

ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΓΑΛΗ ΕΚΡΗΣΗ ΩΣ

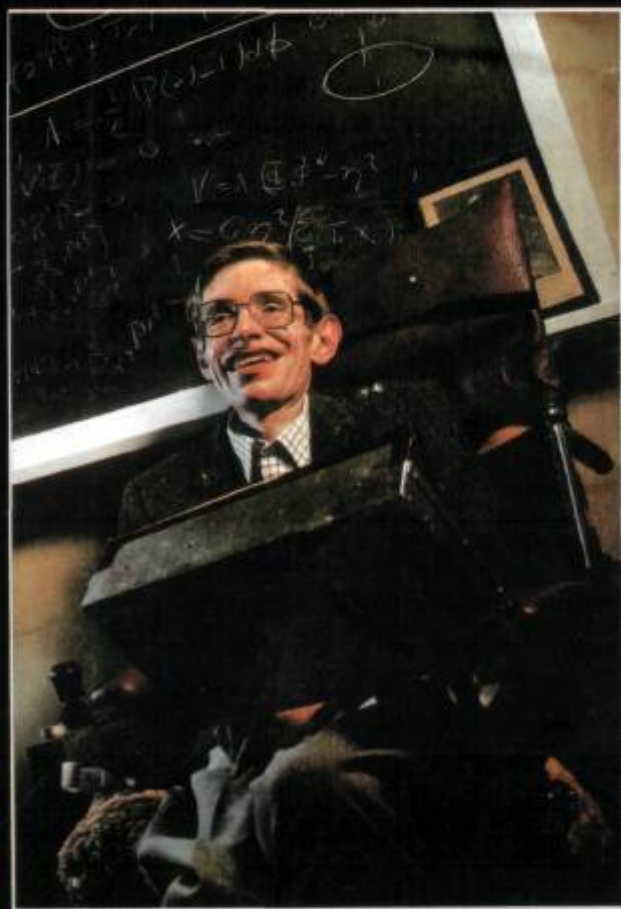
ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΟΥ Χρόνου

ΤΙΣ ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ

Stephen W. Hawking

πρόλογος
από τον
CARL
SAGAN

εισαγωγή
από τον
ΒΑΣΙΛΗ
ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟ



κάτοπτρο

STEPHEN W. HAWKING

Πανεπιστήμιο Cambridge

το χρονικό του Χρόνου

Από τη Μεγάλη έκρηξη ως τις Μαύρες τρύπες

Πρόλογος: Carl Sagan

Εισαγωγή: Βασίλης Ξανθόπουλος

κάτοπτρο

Τίτλος πρωτοτύπου: A brief history of Time — From the Big Bang to Black Holes

Πρώτη έκδοση: Απρίλιος 1988 από Bantam books

© Κείμενο: Stephen Hawking

Πρόλογος: Carl Sagan

Εικόνες: Ron Miller

® Για την ελληνική γλώσσα:

«Εκδόσεις ΚΑΤΟΠΤΡΟ - Αλ. Μάμαλης & ΣΙΑ Ο.Ε.»

ISBN 960 7023 02 1

Μετάφραση και επιστημονική επιμέλεια: Κωνσταντίνος Χάρακας

Εισαγωγή στην ελληνική έκδοση: Βασίλης Κ. Ξανθόπουλος, Καθηγητής
φυσικής Πανεπιστημίου Κρήτης

Γλωσσική επιμέλεια: Παντελής Μπουκάλας

Επιμέλεια: Αλέκος Μάμαλης — Γρηγόρης Τρουφάκος

Κεντρική διάθεση: Εκδόσεις Κάτοπτρο

Ισαύρων 10, 114 71 - Αθήνα

τηλ. 3643272, fax. 3641864

Στοιχειοθεσία: Λύχνος Ε.Π.Ε.

Εκτύπωση: Όλβος Ε.Π.Ε.

Βιβλιοδεσία: Σπ. Σγαρδέλης

Εξώφυλλο: Χρ. Κιουρτσόγλου

Απαγορεύεται η ανατύπωση του παρόντος ή μέρους αυτού χωρίς την
έγγραφη άδεια των εκδοτών

Το βιβλίο αυτό αφιερώνεται στην Jane

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμότατα τον καθηγητή κ. Ξανθόπουλο για την προθυμία του να διαβάσει το αγγλικό κείμενο και να γράψει την εισαγωγή στην ελληνική έκδοση. Ακόμη τον κ. Χάρακα για την ενθουσιώδη και ταχύτατη μετάφραση του αγγλικού κειμένου και για τη συγκινητική συμπαράσταση του.

Οι εκδότες

Περιεχόμενα

Εισαγωγή στην ελληνική έκδοση.....	9
Πρόλογος του Carl Sagan.....	15
Ευχαριστίες.....	18
1. Η εικόνα του Ανθρώπου για το Σύμπαν.....	21
2. Χώρος και Χρόνος.....	41
3. Το Σύμπαν διαστέλλεται.....	69
4. Η αρχή της απροσδιοριστίας.....	92
5. Τα στοιχειώδη σωματίδια και οι δυνάμεις της Φύσης ..	104
6. Οι Μαύρες τρύπες.....	127
7. Οι Μαύρες τρύπες δεν είναι και τόσο μαύρες	154
8. Η μοίρα του Σύμπαντος — Παρελθόν και Μέλλον. . . .	176
9. Το βέλος του Χρόνου.....	214
10. Η ενοποίηση των φυσικών θεωριών.....	229
11. Συμπεράσματα.....	250
12. Γαλιλαίος — Νεύτων — Αϊνστάιν.....	256
Λεξιλόγιο.....	265

Εισαγωγή στην ελληνική έκδοση

Ο Stephen Hawking, ένας από τους πιο διάσημους θεωρητικούς φυσικούς της εποχής μας, έχει γίνει γνωστός στο ευρύ κοινό και για το τι μπορεί να κάνει αλλά και για το τι δεν μπορεί. Δεν μπορεί να κάνει ό,τι είναι εύκολο για όλους μας. Δέσμιος της αναπηρικής του πολυθρόνας από τα είκοσι πέντε του, από μια ασθένεια του νευρικού συστήματος, κινεί μετά βίας τα δάκτυλα των χεριών του και (λόγω επιδείνωσης της κατάστασης του) τα τελευταία τρία χρόνια επικοινωνεί με τον υπόλοιπο κόσμο μόνο με τη βοήθεια υπολογιστή, με τον αργό ρυθμό των δέκα περίπου λέξεων το λεπτό.

Αυτό που μπορεί να κάνει ο Hawking (χωρίς μολύβι και χαρτί) είναι ό,τι δεν μπορούμε ούτε καν να το διανοηθούμε οι περισσότεροι, και ό,τι με δυσκολία μπορεί να παρακολουθήσει η επισημονική ελίτ της εποχής μας. Τα τελευταία είκοσι χρόνια ο Hawking:

— έχει αποδείξει την ύπαρξη «ανωμαλιών» στο χωρόχρονο της

γενικής θεωρίας της σχετικότητας, όπως π.χ. η αρχική Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) από την οποία προήλθε το Σύμπαν,

— έχει ανακαλύψει τους νόμους της μηχανικής και της θερμοδυναμικής για τις μαύρες τρύπες (συμπέρασμα: η θερμοκρασία μιας μαύρης τρύπας είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας της, και η ειδική θερμότητα της είναι αρνητική!),

— κατάφερε να μελετήσει τη συμπεριφορά κβαντικών πεδίων κοντά σε μαύρες τρύπες (συμπέρασμα: σε αντίθεση προς την κλασική θεωρία, που προβλέπει ότι οι μαύρες τρύπες είναι απόλυτα μαύρες αφού μόνον απορροφούν, η κβαντική θεωρία προβλέπει ότι οι μαύρες τρύπες ακτινοβολούν ακριβώς όπως και ένα μέλαν σώμα),

— μέσα στη δεκαετία του '80 πρότεινε μια κβαντική θεωρία για τη δημιουργία του Σύμπαντος, τη θεωρία της Κυματοσυνάρτησης του Σύμπαντος (βασική της αρχή: οι οριακές συνθήκες του Σύμπαντος είναι ότι δεν έχει όρια).

Με την έκδοση του ανά χείρας βιβλίου ο Hawking μας έμαθε πως μπορεί να κάνει και κάτι άλλο, κάτι που αρκετοί το επιχειρούν αλλά λίγοι το πετυχαίνουν: ότι έχει το ταλέντο να απευθυνθεί και στο ευρύ κοινό, και ότι μπορεί να περιγράψει, χωρίς τη βοήθεια των μαθηματικών, τις σύγχρονες ανακαλύψεις στη θεωρία της σχετικότητας και τις συνεχιζόμενες προσπάθειες για την απόκτηση μιας ενοποιημένης κβαντικής θεωρίας των δυνάμεων της φύσης που να περιλαμβάνει και τη βαρύτητα.

Το βιβλίο αρχίζει με μια αναδρομή, από τους αρχαίους Έλληνες μέχρι σήμερα, στις εκάστοτε επικρατούσες κοσμοθεωρίες περί Σύμπαντος. Είναι αξιοθαύμαστο ότι έπρεπε να φτάσουμε στον 20ό αιώνα για να καταλάβουμε ότι το Σύμπαν δεν είναι στατικό, αμετάβλητο και αιώνιο αλλά δυναμικό, διαστελλόμενο και με πεπερασμένο παρελθόν. Με τις παρατηρήσεις του Hubble ότι οι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς με ταχύτητα ανάλογη της απόστασης τους, τις θεωρητικές προβλέψεις της

γενικής σχετικότητας και την παρατήρηση της ακτινοβολίας μικροκυμάτων που γεμίζει το Σύμπαν, ξέρουμε πλέον ότι το Σύμπαν ξεκίνησε από τη Μεγάλη έκρηξη κάπου 15 δισεκατομμύρια χρόνια πριν μας μένει λοιπόν να προβλέψουμε αν θα συνεχίσει να διαστέλλεται για πάντα ή κάποτε θα αρχίσει να συστέλλεται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει τη γέννηση της φυσικής με τα πειράματα του Γαλιλαίου και τους νόμους του Νεύτωνα, εξηγεί τη σχετικότητα του χώρου στη νευτώνεια φυσική, την ασυμβιβαστότητα της σταθερότητας της ταχύτητας του φωτός (θεωρίας Maxwell) με τον απόλυτο αριστοτελικό και νευτώνειο χρόνο, και τη λύση που έδωσε η ειδική σχετικότητα του Αϊνστάιν με την εγκατάλειψη της έννοιας του απόλυτου χρόνου. Φυσιολογικά έτσι φτάνει κανείς στο χωρόχρονο, στη μέτρηση αποστάσεων και χρονικών διαστημάτων με φωτεινά σήματα και στην περιγραφή της βαρύτητας με την καμπύλωση του χωροχρόνου. Το κεφάλαιο τελειώνει με σύντομη περιγραφή των τριών κλασικών τεστ της γενικής θεωρίας της σχετικότητας.

Στο επόμενο κεφάλαιο εκτίθενται οι θεωρητικές και παρατηρησιακές μελέτες που οδηγούν στην αποδοχή ότι το Σύμπαν είναι ομογενές και ισότροπο, και περιγράφονται οι τρεις μορφές Σύμπαντος (ανοιχτό, κλειστό, επίπεδο) που προβλέπει η γενική σχετικότητα. Μετά από σύντομη αναφορά στη θεωρία της συνεχούς δημιουργίας (και τα εναντίον της επιχειρήματα), περιγράφεται η εργασία του συγγραφέα με τον Penrose που απέδειξε γενικά την ύπαρξη ανωμαλιών στη σχετικότητα και καθιέρωσε τη θεωρία της Μεγάλης έκρηξης.

Στα δύο επόμενα κεφάλαια το βιβλίο εγκαταλείπει τις κλασικές θεωρίες του μακρόκοσμου και πραγματεύεται την κβαντική θεωρία του μικρόκοσμου. Αρχίζει με μια απλή εξήγηση της αρχής της αβεβαιότητας και των συνεπειών της στις θετικές επιστήμες και τη σύγχρονη τεχνολογία. Περιγράφει τα «στοι-

χειώδη σωματίδια», από το άτομο στο ηλεκτρόνιο και τον πυρήνα, στα πρωτόνια και νετρόνια, και στα κουάρκ. Συζητά το σπιν των σωματιδίων, τη θεωρητική πρόβλεψη της αντιύλης από τον Dirac, τις δυνάμεις της φύσης (βαρυτικές, ηλεκτρομαγνητικές, ασθενείς και ισχυρές), τις προσπάθειες για την ενοποίηση τους, και τον «περιορισμό» (confinement) των κουάρκ. Σχολιάζει την από τις Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες (G.U.T.) προβλεπόμενη διάσπαση του πρωτονίου (σε 10^{30} χρόνια!), την ασυμμετρία ύλης - αντιύλης, και τις συμμετρίες C,P και T των στοιχειωδών σωματιδίων.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται οι προβλέψεις της κλασικής θεωρίας για τις μαύρες τρύπες, που είναι η φυσική κατάληξη των άστρων με μάζα αρκετά μεγαλύτερη από τη μάζα του Ήλιου. Μαθαίνει κανείς για τη συμπεριφορά του χρόνου στις περιοχές κοντά στις μαύρες τρύπες, για την ανωμαλία στο κέντρο τους και για την απώλεια κάθε ικανότητας να κάνουμε φυσικές προβλέψεις, που όμως δεν επηρεάζει τον έξω κόσμο γιατί η ανωμαλία περιβάλλεται από τον ορίζοντα των γεγονότων. Επίσης συζητά για τη μοναδικότητα των λύσεων που περιγράφουν τις μαύρες τρύπες στην σχετικότητα, τις έμμεσες επιβεβαιώσεις της ύπαρξής τους, καθώς και για τα κύματα βαρύτητας και την «παρατήρηση» τους με το διπλό πάλσαρ του Taylor.

Στο τελευταίο τρίτο του βιβλίου του ο Hawking προχωρεί σιγά σιγά προς το πάντρεμα (αν και ακόμη είμαστε μόνον στον αρραβώνα!) της σχετικότητας με την κβαντική φυσική. Στο τμήμα αυτό η ανάπτυξη των νέων εννοιών και η έκθεση των διαδοχικών μικρών βημάτων της επιστημονικής προόδου γίνεται σε ένα έντονα προσωπικό στυλ, αφού το όνομα του συγγραφέα συνδέεται με τις περισσότερες ανακαλύψεις. Το έβδομο κεφάλαιο πραγματεύεται την ακτινοβολία σωματιδίων από τις μαύρες τρύπες και τις προοπτικές για την παρατήρηση της. Το όγδοο κεφάλαιο αποτελεί μια σύντομη εισαγωγή στην σύγχρονη κοσμολο-

γία, με αναφορές στο μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '70 καθιερωμένο μοντέλο για τα πρωταρχικά στάδια του Σύμπαντος, στη θεωρία του «πληθωριστικού» Σύμπαντος, στο «ανθρωπικό αξίωμα», και στις πρόσφατες προσπάθειες του συγγραφέα για την ανάπτυξη ενός κβαντικού μοντέλου δημιουργίας του Σύμπαντος που αποφεύγει την αναγκαιότητα της αρχικής ανωμαλίας.

Το ένατο κεφάλαιο πραγματεύεται την κατεύθυνση του χρόνου και τη διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στο χρόνο του μικρόκοσμου και του μακρόκοσμου. Θεωρεί τον ψυχολογικό, τον κοσμολογικό και τον θερμοδυναμικό χρόνο, και επιχειρηματολογεί, βασιζόμενος στην υπόθεση ότι το Σύμπαν δεν έχει όριο και στο ανθρωπικό αξίωμα, ότι οι κατευθύνσεις αυτών των τριών χρόνων πρέπει να συμπίπτουν.

Το βιβλίο τελειώνει με μια σύντομη, αλλά και κριτική, αναφορά στις προσπάθειες για την ενοποίηση των φυσικών θεωριών — τις θεωρίες υπερβαρύτητας και τις θεωρίες των χορδών, που δέχονται ότι ο χωρόχρονος έχει περισσότερες από τέσσερις διαστάσεις — και κλείνει με σύντομα βιογραφικά σκετς του Γαλιλαίου, του Νεύτωνα και του Αϊνστάιν.

Η συχνότητα των νέων εννοιών και η πυκνότητα της πληροφορίας στο βιβλίο είναι αρκετά υψηλή, και παρέχεται με το κλασικό ύφος του Hawking, με λίγες και σταράτες κουβέντες που δεν επιδέχονται καμία αμφισβήτηση. Καθώς προχωρούν οι σελίδες η δυσκολία του κειμένου αυξάνει γραμμικά θα έλεγε κανείς με την αρίθμηση τους. Φυσικά η αύξηση της δυσκολίας οφείλεται εν μέρει και στο γεγονός ότι τα τελευταία κεφάλαια πραγματεύονται ιδέες, έννοιες και θεωρήσεις της τρέχουσας δεκαετίας που πολλές φορές πλησιάζουν, αν δεν υπερβαίνουν, τα όρια της φιλοσοφίας.

Μια συμβουλή προς τους αναγνώστες. Μην εγκαταλείψετε με την πρώτη αν δεν καταλαβαίνετε κάτι, ή ακόμη κι αν δεν το

καταλαβαίνετε μετά και από φιλότιμη προσπάθεια. Υπάρχουν πολλά επίπεδα γνώσης, από την απλή απομνημόνευση έως τη δυνατότητα χρήσης των εννοιών, και από τη δυνατότητα συμμετοχής σε επιστημονική συζήτηση έως τη συνεισφορά στην ερευνητική προσπάθεια. Η επιστημονική γνώση είναι τόσο πολλή, υπεραρκετή για να καλύψει τις δυνατότητες μας σε όλα τα επίπεδα μάθησης, και η πρόοδος στην κατανόηση γίνεται βασικά με τη συνεχή μεταφορά γνώσης από τις περιοχές της επιφανειακής στις περιοχές της βαθύτερης και ουσιαστικότερης κατανόησης.

Διαβάζοντας ένα πετυχημένο βιβλίο αποκτούμε μια ουσιαστική γνωριμία με το συγγραφέα του. Είναι πολύ χρήσιμο λοιπόν σε κάθε άνθρωπο της εποχής μας να γνωρίσει τον Stephen Hawking, τον επιστήμονα και τον άνθρωπο. *Και να τον σκέφτεται στις δυσκολίες της ζωής.* Είναι ευχής έργο που το ελληνικό αναγνωστικό κοινό έχει στη διάθεση του το βιβλίο του Hawking μέσα σε ένα εξάμηνο από την κυκλοφορία του στην αγγλική, σε μια επιμελημένη μετάφραση και έκδοση.

Βασίλης Κ. Ξανθόπουλος

Οκτώβριος 1988

Ηράκλειο Κρήτης

Πρόλογος

Περνάμε την καθημερινή μας ζωή χωρίς να καταλαβαίνουμε σχεδόν τίποτε για τον Κόσμο. Ελάχιστα προβληματιζόμαστε για την κοσμική μηχανή που παράγει το φως και κάνει δυνατή την ύπαρξη ζωής· για την βαρύτητα που μας κρατάει πάνω σε έναν περιστρεφόμενο πλανήτη, έναν πλανήτη που αν δεν υπήρχε η βαρύτητα θα μας εκσφενδόνιζε στο Διάστημα, για τα άτομα που μας αποτελούν και που από την σταθερότητα τους εξαρτιόμαστε. Εκτός από τα παιδιά (όσα δεν έχουν μάθει ακόμη να *μην* κάνουν έξυπνες ερωτήσεις), πολύ λίγοι από εμάς διαθέτουν κάποιο χρόνο απορώντας γιατί η Φύση είναι έτσι που είναι· αν δημιουργήθηκε ο Κόσμος ή αν υπήρχε από πάντα· αν ο χρόνος κάποια μέρα θα αρχίσει να ρέει αντίθετα και τα αποτελέσματα θα προηγούνται από τις αιτίες· αν υπάρχουν όρια στη δυνατότητα να γνωρίσουμε τον Κόσμο. Υπάρχουν παιδιά, και έχω γνωρίσει αρκετά από αυτά, που θέλουν να μάθουν πώς μοιάζει μια μαύρη τρύπα· ποια είναι τα μικρότερα κομμάτια της ύλης· γιατί

θυμόμαστε το παρελθόν αλλά όχι το μέλλον. Πώς από το χάος που υπήρχε, αν υπήρχε, δημιουργήθηκε, η τάξη που βλέπουμε σήμερα; και γιατί τελικά υπάρχει το Σύμπαν.

Στην κοινωνία μας είναι ακόμη συνηθισμένο φαινόμενο σε τέτοια ερωτήματα οι γονείς και οι δάσκαλοι να σηκώνουν τους ώμους ή να επικαλούνται κάποια μισοξεχασμένα θρησκευτικά διδάγματα. Πολλοί δεν αισθάνονται άνετα με αυτά τα θέματα, γιατί αγγίζουν τα όρια της ανθρώπινης γνώσης. Αλλά ένα μεγάλο μέρος από την φιλοσοφία και την επιστήμη οδηγήθηκε από την έρευνα αυτών των θεμάτων. Ένας συνεχώς μεγαλύτερος αριθμός ενηλίκων θέλουν να υποβάλλουν ανάλογα ερωτήματα, και κάποτε μένουν έκπληκτοι από τις απαντήσεις. Απέχοντας το ίδιο από τα άτομα και τα άστρα, διευρύνουμε τους ορίζοντες των απαντήσεων για να περιλάβουν και το πολύ μικρό και το πολύ μεγάλο.

