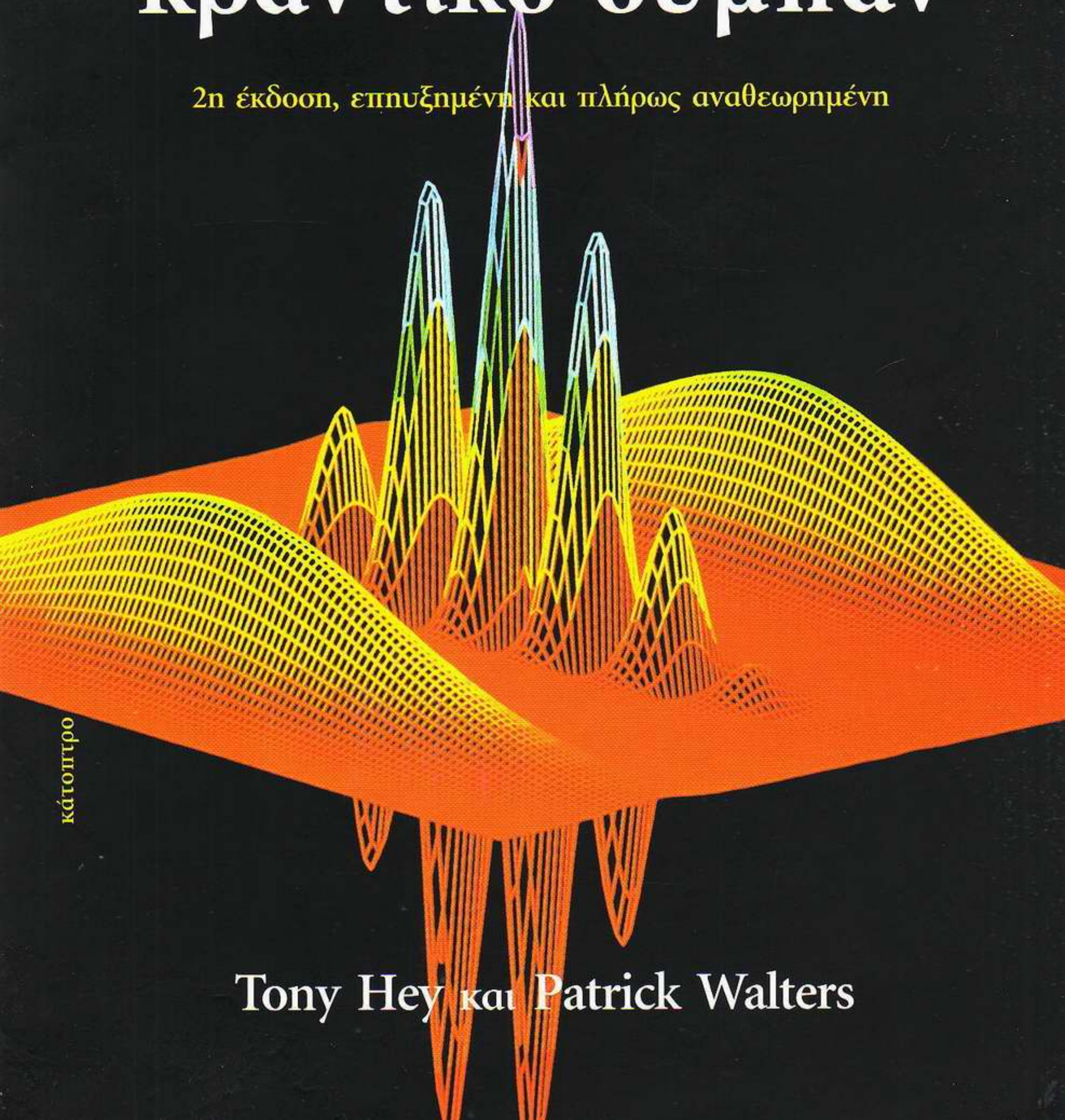


Το νέο κβαντικό σύμπαν

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 Περσμαζόγλου 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
Δυνάμεις του 10	349
Η κλίμακα μαζών	350
Η κλίμακα αποστάσεων	350
Η κλίμακα ταχυτήτων	350
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	350
Χρονικά διαστήματα	353
<i>Παράρτημα 2 Επιλύοντας την εξίσωση του Schrödinger</i>	354
Γλωσσάριο	357
Παραθέματα από τον R.P. Feynman	371
Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	373
Ενρετήριο όρων και ονομάτων	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 μας 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 ορίζοντα 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 «μετρητικό 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 Wojtek 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 οίγουροι, 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 Papay 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 πρόσχαρη διάθεσή τους μας βοήθησαν στην ολοκλήρωση ενός τόσο περρίπλοκου έργου.

Πρόλογος

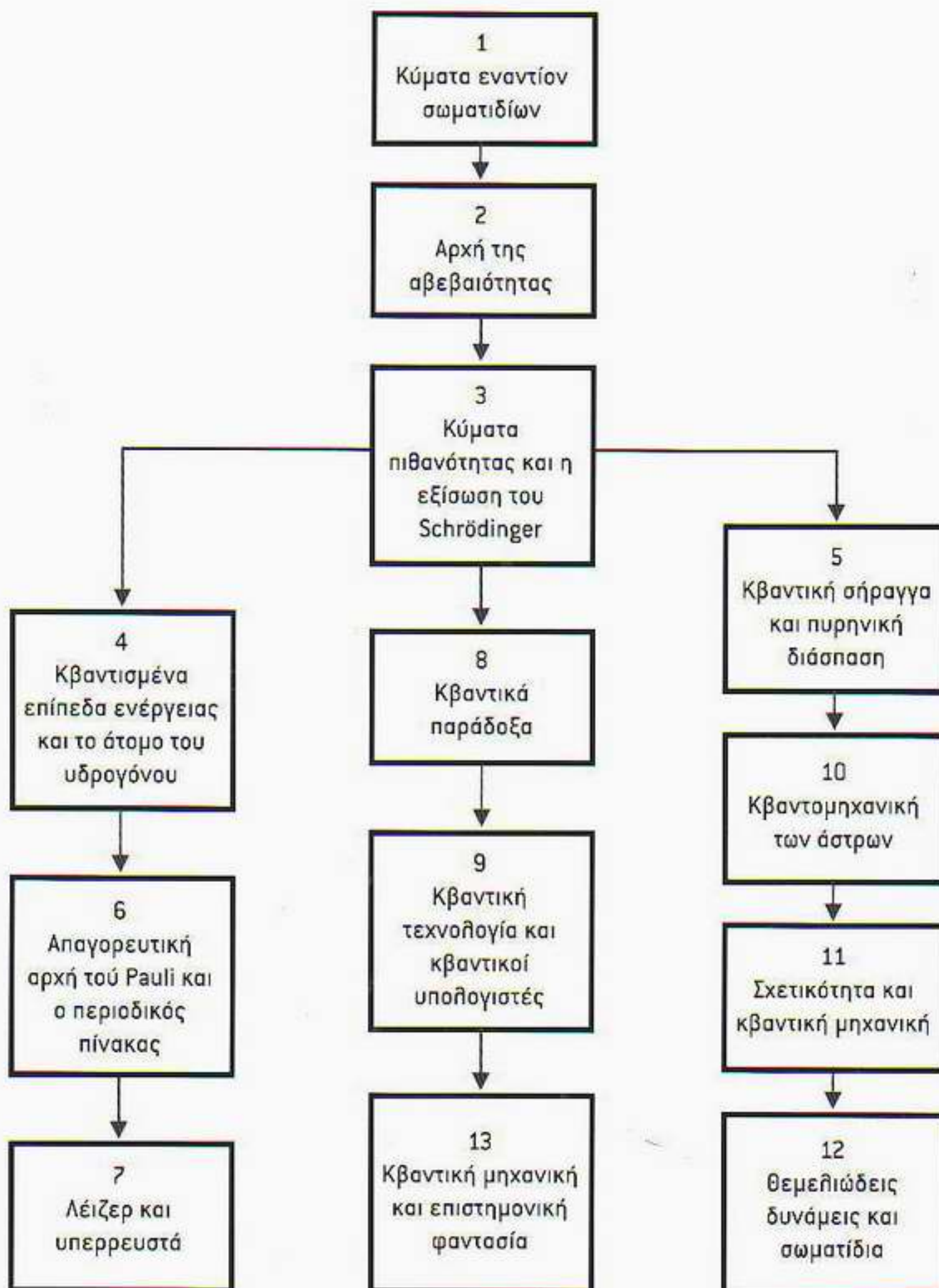
Οι ποιητές λένε πως η επιστήμη σε απομακρύνει από την ομορφιά των άστρων —συσσωματώματα ατόμων αερίων, όλο κι όλο. Τίποτε δεν είναι «όλο κι όλο». Μπορώ και εγώ να κοιτάξω τα άστρα μια ήρεμη νύχτα και να τα νιώσω. Αλλά εγώ βλέπω το ίδιο ή βαθύτερα; Οι απέραντοι ουρανοί ξετυλίζουν τη φαντασία μου —σε αυτή την πανδαισία, το μικρό μάτι μου μπορεί να συλλάβει φως ηλικίας ενός εκατομμυρίου ετών... Ή βλέπω τα άστρα με το μεγάλο μάτι του Palomar 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 κολλυπτονται 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

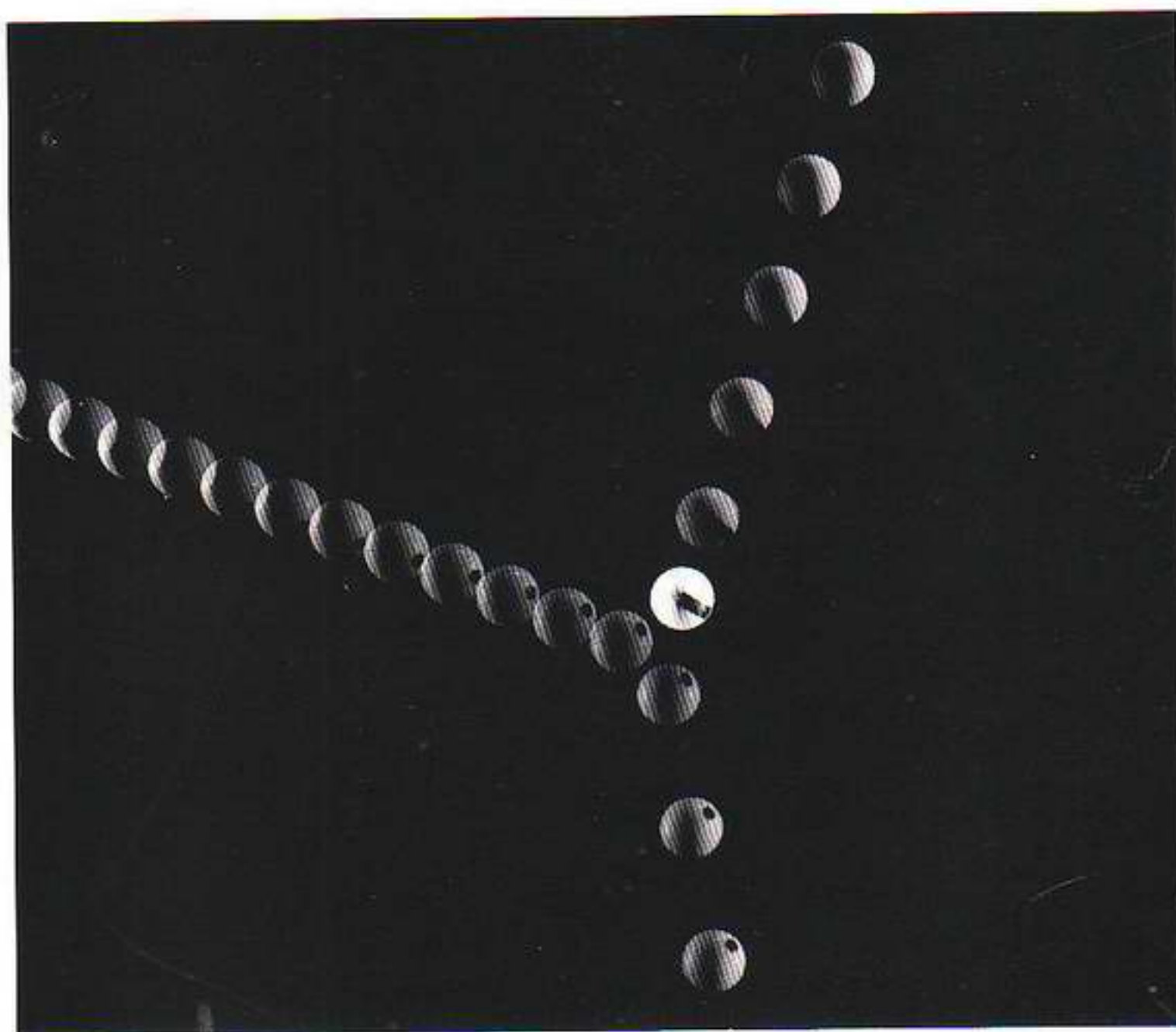
Η επιστήμη συνιστά ένα ιδιαίτερο είδος εξήγησης των πραγμάτων που βλέπουμε γύρω μας. Ξεκινάει με ένα πρόβλημα και με περιέργεια. Κάτι φαίνεται παράξενο στον επιστήμονα· δεν συμφωνεί με τη συνηθισμένη εξήγηση. Κάποτε, μια επίμονη σκέψη ή μια πιο προσεκτική παρατήρησή του μπορεί να λύσει το πρόβλημα. Αν 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-



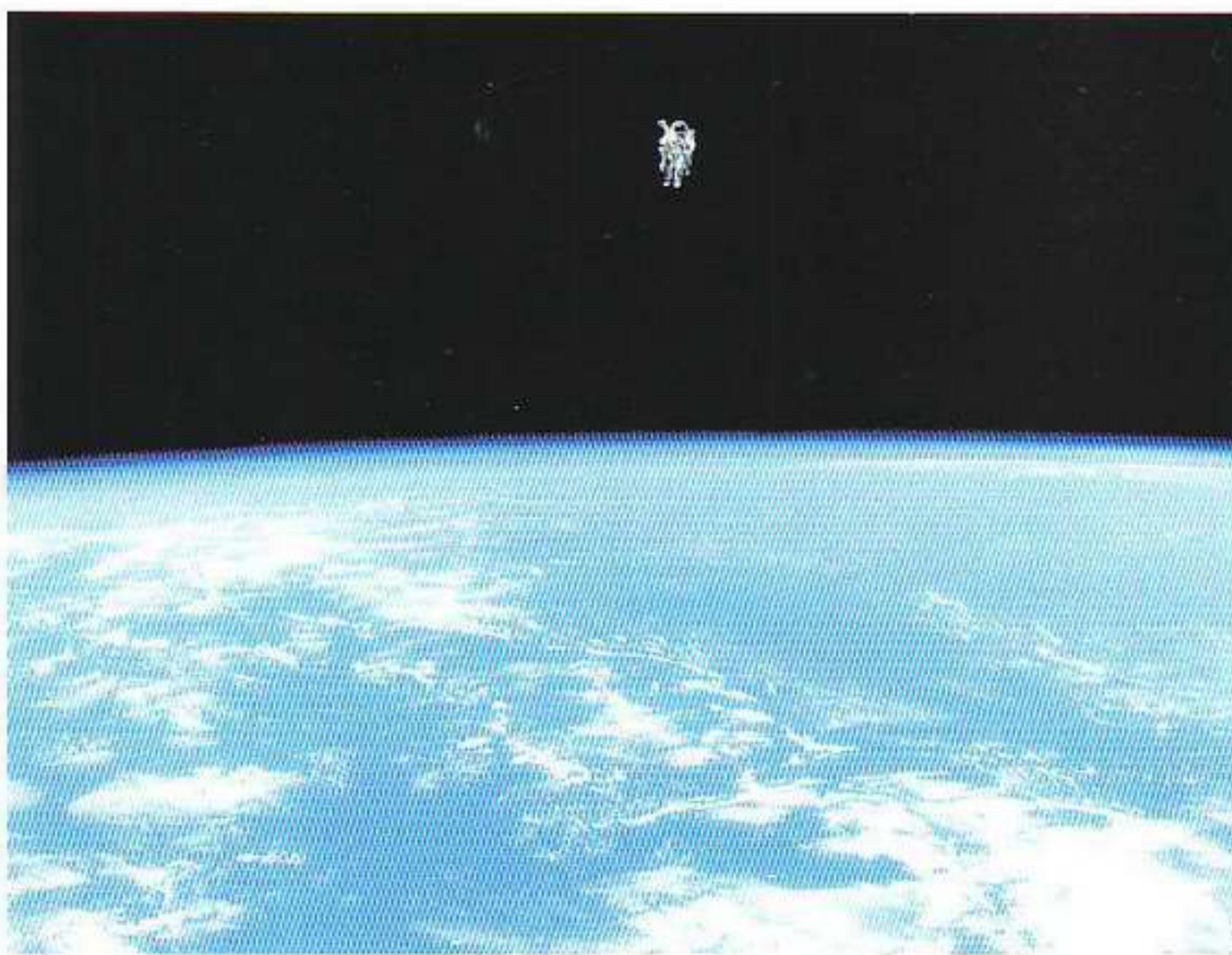
Ο Ισαάκ Νεύτων (1642-1727) δημοσίευσε το 1704 το βιβλίο του *Οπτική*, στο οποίο ερμήνευσε το ουράνιο τόξο και εισηγήθηκε τη «σωματιακή» θεωρία του φωτός. Το 1687, στο βιβλίο του *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Μαθηματικές αρχές της φυσικής φιλοσοφίας) διατύπωσε τις αρχές της μηχανικής 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 περίπατοι», 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 αληθιά, διάβολε, για μένα ήταν άημα και μεγάλο μόλιστα!»

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.

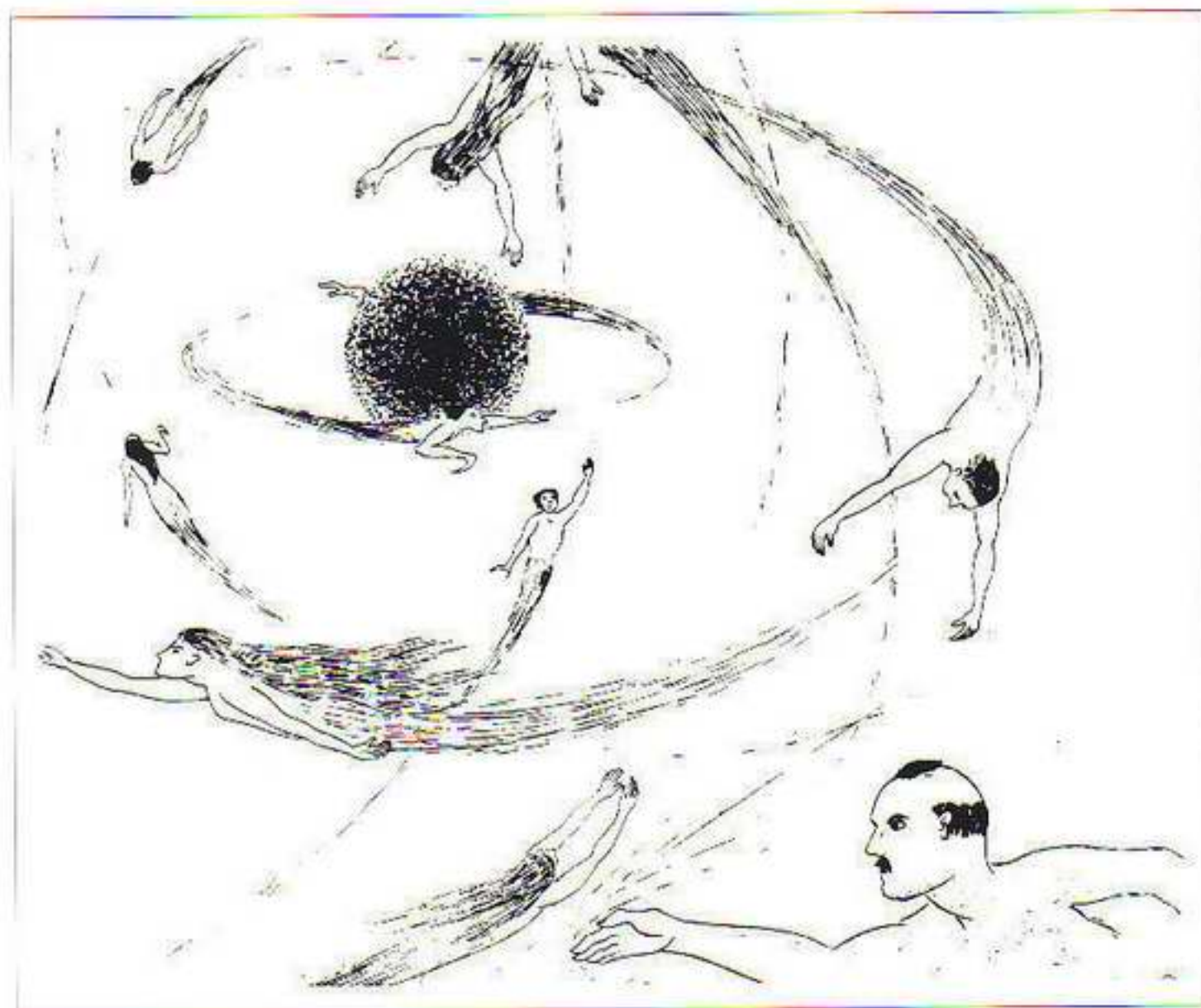
Πώς μπορούμε να σας πείσουμε ότι η κβαντική μηχανική είναι και αναγκαία και χρήσιμη; Λοιπόν, ένας φυσικός, σαν καλός ντετέκτιβ, εξετάζει εξονυχιστικά τα δεδομένα που έχει, και θυμάται πάντα το παλιό αξίωμα του Σέρλοκ Χολμς: «Όταν έχετε αποκλείσει το αδύνατο, αυτό που απομένει, έστω και απίθανο, πρέπει 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 Ιουλήιου 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 υδατινών 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 *φωτοηλεκτρικό 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 φωτοηλεκτρικό 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 διόβαζε από δύο ετών. Στα νεανικά του χρόνια έμαθε να μιλά δώδεκα γλώσσες. Τη φήμη του την αφείλει 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.



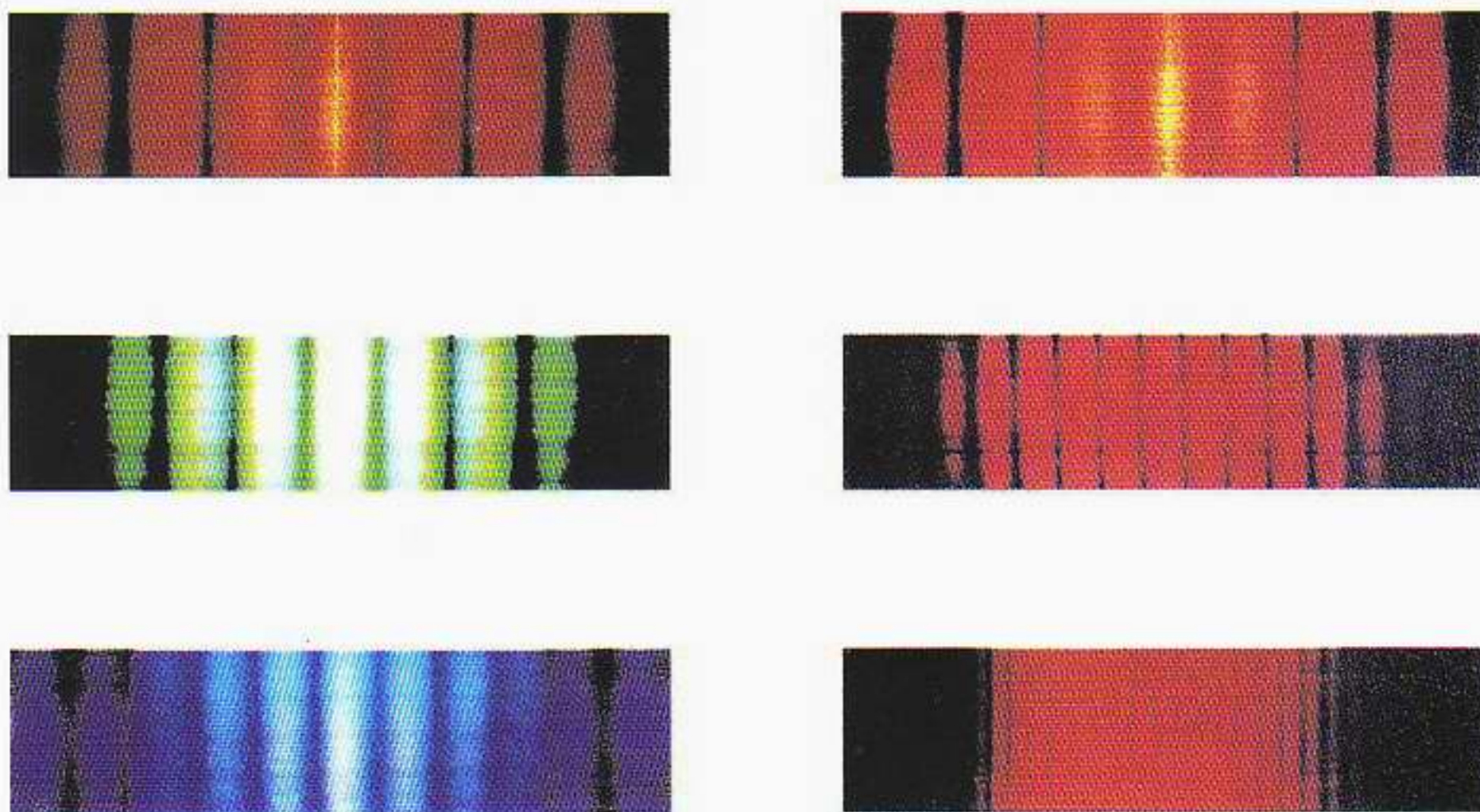
Ο J.J. Thomson (1856-1940) μέτρησε το λόγο του φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου, καθιερώνοντας το έτσι ως ένα νέο στοιχειώδες σωματίδιο. Το 1906 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ.

κριμένες και επιτυχείς προβλέψεις για συστήματα 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.

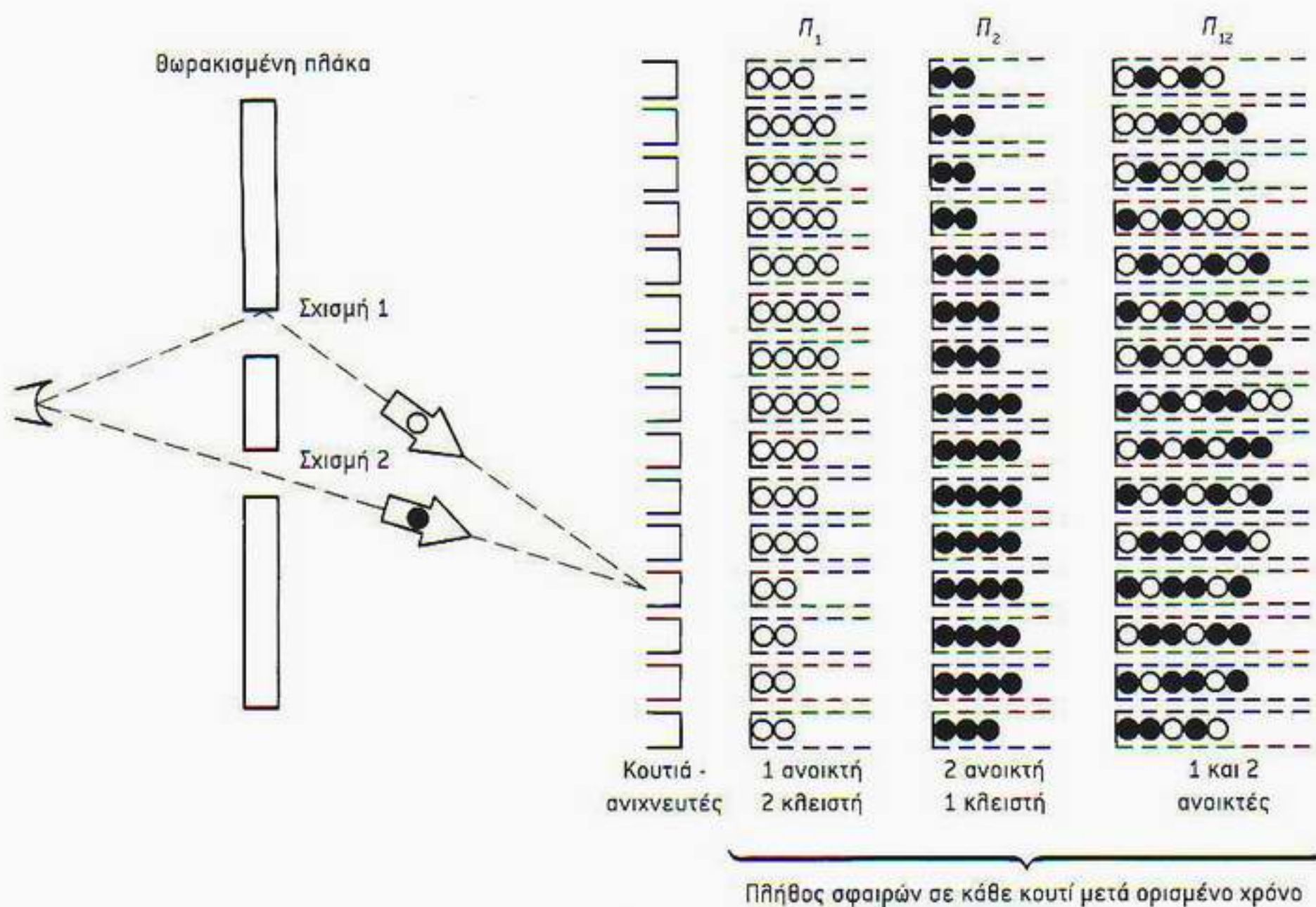
Πριν εξηγήσουμε όμως πώς η κβαντική μηχανική κατάφερε όλα τού-



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 σβήνει από κόκκινο σε μπλε, οι κροσσοί συμβολής πλησιάζουν όλο 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 ηλεκτρονίων. 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 διαμέσου 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.

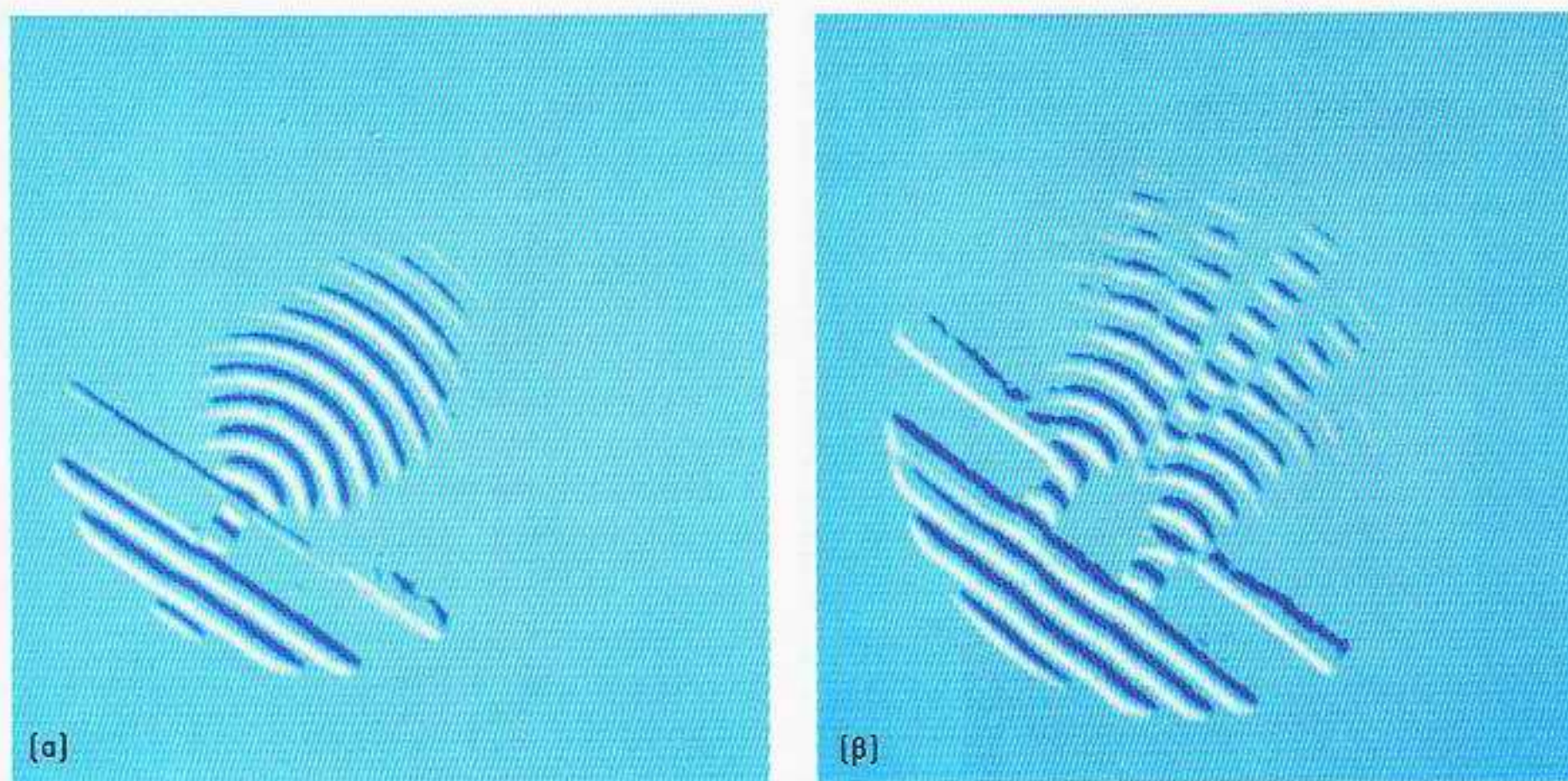
Με υδάτινα κύματα

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



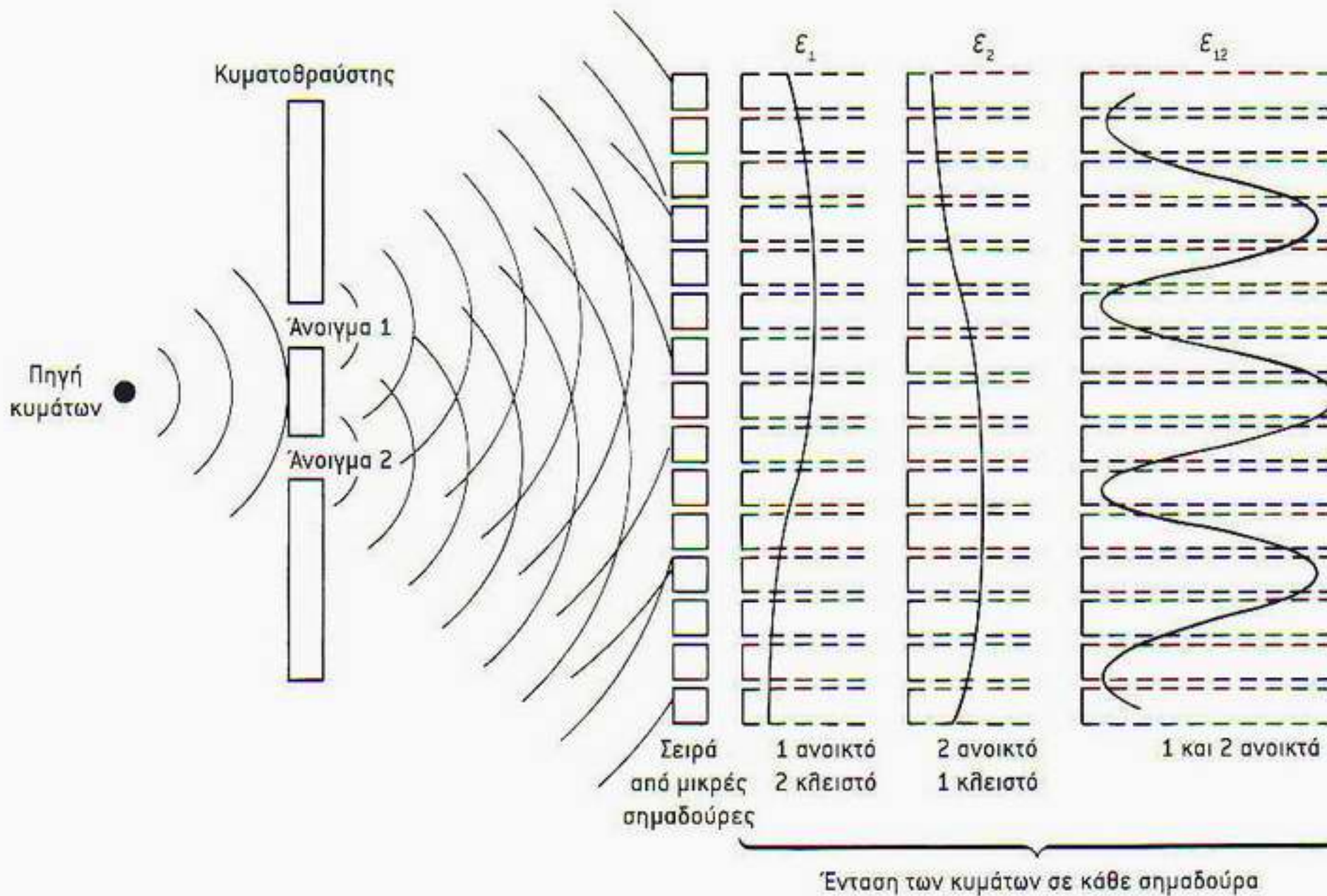
Εικόνα 1.8 Διάδοση υδάτινων κυμάτων επιφανείας. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το κύμα που διέρχεται από μία μόνο σχισμή και διαδίδεται, ενώ στη δεξιά βλέπουμε το φαινόμενο συμβολής των κυμάτων που προκύπτουν από δύο σχισμές.

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_{12} . 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 ανάλογη 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.

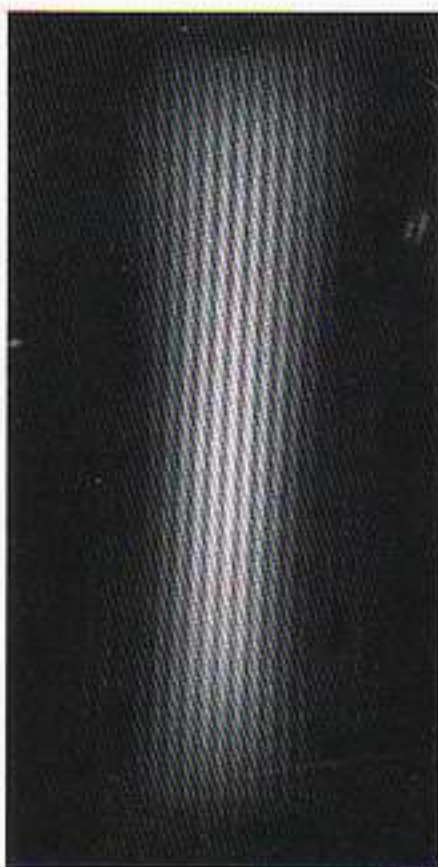
Με ηλεκτρόνια

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.

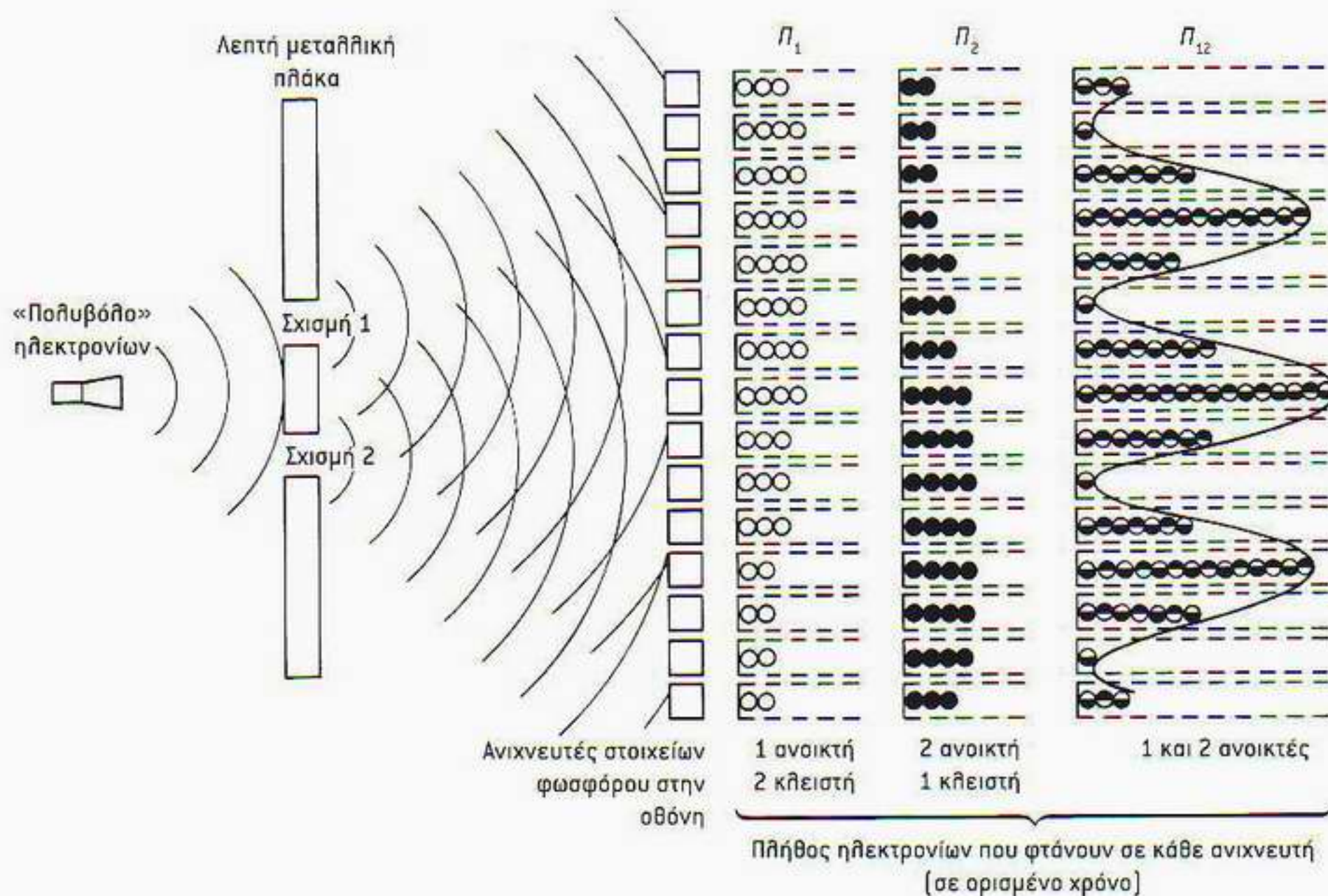
Διάφραγμα: Λεπτή μεταλλική πλάκα με δύο πολύ στενές σχισμές.

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 εκπαρή 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 ανασπαριστώντας 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, οπότε 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. Μοιθανότι 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 πείραμα-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 (πλάτων) 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:

$$\Pi_{12} = (a_1 + a_2)^2$$

$$\Pi_1 = a_1^2$$

$$\Pi_2 = a_2^2$$

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. Υπό 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

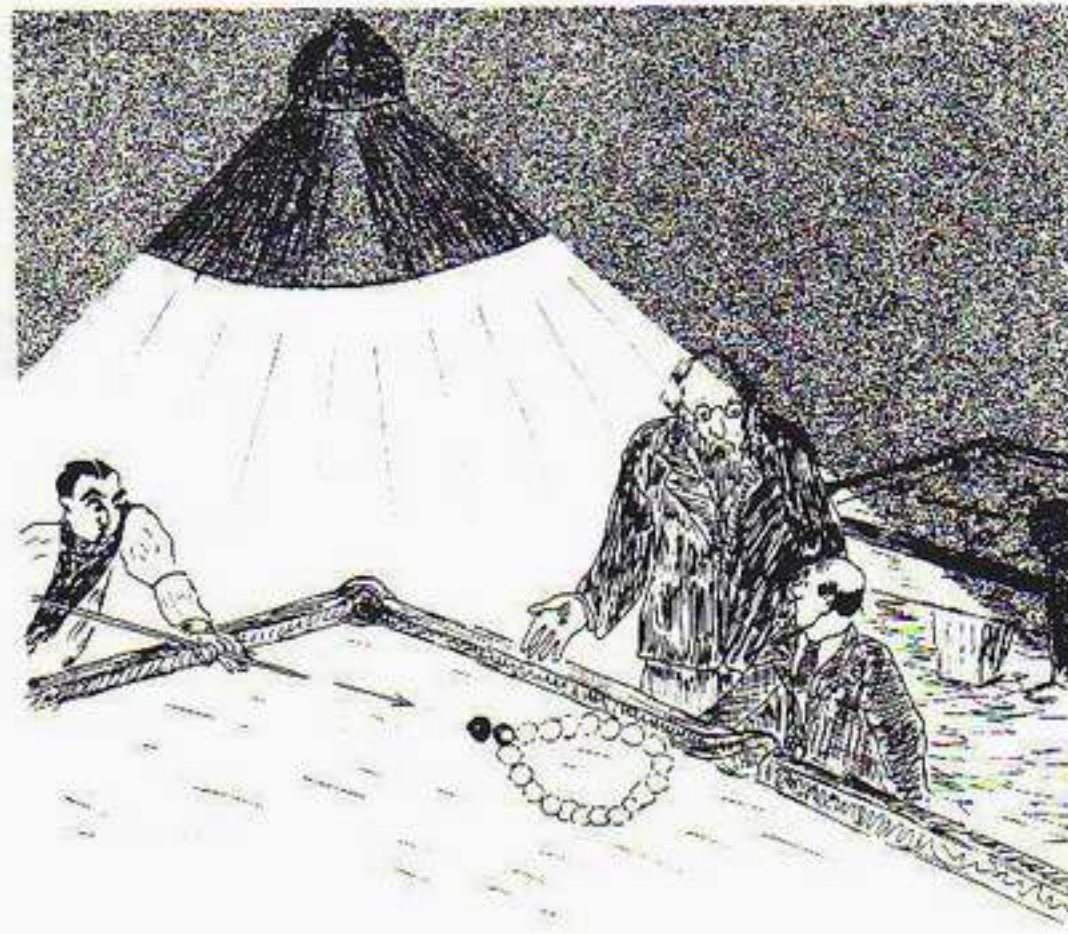
Ένας φιλόσοφος είπε κάποτε: «Είναι αναγκαίο,
για την ίδια την ύπαρξη της επιστήμης, οι ίδιες
συνθήκες να δίνουν πάντοτε τα ίδια αποτελέσματα.»
Λοιπόν, δεν τα δίνουν!
Richard Feynman

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.

Ως 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 εμποτισμένη 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 Ρεζάντα του πρωτοτύπου λέει: «Η λευκή μπίλια πήγε προς όλες τις κατευθύνσεις!» Σε έναν τέτοιο κόσμο, η κβαντική αβεβαιότητα θα ήταν μια συνηθισμένη εμπειρία.



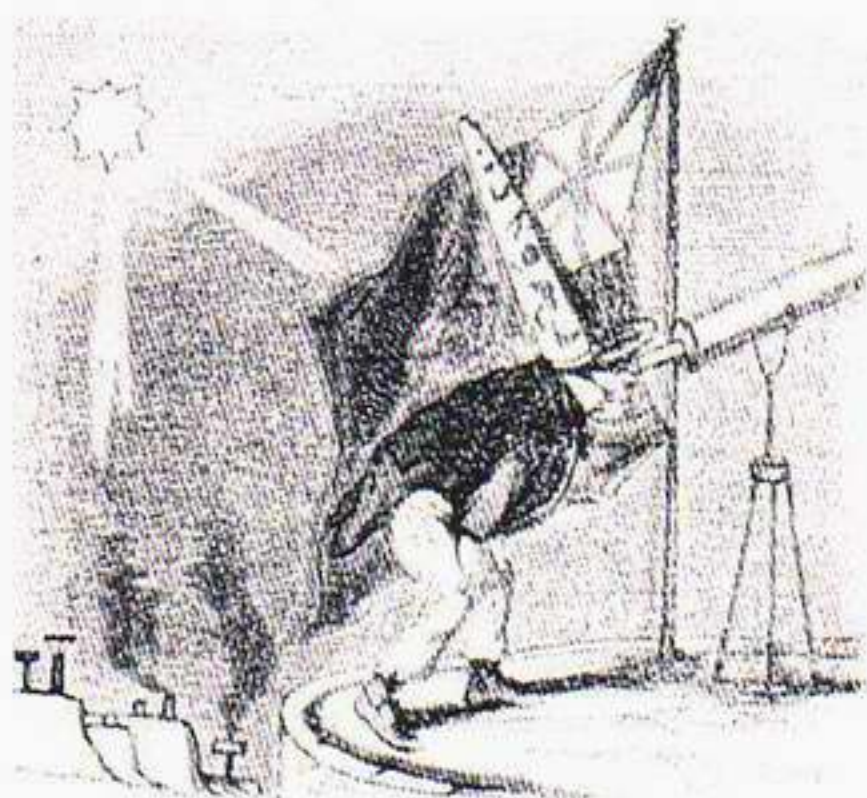
ρισμένο αριθμό σωματιδίων, το μόνο που θα έπρεπε να κάνει για να προβλέψει τις κινήσεις κάθε σωματιδίου κάθε χρονική στιγμή στο μέλλον ήταν να μετρήσει τις τωρινές θέσεις και τις ταχύτητες όλων των σωματιδίων. Μετρώντας τις θέσεις και τις ταχύτητες με «αρκετή ακρίβεια», οι προβλέψεις θα μπορούσαν να 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.

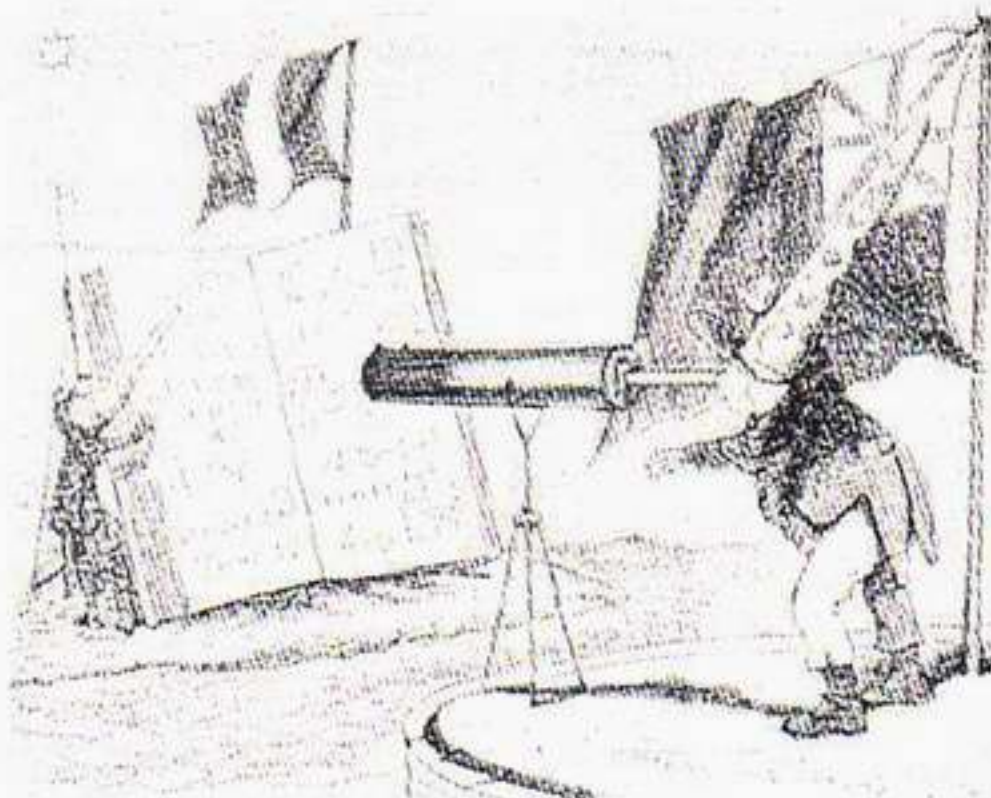
Για να φωτίσουμε αυτό το σημείο, ας ξαναγυρίσουμε άλλη μία φορά στο πείραμα της διπλής σχισμής. Θυμηθείτε ότι μιλούσαμε με βάση την πιθανότητα που έχει το ηλεκτρόνιο να χτυπήσει το πέτασμα. Αυτό το κάναμε επειδή δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πού θα χτυπήσει κάθε ξεχωριστό ηλεκτρόνιο. Μπορούμε να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

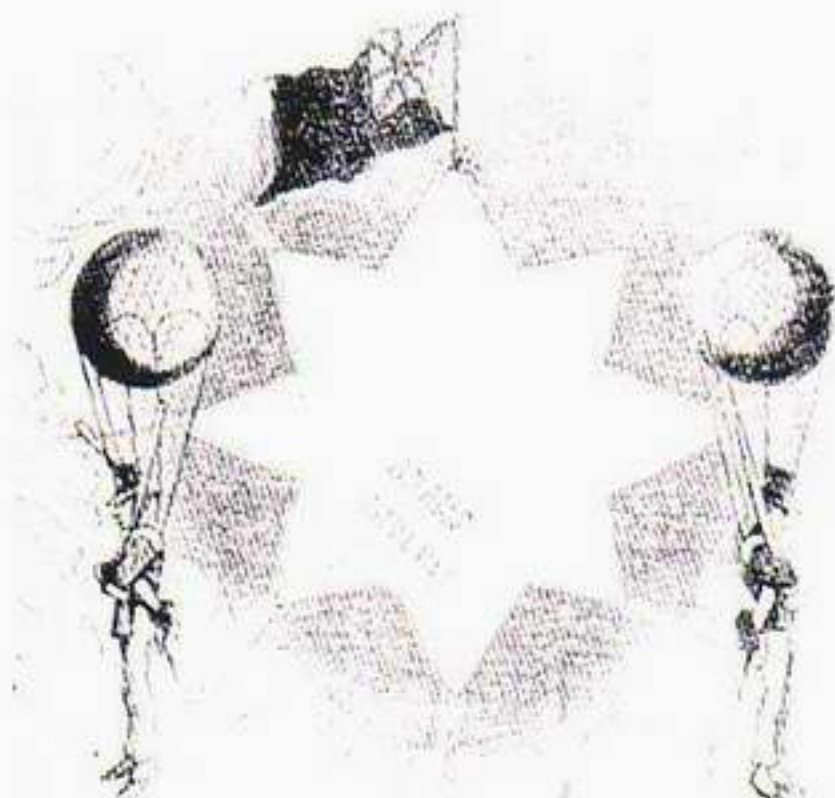
Αν θέλαμε, όμως, μπορούσαμε να μαγνητοσκοπήσουμε την εκτόξευση της κάθε σφαίρας και μετά να παρακολουθήσουμε την τροχιά της προς το



(M. Adams's telescope, looking at the Sun, from the report of M. Adams)



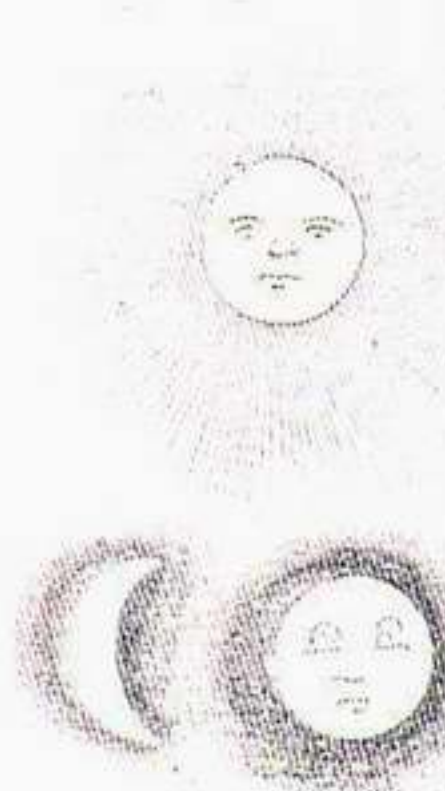
(M. Adams's telescope, looking at the Sun, from the report of M. Adams)



(M. Adams's telescope, looking at the Sun, from the report of M. Adams)



(M. Adams's telescope, looking at the Sun, from the report of M. Adams)

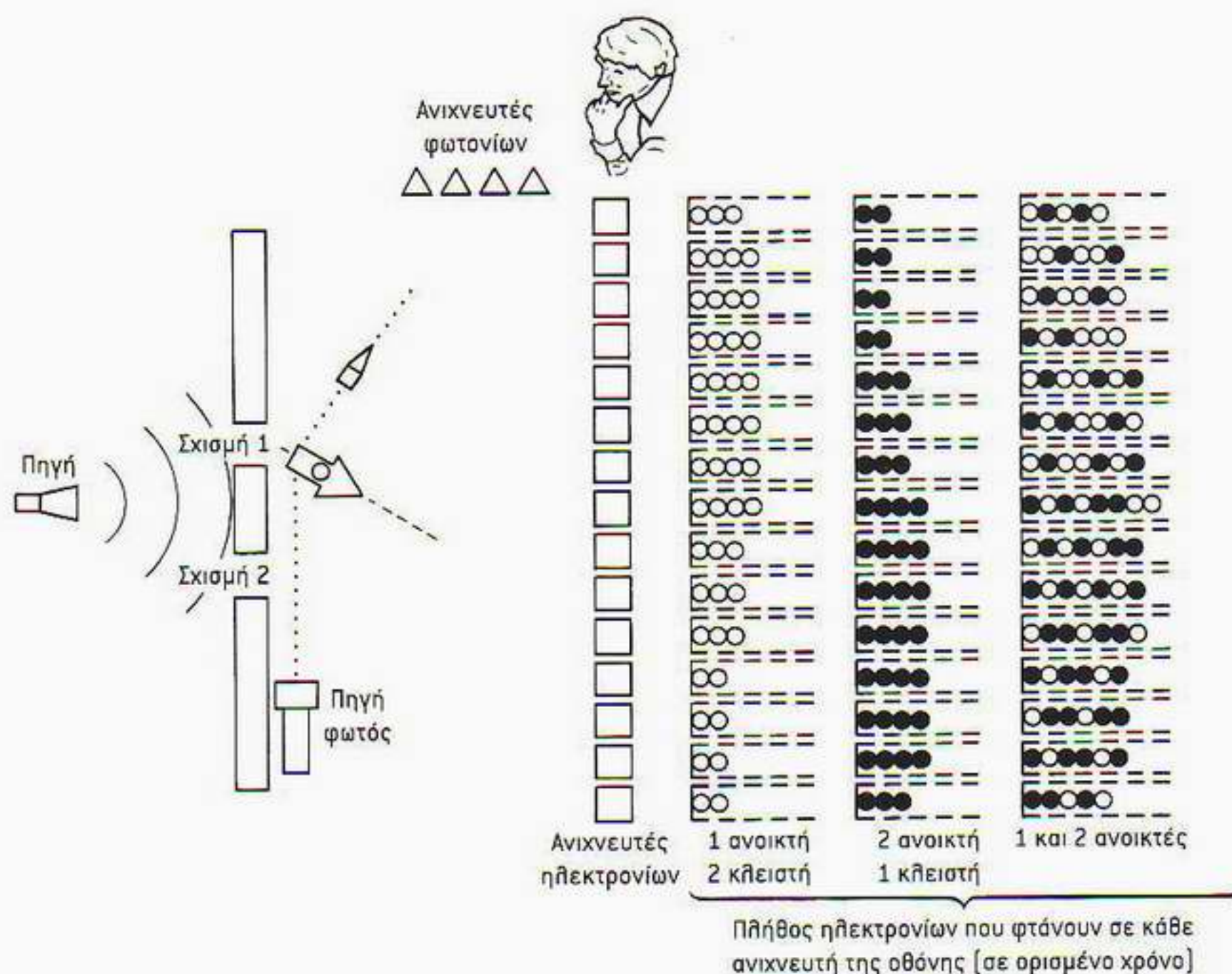


(M. Adams's telescope, looking at the Sun, from the report of M. Adams)

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 κίνησή 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 του Planck επί συχνότητα.

