεδιάσαμε τα διαγράμματα Feynman για τη σκέδαση ηλεκτρονίου-κουάρκ με την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση να διαμεσολαβείται από την ανταλλαγή ενός δυναμει φωτονίου. Ανάλογα διαγράμματα μπορούμε να σχεδιάσουμε και για τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις. Στη διάσπαση β του νετρονίου, για παράδειγμα, ένα κάτω κουάρκ μετατρέπεται σε πάνω κουάρκ εκπέμποντας ένα δυναμει σωματίδιο W , το οποίο διασπάζεται σε ηλεκτρόνιο και αντινεutrino. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, και σε αντίθεση με ό,τι ισχύει για την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση, διαπιστώνουμε πειραματικά ότι η εμβέλεια της ασθενούς δύναμης είναι πολύ μικρή. Χρησιμοποιώντας το επιχείρημα του Yukawa, συμπεραίνουμε ότι το σωματίδιο W πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη μάζα. Επίσης, το σωματίδιο W πρέπει να είναι και φορτισμένο —σε αντίθεση με το φωτόνιο, το οποίο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Εκ πρώτης όψεως, λοιπόν, ελάχιστη ομοιότητα φαίνεται να υπάρχει ανάμεσα στη θεωρία τοπικής φάσης της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής —με τα ουδέτερα και χωρίς μάζα φωτόνιά της— και σε οποιαδήποτε θεωρία των ασθενών αλληλεπιδράσεων —η οποία πρέπει να περιλαμβάνει φορτισμένα σωματίδια μεγάλης μάζας.

Εδώ γίνεται φανερό η σημασία της συζήτησής μας για τους υπεραγωγούς. Ας φανταστούμε πάλι τους εαυτούς μας σαν μικροσκοπικά όντα που ζουν μέσα στον υπεραγωγό. Επειδή το κανονικό υπόβαθρό μας —το «κενό»— έχει ρεύματα θωράκισης με συνέπεια το φωτόνιο να φαίνεται ότι δεν μπορεί να διανύσει παρά μικρές μόνο αποστάσεις, θα νομίζουμε ότι το φωτόνιο έχει μάζα. Έτσι, αν το «κενό» στο οποίο ζούμε είναι ανάλογο με έναν «ασθενή υπεραγωγό», τότε παρόμοια «ρεύματα θωράκισης κενού» μπορεί να κάνουν το W να φαίνεται ότι έχει μάζα. Αυτή η βασική ιδέα υπόκειται του «μηχανισμού Higgs». Δεν πρέπει να μας εκπλήσσει, λόγω της στενής σχέσης του με την υπεραγωγιμότητα, ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός για την πρόσδοση μάζας στα σωματίδια βαθμίδας προτάθηκε αρχικά από τον Philip Anderson, τον διακεκριμένο φυσικό στερεάς κατάστασης (βλ. Κεφάλαιο 7). Στους υπεραγωγούς, τα ρεύματα θωράκισης οφείλονται στα κυκλοφορούντα ζεύγη ηλεκτρονίων Cooper. Στην περίπτωση της θεωρίας βαθμίδας των ασθενών αλληλεπιδράσεων, τα ρεύματα αυτά πιστεύεται ότι οφείλονται σε κάποια σωματίδια γνωστά ως *μποζόνια Higgs*. Ο Peter Higgs, βρετανός θεωρητικός φυσικός εγκατεστημένος στο Εδιμβούργο, υπήρξε ένας από τους πρώτους που επεξεργάστηκαν τις ιδέες του Anderson σε σχετικιστικό πλαίσιο.

Γιατί, άραγε, η επιτροπή του βραβείου Νόμπελ έδειξε τόσο εμπιστοσύνη ώστε να απονεμίσει το βραβείο στους Glashow, Salam και Weinberg προτού ακόμη ανιχνευθεί πειραματικά το σωματίδιο W ; Ένας από τους λόγους ήταν η πετυχημένη πρόβλεψη ενός νέου τύπου κουάρκ —του λεγόμενου «γο-

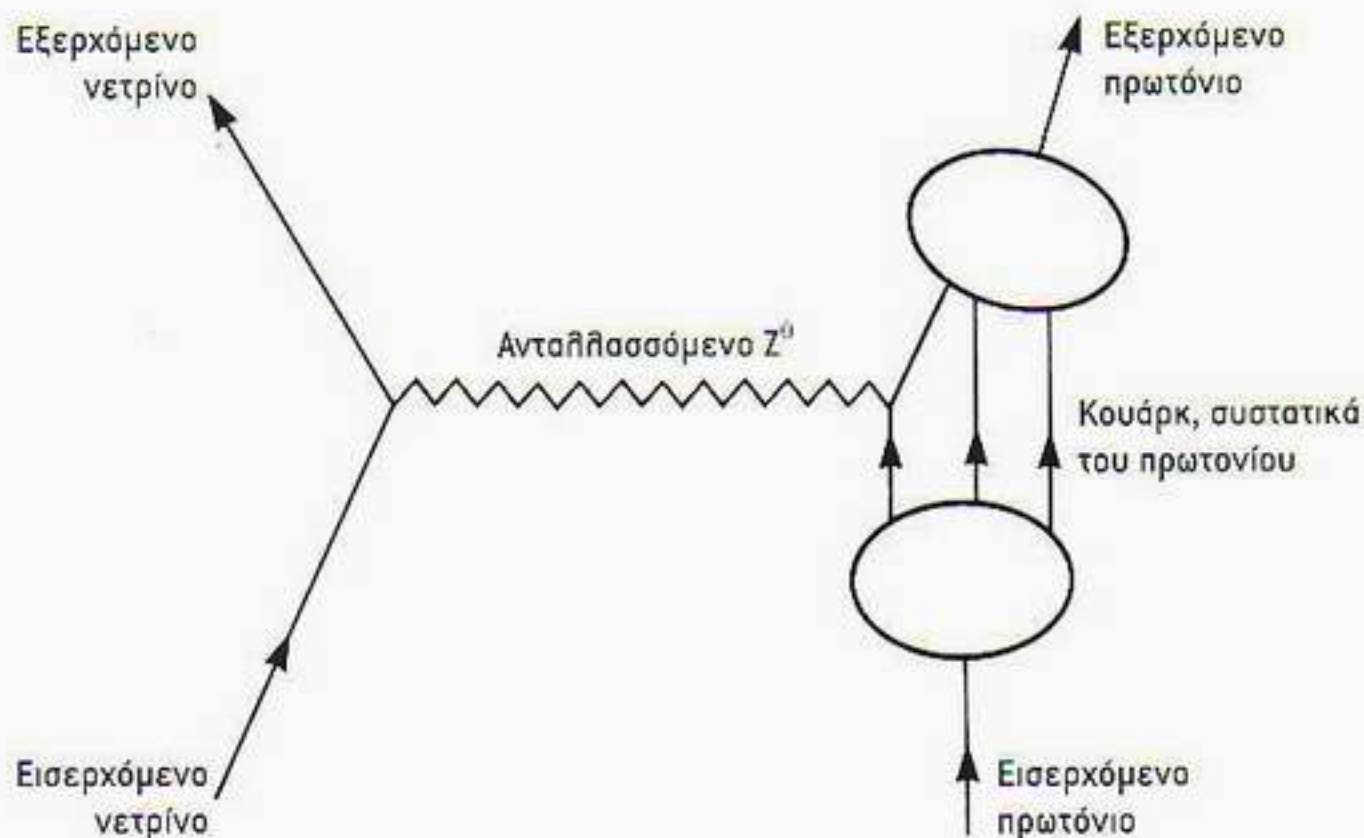


Ο Samuel Ting και άλλα μέλη της ερευνητικής ομάδας του, η οποία ανακάλυψε το σωματίδιο J/ψ στο Μπρουκχέιβεν. Το εν λόγω σωματίδιο πιστεύεται πως είναι δέσμιο κατάσταση ενός γοητευτικού κουάρκ και του αντισωματιδίου του. Ο Ting μοιράστηκε το βραβείο Νόμπελ του 1976 με τον Burton Richter, ο οποίος ηγείτο της ομάδας που ανακάλυψε το ίδιο σωματίδιο στο SLAC.



Οι επί κεφαλής της συνεργασίας των φυσικών που ανακάλυψε το σωματίδιο J/ψ τον Νοέμβριο του 1974 στον επιταχυντή συγκρουόμενων δεσμών ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων του SLAC στην Καλιφόρνια. Διακρίνονται από αριστερά προς τα δεξιά ο Gerson Goldhaber, ο Marty Perl και ο Burton Richter. Το 1995, ο Marty Perl τιμήθηκε με το Νόμπελ φυσικής για την ανακάλυψη του λεπτονίου του.

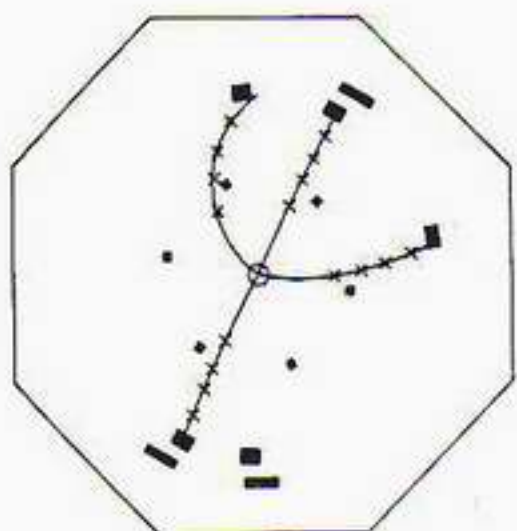
πτευτικού» κουάρκ. Η εν λόγω πρόβλεψη προέκυψε περίπου ως εξής. Η θεωρία που σήμερα είναι γνωστή ως Καθιερωμένο Μοντέλο των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων —ή μοντέλο GSW— προβλέπει ότι, εκτός από τα φορτισμένα σωματίδια W , θα πρέπει να υπάρχει και ένα βαρύ ουδέτερο σωματίδιο, το Z —ένα γνήσιο ασθενές φωτόνιο. Αν όντως υπάρχει αυτό το σωματίδιο, τότε πρέπει να συνεισφέρει στη σκέδαση του νετρίνου μέσω διαγραμμάτων Feynman σαν αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 12.14. Σε αντίθεση με τα διαγράμματα που ενέχουν ανταλλαγή σωματιδίων W , το φορτίο του κουάρκ παραμένει αμετάβλητο στα διαγράμματα όπου έχουμε ανταλλαγή σωματιδίων Z . Οι αντιδράσεις αυτού του είδους αντιστοιχούν στα «ουδέτερα ρεύματα» για τα οποία γίνεται λόγος στο τέλος της επιτροπής Νόμπελ προς τον Salam. Έπειτα από πολλές περιπέτειες επικοινωνιακής φύσεως, η ανακάλυψη των εν



Εικόνα 12.14 Διάγραμμα Feynman για τη σκέδοση νεutrίνου-πρωτονίου. Το νεutrίνο ανταλλάσσει ένα δυνάμει μποζόνιο Z με ένα από τα κουάρκ που υπάρχουν μέσα στο πρωτόνιο.

λόγω ρευμάτων ανακοινώθηκε τελικά στον επιστημονικό κόσμο σε ένα διεθνές συνέδριο που έλαβε χώρα στο Λονδίνο το 1974. Ο προσκεκλημένος ομιλητής του συνεδρίου που θα ανασκοπούσε τις εξελίξεις στον τομέα των ασθενών αλληλεπιδράσεων ήταν ο Έλληνας φυσικός Ιωάννης Ηλιόπουλος. Στην ομιλία του, ο Ηλιόπουλος απύθυνε στο ακροατήριο μια πρόκληση που έμεινε στα χρονικά της φυσικής. Δήλωσε ότι ήταν πρόθυμος να στοιχηματίσει με οποιονδήποτε ένα κιβώτιο μπουκάλια κρασί ότι, όπως ακριβώς η ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων στάθηκε η είδηση που προκάλεσε αίσθηση στο συνέδριο του Λονδίνου, έτσι και το πολύκροτο νέο στο επόμενο συνέδριο θα ήταν η ανακάλυψη του γοπτευτικού κουάρκ. Και το στοίχημα αυτό, ο Ηλιόπουλος το κέρδισε.

Το πώς ακριβώς η ύπαρξη των ουδέτερων ρευμάτων συνεπάγεται και την ύπαρξη αυτού του νέου τύπου κουάρκ είναι ένα αρκετά περίπλοκο θέμα. Αν κανείς πιστεύει ότι οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις όντως περιγράφονται από μια θεωρία βαθμίδας, ένα τέταρτο κουάρκ είναι απαραίτητο προκειμένου να επιτευχθεί συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό το νέο κουάρκ πρέπει να έχει έναν καινούργιο κβαντικό αριθμό, τον οποίο ο Glashow ονόμασε γοπτεία. Όπως ακριβώς η ηλεκτρομαγνητική δύναμη είναι διαφορετική για σωματίδια με διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία, έτσι και η ένταση των ασθενών δυνάμεων εξαρτάται και από την παραδοξότητα και από τη γοπτεία των κουάρκ. Αυτή ήταν η κατάσταση το καλοκαίρι του 1974, και πρέπει να πούμε ότι δεν υπήρχαν και πολλοί φυσικοί που πίστευαν ότι ο Ηλιόπουλος θα κέρδιζε το στοίχημα. Το φθινόπωρο του ίδιου χρόνου, όμως, δημιουργήθηκε έντονος ενθουσιασμός στην κοινότητα των φυσικών όταν ανακαλύφθηκε ένα θεαματικό νέο μεσόνιο ταυτόχρονα στο Stanford και το Μπρουκχέιβεν (ΗΠΑ). Το νέο αυτό σωματίδιο ο Burton Richter και η πειραματική ομάδα του Stanford το ονόμασαν μεσόνιο ψ, ενώ ο Sam Ting και η ομάδα του στο Μπρουκχέιβεν επέλεξαν το όνομα J. Σήμερα, ουδείς αμφισβητεί ότι το μεσόνιο J/ψ συγκροτείται από ένα γοπτευτικό κουάρκ και ένα γοπτευτικό αντικουάρκ. Εκείνη την εποχή, φυσικά, η κατάσταση ήταν συγκεχυμένη, με αποτέλεσμα να εμφανιστούν πολλές άλλες ανταγωνιστικές ευφυείς «εξηγήσεις» για το J/ψ και τις ιδιότητές του. Όλες αυτές οι εναλλακτικές θεωρίες που προτάθηκαν τότε έχουν πια ξεχαστεί καθώς ήρθε στο φως μια ολόκληρη καινούργια και περίπλο-



Εικόνα 12.15 Το σωματίδιο J/ψ ανακαλύφθηκε σχεδόν ταυτόχρονα στο Μπρουκχέιβεν της Νέας Υόρκης και στο SLAC της Καλιφόρνιας. Στο διάγραμμα φαίνεται η αναπαράσταση ενός συμβάντος «τύπου ψ» από τον επιταχυντή συγκρουόμενων δεσμών ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων στο SLAC. Το συμβάν προκαλείται από μια βαρύτερη εκδοχή του ψ, που διασπάται στο συνηθισμένο ψ και σε θετικά και αρνητικά φορτισμένα πιόνια. Το σωματίδιο ψ ταυτοποιείται από τα ζεύγη ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου τα οποία παράγει κατά τη διάσπασή του.

κη φασματοσκοπία των καταστάσεων του *charmium*, η οποία συνοδεύτηκε από μια νέα οικογένεια μεσονίων που αντιπροσωπεύουν δέσμιες καταστάσεις γοπτευτικών κουάρκ και άλλων μη γοπτευτικών αντικουάρκ.

Επιβάλλεται να προσθέσουμε ένα υστερόγραφο σε αυτή την ιστορία των αλληπάλληλων επιτυχιών. Όταν ο Glashow, ο Salam και ο Weinberg πραγματοποιούσαν τις συμβολές τους στο Καθιερωμένο Μοντέλο των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων, υπήρχε ένα σοβαρό πρόβλημα. Αν και η θεωρία τους έδειχνε να υπόσχεται ότι μπορεί να ερμηνεύσει τα πειραματικά δεδομένα, κανένας δεν ήξερε πώς να υπολογίζει τα διαγράμματα Feynman της θεωρίας πέρα από τα *διαγράμματα δέντρον* —δηλαδή τα διαγράμματα που δεν περιείχαν κλειστούς βρόχους. Τα *διαγράμματα βρόχων* συνήθως ενέχουν υψηλότερες δυνάμεις της σταθεράς e , η οποία καθορίζει την ένταση της σύζευξης των σωματιδίων W και Z με τα κουάρκ και τα λεπτόνια. Εφόσον το e^2 βρέθηκε πειραματικά πολύ μικρό, το e^4 θα είναι πολύ μικρότερο, οπότε οι συνεισφορές των «υψηλότερης τάξης» διαγραμμάτων βρόχων αναμένονται σχετικώς ασήμαντες. Δυστυχώς, όλες οι προσπάθειες να υπολογιστούν οι συνεισφορές των διαγραμμάτων βρόχων είχαν καταλήξει σε αποτυχία και ατιθάσευτους απειρισμούς, με αποτέλεσμα κανείς να μην ξέρει τι να κάνει με τις θεωρίες αυτές. Μόνο όταν εμφανίστηκε επί σκηνής ένας νεαρός Ολλανδός ονόματι Gerard 't Hooft ξεκαθάρισαν όλα. Όπως χαρακτηριστικά είπε ο διαπρεπής φυσικός Sidney Coleman: «Το έργο του 't Hooft μεταμόρφωσε το βάτραχο των Weinberg και Salam σε μαγεμένο πρίγκιπα.» Μερικά χρόνια νωρίτερα, ο Coleman είχε κατηγορήσει τον Tini Veltman, τον καθηγητή υπό την καθοδήγηση του οποίου εκπόνησε τη διατριβή του ο 't Hooft, ότι στην έρευνά του επέμενε «να ξεσκονίζει μια ξεχασμένη γωνιά της θεωρητικής φυσικής». Είναι ευτύχημα που ο Veltman αντιστάθηκε σθεναρά στις μόδες της εποχής, όντας ένας από τους πρώτους οι οποίοι αναγνώρισαν τη σπουδαιότητα των θεωριών βαθμίδας. Άρμοζε από πάσης απόψεως, λοιπόν, να απονεμηθεί και στους δύο, τον Veltman και τον 't Hooft, το βραβείο Νόμπελ φυσικής για τη ρηξικέλευθη εργασία τους, κάτι που έγινε τελικά το 1999.



Ο Gerard 't Hooft γεννήθηκε το 1947 και σήμερα είναι καθηγητής της φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Ουτρέχτης στην Ολλανδία. Ενώ εκπονούσε τη διδακτορική του διατριβή υπό την καθοδήγηση του Tini Veltman, ο 't Hooft επέτυχε μια ζωτικής σημασίας πρόοδο ανακαλύπτοντας με ποιον τρόπο είναι δυνατόν να γίνονται συνεπείς υπολογισμοί διαγραμμάτων Feynman στις θεωρίες βαθμίδας. Οι Veltman και 't Hooft τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 1999.

Κουάρκ και γλοιοόνια

Στα πρώτα βήματα της πυρηνικής φυσικής, οι φυσικοί έτρεφαν την ελπίδα ότι η θεωρία της ισχυρής δύναμης θα ήταν απλή και κομψή. Με την ανακάλυψη, όμως, του πιονίου και του συρφετού των υπόλοιπων αδρονίων, καθώς και των διεγερμένων καταστάσεών τους, έγινε γρήγορα φανερό ότι η δύναμη ανάμεσα στα νετρόνια και τα πρωτόνια ήταν πολύ περίπλοκη. Ωστόσο, καθώς οι φυσικοί ανακάλυπταν όλα αυτά τα νέα σωματίδια, έμαθαν επίσης ότι τα αδρόνια αποτελούνται από κουάρκ. Αν επρόκειτο ποτέ να υπάρξει μια απλή θεωρία για τις αδρονικές δυνάμεις, ήταν φυσικό να αναζητήσουν μια εξήγησή τους με βάση τα κουάρκ. Δεν υπήρχε άραγε περίπτωση οι λεγόμενες ισχυρές αλληλεπιδράσεις να αποτελούν απλώς μια ανεπαίσθητη σκιά απίστευτα ισχυρών δυνάμεων μεταξύ των κουάρκ που περιγράφονται με απλό και κομψό νόμο;

Όπως είδαμε, τα κουάρκ είναι αρκετών ειδών: μη παράδοξα, παράδοξα, γοπτευτικά κ.ο.κ. Τις διαφορετικές αυτές *γεύσεις* τις διακρίνει τη μία από την άλλη αποκλειστικά και μόνο η ηλεκτρασθενής δύναμη· η ισχυρή δύναμη είναι η ίδια είτε δρα στα παράδοξα είτε στα γοπτευτικά κουάρκ. Στο ση-

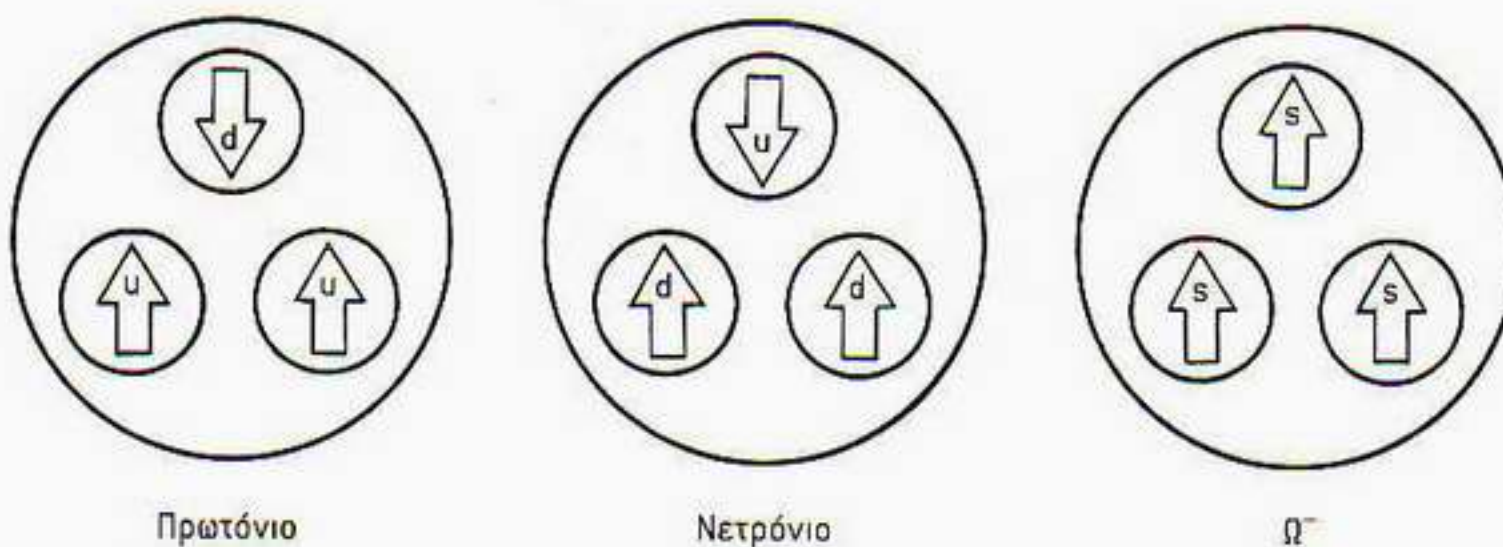
μείο αυτό επιβάλλεται να δώσουμε κάποιες εξηγήσεις για τις κάπως αδόκιμες ονομασίες που δίνουν οι σωματιδιακοί φυσικοί σε αυτούς τους νέους κβαντικούς αριθμούς. Κάθε κβαντικός αριθμός όπως n παραδοξότητα αποτελεί ένα επακριβώς ορισμένο φυσικό μέγεθος. Αρχικά, μάλιστα, ορισμένοι φυσικοί προτιμούσαν αντί της παραδοξότητας να αναφέρονται σε ένα ισοδύναμο μέγεθος που το ονόμαζαν *υπερφορτίο*. Το υπερφορτίο σίγουρα υποβάλλει μια επίσημη και επιβλητική εικόνα για τη σωματιδιακή φυσική, όμως οι περισσότεροι φυσικοί επιμένουν στην παραδοξότητα. Ομοίως, τα μη παράδοξα κουάρκ, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, έχουν μηδενική παραδοξότητα, όμως τα ηλεκτρικά τους φορτία διαφέρουν. Οι φυσικοί, αντί να ονομάζουν τα κουάρκ με «τις ιδιοτιμές της τρίτης συνιστώσας του ισότοπικού σπιν» που αντιστοιχούν στο καθένα, προτιμούν να χρησιμοποιούν τις σύντομες ονομασίες *πάνω* και *κάτω* κουάρκ. Δεδομένου ότι τα πρώτα τρία κουάρκ ονομάζονται *πάνω*, *κάτω* και *παράδοξο*, δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει που τα επόμενα τρία κουάρκ ονομάζονται *γοπτευτικό*, *κορυφή* και *πυθμένας*. Δεν πρόκειται σε καμία περίπτωση για ένα αστείο που γίνεται με έξοδα των φορολογουμένων —δείχνει απλώς ότι και οι φυσικοί είναι εν τέλει άνθρωποι!

Το 1977, ο Leon Lederman ανακοίνωσε την ανακάλυψη του σωματιδίου *ύψιλον* στο Fermilab. Το *ύψιλον* είναι ανάλογο με το J/ψ και πιστεύεται ότι αποτελείται από ένα κουάρκ *πυθμένας* και το αντισωματίδιό του. Όπως συνέβη και με το *γοπτευτικό* κουάρκ, οι φυσικοί ανακάλυψαν μια ολόκληρη νέα φασματοσκοπία μεσονίων που περιέχουν κουάρκ *πυθμένας*. Ακριβώς όπως ο Ηλιόπουλος είχε προβλέψει την ανακάλυψη του *γοπτευτικού* κουάρκ, ήταν πλέον σαφές ότι χρειαζόταν ένα ακόμα κουάρκ για να συμπληρωθούν τα ζεύγη των κουάρκ *πάνω-κάτω*, *γοπτευτικό-παράδοξο* και *κορυφή-πυθμένας*. Αυτά τα τρία ζεύγη κουάρκ αντικατοπτρίζουν τα τρία ζεύγη των λεπτονίων που συνίστανται από το ηλεκτρόνιο, το μιονίο και το ταυ μαζί με τα αντίστοιχα νετρίνα τους. Μόλις το 1995, έπειτα από μεγάλη προσμονή, ανακαλύφθηκε τελικά το κουάρκ *κορυφή*, και πάλι στο Fermilab. Η μεγάλη του μάζα προκάλεσε έκπληξη —είναι περί τις 180 φορές βαρύτερο από το πρωτόνιο.

Οι ισχυρές δυνάμεις δεν αντιλαμβάνονται τις διαφορετικές γεύσεις των κουάρκ, αλλά είναι ευαίσθητες σε έναν άλλο τύπο φορτίου που έχουν όλα τα κουάρκ. Οι φυσικοί ονομάζουν αυτό τον νέο κβαντικό αριθμό *χρώμα*, αλλά δεν πρέπει να λησμονούμε ότι και πάλι πρόκειται για μια βραχυλογική έκφραση με την οποία γίνεται αναφορά σε μια πολύ συγκεκριμένη μαθηματική ιδιότητα. Θα μπορούσαμε να λέμε, με σχολαστική ακρίβεια, ότι τα «κουάρκ μετασχηματίζονται σύμφωνα με τη θεμελιώδη αναπαράσταση της ειδικής μοναδιαίας ομάδας $SU(3)$ » αλλά είναι ασφαλώς προτιμότερο να λέμε απλά ότι τα κουάρκ έχουν ένα «χρωματικό φορτίο». Η φυσική αναγκαιότητα που επέβαλε την εισαγωγή του κβαντικού αριθμού του χρώματος μπορεί σε κάποιο βαθμό να διευκρινιστεί με το ακόλουθο επιχειρήμα. Ας πάρουμε το σωματίδιο Ω^- , την ύπαρξη του οποίου έχει προβλέψει ο Gell-Mann. Πρόκειται για ένα βαρυόνιο και, ως εκ τούτου, συνίσταται από τρία κουάρκ. Δεδομένου ότι το Ω^- έχει ηλεκτρικό φορτίο -1 και παραδοξότητα -3 , τα τρία του κουάρκ πρέπει να είναι όλα τους παράδοξα (Εικόνα 12.16). Το σπιν τού Ω^- , από την άλλη, είναι $3/2$. Εφόσον τα κουάρκ του βρίσκονται στη χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη και έχουν τροχιακή στροφορμή 0 , το σπιν τού Ω^- πρέπει να προέρχεται αποκλειστικά από τα σπιν των κουάρκ του. Χοντρικά μιλώντας, κάθε κουάρκ πρέπει να έχει σπιν $1/2$, και όλα αυτά τα σπιν πρέπει να έχουν τον ίδιο

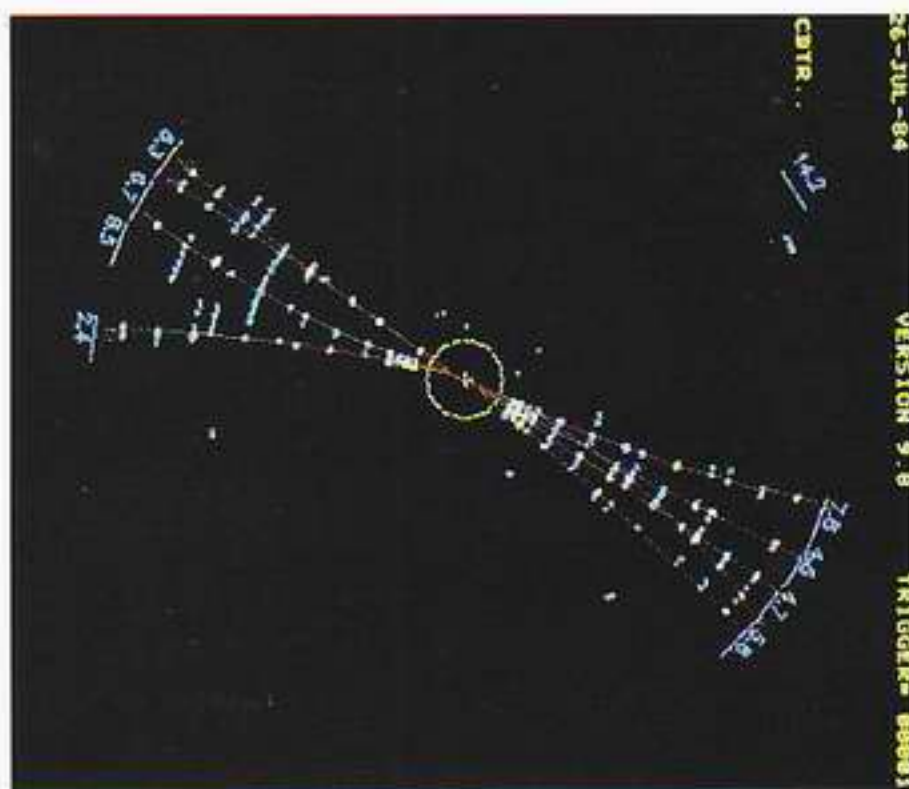
προσανατολισμό —για να δίνουν άθροισμα $3/2$. Ός εδώ, όλα φαίνεται να πηγαίνουν καλά. Πού βρίσκεται, λοιπόν, το πρόβλημα; Στην απαγορευτική αρχή του Pauli, την οποία συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 6. Ως φερμιόνια, τα κουάρκ οφείλουν να υπακούουν στην αρχή του Pauli. Όπως έχουν τα πράγματα, όμως, όλα τα κουάρκ στο σωματίδιο Ω^- έχουν τους ίδιους κβαντικούς αριθμούς, και η απαγορευτική αρχή του Pauli δεν επιτρέπει κάτι τέτοιο. Αυτό ακριβώς το πρόβλημα έρχεται να λύσει η εισαγωγή του πρόσθετου κβαντικού αριθμού του χρώματος για τα κουάρκ. Το χρώμα σχετίζεται με μια μαθηματική δομή γνωστή ως ομάδα και, πιο συγκεκριμένα, με την «ειδική μοναδιαία ομάδα $SU(3)$ ». Η τριαδικότητα της εν λόγω ομάδας σημαίνει ότι υπάρχουν τρεις διαφορετικές δυνατές καταστάσεις για τα κουάρκ. Και πάλι, συνηθίζουμε να αναφερόμαστε σε αυτή την κατάσταση πραγμάτων λιγότερο αυστηρά, λέγοντας ότι τα κουάρκ εμφανίζονται με τρία διαφορετικά χρώματα. Βεβαίως, δεν πρέπει ποτέ να ξεχνάμε ότι πρόκειται για έναν βραχυλογικό τρόπο του λέγειν που υποκαθιστά την αυστηρή μαθηματική ορολογία: τα κουάρκ δεν έχουν πραγματικά φυσικά χρώματα που ελέγχουν τις ισχυρές δυνάμεις! Και αφού τα είπαμε όλα αυτά, μπορούμε πλέον να αντιληφθούμε πώς το χρώμα λύνει το πρόβλημά μας με το Ω^- . Εφόσον υπάρχουν τρία διαφορετικά δυνατά χρώματα για τα κουάρκ, το κάθε κουάρκ μπορεί να έχει διαφορετικό χρώμα —κόκκινο, πράσινο και μπλε, ας πούμε— έτσι ώστε να ικανοποιείται η απαγορευτική αρχή του Pauli.

Είμαστε πλέον σε θέση να περιγράψουμε τα συστατικά στοιχεία της κβαντικής χρωμοδυναμικής, της από μακρού αναζητούμενης θεωρίας των ισχυρών δυνάμεων. Πρόκειται για μια θεωρία βαθμίδας η οποία βασίζεται στο τοπικό αναλλοίωτο φάσης των χρωματικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τα κβαντικά πλάτη των κουάρκ. Μολονότι τα «νέα» πιθανόν να πχούν κάπως αποκαρδιωτικά, δύσκολα θα φανταζόταν κανείς ότι η όποια θεωρία των ισχυρών αλληλεπιδράσεων θα μπορούσε να είναι απλούστερη. Όπως ακριβώς οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις διαμεσολαβούνται από σωματίδια βαθμίδας μηδενικής μάζας —τα φωτόνια, τα οποία τόσες φορές συναντήσαμε—, περιμένουμε και οι αλληλεπιδράσεις κουάρκ-κουάρκ να περιγράφονται με βάση την ανταλλαγή ανάλογων «ισχυρών φωτονίων». Οι φυσικοί έδωσαν σε αυτά τα

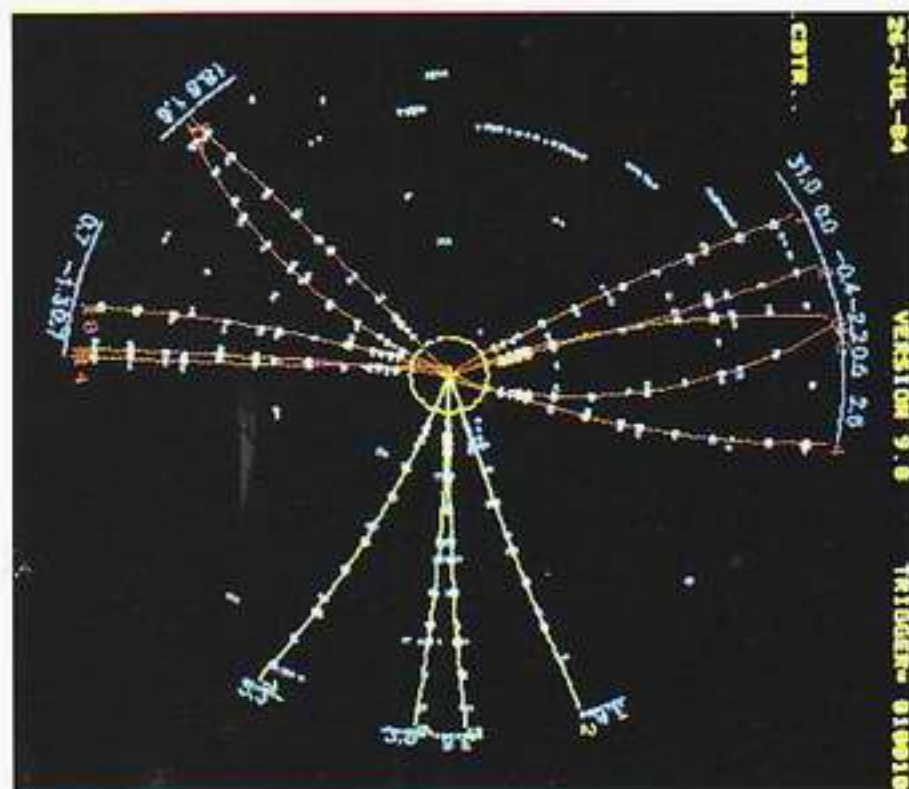


Εικόνα 12.16 Τα κουάρκ από τα οποία συνίσταται το πρωτόνιο, το νετρόνιο και το Ω^- . Για το πρωτόνιο και το νετρόνιο σημειώνονται πιθανοί προσανατολισμοί των σπιν των κουάρκ, [πάνω (u) και κάτω (d)], οι οποίοι δίνουν ολικό σπιν $1/2$. Το Ω^- έχει σπιν $3/2$, γεγονός που σημαίνει ότι και τα τρία παράδοξα κουάρκ του [s] πρέπει να έχουν τα σπιν τους προσανατολισμένα στην ίδια κατεύθυνση. Αυτό όμως αντιβαίνει στην απαγορευτική αρχή του Pauli, εκτός και αν τα κουάρκ έχουν κάποιον πρόσθετο κρυφό κβαντικό αριθμό.

Εικόνα 12.17 Ένα παράδειγμα συμβάντος «ηιδάκων» κουάρκ-αντικουάρκ σε αντίθετες κατευθύνσεις, από τον επιταχυντή συγκρουόμενων δεσμών ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων PETRA στο Αμβούργο της Γερμανίας. Τα περισσότερα ίχνη προέρχονται από πιόνια. Το συγκεκριμένο συμβάν παρατηρήθηκε στον ανιχνευτή TASSO.



Εικόνα 12.18 Η εξαύληση ζευγών ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου στον PETRA δημιουργεί μερικές φορές συμβάντα «τριών ηιδάκων» σαν αυτό που παρατηρήθηκε στον ανιχνευτή TASSO. Τέτοια συμβάντα πιστεύεται ότι οφείλονται στο «θρυμματισμό» ενός κουάρκ, ενός αντικουάρκ και ενός γλοιονίου σε συνήθη αδρόνια.



σωματίδια το όνομα *γλοϊόνια*, επειδή, με μια πολύ πραγματική έννοια, αποτελούν την κόλλα —το «γλοϊό»— που εξασφαλίζει τη συνοχή των πάντων. Τα φωτόνια συζευγνύονται με το συνηθισμένο ηλεκτρικό φορτίο των κουάρκ, ενώ τα γλοϊόνια συζευγνύονται με το χρωματικό τους φορτίο. Επιπλέον, τα γλοϊόνια φέρουν και τα ίδια χρωματικό φορτίο, οπότε η αρχή της βαθμίδας υπαγορεύει ότι, σε αντίθεση με το παράδειγμα των φωτονίων, τα γλοϊόνια πρέπει να αλληλεπιδρούν και μεταξύ τους. Οι φυσικοί πιστεύουν ότι σε τούτο έγκειται το βασικό χαρακτηριστικό που καθιστά την κβαντική χρωμοδυναμική τόσο διαφορετική από την κβαντική ηλεκτροδυναμική. Αλλά γιατί λέμε ότι η κβαντική χρωμοδυναμική είναι τόσο διαφορετική από την κβαντική ηλεκτροδυναμική; Διότι, βεβαίως, μπορούμε εύκολα να παρατηρούμε ηλεκτρόνια στο εργαστήριο, ενώ κανένας δεν κατόρθωσε ποτέ να παρατηρήσει ένα μεμονωμένο κουάρκ. Τα κουάρκ δεν τα έχουμε «δει» παρά μόνο σε συνδυασμό με άλλα κουάρκ και αντικουάρκ μέσα στα αδρόνια. Οι φυσικοί πιστεύουν ότι αυτό δεν είναι τυχαίο και ότι οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα κουάρκ και τα γλοϊόνια διευθετούνται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μη μας δίνουν τη δυνατότητα να απομονώσουμε ένα κουάρκ και να το παρατηρήσουμε μόνο του. Η εν λόγω ιδιότητα καλείται *εγκλωβισμός* των κουάρκ, και στην

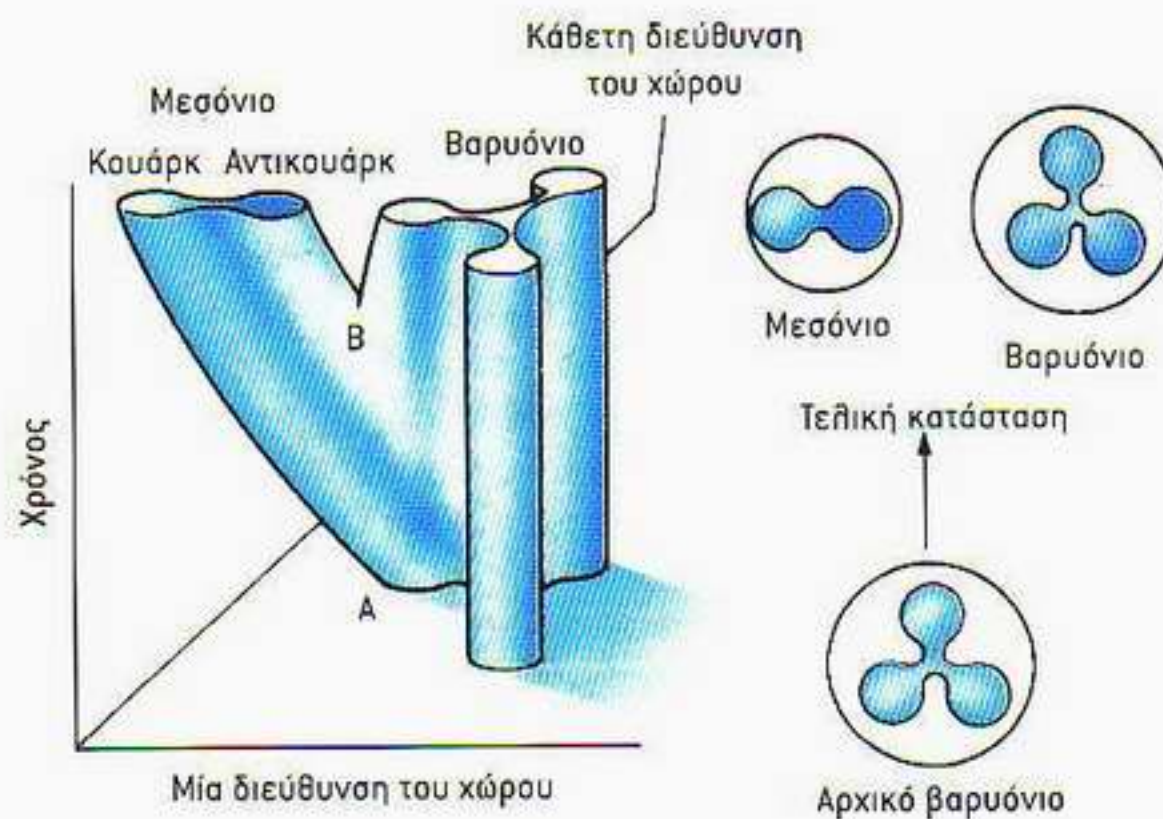
επόμενη ενότητα θα έχουμε την ευκαιρία να εξετάσουμε μερικές από τις ιδέες στις οποίες μπορεί να υπεισέρχεται.

Υπεραγωγοί, μαγνητικά μονόπολα και εγκλωβισμός των κουάρκ

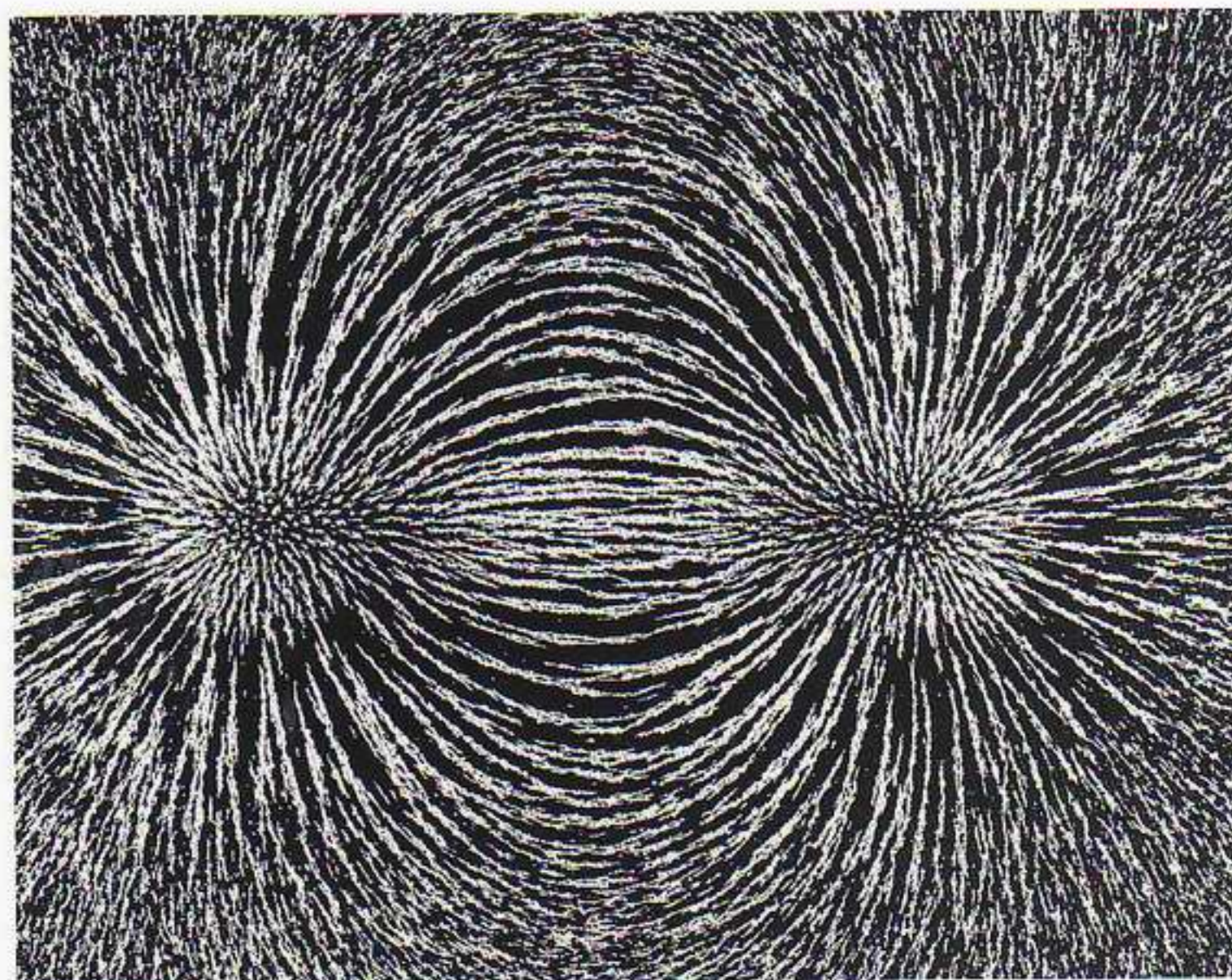
Στα πειράματα όπου μελετάμε συγκρούσεις σωματιδίων υψηλών ενεργειών, δεν έχουμε παρατηρήσει παρά μόνο κοινά αδρόνια. Μολονότι δεν έλειψαν κάποιες περιστασιακές εκρήξεις αδικαιολόγητου, εν τέλει, ενθουσιασμού, αντικείμενα με κλασματικό φορτίο, όπως τα κουάρκ, δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ. Για παράδειγμα, κατά τις συγκρούσεις πρωτονίων πολύ υψηλών ενεργειών δεν παρατηρούμε ποτέ διάσπαση πρωτονίων σε κουάρκ. Αντί τούτου, η ενέργεια των συγκρούσεων καταναλώνεται για να παραχθούν ολόκληρες στρατιές μεσονίων, βαρυονίων και αντιβαρυονίων. Ακόμη και στην αντίδραση στην οποία πιστεύουμε πως ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου εξαυλώνεται παράγοντας ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ κινούμενα προς αντίθετες κατευθύνσεις, ούτε και εδώ παρατηρούμε τα ίδια τα κουάρκ. Απομένει απλώς ένα υπόλειμμα της κίνησης του αρχικού κουάρκ και αντικουάρκ με τη μορφή δύο πιδάκων συνήθων αδρονίων. Επίσης, έχουν παρατηρηθεί και συμβάντα τριών πιδάκων, τα οποία αντιστοιχούν σε διάγραμμα Feynman όπου το κουάρκ ή το αντικουάρκ εκπέμπει ένα γλοϊόνιο υψηλής ενέργειας, αλλά σε κανέναν από αυτούς τους πίδακες δεν παρατηρούμε ελεύθερα κουάρκ ή γλοϊόνια.