Την άνοιξη του 1974, περίπου δύο χρόνια πριν από την προσεδάφιση του διαστημόπλοιου "Viking" στον Άρη, συμμετείχα σε ένα συνέδριο στην Αγγλία· γινόταν με την ευθύνη της Βασιλικής Εταιρίας του Λονδίνου, και είχε θέμα του την έρευνα για εξωγήινη ζωή. Σε κάποιο διάλειμμα διαπίστωσα ότι σε μια γειτονική αίθουσα γινόταν μια πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση. Μπήκα γεμάτος περιέργεια. Και τότε έγινα μάρτυρας μιας αρχαίας τελετουργίας, της ανακήρυξης νέων μελών της Βασιλικής Εταιρίας (ενός από τα παλαιότερα ακαδημαϊκά ιδρύματα του πλανήτη). Στην πρώτη σειρά ένας νεαρός κύριος, καθισμένος σε μια αναπηρική πολυθρόνα, υπέγραφε πολύ αργά σε ένα βιβλίο· σε προηγούμενες σελίδες του ίδιου βιβλίου υπήρχε η υπογραφή του Ισαάκ Νεύτωνα. Όταν τελείωσε, στην αίθουσα έγινε πανδαιμόνιο. Ο Stephen Hawking ήταν από τότε ένας μύθος.

Σήμερα ο Hawking κατέχει την έδρα των μαθηματικών στο Πανεπιστήμιο του Cambridge, την ίδια έδρα που κατείχε πρώτα ο Νεύτων και αργότερα ο P.A.M. Dirac — δυο λαμπροί εξερευ-

νητές του πολύ μεγάλου και του πολύ μικρού. Ο Hawking είναι ο άξιος διάδοχος τους. Αυτό είναι το πρώτο του βιβλίο για τους μη ειδικούς, ένα από τα πλουσιότερα εκλαϊκευμένα βιβλία. Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και γιατί περιέχει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων αλλά και γιατί αποκαλύπτει τον τρόπο σκέψης του συγγραφέα του. Μας αποκαλύπτει με σαφήνεια τα σύνορα της φυσικής, της αστρονομίας, της κοσμολογίας και του θάρρους.

Ακόμη αυτό είναι ένα βιβλίο για το Θεό... ή ίσως για την απουσία του Θεού. Η λέξη «Θεός» γεμίζει τις σελίδες του. Ο Hawking αναζητά την απάντηση στην περίφημη ερώτηση του Αϊνστάιν, αν ο Θεός είχε κάποια ελευθερία επιλογής στη δημιουργία του Σύμπαντος. Όπως ο ίδιος δηλώνει, προσπαθεί να καταλάβει τη σκέψη του Θεού. Και τα συμπεράσματα της προσπάθειας του είναι όλο και πιο αναπάντεχα: ένα Σύμπαν χωρίς όρια στο χώρο, χωρίς αρχή ή τέλος στο χρόνο· ένα Σύμπαν που δεν χρειάζεται ένα Δημιουργό.

Carl Sagan

Πανεπιστήμιο Cornell

Νέα Υόρκη

Ευχαριστίες

Αποφάσισα να γράψω ένα εκλαϊκευμένο βιβλίο σχετικά με το χρόνο και το χώρο μετά από τις διαλέξεις Loeb που έδωσα το 1982 στο Harvard. Υπήρχαν ήδη πολλά βιβλία με θέμα το αρχέγονο Σύμπαν και τις μαύρες τρύπες, βιβλία από πολύ καλά (όπως το "The first three minutes" του Steven Weinberg) μέχρι πολύ κακά, που δεν θα τα αναφέρω. Νόμιζα όμως ότι κανένα τους δεν έθετε πραγματικά τις ερωτήσεις που με είχαν οδηγήσει στην έρευνά μου στην κοσμολογία και την κβαντική θεωρία: Από που προέρχεται το Σύμπαν; Γιατί και πώς άρχισε να υπάρχει; Θα έχει κάποιο τέλος, και, αν ναι, ποιο; Ερωτήματα που ενδιαφέρουν όλους μας. Όμως η σύγχρονη επιστήμη έχει γίνει τόσο πολύπλοκη που μόνο ένας πολύ μικρός αριθμός ειδικών είναι σε θέση να χειριστεί τα απαιτούμενα μαθηματικά της εργαλεία. Παρ' όλα αυτά, οι βασικές αντιλήψεις σχετικά με τη μοίρα του Σύμπαντος μπορεί να περιγραφούν και χωρίς μαθηματικά, έτσι ώστε να μπορέσουν όλοι να τις καταλάβουν, δίχως να χρειάζονται ιδιαίτερες επιστημονικές γνώσεις.

Κάποιος μου είπε πως κάθε εξίσωση που θα έβαζα στο βιβλίο θα μείωνε τις πωλήσεις του στο μισό. Αποφάσισα λοιπόν να μη συμπεριλάβω καμιά εξίσωση. Όμως τελικά αναγκάστηκα να βάλω μία: την περίφημη εξίσωση του Αϊνστάιν $E = mc^2$. Ελπίζω αυτό να μη μου κοστίζει τους μισούς αναγνώστες μου.

Αν παραβλέψουμε την ατυχία μου να προσβληθώ από μυοατροφική πλευρική σκλήρυνση (που είναι μια ανίατη παραλυτική ασθένεια), από κάθε άλλη άποψη στάθηκα τυχερός στη ζωή μου. Η βοήθεια και η συμπαράσταση που μου προσέφεραν η γυναίκα μου Jane και τα παιδιά μου Robert, Lucy και Timmy, με βοήθησε να έχω μια σχεδόν κανονική ζωή και μια επιτυχημένη καριέρα. Ήμουν ακόμη τυχερός που διάλεξα να σπουδάσω θεωρητική φυσική, γιατί εκεί αυτό που χρειάζεται είναι «να τά 'χεις όλα μέσα στο κεφάλι σου». Έτσι η σωματική μου αναπηρία δεν στάθηκε σοβαρό εμπόδιο. Οι επιστήμονες συνάδελφοι μου, χωρίς καμιά εξαίρεση, με βοήθησαν πολύ.

Στην πρώτη «κλασική» περίοδο της καριέρας μου συνεργάτες μου ήταν ο Roger Penrose, ο Robert Geroch, ο Brandon Carter και ο George Ellis. Τους ευχαριστώ για τη βοήθεια τους και για την εργασία που κάναμε μαζί. Όλη αυτή η περίοδος περιλαμβάνεται στο βιβλίο "The large scale structure of Spacetime" που γράψαμε μαζί με τον Ellis το 1973. Δεν συμβουλεύω όμως τους αναγνώστες μου να το διαβάσουν είναι υπερβολικά τεχνικό και δυσνόητο. Ελπίζω πως από τότε έχω μάθει να γράφω απλούστερα και περισσότερο εύληπτα.

Στη δεύτερη «κβαντική» περίοδο της καριέρας μου, που αρχίζει το 1974, συνεργάτες μου ήταν ο Caryl Gibbons, ο Don Page και ο Jim Hartle. Σε αυτούς και τους μεταπτυχιακούς σπουδαστές μου οφείλω πάρα πολλά για τη μεγάλη, θεωρητική και πρακτική, βοήθεια που μου πρόσφεραν. Η παρακολούθηση της προόδου τους ήταν για μένα μια δραστηριότητα που εμπόδισε, όπως ελπίζω, την καθήλωση της σκέψης μου.

Στη συγγραφή αυτού του βιβλίου με έχει βοηθήσει πολύ ένας σπουδαστής μου, ο Brian Whitt. Το 1985, αφού είχα μισοτελειώσει την πρώτη γραφή, έπαθα πνευμονία. Αναγκάστηκα να κάνω εγχείρηση τραχειεκτομής, η οποία μου αφαίρεσε την ικανότητα μου να μιλάω και έκανε σχεδόν αδύνατη την επικοινωνία μου με

τους γύρω. Σκέφτηκα ότι θα ήταν αδύνατο πλέον να το τελειώσω και να το δω τυπωμένο. Όμως ο Brian όχι μόνο με βοήθησε να το ξαναδιαβάσω αλλά και να καταφέρω να χρησιμοποιώ ένα πρόγραμμα επικοινωνίας, που ονομάζεται Living Center και μου το δώρισε ο Walt Woltoz της Words Plus Inc. στο Sunnyvale της Καλιφόρνιας. Με αυτό μπορώ να γράφω βιβλία και άρθρα, και να συνομιλώ με τον κόσμο χρησιμοποιώντας ένα synthesizer φωνής που μου χάρισε η Speech Plus, και αυτή από το Sunnyvale της Καλιφόρνιας. Το synthesizer και έναν μικροϋπολογιστή τα έχει προσαρμόσει στην αναπηρική μου πολυθρόνα ο David Mason. Όλο αυτό το σύστημα με βοηθάει να επικοινωνώ με το περιβάλλον μου καλύτερα από ό,τι την περίοδο πριν χάσω τη φωνή μου.

Έχω δεχτεί υποδείξεις για τη βελτίωση του βιβλίου από πάρα πολλούς ανθρώπους που το διάβασαν πριν πάρει την τελική του μορφή. Ειδικότερα, ο Peter Guzzardi, ο εκδότης μου της Bantam Books, μου έστειλε σελίδες επί σελίδων σχόλια και απορίες για σημεία που θεωρούσε ότι δεν εξηγούσα επαρκώς. Πρέπει να παραδεχτώ ότι μάλλον εξοργίστηκα όταν μου έστειλε έναν μεγάλο κατάλογο με σημεία που έπρεπε να αλλάξω στο βιβλίο· τώρα ομολογώ πως είχε απόλυτο δίκιο.

Εκφράζω τις πολλές ευχαριστίες μου στους βοηθούς μου Colin Williams, David Thomas και Raymond Laflamme. Επίσης στις γραμματείς μου Judy Fella, Ann Ralph, Cheryl Billington, Sue Masey και την ομάδα των νοσοκόμων μου.

Τίποτε απ' όλα αυτά δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την υποστήριξη στην έρευνα και τις ιατρικές δαπάνες από το κολλέγιο Conville και Gaius, το Science and Engineering Research Council, και τα ιδρύματα Leverhulme, McArthur, Nuffield και Ralph Smith. Τους ευχαριστώ βαθύτατα.

Stephen Hawking
20 Οκτωβρίου 1987

1

Η εικόνα του Ανθρώπου για το Σύμπαν

Η Αλίκη στη Χώρα των Θαυμάτων έδινε κάποτε μία διάλεξη για την αστρονομία. Έλεγε ότι η Γη είναι ένας σφαιρικός πλανήτης του ηλιακού συστήματος που κινείται γύρω από το κέντρο του, τον Ήλιο, και ότι ο Ήλιος είναι ένα άστρο που, με την σειρά του, κινείται γύρω από το κέντρο του αστρικού συστήματος, που ονομάζουμε Γαλαξία. Στο τέλος της διάλεξης, η Ντάμα την κοίταξε θυμωμένη με επιτιμητικό ύφος. «Αυτά που λες είναι ανοησίες. Η Γη δεν είναι παρά ένα Μεγάλο Τραπουλόχαρτο. Είναι λοιπόν επίπεδη σαν όλα τα Τραπουλόχαρτα.» της είπε, και στράφηκε περήφανα προς τα μέλη της συνοδείας της, που έδειχναν φανερά ικανοποιημένα από την εξήγηση της. Η Αλίκη χαμογέλασε υπεροπτικά. «Και σε τι στηρίζεται αυτό το Τραπουλόχαρτο;» ρώτησε με ειρωνεία. Η Ντάμα δεν έδειξε να αιφνιδιάζεται. «Είσαι έξυπνη, πολύ έξυπνη», απάντησε. «Μάθε λοιπόν μικρή μου πως αυτό το Τραπουλόχαρτο στηρίζεται σε ένα άλλο, και εκείνο το άλλο σε ένα άλλο άλλο και εκείνο το άλλο

άλλο σε ένα άλλο άλλο άλλο...». Σταμάτησε λαχανιασμένη. «Το Σύμπαν δεν είναι παρά μια Μεγάλη Τράπουλα», τσίριξε.

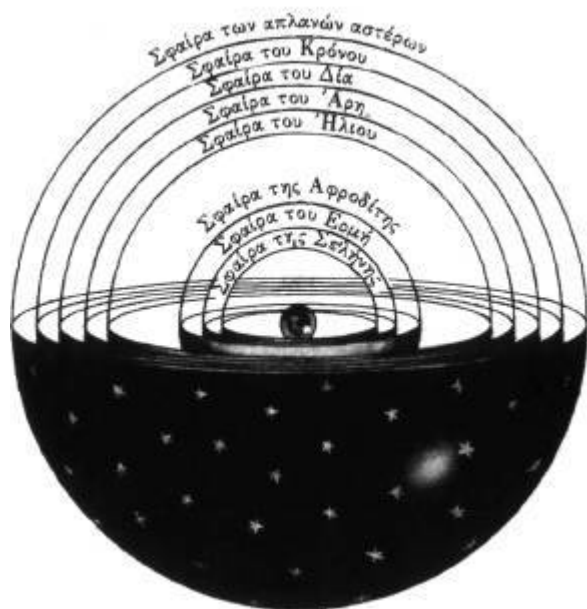
Φυσικά, οι περισσότεροι θα έβρισκαν γελοία αυτήν την εικόνα για το Σύμπαν και τη Γη που στηρίζεται σε μία άπειρη σειρά από τραπουλόχαρτα. Θα μπορούσαν όμως να εξηγήσουν το γιατί; Θα μπορούσαν να περιγράψουν τη δική τους εικόνα για το Σύμπαν και να αποδείξουν πως είναι η σωστή; Τι γνωρίζουν οι άνθρωποι για το Σύμπαν και πώς το γνωρίζουν; Από πού προέρχεται το Σύμπαν και πού πηγαίνει; Υπήρξε αρχή του Σύμπαντος και, αν ναι, τι υπήρξε πριν από αυτήν; Θα υπάρξει τέλος του Σύμπαντος και, αν ναι, τι θα υπάρξει μετά από αυτό; Τι γνωρίζουν οι άνθρωποι για το χρόνο; Υπήρξε αρχή του χρόνου; Θα υπάρξει τέλος του χρόνου;

Η σύγχρονη φυσική, με τη βοήθεια και των καταπληκτικών νέων τεχνολογιών, προτείνει απαντήσεις σε αυτά τα αιώνια ερωτήματα. Στο μέλλον αυτές οι απαντήσεις θα μας φαίνονται τόσο ευνόητες όσο μας φαίνεται σήμερα ότι η Γη είναι σφαιρική και κινείται γύρω από τον Ήλιο — ή τόσο ανόητες όσο ότι η Γη είναι επίπεδη και στηρίζεται σε μία άπειρη σειρά από τραπουλόχαρτα. Ευνόητες ή ανόητες; Μόνον ο χρόνος θα δείξει — ό,τι και αν είναι αυτό που ονομάζεται «χρόνος».

Ήδη από το 340 π.Χ., ο Αριστοτέλης, στο βιβλίο του *Περί Ουρανού*, ήταν σε θέση να υποστηρίξει με δύο επιχειρήματα την πεποίθηση του για μία Γη σφαιρική και όχι επίπεδη. Το πρώτο επιχείρημα βασιζόταν στην κατανόηση του φαινομένου των εκλείψεων της Σελήνης: ο Αριστοτέλης γνώριζε ότι προκαλούνται από την παρεμβολή της Γης ανάμεσα στη Σελήνη και τον Ήλιο. Η σκιά της Γης πάνω στη Σελήνη έχει πάντοτε κυκλικό σχήμα: η παρατήρηση αυτή οδήγησε τον Αριστοτέλη στο συμπέρασμα ότι η Γη είναι σφαιρική. (Αν η Γη ήταν επίπεδη με κυκλικά όρια, τις περισσότερες φορές η σκιά της πάνω στη Σελήνη θα ήταν ελλειψοειδής και όχι κυκλική). Το δεύτερο επιχείρημα

βασίζοταν στην παρατήρηση ότι ο Πολικός αστέρας φαίνεται χαμηλότερα στο στερέωμα όταν κάποιος βρίσκεται στις νοτιότερες περιοχές της Γης, και ψηλότερα όταν βρίσκεται στις βορειότερες. Από τη διαφορά των φαινομενικών θέσεων του Πολικού αστέρα στην Αίγυπτο και την Ελλάδα, οι αστρονόμοι της εποχής του Αριστοτέλη κατόρθωσαν να υπολογίσουν το μήκος της περιμέτρου της Γης με αρκετή ακρίβεια για την εποχή τους. Οι Έλληνες είχαν και ένα τρίτο επιχείρημα για το ότι η Γη πρέπει να είναι σφαιρική: για ποιον άλλο λόγο βλέπουμε πρώτα το κατάρτι του πλοίου που προβάλλει στον ορίζοντα, και ύστερα ολόκληρο το σκάφος;

Ο Αριστοτέλης φαντάστηκε πως η Γη είναι ακίνητη στο κέντρο του Σύμπαντος, και ο Ήλιος, η Σελήνη, οι πλανήτες και τα άστρα κινούνται γύρω της σε κυκλικές τροχιές. Υποστήριζε ότι, αφού όλα τα σώματα φαίνεται, καθώς πέφτουν, να έχουν την τάση να φτάσουν σε κάποιο σημείο, το κέντρο της Γης, αυτό πρέπει να είναι και το κέντρο του Σύμπαντος· για τα ουράνια σώματα, που φαίνονται διαφορετικά από τα άλλα γιατί δεν πέφτουν, πίστευε ότι ταιριάζουν οι κυκλικές τροχιές, επειδή είναι οι τελειότερες. Τον δεύτερο μ.Χ. αιώνα ο Πτολεμαίος επεξεργάστηκε αυτήν την εικόνα για το Σύμπαν και δημιούργησε ένα πλήρες αστρονομικό μοντέλο: Η Γη στέκει ακίνητη στο κέντρο και περιβάλλεται από οκτώ μεγάλες σφαίρες που μεταφέρουν τα ουράνια σώματα· πάνω σ' αυτές κινούνται η Σελήνη, ο Ήλιος και οι πέντε πλανήτες που ήταν τότε γνωστοί (Ερμής, Αφροδίτη, Άρης, Δίας, Κρόνος). Οι πλανήτες κινούνται επίσης σε μικρότερους κύκλους συνδεδεμένους με τις αντίστοιχες σφαίρες· έτσι είναι δυνατό να εξηγηθούν οι αρκετά πολύπλοκες τροχιές των πλανητών στον ουρανό. Η εξωτερική σφαίρα μεταφέρει τους ονομαζόμενους *απλανείς αστέρες*, δηλαδή όλα τα άστρα (πλην των πλανητών) που παραμένουν σταθερά στις ίδιες θέσεις το καθένα σχετικά με τα άλλα, αλλά κινούνται όλα μαζί στον



ΕΙΚΟΝΑ 1-1.

ουρανό γύρω από τον Πολικό αστέρα. Στην κοσμολογία του πτολεμαϊκού συστήματος ουδέποτε έγινε σαφής αναφορά σε ό,τι βρίσκεται πέρα από την εξωτερική σφαίρα των άστρων. Αυτό το μέρος του Σύμπαντος δεν φαινόταν να ανήκει στη σφαίρα των ανθρώπινων γνώσεων.

Το αστρονομικό μοντέλο του Πτολεμαίου αποτελούσε ένα αρκετά ακριβές σύστημα που έδινε τη δυνατότητα να προβλεφθούν οι θέσεις των ουράνιων σωμάτων στο στερέωμα. Για να επιτύχει όμως τη συμφωνία των προβλέψεων με τις αστρονομικές παρατηρήσεις της εποχής του, ο Πτολεμαίος αναγκάστηκε να υποθέσει ότι η Σελήνη έρχεται κάποτε στη μισή απόσταση από τη Γη απ' ό,τι συνήθως. Πρέπει, λοιπόν, κάποτε να φαίνε-

ται διπλάσια απ' ό,τι φαίνεται συνήθως! Παρά την ανωμαλία αυτή, που την είχε αναγνωρίσει και ο ίδιος ο Πτολεμαίος, το αστρονομικό μοντέλο του το αποδέχτηκαν οι περισσότεροι επιστήμονες στους αιώνες που ακολούθησαν. Το αποδέχθηκε και η χριστιανική εκκλησία, ως εικόνα του Σύμπαντος που συμφωνεί με τις γραπτές παραδόσεις της και έχει το μεγάλο πλεονέκτημα να αφήνει αρκετό χώρο για τον Παράδεισο και την Κόλαση, πέρα από την εξωτερική σφαίρα των άστρων.

Το 1515, ένας Πολωνός ιερέας, ο Νικόλαος Κοπέρνικος πρότεινε ένα απλούστερο μοντέλο. (Στην αρχή μάλιστα, ίσως από φόβο μήπως η εκκλησία τον κατηγορήσει σαν αιρετικό, ο Κοπέρνικος διέδιδε τις ιδέες του ανώνυμα). Το αστρονομικό μοντέλο του Κοπέρνικου βασιζόταν στις κοσμολογικές αντιλήψεις του Αρίσταρχου που, ήδη από τα μέσα του τρίτου π.Χ. αιώνα, υπέθεσε ότι ο *Ήλιος* είναι αυτός που στέκει ακίνητος στο κέντρο του Σύμπαντος, και ότι η Γη και οι πλανήτες κινούνται γύρω του. Πέρασε όμως ακόμη ένας αιώνας πριν ληφθεί σοβαρά υπόψη αυτό το μοντέλο. Τότε, δύο αστρονόμοι, ο Κέπλερ και ο Γαλιλαίος, άρχισαν να υποστηρίζουν δημόσια την κοπερνίκεια θεωρία, μολονότι οι τροχιές που προέβλεπε δεν συμφωνούσαν απόλυτα με τα δεδομένα των αστρονομικών μετρήσεων. Η χαριστική βολή στην αριστοτελική/πτολεμαϊκή θεωρία δόθηκε το 1609. Την χρονιά εκείνη ο Γαλιλαίος άρχισε να παρατηρεί τον ουρανό με το τηλεσκόπιο, που μόλις είχε εφευρεθεί. Όταν λοιπόν ο Γαλιλαίος έστρεψε το τηλεσκόπιο του προς το Δία είδε ότι αυτόν τον πλανήτη τον συνόδευαν αρκετοί μικροί δορυφόροι, που περιφέρονταν σε τροχιές γύρω του. Αυτό σήμαινε ότι τα ουράνια σώματα δεν περιστρέφονται μόνο γύρω από το κέντρο της Γης (όπως υποστήριζε ο Αριστοτέλης) ή γύρω από τα αόρατα κέντρα υποθετικών μικρών κύκλων, που και αυτοί περιστρέφονταν γύρω από το κέντρο της Γης (όπως υποστήριζε ο Πτολεμαίος). (Βέβαια, ήταν ακόμη δυνατό να πιστεύει κανείς πως οι δορυφό-

ροι του Δία κινούνται στην πραγματικότητα γύρω από το κέντρο της Γης αλλά σε τόσο εξαιρετικά πολύπλοκες τροχιές ώστε να δίνουν την εντύπωση ότι κινούνται γύρω από το κέντρο του Δία. Παρ' όλα αυτά, η κοπερνίκεια θεωρία ήταν πολύ πιο απλή). Την ίδια εποχή ο Κέπλερ τροποποίησε αυτό το μοντέλο, προτείνοντας ότι οι ακριβείς τροχιές των πλανητών είναι *ελλείψεις* και όχι κύκλοι. (Μια έλλειψη είναι ένας πεπλατυσμένος κύκλος). Τώρα πια, οι προβλέψεις συμφωνούσαν απόλυτα με τις παρατηρήσεις.