Η σταθερά h της αναλογίας ονομάζεται σταθερά του 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 εγκαίνιασε 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 αντικείμενου 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.

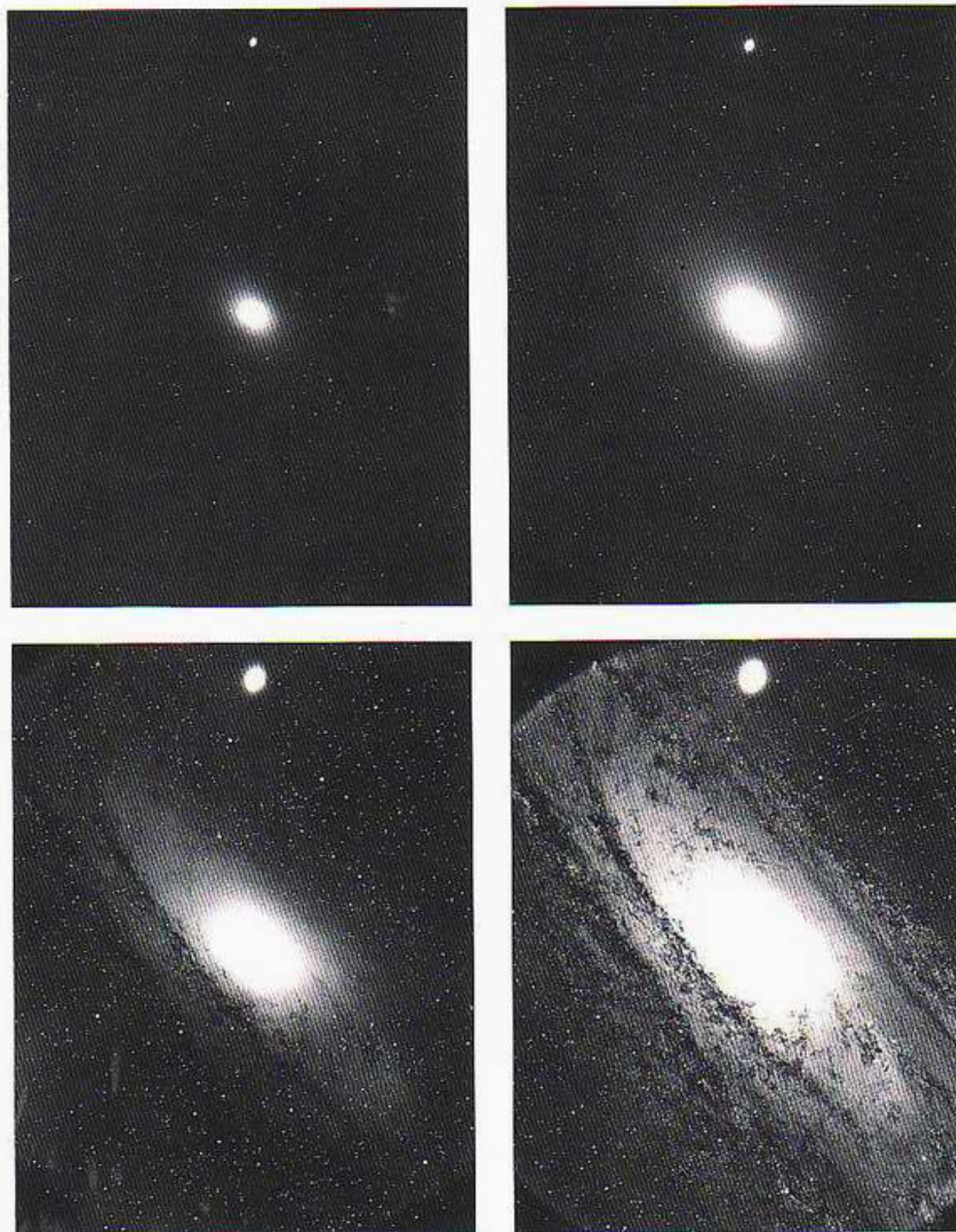
Αβεβαιότητα και φωτογραφία

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.

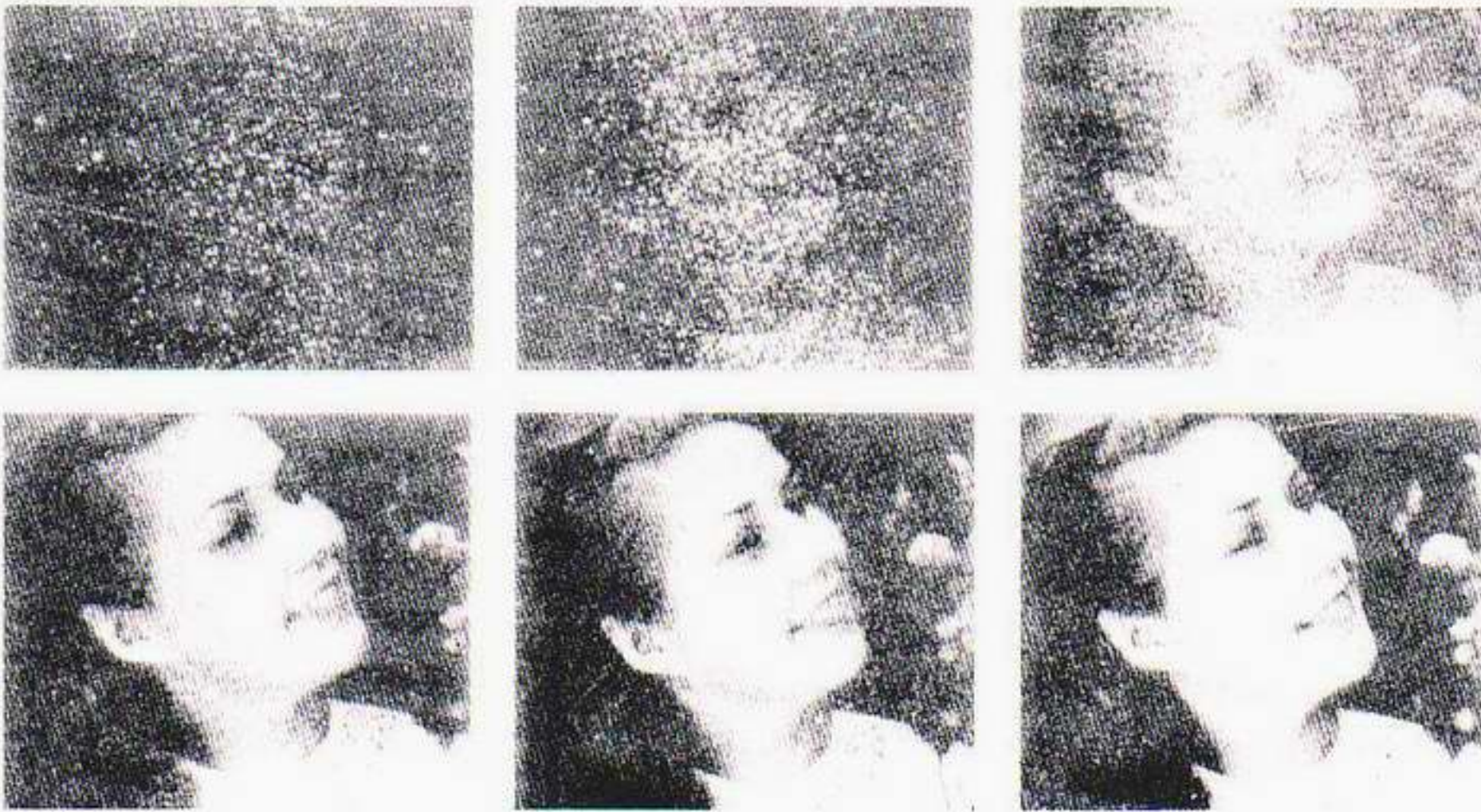
Όπως στο μάτι, τα φωτόνια μπορούν να προκαλέσουν χημικές αλλοιώσεις και στην επιστρωμένη με ειδική φωτοπαθή ουσία επιφάνεια του φιλμ. Ξέρετε ποιο είναι το ενεργό χημικό στοιχείο της επίστρωσης αν μπορείτε να απαντήσετε στην εξής ερώτηση γενικών γνώσεων: Ποια πολυεθνική εταιρεία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής 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 ηλεκτρόνιά 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 διοσεκατομμύρια ιόντα αργύρου. Κι όμως, όταν το φιλμ εισαχθεί στο υγρό εμφάνισης, η μικρή αυτή ομάδα των ουδέτερων ατόμων αργύρου παρασύρει 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.

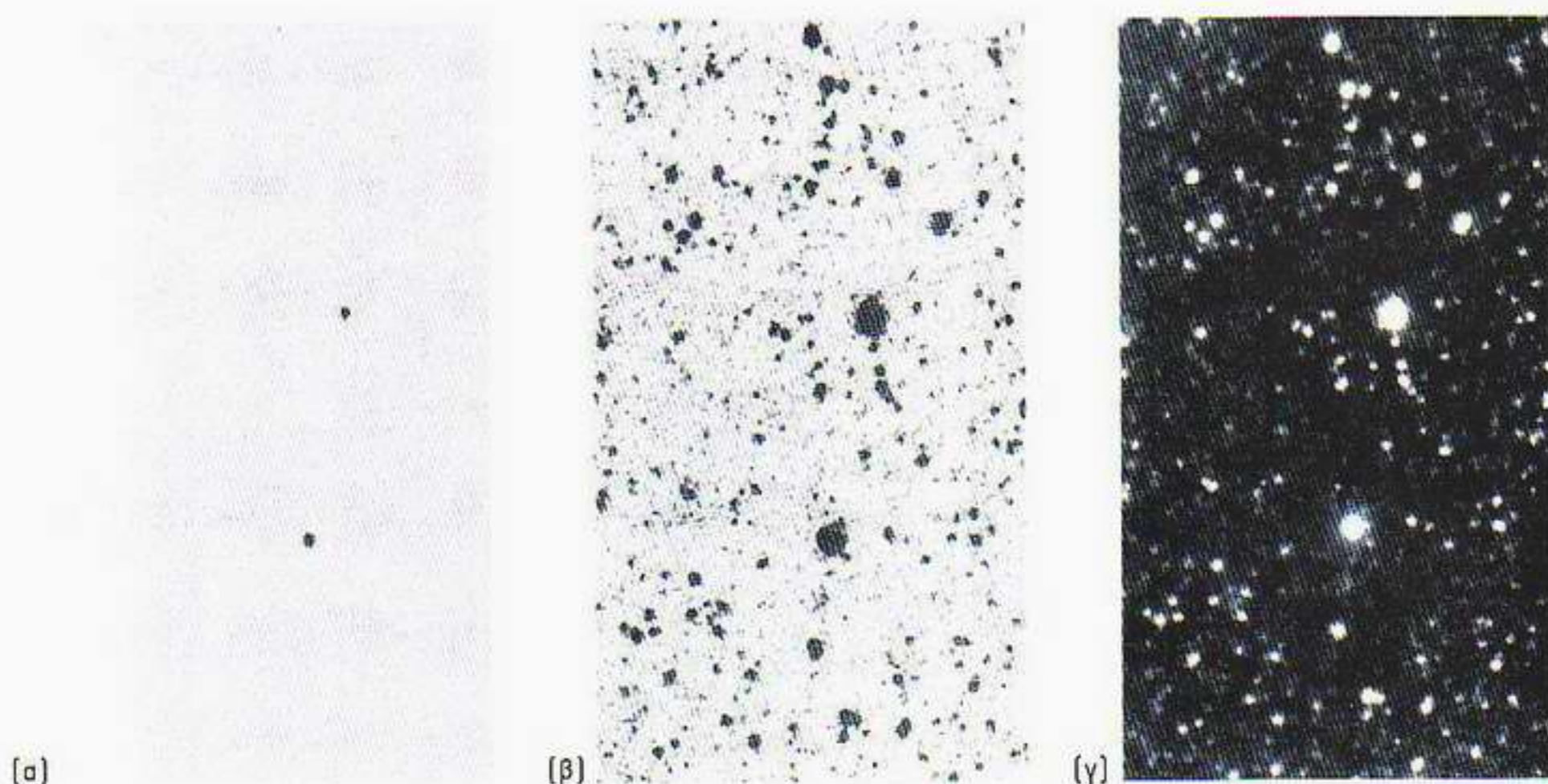
φωτογραφία μοιάζει με μια λίγο-πολύ τυχαία σειρά κουκκίδων. Καθώς αυξάνουμε το χρόνο έκθεσης, ο αριθμός των φωτονίων που εισέρχονται στη μηχανή αυξάνεται. Για τη φωτογραφία πάνω δεξιά εισέρχονται στη μηχανή 10.000 φωτόνια, οπότε ήδη αρχίζει να εμφανίζεται ένα ασαφές, όχι καθαρό, είδωλο. Η βελτίωση συνεχίζεται 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 τελι-



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 επίστροψη 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-



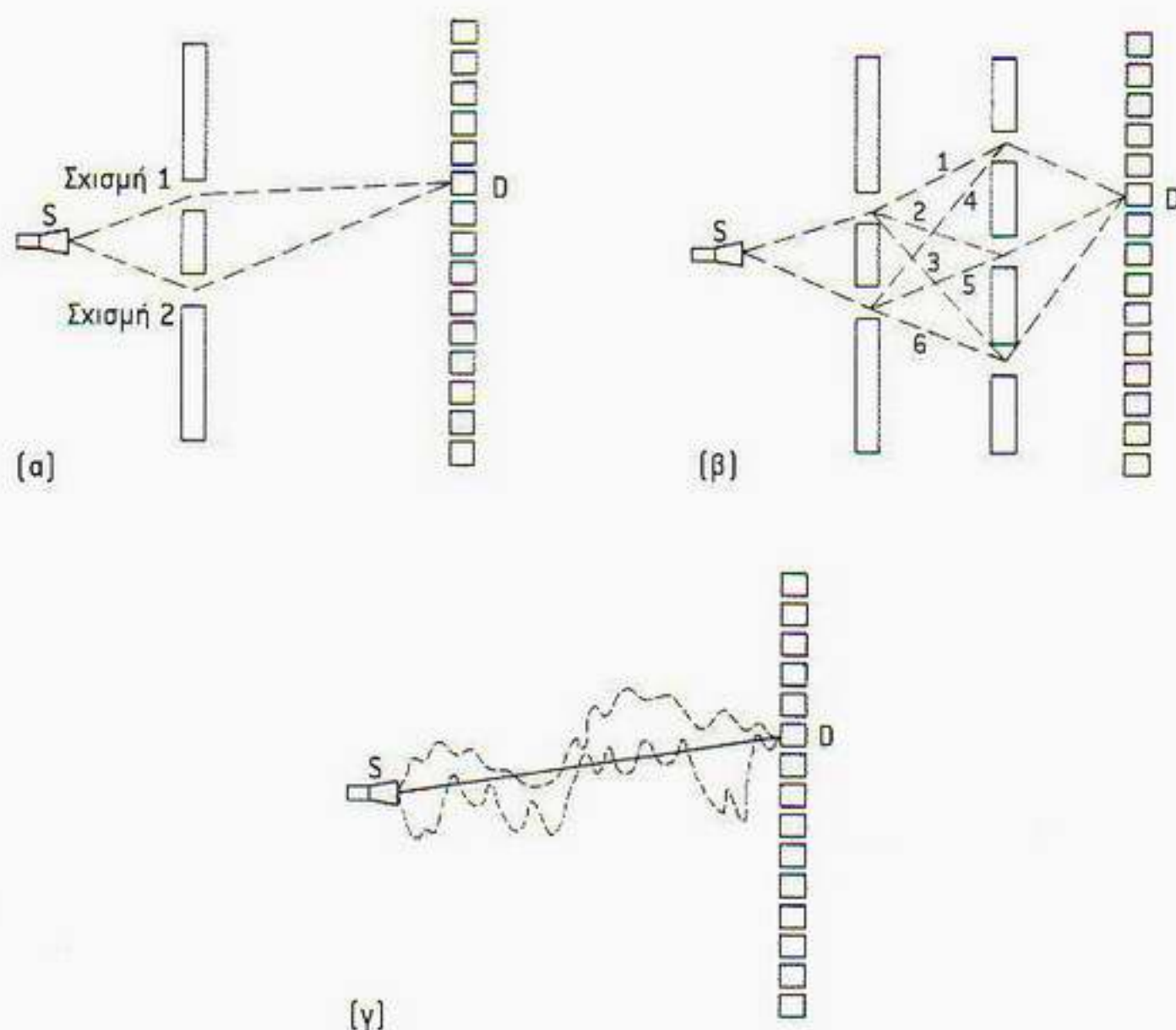
Εικόνα 2.7 Σύγκριση μιας φωτογραφίας και μιας εικόνας από CCD της ίδιας περιοχής του ουρανού και οι δύο έχουν ληφθεί από το ίδιο τηλεσκόπιο 4 μέτρων. (α) Εκτύπωση αρνητικού στην οποία τα άστρα φαίνονται μαύρα ενώ ο ουρανός άσπρος. (β) Εικόνα CCD στην οποία διακρίνονται ποιά περισσότερα άστρα και γαλαξίες. (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. Ός 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 πολλά διαφράγματα και ανοίγοντας πιο πολλές 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:

$$a = a_1 + a_2.$$

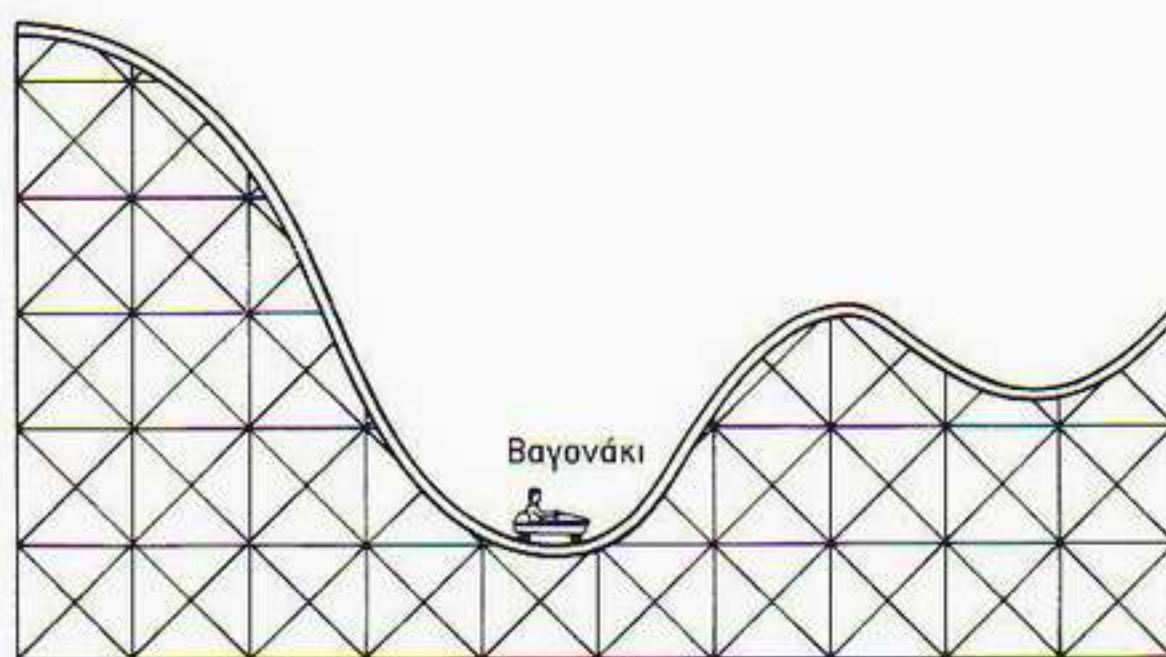
Τότε, η πιθανότητα άφιξης των ηλεκτρονίων σε κάθε σημείο προκύπτει αν υψώσουμε αυτό το πλάτος στο τετράγωνο:

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

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 μεταθλητικής 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.

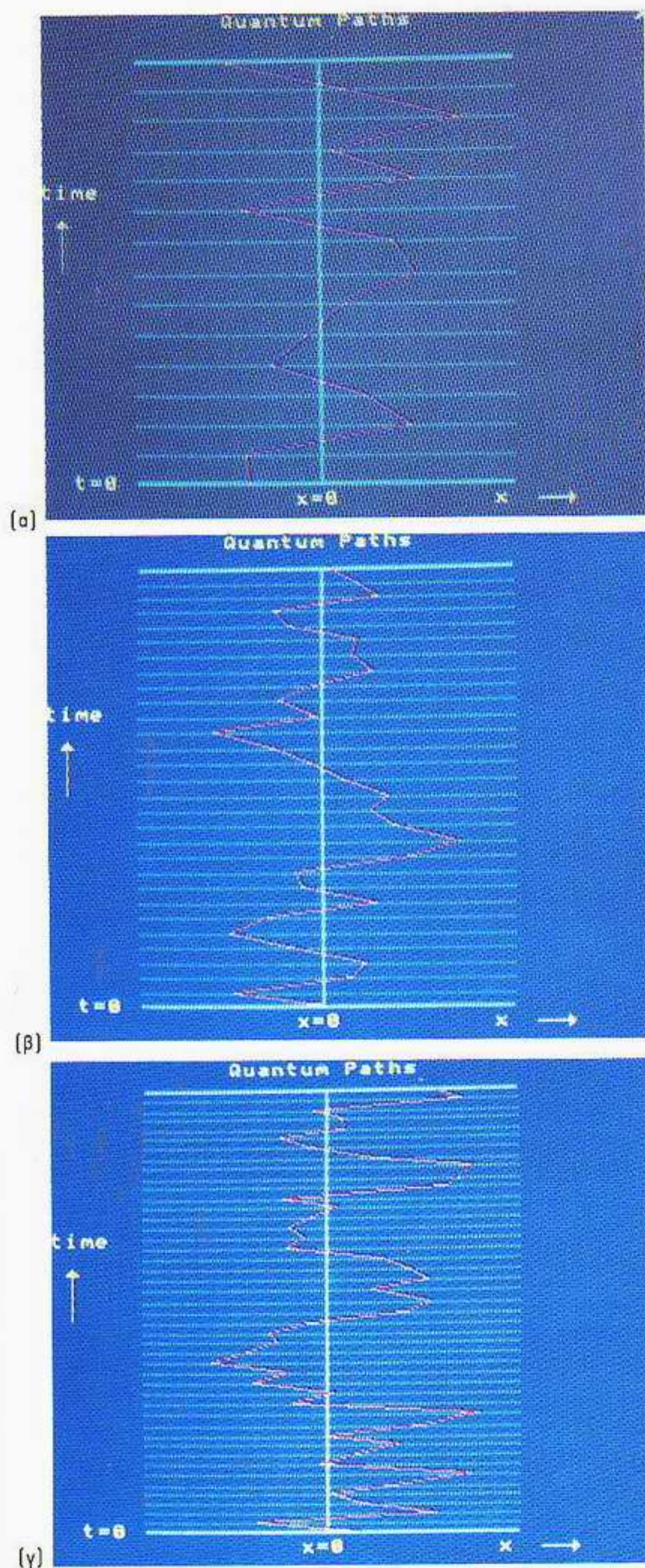
Μπορούμε επίσης να δούμε ότι υπάρχει μια σχέση ανάμεσα στην άθροιση όλων των κβαντικών διαδρομών και στην κβαντική αρχή της αβεβαιότητας. Ας εξετάσουμε πρώτα μια περίπτωση κλασικής κίνησης. Στην Εικόνα 2.9 απεικονίζεται ένα τμήμα της τροχιάς που ακολουθεί το γνωστό «βαγονάκι ιλίγγου» του λούνα-παρκ. 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 βαγόνι 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 βρίσκεται 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 προιωντές 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 δισδιάστατο 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.

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

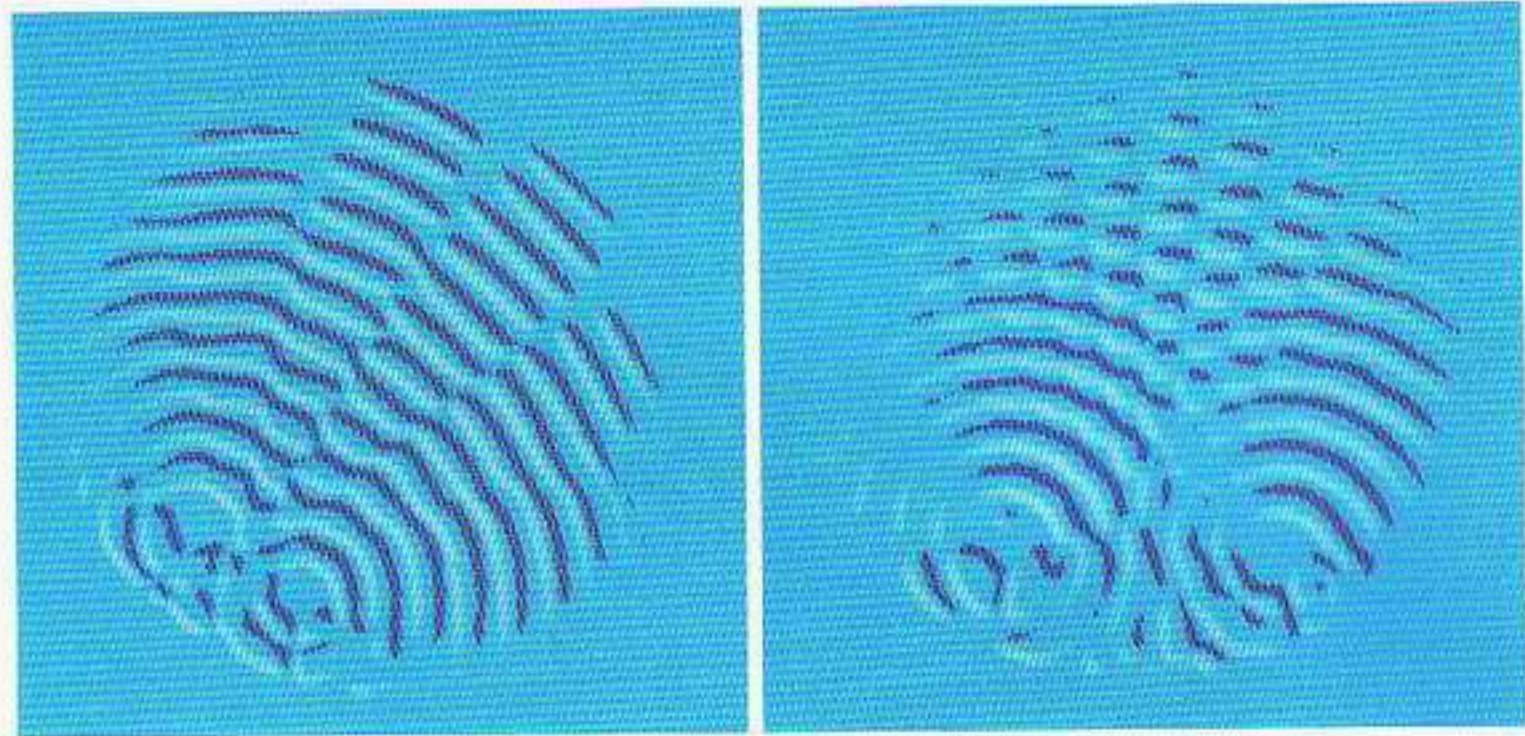
Τα υλικά κύματα του de Broglie

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, συνοψισε 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.



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.

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 Αϊνστάιν ζητώντας τη γνώμη του. Ο Αϊνστάιν 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

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

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



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.»

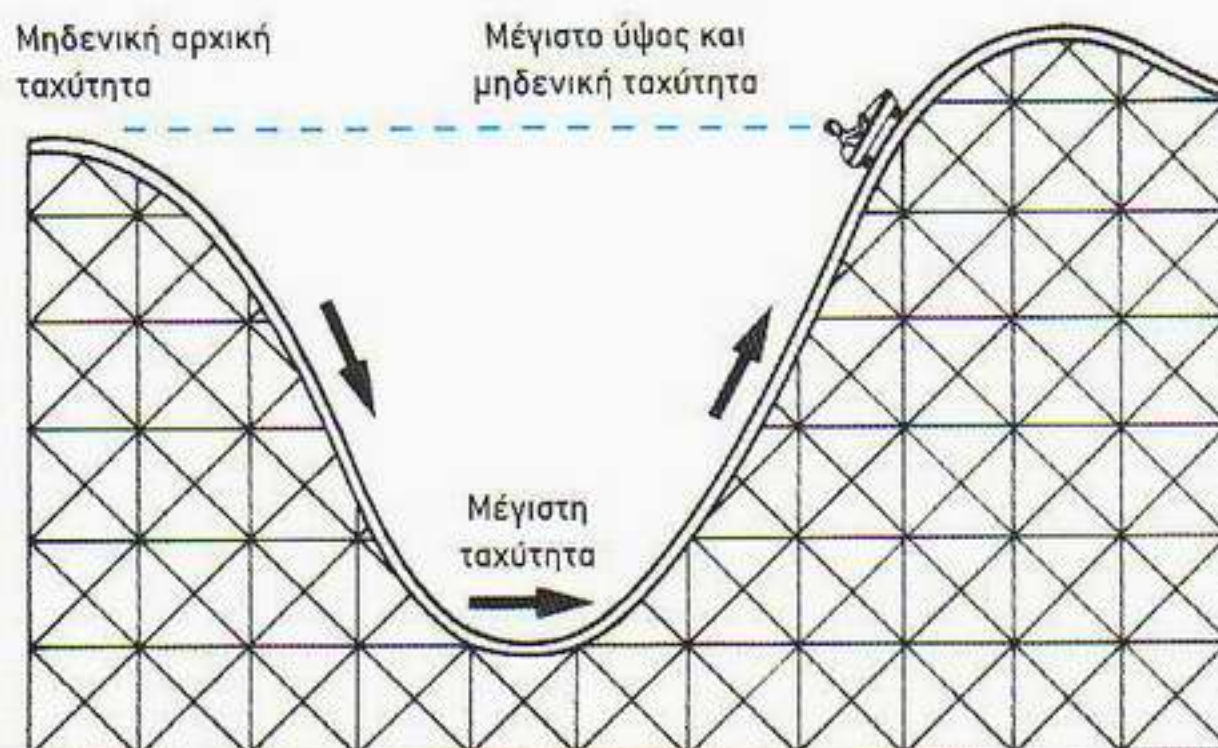
θα δείχνει την κυματική συμβολή σφαιρών πολυβόλου ή και οποιουδήποτε άλλου καθημερινού αντικειμένου. Αν από την άλλη μπορούσαμε να αυξήσουμε την τιμή της σταθεράς του Planck, τα πράγματα θα φαίνονταν πολύ διαφορετικά, όπως στους εφιάλτες του κυρίου Τόμπκινς.

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. Ύστερα θα αρχίσει να ανεβαίνει στην άλλη πλευρά, οπότε σταδιακά θα επιβραδύνεται, ώσπου να σταματήσει. Η κίνηση του βαγονιού μάς 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 το 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-

σαμε 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:

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

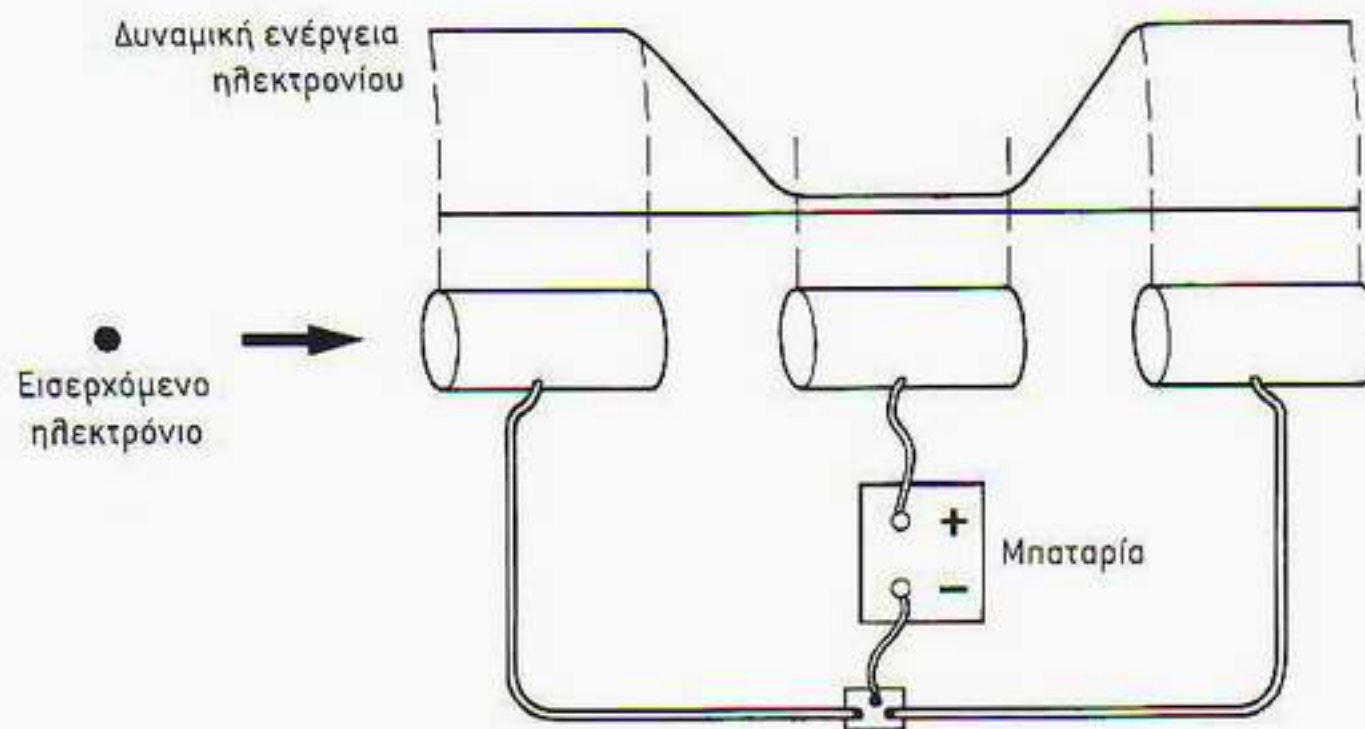
κινητική ενέργεια ίσον ορμή στο τετράγωνο διά το διπλάσιο της μάζας.

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 επισημάναμε 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 τού 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.

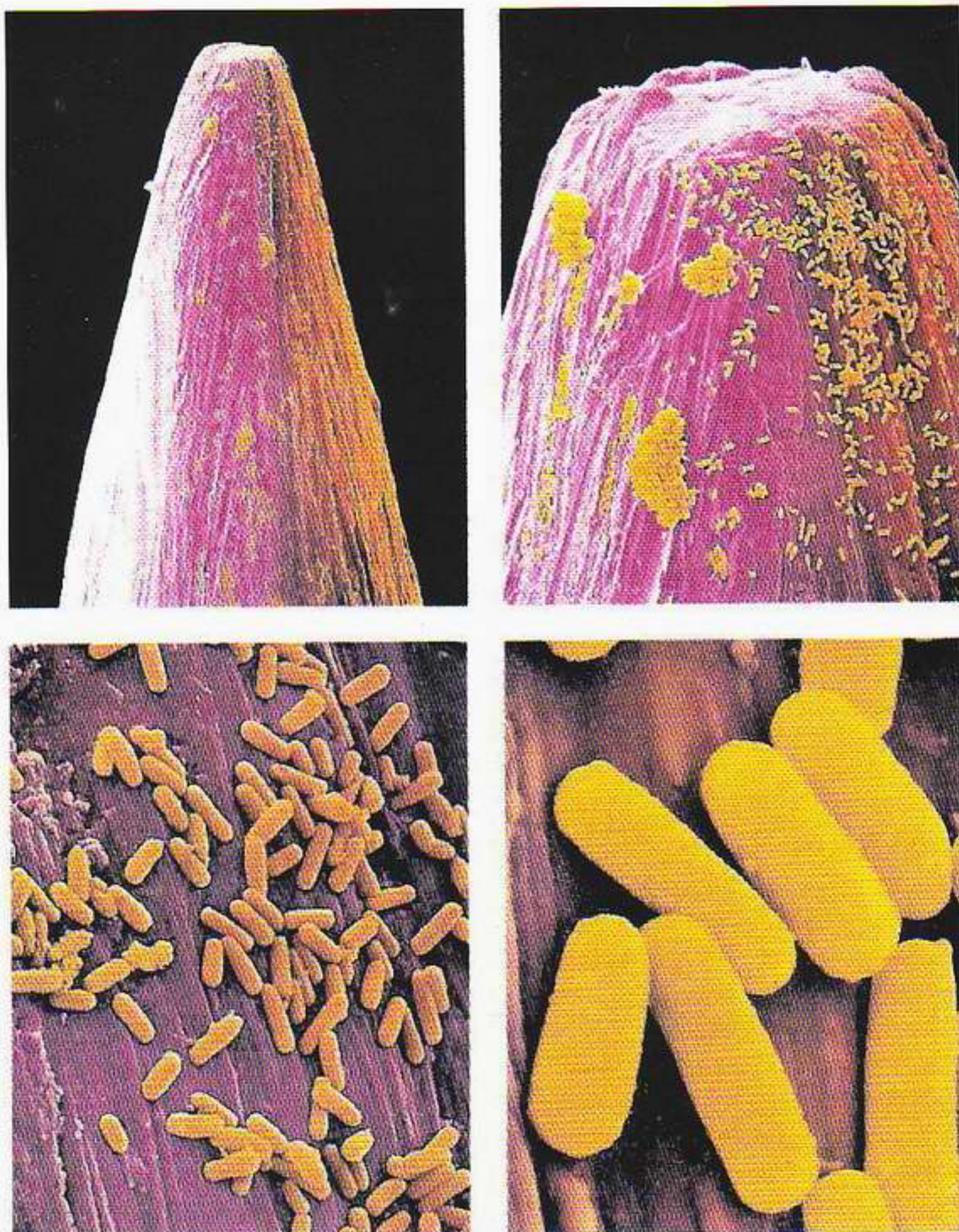
Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια μας προσφέρουν ένα είδωλο του υπό εξέταση αντικειμένου, οπότε τέτοιες «φωτογραφίες» μπορούμε να τις ερμηνεύουμε σχετικά εύκολα. Δέσμες ηλεκτρονίων, όμως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να εξετάσουμε εις βάθος την εσωτερική δομή της ύλης



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 τεθείωσε 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.

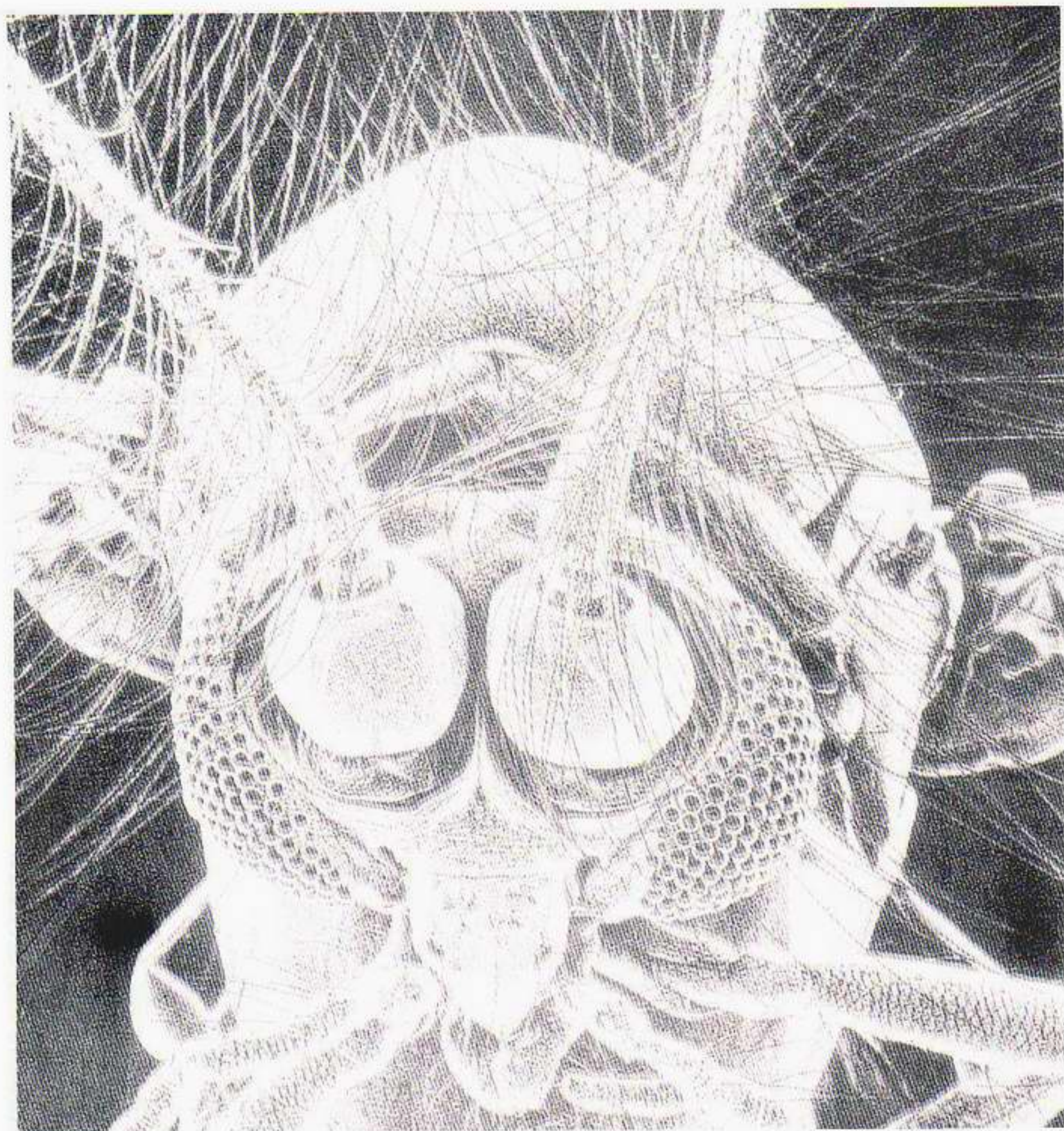
χωρίς να πάρουμε ένα απευθείας είδωλο του αντικειμένου. Σε κάποιους επιταχυντές σωματιδίων, τα ηλεκτρόνια μπορούν να επιταχύνονται σε ταχύτητες λίγο μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός. Τέτοια ηλεκτρόνια με πολύ μεγάλη ορμή μπορούν να εξερευνήσουν πολύ μικρές κλίμακες αποστάσεων. Παρατηρώντας την εικόνα 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.

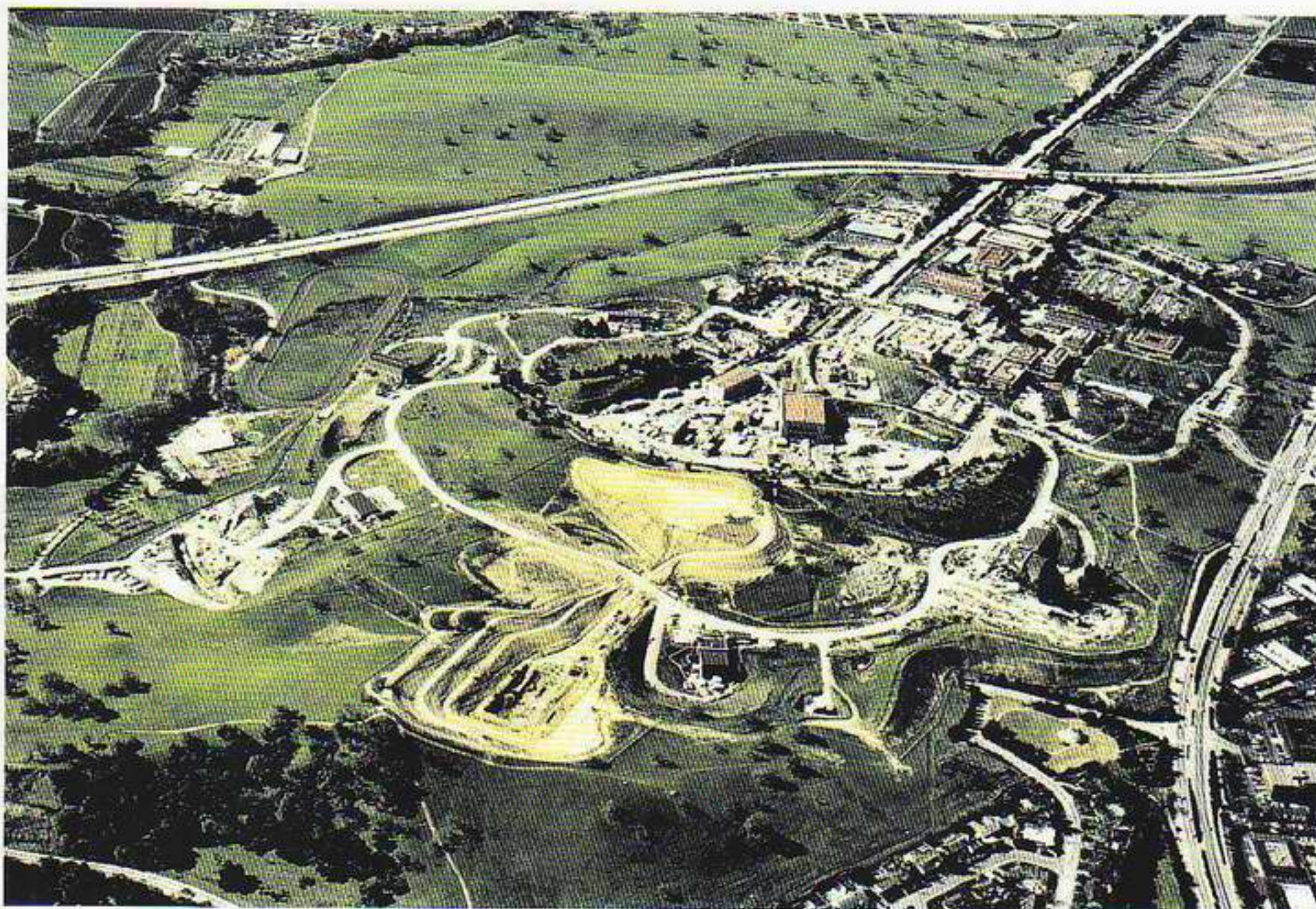
κά μέσα στο πρωτόνιο. Επιπλέον, αντί αυτά τα συστατικά να φέρουν ηλεκτρικό φορτίο όσο τα ηλεκτρόνια ή τα πρωτόνια, βρέθηκαν να έχουν φορτίο ίσο με το $1/3$ ή τα $2/3$ του φορτίου του ηλεκτρονίου! Τούτα τα πολύ μικρά συστατικά σωματίδια των πρωτονίων με τα περίεργα φορτία τους ονομάζονται *κουάρκ*. Αρχικά 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 «άσσους», 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 του 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 «άσσους», που δείχνει ότι εμείς οι φυσικοί δεν είμαστε τόσο απλλαγμένοι 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 ακνίνας, σε μεγέθυνση περίπου 500 φορές. Μεγάλα αμήνη από αυτές βλέπουμε το καθοκαίρι, αλλά ευτυχώς το πραγματικό τους μέγεθος είναι μόνο 2 χιλιοστά του μέτρου.

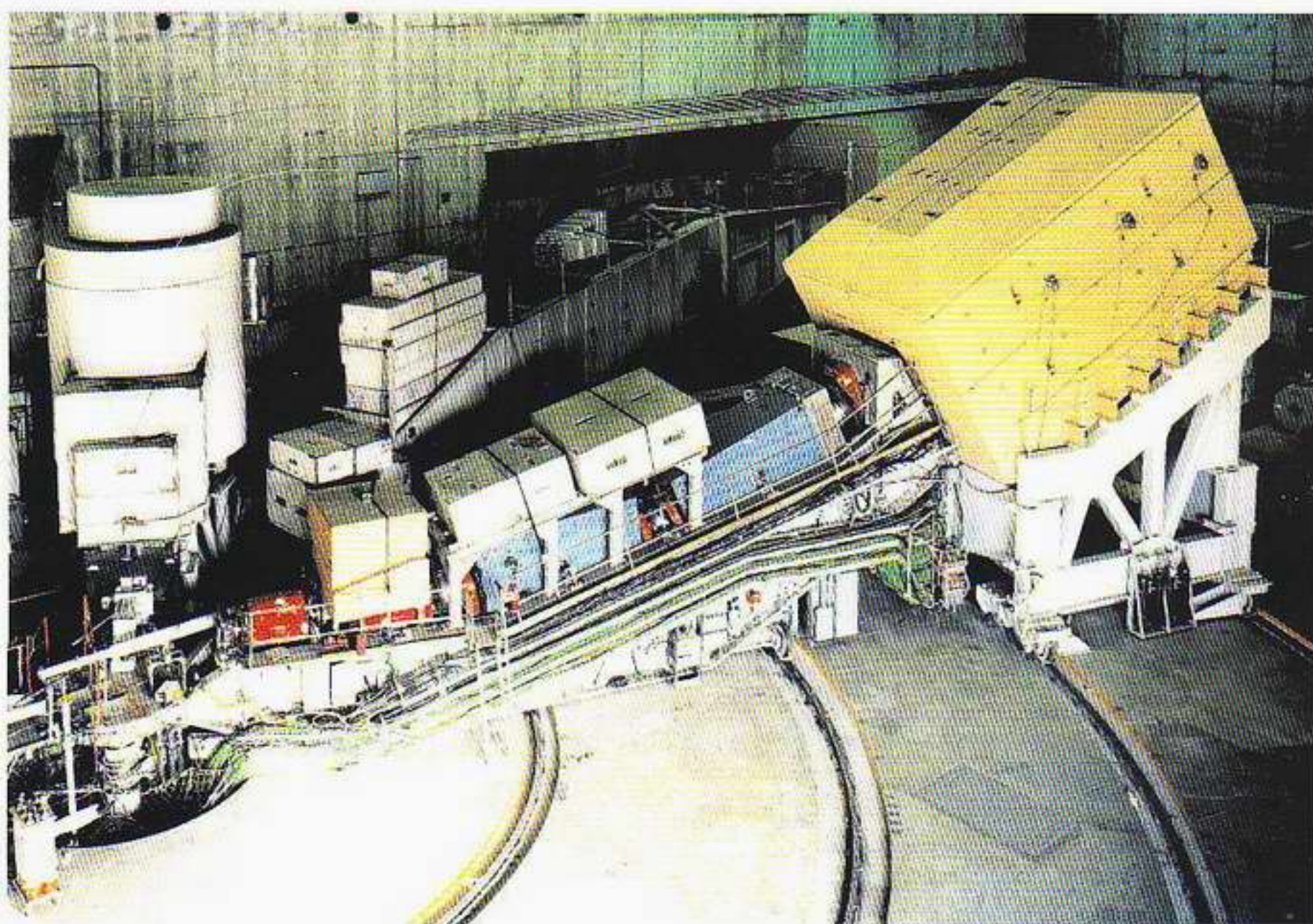
δεχόταν την ύπαρξη νέων θεμελιωδών σωματιδίων! Ο Gell-Mann συνειδητοποίησε πράγματι ότι θα συναντούσε μεγάλη αντίδραση στην ιδέα των κουάρκ, και πήρε την απόφαση να δημοσιεύσει το άρθρο του σε ένα ευρωπαϊκό περιοδικό —η προκατάληψη στην Ευρώπη δεν ήταν τόσο μεγάλη όσο στις ΗΠΑ. Ο Zweig, από την άλλη, 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 διάσημο 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 διάσημα «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 στόχο. 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 ηλίου 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 ηλίου, 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 ηλίου. 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 αναμφοισβήτητα 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.