Παρότι έχουμε πλέον συγκεντρώσει έναν τεράστιο όγκο τεκμηρίων που δείχνουν ότι τα αδρόνια όντως περιέχουν κουάρκ και γλοϊόνια, φαίνεται εντούτοις ότι οι αλληλεπιδράσεις τους ρυθμίζουν τα πράγματα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην έχουμε ποτέ τη δυνατότητα να απομονώσουμε ένα κουάρκ ή ένα γλοϊόνιο. Αν προσπαθήσουμε να αποσπάσουμε ένα κουάρκ από ένα βαρυόνιο, πρέπει να προσφέρουμε τόσο πολλή ενέργεια ώστε τελικά να δημιουργήσουμε ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ (Εικόνα 12.19). Έτσι, αντί να διασπάσουμε το βαρυόνιο, καταλήγουμε να πάρουμε ένα βαρυόνιο και ένα μεσόνιο. Στο πλαίσιο της εικόνας των κουάρκ, το μοντέλο ανταλλαγής μεσονίων του Yukawa για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις παύει να έχει θεμελιώδη σημασία. Οι μετρήσεις των συνεισφορών της ανταλλαγής πιονίων στις πυρηνικές δυνάμεις δεν μας προσφέρουν παρά μόνο πολύ έμμεσες πληροφορίες για τις βασικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ κουάρκ και γλοϊονίων. Αλλά το βασικό ερώτημα παραμένει: Πώς συμβαίνει ο εγκλωβισμός; Αν και κανείς δεν γνωρίζει με βεβαιότητα, έχουν εντούτοις διατυπωθεί μερικές αξιόλογες θεωρητικές υποθέσεις. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες ιδέες στηρίζεται, όπως και στην περίπτωση της ασθενούς δύναμης, σε μια αναλογία με τους υπεραγωγούς, αλλά τούτη τη φορά η διατύπωση του επιχειρήματος ακολουθεί νέο δρόμο.

Για να προχωρήσουμε παραπέρα, θα χρειαστεί πρώτα να εισαγάγουμε δύο νέες συλλογιστικές γραμμές. Η πρώτη αφορά την κλασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού. Όπως γνωρίζουν οι περισσότεροι από εμάς, ενώ τα ηλεκτρικά φορτία μπορούν να υπάρχουν ξεχωριστά, τα μαγνητικά φορτία μπορούν να υπάρχουν μόνο ως ζεύγη νότιου και βόρειου πόλου, όπως συμβαίνει στον γνωστό μας ραβδόμορφο μαγνήτη. Αν ένας μαγνήτης κοπεί στα δύο, δεν προκύπτουν ποτέ δύο απομονωμένα μαγνητικά μονόπολα αλλά δύο μικρότεροι



Εικόνα 12.19 Ένα μοντέλο για τα βαρυόνια και τα μεσόνια με το οποίο επιδεικνύεται παραστατικά ο εγκλωβισμός των κουάρκ. Για να γίνει δυνατή η σχεδίαση της εικόνας, ο χώρος παρουσιάζεται με δύο μόνο διαστάσεις. Τα κουάρκ παριστάνονται με ανοιχτούς γαλάζιους κύκλους και τα αντικουάρκ με σκούρους μπλε. Οι δυνάμεις των γλιονίων φαίνονται σαν ένα ελαστικό φύλλο που συγκρατεί τα κουάρκ μέσα στο αδρόνιο. Καθώς το κουάρκ Α σύρεται μακριά από τα υπόλοιπα κουάρκ, προσδίδεται τόσο πολλή ενέργεια στο σύστημα ώστε κάποια στιγμή δημιουργείται στο σημείο Β ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ και προκύπτουν δύο συνήθη βαρυόνια.

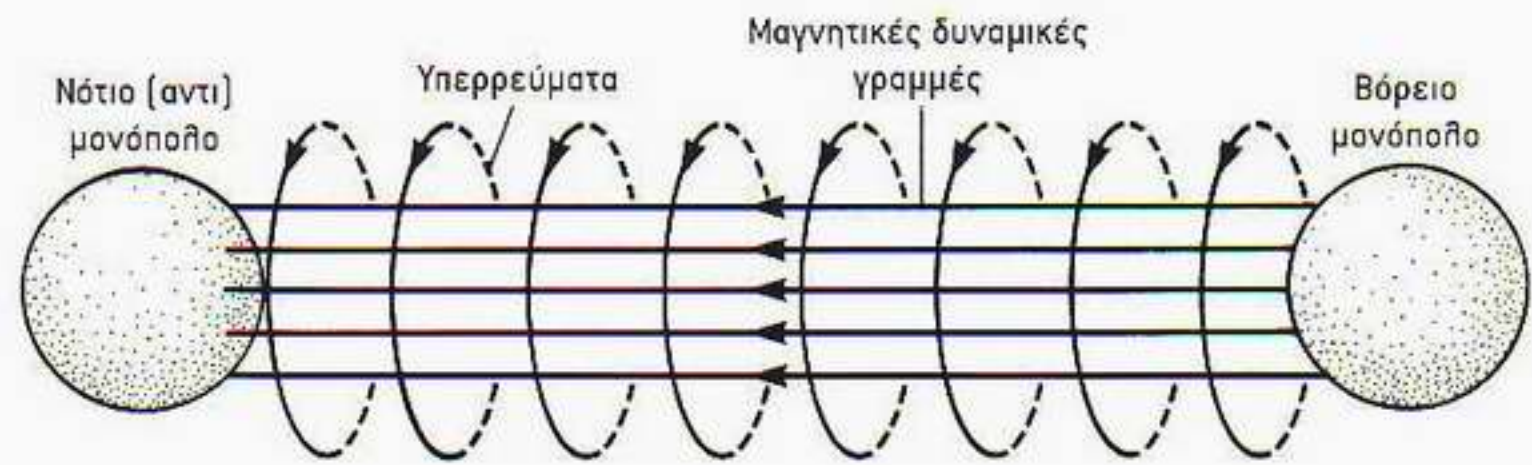


Εικόνα 12.20 Ρινίσματα σιδήρου σκορπισμένα πάνω σε χαρτί το οποίο έχουμε επιθέσει σε έναν ραβδόμορφο μαγνήτη αποκαλύπτουν την εικόνα των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου γύρω από το μαγνήτη.

μαγνήτες. Η αναλογία του μαγνήτη ενίοτε επιστρατεύεται για να εξηγηθεί ένας τύπος εγκλωβισμού —των μονοπόλων στην προκειμένη περίπτωση—, αλλά ο προτεινόμενος μηχανισμός για να εξηγηθεί ο εγκλωβισμός των κουάρκ είναι πιο περίπλοκος. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργού-

νται από ένα σύστημα φορτίων και ρευμάτων περιγράφονται από ένα σύνολο εξισώσεων, τις γνωστές εξισώσεις του Maxwell. Επειδή στη φύση δεν υπάρχουν ελεύθερα μαγνητικά μονόπολα, οι εν λόγω εξισώσεις δεν είναι απόλυτα συμμετρικές ως προς την εναλλαγή ηλεκτρικών και τα μαγνητικών πεδίων. Εάν, ωστόσο, υπήρχαν μεμονωμένα μαγνητικά φορτία και ρεύματα τέτοιων φορτίων, οι προκύπτουσες εξισώσεις θα παρουσίαζαν μια περίεργη δυαδική συμμετρία υπό την εναλλαγή ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Είναι τυπικό της κάπως εκκεντρικής πρωτοτυπίας του Dirac ότι υπήρξε ο πρώτος ο οποίος ασχολήθηκε σοβαρά με τις συνέπειες που θα είχε για την κβαντική μηχανική η ύπαρξη μαγνητικών μονοπόλων. Με μια επιχειρηματολογία υπερβολικά περίπλοκη για να την εκθέσουμε εδώ, ο Dirac έδειξε ότι η ύπαρξη ενός και μόνο κβαντικού μαγνητικού μονοπόλου θα συνεπαγόταν ότι όλα τα ηλεκτρικά φορτία στη φύση θα έπρεπε να είναι ακριβή πολλαπλάσια του φορτίου του ηλεκτρονίου! Αν η μόλις προηγηθείσα συζήτηση για τα υποθετικά μαγνητικά μονόπολα φαίνεται μάλλον απομακρυσμένη από την πραγματικότητα, η δεύτερη συλλογιστική γραμμή που πρέπει να εισαγάγουμε εδράζεται σταθερά στο πείραμα. Όπως εξηγήσαμε σε άλλη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, τα ρεύματα θωράκισης εξουδετερώνουν οποιοδήποτε μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε έναν υπεραγωγό. Στην πραγματικότητα, διαπιστώθηκε πειραματικά ότι υπάρχουν δύο τύποι «κλασικών» υπεραγωγών —πέραν των υπεραγωγών υψηλών θερμοκρασιών. Υπεραγωγοί τύπου I είναι εκείνοι όπου το μαγνητικό πεδίο εξουδετερώνεται πλήρως στο εσωτερικό, όπως ήδη περιγράψαμε. Στους υπεραγωγούς τύπου II, από την άλλη, το μαγνητικό πεδίο δεν αποκλείεται εντελώς από το μέταλλο, αλλά του επιτρέπεται να διέρχεται μέσα από αυτό σε λεπτούς κυλινδρικούς (βλ. Εικόνα 7.22). Εδώ συναντούμε και ένα άλλο απροσδόκητο αποτέλεσμα της κβαντικής μηχανικής: το μαγνητικό πεδίο που διαπερνά κάθε κυλινδρικό είναι κβαντωμένο και μπορεί να λαμβάνει ορισμένες μόνο τιμές.

Τώρα είμαστε έτοιμοι να εξηγήσουμε πώς θα μπορούσε να γίνεται ο εγκλωβισμός των κουάρκ. Ας υποθέσουμε ότι η κατάσταση κενού της κβαντικής χρωμοδυναμικής μοιάζει με έναν υπεραγωγό τύπου II. Λόγω της στενής ομοιότητας που συνδέει την κβαντική χρωμοδυναμική με την κβαντική ηλεκτροδυναμική, δεν θα πρέπει να μας προξενεί έκπληξη το ότι η κβαντική χρωμοδυναμική έχει τόσο έγχρωμα ηλεκτρικά πεδία όσο και έγχρωμα μαγνητικά πεδία. Ένα κενό συμπεριφερόμενο όπως ένας υπεραγωγός τύπου II θα επιτρέπει στα έγχρωμα μαγνητικά πεδία να υπάρχουν μόνο με μορφή λεπτών κυλινδρικών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.21. Το κβαντωμένο μαγνητικό πεδίο που θα επιτρέπεται στους κυλινδρικούς αποδεικνύεται ότι έχει ακριβώς την τιμή την οποία χρειάζεται το πεδίο για να αρχίζει και να τελειώνει σε ένα έγχρωμο μαγνητικό μονόπολο. Και τι σχέση έχει αυτό με τον εγκλωβισμό; Η Εικόνα 12.20 δείχνει τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη όπως αυτές γίνονται ορατές μέσω της χαρακτηριστικής εικόνας που σχηματίζουν τα ρινίσματα σιδήρου. Αν το συγκρίνουμε με αυτή την εικόνα, το μαγνητικό πεδίο του ζεύγους μονοπόλου-αντιμονοπόλου που θα διαπερνά έναν υπεραγωγό τύπου II είναι πολύ διαφορετικό. Ηλεκτρικά ρεύματα θωράκισης περιρρέουν τους κυλινδρικούς και αναγκάζουν τις γραμμές του έγχρωμου μαγνητικού πεδίου να μένουν στριμωγμένες σε έναν πολύ λεπτό σωλήνα. Αν μπορούσαμε να κανονίσουμε τα πράγματα ώστε το ίδιο να συμβαίνει και με το έγχρωμο ηλεκτρικό πεδίο, με κουάρκ και αντικου-

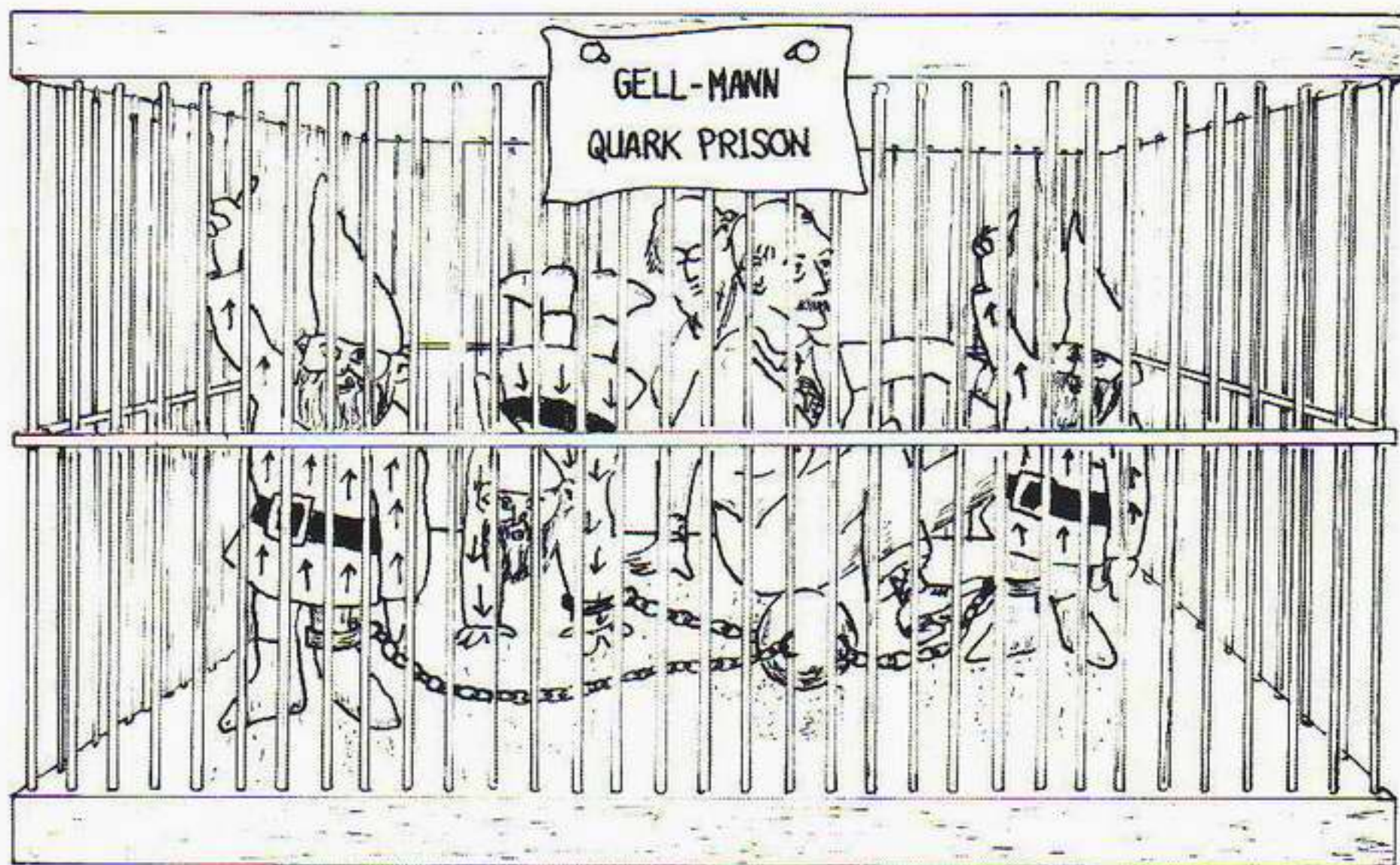


Εικόνα 12.21 Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που συνδέουν ένα ζεύγος μαγνητικού μονοπόλου-αντιμονοπόλου μέσα σε έναν υπεραγωγό. Το μαγνητικό πεδίο συμπιέζεται σε έναν στενό σωλήνα από τα υπερρεύματα των ζευγών Cooper τα οποία κυκλοφορούν γύρω του. Ο εγκλωβισμός των κουάρκ πιστεύεται ότι οφείλεται σε έναν παράμοιο μηχανισμό —το συνηθισμένο κενό δρα σαν «δυσδικός υπεραγωγός», στον οποίο τα ρεύματα που δημιουργούνται από την κυκλοφορία μαγνητικών μονοπόλων συμπιέζουν το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ ενός κουάρκ και ενός αντικουάρκ σε έναν στενό σωλήνα.

άρκ στις θέσεις του μονοπόλου και του αντιμονοπόλου, τότε θα είχαμε ακριβώς τη μορφή του πεδίου που χρειαζόμαστε για τον εγκλωβισμό των κουάρκ. Και τούτο διότι, αν οι γραμμές του πεδίου στριμώνονται σε έναν πολύ λεπτό σωλήνα, τότε η ενέργεια η οποία απαιτείται για να διαχωρίσουμε ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ θα αυξάνεται σε ευθεία αναλογία με την απόσταση που χωρίζει τα δύο σωματίδια. Εν τοιαύτη περίπτωση, η απομάκρυνση του κουάρκ από το αντικουάρκ σε άπειρη απόσταση θα απαιτούσε άπειρη ενέργεια. Σε αυτό ακριβώς έγκειται η πεμπουσία του εγκλωβισμού των κουάρκ.

Ός τώρα εξηγήσαμε τον εγκλωβισμό των μονοπόλων, όχι όμως και των κουάρκ. Ωστόσο, όπως υποσχεθήκαμε, η ιστορία αυτή κρύβει μία ακόμη τελική ανατροπή. Κάθε σύστημα κουάρκ-αντικουάρκ το συνέχει ένα έγχρωμο ηλεκτρικό πεδίο, όχι ένα έγχρωμο μαγνητικό πεδίο, διότι τα κουάρκ δεν έχουν μαγνητικό φορτίο και δεν είναι μαγνητικά μονόπολα. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε την περίεργη συμμετρία που παρουσιάζουν οι εξισώσεις του Maxwell παρουσία μονοπόλων υπό την εναλλαγή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Στηριζόμενοι σε τούτη τη δυαδική συμμετρία, βλέπουμε ότι τα ηλεκτρικά πεδία θα στριμώνονται μέσα σε λεπτούς σωλήνες όπως απαιτείται για τον εγκλωβισμό των κουάρκ, αρκεί το κενό να συμπεριφέρεται ως η δυαδική εκδοχή ενός υπεραγωγού τύπου II. Αντί για ρεύματα ζευγών Cooper γύρω από τους λεπτούς κυλινδρικούς που περιέχουν μαγνητικά πεδία, στο φυσικό κενό τώρα θα υπάρχουν ρεύματα μαγνητικών μονοπόλων που παγιδεύουν λεπτούς σωλήνες μέσα στους οποίους θα στριμώνονται ηλεκτρικά πεδία. Πρόκειται για μια πραγματικά κομψή ιδέα στην οποία θα μπορούσε να βασιστεί ένα μοντέλο για τον εγκλωβισμό. Αλλά πώς ξέρουμε αν το κενό της κβαντικής χρωμοδυναμικής όντως μοιάζει με έναν δυαδικό υπεραγωγό τύπου II;

Υπάρχει, άραγε, κάποιος τρόπος να ελεγχθούν αυτές οι ιδέες περί εγκλωβισμού και να διερευνηθούν οι πλευρές της κβαντικής χρωμοδυναμικής οι σχετικές με τις αλληλεπιδράσεις σε μεγάλες αποστάσεις; Το 1973, ο David Politzer, και ανεξάρτητα οι David Gross και Frank Wilczek, απέδειξαν ότι η κβαντική χρωμοδυναμική έχει την αξιοσημείωτη ιδιότητα η ενεργός σταθερά σύζευξης να μειώνεται όσο μειώνονται οι αποστάσεις. Τούτο σημαίνει ότι, καίτοι η κβαντική χρωμοδυναμική περιγράφει τις πανίσχυρες δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κουάρκ και οδηγούν στον εγκλωβισμό



Εικόνα 12.22 Ο κύριος Τόμπκινς μέσα στο πρωτόνιο. Στην εικόνα αυτή προσθέτουμε ένα ακόμη κεφάλαιο στις περιπέτειες του κυρίου Τόμπκινς. Μέσα στο πρωτόνιο, ο ηρώας μας συναντά τρεις σκανταλιάρηδες νάνους-κουάρκ καταδικασμένους σε αιώνιο εγκλωβισμό στη «φυλακή κουάρκ» του Gell-Mann. Ο κύριος Τόμπκινς ένωσε φρίκη για τις συνθήκες της φυλακής. Οι νάνοι ήταν αλυσσοδεμένοι όλοι μαζί από τους αστραγάλους τους, έδιναν όμως την εντύπωση ότι δεν ποθνοιάζονταν για τον ασφυκτικό εγκλωβισμό τους. Μάλιστα, κουβαριασμένοι στη μέση της φυλακής, υποστήριζαν χαρούμενα ότι ήταν ελεύθεροι. «Είναι πράγματι άνετα» δήλωσαν· όμως ο κύριος Τόμπκινς δεν ήταν και τόσο βέβαιος. «Αφήστε με τώρα να σας δείξω ένα κόλπο» είπε κάποιο από τα τρία κουάρκ, το οποίο στεκόταν ανάποδα με τα χέρια στο πάτωμα. Ο κύριος Τόμπκινς και ο καθηγητής δέχτηκαν να το κρατήσουν γερά και να το τραβήξουν. Το κουάρκ πείσμωνε όλο και περισσότερο, και ζητούσε να το τραβούν ακόμη πιο δυνατά. Ξαφνικά η αλυσίδα έσπασε, και όλοι κατρακύλησαν έξω από τη φυλακή. Όταν ο κύριος Τόμπκινς κατάφερε να συνέρθει, αντίκρισε ένα εκπληκτικό θέαμα. Έξω από τη φυλακή υπήρχαν δύο κουάρκ αλυσσοδεμένα μεταξύ τους! Ο κύριος Τόμπκινς έτριψε τα μάτια του και στράφηκε προς τον καθηγητή, ο οποίος του εξήγησε ότι το δεύτερο κουάρκ ήταν στην πραγματικότητα αντικουάρκ. Ο κύριος Τόμπκινς εξακοιτουβούσε να είναι σαστισμένος και σάστισε ακόμη περισσότερο όταν είδε πως πίσω στη φυλακή υπήρχαν πάλι τρία χαρούμενα κουάρκ, ακόμη αλυσσοδεμένα μαζί. Ο καθηγητής άρχισε να του εξηγεί ότι, όποτε σπάει μία γλοιονική αλυσίδα, εμφανίζονται πάντοτε ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ, αλλά ο κύριος Τόμπκινς είχε πάψει πια να τον ακούει. Δεν άντεχε άλλο!

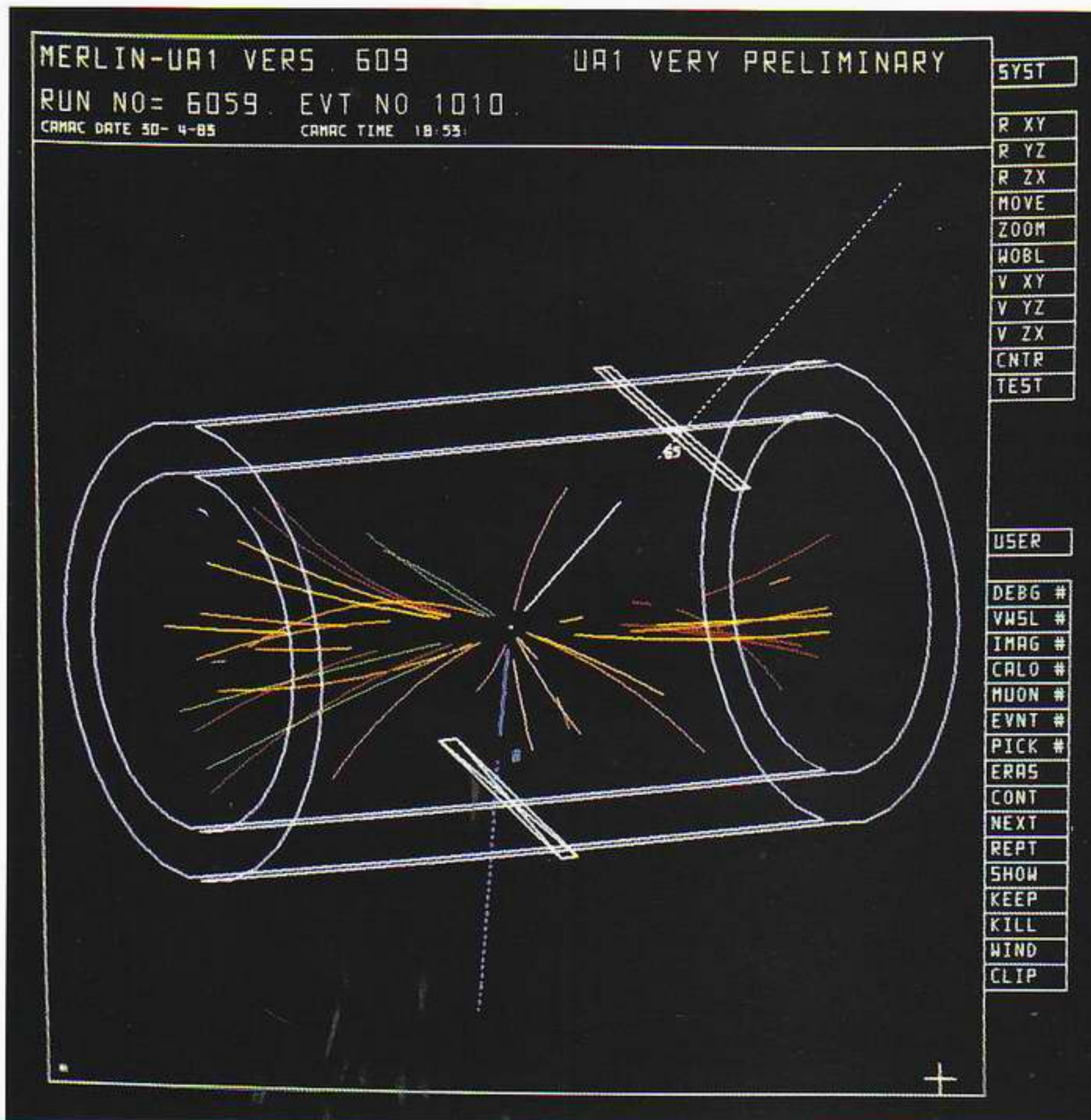
τους σε μεγάλες αποστάσεις, σε μικρές αποστάσεις επιτρέπεται η ανάπτυξη των πλατών πιθανότητας σε σειρές δυνάμεων της σταθεράς σύζευξης και αντίστοιχων διαγραμμάτων Feynman προκειμένου να γίνουν προβλέψεις ελέγξιμες από το πείραμα. Χάρη στην ιδιότητά της αυτή —η οποία είναι γνωστή ως *ασυμπτωτική ελευθερία*—, η κβαντική χρωμοδυναμική μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία στην περιγραφή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των πειραμάτων σκέδασης πλεκτρονίων και νετρίνων υψηλής ενέργειας. Η αρνητική πλευρά της ασυμπτωτικής ελευθερίας έγκειται στο ότι συνεπάγεται αύξηση της ενεργού σταθεράς σύζευξης με την απόσταση. Στην περιοχή των μεγάλων αποστάσεων, επομένως, δεν επιτρέπεται η «διαταρακτική» ανάπτυξη σε σειρά δυνάμεων της σταθεράς σύζευξης, καθότι οι όροι που αντιστοι-

χούν σε υψηλότερες δυνάμεις της σταθεράς σύζευξης είναι τουλάχιστον εξίσου σημαντικοί με όσους αντιστοιχούν στις χαμηλότερες δυνάμεις. Αν, όμως, δεν επιτρέπεται η ανάπτυξη σε διαγράμματα Feynman, πώς μπορούμε να ελπίζουμε ότι θα εξαγάγουμε ποτέ πληροφορίες όσον αφορά τις «μη διαταρακτικές» πλευρές της κβαντικής χρωμοδυναμικής και φαινόμενα όπως ο εγκλωβισμός; Πολλοί φυσικοί προσπαθούν να απαντήσουν στο ερώτημα αυτό επιχειρώντας να λύσουν αριθμητικά τις εξισώσεις της κβαντικής χρωμοδυναμικής με τη βοήθεια πανίσχυρων υπολογιστών! Για να αποκτήσουν οι εν λόγω εξισώσεις την κατάλληλη μορφή ώστε να εισαχθούν σε υπολογιστή, πρέπει να γίνουν πρώτα μερικές μάλλον δραστικές προσεγγίσεις. Η σημαντικότερη από αυτές είναι ότι ο συνεχής χωρόχρονος αντικαθίσταται από ένα διακριτό σύνολο σημείων ενός τετραδιάστατου «πλέγματος». Επιπλέον, για να διαχειριστούν τα κβαντικά πλάτη που ταλαντώνονται με ταχύ ρυθμό, οι φυσικοί, πλήρεις θράσους, στρέφουν τον άξονα του χρόνου στο μιγαδικό επίπεδο έτσι ώστε να συμπίσει με τον φανταστικό άξονα. Οι υπολογιστικές τεχνικές που απαιτούνται για την επίλυση της προκύπτουσας θεωρίας βαθμίδας στο πλέγμα στηρίζονται στο φορμαλισμό των κβαντικών διαδρομών που ανέπτυξε ο Feynman για την κβαντική μηχανική. Πρωτοπόρο ρόλο στη δημιουργία αυτού του προγράμματος για τη μελέτη της κβαντικής χρωμοδυναμικής σε πλέγμα διαδραμάτισαν οι αμερικανοί φυσικοί Ken Wilson και Michael Creutz τη δεκαετία του 1970. Για να αποφέρει η προσέγγιση του χωροχρόνου μέσω ενός σταθερού συνόλου διακριτών σημείων αποτελέσματα ικανά να συσχετιστούν με εκείνα της συνεχούς εκδοχής της κβαντικής χρωμοδυναμικής, απαιτείται πλέγμα με μεγάλο πλήθος σημείων και στις τέσσερις διαστάσεις. Και κάτι τέτοιο, με τη σειρά του, απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Για το λόγο αυτό, φυσικοί σε κάθε γωνιά του πλανήτη προσπαθούν να ενώσουν τους υπολογιστικούς τους πόρους για να δημιουργήσουν έναν παράλληλο υπερυπολογιστή αρκετά ισχυρό ώστε να δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Μέχρι στιγμής, τα αποτελέσματα τέτοιων υπολογιστικών προσομοιώσεων είναι πολύ ενθαρρυντικά και συνεισφέρουν πρόσθετα τεκμήρια υπέρ της άποψης ότι η κβαντική χρωμοδυναμική αποτελεί πράγματι την ορθή υποκείμενη θεωρία.

Πέρα από το Καθιερωμένο Μοντέλο

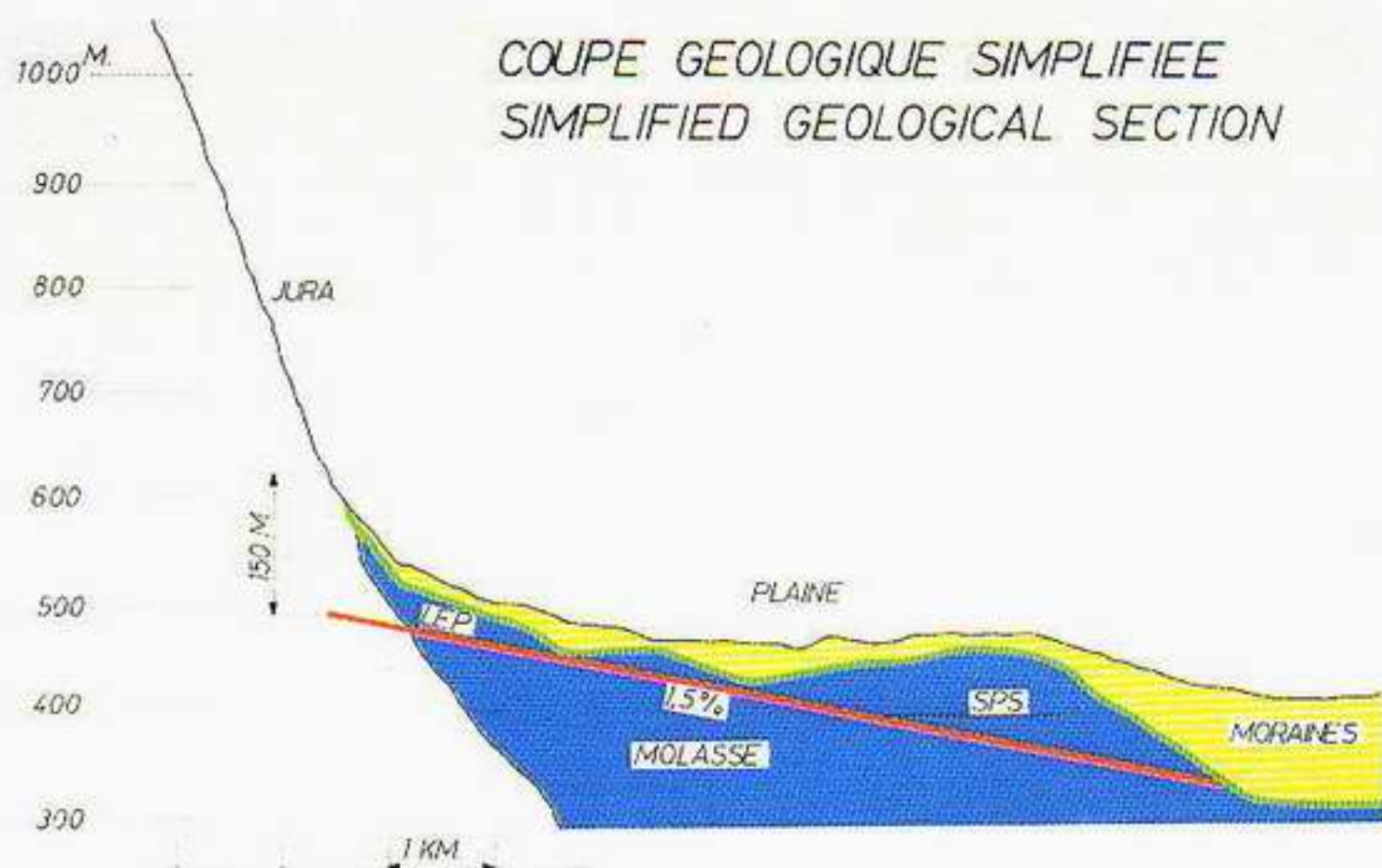
Τι απομένει να γίνει ακόμη; Ο επιταχυντής συγκρουόμενων δεσμών LEP στο CERN επιβεβαίωσε την ύπαρξη των W και Z , ενώ ήλεγξε και άλλες προβλέψεις της θεωρίας GSW (Εικόνα 12.23). Παρά τους εκπληκτικούς αυτούς πειραματικούς θριάμβους που κατήγαγε το Καθιερωμένο Μοντέλο, διάφορα θεμελιώδη ερωτήματα παραμένουν ακόμη αναπάντητα. Αν και το εν λόγω μοντέλο εύκολα επεκτείνεται ώστε να συμπεριλάβει το μιονίο και το ταυ μαζί με τα αντίστοιχα νετρίνα τους δίπλα στη δυάδα ηλεκτρονίου-νετρίνου, στο πλαίσιο του δεν υπάρχει κανένας πειστικός λόγος που να επιβάλλει την ύπαρξή τους ούτε και διατυπώνεται κάποια πρόβλεψη για τις μάζες τους. Επίσης, ουσιαστικά δεν κατανοούμε γιατί υπάρχουν τρεις δυάδες κουάρκ —πάνω-κάτω, παράδοξο-γοητευτικό και κορυφή-πυθμένας— οι οποίες συνοδεύουν τις δυάδες των λεπτονίων, όπως και δεν κατανοούμε γιατί οι μάζες των κουάρκ παίρνουν τόσο διαφορετικές τιμές.

Επιπλέον, μένει να επιβεβαιωθεί ένα ακόμη κρίσιμο στοιχείο του όλου οικοδομήματος. Πρόκειται, φυσικά, για το μυστηριώδες σωματίδιο Higgs.

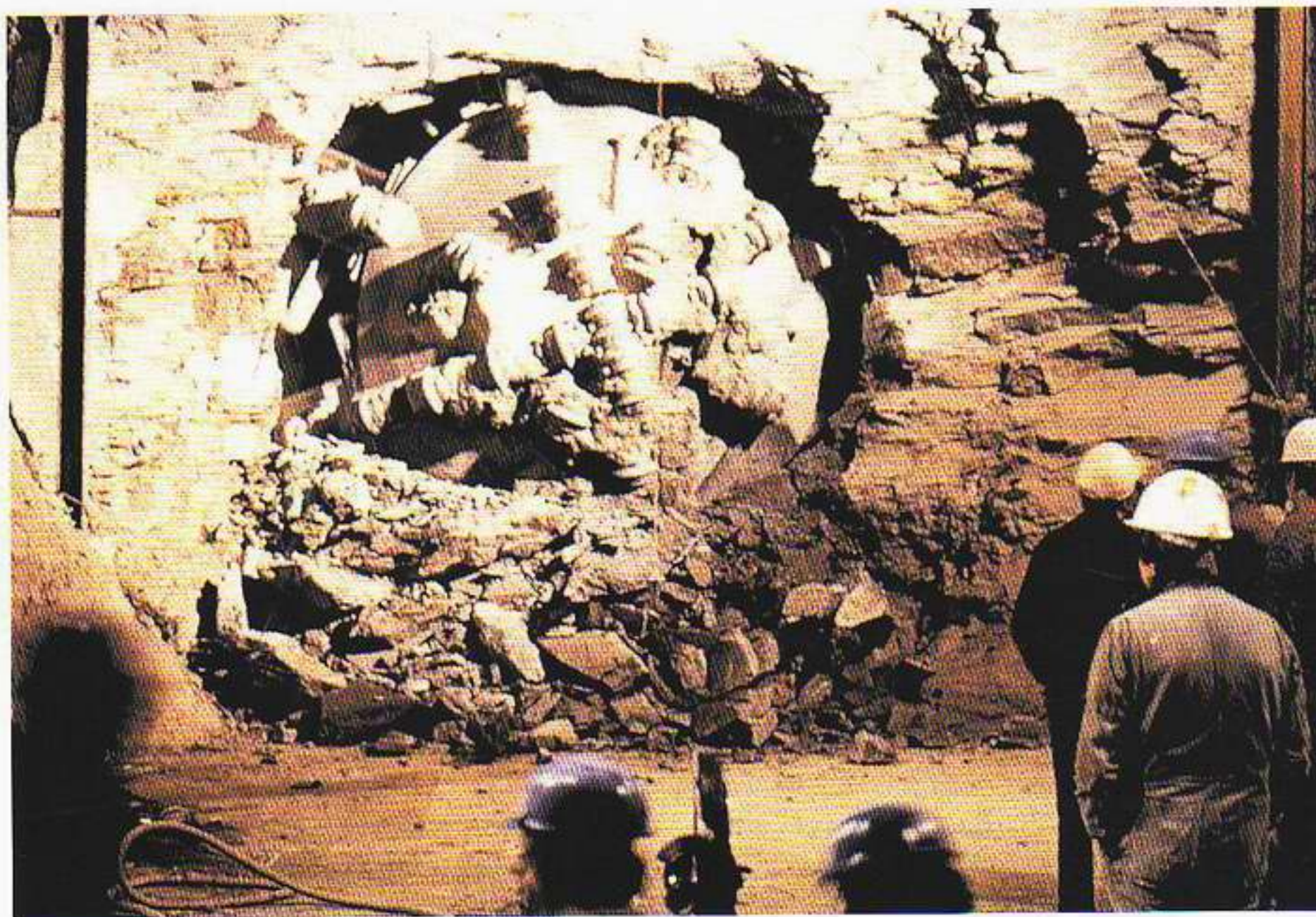


Εικόνα 12.23 Έγχρωμη γραφική απεικόνιση της δημιουργίας ενός ασθενούς μποζονίου Z σε μια σύγκρουση πρωτονίου-αντιπρωτονίου. Το σωματίδιο Z αναγνωρίζεται από το μπλε και λευκά ίχνη που εξέρχονται από τα πλευρικά τοιχώματα του κυλινδρικού ανιχνευτή. Τα ίχνη αυτά τα άφησαν το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο στα οποία διασπάστηκε το Z. Το συγκεκριμένο συμβάν παρατηρήθηκε στο πείραμα UA1, το οποίο καθοδηγούσε ο νομπελίστας Carlo Rubbia.

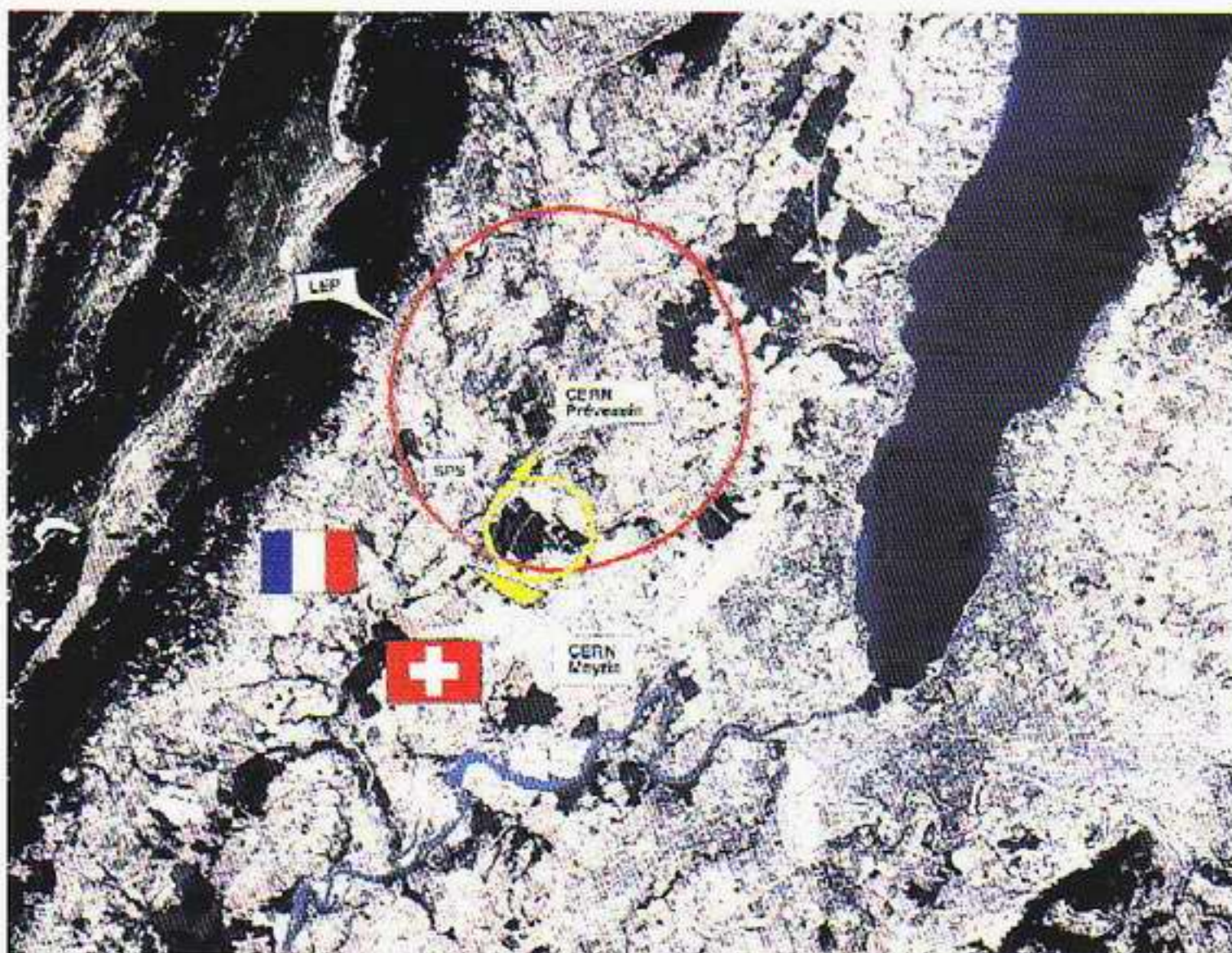
Η όποια απόπειρα πειραματικής ανακάλυψης του εν λόγω σωματιδίου προσκρούει στο γεγονός ότι, στο πλαίσιο του Καθιερωμένου Μοντέλου, δεν μπορεί να γίνει απολύτως καμία πρόβλεψη για τη μάζα του. Προς τούτους δε, το ανάλογο του σωματιδίου Higgs στη φυσική των υπεραγωγών είναι το ζεύγος πλεκτρονίων Cooper. Επομένως, το σωματίδιο Higgs ενδέχεται να μην είναι ένα γνήσιο στοιχειώδες σωματίδιο —μπορεί κάλλιστα να αποδειχθεί σύνθετο. Εν πάση περιπτώσει, πιστεύεται ότι σε ενέργειες της τάξεως του 1 τρισεκατομμυρίου ηλεκτρονιοβόλτ (1 TeV) πρέπει να εκδηλώνονται κάποια από τα χαρακτηριστικά φαινόμενα του Higgs. Με αυτή την προοπτική, κατασκευά-



Εικόνα 12.24 Εγκάρσια διατομή της ορεινής περιοχής κοντά στη Γενεύη, η οποία δείχνει τη θέση της σήραγγας των επιταχυντών LEP και LHC.



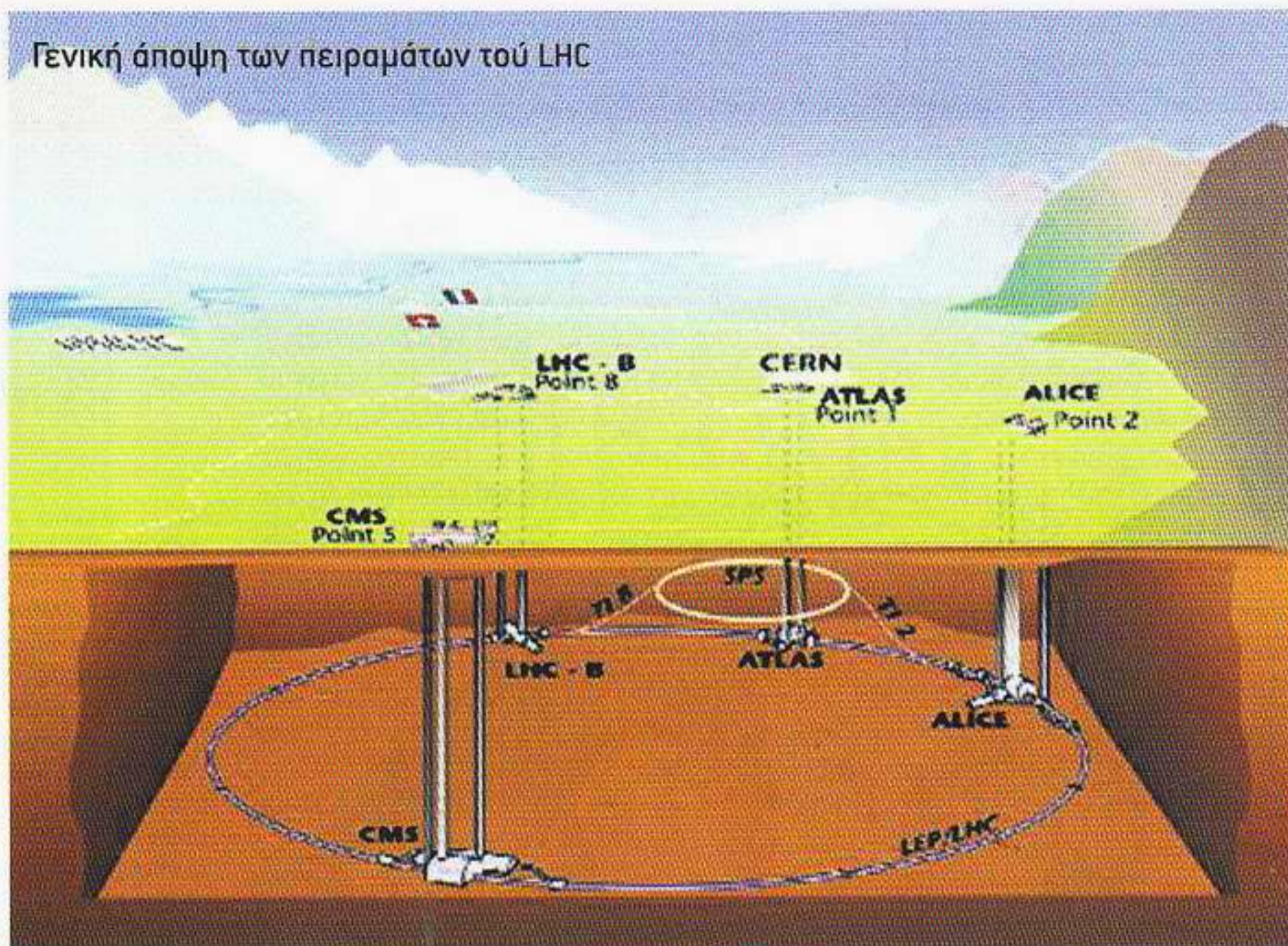
Εικόνα 12.25 Ειδικός «μετροπόντικας» επιστρατεύθηκε για να διανοιχθεί η σήραγγα του επιταχυντή LEP, η οποία τώρα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες του LHC, βαθιά κάτω από τα γαλλοελβετικά σύνορα κοντά στη Γενεύη. Ο δακτύλιος των υπεραγωγίων μαγνητών που συγκροτούν τον επιταχυντή LHC είναι εγκατεστημένος μέσα σε αυτή τη σήραγγα.