Για τον ίδιο τον Κέπλερ οι ελλειπτικές τροχιές ήταν μόνο μία αναγκαστική (και αρκετά ενοχλητική) υπόθεση, επειδή ήταν φανερό ότι είναι λιγότερο τέλειες από τις κυκλικές. Έχοντας ανακαλύψει σχεδόν συμπτωματικά ότι συμφωνούν με τις παρατηρήσεις, δεν μπορούσε να τις συσχετίσει με την υπόθεση της ύπαρξης κάποιων μαγνητικών δυνάμεων που, όπως φανταζόταν, ανάγκαζαν τους πλανήτες να κινηθούν γύρω από τον Ήλιο. Μία εξήγηση των ελλειπτικών τροχιών δόθηκε πολύ αργότερα, το 1687, όταν ο Νεύτων δημοσίευσε το βιβλίο του «Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας», ίσως το σημαντικότερο βιβλίο στην ιστορία των επιστημών. Σε αυτό ο Νεύτων δημιούργησε όχι μόνον μια θεωρία φυσικής για το πώς κινούνται τα σώματα στο χώρο και το χρόνο αλλά και τα πολύπλοκα μαθηματικά που χρειάζονταν για να αναλυθούν αυτές οι κινήσεις. Επί πλέον, υπέθεσε ένα νόμο *παγκόσμιας βαρυτικής έλξης*, σύμφωνα με τον οποίο κάθε σώμα στο Σύμπαν έλκει όλα τα υπόλοιπα με μία δύναμη που είναι τόσο πιο μεγάλη όσο πιο «βαριά» είναι τα σώματα και όσο πιο κοντά βρίσκονται μεταξύ τους. Αυτή ακριβώς η δύναμη κάνει τα σώματα να πέφτουν προς το κέντρο της Γης. (Η ιστορία ότι ο Νεύτων εμπνεύστηκε τη θεωρία του από ένα μήλο που έπεσε στο κεφάλι του, είναι μάλλον μύθος. Το μόνο που αναφέρει ο ίδιος είναι ότι συνέλαβε την ιδέα της βαρύτητας ως παγκόσμιας έλξης καθώς συλλογιζόταν κάποτε «με μια διάθεση ενατένισης» και «με αφορμή την πτώση ενός

μήλου»). Στη συνέχεια ο Νεύτων απέδειξε ότι, σύμφωνα με τον νόμο του, η βαρυτική έλξη μεταξύ των ουράνιων σωμάτων είναι η δύναμη που αναγκάζει τη Σελήνη σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τη Γη, και τη Γη και τους πλανήτες σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο.

Το κοπερνίκαιο αστρονομικό μοντέλο εγκατέλειψε τις ουράνιες σφαίρες του Πτολεμαίου, και μαζί με αυτές την ιδέα ότι το Σύμπαν έχει κάποιο φυσικό όριο. Αφού οι «απλανείς αστέρες», όπως ακριβώς και ο Ήλιος, δεν κινούνται (η φαινομενική κίνηση τους γύρω από τον Πολικό αστέρα προκαλείται από την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της), ήταν λογικό να υποθέσει κανείς ότι αυτά τα άστρα είναι αντικείμενα παρόμοια με τον Ήλιο, απλώς βρίσκονται πολύ πιο μακριά. Διαμορφώθηκε λοιπόν μία εικόνα για το Σύμπαν όπου ο Ήλιος και τα άλλα άστρα είναι στην πραγματικότητα ακίνητα μέσα στο Διάστημα.

Ο Νεύτων όμως καταλάβαινε ότι, σύμφωνα με τη θεωρία του για τη βαρύτητα, τα άστρα θα έλκονταν μεταξύ τους, οπότε και θα αναγκάζονταν να κινηθούν. Μήπως λοιπόν πέφτουν όλα μαζί προς κάποιο σημείο; Ο Νεύτων υποστήριξε ότι αυτό θα συνέβαινε αν υπήρχε ένα πεπερασμένο πλήθος άστρων διασκορπισμένων σε μία πεπερασμένη περιοχή του χώρου. Αν όμως υπήρχε ένα μη πεπερασμένο πλήθος άστρων κατανεμημένων ομοιόμορφα σε έναν απεριόριστο χώρο, επειδή ακριβώς δεν θα υπήρχε κανένα κεντρικό σημείο προς το οποίο να κινηθούν, τα άστρα θα παρέμεναν ακίνητα, σε ισορροπημένες σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους.

Ο συλλογισμός αυτός δείχνει τις παγίδες που κινδυνεύει να συναντήσει κανείς όταν μιλάει για το άπειρο. Σε ένα άπειρο Σύμπαν κάθε άστρο μπορεί να θεωρηθεί ως κεντρικό σημείο, αφού προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω του υπάρχει ένα άπειρο πλήθος άστρων. Η σωστή προσέγγιση στο πρόβλημα της κίνησης των άπειρων άστρων σε έναν άπειρο χώρο είναι λοιπόν δια-

φορετική. Όπως αποδείχτηκε πολύ αργότερα, πρέπει πρώτα να θεωρήσουμε την πεπερασμένη περιοχή, όπου όλα τα άστρα πέφτουν το ένα πάνω στο άλλο, και ύστερα να αναρωτηθούμε για το τι θα συμβεί αν προσθέσουμε και άλλα άστρα γύρω από αυτήν. Σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα, αν τα πρόσθετα άστρα κατανεμηθούν ομοιόμορφα, κάθε άστρο που βρίσκεται στο εσωτερικό της πεπερασμένης περιοχής θα συνεχίσει να κινείται όπως ακριβώς και πριν (αφού οι επιδράσεις των πρόσθετων άστρων πάνω του θα αλληλοεξουδετερώνονται). Τίποτε λοιπόν δεν θα αλλάξει· τα άστρα θα συνεχίσουν να πέφτουν το ένα πάνω στο άλλο. Όσα άστρα και αν προσθέσουμε, αυτή η κίνηση θα διατηρηθεί. Σήμερα γνωρίζουμε πως ένα κοσμολογικό μοντέλο δεν μπορεί να περιγράφει ένα άπειρο *στατικό* Σύμπαν, όπου η βαρύτητα είναι πάντοτε *ελκτική*.

Είναι ενδιαφέρον, αλλά και ενδεικτικό του γενικού κλίματος που επικρατούσε στη σκέψη των ανθρώπων πριν από τον 20ό αιώνα, το ότι κανένας δεν φαντάστηκε πως το Σύμπαν θα μπορούσε να διαστέλλεται ή να συστέλλεται. Ήταν γενικά παραδεκτό ότι το Σύμπαν ή υπήρχε αμετάβλητο από πάντα ή δημιουργήθηκε σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή στο παρελθόν, στην ίδια περίπου κατάσταση με τη σημερινή του. Σε αυτές τις κοσμολογικές αντιλήψεις κυριαρχούσε η τάση των ανθρώπων να αναζητούν αιώνιες αλήθειες, όπως επίσης και η ασφάλεια που βρίσκουν στη σκέψη ότι, αν και οι ίδιοι γερνούν και πεθαίνουν, το Σύμπαν είναι άφθαρτο και αιώνιο.

Βέβαια, μερικοί καταλάβαιναν ότι, σύμφωνα με τη νευτώνια θεωρία της βαρύτητας, το Σύμπαν δεν μπορεί να είναι στατικό· δεν σκέφτηκαν όμως ότι μπορεί να διαστέλλεται. Αντί γι' αυτό, επιχείρησαν να τροποποιήσουν την ίδια τη θεωρία, προτείνοντας ότι η βαρυτική δύναμη κάνει να απωθούνται και όχι να έλκονται όσα σώματα βρίσκονται σε πάρα πολύ μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Η υπόθεση αυτή δεν είχε σημαντική επίδραση στις

προβλέψεις των κινήσεων των πλανητών, αλλά αντιμετώπιζε το πρόβλημα της κίνησης των άστρων. Οι δυνάμεις άπωσης από τα άστρα που βρίσκονταν πιο μακριά εξισορροπούσαν τις δυνάμεις έλξης απ' όσα βρίσκονταν πιο κοντά: έτσι κάθε άστρο θα μπορούσε να παραμείνει σε σταθερή απόσταση από τα άλλα. Παρ' όλα αυτά, όπως γνωρίζουμε σήμερα, μία τέτοια ισορροπία θα ήταν ασταθής: αν σε κάποια περιοχή τα άστρα πλησίαζαν λίγο μεταξύ τους, οι δυνάμεις έλξης θα γίνονταν μεγαλύτερες από τις δυνάμεις άπωσης, οπότε τα άστρα θα άρχιζαν να συγκεντρώνονται προς κάποιο σημείο. Αν αντίθετα σε κάποια περιοχή τα άστρα απομακρύνονταν λίγο μεταξύ τους, οι δυνάμεις άπωσης θα γίνονταν μεγαλύτερες από τις δυνάμεις έλξης, οπότε τα άστρα θα διασκορπίζονταν ακόμη περισσότερο.

Μια άλλη αντίρρηση στην υπόθεση του άπειρου στατικού Σύμπαντος αποδίδεται συνήθως στον Γερμανό φιλόσοφο Heinrich Olbers, που έγραψε για το συγκεκριμένο θέμα το 1823. (Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα είχε ήδη επισημανθεί από κάποιους συγκαίρινους του Νεύτωνα: το άρθρο του Olbers δεν ήταν καν το πρώτο που περιείχε συναφή επιχειρηματολογία, ήταν όμως το πρώτο που προσέχτηκε τόσο πολύ). Το πρόβλημα συνίσταται στο εξής: Ας ονομάσουμε «γραμμή όρασης» μια ευθεία γραμμή που εκτείνεται από το σημείο όπου βρίσκεται ένας παρατηρητής προς κάποιο σημείο του οπτικού του πεδίου. Σε ένα άπειρο στατικό Σύμπαν, όλες οι γραμμές όρασης πρέπει να καταλήγουν στην επιφάνεια κάποιου άστρου, αφού τα άστρα είναι άπειρα και βρίσκονται σε κάθε σημείο του οπτικού πεδίου. Θα περίμενε λοιπόν κανείς ότι ολόκληρος ο ουρανός θα φαινόταν τόσο φωτεινός όσο και ο Ήλιος, ακόμη και τη νύχτα. Το αντεπίχειρημα του Olbers ήταν ότι το φως από τα πολύ μακρινά άστρα το απορροφά η ύλη που παρεμβάλλεται μεταξύ των άστρων αυτών και του παρατηρητή. Αν όμως συνέβαινε πράγματι κάτι τέτοιο, αυτή η ύλη σταδιακά θα θερμαινόταν, και κάποτε

θα άρχιζε και αυτή να φωτοβολεί σαν τα άστρα. Ο μόνος τρόπος για να αποφύγουμε το συμπέρασμα ότι ολόκληρος ο νυχτερινός ουρανός πρέπει να είναι λαμπρός σαν την επιφάνεια του Ήλιου, είναι να υποθέσουμε ότι τά άστρα δεν ήταν από πάντα φωτεινά, αλλά άρχισαν να λάμπουν μετά από κάποια, σχετικά πρόσφατη χρονική στιγμή του παρελθόντος. Στην περίπτωση αυτή, θα μπορούσε είτε η παρεμβαλλόμενη ύλη να μην έχει ακόμη θερμανθεί αρκετά (ώστε να φωτοβολεί σαν τα άστρα), είτε το φως από τα άστρα που βρίσκονται στις μακρινές περιοχές του Σύμπαντος να μην έχει φτάσει ακόμη στη Γη. Και αυτό ακριβώς μας οδηγεί στο ερώτημα: πότε άρχισαν να λάμπουν τα άστρα και γιατί;

Φυσικά, η αρχή του Σύμπαντος είχε συζητηθεί πολύ νωρίτερα. Σύμφωνα με κάποιες παλαιότερες κοσμολογικές παραδόσεις και την ιουδαϊκή/χριστιανική/μουσουλμανική παράδοση, το Σύμπαν άρχισε να υπάρχει μετά από κάποια όχι και πολύ μακρινή χρονική στιγμή του παρελθόντος. Ένα επιχείρημα για μία τέτοια αρχή βασίζεται στην αίσθηση ότι είναι αναγκαίο να έχουμε κάποια «Πρώτη Αιτία» για να εξηγήσουμε την ύπαρξη του Σύμπαντος. (Μέσα στο Σύμπαν εξηγούμε πάντοτε ένα γεγονός ως αποτέλεσμα κάποιου προηγούμενου που αποτελεί την αιτία του· όμως, η ύπαρξη ολόκληρου του Σύμπαντος θα μπορούσε να εξηγηθεί με ανάλογο τρόπο μόνο αν και το ίδιο είχε κάποια αρχή). Ένα άλλο επιχείρημα πρότείνει ο θεολόγος της χριστιανικής θρησκείας Αυγουστίνος, το 400 μ.Χ. Κατά τον Αυγουστίνο ο ρυθμός προόδου του πολιτισμού, κρίνοντας από την εκτέλεση σπουδαίων έργων ή την ανάπτυξη χρήσιμων τεχνικών, δείχνει ότι η αρχή της ύπαρξης του ανθρώπινου είδους πρέπει να προσδιοριστεί περίπου στο 5.000 π.Χ. Αυτή λοιπόν πρέπει να είναι και η ηλικία του Σύμπαντος που, σύμφωνα με τις γραπτές παραδόσεις της χριστιανικής θρησκείας, δημιουργήθηκε μαζί με το ανθρώπινο είδος. (Είναι ενδιαφέρον πάντως ότι αυτή η

εποχή — για την αρχή της ύπαρξης του ανθρώπινου είδους — δεν απέχει και πολύ από το τέλος της τελευταίας εποχής των παγετώνων, γύρω στο 10.000 π.Χ., που, όπως λένε οι αρχαιολόγοι, είναι πραγματικά η εποχή της αρχής του ανθρώπινου πολιτισμού).

Αντίθετα, ο Αριστοτέλης και οι περισσότεροι Έλληνες φιλόσοφοι δεν δέχονταν την ιδέα μιας Δημιουργίας που η εξήγηση της βασίζεται στην παρέμβαση ανεξήγητων θαυμάτων. Πίστευαν ότι και το ανθρώπινο είδος και ο Κόσμος γύρω του υπήρχαν από πάντα και θα υπάρχουν για πάντα. Οι αρχαίοι Έλληνες είχαν ήδη αντιμετωπίσει το επιχείρημα για την πρόοδο που αναφέρθηκε προηγουμένως, θεωρώντας ότι συμβαίνουν κατακλυσμοί ή άλλες καταστροφές που κάθε φορά ξαναφέρνουν το ανθρώπινο είδος πίσω στην αρχή του πολιτισμού.

Τα ερωτήματα για το αν το Σύμπαν είχε μία αρχή στο χρόνο και αν είναι περιορισμένο στο χώρο τα εξέτασε ο φιλόσοφος Immanuel Kant στο μνημειώδες (και πολύ σκοτεινό) έργο του *Κριτική του Καθαρού Λόγου*, που δημοσιεύτηκε το 1781. Ο Kant ονόμασε αυτά τα ερωτήματα αντινομίες (δηλαδή αντιφάσεις) της καθαρής λογικής ανάλυσης επειδή νόμιζε πως υπάρχουν εξίσου πειστικά επιχειρήματα για την αλήθεια και της θέσης (ότι δηλαδή το Σύμπαν είχε μία αρχή) και της αντίθεσης (ότι δηλαδή υπήρχε από πάντα). Το επιχείρημα του για τη θέση ήταν ότι αν το Σύμπαν δεν είχε μία αρχή, θα υπήρχε μία άπειρη περίοδος χρόνου πριν από οποιοδήποτε γεγονός, πράγμα που το θεώρησε παράλογο. Το επιχείρημα του για την αντίθεση ήταν ότι αν το Σύμπαν είχε μία αρχή, θα υπήρχε μία άπειρη περίοδος χρόνου πριν από αυτήν γιατί λοιπόν το Σύμπαν να αρχίσει να υπάρχει σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή και όχι σε κάποια άλλη; Στην πραγματικότητα, και οι δύο συλλογισμοί αναπτύσσονται με βάση την ίδια προϋπόθεση: ότι ο χρόνος συνεχίζεται για πάντα προς τα πίσω, είτε το Σύμπαν υπάρχει από πάντα

είτε όχι. Όπως θα δούμε όμως, η έννοια του χρόνου δεν έχει νόημα πριν από την αρχή του Σύμπαντος. Αυτό το διατύπωσε για πρώτη φορά ο Αυγουστίνος. Όταν τον ρωτούσαν «τι έκανε ο Θεός πριν δημιουργήσει το Σύμπαν», ο Αυγουστίνος (αντί να απαντά ότι σ' αυτό το διάστημα «ο Θεός προετοίμαζε την Κόλαση για όσους έκαναν τέτοιες ερωτήσεις»!) υποστήριξε πως ο χρόνος είναι μια ιδιότητα του Σύμπαντος· συνεπώς δεν υφίσταται χρόνος πριν από την αρχή του Σύμπαντος.

Πριν το 1929, όταν οι περισσότεροι πίστευαν σε ένα ουσιαστικά στατικό και αμετάβλητο Σύμπαν, το ερώτημα αν το Σύμπαν είχε μία αρχή ή όχι ανήκε στην πραγματικότητα στο χώρο της μεταφυσικής ή της θεολογίας. Τα παρατηρούμενα φαινόμενα εξηγούνταν εξίσου καλά ή με τη θεωρία ότι το Σύμπαν υπήρχε από πάντα ή με τη θεωρία ότι άρχισε να υπάρχει από κάποτε αλλά έτσι που να φαίνεται ότι υπήρχε από πάντα. Το 1929 όμως ο αστρονόμος Edwin Hubble έκανε τη μνημειώδη παρατήρηση ότι οι μακρινοί γαλαξίες κινούνται απομακρυνόμενοι γρήγορα από εμάς. Με άλλα λόγια, το Σύμπαν διαστέλλεται. Αυτό σημαίνει ότι στο παρελθόν τα αντικείμενα βρίσκονταν πιο κοντά μεταξύ τους απ' όσο σήμερα. Φαίνεται μάλιστα σαν να υπήρξε μια εποχή, πριν από δέκα με είκοσι δισεκατομμύρια χρόνια, που όλα τα αντικείμενα βρίσκονταν στην ίδια ακριβώς περιοχή και έτσι η πυκνότητα του Σύμπαντος ήταν άπειρη. Η ανακάλυψη αυτή έφερε επιτέλους το ερώτημα για την αρχή του Σύμπαντος από το χώρο της μεταφυσικής και της θεολογίας στο χώρο της επιστήμης.

Οι παρατηρήσεις του Hubble οδήγησαν στην υπόθεση ότι υπήρξε κάποια στιγμή, η στιγμή της λεγόμενης *Μεγάλης Έκρηξης*, που το Σύμπαν ήταν απείρως μικρό και απείρως πυκνό. Κάτω από τέτοιες συνθήκες θα κατέρρεαν όλοι οι φυσικοί νόμοι, οπότε δεν θα υπήρχε κανένας προσδιορισμός του μέλλοντος. Ό,τι συνέβη πριν — αν υπήρξε κάτι πριν — από εκείνη τη

στιγμή, δεν θα μπορούσε με κανέναν τρόπο να επηρεάσει ό,τι θα συνέβαινε μετά. Είναι συνεπώς δυνατό να αγνοήσουμε την ύπαρξη γεγονότων που προηγήθηκαν της Μεγάλης έκρηξης, αφού στη συνέχεια δεν θα είχαν κανένα παρατηρήσιμο αποτέλεσμα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι ο χρόνος είχε μία αρχή στη Μεγάλη έκρηξη, με την έννοια ότι ο προηγούμενος χρόνος δεν είναι δυνατό να οριστεί. Πρέπει όμως να τονισθεί ότι αυτή η αρχή του χρόνου διαφέρει πολύ από εκείνην που εξετάσαμε πρωτύτερα. Μέσα σε ένα αμετάβλητο Σύμπαν δεν υπάρχει καμία φυσική αναγκαιότητα που να επιβάλλει την ύπαρξη μιας αρχής του χρόνου· επίσης, δεν υπάρχει καμία φυσική αναγκαιότητα που να προσδιορίζει την συγκεκριμένη στιγμή μιας τέτοιας αρχής. Αν παρ' όλα αυτά σε ένα αμετάβλητο Σύμπαν υπήρξε μια αρχή του χρόνου, αυτήν θα έπρεπε να την είχε επιβάλει και προσδιορίσει κάποιο υπερφυσικό Ον έξω από αυτό. Θα μπορούσε λοιπόν τότε να φανταστεί κανείς έναν παντοδύναμο Θεό που δημιούργησε ένα τέτοιο Σύμπαν σε οποιαδήποτε στιγμή του παρελθόντος το θέλησε. Αντίθετα, στο διαστελλόμενο Σύμπαν υπάρχει κάποια φυσική αναγκαιότητα που επιβάλλει μία αρχή του χρόνου (η αρχική έκρηξη είναι αναγκαία φυσική αιτία για να προκληθεί η διαστολή) και που προσδιορίζει τη συγκεκριμένη στιγμή αυτής της αρχής (τη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης). Θα μπορούσε λοιπόν και τώρα να φανταστεί κανείς έναν Θεό που δημιούργησε το Σύμπαν τη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης ή και *μετά*, σε οποιαδήποτε στιγμή *μετά* τη Μεγάλη έκρηξη το θέλησε (αφού θα μπορούσε να δημιουργήσει το Σύμπαν απ' ευθείας σε μία μεταγενέστερη κατάσταση, έτσι που να φαίνεται σαν να υπήρξε στο παρελθόν του μία Μεγάλη έκρηξη). Αυτός όμως ο Θεός δεν θα μπορούσε να δημιουργήσει το Σύμπαν *πριν* τη Μεγάλη έκρηξη, ακόμη και αν το ήθελε! Βλέπουμε λοιπόν πως η διαστολή του Σύμπαντος δεν αποκλείει τη δυνατότητα ύπαρξης ενός Θεού, περιορίζει όμως την παντοδυναμία του!