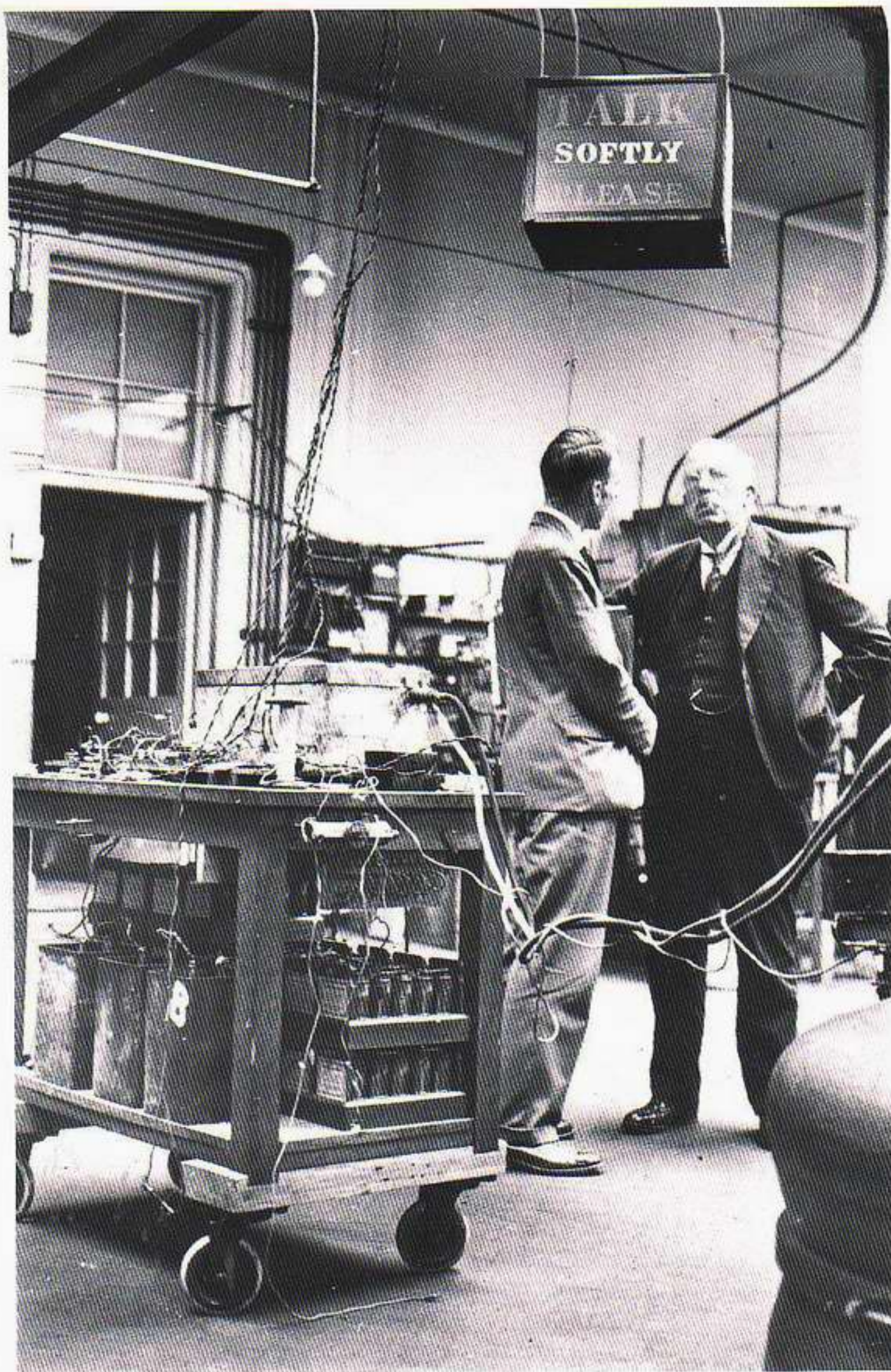
4 Άτομα και πυρήνες

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

Richard Feynman

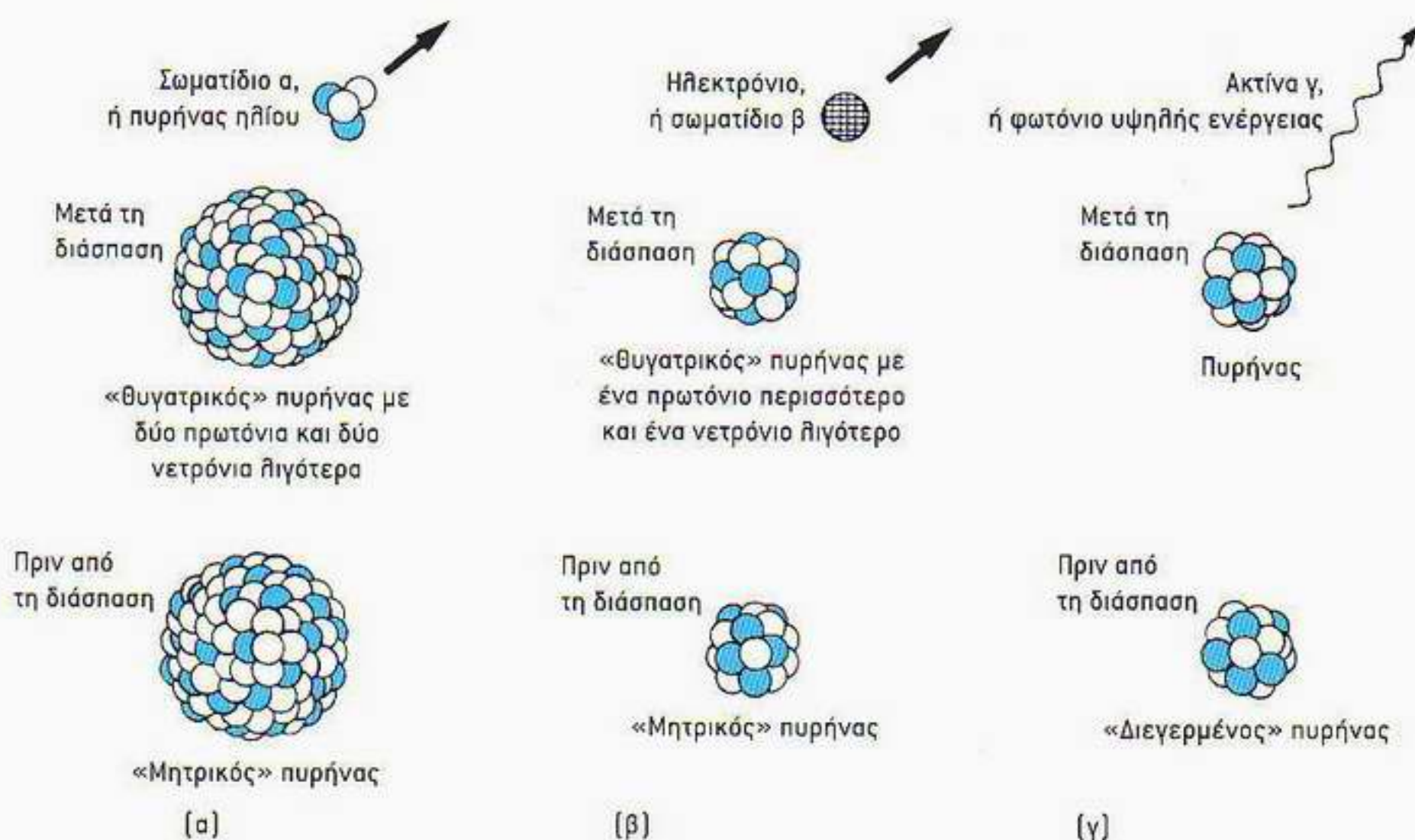
Το άτομο του Rutherford

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



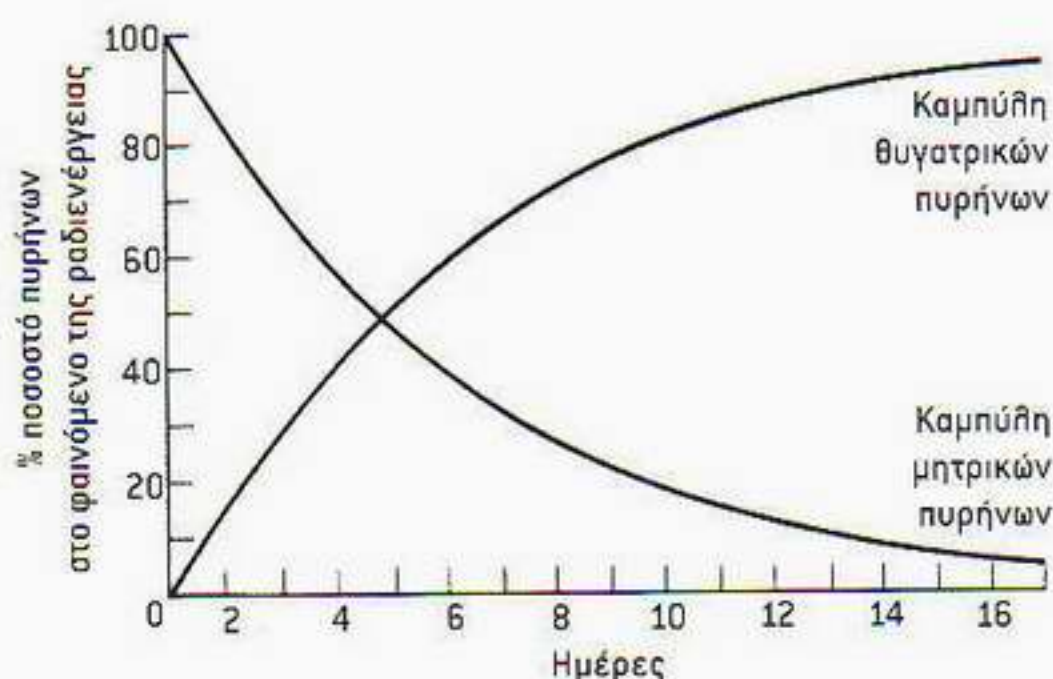
Εικόνα 4.1 Είδη ραδιενέργειας. [α] Οι ακτίνες α είναι πυρήνες ηλίου που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση ενός ασταθούς πυρήνα. Ο τελικός «θυγατρικός» πυρήνας έχει δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια λιγότερα από τον αρχικό «μητρικό». Στο σχήμα αυτό οι γαλάζιοι κύκλοι αναπαριστούν τα πρωτόνια και οι λευκοί τα νετρόνια. [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!

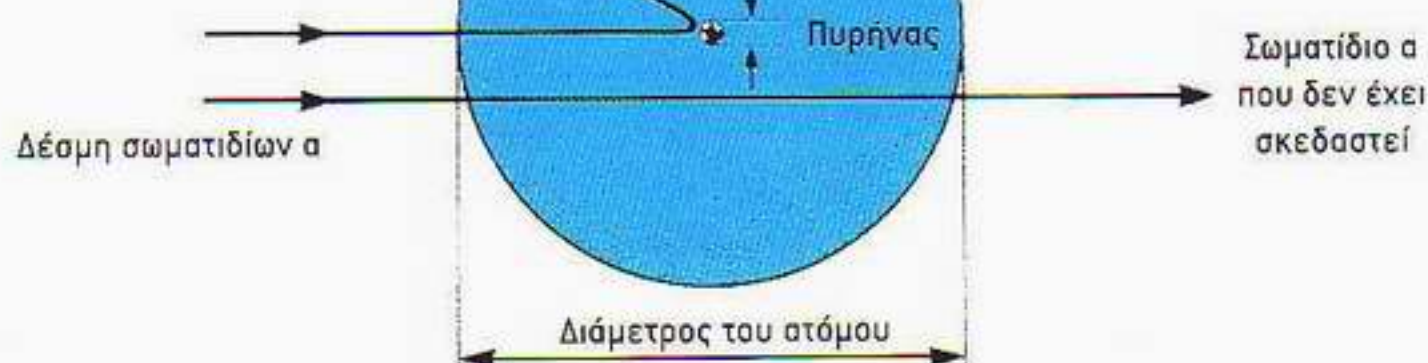
Ο Rutherford προβληματίστηκε με τα αποτελέσματα αυτά για αρκετές εβδομάδες, και τελικά κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα σωματίδια α θα μπορούσαν να σκεδαστούν κατά τόσο μεγάλες γωνίες μόνο αν συγκρούονταν με μια πολύ μικρή και συμπαγή περιοχή ύλης στο εσωτερικό του ατόμου —δηλαδή, τον πυρήνα του.

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-



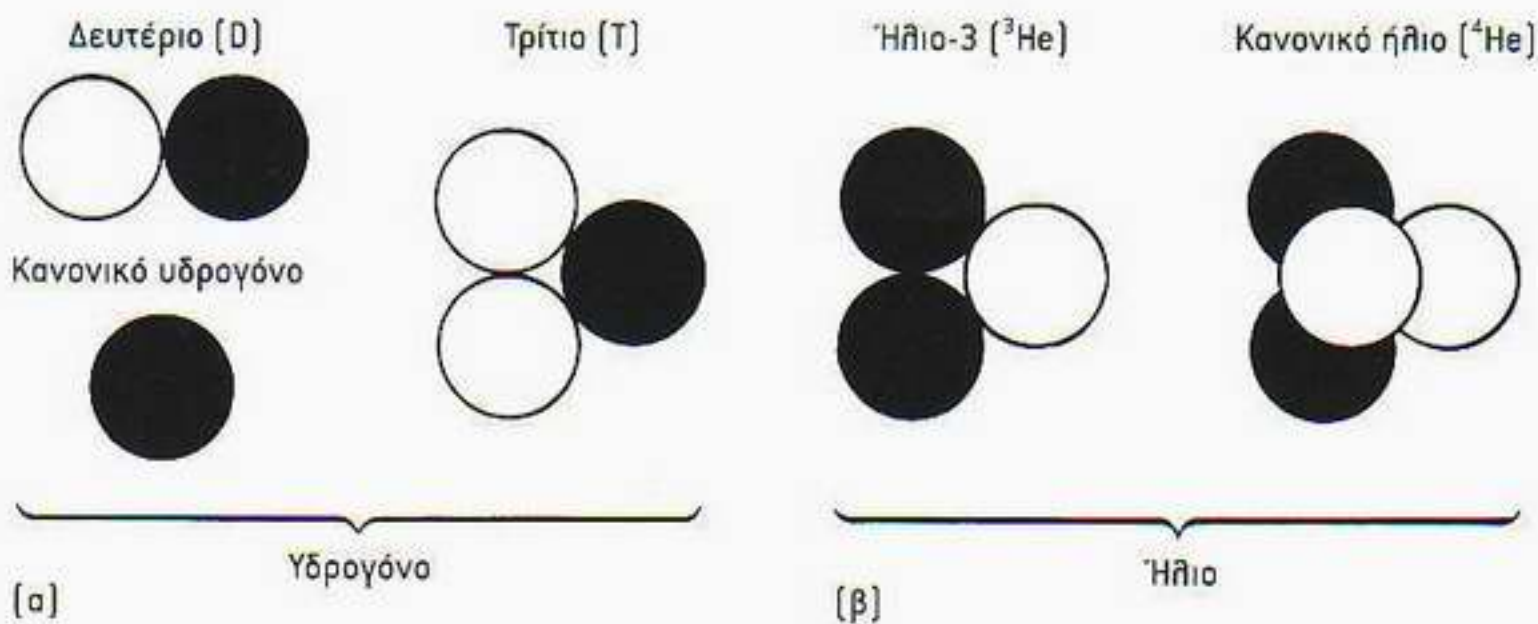
Το οικόσημο του Βόρδου Rutherford. Ο Rutherford έγινε βαρόνος το 1931 και αποφάσισε να συνδέσει το όνομά του με την πόλη Νέβισον της Νέας Ζηλανδίας, τη γενέτειρά του. Το πουλί κίονι στο πάνω μέρος και ο ιθαγενής Μαορί δεξιά, με το ρόμπο στο χέρι, μαρτυρούν την αγάπη του για τη Νέα Ζηλανδία. Παρατηρήστε τις δύο καμπύλες πάνω στην ασπίδα. Προέρχονται από ένα γράφημα του διάσημου άρθρου του για τη ραδιενέργεια. Αριστερά της ασπίδας απεικονίζεται ο Ερμής ο Τρισμέγιστος, 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 πόση φαίνεται καλή 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.

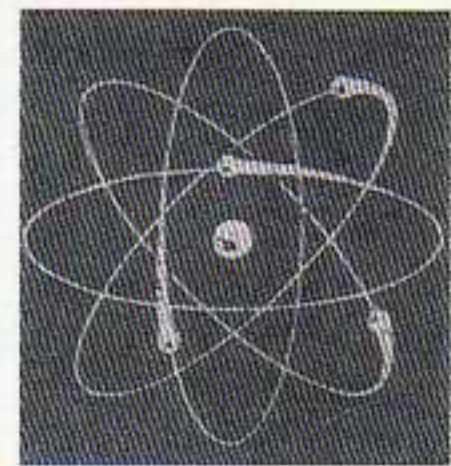
ριθμούς πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα. Ακόμη, τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται μέσα στον πολύ μικρό όγκο του πυρήνα από δυνάμεις που είναι πάρα πολύ μεγαλύτερες από την ηλεκτρική άπωση μεταξύ των πρωτονίων. Αυτές οι «ισχυρές δυνάμεις» επιτρέπουν το συνδυασμό μόνο ορισμένου αριθμού νετρονίων 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.



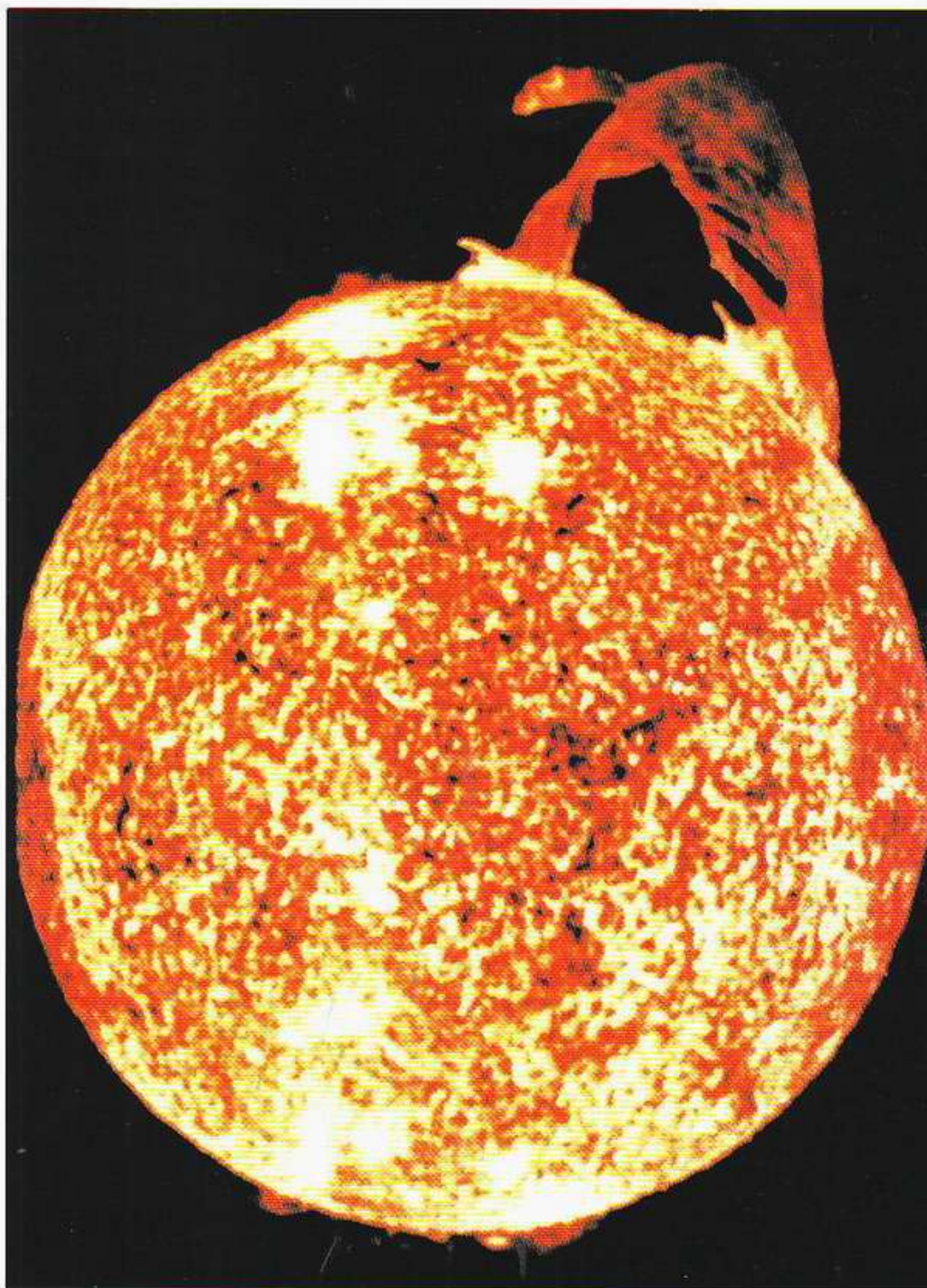
Ο Niels Bohr (1885-1962) επηρεάστηκε πάρα πολύ από τον Rutherford και συνεργάστηκε μαζί του όταν οικοδομούσε το δικό του μοντέλο για το άτομο. Ο Bohr προσπαθούσε πάντα να είναι πολύ σαφής όταν αναφερόταν στην κβαντική θεωρία. Κατά παράδοξο τρόπο, αυτό τον έκανε να φαίνεται πολύ σκοτεινός σε όποιον τον 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 πολυχρονη 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.

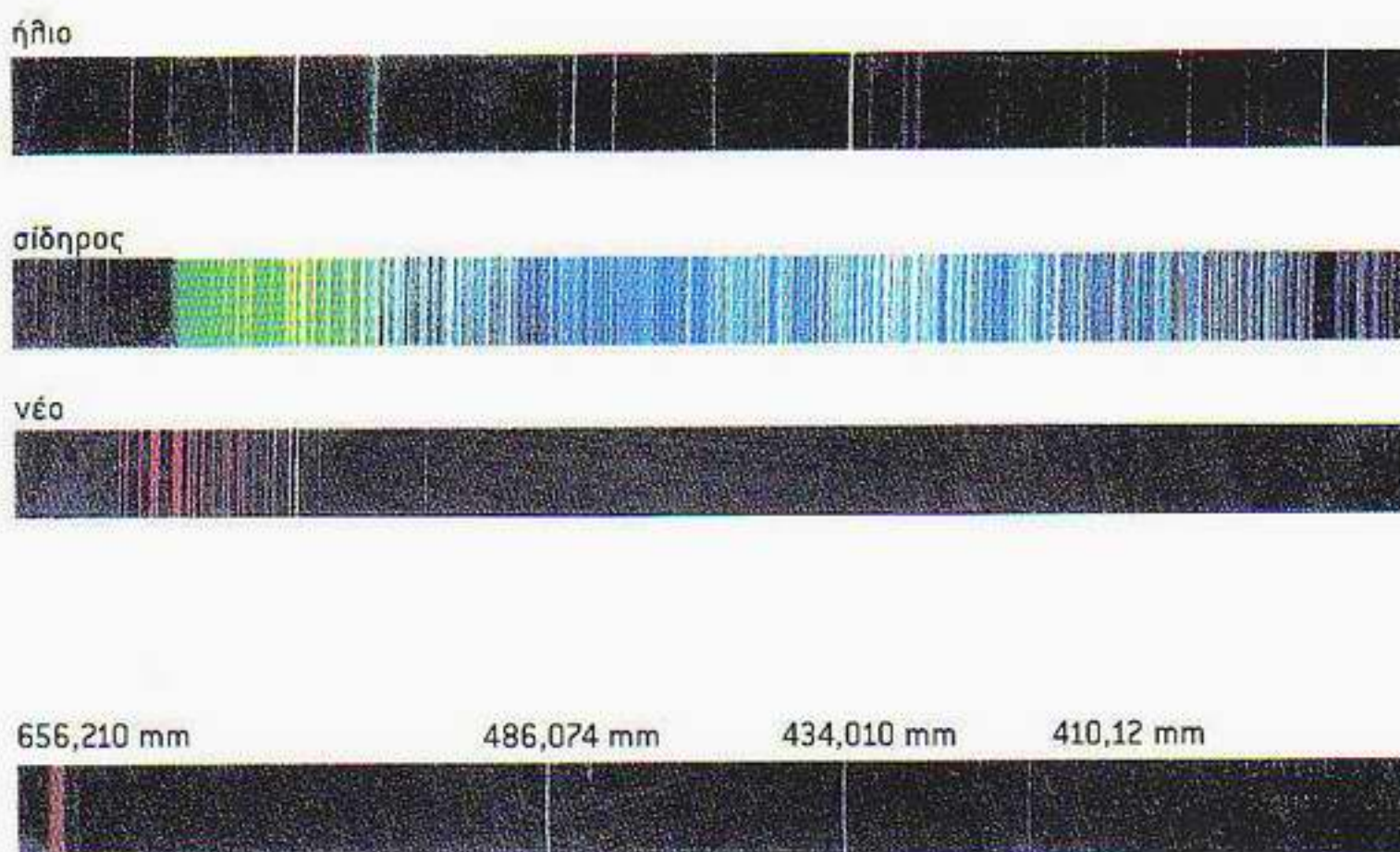
Οι φυσικοί συνήθιζαν «να διασκεδάζουν» δημιουργώντας ηλεκτρικούς σπινθήρες σε σωλίνες που περιείχαν διάφορα αέρια. Βρήκαν λοιπόν ότι κάθε αέριο εκπέμπει φως με ένα χαρακτηριστικό φάσμα —με ορισμένα μόνο μήκη κύματος. Τα φάσματα αυτά ονομάζονται γραμμικά, χρησιμοποιούνται δε για την ταυτοποίηση των διάφορων χημικών στοιχείων. Πράγματι, το στοιχείο ήλιο ανακαλύφθηκε αρχικά στο ηλιακό φως: η Εικόνα 4.5 δείχνει μια άποψη του Ήλιου σε φως ηλίου. Μερικά γραμμικά φάσματα εξηγούνται απλά, όπως το φάσμα του υδρογόνου, του ηλίου 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 αποκαñυπτικό 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 σψίδα από υλικό που απωθείται από μαγνητικές δυνάμεις.



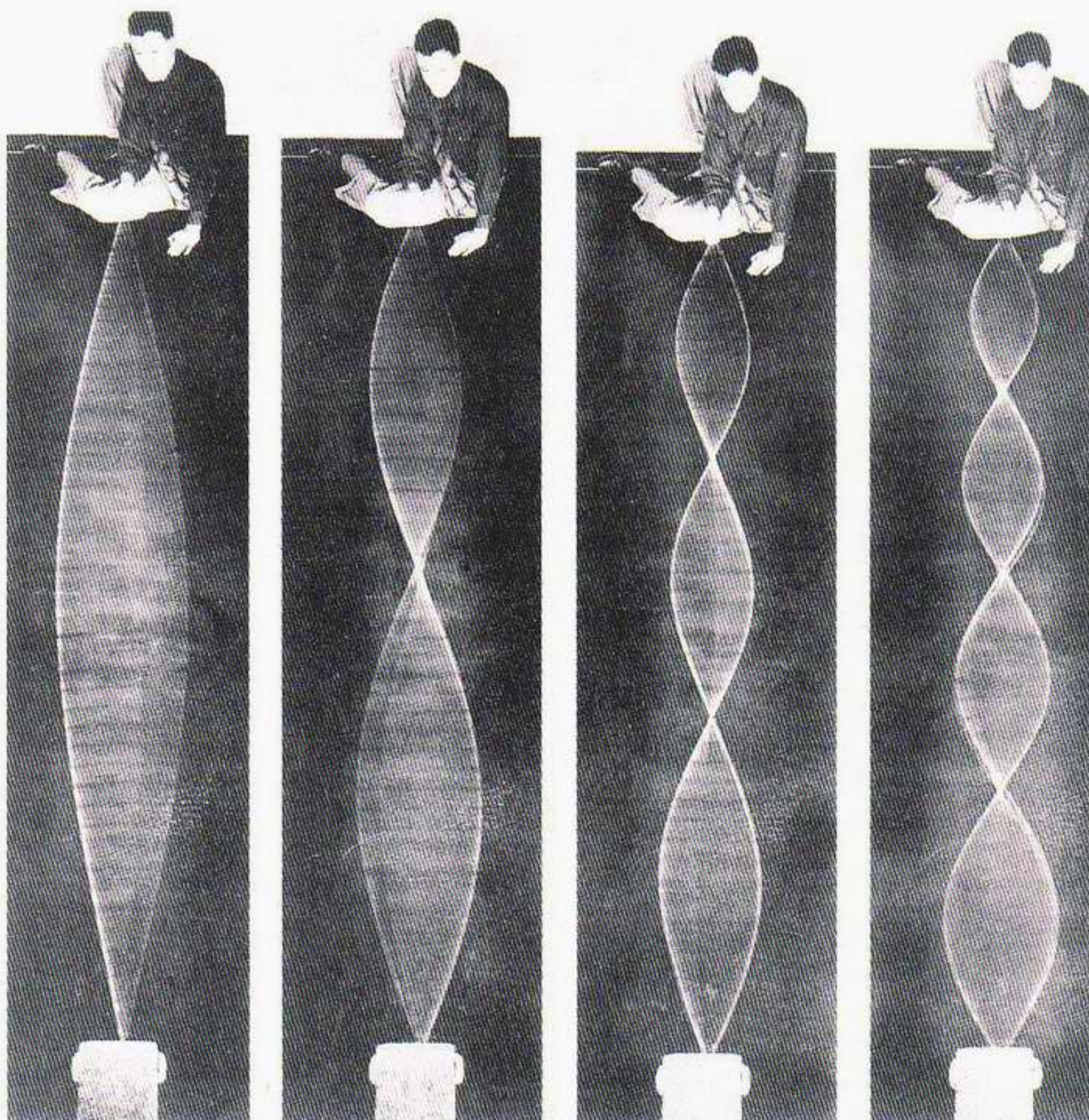
Εικόνα 4.6 Από κάθε στοιχείο σε αέρια μορφή παίρνουμε ένα χαρακτηριστικό φάσμα απορρόφησης όταν συμβεί μια ηλεκτρική εκκένωση στο εσωτερικό του. Το φως της εκκένωσης που φτάνει σε μας μπορούμε να το διαχωρίσουμε σε διαφορετικά μήκη κύματος, διοχετεύοντάς το στο πρίσμα ενός φασματογράφου. Κάθε στοιχείο 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

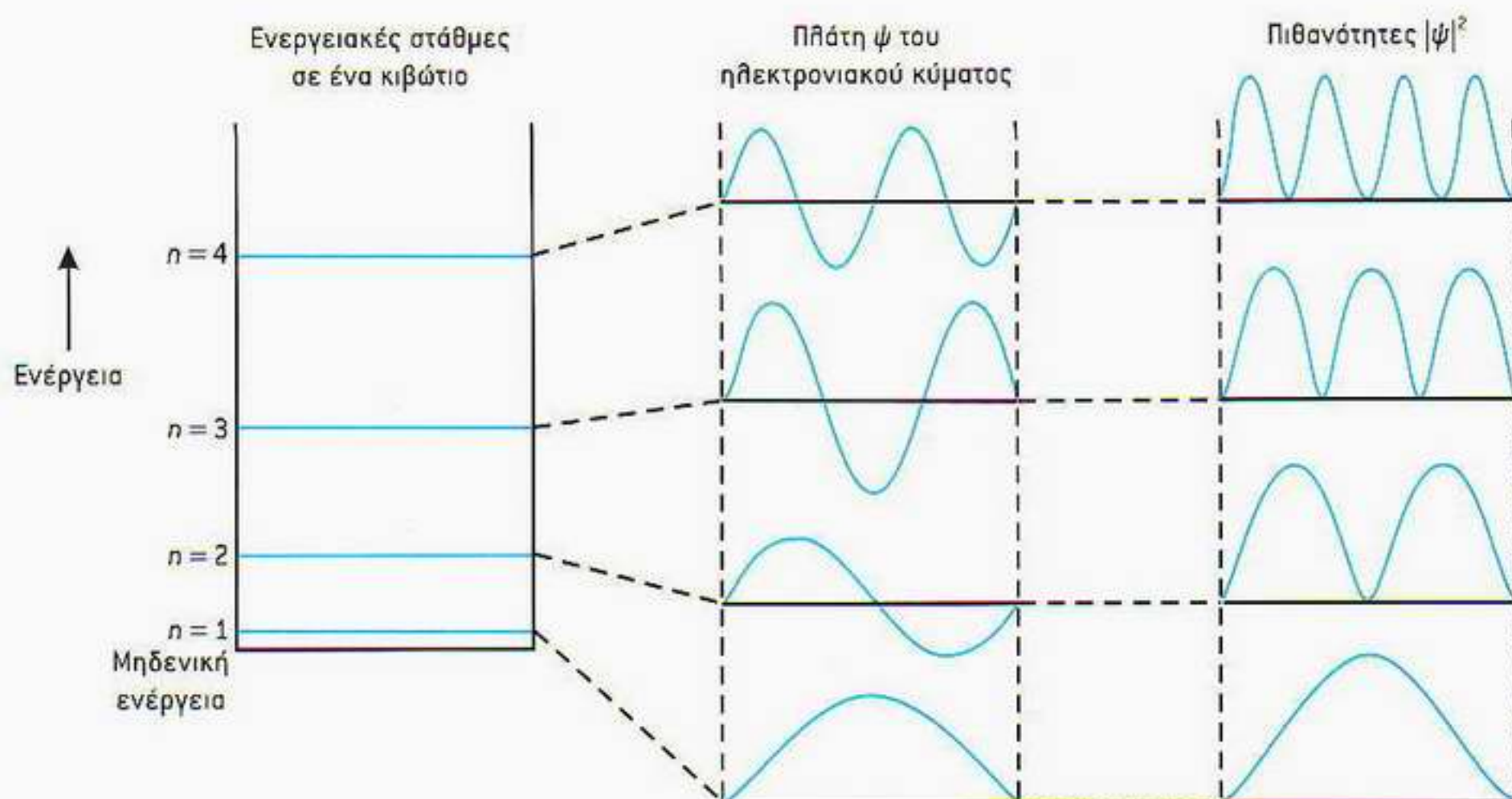
Η ιδέα που οδήγησε τον Bohr στην κατανόηση του γραμμικού φάσματος του υδρογόνου ήταν ότι τα ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τον πυρήνα επιτρέπεται να βρίσκονται μόνο σε ορισμένες τροχιές. Αν αγνοήσουμε προς στιγμήν το πρόβλημα ότι όλες οι τροχιές θα έπρεπε να είναι ασταθείς αφού τα ηλεκτρόνια όφειλαν 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 σιδηροτροχιά 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.

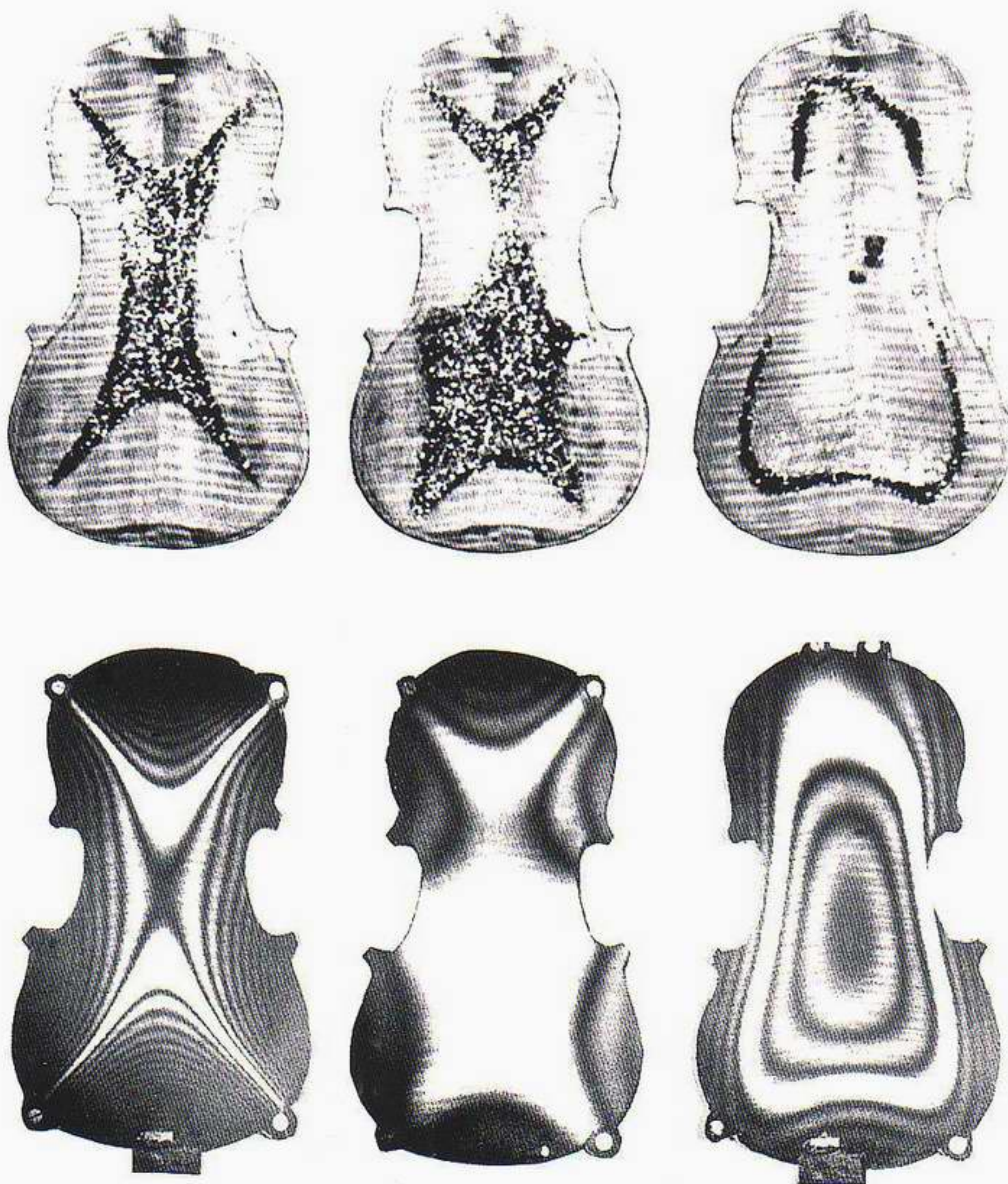
περίπτωση του ηλεκτρονίου, τα απότομα τοιχώματα του κιβωτίου δυναμικού δρουν σαν τα στερεωμένα άκρα της δονούμενης χορδής αλλά, αντί των συνήθων κυμάτων που έχουμε στη χορδή, τώρα έχουμε κύματα πιθανότητας. Για τη χορδή —όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.7—, μόνο συγκεκριμένα μήκη κύματος μπορούν να «χωρέσουν» 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 πλατών 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 ε-πονομαζόμενη θεμελιώδη κατάσταση—, δεν μπορεί να είναι ακίνητο —πρέπει

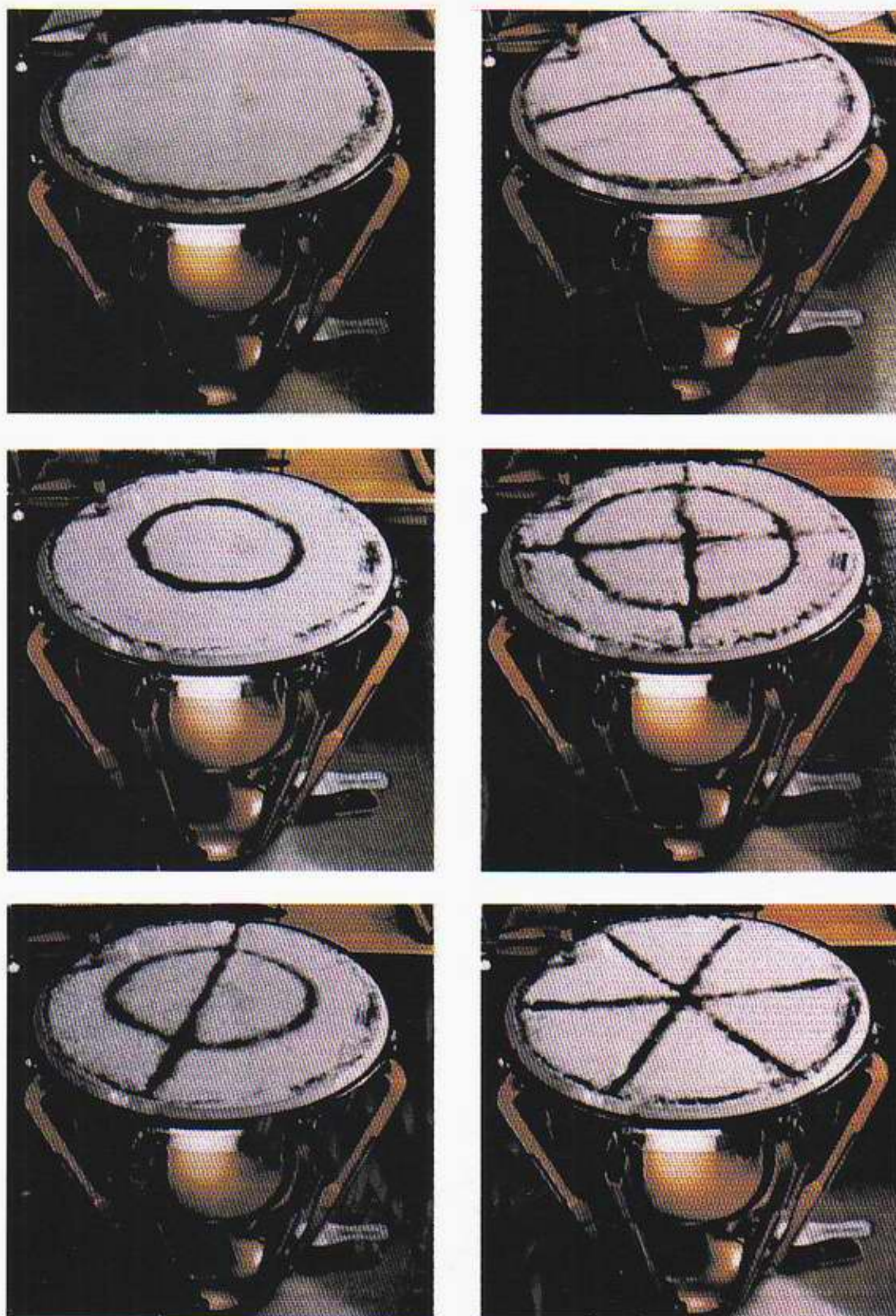
να «στριφογυρνάει» συνεχώς! Στο συγκεκριμένο φαινόμενο αναφερθήκαμε ήδη στο Κεφάλαιο 2, όταν γνωρίσαμε τις κβαντικές διαδρομές του Feynman και την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg. Αυτή η κίνηση, η λεγόμενη *κίνηση μηδενικού σημείου*, αποτελεί μια γενική ιδιότητα των κβαντικών συστημάτων· εξηγεί 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

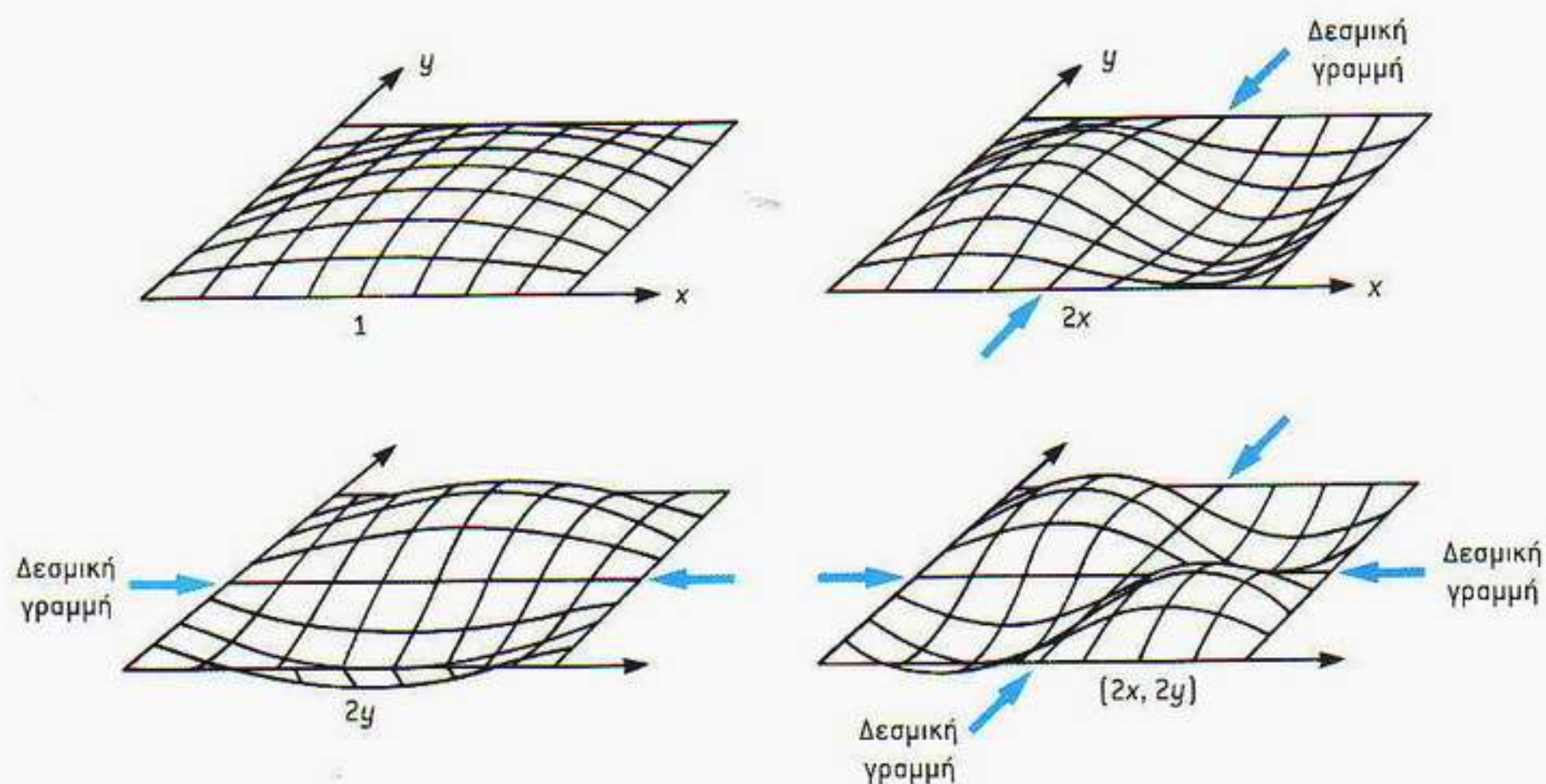


Εικόνα 4.9 Χαρακτηριστικές εικόνες ταλάντωσης της επιφάνειας ενός βιολιού. Στις τρεις πάνω φωτογραφίες φαίνονται οι περιοχές όπου συγκεντρώνεται η πούδρα, την οποία έχουμε διασκορπίσει στην επιφάνεια του βιολιού, καθώς σε αυτές υπάρχει μικρή ή μηδενική ταλάντωση. Στις φωτογραφίες της δεύτερης σειράς 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.

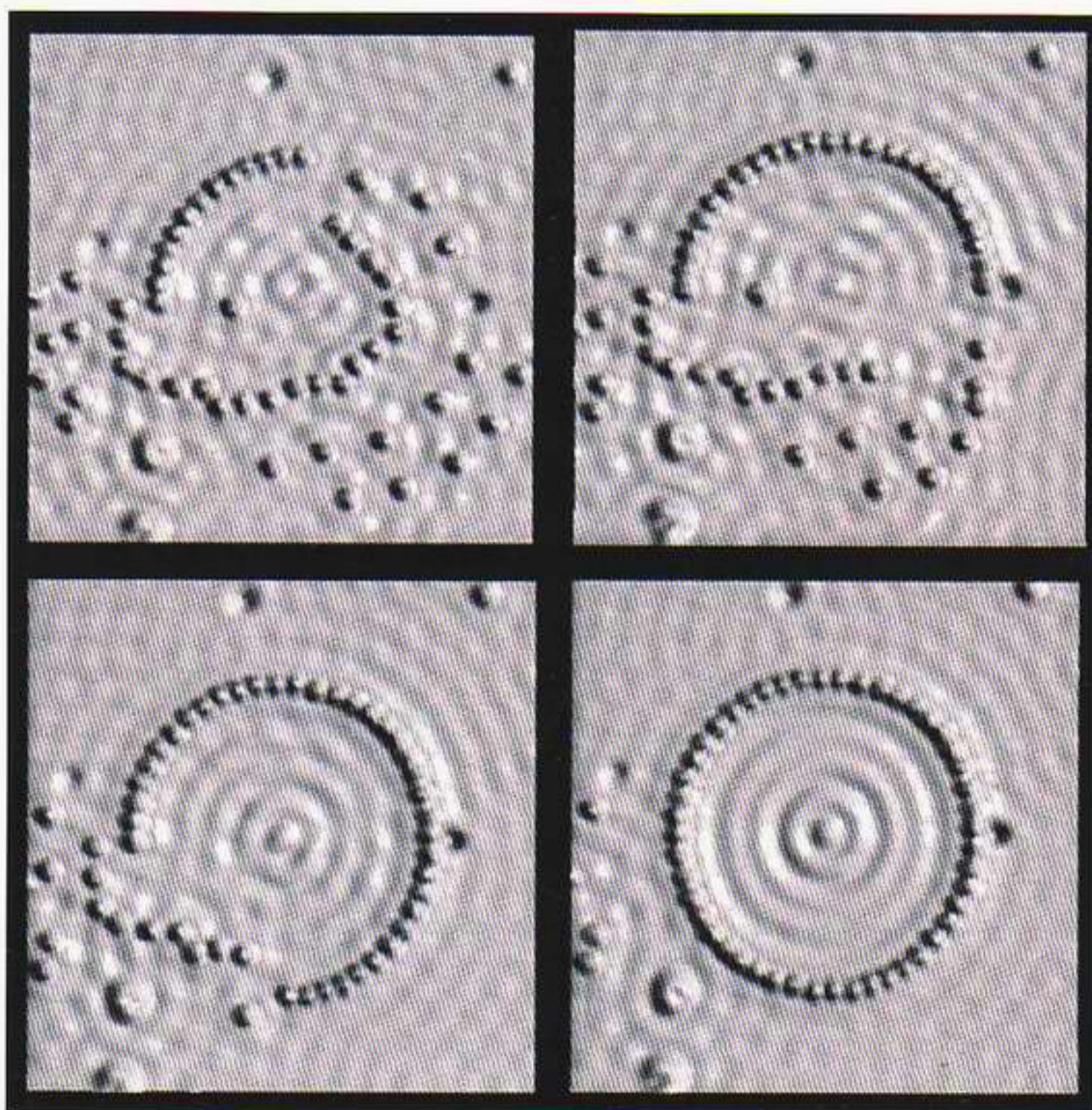
ενέργειας υπάρχει μία μόνο δυνατή κυματοσυνάρτηση, την οποία μπορούμε ξανά να συμβολίσουμε με τον κβαντικό αριθμό $n = 1$. Για την πρώτη διεγερμένη κατάσταση, ωστόσο, υπάρχουν δύο δυνατότητες. Αν συμβολίσουμε τις δύο διευθύνσεις με x και y , βλέπουμε ότι μπορούμε είτε να διεγείρουμε την κίνηση κατά τη 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 χορδών για να γίνει σαφής η αντιστοιχία ταλάντωσης της με τους τρόπους ταλάντωσης μιας χορδής.

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

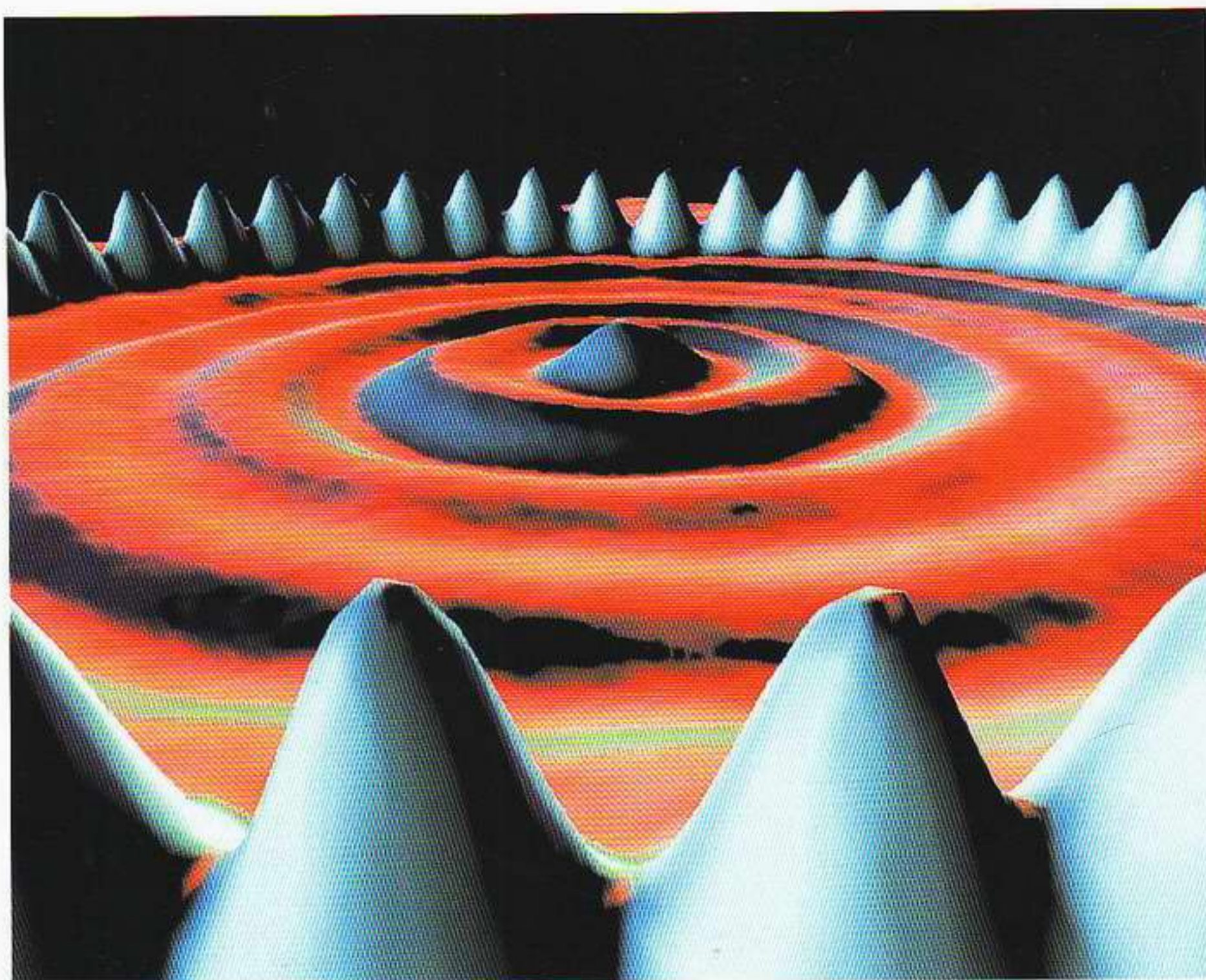


Εικόνα 4.12 Ο φράκτης από ηλεκτρόνια που κατασκεύασε ο Don Eigler και η ομάδα του στην IBM. Οι εικόνες δείχνουν τα ενδιάμεσα στάδια δημιουργίας ενός κυκλικού φράκτη από άτομα σιδήρου πάνω σε μια επιφάνεια χαλκού.

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

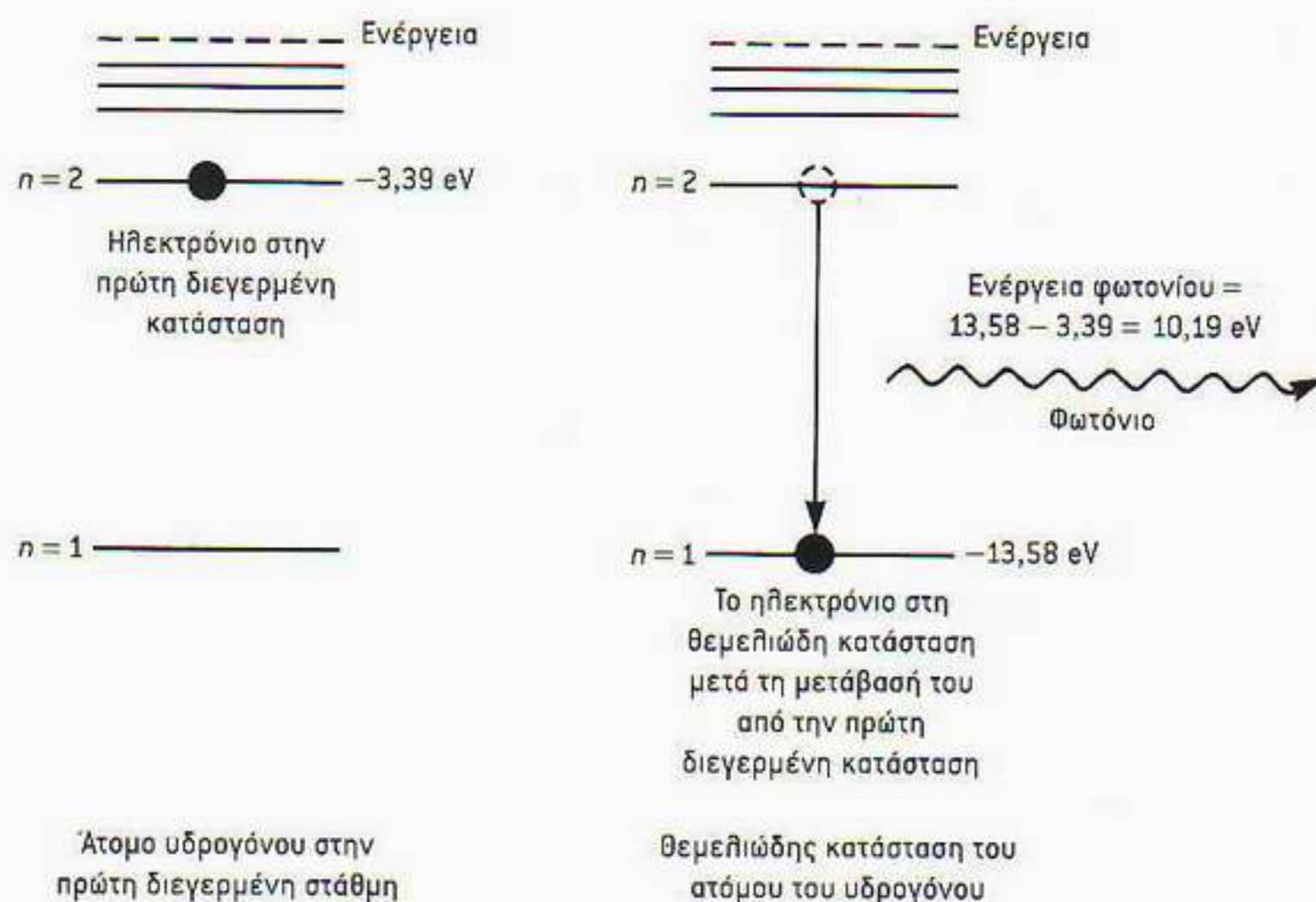
Ένας από τους λόγους που η εξίσωση του Schrödinger έγινε σχεδόν αμέσως αποδεκτή από όλους ήταν ότι, έπειτα από δεκαετίες αναζήτησης στο σκοτάδι, οι φυσικοί είχαν ξανά τη δυνατότητα να εκτελούν υπολογισμούς με γνωστές μαθηματικές τεχνικές. Αντί να είναι υποχρεωμένοι να ακολουθούν τους μυστηριώδεις κανόνες 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 ελαφρό, 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).

