

Μπράιαν Γκριν Το κομψό ούμπαν

ΠΙΠΕΡΙΠΕΤΕΙΑΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ



Ω Κ ε α ν í δ α



Ο Μπράιαν Γκρίν αποφοίτησε από το Χάρβαρντ κι έκανε το διδακτορικό του στην Οξφόρδη. Προσελήφθη στο τμήμα φυσικής του Πανεπιστημίου Κορνέλ το 1990, ανέλαβε την έδρα της φυσικής το 1995 και το 1996 μεταπήδησε στο Πανεπιστήμιο Κολούμπια, όπου διδάσκει φυσική και μαθηματικά. Έχει δώσει διαλέξεις, τόσο γενικού όσο και τεχνικού χαρακτήρα, σε περισσότερες από είκοσι χώρες κι έχει κερδίσει την εκτίμηση της επιστημονικής κοινότητας για τις πρωτοποριακές ανακαλύψεις του στη θεωρία των υπερχορδών.

ΜΠΡΑΪΑΝ ΓΚΡΙΝ

Το κομψό σύμπαν

Υπερχορδές, χρυσμένες διαστάσεις
και το αίτημα για μια τελική θεωρία

Μετάφραση
ΤΑΣΟΣ ΤΣΙΑΝΤΟΥΓΛΑΣ

ΩΚΕΑΝΙΔΑ

νεοπυδό θύμος οΤ

παρατημένος στην πλανήτη της γης
πάσης γης με την απόλυτη απότομη

Τίτλος πρωτότυπου:
Brian Greene, *The Elegant Universe*

1η έκδοση: Μάιος 2004

Μετάφραση από τα αγγλικά: Τάσος Τσιαντούλας
Επιστημονική επιμέλεια: Μιχάλης Αρβανίτης
Επιστημονική θεώρηση της μετάφρασης: Λεωνίδας Καρατζάς
Γλωσσική επιμέλεια: Ζένια Χασάπη
Διόρθωση: Αρετή Μπουκάλα

© 1999, Brian R. Greene
© 1999, για την ελληνική γλώσσα
Εκδόσεις Ωκεανίδα ΑΕ
Σολωμού 25, 106 82 Αθήνα, τηλ. 210.38.27.341
Πλάτωνος 17, 546 31 Θεσσαλονίκη, τηλ. 2310.231.800
e-mail: oceanida@internet.gr
www.oceanida.gr

Ηλεκτρονική στοιχειοθεσία-Σελιδοποίηση: Εκδόσεις «Ωκεανίδα»
Εκτύπωση: Μ. Σπύρου & Σία ΑΕ
Βιβλιοδεσία: Βιβλιοδομή ΑΕ

ISBN 960-410-340-7

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: Στα όρια της γνώσης	
1. Δεμένα με χορδή	19
ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: Το δίλημμα του χωροχρόνου και των χβάντων	
2. Χώρος, χρόνος και το μάτι του παρατηρητή	47
3. Περί στρεβλώσεων και ρυτιδώσεων	90
4. Μικροσκοπική παραδοξότητα	136
5. Η ανάγκη για μια νέα θεωρία: γενική σχετικότητα εναντίον χβαντομηχανικής	182
ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ: Η κοσμική συμφωνία	
6. Μουσική και μόνο μουσική: βασικές αρχές της θεωρίας των υπερχορδών	203
7. Το «υπέρ» στις υπερχορδές	246
8. Περισσότερες διαστάσεις απ' όσες βλέπει το μάτι . .	271
9. Η τρανταχτή απόδειξη: με την υπογραφή του πειράματος	305
ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ: Θεωρία χορδών και χωροχρονικός ιστός	
10. Κβαντική γεωμετρία	331
11. Σχίζοντας τον ιστό του χώρου	375
12. Πέρα από τις χορδές: αναζητώντας τη θεωρία-Μ . .	402
13. Μαύρες τρύπες: από τη σκοπιά των χορδών και της θεωρίας-Μ	452
14. Οι συνέπειες στην κοσμολογία	488

ΜΕΡΟΣ ΠΕΜΠΤΟ: <i>Ενοποίηση των εικοστό πρώτο αιώνα</i>	
15. Προοπτικές	527
 ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ	549
ΓΛΩΣΣΑΡΙ	587
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	609
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΝΟΜΑΤΩΝ	611
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ	617

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία τριάντα χρόνια της ζωής του, ο Albert Einstein τα αφιέρωσε στην αναζήτηση της αποκαλούμενης ενοποιημένης θεωρίας πεδίου – μιας θεωρίας ικανής να περιγράψει τις δυνάμεις της φύσης μέσα σε ένα ενιαίο και συνεκτικό πλαίσιο. Το κίνητρο του Einstein δεν έμοιαζε καθόλου με τα κίνητρα όσων ασχολούνται με την επιστημονική έρευνα, δεν προσπαθούσε δηλαδή να εξηγήσει το άλφα ή το βήτα πειραματικό δεδομένο. Αυτό που τον αθιούσε ήταν η ακλόνητη πεποίθηση ότι η βαθύτερη κατανόηση του σύμπαντος θα αποκάλυπτε το αληθινό του μεγαλείο: την απλότητα και τη δύναμη των αρχών στις οποίες βασίζεται. Ο Einstein ήθελε να φωτίσει τους μηχανισμούς του σύμπαντος με μια σαφήνεια που ποτέ πριν δεν είχε επιτευχθεί επιτρέποντάς μας να θαυμάσουμε την ομορφιά και την ρομποτητά του.

Ο Einstein δεν κατόρθωσε να δει το όνειρό του να πραγματοποιείται, χυρίως γιατί οι συγχυρίες ήταν εναντίον του. Εκείνη την εποχή, πολλά ουσιώδη χαρακτηριστικά της ύλης και οι δυνάμεις της φύσης δεν είχαν ακόμα ανακαλυφθεί ή, στην καλύτερη περίπτωση, ο βαθμός κατανόησής τους ήταν ανεπαρκής. Όμως, κατά τα τελευταία πενήντα χρόνια, διαδοχικές γενιές φυσικών, χτίζοντας ή μια πάνω στα ευρήματα της άλλης και ακολουθώντας μια πορεία γεμάτη εξάρσεις, υφέσεις απότομες στροφές και παλινδρομήσεις, κατάφεραν να φτάσουν σε μια πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών του σύμπαντος. Και τώρα, πολύ μετά την εποχή που ο Einstein διατύπωσε το ζητούμενο μιας ενοποιημένης θεωρίας χωρίς ποτέ να μπορέσει να το υλοποιήσει, οι φυσικοί πι-

στεύουν ότι έχουν βρει τελικά ένα πλαίσιο που θα τους επιτρέψει να συρράψουν όλα τα επιμέρους δεδομένα σε ένα αδιάσπαστο σύνολο, σε μια θεωρία, η οποία θα είναι καταρχήν ικανή να περιγράψει όλα τα φαινόμενα. Αυτή η θεωρία, η θεωρία των υπερχορδών, είναι το αντικείμενο αυτού του βιβλίου.

Έγραψα το *Κομψό σύμπαν* προσπαθώντας να κάνω τις σημαντικές ανακαλύψεις, οι οποίες έχουν προκύψει από την πρωτοπορία της έρευνας στη φυσική, προσιτές στο ευρύ κοινό, και χυρίως στους αναγνώστες που δεν έχουν ειδικές γνώσεις στα μαθηματικά και στη φυσική. Οι διαλέξεις που έχω δώσει τα τελευταία χρόνια με αντικείμενο τη θεωρία των υπερχορδών μου έδωσαν να καταλάβω ότι υπάρχει ευρύτατο ενδιαφέρον για τα ευρήματα της σύγχρονης έρευνας όσον αφορά τους θεμελιώδεις νόμους του σύμπαντος, τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι νόμοι αλλάζουν εκ βάθρων την αντίληψή μας για το σύμπαν, και τους σκοπέλους που μας περιμένουν στην αναζήτηση της ενοποιημένης θεωρίας. Ελπίζω ότι εξηγώντας τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της φυσικής, από την εποχή του Einstein και του Heisenberg μέχρι σήμερα, και περιγράφοντας πώς οι ανακαλύψεις εκείνων ολοκληρώθηκαν μέσα από τις καινοτομίες της δικής μας εποχής, αυτό το βιβλίο θα ανανεώσει και θα ικανοποιήσει αυτό το ενδιαφέρον.

Ελπίζω επίσης ότι το *Κομψό σύμπαν* δεν θα αφήσει αδιάφορους τους αναγνώστες που έχουν κάποιο επιστημονικό υπόβαθρο. Για τους φοιτητές και τους καθηγητές της φυσικής, πιστεύω ότι αυτό το βιβλίο θα αποκρυσταλλώσει στο μυαλό τους μερικές από τις θεμελιώδεις ιδέες της σύγχρονης φυσικής, όπως, π.χ., η ειδική σχετικότητα, η γενική σχετικότητα και η κβαντομηχανική, καθώς θα τους μπολιάσει με τον ενθουσιασμό των ερευνητών που νιώθουν να πλησιάζουν τον ποθητό στόχο της ενοποιημένης θεωρίας. Για τον φανατικό αναγνώστη της εκλαϊκευμένης επιστήμης, προσπάθησα να εξηγήσω πολλές από τις συγκλονιστικές εξελίξεις της τελευταίας δεκαετίας όσον αφορά την κατανόηση του σύμπαντος. Όσο για τους συναδέλφους μου σε άλλους κλάδους

της επιστήμης, ελπίζω ότι αυτό το βιβλίο θα τους δώσει μια τίμια και ισορροπημένη εικόνα δείχνοντας γιατί οι θεωρητικοί των χορδών αντιμετωπίζουν με τόσο ενθουσιασμό τις προόδους που γίνονται στην πορεία προς την αναζήτηση της τελικής θεωρίας για τη φύση.

Η θεωρία των υπερχορδών έχει πολλές προεκτάσεις. Είναι ένας τομέας με μεγάλο εύρος και βάθος που αντλεί από πολλές θεμελιώδεις ανακαλύψεις της φυσικής. Καθώς η θεωρία ενοποιεί τους νόμους του μεγάλου και του μικρού, τους νόμους που περιγράφουν τον φυσικό κόσμο από τις αχανείς εκτάσεις του σύμπαντος μέχρι τις μικρότερες υποδιαιρέσεις της ύλης, υπάρχουν πολλοί δρόμοι, από τους οποίους μπορεί κανείς να προσεγγίσει το αντικείμενό του. Εγώ επέλεξα να επικεντρωθώ στην εξελισσόμενη κατανόησή μας για το χώρο και το χρόνο. Θεωρώ ότι αυτή η πλευρά της εξέλιξης είναι ιδιαίτερα συναρπαστική καθώς επηρεάζει όλες τις βασικές καινούργιες ανακαλύψεις. Ο Einstein μας έδειξε ότι ο χρόνος και ο χώρος συμπεριφέρονται με εκπληκτικά απρόσμενους τρόπους. Ακολουθώντας τα βήματά του, η σύγχρονη έρευνα έχει ενσωματώσει τις ανακαλύψεις του σε ένα κβαντικό σύμπαν με αρκετές κρυφές σπειροειδείς διαστάσεις συνυφασμένες στον ιστό του σύμπαντος – διαστάσεις που η απερίγραπτα πολύπλοκη γεωμετρία τους μπορεί να κρύβει το κλειδί για μερικά από τα πιο βασικιστικά ερωτήματα που έχουν τεθεί ποτέ. Αν και μερικές από τις περιγραφόμενες έννοιες είναι εξαιρετικά δυσνόητες, θα δούμε ότι μπορούν να γίνουν κατανοητές μέσω εύληπτων αναλογιών. Και μόλις οι ιδέες αυτές αποκτήσουν σαφήνεια, τότε η εικόνα που έχετε για το σύμπαν θα αλλάξει με έναν εκπληκτικό και επαναστατικό τρόπο.

Σε δλόκληρο το βιβλίο προσπάθησα να μείνω πιστός στην επιστήμη δίνοντας ταυτόχρονα στον αναγνώστη τη δυνατότητα να καταλάβει διαισθητικά –συχνά μέσω αναλογιών και μεταφορών– τον τρόπο με τον οποίο οι επιστήμονες έφτασαν στην τωρινή τους αντίληψη για το σύμπαν. Αν και αποφεύγω τη χρήση τεχνικής γλώσσας και μαθηματικών σχέσεων, λόγω των ριζικά καινούρ-

γιων εννοιών που εισάγονται, ο αναγνώστης θα πρέπει κάθε τόσο να σταματά και να σκέφτεται το κεφάλαιο ή την εξήγηση που μόλις διάβασε, για να μπορέσει να παρακολουθήσει πλήρως την αλληλουχία των ιδεών. Μερικά κεφάλαια στο τέταρτο μέρος (το οποίο πραγματεύεται τις πιο πρόσφατες εξελίξεις) είναι λίγο πιο αφηρημένα από τα υπόλοιπα. Φροντίζω να προειδοποιώ τον αναγνώστη κάθε φορά που επίκειται ένα τέτοιο κομμάτι και έχω δομήσει το κείμενο κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μπορεί να παραλείψει τα επίμαχα τμήματα χωρίς στην ουσία να χάσει τη λογική συνέχεια της ανάγνωσης. Έχω περιλάβει ένα γλωσσάριο επιστημονικών όρων ως σημείο αναφοράς για τους όρους που περιλαμβάνονται στο κείμενο. Αν και ο μη ειδικός αναγνώστης θα θελήσει ίσως να παραλείψει τις υποσημειώσεις, ο πιο εξειδικευμένος θα βρει εκεί πιο λεπτομερείς εξηγήσεις για ζητήματα που θίγει το κείμενο, διευκρινίσεις ιδεών που έχουν απλοποιηθεί, αλλά και μερικές καθαρά τεχνικές παρεκβάσεις για όσους δεν φοβούνται τα μαθηματικά.

Οφείλω να ευχαριστήσω αρκετούς φίλους για τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της συγγραφής αυτού του βιβλίου. Ο David Steinhhardt διάβασε το χειρόγραφο με μεγάλη προσοχή και έμπειρο μάτι προσφέροντάς μου απλόχερα την ενθάρρυνσή του. Οι David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicholas Boles, Steven Carlip, Arthur Greenspoon, David Mermin, Michael Popowits και Shani Offen διάβασαν το χειρόγραφο προσεκτικά και έκαναν λεπτομερείς υποδείξεις, οι οποίες βελτίωσαν δραματικά την τελική του μορφή. Άλλοι οι οποίοι διάβασαν όλο ή μέρος του χειρογράφου και πρόσφεραν τις συμβουλές και την ενθάρρυνσή τους είναι οι Paul Aspinwall, Persis Drell, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Greene, Teddy Jefferson, Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwen, Nari Mistry, Hasan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa και Gabriele Veneziano. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ ειδικά στον Raphael Gunner για τις διορατικές του χρ-

τικές παρατηρήσεις, και όχι μόνο κατά το στάδιο της συγγραφής, οι οποίες επηρέασαν σημαντικά τη συνολική μορφή του βιβλίου, και τον Robert Malley για την ευγενική αλλά επίμονη παρότρυνσή του να πάψω να σκέφτομαι το βιβλίο και να «στρωθώ» να το γράψω». Οι Steven Weinberg και Sidney Coleman μου πρόσφεραν πολύτιμες συμβουλές και βοήθεια, και με μεγάλη μου χαρά θυμάμαι τις πολύτιμες επαφές που είχα με τους Carol Archer, Vicky Carstens, David Cassel, Anne Coyle, Michael Duncan, Jane Forman, Wendy Greene, Susan Greene, Erik Jendresen, Gary Kass, Shiva Kumar, Robert Mawhinney, Pam Morehouse, Pierre Raymond, Amanda Salles και Eero Simoncelli. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Κώστα Ευθυμίου που με βοήθησε στη διασταύρωση και επιβεβαίωση των παραπομπών και μετέτρεψε τα αρχικά χειρόγραφα σχέδιά μου σε αξιοπρεπή σχήματα, από τα οποία ο Tom Rockwell δημιούργησε –με ιώβεια υπομονή και έμπειρο καλλιτεχνικό μάτι– τις εικόνες που συνοδεύουν το κείμενο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Andrew Hanson και Jim Sethna για τη βοήθειά τους στη σχεδίαση μερικών από τις πιο εξειδικευμένες εικόνες.

Για την προθυμία τους να μιλήσουν μαζί μου και να μου δώσουν τις δικές τους προσωπικές απόψεις σε σχέση με πολλά θέματα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Howard Georgi, Sheldon Glashow, Michael Green, John Schwarz, John Wheeler, Edward Witten και, για δεύτερη φορά, τους Andrew Strominger, Cumrun Vafa και Gabriele Veneziano.

Δεν μπορώ να μην αναφέρω τη διορατικότητα και τις πολύτιμες συμβουλές της Angela Von der Lippe και την έξοχη παρατηρητικότητα της Traci Nagle, επιμελητών του κειμένου στον εκδοτικό οίκο W. W. Norton, γιατί και οι δύο βελτίωσαν σημαντικά τη σαφήνεια της παρουσίασης. Πρέπει επίσης να ευχαριστήσω τους John Brockman και Katinka Matson για τις άσκνες προσπάθειες και τις πολύτιμες συμβουλές τους, χάρη στις οποίες το βιβλίο πέρασε από το στάδιο του χειρογράφου στο τελικό τυπωμένο βιβλίο.

Για τη γενναιόδωρη υποστήριξη των ερευνών μου στη φυσική για παραπάνω από δέκα χρόνια, ευχαριστώ το National Science Foundation, το Alfred P. Sloan Foundation και το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Είναι ίσως αναμενόμενο η δική μου έρευνα να έχει ως αντικείμενο τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η θεωρία χορδών την αντίληψή μας για το χώρο και το χρόνο, και κάπου στα τελευταία χεφάλαια περιγράφω μερικές από τις ανακαλύψεις, στις οποίες είχα την τύχη να συμμετάσχω. Αν και ελπίζω ότι ο αναγνώστης θα διαβάσει με ενδιαφέρον αυτές τις «εκ των ένδον» αποκαλύψεις, δεν θα ήθελα να θεωρηθεί ο ρόλος μου στην εξέλιξη της θεωρίας των χορδών πιο σημαντικός απ' ό,τι πράγματι είναι. Γι' αυτόν το λόγο επιτρέψτε μου, σε αυτό το σημείο, να αναφερθώ στους χίλιους και πλέον φυσικούς σε ολόκληρο τον κόσμο, οι οποίοι συμμετέχουν ενεργά και με μεγάλη αφοσίωση στην προσπάθεια διατύπωσης της τελικής θεωρίας του σύμπαντος. Ζητώ συγγνώμη απ' όλους εκείνους που η δουλειά τους δεν αναφέρθηκε στο βιβλίο αυτό. Ο λόγος είναι ότι επέλεξα να περιγράψω το θέμα μου από μια εντελώς συγκεκριμένη σκοπιά, αλλά και ότι μια γενική παρουσίαση δεν μπορεί ποτέ να είναι πολύ εκτεταμένη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ellen Archer για την αγάπη και την υποστήριξή της, χωρίς τις οποίες αυτό το βιβλίο δεν θα είχε γραφτεί.

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

Στα όρια της γνώσης

1

Δεμένα με χορδή

Αν το αποκαλούσα συνωμοσία θα ήταν υπερβολικά δραματικό. Όμως εδώ και μισό αιώνα – παρά τα τόσα και τόσα μεγάλα επιστημονικά επιτεύγματα – οι φυσικοί νιώθουν να κρέμεται πάνω από το κεφάλι τους μια αόρατη απειλή. Το πρόβλημα είναι το εξής: υπάρχουν δύο ακρογωνιαίοι λίθοι πάνω στους οποίους στηρίζεται η σύγχρονη φυσική. Ο ένας είναι η γενική θεωρία της σχετικότητας του Albert Einstein, η οποία παρέχει ένα θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση του σύμπαντος στις μεγαλύτερες διαστάσεις του: άστρα, γαλαξίες, συμπλέγματα γαλαξιών, αλλά και ακόμη πιο πέρα μέχρι τα ασύλληπτα όρια του ίδιου του σύμπαντος. Ο άλλος είναι η κβαντική μηχανική, η οποία παρέχει το θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση του σύμπαντος σε μικροσκοπική κλίμακα: από τα μόρια και τα άτομα μέχρι τα υποατομικά σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκ. Μετά από χρόνια έρευνας, οι φυσικοί έχουν επιβεβαιώσει πειραματικά, με ασύλληπτη ακρίβεια, σχεδόν όλες τις προβλέψεις των δύο θεωριών. Όμως τα ίδια αυτά θεωρητικά εργαλεία οδηγούν αμείλικτα σε ένα άλλο ανησυχητικό συμπέρασμα: έτσι όπως είναι διατυπωμένες σήμερα, η γενική θεωρία της σχετικότητας και η κβαντομηχανική δεν μπορούν να αληθεύουν ταυτόχρονα. Οι δύο θεωρίες που αποτέλεσαν το υπόβαθρο για την τρομακτική πρόοδο της φυσικής τα τελευταία εκατό χρόνια – πρόοδο που μας έδωσε την εξήγηση για τη διαστολή του σύ-

μπαντος και τη θεμελιώδη δομή της ύλης – είναι αμοιβαία ασύμβατες.

Αν δεν έχετε ξανακούσει γι' αυτό τον ανελέητο ανταγωνισμό, ίσως αναρωτιέστε γιατί συμβαίνει. Δεν είναι δύσκολο να βρείτε την απάντηση. Σε όλες τις καταστάσεις, με εξαίρεση ίσως τις πιο ακραίες, οι φυσικοί μελετούν πράγματα που είναι είτε μικρά και ελαφρά (όπως τα άτομα και τα συστατικά τους) είτε τεράστια και βαριά (όπως τα άστρα και οι γαλαξίες), αλλά όχι και τα δυο μαζί. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να χρησιμοποιούν ή μόνο την χβαντική μηχανική ή μόνο τη γενική θεωρία της σχετικότητας και ότι μπορούν, κλείνοντας πονηρά το μάτι, να αψηφούν τις έντονες διαμαρτυρίες της άλλης θεωρίας. Επί πενήντα χρόνια, αυτή η προσέγγιση μπορεί να μην προσφέρει τη μακαριότητα της άγνοιας, αλλά δεν απέχει και πολύ από αυτή.

Όμως στο σύμπαν παρατηρούνται όντως ακραίες καταστάσεις. Βαθιά στο κέντρο μιας μαύρης τρύπας, μια τεράστια μάζα συμπυκνώνεται σε απειροελάχιστο μέγεθος. Τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης ολόκληρο το σύμπαν ξεπήδησε από ένα σβόλο τόσο μικροσκοπικό που μπροστά του ένας κόκκος άμμου δείχνει κολοσσαίος. Σε αυτές τις απειροελάχιστες σφαίρες με την τεράστια μάζα απαιτείται η ταυτόχρονη εφαρμογή τόσο της χβαντομηχανικής όσο και της γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Για λόγους που θα γίνονται όλο και πιο σαφείς καθώς θα προχωράμε, οι εξισώσεις της γενικής σχετικότητας και της χβαντικής μηχανικής, όταν συνδυαστούν, αρχίζουν να τραντάζονται, να κροταλίζουν και να βγάζουν καπνούς, σαν σακαράκες. Αν θέλουμε να πούμε τα πράγματα με το όνομά τους, στη φυσική διατυπώνονται εύστοχα ερωτήματα που αποσπούν απαντήσεις χωρίς νόημα από το ατυχές αμάλγαμα αυτών των δύο θεωριών. Ακόμη κι αν είστε πρόθυμοι να κρατήσετε το εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας και τις απαρχές του σύμπαντος τυλιγμένα σε πέπλο μυστηρίου, δεν μπορείτε να αποφύγετε τη διαπίστωση ότι η αντιπαλότητα ανάμεσα στην χβαντομηχανική και τη γενική θεωρία της σχετικότητας δηλώνει την κραυγαλέα ανάγκη για ένα καινούργιο, πιο βαθύ, επί-

πεδο κατανόησης. Μπορεί άραγε να αληθεύει ότι το σύμπαν είναι στη βάση του διχασμένο και ότι απαιτείται άλλο σύνολο νόμων όταν τα πράγματα είναι μεγάλα και άλλο, ασύμβατο με το προηγούμενο, όταν είναι μικρά;

Η θεωρία των υπερχορδών, νέα και πρωτάρα σε σύγχριση με τα σεπτά οικοδομήματα της κβαντομηχανικής και της γενικής σχετικότητας, απαντά με ένα ηχηρό όχι. Επίμονες έρευνες κατά την τελευταία δεκαετία από φυσικούς και μαθηματικούς σε ολόκληρο τον κόσμο έχουν αποκαλύψει ότι η νέα αυτή προσέγγιση για την περιγραφή της ουσίας της ύλης εξομαλύνει τις διαφορές ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική. Μάλιστα, η θεωρία των υπερχορδών φανερώνει ακόμα περισσότερα: μέσα σε αυτό το νέο πλαίσιο, η γενική θεωρία της σχετικότητας και η κβαντομηχανική χρειάζονται η μία την άλλη. Σύμφωνα με τη θεωρία των υπερχορδών, το πάντρεμα των νόμων του μεγάλου και του μικρού δεν είναι απλώς επιτυχημένο αλλά και αναπόφευκτο.

Όμως τα καλά νέα δεν τελειώνουν εδώ. Με τη θεωρία των υπερχορδών –θεωρία χορδών, για συντομία – αυτή η ένωση αποκτά ασύλληπτες προεκτάσεις. Επί τρεις δεκαετίες, ο Einstein αναζητούσε μια ενοποιημένη θεωρία της φυσικής, μια θεωρία που θα μπορούσε να συνυφάνει όλες τις δυνάμεις και τα υλικά συστατικά της φύσης στο ίδιο θεωρητικό εργόχειρο. Απέτυχε. Τώρα, στην αυγή της νέας χιλιετίας, οι οπαδοί της θεωρίας χορδών υποστηρίζουν ότι επιτέλους αποκάλυψαν τα νήματα αυτού του ασύλληπτου ενοποιημένου εργόχειρου. Η θεωρία χορδών έχει τη δύναμη να αποδείξει ότι όσα θαυμαστά συμβαίνουν στο σύμπαν μας –από τον φρενήρη χορό των υποατομικών κουάρκ μέχρι το επιβλητικό βαλς της περιφοράς των διπλών αστέρων, από την πρωταρχική φλεγόμενη μπάλα της Μεγάλης Έκρηξης μέχρι τη μεγαλοπρεπή περιδίνιση των ουράνιων γαλαξιών – αντανακλούν μια μεγαλειώδη φυσική αρχή, μια κυρίαρχη εξίσωση.

Καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά της θεωρίας χορδών απαιτούν να αλλάξει ριζικά ο τρόπος που αντιλαμβανόμαστε το χώρο, το

χρόνο και την ύλη, θα περάσει πολύς καιρός μέχρι να τα συνηθίσουμε και να φτάσουμε σιγά σιγά σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο κατανόησης. Όταν όμως δούμε τη θεωρία χορδών από τη σωστή σκοπιά, θα διαπιστώσουμε ότι παρ' όλο που φαίνεται συνταρακτική και εντυπωσιακή, δεν είναι παρά φυσιολογικό επακόλουθο των επαναστατικών ανακαλύψεων της φυσικής κατά τα τελευταία εκατό χρόνια. Πράγματι, θα δούμε ότι η σύγκρουση ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την χβαντομηχανική δεν είναι ουσιαστικά η πρώτη αλλά η τρίτη σε μια σειρά θεμελιωδών συγκρούσεων ζωτικής σημασίας που ανέκυψαν τον περασμένο αιώνα οδηγώντας με την επίλυσή τους στην εκθαμβωτική αναθεώρηση του τρόπου με τον οποίο κατανοούμε το σύμπαν.

Οι τρεις συγκρούσεις

Η πρώτη σύγκρουση, που είχε διαφανεί ήδη από τα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα, αναφέρεται στις προβληματικές ιδιότητες της κίνησης του φωτός. Για να το θέσουμε με συντομία, σύμφωνα με τους νόμους της κίνησης κατά Isaac Newton, αν τρέξεις αρχετά γρήγορα μπορείς να φτάσεις μια ακτίνα φωτός που προπρεύεται, ενώ σύμφωνα με τους νόμους του James Clerk Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό, δεν μπορείς. Όπως θα δούμε στο δεύτερο κεφάλαιο, ο Einstein επέλυσε αυτή τη σύγκρουση με τη θεωρία του για την ειδική σχετικότητα, αλλάζοντας άρδην τον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε το χώρο και το χρόνο. Σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, ο χώρος και ο χρόνος δεν μπορούν πλέον να θεωρούνται καθολικές έννοιες που γίνονται αγτιληπτές απ' όλους με τον ίδιο τρόπο. Αντίθετα, κατά τη θεωρία του Einstein, ο χώρος και ο χρόνος είναι κλασικές οντότητες που η μορφή και η εικόνα τους εξαρτώνται από την κινητική κατάσταση του παρατηρητή.

Η εξέλιξη της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας δεν άργησε να στήσει το σκηνικό για τη δεύτερη σύγκρουση. Από το έργο

του Einstein προκύπτει ότι κανένα αντικείμενο -ή μάλλον, για να είμαστε ακριβείς, καμία επίδραση ή διαταραχή οποιουδήποτε είδους- δεν μπορεί να ταξιδεύει με ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη του φωτός. Αλλά, όπως θα δούμε στο τρίτο κεφάλαιο, η πειραματικά επιτυχής και διαισθητικά αποδεκτή θεωρία της παγκόσμιας έλξης του Newton αποδέχεται την ύπαρξη επιδράσεων που διαδίδονται σε τεράστιες αποστάσεις ακαριαία. Εδώ παρενέβη για δεύτερη φορά ο Einstein, ο οποίος για να άρει την αντίφαση πρότεινε μια νέα ερμηνεία της βαρύτητας με τη γενική θεωρία της σχετικότητας το 1915. Όπως ακριβώς η ειδική θεωρία της σχετικότητας ανέτρεψε τις παλαιότερες αντιλήψεις για το χώρο και το χρόνο, το ίδιο συνέβη και με τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Ο χώρος και ο χρόνος όχι μόνο επηρεάζονται από την κατάσταση κίνησης του παρατηρητή, αλλά μπορούν επίσης να παραμορφώνονται και να καμπυλώνονται, αντιδρώντας στην παρουσία ύλης ή ενέργειας. Αυτού του είδους οι παραμορφώσεις του χωροχρονικού συνεχούς, όπως θα δούμε, μεταδίδουν τη βαρυτική δύναμη από το ένα μέρος στο άλλο. Ο χώρος και ο χρόνος, συνεπώς, δεν είναι πια το αδρανές σκηνικό όπου διαδραματίζονται τα γεγονότα του σύμπαντος: αντίθετα, όπως μας έδειξε πρώτα η ειδική και κατόπιν η γενική σχετικότητα, είναι οι ίδιοι ενεργοί πρωταγωνιστές των γεγονότων.

Για άλλη μια φορά επαναλήφθηκε το ίδιο μοτίβο: η ανακάλυψη της γενικής σχετικότητας, ενώ επέλυσε τη μία σύγκρουση, οδήγησε σε μια άλλη. Κατά τη διάρκεια των τριών δεκαετιών που ακολούθησαν το 1900, οι φυσικοί ανέπτυξαν την κβαντομηχανική (εξετάζεται στο Κεφάλαιο 4) για να ανταποκριθούν στα πολλά και εντονότατα προβλήματα τα οποία ανέκυψαν, όταν οι έννοιες της φυσικής που επικρατούσαν τον δέκατο ένατο αιώνα εφαρμόστηκαν στο μικρόκοσμο. Και όπως αναφέραμε παραπάνω, η τρίτη και σφρότερη σύγκρουση προκύπτει από την ασυμβατότητα της κβαντομηχανικής με τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 5, η μικρή καμπύλωση του χώρου που προκύπτει από τη γενική θεωρία της σχετικότητας, και η ξέφρενη,

ταραχώδης συμπεριφορά του μικρόκοσμου που υποδηλώνει η κβαντομηχανική, διασταυρώνουν τα ξίφη τους. Και εφόσον χρειάστηκε να φτάσουμε μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 για να δοθεί μια λύση από τη θεωρία χορδών, η σύγχρονη αυτή δίκαια θεωρείται το κεντρικό πρόβλημα της σύγχρονης φυσικής. Επιπλέον, καθώς η θεωρία χορδών βασίζεται στην ειδική και γενική θεωρία της σχετικότητας, απαιτεί με τη σειρά της σοβαρή ανασκευή των αντιλήψεών μας για το χώρο και το χρόνο. Για παράδειγμα, οι περισσότεροι από μας θεωρούν δεδομένο ότι το σύμπαν μας έχει τρεις χωρικές διαστάσεις. Όμως αυτό δεν αληθεύει σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, η οποία υποστηρίζει ότι το σύμπαν μας έχει πολύ περισσότερες διαστάσεις απ' όσες βλέπει το μάτι – διαστάσεις που είναι σφιχτά τυλιγμένες στον διπλωμένο χωρικό ιστό του Κόσμου. Αυτές οι αξιοσημείωτες ιδέες για τη φύση του χώρου και του χρόνου είναι τόσο βασικές, που θα τις χρησιμοποιούμε ως κατευθυντήρια γραμμή σε όλα όσα ακολουθούν. Η θεωρία χορδών, για να πούμε τα πράγματα με τ' όνομά τους, είναι η ιστορία του χώρου και του χρόνου μετά τον Einstein.

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε την ουσία της θεωρίας χορδών, χρειάζεται να κάνουμε ένα βήμα πίσω και να περιγράψουμε εν συντομίᾳ τι έχουμε μάθει τον τελευταίο αιώνα για τη μικροσκοπική δομή του σύμπαντος.

Το σύμπαν στις μικρότερες διαστάσεις του: τι γνωρίζουμε για την ύλη

Οι αρχαίοι Έλληνες υπέθεταν ότι το σύμπαν το αποτελούσαν απειροελάχιστα «άτμητα» συστατικά, τα γνωστά μας άτομα. Όπως ακριβώς ο τεράστιος αριθμός λέξεων σε μια γλώσσα που διαθέτει αλφάριθμο, προκύπτει από τις συνδυαστικές δυνατότητες ενός περιορισμένου αριθμού γραμμάτων, έτσι και η τεράστια γκάμα των υλικών αντικειμένων θα μπορούσε να προέρχεται από συνδυασμούς ενός μικρού αριθμού διακριτών, στοιχειωδών δομικών μο-

νάδων. Αυτή η εικασία αποδείχθηκε πολύ εύστοχη. Πάνω από 2.000 χρόνια αργότερα, εξακολουθούμε να πιστεύουμε ότι είναι αληθινή, παρότι η ταυτότητα των περισσότερων θεμελιωδών μονάδων έχει αναθεωρηθεί πολλές φορές. Κατά τον δέκατο ένατο αιώνα, οι επιστήμονες έδειξαν ότι πολλές οικείες στον άνθρωπο ουσίες, όπως το οξυγόνο και ο άνθρακας, είχαν κάποιο ελάχιστο αναγνωρίσιμο συστατικό ακολουθώντας την παράδοση που είχαν καθιερώσει οι Έλληνες, τα ονόμασαν άτομα. Το όνομα έμεινε, αλλά η ιστορία έδειξε ότι επρόκειτο για εσφαλμένη ονομασία, καθώς είναι σίγουρο ότι τα άτομα είναι «τμητά». Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1930, το συλλογικό έργο των J.J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr και James Chadwick είχε καθιερώσει ένα ατομικό μοντέλο πανομοιότυπο με το ηλιακό σύστημα, μοντέλο με το οποίο αισθάνονται εξοικειωμένοι οι περισσότεροι από μας. Το άτομο όχι μόνο δεν είναι το μικρότερο συστατικό της ύλης, αλλά αποτελείται από έναν πυρήνα, που περιέχει πρωτόνια και νετρόνια, και περιβάλλεται από ένα σμήνος ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω του.

Για ένα διάστημα πολλοί φυσικοί πίστευαν ότι τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα ηλεκτρόνια ήταν τα «άτομα» των αρχαίων Ελλήνων. Όμως το 1968, πειραματιστές στο Stanford Linear Accelerator Center, χρησιμοποιώντας τις αυξημένες δυνατότητες της τεχνολογίας για να ερευνήσουν σε βάθος την ύλη, ανακάλυψαν ότι ούτε τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι στοιχειώδη. Αντίθετα, έδειξαν ότι καθένα τους αποτελείται από τρία μικρότερα σωματίδια, τα οποία ονομάζονται κουάρκ – ένα παράξενο όνομα που βρήκε σε ένα απόσπασμα από το Ξύπνημα του Φίνεγκαν του James Joyce ο θεωρητικός φυσικός Murray Gell-Mann, ο οποίος είχε προεικάσει την υπάρξη τους. Οι πειραματιστές επιβεβαίωσαν ότι τα ίδια τα κουάρκ υπάρχουν σε δύο ποικιλίες, που ονομάστηκαν, λιγότερο εμπνευσμένα, άνω και κάτω κουάρκ. Ένα πρωτόνιο αποτελείται από δύο άνω κουάρκ και ένα κάτω κουάρκ· ένα νετρόνιο από δύο κάτω κουάρκ και ένα άνω κουάρκ.

Όλα όσα βλέπετε στον επίγειο κόσμο και στον ουρανό φαίνε-

ται ότι αποτελούνται από συνδυασμούς ηλεκτρονίων, άνω και κάτω κουάρκ. Δεν υπάρχει καμία πειραματική ένδειξη ότι κάποιο από αυτά τα σωματίδια δημιουργείται από κάτι ακόμη μικρότερο. Όμως υπάρχουν πολλές ενδείξεις ότι το σύμπαν διαθέτει και άλλα επιμέρους συστατικά. Στα μέσα της δεκαετίας του 1950, οι Frederick Reines και Clyde Cowan βρήκαν αναμφισβήτητες πειραματικές ενδείξεις για ένα τέταρτο είδος στοιχειώδων σωματίδιων που ονομάζονται νετρίνα – σωματίδια των οποίων η ύπαρξη είχε προβλεφθεί στις αρχές της δεκαετίας του 1930 από τον Wolfgang Pauli. Όπως αποδείχθηκε, τα νετρίνα ανιχνεύονται πολύ δύσκολα, γιατί είναι σωματίδια-φαντάσματα που πολύ σπάνια αλληλεπιδρούν με την υπόλοιπη ύλη: ένα μέσης ενέργειας νετρίνο μπορεί με ευκολία να διαπεράσει μόλυβδο πάχους αρκετών τρισεκατομμυρίων χιλιομέτρων χωρίς την παραμικρή επίδραση στην κίνησή του. Αυτό θα πρέπει να σας ανακουφίζει αισθητά, αφού τη στιγμή που διαβάζετε τούτη τη σελίδα, δισεκατομμύρια νετρίνα που εκτοξεύονται στο διάστημα από τον Ήλιο διαπερνούν το σώμα σας αλλά και τη Γη, συνεχίζοντας το μοναχικό ταξίδι τους στο σύμπαν. Στα τέλη της δεκαετίας του 1930, άλλο ένα σωματίδιο που ονομάζεται μυόνιο –ολόιδιο με το ηλεκτρόνιο, με μόνη διαφορά ότι το μυόνιο είναι περίπου 200 φορές βαρύτερο – ανακαλύφθηκε από φυσικούς που μελετούσαν τις κοσμικές ακτίνες (έναν καταγισμό σωματίδιων από το εξώτερο διάστημα που βομβαρδίζουν τη Γη). Καθώς δεν υπήρχε τίποτε στο κοσμικό γίγνεσθαι, κανένα άλυτο πρόβλημα που να καθιστά αναγκαία την ύπαρξη του μυονίου, ούτε μια θεσούλα κομμένη και ραμμένη στα μέτρα του, ο νομπελίστας φυσικός στα στοιχειώδη σωματίδια Isidor Isaac Rabi χαιρέτισε την ανακάλυψη του μυονίου με την ελάχιστα ενθουσιώδη φράση: «Ποιος το παράγγειλε αυτό;» Ωστόσο το πιάτο είχε ήδη σερβιριστεί. Και επρόκειτο να ακολουθήσουν κι άλλα.

Χρησιμοποιώντας όλο και πιο ισχυρή τεχνολογία, οι φυσικοί συνεχίζουν να βάζουν κομματάκια ύλης να συγκρούονται μεταξύ τους με όλο και μεγαλύτερη ενέργεια, αναδημουργώντας στιγμαία συν-

θήκες παρόμοιες με εκείνες της Μεγάλης Έκρηξης. Στα συντρίμμα ψάχνουν να βρουν νέα θεμελιώδη συστατικά, τα οποία θα προστεθούν στη λίστα των σωματιδίων που όλο και μεγαλώνει. Και νά τι έχουν βρει: τέσσερα επιπλέον κουάρκ – το γοητευτικό, το παράξενο, το χορυφαίο και το εδραίο – και ένα άλλο, βαρύτερο ξαδερφάκι του ηλεκτρονίου, που ονομάζεται σωματίδιο ταυ, καθώς και δύο ακόμη σωματίδια με ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του νετρίνου (τα ονόμασαν μ-νετρίνο ή νετρίνο του μιονίου, και τ-νετρίνο, ώστε να τα ξεχωρίζουν από το αρχικό νετρίνο που τώρα ονομάζεται νετρίνο ηλεκτρονίου). Τα σωματίδια αυτά παράγονται από συγκρούσεις σε υψηλές ενέργειες και η ύπαρξή τους είναι εφήμερη: δεν αποτελούν συστατικά σε ό,τι συνήθως συναντάμε. Άλλα δεν φτάσαμε ακόμη στο τέλος της ιστορίας. Σε καθένα από αυτά τα σωματίδια αντιστοιχεί κι ένα αντισωματίδιο – ένα σωματίδιο με ίση μάζα αλλά αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο (καθώς και αντίθετα φορτία που σχετίζονται με τις άλλες δυνάμεις, όπως θα δούμε παρακάτω). Για παράδειγμα, το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου ονομάζεται ποζιτρόνιο – έχει ίση μάζα με το ηλεκτρόνιο, αλλά το ηλεκτρικό του φορτίο είναι +1, ενώ το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου είναι -1. Όταν έρθουν σε επαφή, η ύλη και η αντιύλη μπορούν να εκμηδενίσουν η μία την άλλη, παράγοντας καθαρή ενέργεια – γι' αυτό στον κόσμο γύρω μας συναντάμε τόσο λίγη αντιύλη σε φυσική κατάσταση.

Οι φυσικοί έχουν αναγνωρίσει ότι αυτά τα σωματίδια ακολουθούν κάποιο μοντέλο, το οποίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.1. Τα σωματίδια της ύλης κατανέμονται σε τρεις ομάδες που συχνά αποκαλούνται οικογένειες. Η κάθε οικογένεια περιέχει δύο από τα κουάρκ, ένα ηλεκτρόνιο ή ένα από τα ξαδέρφια του, και ένα από τα νετρίνα. Οι τύποι σωματιδίων που αντιστοιχούν στις τρεις οικογένειες έχουν πανομοιότυπες ιδιότητες, με εξαίρεση τη μάζα τους η οποία μεγαλώνει σε κάθε επόμενη οικογένεια. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι οι φυσικοί έχουν πλέον ερευνήσει τη δομή της ύλης σε κλίμακες περίπου του ενός δισεκατομμυριοστού του δισεκατομμυριοστού του μέτρου και έχουν δείξει ότι όλα όσα έχου-

με συναντήσει μέχρι σήμερα –είτε απαντούν στη φύση είτε παράγονται τεχνητά σε γιγαντιαίους επιταχυντές– αποτελούνται από κάποιο συνδυασμό σωματιδίων μιας από αυτές τις τρεις οικογένειες ή της αντίστοιχης των αντισωματιδίων.

Οικογένεια 1 Σωματίδιο <i>Mάζα</i>	Οικογένεια 2 Σωματίδιο <i>Mάζα</i>	Οικογένεια 3 Σωματίδιο <i>Mάζα</i>
Ηλεκτρόνιο 0,00054	Μυόνιο 0,11	Ταυ 1,9
Νετρίνο ηλεκτρονίου $< 10^{-8}$	Νετρίνο μιονίου $< 0,0003$	Τ-νετρίνο $< 0,033$
Άνω κουάρκ 0,0047	Γοητευτικό κουάρκ 1,6	Κορυφαίο κουάρκ 189
Κάτω κουάρκ 0,0074	Παράξενο κουάρκ 0,16	Εδραίο κουάρκ 5,2

Πίνακας 1.1 Οι τρεις οικογένειες θεμελιώδων σωματιδίων και οι μάζες τους (σε πολλαπλάσια της μάζας του πρωτονίου). Οι τιμές για τις μάζες των νετρίνων μέχρι στιγμής δεν έχουν προσδιοριστεί πειραματικά.

Μια ματιά στον Πίνακα 1.1 αναμφίβολα θα σας αφήσει με ακόμη εντονότερη αίσθηση αμηχανίας σε σχέση με αυτή που ένιωσε ο Rabi μετά την ανακάλυψη του μιονίου. Αν και η ταξινόμηση σε οικογένειες προσδίδει τουλάχιστον κάποια επίφαση τάξης, αναρίθμητα «γιατί» ξεπηδούν στο προσκήνιο. Γιατί υπάρχουν τόσο πολλά στοιχειώδη σωματίδια, αφού, όπως φαίνεται, η μεγάλη πλειονότητα των πραγμάτων στον κόσμο γύρω μας χρειάζεται μόνο ηλεκτρόνια, άνω και κάτω κουάρκ; Γιατί υπάρχουν τρεις οικογένειες; Γιατί να μην υπάρχει μία οικογένεια, τέσσερις ή κάποιος άλλος αριθμός; Γιατί τα σωματίδια έχουν φαινομενικά τυχαία κα-

τανομή μαζών – γιατί, για παράδειγμα, το ταυ ζυγίζει περίπου 3.520 φορές περισσότερο από το ηλεκτρόνιο; Γιατί το κορυφαίο κουάρκ ζυγίζει περίπου 40.200 φορές όσο το άνω κουάρκ; Είναι τόσο παράξενα αυτά τα φαινομενικά τυχαία νούμερα! Προέκυψαν τυχαία, οφείλονται ίσως σε θεϊκή προαιρεση ή μήπως υπάρχει κάποια εύλογη επιστημονική εξήγηση γι' αυτά τα θεμελιώδη γνωρίσματα του σύμπαντος;

Οι δυνάμεις ή πού είναι το φωτόνιο;

Τα πράγματα περιπλέκονται ακόμη περισσότερο όταν εξετάσουμε τις δυνάμεις της φύσης. Στον κόσμο γύρω μας αφθονούν τα παραδείγματα δράσης-αντίδρασης: μπορούμε να χτυπάμε μπαλάκια με ρακέτες, οι ενθουσιώδεις οπαδοί του μπάντζιτζάμπινγκ μπορούν να ρίχνονται στο κενό δεμένοι από ψηλές γέφυρες, οι μαγνήτες μπορούν να κρατούν τις υπερταχείες αμαξοστοιχίες σε ελάχιστη απόσταση πάνω από τις μεταλλικές τους ράγες, οι μετρητές Geiger μπορούν να ηχούν, όταν βρίσκεται κοντά τους κάποιο ραδιενέργο υλικό, οι ατομικές βόμβες μπορούν να εκρήγνυνται. Μπορούμε να αλλάξουμε την κατάσταση των αντικειμένων σπρώχνοντας, τραβώντας ή ταραχουνώντας τα· εξαχοντίζοντας ή πετώντας άλλα αντικείμενα πάνω τους· τεντώνοντας, στρεβλώνοντας ή συνθλίβοντάς τα· ψύχοντας, θερμαίνοντας ή καίγοντάς τα. Τα τελευταία εκατό χρόνια οι φυσικοί έχουν συγκεντρώσει βάσιμες αποδείξεις ότι όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα διάφορα αντικείμενα και υλικά, καθώς και όλες όσες κατά εκατομμύρια συναντάμε καθημερινά, μπορούν να αναγθούν σε συνδυασμούς από τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις. Μία από αυτές είναι η βαρυτική δύναμη. Οι άλλες τρεις δυνάμεις είναι η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η ισχυρή δύναμη.

Η βαρύτητα είναι η πλέον οικεία από τις δυνάμεις, αυτή που κρατά εμάς σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο και τα πόδια μας σταθε-

ρά πάνω στη Γη. Η μάζα ενός αντικειμένου αποτελεί το μέτρο της βαρυτικής δύναμης που μπορεί να ασκήσει αλλά και να δεχτεί. Μετά τη βαρύτητα η πιο οικεία από τις τέσσερις δυνάμεις είναι η ηλεκτρομαγνητική. Σε αυτήν οφείλονται όλες οι ανέσεις της σύγχρονης ζωής –φώτα, υπολογιστές, τηλεοράσεις, τηλέφωνα–, αυτή βρίσκεται επίσης πίσω από την τρομερή ισχύ ενός κεραυνού αλλά και το απαλό άγγιγμα ενός ανθρώπινου χεριού. Στο μικρόκοσμο, το ηλεκτρικό φορτίο ενός σωματιδίου παίζει για την ηλεκτρομαγνητική δύναμη τον ίδιο ρόλο που παίζει η μάζα για τη βαρύτητα: καθορίζει πόση ηλεκτρομαγνητική δύναμη μπορεί να ασκήσει αλλά και να δεχτεί το σωματίδιο.

Η ισχυρή και η ασθενής δύναμη μας είναι λιγότερο οικείες, επειδή η ισχύς τους εξασθενεί γρήγορα σε αποστάσεις μεγαλύτερες από εκείνες της υποατομικής κλίμακας: είναι οι πυρηνικές δυνάμεις. Νά γιατί αυτές οι δύο δυνάμεις ανακαλύφθηκαν σχετικά πρόσφατα. Η ισχυρή δύναμη κρατά τα κουάρκ «κολλημένα» μεταξύ τους μέσα στα πρωτόνια και τα νετρόνια καθώς και τα πρωτόνια και τα νετρόνια σφιχτοδεμένα μεταξύ τους μέσα στους πυρήνες των ατόμων. Η ασθενής δύναμη είναι κυρίως γνωστή επειδή ευθύνεται για τη ραδιενέργο διάσπαση ουσιών όπως το ουράνιο και το κοβάλτιο.

Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, οι φυσικοί ανακάλυψαν δύο χαρακτηριστικά κοινά σε όλες αυτές τις δυνάμεις. Πρώτα πρώτα, όπως θα συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 5, σε κάθε δύναμη του μικρόκοσμου αντιστοιχεί ένα σωματίδιο, το οποίο αντιπροσωπεύει την ελάχιστη δυνατή ποσότητα ή «πακέτο» της δύναμης. Αν εκτοξεύσετε μία ακτίνα λέιζερ –με ένα «όπλο ηλεκτρομαγνητικών ακτίνων»– εκτοξεύετε μια δέσμη από φωτόνια. Έτσι ονομάζονται τα μικρότερα πακέτα ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Παρομοίως, τα ελάχιστα συστατικά του ασθενούς και του ισχυρού πεδίου δυνάμεων είναι τα σωματίδια που αποκαλούμε μποζόνια ασθενούς βαθμίδας και γλοιόνια. (Το όνομα γλοιόνιο είναι ιδιαίτερα περιγραφικό: μπορείτε να φανταστείτε τα γλοιόνια ως μικροσκοπικά συστατικά της ισχυρής κόλλας που κρατά ενωμέ-

νους τους ατομικούς πυρήνες.) Έως το 1984 οι πειραματιστές είχαν αποδείξει οριστικά ότι υπάρχουν αυτά τα τρία είδη σωματιδίων που δρουν ως φορείς δυνάμεων και ανέλυσαν τις ιδιότητές τους, όπως καταγράφονται στον Πίνακα 1.2. Οι φυσικοί πιστεύουν ότι και η βαρυτική δύναμη διαθέτει ένα αντίστοιχο σωματίδιο –το βαρυτόνιο–, αλλά η ύπαρξή του δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμη πειραματικά.

Δύναμη	Σωματίδιο-φορέας	Μάζα
Ισχυρή	Γλοιόνιο	0
Ηλεκτρομαγνητική	Φωτόνιο	0
Ασθενής	Μποζόνια ασθενούς βαθμίδας	86 ή 97
Βαρυτική	Βαρυτόνιο	0

Πίνακας 1.2 Οι τέσσερις δυνάμεις της φύσης, μαζί με τα σχετιζόμενα σωματίδια και τις μάζες τους, εκφρασμένες σε πολλαπλάσια της μάζας του πρωτονίου. (Τα σωματίδια της ασθενούς δύναμης εμφανίζονται σε διάφορες ποικιλίες, με τις δύο πιθανές μάζες που δίνονται. Θεωρητικές μελέτες δείχνουν ότι το βαρυτόνιο μάλλον δεν έχει μάζα.)

Το δεύτερο κοινό χαρακτηριστικό των δυνάμεων είναι ότι, όπως ακριβώς η μάζα καθορίζει τον τρόπο που η βαρύτητα επηρεάζει ένα σωματίδιο και το ηλεκτρικό φορτίο καθορίζει τον τρόπο που το επηρεάζει η ηλεκτρομαγνητική δύναμη, τα σωματίδια είναι εφοδιασμένα με ορισμένες ποσότητες «ισχυρού φορτίου» και «ασθενούς φορτίου», τα οποία καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται τα σωματίδια από την ισχυρή και την ασθενή δύναμη. (Οι ιδιότητες αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά σε πίνακα στις σημειώσεις αυτού του κεφαλαίου).¹ Αλλά, όπως ακριβώς συμβαίνει με τις μάζες των σωματιδίων, παρ' όλο που οι πει-

ραματικοί φυσικοί έχουν μετρήσει προσεκτικά αυτές τις ιδιότητες, χανείς δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί το σύμπαν μας αποτελείται από αυτά τα συγκεκριμένα σωματίδια, με αυτές τις συγκεκριμένες τιμές μάζας και φορτίου.

Παρά τα κοινά τους χαρακτηριστικά, η διερεύνηση των ίδιων των θεμελιωδών δυνάμεων μπερδεύει ακόμα περισσότερο τα πράγματα. Γιατί, για παράδειγμα, υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις; Γιατί όχι πέντε ή τρεις ή ίσως μόνο μία; Γιατί οι δυνάμεις έχουν τόσο διαφορετικές ιδιότητες; Γιατί η λειτουργία της ισχυρής και της ασθενούς δύναμης περιορίζεται μόνο σε μικροσκοπικές κλίμακες, ενώ η βαρύτητα και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη έχουν απεριόριστη ακτίνα δράσης; Και γιατί είναι τόσο τεράστιες οι διαφορές στα μέτρα αυτών των δυνάμεων;

Για να κατανοήσετε το τελευταίο ερώτημα, φανταστείτε ότι κρατάτε ένα ηλεκτρόνιο στο δεξί σας χέρι κι ένα άλλο στο αριστερό, και πως φέρνετε αυτά τα ομοίως φορτισμένα σωματίδια το ένα κοντά στο άλλο. Η βαρυτική έλξη θα τα ωθεί να έρθουν πιο κοντά, ενώ η ηλεκτρομαγνητική άπωση θα προσπαθεί να τα κρατήσει μακριά. Ποια είναι η ισχυρότερη; Δεν υπάρχει συναγωνισμός: η ηλεκτρομαγνητική άπωση είναι περίπου ένα εκατομμύριο δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια (10^{42}) φορές ισχυρότερη! Αν ο δεξιός σας δικέφαλος μας αντιστοιχούσε στην ισχύ της βαρυτικής δύναμης, τότε ο αριστερός σας δικέφαλος θα έπρεπε να εκτείνεται πέρα από τα όρια του γνωστού σύμπαντος για να αντιστοιχεί στην ισχύ της ηλεκτρομαγνητικής. Ο μόνος λόγος που η ηλεκτρομαγνητική δύναμη δεν υπερισχύει συντριπτικά έναντι της βαρύτητας στον κόσμο γύρω μας είναι ότι τα περισσότερα πράγματα αποτελούνται από ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου, των οποίων οι δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται. Από την άλλη μεριά, εφόσον η βαρύτητα είναι πάντοτε ελκτική, δεν υπάρχουν αντίστοιχες εξουδετερώσεις – περισσότερη ύλη σημαίνει μεγαλύτερη βαρυτική δύναμη. Όμως όσον αφορά τα στοιχειώδη σωματίδια, η βαρύτητα αποδεικνύεται εξαιρετικά ασθενής δύναμη. (Στο γεγονός αυτό οφείλεται η δυσκολία να επιβεβαιωθεί πειραματικά η ύπαρξη του βα-

ρυτονίου. Η αναζήτηση της ελάχιστης ποσότητας της ασθενέστερης δύναμης αποτελεί μεγάλη πρόκληση.) Πειράματα έχουν δεῖξει επίσης ότι η ισχυρή δύναμη είναι περίπου εκατό φορές ισχυρότερη από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη και περίπου εκατό χιλιάδες φορές ισχυρότερη από την ασθενή δύναμη. Όμως ποια είναι η αιτία –ο αποχρών λόγος– που το σύμπαν μας έχει αυτά τα χαρακτηριστικά;

Το συγκεκριμένο ερώτημα δεν γεννιέται από μια νωχελική διάθεση να φιλοσοφήσουμε σχετικά με το γιατί ορισμένες λεπτομέρειες τυχαίνει να είναι έτσι και όχι αλλιώς· το σύμπαν μας θα ήταν εντελώς διαφορετικό αν οι ιδιότητες της ύλης και οι δυνάμεις στα στοιχειώδη σωματίδια μεταβάλλονταν έστω και λίγο. Για παράδειγμα, η ύπαρξη των σταθερών πυρήνων, που σχηματίζουν τα εκατό και πλέον στοιχεία του περιοδικού πίνακα, εξαρτάται απόλυτα από την αναλογία ανάμεσα στην ισχύ της ισχυρής και της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Τα πρωτόνια που συνωστίζονται στους ατομικούς πυρήνες αλληλοαπωθούνται ηλεκτρομαγνητικά· η ισχυρή δύναμη που δρα ανάμεσα στα κουάρκ που τα αποτελούν υπερνικά ευτυχώς αυτή την άπωση και δένει τα πρωτόνια σφιχτά μεταξύ τους. Άλλα ακόμη και μια μικρή διαφοροποίηση στη σχετική ένταση των δύο αυτών δυνάμεων θα κατέστρεφε εύκολα τη μεταξύ τους ισορροπία και θα οδηγούσε τους περισσότερους ατομικούς πυρήνες σε διάσπαση. Επιπλέον, αν η μάζα του ηλεκτρονίου ήταν λίγες φορές μεγαλύτερη απ' όσο είναι, τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια θα έτειναν να ενωθούν για να σχηματίσουν νετρόνια, και έτσι θα «κατάπιναν» πυρήνες υδρογόνου (του απλούστερου στοιχείου στον κόσμο, του οποίου ο πυρήνας αποτελείται μόνο από ένα πρωτόνιο), παρεμποδίζοντας έτσι το σχηματισμό πιο πολύπλοκων στοιχείων. Οι αστέρες βασίζονται στη σύντηξη σταθερών πυρήνων και δεν θα μπορούσαν να σχηματιστούν αν συνέβαιναν τέτοιες μεταβολές στη θεμελιώδη φυσική. Καθοριστικό ρόλο παίζει επίσης και η ισχύς της βαρυτικής δύναμης. Η συντριπτική πυκνότητα της ύλης στον κεντρικό πυρήνα ενός αστέρα τροφοδοτεί τον πυρηνικό του καυστήρα και ευθύνεται για τη λάμψη του. Αν αυξανόταν η βαρυτική δύναμη, η πυκνότητα της αστρι-

κής μάζας θα μεγάλωνε γρηγορότερα, προκαλώντας σημαντική αύξηση στο ρυθμό των πυρηνικών αντιδράσεων. Αλλά, όπως ακριβώς μια εκτυφλωτική φωτοβολίδα καιγεται πολύ πιο γρήγορα από ένα κερί που σιγοκαίει, μια αύξηση στο ρυθμό των πυρηνικών αντιδράσεων θα έκανε τα άστρα, όπως ο Ήλιος μας, να αναλωθούν πολύ πιο γρήγορα, κάτι που θα είχε ολέθρια αποτελέσματα στο σχηματισμό της ζωής όπως την ξέρουμε. Από την άλλη μεριά, αν μειωνόταν σημαντικά η ισχύς της βαρυτικής δύναμης, η ύλη δεν θα μπορούσε καν να συνενωθεί, παρεμποδίζοντας έτσι το σχηματισμό άστρων και γαλαξιών.

Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε να αναφέρουμε κι άλλα παραδείγματα, όμως η ιδέα είναι ξεκάθαρη: το σύμπαν είναι έτσι όπως είναι, επειδή η ύλη και οι δυνάμεις έχουν τις ιδιότητες που έχουν. Μπορεί όμως η επιστήμη να εξηγήσει γιατί έχουν αυτές τις ιδιότητες;

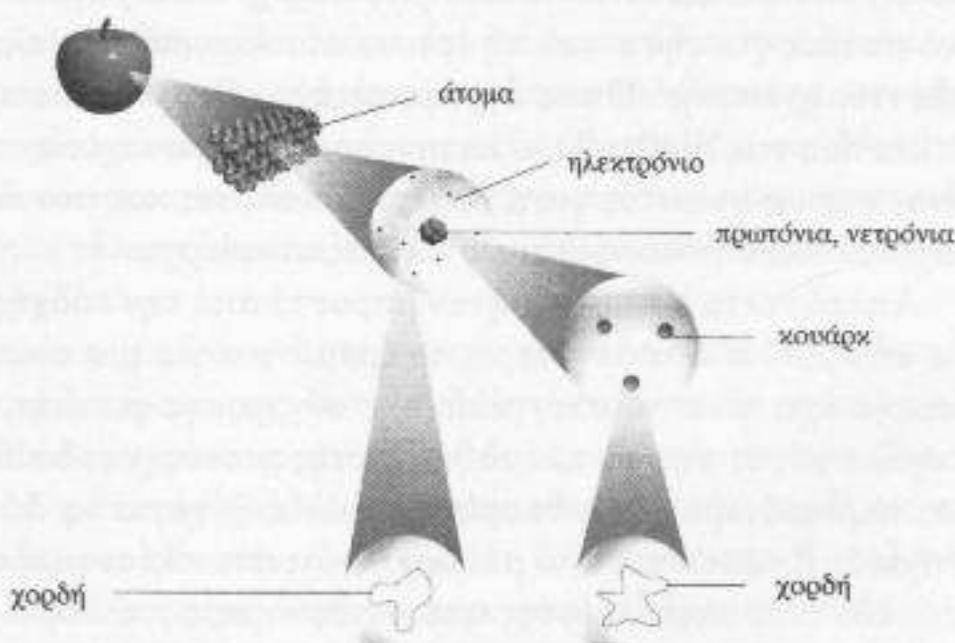
Θεωρία χορδών: η βασική ιδέα

Η θεωρία χορδών παρέχει ένα ισχυρό εννοιολογικό πρότυπο στο πλαίσιο του οποίου μπορούν για πρώτη φορά να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα. Ας ξεκινήσουμε με τη βασική ιδέα.

Τα σωματίδια στον Πίνακα 1.1 είναι το «αλφάβητο» όλης της ύλης. Όπως ακριβώς το γλωσσικό αντίστοιχο, δεν φαίνεται να έχουν κάποια περαιτέρω εσωτερική δομή. Η θεωρία χορδών ισχυρίζεται το αντίθετο. Σύμφωνα με αυτή, αν μπορούσαμε να εξετάσουμε αυτά τα σωματίδια με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια –μια ακρίβεια πολλές τάξεις μεγέθους πέρα από τις τωρινές μας τεχνολογικές δυνατότητες– θα βρίσκαμε ότι καθένα από αυτά δεν είναι σημειακό, αλλά αντίθετα αποτελείται από ένα μικροσκοπικό μονοδιάστατο βρόχο. Κάθε σωματίδιο περιέχει μια ίνα σαν απείρως λεπτό λαστιχάκι, που πάλλεται, ταλαντώνεται και χορεύει, και την οποία οι φυσικοί, χωρίς να διαθέτουν το λογοτεχνικό ταλέντο του Gell-Mann, ονόμασαν χορδή. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζουμε τη βασική ιδέα της

θεωρίας χορδών, ξεκινώντας με ένα συνηθισμένο κομμάτι ύλης, ένα μήλο, και μεγεθύνοντας διαδοχικά τη δομή του, ώστε να αποκαλύψουμε τα συστατικά του σε ολοένα μικρότερες κλίμακες. Στην έως τώρα γνωστή ακολουθία, από τα άτομα στα πρωτόνια, τα νετρόνια, τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκ, η θεωρία χορδών προσθέτει το νέο μικροσκοπικό υπόστρωμα των παλλόμενων χορδών.²

Μολονότι δεν είναι διόλου προφανές, θα δούμε στο Κεφάλαιο 6 ότι με αυτή την απλή αντικατάσταση των σημειακών υλικών συστατικών με χορδές, επιλύεται το πρόβλημα της ασυμβατότητας της χβαντομηχανικής με τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Έτσι η θεωρία χορδών λύνει τον γόρδιο δεσμό της σύγχρονης θεωρητικής φυσικής. Παρ' όλο που από μόνο του αυτό αποτελεί τεράστιο κατόρθωμα, δεν είναι παρά μόνο ένας από τους λόγους που η θεωρία χορδών έχει προκαλέσει τέτοιον ενθουσιασμό.



Σχήμα Τ.1 Η ύλη απαρτίζεται από άτομα, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από κουάρκ και ηλεκτρόνια. Σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, όλα αυτά τα σωματίδια είναι στην πραγματικότητα μικροί βρόχοι μιας παλλόμενης χορδής.

Η θεωρία χορδών ως ενοποιημένη θεωρία των πάντων

Την εποχή του Einstein δεν είχαν ανακαλυφθεί ακόμη η ισχυρή και η ασθενής δύναμη, αλλά ο ίδιος έβρισκε την ύπαρξη και δύο μόνο διαφορετικών δυνάμεων –της βαρύτητας και του ηλεκτρομαγνητισμού– βαθύτατα προβληματική. Ο Einstein δεν δεχόταν ότι η φύση θεμελιώνεται πάνω σε ένα τόσο εικεντρικό σχέδιο. Έτσι ξεχίνησε η τριαντάχρονη έρευνά του σε αναζήτηση της λεγόμενης ενοποιημένης θεωρίας πεδίου η οποία, όπως ήλπιζε, θα έδειχνε ότι οι δύο αυτές δυνάμεις προκύπτουν στην πραγματικότητα από μια μεγάλη θεμελιακή αρχή. Αυτή η δονκιχοτική αναζήτηση απομόνωσε τον Einstein από το κύριο ρεύμα της φυσικής, όπου, όπως είναι κατανοητό, υπήρχε πολύ μεγαλύτερος ενθουσιασμός για την εντατική έρευνα στο νεοαναδυόμενο πλαίσιο της κβαντομηχανικής. Όπως έγραψε σε ένα φίλο του στις αρχές της δεκαετίας του 1940: «Έχω καταντήσει ένας μοναχικός τύπος που είναι κυρίως γνωστός γιατί δεν φορά κάλτσες και που σε ειδικές περιστάσεις επιδεικνύεται ως κάτι αξιοπερίεργο».³

Απλούστατα ο Einstein ήταν μπροστά από την εποχή του. Πάνω από μισό αιώνα αργότερα, το όραμά του για μια ενοποιημένη θεωρία έχει γίνει το ευαγγέλιο της σύγχρονης φυσικής. Και ένα μεγάλο μέρος της φυσικομαθηματικής κοινότητας πείθεται όλο και περισσότερο ότι η θεωρία χορδών ενδέχεται να δώσει απαντήσεις. Εκκινώντας από μία αρχή –ότι στο πλέον μικροσκοπικό επίπεδο όλα αποτελούνται από συνδυασμούς παλλόμενων κλωστών– η θεωρία χορδών παρέχει ένα και μοναδικό ερμηνευτικό σπλαίσιο, ικανό να ενσωματώσει όλες τις δυνάμεις και κάθε μορφή ύλης.

Η θεωρία χορδών διακηρύσσει, για παράδειγμα, ότι οι παρατηρούμενες ιδιότητες των σωματιδίων, τα δεδομένα που συνοψίζονται στους Πίνακες 1.1 και 1.2, αντανακλούν τους διάφορους τρόπους με τους οποίους μπορεί να πάλλεται μια χορδή. Όπως

ακριβώς οι χορδές ενός βιολιού ή ενός πιάνου έχουν συγκεκριμένες ηχητικές συχνότητες με τις οποίες προτιμούν να πάλλονται –έτοις ώστε τα αυτιά μας να αντιλαμβάνονται τις διάφορες μουσικές νότες και τις υψηλότερες αρμονικές τους–, το ίδιο ισχύει και για τους βρόχους της θεωρίας χορδών. Αλλά, όπως θα δούμε, αντί να παράγει μουσικές νότες, καθένας από τους τρόπους με τους οποίους προτιμά να πάλλεται κάθε χορδή στη θεωρία χορδών εμφανίζεται με τη μορφή σωματιδίου, του οποίου η μάζα και τα φορτία καθορίζονται από τον τρόπο ταλάντωσης της χορδής. Το ηλεκτρόνιο είναι μια χορδή που πάλλεται έτοις, το άνω κονάρκ είναι μια χορδή που πάλλεται αλλιώς κ.ο.κ. Αντί να συνιστούν ένα σύνολο χαοτικών πειραματικών δεδομένων, οι σωματιδιακές ιδιότητες στη θεωρία χορδών είναι η εκδήλωση μας και μόνης φυσικής ιδιότητας: του τρόπου ταλάντωσης –της μουσικής, σαν να λέμε – των θεμελιωδών χορδών. Η ίδια ιδέα εφαρμόζεται και στις δυνάμεις της φύσης. Θα δούμε ότι τα σωματίδια των δυνάμεων σχετίζονται επίσης με ορισμένους τρόπους ταλάντωσης των χορδών, και κατά συνέπεια τα πάντα, κάθε μορφή ύλης και δύναμης, ενοποιούνται εντασσόμενα στην κατηγορία των μικροσκοπικών χορδών που ταλαντώνονται – είναι οι «νότες» που μπορούν να πάιξουν οι χορδές.

Για πρώτη φορά στην ιστορία της φυσικής διαθέτουμε λοιπόν κάποια υποδομή που μας δίνει τη δυνατότητα να εξηγήσουμε κάθε θεμελιώδες χαρακτηριστικό της δομής του σύμπαντος. Για το λόγο αυτό η θεωρία χορδών περιγράφεται μερικές φορές ως μια πιθανή «θεωρία των πάντων» (ΘΤΠ) ή ως «απόλυτη» ή «τελική» θεωρία. Αυτοί οι μεγαλόπρεποι περιγραφικοί όροι φιλοδοξούν να περιγράψουν τη βαθύτερη δυνατή θεωρία της φυσικής – μια θεωρία που αποτελεί το υπόβαθρο όλων των άλλων, μια θεωρία που δεν απαιτεί, ούτε καν επιτρέπει, βαθύτερη επεξηγηματική βάση. Στην πράξη, πολλοί οπαδοί της θεωρίας χορδών υιοθετούν μια πιο προσγειωμένη προσέγγιση και αντιλαμβάνονται τη ΘΤΠ με μια πιο περιορισμένη έννοια, σαν μια θεωρία που μπορεί να εξηγήσει τις ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων και των δυνάμεων μέ-

σω των οποίων αλληλεπιδρούν και αλληλοεπηρεάζονται. Ένας φανατικός υπέρμαχος του αναγωγισμού θα υποστήριζε ότι αυτό δεν αποτελεί διόλου περιορισμό, και ότι κατά κανόνα όλα ανεξαιρέτως, από τη Μεγάλη Έκρηξη έως τα ονειροπολήματα, μπορούν να περιγραφούν με βάση κάποιες θεμελιακές μικροσκοπικές φυσικές διεργασίες, στις οποίες εμπλέκονται τα στοιχειώδη συστατικά της ύλης. Αν κατανοείς τα πάντα γύρω από αυτά τα συστατικά, υποστηρίζει ο αναγωγιστής, κατανοείς τα πάντα.

Η φιλοσοφία των αναγωγιστών εύκολα πυροδοτεί έντονες συζητήσεις. Πολλοί βρίσκουν βλακώδη και άκρως αποκρουστικό τον ισχυρισμό ότι τα θαύματα της ζωής και του σύμπαντος δεν είναι πάρα εκφάνσεις ενός άσκοπου χορού μικροσκοπικών σωματιδίων, χορογραφημένου αποκλειστικά από τους νόμους της φυσικής. Άραγε είναι αλήθεια ότι τα συναισθήματα της χαράς, της λύπης ή της βαριεστημάρας δεν είναι τίποτε άλλο από χημικές αντιδράσεις στον εγκέφαλο – αντιδράσεις ανάμεσα σε μόρια και άτομα που, σε ακόμη πιο μικροσκοπικό επίπεδο, είναι αντιδράσεις ανάμεσα σε κάποια από τα σωματίδια του Πίνακα 1.1, τα οποία στην πραγματικότητα είναι απλώς και μόνο παλλόμενες χορδές; Απαντώντας σε αυτό τον τύπο της χριτικής, ο βραβευμένος με Νόμπελ Steven Weinberg, στο βιβλίο του *'Όνειρα για μια τελική θεωρία συνιστά ψυχραιμία:*

Στο άλλο άκρο του φάσματος βρίσκονται οι αντίπαλοι του αναγωγισμού οι οποίοι νιώθουν συγχλονισμένοι απέναντι σε αυτό που θεωρούν ως ψυχρότητα της σύγχρονης επιστήμης. Η γνώση ότι σε κάποιο βαθμό οι ίδιοι και ο κόσμος τους μπορούν να αναχθούν σε ένα ζήτημα σωματιδίων, πεδίων και αλληλεπιδράσεων τους κάνει να αισθάνονται μειωμένοι. [...] Δεν θα προσπαθήσω να απαντήσω σε αυτή την χριτική με μια ζωντανή και ευχάριστη συζήτηση για τις χάρες της σύγχρονης επιστήμης. Η αναγωγιστική άποψη για τον κόσμο είναι ψυχρή και απρόσωπη. Πρέπει να την αποδεχθούμε έτσι όπως είναι, όχι επειδή μας αρέσει, αλλά επειδή αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο κόσμος.⁴

Ορισμένοι συμφωνούν με αυτή την άκαμπτη θέση, άλλοι όχι.

Κάποιοι τρίτοι προσπαθούν να υποστηρίξουν ότι εξελίξεις όπως η θεωρία του χάους δείχνουν πως νέοι κανόνες άρχιζαν να ισχύουν όταν αυξάνεται η πολυπλοκότητα ενός συστήματος. Άλλο να καταλαβαίνουμε τη συμπεριφορά ενός ηλεκτρονίου ή ενός κουάρκ και άλλο να χρησιμοποιούμε αυτή τη γνώση για να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά ενός τυφώνα. Στο σημείο αυτό οι περισσότεροι συμφωνούν. Όμως οι γνώμες διίστανται σχετικά με το αν τα ποικίλα και συχνά απρόσμενα φαινόμενα, που είναι δυνατόν να προκύψουν σε πιο πολύπλοκα συστήματα από τα απλά σωματίδια, καταδεικνύουν πράγματι τη λειτουργία νέων φυσικών νόμων ή αν οι νόμοι αυτοί είναι δευτερογενείς και βασίζονται, αν και με φοβερά περίπλοκο τρόπο, στις φυσικές αρχές που κυβερνούν το απέραντο πλήθος των στοιχειωδών συστατικών. Η διαίσθησή μου λέει ότι δεν αποτελούν νέους και ανεξάρτητους νόμους της φυσικής. Μολονότι θα ήταν δύσκολο να εξηγηθούν οι ιδιότητες ενός τυφώνα με βάση τη φυσική των ηλεκτρονίων και των κουάρκ, θεωρώ ότι αυτό είναι ζήτημα υπολογιστικής αδυναμίας και όχι ένδειξη ότι υπάρχει ανάγκη για νέους φυσικούς νόμους. Άλλα και πάλι, υπάρχουν ορισμένοι που διαφωνούν με αυτή την άποψη.

Αυτό που ισχύει πέρα από κάθε αμφισβήτηση, και έχει πρωταρχική σημασία για τη διαδρομή που θα ακολουθήσουμε στο παρόν βιβλίο, είναι ότι ακόμη κι αν αποδεχθεί κανείς τη συζητήσιμη συλλογιστική των υπέρμαχων του αναγωγισμού, άλλο πράγμα οι επιστημονικές αρχές και άλλο η πράξη. Σχεδόν όλοι συμφωνούν ότι η ανακάλυψη της ΘΤΠ δεν θα σήμαινε σε καμία περίπτωση ότι τα προβλήματα της ψυχολογίας, της βιολογίας, της γεωλογίας, της χημείας ή ακόμη και της φυσικής θα λύνονταν ή κατά κάποιον τρόπο θα υπάγονταν σε αυτή. Το σύμπαν είναι ένας τόπος τόσο θαυμαστά πλούσιος και σύνθετος, ώστε η ανακάλυψη της τελικής θεωρίας, όπως την περιγράφουμε εδώ, δεν θα σήμαινε το τέλος της επιστήμης. Το αντίθετο μάλιστα: η ανακάλυψη της ΘΤΠ –της οριστικής και αδιαμφισβήτητης εξήγησης του σύμπαντος στο πλέον μικροσκοπικό του επίπεδο, μιας

θεωρίας που δεν βασίζεται σε κάποια βαθύτερη εξήγηση – θα αποτελούσε τη σταθερότερη βάση στην οποία θα μπορούσαμε να στηριχτούμε για να κατανοήσουμε τον χόσμο. Η ανακάλυψή της θα σηματοδοτούσε μια αρχή και όχι ένα τέλος. Η απώτατη θεωρία θα παρείχε έναν ακλόνητο στυλοβάτη, ένα συνεχτικό πλαίσιο, διαβεβαιώνοντάς μας, μια για πάντα, ότι το σύμπαν είναι κατανοήσιμος τόπος.

Η κατάσταση της θεωρίας χορδών

Κύριο μέλημα του παρόντος βιβλίου είναι να εξηγήσει τις λειτουργίες του σύμπαντος σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, δίνοντας έμφαση κυρίως στις επιπτώσεις που έχουν οι συνέπειές της στην κατανόηση του χώρου και του χρόνου. Σε αντίθεση με την παρουσίαση πολλών άλλων επιστημονικών ανακαλύψεων, η παρούσα αναφέρεται σε μια θεωρία που δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη εντελώς, δεν έχει επιβεβαιωθεί από αυστηρούς πειραματικούς ελέγχους ούτε έχει γίνει πλήρως αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα. Ο λόγος γι' αυτό, όπως θα συζητήσουμε σε μετέπειτα κεφάλαια, είναι ότι η θεωρία χορδών είναι μια τόσο βαθιά και εκλεπτυσμένη θεωρητική κατασκευή, ώστε παρά τη θεαματική πρόοδο που συντελέστηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες, να έχουμε ακόμη πολύ δρόμο μπροστά μας για να μπορέσουμε να ισχυριστούμε ότι την κατέχουμε πλήρως.

Κι έτσι η θεωρία χορδών θα πρέπει να ιδωθεί ως ένα έργο σε εξέλιξη που μόνο εν μέρει έχει ολοκληρωθεί αποκαλύπτοντας συγκλονιστικές εικόνες για τη φύση του χώρου, του χρόνου και της ύλης. Η αρμονική συνένωση της χβαντομηχανικής με τη γενική θεωρία της σχετικότητας είναι σημαντική επιτυχία. Επιπλέον, σε αντίθεση με οποιαδήποτε προηγούμενη θεωρία, η θεωρία χορδών έχει την ικανότητα να απαντήσει σε πρωταρχικά ερωτήματα αναφορικά με τα πλέον θεμελιώδη συστατικά και δυνάμεις. Αντί-

στοιχης σημασίας, αν και κάπως πιο δύσκολο να εκφραστεί, είναι η αξιοσημείωτη κομψότητα τόσο των απαντήσεων που προτείνει η θεωρία χορδών όσο και του πλαισίου μέσα στο οποίο αυτές αναπτύσσονται. Για παράδειγμα, στη θεωρία χορδών πολλές όψεις της φύσης που θα φαίνονταν τυχαίες τεχνικές λεπτομέρειες –όπως ο αριθμός των διαφορετικών θεμελιωδών σωματιδίων και οι αντίστοιχες ιδιότητές τους– αποδειχνύεται ότι προκύπτουν από βασικές και πραγματικές εκφάνσεις της γεωμετρίας του σύμπαντος. Αν είναι σωστή η θεωρία χορδών, τότε ο μικροσκοπικός ιστός του σύμπαντος μας είναι ένας πάρα πολύ μπλεγμένος και πολυδιάστατος λαβύρινθος, μέσα στον οποίο οι χορδές του σύμπαντος συστρέφονται και πάλλονται ασταμάτητα, υποτάσσονται στο ρυθμό τους τούς νόμους του σύμπαντος. Αντί να αποτελούν τυχαίες λεπτομέρειες, οι ιδιότητες των θεμελιωδών δομικών λίθων της φύσης αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του χωροχρονικού ιστού.

Ωστόσο, σε τελική ανάλυση, τίποτε δεν μπορεί να υποκαταστήσει τις τελεσίδικες, ελέγχιμες προβλέψεις που θα καθορίσουν αν η θεωρία χορδών έχει όντως σηκώσει το πέπλο του μαστηρίου που κρύβει τις βαθύτερες αλήθειες για το σύμπαν μας. Ενδέχεται να περάσει αρκετός χαιρός προτού φτάσει το επίπεδο της νόησής μας σε αρκετό βάθος ώστε να πετύχει αυτόν το στόχο, παρ' όλο που, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 9, κάποιοι πειραματικοί έλεγχοι θα μπορούσαν να παράσχουν ισχυρή και εμπειριστατωμένη υποστήριξη στη θεωρία χορδών μέσα στην επόμενη δεκαετία. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 13 θα δούμε ότι η θεωρία χορδών έλυσε πρόσφατα ένα βασικό αλλά δυσεπίλυτο πρόβλημα αναφορικά με τις μαύρες τρύπες, το οποίο σχετίζεται με τη λεγόμενη εντροπία Bekenstein-Hawking και αντιστεκόταν πεισματικά σε κάθε προσπάθεια επίλυσης με πιο συμβατικά μέσα για παραπάνω από είκοσι πέντε χρόνια. Η επιτυχία αυτή έχει πείσει πολλούς ότι με την εξέλιξη της θεωρίας χορδών θα κατανοήσουμε σε βάθος πώς λειτουργεί το σύμπαν.

Ο Edward Witten, ένας από τους πρωτοπόρους και κορυφαίους ειδικούς στη θεωρία χορδών, συνοψίζει την τρέχουσα κατάσταση, λέγοντας ότι «η θεωρία χορδών αποτελεί ένα μέρος της φυσικής

του εικοστού πρώτου αιώνα, το οποίο κατά λάθος ανακαλύφθηκε τον εικοστό», μια εκτίμηση που πρώτος εξέφρασε ο επιφανής Ιταλός φυσικός Daniele Amati.⁵ Κατά μία έννοια λοιπόν, είναι σαν να είχαν χαρίσει στους προγόνους μας στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα ένα σύγχρονο υπερυπολογιστή χωρίς τις οδηγίες χρήσεως. Ψάχνοντας στα τυφλά θα μπορούν να βρουν κάποιες ενδείξεις για την ισχύ του υπερυπολογιστή, αλλά θα έπρεπε να καταβάλουν επίπονες και χρονοβόρες προσπάθειες για να κατανοήσουν πλήρως τη λειτουργία του. Οι ενδείξεις για τις δυνατότητες του υπερυπολογιστή, όπως και η πολύ γενική ιδέα που έχουμε για την ερμηνευτική ισχύ της θεωρίας χορδών, θα αποτελούσαν εξαιρετικά ισχυρό κίνητρο για να αποκτήσουμε πλήρη εξοικείωση μαζί της. Παρόμοια κίνητρα παροτρύνουν σήμερα μια ολόκληρη γενιά θεωρητικών φυσικών να επιδιώξουν μια πλήρη και ακριβή αναλυτική κατανόηση της θεωρίας χορδών.

Το σχόλιο του Witten αλλά και τα αντίστοιχα άλλων ειδικών δείχνουν ότι μπορεί να περάσουν δεκαετίες ή ακόμη και αιώνες προτού αναπτυχθεί και κατανοηθεί πλήρως η θεωρία χορδών. Λυτό ίσως να είναι αλήθεια. Πράγματι, τα μαθηματικά της θεωρίας χορδών είναι τόσο πολύπλοκα που, μέχρι σήμερα, κανείς δεν γνωρίζει ούτε καν τις ακριβείς εξισώσεις της θεωρίας. Αντί γι' αυτό, οι φυσικοί γνωρίζουν μόνο προσεγγιστικά κάποιες εξισώσεις, αλλά ακόμη και αυτές είναι τόσο περίπλοκες, που μέχρι στιγμής έχουν επιλυθεί μόνο εν μέρει. Ωστόσο μια σειρά από ενθαρρυντικές επαναστατικές ανακαλύψεις στο τελευταίο μισό της δεκαετίας του 1990 –ανακαλύψεις που απάντησαν σε θεωρητικά ερωτήματα ασύλληπτης μέχρι τότε δυσκολίας– υποδεικνύουν ενδεχομένως ότι η πλήρης ποσοτική κατανόηση της θεωρίας χορδών είναι ίσως πολύ πιο κοντά απ' ό,τι αρχικά πιστευόταν. Οι φυσικοί όλου του κόσμου αναπτύσσουν νέες ισχυρές τεχνικές για να υπερβούν τις αμέτρητες προσεγγιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται ώς τώρα, συμπληρώνοντας όλοι μαζί τα σκόρπια κομμάτια του παζλ της θεωρίας χορδών με φρενήρεις ρυθμούς.

Κάτι που προκαλεί έκπληξη είναι ότι γάρη σε αυτές τις εξελί-

ξεις μπορούμε να εξετάσουμε από ευνοϊκότερη θέση ορισμένες βασικές πλευρές της θεωρίας που έμεναν ακλόνητες επί μακρόν. Για παράδειγμα, μπορεί πολύ φυσικά να σας πέρασε από το μυαλό, όπως κοιτάζατε το Σχήμα 1.1, το εξής ερώτημα: γιατί χορδές; Γιατί όχι μικροί δίσκοι του φρίζου; Η μικροσκοπικές σταγόνες σε σχήμα βόλου; Η ένας συνδυασμός απ' όλες αυτές τις δυνατότητες; Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 12, οι πιο πρόσφατες ανακαλύψεις δείχνουν ότι αυτά τα άλλα είδη συστατικών όντως παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη θεωρία χορδών, και έχουν αποκαλύψει ότι η θεωρία χορδών αποτελεί στην πραγματικότητα μέρος μιας ακόμη πιο μεγαλόπρεπης σύνθεσης, η οποία επί του παρόντος (και μαστηριωδώς) ονομάζεται θεωρία-Μ. Αυτές οι τελευταίες εξελίξεις θα αποτελέσουν το θέμα των τελικών κεφαλαίων αυτού του βιβλίου.

Η πρόοδος στην επιστήμη δεν είναι γραμμική. Μερικές περίοδοι είναι γεμάτες από επαναστατικές ανακαλύψεις: άλλες πάλι αποδεικνύονται εντελώς άκαρπες για τους ερευνητές. Οι επιστήμονες προτείνουν λύσεις, τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές. Οι λύσεις συζητώνται από την επιστημονική κοινότητα, μερικές φορές απορρίπτονται, άλλοτε τροποποιούνται και άλλοτε παρέχουν εμπνευσμένα σημεία εκκίνησης για νέους και ακριβέστερους τρόπους κατανόησης του φυσικού σύμπαντος. Με άλλα λόγια, η επιστήμη ακολουθεί μια διαδρομή όλο ζιγκ-ζαγκ, που ελπίζουμε ότι θα μας οδηγήσει στην απώτατη αλήθεια, μια διαδρομή που ξεκίνησε με τις πρώιμες προσπάθειες της ανθρωπότητας να κατανοήσει σε βάθος τον κόσμο, και της οποίας το τέλος δεν μπορούμε να προβλέψουμε. Δεν γνωρίζουμε αν η θεωρία χορδών είναι απλώς μια τυχαία στάση σε αυτή τη διαδρομή, ή αν είναι πράγματι ο τελικός προορισμός. Όμως τις δύο τελευταίες δεκαετίες οι έρευνες εκατοντάδων αφοσιωμένων φυσικών και μαθηματικών από πολλές χώρες μάς έχουν δώσει βάσιμες ελπίδες ότι βρισκόμαστε στον σωστό, και πιθανότατα τελικό, δρόμο.

Αποτελεί εύγλωττη απόδειξη για την πλούσια και μεγαλεπήβολη φύση της θεωρίας χορδών το γεγονός ότι, ακόμα και στο

επίπεδο που βρίσκεται σήμερα η κατανόησή μας, έχουμε καταφέρει να αποκομίσουμε εντυπωσιακές νέες ιδέες για τις λειτουργίες του σύμπαντος. Κεντρικό νήμα σε όσα ακολουθούν θα αποτελέσουν οι εξελίξεις εκείνες που φέρνουν την επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε το χώρο και το χρόνο, μια επανάσταση που ξεκίνησε με τις θεωρίες του Einstein για την ειδική και γενική θεωρία της σχετικότητας. Θα δούμε ότι, αν η θεωρία χορδών είναι ορθή, ο ιστός του σύμπαντός μας έχει ιδιότητες που πιθανότατα θα θάμπωναν ακόμα και τον ίδιο τον Einstein.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

Το δίλημμα του χωροχρόνου
και των κβάντων

Χώρος, χρόνος και το μάτι του παρατηρητή

Τον Ιούνιο του 1905 ο εικοσιεξάχρονος Albert Einstein υπέβαλε ένα άρθρο τεχνικής υφής στο γερμανικό περιοδικό *Annalen der Physik*, όπου ανέλυε ένα παράδοξο σχετικά με το φως, το οποίο τον είχε προβληματίσει αρχικά ως έφηβο, περίπου δέκα χρόνια νωρίτερα. Καθώς γυρνούσε την τελευταία σελίδα του χειρογράφου, ο επιμελητής του περιοδικού Max Planck συνειδητοποίησε ότι η καθεστηκυία επιστημονική τάξη είχε καταλυθεί. Χωρίς φανφάρες και τυμπανοκρουσίες, ένας υπάλληλος του ελβετικού γραφείου ευρεσιτεχνιών στη Βέρνη είχε ανατρέψει πλήρως τις παραδοσιακές έννοιες του χώρου και του χρόνου και τις είχε αντικαταστήσει με μια νέα σύλληψη, οι ιδιότητες της οποίας έρχονται σε αντίθεση με οτιδήποτε μας είναι οικείο μέσα από την καθημερινή μας εμπειρία.

Το παράδοξο που είχε προβληματίσει τον Einstein επί μία δεκαετία είναι το ακόλουθο. Στα μέσα του 19ου αιώνα, μετά από προσεκτική μελέτη του πειραματικού έργου του Άγγλου φυσικού Michael Faraday, ο Σκοτσέζος φυσικός James Clerk Maxwell κατόρθωσε να συνενώσει τον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό στο πλαίσιο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αν έχετε βρεθεί ποτέ στην κορυφή ενός βουνού μόλις πριν από μια σφοδρή ηλεκτρική καταιγίδα ή αν έχετε σταθεί χοντά σε μια γεννήτρια Van de Graaf, καταλαβαίνετε χοντρικά τι είναι ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, γιατί

το έχετε νιώσει. Είναι κάτι σαν ρεύμα ηλεκτρικών και μαγνητικών δυναμικών γραμμών που πλημμυρίζει την περιοχή του χώρου από όπου διέρχεται. Όταν πασπαλίζετε ρινίσματα σιδήρου κοντά σε ένα μαγνήτη, για παράδειγμα, το ιδιαίτερο σχήμα που παίρνουν απεικονίζει κάποιες από τις αόρατες μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Όταν βγάζετε ένα μάλλινο πουλόβερ μια ιδιαίτερα ξηρή μέρα και ακούτε έναν ξερό ήχο, και ίσως νιώθετε κάνα-δυο στιγμαία τσιμπήματα ή τινάγματα, γίνεστε μάρτυρες της ύπαρξης ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών, οι οποίες παράγονται από τα ηλεκτρικά φορτία που δημιούργησαν με την τριβή οι ίνες του πουλόβερ σας. Εκτός από τη συνένωση αυτών και όλων των άλλων ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων σε ένα κοινό μαθηματικό πλαίσιο, η θεωρία του Maxwell έδειξε –εντελώς απρόσμενα – ότι οι ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές ταξιδεύουν με μακροισιμένη και πάντοτε σταθερή ταχύτητα, μια ταχύτητα που αποδεικνύεται ίση με αυτή του φωτός. Χάρη σε αυτό το γεγονός, ο Maxwell συνειδητοποίησε ότι το ίδιο το ορατό φως δεν είναι πάρα μια ειδική περίπτωση ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ένα κύμα που σήμερα γνωρίζουμε ότι αλληλεπιδρά με χημικές ουσίες στον αμφιβληστροειδή και προκαλεί την αίσθηση της όρασης. Επιπλέον (κι αυτό είναι πολύ σημαντικό), η θεωρία του Maxwell έδειξε επίσης ότι όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα –και το ορατό φως ανάμεσά τους– αποτελούν το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα περιπλανώμενου ταξιδιώτη. Δεν σταματούν ποτέ. Δεν επιβραδύνουν ποτέ. Το φως ταξιδεύει πάντοτε με την ταχύτητα του φωτός.

Όλα αυτά είναι ωραία και καλά, μέχρι να αναρωτηθούμε, όπως έχανε ο δεκαεξάχρονος Einstein, τι γίνεται αν εμείς, έχοντας την ταχύτητα του φωτός, κυνηγήσουμε μια φωτεινή ακτίνα. Η διασθητική λογική μας, που βασίζεται στην άμεση εμπειρία και είναι ριζωμένη στους νόμους του Newton, μας λέει ότι θα προφτάσουμε τα φωτεινά κύματα, και άρα αυτά θα μας φαίνονται ακίνητα· το φως θα ακινητοποιηθεί. Όμως σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, και με όλες τις αξιόπιστες παρατηρήσεις, δεν υπάρχει στάσιμο φως: κανείς ποτέ δεν κράτησε μια χούφτα ακίνητου φωτός

στο χέρι του. Εξού και το πρόβλημα. Ευτυχώς ο Einstein δεν γνώριζε ότι πολλοί φυσικοί παγκοσμίου κλάσεως πάλευαν με αυτό το ερώτημα (και ακολουθούσαν συνεχώς λάθος μονοπάτια), κι έτσι μελέτησε το παράδοξο Maxwell-Newton ανεπηρέαστος μέσα στον αγνό κόσμο της δικής του σκέψης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο ο Einstein επέλυσε τη σύγχρουση προτείνοντας τη θεωρία του για την ειδική σχετικότητα και πώς με αυτό τον τρόπο άλλαξε για πάντα την αντίληψή μας για το χώρο και το χρόνο. Προκαλεί ίσως έκπληξη το γεγονός ότι το κεντρικό ζητούμενο της ειδικής σχετικότητας είναι να κατανοήσουμε πώς ακριβώς φαίνεται ο κόσμος σε ανθρώπους, οι οποίοι αποκαλούνται συνήθως «παρατηρητές», που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Αρχικά, αυτό μπορεί να μοιάζει με νοητική άσκηση ήσσονος σημασίας. Συμβαίνει όμως το αντίθετο: όπως χειρίζεται το θέμα ο Einstein, που φντάζεται παρατηρητές να κυνηγούν ακτίνες φωτός, προκύπτουν σοβαρές επιπλοκές στην προσπάθειά μας να κατανοήσουμε πλήρως πώς φαίνονται ακόμη και οι πιο συνηθισμένες καταστάσεις σε ανθρώπους που βρίσκονται σε σχετική κίνηση.

Η διαίσθηση και τα ψεγάδια της

Η κοινή εμπειρία δείχνει ξεκάθαρα σε τι μπορεί να διαφέρουν οι παρατηρήσεις αυτών των ατόμων. Για παράδειγμα, ένας οδηγός θεωρεί ότι τα δέντρα κατά μήκος μιας λεωφόρου κινούνται, αλλά ένας νεαρός που κάνει οτοστόπ στην άκρη του δρόμου, θεωρεί ότι είναι ακίνητα. Παρομοίως, ενώ ο οδηγός θεωρεί ότι ο πίνακας οργάνων του αυτοκινήτου δεν κινείται (το ευχόμαστε τουλάχιστον!), ο νεαρός θεωρεί ότι κινείται, όπως και το υπόλοιπο αυτοκίνητο. Αυτές οι ιδιότητες της λειτουργίας του κόσμου είναι τόσο θεμελιώδεις και διαισθητικές που σπανίως τις προσέχουμε.

Η ειδική θεωρία της σχετικότητας, ωστόσο, διακηρύσσει ότι οι διαφορές στις παρατηρήσεις δύο ανθρώπων που βρίσκονται σε

σχετική κίνηση είναι πιο λεπτές και δυσδιάκριτες. Ισχυρίζεται όλως περιέργως ότι παρατηρητές που βρίσκονται σε σχετική κίνηση θα έχουν διαφορετική αντίληψη της απόστασης και του χρόνου. Αυτό σημαίνει, όπως θα δούμε, ότι δύο ολόιδια ρολόγια που τα φορούν κάποιοι που βρίσκονται σε σχετική κίνηση, θα χτυπούν με διαφορετικούς ρυθμούς και έτσι οι παρατηρητές δεν θα συμφωνούν για το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο ορισμένων γεγονότων. Η θεωρία της ειδικής σχετικότητας αποδεικνύει ότι η διαπίστωση αυτή δεν αμφισβητεί την ακρίβεια των συγκεκριμένων ρολογιών· αντίθετα, αποτελεί μια αληθή διαπίστωση για τον ίδιο το χρόνο.

Παρομοίως, παρατηρητές που βρίσκονται σε σχετική κίνηση και έχουν μαζί τους ολόιδια όργανα μέτρησης, δεν θα συμφωνούν στα μήκη των αποστάσεων που θα μετρούν. Και πάλι, αυτό δεν συμβαίνει ούτε επειδή τα όργανα μέτρησης είναι ανακριβή ούτε επειδή δεν χρησιμοποιούνται σωστά. Τα πλέον ακριβή όργανα μέτρησης στον κόσμο επιβεβαιώνουν ότι ο χώρος και ο χρόνος –όπως μετριούνται βάσει της απόστασης και της διάρκειας– δεν γίνονται το ίδιο αντιληπτοί απ' όλους. Όπως περιέγραψε με ακρίβεια ο Einstein, η ειδική θεωρία της σχετικότητας επιλύει μεν τη σύγκρουση ανάμεσα στη διαισθητική εικόνα που έχουμε για την κίνηση και τις πραγματικές ιδιότητες του φωτός αλλά με κάποιο τίμημα: οι παρατηρήσεις ανθρώπων που κινούνται ο ένας ως προς τον άλλο, δεν θα συμφωνούν ούτε ως προς το χώρο ούτε ως προς το χρόνο.

Έχει περάσει περίπου ένας αιώνας από τότε που ο Einstein πληροφόρησε τον κόσμο για τη δραματική του ανακάλυψη, κι όμως οι περισσότεροι από μας εξακολουθούν να εξετάζουν το χώρο και το χρόνο με απόλυτους όρους. Την ειδική θεωρία της σχετικότητας δεν έχουμε στο αίμα μας – δεν τη νιώθουμε. Οι επιπτώσεις της δεν είναι άμεσα προσιτές στις αισθήσεις μας. Ο λόγος γι' αυτό είναι αρχετά απλός. Οι συνέπειες της ειδικής σχετικότητας εξαρτώνται από το πόσο γρήγορα κινείται κανείς, και στις ταχύτητες των αυτοκινήτων, των αεροπλάνων, ακόμη και των

διαστημικών λεωφορείων, αυτές οι συνέπειες είναι ασήμαντες. Διαφορές στην αντίληψη του χώρου και του χρόνου μεταξύ ανθρώπων που βρίσκονται στεριωμένοι στη Γη και άλλων που ταξιδεύουν με αυτοκίνητα, αεροπλάνα, όντως υπάρχουν, αλλά είναι τόσο μικρές που περνούν απαρατήρητες. Ωστόσο, αν κανείς ταξιδεύει σε ένα φουτουριστικό διαστημόπλοιο με ταχύτητα που θα πλησίαζε αυτήν του φωτός, οι συνέπειες της σχετικότητας θα ήταν ολοφάνερες. Αυτό βέβαια εξακολουθεί να ανήκει στη σφαίρα της επιστημονικής φαντασίας. Εντούτοις, όπως θα συζητήσουμε σε επόμενες ενότητες, έξυπνα πειράματα μας επιτρέπουν να παρατηρήσουμε με σαφήνεια και ακρίβεια τις σχετικές ιδιότητες του χώρου και του χρόνου, τις οποίες προβλέπει η θεωρία του Einstein.

Για να πάρετε μια ιδέα της κλίμακας μεγέθους στην οποία αναφερόμαστε, φανταστείτε ότι είμαστε στο 1970 και είναι της μόδας τα μεγάλα, γρήγορα αυτοκίνητα. Ο Σλιμ, έχοντας μόλις ξοδέψει όλες του τις οικονομίες σε μια καινούργια αμαξάρα, πηγαίνει με τον αδερφό του τον Τζιμ στον κοντινό αυτοκινητόδρομο για να κάνει ένα τεστ-ντράιβ που κάθε πωλητής θα απαγόρευε. Αφού πατήσει τέρμα το γκάζι, ο Σλιμ τρέχει σε μια ευθεία μήκους ενός χιλιομέτρου με 126 μίλια την ώρα, ενώ ο Τζιμ στέκεται στην άκρη του δρόμου και τον χρονομετρεί. Θέλοντας και μία ανεξάρτητη επιβεβαίωση, ο Σλιμ χρησιμοποιεί κι εκείνος ένα χρονόμετρο, ώστε να υπολογίσει πόσο του παίρνει για να διανύσει αυτή τη διαδρομή με το καινούργιο του αυτοκίνητο. Πριν από το επιστημονικό έργο του Einstein, κανείς δεν θα αμφέβαλλε ότι, αν τα χρονόμετρα των δύο αδερφών λειτουργούσαν σωστά, ο καθένας τους θα μετρούσε την ίδια ακριβώς χρονική διάρκεια. Σύμφωνα όμως με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, ενώ ο Τζιμ θα μετρήσει ότι πέρασαν 30 δευτερόλεπτα, το χρονόμετρο του Σλιμ θα καταγράψει 29,9999999999952 δευτερόλεπτα – κάτι ελαφρώς μικρότερο. Φυσικά, η διαφορά αυτή είναι τόσο μικρή που, για να εντοπιστεί θα απαιτούσε μετρήσεις ακριβείας, οι οποίες ξεπερνούν κατά πολύ τις δυνατότητες των χειροκίνητων χρονόμετρων, θα απαιτούσε χρονομετρικά συστήματα ολυμπιακών προδιαγραφών ή ακόμη

και τα πιο ακριβή χρονόμετρα που έχουν κατασκευαστεί, τα ατομικά χρονόμετρα. Άρα λοιπόν δεν είναι παράξενο που οι καθημερινές μας εμπειρίες δεν μας αποκαλύπτουν το γεγονός ότι το πέρασμα του χρόνου εξαρτάται από την κατάσταση της κίνησής μας.

Παρόμοια ασυμφωνία θα υπάρχει και στις μετρήσεις μήκους. Για παράδειγμα, σε μια άλλη δοκιμή ο Τζιμ χρησιμοποιεί ένα έξυπνο κόλπο για να μετρήσει το μήκος του καινούργιου αμαξιού του Σλιμ: ξεκινά το χρονόμετρό του μόλις φτάνει εμπρός του το μπροστινό μέρος του αυτοκινήτου και το σταματά μόλις ακριβώς περνά από μπροστά του το πίσω μέρος του. Από τη στιγμή που ο Τζιμ γνωρίζει ότι ο Σλιμ τρέχει με 120 μίλια την ώρα, μπορεί να υπολογίσει το μήκος του αυτοκινήτου πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα αυτή με το χρόνο που κατέγραψε το χρονόμετρό του. Και πάλι, πριν από τον Einstein, κανείς δεν θα αμφισβητούσε ότι το μήκος που μετρά ο Τζιμ με αυτό τον έμμεσο τρόπο είναι ακριβώς το ίδιο με το μήκος που μέτρησε προσεκτικά με τη μεζούρα ο Σλιμ, όταν το αυτοκίνητο στεκόταν ακίνητο στη βιτρίνα της αντιπροσωπείας. Αντιθέτως, η ειδική θεωρία της σχετικότητας προσβεύει ότι αν ο Σλιμ και ο Τζιμ κάνουν τέτοιες προσεκτικές μετρήσεις και ο Σλιμ βρει ότι το αυτοκίνητο έχει, ας πούμε, ακριβώς 5 μέτρα μήκος, τότε σύμφωνα με τη μέτρηση του Τζιμ το μήκος του αυτοκινήτου θα είναι 4,9999999999999991875 μέτρα – δηλαδή ελαφρώς μικρότερο. Όπως ακριβώς και με τη μέτρηση του χρόνου, πρόκειται για απειροελάχιστη διαφορά, που τα συνηθισμένα όργανα μέτρησης δεν είναι αρκετά ακριβή για να την εντοπίσουν.

Μολονότι οι διαφορές είναι εξαιρετικά μικρές, υποδεικνύουν ένα μοιραίο ψεγάδι στην κοινά αποδεκτή έννοια για την καθολικότητα και το αναλλοίωτο του χώρου και χρόνου. Όσο η σχετική ταχύτητα παρατηρητών όπως ο Τζιμ και ο Σλιμ μεγαλώνει, αυτό το ψεγάδι γίνεται όλο και πιο εμφανές. Για να γίνουν αισθητές οι διαφορές, χρειάζεται ένα αρκετά μεγάλο κλάσμα της μέγιστης δυνατής ταχύτητας –δηλαδή της ταχύτητας του φωτός– την οποία η θεωρία του Maxwell και πειραματικές μετρήσεις υπολογίζουν στα $2.99792458 \cdot 10^8$ m/sec. Αυτή η ταχύτητα είναι τόσο μεγάλη,

που θα αρκούσε για να γίνει ο γύρος της Γης πάνω από εφτά φορές μέσα σ' ένα δευτερόλεπτο. Αν ο Σλιμ, για παράδειγμα, δεν ταξίδευε με 180 αλλά με 261.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο (περίπου 87% της ταχύτητας του φωτός), τα μαθηματικά της ειδικής σχετικότητας προβλέπουν ότι ο Τζιμ θα μετρούσε πως το αυτοκίνητο έχει δυόμισι μέτρα μήκος, μέτρηση που διαφέρει αισθητά από αυτή του Σλιμ (καθώς και από την τιμή στο βιβλίο του κατασκευαστή του αυτοκινήτου). Παρομοίως, ο χρόνος που θα χρειαζόταν για να διανύσει ένα χιλιόμετρο σύμφωνα με τον Τζιμ, θα ήταν περίπου διπλάσιος από το χρόνο που μετρά ο Σλιμ.

Από τη στιγμή που τέτοιες τεράστιες ταχύτητες ξεπερνούν κατά πολύ τις ταχύτητες οι οποίες είναι εφικτές υπό τις παρούσες συνθήκες, οι συνέπειες της «διαστολής του χρόνου» και της «συστολής Lorentz», όπως ονομάζονται σύμφωνα με την τεχνική ορολογία τα φαινόμενα αυτά, είναι ασήμαντες στην καθημερινή μας ζωή. Αν ζούσαμε σε έναν κόσμο όπου οι συνηθισμένες ταχύτητες θα πλησίαζαν την ταχύτητα του φωτός, τότε οι αισθήσεις μας θα ήταν τόσο συμφιλιωμένες με αυτές τις ιδιότητες του χώρου και του χρόνου –αφού θα τις βιώναμε συνεχώς– που δεν θα άξιζε να μιλάμε γι' αυτές περισσότερο απ' όσο μιλάμε για τη φαινομενική κίνηση των δέντρων στην άκρη του δρόμου, την οποία αναφέραμε στην αρχή αυτής της ενότητας. Μα από τη στιγμή που δεν ζούμε σε έναν τέτοιο κόσμο, αυτά τα χαρακτηριστικά δεν μας είναι οικεία. Όπως θα δούμε, για να τα κατανοήσουμε και να τα αποδεχθούμε, πρέπει να αναθεωρήσουμε πλήρως την κosmo-antίληψή μας.

Η αρχή της σχετικότητας

Υπάρχουν δύο απλά αλλά γερά θεμελιωμένα θεωρητικά οικοδομήματα που αποτελούν τους ακρογωνιαίους λίθους της ειδικής σχετικότητας. Όπως προαναφέραμε, το ένα έχει να κάνει

με τις ιδιότητες του φωτός· θα το εξετάσουμε πληρέστερα στην επόμενη ενότητα. Το άλλο είναι πιο αφηρημένο. Δεν αφορά κάποιον συγκεκριμένο φυσικό νόμο αλλά κάθε φυσικό νόμο και είναι γνωστό ως αρχή της σχετικότητας. Η αρχή της σχετικότητας στηρίζεται σε ένα απλό γεγονός: όταν εξετάζουμε το μέτρο ή το άνυσμα της ταχύτητας (δηλαδή την ταχύτητα, τη φορά και τη διεύθυνση της κίνησης), πρέπει να καθορίζουμε επακριβώς ποιος ή τι κάνει τη μέτρηση. Για να κατανοήσουμε πιο εύκολα το νόημα και τη σημασία αυτής της πρότασης, ας αναλογιστούμε την ακόλουθη κατάσταση.

Φανταστείτε ότι ο Τζορτζ, που φορά μια διαστημική στολή με ένα μικρό κόκκινο φωτάκι που αναβοσβήνει, πλέει μέσα στο απόλυτο σκοτάδι ενός εντελώς άδειου χώρου, μακριά από πλανήτες, αστέρια ή γαλαξίες. Από τη μεριά του, ο Τζορτζ νιώθει εντελώς στατικός, τυλιγμένος στο ομοιόμορφο και βουβό κοσμικό σκοτάδι. Στο βάθος, ο Τζορτζ διακρίνει ένα μικρό πράσινο φωτάκι που αναβοσβήνει και έρχεται όλο και πιο κοντά του. Τελικά, πλησιάζει αρκετά κι έτσι ο Τζορτζ βλέπει ότι το φωτάκι είναι προσαρμοσμένο στη διαστημική στολή μας αστροναύτισσας, της Γκρέισι, που πλέει αργά προς το μέρος του. Τον χαιρετά καθώς περνά, το ίδιο κάνει κι ο Τζορτζ, και απομακρύνεται. Την ίδια ιστορία, από τη δική της σκοπιά, μπορεί να αφηγηθεί με την ίδια αξιοπιστία και η Γκρέισι. Ξεκινά κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο, εντελώς μόνη στο απέραντο, βουβό σκοτάδι του διαστήματος. Στο βάθος, η Γκρέισι βλέπει ένα μικρό κόκκινο φωτάκι, το οποίο αναβοσβήνει, να έρχεται όλο και πιο κοντά. Τελικά, πλησιάζει αρκετά κι έτσι η Γκρέισι βλέπει ότι το φωτάκι είναι προσαρμοσμένο στη διαστημική στολή ενός άλλου όντος, του Τζορτζ, που πλέει αργά προς το μέρος της. Την χαιρετά καθώς περνά, το ίδιο κάνει κι η Γκρέισι, και απομακρύνεται.