Για να μιλήσει κανείς για τη φύση του Σύμπαντος και να εξετάσει ερωτήματα όπως το αν υπήρξε μία αρχή ή αν θα υπάρξει ένα τέλος, είναι απαραίτητο να διασαφηνίσει πρώτα τι είναι μία επιστημονική θεωρία. Θα εξετάσουμε την αρκετά απλή και διαδεδομένη άποψη ότι μία θεωρία είναι ακριβώς ένα μοντέλο για το Σύμπαν (ή για κάποιο τμήμα του Σύμπαντος), μαζί με ένα σύνολο κανόνων που συσχετίζουν τις θεωρητικές ποσότητες αυτού του μοντέλου με τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Κάθε θεωρία υπάρχει μέσα στο μυαλό μας και μόνο· δεν έχει καμία άλλη «πραγματική» ύπαρξη. Για να είναι καλή πρέπει να ικανοποιεί δύο απαιτήσεις: να περιγράφει με ακρίβεια ένα μεγάλο σύνολο παρατηρήσεων, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που να περιέχει λίγα αυθαίρετα στοιχεία· επίσης, να προτείνει συγκεκριμένες προβλέψεις για τα αποτελέσματα μελλοντικών παρατηρήσεων. Για παράδειγμα, η θεωρία του Αριστοτέλη ότι όλα τα πράγματα αποτελούνται από τέσσερα στοιχεία, τη γη, τον αέρα, τη φωτιά και το νερό, αν και απλή από την άποψη των αυθαίρετων στοιχείων που περιέχει, δεν προτείνει κάποιες συγκεκριμένες προβλέψεις. Η θεωρία του Νεύτωνα βασίζεται σε ένα απλούστερο μοντέλο: τα σώματα έλκονται με δύναμη ανάλογη μίας ποσότητας τους που ονομάζεται μάζα και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης. Αν και η εν λόγω θεωρία περιέχει λίγα μόνο αυθαίρετα στοιχεία, προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τις κινήσεις του Ήλιου, της Σελήνης και των πλανητών.

Κάθε φυσική θεωρία είναι πάντα μία υπόθεση προσωρινή, με την έννοια ότι δεν μπορούμε ποτέ να αποδείξουμε οριστικά πως είναι σωστή. Όσες φορές και αν συμφωνήσουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τις προβλέψεις της, ποτέ δεν μπορούμε να είμαστε απολύτως βέβαιοι ότι την επόμενη φορά το νέο αποτέλεσμα θα συνεχίσει να συμφωνεί μαζί της. Αντίθετα, για να αποδείξουμε ότι μια θεωρία δεν είναι σωστή αρκεί μία και μόνο φορά

ένα και μόνον αποτέλεσμα να μη συμφωνεί με τις προβλέψεις της. Όπως τόνισε ο φιλόσοφος της επιστήμης Karl Popper, μια καλή θεωρία χαρακτηρίζεται από το ότι προτείνει έναν αριθμό προβλέψεων που μπορεί κάποτε να μη συμφωνήσουν με τα αποτελέσματα των πειραμάτων δηλαδή, μία καλή θεωρία είναι μία θεωρία διαψεύσιμη. Κάθε φορά που γίνονται νέα πειράματα και βρίσκεται ότι συμφωνούν με τις προβλέψεις της, η θεωρία επιβιώνει και η εμπιστοσύνη μας σε αυτήν παραμένει· αν όμως κάποτε γίνει ένα νέο πείραμα που δεν συμφωνεί με τις προβλέψεις, είμαστε υποχρεωμένοι ή να εγκαταλείψουμε τη θεωρία ή να την τροποποιήσουμε ανάλογα. Έτσι τουλάχιστον υποτίθεται ότι συμβαίνει· γιατί βέβαια μπορεί κανείς να αμφισβητήσει την αξιοπιστία κάποιου πειράματος και να την αποδώσει σε αθέμιτο επιστημονικό ανταγωνισμό.

Στην πραγματικότητα, αυτό που συνήθως συμβαίνει είναι ότι δημιουργείται μια νέα θεωρία που περιέχει την προηγούμενη αλλά συμφωνεί και με τα αποτελέσματα των νέων πειραμάτων ή τα δεδομένα των νέων παρατηρήσεων. Ας πάρουμε για παράδειγμα τη θεωρία του Νεύτωνα για τη βαρύτητα. Κάποιες ακριβέστερες παρατηρήσεις του πλανήτη Ερμή αποκάλυψαν μια μικρή ασυμφωνία της κίνησης του με τις προβλέψεις της νευτώνειας θεωρίας. Η γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν προέβλεπε μία κίνηση λίγο διαφορετική από τη θεωρία του Νεύτωνα. Το γεγονός ότι οι προβλέψεις του Αϊνστάιν συμφωνούσαν με τις νέες παρατηρήσεις, ενώ του Νεύτωνα όχι, συνέβαλε αποφασιστικά στην επιβεβαίωση της νέας θεωρίας. Εντούτοις χρησιμοποιούμε ακόμη τη θεωρία του Νεύτωνα επειδή στις καταστάσεις που συνήθως αντιμετωπίζουμε, η διαφορά των προβλέψεων της από τις προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας είναι πολύ μικρή. (Η θεωρία του Νεύτωνα έχει επίσης το μεγάλο πλεονέκτημα ότι είναι πολύ πιο εύχρηστη από τη θεωρία του Αϊνστάιν!)

Ο τελικός αντικειμενικός σκοπός της φυσικής είναι μία θεωρία που να περιγράφει ολόκληρο το Σύμπαν. Οι περισσότεροι επιστήμονες διαχωρίζουν όμως σε δύο μέρη ό,τι εννοούμε με τον όρο «ολόκληρο το Σύμπαν». Κατά πρώτον, υπάρχουν οι φυσικοί νόμοι· αυτοί καθορίζουν πώς ακριβώς αλλάζει το Σύμπαν με την πάροδο του χρόνου. (Αν γνωρίζουμε πώς φαίνεται το Σύμπαν σε κάποια χρονική στιγμή, οι φυσικοί νόμοι περιγράφουν πώς θα φαίνεται σε κάποια επόμενη). Κατά δεύτερον, υπάρχει η αρχική κατάσταση του Σύμπαντος· αυτή καθορίζει πώς ακριβώς ήταν το Σύμπαν στην αρχή του χρόνου. Μερικοί νομίζουν πως η επιστήμη της φυσικής πρέπει να ασχολείται μόνο με το πρώτο μέρος. Θεωρούν ότι τα ερωτήματα για την αρχική κατάσταση του Σύμπαντος ανήκουν στο χώρο της μεταφυσικής ή της θεολογίας. Κάποιοι άλλοι φαντάζονται ένα Θεό που, επειδή είναι παντοδύναμος, θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα Σύμπαν σε οποιαδήποτε αρχική κατάσταση ήθελε. Αν είναι έτσι, τότε θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα Σύμπαν που να αναπτύσσεται με εντελώς τυχαίο τρόπο. Φαίνεται όμως ότι το Σύμπαν εξελίσσεται με πολύ κανονικό τρόπο, σύμφωνα με κάποιους νόμους. Είναι λοιπόν εξίσου λογικό να υποθέσουμε ότι υπάρχουν νόμοι που καθορίζουν την αρχική κατάσταση του Σύμπαντος, όπως ακριβώς υπάρχουν νόμοι που καθορίζουν την εξέλιξή του.

Εκ των πραγμάτων είναι πολύ δύσκολο να εφεύρουμε μία συνολική θεωρία που να περιγράφει κατευθείαν ολόκληρο το Σύμπαν. Αντί γι' αυτό χωρίζουμε το πρόβλημα σε τμήματα και επινοούμε έναν ανάλογο αριθμό επιμέρους θεωριών. Η καθεμία τους περιγράφει το αντίστοιχο τμήμα, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις ορισμένων μόνον φυσικών μεγεθών τις επιδράσεις των άλλων φυσικών μεγεθών ή τις προσεγγίζει μόνο αριθμητικά ή τις παραβλέπει εντελώς. Πιθανώς μία τέτοια προσέγγιση είναι εντελώς λανθασμένη. Αν καθετί μέσα στο Σύμπαν εξαρτάται από καθετί άλλο με έναν θεμελιώδη τρόπο, ίσως τελικά να είναι

αδύνατο να πλησιάσουμε σε συνολική λύση του προβλήματος, χωρίζοντας το σε τμήματα και εξετάζοντας μετά τα τμήματα αυτά. Όπως κι αν έχουν τα πράγματα, η επιστήμη της φυσικής προόδευσε και προοδεύει χρησιμοποιώντας αυτήν ακριβώς τη μέθοδο. Το κλασικό παράδειγμα είναι και πάλι η νευτώνεια θεωρία της βαρύτητας, που λέει ότι η βαρυτική έλξη εξαρτάται από ένα μόνο φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα αντικείμενα του Σύμπαντος, τη μάζα, και είναι ανεξάρτητη από τα άλλα. Έτσι είναι δυνατό να προβλέψουμε τις κινήσεις των πλανητών μέσα στο ηλιακό σύστημα λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση της μάζας τους στη βαρυτική έλξη που καθορίζει τις τροχιές τους.

Σήμερα οι επιστήμονες περιγράφουν το Σύμπαν με τα εννοιολογικά και μαθηματικά εργαλεία δύο βασικών επιμέρους θεωριών, που αποτελούν σπουδαία επιτεύγματα του πρώτου μισού του αιώνα μας: Η *γενική θεωρία της σχετικότητας* περιγράφει την επίδραση της βαρύτητας και τη μακροσκοπική δομή του Σύμπαντος, δηλαδή τη διαμόρφωση του μέσα σε μεγάλες περιοχές (μεγάλες σε σχέση με την ανθρώπινη κλίμακα: από περιοχές ακτίνας λίγων χιλιομέτρων μέχρι περιοχές ακτίνας δισεκατομμυρίων δισεκατομμυρίων χιλιομέτρων). Η *κβαντική μηχανική* περιγράφει τις επιδράσεις των υπόλοιπων φυσικών δυνάμεων και τη μικροσκοπική δομή του Σύμπαντος, δηλαδή τη διαμόρφωση του μέσα σε μικρές περιοχές (για παράδειγμα, περιοχές ακτίνας ενός δισεκατομμυριοστού του χιλιοστού). Δυστυχώς, είναι γνωστό πως οι δύο θεωρίες δεν συμφωνούν — δεν μπορεί λοιπόν να είναι και οι δύο σωστές. Μία από τις κύριες προσπάθειες στη φυσική σήμερα αποβλέπει στη δημιουργία μιας καινούργιας θεωρίας που θα συμπεριλάβει και τις δύο, μιας *κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας*. Προς το παρόν δεν έχουμε μία τέτοια θεωρία, ίσως μάλιστα βρισκόμαστε ακόμη πολύ μακριά από το να την αποκτήσουμε. (Η περιγραφή της πορείας για τη σύνθεση αυτής της ενιαίας θεωρίας απαρτίζει τον κεντρικό κορμό

αυτού του βιβλίου). Όπως όμως θα δούμε στη συνέχεια, έχουμε ήδη κάποιες σημαντικές γνώσεις για το περιεχόμενο των προβλέψεων που θα περιλαμβάνει μια μελλοντική κβαντική θεωρία βαρύτητας.

Εφ' όσον πιστεύουμε ότι το Σύμπαν δεν αναπτύσσεται τυχαία, αλλά εξελίσσεται σύμφωνα με κάποιους νόμους, είμαστε υποχρεωμένοι να προσπαθούμε να συνδυάσουμε τις επιμέρους θεωρίες σε μία πλήρη ενιαία θεωρία που θα καθορίζει τα πάντα μέσα σε αυτό. Υπάρχει όμως κάποιο θεμελιώδες παράδοξο στη διαδικασία αναζήτησης μιας τέτοιας πλήρους ενιαίας θεωρίας. Οι ιδέες για τις επιστημονικές θεωρίες που σκιαγραφήθηκαν προηγουμένως προϋποθέτουν ότι οι άνθρωποι είναι νοήμονα όντα, ελεύθερα να παρατηρούν το Σύμπαν και ικανά να εξάγουν σωστά συμπεράσματα από τις παρατηρήσεις τους. Υποθέτουμε λοιπόν ότι έχουμε τη δυνατότητα να αναζητήσουμε μία πλήρη ενιαία θεωρία και να προοδεύσουμε στη διαδικασία αυτής της αναζήτησης. Αν όμως υπάρχει πράγματι μια πλήρης ενιαία θεωρία, αφού αυτή θα καθορίζει τα πάντα μέσα στο Σύμπαν, θα καθορίζει επίσης και τις πράξεις μας. Κατά συνέπεια θα καθορίζει και τα αποτελέσματα της αναζήτησης μας γι' αυτήν! Και γιατί πρέπει να καθορίζει ότι θα εξάγουμε σωστά συμπεράσματα από τις παρατηρήσεις; Δεν θα μπορούσε εξίσου καλά να καθορίσει ότι θα εξάγουμε λανθασμένα συμπεράσματα;

Η μόνη απάντηση που μπορώ να δώσω στο συγκεκριμένο πρόβλημα βασίζεται στην αρχή της φυσικής επιλογής της θεωρίας του Δαρβίνου. Σε κάθε σύνολο ζωντανών όντων που αναπαράγονται και πολλαπλασιάζονται θα υπάρχουν διαφοροποιήσεις του γενετικού προγράμματος και των χαρακτηριστικών των ατόμων που το απαρτίζουν. Στην περίπτωση νοημόνων όντων, αυτό σημαίνει πως μερικά άτομα του συνόλου θα είναι περισσότερο ικανά από τα υπόλοιπα να εξάγουν τα σωστά συμπεράσματα για τον κόσμο που τα περιβάλλει, και να συμπεριφέρονται ανάλογα

με αυτά τα συμπεράσματα. Τα άτομα αυτά θα έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν και έτσι, σταδιακά, μέσα στο σύνολο θα κυριαρχήσει ο δικός τους τρόπος νόησης και συμπεριφοράς. Στο παρελθόν, η νοημοσύνη, η λογική συμπεριφορά και οι επιστημονικές ανακαλύψεις κατέληγαν πάντοτε να προσφέρουν κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα στον αγώνα για επιβίωση. Δεν είναι βέβαια τόσο προφανές ότι και σήμερα συμβαίνει κάτι ανάλογο: οι επιστημονικές ανακαλύψεις μας μπορούν να μας καταστρέψουν όλους· ακόμη όμως κι αν δεν συμβεί αυτό, μια πλήρης ενιαία θεωρία μπορεί να μην επηρεάσει και πολύ τις πιθανότητες επιβιώσής μας. Αφού όμως το Σύμπαν έχει εξελιχθεί με έναν κανονικό τρόπο μπορούμε να περιμένουμε ότι οι ικανότητες εξαγωγής των σωστών συμπερασμάτων (που τις κληρονομήσαμε μέσω της φυσικής επιλογής) θα εξακολουθήσουν να ισχύουν και κατά τη διαδικασία αναζήτησης μιας πλήρους ενιαίας θεωρίας και δεν θα μας οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Επειδή οι επιμέρους θεωρίες που ήδη διαθέτουμε είναι αρκετές για να κάνουμε ακριβείς προβλέψεις σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, φαίνεται ότι η αναζήτηση μιας πλήρους ενιαίας θεωρίας είναι δύσκολο να στηριχθεί σε λόγους πρακτικής ωφέλειας. (Είναι αξιοσημείωτο όμως ότι παρόμοια επιχειρήματα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν και στην εποχή πριν την ανακάλυψη της κβαντικής μηχανικής, που τελικά μας οδήγησε στην επανάσταση της μικροηλεκτρονικής!). Η ανακάλυψη μιας πλήρους ενιαίας θεωρίας μπορεί πράγματι να μη μας δώσει κάποιο πλεονέκτημα στον αγώνα για την επιβίωση μας. Μπορεί ακόμη να μη βελτιώσει τον τρόπο ζωής μας. Αλλά πάντοτε, από την αυγή του πολιτισμού, οι άνθρωποι δεν παρέμεναν απαθείς μέσα σε ένα περιβάλλον ανεξήγητων φαινομένων. Επιζητούσαν να κατανοήσουν την ουσιαστική τάξη του Κόσμου. Σήμερα εξακολουθούμε να θέλουμε να γνωρίσουμε το γιατί είμαστε εδώ και από πού

προερχόμαστε. Αυτή η βαθύτατη επιθυμία της γνώσης είναι λόγος αρκετός για να συνεχίσουμε την αναζήτηση μας. Και ο σκοπός μας δεν είναι άλλος από την πλήρη περιγραφή του Σύμπαντος που μέσα του ζούμε.

2

Χώρος και Χρόνος

Οι αντιλήψεις που έχουμε σήμερα για την κίνηση των σωμάτων άρχισαν να διαμορφώνονται την εποχή του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα. Πριν από αυτήν οι άνθρωποι πίστευαν στον Αριστοτέλη που υποστήριζε ότι η φυσική κατάσταση ενός σώματος είναι η ακινησία και όχι η κίνηση· η κίνηση είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης πάνω στο σώμα μίας δύναμης ή ώθησης· συνεπώς ένα βαρύ σώμα πρέπει να πέφτει πιο γρήγορα από ένα ελαφρύ, αφού η δύναμη που το ωθεί προς τη Γη είναι μεγαλύτερη. Κατά την αριστοτελική παράδοση θα ήταν δυνατό να ανακαλύψουμε, με την νόηση και μόνο, όλους τους νόμους που κυβερνούν το Σύμπαν έτσι δεν φαίνονταν απαραίτητες οι πειραματικές επαληθεύσεις. Κανείς λοιπόν δεν ενδιαφέρθηκε να εξακριβώσει αν πράγματι τα σώματα με διαφορετικά βάρη κινούνται κατά την πτώση τους με διαφορετικές ταχύτητες — ως την εποχή του Γαλιλαίου. Ο Γαλιλαίος έκανε τα πειράματα που διέψευσαν τελικά τη θεωρία του Αριστοτέλη. Λέγεται ότι έριξε σφαίρες

διαφορετικού βάρους από τον περίφημο κεκλιμένο πύργο της Πίζας και διαπίστωσε ότι έφτασαν ταυτόχρονα στο έδαφος. Η ιστορία αυτή είναι σχεδόν βέβαιο πως δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικά γεγονότα· ο Γαλιλαίος όμως έκανε ένα παρόμοιο και εξίσου αποφασιστικό πείραμα. Άφησε να κυλήσουν σφαίρες με διαφορετικό βάρος πάνω σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο. Επειδή στην περίπτωση αυτή οι ταχύτητες των σφαιρών είναι μικρότερες, η παρατήρηση της κίνησής τους είναι ευκολότερη. Οι μετρήσεις του Γαλιλαίου έδειχναν ότι η ταχύτητα κάθε σώματος αυξάνει με το ίδιο ρυθμό, ανεξάρτητα από το πόσο βάρος έχει. Για παράδειγμα, αν αφήσουμε μια σφαίρα να κυλήσει πάνω σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση 10% (δηλαδή σε κεκλιμένο επίπεδο όπου για κάθε εκατό μέτρα στο μήκος έχουμε διαφορά δέκα μέτρα στο ύψος), μετά από ένα δευτερόλεπτο θα κινείται με ταχύτητα ενός περίπου μέτρου το δευτερόλεπτο, μετά από δύο δευτερόλεπτα με ταχύτητα δύο μέτρων το δευτερόλεπτο, κ.ο.κ. (δηλαδή η ταχύτητά της θα αυξάνει με ρυθμό ένα μέτρο το δευτερόλεπτο) ανεξάρτητα από το πόσο βάρος έχει. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και αν αφήσουμε σφαίρες με διαφορετικό βάρος να πέσουν από κάποιο ύψος. Φυσικά μία μικρή μεταλλική σφαίρα θα πέφτει πιο γρήγορα από ένα κουβάρι μαλλί· αυτό όμως συμβαίνει γιατί η αντίσταση του αέρα είναι πολύ μεγάλη στο κουβάρι του μαλλιού και το επιβραδύνει. Αν χρησιμοποιήσουμε δύο σώματα που δεν συναντούν μεγάλη αντίσταση αέρα, όπως δύο διαφορετικά βαρίδια, θα διαπιστώσουμε ότι πέφτουν με τον ίδιο ρυθμό.