φημης 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

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

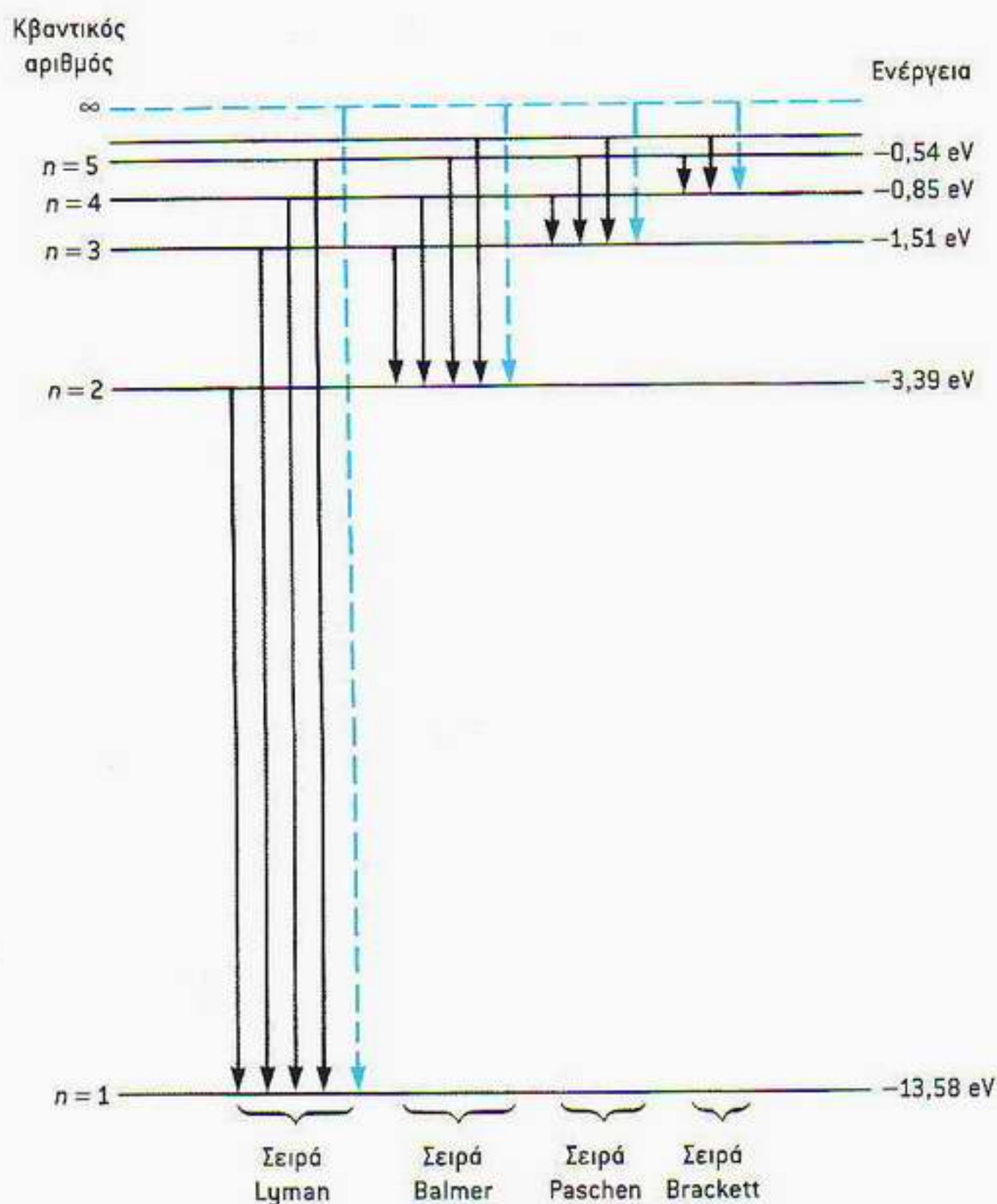
ταχύτητα του φωτός ίσον συχνότητα επί μήκος κύματος,

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 ηλεκτρονιακή μετάβαση, η οποία συνοδεύεται από εκπομπή ενός φωτονίου με ενέργεια ίση με την 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 ηλεκτρονιακές 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 δέσμη 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_i και n_f 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 $n_f = 4$, 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 θάμπερου νεφελώματος υδρογόνου, με πολλά νεοσχηματισμένα άστρα μέσα του. Η ερυθρή απόχρωση του νεφελώματος οφείλεται στις ηλεκτρονιοστικές 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.

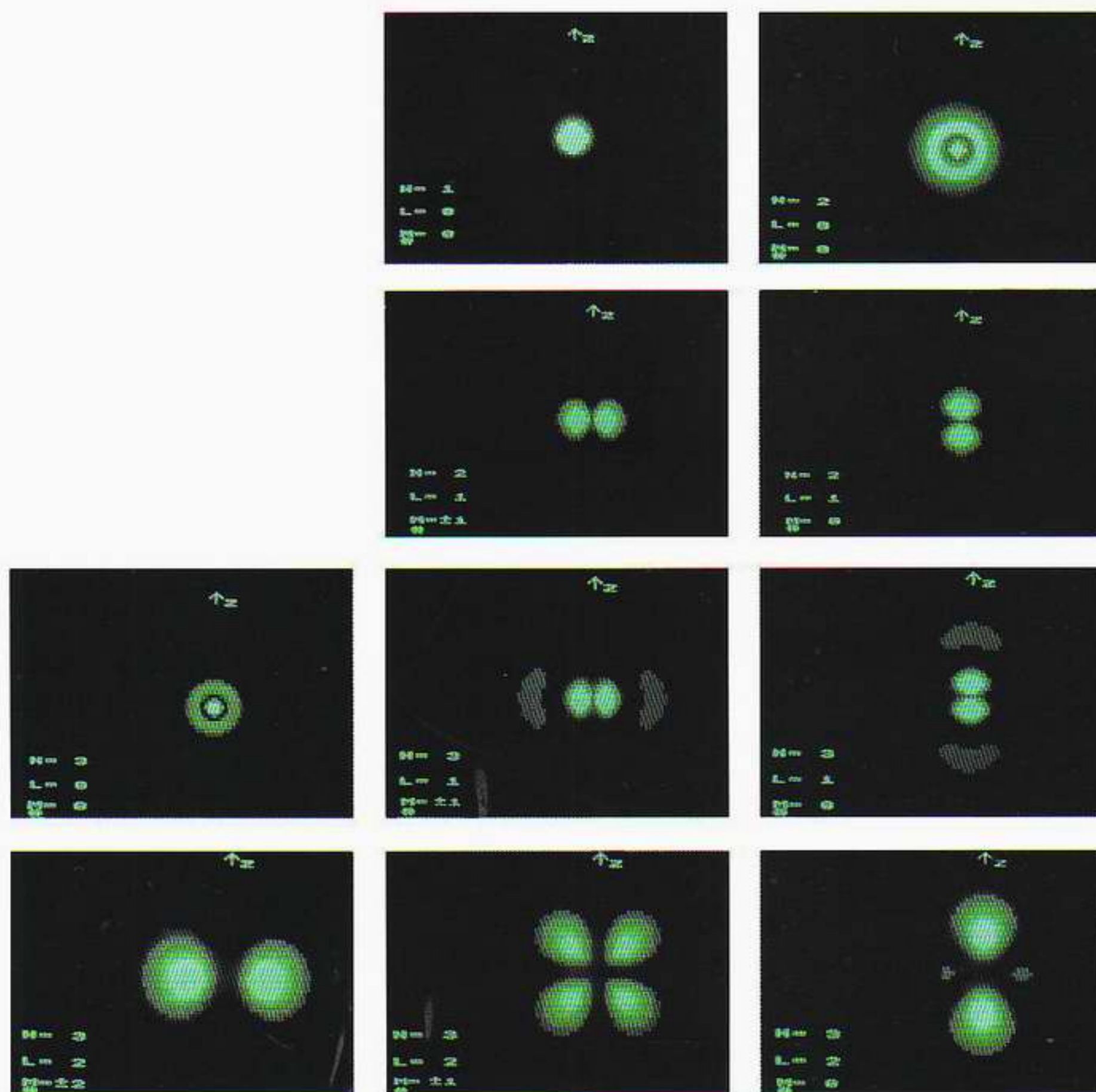
Αν εξετάσουμε τις διεγερμένες ενεργειακές στάθμες πιο λεπτομερειακά, θα διαπιστώσουμε, όπως και στο παράδειγμα της μεμβράνης του τύμπανου, ότι υφίσταται ένας εκφυλισμός —αρκετές κυματοσυναρτήσεις αντιστοιχούν στην ίδια ενέργεια. Περιμένουμε λοιπόν ότι θα χρειαστούμε αρκετούς κβαντικούς αριθμούς για να 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.

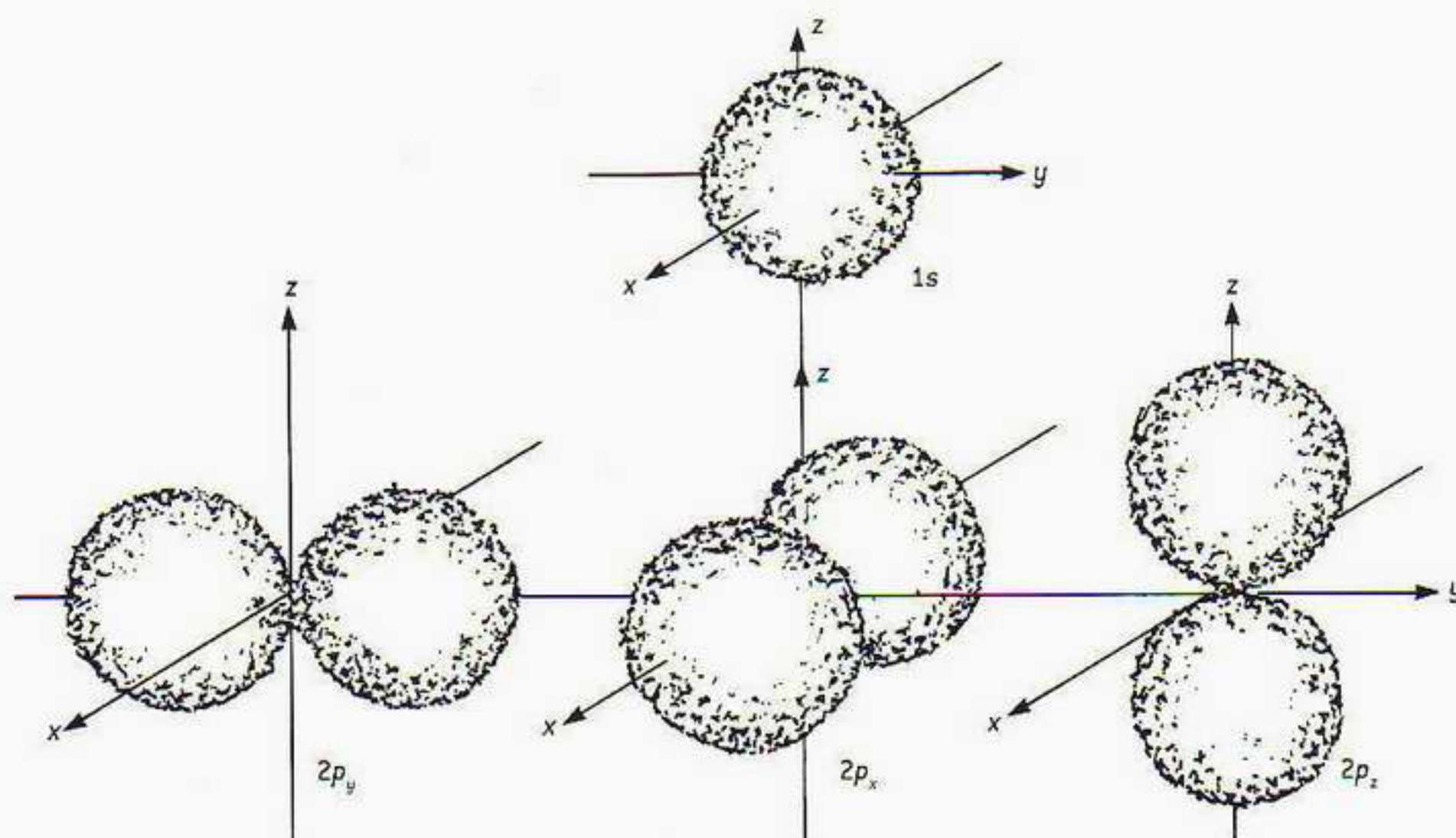
Για σταθερό μήκος σπάγκου, όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχει το μπαλάκι τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η στροφορμή του. Η στροφορμή είναι σημαντική διότι, όπως η ενέργεια, διατηρείται και στα κλασικά και στα κβαντικά συστήματα. Στην περίπτωση του παραδείγματός μας, ας φανταστούμε ότι μικραίνου-



Εικόνα 4.17 Διαμορφώσεις πυκνότητας πιθανότητας για το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου. Οι εικόνες, που έχουν δημιουργηθεί με υπολογιστή, δείχνουν τσμές 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 προσανατολίζονται 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 σαρμένος με ροδοπέταλα».



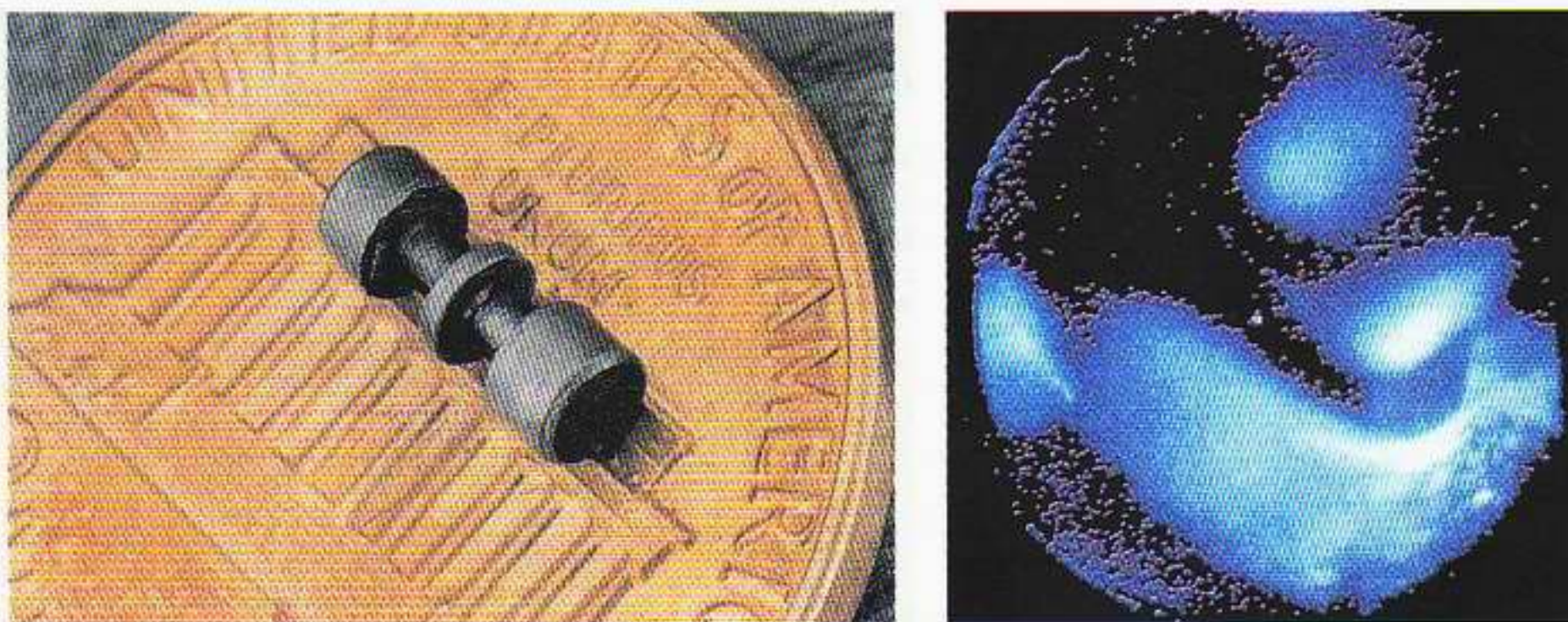
Ο Wolfgang Paul (1913-1993) γεννήθηκε στη Σαξονία της Γερμανίας και σπούδασε θωρινικά για εννέα χρόνια και αρχαία ελληνικά για έξι στο γυμνάσιο του Μονάχου. Στη συνέχεια αποφάσισε να γίνει φυσικός και ζήτησε τη συμβουλή του μεγάλου γερμανού θεωρητικού φυσικού Arnold Sommerfeld. Ο Sommerfeld του πρότεινε 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. Στα αριστερά, μια παγίδα ιόντων αντιπροβάλλεται με ένα νόμισμα του ενός πεντού για να τονιστεί η κλίμακα αυτής της διατάξης· στα δεξιά, η φωτεινή κουκκίδα στο κέντρο είναι ένα παγιδευμένο ιόν υδρογόνου.

με μια δέσμη λέιζερ κατάλληλου μήκους κύματος για να απορροφά 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-

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

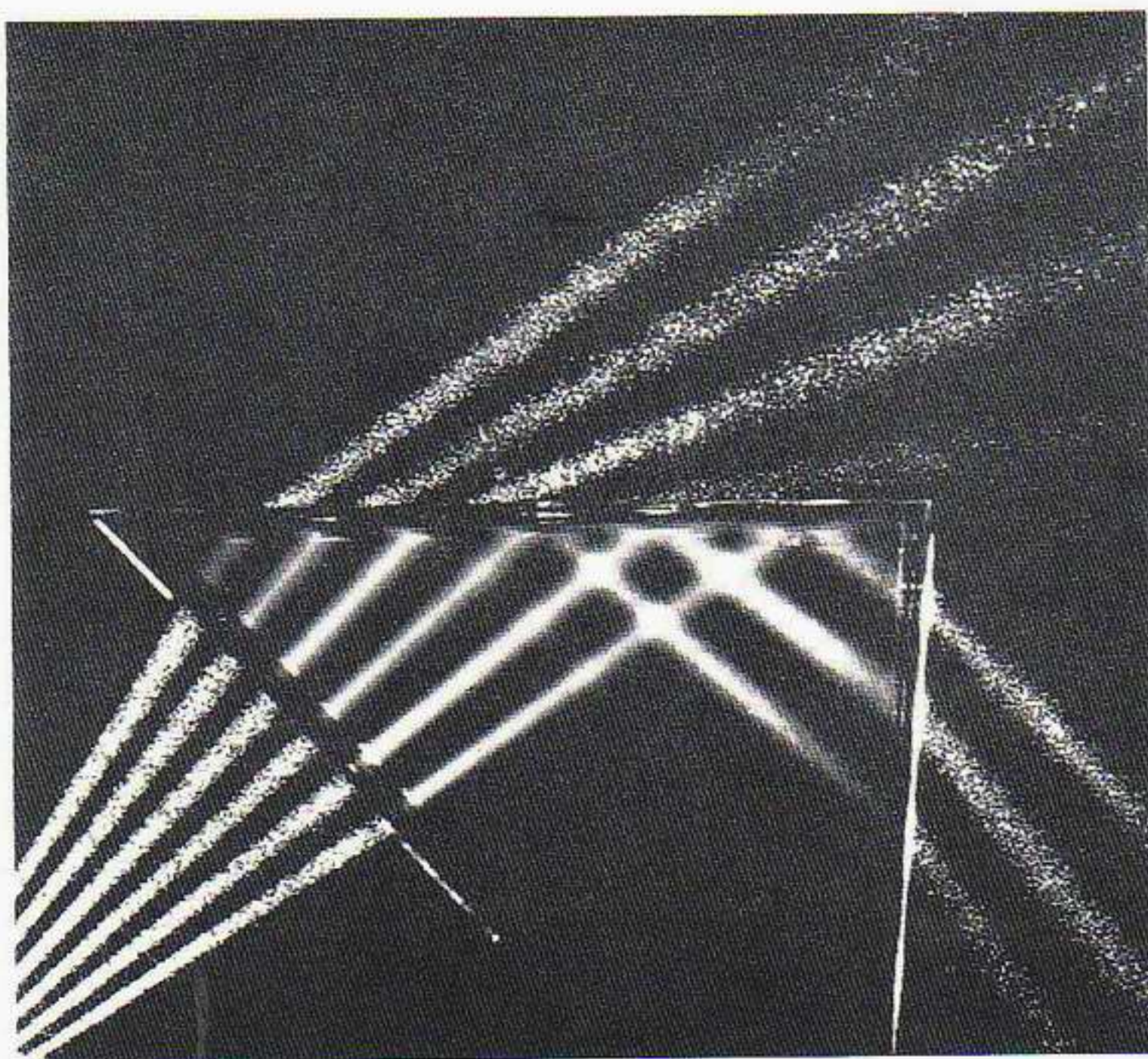
$$(\Delta E) \cdot (\Delta t) \approx h.$$

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

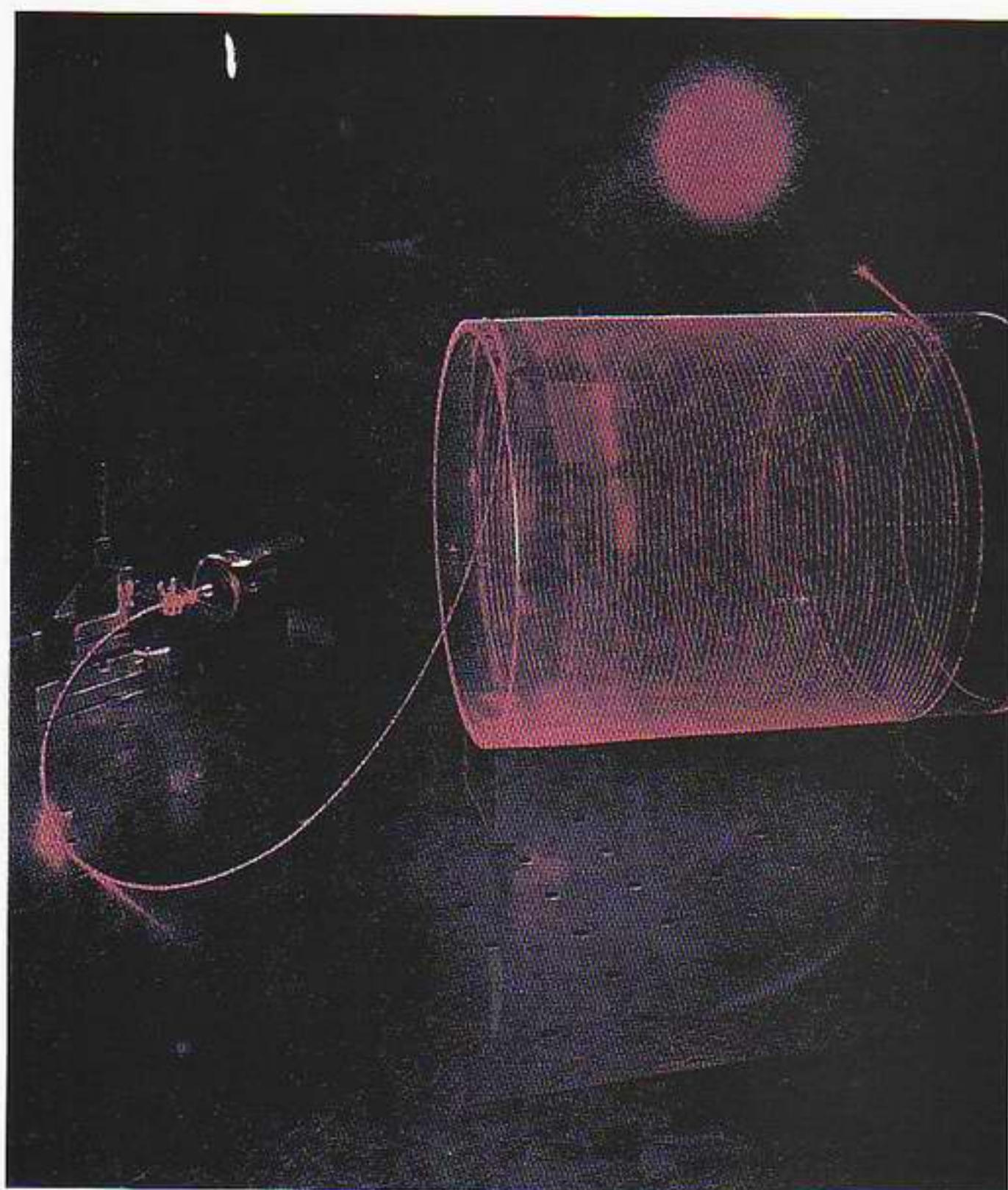
Μολονότι μπορούμε να κάνουμε να εμφανιστεί «κυματικό φαινόμενο σήραγγας» τόσο στα κύματα μιας χορδής όσο και στα υδάτινα κύματα, το πιο οικείο ίσως παράδειγμα το προσφέρει το φως στην κυματική του μορφή. Ας εξετάσουμε τι συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από τον αέρα σε ένα κομμάτι γυαλί. Όπως δείχνει 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 «ορική γωνία», οι φωτεινές ακτίνες ανακλίνονται πλήρως και δεν διαδίδεται καθόλου φως προς τον αέρα. Η ακραία δεξιά ακτίνα ανακλίνεται πλήρως, ενώ οι υπόλοιπες διαχωρίζονται σε ανακλινόμενες και διαθλώμενες.



νόμενο 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 ορικής, 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 γυαλί 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 γυαλί δεν έχει περιθώριο να μειωθεί τόσο πολύ. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οι φυσικοί το ονομάζουν

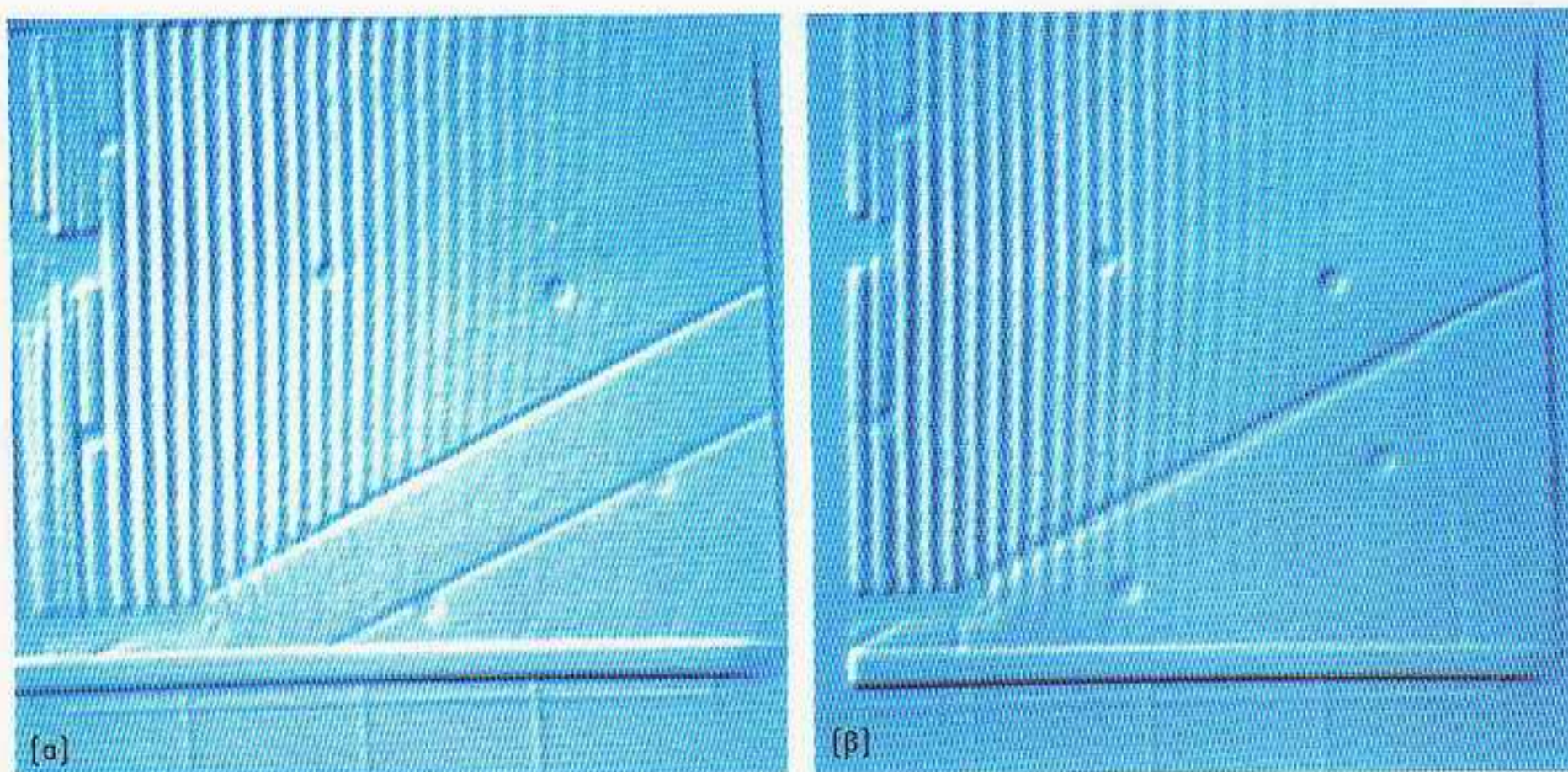


Εικόνα 5.4 Στη φωτογραφία φαίνεται μια οπτική ίνα, τυλιγμένη γύρω από κυλινδρικό τύμπανο, η οποία μεταφέρει φως από λείζερ ηλίου-νέου. Το φως περιορίζεται στο εσωτερικό της ίνας λόγω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης που υφίσταται στα τοιχώματά της. Η ίνα έχει μήκος 100 μέτρα περίπου και είναι σκόπιμα 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.

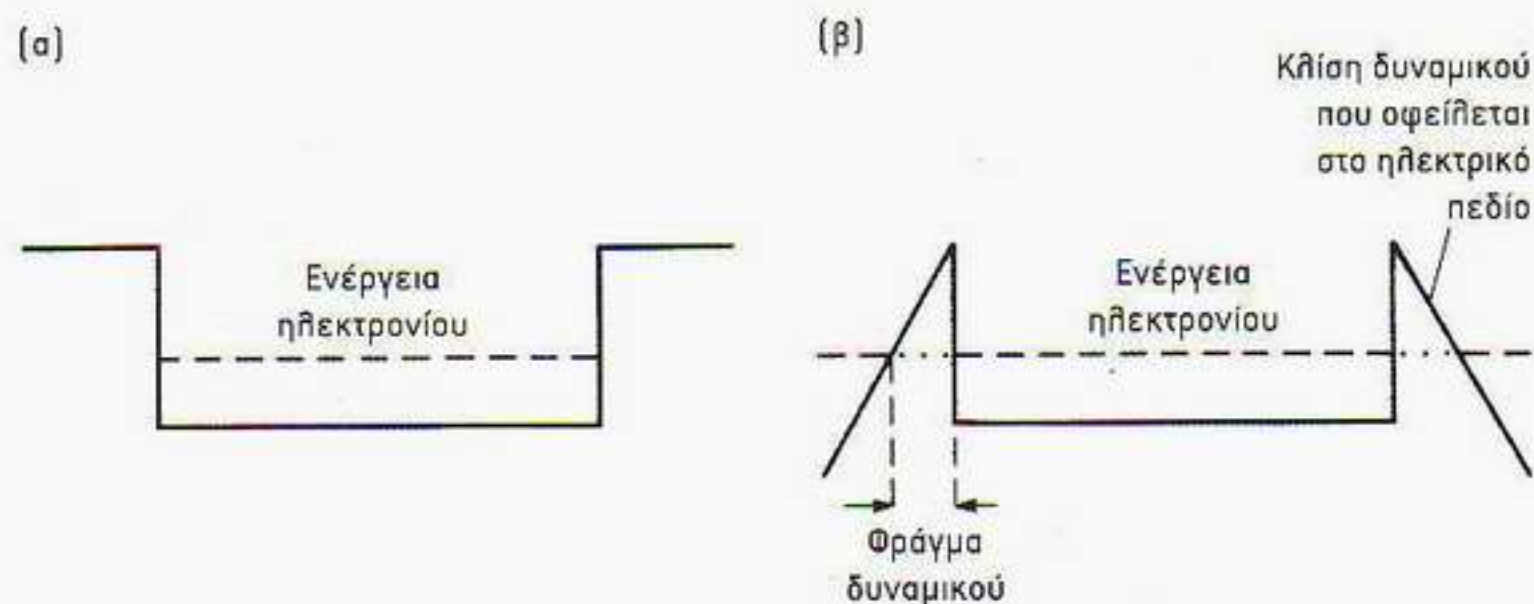
ματαιωμένη εσωτερική ολική ανάκλαση, αλλά πρόκειται για ένα ακριβές οπτικό ανάλογο του κβαντικού φαινομένου σήραγγας για τα κύματα de Broglie. Το φαινόμενο που μόλις περιγράψαμε αξιοποιείται στη σύγχρονη οπτική ως η βάση για ένα «διαχωριστή δέσμης». Το πόσο φως διαδίδεται ή ανακλάται από μια τέτοια διάταξη 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 ηλε-



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 γυάλης πλάκας βυθισμένης στο νερό, 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 ανάκλαση» 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.



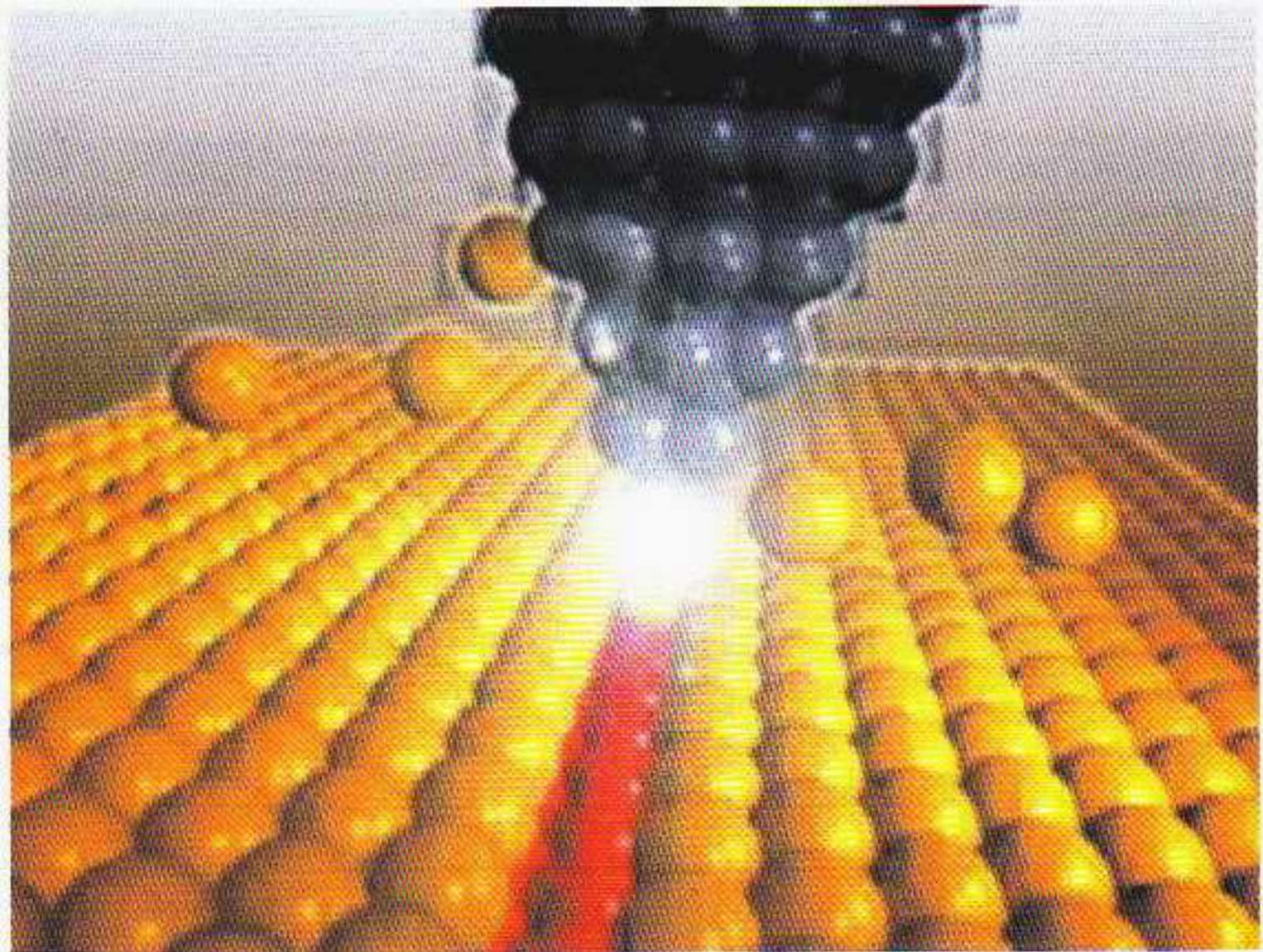
Εικόνα 5.6 [α] Απλοποιημένη εικόνα φρέατος δυναμικού για ηλεκτρόνια σε ένα μέταλλο. Η διακεκομμένη γραμμή παριστάνει την ενέργεια των τυπικών ηλεκτρονίων «αγωγιμότητας» των ηλεκτρονίων που ευθύνονται για την εμφάνιση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ενέργεια αυτή είναι χαμηλότερη από το ύψος του φράγματος, 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.



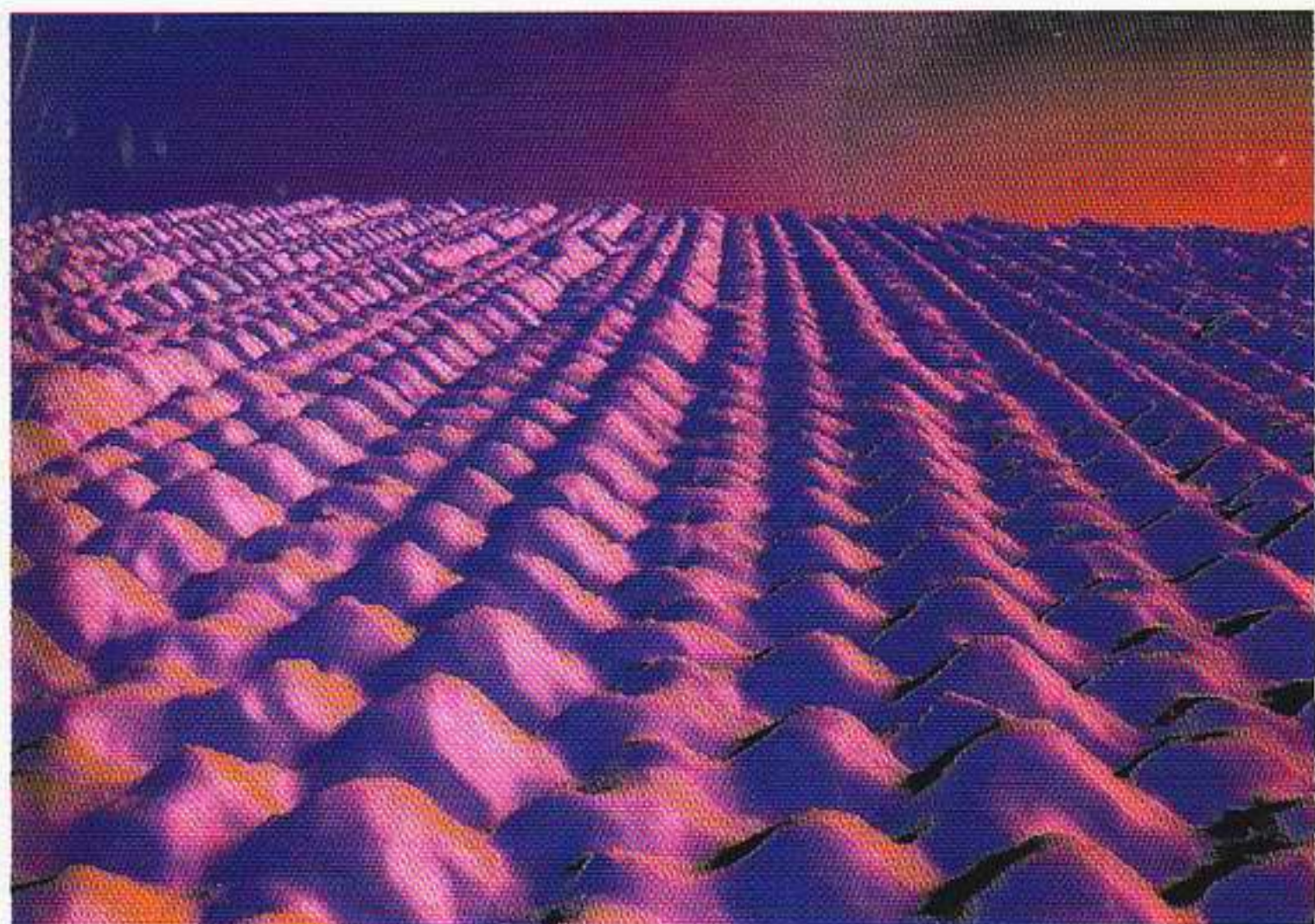
Το 1986, το βραβείο Νόμπελ φυσικής απονεμήθηκε στους Gerd Binnig (αριστερά) και Heinrich Rohrer για την ανακάλυψη του Σαρωτικού Μικροσκοπίου Σήραγγας (STM). Ο Rohrer γεννήθηκε στην Ελβετία και εκπόνησε τη διδακτορική διατριβή του στη φυσική στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας (ETH) στη Ζυρίχη, 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 Ρούσλινγκ 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 σίφωως 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 ανεμπόδια 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



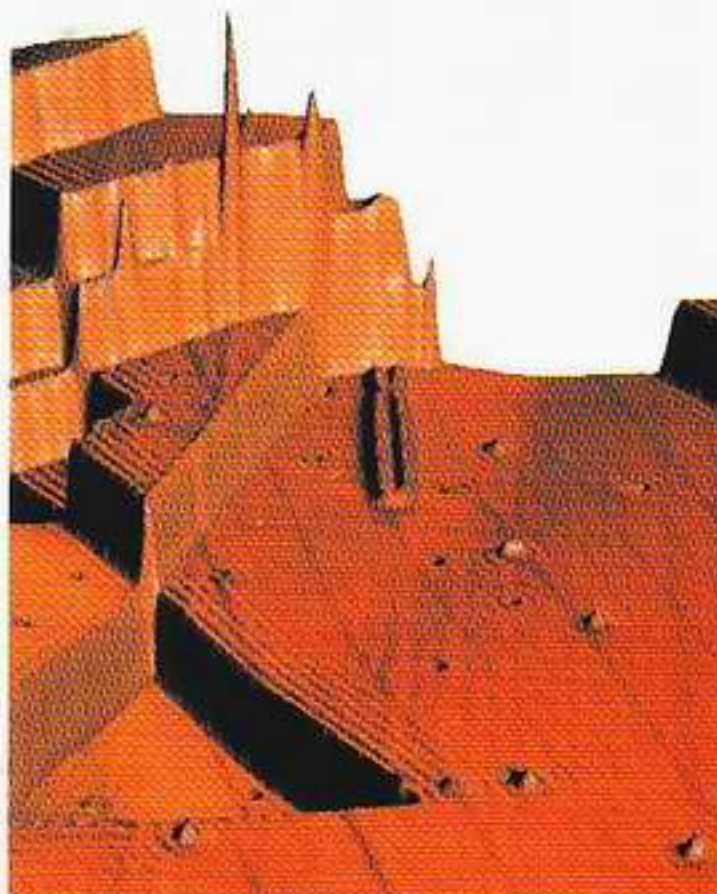
Εικόνα 5.7 Το STM αποτελείται από μια πολύ αιχμηρή ακίδα η οποία ερευνά την επιφάνεια του δείγματος με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Όταν μεταξύ της ακίδας και της επιφάνειας εφαρμοστεί υψηλή τάση, τότε, χάρη στο φαινόμενο σήραγγας, ηλεκτρόνια μπορούν να περάσουν από την αιχμή της ακίδας προς το υπό εξέταση 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.



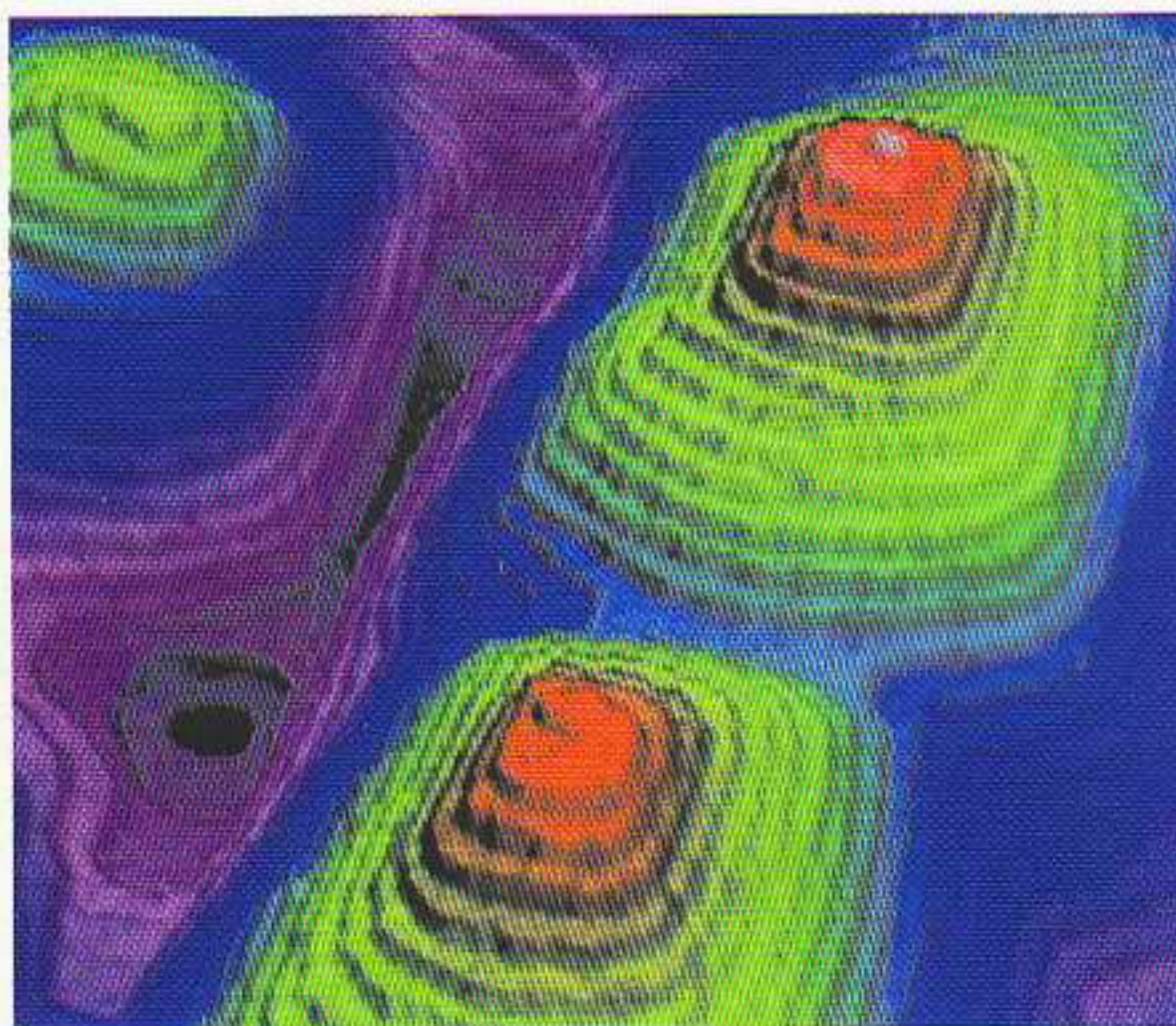
Εικόνα 5.8 Εικόνα της επιφάνειας ενός τεμαχίου πυριτίου που ελήφθη με STM. Οι σειρές των ατόμων απέχουν η μία από την άλλη λιγότερο από 2 νανόμετρα, ενώ δύο γειτονικά άτομα σε μια σειρά τα χωρίζει απόσταση μικρότερη από 1 νανόμετρο.

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 αρσενικού του γαλλίου. Η ικανότητα ανάπτυξης δομών σε ατομικό επίπεδο με τέτοια ακρίβεια θα καταστήσει δυνατή τη δημιουργία μιας νέας γενιάς ηλεκτρονικών και φωτονικών διατάξεων.

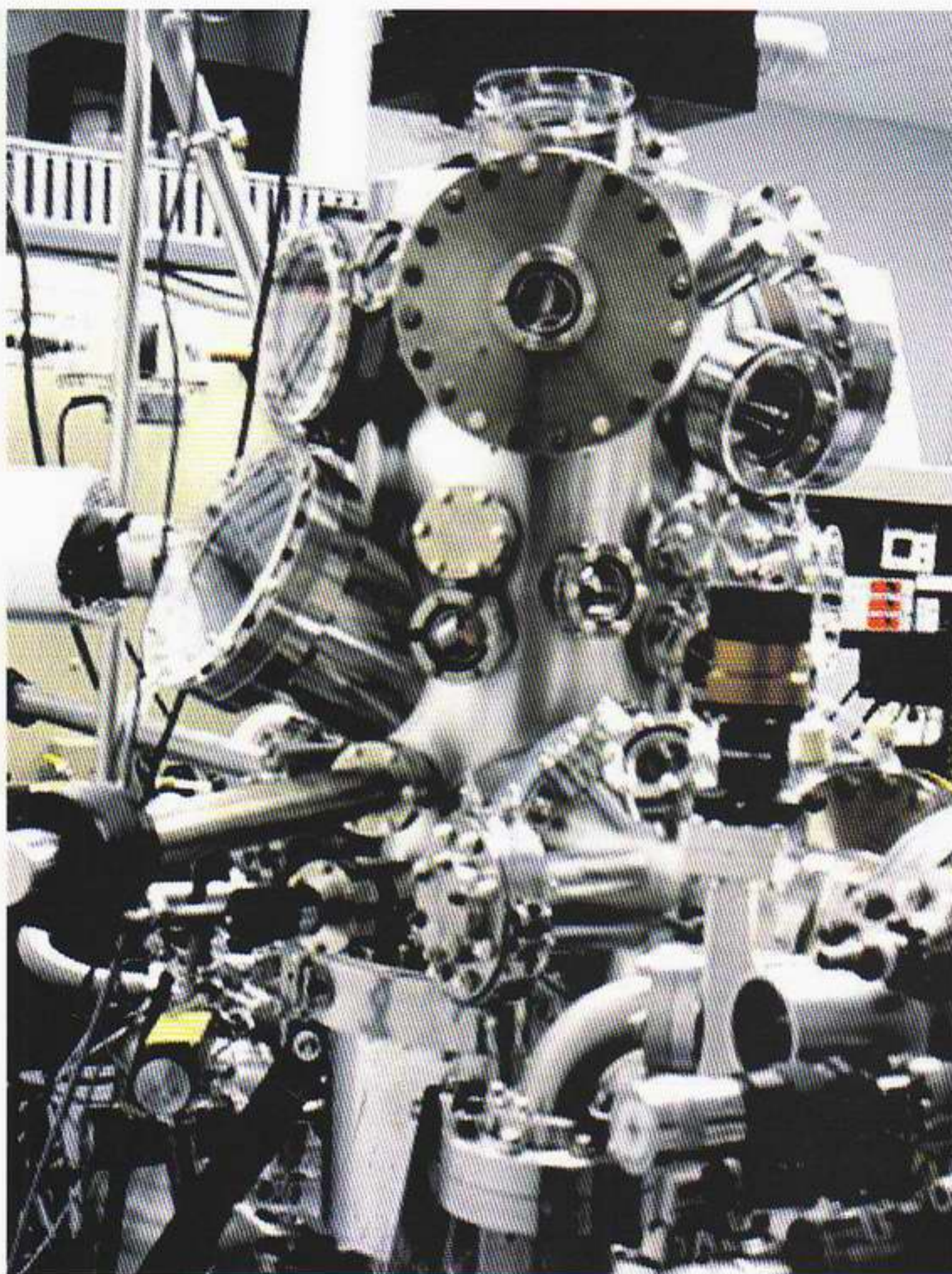
από το δείγμα, εξάρτηση η οποία αποτελεί διακριτικό γνώρισμα του φαινομένου σήραγγας. Ήταν η σημαδιακή νύχτα της 16ης Μαρτίου του 1981.

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 δόλωσε:

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.

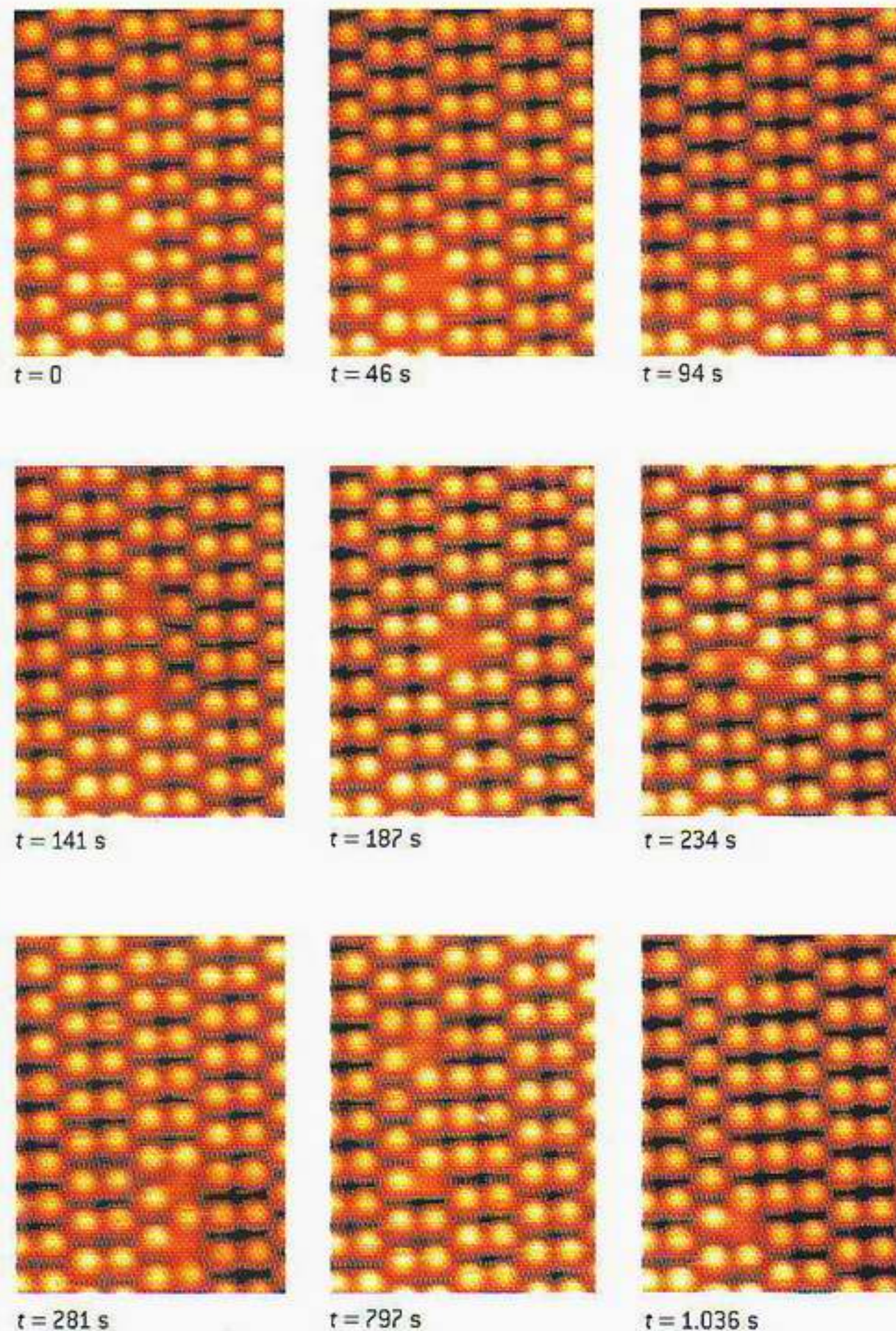
Το 1986, οι Binnig και Rohrer τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ φυσικής.

Καθώς πειραματίζονταν 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.