Οι δύο ιστορίες περιγράφουν την ίδια ακριβώς κατάσταση από δύο διαφορετικές αλλά εξίσου έγκυρες σκοπιές. Κάθε παρατηρητής νιώθει ακίνητος και αντιλαμβάνεται τον άλλο να κινείται. Και οι δύο απόψεις είναι κατανοητές και δικαιολογημένες. Κα-

θώς υπάρχει συμμετρία ανάμεσα στους δύο αστροναύτες, έχουμε βάσιμους λόγους να πιστεύουμε πως δεν μπορούμε να πούμε ότι η μία άποψη είναι «σωστή» και η άλλη «λανθασμένη». Η κάθε άποψη έχει τα ίδια δικαιώματα στην αλήθεια.

Με αυτό το παράδειγμα συλλαμβάνουμε το νόημα της αρχής της σχετικότητας: η έννοια της κίνησης είναι σχετική. Μπορούμε να μιλάμε για την κίνηση ενός αντικειμένου, αλλά μόνο σχετικά ή σε σύγκριση με κάποιο άλλο. Δεν έχει συνεπώς κανένα νόημα η δήλωση «ο Τζορτζ ταξιδεύει με 10 χιλιόμετρα την ώρα», καθώς δεν έχουμε προσδιορίσει κάποιο άλλο αντικείμενο ως σημείο σύγκρισης. Έχει νόημα η δήλωση «ο Τζορτζ ταξιδεύει με 10 χιλιόμετρα την ώρα ως προς την Γκρέισι», καθώς τώρα έχουμε προσδιορίσει την Γκρέισι ως σημείο αναφοράς. Όπως δείχνει το παράδειγμά μας, η τελευταία αυτή δήλωση είναι εντελώς ισοδύναμη με την πρόταση «η Γκρέισι ταξιδεύει με 10 χιλιόμετρα την ώρα ως προς τον Τζορτζ (προς την αντίθετη κατεύθυνση)». Με άλλα λόγια, η έννοια της κίνησης δεν είναι «απόλυτη». Η κίνηση είναι σχετική.

Το στοιχείο-κλειδί σε αυτή την ιστορία είναι ότι ούτε τον Τζορτζ ούτε την Γκρέισι τους σπρώχνει, τους τραβά ή τους επηρεάζει με οποιονδήποτε άλλο τρόπο κάποια δύναμη που θα μπορούσε να ταράξει αυτή τη υηφάλια κατάσταση ομαλής κίνησης με σταθερή ταχύτητα. Έτσι, μια ακριβέστερη διατύπωση είναι ότι η ομαλή κίνηση έχει νόημα μόνο αναφορικά με άλλα αντικείμενα. Πρόκειται για σημαντική αποσαφήνιση, γιατί, αν εμπλέκονται δυνάμεις, αυτές προκαλούν μεταβολές στην ταχύτητα των παρατηρητών –μεταβολές είτε στο μέτρο της ταχύτητας είτε στη διεύθυνση της κίνησης ή και στα δύο– και αυτές οι μεταβολές μπορούν να γίνουν αισθητές. Για παράδειγμα, αν ο Τζορτζ φορούσε στην πλάτη του μια πρωστική μηχανή, σίγουρα θα ένιωθε ότι κινείται. Αυτή η αίσθηση είναι εγγενής. Αν η πρωστική μηχανή λειτουργεί, ο Τζορτζ γνωρίζει ότι κινείται, ακόμη κι αν τα μάτια του είναι κλειστά, οπότε δεν μπορεί να κάνει συγκρίσεις με άλλα αντικείμενα. Ακόμη και χωρίς τέτοιες συγκρίσεις, δεν θα μπορούσε

πλέον να ισχυριστεί ότι ο ίδιος μένει στάσιμος ενώ «ο υπόλοιπος κόσμος κινείται γύρω του». Η κίνηση με σταθερή ταχύτητα είναι σχετική· όχι όμως και η κίνηση με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, δηλαδή η επιταχυνόμενη κίνηση. (Θα επανεξετάσουμε την πρόταση αυτή στο επόμενο κεφάλαιο, όταν θα συζητήσουμε την επιταχυνόμενη κίνηση και τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Einstein.)

Χρησιμοποιούμε για σκηνικό αυτών των ιστοριών το σκοτάδι του κενού χώρου, γιατί αυτό βοηθά στην κατανόηση, καθώς αφαιρεί τα οικεία αντικείμενα, όπως οι δρόμοι και τα κτίρια, στα οποία κατά κανόνα, αλλά όχι δικαιολογημένα, αποδίδουμε το ειδικό πρόνομιο της «ακινησίας». Ωστόσο, η ίδια αρχή εφαρμόζεται και στα γήινα σκηνικά, και τη βιώνουμε πράγματι συχνά.¹ Για παράδειγμα, φανταστείτε ότι αφού σας έχει πάρει ο ύπνος στο τρένο, ξυπνάτε τη στιγμή ακριβώς που το τρένο σας περνά πλάι από ένα άλλο στη διπλανή παράλληλη γραμμή. Καθώς το άλλο τρένο σας κλείνει εντελώς το οπτικό πεδίο μέσα από το παράθυρο κι έτσι σας εμποδίζει να δείτε άλλα αντικείμενα, μπορεί προς στιγμήν να αναρωτηθείτε ποιο τρένο κινείται: το δικό σας, το άλλο τρένο, ή και τα δύο; Φυσικά, αν το τρένο σας τραντάζεται ή ταρακουνιέται ή αν αλλάζει κατεύθυνση στρίβοντας, μπορεί να νιώσετε ότι κινείστε. Αν όμως η διαδρομή είναι εντελώς ομαλή –αν η ταχύτητα του τρένου παραμένει σταθερή– θα παρατηρείτε ότι το ένα τρένο κινείται σε σχέση με το άλλο, χωρίς να είστε σε θέση να πείτε με σιγουριά ποιο κινείται.

Ας προχωρήσουμε ένα βήμα παραπέρα. Φανταστείτε ότι είστε σε αυτό το τρένο και τραβάτε τις κουρτίνες του παραθύρου, σκεπάζοντάς το εντελώς. Χωρίς να μπορείτε να δείτε τίποτε έξω από το δικό σας βαγόνι και καθώς θα θεωρείτε ότι το τρένο κινείται ευθύγραμμα και με απολύτως σταθερή ταχύτητα, δεν θα υπάρχει κανένας τρόπος να καθορίσετε την κινητική σας κατάσταση. Το βαγόνι γύρω σας θα δείχνει ακριβώς το ίδιο, ανεξαρτήτως αν το τρένο στέκεται ακίνητο στις ράγες του ή κινείται με μεγάλη ταχύτητα. Ο Einstein συγκεκριμένοποίησε την ιδέα αυτή, την οποία

ουσιαστικά συνέλαβε πρώτος ο Γαλιλαίος, δηλώνοντας ότι είναι αδύνατο για σας ή για οποιονδήποτε συνεπιβάτη σας να κάνετε κάποιο πείραμα μέσα στο κλειστό βαγόνι για να προσδιορίσετε αν το τρένο κινείται ή όχι. Αυτό και πάλι μας παραπέμπει στην αρχή της σχετικότητας: καθώς κάθε ομαλή κίνηση είναι σχετική, αποκτά νόημα μόνο αναφορικά με άλλα αντικείμενα ή ανθρώπους που επίσης εκτελούν ομαλή κίνηση. Δεν υπάρχει κανένας τρόπος να προσδιορίσετε οτιδήποτε σχετικά με την κατάσταση της κίνησής σας, χωρίς να κάνετε κάποια άμεση ή έμμεση σύγκριση με «εξωτερικά» αντικείμενα. Απλούστατα δεν υπάρχει στη φυσική η έννοια της «απόλυτης» κίνησης με σταθερή ταχύτητα· μόνο οι συγκρίσεις έχουν κάποιο νόημα.

Μάλιστα, ο Einstein συνειδητοποίησε ότι η αρχή της σχετικότητας προβαίνει σε έναν ακόμη πιο σημαντικό ισχυρισμό: οι νόμοι της φυσικής –ό, τι κι αν αφορούν– πρέπει να είναι απολύτως οι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές που κινούνται με σταθερή ταχύτητα. Αν ο Τζορτζ και η Γκρέισι δεν επιπλέουν απλώς στο διάστημα, αλλά εκτελούν ο καθένας τη δική του σειρά πειραμάτων στον δικό του διαστημικό σταθμό, τα αποτελέσματα που θα βρουν θα είναι τα ίδια. Για άλλη μια φορά, ο καθένας τους μπορεί εντελώς δικαιολογημένα να πιστεύει ότι ο δικός του σταθμός είναι σε ακινησία, παρότι οι δύο σταθμοί βρίσκονται σε σχετική κίνηση. Αν διαθέτουν πανομοιότυπα όργανα, τίποτε δεν ξεχωρίζει τις δύο πειραματικές διατάξεις – είναι εντελώς συμμετρικές. Παρομοίως οι νόμοι της φυσικής που ο καθένας εξάγει από τα πειράματά του θα είναι οι ίδιοι. Ούτε οι παρατηρητές ούτε τα πειράματά τους θα μπορούν να νιώσουν ότι ταξιδεύουν με σταθερή ταχύτητα – δηλαδή να επηρεαστούν κατά οποιονδήποτε τρόπο από τη συγχεκριμένη ταχύτητα. Αυτή η απλή ιδέα επιβάλλει πλήρη συμμετρία ανάμεσα σε τέτοιους παρατηρητές και ενσωματώνεται στην αρχή της σχετικότητας. Παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε αυτή την αρχή για να βγάλουμε σημαντικά συμπεράσματα.

Η ταχύτητα του φωτός

Το δεύτερο στοιχείο-χλειδί στην ειδική θεωρία της σχετικότητας έχει να κάνει με το φως και τις ιδιότητες της κίνησής του. Σε αντίθεση με τον ισχυρισμό μας ότι δεν έχει νόημα η διατύπωση «Ο Τζορτζ ταξιδεύει με 10 χιλιόμετρα την ώρα» χωρίς κάποιο συγχεριμένο σημείο αναφοράς για σύγκριση, σχεδόν ένας αιώνας προσπαθειών από μια σειρά αφοσιωμένων πειραματικών φυσικών έχει δείξει ότι ο καθένας ξεχωριστά και όλοι μαζί οι παρατηρητές θα συμφωνήσουν ότι το φως ταξιδεύει με $2.99792458 \cdot 10^8$ μέτρα το δευτερόλεπτο όποιο σημείο αναφοράς και αν πάρουμε.

Το γεγονός αυτό απαιτεί να δούμε το σύμπαν από άλλη σκοπιά. Καταρχήν ας προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τη σημασία του, αντιπαραβάλλοντάς το με παρόμοιες διατυπώσεις που αφορούν πιο συνηθισμένα αντικείμενα. Φανταστείτε ότι μια ωραία ηλιόλουστη μέρα βγαίνετε έξω για να παίξετε πιάσε-πέτα με μια φίλη. Για λίγη ώρα πετάτε χαλαρά το μπαλάκι στον άλλο με ταχύτητα, ας πούμε, 10 μέτρα το δευτερόλεπτο, όταν ξαφνικά ξεσπά μια απρόσμενη καταιγίδα, και αναγκαστικά τρέχετε και οι δύο να βρείτε καταφύγιο. Όταν περάσει η καταιγίδα, ξαναβρίσκεστε για να συνεχίσετε το παιχνίδι σας, αλλά εσείς παρατηρείτε ότι κάτι έχει αλλάξει. Η φίλη σας είναι αναμαλλιασμένη και το μάτι της έχει αγριέψει και γυαλίζει. Κοιτάτε το χέρι της και βλέπετε με έκπληξη ότι δεν σκοπεύει πια να παίξει πιάσε-πέτα με το μπαλάκι του μπέζμπολ, αλλά αντίθετα ετοιμάζεται να σας πετάξει μια χειροβομβίδα. Όπως είναι φυσικό, ο ενθουσιασμός σας για το αθώο αυτό παιχνίδι μειώνεται στο ελάχιστο· γυρνάτε την πλάτη και το βάζετε στα πόδια. Όταν η σύντροφός σας πετά τη χειροβομβίδα, αυτή θα εξακολουθεί να έρχεται προς το μέρος σας, αλλά επειδή τρέχετε, η ταχύτητα με την οποία θα σας προσεγγίζει θα είναι λιγότερη από 10 μέτρα το δευτερόλεπτο. Πράγματι, η κοινή εμπειρία μας λέει ότι, αν μπορείτε να τρέχετε, ας πούμε, με 6 μέτρα το δευτερόλεπτο, τότε η χειροβομβίδα θα σας πλησιάζει με (10-6=)

4 μέτρα το δευτερόλεπτο. Κι ένα άλλο παράδειγμα: αν είστε στα βουνά και μια χιονοστιβάδα κατρακυλά προς το μέρος σας, το ένστικτο σας κάνει να γυρίσετε και να τρέξετε, γιατί αυτό θα μειώσει την ταχύτητα με την οποία σας πλησιάζει το χιόνι – άλλωστε αυτό είναι και το καλύτερο που μπορείτε να κάνετε. Και πάλι, κάποιος ακίνητος παρατηρητής νομίζει ότι η ταχύτητα του χιονιού που πλησιάζει είναι μεγαλύτερη απ' όσο θεωρεί κάποιος που το βάζει στα πόδια.

Τώρα, ας συγχρίνουμε αυτές τις βασικές παρατηρήσεις για τα μπαλάκια του μπέιζμπολ, τις χειροβομβίδες και τις χιονοστιβάδες με όσα παρατηρούμε για το φως. Για να είναι η σύγκριση πληρέστερη, να θυμάστε ότι μια ακτίνα φωτός αποτελείται από απειροελάχιστες «πυκνώσεις» ή «πακέτα» γνωστά ως φωτόνια (χαρακτηριστικό του φωτός το οποίο θα συζητήσουμε εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4). Όταν ανάβουμε ένα φακό ή ένα λέιζερ-πόιντ, στην πραγματικότητα εκτοξεύουμε μια δέσμη φωτονίων προς όποια κατεύθυνση στρέφουμε τη συσκευή. Όπως με τις χειροβομβίδες και τις χιονοστιβάδες, ας αναλογιστούμε πώς φαίνεται η κίνηση ενός φωτονίου σε κάποιον που κινείται. Φανταστείτε ότι η τρελαμένη φίλη σας άφησε τη χειροβομβίδα και πήρε ένα ισχυρό λέιζερ. Αν πυροβολούσε με το λέιζερ εναντίον σας – κι αν είχατε τα κατάλληλα όργανα μέτρησης – θα βρίσκατε ότι η ταχύτητα με την οποία σας προσεγγίζουν τα φωτόνια της ακτίνας είναι 1.080 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα. Άλλα τι θα γινόταν αν τρέχατε, όπως κάνατε όταν αντιμετωπίσατε την προοπτική να παίξετε πιάσε-πέτα με μια χειροβομβίδα; Ποια ταχύτητα θα μετρούσατε τώρα για τα φωτόνια που σας πλησιάζουν; Για να κάνουμε πιο συναρπαστικά τα πράγματα, φανταστείτε ότι καταφέρνετε να το σκάσετε από τη φίλη σας με το αστρόπλοιο Enterprise και πετάτε, ας πούμε, με 200 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα. Σύμφωνα με τη συλλογιστική που βασίζεται στην παραδοσιακή νευτώνεια κοσμοαντίληψη, αφού τώρα απομακρύνεστε, θα περιμένατε να μετρήσετε ότι τα φωτόνια σας πλησιάζουν με μικρότερη ταχύτητα. Συγκεκριμένα, θα περιμένατε να βρείτε ότι σας προσεγγίζουν με (1.080

εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα - 200 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα =) 880 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα.

Πλήθος ενδείξεων που προέρχονται από ποικίλα πειράματα τα οποία είχαν ήδη ξεκινήσει από τη δεκαετία του 1880, σε συνδυασμό με προσεκτική ανάλυση και ερμηνεία της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell σχετικά με το φως, έχουν πείσει προοδευτικά την επιστημονική κοινότητα ότι, στην πραγματικότητα, δεν θα δείτε κάτι τέτοιο. Μολονότι απομακρύνεστε, θα εξακολουθείτε να μετράτε την ταχύτητα των φωτονίων που σας προσεγγίζουν, στα 1.080 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα, τίποτα λιγότερο. Παρότι αρχικά φαίνεται εντελώς γελοίο, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει όταν κανείς απομακρύνεται από μια μπάλα του μπέιζμπολ, χειροβομβίδα ή χιονοστιβάδα που τον πλησιάζει, η ταχύτητα των φωτονίων μένει πάντοτε 1.080 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα. Το ίδιο συμβαίνει αν τρέξετε να προϋπαντήσετε τα φωτόνια ή αν τα κυνηγήσετε - η ταχύτητα με την οποία πλησιάζουν ή απομακρύνονται είναι ίδια και απαράλλαχτη· φαίνεται ότι εξακολουθούν να ταξιδεύουν με 1.080 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα. Ανεξάρτητα από τη σχετική κίνηση ανάμεσα στην πηγή των φωτονίων και τον παρατηρητή, η ταχύτητα του φωτός μένει πάντοτε η ίδια.²

Είναι τέτοιοι οι τεχνολογικοί περιορισμοί, ώστε «πειράματα» με το φως ακριβώς σαν αυτά που περιγράψαμε δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν. Ωστόσο, μπορούν να γίνουν άλλα, ανάλογα. Για παράδειγμα, το 1913 ο Ολλανδός φυσικός Willem de Sitter επισήμανε ότι οι ταχέως κινούμενοι διπλοί αστέρες (δύο αστέρια που περιστρέφονται το ένα γύρω από το άλλο) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθεί πώς επηρεάζει η κίνηση της πηγής την ταχύτητα του φωτός. Διάφορα πειράματα τέτοιου είδους κατά τη διάρκεια των οκτώ περασμένων δεκαετιών έχουν επαληθεύσει με την ακρίβεια που μας επιτρέπουν τα πιο σύγχρονα και τελειοποιημένα όργανα μέτρησης ότι το φως ενός κινούμενου αστέρα έχει την ίδια ταχύτητα με το φως που προέρχεται από έναν αστέρα ακίνητο - 1.080 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα. Επι-

πλέον, πολλά άλλα λεπτομερειακά πειράματα έχουν γίνει τον τελευταίο αιώνα – πειράματα που μετρούν απευθείας την ταχύτητα του φωτός σε διάφορες συνθήκες, αλλά και ελέγχουν πολλές από τις συνέπειες που προκύπτουν από αυτό το χαρακτηριστικό του φωτός, τις οποίες θα δούμε σύντομα – και όλα έχουν επιβεβαιώσει ότι το φως έχει σταθερή ταχύτητα.

Αν δυσκολεύεστε να χωνέψετε αυτή την ιδιότητα του φωτός, να ξέρετε ότι δεν είστε οι μόνοι. Στις αρχές του εικοστού αιώνα οι φυσικοί έκαναν τα πάντα για να την αντικρούσουν. Δεν μπόρεσαν. Ο Einstein, αντίθετα, αποδέχθηκε ότι το φως έχει σταθερή ταχύτητα, γιατί εκεί βρισκόταν η απάντηση στο παράδοξο που τον ταλαιπωρούσε από την εφηβεία του: όσο γρήγορα κι αν κυνηγάς μια ακτίνα φωτός, εξακολουθεί να σου ξεφεύγει με ταχύτητα φωτός. Δεν μπορείς να ελαττώσεις τη φαινομενική ταχύτητα με την οποία απομακρύνεται το φως ούτε στο ελάχιστο, πόσο μάλλον να τη μειώσεις τόσο ώστε το φως να φαίνεται αχίνητο. Τελεία και παύλα. Πάντως αυτή η θριαμβευτική επίλυση της σύγκρουσης ήταν μια μεγάλη νίκη. Ο Einstein συνειδητοποίησε ότι η σταθερή ταχύτητα με την οποία κινείται το φως σήμαινε την κατάρρευση της νευτώνειας φυσικής.

Η αλήθεια και οι συνέπειές της

Η ταχύτητα αποτελεί το μέτρο της απόστασης που μπορεί να διανύσει ένα αντικείμενο σε μια δεδομένη χρονική διάρκεια. Αν είμαστε σε ένα αυτοκίνητο που τρέχει με 100 χιλιόμετρα την ώρα, αυτό φυσικά σημαίνει ότι θα διανύσουμε 100 χιλιόμετρα αν συνεχίσουμε να έχουμε την ίδια κινητική κατάσταση επί μία ώρα. Σύμφωνα με αυτή τη διατύπωση, η ταχύτητα είναι μάλλον μια κοινή έννοια, και έτσι ίσως αναρωτιέστε γιατί τόση φασαρία για τις ταχύτητες που έχουν οι μπάλες του μπέιζμπολ, οι χιονοστιβάδες και τα φωτόνια. Εντούτοις, ας σημειώσουμε ότι η απόσταση είναι έννοια που αναφέρεται στο χώρο – συγχεκριμένα αποτελεί το μέτρο

του διαστήματος που υπάρχει ανάμεσα σε δύο σημεία. Σημειώστε επίσης ότι η διάρκεια είναι έννοια που αναφέρεται στο χρόνο – πόσος χρόνος μεσολαβεί μεταξύ δύο γεγονότων. Η ταχύτητα, συνεπώς, συνδέεται στενά με την αντίληψή μας για το χώρο και το χρόνο. Αν το θέσουμε έτσι, βλέπουμε ότι κάθε πειραματικό δεδομένο που θέτει υπό αμφισβήτηση το κοινό αίσθημα περί ταχύτητας, όπως η σταθερή ταχύτητα με την οποία κινείται το φως, έχει τη δυνατότητα να αμφισβήτησει και το κοινό αίσθημα περί χώρου και χρόνου. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, αυτό το παράξενο γεγονός σχετικά με την ταχύτητα του φωτός αξίζει να ερευνηθεί με κάθε λεπτομέρεια – όπως και έγινε από τον Einstein, ο οποίος οδηγήθηκε έτσι σε αξιοσημείωτα συμπεράσματα.

Η επίδραση στο χρόνο: μέρος I

Με ελάχιστη προσπάθεια, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σταθερή ταχύτητα με την οποία κινείται το φως για να δείξουμε ότι απλούστατα η γνώριμη και συνήθης αντίληψη για το χρόνο είναι εσφαλμένη. Φανταστείτε ότι οι ηγέτες δύο εμπόλεμων κρατών, που κάθονται ο ένας απέναντι στον άλλο στο μακρύ τραπέζι των διαπραγματεύσεων, έχουν μόλις καταλήξει σε συμφωνία για κατάπαυση του πυρός, αλλά κανείς δεν θέλει να υπογράψει το συμφωνητικό πρώτος. Ο Γενικός Γραμματέας των Ήνωμένων Εθνών έχει μια φαεινή ιδέα. Ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας, αρχικά σβηστός, θα τοποθετηθεί στη μέση του τραπεζιού ανάμεσα στους δύο προέδρους. Όταν ανάψει, το φως που εκπέμπει θα φτάσει ταυτόχρονα στους δύο προέδρους, εφόσον απέχουν εξίσου από το λαμπτήρα. Ο κάθε πρόεδρος συμφωνεί να υπογράψει ένα αντίγραφο του συμφωνητικού, μόλις δει το φως. Το σχέδιο μπαίνει σε εφαρμογή και η συμφωνία υπογράφεται προς ικανοποίηση και των δύο μερών.

Ενθουσιασμένος με την επιτυχία του ο Γενικός Γραμματέας εφαρμόζει την ίδια μέθοδο και με δύο άλλα εμπόλεμα κράτη που

έχουν επίσης καταλήξει σε συμφωνία ειρήνευσης. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι πρόεδροι οι οποίοι εμπλέκονται στη συγκεκριμένη διαπραγμάτευση κάθονται στις απέναντι πλευρές ενός τραπεζιού μέσα σε ένα τρένο που ταξιδεύει με σταθερή ταχύτητα. Όπως αρμόζει, ο πρόεδρος της Εμπροσθολάνδης βλέπει προς τη μεριά που κινείται το τρένο, ενώ ο πρόεδρος της Οπισθολάνδης βλέπει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι νόμοι της φυσικής δεν αλλάζουν ανεξάρτητα από την κατάσταση κίνησης του καθενός, αρκεί η κίνηση αυτή να μη μεταβάλλεται, ο Γενικός Γραμματέας δεν λαμβάνει υπόψη του ότι κάθονται προς αντίθετη κατεύθυνση και προχωρεί στην υπογραφή της συμφωνίας χρησιμοποιώντας και πάλι τη μέθοδο του λαμπτήρα. Οι δύο πρόεδροι υπογράφουν τη συμφωνία και, μαζί με τους συμβούλους που τους συνοδεύουν, γιορτάζουν το τέλος των εχθροπραξιών.

Και τότε μαθαίνουν ότι ξέσπασαν ταραχές μεταξύ κατοίκων της κάθε χώρας, οι οποίοι παραχολουθούσαν την τελετή υπογραφής από την αποβάθρα έξω από το κινούμενο τρένο. Όλοι μέσα στο τρένο των διαπραγματεύσεων ακούν απογοητευμένοι πως ο λόγος για τις νέες εχθροπραξίες είναι ο ισχυρισμός των κατοίκων της Εμπροσθολάνδης ότι εξαπατήθηκαν, επειδή ο πρόεδρός τους υπέγραψε τη συμφωνία πριν από τον πρόεδρο της Οπισθολάνδης. Καθώς όλοι μέσα στο τρένο – και από τις δύο μεριές – συμφωνούν ότι το συμφωνητικό υπογράφηκε ταυτόχρονα, πώς γίνεται οι παρατηρητές που έβλεπαν την τελετή απέξω να νομίζουν κάτι διαφορετικό;

Λας εξετάσουμε πιο προσεκτικά την άποψη ενός παρατηρητή που βρίσκεται στην αποβάθρα. Αρχικά ο λαμπτήρας στο τρένο δεν φωτίζει και κατόπιν, κάποια δεδομένη στιγμή, ανάβει στέλνοντας ακτίνες φωτός που τρέχουν και προς τους δύο προέδρους. Από τη σκοπιά ενός ατόμου στην αποβάθρα, ο πρόεδρος της Εμπροσθολάνδης κατευθύνεται προς το φως, ενώ ο πρόεδρος της Οπισθολάνδης απομακρύνεται. Αυτό σημαίνει για κείνον ότι το φως δεν χρειάζεται να διανύσει τόσο μεγάλη απόσταση για να φτάσει στον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης, γιατί και εκείνος κινείται προς το

φως, όσο χρειάζεται για να φτάσει στον πρόεδρο της Οπισθολάνδης, που απομακρύνεται από αυτό. Αυτή η διαπίστωση δεν έχει να κάνει με την ταχύτητα του φωτός καθώς κινείται προς τους δύο πρόεδρους – έχουμε ήδη σημειώσει ότι, ανεξάρτητα από την κινητική κατάσταση της πηγής ή του παρατηρητή, η ταχύτητα του φωτός μένει πάντοτε η ίδια. Αντίθετα, περιγράφουμε πόσο μακριά, από τη σκοπιά των παρατηρητών της πλατφόρμας, πρέπει να ταξιδέψει η αρχική αναλαμπή του φωτός για να φτάσει στον κάθε πρόεδρο. Επειδή αυτή η απόσταση είναι μικρότερη για τον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης απ' ό,τι για τον πρόεδρο της Οπισθολάνδης και καθώς η ταχύτητα του φωτός προς τον καθένα είναι η ίδια, το φως θα φτάσει πρώτα στον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης. Γι' αυτό οι κάτοικοι της Εμπροσθολάνδης ισχυρίζονται ότι εξαπατήθηκαν.

Όταν το CNN μεταδίδει τις αναφορές των αυτοπτών μαρτύρων, ο Γενικός Γραμματέας, οι δύο πρόεδροι και όλοι οι σύμβουλοί τους δεν μπορούν να πιστέψουν στ' αυτιά τους. Όλοι συμφωνούν ότι ο λαμπτήρας τοποθετήθηκε σταθερά, ακριβώς στη μέση μεταξύ των δύο προέδρων και κατά συνέπεια, για να μη μακρηγορούμε, το φως που εξέπεμψε διήνυσε την ίδια απόσταση για να φτάσει στον καθένα τους. Καθώς η ταχύτητα του φωτός προς τα αριστερά και δεξιά είναι η ίδια, πιστεύουν, και όντως παρατηρούν, ότι σίγουρα το φως έφτασε ταυτόχρονα και στους δύο προέδρους.

Ποιος έχει δίκιο: αυτοί πάνω στο τρένο ή αυτοί απέξω; Οι παρατηρήσεις της κάθε ομάδας, καθώς και οι εξηγήσεις που τις συνοδεύουν, είναι άμεμπτες. Η απάντηση είναι ότι και οι δύο έχουν δίκιο. Σαν τους δύο διαστημανθρώπους μας, τον Τζορτζ και την Γκρέισι, η κάθε άποψη έχει ίσο μερίδιο στην αλήθεια. Η μόνη λεπτή διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εδώ οι δύο αλήθειες δείχνουν αντιφατικές. Διακυβεύεται ένα σημαντικό πολιτικό ζήτημα: υπέγραψαν ταυτόχρονα οι δύο πρόεδροι; Οι παραπάνω παρατηρήσεις και συλλογισμοί μάς οδηγούν αναπόδραστα στο συμπέρασμα ότι σύμφωνα με όσους ήταν πάνω στο τρένο υπέγραψαν ταυτόχρονα, ενώ σύμφωνα με όσους ήταν στην πλατφόρμα όχι.

Με άλλα λόγια, πράγματα που συμβαίνουν ταυτόχρονα σύμφωνα με κάποιους παρατηρητές δεν θα συμβαίνουν ταυτόχρονα σύμφωνα με κάποιους άλλους, αν οι δύο ομάδες βρίσκονται σε σχετική κίνηση.

Αυτό το συμπέρασμα ξαφνιάζει. Αποτελεί μία από τις πιο ουσιαστικές ανακαλύψεις όλων των εποχών σχετικά με τη φύση της πραγματικότητας. Ωστόσο, αν πολλά χρόνια αφότου θα έχετε τελειώσει με αυτό το βιβλίο, δεν θυμάστε τίποτε άλλο από το παρόν κεφάλαιο πέρα από την άτυχη προσπάθεια ειρήνευσης, θα έχετε συγκρατήσει την ουσία της ανακάλυψης του Einstein. Χωρίς δυσνόητα μαθηματικά ή πολύπλοκες αλυσίδες λογικών συλλογισμών, αυτό το τελείως απρόσμενο χαρακτηριστικό του χρόνου απορρέει άμεσα από τη σταθερή ταχύτητα του φωτός, όπως δείχνει το σενάριο μας. Προσέξτε ότι, αν η ταχύτητα του φωτός δεν ήταν σταθερή, αλλά συμπεριφερόταν όπως εμείς έχουμε την εντύπωση ότι συμπεριφέρεται, κρίνοντας με βάση τις αργοκίνητες μπάλες του μπέιζμπολ και τις χιονοστιβάδες, τότε οι παρατηρητές στην αποβάθρα θα συμφωνούσαν με αυτούς μέσα στο τρένο. Ένας παρατηρητής έξω από το τρένο θα εξακολουθούσε να ισχυρίζεται ότι τα φωτόνια πρέπει να διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση για να φτάσουν στον πρόεδρο της Οπισθολάνδης απ' ό,τι στον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης. Ωστόσο, έχουμε συνήθως την αίσθηση ότι το φως που προσεγγίζει τον πρόεδρο της Οπισθολάνδης κινείται ταχύτερα, έχοντας δεχτεί «ώθηση» από το τρένο που κινείται προς τα εμπρός. Παρομοίως, οι παρατηρητές στην πλατφόρμα βλέπουν ότι το φως που προσεγγίζει τον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης κινείται πιο αργά, καθώς θα το «τραβά» προς τα πίσω η κίνηση του τρένου. Λφού λάβουν υπόψη τους αυτές τις (εσφαλμένες) εντυπώσεις, οι παρατηρητές στην πλατφόρμα θα δουν ότι οι φωτεινές ακτίνες φτάνουν στους δύο προέδρους ταυτόχρονα. Εντούτοις, στον πραγματικό κόσμο το φως ούτε επιταχύνεται ούτε επιβραδύνεται, δεν μπορούμε να το ωθήσουμε προς τα εμπρός για να πιάσει μεγαλύτερη ταχύτητα ή να το τραβήξουμε προς τα πίσω για να κόψει ταχύτητα. Συνεπώς οι παρατηρητές

στην πλατφόρμα θα ισχυρίζονται δικαιολογημένα ότι το φως έφτασε πρώτα στον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης.

Η σταθερή ταχύτητα του φωτός απαιτεί να ξεγράψουμε την πανάρχαιη αντίληψή μας ότι το ταυτόχρονο είναι μια καθολική έννοια που βρίσκει σύμφωνους τους πάντες, ανεξαρτήτως της κινητικής τους κατάστασης. Το παγκόσμιο ρολόι, που παλιότερα θεωρούσαμε ότι μετρά με απάθεια τα δευτερόλεπτα με τον ίδιο τρόπο εδώ στη Γη όσο και στον Άρη, στον Δία, στο γαλαξία της Ανδρομέδας και σε κάθε γανιά και χαραμάδα του κόσμου, δεν υπάρχει. Αντιθέτως, παρατηρητές που βρίσκονται σε σχετική κίνηση δεν θα συμφωνούν σχετικά με ποια γεγονότα συμβαίνουν την ίδια στιγμή. Για άλλη μια φορά, αυτή η ιδιότητα –που συμπεραίνουμε καλή τη πίστη ότι χαρακτηρίζει τον κόσμο που ζούμε– φαίνεται τόσο ανοίκεια, γιατί έχει εξαιρετικά ασήμαντες συνέπειες, όταν οι ταχύτητες οι οποίες εμπλέκονται είναι αυτές που συνήθως συναντάμε στην καθημερινή μας εμπειρία. Αν το τραπέζι των διαπραγματεύσεων είχε 30 μέτρα μάκρος και το τρένο έτρεχε με 20 χιλιόμετρα την ώρα, οι παρατηρητές στην πλατφόρμα θα «έβλεπαν» το φως να φτάνει στον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης περίπου ένα εκατομμύριο στό του δισεκατομμυριοστού του δευτερολέπτου πριν φτάσει στον πρόεδρο της Οπισθολάνδης. Μολονότι αυτό δείχνει ότι όντως υπάρχει διαφορά, είναι τόσο μικρή που δεν μπορεί να ανιχνευθεί άμεσα από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Αν το τρένο έτρεχε αρκετά πιο γρήγορα, ας πούμε με 970 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα, όποιος βρισκόταν στην πλατφόρμα θα έβλεπε ότι το φως θα έκανε περίπου 20 φορές περισσότερο χρόνο να φτάσει στον πρόεδρο της Οπισθολάνδης απ' ό,τι στον πρόεδρο της Εμπροσθολάνδης. Στις μεγάλες ταχύτητες, οι εντυπωσιακές συνέπειες της ειδικής σχετικότητας γίνονται όλο και πιο έκδηλες.

Η επίδραση στο χρόνο: μέρος II

Είναι δύσκολο να δοθεί ένας αφηρημένος ορισμός του χρόνου – τέτοιες προσπάθειες συνήθως καταλήγουν στη χρησιμοποίηση της

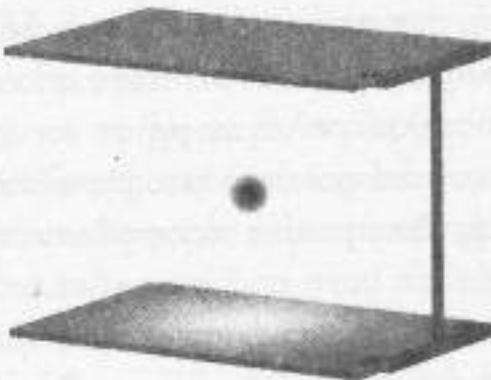
ίδιας της λέξης χρόνος ή καταφεύγουν σε πολύπλοκες γλωσσικές στρεβλώσεις, απλώς και μόνο για να αποφύγουν αυτή τη λέξη. Αντί να πάρουμε ως εμείς τον ίδιο δρόμο, ας υιοθετήσουμε μια πραγματιστική στάση και ας ορίσουμε ως χρόνο αυτό το οποίο μετριέται από τα ρολόγια. Φυσικά, έτσι μεταθέτουμε το βάρος του ορισμού στη λέξη ρολόι: εδώ μπορούμε να θεωρήσουμε κάπως αόριστα ότι ρολόι είναι η συσκευή εκείνη που διαγράφει τέλειους κύκλους στη μονάδα του χρόνου. Θα μετράμε το χρόνο υπολογίζοντας τον αριθμό των κύκλων που πραγματοποιεί το ρολόι μας. Ένα συνηθισμένο ρολόι χειρός ανταποχρίνεται σε αυτό τον ορισμό: έχει δείκτες οι οποίοι κινούνται εκτελώντας ομαλές κυκλικές κινήσεις και όντως μετράμε το χρόνο που πέρασε υπολογίζοντας πόσους κύκλους (ή τι μέρος του κύκλου) διήνυσαν οι δείκτες μεταξύ δύο επιλεγμένων γεγονότων.

Φυσικά, στο νόημα της φράσης «απόλυτα ομαλές κυκλικές κινήσεις» εμπλέκεται εμμέσως και η έννοια του χρόνου, καθώς το «ομαλή» προϋποθέτει ότι κάθε κύκλος απαιτεί τον ίδιο χρόνο. Από πρακτική άποψη, για να διευθετήσουμε αυτό το ζήτημα, κατασκευάζουμε ρολόγια χρησιμοποιώντας απλές εφαρμογές της φυσικής, που έχουν να κάνουν με επαναλαμβανόμενες κυκλικές διαδικασίες, για τις οποίες έχουμε βάσιμους λόγους να πιστεύουμε ότι δεν μεταβάλλονται ούτε στο ελάχιστο από κύκλο σε κύκλο. Τα παλιά ρολόγια με το εκκρεμές που πηγαίνονται και τα ατομικά ρολόγια που βασίζονται σε επαναλαμβανόμενες ατομικές διεργασίες προσφέρονται ως απλά παραδείγματα.

Στόχος μας είναι να κατανοήσουμε πώς η κίνηση επηρεάζει την πάροδο του χρόνου, και καθώς έχουμε δώσει ένα λειτουργικό ορισμό του χρόνου με βάση τα ρολόγια, μπορούμε να επαναδιατυπώσουμε το ερώτημά μας: πώς επηρεάζει η κίνηση τους «χτύπους» των ρολογιών; Είναι ζωτικής σημασίας να υπογραμμίσουμε εξαρχής ότι η συζήτησή μας δεν αφορά τον τρόπο με τον οποίο τα μηχανικά μέρη ενός συγχεκριμένου ρολογιού συμβαίνει να ανταποκρίνονται στο ταρακούνημα ή στο τράνταγμα που μπο-

ρεί να προκύψει από μια ανώμαλη κίνηση. Μάλιστα, θα εξετάσουμε μόνο το πιο απλό και ήρεμο είδος κίνησης – την ομαλή κίνηση – και κατά συνέπεια δεν θα υπάρχει ούτε ταραχούνημα ούτε τράνταγμα. Αντίθετα, μας ενδιαφέρει το γενικότερο ερώτημα πώς η κίνηση επηρεάζει την πάροδο του χρόνου και συνεπώς πώς επηρεάζει θεμελιωδώς το χτύπημα όλων ανεξαιρέτως των ρολογιών, ανεξάρτητα από τον συγκεκριμένο σχεδιασμό ή την κατασκευή τους.

Για το σκοπό αυτό θα εισαγάγουμε το απλούστερο δυνατό (αλλά καθόλου πρακτικό) ρολόι που υπάρχει. Είναι γνωστό ως «ρολόι φωτός» και αποτελείται από δύο μικρά κάτοπτρα, που εφαρμόζονται σε ένα στήριγμα το ένα αντικριστά στο άλλο, και ένα φωτόνιο που αναπηδά μπρος-πίσω ανάμεσά τους (βλέπε Σχήμα 2.1). Αν τα κάτοπτρα απέχουν μεταξύ τους περίπου δεκαπέντε πόντους, το φωτόνιο θα κάνει περίπου ένα δισεκατομμυριοστό του δευτερολέπτου για μία πλήρη διαδρομή πάνω-κάτω. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ρολόι φωτός «χτυπά» κάθε φορά που το φωτόνιο συμπληρώνει μια πλήρη διαδρομή – ένα δισεκατομμύριο χτυπήματα σημαίνει ότι πέρασε ένα δευτερόλεπτο.

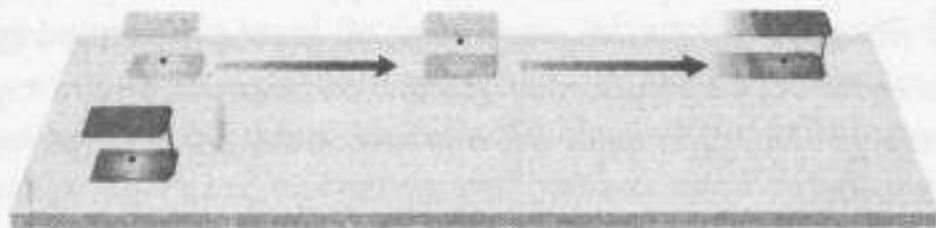


Σχήμα 2.1 Ένα ρολόι φωτός αποτελείται από δύο παράλληλα κάτοπτρα και ένα φωτόνιο που αναπηδά ανάμεσά τους. Το ρολόι «χτυπά» κάθε φορά που το φωτόνιο συμπληρώνει μια πλήρη διαδρομή.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ρολόι φωτός σαν χρονόμετρο, για να μετρήσουμε το χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα σε

δύο γεγονότα: απλώς υπολογίζουμε πόσες φορές χτυπά σε μια συγκεκριμένη περίοδο και πολλαπλασιάζουμε με το χρόνο που αντιστοιχεί σε ένα χτύπημα. Για παράδειγμα, αν χρονομετράμε μία ιπποδρομία και υπολογίζουμε ότι μεταξύ της εκκίνησης και του τερματισμού οι πλήρεις διαδρομές που έκανε το φωτόνιο είναι 55 δισεκατομμύρια, τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάρκεια της ιπποδρομίας ήταν 55 δευτερόλεπτα.

Ο λόγος που στη συζήτησή μας χρησιμοποιούμε το ρολόι φωτός είναι ότι η μηχανική του απλότητα εξαλείφει τις άσχετες λεπτομέρειες, κι έτσι μας παρέχει τη σαφέστερη δυνατή εικόνα για τον τρόπο με τον οποίο η κίνηση επηρεάζει την πάροδο του χρόνου. Για να το καταλάβετε, φανταστείτε ότι παραχολουθούμε νωχελικά το πέρασμα του χρόνου, χαζεύοντας ένα ρολόι φωτός που χτυπά ακουμπισμένο στο διπλανό τραπέζι. Τότε, εντελώς ξαφνικά, ένα δεύτερο ρολόι φωτός γλιστρά πάνω στο τραπέζι, κινούμενο με σταθερή ταχύτητα (βλέπε Σχήμα 2.2). Το ερώτημά μας είναι εάν το κινούμενο ρολόι φωτός θα χτυπά στον ίδιο ρυθμό με το ακίνητο.



Σχήμα 2.2 Μπροστά ένα στατικό ρολόι φωτός, ενώ ένα δεύτερο ρολόι φωτός γλιστρά πίσω του με σταθερή ταχύτητα.

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό, ας εξετάσουμε από τη δική μας σκοπιά τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το φωτόνιο στο κινούμενο ρολόι, προκειμένου να χτυπήσει μία φορά. Το φωτόνιο ξεκινά από τη βάση του κινούμενου ρολογιού, όπως στο Σχήμα 2.2, και αρχικά διανύει την απόσταση προς το πάνω κάτοπτρο. Καθώς, από τη δική μας σκοπιά, το ρολόι κινείται, το φωτό-

νιο θα πρέπει να διανύσει την απόσταση υπό γωνία, όπως δείχνει το Σχήμα 2.3. Αν το φωτόνιο δεν ακολουθούσε αυτή τη διαδρομή, δεν θα έφτανε το πάνω κάτοπτρο και θα χανόταν στο χώρο. Καθώς το κινούμενο ρολόι έχει κάθε δικαίωμα να ισχυριστεί ότι είναι ακίνητο και ότι κινούνται όλα τα άλλα, γνωρίζουμε ότι το φωτόνιο όντως χτυπά στο πάνω κάτοπτρο, και άρα η διαδρομή που σχεδιάστηκε είναι η ορθή. Το φωτόνιο αναπτηδά στο πάνω κάτοπτρο και διανύει ξανά μια διαγώνια διαδρομή για να φτάσει στο κάτω κάτοπτρο, οπότε το κινούμενο ρολόι δίνει ένα χτύπο. Το απλό αλλά ουσιαστικό στοιχείο είναι ότι η διπλή διαγώνια διαδρομή που βλέπουμε να διανύει το φωτόνιο είναι μακρύτερη από την ευθεία πάνω-κάτω διαδρομή που ακολουθεί το φωτόνιο στο ακίνητο ρολόι. Σύμφωνα με τη δική μας οπτική, το φωτόνιο στο κινούμενο ρολόι όχι μόνο διανύει την απόσταση πάνω-κάτω, αλλά κινείται και προς τα δεξιά. Επιπλέον, η σταθερή ταχύτητα του φωτός μάς λέει ότι το φωτόνιο στο κινούμενο ρολόι ταξιδεύει με την ίδια ακριβώς ταχύτητα που έχει και το φωτόνιο στο ακίνητο ρολόι. Άλλα αφού για να δώσει ένα χτύπο πρέπει να ταξιδέψει μακρύτερα, το κινούμενο ρολόι θα χτυπά λιγότερο συχνά. Αυτό το απλό επιχείρημα αποδεικνύει ότι το κινούμενο, από τη δική μας σκοπιά, ρολόι φωτός χτυπά πιο αργά απ' ό,τι το στατικό ρολόι φωτός. Και αφού έχουμε συμφωνήσει ότι ο αριθμός των χτύπων αντανακλά άμεσα την πάροδο του χρόνου, βλέπουμε ότι στο κινούμενο ρολόι ο χρόνος έχει επιβραδυθεί.



Σχήμα 2.3 Σύμφωνα με τη δική μας οπτική, το φωτόνιο στο κινούμενο ρολόι ακολουθεί μια διαγώνια διαδρομή.

Μπορεί να αναρωτιέστε μήπως αυτό απλώς αντανακλά κάποια ειδική ιδιότητα που έχουν τα ρολόγια φωτός, η οποία όμως δεν

εμφανίζεται στο ρολόι του παππού ή στο ακριβό σας Ρόλεξ. Ο χρόνος, όπως μετριέται με αυτά τα πιο οικεία ρολόγια, θα επιβραδύνοταν; Η απάντηση είναι ένα ηχηρό ναι, όπως μπορείτε να δείτε εφαρμόζοντας την αρχή της σχετικότητας. Ας προσαρμόσουμε ένα Ρόλεξ στην κορυφή του κάθε ρολογιού φωτός και ας ξανακάνουμε το προηγούμενο πείραμα. Όπως έχουμε ήδη συζητήσει, το στατικό ρολόι φωτός και το αντίστοιχο Ρόλεξ μετρούν την ίδια ακριβώς χρονική διάρκεια, με ένα δισεκατομμύριο χτύπους στο ρολόι φωτός να αντιστοιχούν σε κάθε δευτερόλεπτο που περνά για το Ρόλεξ. Τι συμβαίνει όμως με το κινούμενο ρολόι φωτός και το αντίστοιχό του Ρόλεξ; Επιβραδύνεται ο ρυθμός των χτύπων στο κινούμενο Ρόλεξ, ώστε να μείνει συγχρονισμένο με το ρολόι φωτός στο οποίο είναι προσαρμοσμένο; Για να γίνει πιο κατανοητό το παράδειγμα, φανταστείτε ότι ο συνδυασμός ρολόι φωτός-Ρόλεξ κινείται επειδή είναι βιδωμένος στο πάτωμα ενός βαγονιού χωρίς παράθυρα σε ένα τρένο που κυλά σε απόλυτα ευθύγραμμες και ομαλές ράγες με σταθερή ταχύτητα. Εξαιτίας της αρχής της σχετικότητας, ένας παρατηρητής που βρίσκεται πάνω σε αυτό το τρένο δεν μπορεί να ανιχνεύσει οποιαδήποτε επίδραση της κίνησης του τρένου. Λν όμως το ρολόι φωτός και το Ρόλεξ έχαναν το συγχρονισμό τους, αυτή θα ήταν όντως αξιοπρόσεκτη επίδραση. Κι έτσι, το κινούμενο ρολόι φωτός και το Ρόλεξ που είναι προσαρμοσμένο πάνω του, πρέπει να εξακολουθούν να μετρούν ίση χρονική διάρκεια· το Ρόλεξ πρέπει να επιβραδύνει κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και το ρολόι φωτός. Ανεξάρτητα από μάρκα, τύπο ή κατασκευή, τα ρολόγια που κινούνται το ένα ως προς το άλλο καταγράφουν την πάροδο του χρόνου με διαφορετικούς ρυθμούς.

Η συζήτηση για τα ρολόγια φωτός καθιστά επίσης σαφές ότι η ακριβής χρονική διαφορά ανάμεσα σε στατικά και κινούμενα ρολόγια εξαρτάται από την επιπλέον απόσταση που πρέπει να διανύσει το φωτόνιο στο κινούμενο ρολόι, προκειμένου να ολοκληρώσει τη διαδρομή του. Αυτό πάλι εξαρτάται από το πόσο γρήγορα γλιστρά το κινούμενο ρολόι – από τη σκοπιά ενός ακίνητου παρατηρητή, όσο πιο γρήγορα κινείται το ρολόι, τόσο μεγαλύτε-

ρη απόσταση πρέπει να διανύσει το φωτόνιο. Συμπεραίνουμε ότι, σε σύγκριση με ένα στατικό ρολόι, ο ρυθμός των χτύπων του κινούμενου ρολογιού γίνεται όλο και πιο αργός όσο το ρολόι κινείται όλο και πιο γρήγορα.³

Για να αποκτήσουμε αίσθηση της κλίμακας, σημειώστε ότι το φωτόνιο διανύει μια πλήρη διαδρομή σε ένα περίπου δισεκατομμυριοστό του δευτερολέπτου. Για να μπορεί συνεπώς το ρολόι να διασχίσει μια αξιόλογη απόσταση στο χρόνο που αντιστοιχεί σε ένα χτύπο, πρέπει να ταξιδεύει με πάρα πολύ μεγάλη ταχύτητα – δηλαδή με ένα σημαντικό ποσοστό της ταχύτητας του φωτός. Αν ταξιδεύει με πιο συνηθισμένες ταχύτητες, όπως, ας πούμε, με 18 χιλιόμετρα την ώρα, η απόσταση που μπορεί να διανύσει προτού ολοκληρωθεί ο ένας χτύπος είναι απειροελάχιστη – περίπου 5 δισεκατομμυριοστά του μέτρου. Η επιπλέον απόσταση που πρέπει να διανύσει το κινούμενο φωτόνιο είναι ελάχιστη, και έχει εξίσου ελάχιστη επίδραση στο ρυθμό με τον οποίο χτυπά το κινούμενο ρολόι. Και πάλι, εξαιτίας της αρχής της σχετικότητας, αυτό αληθεύει για όλα τα ρολόγια – άρα και για τον ίδιο το χρόνο. Γι' αυτό και όντα σαν κι εμάς, που ταξιδεύουν το ένα ως προς το άλλο με τόσο χαμηλές ταχύτητες, γενικά δεν αντιλαμβάνονται τις διαταραχές στην πάροδο του χρόνου. Οι συνέπειες, μολονότι όντως υπαρκτές, είναι απίστευτα μικρές. Αν, από την άλλη μεριά, μπορούσαμε να πιαστούμε από το κινούμενο ρολόι και να ταξιδέψουμε μαζί του με, ας πούμε, τα τρία τέταρτα της ταχύτητας του φωτός, οι εξισώσεις της ειδικής σχετικότητας θα έδειχναν ότι ακίνητοι παρατηρητές θα έβλεπαν το κινούμενο ρολόι μας να χτυπά μόνο με τα δύο τρίτα περίπου του ρυθμού του δικού τους. Μια σημαντική, στ' αλήθεια, συνέπεια.

Το αθάνατο νερό

Έχουμε δει πως η σταθερή ταχύτητα με την οποία κινείται το φως συνεπάγεται ότι ένα κινούμενο ρολόι φωτός χτυπά πιο αργά από

ένα ακίνητο. Και εξαιτίας της αρχής της σχετικότητας, αυτό πρέπει να αληθεύει όχι μόνο για τα ρολόγια φωτός αλλά για κάθε ρολόι – άρα και για τον ίδιο το χρόνο. Ο χρόνος κυλά πιο αργά για κάποιον που βρίσκεται σε κίνηση απ' ό,τι για κάποιον που είναι ακίνητος. Αν η σχετικά απλή συλλογιστική η οποία μας οδήγησε σε αυτό το συμπέρασμα είναι ορθή, τότε, για παράδειγμα, δεν θα έπρεπε κάποιος που βρίσκεται σε κίνηση να ζει περισσότερο από κάποιον που μένει ακίνητος; Άλλωστε, αν ο χρόνος περνά πιο αργά για κάποιον που βρίσκεται σε κίνηση απ' ό,τι για κάποιον που είναι ακίνητος, τότε αυτή η διαφορά θα έπρεπε να ισχύει όχι μόνο για το χρόνο που μετριέται με ρολόγια, αλλά και για το χρόνο που μετριέται με τους χτύπους της καρδιάς και τη φθορά του σώματος. Αυτό όντως ισχύει, όπως έχει επαληθευτεί άμεσα – όχι για το προσδόκιμο της ανθρώπινης ζωής αλλά για ορισμένα σωματίδια από το μικρόκοσμο: τα μυόνια. Υπάρχει ωστόσο μια κρυμμένη παγίδα, που μας εμποδίζει να ισχυριστούμε ότι μόλις ανακαλύψαμε την πηγή της νιότης.

Όταν βρίσκονται ακίνητα στο εργαστήριο, τα μυόνια διασπώνται με μια διαδικασία αρκετά παραπλήσια με τη ραδιενεργό διάσπαση, περίπου κάθε δύο εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου. Η διάσπαση αυτή αποτελεί πειραματικό γεγονός το οποίο τεκμηριώνεται από τεράστιο αριθμό ενδείξεων. Είναι λες και το μυόνιο ζει τη ζωή του με ένα πιστόλι στον κρόταφο· όταν φτάσει στην ηλικία των δύο εκατομμυριοστών του δευτερολέπτου, πιέζει τη σκανδάλη και εκρήγνυται σε ηλεκτρόνια και νετρίνα. Αν όμως αυτά τα μυόνια δεν κάθονται ακίνητα στο εργαστήριο, αλλά ταξιδεύουν μέσα σε μία συσκευή που είναι γνωστή ως επιταχυντής σωματιδίων, η οποία τα επιταχύνει σε ταχύτητες ελάχιστα μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός, ο μέσος χρόνος ζωής τους, όπως μέτριέται από τους επιστήμονες στο εργαστήριο, αυξάνεται εντυπωσιακά. Αυτό είναι ένα πραγματικό γεγονός. Στα 1.075 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα (περίπου 99,5% της ταχύτητας του φωτός), ο χρόνος ζωής του μυονίου δείχνει να αυξάνεται περίπου κατά δέκα φορές. Η εξήγηση, σύμφωνα με την ειδική θεωρία της

σχετικότητας, είναι ότι τα «ρολόγια» που φορούν τα μυόνια χτυπούν πολύ πιο αργά από τα ρολόγια στο εργαστήριο, κι έτσι ενώ σύμφωνα με τα ρολόγια του εργαστηρίου έχει περάσει αρχετή ώρα και τα μυόνια θα έπρεπε να έχουν ήδη τραβήξει τη σκανδάλη για να εκραγούν, σύμφωνα με τα ρολόγια πάνω στα ταχέως κινούμενα μυόνια, η μοιραία στιγμή αργεί ακόμα πολύ. Αυτό αποτελεί μία εξαιρετικά άμεση και δραματική απόδειξη για τις συνέπειες της κίνησης στην πάροδο του χρόνου. Αν οι άνθρωποι μπορούσαν να τρέξουν τόσο γρήγορα όσο αυτά τα μυόνια, το προσδόκιμο της ζωής τους θα πολλαπλασιαζόταν με τον ίδιο παράγοντα. Αντί να ζουν εβδομήντα χρόνια, οι άνθρωποι θα ζούσαν 700.⁴

Και τώρα η παγίδα. Μολονότι οι παρατηρητές στο εργαστήριο βλέπουν τα ταχέως κινούμενα μυόνια να ζουν πολύ περισσότερο από τα ακίνητα αδέρφια τους, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος κυλά πιο αργά για τα μυόνια που κινούνται. Λυτή η επιβράδυνση του χρόνου δεν ισχύει μόνο για τα ρολόγια που φορούν τα μυόνια, αλλά για όλες τις δραστηριότητες τις οποίες θα μπορούσαν να επιτελέσουν. Για παράδειγμα, αν ένα ακίνητο μυόνιο μπορεί να διαβάσει 100 βιβλία στη σύντομη ζωή του, το ταχέως κινούμενο ξαδελφάκι του θα μπορεί επίσης να διαβάσει τα ίδια 100 βιβλία, γιατί, παρά το γεγονός ότι φαίνεται να ζει περισσότερο από το στατικό μυόνιο, ο ρυθμός διαβάσματος -καθώς και οτιδήποτε άλλο στη ζωή του- έχει επίσης επιβράδυνθεί. Από τη σκοπιά του εργαστηρίου, είναι λες και το κινούμενο μυόνιο ζει τη ζωή του σε αργή κίνηση: σύμφωνα με αυτή την προσπτική το κινούμενο μυόνιο θα ζήσει περισσότερο από ένα ακίνητο, αλλά η «ποσότητα ζωής» που θα αισθανθεί το μυόνιο είναι ακριβώς η ίδια. Το ίδιο συμπέρασμα ισχύει φυσικά και για τους ταχέως κινούμενους ανθρώπους που έχουν προσδόκιμο ζωής πολλών αιώνων. Άπό τη δική τους σκοπιά, η ζωή τους δεν έχει τίποτε το ασυνήθιστο. Από τη δική μας σκοπιά, ζουν τη ζωή τους σε υπερβολικά αργή κίνηση και κατά συνέπεια ένας από τους κανονικούς κύκλους της δικής τους ζωής καταλαμβάνει τεράστια ποσότητα του δικού μας χρόνου.

Ποιος κινείται τέλος πάντων;

Η σχετικότητα της κίνησης αποτελεί τόσο το κλειδί για την κατανόηση της θεωρίας του Einstein όσο και μια δυνάμει πηγή σύγχυσης. Παρατηρήσατε ενδεχομένως ότι αν αλλάξουμε οπτική, οι ρόλοι των «κινούμενων» μυονίων, των οποίων τα ρολόγια χτυπούν αργά, και των ακίνητων αντιστοίχων τους εναλλάσσονται. Όπως ακριβώς ο Τζορτζ και η Γκρέισι δήλωναν εξίσου δικαιωματικά ότι οι ίδιοι ήταν ακίνητοι και ότι ο άλλος κινούνταν, τα μυόνια που περιγράψαμε ως κινούμενα έχουν κάθε δικαίωμα να υποστηρίζουν ότι, από τη δική τους σκοπιά, τα ίδια δεν κινούνται, ενώ τα «ακίνητα» μυόνια κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα επιχειρήματα που παρουσιάστηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου καλά και από αυτή τη σκοπιά, οδηγώντας στο φαινομενικά αντίθετο συμπέρασμα ότι τα ρολόγια που φορούν τα μυόνια, τα οποία εμείς βαφτίσαμε ακίνητα, τρέχουν αργά σε σύγκριση με αυτά που φορούν τα μυόνια τα οποία περιγράψαμε ως κινούμενα.

Έχουμε ήδη συναντήσει μια κατάσταση, την τελετή υπογραφής «διά του λαμπτήρος», κατά την οποία η διαφορετική θέση του παρατηρητή οδηγεί σε συμπεράσματα που φαίνονται εντελώς αντιφατικά. Στην περίπτωση εκείνη είχαμε αναγκαστεί, ακολουθώντας τη στοιχειώδη λογική της ειδικής σχετικότητας, να εγκαταλείψουμε τη βαθιά ριζωμένη αντίληψη ότι όλοι, ανεξάρτητα από την κινητική τους κατάσταση, συμφωνούν σχετικά με ποια γεγονότα συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η παρούσα ανακολουθία, ωστόσο, φαίνεται χειρότερη. Πώς μπορούν και οι δύο παρατηρητές να ισχυρίζονται ότι το ρόλοι του άλλου τρέχει πιο αργά; Ακόμη πιο δραματικό όμως είναι το γεγονός ότι οι διαφορετικές, πλην όμως εξίσου έγκυρες, απόψεις των μυονίων δείχνουν να μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως κάθε ομάδα θα ισχυριστεί ότι πρώτα θα πεθάνουν τα μυόνια της άλλης ομάδας. Μαθαίνουμε ότι ο κόσμος μας ενδέχεται να εμφανίσει ορισμένα απρόσμενα και πε-

ρίεργα χαρακτηριστικά, αλλά ελπίζουμε ότι ποτέ δεν θα περάσει στη σφαίρα του παραλόγου. Μα τι συμβαίνει τέλος πάντων;

Όπως και όλα τα φαινομενικά παράδοξα που προχύπτουν από την ειδική θεωρία της σχετικότητας, αυτά τα λογικά διλήμματα, όταν εξεταστούν προσεκτικά, πάνουν να υφίστανται, οδηγώντας σε βαθύτερη κατανόηση των λειτουργιών του σύμπαντος. Για να αποφύγουμε να αποδώσουμε ακόμη πιο έντονες ανθρωπομορφικές ιδιότητες στα μυόνια, ας στραφούμε ξανά στον Τζορτζ και την Γκρέισι, οι οποίοι τώρα, πέρα από τα χρωματιστά φωτάκια τους που αναβοσβήνουν, έχουν και φανταχτερά ψηφιακά ρολόγια στις διαστημικές στολές τους. Από τη σκοπιά του Τζορτζ, ο ίδιος είναι ακίνητος, ενώ η Γκρέισι με το πράσινο φωτάκι της που αναβοσβήνει και το τεράστιο ψηφιακό της ρολόι εμφανίζεται στο βάθος και κατόπιν των προσπερνά μέσα στο σκοτάδι του κενού χώρου. Ο Τζορτζ παρατηρεί ότι το ρολόι της Γκρέισι τρέχει αργά σε σύγκριση με το δικό του (ο ρυθμός της επιβράδυνσης εξαρτάται από το πόσο γρήγορα τον προσπερνά). Αν ήταν λίγο πιο ξύπνιος, θα παρατηρούσε ότι πέρα από την πάροδο του χρόνου στο ρολόι της, το καθετί πάνω στην Γκρέισι -ο τρόπος που τον χαιρετά καθώς περνά, ο ρυθμός με τον οποίο ανοιγοκλείνει τα βλέφαρά της και ούτω καθεξήγινεται σε αργή κίνηση. Από τη σκοπιά της Γκρέισι, οι ίδιες ακριβώς παρατηρήσεις ισχύουν και για τον Τζορτζ.

Μολονότι κάτι τέτοιο φαντάζει παράδοξο, ας προσπαθήσουμε να βρούμε ένα ακριβές πείραμα το οποίο θα αποκάλυπτε κάποιο λογικό ατόπημα. Το πιο απλό που μπορούμε να κάνουμε είναι να τα κανονίσουμε έτσι ώστε, όταν ο Τζορτζ και η Γκρέισι προσπερνούν ο ένας τον άλλο, να συγχρονίσουν τα ρολόγια τους να δείχνουν 12.00. Καθώς απομακρύνονται, ο καθένας ισχυρίζεται ότι το ρολόι του άλλου τρέχει πιο αργά. Για να αντιμετωπίσουν αμέσως αυτή τη διαφωνία, ο Τζορτζ και η Γκρέισι πρέπει να κανασυναντηθούν και να συγχρίνουν απευθείας το χρόνο που πέρασε στα ρολόγια τους. Όμως πώς μπορούν να κάνουν κάτι τέτοιο; Λοιπόν, ο Τζορτζ έχει μια προωθητική συσκευή την οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ώστε, όπως ο ίδιος πιστεύει, να προφτάσει την

Γκρέισι. Αλλά αν το κάνει, η συμμετρία ανάμεσα στους δύο παρατηρητές, η οποία αποτελεί την αιτία του φαινομενικού παραδόξου, χαλά, αφού ο Τζορτζ θα κάνει επιταχυνόμενη και όχι ελεύθερη ομαλή κίνηση. Όταν ξανασυναντηθούν κατ' αυτό τον τρόπο, θα έχει πράγματι περάσει λιγότερος χρόνος στο ρολόι του Τζορτζ, αλλά τώρα θα είναι σε θέση να πει με σιγουριά ότι βρισκόταν σε κίνηση, αφού μπόρεσε να το νιώσει. Οι απόψεις του Τζορτζ και της Γκρέισι δεν συγκρίνονται πλέον με ίσους όρους. Πυροδοτώντας την προωθητική συσκευή του, ο Τζορτζ δεν έχει πια δικαίωμα να τσχυρίζεται ότι βρίσκεται σε ακινησία.

Αν ο Τζορτζ κυνηγήσει την Γκρέισι κατ' αυτό τον τρόπο, η χρονική διαφορά που θα δείχνουν τα ρολόγια τους εξαρτάται από τη σχετική τους ταχύτητα και τις λεπτομέρειες του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιεί ο Τζορτζ την προωθητική συσκευή του. Όπως μας είναι πλέον γνωστό, αν οι ταχύτητες που εμπλέχονται είναι μικρές, η διαφορά θα είναι απειροελάχιστη. Αν όμως έχουμε να κάνουμε με ένα σημαντικό ποσοστό της ταχύτητας του φωτός, οι διαφορές μπορεί να είναι λεπτά, μέρες, χρόνια, αιώνες ή ακόμα μεγαλύτερες. Για να κάνουμε το παράδειγμα πιο συγκεκριμένο, φανταστείτε ότι η σχετική ταχύτητα του Τζορτζ και της Γκρέισι, όταν προσπερνά ο ένας τον άλλο, είναι το 99,5% της ταχύτητας του φωτός. Επιπλέον, ας πούμε ότι ο Τζορτζ περιμένει τρία χρόνια, σύμφωνα με το δικό του ρολόι, προτού ανάψει την προωθητική συσκευή του η οποία, με μια στιγματικά ώθηση, τον προωθεί προς την Γκρέισι με την ίδια ταχύτητα που είχε όταν απομακρύνονταν, δηλαδή το 99,5% της ταχύτητας του φωτός. Όταν φτάσει την Γκρέισι, θα έχουν περάσει 6 χρόνια στο ρολόι του, αφού θα του πάρει 3 χρόνια να την προφτάσει. Ωστόσο τα μαθηματικά της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας δείχνουν ότι στο δικό της ρολόι θα έχουν περάσει 60 χρόνια. Δεν πρόκειται για κάποια απάτη: η Γκρέισι θα πρέπει να ψάξει στα βάθη της μνήμης της, περίπου 60 χρόνια πριν, για να θυμηθεί πότε προσπέρασε τον Τζορτζ στο διάστημα. Για τον Τζορτζ, από την άλλη μεριά, πέρασαν μόνο 6 χρόνια. Πράγματι, κατά κάποιον τρόπο, η κίνηση του Τζορτζ τον έκα-

νε να ταξιδέψει στο χρόνο, αν και με πολύ συγκεκριμένο τρόπο: ταξίδεψε στο μέλλον της Γκρέισι.

Η επαναφορά των ρολογιών στον ίδιο χώρο, προκειμένου να τα συγκρίνουμε, μπορεί εκ πρώτης όψεως να μοιάζει με καθαρά πρακτικό πρόβλημα, να φαίνεται απλώς σαν ένα υπολογιστικό πρόβλημα ρουτίνας, όμως είναι το βασικότερο σημείο του ζητήματος. Μπορούμε να φανταστούμε ποικίλα τεχνάσματα για να παρακάμψουμε αυτό το τρωτό σημείο του παραδόξου, όμως όλα στο τέλος αποτυγχάνουν. Για παράδειγμα, αντί ο Τζορτζ και η Γκρέισι να φέρουν τα ρολόγια τους ξανά δίπλα δίπλα, γιατί να μην τα συγκρίνουν, επικοινωνώντας με κινητά τηλέφωνα; Αν μια τέτοια επικοινωνία ήταν ακαριαία, θα αντιμετωπίζαμε μια αξεπέραστη ασυνέπεια: σύμφωνα με τη συλλογιστική της Γκρέισι, το ρολό του Τζορτζ τρέχει αργά, και κατά συνέπεια εκείνος θα έπρεπε να αναφέρει ότι έχει περάσει λιγότερος χρόνος· σύμφωνα με τη συλλογιστική του Τζορτζ, το ρολό της Γκρέισι τρέχει αργά, και κατά συνέπεια εκείνη θα έπρεπε να αναφέρει ότι έχει περάσει λιγότερος χρόνος. Δεν μπορεί να έχουν και οι δύο δίκιο· αυτό θα μας οδηγούσε σε αδιέξοδο. Το σημείο-κλειδί είναι βέβαια ότι τα κινητά τηλέφωνα, όπως και όλες οι μορφές επικοινωνίας, δεν μεταδίδουν τα σήματά τους ακαριαία. Τα κινητά τηλέφωνα λειτουργούν με ραδιοκύματα, μια μορφή φωτός, άρα το σήμα που εκπέμπουν, μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται κάποιος χρόνος για να ληφθούν τα σήματα – για την ακρίβεια ακριβώς τόσος χρόνος, ώστε να συμβιβάζονται οι δύο απόψεις.

Ας το δούμε πρώτα από τη σκοπιά του Τζορτζ. Φανταστείτε ότι κάθε ώρα, όταν πάει ακριβώς, ο Τζορτζ μιλάει στο κινητό του λέγοντας: «Είναι δώδεκα η ώρα, και όλα πάνε καλά», «Είναι μία η ώρα, και όλα πάνε καλά», και ούτω καθεξής. Αφού από τη δική του σκοπιά το ρολό της Γκρέισι πάει αργά, αρχικά νομίζει ότι η Γκρέισι θα λάβει αυτά τα μηνύματα προτού το ρολό της δείξει την αντίστοιχη ώρα. Έτσι, συμπεραίνει ότι η Γκρέισι θα πρέπει να συμφωνήσει ότι το δικό της ρολό πάει αργά. Άλλα μετά το ξανασκέφτεται: «Αφού η Γκρέισι απομακρύνεται από μένα, το σή-

μα που της στέλνω με το κινητό μου πρέπει να διανύει όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις για να τη φτάσει. Ίσως αυτός ο επιπλέον χρόνος που χρειάζεται για το ταξίδι να αντισταθμίζει τη βραδύτητα του ρολογιού της». Η συνειδητοποίηση ότι υπάρχουν αντιθετικά φαινόμενα –η βραδύτητα του ρολογιού της Γκρέισι σε αντίθεση με το χρόνο που ταξιδεύει το σήμα του– τον παρακινεί να καθίσει και να υπολογίσει ποσοτικά το συνδυασμό των δύο φαινομένων. Το αποτέλεσμα το οποίο βρίσκει είναι ότι ο χρόνος που κάνει να φτάσει το σήμα αντισταθμίζει και με το παραπάνω τη βραδύτητα του ρολογιού της Γκρέισι. Καταλήγει στο εκπληκτικό συμπέρασμα ότι η Γκρέισι θα λαμβάνει τα σήματα που αναγγέλλουν το πέρασμα μιας ώρας στο δικό του ρολόι, αφότου η συγκεκριμένη ώρα θα έχει περάσει στο δικό της. Μάλιστα, καθώς ο Τζορτζ ξέρει ότι η Γκρέισι είναι τζιμάνι στη φυσική, γνωρίζει ότι θα λάβει υπόψη της πόση ώρα ταξιδεύει το σήμα, όταν βγάλει τα συμπεράσματά της για το δικό του ρολόι, βασισμένη στα μηνύματα που της στέλνει με το κινητό του τηλέφωνο. Λίγοι ακόμη ποσοτικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι ακόμη κι αν λάβει υπόψη της το χρόνο του ταξιδιού, η ανάλυση των σημάτων θα οδηγήσει την Γκρέισι στο συμπέρασμα ότι το ρολόι του Τζορτζ χτυπά πιο αργά από το δικό της.

Ακριβώς η ίδια συλλογιστική ισχύει όταν εξετάσουμε τα πράγματα από τη σκοπιά της Γκρέισι, με την ίδια να στέλνει κάθε ώρα σήματα στον Τζορτζ. Αρχικά, θεωρώντας πως το ρολόι του Τζορτζ χτυπά πιο αργά, θα οδηγηθεί στο συμπέρασμα ότι εκείνος θα λαμβάνει τα δικά της μηνύματα, προτού εκπέμψει τα δικά του. Άλλα όταν λάβει υπόψη της τις όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις που πρέπει να διανύει το σήμα της για να φτάσει στον Τζορτζ, καθώς αυτός γίνεται στα σκοτάδια, συνειδητοποιεί ότι στην πραγματικότητα ο Τζορτζ θα τα λάβει αφού εκπέμψει τα δικά του. Για άλλη μια φορά, η Γκρέισι καταλαβαίνει ότι ακόμη κι αν ο Τζορτζ λάβει υπόψη του το χρόνο του ταξιδιού, θα συμπεράνει από τα μηνύματα που του στέλνει με το κινητό της ότι το ρολόι της χτυπά πιο αργά από το δικό του.

Για όσο διάστημα δεν επιταχύνεται ούτε ο Τζορτζ ούτε η Γκρέισι, οι απόψεις τους διαθέτουν τα ίδια ακριβώς ερείσματα. Μολονότι μοιάζει παράδοξο, με αυτό τον τρόπο συνειδητοποιούν και οι δύο ότι είναι απόλυτα λογικό που ο καθένας τους νομίζει ότι το ρόλο του άλλου πάει πιο αργά.

Η επίδραση της κίνησης στο χώρο

Η προηγούμενη συζήτηση αποκαλύπτει ότι οι παρατηρητές βλέπουν τα κινούμενα ρολόγια να χτυπούν πιο αργά από το δικό τους – δηλαδή ότι ο χρόνος επηρεάζεται από την κίνηση. Αν προχωρήσουμε λίγο ακόμα, θα δούμε ότι η επίδραση της κίνησης είναι εξίσου δραματική και για το χώρο. Ας ξαναγυρίσουμε στον Σλιμ και τον Τζιμ στον αυτοκινητόδρομο. Στην έκθεση της αντιπροσωπείας, όπως ήδη επισημάναμε, ο Σλιμ είχε μετρήσει προσεκτικά το μήκος του καινούργιου του αυτοκινήτου με μια μεζούρα. Καθώς ο Σλιμ γκαζώνει στην ευθεία, ο Τζιμ δεν μπορεί να εφαρμόσει την ίδια μέθοδο για να μετρήσει το μήκος του αμαξιού, και έτσι πρέπει να χρησιμοποιήσει κάποιον έμμεσο τρόπο. Μπορεί, όπως σημειώσαμε πρωτύτερα, να εφαρμόσει την εξής μέθοδο: ο Τζιμ ξεκινά το χρονόμετρό του μόλις περάσει εμπρός του ο μπροστινός προφυλακτήρας του αυτοκινήτου και το σταματά μόλις περάσει και ο πίσω. Πολλαπλασιάζοντας το χρόνο που πέρασε με την ταχύτητα του αυτοκινήτου, ο Τζιμ μπορεί να υπολογίσει το μήκος του αυτοκινήτου.

Σύμφωνα με τις νεότερες εκτιμήσεις μας για τις λεπτές παραμέτρους του χρόνου, συνειδητοποιούμε ότι από τη σκοπιά του Σλιμ ο ίδιος είναι ακίνητος, ενώ ο Τζιμ κινείται, και έτσι ο Σλιμ βλέπει ότι το ρόλο του Τζιμ χτυπά πιο αργά. Άρα ο Σλιμ συνειδητοποιεί ότι η έμμεση μέτρηση του μήκους του αμαξιού από τον Τζιμ θα το βγάλει πιο χοντό απ' όσο το μέτρησε ο ίδιος στην αντιπροσωπεία, επειδή ο Τζιμ στους υπολογισμούς του (το μήκος ισούται με την ταχύτητα επί το χρόνο που πέρασε) μετρά το χρόνο που πέρασε με

ένα ρολόι το οποίο χτυπά αργά. Αφού χτυπά αργά, ο Τζιμ βρίσκει ότι πέρασε λιγότερος χρόνος, και το αποτέλεσμα των υπολογισμών του θα δώσει μικρότερο μήκος.

Έτσι ο Τζιμ θα παρατηρεί ότι το μήκος του αυτοκινήτου του Σλιμ, όταν αυτό βρίσκεται σε κίνηση, είναι μικρότερο από το μήκος του όταν μετριέται σε ηρεμία. Αυτό αποτελεί παράδειγμα ενός γενικότερου φαινομένου, ότι δηλαδή οι παρατηρητές θεωρούν πως ένα κινούμενο αντικείμενο συρρικνώνεται κατά τη διεύθυνση της κίνησής του. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας δείχνουν ότι αν ένα αντικείμενο κινείται περίπου με το 98% της ταχύτητας του φωτός, τότε ένας ακίνητος παρατηρητής θα το βλέπει 80% κοντύτερο απ' ό,τι αν ήταν ακίνητο. Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.⁵



Σχήμα 2.4 Ένα κινούμενο αντικείμενο συρρικνώνεται κατά τη διεύθυνση της κίνησής του.

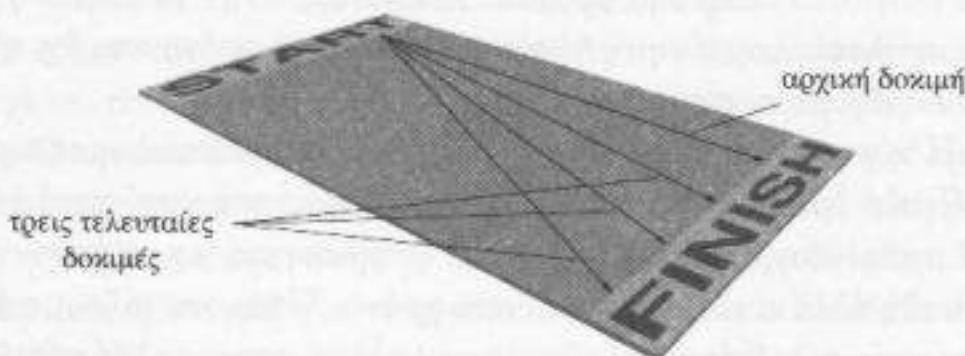
Η κίνηση στο χωροχρόνο

Η σταθερή ταχύτητα του φωτός οδήγησε στην αντικατάσταση της παραδοσιακής αντίληψης για το χώρο και το χρόνο ως σταθερών και αυθυπόστατων δομών από μια νέα σύλληψη, σύμφωνα με την οποία ο χώρος και ο χρόνος εξαρτώνται στενά από τη σχετική κίνηση μεταξύ παρατηρητή και παρατηρουμένου. Θα μπορούσαμε να κλείσουμε τη συζήτησή μας εδώ, έχοντας συνειδητοποιήσει ότι τα κινούμενα αντικείμενα ενεργούν σε αργή κίνηση και φαίνονται μικρότερα. Η θεωρία της ειδικής σχετικότητας ωστόσο μας παρέχει μια πολύ βαθύτερη και ενιαία προ-

οπτική, υπό την οποία μπορούμε να εξετάσουμε αυτά τα φαινόμενα.

Για να κατανοήσουμε την προοπτική αυτή, ας φανταστούμε ένα μάλλον δύσχρηστο αυτοκίνητο που αποκτά πολύ γρήγορα μια σταθερή ταχύτητα 200 χιλιομέτρων την ώρα και μένει κολλημένο εκεί, ούτε παραπάνω ούτε παρακάτω, μέχρι να το σβήσουμε, οπότε σταματά. Ας φανταστούμε επίσης ότι ο Σλιμ, εξαιτίας της αυξανόμενης φήμης του ως προικισμένου οδηγού, καλείται να δοκιμάσει αυτό το αυτοκίνητο σε μια μακριά, φαρδιά και ευθεία πίστα στο μέσο μιας επίπεδης έκτασης στην έρημο. Καθώς η απόσταση ανάμεσα στη γραμμή της εκκίνησης και τη γραμμή τερματισμού είναι 20 χιλιόμετρα, το αυτοκίνητο πρέπει να την καλύψει σε ένα δέκατο της ώρας, ή έξι λεπτά. Ο Τζιμ, ο οποίος διαπρέπει ως μηχανικός αυτοκινήτων, επιθεωρεί τα στοιχεία που έχει καταγράψει μετά από δεκάδες δοκιμές και ανησυχεί, όταν βλέπει ότι, παρ' όλο που οι περισσότερες δοκιμές χρονομετρήθηκαν στα έξι λεπτά, κάποιες λίγες στο τέλος κράτησαν αρκετά παραπάνω: $6\frac{1}{2}$, 7, ακόμη και $7\frac{1}{2}$ λεπτά. Αρχικά υποψιάζεται κάποιο μηχανικό πρόβλημα, καθώς αυτοί οι χρόνοι φαίνεται να υποδεικνύουν ότι το αυτοκίνητο ταξίδευε με λιγότερο από 200 χιλιόμετρα την ώρα στις τρεις τελευταίες δοκιμές. Εντούτοις, αφού εξετάσει προσεκτικά το αυτοκίνητο, πείθεται ότι είναι σε εξαιρετική κατάσταση. Ανίκανος να εξηγήσει αυτή την ανωμαλία στους χρόνους, συμβουλεύεται τον Σλιμ ρωτώντας τον για τις τελευταίες δοκιμές. Ο Σλιμ έχει μια απλή εξήγηση. Λέει στον Τζιμ ότι επειδή η πίστα εκτείνεται από την ανατολή προς τη δύση, καθώς προχωρούσε η μέρα, είχε τον ήλιο κόντρα. Στις τρεις τελευταίες δοκιμές τα πράγματα ήταν τόσο άσχημα, που οδήγησε από τη μία άκρη της πίστας έως την άλλη υπό γωνία. Κάνει ως ένα πρόχειρο σκίτσο της διαδρομής που ακολούθησε στις τρεις τελευταίες δοκιμές – μπορείτε να το δείτε στο Σχήμα 2.5. Η εξήγηση για τους τρεις μεγαλύτερους χρόνους φαίνεται πλέον ξεκάθαρα: η διαδρομή από την αφετηρία ως το τέρμα είναι μα-

χρύτερη, όταν τη διανύεις υπό γωνία, και συνεπώς με την ίδια ταχύτητα των 200 χιλιομέτρων την ώρα θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο για να καλυφθεί. Για να το θέσουμε αλλιώς, όταν κινείσαι υπό γωνία, ένα μέρος της ταχύτητας των 200 χιλιομέτρων την ώρα ξοδεύεται για να πάς από νότο προς βορρά, αφήνοντας λιγότερη ταχύτητα για το ταξίδι από ανατολή προς δύση. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστείς λίγο περισσότερο χρόνο για να διασχίσεις την πίστα.



Σχήμα 2.5 Εξαιτίας του απογευματινού εκτυφλωτικού ήλιου, ο Σλιμ οδηγούσε υπό όλο και μεγαλύτερη γωνία στις τρεις τελευταίες δοκιμές.

Όπως είπαμε, η εξήγηση του Σλιμ είναι ευκολονόητη· εντούτοις, για το εννοιολογικό άλμα που ετοιμαζόμαστε να κάνουμε, είναι σκόπιμο να την αναδιατυπώσουμε ελαφρώς. Οι κατευθύνσεις βορρά-νότου και ανατολής-δύσης είναι δύο ανεξάρτητες χωρικές διαστάσεις στις οποίες μπορεί να κινηθεί ένα αυτοκίνητο. (Μπορεί επίσης να κινηθεί κατακόρυφα, όταν διασχίζει έναν ανηφορικό δρόμο στο βουνό για παράδειγμα, αλλά εδώ δεν θα χρειαστούμε αυτή τη δυνατότητα.) Η εξήγηση του Σλιμ δείχνει ότι, παρ' όλο που το αυτοκίνητο ταξίδευε με 200 χιλιόμετρα την ώρα σε όλες τις δοκιμές, κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων η ταχύτητά του μοιράστηκε ανάμεσα στις δύο διαστάσεις, κι έτοι φάνηκε να κινείται με ταχύτητα μικρότερη από 200 χιλιόμετρα την ώρα στην κατεύθυνση ανατολής-δύσης. Στις προηγούμενες δοκιμές τα 200 χιλιόμετρα την ώρα χρησίμευαν αποκλειστικά για

την κίνηση από ανατολή προς δύση: στις τρεις τελευταίες ένα μέρος αυτής της ταχύτητας αναλώθηκε και για την κίνηση από βορρά προς νότο.

Ο Einstein βρήκε ότι σε αυτήν ακριβώς την ιδέα -στο μοίρασμα δηλαδή της κίνησης ανάμεσα σε διαφορετικές διαστάσεις- στηρίζεται ό,τι αξιοσημείωτο έχει να επιδείξει η ειδική θεωρία της σχετικότητας, αρκεί να συνειδητοποιήσουμε ότι η κίνηση ενός αντικειμένου δεν μοιράζεται μόνο στις χωρικές διαστάσεις αλλά και στη διάσταση του χρόνου. Μάλιστα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η κίνηση γίνεται χυρίως στο χρόνο και όχι στο χώρο. Ας δούμε τι σημαίνει αυτό.

Η κίνηση στο χώρο είναι μια έννοια που μαθαίνουμε νωρίς στη ζωή μας. Μολονότι συνήθως δεν σκεφτόμαστε κατ' αυτό τον τρόπο, μαθαίνουμε επίσης ότι εμείς, οι φίλοι μας, τα υπάρχοντά μας, δηλαδή όλοι κινούμαστε και στο χρόνο. Όταν κοιτάζουμε ένα ρολόι, ακόμη κι όταν χαζεύουμε νωχελικά στην τηλεόραση, η ένδειξη του ρολογιού αλλάζει συνεχώς, «προχωρώντας στο χρόνο». Εμείς και τα πάντα γύρω μας γερνάμε, περνώντας αναπόφευκτα από τη μία χρονική στιγμή στην επομένη. Πράγματι, ο μαθηματικός Hermann Minkowski και τελικά και ο ίδιος ο Einstein υποστήριξαν ότι πρέπει να θεωρήσουμε το χρόνο ως άλλη μια διάσταση του σύμπαντος -την τέταρτη διάσταση-, η οποία έχει πολλές ομοιότητες με τις τρεις χωρικές διαστάσεις στις οποίες είμαστε βυθισμένοι. Μολονότι αυτό ακούγεται αφηρημένο, η έννοια του χρόνου ως διάστασης είναι συγκεκριμένη. Όταν θέλουμε να συναντήσουμε κάποιον, του λέμε πού «στο χώρο» περιμένουμε να τον δούμε - για παράδειγμα, στον 9ο όροφο του κτιρίου στη γωνία της 53ης Οδού με την 7η Λεωφόρο. Εδώ υπάρχουν τρεις πληροφορίες (9ος όροφος, 53η Οδός, 7η Λεωφόρος) που αντικατοπτρίζουν μία συγκεκριμένη θέση στις τρεις χωρικές διαστάσεις του σύμπαντος. Εξίσου σημαντικό ωστόσο είναι να καθορίσουμε και πότε περιμένουμε να συναντηθούμε - για παράδειγμα, στις 3 μ.μ. Αυτή η πληροφορία μάς λέει πού «στο χρόνο» θα λάβει χώρα η συνάντησή μας. Τα γεγονότα καθορίζονται συ-

νεπώς από τέσσερις πληροφορίες: τρεις για το χώρο και μία για το χρόνο. Λυτά τα δεδομένα λέμε ότι καθορίζουν τη θέση του γεγονότος στο χώρο και στο χρόνο, ή στο χωροχρόνο, για συντομία. Υπ' αυτή την έννοια, ο χρόνος αποτελεί άλλη μία διάσταση.

Εφόσον αυτή η άποψη υποδηλώνει ότι ο χώρος και ο χρόνος είναι απλώς διαφορετικά παραδείγματα διαστάσεων, θα μπορούσαμε ίσως να κάνουμε λόγο για την ταχύτητα ενός αντικειμένου στο χρόνο, όπως ακριβώς αναφερόμαστε στην έννοια της ταχύτητάς του στο χώρο; Η απάντηση είναι: Ναι, μπορούμε.

Μία σημαντική ένδειξη για τη μέθοδο που θα ακολουθήσουμε προέρχεται από μία βασική πληροφορία που έχουμε ήδη συναντήσει. Όταν ένα αντικείμενο κινείται στο χώρο σε σχέση μ' εμάς, το ρολόι του χτυπά πιο αργά σε σχέση με το δικό μας. Με άλλα λόγια, η ταχύτητα της κίνησής του στο χρόνο επιβραδύνεται. Και τώρα έφτασε η στιγμή για το εννοιολογικό άλμα: ο Einstein υποστήριξε ότι όλα τα αντικείμενα στο σύμπαν ταξιδεύουν συνεχώς στο χωροχρόνο με συγκεκριμένη ταχύτητα – την ταχύτητα του φωτός. Αυτή η ιδέα είναι παράξενη: έχουμε συνηθίσει να πιστεύουμε ότι τα αντικείμενα ταξιδεύουν με ταχύτητες σημαντικά μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός. Τονίσαμε επανειλημμένα ότι αυτή είναι η αιτία που οι συνέπειες της σχετικότητας είναι τόσο ανοίκειες στον καθημερινό μας κόσμο. Όλα αυτά αληθεύουν. Τώρα όμως μιλάμε για τη συνισταμένη ταχύτητα ενός αντικειμένου και στις τέσσερις διαστάσεις – τρεις χωρικές και μία χρονική – και είναι η ταχύτητα του αντικειμένου υπό αυτή τη γενικευμένη έννοια που ισούται με αυτήν του φωτός. Για να το κατανοήσουμε πληρέστερα και για να αποκαλύψουμε πόσο σημαντικό είναι, σημειώνουμε ότι, όπως και στο δύσχρηστο αυτοκίνητο με τη μία και μοναδική ταχύτητα, για το οποίο συζητούσαμε νωρίτερα, αυτή η δεδομένη ταχύτητα μπορεί να μοιράζεται ανάμεσα στις διάφορες διαστάσεις – τις διαφορετικές χωρικές και χρονικές διαστάσεις δηλαδή. Αν ένα αντικείμενο είναι ακίνητο (ως προς εμάς) και κατά συνέπεια δεν κινείται καθόλου στο χώρο, τότε σε αναλογία με τις πρώτες δοκιμές του αυτοκινήτου, όλη η κί-

νηση του αντικειμένου χρησιμοποιείται για να ταξιδέψει σε μία διάσταση – στην προχειμένη περίπτωση, στη χρονική διάσταση. Επιπλέον, όλα τα αντικείμενα, που είναι ακίνητα το ένα σε σχέση με το άλλο και σε σχέση μ' εμάς, κινούνται στο χρόνο –γερνούν– με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό ή με την ίδια ταχύτητα. Αν ένα αντικείμενο ωστόσο κινείται και στο χώρο, αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος της προηγούμενης κίνησής του στο χρόνο πρέπει να εκτραπεί. Όπως συμβαίνει και με το αυτοκίνητο που ταξιδεύει υπό γωνία, αυτό το μοίρασμα της κίνησης συνεπάγεται ότι το αντικείμενο θα ταξιδεύει πιο αργά στο χρόνο απ' ό,τι τα ακίνητα αντίστοιχά του, εφόσον τώρα μέρος της κίνησής του χρησιμοποιείται για να κινηθεί στο χώρο. Με άλλα λόγια, το ρολόι του θα χτυπά πιο αργά αν κινείται στο χώρο. Αυτό ακριβώς βρήκαμε και νωρίτερα. Βλέπουμε τώρα ότι ο χρόνος επιβραδύνεται, όταν ένα αντικείμενο κινείται ως προς εμάς, επειδή έτσι ένα μέρος της κίνησής του στο χρόνο γίνεται κίνηση στο χώρο. Η ταχύτητα ενός αντικειμένου στο χώρο, κατά συνέπεια, απλώς αντικατοπτρίζει πόση από την κίνησή του στο χρόνο εκτρέπεται στο χώρο.⁶

Βλέπουμε επίσης ότι αυτό το εννοιολογικό πλαίσιο εξηγεί άμεσα το γεγονός ότι υπάρχει ένα όριο στη χωρική ταχύτητα ενός αντικειμένου: η μέγιστη ταχύτητα στο χώρο εκδηλώνεται όταν όλη η κίνηση ενός αντικειμένου στο χρόνο εκτρέπεται στο χώρο. Αυτό συμβαίνει όταν όλη η προηγούμενη κίνησή του στο χρόνο με την ταχύτητα του φωτός μετατραπεί σε κίνηση στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Έχοντας εξαντλήσει όμως έτσι όλη του την κίνηση στο χρόνο, αυτή είναι η μέγιστη ταχύτητα στο χώρο που μπορεί να αποκτήσει το αντικείμενο – οποιοδήποτε αντικείμενο. Η ίδια αναλογία ισχύει και για το αυτοκίνητο στο παραδειγμά μας, αν το οδηγήσουμε απευθείας στην κατεύθυνση βορρά-νότου. Όπως ακριβώς στο αυτοκίνητο δεν θα έχει απομείνει καθόλου ταχύτητα για να κινηθεί στην κατεύθυνση ανατολής-δύσης, για κάτι που ταξιδεύει στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός δεν θα περισσεύει καθόλου ταχύτητα για να κινηθεί στο χρόνο. Έτσι το φως δεν γερνά· ένα φωτόνιο που ξεπήδησε από τη Με-

γάλη Έκρηξη έχει σήμερα την ίδια ηλικία που είχε και τότε. Στην ταχύτητα του φωτός, ο χρόνος δεν περνά.

Και τι γίνεται με το $E = mc^2$;

Μολονότι ο ίδιος ο Einstein δεν συνηγόρησε υπέρ της ονομασίας «θεωρία της σχετικότητας» (προτείνοντας αντίθετα το όνομα «θεωρία του αναλλοίωτου» για να εκφράσει μεταξύ άλλων το αμετάβλητο της ταχύτητας του φωτός), το νόημα αυτού του όρου είναι πλέον σαφές. Το έργο του Einstein έδειξε ότι έννοιες όπως ο χώρος και ο χρόνος, οι οποίες προηγουμένως φαίνονταν διακριτές και απόλυτες, είναι στην πραγματικότητα αλληλένδετες και σχετικές. Ο Einstein συνέχισε δείχνοντας ότι και άλλες φυσικές ιδιότητες του κόσμου είναι επίσης απρόσμενα αλληλένδετες. Η διασημότερη εξίσωσή του παρέχει ένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα. Με αυτήν ο Einstein επιβεβαίωσε ότι η ενέργεια (E) ενός αντικειμένου και η μάζα του (m) δεν αποτελούν ανεξάρτητες έννοιες: μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια, αν γνωρίζουμε τη μάζα (πολλαπλασιάζοντας την τελευταία δύο φορές με την ταχύτητα του φωτός, c^2) ή μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα, αν γνωρίζουμε την ενέργεια (διαιρώντας την τελευταία δύο φορές με την ταχύτητα του φωτός). Με άλλα λόγια, η ενέργεια και η μάζα -όπως τα δολάρια και τα ευρώ- μοιάζουν με μετατρέψιμα νομίσματα. Σε αντίθεση με τα χρήματα όμως, η ισοτιμία συναλλαγής, ίση με την ταχύτητα του φωτός στο τετράγωνο, έχει καθοριστεί μια για πάντα. Καθώς αυτή η ισοτιμία είναι ιδιαίτερα μεγάλη (το c^2 είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός), μια μικρή μάζα μπορεί να μετατραπεί σε τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Ο κόσμος κατάλαβε πόσο τεράστια είναι η καταστροφική ισχύς που προκύπτει από τη μετατροπή αυτή, όταν λιγότερο από το 95% μιας λίβρας ουρανίου έγινε ενέργεια στη Χιροσίμα: κάποια μέρα, σε πυρηνικούς σταθμούς σύντηξης, ενδέχεται να χρησιμοποιούμε την εξίσωση του Einstein για να ικανοποιούμε τις ενεργειακές ανάγκες

ολόκληρης της ανθρωπότητας, χρησιμοποιώντας τα ατέλειωτα αποθέματα θαλασσινού νερού.

Από τη σκοπιά των εννοιών που έχουμε τονίσει στο παρόν κεφάλαιο, η εξίσωση του Einstein μας παρέχει την πιο σαφή εξήγηση για τη βασική αλήθεια ότι τίποτε δεν μπορεί να ταξιδεύει γρηγορότερα από το φως. Ενδέχεται να απορείτε, για παράδειγμα, γιατί να μην μπορούμε να πάρουμε ένα αντικείμενο, ας πούμε ένα μυόνιο, που ένας επιταχυντής το έχει επιταχύνει στο 99,5% της ταχύτητας του φωτός και να το «πιέσουμε λίγο παραπάνω», ώστε να φτάσει στο 99,9% της ταχύτητας του φωτός και μετά να το «πιέσουμε για τα καλά», εξαναγκάζοντάς το να ξεπεράσει το φράγμα της ταχύτητας του φωτός. Ο τύπος του Einstein εξηγεί γιατί οι προσπάθειες αυτές δεν θα στεφθούν ποτέ από επιτυχία. Όσο γρηγορότερα κινείται κάτι, τόσο περισσότερη ενέργεια έχει, και από τον τύπο του Einstein βλέπουμε ότι η περισσότερη ενέργεια αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μάζα. Τα μυόνια που ταξιδεύουν με το 99,9% της ταχύτητας του φωτός, για παράδειγμα, ζυγίζουν πολύ περισσότερο από τα ακίνητα ξαδέρφια τους. Πράγματι, ζυγίζουν 22 φορές περισσότερο. (Οι μάζες που αναγράφονται στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται σε σωμάτια που βρίσκονται σε ηρεμία.) Όμως όσο πιο μεγάλη μάζα έχει ένα αντικείμενο, τόσο δυσκολότερο είναι να αυξήσεις την ταχύτητά του. Άλλο πράγμα να σπρώχνεις έναν ποδηλάτη και άλλο μια νταλίκα. Κι έτσι, όσο γρηγορότερα κινείται ένα μυόνιο τόσο δυσκολότερο είναι να αυξηθεί κι άλλο η ταχύτητά του. Στο 99,999% της ταχύτητας του φωτός, η μάζα του μυονίου έχει αυξηθεί 224 φορές· στα 99,99999999% της ταχύτητας του φωτός, έχει αυξηθεί πάνω από 70.000 φορές. Εφόσον η μάζα του μυονίου αυξάνεται απεριόριστα όσο η ταχύτητά του πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός, θα χρειαζόταν να δεχτεί μια ώθηση με άπειρη ποσότητα ενέργειας για να φτάσει ή να ξεπεράσει το φράγμα της ταχύτητας του φωτός. Αυτό φυσικά είναι αδύνατο και συνεπώς τίποτε δεν μπορεί να ταξιδέψει γρηγορότερα από το φως.

Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, αυτό το συμπέρασμα

αποτελεί το σπόρο από τον οποίο ξεπήδησε η δεύτερη μεγάλη διαμάχη που αντιμετώπισε η φυσική των προηγούμενο αιώνα και σηματοδοτεί το τέλος άλλης μιας σεπτής και πολυαγαπημένης θεωρίας – της θεωρίας της παγκόσμιας έλξης του Newton.

Περί στρεβλώσεων και ρυτιδώσεων

Με την ειδική θεωρία της σχετικότητας ο Einstein επέλυσε τη σύγκρουση ανάμεσα στην «πανάρχαιη διαίσθηση» για την κίνηση και τη σταθερή ταχύτητα με την οποία κινείται το φως. Η λύση που δόθηκε, με λίγα λόγια, ήταν ότι η διαίσθηση κάνει λάθος – αντλεί τις πληροφορίες της από κινήσεις που είναι κατά κανόνα εξαιρετικά αργές σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός, και οι τόσο μικρές ταχύτητες αποκρύπτουν τον πραγματικό χαρακτήρα του χώρου και του χρόνου. Η ειδική θεωρία της σχετικότητας αποκαλύπτει τη φύση τους και δείχνει ότι διαφέρουν ριζικά από την αντίληψη που είχαμε προηγουμένως γι' αυτούς. Όμως το γεγονός ότι βελτιώσαμε τον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε τις θεμελιώδεις έννοιες του χώρου και του χρόνου δεν ήταν απλή υπόθεση. Ο Einstein συνειδητοποίησε γρήγορα ότι από τις πολυάριθμες επιπτώσεις που προέκυψαν από τις αποκαλύψεις της ειδικής σχετικότητας, μία είχε ιδιαίτερο βάθος: το δόγμα ότι τίποτε δεν μπορεί να ξεπεράσει σε ταχύτητα το φως, αποδεικνύεται ασύμβατο με την αξιοσέβαστη θεωρία της παγκόσμιας έλξης, που είχε προταθεί από τον Newton στο δεύτερο μισό του δέκατου έβδομου αιώνα. Και έτσι, ενώ επέλυε τη μία σύγκρουση, η ειδική θεωρία της σχετικότητας γεννούσε μια άλλη. Μετά από μία δεκαετία επίπονης και μερικές φορές βασανιστικής μελέτης, ο Einstein ξεπέρασε το δίλημμα προτείνοντας τη γενική θεωρία του για τη σχετικότητα. Με τη θεωρία αυτή, ο Einstein άλλαξε για άλλη μια φο-

ρά επαναστατικά τον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε το χώρο και το χρόνο, δείχνοντας ότι στρεβλώνονται και παραμορφώνονται για να μεταδώσουν τη δύναμη της βαρύτητας.

Η νευτώνεια θεώρηση της βαρύτητας

Ο Isaac Newton, γεννημένος το 1642 στην κομητεία του Λίνκολν στην Αγγλία, άλλαξε την ίδια τη φύση της επιστημονικής έρευνας, θέτοντας την πλήρη ισχύ των μαθηματικών στην υπηρεσία της φυσικής. Η ευφυΐα του Newton ήταν τόσο μνημειώδης, που άταν, για παράδειγμα, διαπίστωσε ότι τα μαθηματικά τα οποία χρειαζόταν για κάποιες έρευνές του δεν υπήρχαν, τα εφηύρε. Έπρεπε να περάσουν σχεδόν τρεις αιώνες προτού ο επιστημονικός κόσμος φιλοξενήσει μια εφάμιλλη ιδιοφυΐα. Από τις αναρίθμητες και βαθυστόχαστες ιδέες του Newton σχετικά με τη λειτουργία του σύμπαντος, αυτή που θα μας απασχολήσει χυρίως εδώ είναι η θεωρία του για την παγκόσμια έλξη.

Η δύναμη της βαρύτητας διαποτίζει την καθημερινή μας ζωή. Κρατά εμάς, και όλα τα αντικείμενα γύρω μας, στην επιφάνεια της Γης· συγχρατεί τον αέρα που αναπνέουμε, ώστε να μη διαφύγει στο διάστημα· κρατά τη Σελήνη σε τροχιά γύρω από τη Γη και τη Γη σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο. Η βαρύτητα υπαγορεύει το ρυθμό του κοσμικού χορού που εκτελούν ακούραστα και σχολαστικά δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων κάτοικοι του σύμπαντος, από τους αστεροειδείς ως τους πλανήτες, τα άστρα και τους γαλαξίες. Περισσότεροι από τρεις αιώνες νευτώνειας επιρροής μας κάνουν να θεωρούμε δεδομένο ότι μία και μόνη δύναμη –η βαρύτητα– ευθύνεται για όλον αυτό τον πλούτο των γήινων και εξωγήινων συμβάντων. Πριν από τον Newton όμως, κανείς δεν καταλάβαινε ότι ένα μήλο που πέφτει από το δέντρο στη γη αποτελεί μαρτυρία της ίδιας φυσικής αρχής που κρατά τους πλανήτες σε περιφορά γύρω από τον Ήλιο. Κάνοντας ένα τολμηρό βήμα προς χάριν της επιστημονικής ηγεμονίας, ο Newton ενοποίησε τη φυ-

σική που κυβερνούσε τον ουρανό και τη φυσική που κυβερνούσε τη Γη, διακηρύσσοντας ότι η δύναμη της βαρύτητας ήταν το αόρατο χέρι που δρούσε και στις δύο περιπτώσεις.

Ο Newton, λόγω της άποψής του για τη βαρύτητα, μπορεί να ονομαστεί «ο μεγάλος εξισορροπιστής». Υποστήριξε πως καθετί ασκεί ελκτική βαρυτική δύναμη πάνω σε οτιδήποτε άλλο. Ανεξαρτήτως φυσικής σύστασης, καθετί ασκεί αλλά και υφίσταται τη δύναμη της βαρύτητας. Βασισμένος σε μια προσεκτική μελέτη της ανάλυσης του Johannes Kepler για την πλανητική κίνηση, ο Newton συμπέρανε ότι το πόσο μεγάλη ή μικρή θα είναι η βαρυτική έλξη ανάμεσα σε δύο σώματα εξαρτάται από δύο μόνο παράγοντες: την ποσότητα του υλικού που εμπεριέχεται στο κάθε σώμα και την απόσταση ανάμεσά τους. «Τοιχό» σημαίνει ύλη – η ύλη περιλαμβάνει τον συνολικό αριθμό πρωτονίων, νετρονίων και ηλεκτρονίων, ο οποίος με τη σειρά του καθορίζει τη μάζα του αντικειμένου. Η θεωρία της παγκόσμιας έλξης του Newton μας βεβαιώνει ότι η ελκτική δύναμη ανάμεσα σε δύο αντικείμενα είναι μεγαλύτερη για αντικείμενα μεγάλης μάζας και μικρότερη για αντικείμενα μικρής μάζας· μας βεβαιώνει επίσης ότι η δύναμη της έλξης είναι μεγαλύτερη όταν η απόσταση ανάμεσα στα αντικείμενα είναι μικρή και μικρότερη όταν η απόσταση είναι μεγάλη.

Ο Newton προχώρησε πολύ πιο πέρα από αυτή την ποιοτική περιγραφή και κατέγραψε τις εξισώσεις που περιγράφουν ποσοτικά τη βαρυτική δύναμη ανάμεσα σε δύο αντικείμενα. Δηλαδή οι εξισώσεις αυτές λένε ότι η βαρυτική δύναμη ανάμεσα σε δύο σώματα είναι ανάλογη με το γινόμενο των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Αυτός ο «νόμος της παγκόσμιας έλξης» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλεφθεί η κίνηση των πλανητών και των κομητών γύρω από τον Ήλιο, της Σελήνης γύρω από τη Γη, των πυραύλων που ξεκινούν για πλανητικές εξερευνήσεις, καθώς και για πιο γήινες εφαρμογές, όπως μπάλες του μπέιζμπολ που πετούν στον αέρα ή δύτες που κάνουν θεαματικές βουτιές από μια εξέδρα. Η συμφωνία ανάμεσα στις προβλέψεις και την έμπρα-

κτη παρατήρηση της κίνησης αυτών των αντικειμένων είναι θεαματική. Η επιτυχία αυτή χάρισε στη θεωρία του Newton ομόφωνη αποδοχή μέχρι τις αρχές του εικοστού αιώνα. Ωστόσο η ανακάλυψη της ειδικής σχετικότητας από τον Einstein ύψωσε για τη θεωρία του Newton ένα εμπόδιο που αποδείχθηκε αξεπέραστο.

Η ασυμβατότητα της νευτώνειας βαρύτητας και της ειδικής σχετικότητας

Βασικό γνώρισμα της ειδικής σχετικότητας είναι το απόλυτο φράγμα στην ταχύτητα, το οποίο θέτει το φως. Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι το φράγμα αυτό δεν αφορά μόνο τα υλικά αντικείμενα αλλά και τα σήματα και τις επιδράσεις οποιουδήποτε είδους. Απλώς δεν υπάρχει κανένας τρόπος να μεταδοθούν πληροφορίες ή μια διαταραχή από τον έναν τόπο στον άλλο με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν του φωτός. Φυσικά, στον κόσμο μας υπάρχουν πολλοί τρόποι να διαδοθούν οι διαταραχές με ταχύτητα μικρότερη από αυτήν του φωτός. Η ομιλία σας και όλοι οι υπόλοιποι ήχοι, για παράδειγμα, μεταφέρονται με κύματα που ταξιδεύουν περίπου με 1.130 χιλιόμετρα την ώρα στον αέρα, πολύ πιο αργά σε σύγκριση με τα 1.080 εκατομμύρια χιλιόμετρα την ώρα της ταχύτητας του φωτός. Αυτή η διαφορά ταχύτητας γίνεται εμφανής όταν παρακολουθείτε ένα παιχνίδι μπέιζμπολ από θέσεις που βρίσκονται πολύ μακριά από το κέντρο του γηπέδου. Όταν ο παίκτης χτυπήσει την μπάλα, ο ήχος φτάνει σ' εσάς με κάποια καθυστέρηση μετά το χτύπημα. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και σε μια καταγίδα. Μολονότι η αστραπή και ο κεραυνός παραγονται ταυτόχρονα, βλέπετε την αστραπή προτού ακούσετε τον κεραυνό. Και πάλι αυτό αντανακλά τη σημαντική διαφορά ταχύτητας ανάμεσα στο φως και τον ήχο. Η επιτυχημένη ειδική θεωρία της σχετικότητας μας πληροφορεί ότι απλούστατα η αντίστροφη κατάσταση, όπου κάποιο σήμα θα έφτανε σ' εμάς πριν από

το φως που εκπέμπει, είναι αδύνατη. Τίποτε δεν τρέχει γρηγορότερα από τα φωτόνια.

Εδώ είναι τα δύσκολα. Στη νευτώνεια θεωρία περί βαρύτητας, ένα σώμα ασκεί σε ένα άλλο βαρυτική έλξη με δύναμη που καθορίζεται μόνο από τη μάζα των σωμάτων που εμπλέκονται και το μήκος της απόστασής τους. Η δύναμη δεν εξαρτάται καθόλου από το πόση ώρα τα αντικείμενα βρίσκονται το ένα ενώπιον του άλλου. Αυτό σημαίνει ότι αν αλλάξουν οι μάζες τους ή η απόστασή τους, τα σώματα, σύμφωνα με τον Newton, θα νιώσουν αμέσως μια μεταβολή στην αμοιβαία βαρυτική τους έλξη. Για παράδειγμα, η θεωρία του Newton για τη βαρύτητα υποστηρίζει ότι αν εκραγεί ξαφνικά ο Ήλιος, η Γη –περίπου 93 εκατομμύρια μίλια μακριά – θα ξέφευγε στη στιγμή από τη συνήθη ελλειπτική της τροχιά. Ακόμη κι αν το φως της έκρηξης χρειάζεται οκτώ λεπτά για να φτάσει από τον Ήλιο στη Γη, σύμφωνα με τη θεωρία του Newton η γνώση ότι ο Ήλιος έχει εκραγεί, θα μεταδιδόταν ακαριαία στη Γη, διαμέσου της ξαφνικής μεταβολής στη βαρυτική δύναμη που κυβερνά την κίνησή της.

Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε άμεση σύγκρουση με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, καθώς η τελευταία διαβεβαιώνει ότι καμία πληροφορία δεν μπορεί να μεταδοθεί γρηγορότερα από την ταχύτητα του φωτός – η ακαριαία μετάδοση παραβιάζει στον μέγιστο βαθμό αυτή την αρχή.

Στις αρχές του εικοστού αιώνα, συνεπώς, ο Einstein συνειδητοποίησε ότι η τρομερά επιτυχής νευτώνεια θεωρία της βαρύτητας ερχόταν σε σύγκρουση με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Πεπεισμένος για το αληθές της ειδικής σχετικότητας, και παρά το πλήθος των πειραμάτων που στήριζαν τη θεωρία του Newton, ο Einstein αναζήτησε μία νέα θεωρία περί βαρύτητας, συμβατή με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Αυτό τελικά τον οδήγησε στην ανακάλυψη της γενικής σχετικότητας, μέσα από την οποία ο χαρακτήρας του χώρου και του χρόνου υπέστη και πάλι έναν αξιοσημείωτο μετασχηματισμό.

Η πιο πετυχημένη σκέψη του Einstein

Αχόμη και πριν από την ανακάλυψη της ειδικής σχετικότητας, η νευτώνεια θεωρία της βαρύτητας έπασχε σημαντικά σε κάποιο σημείο. Μολονότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνουν εξαιρετικά ακριβείς προβλέψεις σχετικά με την κίνηση των αντικειμένων υπό την επήρεια της βαρύτητας, δεν μας εξηγεί τι είναι η βαρύτητα. Πώς γίνεται δηλαδή δύο σώματα που απέχουν μεταξύ τους εκατοντάδες εκατομμύρια χιλιόμετρα να επηρεάζουν το ένα την κίνηση του άλλου; Με ποια μέσα εκτελεί την αποστολή της η βαρύτητα; Αυτό το πρόβλημα το γνώριζε πολύ καλά και ο ίδιος ο Newton. Είχε μάλιστα γράψει:

Πώς είναι δυνατόν να διανοηθεί κανείς ότι η άψυχη άμορφη ύλη μπορεί, χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου άλλου άυλου παράγοντα, να επιδρά πάνω σε άλλη ύλη και μάλιστα χωρίς αμοιβαία επαφή. Το γεγονός ότι η Βαρύτητα πρέπει να είναι έμφυτη, ενδογενής και ουσιώδης στην ύλη, έτσι ώστε ένα σώμα να μπορεί να επιδρά σε ένα άλλο από απόσταση χωρίς τη μεσολάβηση κανενός άλλου παράγοντα, μέσω του οποίου να μπορεί να διαδίδεται η δράση και η δύναμη τους από το ένα στο άλλο, είναι για μένα τόσο μεγάλος παραλογισμός, που πιστεύω ότι κανένας Άνθρωπος με σωστή φιλοσοφική σκέψη δεν θα μπορούσε ποτέ να περιπέσει σε αυτόν. Η Βαρύτητα πρέπει να οφείλεται σε κάποιον παράγοντα που να επιδρά σταθερά σύμφωνα με κάποιους νόμους: αλλά αν αυτός ο παράγοντας είναι υλικός ή άυλος, το αφήνω στην χρήση των αναγνωστών μου.¹

Δηλαδή ο Newton δέχτηκε την ύπαρξη της βαρύτητας και στη συνέχεια διατύπωσε τις εξισώσεις που περιγράφουν επακριβώς τις συνέπειές της, αλλά δεν έκανε τον παραμικρό υπαινιγμό για τον τρόπο με τον οποίο πραγματικά λειτουργεί. Έδωσε στον κό-

σμο τις «οδηγίες χρήσης» για τη βαρύτητα, οι οποίες περιέγραφαν λεπτομερώς πώς να τη «χρησιμοποιούμε» – οδηγίες που οι φυσικοί, οι αστρονόμοι και οι μηχανικοί έχουν εκμεταλλευτεί με επιτυχία για να στείλουν πυραύλους στη Σελήνη, στον Ήρη και σε άλλους πλανήτες στο ηλιακό σύστημα, για να προβλέψουν τις ηλιακές και σεληνιακές εκλείψεις, την κίνηση των κομητών, και ούτω καθεξής. Άφησε όμως τις εσώτερες λειτουργίες – τα περιεχόμενα του «μαύρου κουτιού» της βαρύτητας – τυλιγμένες σε απόλυτο μυστήριο. Όταν χρησιμοποιείτε το στερεοφωνικό σας ή τον προσωπικό σας υπολογιστή, μπορεί να βρεθείτε σε μια παρόμοια κατάσταση άγνοιας όσον αφορά την εσωτερική τους λειτουργία. Από τη στιγμή που γνωρίζετε πώς να χρησιμοποιείτε τη συσκευή, ούτε εσείς ούτε κανείς άλλος χρειάζεται να γνωρίζει πώς επιτυγχάνει τους στόχους τους οποίους της θέτετε. Άλλα αν το στερεοφωνικό σας ή ο υπολογιστής σας χαλάσει, η επισκευή του βασίζεται κυρίως στη γνώση των εσωτερικών του λειτουργιών. Παρομοίως, ο Einstein συνειδητοποίησε ότι, παρά τα εκατοντάδες χρόνια πειραματικής επιβεβαίωσης, η ειδική θεωρία της σχετικότητας υποδήλωνε ότι η θεωρία του Newton ήταν ελαφρώς «χαλασμένη» και ότι η επισκευή της απαιτούσε να καταπιαστούμε με το ερώτημα σχετικά με την πραγματική και πλήρη φύση της βαρύτητας.

Το 1907, ενώ αναλογιζόταν αυτά τα ζητήματα κλεισμένος στο γραφείο ευρεσιτεχνιών στη Βέρνη της Ελβετίας, ο Einstein έφασε σε μια βασική ιδέα η οποία, μετά από πολλές παλινδρομήσεις, θα τον οδηγούσε τελικά σε μια ριζικά νέα θεωρία της βαρύτητας – μια προσέγγιση που όχι απλώς θα συμπλήρωνε το κενό στη θεωρία του Newton, αλλά μάλλον θα αναδιατύπωνε πλήρως τη συλλογιστική γύρω από τη βαρύτητα και, το σημαντικότερο, θα το έκανε με τρόπο απόλυτα συνεπή προς την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Η ιδέα του Einstein σχετίζεται με ένα ερώτημα που ενδέχεται να σας είχε προβληματίσει στο Κεφάλαιο 2. Εκεί υπογραμμίσαμε ότι μας ενδιαφέρει να κατανοήσουμε πώς φαίνεται ο κόσμος στους

παρατηρητές που βρίσκονται σε σχετική κίνηση με σταθερή ταχύτητα. Συγκρίνοντας προσεκτικά τις παρατηρήσεις αυτών των παρατηρητών, ανακαλύψαμε ορισμένες δραματικές επιπτώσεις για τη φύση του χώρου και του χρόνου. Άλλα τι γίνεται με τους παρατηρητές που κάνουν επιταχυνόμενη κίνηση; Είναι πολύ πιο περίπλοκο να αναλυθούν αυτά τα οποία παρατηρούν όσοι εκτελούν επιταχυνόμενη κίνηση, παρά οι παρατηρήσεις όσων κινούνται με σταθερή ταχύτητα, των οποίων η κίνηση είναι πιο απαλή. Μπορούμε ωστόσο να αναρωτηθούμε αν υπάρχει κάποιος τρόπος να δαμάσουμε αυτή την πολυπλοκότητα και να εντάξουμε απευθείας την επιταχυνόμενη κίνηση σε αυτό τον καινούργιο τρόπο με τον οποίο κατανοούμε το χώρο και το χρόνο.

Η «πιο πετυχημένη σκέψη» του Einstein μας έδειξε πώς να το κάνουμε. Για να καταλάβετε την ιδέα του, φανταστείτε ότι βρισκόμαστε στο 2050, είστε ο κορυφαίος ειδικός του FBI σε θέματα εκρηκτικών και έχετε μόλις λάβει μια απεγνωσμένη κλήση για να εξετάσετε κάτι που, όπως φαίνεται, είναι μια υπερσύγχρονη βόμβα στην καρδιά της Ουάσιγκτον. Αφού τρέξετε επιτόπου και εξετάσετε τη συσκευή, ο χειρότερος εφιάλτης σας γίνεται πραγματικότητα: η βόμβα είναι πυρηνική και μάλιστα τόσο ισχυρή, που ακόμη κι αν θαβόταν βαθιά στο φλοιό της γης ή βυθιζόταν στα βάθη του ωκεανού, οι ζημιές από την έκρηξή της θα ήταν σαρωτικές. Αφού εξετάσετε πάρα πολύ προσεκτικά το μηχανισμό πυροδότησης της βόμβας, συνειδητοποιείτε ότι όχι μόνο δεν υπάρχει ελπίδα να την αφοπλίσετε, αλλά διαθέτει επιπλέον έναν νέο εφεδρικό μηχανισμό πυροδότησης. Η βόμβα είναι τοποθετημένη σε μια ζυγαριά. Αν η ένδειξη στη ζυγαριά αποκλίνει από την τρέχουσα τιμή της περισσότερο από 50%, η βόμβα θα ξεραγεί. Σύμφωνα με το χρονόμετρό της, βλέπετε ότι σας μένει μόνο μια βδομάδα, κι ο χρόνος ήδη μετρά αντίστροφα. Η μοίρα εκατομμυρίων ανθρώπων βρίσκεται στα χέρια σας. Τι θα μπορούσατε να κάνετε;

Αφού λοιπόν έχετε αποφασίσει ότι δεν υπάρχει κανένα ασφαλές μέρος μέσα ή πάνω στη γη για να ανατινάξετε τη συσκευή,

φαίνεται πως έχετε μόνο μία εναλλακτική λύση: πρέπει να εκτοξεύσετε τη συσκευή στα βάθη του διαστήματος, όπου η έκρηξή της δεν θα προκαλέσει ζημιές. Παρουσιάζετε αυτή την ιδέα σε μια συνάντηση της ομάδας σας στο FBI και σχεδόν αμέσως το σχέδιό σας ανατρέπεται από ένα νεαρό βοηθό. «Υπάρχει ένα σοβαρό πρόβλημα με το σχέδιό σας», ξεκινά να λέει ο βοηθός σας, ο Ισαάκ. «Καθώς η συσκευή θα απομακρύνεται από τη Γη, το βάρος της θα μειώνεται, αφού θα ελαττώνεται η βαρυτική έλξη της Γης. Αυτό σημαίνει ότι η ένδειξη της Ζυγαριάς μέσα στη συσκευή θα μειωθεί, προκαλώντας την έκρηξη προτού η βόμβα φτάσει με ασφάλεια στα βάθη του διαστήματος». Πριν καλά καλά προλάβετε να αξιολογήσετε την χριτική του, πετάγεται ένας άλλος νεαρός βοηθός: «Μάλιστα, τώρα που το σκέφτομαι, υπάρχει κι άλλο ένα πρόβλημα», λέει ο βοηθός σας, ο Αλβέρτος. «Το πρόβλημα αυτό είναι εξίσου σοβαρό με την αντίρρηση του Ισαάκ, αλλά κάπως πιο λεπτό, και γι' αυτό σας ζητώ να έχετε υπομονή μαζί μου, καθώς θα το εξηγώ». Επειδή σας χρειάζεται λίγος χρόνος για να εξετάσετε την αντίρρηση του Ισαάκ, προσπαθείτε να κάνετε τον Αλβέρτο να σωπάσει, αλλά, ως συνήθως, άμα ξεκινήσει, τίποτα δεν τον σταματά.

«Για να εκτοξεύσουμε τη συσκευή στο διάστημα, θα πρέπει να την τοποθετήσουμε σε έναν πύραυλο. Καθώς ο πύραυλος θα επιταχύνει για να ξεχυθεί στο διάστημα, η ένδειξη στη Ζυγαριά θα αυξηθεί, κάνοντας και πάλι τη συσκευή να εκραγεί πρόωρα. Βλέπετε, η βάση της βόμβας –που ακουμπάει στη Ζυγαριά– θα σπρώχνει τη Ζυγαριά περισσότερο απ' όσο τη σπρώχνει όταν η συσκευή είναι ακίνητη, με τον ίδιο τρόπο που το σώμα σας πιέζεται προς το κάθισμα σε ένα αυτοκίνητο που επιταχύνει. Η βόμβα θα «πιέζει» τη Ζυγαριά όπως ακριβώς το σώμα σας πιέζει το μαξιλαράκι στην πλάτη του καθίσματος. Όταν μια Ζυγαριά πιέζεται, φυσικά η ένδειξη της αυξάνει – και αυτό θα κάνει τη βόμβα να εκραγεί, αν η αύξηση που προκύπτει είναι μεγαλύτερη από 50%».

Ευχαριστείτε τον Αλβέρτο για το σχόλιό του αλλά, καθώς δεν προσέχατε και πολύ την εξήγησή του, επειδή προσπαθούσατε να

επιβεβαιώσετε από μέσα σας την επισήμανση του Ισαάκ, δηλώνετε αποκαρδιωμένος ότι αρκεί ένα μόνο μοιραίο χτύπημα για να σκοτώσεις μια ιδέα, και αυτό έκανε ακριβώς η προφανώς σωστή παρατήρηση του Ισαάκ. Νιώθετε απογοητευμένος και ζητάτε από την ομάδα νέες προτάσεις. Εκείνη τη στιγμή, ο Αλβέρτος βρίσκεται αντιμέτωπος με μια συγκλονιστική αποκάλυψη: «Τώρα που το ξανασκέφτομαι», συνεχίζει, «δεν νομίζω ότι η ιδέα σας είναι εντελώς άχρηστη. Η παρατήρηση του Ισαάκ ότι η βαρύτητα μειώνεται καθώς η συσκευή ανυψώνεται στο διάστημα, σημαίνει ότι η ένδειξη στη ζυγαριά θα πέσει. Η παρατήρησή μου ότι η επιτάχυνση του πυραύλου προς τα επάνω θα κάνει τη συσκευή να πλέζει περισσότερο τη ζυγαριά σημαίνει ότι η ένδειξη θα ανέβει. Αν λάβουμε υπόψη μας και τις δύο αυτές παραμέτρους, βλέπουμε ότι, εφόσον ρυθμίσουμε με προσοχή τον ακριβή χρόνο της επιτάχυνσης του πυραύλου που κινείται προς τα πάνω, αυτές οι δύο συνέπειες μπορούν να αλληλοεξουδετερωθούν! Πιο συγκεκριμένα, στα πρώτα στάδια της απογείωσης, όταν ο πύραυλος νιώθει ακόμη την πλήρη ένταση της γήινης βαρύτητας, μπορεί να επιταχύνει, όχι όμως απότομα, ώστε να μένουμε εντός του περιθωρίου του 50%. Καθώς ο πύραυλος απομακρύνεται όλο και περισσότερο από τη Γη – και συνεπώς νιώθει τη γήινη βαρύτητα όλο και λιγότερο –, θα πρέπει να αυξήσουμε την επιτάχυνσή του προς τα πάνω, για να αντισταθμίσουμε. Η αύξηση της ένδειξης εξαιτίας της επιτάχυνσης προς τα πάνω μπορεί να ισούται ακριβώς με τη μείωση της ένδειξης εξαιτίας της ελαττωμένης βαρυτικής έλξης, κι έτσι, στην πραγματικότητα, μπορούμε να διατηρήσουμε τη συγκεκριμένη ένδειξη στη ζυγαριά αμετάβλητη!»

Η πρόταση του Αλβέρτου αρχίζει σιγά σιγά να αποκτά νόημα. «Με άλλα λόγια», απαντάτε, «ιμια επιτάχυνση προς τα πάνω μπορεί να αναπληρώσει ή να αντικαταστήσει τη βαρύτητα. Μπορούμε να μιμηθούμε τις συνέπειες της βαρύτητας μέσω μιας κατάλληλα επιταχυνόμενης κίνησης».

«Ακριβώς», απαντά ο Αλβέρτος.

«Λοιπόν», συνεχίζετε, «μπορούμε να εκτοξεύσουμε τη βόμβα

στο διάστημα και, ρυθμίζοντας προσεκτικά την επιτάχυνση του πυραύλου, μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι η ένδειξη στη ζυγαριά δεν θα αλλάξει, αποφεύγοντας έτσι την έκρηξη μέχρι ο πύραυλος να βρεθεί σε απόσταση ασφαλείας από τη Γη». Κι έτσι, παίζοντας με τη βαρύτητα και την επιταχυνόμενη κίνηση -χρησιμοποιώντας την ακρίβεια της πυραυλικής επιστήμης του εικοστού πρώτου αιώνα- κατορθώνετε να αποσοβήσετε την καταστροφή.

Η συνειδητοποίηση ότι η βαρύτητα και η επιτάχυνση είναι βαθιά συνυφασμένες ήταν η ιδέα-χλειδί που ήρθε στον Einstein μια ωραία ημέρα στο γραφείο ευρεσιτεχνιών της Βέρνης. Μολονότι η ιστορία της βόμβας αναδεικνύει την ουσία της συγχριμένης ιδέας, αξίζει να την αναδιατυπώσουμε με τρόπο που να προσιδιάζει περισσότερο στο Κεφάλαιο 2. Για το σκοπό αυτό, θυμηθείτε ότι αν σας βάλουν σε ένα σφραγισμένο βαγόνι χωρίς παράθυρα, το οποίο δεν επιταχύνεται, δεν υπάρχει τρόπος να προσδιορίσετε εσείς ο ίδιος την ταχύτητά σας. Τίποτα δεν φαίνεται να αλλάζει στο βαγόνι και όλα τα πειράματα που κάνετε δίνουν τα ίδια αποτελέσματα ανεξάρτητα από το πόσο γρήγορα κινείστε. Για να είμαστε πιο ουσιαστικοί, χωρίς εξωτερικά σημεία αναφοράς για σύγκριση, δεν υπάρχει κανένας τρόπος να δοθεί κάποιο μέτρο ταχύτητας στην κινητική σας κατάσταση. Από την άλλη μεριά, εφόσον κάνετε επιταχυνόμενη κίνηση, ακόμη κι αν η αντιληπτική σας ικανότητα περιορίζεται εντός των ορίων του σφραγισμένου βαγονιού σας, θα νιώσετε μια δύναμη πάνω στο σώμα σας. Για παράδειγμα, αν το κάθισμά σας, που κοιτάζει προς τα εμπρός, είναι βιδωμένο στο πάτωμα και το βαγόνι σας επιταχύνεται προς την ίδια κατεύθυνση, θα νιώσετε τη δύναμη του καθίσματος στην πλάτη σας, όπως ακριβώς στο αυτοκίνητο που περιέγραφε ο Αλβέρτος. Παρομοίως, αν το βαγόνι σας επιταχύνεται προς τα πάνω, θα νιώσετε τη δύναμη από το πάτωμα στα πόδια σας. Ο Einstein συνειδητοποίησε ότι, εντός των ορίων του μικρού σας βαγονιού, δεν θα μπορείτε να ξεχωρίσετε αυτές τις επιταχυνόμενες καταστάσεις από καταστάσεις

χωρίς επιτάχυνση αλλά με βαρύτητα. Όταν τα μεγέθη τους ρυθμιστούν προσεκτικά, οι δυνάμεις που νιώθετε από το βαρυτικό πεδίο ή από την επιταχυνόμενη κίνηση δεν ξεχωρίζουν. Αν το βαγόνι σας στέκεται ήσυχα ήσυχα οριζόντια πάνω στην επιφάνεια της γης, θα νιώθετε τη γνώριμη δύναμη από το πάτωμα στα πόδια σας, όπως και στο σενάριο με την επιτάχυνση προς τα πάνω πρόκειται για την ίδια ακριβώς ισοδυναμία που εκμεταλλεύτηκε ο Αλβέρτος στη δική του λύση για την εκτόξευση της βόρμβας στο διάστημα. Αν το βαγόνι σας στηρίζεται στο πίσω μέρος του, θα νιώθετε τη δύναμη του καθίσματος στην πλάτη σας (που θα σας εμποδίζει να πέσετε), όπως όταν επιταχύνεστε οριζόντιως. Ο Einstein αποκάλεσε την αδυναμία διάκρισης μεταξύ επιταχυνόμενης κίνησης και βαρύτητας αρχή της ισοδυναμίας.² Λυτή η αρχή παίζει σημαντικό ρόλο στη γενική θεωρία της σχετικότητας.

Η περιγραφή αυτή δείχνει ότι η γενική σχετικότητα τελειώνει τη δουλειά που άρχισε η ειδική σχετικότητα. Μέσω της αρχής της σχετικότητας, η ειδική θεωρία της σχετικότητας κηρύσσει τη δημοκρατία όλων των σημείων αναφοράς: οι νόμοι της φυσικής εμφανίζονται πανομοιότυποι σε όλους τους παρατηρητές που εκτελούν ομαλή κίνηση. Κι όμως αυτή η δημοκρατία είναι περιορισμένη, αφού εξαιρεί έναν τεράστιο αριθμό άλλων παρατηρητών και συγκεκριμένα αυτούς των οποίων η κίνηση είναι επιταχυνόμενη. Η ιδέα που είχε ο Einstein το 1907 μας δείχνει πώς να ενσωματώσουμε όλους τους παρατηρητές –είτε χαρακτηρίζονται από ομαλή κίνηση είτε από επιταχυνόμενη– σε ενιαίο πλαίσιο ισονομίας. Εφόσον δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα σε μια θέση παρατήρησης, κινούμενη με επιτάχυνση και χωρίς βαρυτικό πεδίο και σε μια μη επιταχυνόμενη θέση παρατήρησης με βαρυτικό πεδίο, μπορούμε να υιοθετήσουμε τη δεύτερη εκδοχή, και να διακηρύξουμε ότι όλοι οι παρατηρητές, ανεξάρτητα από την κινητική τους κατάσταση, μπορούν να ισχυριστούν ότι είναι ακίνητοι και ότι «κινείται ο υπόλοιπος κόσμος γύρω τους», αρκεί να συμπεριλάβουν το κατάλληλο βαρυτικό πεδίο στην περιγραφή του περιβάλλοντος χώρου. Υπ’

αυτή την έννοια, η γενική θεωρία της σχετικότητας, λαμβάνοντας υπόψη τη βαρύτητα, εξασφαλίζει ότι όλα τα πιθανά σημεία παρατήρησης συγχρίνονται με ίσους όρους. (Όπως θα δούμε αργότερα, αυτό σημαίνει ότι στο Κεφάλαιο 2 οι διακρίσεις μεταξύ παρατηρητών, οι οποίες έγιναν με βάση την επιταχυνόμενη κίνηση –όπως όταν ο Τζορτζ χυνηγούσε την Γκρέισι θέτοντας σε λειτουργία την προωθητική συσκευή του και γερνούσε λιγότερο από αυτήν–, επιδέχονται μια ισοδύναμη περιγραφή χωρίς επιτάχυνση αλλά με βαρύτητα.)

Είναι οπωσδήποτε αξιοσημείωτο ότι ο Einstein συνειδητοποίησε τη στενή σχέση ανάμεσα στη βαρύτητα και την επιταχυνόμενη κίνηση, όμως γιατί αυτό τον έκανε τόσο ευτυχισμένο; Γιατί απλούστατα η βαρύτητα είναι μυστηριώδης. Αποτελεί μια μεγαλειώδη δύναμη που κατακλύζει τη ζωή στο σύμπαν, αλλά είναι άπιαστη και αθέρια. Από την άλλη μεριά, η επιταχυνόμενη κίνηση, μολονότι κάπως πιο περίπλοκη από την ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, είναι συγκεκριμένη και απτή. Ανακαλύπτοντας ένα θεμελιακό χρίκο ανάμεσα στις δύο, ο Einstein συνειδητοποίησε ότι μπορούσε να χρησιμοποιήσει τις γνώσεις του για την κίνηση ως ισχυρό εργαλείο για την απόκτηση παρόμοιων γνώσεων για τη βαρύτητα. Η εφαρμογή αυτής της στρατηγικής στην πράξη δεν ήταν εύκολη υπόθεση, ακόμη και για μια διάνοια όπως ο Einstein, αλλά σε τελευταία ανάλυση αυτή η προσέγγιση γέννησε τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Η κατάκτηση αυτού του στόχου απαιτούσε από τον Einstein να προσθέσει έναν ακόμη χρίκο στην αλυσίδα που ένωνε τη βαρύτητα και την επιταχυνόμενη κίνηση: την καμπύλωση του χώρου και του χρόνου, για την οποία θα μιλήσουμε αμέσως παρακάτω.

Η επιτάχυνση και η στρέβλωση του χώρου και του χρόνου

Ο Einstein προσπάθησε να κατανοήσει τη βαρύτητα δουλεύοντας με φοβερή ένταση. Περίπου πέντε χρόνια μετά την επιτυχή ανα-

κάλυψή του στο γραφείο ευρεσιτεχνιών της Βέρνης, έγραφε στον φυσικό Arnold Sommerfeld: «Δουλεύω τώρα αποκλειστικά πάνω στο πρόβλημα της βαρύτητας... [Ε]νά πράγμα είναι σίγουρο – ότι ποτέ στη ζωή μου δεν τυραννήθηκα τόσο... Σε σύγκριση με αυτό το πρόβλημα, η αρχική [δηλαδή η ειδική] θεωρία της σχετικότητας είναι παιχνιδάκι».³

Φαίνεται ότι το 1912 είχε προχωρήσει στην επόμενη εντυπωσιακή ανακάλυψη-χλειδί, μια απλή αλλά δυσδιάκριτη συνέπεια της εφαρμογής της ειδικής σχετικότητας στη σχέση μεταξύ βαρύτητας και επιταχυνόμενης κίνησης. Για να κατανοήσουμε αυτή την πρόοδο στη συλλογιστική του Einstein, είναι απλούστερο να εστιάσουμε την προσοχή μας, όπως προφανώς έκανε κι ο ίδιος, σε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα επιταχυνόμενης κίνησης.⁴ Θυμηθείτε ότι ένα αντικείμενο επιταχύνεται όταν μεταβάλλεται είτε το μέτρο της ταχύτητας είτε η διεύθυνση της κίνησής του. Για λόγους απλότητας, θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στη μεταβαλλόμενη κίνηση όπου αλλάζει μόνο η διεύθυνση της κίνησης του αντικειμένου μας, ενώ το μέτρο της ταχύτητάς του παραμένει σταθερό. Ειδικότερα, θα εξετάσουμε την κίνηση σε κύκλο, κάτι σαν αυτό που νιώθει κανείς στο Ταψί του λούνα πάρκ. Σε περίπτωση που δεν έχετε δοκιμάσει ποτέ τις αντοχές σας σε κάτι τέτοιο, στέκεστε με την πλάτη στο εσωτερικό μέρος μιας κυκλικής κατασκευής από πλεξιγκλάς, η οποία περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Όπως και με όλες τις επιταχυνόμενες κινήσεις, μπορείτε να νιώσετε αυτή την κίνηση – νιώθετε το σώμα σας να απομακρύνεται από το κέντρο του τροχού ακολουθώντας τη φορά της ακτίνας του, και νιώθετε το κυκλικό τοίχωμα από πλεξιγκλάς να πιέζει την πλάτη σας, κρατώντας σας σε κυκλική τροχιά. (Μάλιστα, μολονότι άσχετο με την παρούσα συζήτηση, η περιστροφική κίνηση σας «καρφίτσωνει» στο πλεξιγκλάς με τόση δύναμη, ώστε όταν η πλατφόρμα όπου στέκεστε φύγει προς τα κάτω, εσείς δεν γλιστράτε μαζί της.) Αν η περιστροφή είναι εξαιρετικά ομαλή και κλείσετε τα μάτια σας, η πίεση της κίνησης στην πλά-

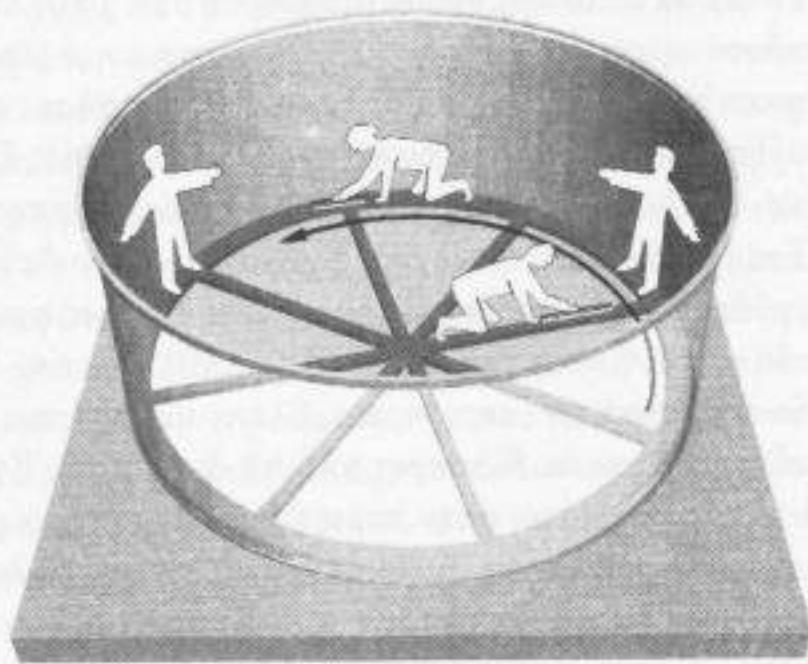
τη σας –όπως και ο τρόπος με τον οποίο στηρίζει το σώμα σας ένα χρεβάτι – μπορεί σχεδόν να σας κάνει να νομίσετε ότι είστε ξαπλωμένος. Το «σχεδόν» προκύπτει από το γεγονός ότι εξακολουθείτε να νιώθετε τη συνήθη «κατακόρυφη» βαρύτητα κι έτσι ο εγχέφαλός σας δεν ξεγελιέται εντελώς. Αλλά αν ανεβαίνατε σε ένα ταψί που βρισκόταν στο διάστημα και αν αυτό περιστρεφόταν με τον κατάλληλο ρυθμό, θα νιώθατε ακριβώς σαν να ήσαστε ξαπλωμένος σε ένα ακίνητο χρεβάτι εδώ στη γη. Επιπλέον, αν σηκωνόσαστε και περπατούσατε πάνω στο περιστρεφόμενο πλεξιγκλάς, τα πόδια σας θα πιέζονταν πάνω του όπως σε ένα δάπεδο πάνω στη γη. Πράγματι, οι διαστημικοί σταθμοί σχεδιάζονται ώστε να περιστρέφονται κατ' αυτό τον τρόπο, για να δημιουργούν μια τεχνητή αίσθηση βαρύτητας στο διάστημα.

Έχοντας χρησιμοποιήσει την επιταχυνόμενη κίνηση του Ταψιού του λούνα παρκ για να μιμηθούμε τη βαρύτητα, μπορούμε τώρα να παρακολουθήσουμε τη σκέψη του Einstein και να δούμε πώς φαίνονται ο χώρος και ο χρόνος σε κάποιον που εκτελεί την περιστροφή. Η συλλογιστική του Einstein, προσαρμοσμένη στο συγκεκριμένο παράδειγμα, έχει ως εξής. Εμείς, οι στατικοί παρατηρητές, μπορούμε εύκολα να μετρήσουμε την περιφέρεια και την ακτίνα του περιστρεφόμενου τροχού. Για παράδειγμα, για να μετρήσουμε την περίμετρο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα χάρακα, καλύπτοντας με προσοχή διαδοχικά όλη την περιφέρεια του περιστρεφόμενου τροχού· για την ακτίνα του μπορούμε να εφαρμόσουμε την ίδια μέθοδο, μετρώντας από το κέντρο του κύκλου μέχρι την εξωτερική στεφάνη του. Σύμφωνα με όσα ξέρουμε από τη γεωμετρία που μάθαμε στο σχολείο, περιμένουμε πως θα βρούμε, και όντως βρίσκουμε, ότι ο λόγος τους ισούται με δύο φορές το π –περίπου 6,28–, όπως συμβαίνει και για κάθε κύκλο που σχεδιάζουμε πάνω σε ένα επίπεδο κομμάτι χαρτί. Όμως πώς βλέπει τα πράγματα όποιος συμμετέχει στην κίνηση;

Για να το μάθουμε, ζητάμε από τον Σλιμ και τον Τζιμ, που

τους βρίσκουμε να απολαμβάνουν μια βόλτα στο Ταψί του λούνα παρκ, να κάνουν μερικές μετρήσεις για λογαριασμό μας. Πετάμε ένα χάρακα στον Σλιμ, ο οποίος ξεκινά να μετρήσει την περιφέρεια του Ταψιού, και άλλον ένα στον Τζιμ, ο οποίος ξεκινά να μετρήσει την ακτίνα. Για να αποχτήσουμε καλύτερη εποπτεία, ας δούμε το Ταψί από ψηλά, όπως στο Σχήμα 3.1. Συνοδεύουμε αυτό το στιγμιότυπο της περιστροφής με ένα βελάκι που δείχνει τη στιγμιαία κατεύθυνση της κίνησης σε κάθε σημείο. Καθώς ο Σλιμ αρχίζει να μετρά την περιφέρεια, βλέπουμε αμέσως από ψηλά ότι η μέτρησή του θα διαφέρει από τη δική μας. Έτσι όπως τοποθετεί το χάρακα πάνω στην περιφέρεια, παρατηρούμε ότι το μήκος του χάρακα κοντάίνει. Λυτό δεν είναι τίποτε άλλο από τη συστολή Lorentz που συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 2, κατά την οποία το μήκος ενός αντικειμένου φαίνεται πως κοντάίνει κατά τη διεύθυνση της κίνησής του. Όμως ένας πιο κοντός χάρακας πρέπει να τοποθετηθεί περισσότερες φορές διαδοχικά, ώστε να καλύψει ολόκληρη την περιφέρεια. Εφόσον ο ίδιος θεωρεί ότι ο χάρακας εξακολουθεί να έχει μήκος ένα μέτρο (αφού δεν υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα σ' εκείνον και το χάρακά του, πιστεύει ότι ο χάρακας έχει το κανονικό του μήκος, δηλαδή ένα μέτρο), αυτό σημαίνει ότι ο Σλιμ θα μετρήσει μεγαλύτερη περιφέρεια απ' ό,τι εμείς.

Τι γίνεται όμως με την ακτίνα; Ο Τζιμ, λοιπόν, χρησιμοποιεί την ίδια μέθοδο για να μετρήσει το μήκος μιας ακτινωτής δοκού, κι εμείς από ψηλά βλέπουμε ότι πρόκειται να βρει την ίδια απάντηση μ' εμάς. Ο λόγος είναι ότι ο χάρακάς του δεν δείχνει προς τη στιγμιαία κατεύθυνση της κίνησης του τροχού (όπως όταν μετριέται η περιφέρεια). Λυτίθετα, δείχνει σε μια κατεύθυνση υπό γωνία ενενήντα μοιρών ως προς την κίνηση, και συνεπώς δεν συστέλλεται το μήκος του. Ο Τζιμ θα βρει συνεπώς ακριβώς το ίδιο μήκος ακτίνας που βρήκαμε κι εμείς.

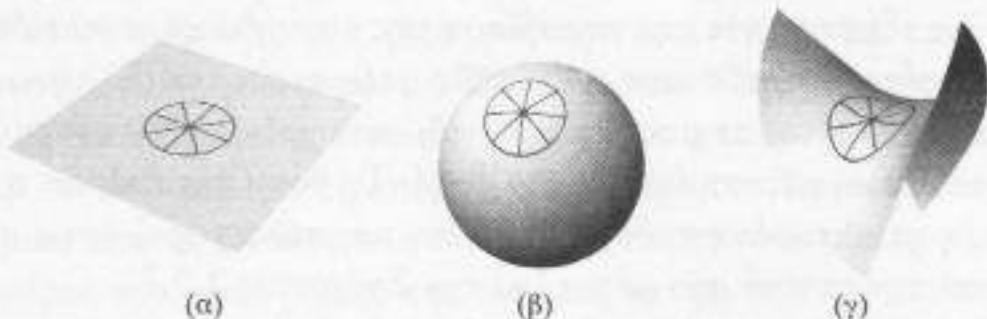


Σχήμα 3.1 Ο χάρακας του Σλιμ συστέλλεται, καθώς τοποθετείται στη διεύθυνη κατά την οποία κινείται το Ταψί. Όμως ο χάρακας του Τζιμ τοποθετείται κατά μήκος μιας ακτινωτής δοχού, κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του Ταψιού, και συνεπώς το μήκος του δεν συστέλλεται.

Τώρα όμως, όταν ο Σλιμ και ο Τζιμ υπολογίσουν το λόγο της περιφέρειας του Ταψιού προς την ακτίνα του, θα βρουν ένα νούμερο που θα είναι μεγαλύτερο από το 2π , τη δική μας απάντηση, αφού η περιφέρεια είναι μεγαλύτερη αλλά η ακτίνα ίδια. Αυτό φαίνεται παράξενο. Πώς στο καλό μπορεί κάτι που έχει το σχήμα του κύκλου να παραβιάζει αυτό το οποίο συνειδητοποίησαν οι αρχαίοι Έλληνες, ότι δηλαδή για κάθε κύκλο ο λόγος αυτός ισούται ακριβώς με δύο φορές το π ;

Νά τι εξήγηση δίνει ο Einstein. Το αποτέλεσμα των αρχαίων Έλλήνων ισχύει για κύκλους που σχεδιάζονται σε επίπεδη επιφάνεια. Αλλά, όπως ακριβώς οι στρεβλοί ή καμπύλοι καθρέφτες σε ένα λούνα πάρκι παραμορφώνουν τις κανονικές χωρικές σχέσεις στην αντανάκλασή σας, αν ένας κύκλος σχεδιαστεί σε μια στρεβλή ή καμπύλη επιφάνεια, οι συνήθεις χωρικές σχέσεις θα παρα-

μορφωθούν επίσης: ο λόγος της περιφέρειάς του προς την ακτίνα του δεν θα είναι κατά κανόνα ίσος με 2π .



Σχήμα 3.2 Ένας κύκλος που σχεδιάζεται σε μια σφαίρα (β) έχει μικρότερη περιφέρεια από έναν που σχεδιάζεται σε ένα επίπεδο φύλλο χαρτί (α), ενώ ένας κύκλος που σχεδιάζεται στην επιφάνεια μιας σέλας (γ) έχει μεγαλύτερη περιφέρεια, μολονότι άλλοι έχουν την ίδια ακτίνα.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.2 συγκρίνονται τρεις κύκλοι των οποίων οι ακτίνες είναι ίσες. Παρατηρήστε ωστόσο ότι οι περιφέρειές τους δεν είναι ίδιες. Η περιφέρεια του κύκλου στο (β) που σχεδιάστηκε πάνω στην καμπύλη επιφάνεια μιας σφαίρας είναι μικρότερη από την περιφέρεια του κύκλου που σχεδιάστηκε πάνω στην επίπεδη επιφάνεια στο (α), μολονότι έχουν την ίδια ακτίνα. Η καμπύλη φύση της επιφάνειας της σφαίρας αναγκάζει τις ακτινικές γραμμές του κύκλου να συγκλίνουν ελαφρά η μία προς την άλλη κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή μείωση στην περιφέρεια του κύκλου. Η περιφέρεια του κύκλου στο (γ), σχεδιασμένη και πάλι σε μια κυρτή επιφάνεια –με σχήμα σέλας– είναι μεγαλύτερη από αυτή που σχεδιάζεται σε μια επίπεδη επιφάνεια: η καμπύλη φύση της επιφάνειας που έχει σχήμα σέλας, αναγκάζει τις ακτινικές γραμμές του κύκλου να αποκλίνουν ελαφρά η μία από την άλλη κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση στην περιφέρεια του κύκλου. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδηλώνουν ότι ο λόγος της περιφέρειας προς την ακτίνα του κύκλου στο (γ) θα είναι μικρότερος από 2π , ενώ ο ίδιος λόγος στο (γ) θα είναι μεγαλύτερος από 2π . Όμως αυτή η απόκλιση από το 2π , κυρίως η με-

γαλύτερη τιμή που βρήκαμε στο (γ), είναι το ίδιο ακριβώς που βρήκαμε για το περιστρεφόμενο Ταψί του λούνα πάρκ. Αυτό οδήγησε τον Einstein να προτείνει μια ιδέα –την καμπύλωση του χώρου– ως εξήγηση για την παραβίαση της «συνήθους», ευκλείδειας γεωμετρίας. Απλούστατα η επίπεδη γεωμετρία των Ελλήνων, η οποία διδάσκεται σε μικρά παιδιά εδώ και χρόνια, δεν εφαρμόζεται για όποιον περιστρέφεται στο Ταψί. Τη θέση της παίρνει, αντίθετα, η γενικευμένη εκδοχή της στον καμπύλο χώρο, όπως αποδίδεται σχηματικά στο μέρος (γ) του Σχήματος 3.2.⁵

Κι έτσι ο Einstein συνειδητοποίησε ότι οι οικείες γεωμετρικές σχέσεις για το χώρο, τις οποίες κωδικοποίησαν οι Έλληνες, σχέσεις που προσιδιάζουν σε «επίπεδες» μορφές χώρου, όπως ένας κύκλος σε ένα επίπεδο τραπέζι, δεν ισχύουν από τη σκοπιά ενός επιταχυνόμενου παρατηρητή. Φυσικά, εμείς έχουμε συζητήσει μόνο ένα συγκεκριμένο είδος επιταχυνόμενης κίνησης, αλλά ο Einstein έδειξε ότι παρόμοια αποτελέσματα –στρέβλωση του χώρου– εμφανίζονται σε κάθε περίπτωση επιταχυνόμενης κίνησης.

Μάλιστα, η επιταχυνόμενη κίνηση δεν έχει ως αποτέλεσμα μόνο τη στρέβλωση του χώρου αλλά και μία ανάλογη στρέβλωση του χρόνου. (Για την ιστορία, ο Einstein εστίασε την προσοχή του πρώτα στη στρέβλωση του χρόνου και κατόπιν συνειδητοποίησε τη σημασία της στρέβλωσης του χώρου.⁶) Από μια άποψη, δεν θα έπρεπε να προκαλεί τόση έκπληξη το γεγονός ότι επηρεάζεται και ο χρόνος, καθώς έχουμε δει ήδη στο Κεφάλαιο 2 ότι η ειδική θεωρία της σχετικότητας διατυπώνει με σαφήνεια τι είναι η φύση του χωροχρόνου. Αυτή η συνένωση συνοψίζεται στα ποιητικά λόγια του Minkowski, ο οποίος σε μια διάλεξη για την ειδική θεωρία της σχετικότητας το 1908, είπε: «Από δω και στο εξής ο χώρος από μόνος του και ο χρόνος από μόνος του θα καταντήσουν απλώς σκιές, και μόνο ένα είδος ένωσης ανάμεσά τους θα διατηρεί την ανεξαρτησία του».⁷ Σε μια πιο προσγειωμένη αλλά το ίδιο αναχριβή γλώσσα, ενώνοντας το χώρο και το χρόνο στην ενοποιημένη δομή του χωροχρόνου, η ειδική θεωρία της σχετικότητας δηλώνει πως «ό, τι ισχύει για το χώρο ισχύει και για το χρόνο».

Άλλα αυτό εγείρει ένα ερώτημα: ενώ μπορούμε να απεικονίσουμε τον στρεβλωμένο χώρο αποδίδοντάς του ένα καμπύλο σχήμα, τι ακριβώς εννοούμε με τη στρέβλωση του χρόνου;

Για να πάρουμε μια ιδέα για την απάντηση, ας εκμεταλλευτούμε άλλη μια φορά τον Σλιμ και τον Τζιμ πάνω στο Ταψί και ας τους ζητήσουμε να εκτελέσουν το ακόλουθο πείραμα. Ο Σλιμ θα στέκεται με την πλάτη στον τοίχο του Ταψιού, στο τέρμα μιας από τις ακτίνες του, ενώ ο Τζιμ θα μπουσουλάει αργά προς το μέρος του κατά μήκος της ακτίνας αυτής, ξεκινώντας από το κέντρο του Ταψιού. Κάθε λίγα μέτρα, ο Τζιμ θα σταματάει το μπουσούλημα και τα δύο αδέρφια θα συγκρίνουν τις ενδείξεις των ρολογιών τους. Τι θα βρίσκουν; Από την πανοραμική σκοπιά ενός ακίνητου παρατηρητή, μπορούμε και πάλι να προβλέψουμε την απάντηση: Τα ρολόγια τους δεν θα συμφωνούν. Καταλήγουμε σε αυτό το συμπέρασμα, επειδή συνειδητοποιούμε ότι ο Σλιμ και ο Τζιμ ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες – στο Ταψί, όσο πιο έξω βρίσκεστε σε μια ακτίνα, τόσο μεγαλύτερη απόσταση διανύετε για να ολοκληρώσετε μία περιστροφή, και κατά συνέπεια πρέπει να κινηθείτε πιο γρήγορα. Όμως εξαιτίας της ειδικής σχετικότητας, όσο πιο γρήγορα κινείστε, τόσο πιο αργά χτυπά το ρολόι σας, και συνεπώς συνειδητοποιούμε ότι το ρολόι του Σλιμ θα χτυπά πιο αργά από τον Τζιμ. Επιπλέον, ο Σλιμ και ο Τζιμ θα ανακαλύψουν ότι, όσο ο Τζιμ πλησιάζει τον Σλιμ, ο ρυθμός των χτύπων στο ρολόι του Τζιμ θα επιβραδύνεται, προσεγγίζοντας το ρυθμό του Σλιμ. Αυτό αντανακλά το γεγονός ότι όσο ο Τζιμ προχωρά προς τα έξω κατά μήκος της ακτίνας, η κυκλική του ταχύτητα αυξάνεται προσεγγίζοντας την ταχύτητα του Σλιμ.

Συμπεραίνουμε ότι για παρατηρητές που μετέχουν στην περιστροφική κίνηση, όπως ο Σλιμ και ο Τζιμ, ο ρυθμός ο οποίος χαρακτηρίζει το πέρασμα του χρόνου, εξαρτάται από την ακριβή τους θέση – στην περίπτωση αυτή, από την απόστασή τους από το κέντρο του Ταψιού. Αυτό μας δείχνει τι εννοούμε με τη στρέβλωση του χρόνου: ο χρόνος στρεβλώνεται αν ο ρυθμός του διαφέρει από τόπο σε τόπο. Και, γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα

συζήτηση, ο Τζιμ θα προσέξει κάτι ακόμη καθώς μπουσουλάει προς τα έξω κατά μήκος της ακτίνας. Θα νιώσει μια όλο και πιο έντονη έλξη προς τα έξω, επειδή δεν αυξάνεται μόνο η ταχύτητά του αλλά και η επιτάχυνσή του, όσο πιο μακριά βρίσκεται από το κέντρο του περιστρεφόμενου Ταψιού. Στο Ταψί λοιπόν βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη επιτάχυνση συνδέεται με πιο αργά ρολόγια – δηλαδή η μεγαλύτερη επιτάχυνση έχει ως αποτέλεσμα μια ισχυρότερη στρέβλωση του χρόνου.

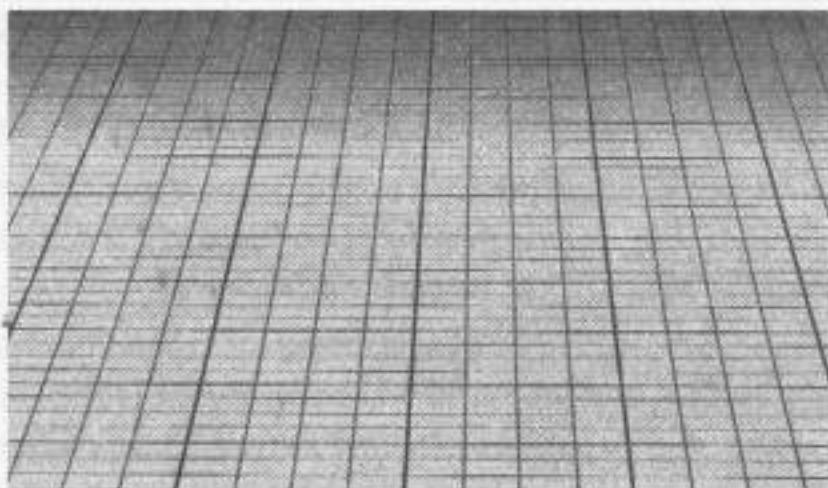
Αυτές οι παρατηρήσεις οδήγησαν τον Einstein στο τελικό άλμα. Αφού είχε δείξει πως η βαρύτητα και η επιταχυνόμενη κίνηση είναι ουσιαστικά μη διακριτές, όταν πια έδειξε ότι και η επιταχυνόμενη κίνηση συνδέεται με τη στρέβλωση του χώρου και του χρόνου, έκανε την ακόλουθη πρόταση σχετικά με τις εσωτερικές λειτουργίες του «μαύρου κουτιού» της βαρύτητας – του μηχανισμού με τον οποίο λειτουργεί η βαρύτητα. Η βαρύτητα, σύμφωνα με τον Einstein, είναι η στρέβλωση του χώρου και του χρόνου. Ας δούμε τι σημαίνει αυτό.

Τα βασικά της γενικής σχετικότητας

Για να πάρουμε μια ιδέα γι' αυτή τη νέα θεώρηση της βαρύτητας, ας εξετάσουμε την πρότυπη κατάσταση ενός πλανήτη, όπως η Γη, που περιστρέφεται γύρω από ένα αστέρι, όπως ο Ήλιος. Στη νευτώνεια βαρύτητα ο Ήλιος κρατά τη Γη σε τροχιά με ένα απροσδιόριστο βαρυτικό «σχοινί» που κατά κάποιον τρόπο απλώνεται ακαριαία σε τεράστιες αποστάσεις στο χώρο και αρπάζει τη Γη (και ομοίως το «σχοινί» της Γης απλώνεται και αρπάζει τον Ήλιο). Ο Einstein μας προσέφερε μια νέα σύλληψη γι' αυτό που πραγματικά συμβαίνει. Θα μας είναι χρήσιμο στη συζήτησή μας για την προσέγγιση του Einstein να έχουμε ένα συγκεκριμένο οπτικό μοντέλο του χωροχρόνου, το οποίο να μπορούμε να χειρίστούμε με άνεση. Για το σκοπό αυτό, θα απλοποιήσουμε δύο πράγματα. Πρώτον, προς το παρόν, θα αγνοήσουμε το χρόνο και

Θα εστιάσουμε την προσοχή μας αποκλειστικά σε ένα οπτικό μοντέλο του χώρου. Θα ενσωματώσουμε ξανά το χρόνο στη συζήτησή μας σύντομα. Δεύτερον, προκειμένου να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε και να χειριστούμε τις εικόνες στις σελίδες του βιβλίου, θα αναφερόμαστε συχνά σε μια διδιάστατη προσομοίωση του τρισδιάστατου χώρου. Οι περισσότερες ιδέες που αποκομίζουμε σκεπτόμενοι με βάση αυτό το μοντέλο με τις λιγότερες διαστάσεις είναι άμεσα εφαρμόσιμες στο πλαίσιο των τριών διαστάσεων κι έτσι το απλούστερο μοντέλο αποτελεί ένα ισχυρό παιδαγωγικό εργαλείο.

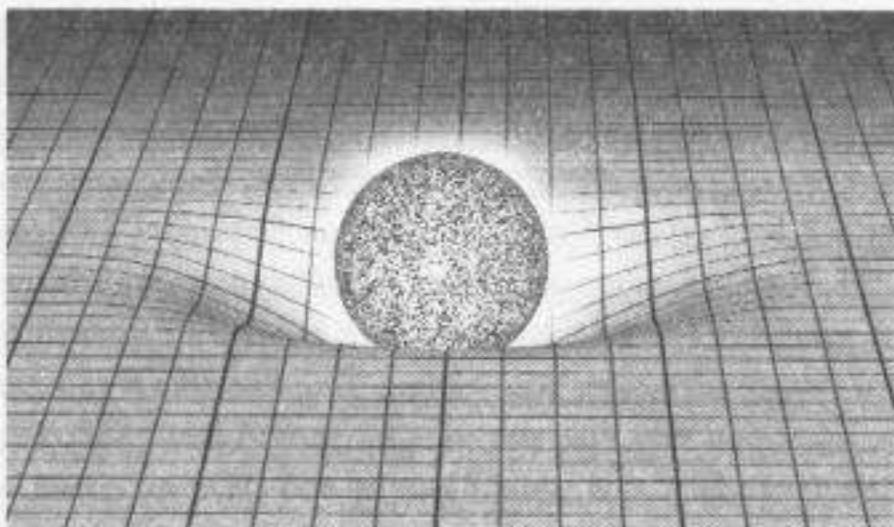
Στο Σχήμα 3.3 χρησιμοποιούμε αυτές τις απλοποιήσεις και σχεδιάζουμε ένα διδιάστατο μοντέλο μιας χωρικής περιοχής του σύμπαντος. Χωρίζουμε το ορθογώνιο σε τετραγωνάκια για να προσδιορίζουμε με άνεση τις διάφορες θέσεις, όπως ακριβώς χωρίζουμε σε τετράγωνα και τους χάρτες με τους δρόμους, προκειμένου να εντοπίζονται οι θέσεις σε μια πόλη. Σε μια πόλη βέβαια δύνει κανείς μια διεύθυνση προσδιορίζοντας μια θέση στον διδιάστατο τετραγωνισμένο χάρτη των δρόμων και μια άλλη, όπως ο αριθμός του ορόφου, στην καταχόρυφη διεύθυνση. Αυτή η τελευταία πληροφορία, η θέση στην τρίτη χωρική διάσταση, αποσιωπάται στο διδιάστατο ανάλογό μας για λόγους οπτικής σαφήνειας.



Σχήμα 3.3 Μια σχηματική αναπαράσταση του επίπεδου χώρου.

Ο Einstein θεωρούσε ότι με την απουσία κάθε είδους ενέργειας ο χώρος θα ήταν επίπεδος. Στο διδιάστατο μοντέλο μας αυτό σημαίνει ότι το «σχήμα» του χώρου θα ήταν σαν την επιφάνεια ενός λείου τραπεζιού, όπως σχεδιάζεται στο Σχήμα 3.3. Σχετικά με το χώρο του σύμπαντός μας, αυτή η εικόνα επικρατούσε για χιλιάδες χρόνια. Άλλα τι συμβαίνει στο χώρο αν είναι παρόν ένα αντικείμενο με μεγάλη μάζα, όπως ο Ήλιος; Πριν από τον Einstein, η απάντηση ήταν τίποτα. Θεωρούσαμε ότι ο χώρος (και ο χρόνος) συνιστούσαν ένα αδρανές σκηνικό, όντας απλώς και μόνο η σκηνή πάνω στην οποία διαδραματίζονταν τα γεγονότα του σύμπαντος. Ακολουθώντας όμως την αλυσίδα των συλλογισμών του Einstein, οδηγούμαστε σε ένα διαφορετικό συμπέρασμα.

Ένα σώμα με μεγάλη μάζα όπως ο Ήλιος, και στην πραγματικότητα κάθε σώμα, ασκεί βαρυτική δύναμη στα άλλα αντικείμενα. Στο παράδειγμα με τη βόμβα των τρομοκρατών μάθαμε ότι η βαρυτική δύναμη δεν ξεχωρίζει από την επιταχυνόμενη κίνηση. Στο παράδειγμα με το Ταφί του λούνα πάρκ μάθαμε ότι για τη μαθηματική περιγραφή της επιταχυνόμενης κίνησης απαιτούνται οι σχέσεις του καμπυλωμένου χώρου. Αυτοί οι συνδετικοί κρίκοι μεταξύ βαρύτητας, επιταχυνόμενης κίνησης και καμπυλωμένου χώρου οδήγησαν τον Einstein να προτείνει κάτι αξιοσημείωτο, ότι η παρουσία μάζας, όπως ο Ήλιος, αναγκάζει τον χωρικό ιστό γύρω της να στρεβλωθεί, όπως δείχνει το Σχήμα 3.4. Μια χρήσιμη αναλογία που επικαλούμαστε συχνά είναι ότι, όπως περίπου μια ελαστική μεμβράνη πάνω στην οποία τοποθετήθηκε μια μπάλα του μπόουλινγκ, έτσι και ο ιστός του χώρου παραμορφώνεται εξαιτίας της παρουσίας ενός αντικειμένου με μεγάλη μάζα, όπως ο Ήλιος. Σύμφωνα με αυτή τη ριζοσπαστική πρόταση, ο χώρος δεν προσφέρεται απλώς ως αδρανής αρένα, ως στίβος όπου διαδραματίζονται τα γεγονότα του σύμπαντος· αντίθετα, το σχήμα του χώρου ανταποκρίνεται στα αντικείμενα του περιβάλλοντος.

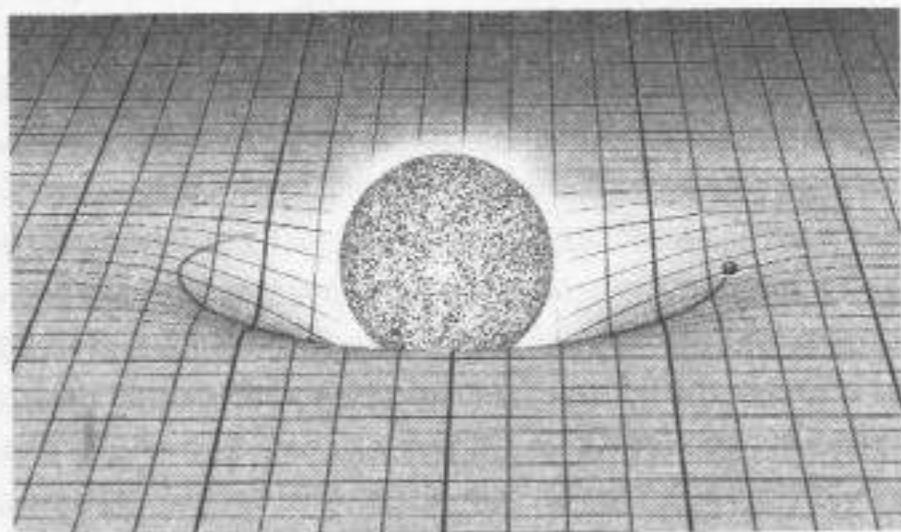


Σχήμα 3.4 Ένα σώμα με μεγάλη μάζα όπως ο Ήλιος αναγκάζει τον χωρικό ιστό να στρεβλωθεί, περίπου όπως μια μπάλα του μπόουλινγκ που τοποθετείται πάνω σε μια ελαστική μεμβράνη.

Αυτή η στρέβλωση, με τη σειρά της, επηρεάζει άλλα αντικείμενα που κινούνται κοντά στον Ήλιο, γιατί πρέπει τώρα να διασχίσουν τον παραμορφωμένο χωρικό ιστό. Χρησιμοποιώντας την αναλογία της ελαστικής μεμβράνης και της μπάλας του μπόουλινγκ, αν τοποθετήσουμε μία μικρή μπίλια στη μεμβράνη και της δώσουμε κάποια αρχική ταχύτητα, η διαδρομή που θα ακολουθήσει εξαρτάται από την παρουσία της μπάλας του μπόουλινγκ στο κέντρο. Αν απουσιάζει η μπάλα του μπόουλινγκ, η ελαστική μεμβράνη θα είναι επίπεδη και η μπίλια θα κινηθεί σε ευθεία γραμμή. Αν η μπάλα του μπόουλινγκ είναι παρούσα και κατά συνέπεια στρεβλώνει τη μεμβράνη, η μπίλια θα διαγράψει καμπύλη διαδρομή. Μάλιστα, αγνοώντας την τριβή, αν θέσουμε την μπίλια σε κίνηση με τη σωστή ακριβώς ταχύτητα στη σωστή ακριβώς κατεύθυνση, θα συνεχίσει να διαγράφει μια επαναλαμβανόμενη καμπύλη διαδρομή γύρω από την μπάλα του μπόουλινγκ – στην πράξη, θα «τεθεί σε τροχιά». Η ίδια η γλώσσα ωθεί αυτή την αναλογία προς το μοντέλο της βαρύτητας.

Ο Ήλιος, όπως και η μπάλα του μπόουλινγκ, στρεβλώνει τον ιστό του χώρου που τον περιβάλλει, και η κίνηση της Γης, όπως

και της μπίλιας, καθορίζεται από το σχήμα της στρέβλωσης. Η Γη, σαν την μπίλια, θα κινηθεί σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο αν η ταχύτητα και ο προσανατολισμός της έχουν τις κατάλληλες τιμές. Αυτή η επίδραση στην κίνηση της Γης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5, είναι αυτό που ονομάζουμε βαρυτική επίδραση του Ήλιου. Η διαφορά τώρα είναι ότι, αντίθετα με τον Newton, ο Einstein προσδιόρισε το μηχανισμό με τον οποίο μεταδίδεται η βαρύτητα: τη στρέβλωση του χώρου. Στη θεώρηση του Einstein, το βαρυτικό σχοινί που κρατά τη Γη σε τροχιά δεν προέρχεται από κάποια μυστηριώδη ακαριαία δύναμη του Ήλιου, αλλά από τη στρέβλωση του χωρικού ιστού που προκαλείται από την παρουσία του Ήλιου.



Σχήμα 3.5 Η Γη διατηρείται σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο επειδή κυλά μέσα σε μια κοιλάδα στον στρεβλωμένο χωρικό ιστό. Για να μιλήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια, ακολουθεί μια «διαδρομή ελάχιστης αντίστασης» στην παραμορφωμένη περιοχή γύρω από τον Ήλιο.

Η εικόνα αυτή μας επιτρέπει να κατανοήσουμε τα δύο ουσιαστικά χαρακτηριστικά της βαρύτητας μ' ένα νέο τρόπο. Πρώτον, όσο πιο μεγάλη μάζα έχει η μπάλα του μπόουλινγκ, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση που προκαλεί στην ελαστική μεμ-

βράνη· παρομοίως, στην περιγραφή του Einstein για τη βαρύτητα, όσο πιο μεγάλη μάζα έχει ένα αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη παραμόρφωση προκαλεί στον περιβάλλοντα χώρο. Αυτό υποδηλώνει ότι όσο πιο μεγάλη μάζα έχει ένα αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη βαρυτική επίδραση μπορεί να ασκήσει σε άλλα σώματα, γεγονός απόλυτα σύμφωνο με την εμπειρία μας. Δεύτερον, όπως ακριβώς η παραμόρφωση της ελαστικής μεμβράνης εξαιτίας της μπάλας του μπόουλινγκ μικραίνει όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν, η ποσότητα της χωρικής στρέβλωσης εξαιτίας ενός σώματος με μεγάλη μάζα, όπως ο Ήλιος, μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το συγκεκριμένο σώμα. Αυτό, πάλι, ταιριάζει με τον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε τη βαρύτητα, της οποίας η επίδραση εξασθενεί όσο η απόσταση ανάμεσα στα αντικείμενα μεγαλώνει.

Ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να επισημάνουμε είναι ότι και η ίδια η μπίλια στρεβλώνει την ελαστική μεμβράνη, αν και πολύ λίγο. Παρομοίως, η Γη, όντας και η ίδια ένα σώμα με μεγάλη μάζα, στρεβλώνει επίσης τον χωρικό ιστό, μολονότι πολύ λιγότερο από τον Ήλιο. Κατ' αυτό τον τρόπο, στη γλώσσα της γενικής σχετικότητας, η Γη κρατά τη Σελήνη σε τροχιά και τον καθένα μας δεμένο στην επιφάνειά της. Όταν ένας αλεξιπτωτιστής βουτά προς το έδαφος, γλιστρά σε μια κατωφέρεια του χωρικού ιστού που προκαλείται από τη μάζα της Γης. Επιπλέον, ο καθένας μας – όπως και κάθε άλλο αντικείμενο με μάζα – στρεβλώνει επίσης τον χωρικό ιστό στη στενή γειτονία του σώματός του, παρότι η συγκριτικά μικρή μάζα ενός ανθρώπινου σώματος καθιστά αυτό το κοίλωμα εξαιρετικά μικρό.

Περιληπτικά λοιπόν, ο Einstein συμφωνούσε απόλυτα με τη δήλωση του Newton ότι «η βαρύτητα πρέπει να οφείλεται σε κάποιο μεσολαβητή» και απάντησε στην πρόκληση του Newton, που άφηνε την ταυτότητα του μεσολαβητή αυτού «στην κρίση των αναγνωστών του». Ο μεσολαβητής της βαρύτητας, σύμφωνα με τον Einstein, είναι ο κοσμικός ιστός.

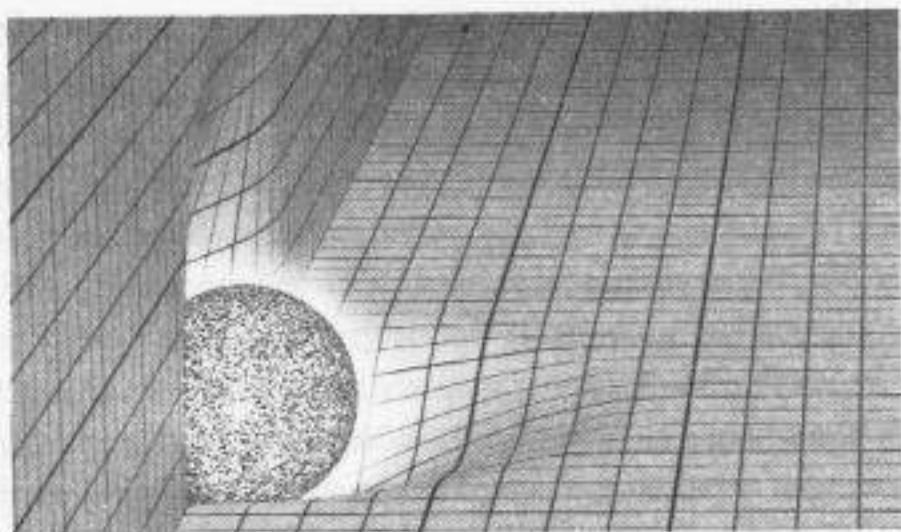
Μερικές προειδοποιήσεις

Η αναλογία της ελαστικής μεμβράνης και της μπάλας του μπόουλινγκ είναι πολύτιμη, γιατί μας παρέχει μια εικόνα με την οποία μπορεί να γίνει χειροπιαστό αυτό που εννοούμε ως στρέβλωση του χωρικού ιστού του σύμπαντος. Οι φυσικοί χρησιμοποιούν συχνά αυτήν και άλλες παρόμοιες αναλογίες για να καθοδηγήσουν τη διαίσθησή τους αναφορικά με τη βαρύτητα και την καμπυλότητα. Εντούτοις, παρά τη χρησιμότητά της, η αναλογία της ελαστικής μεμβράνης και της μπάλας του μπόουλινγκ δεν είναι τέλεια, και για λόγους σαφήνειας θα επιστήσουμε την προσοχή σε μερικές από τις αδυναμίες της.

Πρώτον, όταν ο Ήλιος κάνει τον χωρικό ιστό γύρω του να στρεβλώνεται, αυτό δεν συμβαίνει επειδή ο ίδιος «τραβιέται προς τα κάτω» από τη βαρύτητα όπως γίνεται με την μπάλα του μπόουλινγκ, η οποία στρεβλώνει την ελαστική μεμβράνη, επειδή τραβιέται προς τη μεριά της Γης από τη βαρύτητα. Στην περίπτωση του Ήλιου, δεν υπάρχει κάποιο άλλο αντικείμενο για να «τον τραβήξει». Αντίθετα, ο Einstein μας έμαθε ότι η στρέβλωση του χώρου είναι η βαρύτητα. Η παρουσία και μόνο ενός αντικειμένου με μάζα αναγκάζει το χώρο να ανταποκριθεί αποκτώντας μια στρέβλωση. Παρομοίως, η Γη δεν διατηρείται σε τροχιά, επειδή η βαρυτική έλξη κάποιου άλλου εξωτερικού αντικειμένου την οδηγεί κατά μήκος των κοιλάδων στον στρέβλωμένο περιβάλλοντα χώρο, όπως γίνεται με την μπίλια στη στρέβλωμένη ελαστική μεμβράνη. Αντίθετα, ο Einstein έδειξε ότι τα αντικείμενα κινούνται διαμέσου του χώρου (του χωρογρόνου, ακριβέστερα) κατά μήκος των συντομότερων δυνατών διαδρομών – των «ευκολότερων δυνατών διαδρομών» ή των «διαδρομών ελάχιστης αντίστασης». Αν ο χώρος είναι στρέβλωμένος, οι διαδρομές αυτές θα είναι καμπύλες. Κι έτσι, μολονότι το μοντέλο της ελαστικής μεμβράνης και της μπάλας του μπόουλινγκ παρέχει μία καλή οπτική αναλογία, δείχνοντάς μας πώς ένα αντικείμενο

όπως ο Ήλιος στρεβλώνει το χώρο γύρω του και συνεπώς επηρεάζει την κίνηση άλλων σωμάτων, ο φυσικός μηχανισμός με τον οποίο συμβαίνουν αυτές οι παραμορφώσεις είναι εντελώς διαφορετικός. Ενώ ο προηγούμενος μηχανισμός αντιστοιχεί στη διαίσθησή μας περί βαρύτητας σύμφωνα με το παραδοσιακό νευτώνειο πλαίσιο, ο τελευταίος συνιστά μια αναδιατύπωση της βαρύτητας σύμφωνα με τους όρους του καμπυλωμένου χώρου.

Μια δεύτερη αδυναμία της αναλογίας προέρχεται από το γεγονός ότι η ελαστική μεμβράνη είναι διδιάστατη. Στην πραγματικότητα, μολονότι αυτό είναι δυσκολότερο να το συλλάβουμε σαν εικόνα, ο Ήλιος (και όλα τα άλλα αντικείμενα με μεγάλη μάζα) στην πραγματικότητα στρεβλώνει τον τρισδιάστατο χώρο που τον περιβάλλει. Το Σχήμα 3.6 είναι μια χονδρειδής απόπειρα απεικόνισης· ολόκληρος ο χώρος που περιβάλλει τον Ήλιο –«από κάτω», «από τα πλάγια», «από πάνω»–, υπόκειται στο ίδιο είδος παραμόρφωσης, και το Σχήμα 3.6 αποδίδει σχηματικά ένα μέρος αυτής της παραμόρφωσης. Ένα σώμα, όπως η Γη, ταξιδεύει μέσα στον τρισδιάστατο στρεβλωμένο περιβάλλοντα χώρο που προκάλεσε η παρουσία του Ήλιου. Ίσως βρείτε το σχήμα αυτό προβληματικό – γιατί η Γη δεν προσκρούει πάνω στο «κάθετο τμήμα» του καμπυλωμένου χώρου στην εικόνα; Θυμηθείτε όμως ότι ο χώρος, σε αντίθεση με την ελαστική μεμβράνη, δεν αποτελεί στερεό εμπόδιο. Αντίθετα, τα στρεβλωμένα πλέγματα της εικόνας δεν είναι παρά ένα ζευγάρι λεπτές φέτες, κομμένες κατά μήκος ολόκληρου του τρισδιάστατου στρεβλωμένου χώρου μέσα στον οποίο εσείς, η Γη και καθετί άλλο είστε εντελώς βυθισμένοι και κινείστε ελεύθερα. Ίσως θεωρήσετε ότι αυτό απλώς χειροτερεύει το πρόβλημα: Γιατί δεν νιώθουμε το χώρο, εφόσον είμαστε βυθισμένοι μέσα στον ιστό του; Κι όμως τον νιώθουμε. Νιώθουμε τη βαρύτητα, και ο χώρος αποτελεί το μέσο με το οποίο μεταδίδεται η βαρυτική δύναμη. Όπως έχει πει επανειλημμένα ο επιφανής φυσικός John Wheeler, περιγράφοντας τη βαρύτητα, «η μάζα επιβάλλεται στο χώρο υπαγορεύοντάς του πώς να καμπυλώσει, κι ο χώρος επιβάλλεται στη μάζα υπαγορεύοντάς της πώς να κινηθεί».⁸



Σχήμα 3.6 Μια απεικόνιση του στρεβλωμένου τρισδιάστατου χώρου που περιβάλλει τον Ήλιο.

Μια τρίτη αδυναμία που συνδέεται με αυτή την αναλογία είναι το γεγονός ότι έχουμε βάλει στην άκρη τη γρανική διάσταση. Αυτό έγινε για λόγους οπτικής σαφήνειας διότι, παρά τις επιταγές της γενικής σχετικότητας, ότι δηλαδή πρέπει να θεωρούμε τη γρανική διάσταση ισότιμη με τις τρεις οικείες χωρικές διαστάσεις, είναι πολύ δυσκολότερο να «δούμε» το χρόνο. Όμως, όπως φάνηκε με το παράδειγμα του Ταψιού στο λούνα πάρκ, η επιτάχυνση – και κατά συνέπεια και η βαρύτητα – στρεβλώνει τόσο το χώρο όσο και το χρόνο. (Μάλιστα, τα μαθηματικά της γενικής σχετικότητας δείχνουν ότι στην περίπτωση ενός σχετικά αργοχίνητου σώματος, όπως η Γη, που περιφέρεται γύρω από ένα συνηθισμένο αστέρα, όπως ο Ήλιος, η στρέβλωση του χρόνου έχει τελικά πολύ σημαντικότερο αντίκτυπο στην κίνηση της Γης απ' ό,τι η στρέβλωση του χώρου.) Θα επανέλθουμε στο θέμα της στρέβλωσής του χρόνου μετά την επόμενη ενότητα.

Όσο σημαντικές κι αν είναι αυτές οι προειδοποιήσεις, εάν και εφόσον τις λαμβάνετε υπόψη σας, είναι απόλυτα αποδεκτό να επικαλείστε την εικόνα του στρεβλωμένου χώρου που μας παρέχει η μπάλα του μπόουλινγκ πάνω στην ελαστική μεμβράνη ως σχη-

ματική απεικόνιση της νέας θεώρησης του Einstein για τη βαρύτητα.

Επίλυση συγκρούσεων

Εισάγοντας το χώρο και το χρόνο ως δυναμικούς πρωταγωνιστές, ο Einstein έδωσε μια καθαρή νοητική εικόνα του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η βαρύτητα. Το κεντρικό ερώτημα ωστόσο είναι κατά πόσο αυτή η αναδιατύπωση της βαρυτικής δύναμης επιλύει τη σύγκρουση μεταξύ της ειδικής σχετικότητας και της νευτώνειας θεωρίας για τη βαρύτητα. Το κάνει όντως. Και πάλι η αναλογία της ελαστικής μεμβράνης παρέχει την κεντρική ιδέα. Φανταστείτε ότι έχουμε μια μπίλια που κυλά σε ευθεία γραμμή κατά μήκος της επίπεδης μεμβράνης, χωρίς να υπάρχει η μπάλα του μπόουλινγκ. Όταν τοποθετήσουμε την μπάλα του μπόουλινγκ στη μεμβράνη, η κίνηση της μπίλιας θα επηρεαστεί αλλά όχι ακαριαία. Αν τραβούσαμε σε φιλμ αυτή την ακολουθία συμβάντων και την προβάλλαμε σε αργή κίνηση, θα βλέπαμε ότι η διαταραχή που προκλήθηκε από την τοποθέτηση της μπάλας του μπόουλινγκ απλώνεται σαν τις ρυτιδώσεις στην επιφάνεια μας λιμνούλας και κάποια στιγμή φτάνει στη θέση της μπίλιας. Μετά από λίγο, οι παροδικές κυματώσεις κατά μήκος της ελαστικής επιφάνειας θα πάψουν, αφήνοντάς μας μια στατική στρεβλωμένη μεμβράνη.

Το ίδιο ισχύει και για τον χωρικό ιστό. Όταν δεν είναι παρούσα κάποια μάζα, ο χώρος είναι επίπεδος, και ένα μικρό αντικείμενο θα χαίρεται μακάριο την ακινησία του ή θα κινείται με σταθερή ταχύτητα. Αν μια μεγάλη μάζα εμφανιστεί στο προσκήνιο, ο χώρος θα στρεβλωθεί – αλλά, όπως και στην περίπτωση της μεμβράνης, η παραμόρφωση δεν θα είναι ακαριαία. Αντίθετα, θα ξεκινά από το σώμα με τη μεγάλη μάζα και θα απλώνεται προς τα έξω, καταλήγοντας τελικά σ' εκείνο το στρεβλωμένο σχήμα που μεταδίδει τη βαρυτική έλξη του νέου σώματος. Στην αναλογία μας, οι διαταρα-

χές στην ελαστική μεμβράνη ταξιδεύουν κατά μήκος της έκτασής της με μια ταχύτητα που υπαγορεύεται από τη συγχεκριμένη υλική της σύσταση. Στο πραγματικό περιβάλλον της γενικής σχετικότητας, ο Einstein μπόρεσε να υπολογίσει πόσο γρήγορα ταξιδεύουν οι διαταραχές στον ιστό του σύμπαντος και βρήκε ότι διαδίδονται ακριβώς με την ταχύτητα του φωτός. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι στην υποθετική κατάσταση που συζητούσαμε νωρίτερα, όπου ο θάνατος του Ήλιου επιδρά στη Γη εξαιτίας των αλλαγών στην αμοιβαία βαρυτική τους έλξη, η επίδραση αυτή δεν θα μεταδοθεί ακαριαία. Αντίθετα, όταν ένα αντικείμενο αλλάζει θέση, πόσο μάλλον όταν εκρήγνυται, προκαλεί μεταβολή στην παραμόρφωση του χωροχρονικού ιστού, η οποία διαδίδεται προς τα έξω με την ταχύτητα του φωτός, τηρώντας ευλαβικά το κοσμικό όριο ταχύτητας της ειδικής σχετικότητας. Έτσι, εμείς στη Γη θα αντιλαμβανόμαστε οπτικά την καταστροφή του Ήλιου την ίδια στιγμή που θα νιώθαμε τις βαρυτικές συνέπειες – περίπου οκτώ λεπτά μετά την έκρηξη. Συνεπώς η διατύπωση του Einstein επιλύει τη σύγκρουση· οι βαρυτικές διαταραχές συμβαδίζουν με τα φωτόνια, αλλά δεν τα ξεπερνούν.

Η στρέβλωση του χρόνου, αναθεωρημένη

Απεικονίσεις όπως αυτές στα Σχήματα 3.2, 3.4 και 3.6 συλλαμβάνουν την ουσία της σημασίας του «στρέβλωμένου χώρου». Μια στρέβλωση παραμορφώνει το σχήμα του χώρου. Οι φυσικοί έχουν επινοήσει ανάλογες εικόνες προσπαθώντας να αποδώσουν το νόημα του «στρέβλωμένου χρόνου», αλλά είναι πολύ πιο δύσκολο να γίνουν κατανοητές, κι έτσι δεν θα τις παρουσιάσουμε εδώ. Αντί γι' αυτές, ας ακολουθήσουμε το παράδειγμα του Σλιμ και του Τζιμ στο Ταψί του λούνα πάρκ κι ας προσπαθήσουμε να πάρουμε μια ιδέα της εμπειρίας που προκαλεί ο στρέβλωμένος, λόγω βαρύτητας, χρόνος.

Για να το πετύχουμε, ας θυμηθούμε τον Τζορτζ και την Γκρέι-

σι, που δεν πλέουν πια στα σκοτεινά βάθη του κενού διαστήματος αλλά στα περίχωρα του ηλιακού συστήματος. Εξακολουθούν να φορούν μεγάλα ψηφιακά ρολόγια στις διαστημικές τους στολές, τα οποία αρχικά είναι συντονισμένα. Για να διατηρήσουμε τα πράγματα απλά, αγνοούμε την επίδραση των πλανητών και εξετάζουμε μόνο το βαρυτικό πεδίο του Ήλιου. Ας φανταστούμε επίσης ότι από ένα διαστημόπλοιο που μετεωρίζεται κοντά στον Τζορτζ και την Γκρέισι ξετυλίγεται ένα μακρύ καλώδιο που φτάνει μέχρι την επιφάνεια του Ήλιου. Ο Τζορτζ χρησιμοποιεί το καλώδιο αυτό για να κατέβει σιγά σιγά προς τον Ήλιο. Καθώς κατεβαίνει, σταματά κάθε λίγο έτσι ώστε αυτός και η Γκρέισι να μπορούν να συγχρίνουν το ρυθμό με τον οποίο παρέρχεται ο χρόνος στα ρολόγια τους. Η στρέβλωση που προβλέπει για το χρόνο η γενική θεωρία της σχετικότητας του Einstein, συνεπάγεται ότι το ρολόι του Τζορτζ θα πηγαίνει όλο και πιο αργά σε σύγκριση με της Γκρέισι, όσο γίνεται όλο και πιο ισχυρό το βαρυτικό πεδίο που αισθάνεται ο Τζορτζ. Δηλαδή όσο πιο κοντά πλησιάζει στον Ήλιο, τόσο πιο αργά θα πηγαίνει το ρολόι του. Κατ' αυτή την έννοια, η βαρύτητα παραμορφώνει και το χρόνο όπως και το χώρο.

Θα πρέπει να παρατηρήσατε ότι, σε αντίθεση με την περίπτωση στο Κεφάλαιο 2, όπου ο Τζορτζ και η Γκρέισι βρίσκονταν στο κενό κινούμενοι ο ένας σε σχέση με τον άλλο με σταθερή ταχύτητα, στην παρούσα κατάσταση δεν υπάρχει καμία συμμετρία ανάμεσά τους. Ο Τζορτζ, σε αντίθεση με την Γκρέισι, νιώθει τη δύναμη της βαρύτητας να γίνεται ολοένα και ισχυρότερη – πρέπει να κρατά το καλώδιο όλο και πιο σφιγτά όσο πλησιάζει στον Ήλιο, για να αποφύγει να τον τραβήξει ο Ήλιος μέσα του. Και οι δύο συμφωνούν ότι το ρολόι του Τζορτζ πηγαίνει πιο αργά. Δεν υπάρχει καμία «ισοδύναμη προοπτική», η οποία θα επέτρεπε την αντιστροφή των ρόλων τους χωρίς να αλλάξει τίποτε. Το ίδιο ακριβώς είδαμε και στο Κεφάλαιο 2, όταν ο Τζορτζ αισθάνθηκε την επιτάχυνση πυροδοτώντας την προωθητική συσκευή του για να προφτάσει την Γκρέισι. Η επιτάχυνση την οποία ένιωσε ο Τζορτζ είχε ως αποτέλεσμα το ρολόι του να πηγαίνει σαφώς πιο αργά σε

σχέση με εκείνο της Γκρέισι. Καθώς τώρα γνωρίζουμε ότι η αισθηση της επιταχυνόμενης κίνησης είναι η ίδια με την αισθηση της βαρυτικής δύναμης, στην παρούσα κατάσταση του Τζορτζ που κρατιέται από το καλώδιο, εμπλέκεται η ίδια αρχή της φυσικής, και για άλλη μια φορά βλέπουμε ότι το ρολόι του Τζορτζ, και καθετί άλλο στη ζωή του, δουλεύει σε αργή κίνηση σε σύγκριση με την Γκρέισι.

Σε ένα βαρυτικό πεδίο σαν κι αυτό στην επιφάνεια ενός συνηθισμένου άστρου όπως ο Ήλιος, η βράδυνση των ρολογιών είναι αρκετά μικρή. Αν η Γκρέισι μείνει στη θέση της, ένα δισεκατομμύριο χιλιόμετρα μακριά από τον Ήλιο, τότε, όταν ο Τζορτζ θα έχει κατέβει λίγα χιλιόμετρα πριν από την επιφάνεια του Ήλιου, ο ρυθμός των χτύπων στο ρολόι του θα προσεγγίζει περίπου το 99,9998% του ρυθμού στο ρολόι της Γκρέισι. Πιο αργός, αλλά όχι κατά πολύ.⁹ Αν ωστόσο ο Τζορτζ κατέβαινε με ένα καλώδιο τόσο χαμηλά, ώστε να αιωρείται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια ενός αστέρα νετρονίων, ο οποίος έχει μάζα ίση περίπου με αυτήν του Ήλιου αλλά πυκνότητα μερικά εκατομμύρια δισεκατομμυρίων φορές μεγαλύτερη από την ηλιακή πυκνότητα, το ισχυρότερο βαρυτικό πεδίο θα έκανε το ρολόι του να χτυπά με ρυθμό που θα αντιστοιχούσε περίπου στο 76% του ρυθμού στο ρολόι της Γκρέισι. Ισχυρότερα βαρυτικά πεδία, όπως αυτά που απαντούν στην περιφέρεια μιας μαύρης τρύπας (θα τα εξετάσουμε παρακάτω), προένονται μια ακόμη πιο αργή ροή του χρόνου· ισχυρότερα βαρυτικά πεδία προένονται εντονότερη στρέβλωση του χρόνου.

Πειραματική επαλήθευση της γενικής σχετικότητας

Οι περισσότεροι άνθρωποι που μελετούν τη γενική σχετικότητα θέλγονται από την αισθητική της κομψότητα. Αντικαθιστώντας την ψυχρή, μηχανιστική νευτώνεια θεώρηση του χώρου, του χρόνου και της βαρύτητας με μια δυναμική και γεωμετρική περιγραφή που περιλαμβάνει έναν καμπυλωμένο χωροχρόνο, ο Einstein

συνύφανε τη βαρύτητα στον θεμελιακό ιστό του σύμπαντος. Αντί να επιβάλλεται ως μια επιπρόσθετη δομή, η βαρύτητα γίνεται αναπόσπαστο τμήμα του σύμπαντος στο πλέον θεμελιώδες του επίπεδο. Η ζωντάνια του χώρου και του χρόνου, που τους επιτρέπει να καμπυλώνονται, να αναδιπλώνονται και να παρουσιάζουν κυματισμούς, είναι αυτό που συνήθως αποκαλούμε βαρύτητα.

Πέρα από ζητήματα αισθητικής, η τελική δοκιμασία για μια φυσική θεωρία είναι η ικανότητά της να εξηγεί και να προβλέπει με ακρίβεια τα φυσικά φαινόμενα. Από τη σύλληψή της στα τέλη του δέκατου έβδομου αιώνα μέχρι τις αρχές του εικοστού, η νευτώνεια θεωρία περί βαρύτητας περνούσε αυτή τη δοκιμασία με εξαιρετικές επιδόσεις. Είτε εφαρμοζόταν σε μπάλες που πετιούνταν στον αέρα, είτε σε αντικείμενα που έπεφταν από επικλινείς πύργους, σε κοινήτες που περιστρέφονταν γύρω από τον Ήλιο ή σε πλανήτες που διέγραφαν τροχιές γύρω από τον Ήλιο, η θεωρία του Newton παρείχε εξαιρετικά ακριβείς εξηγήσεις για όλες τις παρατηρήσεις αλλά και προβλέψεις που επαληθεύονταν αμέτρητες φορές και σε πολλίλες καταστάσεις. Το κίνητρο για την αμφισβήτηση αυτής της εξαιρετικά πετυχημένης θεωρίας, όπως έχουμε τονίσει, ήταν η ιδιότητά της να μεταδίδει ακαριαία τη βαρυτική δύναμη, η οποία έρχεται σε αντίθεση με την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Οι συνέπειες της ειδικής σχετικότητας, μολονότι αποτελούν βασικό στοιχείο για μια ουσιαστική κατανόηση του χώρου, του χρόνου και της κίνησης, είναι εξαιρετικά ισχνές στον κανονικό χόσμο των μικρών ταχυτήτων που μας περιβάλλει. Παρομοίως, οι αποκλίσεις ανάμεσα στη γενική σχετικότητα του Einstein –μια θεωρία περί βαρύτητας συμβατή με την ειδική σχετικότητα– και τη νευτώνεια θεωρία περί βαρύτητας είναι σχεδόν αμελητέες στις περισσότερες καταστάσεις που αντιμετωπίζουμε συνήθως. Αυτό είναι και καλό και κακό. Καλό γιατί κάθε θεωρία που φιλοδοξεί να εκτοπίσει τη νευτώνεια θεωρία της βαρύτητας θα πρέπει να συμφωνεί απόλυτα μαζί της στους τομείς εκείνους όπου η εφαρμογή της έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Κακό επειδή έτσι γίνεται δύσκολο να αποφανθούμε πειραματικά υπέρ μιας από τις δύο θεω-

ρίες. Η διάκριση ανάμεσα στη θεωρία του Newton και του Einstein απαιτεί εξαιρετικά ακρίβεις μετρήσεις σε πειράματα τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα στα σημεία όπου διαφοροποιούνται οι δύο θεωρίες. Αν πετάξετε μια μπάλα του μπέιζμπολ, τόσο η βαρύτητα του Newton όσο και του Einstein μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει πού θα προσγειωθεί, και μολονότι οι απαντήσεις θα διαφέρουν, οι διαφορές θα είναι τόσο μικρές, που σε γενικές γραμμές θα ξεπερνούν την ικανότητά μας να τις ανιχνεύσουμε πειραματικά. Απαιτείται ένα πιο έξυπνο πείραμα, και ο Einstein πρότεινε ένα.¹⁰

Βλέπουμε τα αστέρια μόνο τη νύχτα, αλλά φυσικά βρίσκονται εκεί και τη μέρα. Συνήθως δεν τα βλέπουμε, επειδή το μακρινό στίγμα τους καλύπτεται εντελώς από το φως που εκπέμπει ο Ήλιος. Κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής έκλειψης ωστόσο η Σελήνη εμποδίζει προσωρινά το φως του Ήλιου και οι μακρινοί αστέρες γίνονται ορατοί. Εντούτοις η παρουσία του Ήλιου εξακολουθεί να έχει κάποια συνέπεια. Το φως κάποιων μακρινών αστέρων πρέπει να περάσει πολύ χοντά από τον Ήλιο για να φτάσει στη Γη. Η γενική σχετικότητα του Einstein προβλέπει ότι ο Ήλιος θα προκαλέσει τη στρέβλωση του περιβάλλοντος χώρου και χρόνου και ότι αυτή η παραμόρφωση θα επηρεάσει τη διαδρομή που ακολουθεί το αστρικό φως. Άλλωστε τα φωτόνια από μια μακρινή πηγή ταξιδεύουν διαμέσου του ιστού του σύμπαντος· αν ο ιστός αυτός είναι στρεβλός, η κίνηση των φωτονίων θα επηρεαστεί όσο και η κίνηση των υλικών σωμάτων. Η κύρτωση της διαδρομής του φωτός είναι μέγιστη για εκείνα τα φωτεινά σήματα που στο δρόμο τους για τη Γη περνούν ξυστά από τον Ήλιο. Μια ηλιακή έκλειψη καθιστά δυνατή την παρατήρηση τέτοιων αστέρων των οποίων το φως περνά ξυστά από τον Ήλιο, χωρίς να επισκιάζεται εντελώς από το ηλιακό φως.

Η γωνία που σχηματίζει η διαδρομή του φωτός μπορεί να μετρηθεί με έναν απλό τρόπο. Η κύρτωση της διαδρομής του αστρικού φωτός έχει ως αποτέλεσμα μια μετατόπιση στη φαινόμενη θέση του αστέρα. Μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια τη με-

τατόπιση συγχρίνοντας αυτή τη φαινόμενη θέση με την πραγματική θέση του αστέρα, η οποία μας είναι γνωστή από παρατηρήσεις του τη νύχτα (όταν απουσιάζει η στρεβλωτική επίδραση του Ήλιου), που έχουν γίνει όταν η Γη βρίσκεται στην κατάληξη θέσης, περίπου έξι μήνες νωρίτερα ή αργότερα. Το Νοέμβριο του 1915, ο Einstein χρησιμοποίησε τη νέα του θεώρηση για τη βαρύτητα για να υπολογίσει τη γωνία απόκλισης των φωτεινών αστρικών σημάτων που περνούν ξυστά από τον Ήλιο, και βρήκε ότι η απάντηση ήταν 0,00049 της μοίρας (1,75 δεύτερα ακτινίου, όπου το ένα δεύτερο ακτινίου ισούται με το $\frac{1}{3600}$ της μοίρας). Η μικροσκοπική αυτή γωνία είναι ίση με τη γωνία που ορίζει στο οπτικό πεδίο ένα χέρμα των 10 λεπτών ιδωμένο από απόσταση τριών περίπου χιλιομέτρων. Η ανίχνευση μιας τόσο μικρής γωνίας ωστόσο ήταν εντός των τεχνολογικών ορίων της εποχής. Με παρότρυνση του Sir Frank Dyson, διευθυντή του αστεροσκοπείου του Γκρίνουιτς, ο Sir Arthur Eddington, διάσημος αστρονόμος και γραμματέας της Royal Astronomical Society στην Αγγλία, οργάνωσε μια αποστολή στο νησί Πρίνσιπε έξω από τις ακτές της Δυτικής Αφρικής για να ελέγξει την πρόβλεψη του Einstein κατά τη διάρκεια της ηλιακής έκλειψης της 29ης Μαΐου του 1919.

Στις 6 Νοεμβρίου 1919, μετά από πέντε μήνες αναλύσεων των φωτογραφιών που τραβήχτηκαν κατά την έκλειψη στο Πρίνσιπε (και άλλων φωτογραφιών της έκλειψης που τραβήχτηκαν από μία άλλη βρετανική ομάδα με επικεφαλής τους Charles Davidson και Andrew Crommelin στο Σομπράλ της Βραζιλίας) ανακοινώθηκε σε μια κοινή συνέλευση της Royal Society και της Royal Astronomical Society ότι η βασισμένη στη γενική θεωρία της σχετικότητας πρόβλεψη του Einstein είχε επιβεβαιωθεί. Χρειάστηκε ελάχιστος χρόνος για να μαθευτεί αυτή η επιτυχία – η πλήρης ανατροπή των προηγούμενων αντιλήψεων για το χώρο και το χρόνο – πέρα από τα σύνορα της επιστημονικής κοινότητας των φυσικών και να γίνει ο Einstein διάσημος παγκοσμίως. Στις 7 Νοεμβρίου 1919, ο κεντρικός τίτλος των *Times* του Λονδίνου έγραφε το εξής:

«ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ – ΝΕΑ ΘΕΩΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΜΠΛΑΝ – ΟΙ ΝΕΥΤΡΟΝΙΕΣ ΑΝΤΙΔΗΨΕΙΣ ΑΝΑΤΡΕΠΟΝΤΑΙ».¹¹ Αυτή ήταν η στιγμή το θριάμβου για τον Einstein.

Στα χρόνια που ακολούθησαν αυτό το πείραμα, η επιβεβαίωση της γενικής σχετικότητας από τον Eddington υπέστη εξονυχιστική έρευνα. Πολυάριθμες δυσνόητες και δυσδιάκριτες όψεις της μέτρησης καθιστούσαν δύσκολη την προσομοίωση και προκαλούσαν ορισμένα ερωτήματα σχετικά με την αξιοπιστία του αρχικού πειράματος. Εντούτοις τα τελευταία σαράντα χρόνια μα ποικιλία πειράματων που εκμεταλλεύτηκαν τις τεχνολογικές εξελίξεις, έχουν ελέγξει πολυάριθμες όψεις της γενικής σχετικότητας με μεγάλη ακρίβεια. Οι προβλέψεις της γενικής σχετικότητας επιβεβαιώνονται με συνέπεια. Δεν υπάρχει πλέον καμία αμφιβολία ότι η περιγραφή της βαρύτητας από τον Einstein όχι μόνο είναι συμβατή με την ειδική σχετικότητα, αλλά αποφέρει προβλέψεις πλησιέστερες στα πειραματικά δεδομένα από αυτές της θεωρίας του Newton.

Μαύρες τρύπες, η Μεγάλη Έκρηξη και η διαστολή του χώρου

Ενώ η ειδική σχετικότητα είναι περισσότερο οφθαλμοφανής όταν τα πράγματα κινούνται γρήγορα, η γενική σχετικότητα αναδεικνύεται όταν τα πράγματα έχουν πολύ μεγάλη μάζα και οι στρεβλώσεις στο χώρο και το χρόνο είναι κατ' αντιστοιχία έντονες. Ας περιγράψουμε δύο παραδείγματα.

Το πρώτο είναι μια ανακάλυψη που έκανε ο Γερμανός αστρονόμος Karl Schwarzschild, ο οποίος στα διαλείμματα της δικής του έρευνας για τον υπολογισμό της τροχιάς των βλημάτων πυροβολικού στο ρωσικό μέτωπο, κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου πολέμου το 1916, μελετούσε όσα φανέρωσε ο Einstein για τη βαρύτητα. Είναι αξιοσημείωτο ότι μόλις λίγους μήνες αφότου ο Einstein έβαλε τις τελευταίες πινελιές στη γενική θεωρία της σχετικότητας, ο Schwarzschild μπόρεσε να χρησιμοποιήσει

τη θεωρία αυτή για να κατανοήσει πλήρως και ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο ο χώρος και ο χρόνος στρεβλώνονται στη γειτονία ενός απόλυτα σφαιρικού άστρου. Ο Schwarzschild έστειλε τα αποτελέσματά του από το ρωσικό μέτωπο στον Einstein, ο οποίος τα παρουσίασε εκ μέρους του Schwarzschild στην Πρωσική Ακαδημία.

Πέρα από την επιβεβαίωση και την ακριβή μαθηματική περιγραφή της στρέβλωσης που παραστήσαμε σχηματικά στο Σχήμα 3.5, το έργο του Schwarzschild –το οποίο είναι γνωστό σήμερα ως «λύση του Schwarzschild»– αποκάλυψε μια εκπληκτική επίπτωση της γενικής σχετικότητας. Έδειξε πως όταν η μάζα ενός αστέρα συγκεντρώνεται σε μια αρκετά μικρή σφαιρική περιοχή, έτσι ώστε αν η μάζα του διαιρεθεί με την ακτίνα του να υπερβαίνει μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή, η προκαλούμενη χωροχρονική στρέβλωση είναι τόσο ριζική που οτιδήποτε, ακόμη και το φως, πλησιάζει αρκετά κοντά στο άστρο είναι ανίκανο να ξεφύγει από τη βαρυτικές του αρπάγες. Αφού ακόμη και το φως δεν μπορεί να ξεφύγει από τέτοια «συμπυκνωμένα άστρα», τα ονόμασαν αρχικά σκοτεινά ή παγωμένα άστρα. Ένα πιο «πιασάρικο» όνομα επινόησε χρόνια αργότερα ο John Wheeler, που τα αποκάλεσε μαύρες τρύπες – μαύρες επειδή δεν μπορούν να εκπέμψουν φως, τρύπες επειδή οτιδήποτε πλησιάσει αρκετά κοντά πέφτει μέσα τους και χάνεται για πάντα. Αυτό το όνομα καθιερώθηκε.

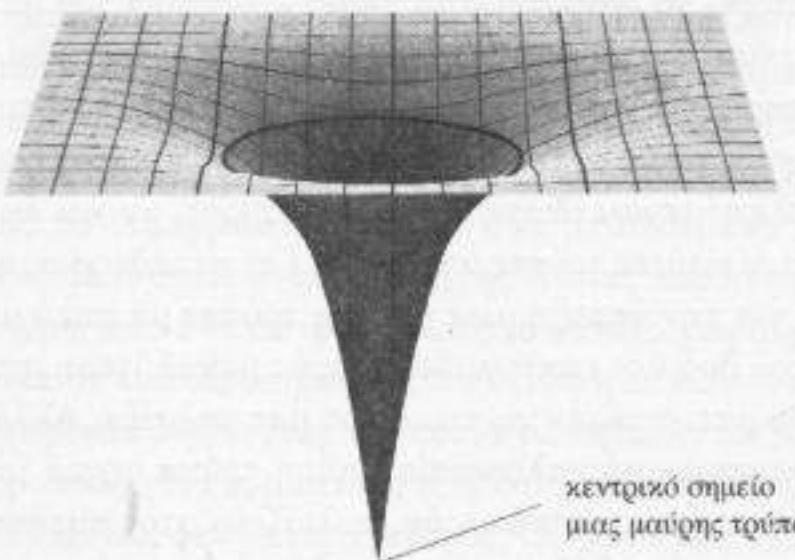
Απεικονίζουμε τη λύση του Schwarzschild στο Σχήμα 3.7. Μολονότι οι μαύρες τρύπες έχουν τη φήμη άρπαγα, τα αντικείμενα που περνούν κοντά τους σε μια απόσταση ασφαλείας αποκλίνουν από την πορεία τους, όπως περίπου θα έκαναν αν βρίσκονταν δίπλα σ'ένα συνηθισμένο άστρο, και μπορούν να συνεχίσουν το χωρωπό ταξίδι τους. Όμως τα αντικείμενα οποιασδήποτε σύστασης που πλησιάζουν υπερβολικά κοντά –πιο κοντά από αυτό που έχει ονομαστεί ορίζοντας γεγονότων της μαύρης τρύπας– είναι καταδικασμένα: θα τραβηγχτούν αναπόδραστα προς το κέντρο της μαύρης τρύπας και θα υποστούν μια ολοένα αυξανόμενη και τελικά καταστροφική βαρυτική πίεση. Για παράδειγμα, αν περνούσατε

πρώτα τα πόδια σας στον ορίζοντα γεγονότων, καθώς θα πλησιάζετε προς το κέντρο της μαύρης τρύπας θα νιώθατε όλο και πιο άβολα. Η βαρυτική δύναμη της μαύρης τρύπας θα αυξανόταν τόσο δραματικά που η έλξη της στα πόδια σας θα ήταν πολύ ισχυρότερη από την έλξη της στο κεφάλι σας (αφού μπήκατε πρώτα με τα πόδια, τα πόδια σας θα είναι πάντοτε λίγο πιο κοντά στο κέντρο της μαύρης τρύπας απ' ό,τι το κεφάλι σας). τόσο ισχυρότερη που, πράγματι, θα σας τέντωνε με μια δύναμη η οποία γρήγορα θα έσκιζε το σώμα σας σε κομματάκια.

Εάν, αντίθετα, ήσαστε πιο συνετός στις βόλτες σας κοντά σε μια μαύρη τρύπα και προσέχατε ιδιαιτέρως να μην καταπατήσετε τα όρια του ορίζοντα γεγονότων, θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε τη μαύρη τρύπα για ένα αρκετά εκπληκτικό κατόρθωμα. Φανταστείτε, για παράδειγμα, ότι ανακαλύψατε μια μαύρη τρύπα με μάζα περίπου 1.000 φορές μεγαλύτερη από του Ήλιου, και κατεβαίνετε με ένα καλώδιο, όπως έκανε ο Τζορτζ στον Ήλιο, περίπου δύο εκατοστά πάνω από τον ορίζοντα γεγονότων της μαύρης τρύπας. Όπως έχουμε δει ήδη, τα βαρυτικά πεδία προξενούν στρέβλωση του χρόνου, και αυτό σημαίνει ότι το πέρασμά σας στο χρόνο θα επιβραδυνθεί. Πραγματικά, καθώς οι μαύρες τρύπες διαθέτουν ισχυρότατα βαρυτικά πεδία, το πέρασμά σας στο χρόνο θα επιβραδύνει την κατάβαση. Το ρολόι σας θα χτυπά περίπου δέκα χιλιάδες φορές πιο αργά από αυτά των φίλων σας πίσω στη Γη. Αν μπορούσατε να αιωρείστε ακριβώς στα όρια του ορίζοντα γεγονότων της μαύρης τρύπας κατ' αυτό τον τρόπο για ένα χρόνο και μετά σκαρφαλώνατε με το καλώδιό σας μέχρι το αστρόπλοιο που σας περιμένει για ένα σύντομο και χαλαρωτικό ταξιδάκι πίσω στην πατρίδα, με την επιστροφή σας στη Γη θα βρίσκατε ότι θα είχαν περάσει περισσότερα από δέκα χιλιάδες χρόνια από την αρχική αναχώρησή σας. Θα είχατε χρησιμοποιήσει επιτυχώς τη μαύρη τρύπα ως ένα είδος χρονομηχανής, η οποία θα σας επέτρεπε να ταξιδέψετε στο μακρινό μέλλον της Γης.

Για να πάρετε μια ιδέα για τα ακραία μεγέθη για τα οποία μιλάμε, ένα άστρο με τη μάζα του Ήλιου θα ήταν μαύρη τρύπα, αν

η ακτίνα του δεν ήταν όση η πραγματική (γύρω στα $6,96 \cdot 10^8$ μέτρα), αλλά τρία μόλις χιλιόμετρα. Φανταστείτε: ολόκληρος ο Ήλιος συμπιεσμένος έτσι ώστε να χωράει άνετα στο κέντρο του Μανχάταν. Ένα κουταλάκι του τσαγιού από αυτόν το συμπικνωμένο Ήλιο θα ζύγιζε όσο το Έβερεστ. Για να φτιάξουμε μια μαύρη τρύπα από τη Γη, θα έπρεπε να τη συμπιέσουμε σε μια σφαίρα με ακτίνα περίπου ένα εκατοστό. Για πολύ καιρό οι φυσικοί αντιμετώπιζαν με σκεπτικισμό το ενδεχόμενο να υπάρχουν πραγματικά τέτοιες ακραίες καταστάσεις της ύλης και πολλοί νόμιζαν ότι οι μαύρες τρύπες συνιστούσαν απλώς προϊόν της κουρασμένης φαντασίας των θεωρητικών.



Σχήμα 3.7 Μια μαύρη τρύπα στρεβλώνει τον περιβάλλοντα χωροχρόνο τόσο έντονα, ώστε οτιδήποτε εισέρχεται στον «κορίζοντα γεγονότων» της – που απεικονίζεται με τον σκουρόχρωμο κύκλο – δεν μπορεί να ξεφύγει από τη βαρυτική της έλξη. Κανείς δεν ξέρει τι ακριβώς συμβαίνει στο βαθύτερο εσωτερικό σημείο μιας μαύρης τρύπας.

Εντούτοις την τελευταία δεκαετία έχουν συσσωρευτεί πολλές πειραματικές ενδείξεις που μας πείθουν όλο και περισσότερο ότι οι μαύρες τρύπες υπάρχουν. Φυσικά, αφού είναι μαύρες, δεν μπορούμε να τις παρατηρήσουμε άμεσα, σαρώνοντας τον ουρανό με

τηλεσκόπια. Λαντί γι' αυτό, οι αστρονόμοι αναζητούν μαύρες τρύπες διερευνώντας την ανώμαλη συμπεριφορά άλλων πιο συνηθισμένων αστέρων που εκπέμπουν φως και που ενδέχεται να βρίσκονται στα όρια του ορίζοντα γεγονότων μιας μαύρης τρύπας. Για παράδειγμα, καθώς σκόνη και αέρια από τα εξώτερα στρώματα των κοντινών συνηθισμένων αστέρων πέφτουν στον ορίζοντα γεγονότων της μαύρης τρύπας, επιταχύνονται αγγίζοντας σχεδόν την ταχύτητα του φωτός. Σε αυτές τις ταχύτητες, η τριβή μέσα στους στροβίλους της ύλης που καταβαραθρώνεται παράγει τεράστιες ποσότητες θερμότητας, η οποία κάνει το μίγμα αερίων και σκόνης να φωτοβολεί, εκπέμποντας συνηθισμένο ορατό φως και ακτίνες X. Καθώς αυτή η ακτινοβολία παράγεται στα όρια του ορίζοντα γεγονότων, μπορεί να διαφύγει από τη μαύρη τρύπα και να ταξιδέψει στο διάστημα, ώστε να παρατηρηθεί και να μελετηθεί άμεσα. Η γενική θεωρία της σχετικότητας προβλέπει αναλυτικά τις ιδιότητες που θα έχουν αυτές οι εκπομπές ακτίνων X: η παρατήρηση αυτών των προβλεπόμενων ιδιοτήτων δίνει ισχυρές, αν και έμμεσες, ενδείξεις ότι οι μαύρες τρύπες υπάρχουν. Για παράδειγμα, αυξάνουν οι ενδείξεις για την ύπαρξη μιας μαύρης τρύπας με πολύ μεγάλη μάζα, περίπου δυόμισι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του Ήλιου μας, στο κέντρο του δικού μας γαλαξία. Άλλα ακόμη κι αυτή η φαινομενικά κολοσσιαία μαύρη τρύπα ωχριά μπροστά σε όσες οι αστρονόμοι πιστεύουν ότι φωλιάζουν στον πυρήνα των αφάνταστα φωτεινών κβάζαρ που είναι διασκορπισμένα στο σύμπαν: μαύρες τρύπες των οποίων οι μάζες μπορεί να είναι ακόμη και δισεκατομμύρια φορές μεγαλύτερες από τη μάζα του Ήλιου.

Ο Schwarzschild πέθανε μόλις λίγους μήνες αφότου βρήκε την ομώνυμη λύση, από μια δερματική ασθένεια που κόλλησε στο ρωσικό μέτωπο. Ήταν 42 χρονών. Η τραγικά σύντομη ενασχόλησή του με τη θεωρία της βαρύτητας του Einstein αποκάλυψε μία από τις πιο εντυπωσιακές και μυστηριώδεις όψεις του φυσικού μας κόσμου.

Το δεύτερο παράδειγμα στο οποίο φαίνεται η αξία της γενικής σχετικότητας, αφορά την απαρχή και την εξέλιξη ολόκληρου του

σύμπαντος. Όπως έχουμε δει, ο Einstein έδειξε ότι ο χώρος και ο χρόνος ανταποκρίνονται στην παρουσία μάζας και ενέργειας. Αυτή η παραμόρφωση του χωροχρόνου επηρεάζει την κίνηση των άλλων κοσμικών σωμάτων, τα οποία κινούνται στη γειτονία των στρεβλώσεων που προκύπτουν. Με τη σειρά του, ο ακριβής τρόπος με τον οποίο κινούνται αυτά τα σώματα, εξαιτίας της δικής τους μάζας και ενέργειας, έχει περαιτέρω συνέπειες στη στρέβλωση του χωροχρόνου, οι οποίες επηρεάζουν με τη σειρά τους την κίνηση των σωμάτων, και έτσι συνεχίζεται αέναα ο αλληλένδετος κοσμικός χορός. Με τη βοήθεια των εξισώσεων της γενικής σχετικότητας, εξισώσεων που πηγάζουν από τη γεωμετρική αντίληψη για τον καμπύλο χώρο, την οποία πρόβαλε πρώτος ο μεγάλος μαθηματικός του δέκατου ένατου αιώνα Georg Bernhard Riemann (περισσότερα για τον Riemann αργότερα), ο Einstein μπόρεσε να περιγράψει ποσοτικά την αμοιβαία εξέλιξη του χώρου, του χρόνου και της ύλης. Προς μεγάλη του έκπληξη, όταν οι εξισώσεις του εφαρμοστούν όχι σε ένα μεμονωμένο σύστημα μέσα στο σύμπαν, όπως ένας πλανήτης ή ένας κομήτης που περιφέρεται γύρω από ένα άστρο, αλλά στο σύνολο του σύμπαντος, καταλήγουμε σε ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα: το συνολικό μέγεθος του χωρικού σύμπαντος πρέπει να μεταβάλλεται με το χρόνο. Δηλαδή ο ιστός του σύμπαντος είτε διαστέλλεται είτε συστέλλεται, αλλά πάντως δεν μένει σταθερός. Οι εξισώσεις της γενικής σχετικότητας το δείχνουν καθαρά.