Οι μετρήσεις του Γαλιλαίου οδήγησαν στους νόμους της κίνησης του Νεύτωνα. Στα πειράματα με το κεκλιμένο επίπεδο, η αιτία που το σώμα αυξάνει την ταχύτητα του είναι το βάρος του. Αυτό δείχνει πως όταν μια δύναμη, όπως το βάρος, δρα πάνω σε ένα σώμα τείνει να αλλάξει την κίνηση του, και όχι μόνο να την προκαλέσει ή να την διατηρήσει, όπως υποστήριζε η θεωρία του Αριστοτέλη. Όταν δεν ασκείται πάνω στο σώμα

κάποια δύναμη ή ώθηση, η κινητική του κατάσταση παραμένει η ίδια (δηλαδή η ταχύτητα του σώματος διατηρείται σταθερή). Την ιδέα αυτή την πρωτοδιατύπωσε το 1687 ο Νεύτων, στις «*Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας*» και είναι γνωστή ως ο πρώτος νόμος του: αν πάνω σε ένα σώμα δεν ασκείται κάποια δύναμη, τότε θα συνεχίσει να κινείται σε ευθεία γραμμή και με την ίδια ταχύτητα. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα περιγράφει αυτό που συμβαίνει όταν πάνω σε ένα σώμα ασκείται μια δύναμη: τότε το σώμα επιταχύνεται (δηλαδή αλλάζει η ταχύτητα του) με ρυθμό ανάλογο της δύναμης αυτής. (Για παράδειγμα, η επιτάχυνση είναι διπλάσια όταν και η δύναμη είναι διπλάσια). Η επιτάχυνση ενός σώματος εξαρτάται επίσης από την ποσότητα ύλης που περιέχει, δηλαδή τη μάζα του: είναι τόσο πιο μικρή όσο πιο μεγάλη είναι η μάζα. (Όταν η ίδια δύναμη δρα πάνω σε ένα σώμα με διπλάσια μάζα, θα το επιταχύνει με μισή επιτάχυνση). Ένα συνηθισμένο παράδειγμα είναι το αυτοκίνητο: όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη της μηχανής του τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιτάχυνση του. Όσο βαρύτερο είναι όμως ένα αυτοκίνητο τόσο μικρότερη είναι η επιτάχυνση του σχετικά με ένα άλλο με ίδια δύναμη μηχανής αλλά ελαφρύτερο.

Εκτός από αυτούς τους δύο νόμους της κίνησης για την ταχύτητα και την επιτάχυνση ο Νεύτων διατύπωσε και το νόμο της βαρύτητας. Σύμφωνα με αυτόν όλα τα σώματα έλκονται μεταξύ τους: η δύναμη της βαρύτητας μεταξύ δύο σωμάτων, ας πούμε του σώματος Α και του σώματος Β, είναι ανάλογη με τη μάζα του Α και επίσης ανάλογη με τη μάζα του Β. Αν δηλαδή η μάζα του Α γίνει διπλάσια, τότε και η δύναμη της βαρύτητας μεταξύ τους θα γίνει διπλάσια. Αυτό ίσως φαίνεται φυσικό, γιατί μπορεί κανείς να φανταστεί το καινούργιο σώμα (με τη διπλάσια μάζα) σαν την ένωση δύο σωμάτων (με την αρχική μάζα). Το καθένα θα έλκει το Β με την αρχική δύναμη· έτσι η συνολική δύναμη μεταξύ του Α (με τη διπλάσια μάζα) και του Β θα είναι διπλάσια. Για

παράδειγμα, αν η μάζα του ενός σώματος διπλασιαστεί και του άλλου τριπλασιαστεί, τότε η ελκτική δύναμη μεταξύ τους θα εξαπλασιαστεί. Μπορεί λοιπόν κανείς να καταλάβει γιατί όλα τα σώματα πέφτουν με τον ίδιο ρυθμό: ένα σώμα με διπλάσιο βάρος θα έλκεται από τη Γη με διπλάσια δύναμη αλλά θα έχει και τη διπλάσια μάζα. Αυτές οι δυο επιδράσεις θα αλληλοεξουδετερωθούν, οπότε (σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα) η επιτάχυνση του θα παραμείνει η ίδια.

Ο νόμος του Νεύτωνα για τη βαρύτητα μας λέει επίσης ότι όσο περισσότερο απέχουν τα σώματα τόσο μικρότερη είναι η δύναμη της βαρύτητας. Αν η απόσταση του Α από το Β (ή του Β από το Α) διπλασιαστεί, η δύναμη της βαρύτητας μεταξύ τους θα γίνει τέσσερις φορές μικρότερη. Αν η απόσταση τους τριπλασιαστεί, η δύναμη θα γίνει εννιά φορές μικρότερη, κ.ο.κ. Ο νόμος του Νεύτωνα για τη βαρύτητα προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τις τροχιές της Γης, της Σελήνης και των πλανητών στο ηλιακό σύστημα. Αν η βαρυτική έλξη των σωμάτων αυξανόταν με μεγαλύτερο ρυθμό όσο πιο μικρή γινόταν η απόσταση, οι τροχιές των πλανητών δεν θα ήταν ελλειπτικές αλλά σπειροειδείς προς τον Ήλιο· αν μειωνόταν με μεγαλύτερο ρυθμό όσο πιο μεγάλη γινόταν η απόσταση, οι δυνάμεις της βαρύτητας από τα άλλα άστρα θα κυριαρχούσαν και οι πλανήτες θα διέφευγαν από το ηλιακό σύστημα.

Η διαφορά των ιδεών του Αριστοτέλη από τις ιδέες του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα, είναι μεγάλη. Ο Αριστοτέλης πίστευε σε μία ιδανική απόλυτη κατάσταση ηρεμίας όπου θα βρίσκονταν όλα τα σώματα αν δεν επιδρούσαν πάνω τους κάποιες δυνάμεις ή ωθήσεις. Από τους νόμους του Νεύτωνα όμως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν υπάρχει απόλυτο κριτήριο για το αν ένα σώμα βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ή όχι. Ας πάρουμε για παράδειγμα δύο σώματα, το Α και το Β, που απομακρύνονται το ένα από το άλλο με σταθερή ταχύτητα. Μπορούμε να

πούμε ότι το Α είναι σε κατάσταση ηρεμίας και το Β κινείται σε σχέση με το Α, αλλά μπορούμε επίσης να πούμε ότι το Β είναι σε κατάσταση ηρεμίας και το Α κινείται σε σχέση με το Β. Αν λοιπόν αγνοήσουμε προς στιγμήν την κίνηση της Γης γύρω από τον εαυτό της και τον Ήλιο, μπορούμε να πούμε ότι η Γη βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ενώ ένα τρένο πάνω της κινείται προς τον Βορρά με εκατό χιλιόμετρα την ώρα, ή ότι το τρένο βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ενώ η Γη ολόκληρη κινείται προς το Νότο με εκατό χιλιόμετρα την ώρα. Αν κάνουμε πειράματα με κινούμενα σώματα πάνω σε αυτό το τρένο, οι νόμοι του Νεύτωνα θα εξακολουθούν να ισχύουν. Για παράδειγμα, παίζοντας πινγκ - πονγκ σ' ένα τραπέζι που βρίσκεται πάνω στο τρένο θα διαπιστώσουμε ότι το μπαλάκι ακολουθεί τους νόμους του Νεύτωνα, ακριβώς όπως και ένα μπαλάκι σε ένα τραπέζι που βρίσκεται πάνω στο έδαφος. Δεν υπάρχει κανένας τρόπος να πούμε αν κινείται το τρένο ή η Γη.

Η έλλειψη απόλυτου κριτηρίου της κατάστασης ηρεμίας σημαίνει ότι δεν μπορεί κανείς να προσδιορίσει αν δύο γεγονότα που συνέβησαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, συνέβησαν στο ίδιο σημείο του χώρου ή όχι. Ας επιστρέψουμε στο παράδειγμα του τρένου που κινείται με εκατό χιλιόμετρα την ώρα και ας υποθέσουμε ότι αφήνουμε το μπαλάκι του πινγκ - πονγκ να πέσει από το τραπέζι πάνω στο δάπεδο. Αν αναπηδήσει χτυπώντας στο ίδιο σημείο δυο φορές μέσα σε ένα δευτερόλεπτο, για κάποιον που δεν βρίσκεται πάνω στο τρένο το σημείο όπου χτύπησε την πρώτη φορά με το σημείο όπου χτύπησε τη δεύτερη είναι διαφορετικά, και μάλιστα απέχουν μεταξύ τους περίπου 28 μέτρα (γιατί τόσο θα είναι η απόσταση που θα έχει διανύσει το τρένο σε ένα δευτερόλεπτο). Βλέπουμε λοιπόν ότι η ανυπαρξία απόλυτης κατάστασης ηρεμίας σημαίνει ότι δεν μπορούμε να προσδώσουμε σε ένα γεγονός μια απόλυτη θέση στο χώρο, όπως πίστευε ο Αριστοτέλης. Οι θέσεις των γεγονότων και οι μεταξύ

τους αποστάσεις θα είναι διαφορετικές για έναν παρατηρητή πάνω στο τρένο και για έναν πάνω στο έδαφος, και δεν θα υπάρχει κανένας λόγος να προτιμήσουμε τις θέσεις και τις αποστάσεις που αντιλαμβάνεται ο ένας από αυτές που αντιλαμβάνεται ο άλλος.

Ο Νεύτων ανησυχούσε πολύ από την ανυπαρξία απόλυτης θέσης στο χώρο, ή, όπως αποκλήθηκε, την ανυπαρξία του *απόλυτου χώρου*. Πίστευε ότι η ανυπαρξία ενός απόλυτου χώρου δεν συμφωνούσε με την ιδέα ενός απόλυτου Θεού. Αποδέχτηκε λοιπόν τον απόλυτο χώρο, αν και αυτό φαινόταν ότι έρχεται σε αντίθεση με τους νόμους της κίνησης που διατύπωσε ο ίδιος. Πολλοί επιστήμονες άσκησαν κριτική στον Νεύτωνα για τη στάση του αυτή· ιδιαίτερα οξεία ήταν η κριτική του Berkley, ενός φιλοσόφου που θεωρούσε ότι όλα τα υλικά αντικείμενα στο χώρο και το χρόνο είναι μια ψευδαίσθηση.

Ο Νεύτων, όπως και ο Αριστοτέλης, πίστευε και στον απόλυτο χρόνο. Πίστευε δηλαδή ότι μπορεί κανείς να είναι βέβαιος, χωρίς καμιάν αμφιβολία, για το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο γεγονότων, αρκεί να χρησιμοποιήσει για τις μετρήσεις του ένα ακριβές ρολόι. Ο χρόνος ήταν κάτι εντελώς διαφορετικό και ανεξάρτητο από το χώρο. Ακόμη και σήμερα αυτή είναι η άποψη της κοινής λογικής των περισσότερων. Είμαστε όμως υποχρεωμένοι να αλλάξουμε τις αντιλήψεις μας για το χώρο και το χρόνο. Οι φαινομενικά εύλογες απόψεις της κοινής λογικής λειτουργούσαν και λειτουργούν ακόμη πολύ καλά όταν έχουμε να κάνουμε με αντικείμενα όπως τα μήλα που πέφτουν στην Γη ή τους πλανήτες που κινούνται στο ηλιακό σύστημα. Είναι όμως εντελώς άχρηστες και λανθασμένες όταν τα αντικείμενα που αντιμετωπίζουμε κινούνται με ταχύτητες που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός.

Το 1676 ο Δανός αστρονόμος Ole Roemer ανακάλυψε ότι το φως διαδίδεται με πεπερασμένη αλλά πολύ μεγάλη ταχύτητα. 0

Roemer μέτρησε τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών διελεύσεων των δορυφόρων του Δία πίσω από τον πλανήτη αυτόν (οι εν λόγω διελεύσεις ονομάζονται εκλείψεις των δορυφόρων). Παρατήρησε λοιπόν ότι δεν είναι ακριβώς ίσα, όπως θα περίμενε κανείς από ένα ανάλογο περιοδικό φαινόμενο. Καθώς η Γη και ο Δίας κινούνται γύρω από τον Ήλιο, η μεταξύ τους απόσταση μεταβάλλεται. Ο Roemer παρατήρησε ότι τα διαστήματα αυτά είναι μεγαλύτερα όσο μακρύτερα βρίσκεται η Γη από τον Δία. Υποστήριξε λοιπόν ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι το φως καθυστερεί περισσότερο να φτάσει από τον Δία στη Γη όσο μεγαλύτερη είναι η μεταξύ τους απόσταση. Από τις μετρήσεις των διαφορών στην απόσταση του Δία από τη Γη, και των διαφορών στα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών εκλείψεων, ο Roemer υπολόγισε με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα του φωτός. Το κατόρθωμα του — που όχι μόνον απέδειξε ότι το φως διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα αλλά και τη μέτρησε — ήταν πολύ σημαντικό, αν μάλιστα σκεφτούμε ότι συντελέστηκε δέκα χρόνια πριν τη δημοσίευση των *Μαθηματικών Αρχών* του Νεύτωνα.

Χρειάστηκε να περάσουν δύο σχεδόν αιώνες ακόμη για να φτάσουμε στη διατύπωση μιας θεωρίας για τη φύση και τη διάδοση του φωτός. Το 1865 ο Βρετανός φυσικός James Clerk Maxwell κατάφερε να ενοποιήσει τις επιμέρους θεωρίες που χρησιμοποιούν ως τότε στην περιγραφή των δυνάμεων του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού. Οι εξισώσεις της θεωρίας του Maxwell προέβλεπαν την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών περιοδικών διαταραχών στο χώρο, των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προέβλεπαν επίσης ότι αυτές οι περιοδικές διαταραχές, αυτά τα κύματα, κινούνται με σταθερή ταχύτητα μέσα στο χώρο. Αν το μήκος κύματος αυτών των κυμάτων (δηλαδή η απόσταση των κορυφών δύο γειτονικών κυμάτων) είναι ένα μέτρο ή και περισσότερο, τότε έχουμε τα ραδιοφωνικά κύματα ή ραδιοκύματα. Μικρότερα μήκη κύματος

χαρακτηρίζουν τα μικροκύματα (μερικά εκατοστόμετρα) και τις υπέρυθρες ακτίνες (ένα δεκάκις χιλιοστό του εκατοστομέτρου). Το ορατό φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος από σαράντα ως ογδόντα εκατομμυριοστά του εκατοστομέτρου. Ακόμη πιο μικρά μήκη κύματος χαρακτηρίζουν τις υπεριώδεις ακτίνες, τις ακτίνες Χ και τις ακτίνες γ.

Η θεωρία του Maxwell προέβλεπε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα πρέπει να κινούνται με σταθερή ταχύτητα. Αλλά η θεωρία του Νεύτωνα απέρριψε την άποψη ότι υπάρχει μια απόλυτη κατάσταση ηρεμίας· έτσι, αν θεωρήσουμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κινούνται με σταθερή ταχύτητα, πρέπει να αναζητήσουμε κάποιο σώμα σε σχέση με το οποίο θα μετράμε αυτή την ταχύτητα. Η προσπάθεια λοιπόν να επιτευχθεί συμφωνία ανάμεσα στις δύο θεωρίες οδήγησε στην υπόθεση ότι υπήρχε μια ουσία — ο «αιθέρας» — που ήταν παντού παρούσα, ακόμη και στον κενό χώρο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα θα κινούνταν μέσα στον αιθέρα όπως τα ηχητικά κύματα κινούνται μέσα στον αέρα· η ταχύτητα τους λοιπόν θα ήταν σταθερή σε σχέση με τον αιθέρα. Οι παρατηρητές που θα κινούνταν με διαφορετικές ταχύτητες μέσα στον αιθέρα θα έβρισκαν ότι και το φως θα κινούνταν με διαφορετικές ταχύτητες· αλλά σε σχέση με τον αιθέρα το φως θα διατηρούσε πάντα την ίδια σταθερή ταχύτητα. Στην περίπτωση της Γης που θα έπρεπε να κινείται και αυτή μέσα στον αιθέρα κατά την κίνηση της γύρω από τον Ήλιο, η ταχύτητα του φωτός πάνω σε μία ευθεία παράλληλη προς τη διεύθυνση της κίνησης της (όταν κινούμαστε προς τη φωτεινή πηγή) θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός πάνω σε μία ευθεία κάθετη προς αυτή τη διεύθυνση (όταν δεν κινούμαστε προς τη φωτεινή πηγή). Το 1887 οι Albert Michelson και Edward Morley κατόρθωσαν να κάνουν αυτό το πείραμα: συνέκριναν την ταχύτητα του φωτός κατά τη διεύθυνση της κίνησης της Γης με την ταχύτητα του κατά την κάθετη διεύθυνση. Προς μεγά-

λη τους έκπληξη, βρήκαν ότι ήταν ακριβώς οι ίδιες! Από το 1887 ως το 1905 καταβλήθηκαν προσπάθειες να εξηγηθεί το αποτέλεσμα του πειράματος των Michelson και Morley με διάφορες υποθέσεις, όπως ότι η κίνηση μέσα στον αιθέρα επηρέαζε τις συσκευές μέτρησης αποστάσεων, κάνοντας τες να συστέλλονται, ή τις συσκευές μέτρησης χρονικών διαστημάτων, κάνοντας τες να επιβραδύνονται. Αλλά το 1905, σε ένα διάσημο άρθρο, ένας άγνωστος ως τότε υπάλληλος ενός γραφείου ευρεσιτεχνιών, ο Αλβέρτος Αϊνστάιν, έδειξε ότι η ιδέα του αιθέρα είναι άχρηστη αρκεί να θέλει κανείς να εγκαταλείψει την ιδέα του απόλυτου χρόνου. Ανάλογη θέση υποστήριξε την ίδια εποχή ο κορυφαίος μαθηματικός Poincare. Όμως τα επιχειρήματα του Αϊνστάιν βασίζονταν περισσότερο στην φυσική απ' ό,τι τα επιχειρήματα του Poincare, ο οποίος αντιμετώπισε το πρόβλημα κυρίως ως πρόβλημα μαθηματικών.

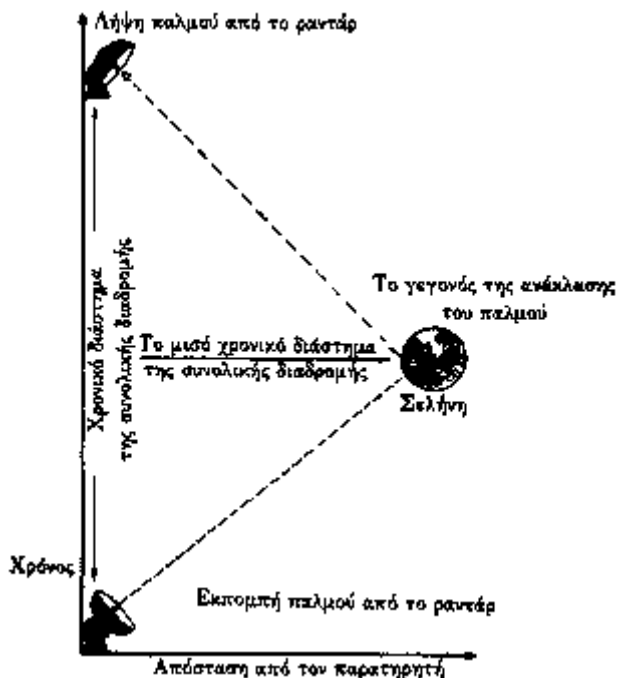
Η θεμελιώδης υπόθεση της *θεωρίας της σχετικότητας*, όπως ονόμασαν τη νέα θεωρία ο Αϊνστάιν και ο Poincare, ήταν ότι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να παραμένουν οι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές που κινούνται με οποιαδήποτε σταθερή ταχύτητα σε σχέση με τους άλλους. Όπως είδαμε, αυτή η ιδέα ίσχυε στην θεωρία του Νεύτωνα, τώρα όμως η ισχύς της επεκτάθηκε και στη θεωρία του Maxwell: όλοι οι παρατηρητές πρέπει να βρίσκουν ότι το φως κινείται σε σχέση με αυτούς με την ίδια σταθερή ταχύτητα, ανεξάρτητα με ποιά ταχύτητα κινούνται οι ίδιοι σε σχέση με τους άλλους. Αυτή η απλή ιδέα έχει μερικές σημαντικές συνέπειες. Ίσως η γνωστότερη είναι η ισοδυναμία ενέργειας και μάζας που εκφράζεται στη περίφημη εξίσωση του Αϊνστάιν $E = mc^2$ (όπου E η ενέργεια, m η μάζα και c η ταχύτητα του φωτός). Από αυτή την ισοδυναμία προκύπτει ότι η ενέργεια που αποκτά ένα αντικείμενο λόγω της κίνησης του προστίθεται στην αρχική του μάζα και τη μεγαλώνει· έτσι γίνεται δυσκολότερο να αυξηθεί και άλλο η ταχύτητα του. Το φαινόμενο γίνεται ιδιαίτε-

ρα σημαντικό μόνο για όσα αντικείμενα κινούνται με ταχύτητες που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Για παράδειγμα, σε ταχύτητα ίση με το 10% της ταχύτητας του φωτός η μάζα ενός αντικειμένου θα γίνει 0,5% μεγαλύτερη από την κανονική, αλλά σε 90% της ταχύτητας του φωτός θα γίνει περίπου διπλάσια της κανονικής. Όσο περισσότερο ένα αντικείμενο προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός τόσο ταχύτερα μεγαλώνει η μάζα του· έτσι χρειάζεται όλο και περισσότερη ενέργεια για να αυξηθεί και άλλο η ταχύτητά του. Στην πραγματικότητα, ένα αντικείμενο δεν θα μπορούσε ποτέ να φτάσει την ίδια την ταχύτητα του φωτός, γιατί τότε η μάζα του θα γινόταν άπειρη. Αλλά από την ισοδυναμία ενέργειας και μάζας βλέπουμε ότι για την κίνηση αυτής της άπειρης μάζας θα είχε καταναλωθεί άπειρο ποσό ενέργειας. Για τον λόγο αυτό όλα τα αντικείμενα είναι περιορισμένα, από τη θεωρία της σχετικότητας, σε ταχύτητες μικρότερες της ταχύτητας του φωτός. Μόνον το φως και τα άλλα κύματα που δεν έχουν αρχική μάζα μπορούν να κινηθούν με αυτήν την ταχύτητα.