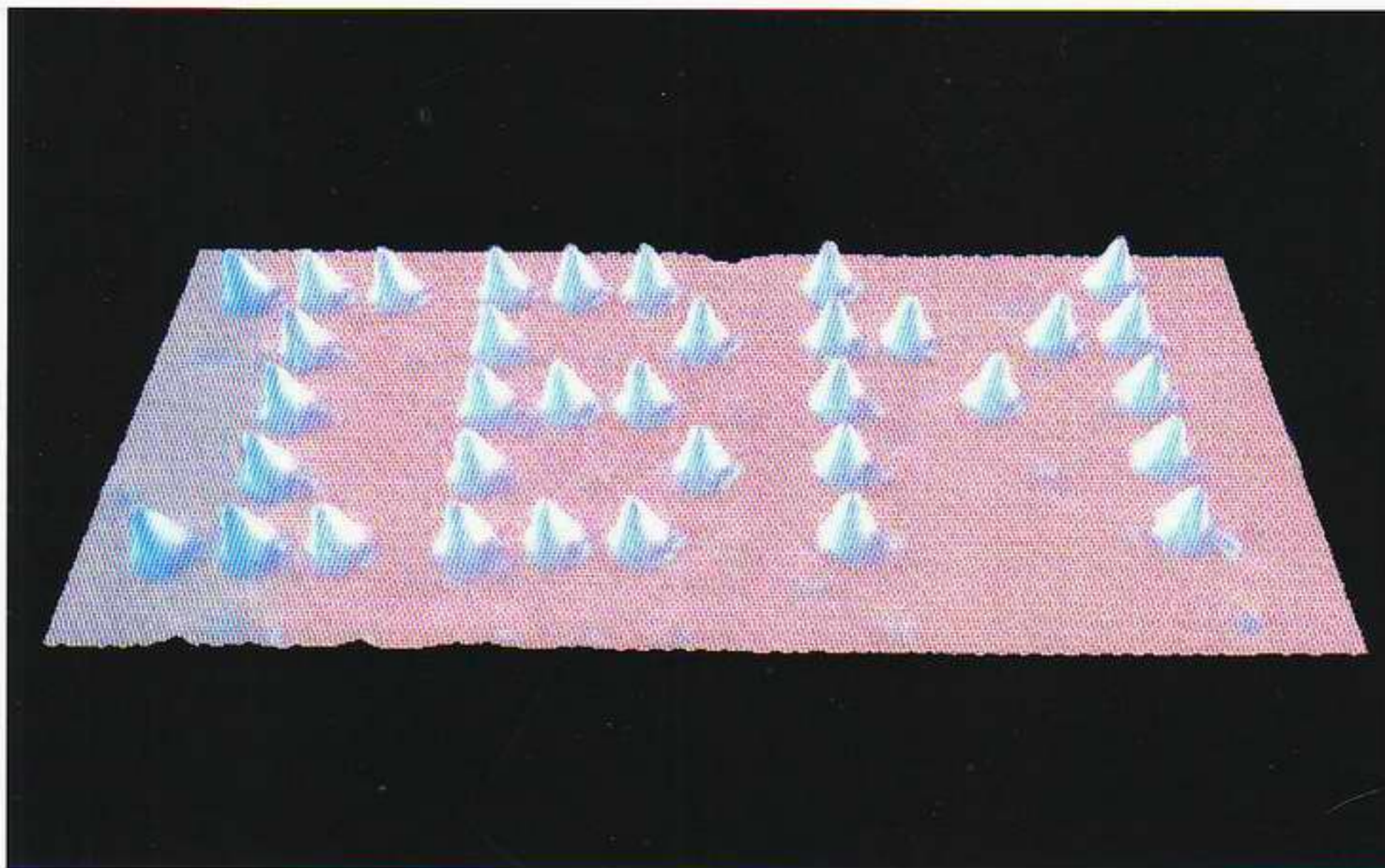
μετεξελίχθηκε σε έναν συναρπαστικό νέο τεχνολογικό κλάδο από μια ομάδα των Εργαστηρίων της IBM στο Άλμαντιν της Καλιφόρνιας. Τα ονόματα των Don Eigler και Erhard Schweizer απασχόλησαν πρώτη φορά τα πρωτοσέλιδα του Τύπου όταν οι δύο ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα STM για να κατασκευάσουν μια εκδοχή του 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.

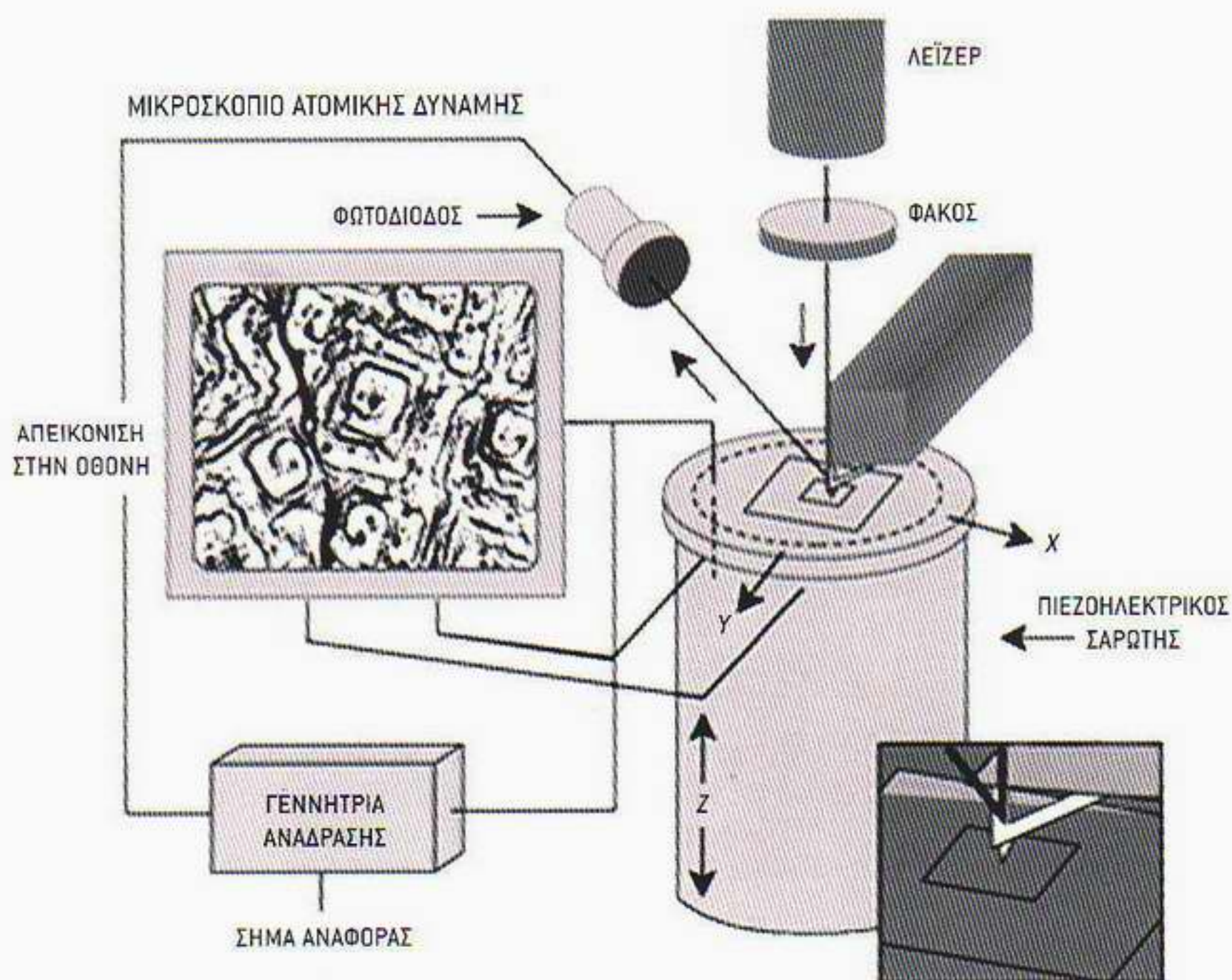
Εδώ επιβάλλεται να αναφερθεί και μία ακόμη τεχνολογική εξέλιξη που προέκυψε από την εργασία των Binnig και Rohrer. Η εικόνα που παίρνουμε από ένα STM εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας, οι οποίες ενδέχεται να είναι αρκετά περίπλοκες, με αποτέλεσμα η προκύπτουσα εικόνα να μην επιδέχεται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

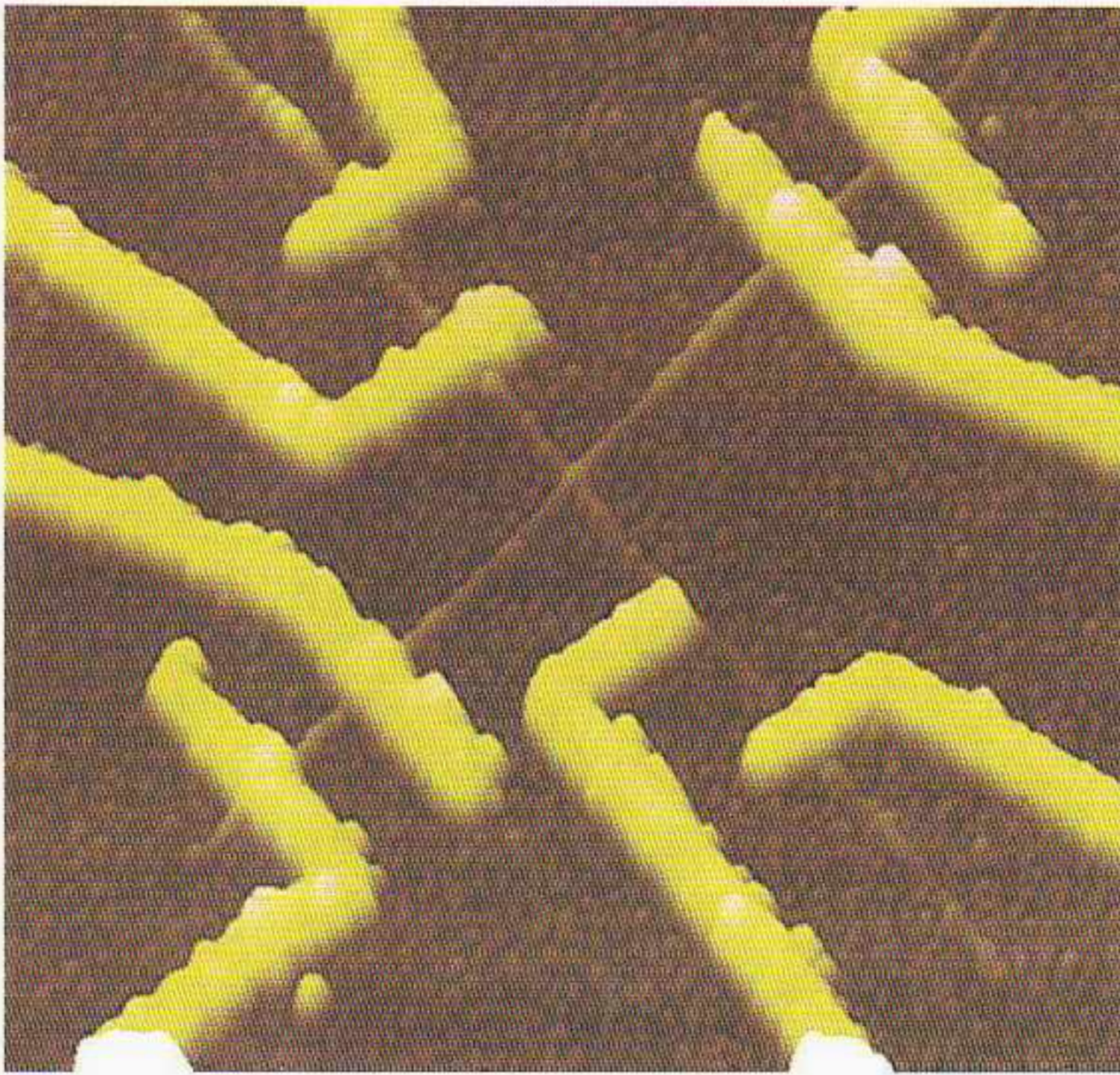


Εικόνα 5.14 Το AFM εφευρέθηκε το 1986. Μια αιχμή τοποθετείται στο ελεύθερο άκρο ενός μικροσκοπικού προεξέχοντος βραχίονα, ο οποίος στη συνέχεια σαρώνει μια επιφάνεια με τρόπο παρόμοιο με εκείνον του STM. Καθώς σαρώνεται το δείγμα, οι ασθενείς δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της αιχμής και της επιφάνειας αναγκάζουν το βραχίονα να αποκλίνει. Με τη μέτρηση αυτής της απόκλισης αποκαλύπτεται 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 νανοσωλήνες άνθρακα διαμέτρου 1 νανομέτρου διατεταγμένοι πάνω σε μια επιφάνεια πυριτίου. Οι νανοτεχνολόγοι πειραματίζονται με αυτά τα συστήματα αποσκοπώντας στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων εξαιρετικά μικρών διαστάσεων.

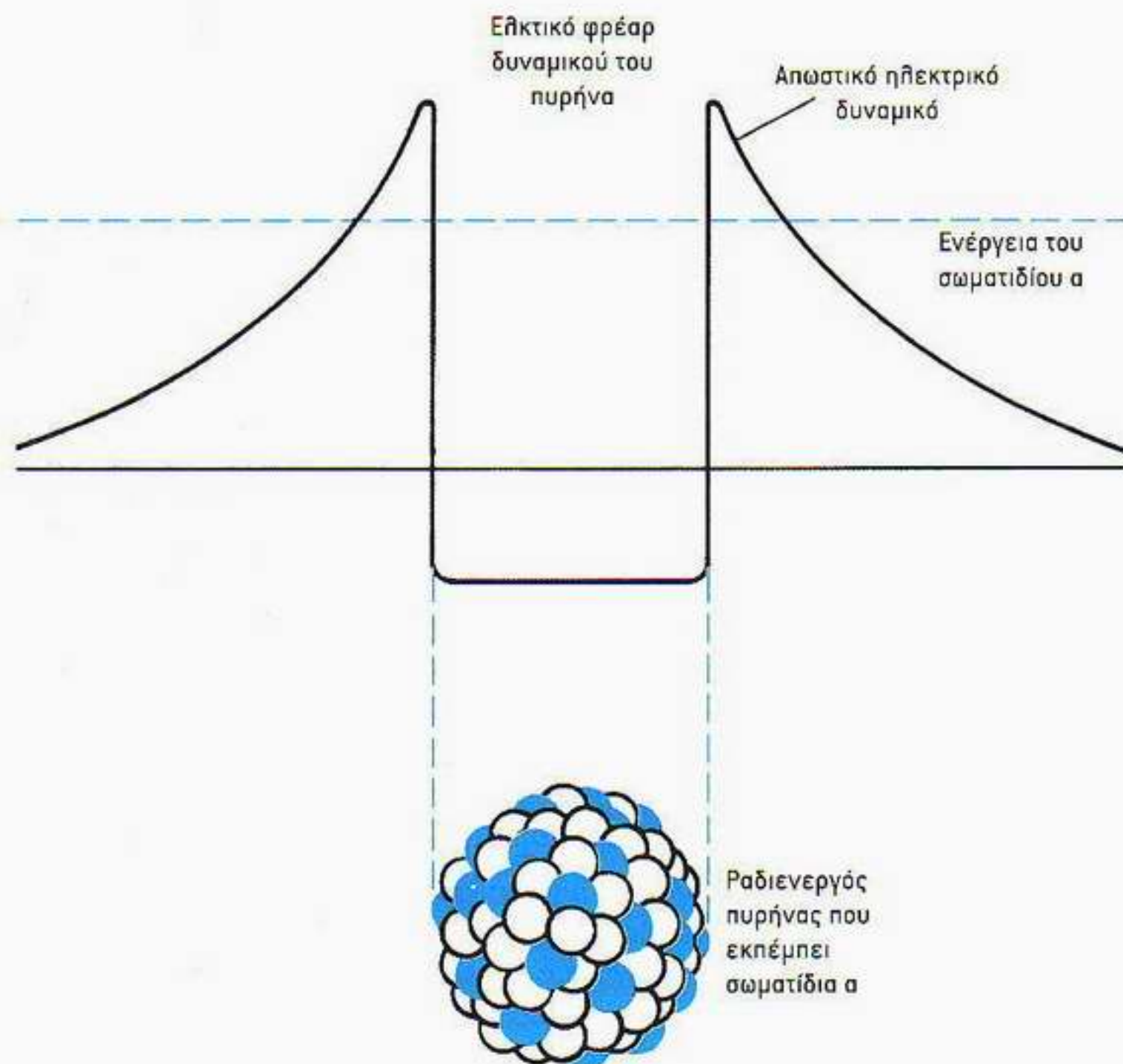
γείας. Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV) ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν κινηθεί μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού 1 βολτ. Ανάλογες ενέργειες συναντάμε στις ηλεκτρονιακές ενεργειακές στάθμες των ατόμων. Από την άλλη, οι διαδικασίες που σημειώνονται στον πυρήνα έχουν ενέργειες 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, απωθούνταν 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 κατακυλώντας με ορμή από την κορυφή, ασφαλώς θα σας είχε τραυματίσει σοβαρά. Αντίθετα, όμως, εσείς δεν νιώσατε παρά μόνο μια πολύ ελαφρά ώθηση!

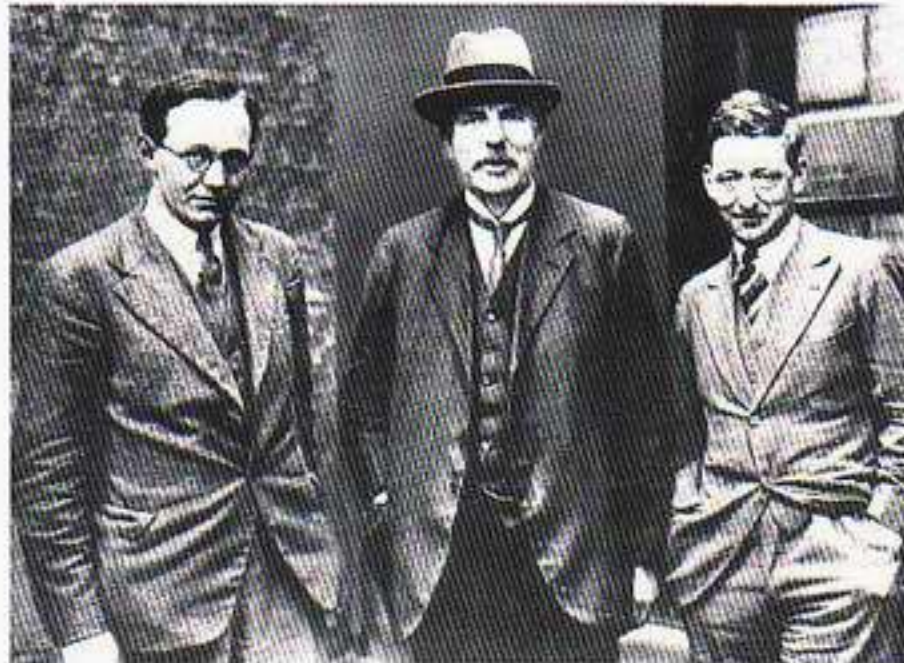


Ο George Gamow (1904-1968) υπήρξε ο δημιουργός του ατρόμητου εξερευνητή κυρίου Τόμπκινς. Ο Gamow ήταν εγγονός ενός στρατηγού του τσάρου και έλαβε το διδακτορικό δίπλωμά του από το Πανεπιστήμιο του Λένινγκραντ. Αφού εργάστηκε στα περισσότερα σημαντικά επιστημονικά κέντρα της Ευρώπης, εγκαταστάθηκε τελικά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

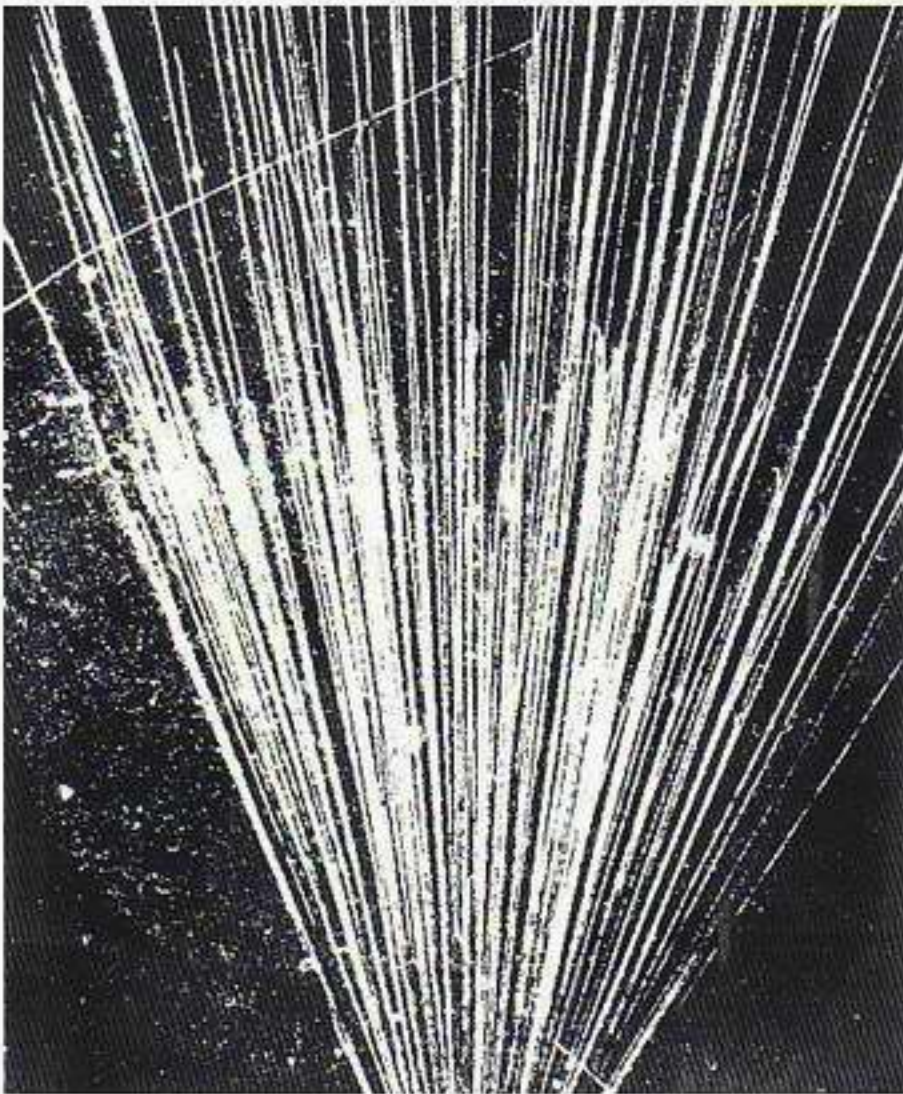
Εικόνα 5.16 Ο Gamow πρωτοεφάρμοσε τη φυσική του κβαντικού φαινομένου σήραγγας στη διαδικασία της διάσπασης α. Επειδή τα σωματίδια α χαρακτηρίζονται από ασυνήθιστη σταθερότητα, μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκονται μέσα σε ένα φρέαρ δυναμικού το οποίο οφείλεται σε όλα τα υπόλοιπα σωματίδια του πυρήνα. Ένα 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 συνωστιζονται 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), εκστέρωθεν του Rutherford.

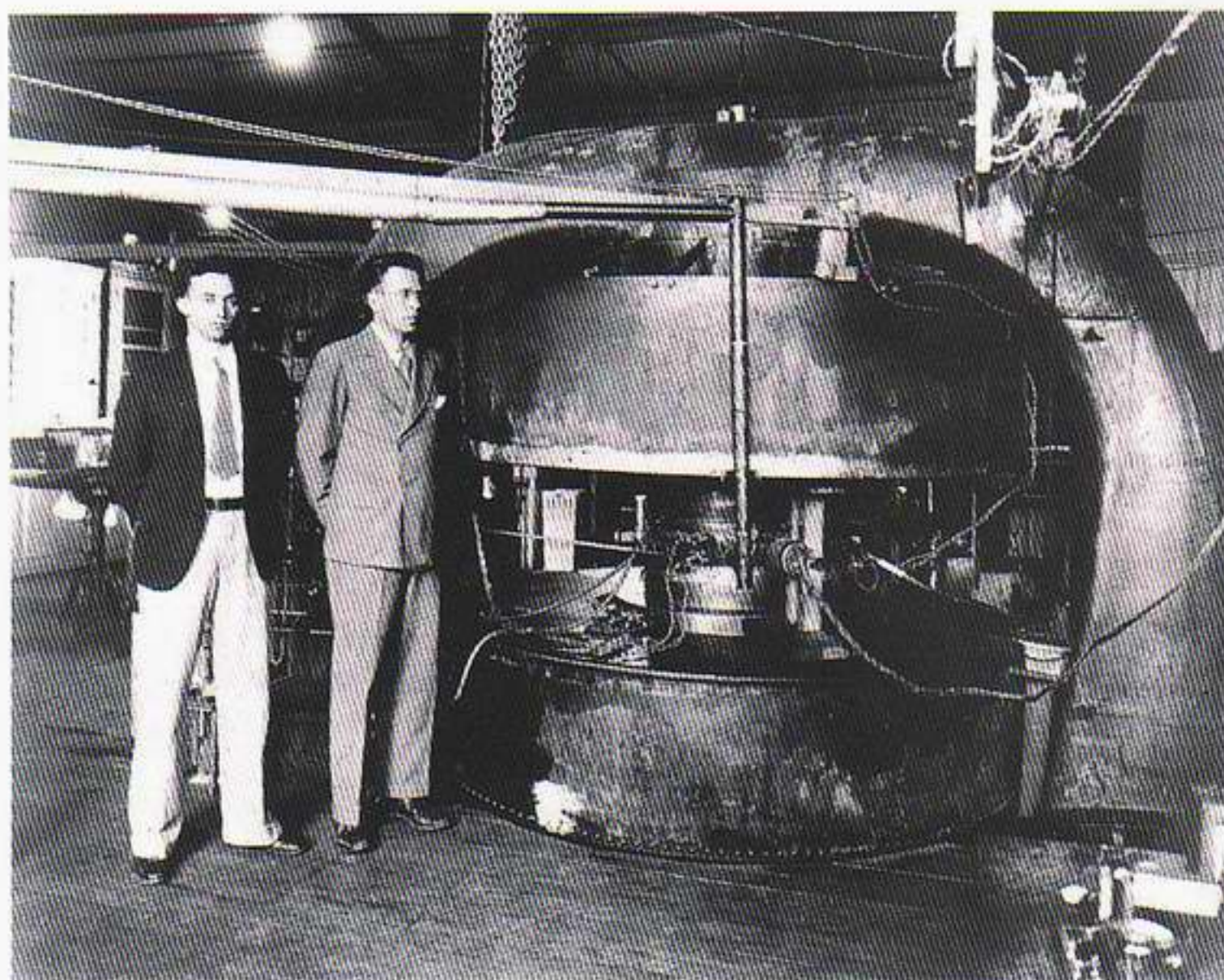


Εικόνα 5.17 Ίχνη τροχιών σωματιδίων α σε ένα θάλαμο νέφους. Τα ίχνη αυτά αποτελούνται από μικροσκοπικά σταγονίδια νερού που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα συμπύκνωσης κατά μήκος της τροχιάς ενός σωματιδίου α . Εφόσον ένα σωματίδιο α έχει πολύ μικρή πιθανότητα να συναντήσει τον πυρήνα ενός από τα άτομα του 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 κόμπο 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.

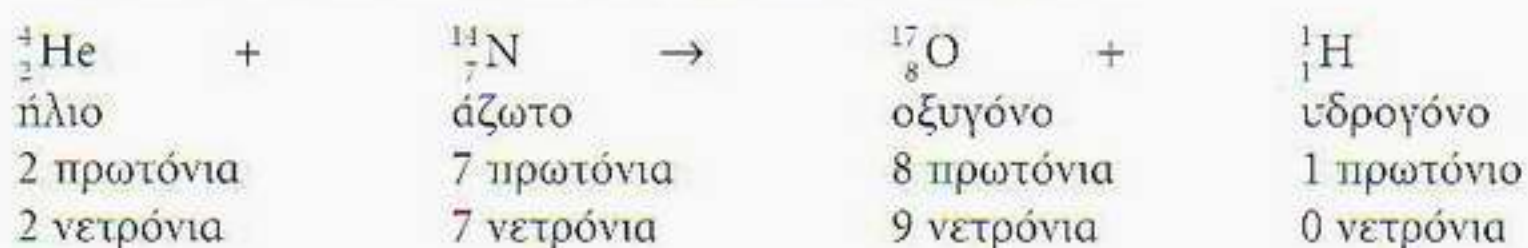
Μολαταύτα, η εξήγηση της διάσπασης α με τη βοήθεια του φαινομένου σήραγγας παραμένει έγκυρη ως προς τα βασικά της σημεία.

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 δίνουν στο κύκλοτρό τους. Με τη διάταξη αυτή παρήχθη το 1937 το πρώτο τεχνητό χημικό στοιχείο, το τεχνητό. Το τεχνητό έχει 43 πρωτόνια, αλλά δεν το συναντάμε στη φύση επειδή όλα του τα ισότοπα είναι ραδιενεργά με μικρούς χρόνους ημιζωής.



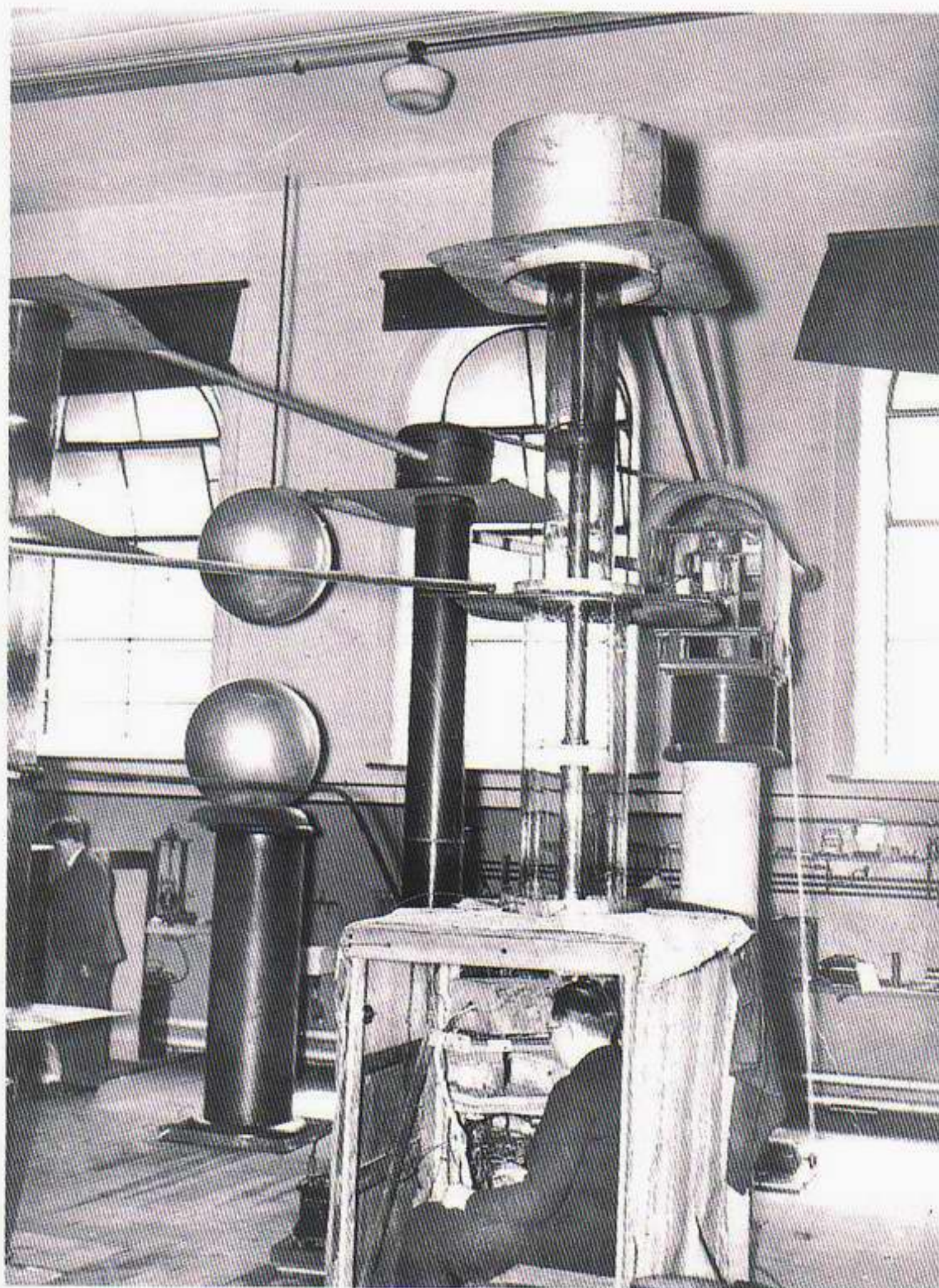
κατά ατόμων αζώτου, διαπίστωσε ότι σε μερικές περιπτώσεις παράγονταν πρωτόνια. Έτσι, ο Rutherford συμπίερανε ότι είχε δει μια «πυρηνική διάσπαση». Την αντίδραση αυτή θα τη γράφαμε σήμερα ως εξής:



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.

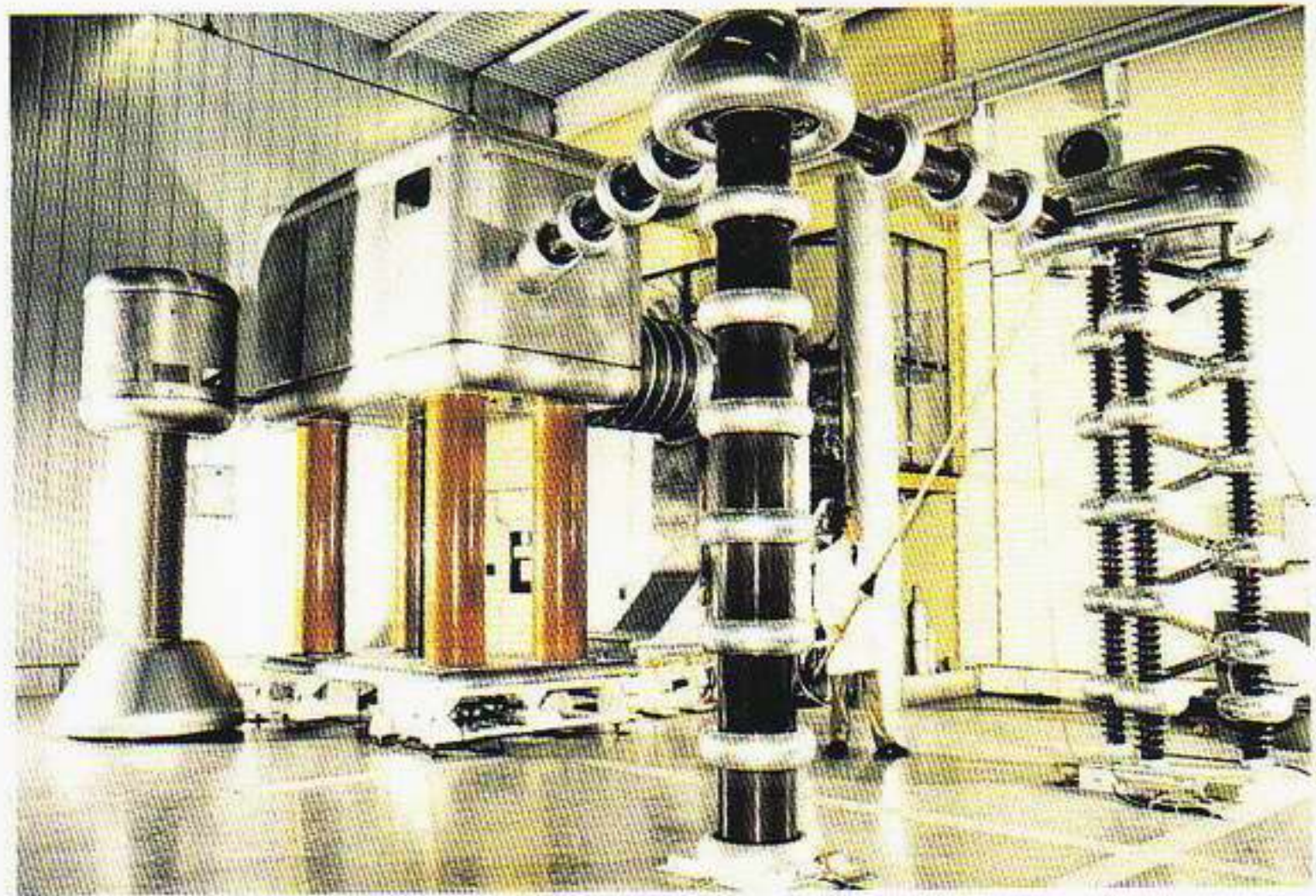
Αυτή η δυνατότητα έγινε πραγματικότητα όταν εφευρέθηκαν νέοι τύποι επιταχυντών σωματιδίων. Το 1932, την ίδια χρονιά που ο Chadwick ανακάλυψε το νετρόνιο, ένας αμερικανός φυσικός ονόματι Ernest Lawrence κατασκεύασε μια μηχανή που ονομάστηκε *κύκλοτρο*, και η οποία μπορούσε να επιταχύνει σωματίδια σε ενέργειες αρκετών μεγαβλεκτρονιοβόλτ. 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 μεγαβλεκτρονιοβόλτ 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 στόχου 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

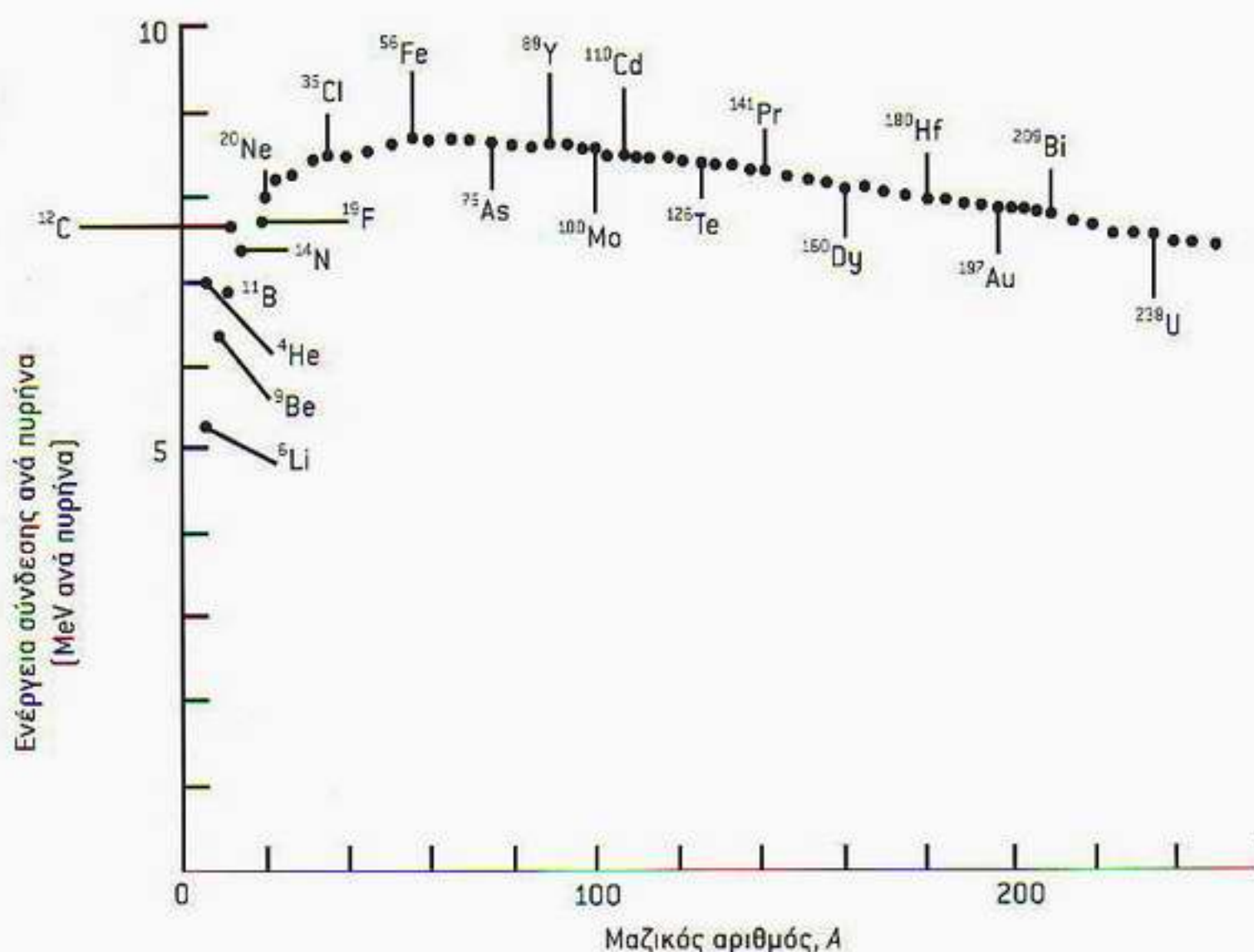
$$A = Z + N.$$

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-τρίτιου, 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 συναρτější 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.



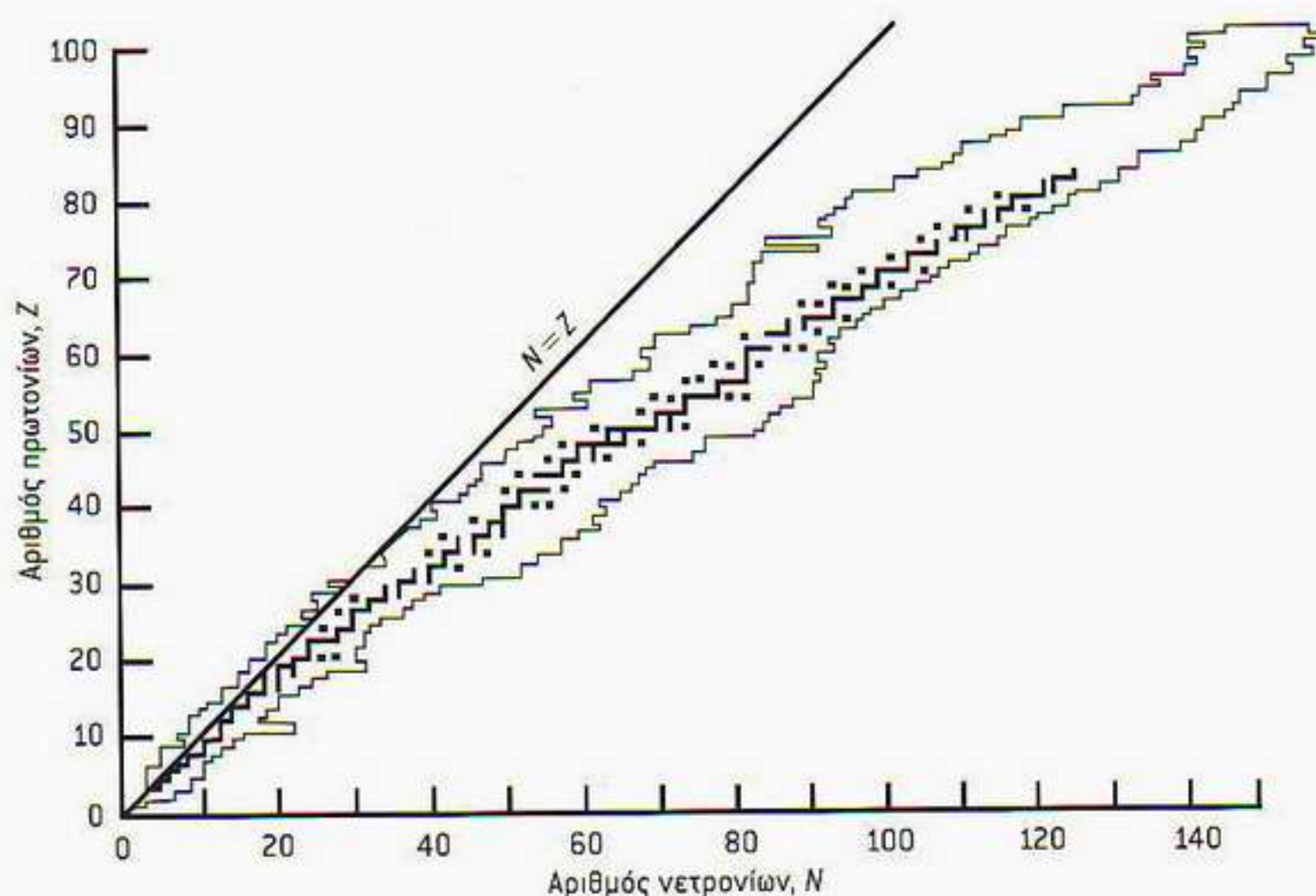
η οποία δυνητικώς απελευθερώνει ενέργεια 17,6 MeV. Το πρόβλημα που παρουσιάζει η παραγωγή ενέργειας με αυτό τον τρόπο έγκειται στο ότι είναι δύσκολο να φτιάξουμε ένα περιβάλλον στο οποίο να μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτοσυντηρούμενη αντίδραση. Και τούτο λόγω του οικείου ηλεκτρικού φράγματος Coulomb, 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 πχει 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!

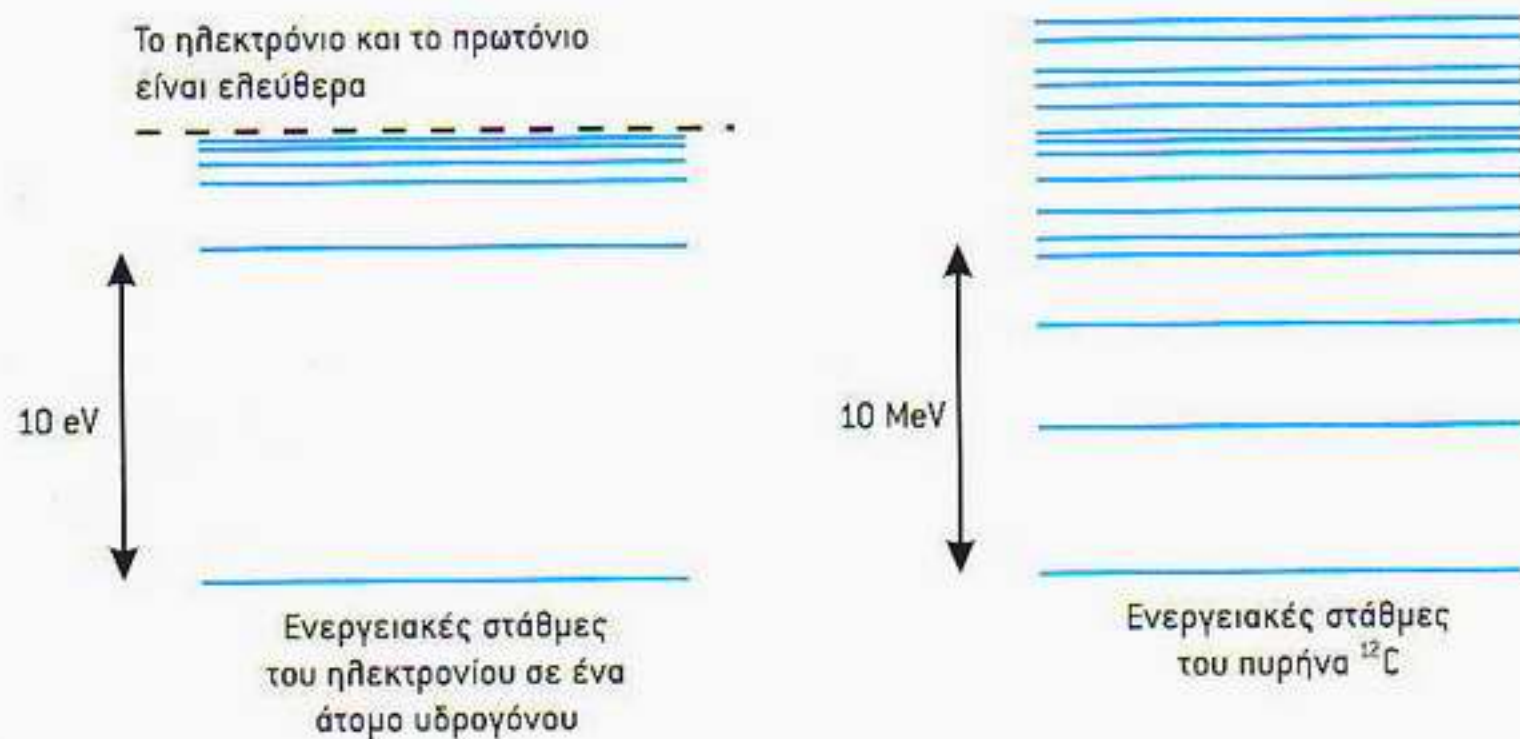
Ραδιενέργεια, πυρηνική σύντηξη και η ατομική βόμβα

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 ^{12}C . 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 πρωτόνιά 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».

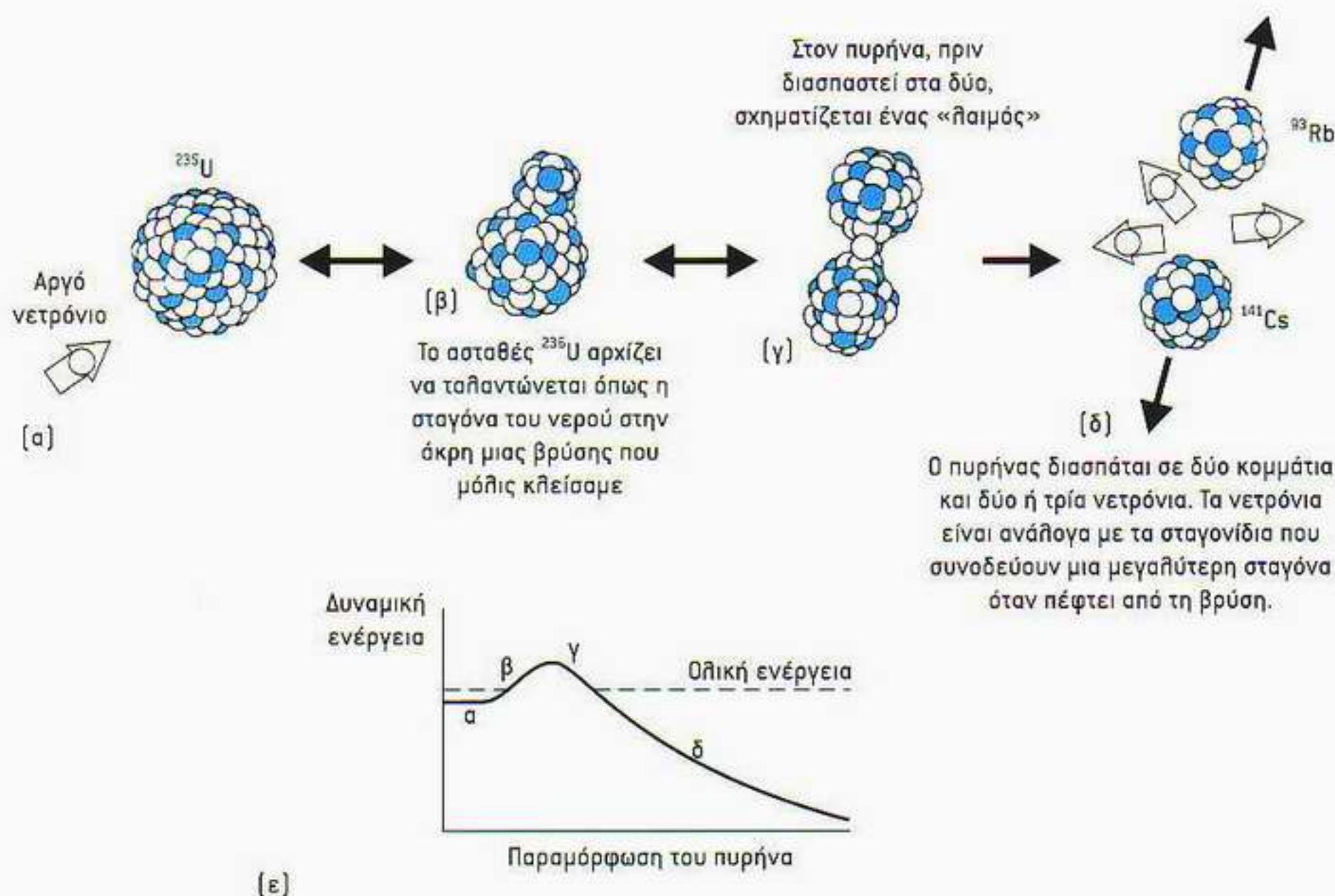
Αυτή η εικόνα μάς δείχνει επίσης ότι υπάρχει η δυνατότητα ένας βαρύς πυρήνας να μειώσει την ενέργειά του με τρόπο εντυπωσιακότερο από τη διάσπαση β . Ο Bohr είχε διατυπώσει την άποψη ότι τους βαρείς πυρήνες θα έπρεπε να τους φανταζόμαστε μάλλον ως «υγρές σταγόνες» παρά ως ψαθυρό στερεό. Σε έναν βαρύ 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 του 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 προέβαλε 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-

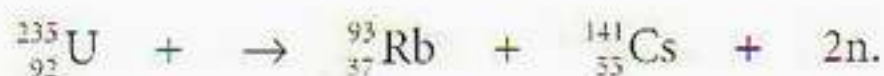


Εικόνα 5.23 Σχηματική παράσταση του μοντέλου της υγρής σταγόνας για την πυρηνική σχάση —[α] ως [δ]— και της σχέσης του με το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας [ε].

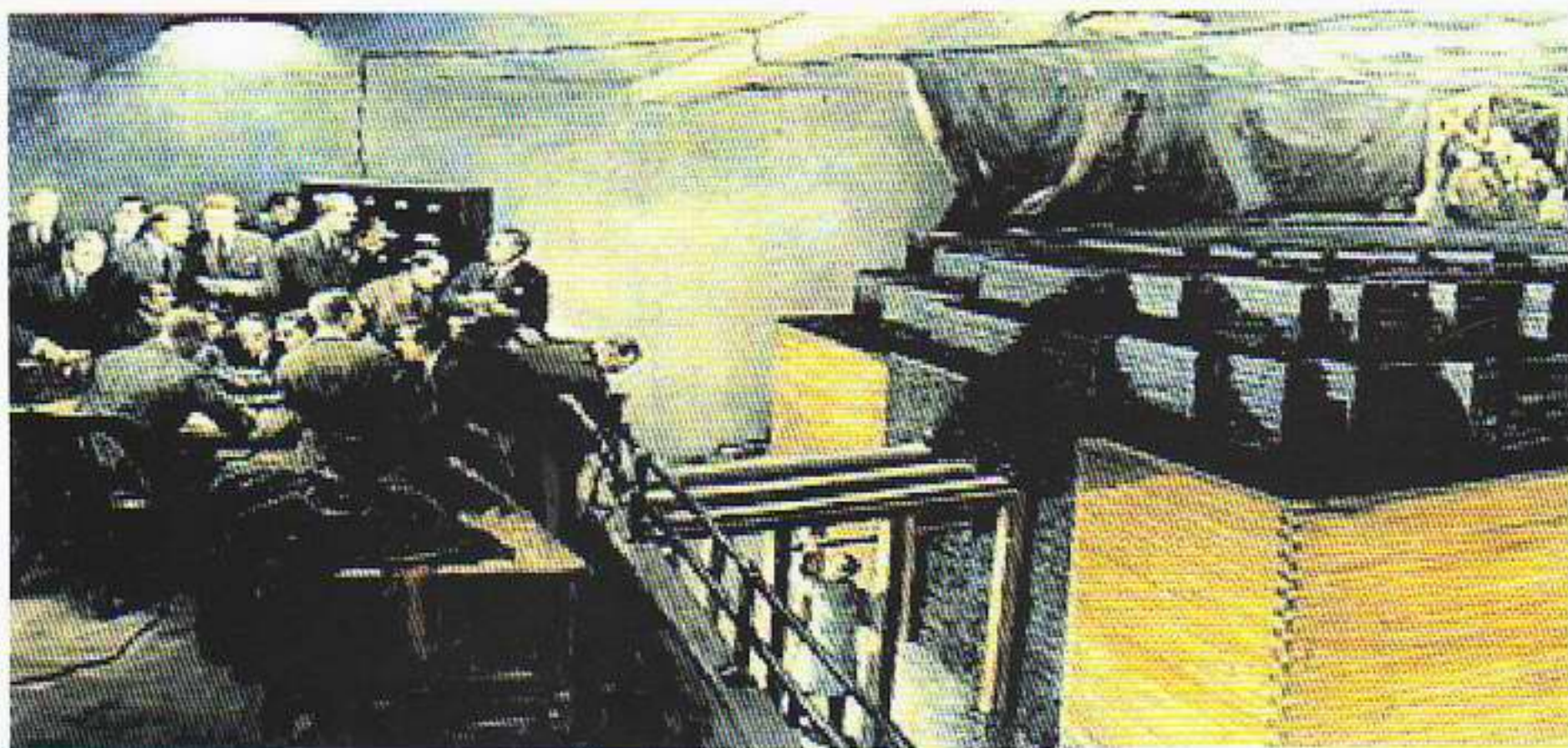
λάχιστης» ενέργειας διαπερνώντας το φράγμα που χωρίζει τις δύο κοιλάδες. Το «ψευδοελάχιστο» της ενέργειας ονομάζεται *μετασταθής κατάσταση*, και η σχάση μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία κβαντικής μετάπτωσης από τη μετασταθή στη θεμελιώδη κατάσταση που πραγματοποιείται χάρη στο φαινόμενο σήραγγας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

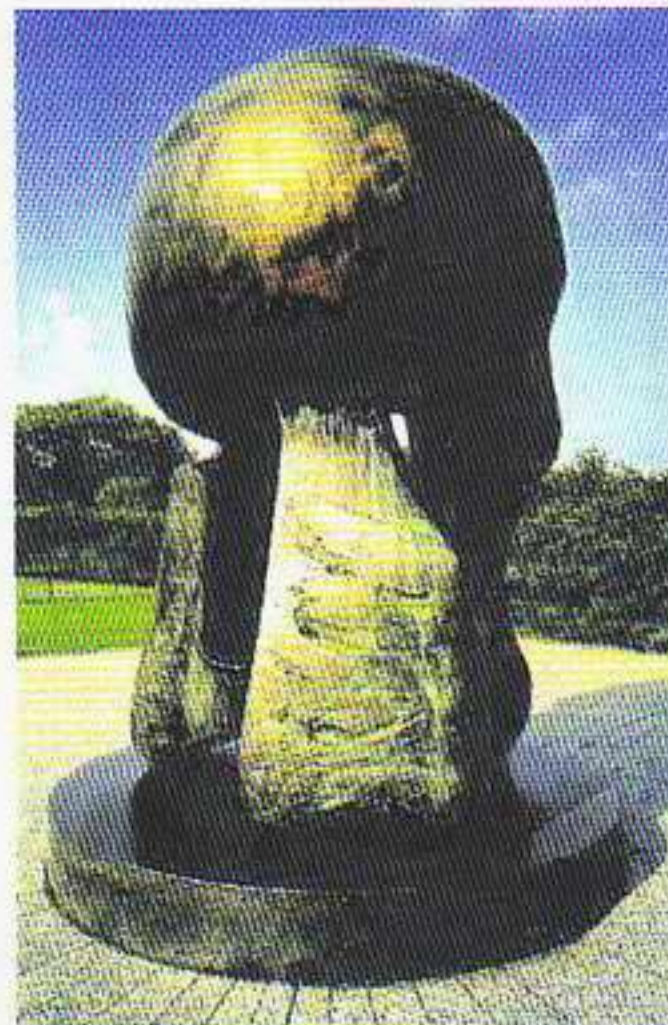
Το πώς δημιουργήθηκαν τα πυρηνικά όπλα σχετίζεται με το δεύτερο υστερόγραφο. Οι πυρηνικές αντιδράσεις, στις οποίες η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη μετατροπή της μάζας υπερβαίνει κατά περίπου 100 εκατομμύρια φορές την ενέργεια την οποία μπορούμε να πάρουμε από τις χημικές αντιδράσεις, έχουν σαφώς 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 καϊσίου. 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'

From JAMES BURNETT

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 shattering effects of one of the bombs. Now she is threatened with being blown up at the Pacific. Since after President Truman had ordered the unconditional news of the atomic bomb this afternoon, radio waves have said that a new ultimatum is to be sent to Japan.