Εικόνα 12.26 Αεροφωτογραφία του εργαστηρίου CERN στα γαλλοεθβετικά σύνορα, λίγο έξω από τη Γενεύη της Ελβετίας. Ο μεγάλος κύκλος δείχνει τη διαδρομή της υπόγειας σήραγγας του LEP, η οποία τώρα χρησιμοποιείται για τον επιταχυντή LHC.

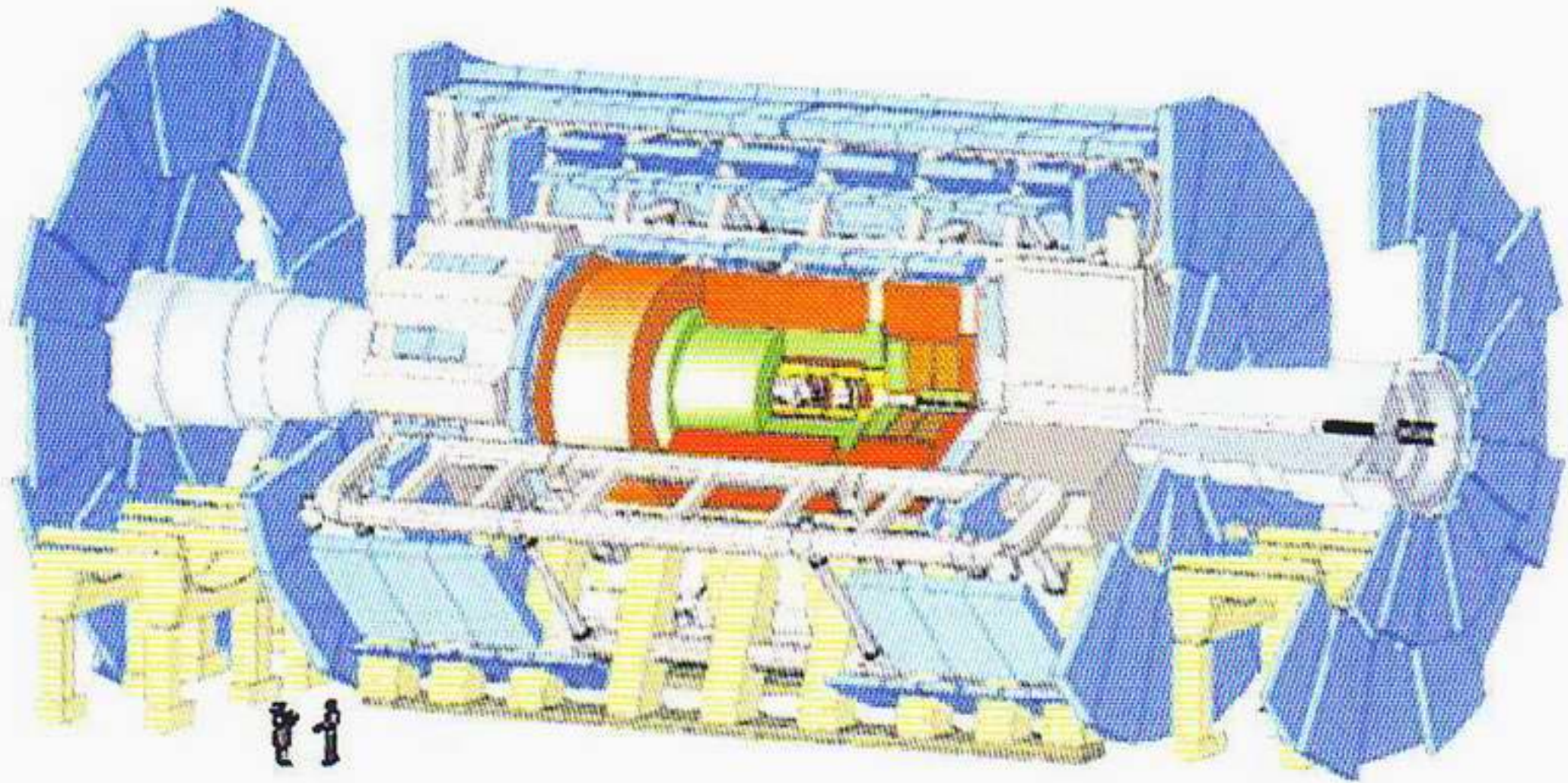
ζεται στο CERN ο Μεγάλος Αδρονικός Επιταχυντής (LHC), ο οποίος θα χρησιμοποιεί την ίδια σήραγγα όπως και ο LEP. Φυσικοί από όλο τον κόσμο σχεδιάζουν και κατασκευάζουν δύο γιγαντιαίους νέους ανιχνευτές για τον LHC ικανούς να ανακαλύψουν το μποζόνιο Higgs.

Υπάρχουν, άραγε, ενδείξεις που να υπόσχονται νέα φυσική πέραν του Καθιερωμένου Μοντέλου; Βεβαίως ναι! Έχουμε πλέον μερικές ενδιαφέρουσες ενδείξεις από τις οποίες διαφαίνεται ότι το Καθιερωμένο Μοντέλο ίσως χρειάζεται επέκταση. Η πρώτη αφορά το ερώτημα κατά πόσον τα νετρίνα έχουν μάζα μηδενική, όπως τα φωτόνια, ή μη μηδενική. Στην απλούστερη εκδοχή του Καθιερωμένου Μοντέλου γίνεται δεκτό ότι και τα τρία νετρίνα έχουν μηδενική μάζα. Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 10, στα πειράματα ανίχνευσης νλιακών νετρίνων παραγόμενων από πυρηνικές αντιδράσεις στον Ήλιο, παρατηρούμε λιγότερα ηλεκτρονικά νετρίνα απ' ό,τι αναμενόταν βάσει προσεκτικών υπολογισμών. Μια πιθανή εξήγηση του παρατηρούμενου ελλείμματος ηλεκτρονικών νετρίνων είναι ότι έχουν μη μηδενική μάζα που τους επιτρέπει να «ταλαντώνονται» μετατρέπόμενα σε κάποιο συνδυασμό νετρίνων του μιονίου και του ταυ. Μέχρι πρόσφατα, τα αποτελέσματα των ερευνών για τα νλιακά νετρίνα συνέχιζαν να αποτελούν ένα αίνιγμα το οποίο βασανιστικά αποζητούσε λύση. Απαιτούνταν περισσότερα πειραματικά τεκμήρια για τις πιθανές νετρινικές ταλαντώσεις. Η κατάσταση αυτή άλλαξε άρδην εσχάτως με τα συναρπαστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από ένα τεράστιο νέο πείραμα ανίχνευσης νλιακών νετρίνων, το γνωστό Super-Kamiokande. Για την πραγματοποίησή του εν λόγω πειράματος, 50.000 τόνοι νερού και 11.200 φωτοπολλαπλασιαστές τοποθετήθηκαν σε βάθος 2.700 μέτρων κάτω από την επιφάνεια της Γης, μέσα στο ορυχείο Kamioka Mozumi στην Ιαπωνία. Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι ανιχνευτές φωτός, ικανοί να ανιχνεύουν έστω και ένα μόνο φωτόνιο. Τα νετρίνα αλληλεπι-

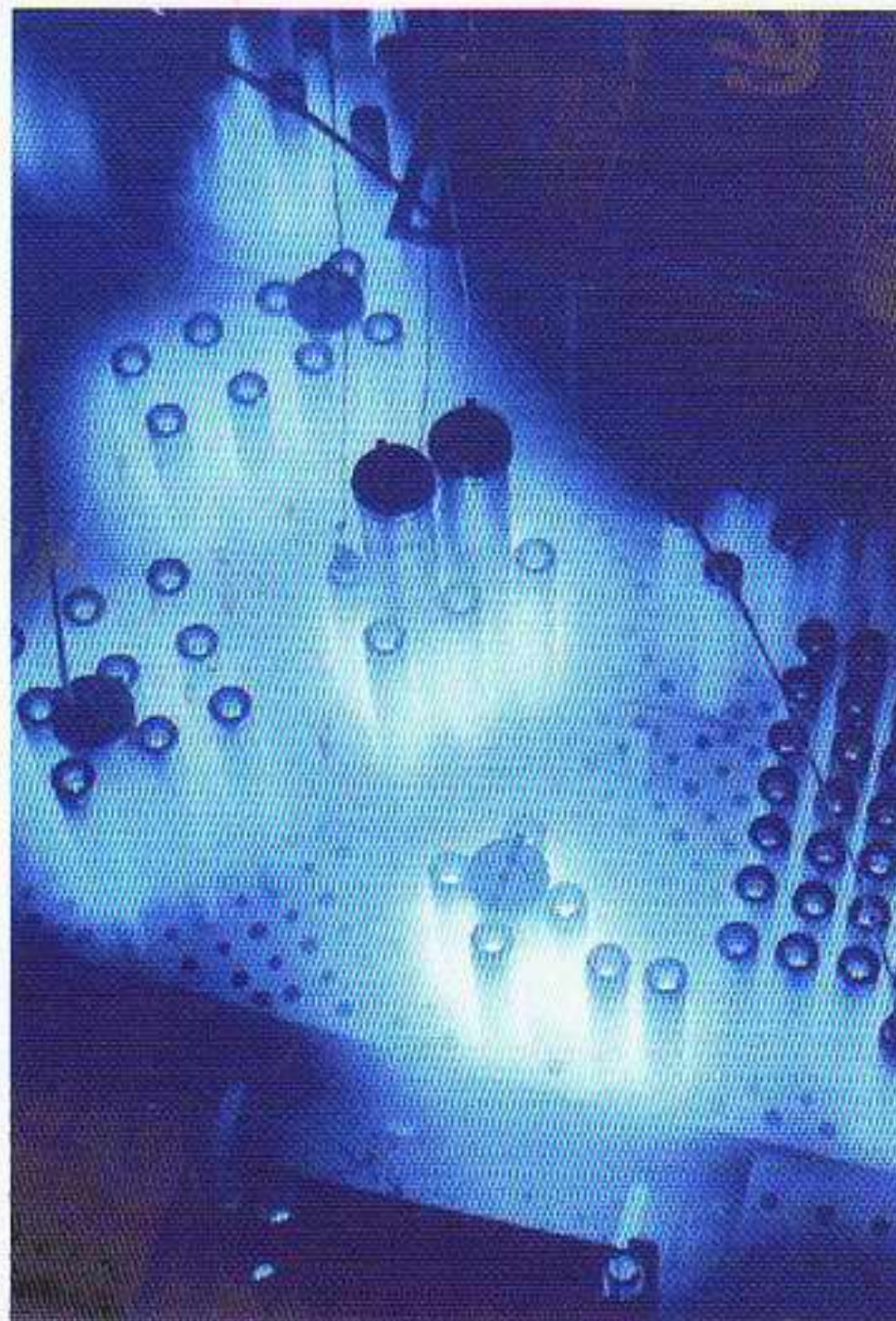


Εικόνα 12.27 Εγκάρσια διατομή του Μεγάλου Αδρονικού Επιταχυντή (LHC) στο CERN όπου φαίνονται τα τέσσερα πειραματικά ορύγματα (αρχικά θα καταληφθούν μόνο τα τρία). Κάθε πειραματική ομάδα που θα εργαστεί στα πειράματα του LHC συγκροτείται από χίλιους και πλέον φυσικούς, οι οποίοι προέρχονται από εκατό και πλέον ινστιτούτα της Ευρώπης, των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας. Αναμένονται τέτοιος όγκος δεδομένων και τόσο αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις, ώστε οι σωματιδιακοί φυσικοί βοήθησαν στην ανάπτυξη μιας νέας υποδομής κατανεμημένης επεξεργασίας δεδομένων, η οποία είναι γνωστή ως «Πλέγμα». Ακριβώς όπως ο Tim Berners-Lee και η κοινότητα των σωματιδιακών φυσικών στο CERN ανέπτυξαν τον Παγκόσμιο Ιστό με σκοπό να μοιράζονται τις πληροφορίες τους, έτσι και το Πλέγμα θα δώσει στους σωματιδιακούς φυσικούς τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν από κοινού δεδομένα και υπολογιστικούς πόρους.

δρούν μέσα στον ανιχνευτή, δημιουργώντας είτε ηλεκτρόνια είτε μόνια που παράγουν ακτινοβολία Cerenkov. Ακτινοβολία Cerenkov παράγεται όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο ταξιδεύει με ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη του φωτός στο νερό. Πρόκειται για φαινόμενο παρόμοιο με το ηχητικό κρουστικό κύμα που προκαλεί η πτήση ενός υπερηχητικού αεροπλάνου. Ο ανιχνευτής τοποθετείται βαθιά μέσα στη γη ώστε να προφυλάσσεται από τα μόνια της κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία θα κατέπνιγαν το σήμα που οφείλεται σε μόνια δημιουργούμενα κατά τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων μέσα στο νερό. Εκτός του ότι αναμένεται να επιβεβαιώσει το αποτέλεσμα των παλαιότερων ερευνών σχετικά με τα ηλιακά νετρίνα, το πείραμα μπορεί να μετρήσει και τα «ατμοσφαιρικά νετρίνα» —ηλεκτρονικά και μιονικά νετρίνα που καταφθάνουν στον ανιχνευτή ως αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων της κοσμικής ακτινοβολίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Το πλήθος των μιονικών νετρίνων βρίσκεται σημαντικά μικρότερο του αναμενομένου, και τα αποτελέσματα αποτελούν πειστικά τεκμήρια υπέρ του ότι και τα μιονικά νετρίνα πρέπει να

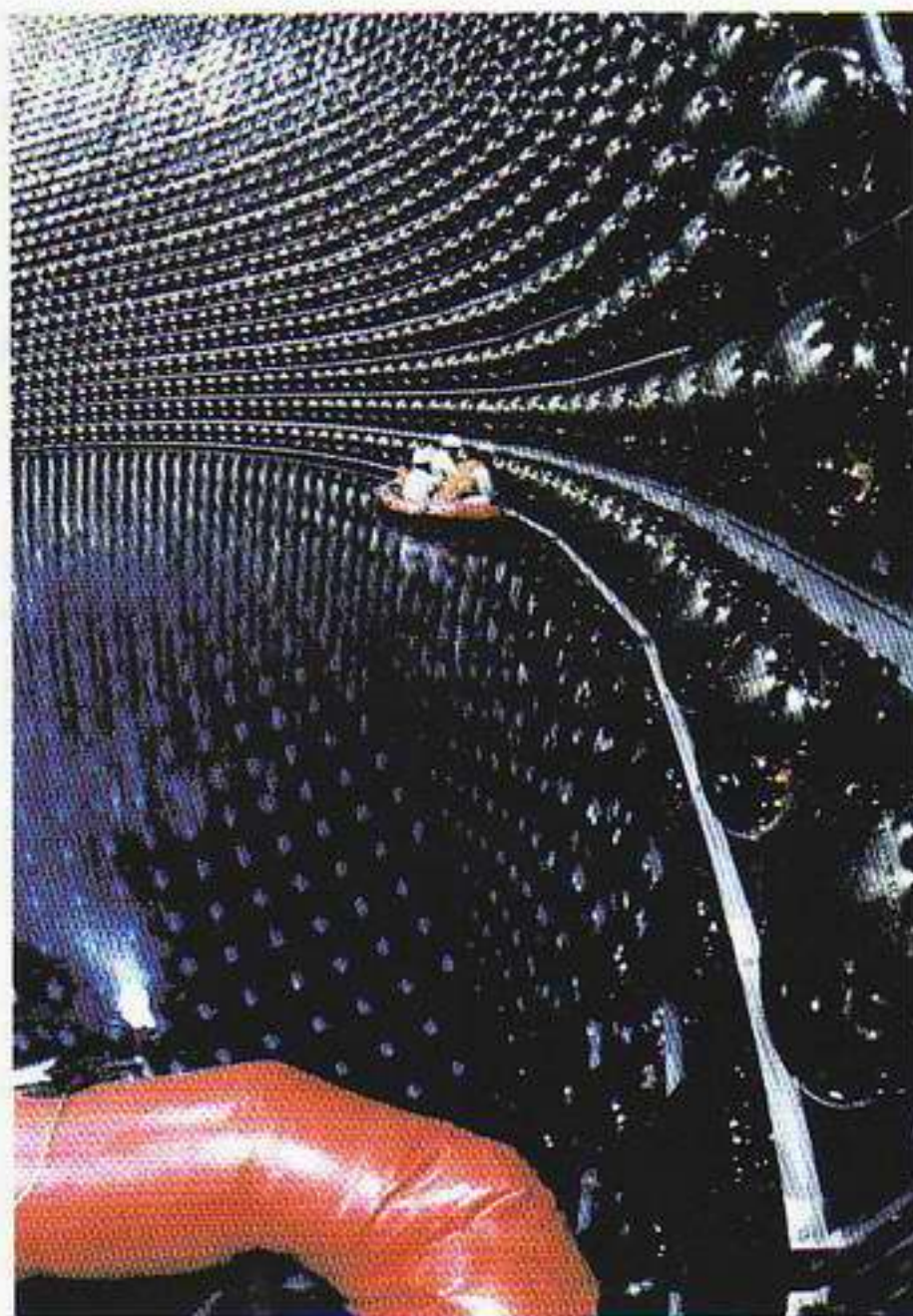


Εικόνα 12.28 Σχηματική αναπαράσταση του υπερμεγέθους ανιχνευτή ATLAS που κατασκευάστηκε για τον LHC στο CERN. Προσέξτε το μέγεθος των ανθρώπων, χάριν σύγκρισης.



Εικόνα 12.29 Η απόκοσμη γαλάζια λάμψη αυτής της δεξαμενής αποθήκευσης πυρηνικών καυσίμων σφείλεται στην ακτινοβολία Cerenkov. Η εν λόγω ακτινοβολία προκαλείται από τη ραδιενεργό διάσπαση σωματιδίων που ταξιδεύουν με ταχύτητες μεγαλύτερες εκείνης του φωτός στο νερό. Το φαινόμενο είναι ανάλογο με το ηχητικό κρουστικό κύμα που δημιουργείται όταν ένα αεροπλάνο πετά με ταχύτητα ανώτερη από εκείνη του ήχου στον αέρα.

Εικόνα 12.30 Τεχνικοί που επιβαίνουν πλαστικής ρέμβου εξετάζουν το εσωτερικό του ανιχνευτή Super-Kamiokande, ο οποίος όταν βρίσκεται εν λειτουργία γεμίζει με 50.000 τόνους εξαιρετικά καθαρού νερού. Στη φωτογραφία φαίνονται, επίσης, μερικοί από τους 13.000 φωτοπολλαπλασιαστές που εκτελούν χρέη ανιχνευτών.



υφίστανται ταλαντώσεις. Από το Παρατηρητήριο Νετρίνων του Σάντμπερι (SNO), εγκατεστημένο κάτω από το έδαφος σε ένα ορυχείο νικελίου στο Οντάριο του Καναδά, επίσης προσφάτως ανακοινώθηκαν αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν την αναγκαιότητα των νετρινικών ταλαντώσεων. Το πρόγραμμα SNO είναι μοναδικό κατά το ότι χρησιμοποιεί βαρύ ύδωρ, το οποίο περιέχει δευτέριο. Οι πυρηνικές αντιδράσεις του Ήλιου παράγουν ηλεκτρονικά νετρίνα, τα οποία ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα νετρίνα ο ανιχνευτής βαρέος ύδατος του SNO. Μόνο η συγκεκριμένη γεύση νετρίνων απορροφάται από το νετρόνιο στον πυρήνα του δευτερίου, μετασχηματίζοντάς τον σε δύο πρωτόνια απομακρυνόμενα μεταξύ τους ταχύτατα. Όλα αυτά τα νέα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ανάγκη επέκτασης του Καθιερωμένου Μοντέλου.

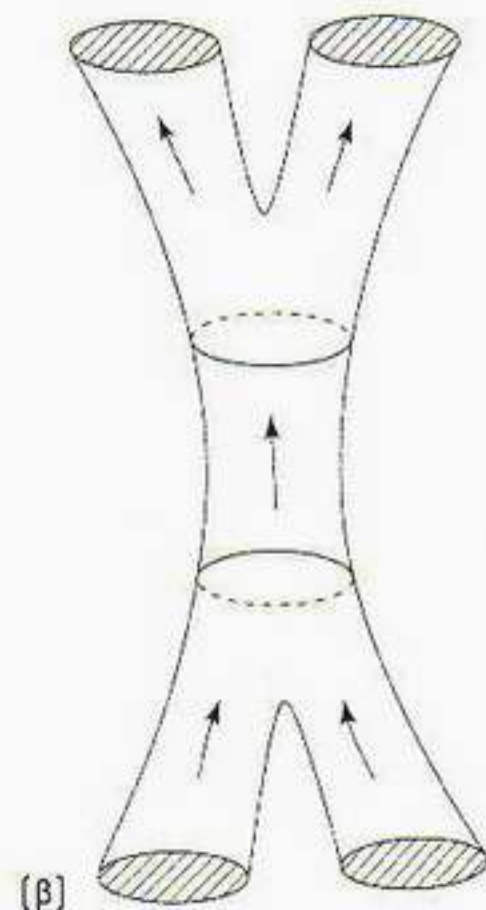
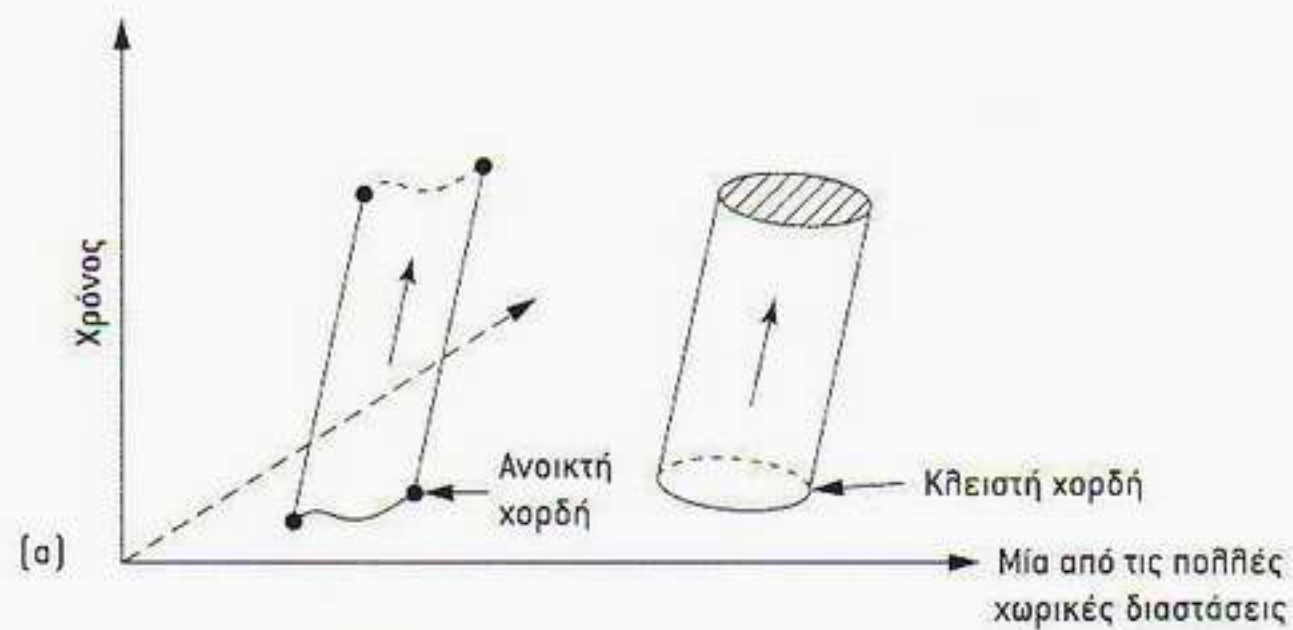
Οι επόμενες δύο ενδείξεις, παρότι λιγότερο άμεσες, υποβάλλουν και αυτά την πεποίθηση ότι το Καθιερωμένο Μοντέλο χρήζει επέκτασης. Η πρώτη αφορά την παρατηρούμενη ασυμμετρία μεταξύ ύλης και αντιύλης στο Σύμπαν. Αποτελούμαστε από σωματίδια και όχι από αντισωματίδια. Και απ' όσο γνωρίζουμε, δεν υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη γαλαξιών με άστρα και πλανήτες (και γιατί όχι, ανθρώπους) αποτελούμενους από αντιύλη οπουδήποτε αλλού στο Σύμπαν. Το Καθιερωμένο Μοντέλο αδυνατεί να εξηγήσει πώς ένα Σύμπαν αρχικά συμμετρικό ως προς την ύλη και την αντιύλη μπορεί τελικά να εξελιχθεί στη σημερινή ασύμμετρη κατάσταση. Φυσικά, δεν αποκλείεται το Σύμπαν να εκκίνησε από μια ασύμμετρη κατάσταση, αλλά οι περισσότεροι φυσικοί δεν θεωρούν μια τέτοια λύση ελκυστική. Η δεύτερη ένδειξη που προέρχεται από το Σύμπαν ως ολότητα αφορά το ζήτημα της σκοτεινής ύλης. Η ύπαρξη της σκοτεινής ύλης συνάγεται ως εξής: Οι αστρονόμοι έχουν



Εικόνα 12.31 Σπειροειδείς γαλαξίες, σμήνη γαλαξιών και σκοτεινή ύλη. Οι τροχιακές ταχύτητες των άστρων και των αερίων ενός σπειροειδούς γαλαξία θα έπρεπε να ελαττώνονται πέραν της περιοχής όπου βρίσκεται συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο μέρος της ορατής ύλης. Μιας και τα δεδομένα δεν δείχνουν καμία τέτοια ελάττωση, πρέπει να υπάρχει κάποιου είδους αόρατη «σκοτεινή ύλη», η οποία εκτείνεται σε μεγάλες αποστάσεις από το κέντρο του γαλαξία. Ομοίως, κανένα σμήνος ή υπερσμήνος γαλαξιών δεν περιέχει ορατή μάζα αρκετή για να διατηρεί τη συνοχή του. Στη φωτογραφία φαίνεται ο NGC253, ένας από τους εγγύτερους προς τη Γη σπειροειδείς γαλαξίες, ο οποίος απέχει μόλις 10 εκατομμύρια έτη φωτός.

παρατηρήσει πολλούς σπειροειδείς γαλαξίες σαν το δικό μας. Πρόκειται για συγκεντρώσεις άστρων και αερίων οι οποίες έχουν σχήμα δίσκου και περιστρέφονται γύρω από το κέντρο τους. Το αίνιγμα έγκειται στο ότι ο ρυθμός περιστροφής είναι πολύ ταχύς για να διατηρείται η συνοχή του γαλαξία, αν αυτός βέβαια περιέχει μόνο τη μάζα των άστρων και των αερίων που παρατηρούμε. Μια παρόμοια παρατήρηση ισχύει και για σμήνη γαλαξιών. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι θα πρέπει να υπάρχει κάποιου είδους σκοτεινή ύλη, η οποία —αν και μέχρι στιγμής διαφεύγει την παρατήρηση— θα παρέχει την αναγκαία βαρυτική έλξη ώστε να διατηρείται η συνοχή των γαλαξιών και των σμηνών γαλαξιών. Από τι θα μπορούσε, άραγε, να συνίσταται η σκοτεινή ύλη; Ένας υποψήφιος για το ρόλο σημαντικού ποσοστού της ελλείπουσας σκοτεινής ύλης εμφανίζεται σε μια επέκταση του Καθιερωμένου Μοντέλου, η οποία βασίζεται σε μια μάλλον ασυνήθιστη συμμετρία που λέγεται *υπερσυμμετρία*.

Ός τώρα, στην κβαντική μηχανική υπήρχε σαφής διαχωρισμός των σωματιδίων σε «φερμιόνια», τα οποία υπακούουν στην απαγορευτική αρχή τού Pauli —όπως είναι τα λεπτόνια και τα κουάρκ— και σε «μποζόνια», τα οποία παίζουν το ρόλο των φορέων των διάφορων δυνάμεων —όπως το φωτόνιο, τα ενδιάμεσα διανυσματικά μποζόνια W και Z και τα γλοιόνια. Η υπερσυμμετρία ως ένα νέο είδος συμμετρίας απαιτεί οι εξισώσεις της θεμελιώδους θεωρίας να παραμένουν αμετάβλητες όταν τα φερμιόνια αντικαθίστανται από μποζόνια και τα μποζόνια από φερμιόνια! Η απαίτηση αυτή συνεπάγεται ότι υπάρχουν πολλά νέα «υπερσωματίδια» —υπερσυμμετρικοί σύντροφοι των ήδη οικείων μας σωματιδίων—, τα οποία περιμένουν να ανακαλυφθούν. Εκτός από τα λεπτόνια και τα κουάρκ που γνωρίζουμε, η θεωρία προβλέπει νέους μποζονικούς υπερσυντρόφους τους, οι οποίοι με φιλοπαίγμονα διάθεση αποκαλούνται *υπερλεπτόνια* και *υπερκουάρκ*. Ομοίως, πέραν των φωτονίων, των εν-



Εικόνα 12.32 (α) Ανοικτή και κλειστή χορδή. Η κλειστή χορδή έχει έναν τρόπο ταλάντωσης χαρακτηριστικό του άμαζου βαρυτονίου με σπιν 2. (β) Οι χορδές αλληλεπιδρούν χωριζόμενες και συνενοούμενες.

διάμεσων διανυσματικών μποζονίων \bar{W} και \bar{Z} και των γλοιονίων, θα πρέπει να αναμένουμε την ύπαρξη των φωτίνων, των βαθμιδίων W και Z και των γλοιόνων. Το φωτίνο, για παράδειγμα, θα μπορούσε να συνεισφέρει στη μυστηριώδη σκοτεινή ύλη που πρέπει να διαποτίζει το Σύμπαν. Δυστυχώς, προς το παρόν δεν υπάρχει καμία άμεση πειραματική απόδειξη για την ύπαρξη οιαδήποτε από τα προαναφερθέντα υπερσωματίδια. Έχουμε βάσιμες ελπίδες, όμως, ότι η νέα γενιά επιταχυντών στο Fermilab των ΗΠΑ καθώς και ο LHC του CERN στην Ευρώπη θα αποκαλύψουν πρόσθετα τεκμήρια που θα μας επιτρέψουν να αποφανθούμε κατά πόσον η υπερσυμμετρία διαδραματίζει εν τέλει κάποιον ρόλο στη φύση και δεν αποτελεί απλώς μια εικασία των θεωρητικών.

Η κβαντική μηχανική αντιμετωπίζει μία ακόμα, τελική πρόκληση. Πρόκειται για την ενοποίησή της με τη βαρύτητα, ώστε να δημιουργηθεί μια συνεπής θεωρία κβαντικής βαρύτητας. Οι απόπειρες ανάπτυξης μιας θεωρίας βαθμίδας για τη βαρύτητα κατά το πρότυπο της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής και της κβαντικής χρωμοδυναμικής αποδείχθηκαν ανεπιτυχείς. Εγκαταλείποντας αυτό τον αδιέξοδο δρόμο, ορισμένοι θεωρητικοί φυσικοί μελετούν έναν νέο τρόπο οικοδόμησης μιας θεωρίας που θα εμπερικλείει τόσο το Καθιερωμένο Μοντέλο όσο και τη βαρύτητα με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η συνέπεια και η δυνατότητα υπολογισμών. Οι θεωρίες αυτού του είδους ονομάζονται *θεωρίες χορδών* —αφού, αντί να περιγράφουν ένα σωματίδιο όπως, φέρ'

επειν, το ηλεκτρόνιο ως σημείο στο χωρόχρονο, οι εν λόγω θεωρίες περιγράφουν τα θεμελιώδη σωματίδια ως μονοδιάστατες χορδές. Η χαρακτηριστική κλίμακα μάζας της κβαντικής βαρύτητας δίνεται από τη μάζα Planck, η οποία ορίζεται ως συνδυασμός της σταθεράς του Planck, της ταχύτητας του φωτός και της νευτώνειας βαρυτικής σταθεράς. Αριθμητικά, η μάζα Planck είναι περίπου 10^{19} φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του πρωτονίου. Η μάζα αυτή καθορίζει επίσης και την κλίμακα μήκους της χορδής, η οποία ανέρχεται σε περίπου 10^{-33} εκατοστά —οπότε στις συνηθισμένες μας κλίμακες μήκους οι χορδές δεν διακρίνονται από τα σημειακά σωματίδια. Οι χορδές μπορεί να είναι ανοικτές ή να κλείνουν σε βρόχο, και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένους τρόπους ταλάντωσης οι οποίοι μπορούν να συσχετιστούν με ιδιότητες όπως η μάζα και το σπιν. Η υπερουμμετρία αναδύεται με φυσικό τρόπο στις θεωρίες χορδών, και οι θεωρητικοί κατέληφθησαν από έντονο ενθουσιασμό όταν ανακάλυψαν ότι δεν υπήρχαν παρά λίγες μόνο δυνατές συνεπείς θεωρίες υπερχορδών, και ότι μάλιστα όλες τους προϋπέθεταν ένα χωρόχρονο 10 διαστάσεων! Βεβαίως, εφόσον ζούμε σε έναν τετραδιάστατο χωρόχρονο, για να περιγράψουν σωστά οι εν λόγω θεωρίες τον κόσμο μας, πρέπει αναγκαστικά 6 από τις 10 διαστάσεις να τυλίγονται σε ένα συμπαγές «κουβάρι» τόσο μικροσκοπικό ώστε να διαφεύγει τη μέτρηση. Ούτως εχόντων των πραγμάτων, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ερώτημα κατά πόσον θα ήμασταν ποτέ σε θέση να «δούμε» οποιαδήποτε παρατηρήσιμα φαινόμενα που να οφείλονται σε αυτές τις «επιπλέον» διαστάσεις. Μεγάλη ευφορία προκάλεσε μεταξύ των θεωρητικών και η πρόσφατη ανακάλυψη της θεωρίας M, μιας θεωρίας η οποία προέκυψε ως καρπός της συνειδητοποίησης του γεγονότος ότι όλα τα διαφορετικά μοντέλα υπερχορδών στις 10 διαστάσεις μπορούν να εξαχθούν από μία και μοναδική θεωρία υπερβαρύτητας στις 11 διαστάσεις. Προς το παρόν, οι φυσικοί συνεχίζουν να διερευνούν τις συναρπαστικές δυνατότητες που προσφέρουν οι θεωρίες αυτές —και απέχουν πολύ ακόμα από την απάντηση σε ερωτήματα όπως το πώς οπάζει η υπερουμμετρία και πώς ανακύπτουν οι μάζες των παρατηρούμενων σωματιδίων. Ωστόσο, από όλα όσα είπαμε γίνεται φανερό ότι η σωματιδιακή φυσική, η βαρύτητα και η κβαντική μηχανική ενδέχεται να επιφυλάσσουν περαιτέρω εκπλήξεις για τη μελλοντική γενιά των φυσικών.

13 Κβαντική φυσική και επιστημονική φαντασία

Διαβάζεις πάρα πολλά μυθιστορήματα!
Richard Feynman

Προοίμιο: το άτομο και ο πυρήνας

Στις μέρες μας, όπου η ατομική σύσταση της ύλης αποτελεί καθιερωμένο θέμα διδασκαλίας στα σχολεία, είναι δύσκολο να φανταστούμε την καχυποψία και την εχθρότητα με την οποία αντιμετωπίστηκε η έννοια του ατόμου στο τέλος του 19ου αιώνα. Και τούτο είναι πράγματι εξαιρετικά παράδοξο, αφού η συγκεκριμένη ιδέα υπήρχε ήδη από τον 5ο αιώνα π.Χ. στα κείμενα των αρχαίων ελλήνων φιλοσόφων Λεύκιππου και Δημόκριτου. Το γεγονός ότι η «ατομική υπόθεση» περιβαλλόταν με δυσπιστία εκπλήσσει ακόμα περισσότερο, δεδομένου ότι οι Daniel Bernoulli, James Clerk Maxwell και Ludwig Boltzmann είχαν όλοι τους χρησιμοποιήσει επιτυχώς ένα ατομικό μοντέλο των αερίων —με τα άτομα ιδωμένα ως μικροσκοπικές σκληρές, ανένδοτες σφαίρες που κινούνταν και συγκρούονταν σαν μπάλες του μπιλιάρδου— για να εξηγήσουν πολλές θερμοδυναμικές ιδιότητες των αερίων. Παρ' όλα αυτά, μόνο η περίφημη εργασία του Αϊνστάιν για την κίνηση Brown το 1905 —η οποία εξηγούσε την παρατηρούμενη τυχαία δόνηση των κόκκων γύρης που επέπλεαν στο νερό ως αποτέλεσμα κρούσεών τους με τα μόριά του— έκανε όλους σχεδόν τους αμφισβητίες να σιγήσουν και κατέστησε την ατομική υπόθεση γενικώς αποδεκτή.

Όπως είδαμε, η θεώρηση των ατόμων ως μικροσκοπικών, σκληρών, άφθαρτων σφαιρών επέζησε μόνο ως το 1911. Τότε, ο Ernest Rutherford έκανε την εκπληκτική και απροσδόκητη ανακάλυψη ότι το μεγαλύτερο μέρος του ατόμου το κατελάμβανε το κενό! Μέσω υπολογισμών της σκέδασης σωματιδίων α από άτομα, συνήγαγε το συμπέρασμα ότι σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου, καθώς και όλο το θετικό του φορτίο, πρέπει να είναι συγκεντρωμένο

σε μια μικροσκοπική σφαίρα κατά πολύ μικρότερη από το φαινόμενο μέγεθος του ατόμου, την οποία ονόμασε *πυρήνα*. Υπολόγισε δε ότι η ακτίνα του πυρήνα είναι 10.000 φορές μικρότερη αυτής του ατόμου. Δύο χρόνια μετά, ο νεαρός Niels Bohr, ο οποίος συνεργαζόταν με τον Rutherford στο Μάντσεστερ, πρότεινε το περίφημο πλανητικό μοντέλο του ατόμου. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, το πρόβλημα με αυτό το μοντέλο —στο οποίο αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια διαγράφουν τροχιές γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα— συνίστατο στο ότι, σύμφωνα με τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού που διατύπωσε ο Maxwell, το άτομο όφειλε να είναι ασταθές. Ο Bohr γνώριζε ότι τούτο συνιστούσε σοβαρό πρόβλημα· ωστόσο είχε ανακαλύψει ότι μπορούσε να εξηγήσει τις συχνότητες των φασματικών γραμμών του υδρογόνου συσχετίζοντάς τις με τις ενεργειακές διαφορές μεταξύ των τροχιών στις οποίες μεταβαίνουν τα ηλεκτρόνια μέσω «αλμάτων». Για το λόγο αυτό πρότεινε ότι τα ηλεκτρόνια πράγματι κινούνται γύρω από τον πυρήνα —μόνο όμως σε συγκεκριμένες σταθερές «κβαντικές» τροχιές, οι οποίες αψηφούν τους νόμους της κλασικής φυσικής. Η συγκεκριμένη εικόνα για το άτομο κέντρισε τη λαϊκή φαντασία. Αντί να είναι στερεές, συμπαγείς, σκληρές σφαίρες, τα άτομα καταλαμβάνονταν κυρίως από κενό. Έμοιαζαν με μικροσκοπικά ηλιακά συστήματα, με τον πυρήνα να παίζει το ρόλο του Ήλιου και τα περιφερόμενα ηλεκτρόνια το ρόλο των πλανητών.

Οι εν λόγω εξελίξεις γρήγορα βρήκαν την έκφρασή τους στο πλαίσιο του νεοεμφανιζόμενου λογοτεχνικού είδους της επιστημονικής φαντασίας. Πολλές από τις πρώτες απόπειρες ενσωμάτωσης των νέων ανακαλύψεων για το άτομο σε ένα μυθιστόρημα επιστημονικής φαντασίας ήταν κραυγαλέα ανακριβείς. Στο μεταίχμιο των δύο αιώνων, ιστορίες «χαμένων κόσμων» —στις οποίες γενναίοι εξερευνητές μάχονταν ανοίκειους κινδύνους σε καινοφανή περιβάλλοντα— αποτελούσαν δημοφιλές θέμα. Το *Ταξίδι στο κέντρο της Γης*, του Ιουλίου Βερν, και *The Lost World*, του σερ Arthur Conan Doyle, είναι δύο κλασικά παραδείγματα. Τη δεκαετία του 1920, οι συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας είχαν ξεμείνει πια από πειστικά μέρη για να τοποθετήσουν τους νέους χαμένους κόσμους τους. Καθώς όμως τα νέα για τις ανακαλύψεις της ατομικής φυσικής γίνονταν λαϊκό κτήμα, μερικοί συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας στράφηκαν στους ορθάνοιχτους ορίζοντες του κόσμου του ατόμου προς αναζήτηση έμπνευσης. Η ιδέα ότι το ίδιο το άτομο αποτελούσε μικρογραφία ηλιακού συστήματος και κατοικούνταν από μικροσκοπικά, έλλογα πλάσματα, απετέλεσε τον κύριο άξονα γύρω από τον οποίο συνυφάνθηκαν πολλές από τις πρώιμες ιστορίες επιστημονικής φαντασίας. Ο συγγραφέας Brian Aldis τις χαρακτήρισε μια νέα εκδοχή των *Ταξιδιών του Γκιούλιβερ*, «ο Γκιούλιβερ κατέρχεται μέσα από το μικροσκόπιο». Ένα τυπικό παράδειγμα αποτελεί η ιστορία *Submicroscopic* του S.P. Meek. Ο ήρωάς του, μετά την παρακολούθηση μιας διάλεξης σχετικά με τις «σύγχρονες» θεωρίες του ατόμου, αποφασίζει να γίνει επιστήμονας. Στη διάλεξη αυτή, ο «δόκτωρ» δίνει μια ιδέα για το μέγεθος του ατόμου αναφερόμενος, χάριν σύγκρισης, σε ένα κυβικό χιλιοστό αέριου υδρογόνου:

Περιέχει χοντρικά 90 τετράκις εκατομμύρια άτομα, αριθμό σχεδόν ασύλληπτο. Θεωρήστε τούτο το τεράστιο πλήθος σωματιδίων στοιβαγμένο σε έναν κύβο με ακμή μικρότερη του ενός χιλιοστού. Παρ' όλα αυτά, κάθε άτομο είναι τόσο μικρό σε σχέση με το διάστημα

που το χωρίζει από τα γειτονικά του, ώστε μπορούμε να θεωρούμε ότι στο πλιακό μας σύστημα επικρατεί συνωστισμός.

Ο Meek στη συνέχεια περιγράφει τη «βίαιη κίνηση» των ηλεκτρονίων καθώς κινούνται γύρω από τα πρωτόνια και διακηρύσσει ότι «αυτός ο συνδυασμός φυγόκεντρης δύναμης και ηλεκτρικής έλξης είναι που κρατά το άτομο σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας». Η εισαγωγή αυτή σκοπό είχε να καταστήσει αληθοφανή την κατασκευή ενός «ρυθμιστή ηλεκτρονιακών δονήσεων». Όπως εξηγεί ο ίδιος ο ήρωας:

Με γούπευσαν ιδιαίτερα οι εργασίες των Bohr και Langmuir, και δόθηκα ολόψυχα στη διερεύνηση της υποτιθέμενης κίνησης των ηλεκτρονίων γύρω από τα πρωτόνια του πυρήνα. Η διερεύνηση αυτή με έκανε να υποπτευθώ ότι η κίνηση δεν ήταν κυκλική και σταθερή αλλά περιοδική και απλή αρμονική, εκτός των περιπτώσεων όπου οι αρμονικές περίοδοι μεταβάλλονταν λόγω των συχνών συγκρούσεων.

Η επιστημονική «εξήγηση» είχε πια κατέλθει στο επίπεδο της ανοπισίας διανοημένης με ψήγματα επιστημονικής ορολογίας! Στη συνέχεια δε, ακολουθεί η ανακάλυψη νέων πολιτισμών που ζουν σε αυτές τις μικροσκοπικές κλίμακες. Η «συνταγή» για τέτοιου είδους μυθιστορήματα ήταν απλή: οι φανταστικές γενικεύσεις πρόσφατων ανακαλύψεων της ατομικής φυσικής και η εξώθησή τους στα άκρα λειτουργούσαν ως διεγερτικό για τον αναγνώστη και δρούσαν ως σκηνικό μιας περιπετειώδους ιστορίας παλικαρισμών. Παρά την εκτεταμένη επιστημονική μας εκλέπτυνση, η συνταγή αυτή δεν διαφέρει πολύ από την υιοθετούμενη από δύο σύγχρονους διαδόχους που σημειώνουν τεράστια επιτυχία —το *Star Trek* και το *Star Wars*!

Ποιο είναι το κύριο συστατικό της επιστημονικής φαντασίας; Σύμφωνα με το συγγραφέα Fred Pohl, «μια καλή ιστορία επιστημονικής φαντασίας θα πρέπει να μπορεί να προβλέπει όχι μόνο το αυτοκίνητο αλλά και το μποτιλιάρισμα». Πιθανώς δεν υπάρχει πιο διορατικός συγγραφέας επιστημονικής φαντασίας από τον Herbert George Wells, ευρύτερα γνωστό ως H.G. Wells. Γεννήθηκε το 1866 στη νότια Αγγλία σε μια περίοδο μεγάλης αναταραχής στον επιστημονικό κόσμο. Οι Δαρβίνος, Maxwell, Mendeleev, Joule και Kelvin έθεταν τα θεωρητικά θεμέλια της εξέλιξης, του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού, της χημείας, της στατιστικής φυσικής και της θερμοδυναμικής. Κατά την πρώτη δεκαετία του 20ού αιώνα, οι Planck, Αϊνστάιν, Rutherford και Bohr, εφορμώντες από αυτούς τους επιστημονικούς θριάμβους, ανέτρεψαν την κλασική φυσική και θεμελίωσαν την κβαντική φυσική. Παράλληλα, ο Αϊνστάιν ανάγκασε τους φυσικούς να αναθεωρήσουν τις ως τότε καθιερωμένες ιδέες τους για τη θεμελιώδη φύση του χώρου και του χρόνου. Μόλις το 1895, δέκα ολόκληρα χρόνια προτού ο Αϊνστάιν δημοσιεύσει την ειδική θεωρία της σχετικότητας, ο Wells έγραψε το περίφημο βιβλίο του *The Time Machine*, το οποίο στην εποχή του φάνηκε περίεργο. Με αυτή την ιστορία, ο Wells εισήγαγε την έννοια του ταξιδιού στο χρόνο και πρόσφερε στην επιστημονική φαντασία μια εξ ολοκλήρου νέα διάσταση για διερεύνηση. Είναι λιγότερο γνωστό ότι ο Wells υπήρξε εξίσου ευφάνταστα δημιουργικός στο πλαίσιο της ατομικής και πυρηνικής φυσικής. Το μυθιστόρημά του *The World Set Free*, το οποίο έγραψε λίγο πριν από τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, αξίζει ένα λεπτομερές φυλλομέτρημα.



Ο Herbert George Wells (1866-1946), ευρύτερα γνωστός ως H.G. Wells, εμπνεύστηκε από τις διαλέξεις του T.H. Huxley για τη θεωρία της εξέλιξης μέσω φυσικής επιλογής του Δαρβίνου. Το θέμα της εξέλιξης της ανθρωπότητας βόσσει αυτών των άτεγκτων δυνάμεων διαπνέει το πρώτο και πιθανότατα πιο διάσημο βιβλίο του, *The Time Machine*, που εκδόθηκε το 1895, σιγά και σιγά από τα μεταγενέστερα έργα του. Συχνά, τού καταλογίζεται ότι προέβλεψε το άρμα μάχης, το σεροσκάφος και τον εναέριο πόλεμο, την ατομική βόμβα και το πυρηνικό αδιέξοδο, ακόμα και ένα είδος γενετικής μηχανικής στο μυθιστόρημά του *The Island of Doctor Moreau*. Το 1920, ο Hugo Gernsback αναδημοσίευσε στο περιοδικό του *Amazing Stories* όλο σχεδόν τα μυθιστορήματα του Wells, με αποτέλεσμα το έργο του Wells να ασκήσει κατά το παρελθόν και να συνεχίζει να ασκεί ακόμα και στις μέρες μας τεράστια επίδραση στις ΗΠΑ. Το βιβλίο του *The War of the World* υπήρξε η πρώτη ιστορία εισβολής εξωγήινων, και η ραδιοφωνική δραματοποίησή της το 1938 από τον Orson Welles προκάλεσε πανικό στη Νέα Υόρκη.