Μία άλλη σημαντική συνέπεια της σχετικότητας είναι η επαναστατική αλλαγή που προκάλεσε στις ιδέες μας για το χώρο και το χρόνο. Ας εξετάσουμε το τι θα συμβεί αν σταλεί ένας παλμός φωτός από ένα σημείο σε κάποιο άλλο και μετρηθεί από διάφορους παρατηρητές η διάρκεια και το μήκος της διαδρομής. Κατά τη θεωρία του Νεύτωνα, όλοι οι παρατηρητές θα συμφωνήσουν για τη διάρκεια της διαδρομής (αφού ο χρόνος είναι απόλυτος), όχι όμως και για το μήκος της διαδρομής (αφού ο χώρος δεν είναι απόλυτος). Η ταχύτητα του παλμού του φωτός ισούται με το μήκος της διαδρομής διαιρεμένο με τη διάρκεια της διαδρομής. Άρα, οι διάφοροι παρατηρητές θα μετρήσουν διαφορετικές ταχύτητες για το φως. Αντίθετα, κατά τη θεωρία της σχετικότητας όλοι οι παρατηρητές πρέπει να συμφωνούν για την ταχύτητα του παλμού φωτός (αφού γνωρίζουν ότι το φως κινείται με

την ίδια σταθερή ταχύτητα). Αλλά αφού θα εξακολουθούν να μη συμφωνούν για το μήκος της διαδρομής, πρέπει τώρα να μη συμφωνούν και για τη διάρκεια της διαδρομής. (Η διάρκεια της διαδρομής ισούται με το μήκος της διαδρομής —όπου δεν θα συμφωνούν όλοι οι παρατηρητές — διαιρεμένο με την ταχύτητα του φωτός — όπου θα συμφωνούν όλοι οι παρατηρητές. Άρα η διάρκεια της διαδρομής δεν θα είναι ίδια για όλους τους παρατηρητές). Με άλλα λόγια, η θεωρία της σχετικότητας *απέρριψε την ιδέα του απόλυτου χρόνου!* Φαίνεται ότι ο κάθε παρατηρητής πρέπει να μεταφέρει το δικό του ρολόι που θα δείχνει τον δικό του χρόνο, και ότι τα ίδια ρολόγια όταν μεταφέρονται από διαφορετικούς παρατηρητές θα δείχνουν διαφορετικούς χρόνους.

Ο κάθε παρατηρητής μπορεί να μάθει πού και πότε συνέβη ένα γεγονός χρησιμοποιώντας ένα ραντάρ. Το ραντάρ είναι μία συσκευή που στέλνει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς και ύστερα συλλαμβάνει ένα μέρος από τους παλμούς που ανακλώνται πάνω στα αντικείμενα. Ο παρατηρητής μπορεί να σημειώσει τη χρονική στιγμή της εκπομπής και τη χρονική στιγμή της λήψης. Ο χρόνος ενός γεγονότος είναι η στιγμή στη μέση του χρονικού διαστήματος μεταξύ της εκπομπής και της λήψης. Ο χώρος ενός γεγονότος (δηλαδή η απόσταση του από τον παρατηρητή) είναι το μισό του χρονικού διαστήματος μεταξύ της εκπομπής και της λήψης πολλαπλασιασμένο επί την ταχύτητα του φωτός. Ένα γεγονός λοιπόν που προσδιορίζεται με αυτόν τον τρόπο είναι κάτι που συμβαίνει σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου και σε συγκεκριμένη στιγμή του χρόνου. Στην εικόνα 2-1 παριστάνονται μαζί η εκπομπή, η ανάκλαση και η λήψη των παλμών του ραντάρ, με τη βοήθεια ενός «χωροχρονικού διαγράμματος». Με τη διαδικασία που περιγράψαμε, οι μετρήσεις των διαφόρων παρατηρητών, οι οποίοι κινούνται ο ένας σε σχέση με τον άλλον, δίνουν για το ίδιο γεγονός διαφορετικά αποτελέσματα, αν και



ΕΙΚΟΝΑ 2-1. Ο χρόνος μετρίεται στον κατακόρυφο άξονα και η απόσταση από τον παρατηρητή στον οριζόντιο. Η διαδρομή του παρατηρητή στο χώρο και το χρόνο παριστάνεται με την κατακόρυφη γραμμή στο αριστερά του διαγράμματος. Οι διαδρομές των παλμών του ραντάρ παριστάνονται από τις διαγώνιες γραμμές.

εκτελούνται με την ίδια μέθοδο. Κανένα αποτέλεσμα δεν είναι πιο σωστό από τα άλλα, όλα όμως έχουν σχέση μεταξύ τους: κάθε παρατηρητής μπορεί να υπολογίσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενός άλλου παρατηρητή αν γνωρίζει τη μεταξύ τους σχετική ταχύτητα.

Όταν θέλουμε σήμερα να μετρήσουμε αποστάσεις με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιούμε αυτόν τον τρόπο, επειδή τα χρονόμετρα ακριβείας είναι πιο εύχρηστα και σταθερά (όταν μεταβάλλο-

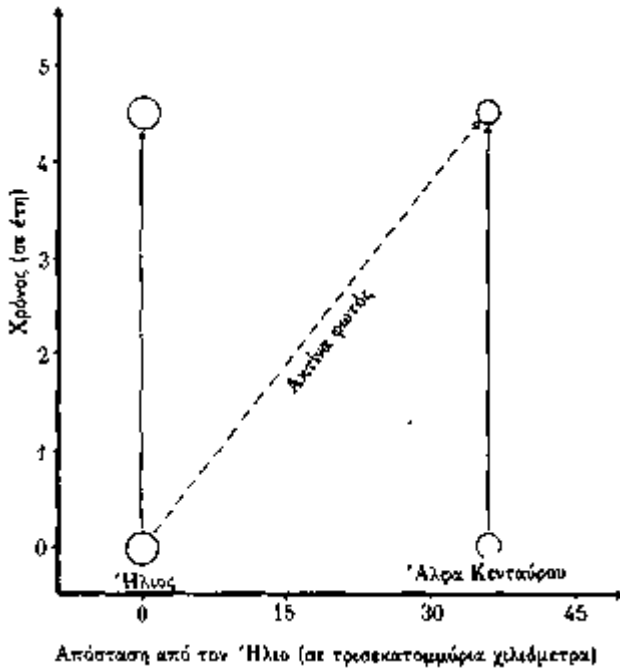
νται οι συνθήκες του περιβάλλοντος) από τις μετροταινίες ακριβείας. Έτσι υπολογίζουμε έμμεσα την απόσταση από την μέτρηση του χρόνου — και την ταχύτητα του φωτός — (χρησιμοποιώντας ένα χρονόμετρο ακριβείας) και όχι άμεσα (χρησιμοποιώντας μια μετροταινία ακριβείας). Στο παρελθόν, τη μονάδα μέτρησης των αποστάσεων που χρησιμοποιείται στις περισσότερες χώρες — το ένα μέτρο — την ορίζαμε σε σχέση με το μήκος μιας ράβδου από πλατίνα που βρίσκεται στο Παρίσι. Σήμερα πια το μέτρο το ορίζουμε ως την απόσταση που διανύει το φως σε χρόνο 0,000000003335640952 δευτερολέπτον. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιούμε ως μονάδα μέτρησης των αποστάσεων το ένα δευτερόλεπτο φωτός, δηλαδή την απόσταση που διανύει το φως σε ένα δευτερόλεπτο. Στη θεωρία της σχετικότητας ορίζουμε την απόσταση από το χρόνο και την ταχύτητα του φωτός, και όχι την ταχύτητα του φωτός από την απόσταση και το χρόνο. Δεν υπάρχει λοιπόν καμία ανάγκη να εισαγάγουμε την ιδέα του αιθέρα για να ορίσουμε την ταχύτητα του φωτός σε σχέση με αυτόν. Άλλωστε η παρουσία του υποθετικού αιθέρα δεν προκαλεί κανένα μετρήσιμο αποτέλεσμα, όπως έδειξε το πείραμα των Michelson και Morley. Η θεωρία της σχετικότητας λοιπόν, αν και μας απαλλάσσει από την ιδέα του αιθέρα, μας αναγκάζει να αλλάξουμε ριζικά τις ιδέες μας για το χώρο και τον χρόνο. Πρέπει να αποδεχτούμε ότι ο χρόνος δεν είναι εντελώς διαχωρισμένος και ανεξάρτητος από τον χώρο αλλά ενωμένος με αυτόν σε μία ουσία που ονομάζεται *χωρόχρονος*.

Είναι εμπειρικά γνωστό ότι μπορούμε να περιγράψουμε την θέση ενός σημείου στον χώρο χρησιμοποιώντας τρεις αριθμούς, ή τρεις «συντεταγμένες», όπως λέγονται αυτοί οι αριθμοί στη γλώσσα των μαθηματικών. Για παράδειγμα, μπορούμε να πούμε ότι ένα σημείο μέσα σε κάποιο δωμάτιο απέχει δύο μέτρα από τον έναν τοίχο, τρία από τον άλλο και ένα από το δάπεδο· ή μπορούμε να προσδιορίσουμε ότι ένα σημείο βρίσκεται σε ορισμέ-

νο γεωγραφικό μήκος, ορισμένο γεωγραφικό πλάτος και ορισμένο ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Είμαστε ελεύθεροι να χρησιμοποιήσουμε οποιεσδήποτε τρεις συντεταγμένες θεωρούμε κατάλληλες· μπορεί όμως αυτές οι συντεταγμένες να έχουν περιορισμένη ακτίνα εφαρμογής. Κανείς δεν θα προσδιόριζε τη θέση της Σελήνης χρησιμοποιώντας γεωγραφικά μήκη, γεωγραφικά πλάτη και ύψη από την επιφάνεια της θάλασσας· θα μπορούσε όμως να την προσδιορίσει με την απόσταση από τον Ήλιο, την Γη και τον Δία. Ακόμη και τέτοιου είδους συντεταγμένες δεν θα χρησίμευαν για να προσδιορίσουμε τη θέση του ίδιου του

Ήλιου στο Γαλαξία μας ή τη θέση του Γαλαξία μας μέσα στο σμήνος των Γαλαξιών που τον περιέχει. Μπορούμε όμως να περιγράψουμε ολόκληρο το Σύμπαν ως σύνολο αλληλοεπικαλυπτομένων περιοχών. Σε κάθε περιοχή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές τριάδες συντεταγμένων για να προσδιορίσουμε τη θέση κάποιου σημείου.

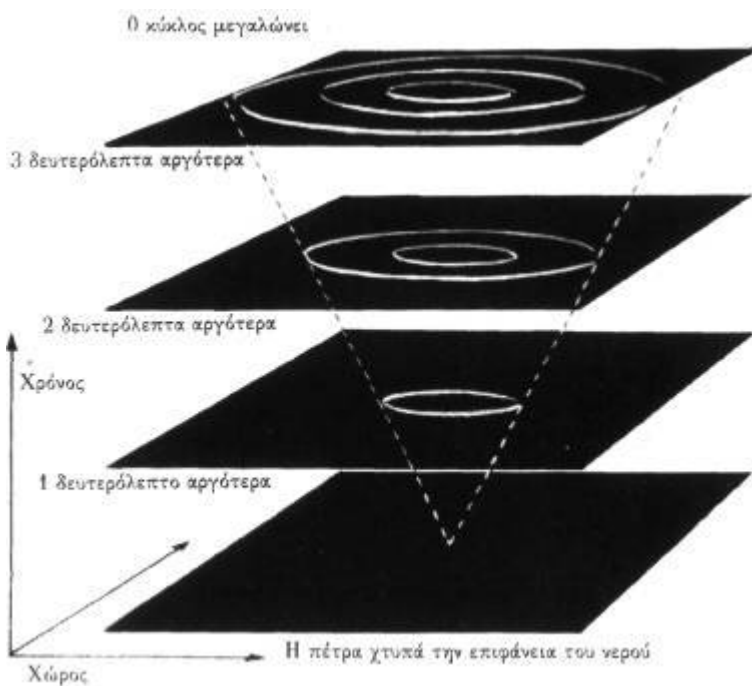
Ένα γεγονός είναι κάτι που συμβαίνει σε συγκεκριμένο σημείο στον χώρο και σε συγκεκριμένη στιγμή στο χρόνο. Μπορεί λοιπόν να προσδιοριστεί με τέσσερις αριθμούς (τρεις αριθμούς για το χώρο και έναν για το χρόνο). Είναι συχνά χρήσιμο να θεωρούμε ότι αυτές οι τέσσερις συντεταγμένες προσδιορίζουν τη θέση του γεγονότος σε έναν «τετραδιάστατο χώρο», το χωρόχρονο. Είναι όμως αδύνατο να φανταστούμε έναν τετραδιάστατο χώρο όπως φανταζόμαστε τον τρισδιάστατο. Προτιμούμε λοιπόν να αγνοούμε τη μία διάσταση του χώρου και να φανταζόμαστε έναν τρισδιάστατο χωρόχρονο. Σε αυτό το βιβλίο τα χωροχρονικά διαγράμματα θα παρουσιάζονται με το χρόνο να αυξάνεται προς την επάνω πλευρά της σελίδας, και τη μία διάσταση του χώρου να επεκτείνεται οριζόντια. Τις περισσότερες φορές ή θα αγνοούνται και οι δύο άλλες διαστάσεις του χώρου ή θα αγνοείται μόνον η μία, ενώ η άλλη θα παρουσιάζεται προοπτικά. Για παράδειγμα, στην εικόνα 2-2 ο χρόνος μετριέται στον κατακόρυ-



ΕΙΚΟΝΑ 2-2.

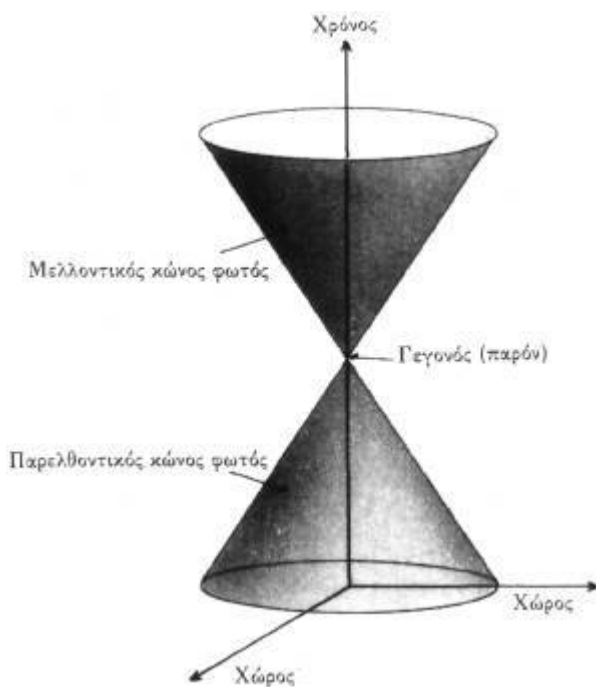
φο άξονα σε χρόνια και η απόσταση του άστρου Άλφα του Κενταύρου από τον Ήλιο στον οριζόντιο άξονα σε χιλιόμετρα. Οι διαδρομές του Ήλιου και του Άλφα του Κενταύρου μέσα στο χωρόχρονο παρουσιάζονται με τις κατακόρυφες γραμμές αριστερά και δεξιά. Ένας παλμός φωτός από τον Ήλιο ακολουθεί τη διαγώνια γραμμή και φθάνει, τέσσερα χρόνια μετά τη στιγμή της εκπομπής του, στο σημείο του χωροχρόνου όπου τότε βρίσκεται το Άλφα του Κενταύρου.

Οι εξισώσεις του Maxwell προέβλεψαν ότι η ταχύτητα του φωτός πρέπει να είναι η Ίδια, όποια κι αν είναι η ταχύτητα της



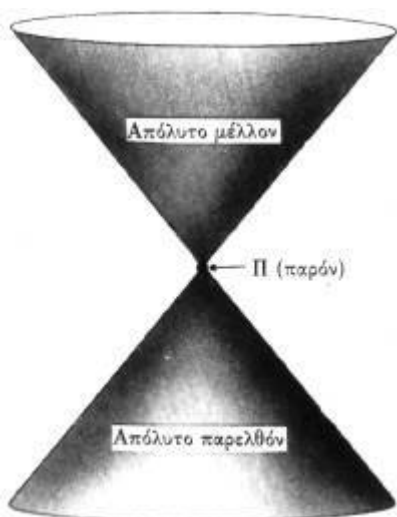
ΕΙΚΟΝΑ 2-3.

φωτεινής πηγής· είδαμε ότι ακριβείς μετρήσεις επιβεβαίωσαν αυτήν την πρόβλεψη. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αν μία φωτεινή πηγή που βρίσκεται σε συγκεκριμένο σημείο εκπέμψει ένα φωτεινό κύμα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, τότε, καθώς θα περνάει ο χρόνος, το φωτεινό κύμα θα εξαπλώνεται προς όλες τις διευθύνσεις σχηματίζοντας μια φωτεινή σφαιρική επιφάνεια· το μέγεθος και η θέση της σφαιρικής επιφάνειας δεν θα εξαρτώνται από την ταχύτητα της φωτεινής πηγής. Μετά από ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου, η ακτίνα της θα είναι 300 μέτρα· μετά από δύο εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου θα είναι 600 μέτρα, κ.ο.κ. Η διάδοση του φωτεινού κύμα-



ΕΙΚΟΝΑ 2-4.

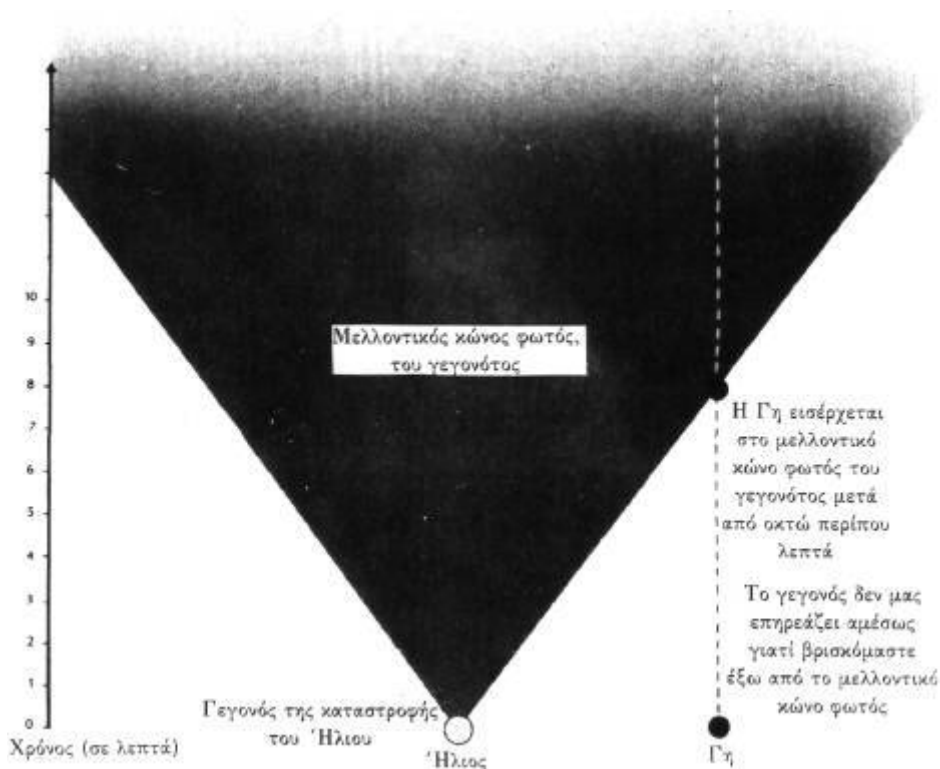
τος μοιάζει με τη διάδοση των κυμάτων που προκαλούνται από μία πέτρα πάνω στην επιφάνεια μιας λίμνης, και σχηματίζουν έναν κύκλο που μεγαλώνει καθώς περνάει ο χρόνος. Ας φανταστούμε ένα τρισδιάστατο μοντέλο αποτελούμενο από τις δύο διαστάσεις της επιφάνειας της λίμνης και τη μία διάσταση του χρόνου. Ο κύκλος που μεγαλώνει (και μετακινείται κατά τη διεύθυνση της διάστασης του χρόνου) θα σχηματίσει έναν κώνο που η κορυφή του θα βρίσκεται ακριβώς στο σημείο και στη στιγμή που η πέτρα έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του νερού. Στις τέσσερις διαστάσεις το φωτεινό κύμα που εξαπλώνεται από ένα αρχικό γεγονός σχηματίζει ένα «τρισδιάστατο κώνο» μέσα στον



ΕΙΚΟΝΑ 2-5.

τετραδιάστατο χωρόχρονο. Αυτός ο κώνος ονομάζεται «μελλοντικός κώνος φωτός». Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να θεωρήσουμε έναν άλλο κώνο, τον «παρελθοντικό κώνο φωτός» που αποτελείται από το σύνολο όλων των γεγονότων από όπου θα μπορούσε να φτάσει ένας παλμός φωτός στο αρχικό γεγονός (βλ. εικ. 2-4).