Αυτό το συμπέρασμα ήταν εξωφρενικό, ακόμα και για τον Einstein. Μπορεί ο ίδιος να ανέτρεψε την καθολική αντίληψη αναφορικά με τη φύση του χώρου και του χρόνου, η οποία είχε διαμορφωθεί από την καθημερινή εμπειρία χιλιάδων χρόνων, αλλά η έννοια εγός ανέκαθεν υπάρχοντος, αμετάβλητου στο χρόνο σύμπαντος ήταν τόσο βαθιά ριζωμένη που ούτε κι αυτός ο προοδευτικός στοχαστής μπορούσε να την εγκαταλείψει. Για το λόγο αυτό, ο Einstein αναθεώρησε τις εξισώσεις του και τις τροποποίησε εισάγοντας τη λεγόμενη κοσμολογική σταθερά, έναν πρόσθετο όρο που του επέτρεψε να αποφύγει αυτή την πρόβλεψη και να επι-

στρέψει και πάλι στη θαλπωρή ενός στατικού σύμπαντος. Παρ' όλα αυτά, 12 χρόνια αργότερα, μετά από λεπτομερείς μετρήσεις σε μακρινούς γαλαξίες, ο Αμερικανός αστρονόμος Edwin Hubble απέδειξε πειραματικά ότι το σύμπαν διαστέλλεται. Έχει μείνει γραμμένο στα χρονικά της επιστήμης πως τότε ο Einstein επέστρεψε στην αρχική μορφή των εξισώσεών του, θεωρώντας ότι η προσωρινή τροποποίησή τους ήταν η μεγαλύτερη γκάφα της ζωής του.¹² Παρά την αρχική του απροθυμία να αποδεχθεί αυτό το συμπέρασμα, η θεωρία του Einstein προέβλεπε τη διαστολή του σύμπαντος. Μάλιστα, στις αρχές της δεκαετίας του 1920 -χρόνια πριν από τις μετρήσεις του Hubble- ο Ρώσος μετεωρολόγος Alexander Friedmann είχε χρησιμοποιήσει τις αρχικές εξισώσεις του Einstein για να δείξει, με αρκετή ακρίβεια, ότι όλοι οι γαλαξίες θα πρέπει να παρασύρονται από το υπόστρωμα του διαστελλόμενου χωρικού ιστού, απομακρυνόμενοι έτσι ταχύτατα ο ένας από τον άλλον. Οι παρατηρήσεις του Hubble και πολλές άλλες που τις ακολούθησαν, επαλήθευσαν πλήρως το εκπληκτικό αυτό συμπέρασμα της γενικής σχετικότητας. Παρέχοντας την εξήγηση για τη διαστολή του σύμπαντος, ο Einstein πέτυχε ένα από τα μεγαλύτερα πνευματικά κατορθώματα όλων των εποχών.

Εάν ο χωρικός ιστός διαστέλλεται, αυξάνοντας έτσι την απόσταση ανάμεσα στους γαλαξίες που παρασύρονται από την κοσμική ροή, μπορούμε να φανταστούμε ότι αν ακολουθήσουμε την εξέλιξη αντίστροφα στο χρόνο, θα μάθουμε για την αρχή του σύμπαντος. Σε αντίστροφη κίνηση, ο ιστός του χώρου συρρικνώνεται, φέρνοντας όλους τους γαλαξίες όλο και πιο κοντά τον ένα στον άλλον. Όπως συμβαίνει και με το περιεχόμενο μιας χύτρας ταχύτητας, καθώς το συστελλόμενο σύμπαν συμπιέζει τους γαλαξίες, η θερμοκρασία αυξάνεται δραματικά, τα άστρα αποσυντίθενται και δημιουργείται ένα καυτό πλάσμα από τα στοιχειώδη συστατικά της ύλης. Καθώς ο χωρικός ιστός συνεχίζει να συρρικνώνεται, η θερμοκρασία αυξάνει με αμείωτο ρυθμό, το ίδιο και η πυκνότητα του αρχικού πλάσματος. Καθώς φανταζόμαστε ότι το ρολόι, ξεχινώντας από την ηλικία του σύμπαντος που παρατηρούμε σήμε-

ρα, περίπου 15 δισεκατομμύρια χρόνια, τρέχει προς τα πίσω, το σύμπαν όπως το γνωρίζουμε συρρικνώνεται σε ολοένα και μικρότερο μέγεθος. Η ύλη που αποτελεί τα πάντα – κάθε αυτοκίνητο, σπίτι, κτίσμα, βουνό στη γη, την ίδια τη Γη, τη Σελήνη, τον Κρόνο, το Δία και κάθε άλλο πλανήτη, τον Ήλιο και κάθε άλλο αστέρα στο Γαλαξία μας, το γαλαξία της Ανδρομέδας με τα 100 δισεκατομμύρια άστρα του, και κάθε άλλον από τους γαλαξίες των οποίων ο αριθμός ξεπερνά τα 100 δισεκατομμύρια – συμπιέζεται από μια κοσμική μέγκενη σε απίστευτη πυκνότητα. Και καθώς το ρολόι γυρίζει πίσω σε ακόμα παλαιότερες εποχές, ολόκληρος ο κόσμος συμπυκνώνεται στο μέγεθος ενός πορτοκαλιού, ενός λειμονιού, ενός μπιζελιού, ενός κόκκου άμμου και σε ακόμη πιο μικροσκοπικά μεγέθη. Γυρίζοντας με τη φαντασία μας πίσω, μέχρι «το ξεκίνημα», το σύμπαν φαίνεται να ξεκίνησε από ένα σημείο – μια εικόνα την οποία θα επανεξετάσουμε χριτικά σε επόμενα κεφάλαια –, στο οποίο όλη η ύλη και η ενέργεια είχαν συμπιεστεί σε απίστευτη πυκνότητα και θερμοκρασία. Πιστεύουμε ότι μια κοσμική έκρηξη, η Μεγάλη Έκρηξη, ξέσπασε από αυτό το ασταθές μίγμα, ξερνώντας τους σπόρους από τους οποίους εξελίχθηκε το σύμπαν όπως το ξέρουμε.

Η εικόνα της Μεγάλης Έκρηξης ως μιας κοσμικής έκρηξης που εκτοξεύει τα υλικά συστατικά του σύμπαντος σαν τα θραύσματα μιας βόμβας που εκρήγνυνται, είναι χρήσιμη, αν και λίγο παραπλανητική. Όταν εκρήγνυνται μια βόμβα, αυτό συμβαίνει σε μία δεδομένη θέση στο χώρο και μια δεδομένη στιγμή στο χρόνο. Το περιεχόμενό της εκτοξεύεται στον περιβάλλοντα χώρο. Στη Μεγάλη Έκρηξη δεν υπάρχει περιβάλλων χώρος. Καθώς το σύμπαν εξελίσσεται αντίστροφα ως το ξεκίνημα, η σύνθλιψη όλης της ύλης συμβαίνει επειδή όλος ο χώρος συρρικνώνεται. Η αντίστροφη εξέλιξη από το μέγεθος του πορτοκαλιού ως το μέγεθος του μπιζελιού και του κόκκου άμμου περιγράφει ολόκληρο το σύμπαν – όχι κάτι μέσα στο σύμπαν. Αν συνεχίσουμε μέχρι την αρχή, θα δούμε ότι απλούστατα δεν υπάρχει χώρος έξω από την πρωταρχική σημειακή βομβίδα. Αντίθετα, η Μεγάλη Έκρηξη είναι

το ξέσπασμα του συμπιεσμένου χώρου που καθώς ξεδιπλώνεται, σαν παλιρροϊκό κύμα, παρασύρει μαζί του την ύλη και την ενέργεια συνεχώς, ακόμη και σήμερα.

Έχει δίκιο η γενική σχετικότητα;

Καμία απόκλιση από τις προβλέψεις της γενικής σχετικότητας δεν έχει βρεθεί σε πειράματα που πραγματοποιούνται σύμφωνα με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα. Μόνο ο χρόνος θα δείξει αν μεγαλύτερη πειραματική ακρίβεια θα αποκαλύψει τελικά κάποιες αποκλίσεις, αποδεικνύοντας έτσι ότι και αυτή η θεωρία δεν περιγράφει παρά μόνο κατά προσέγγιση πώς λειτουργεί πράγματι η φύση. Ο συστηματικός έλεγχος των θεωριών σε δύο και υψηλότερα επίπεδα ακριβείας είναι, σίγουρα, ένας τρόπος να προσδεύει η επιστήμη αλλά όχι και ο μόνος. Στην πραγματικότητα, έχουμε ήδη διαπιστώσει το εξής: Η αναζήτηση μιας νέας θεωρίας για τη βαρύτητα δεν ξεκίνησε από μια πειραματική απόρριψη της θεωρίας του Newton αλλά, αντίθετα, από τη σύγχρουση της νευτώνειας με μια άλλη θεωρία – την ειδική σχετικότητα. Μόνο μετά την εμφάνιση της γενικής σχετικότητας, ως μιας ανταγωνιστικής θεωρίας για τη βαρύτητα, αναγνωρίστηκαν τα πειραματικά σφάλματα στη θεωρία του Newton με την αναζήτηση των λεπτών αλλά μετρήσιμων σημείων στα οποία διέφεραν οι δύο θεωρίες. Έτσι, οι εσωτερικές θεωρητικές ασυνέπειες μπορούν να διαδραματίσουν εξίσου ζωτικό ρόλο με τα πειραματικά δεδομένα στην αλματώδη πρόοδο της επιστήμης.

Τον τελευταίο μισό αιώνα, η φυσική έχει βρεθεί αντιμέτωπη με μια άλλη θεωρητική διαμάχη η οποία συναγωνίζεται σε δριμύτητα τη σύγχρουση μεταξύ της ειδικής σχετικότητας και της νευτώνειας θεωρίας. Η γενική σχετικότητα δείχνει να είναι θεμελιωδώς ασύμβατη με μία άλλη πάρα πολύ καλά ελεγμένη θεωρία: την χραντομηχανική. Όσον αφορά το υλικό που καλύψαμε στο παρόν κεφάλαιο, η σύγχρουση αυτή εμποδίζει τους φυσικούς

να κατανοήσουν τι στ' αλήθεια συμβαίνει στο χώρο, στο χρόνο και την ύλη όταν συνθλίβονται μεταξύ τους ολοκληρωτικά τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης ή στο κεντρικό σημείο μιας μαύρης τρύπας. Άλλα και γενικότερα, η σύγκρουση αυτή επισημαίνει μια θεμελιώδη ανεπάρκεια της αντίληψής μας για τη φύση. Η επίλυση αυτής της σύγκρουσης έχει αντισταθεί στις προσπάθειες ορισμένων από τους μεγαλύτερους θεωρητικούς φυσικούς, αποκτώντας δικαιολογημένα τη φήμη του κεντρικού προβλήματος της σύγχρονης θεωρητικής φυσικής. Η κατανόηση αυτής της σύγκρουσης απαιτεί εξοικείωση με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της κβαντικής θεωρίας, στην οποία στρεφόμαστε αμέσως.

Μικροσκοπική παραδοξότητα

Κάπως κουρασμένοι από τη διαγαλαξιακή τους αποστολή, ο Τζορτζ και η Γκρέισι γυρίζουν στη Γη και πάνε κατευθείαν στο H-Bar για να γιορτάσουν με μερικά ποτά την επιστροφή τους από το διάστημα. Ο Τζορτζ παραγγέλνει τα συνηθισμένα -χυμό παπάγιας με πάγο για τον εαυτό του και μια βότκα τόνικ για την Γκρέισι - και ξαπλώνει στην καρέκλα του, με τα χέρια διπλωμένα πίσω από το κεφάλι για να απολαύσει το πούρο που μόλις άναψε. Καθώς όμως ετοιμάζεται να τραβήξει την πρώτη ρουφηξιά, ξαφνιάζεται βλέποντας ότι το πούρο έχει εξαφανιστεί ανάμεσα από τα δόντια του. Πιστεύοντας ότι το πούρο μάλλον γλίστρησε από το στόμα του, ο Τζορτζ τινάζεται περιμένοντας να το βρει να καίει το παντελόνι ή το πουκάμισό του. Άλλα δεν είναι εκεί. Το πούρο έχει εξαφανιστεί. Η Γκρέισι, παραξενεμένη από τις ξέφρενες κινήσεις του Τζορτζ, κάνει τη δική της έρευνα και ανακαλύπτει το πούρο πάνω στον πάγκο ακριβώς πίσω από την καρέκλα του Τζορτζ. «Παράξενο», λέει ο Τζορτζ, «πώς στο καλό μπορεί να έπεσε εκεί πέρα; Λες και πέρασε ακριβώς μέσα από το κεφάλι μου - αλλά η γλώσσα μου δεν είναι καμένη ούτε φαίνεται να έχω καμάτι καινούργια τρύπα». Η Γκρέισι εξετάζει τον Τζορτζ και απρόθυμα επιβεβαιώνει ότι η γλώσσα και το κεφάλι του δείχνουν απολύτως φυσιολογικά. Μια και τα ποτά μόλις έχουν φτάσει, ο Τζορτζ και η Γκρέισι ανασηκώνουν τους ώμους τους και αποδίδουν το πεσμένο πούρο στα μικρά μυστήρια της ζωής. Άλλα στο H-Bar τα παράξενα συνεχίζονται.

Ο Τζορτζ κοιτάζει το χυμό του και παρατηρεί ότι τα παγάκια χοροπηδούν αδιάκοπα – συγχρούνται μεταξύ τους και με τα τοιχώματα του ποτηριού σαν τα συγχρουόμενα αυτοκινητάκια στο λούνα πάρκ. Κι αυτή τη φορά δεν είναι μόνος. Η Γκρέισι σηκώνει το ποτήρι της, που είναι περίπου το μισό σε μέγεθος από του Τζορτζ, και βλέπουν κι οι δυο τους ότι τα δικά της παγάκια χοροπηδούν ακόμη πιο ξέφρενα. Με δυσκολία ξεχωρίζουν το κάθε παγάκι, καθώς όλα μαζί μπερδεύονται σε μια παγωμένη μάζα. Όμως τίποτε από αυτά δεν συγκρίνεται με ότι συμβαίνει στη συνέχεια. Καθώς ο Τζορτζ και η Γκρέισι γουρλώνουν τα μάτια με έκπληξη κοιτώντας το ποτήρι της να τραντάζεται, βλέπουν ένα παγάκι να περνά μέσα από το τοίχωμα του ποτηριού και να πέφτει στο πάτωμα. Αρπάζουν το ποτήρι και βλέπουν ότι είναι εντελώς ανέπαφο· με κάποιον τρόπο το παγάκι πέρασε μέσα από το συμπαγές γυαλί χωρίς να προκαλέσει καμία ζημιά. «Πρέπει να έχουμε παραισθήσεις λόγω της παραμονής μας στο διάστημα», λέει ο Τζορτζ. Αγνοώντας τα παγάκια και την αλλοπρόσαλλη συμπεριφορά τους, κατεβάζουν και οι δυο το ποτό τους με τη μία, και φεύγουν για το σπίτι τους για να συνέλθουν. Στη βιασύνη τους να φύγουν, ούτε ο Τζορτζ ούτε η Γκρέισι καταλαβαίνουν ότι η ζωγραφισμένη πόρτα στον τοίχο του μπαρ δεν είναι η αληθινή και περνούν από μέσα. Οι θαμώνες του H-Bar όμως έχουν συνηθίσει να βλέπουν τον κόσμο να περνά μέσα από τους τοίχους και ούτε που προσέχουν την εσπευσμένη αναχώρηση του Τζορτζ και της Γκρέισι.

Πριν από έναν αιώνα, όταν ο Conrad και ο Freud φώτιζαν την καρδιά και την ψυχή του σκότους, ο Γερμανός φυσικός Max Planck έριχνε την πρώτη ακτίνα φωτός στην κβαντομηχανική, μια σχολή σκέψης που διακηρύσσει, μεταξύ άλλων, ότι οι εμπειρίες του Τζορτζ και της Γκρέισι στο H-Bar –εάν αναχθούν στο επίπεδο του μικρόκοσμου– δεν χρειάζεται να αποδοθούν σε παραισθήσεις. Τέτοια ανοίκεια και αλλόχοτα συμβάντα χαρακτηρίζουν τον πραγματικό τρόπο λειτουργίας του σύμπαντός μας σε εξαιρετικά μικρές κλίμακες.

Το κβαντικό πλαίσιο

Η κβαντομηχανική είναι ένα εννοιολογικό πλαίσιο για την κατανόηση των ιδιοτήτων που παρουσιάζει το σύμπαν σε πολύ μικρές κλίμακες. Και όπως ακριβώς η ειδική και η γενική θεωρία της σχετικότητας απαιτούν δραματικές μεταβολές στην κοσμοαντίληψή μας όταν τα πράγματα κινούνται πολύ γρήγορα ή όταν έχουν μεγάλη μάζα, η κβαντομηχανική αποκαλύπτει ότι το σύμπαν έχει εξίσου, αν όχι και περισσότερο, εντυπωσιακές ιδιότητες, όταν το εξετάζουμε σε ατομικές ή υποατομικές κλίμακες αποστάσεων. Το 1965, ο Richard Feynman, ένας από τους μεγαλύτερους θιασώτες της κβαντομηχανικής, έγραφε:

Κάποια εποχή οι εφημερίδες έγραφαν ότι μόνο δώδεκα άνθρωποι καταλάβαιναν τη θεωρία της σχετικότητας. Δεν πιστεύω ότι υπήρξε ποτέ τέτοια εποχή. Μπορεί κάποτε να την καταλάβαινε μόνο ένας άνθρωπος κι αυτό γιατί ήταν ο μόνος που γνώριζε την ύπαρξή της, επειδή ήταν ο μόνος που την κατείχε, προτού γράψει το άρθρο του. Λεπτότου όμως ο κόσμος διάβασε το συγκεκριμένο άρθρο, ήταν πολλοί αυτοί που κατάλαβαν τη θεωρία της σχετικότητας, με τον έναν ή τον άλλο τρόπο, σίγουρα περισσότεροι από δώδεκα. Από την άλλη μεριά, νομίζω πως μπορώ να πω με βεβαιότητα ότι κανείς δεν καταλαβαίνει την κβαντομηχανική.¹

Μολονότι ο Feynman εξέφρασε αυτή την άποψη του λάχιστον πριν από τρεις δεκαετίες, στέκει εξίσου καλά και σήμερα. Αυτό που εννοούσε είναι ότι παρ' όλο που η ειδική και η γενική θεωρία της σχετικότητας απαιτούν μια δραστική αναθεώρηση των προηγούμενων τρόπων θέασης του κόσμου, όταν κανείς αποδεχθεί πλήρως τις βασικές αρχές που τις στηρίζουν, τότε οι νέες και ανοίκειες επιπτώσεις στο χώρο και στο χρόνο προκύπτουν αβίαστα μέσα από προσεκτικές λογικές διαδικασίες. Λν μελετήσετε με την πρέπουσα

προσήλωση τις περιγραφές του έργου του Einstein στα προηγούμενα δύο κεφάλαια, θα αναγνωρίσετε -έστω και για μια στιγμή- το αναπόφευκτό των συμπερασμάτων που εξαγάγαμε. Η κβαντομηχανική είναι διαφορετική. Έως το 1928 περίπου, πολλοί από τους μαθηματικούς τύπους και κανόνες της κβαντομηχανικής είχαν διατυπωθεί ήδη και, από τότε και μετά, η θεωρία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για να γίνουν οι πλέον ακριβείς και επιτυχείς αριθμητικές προβλέψεις στην ιστορία της επιστήμης. Στην ουσία όμως, όσοι χρησιμοποιούν την κβαντομηχανική, ανακαλύπτουν ότι ακολουθούν τύπους και κανόνες που διατυπώθηκαν από τους «προπάτορες» της θεωρίας -υπολογιστικές τεχνικές που εφαρμόζονται απευθείας- χωρίς πραγματικά να καταλαβαίνουν γιατί οι τεχνικές λειτουργούν ή τι ακριβώς σημαίνουν. Σε αντίθεση με τη σχετικότητα, ελάχιστοι άνθρωποι -αν υπάρχουν κι αυτοί- μπορούν να ισχυριστούν ότι έχουν κάνει κτήμα τους την κβαντομηχανική.

Τι να σημαίνει άραγε αυτό; Μήπως ότι στο μικροσκοπικό επίπεδο το σύμπαν λειτουργεί με τρόπους τόσο σκοτεινούς και ανοικείους, ώστε το ανθρώπινο μυαλό, που έχει εξελιχθεί διαμέσου των αιώνων για να αντιμετωπίζει επιτυχώς τα φαινόμενα στις οικείες καθημερινές κλίμακες, είναι ανίκανο να συλλάβει πλήρως «τι πραγματικά συμβαίνει»; Ή μήπως, λόγω κάποιας ιστορικής συγκυρίας, οι φυσικοί προχώρησαν σε μια άκρως αδέξια διατύπωση της κβαντομηχανικής η οποία, μολονότι ποσοτικά επιτυχής, συσκοτίζει την αληθινή φύση της πραγματικότητας; Κανείς δεν ξέρει. Μπορεί κάποια στιγμή στο μέλλον κάποιος έξυπνος άνθρωπος να βρει το δρόμο για μια νέα διατύπωση που θα αποκαλύψει πλήρως τα «πώς» και τα «γιατί» της κβαντομηχανικής. Ίσως πάλι και να μη συμβεί τίποτε τέτοιο. Το μόνο που γνωρίζουμε με βεβαιότητα είναι ότι η κβαντομηχανική μάς δείχνει ρητά και κατηγορηματικά πως αρκετές βασικές έννοιες, απαραίτητες για την κατανόηση του οικείου καθημερινού μας κόσμου, δεν έχουν κανένα απολύτως νόημα όταν εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας στο μικροσκοπικό επίπεδο. Αναγκαίόμαστε έτσι να τροποποιήσουμε σημαντικά τόσο τη γλώσσα μας όσο και τη συλλογιστική μας όταν

επιχειρούμε να κατανοήσουμε και να ερμηνεύσουμε το σύμπαν σε ατομικές και υποατομικές κλίμακες.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα αναπτύξουμε τις βασικές αρχές αυτής της γλώσσας και θα περιγράψουμε αρκετές από τις αξιοσημείωτες εκπλήξεις που μας επιφυλάσσει. Εάν κατά την πορεία η κβαντομηχανική σάς φανεί εντελώς παράδοξη ή ακόμη και γελοία, πρέπει να έχετε στο μυαλό σας δύο πράγματα. Πρώτον, πέρα από το γεγονός ότι είναι μια μαθηματικά συνεπής θεωρία, πιστεύουμε στην κβαντομηχανική μόνο και μόνο επειδή έχει δώσει προβλέψεις που έχουν επαληθευτεί με εκπληκτική ακρίβεια. Αν κάποιος μπορεί να σας διηγηθεί με ανατριχιαστική ακρίβεια ένα σωρό προσωπικές λεπτομέρειες από την παιδική σας ηλικία, είναι δύσκολο να μην πιστέψετε στον ισχυρισμό του ότι είναι ο από χρόνια χαμένος αδερφός σας. Δεύτερον, δεν είστε ο μόνος που αντιδρά έτσι στην κβαντομηχανική. Αυτή τη στάση υιοθετούν σε μικρότερο ή σε μεγαλύτερο βαθμό ορισμένοι από τους πιο αξιοσέβαστους φυσικούς όλων των εποχών. Ο Einstein αρνήθηκε να αποδεχθεί πλήρως την κβαντομηχανική. Ακόμη και ο Niels Bohr, ένας από τους βασικούς πρωτεργάτες της θεωρίας και από τους πιο ένθερμους υποστηρικτές της, παρατήρησε κάποτε ότι αν δεν ζαλίζεστε κάποιες φορές όταν σκέφτεστε την κβαντομηχανική, τότε δεν την έχετε καταλάβει στ' αλήθεια.

Κάνει υπερβολική ζέστη στην χουζίνα

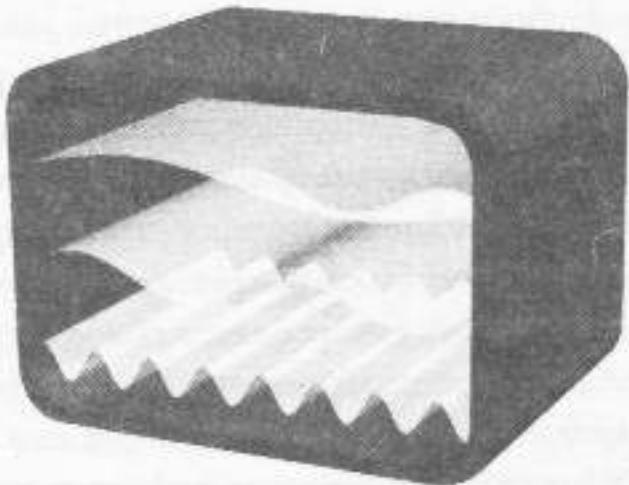
Ο δρόμος προς την κβαντομηχανική άνοιξε με μια σπαζοκεφαλιά. Φανταστείτε ότι ο φούρνος της χουζίνας σας είναι τέλεια μονωμένος, ότι τον ρυθμίζετε σε κάποια θερμοκρασία, ας πούμε 200 βαθμούς Κελσίου, και ότι τον αφήνετε αρκετή ώρα να ζεσταθεί. Ακόμη κι αν έχετε αφαιρέσει όλο τον αέρα από το φούρνο προτού τον ανάψετε, θερμαίνοντας τα τοιχώματά του δημιουργείτε κύματα ακτινοβολίας στο εσωτερικό του. Πρόκειται για το ίδιο είδος ακτινοβολίας -ζέστη και φως με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων – που εκπέμπεται από την επιφάνεια του Ήλιου ή από μια πυρωμένη μασιά.

Εδώ είναι το πρόβλημα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια – η ζωή στη γη, για παράδειγμα, εξαρτάται από λυτά από την ηλιακή ενέργεια που μεταδίδεται από τον ήλιο στη γη με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στις αρχές του εικοστού αιώνα, οι φυσικοί υπολόγισαν τη συνολική ενέργεια που φέρει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσα σε ένα φούρνο με δεδομένη θερμοκρασία. Χρησιμοποιώντας δοκιμασμένες υπολογιστικές μεθόδους, οι φυσικοί κατέληξαν σε μια γελοία απάντηση: για οποιαδήποτε δεδομένη θερμοκρασία, η συνολική ενέργεια στο φούρνο είναι άπειρη.

Ήταν σαφές για όλους ότι επρόκειτο για κάτι ανόητο – ένας ζεστός φούρνος μπορεί να εμπειρίζει αρκετή ενέργεια αλλά σίγουρα όχι άπειρη. Για να καταλάβουμε τη λύση που πρότεινε ο Planck, αξίζει να διερευνήσουμε το πρόβλημα στις λεπτομέρειές του. Όταν η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell εφαρμοστεί στην ακτινοβολία μέσα σε ένα φούρνο, προκύπτει ότι τα κύματα που δημιουργούνται από τα θερμά τοιχώματα πρέπει να έχουν έναν ακέραιο αριθμό από κορυφές και κοιλίες που να καλύπτουν εντελώς την απόσταση ανάμεσα στις απέναντι επιφάνειες. Μερικά παραδείγματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Οι φυσικοί χρησιμοποιούν τρεις όρους για να περιγράψουν αυτά τα κύματα: το μήκος κύματος, τη συχνότητα και το πλάτος. Το μήκος κύματος είναι η απόσταση ανάμεσα σε διαδοχικές κορυφές ή διαδοχικές κοιλίες των κυμάτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Περισσότερες κορυφές και κοιλίες σημαίνουν μικρότερο μήκος κύματος, καθώς πρέπει όλες να στριμωχτούν ανάμεσα στα σταθερά τοιχώματα του φούρνου. Η συχνότητα αναφέρεται στον αριθμό των πλήρων ταλαντώσεων που εκτελεί το κύμα ανά δευτερόλεπτο. Προκύπτει ότι η συχνότητα καθορίζεται από το μήκος κύματος και αντιστρόφως: μεγάλα μήκη κύματος υποδηλώνουν μικρή συχνότητα μικρότερα μήκη κύματος υποδηλώνουν υψηλότερη συχνότητα. Για να καταλάβετε γιατί, σκεφτείτε τι γίνε-

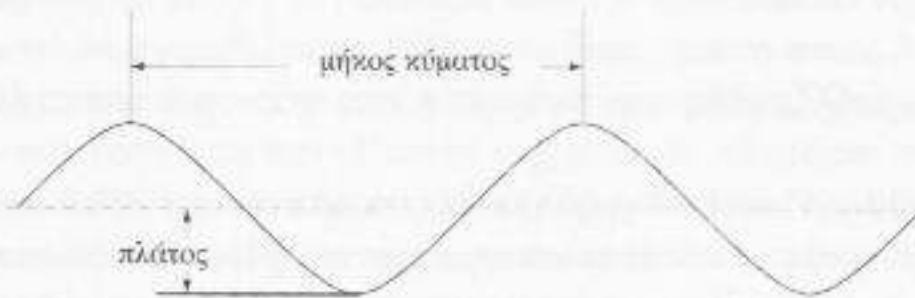
ται όταν προκαλείτε κύματα κουνώντας ένα μακρύ σχοινί δεμένο από το ένα του άκρο. Για να δημιουργήσετε μεγάλο μήκος κύματος, κουνάτε το δικό σας άκρο πάνω-κάτω με χαλαρό ρυθμό. Η συχνότητα των κυμάτων συμπίπτει με τον αριθμό των κύκλων που εκτελεί το χέρι σας ανά δευτερόλεπτο και κατά συνέπεια είναι σχετικά μικρή. Άλλα για να δημιουργήσετε μικρά μήκη κύματος κουνάτε το χέρι σας πιο έντονα – πιο συχνά, σαν να λέμε και έτσι παράγεται κύμα υψηλότερης συχνότητας. Τέλος, οι φυσικοί χρησιμοποιούν τον όρο πλάτος για να περιγράψουν το μέγιστο ύψος ή βάθος του κύματος, όπως επίσης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1 Η θεωρία του Maxwell μας λέει ότι τα κύματα ακτινοβολίας σε ένα φούρνο έχουν ακέραιο αριθμό από χορυφές και κοιλίες – συμπληρώνουν πλήρεις κυματικούς κύκλους.

Στην περίπτωση που βρίσκετε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κάπως αόριστα, μια άλλη καλή αναλογία είναι τα κύματα που παράγονται όταν χτυπάμε τη χορδή ενός βιολιού. Διαφορετικές κυματικές συχνότητες αντιστοιχούν σε διαφορετικές μουσικές νότες: όσο πιο υψηλή η συχνότητα, τόσο πιο υψηλή η νότα. Το πλάτος του κύματος μας χορδής του βιολιού καθορίζεται από το πόσο δυνατά τη χτυπάμε. Ισχυρότερο χτύπημα σημαίνει ότι δίνουμε περισσότερη ενέργεια στην κυματική διαταραχή· άρα περισσότερη

ενέργεια αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο πλάτος. Αυτό μπορείτε να το ακούσετε, καθώς ο ήχος που προκύπτει είναι δυνατότερος. Παρομοίως, λιγότερη ενέργεια αντιστοιχεί σε μικρότερο πλάτος και σε χαμηλότερη ένταση ήχου.



Σχήμα 4.2 Το μήκος κύματος είναι η απόσταση ανάμεσα σε διαδοχικές κορυφές ή κοιλίες του κύματος. Το πλάτος είναι το μέγιστο ύψος ή βάθος του κύματος.

Χρησιμοποιώντας τη θερμοδυναμική του 19ου αιώνα, οι φυσικοί μπόρεσαν να υπολογίσουν με πόση ενέργεια τα τοιχώματα του φούρνου θα τροφοδοτούσαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα για κάθε επιτρεπόμενο μήκος κύματος – σαν να λέμε δηλαδή, πόσο δυνατά θα «χτυπούσαν» τα τοιχώματα το κάθε κύμα. Το αποτέλεσμα που βρήκαν είναι απλό στη διατύπωση: κάθε επιτρεπόμενο κύμα – ανεξάρτητα από το μήκος κύματός του – φέρει την ίδια ποσότητα ενέργειας (η ακριβής τιμή της καθορίζεται από τη θερμοχρασία του φούρνου). Με άλλα λόγια, όλοι οι πιθανοί σχηματισμοί κυμάτων μέσα στο φούρνο είναι απόλυτα ισοδύναμοι όσον αφορά την ενέργεια που εμπειριέχουν.

Αρχικά αυτό το συμπέρασμα, μολονότι ενδιαφέρον, φαίνεται ακίνδυνο. Δεν είναι όμως. Σηματοδοτεί ούτε λίγο ούτε πολύ την κατάρρευση της λεγόμενης κλασικής φυσικής. Ο λόγος είναι ο εξής: μολονότι η απαίτηση να έχουν όλα τα κύματα μέσα στο φούρνο ακέραιο αριθμό κορυφών και κοιλιών αποκλείει μια τεράστια ποικιλία πιθανών κυματικών σχηματισμών, οι πιθανοί σχηματισμοί που απομένουν εξακολουθούν να είναι άπειροι – δηλαδή κύματα με όλο και περισσότερες κορυφές και κοιλίες. Εφόσον κά-

Θε χυματικός σχηματισμός φέρει την ίδια ποσότητα ενέργειας, ένα άπειρο πλήθος τους μεταφράζεται σε άπειρη ποσότητα ενέργειας. Στο γύρισμα του αιώνα υπήρχε μια γιγάντια μύγα μέσα στο γάλα της θεωρίας.

Τεμαχίζοντας την ενέργεια στο γύρισμα του αιώνα

Το 1900 ο Planck οδηγήθηκε σε μια εμπνευσμένη εικασία που του επέτρεψε να λύσει το αίνιγμα και του χάρισε το Νόμπελ Φυσικής το 1918.² Για να πάρετε μια ιδέα της λύσης που έδωσε, φανταστείτε ότι εσείς μαζί με ένα τεράστιο πλήθος ανθρώπων -«άπειρο» σε αριθμό - βρίσκεστε στριμωγμένοι σε μια μεγάλη κρύα αποθήκη την οποία διαχειρίζεται ένας μίζερος σπιτονοικοκύρης. Υπάρχει στον τοίχο ένας φανταχτερός ψηφιακός θερμοστάτης που ελέγχει τη θερμοκρασία, αλλά παθαίνετε σοκ όταν ακούτε τα ποσά τα οποία χρεώνει ο σπιτονοικοκύρης για τη θέρμανση. Αν βάλετε το θερμοστάτη στους 10 βαθμούς Κελσίου, καθένας πρέπει να πληρώσει στο σπιτονοικοκύρη 40 ευρώ. Αν τον βάλετε στους 15 βαθμούς, 45 και ούτω καθεξής. Συνειδητοποιείτε ότι αφού μοιράζεστε την αποθήκη με έναν άπειρο αριθμό συντρόφων, και μόνο που θα ανάβετε τη θέρμανση, ο σπιτονοικοκύρης θα κερδίζει άπειρο ποσό χρημάτων.

Μελετώντας ωστόσο προσεκτικότερα τους κανόνες πληρωμής του σπιτονοικοκύρη, ανακαλύπτετε ένα παραθυράκι. Επειδή ο σπιτονοικοκύρης είναι πολυάσχολος άνθρωπος, δεν θέλει να δίνει ρέστα, ειδικά σε έναν άπειρο αριθμό ανεξάρτητων νοικάρηδων. Γι' αυτό καταρτίζει έναν εσωτερικό κανονισμό. Αυτοί που μπορούν να πληρώσουν ακριβώς όσα οφείλουν, το κάνουν. Διαφορετικά, πληρώνουν μόνο όσα μπορούν, χωρίς να απαιτούν ρέστα. Κι έτσι, εσείς που θέλετε και να εμπλέξετε όλους τους ενδιαφερομένους και να αποφύγετε τις υπερβολικές χρεώσεις για τη θέρμανση, υποχρεώνετε τους συγκατοίκους σας να οργανώσετε τον κοινό σας πλούτο κατά τον ακόλουθο τρόπο: Ένα άτομο κρατάει

όλα τα πεντάλεπτα, κάποιο άλλο όλα τα δεκάλεπτα, ένα άλλο όλα τα εικοσάλεπτα, ένα άλλο όλα τα πενηντάλεπτα και ούτω καθεξής, μέχρι τα κέρματα του ενός ευρώ, των δύο, τα χαρτονομίσματα των πέντε, των δέκα, των είκοσι, των πενήντα, των εκατό ευρώ και τα ακόμη μεγαλύτερα (και όχι τόσο οικεία) νομίσματα. Εντελώς ανερυθρίαστα, βάζετε το θερμοστάτη στους 35 βαθμούς και περιμένετε την άφιξη του σπιτονοικοκύρη. Όταν έρθει, αυτός που κρατά τα πεντάλεπτα πηγαίνει να πληρώσει πρώτος και δίνει 2.800 τέτοια κέρματα. Κατόπιν αυτός που κρατά τα δεκάλεπτα αφήνει 1.400, αυτός με τα εικοσάλεπτα αφήνει 700, αυτός με τα πενηντάλεπτα δίνει στο σπιτονοικοκύρη 80, αυτός με το ένα ευρώ του αφήνει 140, αυτός με τα δύο 70, μέχρι που φτάνουμε σε αυτόν με τα πενήντα ευρώ που του δίνει 2 και σε αυτόν με τα 100 που δίνει 1 (καθώς τα τρία και τα δύο θα ξεπερνούσαν την έπιβεβλημένη πληρωμή και άρα θα χρειάζονταν ρέστα). Αλλά ο κάθε επόμενος κρατά μόνο νομίσματα –ελάχιστα «τεμάχια» χρήματος– που ξεπερνούν την απαιτούμενη πληρωμή. Έτσι δεν μπορούν να πληρώσουν το σπιτονοικοκύρη και άρα, αντί να εισπράξει το άπειρο ποσό χρημάτων που περίμενε, φεύγει με το μικρό ποσό των 1.100 ευρώ.

Ο Planck χρησιμοποίησε παρόμοια στρατηγική προκειμένου να μετατρέψει το γελούδι αποτέλεσμα της άπειρης ενέργειας μέσα στο φούρνο σε κάποια πεπερασμένη τιμή. Νά πώς έγινε. Ο Planck έκανε την τολμηρή υπόθεση ότι η ενέργεια που φέρει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο φούρνο εμφανίζεται σε τεμάχια, όπως τα χρήματα. Η ενέργεια μπορεί να ισούται μία φορά επί κάποιο βασικό «ενεργειακό νόμισμα» ή δύο φορές επί αυτό ή τρεις φορές επί αυτό και ούτω καθεξής – αλλά αυτό είν' όλο. Ο Planck δήλωσε ότι όπως ακριβώς δεν μπορούμε να πάρουμε δύο τρίτα ενός χαρτονομίσματος των πέντε ευρώ ή δυόμισι λεπτά, όταν έχουμε να κάνουμε με ενέργεια, δεν επιτρέπονται τα κλάσματα. Βέβαια, οι νομισματικές μας μονάδες καθορίζονται από το Εθνικό Θησαυροφυλάκιο. Αναζητώντας κάποια πιο ουσιαστική εξήγηση, ο Planck πρότεινε ότι η ενεργειακή αξία ενός κύματος –το ελάχιστο «τε-

μάχιο» ενέργειας που μπορεί να έχει – καθορίζεται από τη συχνότητά του. Ειδικότερα, θεώρησε ως δεδομένο ότι η ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να έχει ένα κύμα είναι ανάλογη προς τη συχνότητά του: μεγαλύτερη συχνότητα (μικρότερο μήκος κύματος) συνεπάγεται μεγαλύτερη ελάχιστη ενέργεια· μικρότερη συχνότητα (μεγαλύτερο μήκος κύματος) συνεπάγεται μικρότερη ελάχιστη ενέργεια. Χοντρικά, όπως ακριβώς τα ήπια ωκεάνια κύματα είναι μακρύτερα και ομαλά ενώ τα άγρια κύματα χοντύτερα και χοφτά, η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος περιέχει λόγω εγγενών παραγόντων λιγότερη ενέργεια από την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.

Κι εδώ είναι η ουσία: οι υπολογισμοί του Planck έδειξαν ότι αυτός ο τεμαχισμός της επιτρεπτής για κάθε κύμα ενέργειας διόρθωνε το προηγούμενο γελοίο αποτέλεσμα της άπειρης συνολικής ενέργειας. Δεν είναι δύσκολο να δούμε γιατί. Όταν ένας φούρνος θερμαίνεται σε κάποια ορισμένη θερμοκρασία, οι υπολογισμοί που βασίζονται στη θερμοδυναμική του δέχαται ένατου αιώνα, προβλέπουν ότι κάθε κύμα θα πρέπει να συνεισφέρει ένα κοινό ποσό ενέργειας στο σύνολο. Άλλα όπως ακριβώς συμβαίνει και με κάθε συγκάτοικο που δεν μπορεί να συνεισφέρει το κοινό ποσό χρημάτων το οποίο χρωστά στο σπιτονοικοκύρη, επειδή τα νομίσματα που έχει μαζί του είναι μεγάλα σε αξία, αν η ελάχιστη ενέργεια την οποία μπορεί να μεταφέρει ένα συγκεκριμένο κύμα ξεπερνά την ενέργεια που υποτίθεται ότι πρέπει να συνεισφέρει, αντί να προσφέρει παραμένει σε αδράνεια. Εφόσον η ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να μεταφέρει ένα κύμα είναι, σύμφωνα με τον Planck, ανάλογη προς τη συχνότητά του, καθώς εξετάζουμε στο φούρνο κύματα με ολοένα και μεγαλύτερη συχνότητα (μικρότερο μήκος κύματος), αργά ή γρήγορα η ελάχιστη ενέργεια που μπορούν να μεταφέρουν γίνεται μεγαλύτερη από την αναμενόμενη ενεργειακή συνεισφορά τους. Σαν τους συγκάτοικους στην αποθήκη, στους οποίους εμπιστευτήκαμε νομίσματα από διακόσια ευρώ και πάνω, αυτά τα κύματα με τις όλο και μεγαλύτερες συχνότητες δεν μπορούν να συνεισφέρουν το ποσό της ενέργειας το οποίο απαιτεί η φυ-

σική του δέκατου ένατου αιώνα. Και έτσι, όπως ακριβώς μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός συγχατοίχων μπορεί να συνεισφέρει στη συνολική πληρωμή για τη θέρμανση – πράγμα που οδηγεί σε πεπερασμένη συνολική ποσότητα χρήματος –, μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός κυμάτων μπορεί να συνεισφέρει στη συνολική ενέργεια του φούρνου – κάτι που οδηγεί και πάλι σε πεπερασμένη συνολική ενέργεια. Είτε πρόκειται για ενέργεια είτε για χρήματα, ο τεμαχισμός των θεμελιωδών μονάδων – και το ολοένα αυξανόμενο μέγεθος αυτών των τεμαχίων, καθώς πηγαίνουμε προς τις υψηλότερες συχνότητες ή τα μεγαλύτερα νομίσματα – μεταβάλει ένα άπειρο αποτέλεσμα σε πεπερασμένο.³

Εξαλείφοντας τον έκδηλο παραλογισμό ενός άπειρου αποτέλεσματος, ο Planck πραγματοποίησε ένα σημαντικό βήμα. Αυτό όμως που έχανε τον χόσμο να πιστέψει στ' αλήθεια πως η εικασία του ήταν έγκυρη είναι το γεγονός ότι, το πεπερασμένο αποτέλεσμα που έδινε αυτή η νέα του προσέγγιση για την ενέργεια σε ένα φούρνο, συμφωνούσε εντυπωσιακά με τις πειραματικές μετρήσεις. Ειδικότερα, ο Planck βρήκε ότι, ρυθμίζοντας μία παράμετρο που υπεισέρχεται στους νέους υπολογισμούς του, μπορούσε να προβλέψει με ακρίβεια τη μετρούμενη ενέργεια ενός φούρνου για κάθε δεδομένη θερμοκρασία. Αυτή η παράμετρος είναι ο συντελεστής αναλογίας ανάμεσα στη συχνότητα κύματος και το ελάχιστο «τεμάχιο» ενέργειας που μπορεί να έχει το κύμα. Ο Planck βρήκε ότι αυτός ο συντελεστής αναλογίας –ο οποίος σήμερα είναι γνωστός ως σταθερά του Planck και συμβολίζεται με \hbar (προφέρεται «h-bar»)– έχει τιμή περίπου ένα δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του δισεκατομμυριοστού σε συνήθεις μονάδες.⁴ Η απειροελάχιστη τιμή της σταθεράς του Planck σημαίνει ότι το μέγεθος των ενεργειακών τεμαχίων είναι χαρακτηριστικά μικρό. Γι' αυτό, για παράδειγμα, μας φαίνεται ότι μπορούμε να κάνουμε την ενέργεια ενός κύματος στη χορδή ενός βιολιού –και κατά συνέπεια την ένταση του ήχου που παράγει – να μεταβάλλεται κατά συνεχή τρόπο. Στην πραγματικότητα ωστόσο η ενέργεια του κύματος αυξάνεται περνώντας από διαδοχικά σκαλοπά-

τια «αλά Planck», όμως το μέγεθος των σκαλοπατιών είναι τόσο μικρό, ώστε η μετάβαση με διαχριτά άλματα από τη μία ένταση στην άλλη φαίνεται να είναι ομαλή. Σύμφωνα με τον ισχυρισμό του Planck, το μέγεθος αυτών των ενεργειακών άλμάτων μεγαλώνει όσο η συχνότητα των κυμάτων αυξάνεται (και το μήκος κύματος γίνεται μικρότερο). Αυτή είναι η βασική συνιστώσα που επιλύει το παράδοξο της άπειρης ενέργειας.

Όπως θα δούμε, η χβαντική υπόθεση του Planck δεν μας επιτρέπει απλώς και μόνο να κατανοήσουμε το ενεργειακό περιεχόμενο ενός φούρνου, αλλά προχωρεί ακόμα παραπέρα. Ανατρέπει πολλά πράγματα σχετικά με τον κόσμο, τα οποία θεωρούμε δεδομένα. Το μικρό μέγεθος της \hbar περιορίζει στο μικροσκοπικό βασίλειο τις περισσότερες από τις ριζικές αυτές αποκλίσεις από τα συνηθισμένα, αλλά αν η \hbar τύχαινε να είναι πολύ μεγαλύτερη, τότε τα παράδοξα συμβάντα στο H-Bar θα ήταν στην ουσία κοινότοπα. Όπως θα δούμε, τα μικροσκοπικά τους αντίστοιχα όντως είναι.

Τι είναι τα τεμάχια;

Ο Planck δεν μπορούσε να αιτιολογήσει τη ζωτικής σημασίας πρότασή του για την τεμαχισμένη ενέργεια. Εκτός από το γεγονός ότι έδινε σωστά αποτελέσματα, ούτε ο ίδιος ούτε κανένας άλλος μπορούσε να βρει κάποιον πειστικό λόγο που να δείχνει γιατί θα έπρεπε να ισχύει. Όπως είπε κάποτε ο φυσικός George Gamow, ήταν λες και η φύση επέτρεπε σε κάποιον να πιει ένα ολόκληρο ποτήρι μπίρα ή καθόλου μπίρα αλλά τίποτε ενδιάμεσο.⁵ Το 1905 ο Einstein βρήκε μια εξήγηση και για την ιδέα του αυτή κέρδισε το Νόμπελ Φυσικής το 1921.

Ο Einstein κατέληξε στην εξήγησή του μέσα από τον προβληματισμό του για το λεγόμενο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο Γερμανός φυσικός Heinrich Hertz ήταν ο πρώτος που το 1887 βρήκε ότι όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία -φως- πέφτει πάνω σε

ορισμένα μέταλλα, αυτά εκπέμπουν ηλεκτρόνια. Από μόνο του, αυτό δεν φαίνεται ιδιαίτερα αξιοσημείωτο. Τα μέταλλα έχουν την ιδιότητα κάποια από τα ηλεκτρόνια τους να συνδέονται με χαλαρούς δεσμούς μέσα στα άτομα (γι' αυτόν το λόγο τα μέταλλα είναι τόσο χαλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού). Όταν το φως προσπίπτει στη μεταλλική επιφάνεια, αποθέτει εκεί την ενέργειά του, περίπου όπως κάνει όταν χτυπά την επιφάνεια του δέρματός σας, κάνοντάς σας να νιώθετε περισσότερη ζεστασιά. Αυτή η μεταβιβαζόμενη ενέργεια μπορεί να διεγείρει τα ηλεκτρόνια στο μέταλλο, και ορισμένα απ' όσα είναι χαλαρά συνδεδεμένα, μπορεί να αποσπαστούν από την επιφάνεια.

Όμως οι ιδιαιτερότητες του φωτοηλεκτρικού φαινομένου γίνονται εμφανείς όταν οι ιδιότητες των αποβαλλόμενων ηλεκτρονίων μελετηθούν λεπτομερέστερα. Με μια πρώτη ματιά θα νομίζατε ότι καθώς η ένταση του φωτός –η λάμψη του– αυξάνεται, θα αυξηθεί και η ταχύτητα των αποβαλλόμενων ηλεκτρονίων, αφού το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει περισσότερη ενέργεια. Όμως δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Αντίθετα, το πλήθος των αποβαλλόμενων ηλεκτρονίων αυξάνεται, αλλά η ταχύτητά τους μένει σταθερή. Από την άλλη μεριά, έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι η ταχύτητα των αποβαλλόμενων ηλεκτρονίων όντως αυξάνεται αν αυξηθεί η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός, και, αντιστοίχως, η ταχύτητά τους μειώνεται αν μειωθεί η συχνότητα του φωτός. (Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο ορατό σημείο του φάσματος, αύξηση συχνότητας ισοδυναμεί με αλλαγή χρώματος, από το κόκκινο στο πορτοκαλί, στο κίτρινο, στο πράσινο, στο μπλε, στο λουλακί και τέλος στο ιώδες. Οι συχνότητες πάνω από το ιώδες δεν είναι ορατές και αντιστοιχούν στις υπεριώδεις ακτίνες και, κατόπιν, στις ακτίνες X· οι συχνότητες κάτω από το κόκκινο επίσης δεν είναι ορατές και αντιστοιχούν στην υπέρυθρη ακτινοβολία.) Μάλιστα, καθώς η συχνότητα του φωτός που χρησιμοποιείται μειώνεται, φτάνουμε σε ένα σημείο όπου η ταχύτητα των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων πέφτει στο μηδέν και σταματούν να αποβάλλονται από την

επιφάνεια, ανεξάρτητα από την πιθανή εκτυφλωτική ένταση της φωτεινής πηγής. Για κάποιον άγνωστο λόγο, το χρώμα της προσπίπουσας φωτεινής ακτίνας –και όχι η συνολική της ενέργεια– ελέγχει αν αποβάλλονται ηλεκτρόνια ή όχι και, στην περίπτωση που αποβάλλονται, τι ενέργεια έχουν.

Για να κατανοήσουμε πώς εξήγησε ο Einstein αυτά τα αινιγματικά δεδομένα, ας επιστρέψουμε στη θαλπωρή της αποθήκης, όπου τώρα πια η ζέστη αγγίζει τους 35 βαθμούς. Φανταστείτε ότι ο σπιτονοικοχύρης, που μισεί τα παιδιά, απαιτεί όποιος είναι κάτω από δεκαπέντε ετών να ζει στα βαθιά υπόγεια της αποθήκης, τα οποία οι ενήλικοι μπορούν να βλέπουν από ένα τεράστιο μπαλκόνι που βρίσκεται γύρω γύρω. Επιπλέον, ο μόνος τρόπος για να μπορέσει να φύγει από την αποθήκη κάποιο από τα πάμπολλα παιδιά, τα οποία βρίσκονται περιορισμένα στο υπόγειο, είναι να πληρώσει στο φρουρό τέλη εξόδου που φτάνουν το γιγαντιαίο ποσό των 85 ευρώ. (Αυτός ο σπιτονοικοχύρης θα μας πιει το αίμα στο τέλος!) Οι ενήλικοι, που με δική σας προτροπή έχουν κατανείμει τον χοινό πλούτο κατά νόμισμα, όπως περιγράφαμε προηγουμένως, μπορούν να δώσουν χρήματα στα παιδιά μόνο πετώντας τους νομίσματα από το μπαλκόνι. Ας δούμε τι θα συμβεί.

Αυτός που έχει τα πεντάλεπτα αρχίζει να πετά μερικά κάτω, αλλά το ποσό αυτό παραείναι πενιχρό για να μπορέσει έστω κι ένα παιδί να πληρώσει το εξιτήριο. Και καθώς ουσιαστικά υπάρχει μια «άπειρη» θάλασσα από παιδιά τα οποία παλεύουν όλα μανιασμένα μέσα σε ένα θυελλώδη αναβρασμό να πιάσουν τα λεφτά που πέφτουν, ακόμη κι αν ο ενήλικος που κουβαλά τα πεντάλεπτα ρίξει τεράστιες ποσότητες από αυτά τα κέρματα, κανένα μεμονωμένο παιδί δεν θα καταφέρει να μαζέψει τα 1.700 πεντάλεπτα τα οποία χρειάζεται για να πληρώσει το φρουρό. Το ίδιο ισχύει για τους ενηλίκους που κουβαλούν τα δεκάλεπτα, τα εικοσάλεπτα, τα πενηντάλεπτα και τα κέρματα του ενός ευρώ. Μολονότι το συνολικό ποσό των χρημάτων που ρίχνει κάθε ενήλικος είναι εκπληκτικά μεγάλο, θα σταθεί τυχερό όποιο παιδί πιάσει έστω κι ένα κέρμα (τα περισσότερα δεν θα πιάσουν ούτε ένα) και σίγου-

ρα κανένα παιδί δεν θα μαζέψει τα 85 ευρώ που του χρειάζονται για να φύγει. Όταν όμως αυτός που έχει τα χαρτονομίσματα των εκατό ευρώ αρχίζει να τα ρίχνει κάτω ένα ένα, όσα τυχερά παιδιά πιάνουν ένα χαρτονόμισμα μπορούν να φύγουν αμέσως. Παρατηρήστε όμως ότι μόλις αυτός ο ενήλικος ξεθαρρέψει και αρχίσει να πετά τα εκατοντάευρα με το τσουβάλι, ο αριθμός των παιδιών που μπορούν να φύγουν αυξάνεται δραματικά, αλλά, αφού πληρώσουν το φρουρό, απομένουν στο καθένα τους 15 ευρώ ακριβώς. Αυτό αληθεύει ανεξάρτητα από τον συνολικό αριθμό από τα κατοστάρικα που ρίχνονται.

Κοιτάξτε τώρα τι σχέση έχουν όλα αυτά με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Βασισμένος στα πειραματικά δεδομένα που είδαμε προηγουμένως, ο Einstein πρότεινε να ενσωματωθεί η άποψη του Planck για τη διαμερισμένη ενέργεια των κυμάτων σε μια νέα περιγραφή του φωτός. Μια φωτεινή ακτίνα, σύμφωνα με τον Einstein, θα έπρεπε στην ουσία να θεωρείται ως μία ροή μικροσκοπικών πακέτων –μικροσκοπικών σωματιδίων φωτός– τα οποία τελικά βαφτίστηκαν φωτόνια από το χημικό Gilbert Lewis (μια έννοια που χρησιμοποιήσαμε στο παράδειγμά μας με το ρολόι φωτός στο Κεφάλαιο 2). Για να πάρετε μια ιδέα της κλίμακας, σύμφωνα με αυτή τη σωματιδιακή αντίληψη περί φωτός, μια τυπική λάμπα των 100 βατ εκπέμπει περίπου εκατό δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων (10^{20}) φωτόνια το δευτερόλεπτο. Ο Einstein χρησιμοποίησε αυτή τη νέα σύλληψη για να προτείνει ότι για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ευθύνεται ένας μηχανισμός στο μικροσκοπικό επίπεδο. Όπως εισηγήθηκε, ένα ηλεκτρόνιο αποσπάται από μια μεταλλική επιφάνεια αν χτυπηθεί από ένα φωτόνιο που περιέχει αρκετή ενέργεια. Και τι καθορίζει την ενέργεια ενός μεμονωμένου φωτονίου; Για να ερμηνεύσει τα πειραματικά δεδομένα, ο Einstein ακολούθησε το νήμα που άφησε ο Planck και πρότεινε ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου είναι ανάλογη προς τη συχνότητα του κύματος φωτός (με συντελεστή αναλογίας τη σταθερά του Planck).

Τώρα, σαν τα παιδιά που υποχρεούνται να πληρώσουν ένα ελάχιστο τέλος εξόδου, τα ηλεκτρόνια σε ένα μέταλλο πρέπει να συ-

γκρουστούν με ένα φωτόνιο το οποίο να έχει μια ορισμένη ελάχιστη ενέργεια, ώστε να μπορέσουν να αποβληθούν από την επιφάνεια. (Όπως συμβαίνει και με τα παιδιά που παλεύουν για τα χρήματα, είναι εξαιρετικά απίθανο να χτυπηθεί ένα ηλεκτρόνιο από περισσότερα του ενός φωτόνια – τα πιο πολλά δεν χτυπιούνται καθόλου.) Όμως αν η συχνότητα της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης είναι πολύ χαμηλή, από τα επιμέρους φωτόνιά της θα λείπει η απαιτούμενη ισχύς για να αποβάλουν τα ηλεκτρόνια. Όπως ακριβώς κανένα από τα παιδιά δεν μπορεί να πληρώσει για να φύγει, ανεξάρτητα από τον τεράστιο συνολικό αριθμό νομισμάτων με τα οποία τα περιλούζουν οι ενήλικοι, κανένα ηλεκτρόνιο δεν απελευθερώνεται, ανεξάρτητα από την τεράστια συνολική ενέργεια που εμπεριέχεται στην προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη, αν η συχνότητά της (και συνεπώς η ενέργεια των ανεξάρτητων φωτονίων της) είναι πολύ χαμηλή.

Όμως, όπως ακριβώς τα παιδιά μπορούν να εγκαταλείψουν την αποθήκη μόλις τα νομίσματα που τα περιλούζουν γίνουν αρκετά μεγάλα, τα ηλεκτρόνια θα αποσπαστούν από την επιφάνεια μόλις η συχνότητα του φωτός που τα λούζει –το ενεργειακό τους νόμισμα– γίνει αρκετά υψηλή. Επιπλέον, όπως ακριβώς ο ενήλικος που κουβαλά τα χαρτονομίσματα των εκατό ευρώ αυξάνει τη συνολική ποσότητα χρημάτων τα οποία πέφτουν στο υπόγειο, αυξάνοντας τον αριθμό των επιμέρους χαρτονομίσμάτων που πετά, η συνολική ένταση μιας φωτεινής ακτίνας με συγκεκριμένη συχνότητα αυξάνεται όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των φωτονίων που περιέχει. Και όπως ακριβώς περισσότερα χαρτονομίσματα των εκατό ευρώ έχουν ως αποτέλεσμα ότι μπορούν να φύγουν περισσότερα παιδιά, περισσότερα φωτόνια έχουν ως αποτέλεσμα ότι χτυπιούνται και αποσπώνται περισσότερα ηλεκτρόνια από την επιφάνεια. Παρατηρήστε όμως ότι η ενέργεια που απομένει σε καθένα από αυτά τα ηλεκτρόνια, αφού σπάσει τα δεσμά του και αποβληθεί από την επιφάνεια, εξαρτάται αποκλειστικά από την ενέργεια του φωτονίου που το χτυπάει – και αυτό καθορίζεται από τη συχνότητα της φωτεινής ακτίνας και όχι από τη συνολική της

ένταση. Όπως ακριβώς τα παιδιά εγκαταλείπουν τα υπόγεια με 15 ευρώ στην τσέπη, ανεξάρτητα από το πόσα κατοστάρικα ρίχτηκαν κάτω, κάθε ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει την επιφάνεια με την ίδια ενέργεια – και συνεπώς με την ίδια ταχύτητα – ανεξάρτητα από τη συνολική ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Περισσότερο συνολικό χρήμα απλώς σημαίνει ότι μπορούν να φύγουν περισσότερα παιδιά· περισσότερη συνολική ενέργεια στη φωτεινή ακτίνα απλώς σημαίνει ότι απελευθερώνονται περισσότερα ηλεκτρόνια. Αν θέλουμε τα παιδιά να φεύγουν από τα υπόγεια με περισσότερα χρήματα, πρέπει να αυξήσουμε την αξία των χαρτονομισμάτων που ρίχνουμε· αν θέλουμε τα ηλεκτρόνια να εγκαταλείπουν την επιφάνεια με μεγαλύτερη ταχύτητα, πρέπει να αυξήσουμε τη συχνότητα της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης – με άλλα λόγια, πρέπει να αυξήσουμε την ενέργεια των φωτονίων που πέφτουν πάνω στη μεταλλική επιφάνεια.

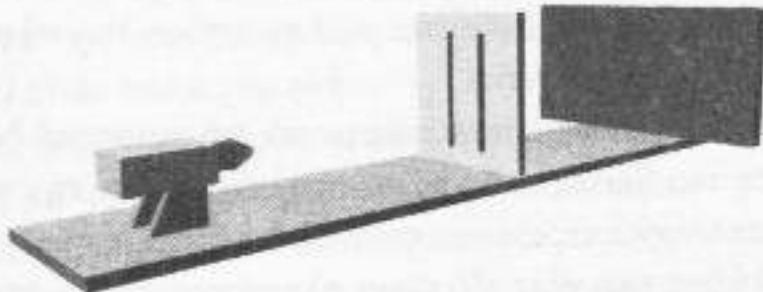
Όλα αυτά συμφωνούν απολύτως με τα πειραματικά δεδομένα. Η συχνότητα του φωτός (το χρώμα του) καθορίζει την ταχύτητα των εξερχόμενων ηλεκτρονίων· η συνολική ένταση του φωτός καθορίζει το πλήθος των εξερχόμενων ηλεκτρονίων. Κι έτσι ο Einstein έδειξε ότι η εικασία του Planck για την τεμαχισμένη ενέργεια αντανακλά όντως ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων: ότι αποτελούνται από σωματίδια – τα φωτόνια – που είναι μικρές δεσμίδες, ή κβάντα, φωτός. Ο τεμαχισμός της ενέργειας που εμπεριέχεται σε αυτά τα κύματα οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελούνται και τα ίδια από τεμάχια.

Η ιδέα του Einstein σηματοδοτούσε μια μεγάλη πρόοδο. Όμως, όπως θα δούμε αμέσως, η ιστορία δεν είναι τόσο ξεκάθαρη όσο φαίνεται με την πρώτη ματιά.

Είναι κύμα ή σωματίδιο;

Όλοι γνωρίζουν ότι το νερό – και κατά συνέπεια τα κύματα στο νερό – αποτελείται από έναν τεράστιο αριθμό μορίων νερού. Είναι

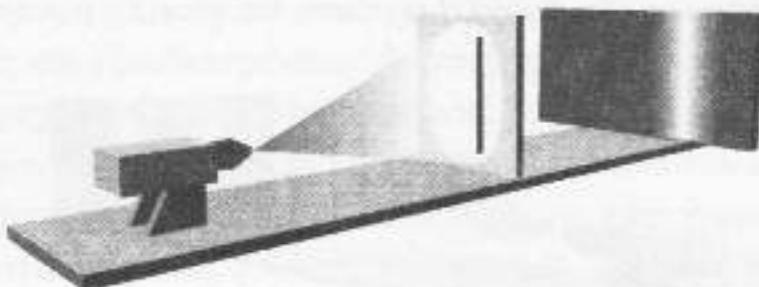
λοιπόν τόσο περίεργο να αποτελούνται και τα φωτεινά χύματα από έναν τεράστιο αριθμό σωματιδίων, και συγχεκριμένα από φωτόνια; Είναι. Όμως η έκπληξη βρίσκεται στις λεπτομέρειες. Βλέπετε, παραπάνω από τριακόσια χρόνια νωρίτερα ο Newton ισχυρίστηκε ότι το φως συντίθεται από μια ροή σωματιδίων, συνεπώς η ιδέα δεν είναι και τόσο καινούργια. Εντούτοις, ορισμένοι από τους συναδέλφους του Newton, και ιδιαίτερα ο Ολλανδός φυσικός Christian Huygens, διαφώνησαν μαζί του και υποστήριξαν ότι το φως είναι χύμα. Η διαμάχη κράτησε χρόνια, αλλά τελικά τα περάματα, τα οποία εκτέλεσε ο Άγγλος φυσικός Thomas Young στις αρχές της δεκαετίας του 1800, έδειξαν ότι ο Newton είχε άδικο.



Σχήμα 4.3 Στο πείραμα της διπλής σχισμής, μια ακτίνα φωτός πέφτει σε ένα πέτασμα όπου έχουν ανοιχτεί δύο σχισμές. Το φως που περνά το πέτασμα αποτυπώνεται κατόπιν σε μια φωτογραφική πλάκα, όταν η μία ή και οι δύο σχισμές είναι ανοιχτές.

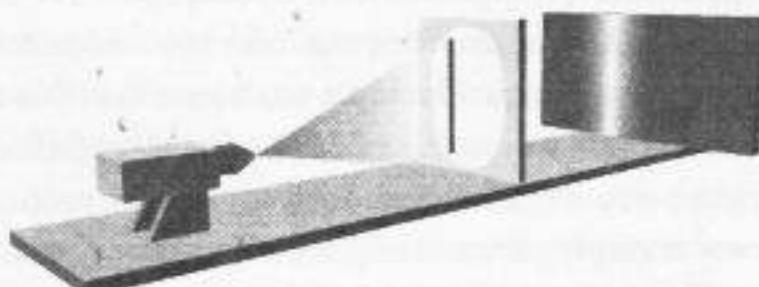
Μια εκδοχή της πειραματικής διάταξης του Young –που έμεινε γνωστή ως «πείραμα της διπλής σχισμής»– παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.3. Ο Feynman μάλιστα υποστήριζε ότι για να συλλέξουμε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την κβαντομηχανική, αρκεί να εξετάσουμε προσεκτικά όλες τις συνέπειες αυτού του πειράματος· αξίζει λοιπόν να το συζητήσουμε. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.3, το φως πέφτει σε ένα λεπτό συμπαγές πέτασμα όπου έχουν ανοιχτεί δύο σχισμές. Μία φωτογραφική πλάκα αποτυπώνει το φως που περνά μέσα από τις σχισμές – φωτεινότερες περιοχές στη φωτογραφία υποδεικνύουν περισσότερο προσπίπτον φως. Το πείραμα συ-

νισταται στη σύγκριση των εικόνων που προκύπτουν πάνω στις φωτογραφικές πλάκες, όταν μένει ανοιχτή είτε η μία είτε και οι δύο σχισμές του πετάσματος και η φωτεινή πηγή ακτινοβολεί.



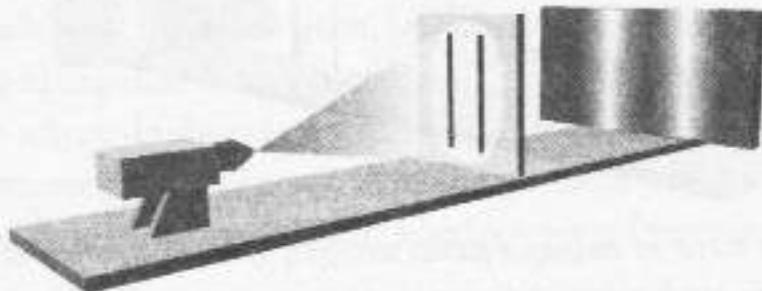
Σχήμα 4.4 Σε αυτό το πείραμα μένει ανοιχτή η δεξιά σχισμή κι έτοι οδηγούμαστε στην εικόνα που φαίνεται στη φωτογραφική πλάκα.

Αν καλυφθεί η αριστερή σχισμή και μείνει ανοιχτή η δεξιά, η φωτογραφία δείχνει όπως στο Σχήμα 4.4. Αυτό είναι λογικό, καθώς το φως που χτυπά στη φωτογραφική πλάκα πρέπει να περάσει μέσα από τη μόνη ανοιχτή σχισμή και κατά συνέπεια να συγκεντρωθεί στο δεξιό μέρος της φωτογραφίας. Παρομοίως, αν καλυφθεί η δεξιά σχισμή και μείνει ανοιχτή η αριστερή, η φωτογραφία θα δείχνει όπως στο Σχήμα 4.5. Αν μείνουν ανοιχτές και οι δύο σχισμές, η σωματιδιακή εκδοχή του Newton για το φως οδηγεί στην πρόβλεψη ότι η φωτογραφική πλάκα θα δείχνει όπως στο Σχήμα 4.6, ένα αμάλγαμα των Σχημάτων 4.4 και 4.5. Στην ουσία, αν φανταστείτε τα νευτώνεια σωμάτια του φωτός σαν μικρά



Σχήμα 4.5 Όπως στο Σχήμα 4.4, μόνο που τώρα μένει ανοιχτή η αριστερή σχισμή.

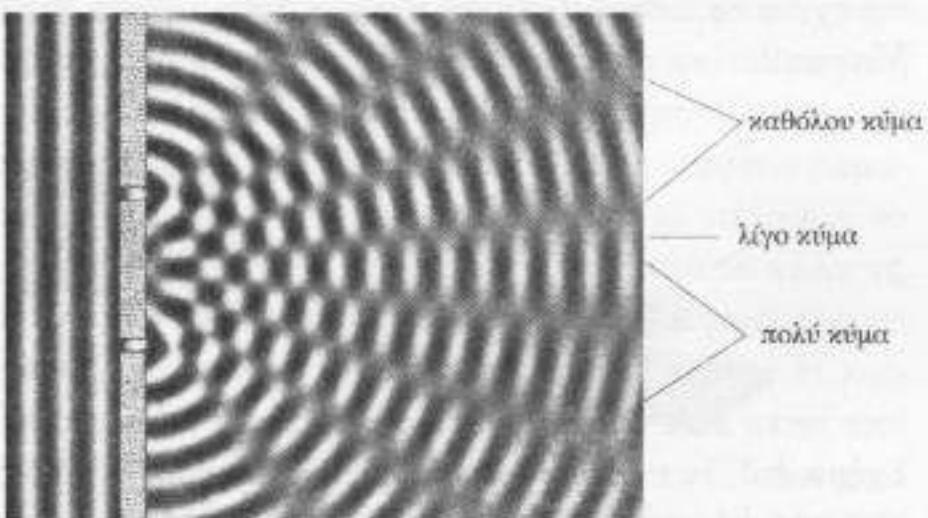
σκάγια τα οποία εκτοξεύετε στον τοίχο, όσα περνούν θα συγκεντρωθούν στις δύο περιοχές που βρίσκονται πίσω ακριβώς από τις δύο σχισμές. Αντίθετα, η κυματική εκδοχή του φωτός οδηγεί σε μια πολύ διαφορετική πρόβλεψη για όσα συμβαίνουν αν ανοίξουν και οι δύο σχισμές. Ας δούμε λοιπόν τι θα γίνει.



Σχήμα 4.6 Η νευτώνεια άποψη για τη σωματιδιακή φύση του φωτός προβλέπει ότι όταν μένουν ανοιχτές και οι δύο σχισμές, στη φωτογραφίη πλάκα συγχωνεύονται οι εικόνες των Σχημάτων 4.4 και 4.5.

Φανταστείτε προς στιγμήν ότι αντί για κύματα φωτός έχουμε να κάνουμε με υδάτινα κύματα. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει είναι το ίδιο, αλλά το νερό διευκολύνει περισσότερο τη σκέψη μας. Όταν τα υδάτινα κύματα χτυπούν το πέτασμα, κυκλικά κύματα που κινούνται προς τα έξω ξεπροβάλλουν από κάθε σχισμή και μοιάζουν αρκετά με όσα δημιουργούνται όταν πετάμε ένα βότσαλο σε μια λιμνούλα, όπως δείχνει το Σχήμα 4.7. (Είναι απλό να το δοκιμάσετε χρησιμοποιώντας ένα πέτασμα από χαρτόνι με δύο σχισμές μέσα σε μια λεκάνη με νερό.) Καθώς τα κύματα που προβάλλουν από κάθε σχισμή συμβάλλουν, συμβαίνει κάτι ενδιαφέρον. Αν οι κορυφές δύο κυμάτων συμβάλλουν, το ύψος του υδάτινου κύματος σε αυτό το σημείο αυξάνεται: είναι το άθροισμα του ύψους των δύο επιμέρους κορυφών. Αν συμβάλλουν οι κοιλίες δύο κυμάτων, το βάθος της υδάτινης κοιλότητας στο σημείο αυτό αυξάνεται με παρόμοιο τρόπο. Και τέλος, αν η κορυφή κάποιου κύματος που ξεπροβάλλει από τη μία σχισμή συμβάλλει με την κοιλία κάποιου κύματος που ξεπροβάλλει από την άλλη, αλληλοεξουδετερώνονται. (Αυτή ακριβώς η ιδέα κρύβεται πίσω από τα μοντέρνα ακουστικά εξουδετέρωσης θο-

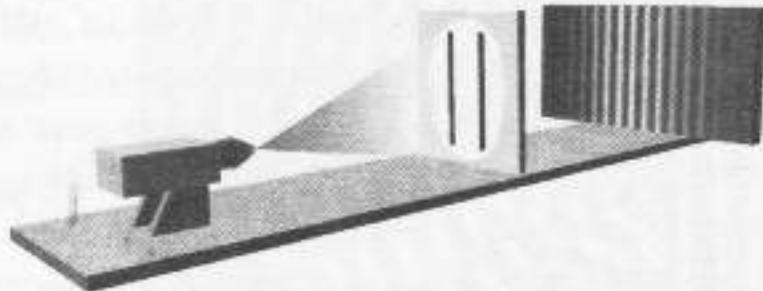
ρύβου – μετρούν το σχήμα του εισερχόμενου ηχητικού κύματος και κατόπιν παράγουν ένα άλλο με ακριβώς «αντίθετο» σχήμα, εξουδετερώνοντας έτσι τον ανεπιθύμητο θόρυβο.) Ανάμεσα σε αυτές τις ακραίες περιπτώσεις συμβολής –κορυφή με κορυφή, κοιλία με κοιλία και κορυφή με κοιλία – υπάρχει πλήθος από επιμέρους επαυξήσεις ύψους και εξουδετερώσεις. Αν εσείς μαζί με μια μεγάλη παρέα φίλων σας σχηματίσετε μια γραμμή από βαρκούλες παράλληλα προς το πέτασμα, και ο καθένας σας καταγράφει πόσο τον κουνά το κύμα που προκύπτει, το αποτέλεσμα θα είναι κάτι σαν κι αυτό που φαίνεται στο δεξιό άκρο του Σχήματος 4.7. Τα μέρη όπου το κούνημα είναι σημαντικό, βρίσκονται εκεί όπου συμπίπτουν οι κορυφές (ή οι κοιλίες) των κυμάτων από τις δύο σχισμές. Περιοχές ελάχιστου ή μηδενικού κουνήματος έχουμε όπου οι κορυφές από τη μία σχισμή συμπίπτουν με τις κοιλίες από την άλλη και αλληλοεξουδετερώνονται.



Σχήμα 4.7 Κυκλικά υδάτινα κύματα που ξεπροβάλλουν από κάθε σχισμή, συμβάλλουν επαυξάνοντας το συνολικό κύμα σε ορισμένες περιοχές και μειώνοντάς το σε άλλες.

Εφόσον η φωτογραφική πλάκα καταγράφει πόσο «κουνιέται» το εισερχόμενο φως, όταν εφαρμοστεί ακριβώς η ίδια συλλογιστική στην κυματική εκδοχή μιας φωτεινής ακτίνας, βλέπουμε πως, όταν μείνουν ανοιχτές και οι δύο σχισμές, η φωτογραφία θα μοιά-

Ζει με το Σχήμα 4.8. Οι φωτεινότερες περιοχές στο Σχήμα 4.8 βρίσκονται εκεί όπου οι κορυφές (ή οι κοιλίες) από τα φωτεινά κύματα των δύο σχισμών συμπίπτουν. Οι σκοτεινές περιοχές βρίσκονται εκεί όπου κορυφές του κύματος από τη μία σχισμή συμπίπτουν με κοιλίες του κύματος από την άλλη, οδηγώντας σε εξουδετέρωση. Αυτή η εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών λωρίδων είναι γνωστή ως χροσσοί συμβολής. Η φωτογραφία του Σχήματος 4.8 διαφέρει σημαντικά από τη φωτογραφία στο Σχήμα 4.6, και άρα με το συγκεκριμένο πείραμα γίνεται διάχριση ανάμεσα στη σωματιδιακή και την κυματική εκδοχή του φωτός. Ο Young εκτέλεσε μια παραλλαγή αυτού του πειράματος και τα αποτελέσματά του ταίριαζαν με το Σχήμα 4.8, επιβεβαιώνοντας έτσι την κυματική εκδοχή. Η άποψη του Newton ηττήθηκε (μολονότι χρειάστηκε αρκετός χρόνος μέχρι να το παραδεχτούν οι φυσικοί). Υπερίσχυσε η άποψη για την κυματική φύση του φωτός και στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε στέρεα μαθηματικά θεμέλια από τον Maxwell.



Σχήμα 4.8 Αν το φως είναι κύμα, τότε, όταν και οι δύο σχισμές μένουν ανοιχτές, θα υπάρχει συμβολή ανάμεσα στα μέρη του κύματος που ξεπροβάλλουν από κάθε σχισμή.

Όμως φαίνεται πως ο Einstein, ο άνθρωπος που κατέρριψε τη σεπτή θεωρία του Newton για τη βαρύτητα, ανέστησε το νευτώνειο σωματιδιακό μοντέλο του φωτός, εισάγοντας τα φωτόνια. Φυσικά εξακολουθούμε να αντιμετωπίζουμε το ίδιο ερώτημα: πώς μπορούν να εξηγηθούν οι χροσσοί συμβολής του Σχήματος 4.8 από σωματιδιακή σκοπιά; Με μια πρώτη ματιά ενδέχεται να κάνετε

την ακόλουθη υπόδειξη. Το νερό συνίσταται από μόρια H_2O – τα «σωματίδια» του νερού. Ωστόσο, όταν συρρέουν πολλά τέτοια μόρια, μπορούν να παραχθούν υδάτινα κύματα, με τις συνακόλουθες ιδιότητες συμβολής που δείχνει το Σχήμα 4.7. Κι έτσι, μπορεί να φαίνεται λογική η υπόθεση ότι κάποιες κυματικές διότητες, όπως οι κροσσοί συμβολής, μπορούν να προκύψουν από γία σωματιδιακή εκδοχή για το φως, αρκεί να εμπλέχεται ένας τεράστιος αριθμός φωτονίων, δηλαδή σωματιδίων του φωτός.

Στην πραγματικότητα εντούτοις ο μικρόκοσμος είναι πολύ πιο περίπλοκος. Ακόμη κι αν η ένταση της φωτεινής πηγής στο Σχήμα 4.8 μειώνεται συνεχώς, μέχρι να αρχίσουν να εκπέμπονται μεμονωμένα φωτόνια προς το πέτασμα –ας πούμε με ρυθμό ένα κάθε δέκα δευτερόλεπτα–, η φωτογραφική πλάκα θα εξακολουθεί να δείχνει όπως αυτή στο Σχήμα 4.8: αν περιμένουμε αρκετά, ώστε να περάσει από τις σχισμές ένας τεράστιος αριθμός από αυτές τις διακριτές δέσμες φωτός και καθεμιά τους να καταγραφεί σαν ξεχωριστό σημείο εκεί όπου θα χτυπήσει τη φωτογραφική πλάκα, αυτά τα σημεία θα αυξηθούν σταδιακά, σχηματίζοντας την εικόνα των κροσσών συμβολής. Εκπληκτικό! Πώς μπορούν μεμονωμένα σωματίδια, τα φωτόνια, που περνούν από το πέτασμα το ένα μετά το άλλο και χτυπούν ξεχωριστά το ένα από το άλλο τη φωτογραφική πλάκα, να συνωμοτούν, ώστε να παράγουν φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς κυμάτων που συμβάλλουν; Η κοινή λογική λέει ότι κάθε ξεχωριστό φωτόνιο περνά είτε μέσα από την αριστερή σχισμή είτε μέσα από τη δεξιά, και κατά συνέπεια θα περιμέναμε να δούμε την εικόνα που φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Μάταια όμως.

Αν δεν έχετε μείνει έκθαμβοι μπροστά σε αυτό το φυσικό φαινόμενο, σημαίνει πως είτε το έχετε ξανασυναντήσει και δεν σας προκαλεί πλέον καμία αίσθηση, είτε ότι η περιγραφή μέχρι στιγμής δεν ήταν αρκετά παραστατική. Σε περίπτωση λοιπόν που ισχύει το δεύτερο, ας το περιγράψουμε ξανά, αλλά με λίγο διαφορετικό τρόπο. Κλείνετε την αριστερή σχισμή και εκτοξεύετε τα φωτόνια ένα ένα στο πέτασμα. Κάποια το περνούν, κάποια όχι.

Αυτά που περνούν αποτυπώνουν σημείο σημείο μια εικόνα στη φωτογραφική πλάκα που μοιάζει με αυτή στο Σχήμα 4.4. Κατόπιν εκτελείτε το πείραμα ξανά με μια νέα φωτογραφική πλάκα, αλλά αυτή τη φορά ανοίγετε και τις δύο σχισμές. Πολύ φυσικά, πιστεύετε ότι αυτό απλώς θα αυξήσει τον αριθμό των φωτονίων που περνούν μέσα από τις σχισμές και χτυπούν τη φωτογραφική πλάκα, εκθέτοντας έτσι το φίλμ σε συνολικά περισσότερο φως συγκριτικά με την πρώτη εκτέλεση του πειράματος. Όταν όμως αργότερα εξετάζετε την εικόνα που δημιουργήθηκε, ανακαλύπτετε ότι όχι μόνον, όπως περιμένατε, υπάρχουν φωτεινές περιοχές στη φωτογραφική πλάκα εκεί όπου στην πρώτη εκτέλεση υπήρχε σκοτάδι, αλλά ότι υπάρχουν και περιοχές της φωτογραφικής πλάκας οι οποίες ήταν φωτεινές στο πρώτο πείραμα, ενώ τώρα είναι σκοτεινές, όπως στο Σχήμα 4.8. Λυξάνοντας τον αριθμό των ανεξάρτητων φωτονίων που χτύπησαν τη φωτογραφική πλάκα, μειώσατε τη φωτεινότητα σε ορισμένες περιοχές. Κατά κάποιον τρόπο μεμονωμένα φωτόνια που εκπέμπονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές έχουν την ικανότητα να αλληλοεξουδετερώνονται. Σκεφτείτε πόσο παράλογο ακούγεται αυτό: φωτόνια τα οποία θα περνούσαν από τη δεξιά σχισμή και θα χτυπούσαν το φίλμ στο σημείο όπου βρίσκεται κάποιος από τους σκοτεινούς κροσσούς του Σχήματος 4.8, δεν τα χαταφέρνουν, όταν μένει ανοιχτή η αριστερή σχισμή (και γι' αυτό τώρα ο κροσσός είναι σκοτεινός). Μα πώς στο καλό μπορεί να επηρεάζεται μια μικροσκοπική δέσμη φωτός που περνά από τη μία σχισμή, από το άνοιγμα ή το κλείσιμο της άλλης σχισμής; Όπως παρατήρησε ο Feynman, είναι τόσο παράξενο όσο αν πυροβολήσετε το πέτασμα με ένα πολυβόλο, όταν και οι δύο σχισμές μείνουν ανοιχτές, και οι ανεξάρτητες σφαίρες, που εκτοξεύτηκαν ξεχωριστά, με κάποιον τρόπο αλληλοεξουδετερώθιον, αφήνοντας στο στόχο ένα λύγος ανέγγιχτων περιοχών – τις οποίες πετυχαίνετε όταν μένει ανοιχτή μόνο η μία σχισμή του διαφράγματος.

Αυτού του είδους τα πειράματα δείχνουν ότι τα σωματίδια φωτός του Einstein διαφέρουν αρχετά από τα νευτώνεια. Με κάποιον

τρόπο τα φωτόνια -μολονότι σωματίδια- διαθέτουν και κυματικές ιδιότητες. Το γεγονός ότι η ενέργεια αυτών των σωματιδίων καθορίζεται από ένα κυματικό χαρακτηριστικό -τη συχνότητα- είναι η πρώτη ένδειξη πως εδώ συμβαίνει μια παράξενη ένωση. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο όμως και το πείραμα της διπλής σχισμής φανερώνουν τις πραγματικές διαστάσεις αυτού του ζητήματος. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δείχνει ότι το φως έχει σωματιδιακές ιδιότητες. Το πείραμα της διπλής σχισμής δείχνει ότι το φως εκδηλώνει τις ιδιότητες συμβολής των κυμάτων. Και τα δύο μαζί δείχνουν ότι το φως έχει τόσο κυματικές όσο και σωματιδιακές ιδιότητες. Ο μικρόκοσμος απαιτεί να αλλάξουμε την αντίληψή μας ότι κάτι είναι είτε κύμα είτε σωμάτιο, και να ενστερνιστούμε το ενδεχόμενο να είναι και τα δύο. Κι εδώ ακριβώς εμφανίζεται στο προσκήνιο η αποφθεγματική φράση του Feynman, «κανείς δεν καταλαβαίνει την κβαντομηχανική». Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε λέξεις όπως «κυματοσωματιδιακός δυσμός». Μπορούμε να μεταφράσουμε αυτές τις λέξεις σε ένα μαθηματικό φορμαλισμό που να περιγράφει πραγματικά πειράματα με καταπληκτική ακρίβεια. Όμως είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποκτήσουμε μια βαθιά συναίσθηση αυτού του εκθαμβωτικού χαρακτηριστικού που παρουσιάζει ο μικρόκοσμος.

Και τα σωματίδια της ύλης είναι κύματα

Στις πρώτες δεκαετίες του εικοστού αιώνα, πολλοί από τους μεγαλύτερους θεωρητικούς φυσικούς αγωνίζονταν ακούραστα προκειμένου να αναπτύξουν τρόπους για μία μαθηματικά έγκυρη και σύμφωνη με τη λογική της φυσικής κατανόηση αυτών των μέχρι τότε χρυμμένων μικροσκοπικών χαρακτηριστικών της πραγματικότητας. Υπό την χαθοδήγηση του Niels Bohr στην Κοπεγχάγη, για παράδειγμα, σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην εξήγηση των ιδιοτήτων του φωτός που εκπέμπεται από θερμά άτομα υδρογόνου. Όμως και αυτό και το υπόλοιπο επιστημονικό έργο

που συντελέστηκε πριν από τα μέσα της δεκαετίας του 1920 έμοιαζε περισσότερο με μια πρόχειρη συρραφή των ιδεών του δέκατου ένατου αιώνα με τις νεόκοπες κβαντικές έννοιες παρά με μια στέρεη και συνεκτική βάση-πλαίσιο για την κατανόηση της φυσικής του σύμπαντος. Σε σύγκριση με το σαφές, λογικό πλαισιο των νόμων του Newton για την χίνηση ή με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell, η ανολοκλήρωτη κβαντική θεωρία βρισκόταν σε χαοτική κατάσταση.

Το 1923, ο νεαρός Γάλλος ευγενής, ο πρίγκιπας Louis de Broglie, προσέθεσε ένα νέο στοιχείο στην κβαντική διαμάχη, ένα στοιχείο που σύντομα θα βοηθούσε στην εισαγωγή του μαθηματικού πλαισίου της σύγχρονης κβαντομηχανικής και το οποίο του χάρισε το Νόμπελ Φυσικής το 1929. Ξεχινώντας από μια αλυσίδα συλλογισμών που βασίζονται στην ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein, ο de Broglie πρότεινε πως ο δυϊσμός κύματος-σωματιδίου δεν βρίσκει εφαρμογή μόνο στο φως αλλά και στην ύλη. Υποστήριξε, χοντρικά, ότι εφόσον η σχέση $E = mc^2$ του Einstein συνδέει τη μάζα με την ενέργεια κι εφόσον ο Planck και ο Einstein συνέδεσαν την ενέργεια με τη συχνότητα των κυμάτων, αν συνδυαστούν αυτά τα δύο, θα πρέπει και η μάζα να διαθέτει τη δική της κυματική μετενσάρκωση. Αφού εργάστηκε προσεκτικά ακολουθώντας αυτή τη συλλογιστική, πρότεινε ότι όπως ακριβώς το φως είναι ένα κυματικό φαινόμενο, για το οποίο η κβαντική θεωρία δείχνει ότι υπάρχει μια εξίσου έγκυρη σωματιδιακή περιγραφή, για ένα ηλεκτρόνιο –το οποίο συνήθως εκλαμβάνουμε ως σωματίδιο– θα μπορούσε να υπάρχει μια εξίσου έγκυρη κυματική περιγραφή. Ο Einstein δέχτηκε αμέσως την ιδέα του de Broglie, καθώς ήταν φυσικό επακόλουθο όσων είχε ο ίδιος συνεισφέρει με τη σχετικότητα και τα φωτόνια. Λλά ακόμα κι έτσι, τίποτε δεν ισχύει αν δεν αποδειχθεί πειραματικά. Και η απόδειξη επρόκειτο να κάνει σύντομα την εμφάνισή της μέσα από το έργο των Clinton Davisson και Lester Germer.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1920, οι Davisson και Germer, πειραματικοί φυσικοί στην τηλεφωνική εταιρεία Bell, μελετούσαν

πώς μια δέσμη ηλεκτρονίων ανακλάται στο νικέλιο. Η μόνη λεπτομέρεια που μας αφορά εδώ είναι ότι σε ένα τέτοιο πείραμα οι κρύσταλλοι του νικελίου συμπεριφέρονται περίπου όπως οι δύο σχισμές στο πείραμα το οποίο απεικονίζεται στα σχήματα της προηγούμενης ενότητας – στην πράξη, μπορούμε άνετα να θεωρήσουμε ότι πρόκειται για το ίδιο ακριβώς πείραμα το οποίο απεικονίζεται εκεί, μόνο που αντί της φωτεινής δέσμης χρησιμοποιείται μια δέσμη ηλεκτρονίων. Θα αντιμετωπίσουμε λοιπόν το πείραμα από αυτή την άποψη. Όταν οι Davisson και Germer εξέτασαν τα ηλεκτρόνια που περνούσαν από τις δύο σχισμές του πετάσματος αφήνοντάς τα να χτυπούν σε μια φωσφορίζουσα οθόνη η οποία κατέγραφε το σημείο πρόσπτωσης του κάθε ηλεκτρονίου με μια φωτεινή κουκίδα – ουσιαστικά ότι συμβαίνει μέσα σε μια συσκευή τηλεόρασης –, ανακάλυψαν κάτι αξιοσημείωτο. Ένα σχήμα σχεδόν πανομοιότυπο με αυτό που συναντάμε στο Σχήμα 1.8 έκανε την εμφάνισή του. Το πείραμά τους έδειξε συνεπώς ότι τα ηλεκτρόνια εκδηλώνουν φαινόμενα συμβολής, χαρακτηριστική ιδιότητα των κυμάτων. Στις σκοτεινές περιοχές της φωσφορίζουσας οθόνης τα ηλεκτρόνια με κάποιον τρόπο «αλληλοεξουδετερώνονται», όπως ακριβώς οι συμβάλλουσες χορυφές και κοιλίες των υδάτινων κυμάτων. Ακόμη κι αν η δέσμη των εκτοξευόμενων ηλεκτρονίων «εξασθενούσε» τόσο ώστε να εκπέμπεται, για παράδειγμα, μόνο ένα ηλεκτρόνιο κάθε δέκα δευτερόλεπτα, τα ανεξάρτητα ηλεκτρόνια εξακολουθούσαν να σχηματίζουν τους φωτεινούς και σκοτεινούς χροσσούς – σημείο σημείο. Κατά κάποιον τρόπο, όπως τα φωτόνια, έτσι και τα ανεξάρτητα ηλεκτρόνια «συμβάλλουν», υπό την έννοια ότι τα ανεξάρτητα ηλεκτρόνια, καθώς περνά η ώρα, αναπαράγουν τους χροσσούς συμβολής που χαρακτηρίζουν τα κύματα. Αναπόφευκτα, είμαστε αναγκασμένοι να συμπεράνουμε ότι κάθε ηλεκτρόνιο ενέχει κυματικό χαρακτήρα, σε συνδυασμό με την πιο οικεία περιγραφή του ως σωματιδίου.

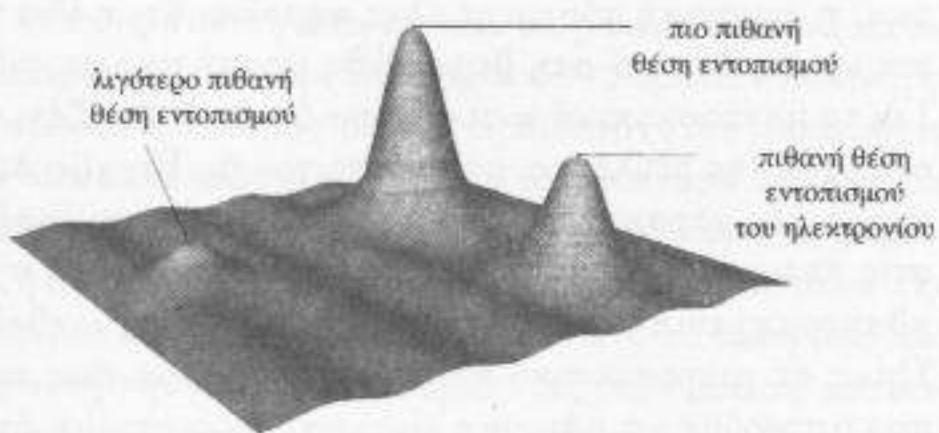
Παρότι η περιγραφή μας αφορούσε την περίπτωση των ηλεκτρονίων, παρόμοια πειράματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όλη η

ύλη έχει κυματικό χαρακτήρα. Αλλά πώς συμβιβάζεται αυτό με την εμπειρική μας πεποίθηση ότι η ύλη είναι στερεή και συμπαγής και σε καμία περίπτωση κυματοειδής; Ο de Broglie διατύπωσε λοιπόν έναν τύπο για το μήκος κύματος των κυμάτων της ύλης, ο οποίος δείχνει ότι είναι ανάλογο προς τη σταθερά του Planck, \hbar . (Για την ακρίβεια, το μήκος κύματος ισούται με το πηλίκο της \hbar προς την ορμή του υλικού σώματος.) Από τη στιγμή που η \hbar είναι τόσο μικρή, τα μήκη κύματος που προκύπτουν είναι εξίσου μικρής κλίμακας, σε σύγκριση με τα συνήθη μεγέθη. Γι' αυτό ο κυματικός χαρακτήρας της ύλης γίνεται άμεσα εμφανής μόνο μετά από προσεκτική έρευνα με τη χρήση μικροσκοπίου. Όπως ακριβώς η μεγάλη τιμή της c , της ταχύτητας του φωτός, αποκρύπτει μεγάλο μέρος της αληθινής φύσης του χώρου και του χρόνου, η μικρή τιμή της \hbar αποκρύπτει τις κυματικές όψεις της ύλης στον καθημερινό μας κόσμο.

Κύματα από τι;

Το φαινόμενο συμβολής, που ανακάλυψαν οι Davisson και Germer, αποτέλεσε χειροπιαστή μαρτυρία για την κυματική φύση των ηλεκτρονίων. Ποιος ήταν όμως ο φορέας αυτών των κυμάτων; Αρχικά ο Αυστριακός φυσικός Erwin Schrödinger πρότεινε την ιδέα ότι τα κύματα είναι «κηλίδες» ηλεκτρονίου. Αυτή η πρόταση έδινε μια «γεύση» για το κύμα ηλεκτρονίου, αλλά ήταν πολύ πρόχειρη. Όταν κάτι απλώνεται σαν κηλίδα, ένα μέρος του είναι εδώ κι άλλο εκεί. Ωστόσο ποτέ κανείς δεν συναντά μισό ηλεκτρόνιο ή ένα τρίτο του ηλεκτρονίου ή οποιοδήποτε άλλο κλάσμα, τέλος πάντων. Αυτό μας δυσκολεύει να συλλάβουμε τι πραγματικά είναι οι κηλίδες ηλεκτρονίου. Ως εναλλακτική λύση, το 1926 ο Γερμανός φυσικός Max Born επεξεργάστηκε αναλυτικά την ερμηνεία του Schrödinger για το κύμα ηλεκτρονίου, και είναι η δική του ερμηνεία -διευρυμένη από τον Bohr και τους συνεργάτες του- που μας συνοδεύει μέχρι σήμερα. Η πρόταση του Born συνιστά ένα από τα πλέον περίεργα χαρακτηριστικά της κβαντικής θεω-

ρίας, αλλά παρ' όλα αυτά υποστηρίζεται από πλήθος πειραματικών δεδομένων. Υποστήριξε ότι το κύμα ηλεκτρονίου πρέπει να ερμηνευτεί από τη σκοπιά των πιθανοτήτων. Το ηλεκτρόνιο είναι πιθανότερο να βρίσκεται εκεί όπου το πλάτος (το τετράγωνο του πλάτους, για να είμαστε ακριβέστεροι) του κύματος είναι μεγάλο· εκεί όπου το πλάτος είναι μικρό, είναι λιγότερο πιθανό να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Το κύμα που αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρόνιο είναι μεγαλύτερο εκεί όπου είναι πιθανότερο να εντοπιστεί το ηλεκτρόνιο και σταδιακά μικρότερο σε μέρη όπου είναι λιγότερο πιθανό να εντοπιστεί.

'Όντως αυτή η ιδέα φαίνεται παράξενη. Τι δουλειά έχουν οι πιθανότητες στη διατύπωση της θεμελιώδους φυσικής; Οι πιθανότητες εμφανίζονται συνήθως στις ιπποδρομίες, στα ζάρια ή στο τραπέζι της ρουλέτας, αλλά στις περιπτώσεις αυτές απλώς αντανακλούν την ελλιπή μας γνώση. Αν γνωρίζαμε επακριβώς την ταχύτητα του τροχού της ρουλέτας, το βάρος και τη σκληρότητα της λευκής μπίλιας, τη θέση και την ταχύτητα της μπίλιας όταν πέφτει στον τροχό, τις ακριβείς προδιαγραφές του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένα τα χωρίσματα και ούτω καθεξής, και αν χρησιμοποιούσαμε αρκούντως ισχυρούς υπολογιστές για να κάνουμε τους υπολογισμούς μας, θα μπορούσαμε, σύμφωνα με την κλασική φυσική, να προβλέψουμε με βεβαιό-

τητα που θα κατέληγε η μπίλια. Τα καζίνο στηρίζονται στην ανικανότητά σας να συλλέξετε όλες αυτές τις πληροφορίες και να κάνετε τους απαιτούμενους υπολογισμούς πριν τοποθετήσετε τις μάρκες σας στο τραπέζι. Όμως βλέπουμε ότι οι πιθανότητες, όπως τις συναντάμε στο τραπέζι της ρουλέτας, δεν αντανακλούν κάτι ιδιαίτερο σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του χόσμου. Η χβαντομηχανική, αντιθέτως, εισάγει την έννοια των πιθανοτήτων σε ένα πολύ βαθύτερο επίπεδο στο σύμπαν. Σύμφωνα με τον Born και τα αποτελέσματα μισού αιώνα πειραμάτων, η χυματική φύση της ύλης σημαίνει ότι η ίδια η ύλη πρέπει να περιγραφεί στη θεμελιώδη μορφή της με πιθανότητες. Για τα μακροσκοπικά αντικείμενα όπως το φλιτζάνι του καφέ ή ο τροχός της ρουλέτας, ο κανόνας του de Broglie δείχνει ότι ο χυματικός χαρακτήρας δεν παρατηρείται στην πράξη και ότι στις περισσότερες καθημερινές επιδιώξεις μας η σχετιζόμενη χβαντομηχανική πιθανότητα μπορεί να αγνοηθεί εντελώς. Όμως σε μικροσκοπικό επίπεδο μαθαίνουμε πως το καλύτερο που μπορούμε να κάνουμε είναι να ισχυριστούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο έχει συγκεκριμένη πιθανότητα εντοπισμού σε κάποια δεδομένη θέση.

Η πιθανοθεωρητική ερμηνεία έχει το πλεονέκτημα ότι αν ένα κύμα ηλεκτρονίου κάνει ό,τι μπορούν να κάνουν και τα άλλα κύματα –αν, για παράδειγμα, προσκρούει σε κάποιο εμπόδιο και δημιουργεί διάφορους νέους χυματισμούς–, αυτό δεν σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο θα διαχωριστεί σε κομμάτια, αλλά ότι υπάρχει ένα πλήθος θέσεων όπου το ηλεκτρόνιο ενδέχεται να εντοπιστεί με μη μηδενική πιθανότητα. Στην πράξη, αν ένα συγκεκριμένο πείραμα, που σχετίζεται, ας πούμε, με κάποιο ηλεκτρόνιο, επαναληφθεί πολλές φορές με εντελώς πανομοιότυπο τρόπο, δεν θα μας δίνει κάθε φορά την ίδια θέση για το ηλεκτρόνιο. Αντίθετα, στις διαδοχικές επαναλήψεις του πειράματος τα αποτελέσματα που θα δείχνουν πόσες φορές εντοπίζεται το ηλεκτρόνιο σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση θα ποικίλουν, και αυτή η ιδιότητα θα καθορίζεται από το σχήμα που θα έχει το κύμα πιθανότητας του ηλεκτρο-

νίου. Αν το κύμα πιθανότητας (για την ακρίβεια, το τετράγωνο του κύματος πιθανότητας) είναι διπλάσιο σε πλάτος στη θέση A απ' ό,τι στη θέση B, τότε η θεωρία προβλέπει πως σε μια ακολουθία πολλών επαναλήψεων του πειράματος το γλεκτρόνιο θα εντοπίζεται στη θέση A διπλάσιες φορές απ' ό,τι στη θέση B. Τα αποτελέσματα κάθε πειράματος δεν μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια: το καλύτερο που μπορούμε να κάνουμε είναι να προβλέψουμε την πιθανότητα με την οποία ενδέχεται να προκύψει διαφορετικό αποτέλεσμα.

Ακόμη κι έτσι, από τη στιγμή που θα μπορέσουμε να καθορίσουμε μαθηματικά το ακριβές σχήμα των κυμάτων πιθανότητας, οι προβλέψεις που μας δίνουν οι πιθανότητες μπορούν να ελεγχθούν αν επαναλάβουμε ένα δεδομένο πείραμα πολλές φορές, και μετρήσουμε έτσι πειραματικά την πιθανότητα να πάρουμε το ένα ή το άλλο αποτέλεσμα. Λίγους μόνο μήνες μετά την πρόταση του de Broglie, ο Schrödinger έκανε το αποφασιστικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, ορίζοντας μια εξίσωση που καθορίζει το σχήμα και την εξελικτική πορεία των κυμάτων πιθανότητας ή, όπως έμειναν γνωστά, των κυματοσυναρτήσεων. Δεν πέρασε καιρός και τόσο η εξίσωση του Schrödinger όσο και η πιθανοθεωρητική ερμηνεία χρησιμοποιήθηκαν δίνοντας απίστευτα ακριβείς προβλέψεις. Συνεπώς, μέχρι το 1927 η κλασική αθωότητα είχε χαθεί. Είχαν παρέλθει ανεπιστρεπτί οι μέρες ενός σύμπαντος που έμοιαζε με ωρολογιακό μηχανισμό, του οποίου τα συστατικά μέρη είχαν τεθεί σε κίνηση κάποια στιγμή στο παρελθόν και εκπλήρωναν υπάκουα το αναπόφευκτο, μονοσήμαντα ορισμένο πεπρωμένο τους. Σύμφωνα με την κβαντομηχανική, το σύμπαν εξελίσσεται μεν σύμφωνα με μια ισχυρή και ακριβή μαθηματική διατύπωση, αλλά το πλαίσιο αυτό καθορίζει μόνο την πιθανότητα να συμβεί μια οποιαδήποτε μελλοντική κατάσταση – και όχι ποια ακριβώς θα είναι η πραγματική μελλοντική κατάσταση.

Πολλοί θεωρούν το συμπέρασμα αυτό ανησυχητικό ή ακόμη και εντελώς απαράδεκτο. Ο Einstein ήταν ένας από αυτούς. Με

μία από τις πιο αποφθεγματικές φράσεις στο χώρο της φυσικής, ο Einstein επέπληξε τα πρωτοπαλίκαρα της κβαντομηχανικής λέγοντάς τους ότι «ο Θεός δεν παιζει ζάρια με το Σύμπαν». Ένιωθε ότι οι πιθανότητες παρεισφρέουν στις βασικές έννοιες της φυσικής λόγω κάποιας παραλλαγής της αυτίας, για την οποία εμφανίζονται και στον τροχό της ρουλέτας: εξαιτίας κάποιας βασικής ατέλειας στην κατανόησή μας. Το μέλλον του σύμπαντος, σύμφωνα με την άποψη του Einstein, δεν άφηνε περιθώριο στο τυχαίο. Η φυσική θα έπρεπε να προβλέπει πώς εξελίσσεται το σύμπαν κι όχι απλώς την πιθανότητα κάποιας συγκεκριμένης εξέλιξης. Όμως το ένα πείραμα μετά το άλλο –μερικά από τα πιο πειστικά έγιναν μετά το θάνατό του– επιβεβαιώνουν ότι ο Einstein είχε αναμφίβολα άδικο. Όπως έχει πει ο Βρετανός φυσικός Stephen Hawking, στο σημείο αυτό «ήταν μπερδεμένος ο Einstein κι όχι η κβαντική θεωρία».⁶

Ωστόσο η συζήτηση για την πραγματική σημασία της κβαντομηχανικής συνεχίζεται χωρίς σταματημό. Όλοι συμφωνούν με ποιο τρόπο πρέπει να χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της κβαντικής θεωρίας για να γίνονται ακριβείς προβλέψεις. Όμως για πολλά άλλα ζητήματα δεν υπάρχει ομοφωνία: τι σημαίνουν στην πραγματικότητα τα κύματα πιθανότητας, πώς «επιλέγει» ένα σωματίδιο ποιες απ' όλες τις πιθανές μελλοντικές καταστάσεις του θα ακολουθήσει, αν όντως επιλέγει κάποια, ή μήπως αντίθετα διακλαδίζεται σαν παραπόταμος για να ζήσει όλες τις πιθανές μελλοντικές καταστάσεις του, σε έναν όλο και μεγαλύτερο χώρο από παράλληλα σύμπαντα; Λυτά τα ερμηνευτικά ζητήματα σηκώνουν από μόνα τους μεγάλη κουβέντα, και, πράγματι, υπάρχουν πολλά εξαιρετικά βιβλία που υιοθετούν τον έναν ή τον άλλο τρόπο σκέψης σχετικά με την κβαντική θεωρία. Πάντως φαίνεται βέβαιο ότι ανεξάρτητα από τον τρόπο ερμηνείας της, η κβαντομηχανική αποδεικνύει, χωρίς να χωρούν αμφιβολίες, πως το σύμπαν θεμελιώνεται σε αρχές που, από τη σκοπιά της καθημερινής μας εμπειρίας, μοιάζουν παράδοξες.

Το μετα-μετάθημα τόσο της σχετικότητας όσο και της χβαντομηχανικής είναι ότι, όταν ερευνούμε σε βάθος τις θεμελιώδεις λειτουργίες του σύμπαντος, ενδέχεται να διαψευστούν οι προσδοκίες μας. Το θάρρος να θέτουμε ερωτήματα σε βάθος μπορεί να απαιτεί έναν μη αναμενόμενο βαθμό ευελιξίας, προκειμένου να αποδεχθούμε τις απαντήσεις.

Η μέθοδος του Feynman

Ο Richard Feynman ήταν ένας από τους μεγαλύτερους θεωρητικούς φυσικούς μετά τον Einstein. Αποδεχόταν πλήρως τον πιθανοθεωρητικό πυρήνα της χβαντομηχανικής, αλλά μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο παρουσίασε ένα νέο ισχυρό τρόπο αντιμετώπισης αυτής της θεωρίας. Από τη σκοπιά των αριθμητικών προβλέψεων, η μέθοδος του Feynman συμφωνεί ακριβώς με όλα τα προηγούμενα. Ωστόσο η διατύπωσή της είναι αρκετά διαφορετική. Ας την περιγράψουμε με το παράδειγμα της διπλής σχισμής.

Αυτό που προβληματίζει στο Σχήμα 4.8 είναι ότι φανταζόμαστε κάθε ηλεκτρόνιο να περνά είτε από την αριστερή σχισμή είτε από τη δεξιά και συνεπώς περιμένουμε ότι η συνένωση των Σχημάτων 4.4 και 4.5, όπως στο Σχήμα 4.6, θα αναπαριστά με ακρίβεια τα δεδομένα τα οποία προκύπτουν. Ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο περνά από τη δεξιά σχισμή, δεν θα έπρεπε να νοιάζεται αν υπάρχει ενδεχομένως και αριστερή σχισμή και αντίστροφα. Άλλα κατά κάποιον τρόπο το κάνει. Οι ροσσοί συμβολής οι οποίοι προκύπτουν απαιτούν κάτι που βρίσκεται σε μια ενδιάμεση μικτή κατάσταση και αισθάνεται και τις δύο σχισμές, ακόμη κι αν εκτοξεύουμε τα ηλεκτρόνια ένα ένα. Οι Schrödinger, de Broglie και Born εξήγησαν το φαινόμενο σχετίζοντας κάθε ηλεκτρόνιο με κύματα πιθανότητας. Όπως τα υδάτινα κύματα στο Σχήμα 4.7, το κύμα πιθανότητας του ηλεκτρονίου «βλέπει» και τις δύο σχισμές και υπόκειται στο ίδιο είδος συμβολής λόγω ανάμιξης. Τα

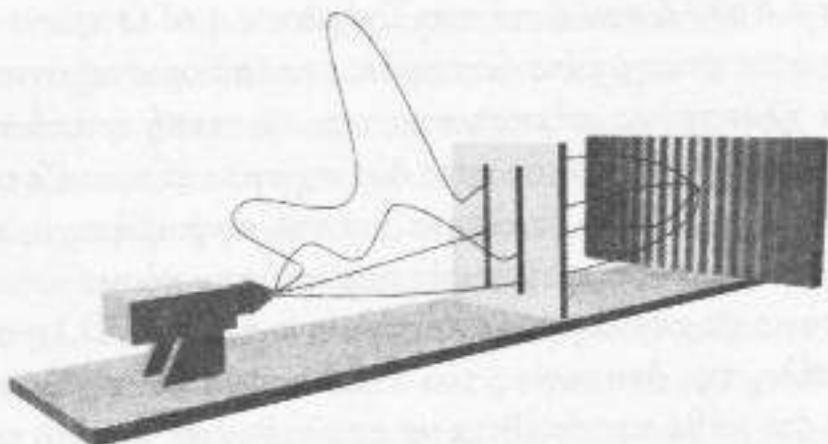
σημεία όπου το κύμα πιθανότητας αυξάνεται από την ανάμιξη, όπως τα σημεία μεγάλου πλάτους στο Σχήμα 4.7, υποδεικνύουν θέσεις όπου το ηλεκτρόνιο είναι πιθανό να εντοπιστεί· τα σημεία όπου το κύμα πιθανότητας μειώνεται από την ανάμιξη, όπως οι τόποι ελάχιστου ή μηδενικού πλάτους στο Σχήμα 4.7, υποδεικνύουν θέσεις όπου το ηλεκτρόνιο είναι δύσκολο ή απίθανο να εντοπιστεί. Τα ηλεκτρόνια χτυπούν τη φωσφορίζουσα οθόνη ένα ένα, διανεμημένα σύμφωνα με αυτή την κατανομή πιθανοτήτων, και έτσι δημιουργούν κροσσούς συμβολής όπως αυτοί στο Σχήμα 4.8.