Ο Leo Szilard, ούγγρος θεωρητικός φυσικός, γεννήθηκε στη Βουδαπέστη το 1898. Το 1928, και ενώ εργαζόταν στο Βερολίνο, διάβασε το μανιφέστο *The Open Conspiracy* του H.G. Wells, στο οποίο καλούσε σε δημόσια συμπάραταξη τους επιστημονικά ενημερωμένους βιομηχάνους και κεφαλαιοκράτες με σκοπό την εγκαθίδρυση μιας παγκόσμιας δημοκρατίας που θα σώσει τον κόσμο. Χαρακτηριστικά φιλόδοξος, ο Szilard ταξίδεψε στο Λονδίνο για να συναντήσει τον Wells και να αγοράσει τα πνευματικά δικαιώματα των βιβλίων του για την Ευρώπη. Ήταν επίσης εφευρετικός: κατείχε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα νέο είδος ψυγείου, σε συνεργασία με κάποιον... Άλμπερτ Αϊνστάιν. Όντας εβραίος, είχε τη φρόνηση να εγκαταλείψει τη Γερμανία μία μόλις ημέρα προτού οι Ναζί αρχίσουν να ελέγχουν τα τρένα. Έγραψε σχετικά: «Αυτό αποδεικνύει ότι, αν θες να πετύχεις σε τούτο τον κόσμο, δεν χρειάζεται να είσαι πολύ εξυπνότερος από τους υπόλοιπους· απλά πρέπει να προηγήσαι κατά μία μέρα.» Ο Szilard διάβασε το *The World Set Free* το 1932. Τριάντα χρόνια μετά, μπορούσε ακόμα να το εκθέσει περιληπτικά με μεγάλη λεπτομέρεια. Στις 22 Σεπτεμβρίου 1933, ο Szilard θύμωσε διαβάζοντας ένα άρθρο στους *Times* του Λονδίνου σύμφωνα με το οποίο ο λόρδος Rutherford είχε δηλώσει ότι όποιος σκεφτόταν να παραγάγει ισχύ από πυρηνική ενέργεια «έλεγε ανοησίες». Καθώς περπατούσε επιστρέφοντας στο ξενοδοχείο του στο Southamton Row, ο Szilard συνέλαβε την ιδέα της πυρηνικής αλυσιδωτής αντίδρασης.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, ο Ernest Rutherford βρισκόταν στον Καναδά, όπου διεξήγε κοπιαστικές μελέτες σχετικά με τις ραδιενεργές διασπάσεις του ραδίου και άλλων βαρέων πυρήνων. Το 1903, ο Rutherford και ο συνεργάτης του Frederick Soddy ήταν σε θέση να υπολογίσουν την τεράστια ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται σε τέτοιες αντιδράσεις διάσπασης. Έκαναν τους υπολογισμούς τους τουλάχιστον μία δεκαετία προτού ο Αϊνστάιν ανακαλύψει την περίφημη σχέση μεταξύ μάζας και ενέργειας, σε μια περίοδο όπου οι φυσικοί είχαν αμυδρή μόνο ιδέα για τη φύση του ατομικού πυρήνα. Πέρασαν τριάντα χρόνια μέχρις ότου ο James Chadwick ανακάλυψε το νετρόνιο και σαράντα χρόνια προτού ο Francis Aston προτείνει την ύπαρξη των ισχυρών πυρηνικών δυνάμεων. Δεν προκαλεί έκπληξη λοιπόν το γεγονός ότι η προέλευση αυτών των ενεργειών από τις ραδιενεργές διασπάσεις θεωρούνταν τότε μυστήριο —και οι δυο τους όμως είχαν επίγνωση του γεγονότος ότι η απελευθέρωση τόσο υψηλών ενεργειών θα μπορούσε να αποβεί επικίνδυνη. Το 1904, ο Soddy έγραψε:

Είναι πιθανό, όλη η βαριά ύλη να κατέχει —σε λανθάνουσα μορφή εγκλωβισμένη στη δομή του ατόμου— ποσότητα ενέργειας ανάλογη αυτής που κατέχει το ράδιο. Αν αυτή η ενέργεια μπορούσε να αντληθεί και να τιθασευτεί, τι ρόλο θα έπαιζε άραγε στη διαμόρφωση του μέλλοντος της ανθρωπότητας; Ο άνθρωπος που θα καταφέρει να χειριστεί το μοχλό με τον οποίο η φειδωλή φύση ρυθμίζει ζηλότυπα την απόδοση αυτής της αποθηκευμένης ενέργειας θα έχει στα χέρια του ένα όπλο ικανό να καταστρέψει όλη τη Γη, αν το θελήσει.

Το 1909, ο Soddy έγραψε ένα βιβλίο με τίτλο *The Interpretation of Radium*, το οποίο ενέπνευσε τον Wells να συγγράψει ένα μυθιστόρημα γι' αυτή την καινούργια πυρηνική ενέργεια, το *The World Set Free*. Σε αυτό, ο Wells πιθανολογεί ότι μια εκρηκτική αλυσιδωτή αντίδραση θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση λειτουργίας μιας ατομικής βόμβας. Φανταζόταν ότι αυτές οι βόμβες θα κατασκευάζονταν από ένα νέο στοιχείο που θα συνθέτετε ο άνθρωπος, το «καρολίνειο» —το οποίο υποτίθεται πως «θα διέθετε τη μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια, ενώ θα ήταν και το πιο επικίνδυνο για κατασκευή και διαχείριση». Αν και ο Wells, εύλογα, έσφαλε στις λεπτομέρειες, το φανταστικό στοιχείο που επινόησε παρουσιάζει ζοφερές ομοιότητες με το πλουτώνιο, το οποίο ανακαλύφθηκε αρκετά χρόνια μετά από τον Glenn Seaborg. Ο Wells δεν πρόβλεψε απλώς τα τρομακτικά αποτελέσματα των πυρηνικών όπλων, αλλά διείδε και το πυρηνικό αδιέξοδο το οποίο αναπόφευκτα θα επέφερε η ευρεία διάδοσή τους. Στον φανταστικό του κόσμο, η ειρήνη και ο περιορισμός των πυρηνικών όπλων θα επιτυγχάνονταν μόνο μετά την καταστροφή όλων των μεγάλων ευρωπαϊκών πολέμων από ατομικά όπλα. Πρέπει να αισθανόμαστε τυχεροί που στη συγκεκριμένη περίπτωση η πραγματικότητα είναι καλύτερη από την επιστημονική φαντασία. Αν και το μυθιστόρημά του δεν έγινε εμπορική επιτυχία, μπορεί να του καταλογισθεί ότι επηρέασε την πορεία του Β' Παγκόσμιου Πολέμου. Διαβάζοντας το *The World Set Free*, ο ούγγρος φυσικός Leo Szilard ανησύχησε σοβαρά σχετικά με το ενδεχόμενο κατασκευής ενός τέτοιου όπλου από τους Ναζί. Φοβόταν πως ο Heisenberg και οι άλλοι μεγάλοι γερμανοί φυσικοί εκείνης της εποχής ήταν περισσότερο από ικανοί να το κατασκευάσουν, αν βεβαίως ήταν τεχνικά εφικτό. Ο Szilard έπεισε το φίλο του

και σύντροφο-πρόσφυγα Άλμπερτ Αϊνστάιν να γράψει στον πρόεδρο Ρούζβελτ και να του επιστήσει την προσοχή για τον κίνδυνο. Στην επιστολή τους, οι Αϊνστάιν και Szilard εξηγούσαν με γλαφυρό τρόπο τους κινδύνους που ενέχει η απειλή των πυρηνικών όπλων: «Μία και μόνο βόμβα αυτού του είδους [...], αν εκραγεί σε ένα λιμάνι, μπορεί κάλλιστα να το καταστρέψει εξ ολοκλήρου μαζί με κάποιες από τις γειτονικές περιοχές.» Η παραπάνω περίπτωση αποτελεί ενδιαφέρον παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο η επιστημονική φαντασία μπορεί να επηρεάσει το ρου της ιστορίας. Περιγράφοντας σε μυθοπλαστικό πλαίσιο την πιθανή εφαρμογή των νέων επιστημονικών ανακαλύψεων, ο Wells εμφύτευσε την ανησυχία στον Szilard σχετικά με τους κινδύνους των πυρηνικών όπλων. Ίσως και οι σημερινοί συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας να διαδραματίσουν ανάλογο ρόλο όσον αφορά τη γενετική μηχανική και την επικείμενη επανάσταση της βιοπληροφορικής.

Πυρηνική ενέργεια και η «χρυσή εποχή» της επιστημονικής φαντασίας

Η γένεση της σύγχρονης επιστημονικής φαντασίας παραμένει επίμαχο θέμα συζήτησης στους κύκλους της λογοτεχνικής κοινότητας. Κατά τον Brian Aldis, η σύγχρονη επιστημονική φαντασία αρχίζει με τον *Frankenstein* (1818) της Mary Shelley, ενώ συνδέεται και με άλλα πρώιμα γοτθικά μυθιστορήματα. Άλλοι πάλι υποδεικνύουν ως αφετηρία τα έργα του Ιουλίου Βερν και του H.G. Wells. Τέλος, μια τρίτη ομάδα ισχυρίζεται ότι η επιστημονική φαντασία ωρίμασε μόνο με την εμφάνιση των ανάλογων «περιοδικών της πεντάρας», τα οποία ασχολούνταν αποκλειστικά με αυτή και ονομάστηκαν έτσι λόγω του φτηνού χαρτιού εκτύπωσης. Το 1926, ένας ευρωπαίος μετανάστης στις ΗΠΑ, ο Hugo Gernsback, εξέδωσε το περιοδικό επιστημονικής φαντασίας *Amazing Stories*. Μολονότι δεν επρόκειτο για το πρώτο παγκοσμίως περιοδικό επιστημονικής φαντασίας, γρήγορα αναδείχθηκε στο περιοδικό με τη μεγαλύτερη επιρροή. Επίσης, ο Gernsback επινόησε και τον όρο «επιστημονική φαντασία». Εν μέσω αυτών των πρώτων προσπαθειών, ξεπήδησε ένα άλλο περιοδικό που επηρέασε βαθιά την εξέλιξη της σύγχρονης επιστημονικής φαντασίας. Πρόκειται για το *Astounding Science Fiction*, εκδότης του οποίου υπήρξε ο John W. Campbell ο νεότερος. Στο *The Illustrated History of Science Fiction*, ο James Gunn φτάνει στο σημείο να δηλώσει:

Τα χρόνια μεταξύ του 1938 και του 1950 ήταν εκπληκτικά· σε αυτά, ο πρώτος μεγάλος εκδότης επιστημονικής φαντασίας εξέδωσε το πρώτο περιοδικό της σύγχρονης επιστημονικής φαντασίας, προσέφερε στίβο ζύμωσης στους πρώτους συγγραφείς της, και εν τέλει έδωσε υπόσταση στην ίδια τη σύγχρονη επιστημονική φαντασία.

Ο ίδιος ο Campbell διέθετε σοβαρό επιστημονικό υπόβαθρο, παράλληλα όμως ήταν και συγγραφέας επιστημονικής φαντασίας. Ένας από τους διασημότερους συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας όλων των εποχών, ο Isaac Asimov, χαρακτηρίζει το τεύχος Αυγούστου 1938 του *Astounding Science Fiction* ως την απαρχή της «χρυσής εποχής» της επιστημονικής φαντασίας. Το τεύχος αυτό περιέχει την ιστορία «Who Goes There?» —γραμμένη από τον Campbell υπό το ψευδώνυμο Don A. Stuart. Ο Asimov θεωρεί την εν λόγω ιστορία

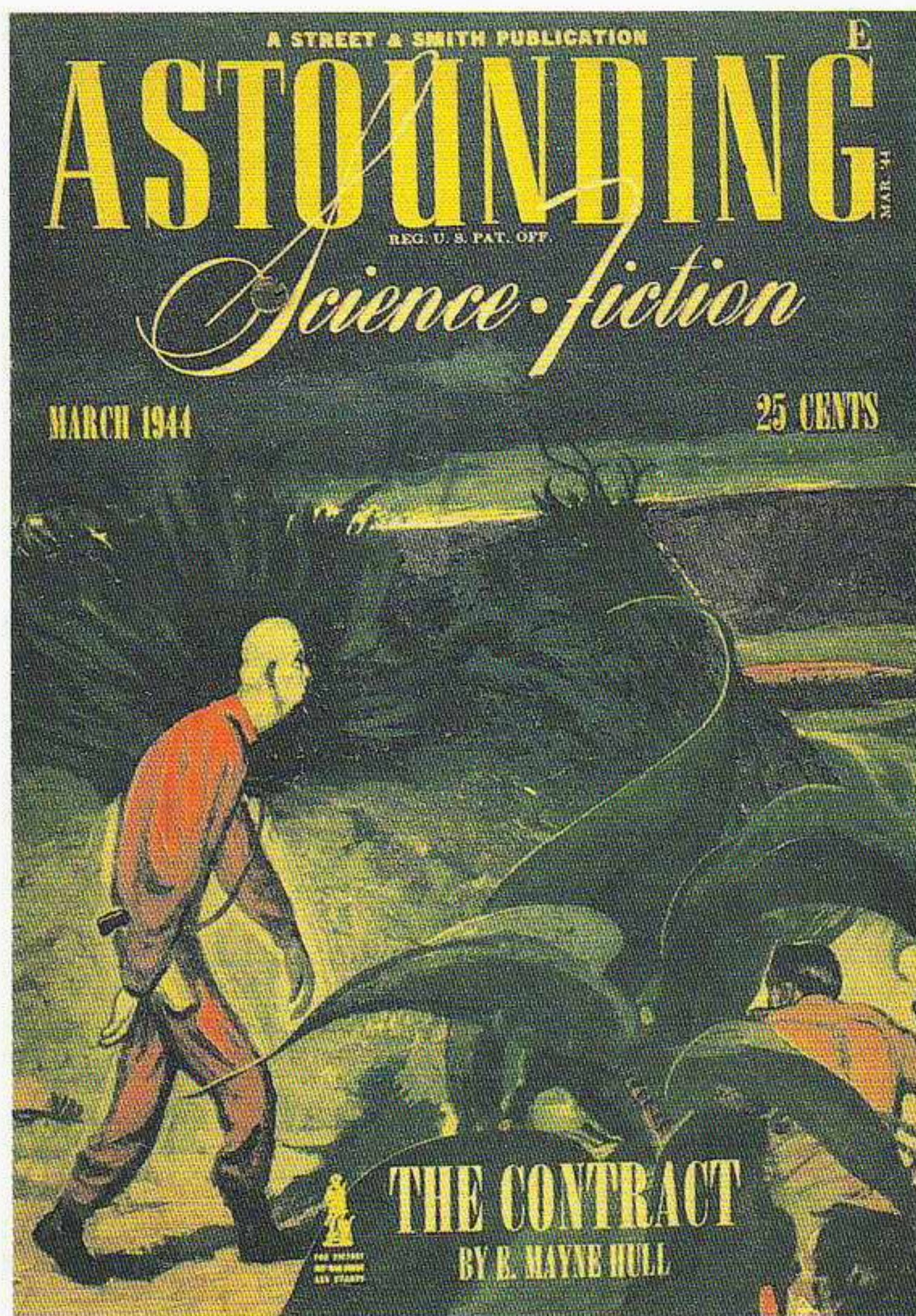
Το 1934 κατοχύρωσε την κεντρική ιδέα, ενώ σε μια μεταγενέστερη τροποποίησή της επεξηγούσε την αναγκαιότητα συγκέντρωσης μιας κρίσιμης μάζας καθώς και τη δυνατότητα δημιουργίας πυρηνικής έκρηξης. Ο Rutherford αρνήθηκε να του παραχωρήσει κονδύλια και εγκαταστάσεις για τη διεξαγωγή των απαραίτητων πειραμάτων.



Ο Hugo Gernsback (1884-1967) γεννήθηκε στο Λουξεμβούργο και μετανάστευσε στις ΗΠΑ σε ηλικία είκοσι ετών. Εξέδωσε το μυθιστόρημά του *Ralph 124C 41+*, με τον υπότιτλο *A Romance of the year 2660*, στο πρώτο μιας σειράς τευχών του περιοδικού *Modern Electrics* το 1911. Το 1926, ο Gernsback εξέδωσε το πρώτο περιοδικό αποκλειστικά αφιερωμένο στην επιστημονική φαντασία, το *Amazing Stories*. Το σλόγκαν στο εξώφυλλο διακήρυττε την αποστολή του: «Αχαλίνωτη φαντασία σήμερα, αδιαμφισβήτητο γεγονός αύριο.» Ο Gernsback ήταν αυτός που εφηύρε τον όρο «επιστημονική φαντασία», ενώ προς τιμήν του έχει δοθεί το όνομά του στα ετήσια βραβεία επιστημονικής φαντασίας Hugo.



Ο John Wood Campbell ο νεότερος υπήρξε αναμφισβήτητα ο μεγαλύτερος εκδότης επιστημονικής φαντασίας και ανέθρεψε μια ολόκληρη γενιά συγγραφέων της —μεταξύ των οποίων ο Isaac Asimov και ο Robert Heinlein. Το 1938 εξέδωσε το *Astounding*, ενώ με την επιμονή του για συγγραφή έργων συνεχώς υψηλότερου επιπέδου καθώς και με τη βοήθεια και υποστήριξη του προς συγγραφείς όπως ο Asimov, δημιούργησε το σύγχρονο λογοτεχνικό είδος της επιστημονικής φαντασίας. Συνέγραψε και ο ίδιος έργα επιστημονικής φαντασίας υπό το ψευδώνυμο Don A. Stuart. Ο Isaac Asimov θεωρεί την ιστορία του Campbell «Who goes there?», η οποία δημοσιεύτηκε το 1938, ως «μία από τις καλύτερες ιστορίες επιστημονικής φαντασίας που γράφτηκαν ποτέ».



Εικόνα 13.1 Το εξώφυλλο του τεύχους Μαρτίου 1944 του *Astounding* που περιείχε την ιστορία «Deadline» του Cleve Cartmill. Σε αυτή, ο Cartmill αποκαλύπτει το μεγαλύτερο μυστικό του Β' Παγκόσμιου Πολέμου, δηλαδή ότι για την κατασκευή της ατομικής βόμβας αρκούν «μόνο μερικά κιλά U-235». Μετά την ήττα της Γερμανίας, ο Heisenberg μαζί με άλλους γερμανούς πυρηνικούς φυσικούς κρατούνταν στο Farm Hall, κοντά στο Γκόμαντσεστερ της Αγγλίας. Εκεί άκουσαν τα νέα για τη ρίψη ατομικής βόμβας στη Χιροσίμα. Οι συζητήσεις μεταξύ των γερμανών επιστημόνων καταγράφονταν μυστικά και αποκαλύπτονται ότι αρχικά ο Heisenberg πίστευε πως ακόμα και μια βόμβα 30 κιλών U-235 «δεν θα εκρηγνυόταν, αφού η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι πολύ μεγάλη». Έπειτα από εντατική δουλειά μίας εβδομάδας, ο Heisenberg κατάλαβε τα λάθη στο συλλογισμό του και έδωσε μια διάλεξη στους συναδέλφους του δείχνοντας τελικά πως μπορούσε να κατασκευαστεί μια βόμβα ουρανού. Ευτυχώς ο Heisenberg, αντίθετα με τον Werner von Braun, δεν ήταν συνδρομητής του *Astounding* κατά τον πόλεμο!

ως «μία από τις καλύτερες ιστορίες επιστημονικής φαντασίας που γράφτηκαν ποτέ» και ισχυρίζεται ότι λειτούργησε ως πρότυπο για ολόκληρη γενιά επίδοξων συγγραφέων επιστημονικής φαντασίας. Σχετικά με τον Campbell και το περιοδικό του, ο Asimov έχει δηλώσει:

Κατά τη χρυσή εποχή, ο Campbell και το *Astounding* δέσποζαν στο πεδίο της επιστημονικής φαντασίας σε τέτοιο βαθμό ώστε, διαβάζοντας κανείς το περιοδικό, αποκτούσε στην ουσία πλήρη γνώση ολόκληρου του πεδίου.

Το 1944 επισκέφτηκαν τον Campbell στο γραφείο του, στις εγκαταστάσεις του *Astounding*, πράκτορες της Στρατιωτικής Υπηρεσίας Πληροφοριών. Ενδιαφέρονταν για ένα άρθρο που είχε δημοσιευθεί στο τεύχος Μαρτίου. Τους είχε κινήσει το ενδιαφέρον η ιστορία «Deadline» του Cleve Cartmill. Διαβάζοντάς την τώρα, διαπιστώνει κανείς εύκολα τι προκάλεσε την ανηυχία τους. Ένα χρόνο αργότερα περίπου, στο πλαίσιο του Προγράμματος Manhattan θα κατασκευαζόταν η βόμβα ουρανίου-235, η επονομαζόμενη «Little Boy». Μπορεί, λοιπόν, κανείς να αναλογιστεί πόσο θορυβήθηκαν όταν ένα περιοδικό επιστημονικής φαντασίας δημοσίευε όχι μόνο τις βασικές αρχές κατασκευής μιας τέτοιας βόμβας, αλλά περιελάμβανε επίσης τρομακτικά πολλές αυθεντικές λεπτομέρειες! Αντί να απαιτεί τόνους ουρανίου —που ήταν και η επικρατούσα επιστημονική πεποίθηση εκείνη την εποχή εκτός των ορίων του Λος Άλαμος—, η βόμβα του Cartmill χρειαζόταν «μόνο μερικά κιλά U-235». Δεν εκπλήσσει λοιπόν το γεγονός ότι οι αρχές τέθηκαν σε συναγερμό, αφού επρόκειτο για την καίριας σημασίας γνώση την οποία οι Σύμμαχοι ήθελαν πάση θυσία να κρατήσουν κρυφή από τους Ναζί. Μετά τον πόλεμο, από τις ανακρίσεις του Heisenberg και άλλων γερμανών πυρηνικών φυσικών, αποκαλύφθηκε ότι πράγματι οι Ναζί αγνοούσαν τούτη την ανακάλυψη. Το 1940, δύο γερμανοί πρόσφυγες, ο Otto Frisch και ο Rudolph Peierls, στο Μπίρμιγχαμ της Αγγλίας, υπολόγισαν για πρώτη φορά την κρίσιμη μάζα που απαιτείται για μια βόμβα από καθαρό U-235. Οι Frisch και Peierls εξεπλάγησαν από το πόσο μικρή ποσότητα υλικού χρειαζόταν:

Υπολογίσαμε ότι η κρίσιμη μάζα ανερχόταν περίπου στο μισό κιλό, ενώ σύμφωνα με τις εκτιμήσεις που αφορούσαν το φυσικό ουράνιο απαιτούνταν τόνοι.

Οι Frisch και Peierls ένωσαν δέος από τα αποτελέσματά τους, αφού υπολόγισαν ότι σχεδόν μισό κιλό U-235 θα απελευθέρωνε ενέργεια ισοδύναμη με αυτή χιλιάδων τόνων συνήθων εκρηκτικών. Η έκρηξη μιας τέτοιας βόμβας θα ήταν αρκετά ισχυρή για να καταστρέψει το «κέντρο μιας μεγάλης πόλης». Οι Frisch και Peierls είκασαν ότι ένα εργοστάσιο ισοτοπικού διαχωρισμού σε περίπου 100.000 βήματα θα ήταν σε θέση να παρασκευάσει «μισό κιλό επαρκώς καθαρού ουρανίου-235 στο εύλογο διάστημα των μερικών εβδομάδων». Μολονότι το κόστος ενός τέτοιου εργοστασίου ήταν αποθαρρυντικό, και τους δύο επιστήμονες κατέτρεχε ο φόβος μην τύχει και οι φυσικοί του Χίτλερ έφταναν στο ποθούμενο αποτέλεσμα πρώτοι. Όπως ανέφεραν στην έκθεσή τους προς τη βρετανική κυβέρνηση, «ακόμη κι αν αυτό το εργοστάσιο στοιχίζει όσο ένα θωρηκτό, αξίζει». Είχαν πλήρη συναίσθηση της απόλυτης αναγκαιότητας για μυστικότητα, με συνέπεια να δακτυλογραφήσει την έκθεση ο ίδιος ο Peierls αντί της γραμματέας. Η έκθεσή τους έγινε γνωστή με το όνομα

«Μνημόνιο των Frisch και Peierls» και εξώθησε τον Τσόρτσιλ να συστήσει άμεσα μια ομάδα, που πήρε την επωνυμία Επιτροπή MAUD, με σκοπό να διερευνήσει αν η κατασκευή της ατομικής βόμβας ήταν εφικτή. Η ιστορία θα μπορούσε να είχε πάρει και μια πρώτης τάξεως τροπή αλά Κάφκα, αφού αρχικά απαγορεύτηκε στους Frisch και Peierls να αναγνώσουν την ίδια τους την έκθεση επειδή θεωρούνταν εχθροί!

Επιστρέφοντας στο θέμα μας, ως ιστορία η «Deadline» είναι μη πειστική και φαντάζει απίθανη. Η δράση τοποθετείται σε έναν άλλο πλανήτη όπου μαίνεται πόλεμος μεταξύ των *Seilla* και *Sixa*, ο οποίος αντικατοπτρίζει τον πραγματικό πόλεμο επί της Γης μεταξύ των Συμμάχων (αναγραμματισμός του *Seilla*) και των δυνάμεων του Άξονα (αναγραμματισμός του *Sixa*), των Χίτλερ και Μουσολίνι. Η ιστορία ξεκινά με τη ρίψη ενός πράκτορα βαθιά στην εχθρική ενδοχώρα. Αποστολή του είναι η καταστροφή μιας μυστικής ατομικής βόμβας που αναπτύχθηκε από τις δυνάμεις *Sixa*, οι οποίες βρίσκονταν πια σε απόγνωση. Ξαφνικά, μέσα από τις σελίδες αυτής της καθόλου πειστικής ιστορίας, αποκαλύπτεται απρομελέτητα και συμπτωματικά ένα από τα μεγαλύτερα στρατιωτικά μυστικά του Β' Παγκόσμιου Πολέμου. Ο Cartmill περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι δυνάμεις *Sixa* είχαν απομονώσει αρκετά κιλά U-235 μέσω «νέων ατομικών μεθόδων ισοτοπικού διαχωρισμού». Ακόμα χειρότερα, ο ήρωάς του εξηγεί ότι μια βόμβα που περιέχει μερικά μόνο κιλά U-235 θα μπορούσε να απελευθερώσει ενέργεια ισοδύναμη «με εκείνη 50 εκατομμυρίων τόνων TNT και, αν αυτή εκραγεί σε ένα νησί, θα το εξαλείψει από προσώπου Γης». Η ιστορία περιείχε επίσης ανησυχητικά πειστικές λεπτομέρειες για τον τρόπο κατασκευής μιας τέτοιας βόμβας ουρανού. Η φανταστική βόμβα απαρτιζόταν από δύο ημισφαίρια ουρανού, τα οποία χωρίζε ένα στρώμα καδμίου που χρησίμευε στην απορρόφηση των νετρονίων. Στη συνέχεια, μέσω έναυσης μιας μικρής έκρηξης που κατέστρεφε το ενδιαμεσο διαχωριστικό στρώμα, τα δύο ημισφαίρια έρχονταν σε επαφή σχηματίζοντας την κρίσιμη μάζα μιας αλυσιδωτής αντίδρασης.

Θεωρείται απίθανο να γνώριζε ο Cartmill οτιδήποτε σχετικά με το Πρόγραμμα Manhattan ή τον αγωνιώδη φόβο μην τύχει και οι Γερμανοί τα καταφέρουν πρώτοι —προφανώς γνώριζε όμως αρκετή πυρηνική φυσική για να κάνει μερικές εύστοχες εικασίες. Υπάρχει, όμως, άλλη μία περίεργη σύμπτωση. Τα πρόσωπα του έργου εξετάζουν την πιθανότητα η έκρηξη μιας τέτοιας βόμβας να προκαλούσε ακούσια ανάφλεξη της ατμόσφαιρας, καταστρέφοντας ολόκληρο τον πλανήτη. Για την ακρίβεια, ο Edward Teller, ο οποίος αργότερα έμελλε να ηγηθεί της ανάπτυξης της βόμβας υδρογόνου, είχε προτείνει το 1942 ακριβώς το ίδιο ολέθριο ενδεχόμενο. Ο Arthur Compton, ένας από τους επί κεφαλής του Προγράμματος Manhattan, έχει γράψει για εκείνη την εποχή ότι ο Robert Oppenheimer τον ενημέρωσε σχετικά με αυτό το ενδεχόμενο:

Υπήρχε, άραγε, η παραμικρή πιθανότητα μια ατομική βόμβα να πυροδοτούσε την ανάφλεξη του αζώτου της ατμόσφαιρας ή του υδρογόνου των ωκεανών; Ένα τέτοιο γεγονός θα ισοδυναμούσε με απόλυτη καταστροφή. Καλύτερα να αποδεχθούμε το ζυγό των Ναζί από το να διακινδυνεύσουμε τον αφανισμό ολόκληρης της ανθρωπότητας.

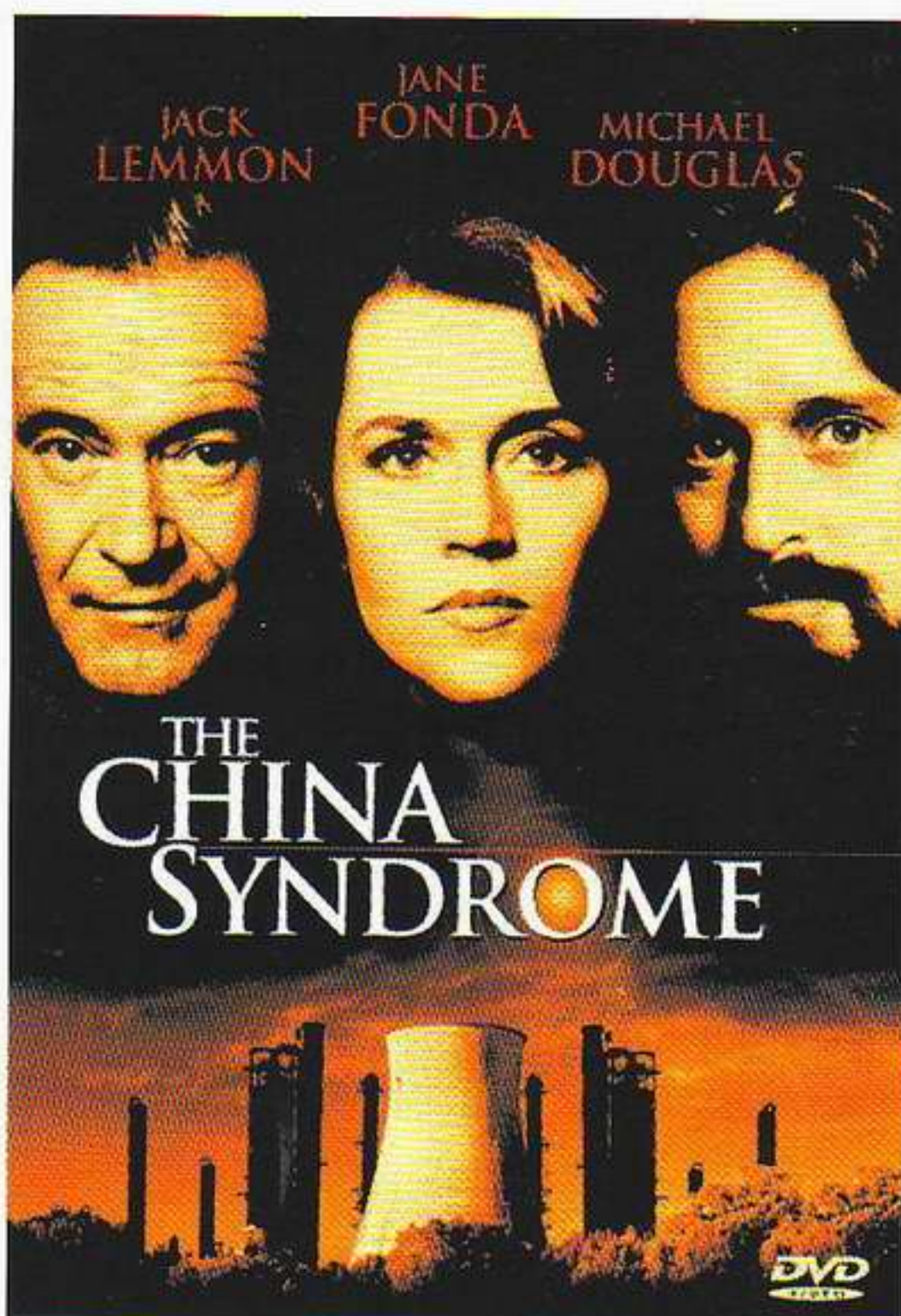
Ο επί κεφαλής της θεωρητικής ομάδας, Hans Bethe, ανησύχησε τόσο ώστε ή-

λεγξε ο ίδιος λεπτομερώς τους υπολογισμούς του Teller. Ευτυχώς, ο Bethe ανακάλυψε ότι ο Teller είχε κάνει μερικές αδικαιολόγητες παραδοχές, οπότε ένα τέτοιο καταστροφικό αποτέλεσμα ήταν εξαιρετικά απίθανο. Η επίσημη έκθεση του προγράμματος σχεδιασμού της βόμβας απέρριπτε αυτή την πιθανότητα με τη φράση: «Η επιστήμη και η κοινή λογική βεβαίωσαν ότι το ενδεχόμενο ανάφλεξης της ατμόσφαιρας είναι αδύνατο.» Παρά τις σχετικές θεωρητικές διαβεβαιώσεις, μεταξύ των φυσικών του Προγράμματος Manhattan, οι οποίοι μαζεύτηκαν στην τοποθεσία Τρίνιτι στο Νιου Μέξικο για να παρακολουθήσουν την πρώτη πυρηνική δοκιμή, πρέπει να επικρατούσε κάποια νευρική κατάσταση. Αν ο Cleve Cartmill δεν είχε ακούσει τίποτα σχετικό από τους φυσικούς οι οποίοι συμμετείχαν στο Πρόγραμμα Manhattan —και ασφαλώς δεν θα δημοσίευε την ιστορία του αν γνώριζε κάτι—, τότε είναι αξιοθαύμαστο με πόση ακρίβεια είχε οραματιστεί τους στόχους του εν λόγω άκρως απόρρητου προγράμματος. Ωστόσο, εξίσου εκπληκτικό είναι ίσως το γεγονός ότι η αμερικανική στρατιωτική αντικατασκοπία μελετούσε ένα περιοδικό επιστημονικής φαντασίας. Φαίνεται βέβαια περισσότερο πιθανό να διάβασαν το παραπάνω περιοδικό στον ελεύθερο χρόνο τους οι προϊστάμενοι των συγκεκριμένων πρακτόρων και να παρατήρησαν τις ομοιότητες με το Πρόγραμμα Manhattan. Παρ' όλα αυτά, ο John Campbell αισθάνθηκε ανακούφιση καθώς οι αξιωματικοί που τον επισκέφθηκαν δεν παρατήρησαν το χάρτη στον τοίχο που έδειχνε τη διασπορά των συνδρομητών του *Astounding*. Αν το είχαν πράξει, θα είχαν παρατηρήσει ένα σμήνος από καρφίτσες που ίσως τους φαινόταν ύποπτο, αφού επιγραφόταν «ταχυδρομική θυρίδα 1663, Σάντα Φε, Νιου Μέξικο» —η οποία αντιστοιχούσε στην ταχυδρομική διεύθυνση του Λος Άλαμος κατά τον πόλεμο. Ακόμα χειρότερα, ένας εκ των συνδρομητών ήταν και ο γερμανός επιστήμονας της πυραυλικής τεχνολογίας Werner von Braun, ο οποίος κατάφερε να εισαγάγει το δικό του αντίτυπο του *Astounding* στη Γερμανία καθ' όλη τη διάρκεια του πολέμου. Πρόκειται, τελικά, για μια χαρακτηριστική περίπτωση όπου η καλή και επιτυχημένη επιστημονική φαντασία μπορεί να αποβεί επιζήμια για την εθνική ασφάλεια.

Οι ατομικές βόμβες συμβολίζουν πολύ εύστοχα την κατανόηση από μέρους μας της φυσικής του ατόμου και του πυρήνα. Η πυρηνική ενέργεια, παρότι προκαλεί και η ίδια προβλήματα στο περιβάλλον, αποτελεί ένα ακόμα σύμβολο, ισχυρότερο και θετικότερο. Η διάσημη τριλογία του Asimov *Foundation* δημοσιεύεται στο *Astounding* από τον Μάιο του 1942 ως τον Ιανουάριο του 1950. Η σειρά πραγματεύεται την πτώση της φαινομενικά ανίκητης «Γαλαξιακής Αυτοκρατορίας» και την προσπάθεια ενός ανθρώπου να βραχύνει την αναπόδραστη επικείμενη περίοδο βαρβαρότητας στην οποία θα βυθιζόταν ο Γαλαξίας. Ο δευτερεύων ήρωας Hari Seldon επινόησε τη νέα επιστήμη της «ψυχοϊστορίας», η οποία του επιτρέπει να προβλέπει και να διαμορφώνει γεγονότα κατά την πτώση της Αυτοκρατορίας. Σε έναν κρυφό πλανήτη στις απόμακρες παρυφές του Γαλαξία, έχει ιδρυθεί μια αποικία «εγκυκλοπαιδιστών» επονομαζόμενη «Ίδρυμα». Το Ίδρυμα έχει τη φαινομενικά αγαθή, ακίνδυνη αποστολή της παραγωγής της «Γαλαξιακής Εγκυκλοπαίδειας», με σκοπό να διασώσει και συντηρήσει την επιστημονική γνώση μετά την πτώση της Αυτοκρατορίας (που είχε προβλέψει ο Seldon). Για την ακρίβεια, καθώς η αυτοκρατορική κυριαρχία καταρρέει στη γαλαξιακή περιφέρεια, το Ίδρυμα καλείται εκ των πραγμάτων να επιβιώσει χάρη στην ευφυΐα του. Η διαρκής επιστημονική καινοτομία δεν θεωρείται πλέον ακαδημαϊκή

πολυτέλεια χωρίς αντίκρισμα αλλά ουσιώδης για την επιβίωση του Ιδρύματος. Στα αστρικά συστήματα των πολεμάρχων που την περιβάλλουν, αλλά ακόμα και στην καρδιά της Γαλαξιακής Αυτοκρατορίας, η επέλευση του επιστημονικού αναλφαριθμητισμού σηματοδοτείται από την απώλεια ελέγχου επί της ατομικής ενέργειας. Η γνώση της ατομικής ενέργειας χρησιμοποιείται από τον Asimov ως μέτρο για τον καθορισμό του υγιούς πολιτισμού. Σε ένα μοντέρνο πλαίσιο, δύο σύγχρονοι συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας, οι Larry Niven και Jerry Rournelle, χρησιμοποίησαν το ίδιο μέτρο ως σύμβολο ελπίδας για τον δικό μας πολιτισμό. Το βιβλίο τους *Lucifer's Hammer* είναι ένα σύγχρονο «μυθιστόρημα της συντέλειας του κόσμου», στο οποίο ο πολιτισμός καταστρέφεται από τη σύγκρουση της Γης με έναν κομήτη. Ως παράδειγμα της κατάστασης που επικρατεί στον κόσμο αναφέρεται ότι η δράση τοποθετείται στην Καλιφόρνια, για την οποία ερίζουν ένοπλες ομάδες πολεμάρχων της σύγχρονης εποχής. Στην τριλογία του Asimov, το Ίδρυμα, μέσω του σεβασμού του στην επιστήμη και στην ανωτερότητα της πυρηνικής ενέργειας, αποτελεί σύμβολο ελπίδας για την ανθρωπότητα κατά τις ημέρες κατάρρευσης της Γαλαξιακής Αυτοκρατορίας. Στην ιστορία των Niven και Rournelle, την ελπίδα για το μέλλον ενορκώνει μια ομάδα επιστημόνων που αποκαθιστούν τη λειτουργία του εργοστασίου πυρηνικής ενέργειας του Σαν Γιοακίν.

Είναι εύκολο να στηλιτεύει κανείς τα προφανή προβλήματα και κινδύνους που απορρέουν από την πυρηνική ενέργεια. Συνέπεια των πυρηνικών ατυχημάτων στο Θρι Μάιλ Άιλαντ (ΗΠΑ) και το Τσέρνομπιλ (Ουκρανία) ήταν να αφυπνιστούμε και να συνειδητοποιήσουμε με δραματικό τρόπο αυτούς τους κινδύνους. Η ταινία του 1979 *The China Syndrome* προβλήθηκε λίγο μετά το συμβάν στο Θρι Μάιλ Άιλαντ. Η βασική συλλογιστική της είναι ότι, αν καταρρεύσει το σύστημα ψύξης του πυρηνικού αντιδραστήρα, τότε στην καρδιά του θα μπορούσε να εκδηλωθεί μια ανεξέλεγκτη πυρηνική αντίδραση που θα οδηγούσε σε πυρηνική μόλυνση με καταστροφικές συνέπειες. Το «σύνδρομο» του τίτλου αναφέρεται στην ευφάνταστη ιδέα ότι οι θερμοκρασίες στην καρδιά του αντιδραστήρα θα έφταναν σε τόσο υψηλά επίπεδα ώστε το τηγμένο υλικό θα μπορούσε να διαπεράσει τη Γη αι' άκρη σ' άκρη. Αρνητικές εικόνες για την πυρηνική ενέργεια, την εξόρυξη ουρανίου και τη ραδιενέργεια εμφανίζονται επίσης σε ταινίες όπως οι *Silkwood* (1984) και *Thunderheart* (1992). Ασφαλώς είναι αλήθεια ότι τα έξοδα καθαρισμού των εγκαταστάσεων στο Χάνφορντ (Πολιτεία της Ουάσιγκτον) —όπου και παρασκευάστηκε η πλειονότητα του πλουτωνίου για το Πρόγραμμα Manhattan— υπολογίζονται σε πολλά δισεκατομμύρια δολάρια. Ίσως, όμως, στον ορίζοντα να ανατέλλει μια νέα ελπίδα για τη βαλλόμενη πυρηνική βιομηχανία. Πρώτον, καθίσταται τώρα πιο εμφανές ότι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο δημιουργούν και αυτοί τα δικά τους προβλήματα στο περιβάλλον και συμβάλλουν τα μέγιστα στην παγκόσμια θέρμανση. Δεύτερον, οι φυσικοί ίσως καταφέρουν να επινοήσουν τρόπους μείωσης της επικινδυνότητας των πυρηνικών αποβλήτων. Ερευνητικές ομάδες από το Λος Άλαμος και το CERN εξετάζουν το ενδεχόμενο της «πυρηνικής μεταστοιχειώσης». Σύμφωνα με αυτή την ιδέα, νετρόνια που βάλονται κατά επικίνδυνων ραδιενεργών στοιχείων μπορούν να τα μεταστοιχειώσουν σε λιγότερο επιβλαβή πυρηνικά απόβλητα. Για παράδειγμα, αντιδραστήρες ανά τον κόσμο παράγουν ως υποπροϊόν το τεχνήτιο-99, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 200.000 χρόνια. Με την πρόσληψη, όμως, ενός νετρονίου μετατρέπεται σε τεχνήτιο-100 με χρόνο ημιζωής μόλις



Εικόνα 13.2 Στην ταινία *The China Syndrome*, η εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας παρουσιάζεται ως εγχείρημα που ενέχει μεγάλους κινδύνους. Ο τίτλος αναφέρεται στην ευφάνταστη ιδέα ότι η καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, σε περίπτωση τήξης, θα μπορούσε να διατρυπήσει τη Γη απ' άκρη σ' άκρη. Στην τριλογία *Foundation* του Asimov, η πυρηνική ενέργεια διαδραματίζει έναν περισσότερο υψιπέτη ρόλο ως σύμβολο πολιτισμού.

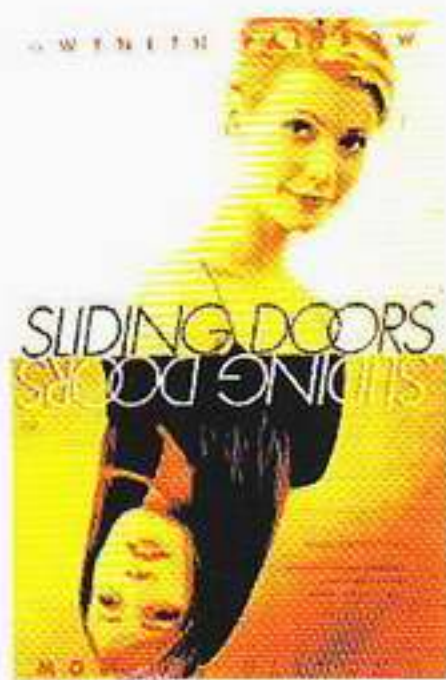
16 δευτερόλεπτα, το οποίο στη συνέχεια διασπάται στο αβλαβές και σταθερό ρουθίνιο-100. Υποστηρικτές αυτής της προσέγγισης ισχυρίζονται ότι ο όγκος των επικίνδυνων αποβλήτων θα μπορούσε να μειωθεί στο 1/100. Επιπλέον, αντί να είμαστε υποχρεωμένοι να βρίσκουμε χώρους εναπόθεσης των πυρηνικών αποβλήτων που να παραμένουν ασφαλείς για εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια, το χρονικό διάστημα αυτό θα μπορούσε να μειωθεί «απλώς» σε μερικές εκατοντάδες χρόνια. Οι φυσικοί έχουν ακόμα μακρύ δρόμο μπροστά τους προτού μπορέσουν να ισχυριστούν ότι έλυσαν το πρόβλημα των πυρηνικών αποβλήτων με έναν περιβαλλοντικά αποδεκτό τρόπο. Εντούτοις, με την παγκόσμια θέρμανση να γίνεται ολοένα και πιο ορατή, η πυρηνικά παραγόμενη ισχύς ίσως συνεχίσει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας κατά τον 21ο αιώνα.

Σημεία Jonbar, πολλαπλά σύμπαντα και η γάτα του Schrödinger

Οι εναλλασσόμενοι κόσμοι αποτελούν επί μακρόν αγαπημένο επινόημα των συγγραφέων επιστημονικής φαντασίας. Μία από τις εκδοχές του συγκεκριμένου είδους επιστημονικής φαντασίας συμπυκνώνεται στο ερώτημα «Τι θα συνέβαινε αν...;». Τι θα συνέβαινε αν ο Χίτλερ και οι δυνάμεις του Ά-



Τα μυθιστορήματα του Philip K. Dick (1928-1982) τυγχάνουν στις μέρες μας πατριευτικής αναβίωσης. Πιθανόν ο Dick είναι ευρύτερα γνωστός από το μυθιστόρημά του *Do Androids Dream of Electric Sheep?*, του 1968, στο οποίο βασίστηκε η αξιομνημόνευτη ταινία *Blade Runner* (σε σκηνοθεσία του Ridley Scott). Η σύντομη ιστορία του «We can remember it for you wholesale» αποτέλεσε τη βάση της ταινίας *Total Recall*. Το μυθιστόρημά του *The Man in the High Castle* (1962) είναι ένα από τα καλύτερα μυθιστορήματα για «εναρτησασόμενους κόσμους», και περιγράφει τις ΗΠΑ υπό την κυριαρχία των Γερμανών και Ιαπώνων —ως νικητών του Β΄ Παγκόσμιου Πολέμου.



Εικόνα 13.3 Αφίσα της ταινίας «εναρτησασόμενων κόσμων» *Sliding Doors*. Το σημείο Jonbar για την ηρωίδα, την οποία υποδύεται η Gwyneth Paltrow, έγκειται στο να προλάβει ή να χάσει το μετρό.

ξονα είχαν κερδίσει τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο; Το ερώτημα αυτό αποτελεί τον κορμό του βιβλίου *The Man in the High Castle* (1962), ενός από τα πιο διάσημα μυθιστορήματα του Philip K. Dick. Σε αυτό, οι ΗΠΑ έχουν διαμελιστεί μεταξύ της Γερμανίας στα ανατολικά και της Ιαπωνίας στα δυτικά. Η πλοκή περιστρέφεται γύρω από το μυστηριώδες αντεργκράουντ μυθιστόρημα *The Grasshopper Lies Heavy* που προσφέρει μια εναλλακτική εκδοχή της παγκόσμιας ιστορίας στην οποία ο Χίτλερ και οι Ιαπωνέζοι ηττήθηκαν. Ποια είναι η «αληθινή» πραγματικότητα; Μπορούν να υπάρξουν και οι δύο κόσμοι; Με τον δικό του ιδιόρρυθμο τρόπο, το βιβλίο διερευνά τις ιδέες των Πολλών Κόσμων των Everett και Wheeler, αν και φαίνεται απίθανο ο Dick να τις γνώριζε.