Ο παρελθοντικός και ο μελλοντικός κώνος φωτός ενός γεγονότος Π χωρίζουν το χωρόχρονο σε τρεις περιοχές (βλ. εικ. 2-5). Το *απόλυτο μέλλον* του γεγονότος Π είναι η περιοχή που βρίσκεται μέσα στον μελλοντικό κώνο φωτός του Π . Αποτελείται από το σύνολο όλων των γεγονότων που μπορεί να επηρεασθούν απ' ό,τι συμβαίνει στο Π . Τα γεγονότα που βρίσκονται έξω από τον μελλοντικό κώνο φωτός του Π δεν μπορεί να προσεγγιστούν από οποιαδήποτε σήματα σταλούν από το Π , γιατί τίποτε δεν

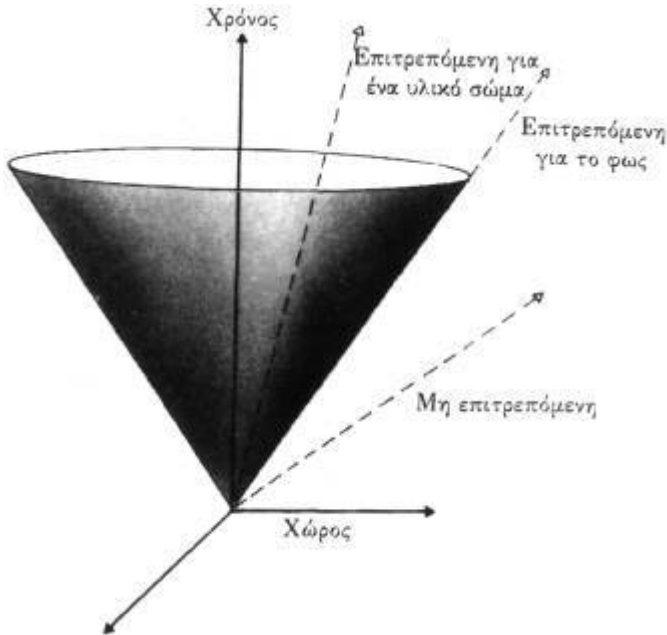


ΕΙΚΟΝΑ 2-6.

μπορεί να διαδοθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός· δεν μπορεί λοιπόν να επηρεασθούν απ' ό,τι συμβαίνει στο Π. Το *απόλυτο παρελθόν* του Π είναι η περιοχή που βρίσκεται μέσα στον παρελθοντικό κώνο φωτός. Αποτελείται από το σύνολο όλων των γεγονότων απ' όπου μπορεί να φτάσουν στο Π σήματα που διαδίδονται με ταχύτητα ίση ή μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός. Αποτελείται δηλαδή από το

σύνολο όλων των γεγονότων που μπορεί να επηρεάσουν ό,τι συμβαίνει στο Π. Αν κάποιος γνωρίζει τι συμβαίνει κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή παντού στην περιοχή του χώρου που βρίσκεται μέσα στον παρελθοντικό κώνο φωτός του Π, τότε μπορεί να προβλέψει τι θα συμβεί στο Π. Τα γεγονότα που βρίσκονται στην *υπόλοιπη περιοχή* του χωροχρόνου, έξω από τον παρελθοντικό και μελλοντικό κώνο φωτός, δεν είναι δυνατό να επηρεάσουν ή να επηρεαστούν από τα γεγονότα στο Π. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι πριν από ένα δευτερόλεπτο καταστράφηκε ο Ήλιος και σταμάτησε να λάμπει. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί να επηρεάσει τα τωρινά γεγονότα πάνω στη Γη, γιατί αυτά βρίσκονται έξω από τον μελλοντικό κώνο φωτός του. Έτσι θα μάθουμε γι' αυτό μόνο μετά από οκτώ λεπτά, το χρόνο που χρειάζεται ένα φωτεινό σήμα για να διανύσει την απόσταση από τον Ήλιο ως τη Γη. Μόνον μετά από οκτώ λεπτά τα γεγονότα πάνω στην Γη θα βρίσκονται μέσα στον μελλοντικό κώνο φωτός του γεγονότος της καταστροφής του Ήλιου. Για τον ίδιο λόγο δεν ξέρουμε τι συμβαίνει αυτή τη στιγμή στις μακρινές περιοχές του Σύμπαντος· το φως των μακρινών γαλαξιών που βλέπουμε έχει φύγει από την επιφάνεια των άστρων τους πριν από εκατομμύρια (ή και δισεκατομμύρια) χρόνια. Έτσι, όταν κοιτάμε το Σύμπαν το βλέπουμε όπως ήταν στο παρελθόν.

Αν αγνοήσουμε τις επιδράσεις εξαιτίας της βαρύτητας, όπως έκαναν ο Αϊνστάιν και ο Poincare το 1905, έχουμε αυτό που ονομάζεται *ειδική* θεωρία της σχετικότητας. Για κάθε γεγονός στο χωρόχρονο μπορούμε να κατασκευάσουμε έναν κώνο φωτός (το σύνολο όλων των δυνατών διαδρομών που θα μπορούσε να έχει ακολουθήσει το φως αν εκπεμπόταν από αυτό το γεγονός)· αφού η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια για κάθε γεγονός και προς κάθε κατεύθυνση, όλοι οι κώνοι φωτός θα είναι ίδιοι και θα έχουν την ίδια κατεύθυνση. Η θεωρία αυτή μας λέει επίσης ότι



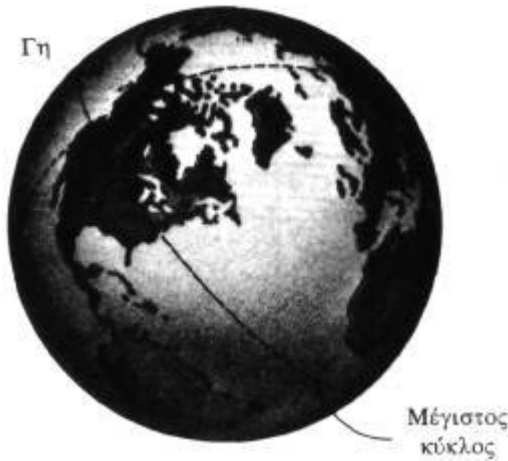
ΕΙΚΟΝΑ 2-7.

τίποτε δεν μπορεί να κινηθεί πιο γρήγορα από το φως. Αυτό σημαίνει πως η διαδρομή κάθε αντικειμένου μέσα στο χώρο και το χρόνο πρέπει να παριστάνεται από μία γραμμή που βρίσκεται ολόκληρη στο εσωτερικό του κώνου φωτός, (βλ. εικ. 2-7).

Η ειδική θεωρία της σχετικότητας εξήγησε γιατί η ταχύτητα του φωτός φαίνεται η ίδια σε όλους τους παρατηρητές (όπως έδειξε το πείραμα των Michelson και Morley)· περιέγραψε επίσης τι συμβαίνει όταν τα αντικείμενα κινούνται με ταχύτητες που προσεγγίζουν την ταχύτητα του φωτός. Παρ' όλα αυτά, δεν συμφωνούσε με τη θεωρία του Νεύτωνα για την βαρύτητα, που προέβλεπε ότι τα αντικείμενα έλκουν το ένα το άλλο με μια δύναμη που εξαρτάται από την μεταξύ τους απόσταση. Αυτό

σήμαινε ότι αν το ένα αντικείμενο άλλαζε θέση και απόσταση από το άλλο, η δύναμη της βαρύτητας μεταξύ τους θα άλλαζε αυτομάτως, την ίδια ακριβώς στιγμή. Μ' άλλα λόγια, οι βαρυτικές επιδράσεις θα διαδίδονταν με *άπειρη ταχύτητα* και όχι με ταχύτητα ίση ή μικρότερη της ταχύτητας του φωτός, όπως θα έπρεπε να συμβαίνει σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Ο Αϊνστάιν έκανε διάφορες προσπάθειες, από το 1905 ως το 1915, για να φτάσει σε μια θεωρία της βαρύτητας που να συμφωνεί με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Τελικά, το 1915 πρότεινε αυτό που ονομάζουμε σήμερα *γενική* θεωρία της σχετικότητας.

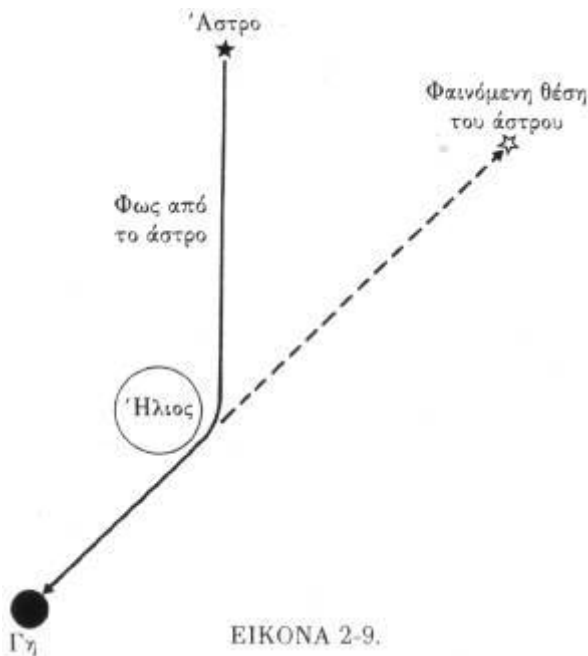
Ο Αϊνστάιν έκανε την επαναστατική υπόθεση ότι η βαρύτητα είναι συνέπεια του γεγονότος ότι ο χωρόχρονος δεν είναι επίπεδος, όπως πιστευόταν μέχρι τότε, αλλά καμπύλος. Την καμπυλότητά του αυτή την προκαλεί η παρουσία της ύλης, δηλαδή της μάζας και της ενέργειας. Έτσι, τα διάφορα σώματα, όπως η Γη και οι άλλοι πλανήτες, δεν αναγκάζονται να κινούνται σε καμπύλες τροχιές από κάποια δύναμη που υποθέσαμε ότι υπήρχε και που ονομάσαμε δύναμη βαρύτητας. Αντί γι' αυτό τα σώματα ακολουθούν τις «ευθείες» του καμπύλου χωροχρόνου, δηλαδή τις καμπύλες που είναι λιγότερο καμπυλωμένες από όλες τις άλλες και λέγονται *γεωδαισικές*. Μία γεωδαισική καμπύλη σε έναν καμπύλο χώρο είναι (όπως και η ευθεία γραμμή σε έναν επίπεδο χώρο) η διαδρομή με το μικρότερο μήκος ανάμεσα σε δύο γειτονικά σημεία. Για παράδειγμα, η επιφάνεια της Γης είναι ένας καμπύλος χώρος δύο διαστάσεων μία γεωδαισική καμπύλη πάνω της (που ονομάζεται «μέγιστος κύκλος») είναι η διαδρομή με το μικρότερο μήκος ανάμεσα σε δύο σημεία (βλ. ειγ. 2-8). Τα αεροπλάνα (για λόγους οικονομίας καυσίμων) κινούνται συνήθως πάνω σε τέτοιες γεωδαισικές καμπύλες, αφού είναι οι συντομότερες διαδρομές ανάμεσα στα αεροδρόμια. Στη γενική θεωρία της σχετικότητας τα αντικείμενα ακολουθούν πάντοτε τις γεω-



ΕΙΚΟΝΑ 2-8.

δαισικές καμπύλες που ενώ είναι, οι πιο «ευθείες» γραμμές του τετραδιάστατου χωροχρόνου, σε μας φαίνονται σαν καμπύλες γραμμές του τριαδιάστατου χώρου. (Όπως για παράδειγμα οι ελλειπτικές τροχιές των πλανητών: Οι πλανήτες ακολουθούν ακριβώς τις γεωδαισικές καμπύλες του χωροχρόνου που έχει καμπυλωθεί από την ύλη του Ήλιου. Αυτές οι «ευθείες» του τετραδιάστατου χωροχρόνου μας φαίνονται σαν ελλείψεις στον τρισδιάστατο χώρο). Μοιάζει κάπως σαν την σκιά ενός αεροπλάνου που πετάει πάνω από λόφους. Αν και το αεροπλάνο ακολουθεί μια ευθεία γραμμή στον τρισδιάστατο χώρο, η σκιά του ακολουθεί μία καμπύλη γραμμή στον δισδιάστατο χώρο του εδάφους.

Ο ελλειπτικές τροχιές των πλανητών που προβλέπει η γενική θεωρία της σχετικότητας είναι σχεδόν οι ίδιες μ' αυτές που προβλέπει η θεωρία του Νεύτωνα για τη βαρύτητα. Αλλά στην περίπτωση του πλανήτη Ερμή, που υφίσταται τις ισχυρότερες



βαρυτικές επιδράσεις επειδή βρίσκεται πιο κοντά στον Ήλιο, η γενική θεωρία της σχετικότητας προέβλεπε επίσης τη στροφή του άξονα της έλλειψης κατά μία μοίρα κάθε δέκα χιλιάδες χρόνια. Η συμφωνία αυτής της πρόβλεψης με τα δεδομένα των αστρονομικών παρατηρήσεων ήταν μία από τις πρώτες επιβεβαιώσεις της θεωρίας του Αϊνστάιν. Σήμερα, έχουν παρατηρηθεί και για τις τροχιές των άλλων πλανητών μικρές αποκλίσεις από τις προβλέψεις της θεωρίας του Νεύτωνα που συμφωνούν με τις προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας.

Το φως πρέπει και αυτό να ακολουθεί γεωδαισικές καμπύλες στο χωρόχρονο. Το γεγονός ότι ο χωρόχρονος είναι καμπύλος σημαίνει ότι και στον τρισδιάστατο χώρο το φως δεν φαίνεται να

κινείται σε ευθεία γραμμή. Η γενική θεωρία της σχετικότητας προβλέπει λοιπόν ότι οι ακτίνες του φωτός πρέπει να κάμπτονται από τις βαρυτικές επιδράσεις. Για παράδειγμα, η θεωρία προβλέπει ότι οι κώνοι φωτός των σημείων κοντά στον Ήλιο πρέπει να έχουν μια μικρή κλίση σε σχέση με τους κώνους των μακρινότερων σημείων. Αυτό σημαίνει ότι όταν το φως κάποιων άστρων περάσει από τα σημεία που βρίσκονται κοντά στον Ήλιο θα αλλάξει κατεύθυνση διάδοσης· έτσι για κάποιον παρατηρητή πάνω στη Γη αυτά τα άστρα θα φαίνονται σε διαφορετική θέση (εικόνα 2-9). Φυσικά, αν το φως από τα ίδια πάντοτε άστρα περνούσε από τα ίδια πάντοτε σημεία κοντά στον Ήλιο, δεν θα μπορούσαμε να πούμε αν άλλαξε κατεύθυνση ή όχι. Καθώς όμως η Γη κινείται στην τροχιά της, η ευθεία που την ενώνει με τον Ήλιο περιστρέφεται, και η προέκταση της συναντά διαφορετικά άστρα σε διαφορετικές εποχές του χρόνου. Μπορούμε λοιπόν να συγκρίνουμε τις θέσεις αυτών των άστρων στην εποχή που το φως τους υφίσταται την ισχυρή βαρυτική επίδραση του Ήλιου με τις θέσεις τους σε μιαν άλλη εποχή.

Κανονικά, είναι πολύ δύσκολο να παρατηρήσουμε αυτό το φαινόμενο, γιατί το φως από τον ίδιο τον Ήλιο δεν μας αφήνει να εντοπίσουμε το φως των άστρων στην περιοχή του ουρανού που βρίσκεται γύρω του. Μπορούμε όμως αυτό να το επιτύχουμε κατά τη διάρκεια μιας έκλειψης Ηλίου, όταν η Σελήνη παρεμποδίζει το ηλιακό φως. Τα δεδομένα των σχετικών παρατηρήσεων συμφωνούν απολύτως με τις προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας.

Μία άλλη πρόβλεψη της ίδιας θεωρίας είναι ότι ο χρόνος φαίνεται πως περνάει πιο αργά κοντά σε ένα σώμα με μεγάλη μάζα και βαρυτική επίδραση, όπως είναι η Γη. Αυτό μπορούμε να το καταλάβουμε από τη σχέση που συνδέει την ενέργεια του φωτός με τη συχνότητα του (δηλαδή το πλήθος των φωτεινών κυμάτων που περνούν από κάποιο σημείο ανά δευτερόλεπτο). Αυτή η σχέ-

ση είναι πολύ απλή: όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια τόσο μεγαλύτερη είναι και η συχνότητα. Καθώς λοιπόν το φως κινείται από γεγονότα που συμβαίνουν σε περιοχές όπου η βαρυτική επίδραση της Γης είναι μικρότερη (δηλαδή από περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο) προς περιοχές όπου η βαρυτική επίδραση είναι μεγαλύτερη (δηλαδή προς περιοχές με μικρότερο υψόμετρο) η ενέργεια του μεγαλώνει, οπότε μεγαλώνει και η συχνότητά του. Αυτό σημαίνει πως το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών φωτεινών κυμάτων μικραίνει. Για κάποιον παρατηρητή που βρίσκεται σε μία περιοχή με μικρότερο υψόμετρο, τα διαδοχικά γεγονότα που συμβαίνουν σε μια περιοχή με μεγαλύτερο υψόμετρο θα φαίνονται πως συμβαίνουν σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Για τον παρατηρητή λοιπόν αυτόν οτιδήποτε συμβαίνει εδώ κάτω θα φαίνεται ότι συμβαίνει πιο αργά σε σχέση με οτιδήποτε συμβαίνει εκεί ψηλά: ο χρόνος θα φαίνεται πως περνάει πιο αργά. Η πρόβλεψη αυτή επιβεβαιώθηκε το 1962, όταν χρησιμοποιήθηκαν δυο ίδια πολύ ακριβή χρονόμετρα: το ένα τοποθετήθηκε στην κορυφή ενός υδατόπυργου και το άλλο στη βάση του. Το χρονόμετρο στη βάση, που βρισκόταν σε μικρότερο υψόμετρο, βρέθηκε να καθυστερεί σε σχέση με το άλλο στην κορυφή, ακριβώς όσο προέβλεπε η γενική θεωρία της σχετικότητας. Η διαφορά στο ρυθμό των ρολογιών σε διαφορετικά υψόμετρα από τη Γη έχει σήμερα σημαντική πρακτική χρησιμότητα, με την καθιέρωση των νέων μεθόδων εντοπισμού και πλοήγησης πλοίων και αεροπλάνων από δορυφόρους. Αν αγνοούσαμε τις προβλέψεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, οι θέσεις που θα υπολογίζαμε θα απέιχαν αρκετά χιλιόμετρα από τις πραγματικές!

Οι νόμοι της κίνησης του Νεύτωνα απέρριψαν την ιδέα της απόλυτης θέσης στο χώρο. Η θεωρία της σχετικότητας απορρίπτει και την ιδέα του απόλυτου χρόνου. Ας εξετάσουμε την περίπτωση των *δίδυμων αδελφών*, που ο ένας πάει να ξήσει πάνω σε βουνό ενώ ο άλλος μένει πλάι στη θάλασσα. Ο πρώτος

αδελφός (που ζει σε μία περιοχή με μεγαλύτερο υψόμετρο) θα γερνάει γρηγορότερα από τον δεύτερο. Έτσι, αν ξανασυναντηθούν, ο ένας θα είναι νεότερος από τον άλλον. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά στις ηλικίες θα είναι πολύ μικρή· θα ήταν όμως πολύ πιο μεγάλη αν ο ένας δίδυμος πήγαινε ένα μακρινό ταξίδι με ένα διαστημόπλοιο κινούμενο με ταχύτητα λίγο μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός. Στην επιστροφή του θα ήταν πολύ νεότερος από τον αδελφό του που θα είχε μείνει στη Γη. Αυτό φαίνεται πολύ παράξενο σε κάποιον που έχει συνηθίσει στην ιδέα του απόλυτου χρόνου. Αλλά στη θεωρία της σχετικότητας δεν υπάρχει κανένας μοναδικός απόλυτος χρόνος· αντίθετα, ο καθένας έχει τον δικό του χρόνο που εξαρτάται από το πού βρίσκεται και το πώς κινείται.

Πριν από το 1915 φανταζόμασταν το χώρο και το χρόνο σαν ένα σταθερό υπόβαθρο που πάνω του συνέβαιναν τα διάφορα γεγονότα αλλά το ίδιο όμως δεν φαινόταν να επηρεάζεται από αυτά. Τα σώματα κινούνταν, έλκονταν και απωθούνταν από διάφορες δυνάμεις, αλλά ο χώρος και ο χρόνος συνέχιζαν να υπάρχουν χωρίς να υφίστανται καμία επίδραση από οτιδήποτε. Ήταν φυσικό, λοιπόν, να φανταζόμαστε ότι ο χώρος και ο χρόνος συνέχιζαν να υπάρχουν από παντού προς παντού, από πάντα για πάντα.

Η κατάσταση όμως είναι πολύ διαφορετική στη γενική θεωρία της σχετικότητας. Ο χώρος και ο χρόνος είναι τώρα ποσότητες που επηρεάζονται από τα σώματα και τις δυνάμεις: όταν ένα σώμα κινείται η μία δύναμη δρα, το γεγονός επιδρά στο χώρο και το χρόνο και μεταβάλλει την καμπυλότητά τους. Αντίστροφα, η καμπυλότητα του χώρου και του χρόνου επιδρά στον τρόπο που κινούνται τα σώματα και δρουν οι δυνάμεις. Ο χώρος και ο χρόνος όχι μόνον επηρεάζουν αλλά και επηρεάζονται από οτιδήποτε συμβαίνει μέσα στο Σύμπαν. Όπως ακριβώς δεν μπορούμε να μιλάμε για τα γεγονότα μέσα στο Σύμπαν χωρίς τις έννοιες του

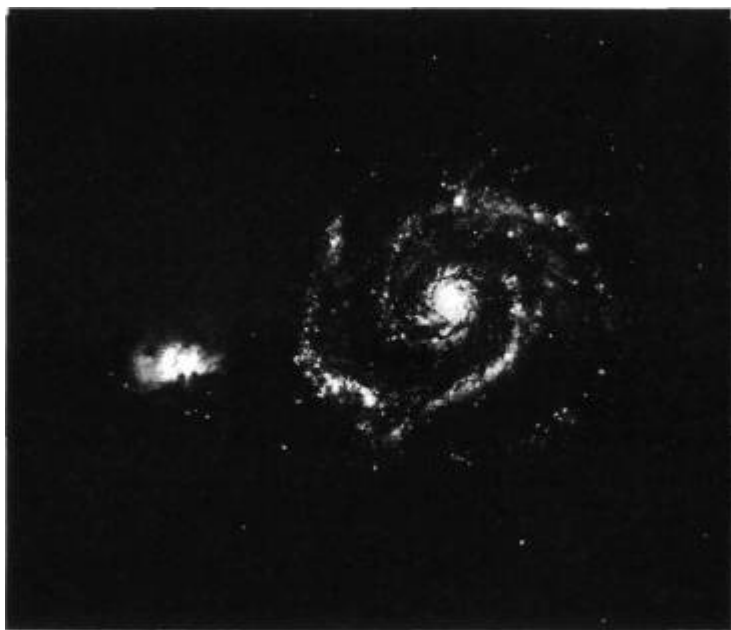
χώρου και του χρόνου, έτσι στη γενική θεωρία της σχετικότητας δεν μπορούμε να μιλάμε για το χώρο και το χρόνο χωρίς τα γεγονότα μέσα στο Σύμπαν δεν έχει νόημα λοιπόν να μιλάμε για τον χώρο και το χρόνο έξω από το Σύμπαν.