The ultimatum says that Japan has 48 hours to surrender. If she does not, she will face the prospect of the most annihilating of the Japanese nation.

ZERO HOUR CAME ON JULY 15

Blind girl 'saw' the first big flash

By John L. ...

Spies and commandos WE BEAT in battle of wits

NAZIS BY FEW MONTHS

By ...

... the ...

JAP TOWN ...

...

...

...

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

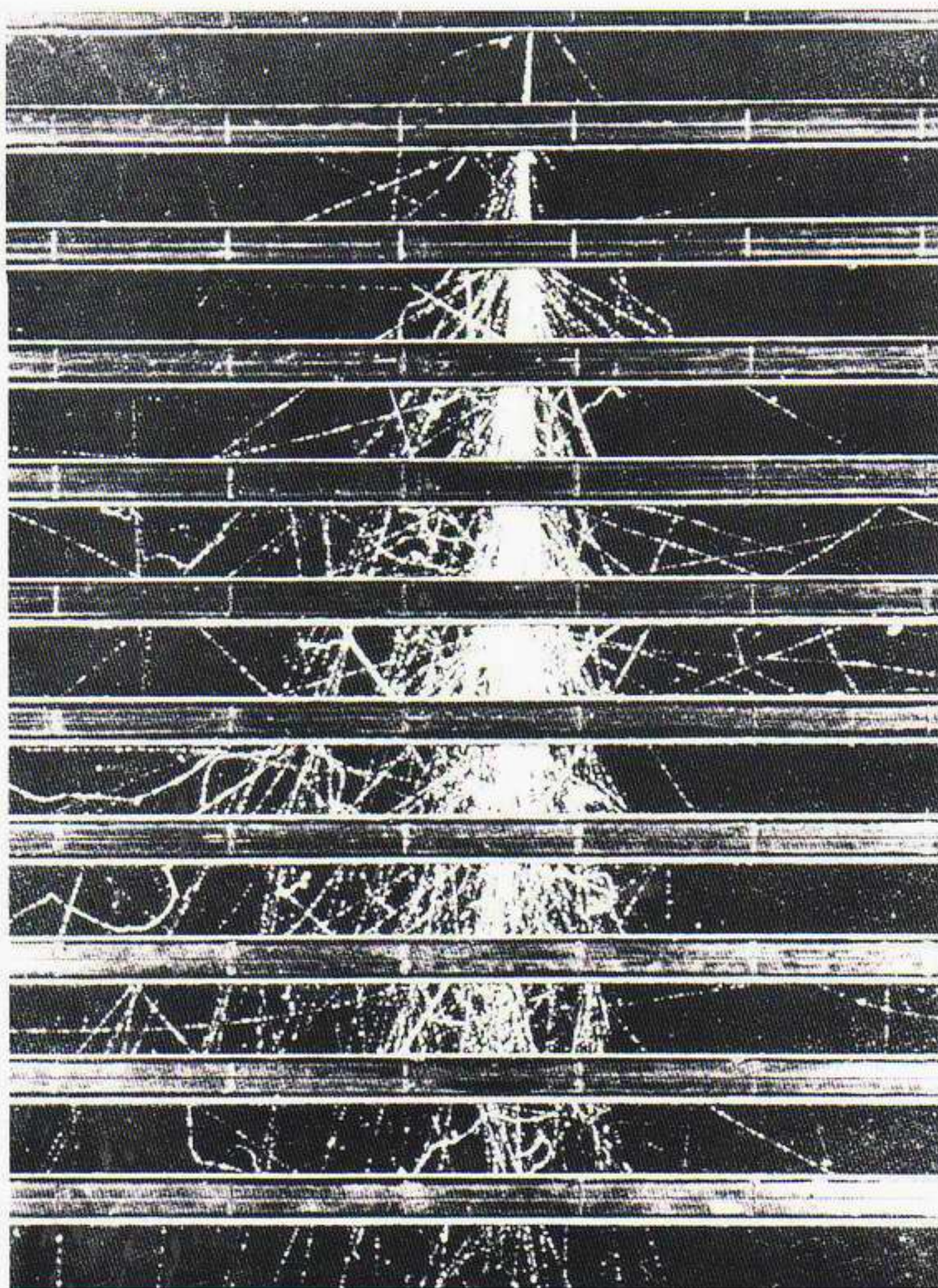
Σχεδόν τα πάντα γύρω μας είναι ελαφρώς ραδιενεργά. Ο αέρας που αναπνέουμε, το χώμα στους κήπους μας, τα περισσότερα δομικά υλικά, ακόμα και τα ίδια μας τα σώματα, όλα περιέχουν ραδιενεργά στοιχεία. Μεγάλο μέρος αυτής της ραδιενέργειας πηγάζει από το αυτοφυές ουράνιο και θόριο. Ο φλοιός της Γης έχει, 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! Δυσνητικώς 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 σχετικώς 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 Τα υπεραιωνόβια 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 ορειχάλκινων πλάκων στο θάλαμο.

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 Pauli 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 πολυμελούς οικογένειας (ηπεριελάμβανε 14, και κατά μια άλλη εκδοχή, 17 παιδιά)! Η φήμη του ως χημικού τού επέτρεψε να γλυτώσει τις συνηθισμένες ποινές που επέσυρε η ανορθόδοξη συμπεριφορά του, ενώ η κυβέρνηση της τσαρικής Ρωσίας έδειξε ανοχή για τις φιλελεύθερες ιδέες του και την υποστήριξη από μέρους του των φοιτητικών αιτημάτων. Το 1876, μόλις 42 ετών, μπόρεσε να πάρει διαζύγιο από τη σύζυγό του και να παντρευτεί μια νεαρή σπουδάστρια των καλών τεχνών χωρίς να διωχθεί από τις αρχές. Η πιο χαριτωμένη εκκεντρικότητά του ήταν ίσως ότι κουρευόταν μόνο μια φορά το χρόνο.

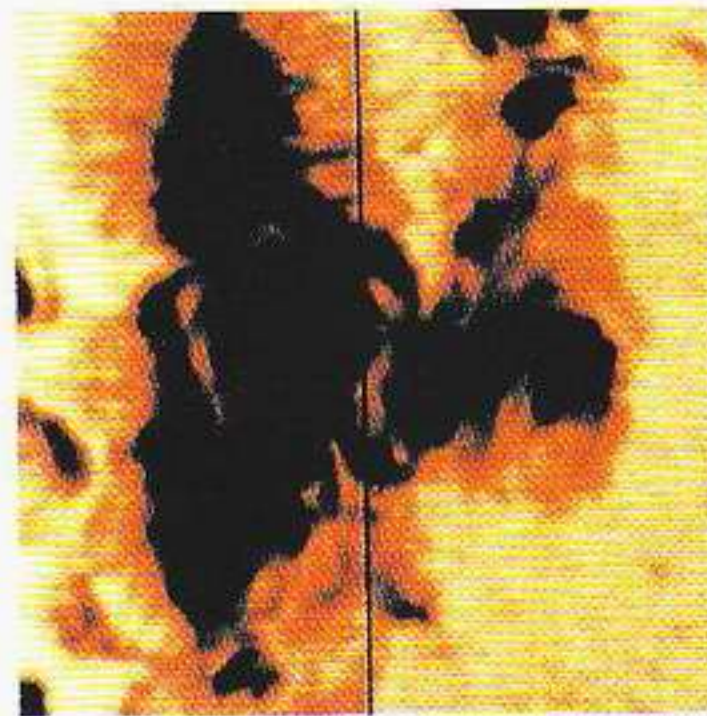
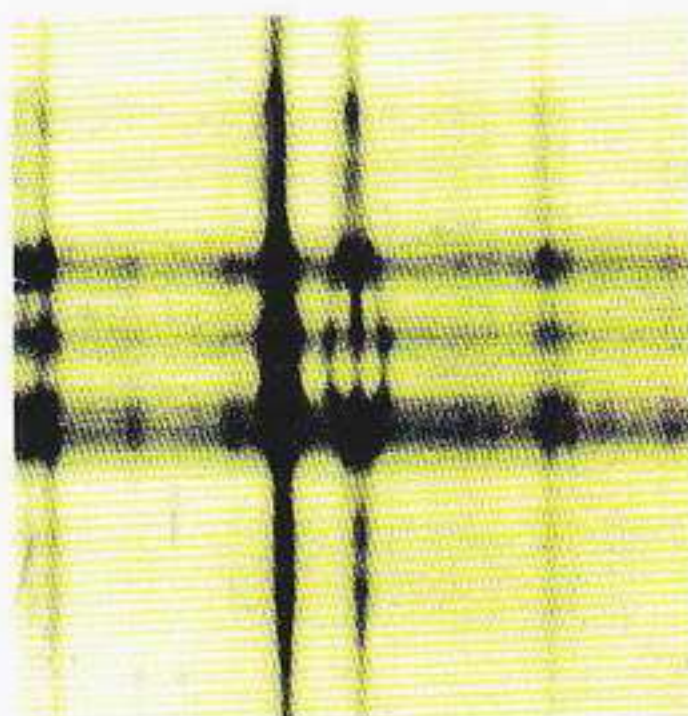
Εικόνα 6.1 «Πειραματικό Σύστημα Στοιχείων» —η επιστημονική εργασία που έστειλε ο Mendeleev σε ρώσους φυσικούς και χημικούς το 1869. Η κύρια διαφορά ανάμεσα σε αυτό το σύστημα και στον σημερινό «περιοδικό πίνακα» των χημικών στοιχείων (πέραν του διαφορετικού προσανατολισμού) οφείλεται στο ότι ο Mendeleev 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 = Co = 59	Pt = 106,6	Os = 199.
		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
H = 1				
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
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137
		? = 45	Ce = 92	Pb = 207.
		?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. Ός 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 αμηχανία 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-

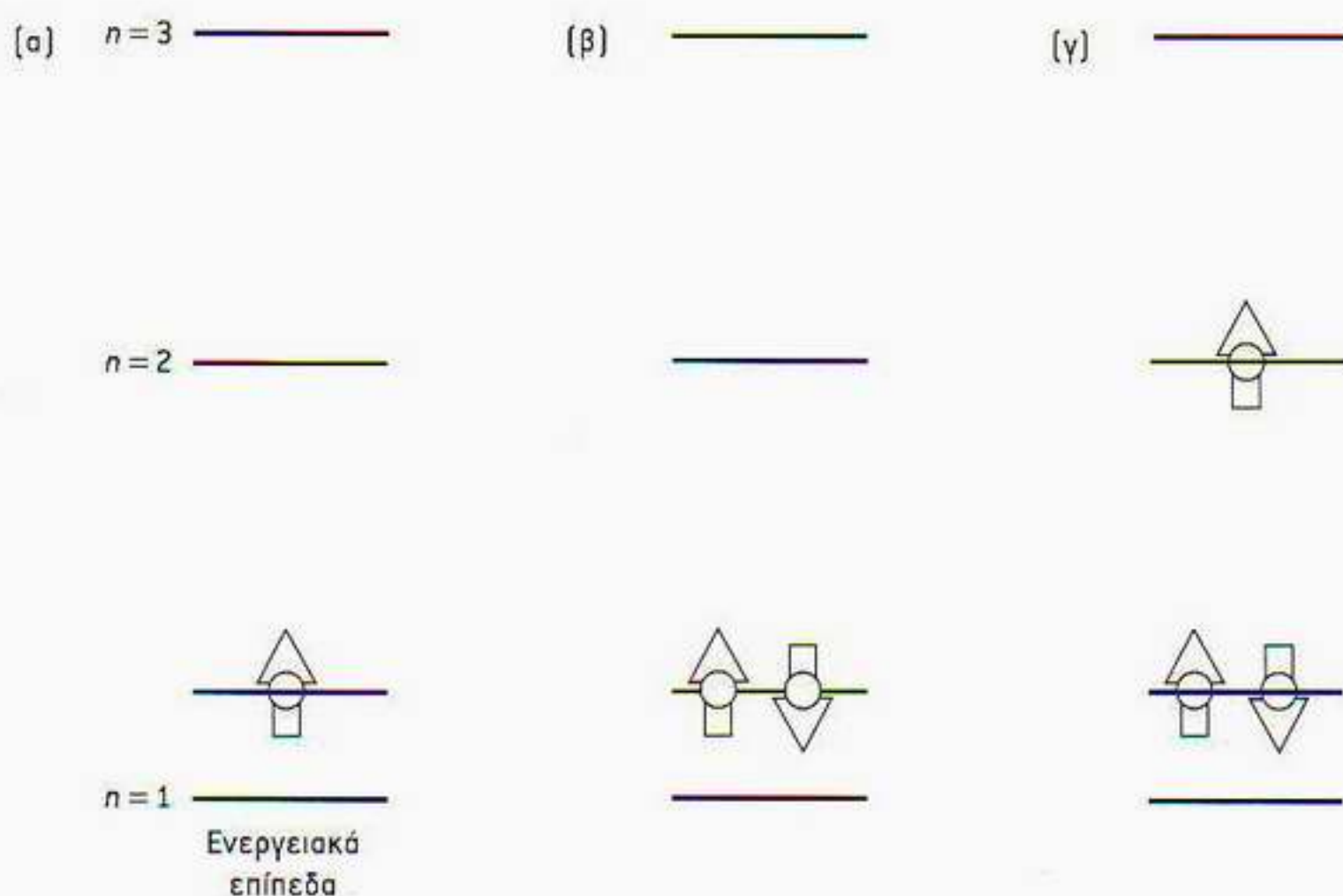


Ο Enrico Fermi (1901-1954) ξεχώριζε από τους φυσικούς της γενιάς του εξαιτίας της θαμνερής συνεισφοράς του τόσο στη θεωρητική όσο και στην πειραματική φυσική. Στα πρώτα στάδια του πειραματικού του έργου χρησιμοποίησε τα άρτι ανακαλυφθέντα νετρόνια, για να προκαλέσει τεχνητή ραδιενεργό διάσπαση. Η βράβειυσή 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 πιάθος 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 επιτρέπεται 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-



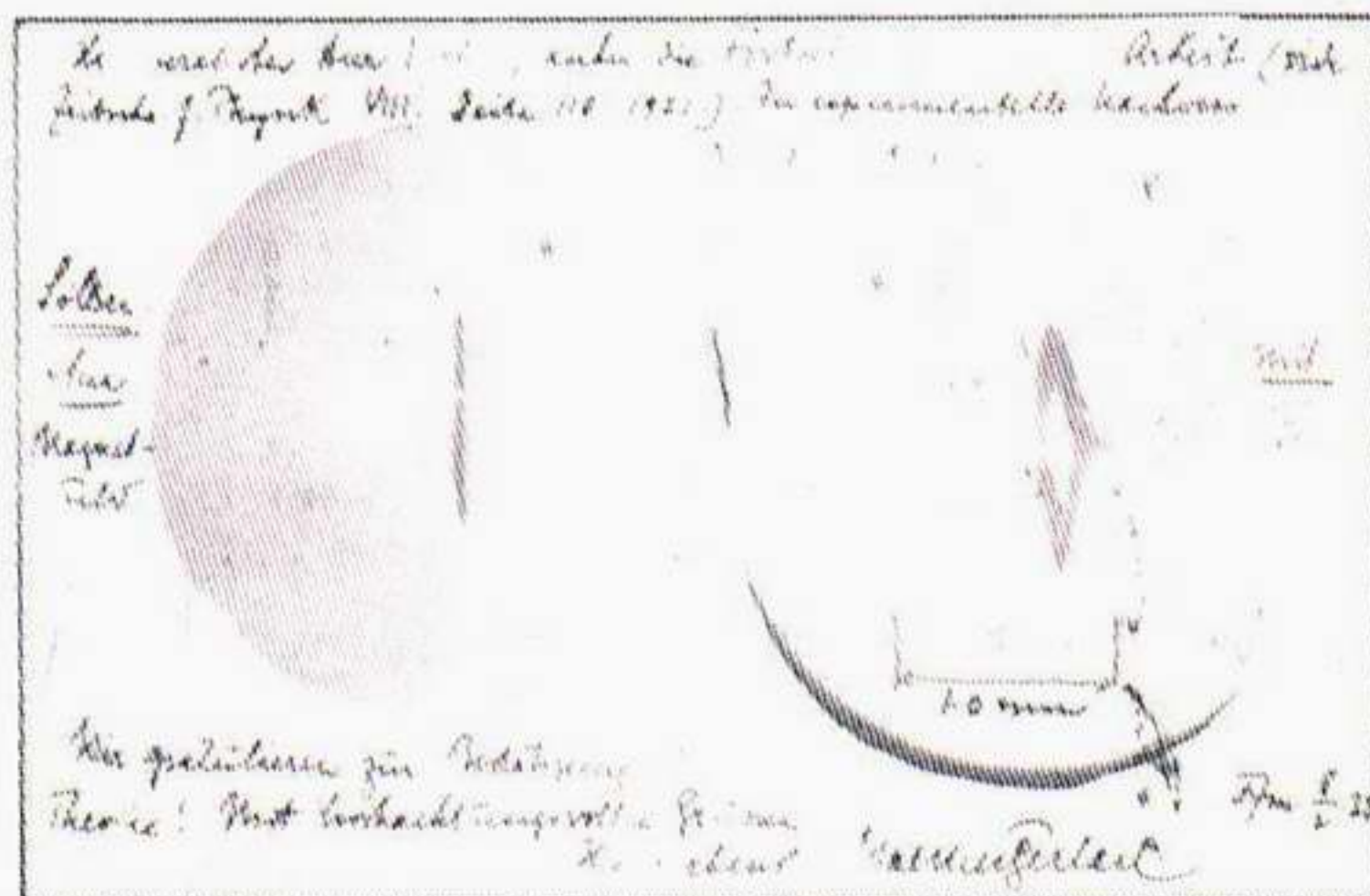
Εικόνα 6.3 Ηλεκτρόνια μέσα σε κιβώτιο. Τα ηλεκτρόνια συμπληρώνουν τις ενεργειακές στάθμες σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli. (α) Ένα ηλεκτρόνιο μέσα στο κιβώτιο —μπορεί να έχει σπιν ή «πάνω» ή «κάτω». (β) Δύο ηλεκτρόνια μέσα στο κιβώτιο —και τα δύο μπορούν να βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση, 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 μετανάστευσε στις ΗΠΑ. Τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1943.

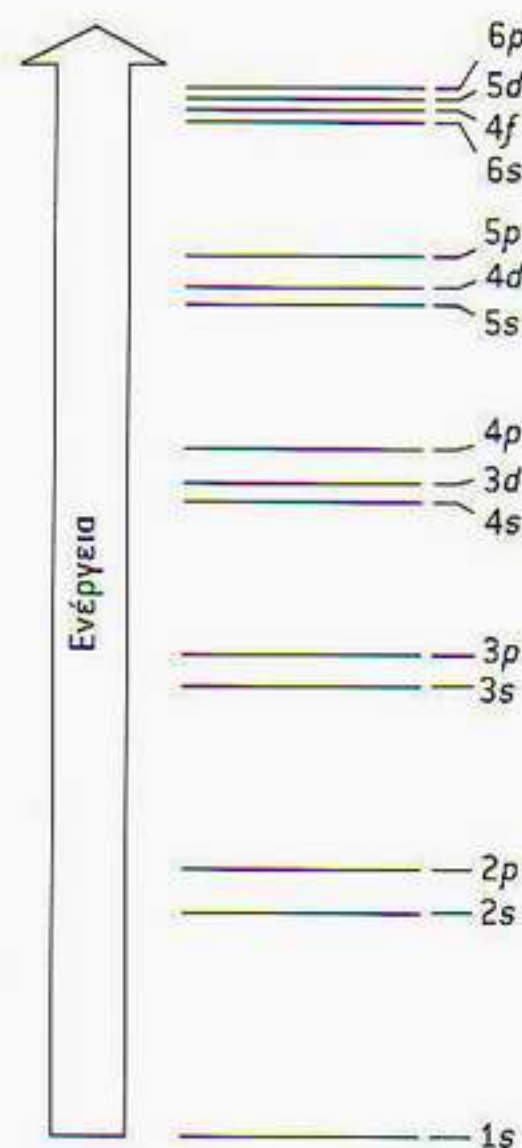


Η κάρτα που έστειλε ο Gerlach, συνεργάτης του Stern στο διάσημο πείραμά τους για την κβάντωση του χώρου, στον Niels Bohr για να του ανακοινώσει την ανακάλυψή τους.

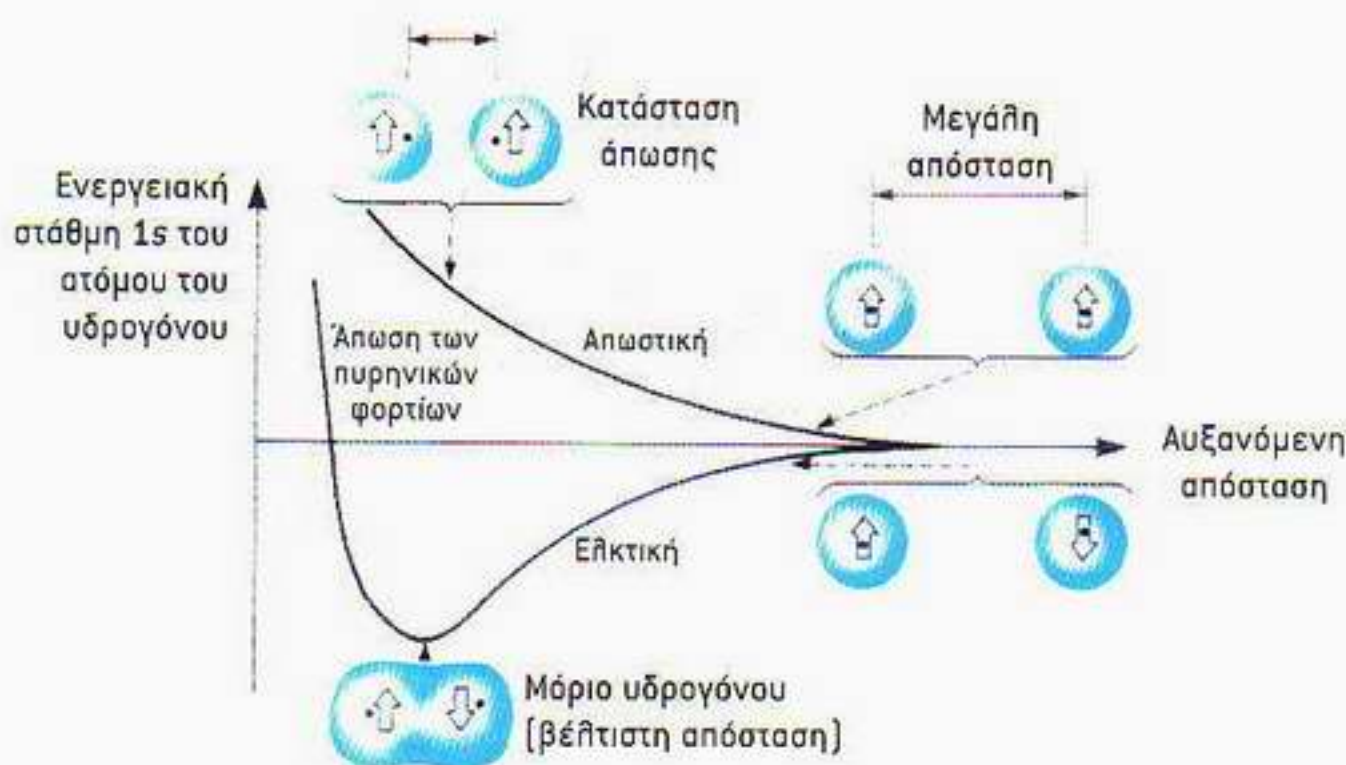
Τα χημικά στοιχεία

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 του Pauli μπορεί να εξηγήσει τους διαφορετικούς τύπους χημικών δεσμών και πώς τα ηλεκτρόνια συ-

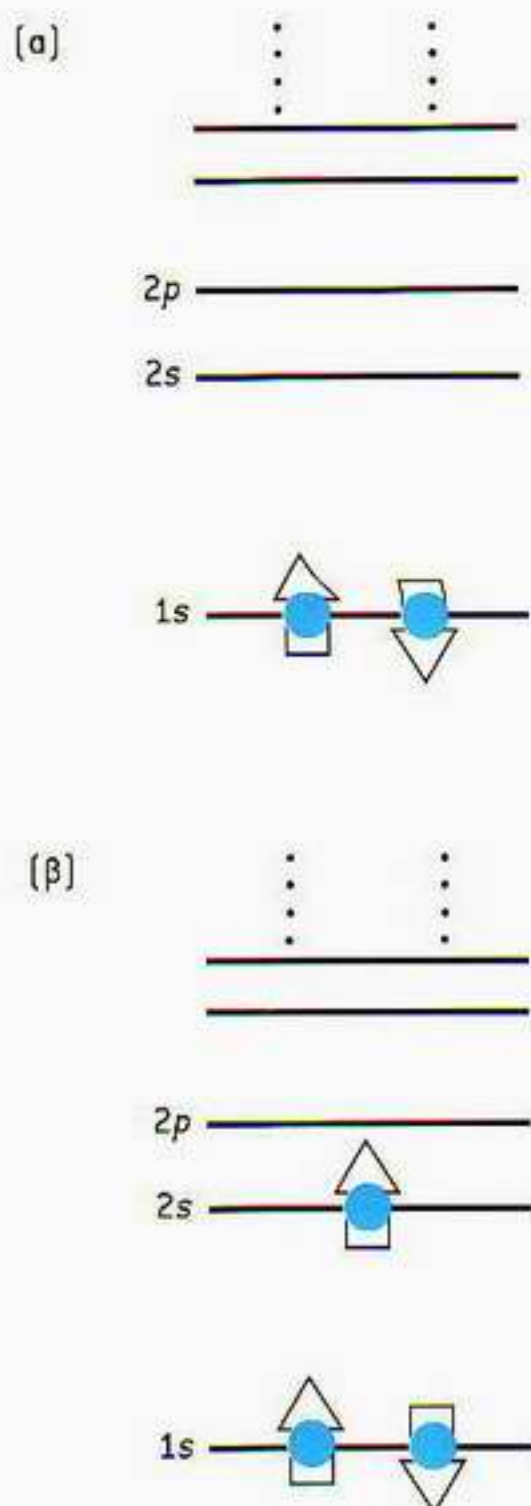
μπληρώνουν τις διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες για να προκύψουν τα διάφορα χημικά στοιχεία. Στο Κεφάλαιο 4 είδαμε πώς η εξίσωση του Schrödinger για το υδρογόνο οδήγησε στις κβαντωμένες ενεργειακές στάθμες του Bohr. Τα ηλεκτρόνια των μεγαλύτερων ατόμων, των οποίων ο πυρήνας περιέχει Z πρωτόνια —άρα και 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 ελκονται 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).

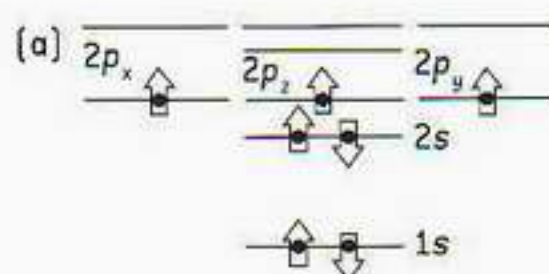
σουμε τον περιοδικό πίνακα είναι να τοποθετήσουμε τα ηλεκτρόνια σε αυτά τα επίπεδα σύμφωνα με τη «στεγαστική πολιτική» του Pauli. Δεν ήταν λοιπόν τυχαίο που ο Pauli είχε το παρατσούκλι «διευθυντής της στεγαστικής υπηρεσίας των ατόμων».

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 $1s$ 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 , y ή z . Τα σύμβολα αυτά δείχνουν αν οι λοβοί της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας του ηλεκτρονίου είναι προσανατολισμένοι στις κατευθύνσεις των αξόνων x , y 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 οποιονδήποτε 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 κυματοσυνάρτηση 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



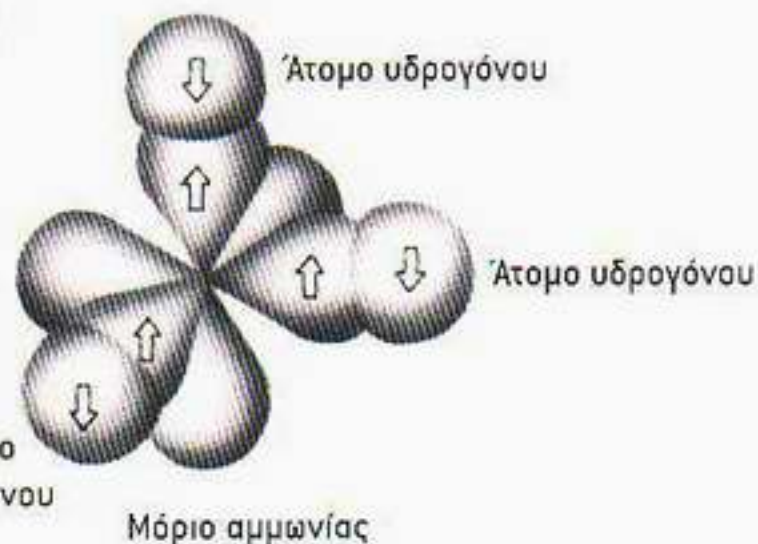
Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του αζώτου· τα ηλεκτρόνια της θεμελιώδους κατάστασης αναπαριστώνται ως μαύροι κύκλοι, ενώ ο προσανατολισμός τού σπιν με βέλη.

(β)



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

(γ)

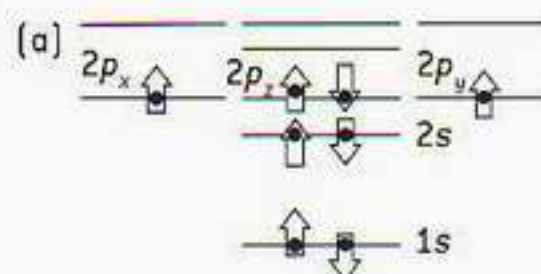


Άτομο υδρογόνου

Μόριο αμμωνίας

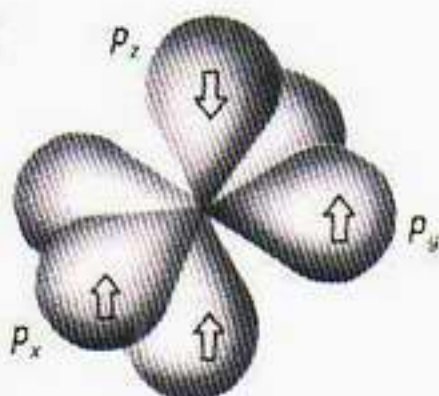
Εικόνα 6.7 Απεικόνιση της δομής του μορίου της αμμωνίας (NH_3).

(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.



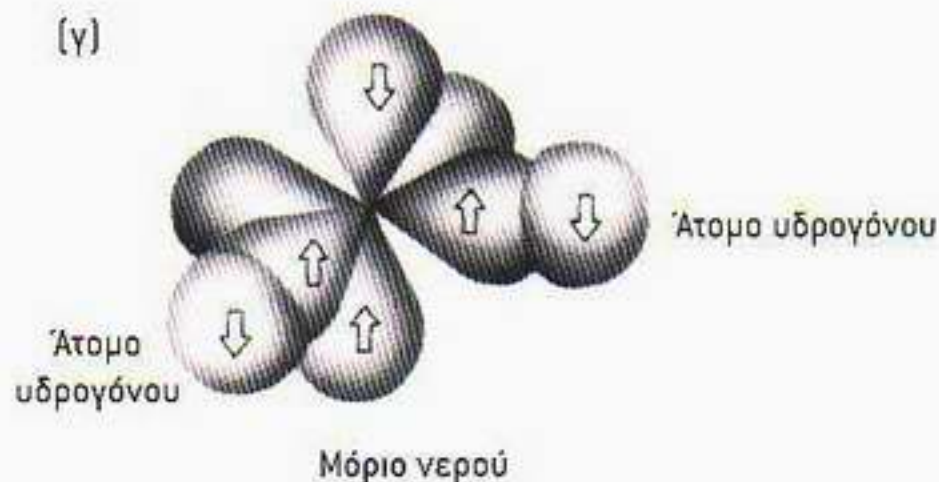
Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του οξυγόνου· τα ηλεκτρόνια της θεμελιώδους κατάστασης αναπαριστώνται ως μαύροι κύκλοι, ενώ ο προσανατολισμός τού σπιν με βέλη.

(β)



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

(γ)



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 (Li_2O), με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που το υδρογόνο συνδέεται με το οξυγόνο σχηματίζοντας το μόριο του νερού.

Μετάλλα, 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

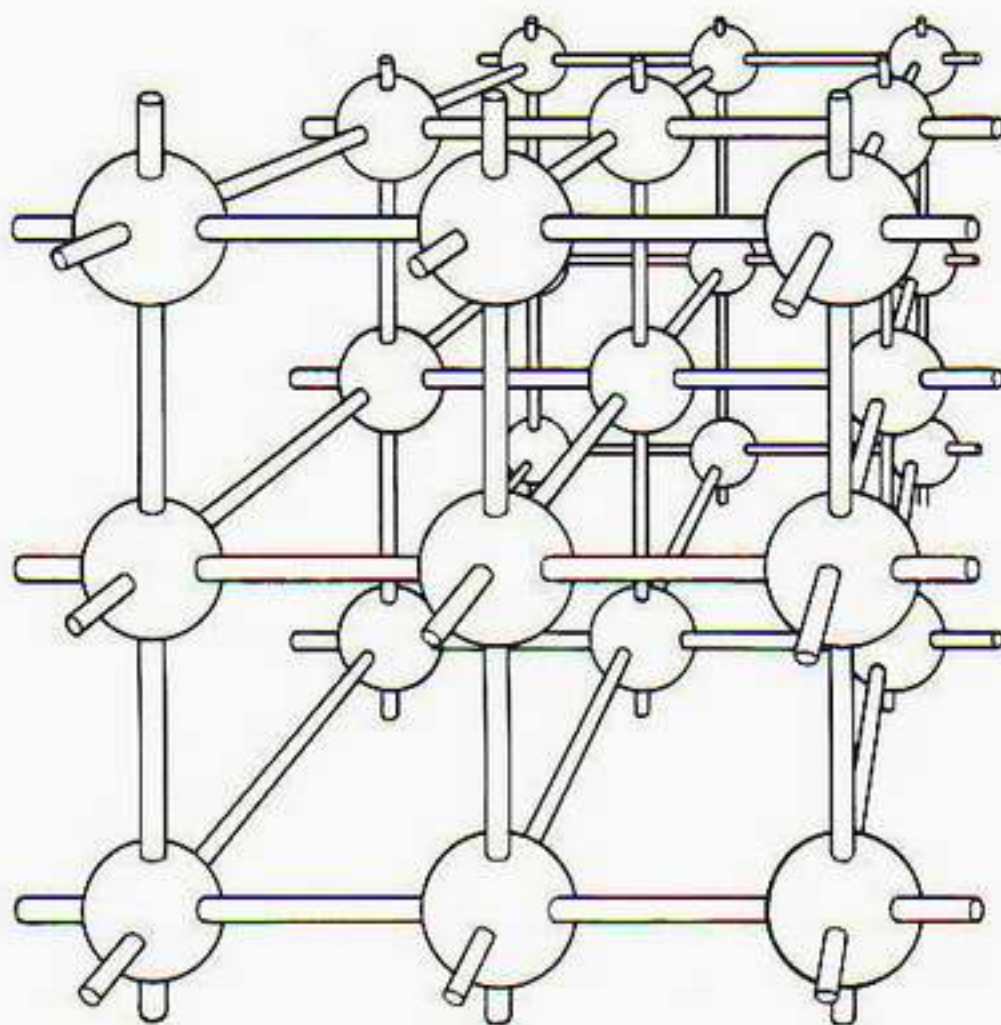


Εικόνα 6.9 Η φωτογραφία αυτή, που ελήφθη από το δορυφόρο Landsat, δείχνει τον κόλπο του Σαν Φρανσίσκο με τη Σίθικον Βόθει και το Σαν Χοσέ κάτω δεξιά. Στη μέση οριστερό διακρίνονται καθαρά οι λίμνες Σαν Αντρέας, που διατάσσονται κατά μήκος του διαβόητου τεκτονικού ρήγματος, παράλληλα με την ακτή.

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

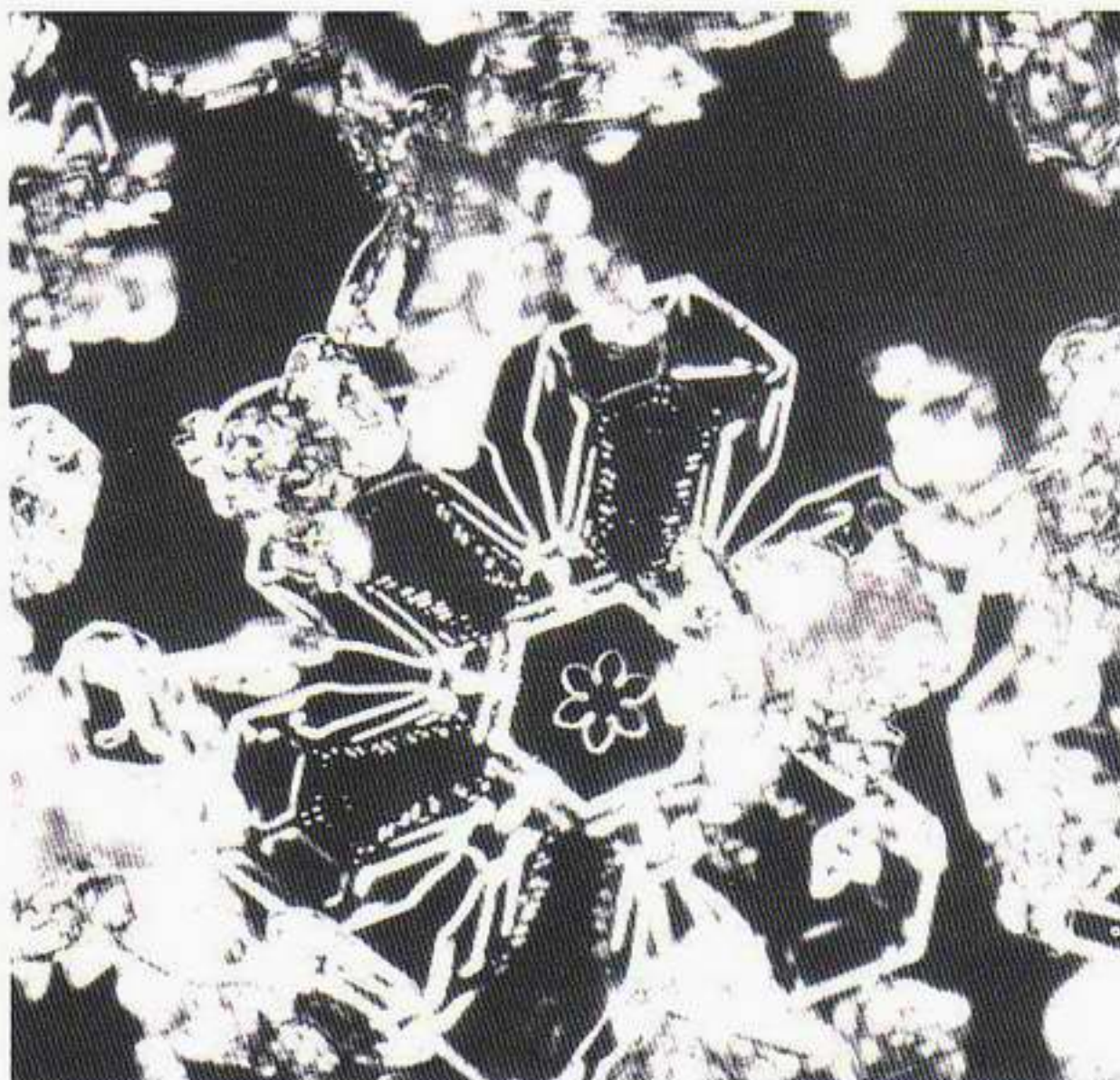
Εικόνα 6.10 Η διάταξη των ατόμων σε ένα κυβικό κρυστολλητικό πλέγμα. Οι σφαίρες παριστάνουν τις θέσεις των ατόμων, ενώ οι σωλήνες που τις συνδέουν τη διεύθυνση των δεσμών μέσω των οποίων συγκρατούνται τα άτομα του υλικού. Στην περίπτωση του κοινού επιτραπέζιου αλατιού, οι σφαίρες αντιστοιχούν εναλλάξ 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 άνγκστρεμ (10^{-10} μέτρα).



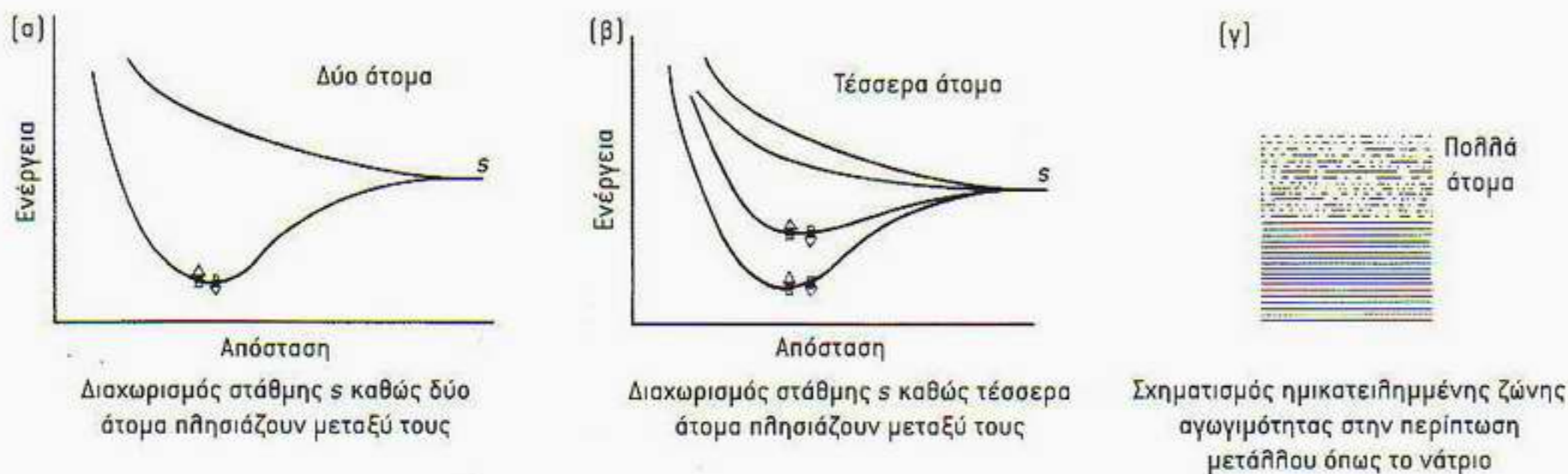
Εικόνα 6.11 Το κοινό επιτραπέζιο αλάτι, μεγεθυμένο 50 φορές με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Οι εμφανείς κυβικές μορφές αντικατοπτρίζουν την υποκείμενη πλεγματοειδή δομή.

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 ηλεκτρονίων 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 ηλεκτρονίων είναι αντιπαράλληλα. Όταν τα σπιν είναι παράλληλα, λόγω της αρχής του Pauli τα ηλεκτρόνια διατηρούνται σε απόσταση και δεν επιτρέπεται η σύνδεση των ατόμων. Από πλευράς ενέργειας βλέπουμε ότι, στην πρώτη περίπτωση, τα δύο ηλεκτρόνια 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 ηλεκτρόνια έχουν περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι τα δύο άτομα —οπότε αυτά δεν συνδέονται (βλ. Εικόνα 6.5). Ανάλογο φαινόμενο παρατηρείται με τα εξωτερικά ηλεκτρόνια 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 ηλεκτρόνια, ένα με σπιν «πάνω» και ένα με σπιν «κάτω». Οι κατώτερες ενεργειακές στάθμες αντιστοιχούν σε ισχυρότερα συνδεδεμένα ηλεκτρόνια 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 $2N$ ηλεκτρόνια και, για το νάτριο, θα είναι πλήρως κατειλημμένες. Η ζώνη $2p$ μπορεί να δεχτεί $6N$ ηλεκτρόνια (τρεις διαφορετικές καταστάσεις p επί δύο διαφορετικές καταστάσεις σπιν για καθεένα από τα N άτομα) και θα είναι επίσης συμπληρωμένη. Ωστόσο, το άτομο του νατρίου διαθέτει ένα μόνο ηλεκτρόνιο στην κατάσταση $3s$, οπότε στην περίπτωση μετάλλου με N άτομα, η ζώνη $3s$ θα περιέχει N μόνο ηλεκτρόνια και θα είναι ημικατειλημμένη. Αυτά τα ηλεκτρόνια της στάθμης $3s$ αποτελούν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Αν εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού στις άκρες ενός σύρματος από νάτριο, τα εν λόγω ηλεκτρόνια 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 ηλεκτρονίων αγωγιμότητας ενός μετάλλου μάς βοηθά να καταλάβουμε γιατί πολλές ιδιότητές τους μπορούν να εξηγηθούν με το απλό μοντέλο των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα κιβώτιο, το οποίο εξετάσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Κατά το σχηματισμό ομοιοπολικού δεσμού στο μόριο του υδρογόνου, τα δύο ηλεκτρόνια 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 ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μοιράζονται ανάμεσα σε όλα τα άτομα του μετάλλου.

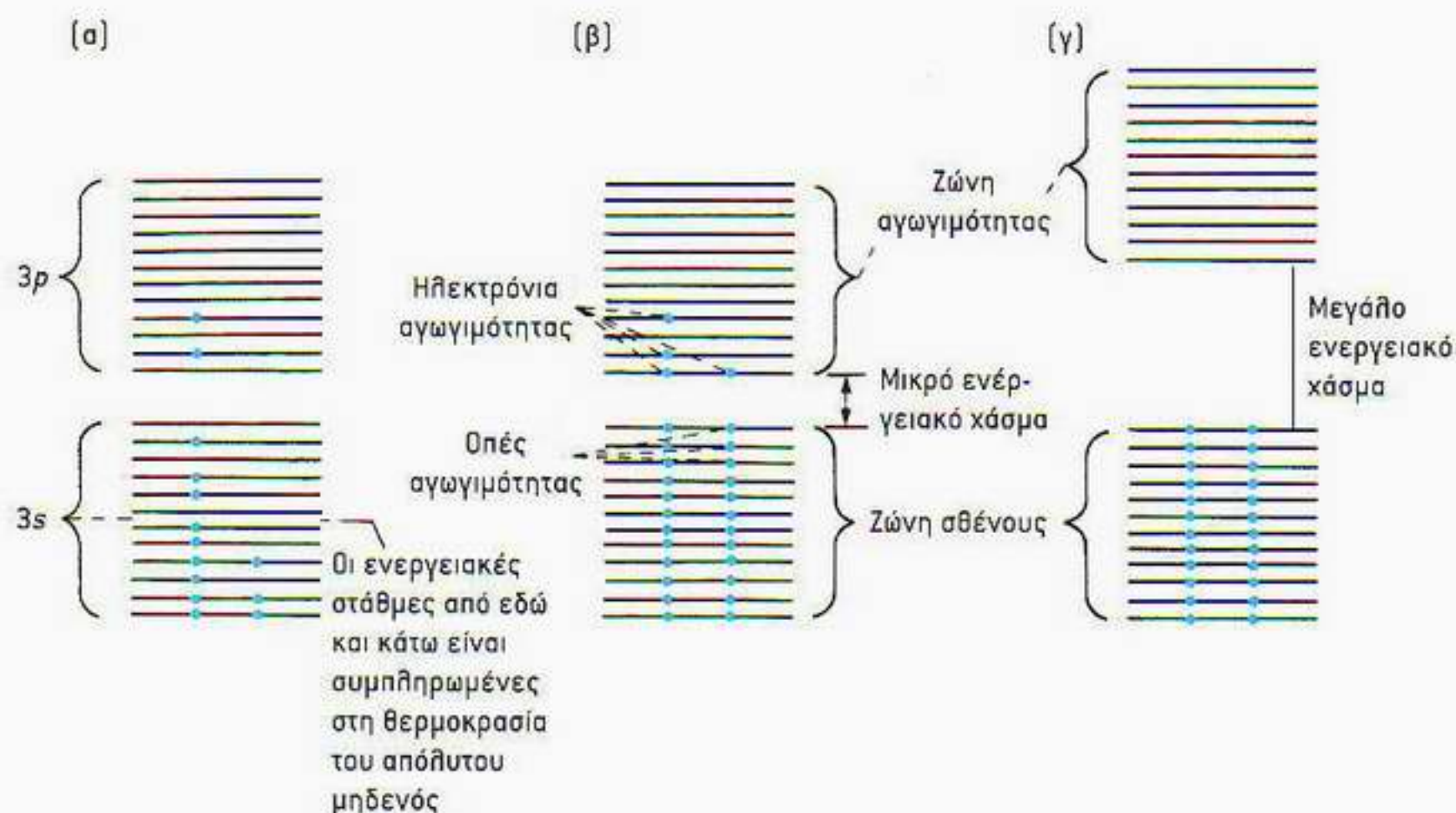


Εικόνα 6.12 Η υπέροχη συμμετρία αυτής της νιφάδας χιονιού αντικατοπτρίζει την εξαγωνική δομή που συγκροτείται από τους δεσμούς μεταξύ των μορίων νερού κατά το σχηματισμό του πάγου.



Εικόνα 6.13 Διαχωρισμός ενεργειακών σταθμών σε ένα στοιχείο όπως το νάτριο, που διαθέτει ένα μόνο ηλεκτρόνιο κατάστασης 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 ημικατεληγμένης ζώνης αγωγιμότητας, καθώς πολλά άτομα προσεγγίζουν το ένα το άλλο.

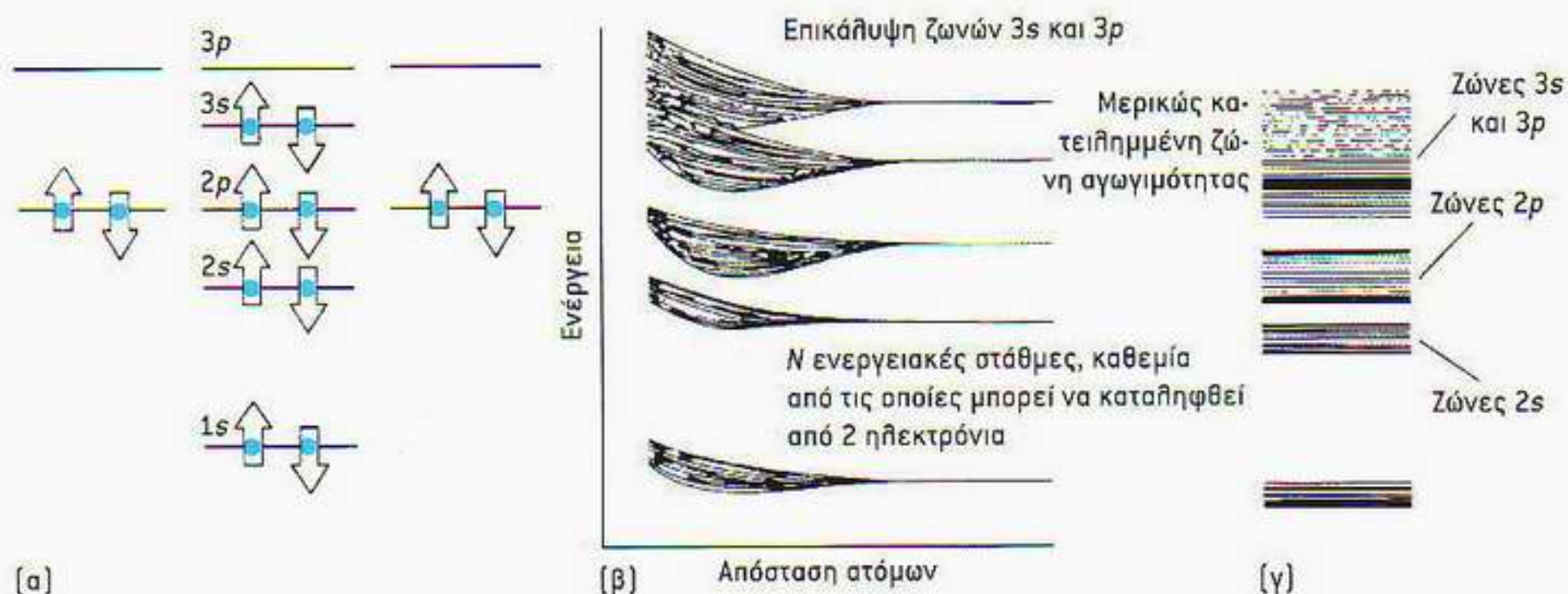
Η κατάσταση πραγμάτων που μόλις περιγράψαμε αντιστοιχεί στη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση του νατρίου, του οποίου τα ιόντα είναι «καρφωμένα» σε μια κρυσταλλική πλεγματοκή δομή. Σε θερμοκρασία δωματίου, όμως, τα ιόντα του πλέγματος διαθέτουν κάποια θερμική κινητική ενέργεια η οποία αντιστοιχεί σε δονήσεις 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 ασυμπληρωτές ενεργειακές στάθμες στις οποίες μπορούν να μετακινηθούν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, οπότε σε κανονικές θερμοκρασίες μερικά ηλεκτρόνια θα διεγερθούν στη σχεδόν ασυμπληρωτή 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.