Η «κλασική» ιστορία εναλλασσόμενων κόσμων δομείται γύρω από τη στιγμή που γίνεται η επιλογή του μέλλοντος, η οποία ενίοτε καλείται «σημείο Jonbar». Ο όρος προήλθε από μια ιστορία του Jack Williamson που εκδόθηκε το 1938 στο *Astounding* υπό τον τίτλο «The legion of time». Ο ήρωας, ένας καθηγητής του Πανεπιστημίου Harvard ονόματι Lanning, δέχεται την επίσκεψη δύο κυριών από δύο διαφορετικά μέλλοντα —η μία προέρχεται από τη ζηλευτή πόλη Jonbar, ενώ η άλλη από την παρακμάζουσα πόλη Gyronchi. Τα δύο μέλλοντα αποκλείονται αμοιβαία, οπότε μόνο ένα εξ αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί —ανάλογα με το πώς θα επηρεαστεί η δύναμη υλοποίησής τους στο χωρόχρονο του Lanning. Για τη στιγμή της επιλογής, ο Lanning ανατρέχει σε μια σκηνή με κάποιο αγόρι σε ένα λιβάδι. Το αγόρι, ονόματι John Barr, πρόκειται να σπρώξει από το γρασίδι είτε ένα μαγνήτη —με αποτέλεσμα να εξελιχθεί σε μεγάλο επιστήμονα, γεγονός που θα οδηγήσει ασφαλώς στην πόλη Jonbar— είτε μια μικρή πέτρα —και θα γίνει ένας μετανάστης εργάτης. Ο Lanning, ενώ μάχεται από την αρχή ως το τέλος με ανδρεία κατά του εχθρού, τελικά καταφέρνει να πετάξει ένα μαγνήτη στα πόδια του αγοριού, και τότε βλέπει στα «μάτια του να ανατέλλει το φως της επιστήμης». Στη σκηνή αυτή γεννήθηκε ο όρος «σημείο Jonbar». Τέτοιου είδους ιστορίες προβάλλουν την αισιόδοξη άποψη ότι μεμονωμένες ανθρώπινες πράξεις μπορούν να αλλάξουν την ιστορία —κρατάμε το μέλλον στα χέρια μας. Η ταινία *Sliding Doors* αποτελεί σύγχρονη απόδοση του θέματος: στο ένα μέλλον η ηρωίδα προλαβαίνει το μετρό, ενώ στο άλλο το χάνει.

Ένας άλλος τύπος μυθιστορήματος εναλλασσόμενων κόσμων βασίζεται στην υπόθεση ότι όλες οι δυνατότητες που αναφύονται από ένα σημείο Jonbar πραγματοποιούνται, οπότε κάθεμιά τους παράγει ένα «παράλληλο» σύμπαν. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές τέτοιων ιστοριών με πολλαπλά σύμπαντα, οι περισσότερες όμως στηρίζονται σε κάποιο μηχανισμό μετάβασης από σύμπαν σε σύμπαν. Τα βιβλία *Ring Around the Sun* του Clifford D. Simak και *Worlds of the Imperium* του Keith Laumer περιγράφουν μια ολόκληρη σειρά από παράλληλους, αλλά διαφορετικούς, «πλανήτες-Γη». Στα περισσότερα από τα έργα του Michael Moorcock, η δράση τοποθετείται σε αυτό που αποκαλεί «πολυσύμπαν», μια άπειρη ακολουθία εναλλασσόμενων συμπάντων. Στα πολλαπλά σύμπαντα στηρίζεται επίσης και η βρετανική κωμική τηλεοπτική σειρά επιστημονικής φαντασίας *Red Dwarf*. Σε αυτήν, όλα τα «συνήθη κώπια» της επιστημονικής φαντασίας χρησιμοποιούνται ως αφορμή για νέες κωμικές καταστάσεις —ένα αντίδοτο στη σοβαροφάνεια του *Star Trek*. Ως παράδειγμα αναφέρεται το επεισόδιο «Dimension Jump», όπου ο «άπειρος» Arnold Rimmer συναντά την εναλλακτική του έκδοση, τον «εύελπι» Rimmer. Αυτοί ανάγουν το δικό τους «σημείο Jonbar» στη στιγμή κατά την οποία ένας



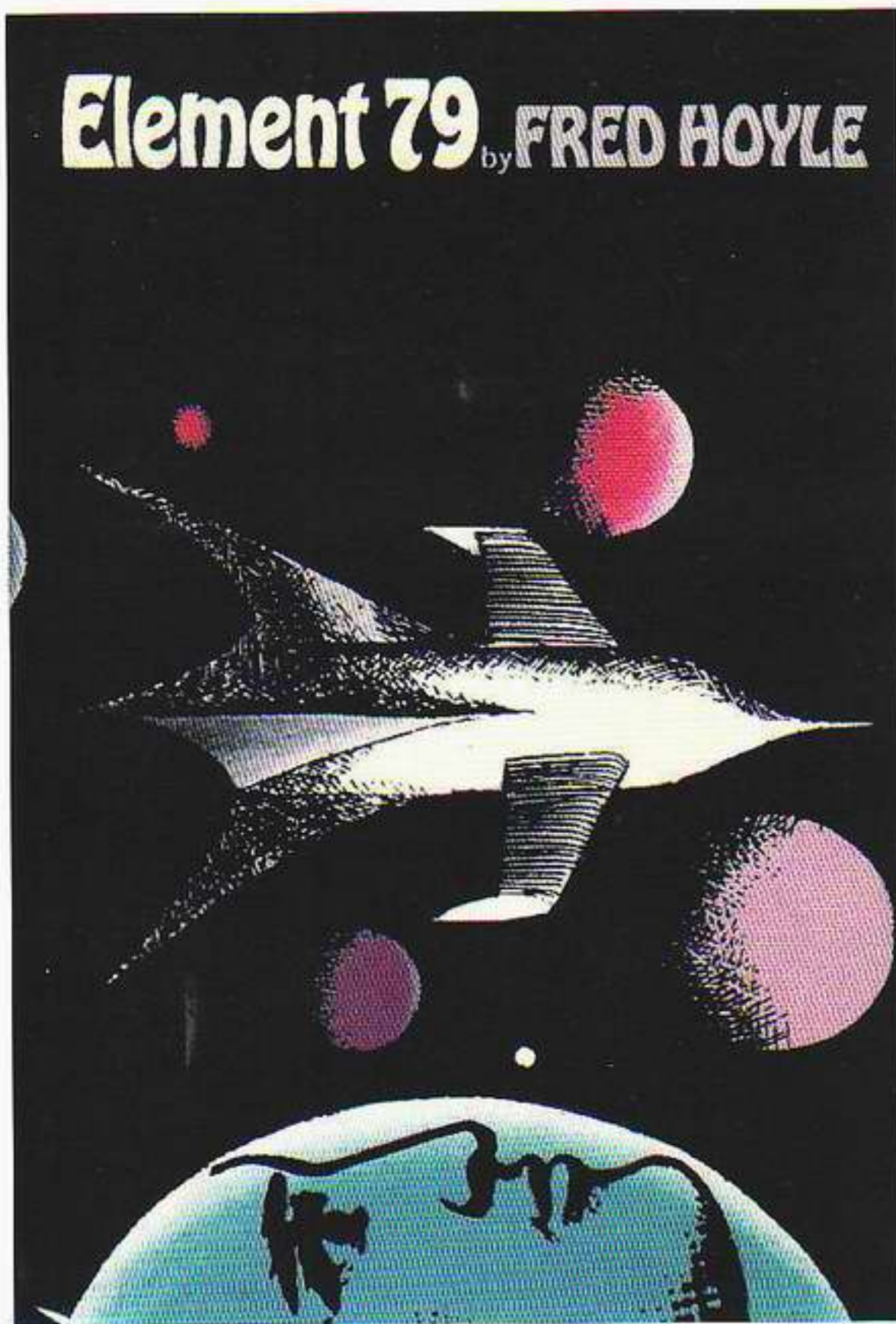
Εικόνα 13.4 Η βρετανική τηλεοπτική σειρά *Red Dwarf* αποτελεί ειρωνική απάντηση στη σοβαροφάνεια των αμερικανικών σειρών όπως το *Star Trek*. Στο επεισόδιο «Dimension jump», ο «χαμένος» Arnold Rimmer, που αποτελεί την οικεία εκδοχή του ολογράμματος, συναντά το «νικητή», το ακριβές αντίγραφο του Ace Rimmer. Ανατρέχοντας στο παρελθόν, το σημείο Jonathan μπορεί να αναχθεί στη στιγμή κατά την οποία ο Rimmer κάνει μια τάξη στο σχολείο. Στη φωτογραφία φαίνεται ο Arnold με τον Ace, τον κβαντικό του κλώνο.

τους έπρεπε να παρακολουθήσει εκ νέου μια τάξη στο σχολείο. Αντίθετα, στη σειρά *The Next Generation* του *Star Trek*, το θέμα αντιμετωπίζεται πιο σοβαρά. Στο επεισόδιο με τίτλο «Parallels», το διαστημόπλοιο του Worf διασχίζει μια «κβαντική σχισμή στο χωρόχρονο», οπότε τα όρια μεταξύ διαφορετικών κβαντικών πραγματικοτήτων «καταρρέουν». Καθώς ο Worf μεταπηδά από τον έναν κλάδο της κυματοσυνάρτησης στον άλλο, βιώνει κάθε φορά διαφορετικές κβαντικές πραγματικότητες. Ο Data συμπυκνώνει την κβαντομηχανική ερμηνεία των «πολλών κόσμων» στη φράση: «Όλα όσα είναι δυνατόν να συμβούν, συμβαίνουν.»

Έχουν, όμως, αυτά τα πολλαπλά σύμπαντα κάποια επιστημονική βάση; Στο Κεφάλαιο 7 εισαγάγαμε το μετρικό πρόβλημα στην κβαντική μηχανική. Μια προτεινόμενη λύση είναι και η ερμηνεία των πολλών κόσμων του Hugh Everett. Αντί κατά τη μέτρηση η κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου να καταρρέει σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ο Everett υπέθεσε ότι πραγματοποιούνται όλα τα δυνατά αποτελέσματα της μέτρησης, το καθένα όμως και σε ένα διαφορετικό παράλληλο σύμπαν. Αλλά αφού μετρήσεις επί κβαντικών συστημάτων λαμβάνουν χώρα αδιαλείπτως, το γεγονός αυτό οδηγεί σε έναν απίστευτα μεγάλο και διαρκώς αυξανόμενο αριθμό διαφορετικών συμπάντων. Μολονότι η συγκεκριμένη «εξήγηση» του μετρικού προβλήματος είναι κατά κάποιον τρόπο ελκυστική, η θεωρία φαίνεται ότι έχει μικρό έως μηδαμινό προβλεπτικό περιεχόμενο, αφού δεν είναι εφικτή η εξερεύνηση ή αλληλεπίδραση αυτών των επιπρόσθετων συμπάντων. Ο David Deutsch, φυσικός στο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης, αντιμετωπίζει πιο θετικά τη θεωρία του πολυσύμπαντος. Δικαιολογημένα θεωρείται ως ένας από τους πρωτοπόρους της κβαντικής υπολογιστικής, αφού έδειξε πρώτος τον τρόπο με τον οποίο οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να μετέλθουν της «κβαντικής παραλληλίας» προς παραγωγή γρηγορότερων αποτελεσμάτων από τους συμβατικούς υπολογιστές. Ο Deutsch πιστεύει ότι η κβαντική συμβολή και η κβαντική παραλληλία μπορούν να κατανοηθούν μόνο υπό την οπτική των πολλών κόσμων. Άλλοι φυσικοί, πάλι, διαφωνούν.

Όπως είδαμε, ο Erwin Schrödinger εξέθεσε γλαφυρά τις ενστάσεις

Element 79 by FRED HOYLE



Εικόνα 13.5 Το εξώφυλλο της συλλογής ιστοριών επιστημονικής φαντασίας του Fred Hoyle με τίτλο *Element 79*. Η ομώνυμη ιστορία αφορά ένα μετεωρίτη από στάφιο χρυσόφι, το χημικό στοιχείο του τίτλου, ο οποίος ρημάζει το μεγαλύτερο μέρος της Σκωτίας, αλλά αναζωογονεί τη βρετανική οικονομία προσφέροντας στην κυβέρνηση τον έλεγχο της παγκόσμιας αγοράς χρυσού. Στην ιστορία «A jury of five», ο Hoyle διερευνά το ρόλο του παρατηρητή στην κβαντική μηχανική μέσω μιας ανθρώπινης εκδοχής του παραδόξου της γάτας του Schrödinger.

του σχετικά με το μετρητικό πρόβλημα, τους παρατηρητές και την κβαντική θεωρία στο πείραμα της δύσμοιρης γάτας του. Μερικοί συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας έχουν αποτολμήσει τη διερεύνηση παρόμοιων κβαντικών μετρητικών προβλημάτων. Ένας από τους πρώτους συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας που έθεσε το πρόβλημα αυτό ως βάση μιας ιστορίας του ήταν ο αστρονόμος Fred Hoyle. Ο Hoyle συγκαταλέγεται στο μικρό εκείνο πλήθος επιτυχημένων επιστημόνων οι οποίοι ήταν παράλληλα και επιτυχημένοι συγγραφείς ιστοριών επιστημονικής φαντασίας. Αν και η έρευνά του περί σχηματισμού των διάφορων χημικών στοιχείων στα άστρα παρ' ολίγον να του αποφέρει το βραβείο Νόμπελ, ο Hoyle είναι πιθανότατα πιο γνωστός στο ευρύ κοινό ως ένας από τους επινοητές της θεωρίας «σταθερής κατάστασης» του Σύμπαντος. Ως ερμηνεία της παρατηρούμενης διαστολής του Σύμπαντος, η εν λόγω θεωρία πρότεινε την αδιάλειπτη δημιουργία ύλης. Για μερικά χρόνια, η θεωρία της σταθερής κατάστασης αποτελούσε σοβαρό αντίπαλο για την εναλλακτική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης. Ακριβέστερα, το όνομα «Big Bang» το έπλασε ο ίδιος ο Hoyle με χλευαστική διάθεση στη διάρκεια μιας ραδιοφωνικής συνέντευξης. Στις μέρες μας, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι οι νέες

ενδείξεις που συσσωρεύτηκαν τα τελευταία είκοσι χρόνια κλίνουν κατηγορηματικά υπέρ της θεωρίας της Μεγάλης Έκρηξης. Το πρώτο επιτυχημένο μυθιστόρημα επιστημονικής φαντασίας του Hoyle έφερε τον τίτλο *The Black Cloud* και εκδόθηκε το 1957. Ένα αέριο νέφος εφοδιασμένο με αισθήσεις καταφθάνει στο ηλιακό μας σύστημα κρύβοντας τον Ήλιο, απειλώντας ακούσια τη ζωή στη Γη. Όλη η βαθιά δυσπιστία που έτρεφε ο Hoyle απέναντι στο «κατεστημένο» —επιστημονικό και πολιτικό— διακρίνεται καθαρά στον αγώνα που καταβάλλει ο επιστήμων-ήρωάς του έναντι της γραφειοκρατίας. Μεγαλύτερη συνάφεια προς το θέμα μας έχει μια σύντομη ιστορία που περιλαμβάνεται στη συλλογή *Element 79*. Η εν λόγω ιστορία τιτλοφορείται «A jury of five», και το ενδιαφέρον στοιχείο της έγκειται στο ότι χειρίζεται το μετρικό πρόβλημα με πρωτότυπο τρόπο. Η πλοκή εκτυλίσσεται γύρω από μια αυτοκινητική σύγκρουση, με την αστυνομία να βρίσκει μόνο ένα πτώμα, ενώ αδυνατεί να αποφανθεί με βεβαιότητα ποιος από τους οδηγούς πέθανε, αφού ο άλλος κατά τα φαινόμενα δέχτηκε ένα χτύπημα στο κεφάλι και στη συνέχεια εγκατέλειψε το σημείο περιπλανώμενος στην ύπαιθρο σε κατάσταση σύγχυσης. Την ιστορία αφηγούνται από την πλευρά τους οι δύο οδηγοί, προσάπτοντάς της χαρακτήρα απόκοσμο. Μπορούν να ακούσουν και να δουν τι κάνει η αστυνομία, οι οικογένειες και οι φίλοι τους, αδυνατούν όμως να αλληλεπιδράσουν μαζί τους. Η τελευταία σκηνή διαδραματίζεται στο νεκροτομείο, όπου πέντε ένορκοι παρακολουθούν το σήκωμα του σεντονιού που σκεπάζει το πρόσωπο του πτώματος. Ο ένας από τους οδηγούς που έχουν αποχωριστεί το σώμα τους είναι ο Adams, ολιγόλογος και συνεσταλμένος καθηγητής φιλοσοφίας στην Οξφόρδη. Ο άλλος είναι ένας δουλευταράς, φιλόδοξος επιχειρηματίας που απατούσε τη γυναίκα του. Ο Adams αντιλαμβάνεται εν τέλει τι πρέπει να συμβαίνει:

Καθ' οδόν προς την πόλη, επισημαίνει ο Adams, «πιστεύω ότι επιτέλους κατάλαβα. Ένας από τους δυο μας θα αποκαλυφθεί πως κείται κάτω από το σεντόνι, νεκρός. Ο άλλος πρόκειται να βρεθεί να πλανάται άσκοπα στην ύπαιθρο, ζωντανός.»

«Στο καλό, δεν καταλαβαίνω τίποτα.»

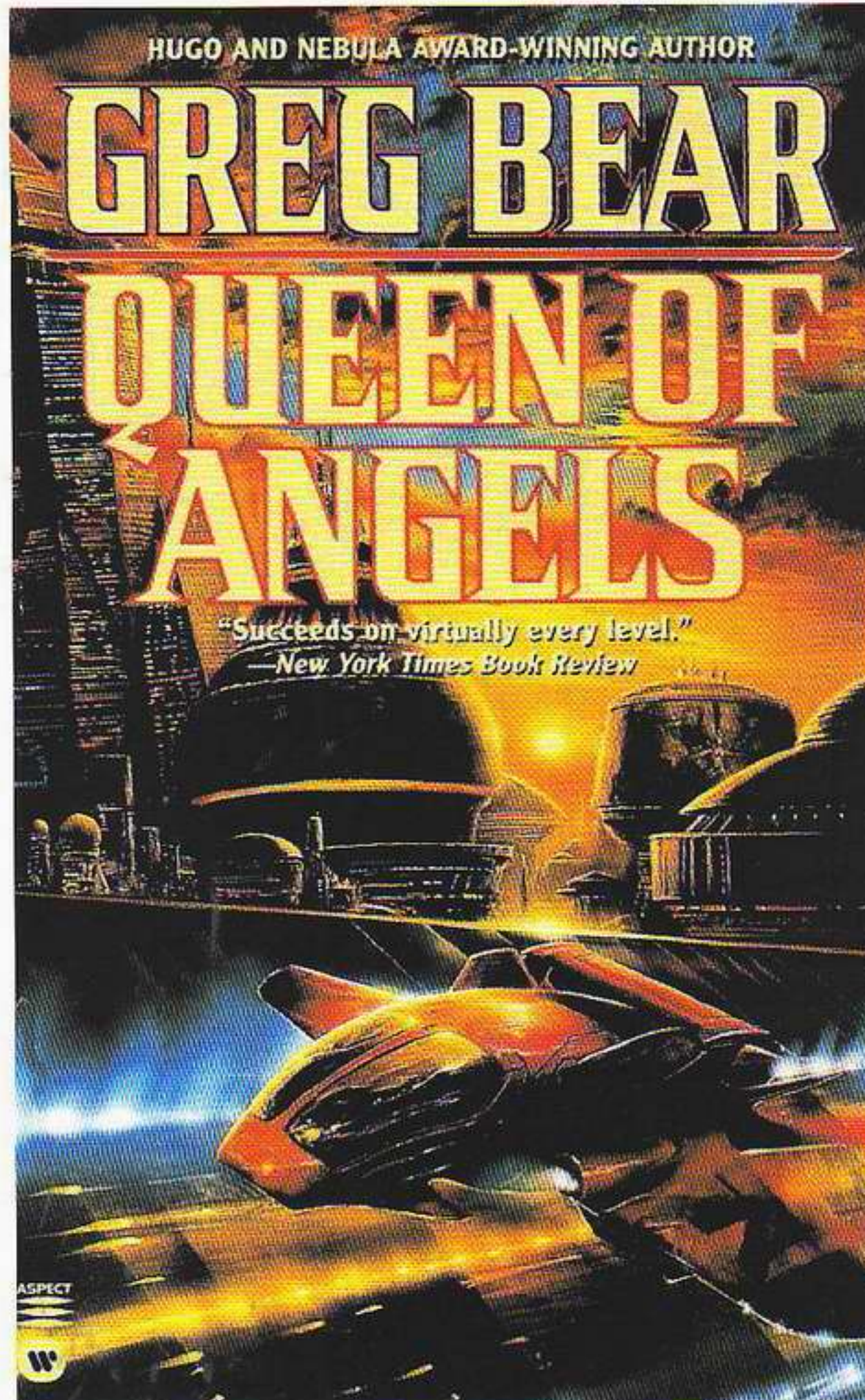
«Νομίζω ότι δεν έχει ακόμα καθοριστεί ποιος από τους δυο μας θα είναι.»

«Τι εννοείς;»

«Θα εξαρτηθεί από το τι θέλουν εκείνοι.»

Οι πέντε ένορκοι ψηφίζουν, με αποτέλεσμα ο Adams να καταλήξει νεκρός. Ο Hoyle το εξηγεί ως εξής:

Για την έκβαση ευθύνεται ο Adams· για την ακρίβεια, η στιγμιαία αντίδρασή του όταν το αυτοκίνητο του Hadley πετάχτηκε μπροστά του και τον χτύπησε. Η στιγμιαία αντίδραση του Adams, πάλι, εξαρτήθηκε από την ηλεκτρική, νευρολογική δραστηριότητα του εγκεφάλου του, η οποία σε τελική ανάλυση εξαρτάται από ένα συγκεκριμένο κβαντικό γεγονός, σχετιζόμενο με το αν το δυστύχημα τελικά συνέβη ή όχι. Μέχρι τη στιγμή που το κυματιστό σεντόνι τραβήχτηκε διαμιάς από το πτώμα στο νεκροτομείο, η κυματοσυνάρτηση που αναπαριστούσε το γεγονός τελούσε ακόμη σε «μικτή κατάσταση», όπως λένε οι φυσικοί. Ας προστεθεί, προς χάριν του ευφυούς φυσικού, ότι ένα στοιχείο που οδηγεί στη λύση του βαθύ-



Εικόνα 13.6 Το εξώφυλλο του βιβλίου *Queen of Angels* του Greg Bear που πρωτοεκδόθηκε το 1990. Πρόκειται για μια αστυνομική περιπέτεια που εκτυλίσσεται με φόντο νανοτεχνολογικά θαύματα. Όπως δηλώνει ο συγγραφέας σε μια υποσημείωση, «η νανοτεχνολογία που περιγράφεται εδώ είναι άκρως εικονοφανής», και αναφέρει το οραματικό βιβλίο *The Engines of Creation* του K. Eric Drexler.

τερου προβλήματος της θεωρητικής φυσικής —της αναγωγής της κυματοσυνάρτησης του Schrödinger— κρύβεται στον τρόπο με τον οποίο οι πέντε ένορκοί μας κατέληξαν στην απόφασή τους.

Ο Hoyle ανέπλασε με τρόπο ερεθιστικό το παράδοξο της γάτας του Schrödinger. Στη δική του εκδοχή, το πτώμα δεν γίνεται αντικείμενο παρατήρησης μόνο από το φίλο του Wigner αλλά από πέντε διαφορετικές συνειδήσεις που αποφασίζουν κατά πλειοψηφία. Ο διάσημος μαθηματικός John von Neumann και ο φυσικός Eugene Wigner αισθάνθηκαν ότι η λογική τους ωθεί να ταχθούν με την άποψη ότι η αναγωγή της κυματοσυνάρτησης συμβαίνει στη συνείδηση του παρατηρητή. Ο John Archibald Wheeler προχώρησε ακόμα παραπέρα εικάζοντας ότι:

Είναι δυνατόν το Σύμπαν να «προσέχθη εις το είναι», κατά μία παράξενη έννοια, μέσω συμμετοχής των συμμετεχόντων σε αυτό; Η «συμμετοχή» αποτελεί την ομολογουμένως νέα έννοια που μας προσφέρει η κβαντική μηχανική. Εξοβελίζει τον «παρατηρητή» όπως αυτός νοείται στην κλασική θεωρία, τον άνθρωπο δηλαδή που στέκεται πίσω από τον παχύ γυάλινο τοίχο και παρακολουθεί τα τεκταινόμενα χωρίς να λαμβάνει μέρος.

Η ιστορία τού Hoyle τονίζει αναμφίβολα το πρόβλημα της μέτρησης. Προσφέρει όμως και μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για όσους πιστεύουν ότι ο τρόπος υπερκέρασης των δυσκολιών της κβαντικής μηχανικής έγκειται στο ρόλο του παρατηρητή-φορέα συνείδησης.

Νανοτεχνολογία και κβαντικοί υπολογιστές

Ποιο νέο είδος κβαντικής τεχνολογίας μπορεί να αποτελέσει πηγή έμπνευσης για τους συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας; Λίγοι συγγραφείς έχουν αντιμετωπίσει την πρόκληση της νανοτεχνολογίας. Δύο τέτοιες εξαιρέσεις αποτελούν ο Greg Bear με το μυθιστόρημά του *Queen of Angels* και ο Neal Stephenson με το *The Diamond Age*. Το *Queen of Angels* του Greg Bear εκτυλίσσεται στο Λος Άντζελες κατά το γύρισμα της «δυσδικής χιλιετίας» 2048. Η περίπλοκη αυτή ιστορία συνυφαίνει την εξιχνίαση ενός φόνου με νέα από τη ρομποτική εξερεύνηση πλανητών στο σύστημα του Άλφα Κενταύρου. Οι δυνατότητες ύπαρξης εξωγήινης νοημοσύνης και υπολογιστών με αυτογνωσία αποτελούν θέμα μιας μικρότερης κλίμακας πλοκής που εκτυλίσσεται παράλληλα με την κύρια δράση —η οποία περιστρέφεται γύρω από τη χειραγώγηση, την εξερεύνηση και την τιμωρία του νου. Ο χαρακτήρας του νανοχειρουργού περιγράφει τις τεχνικές που ανέπτυξε για να εξερευνήσει αυτό που ο ίδιος ονομάζει «Χώρα του Νου». Στην προκειμένη περίπτωση, ο διαταραγμένος νους ενός διάσημου ποιητή μεταλλάχθηκε σε κατά συρροή δολοφόνο:

Η νανοθεραπεία —η χρήση μικροσκοπικών χειρουργικών συσκευών για την αλλαγή των νευρωνικών οδών και την κυριολεκτική αναδόμηση του εγκεφάλου— προσφέρει την ευκαιρία πλήρους εξερεύνησης της Χώρας του Νου. Αδυνατούσα να λάβω γνώση της κατάστασης μεμονωμένων νευρώνων στον πυρήνα του υποθαλάμου χωρίς να αναγκαστώ να καταφύγω σε επεμβατικές μεθόδους, όπως, για παράδειγμα, στη χρήση καθετήρων που καταλήγουν σε μικρολεκτρόδια ή προσδετικών παραγόντων επισημειωμένων με ραδιενεργές ουσίες. Όμως, είχα βρει τη λύση· μικροσυσκευές ικανές να παραμένουν στο εσωτερικό ενός νευράξονα ή ενός νευρώνα, ή και πλησίον του, που μετρούν την κατάσταση του νευρώνα και αποστέλλουν σήματα προς ευαίσθητους εξωτερικούς δέκτες μέσω μικροσκοπικών «έμβιων» καλωδίων [...]. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους αποδείχθηκαν ευκολότερα απ' ό,τι ανέμενα. Οι πρώτες μικροσυσκευές ήταν νανοθεραπευτικές μονάδες ελέγχου, μικροσκοπικοί αισθητήρες οι οποίοι παρακολουθούσαν και κατέγραφαν τη δραστηριότητα άλλων χειρουργικών μικροσυσκευών και οι οποίες εκτελούσαν κυριολεκτικά την οποιαδήποτε επιθυμία μου.

Παρόμοια νανοτεχνολογικά θαύματα επιδεικνύει και η μη επανδρωμένη διαστημική εξερευνητική συσκευή «AXIS» καθ' οδόν προς το σύστημα του Άλφα Κενταύρου:

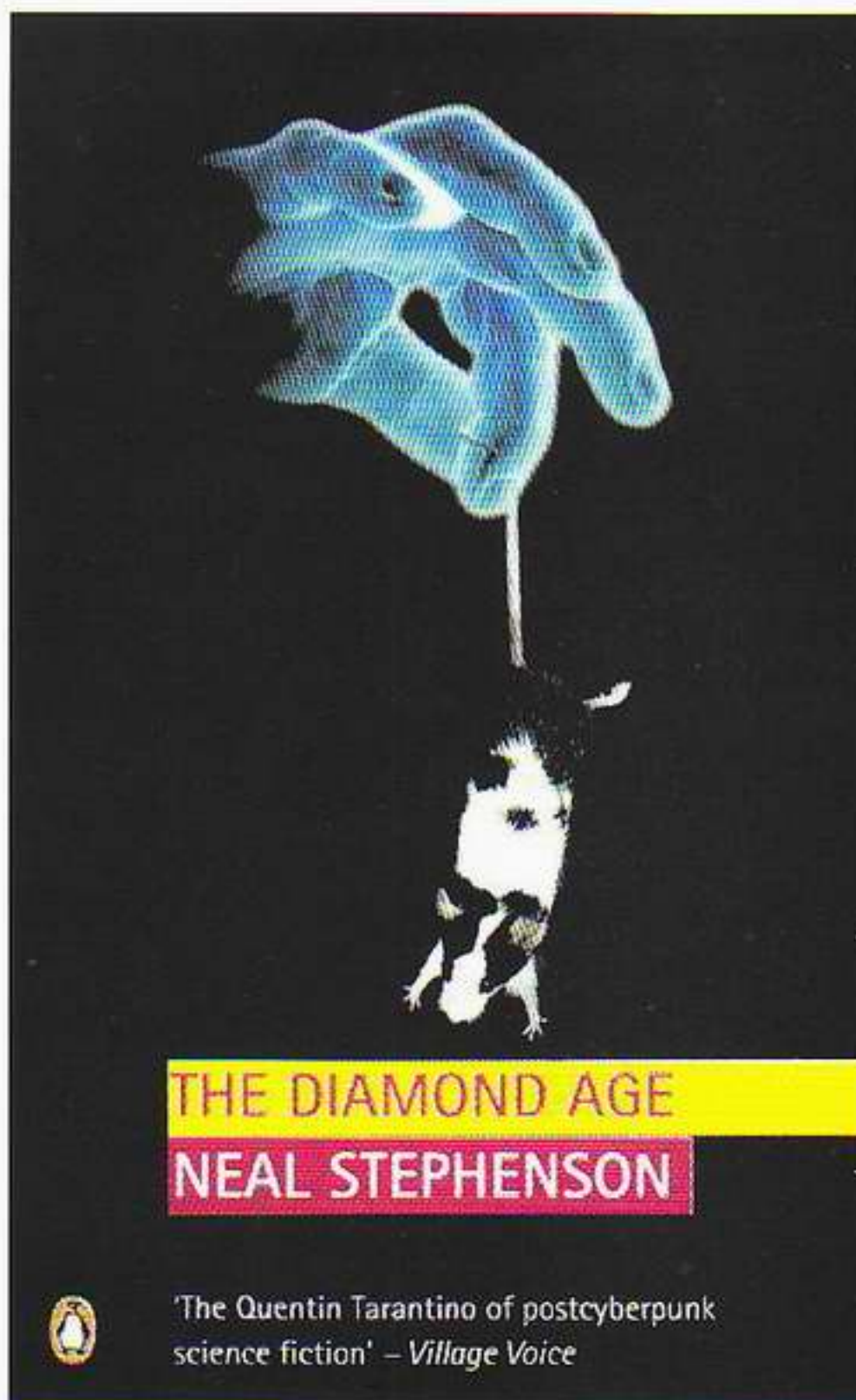
Ο «νους» τού AXIS απαρτίζεται από το βιολογικό σύστημα και το μηχανικό σύστημα. Για όσα χρόνια το AXIS επιτάχυνε χάρη στον θηριώδη διάπυρο πίδακα από πλάσμα ύλης-αντιύλης, η μη επανδρωμένη εξερευνητική διαστημική συσκευή ελεγχόταν από έναν πρωτόγονο, γεροφτιαγμένο και ανθεκτικό στη ραδιενεργό προσβολή υπολογιστή ανόργανης ύλης [...]. Περίπου έξι μήνες πριν από την έναρξη της επιβραδυντικής φάσης, το AXIS ενεργοποίησε μια μικρή γεννήτρια σύντηξης, ελάχιστα μεγαλύτερη από ανθρώπινο αντίχειρα, η οποία παρήγαγε θερμότητα επαρκή για να τροφοδοτήσει τις δραστηριότητες νανομηχανών και την ανάπτυξη των τεράστιων αλλά εξαιρετικά λεπτών και ελαφρών υπεραγωγίων πτερυγίων του [...]. Το AXIS περίμενε έως ότου πλησιάσει στον Άλφα Κενταύρου Β για να δρομολογήσει την ανάπτυξη του βιολογικού συστήματος σκέψης.

Η δράση εναλλάσσεται από σκηνή σε σκηνή, ενώ η νανοτεχνολογία είναι διακριτικά πανταχού παρούσα — νανοξυλεία, νανοβιβλία, νανοτροφές και νανοαρώματα. Η αστυνομία έχει επίσης να αντιπαρατάξει μια εντυπωσιακή σειρά τεχνολογικών επινοημάτων — νανομοριακές πανοπλίες, ποντίκια-νανορομπότ της υπηρεσίας σήμανσης, νανοκατασκόπους ενσωματωμένους σε μείκ-απ και μικρά βέλη σχεδιασμένα να αλλάζουν σχήμα και να εισχωρούν σε πληγές. Όσον αφορά τα μυστικά όπλα, μέσω της νανοτεχνολογίας αποκτούν νέα διάσταση:

Εκείνη παρακολουθούσε υπομονετικά το νανορομπότ εν δράσει. Οι μεταλλικές σωληνώσεις της σχάρας του είχαν στραπατοαριστεί κάτω από το γκρι επίχρισμα. Ο πολτός από αποδομημένα αντικείμενα συστέλλοταν σε ένα στρογγυλό μόρφωμα πολυπλοκότητας. Μέσα σε αυτό, το νανορομπότ ανακατασκεύαζε ένα αντικείμενο — θύμιζε το έμβρυο που σχηματίζεται μέσα στο αβγό [...]. Αυτή διέκρινε το βασικό του σχήμα. Στη μια πλευρά, περίσσεια ακατέργαστου υλικού έπαιρνε τη μορφή σβώλων καθαρής σκουριάς. Το νανορομπότ απομακρύνθηκε από τη σκουριά. Λαβή, γεμιστήρας, θαλάμη, κάννη, οδηγός πτήσης. Σε μια πλευρά του μορφώματος άρχισε να σχηματίζεται ένας δεύτερος σβώλος, όχι σκουριάς. Εφεδρικός γεμιστήρας.

Μια παρόμοια άποψη για το μέλλον παρατίθεται στο μυθιστόρημα *The Diamond Age* του Neal Stephenson, με υπότιτλο *A Young Lady's Illustrated Primer*. Στην εν λόγω ιστορία, η νανοτεχνολογία υπηρετεί την τέχνη και την ψυχαγωγία, τη διατροφή και ένδυση των μαζών, την κατανάλωση νανοϋλικού από νέφη «έξυπνης» ομίχλης, αλλά λειτουργεί και ως το έξυπνο και διαδραστικό «αλφαβητάρι» του τίτλου. Το αλφαβητάρι είναι ένα παράνομο ανατρεπτικό τεχνολογικό θαύμα που διδάσκει στον αναγνώστη τα πάντα, από μυθολογία και επιστήμη μέχρι πολεμικές τέχνες και τεχνικές επιβίωσης σε ένα συχνά εχθρικό περιβάλλον:

Ένα φύλλο χαρτιού είχε πάχος εκατό περίπου χιλιάδες νανόμετρα.



Εικόνα 13.7 Το εξώφυλλο του *The Diamond Age*, του Neal Stephenson. Ο εναλλακτικός τίτλος είναι *A Young Lady's Illustrated Primer*, και αναφέρεται στο έξυπνο βιβλίο που βρίθει νανοτεχνολογικών θαυμάτων και το οποίο έφτασε στα χέρια της Nell, της ηρωίδας του βιβλίου.

Μέσα του μπορούσαν να χωρέσουν σχεδόν τριακόσιες χιλιάδες άτομα. Το έξυπνο χαρτί αποτελείτο από ένα δίκτυο απειροστά μικρών υπολογιστών στοιβαγμένων μεταξύ των μέντιατρον. Το μέντιατρον ήταν ένα αντικείμενο ικανό να αλλάζει χρώμα από μέρος σε μέρος. Δύο τέτοια μέντιατρον κάλυπταν τα δύο τρίτα του πάχους του χαρτιού, αφήνοντας ένα εσωτερικό χάσμα αρκετά φαρδύ για να χωρά δομές εύρους εκατό χιλιάδων ατόμων. Το φως και ο αέρας μπορούσαν εύκολα να διεισδύσουν ως αυτό το σημείο, οπότε οι εργασίες περιορίζονταν εντός κενотоπιών —ανέρων φουλερενικών κελυφών καλυμμένων με ένα ανακλαστικό στρώμα αργιλίου, για να μην εκρήγνυνται συλλήβδην όποτε η σελίδα εκτίθεται στον ήλιο. Το εσωτερικό κάθε τέτοιας φουλερενικής μπάλας ήταν ένα εύτακτο περιβάλλον. Σε αυτό επικρατούσε η «λογική των ράβδων», και αυτή έκανε το χαρτί έξυπνο. Καθένας από τους σφαιρικούς υπολογιστές συνδεόταν με τους τέσσερεις γείτονές του, σε βορρά-ανατολή-νότο-δύση, μέσω μιας δεσμίδας διωστήρων που διέτρεχαν έναν εύκαμπτο, κενό νανοσωλήνα, ούτως ώστε η σελίδα εν συνόλω να συνιστά έναν παράλληλο υπολογιστή αποτελούμενο από δισεκατομμύρια μεμονωμένους επεξεργαστές.

Το αλφαβητάρι που σχεδίασε ο νανοτεχνολόγος John Hackworth ήταν πολλές φορές εξυπνότερο από ετούτο το έξυπνο χαρτί. Το παρήγαγε ένας «συμπληπτής ύλης», ο οποίος αποσπά κάθε φορά ένα άτομο από έναν ιμάντα μεταφοράς ακολουθώντας τις οδηγίες ενός προγράμματος, με σκοπό να συναρμολογήσει την επιθυμητή δομή. Για να αντιληφθούμε έναν κόσμο που βρίθεται νανοσυσκευών, πρέπει να αλλάξουμε τον τρόπο σκέψης μας:

Αερόστατο σήμαινε οτιδήποτε αιωρείτο στον αέρα, και αποτελούσε ένα εύκολο στην εκτέλεση κόλπο εκείνες τις ημέρες. Οι υπολογιστές ήταν απειροστά μικροί. Οι δε μπαταρίες πολύ πιο ισχυρές. Δυσκολευόταν κανείς να κατασκευάσει αντικείμενα βαρύτερα του αέρα. Τα απλά, συνηθισμένα πράγματα όπως τα υλικά συσκευασίας —δηλαδή η κύρια πηγή απορριμμάτων— είχαν την τάση να αιωρούνται ολόγυρα σαν να μην είχαν καθόλου βάρος, ενώ οι πιλότοι αεροσκαφών που πετούσαν ως και 10 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας είχαν συνηθίσει να βλέπουν άδειες, πεταμένες σακούλες προϊόντων να περνούν ξυστά από τους ανεμοθώρακες των αεροπλάνων τους (και να τις απορροφούν οι κινητήρες τους).

Η εν λόγω τεχνολογία, όμως, έχει και τη σκοτεινή της πλευρά. Ο Harv, ο περπατημένος αδελφός της Nell —της ηρωίδας—, της εξηγεί γιατί το χρώμα του ουρανού έγινε ξαφνικά μολυβί:

«Ακάρεα» είπε «ή τουλάχιστον έτσι λένε στο Τσίρκο των Ψύλλων». Έπιασε ένα από τα μαύρα πράγματα από τη μάσκα και το χτύπησε ελαφρά με την άκρη του δαχτύλου του. Ένα τεφρώδες νέφος εξήλθε περιδινούμενο από το εσωτερικό του, όπως μια σταγόνα μελάνι σε ένα ποτήρι με νερό, και μετεωρίστηκε στον αέρα, χωρίς να ανεβαίνει ή κατεβαίνει. Φωτεινές λάμπες λαμπύρισαν μέσα του σαν νεραϊδόσκονη. «Βλέπεις, πάντοτε κυκλοφορούν τριγύρω ακάρεα, μιλάνε μεταξύ τους μέσω των εκλάμψεων» εξήγησε ο Harv. «Βρίσκονται στον αέρα, τις τροφές, το νερό, παντού. Και ακολουθούν υποτίθεται κανόνες που λέγονται πρωτόκολλα. Και υπάρχει ένα αρκετά παλιό πρωτόκολλο που αναφέρει ότι τα ακάρεα είναι τάχα ευεργετικά για τους πνεύμονές μας. Αν εισπνεύσεις ένα από αυτά, υποτίθεται ότι αποδομούνται μέσα σου σε πιο ασφαλή κομμάτια [...]. Υπάρχουν όμως άνθρωποι που μερικές φορές δεν τηρούν αυτούς τους κανόνες, δεν τηρούν τα πρωτόκολλα. Και υποθέτω, αν υπάρχουν πάρα πολλά, εκατομμύρια, ακάρεα στον αέρα και όλα διασπώνται μέσα στους πνεύμονές σου, ίσως τελικά αυτά τα ασφαλή κομμάτια να μην είναι και τόσο ασφαλή, αν πρόκειται για εκατομμύρια. Τέλος πάντων, οι τύποι στο Τσίρκο των Ψύλλων λένε ότι μερικές φορές τα ακάρεα πολεμούν μεταξύ τους [...]. Η σκόνη αυτή —εμείς την αποκαλούμε τόνερ— είναι στην ουσία τα πτώματα των νεκρών ακάρεων.»

Τελικά, πόσο ρεαλιστικά είναι αυτά τα σενάρια; Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 8, η νανομηχανική γίνεται σταδιακά πραγματικότητα, σαφώς όμως απομένει μακρύς δρόμος μέχρι να φτάσει σε τέτοιο επίπεδο εκλέπτυνσης. Προς το παρόν βρισκόμαστε ακόμα στα αρχικά, πρώιμα στάδια απόκτησης επαρκούς ε-

λέγχου επί της ατομικής ύλης, για να είμαστε σε θέση να συναρμολογήσουμε κατά παραγγελία τεχνητά άτομα και άλλα νανοσυστήματα. Απαιτούνται πολλά ακόμη προτού καταφέρουμε να κατασκευάσουμε νανοσυστήματα ικανά να τρέχουν ένα πρόγραμμα ή να ασκούν, σε κάποιο βαθμό, έλεγχο στο δικό τους περιβάλλον. Σύμφωνα με το όραμα της μοριακής νανοτεχνολογίας του Eric Drexler, η πρόοδος-κλειδί που απαιτείται για την υλοποίηση του ονείρου του είναι η ικανότητα κατασκευής ενός «αυτοσυναρμολογούμενου συστήματος», ή «συναρμολογητή» —ένα νανούστημα ικανό να παράγει αντίγραφο του εαυτού του με αξιόπιστο τρόπο ή να τρέχει ένα πρόγραμμα που το κατευθύνει στην κατασκευή άλλων συγκεκριμένων νανοσυστημάτων. Έχουν εκτελεστεί μερικά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση, απέχουμε όμως πολύ ακόμα από την υλοποίηση του ονείρου του Drexler. Όταν —ή αν τελικά— η νανοτεχνολογία φτάσει σε αυτό το επίπεδο, τότε κατά τον Drexler θα έχουμε έναν ουτοπικό κόσμο χωρίς πείνα, αφού θα μπορούμε να συνθέσουμε τροφή από πρώτες ύλες, δεν θα υπάρχει έλλειψη ενέργειας, αφού θα μπορούμε να φτιάχνουμε πάμφθυνα μικροσκοπικά φωτοκύτταρα, δεν θα υπάρχουν ασθένειες, αφού μικροσκοπικοί νανοχειρουργοί-ρομπότ θα μπορούν να ενεθούν στο κυκλοφορικό μας σύστημα για να εξαλείψουν νοσούντα κύτταρα ή ιούς. Ακούγεται πολύ ωραίο για να είναι αληθινό, και φυσικά δεν αποκλείεται να αποδειχθεί άπιαστο όνειρο. Αξίζει τον κόπο όμως να προσπαθήσουμε για ένα τέτοιο μέλλον· και όπως είπε ο Feynman σε μια ομιλία του το 1959, η νανοτεχνολογία είναι «η πρόκληση να εισέλθουμε σε ένα νέο πεδίο της φυσικής». Σαράντα χρόνια μετά, αν εξαιρέσουμε τις προσπάθειες σχετικά λίγων πρωτοπόρων επιστημόνων, η αρχική πρόκληση του Feynman και το ουτοπικό όραμα του Drexler εξακολουθούν να αποτελούν συναρπαστικές προκλήσεις για τη νέα γενιά επιστημόνων και μηχανικών.

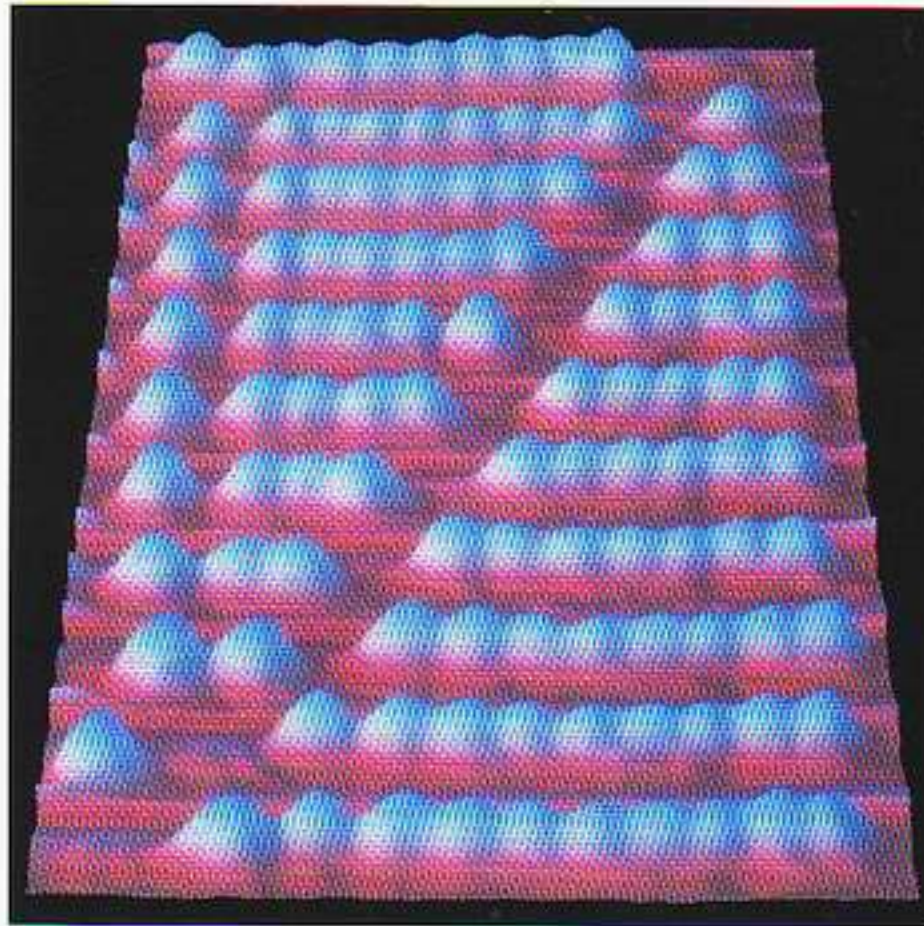
Τι έχει απομείνει στην επιστημονική φαντασία για να εξερευνηθεί; Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, στρεφόμαστε προς το νέο μυθιστόρημα του Michael Crichton, το *Timeline*. Στο *Jurassic Park* και το *The Lost World*, ο Michael Crichton αντιμετώπισε την πρόκληση της γενετικής μηχανικής. Στο *Timeline* στρέφεται στην κβαντική τηλεμεταφορά και την κβαντική υπολογιστική. Το μυθιστόρημα αναμειγνύει τη φουτουριστική κβαντική τεχνολογία με ταξίδια στο χρόνο και τη μεσαιωνική ιστορία δημιουργώντας μια πλοκή που καθηλώνει. Η δράση τοποθετείται στο Νιου Μέξικο, κοντά στο Εθνικό Εργαστήριο του Λος Άλαμος, το οποίο και στην τρέχουσα πραγματικότητά μας αποτελεί ένα από τα πρωτοπόρα ερευνητικά κέντρα στην κβαντική κρυπτογραφία και την κβαντική υπολογιστική. Μια νεοσύστατη εταιρεία υψηλής τεχνολογίας, επονομαζόμενη International Technology Corporation, ή ITC, επιχορηγεί για μυστηριώδεις λόγους την ιστορική έρευνα σχετικά με τον Εκατονταετή Πόλεμο μεταξύ Αγγλίας και Γαλλίας. Η δράση εναλλάσσεται μεταξύ του χώρου ανασκαφών στην Ντορντόν της Γαλλίας και του αρχηγείου της ITC στο Νιου Μέξικο. Ο επί κεφαλής καθηγητής των ανασκαφών ανακαλείται στην ITC για να συναντήσει τον πρόεδρο της εταιρείας. Πίσω στη Γαλλία, έπειτα από μερικές μέρες χωρίς ίχνος νέων του καθηγητή, οι φοιτητές του ανακαλύπτουν μια κατά τα φαινόμενα μεσαιωνική έκκληση για βοήθεια προερχόμενη από τον ίδιο! Οι φοιτητές φτάνουν αεροπορικώς στο Νιου Μέξικο για να στελεχώσουν την ομάδα διάσωσης, η οποία πρόκειται να αποσταλεί πίσω στο παρελθόν για να τον σώσει. Τα διοικητικά στελέχη της ITC εξηγούν στους σκεπτικιστές φοιτητές τη νέα τους τεχνολογία:



Εικόνα 13.8 Μακρομοριακός τριβέας τον οποίο σχεδίασαν οι Κ. Eric Drexler και Ralph C. Merkle, δύο από τους πιο ένθερμους υποστηρικτές της μοριακής νανοτεχνολογίας. Το βιβλίο του Drexler *The Engines of Creation*, στο οποίο αναπτύσσει το όραμά του για τη νανοτεχνολογία, εκδόθηκε το 1986. Ο Drexler, όμως, έλαβε το διδακτορικό του δίπλωμα από το MIT μόλις το 1991. Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Επιστήμης Υπολογιστών είχε αρνηθεί να τον δεχτεί ως διεπιστημονικό διδακτορικό φοιτητή, και έτσι ο Marvin Minsky τον ενέγραψε στο περίφημο Media Lab του MIT. Μοιρασί ο Drexler παραδέχεται ότι το όραμα που έχει για το μέλλον ίσως γίνει πραγματικότητα έπειτα από αρκετές δεκαετίες, ο συνάδελφός του Ralph Merkle εγκατέλειψε το ερευνητικό εργαστήριο Xerox PARC για να εργαστεί σε μια νεοσύστατη εταιρεία νανοτεχνολογίας.