Ο Feynman ακολούθησε διαφορετικό δρόμο. Αμφισβήτησε τη στοιχειώδη κλασική παραδοχή ότι κάθε ηλεκτρόνιο περνά είτε από τη δεξιά είτε από την αριστερή σχισμή. Ενδεχομένως να σκέψεστε ότι αυτός ο μηχανισμός είναι τόσο στοιχειώδης, ώστε να φαίνεται ανόητη η αμφισβήτησή του. Στο κάτω κάτω, δεν μπορείτε να ρίξετε μια ματιά στην περιοχή ανάμεσα στις σχισμές και τη φωσφορίζουσα οθόνη και να δείτε μέσα από ποια σχισμή περνά κάθε ηλεκτρόνιο; Μπορείτε. Όμως τότε θα έχετε αλλάξει το πείραμα. Για να δείτε το ηλεκτρόνιο, πρέπει να του κάνετε κάτι – για παράδειγμα, μπορείτε να το φωτίσετε, δηλαδή να το βομβαρδίσετε με φωτόνια και να μελετήσετε την αντανάκλασή τους. Βέβαια στις συνηθισμένες χλίμακες τα φωτόνια δρουν ως αμελητέα βληματάκια που εξοστρακίζονται στα δέντρα, στις εικόνες και στους ανθρώπους χωρίς ουσιαστικά να επηρεάζουν την κινητική κατάσταση αυτών των συγχριτικά μεγάλων υλικών σωμάτων. Τα ηλεκτρόνια όμως είναι ελαχιστότατες συγκεντρώσεις ύλης. Όσο ήπιος κι αν είναι ο τρόπος με τον οποίο θα προσπαθήσετε να εντοπίσετε από ποια σχισμή πέρασε το ηλεκτρόνιο, τα φωτόνια που θα ανακλαστούν πάνω του θα επηρεάσουν αναγκαστικά την κατοπινή του κίνηση. Και αυτή η μεταβολή στην κίνησή του θα αλλάξει τα αποτελέσματα του πειράματός μας. Αν επέμβετε στο πείραμα όσο χρειάζεται για να μπορέσετε να διαπιστώσετε από ποια σχισμή περνά κάθε ηλεκτρόνιο, τότε, όπως δείχνουν τα πειράματα, τα αποτελέσματα αλλάζουν και δεν είναι σαν αυτά του

Σχήματος 4.8 αλλά σαν αυτά του Σχήματος 4.6! Ο κραντικός κόσμος είναι έτσι φτιαγμένος ώστε μόλις προσδιοριστεί ότι το άλφα ή το βήτα ηλεκτρόνιο πέρασε από την αριστερή ή από τη δεξιά σχισμή, η συμβολή ανάμεσα στις δύο σχισμές εξαφανίζεται.

Κι έτσι ο Feynman δικαιώθηκε για την αμφισβήτηση που εξέφρασε, αφού – μολονότι η εμπειρία μας από τον κόσμο απαιτεί κάθε ηλεκτρόνιο να περνά μόνο από τη μία ή από την άλλη σχισμή μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1920 οι φυσικοί είχαν συνειδητοποιήσει ότι κάθε προσπάθεια να επαληθευτεί αυτή η φαινομενικά στοιχειώδης ιδιότητα της πραγματικότητας αλλοίωνε το πείραμα.

Ο Feynman διακήρυξε ότι κάθε ηλεκτρόνιο που φτάνει στη φωσφορίζουσα οθόνη περνά στην πραγματικότητα και από τις δύο σχισμές. Ακούγεται παράλογο, αλλά μη βιάζεστε: ακόμα δεν έχετε δει τίποτα. Ο Feynman υποστήριξε ότι στην ουσία κάθε μεμονωμένο ηλεκτρόνιο που πηγαίνει από την πηγή μέχρι ένα δεδομένο σημείο στη φωσφορίζουσα οθόνη, διανύει κάθε δυνατή τροχιά ταυτόχρονα: κάποιες από τις τροχιές αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 4.10. Περνά όμορφα και όσυχα από την αριστερή σχισμή. Ταυτόχρονα, περνά επίσης όμορφα και όσυχα από τη δεξιά σχισμή. Κατευθύνεται προς την αριστερή σχισμή, αλλά ξαφνικά αλλάζει πορεία προς τα δεξιά. Αμφιταλαντεύεται πέρα-δώθε και τελικά περνά από την αριστερή σχισμή. Κάνει ένα μακρινό ταξίδι μέχρι το γαλαξία της Ανδρομέδας, επιστρέφει και περνά από την αριστερή σχισμή, κινούμενο προς την οθόνη. Κι έτσι συνεχίζεται η ιστορία – το ηλεκτρόνιο, σύμφωνα με τον Feynman, «ρουφάει» ταυτόχρονα με απληστία κάθε δυνατή διαδρομή που συνδέει τη θέση εκκίνησης με τον τελικό του προορισμό.



Σχήμα 4.10 Σύμφωνα με την κβαντομηχανική του Feynman, τα σωματίδια πηγαίνουν από τη μία θέση στην άλλη ακολουθώντας κάθε δυνατή διαδρομή. Εδώ σχεδιάζονται μερικές από τις άπειρες τροχιές ενός ηλεκτρονίου που πηγαίνει από την πηγή στη φωσφορίζουσα οθόνη. Παρατηρήστε ότι στην ουσία το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο περνά και από τις δύο σχισμές.

Ο Feynman έδειξε ότι μπορούσε να αποδώσει έναν αριθμό στην καθεμιά από τις διαδρομές αυτές κατά τέτοιον τρόπο, ώστε ο συνδυασμός του μέσου όρου τους να δίνει το ίδιο ακριβώς πιθανοθεωρητικό αποτέλεσμα με αυτό που υπολογίζουμε ακολουθώντας την προσέγγιση των κυματοσυναρτήσεων. Κι έτσι σύμφωνα με τον Feynman δεν χρειάζεται να αποδοθεί κάποιο κύμα πιθανότητας στο ηλεκτρόνιο. Αντί γι' αυτό, πρέπει να φανταστούμε κάτι εξίσου, αν όχι περισσότερο, παράδοξο. Η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο –που στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται μόνο σωματίδιο– σε κάποιο δεδομένο σημείο της οθόνης προκύπτει από το συνδυασμό όλων των διαδρομών τις οποίες μπορεί να ακολουθήσει για να φτάσει εκεί. Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή ως μέθοδος «αθροιστικών διαδρομών» του Feynman στην κβαντομηχανική.⁷

Στο σημείο αυτό η κλασική σας ανατροφή σάς κάνει να επαναστατήσετε: Πώς μπορεί ένα ηλεκτρόνιο να ακολουθεί ταυτόχρονα διαφορετικές διαδρομές – και μάλιστα άπειρες σε πλήθος;

Η αντίρρησή σας φαίνεται βάσιμη, αλλά η κβαντομηχανική –η φυσική του κόσμου μας– απαιτεί να παραμερίζετε τέτοιες πεζότητες. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών βάσει της μεθόδου του Feynman συμφωνούν με αυτά της μεθόδου των κυματοσυναρτήσεων, τα οποία με τη σειρά τους συμφωνούν με τα πειράματα. Πρέπει να αφήσετε τη φύση να υπαγορεύσει τι είναι λογικό και τι όχι. Όπως έγραψε κάποτε ο Feynman, «[Η κβαντομηχανική] περιγράφει τη φύση ως παράλογη από τη σκοπιά της κοινής λογικής. Και συμφωνεί πλήρως με το πείραμα. Έτσι ελπίζω πως θα μπορέσετε να αποδεχθείτε τη Φύση όπως πραγματικά είναι: παράλογη».⁸

Όμως όσο παράλογη κι αν είναι η φύση όταν εξετάζεται σε μικροσκοπικές κλίμακες, φαίνεται πως τα πράγματα συνωμοτούν ώστε στις συνηθισμένες κλίμακες να συναντάμε τα οικεία και τετριμένα φαινόμενα της καθημερινής μας εμπειρίας. Για το σκόπο αυτό, ο Feynman έδειξε ότι αν εξετάσετε πώς κινούνται μεγάλα αντικείμενα –όπως μπαλάκια του τένις, αεροπλάνα ή πλανήτες–, όλα μεγάλα σε σύγκριση με τα υποατομικά σωματίδια – ο κανόνας του για την απαρίθμηση των διαδρομών εξασφαλίζει ότι όλες οι διαδρομές πλην μιας αλληλοεξουδετερώνονται όταν συνδυαστούν κατάλληλα. Στην πράξη, από τις άπειρες διαδρομές μόνο μία έχει σημασία όσον αφορά την κίνηση του αντικειμένου. Και η διάδρομή αυτή συμπίπτει ακριβώς με την τροχιά που προκύπτει από τους νευτώνειους νόμους της κίνησης. Γι' αυτόν το λόγο στην καθημερινή μας εμπειρία μας φαίνεται ότι τα αντικείμενα –όπως μια μπάλα που πετάμε στον αέρα – ακολουθούν μια απλή, μονοσήμαντη και προβλέψιμη τροχιά από την αφετηρία μέχρι τον προορισμό τους. Όμως όσον αφορά τα αντικείμενα σε μικροσκοπικές κλίμακες, ο κανόνας του Feynman για την απαρίθμηση των διαδρομών δείχνει ότι πολλές διαφορετικές διαδρομές μπορούν να συνεισφέρουν στην κίνηση ενός αντικειμένου και ότι πράγματι αυτό συμβαίνει συχνά. Στο πείραμα της διπλής σχισμής, για παράδειγμα, ορισμένες από τις διαδρομές περνούν μέσα από διαφορετικές σχισμές, προκαλώντας την

εμφάνιση των κροσσών συμβολής. Στο μικρόχοσμο δεν μπορούμε συνεπώς να ισχυριστούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο περνά μέσα από τη μία ή την άλλη σχισμή μόνο. Οι κροσσοί συμβολής και η εναλλακτική διατύπωση της κβαντομηχανικής από τον Feynman δείχνουν ξεκάθαρα το αντίθετο.

Όπως ακριβώς ενδέχεται να ανακαλύψουμε ότι οι διαφορετικές ερμηνείες ενός βιβλίου ή μιας ταινίας μπορούν να μας βοηθούν περισσότερο ή λιγότερο στην κατανόηση των διαφόρων όψεων του έργου, το ίδιο ισχύει και για τις διάφορες μεθόδους της κβαντομηχανικής. Μολονότι οι προβλέψεις τους συμφωνούν πάντοτε πλήρως, η μέθοδος των χυματοσυναρτήσεων και η μέθοδος των αθροιστικών διαδρομών του Feynman μας βοηθούν να σκεφτόμαστε με διάφορους τρόπους τι συμβαίνει. Όπως θα δούμε αργότερα, σε ορισμένες εφαρμογές η μία ή η άλλη προσέγγιση μπορεί να μας προσφέρει ένα ανεκτίμητο ερμηνευτικό πλαίσιο.

Κβαντική παραδοξότητα

Θα πρέπει πια να έχετε αποκτήσει μια αίσθηση για τον δραματικά νέο τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το σύμπαν σύμφωνα με την κβαντομηχανική. Αν μέχρι στιγμής δεν έχετε πέσει θύμα της ζάλης που προκαλούν οι αρχές του Bohr, να είστε σίγουροι ότι η κβαντική παραδοξότητα που θα εξετάσουμε αμέσως παρακάτω θα σας προκαλέσει μια ελαφριά σκοτοδίνη.

Σε σχέση με τις θεωρίες της σχετικότητας, η ενστικτώδης πρόσληψη της κβαντομηχανικής φαίνεται ακόμα πιο δύσκολη – δεν είναι εύκολο να μάθεις να σκέφτεσαι σαν ανθρωπάκι που γεννήθηκε και μεγάλωσε στο μικρόχοσμο. Υπάρχει ωστόσο μια όψη της θεωρίας η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως κατευθυντήρια γραμμή για τη διαίσθησή σας, καθώς συνιστά το κατεξοχήν γνώρισμα που διαφοροποιεί θεμελιωδώς την κβαντική από την κλασική συλλογιστική. Πρόκειται για την αρχή της απροσδιοριστίας, η οποία

ανακαλύφθηκε από το Γερμανό φυσικό Werner Heisenberg το 1927.

Η αρχή αυτή ξεχινά από μια ένσταση που μπορεί να εκφράσσεται νωρίτερα. Παρατηρήσαμε ότι ο καθορισμός της σχισμής μέσα από την οποία περνά το ηλεκτρόνιο (της θέσης δηλαδή του ηλεκτρονίου) αναγκαστικά διαταράσσει τη μετέπειτα κίνησή του (δηλαδή την ταχύτητά του). Αφού όμως μπορούμε να βεβαιωθούμε για την παρουσία κάποιου δίπλα μας είτε ακουμπώντας τον απαλά είτε δίνοντάς του ένα φιλικό χτυπηματάκι στη πλάτη, γιατί να μην μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση του ηλεκτρονίου με μια «ολοένα και πιο ήπια» πηγή φωτός, έτσι ώστε να έχουμε μια ολοένα και πιο μικρή επίδραση στην κίνησή του; Σύμφωνα με τη φυσική του δέκατου ένατου αιώνα μπορούμε. Χρησιμοποιώντας μια ολοένα και πιο ασθενή λάμπα (και έναν ολοένα και πιο ευαίσθητο αισθητήρα φωτός) μπορούμε να έχουμε μια οριακά αμελητέα επίδραση στην κίνηση του ηλεκτρονίου. Όμως η ίδια η κβαντομηχανική φανερώνει ένα σφάλμα στο συλλογισμό αυτό. Καθώς μειώνουμε την ένταση της φωτεινής πηγής, μειώνεται και ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπει. Όταν φτάσουμε σε σημείο να εκπέμπονται μεμονωμένα φωτόνια, δεν μπορούμε να μειώσουμε άλλο την ένταση της λάμπας χωρίς στην πράξη να την κλείσουμε. Υπάρχει ένα κβαντομηχανικό όριο στην «ηπιότητα» της έρευνάς μας. Και συνεπώς, πάντοτε προκαλούμε μία ελάχιστη διαταραχή στην ταχύτητα του ηλεκτρονίου καθώς υπολογίζουμε τη θέση του.

Λοιπόν, αυτό είναι σχεδόν σωστό. Ο νόμος του Planck μας λέει ότι η ενέργεια ενός μονήρου φωτονίου είναι ανάλογη με τη συχνότητά του (αντιστρόφως ανάλογη προς το μήκος κύματός του). Χρησιμοποιώντας ολοένα χαμηλότερης συχνότητας φως (με ολοένα μεγαλύτερο μήκος κύματος) μπορούμε συνεπώς να παράγουμε ολοένα και πιο «ήπια» μεμονωμένα φωτόνια. Εδώ όμως κρύβεται η παγίδα. Όταν ένα κύμα ανακλάται από ένα αντικείμενο, η πληροφορία την οποία λαμβάνουμε αρχεί μόνο για να καθορίσουμε τη θέση του αντικειμένου με σφάλμα που κυμαίνεται ανά-

λογα με το μήκος κύματος. Για να συλλάβετε διαισθητικά αυτό το σημαντικό γεγονός, φανταστείτε ότι προσπαθείτε να εντοπίσετε τη θέση ενός μεγάλου βράχου που εξέχει ελάχιστα από το νερό, από τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει τα κύματα που περνούν από πάνω του. Καθώς τα κύματα πλησιάζουν στο βράχο, σχηματίζουν μια ακολουθία όπου η κάθε κορυφή του κύματος διαδέχεται ομαλά την άλλη. Μόλις περάσουν πάνω από το βράχο, οι επιμέρους κορυφές του κύματος διαταράσσονται – αλάθητο σημάδι της παρουσίας του βυθισμένου βράχου. Όμως όπως ακριβώς οι μικρότερες γραμμούλες σηματοδοτούν τις ελάχιστες υποδιαιρέσεις, έτσι και η απόσταση ανάμεσα στις κορυφές του κύματος αποτελεί την ελάχιστη μονάδα της κυματικής ακολουθίας, και συνεπώς αν απλώς εξετάσουμε πώς διαταράσσονται, μπορούμε να εντοπίσουμε τη θέση του βράχου με περιθώριο σφάλματος που δεν ξεπερνά την απόσταση των κορυφών, δηλαδή το μήκος κύματος. Στην περίπτωση του φωτός, τα φωτόνια του αποτελούν, μιλώντας χοντρικά, τις επιμέρους κορυφές του κύματος (όπου το ύψος των κορυφών καθορίζεται από το πλήθος των φωτονίων)· άρα ένα φωτόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδείξει προσεγγιστικά και μόνο τη θέση ενός αντικειμένου με περιθώριο σφάλματος ίσο με το μήκος κύματος.

Κι έτσι βρισκόμαστε αντιμέτωποι με μια κβαντομηχανική δράση εξισορρόπησης. Αν χρησιμοποιήσουμε υψίσυχη ακτινοβολία (μικρό μήκος κύματος), μπορούμε να εντοπίσουμε ένα ηλεκτρόνιο με μεγαλύτερη ακρίβεια. Άλλα τα υψίσυχα φωτόνια έχουν μεγάλη ενέργεια και κατά συνέπεια επηρεάζουν κατά πολύ την ταχύτητα του ηλεκτρόνιου. Αν χρησιμοποιήσουμε ακτινοβολία χαμηλής συχνότητας (μεγάλο μήκος κύματος), ελαχιστοποιούμε την επίδραση στην κίνηση του ηλεκτρόνιου, αφού τα φωτόνια που αποτελούν το φως έχουν συγχριτικά χαμηλή ενέργεια, αλλά χάνουμε σε ακρίβεια στον καθορισμό της θέσης του ηλεκτρόνιου. Ο Heisenberg ποσοτικοποίησε την παραπάνω δυσαναλογία και βρήκε μια σχέση ανάμεσα στην ακρίβεια με την οποία μετρά κανείς τη θέση του ηλεκτρόνιου και την ακρίβεια με την οποία μετρά την τα-

χύτητά του. Βρήκε –συμφωνώντας με όσα είπαμε παραπάνω – ότι η μία είναι αντιστρόφως ανάλογη της άλλης: μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση της θέσης σημαίνει αναγκαστικά μεγαλύτερο σφάλμα στη μέτρηση της ταχύτητας και αντιστρόφως. Και, κάτι που έχει ξεχωριστή σημασία, παρότι στη συζήτησή μας χρησιμοποιούμε ένα συγκεκριμένο τρόπο για να εντοπίσουμε το ηλεκτρόνιο, ο Heisenberg έδειξε ότι αυτή η σχέση ανάμεσα στην ακρίβεια της μέτρησης της θέσης και της ταχύτητας αποτελεί θεμελιώδες γεγονός το οποίο ισχύει ανεξάρτητα από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται ή τη διαδικασία που ακολουθείται. Αντίθετα προς το πλαίσιο του Newton ή ακόμη και του Einstein, στα οποία η κίνηση ενός σωματιδίου περιγράφεται με τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητάς του, η κβαντομηχανική δείχνει ότι στο μικρόχοσμο δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά με πλήρη ακρίβεια. Επιπλέον, όσο ακριβέστερα γνωρίζουμε το ένα, με τόσο λιγότερη ακρίβεια γνωρίζουμε το άλλο. Και παρότι στην περιγραφή μας χρησιμοποιήσαμε τα ηλεκτρόνια, η ιδέα εφαρμόζεται σε όλα τα συστατικά της φύσης.

Ο Einstein προσπάθησε να γεφυρώσει αυτό το χάσμα με την κλασική φυσική, υποστηρίζοντας πως, μολονότι η κβαντική συλλογιστική φαίνεται όντως να περιορίζει τη γνώση μας για τη θέση και την ταχύτητα, το ηλεκτρόνιο εξακολουθεί να έχει μια συγκεκριμένη θέση και ταχύτητα, όπως ακριβώς πιστεύαμε πάντοτε. Άλλα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, θεωρητικές εξελίξεις, με αιχμή του δόρατος το έργο του εκλιπόντος Ιρλανδού φυσικού John Bell και τα πειραματικά αποτελέσματα του Alain Aspect και των συνεργατών του, έχουν δείξει πειστικά ότι ο Einstein έκανε λάθος. Τα ηλεκτρόνια –όπως και καθετί άλλο εξάλλου– δεν μπορούν να περιγραφθούν σαν να βρίσκονται στην τάδε συγκεκριμένη θέση και ταυτοχρόνως σαν να έχουν τη δείνα συγκεκριμένη ταχύτητα. Η κβαντομηχανική δείχνει ότι μια τέτοια πρόταση όχι μόνο δεν θα μπορούσε ποτέ να επαληθευτεί πειραματικά –όπως εξηγήσαμε παραπάνω–, αλλά θα ερχόταν και σε αντίφαση με τα αποτελέσματα άλλων έγκυρων πειραμάτων που έγιναν πρόσφατα.

Πράγματι, αν απομονώνατε ένα μοναχικό ηλεκτρόνιο σε ένα μεγάλο συμπαγές κοντί και μετά συμπιέζατε σιγά σιγά τις έδρες του για να εξακριβώσετε τη θέση του ηλεκτρονίου με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια, τότε θα βρίσκατε ότι κινείται ολοένα και πιο μανιασμένα. Σαν να είχε καταληφθεί από κλειστοφοβία, το ηλεκτρόνιο θα ένιωθε όλο και μεγαλύτερη αναστάτωση – θα χτυπούσε σαν τρελό στα τοιχώματα του κοντιού με φρενήρη, απρόβλεπτη ταχύτητα. Η φύση δεν επιτρέπει να στριψώχνουν τα συστατικά της. Στο H-Bar, όπου φανταζόμαστε την ή να έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή απ' ό,τι στον πραγματικό κόσμο, υποτάσσοντας έτσι άμεσα τα καθημερινά αντικείμενα στους κβαντικούς νόμους, τα παγάκια στα ποτά του Τζορτζ και της Γκρέισι χοροπηδούν ξέφρενα καθώς πάσχουν και αυτά από κβαντική κλειστοφοβία. Μολονότι το H-Bar ανήκει στη χώρα της φαντασίας – στην πραγματικότητα, η ή είναι απίστευτα μικρή –, αυτό ακριβώς το είδος κβαντικής κλειστοφοβίας αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα ολόκληρου του μικρόκοσμου. Η κίνηση των μικροσκοπικών σωματιδίων γίνεται όλο και πιο άστατη, όταν τα εξετάζουμε και τα περιορίζουμε σε όλο και μικρότερες περιοχές του χώρου.

Η αρχή της απροσδιοριστίας ευθύνεται επίσης για την εμφάνιση ενός εντυπωσιακού κβαντικού φαινομένου, γνωστού με την ονομασία φαινόμενο σήραγγας. Αν εκτοξεύσετε ένα ελαστικό μπαλάκι σε έναν τσιψεντένιο τοίχο τρία μέτρα παχύ, η κλασική φυσική επιβεβαιώνει αυτό που σας λέει το ένστικτό σας ότι θα συμβεί: το μπαλάκι θα αναπηδήσει προς το μέρος σας γιατί δεν έχει αρκετή ενέργεια για να διαπεράσει ένα τέτοιο εμπόδιο. Στο επίπεδο όμως των θεμελιωδών σωματιδίων η κβαντομηχανική δείχνει αναμφίβολα ότι ένα μικρό μέρος από τις χυματοσυναρτήσεις – από τα κύματα πιθανότητας δηλαδή – των σωματιδίων που συνιστούν το μπαλάκι περνά τον τοίχο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια μικρή – αλλά όχι μηδενική – πιθανότητα να μπορέσει στ' αλήθεια το μπαλάκι να διαπεράσει τον τοίχο και να βγει από την άλλη μεριά. Πώς μπορεί να γίνει αυτό; Για άλλη μια φορά θα πρέ-

πει να αναζητήσουμε την αιτία στην αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg.

Για να το καταλάβετε, φανταστείτε ότι είστε πάμφτωχος και ξαφνικά μαθαίνετε ότι κάποιος μακρινός συγγενής απεβίωσε σε κάποια εξωτική χώρα, αφήνοντας μια τεράστια περιουσία που μπορείτε να τη διεκδικήσετε. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι δεν έχετε τα χρήματα να αγοράσετε ένα εισιτήριο για το αεροπλάνο που θα σας πάει ώς εκεί. Εξηγείτε την κατάσταση στους φίλους σας: αν μπορούν να σας βοηθήσουν να ξεπεράσετε το εμπόδιο που ορθώνεται ανάμεσα σ' εσάς και την περιουσία, δανείζοντάς σας προσωρινά τα χρήματα για το εισιτήριο, θα τους ξεπληρώσετε γενναιόδωρα όταν επιστρέψετε. Όμως κανείς δεν έχει αρκετά χρήματα να σας δανείσει. Θυμάστε ωστόσο ότι ένας παλιός σας φίλος δουλεύει σε μια αεροπορική εταιρεία και τον εκλιπαρείτε να σας βοηθήσει. Ούτε αυτός μπορεί να σας δανείσει το ποσό που ζητάτε, αλλά έχει να προτείνει μια λύση. Το λογιστικό σύστημα της αεροπορικής εταιρείας είναι τέτοιο που, αν στείλετε τηλεγραφικά τα χρήματα μέσα σε 24 ώρες από την άφιξη στον προορισμό σας, κανείς δεν θα μάθει ποτέ ότι το εισιτήριο δεν πληρώθηκε πριν από την αναχώρηση. Έτσι θα έχετε τη δυνατότητα να πάρετε την κληρονομιά σας.

Οι λογιστικές διαδικασίες της χβαντομηχανικής είναι σχεδόν παρεμφερείς. Ο Heisenberg έδειξε ότι, όπως ακριβώς υπάρχει μια συναλλαγή ανάμεσα στην ακρίβεια μέτρησης της θέσης και της ταχύτητας, υπάρχει επίσης μια ανάλογη συναλλαγή ανάμεσα στην ακρίβεια μέτρησης της ενέργειας και του χρόνου που απαιτείται για να γίνει η μέτρηση. Η χβαντομηχανική επιβεβαιώνει ότι δεν μπορείτε να πείτε πως ένα σωματίδιο έχει τη συγκεκριμένη ακριβώς ενέργεια στη συγκεκριμένη ακριβώς χρονική στιγμή. Ολοένα αυξανόμενη ακρίβεια στις μετρήσεις της ενέργειας απαιτεί ολοένα αυξανόμενους χρόνους μετρήσεων. Μιλώντας χοντρικά, αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια ενός σωματιδίου μπορεί να κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος, εφόσον αυτή η διακύμανση διαρκεί αρκετά μακρό χρονικό διάστημα. Έτσι, ακριβώς όπως το λογιστικό σύ-

στημα της αεροπορικής εταιρείας σάς «επιτρέπει» να «δανειστείτε» τα χρήματα για ένα αεροπορικό εισιτήριο, αρκεί να το ξεπληρώσετε αρκετά γρήγορα, η κβαντομηχανική επιτρέπει σε ένα σωματίδιο να «δανειστεί» ενέργεια, αρκεί να την αποδώσει πάλι εντός ενός χρονικού πλαισίου που καθορίζεται από την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg.

Τα μαθηματικά της κβαντομηχανικής δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό φράγμα, τόσο μικρότερη πιθανότητα υπάρχει να συναντήσουμε στην πραγματικότητα αυτές τις λογιστικές πρακτικές του μικρόκοσμου. Αλλά τα μικροσκοπικά σωματίδια που αντιμετωπίζουν μια συμπαγή πλάκα μπορούν να δανειστούν και ορισμένες φορές όντως δανείζονται αρκετή ενέργεια, ώστε να κάνουν αυτό που είναι αδύνατο από τη σκοπιά της κλασικής φυσικής – να διεισδύσουν στιγμιαία και να φτιάξουν μια σήραγγα για να διαπεράσουν μια περιοχή όπου αρχικά δεν είχαν αρχετή ενέργεια για να εισέλθουν. Καθώς τα αντικείμενα που μελετάμε γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα, αφού αποτελούνται από όλο και περισσότερα σωματίδια, αυτό το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας εξακολουθεί να είναι εφικτό, αλλά καθίσταται απίθανο, γιατί πρέπει να έχουν όλα τα ανεξάρτητα σωματίδια αρκετή τύχη, ώστε να περάσουν τη σήραγγα ταυτόχρονα. Όμως τα σκανδαλώδη επεισόδια με το πούρο που εξαφανίζεται, με το παγάκι που περνά μέσα από το τοίχωμα του ποτηριού, και με τον Τζορτζ και την Γκρέισι που περνούν μέσα από τον τοίχο του μπαρ, μπορούν να συμβούν. Στη χώρα της φαντασίας του H-Bar, όπου υποθέτουμε ότι η ή είναι μεγάλη, τέτοιες κβαντικές σήραγγες αποτελούν κοινοτοπία. Όμως οι νόμοι των πιθανοτήτων της κβαντομηχανικής – και ειδικότερα η μικρή τιμή της ή στην πραγματικότητα – δείχνουν ότι αν πέφτατε πάνω σε ένα συμπαγή τοίχο μία φορά το δευτερόλεπτο, τότε θα έπρεπε να περιμένετε περισσότερο από την τρέχουσα ηλικία του σύμπαντος για να έχετε μια βάσιμη πιθανότητα να τον διαπεράσετε σε μία από τις προσπάθειές σας. Ωστόσο, αν διαθέτατε αιώνια υπομονή (και μακροζωία), θα μπορούσατε – αργά ή γρήγορα – να περάσετε από την άλλη μεριά.

Η αρχή της απροσδιοριστίας βρίσκεται στην καρδιά της κβαντομηχανικής. Χαρακτηριστικά για τα οποία συνήθως νομίζουμε ότι είναι τόσο στοιχειώδη ώστε να μην αμφιβάλλει κανείς για την ορθότητά τους –όπως, για παράδειγμα, ότι τα αντικείμενα έχουν συγκεκριμένες θέσεις και ταχύτητες αλλά και συγκεκριμένες ενέργειες σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές –, θεωρούνται σήμερα εσφαλμένες εντυπώσεις που δημιουργούνται επειδή η τιμή της σταθεράς του Planck είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με τις κλίμακες του καθημερινού μας κόσμου. Εξαιρετική σημασία έχει το γεγονός ότι όταν αυτή η κβαντική προσέγγιση εφαρμόζεται στο χωρόχρονο, φανερώνει μοιραίες ατέλειεις στις «ραφές της βαρύτητας» και μας οδηγεί στην τρίτη και κυριότερη σύγκρουση που έζησε η φυσική τον περασμένο αιώνα.

*Η ανάγκη για μια νέα θεωρία:
γενική σχετικότητα
εναντίον κβαντομηχανικής*

Η κατανόηση του φυσικού σύμπαντος έγινε ακόμα πιο βαθιά κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα. Τα θεωρητικά εργαλεία της κβαντομηχανικής και της γενικής θεωρίας της σχετικότητας μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε και να κάνουμε ελέγξιμες προβλέψεις για φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται από το μικρόκοσμο μέχρι τους γαλαξίες και τα συμπλέγματά τους, αλλά και για την ίδια τη δομή ολόκληρου του σύμπαντος. Αυτό το επίτευγμα είναι μυημειώδες. Μας σαγηνεύει πραγματικά το γεγονός ότι όντα περιορισμένα σε έναν πλανήτη που περιφέρεται γύρω από ένα μέτριο άστρο στις μακρινές παρυφές ενός συνηθισμένου γαλαξία έχουν μπορέσει, με σχέψεις και πειράματα, να διαπιστώσουν και να κατανοήσουν ορισμένα από τα πλέον μυστηριώδη χαρακτηριστικά του φυσικού σύμπαντος. Εντούτοις οι φυσικοί είναι όντα που δεν θα ικανοποιηθούν αν δεν νιώσουν ότι τους έχει αποκαλυφθεί η βαθύτερη και θεμελιωδέστερη γνώση του σύμπαντος. Όπως υπαινίσσεται ο Stephen Hawking, αυτό θα είναι το πρώτο βήμα για να γνωρίσουμε «το νου του Θεού».¹

Γιάρχουν πολλές ενδείξεις ότι τόσο η κβαντομηχανική όσο και η γενική θεωρία της σχετικότητας δεν παρέχουν αυτό το βαθύτατο επίπεδο κατανόησης. Από τη στιγμή που τα συνήθη πεδία

εφαρμογής τους είναι τόσο διαφορετικά, οι περισσότερες καταστάσεις απαιτούν τη χρήση είτε της κβαντομηχανικής είτε της γενικής σχετικότητας αλλά όχι και των δύο μαζί. Σε ορισμένες ακραίες συνθήκες ωστόσο, όπου πολύ μικρά αντικείμενα έχουν πολύ μεγάλη μάζα -κοντά στο κέντρο μας μαύρης τρύπας ή σε ολόκληρο το σύμπαν τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης, για να αναφέρουμε δύο παραδείγματα-, χρειαζόμαστε τόσο τη γενική σχετικότητα όσο και την κβαντομηχανική για να αποκτήσουμε πλήρη εικόνα. Ωστόσο ακριβώς όπως όταν αναμιγνύουμε φωτιά και μπαρούτι, έτσι και όταν προσπαθήσουμε να συνδυάσουμε την κβαντομηχανική με τη γενική θεωρία της σχετικότητας, προκαλείται βίαιη έκρηξη. Καλά διατυπωμένα φυσικά προβλήματα παίρνουν απαντήσεις που δεν έχουν νόημα όταν χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις και των δύο αυτών θεωριών. Η ασυναρτησία παίρνει συχνά τη μορφή μιας πρόβλεψης, σύμφωνα με την οποία η κβαντομηχανική πιθανότητα για μια διεργασία δεν είναι 20% ή 73% ή 91% αλλά άπειρη. Τι στο καλό μπορεί να σημαίνει μια πιθανότητα μεγαλύτερη της μονάδας, δεν μιλάμε καν για άπειρη; Αναγκαζόμαστε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει κάποιο σοβαρό σφάλμα. Εξετάζοντας προσεκτικά τις θεμελιώδεις ιδιότητες της γενικής σχετικότητας και της κβαντομηχανικής, μπορούμε να εντοπίσουμε το σφάλμα αυτό.

Η καρδιά της κβαντομηχανικής

Όταν ο Heisenberg ανακάλυψε την αρχή της απροσδιοριστίας, η φυσική έκανε μια απότομη στροφή και δεν επέστρεψε ποτέ στην αρχική της πορεία. Οι πιθανότητες, οι χυματοσυναρτήσεις, η συμβολή, τα κβάντα, όλα αυτά απαιτούν ριζικά νέους τρόπους θέασης της πραγματικότητας. Εντούτοις, ένας ξεροκέφαλος «κλασικός» φυσικός μπορεί να διατηρούσε μια τελευταία ελπίδα πως όταν όλα θα τελείωναν, αυτές οι αποκλίσεις από τις πρότερες θεωρίες θα ακοδομούσαν ένα πλαίσιο όχι και τόσο μακρινό από τους παλιούς

τρόπους σκέψης. Όμως η αρχή της απροσδιοριστίας απέκλεισε μια και καλή κάθε προσπάθεια να μείνουμε πιστοί στα παλιά.

Η αρχή της απροσδιοριστίας μάς λέει ότι το σύμπαν είναι ένα μέρος σε φρενήρη κίνηση όταν εξετάζεται σε ολοένα και μικρότερες αποστάσεις και ολοένα και βραχύτερες χρονικές κλίμακες. Το παρατηρήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσπαθώντας να εντοπίσουμε τη θέση στοιχειωδών σωματιδίων, για παράδειγμα ηλεκτρονίων: ρίχνοντας όλο και πιο υψηλού χρόνου φως στα ηλεκτρόνια, μετράμε τη θέση τους με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά υπάρχει και το κόστος ότι οι παρατηρήσεις μας γίνονται όλο και πιο παρεμβατικές. Τα υψηλού χρόνου φωτόνια έχουν μεγάλη ενέργεια και συνεπώς δίνουν στα ηλεκτρόνια μια δυνατή «κλοτσιά», μεταβάλλοντας σημαντικά την ταχύτητά τους. Όλα αυτά θυμίζουν την τρέλα που επικρατεί σε ένα δωμάτιο γεμάτο παιδιά, των οποίων γνωρίζουμε μεν τις στιγμαίες θέσεις με μεγάλη ακρίβεια αλλά δεν ελέγχουμε σχεδόν καθόλου την κίνησή τους – την ταχύτητα και τη διεύθυνση προς την οποία κινούνται. Αυτή η αδυναμία να γνωρίζουμε μαζί και τις θέσεις και τις ταχύτητες των στοιχειωδών σωματιδίων υποδηλώνει ότι ο μικρόκοσμος πάσχει από εγγενή αταξία.

Παρότι αυτό το παράδειγμα φανερώνει τη θεμελιώδη σχέση μεταξύ απροσδιοριστίας και φρενίτιδας, στην πραγματικότητα αποκαλύπτει μέρος μόνο της ιστορίας. Μπορεί, για παράδειγμα, να σας οδηγήσει στη σκέψη ότι η απροσδιοριστία προκύπτει μόνο όταν εμείς, αδέξιοι παρατηρητές της φύσης, παρεμβαίνουμε άτσαλα στην εξέλιξη του φαινομένου. Αυτό δεν αληθεύει. Το παράδειγμα του ηλεκτρονίου που αντιδρά βίᾳ στον εγκλεισμό του σε ένα μικρό κουτί, κινούμενο ξέφρενα πέρα-δώθε με μεγάλη ταχύτητα, μας φέρνει λίγο πιο κοντά στην αλήθεια. Ακόμη και χωρίς να «κανονιοβολείται» από τα παρεμβατικά φωτόνια του πειραματιστή, η ταχύτητά του μεταβάλλεται έντονα και απρόβλεπτα από τη μια στιγμή στην άλλη. Όμως ούτε κι αυτό το παράδειγμα αποκαλύπτει πλήρως τα εκπληκτικά χαρακτηριστικά της φύσης του μικροκόσμου που μας κληροδότησε η ανακάλυψη του Heisenberg. Ακόμη και στο πλέον αδρανές σκηνικό που μπορούμε

να φανταστούμε, όπως μια κενή περιοχή του διαστήματος, η αρχή της απροσδιοριστίας μάς λέει ότι σε μικροσκοπικά μεγέθη υπάρχει οργιώδης δραστηριότητα. Και αυτή η δραστηριότητα γίνεται όλο και πιο ταραχώδης όσο περισσότερο μικραίνουν οι χλιμακες του μήκους και του χρόνου.

Για να κατανοήσουμε το παραπάνω μάς είναι απαραίτητη η χβαντική λογιστική. Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι, όπως ακριβώς εσείς μπορείτε να δανειστείτε χρήματα, ώστε να ξεπεράσετε ένα σημαντικό οικονομικό εμπόδιο, κάποιο σωματίδιο σαν το ηλεκτρόνιο μπορεί να δανειστεί προσωρινά ενέργεια για να υπερπηδήσει ένα πραγματικό φυσικό φραγμό. Αυτό αληθεύει. Η χβαντομηχανική όμως μας αναγκάζει να πάμε την αναλογία αυτή ακόμη πιο πέρα. Φανταστείτε ένα συστηματικό τρακαδόρο που πηγαίνει από φίλο σε φίλο ζητώντας χρήματα. Όσο συντομότερη διορία του δίνεται για να επιστρέψει τα χρήματα, τόσο μεγαλύτερο το δάνειο που ζητά. Δανείζεται και επιστρέφει, δανείζεται και επιστρέφει – ξανά και ξανά με αμείωτη ένταση παίρνει χρήματα, μόνο και μόνο για να τα ξαναδώσει πίσω σε σύντομο διάστημα. Όπως οι τιμές των μετοχών σε μια γεμάτη σκαμπανεβάσματα μέρα στο Χρηματιστήριο, το σύνολο των χρημάτων που κατέχει ο συστηματικός τρακαδόρος κάθε δεδομένη στιγμή αυξομειώνεται με τεράστιες διακυμάνσεις, αλλά, όταν όλα τελειώνουν, ένας απολογισμός των οικονομικών του δείχνει ότι δεν είναι πλουσιότερος απ' όσο όταν ξεκίνησε.

Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg βεβαιώνει ότι μια παρόμοια φρενήρης ανταλλαγή ενέργειας και ορμής συμβαίνει αέναντι στο σύμπαν σε μικροσκοπικά χωρικά και χρονικά διαστήματα. Ακόμη και σε μια κενή περιοχή του σύμπαντος – μέσα σε ένα άδειο κουτί, για παράδειγμα – η αρχή της απροσδιοριστίας λέει ότι η ενέργεια και η ορμή είναι απροσδιόριστες: κυμαίνονται μεταξύ ακραίων τιμών που γίνονται ολοένα μεγαλύτερες όσο το μέγεθος του κουτιού και η χρονική χλίμακα στην οποία το εξετάζουμε μικραίνουν. Λες και η περιοχή του χώρου μέσα στο κουτί είναι ένας συστηματικός «τρακαδόρος» ενέργειας και ορμής που συνεχώς αποσπά «δάνεια» από το σύμπαν και στη συνέχεια τα «ξεπληρώ-

νει». Όμως τι είναι αυτό που συμμετέχει σε αυτές τις «συναλλαγές» μέσα σε μια, για παράδειγμα, ήρεμη κενή περιοχή του χώρου; Στην κυριολεξία τα πάντα. Η ενέργεια (και η ορμή επίσης) είναι ένα εύχολα μετατρέψιμο νόμισμα. Η σχέση $E = mc^2$ μας λέει ότι η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε μάζα και αντιστρόφως. Έτσι αν μια ενεργειακή διακύμανση είναι αρκετά μεγάλη, μπορεί, για παράδειγμα, να προκαλέσει παροδικά την ξαφνική εμφάνιση ενός ηλεκτρονίου και του αντισωματιδίου του, του ποζιτρονίου, ακόμη κι αν ο χώρος ήταν αρχικά κενός! Αφού η ενέργεια πρέπει να επιστραφεί σύντομα, αυτά τα σωματίδια θα αλληλοεξουδετερωθούν μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, απελευθερώνοντας την ενέργεια που είχαν δανειστεί για τη δημιουργία τους. Το ίδιο ισχύει και για όλες τις άλλες μορφές που μπορούν να πάρουν η ενέργεια και η ορμή –εμφανίσεις και εξουδετερώσεις άλλων σωματιδίων, ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις, διακυμάνσεις του πεδίου των ισχυρών ή των ασθενών δυνάμεων–, αφού η κβαντομηχανική απροσδιοριστία μάς λέει ότι στις μικροσκοπικές κλίμακες όλο το σύμπαν είναι μια ασφυκτικά γεμάτη, χαοτική, φρενήρης αρένα. Χαριτολογώντας ο Feynman είπε κάποτε: «Δημιουργία κι εξουδετέρωση, δημιουργία κι εξουδετέρωση – τι χάσιμο χρόνου».² Καθώς ο δανεισμός και η αποπληρωμή κατά μέσο όρο αλληλοεξουδετερώνονται, μια κενή περιοχή του χώρου δείχνει ήρεμη και γαλήνια, όταν εξετάζεται χωρίς μικροσκοπική ακρίβεια. Η αρχή της απροσδιοριστίας ωστόσο μας αποκαλύπτει ότι οι μακροσκοπικοί μέσοι όροι υποκρύπτουν έναν πλούτο μικροσκοπικής δραστηριότητας.³ Όπως θα δούμε σε λίγο, αυτή η φρενίτιδα αποτελεί το κατεξοχήν εμπόδιο για τη συνένωση της γενικής σχετικότητας και της κβαντομηχανικής.

Κβαντική θεωρία πεδίου

Τις δεκαετίες του 1930 και του 1940, οι θεωρητικοί φυσικοί, με γηγετικές μορφές τους Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwin-

ger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga και Feynman, για να κατονομάσουμε μερικούς, πάλευαν με όλες τους τις δυνάμεις να ανακαλύψουν μια μαθηματική θεωρία ικανή να χειριστεί αυτή τη μικροσκοπική αναταραχή. Βρήκαν ότι η κβαντική κυματική εξίσωση του Schrödinger (που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 4) ήταν στην πραγματικότητα μόνο μια προσεγγιστική περιγραφή της μικροσκοπικής φυσικής – μια προσέγγιση που λειτουργεί εξαιρετικά καλά όταν δεν εξετάζουμε σε βάθος τη μικροσκοπική φρενίτιδα (είτε πειραματικά είτε θεωρητικά), αλλά αποτυγχάνει στα σίγουρα αν το προσπαθήσουμε.

Το σημαντικό τμήμα της φυσικής που αγνόησε ο Schrödinger στη δική του διατύπωση της κβαντομηχανικής είναι η ειδική σχετικότητα. Αρχικά μάλιστα, ο Schrödinger προσπάθησε πράγματι να ενσωματώσει την ειδική σχετικότητα, αλλά η κβαντική εξίσωση στην οποία κατέληξε βρισκόταν σε ασυμφωνία με πειραματικές μετρήσεις του υδρογόνου. Αυτό οδήγησε τον Schrödinger να υιοθετήσει την πατροπαράδοτη στη φυσική μέθοδο του διαίρει και βασίλευε: αντί να προσπαθούμε, με ένα άλμα, να ενσωματώσουμε όλα όσα γνωρίζουμε για τον φυσικό κόσμο στην ανάπτυξη μιας νέας θεωρίας, συχνά είναι πιο αποτελεσματικό να κάνουμε πολλά μικρά βήματα που να ενσωματώνουν διαδοχικά τις νεότερες ανακαλύψεις από το μέτωπο της έρευνας. Ο Schrödinger αναζήτησε και βρήκε ένα μαθηματικό πλαίσιο που κάλυπτε τον πειραματικά διαπιστωμένο δυϊσμό κύματος-σωματίου, αλλά δεν ενσωμάτωσε, σε αυτό το πρώιμο στάδιο αντίληψης, την ειδική σχετικότητα.¹

Σύντομα όμως οι φυσικοί συνειδητοποίησαν ότι η ειδική σχετικότητα ήταν χεφαλαιώδους σημασίας για ένα σωστό κβαντομηχανικό πλαίσιο. Αυτό συμβαίνει επειδή η μικροσκοπική φρενίτιδα απαιτεί να αναγνωρίσουμε ότι η ενέργεια μπορεί να εκδηλωθεί με πολλούς τρόπους – έννοια που προέρχεται από τον ισχυρισμό της ειδικής σχετικότητας ότι $E = mc^2$. Αγνοώντας την ειδική σχετικότητα, ο Schrödinger αγνόησε το εύπλαστο της ύλης, της ενέργειας και της κίνησης.

Οι φυσικοί αρχικά συγκέντρωσαν τις προσπάθειές τους στη συγχώνευση της ειδικής σχετικότητας και των χβαντικών αντιλήψεων για την ηλεκτρομαγνητική δύναμη και την αλληλεπίδρασή της με την ύλη. Μέσα από μια σειρά εμπνευσμένων εξελίξεων δημούργησαν την χβαντική ηλεκτροδυναμική που τελικά ονομάστηκε σχετικιστική χβαντική θεωρία πεδίου ή, για συντομία, χβαντική θεωρία πεδίου. Κβαντική επειδή όλα τα ζητήματα πιθανοτήτων και απροσδιοριστίας ενσωματώνονται εξαρχής· και θεωρία πεδίου επειδή συνενώνει τις χβαντικές αρχές με την παλαιότερη κλασική έννοια του δυναμικού πεδίου – στη συγκεκριμένη περίπτωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του Maxwell. Και τέλος, σχετικιστική επειδή και η ειδική σχετικότητα ενσωματώνεται εξαρχής. (Αν επιθυμείτε ένα χειροπιαστό παράδειγμα χβαντικού πεδίου, μπορείτε σε γενικές γραμμές να χρησιμοποιήσετε την εικόνα ενός κλασικού πεδίου –ας πούμε, έναν ωκεανό από δυναμικές γραμμές που διαπερνούν το χώρο-, αλλά θα πρέπει να λάβετε υπόψη σας δύο πράγματα. Πρώτον, θα πρέπει να θεωρήσετε ότι το χβαντικό πεδίο αποτελείται από σωματιδιακά συστατικά, όπως, π.χ., τα φωτόνια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Δεύτερον, θα πρέπει να φανταστείτε ότι η ενέργεια, με τη μορφή της μάζας και της κίνησης σωματιδίων, πηγαίνονται ασταμάτητα από το ένα χβαντικό πεδίο στο άλλο, καθώς ταλαντώνονται ασταμάτητα μέσα στο χώρο και το χρόνο.)

Η χβαντική ηλεκτροδυναμική είναι ενδεχομένως η πιο ακριβής θεωρία που έχει προταθεί για τα φυσικά φαινόμενα. Μια ένδειξη της ακρίβειάς της μπορεί να βρεθεί στο έργο του Toichiro Kinoshita, ενός φυσικού σωματιδίων στο Πανεπιστήμιο Κορνέλ, ο οποίος τα τελευταία τριάντα χρόνια χρησιμοποιεί με υπομονή και επιμονή την χβαντική ηλεκτροδυναμική για να υπολογίσει με κάθε λεπτομέρεια τις ιδιότητες των ηλεκτρονίων. Οι υπολογισμοί του Kinoshita γεμίζουν χιλιάδες σελίδες και απαίτησαν τους ισχυρότερους υπολογιστές στον κόσμο για να ολοκληρωθούν. Σίγουρα όμως η προσπάθεια άξιζε τον κόπο: οι υπολογισμοί έχουν δώσει προβλέψεις σχετικά με τα ηλεκτρόνια, οι οποίες έχουν επαλη-

θευτεί πειραματικά με ακρίβεια μεγαλύτερη του ενός δισεκατομμυριοστού. Αυτή η συμφωνία ανάμεσα στους αφηρημένους θεωρητικούς υπολογισμούς και την πραγματικότητα είναι εξαιρετικά εντυπωσιακή. Μέσα από την κβαντική ηλεκτροδυναμική, οι φυσικοί μπόρεσαν να παγιώσουν το ρόλο των φωτονίων, ορίζοντάς τα ως τις «μικρότερες δυνατές πυκνώσεις φωτός», και να αποκαλύψουν τις αλληλεπιδράσεις τους με φορτισμένα σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια, εντός ενός μαθηματικά πλήρους, ικανού για προβλέψεις, και πειστικού πλαισίου.

Η επιτυχία της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής ενέπνευσε και άλλους φυσικούς στις δεκαετίες του 1960 και του 1970 να επιχειρήσουν μια ανάλογη προσέγγιση για την ανάπτυξη μιας κβαντομηχανικής θεώρησης των ασθενών, των ισχυρών και των βαρυτικών δυνάμεων. Για τις ασθενείς και τις ισχυρές δυνάμεις, αυτή η τακτική αποδείχθηκε πάρα πολύ αποδοτική. Σε αναλογία με την κβαντική ηλεκτροδυναμική, οι φυσικοί κατόρθωσαν να δημιουργήσουν κβαντικές θεωρίες πεδίου για τις ασθενείς και τις ισχυρές δυνάμεις που ονομάστηκαν κβαντική χρωμοδυναμική και κβαντική ηλεκτροσθενής θεωρία. Το «κβαντική χρωμοδυναμική» ακούγεται πιο φανταχτερό αντί του λογικότερου «κβαντική δυναμική ισχυρού πεδίου», αλλά δεν είναι παρά ένα όνομα χωρίς κανένα βαθύτερο νόημα· από την άλλη μεριά, ο χαρακτηρισμός «ηλεκτροσθενής» συμπυκνώνει ένα σημαντικό ορόσημο στη γνώση μας για τις δυνάμεις της φύσης.

Μέσα από το έργο τους που κέρδισε Νόμπελ φυσικής, οι Sheldon Glashow, Abdus Salam και Steven Weinberg έδειξαν ότι οι ασθενείς και οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις ενοποιούνται με φυσικό τρόπο σε θεωρητικό πλαίσιο με τη βοήθεια του κβαντικού πεδίου, μολονότι οι εκδηλώσεις τους δείχνουν εντελώς διακριτές στον κόσμο γύρω μας. Άλλωστε τα πεδία των ασθενών δυνάμεων είναι παντού σχεδόν μηδενικά εκτός από τις υποατομικές κλίμακες, ενώ τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία –το ορατό φως, τα σήματα του ραδιοφώνου και της τηλεόρασης, οι ακτίνες X – εμφανίζονται κυρίως σε μακροσκοπικές κλίμακες. Εντούτοις οι Glashow, Salam

και Weinberg έδειξαν ότι στην ουσία σε αρκετά υψηλές ενέργειες και θερμοκρασίες –όπως αυτές που επικρατούσαν ένα κλάσμα του δευτερολέπτου μετά τη Μεγάλη Έκρηξη– τα ηλεκτρομαγνητικά και τα πεδία ασθενών δυνάμεων διαχέονται το ένα μέσα στο άλλο, αποκτούν παρόμοια χαρακτηριστικά και για λόγους ακριβείας ονομάζονται πλέον ηλεκτρασθενή πεδία. Όταν η θερμοκρασία πέφτει, όπως γίνεται συνεχώς από τη Μεγάλη Έκρηξη και μετά, οι ηλεκτρομαγνητικές και οι ασθενείς δυνάμεις αποκρισταλλώνονται σε μορφές διαφορετικές από αυτές που είχαν σε υψηλές θερμοκρασίες –μέσα από μια διαδικασία η οποία είναι γνωστή ως ρήξη συμμετρίας την οποία θα εξετάσουμε αργότερα– και συνεπώς δείχνουν να είναι διαφορετικές μεταξύ τους στο παγωμένο σύμπαν όπου ζούμε σήμερα.

Κι έτσι, αν ακόμη χρατάτε σκορ, μέχρι τη δεκαετία του 1970 οι φυσικοί είχαν αναπτύξει μια λογική και επιτυχημένη κβαντομηχανική περιγραφή των τριών από τις τέσσερις δυνάμεις (ισχυρή, ασθενής και ηλεκτρομαγνητική) και είχαν δείξει ότι δύο από τις τρεις (ασθενής και ηλεκτρομαγνητική) μοιράζονται στην πραγματικότητα κάτι κοινό (την ηλεκτρασθενή δύναμη). Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, οι φυσικοί έχουν δοκιμάσει την εγκυρότητα αυτής της κβαντομηχανικής περιγραφής των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων –τόσο τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όσο και με τα σωματίδια της ύλης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1– με πάρα πολλούς πειραματικούς ελέγχους. Η θεωρία αντιμετώπισε όλες τις προκλήσεις με αυτοπεποίθηση. Από τη στιγμή που οι πειραματιστές μετρούν χάπου 19 παραμέτρους (τις μάζες των σωματιδίων του Πίνακα 1.1, τα δυναμικά τους φορτία όπως καταγράφονται στον Πίνακα της σημείωσης 1 στο τέλος του Ιου Κεφαλαίου, τη συγχριτική ισχύ των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων στον Πίνακα 1.2, καθώς και χάποια άλλα νούμερα που δεν χρειάζεται να τα αναφέρουμε), και οι θεωρητικοί εισάγουν αυτούς τους αριθμούς στις κβαντικές θεωρίες πεδίου οι οποίες σχετίζονται με τα σωματίδια αλλά και με τις ισχυρές, ασθενείς και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, οι προβλέψεις της θεωρίας αναφο-

ρικά με το μικρόκοσμο συμφωνούν εκπληκτικά με τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό αληθεύει και για ενέργειες ικανές να διασπούν την ύλη σε κομμάτια ενός δισεκατομμυριστού του δισεκατομμυριστού του μέτρου, μέγεθος που αποτελεί το σημερινό όριο της τεχνολογίας μας. Για το λόγο αυτό, οι φυσικοί αποκλούν τη θεωρία των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων και τις τρεις οικογένειες των σωματιδίων της ύλης βασική θεωρία ή (συχνότερα) βασικό μοντέλο της φυσικής σωματιδίων.

Σωματίδια αγγελιοφόροι

Σύμφωνα με το βασικό μοντέλο, όπως ακριβώς το φωτόνιο είναι το ελάχιστο συστατικό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, τα πεδία των ισχυρών και των ασθενών δυνάμεων έχουν επίσης ελάχιστα συστατικά. Όπως συζητήσαμε συνοπτικά στο Κεφάλαιο 1, οι ελάχιστες πυκνώσεις της ισχυρής δύναμης είναι γνωστές ως γλοιόνια και της ασθενούς ως μποζόνια ασθενούς βαθμίδας (ή, ακριβέστερα, ως μποζόνια W και Z). Σύμφωνα με το βασικό μοντέλο δεν πρέπει να θεωρούμε ότι αυτά τα σωματίδια έχουν εσωτερική δομή – στο συγκεκριμένο πλαίσιο είναι εξίσου στοιχειώδη όσο και τα σωματίδια στις τρεις οικογένειες της ύλης.

Τα φωτόνια, τα γλοιόνια και τα μποζόνια ασθενούς βαθμίδας παρέχουν τον μικροσκοπικό μηχανισμό για τη διάδοση των δυνάμεων τις οποίες απαρτίζουν. Για παράδειγμα, όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο απωθεί ένα άλλο όμοιου φορτίου, μπορείτε σε γενικές γραμμές να φανταστείτε ότι καθένα τους περιβάλλεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο –ένα «κέφος» ή μια «ομίχλη» «ηλεκτρικής ουσίας»– και ότι η δύναμη που νιώθει κάθε σωματίδιο προέρχεται από την άπωση ανάμεσα στα αντίστοιχα δυναμικά πεδία τους. Η ακριβής μικροσκοπική περιγραφή αυτής της αμοιβαίας άπωσης είναι βέβαια κάπως διαφορετική. Ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποτελείται από μια πυκνή μάζα φωτονίων· η αλληλεπίδραση ανάμεσα σε δύο φορτισμένα σωματίδια προκύπτει πράγματι από το γεγονός ότι αεκτο-

ξεύουν» φωτόνια το ένα στο άλλο. Θα μπορούσαμε χοντρικά να πούμε ότι, όπως εσείς μπορείτε να επηρεάσετε την κίνηση ενός φίλου σας που κάνει μαζί σας πατινάζ, πετώντας μπάλες του μπόουλινγκ, δύο ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια αλληλοεπηρεάζονται ανταλλάσσοντας αυτές τις ελάχιστες δεσμίδες φωτός.

Ένα σημαντικό ψεγάδι στο παράδειγμα του πατινάζ είναι ότι οι μπάλες του μπόουλινγκ δρουν μόνο «απωσικά» – απομακρύνοντας πάντα τους δύο πατινέρ. Αντίθετα, δύο αντίθετα φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν επίσης μέσω ανταλλαγής φωτονίων, μολονότι η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που προκύπτει είναι ελκτική. Λες και το φωτόνιο δεν είναι ο μεταδότης της δύναμης αυτής καθ' εαυτήν, αλλά ο μεταδότης ενός μηνύματος για τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να ανταποκριθεί ο παραλήπτης στην εν λόγω δύναμη. Για όμοια φορτισμένα σωματίδια το φωτόνιο μεταφέρει το μήνυμα «απομακρυνθείτε», ενώ για αντίθετα φορτισμένα σωματίδια μεταφέρει το μήνυμα «πληησιάστε». Για το λόγο αυτό το φωτόνιο αναφέρεται ορισμένες φορές ως σωματίδιο-αγγελιοφόρος της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης ή σωματίδιο-φορέας του μηνύματός της. Παρομοίως, τα γλοιόνια και τα μποζόνια ασθενούς βαθμίδας είναι τα σωματίδια-φορείς των ισχυρών και των ασθενών πυρηνικών δυνάμεων. Η ισχυρή δύναμη, η οποία κρατά τα κουάρκ δεμένα μέσα στα πρωτόνια και τα νετρόνια, προκύπτει από την ανταλλαγή γλοιονίων ανάμεσα σε μεμονωμένα κουάρκ. Τα γλοιόνια είναι σαν να παρέχουν την «χόλλα» που κρατά αυτά τα υποατομικά σωματίδια κολλημένα μεταξύ τους. Η ασθενής δύναμη, που ευθύνεται για ορισμένα στοιχεία μετάπτωσης στις πυρηνικές διασπάσεις, παράγεται από τα μποζόνια ασθενούς βαθμίδας.

Συμμετρία βαθμίδας

Ίσως έχετε συνειδητοποιήσει ότι αυτό που μας τα χαλάει στη συζήτησή μας για την κβαντική θεωρία των δυνάμεων της φύσης είναι η βαρύτητα. Με δεδομένη την επιτυχή προσέγγιση που έχουν

εφαρμόσει οι φυσικοί στις άλλες τρεις δυνάμεις, ενδεχομένως να τους προτείνατε να αναζητήσουν μια χβαντική θεωρία πεδίου για τη βαρυτική δύναμη – μια θεωρία στην οποία η ελάχιστη μονάδα του βαρυτικού δυναμικού πεδίου, το βαρυτόνιο, θα ήταν το σωματίδιοφορέας του. Εκ πρώτης όψεως, όπως επισημαίνουμε τώρα, αυτή η πρόταση θα φαινόταν ιδιαίτερα εύστοχη, γιατί η χβαντική θεωρία πεδίου των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων αποκαλύπτει ότι υπάρχει μια προκλητική ομοιότητα ανάμεσα σε αυτές και σε μια πλευρά της βαρυτικής δύναμης που συναντήσαμε στο Κεφάλαιο 3.

Θυμηθείτε ότι η βαρυτική δύναμη μας επιτρέπει να πούμε ότι όλοι οι παρατηρητές – ανεξάρτητα από την κινητική τους κατάσταση – συγχρίνονται με απολύτως ίσους όρους. Ακόμη και αυτοί που κανονικά θα θεωρούσαμε πως επιταχύνονται, μπορούν να ισχυριστούν ότι βρίσκονται σε ηρεμία, αφού μπορούν να αποδώσουν τη δύναμη που αισθάνονται στο γεγονός ότι βρίσκονται μέσα σε κάποιο βαρυτικό πεδίο. Γι' αυτή την έννοια, η βαρύτητα επιβάλλει μια συμμετρία: διασφαλίζει την εγκυρότητα όλων των δυνατών θέσεων παρατήρησης, όλων των δυνατών συστημάτων αναφοράς. Η ομοιότητά της με την ισχυρή, την ασθενή και την ηλεκτρομαγνητική δύναμη είναι ότι και αυτές συνδέονται με κάποιες συμμετρίες, αν και πολύ πιο αφηρημένες από αυτήν που σχετίζεται με τη βαρύτητα.

Για να αποκτήσετε μια γενική εικόνα γι' αυτές τις αρχετά λεπτές αρχές συμμετρίας, ας εξετάσουμε ένα σημαντικό παράδειγμα. Όπως καταγράφαμε στον πίνακα της σημείωσης 1 στο τέλος του 1ου Κεφαλαίου, κάθε κουάρκ «βγαίνει» σε τρία «χρώματα» (με λίγη φαντασία αποκαλούνται κόκκινο, πράσινο και μπλε, μολονότι πρόκειται για απλούς χαρακτηρισμούς που δεν έχουν καμία σχέση με το χρώμα υπό τη συνήθη οπτική έννοια), τα οποία καθορίζουν πώς το κουάρκ ανταποκρίνεται στην ισχυρή δύναμη, όπως περίπου το ηλεκτρικό του φορτίο καθορίζει πώς ανταποκρίνεται στην ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Όλα τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί αποδεικνύουν ότι υφίσταται μια συμμετρία ανάμεσα στα κουάρκ υπό την έννοια ότι οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε οποιαδήποτε κουάρκ με ίδιο χρώμα (κόκκινο με κόκκινο, πράσινο με πράσινο ή

μπλε με μπλε) είναι όλες πανομοιότυπες, και παρομοίως, οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε οποιαδήποτε κουάρκ με διαφορετικό χρώμα (χόκκινο με πράσινο, πράσινο με μπλε ή μπλε με κόκκινο) είναι επίσης πανομοιότυπες. Μάλιστα, τα δεδομένα επιβεβαιώνουν κάτι ακόμη πιο εντυπωσιακό. Σε περίπτωση που τα τρία χρώματα –τα τρία διαφορετικά ισχυρά φορτία–, τα οποία μπορεί να φέρει ένα κουάρκ, μετατεθούν όλα κατά ένα συγκεκριμένο τρόπο (μιλώντας χοντρικά με τα χρώματα που έχουμε αποδώσει νοερά, αν το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε μετατεθούν, για παράδειγμα, στο κίτρινο, το λουλακί και το ιώδες), οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα κουάρκ θα παραμείνουν, και πάλι, εντελώς αμετάβλητες ακόμα κι αν οι λεπτομέρειες αυτής της μετάθεσης αλλάζουν από στιγμή σε στιγμή ή από τόπο σε τόπο. Για το λόγο αυτό, όπως ακριβώς λέμε ότι μια μπάλα επιδεικνύει σφαιρική συμμετρία επειδή δείχνει ολόιδια ανεξαρτήτως αν την περιστρέψουμε στα χέρια μας ή αν αλλάζουμε τη γωνία υπό την οποία τη βλέπουμε, λέμε και ότι το σύμπαν αποτελεί παράδειγμα συμμετρίας ισχυρών δυνάμεων: Η φυσική παραμένει αμετάβλητη σε τέτοιες μεταθέσεις δυναμικού φορτίου – είναι εντελώς ανεπηρέαστη από αυτές. Για ιστορικούς λόγους, οι φυσικοί λένε επίσης ότι η συμμετρία ισχυρών δυνάμεων συνιστά ένα παράδειγμα συμμετρίας βαθμίδας.⁵

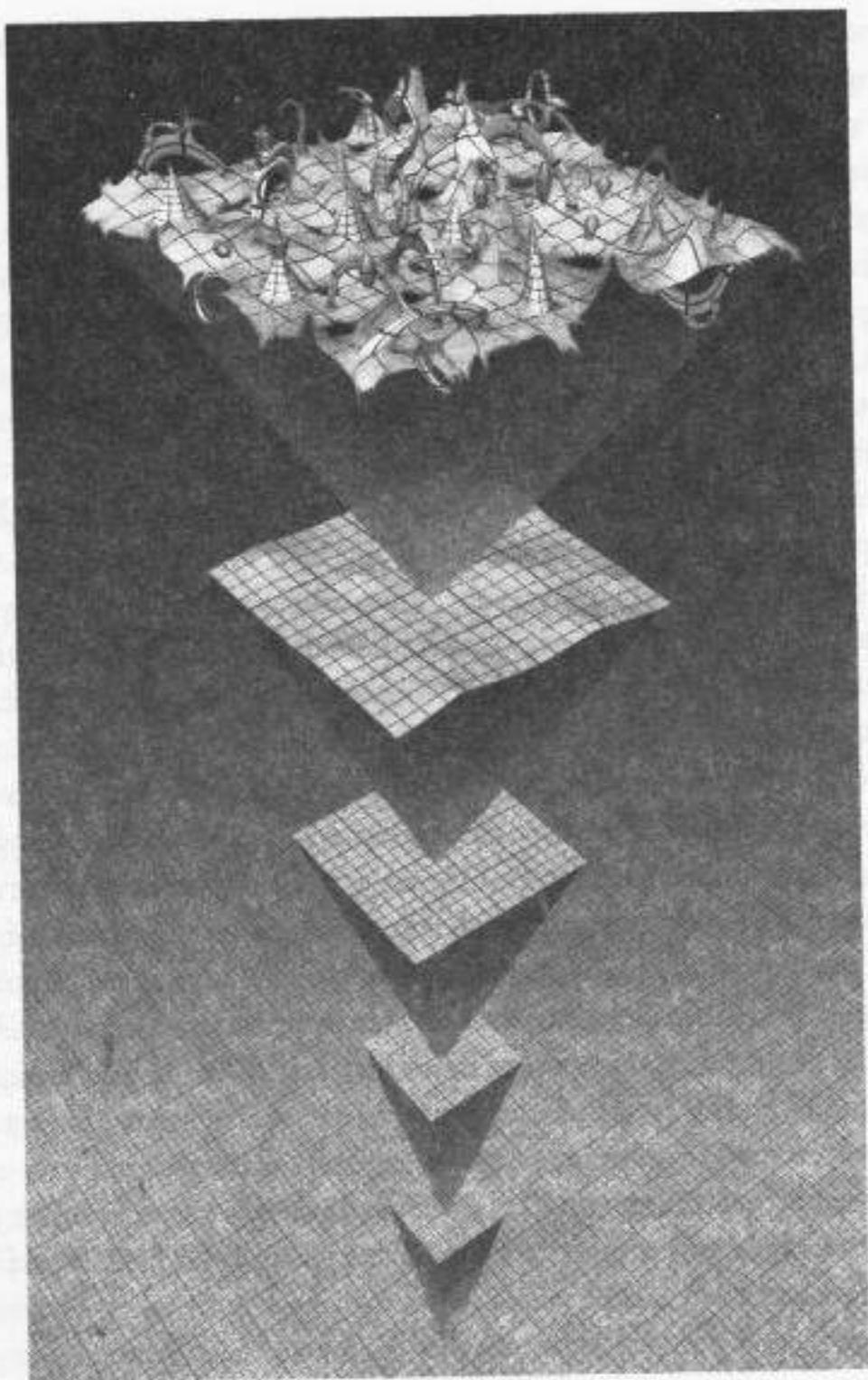
Εδώ βρίσκεται το βασικό σημείο. Όπως ακριβώς η συμμετρία ανάμεσα σε όλες τις δυνατές θέσεις παρατήρησης στη γενική θεωρία της σχετικότητας απαιτεί την ύπαρξη της βαρυτικής δύναμης, έτσι και οι συμμετρίες βαθμίδας, σύμφωνα με μελέτες που βασίστηκαν στις εργασίες του Hermann Weyl στη δεκαετία του 1920 και των Chen-Ning Yang και Robert Mills στη δεκαετία του 1950, απαιτούν την ύπαρξη άλλων δυνάμεων. Όπως περίπου ένα ευαίσθητο κλιματιστικό κρατά τη θερμοκρασία, την πίεση του αέρα και την υγρασία σε ένα χώρο εντελώς σταθερές, απαλείφοντας κάθε εξωτερική επίδραση, ορισμένα είδη δυναμικών πεδίων μπορούν, σύμφωνα με τους Yang και Mills, να αντισταθμίζουν πλήρως τις μεταθέσεις των φορτίων, διατηρώντας έτσι τις φυσικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα σωματίδια εντελώς αμετάβλητες. Στην πε-

ρίπτωση της συμμετρίας βαθμίδας που σχετίζεται με τις μεταβολές των φορτίων των κουάρκ, η απαιτούμενη δύναμη δεν είναι άλλη από την ίδια την ισχυρή δύναμη. Με άλλα λόγια, χωρίς την ισχυρή δύναμη η φυσική θα άλλαζε όταν συνέβαιναν μεταβολές χρωματικών φορτίων, όπως αυτές που εξετάσαμε πρωτύτερα. Το παραπάνω συμπέρασμα δείχνει ότι, παρ' όλο που η βαρυτική δύναμη και η ισχυρή δύναμη έχουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες (θυμηθείτε, για παράδειγμα, ότι η βαρύτητα είναι πολύ μικρότερης έντασης από την ισχυρή δύναμη και λειτουργεί σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις), έχουν κοινές ρίζες: απαιτούνται και οι δύο ώστε το σύμπαν να περιλαμβάνει συγκεκριμένες συμμετρίες. Επιπλέον, μπορούμε να ισχυριστούμε το ίδιο και για την ασθενή και ηλεκτρομαγνητική δύναμη, δείχνοντας ότι και η δική τους ύπαρξη συνδέεται με κάποιες άλλες συμμετρίες βαθμίδας – τις αποκαλούμενες ασθενείς και ηλεκτρομαγνητικές συμμετρίες βαθμίδας. Συνεπώς, και οι τέσσερις δυνάμεις σχετίζονται άμεσα με συμμετρίες.

Αυτό το κοινό χαρακτηριστικό των τεσσάρων δυνάμεων θα φαίνοταν καλός οιωνός για την πρόταση την οποία κάνατε στην αρχή αυτής της ενότητας. Δηλαδή στην προσπάθειά μας να ενσωματώσουμε την κβαντομηχανική στη γενική σχετικότητα θα έπρεπε να αναζητήσουμε μια κβαντική θεωρία πεδίου για τη βαρυτική δύναμη, όπως ακριβώς έκαναν οι φυσικοί ανακαλύπτοντας κβαντικές θεωρίες πεδίου που έστεκαν για τις άλλες τρεις δυνάμεις. Για πολλά χρόνια, η συλλογιστική αυτή ενέπνευσε μια ομάδα αξιοθαύμαστων και διακεκριμένων φυσικών να ακολουθήσει αυτό το μονοπάτι με θάρρος, αλλά αποδείχθηκε ότι πατούσαν σε επικίνδυνο έδαφος και κανείς δεν κατάφερε να φτάσει μέχρι το τέλος. Ας δούμε γιατί.

Γενική σχετικότητα εναντίον κβαντομηχανικής

Η γενική σχετικότητα βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλες αστρονομικές κλίμακες. Σε τέτοιες κλίμακες η θεωρία του Einstein υπο-



Σχήμα 5.1 Με διαδοχικές μεγεθύνσεις μιας περιοχής του χώρου, μπορούμε να εξετάσουμε τις υπομικροσκοπικές ιδιότητές της. Οι προσπάθειες να ενοποιηθούν η γενική σχετικότητα και η κβαντομηχανική σκοντάφτουν στον έντονο κβαντικό αφρό που εμφανίζεται στο μέγιστο στάδιο μεγέθυνσης.

στηρίζει η απουσία μάζας σημαίνει πως ο χώρος είναι επίπεδος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Καθώς προσπαθούμε να γεφυρώσουμε τη γενική σχετικότητα με την κβαντομηχανική, πρέπει να στρέψουμε την προσοχή μας σε άλλο σημείο και να εξετάσουμε τις μικροσκοπικές ιδιότητες του χώρου. Αυτό ακριβώς κάνουμε στο Σχήμα 5.1, όπου εστιάζουμε και μεγεθύνουμε διαδοχικά σε ολοένα και μικρότερες περιοχές του χωρικού ιστού. Στην αρχή, καθώς εστιάζουμε, δεν συμβαίνουν και πολλά· όπως βλέπουμε στα τρία πρώτα επίπεδα μεγέθυνσης στο Σχήμα 5.1, η δομή του χώρου διατηρεί την ίδια βασική μορφή. Αντλώντας τα επιχειρήματά μας από την κλασική φυσική, θα υποστηρίζαμε ότι αυτή η ήρεμη και επίπεδη εικόνα του χώρου θα συνεχίζεται επ' άπειρον, σε οσοδήποτε μικρή κλίμακα. Όμως η κβαντομηχανική αλλάζει άρδην αυτή την άποψή μας. Όλα υπόκεινται στις κβαντικές διακυμάνσεις που πηγάζουν από την αρχή της απροσδιοριστίας – ακόμη και το βαρυτικό πεδίο. Μολονότι η κλασική συλλογιστική καταλήγει ότι το κενό έχει μηδενικό βαρυτικό πεδίο, η κβαντομηχανική δείχνει ότι ναι μεν κατά μέσο όρο είναι μηδενικό, αλλά η πραγματική του τιμή μεταβάλλεται λόγω των κβαντικών διακυμάνσεων. Επιπλέον, η αρχή της απροσδιοριστίας μας λέει ότι το πλήθος των ταλαντώσεων του βαρυτικού πεδίου αυξάνεται, καθώς εστιάζουμε σε ολοένα μικρότερες περιοχές του χώρου. Η κβαντομηχανική δείχνει ότι τίποτε δεν θέλει να στριμώχνεται· όσο πιο πολύ στενεύουμε τα χωρικά πλαίσια, τόσο οδηγούμαστε σε όλο και μεγαλύτερες ταλαντώσεις.

Καθώς τα βαρυτικά πεδία εκδηλώνονται ως καμπυλώσεις, αυτές οι κβαντικές διακυμάνσεις μεταφράζονται σε ολοένα και πιο βίαιες διαταραχές του περιβάλλοντος χώρου. Οι διαταραχές αρχίζουν να εμφανίζονται στο τέταρτο στάδιο μεγέθυνσης στο Σχήμα 5.1. Δουλεύοντας σε ολοένα μικρότερες κλίμακες, όπως κάνουμε στο πέμπτο στάδιο του Σχήματος 5.1, βλέπουμε ότι οι τυχαίες κβαντομηχανικές ταλαντώσεις στο βαρυτικό πεδίο αντιστοιχούν σε τόσο έντονες παραμορφώσεις ώστε ο χώρος να μη μοιάζει πια με λείο, καμπύλο αντικείμενο όπως η ελαστική μεμβράνη που χρησιμοποιή-

σαμε εποπτικά στο Ζο Κεφάλαιο. Αντίθετα, ο χώρος παίρνει την αφρώδη, ταραγμένη, στρεβλή μορφή που φαίνεται στο επάνω μέρος της εικόνας. Ο John Wheeler επινόησε τον όρο κβαντικός αφρός για να περιγράψει τη φρενίτιδα που αποκαλύπτεται όταν εξετάζουμε το χώρο (και το χρόνο) σε υπομικροσκοπικές κλίμακες – περιγράφει μια ανοίκεια περιοχή του σύμπαντος όπου οι συμβατικές έννοιες του δεξιά και αριστερά, πίσω και μπρος, πάνω και κάτω (ή ακόμη του πριν και του μετά) χάνουν το νόημά τους. Σε τόσο μικρές κλίμακες αντιμετωπίζουμε ασυμβατότητα σε θεμελιώδες επίπεδο ανάμεσα στη γενική σχετικότητα και την κβαντομηχανική. Η έννοια μιας λείας γεωμετρίας του χώρου, η βασική αρχή της γενικής σχετικότητας, καταρρίπτεται λόγω των βίαιων διακυμάνσεων του κβαντικού κόσμου σε μικρές κλίμακες. Σε υπομικροσκοπικές κλίμακες, το βασικό χαρακτηριστικό της κβαντομηχανικής –η αρχή της απροσδιοριστίας– βρίσκεται σε άμεση σύγκρουση με το βασικό χαρακτηριστικό της γενικής σχετικότητας – το λείο γεωμετρικό μοντέλο του χώρου (και του χωροχρόνου).

Στην πράξη, αυτή η σύγκρουση προβάλλει με πολύ συγκεκριμένο τρόπο. Υπολογισμοί που βασίζονται τόσο στις εξισώσεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας όσο και της κβαντομηχανικής καταλήγουν πάντα στο ίδιο παράλογο αποτέλεσμα: το άπειρο. Σαν μια δυνατή ξυλιά στην παλάμη από ένα δάσκαλο του παλιού καιρού, το άπειρο είναι ο τρόπος με τον οποίο η φύση μάς λέει ότι κάπου κάνουμε λάθος.⁶ Οι εξισώσεις της γενικής σχετικότητας δεν μπορούν να χειριστούν τη φρενίτιδα του κβαντικού αφρού.

Σημειώστε ωστόσο ότι καθώς επιστρέφουμε σε πιο συνθισμένες κλίμακες (ακολουθώντας αντίστροφα τη σειρά των σχεδίων στο Σχήμα 5.1), οι τυχαίες, βίαιες και μικρής κλίμακας ταλαντώσεις αλληλοεξουδετερώνονται – ουσιαστικά κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο ο τραπεζικός λογαριασμός του συστηματικού μιας τρακαδόρου δεν φανερώνει τα κουσούρια του κατόχου του – και η έννοια της λείας γεωμετρίας του κοσμικού ιστού αποκτά ξανά νόημα. Το ίδιο περίπου νιώθετε όταν κοιτάζετε μια εικόνα τυπωμένη από εκτυπωτή: από μακριά οι κουκίδες που συνθέτουν

την εικόνα αναμιγνύονται και δημιουργούν την εντύπωση μιας λείας εικόνας, στην οποία οι τόνοι φωτεινότητας αλλάζουν ομαλά και χωρίς άλματα από τη μια περιοχή στην άλλη. Όταν εξετάζετε την εικόνα σε μικρότερες κλίμακες, διαπιστώνετε ωστόσο ότι διαφέρει σημαντικά από την ομαλή όψη που έχει από απόσταση. Δεν είναι παρά μια συλλογή από διακριτές κουκκίδες που η καθεμιά απέχει από τις υπόλοιπες. Σημειώστε όμως ότι αντιλαμβάνεστε αυτή την ιδιαιτερότητα της εικόνας μόνο όταν την εξετάσετε στη μικρότερη δυνατή κλίμακα· από μακριά δείχνει λεία. Παρομοίως, ο χωροχρονικός ιστός δείχνει ομαλός, εκτός αν εξεταστεί με υπομικροσκοπική ακρίβεια. Γι' αυτόν το λόγο η γενική θεωρία της σχετικότητας βρίσκει εφαρμογή σε αρκετά μεγάλες κλίμακες χώρου (και χρόνου) – στις κλίμακες που εμπλέκονται στις συνηθισμένες αστρονομικές εφαρμογές –, αλλά γίνεται ασυνεπής σε μικρές χωρικές (και χρονικές) κλίμακες. Το κεντρικό αξίωμα της λείας και ήπιας καμπυλωμένης γεωμετρίας δικαιώνεται στα μεγάλα, αλλά καταρρέει εξαιτίας των κβαντικών διακυμάνσεων, όταν το χρησιμοποιήσουμε στα μικρά.

Οι βασικές αρχές της γενικής θεωρίας της σχετικότητας και της κβαντομηχανικής μάς επιτρέπουν να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση τις κλίμακες κάτω από τις οποίες θα έπρεπε να συρρικνωθεί χανείς, ώστε να υποστεί το ολέθριο φαινόμενο του Σχήματος 5.1. Το μικρό μέγεθος της σταθεράς του Planck – που ορίζει την ισχύ των κβαντικών φαινομένων – και η μικρή ένταση της βαρυτικής δύναμης συνδυάζονται για να δώσουν ένα αποτέλεσμα που αποκαλείται μήκος Planck, το οποίο είναι μικρότερο πέρα από κάθε φαντασία: ένα εκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου (10^{-33} cm).⁷ Το πέμπτο στάδιο στο Σχήμα 5.1 αποδίδει λοιπόν σχηματικά το υπομικροσκοπικό τοπίο του σύμπαντος, σε επίπεδο μικρότερο από το μήκος Planck. Για να πάρετε μια αίσθηση της κλίμακας, αν μεγεθύναμε ένα άτομο στις διαστάσεις του γνωστού σύμπαντος, το μήκος Planck μετά βίας θα έφτανε το ύψος ενός μέσου δέντρου.

Κι έτσι βλέπουμε ότι η ασυμβατότητα ανάμεσα στη γενική σχετικότητα και την κβαντομηχανική γίνεται εμφανής μόνο σε ένα μάλλον απόχρυφο πεδίο του σύμπαντος. Για το λόγο αυτό θα μπορούσατε δικαιολογημένα να ρωτήσετε αν αξίζει να ανησυχούμε γι' αυτήν. Πράγματι, ούτε η κοινότητα των φυσικών εκφράζεται ομόφωνα σχετικά με αυτό το ζήτημα. Υπάρχουν εκείνοι που ναι μεν αναγνωρίζουν το πρόβλημα, αλλά συνεχίζουν να χρησιμοποιούν ανεμπόδιστα την κβαντομηχανική και τη γενική θεωρία της σχετικότητας για προβλήματα των οποίων τα τυπικά τους μήκη ξεπερνούν κατά πολύ το μήκος Planck, όταν η έρευνά τους το απαιτεί. Ωστόσο υπάρχουν και άλλοι που, ανεξάρτητα από τις υπομικροσκοπικές αποστάσεις στις οποίες πρέπει να εισέλθει κανείς ώστε να φανερωθεί το πρόβλημα, αναστατώνονται από το γεγονός ότι οι δύο ακρογωνιαίοι λίθοι της σημερινής φυσικής είναι στον πυρήνα τους θεμελιωδώς ασύμβατοι. Αυτή η ασυμβατότητα, υποστηρίζουν, υποδεικνύει κάποιο ουσιαστικό ελάττωμα στον τρόπο με τον οποίο κατανοούμε το φυσικό σύμπαν. Η άποψη αυτή στηρίζεται σε μια αναπόδεικτη αλλά βαθιά διαίσθηση ότι το σύμπαν, αν το κατανοήσουμε στο βαθύτερο και θεμελιωδέστερο επίπεδό του, μπορεί να περιγραφεί από μια λογικά έγκυρη θεωρία, της οποίας τα μέρη θα συνενώνονται αρμονικά. Και σίγουρα, ανεξάρτήτως αν αυτή η ασυμβατότητα παίζει κεντρικό ρόλο στη δική τους έρευνα, οι περισσότεροι φυσικοί δυσκολεύονται να πιστέψουν ότι, σε τελικό επίπεδο, η βαθύτερη θεωρητική κατανόηση του σύμπαντος θα αποτελείται από μία μαθηματικά ασυνεπή συρραφή δύο πανίσχυρων πλην όμως αλληλοσυγχρουόμενων ερμηνευτικών πλαισίων.

Οι φυσικοί έχουν κάνει πολυάριθμες προσπάθειες να τροποποιήσουν είτε τη γενική θεωρία της σχετικότητας είτε την κβαντομηχανική, κατά τέτοιον τρόπο ώστε να αποφύγουν τη σύγκρουση, αλλά οι προσπάθειες αυτές, συχνά θαρραλέες και ευρηματικές, απέτυχαν η μία μετά την άλλη.

Αυτό όμως συνέβαινε μέχρι να ανακαλυφθεί η θεωρία των υπερχορδών.⁸

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

Η κοσμική συμφωνία

*Μουσική και μόνο μουσική:
βασικές αρχές της θεωρίας
των υπερχορδών*

Η μουσική αποτελούσε πάντα το καλύτερο εποπτικό μέσο για όσους προβληματίζονται σχετικά με το σύμπαν. Από την αρχαία «μουσική των σφαιρών» των πυθαγορείων μέχρι την «αρμονία της φύσης» που έχουν καθοδηγήσει την έρευνα ανά τους αιώνες, η ανθρωπότητα έχει αναζητήσει το τραγούδι της φύσης στις ήσυχες περιπλανήσεις των ουράνιων σωμάτων και τις ασυγκράτητες εκρήξεις των υποατομικών σωματιδίων. Με την ανακάλυψη της θεωρίας των υπερχορδών, οι μουσικές μεταφορές αποκτούν μια εκπληκτικά απτή διάσταση, καθώς η θεωρία υποδεικνύει ότι ο μικρόκοσμος είναι γεμάτος μικροσκοπικές χορδές, των οποίων οι παλμικές παραλλαγές ενορχηστρώνουν την εξέλιξη του Κόσμου. Ο άνεμος της αλλαγής, σύμφωνα με τη θεωρία των υπερχορδών, πνέει μέσα από ένα σύμπαν που μοιάζει με αιολική άρπα.

Αντίθετα, το βασικό μοντέλο θεωρεί τα θεμελιώδη συστατικά του σύμπαντος σαν σημειακά στοιχεία, χωρίς καμία εσωτερική δομή. Όσο ισχυρή κι αν είναι αυτή η θεώρηση (έχουμε ήδη σημειώσει ότι σχεδόν κάθε πρόβλεψη του βασικού μοντέλου για το μικρόκοσμο έχει επαληθευτεί με ακρίβεια που φτάνει το δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου – το σημερινό

όριο της τεχνολογίας μας), το βασικό μοντέλο δεν μπορεί να αποτελέσει μια πλήρη ή τελική θεωρία, αφού δεν καλύπτει τη βαρύτητα. Επιπλέον, οι προσπάθειες να ενσωματωθεί η βαρύτητα στο χβαντομηχανικό του πλαίσιο έχουν αποτύχει εξαιτίας των βίαιων διακυμάνσεων του χωρικού ιστού που εμφανίζονται στις υπομικροσκοπικές κλίμακες – σε κλίμακες δηλαδή μικρότερες από το μήκος Planck. Αυτή η ανεπίλυτη σύγκρουση μας παρακίνησε να προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε σε ακόμα μεγαλύτερο βάθος τη φύση. Το 1984, οι φυσικοί Michael Green, που ήταν τότε στο Queen Mary College, και John Schwarz, του California Institute of Technology, έδωσαν την πρώτη πειστική ένδειξη ότι η θεωρία των υπερχορδών (ή «θεωρία χορδών», για συντομία) θα μπορούσε να συμβάλει στην κατανόηση αυτών των φαινομένων.

Η θεωρία χορδών παρέχει μα νέα και ριζικά τροποποιημένη θεωρητική περιγραφή των υπομικροσκοπικών ιδιοτήτων του σύμπαντος, η οποία, όπως συνειδητοποίησαν σταδιακά οι φυσικοί, αλλάζει τη θεωρία της γενικής σχετικότητας του Einstein με τέτοιον τρόπο ώστε να γίνει πλήρως συμβατή με τους νόμους της χβαντομηχανικής. Σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, τα θεμελιώδη συστατικά του σύμπαντος δεν είναι σημειακά σωματίδια αλλά μικροσκοπικά, μονοδιάστατα νήματα, κάτι σαν απέριως λεπτά λαστιχάκια, που ταλαντώνται. Όμως μη σας ξεγελά το όνομα: αντίθετα από μια συνηθισμένη χορδή, που αποτελείται η ίδια από μόρια και άτομα, οι χορδές της θεωρίας χορδών θεωρείται ότι βρίσκονται βαθιά στην καρδιά της ύλης. Η θεωρία προτείνει ότι αυτές είναι τα υπομικροσκοπικά συστατικά που απαρτίζουν τα σωματίδια, από τα οποία φτιάχνονται τα άτομα. Οι χορδές της θεωρίας χορδών είναι τόσο μικρές – κατά μέσο όρο έχουν μήκος όσο περίπου και το μήκος Planck – που φαίνονται σαν σημεία, ακόμη κι όταν τις εξετάζουμε με τον πιο ισχυρό εξοπλισμό.

Ωστόσο, αν θεωρήσουμε ότι τα θεμελιώδη συστατικά όλων των πραγμάτων δεν είναι σημειακά σωματίδια αλλά μήκη χορδών, οι συνέπειες αυτής της φαινομενικά απλής αντικατάστασης φτάνουν πολύ μακριά. Πρώτον και κύριο, η θεωρία χορδών φαίνεται να επι-

λύει τη σύγκρουση μεταξύ γενικής θεωρίας της σχετικότητας και χβαντομηχανικής. Όπως θα δούμε, η μη σημειακή φύση μας χορδής αποτελεί το χυριότερο νέο στοιχείο που επιτρέπει τη δημιουργία ενιαίου αρμονικού πλαισίου στο οποίο ενσωματώνονται και οι δύο θεωρίες. Δεύτερον, η θεωρία χορδών παρέχει μια αληθινά ενοποιημένη θεωρία, καθώς προτείνει ότι κάθε μορφή ύλης και όλες οι δυνάμεις προκύπτουν από το ίδιο βασικό συστατικό: τις παλλόμενες χορδές. Τέλος, όπως θα συζητήσουμε αναλυτικότερα σε επόμενα κεφάλαια, εκτός από αυτά τα αξιοσημείωτα επιτεύγματα, η θεωρία χορδών μεταβάλλει για άλλη μια φορά ριζικά την αντίληψή μας για το χωροχρόνο.¹

Μια σύντομη ιστορία της θεωρίας χορδών

Το 1968, ένας νεαρός θεωρητικός φυσικός, ο Gabriele Veneziano, πάσχιζε να βγάλει νόημα από τις διάφορες ιδιότητες της ισχυρής πυρηνικής δύναμης που είχε παρατηρήσει από πειράματα. Ο Veneziano, που ήταν τότε υπότροφος στο CERN, το ευρωπαϊκό εργαστήριο πυρηνικών ερευνών στη Γενεύη της Ελβετίας, είχε ασχοληθεί με αυτό το πρόβλημα για χρόνια, ώσπου μια μέρα έκανε μια φανταστική ανακάλυψη. Προς μεγάλη του έκπληξη, συνειδητοποίησε ότι ένας δυσνόητος μαθηματικός τύπος, που είχε κατασκευαστεί από τον διάσημο Ελβετό μαθηματικό Leonhard Euler περίπου διακόσια χρόνια πριν -η επονομαζόμενη συνάρτηση βήτα του Euler- έμοιαζε να περιγράφει πολλές ιδιότητες των ισχυρά αλληλεπιδρώντων σωματιδίων. Η παρατήρηση του Veneziano κατάφερε να περιγράψει με μαθηματικό τρόπο πολλές ιδιότητες της ισχυρής δύναμης και οδήγησε σε έναν ερευνητικό οργασμό που στόχευε στην επιστράτευση της συνάρτησης βήτα του Euler και διαφόρων γενικεύσεων της για να περιγράψει το πλεόνασμα δεδομένων που προέρχονταν από σχάσεις ατόμων σε διάφορα εργαστήρια ανά τον κόσμο. Ωστόσο, κατά μία έννοια, η παρατήρηση του Veneziano ήταν ατελής. Όπως οι τύποι που μαθαίνει απέ-

Ξω ένας μαθητής χωρίς να καταλαβαίνει το νόημα ή την αιτιολόγησή τους, η συνάρτηση βήτα του Euler έδειχνε να δουλεύει, χωρίς κανείς να γνωρίζει γιατί. Ήταν ένας τύπος που αναζητούσε την εξήγησή του. Η κατάσταση άλλαξε το 1970, όταν το έργο των Yoichiro Nambu του Πανεπιστημίου του Σικάγου, Holger Nielsen του Ινστιτούτου Niels Bohr και Leonard Susskind του Πανεπιστημίου του Στάνφορντ αποκάλυψε την έως τότε άγνωστη φυσική που κρυβόταν πίσω από τον τύπο του Euler. Οι φυσικοί αυτοί έδειξαν ότι, αν θεωρούσε κανείς ως μοντέλο για τα στοιχειώδη σωματίδια κάποιες μικρές, παλλόμενες, μονοδιάστατες χορδές, τότε οι πυρηνικές τους αλληλεπιδράσεις θα περιγράφονταν με ακρίβεια από τη συνάρτηση του Euler. Άν τα μήκη των χορδών ήταν αρκετά μικρά, υποστήριζαν, θα έμοιαζαν με σημειακά σωματίδια, κάτι που θα ήταν συνεπές προς τις πειραματικές παρατηρήσεις.

Μολονότι αυτό παρείχε μια διαισθητικά απλή και βολική θεωρία, μετά από λίγο καιρό η περιγραφή της ισχυρής δύναμης με χορδές αποδείχθηκε λανθασμένη. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, πειράματα σε μεγάλες ενέργειες, ικανά να ερευνήσουν σε βάθος τι επικρατεί στις υποατομικές κλίμακες, έδειξαν ότι το μοντέλο των χορδών οδηγούσε σε προβλέψεις που δεν συμβάδιζαν με τις παρατηρήσεις. Τον ίδιο καιρό αναπτυσσόταν η σωματιδιακή θεωρία πεδίου της κβαντικής χρωμοδυναμικής, η οποία, με την εκπληκτική ακρίβειά της στην περιγραφή της ισχυρής δύναμης, υποσκέλισε τη θεωρία χορδών.

Οι περισσότεροι φυσικοί στοιχειωδών σωματιδίων θεώρησαν ότι η θεωρία χορδών είχε πάρει τη θέση της στο σκουπιδοτενέχε της φυσικής, όμως κάποιοι αφοσιωμένοι ερευνητές εξακολούθησαν να την πιστεύουν. Ο Schwarz, για παράδειγμα, διαισθανόταν ότι «η μαθηματική δομή της θεωρίας χορδών ήταν τόσο όμορφη και είχε τέτοιες θαυμαστές ιδιότητες, που έπρεπε να εκφράζει κάτι βαθύτερο».² Ένα από τα προβλήματα που αντιμετώπισαν οι φυσικοί με τη θεωρία χορδών ήταν ότι έδειχνε απίστευτα πολυσχιδής. Η θεωρία περιείχε παλλόμενες χορδές με ιδιότητες όμοιες

με εκείνες των γλοιονίων, κάτι που επιβεβαίωνε τον αρχικό ισχυρισμό ότι επρόκειτο για μια θεωρία η οποία αφορούσε την ισχυρή πυρηνική δύναμη. Πέρα από αυτά όμως, περιλάμβανε πρόσθετα σωματίδια-φορείς που δεν φαινόταν να έχουν κάποια σχέση με τις πειραματικές ενδείξεις της ισχυρής δύναμης. Το 1974, ο Schwarz και ο Joël Scherk της Ecole Normale Supérieure έκαναν ένα βαρραλέο βήμα που μετέτρεπε το φαινομενικό αυτό ελάττωμα σε προτέρημα. Αφού μελέτησαν τους γριφώδεις τρόπους ταλάντωσης των χορδών, συνειδητοποίησαν ότι οι ιδιότητές τους ταίριαζαν απόλυτα με αυτές του υποθετικού σωματίδιου-φορέα της βαρυτικής δύναμης, του βαρυτόνιου. Παρότι αυτές οι «ελάχιστες πυκνώσεις» βαρυτικής δύναμης δεν έχουν, μέχρι και σήμερα, ανιχνευθεί, οι θεωρητικοί μπορούν με σιγουριά να προβλέψουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που ενδέχεται να έχουν, και οι Scherk και Schwarz βρήκαν ότι αυτές οι ιδιότητες πραγματώνονται με ακρίβεια από ορισμένες ταλαντώσεις. Στηριζόμενοι σε αυτό, ισχυρίστηκαν ότι η θεωρία χορδών απέτυχε στην πρώτη της προσπάθεια, επειδή οι φυσικοί είχαν περιορίσει αδικαιολόγητα το πεδίο εφαρμογής της. Η θεωρία χορδών δεν είναι απλώς μια θεωρία για την ισχυρή δύναμη: είναι μια κβαντική θεωρία που περιλαμβάνει και τη βαρύτητα.³

Η κοινότητα των φυσικών δεν έδειξε και μεγάλο ενθουσιασμό γι' αυτή την πρόταση. Όπως θυμάται ο Schwarz, «η δουλειά μας αγνοήθηκε πλήρως».⁴ Ο δρόμος της εξέλιξης ήταν ήδη γεμάτος από αποτυχημένες προσπάθειες να ενοποιηθεί η βαρύτητα και η κβαντομηχανική. Η θεωρία χορδών είχε αποδειχθεί ανεπαρκής στην αρχική της προσπάθεια να περιγράψει την ισχυρή δύναμη, και φαινόταν σε πολλούς άσκοπο να προσπαθήσουν να χρησιμοποιήσουν την ίδια θεωρία για την επιδίωξη ενός πολύ περισσότερου στόχου. Ακόμη πιο αποκαρδιωτικές στάθηκαν μετέπειτα μελέτες στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τις αρχές του 1980, που έδειξαν ότι η θεωρία χορδών και η κβαντομηχανική είχαν και τις δικές τους ασυμφωνίες σε διάφορα λεπτά ζητήματα. Για άλλη μια φορά γινόταν φανερό ότι η βαρυτική δύναμη αντι-

στεκόταν στην ενσωμάτωσή της στη μικροσκοπική περιγραφή του σύμπαντος.

Έτσι είχαν τα πράγματα μέχρι το 1984. Σε μια εργασία-ορόσημο, απόσταγμα δώδεκα χρόνων εντατικής έρευνας, η οποία γενικά είχε αγνοηθεί και μερικές φορές απορριφθεί απερίφραστα από τους περισσότερους φυσικούς, οι Green και Schwarz απέδειξαν ότι οι λεπτές αυτές κβαντικές αντιφάσεις που επηρέαζαν τη θεωρία χορδών μπορούσαν να επιλυθούν. Επιπλέον, έδειξαν ότι η θεωρία που προέκυπτε είχε τέτοιο εύρος, ώστε να συμπεριλαμβάνει τις τέσσερις δυνάμεις και ολόκληρη την ύλη. Καθώς η είδηση αυτής της ανακάλυψης διαδόθηκε στην παγκόσμια κοινότητα των φυσικών, οι φυσικοί σωματιδίων άφηναν ο ένας μετά τον άλλον τα ερευνητικά τους προγράμματα για να ριχτούν με όλες τους τις δυνάμεις σε μια μάχη που ίσως θα σήμαινε το τέλος του πολέμου, ικανοποιώντας το πανάρχαιο αίτημα της θεωρίας να κατανοήσει τις βαθύτερες λειτουργίες του σύμπαντος.

Άρχισα τις μεταπτυχιακές σπουδές μου στο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης τον Οκτώβριο του 1984. Μολονότι ήμουν ενθουσιασμένος που μάθαινα πράγματα όπως η κβαντική θεωρία πεδίου, η θεωρία βαθμίδας και η γενική θεωρία της σχετικότητας, υπήρχε διάχυτη η αίσθηση στους παλαιότερους μεταπτυχιακούς φυσικούς ότι δεν υπήρχε μέλλον στη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων. Το βασικό μοντέλο είχε εδραιωθεί και η αξιοσημείωτη επιτυχία του στην πρόβλεψη των πειραματικών αποτελεσμάτων υποδείχνυε ότι η επαλήθευσή του ήταν απλώς ζήτημα χρόνου και λεπτομερειών. Η υπέρβαση των ορίων ώστε να συμπεριληφθεί η βαρύτητα και να εξηγηθούν ίσως τα πειραματικά δεδομένα στα οποία στηρίζεται το βασικό μοντέλο –οι 19 αριθμοί οι οποίοι περιγράφουν τις μάζες των στοιχειωδών σωματιδίων, τα φορτία τους και τις σχετικές δυνάμεις, αριθμοί που είναι γνωστοί πειραματικά, ανεξήγητοι όμως θεωρητικά – αποτελούσε τόσο γιγαντιαίο έργο ώστε όλοι πλην των πιο θαρραλέων φυσικών δείλιαζαν μπροστά στην πρόκληση. Ωστόσο, έξι μήνες αργότερα, το κλίμα είχε μεταστραφεί εντελώς. Η επιτυχία των Green και Schwarz εμφύσησε τελικά μέχρι και στους

πρωτοετείς μεταπτυχιακούς φοιτητές την πίστη ότι ζουσαν μια σημαντική στιγμή στην ιστορία της φυσικής. Αυτή η συνταρακτική αίσθηση έδιωξε την προηγούμενη πλήξη. Μερικοί από μας δούλευαν επίμονα μέχρι αργά το βράδυ, προσπαθώντας να κάνουν κτήμα τους τον μεγάλο όγκο γνώσεων της θεωρητικής φυσικής και των θεωρητικών μαθηματικών που απαιτούνται για την κατανόηση της θεωρίας χορδών.

Η περίοδος από το 1984 έως το 1986 έμεινε γνωστή ως «πρώτη επανάσταση των υπερχορδών». Κατά τη διάρκεια των τριών αυτών χρόνων γράφτηκαν περισσότερες από χίλιες επιστημονικές εργασίες για τη θεωρία χορδών από φυσικούς σε όλο τον κόσμο. Οι εργασίες αυτές έδειξαν με επιχειρήματα ότι πολλά χαρακτηριστικά του βασικού μοντέλου για τη φυσική -χαρακτηριστικά που είχαν ανακαλυφθεί με μόχθο μετά από δεκαετίες έρευνας- προέκυπταν φυσικά και αβίαστα από τη μεγαλόπρεπη δομή της θεωρίας χορδών. Όπως είπε κάποτε ο Michael Green, «Τη στιγμή που συναντάς τη θεωρία χορδών και αντιλαμβάνεσαι πως σχεδόν όλες οι κύριες εξελίξεις στη φυσική τα τελευταία εκατό χρόνια πηγάζουν -και μάλιστα με τέτοια κομψότητα- από ένα τόσο απλό σημείο εκκίνησης, συνειδητοποιείς ότι αυτή η απίστευτα πειστική θεωρία είναι κάτι εξαιρετικό και ανεπανάληπτο».⁵ Επιπλέον η θεωρία χορδών παρέχει, όπως θα δούμε, για πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά πολύ πιο πλήρη και ικανοποιητική εξήγηση από αυτήν που δίνει το βασικό μοντέλο. Οι εξελίξεις αυτές έπεισαν πολλούς φυσικούς ότι η θεωρία χορδών είχε βαλθεί να εκπληρώσει την υπόσχεσή της, να αποτελέσει δηλαδή την απώτατη ενοποιημένη θεωρία.

Εντούτοις οι θεωρητικοί των χορδών σκόνταφταν συνεχώς σε ένα σημαντικό εμπόδιο. Όταν κάποιος ασχολείται με τη θεωρητική φυσική, αντιμετωπίζει συχνά εξισώσεις υπερβολικά δύσκολες τόσο στην ερμηνεία όσο και στην ανάλυσή τους. Οι φυσικοί βέβαια δεν το βάζουν κάτω και προσπαθούν να λύσουν τις εξισώσεις προσεγγιστικά. Στη θεωρία χορδών επικρατεί ακόμη πιο δύσκολη κατάσταση. Μέχρι και ο προσδιορισμός των ίδιων

των εξισώσεων έχει αποδειχθεί τόσο δύσκολος, που μόνο προσεγγιστικές εκδοχές τους έχουν συναχθεί μέχρι στιγμής. Οι θεωρητικοί των χορδών περιορίζονται συνεπώς στην εύρεση προσεγγιστικών λύσεων σε προσεγγιστικές εξισώσεις. Λίγα χρόνια μετά τη δραματική πρόοδο που συντελέστηκε κατά τη διάρκεια της πρώτης επανάστασης των υπερχορδών, οι φυσικοί ανακάλυψαν ότι οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούσαν ήταν ανεπαρκείς και δεν έδιναν απάντηση σε πλήθος ουσιαστικών ερωτημάτων, εμποδίζοντας την περαιτέρω εξέλιξη. Εφόσον δεν είχαν συγκεκριμένες προτάσεις για τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν να αντικατασταθούν οι προσεγγιστικές μέθοδοι, πολλοί φυσικοί που έκαναν έρευνες στον τομέα της θεωρίας χορδών αποθαρρύνθηκαν και επέστρεψαν στα παλιά. Για όσους παρέμειναν, τα τέλη της δεκαετίας του 1980 και οι αρχές της δεκαετίας του 1990 ήταν περίοδος δοκιμασίας. Η θεωρία χορδών, όμορφη και γεμάτη υποσχέσεις, έμοιαζε με θησαυρό, κλειδωμένο και ασφαλισμένο σε ένα θησαυροφυλάκιο που φαίνοταν μόνο μέσα από μια προκλητική τρυπούλα. Μας καλούσε κοντά της, αλλά κανείς δεν είχε το κλειδί να ξεκλειδώσει. Μεγάλες περίοδοι επιστημονικής ανομβρίας διακόπτονταν κατά καιρούς από σημαντικές ανακαλύψεις, αλλά ήταν σαφές για όλους τους ενδιαφερομένους ότι απαιτούνταν νέες μέθοδοι, αρκετά ισχυρές ώστε να ξεπεράσουν τις προηγούμενες προσεγγίσεις.

Τότε, σε μια συναρπαστική διάλεξη στο συνέδριο περί Χορδών που έγινε το 1995 στο Πανεπιστήμιο Νότιας Καλιφόρνιας –μια διάλεξη που κατέπληξε ένα πολυπληθές ακροατήριο, στο οποίο συμμετείχαν οι χορυφαίοι φυσικοί του κόσμου–, ο Edward Witten ανακοίνωσε ένα σχέδιο για το επόμενο βήμα, δίνοντας έτσι το έναυσμα για τη «δεύτερη επανάσταση των υπερχορδών». Οι θεωρητικοί των χορδών, μέχρι την ώρα που γράφεται αυτό το βιβλίο, εργάζονται πυρετωδώς για να βελτιώσουν ένα σύνολο νέων μεθόδων οι οποίες υπόσχονται ότι θα ξεπεράσουν τα θεωρητικά εμπόδια που υπήρχαν προηγουμένως. Όσες δυσκολίες βρίσκονται μπροστά μας θα δοκιμάσουν σκληρά τη δεξιοτεχνία των καλύτερων θεωρητικών των

υπερχορδών στον κόσμο, αλλά το φως στην άκρη του τούνελ, αν και απέχουμε πολύ ακόμη, αρχίζει να αχνοφαίνεται.

Σε αυτό το χεφάλαιο και σε άλλα που θα ακολουθήσουν, θα περιγράψουμε τις έννοιες της θεωρίας χορδών που προέκυψαν από την πρώτη επανάσταση των υπερχορδών και το έργο που ακολούθησε. Σε ορισμένα σημεία θα επισημάνουμε τις νέες ιδέες που ξεπηδούν από τη δεύτερη επανάσταση των υπερχορδών. η συζήτησή μας γι' αυτές τις πιο πρόσφατες εξελίξεις θα ξεχινήσει στα Κεφάλαια 12 και 13.

Πάλι τα άτομα των Ελλήνων;

Όπως σημειώσαμε στην αρχή αυτού του χεφαλαίου και όπως δείχνει στο Σχήμα 1.1, η θεωρία χορδών υποστηρίζει ότι, αν τα υποτιθέμενα σωματίδια του βασικού μοντέλου εξετάζονταν με ακρίβεια κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μας επιτρέπουν οι σημερινές μας δυνατότητες, θα φαινόταν πως το καθένα αποτελείται από μια απλή, μικροσκοπική, παλλόμενη χορδή σε σχήμα βρόχου.

Για λόγους που θα ξεκαθαρίσουμε παρακάτω, το μήκος μιας συνηθισμένης χορδής είναι όσο περίπου το μήκος Planck, δηλαδή εκατό δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων (10^{20}) φορές μικρότερη από έναν ατομικό πυρήνα. Δεν είναι λοιπόν παράξενο που τα σημερινά πειράματα δεν μπορούν να φανερώσουν τη μικροσκοπικά νηματώδη υφή της ύλης: οι χορδές είναι υπερβολικά μικρές ακόμη και για τις κλίμακες των υποατομικών σωματιδίων. Θα χρειαζόμαστε έναν ατομικό επιταχυντή εκατομμύρια δισεκατομμυρίων φορές πιο ισχυρό από αυτούς που έχουν κατασκευαστεί για να δούμε ότι μια χορδή δεν είναι σημειακό σωματίδιο.

Θα περιγράψουμε σε λίγο τις απίστευτες συνέπειες που προκύπτουν από την αντικατάσταση των σημειακών σωματιδίων με χορδές, αλλά πρώτα ας δούμε κάτι πιο βασικό: Από τι είναι φτιαγμένες οι χορδές;

Υπάρχουν δύο δυνατές απαντήσεις στο ερώτημα αυτό. Σύμ-

φωνα με την πρώτη, οι χορδές είναι θεμελιώδεις – είναι τα «άτομα», τα άτμητα συστατικά έτσι όπως τα εννοούσαν οι αρχαίοι Έλληνες. Όντας αναμφίβολα τα μικρότερα συστατικά του κόσμου, αποτελούν το τέλος της διαδρομής – την τελευταία μπάμπουσκαστα αναρίθμητα στρώματα της ολοένα και λεπτότερης δομής του μικρόκοσμου. Από τη σκοπιά αυτή, μολονότι οι χορδές έχουν διαστάσεις, δεν έχουν σύσταση. Αν οι χορδές ήταν φτιαγμένες από κάτι ακόμα μικρότερο, δεν θα ήταν θεμελιώδεις. Αντίθετα τότε, αυτό που θα συνιστούσε τις χορδές θα τις αντικαθιστούσε αμέσως και θα χαρακτηριζόταν δικαιωματικά ως το πλέον θεμελιώδες συστατικό της φύσης. Για να χρησιμοποιήσουμε τη γλωσσολογική αναλογία, οι παράγραφοι φτιάχνονται από προτάσεις, οι προτάσεις από λέξεις και οι λέξεις από γράμματα. Τι φτιάχνει τα γράμματα; Από γλωσσολογική σκοπιά, αυτό είναι το τέλος της διαδρομής. Τα γράμματα είναι γράμματα – αποτελούν τους θεμέλιους λίθους δόμησης της γραπτής γλώσσας· δεν υφίσταται λεπτότερη υποχείμενη δομή. Δεν έχει νόημα να ρωτάμε για τη σύστασή τους. Παρομοίως, μια χορδή είναι απλώς μια χορδή – αφού δεν υπάρχει τίποτε πιο θεμελιώδες από αυτή, μια χορδή δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από κάποια άλλη ουσία.