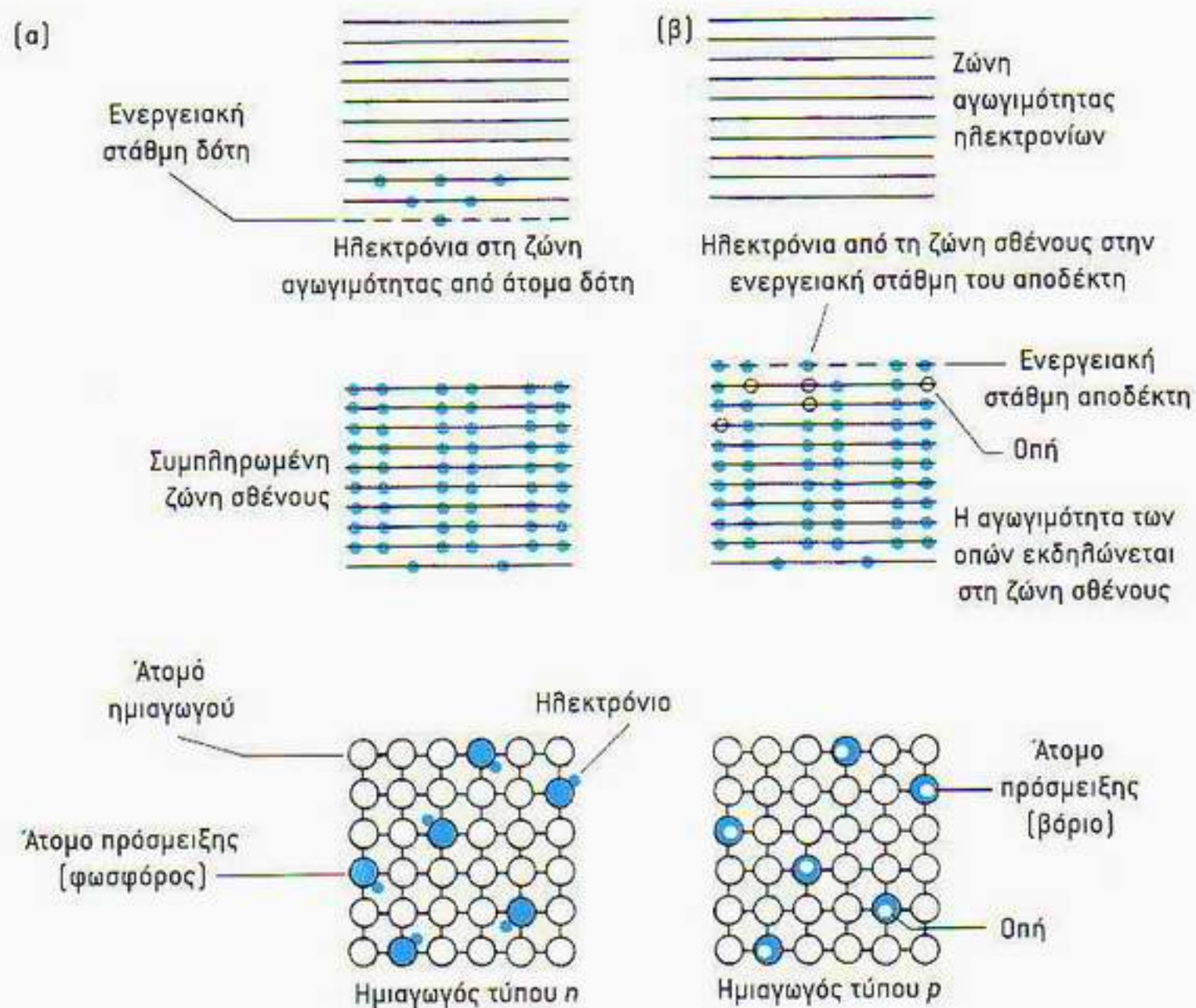
ντική κατάσταση. Η κατώτερη ζώνη είναι ήδη συμπληρωμένη, ενώ το πολύ μεγάλο ενεργειακό χάσμα που τη χωρίζει από την ανώτερη κενή ζώνη καθιστά ανέφικτη τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων στη δεύτερη. Η ίδια ακριβώς κατάσταση επικρατεί σε ένα μονωτή: ουσιαστικά, δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας για 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 συνηθείς 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 4*N* 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 περιγράφτηκαν 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 4*N* 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-

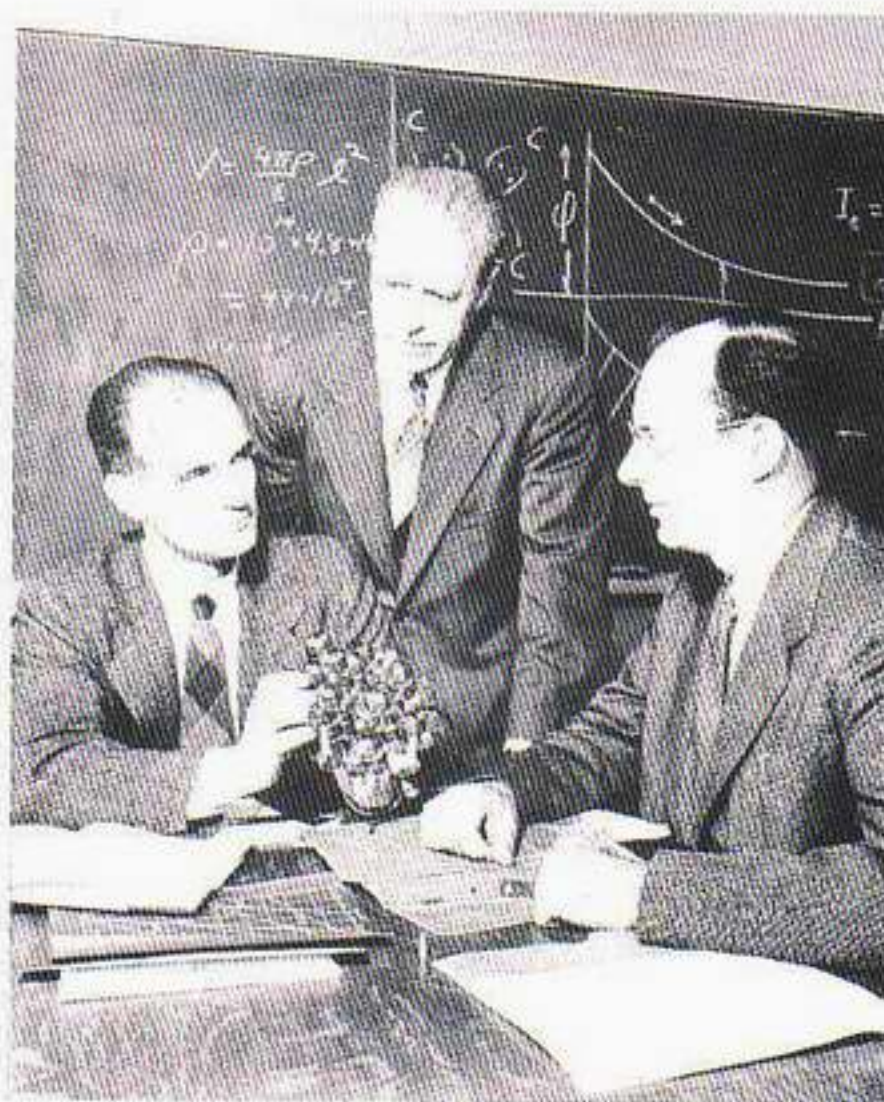


Εικόνα 6.16 Ημιαγωγοί, στο πλέγμα των οποίων έχει εισαχθεί μικρός αριθμός ατόμων πρόσμειξης. (α) Ημιαγωγός τύπου n , στον οποίο τα άτομα πρόσμειξης έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο. Σε αυτόν αντιστοιχεί το διάγραμμα ενεργειακών σταθμών που παρουσιάζεται στο πάνω μέρος της εικόνας. (β) Ημιαγωγός τύπου p , 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.

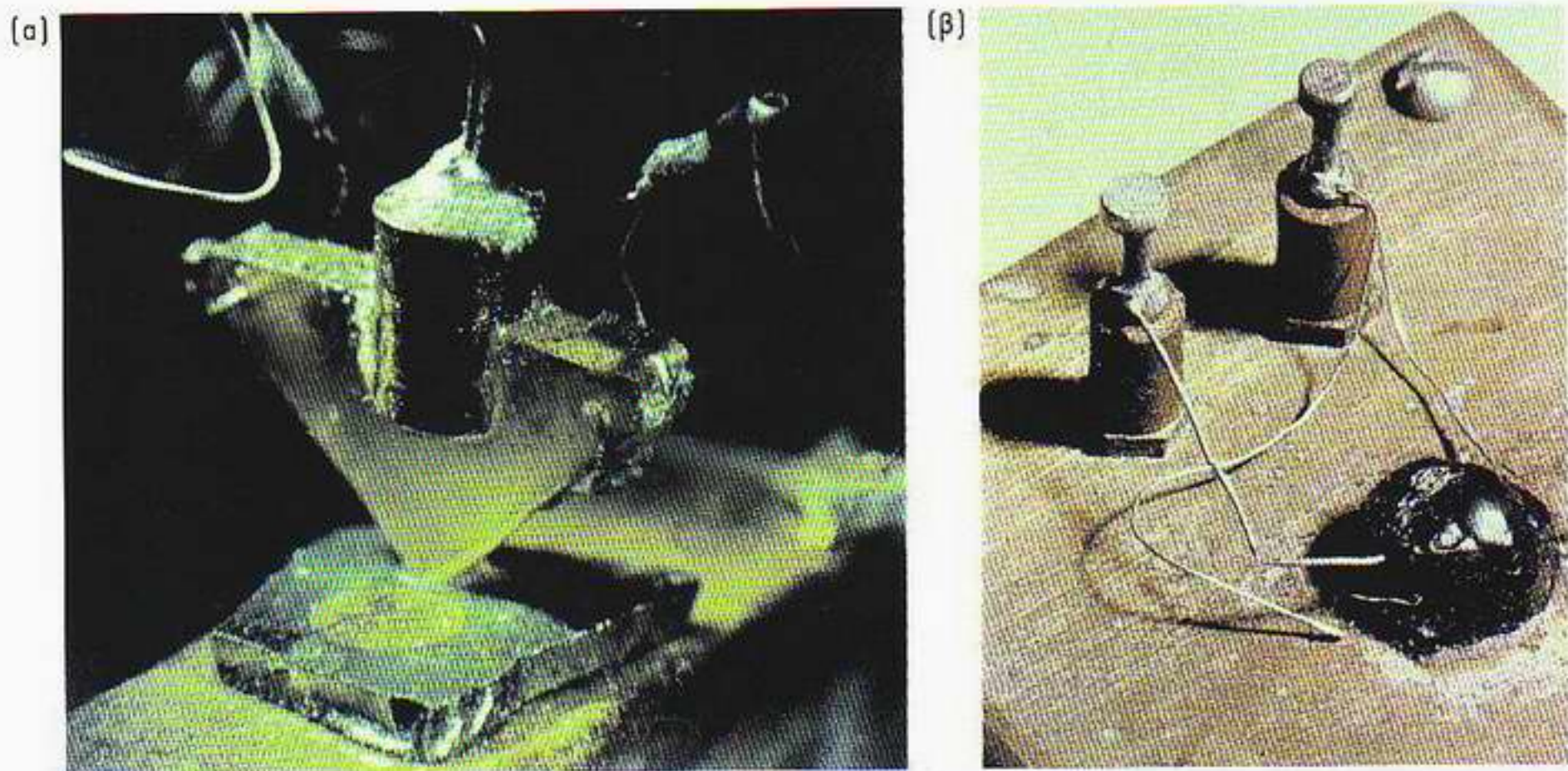
μα του βορίου δημιουργούν ακριβώς πάνω από τη σχεδόν πλήρη ζώνη σθένους καταστάσεις που λειτουργούν ως αποδέκτες, με αποτέλεσμα στη θερμοκρασία δωματίου τα ηλεκτρόνια να διεγείρονται εύκολα προς αυτές. Αλλά γιατί «ημιαγωγοί τύπου p »; Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η αγωγιμότητα στη σχεδόν πλήρη ζώνη σθένους 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.

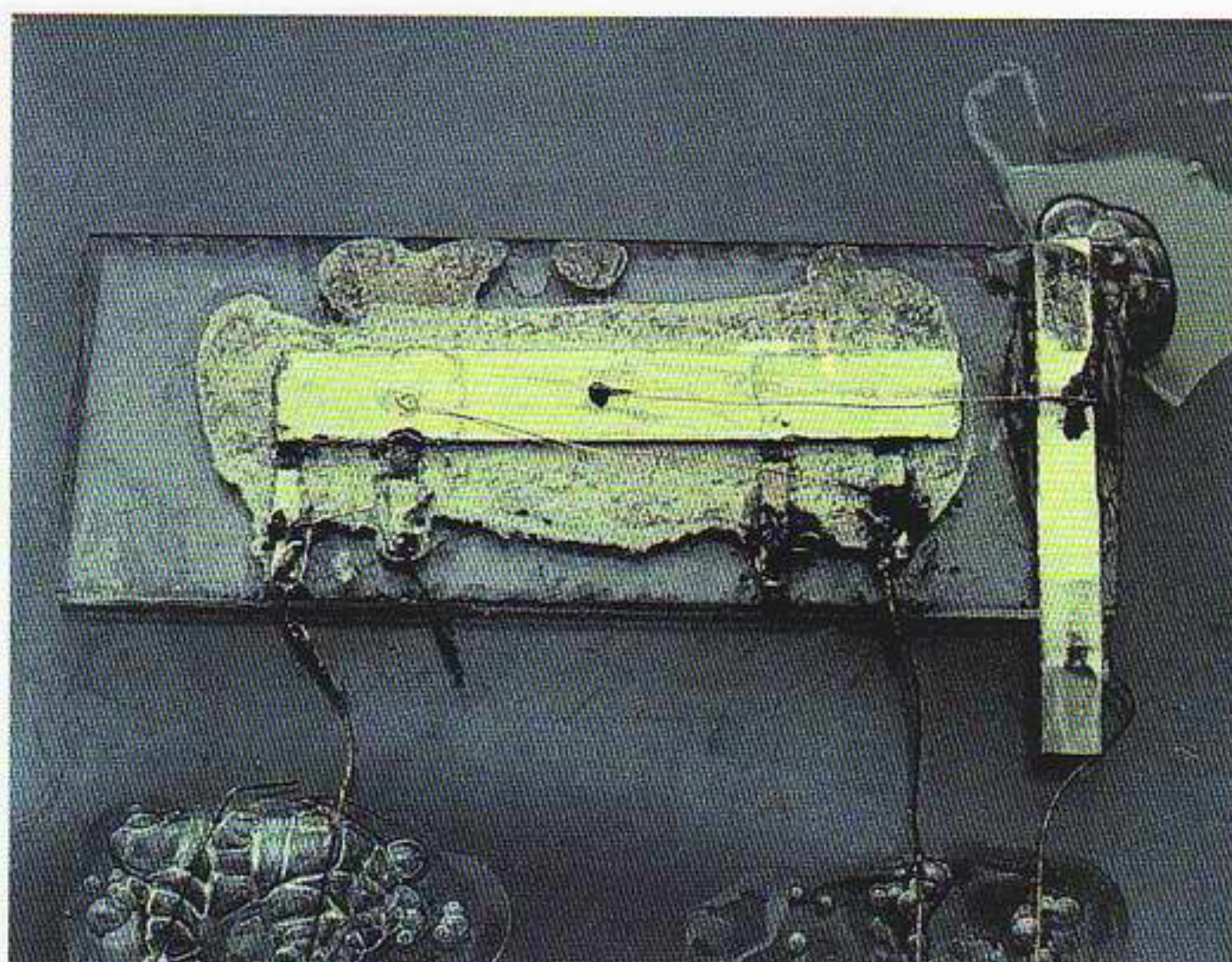


Εικόνα 6.17 Τα πρώτα τρανζίστορ. (α) Ομοίωμα του τρανζίστορ σημειακής επαφής που εφηύραν οι Bardeen και Brattain. Η κάθε πλευρά του σφηνοειδούς σχήματος ημιαγωγού, που παίζει το ρόλο της βάσης, έχει μήκος περίπου 3 εκατοστά. (β) Το τρανζίστορ επαφής του Shockley φαίνεται πολύ ακαθάριστο, ωστόσο μπορούσε να κατασκευαστεί ευκολότερα με αξιοπιστία.

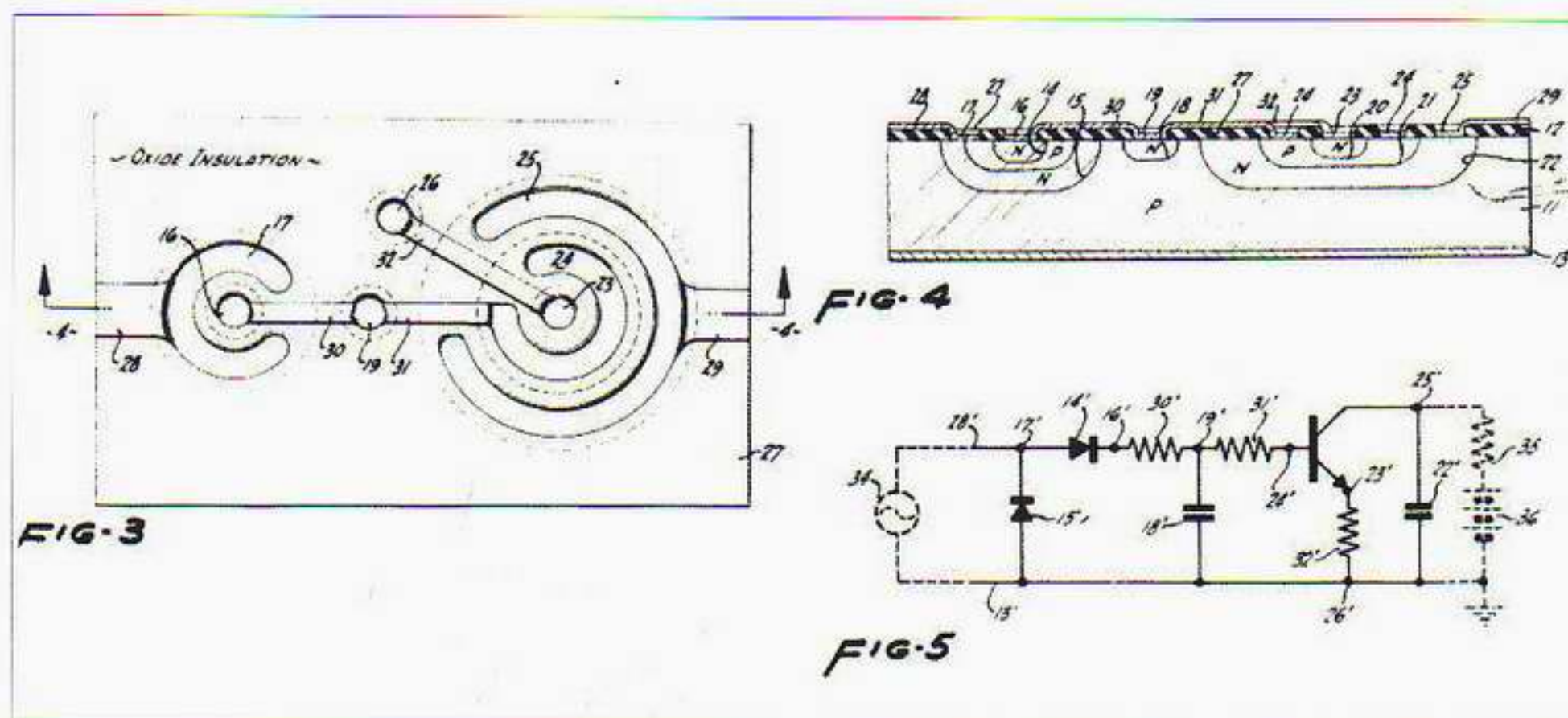
Τα τρανζίστορ αποδείχθηκαν ιδανικά για τη δυαδική λογική «0-1» των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επιπλέον, η αξιοπιστία τους και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μαζί με μια σειρά από θεαματικές τεχνικές βελτιώσεις τα έχουν καταστήσει σήμερα το βασικό δομικό στοιχείο της σύγχρονης μικροηλεκτρονικής. Η βασική 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-

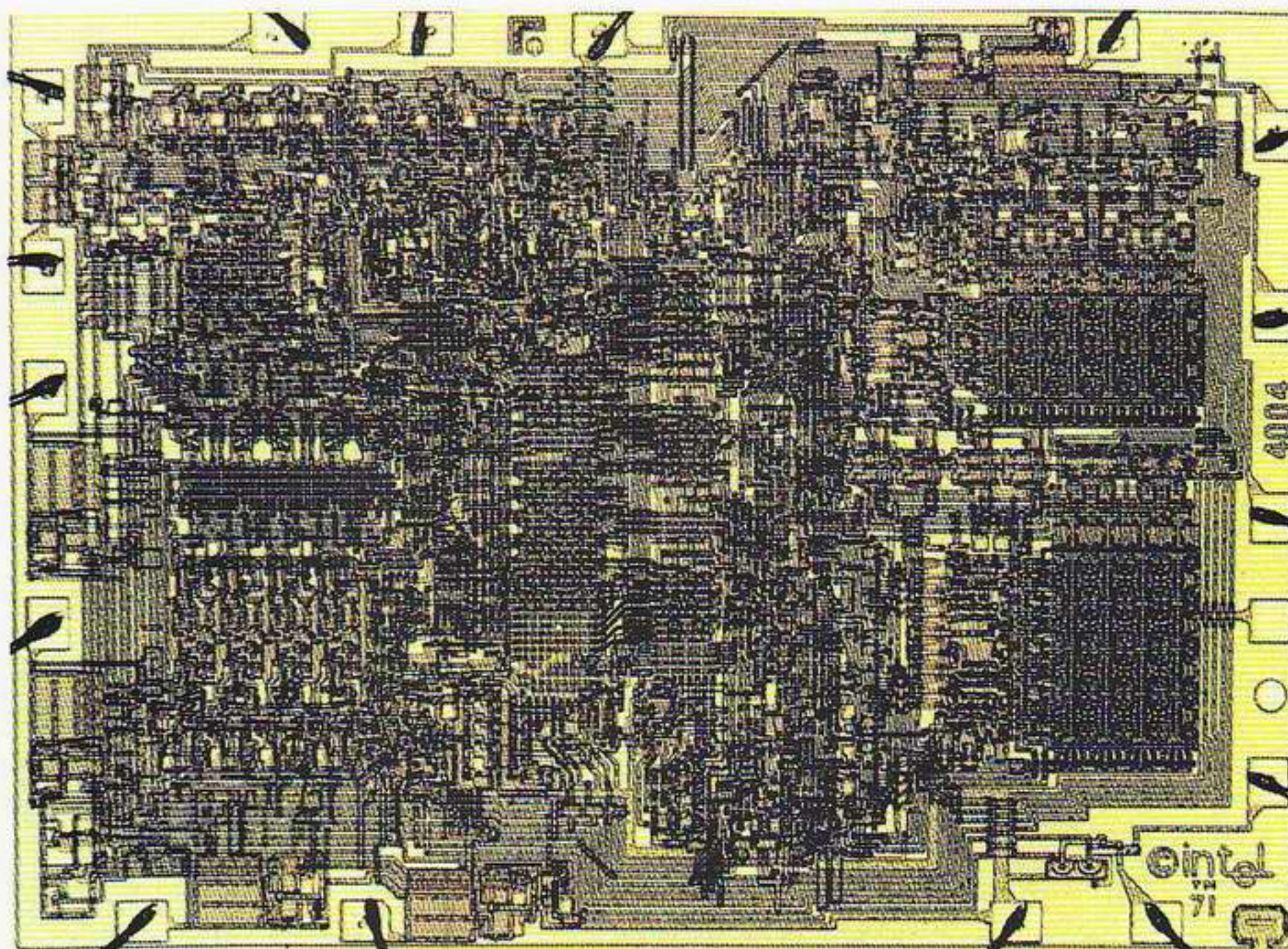


Εικόνα 6.18 Το πρώτο «ολοκληρωμένο κύκλωμα», ή τσιπ. Ο Jack Kilby, αντί να κατασκευάσει τα διάφορα εξαρτήματα του κυκλώματος ξεχωριστά, ενσωμάτωσε ένα τρανζίστορ, έναν πυκνωτή και μερικές αντιστάσεις στο ίδιο κομμάτι γερμανίου.



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

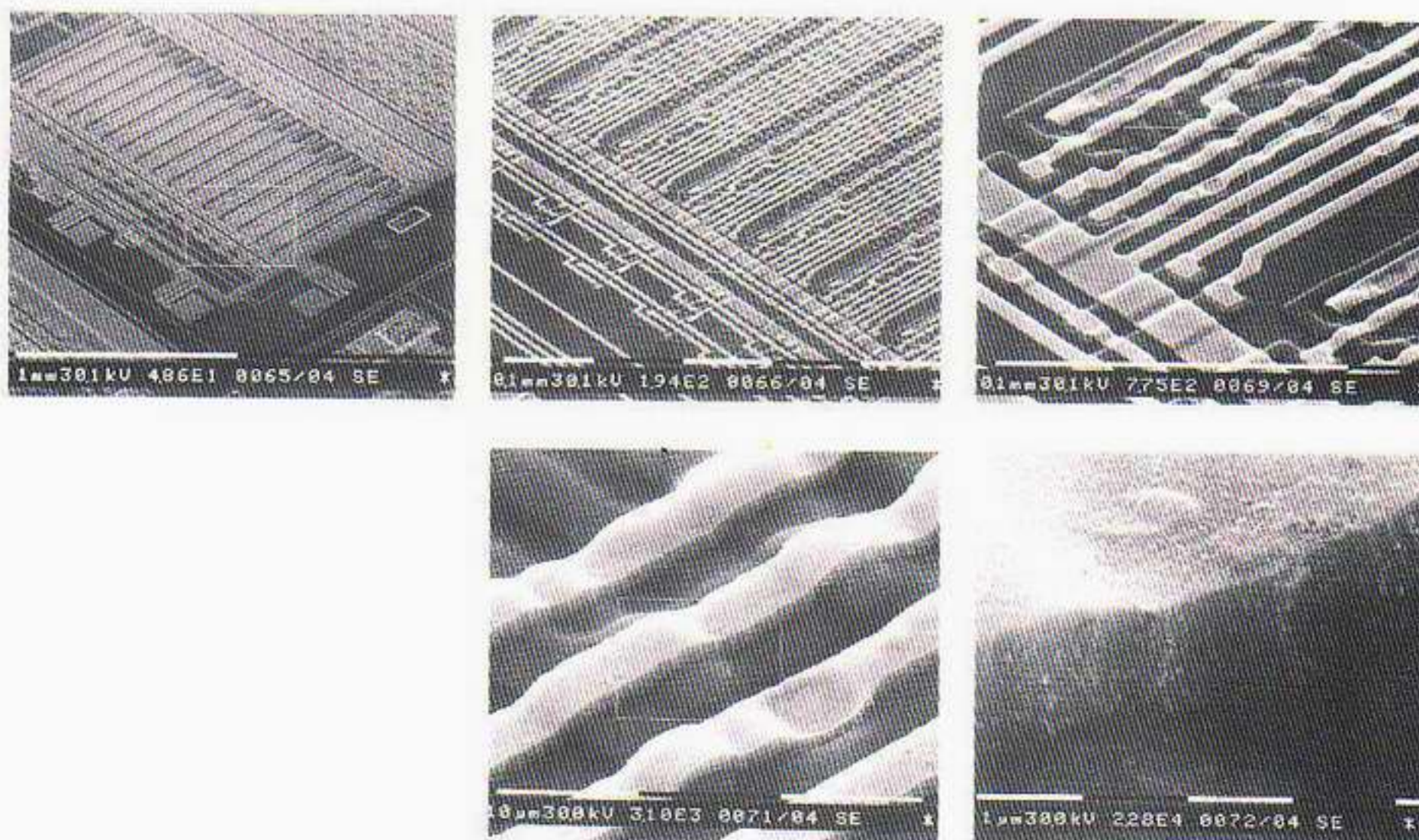
κό κύκλωμα από πυρίτιο το 1957, οι δυνατότητες της συγκεκριμένης εξέλιξης δεν εκτιμήθηκαν στη Μεγάλη Βρετανία. Έτσι, το αποφασιστικό άλμα προς αυτή την κατεύθυνση έγινε το καλοκαίρι του 1959 από έναν Αμερικανό που εργαζόταν στην Texas Instruments, τον Jack Kilby, ο οποίος έφτιαξε το πρώτο λειτουργικό 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



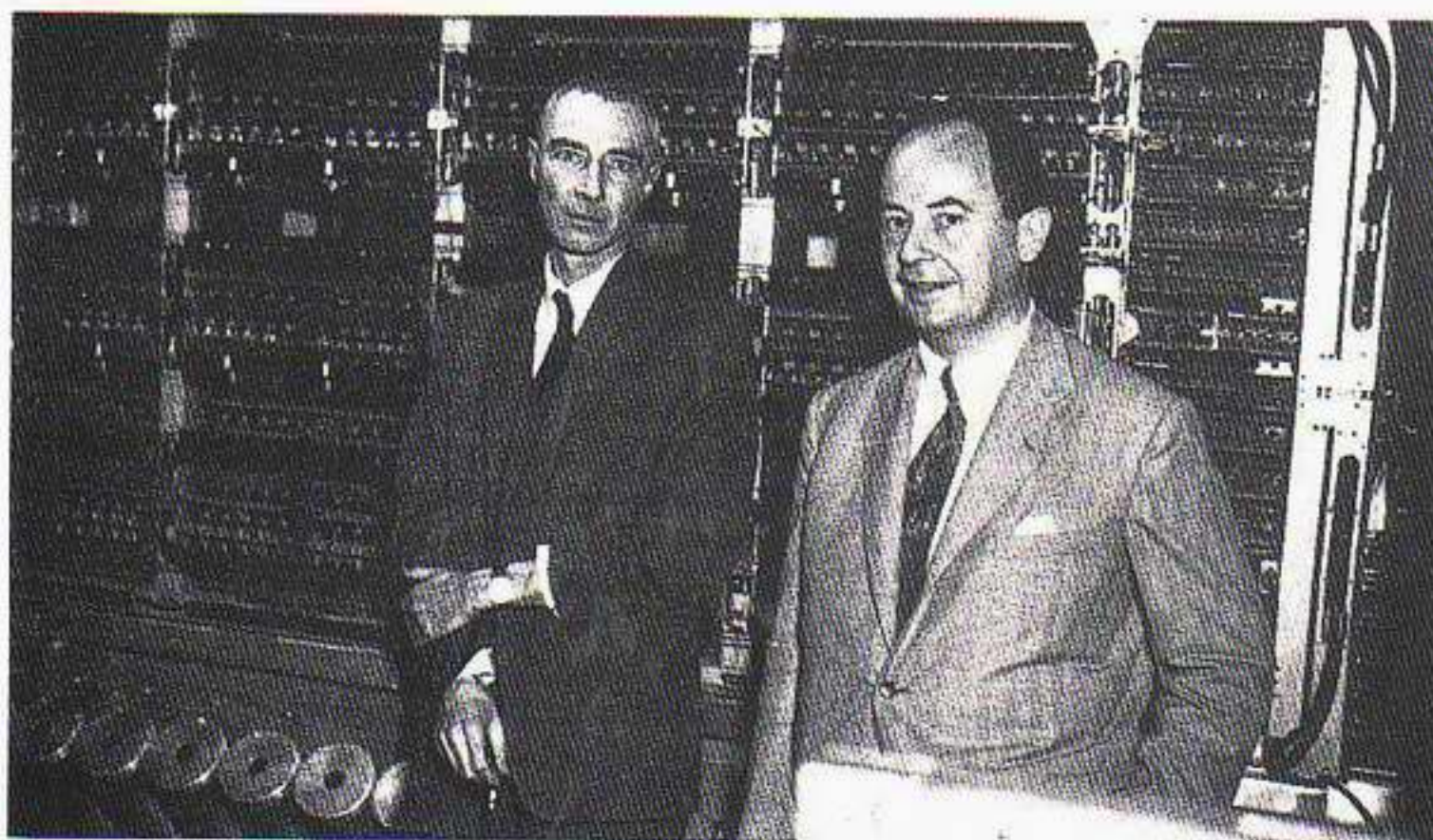
Εικόνα 6.20 Ο πρώτος μικροεπεξεργαστής. Ο Ted Hoff, μηχανικός της Intel, είχε την ιδέα να τοποθετήσει όλα τα στοιχεία ενός προγραμματιζόμενου υπολογιστή σε ένα τσιπ. Το τσιπ έχει διαστάσεις περίπου 3 επί 4 χιλιοστόμετρα και περιέχει πάνω από 2.000 τρανζίστορ.

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.

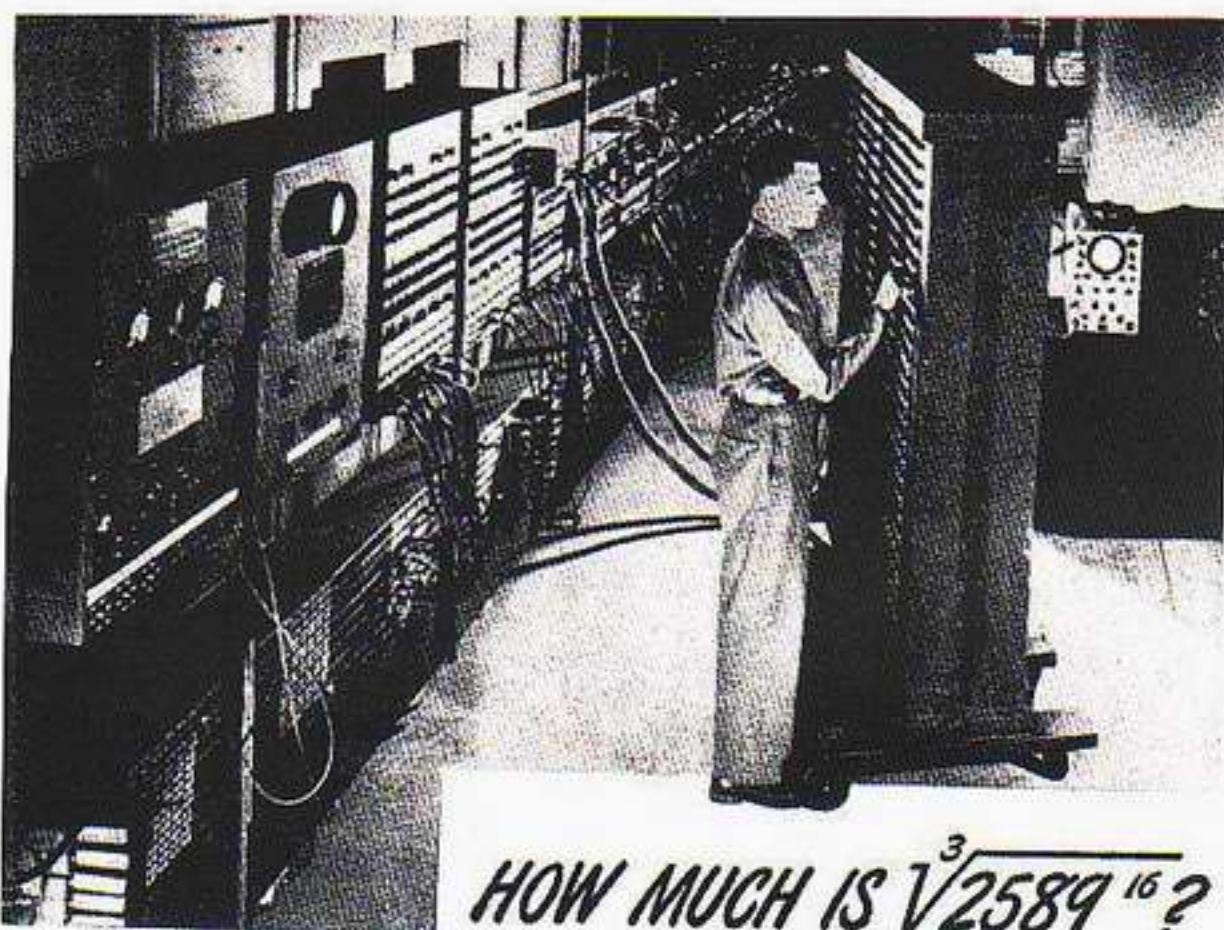


Ο Robert Oppenheimer και ο John von Neumann στα επίσημα εγκαίνια του κτηρίου υπολογιστών του Ινστιτούτου Ανώτερων Σπουδών του Πρίνστον, το 1952. Ο Oppenheimer διετέλεσε επί κεφαλής του Προγράμματος Manhattan στο Λος Άντζελες, κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Ο von Neumann ήταν ένας ιδιοφυής σύγχρονος μαθηματικός 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 εργοστάσιο. 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

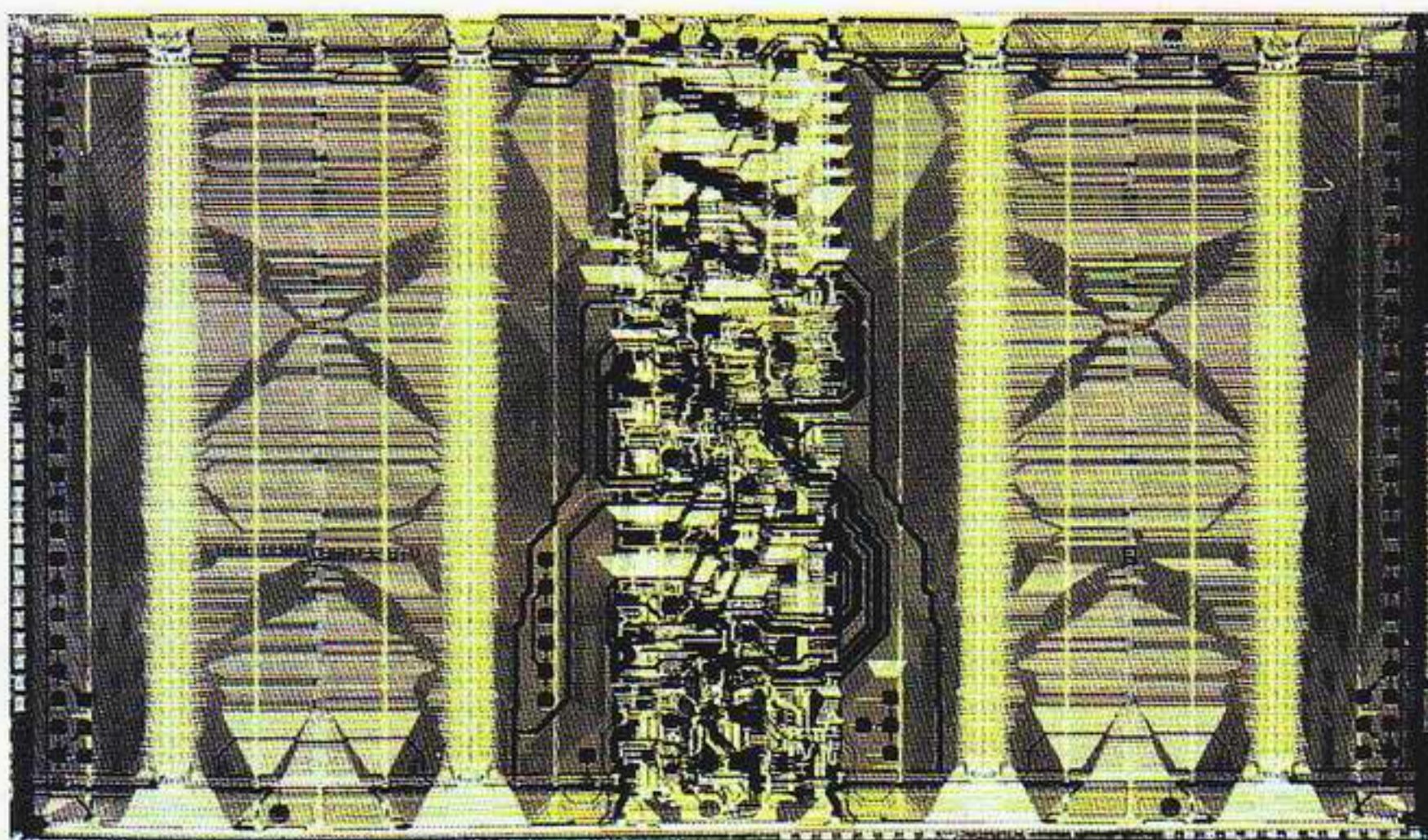
which have never before existed. You'll find that an Army career pays off.

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 1, 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.

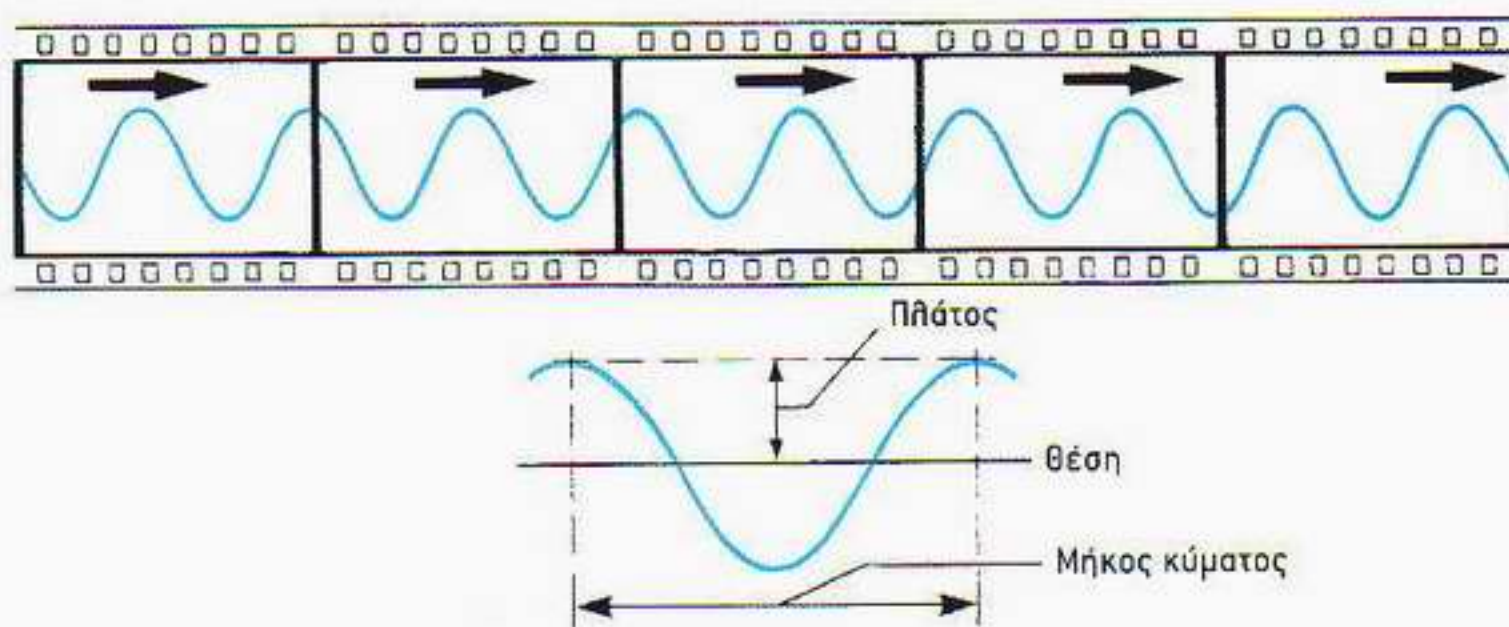
...υπάρχουν ορισμένες καταστάσεις στις οποίες οι ιδιομορφίες της κβαντικής μηχανικής μπορούν να εκδηλωθούν με ιδιαίτερο τρόπο σε μεγάλη κλίμακα.

Richard Feynman

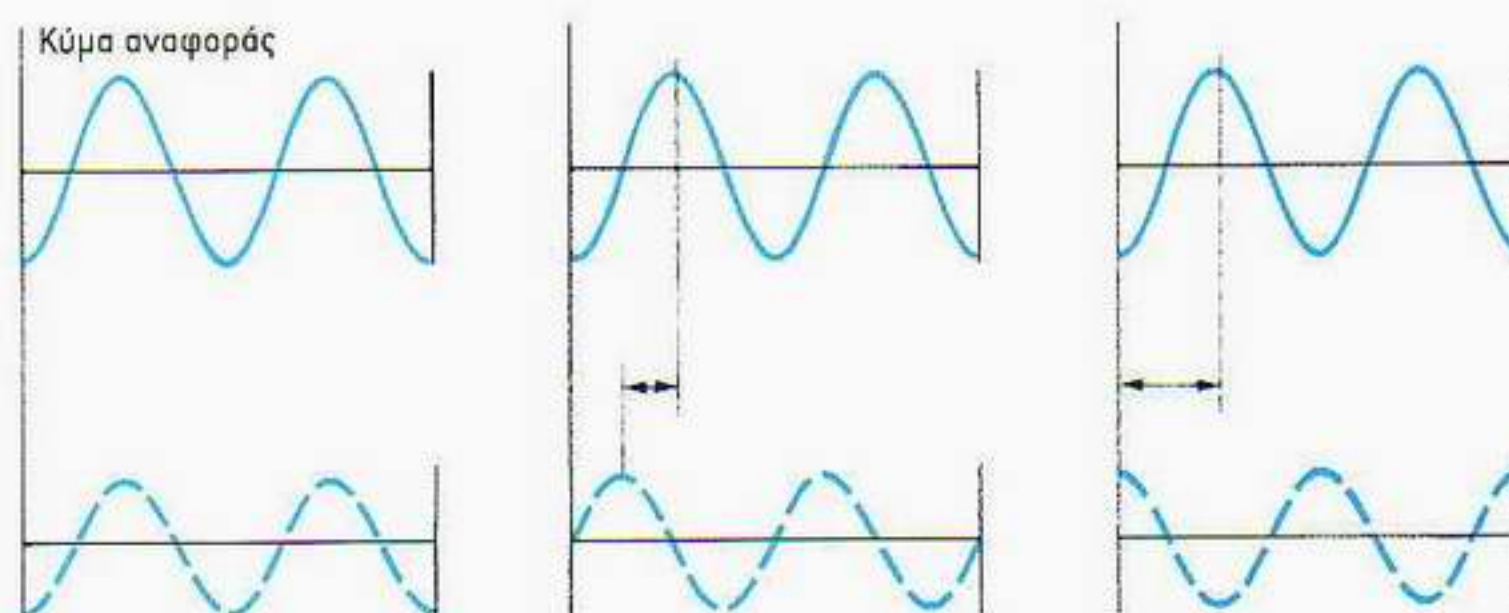
Φως λέιζερ

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».

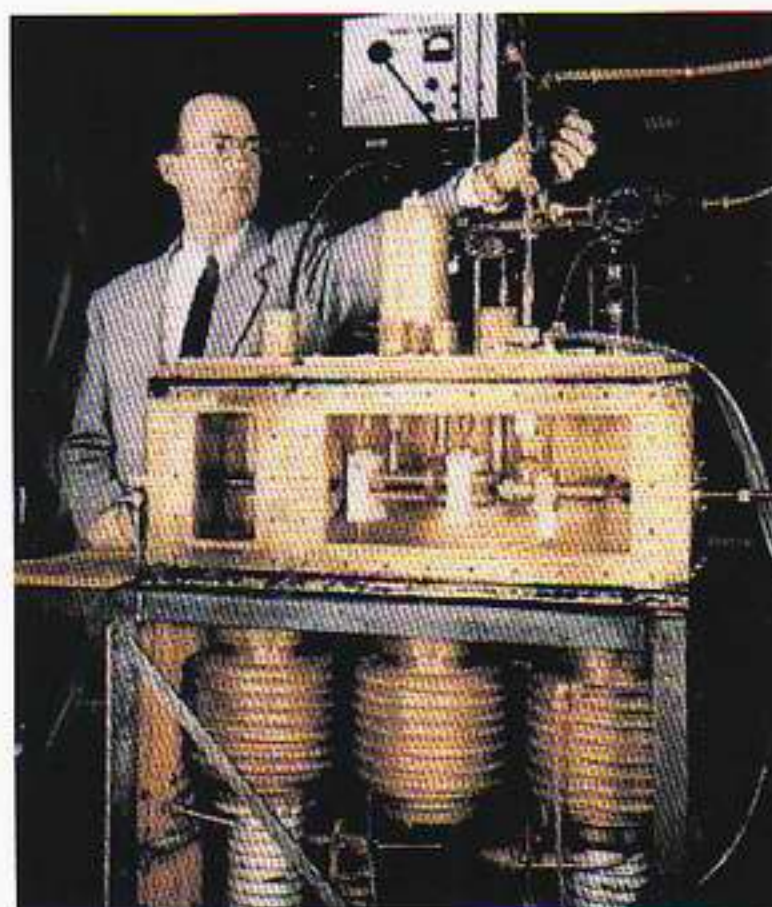
Ας εξετάσουμε την απλή κυματική κίνηση που φαίνεται στην Εικόνα 7.1. Όπως βλέπουμε, ο σχηματισμός επαναλαμβάνεται έπειτα από κάθε ένα «μήκος κύματος», και η «συχνότητα» της κυματικής κίνησης αντιστοιχεί στον αριθμό των μηκών κύματος που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο. Αν το κύμα αυτό παριστάνει μια κυματική 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.

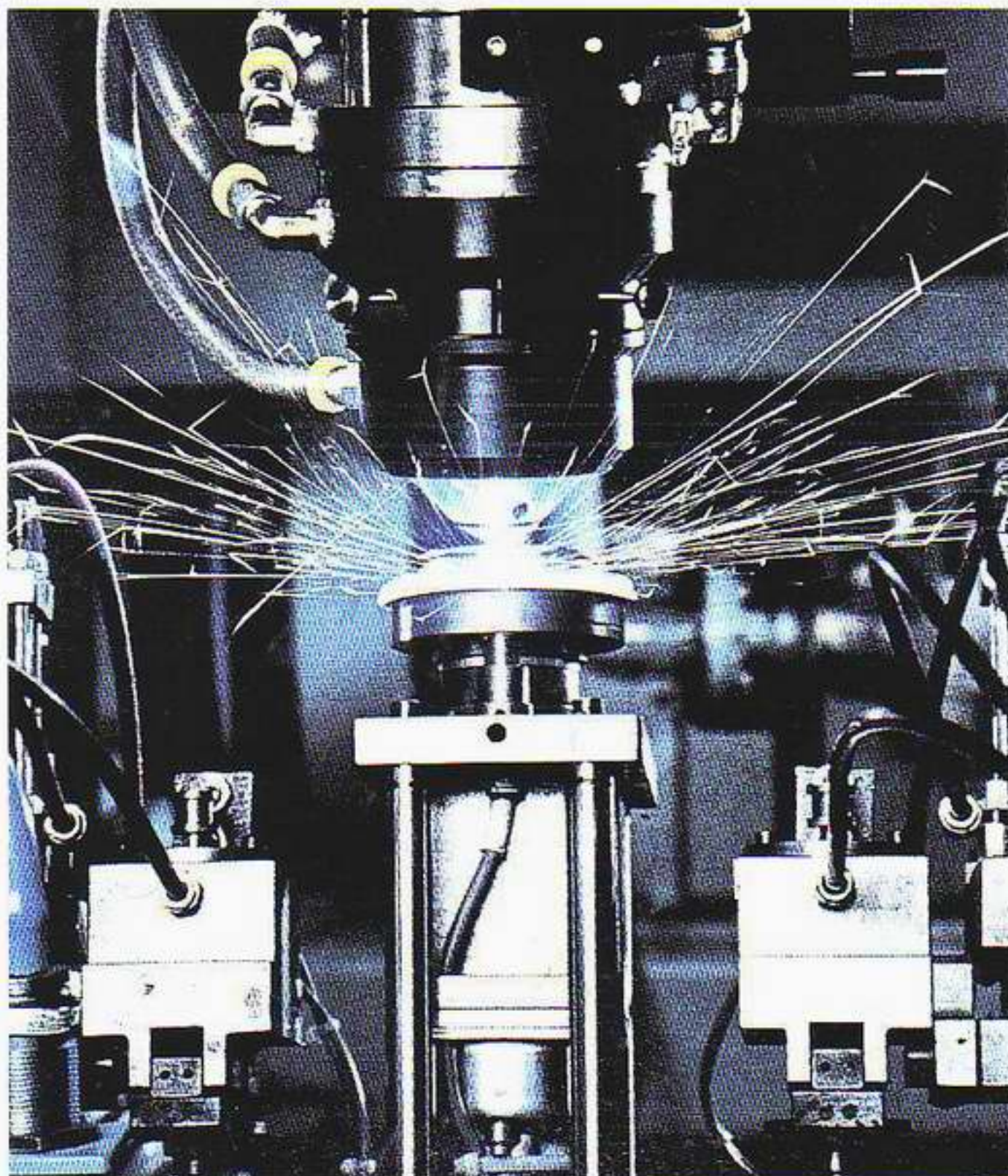


Ο Charles Townes γεννήθηκε στη Νότια Καρολίνα το 1915. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου ασχολήθηκε με τη σχεδίαση συστημάτων ραντάρ για λογαριασμό των Εργαστηρίων Bell. Κάποιο πρωινό του 1951, ενώ περίμενε να ανοίξει ένα εστιατόριο για να πάρει το πρωινό του, του ήρθε η ιδέα να χρησιμοποιήσει 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,

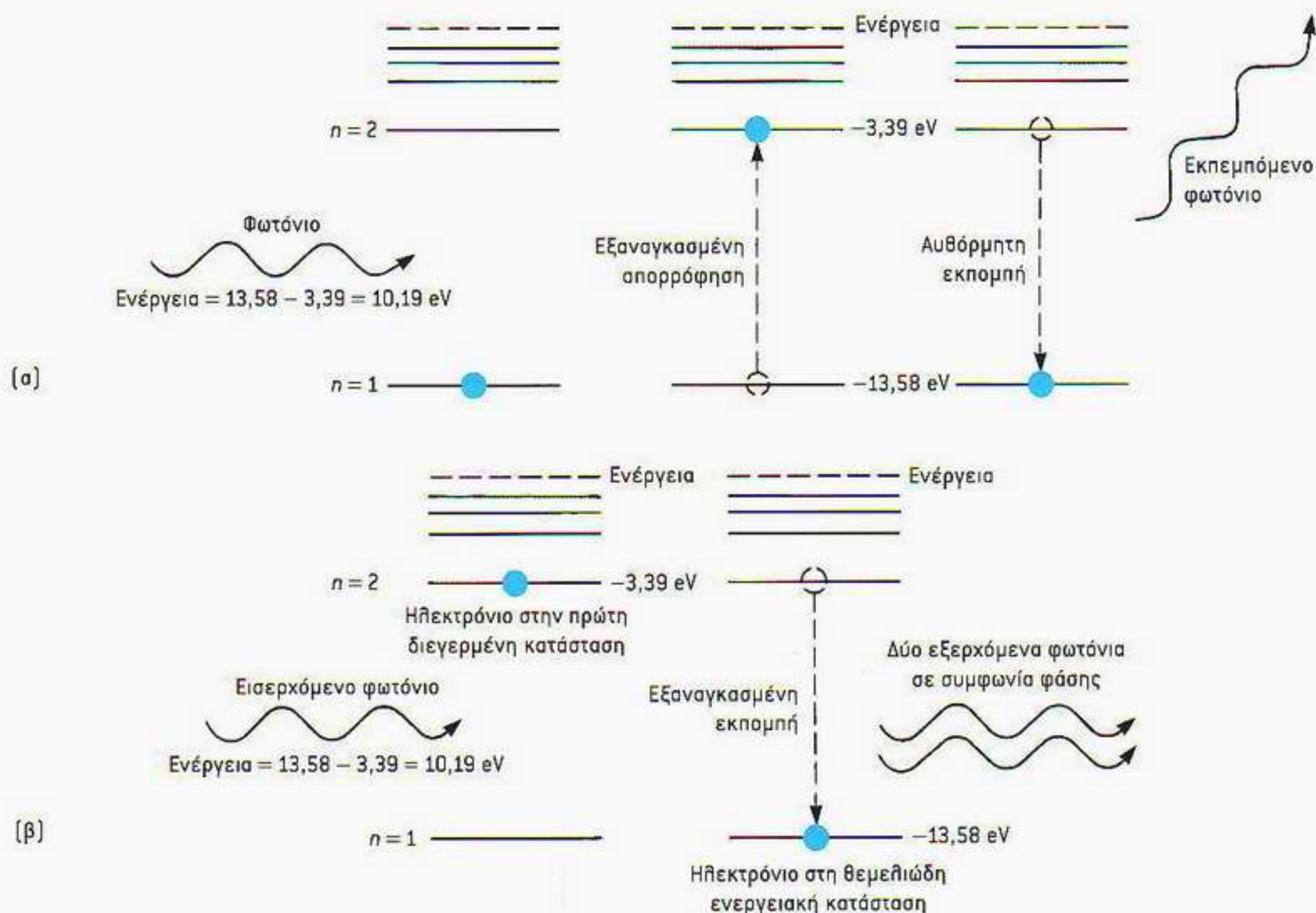
ίδιο σημείο. Στη δεύτερη περίπτωση, το κύμα που παριστάνεται με τη διακεκομμένη γραμμή έχει αρχίσει να κατέρχεται προτού το άλλο εμφανίσει την κορυφή του. Και τέλος, το επόμενο σχήμα δείχνει την ακραία περίπτωση όπου το όρος του ενός κύματος συμπίπτει χρονικά με την κοιλάδα του άλλου. Λέμε ότι οι δύο 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 πληρώνει το δίδακτρό του. Ενώ εργαζόταν στα ερευνητικά εργαστήρια της Howard Hughes, ενδιαφέρθηκε για το μείζερ που είχε επινοήσει ο Townes και καταπιάνηκε 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.