Οι συνήθεις υπολογιστές πραγματοποιούν υπολογισμούς χρησιμοποιώντας δύο καταστάσεις του ηλεκτρονίου που περιγράφονται ως 0 και 1. Έτσι δουλεύουν όλοι οι υπολογιστές, ανακατεύοντας μηδενικά και μονάδες. Πριν από είκοσι χρόνια, όμως, ο Richard Feynman είχε αναρωτηθεί κατά πόσον ήταν εφικτή η κατασκευή ενός εξαιρετικά ισχυρού υπολογιστή χρησιμοποιώντας και τις 32 κβαντικές καταστάσεις του ηλεκτρονίου. Πολλά εργαστήρια προσπαθούν τώρα να κατασκευάσουν τέτοιους κβαντικούς υπολογιστές. Το πλεονέκτημά τους είναι η ασύλληπτα μεγάλη ισχύς τους —τόσο μεγάλη ώστε ένα τρισδιάστατο έμβιο ον να μπορεί να περιγραφεί και να συμπιεστεί σε ένα ρεύμα ηλεκτρονίων, όπως ακριβώς γίνεται και με το φαξ. Στη συνέχεια, το ηλεκτρονικό αυτό ρεύμα μπορεί να μεταδοθεί μέσω μιας σκουληκότρυπας του κβαντικού αφρού και να ανασυσταθεί σε ένα άλλο σύμπαν. Αυτό λοιπόν κάνουμε εμείς. Δεν πρόκειται για κβαντική τηλεμεταφορά, ούτε για σωματιδιακή διαπλοκή, αλλά για άμεση αποστολή σε ένα άλλο σύμπαν.

Όπως είδαμε, η κβαντική υπολογιστική αρχίζει να υλοποιείται, έχουν δε διεξαχθεί και μικρής κλίμακας πειράματα κβαντικής τηλεμεταφοράς. Εν προκειμένω όμως, πρόκειται για ευφυή γενίκευση πέραν των ορίων της παρούσας γνώσης μας, στην οποία ενδιαφέρουσες κβαντικές τεχνολογίες —όπως κβα-

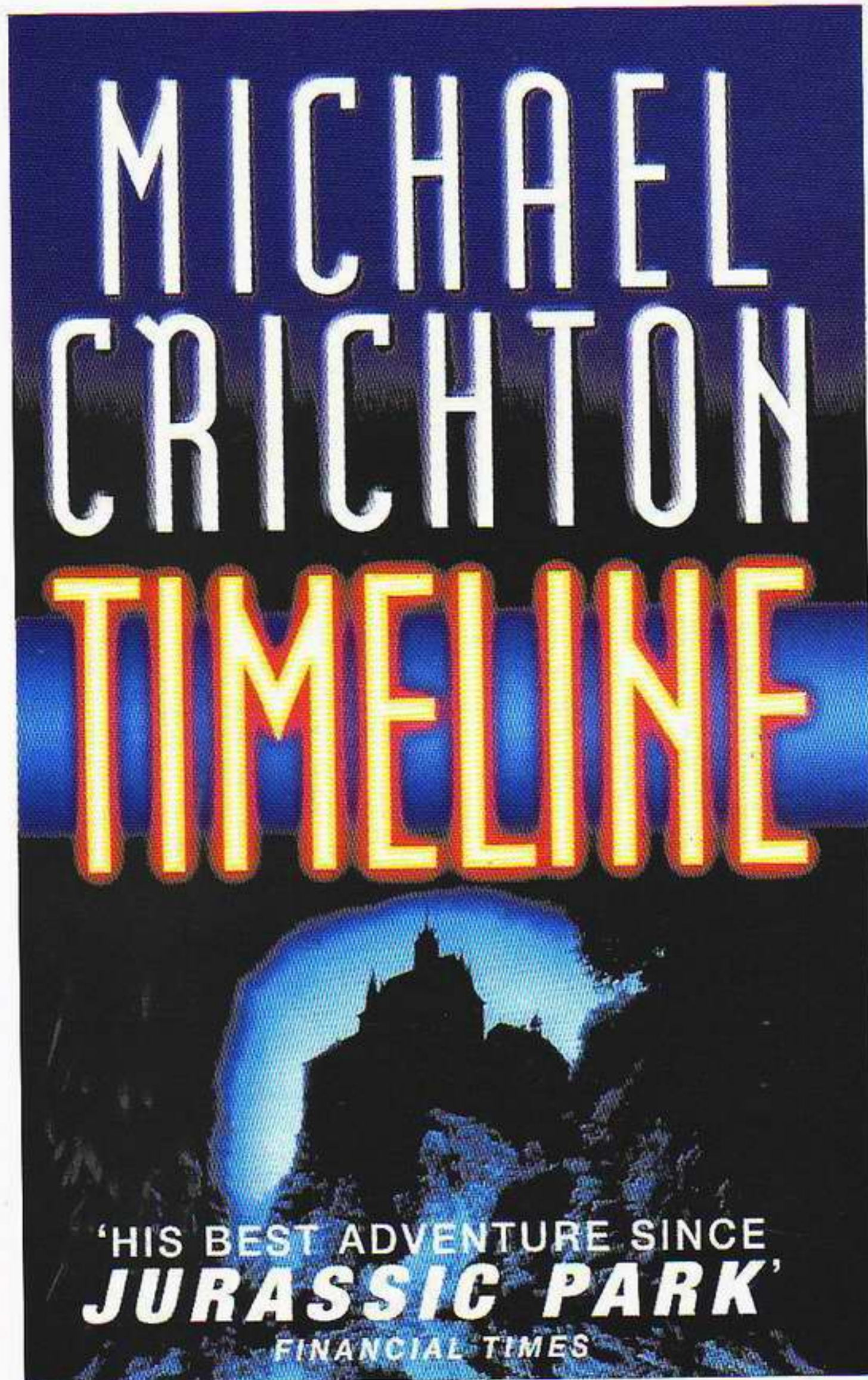


Εικόνα 13.9 Μοριακός άβρακας που δημιούργησε ο Jim Gimzewski και η ομάδα του στην IBM της Ζυρίχης. Οι «χάντρες» είναι φουλερενικές μπάλες —η προσφάτως ανακαλυφθείσα σταθερή μορφή άνθρακα. Ο χειρισμός του άβρακα μπορεί να γίνει σε θερμοκρασία δωματίου μέσω ενός STM. Μαλλονότι πρόκειται για εντυπωσιακό επίτευγμα, απέχουμε πολύ ακόμα από την κατασκευή πραγματικών νανοϋπολογιστών.

ντική υπολογιστική, τηλεμεταφορά και διαπλοκή, κβαντικά πολυσύμπαντα και σκουληκότρυπες— αναμειγνύονται κατά τρόπο που ακούγεται πιστευτός. Λάθος αποτελεί η αναφορά «στις 32 κβαντικές καταστάσεις του ηλεκτρονίου», ίσως όμως ο απώτερος σκοπός του συγγραφέα ήταν να περιπλέξει λίγο τα πράγματα! Ένα από τα χαρακτηριστικά της καλής επιστημονικής φαντασίας είναι η ικανότητά της να προβλέπει το μακρινό μέλλον και όχι απλώς το επόμενο βήμα. Ο Crichton δεν αναγνωρίζει μόνο ότι η αποθήκευση και συμπίεση του πληροφοριακού ισοδυνάμου ενός ανθρώπου συνιστά γιγαντιαίο υπολογιστικά άθλο, έχει και τη λύση:

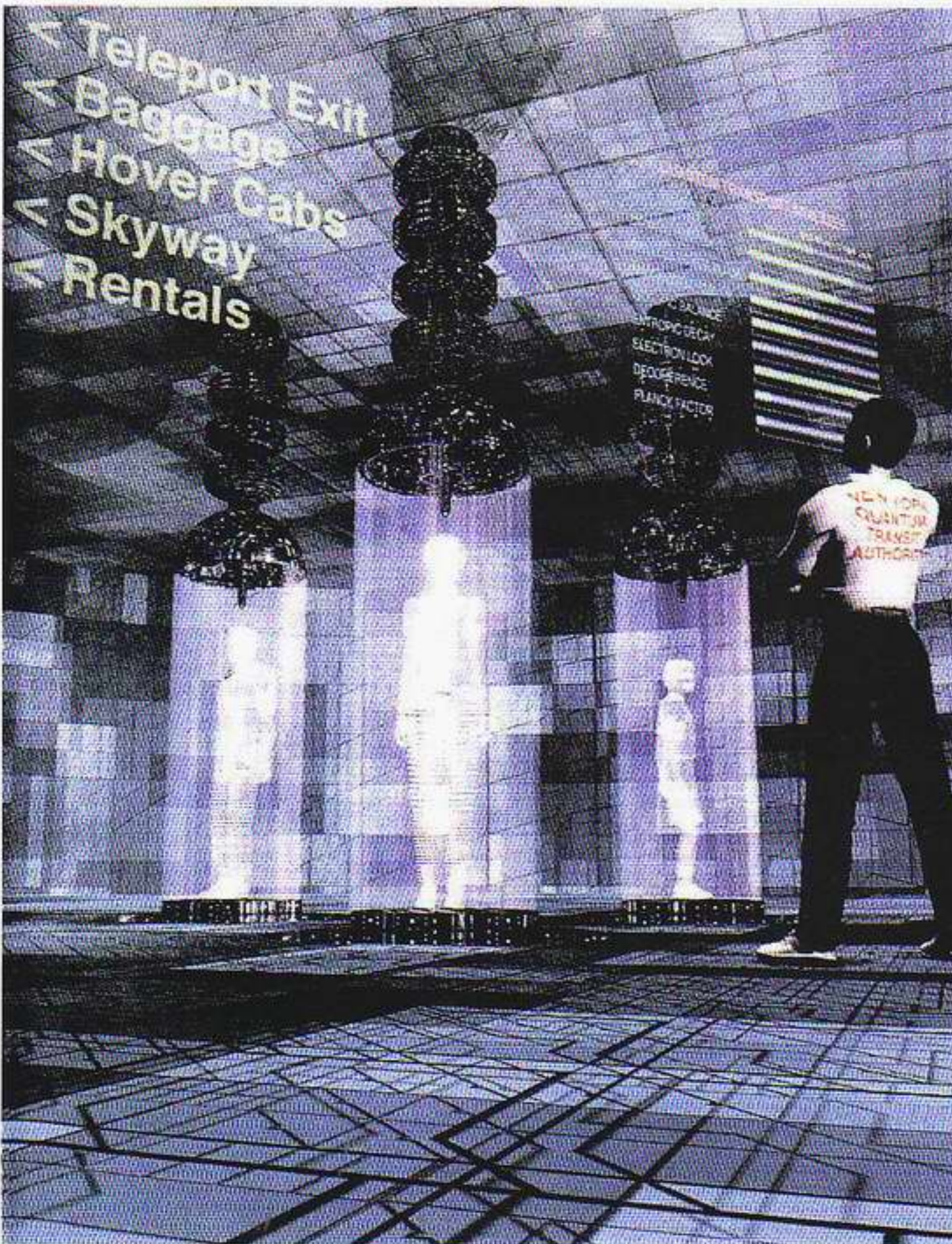
«[...] θα απαιτηθεί μαζική χρήση παράλληλων επεξεργαστών» είπε ο Gordon, συγκατανεύοντας [...]. «Συνδέεις μερικούς υπολογιστές στους οποίους και καταμερίζεις την εργασία για να γίνει γρηγορότερα. Ένας μεγάλος υπολογιστής παράλληλης επεξεργασίας θα περιλαμβάνει συνδεδεμένους 16 χιλιάδες επεξεργαστές, ενώ ένας πραγματικά μεγάλος, 32 χιλιάδες. Εμείς έχουμε συνδεδεμένους 32 δισεκατομμύρια επεξεργαστές.» [...] Ο Gordon κάθισε και χαμογέλασε. Κοίταζε τον Stern περιμένοντας. «Τέτοιας κλίμακας επεξεργασία θα γινόταν εφικτή» είπε ο Stern «μόνο μέσω της χρήσης των κβαντικών χαρακτηριστικών μεμονωμένων ηλεκτρονίων. Τότε, όμως, μιλάμε για κβαντικούς υπολογιστές που δεν έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα.» Ο Gordon απλά χαμογέλασε. «Έτσι δεν είναι;» συμπλήρωσε ο Stern.

Ο Crichton ψηλαφίζει επίσης και ένα από τα πιθανά προβλήματα της κβαντικής υπολογιστικής. Η κβαντική πληροφορία αποθηκεύεται υπό μορφή λεπτεπίλεπτων διαφορών μεταξύ των κβαντικών υπερθέσεων και, όπως και στους συνήθεις κλασικούς υπολογιστές, υπόκειται σε σφάλματα. Όσον αφορά τη συνήθη υπολογιστική μνήμη, αδέσποτα σωματίδια των κοσμικών ακτίνων διαπερνούν το σύστημα και περιστασιακά μεταλλάσσουν, κατά τύχη, μια μονάδα σε μηδενικό, και αντιστρόφως. Για το λόγο αυτό, οι μηχανικοί υπολογιστών έχουν αναπτύξει προγράμματα ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμά-



Εικόνα 13.10 Το εξώφυλλο του βιβλίου *Timeline*, του Michael Crichton —ένα μυθιστόρημα που συνδυάζει την κβαντική τηλεμεταφορά με το ταξίδι στο χρόνο. Φοιτητές της μεσαιωνικής αρχαιολογίας ταξιδεύουν πίσω στο χρόνο για να σώσουν τον καθηγητή τους στο πεδίο της μάχης κατά τον Εκατονταετή Πόλεμο στη Γαλλία. Σχετικά με τις επιστημονικές έννοιες που εμφανίζονται στο βιβλίο, ο Crichton παραπέμπει στο *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes and Its Implications* του David Deutsch.

των, τα οποία καθιστούν δυνατό τον εντοπισμό και διόρθωσή τους. Οι κβαντικοί υπολογιστές, από την άλλη, αποδεικνύονται περισσότερο ανοχύρωτοι απέναντι στα σφάλματα, αν και έχει δείχθει ότι είναι δυνατόν —καταρχάς— αυτά να διορθωθούν. Κατά τη μεταφορά στο χρόνο και την επαναφορά ενός όντος τόσο περίπλοκου όσο ο άνθρωπος, έχει προφανώς σημασία για τον ίδιο να μη μεταβάλλεται η πληροφορία. Η ΠΤΚ, κατά την ανάπτυξη του κβαντικού της συστήματος τηλεμεταφοράς, αντιμετώπισε προβλήματα με τέτοια



Εικόνα 13.11 Καλλιτεχνική απόδοση των μελλοντικών «αρμοδίων αρχών κβαντικής μεταφοράς της Νέας Υόρκης». Ο Michael Crichton οραματίζεται στο μυθιστόρημά του *Timeline* τη χρήση ενός παρόμοιου συστήματος κβαντικής τηλεμεταφοράς για ταξίδια στο χρόνο.

«σφάλματα μεταγραφής». Ο Wellsey, ο γάτος, αποτελεί ζωντανή προειδοποίηση:

«Ο Wellsey διασπάστηκε» είπε ο Kramer στον Stern. «Ήταν από τα πρώτα πειραματόζωα που στείλαμε πίσω στο χρόνο. Προτού ακόμα ανακαλύψουμε ότι κατά τη μεταφορά απαιτείται ασπίδα νερού, με αποτέλεσμα να έχει διασπαστεί πολύ άσχημα.»

«Διασπάστηκε;»

Ο Kramer στράφηκε στον Gordon. «Δεν του έχεις πει τίποτα;»

«Φυσικά και του είπα» απάντησε ο Gordon. Γυρίζοντας στον Stern, είπε: «Διασπάστηκε σημαίνει ότι υπέστη σοβαρά σφάλματα μεταγραφής.»

Η χρήση της φράσης «σφάλματα μεταγραφής» για την περιγραφή «αλλοιώσεων» που απειλούν τη ίδια τη ζωή θυμίζει τον τρόπο που οι στρατιωτικοί πε-

FROM THE DIRECTOR OF "FALLS OF DOVER"

ROBERT REDFORD DAN AYKROYD
 BEN KINGSLEY MARY MCCONNELL RIVER PHOENIX
 SIDNEY POTTER DAVID STRATHAIRN

SNEAKERS



We could tell you what it's about.
 But then, of course, we would have to kill you.

DVD

W I D E S C R E E N

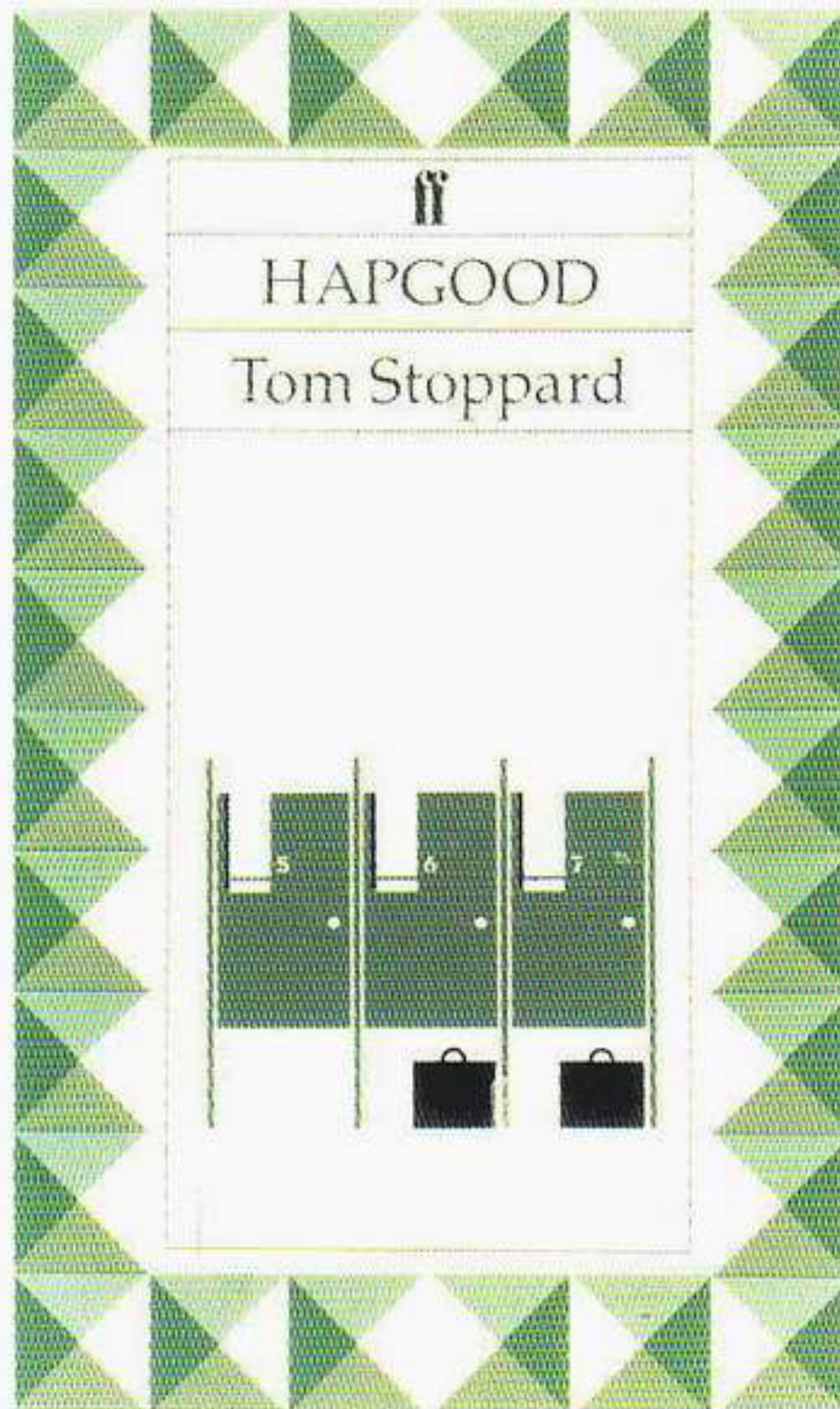


Εικόνα 13.12 Ο Len Adleman είναι καθηγητής της επιστήμης των υπολογιστών στο Λος Άντζελες και αντιπροσωπεύει το «A» στο σύστημα κρυπτογράφησης δεδομένων RSA. Το σύστημα RSA βασίζεται στο γεγονός ότι η παραγοντοποίηση πολύ μεγάλων αριθμών είναι εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση και για τα σημερινά υπολογιστικά συστήματα. Η επινόηση ενός νέου γρήγορου αλγορίθμου παραγοντοποίησης —ή η κατασκευή ενός κβαντικού υπολογιστή— θα καθιστούσε τρωτό μεγάλο μέρος των κρυπταγραφημένων δεδομένων του συστήματος RSA. Ο Adleman διετέλεσε, κατόπιν παράκλησης, σύμβουλος επί θεμάτων κρυπτογράφησης στην ταινία *Sneakers*, με πρωταγωνιστή τον Robert Redford. Μεγάλο μέρος της δράσης αφορά την κλοπή και ανάκτηση ενός κουτιού που μοιάζει με κβαντικό υπολογιστή.

ριγράφουν τις απώλειες σε άμαχο πληθυσμό —τις «παράπλευρες απώλειες». Έτσι λοιπόν, στο μυθιστόρημα *Timeline*, ο προβληματισμός σχετικά με την κβαντική υπολογιστική λειτουργεί ως συναρπαστικό του υπόβαθρο. Λίγοι συγγραφείς μπορούν να συνδυάσουν τόσο καλά όσο ο Michael Crichton τα πραγματικά αποτελέσματα της πρωτοποριακής επιστημονικής έρευνας και να τα τοποθετήσουν στο πλαίσιο ενός έξυπνου και ευφάνταστου έργου επιστημονικής φαντασίας.

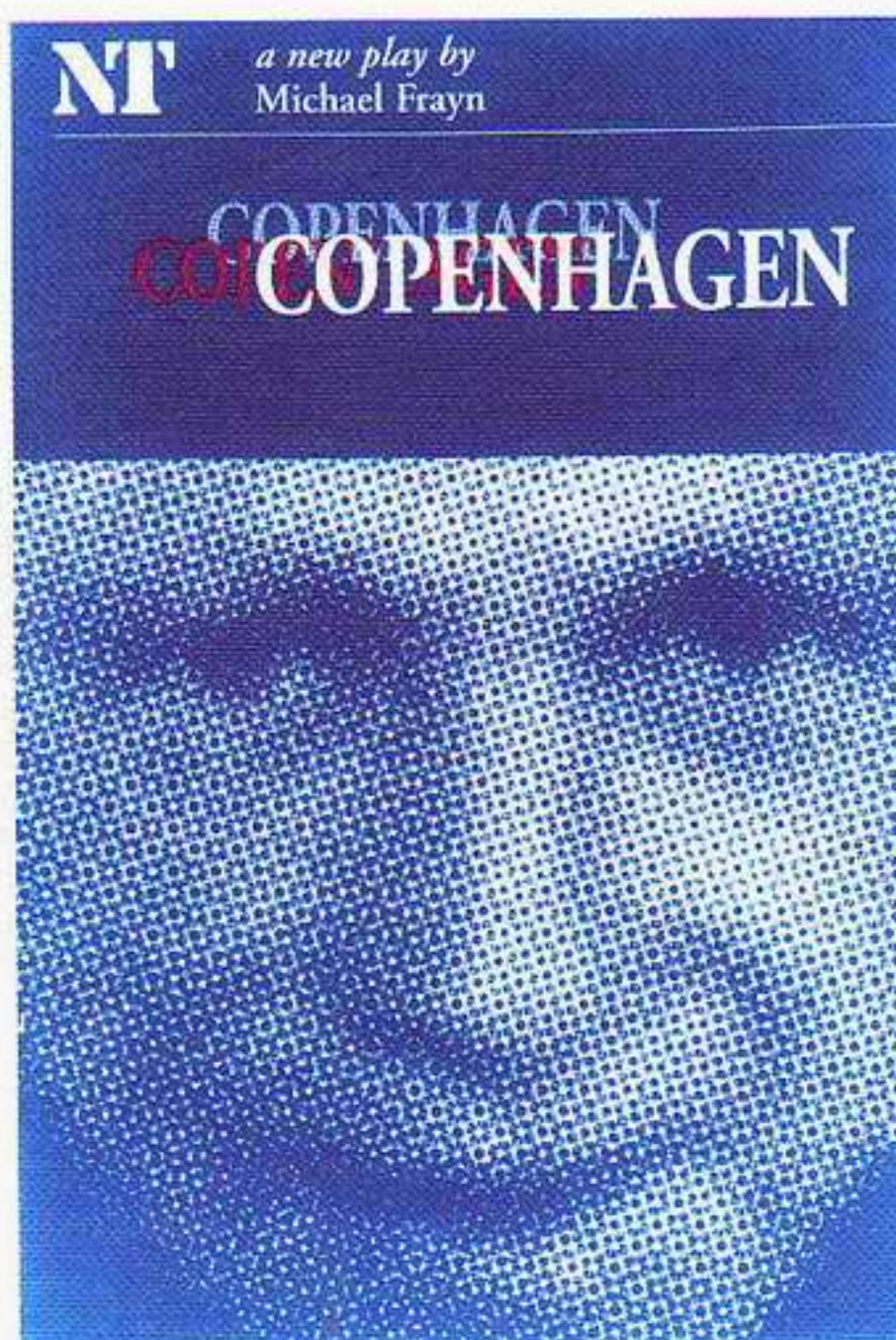
Εν κατακλείδι

Η σύντομη περιήγησή μας αποκάλυψε ότι, αν και η κβαντική φυσική είναι διάχυτη στη σύγχρονη επιστημονική φαντασία, σπανίως διαδραματί-



Εικόνα 13.13 Στην προμετωπίδα του θεατρικού του έργου *Hargood*, ο Tom Stoppard παραθέτει τον Feynman: «Επιλέγουμε την εξέταση ενός φαινομένου το οποίο είναι αδύνατο, απερίττως αδύνατο να εξηγηθεί κλασικά, και το οποίο εμπεριέχει την πεμπτούσια της κβαντικής μηχανικής. Στην πραγματικότητα, εμπεριέχει το μοναδικό μυστήριο [...]. Οποιαδήποτε άλλη κατάσταση στο πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής καταλήγει να εξηγείται λέγοντας: "Θυμάστε την περίπτωση του πειράματος της διπλής σχισμής; Ε, λοιπόν, είναι το ίδιο πράγμα."» Στο έργο, ο Kerner, ένας φυσικός που είναι διπλός —ή τριπλός— πράκτορας, λέει στον Blair, τον κυνηγό κατασκοπών: «Παίρνεις αυτό που ζήτησες να μάθεις», το οποίο θυμίζει σε μεγάλο βαθμό τη συζήτησή μας για τα προβλήματα της κβαντικής μέτρησης.

ζει κεντρικό ρόλο. Τα κβαντικά άλματα και η δυαδικότητα σωματιδίου-κύματος, βέβαια, έφτασαν να αποτελούν στοιχεία του καθημερινού μας λόγου, αλλά και η γριφώδης φύση των κβαντικών φαινομένων έγινε το θέμα μερικών μυθιστορημάτων και θεατρικών έργων. Στο θεατρικό έργο *Hargood*, ο συγγραφέας Tom Stoppard παίζει με την ιδέα ότι οι διπλοί πράκτορες επιδεικνύουν μιας μορφής κυματοσωματιδιακή δυαδικότητα, ανάλογη αυτής του φωτός. Ο φυσικός λέει στον κυνηγό κατασκοπών: «Ένας διπλός πράκτορας μοιάζει με παιχνίδισμα του φωτός. Το τι μαθαίνεις εξαρτάται από το τι ζητάς να μάθεις.» Η ίδια αναζήτηση για την «αληθινή» εκδοχή των πραγμάτων εμφανίζεται και στο σύγχρονο θεατρικό έργο *Copenhagen* του Michael Frayn. Σε αυτό, η δράση εστιάζεται στα γεγονότα που διαδραματίστηκαν σε μια συνάντηση του Heisenberg —του διάσημου φυσικού που έμεινε στη Γερμανία εργαζόμενος για τους Ναζί— με τον Niels Bohr —τον δανό μέντορά του στην κβαντική θεωρία—, η οποία διεξήχθη στην κατεχόμενη από τους Ναζί Κοπεγχάγη. Στα εν λόγω έργα, όμως, η κβαντική μηχανική χρησιμοποιείται στην ουσία μόνο ως αλληγορία της πολυπλοκότητας των ανθρώπινων αλληλεπιδράσεων. Στα μυθιστορήματα των Bear, Stephenson και Crichton, ολόκληρο το μέλλον μας κυριαρχείται από την κβαντική τεχνολογία. Ο αιώνας αυτός πρόκειται να φέρει μεγάλη πρόοδο στη βιοπληροφορική και τη γονιδιωματική. Ισοδύναμα, ακόμα και αν μέρος μόνο από τα όνειρα των ναυτοτεχνολόγων πραγματοποιηθεί,



Εικόνα 13.14 Το εξώφυλλο του προγράμματος από την πρεμιέρα του θεατρικού έργου *Copenhagen* του Michael Frayn στο θέατρο Cottesloe του Λονδίνου. Η υπόθεση του έργου εκτυλίσσεται γύρω από ένα πραγματικό γεγονός: ο Heisenberg πήγε πραγματικά το 1941 στην Κοπεγχάγη για να συναντήσει τον Bohr και συζητήσουν όντως τη δυνατότητα κατασκευής ατομικών όπλων. Στα δημοσιευμένα απομνημονεύματά τους για την εν λόγω συνάντηση διαφωνούν για το περιεχόμενο, ακόμα και για το μέρος όπου έλαβε χώρα η συζήτησή τους. Μοιλονότι ο Heisenberg δεν ήταν Ναζί ούτε φιθιικά διακείμενος απέναντί τους, πίστευε αναμφισβήτητα ότι είχε εξαιρετική σημασία για τη Γερμανία να κερδίσει τον πόλεμο. Σύμφωνα με τον Stefan Rozental, κατά τη διάρκεια αυτής της επίσκεψης ο Heisenberg δήλωσε ότι «η κατοχή της Δανίας, της Νορβηγίας, του Βελγίου και της Ολλανδίας υπήρξε άτυχο γεγονός, αλλά όσον αφορά τις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης αποτελούσε καλή εξέλιξη, αφού οι χώρες αυτές αδυνατούσαν να κυβερνηθούν από μόνες τους». Αναφέρεται ότι ο Christian Moller απάντησε: «Ής τώρα έχουμε διαπιστώσει ότι μόνο η Γερμανία δεν μπορεί να κυβερνηθεί από μόνη της.» Μετά τον πόλεμο, κανονίστηκε άλλη μία επίσκεψη του Heisenberg στον Bohr, κατά την οποία, όπως συμβαίνει και στο έργο, «οι δύο άντρες ανόησαν μια βραδιά προσπαθώντας να ανασυστήσουν τη συζήτηση του 1941, χωρίς όμως επιτυχία.» Πρόκειται για μια περίπτωση στην οποία η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg ταιριάζει μετά βεβαιότητας!

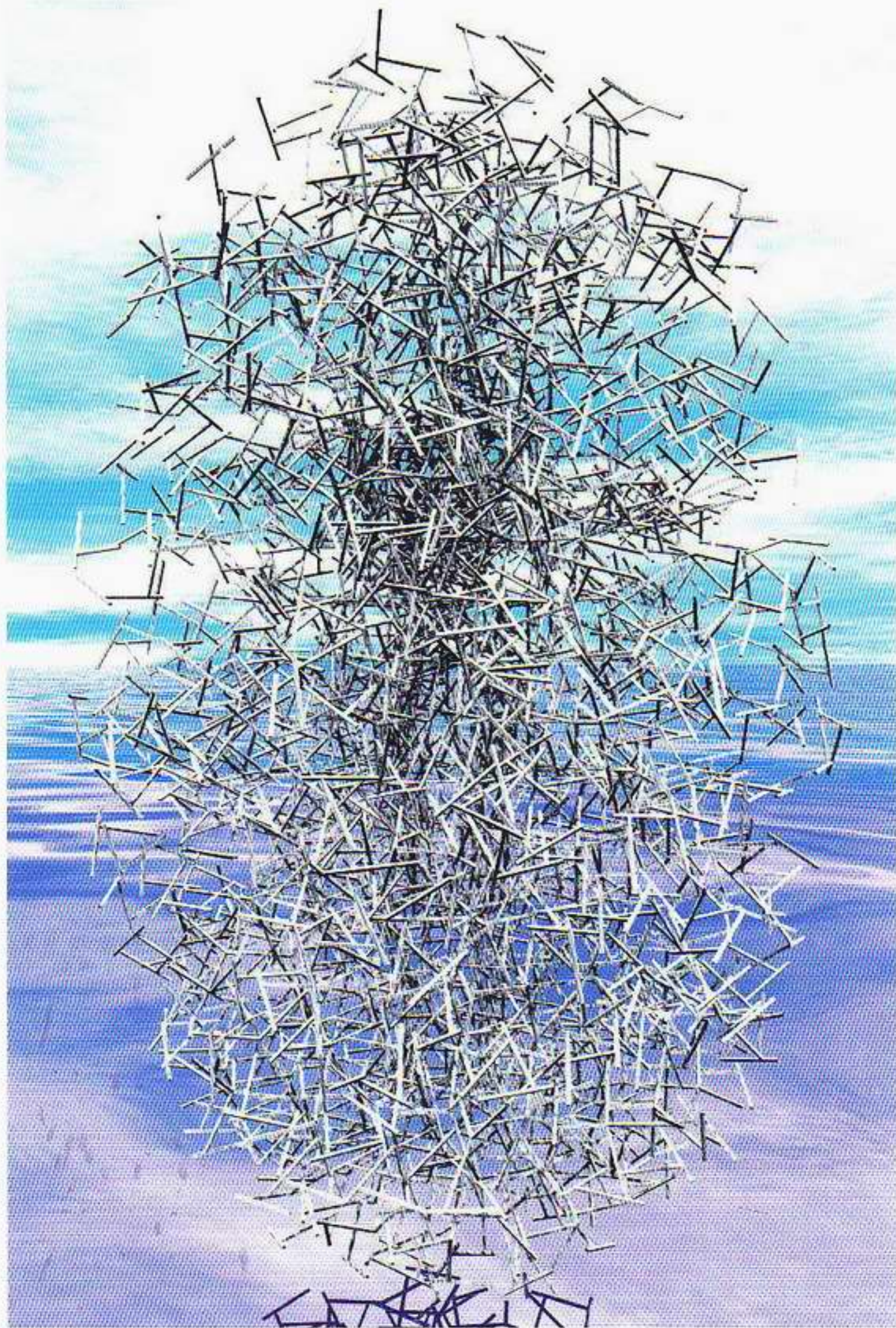
οι μηχανικοί του μέλλοντος δεν αποκλείεται να είναι «κβαντικοί τεχνολόγοι». Πολύ εύστοχα ο φυσικός Paul Davies επισημαίνει ότι

Ο 19ος αιώνας έμεινε γνωστός ως η εποχή της μηχανής· ο 20ός θα καταγραφεί στην ιστορία ως η εποχή της πληροφορίας. Πιστεύω ότι ο 21ος αιώνας θα αποτελέσει την αληθινή εποχή των κβάντων.

Επίλογος

Κάποτε ένας ποιητής έγραψε: «Μέσα σε ένα ποτήρι κρασί βρίσκεται ολόκληρο το Σύμπαν.» Ίσως ποτέ δεν θα μάθουμε με ποια έννοια το είπε· οι ποιητές δεν γράφουν για να γίνονται κατανοητοί. Είναι, όμως, αλήθεια ότι, αν παρατηρήσουμε προσεκτικά ένα ποτήρι κρασί, πραγματικά θα δούμε μέσα του ολόκληρο το Σύμπαν. Υπάρχει η πλευρά της φυσικής: το ανήσυχο υγρό που εξατμίζεται ανάλογα με τον άνεμο και τον καιρό, οι αντανάκλασεις του φωτός πάνω στο γυαλί, το ξέφρενο παιχνίδι των ατόμων που αποκαλύπτει η φαντασία μας. Το γυαλί είναι το απόσταγμα των πετρωμάτων του πλανήτη μας, και στη σύστασή του διακρίνουμε τα μυστικά της ηλικίας του Σύμπαντος και της εξέλιξης των άστρων. Ποια είναι η παράξενη διάταξη των χημικών ουσιών μέσα στο κρασί; Πώς προήλθαν όλα αυτά; Υπάρχουν τα φυράματα, τα ένζυμα, τα υποστρώματα και τα προϊόντα. Εκεί, μέσα στο κρασί, βρίσκεται η μεγάλη γενίκευση: όλη η ζωή είναι προϊόν ζύμωσης. Ουδείς μπορεί να μελετήσει τη χημεία του κρασιού χωρίς να ανακαλύψει, όπως ο Louis Pasteur, την αιτία τόσων και τόσων ασθενειών. Και το χρώμα του —αυτό το ζωντανό πορφυρό χρώμα του κρασιού— αφήνει ανεξίτηλη τη σφραγίδα του στη συνείδηση όσων το προσέχουν! Αν ο μικρός νους μας, για λόγους ευκολίας, διαιρεί ένα ποτήρι κρασί —αυτό το σύμπαν— σε μέρη (φυσική, βιολογία, γεωλογία, αστρονομία, ψυχολογία κ.ο.κ.), ας μην ξεχνάμε ότι η φύση δεν το γνωρίζει! Ας αναμείξουμε, λοιπόν, ξανά τα μέρη του, κι ας θυμηθούμε εν τέλει σε τι μας χρησιμεύει· ας το αφήσουμε να μας προσφέρει την έσχατη ευχαρίστηση: να το πίνουμε και να τα ξεχνάμε όλα!

Richard Feynman



Ο καλλιτέχνης Antony Gormley —σε συνεργασία με τους μηχανικούς Neil Thomas και Gary Eliot— δημιούργησε το «Κβαντικό σύννεφο», ένα γλυπτό ύψους 33 μέτρων. Απαρτίζεται από 4.000 πανομοιότυπες ράβδους γαββανισμένου χάλυβα μήκους 1,6 μέτρα η καθεμία, και φέρνει στο νου μια κβαντομηχανική κατανομή πιθανότητας. Στηρίζεται επί τεσσάρων πλωτήρων από χυτοσίδηρο στον Τάμεση ποταμό, κοντά στο θόλο της Χιλιετίας.

Παράρτημα 1

Το μέγεθος των πραγμάτων

Δυνάμεις τού 10

Η κλίμακα των αποστάσεων στον κβαντικό κόσμο είναι πολύ μικρότερη από οποιαδήποτε άλλη συναντάμε στην καθημερινή μας ζωή. Ομοίως, οι αποστάσεις που ακούγονται σε οποιαδήποτε συζήτησή μας για άστρα και γαλαξίες είναι τρομακτικά πιο μεγάλες από αυτές μεταξύ και των πιο απομακρυσμένων σημείων της επιφάνειας της Γης. Ο κατάλληλος τρόπος για να γράφουμε πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές αποστάσεις είναι να χρησιμοποιούμε ένα σύστημα βασιζόμενο στις δυνάμεις τού 10.

Οι μεγάλοι αριθμοί μπορούν να γραφούν ως δυνάμεις τού 10 ως εξής:

$$\text{δέκα} = 10 = 10^1$$

$$\text{εκατό} = 100 = 10 \times 10 = 10^2$$

$$\text{χίλια} = 1.000 = 10 \times 10 \times 10 = 10^3.$$

Για παράδειγμα, υποθέστε ότι θέλετε να γράψετε με τον τρόπο αυτό έναν πολύ μεγάλο αριθμό, λόγου χάρη την ταχύτητα του φωτός. Η ταχύτητα του φωτός συνήθως συμβολίζεται με c και ισούται περίπου με 300 εκατομμύρια μέτρα ανά δευτερόλεπτο:

$$c = 300.000.000 \text{ m/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

Το πλεονέκτημα να χρησιμοποιούμε δυνάμεις τού 10 είναι προφανές.

Και οι μικροί αριθμοί μπορούν να εκφραστούν με τον ίδιο τρόπο:

$$\text{ένα δέκατο} = 1/10 = 10^{-1}$$

$$\text{ένα εκατοστό} = 1/100 = 1/10 \times 1/10 = 10^{-2}$$

$$\text{ένα χιλιοστό} = 1/1.000 = 1/10 \times 1/10 \times 1/10 = 10^{-3}.$$

Η κλίμακα των κβαντικών αντικειμένων χαρακτηρίζεται από τη σταθερά του Planck. Το σύμβολό της είναι το h και η τιμή της περίπου 4,2 τρισεκατομμυριοστά του «ηλεκτρονιοβόλτ επί δευτερόλεπτο».

$$h = 4,2/1.000.000.000.000.000 \text{ eVs.}$$

Σε δυνάμεις όμως του 10, είναι πολύ λιγότερο δύσχρηστη:

$$h = 4,2 \times 10^{-15} \text{ eVs.}$$

Θα χρησιμοποιήσουμε λοιπόν αυτό τον τρόπο απεικόνισης αριθμών για να σας δώσουμε μια ιδέα για την τάξη μεγέθους διάφορων αντικειμένων.

Η κλίμακα μαζών

Μια γνώριμη μονάδα μάζας είναι το χιλιόγραμμο, ή kg. Όμως τα άτομα και οι πυρήνες είναι πολύ ελαφρότερα από αυτό —το χιλιόγραμμο αποδεικνύεται πολύ μεγάλη και ακατάλληλη μονάδα για τέτοιες μάζες. Τα βασικά δομικά στοιχεία των ατόμων και των πυρήνων —τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα ηλεκτρόνια— έχουν τις παρακάτω περίπου μάζες:

$$\text{μάζα πρωτονίου και νετρονίου} = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{μάζα ηλεκτρονίου} = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg.}$$

Από την άλλη, οι πλανήτες και τα άστρα έχουν τεράστιες μάζες. Το χιλιόγραμμο, και πάλι, δεν είναι κατάλληλη μονάδα για μάζες όπως οι ακόλουθες:

$$\text{μάζα Γης} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$\text{μάζα Δία} = 2 \times 10^{27} \text{ kg}$$

$$\text{μάζα Ήλιου} = 2 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

Η κλίμακα αποστάσεων

Στην καθημερινή ζωή, η συνηθισμένη μονάδα μήκους είναι το μέτρο —περίπου το ύψος ενός μικρού παιδιού. Στον Πίνακα Π1.1 συγκρίνουμε τις κλίμακες μεγέθους αντικειμένων που συναντήσαμε στο παρόν βιβλίο.

Η κλίμακα ταχυτήτων

Η ταχύτητα του συνηθισμένου περπατήματος είναι περίπου ένα μέτρο ανά δευτερόλεπτο (περίπου 3,6 km/h). Στον Πίνακα Π1.2 συγκρίνονται οι ταχύτητες διάφορων αντικειμένων, με μέγιστη την ταχύτητα του φωτός —η οποία, σύμφωνα με τον Αϊνστάιν, αποτελεί αξεπέραστο όριο.

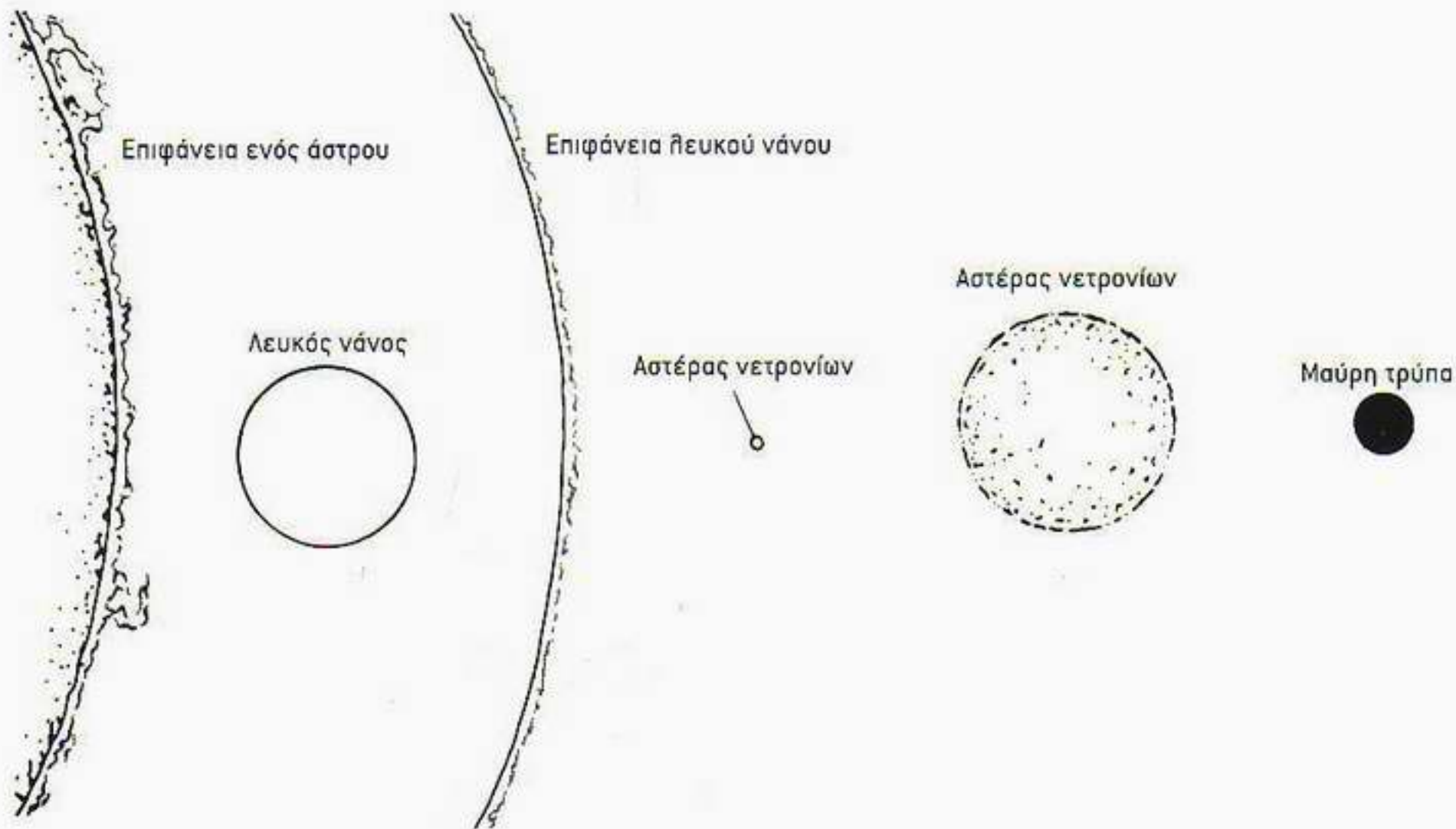
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τα μήκη κύματος του ορατού φωτός συνιστούν μικρό μόνο μέρος του όλου φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στον Πίνακα Π1.3 συγκεντρώσαμε τις τυπικές περιοχές μηκών κύματος των διάφορων ειδών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Επίσης δίνονται οι ενέργειες που αντιστοιχούν

Πίνακας Π1.1 Κλίμακα αποστάσεων

Μεγάλη κλίμακα		Μικρή κλίμακα	
$10^4 \text{ m} = 10 \text{ km}$	Αστέρας νετρονίων, μαύρη τρύπα	10^{-4} m	Το μικρότερο αντικείμενο που είναι ορατό διά γυμνού οφθαλμού
$10^7 \text{ m} = 10^4 \text{ km}$	Λευκός νάνος, Γη	10^{-6} m	Το μικρότερο αντικείμενο που είναι ορατό με κοινό μικροσκόπιο
$10^8 \text{ m} = 10^5 \text{ km}$	Δίας	10^{-8} m	Μεγάλα μόρια
$10^9 \text{ m} = 10^6 \text{ km}$	Ήλιος, συνηθισμένα άστρα	10^{-10} m	Άτομα
$10^{11} \text{ m} = 10^8 \text{ km}$	Ερυθρός γίγαντας, απόσταση Γης-Ήλιου	10^{-14} m	Πυρήνας
$10^{16} \text{ m} = 1 \text{ έτος φωτός (ε.φ.)}$	Η απόσταση την οποία διανύει το φως σε ένα έτος	10^{-15} m	Πρωτόνιο, νετρόνιο
$10^{21} \text{ m} = 10^5 \text{ ε.φ.}$	Μέγεθος του Γαλαξία μας		
$10^{23} \text{ m} = 10^7 \text{ ε.φ.}$	Σμήνη γαλαξιών		
$10^{26} \text{ m} = 10^{10} \text{ ε.φ.}$	Οι πιο μακρινοί γαλαξίες, κβάζαρ		

m = μέτρα



Εικόνα Π1.1 Σχετικά μεγέθη των άστρων.