Αυτή είναι η πρώτη απάντηση. Η δεύτερη στηρίζεται στο απλό γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε ακόμη αν η θεωρία χορδών είναι σωστή, πόσο μάλλον τελική θεωρία. Αν η θεωρία χορδών αποδειχθεί τελικά αναληθής, τότε θα μπορέσουμε να ξεχάσουμε τις χορδές και το ανούσιο ερώτημα για τη σύστασή τους. Μολονότι υπάρχει αυτό το ενδεχόμενο, η έρευνα μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1980 αποδεικνύει με επιχειρήματα ότι είναι μάλλον απίθανο. Άλλα η ιστορία σίγουρα μας διδάσκει πως κάθε φορά που κατανοούμε σε ακόμα μεγαλύτερο βάθος το σύμπαν, ανακαλύπτουμε ένα ακόμη λεπτότερο επίπεδο της ύλης που αποτελείται από ακόμα πιο μικροσκοπικά συστατικά. Κι έτσι, ένα άλλο ενδεχόμενο, στην περίπτωση που οι χορδές αποτύχουν να αναγνωριστούν ως η τελική θεωρία, είναι να αποτελούν άλλο ένα στρώμα στο ρευμάτιδι του κόσμου, ένα στρώμα που γίνεται μεν ορατό στο μήκος Planck, αλ-

λά όχι πάντως το τελικό. Στην περίπτωση αυτή, οι χορδές μπορεί να αποτελούνται από ακόμη λεπτότερες δομές. Οι θεωρητικοί των χορδών έχουν προβάλει αυτό το ενδεχόμενο και εξακολουθούν να το εξετάζουν. Μέχρι στιγμής υπάρχουν συναρπαστικοί υπαινιγμοί σε θεωρητικές μελέτες ότι οι χορδές ενδέχεται να έχουν βαθύτερη δομή, αλλά δεν υπάρχουν έως σήμερα οριστικές ενδείξεις. Μόνο ο χρόνος και η εντατική έρευνα θα μπορέσουν να δώσουν την τελική απάντηση στο ερώτημα αυτό.

Πέρα από μερικές εικασίες που θα εκθέσουμε στα Κεφάλαια 12 και 15, στη συζήτησή μας εδώ θα αντιμετωπίζουμε τις χορδές με τον τρόπο που προτείνεται στην πρώτη απάντηση – θα τις θεωρούμε δηλαδή ως το πλέον θεμελιώδες συστατικό της φύσης.

Ενοποίηση μέσω της θεωρίας χορδών

Πέρα από την ανικανότητά του να ενσωματώσει τη βαρυτική δύναμη, το βασικό μοντέλο έχει κι άλλο ένα μειονέκτημα: αδυνατεί να δώσει εξήγηση για τις λεπτομέρειες της κατασκευής του. Γιατί η φύση επέλεξε τις συγκεκριμένες δυνάμεις και τα σωματίδια που περιγράψαμε σε προηγούμενα κεφάλαια και καταγράψαμε στους Πίνακες 1.1 και 1.2; Γιατί οι 19 παράμετροι που περιγράφουν τα συστατικά αυτά έχουν τις συγκεκριμένες τιμές; Μας δημιουργείται η αίσθηση ότι το πλήθος αυτών των συστατικών και οι αναλυτικές τους ιδιότητες φαίνονται μάλλον αυθαίρετα. Κρύβεται κάποιο βαθύτερο επίπεδο κατανόησης πίσω από αυτά τα φαινομενικά τυχαία συστατικά ή μήπως οι λεπτομερείς φυσικές ιδιότητες του σύμπαντος «επιλέχθηκαν» στην τύχη;

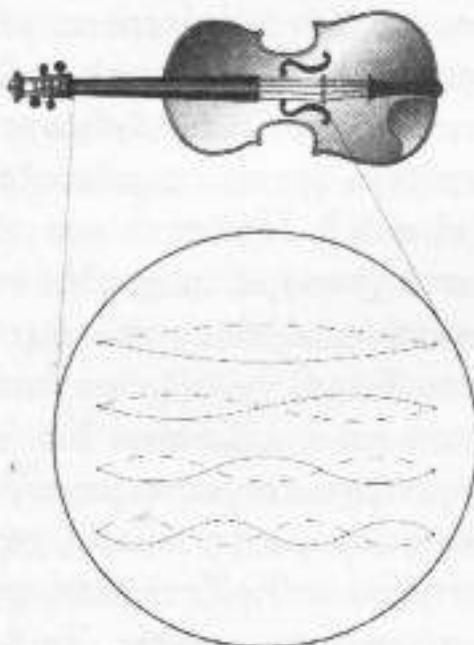
Το ίδιο το βασικό μοντέλο δεν μπορεί φυσικά να δώσει κάποια εξήγηση, καθώς εκλαμβάνει τα σωματίδια και τις ιδιότητές τους ως πειραματικά δεδομένα. Όπως ακριβώς ο δείκτης του χρηματιστηρίου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την αξία του χαρτοφυλακίου σας χωρίς να εισαγάγετε τα δεδομένα της αρχικής σας επένδυσης, έτσι και το βασικό μοντέλο δεν μπο-

ρεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει οποιαδήποτε πρόβλεψη χωρίς να εισαχθούν τα δεδομένα για τις ιδιότητες των θεμελιωδών σωματιδίων.⁶ Αφού οι πειραματικοί φυσικοί καταμετρήσουν με κάθε λεπτομέρεια αυτά τα δεδομένα, οι θεωρητικοί μπορούν κατόπιν να χρησιμοποιήσουν το βασικό μοντέλο για να κάνουν ελέγξιμες προβλέψεις, όπως τι θα συμβεί αν συγχεκριμένα σωματίδια συγκρουστούν μεταξύ τους σε έναν επιταχυντή. Λλλά το βασικό μοντέλο δεν μπορεί να εξηγήσει τις ιδιότητες των θεμελιωδών σωματιδίων στους Πίνακες 1.1 και 1.2, τουλάχιστον όχι περισσότερο απ' όσο μπορεί ο σημερινός δείκτης του χρηματιστηρίου να εξηγήσει την αρχική σας τοποθέτηση σε μετοχές πριν από δέκα χρόνια.

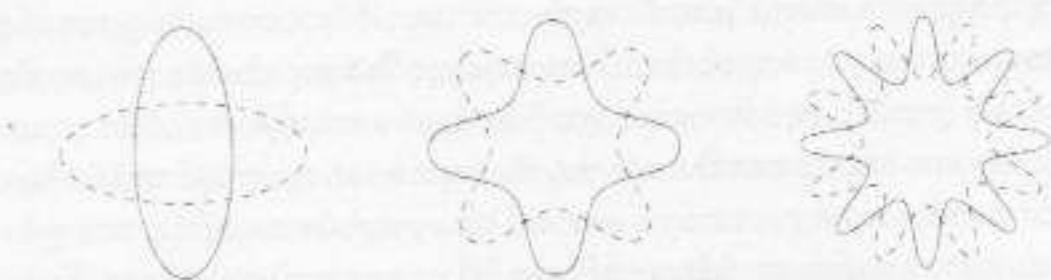
Μάλιστα, αν τα πειράματα είχαν αποκαλύψει κάποιο διαφορετικό σωματίδιο ως συστατικό του μικρόχοσμου, το οποίο ενδεχομένως θα αλληλεπιδρούσε με κάπως διαφορετικές δυνάμεις, αυτές οι μεταβολές θα μπορούσαν να ενσωματωθούν με σχετική ευκολία στο βασικό μοντέλο, αν εισάγονταν στη θεωρία διαφορετικά δεδομένα. Η δομή του βασικού μοντέλου, υπ' αυτή την έννοια, είναι υπερβολικά εύκαμπτη για να μπορεί να εξηγήσει τις ιδιότητες των θεμελιωδών σωματιδίων, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων.

Η θεωρία χορδών είναι εντελώς διαφορετική. Συνιστά ένα μοναδικό και άκαμπτο θεωρητικό οικοδόμημα. Δεν απαιτεί κανένα δεδομένο, πέρα από έναν και μόνο αριθμό, που περιγράφουμε παρακάτω, ο οποίος απαιτείται για να καθορίσει την χλίμακα των μετρήσεων. Όλες οι ιδιότητες του μικρόχοσμου βρίσκονται εντός των ορίων της ερμηνευτικής της ισχύος. Για να το καταλάβετε, ας εξετάσουμε πρώτα τις πιο οικείες σ' εμάς χορδές ενός βιολιού. Κάθε τέτοια χορδή μπορεί να φιλοξενήσει μια τεράστια ποικιλία (στην πραγματικότητα, ένα άπειρο πλήθος) διαφορετικών τρόπων ταλάντωσης, οι οποίοι είναι γνωστοί ως τρόποι συντονισμού, όπως αυτοί που εικονίζονται στο Σχήμα 6.1. Οι τρόποι συντονισμού είναι τρόποι κυμάτωσης όπου τα όρη και οι κοιλίες του χύματος ισαπέχουν και βρίσκονται ανάμεσα στα δύο σταθερά άκρα

της χορδής. Τα αυτιά μας διαχρίνουν τους διαφορετικούς αυτούς συντονισμένους τρόπους ταλάντωσης ως διαφορετικές μουσικές νότες. Οι χορδές της θεωρίας χορδών έχουν παρόμοιες ιδιότητες. Η χορδή μπορεί να εκτελέσει συντονισμένους τρόπους ταλάντωσης όταν τα ισαπέχοντα όρη και κοιλίες χωρούν ακριβώς στο χώρο που καταλαμβάνει. Μερικά παραδείγματα φαίνονται στο Σχήμα 6.2. Εδώ βρίσκεται η ουσία: όπως ακριβώς οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους ταλαντώνεται η χορδή του βιολιού παράγουν διαφορετικές νότες, έτσι και οι διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης μιας θεμελιώδους χορδής παράγουν διαφορετικές μάζες και δυνάμεις. Επειδή αυτό είναι πολύ σημαντικό, καλό θα ήταν να το επαναλάβουμε. Σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, οι ιδιότητες ενός στοιχειώδους «σωματιδίου» –η μάζα του και οι δυνάμεις του– καθορίζονται με ακρίβεια από τον τρόπο συντονισμού της εσωτερικής του χορδής.

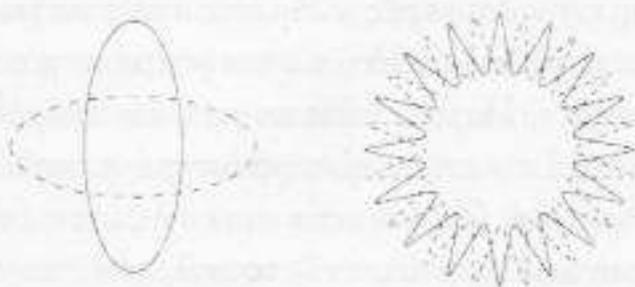


Σχήμα 6.1 Οι χορδές ενός βιολιού μπορούν να ταλαντώνονται έτσι ώστε ένας ακέραιος αριθμός ορέων και κοιλιών να χωράει ανάμεσα στα δύο άκρα τους.



Σχήμα 6.2 Οι βρόχοι στη θεωρία χορδών μπορούν να ταλαντώνονται όπως η χορδή του βιολιού. Ένας ακέραιος αριθμός ορέων και κοιλιών χωρίς επιβάση στο χώρο που καταλαμβάνει η χορδή.

Είναι εύκολο να κατανοήσουμε αυτή τη συσχέτιση αν αναφερθούμε στη μάζα ενός σωματιδίου. Η ενέργεια κάθε παλλόμενης χορδής εξαρτάται από το πλάτος –τη μέγιστη απομάκρυνση ανάμεσα σε μια κοιλία και σε ένα όρος– και το μήκος κύματος –την απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά όρη. Όσο μεγαλύτερο το πλάτος και όσο μικρότερο το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια. Αυτό συμφωνεί με ό,τι αναμένατε διαστητικά – πιο φρενήρεις τρόποι ταλάντωσης έχουν μεγαλύτερη ενέργεια, ενώ οι λιγότερο φρενήρεις μικρότερη. Δίνουμε δύο παραδείγματα στο Σχήμα 6.3. Πρόκειται και πάλι για κάτι οικείο, καθώς όσο πιο δυνατά χτυπάμε τις χορδές του βιολιού τόσο πιο έντονα ταλαντώνονται, ενώ όσες χτυπάμε πιο απαλά ταλαντώνονται ηπιότερα. Τώρα, γνωρίζουμε από την ειδική σχετικότητα ότι η ενέργεια και η μάζα είναι δύο όψεις του ίδιου νομίσματος: μεγαλύτερη ενέργεια σημαίνει μεγαλύτερη μάζα και αντιστρόφως. Έτσι, σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, η μάζα ενός στοιχειώδους σωματιδίου καθορίζεται από την ενέργεια της ταλάντωσης της εσωτερικής του χορδής. Τα βαρύτερα σωματίδια έχουν εσωτερικές χορδές που ταλαντώνονται με μεγαλύτερη ενέργεια, ενώ τα ελαφρύτερα έχουν χορδές που ταλαντώνονται με μικρότερη.



Σχήμα 6.3 Εντονότερη ταλάντωση συνεπάγεται μεγαλύτερη ενέργεια.

Εφόσον η μάζα ενός σωματιδίου καθορίζει τις βαρυτικές του ιδιότητες, βλέπουμε ότι υπάρχει μια άμεση σχέση ανάμεσα στον τρόπο ταλάντωσης μιας χορδής και την αντίδραση ενός σωματιδίου στη βαρυτική δύναμη. Μολονότι η συλλογιστική που εμπλέκεται είναι κάπως πιο αφηρημένη, οι φυσικοί έχουν ανακαλύψει ότι υφίσταται αντίστοιχη ευθυγράμμιση ανάμεσα σε άλλες λεπτομέρειες που σχετίζονται με τις μορφές ταλάντωσης μιας χορδής και τις ιδιότητές της όσον αφορά τις άλλες δυνάμεις. Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό, το ασθενές και το ισχυρό φορτίο που φέρει μια συγκεκριμένη χορδή καθορίζονται με ακρίβεια από τον τρόπο με τον οποίο ταλαντώνεται. Επιπλέον, η ίδια ακρίβως ιδέα εφαρμόζεται και στα σωματίδια φορείς. Τα φωτόνια, τα μποζόνια ασθενούς βαθμίδας και τα γλοιόνια δεν είναι παρά διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης που εκτελούν οι χορδές. Έχει ιδιαίτερη σημασία το γεγονός ότι απ' όλους τους τρόπους με τους οποίους ταλαντώνονται οι χορδές, υπάρχει ένας που ταιριάζει με τις ιδιότητες του βαρυτού, κάτι που βεβαιώνει ότι η βαρύτητα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της θεωρίας χορδών.⁷

Βλέπουμε λοιπόν ότι, σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, οι παρατηρούμενες ιδιότητες κάθε στοιχειώδους σωματιδίου προκύπτουν επειδή η εσωτερική του χορδή ταλαντώνεται σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Η αντίληψη αυτή διαφέρει ριζικά από εκείνη που ασπάζονται οι φυσικοί πριν από την ανακάλυψη της θεωρίας χορδών: σύμφωνα με την παλαιότερη αντίληψη, μπορού-

με να εξηγήσουμε τις διαφορές ανάμεσα στα στοιχειώδη σωματίδια λέγοντας ότι κάθε σωματίδιο είναι «κομμένο και ραμμένο από διαφορετικό ύφασμα». Παρότι κάθε σωματίδιο θεωρείται στοιχειώδες, το «υλικό» από το οποίο είναι φτιαγμένο καθένα από αυτά θεωρείται διαφορετικό. Το «υλικό» των ηλεκτρονίων, για παράδειγμα, έχει αρνητικό φορτίο, ενώ το «υλικό» των νετρίνων δεν έχει φορτίο. Η θεωρία χορδών αλλάζει ριζικά την εικόνα αυτή, διακηρύσσοντας ότι το «υλικό» όλης της ύλης και όλων των δυνάμεων είναι το ίδιο. Κάθε στοιχειώδες σωματίδιο αποτελείται από μία και μοναδική χορδή –με άλλα λόγια, κάθε σωματίδιο είναι μία ξεχωριστή χορδή– και όλες οι χορδές είναι απολύτως ίδιες. Οι διαφορές ανάμεσα στα σωματίδια προκύπτουν επειδή οι αντίστοιχες χορδές τους ταλαντώνονται σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτά που εμφανίζονται ως διαφορετικά στοιχειώδη σωματίδια είναι στην πραγματικότητα διαφορετικές «κνότες» μιας στοιχειώδους χορδής. Το σύμπαν –που αποτελείται από έναν τεράστιο αριθμό τέτοιων παλλόμενων χορδών– είναι μια ορχήστρα κοσμικού μεγέθους.

Τα παραπάνω δείχνουν πώς η θεωρία χορδών μάς παρέχει ένα πραγματικά υπέροχο ενοποιητικό πλαίσιο. Κάθε σωματίδιο ύλης αλλά και κάθε δύναμη αποτελούνται από μια χορδή της οποίας ο τρόπος ταλάντωσης συνιστά το «δακτυλικό της αποτύπωμα». Καθώς κάθε φυσικό γεγονός, διαδικασία ή συμβάν στο πλέον θεμελιώδες επίπεδο του σύμπαντος μπορεί να περιγραφεί συναρτήσει δυνάμεων οι οποίες ενεργούν μεταξύ αυτών των στοιχειωδών υλικών συστατικών, η θεωρία χορδών υπόσχεται μια μοναδική ενοποιημένη περιγραφή του φυσικού μας σύμπαντος που θα περιλαμβάνει τα πάντα: μια Θεωρία Των Πάντων (ΘΤΙΙ).

Η μουσική της θεωρίας χορδών

Μολονότι η θεωρία χορδών καταργεί την προηγούμενη αντίληψη περί στοιχειωδών σωματιδίων δίχως εσωτερική δομή, η παλιά

θεωρία ξεπερνιέται δύσκολα, ιδίως όταν παρέχει μια ακριβή περιγραφή της πραγματικότητας μέχρι και σε πολύ μικρές κλίμακες. Ακολουθώντας λοιπόν την χοινή πρακτική, θα συνεχίσουμε να αναφερόμαστε σε «στοιχειώδη σωματίδια», αλλά θα εννοούμε πάντα «αυτά που μοιάζουν σαν στοιχειώδη σωματίδια αλλά στην πραγματικότητα είναι μικροσκοπικές παλλόμενες χορδές». Στην προηγούμενη ενότητα αναφέραμε ότι οι μάζες και οι δυνάμεις αυτών των στοιχειωδών σωματιδίων είναι αποτέλεσμα του τρόπου με τον οποίο ταλαντώνονται οι αντίστοιχες χορδές. Αυτό μας οδηγεί στο ακόλουθο συμπέρασμα: αν μπορέσουμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια τους τρόπους ταλάντωσης που επιτρέπεται να κάνουν οι θεμελιώδεις χορδές –τις «νότες», σαν να λέμε, που μπορούν να παίξουν– θα είμαστε σε θέση να εξηγήσουμε τις παρατηρούμενες ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων. Για πρώτη φορά, συνεπώς, η θεωρία χορδών στήνει ένα πλαίσιο το οποίο μπορεί να εξηγήσει τις ιδιότητες όσων σωματιδίων παρατηρούμενες στη φύση.

Στο στάδιο αυτό λοιπόν θα πρέπει να «πιάσουμε» μια χορδή και να τη «χτυπήσουμε» με όλους τους τρόπους, ώστε να καθορίσουμε όλους τους δυνατούς τρόπους ταλάντωσης. Αν η θεωρία χορδών έχει δίκιο, θα βρούμε ότι οι δυνατοί τρόποι αποδίδουν ακριβώς τις παρατηρούμενες ιδιότητες της ύλης και των σωματιδίων-φρέων των Πινάκων 1.1 και 1.2. Φυσικά, μια χορδή είναι υπερβολικά μικρή για να εκτελέσουμε το πείραμα ακριβώς όπως το περιγράψαμε. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας μια μαθηματική προσομοίωση μπορούμε να «χτυπήσουμε» θεωρητικά μια χορδή. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, πολλοί οπαδοί της θεωρίας χορδών πίστευαν ότι η μαθηματική ανάλυση που απαιτείται για να γίνει αυτό δεν θα αργούσε να εξηγήσει έως και την παραμικρή ιδιότητα του σύμπαντος στο πλέον μικροσκοπικό επίπεδο. Ορισμένοι ενθουσιώδεις φυσικοί υποστήριξαν ότι η ΘΤΠ είχε ανακαλυφθεί τελικά. Οι γνώσεις όμως που αποκτήσαμε τα αμέσως επόμενα δέκα χρόνια μάς έδειξαν ότι η ευφορία που είχε δημιουργήσει αυτή τη πεποίθηση ήταν πρόωρη. Η θεωρία χορδών μοιάζει με μια ΘΤΠ, αλλά υπάρχουν αρκετές δυσκολίες οι οποίες μας εμποδίζουν

να προσδιορίσουμε το φάσμα των ταλαντώσεων μιας χορδής, με την ακρίβεια που απαιτείται ώστε να γίνουν συγκρίσεις με τα πειραματικά αποτελέσματα. Άρα προς το παρόν δεν γνωρίζουμε αν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του σύμπαντός μας, που συνοψίζονται στους Πίνακες 1.1 και 1.2, μπορούν να εξηγηθούν από τη θεωρία χορδών. Όπως θα συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 9, κάτω από ορισμένες σαφείς προϋποθέσεις, η θεωρία χορδών μπορεί να δώσει ένα «σύμπαν» με ιδιότητες που βρίσκονται σε ποιοτική συμφωνία με τα γνωστά δεδομένα για τα σωματίδια και τις δυνάμεις, αλλά η εξαγωγή λεπτομερών αριθμητικών προβλέψεων από τη θεωρία ξεπερνά προς το παρόν τις δυνατότητές μας. Κι έτσι, μολονότι το πλαίσιο της θεωρίας χορδών είναι ικανό, σε αντίθεση με το βασικό μοντέλο, να εξηγήσει γιατί τα σωματίδια και οι δυνάμεις διαθέτουν τις συγχεκριμένες ιδιότητες, δεν έχουμε καταφέρει, μέχρι σήμερα, να το εκμεταλλευτούμε. Δεν πρέπει να ξεχνάμε όμως ότι η θεωρία χορδών είναι μια πλούσια και ισχυρή θεωρία, και μπορεί να μη γνωρίζουμε πλήρως τις ιδιότητές της, ωστόσο έχουμε καταφέρει να κατανοήσουμε μια σειρά από νέα φυσικά φαινόμενα που προκύπτουν από τη θεωρία, όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα συζητήσουμε λεπτομερώς τη φύση των δυσχερειών, αλλά είναι καλό να τις κατανοήσουμε πρώτα σε ένα γενικότερο επίπεδο. Οι χορδές στον κόσμο γύρω μας εμφανίζονται με μια ποικιλία τάσεων. Το χορδόνι που δένουμε τα παπούτσια μας, για παράδειγμα, είναι συνήθως σχετικά χαλαρό σε σύγκριση με τη χορδή ενός βιολιού. Και τα δύο δέχονται, με τη σειρά τους, πολύ μικρότερη τάση απ' όση δέχονται οι ατσάλινες χορδές ενός πιάνου. Για να μπορέσει η θεωρία χορδών να καθορίσει την κλίμακά της, πρέπει να γνωρίζει ένα μοναδικό αριθμό: την τάση των χορδών. Πώς καθορίζεται αυτή η τάση; Αν μπορούσαμε να «χτυπήσουμε» μια θεμελιώδη χορδή, θα βρίσκαμε πόσο δύσκαμπτη είναι και με αυτό τον τρόπο θα μετρούσαμε την τάση της, όπως περίπου κάνουμε για να μετρήσουμε την τάση άλλων, πιο οικείων σ' εμάς, χορδών. Άλλα αφού οι θεμελιώδεις

χορδές είναι τόσο μικρές, δεν μπορούμε να ακολουθήσουμε αυτή την προσέγγιση και απαιτείται μια πιο έμμεση μέθοδος. Το 1974, όταν οι Scherk και Schwarz πρότειναν ότι ένας συγκεκριμένος τρόπος ταλάντωσης των χορδών ήταν το βαρυτόνιο, μπόρεσαν να εκμεταλλευτούν μια τέτοια έμμεση προσέγγιση και να προβλέψουν έτσι την τάση των χορδών της θεωρίας χορδών. Οι υπολογισμοί τους αποκάλυψαν ότι το μέτρο της δύναμης, που μεταδίδεται από την προτεινόμενη ταλάντωση της χορδής που αντιστοιχεί στο βαρυτόνιο, είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την τάση της χορδής. Και καθώς το βαρυτόνιο υποτίθεται ότι μεταδίδει τη βαρυτική δύναμη –μια αρκετά μικρή δύναμη–, βρήκαν ότι αυτό συνεπάγεται μια κολοσσιαία τάση της τάξης των χιλίων δισεκατομμυρίων δισεκατομμυρίων δισεκατομμυρίων δισεκατομμυρίων (10^{39}) τόνων, τη λεγόμενη τάση Planck. Οι θεμελιώδεις χορδές κατά συνέπεια είναι εξαιρετικά δύσκαμπτες αν συγχριθούν με τις χορδές που ξέρουμε. Αυτό έχει τρεις σημαντικές συνέπειες.

Τρεις συνέπειες των δύσκαμπτων χορδών

Πρώτον, ενώ τα άκρα μιας χορδής βιολιού ή πιάνου είναι σταθερά στερεωμένα, γεγονός που εξασφαλίζει ότι έχουν σταθερό μήκος, δεν συμβαίνει κάτι ανάλογο το οποίο να καθορίζει το μέγεθος μιας θεμελιώδους χορδής. Αντίθετα, η τεράστια τάση της χορδής αναγκάζει τους βρόγους της θεωρίας χορδών να συστέλλονται απειροελάχιστα. Ακριβείς υπολογισμοί δείχνουν ότι η τάση Planck οδηγεί σε ένα τυπικό μέγεθος χορδής που είναι ίσο με το μήκος Planck – 10^{-33} cm – όπως σημειώσαμε και νωρίτερα.⁸

Δεύτερον, εξαιτίας της τεράστιας τάσης, η τυπική ενέργεια ενός παλλόμενου βρόγου στη θεωρία χορδών είναι εξαιρετικά μεγάλη. Για να το καταλάβουμε, αρχεί να θυμηθούμε ότι όσο πιο πολύ τεντώνεται μια χορδή τόσο δυσκολότερο είναι να την κάνουμε να ταλαντωθεί. Για παράδειγμα, είναι πολύ πιο εύκολο να κάνουμε μια χορδή βιολιού να ταλαντωθεί απ' ό,τι μια χορδή πιά-

νου. Δύο χορδές, κατά συνέπεια, που έχουν διαφορετική τάση και ταλαντώνονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο δεν θα έχουν την ίδια ενέργεια. Η χορδή με τη μεγαλύτερη τάση θα έχει περισσότερη ενέργεια από τη χορδή με τη μικρότερη τάση, καθώς απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να τεθεί σε κίνηση.

Αυτό μας επισημαίνει το γεγονός ότι η ενέργεια μιας παλλόμενης χορδής καθορίζεται από δύο πράγματα: τον ακριβή τρόπο με τον οποίο ταλαντώνεται (όσο πιο γρήγορα τόσο μεγαλύτερη ενέργεια θα έχει) και την τάση της χορδής (μεγαλύτερη τάση αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ενέργεια). Με μια πρώτη ματιά ίσως νομίσετε ότι ολοένα πιο ήπιοι τρόποι ταλάντωσης μιας χορδής –ολοένα μικρότερα πλάτη και λιγότερα όρη και κοιλίες– μπορεί να συνεπάγονται όλο και λιγότερη ενέργεια. Αλλά, όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4 σε ένα διαφορετικό παράδειγμα, η κβαντομηχανική μιας λέει ότι αυτός ο συλλογισμός δεν είναι σωστός. Κατά την κβαντομηχανική όλες οι ταλαντώσεις ή οι κυματικές διαταραχές μπορούν να υπάρχουν μόνο σε διαχριτές ποσότητες. Για να το πούμε πιο απλά, όπως ακριβώς το χρηματικό ποσό που διαθέτει κάθε έγκλειστος στην αποθήκη είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της αξίας του νομίσματος που του εμπιστευτήκαμε, έτσι και η ενέργεια κάποιας ταλάντωσης μιας χορδής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας ελάχιστης ενέργειακής τιμής. Συγκεκριμένα, αυτή η ελάχιστη ενέργειακή τιμή είναι ανάλογη προς την τάση της χορδής (και ανάλογη επίσης προς τον αριθμό ορέων και κοιλιών του συγκεκριμένου τρόπου ταλάντωσης), ενώ ο ακέραιος πολλαπλασιαστής καθορίζεται από το πλάτος της ταλάντωσης.

Το κλειδί στην παρούσα συζήτηση είναι το εξής: αφού οι ελάχιστες ενέργειακές υποδιαιρέσεις είναι ανάλογες προς την τάση της χορδής και αφού η τάση αυτή είναι πολύ μεγάλη, οι θεμελιώδεις ελάχιστες ενέργειες είναι, στις συνήθεις κλίμακες της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων, αντίστοιχα πολύ μεγάλες. Είναι πολλαπλάσια της ενέργειας Planck. Για να αποκτήσετε μια αισθηση της κλίμακας, αν μετατρέψουμε την ενέργεια Planck σε μάζα χρησιμοποιώντας τον περίφημο τύπο του Einstein $E = mc^2$,

Θα αντιστοιχεί σε μάζα δέκα δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων (10^{19}) φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του πρωτονίου. Αυτή η γιγαντιαία μάζα –σε σχέση με τα μεγέθη των στοιχειωδών σωματιδίων– είναι γνωστή ως μάζα Planck· ισούται περίπου με τη μάζα ενός κόκκου σκόνης ή με ένα εκατομμύριο βακτήρια μέσου μεγέθους. Κι έτσι, το τυπικό ισοδύναμο μάζας ενός παλλόμενου βρόχου στη θεωρία χορδών ισούται σε γενικές γραμμές με κάποιο ακέραιο (1, 2, 3, ...) πολλαπλάσιο της μάζας Planck. Οι φυσικοί συχνά διατυπώνουν το παραπάνω συμπέρασμα λέγοντας ότι η «φυσική» ή «τυπική» ενεργειακή κλίμακα (και συνεπώς η κλίμακα μάζας) της θεωρίας χορδών είναι η κλίμακα Planck.

Αυτό εγείρει ένα χρίσμα ερώτημα, που σχετίζεται άμεσα με το στόχο να αναπαραχθούν οι ιδιότητες των σωματιδίων των Πινάκων 1.1 και 1.2: Αν η «φυσική» ενεργειακή κλίμακα της θεωρίας χορδών είναι κάπου δέκα δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων φορές μεγαλύτερη αυτής ενός πρωτονίου, πώς γίνεται η θεωρία αυτή να δώσει μια εξήγηση για τα πολύ ελαφρύτερα σωματίδια –τα ηλεκτρόνια, τα κουάρχ, τα φωτόνια κ.ο.κ.– που αποτελούν τον κόσμο γύρω μας;

Η απάντηση, για άλλη μια φορά, έρχεται από την κβαντομηχανική. Η αρχή της απροσδιοριστίας εξασφαλίζει ότι τίποτε και ποτέ δεν βρίσκεται σε απόλυτη ηρεμία. Όλα τα αντικείμενα κινούνται «κβαντό-νευρικά», γιατί, αν δεν το έκαναν, θα μπορούσαμε να γνωρίζουμε πού ακριβώς βρίσκονται και με ποια ακριβώς ταχύτητα κινούνται, σε αντίθεση με όσα υποστήριζε ο Heisenberg. Το ίδιο ισχύει και για τους βρόχους της θεωρίας χορδών· ανεξάρτητα από το πόσο ήρεμη εμφανίζεται μια χορδή, θα εκτελεί πάντοτε κάποια κβαντική ταλάντωση. Στη δεκαετία του 1970 έγινε μια αξιοσημείωτη ανακάλυψη: βρέθηκε ότι μπορούν να υπάρξουν ενεργειακές εξουδετερώσεις ανάμεσα σε αυτά τα κβαντικά τρεμουλιάσματα και τις πιο προσιτές στον ανθρώπινο νου ταλαντώσεις των χορδών, που συζητήσαμε παραπάνω και που απεικονίζονται στα Σχήματα 6.2 και 6.3. Στην πράξη, λόγω των παράξενων ιδιοτήτων της κβαντομηχανικής, η ενέργεια των κβαντι-

κών τρεμουλιασμάτων μιας χορδής είναι αρνητική και αυτό μειώνει τη συνολική ενέργεια μιας παλλόμενης χορδής κατά μία ποσότητα περίπου ίση με την ενέργεια Planck. Αυτό σημαίνει ότι οι ταλαντώσεις μικρότερης ενέργειας μιας χορδής έχουν καθαρή ενέργεια μικρότερη και όχι περίπου ίση με την ενέργεια Planck, όπως αφελώς περιμέναμε, λόγω εξουδετερώσεων. Η μάζα που ισοδυναμεί σε αυτές τις ενέργειες τακιριάζει στα σωματίδια της ύλης και τις δυνάμεις που παρουσιάζονται στους Πίνακες 1.1 και 1.2. Αυτές οι ταλαντώσεις ελάχιστης ενέργειας συνδέουν τη θεωρητική περιγραφή των χορδών με τον πειραματικά προσεγγίσιμο χόσμο της φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων. Οι Seherk και Schwarz έδωσαν ένα σημαντικό παράδειγμα βρίσκοντας ότι στον τρόπο ταλάντωσης, του οποίου οι ιδιότητες ανταποκρίνονται σε αυτές του βαρυτονίου, οι ενεργειακές εξουδετερώσεις είναι πλήρεις, δίνοντας έτσι ένα σωματίδιο βαρυτικής δύναμης με μηδενική μάζα. Αυτό ακριβώς είναι το βαρυτόνιο: η βαρυτική δύναμη διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός και μόνο σωματίδια χωρίς μάζα μπορούν να ταξιδεύουν με αυτή τη μέγιστη ταχύτητα. Όμως οι συνδυασμοί ταλαντώσεων χαμηλής ενέργειας αποτελούν την εξαίρεση και όχι τον κανόνα. Η πιο συνηθισμένη θεμελιώδης παλλόμενη χορδή αντιστοιχεί σε ένα σωματίδιο η μάζα του οποίου είναι δισεκατομμύρια δισεκατομμυρίων φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του πρωτονίου.

Αυτό μας λέει ότι τα πιο ελαφρά σε σύγκριση με τα άλλα σωματίδια των Πινάκων 1.1 και 1.2 προκύπτουν, κατά μία έννοια, από τη λεπτή ομίχλη που σκεπάζει τον ταραγμένο ωκεανό των χορδών με μεγαλύτερη ενέργεια. Ακόμη και ένα σωματίδιο τόσο βαρύ όσο το χορυφαίο κουάρκ, με μάζα περίπου 189 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του πρωτονίου, μπορεί να προκύψει από μια παλλόμενη χορδή μόνο εάν η τεράστια ενέργεια της χορδής στην κλίμακα Planck εξουδετερώθει από τα τρεμουλιάσματα της κβαντικής απροσδιοριστίας, ώστε να μείνει ένα ποσοστό μικρότερο από το ένα στα εκατό εκατομμύρια δισεκατομμύρια. Είναι σαν να παίζετε ένα τηλεπαιχνίδι όπου ο παρουσιαστής σάς δίνει δέκα δι-

σεκατομμύρια δισεκατομμυρίων ευρώ και για να κερδίσετε σας προκαλεί να αγοράσετε προϊόντα ξοδεύοντας –εξουδετερώνοντας, σαν να λέμε – όλα σας τα χρήματα εκτός από τα 189 ευρώ, ούτε ένα περισσότερο ή λιγότερο. Μια τόσο υπέρογχη δαπάνη, που θα απαιτούσε από τον αγοραστή να ξοδέψει ένα συγχεκριμένο ποσό, χωρίς να γνωρίζει την ακριβή τιμή κάθε ξεχωριστού αντικειμένου, θα δοκίμαζε τις ικανότητες και των πλέον δεινών αγοραστών του κόσμου. Στη θεωρία χορδών, όπου το νόμισμα είναι ενεργειακό και όχι χρηματικό, προσεγγιστικοί υπολογισμοί έχουν δείξει οριστικά ότι μπορούν να συμβούν αντίστοιχες εξουδετερώσεις ενέργειας, αλλά, για λόγους που θα γίνονται όλο και πιο εμφανείς στα κεφάλαια που ακολουθούν, οι υπάρχουσες θεωρητικές μας δυνατότητες δεν μας επιτρέπουν να επαληθεύσουμε με μεγάλη ακρίβεια αυτές τις εξουδετερώσεις. Ωστόσο, όπως αφήσαμε να εννοηθεί προηγουμένως, θα δούμε ότι πολλές άλλες ιδιότητες της θεωρίας χορδών είναι λιγότερο ευπαθείς σε τέτοιες λεπτομέρειες και μπορούν να συναχθούν και να κατανοθούν με σιγουριά.

Αυτό μας οδηγεί στην τρίτη συνέπεια που προκύπτει από την πολύ μεγάλη τιμή της τάσης των χορδών. Οι χορδές μπορούν να ταλαντώνονται με άπειρους διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 6.2 δείξαμε τα αρχικά στάδια μιας άπειρης ακολουθίας δυνατοτήτων, που χαρακτηρίζονται από έναν ολοένα αυξανόμενο αριθμό ορέων και κοιλιών. Δεν σημαίνει όμως αυτό ότι θα πρέπει αντίστοιχα να υπάρχει και μια άπειρη ακολουθία στοιχειώδων σωματιδίων, κάτι που φαινομενικά έρχεται σε σύγκρουση με όσα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 1.1 και 1.2;

Η απάντηση είναι ναι: αν η θεωρία χορδών είναι σωστή, καθεμά από τις άπειρες ταλαντώσεις των χορδών θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ένα στοιχειώδες σωματίδιο. Οφείλουμε να επισημάνουμε ωστόσο ότι ουσιώδες: η υψηλή τάση των χορδών εξασφαλίζει ότι εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις όλες οι άλλες ταλαντώσεις θα αντιστοιχούν σε εξαιρετικά βαριά σωματίδια (οι ελάχιστες αυτές εξαιρέσεις αποτελούν ταλαντώσεις ελάχιστης ενέρ-

γειας, που παρουσιάζουν σχεδόν πλήρεις εξουδετερώσεις ενέργειας λόγω του χβαντικού «τρεμουλιάσματος» των χορδών). Και πάλι, εδώ με τον όρο βαριά εννοούμε σωματίδια πολλές φορές βαρύτερα από τη μάζα Planck. Καθώς οι ισχυρότεροι επιταχυντές σωματιδίων που έχουν χατασκευαστεί μπορούν να φτάσουν σε τάξεις ενέργειας μόνο χίλιες φορές τη μάζα του πρωτονίου, μικρότερη δηλαδή από το ένα εκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού της ενέργειας Planck, βρισκόμαστε ακόμη μακριά από τη δυνατότητα να αναζητήσουμε στο εργαστήριο κάποιο από τα νέα σωματίδια που προβλέπει η θεωρία χορδών.

Ωστόσο υπάρχουν πιο έμμεσοι τρόποι για να τα αναζητήσουμε. Για παράδειγμα, οι ενέργειες που σχετίζονται με τη γέννηση του σύμπαντος, πρέπει να ήταν αρκετά μεγάλες ώστε να παρήγαγαν άφθονα τέτοια σωματίδια. Γενικά θα περίμενε κανείς ότι δεν θα διατηρούνταν μέχρι σήμερα, γιατί αυτά τα υπερβαρέα σωματίδια είναι συνήθως ασταθή και διασπώνται εχχωρώντας την τεράστια μάζα τους σε ένα πλήθος ελαφρύτερων σωματιδίων, τα οποία καταλήγουν στα οικεία, συγκριτικά ελαφρά σωματίδια του γύρω μας κόσμου. Είναι ωστόσο δυνατό να έχει επιβιώσει μέχρι σήμερα –σαν απομεινάρι της Μεγάλης Έκρηξης– μια τέτοια υπερβαρεία κατάσταση ταλάντωσης μιας χορδής. Η εύρεση τέτοιων σωματιδίων, όπως θα συζητήσουμε πληρέστερα στο Κεφάλαιο 9, θα αποτελούσε –αν μη τι άλλο– μια μνημειώδη ανακάλυψη.

Βαρύτητα και χβαντομηχανική στη θεωρία χορδών

Το ενοποιημένο πλαίσιο που μας παρουσιάζει η θεωρία χορδών είναι ακαταμάχητο. Αυτό όμως που μας γοητεύει πραγματικά είναι η ικανότητά του να εξομαλύνει τις διαφορές ανάμεσα στη βαρυτική δύναμη και την χβαντομηχανική. Θυμηθείτε πως το πρόβλημα ανακύπτει κατά τη συνένωση της γενικής θεωρίας της σχετικότητας με την χβαντομηχανική, όταν το κεντρικό αξίωμα της πρώτης –ότι ο χώρος και ο χρόνος αποτελούν μία ομαλά καμπυ-

λωμένη γεωμετρική δομή – συγκρούεται με το βασικό χαρακτηριστικό της δεύτερης – ότι τα πάντα στο σύμπαν, συμπεριλαμβανομένου του χωροχρονικού ιστού, υφίστανται κβαντικές ταλαντώσεις που γίνονται εξαιρετικά έντονες όταν τις εξετάζουμε σε ολοένα μικρότερες κλίμακες. Σε μεγέθη της κλίμακας Planck και ακόμη μικρότερα, οι κβαντικές ταλαντώσεις είναι τόσο βίαιες που καταστρέφουν την έννοια του ομαλά καμπυλωμένου γεωμετρικού χώρου: αυτό σημαίνει ότι η γενική θεωρία της σχετικότητας καταρρέει.

Η θεωρία χορδών απαλύνει τις βίαιες κβαντικές ταλαντώσεις «διαχέοντας» μέρος των ιδιοτήτων του χώρου σε μικρές κλίμακες. Υπάρχει μια προσεγγιστική και μια πιο ακριβής απάντηση στο ερώτημα τι σημαίνει στ' αλήθεια αυτό και πώς επιλύει τη σύγκρουση. Θα εξετάσουμε τις δύο απαντήσεις με τη σειρά.

Η προσεγγιστική απάντηση

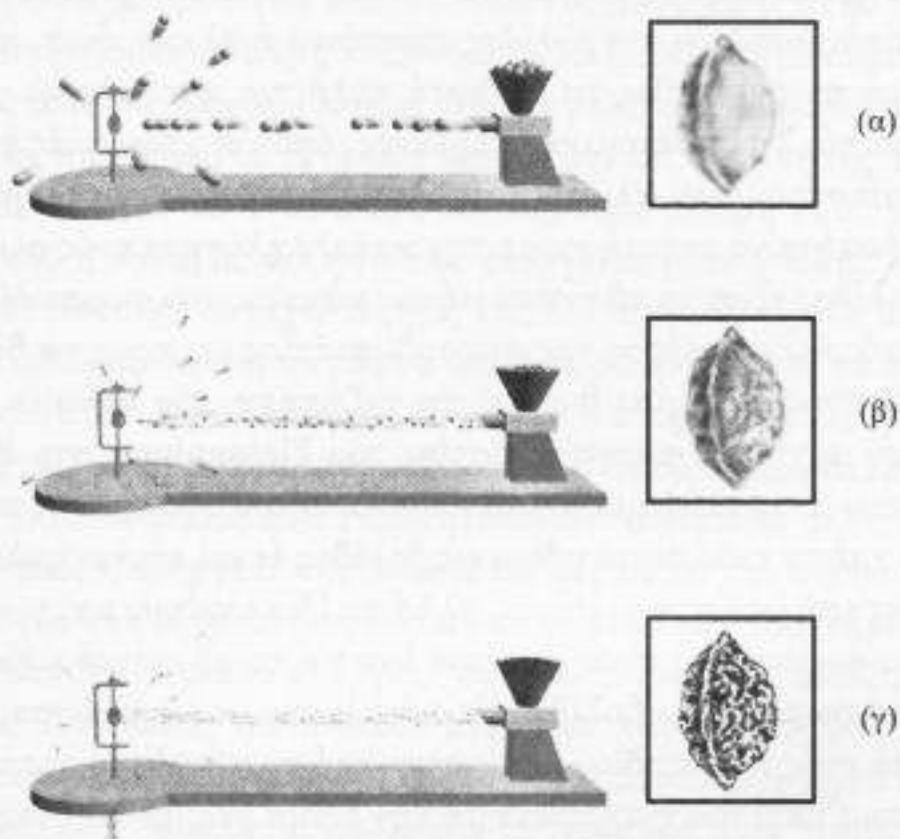
Μολονότι ακούγεται χονδρειδές, ένας τρόπος να μάθουμε τη δομή ενός αντικειμένου είναι να πετάμε πάνω του άλλα αντικείμενα και να παρατηρούμε πώς ακριβώς εκτρέπονται. Μπορούμε να βλέπουμε τα πράγματα, για παράδειγμα, επειδή τα μάτια μας συλλέγουν και ο εγκέφαλός μας αποκωδικοποιεί τις πληροφορίες που μεταφέρονται από φωτόνια τα οποία ανακλώνται από τα αντικείμενα που κοιτάζουμε. Οι επιταχυντές σωματιδίων βασίζονται στην ίδια αρχή: πετούν ύλη, για παράδειγμα ηλεκτρόνια και πρωτόνια το ένα πάνω στο άλλο ή και πάνω σε άλλους στόχους, και περίπλοκοι ανιχνευτές αναλύουν τα φερτά υλικά, ώστε να καθοριστεί η δομή των αντικειμένων που εμπλέχονται.

Ένας γενικός κανόνας υπαγορεύει ότι το μέγεθος του σωματιδίου που χρησιμοποιούμε στην έρευνα θέτει ένα κατώτατο όριο στην κλίμακα που αντιλαμβανόμαστε. Για να καταλάβετε τι σημαίνει αυτή η σημαντική δήλωση, φανταστείτε ότι ο Σλιμ και ο Τζιμ αποφασίζουν να ασχοληθούν λιγάκι με την τέχνη και γρά-

φονται σε μια σχολή σχεδίου. Καθώς το εξάμηνο προχωρεί, ο Τζιμ εκνευρίζεται όλο και περισσότερο από τη μεγάλη καλλιτεχνική πρόοδο του Σλιμ και τον προκαλεί σε έναν ασυνήθιστο διαγωνισμό. Προτείνει να πάρουν από ένα κουκούτσι ροδάκινου, να το στηρίξουν σταθερά με μια μέγκενη και να απεικονίσει ο καθένας όσο καλύτερα μπορεί αυτή τη «νεκρή φύση». Το ασυνήθιστο σε αυτόν το διαγωνισμό του Τζιμ είναι ότι και ο ίδιος και ο Σλιμ απαγορεύεται να δουν τα κουκούτσια. Επιτρέπεται μόνο να μάθουν το μέγεθος, το σχήμα και τα χαρακτηριστικά του κουκουτσιού πετώντας διάφορα αντικείμενα (όχι φωτόνια!) στο κουκούτσι και παρατηρώντας πώς εκτρέπονται, όπως δείχνει το Σχήμα 6.4. Χωρίς ο Σλιμ να το γνωρίζει, ο Τζιμ του γεμίζει τη συσκευή εκτόξευσης με γυάλινες μπίλιες (όπως στο Σχήμα 6.4(α)), ενώ στη δική του βάζει πολύ μικρότερα πλαστικά σφαιρίδια των πέντε χιλιοστών (όπως στο Σχήμα 6.4(β)). Ανοίγουν και οι δύο τις συσκευές τους και ο διαγωνισμός αρχίζει.

Μετά από λίγο, το καλύτερο σχέδιο που μπόρεσε να φτιάξει ο Σλιμ εμφανίζεται στο Σχήμα 6.4(α). Παρατηρώντας τις τροχιές που ακολουθήσαν όσες μπίλιες σκεδάστηκαν μπόρεσε να μάθει ότι το κουκούτσι είναι μια μικρή μάζα με σκληρή επιφάνεια. Άλλα κατάφερε να μάθει μόνο αυτό. Οι μπίλιες είναι υπερβολικά μεγάλες, άρα καθόλου ευαίσθητες στη λεπτότερη αυλακωτή δομή του κουκουτσιού. Μόλις ο Σλιμ κοιτάζει το σχέδιο του Τζιμ (Σχήμα 6.4(β)), βλέπει με έκπληξη ότι ο Τζιμ τον ξεπέρασε. Μια ματιά στη συσκευή του Τζιμ ωστόσο αποκαλύπτει το κόλπο: τα μικρότερα σωματίδια που χρησιμοποίησε ο Τζιμ είναι αρκετά λεπτά, επομένως ορισμένα από τα πιο αδρά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του κουκουτσιού επηρεάζουν τη γωνία. Κι έτσι, εκτοξεύοντας πολλά σφαιρίδια των πέντε χιλιοστών στο κουκούτσι και παρατηρώντας τις τροχιές τους αφού ανακλάστηκαν, ο Τζιμ κατόρθωσε να ζωγραφίσει μια πιο λεπτομερή εικόνα. Ο Σλιμ, για να μη χάσει, πηγαίνει πίσω στη συσκευή του, τη γεμίζει με ακόμη μικρότερα σωματίδια –σφαιρίδια του μισού χιλιοστού–, αρκετά μικροσκοπικά ώστε να μπορούν να εισχωρήσουν και συνεπώς να ανα-

χλαστούν από τις λεπτότερες αυλακώσεις στην επιφάνεια του χουκουτσιού. Παρατηρώντας πώς ανακλώνται αυτές οι βολίδες, καταφέρνει να ζωγραφίσει την εικόνα που φαίνεται στο Σχήμα 6.4(γ) και να κερδίσει το διαγωνισμό.



Σχήμα 6.4 Ένα χουκούτσι στερεώνεται σε μια μέγκενη και ο Σλιψ με τον Τζιμ το ζωγραφίζουν παρατηρώντας μόνο πώς τα αντικείμενα –οι «βολίδες»– ανακλώνται όταν εκτοξεύονται πάνω του. Χρησιμοποιώντας ολοένα μικρότερα αντικείμενα –(α) μπίλιες, (β) σκάγια των πέντε χιλιοστών, (γ) σκάγια του μισού χιλιοστού– μπορούν να ζωγραφίσουν ολοένα λεπτομερέστερες απεικονίσεις.

Το δίδαγμα αυτού του μικρού διαγωνισμού είναι σαφές: τα σωματίδια που μας χρησιμεύουν ως βολίδες δεν πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα φυσικά χαρακτηριστικά που εξετάζουμε· διαφορετικά, θα είναι ελάχιστα ευαίσθητα στις δομές που μας ενδιαφέρουν.

Η ίδια συλλογιστική ισχύει φυσικά αν θέλει κάποιος να εξετάσει το κουκούτσι ακόμη βαθύτερα, ώστε να ανακαλύψει την ατομική και την υποατομική δομή του. Τα σκάγια του μισού χιλιοστού δεν θα μας παρέχουν καμία χρήσιμη πληροφορία· είναι σαφώς πολύ μεγάλα για να διαθέτουν κάποια ευαισθησία σε υποατομικά μεγέθη. Γι' αυτόν το λόγο οι επιταχυντές σωματιδίων χρησιμοποιούν για βολίδες πρωτόνια ή ηλεκτρόνια, καθώς το μικρό τους μέγεθος τα καθιστά πολύ πιο κατάλληλα γι' αυτόν το σκοπό. Σε υποατομικές κλίμακες, όπου οι κβαντικές έννοιες αντικαθιστούν την χλασική συλλογιστική, το αποτελεσματικότερο μέσο για να εκτιμήσουμε την καταλληλότητα ενός σωματιδίου ως βολίδας είναι το κβαντικό μήκος κύματος του σωματιδίου, το οποίο καθορίζει το εύρος της απροσδιοριστίας ως προς τη θέση του. Το γεγονός αυτό μας θυμίζει τη συζήτηση που κάναμε σχετικά με την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg στο Κεφάλαιο 4, όπου ανακαλύψαμε ότι το περιθώριο του σφάλματος που επιφέρει η χρήση ενός σωματιδίου ως βολίδας (εκεί επικεντρώσαμε τη συζήτησή μας στα φωτόνια, αλλά τα ίδια ισχύουν και για όλα τα άλλα σωματίδια) είναι περίπου ίση με το κβαντικό μήκος κύματος του σωματιδίου-βολίδα. Σε κάπως πιο απλή γλώσσα, η ευαισθησία ενός σωματιδίου μειώνεται από το κβαντικό τρεμούλιασμα, όπως περίπου η ακρίβεια με την οποία χειρίζεται ένας χειρουργός το νυστέρι μειώνεται επικίνδυνα όταν τα χέρια του τρέμουν. Θυμηθείτε όμως ότι στο Κεφάλαιο 4 κάναμε άλλη μια σημαντική επισήμανση: το κβαντικό μήκος κύματος ενός σωματιδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την ορμή του, η οποία, μιλώντας χοντρικά, είναι η ενέργειά του. Κι έτσι, αυξάνοντας την ενέργεια ενός σημειακού σωματιδίου, το κβαντικό του μήκος κύματος μπορεί να γίνεται ολοένα μικρότερο –η κβαντική αλλοίωση μπορεί να μειώνεται όλο και περισσότερο– και έτσι μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να ερευνήσουμε όλο και πιο αδιόρατες φυσικές δομές. Διαισθητικά, τα σωματίδια υψηλότερης ενέργειας έχουν μεγαλύτερη διεισδυτική ισχύ και είναι συνεπώς ικανότερα να ανιχνεύουν λεπτότερα χαρακτηριστικά.

Από αυτή την άποψη, η διάκριση ανάμεσα σε σημειακά σωματίδια και σε συστάδες χορδών γίνεται εμφανής. Όπως συνέβαινε και με τα πλαστικά σκάγια που εξερευνούσαν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά ενός κουκουτσιού, η ενδογενής χωρική έκταση μιας χορδής την εμποδίζει να ερευνά τη δομή οποιουδήποτε πράγματος μικρότερου από το δικό της μέγεθος – στην περίπτωση αυτή, δομές που εμφανίζονται σε κλίμακες αποστάσεων μικρότερες από το μήκος Planck. Με μεγαλύτερη ακρίβεια, ο David Gross, που δίδασκε τότε στο Πρίνστον, και ο φοιτητής του Paul Mende έδειξαν το 1988 ότι, όταν λάβουμε υπόψη την κβαντομηχανική, η συνεχής αύξηση της ενέργειας μιας χορδής δεν οδηγεί σε αντίστοιχη συνεχή αύξηση της ικανότητάς της να ανιχνεύει λεπτότερες δομές, αντίθετα απ' ό,τι συμβαίνει με τα σημειακά σωματίδια. Ανακάλυψαν ότι, όταν η ενέργεια μιας χορδής αυξάνεται, αυτή μπορεί αρχικά να ερευνά δομές μικρότερης κλίμακας, όπως ακριβώς ένα ενεργητικότερο σημειακό σωματίδιο. Όταν όμως η ενέργειά της αυξάνεται πέρα από την τιμή που απαιτείται για την εξερεύνηση δομών στην κλίμακα του μήκους Planck, η οποία επιπλέον ενέργεια δεν βελτιώνει την ακρίβεια της χορδής. Αντίθετα, η επιπλέον ενέργεια κάνει τη χορδή να μεγαλώσει σε μέγεθος, μειώνοντας έτσι την ευαισθησία της στις μικρές κλίμακες. Μάλιστα, μολονότι το μέγεθος μιας τυπικής χορδής είναι το μήκος Planck, αν δώσουμε σε μια χορδή αρχετή ενέργεια – μια ποσότητα ενέργειας που ξεπερνά κάθε φαντασία, αλλά που κατά πάσα πιθανότητα υπήρχε στη Μεγάλη Έκρηξη – θα μπορούσαμε να την κάνουμε να μεγαλώσει μέχρι να φτάσει σε μακροσκοπικό μέγεθος, φτιάχνοντας έτσι μια πραγματικά χονδροειδή βολίδα για το μικρόχοσμο! Είναι λες και η εικόνα που έχουμε για μία χορδή, αντίθετα με αυτό που συμβαίνει σε ένα σημειακό σωματίδιο, αλλοιώνεται από δύο παράγοντες: από το κβαντικό «τρεμούλιασμα», όπως κι ένα σημειακό σωματίδιο, αλλά και από το ίδιο της το μέγεθος. Αν αυξήσουμε την ενέργεια μιας χορδής, τότε η αλλοίωση από τον πρώτο παράγοντα μειώνεται, αυξάνεται όμως η αλλοίωση από τον δεύτερο. Το τελικό

αποτέλεσμα είναι ότι, όσο σκληρά και να προσπαθείτε, το γεγονός πως οι χορδές δεν είναι σημειαχές σας εμποδίζει να τις χρησιμοποιήσετε για να εξερευνήσετε φαινόμενα σε κλίμακες μικρότερες από το μήκος Planck.

Όμως ολόκληρη η διαμάχη ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική προκύπτει από τις ιδιότητες του χώρου σε κλίμακες μικρότερες από το μήκος Planck. Αν το θεμελιώδες συστατικό του σύμπαντος δεν μπορεί να ερευνήσει κλίμακες μικρότερες από το μήκος Planck, τότε ούτε αυτό ούτε οτιδήποτε φτιαγμένο από αυτό μπορεί να επηρεαστεί από τις υποτιθέμενες καταστροφικές κβαντικές διακυμάνσεις που χυριαρχούν στις μικρές κλίμακες. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει όταν γλιστράμε το χέρι μας κατά μήκος μιας καλά λειασμένης γρανιτένιας επιφάνειας. Μολονότι όταν τον κοιτάζουμε στο μικροσκόπιο ο γρανίτης είναι ανομοιόμορφος, κοκκώδης και ανώμαλος, τα δάχτυλά μας δεν μπορούν να ανιχνεύσουν αυτές τις διακυμάνσεις μικρής κλίμακας και η επιφάνεια μας φαίνεται εντελώς λεία. Τα κοντόχοντρα τεντωμένα μας δάχτυλα αποκρύπτουν τις μικροσκοπικές ανομοιόμορφίες. Κατά παρόμοιο τρόπο, εφόσον μια χορδή έχει χωρική έκταση, υπάρχουν όρια ως προς την ευαισθησία της στις μικρές κλίμακες. Δεν μπορεί να ανιχνεύσει διακυμάνσεις σε κλίμακες αποστάσεων μικρότερες από το μήκος Planck. Όπως τα δάχτυλά μας πάνω στο γρανίτη, η χορδή αποκρύπτει τις υπομικροσκοπικές διακυμάνσεις του βαρυτικού πεδίου. Παρ' όλο που οι διακυμάνσεις που προκύπτουν τελικά είναι ουσιαστικές, η «απόκρυψη» τις εξομαλύνει όσο ακριβώς χρειάζεται για να αρθεί η όποια διαφορά ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική. Πιο συγκεκριμένα, οι ολέθριοι απειρισμοί (που εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο), οι οποίοι προκύπτουν στην προσέγγιση των σημειαχών σωματιδίων κατά τη δημιουργία μιας κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας, παραμερίζονται από τη θεωρία χορδών.

Μια ουσιώδης διαφορά ανάμεσα στο γρανίτη και σε αυτό που μας αφορά πραγματικά, τον χωρικό ιστό δηλαδή, είναι ότι υπάρ-

χουν τρόποι για να ανακαλύψουμε τη μικροσκοπική ανομοιομορφία της επιφάνειας του γρανίτη: μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε «βολίδες» λεπτότερες και ακριβέστερες από τα δάχτυλά μας. Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έχει την ικανότητα να αναλύει επιφανειακά χαρακτηριστικά μικρότερα από ένα εκατομμυριοστό του εκατοστού· αυτό αρκεί για να αποκαλυφθούν οι πολυάριθμες επιφανειακές ατέλειες. Αντίθετα, στη θεωρία χορδών δεν υπάρχει τρόπος να αποκαλυφθούν οι «ατέλειες» του χωρικού ιστού σε κλίμακες μικρότερες από το μήκος Planck. Σε ένα σύμπαν που κυβερνάται από τους νόμους της θεωρίας χορδών, η κλασική αντίληψη ότι μπορούμε πάντοτε να τέμνουμε περαιτέρω τη φύση σε ολοένα μικρότερα κομμάτια, χωρίς όριο, δεν αληθεύει. Υπάρχει ένα όριο, και αυτό έρχεται στο προσκήνιο προτού αντιμετωπίσουμε τον καταστρεπτικό κβαντικό αφρό του Σχήματος 5.1. Συνεπώς, υπό κάποια έννοια η οποία θα γίνει πιο σαφής στα επόμενα κεφάλαια, μπορεί να πει κανείς ακόμη και ότι οι υποτιθέμενες θυελλώδεις κβαντικές κυματώσεις κάτω από την κλίμακα Planck δεν υπάρχουν. Ένας θετικιστής θα έλεγε ότι κάτι υπάρχει μόνο αν μπορεί –τουλάχιστον θεωρητικά– να ανιχνευτεί και να μετρηθεί. Λπό τη στιγμή που η χορδή υποτίθεται ότι αποτελεί το πιο θεμελιώδες αντικείμενο του σύμπαντος, και αφού είναι υπερβολικά μεγάλη για να επηρεάζεται από τις βίαιες διακυμάνσεις του χωρικού ιστού σε κλίμακες κάτω από το μήκος Planck, τότε αυτές οι διαταραχές δεν μπορούν να μετρηθούν και συνεπώς, σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, δεν εμφανίζονται στην πραγματικότητα.

Μια ταχυδακτυλουργία;

Αυτή η συζήτηση μπορεί να σας άφησε με το αίσθημα του ανικανοποίητου. Αντί να δείξουμε ότι η θεωρία χορδών δαμάζει τις κβαντικές ταλαντώσεις του χώρου στις κλίμακες κάτω από το μήκος Planck, φαίνεται ότι χρησιμοποιήσαμε το μη μηδενικό

μέγεθος των χορδών για να παρακάμψουμε εντελώς το ζήτημα. Έχουμε στ' αλήθεια δώσει λύση στα πάντα; Ναι, έχουμε. Οι δύο επισημάνσεις που ακολουθούν βοηθούν να το αποσαφηνίσουμε.

Πρώτον, αυτό που υπονοείται στο προηγούμενο επιχείρημα είναι ότι οι υποτιθέμενα προβληματικές ταλαντώσεις του χώρου σε κλίμακες κάτω από το μήκος Planck αποτελούν στην πραγματικότητα κατασκεύασμα της διατύπωσης της γενικής θεωρίας της σχετικότητας και της κβαντομηχανικής σε περιβάλλον σημειακών σωματιδίων. Υπό μία έννοια συνεπώς η βασική διαμάχη της σύγχρονης θεωρητικής φυσικής είναι ένα πρόβλημα δικής μας κατασκευής. Επειδή προηγουμένως φανταζόμαστε όλα τα σωματίδια της ύλης και όλους τους φορείς δυνάμεων ως σημειακά αντικείμενα δίχως καμία απολύτως χωρική έκταση, αναγκαζόμαστε να εξετάζουμε τις ιδιότητες του σύμπαντος σε αυθαίρετα μικρές κλίμακες. Και στις μικρότερες διαστάσεις συναντούσαμε φαινομενικά αξεπέραστα προβλήματα. Η θεωρία χορδών μάς λέει ότι αυτά τα προβλήματα τα συναντούσαμε επειδή δεν είχαμε κατανοήσει τους αληθινούς κανόνες του παιχνιδιού· οι νέοι κανόνες μάς λένε ότι υπάρχει ένα όριο στο πόσο λεπτομερώς μπορούμε να εξερευνήσουμε το σύμπαν – και, κατά μία έννοια, ένα όριο στην εφαρμογή της κλασικής έννοιας της απόστασης στην υπομικροσκοπική δομή του κόσμου. Οι υποτιθέμενα ολέθριες ταλαντώσεις προέκυπταν στις θεωρίες μας, όπως διαπιστώνουμε τώρα, επειδή δεν είχαμε συνειδητοποιήσει αυτά τα όρια και έτσι η σωματιδιακή προσέγγιση μας οδηγούσε σε μια χονδροειδή υπέρβαση των ορίων της φυσικής πραγματικότητας.

Εφόσον με αυτή την εμφανέστατα απλή λύση ξεπερνιούνται τα προβλήματα ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική, ίσως αναρωτηθείτε γιατί μας πήρε τόσο καιρό μέχρι να προτείνει κάποιος ότι η περιγραφή με βάση τα σημειακά σωματίδια είναι απλώς και μόνο μια εξιδανίκευση και ότι στην πραγματικότητα τα στοιχειώδη σωματίδια

έχουν τελικά κάποια χωρική έκταση. Αυτό μας οδηγεί σε μια δεύτερη επισήμανση. Πολύ παλιότερα, μερικά από τα μεγαλύτερα μυαλά στη θεωρητική φυσική, όπως οι Pauli, Heisenberg, Dirac και Feynman, είχαν όντως προτείνει ότι τα συστατικά της φύσης ενδέχεται να μην είναι σημεία αλλά μικρές δονούμενες «σταγόνες» ή «βόλοι». Και αυτοί και άλλοι ανακάλυψαν ωστόσο ότι είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστεί μια θεωρία που να μην έχει ως θεμελιώδες συστατικό τα σημειακά σωματίδια και παράλληλα να είναι συνεπής προς τις πλέον βασικές φυσικές αρχές, όπως η διατήρηση της κβαντομηχανικής πιθανότητας (έτσι ώστε τα φυσικά αντικείμενα να μην εξαφανίζονται ξαφνικά από το σύμπαν, χωρίς να αφήνουν κάποιο ίχνος) και η αδυναμία μετάδοσης των πληροφοριών με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν του φωτός. Από πολλές απόψεις, η έρευνά τους έδειχνε συνέχεια ότι είτε η μία είτε και οι δύο αυτές αρχές παραβιάζονταν όταν απέρριπταν το μοντέλο των σημειακών σωματιδίων. Για μεγάλο διάστημα λοιπόν φαινόταν αδύνατο να βρεθεί μια ορθολογική κβαντική θεωρία βασισμένη σε οτιδήποτε άλλο εκτός από σημειακά σωματίδια. Το αληθινά εντυπωσιακό χαρακτηριστικό της θεωρίας χορδών είναι ότι περισσότερα από είκοσι χρόνια επακριβών ερευνών έχουν δείξει πως, αν και διαθέτει ορισμένα ανοίκεια χαρακτηριστικά, είναι μια θεωρία που όντως συμμορφώνεται με όλες τις απαιτήσεις μας ορθολογικής φυσικής θεωρίας. Και επιπλέον, λόγω της ταλάντωσης του Βαρυτονίου, η θεωρία χορδών είναι μια κβαντική θεωρία που περιλαμβάνει τη βαρύτητα.

Μια πιο ακριβής απάντηση

Η προσεγγιστική απάντηση μας δείχνει, συλλαμβάνοντας την ουσία του ζητήματος, γιατί η θεωρία χορδών τα καταφέρνει εκεί όπου οι προηγούμενες θεωρίες σημειακών σωματιδίων είχαν αποτύχει. Κι έτσι, αν θέλετε, μπορείτε να προχωρήσετε στην

επόμενη ενότητα χωρίς να χάσετε τη λογική ροή της συζήτησής μας. Αφού όμως έχουμε αναπτύξει τις βασικές ιδέες της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας στο Κεφάλαιο 2, κατέχουμε ήδη τα αναγκαία εργαλεία για να περιγράψουμε ακριβέστερα πώς η θεωρία χορδών γαληνεύει τα βίαια κβαντικά τρεμουλιάσματα.

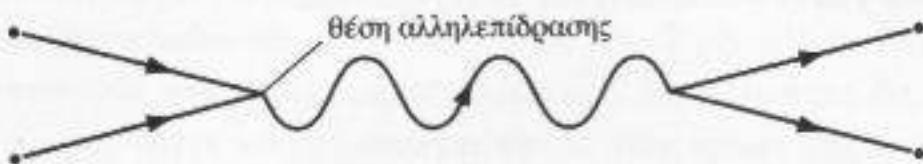
Στην πιο ακριβή απάντηση, θα στηριχτούμε στην ίδια βασική ιδέα όπως και στην προσεγγιστική απάντηση, αλλά θα την εκφράσουμε άμεσα σε επίπεδο χορδών. Θα το κάνουμε συγκρίνοντας, με κάποια λεπτομέρεια, τα σημειακά σωματίδια και τις χορδές ως «βιολίδες». Θα δούμε πώς η εκτεταμένη υφή των χορδών αποκρύπτει τις πληροφορίες που θα αποκτούσαμε από σημειακά σωματίδια, και κατά συνέπεια πώς απαλλάσσεται από τις υπομηκροσκοπικές ιδιότητες που ευθύνονται για το βασικό δίλημμα της σύγχρονης φυσικής.



Σχήμα 6.5 Δύο σωματίδια αλληλεπιδρούν -«συγκρούονται» το ένα με το άλλο-, με αποτέλεσμα να εκτρέπονται.

Εξετάζουμε αρχικά τον τρόπο με τον οποίο θα αλληλεπιδρούσαν τα σημειακά σωματίδια, αν υπήρχαν στην πραγματικότητα, και κατά συνέπεια πώς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα για διερεύνηση. Η πιο βασική αλληλεπίδραση συμβαίνει ανάμεσα σε δύο σημειακά σωματίδια που ετοιμάζονται να συγκρουστούν, ώστε οι τροχιές τους να διασταυρώθούν, όπως στο Σχήμα 6.5. Αν αυτά τα σωματίδια ήταν μπάλες του μπιλιάρδου, θα συγκρούονταν και η καθεμιά τους θα σκεδαζόταν σε μια νέα τροχιά. Η κβαντική θεωρία πεδίου για σημειακά σωματίδια δείχνει ότι συμβαίνει ουσιαστικά το ίδιο όταν συ-

γκρούονται στοιχειώδη σωματίδια –πέφτουν το ένα πάνω στο άλλο και διαγράφουν αποκλίνουσες τροχιές– αλλά με κάποιες μικροδιαφορές.

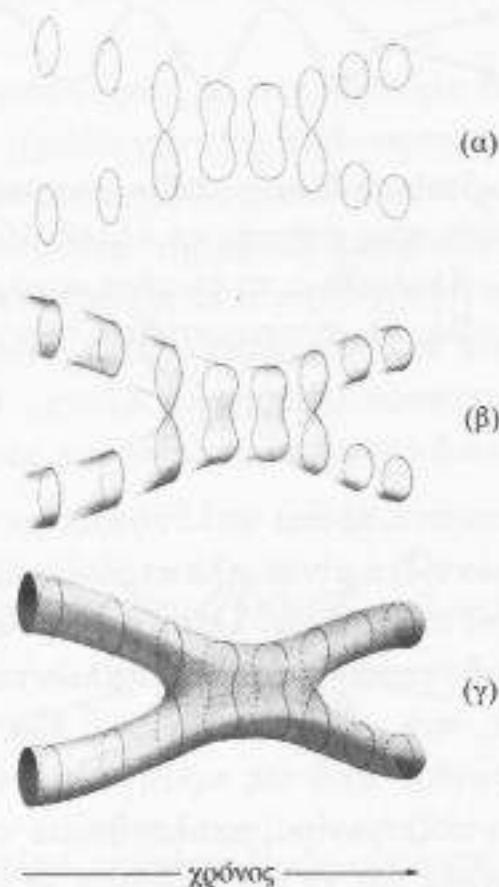


Σχήμα 6.6 Στην χβαντική θεωρία πεδίου, ένα σωματίδιο και το αντισωματίδιό του μπορούν προς στιγμήν να αλληλοεξουδετερωθούν παράγοντας ένα φωτόνιο. Ακολούθως, το φωτόνιο αυτό μπορεί να παράγει ένα νέο ζεύγος σωματιδίου και αντισωματιδίου, τα οποία διαγράφουν διαφορετικές τροχιές.

Για λόγους εποπτείας και απλότητας, φανταστείτε ότι το ένα από τα δύο σωματίδια είναι ηλεκτρόνιο και το άλλο το αντισωματίδιό του, το ποζιτρόνιο. Όταν συγκρούονται ύλη και αντιύλη, αλληλοεξουδετερώνονται προκαλώντας έκλυση καθαρής ενέργειας, όπως, π.χ., ενός φωτονίου.⁹ Για να διακρίνουμε την τροχιά του φωτονίου από τις προηγούμενες τροχιές του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου, ακολουθούμε την πεπατημένη των βιβλίων της φυσικής και τη σχεδιάζουμε με μια κυματιστή γραμμή. Τυπικά, το φωτόνιο θα ταξιδέψει για λίγο και κατόπιν θα απελευθερώσει την ενέργεια που πήρε από το αρχικό ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου παράγοντας ένα άλλο ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου, με τροχιές όπως αυτές που φαίνονται στο δεξί άκρο του Σχήματος 6.6. Με δυο λόγια, δύο σωματίδια εκτοξεύονται το ένα πάνω στο άλλο, αλληλεπιδρούν μέσω της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης και τελικά επανεμφανίζονται σε σκεδασμένες τροχιές – μια αλληλουχία γεγονότων που μοιάζει κάπως με την περιγραφή μας για τις μπάλες του μπιλιάρδου που συγκρούονται.

Μας ενδιαφέρουν εδώ οι λεπτομέρειες της αλληλεπίδρασης

— ειδικότερα, το σημείο όπου το αρχικό ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο αλληλοεξουδετερώνονται και παράγουν το φωτόνιο. Η βασική αλήθεια, όπως θα γίνει εμφανές, είναι ότι χωρίς καμιά απολύτως αμφιβολία αυτό συμβαίνει σε έναν πλήρως προσδιορίσιμο τόπο και χρόνο όπως δείχνει το Σχήμα 6.6.

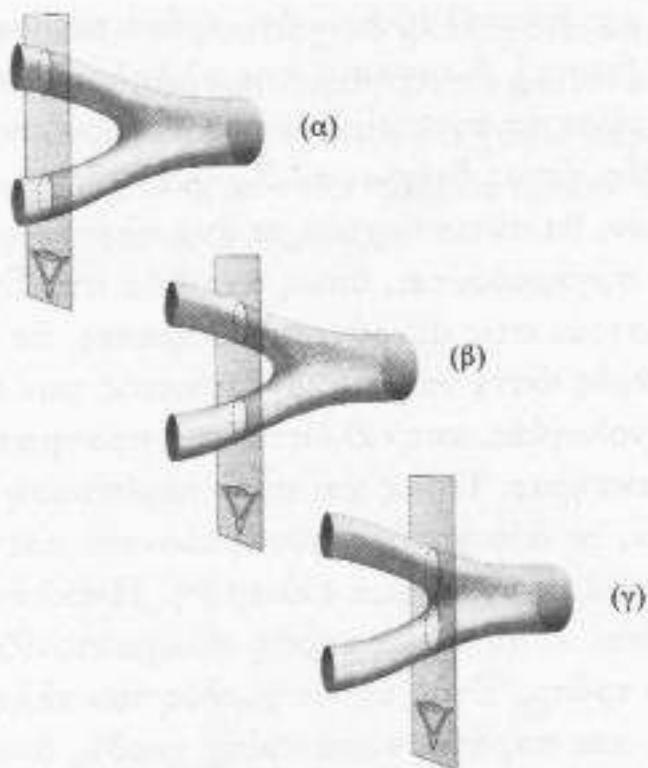


Σχήμα 6.7 (α) Δύο χορδές που συγχρούνται μπορούν να συνενωθούν σε μια τρίτη χορδή, η οποία κατόπιν μπορεί να χωρίσει ξανά σε δύο χορδές που διαγράφουν σκεδασμένες τροχιές. **(β)** Η ίδια διεργασία που φαίνεται στο (α), επικεντρωμένη στην κίνηση των χορδών. **(γ)** Μια «φωτογραφία χρονικής εξέλιξης» δύο χορδών που αλληλεπιδρούν, σαρώνοντας έτσι ένα «κοσμικό φύλλο».

Πώς μεταβάλλεται αυτή η περιγραφή αν εξετάσουμε προσεκτικότερα τα αντικείμενα που θεωρούσαμε σημεία μηδενικής

διάστασης και ανακαλύψουμε ότι πρόκειται για μονοδιάστατες χορδές; Η βασική διεργασία της αλληλεπίδρασης παραμένει ίδια, αλλά τώρα τα αντικείμενα που συγκρούονται είναι παλλόμενες χορδές, όπως δείχνει το Σχήμα 6.7. Αν αυτές οι χορδές συντονιστούν, θα αντιστοιχούν σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο που συγκρούονται, όπως ακριβώς στο Σχήμα 6.6. Μόνο όταν εξεταστούν στις μικρότερες χλίμακες, σε χλίμακες δηλαδή τόσο μικρές ώστε να βρίσκονται εκτός των ορίων της υπάρχουσας τεχνολογίας, αποκαλύπτεται ο πραγματικός τους νηματώδης χαρακτήρας. Όπως και στην περίπτωση των σημειακών σωματιδίων, οι δύο χορδές συγκρούονται και αλληλοεξουδετερώνονται παράγοντας μια έκλαμψη. Η έκλαμψη, δηλαδή το φωτόνιο, είναι κι αυτό μια χορδή που συντονίζεται με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Έτσι, οι δύο χορδές που αλληλεπιδρούν συγχωνεύονται και παράγουν μια τρίτη χορδή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Όπως ακριβώς στην περιγραφή μας με βάση τα σημειακά σωματίδια, η χορδή αυτή κινείται για λίγο, και μετά απελευθερώνει όση ενέργεια είχε πάρει από τις δύο αρχικές χορδές, με αποτέλεσμα να διασπάται σε δύο χορδές που συνεχίζουν να κινούνται. Και πάλι, υπό οποιαδήποτε οπτική πλην της πλέον μικροσκοπικής, αυτή η περιγραφή θα δείχνει εντελώς όμοια με την αλληλεπίδραση των δύο σημειακών σωματιδίων του Σχήματος 6.6.

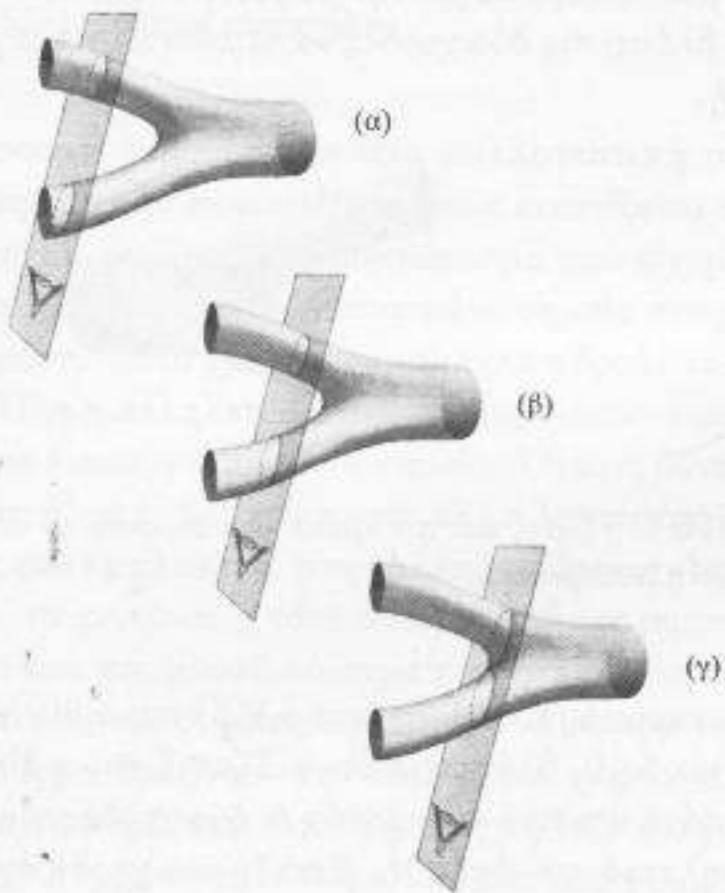
Υπάρχει ωστόσο μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο περιγραφές. Τονίσαμε ότι η αλληλεπίδραση των σημειακών σωματιδίων συμβαίνει σε ένα προσδιορίσιμο σημείο στο χώρο και το χρόνο, σε μια θέση για την οποία θα συμφωνούσαν όλοι οι παρατηρητές. Όπως θα δούμε τώρα, αυτό δεν ισχύει για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ χορδών. Θα το δείξουμε συγκρίνοντας πώς ο Τζορτζ και η Γκρέισι, δύο παρατηρητές σε σχετική κίνηση όπως στο Κεφάλαιο 2, θα περιέγραφαν την αλληλεπίδραση. Θα δούμε ότι δεν θα συμφωνούν ούτε πού ούτε και πότε ακουμπούν οι δύο χορδές για πρώτη φορά.



Σχήμα 6.8 Οι δύο χορδές που πλησιάζουν όπως τις βλέπει ο Τζόρτζ σε τρεις διαδοχικές στιγμές στο χρόνο. Στα (α) και (β) οι χορδές προσεγγίζουν η μία την άλλη· στο (γ) ακουμπούν για πρώτη φορά, σύμφωνα πάντα με τη δική του σκοπιά.

Φανταστείτε λοιπόν ότι παρατηρούμε την αλληλεπίδραση ανάμεσα στις δύο χορδές εφοδιασμένοι με μια φωτογραφική μηχανή της οποίας το διάφραγμα παραμένει ανοιχτό, έτσι ώστε να καταγράφεται ολόχληρο το ιστορικό της διεργασίας πάνω στο ίδιο φίλμ.¹⁰ Δείχνουμε το αποτέλεσμα, που είναι γνωστό ως κοσμικό φύλλο μιας χορδής, στο Σχήμα 6.7(γ). Αν «κόψουμε» το κοσμικό φύλλο με παράλληλες τομές –περίπου όπως κόβουμε σε φέτες μια φρατζόλα ψωμί–, μπορούμε να ανακτήσουμε το ιστορικό της αλληλεπίδρασης των χορδών στιγμή προς στιγμή. Δείχνουμε ένα παράδειγμα αυτών των τομών στο Σχήμα 6.8. Ειδικότερα, στο Σχήμα 6.8(α) χρησιμοποιούμε ένα επίπεδο που μας δείχνει ποια γεγονότα συμβαίνουν ταυτόχρονα υπό την οπτική γωνία του Τζόρτζ, ο οποίος εστιάζει στις δύο χορδές που πλησιάζουν. Όπως

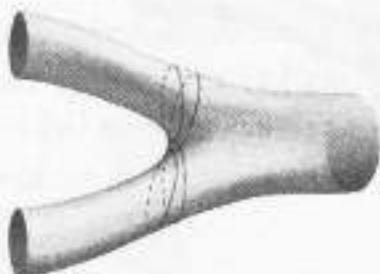
κάναμε συχνά και σε προηγούμενα κεφάλαια, στο διάγραμμα αυτό έχουμε απαλείψει τη μία διάσταση για λόγους οπτικής σαφήνειας. Στην πραγματικότητα βέβαια, η διάταξη των γεγονότων μιας χρονικής στιγμής για οποιονδήποτε παρατηρητή είναι τρισδιάστατη. Στα Σχήματα 6.8(β) και 6.8(γ) βλέπουμε δύο στιγμιότυπα σε μετέπειτα χρόνους –σε μετέπειτα «φέτες» του κοσμικού φύλλου– που δείχνουν πώς βλέπει ο Τζορτζ τις δύο χορδές να πλησιάζουν η μία την άλλη. Και είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι στο Σχήμα 6.8(γ) φαίνεται η χρονική στιγμή κατά την οποία, σύμφωνα με τον Τζορτζ, οι δύο χορδές ακουμπούν για πρώτη φορά και συνενώνονται παράγοντας την τρίτη χορδή.



Σχήμα 6.9 Οι δύο χορδές όπως τις βλέπει η Γκρέισι σε τρεις διαδοχικές χρονικές στιγμές. Στα (α) και (β) οι χορδές προσεγγίζουν η μία την άλλη· στο (γ) ακουμπούν για πρώτη φορά, σύμφωνα πάντα με τη δική της σκοπιά.

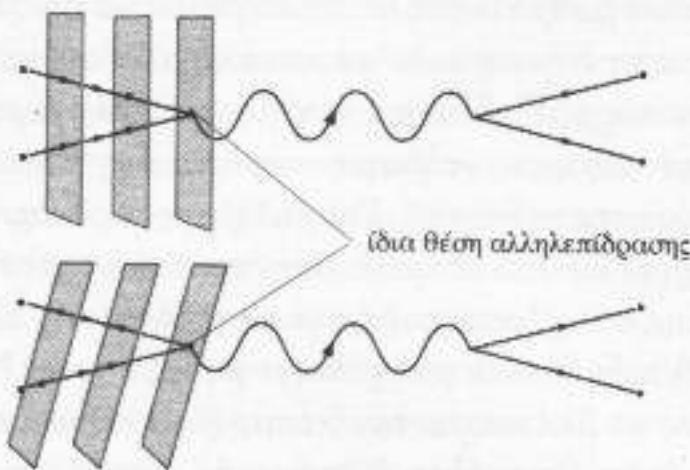
Ας κάνουμε τώρα το ίδιο και για την Γκρέισι. Όπως συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 2, η σχετική κίνηση του Τζορτζ και της Γκρέισι συνεπάγεται ότι αυτοί οι δύο δεν θα συμφωνούν ποια γεγονότα συμβαίνουν ταυτόχρονα. Από τη μεριά της Γκρέισι, τα γεγονότα που συμβαίνουν ταυτόχρονα στο χώρο βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9. Με άλλα λόγια, από τη σκοπιά της Γκρέισι, το κοσμικό φύλλο του Σχήματος 6.7(γ) πρέπει να «χοπεί σε φέτες» υπό διαφορετική γωνία ώστε να φανερωθεί η πρόοδος της αλληλεπίδρασης σε σχέση με το χρόνο.

Στα Σχήματα 6.9(β) και 6.9(γ) δείχνουμε διαδοχικές χρονικές στιγμές, σύμφωνα με την Γκρέισι τώρα, καθώς και τη στιγμή όπου βλέπει τις δύο χορδές να τέμνονται παράγοντας την τρίτη χορδή.



Σχήμα 6.10 *O Τζορτζ και η Γκρέισι δεν συμφωνούν όσον αφορά τη θέση της αλληλεπίδρασης.*

Αν συγκρίνουμε τα Σχήματα 6.9(β) και 6.8(γ), όπως κάνουμε στο Σχήμα 6.10, βλέπουμε ότι ο Τζορτζ και η Γκρέισι δεν συμφωνούν πότε και πού ακουμπούν οι δύο χορδές για πρώτη φορά – που αλληλεπιδρούν δηλαδή. Επειδή μια χορδή έχει συγκεκριμένη χωρική υπόσταση, δεν υπάρχει καμία θέση στο χώρο ή στιγμή στο χρόνο την οποία μπορούμε να υποδείξουμε με σιγουριά ως θέση ή στιγμή στην οποία αλληλεπιδρούν οι χορδές για πρώτη φορά – αντίθετα, αυτό εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του παρατηρητή.



Σχήμα 6.11 Παρατηρητές σε σχετική κίνηση συμφωνούν πότε και που αλληλεπιδρούν δύο σημειακά σωματίδια.

Αν εφαρμόσουμε ακριβώς την ίδια συλλογιστική στην αλληλεπίδραση σημειακών σωματιδίων, όπως εικονίζεται συνοπτικά στο Σχήμα 6.11, βγάζουμε το συμπέρασμα που είχαμε διατυπώσει νωρίτερα – ότι υπάρχει συγχεκριμένο σημείο στο χώρο και συγχεκριμένη στιγμή στο χρόνο όπου αλληλεπιδρούν τα σημειακά σωματίδια. Όλη η αλληλεπίδραση των σημειακών σωματιδίων συσσωρεύεται σε ένα συγχεκριμένο σημείο. Όταν η δύναμη μιας αλληλεπίδρασης είναι η βαρυτική – με άλλα λόγια, όταν το σωματίδιο-φορέας που εμπλέκεται στην αλληλεπίδραση είναι το βαρυτόνιο και όχι το φωτόνιο –, τότε αυτή η πλήρης συμπύκνωση της δύναμης σε ένα και μοναδικό σημείο οδηγεί σε καταστροφικά αποτελέσματα, όπως οι απειρισμοί που αναφέραμε νωρίτερα. Οι χορδές, αντίθετα, θολώνουν την εικόνα του χώρου όπου συμβαίνουν οι αλληλεπιδράσεις. Από τη στιγμή που διαφορετικοί παρατηρητές αντίλαμβάνονται ότι η αλληλεπίδραση συμβαίνει σε διάφορες θέσεις στο αριστερό μέρος της επιφάνειας στο Σχήμα 6.10, υπό μία έννοια αυτό σημαίνει ότι η θέση της αλληλεπίδρασης διευρύνεται. Έτσι η δύναμη κατανέμεται σε μεγαλύτερο χώρο και, στην περίπτωση της βαρυτικής δύναμης, αυτή η «διεύρυνση» αποδυναμώνει αρχετά τις υπομικροσκοπικές της ιδιότη-

τες – σε τέτοιο βαθμό ώστε οι υπολογισμοί να δίνουν κομψές πεπερασμένες απαντήσεις αντί να καταλήγουν σε άπειρα όπως γινόταν μέχρι τώρα. Πρόκειται για μια ακριβέστερη εκδοχή της «αλλοίωσης» που συναντήσαμε στην προσεγγιστική απάντηση της προηγούμενης ενότητας. Για άλλη μα φορά, αυτή η «αλλοίωση» καταλήγει σε μια εξομάλυνση του υπομικροσκοπικού τρεμουλιάσματος του χώρου, καθώς οι αποστάσεις σε κλίμακες κάτω από την κλίμακα Planck συγχέονται μεταξύ τους.

Είναι σαν να βλέπουμε τον κόσμο με κιάλια υπερβολικά μικρής ή υπερβολικά μεγάλης διακριτικής ικανότητας, οι λεπτομέρειες σε κλίμακες κάτω από την κλίμακα Planck, που θα ήταν ανιχνεύσιμες από ένα πολύ μικρό σημειακό σωματίδιο, σύμφωνα με τη θεωρία χορδών συμφύρονται αξεδιάλυτα κι έτσι γίνονται ακίνδυνες. Και αντίθετα απ' ό,τι συμβαίνει με τη ματιά, αν η θεωρία χορδών αποτελεί την έσχατη περιγραφή του σύμπαντος, δεν υπάρχει διορθωτικός φακός ο οποίος θα μπορέσει να εστιάσει σωστά στις υποτιθέμενες διακυμάνσεις που εμφανίζονται κάτω από την κλίμακα Planck. Η ασυμβατότητα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας και της κβαντομηχανικής –η οποία γίνεται έκδηλη μόνο σε κλίμακες μικρότερες της κλίμακας Planck – αίρεται σε ένα σύμπαν που έχει κατώτατο όριο στις προσεγγίσιμες ή θεωρητικά υπαρχτές αποστάσεις, με τη συμβατική έννοια των όρων. Αυτό είναι το σύμπαν που περιγράφει η θεωρία χορδών, στην οποία βλέπουμε ότι οι νόμοι του μεγάλου και του μικρού μπορούν να συγχωνευτούν αρμονικά απαλλάσσοντάς μας με συνοπτικές διαδικασίες από την υποτιθέμενη καταστροφή που καραδοκεί στις υπομικροσκοπικές κλίμακες.

Πέρα από τις χορδές;

Οι χορδές ξεχωρίζουν για δύο λόγους. Πρώτον, παρότι έχουν διαστάσεις, μπορούν να περιγραφούν με συνέπεια από την κβαντομηχανική. Δεύτερον, ανάμεσα στις ταλαντώσεις τους υπάρχει μία

που έχει ακριβώς τις ιδιότητες του βαρυτονίου, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η βαρυτική δύναμη αποτελεί οργανικό μέρος της δομής τους. Άλλα όπως ακριβώς η θεωρία χορδών δείχνει πως η συμβατική έννοια των σημειακών σωματιδίων με μηδενική διάσταση είναι μια μαθηματική αφαίρεση που δεν υφίσταται στην πραγματικότητα, δεν θα μπορούσαν και οι απέριως λεπτές μονοδιάστατες χορδές να είναι επίσης μέρος μιας παρόμοιας μαθηματικής αφαίρεσης; Μήπως στην πραγματικότητα οι χορδές έχουν κάποιο πάχος – όπως η επιφάνεια μιας διδιάστατης σαμπρέλας ποδηλάτου ή, ακόμη καλύτερα, όπως ένα λεπτό τρισδιάστατο ντόνατ; Οι φαινομενικά αξεπέραστες δυσκολίες που συνάντησαν ο Heisenberg, ο Dirac και πολλοί άλλοι στις προσπάθειές τους να καταστρώσουν μια κβαντική θεωρία με τρισδιάστατους βόλους συνεχίζουν να προβάλλουν εμπόδια σε όσους ερευνητές ασπάζονται αυτή την ιδέα.

Εντελώς αναπάντεχα όμως, οι θεωρητικοί των χορδών συνειδητοποίησαν στα μέσα της δεκαετίας του 1990, μέσα από μια έμμεση και ιδιοφυή συλλογιστική, ότι όντως υπάρχουν θεμελιώδη αντικείμενα μεγαλύτερων διαστάσεων που παίζουν στην πραγματικότητα ένα σημαντικό και ιδιάζοντα ρόλο στη θεωρία χορδών. Οι ερευνητές συνειδητοποίησαν σταδιακά ότι η θεωρία χορδών δεν είναι μια θεωρία που περιέχει αποκλειστικά χορδές. Σύμφωνα με μια σημάντικη παρατήρηση, θεμελιώδη για τη δεύτερη επανάσταση των υπερχορδών που ξεκίνησε από τον Witten και κάποιους άλλους το 1995, η θεωρία χορδών περιλαμβάνει στην πραγματικότητα συστατικά με διάφορες διαστάσεις: διδιάστατα σωματίδια που μοιάζουν με δίσκους του φρίζμπι, τρισδιάστατα σωματίδια που μοιάζουν με σταγόνες και κάποια άλλα ακόμη πιο εξωτικά. Λυτές οι πρόσφατες ανακαλύψεις θα μας απασχολήσουν στα Κεφάλαια 12 και 13. Προς το παρόν θα συνεχίσουμε να ακολουθούμε το νήμα της ιστορίας και θα εξερευνήσουμε περαιτέρω τις εκπληκτικές νέες ιδιότητες ενός σύμπαντος φτιαγμένου από μονοδιάστατες χορδές και όχι από σημειακά σωματίδια μηδενικής διάστασης.

To «υπέρ» στις υπερχορδές

Όταν το 1919 ο Λόρδος Eddington επιβεβαίωσε την πρόβλεψη του Einstein για την καμπύλωση του φωτός από τον Ήλιο, ο Ολλανδός φυσικός Hendrik Lorentz έστειλε στον Einstein ένα τηλεγράφημα για να του μεταφέρει τα καλά νέα. Καθώς διαδόθηκε η επτυχία της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, κάποιος φοιτητής ρώτησε τον Einstein τι θα σκεφτόταν αν το πείραμα του Eddington δεν είχε δώσει την αναμενόμενη καμπύλωση του αστρικού φωτός. Ο Einstein απάντησε: «Τότε θα λυπόμουν πολύ τον κακόμοιρο Λόρδο, γιατί η θεωρία είναι σωστή».¹ Φυσικά, αν τα πειράματα είχαν όντως αποτύχει να επιβεβαιώσουν τις προβλέψεις του Einstein, η θεωρία δεν θα ήταν σωστή, και η γενική σχετικότητα δεν θα είχε γίνει ακρογωνιαίος λίθος της σύγχρονης φυσικής. Αυτό όμως που εννοούσε ο Einstein είναι ότι η γενική σχετικότητα περιγράφει τη βαρύτητα σε τέτοιο βάθος, με μια τέτοια εσωτερική κομψότητα και με τόσο απλές αλλά πανίσχυρες ιδέες, που δυσκολευόταν να φανταστεί ότι η φύση θα μπορούσε να παραχάμψει μια τέτοια θεωρία. Η γενική σχετικότητα, για τον Einstein, ήταν πολύ όμορφη για να είναι λάθος.

Ωστόσο η αισθητική δεν αποτελεί επιστημονικό κριτήριο. Σε τελική ανάλυση, οι θεωρίες χρίνονται όταν έρχονται αντιμέτωπες με αυστηρά, ψυχρά πειραματικά δεδομένα. Το τελευταίο αυτό σχόλιο υπόκειται σε έναν πολύ σημαντικό περιορισμό. Όταν οι-

χοδομείς μια θεωρία, λόγω της ατελούς ανάπτυξής της, δεν μπορείς να αξιολογήσεις λεπτομερώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα πειράματα. Εντούτοις, οι φυσικοί πρέπει να κάνουν επιλογές και να κρίνουν ποια ερευνητική πορεία πρέπει να ακολουθήσει η υπό εξέλιξη θεωρία τους. Ορισμένες από αυτές τις αποφάσεις υπαγορεύονται από την εσωτερική λογική συνέπεια· το ζητούμενο για κάθε θεωρία είναι να μην περιέχει παράξοδα και αντιφάσεις. Άλλες αποφάσεις υπαγορεύονται από την ποιότητα των πειραματικών συνεπειών ενός θεωρητικού συστήματος σε σύγκριση με κάποιο άλλο· γενικώς δεν ενδιαφερόμαστε για μια θεωρία που δεν θα μοιάζει σε τίποτα με όσα συναντάμε στον κόσμο γύρω μας. Σίγουρα όμως ορισμένες αποφάσεις που παίρνουν οι θεωρητικοί φυσικοί στηρίζονται σε αισθητικά κριτήρια – στο αισθητήριό μας, το οποίο μας υποδεικνύει ποιες θεωρίες έχουν κομψότητα και δομική ομορφιά αντίστοιχες με αυτές του κόσμου που αντιλαμβανόμαστε. Φυσικά, τίποτε δεν εξασφαλίζει ότι αυτή η τακτική οδηγεί στην αλήθεια. Ενδεχομένως, σε αντίθεση με τις έως τώρα εμπειρίες μας, η δομή του σύμπαντος να είναι κατά βάθος λιγότερο κομψή απ' ό,τι πιστεύουμε ή να ανακαλύψουμε ότι τα υπάρχοντα κριτήριά μας περί αισθητικής χρειάζονται ουσιαστική βελτίωση όταν εφαρμόζονται σε όλο και πιο ανοίκεια πλαισια. Ωστόσο, καθώς μπαίνουμε σε μια εποχή όπου οι θεωρίες μας περιγράφουν περίοχές του σύμπαντος τις οποίες είναι όλο και πιο δύσκολο να ελέγξουμε πειραματικά, οι φυσικοί πρέπει να βασίζονται σε μια τέτοια αισθητική προκειμένου να οδηγηθούν μακριά από αδιέξοδα και ατέρμονες ατραπούς που ειδάλλως ίσως να ακολουθούσαν. Μέχρι στιγμής, η προσέγγιση αυτή στάθηκε ισχυρός και διορατικός οδηγός.

Στη φυσική, όπως και στην τέχνη, η συμμετρία αποτελεί στοιχείο-κλειδί για την αισθητική. Σε αντίθεση όμως με την τέχνη, η συμμετρία στη φυσική έχει ένα πολύ συγχεκτιμένο και ακριβές νόημα. Μάλιστα, ακολουθώντας επιμελώς αυτήν ακριβώς την έννοια περί συμμετρίας μέχρι τα τελικά μαθηματικά της συμπεράσματα, οι φυσικοί ανακάλυψαν τις τελευταίες δεκαετίες θεω-

ρίες όπου τα σωματίδια της ύλης και τα σωματίδια φορείς συνδέονται πολύ πιο στενά απ' ό,τι μπορούσαμε να φανταστούμε παλιότερα. Οι θεωρίες αυτές, που ενοποιούν όχι μόνο τις δυνάμεις της φύσης αλλά και τα υλικά της συστατικά, έχουν τη μέγιστη δυνατή συμμετρία και για το λόγο αυτό αποκαλούνται υπερσυμμετρικές. Η θεωρία των υπερχορδών, όπως θα δούμε, είναι ταυτόχρονα η αρχή αλλά και το χορυφαίο παράδειγμα υπερσυμμετρικού πλαισίου.

Η φύση των νόμων της φυσικής

Φανταστείτε ένα σύμπαν όπου οι νόμοι της φυσικής είναι εξίσου εφήμεροι με τις τάσεις της μόδας – αλλάζουν από χρονιά σε χρονιά, από εβδομάδα σε εβδομάδα ή ακόμη από λεπτό σε λεπτό. Σε έναν τέτοιο κόσμο, αν υποθέσουμε ότι οι αλλαγές δεν θα παρεμπόδιζαν τις βασικές ζωτικές λειτουργίες, δεν θα βαριόσαστε ούτε στιγμή κι αυτό είναι το λιγότερο. Τα πιο απλά καθημερινά πράγματα θα ήταν μια περιπέτεια, καθώς οι τυχαίες μεταβολές θα εμπόδιζαν εσάς ή οποιονδήποτε άλλο να χρησιμοποιήσετε την εμπειρία του παρελθόντος για να προβλέψετε τι θα συμβεί.

Ένα τέτοιο σύμπαν θα ήταν εφιάλτης για τους φυσικούς. Οι φυσικοί – αλλά και σχεδόν όλος ο κόσμος – στηρίζονται στη σταθερότητα του σύμπαντος: οι νόμοι που ισχύουν σήμερα ήταν αληθείς και χτες και θα εξακολουθήσουν να αληθεύουν και αύριο (έστω κι αν έως τώρα δεν σταθήκαμε αρκετά έξυπνοι για να τους βρούμε όλους). Άλλωστε, ποιο νόημα θα μπορούσαμε να αποδώσουμε στον όρο νόμος αν μπορούσε να αλλάζει έτσι ξαφνικά; Αυτό δεν σημαίνει ότι το σύμπαν είναι στατικό· το σύμπαν σαφώς αλλάζει με πολλούς τρόπους από τη μια στιγμή στην άλλη. Ωστόσο οι νόμοι που διέπουν αυτή την εξέλιξη είναι σταθεροί και αμετάβλητοι. Ισως αναρωτηθείτε αν όντως γνωρίζουμε ότι αυτός ο ισχυρισμός αληθεύει. Στην πραγματικότητα δεν το γνωρίζουμε. Όμως η επι-

τυχία μας στην περιγραφή πολυάριθμων χαρακτηριστικών του σύμπαντος, από μια ελάχιστη στιγμή μετά τη Μεγάλη Έκρηξη μέχρι και σήμερα, μας διαβεβαιώνει ότι, αν οι νόμοι αλλάζουν, αυτή η αλλαγή θα πρέπει να γίνεται εξαιρετικά αργά. Η απλούστερη παραδοχή, συνεπής προς όλα όσα γνωρίζουμε, είναι ότι οι νόμοι είναι σταθεροί.

Φανταστείτε τώρα ένα σύμπαν όπου οι νόμοι της φυσικής είναι τόσο τοπικά περιορισμένοι όσο και τα κατά τόπους ήθη και έθιμα – μεταβάλλονται απρόβλεπτα από το ένα μέρος στο άλλο και αντιστέκονται σθεναρά στις όποιες εξωτερικές επιρροές. Όπως οι περιπέτειες του Γκάλιβερ, τα ταξίδια σε έναν τέτοιο χόσμο θα σας χάριζαν μια απέριως πλούσια ποικιλία απρόσμενων εμπειριών. Από τη σκοπιά ενός φυσικού όμως και αυτό το σύμπαν είναι εφιαλτικό. Δυσκολευόμαστε, για παράδειγμα, να ανεχτούμε το γεγονός ότι νόμοι που ισχύουν σε μια χώρα μπορεί να μην ισχύουν σε μια άλλη. Γιά φανταστείτε όμως πώς θα ήταν τα πράγματα αν οι νόμοι της φύσης παρουσίαζαν την ίδια ποικιλομορφία. Σε έναν τέτοιο χόσμο, τα πειράματα που θα γίνονταν σε μια τοποθεσία δεν θα είχαν καμία σχέση με τους φυσικούς νόμους που θα ισχυαν κάπου αλλού. Αντίθετα, οι φυσικοί θα έπρεπε να επαναλαμβάνουν συνεχώς τα ίδια πειράματα σε διαφορετικές τοποθεσίες, προκειμένου να ελέγξουν τους τοπικούς φυσικούς νόμους που θα ισχυαν στην καθεμιά. Ευτυχώς, όλα όσα γνωρίζουμε υποδειχνύουν ότι οι νόμοι της φυσικής είναι παντού οι ίδιοι. Τα πειράματα σε όλο τον χόσμο εξηγούν με τον ίδιο τρόπο τα φυσικά φαινόμενα. Επιπλέον, η ικανότητά μας να δίνουμε εξήγηση σε ένα τεράστιο πλήθος αστροφυσικών παρατηρήσεων σε απόμακρες κοσμικές περιοχές χρησιμοποιώντας το ίδιο, σταθερό σύνολο φυσικών αρχών, μας οδηγεί στην πεποίθηση ότι όντως αληθεύουν παντού οι ίδιοι νόμοι. Καθώς δεν έχουμε ταξιδέψει ποτέ στην άλλη άκρη του σύμπαντος, δεν μπορούμε να αποκλείσουμε οριστικά την πιθανότητα να επικρατεί ένα εντελώς διαφορετικό είδος φυσικής κάπου αλλού, όμως όλα δείχνουν το αντίθετο.

Και πάλι, αυτό δεν σημαίνει ότι το σύμπαν δείχνει το ίδιο –ή έχει τις ίδιες λεπτομερείς ιδιότητες – σε διαφορετικές τοποθεσίες. Ένας αστροναύτης που φορά παπούτσια με ελατήρια μπορεί να κάνει ένα σωρό πράγματα στη Σελήνη που είναι αδύνατο να τα κάνει στη Γη. Αναγνωρίζουμε όμως ότι η διαφορά προκύπτει επειδή η Σελήνη έχει πολύ μικρότερη μάζα από τη Γη: αυτό δεν σημαίνει ότι ο νόμος της βαρύτητας κατά κάποιον τρόπο αλλάζει από τόπο σε τόπο. Ο νόμος του Newton, ή για την ακρίβεια του Einstein, για τη βαρύτητα είναι ίδιος τόσο στη Γη όσο και στη Σελήνη. Η διαφορά στις εμπειρίες του αστροναύτη οφείλεται σε αλλαγή συνθηκών και όχι σε μεταβολή του φυσικού νόμου.

Οι φυσικοί περιγράφουν αυτές τις δύο ιδιότητες των φυσικών νόμων –ότι δηλαδή δεν εξαρτώνται από το πότε ή το πού τους χρησιμοποιούμε – ως συμμετρίες της φύσης. Χρησιμοποιώντας αυτό τον όρο, οι φυσικοί εννοούν ότι η φύση αντιμετωπίζει κάθε στιγμή του χρόνου και κάθε θέση του χώρου με τον ίδιο τρόπο –συμμετρικά – εξασφαλίζοντας ότι ισχύουν οι ίδιοι θεμελιώδεις νόμοι. Όπως ακριβώς στις εικαστικές τέχνες και τη μουσική, οι συμμετρίες αυτές προκαλούν βαθιά ικανοποίηση· υπογραμμίζουν την τάξη και τη συνοχή στις λειτουργίες της φύσης. Η κομψότητα των πλούσιων, σύνθετων και πολυποίκιλων φαινομένων που προκύπτουν από ένα απλό σύνολο παγκόσμιων νόμων, μας δίνει μόνο μια μικρή γεύση γι' αυτό που εννοούν οι φυσικοί όταν μιλούν για «ομορφιά».

Στις συζητήσεις μας σχετικά με την ειδική και τη γενική θεωρία της σχετικότητας, συναντήσαμε κι άλλες συμμετρίες της φύσης. Θυμηθείτε ότι η αρχή της σχετικότητας, που βρίσκεται στην καρδιά της ειδικής σχετικότητας, μας λέει ότι όλοι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να είναι ίδιοι ανεξάρτητα από την ομαλή σχετική κίνηση που μπορεί να εκτελούν οι ανεξάρτητοι παρατηρητές. Αυτό είναι ένα είδος συμμετρίας, αφού σημαίνει ότι η φύση συμπεριφέρεται σε όλους αυτούς τους παρατηρητές πανομοιότυπα – συμμετρικά. Κάθε τέτοιος παρατηρητής δικαιούται να θεωρεί τον εαυτό του ακίνητο. Και πάλι, αυτό δεν σημαίνει ότι παρατηρητές σε

σχετική κίνηση θα κάνουν τις ίδιες παρατηρήσεις· όπως είδαμε και νωρίτερα, υπάρχουν ένα σωρό εκπληκτικές διαφορές στις παρατηρήσεις τους. Ωστόσο, όπως και με τις διαφορετικές εμπειρίες του αστροναύτη με τα ελατήρια στη Γη και στη Σελήνη, οι διαφορές στις παρατηρήσεις αντανακλούν τις λεπτομέρειες του περιβάλλοντος —οι παρατηρητές βρίσκονται σε σχετική κίνηση— παρ' όλο που οι παρατηρήσεις τους διέπονται από πανομοιότυπους νόμους.

Με την αρχή της ισοδυναμίας στη γενική σχετικότητα, ο Einstein επέκτεινε σημαντικά τη συμμετρία αυτή, δείχνοντας ότι οι νόμοι της φυσικής είναι πράγματι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές, ακόμη κι αν κάνουν επιταχυνόμενη κίνηση. Θυμηθείτε ότι ο Einstein έκανε αυτή την ανακάλυψη όταν συνειδητοποίησε ότι ακόμα κι ένας επιταχυνόμενος παρατηρητής δικαιούται να θεωρεί τον εαυτό του σε ακινησία και να ισχυρίζεται ότι η δύναμη που νιώθει οφείλεται σε κάποιο βαρυτικό πεδίο. Από τη στιγμή που η βαρύτητα εντάσσεται στο πλαίσιο της σχετικότητας, όλες οι δυνατές θέσεις παρατήρησης είναι εντελώς ισοδύναμες. Πέρα από την εγγενή γοητεία αυτής της ισότιμης αντιμετώπισης όλων των κινήσεων, έχουμε δει ότι αυτές οι αρχές συμμετρίας διαδραμάτισαν σημαίνοντα ρόλο στα εκπληκτικά συμπεράσματα για τη βαρύτητα, στα οποία κατέληξε ο Einstein.