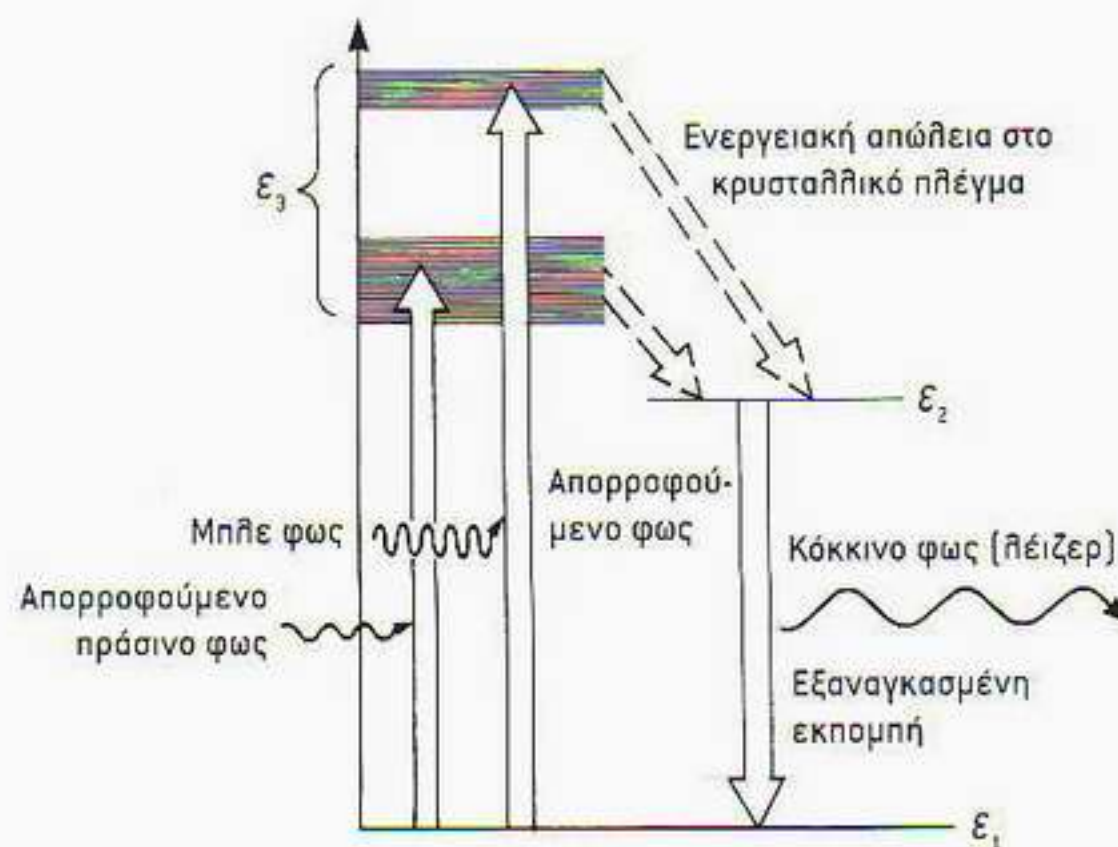
Εικόνα 7.4 Οι τρεις δυνατές διαδικασίες μετάβασης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια σε ένα άτομο. (α) Οι διαδικασίες της εξαναγκασμένης απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής. Στην πρώτη περίπτωση, ένα φωτόνιο με την κατάλληλη ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στη θεμελιώδη 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-

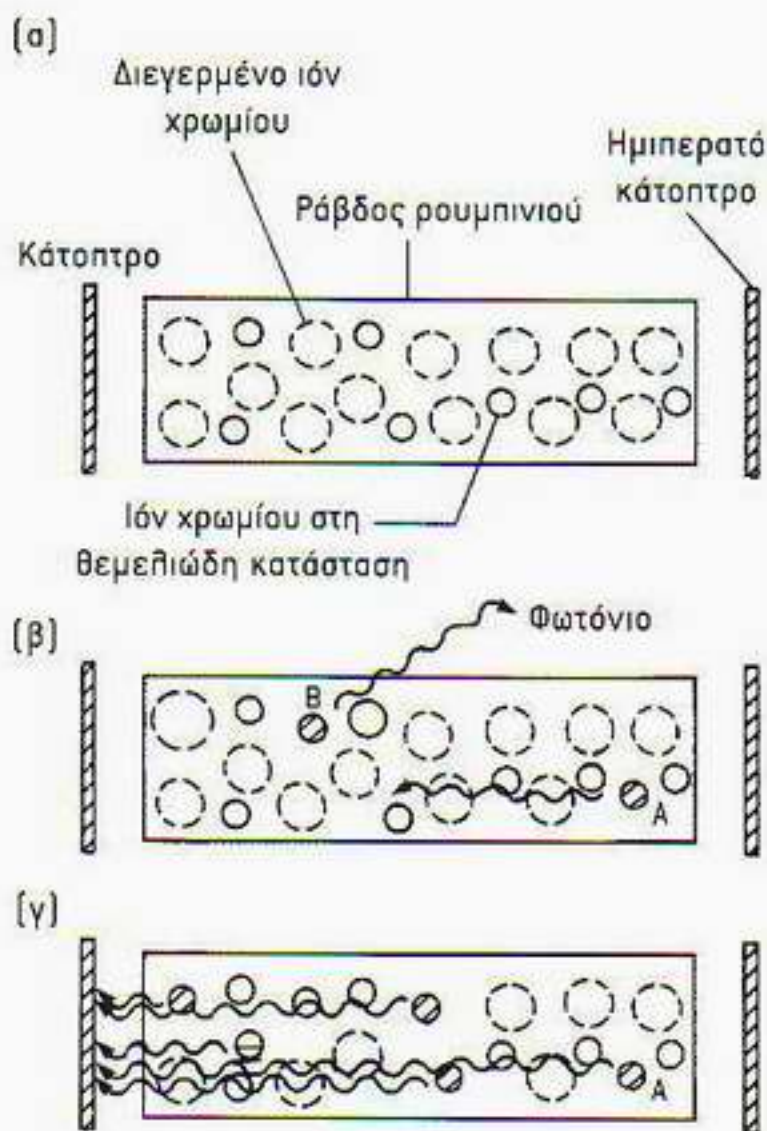
ταστάσεις «εξαναγκάζονται» να μεταβούν στην υψηλότερη. Πρόκειται για μια διαδικασία η οποία ενίοτε αναφέρεται με το όνομα *εξαναγκασμένη απορρόφηση* (Εικόνα 7.4). Γνωρίζουμε επίσης ότι ένα άτομο ευρισκόμενο σε διεγερμένη κατάσταση μπορεί να εκπέμψει αυθόρμητα ένα φωτόνιο με τόση ενέργεια ώστε το ηλεκτρόνιο 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 τού 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.

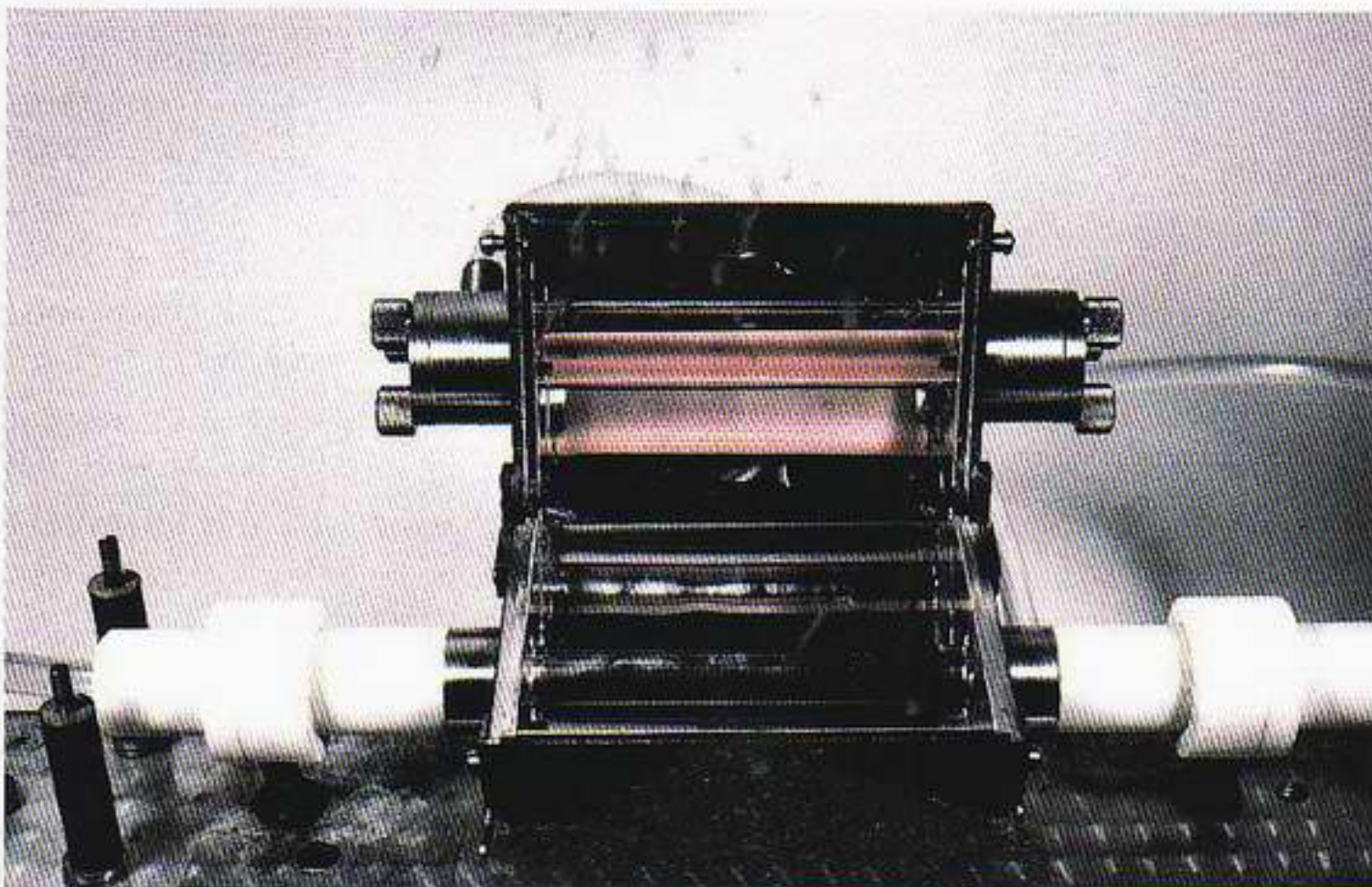


Εικόνα 7.5 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών για ένα λείζερ ρουμπινιού. Τα άτομα του χρωμίου στο ρουμπίνι «αντλούνται» στις δύο ευρείες διεγερμένες ενεργειακές ζώνες απορροφώντας πράσινο και μπλε φως. Αυτά τα διεγερμένα άτομα γρήγορα χάνουν ενέργεια, η οποία αποδίδεται στο κρυσταλλικό πλέγμα, και τα ηλεκτρόνια 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»



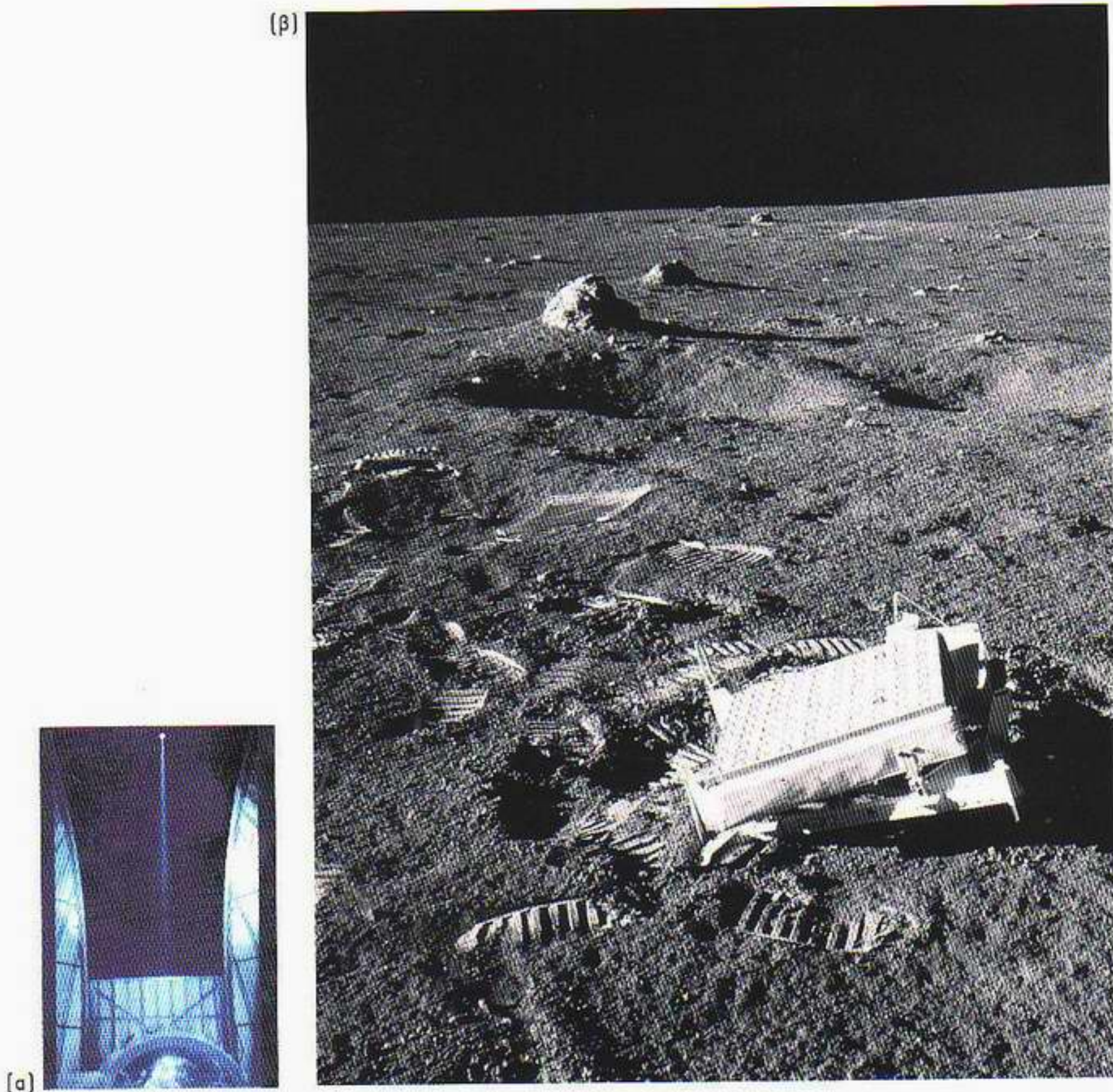
Εικόνα 7.6 Μια σειρά στιγμιотύπων που δείχνει πώς εξελίσσεται η διαδικασία παραγωγής φωτός λέιζερ. (α) Η εικόνα του κρυστάλλου μετά την επίτευξη της αντιστροφής πληθυσμών. Οι μικρότεροι κύκλοι αναπαριστούν τα άτομα χρωμίου που βρίσκονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση και οι μεγαλύτεροι, με τη διακεκομμένη 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 ρουμπινίου, 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 ρουμπινίου 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.



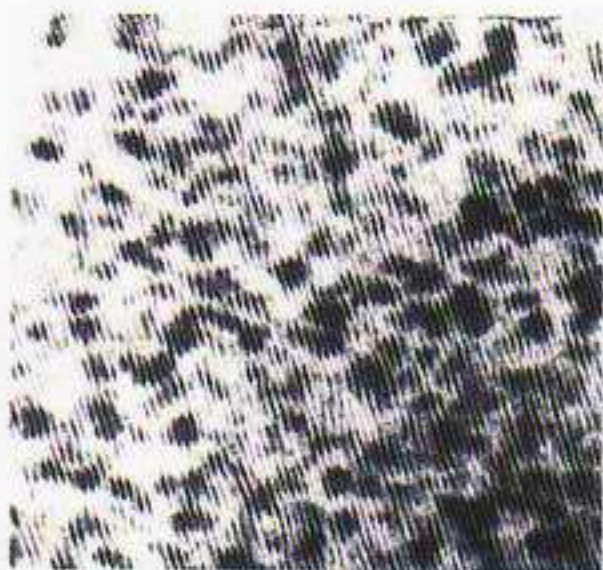
Εικόνα 7.7 Το εσωτερικό ενός λέιζερ ρουμπινίου. Ο ροζ κύλινδρος στο πάνω τμήμα της συσκευής είναι το ρουμπίνι, ενώ ο κύλινδρος στο κάτω μέρος είναι η πυκνή εκκλάνση που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της αντιστροφής πληθυσμών. Και οι δύο ψύχονται με νερό εισερχόμενο στη συσκευή από τους δύο σωλήνες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



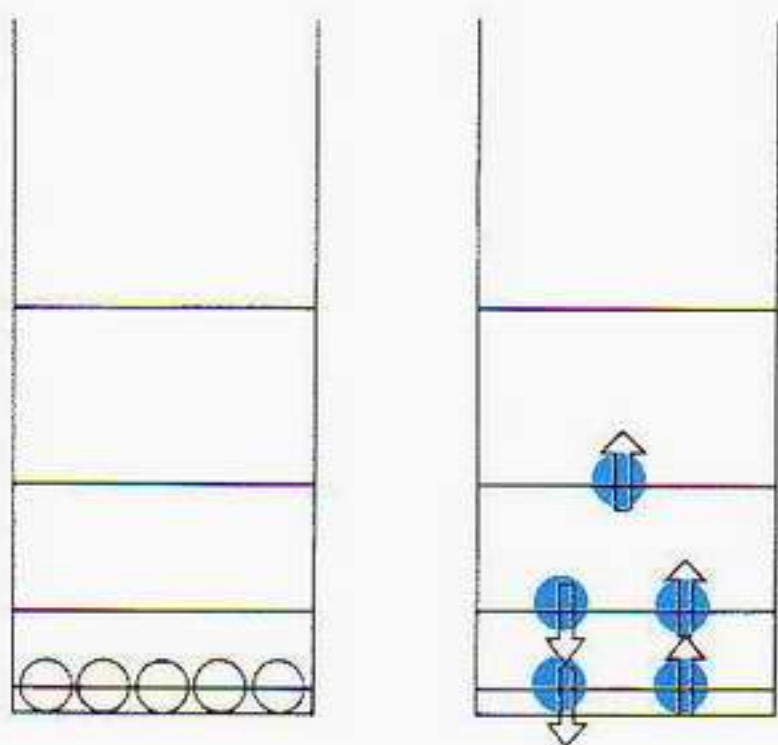
Ο Dennis Gabor (1900-1979) γεννήθηκε στη Βουδαπέστη, σπούδασε όμως στη Γερμανία. Με την άνοδο του Χίτλερ στην εξουσία, μετανάστευσε στην Αγγλία και εργάστηκε ως ερευνητής μηχανικός για λογαριασμό της εταιρείας ηλεκτρικών κατασκευών Thomson-Houston στο Ράγκμπι. Η αρχική του εργασία στην ολογραφία, το 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 επισωτρώων.

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 έργο. 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 επεσήμανε 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). Απεθρισμένος 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 αγγλικά 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 —μία 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 πειράματά 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 τάλαντωση 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

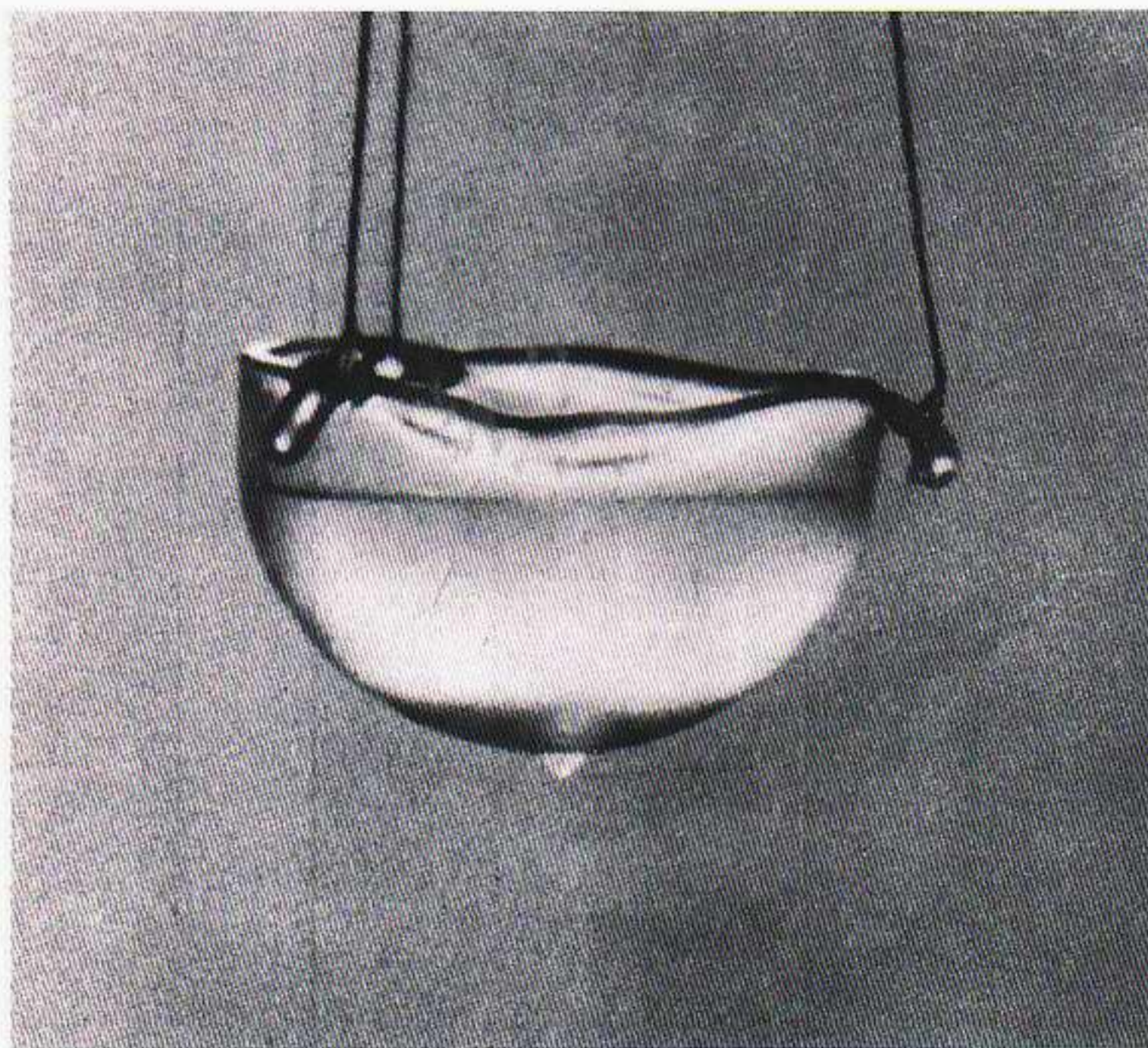
ένα λεπτό υμένιο ηλίου σε όλη την επιφάνεια του κυπέλλου. Το στρώμα αυτό δρα μάλιστα ως σίφωνας διαμέσου του οποίου το ήλιο ρέει με σχεδόν μηδενική εσωτερική τριβή. Έτσι, ανεξάρτητα από τη διαφορά που έχουν αρχικά οι στάθμες του υγρού μέσα και έξω από το κύπελλο, το ήλιο ρέει μέχρι αυτές να βρεθούν στο 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 κυπέλλου 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 λ για το υγρό ήλιο. Πρόκειται για μια ρίζαν ασυνήθης 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 λ καμπύλη που προκύπτει από μετρήσεις της ειδικής θερμότητας του ηλίου.



Εικόνα 7.12 Το υγρό ήλιο κάτω από το σημείο λ είναι υπερρρευστό και εμφανίζει μερικές αξιοσημείωτες ιδιότητες. Η φωτογραφία δείχνει πώς το υγρό ήλιο μπορεί να αναρριχάται έρχοντας στα τοιχώματα ενός δοχείου, να περνάει πάνω από τα 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 —χιλίες 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.

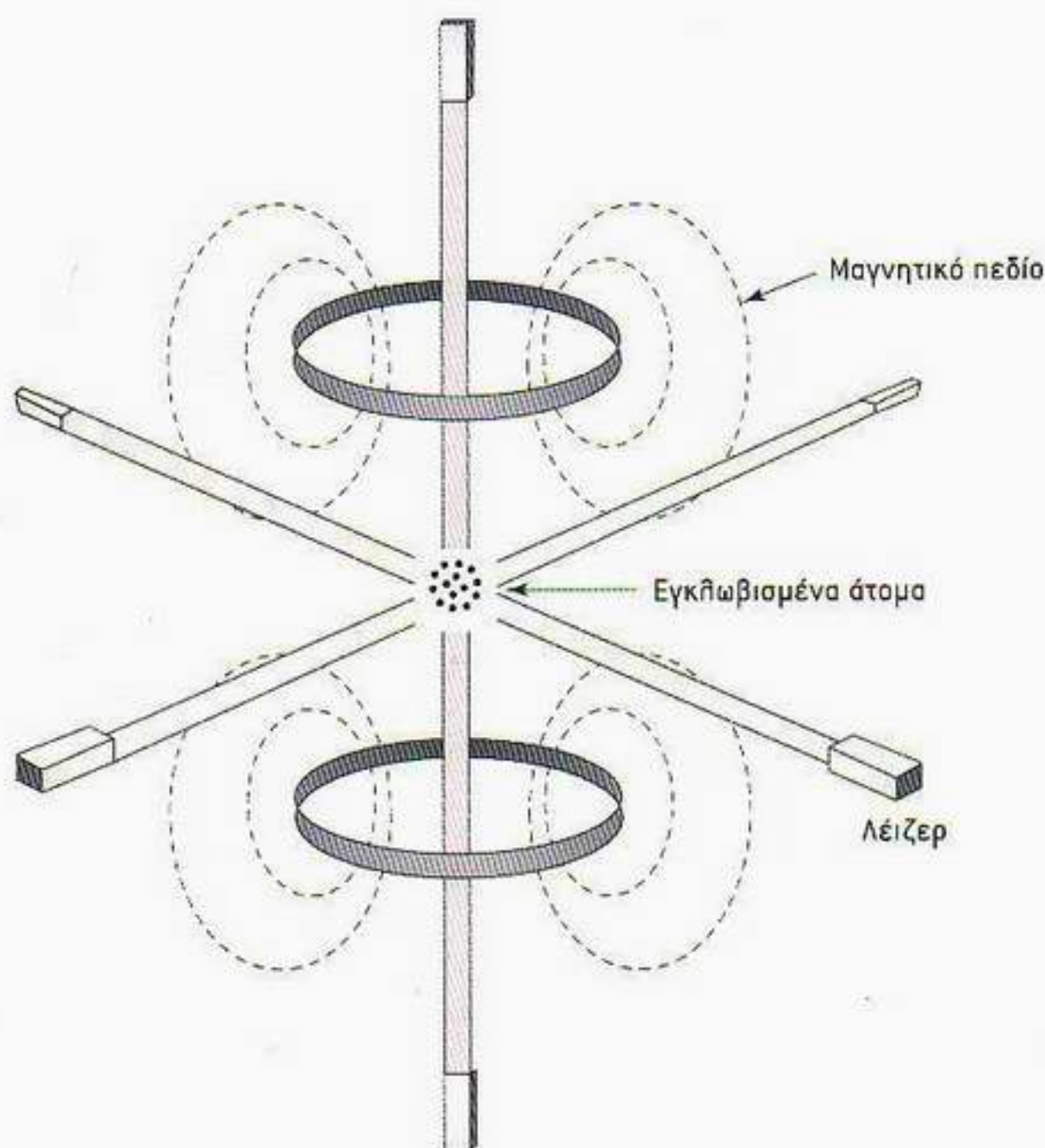
Φανταστείτε ένα άτομο κινούμενο προς ένα φωτόνιο που πλησιάζει. Από την καθημερινή μας ζωή έχουμε εξοικειωθεί με το φαινόμενο Doppler για τον ήχο. Για παράδειγμα, αν σταθούμε πλάι στις ράγες ενός τρένου, ο ήχος της σειρήνας του ακούγεται οξύτερος καθώς αυτό μας πλησιάζει, ενώ ακούγεται πιο βαρύς όταν 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 ηλεκτρονικές 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 απένειμε 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.



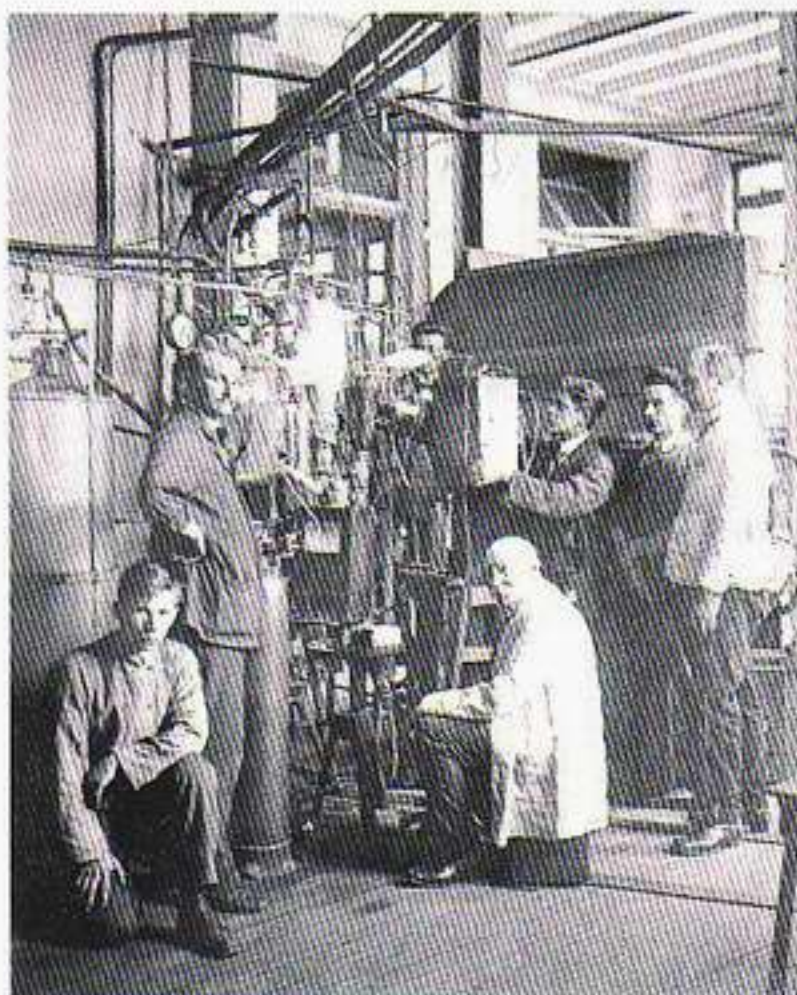
Το βραβείο Νόμπελ φυσικής του 1997 απονεμήθηκε στους Stephen Chu (α), William Phillips (β) και Claude Cohen-Tannoudji (γ), για την ανάπτυξη της μεθόδου ψύξης και παγίδευσης ατόμων με τη βοήθεια φωτός λέιζερ.

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 ηλεκτρονίων έγινε αντιληπτό ότι πολλά χαρακτηριστικά της ικανότητας των μετάλλων να άγουν τον ηλεκτρισμό μπορούσαν να εξηγηθούν με βάση την κίνηση των ηλεκτρονίων τους. Η αντίσταση στη ροή του ρεύματος οφείλεται στη σκέδαση που υφίστανται τα ηλεκτρόνια 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-

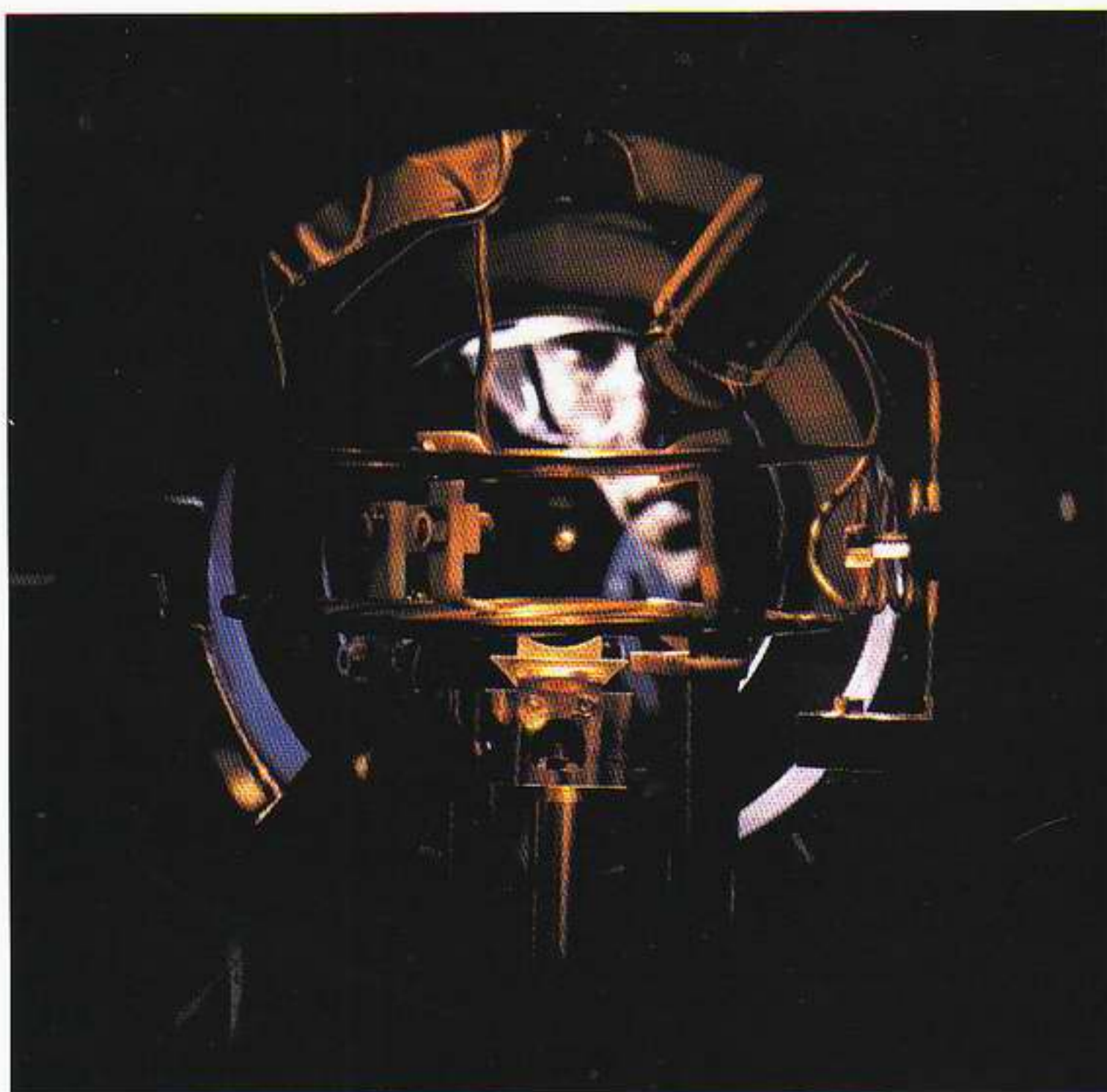


Ο Kamerlingh Onnes (1853-1925) στο κρυογονικό εργαστήριό του στο Λέιντεν της Ολλανδίας. Ο Onnes ήταν ο πρώτος που υγροποίησε το ήλιο, και για το επίτευγμά του αυτό τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ του 1913. Υπήρξε επίσης ο πρώτος που παρατήρησε το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας —το μηδενισμό της ηλεκτρικής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

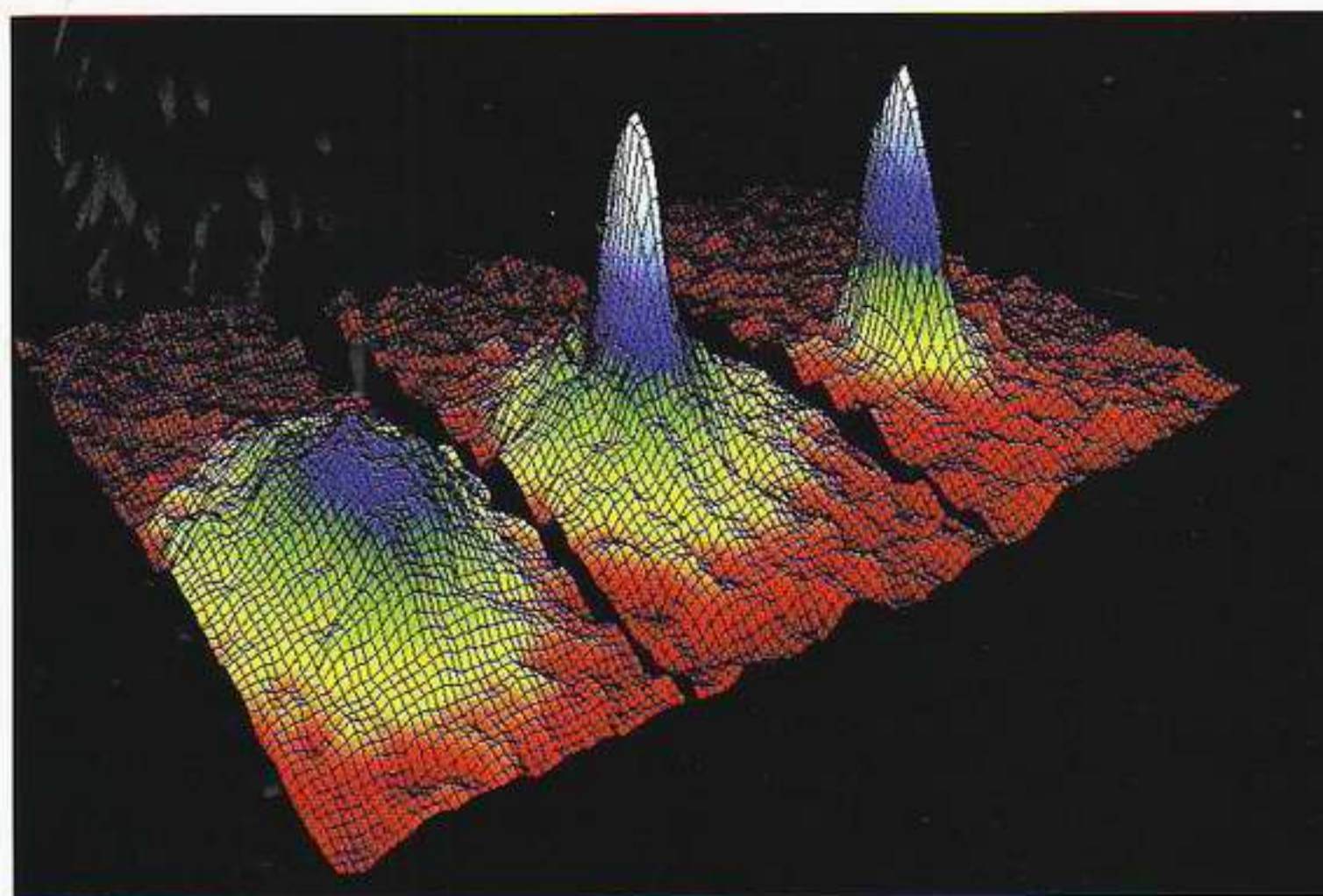
πάνω μέταλλα, όμως, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ηλεκτρικά ρεύματα διατηρούμενα επί χρόνια. Τα μέταλλα αυτού του είδους, λοιπόν, δικαίως χαρακτηρίζονται *υπεραγωγοί*.

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.

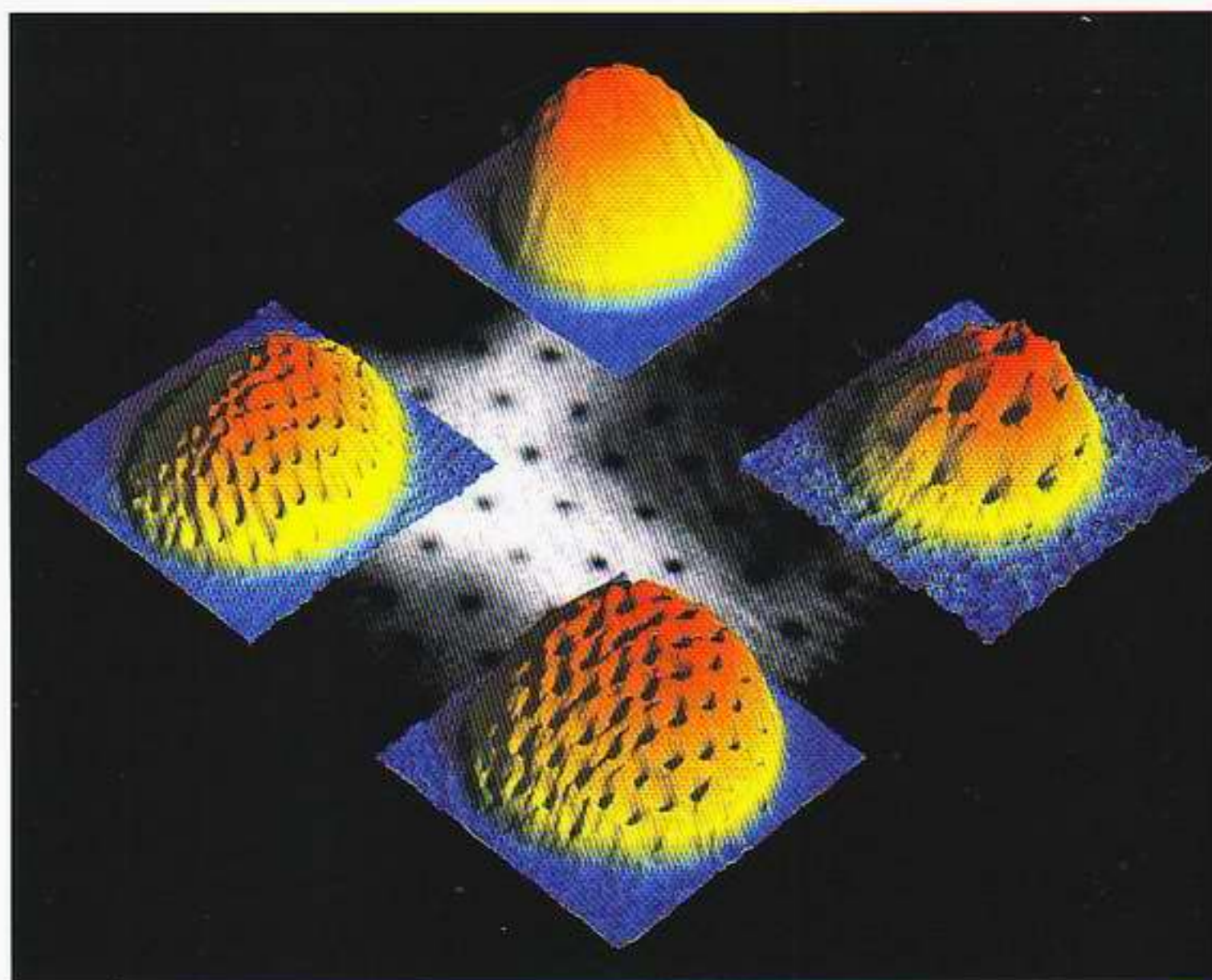
Πώς μπορούμε να κατανοήσουμε την υπεραγωγιμότητα; Από το 1935 ακόμα, στην Οξφόρδη, οι αδελφοί Heinz και Fritz London —οι οποίοι διεξήγαγαν μεγάλο μέρος της πειραματικής και θεωρητικής εργασίας πάνω στους υπεραγωγούς κατά την πρώιμη φάση του πεδίου— κατάλαβαν ότι η κβαντική μηχανική πρέπει να συνιστά 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 αποωθούνται 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.

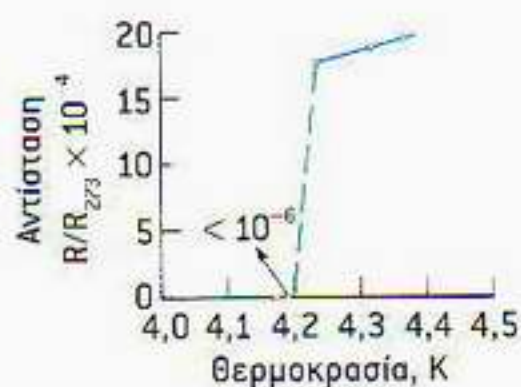
αυτά τα ιόντα λίγο πιο κοντά μεταξύ τους απ' ό,τι θα ήταν κανονικά· έτσι, ένα άλλο ηλεκτρόνιο θα υφίσταται συνολικά από τα δύο ιόντα μια μικρή έλξη. Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα τα δύο αυτά ηλεκτρόνια να «συζευχθούν» και να σχηματίσουν ένα ζεύγος Cooper. Τα ζεύγη Cooper είναι μάλλον παράξενα κατά το ότι αποτελούνται από ηλεκτρόνια 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 ηλεκτρόνια 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 ^4He , 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 ηλεκτρο-

Εικόνα 7.18 Αιώρηση με τη βοήθεια υπεραγωγού. Ένας μικρός μαγνήτης αιωρείται πάνω από έναν υπεραγωγίμο 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 αλλού 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.

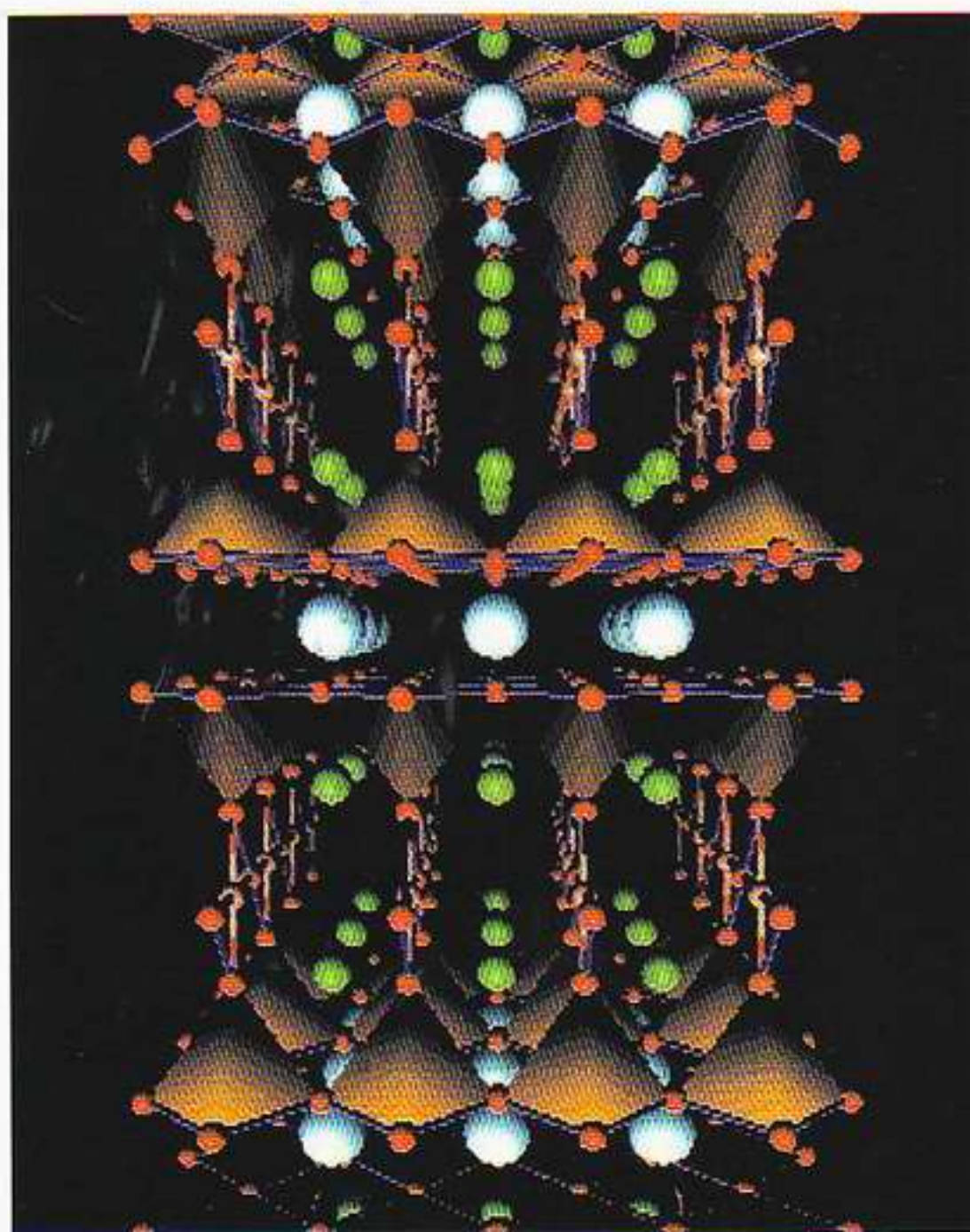


Εικόνα 7.19 Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας από τον Kamerlingh Onnes το 1911. Μια συνταρακτική γραφική παράσταση που δείχνει πώς ξαφνικά μηδενίζεται η ηλεκτρική αντίσταση του υδραργύρου καθώς η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 4,2 Κέλβιν.

νίων σε όλα τα ηλεκτρόνια του υπεραγωγίμου 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 κατέφεραν 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 οξείδια 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!



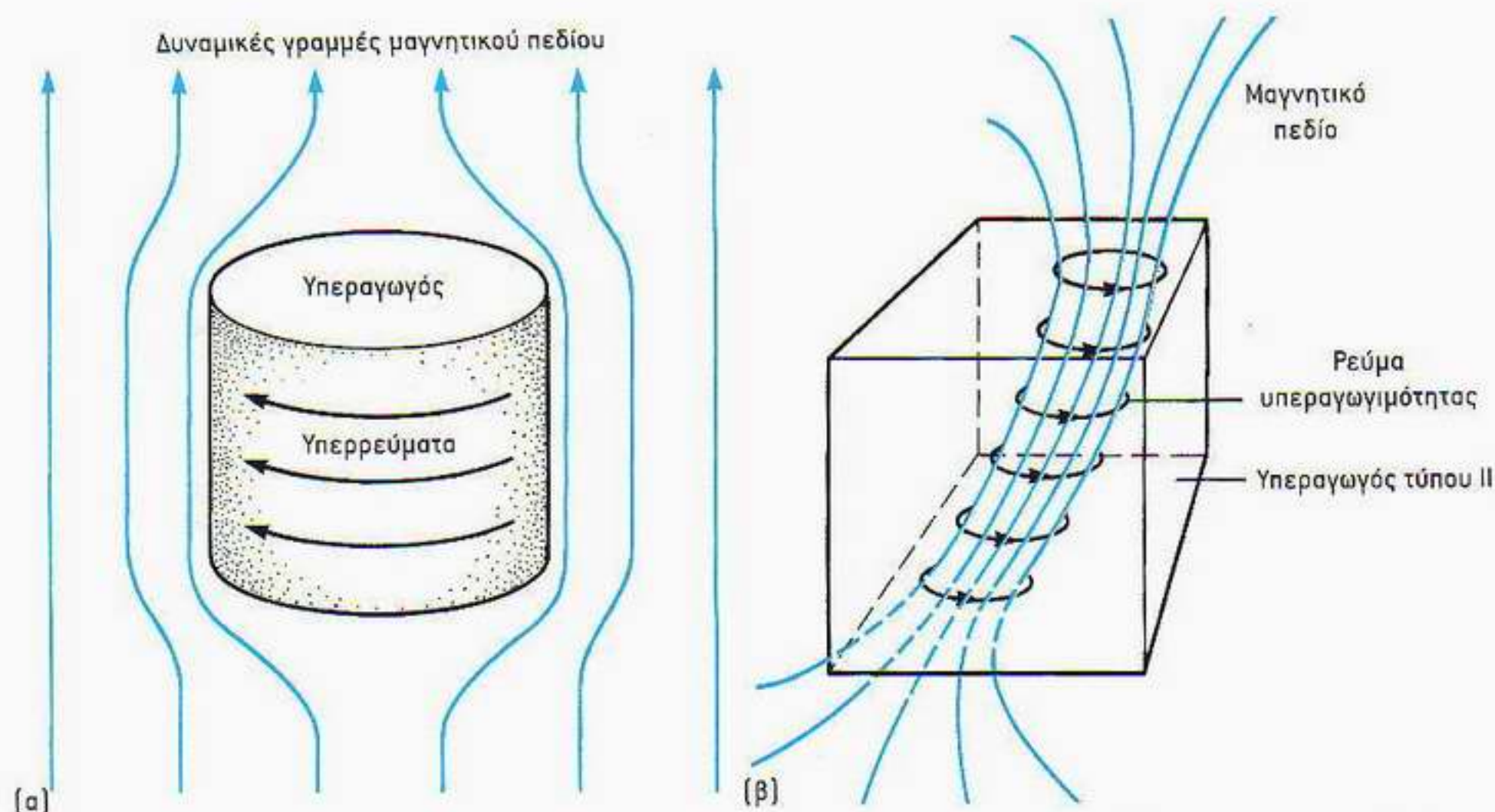
[α]



[β]

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

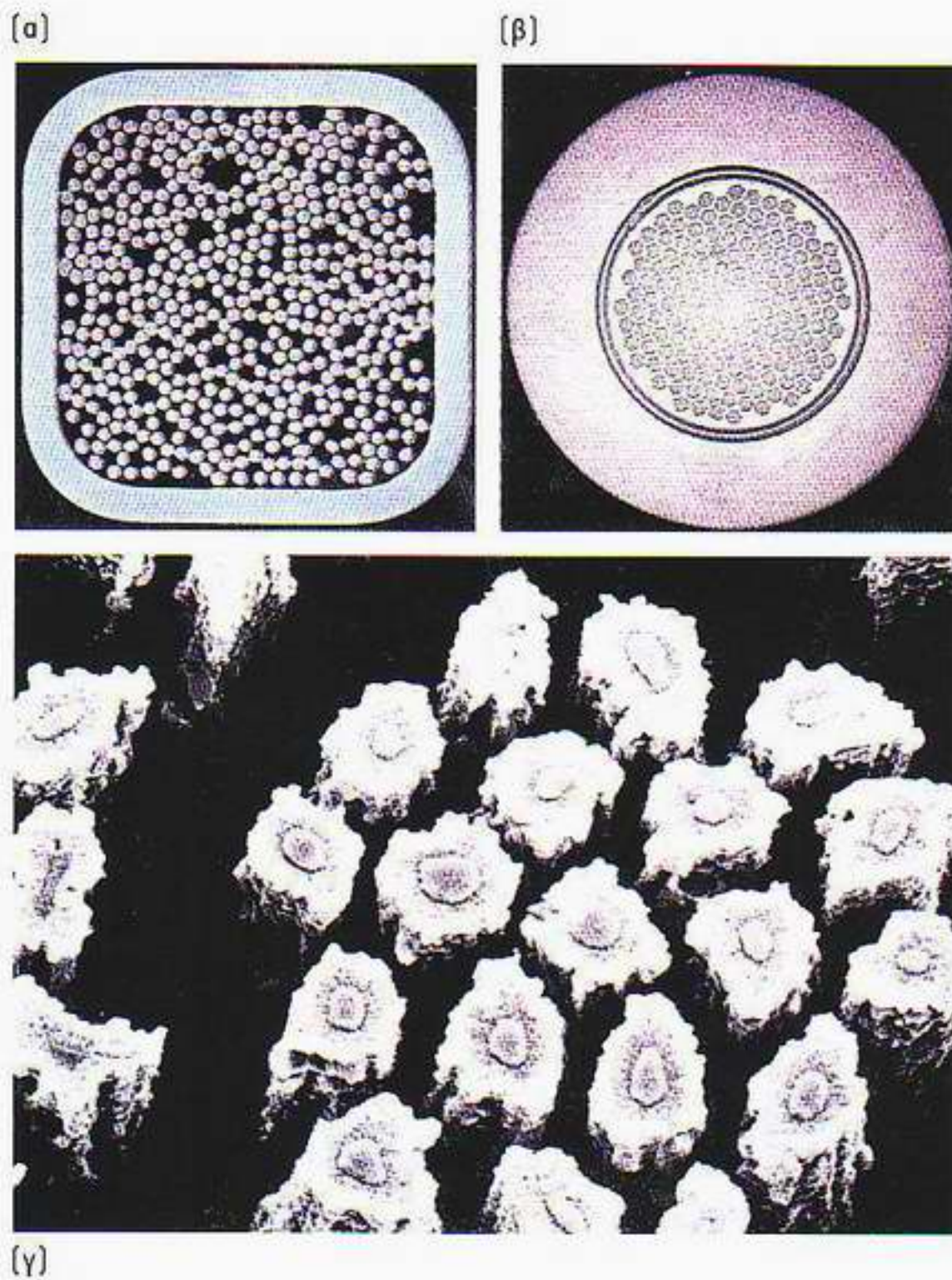
Εικόνα 7.20 Εικόνα της πολύπλοκης δομής ενός υπεραγωγού υψηλής θερμοκρασίας κατασκευασμένη από υπολογιστή.



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 δισπερνούν 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 σπών. 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 αμβλυνθεί 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-

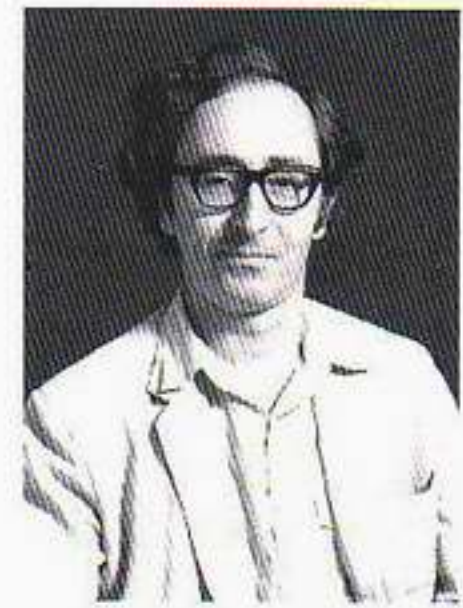


Εικόνα 7.22 Φωτογραφίες υπεραγωγίων καλωδίων τα οποία σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν πολύ ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα. (α) Χαλύβδινος σωλήνας που περιέχει εκατοντάδες υπεραγωγίμα σύρματα. Μέσα στο σωλήνα διοχετεύεται υγρό ήλιο για να διατηρούνται οι χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται ώστε τα σύρματα να 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 χαλκίνο περίβλημα. (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 μικροσκοπίων.

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 θα 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 το βραβείο 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.