στα φωτόνια κάθε είδους ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, γεγονός το οποίο μας υπενθυμίζει ότι το φως αλληλεπιδρά επιδεικνύοντας κβαντική συμπεριφορά.

Πίνακας Π1.2 Κλίμακα ταχυτήτων

3 m/s	Ρυθμός τρεξίματος
200 m/s	Ταχύτητα αεριωθούμενου σκάφους
300 m/s	Ταχύτητα του ήχου στον αέρα
10.000 m/s	Ταχύτητα διαφυγής πυραύλου
30.000 m/s	Ταχύτητα περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο
2×10^7 m/s	Τυπική ταχύτητα ηλεκτρονίου καθοδικού σωλήνα τηλεόρασης
3×10^8 m/s	Ταχύτητα του φωτός στο κενό

m/s = μέτρα ανά δευτερόλεπτο.

Πίνακας Π1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Είδος ακτινοβολίας	Περιοχή μηκών κύματος	Ενέργεια φωτονίου
γ	10^{-11} - 10^{-14} m	10^6 eV = 1 MeV
Ακτίνες Χ	10^{-8} - 10^{-11} m	10^3 eV = 1 keV
Υπεριώδες	4×10^{-7} - 10^{-8} m	10 eV
Ορατό	8×10^{-7} (ερυθρό)- 4×10^{-7} m (ιώδες)	1 eV
Υπέρυθρο	10^{-4} - 4×10^{-7} m	10^{-1} eV
Μικροκύματα	1 - 10^{-4} m	10^{-4} eV
Ραδιοκύματα	10^{-3} m και πιο μακρά	10^{-8} eV

m = μέτρα, eV = ηλεκτρονιοβόλτ.

Πίνακας Π1.4 Χρονικά διαστήματα

Μεγάλα χρονικά διαστήματα		Μικρά χρονικά διαστήματα	
10^3 s	Χρόνος που χρειάζεται το φως για να φτάσει από τον Ήλιο στη Γη, ο χρόνος ημιζωής του νετρονίου	10^{-6} s	Χρόνος ημιζωής του μιονίου
$3,1 \times 10^7$ s	Ένα έτος	10^{-8} s	Μέσος χρόνος ημιζωής μιας διεγερμένης ενεργειακής κατάστασης ατόμου
10^9 s	Διάρκεια ανθρώπινης ζωής	10^{-10} s	Χρόνος που χρειάζεται το φως για να διανύσει απόσταση 30 cm
10^{11} s	Έναρξη των αστικών πολιτισμών της Ανατολής, χρόνος ημιζωής του άνθρακα-14	10^{-15} s	Περίοδος ταλάντωσης του ορατού φωτός
10^{14} s	Πρώτοι άνθρωποι	10^{-28} s	Χρόνος που χρειάζεται το φως για να διασχίσει ένα άτομο
10^{17} s	Αρχή του ηλιακού συστήματος, χρόνος ημιζωής του ουρανίου-238	10^{-24} s	Χρόνος που χρειάζεται το φως για να διασχίσει τον πυρήνα
10^{18} s	Απαρχή του Σύμπαντος		

s = δευτερόλεπτο.

Χρονικά διαστήματα

Μια κατάλληλη μονάδα για τα χρονικά διαστήματα στην καθημερινή μας ζωή είναι το ένα δευτερόλεπτο — περίπου η διάρκεια ενός χτύπου καρδιάς. Στην Πίνακα Π1.4 συγκρίνουμε μεγάλα και μικρά χρονικά διαστήματα.

Παράρτημα 2

Επιλύοντας την εξίσωση του Schrödinger

Το παράρτημα τούτο προορίζεται για αναγνώστες με κάποιες γνώσεις απειροστικού λογισμού —κυρίως πώς παραγωγίζουμε και ολοκληρώνουμε ημίτονα και συνημίτονα. Εξετάζουμε το πρόβλημα της αναζήτησης του πλάτους της κβαντικής πιθανότητας για ένα σωματίδιο ευρισκόμενο μέσα σε ένα «κιβώτιο δυναμικού». Αυτό μας αναγκάζει να λύσουμε την εξίσωση του Schrödinger για ένα σωματίδιο που έχει ενέργεια E και περιορίζεται σε συγκεκριμένη περιοχή από ένα ηλεκτρικό δυναμικό V :

$$E\psi(x) = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x).$$

Υποθέτουμε ότι το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινηθεί προς μία μόνο κατεύθυνση στο χώρο, αντί για τις τρεις κατευθύνσεις, όπως πραγματικά συμβαίνει. Παρά τον ολοφάνερα τεχνητό χαρακτήρα του, το παράδειγμα αυτό διευκρινίζει χαρακτηριστικά που συναντώνται και σε προβλήματα κοντά στην πραγματικότητα. Μια απλή γενίκευση του προβλήματος σε τρεις διαστάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευκρινίσει πολλά θέματα της κβαντικής φυσικής τα οποία έχουν να κάνουν όχι μόνο με τα ηλεκτρόνια των μετάλλων αλλά και με τα πρωτόνια και τα νετρόνια των πυρήνων.

Το μονοδιάστατο κιβώτιο δυναμικού φαίνεται στην Εικόνα 4.8. Έξω από το κιβώτιο, το δυναμικό θεωρείται απεριόριστα μεγάλο, ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί το σωματίδιο εκεί. Έτσι, το σωματίδιο είναι αναγκασμένο να βρίσκεται μέσα στο κιβώτιο· δηλαδή, το κβαντικό πλάτος ισούται με μηδέν παντού εκτός από την περιοχή μεταξύ των τιμών $x = 0$ και $x = L$ —τα δύο άκρα του κιβωτίου. Μέσα στην εν λόγω περιοχή, το σωματίδιο κινείται ελεύθερα· με άλλα λόγια, το κβαντικό πλάτος για σωματίδιο ευρισκό-

μενο μέσα στο κιβώτιο προσδιορίζεται από την εξίσωση του Schrödinger χωρίς τον όρο του δυναμικού:

$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2}.$$

Για να βρούμε τη μορφή των επιτρεπόμενων λύσεων, απλοποιούμε λίγο την εξίσωση εισάγοντας μια νέα μεταβλητή k :

$$k^2 = 2mE/\hbar^2.$$

Τότε, η εξίσωση του Schrödinger για το σωματίδιο μέσα στο κιβώτιο γίνεται:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -k^2\psi(x),$$

η οποία δείχνει πιο καθαρά τη μαθηματική δομή της: Η δεύτερη παράγωγος της κυματοσυνάρτησης ισούται με την ίδια την κυματοσυνάρτηση πολλαπλασιασμένη επί τον παράγοντα $-k^2$. Η εξίσωση αυτή είναι πολύ γνωστή στην κλασική φυσική —πρόκειται για την εξίσωση της «απλής αρμονικής κίνησης», και οι λύσεις της είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Έτσι, στην πιο γενική μορφή της, η κυματοσυνάρτηση γίνεται ένα άθροισμα όρων ημιτόνων και συνημιτόνων:

$$\psi(x) = A\eta\mu(kx) + B\sigma\upsilon\nu(kx),$$

όπου A και B αυθαίρετες σταθερές. Αυτή είναι και η γενική μορφή της λύσης· εμείς όμως ζητάμε τη λύση του δικού μας προβλήματος, του κιβωτίου δυναμικού. Κατά συνέπεια, στην περίπτωσή μας απαιτείται να μηδενίζεται το κβαντικό πλάτος για κάθε τιμή του x μικρότερη από το μηδέν και μεγαλύτερη από το L . Πρέπει λοιπόν να απαιτήσουμε η λύση μας να ικανοποιεί αυτές τις «συνοριακές συνθήκες». Εφαρμόζοντας τη συνοριακή συνθήκη στο $x = 0$, έχουμε:

$$\psi_{(x=0)} = A\eta\mu(0) + B\sigma\upsilon\nu(0) = 0,$$

όπερ σημαίνει ότι το B πρέπει να ισούται με μηδέν, αφού το $\eta\mu(0)$ είναι μηδέν, αλλά το $\sigma\upsilon\nu(0)$ δεν είναι μηδέν. Εφαρμόζοντας τώρα τη συνοριακή συνθήκη στο $x = L$, παίρνουμε:

$$\psi_{(x=L)} = A\eta\mu(kL) = 0.$$

Επειδή η κυματοσυνάρτηση δεν πρέπει να ισούται πάντοτε με μηδέν, δεν μπορούμε να ικανοποιήσουμε την παραπάνω σχέση υποθέτοντας ότι το A είναι μηδέν. Αυτό συνεπάγεται ότι αποδεκτή λύση του προβλήματος είναι κάθε τιμή που μηδενίζει το $\eta\mu(kL)$. Τούτο όμως συμβαίνει όταν το kL είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π (το π μετρείται σε ακτίνια — π ακτίνια = 180°). Έτσι, οι επιτρεπόμενες κυματοσυναρτήσεις στο πρόβλημά μας είναι εκείνες για τις οποίες το k ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$k = n\pi/L, \text{ για } n = 1, 2, 3, \dots$$

Επειδή όμως το k συνδέεται με την ενέργεια E μέσω της εξίσωσης

$$E = \hbar^2 k^2 / 2m,$$

βλέπουμε ότι επιτρέπονται ορισμένες μόνο τιμές της E . Λέμε λοιπόν ότι η ενέργεια είναι «κβαντωμένη»:

$$E = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}, \text{ για } n = 1, 2, 3, \dots$$

Αυτές είναι οι ενεργειακές στάθμες για το κιβώτιο δυναμικού που είδαμε στο Κεφάλαιο 3 μαζί με τις ημιτονοειδείς τους κυματοσυναρτήσεις. Με τη λύση της εξίσωσης του Schrödinger πετύχαμε να προσδιορίσουμε ποια μήκη κύματος ταιριάζουν σε ένα κιβώτιο δυναμικού μήκους L . Από εδώ λοιπόν ξεκινάει η κβάντωση της ενέργειας.

Η σταθερά A μπορεί να προσδιοριστεί με την ακόλουθη μέθοδο. Σύμφωνα με τον Max Born, η πιθανότητα να βρίσκεται ένα σωματίδιο σε μια δεδομένη θέση στο κιβώτιο δίνεται από το τετράγωνο της κυματοσυνάρτησης στη θέση εκείνη. Αφού όμως το άθροισμα των πιθανοτήτων να βρίσκεται το σωματίδιο σε οποιαδήποτε δυνατή θέση μέσα στο κιβώτιο πρέπει να είναι μονάδα (δηλαδή το σωματίδιο βρίσκεται με βεβαιότητα κάπου μέσα στο κιβώτιο), πρέπει να έχουμε μια συνθήκη «κανονικοποίησης» της μορφής

$$\int_0^L \psi^2(x) dx = 1.$$

Αντικαθιστώντας την κυματοσυνάρτηση

$$\psi(x) = A \eta\mu(kx)$$

και χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$\sigma\upsilon\nu(2kx) = 1 - 2\eta\mu^2(kx),$$

όπου $k = n\pi/L$, μπορούμε να ολοκληρώσουμε και να πάρουμε:

$$A^2 L/2 = 1.$$

Έτσι, η σταθερά A υπολογίζεται ίση με

$$A = \sqrt{\frac{2}{L}},$$

και οι κυματοσυναρτήσεις για ένα σωματίδιο περιορισμένο μέσα σε ένα κιβώτιο μήκους L έχουν τη μορφή

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \eta\mu(n\pi x/L), \text{ για } n = 1, 2, 3, \dots$$

Το αντίστοιχο πρόβλημα για ένα σωματίδιο σε τρισδιάστατο κιβώτιο δυναμικού θα έχει ως λύση κυματοσυναρτήσεις με περαιτέρω ημιτονοειδείς όρους για τις διευθύνσεις y και z . Γενικά, για τη λύση της εξίσωσης του Schrödinger για πραγματικά δυναμικά απαιτούνται πολύ πιο πολύπλοκα μαθηματικά από αυτά που χρειάστηκαν για το παραπάνω απλό παράδειγμα. Εντούτοις, το συγκεκριμένο παράδειγμα περιλαμβάνει όλες τις ουσιώδεις φυσικές έννοιες.

Γλωσσάριο

αδρόνιο (hadron)

Οποιοδήποτε σωματίδιο αλληλεπιδρά μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Τα αδρόνια διαιρούνται σε μεσόνια και βαρυόνια. Έτσι, ένα πiónιο είναι μεσόνιο, ένα πρωτόνιο είναι βαρυόνιο, και τα δύο όμως είναι αδρόνια.

ακτίνα γ (gamma ray)

Φωτόνιο με πολύ υψηλή ενέργεια (βλ. Πίνακα Π1.3 του Παραρτήματος 1).

ακτίνα X (X-ray)

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή φωτόνια μεγάλης ενέργειας (βλ. Παράρτημα 1).

ανορθωτής (rectifier)

Ηλεκτρονική διάταξη που επιτρέπει τη ροή ρεύματος κατά μία μόνο κατεύθυνση, παρεμποδίζοντας τη διέλευσή του κατά την αντίθετη.

αντισωματίδιο (antiparticle)

Σωματίδιο ίδιας μάζας με το αντίστοιχο σωματίδιο αλλά με αντίθετες ιδιότητες φορτίων. Όταν ένα σωματίδιο συναντήσει το αντισωματίδιό του, εξαυλώνονται σε ενέργεια. Ακόμη, παρά το γεγονός ότι το νετρόνιο έχει μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο, υπάρχει και το αντινετρόνιο, επειδή τα νετρόνια συμμετέχουν στην ιδιότητα διατήρησης του ολικού αριθμού των βαρυονίων στο Σύμπαν. Τα αντινετρόνια έχουν την αντίθετη τιμή βαρυονικού φορτίου.

απαγορευτική αρχή του Pauli (Pauli's exclusion principle)

Δύο φερμιόνια δεν μπορούν να έχουν τους ίδιους κβαντικούς αριθμούς. Εφαρμοζόμενη στα ηλεκτρόνια των ατόμων, η αρχή αυτή μπορεί και ερμηνεύει τον περιοδικό πίνακα των χημικών στοιχείων.

αποσυγκρότηση, ή άραση της συνεκτικότητας (decoherence)

Η ιδέα ότι ένα κβαντικό σύστημα δεν μπορεί ποτέ να απομονωθεί πλήρως από το περιβάλλον του. Οι υποστηρικτές αυτής της ιδέας, που έχει προταθεί ως λύση στο κβαντικό μετρητικό πρόβλημα, ισχυρίζονται ότι η εν λόγω σύζευξη προκαλεί εξαιρετικά ταχεία κατάρρευση των λεπτών σχέσεων φάσης μεταξύ των κβαντικών πλατών.

αρχή της αβεβαιότητας, ή της απροσδιοριστίας, του Heisenberg

(Heisenberg's uncertainty principle)

Αν σε κάποιο πείραμα προσδιοριστεί η θέση ενός σωματιδίου με ορισμένη ακρίβεια Δx , αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ορμή του να μην μπορεί να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια από Δp τόσο ώστε

το γινόμενο $\Delta x \cdot \Delta p$ να είναι μεγαλύτερο από κάποια συγκεκριμένη τιμή, της τάξεως της σταθεράς του Planck. Για μετρήσεις ενέργειας και χρόνου, εφαρμόζεται μια παρόμοια αρχή αβεβαιότητας.

άρωμα, ή γεύση (flavour)

Η ιδιότητα που ξεχωρίζει τα διάφορα είδη κουάρκ —πάνω, κάτω, παράδοξο, γοπτευτικό, κορυφή, πυθμένας. Η ιδιότητα αυτή εφαρμόζεται και στα λεπτόνια για να ξεχωρίζει τα διάφορα είδη τους (ηλεκτρόνιο, μιονίο κ.λπ.).

ασθενής αλληλεπίδραση (δύναμη) (weak interaction (force))

Μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης, με πολύ μικρή εμβέλεια. Η ασθενής αλληλεπίδραση ευθύνεται για τη διάσπαση β και τις αλληλεπιδράσεις που περιλαμβάνουν νετρίνα.

αστέρας νετρονίων (neutron star)

Άστρο, στη σύσταση του οποίου υπερτερούν τα νετρόνια. Η διάμετρος του είναι περίπου δεκαπέντε χιλιόμετρα, η μάζα του όμως μπορεί να συγκριθεί με αυτή του Ήλιου. Οι αστέρες νετρονίων πιστεύεται ότι σχηματίζονται ως επακόλουθα κάποιας υπερκαινοφανούς έκρηξης.

άτομο (atom)

Ένας πυρήνας με ένα σύστημα ηλεκτρονίων συνδεδεμένων σε αυτόν. Τα κοινά άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και αποτελούν την ελάχιστη αναγνωρίσιμη ποσότητα ενός χημικού στοιχείου.

αυθόρμητη εκπομπή (spontaneous emission)

Φωτόνια εκπεμπόμενα από ένα απομονωμένο άτομο (ή άλλο κβαντικό σύστημα) κατά τη μετάβαση από μια διεγερμένη κατάσταση σε κάποια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση.

βαρυόνιο (baryon)

Φερμιόνιο, που αλληλεπιδρά μέσω της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, όπως το νετρόνιο ή το πρωτόνιο. Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ.

γαλαξίας (galaxy)

Μεγάλη συγκέντρωση 10 εκατομμυρίων ή και περισσότερων άστρων σε μια περιοχή του Διαστήματος, απομακρυσμένη από άλλες τέτοιες συγκεντρώσεις. Ο Ήλιος είναι ένα από τα 200 περίπου δισεκατομμύρια άστρα που αποτελούν τον Γαλαξία μας.

γάτα του Schrödinger (Schrödinger's cat)

Νοητικό πείραμα, σύμφωνα με το οποίο μια γάτα βρίσκεται περιορισμένη μέσα σε ένα κιβώτιο έχοντας πιθανότητα 50% να θανατωθεί εξαιτίας κάποιας κβαντικής διαδικασίας. Σκοπός του πειράματος είναι να τονιστεί το μετρητικό πρόβλημα της κβαντικής μηχανικής μέσω της φαινομενικής αναγκαιότητας η γάτα να τελεί ως κβαντική υπέρθεση αμφοτέρων των καταστάσεων ζωής και θανάτου μέχρις ότου ανοιχθεί το κιβώτιο και η κατάστασή της γίνει αντικείμενο παρατήρησης.

γλοιόνιο (gluon)

Κβαντικό σωματίδιο το οποίο συζευγνύεται με το χρωματικό φορτίο των κουάρκ.

γοπτευτικό κουάρκ (charmed quark)

Είδος κουάρκ που μοιάζει με το πάνω κουάρκ, έχει φορτίο ίσο προς τα $2/3$ του πρωτονίου, διαθέτει όμως και μια πρόσθετη ιδιότητα, τη «γοπτεία», η οποία διατηρείται στις ισχυρές αλληλεπιδράσεις αλλά μπορεί να παραβιασθεί στις ασθενείς.

δευτέριο (deuterium)

Ισότοπο του υδρογόνου, του οποίου ο πυρήνας αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο.

διάγραμμα Feynman (Feynman diagram)

Εποπτικός τρόπος αναπαράστασης της συμβολής στο κβαντικό πλάτος μιας διαδικασίας η οποία συνίσταται από απλά μέρη. Η συμβολή του Feynman έγκειται στην επινόηση συγκεκριμένων κανόνων υπολογισμού του πλάτους από τις απλές αυτές συνιστώσες του διαγράμματος.

διάθλαση (refraction)

Η αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του φωτός (ή άλλης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) καθώς αυτό περνά από ένα διαφανές μέσο σε ένα άλλο.

διάσπαση β (beta decay)

Ραδιενεργός διεργασία στην οποία ένα νετρόνιο (ή πρωτόνιο) μετατρέπεται σε πρωτόνιο (ή νετρόνιο) εκπέμποντας συγχρόνως ένα ηλεκτρόνιο (ή αντιηλεκτρόνιο). Το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο λέγεται σωματίδιο β . Η ραδιενεργός διάσπαση β διέπεται από την ασθενή αλληλεπίδραση (δύναμη) και συνοδεύεται πάντοτε από την εκπομπή ενός νετρίνου (ή αντινετρίνου).

διατήρηση (conservation)

Όταν η συνολική ποσότητα κάποιου φυσικού μεγέθους παραμένει πάντοτε σταθερή, λέμε ότι αυτό διατηρείται. Για παράδειγμα, η ολική ενέργεια ενός απομονωμένου συστήματος διατηρείται.

δυνάμει σωματίδιο (virtual particle)

Σωματίδιο το οποίο παραβιάζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας και υφίσταται μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να ικανοποιείται η σχέση αβεβαιότητας ενέργειας-χρόνου.

δύναμη (force)

Οτιδήποτε μεταβάλλει την κίνηση ενός σώματος. Υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις: η βαρυτική, η ηλεκτρομαγνητική, η ισχυρή πυρηνική και η ασθενής πυρηνική.

δυναμική ενέργεια (potential energy)

Η ενέργεια που έχει ένα σώμα λόγω της θέσης του ή της κατάστασής του. Για παράδειγμα, το ύψος ενός αντικειμένου πάνω από την επιφάνεια της Γης προσδιορίζει τη βαρυτική δυναμική του ενέργεια.

ενέργεια (energy)

Η ικανότητα ενός σώματος να παράγει έργο. Η συνολική ενέργεια ενός σώματος (ή ενός συστήματος) διατηρείται, αν και μπορεί να μετατρέπεται σε άλλες μορφές, όπως ηλεκτρική ή κινητική.

Εξίσωση του Schrödinger (Schrödinger's equation)

Η βασική εξίσωση της κβαντικής μηχανικής, η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά ενός σωματιδίου μέσα σε ένα δυναμικό.

ερμηνεία της Κοπεγχάγης (Copenhagen interpretation)

Η συμβατική ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής, σύμφωνα με την οποία η διαδικασία της μέτρησης μέσω μιας «κλασικής συσκευής» προκαλεί την κατάρρευση της κβαντικής κυματοσυνάρτησης σε ένα παρατηρήσιμο αποτέλεσμα.

ερμηνεία των πολλών κόσμων (Many Worlds interpretation)

Η ιδέα ότι οποιαδήποτε μέτρηση ενός κβαντικού συστήματος προκαλεί το διαχωρισμό του Σύμπαντος σε πολλαπλά αντίγραφα του που αντιστοιχούν σε όλα τα δυνατά αποτελέσματα του πειράματος, σε διαφορετικούς όμως και μη αλληλεπιδρώντες κόσμους.

έτος φωτός (light year)

Η απόσταση την οποία διανύει το φως σε ένα έτος. Ισούται με 10 περίπου τρισεκατομμύρια χιλιόμετρα. Οι αποστάσεις μεταξύ των άστρων του Γαλαξία μας είναι συνήθως λίγα έτη φωτός.

ηλεκτρασθενής θεωρία (electroweak theory)

Η θεωρία που ενοποιεί την ηλεκτρομαγνητική με την ασθενή πυρηνική δύναμη. Η σχέση μεταξύ των δύο δυνάμεων δεν αποκαλύπτεται στις συνήθεις ενέργειες. Σε υψηλές ενέργειες, όμως, όπως εκείνες που επικρατούσαν στο αρχέγονο Σύμπαν, οι δυο τους λειτουργούν ως μία, ηλεκτρασθενής δύναμη.

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (electromagnetic radiation)

βλ. Παράρτημα 1.

ηλεκτρομαγνητική δύναμη (electromagnetic force)

Μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης που αναπτύσσεται κατά την αλληλεπίδραση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων. Η ηλεκτρική έλξη μεταξύ των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων, τα οποία συγκροτούν τα άτομα, αποτελεί ένα παράδειγμα ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης.

ηλεκτρόνιο (electron)

Αρνητικά φορτισμένο στοιχειώδες σωματίδιο, συστατικό όλων των ατόμων, που περιβάλλει τον πυρήνα καθορίζοντας το μέγεθος του ατόμου, τη συνοχή και τις χημικές του ιδιότητες. Τα ηλεκτρόνια είναι πολύ ελαφρά συγκρινόμενα με τον πυρήνα.

ηλεκτρονιοβόλτ (electron-volt, eV)

Μονάδα ενέργειας συγκρίσιμη προς την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων στα άτομα. Ένα ηλεκτρονιοβόλτ είναι ακριβώς η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για να απομακρύνουμε ένα ηλεκτρόνιο από κιβώτιο δυναμικού ύψους 1 βολτ.

ημιαγωγός (semiconductor)

Υλικό του οποίου η ικανότητα να άγει τον ηλεκτρισμό δεν είναι μεγάλη —είναι ενδιάμεση, μεταξύ της αντίστοιχης των μετάλλων και των μονωτών—, αλλά αυξάνει όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία.

ημιζωή (half-life)

Ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση των μισών από τα άτομα ενός δείγματος συγκεκριμένου ραδιενεργού στοιχείου.

θεμελιώδης κατάσταση (ground state)

Η κατάσταση ελάχιστης ενέργειας ενός κβαντικού συστήματος (λόγου χάρι, ενός ατόμου). Οποιαδήποτε άλλη κατάσταση του συστήματος ονομάζεται διεγερμένη.

θερμοκρασία (ground state)

Ένα μέτρο της μέσης κινητικής ενέργειας των συστατικών στοιχείων (ατόμων ή άλλων σωματιδίων) ενός σώματος. Αν δύο σώματα σε επαφή έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες, η θερμότητα θα ρέει από το θερμότερο σώμα προς το ψυχρότερο έως ότου εξισωθούν οι θερμοκρασίες τους (θερμική ισορροπία).

θεωρία χορδών (string theory)

Σύνολο θεωριών βασιζόμενων στην ιδέα ότι οι πιο θεμελιώδεις οντότητες δεν είναι σημειακά σωματίδια αλλά μονοδιάστατα αντικείμενα που μοιάζουν με χορδές. Οι θεωρίες αυτές είναι ελκυστικές, αφού προσφέρουν την προοπτική μιας συνεπούς κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας καθώς και της ενοποίησης των τεσσάρων θεμελιωδών δυνάμεων της φύσης.

ιόν (ion)

Άτομο του οποίου ο αριθμός των ηλεκτρονίων του δεν ισούται με τον αριθμό των πρωτονίων του. Ένα κανονικό άτομο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, διότι το θετικό φορτίο των πρωτονίων του εξουδετερώνεται από το αρνητικό φορτίο των ισοαριθμών ηλεκτρονίων του.

ισότοπο (isotope)

Ισότοπο ενός χημικού στοιχείου είναι αυτό το οποίο στον πυρήνα του φέρει τον ίδιο αριθμό πρωτονίων με το δεδομένο στοιχείο αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων.

ισχυρή αλληλεπίδραση (δύναμη) (strong interaction (force))

Η ισχυρότερη από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις και αυτή με τη μικρότερη εμβέλεια. Συγκρατεί ενωμένα μεταξύ τους τα κουάρκ στα πρωτόνια και τα νετρόνια, αλλά και τα πρωτόνια και τα νετρόνια μέσα στους πυρήνες.

Καθιερωμένο Μοντέλο (Standard Model)

Η επικρατούσα θεωρία της σωματιδιακής φυσικής —της κβαντικής χρωμοδυναμικής για την περιγραφή των ισχυρών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κουάρκ και της ηλεκτρασθενοφύς θεωρίας για τις ηλεκτρομαγνητικές και ασθενείς αλληλεπιδράσεις.

καόνιο (K-μεσόνιο) (kaon (K-meson))

Ένα είδος «παράδοξου» μεσονίου.

κάτω κουάρκ (down quark)

Το ελαφρότερο κουάρκ, με φορτίο ίσο με το $-1/3$ του πρωτονίου.

καφέ νάνος (brown dwarf)

Ένα «αποτυχημένο άστρο» —ένα αντικείμενο μεγαλύτερης μάζας από οποιονδήποτε πλανήτη, όχι όμως τόσο μεγάλης για να πυροδοτήσει τη σύντηξη υδρογόνου στον πυρήνα του.

Κβάζαρ, ή ημιστέρας (quasistellar object)

Αστρικό αντικείμενο με μεγάλη μετατόπιση του φάσματός του προς το ερυθρό. Αν η μετατόπιση προς το ερυθρό αποδοθεί στη διαστολή του Σύμπαντος κατά Hubble, τότε οι κβάζαρ πρέπει να ακτινοβολούν 100 περίπου φορές την ενέργεια ενός συνηθισμένου γαλαξία από μια κεντρική περιοχή όχι μεγαλύτερη από αυτή του ηλιακού συστήματος! Για την ερμηνεία των κβάζαρ συχνά καταφεύγουμε στις μαύρες τρύπες.

κβαντική ηλεκτροδυναμική (quantum electrodynamics, QED)

Η κβαντική θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων.

κβαντική κουκκίδα (quantum dot)

Τύπος κβαντικού «νανοκυκλώματος», στο οποίο ηλεκτρόνια περιορίζονται εντός μικρής περιοχής. Ο χώρος περιορισμού μπορεί να γίνει τόσο μικρός ώστε να μπορεί να μετρηθεί η κβάντωση της ενέργειας· το αποτέλεσμα είναι ένα είδος «τεχνητού ατόμου».

κβαντική χρωμοδυναμική (quantum chromodynamics, QCD)

Η κβαντική θεωρία της αλληλεπίδρασης των κουάρκ και των γλοιονίων. Τα κουάρκ και τα γλοιόνια είναι φορείς κάποιας ιδιότητας παρόμοιας με το ηλεκτρικό φορτίο, που ονομάζεται «χρώμα» (χωρίς καμία σχέση με τη συνηθισμένη έννοια του χρώματος).

κβαντικό μπιτ (q-bit)

Η βασική μονάδα κβαντικής πληροφορίας. Σε ένα κβαντικό σύστημα δύο καταστάσεων, ένα κβαντικό μπιτ μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα κλασικό μπιτ όπως το 0 ή το 1, ή σε μια κβαντομηχανική υπέρθεση των δύο.

κβαντικό φαινόμενο σήραγγας (tunneling)

Η ικανότητα των κβαντικών αντικειμένων να διέρχονται διαμέσου περιοχών («φράγματα») που είναι ενεργειακά απαγορευμένες για την κλασική φυσική.

κβαντικός αριθμός (quantum number)

Ακέραιος ή ημιακέραιος αριθμός ή σύνολο αριθμών που καθορίζουν την κατάσταση ενός κβαντικού συστήματος. Λόγου χάριν, οι κβαντωμένες ενεργειακές στάθμες των ατόμων του υδρογόνου δηλώνονται από μια σειρά θετικών ακέραιων αριθμών που ξεκινούν με $n = 1$ για τη θεμελιώδη κατάσταση.

κβαντωμένη ποσότητα (quantized quantity)

Κάθε ποσότητα που μπορεί να παίρνει μόνο διακριτές τιμές σε κάποιο συγκεκριμένο σύστημα. Έτσι, ένα άτομο υδρογόνου έχει ορισμένες διακριτές ενεργειακές στάθμες, οπότε λέμε ότι η ενέργεια του συστήματος αυτού είναι κβαντωμένη.

κίνηση μηδενικού σημείου (zero-point motion)

Ταλαντωτική κίνηση ατόμων στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός, η οποία οφείλεται στην αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg.

κινητική ενέργεια (kinetic energy)

Η ενέργεια ενός αντικειμένου που οφείλεται στην κίνησή του.

κλασικές θεωρίες (classical theories)

Η φυσική πριν από την κβαντική θεωρία και τη σχετικότητα, η οποία περιελάμβανε τη νευτώνεια μηχανική, την ηλεκτρομαγνητική θεωρία και τη θερμοδυναμική.

κοσμικές ακτίνες (cosmic rays)

Σωματίδια πολύ υψηλών ενεργειών, τα οποία προέρχονται από εξωγήινες πηγές. Η κοσμική ακτινοβολία με χαμηλή σχετικώς ενέργεια προέρχεται, χωρίς αμφιβολία, από τον Ήλιο, η προέλευση όμως των κοσμικών ακτίνων με μεγάλη ενέργεια παραμένει ένα ζήτημα που προκαλεί διαμάχες.

κουάρκ (quark)

Τα στοιχειώδη σωματίδια που πιστεύεται ότι αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες της αδρονικής ύλης, δηλαδή των πρωτονίων και των πονίων. Τα κουάρκ φέρουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο.

κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου (proton-proton cycle)

Διαδοχή πυρηνικών αντιδράσεων με τελική κατάληξη τη μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο. Στη μετατροπή αυτή οφείλεται η παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο.

κυματική κίνηση (wave motion)

Κάθε είδους ταλάντωση ή διαταραχή η οποία διαδίδεται στο χώρο.

λάμδα (lamda, Λ)

Ένα είδος «παράδοξου» βαρυονίου.

λεπτόνιο (lepton)

Ένα φερμιόνιο, όπως το ηλεκτρόνιο ή το νεutrίνο, το οποίο δεν επηρεάζεται από την ισχυρή αλληλεπίδραση.

λευκός νάνος (white dwarf)

Πυκνό και συμπαγές κατάλοιπο αστρικής κατάρρευσης με μάζα συγκρίσιμη προς αυτής του Ήλιου και μέγεθος συγκρίσιμο προς αυτού της Γης. Η ισορροπία του σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή του Pauli μεταξύ των ηλεκτρονίων που το αποτελούν.

μαγνητική ροπή (magnetic moment)

Ένας μαγνήτης μπορεί να θεωρηθεί ως ζεύγος δύο μαγνητικών πόλων, βόρειου και νότιου. Μαγνητική ροπή είναι το φυσικό μέγεθος

που περιγράφει πώς ο μαγνήτης επηρεάζεται από κάποιο μαγνητικό πεδίο.

μαγνητικό μονόπολο (magnetic monopole)

Υποθετικό σωματίδιο, το οποίο συνίσταται από έναν απομονωμένο μαγνητικό πόλο.

μαύρη τρύπα (black hole)

Αντικείμενο στο οποίο η βαρύτητα υπερσχύει όλων των άλλων δυνάμεων και προκαλεί κατάρρευση σε μια χωροχρονική ανωμαλία, στην οποία οι γνωστοί νόμοι της φυσικής δεν ισχύουν. Αν φως ή άλλο αντικείμενο εισχωρήσει σε μια κρίσιμη περιοχή γύρω από την ανωμαλία, σε απόσταση γνωστή ως ακτίνα Schwarzschild, αυτό δεν θα μπορέσει ποτέ να διαφύγει. Η συγκεκριμένη ιδιότητα έδωσε στο αντικείμενο το όνομα «μαύρη» τρύπα.

Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία (Grand Unified Theory, GUT)

Θεωρία που προτείνει τη σύνδεση ηλεκτρασθενούς και ισχυρής δύναμης. Η ιδέα είναι παρόμοια με αυτή της ηλεκτρασθενούς ενοποίησης και η σχέση μεταξύ των δύο δυνάμεων παραμένει ανεκδήλωτη μέχρι εξαιρετικά υψηλές ενέργειες, οι οποίες κείνται αρκετά πέραν των όποιων μελλοντικών πειραμάτων με επιταχυντές μπορεί να προσδοκούμε.

μεσόνιο (meson)

Οποιοδήποτε μποζόνιο αλληλεπιδρά μέσω της ισχυρής δύναμης. Όλα τα μεσόνια είναι ασταθή και συνίστανται από μια δέσμια κατάσταση ενός κουάρκ και ενός αντικουάρκ.

μέταλλο (metal)

Υλικό που είναι καλός αγωγός τόσο της θερμότητας όσο και του ηλεκτρισμού και καλός ανακλαστήρας για το φως. Στα μέταλλα, μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων τους μπορεί και κινείται ελεύθερα στο εσωτερικό τους.

μετατόπιση προς το ερυθρό (red shift)

Η μετατόπιση του μήκους κύματος του λαμβανόμενου φωτός προς το ερυθρό άκρο του φάσματος. Η συχνότερη αιτία της μετατόπισης προς το ερυθρό είναι το φαινόμενο Doppler, το οποίο οφείλεται στην απομάκρυνση της φωτεινής πηγής από το δέκτη.

μετρικό πρόβλημα (measurement problem)

Το πρόβλημα της κατανόησης του τρόπου με τον οποίο μια κυματοσυνάρτηση που αντιστοιχεί σε πολλά δυνατά τελικά αποτελέσματα «καταρρέει» σε συγκεκριμένη κατάσταση. Για την ερμηνεία του προβλήματος έχουν προταθεί πολλές πιθανές λύσεις (βλ. *ερμηνεία της Κοπεγχάγης*, *αποσυγκρότηση* και *ερμηνεία των πολλών κόσμων*).

μιόνιο (muon, μ)

Λεπτόνιο παρόμοιο με το ηλεκτρόνιο αλλά με μάζα 200 περίπου φορές μεγαλύτερη. Το μιόνιο είναι ασταθές και διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα ζεύγος νετρίνων.

μοντέλο της Μεγάλης Έκρηξης (Big Bang model)

Η θεωρία κατά την οποία το Σύμπαν άρχισε να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη στιγμή (πριν από 15 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια). Το πρωταρχικό Σύμπαν ήταν εξαιρετικά θερμό και πυκνό, ψυχόταν όμως συνεχώς λόγω μιας καθολικής κοσμικής διαστολής. Αυτή η διαστολή του Σύμπαντος είναι σήμερα παρατηρήσιμη ως απομάκρυνση των γαλαξιών.

μονωτής (insulator)

Υλικό που είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού.

μπιτ (και μπάιτ) (bit (and byte))

Η μικρότερη μονάδα δεδομένων —ένα μόνο δυαδικό ψηφίο, που μπορεί να είναι είτε το 0 είτε το 1. Η λέξη bit (μπιτ) αποτελεί σύντμηση του binary digit (δυαδικό ψηφίο). Ένα μπάιτ (byte, ψηφιολέξη) αποτελείται από 8 μπιτ δεδομένων.

μποζόνιο (boson)

Σωματίδιο με ακέραιο spin· έχει την ιδιότητα οποιοσδήποτε αριθμός από αυτά να μπορεί να καταλαμβάνει την ίδια κβαντική κατάσταση. Τα σωματίδια-φορείς δυνάμεων, όπως τα φωτόνια και τα γλοιόνια, είναι μποζόνια. Επίσης σύνθετα αντικείμενα αποτελούμενα από έναν ζυγό αριθμό «σωματιδίων ύλης», δηλαδή φερμιονίων (όπως το ^4He , με δύο πρωτόνια, δύο νετρόνια και δύο ηλεκτρόνια), είναι και αυτά μποζόνια.

μποζόνιο Higgs (Higgs boson)

Υποθετικό σωματίδιο που προβλέπεται από τη θεωρία των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων (των Glashow, Salam και Weinberg) και χρειάζεται για να προσδώσει μάζα στα σωματίδια W και Z.

νανοτεχνολογία (nanotechnology)

Τεχνολογία που αφορά διατάξεις μικρότερες των 100 νανομέτρων (10^{-9} m) περίπου. Οι διατάξεις αυτής της κλίμακας είναι κατά πολύ μικρότερες από τα οικεία σε μας μακροσκοπικά αντικείμενα, υπακούουν δε σε ένα συνδυασμό κλασικής και κβαντικής φυσικής.

νετρίνο (neutrino)

Ηλεκτρικά ουδέτερο λεπτόνιο. Τα νετρίνα αλληλεπιδρούν μόνο μέσω της ασθενούς δύναμης (και της βαρυτικής), και έτσι (σε χαμηλές ενέργειες) είναι εξαιρετικά διεισδυτικά. Τα νετρίνα εμφανίζονται σε τρεις παραλλαγές, το ηλεκτρονιακό νετρίνο, το μιονιακό νετρίνο και το νετρίνο ταυ.

νετρόνιο (neutron)

Ηλεκτρικά ουδέτερο βαρυόνιο, που έχει σχεδόν την ίδια μάζα με το πρωτόνιο. Τα νετρόνια μαζί με τα πρωτόνια αποτελούν τα συστατικά του πυρήνα.

νόμος του Moore (Moore's law)

Η πρόβλεψη του Gordon Moore, συνιδρυτή της Intel, ότι το πλήθος των τρανζίστορ σε ένα τσιπ και οι επιδόσεις του διπλασιάζονται κάθε δεκαοκτώ μήνες. Ο «νόμος» αυτός ισχύει τα τελευταία τριάντα

χρόνια· όμως, αντίθετα με έναν πραγματικό φυσικό νόμο, τελικά θα αποτύχει όταν το μέγεθος ελάχιστου χαρακτηριστικού σε ένα τσιπ προσεγγίσει τις ατομικές διαστάσεις.

ουδέτερο ρεύμα (neutral current)

Ασθενής αλληλεπίδραση η οποία αφήνει το φορτίο των αλληλεπιδρώντων σωματιδίων αναλλοίωτο.

πάλσαρ (pulsar)

Γρήγορα και περιοδικά μεταβαλλόμενη πηγή ραδιοκυμάτων, η οποία υποθέτουμε ότι είναι ένας περιστρεφόμενος αστέρας νετρονίων.

πάνω κουάρκ (up quark)

Το ελαφρότερο κουάρκ, με φορτίο ίσο προς τα $2/3$ εκείνου του πρωτονίου.

παράδοξο Einstein-Podolsky-Rosen (EPR paradox)

Διάσημο «νοητικό πείραμα», το οποίο τονίζει το κβαντομηχανικό παράδοξο της «υπερφωτεινής σύνδεσης» μεταξύ ταχέως απομακρυνόμενων κβαντικών αντικειμένων. Η πρόταση EPR μετασχηματίστηκε από τον John Bell σε μια πειραματικά ελέγξιμη ανισότητα, η οποία φωτίζει τη θεμελιώδη φύση της κβαντικής μηχανικής.

«παραδοξότητα» (strangeness)

Ιδιότητα των αδρονίων που διατηρείται στην ισχυρή αλληλεπίδραση αλλά παραβιάζεται στην ασθενή. Συνδέεται με το «παράδοξο» κουάρκ.

πεδίο (field)

Οποιαδήποτε ποσότητα εκτείνεται με συνεχή και ομαλό τρόπο στο χώρο και το χρόνο, σε αντίθεση με ένα σωματίδιο που κάθε χρονική στιγμή υπάρχει σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου.

περιοδικός πίνακας (periodic table)

Κατάταξη των διάφορων ειδών ατόμων (χημικών στοιχείων) κατά αύξοντα αριθμό πρωτονίων του πυρήνα. Τα άτομα με ίδιες φυσικές και χημικές ιδιότητες τοποθετούνται σε στήλες (βλ. Εικόνα 6.1).

πιόνιο (π-μεσόνιο) (pion (pi-meson))

Το ελαφρότερο μεσόνιο. Υπάρχει σε τρεις παραλλαγές, με ηλεκτρικό φορτίο +1, 0 και -1 φορές αυτό του πρωτονίου.

πλάσμα (plasma)

Μείγμα ιόντων και ηλεκτρονίων. Στο εσωτερικό των άστρων δεν μπορούν να υπάρξουν συνηθισμένα ιόντα, οπότε το πλάσμα αποτελείται από πυρήνες και ηλεκτρόνια.

ποζιτρόνιο, ή αντιηλεκτρόνιο (positron)

Το θετικά φορτισμένο αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου.

πρωτόνιο (proton)

Σωματίδιο με φορτίο αντίθετο από αυτό του ηλεκτρονίου και μάζα 1.836 φορές μεγαλύτερη από αυτού. Τα πρωτόνια μαζί με τα νετρόνια

σχηματίζουν τους πυρήνες των ατόμων. Ο πυρήνας του κοινού υδρογόνου συντίθεται μόνο από ένα πρωτόνιο.

πυρήνας (nucleus)

Το συμπαγές κεντρικό τμήμα του ατόμου, το οποίο αποτελείται από νετρόνια και πρωτόνια.

πυρηνική αντίδραση (nuclear reaction)

Σύγκρουση πυρήνων με αποτέλεσμα την ανακατανομή των πρωτονίων και νετρονίων ώστε οι προκύπτοντες πυρήνες να είναι διαφορετικοί.

ραδιενέργεια (radioactivity)

Αυθόρμητη διάσπαση συγκεκριμένων πυρήνων με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας α , β ή γ .

σκοτεινή ύλη (dark matter)

Εκτιμήσεις για την ύλη του Γαλαξία μας κάνουν τους αστρονόμους να πιστεύουν ότι υπάρχει μιας μορφής ύλη η οποία δεν εμφανίζεται στις φωτογραφίες. Η φύση της σκοτεινής ύλης αποτελεί κρίσιμο πρόβλημα για τη σωματιδιακή φυσική και την κοσμολογία.

σπιν (spin)

Θεμελιώδης ιδιότητα των κβαντικών σωματιδίων, η οποία σχετίζεται (αλλά δεν ταυτίζεται) με την περιστροφή γύρω από τον εαυτό τους.

σταθερά του Planck (Planck's constant, h)

Η θεμελιώδης σταθερά της κβαντικής μηχανικής.

στοιχειώδες σωματίδιο (elementary particle)

Σωματίδιο χωρίς οποιαδήποτε εσωτερική δομή, το θεμελιώδες δομικό στοιχείο της ύλης. Στοιχειώδη σωματίδια σήμερα θεωρούμε ότι είναι τα κουάρκ και τα λεπτόνια (ηλεκτρόνια, νετρίνα κ.λπ.).

συμπύκνωμα Bose-Einstein (Bose-Einstein condensate)

Αραιό ατομικό αέριο, τόσο ψυχρό ώστε όλα τα άτομα να συμπεριφέρονται σαν μια μοναδική οντότητα με συλλογικό κβαντικό τρόπο.

σύντηξη (fusion)

Πυρηνική αντίδραση στην οποία δύο ή περισσότεροι πυρήνες ενώνονται και δημιουργούν έναν πυρήνα με περισσότερα πρωτόνια και νετρόνια από τους αρχικούς. Η αντίδραση σύντηξης του υδρογόνου προς ήλιο αποτελεί την πηγή ενέργειας του Ήλιου.

σχάση (fission)

Η διαίρεση ενός μεγάλου πυρήνα σε δύο περίπου ισομεγέθεις μικρότερους πυρήνες, η οποία κάποτε συνοδεύεται από την εκπομπή και άλλων μικρών θραυσμάτων. Σχάση μπορεί να υποστούν κάποιοι πυρήνες όταν βομβαρδίζονται με νετρόνια, και αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

σχετικότητα (relativity)

Οι θεμελιώδεις θεωρίες τού Αϊνστάιν για το χώρο και το χρόνο. Η ειδική σχετικότητα ασχολείται με μη επιταχυνόμενα συστήματα. Η

γενική σχετικότητα εφαρμόζεται σε επιταχυνόμενα συστήματα και αποδεικνύεται ότι στην ουσία είναι μια θεωρία βαρύτητας.

σωματίδιο (particle)

Μικρό αντικείμενο με καλώς ορισμένη θέση κάθε χρονική στιγμή. Ένα κβαντικό αντικείμενο μερικές φορές συμπεριφέρεται ως σωματίδιο και μερικές ως κύμα. Στο βιβλίο χρησιμοποιούμε επίσης αυτή τη λέξη για να περιγράψουμε κβαντικά αντικείμενα με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως τα φωτόνια ή τα ηλεκτρόνια.