Υπάρχουν μήπως κι άλλες αρχές συμμετρίας σχετικά με το χώρο, το χρόνο και την κίνηση, στις οποίες πρέπει να υπακούουν οι νόμοι της φύσης; Αν το καλοσκεφτείτε, μπορεί να καταλήξετε σε άλλη μία δυνατότητα. Οι νόμοι της φυσικής πρέπει να αδιαφορούν για τη γωνία υπό την οποία κάνετε τις παρατηρήσεις σας. Για παράδειγμα, αν εκτελέσετε κάποιο πείραμα και κατόπιν αποφασίσετε να στρέψετε κατά κάποια γωνία όλα τα αντικείμενα που συμμετέχουν σε αυτό και μετά να εκτελέσετε το πείραμα ξανά, πρέπει να ισχύουν οι ίδιοι νόμοι. Αυτή η συμμετρία λέγεται «γωνιακή» και σημαίνει ότι οι νόμοι της φυσικής αντιμετωπίζουν με τον ίδιο τρόπο όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς. Είναι

μια αρχή συμμετρίας ισοδύναμη με τις προηγούμενες που συζητήσαμε.

Υπάρχουν κι άλλες; Μήπως παραλείψαμε κάποιες συμμετρίες; Ίσως εννοείτε τις συμμετρίες βαθμίδας που συνδέονται με τις μη βαρυτικές δυνάμεις, όπως τις εξετάσαμε στο Κεφάλαιο 5. Κι αυτές ασφαλώς είναι συμμετρίες της φύσης, αλλά ανήκουν σε μια πιο αφηρημένη κατηγορία· εδώ το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται σε συμμετρίες που σχετίζονται άμεσα με το χώρο, το χρόνο ή την κίνηση. Με τον περιορισμό αυτό, το πιθανότερο είναι ότι τώρα δεν μπορείτε να σκεφτείτε άλλες δυνατότητες. Πράγματι, το 1967 οι φυσικοί Sidney Coleman και Jeffrey Mandula μπόρεσαν να αποδείξουν ότι καμία άλλη συμμετρία που να σχετίζεται με το χώρο, το χρόνο ή την κίνηση δεν θα μπορούσε να συνδυαστεί με αυτές που μόλις συζητήσαμε και να δώσει μια θεωρία που να έχει κάποια ομοιότητα με τον χόσμο μας.

Αργότερα ωστόσο, προσεκτική μελέτη που βασίστηκε σε ιδέες πολλών φυσικών, αποκάλυψε ότι στο θεώρημα αυτό υπάρχει ένα παραθυράκι: το συμπέρασμα των Coleman-Mandula δεν εκμεταλλευόταν πλήρως τις συμμετρίες που βασίζονται στην ιδιοπεριστροφή ή σπιν.

Σπιν

Ένα στοιχειώδες σωματίδιο, όπως το ηλεκτρόνιο, μπορεί να περιστρέφεται γύρω από έναν ατομικό πυρήνα περίπου κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο. Ωστόσο, στην παραδοσιακή περιγραφή ενός ηλεκτρονίου ως σημειακού σωματιδίου, φαίνεται να μην υπάρχει ανάλογο της ιδιοπεριστροφής της Γης, της περιστροφής της δηλαδή γύρω από τον άξονά της. Όταν οποιοδήποτε αντικείμενο περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του, τα σημεία πάνω στον άξονα της περιστροφής -όπως το κέντρο ενός δίσκου του φρίζιμπιδεν κινούνται. Στην ουσία κάτι το οποίο είναι πράγματι σημεια-

κό δεν έχει «άλλα σημεία» που να βρίσκονται εκτός του υποτιθέμενου άξονα της περιστροφής. Και έτσι θα έπρεπε να συμπεράνουμε ότι ούτε καν υφίσταται έννοια ιδιοπεριστροφής για σημειακά αντικείμενα. Πριν από πολλά χρόνια, αυτή η συλλογιστική έπεσε θύμα άλλης μιας έκπληξης που μας επιφύλαξε η κβαντομηχανική.

Στα 1925, οι Ολλανδοί φυσικοί George Uhlenbeck και Samuel Goudsmit συνειδητοποίησαν ότι ένα πλήθος δεδομένων τα οποία προκαλούσαν προβληματισμό και είχαν να κάνουν με τις ιδιότητες του φωτός που εκπέμπεται και απορροφάται από άτομα, θα μπορούσαν να εξηγηθούν αν υποθέταμε ότι τα ηλεκτρόνια διέθεταν κάποιες πολύ συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες. Περίπου εκατό χρόνια νωρίτερα, ο Γάλλος André-Marie Ampère είχε δείξει ότι ο μαγνητισμός προέρχεται από κινήσεις ηλεκτρικών φορτίων. Οι Uhlenbeck και Goudsmit ακολούθησαν αυτή τη σκέψη και βρήκαν ότι μόνο ένα συγκεκριμένο είδος κίνησης του ηλεκτρονίου μπορούσε να προκαλέσει τις μαγνητικές ιδιότητες που προέκυπταν από τα δεδομένα: η περιστροφική κίνηση – με άλλα λόγια, η ιδιοπεριστροφή, το σπιν του ηλεκτρονίου. Λαντίθετα απ' ό,τι αναμέναμε, οι Uhlenbeck και Goudsmit ισχυρίστηκαν ότι, περίπου όπως η Γη, τα ηλεκτρόνια περιφέρονται και περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους.

Εννοούσαν οι Uhlenbeck και Goudsmit κυριολεκτικά ότι το ηλεκτρόνιο περιστρέφεται; Και ναι και όχι. Αυτό που έδειχνε πραγματικά η δουλειά τους είναι ότι υπάρχει μια κβαντομηχανική έννοια της ιδιοπεριστροφής, η οποία είναι κάπως συγγενική προς τη συνήθη εικόνα αλλά ενδογενώς κβαντική στη φύση της. Είναι κι αυτή μία από εκείνες τις ιδιότητες του μικρόκοσμου που φαίνεται να στηρίζεται σε χλασικές έννοιες, αλλά επαληθεύεται πειραματικά με την κβαντομηχανική. Για παράδειγμα, φανταστείτε μία αθλήτρια του πατινάζ που περιστρέφεται. Όταν φέρνει τα χέρια πιο κοντά στο σώμα της, περιστρέφεται γρηγορότερα: όταν τα απομακρύνει, περιστρέφεται βραδύτερα. Και αργά ή γρή-

γορά, αναλόγως με το πόσο ζωηρά ξεκίνησε να περιστρέφεται, θα επιβραδυθεί και θα σταματήσει. Δεν συμβαίνει το ίδιο με το σπιν που ανακάλυψαν οι Uhlenbeck και Goudsmit. Σύμφωνα με τις εργασίες τους και με μετέπειτα μελέτες, κάθε ηλεκτρόνιο στο σύμπαν, ανέχαθεν και παντοτινά, ιδιοπεριστρέφεται με έναν καθορισμένο και αναλλοίωτο ρυθμό. Το σπιν ενός ηλεκτρονίου δεν είναι μια παροδική κατάσταση της κίνησης όπως για τα περισσότερα άλλα αντικείμενα τα οποία, για τον έναν ή τον άλλο λόγο, έτυχε να περιστρέφονται. Αντίθετα, το σπιν ενός ηλεκτρονίου είναι μια ενδογενής ιδιότητα, όπως περίπου η μάζα του ή το ηλεκτρικό του φορτίο. Αν ένα ηλεκτρόνιο δεν εμφανίζε σπιν, δεν θα ήταν ηλεκτρόνιο.

Μολονότι οι πρώτες έρευνες επικεντρώθηκαν στο ηλεκτρόνιο, οι φυσικοί έδειξαν αργότερα ότι αυτές οι ιδέες περί σπιν εφαρμόζονται εξίσου καλά σε όλα τα σωματίδια της ύλης, που αποτελούν τις τρεις οικογένειες του Πίνακα 1.1. Αυτό αληθεύει μέχρι την παραμικρή λεπτομέρεια: όλα τα σωματίδια της ύλης (και τα αντισωματίδια τους επίσης) έχουν σπιν ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου. Στη γλώσσα τους, οι φυσικοί λένε ότι όλα τα σωματίδια της ύλης έχουν «σπιν- $\frac{1}{2}$ », όπου η τιμή $\frac{1}{2}$ είναι, για να το πούμε πιο απλά, ένα κβαντομηχανικό μέτρο του ρυθμού με τον οποίο περιστρέφονται τα σωματίδια.² Επιπλέον, οι φυσικοί έχουν δείξει ότι όλοι οι φορείς των άλλων δυνάμεων πλην της βαρυτικής –τα φωτόνια, τα μποζόνια ασθενούς βαθμίδας και τα γλοιόνια– ιδιοπεριστρέφονται ενδογενώς με σπιν διπλάσιο από αυτό των σωματιδίων της ύλης. Όλα έχουν «σπιν-1».

Και με τη βαρύτητα τι γίνεται; Ακόμη και πριν από τη θεωρία χορδών, οι φυσικοί είχαν κατορθώσει να υπολογίσουν πόσο σπιν θα έπρεπε να έχει το υποθετικό βαρυτόνιο ώστε να μπορεί να είναι ο φορέας της βαρυτικής δύναμης. Η απάντηση; Διπλάσιο από το σπιν των φωτονίων, των μποζόνιων ασθενούς βαθμίδας και των γλοιονίων – δηλαδή «σπιν-2».

Στο πλαίσιο της θεωρίας χορδών, το σπιν –όπως ακριβώς η μάζα και το φορτίο– σχετίζεται με τον τρόπο ταλάντωσης της χορ-

δής. Όπως και με τα σημειακά σωματίδια, είναι κάπως παραπλανητικό να θεωρούμε ότι το σπιν που φέρει μια χορδή οφείλεται σε μια πραγματική περιστροφή της στο χώρο, αλλά ας κρατήσουμε ότι την εικόνα στο μυαλό μας. Παρεμπιπτόντως, μπορούμε να αποσαφηνίσουμε τώρα ένα σημαντικό ζήτημα που είχε ανακύψει νωρίτερα. Το 1974, όταν οι Scherk και Schwarz υποστήριξαν ότι η θεωρία χορδών έπρεπε να αντιμετωπιστεί ως μια κβαντική θεωρία που συμπεριλαμβάνει τη βαρυτική δύναμη, το έχαναν επειδή είχαν βρει ότι οι χορδές περιλαμβάνουν κατ' ανάγκην στο ρεπερτόριό τους μια ταλάντωση μηδενικής μάζας με σπιν-2 – τα κατεξοχήν χαρακτηριστικά του βαρυτονίου. Και δεν υπάρχει βαρυτόνιο χωρίς βαρύτητα.

Με αυτές τις βασικές σκέψεις όσον αφορά την έννοια του σπιν, ας επιστρέψουμε στο ρόλο που έπαιξε το σπιν στο αποτέλεσμα των Coleman-Mandula σχετικά με τις πιθανές συμμετρίες στη φύση που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Υπερσυμμετρία και υπερεταίροι

Όπως έχουμε τονίσει, η έννοια του σπιν, μολονότι δίνει την εικόνα μιας περιστρεφόμενης σβούρας, είναι ουσιαστικά διαφορετική για λόγους που απορρέουν από την κβαντομηχανική. Η ανακάλυψη του σπιν το 1925 φανέρωσε ότι υπάρχει άλλο ένα είδος περιστροφικής κίνησης που δεν θα μπορούσε να υπάρχει σε ένα αμιγώς κλασικό σύμπαν.

Έτσι προκύπτει το ακόλουθο ερώτημα: όπως ακριβώς η συνήθης περιστροφική κίνηση οδηγεί σε μια αρχή συμμετρίας, η οποία παραμένει διατηρούμενη ως προς την περιστροφή («η φυσική αντιμετωπίζει πανομοιότυπα όλους τους χωρικούς προσανατολισμούς»), δεν θα μπορούσε και αυτή η περιστροφική κίνηση που σχετίζεται με το σπιν να δίνει κάποια άλλη συμμετρία; Γύρω στα 1971, οι φυσικοί έδειξαν ότι η απάντηση στο ερώτημα αυτό είναι καταφατική. Παρ' όλο που η όλη ιστορία φαίνεται κάπως περί-

πλοκη, η βασική ιδέα είναι ότι, όταν λάβουμε υπόψη το σπιν, υπάρχει μόνο μία ακόμη συμμετρία των νόμων της φύσης που επιβεβαιώνεται από τα μαθηματικά. Είναι γνωστή ως υπερσυμμετρία.³

Η υπερσυμμετρία δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή με μια απλή και διαισθητική αλλαγή της θέσης παρατήρησης· μετατοπίσεις στο χρόνο, ως προς τη χωρική θέση ή τη γωνία, καθώς και μεταβολές στην ταχύτητα της κίνησης εξαντλούν όλες τις πιθανές δυνατότητες. Αλλά όπως ακριβώς το σπιν «μοιάζει με περιστροφική κίνηση που δέχεται μια κβαντομηχανική στρέβλωση», η υπερσυμμετρία μπορεί να συσχετιστεί με μια αλλαγή παρατηρησιακής θέσης σε μια «κβαντομηχανική επέκταση του χωροχρόνου». Τα εισαγωγικά εδώ είναι εξαιρετικά σημαντικά, καθώς η τελευταία αυτή φράση χρησιμοποιείται μόνο και μόνο για να σχηματίσουμε μια πολύ γενική ιδέα για τη θέση που κατέχει η υπερσυμμετρία στο ευρύτερο πλαίσιο των αρχών συμμετρίας.⁴ Ωστόσο, αφού η κατανόηση της προέλευσης της υπερσυμμετρίας είναι μάλλον λεπτή υπόθεση, εμείς θα επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας σε μία από τις κύριες συνέπειές της – με την προϋπόθεση ότι οι νόμοι της φύσης υπακούουν στις αρχές της – που μπορεί να γίνει κατανοητή πολύ πιο εύκολα.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, οι φυσικοί συνειδητοποίησαν ότι, αν το σύμπαν είναι υπερσυμμετρικό, τα σωματίδια της φύσης θα πρέπει να εμφανίζονται σε ζεύγη των οποίων τα σπιν θα διαφέρουν κατά μισή μονάδα. Τέτοια ζεύγη σωματιδίων – ανεξαρτήτως αν θεωρούνται σημειακά (όπως στο βασικό μοντέλο) ή μικροσκοπικοί δονούμενοι βρόχοι – αποκαλούνται υπερεταίροι. Από τη στιγμή που τα σωματίδια της ύλης έχουν σπιν- $\frac{1}{2}$, ενώ ορισμένα σωματίδια φορείς έχουν σπιν-1, η υπερσυμμετρία φαίνεται να οδηγεί σε ένα ζευγάρωμα – ένα συν-εταιρισμό – της ύλης με τους φορείς των δυνάμεων. Η ιδέα εκ πρώτης όψεως φαίνεται καταπληκτική και ενοποιητική. Το πρόβλημα προχύπτει στις λεπτομέρειες.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, όταν οι φυσικοί προσπά-

θησαν να ενσωματώσουν την υπερσυμμετρία στο βασικό μοντέλο, ανακάλυψαν ότι κανένα από τα γνωστά σωματίδια –εκείνα των Πινάκων 1.1 και 1.2– δεν θα μπορούσε να είναι υπερεταίρος κάποιου άλλου. Αντίθετα, λεπτομερειακή θεωρητική ανάλυση έδειξε ότι, αν το σύμπαν ενσωματώνει την υπερσυμμετρία, τότε για κάθε γνωστό σωματίδιο θα πρέπει να υπάρχει ένα ακόμη σωματίδιο υπερεταίρος που δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμη, με σπιν μισή μονάδα μικρότερο από του γνωστού του «συνεταίρου». Για παράδειγμα, θα πρέπει να υπάρχει ένας εταίρος του ηλεκτρονίου με σπιν-0· αυτό το υποθετικό σωματίδιο έχει ονομαστεί *s*-ηλεκτρόνιο (μια σύντμηση του *supersymmetric-electron*: υπερσυμμετρικό ηλεκτρόνιο). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και για τα άλλα σωματίδια της ύλης· για παράδειγμα, οι υποθετικοί υπερεταίροι με σπιν-0 των νετρίνων και των κουάρκ θα ονομάζονται *s*-νετρίνα και *s*-κουάρκ. Παρομοίως, οι φορείς των δυνάμεων θα πρέπει να διαθέτουν υπερεταίρους με σπιν- $\frac{1}{2}$: για τα φωτόνια –εδώ οι κανόνες ονοματολογίας αλλάζουν λιγάκι– θα πρέπει να υπάρχουν τα φωτίνια, για τα γλοιόνια τα *gluininos*, για τα *W* και *Z* μποζόνια τα *winos* και *zinios*.

Μια προσεκτικότερη εξέταση αποκαλύπτει συνεπώς ότι η υπερσυμμετρία τείνει να γίνει τρομερά αντιοικονομική· απαιτεί έναν ολόκληρο στρατό από πρόσθετα σωματίδια, τα οποία καταλήγουν να διπλασιάσουν τον κατάλογο των θεμελιωδών συστατικών. Και εφόσον δεν έχει ανακαλυφθεί ποτέ κανένα σωματίδιο-υπερεταίρος, θα έίχατε κάθε δικαίωμα να χρησιμοποιήσετε το σχόλιο του Rabi από το Κεφάλαιο 1 αναφορικά με την ανακάλυψη του μιονίου, να δηλώσετε ότι «κανείς δεν παράγγειλε την υπερσυμμετρία» και να απορρίψετε με συνοπτικές διαδικασίες αυτή την αρχή συμμετρίας. Για τρεις λόγους ωστόσο πολλοί φυσικοί είναι πεπεισμένοι ότι μια τόσο άμεση απόρριψη της υπερσυμμετρίας θα ήταν κάπως ανθριμή. Ας συζητήσουμε αυτούς τους τρεις λόγους.

Υπεράσπιση της υπερσυμμετρίας:
πριν από τη θεωρία χορδών

Πρώτον, για λόγους αισθητικής, οι φυσικοί δυσκολεύονται να πιστέψουν ότι ενώ η φύση υπακούει σε όλες τις συμμετρίες που είναι μαθηματικά δυνατές, δεν υπακούει στην υπερσυμμετρία. Προφανώς, μπορεί οι συμμετρίες να περιορίζονται, πράγμα που είναι πολύ λυπηρό. Το αντίστοιχο στη μουσική θα ήταν εάν ο Μπαχ, αφού ανέπτυσσε διάφορες διαπλεκόμενες μελωδίες σε ένα αξιοθαύμαστα συμμετρικό μουσικό σύνολο, παρέλειπε το τελικό μουσικό μέτρο, την κατακλείδα.

Δεύτερον, ακόμη και εντός του βασικού μοντέλου, μιας θεωρίας που αγνοεί τη βαρύτητα, ακανθώδη τεχνικά ζητήματα, τα οποία σχετίζονται με χβαντικές διεργασίες, επιλύονται αριστοτεχνικά αν η θεωρία είναι υπερσυμμετρική. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι κάθε σωματίδιο συνεισφέρει με τον δικό του τρόπο στη μικροσκοπική χβαντομηχανική φρενίτιδα. Οι φυσικοί έχουν ανακαλύψει ότι μέσα σε αυτή τη φρενίτιδα ορισμένες διεργασίες που αφορούν αλληλεπιδράσεις σωματιδίων δεν επηρεάζονται αν και μόνο αν οι αριθμητικές παράμετροι του βασικού μοντέλου ρυθμίστούν με τέτοιον τρόπο – με ακρίβεια μεγαλύτερη του ενός εκατομμυριοστού του δισεκατομμυριοστού – ώστε να εξουδετερώνουν τις πιο επιβλαβείς χβαντικές επιδράσεις. Με ανάλογη ακρίβεια θα έπρεπε να σημαδέψει κι ένας σκοπευτής που θα διέθετε ένα πολύ ισχυρό όπλο, ώστε να χτυπήσει από τη Γη ένα συγκεκριμένο στόχο στη Σελήνη με απόκλιση μικρότερη από το πάχος μιας αμοιβάδας. Παρότι αριθμητικές ρυθμίσεις ανάλογης ακρίβειας μπορούν να γίνουν εντός του βασικού μοντέλου, πολλοί φυσικοί στέκονται αρκετά επιφυλακτικοί απέναντι σε μια θεωρία που είναι τόσο εύθραυστη ώστε να καταρρέει αν ένα νούμερο αλλάξει στο δέκατο πέμπτο ψηφίο μετά την υποδιαστολή.⁵

Η υπερσυμμετρία αλλάζει δραστικά το τοπίο διότι τα μποζόνια – τα σωματίδια που το σπιν τους είναι ακέραιος αριθμός (και

ονομάστηκαν έτσι προς τιμήν του Ινδού φυσικού Satyendra Bose) – και τα φερμιόνια – τα σωματίδια που το σπιν τους είναι το μισό ενός περιττού αριθμού (και ονομάστηκαν έτσι προς τιμήν του Ιταλού φυσικού Enrico Fermi) – έχουν την τάση να αλληλοεξουδετερώνονται. Όπως συμβαίνει στις αντίθετες άκρες μιας τραμπάλας, όταν τα κβαντικά τρεμουλιάσματα ενός μποζονίου είναι θετικά, αυτά ενός φερμιονίου τείνουν να είναι αρνητικά και αντιστρόφως. Από τη στιγμή που η υπερσυμμετρία συνεπάγεται ότι τα μποζόνια και τα φερμιόνια εμφανίζονται σε ζεύγη, συμβαίνουν εξαρχής σημαντικές εξουδετερώσεις – εξουδετερώσεις που εξημερώνουν αρκετά κάποια από τα πιο φρενήρη κβαντικά φαινόμενα. Αποδεικνύεται τελικά ότι η συνέπεια του υπερσυμμετρικού βασικού μοντέλου – του βασικού μοντέλου συμπληρωμένου με την υπερσυμμετρική ιδιότητα – δεν στηρίζεται πλέον στις άβολες και εύθραυστες αριθμητικές ρυθμίσεις του συνήθους βασικού μοντέλου. Μολονότι πρόκειται για ένα ιδιαίτερα τεχνικό ζήτημα, πολλοί φυσικοί στοιχειωδών σωματιδίων θεωρούν ότι αυτή η συνειδητοποίηση καθιστά την υπερσυμμετρία ιδιαίτερα ελκυστική.

Η τρίτη ένδειξη προς υπεράσπιση της υπερσυμμετρίας προέρχεται από την έννοια της μεγάλης ενοποίησης. Ένα από τα πιο προβληματικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων δυνάμεων της φύσης είναι το τεράστιο εύρος της ενδογενούς ισχύος τους. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη κυμαίνεται στο 1% της ισχύος της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η ασθενής δύναμη είναι μερικές χιλιάδες φορές πιο αδύναμη από την ηλεκτρομαγνητική, και η βαρυτική δύναμη είναι κάπου εκατό εκατομμύρια δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια (10^{-35}) φορές ακόμα πιο αδύναμη. Ακολουθώντας το πρωτοποριακό και τελικά βραβευμένο με Νόμπελ έργο των Glashow, Salam και Weinberg, που απέδειξε τη βαθιά σχέση μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και της ασθενούς δύναμης (όπως συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 5), το 1974 ο Glashow, μαζί με το συνάδελφό του από το Χάρβαρντ Howard Georgi πρότειναν ότι μπορεί να γίνει κι ένας ανάλογος συσχετισμός με την ισχυρή δύναμη. Το έργο τους, με το οποίο προτάθηκε μια «μεγάλη ενοποί-

ηση» των τριών από τις τέσσερις δυνάμεις, διέφερε σε χάτι βασικό από την ηλεκτρασθενή θεωρία: ενώ οι ηλεκτρομαγνητικές και οι ασθενείς δυνάμεις αποκρυστάλλωθηκαν σε μια συμμετρική ένωση, όταν η θερμοκρασία του σύμπαντος έπεσε περίπου στους ένα εκατομμύριο δισεκατομμύρια βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν (10^{15} βαθμούς Kelvin), οι Georgi και Glashow έδειξαν ότι η ένωση με την ισχυρή δύναμη θα ήταν εμφανής μόνο σε μια θερμοκρασία περίπου δέκα τρισεκατομμύρια φορές υψηλότερη – περίπου δέκα δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν (10^{28} βαθμούς Kelvin). Από ενεργειακή σκοπιά, αυτό ισοδυναμεί περίπου με ένα εκατομμύριο δισεκατομμύρια φορές τη μάζα του πρωτονίου, είναι δηλαδή περίπου τέσσερις τάξεις μεγέθους μικρότερη από τη μάζα Planck. Οι Georgi και Glashow έφτασαν τη θεωρητική φυσική σε ένα σημείο που κανείς δεν είχε τολμήσει μέχρι τότε να εξερευνήσει.

Μετέπειτα εργασίες στο Χάρβαρντ, από τους Georgi, Helen Quinn και Weinberg το 1974, έχαναν ακόμη πιο εμφανή την δυνάμει ενότητα των μη βαρυτικών δυνάμεων εντός του πλαισίου της μεγάλης ενοποίησης. Καθώς η συνεισφορά τους εξακολουθεί να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενοποίηση των δυνάμεων και την αξιολόγηση της σχέσης της υπερσυμμετρίας με τον φυσικό μας χόσμο, ας ξοδέψουμε λίγο χρόνο για να την εξηγήσουμε.

Όλοι γνωρίζουμε ότι η ηλεκτρική έλξη ανάμεσα σε δύο αντίθετα φορτισμένα σώματα δια ή η βαρυτική έλξη ανάμεσα σε δύο σώματα μεγαλώνει όσο η απόσταση ανάμεσα στα σώματα μειώνεται. Πρόκειται για απλά και πασίγνωστα χαρακτηριστικά της κλασικής φυσικής. Υπάρχει ωστόσο μια έκπληξη όταν μελετήσουμε την επίδραση που έχει η κβαντική φυσική στις δυνάμεις. Και γιατί πρέπει η κβαντική φυσική να επηρεάζει με κάποιον τρόπο τις δυνάμεις; Η απάντηση, για άλλη μια φορά, βρίσκεται στις κβαντικές διαταραχές. Όταν εξετάζουμε το ηλεκτρικό πεδίο ενός ηλεκτρονίου, για παράδειγμα, το εξετάζουμε στην πραγματικότητα μέσα από το «κένος» των στιγμαίων δημιουργιών και εκ-

μηδενισμών σωματιδίων και αντισωματιδίων, που συμβαίνουν στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόνιο. Οι φυσικοί συνειδητοποίησαν πριν από λίγο καιρό ότι αυτό το πυκνό νέφος των μικροσκοπικών διαταραχών καλύπτει όλη την ένταση του δυναμικού πεδίου του ηλεκτρονίου, περίπου όπως η καταχνιά συσκοτίζει κάπως τη φωτεινή δέσμη ενός φάρου. Παρατηρήστε όμως ότι όσο πλησιάζουμε το ηλεκτρόνιο, τόσο μεγαλύτερο μέρος του νέφους των σωματιδίων-αντισωματιδίων που το καλύπτει θα αφήνουμε πίσω μας και συνεπώς θα αισθανόμαστε λιγότερο την περιοριστική του επίδραση. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρονίου θα αυξάνεται καθώς το πλησιάζουμε.

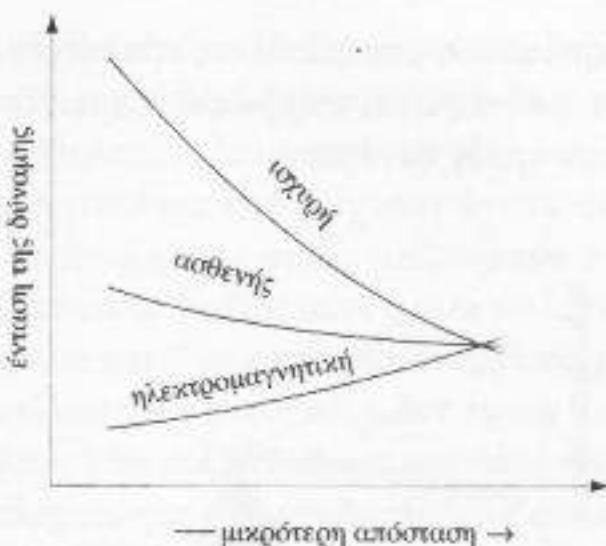
Οι φυσικοί διαχωρίζουν αυτή την κβαντομηχανική αύξηση έντασης καθώς πλησιάζουμε το ηλεκτρόνιο αναφερόμενοι σε εκείνη που είναι ήδη γνωστή από την κλασική φυσική, λέγοντας ότι η ενδογενής ένταση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης αυξάνεται σε μικρότερες κλίμακες. Αυτό αντανακλά το γεγονός ότι η ένταση αυξάνεται όχι μόνο επειδή πλησιάζουμε πιο κοντά στο ηλεκτρόνιο, αλλά επειδή έτσι γίνεται ορατό μεγαλύτερο μέρος του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου του ηλεκτρονίου. Μάλιστα, μολονότι επικεντρώσαμε τη συζήτησή μας στο ηλεκτρόνιο, τα ίδια ισχύουν εξίσου για όλα τα ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κάτι που συνοψίζεται στη φράση ότι τα κβαντικά φαινόμενα αναγκάζουν την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης να αυξηθεί όταν εξετάζεται σε μικρότερες κλίμακες αποστάσεων.

Τι γίνεται όμως με τις άλλες δυνάμεις του βασικού μοντέλου; Πώς μεταβάλλεται η εσωτερική έντασή τους με την απόσταση; Το 1973, οι Gross και Frank Wilczek στο Πρίνστον και, ανεξάρτητα, ο David Politzer στο Χάρβαρντ μελέτησαν αυτό το ερώτημα και βρήκαν μια απάντηση που ξάφνιασε: το κβαντικό νέφος μέσα στο οποίο γεννιούνται και εκμηδενίζονται σωματίδια αυξάνει την ένταση της ισχυρής και της ασθενούς δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι, όσο τις εξετάζουμε σε ολοένα μικρότερες αποστάσεις, διαπερνάμε ολοένα μεγαλύτερο μέρος αυτού του ταραχγμένου νέφους και κατά συνέπεια δεχόμαστε λιγότερο την επίδρασή του.

Κι έτσι, η ένταση αυτών των δυνάμεων γίνεται μικρότερη όταν τις εξετάζουμε σε μικρότερες αποστάσεις.

Οι Georgi, Quinn και Weinberg πήραν τη σκυτάλη αυτής της ανακάλυψης και έφτασαν μέχρι το τέλος. Έδειξαν ότι όταν συνυπολογιστούν προσεκτικά όλα αυτά τα κβαντικά φαινόμενα, το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι οι εντάσεις και των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων καταλήγουν να συμπίπτουν. Μολονότι τα μέτρα των συγκεκριμένων δυνάμεων διαφέρουν κατά πολύ στις κλίμακες που μπορούμε να προσεγγίσουμε με τη σημερινή τεχνολογία, οι Georgi, Quinn και Weinberg υποστήριξαν ότι στην πραγματικότητα αυτή η διαφορά οφείλεται στη διαφορετική επίδραση που έχει η αχλή της μικροσκοπικής κβαντικής δραστηριότητας στην κάθε δύναμη. Οι υπολογισμοί τους έδειξαν ότι αν αυτή η αχλή διαπεραστεί και οι δυνάμεις εξεταστούν όχι στις συνηθισμένες κλίμακες αλλά σε κλίμακες της τάξης του ενός εκατοστού του δισεκατομμυριοστού του δισεκατομμυριοστού του δισεκατομμυριοστού (10^{-29}) του ενός cm (μόλις δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από το μήκος Planck), οι εντάσεις των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων φαίνεται να εξισώνονται.

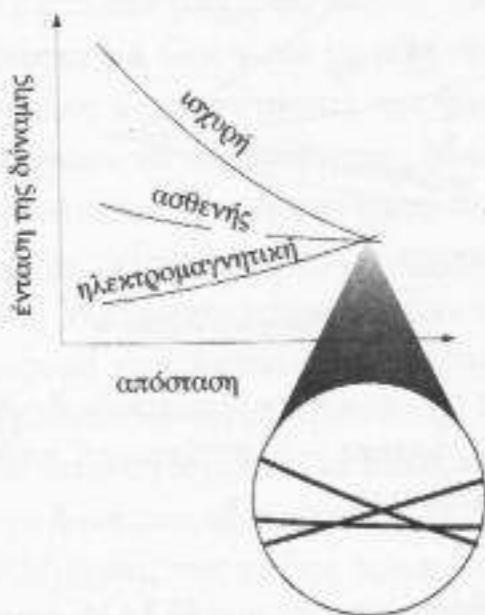
Παρότι εντελώς αδιανόητη στο πεδίο της καθημερινής εμπειρίας, η υψηλή ενέργεια που απαιτείται ώστε να αισθανθούμε αυτές τις τόσο μικρές κλίμακες ήταν απόλυτα χαρακτηριστική του ταραγμένου, ζεστού πρωταρχικού σύμπαντος, όταν αυτό είχε ηλικία μόλις ένα χιλιοστό του τρισεκατομμυριοστού του τρισεκατομμυριοστού του τρισεκατομμυριοστού (10^{-39}) του δευτερολέπτου – όταν η θερμοκρασία του ήταν της τάξης των 10^{28} Kelvin, όπως αναφέραμε προηγουμένως. Όπως περίπου διάφορα ανόμοια συστατικά – κομμάτια μετάλλου, ξύλα, πέτρες, ορυκτά κ.λπ. – λιώνουν όλα μαζί και γίνονται ένα ομοιόμορφο, ομογενές πλάσμα όταν τα θερμάνουμε σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, οι παραπάνω θεωρητικές εργασίες πρότειναν ότι η ισχυρή, η ασθενής και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη συνενώνονται όλες μαζί σε μία μεγάλη ενοποιημένη δύναμη σε αυτές τις τεράστιες θερμοκρασίες. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 7.1.⁶



Σχήμα 7.1 Οι εντάσεις των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων καθώς δρουν σε ολοένα μικρότερες κλίμακες – ή, αντίστοιχα, καθώς δρουν σε πεδία ολοένα μεγαλύτερης ενέργειας.

Μολονότι δεν διαθέτουμε την κατάλληλη τεχνολογία ώστε να ελέγξουμε τόσο μικροσκοπικές κλίμακες ή να παράγουμε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, από το 1974 και μετά οι πειραματιστές έχουν βελτιώσει σημαντικά τις μετρήσεις της έντασης των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων σε καθημερινές συνθήκες. Με αυτά τα δεδομένα –τα σημεία εκκίνησης για τις τρεις καμπύλες ισχύος στο Σχήμα 7.1– γίνονται οι κβαντομηχανικές προεκτάσεις των Georgi, Quinn και Weinberg. Το 1991, ο Ugo Amaldi από το CERN, και οι Wim de Boer και Hermann Fürstenau από το Πανεπιστήμιο της Καρλσρούης στη Γερμανία, υπολόγισαν ξανά τα συμπεράσματα των Georgi, Quinn και Weinberg χρησιμοποιώντας τα βελτιωμένα πειραματικά δεδομένα κι έδειξαν δύο σημαντικά πράγματα. Πρώτον, οι εντάσεις των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων συμπίπτουν περίπου αλλά όχι πλήρως στις μικροσκοπικές κλίμακες αποστάσεων (ισοδύναμα, σε κλίμακες υψηλών ενέργειών/υψηλών θερμοκρασιών), όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Δεύτερον, αυτή η απειροελάχιστη αλλά αναμφισβήτητη διαφορά στις εντάσεις τους εξαφανίζεται αν συμπεριληφθεί η υπερσυμμετρία. Ο λόγος είναι ότι τα νέα σωματίδια-υπερεταίροι που απαιτεί η

υπερσυμμετρία, προκαλούν επιπρόσθετες κβαντικές διακυμάνσεις, και οι διακυμάνσεις αυτές είναι ακριβώς ό,τι χρειάζεται για τη σύγχλιση μεταξύ των τριών δυνάμεων.



Σχήμα 7.2 Βελτιωμένοι υπολογισμοί της έντασης των δυνάμεων αποκαλύπτουν ότι, χωρίς την υπερσυμμετρία, αυτές συμπίπτουν περίπου αλλά όχι πλήρως.

Σε πολλούς φυσικούς φαίνεται εξαιρετικά δύσκολο να πιστέψουν ότι η φύση θα επέλεγε τις δυνάμεις έτσι ώστε να έχουν εντάσεις οι οποίες περίπου, αλλά όχι πλήρως, συμπίπτουν μικροσκοπικά – σε μικροσκοπικές δηλαδή κλίμακες. Είναι σαν να φτιάχνουμε ένα παζλ που το τελευταίο του κομμάτι δεν έχει το σωστό σχήμα και δεν ταιριάζει ακριβώς στη θέση που του αντιστοιχεί. Η υπερσυμμετρία διορθώνει επιδέξια το σχήμα του, έτσι ώστε όλα τα κομμάτια να δένουν σωστά στις μεταξύ τους θέσεις.

Μια άλλη όψη της τελευταίας αυτής ανακάλυψης είναι ότι δίνει μια πιθανή απάντηση στο ερώτημα γιατί δεν έχουμε ανακαλύψει κανένα σωματίδιο-υπερεταίρο. Οι υπολογισμοί που οδηγούν στην ταύτιση των τριών εντάσεων, αλλά και άλλοι παράγοντες

που έχουν μελετηθεί από πολλούς φυσικούς, δείχνουν ότι τα σωματίδια-υπερεταίροι πρέπει να είναι αρκετά βαρύτερα από τα γνωστά σωματίδια. Μολονότι δεν μπορεί να γίνει καμία οριστική πρόβλεψη, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι τα σωματίδια-υπερεταίροι μπορεί να είναι χίλιες φορές μαζικότερα από το πρωτόνιο, αν όχι ακόμη βαρύτερα. Καθώς ούτε και οι καλύτεροι επιταχυντές μας δεν μπορούν να επιτύχουν τέτοιες ενέργειες, μπορούμε να καταλάβουμε γιατί αυτά τα σωματίδια δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα. Στο Κεφάλαιο 9 θα συζητήσουμε και πάλι ποιες πειραματικές προοπτικές υπάρχουν για να προσδιορίσουμε στο εγγύς μέλλον αν η υπερσυμμετρία αποτελεί όντως ιδιότητα του χόσμου μας.

Φυσικά οι εξηγήσεις που σας έχουμε δώσει για να πιστέψετε –ή τουλάχιστον να μην απορρίψετε– την υπερσυμμετρία είναι κάθε άλλο παρά πειστικές. Έχουμε περιγράψει πώς η υπερσυμμετρία εξυψώνει τις θεωρίες μας στην πλέον συμμετρική μορφή τους – αλλά θα μπορούσατε να αντιτείνετε ότι το σύμπαν δεν ενδιαφέρεται καθόλου να προσλάβει την πλέον συμμετρική μορφή που είναι μαθηματικά δυνατή. Έχουμε επισημάνει ένα σημαντικό τεχνικό ζήτημα: η υπερσυμμετρία μάς απαλλάσσει από το δύσκολο έργο να ρυθμίσουμε τις αριθμητικές παραμέτρους του βασικού μοντέλου ώστε να αποφύγουμε λεπτά κβαντικά προβλήματα – αλλά θα μπορούσατε να αντιτείνετε ότι η αληθής θεωρία που περιγράφει τη φύση μπορεί κάλλιστα να βαδίζει πάνω στη λεπτή γραμμή η οποία χωρίζει την αυτοσυνέπεια από την αυτοκαταστροφή. Έχουμε συζητήσει πώς μεταβάλλει η υπερσυμμετρία την εσωτερική ένταση των τριών μη βαρυτικών δυνάμεων στις μικροσκοπικές κλίμακες κατά τέτοιον τρόπο ώστε αυτές να συνενώνονται σε μία μεγάλη ενοποιημένη δύναμη – αλλά θα μπορούσατε, και πάλι, να ισχυρίσετε πως τίποτα στη φύση δεν υπαγορεύει ότι οι εντάσεις αυτών των δυνάμεων θα πρέπει να ταυτίζονται στις μικροσκοπικές κλίμακες. Και τέλος, θα μπορούσατε να πείτε πως η απλούστερη εξήγηση στο ερώτημα γιατί δεν έχουν ανακαλυφθεί ποτέ τα σωματίδια-υπερεταίροι είναι ότι το σύμπαν μας δεν είναι υπερσυμμετρικό και συνεπώς δεν υπάρχουν υπερεταίροι.

Κανείς δεν μπορεί να αντικρούσει κάποιο από αυτά τα επιχειρήματά σας. Μπορούμε όμως να υπερασπιστούμε την υπερσυμμετρία πολύ πιο αποτελεσματικά αν εξετάσουμε το ρόλο της στη θεωρία χορδών.

Η υπερσυμμετρία στη θεωρία χορδών

Η αρχική θεωρία χορδών που προέκυψε από το έργο του Veneziano στα τέλη της δεκαετίας του 1960 συμπεριλάμβανε όλες τις συμμετρίες που συζητήσαμε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, όχι όμως την υπερσυμμετρία (η οποία δεν είχε ανακαλυφθεί ακόμη). Για την ακρίβεια αυτή η πρώτη θεωρία που βασιζόταν στην έννοια της χορδής ονομαζόταν μποζονική θεωρία χορδών. Ο όρος μποζονική δείχνει ότι όλοι οι τρόποι ταλάντωσης της μποζονικής χορδής έχουν σπιν ακέραιο αριθμό – δεν υπάρχουν φερμιονικές ταλαντώσεις, με σπιν δηλαδή που να διαφέρει κατά μισή μονάδα από ακέραιο. Αυτό οδήγησε σε δύο προβλήματα.

Πρώτον, αν η θεωρία χορδών έμελλε να περιγράψει όλες τις δυνάμεις και όλη την ύλη, θα έπρεπε με κάποιον τρόπο να συμπεριλάβει και φερμιονικές ταλαντώσεις, καθώς όλα τα γνωστά σωματίδια της ύλης έχουν σπιν- $\frac{1}{2}$. Δεύτερον, περισσότερα προβλήματα δημιουργούσε η ανακάλυψη ότι στην μποζονική θεωρία χορδών υπήρχε ένας τρόπος ταλάντωσης του οποίου η μάζα (ακριβέστερα, το τετράγωνο της μάζας) ήταν αρνητική – το επονομαζόμενο ταχυόνιο. Ακόμη και πριν από τη θεωρία χορδών, οι φυσικοί είχαν μελετήσει το ενδεχόμενο εκτός από τα γνωστά σωματίδια που έχουν όλα θετικές μάζες, να υπάρχουν στον κόσμο μας ταχυόνια, αλλά οι προσπάθειές τους έδειξαν ότι είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, μια τέτοια θεωρία να έχει λογική συνέπεια. Παρομόιως, στο πλαίσιο της μποζονικής θεωρίας χορδών, οι φυσικοί δοκίμασαν όλα τους τα κόλπα για να βγάλουν κάποια άκρη σε σχέση με την παράδοξη πρόβλεψη του ταχυονικού τρόπου ταλάντωσης αλλά χωρίς επιτυχία. Αυτά τα χαρακτηριστικά έδειχναν όλο

και πιο ξεκάθαρα ότι, αν και επρόκειτο για μια ενδιαφέρουσα θεωρία, από τις μποζονικές χορδές έλειπε κάτι ουσιώδες.

Το 1971, ο Pierre Ramond του Πανεπιστημίου της Φλόριντα ανταποκρίθηκε στην πρόκληση να κάνει αλλαγές στην μποζονική θεωρία χορδών για να συμπεριλάβει και φερμιονικές ταλαντώσεις. Μέσα από το έργο του και τις μετέπειτα ανακαλύψεις των Schwarz και André Neveu, άρχισε να προβάλει μια νέα εκδοχή της θεωρίας χορδών. Και προς έκπληξη των περισσοτέρων, οι μποζονικοί και οι φερμιονικοί τρόποι ταλάντωσης αυτής της νέας θεωρίας εμφανίζονταν σε ζεύγη. Για κάθε μποζονικό τρόπο υπήρχε ένας φερμιονικός τρόπος και αντιστρόφως. Μέχρι το 1977, οι ιδέες του Ferdinando Gliozzi του Πανεπιστημίου του Τορίνου, του Scherk και του David Olive του Imperial College είχαν φωτίσει αυτό το ζευγάρωμα με τον σωστό τρόπο. Η νέα θεωρία χορδών συμπεριλάμβανε την υπερσυμμετρία και το παρατηρούμενο ζευγάρωμα των μποζονικών και φερμιονικών τρόπων ταλάντωσης αντανακλούσε αυτό τον ιδιαίτερα συμμετρικό χαρακτήρα. Η υπερσυμμετρική θεωρία χορδών –η θεωρία των υπερχορδών δηλαδή– είχε γεννηθεί. Επιπλέον το έργο των Gliozzi, Scherk και Olive οδήγησε και σε ένα άλλο σημαντικό αποτέλεσμα: έδειξαν ότι η προβληματική ταχυονική ταλάντωση των μποζονικών χορδών δεν ταλανίζει τις υπερχορδές. Σιγά σιγά τα κομμάτια του παζλ των χορδών έμπαιναν στη σωστή τους θέση.

Ωστόσο ο κύριος αντίκτυπος του έργου του Ramond, καθώς και των Neveu και Schwarz, δεν αφορούσε αρχικά τη θεωρία χορδών. Το 1973 οι φυσικοί Julius Wess και Bruno Zumino συνειδητοποίησαν ότι η υπερσυμμετρία –η νέα συμμετρία που προέχυπτε από την αναδιατύπωση της θεωρίας χορδών– ήταν εφαρμόσιμη ακόμη και σε θεωρίες που βασίζονταν σε σημειακά σωματίδια. Έκαναν γοργά και σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση της ενσωμάτωσης της υπερσυμμετρίας στο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας πεδίου των σημειακών σωματιδίων. Και καθώς, εκείνο τον καιρό, η κβαντική θεωρία πεδίου ήταν πολύ δημοφιλής στο κυρίαρχο ρεύμα της κοινότητας των σωματιδιακών φυσικών –ενώ η θεωρία

χορδών γινόταν όλο και πιο περιθωριακή –, οι ιδέες των Wess και Zumino αποτέλεσαν το έναυσμα για έναν εκπληκτικό όγκο μετέπειτα ερευνών πάνω σε αυτό που κατέληξε να ονομάζεται υπερσυμμετρική κβαντική θεωρία πεδίου. Το υπερσυμμετρικό βασικό μοντέλο, το οποίο εξετάσαμε στην προηγούμενη ενότητα, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά θεωρητικά επιτεύγματα αυτών των ερευνών: αναγνωρίζουμε πλέον ότι μέσα από ιστορικές χαρτές και πισωγυρίσματα, ακόμη και αυτή η σωματιδιακή θεωρία χρωστά πολλά στη θεωρία χορδών.

Με την αναβίωση της θεωρίας των υπερχορδών στα μέσα της δεκαετίας του 1980, η υπερσυμμετρία επέστρεψε στο αρχικό της πλαίσιο. Και στο πλαίσιο αυτό, η υπεράσπιση της υπερσυμμετρίας αποκτά κι άλλες διαστάσεις εκτός απ' όσες είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Η θεωρία χορδών είναι ο μόνος τρόπος που γνωρίζουμε για να ενοποιήσουμε τη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική. Άλλα μόνο η υπερσυμμετρική εκδοχή της θεωρίας χορδών κατορθώνει να αποφύγει το ακανθώδες πρόβλημα του ταχυονίου και παράλληλα διαθέτει φερμονικές ταλαντώσεις οι οποίες μπορούν να περιγράψουν τα σωματίδια της ύλης που συνιστούν τον χόσμο γύρω μας. Η υπερσυμμετρία λοιπόν βαδίζει χέρι χέρι με τη θεωρία χορδών και την πρότασή της για μια κβαντική θεωρία της βαρύτητας, καθώς και με τον μεγαλεπήβολο στόχο της να ενοποιήσει όλες τις δυνάμεις και όλη την ύλη. Αν η θεωρία χορδών είναι σωστή, οι φυσικοί πιστεύουν ότι θα είναι σωστή και η υπερσυμμετρία.

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 ωστόσο ένα μεγάλο πρόβλημα στοίχειωνε την υπερσυμμετρική θεωρία χορδών.

Μια υπερ-αφθονία προσόντων

Αν κάποιος σας πει ότι έλυσε το μυστήριο της εξαφάνισης της Amelia Earhart, ίσως φανείτε δύσπιστοι στην αρχή, αλλά, αν έχει μια απόλυτα τεκμηριωμένη και καλοζυγισμένη εξήγηση, μπορεί να καθίσετε να τον ακούσετε και, ποιος ξέρει, μπορεί ακόμη και

να πειστείτε. Τι θα γίνει όμως αν την επόμενη ακριβώς στιγμή σας πει ότι παρεμπιπτόντως έχει και μια δεύτερη εξήγηση; Ακούτε υπομονετικά και με έκπληξη ανακαλύπτετε ότι κι αυτή η εναλλακτική εξήγηση είναι εξίσου καλά τεκμηριωμένη και μελετημένη όσο και η πρώτη. Και μόλις τελειώσει τη δεύτερη εξήγηση, σας σερβίρει και μια τρίτη, μια τέταρτη, ακόμη και μια πέμπτη εξήγηση – η καθεμιά τους διαφορετική από τις άλλες και εντούτοις εξίσου πειστική. Χωρίς αμφιβολία, μετά το τέλος αυτής της εμπειρίας δεν θα αισθάνεστε ότι βρίσκεστε πιο κοντά στην αλήθεια και πως γνωρίζετε περισσότερα για την τύχη της Amelia Earhart απ' ό,τι στην αρχή. Στο πεδίο των θεμελιωδών εξηγήσεων, το ευ σίγουρα δεν βρίσκεται εν τω πολλώ.

Γύρω στα 1985, η θεωρία χορδών –παρά τον δικαιολογημένο ενθουσιασμό που προκαλούσε– άρχισε να ακούγεται σαν τον υπέρενθουσιώδη ντετέκτιβ φίλο μας. Ο λόγος είναι ότι μέχρι το 1985 οι φυσικοί είχαν συνειδητοποιήσει πια πως η υπερσυμμετρία, που ήδη αποτελούσε βασικό συστατικό στη δομή της θεωρίας χορδών, μπορούσε να ενσωματωθεί στη θεωρία χορδών όχι μόνο με έναν αλλά για την ακρίβεια με πέντε διαφορετικούς τρόπους. Η κάθε μέθοδος καταλήγει σε έναν τρόπο ζευγαρώματος μποζονικών και φερμιονικών ταλαντώσεων, αλλά οι λεπτομέρειες αυτού του ζευγαρώματος, καθώς και πολυάριθμες άλλες ιδιότητες των θεωριών που προκύπτουν, διαφέρουν ουσιωδώς. Παρότι τα ονόματά τους δεν έχουν και τόση σημασία, αξίζει να σημειώσουμε ότι αυτές οι πέντε υπερσυμμετρικές θεωρίες χορδών αποκαλούνται Θεωρία Τύπου I, Θεωρία Τύπου II, Θεωρία Τύπου III, Θεωρία Ετεροτικού Τύπου O(32), και Θεωρία Ετεροτικού Τύπου E₈ x E₈. Όλα τα χαρακτηριστικά της θεωρίας χορδών που έχουμε συζητήσει μέχρι τώρα ισχύουν για καθεμιά από αυτές τις θεωρίες – οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους μόνο σε μικρολεπτομέρειες.

Οι πέντε διαφορετικές εκδοχές της υποτιθέμενης ΘΤΠ –της απώτατης πιθανώς ενοποιημένης θεωρίας– προκαλούσαν μεγάλη αμηχανία στους θεωρητικούς των χορδών. Όπως ακριβώς υπάρχει μόνο μία αληθής εξήγηση για όλα όσα συνέβησαν στην Amelia

Earhart (ασχέτως αν την ανακαλύψουμε ποτέ), το ίδιο περιμένουμε να ισχύει και για τη βαθύτερη, τη θεμελιωδέστερη κατανόηση της λειτουργίας του κόσμου. Σε ένα σύμπαν ζούμε· μία εξήγηση προσδοκούμε.

Για να λυθεί το πρόβλημα θα μπορούσαμε να προτείνουμε πως, παρότι υπάρχουν πέντε διαφορετικές θεωρίες υπερχορδών, οι τέσσερις θα μπορούσαν απλώς να αποκλειστούν από το πείραμα, αφήνοντάς μας ένα μόνο αληθές και κατάλληλο ερμηνευτικό πλαίσιο. Αλλά, ακόμη κι αν είχαν έτσι τα πράγματα, θα μέναμε με την ενοχλητική απορία γιατί να μην υπάρχει εξαρχής μόνο αυτή η θεωρία. Όπως παρατηρεί αυτοσαρκαστικά ο Witten: «Αν μόνο μία από τις πέντε θεωρίες περιγράφει το σύμπαν μας, τότε ποιος κατοικεί στους άλλους τέσσερις κόσμους;»⁷ Οι φυσικοί ονειρεύονται ότι η αναζήτηση για την ύστατη αλήθεια θα καταλήξει σε ένα απλό, μοναδικό, απολύτως αναπόδραστο συμπέρασμα. Το ιδανικό είναι η τελική θεωρία –είτε πρόκειται για τη θεωρία χορδών είτε για κάποια άλλη– να έχει τη μορφή που θα έχει επειδή απλούστατα δεν θα υπάρχει άλλη δυνατότητα. Αν ανακαλύπταμε ότι υπάρχει μόνο μία λογικά έγκυρη θεωρία που ενσωματώνει τα θεμελιώδη συστατικά της γενικής θεωρίας της σχετικότητας και της κβαντομηχανικής, πολλοί νιώθουν ότι θα κατορθώναμε να κατανοήσουμε απόλυτα και σε βάθος γιατί το σύμπαν έχει τις ιδιότητες που έχει. Με λίγα λόγια, μια τέτοια ενοποιημένη θεωρία θα ήταν σωστός παράδεισος.⁸

Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 12, μετά από έρευνες στη θεωρία των υπερχορδών έχουν γίνει γιγάντια άλματα προς αυτή την ουτοπία της ενοποίησης, δείχνοντας εντελώς απρόσμενα ότι στην πραγματικότητα οι πέντε διαφορετικές θεωρίες είναι πέντε διαφορετικοί τρόποι περιγραφής μας και μοναδικής θεωρίας που εμπεριέχει όλες τις άλλες. Η θεωρία των υπερχορδών φέρει τελικά τη σφραγίδα της μοναδικότητας.

Τα πράγματα δείχνουν να βρίσκουν τη σωστή τους θέση, αλλά, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, η ενοποίηση με τη βοήθεια της θεωρίας χορδών απαιτεί να απομακρυνθούμε ακόμα λίγο από τη συμβατική σοφία.

*Περισσότερες διαστάσεις
απ' όσες βλέπει το μάτι*

Ο Einstein επέλυσε δύο από τις κυριότερες επιστημονικές διαμάχες των προηγούμενων εκατό χρόνων με την ειδική και κατόπιν με τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Μολονότι τα αρχικά προβλήματα που στάθηκαν έναυσμα για το έργο του δεν προμήνυαν το τελικό αποτέλεσμα, καθεμιά από τις λύσεις που έδωσε άλλαξε πλήρως την κατανόησή μας για το χώρο και το χρόνο. Η θεωρία χορδών επιλύει την τρίτη μεγάλη επιστημονική διαμάχη του περασμένου αιώνα και, με έναν τρόπο που και ο ίδιος ο Einstein θα τον έβρισκε αξιοσημείωτο, απαιτεί να υποβάλλουμε την αντίληψή μας για το χώρο και το χρόνο σε μία ακόμη ριζική αναθεώρηση. Η θεωρία χορδών ταράζει με τέτοια ένταση τα θεμέλια της σύγχρονης φυσικής που ακόμη και το γενικά αποδεκτό πλήθος διαστάσεων στο σύμπαν μας – κάτι τόσο θεμελιώδες ώστε ενδεχομένως το θεωρείτε υπεράνω αμφισβήτησης – ανατρέπεται με τρόπο δραματικό, πληγή όμως πειστικό.

Η ψευδαίσθηση του οικείου

Η εμπειρία τρέφει τη διαίσθηση. Και κάτι παραπάνω: η εμπειρία καθορίζει το πλαίσιο μέσα στο οποίο αναλύουμε και ερμηνεύ-

ουμε όσα αντιλαμβανόμαστε. Αναμφίβολα θα περιμένατε, για παράδειγμα, ότι το «άγριο παιδί» που έχει ανατραφεί από μια αγέλη λύκων θα ερμηνεύει τον κόσμο από μια σκοπιά που θα διαφέρει ουσιωδώς από τη δική σας. Ακόμη και λιγότερο ακραίες συγκρίσεις, όπως ανάμεσα σε άτομα που ανατράφηκαν με εντελώς διαφορετικές πολιτισμικές παραδόσεις, φανερώνουν σε ποιο βαθμό οι εμπειρίες μας καθορίζουν τον τρόπο που ερμηνεύουμε τα πράγματα.

Υπάρχουν όμως ορισμένα πράγματα για τα οποία όλοι έχουμε κάποια εμπειρία. Και συχνά οι πεποιθήσεις και οι προσδοκίες που απορρέουν από αυτές τις καθολικές εμπειρίες είναι εκείνες που διαπιστώνονται αλλά και αμφισβητούνται δυσκολότερα από τις άλλες. Ένα απλό αλλά βαθυστόχαστο παράδειγμα είναι το ακόλουθο: αν αφήνατε αυτό το βιβλίο από τα χέρια σας και σήκωνόσαστε, θα μπορούσατε να κινηθείτε σε τρεις ανεξάρτητες διευθύνσεις – με άλλα λόγια, μέσα από τρεις διαφορετικές χωρικές διαστάσεις. Όποια διαδρομή κι αν ακολουθήσετε – ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητά της –, προκύπτει από κάποιο συνδυασμό κινήσεων σε αυτές τις χωρικές διαστάσεις που θα μπορούσαμε να τις αποκαλέσουμε «διάσταση δεξιά-αριστερά», «διάσταση μπρος-πίσω» και «διάσταση πάνω-κάτω». Κάθε φορά που προχωρείτε ένα βήμα, κάνετε σιωπηρά τρεις ξεχωριστές επιλογές οι οποίες καθορίζουν πώς θα κινηθείτε στον τρισδιάστατο χώρο.

Μια ισοδύναμη διατύπωση, όπως είδαμε και στη συζήτησή μας για την ειδική θεωρία της σχετικότητας, είναι ότι κάθε θέση στο σύμπαν μπορεί να καθοριστεί πλήρως αν δοθούν τρία στοιχεία: πού βρίσκεται σε σχέση με τις τρεις χωρικές διαστάσεις. Για να δώσουμε ένα πιο κοινό παράδειγμα, μπορείτε να προσδιορίσετε μια διεύθυνση σε μια πόλη, δίνοντας το όνομα ενός δρόμου («διάσταση δεξιά-αριστερά»), μιας διασταύρωσης ή λεωφόρου («διάσταση μπρος-πίσω») και τον όροφο («διάσταση πάνω-κάτω»). Και σύμφωνα με μια πιο σύγχρονη προοπτική, έχουμε δει ότι το έργο του Einstein μας ενθαρρύνει να αντιμετωπίζουμε το χρόνο ως μία

επιπλέον διάσταση («διάσταση μέλλον-παρελθόν»), κάτι που μας δίνει ένα σύνολο τεσσάρων διαστάσεων (τριών χωρικών και μιας χρονικής). Προσδιορίζουμε τα γεγονότα στο σύμπαν λέγοντας που και πότε συμβαίνουν.

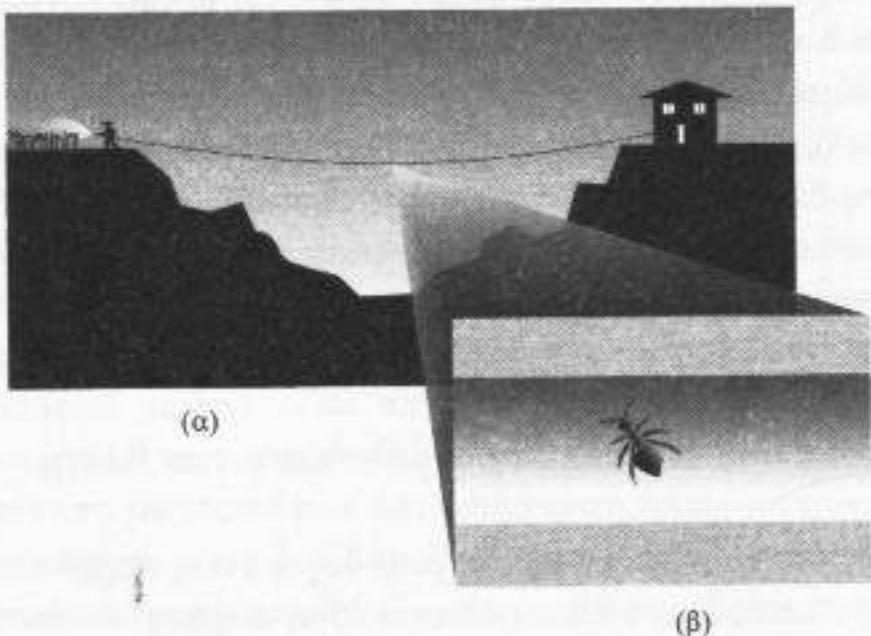
Επειδή αυτή η ιδιότητα του σύμπαντος είναι τόσο θεμελιώδης, τόσο σταθερή και συναντάται παντού, δείχνει αχλόνητη. Ωστόσο το 1919 ένας σχετικά άγνωστος Πολωνός μαθηματικός ονόματι Theodor Kaluza από το Πανεπιστήμιο του Κένιγκσμπεργκ τόλμησε να αμφισβήτησε το προφανές – πρότεινε ότι το σύμπαν μπορεί στην πραγματικότητα να μην έχει τρεις χωρικές διαστάσεις· μπορεί να έχει περισσότερες. Μερικές φορές, οι προτάσεις που ακούγονται ανόητες είναι απλώς ανόητες. Άλλες φορές, πάλι, ταράζουν τα θεμέλια της φυσικής. Μολονότι χρειάστηκε αρκετό χρόνο μέχρι να διαδοθεί, η πρόταση του Kaluza στάθηκε επαναστατική για τη διατύπωση των νόμων της φυσικής. Εξακολουθούμε και σήμερα να αισθανόμαστε τους μετασεισμούς αυτής της απίθανα ενορατικής του σύλληψης.

Η ιδέα του Kaluza και η βελτίωση του Klein

Η πρόταση ότι το σύμπαν μας έχει ενδεχομένως περισσότερες από τρεις χωρικές διαστάσεις φαίνεται ίσως ανόητη, εκκεντρική ή μυστικιστική. Στην πραγματικότητα όμως είναι συγχεκριμένη και απόλυτα εύλογη. Για να το καταλάβουμε, ας στρέψουμε για λίγο την προσοχή μας από το σύμπαν σε ένα πιο σύνηθες αντικείμενο, όπως το μακρύ, λεπτό λάστιχο του ποτίσματος.

Φανταστείτε ότι καμιά εκατοστή μέτρα από αυτό το λάστιχο τεντώνονται πάνω από ένα φαράγγι και εσείς το βλέπετε από μισό περίπου χιλιόμετρο μακριά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1(α). Από αυτή την απόσταση μπορείτε εύκολα να δείτε τη μακριά, απλωμένη οριζόντια έκταση του λάστιχου, αλλά, αν δεν διαθέτετε υπεράνθρωπη όραση, θα σας είναι δύσκολο να διακρίνετε το πάχος του. Από το μακρινό αυτό σημείο θέασης θα σκεφτόσαστε

ότι, αν ένα μυρμήγκι ήταν αναγκασμένο να ζει πάνω στο λάστιχο, θα μπορούσε να περπατάει μόνο σε μία διάσταση: στη διάσταση δεξιά-αριστερά κατά μήκος του λάστιχου. Αν σας ζητούσε κάποιος να καθορίσετε πού βρίσκεται το μυρμήγκι σε μια δεδομένη στιγμή, θα χρειαζόταν να δώσετε μόνο μία πληροφορία: την απόσταση του μυρμήγκιου από το αριστερό (ή το δεξιό) άκρο του λάστιχου. Το αποτέλεσμα τελικά είναι ότι, από μισό χιλιόμετρο μακριά, ένα μακρύ κομμάτι λάστιχο του ποτίσματος μοιάζει με μονοδιάστατο αντικείμενο.



Σχήμα 8.1 (α) Ένα λάστιχο του ποτίσματος ιδωμένο από αρκετή απόσταση μοιάζει με μονοδιάστατο αντικείμενο. (β) Όταν μεγεθυνθεί, γίνεται ορατή μια δεύτερη διάσταση – που έχει το σχήμα κύκλου και τυλίγεται γύρω από το λάστιχο.

Στην πραγματικότητα όμως γνωρίζουμε ότι το λάστιχο έχει πάχος. Μπορεί να δυσκολεύεστε να το δείτε από μισό χιλιόμετρο μακριά, αλλά χρησιμοποιώντας ένα ζευγάρι κιάλια μπορείτε να εστιάσετε στο λάστιχο και να παρατηρήσετε άμεσα την περιφέρειά του, όπως δείχνει το Σχήμα 8.1(β). Με αυτή τη μεγέθυνση

βλέπετε ότι το μικρό μυρμήγκι που ζει πάνω στο λάστιχο μπορεί στην πραγματικότητα να κινηθεί σε δύο ανεξάρτητες διευθύνσεις: αριστερά-δεξιά κατά μήκος του λάστιχου, όπως έχουμε ήδη υποδείξει, και κατά τη θετική ή την αρνητική φορά γύρω από το κυκλικό μέρος του λάστιχου. Συνειδητοποιείτε τώρα ότι για να καθορίσετε πού βρίσκεται το μυρμήγκι σε κάθε δεδομένη στιγμή, πρέπει ουσιαστικά να δώσετε δύο πληροφορίες: πού βρίσκεται το μυρμήγκι σε σχέση με το μήκος του λάστιχου και πού βρίσκεται το μυρμήγκι σε σχέση με την κυκλική του περιφέρεια. Αυτό φανερώνει ότι η επιφάνεια του λάστιχου είναι διδιάστατη.¹

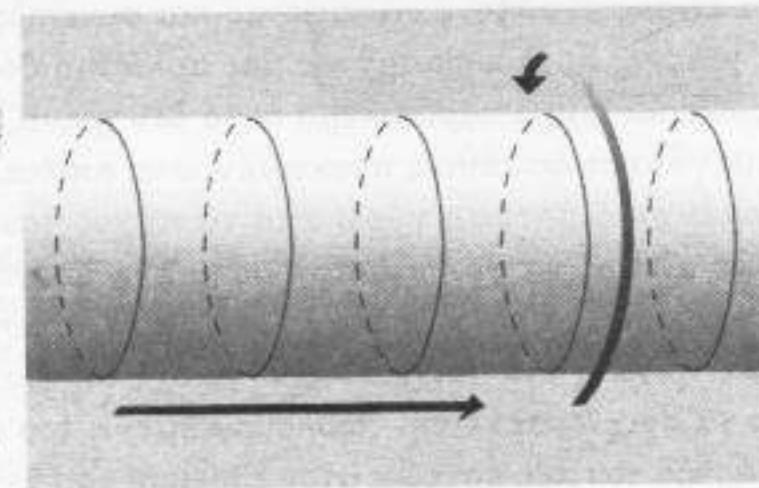
Εντούτοις, υπάρχει μια σαφής διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο διαστάσεις. Η διεύθυνση κατά μήκος του λάστιχου έχει μεγάλο μήκος, είναι εκτεταμένη και εύκολα ορατή. Η διεύθυνση που περικυκλώνει το πάχος του λάστιχου έχει μικρό μήκος, είναι «κουλουριασμένη» και δύσκολα την πιάνει τό μάτι. Για να αντιληφθείτε την κυκλική διάσταση, θα πρέπει να εξετάσετε το λάστιχο με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια.

Το παράδειγμα αυτό τονίζει ένα δυσδιάχριτο και σημαντικό χαρακτηριστικό των χωρικών διαστάσεων: ότι είναι δύο ειδών. Μπορεί να είναι μεγάλες, εκτεταμένες και συνεπώς άμεσα αισθητές, ή μικρές, κουλουριασμένες και πολύ πιο δύσκολα ανιχνεύσιμες. Φυσικά, στο παράδειγμα αυτό δεν χρειαζόταν να καταβάλετε μεγάλη προσπάθεια προκειμένου να αποκαλύψετε την «καμπυλωμένη» διάσταση γύρω από το πάχος του λάστιχου. Χρειάστηκε απλώς να χρησιμοποιήσετε ένα ζευγάρι κιάλια. Ωστόσο, αν είχατε ένα πολύ λεπτό λάστιχο του ποτίσματος –λεπτό όσο μια τρίχα ή ένα τριχοειδές αγγείο–, θα ήταν πολύ δυσκολότερο να ανιχνεύσετε την κουλουριασμένη του διάσταση.

Σε ένα άρθρο του που έστειλε στον Einstein το 1919, ο Kaluza πρότεινε ότι ο χωρικός ιστός του σύμπαντος διαθέτει ενδεχομένως περισσότερες από τρεις διαστάσεις. Κίνητρο γι' αυτό το ριζοσπαστικό άρθρο, όπως θα συζητήσουμε κατόπιν, στάθηκε η διαπίστωση του Kaluza ότι η πρότασή του παρείχε ένα κομψό και ελκυστικό πλαισιο για το συ-

νταίριασμα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Einstein και της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell μέσα σε ένα απλό, ενοποιημένο θεωρητικό πλαίσιο. Πώς μπορεί όμως να συμβιβαστεί αυτή η πρόταση με το προφανές γεγονός ότι εμείς βλέπουμε μόνο τρεις διαστάσεις;

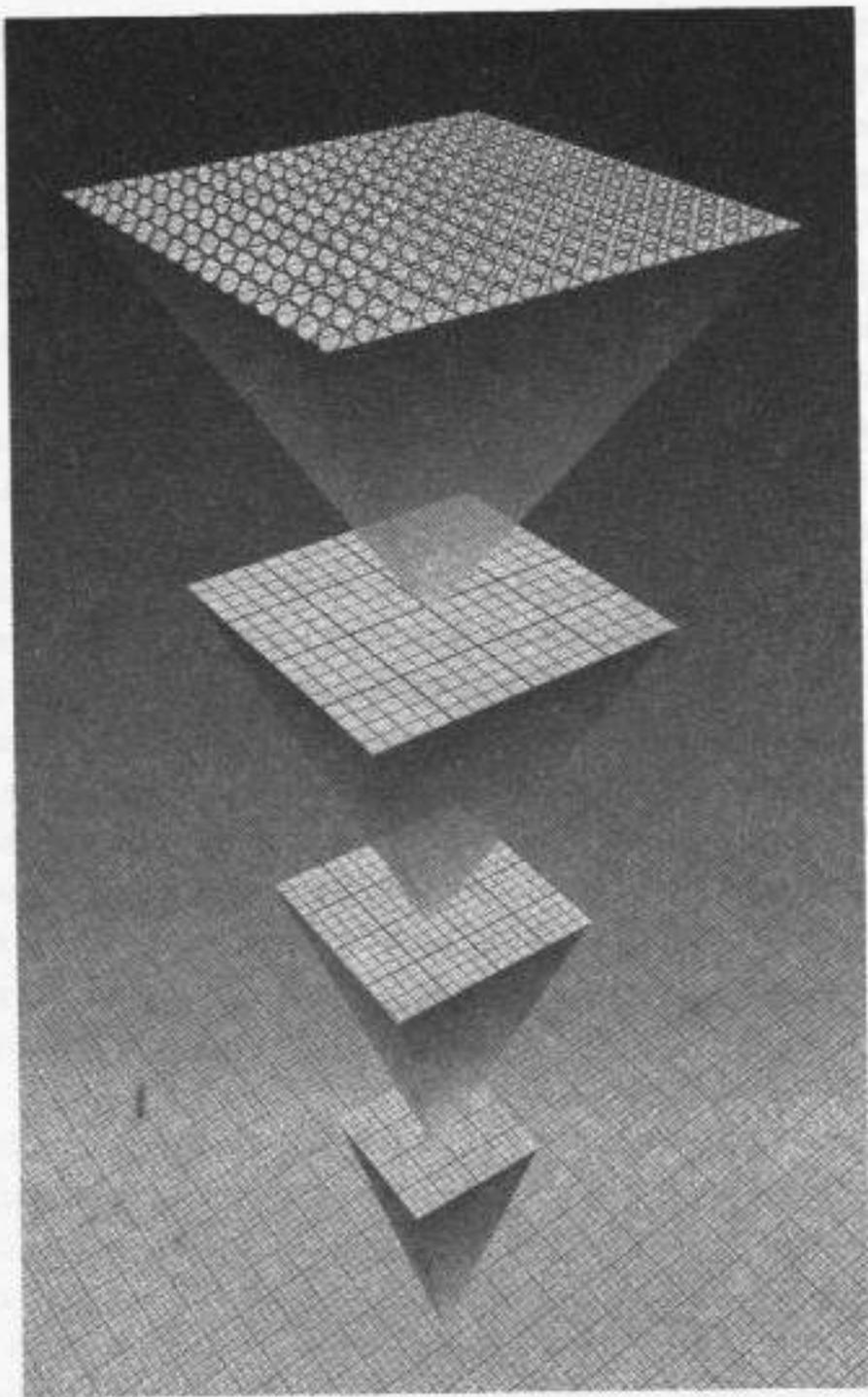
Η απάντηση, για την οποία γίνεται νύξη στο έργο του Kaluza, αλλά διατυπώνεται με τρόπο σαφή και εκλεπτυσμένο από το Σουηδό μαθηματικό Oskar Klein το 1926, είναι ότι ο χωρικός ιστός του σύμπαντος μπορεί να διαθέτει τόσο εκτεταμένες όσο και καμπυλωμένες διαστάσεις. Με άλλα λόγια, όπως ακριβώς η οριζόντια έκταση του λάστιχου του ποτίσματος, έτσι και το σύμπαν μας έχει διαστάσεις που είναι μεγάλες, εκτεταμένες και εύκολα ορατές – τις τρεις χωρικές διαστάσεις της καθημερινής μας εμπειρίας. Ωστόσο, όπως ακριβώς η κυκλική περιφέρεια του λάστιχου, έτσι και το σύμπαν μπορεί να διαθέτει και άλλες χωρικές διαστάσεις που βρίσκονται στριμωγμένες σε ένα μικροσκοπικό χώρο – ένα χώρο τόσο μικρό που δεν έχει ανιχνευτεί ούτε κι από τα πιο τέλεια όργανα.



Σχήμα 8.2 Η επιφάνεια του λάστιχου του ποτίσματος είναι διδιάστατη: η μία διάσταση (η οριζόντια έκτασή της), που δηλώνεται από το ευθύ βέλος, έχει μεγάλο μήκος και είναι εκτεταμένη· η άλλη διάσταση (η κυκλική της περιφέρεια), που δηλώνεται από το κυκλικό βέλος, έχει μικρό μήκος και είναι κουλουριασμένη.

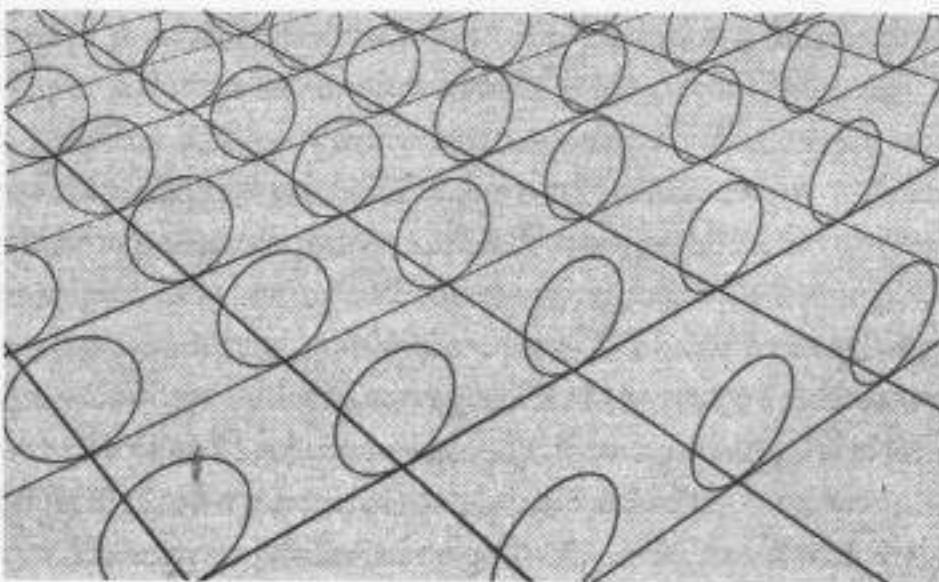
Για να αποκτήσουμε μια πιο σαφή εικόνα αυτής της αξιοπρόσεκτης πρότασης, ας επανεξετάσουμε για λίγο το λάστιχο του ποτίσματος. Φανταστείτε ότι γύρω από την περιφέρειά του έχουν ζωγραφιστεί πολύ κοντά ο ένας στον άλλο μαύροι κύκλοι. Από μακριά, όπως και πριν, το λάστιχο του ποτίσματος θα φαίνεται σαν μια λεπτή, μονοδιάστατη γραμμή. Αν όμως το παρατηρήσετε με τα κιάλια, θα μπορέσετε να ανιχνεύσετε την καμπυλωμένη του διάσταση, ακόμη πιο εύκολα τώρα μετά τη ζωγραφική που κάναμε, και θα δείτε αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 8.2. Σε αυτή την εικόνα τονίζεται ότι η επιφάνεια του λάστιχου είναι διδιάστατη, με μια μεγάλη, εκτεταμένη διάσταση και μια μικρή, κυκλική διάσταση. Ο Kaluza και ο Klein πρότειναν ότι στο σύμπαν συμβαίνει κάτι παρόμοιο, μόνο που σε αυτό υπάρχουν τρεις μεγάλες, εκτεταμένες χωρικές διαστάσεις και μία μικρή, κυκλική διάσταση – συνολικά δηλαδή τέσσερις χωρικές διαστάσεις. Είναι δύσκολο να σχεδιάσουμε κάτι με τόσο πολλές διαστάσεις, έτσι λοιπόν για να σχηματίσουμε στο μιαλό μας μια εικόνα, θα πρέπει να συμβιβαστούμε με μια απεικόνιση που θα ενσωματώνει δύο μεγάλες διαστάσεις και μία μικρή, κυκλική διάσταση. Αυτό προσπαθούμε να κάνουμε στο Σχήμα 8.3, όπου ουσιαστικά μεγεθύνουμε τον χωρικό ιστό όπως ακριβώς μεγεθύναμε την επιφάνεια στο λάστιχο του ποτίσματος.

Η χαμηλότερη εικόνα στο σχήμα δείχνει τη φαινόμενη δομή του σύμπαντος –τον συνήθη χόσμο γύρω μας– σε οικείες κλίμακες, όπως αυτές που μετριούνται σε μέτρα. Αυτές οι κλίμακες αναπαρίστανται από το μεγαλύτερο πλέγμα. Στις εικόνες που ακολουθούν, μεγεθύνουμε τον χωρικό ιστό εστιάζοντας σε ολοένα και μικρότερες περιοχές, τις οποίες μεγεθύνουμε διαδοχικά προκειμένου να γίνονται ορατές εύκολα. Στην αρχή, καθώς εξετάζουμε τον χωρικό ιστό σε μικρότερες κλίμακες, δεν συμβαίνει και τίποτα ιδιαίτερο· φαίνεται να διατηρεί την ίδια βασική μορφή που έχει και στις μεγαλύτερες κλίμακες, όπως βλέπουμε στα τρία πρώτα επίπεδα μεγέθυνσης. Ωστόσο, καθώς συνεχίζουμε το ταξίδι μας προς τις πλέον μικροσκοπικές αποστάσεις του σύμπαντος –το τέ-



Σχήμα 8.3 Όπως στο Σχήμα 5.1, το κάθε διαδοχικό επίπεδο αναπαριστά μια τεράστια μεγέθυνση του χωρικού ιστού που φαίνεται στο προηγούμενο επίπεδο. Το σύμπαν μας ενδέχεται να διαθέτει επιπλέον διαστάσεις -όπως βλέπουμε στο τέταρτο επίπεδο μεγέθυνσης- με την προϋπόθεση ότι αυτές καμπυλώνονται σε ένα χώρο τόσο μικρό που μέχρι στιγμής δεν έχει ανιχνευτεί.

ταρτο επίπεδο μεγέθυνσης στο Σχήμα 8.3-, μια νέα, καμπυλωμένη, κυκλική διάσταση γίνεται εμφανής και μοιάζει πολύ με τις κυκλικές θηλιές του νήματος που αποτελούν το πέλος ενός πυκνοπλεγμένου χαλιού. Οι Kaluza και Klein πρότειναν ότι αυτή η επιπρόσθετη κυκλική διάσταση υφίσταται σε κάθε σημείο των εκτεταμένων διαστάσεων, όπως ακριβώς η κυκλική περιφέρεια του λάστιχου του ποτίσματος υφίσταται σε κάθε σημείο κατά μήκος της απλωμένης, οριζόντιας έκτασής του. (Για λόγους οπτικής ευχρίνειας έχουμε σχεδιάσει μόνο ένα δείγμα της κυκλικής διάστασης ανά ταχτά σημεία κατά μήκος των εκτεταμένων διαστάσεων.) Δείχνουμε ένα κοντινό πλάνο της ιδέας των Kaluza-Klein για τη μικροσκοπική δομή του χωρικού ιστού στο Σχήμα 8.4.



Σχήμα 8.4 Οι γραμμές του πλέγματος αναπαριστούν τις εκτεταμένες διαστάσεις που γνωρίζουμε από την κοινή μας εμπειρία, ενώ οι κύκλοι είναι μια νέα, μικροσκοπική, καμπυλωμένη διάσταση. Όπως οι κυκλικές θηλιές του νήματος που αποτελούν το πέλος ενός χαλιού, οι κύκλοι υφίστανται σε κάθε σημείο των οικείων εκτεταμένων διαστάσεων – αλλά για λόγους οπτικής ευχρίνειας τους σχεδιάζουμε μόνο στα σημεία όπου τέμνονται οι γραμμές του πλέγματος.

Η ομοιότητα με το λάστιχο του ποτίσματος είναι προφανής, αν και υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές. Το σύμπαν έχει τρεις

μεγάλες, εκτεταμένες χωρικές διαστάσεις (από τις οποίες έχουμε σχεδιάσει μόνο τις δύο), σε σύγχριση με τη μία του λάστιχου, και, κάτι σημαντικότερο, περιγράφουμε τώρα τον χωρικό ιστό του ίδιου του σύμπαντος και όχι μόνο ένα αντικείμενο, όπως το λάστιχο, που υφίσταται εντός του σύμπαντος. Ωστόσο η βασική ιδέα παραμένει η ίδια: όπως και η κυκλική περιφέρεια του λάστιχου, αν η επιπρόσθετη καμπυλωμένη, κυκλική διάσταση του σύμπαντος είναι εξαιρετικά μικρή, ανιχνεύεται πολύ πιο δύσκολα απ' ότι οι ορατές, μεγάλες, εκτεταμένες διαστάσεις. Μάλιστα, αν το μέγεθός της είναι ιδιαίτερα μικρό, δεν θα μπορούν να την ανιχνεύσουν ούτε και τα πιο ισχυρά μεγεθυντικά μας όργανα. Και κάτι που έχει εξαιρετική σημασία, η κυκλική διάσταση δεν είναι απλώς μια κυκλική προεξοχή μέσα στις οικείες εκτεταμένες διαστάσεις, όπως μπορεί να σας κάνει να πιστέψετε η απεικόνιση, αλλά μια νέα διάσταση, η οποία υφίσταται σε κάθε σημείο των οικείων εκτεταμένων διαστάσεων όπως ακριβώς καθεμιά από τις διαστάσεις πάνω-κάτω, αριστερά-δεξιά και μπρος-πίσω υφίσταται επίσης σε κάθε σημείο. Αποτελεί μια νέα και ανεξάρτητη διεύθυνση κατά την οποία θα μπορούσε να κινηθεί ένα μυρμήγκι, αν ήταν αρκετά μικρό. Για να καθορίσουμε τη θέση ενός τέτοιου μικροσκοπικού μυρμηγκιού, θα χρειαζόταν να πούμε πού βρίσκεται στις τρεις οικείες εκτεταμένες διαστάσεις (οι οποίες αναπαρίστανται από το πλέγμα) καθώς επίσης και πού βρίσκεται στην κυκλική διάσταση. Θα χρειαζόμαστε τέσσερις χωρικές πληροφορίες· και αν προσθέσουμε και το χρόνο, θα έχουμε ένα σύνολο πέντε χωροχρονικών πληροφοριών – μία παραπάνω απ' όσες θα περιμέναμε φυσιολογικά.

Κι έτσι, αρκετά απρόσμενα, βλέπουμε πως μολονότι αντιλαμβανόμαστε μόνο τρεις εκτεταμένες διαστάσεις, η συλλογιστική των Kaluza και Klein δείχνει ότι αυτό δεν αποκλείει την ύπαρξη επιπρόσθετων καμπυλωμένων διαστάσεων, ακόμα κι αν αυτές είναι πολύ μικρές. Το σύμπαν μπορεί κάλλιστα να διαθέτει περισσότερες διαστάσεις απ' όσες βλέπει το μάτι.

Πόσο μικρό είναι το «μικρό»; Όργανα τελευταίας τεχνολογίας

μπορούν να ανιχνεύσουν τόσο μικρές δομές όσο το ένα δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου. Από τη στιγμή που μια επιπρόσθετη διάσταση είναι χαμπυλωμένη και μικρότερη από αυτή τη μικροσκοπική ποσότητα, είναι υπερβολικά μικρή για να μπορέσουμε να την ανιχνεύσουμε. Το 1926 ο Klein συνδύασε την αρχική πρόταση του Kaluza με ορισμένες ιδέες από το αναδυόμενο πεδίο της χβαντομηχανικής. Οι υπολογισμοί του έδειξαν ότι η επιπρόσθετη κυκλική διάσταση ενδέχεται να είναι τόσο μικρή όσο το μήκος Planck, πολύ μικρότερη απ' ό,τι μπορούμε να προσεγγίσουμε πειραματικά. Από τότε, οι φυσικοί αποκαλούν την πιθανότητα ύπαρξης επιπρόσθετων μικροσκοπικών χωρικών διαστάσεων *θεωρία των Kaluza-Klein*.²

Τα πηγαίνελα πάνω σ' ένα λάστιχο

Το απτό παράδειγμα του λάστιχου και η απεικόνιση στο Σχήμα 8.3 χρησιμοποιήθηκαν για να σας δείξουν πώς είναι δυνατό να διαθέτει το σύμπαν μας επιπρόσθετες χωρικές διαστάσεις. Όμως ακόμη και οι ερευνητές σε αυτό τον τομέα δυσκολεύονται να σχηματίσουν την εικόνα ενός σύμπαντος με περισσότερες από τρεις χωρικές διαστάσεις. Για το λόγο αυτό, οι φυσικοί συχνά ακονίζουν τη διαίσθησή τους σχετικά με αυτές τις επιπλέον διαστάσεις, προσπαθώντας να φανταστούν πώς θα ήταν η ζωή αν ζούσαμε σε ένα υποθετικό σύμπαν λιγότερων διαστάσεων – βαδίζοντας έτσι στα χνάρια του υπέροχου και κλασικού εκλαϊκευτικού βιβλίου *Flatland* που έγραψε ο Edwin Abbott το 1884.³ Με αυτό το σκεπτικό συνειδητοποιούμε σιγά σιγά ότι το σύμπαν διαθέτει περισσότερες διαστάσεις από αυτές που αντιλαμβανόμαστε άμεσα. Ας προσπαθήσουμε να κάνουμε κι εμείς το ίδιο και ας φανταστούμε ένα διδιάστατο σύμπαν που έχει το ίδιο σχήμα με το λάστιχο του ποτίσματος. Για να το πετύχουμε, πρέπει να εγκαταλείψουμε την προοπτική του «απομακρυσμένου παρατηρητή» που βλέπει το λάστιχο ως ένα αντικείμενο μέσα στο σύμπαν μας. Αντίθετα, πρέπει

να αφήσουμε πίσω μας τον κόσμο όπως τον γνωρίζουμε και να εισέλθουμε σε ένα νέο «Λαστιχοσύμπαν», στο οποίο η επιφάνεια ενός λάστιχου του ποτίσματος με πολύ μεγάλο μήκος (μπορείτε να το φαντάζεστε με άπειρο μήκος) είναι το μόνο που υπάρχει όσον αφορά τη χωρική έκταση. Φανταστείτε ότι είστε ένα μυρμηγκάκι που ζει πάνω σε αυτή την επιφάνεια.

Ας αρχίσουμε κάνοντας τα πράγματα ακόμη πιο ακραία. Φανταστείτε ότι η περιφέρεια της χυκλικής διάστασης στο Λαστιχοσύμπαν σας είναι πολύ μικρή – τόσο μικρή που ούτε εσείς ούτε και κανείς άλλος από τους συμπατριώτες σας, τους Λαστιχανθρώπους, μπορεί να αντιληφθεί την ύπαρξή της. Αντίθετα, και εσείς και όλοι οι άλλοι που ζουν στο Λαστιχοσύμπαν θεωρείτε αυτό το βασικό δεδομένο της ζωής τόσο προφανές, ώστε να μην επιδέχεται καμία αμφισβήτηση: το σύμπαν έχει μία χωρική διάσταση. (Αν το Λαστιχοσύμπαν είχε γεννήσει το δικό του μυρμηγκάκι-Einstein, τότε οι Λαστιχάνθρωποι θα έλεγαν ότι το σύμπαν διαθέτει μία χωρική και μία χρονική διάσταση.) Μάλιστα, το χαρακτηριστικό αυτό του σύμπαντος είναι τόσο ολοφάνερο, που οι Λαστιχάνθρωποι έχουν ονομάσει την πατρίδα τους *Γραμμοχώρα*, κάτι που υπογραμμίζει την ύπαρξη μόνο μιας χωρικής διάστασης.

Η ζωή στη *Γραμμοχώρα* είναι πολύ διαφορετική από τη ζωή που γνωρίζουμε. Για παράδειγμα, το σώμα σας, το τόσο οικείο σ' εσάς, δεν χωράει στη *Γραμμοχώρα*. Όση προσπάθεια κι αν κάνετε για να αδυνατίσετε, δεν θα κατορθώσετε με τίποτα να αποφύγετε το αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι έχετε μήκος, πλάτος και ύψος – είστε δηλαδή τρισδιάστατος. Στη *Γραμμοχώρα* ο χώρος δεν επαρκεί για τόσο πολύπλοκες αρχιτεκτονικές. Σύμφωνα με την εικόνα που έχετε στο μυαλό σας, η *Γραμμοχώρα* εξακολουθεί ενδεχομένως να μοιάζει με ένα αντικείμενο λεπτό και μακρύ μέσα στο σύμπαν μας. Θυμηθείτε ωστόσο πως στην πραγματικότητα θα πρέπει να φαντάζεστε τη *Γραμμοχώρα* ως σύμπαν – το μόνο που υπάρχει. Ως κάτοικος της *Γραμμοχώρας*, πρέπει να χωρέσετε μέσα στη χωρική της έκταση. Προσπαθήστε να το φαντα-

στείτε. Ακόμη κι αν μπείτε στο σώμα ενός μυρμηγκιού, πάλι δεν θα τα καταφέρετε. Θα πρέπει να ζουλήξετε το νέο σας σώμα ώστε να μοιάζει περισσότερο με σκουλήκι, και μετά να το ζουλήξετε κι άλλο μέχρι να μηδενιστεί το πάχος του. Για να χωρέσετε στη Γραμμοχώρα, πρέπει να είστε ένα ον που θα διαθέτει μόνο μήκος.

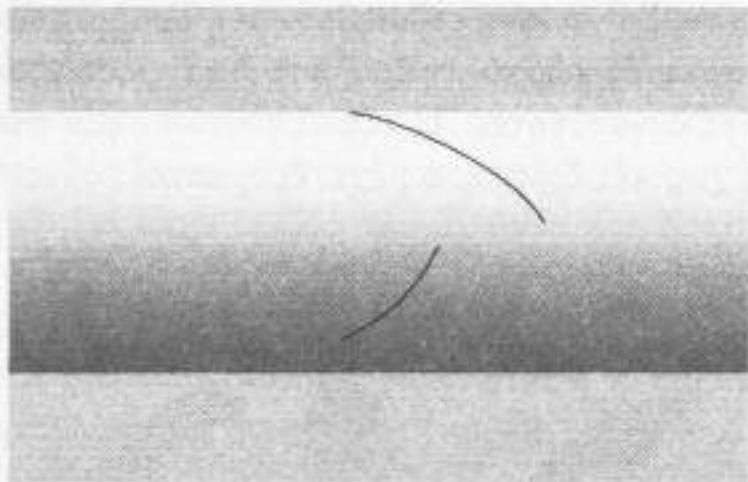
Φανταστείτε έπειτα ότι έχετε από ένα μάτι σε κάθε άκρη του σώματός σας. Σε αντίθεση με τα ανθρώπινα μάτια σας, που μπορούν να στριφογυρίζουν για να κοιτάξουν και προς τις τρεις κατευθύνσεις, τα συγκεκριμένα μάτια είναι σταθερά καρφωμένα στη θέση τους και το καθένα τους κοιτάζει προς μία μόνο διάσταση. Αυτό δεν αποτελεί ανατομικό περιορισμό του νέου σας σώματος. Αντίθετα, και εσείς και όλα τα άλλα Γραμμούντα αναγνωρίζετε ότι, αφού η Γραμμοχώρα έχει μόνο μία διάσταση, δεν μπορείτε να δείτε πουθενά αλλού. Το μπρος και το πίσω εξαντλούν την έκταση της Γραμμοχώρας.

Μπορούμε να συνεχίσουμε να φανταζόμαστε τη ζωή στη Γραμμοχώρα, αλλά σύντομα συνειδητοποιούμε ότι δεν υπάρχουν και πολλά να φανταστούμε. Για παράδειγμα, αν ένα άλλο Γραμμούν βρίσκεται από τη μία ή από την άλλη μεριά σας, σκεφτείτε πώς θα φαίνεται: θα βλέπετε το ένα μάτι του -αυτό που σας κοιτάζει-, αλλά, σε αντίθεση με τα ανθρώπινα μάτια, το δικό του θα είναι απλώς ένα σημείο. Τα μάτια στη Γραμμοχώρα δεν έχουν χαρακτηριστικά και δεν φανερώνουν συναισθήματα - γιατί απλούστατα δεν υπάρχει χώρος γι' αυτά τα οικεία χαρακτηριστικά. Επιπλέον, δεν θα μπορείτε να ξεφύγετε από αυτή την τελίτσα που έχει η φίλη σας για μάτι. Αν θέλετε να την προσπεράσετε και να εξερευνήσετε το βασίλειο της Γραμμοχώρας από την άλλη μεριά του κορμού της, ετοιμαστείτε για μια μεγάλη απογοήτευση. Δεν μπορείτε να την προσπεράσετε. Σας «κλείνει εντελώς το δρόμο», και δεν υπάρχει χώρος στη Γραμμοχώρα για να την παρακάμψετε. Η σειρά με την οποία τα Γραμμούντα φύτρωσαν στην έκταση της Γραμμοχώρας είναι καθορισμένη και αμετάβλητη. Τι βαρετό!

Χιλιάδες χρόνια μετά τη Γένεση της Γραμμοχώρας, ένα Γραμ-

μιόν ονόματι Καλούζα Κ. Λάιν δίνει κάποια ελπίδα στους καταπιεσμένους Γραμμοκατοίκους. Είτε λόγω θεϊκής έμπνευσης είτε επειδή νιώθει φοβερή απόγνωση κοιτάζοντας τόσα χρόνια το μάτι-σημείο του γειτονικού όντος, προτείνει ότι μπορεί τελικά η Γραμμοχώρα να μην είναι μονοδιάστατη. Ενδεχομένως, σύμφωνα με τη θεωρία του, να είναι στην πραγματικότητα διδιάστατη, με μια δεύτερη πολύ μικρή κυκλική διάσταση που μέχρι στιγμής δεν έχει παρατηρηθεί άμεσα εξαιτίας του μικροσκοπικού μεγέθους της. Ο Καλούζα Κ. Λάιν υπόσχεται μια εντελώς νέα ζωή, η οποία θα μπορούσε να γίνει πραγματικότητα αν αυτή η καμπυλωμένη διεύθυνση μπορούσε να μεγαλώσει σε μέγεθος – κάτι που είναι επιτέλους εφικτό χάρη στο πρόσφατο έργο του συναδέλφου του, του Λαϊνστάιν. Ο Καλούζα Κ. Λάιν περιγράφει ένα σύμπαν που συναρπάζει εσάς όπως και κάθε σύντροφό σας και γεμίζει τους πάντες ελπίδα – ένα σύμπαν όπου τα Γραμμοόντα μπορούν να κινηθούν ελεύθερα το ένα δίπλα στο άλλο χρησιμοποιώντας αυτή τη δεύτερη διάσταση: κάτι που σηματοδοτεί το τέλος της χωρικής σας σκλαβιάς. Συνειδητοποιούμε ότι ο Καλούζα Κ. Λάιν περιγράφει τη ζωή πάνω σε ένα «πεπλατυσμένο» Λαστιχοσύμπαν.

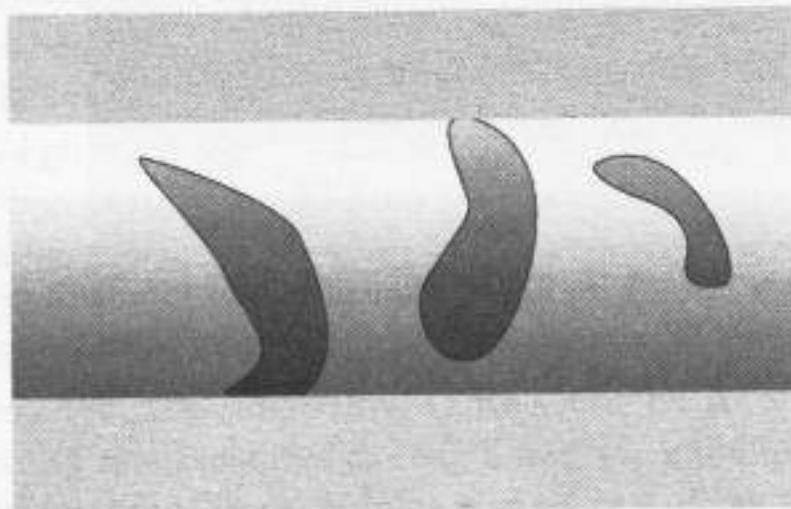
Στην πραγματικότητα, αν η κυκλική διάσταση μπορούσε να μεγαλώσει, «φουσκώνοντας» έτσι τη Γραμμοχώρα μέχρι να γίνει Λαστιχοσύμπαν, η ζωή σας θα άλλαζε δραματικά. Πάρτε το σώμα σας, για παράδειγμα. Ως Γραμμοόν, οτιδήποτε ανάμεσα στα μάτια σας αποτελεί το εσωτερικό του σώματός σας. Τα μάτια σας συνεπώς παίζουν τον ίδιο ρόλο για το γραμμοσώμα σας όπως το δέρμα για το συνηθισμένο ανθρώπινο σώμα: αποτελούν το όριο ανάμεσα στο εσωτερικό του σώματός σας και τον έξω κόσμο. Ένας γιατρός στη Γραμμοχώρα έχει πρόσβαση στο εσωτερικό του γραμμοσώματός σας μόνο αν τρυπήσει την επιφάνειά του – με άλλα λόγια, «χειρουργοί» στη Γραμμοχώρα είναι οι οφθαλμίατροι.



Σχήμα 8.5 Ένα Γραμμοόν μπορεί να κοιτάξει απευθείας στο εσωτερικό του σώματος ενός άλλου όταν η Γραμμοχώρα μεγαλώσει και γίνει Λαστιχοσύμπαν.

* Φανταστείτε όμως τώρα τι συμβαίνει αν η Γραμμοχώρα διαθέτει όντως, όπως υποστηρίζει ο Καλούζα Κ. Λάιν, μια χρυμμένη καμπυλωμένη διάσταση, και τι γίνεται όταν αυτή η διάσταση μεγαλώσει μέχρις ενός παρατηρήσιμου μεγέθους. Τώρα, ένα Γραμμοόν μπορεί να δει το σώμα σας υπό γωνία και συνεπώς να κοιτάξει κατευθείαν στο εσωτερικό του, όπως δείχνουμε στο Σχήμα 8.5. Χρησιμοποιώντας αυτή τη δεύτερη διάσταση, ένας γιατρός μπορεί να χειρουργήσει το σώμα σας φτάνοντας απευθείας στο εκτεθειμένο εσωτερικό του. Περίεργο! Με το πέρασμα του χρόνου, τα Γραμμοόντα θα ανέπτυσσαν αναμφίβολα κάποιο είδος κάλυψης, σαν το δέρμα, για να προστατεύσουν το εκτεθειμένο εσωτερικό του σώματός τους από την επαφή με τον έξω κόσμο. Και επιπλέον, θα εξελίσσονταν αναμφισβήτητα σε όντα με μήκος αλλά και με πλάτος: σε Επιπεδοόντα που θα κινούνται στο διδιάστατο Λαστιχοσύμπαν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6. Αν η κυκλική διάσταση μεγαλωνει υπερβολικά, αυτό το διδιάστατο σύμπαν θα έμοιαζε φοβερά με την Επιπεδοχώρα του Abbott – το φανταστικό διδιάστατο δημιούργημά του, με την πλούσια πολιτιστική κληρονομιά και το σατιρικό κοινωνικό σύστημα όπου οι τάξεις ορίζονται ανάλογα με το γεωμετρικό σχήμα του καθενός. Μολονότι είναι δύσκολο να φα-

νταστούμε να συμβαίνει κάτι ενδιαφέρον στη Γραμμοχώρα -απλώς δεν υπάρχει αρκετός χώρος-, η ζωή στο Λαστιχοσύμπαν προσφέρει πάμπολλες δυνατότητες. Η εξέλιξη από τη μία στις δύο παρατηρήσιμες χωρικές διαστάσεις έχει δραματικές συνέπειες.



Σχήμα 8.6 Επίπεδα διδιάστατα όντα που ζουν στο Λαστιχοσύμπαν.

Και τώρα η επωδός: και γιατί να σταματήσουμε εδώ; Το διδιάστατο σύμπαν μπορεί κι αυτό να διαθέτει μια καμπυλωμένη διάσταση και συνεπώς να είναι στα κρυφά τρισδιάστατο. Αυτό μπορεί να φανεί στο Σχήμα 8.4, με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν μόνο δύο χωρικές διαστάσεις (ενώ, όταν πρωτομιλήσαμε για το σχήμα αυτό, φανταζόμαστε ότι το πλέγμα ήταν τρισδιάστατο). Αν η κυκλική διάσταση επεκτεινόταν, ένα διδιάστατο ον θα βρισκόταν σε έναν εντελώς νέο χόσμο, στον οποίο η κίνηση δεν περιορίζεται μόνο στο δεξιά-αριστερά και το μπρος-πίσω. Τώρα, κάποιο ον θα μπορούσε να κινηθεί και σε μια τρίτη διάσταση - την «πάνω-κάτω» διεύθυνση κατά μήκος του κύκλου. Μάλιστα, αν η κυκλική διάσταση μεγάλωνε αρκετά, αυτό θα μπορούσε να είναι το δικό μας τρισδιάστατο σύμπαν. Δεν γνωρίζουμε προς το παρόν κατά πόσο κάποια από τις τρεις χωρικές μας διαστάσεις εκτείνεται απεριόριστα ή αν στην πραγματικότητα κάποια στιγμή καμπυλώνεται σχηματίζοντας ένα γιγαντιαίο κύκλο που εκτείνεται πέρα από την ακτίνα δράσης των πιο δυνατών μας τηλεσκοπίων. Αν η κυκλική διάστα-

ση στο Σχήμα 8.4 μεγάλωνε αρκετά –μερικά δισεκατομμύρια έτη φωτός σε έκταση–, το συγκεκριμένο σχήμα θα μπορούσε κάλλιστα να απεικονίζει τον κόσμο μας.

Και η επωδός ξανακούγεται: και γιατί να σταματήσουμε εδώ; Αυτό μας οδηγεί στην εικόνα των Kaluza και Klein για το σύμπαν: ότι δηλαδή το τρισδιάστατο σύμπαν μας διαθέτει ενδεχόμενως μια ανεξερεύνητη χαμπυλωμένη τέταρτη χωρική διάσταση. Αν αυτή η εντυπωσιακή πιθανότητα, ή η γενίκευσή της σε πολλές χαμπυλωμένες διαστάσεις (που θα συζητήσουμε σε λίγο), αποδειχθεί αληθινή, και αν αυτές οι χαμπυλωμένες διαστάσεις μπορούσαν να φουσκώσουν φτάνοντας σε ένα μακροσκοπικό μέγεθος, τότε τα παραδείγματα που αναφέραμε για κόσμους με λιγότερες διαστάσεις δείχνουν ξεκάθαρα ότι η ζωή όπως την ξέρουμε θα μεταβαλλόταν δραματικά.

Εντούτοις, όσο κι αν αυτό προκαλεί έκπληξη, ακόμη κι αν αυτές οι επιπλέον διαστάσεις έμεναν παντοτινά χαμπυλωμένες και μικρές, η ύπαρξή τους και μόνο έχει βαθύτατες συνέπειες.

Ενοποίηση στις υψηλότερες διαστάσεις

Μολονότι η πρόταση του Kaluza το 1919 ότι το σύμπαν μας θα μπορούσε να διαθέτει περισσότερες χωρικές διαστάσεις από αυτές που αντιλαμβανόμαστε άμεσα, αποτελούσε από μόνη της ένα αξιοσημείωτο ενδεχόμενο, υπήρχε κάτι αλλο που την καθιστούσε πραγματικά πειστική. Ο Einstein είχε διατυπώσει τη γενική θεωρία της σχετικότητας στο πλαίσιο του οικείου σύμπαντος με τις τρεις χωρικές διαστάσεις και τη μία χρονική. Η μαθηματική διατύπωση της θεωρίας του όμως μπορούσε να επεκταθεί σχετικά εύκολα ώστε να γραφτούν ανάλογες εξισώσεις για ένα σύμπαν με επιπρόσθετες χωρικές διαστάσεις. Με τη «μετριοπαθή» παραδοχή μιας μόνο παραπάνω χωρικής διάστασης, ο Kaluza έκανε την απαραίτητη μαθηματική ανάλυση και κατέληξε σε συγκεκριμένες νέες εξισώσεις.

Ανακάλυψε ότι στην αναθεωρημένη διατύπωση οι εξισώσεις που αφορούσαν τις τρεις συνηθισμένες διαστάσεις ήταν ουσιαστικά πανομοιότυπες με αυτές του Einstein. Καθώς όμως περιέλαβε μία επιπλέον χωρική διάσταση, ήταν αναμενόμενο να βρει και κάποιες επιπλέον εξισώσεις, πέρα απ' όσες είχε βρει αρχικά ο Einstein. Αφού μελέτησε τις επιπλέον εξισώσεις που σχετίζονταν με τη νέα διάσταση, ο Kaluza συνειδητοποίησε ότι συνέβαινε κάτι εκπληκτικό. Οι επιπλέον εξισώσεις ήταν αυτές με τις οποίες περιέγραφε ο Maxwell την ηλεκτρομαγνητική δύναμη στη δεκαετία του 1880! Προσθέτοντας άλλη μία χωρική διάσταση, ο Kaluza είχε ενοποιήσει τη θεωρία του Einstein για τη βαρύτητα με τη θεωρία του Maxwell για το φως.

Πριν από την πρόταση του Kaluza, η βαρύτητα και ο ηλεκτρομαγνητισμός αντιμετωπίζονταν ως δύο άσχετες μεταξύ τους δυνάμεις· κανείς δεν είχε καν υπαινιχθεί ότι θα μπορούσε να υπάρχει κάποια σχέση ανάμεσά τους. Ο Kaluza τόλμησε και φαντάστηκε ότι το σύμπαν μας έχει μια πρόσθετη χωρική διάσταση, με αποτέλεσμα να ανακαλύψει ότι υπάρχει στενότατη σχέση ανάμεσα σε αυτές τις δυνάμεις. Η θεωρία του υποστήριζε ότι τόσο η βαρύτητα όσο και ο ηλεκτρομαγνητισμός σχετίζονται με τους κυματισμούς του χωρικού ιστού. Η βαρύτητα διαδίδεται μέσω των κυματισμών στις τρεις οικείες χωρικές διαστάσεις, ενώ ο ηλεκτρομαγνητισμός διαδίδεται μέσω κυματισμών στη νέα, καμπυλωμένη διάσταση.

Ο Kaluza έστειλε το άρθρο του στον Einstein και στην αρχή αυτό κίνησε ιδιαίτερα την περιέργεια του Einstein. Στις 21 Απριλίου 1919 ο Einstein απάντησε στο γράμμα του Kaluza λέγοντάς του πως ο ίδιος δεν είχε σκεφτεί ποτέ ότι η ενοποίηση θα μπορούσε να επιτευχθεί «μέσα σε έναν πενταδιάστατο [τέσσερις χωρικές και μία χρονική διάσταση] κυλινδρικό κόσμο», και πρόσθεσε: «Έκ πρώτης όψεως, η ιδέα σας μου αρέσει πάρα πολύ».⁴ Μία εβδομάδα αργότερα ωστόσο ο Einstein έγραψε ξανά στον Kaluza, εκφράζοντας αυτή τη φορά σκεπτικισμό: «Διάβασα το άρθρο σας προσεκτικά και το βρίσκω πραγματικά ενδιαφέρον. Πουθενά, μέ-

χρι στιγμής, δεν βρίσκω κάτι που δεν στέκει. Από την άλλη μεριά, θα πρέπει να παραδεχτώ ότι τα επιχειρήματα που προβάλλονται μέχρι στιγμής δεν μου φαίνονται αρκούντως πειστικά».⁵ Άλλα κατόπιν, στις 14 Οκτωβρίου 1921, παραπάνω από δύο χρόνια αργότερα, ο Einstein έγραψε στον Kaluza ξανά, αφού είχε χρόνο να χωνέψει τη νεωτερική προσέγγιση του Kaluza πληρέστερα: «Αναθεώρησα την άποψή μου και μετανιώνω που σας αποθάρρυνα να δημοσιεύσετε την ιδέα σας για την ενοποίηση της βαρύτητας με τον ηλεκτρομαγνητισμό πριν από δύο χρόνια... Αν το επιθυμείτε, μπορώ τελικά να παρουσιάσω το άρθρο σας στην Ακαδημία».⁶ Έστω και καθυστερημένα, το έργο του Kaluza έλαβε τελικά την έγκριση του μεγάλου δασκάλου.