σωματίδιο α (alpha particle)

Πυρήνες ηλίου, οι οποίες συντίθενται από δυο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Στη ραδιενεργό διάσπαση α, ένας ασταθής πυρήνας εκπέμπει ένα ταχέως κινούμενο σωματίδιο α.

σωματίδιο W (W particle)

Βαρύ φορτισμένο σωματίδιο το οποίο, όπως και το αντίστοιχό του ουδέτερο σωματίδιο Z, συνδέεται με την ασθενή αλληλεπίδραση (όπως το φωτόνιο συνδέεται με την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση).

σωματίδιο Z (Z particle)

Ουδέτερο βαρύ μποζόνιο, που συνδέεται με την ασθενή αλληλεπίδραση.

τρανζίστορ (transistor)

Διάταξη ημιαγωγών, στην οποία η ροή του ρεύματος μεταξύ δύο επαφών του μπορεί να ελεγχθεί από την τάση που εφαρμόζεται σε μια τρίτη επαφή.

υδρογόνο (hydrogen)

Το ελαφρότερο χημικό στοιχείο. Ο πυρήνας του συνηθισμένου υδρογόνου συνίσταται από ένα πρωτόνιο.

υπεραγωγός (superconductor)

Υλικό (συνήθως μέταλλο ή κράμα) του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση μηδενίζεται κάτω από κάποια κρίσιμη θερμοκρασία.

υπερκαινοφανής (supernova)

Καταστροφική αστρική έκρηξη στην οποία η εκλυόμενη ενέργεια είναι συγκρίσιμη με αυτή που παράγεται επί ένα μήνα από έναν ολόκληρο γαλαξία. Βαθμιαία, η έκρηξη εξασθενεί, μπορεί δε να προκαλέσει το σχηματισμό ενός αστέρα νετρονίων ή μιας μαύρης τρύπας.

υπερρευστό (superfluid)

Υγρό που ρέει χωρίς τριβές και έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα κάτω από μια συγκεκριμένη κρίσιμη θερμοκρασία.

υπερσυμμετρία (supersymmetry)

Μια νέου είδους συμμετρία που απαιτεί οι εξισώσεις της θεμελιώδους θεωρίας να παραμένουν αμετάβλητες κατά την εναλλαγή φερμιονίων με μποζόνια, και αντιστρόφως. Από την υπόθεση αυτή απορρέει η ύπαρξη πολλών υπερσυμμετρικών

συντρόφων, ένας για κάθε γνωστό μας σωματίδιο, οι οποίοι ως τώρα δεν έχουν ανακαλυφθεί και αποκαλούνται υπερσυμμετρικά σωματίδια. Έτσι, ο φερμιονικός σύντροφος του φωτονίου λέγεται φωτίνο, ενώ ο μποζονικός σύντροφος του κουάρκ λέγεται υπερσυμμετρικό κουάρκ.

φαινόμενο Doppler (Doppler effect)

Η μεταβολή του μήκους κύματος των κυμάτων που φτάνουν σε ένα δέκτη όταν η πηγή και ο δέκτης βρίσκονται σε σχετική μεταξύ τους κίνηση. Η μετατόπιση Doppler προκαλεί αύξηση του μήκους κύματος όταν η πηγή και ο δέκτης απομακρύνονται, και, αντιστρόφως, ελάττωση του μήκους κύματος όταν πλησιάζουν.

φαινόμενο Hall (Hall effect)

Εμφάνιση τάσης σε έναν ρευματοφόρο αγωγό ή ημιαγωγό μέσω της εφαρμογής μαγνητικού πεδίου κάθετα προς το ρεύμα. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η τάση Hall κβαντώνεται (κβαντικό φαινόμενο Hall).

φαινόμενο Zeeman (Zeeman effect)

Ο διαχωρισμός των απλών φασματικών γραμμών σε δύο ή περισσότερες όταν τα άτομα βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

φερμιόνιο (fermion)

Στοιχειώδες σωματίδιο ύλης ή οποιοδήποτε σύνθετο αντικείμενο περιλαμβάνει περιττό αριθμό στοιχειωδών φερμιονίων. Έτσι, εκτός από τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκ, τόσο τα πρωτόνια όσο και τα νετρόνια είναι φερμιόνια διότι περιέχουν περιττό αριθμό (τρία) κουάρκ. Όλα τα στοιχειώδη φερμιόνια έχουν σπιν 1/2.

χρωματικό φορτίο (colour charge)

Ιδιότητα των κουάρκ και των γλοιονίων. Αυτή δημιουργεί τις δυνάμεις μεταξύ των κουάρκ (και των γλοιονίων), σύμφωνα με τη θεωρία της κβαντικής χρωμοδυναμικής. Το χρωματικό φορτίο παίζει στην κβαντική χρωμοδυναμική τον ίδιο ρόλο που παίζει το κοινό ηλεκτρικό φορτίο στην κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία.

ωμέγα μίνους (omega minus, Ω^-)

Το ελαφρότερο βαρυόνιο, το οποίο αποτελείται από τρία «παράδοξα» κουάρκ.

Παραθέματα από τον R.P. Feynman

Πρόλογος

σελ. 15 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 1, κεφ. 3, σελ. 6, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 1

σελ. 19 *The Character of Physical Law*, κεφ. 6, MIT Press 1967.

Κεφάλαιο 2

σελ. 35 *The Character of Physical Law*, κεφ. 6, MIT Press 1967.

Κεφάλαιο 3

σελ. 53 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 3, κεφ. 2, σελ. 12, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 4

σελ. 67 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 3, κεφ. 2, σελ. 6, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 5

σελ. 93 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 3, κεφ. 8, σελ. 12, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 6

σελ. 127 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 3, κεφ. 2, σελ. 7, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 7

σελ. 153 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 3, κεφ. 21, σελ. 1, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 8

σελ. 181 “Simulating Physics with Computers”, *International Journal of Theoretical Physics*, **21**, 1982.

σελ. 200 *Feynman Lectures on Gravitation*, επιμ. Brian Hatfield, σελ. 14, Addison Wesley 1995.

Κεφάλαιο 9

- σελ. 207 “There’s Plenty of Room at the Bottom”· ανατύπωση στο Tony Hey, επιμ., *Feynman and Computation*, Perseus 1999.
- σελ. 225 “Stimulating Physics with Computers”· ανατύπωση στο Tony Hey, επιμ., *Feynman and Computation*, σελ. 151, Perseus 1999.

Κεφάλαιο 10

- σελ. 237 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 1, κεφ. 3, σελ. 7, Addison-Wesley 1966.

Κεφάλαιο 11

- σελ. 257 “Theory of Positrons”, *Physical Review*, 76, 1949.

Κεφάλαιο 12

- σελ. 277 Συνέντευξη στο BBC· ανατύπωση στο *The Listener*, 26 Νοεμβρίου 1981.

Κεφάλαιο 13

- σελ. 319 Συζήτηση του Richard Feynman με τον Tony Hey στο Caltech, 1972.

Επίλογος

- σελ. 347 *The Feynman Lectures on Physics*, τόμ. 1, κεφ. 3, σελ. 10, Addison-Wesley 1966.

Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Κβαντική μηχανική

R.P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, 1965.

(Ελληνική έκδοση: *Ο χαρακτήρας του φυσικού νόμου*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2004.) Το βιβλίο περιλαμβάνει επτά διαλέξεις που δόθηκαν στο Πανεπιστήμιο Cornell το 1964. Ακόμα και μετά την πάροδο σαράντα περίπου ετών, το βιβλίο εξακολουθεί να απαστράπτει χάρη στο μοναδικό ύφος και πνεύμα τού Feynman.

R.P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, 1965.

Και οι τρεις τόμοι διακρίνονται για την οξυδερκή, διεισδυτική και καινοτόμο παρουσίαση όλων των όψεων της φυσικής. Ο τρίτος τόμος περιλαμβάνει την ασυνήθιστη προσέγγιση του Feynman στην κβαντική μηχανική —οι περισσότεροι φοιτητές τη βρίσκουν σχετικά δύσκολη και προτιμούν μια συμβατικότερη προσέγγιση. (Στα ελληνικά κυκλοφορούν δύο βιβλία με μικρά αποσπάσματα των παραπάνω διαλέξεων: το *Έξι εύκολα κομμάτια* Εκδόσεις Κάτοπτρο, 1998, και το *Έξι όχι τόσο εύκολα κομμάτια*, Εκδόσεις Κάτοπτρο, 2000.)

R.P. Feynman, *QED*, Princeton University Press, 1985.

(Ελληνική έκδοση: *QED*, Εκδόσεις Τροχαλία, 1987.) Διασκεδαστική αλλά παράλληλα σοβαρή προσπάθεια παρουσίασης στο ευρύ κοινό της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής. Όπως πάντα, ο Feynman προσπαθεί να επιτύχει τη μέγιστη σαφήνεια και απλότητα χωρίς να διολισθαίνει στην παραποίηση της αλήθειας.

R.P. Feynman, *The Feynman Lectures on Computation*, επιμ. Tony Hey και Robin Allen, Addison-Wesley, 1996.

Μια σύνοψη αλά Feynman της επιστήμης υπολογιστών από την πλευρά του φυσικού —ο Feynman ανάλωσε τα τελευταία πέντε χρόνια της ζωής του δίνοντας αυτές τις διαλέξεις.

A.P. French και E.F. Taylor, *An Introduction to Quantum Physics*, Norton, 1978.

Παραδοσιακό βιβλίο κβαντικής μηχανικής, πιο φλύαρο από τα περισσότερα άλλα, και αρκετά εύληπτο στην πλειονότητα των κεφαλαίων του.

J.C. Polkinghorne, *The Quantum World*, Longman, 1984.

Διαγής και προσεκτική εισαγωγή στα εννοιολογικά προβλήματα της κβαντικής μηχανικής. Τα περίφημα παράδοξα της γάτας τού Schrödinger, της φίλης τού Wigner, και των Einstein-Podolsky-Rosen συζητούνται λεπτομερώς.

G. Gamow, *Mr Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, 1965.

(Ελληνική έκδοση: *Οι περιπέτειες του κυρίου Τόμπκινς*, Εκδόσεις Δίαυλος,

1995.) Η διασκεδαστική καταγραφή από τον διάσημο φυσικό George Gamow των φανταστικών εξερευνήσεων του κυρίου Τόμπκινς στη σχετικότητα και την κβαντική μηχανική.

G. Gamow και R. Stannard, *The New World of Mr Tompkins*, Cambridge University Press, 1999.

David Lindley, *Where Does the Weirdness Go?*, Basic Books, 1996.

Αξιανάγνωστη και σαφής καταγραφή των παραδόξων και προβλημάτων που εγείρει η κβαντική μηχανική.

Gerard Milburn, *Quantum Technology*, Allen and Unwin, 1996.

Σύγχρονος απολογισμός των νέων κβαντικών τεχνολογιών, μεταξύ των οποίων παγίδες ιόντων, κβαντικά νανοκυκλώματα, κβαντική κρυπτογραφία και κβαντική υπολογιστική.

Hans Christian von Baeyer, *Taming the Atom*, Random House, 1992.

Εξαιρετική και αξιανάγνωστη εξιστόρηση του ατομισμού από τις πρωιμότερες απαρχές του ως τα σύγχρονα πειράματα χειρισμού ατόμων.

Ιστορικό υπόβαθρο

R. Frisch, *What Little I Remember*, Cambridge University Press, 1979.

(Ελληνική έκδοση: *Τα λίγα που θυμάμαι*, Εκδόσεις Δίαυλος, 1996.)

E. Segre, *From X-rays to Quarks*, Freeman, 1980.

(Ελληνική έκδοση: *Ιστορία της φυσικής — Από τις ακτίνες X έως τα κουάρκ*, Εκδόσεις Δίαυλος, 1997.) Οι παραπάνω δύο συναρπαστικές αυτοβιογραφικές καταγραφές της αυγής της κβαντικής μηχανικής αξίζουν με το παραπάνω να τις διαβάσετε.

R.P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr Feynman!*, Norton, 1985.

(Ελληνική έκδοση: *Σίγουρα θα αστειεύεστε κύριε Feynman*, Εκδόσεις Τροχαλία, 1989.) Συλλογή ευχάριστων και διασκεδαστικών ανεκδότων του Feynman που περιέχει πολλές από τις θρυλικές «ιστορίες του» καθώς και πολλά άλλα.

A. Pais, *Subtle is the Lord — The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982.

Πιθανόν το εγκυρότερο βιβλίο για τη συμβολή του Αϊνστάιν στη θεμελίωση της κβαντικής μηχανικής και την ανάπτυξη της γενικής θεωρίας της σχετικότητας.

P. Goodchild, *J. Oppenheimer — Shatterer of Worlds*, BBC Publications, 1980.

Βιβλίο εμπνευσμένο από την τηλεοπτική σειρά του BBC που αφορά ένα συναρπαστικό κομμάτι της σύγχρονης ιστορίας.

Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, Simon and Schuster, 1986.

S. Augarten, *Bit by Bit — An Illustrated History of Computers*, Tickner and Fields, 1984.

Ενδιαφέρουσα καταγραφή της ιστορίας της υπολογιστικής από τους πρωτοπόρους, όπως οι John von Neumann και Alan Turing, ως τους σύγχρονους ήρωες, όπως οι Jobs και Wozniak, δημιουργοί του προσωπικού υπολογιστή.

Ευρετήριο όρων και ονομάτων

a, α

αδρόνια, 292, 299, 302, 303

άζωτο, 135

υγρό, 175

«άθροισμα ιστοριών», 47

Αϊνστάϊν, Άλμπερτ, 23, 164, 193, 195, 229, 256, 258, 321, 322, 323

ακτινοβολία και, 24, 157

κίνηση Brown και, 319

πιθανότητες και, 182, 184, 192, 198

συμπύκνωση Bose, 162-166, 167, 169, 170, 172, 175

σχέση μάζας-ενέργειας, 113-115, 294

φύση του φωτός και, 53, 54

Bohr και, 72, 164, 184, 190-191, 193

$E = mc^2$, 112, 257, 294

βλ. και θεωρία της σχετικότητας

ακτίνα Schwarzschild, 256

ακτίνες

α, 67, 68, 69, 70, 97, 107, 108, 109, 113, 115, 240, 319

β, 67, 69, 115, 241

γ, 42, 67, 69, 115, 116

χ, 53, 215, 255, 256

ακτινοβολία, 24

θερμική, 40

υπεριώδης, 23

Cerenkov, 312, 313

Hawking, 269-270

αμμωνία, 135, 136

αμφιβληστροειδής, 42

αναλλοίωτο

βαθμίδας, 278, 283

φύσης, 279, 283, 295, 296, 301

άνθρακας, 125, 243

κύκλος του, 240, 250

ανιχνευτές σωματιδίων, 313-314

αντιβαρυόνιο, 303

αντικουάρκ, 266

αντινετρίνο, 242

αντιπρωτόνιο, 261, 262

αντιστροφή πληθυσμών, 157

αντισωματίδια, 257-276, 314

αντιύλη, 90, 314

απόθεση χημικού ατμού (CVD), 217

αποκλεισμός Coulomb, 219

απόλυτο μηδέν, 167, 169

άπωση Coulomb, 117

αργό, 125

άργυρος, 43

αρνητική ενέργεια, 264

αρσενικούχο γάλλιο, 217, 218

άρση της συνεκτικότητας (αποσυγκρότηση), 200, 203-206

αρχή διατήρησης της ενέργειας, 56, 57

αστέρες νετρονίων, 24, 250-256, 275

άστρα, 237-256

βαρυτικές δυνάμεις στα, 239

καύση υδρογόνου στα, 240-246

ατομική βόμβα, 115-126, 252, 321, 324-329

ατομικό βάρος, 127

άτομο, 20, 67-91, 319-323

ενεργειακές στάθμες, 82-89, 117, 130, 139, 140, 141, 143

παγίδες, 89-91

πλανητικό μοντέλο του, 21-22, 71, 72, 320

πυρήνας του, 67, 69, 70

του Rutherford, 67-74

υπέρψυχρα, 170

ψυχρά, 167-170

αυθόρμητη εκπομπή, 157

Αφροδίτη (πλανήτης), 246

Adams, John Couch, 37

Adleman, Len, 344

Aldis, Brian, 320, 323

Anderson, Carl, 260, 261

Anderson, Philip, 177, 296

Angstrom, A.J., 72

Armstrong, Neil, 21

Asimov, Isaac, 323, 324, 325, 327, 328, 329

Aspect, Alain, 198

Aston, Francis, 322

Atkinson, Robert, 240

β, b, ν

βαθμίδα, 316

βάριο, 120

βαρυόνιο, 288, 291, 292, 300, 303, 304

Βερν, Ιούλιος, 20

Από τη Γη στη Σελήνη, 20, 21

Ταξίδι στο κέντρο της Γης, 320

- Β' Παγκόσμιος Πόλεμος, 118, 123, 149, 221, 222, 324, 326, 330
- Balmer, Johann Jakob, 72, 74, 83
σειρά, 86
- Bardeen, John, 145, 146, 173, 174
- Bear, Greg, 335
- Becker, Richard, 90
- Bednorz, J.G., 175
- Bell, John, 189, 194, 202, 204
ανισότητα, 196, 197, 198
- Bell Burnell, Jocelyn, 253
- Bennett, Charles, 223, 230, 232, 233
- Bernoulli, Daniel, 319
- Besso, M.A., 157, 257
- Bethe, Hans, 240, 241, 326
- Binnig, Gerd, 99, 101, 102, 104, 105, 106
- Bloch, Felix, 143
- Bohm, David, 194, 195, 282
- Bohr, Niels, 42, 71, 76, 81, 82, 83, 117, 132, 188, 189, 268, 321, 345
Αϊνστάιν και, 72, 164, 184, 190-191, 193
ατομικό μοντέλο του, 72, 74, 129, 320
για την κβαντική μηχανική, 190, 198
κανόνες τού, 82, 130
τροχιά, 86, 87, 128
- Boltzmann, Ludwig, 319
- Born, Max, 181-185
- Bose, Satyendra, 131, 162, 163
συμπύκνωση, 162-166, 167, 169, 170, 172, 175
- Bragg, William, 53
- Brassard, Gilles, 232
- Brattain, Walter, 145, 146
- Braun, Werner von, 324
- Butler, Clifford, 287, 289, 291
- Bynes, Rob, 255
- van de Meer, Simon, 293
- Veltman, Tini, 299
- γ, ε, g**
γαλαξίας της Ανδρομέδας, 43, 44
γεργμάνιο, 219
Γη, 238, 239, 245, 275-276
γλοιόνια, 277-317, 299-303, 316
- Campbell, J.W., 323, 324, 325, 327
- Cartwill, Cleve, 324, 325, 327
- Casimir, Hendrik, 268
φαινόμενο, 269
- Chadwick, James, 110, 241, 283, 322
- Chandrasekhar, Subrahmanyan, 243, 250
- Charles, Phil, 255
- Chu, Stephen, 168, 170
- Cirac, Ignacio, 231
- Cockroft, J.D., 109, 110, 112
- Cohen-Tannoudji, Claude, 169, 170
- Coleman, Sidney, 299
- Compton, Arthur, 326
- Condon, Edward, 108
- Conversi Marcello, 285
- Cooper, Leon, 171, 173, 174, 175
ζεύγην Cooper, 173, 175, 176, 178, 306
- Copenhagen, 345, 346
- Cornell, Eric, 167, 169, 170
- Cowan, Clyde, 242
- Crepeau, Claude, 232
- Creutz, Michael, 308
- Crichton, Michael, 339, 341, 342, 343, 344, 345
- Gabor, Dennis, 162
- Gambling, Alec, 97
- Gamow, George, 22, 35, 36, 108, 270
- Gell-Mann, Murray, 59, 61, 62, 291, 292, 300, 307
- Gerber, Christoph, 105
- Germer, L.H., 24, 54
- Gernsback, Hugo, 323
- Gimzeweski, Jim, 341
- Glaser, Donald, 260
- Glashow, Sheldon, 293, 296, 298, 299
- Gold, Tommy, 253
- Goldhaber, Gerson, 297
- Gormley, Antony, 348
- Goudsmit, Sam, 129, 130
- Gross, David, 306
- Griffiths, Robert, 205
- Gunn, James, 323
- Gurney, Ronald, 108
- δ, d**
δευτέριο, 71, 113, 114, 241
δευτερόνιο, 113
δημιουργισμός, 202
Δημόκριτος, 319
διαπλοκή EPR, 225, 234
Δίας (πλανήτης), 237
σύγκριση με Γη, 238
σύγκριση με Ήλιο, 237, 239
διάσπαση α, 106-113
διάσπαση β, 116, 243, 289, 296
διάσταση, 49
διαστολή του Σύμπαντος, 271-273
διάταξη συζευγμένου φορτίου (CCD), 45, 46
δίοδος σήραγγας, 95
δράση εξ αποστάσεως, 193, 194, 198
δυνάμει σωματίδια, 264, 266
δυναμική ενέργεια, 93
δύναμη Coulomb, 117
Dalitz, Dick, 291
Davies, Paul, 346

Davis, Raymond, 244
 Davisson, C.J., 24, 54
 de Broglie, Louis-Victor, 24, 53, 54, 93, 166
 εξίσωση του, 54, 59
 κύματα και, 54, 65, 95, 145, 195, 246, 247
 Debye, P.J.W., 55
 Dehmett, Hans, 89, 90, 91
 Deutsch, David, 202-203, 228, 229, 331, 342
 De Valera, Eamon, 56
 Dewar, James, 164
 DeWitt, Bryce, 201, 202
 Dick, P.K., 330
 Dirac, Paul, 23, 258, 263, 305
 αντισωματίδια και, 257-276
 εξίσωση, 258
 θάλασσα, 259-261, 263
 κενό, 261, 267
 Doyle, Arthur Conan, 320
 Drexler, Eric, 339, 340
 Dummer, G.W.A., 146

ε, e
 ενέργεια
 αρνητική, 264
 πλεκτρομαγνητική, 269
 κβάντωση της, 74-81
 μάζα και, 113-115, 294
 πυρηνική, 323-329
 σύνδεσης των πυρήνων, 113-114, 117
 ενεργειακές στάθμες, 82-89, 130, 132-133, 139, 140, 141, 143
 εξαναγκασμένη απορρόφηση, 157
 επαφή Josephson, 95, 232-233
 επιστήμη, 19
 πείραμα και, 19-23
 ψευδοεπιστήμες, 19
 επιστημονική φαντασία, 319-348
 επιταξία μοριακής δέσμης (MBE), 217
 επιταχυντές σωματιδίων, 60, 63, 64, 112, 194, 242, 302, 316
 Bevatron, 262
 LEP, 310
 LHC, 310, 311, 312, 313, 316
 PETRA, 302
 SLAC, 297
 ερμηνεία των πολλών κόσμων, 200-203
 Ερμής (πλανήτης), 37, 246
 ερυθρός γίγαντας, 245, 246-250
 Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN), 61, 62
 Eddington, Arthur, 240
 Eigler, Don, 80, 81, 103, 104, 105, 209, 211
 Eliot, Gary, 348
 Everett, Hugh, 201, 202, 330, 331

ζ, z

ζεύγη Cooper, 173, 175, 176, 178
 Zeilinger, Anton, 232
 Zurek, Wojciech, 203, 233
 Zweig, George, 59, 61, 62, 63, 291, 292

n, h

πλεκτρασθενής δύναμη, 299
 πλεκτρικό ρεύμα, 45, 136, 142, 144, 175
 πλεκτρομαγνητισμός, 128, 185, 193, 204, 268, 269, 277, 282, 283, 298, 303, 305
 πλεκτρονικό μικροσκόπιο, 59-62, 149
 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Εκπομπής Πεδίου, 99
 Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης, 105, 106, 107
 Σαρωτικό Μικροσκόπιο Σήραγγας, 80, 81, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 211
 πλεκτρονικοί υπολογιστές, 51, 52, 145, 146, 148, 214, 220, 221
 κβαντικοί, 211, 225-233, 335-344
 υπερυπολογιστές, 308
 ENIAC, 149, 150
 UNIVAC 1, 150
 πλεκτρόνιο, 21, 30-33, 35, 42, 46-47, 49, 57-58, 67, 97, 130, 131, 134, 142, 162, 163, 219, 251, 261, 264, 278, 286, 302, 317
 αποβολή, 43
 βαρύ, 286, 287
 δυναμική ενέργεια του, 58, 76, 98
 ενεργειακή στάθμη, 82-89, 130-135, 139
 ζεύγη, 296
 θέση του, 49, 77
 κίνηση του, 246
 κυματοσυνάρτηση του, 101
 μάζα του, 24
 μονήρη, 219
 οπτική και, 58-65
 ορμή του, 49
 οκέδαση, 60, 264, 265, 266, 268, 284
 σπιν, 127-131, 258, 263
 σχετικιστικό, 258, 259
 φορτίο του, 305
 φράκτης από, 80-81
 ως κύμα, 24, 33, 54
 ως σωματίδιο, 24
 πλεκτρονιοβόλτ, 107, 117
 ήλιο, 69, 70, 71, 113, 134, 164
 καύση του, 247, 250
 υγρό, 77, 163, 164-167
 υπερρευστό, 165, 167
 Ηλιόπουλος, Ιωάννης, 298
 Ήλιος, 72, 73, 86, 128, 240, 241, 242, 245, 246, 248, 256
 εξέλιξη του, 246-247
 μάζα του, 239, 270

- παραγωγή ενέργειας στον, 242-243
 πυρηνικές αντιδράσεις στον, 314
 σύγκριση με Δία, 237
 φάσμα του, 271
 ημιαγωγοί, 24, 136, 143-151, 217, 219, 220
 Hackworth, John, 338
 Hahn, Otto, 117, 118, 120
 Hall, Edwin, 178
 Hansen, Hans Marius, 72
 Haroche, Serge, 203, 204
 Hartle, James, 205
 Hawking, Stephen, 203, 274
 ακτινοβολία, 269-276
 Heiman, Frederic, 148
 Heinlein, Robert, 324
 Heisenberg, Werner, 23, 24, 35, 39, 164, 166, 183, 190, 258, 262, 324, 325, 345, 346
 αρχή της αβεβαιότητας, 39-49, 54, 76, 77, 95, 191, 243, 268, 293
 διαίρεση, 189
 Helmersen, Kristian, 172
 Hewish, Anthony, 253
 Higgs, Peter, 296
 κενό, 293
 μποζόνια, 296, 311
 σωματίδιο, 308, 309
 Ho, Wilson, 211
 Hoerni, Jean, 148
 Hoff, Ted, 148, 151
 Hofstein, Steven, 148
 Hoyle, Fred, 242, 332, 333, 335
 Hubble, Edwin, 271, 272
 σταθερά του, 271
 Hughes, Richard, 225
- θ**
- θάλαμος νέφους, 126, 260
 θάλαμος φουσαλλίδων, 260-261, 285, 288, 290, 291, 292
 Θεός, 202
 θεωρία βαθμίδας, 298, 299, 308
 θεωρία M, 317
 θεωρία πεδίων, 263-264, 268
 θεωρία της σχετικότητας, 23, 277
 γενική, 37, 129, 164, 240, 255, 256, 257
 ειδική, 157, 257, 258
 βλ. και Αϊνστάιν, Άλμπερτ
 θεωρία χορδών, 278, 316, 317
 θόριο, 124
 Θρι Μάιλ Άιλαντ, πυρηνικό ατύχημα, 328
- ι, j**
- ιόντα, 85, 90, 91, 99, 115, 140
 παγίδες, 231, 233
 ισχυρές δυνάμεις, 70, 117, 241, 284, 286, 289
 IBM, 52, 81, 103, 104, 150, 151, 175, 209, 211, 216, 230, 235
 Intel, 212, 213, 214, 215
 Jammer, May, 24
 Jobs, Steven, 213
 Jordan, Pascual, 190
 Josephson, Brian, 177, 178
 Joyce, James, 61
 Jozsa, Richard, 232
Jurassic Park, 339
- κ, k, q**
- Καθιερωμένο Μοντέλο, 278, 284, 297, 299, 311, 314
 πέρα από το, 308-317
 καινοφανείς εκρήξεις, 247, 249
 καίσιο, 120
 κάλιο, 125
 καόνιο, 288, 289
 κβάζαρ, 269
 κβαντικές διαδρομές, 46-49, 50, 77
 κβαντικές πιθανότητες, 181-185
 κβαντική αβεβαιότητα, 35, 36, 39-49
 κβαντική ηλεκτροδυναμική, 263, 277, 282
 κβαντική κουκκίδα, 219-220
 κβαντική κρυπτογραφία, 221-225, 229
 κβαντική παραλληλία, 228
 κβαντική πληροφορία, 220-225
 κβαντική συνεργασία, 153-179
 κβαντική τεχνολογία, 207-235
 κβαντική τηλεμεταφορά, 229, 233-235, 340, 342
 κβαντική χρωμοδυναμική, 277-278, 301, 302, 306, 307, 308
 κβαντικό πλάτος πιθανότητας, 33
 κβαντικό φαινόμενο σήραγγας, 93-126
 κβαντικό φαινόμενο Hall, 178-179
 κβαντικοί αριθμοί, 79, 80, 84, 86-89, 131, 132, 160, 300
 κβαντικός αλγόριθμος, 229
 Κένεντι, Τζον, 253
 κενό, 99, 259, 268, 274
 διακυμάνσεις, 267-269
 δύναμη, 268
 Dirac, 261, 267
 κινητική ενέργεια, 57, 93
 κοσμικές ακτίνες, 125, 126, 231, 261, 285, 286, 287, 288, 341
 κουάρκ, 61, 266, 277, 278, 284, 289, 291, 292, 299-303, 308, 315
 «γεύσεις», 291, 299
 γοπτευτικό, 296-297, 298, 300
 εγκλωβισμός των, 303-308
 κάτω, 296, 300
 κορυφή, 300

πάνω, 296, 300
 πυθμένας, 300
 κρύσταλλοι, 137-138, 217, 268
 κύκλοτρο, 110, 119
 κύματα, 22, 24, 32, 55, 95-97, 154, 155, 279, 280, 345
 δυναμικότητα σωματιδίου και, 345
 μήκος κύματος, 59, 72, 246, 247
 περίθλαση των, 42
 πιθανότητας, 76, 227
 στάσιμα, 75
 συμβολή των, 22, 23, 30, 47, 54, 55, 64, 188, 280-281, 283
 υδάτινα, 22, 27-30, 98, 188
 υλικά, 58-65
 ύψος (πλάτος) του, 29
 φθίνον, 96
 de Broglie, 54, 65
 κυματοσυνάρτηση, 76, 86-89, 101, 132, 139
 Kepler, Johann, 249
 Ketterle, Wolfgang, 169
 Kilby, Jack, 147, 150
 Kirchhoff, G.R., 271
 Kleppner, Daniel, 167, 269
 Klitzing, Klaus von, 178, 179
 Quate, Call, 105

λ, l

λείζερ, 65, 78, 91, 97, 106, 153-162, 168
 λεπτόνια, 292, 297, 300, 315
 Λεύκιππος, 319
 λευκοί νάνοι, 246-250
 λίθιο, 127, 134, 136
 λυχνίες, 150
 Langevin, Paul, 53
 Laumer, Keith, 330
 Lawrence, Ernest, 110, 112, 119
 Lederman, Leon, 300
 Lee, David, 166
 Le Verrier, Jean Joseph, 37
 Libby, William, 125
 Lindley, David, 193
 London, Fritz, 163, 171
 Lorentz, H.A., 130

μ, m

μαγνήσιο, 142
 μαγνητικά μονόπολα, 303-308
 μαγνητικό πεδίο, 282, 283
 μαζικός αριθμός, 114
 μαύρη τρύπα, 250-256, 269, 274
 αρχέγονη, 274
 δημιουργία σωματιδίων κοντά σε, 274-275
 μαύροι νάνοι, 247

Μεγάλη Έκρηξη, 270, 272, 274, 276, 332, 333
 Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία, 278
 Μεγάλο Νεφέλωμα του Μαγγελάνου, 250
 μείζερ, 154
 μεσόνιο, 278, 286, 287, 288, 292, 303
 μέταλλα, 136-143
 μετασταθής κατάσταση, 119
 μεταστοιχειώση, 328-329
 μετατόπιση
 Doppler, 271, 272
 Lamb, 268
 μήτρες (μαθηματικές), 183
 μηχανική
 κβαντική, 20, 21, 23-26, 32, 33, 35, 36, 49, 74, 76, 166, 181, 188, 190, 192, 198, 199, 201, 222, 227, 228-229, 235, 237, 256, 258, 262, 266, 277, 278, 308, 316
 κλασική, 20, 24, 257
 νευτώνεια, 35
 μικροεπεξεργαστής, 151, 214, 215
 μικροηλεκτρονική, 143-151
 μίονια, 125, 285, 286, 287, 308
 μονόδρομες συναρτήσεις, 222
 μονωτές, 136
 μόρια, 20
 μπιτ, 220, 221, 224
 q-μπιτ, 228, 229, 231, 232, 233
 μποζόνια, 131, 160, 162, 166, 173, 263, 266, 295, 296, 309, 315, 316
 Maiman, Theodore Harold, 155
 Mandelbrot, Benoit, 52
 Maxwell, James Clerk, 185, 193, 258, 277, 319, 321
 εξισώσεις του, 263, 305, 306
 McCandless, Bruce, 21
 McLellan, Bill, 207, 208
 McMillan, Ed, 119
 Mead, Carver, 213-214
 Meek, S.P., 320, 321
 Meitner, Lise, 117, 118, 119
 Mendeleev, Dimitri, 89, 127, 128, 162, 321
 Merkle, R.C., 340
 Mills, Robert, 283
 Minsky, Marvin, 340
 Moller, Christian, 346
 Moorcock, Michael, 330
 Moore, Gordon, 211, 213, 215
 νόμος του, 211-220
 Muller, K.A., 175

ν, n

Ναγκασάκι, 121, 123
 νανοτεχνολογία, 81, 207-211, 335-344
 νέο, 71, 135

- νετρίνα, 116, 241, 242, 243, 251, 285, 287, 290, 298, 311, 312
 ηλιακά, 243, 244, 246, 314
 νετρόνιο, 58-65, 69, 70, 110, 116, 117, 118, 128, 162, 164, 241, 242, 247, 278, 283, 291, 296, 301
 ανακάλυψη του, 241, 283
 αστέρες νετρονίων, 250-256
 Νεύτων, Ισαάκ, 19, 20, 23, 258
 νόμοι του, 35, 37, 56, 57, 184, 199, 257
 νεφέλωμα
 του Καρκίνου, 251, 253, 254
 του Ωρίωνα, 85
 νουκλεόνια, 108, 113, 114, 117
 ντετερμινιστική θεώρηση της φύσης, 35-36
 Newman, Tom, 208, 209
 Neumann, John von, 149, 199, 205, 253, 334
 Niven, Larry, 274, 275, 328
 Noddack, Ida, 118
 Noyce, Robert, 147, 148, 151, 211, 213
- ο, ο**
 ολογραφία, 161-162
 ολοκληρωμένο κύκλωμα, 147, 150
 ομοιοπολικός δεσμός, 134
 οπτικές λαβίδες, 170
 οπτική, 58-65, 96
 οπτική ίνα, 96, 97
 οπτική μελάσα, 168
 ορμή σωματιδίου, 40, 41, 54, 57, 257, 259
 ουράνιο, 108, 114, 118, 120, 122, 124, 126, 325
 Occhialini, Giuseppe, 286
 Omnes, Roland, 205
 Onnes, Kamerlingh, 164, 171, 174
 Oppenheimer, Robert, 149, 252, 253, 326
 Osheroff, Douglas, 166
- π, ρ**
 παλίρροιες, 275-276
 πάσσαρ, 252, 253
 παράδοξα σωματίδια, 287-292
 παράδοξο της γάτας του Schrödinger, 26, 181, 182, 198-200, 204
 παράδοξο Einstein-Podolsky-Rosen, 181, 182, 192, 193, 194, 211, 228, 229
 πείραμα, 19-23
 πείραμα διπλής οξιομής, 23, 25-33, 36-38, 39, 46-48, 64, 181, 184, 188, 277-278, 280
 περιοδικός πίνακας, 127, 128, 129, 130, 132-136, 162
 πόνιο, 263, 284, 285, 288, 291, 293, 299
 πλάσμα, 115, 239
 πλουτώνιο, 119, 122, 123
 ποζιτρόνιο, 89, 90, 116, 242, 259, 260, 261, 262, 263, 264
 πολλαπλά σύμπαντα, 329-335
 πολωτής, 225
 Ποσειδώνας (πλανήτης), 35, 37
 ποσειδώνιο, 119
 πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης, 182, 188
 Πρόγραμμα Manhattan, 47, 149, 252, 325, 326, 327, 328
 πρωτόνιο, 69, 70, 113, 116, 117, 125, 128, 162, 163, 247, 251, 278, 284, 291, 298, 301
 στον Ήλιο, 242, 243
 πυρηνικά απόβλητα, 328-329
 πυρίτιο, 102, 107, 143, 147, 217, 219, 227
 «κοιλάδα» του, 137
 πυρηνικοί αντιδραστήρες, 120, 123
 Pais, Abraham, 191
 Pancini, Ettore, 285
 Paul, Wolfgang, 89, 90
 Pauli, Wolfgang, 127, 128, 129, 130, 134, 241, 242
 απαγορευτική αρχή του, 127-131, 132, 133, 134, 139, 141, 160, 162, 237, 246, 247, 249, 250, 251, 255, 259, 263, 301, 315
 Payne, David, 97
 Peierls, Rudolph, 194, 205, 325, 326
 Penning, Frans, 90
 Penrose, Roger, 205
 Peres, Asher, 232
 Perl, Martin, 287, 297
 Petersen, Aage, 190
 Phillips, William, 169, 170
 Piccioni, Oreste, 285
 Planck, Max, 40, 53, 321
 μάζα, 317
 σταθερά του, 40, 41, 54, 55, 59, 84, 88, 94, 178, 179
 φύση του φωτός και, 53
 Pohl, Fred, 321
 Politzer, David, 306
 Pournelle, Jerry, 328
 Powell, Frank, 286
- ρ, τ**
 ραδιενέργεια, 67, 70, 115-126
 είδη, 69
 φυσική, 277
 ράδιο, 124
 ραδιοχρονολόγηση, 124
 ρουβίδιο, 120, 172, 173
 Rabi, Isidor, 286
 Raimond, Jean-Michel, 203, 204
 Ratcliffe, J., 68
 Reines, Frederick, 242
 Richardson, Lewis, 51
 Richardson, Robert, 166
 Richter, Burton, 297, 298
 Rochester, George, 287, 289, 291
 Rock, Arthur, 215

Rohrer, Heinrich, 99, 101, 102
 Rozental, Stefan, 346
 Rubbia, Carlo, 293, 309
 Rutherford, Ernest, 67-71, 72, 107, 109, 110, 239, 319, 320, 321, 322, 323

σ, s

σειρά Brackett, 84
 σειρά Lyman, 84
 σειρά Paschen, 84
 Σείριος, 247, 248
 Σελήνη, 160, 161
 βαρυτική έλξη της, 275-276
 σημεία Ionbar, 329-335
 σκοτεινή ύλη, 314-315
 σπιν, 139, 258, 263, 300, 317
 σταθερά λεπτής υφής, 179, 263
 στοιχειώδη σωματίδια, 24, 40, 58
 στροφορμή, 86, 87, 88, 89, 129, 130
 Συνέδρια Solvay, 191, 195
 σύντηξη, 114, 115-126
 σχάση, 114, 117, 118, 119-120, 122
 σωματίδια
 ύψιλον, 300
 Z, 293, 295, 299, 308, 309, 315, 316
 Ω, 291, 300, 301
 J, 298
 J/ψ, 297, 298, 300
 V, 291
 W, 293, 295, 296, 297, 299, 308, 315, 316
 Salam, Abdus, 293, 296, 297, 299
 Schrieffer, John, 173, 174, 175
 Schrödinger, Erwin, 23, 24, 54, 74, 83, 166, 184, 189, 192, 228, 258, 262, 263, 331-332
 γάτα του, 26, 198-200, 203, 329-335
 εξίσωση του, 47, 55-58, 59, 64, 75, 77, 81, 82, 88, 95, 129, 133, 143, 182, 183, 184, 188, 198, 199, 200, 203, 204, 205
 κυματοσυνάρτηση του, 164, 334
 υλικά κύματα και, 53-65, 183
 Schweizer, Erhard, 103, 105
 Seaborg, Glem, 123
 Shelley, Mary, 323
 Shockley, William, 145, 146
 Shor, Peter, 229, 230, 232
Silkwood, 328
 Simak, C.D., 330
 Soddy, Frederick, 322
 Solvay, Ernest, 195
 Sommerfeld, Arnold, 42, 90
Star Trek, 232, 233, 321, 330, 331
Star Wars, 321
 Steane, Andrew, 232

Stephenson, Neal, 335, 336, 337, 345
 Stern, Otto, 130, 132
 Strassmann, Fritz, 118, 120
 Szilard, Leo, 322, 323

τ, t

τεχνητίο, 110
 τρανζίστορ, 143-151, 174, 213, 217
 τρίτιο, 71, 114, 241
 Τσέρνομπιλ, 328
 τσιπ πυριτίου, 24, 45, 46, 151, 211, 213-220
 DRAM, 214-215
 Teller, Edward, 253, 326, 327
The China Syndrome, 328, 329
The Diamond Age, 335-337
The Lost World, 339
The Time Machine, 321
The World Set Free, 321, 322
 Thomas, Neil, 348
 Thomson, G.P., 24, 54
 Thomson, J.J., 24
 't Hooft, Gerard, 299
Thunderheart, 328
Timeline, 339, 342, 343, 344
 Ting, Samuel, 297, 298
 Townes, Charles, 154
 Turing, Alan, 221, 226
 μηχανή, 226, 227

υ, u, γ

υδρογόνο, 70, 134
 ατομικό, 239
 άτομο του, 81-86
 γραμμικό φάσμα του, 72, 74
 ισότοπο του, 71
 στα άστρα, 240-246
 στον Δία, 237-239
 υδροποίηση του, 164
 φάσμα του, 268
 υδρογονοβόμβα, 253
 υπεραγωγιμότητα, 24, 145, 166, 170-178, 232, 233, 295, 296, 303-308
 υπερκαινοφανείς εκρήξεις, 124, 247-248, 250, 251
 υπερουράνια στοιχεία, 118, 119
 υπερρευστά, 153, 164, 165, 167
 υπερσυμμετρία, 278, 315, 316, 317
 Uhlenbeck, George, 129, 130
 Yang, Chen Ning, 283
 Young, Thomas, 23, 25, 30
 Yukawa, Hideki, 284, 285, 286, 293, 294, 296, 303
 σωματίδιο του, 286, 287

- φ, f**
 φαινόμενο Doppler, 167-168
 φαινόμενο Josephson, 178
 φαινόμενο Zeeman, 128, 129, 130
 φερμιόνια, 131, 162, 266, 301, 315
 φράγματα δυναμικού, 93-95, 110, 111, 114, 115
 Coulomb, 115
 φράκταλ, 49-52
 φρέαρ δυναμικού, 99, 108
 φυσική
 κβαντική, 136
 κλασική, 36, 188
 πυρηνική, 106-113
 φωνόνια, 268
 φως, 23, 41, 42, 53, 72, 89-91, 167
 αλληλεπίδραση με ύλη, 39
 ανάκλαση, 96
 διάθλαση, 95
 κβαντική μηχανική και, 23-26, 42
 κυματική θεωρία του, 23, 30, 53
 λείζερ, 153-162, 168
 μήκος κύματος του, 40, 270
 πιθανοκρατική φύση του, 45
 πολωμένο, 185-191
 συμβολή του, 25, 39, 78
 συχνότητα του, 40, 41
 ταχύτητα του, 60, 193, 246, 257, 294, 317
 φάσμα, 72, 73
 φωσφόρος, 30, 31, 143
 φωτίνα, 316
 φωτογραφία, 42-46
 φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, 23, 39, 41, 164
 φωτολιθογραφία, 215
 φωτόνιο, 23, 24, 38, 39, 41, 42, 44-46, 53, 84, 91, 116,
 134, 157, 158, 159, 167, 168, 185-191, 192, 220, 223,
 224, 232, 233, 234, 239, 266, 284, 289, 295, 296, 311,
 315
 ανιχνευτές, 45
 από άστρα, 43, 239
 ασθενή, 277-317
 ενέργεια του, 40, 259
 ισχυρά, 301
 πόλωση του, 189, 190, 194, 195, 196, 197, 233
 φωτοπολλαπλασιαστές, 311
 Fairchild Semiconductors, 211, 213
- Fermi, Enrico, 81, 118, 130, 131, 241
 αντιδραστήρας του, 120, 123, 126
 Feynman, Richard, 19, 25, 35, 39, 47, 67, 93, 127, 153,
 181, 201, 207, 225, 229, 235, 237, 257, 277, 278, 279,
 298, 319, 347
 για τον Dirac, 258
 διαγράμματα, 264-267, 284, 296, 297, 299, 307,
 308
 ερμηνεία πολλών κόσμων και, 202
 κανόνες, 257-276
 κβαντικές διαδρομές τού, 46-49, 50, 77, 308
 κβαντική αβεβαιότητα και, 46, 226
 κβαντικοί υπολογιστές και, 340
 νανοτεχνολογία και, 207-211, 220
- Fraunhofer, Joseph, 271
 Frayn, Michael, 345, 346
 Fredkin, Ed, 225, 226, 227, 228
 Frisch, Otto, 325, 326
 Fuchs, Klaus, 222, 253
- x**
 Χιροσίμα, 122, 123, 324
 κλώριο, 138
 χρόνος, 227, 257, 264
 κίνηση προς τα πίσω στο, 266, 268, 272
 ταξίδια στο, 321, 343
 χρώμιο, 158
 χώρος, 264
 κβάντωση του, 130, 132
 χωρόχρονος, 308, 317, 331
- w**
 Weinberg, Steven, 293, 296, 299
 Welles, Orson, 321
 Wells, H.G., 321, 322, 323
 Weyl, Herman, 282
 Wheeler, John, 201, 330, 334
 Wieman, Carl, 167, 169, 170
 Wien, Wilhelm, 42
 Wigner, Eugene, 174, 199, 205, 334
 «φίλη» τού, 199-200
 Wilczek, Frank, 306
 Wilson, Ke, 308
 Wooters, William, 232, 233
 Wozniak, Stephen, 213

Ο TONY HEY απέκτησε το διδακτορικό του δίπλωμα στη θεωρητική φυσική από το Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης και εργάστηκε ως ερευνητής στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καλιφόρνιας και το CERN. Σήμερα είναι καθηγητής ηλεκτρονικής και υπολογιστών στο Πανεπιστήμιο του Σαουθάμπτον (νότια κεντρική Αγγλία), και διευθυντής του βρετανικού προγράμματος «e-science». Είναι εταίρος της Βασιλικής Ακαδημίας Μηχανολογίας.

Ο PATRICK WALTERS έλαβε το διδακτορικό του δίπλωμα στη θεωρητική φυσική από το Πανεπιστήμιο του Ντάραμ (βορειοανατολική Αγγλία). Διδάσκει φυσική σε ενήλικες, εντάσσοντάς τη στο ευρύτερο πολιτιστικό και ιστορικό πλαίσιο, και αυτή την περίοδο είναι λέκτορας στο Τμήμα Επιμόρφωσης Ενηλίκων του Πανεπιστημίου της Ουαλίας στο Σουόνσι.

- «Το *Κβαντικό σύμπαν* έχει ένα δικό μου μικρό απόσπασμα στην αρχή κάθε κεφαλαίου· παρ' όλα αυτά, είναι ένα τρομερά καλό βιβλίο.»
—Richard Feynman, *Νόμπελ φυσικής*
- «Επιτέλους, ένα βιβλίο που καταγράφει την ευρύτητα του πεδίου της κβαντικής μηχανικής χωρίς να οδηγεί τον αναγνώστη στο λαβύρινθο των μαθηματικών. Ένα ζωντανό, πληροφοριακό, θαυμάσια εικονογραφημένο βιβλίο για την ισχυρότερη επιστημονική θεωρία που γνώρισε η ανθρωπότητα.»
—Paul Davies
- «Αν θέλετε μια εισαγωγή στην πιο επιτυχή και ευρεία θεωρία που συνέλαβε η ανθρώπινη νόηση, τότε διαβάστε το *Κβαντικό σύμπαν*.»
—*The New Scientist*
- «Το βιβλίο αυτό θα καταπλήξει και θα ευχαριστήσει, διότι θα ανοίξει την πόρτα του μυστικού κήπου των φυσικών σε εκείνους τους μακαρίους που θα θελήσουν να γνωρίσουν γιατί ο Κόσμος μας είναι αυτός που είναι.»
—*Nature*
- «Συνιστώ θερμά το *Κβαντικό σύμπαν* σε καθέναν που αισθάνεται αμήχανος από τη φαινομενική πολυπλοκότητα της σύγχρονης επιστήμης.»
—*Astronomy Now*

ISBN 960-7778-86-3