Μολονότι ήταν μια όμορφη ιδέα, μετέπειτα λεπτομερείς μελέτες της πρότασης του Kaluza, όπως συμπληρώθηκε από τον Klein, έδειξαν ότι υπήρχαν σοβαρές αντιφάσεις με τα πειραματικά δεδομένα. Ακόμη και οι απλούστερες προσπάθειες να ενσωματωθεί το ηλεκτρόνιο στη θεωρία κατέληγαν σε προβλέψεις για το λόγο ανάμεσα στο φορτίο και τη μάζα του, που διέφεραν σημαντικά από τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές. Και καθώς δεν εμφανιζόταν κανένας προφανής τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι περισσότεροι φυσικοί που είχαν προσέξει την ιδέα του Kaluza έχασαν το ενδιαφέρον τους. Ο Einstein και κάποιοι άλλοι συνέχισαν, κατά καιρούς, να ασχολούνται ερασιτεχνικά με την πιθανότητα ύπαρξης επιπλέον καμπυλωμένων διαστάσεων, αλλά αυτή η ενασχόληση σύντομα κατέληξε στο περιθώριο της θεωρητικής φυσικής.

Είναι αλήθεια ότι η ιδέα του Kaluza ήταν πολύ μπροστά από την εποχή της. Η δεκαετία του 1920 σηματοδότησε την έναρξη μιας φρενήρους ενασχόλησης των θεωρητικών και πειραματικών φυσικών με την κατανόηση των θεμελιωδών νόμων του μικρόκοσμου. Οι θεωρητικοί είχαν πολλή δουλειά, αφού προσπαθούσαν να αναπτύξουν τη δομή της κβαντομηχανικής και της κβαντικής θεωρίας πεδίου. Οι πειραματικοί έπρεπε να ανακαλύψουν τις λεπτομερείς ιδιότητες του ατόμου καθώς και ένα σωρό άλλα θεμε-

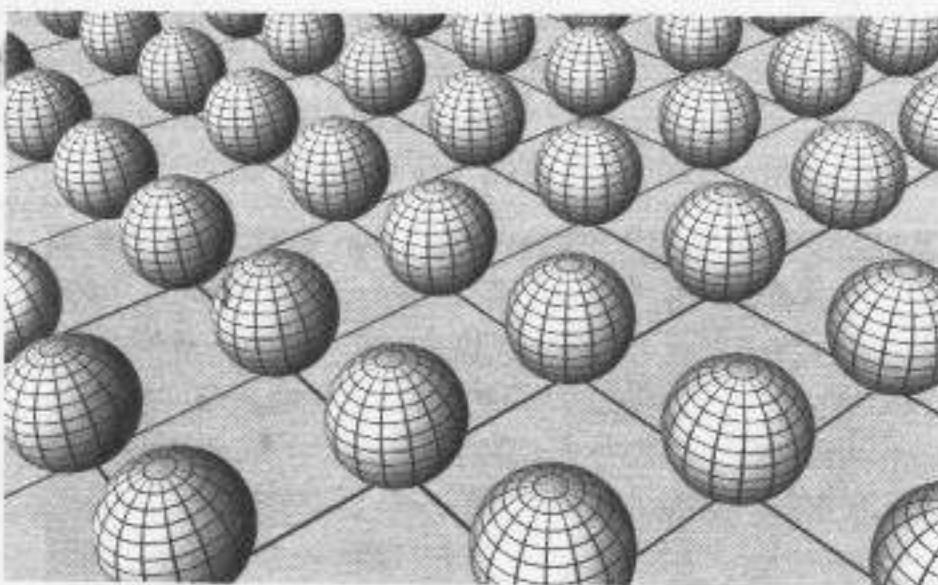
λιώδη υλικά συστατικά. Η θεωρία καθοδηγούσε το πείραμα και το πείραμα εκλέπτυνε τη θεωρία καθώς οι φυσικοί προχωρούσαν για μισό αιώνα, μέχρι να ανακαλύψουν τελικά το βασικό μοντέλο. Άρα δεν είναι παράξενο που οι εικασίες σχετικά με τις επιπλέον διαστάσεις κατέλαβαν την τελευταία θέση στις προτεραιότητες αυτής της παραγωγικής και πρωτοπόρας εποχής. Καθώς οι φυσικοί μελετούσαν πανίσχυρες κβαντικές μεθόδους, οι συνέπειες των οποίων οδηγούσαν σε πειραματικά ελέγχιμες προβλέψεις, δεν υπήρχε και πολύ ενδιαφέρον για την καθαρή εικασία να είναι το σύμπαν ένας εντελώς διαφορετικός τόπος, όταν εξετάζεται σε μικροσκοπικές κλίμακες που ούτε τα ισχυρότερα όργανά μας μπορούν να ελέγξουν.

Όμως αργά ή γρήγορα, κάθε καλπασμός χάνει την αρχική ορμή του. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1960 και τις αρχές της δεκαετίας του 1970 είχε ολοκληρωθεί η θεωρητική δόμηση του βασικού μοντέλου. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και τις αρχές της δεκαετίας του 1980 πολλές από τις προβλέψεις του είχαν επαληθευτεί πειραματικά, και οι περισσότεροι φυσικοί σωματιδίων συμπέραιναν ότι ήταν απλώς ζήτημα χρόνου να επαληθευτούν και οι υπόλοιπες. Παρότι ορισμένες σημαντικές λεπτομέρειες παρέμεναν δίχως απάντηση, πολλοί ήταν εκείνοι που πίστευαν ότι τα κύρια ερωτήματα σχετικά με τις ισχυρές, ασθενείς και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις είχαν ήδη απαντηθεί.

Οι συνθήκες είχαν πλέον ωριμάσει ώστε να επανέλθουμε στο πιο σημαντικό ερώτημα: στην αινιγματική σύγκρουση ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική. Η επιτυχία στη διατύπωση μας κβαντικής θεωρίας για τις τρεις από τις δυνάμεις της φύσης ενθάρρυνε τους φυσικούς να προσπαθήσουν να εντάξουν και την τέταρτη, τη βαρύτητα, στο ίδιο πλαίσιο. Αφού προηγήθηκαν πολυάριθμες ιδέες που τελικά απέτυχαν όλες, η κοινότητα των φυσικών γινόταν ολοένα και πιο ανοιχτή σε ριζοσπαστικές προσεγγίσεις. Και ενώ στα τέλη της δεκαετίας του 1920 είχε ταφεί, η θεωρία των Kaluza-Klein ξαναβγήκε στην επιφάνεια.

Σύγχρονη θεωρία Kaluza-Klein

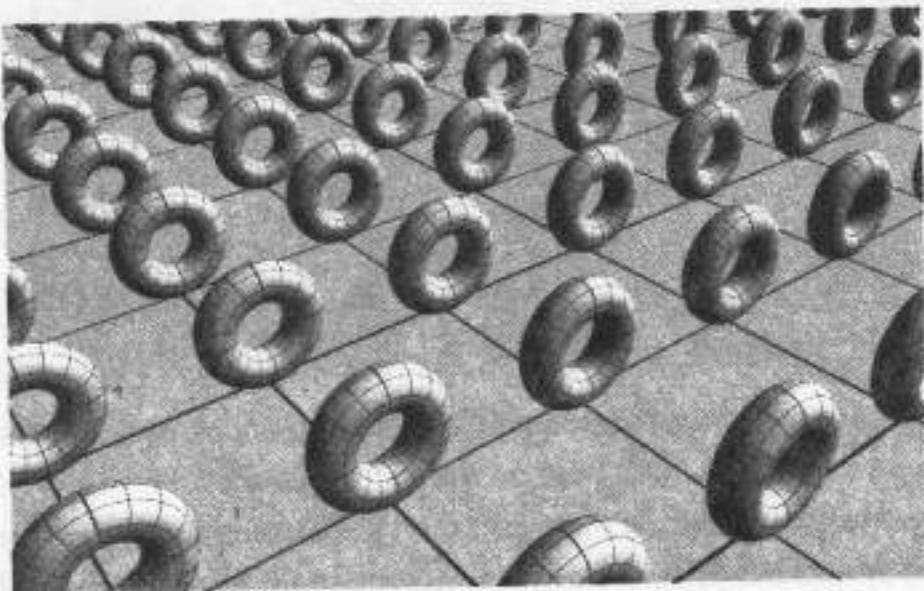
Η κατανόησή μας γύρω από τη φυσική άλλαξε σημαντικά και πρώτης σε μεγάλο βάθος στις έξι δεκαετίες που πέρασαν από την αρχική πρόταση του Kaluza. Η κβαντομηχανική διαμορφώθηκε πλήρως και επαληθεύτηκε πειραματικά. Οι ισχυρές και οι ασθενείς δυνάμεις, άγνωστες στη δεκαετία του 1920, ανακαλύφθηκαν και έχουν γίνει κατανοητές σε μεγάλο βαθμό. Ορισμένοι φυσικοί εικάζουν ότι η αρχική πρόταση του Kaluza απέτυχε επειδή ο ίδιος δεν γνώριζε τότε αυτές τις άλλες δυνάμεις κι έτσι στάθηκε υπερβολικά συντηρητικός στη νέα δομή του χώρου που πρότεινε. Περισσότερες δυνάμεις σηματοδοτούσαν την ανάγκη για περισσότερες διαστάσεις. Ήποστηρίχτηκε ότι μία μόνο νέα κυκλική διάσταση, μολονότι ικανή να υποδείξει τη σχέση ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας με τον ηλεκτρομαγνητισμό, δεν αρκούσε.



Σχήμα 8.7 Δύο επιπλέον διαστάσεις καμπυλωμένες σε σχήμα σφαίρας.

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970 διεξαγόταν μια έντονη ερευνητική προσπάθεια που επικέντρων το ενδιαφέρον της σε θεωρίες πολλών διαστάσεων με πολυάριθμες καμπυλωμένες χωρικές διευθύνσεις. Το Σχήμα 8.7 εικονίζει ένα παράδειγμα με δύο επι-

πλέον διαστάσεις που είναι χαμπυλωμένες πάνω στην επιφάνεια μας μπάλας – δηλαδή μιας σφαίρας. Όπως και στην περίπτωση της μιας χυκλικής διάστασης, αυτές οι επιπρόσθετες διαστάσεις ενυπάρχουν σε κάθε σημείο των οικείων εκτεταμένων διαστάσεων. (Για λόγους οπτικής σαφήνειας έχουμε και πάλι σχεδιάσει μόνο ένα δείγμα των σφαιρικών διαστάσεων σε σημεία που ισαπέχουν στο πλέγμα των εκτεταμένων διαστάσεων.) Πέρα από το να προτείνει ένα διαφορετικό πλήθος επιπρόσθετων διαστάσεων, μπορεί κανείς να φανταστεί διαφορετικά σχήματα για τις επιπλέον αυτές διαστάσεις. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 8.8 απεικονίζουμε δύο επιπρόσθετες διαστάσεις, οι οποίες έχουν τώρα το σχήμα ενός ντόνατ – δηλαδή ενός τόρου, όπως ονομάζουμε το σχήμα αυτό στα μαθηματικά. Μολονότι κάτι τέτοιο ξεπερνά τις σχεδιαστικές μας ικανότητες, μπορούμε να φανταστούμε ότι άλλες πιο πολύπλοκες δυνατότητες με τρεις, τέσσερις, πέντε, και ουσιαστικά με οποιοδήποτε πλήθος επιπλέον χωρικών διαστάσεων, χαμπυλωμένων σε ένα εύρυ φάσμα εξωτικών σχημάτων. Αυτό που απαιτούμε και πάλι είναι όλες αυτές οι διαστάσεις να έχουν μέγεθος μικρότερο από την ελάχιστη χλίμακα που μπορούμε να ερευνήσουμε, καθώς κανένα περιμακ δεν έχει αποκαλύψει ακόμη την ύπαρξή τους.



Σχήμα 8.8 Δύο επιπλέον διαστάσεις κουλουριασμένες στο σχήμα ενός ντόνατ ή τόρου.

Από τις θεωρίες πολλών διαστάσεων, αυτές που υπόσχονται τα περισσότερα είναι όσες ενσωματώνουν και την υπερσυμμετρία. Οι φυσικοί ήλπιζαν ότι η μερική εξουδετέρωση των πιο έντονων χβαντικών διακυμάνσεων, που προκύπτει από το ζευγάρωμα των σωματιδίων-υπερεταίρων, θα λείαινε τις διαφορές ανάμεσα στη βαρυτική θεωρία και την χβαντομηχανική. Επινόησαν το όνομα υπερβαρύτητα πολλών διαστάσεων για να περιγράψουν τις θεωρίες που συμπεριλαμβάνουν τη βαρύτητα, τις επιπρόσθετες διαστάσεις και την υπερσυμμετρία.

Όπως είχε συμβεί και με την πρώτη απόπειρα του Kaluza, κάποιες εκδοχές της υπερβαρύτητας πολλών διαστάσεων έμοιαζαν αρχικά πολλά υποσχόμενες. Οι νέες εξισώσεις που προέκυπταν από τις επιπλέον διαστάσεις θύμιζαν τρομερά αυτές που χρησιμοποιούνταν για να περιγράψουν τον ηλεκτρομαγνητισμό και τις ισχυρές και ασθενείς δυνάμεις. Άλλα διεξοδικοί έλεγχοι έδειξαν ότι τα παλιά αινίγματα παρέμεναν άλυτα. Το πιο σημαντικό ήταν ότι οι ολέθριες χβαντικές ταλαντώσεις του χώρου στις μικρές κλίμακες μειώνονταν μεν από την υπερσυμμετρία, αλλά όχι αρκετά για να δώσουν μια λογική θεωρία. Οι φυσικοί δυσκολεύονταν επίσης να ανακαλύψουν μία μοναδική, λογική θεωρία πολλών διαστάσεων που να ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά των δυνάμεων και της ύλης.⁷

Με τον καιρό έγινε σαφές ότι κάποια στοιχεία μιας ενοποιημένης θεωρίας έβγαιναν στην επιφάνεια, αλλά το βασικό εκείνο κομμάτι που θα μπορούσε να τα συνενώσει όλα μαζί με τρόπο χβαντομηχανικά συνεπή απουσίαζε. Το 1984 αυτό το κομμάτι –η θεωρία χορδών– έκανε την εμφάνισή του και αμέσως πρωταγωνίστησε.

Περισσότερες διαστάσεις και θεωρία χορδών

Έως τώρα θα πρέπει να έχετε πειστεί ότι το σύμπαν μας μπορεί να έχει επιπλέον καμπυλωμένες χωρικές διαστάσεις: ασφαλώς, από τη στιγμή που είναι αρκετά μικρές, τίποτε δεν αποκλείει την

ύπαρξή τους. Μπορεί όμως να νομίζετε ότι αυτές οι επιπλέον διαστάσεις δεν είναι παρά ένα εγκεφαλικό δημιούργημα. Η ανικανότητά μας να ερευνήσουμε κλίμακες μικρότερες από ένα δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου επιτρέπει όχι μόνο την ύπαρξη επιπλέον μικροσκοπικών διαστάσεων αλλά και κάθε λογής αλλοπρόσαλλους συνδυασμούς – ακόμη και να υπάρχει ένας μικροσκοπικός πολιτισμός από ακόμη πιο μικροσκοπικά πράσινα ανθρωπάκια. Μολονότι η πρώτη πρόταση φαίνεται πιο βάσιμη από τη δεύτερη, ίσως είναι εξίσου αυθαίρετο να δεχτούμε αξιωματικά οποιαδήποτε από τις δύο αυτές πειραματικά ανέλεγκτες – και, προς το παρόν, μη ελέγξιμες – πιθανότητες.

Έτσι είχαν τα πράγματα μέχρι την εμφάνιση της θεωρίας χορδών. Αυτή η θεωρία επιλύει το βασικό δίλημμα που απασχολεί τη σύγχρονη φυσική – την ασυμβατότητα της κβαντομηχανικής με τη γενική θεωρία της σχετικότητας – και ενοποιεί όλα τα θεμελιώδη συστατικά και τις δυνάμεις της φύσης. Άλλα, για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, πρέπει, σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, ο χώρος να έχει περισσότερες διαστάσεις.

Και νά γιατί: μία από τις βασικές ιδέες της κβαντομηχανικής μας λέει ότι η ικανότητά μας να προβλέπουμε περιορίζεται δραστικά: μπορούμε μόνο να βεβαιώνουμε ότι υπάρχει η τάδε πιθανότητα να συμβεί το δείνα αποτέλεσμα. Μολονότι ο Einstein πίστεψε ότι αυτή είναι μια πολύ δυσάρεστη πλευρά του σύγχρονου τρόπου ερμηνείας της φύσης, και ενδεχομένως να συμφωνείτε μαζί του, τα πράγματα δείχνουν ότι ισχύει. Ας το δεχτούμε. Όλοι γνωρίζουμε ότι η πιθανότητα είναι ένας αριθμός που κυμαίνεται ανάμεσα στο 0 και το 1 – ή αντίστοιχα, όταν εκφράζεται ποσοστιαία, ανάμεσα στο 0 και το 100 τοις εκατό. Οι φυσικοί έχουν ανακαλύψει πως, όταν ορισμένοι υπολογισμοί καταλήγουν σε «πιθανότητες» που δεν βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά τα αποδεκτά όρια, μας παρέχουν μια ισχυρή ένδειξη για τη δυσλειτουργία μιας κβαντομηχανικής θεωρίας. Για παράδειγμα, επισημάναμε νωρίτερα ότι ένα σημάδι της μεγάλης ασυμβατότητας ανάμεσα στη γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντομηχανική στο πλαίσιο των σημειακών σω-

ματιδίων είναι ότι οι υπολογισμοί καταλήγουν σε πιθανότητες με άπειρη τιμή. Όπως έχουμε συζητήσει, η θεωρία χορδών διορθώνει αυτούς τους απειρισμούς. Αλλά αυτό που δεν έχουμε έως τώρα αναφέρει είναι ότι εξακολουθεί να υπάρχει κι ένα άλλο, κάπως πιο λεπτό πρόβλημα. Στα πρώτα βήματα της θεωρίας χορδών οι φυσικοί ανακάλυψαν ότι ορισμένοι υπολογισμοί κατέληγαν σε αρνητικές πιθανότητες, που ξέφευγαν επίσης από τα αποδεκτά όρια. Έτσι, εκ πρώτης όψεως, η θεωρία χορδών φαινόταν να πνίγεται στα ίδια της τα κβαντομηχανικά απόνερα.

Με αξιέπαινη αποφασιστικότητα, οι φυσικοί έψαξαν και βρήκαν την αιτία αυτής της μη αποδεκτής ιδιότητας. Η εξήγηση ξεκινά με μια απλή παρατήρηση. Αν μια χορδή είναι περιορισμένη σε μια διδιάστατη επιφάνεια –όπως η επιφάνεια ενός τραπεζιού ή ενός λάστιχου του ποτίσματος–, το πλήθος των ανεξάρτητων διευθύνσεων στις οποίες μπορεί να ταλαντώνεται περιορίζεται σε δύο: δεξιά-αριστερά και μπρος-πίσω πάνω σε αυτή την επιφάνεια. Κάθε τέτοια ταλάντωση αποτελείται από κάποιο συνδυασμό ταλαντώσεων σε αυτές τις δύο διευθύνσεις. Αντίστοιχα, βλέπουμε ότι μια χορδή στην Επιπεδοχώρα, στο Λαστιχοσύμπαν ή σε κάθε άλλο διδιάστατο σύμπαν, είναι επίσης περιορισμένη να ταλαντώνεται σε δύο ανεξάρτητες διευθύνσεις. Αν ωστόσο η χορδή μπορέσει να εγκαταλείψει την επιφάνεια, το πλήθος των ανεξάρτητων διευθύνσεων ταλάντωσης αυξάνεται σε τρεις, καθώς η χορδή μπορεί τότε να δονείται και πάνω-κάτω. Αντιστοίχως, σε ένα σύμπαν με τρεις χωρικές διαστάσεις, μια χορδή μπορεί να ταλαντώνεται σε τρεις ανεξάρτητες διευθύνσεις. Μολονότι γίνεται όλο και πιο δύσκολο να φανταστούμε μια τέτοια εικόνα, το ίδιο μοτίβο συνεχίζεται: σε ένα σύμπαν με ακόμη περισσότερες χωρικές διαστάσεις, υπάρχουν ακόμη περισσότερες ανεξάρτητες διευθύνσεις ταλάντωσης για κάποια χορδή.

Τονίζουμε αυτό το χαρακτηριστικό της ταλάντωσης των χορδών, επειδή οι φυσικοί ανακάλυψαν ότι οι υπολογισμοί που προκαλούσαν πρόβλημα ήταν εξαιρετικά ευαίσθητοι στο πλήθος των ανεξάρτητων διευθύνσεων στις οποίες μπορεί να ταλαντώνεται

μια χορδή. Οι αρνητικές πιθανότητες προέκυπταν από μια δυσαρμονία ανάμεσα σε όσα απαιτούσε η θεωρία και όσα φαινόταν να επιβάλει η πραγματικότητα: οι υπολογισμοί έδειχναν ότι, αν οι χορδές μπορούσαν να ταλαντώνονται σε εννέα ανεξάρτητες χωρικές διευθύνσεις, δλες οι αρνητικές πιθανότητες θα εξουδετερώνονταν. Ωραία, πρόκειται για μια θαυμάσια θεωρία, αλλά και τι μ' αυτό; Αν η θεωρία χορδών σκοπεύει να περιγράψει τον κόσμο μας, έναν κόσμο με τρεις χωρικές διαστάσεις, φαίνεται ότι εξακολουθούμε να έχουμε πρόβλημα.

Έχουμε όμως πρόβλημα όντως; Αν γυρίσουμε πάνω από μισό αιώνα πίσω, βλέπουμε ότι οι Kaluza και Klein αφήνουν ένα παραθυράκι στη θεωρία τους. Από τη στιγμή που οι χορδές είναι τόσο μικρές, όχι μόνο μπορούν να ταλαντώνονται στις μεγάλες, εκτεταμένες διαστάσεις αλλά και σε μικροσκοπικές και καμπυλωμένες διαστάσεις. Κι έτσι μπορούμε όντως να καλύψουμε την απαίτηση του εννεαδιάστατου χώρου που θέτει η θεωρία χορδών στο δικό μας σύμπαν, αν υποθέσουμε –όπως οι Kaluza και Klein– ότι πέρα από τις τρεις οικείες εκτεταμένες χωρικές διαστάσεις υπάρχουν άλλες έξι καμπυλωμένες χωρικές διαστάσεις. Με τον τρόπο αυτό, η θεωρία χορδών, που κόντευε να απορριφθεί από τη φυσική ως μη συνεπής θεωρία, διασώζεται. Επιπλέον, η θεωρία χορδών δεν δέχεται απλώς ως αξίωμα την ύπαρξη επιπλέον διαστάσεων, όπως έγινε από τον Kaluza, τον Klein και τους οπαδούς τους, αλλά τη θεωρεί απολύτως απαραίτητη. Για να έχει η θεωρία χορδών νόημα, το σύμπαν θα πρέπει να διαθέτει εννέα χωρικές και μία χρονική διάσταση, συνολικά δηλαδή δέκα διαστάσεις. Στο πλαίσιο αυτό, η πρόταση που έκανε ο Kaluza το 1919 μπορεί να παρουσιαστεί με τα πλέον ισχυρά και πειστικά επιχειρήματα.

Ορισμένα ερωτήματα

Αυτό εγείρει έναν αριθμό ερωτημάτων. Πρώτον, γιατί να απαιτεί η θεωρία χορδών εννέα διαστάσεις, προκειμένου να αποφύγει τις

αρνητικές πιθανότητες; Ίσως κανένα άλλο ερώτημα στη θεωρία χορδών δεν είναι τόσο δύσκολο να απαντηθεί δίχως τη βοήθεια του μαθηματικού φορμαλισμού. Ένας αιμιγώς θεωρητικός υπολογισμός δίνει την απάντηση, αλλά κανείς δεν διαθέτει μια διαισθητική, μη τεχνική εξήγηση για το συγκεκριμένο νούμερο που προκύπτει. Ο φυσικός Ernest Rutherford είπε χάποτε ότι αν δεν μπορείς, σε γενικές γραμμές, να εξηγήσεις ένα αποτέλεσμα με απλούς, μη τεχνικούς όρους, τότε δεν κατέχεις την αλήθεια. Αυτό δεν σημαίνει πως το αποτέλεσμα είναι λανθασμένο· δείχνει όμως ότι δεν κατανοείς πλήρως την προέλευση, το νόημα ή τις συνέπειές του. Ίσως αυτό να αληθεύει όσον αφορά τις επιπλέον διαστάσεις της θεωρίας χορδών. (Πράγματι, ας εκμεταλλευτούμε εδώ την ευκαιρία να δούμε –παρενθετικά– ένα κεντρικό χαρακτηριστικό της δεύτερης επανάστασης των χορδών που θα συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 12. Ο υπολογισμός που βρίσκεται πίσω από το αποτέλεσμα των δέκα χωροχρονικών διαστάσεων –εννέα χωρικών και μιας χρονικής– αποδεικνύεται προσεγγιστικώς και μόνο. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, ο Witten, στηριζόμενος σε δικές του ιδέες και στο προηγούμενο έργο των Michael Duff από το Τέξας A&M University System και Chris Hull και Paul Townsend από το Cambridge, παρείχε πειστικές ενδείξεις ότι ο προσεγγιστικός υπολογισμός στην πραγματικότητα αγνοεί μία χωρική διάστασή: υποστήριξε προς έκπληξη των περισσότερων θεωρητικών των χορδών ότι η θεωρία χορδών απαιτεί στην πραγματικότητα δέκα χωρικές και μία χρονική διάσταση, συνολικά δηλαδή έντεκα διαστάσεις. Θα αγνοήσουμε αυτό το σημαντικό συμπέρασμα μέχρι το Κεφάλαιο 12, καθώς δεν έχει παρά ελάχιστη σχέση με αυτά που θα συζητήσουμε έως τότε.)

Δεύτερον, αν οι εξισώσεις της θεωρίας χορδών (ή, ακριβέστερα, οι προσεγγιστικές εξισώσεις που θα μας καθοδηγούν μέχρι το Κεφάλαιο 12) δείχνουν ότι το σύμπαν έχει εννέα χωρικές και μία χρονική διάσταση, γιατί οι τρεις χωρικές διαστάσεις (και η μία χρονική) είναι μεγάλες και εκτεταμένες, ενώ όλες οι υπόλοιπες μικροσκοπικές και καμπυλωμένες; Γιατί δεν είναι όλες εκτετα-

μένες ή όλες καμπυλωμένες ή κάποια άλλη ενδιάμεση δυνατότητα; Προς το παρόν κανείς δεν μπορεί να απαντήσει σε αυτό το ερώτημα. Αν η θεωρία χορδών είναι σωστή, τότε θα μπορέσουμε κάποια στιγμή να πάρουμε μια απάντηση, όμως η εικόνα που έχουμε έως τώρα για τη θεωρία δεν είναι αρκετά αποσαφηνισμένη ώστε να επιτύχουμε αυτόν το στόχο. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπήρξαν τολμηρές προσπάθειες για να εξηγηθεί. Για παράδειγμα, από κοσμολογική σκοπιά, μπορούμε να φανταστούμε ότι όλες οι διαστάσεις ξεκινούν σε μια κατάσταση έντονης καμπύλωσης και μετά από ένα συμβάν του μεγέθους της Μεγάλης Έκρηξης οι τρεις χωρικές και η μία χρονική διάσταση ξεδιπλώνονται και αναπτύσσονται μέχρι το σημερινό τους μέγεθος, ενώ οι υπόλοιπες χωρικές διαστάσεις παραμένουν μικρές. Έχουν προταθεί διάφορα χονδροειδή επιχειρήματα τα οποία θα δούμε στο Κεφάλαιο 14 προκειμένου να εξηγηθεί γιατί εκτείνονται μόνο οι τρεις χωρικές διαστάσεις, αλλά, για να είμαστε δίκαιοι, πρέπει να τονίσουμε ότι οι εξηγήσεις αυτές βρίσκονται ακόμη σε εμβρυακό στάδιο. Σε όσα ακολουθούν, θα υποθέσουμε ότι όλες οι χωρικές διαστάσεις πλην των τριών είναι καμπυλωμένες, σύμφωνα με ότι βλέπουμε γύρω μας. Ένας από τους βασικούς στόχους της σύγχρονης έρευνας είναι να αποδείξει ότι αυτή η υπόθεση προκύπτει από την ίδια τη θεωρία.

Τρίτον, με δεδομένη την απαίτηση των πολυάριθμων επιπρόσθετων διαστάσεων, μήπως υπάρχει η πιθανότητα κάποιες από αυτές να είναι χρονικές και όχι χωρικές όπως υποθέτουμε; Αν το σχεφτείτε για λίγο, θα διαπιστώσετε πως αυτό ακούγεται κάπως παράδοξο. Όλοι κατανοούμε διαισθητικά τι σημαίνει να έχει το σύμπαν πολλαπλές χωρικές διαστάσεις, καθώς ζούμε σε έναν κόσμο προκισμένο όχι με μία αλλά με τρεις χωρικές διαστάσεις. Τι θα σήμαναν όμως οι πρόσθετες χρονικές διαστάσεις; Θα μπορούσε μία από αυτές να ταυτίζεται με το χρόνο έτσι όπως τον βιώνουμε τώρα και οι άλλες να είναι κατά κάποιον τρόπο «διαφορετικές»;

Τα πράγματα μπλέκονται ακόμη περισσότερο όταν σκεφτόμαστε μια καμπυλωμένη χρονική διάσταση. Για παράδειγμα, αν ένα

μικροσκοπικό μυρμηγκάκι περπατά πάνω σε μια πρόσθετη χωρίκή καμπυλωμένη διάσταση σε σχήμα κύκλου, θα ανακαλύψει ότι περνά από την ίδια θέση ξανά και ξανά, καθώς διαγράφει πλήρεις περιστροφές. Αυτό δεν είναι και τόσο περίεργο, καθώς είμαστε εξοικειωμένοι με τη δυνατότητα να επιστρέψουμε, αν το επιθυμούμε, στο ίδιο μέρος όσο συχνά θέλουμε. Αν όμως η καμπυλωμένη διάσταση είναι χρονική, αυτό σημαίνει ότι αν τη διατρέξουμε θα επιστρέψουμε, μετά την πάροδο κάποιου χρόνου, σε μια προηγούμενη χρονική στιγμή. Φυσικά κάτι τέτοιο ξεφεύγει εντελώς από το πεδίο των εμπειριών μας. Ο χρόνος, όπως τον γνωρίζουμε, είναι μια διάσταση που διατρέχουμε αναπόφευκτα μόνο προς μία κατεύθυνση, χωρίς ποτέ να μπορούμε να επιστρέψουμε σε κάποια προηγούμενη στιγμή. Φυσικά ενδέχεται οι καμπυλωμένες χρονικές διαστάσεις να έχουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες από την οικεία χρονική διάσταση που φανταζόμαστε να εκτείνεται από τη δημιουργία του σύμπαντος μέχρι τώρα. Όμως, αντίθετα από τις επιπλέον χωρικές διαστάσεις, οι νέες και μέχρι πρότινος άγνωστες χρονικές διαστάσεις θα απαιτούσαν σαφώς μια ακόμη μεγαλύτερη αναθεώρηση των αντιλήψεών μας. Ορισμένοι θεωρητικοί διερευνούν τη δυνατότητα να ενσωματώσουν επιπλέον χρονικές διαστάσεις στη θεωρία χορδών, αλλά μέχρι στιγμής η προσπάθεια είναι ατελέσφορη. Στη δική μας συζήτηση περί θεωρίας χορδών, θα μείνουμε πιστοί σε μιά πιο «συμβατική» προσέγγιση, όπου όλες οι καμπυλωμένες διαστάσεις είναι χωρικές, αλλά το συναρπαστικό ενδεχόμενο των νέων χρονικών διαστάσεων θα μπορούσε κάλλιστα να παίζει κάποιο ρόλο στις μελλοντικές εξελίξεις.

Οι συνέπειες τών επιπρόσθετων διαστάσεων στη φυσική

Πολλά χρόνια ερευνών, που ξεκινούν από την αρχική εργασία του Kaluza, έχουν δείξει πως μολονότι οι επιπλέον διαστάσεις που προτείνουν οι φυσικοί πρέπει να είναι μικρότερες απ' ότι μπορούμε να «δούμε» με γυμνό μάτι ή με κάποιο όργανο άμεσα (κα-

θώς δεν τις έχουμε δει), παράγουν ωστόσο σημαντικά έμμεσα φαινόμενα στη φυσική που παρατηρούμε. Στη θεωρία χορδών, αυτή η σύνδεση ανάμεσα στις μικροσκοπικές ιδιότητες του χώρου και τη φυσική που παρατηρούμε είναι ιδιαίτερα εμφανής.

Για να το κατανοήσετε, θα πρέπει να θυμηθείτε ότι οι μάζες και τα φορτία των σωματιδίων στη θεωρία χορδών καθορίζονται από τους δυνατούς τρόπους συντονισμού των χορδών. Φανταστείτε μια μικροσκοπική χορδή καθώς κινείται και ταλαντώνεται, και θα συνειδητοποιήσετε ότι οι τρόποι συντονισμού της επηρεάζονται από τον περιβάλλοντα χώρο της. Σκεφτείτε, για παράδειγμα, τα κύματα της θάλασσας. Έχει, στον ωκεανό, τα μεμονωμένα κύματα σχηματίζονται και κινούνται με τον έναν ή τον άλλο τρόπο με κάποια σχετική ελευθερία. Αυτό μοιάζει πολύ με τους τρόπους ταλάντωσης μιας χορδής καθώς αυτή κινείται στις μεγάλες, εκτεταμένες χωρικές διαστάσεις. Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 6, μια τέτοια χορδή μπορεί να ταλαντώνεται εξίσου ελεύθερα σε καθεμιά από τις εκτεταμένες διευθύνσεις κάθε στιγμή. Όταν όμως ένα θαλάσσιο κύμα περάσει μέσα από ένα πιο στενό χωρικό περιβάλλον, η μορφή της κίνησής του θα επηρεαστεί σίγουρα από το βάθος του νερού, για παράδειγμα, ή από τη θέση και το σχήμα των βράχων που συναντά, τα κανάλια μέσα από τα οποία διοχετεύεται το νερό κτλ. Σκεφτείτε ακόμη τον αυλό του εικκλησιαστικού οργάνου ή το γαλλικό κόρνο. Οι ήχοι που μπορεί να αναπαράγει καθένα από αυτά τα όργανα είναι άμεση συνέπεια των τρόπων συντονισμού των ρευμάτων του αέρα που ταλαντώνεται στο εσωτερικό τους· αυτοί οι τρόποι καθορίζονται από το ακριβές μέγεθος και σχήμα του χώρου εντός του οργάνου μέσα από το οποίο διοχετεύονται τα ρεύματα του αέρα. Οι καμπυλωμένες χωρικές διαστάσεις έχουν μια παρόμοια επίδραση στους πιθανούς τρόπους ταλάντωσης μιας χορδής. Καθώς οι μικροσκοπικές χορδές ταλαντώνονται σε όλες τις χωρικές διαστάσεις, ο ακριβής τρόπος με τον οποίο συστρέφεται και περιελίσσεται η μία επιπρόσθετη διάσταση γύρω από την άλλη επηρεάζει και περιορίζει σημαντικά τους πιθανούς τρόπους συντονισμού. Αυτοί οι τρόποι

ταλάντωσης, που καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία των επιπρόσθετων διαστάσεων, ευθύνονται για τις ιδιότητες των σωματιδίων στις οικείες εκτεταμένες διαστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι η γεωμετρία των επιπρόσθετων διαστάσεων καθορίζει θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες όπως οι μάζες και τα φορτία των σωματιδίων που παρατηρούμε στις τρεις συνήθεις χωρικές διαστάσεις.

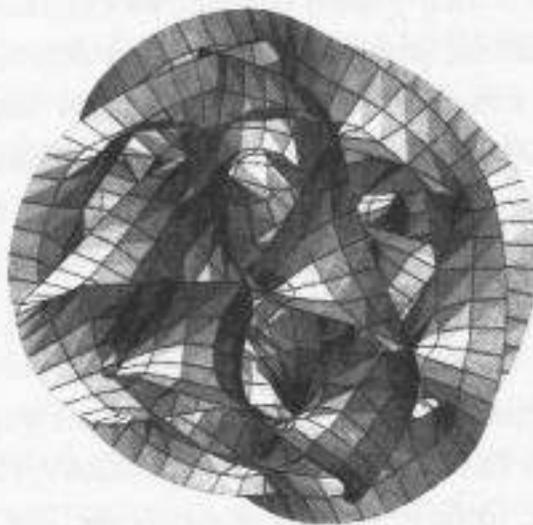
Επειδή έχουμε να κάνουμε με κάτι τόσο σημαντικό και βαθυστόχαστο, θα το πούμε άλλη μια φορά με περισσότερο στόμφο. Σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, το σύμπαν είναι φτιαγμένο από μικροσκοπικές χορδές που συντονίζονται· ο συντονισμός αυτός είναι η πηγή από την οποία προέρχονται οι μάζες των σωματιδίων και τα φορτία των δυνάμεών τους. Η θεωρία χορδών απαιτεί επίσης επιπρόσθετες χωρικές διαστάσεις μικροσκοπικά καμπυλωμένες, για να εξηγείται το γεγονός ότι ποτέ δεν τις έχουμε δει. Άλλα μια μικροσκοπική χορδή μπορεί να εξερευνήσει ένα μικροσκοπικό χώρο. Καθώς μια χορδή κινείται δονούμενη, η γεωμετρική μορφή των επιπρόσθετων διαστάσεων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις ταλαντώσεις της. Επειδή οι ταλαντώσεις των χορδών εμφανίζονται σ' εμάς ως μάζες και φορτία των στοιχειωδών σωματιδίων, συμπεραίνουμε ότι αυτές οι θεμελιώδεις ιδιότητες του σύμπαντος καθορίζονται, σε μεγάλο βαθμό, από το μέγεθος και τη γεωμετρία των επιπρόσθετων διαστάσεων. Πρόκειται για μία από τις πιο σημαντικές ιδέες της θεωρίας χορδών.

Αφού οι πρόσθετες διαστάσεις επηρεάζουν τόσο πολύ τις θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες του σύμπαντος, θα πρέπει τώρα να προσπαθήσουμε –χωρίς φόβο και πάθος– να καταλάβουμε με τι μοιάζουν αυτές οι καμπυλωμένες διαστάσεις.

Με τι μοιάζουν οι καμπυλωμένες διαστάσεις;

Οι επιπλέον χωρικές διαστάσεις της θεωρίας χορδών δεν μπορούν να έχουν οποιοδήποτε σχήμα· οι θεωρητικές εξισώσεις περιορί-

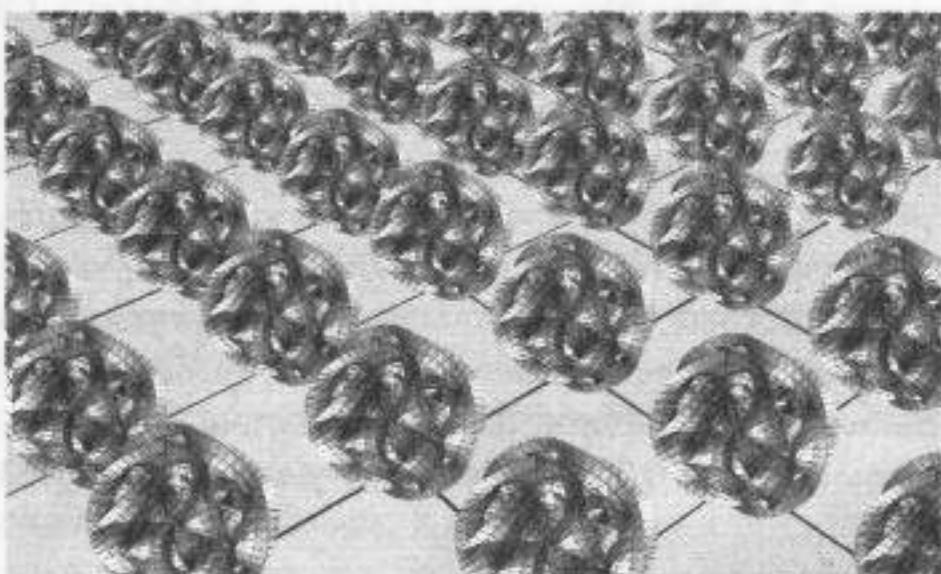
Ζουν αυστηρά το σχήμα που μπορούν να πάρουν. Το 1984, ο Philip Candelas του Πανεπιστημίου του Τέξας στο Όστιν, ο Gary Horowitz κι ο Andrew Strominger του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στη Σάντα Μπάρμπαρα και ο Edward Witten έδειξαν ότι μια συγκεκριμένη κλάση εξαδιάστατων γεωμετρικών σχημάτων μπορεί να ικανοποιήσει αυτούς τους περιορισμούς. Λατά τα σχήματα είναι γνωστά ως χώροι *Calabi-Yau* (ή σχήματα *Calabi-Yau*) προς τιμήν δύο μαθηματικών, του Eugenio Calabi από το Πανεπιστήμιο της Πενσιλβανία και του Shing-Tung Yau από το Χάρβαρντ, των οποίων η έρευνα σε παρόμοια θέματα, πριν όμως από την εμφάνιση της θεωρίας χορδών, έπαιξε σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των συγκεκριμένων χώρων. Μολονότι τα μαθηματικά που περιγράφουν τους χώρους *Calabi-Yau* είναι περίπλοκα και απαιτούν ιδιαίτερες γνώσεις, μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα γι' αυτούς με μια εικόνα.⁸



Σχήμα 8.9 Ένα παράδειγμα χώρου *Calabi-Yau*.

Στο Σχήμα 8.9 δείχνουμε ένα παράδειγμα ενός χώρου *Calabi-Yau*.⁹ Καθώς βλέπετε το συγκεκριμένο σχήμα, πρέπει να θυμάστε συνεχώς ότι αυτή η εικόνα υπόκειται σε ενδογενείς περιορισμούς. Προσπαθούμε να αναπαραστήσουμε ένα εξαδιάστατο σχήμα σε ένα διδιάστατο χαρτί χαρτί, κάτι που παραμορφώνει αρκετά το σχήμα. Ωστόσο, η εικόνα όντως δίνει μια γενική ιδέα για τη μορφή ενός

χώρου Calabi-Yau.¹⁰ Το σχήμα αυτό είναι ένα μόνο από τα δεκάδες χιλιάδες παραδείγματα που ικανοποιούν τους αυστηρούς περιορισμούς για τις επιπλέον διαστάσεις, οι οποίοι προκύπτουν από τη θεωρία χορδών. Μπορεί βέβαια να μη σας φαίνεται και τόσο ξεχωριστό ένα σχήμα που ανήκει σε ένα σύλλογο με δεκάδες χιλιάδες μέλη, θα πρέπει όμως να συγχρίνετε τον αριθμό αυτό με το άπειρο πλήθος σχημάτων που είναι μαθηματικά δυνατά· σύμφωνα με το μέτρο αυτό, οι χώροι Calabi-Yau είναι όντως σπάνιοι.



Σχήμα 8.10 Σύμφωνα με τη θεωρία χορδών, το σύμπαν διαθέτει επιπρόσθετες διαστάσεις καμπυλωμένες σε σχήμα Calabi-Yau.

Για να συνοψίσουμε, θα πρέπει τώρα να φανταστείτε ότι η κάθε σφαίρα στο Σχήμα 8.7 –που αναπαριστούσε δύο καμπυλωμένες διαστάσεις– αντικαθίσταται από ένα χώρο Calabi-Yau. Με άλλα λόγια, σε κάθε σημείο των τριών οικείων εκτεταμένων διαστάσεων, η θεωρία χορδών ισχυρίζεται ότι υπάρχουν άλλες έξι διαστάσεις, τις οποίες κανείς δεν είχε προβλέψει έως τώρα, ισχυρά καμπυλωμένες, δίνοντας ένα από αυτά τα μάλλον περίπλοκα σχήματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.10. Οι διαστάσεις αυτές αποτελούν θεμελιώδες και αναπόσπαστο χαρακτηριστικό του χωρικού ιστού· ενυπάρχουν παντού. Για παράδειγμα, αν κάνετε με το χέρι σας μια καμπυλόγραμμη κίνηση,

δεν κινείστε μόνο στις τρεις εκτεταμένες αλλά και στις καμπυλωμένες διαστάσεις. Φυσικά, επειδή οι καμπυλωμένες διαστάσεις είναι τόσο μικρές, καθώς κινείτε το χέρι σας περνάτε από αυτές πάρα πολλές φορές, επιστρέφοντας κάθε φορά στο αρχικό σημείο. Η μικροσκοπική τους έκταση σημαίνει ότι δεν υπάρχει και πολύς χώρος για να κινηθεί ένα μεγάλο αντικείμενο σαν το χέρι σας – όλα ισορροπούν έτσι ώστε, όταν ολοκληρώνετε την κίνηση του χεριού σας, να μην έχετε αισθανθεί καθόλου το ταξίδι που κάνατε διαμέσου των καμπυλωμένων διαστάσεων Calabi-Yau.

Πρόκειται για ένα εκπληκτικό χαρακτηριστικό της θεωρίας χορδών. Αλλά, αν έχετε πρακτικό μυαλό, μάλλον θα θελήσετε να επιστρέψει η κουβέντα σε ένα ουσιαστικό και συγχεκριμένο ζήτημα. Τώρα που αποκτήσαμε μια καλύτερη αίσθηση γι' αυτές τις επιπλέον διαστάσεις, ποιες είναι οι φυσικές ιδιότητες που απορρέουν από τις εσωτερικές ταλαντώσεις των χορδών και πώς συγχρίνονται αυτές οι ιδιότητες με τα πειραματικά δεδομένα; Αυτή είναι η ερώτηση των 100.000 δολαρίων για τη θεωρία χορδών.

Η τρανταχτή απόδειξη: με την υπογραφή του πειράματος

Τίποτε δεν θα ευχαριστούσε περισσότερο τους θεωρητικούς των χορδών από έναν κατάλογο με λεπτομερείς, πειραματικά ελέγχιμες προβλέψεις, τις οποίες θα παρουσίαζαν με περηφάνια στο κοινό. Δεν υπάρχει τρόπος να βεβαιωθούμε ότι κάποια θεωρία περιγράφει τον κόσμο μας, χωρίς να υποβάλουμε τις προβλέψεις της σε πειραματική επαλήθευση. Και ανεξάρτητα από το πόσο ελκυστική είναι η εικόνα που μας προσφέρει η θεωρία χορδών, αν δεν περιγράφει με ακρίβεια το σύμπαν μας, θα έχει τόση σχέση με αυτό όσο κι ένα επιτραπέζιο παιχνίδι.

Ο Edward Witten δεν παραλείπει να δηλώνει ότι η θεωρία χορδών έχει κάνει ήδη μια σημαντική και πειραματικά επιβεβαιωμένη πρόβλεψη: «Η θεωρία χορδών διαθέτει την αξιοσημείωτη ιδιότητα να προβλέπει τη βαρύτητα».¹ Αυτό που εννοεί εδώ ο Witten είναι ότι τόσο ο Newton όσο κι ο Einstein ανέπτυξαν θεωρίες για τη βαρύτητα, επειδή οι παρατηρήσεις τους για τον κόσμο έδειχναν καθαρά ότι η βαρύτητα υπάρχει και ότι, κατά συνέπεια, απαιτούσε μια ακριβή και συνεπή εξήγηση. Αντίθετα, ένας φυσικός που θα μελετούσε τη θεωρία χορδών –ακόμη κι αν δεν είχε ξανακούσει για τη γενική θεωρία της σχετικότητας– θα έφτανε αναπόδραστα σε αυτή μέσα από τις χορδές. Εξαιτίας του τρόπου με τον οποία ταλαντώνεται το βαρυτόνιο, που έχει σπιν-2 και δεν

διαθέτει μάζα, η θεωρία χορδών είναι συνυφασμένη με τη βαρύτητα. Όπως έχει πει και ο Witten, «το γεγονός ότι η βαρύτητα αποτελεί συνέπεια της θεωρίας χορδών συνιστά μία από τις μεγαλύτερες θεωρητικές ιδέες που υπήρξαν ποτέ».² Αν και παραδέχεται ότι αυτή η «πρόβλεψη» θα έπρεπε να ονομάζεται καλύτερα «εκ των υστέρων πρόβλεψη», γιατί οι φυσικοί είχαν ανακαλύψει θεωρητικές περιγραφές της βαρύτητας προτού γνωρίσουν τη θεωρία χορδών, ο Witten επισημαίνει ότι αυτό αποτελεί μια απλή συγχυρία στην ιστορία αυτού του πλανήτη. Άλλοι προηγμένοι πολιτισμοί στο σύμπαν μας, ισχυρίζεται ευφάνταστα ο Witten, είναι πολύ πιθανό να ανακάλυψαν πρώτα τη θεωρία χορδών και να προέκυψε στη συνέχεια ως συγχλονιστική συνέπεια της κάποια θεωρία για τη βαρύτητα.

Καθώς είμαστε δεμένοι με την ιστορία της επιστήμης του δικού μας πλανήτη, υπάρχουν πολλοί που θεωρούν ότι αυτή η εκ των υστέρων πρόβλεψη της βαρύτητας δεν επιβεβαιώνει πειραματικά τη θεωρία χορδών. Οι περισσότεροι φυσικοί θα ήταν πολύ πιο ευτυχισμένοι αν συνέβαινε κάτι από τα εξής δύο: είτε να διατυπωνόταν μια θεωρία για τις χορδές η οποία θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί πειραματικά, είτε να προβλεπόταν εκ των υστέρων κάποια ιδιότητα (όπως η μάζα του ηλεκτρονίου ή η ύπαρξη τριών οικογενειών σωματιδίων) για την οποία δεν έχουμε προς το παρόν καμία εξήγηση. Σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε πόσο κοντά έχουν φτάσει οι φυσικοί σε αυτούς τους στόχους.

Κατά περίεργο τρόπο, ενώ η θεωρία χορδών έχει τη δυνατότητα να προβλέψει περισσότερα πράγματα από κάθε άλλη θεωρία –έίναι μια θεωρία που μπορεί να ερμηνεύσει τις πλέον θεμελιώδεις ιδιότητες της φύσης–, οι φυσικοί δεν έχουν κατορθώσει μέχρι σήμερα να δώσουν ακριβείς προβλέψεις που να μπορούν να συγχριθούν με τα πειραματικά δεδομένα. Σαν ένα παιδί που αποκτά το ονειρεμένο του δώρο για τα Χριστούγεννα, αλλά δεν μπορεί να παίξει με αυτό γιατί λείπουν μερικές σελίδες από τις οδηγίες χρήσης, έτσι και οι φυσικοί έχουν ενδεχομένως στα χέρια τους τη Βίβλο της σύγγρονης επιστήμης, αλλά δεν θα μπορέσουν να ερμη-

νεύσουν πλήρως τις προβλέψεις της αν δεν βρουν τις σελίδες που λείπουν. Ωστόσο, όπως θα συζητήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο, ένα βασικό χαρακτηριστικό της θεωρίας χορδών θα μπορούσε να επιβεβαιωθεί πειραματικά αν μας βοηθήσει η τύχη μέσα στην ερχόμενη δεκαετία. Και αν μας βοηθήσει λίγο παραπάνω, έμμεσες ενδείξεις της θεωρίας θα μπορούσαν να επιβεβαιωθούν ακόμη και τώρα.

Διασταυρούμενα πυρά

Είναι σωστή η θεωρία χορδών; Δεν το γνωρίζουμε. Αν είστε της άποψης ότι στη φυσική δεν πρέπει να υπάρχουν άλλοι νόμοι για το μικρόκοσμο και άλλοι για το μακρόκοσμο, και αν επίσης πιστεύετε ότι δεν πρέπει να ησυχάσουμε πριν ανακαλύψουμε μια θεωρία με απεριόριστο πεδίο εφαρμογής, η θεωρία χορδών είναι το μόνο χαρτί που μπορούμε να παίξουμε. Θα μπορούσατε εντούτοις να υποστηρίξετε ότι αυτό απλώς καταδεικνύει την έλλειψη φαντασίας των φυσικών και όχι κάποια θεμελιώδη μοναδικότητα της θεωρίας χορδών. Ίσως. Θα μπορούσατε επιπλέον να υποστηρίξετε ότι, όπως αυτός που ψάχνει τα κλειδιά του μόνο εκεί που πέφτει το φως του φανοστάτη, έτσι και οι φυσικοί συνωστίζονται γύρω από τη θεωρία χορδών απλώς και μόνο επειδή, από ένα καπρίτσιο της επιστημονικής ιστορίας, φωτίστηκε αυτή η κατεύθυνση. Δεν αποκλείεται. Και, αν είστε κάπως συντηρητικοί ή αν σας αρέσει να κάνετε το δικηγόρο του διαβόλου, θα μπορούσατε ακόμα και να πείτε ότι οι φυσικοί δεν πρέπει διόλου να σπαταλούν το χρόνο τους σε μια θεωρία που αξιώνει την ύπαρξη ενός νέου χαρακτηριστικού της φύσης μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια δισεκατομμυρίων φορές μικρότερου από το μικρότερο αντικείμενο που εμπίπτει στον άμεσο πειραματικό μας έλεγχο.

Αν διατυπώνατε αυτές τις κατηγορίες γύρω στη δεκαετία του 1980, τότε που η θεωρία χορδών έκανε το πρώτο μπαμ, θα σας υποστήριζαν μερικοί από τους πιο αξιοσέβαστους φυσικούς του

αιώνα μας. Για παράδειγμα, στα μέσα της δεκαετίας του 1980 ο τιμημένος με Νόμπελ Sheldon Glashow, φυσικός στο Χάρβαρντ, μαζί με το φυσικό Paul Ginsparg, επίσης του Χάρβαρντ, αμφισβήτησαν δημόσια τη θεωρία χορδών, στηριζόμενοι στην αδυναμία πειραματικής επιβεβαίωσής της:

Αντί της παραδοσιακής αντιπαραβολής θεωρίας και πειράματος, οι θεωρητικοί των υπερχορδών αναζητούν μια εσωτερική αρμονία, όπου η κομψότητα, η μοναδικότητα και η ομορφιά καθορίζουν την αλήθεια. Η θεωρία αυτή βασίζει την ύπαρξή της σε συμπτώσεις, σε ως εκ θαύματος αλληλοαναιρέσεις και σε συσχετισμούς ανάμεσα σε φαινομενικά άσχετους μεταξύ τους (και πιθανώς άγνωστους ακόμη) κλάδους των μαθηματικών. Συνιστούν άραγε αυτές οι ιδιότητες επαρκή λόγο για να αποδεχθούμε τις υπερχορδές; Από πότε τα μαθηματικά και η αισθητική υποσκελίζουν και υπερβαίνουν το καθαρό πείραμα;³

Κάπου αλλού, ο Glashow είπε:

Η θεωρία των υπερχορδών φαίνεται τόσο φιλόδοξη, που δεν μπορεί παρά να είναι ή εντελώς σωστή ή εντελώς λάθος. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι τα μαθηματικά της είναι τόσο καινούργια και δύσκολα, που για πολλές ακόμα δεκαετίες δεν θα ξέρουμε ποιο από τα δύο ισχύει.⁴

Αναρωτήθηκε ακόμα αν πρέπει οι θεωρητικοί των χορδών «να πληρώνονται από το πανεπιστήμιο για να διαφθείρουν ευκολόπιστους φοιτητές», προειδοποιώντας ότι η θεωρία χορδών υπονομεύει την επιστήμη, όπως περίπου την υπονόμευε και η θεολογία κατά το Μεσαίωνα.⁵

Ο Richard Feynman, λίγο πριν πεθάνει, ξεκαθάρισε ότι κατά τη γνώμη του η θεωρία χορδών δεν ήταν πανάκεια για τα διάφορα προβλήματα –όπως οι απειρισμοί, για παράδειγμα– που εμπόδιζαν την αρμονική ένωση της βαρύτητας με την κβαντομηχανική:

Πιστεύω – και μπορεί να κάνω λάθος – ότι το καλό το παλικάρι ξέρει κι άλλο μονοπάτι. Δεν νομίζω ότι υπάρχει μόνο ένας τρόπος να ξεφορτωθούμε τους απειρισμούς. Το γεγονός ότι μια θεωρία παραχάμπτει τους απειρισμούς δεν είναι για μένα επαρκής λόγος για να πιστέψω τη μοναδικότητά της.⁶

Και ο Howard Georgi, ο επιφανής συνάδελφος και συνεργάτης του Glashow στο Χάρβαρντ, καταχεραύνωσε και αυτός τη θεωρία χορδών στα τέλη της δεκαετίας του 1980:

Αν επιτρέψουμε στους εαυτούς μας να πλανευτούν από το τραγούδι των σειρήνων που μιλά για την «ύστατη» ενοποίηση σε τόσο μικρές κλίμακες, ώστε οι φίλοι μας οι πειραματιστές να σηκώνουν τα χέρια ψηλά, τότε θα υπάρξει πρόβλημα, γιατί θα χάσουμε την ικανότητα να φιλτράρουμε τις άσχετες ιδέες, ικανότητα που κάνει τη φυσική πιο ενδιαφέρουσα από τόσες άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες.⁷

Όπως συμβαίνει σε πολλά ζητήματα μείζονος σημασίας, για κάθε τέτοιο αντιρρησία υπάρχει κι ένας ενθουσιώδης υποστηρικτής. Ο Witten έχει πει ότι, όταν έμαθε πώς η θεωρία χορδών ενσωματώνει τη βαρύτητα και την κβαντομηχανική, ένιωσε «τη μεγαλύτερη διανοητική ανατριχίλα» της ζωής του.⁸ Ο Cumrun Vafa, χορυφαίος θεωρητικός των χορδών από το Πανεπιστήμιο Χάρβαρντ, έχει πει ότι «με τη θεωρία χορδών κατανοούμε σε βάθος το σύμπαν, πιο πολύ απ' όσο με οποιαδήποτε άλλη θεωρία».⁹ Και ο νομπελίστας Murray Gell-Mann έχει πει ότι η θεωρία χορδών είναι «κάτι υπέροχο» και ότι περιμένει πως κάποια εκδοχή της θα αποτελέσει κάποια μέρα τη θεωρία μας για ολόκληρο τον κόσμο.¹⁰

Παρά τις διαφορετικές τοποθετήσεις, κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας το μεγαλύτερο μέρος της χριτικής ενάντια στη θεωρία χορδών κόπασε. Ο Glashow το αποδίδει σε δύο παράγοντες. Πρώτον, σημειώνει ότι στα μέσα της δεκαετίας του 1980:

Οι φυσικοί των χορδών ισχυρίζονταν με ενθουσιασμό και υπεροφία ότι σύντομα θα απαντούσαν σε όλα τα ερωτήματα της φυσικής. Καθώς είναι πλέον πολύ πιο προσεκτικοί στις δηλώσεις τους, μεγάλο μέρος της κριτικής που άσκησα κατά τη δεκαετία του 1980 δεν έχει πλέον αντίχρισμα.¹¹

Δεύτερον, όπως επίσης επισημαίνει:

Εμείς οι θεωρητικοί που δεν ασχολούμαστε με τις χορδές δεν σημειώσαμε καμία πρόοδο κατά την τελευταία δεκαετία. Έτσι, το επιχείρημα ότι η θεωρία χορδών είναι το μόνο χαρτί που μπορούμε να παίξουμε, ενισχύεται σημαντικά. Υπάρχουν ερωτήματα που δεν θα μπορέσουν να απαντηθούν στο πλαίσιο της παραδοσιακής κβαντικής θεωρίας πεδίου. Αυτό είναι πλέον σαφές. Ενδέχεται να δοθούν απαντήσεις από κάτι άλλο, και το μόνο «άλλο» που γνωρίζω είναι η θεωρία χορδών.¹²

Ο Georgi θυμάται τη δεκαετία του 1980 με τον ίδιο περίπου τρόπο:

Σε διάφορες περιόδους της πρώιμης ιστορίας της, η θεωρία υπερεκτιμήθηκε. Στα χρόνια που μεσολάβησαν, ανακάλυψα ότι ορισμένες από τις ιδέες της θεωρίας χορδών άνοιγαν νέους δρόμους στη φυσική, οι οποίοι στάθηκαν χρήσιμοι και για το δικό μου έργο. Σήμερα είμαι πολύ πιο χαρούμενος όταν βλέπω ανθρώπους να ασχολούνται με τη θεωρία χορδών, καθώς μπορώ πλέον να δω πώς κάτι χρήσιμο θα προκύψει από αυτή.¹³

Ο θεωρητικός David Gross, ηγετική φυσιογνωμία τόσο στην παραδοσιακή φυσική όσο και στη φυσική των χορδών, έχει συνοψίσει εύγλωττα την κατάσταση με τον ακόλουθο τρόπο:

Παλιότερα συνηθίζόταν, κατά την αναρρίχησή μας στο βουνό της φύσης, να μας καθοδηγούν οι πειραματιστές. Εμείς οι τεμπέληδες θεωρητικοί μέναμε πίσω. Κάθε τόσο, οι πειραματι-

στές χλοτσούσαν προς τα πίσω κάποιο πειραματικό λιθαράκι που αναπηδούσε στα κεφάλια μας. Έτσι, κάποια στιγμή πιάναμε το υπονοούμενο και ακολουθούσαμε το δρόμο που είχαν χαράξει. Όταν πια συναντούσαμε τους φίλους μας, τους εξηγούσαμε τι ακριβώς έβλεπαν και πώς είχαν φτάσει ώς εκεί. Αυτός ήταν ο παλιός καλός τρόπος (για τους θεωρητικούς τουλάχιστον) για να ανεβούμε το βουνό. Όλοι μας αναπολούμε τις ωραίες εκείνες ημέρες. Τώρα όμως πρέπει εμείς οι θεωρητικοί να αναλάβουμε την ηγεσία. Πρόκειται για ένα πολύ μοναχικό εγχείρημα.¹⁴

Οι θεωρητικοί των χορδών δεν επιθυμούν καθόλου να αναρριχηθούν μόνοι στις δυσπρόσιτες κορυφές του Όρους Φύση. Θα προτιμούσαν καλύτερα να μοιράζονται τα βάρη και τις συγκινήσεις με τους πειραματιστές συναδέλφους τους. Η παρούσα κατάσταση δεν συνιστά παρά μια τεχνολογική αντινομία – μια ιστορική έλλειψη συγχρονισμού· ενώ δηλαδή διαθέτουμε, τουλάχιστον εν μέρει, τα θεωρητικά σχοινιά και καρφιά για την τελική αναρρίχηση στην κορυφή, τα πειραματικά δεν υπάρχουν ακόμη. Όμως αυτό δεν σημαίνει ότι η θεωρία χορδών είναι θεμελιωδώς αποκομμένη από το πείραμα. Αντίθετα, οι θεωρητικοί των χορδών έχουν την ευγενή φιλοδοξία να «χλοτσήσουν προς τα πίσω ένα θεωρητικό πετραδάκι» από τις κορυφές των υπερυψηλών ενεργειών προς τους πειραματιστές που δουλεύουν πιο χαμηλά. Αυτό αποτελεί πρωτεύοντα στόχο της στημερινής έρευνας στη θεωρία χορδών. Κανένας βράχος δεν έχει ξεκολλήσει ακόμη από την κορυφή για να κατρακυλήσει με θόρυβο κάτω, αλλά, αυτή τη στιγμή που μιλάμε, κάποια προκλητικά και πολλά υποσχόμενα χαλικάκια κυλούν ήδη.

Ο δρόμος προς το πείραμα

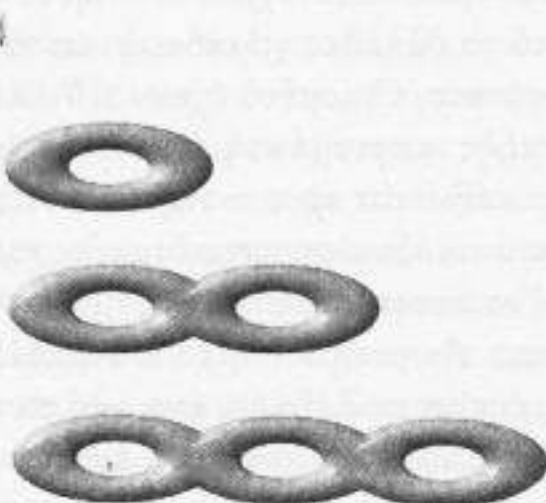
Δίχως μια επανάσταση στην τεχνολογία, δεν θα μπορέσουμε να δούμε ποτέ μια χορδή. Οι φυσικοί μπορούν να κάνουν έρευνες σε

κλίμακες που φτάνουν μέχρι το ένα δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου με επιταχυντές μήκους πολλών χιλιομέτρων. Για να κάνουμε έρευνα σε μικρότερες κλίμακες, απαιτούνται υψηλότερες ενέργειες, δηλαδή ισχυρότεροι επιταχυντές που να μπορούν να εστιάζουν την απαιτούμενη ενέργεια σε ένα μόνο σωματίδιο. Καθώς το μήκος Planck είναι περίπου 17 φορές μικρότερο από τη μικρότερη κλίμακα στην οποία έχουμε πρόσβαση, με τη σημερινή τεχνολογία θα χρειαζόμαστε έναν επιταχυντή στο μέγεθος του γαλαξία μας για να μπορέσουμε να δούμε μια χορδή. Μάλιστα, ο Shmuel Nussinov του Πανεπιστημίου του Τελ Αβίβ έχει δείξει ότι αυτός ο κατά προσέγγιση αναλογικός υπολογισμός είναι μάλλον υπερβολικά αισιόδοξος: σύμφωνα με την προσεκτικότερη δική του μελέτη, θα χρειαζόμαστε έναν επιταχυντή με μέγεθος όσο ολόκληρο το σύμπαν. (Η ενέργεια που απαιτείται για να εξερευνήσουμε την ύλη σε κλίμακες όσο το μήκος Planck ισούται περίπου με χίλιες κιλοβατώρες –ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία ενός μέσου κλιματιστικού για περίπου εκατό ώρες–, κάτι όχι και τόσο απρόσιτο. Η φαινομενικά ανυπέρβλητη τεχνολογική πρόκληση είναι να κατευθύνουμε αυτή την ενέργεια σε ένα και μόνο σωματίδιο, δηλαδή σε μία και μόνη χορδή.) Και καθώς το Κογχρέσο των ΗΠΑ ματαίωσε τελικά τη χρηματοδότηση του Υπεραγώγιου Υπερεπιταχυντή –ενός επιταχυντή με περιφέρεια «μόλις» 54 μιλίων–, δεν θα σας συμβούλευα να κρατήσετε την αναπνοή σας μέχρι να βρεθούν τα χρήματα για έναν επιταχυντή που θα εξερευνά τις κλίμακες Planck. Αν σκοπεύουμε να ελέγξουμε τη θεωρία χορδών πειραματικά, αυτό θα πρέπει να γίνει με κάποιον έμμεσο τρόπο. Θα πρέπει να προσδιορίσουμε φυσικές συνέπειες της θεωρίας χορδών που να μπορούν να παρατηρηθούν σε κλίμακες πολύ μεγαλύτερες από το μέγεθος της ίδιας της χορδής.¹⁵

Στην πρωτοποριακή τους εργασία, οι Candelas, Horowitz, Strominger και Witten έχαναν τα πρώτα βήματα προς αυτόν το στόχο. Δεν ανακάλυψαν μόνο ότι οι πρόσθετες διαστάσεις της θεωρίας χορδών πρέπει να είναι καμπυλωμένες σε ένα σχήμα

Calabi-Yau, αλλά κατέληξαν και σε ορισμένες συνέπειες που έχει αυτή η ιδιότητα στους πιθανούς τρόπους ταλάντωσης των χορδών. Ένα από τα βασικά αποτελέσματα της έρευνάς τους είναι ένδεικτικό των απίθανα απρόσμενων λύσεων που προσφέρει η θεωρία χορδών σε ανεπίλυτα προβλήματα της φυσικής στοιχειώδων σωματιδίων.

Θυμηθείτε ότι τα στοιχειώδη σωματίδια που έχουν ανακαλύψει οι φυσικοί εμπίπτουν σε τρεις ομάδες πανομοιότυπης οργάνωσης, όπου τα σωματίδια σε κάθε διαδοχική οικογένεια έχουν όλο και μεγαλύτερη μάζα. Το δύσκολο ερώτημα, για το οποίο δεν υπήρχε ούτε υποψία απάντησης πριν από τη θεωρία χορδών, είναι: γιατί οικογένειες και γιατί τρεις; Η πρόταση της θεωρίας χορδών είναι η ακόλουθη: ένα τυπικό σχήμα Calabi-Yau περιέχει τρύπες ανάλογες με αυτές που βρίσκουμε στο κέντρο ενός μουσικού δίσκου, ενός τόρου ή ενός «πολυτόρου», όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.1. Σε σχήματα Calabi-Yau περισσότερων διαστάσεων, μπορούν να προκύψουν διάφορα είδη οπών με ποικίλες διαστάσεις («πολυδιάστατες οπές»). Το Σχήμα 9.1 απεικονίζει τη βασική ιδέα. Οι Candelas, Horowitz, Strominger και Witten εξέτασαν με προσοχή την επίδραση των οπών στις ταλαντώσεις των χορδών και ανακάλυψαν τα ακόλουθα.



Σχήμα 9.1 Ένας τόρος και τα συγγενικά του σχήματα με περισσότερες οπές.

Για τις χορδές υπάρχει μια οικογένεια ταλαντώσεων ελάχιστης ενέργειας, που σχετίζεται με την κάθε οπή στην Calabi-Yau περιοχή του χώρου. Επειδή τα γνωστά μας στοιχειώδη σωματίδια πρέπει να αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις ελαχίστης ενέργειας, η ύπαρξη πολλών οπών –όπως στον πολυτόρο– σημαίνει ότι οι τρόποι ταλάντωσης των χορδών θα κατατάσσονται σε πολλές οικογένειες. Αν το χαμπυλωμένο σχήμα Calabi-Yau έχει τρεις οπές, τότε θα υπάρχουν τρεις οικογένειες στοιχειωδών σωματιδίων.¹⁶ Κι έτσι, η θεωρία χορδών ισχυρίζεται ότι η οργάνωση σε οικογένειες, που παρατηρείται πειραματικά, αντί να αποτελεί ανεξήγητο χαρακτηριστικό τυχαίας ή θείας προέλευσης, αντανακλά τον αριθμό των οπών στο γεωμετρικό σχήμα που περιλαμβάνει τις επιπλέον διαστάσεις! Αυτό το συμπέρασμα είναι από εκείνα που κάνουν την καρδιά ενός φυσικού να χτυπά δυνατά.

Ενδεχομένως να σκεφτείτε ότι το πλήθος των οπών στις χαμπυλωμένες διαστάσεις μεγέθους κλίμακας Planck –και όταν μιλάμε για τέτοια μεγέθη, αναφερόμαστε κατεξοχήν στη φυσική της «κορυφής του βουνού»– έχει ρίζει επιτέλους ένα πειραματικά ελέγχιμο λιθαράκι προς τα κάτω, προς τις προσιτές δηλαδή ενέργειες. Άλλωστε, οι πειραματιστές μπορούν να εξακριβώσουν –στην πραγματικότητα έχουν ήδη εξακριβώσει– ότι οι οικογένειες σωματιδίων που υπάρχουν είναι τρεις. Δυστυχώς, το πλήθος των οπών που περιέχει καθένα από τα δεκάδες χιλιάδες γνωστά σχήματα Calabi-Yau ποικίλλει ευρύτατα. Ορισμένα έχουν 3. Άλλα όμως έχουν 4, 5, 25 και ούτω καθεξής – ορισμένα μάλιστα έχουν ακόμη και 480 οπές. Το πρόβλημα είναι ότι προς το παρόν κανείς δεν γνωρίζει πώς να συμπεράνει, από τις εξισώσεις της θεωρίας χορδών, ποια από τα σχήματα Calabi-Yau αποτελούν στην πραγματικότητα τις επιπλέον χωρικές διαστάσεις. Αν μπορούσαμε να ανακαλύψουμε την αρχή που θα μας επέτρεπε να επιλέξουμε ένα από τα πολυάριθμα πιθανά σχήματα Calabi-Yau, τότε πράγματι ένας βράχος από την κορυφή της φυσικής θα κατρακυλούσε προς τους πειραματιστές. Αν το συγκεκριμένο σχήμα Calabi-Yau που θα προέχυπτε από τις εξισώσεις είχε τρεις τρύπες, θα είχαμε βρει μια εντυπωσιακή εκ των

υστέρων πρόβλεψη της θεωρίας χορδών, η οποία θα εξηγούσε ένα γνωστό χαρακτηριστικό του χόσμου που σε άλλη περίπτωση θα παρέμενε εντελώς μυστηριώδες. Η εύρεση όμως της αρχής που θα μας επιτρέψει να επιλέξουμε ανάμεσα στα σχήματα Calabi-Yau αποτελεί ακόμα άλυτο πρόβλημα. Ωστόσο – και αυτό είναι το σημαντικό – βλέπουμε ότι η θεωρία χορδών ενέχει τη δυνατότητα απάντησης σε αυτόν το θεμελιώδη γρίφο της φυσικής των σωματιδίων, κάτι που αποτελεί από μόνο του σημαντική πρόοδο.

Το πλήθος των οικογενειών δεν είναι παρά μόνο μία από τις πειραματικές συνέπειες της γεωμετρικής μορφής των επιπλέον διαστάσεων. Επειδή επηρεάζουν τους πιθανούς τρόπους ταλάντωσης των χορδών, οι επιπλέον διαστάσεις έχουν κι άλλες συνέπειες στις επιμέρους ιδιότητες των σωματιδίων της ύλης και των δυνάμεων. Για να δώσουμε ένα βασικό παράδειγμα, μετέπειτα εργασίες των Strominger και Witten έδειξαν ότι οι μάζες των σωματιδίων σε κάθε οικογένεια εξαρτώνται – κρατηθείτε, αυτό ακούγεται κάπως δύσκολο – από τον τρόπο με τον οποίο τα όρια των διαφόρων πολυδιάστατων οπών στα σχήματα Calabi-Yau τέμνονται και αλληλεπικαλύπτονται. Δεν είναι εύκολο να σχηματίσουμε στο μαλό μας μια τέτοια εικόνα, ωστόσο η βασική ιδέα είναι ότι καθώς οι χορδές ταλαντώνονται μέσα στις πρόσθετες καμπυλωμένες διαστάσεις, η θέση των διαφόρων οπών και ο τρόπος με τον οποίο κάποιο σχήμα Calabi-Yau διπλώνεται γύρω τους επηρεάζει άμεσα τους πιθανούς τρόπους συντονισμού. Μολονότι δυσκολεύομαστε να μπούμε σε λεπτομέρειες, οι οποίες άλλωστε δεν έχουν και τόση σημασία, το ουσιώδες είναι ότι, όπως συμβαίνει και με το πλήθος των οικογενειών, η θεωρία χορδών μπορεί να μας προσφέρει ένα πλαίσιο για να απαντάμε σε ερωτήματα – όπως γιατί το ηλεκτρόνιο και τα άλλα σωματίδια έχουν τις μάζες που έχουν – στα οποία προηγούμενες θεωρίες παραμένουν εντελώς σιωπηλές. Και πάλι όμως, για να μπορούμε να κάνουμε τέτοιους υπολογισμούς, πρέπει να γνωρίζουμε ποιο χώρο Calabi-Yau θα δεχτούμε για τις πρόσθετες διαστάσεις.

Η συζήτηση που προηγήθηκε μας δίνει μια ιδέα για τον τρόπο με τον οποίο η θεωρία χορδών μπορεί να εξηγήσει κάποια στιγ-

μή στο μέλλον τις ιδιότητες των σωματιδίων της ύλης που καταγράφονται στον Πίνακα 1.1. Οι θεωρητικοί των χορδών πιστεύουν ότι θα δοθεί εξήγηση και στις ιδιότητες των σωματιδίων-φορέων των θεμελιωδών δυνάμεων του Πίνακα 1.2. Με άλλα λόγια, όπως οι χορδές συστρέφονται και ταλαντώνονται καθώς ελίσσονται διαμέσου των εκτεταμένων και καμπυλωμένων διαστάσεων, ένα μικρό υποσύνολο του τεράστιου ρεπερτορίου των ταλαντώσεων τους αποτελείται από ταλαντώσεις με σπιν 1 ή 2. Τέτοιες ταλαντώσεις είναι πιθανό να μεταφέρουν δυνάμεις. Ανεξάρτητα από το σχήμα του χώρου Calabi-Yau, υπάρχει πάντοτε ένας τρόπος ταλάντωσης δίχως μάζα που έχει σπιν-2· ταυτίζουμε αυτό τον τρόπο ταλάντωσης με το βαρυτόνιο. Ωστόσο ο ακριβής κατάλογος των σωματιδίων-φορέων με σπιν-1 –το πλήθος τους, η ισχύς της δύναμης που φέρουν και οι συμμετρίες βαθμίδας τις οποίες ακολουθούν – εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το ακριβές σχήμα των καμπυλωμένων διαστάσεων. Κι έτσι, για άλλη μια φορά, συμπεραίνουμε ότι η θεωρία χορδών παρέχει ένα πλαίσιο για την εξήγηση των παρατηρούμενων σωματιδίων-φορέων που περιέχονται στο σύμπαν μας ή, με άλλα λόγια, για την εξήγηση των ιδιοτήτων των θεμελιωδών δυνάμεων, αλλά αν δεν γνωρίζουμε το ακριβές σχήμα Calabi-Yau των επιπρόσθετων διαστάσεων, δεν μπορούμε να κάνουμε καμία συγκεκριμένη πρόβλεψη ή εκ των υστέρων πρόβλεψη (αν εξαιρέσουμε το σχόλιο του Witten αναφορικά με την εκ των υστέρων πρόβλεψη της βαρύτητας).

Γιατί δεν μπορούμε να βρούμε το «σωστό» σχήμα Calabi-Yau; Οι περισσότεροι θεωρητικοί των χορδών το αποδίδουν στην ανεπάρκεια των θεωρητικών εργαλείων που χρησιμοποιούμε σήμερα για την ανάλυση της θεωρίας χορδών. Όπως θα συζητήσουμε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 12, το μαθηματικό πλαίσιο της θεωρίας χορδών είναι τόσο πολύπλοκο που οι φυσικοί μπορούν να προσεγγίσουν τη λύση μόνο με τη βοήθεια της θεωρίας διαταραχών. Σύμφωνα με αυτή την προσεγγιστική μέθοδο, κάθε δυνατό σχήμα Calabi-Yau μοιάζει ισότιμο με κάθε άλλο· κανένα δεν αποκλείεται αξιωματικά από τις εξισώσεις. Και εφόσον οι συνέπειες της

θεωρίας χορδών στη φυσική εξαρτώνται ιδιαίτερα από την ακριβή μορφή των καμπυλωμένων διαστάσεων, δεν μπορούμε να βγάλουμε κανένα συγχεκριμένο και πειραματικά ελέγχιμο συμπέρασμα, αν δεν έχουμε τη δυνατότητα επιλογής ενός χώρου Calabi-Yau. Ένα από τα κίνητρα της σημερινής έρευνας είναι να καταφέρουμε να αναπτύξουμε θεωρητικές μεθόδους καλύτερες από την προσεγγιστική μέθοδο, ελπίζοντας ότι, ανάμεσα στα άλλα πλεονεκτήματα, θα οδηγηθούμε σε ένα και μόνο σχήμα Calabi-Yau που θα περιγράφει τις επιπλέον διαστάσεις. Θα συζητήσουμε για τις προόδους που έχουν γίνει προς την κατεύθυνση αυτή στο Κεφάλαιο 13.

Εξαντλώντας τις δυνατότητες

Θα μπορούσατε λοιπόν να ρωτήσετε: παρότι δεν έχουμε ακόμη τη δυνατότητα να ξεκαθαρίσουμε ποιο σχήμα Calabi-Yau επιλέγεται από τη θεωρία χορδών, μήπως κάποια επιλογή καταλήγει σε φυσικές ιδιότητες που συμφωνούν με αυτά που παρατηρούμε; Με άλλα λόγια, αν μπορούσαμε να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες φυσικές ιδιότητες που συνδέονται με κάθε σχήμα Calabi-Yau και να τις συγκεντρώσουμε σε έναν τεράστιο κατάλογο, θα βρίσκαμε κάποιες που να αντάποκρίνονται στην πραγματικότητα; Αυτό είναι ένα καλό ερώτημα, αλλά, για δύο λόγους, δεν μπορεί να απαντηθεί πλήρως.



Σχήμα 9.2 Το σχήμα ενός τόρου με πολλές οπές μπορεί να παραμορφωθεί με πολλούς τρόπους, ένας από τους οποίους εικονίζεται εδώ, χωρίς να αλλάξει ο αριθμός των οπών που περιέχει.

Θα μπορούσαμε λογικά να αρχίσουμε εστιάζοντας μόνο σε εκείνα τα σχήματα Calabi-Yau που δίνουν τρεις οικογένειες. Έτσι μειώνεται σημαντικά το πλήθος των επιλογών, αλλά και πάλι απομένουν πολλές. Παρατηρήστε επίσης ότι μπορούμε να παραμορφώσουμε έναν τόρο με πολλές οπές – παράγοντας μια άπειρη ποικιλία σχημάτων – χωρίς να αλλάξουμε τον αριθμό των οπών που περιέχει. Στο Σχήμα 9.2 απεικονίζουμε μια τέτοια παραμορφωση του τελευταίου τόρου του Σχήματος 9.1. Με τον ίδιο περίπου τρόπο μπορούμε να ξεχινήσουμε με ένα χώρο Calabi-Yau με τρεις οπές και να παραμορφώσουμε ελαφρώς το σχήμα του χωρίς να αλλάξουμε τον αριθμό των οπών, παίρνοντας ξανά μια άπειρη ακολουθία σχημάτων. (Όταν αναφέραμε νωρίτερα ότι υπάρχουν δεκάδες χιλιάδες σχήματα Calabi-Yau, είχαμε ομαδοποιήσει ήδη όλα εκείνα τα σχήματα που μπορούν να πάρουν το ένα τη μορφή του άλλου με ελαφρές παραμορφώσεις θεωρώντας όλη την ομάδα ως έναν και μοναδικό χώρο Calabi-Yau.) Το πρόβλημα είναι ότι οι λεπτομερείς φυσικές ιδιότητες των ταλαντώσεων των χορδών, οι μάζες και η ανταπόκρισή τους στις δυνάμεις επηρεάζονται ιδιαίτερα από τέτοιες μικροαλλαγές στο σχήμα, όμως για άλλη μια φορά δεν υπάρχει τρόπος να επιλέξουμε. Όσοι μεταπτυχιακοί φοιτητές και όσοι καθηγητές φυσικής και να ασχοληθούν με αυτό, είναι απλώς αδύνατο να υπολογιστούν οι φυσικές ιδιότητες που αντιστοιχούν σε κάθε σχήμα αυτού του ατέλειωτου καταλόγου.

Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει τους θεωρητικούς των χορδών να εξετάσουν τι προκύπτει από μέρος μόνο των δυνατών σχημάτων Calabi-Yau. Όμως, ακόμη και τώρα, τα πράγματα δεν είναι εύκολα. Οι προσεγγιστικές εξισώσεις που χρησιμοποιούν προς το παρόν οι θεωρητικοί των χορδών δεν είναι αρκετά ισχυρές, ώστε να υπολογίσουν πλήρως τις φυσικές ιδιότητες που προκύπτουν για κάθε ξεχωριστό σχήμα Calabi-Yau. Μπορούν όμως να μας βοηθήσουν να καταλάβουμε καλύτερα, να εκτιμήσουμε δηλαδή χοντρικά, τις ιδιότητες ταλάντωσης των χορδών με την ελπίδα ότι αυτές οι ιδιότητες θα συμμορφώνονται με τα σωματίδια που παρατηρούμε. Συγχειριμένα και τελεσίδικα συμπεράσματα όμως,

όπως αυτά για τη μάζα του ηλεκτρονίου ή την ισχύ της ασθενούς δύναμης, απαιτούν εξισώσεις πολύ πιο ακριβείς από το τωρινό μας προσεγγιστικό πλαίσιο. Θυμηθείτε το Κεφάλαιο 6 – και το παράδειγμα με το τηλεπαιχνίδι – όπου είδαμε ότι η «φυσιολογική» ενέργειακή κλίμακα της θεωρίας χορδών είναι η ενέργεια Planck, και μην ξεχνάτε επίσης ότι η θεωρία χορδών δίνει ταλαντώσεις με μάζες στο πλαίσιο αυτών που παρατηρούμε στα γνωστά σωματίδια της ύλης και των δυνάμεων μόνο μέσα από εξαιρετικής ευαισθησίας εξουδετερώσεις. Τέτοιες εξουδετερώσεις απαιτούν ακριβείς υπολογισμούς, γιατί ακόμη και μικρά σφάλματα δίνουν μεγάλες αποκλίσεις. Όπως θα συζητήσουμε στο Κεφάλαιο 12, στα μέσα της δεκαετίας του 1990 οι φυσικοί έκαναν σημαντικές προόδους για να ξεπεράσουν τις προσεγγιστικές εξισώσεις, όμως ο δρόμος είναι ακόμη μακρύς.

Σε ποιο σημείο βρισκόμαστε λοιπόν; Δίχως να διαθέτουμε θεμελιώδη κριτήρια για να επιλέξουμε το κατάλληλο σχήμα Calabi-Yau, ούτε και θεωρητικά εργαλεία για να επεξεργαστούμε πλήρως τις παρατηρήσιμες συνέπειες μας τέτοιας επιλογής, μπορούμε τουλάχιστον να αναρωτηθούμε αν κάποια επιλογή από τον κατάλογο των χώρων Calabi-Yau δίνει έναν κόσμο που να συμφωνεί έστω και χοντρικά με τον παρατηρούμενο. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι αρκετά ενθαρρυντική. Παρότι οι περισσότερες καταχωρίσεις στον κατάλογο των χώρων Calabi-Yau καταλήγουν σε παρατηρήσιμες συνέπειες αρκετά διαφορετικές από τον κόσμο μας (διαφορετικά πλήθη οικογενειών σωματιδίων, διαφορετικούς αριθμούς και τύπους θεμελιωδών δυνάμεων και άλλες ανάλογες βασικές αποκλίσεις), κάποιες ελάχιστες καταχωρίσεις καταλήγουν σε μια φυσική που είναι ποιοτικά κοντινή σε αυτά που έντως παρατηρούμε. Δηλαδή υπάρχουν χώροι Calabi-Yau που, όταν επιλεγούν για να αναπαραστήσουν τις καμπυλωμένες διαστάσεις της θεωρίας χορδών, δίνουν ταλαντώσεις που μοιάζουν αρκετά με αυτές του βασικού μοντέλου. Και κάτι που έχει ουσιαστική σημασία, η θεωρία χορδών ενσωματώνει με επιτυχία τη βαρυτική δύναμη σε αυτό το κβαντομηχανικό πλαίσιο.

Στο τρέχον επίπεδο της κατανόησής μας, η κατάσταση αυτή είναι ό,τι καλύτερο θα μπορούσαμε να ελπίσουμε. Αν πολλά σχήματα Calabi-Yau συμφωνούσαν χοντρικά με το πείραμα, τότε δεν θα ήταν απαραίτητο να επιδιώκουμε τη σύνδεση μιας συγκεκριμένης επιλογής με τις παρατηρούμενες φυσικές ιδιότητες. Θα υπήρχαν πολλές επιλογές που θα πληρούσαν τα κριτήρια κι έτσι δεν θα μπορούσε να γίνει καμία συγκεκριμένη επιλογή ούτε καν από πειραματική σκοπιά. Από την άλλη μεριά, αν κανένα από τα σχήματα Calabi-Yau δεν πλησίαζε καν τις παρατηρούμενες φυσικές ιδιότητες, θα αποδεικνυόταν ότι η θεωρία χορδών είναι μεν όμορφη, αλλά δεν έχει καμία σχέση με το σύμπαν μας. Το γεγονός ότι υπάρχουν κάποια σχήματα Calabi-Yau που, παρά τις περιορισμένες σημερινές δυνατότητές μας να συναγάγουμε ακριβή φυσικά συμπεράσματα, φαίνεται να βρίσκονται εντός των αποδεκτών φυσικών πλαισίων, αποτελεί ένα εξαιρετικά ενθαρρυντικό αποτέλεσμα.

Η εξήγηση των ιδιοτήτων των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης και των δυνάμεων θα ήταν ένα από τα μεγαλύτερα –αν όχι το μεγαλύτερο– επιστημονικά επιτεύγματα. Θα αναφωτιέστε ίσως αν υπάρχουν εκ των προτέρων –και όχι εκ των υστέρων– προβλέψεις της θεωρίας χορδών που να μπορούν να ελεγχθούν πειραματικά είτε τώρα είτε στο άμεσο μέλλον. Η απάντηση είναι θετική.

Υπερσωματίδια

Οι θεωρητικές δυσκολίες, που μας εμποδίζουν προς το παρόν να κάνουμε λεπτομερείς προβλέψεις, μας αναγκάζουν να αναζητάμε αρχετυπικές μάλλον παρά συγκεκριμένες πλευρές ενός σύμπαντος χορδών. Με τον όρο αρχετυπικός εννοούμε εκείνα τα χαρακτηριστικά που είναι θεμελιώδη για τη θεωρία χορδών και δεν επηρεάζονται ουσιαστικά, για να μην πούμε ότι δεν επηρεάζονται καθόλου, από τις λεπτομερείς ιδιότητες της θεωρίας που βρίσκονται σήμε-

ρα εκτός των θεωρητικών μας ορίων. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορούν να εξεταστούν με ασφάλεια, παρότι δεν κατανοούμε πλήρως ολόκληρη τη θεωρία. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα επιστρέψουμε και σε άλλα παραδείγματα, αλλά προς το παρόν ας εστιάσουμε την προσοχή μας σε ένα: την υπερσυμμετρία.

Όπως έχουμε συζητήσει, μία θεμελιώδης ιδιότητα της θεωρίας χορδών είναι ότι εμφανίζει υψηλή συμμετρία, γιατί ενσωματώνει όχι μόνο διαισθητικές αρχές συμμετρίας, αλλά υπαχούει, επίσης, και στην ύψιστη μαθηματική επέκταση αυτών των αρχών, την υπερσυμμετρία. Αυτό σημαίνει, όπως συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 7, ότι οι χορδές ταλαντώνονται ανά ζεύγη –ανά υπερσυμμετρικά ζεύγη– με μισή μονάδα σπιν διαφορά. Αν η θεωρία χορδών είναι ορθή, τότε κάποιες από τις ταλαντώσεις των χορδών θα αντιστοιχούν στα γνωστά στοιχειώδη σωματίδια. Και εξαιτίας τών υπερσυμμετρικών ζευγών, η θεωρία χορδών προβλέπει ότι κάθε τέτοιο γνωστό σωματίδιο θα διαθέτει έναν υπερεταίρο. Μπορούμε να καθορίσουμε το φορτίο κάθε τέτοιου υπεραιτέρου, αλλά προς το παρόν δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τις μάζες τους. Ακόμη κι έτσι όμως, η υπόθεση της ύπαρξης υπερεταίρων αποτελεί γενικό χαρακτηριστικό της θεωρίας χορδών· είναι μια ιδιότητα διαπιστωμένη, ανεξάρτητη από εκείνες τις πτυχές της θεωρίας που παραμένουν σκοτεινές.

Δεν έχει παρατήρηθεί ποτέ κάποιος υπερεταίρος των γνωστών στοιχειωδών σωματιδίων. Αυτό ενδεχομένως να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και ότι η θεωρία χορδών είναι εσφαλμένη. Όμως πολλοί φυσικοί στοιχειωδών σωματιδίων υποψιάζονται ότι οι υπερεταίροι έχουν πολύ μεγάλο βάρος και γι' αυτό δεν έχουμε ακόμα τη δυνατότητα να τους παρατηρήσουμε. Οι φυσικοί κατασκευάζουν τώρα έναν τέραστιο επιταχυντή στη Γενεύη της Ελβετίας, με το όνομα Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων. Υπάρχουν πολλές ελπίδες ότι αυτή η μηχανή θα έχει τέτοια ισχύ ώστε να ανακαλυφθούν οι υπερεταίροι. Ο επιταχυντής θα τεθεί σε λειτουργία πριν από το 2010, οπότε από και πέρα υπάρχει η πιθανότητα να επιβεβαιωθεί πειραματικά η υπερσυμμετρία. Πολύ σύντομα. Όπως

έχει πει ο Schwarz: «Η υπερσυμμετρία θα ανακαλυφθεί μάλλον σύντομα. Και όταν αυτό συμβεί, θα προκαλέσει δραματικές αλλαγές». ¹⁷

Θα πρέπει ωστόσο να έχουμε στο μιαλό μας δύο πράγματα. Ακόμη κι αν ανακαλυφθούν οι υπερεταίροι, το γεγονός αυτό από μόνο του δεν θα αποδείξει την ορθότητα της θεωρίας χορδών. Όπως έχουμε δει, μολονότι η υπερσυμμετρία ανακαλύφθηκε μέσα από τη μελέτη της θεωρίας χορδών, έχει ενσωματωθεί με επιτυχία και σε άλλες θεωρίες σωματιδίων, και συνεπώς δεν αποτελεί αποκλειστικό χαρακτηριστικό της θεωρίας χορδών. Αντίστοιχα, ακόμη κι αν δεν ανακαλυφθούν οι υπερεταίροι με τον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων, το γεγονός αυτό από μόνο του δεν θα σταθεί ικανό να καταδικάσει τη θεωρία χορδών, καθώς μπορεί να σημαίνει ότι οι υπερεταίροι έχουν τέτοιο βάρος που ξεπερνούν τις δυνατότητες και της συγκεκριμένης μηχανής.

Αφού εκφράσαμε αυτές τις επιφυλάξεις, τώρα μπορούμε να πούμε ότι, αν όντως βρεθούν οι υπερεταίροι, αυτό θα αποτελέσει σίγουρα μια ισχυρή και συναρπαστική ένδειξη υπέρ της θεωρίας χορδών.

Σωματίδια με κλασματικό φορτίο

Άλλη μία περίπτωση, όπου το πείραμα προσυπογράφει τη θεωρία χορδών, έχει να κάνει με το ηλεκτρικό φορτίο και είναι κάπως λιγότερο γενική από τους υπερεταίρους αλλά εξίσου σημαντική. Τα στοιχειώδη σωματίδια του βασικού μοντέλου διαθέτουν μια πολύ περιορισμένη παλέτα ηλεκτρικού φορτίου: τα κουάρκ και τα αντικουάρκ έχουν ηλεκτρικά φορτία $1/3$, $2/3$, $-1/3$ ή $-2/3$, ενώ τα υπόλοιπα σωματίδια 0, 1 ή -1. Οι συνδυασμοί αυτών των σωματιδίων ευθύνονται για όλη τη γνωστή ύλη στο σύμπαν. Στη θεωρία χορδών εντούτοις είναι δυνατό να υπάρχουν ταλαντώσεις που αντιστοιχούν σε σωματίδια με πολύ διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία. Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό φορτίο ενός σωματιδίου μπορεί να

πάρει ασυνήθιστες κλασματικές τιμές, όπως $1/5$, $1/11$, $1/13$ ή $1/53$ και πολλές άλλες. Αυτά τα ασυνήθιστα φορτία προχύπτουν όταν οι καρπυλωμένες διαστάσεις έχουν μια συγκεκριμένη γεωμετρική ιδιότητα: αν διαθέτουν οπές που τις κυκλώνουν χορδές οι οποίες κατά περίεργο τρόπο απεμπλέκονται μόνο αν τυλιχτούν γύρω από τις οπές ένα συγκεκριμένο πλήθος φορών.¹⁸ Οι λεπτομέρειες δεν έχουν και τόση σημασία, όμως ανάλογα με το πλήθος των φορών που τυλίγονται οι χορδές γύρω από τις οπές, επηρεάζονται οι τρόποι ταλάντωσής τους και έτσι καθορίζεται ο παρονομαστής των κλασματικών φορτίων.

Ορισμένα σχήματα Calabi-Yau έχουν αυτή τη γεωμετρική ιδιότητα, κάποια άλλα όχι, και για το λόγο αυτό η ύπαρξη ασυνήθιστων ηλεκτρικών φορτίων δεν έχει τόσο αρχετυπικό χαρακτήρα όσο η ύπαρξη υπερεταίρων. Από την άλλη μεριά, ενώ η ύπαρξη υπερεταίρων δεν αποτελεί αποκλειστική ιδιότητα της θεωρίας χορδών, η εμπειρία μάς έχει δείξει ότι δεν υπάρχει κάποιος ουσιαστικός λόγος ύπαρξης τέτοιων εξωτικών κλασματικών φορτίων σε οποιαδήποτε θεωρία σημειακών σωματιδίων. Μπορούν μεν να ενσωματωθούν διά της βίας σε μια τέτοια θεωρία, αλλά κάτι τέτοιο θα ήταν τόσο φυσικό όσο κι ένας ταύρος σε υαλοπωλείο. Η πιθανή τους ύπαρξη λόγω των απλών γεωμετρικών ιδιοτήτων των επιπρόσθετων διαστάσεων καθιστά τα ασυνήθιστα αυτά ηλεκτρικά φορτία μια εύλογη πειραματική υπογραφή στη θεωρία χορδών.

Όπως συμβαίνει και με τους υπερεταίρους, τέτοια ασυνήθιστα φορτισμένα σωματίδια δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ, και η γνώση μας γύρω από τη θεωρία χορδών δεν μας επιτρέπει κάποια συγκεκριμένη πρόβλεψη για τις μάζες τους εάν και εφόσον οι επιπλέον διαστάσεις έχουν τις σωστές ιδιότητες για να τα παραγάγουν. Μια εξήγηση για το γεγονός ότι δεν τα έχουμε παρατηρήσει είναι ότι, αν όντως υπάρχουν, οι μάζες τους πρέπει να ξεπερνούν τις τρέχουσες τεχνολογικές μας δυνατότητες – μπορεί μάλιστα να είναι της τάξης της μάζας Planck. Αλλά, αν ένα μελλοντικό πείραμα έφερνε στο φως ασυνήθιστα ηλεκτρικά φορτία, αυτό θα

αποτελούσε μια πολύ σημαντική ένδειξη ότι η θεωρία χορδών ισχύει.

Βλέποντας πιο μακριά

Υπάρχουν κι άλλοι τρόποι εύρεσης στοιχείων για τη θεωρία χορδών. Για παράδειγμα, ο Witten έχει επισημάνει τη μικρή πιθανότητα να βρουν κάποια μέρα οι αστρονόμοι κάποιο σημάδι της θεωρίας χορδών στα στοιχεία που συλλέγουν παρατηρώντας τον ουρανό. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 6, αν και το μέγεθος μιας χορδής είναι της τάξεως μεγέθους του μήκους Planck, χορδές με μεγαλύτερη ενέργεια μπορούν να μεγαλώσουν πολύ περισσότερο. Η ενέργεια της Μεγάλης Έκρηξης μάλιστα θα μπορούσε να είναι τόσο μεγάλη ώστε να παραγάγει μερικές χορδές με μακροσκοπικό μέγεθος, οι οποίες, λόγω της διαστολής του σύμπαντος, ενδέχεται να έχουν μεγαλώσει φτάνοντας σε αστρονομικές κλίμακες μεγέθους. Μπορούμε να φανταστούμε ότι τώρα ή κάποια στιγμή στο μέλλον, μια τέτοιου είδους χορδή θα διασχίσει τον νυχτερινό μας ουρανό, αφήνοντας πίσω της αναμφισβήτητα και μετρήσιμα ίχνη στα δεδομένα που συλλέγουν οι αστρονόμοι (όπως, για παράδειγμα, μια μικρή μετατόπιση στην κοσμική μικροκυματική θερμοκρασία· βλέπε Κεφάλαιο 14). Όπως λέει ο Witten: «Παρότι ακούγεται κάπως επιτηδευμένο, αυτό είναι το αγαπημένο μου σενάριο για την επιβεβαίωση της θεωρίας χορδών, καθώς τίποτε άλλο δεν θα διευθετούσε το ζήτημα τόσο ουσιαστικά όσο μια χορδή που θα βλέπαμε με το τηλεσκόπιο». ¹⁹

Υπάρχουν κι άλλα, πολύ πιο ρεαλιστικά ενδεχόμενα ίχνη της θεωρίας χορδών. Ακολουθούν πέντε παραδείγματα. Πρώτον, στον Πίνακα 1.1 επισημάναμε ότι δεν γνωρίζουμε αν τα νετρίνα είναι απλώς πολύ ελαφρά ή αν στην πραγματικότητα έχουν μηδενική μάζα. Σύμφωνα με το βασικό μοντέλο, δεν έχουν μάζα, όχι δύναμης για κάποιον ιδιαίτερο λόγο. Μια πρόκληση για τη θεωρία χορδών είναι να παράσχει μια πειστική εξήγηση των τωρινών και μελλο-

ντικών δεδομένων για τα νετρίνα, ιδίως αν τα πειράματα δείξουν ότι τα νετρίνα έχουν τελικά κάποια απειροελάχιστη αλλά μη μηδενική μάζα. Δεύτερον, υπάρχουν ορισμένες υποθετικές διεργασίες που απαγορεύονται από το βασικό μοντέλο, αλλά θα μπορούσαν να ισχύουν στη θεωρία χορδών. Ανάμεσα σε αυτές συγκαταλέγονται η ενδεχόμενη διάσπαση του πρωτονίου (μην ανησυχείτε, μια τέτοια διάσπαση, αν όντως μπορεί να γίνει, θα είναι εξαιρετικά βραδεία) και πιθανές μεταστοιχειώσεις και διασπάσεις διαφόρων συνδυασμών από κουάρκ, που παραβιάζουν ορισμένες καλά εδραιωμένες ιδιότητες της κβαντικής θεωρίας πεδίου των σημειακών σωματιδίων.²⁰ Αυτού του είδους οι διεργασίες έχουν μεγάλο ενδιαφέρον, γιατί η απουσία τους από τη συμβατική θεωρία ανοίγει το δρόμο για μια φυσική που δεν μπορεί να εξηγηθεί χωρίς νέες θεωρητικές αρχές. Αν παρατηρηθούν, καθεμιά από αυτές τις διεργασίες θα μπορούσε να αποτελέσει πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή της θεωρίας χορδών. Τρίτον, για συγκεκριμένα σχήματα Calabi-Yau, οι χορδές ταλαντώνονται με τέτοιον τρόπο ώστε δημιουργούνται νέα, μικροσκοπικά πεδία δυνάμεων μεγάλης εμβέλειας. Αν ανακαλύπτονταν οι επιδράσεις μιας τέτοιας νέας δύναμης, θα μπορούσαν κάλλιστα να αντανακλούν ένα μέρος της νέας φυσικής της θεωρίας χορδών. Τέταρτον, όπως θα επισημάνουμε στο επόμενο κεφάλαιο, οι αστρονόμοι έχουν συλλέξει ενδείξεις ότι ο Γάλαξίας μας και ενδεχομένως ολόκληρο το σύμπαν είναι βυθισμένα σε σκιώδη ύλη, η ταυτότητα της οποίας δεν έχει αναγνωριστεί ακόμη. Μέσα από τους πολλούς τρόπους ταλάντωσης, η θεωρία χορδών έχει να προτείνει κάποιους που μπορεί να ευθύνονται για τη δημιουργία της σκιώδους ύλης: αυτή η επιμηγορία πρέπει να περιμένει τα μελλοντικά πειραματικά αποτελέσματα που θα αποκαλύψουν με κάθε λεπτομέρεια τις ιδιότητες της σκιώδους ύλης.

Και τέλος, ένας πέμπτος ενδεχόμενος τρόπος συσχέτισης της θεωρίας χορδών με τις παρατηρήσεις εμπλέκει την κοσμολογική σταθερά – θυμηθείτε, όπως συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 3, ότι προκειται για την τροποποίηση που είχε προτείνει αρχικά ο Einstein

στις εξισώσεις της γενικής σχετικότητας ώστε να εξασφαλιστεί ένα στατικό σύμπαν. Μολονότι η μελλοντική ανακάλυψη ότι το σύμπαν διαστέλλεται οδήγησε τον Einstein να αποσύρει αυτή την τροποποίηση, οι φυσικοί είχαν συνειδητοποιήσει από τότε ότι δεν υπάρχει εξήγηση στο γιατί θα πρέπει η κοσμολογική σταθερά να είναι μηδέν. Στην πραγματικότητα, η κοσμολογική σταθερά μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα είδος ολικής ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο χενό, οπότε η τιμή της θα μπορούσε να υπολογιστεί θεωρητικά και να επιβεβαιωθεί πειραματικά. Μέχρι σήμερα όμως τέτοιοι υπολογισμοί και μετρήσεις χαρακτηρίζονται από μια τεράστια αναντιστοιχία: οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι η κοσμολογική σταθερά είναι ή μηδέν (όπως πρότεινε τελικά ο Einstein) ή πολύ μικρή· οι υπολογισμοί υποδηλώνουν ότι οι κβαντομηχανικές διαταραχές στο χενό τείνουν να δημιουργήσουν μια μη μηδενική κοσμολογική σταθερά της οποίας η τιμή είναι περίπου 120 τάξεις μεγέθους (η μονάδα ακολουθούμενη από 120 μηδενικά) μεγαλύτερη απ' όσο επιτρέπει το πείραμα! Αυτό προσφέρει μια υπέροχη πρόκληση και μια καταπληκτική ευκαιρία για τους θεωρητικούς των χορδών: μπορούν οι υπολογισμοί της θεωρίας χορδών να αναιρέσουν αυτή την αναντιστοιχία και να εξηγήσουν γιατί η κοσμολογική σταθερά είναι μηδέν ή, αν τελικά αποδειχθεί πειραματικά ότι η τιμή της είναι μικρή αλλά όχι μηδενική, θα μπορέσει η θεωρία χορδών να δώσει μια εξήγηση; Αν οι θεωρητικοί των χορδών σταθούν ικανοί να αντιμετωπίσουν αυτή την πρόκληση –προς το παρόν δεν το έχουν καταφέρει– θα μας προσφέρουν μια ακαταμάχητη ένδειξη υπέρ της θεωρίας.

Μια αποτίμηση

Η ιστορία της φυσικής βρίθει από θεωρίες που, όταν πρωτοπαρουσιάστηκαν, έδιναν την εντύπωση ότι θα ήταν εντελώς αδύνατο να ελεγχθούν αλλά, μέσα από διάφορες απρόβλεπτες εξελίξεις, μπόρεσαν τελικά να επαληθευτούν πειραματικά. Η ιδέα ότι η ύλη

αποτελείται από άτομα, η υπόθεση του Pauli ότι υπάρχουν «μυστηριώδη» σωματίδια, τα νετρίνα, και το ενδεχόμενο να υπάρχουν στο σύμπαν αστέρες νετρονίων και μαύρες τρύπες, αποτελούν τρεις πολύ γνωστές θεωρίες που σήμερα τις ασπαζόμαστε πλήρως, αλλά την εποχή της διατύπωσής τους έμοιαζαν με φαντασιουργήματα.

Η ανάγκη εισαγωγής της θεωρίας χορδών είναι εξίσου ισχυρή με εκείνη που οδήγησε στις τρεις προαναφερθείσες θεωρίες – η θεωρία χορδών μάλιστα έγινε δεκτή ως η πλέον σημαντική και συναρπαστική εξέλιξη στη θεωρητική φυσική μετά την ανακάλυψη της κβαντομηχανικής. Η σύγχριση είναι ιδιαίτερα επιτυχημένη, καθώς η ιστορία της κβαντομηχανικής μάς διδάσκει ότι μπορεί ενδεχομένως να χρειαστούν αρκετές δεκαετίες μέχρι οι επαναστάσεις της φυσικής να φτάσουν στην ωριμότητά τους. Άλλωστε σε σχέση με τους σημερινούς θεωρητικούς των χορδών, οι φυσικοί που ανακάλυψαν την κβαντομηχανική είχαν ένα σημαντικό πλεονέκτημα: η κβαντομηχανική, ακόμη κι όταν βρισκόταν στην αρχή της, συσχετίζόταν άμεσα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ακόμη κι έτσι, χρειάστηκαν γύρω στα τριάντα χρόνια για να δομηθεί λογικά και περίπου άλλα είχοσι για να ενσωματωθεί πλήρως η ειδική θεωρία της σχετικότητας στο θεωρητικό πλαίσιο της κβαντομηχανικής. Σήμερα προσπαθούμε να ενσωματώσουμε και τη γενική θεωρία της σχετικότητας, και αυτός είναι ένας πολύ φιλόδοξος στόχος που συναντά περισσότερες δυσκολίες στην πειραματική του επιβεβαίωση. Σε αντίθεση με τους εμπνευστές της κβαντικής θεωρίας, οι σημερινοί θεωρητικοί των χορδών δεν έχουν τη βοήθεια της φύσης – τα λεπτομερή πειραματικά δεδομένα – να τους καθοδηγεί σε κάθε τους βήμα.

Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να φανταστούμε μία ή περισσότερες γενιές φυσικών να αφιερώνουν τη ζωή τους στη διερεύνηση και την ανάπτυξη της θεωρίας χορδών χωρίς ποτέ να πάρουν κάποια πειραματική επιβεβαίωση. Σε κάθε γωνιά της γης όλοι αυτοί οι φυσικοί που αφοσιώνονται με όλες τους τις δυνάμεις στη θεωρία χορδών γνωρίζουν ότι αναλαμβάνουν ένα ρίσκο: να σπα-

ταλήσουν όλη τους τη ζωή δίχως αποτέλεσμα. Αναμφίβολα, θα υπάρχει συνεχώς πρόδος στο θεωρητικό κομμάτι, θα αρχεί όμως αυτό ώστε να ξεπεράσουμε τους σημερινούς σκοπέλους και να καταλήξουμε σε συγκεκριμένες, πειραματικά ελέγχιμες προβλέψεις; Θα οδηγήσουν οι έμμεσοι έλεγχοι που συζητούσαμε προηγουμένως σε μια τρανταχτή απόδειξη για τη θεωρία χορδών; Τα ερωτήματα αυτά βασανίζουν κάθε θεωρητικό των χορδών, δίχως όμως να μπορούν να απαντηθούν. Μόνο ο χρόνος θα αποκαλύψει τις απαντήσεις. Η όμορφη απλότητα της θεωρίας χορδών, ο τρόπος με τον οποίο δαμάζει τη σύγχρονη ανάμεσα στη βαρύτητα και την κβαντομηχανική, η ικανότητά της να ενοποιεί όλα τα συστατικά της φύσης και η απεριόριστη δυνατότητά της να προβλέπει, όλα αυτά μας εμπνέουν τόσο πολύ ώστε το ρίσκο να αξίζει τον κόπο.

Αυτές οι μεγαλόπνοες σκέψεις αποκτούν όλο και ισχυρότερο έρεισμα χάρη στην ικανότητα της θεωρίας χορδών να αποκαλύπτει αξιοσημείωτα νέα φυσικά χαρακτηριστικά ενός σύμπαντος βασισμένου σε χορδές – χαρακτηριστικά που φανερώνουν μια λεπτή και βαθιά συνοχή στις λειτουργίες της φύσης. Στη γλώσσα που εισαγάγαμε παραπάνω, πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά αποτελούν γενικές ιδιότητες που, ανεξάρτητα από άγνωστες προς το παρόν λεπτομέρειες, θα είναι οι θεμελιώδεις ιδιότητες ενός σύμπαντος φτιαγμένου από χορδές. Οι πιο εξωφρενικές από αυτές έχουν επηρεάσει βαθιά την ολοένα εξελισσόμενη κατανόησή μας για το χώρο και το χρόνο.