Η βαθύτερη κατανόηση του χώρου και του χρόνου προκάλεσε μια επαναστατική αλλαγή στην εικόνα του ανθρώπου για τον Κόσμο. Η ιδέα για ένα ουσιαστικά αμετάβλητο Σύμπαν, που θα μπορούσε να υπάρχει από πάντα για πάντα, αντικαταστάθηκε με την ιδέα για το μεταβαλλόμενο, διαστελλόμενο Σύμπαν που φαινόταν ότι είχε μια αρχή πριν από κάποιο πεπερασμένο χρονικό διάστημα, και ίσως θα έχει ένα τέλος μετά από κάποιο άλλο πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Αυτή η επαναστατική αλλαγή αποτελεί το θέμα του επόμενου κεφαλαίου. Ήταν επίσης η αφετηρία της δικής μου εργασίας στη θεωρητική φυσική. Ο Roger Penrose και εγώ δείξαμε ότι από την ίδια τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν προκύπτει ότι το Σύμπαν πρέπει να είχε μια αρχή και ίσως θα έχει ένα τέλος.

3

Το Σύμπαν διαστέλλεται

Αν κοιτάξουμε στον ουρανό μία νύχτα χωρίς φεγγάρι, τα φωτεινότερα αντικείμενα που βλέπουμε είναι οι πλανήτες Αφροδίτη, Άρης, Δίας και Κρόνος. Υπάρχουν επίσης οι «απλανείς», δηλαδή τα «ακίνητα» άστρα· τα άστρα είναι σώματα ακριβώς σαν τον Ήλιο αλλά βρίσκονται πολύ πιο μακριά. Καθώς η Γη κινείται στην τροχιά της γύρω από τον Ήλιο, μερικά φαίνονται να μετακινούνται λίγο σε σχέση με τα υπόλοιπα· δεν είναι λοιπόν καθόλου «απλανή» και ακίνητα! Αυτό συμβαίνει επειδή βρίσκονται αρκετά κοντά σε εμάς· καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο, τα βλέπουμε από διαφορετικές θέσεις μπροστά από τα άλλα που βρίσκονται μακρύτερα. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε κατευθείαν την απόστασή τους: όσο πιο κοντά βρίσκονται τόσο πιο πολύ φαίνονται να κινούνται. Το άστρο που βρίσκεται πιο κοντά σε εμάς από όλα, το «εγγύτατο του Κενταύρου» (Πρόξιμα του Κενταύρου) απέχει περίπου τέσσερα έτη φωτός (δηλαδή το φως του χρειάζεται περίπου τέσσερα χρόνια για να φτάσει



ΕΙΚΟΝΑ 3-1.

στη Γη). Τα περισσότερα άστρα που είναι ορατά διά γυμνού οφθαλμού βρίσκονται σε περιοχή ακτίνας μερικών εκατοντάδων ετών φωτός. Συγκριτικά με τις αποστάσεις αυτές, το δικό μας άστρο, ο Ήλιος, βρίσκεται πολύ κοντά: «μόνον» οκτώ λεπτά φωτός! Αν και υπάρχουν άστρα προς όλες τις κατευθύνσεις στον ουρανό, τα περισσότερα φαίνονται συγκεντρωμένα σε μια φωτεινή λωρίδα που την ονομάζουμε Γαλαξία. Ήδη από το 1750 μερικοί αστρονόμοι υπέθεσαν ότι αυτή η συγκέντρωση θα μπορούσε να εξηγηθεί αν τα περισσότερα από τα ορατά άστρα βρίσκονται σε μία περιοχή του Σύμπαντος σχήματος δίσκου, αυτό

που σήμερα ονομάζουμε σπειροειδή Γαλαξία. Μετά από λίγες μόνο δεκαετίες ο αστρονόμος William Herschel επιβεβαίωσε αυτήν την υπόθεση, συλλέγοντας με υπομονή στοιχεία για τις θέσεις και τις αποστάσεις εκατοντάδων άστρων. Παρ' όλα αυτά, η άποψη ότι τα άστρα είναι συγκεντρωμένα σε γαλαξίες επικράτησε οριστικά μόνον στις αρχές του 20ού αιώνα.

Η σύγχρονη εικόνα του ανθρώπου για το Σύμπαν διαμορφώθηκε μετά το 1924, όταν ο Αμερικανός αστρονόμος Edwin Hubble έδειξε ότι ο δικός μας Γαλαξίας δεν είναι ο μοναδικός. Στην πραγματικότητα υπάρχουν πάρα πολλοί άλλοι, με τεράστιες εκτάσεις άδειου χώρου μεταξύ τους. Για να το αποδείξει χρειάστηκε να προσδιορίσει τις αποστάσεις των άλλων γαλαξιών που, ακριβώς επειδή βρίσκονται τόσο μακριά, φαίνονται πραγματικά εντελώς ακίνητοι. Ο Hubble λοιπόν ήταν αναγκασμένος να χρησιμοποιήσει έμμεσες μεθόδους προσδιορισμού των συγκριμένων αποστάσεων. Το πόσο φωτεινό φαίνεται ένα άστρο, η φαινομενική του λαμπρότητα, εξαρτάται από δύο παράγοντες: την ποσότητα του φωτός που ακτινοβολεί στο περιβάλλον του (την πραγματική του λαμπρότητα) και την απόστασή του από τον παρατηρητή. Για τα κοντινά μας άστρα μπορούμε να μετρήσουμε τη φαινομενική λαμπρότητα και την απόσταση και να υπολογίσουμε τη πραγματική τους λαμπρότητα. Αντίστροφα, αν γνωρίζαμε την πραγματική λαμπρότητα των μακρινών άστρων που βρίσκονται σε άλλους γαλαξίες, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την απόστασή τους μετρώντας τη φαινομενική τους λαμπρότητα. Ο Hubble παρατήρησε ότι μεταξύ των κοντινών μας άστρων που μπορούμε να μετρήσουμε τη φαινομενική τους λαμπρότητα βρίσκονται κάποιοι χαρακτηριστικοί τύποι άστρων που έχουν πάντα την ίδια πραγματική λαμπρότητα. Συμπέρανε λοιπόν ότι αν βρίσκαμε σε κάποιον άλλον γαλαξία κάποια παρόμοια άστρα, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι και εκείνα έχουν την ίδια πραγματική λαμπρότητα —και έτσι θα

μπορούσαμε να υπολογίσουμε την απόσταση τους και την απόσταση του γαλαξία τους. Θα μπορούσαμε μάλιστα να υπολογίσουμε τις αποστάσεις διαφορετικών άστρων στον ίδιο γαλαξία, αν βρίσκαμε κάθε φορά για το κάθε άστρο την ίδια περίπου απόσταση θα ήμασταν βέβαιοι ότι αυτή είναι και η απόσταση του γαλαξία τους.

Με τον τρόπο αυτό ο Hubble υπολόγισε τις αποστάσεις εννέα γαλαξιών. Γνωρίζουμε σήμερα ότι ο γαλαξίας μας είναι μόνο ένας από τους εκατοντάδες δισεκατομμύρια άλλους γαλαξίες που μπορούμε να διακρίνουμε χρησιμοποιώντας τα σύγχρονα τηλεσκόπια· ο κάθε γαλαξίας περιλαμβάνει με τη σειρά του εκατοντάδες δισεκατομμύρια άστρα. (Στην εικόνα 3-1 βλέπουμε έναν σπειροειδή γαλαξία παρόμοιο με τον δικό μας). Ζούμε σε έναν γαλαξία με διάμετρο περίπου εκατό χιλιάδες έτη φωτός που περιστρέφεται αργά, τα άστρα στους σπειροειδείς βραχίονες του εκτελούν μια πλήρη περιστροφή γύρω από το κέντρο του σε περίοδο μερικών εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών. Ο 'Ηλιος μας δεν είναι παρά ένα συνηθισμένο άστρο, μετρίου μεγέθους, κοντά στην εσωτερική πλευρά ενός από τους σπειροειδείς βραχίονες. Σήμερα ο Κόσμος φαίνεται πολύ πιο διαφορετικός απ' ό,τι την εποχή του Αριστοτέλη και του Πτολεμαίου, όταν οι άνθρωποι πίστευαν πως η Γη είναι το κέντρο του Σύμπαντος!

Τα άστρα βρίσκονται τόσο μακριά που μας φαίνονται σαν φωτεινά σημεία, δεν μπορούμε να δούμε το μέγεθος και το σχήμα τους. Πώς μπορούμε λοιπόν να διακρίνουμε τους διάφορους τύπους τους; Για όλα σχεδόν τα άστρα υπάρχει ένα και μόνο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους που μπορούμε να το γνωρίσουμε άμεσα: το *χρώμα* τους. Ο Νεύτων ανακάλυψε ότι όταν το ηλιακό φως περνάει μέσα από ένα κομμάτι γυαλί τριγωνικής διατομής — ένα τριγωνικό πρίσμα — αναλύεται στα χρώματα που το συνθέτουν, το «φάσμα» του (όπως στο ουράνιο τόξο). Εστιάζοντας ένα τηλεσκόπιο σε κάποιο άστρο ή γαλαξία, μπορούμε να αναλύ-

σουμε το φως του, και να πάρουμε έτσι το φάσμα του. Τα άστρα έχουν διαφορετικά φάσματα, αλλά η σχετική λαμπρότητα των διαφορετικών χρωμάτων είναι η ίδια για όλα τα φάσματα. Στην πραγματικότητα, το φως που εκπέμπει οποιοδήποτε αντικείμενο βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία έχει ένα χαρακτηριστικό φάσμα, που εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και όχι από τη σύσταση ή τη δομή του αντικειμένου. Μπορούμε, λοιπόν, εξετάζοντας το φάσμα ενός άστρου, να βρούμε σε ποια θερμοκρασία αντιστοιχεί. Επίσης μπορούμε να βρούμε αν υπάρχουν κάποιες διαφορές του φάσματος ενός άστρου από το αντίστοιχο χαρακτηριστικό φάσμα στη θερμοκρασία αυτή (για παράδειγμα αν λείπουν κάποιες συγκεκριμένες περιοχές): επειδή γνωρίζουμε ότι τα διαφορετικά χημικά στοιχεία απορροφούν διαφορετικές περιοχές των φασμάτων, μπορούμε να προσδιορίσουμε ποια ακριβώς χημικά στοιχεία βρίσκονται στην ατμόσφαιρα του συγκεκριμένου άστρου.

Όταν το 1920 οι αστρονόμοι άρχισαν να εξετάζουν τα φάσματα των άστρων άλλων γαλαξιών βρήκαν κάτι πολύ ενδιαφέρον: τα φάσματα αυτά ήταν παρόμοια με εκείνα των άστρων του γαλαξία μας, αλλά οι συγκεκριμένες περιοχές που έλειπαν ήταν όλες *μετατοπισμένες* προς τη μια άκρη του φάσματος, προς το *ερυθρό χρώμα*. Η μετατόπιση προς το ερυθρό μέρος του φάσματος είναι πολύ σημαντική: είναι αποτέλεσμα της απομάκρυνσης της πηγής του φωτός από τον παρατηρητή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Doppler. Ας το εξετάσουμε αναλυτικότερα.

Όπως είδαμε, το φως συνίσταται από ηλεκτρομαγνητικές περιοδικές διαταραχές ή κύματα — τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος, δηλαδή από την απόσταση των κορυφών δυο γειτονικών κυμάτων. Τα χρώματα του φάσματος είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος: 68 εκατομμυριοστά του εκατοστομέτρου για το

ερυθρό χρώμα, 48 εκατομμυριοστά του εκατοστομέτρου για το κυανό, και 42 εκατομμυριοστά του εκατοστομέτρου για το ιώδες. (Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μεγαλύτερο μήκος κύματος από αυτό του ερυθρού είναι αόρατα στο ανθρώπινο μάτι και ονομάζονται υπέρυθρες ακτίνες. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μικρότερο μήκος κύματος από αυτό του ιώδους είναι επίσης αόρατα στο ανθρώπινο μάτι και ονομάζονται υπεριώδεις ακτίνες). Η συχνότητα (το πλήθος των φωτεινών κυμάτων που φτάνουν σε κάποιο σημείο κάθε δευτερόλεπτο) μεγαλώνει όσο μικραίνει το μήκος κύματος, και αντίστροφα. Το ιώδες έχει μεγαλύτερη συχνότητα από το κυανό και αυτό μεγαλύτερη από το ερυθρό. Ας φανταστούμε μία φωτεινή πηγή, όπως ένα άστρο, σε σταθερή απόσταση από εμάς, που εκπέμπει φωτεινά κύματα με σταθερή συχνότητα. Είναι ευνόητο ότι η συχνότητα των κυμάτων όταν φτάνουν σε μας θα είναι η ίδια με τη συχνότητα τους όταν εκπέμπονται από το άστρο. (Η βαρυτική επίδραση των γαλαξιών δεν είναι τόσο μεγάλη που να προκαλεί σημαντικές μεταβολές). Ας υποθέσουμε τώρα ότι το άστρο αρχίζει να απομακρύνεται από εμάς. Όταν θα εκπέμψει την κορυφή του επόμενου κύματος το άστρο θα βρίσκεται μακρύτερα από εμάς· έτσι ο χρόνος που θα χρειαστεί αυτή η κορυφή να φτάσει σε εμάς θα είναι τώρα μεγαλύτερος. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος μεταξύ της προηγούμενης και αυτής της κορυφής θα είναι επίσης μεγαλύτερος, και έτσι ο αριθμός των διαδοχικών κυμάτων που φτάνουν σε εμάς κάθε δευτερόλεπτο θα είναι μικρότερος (δηλαδή η συχνότητα των φωτεινών κυμάτων θα είναι μικρότερη). Αντίστροφα, αν το άστρο πλησιάζει σε εμάς η συχνότητα των φωτεινών κυμάτων θα είναι μεγαλύτερη. Στην περίπτωση του ορατού φωτός, αυτό σημαίνει ότι τα φάσματα των άστρων που απομακρύνονται από εμάς μετατοπίζονται προς το ερυθρό μέρος του φάσματος, ενώ τα φάσματα των άστρων που πλησιάζουν σε εμάς μετατοπίζονται προς το κυανό μέρος. Αυτή η σχέση συχνότητας και ταχύ-

τητας, που ονομάζεται φαινόμενο Doppler, αποτελεί σχεδόν καθημερινή εμπειρία. Αν ακούσουμε προσεχτικά ένα αυτοκίνητο που κινείται με ταχύτητα στον δρόμο θα διαπιστώσουμε ότι, καθώς πλησιάζει σε εμάς, η μηχανή του παράγει οξύτερο ήχο (που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συχνότητα ηχητικών κυμάτων) απ' ό,τι αν παρέμενε ακίνητο. Αντίθετα, καθώς απομακρύνεται παράγει βαρύτερο ήχο (που αντιστοιχεί σε μικρότερη συχνότητα). Το ίδιο συμβαίνει και με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως τα κύματα του ορατού φωτός ή του ραντάρ. Με αυτόν ακριβώς τον τρόπο, υπολογίζοντας την ταχύτητα από τη μεταβολή της συχνότητας των κυμάτων του ραντάρ, ελέγχεται στους δρόμους ταχείας κυκλοφορίας η ταχύτητα των αυτοκινήτων.

Στα χρόνια που ακολούθησαν την απόδειξη της ύπαρξης άλλων γαλαξιών, ο Hubble ασχολήθηκε με την παρατήρηση των φασμάτων τους και την ταξινόμηση τους σύμφωνα με τις αποστάσεις που προέκυψαν από τον υπολογισμό της λαμπρότητας τους. Στην εποχή εκείνη οι περισσότεροι επιστήμονες πίστευαν ότι οι γαλαξίες κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις· περίμεναν λοιπόν ότι τα φάσματα τους θα ήταν μετατοπισμένα τόσο προς το κυανό όσο και προς το ερυθρό. Κι όμως βρέθηκε ότι οι περισσότεροι γαλαξίες έχουν φάσματα μετατοπισμένα προς το ερυθρό. Σχεδόν όλοι απομακρύνονται από εμάς! Ακόμη μεγαλύτερη έκπληξη προκάλεσε η ανακάλυψη που δημοσίευσε ο Hubble το 1929: το μέγεθος της μετατόπισης των φασμάτων των γαλαξιών ήταν ανάλογο με την απόσταση του γαλαξία από εμάς. Με άλλα λόγια, όσο μακρύτερα βρίσκεται ένας γαλαξίας τόσο ταχύτερα απομακρύνεται! Αυτό σήμαινε ότι το Σύμπαν δεν είναι στατικό, όπως νόμιζαν όλοι ως τότε, αλλά *διαστέλλεται*: η απόσταση μεταξύ των γαλαξιών μεγαλώνει συνεχώς.

Η ανακάλυψη ότι το Σύμπαν διαστέλλεται αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες επαναστάσεις του πνεύματος στον 20ό αιώνα. Εκ των υστέρων είναι εύκολο να απορούμε γιατί κανείς ως τότε

δεν είχε υποθέσει κάτι τέτοιο. Ο Νεύτων και οι άλλοι επιστήμονες είχαν καταλάβει ήδη από τον 17ο αιώνα ότι ένα στατικό Σύμπαν θα άρχιζε να συρρικνώνεται κάτω από την επίδραση της βαρύτητας. Αν υποθέσουμε όμως ότι το Σύμπαν δεν είναι στατικό αλλά διαστέλλεται, η συρρίκνωση δεν είναι αναγκαία. Αν μάλιστα το Σύμπαν διαστέλλεται με αρκετά γρήγορο ρυθμό, η βαρύτητα δεν θα μπορέσει ποτέ να το ακινητοποιήσει και να το αναγκάσει να συρρικνωθεί· έτσι το Σύμπαν θα συνεχίσει να διαστέλλεται για πάντα. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με έναν πύραυλο που εκτοξεύεται από την επιφάνεια της Γης: αν έχει μικρή ταχύτητα, σε κάποια στιγμή η βαρύτητα θα τον σταματήσει και θα τον αναγκάσει να επιστρέψει στη Γη· αν όμως η ταχύτητα του είναι μεγάλη (περίπου έντεκα χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο ή και περισσότερο) η βαρύτητα δεν θα μπορέσει ποτέ να τον σταματήσει· θα συνεχίσει λοιπόν για πάντα να απομακρύνεται από τη Γη. Η εξέλιξη αυτή του Σύμπαντος θα μπορούσε να είχε προβλεφθεί με βάση τη θεωρία του Νεύτωνα ήδη από τον 19ο, τον 18ο ή ακόμη και τον 17ο αιώνα. Αλλά η πεποίθηση για ένα στατικό Σύμπαν ήταν τόσο ισχυρή που διατηρήθηκε ως τις αρχές του 20ού αιώνα. Ακόμη και ο Αϊνστάιν οδηγήθηκε από την πεποίθηση αυτή στο να τροποποιήσει τη θεωρία του — έτσι που να προβλέπει ένα στατικό Σύμπαν — προσθέτοντας στις εξισώσεις της έναν όρο που τον ονόμασε «*κοσμολογική σταθερά*». Ο όρος αυτός αντιστοιχούσε σε μια καινούργια δύναμη «αντιβαρύτητας» που, αντίθετα με τις άλλες δυνάμεις, δεν είχε κάποια υλική αιτία αλλά υπήρχε από την αρχή μέσα στην ίδια τη δομή του χωροχρόνου: ο χωροχρόνος είχε από μόνος του την τάση να επεκτείνεται τόσο ακριβώς όσο χρειαζόταν για να εξισορροπείται η συρρίκνωση του από την επίδραση της βαρύτητας. Έτσι μπορούσε να προκύπτει τελικά ένα στατικό Σύμπαν. Ένας μόνον επιστήμονας επέμεινε στις αρχικές εξισώσεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας που περιείχαν την πρόβλεψη για το μη στατι-

κό Σύμπαν. Ενώ και ο ίδιος ο δημιουργός της, ο Αϊνστάιν, και οι άλλοι φυσικοί προσπαθούσαν να βρουν τρόπους για να αποφύγουν αυτήν την πρόβλεψη, ο Ρώσος φυσικός και μαθηματικός Alexander Friedmann προσπαθούσε να την εξηγήσει.

Ο Friedmann έκανε δύο απλές υποθέσεις: ότι το Σύμπαν φαίνεται το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν κοιτάξουμε, και ότι αυτό θα ίσχυε κι αν παρατηρούσαμε το Σύμπαν από οπουδήποτε αλλού. Από αυτές και μόνον τις δύο υποθέσεις και τις αρχικές εξισώσεις της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, ο Friedmann έδειξε ότι δεν πρέπει να περιμένουμε ένα στατικό Σύμπαν. Στην πραγματικότητα, το 1922, αρκετά χρόνια πριν από την ανακάλυψη του Hubble, ο Friedmann προέβλεψε ακριβώς ό,τι παρατήρησε ο Hubble!

Φυσικά η πρώτη υπόθεση του Friedmann (ότι το Σύμπαν φαίνεται το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν κοιτάξουμε) δεν είναι απόλυτα σωστή· για παράδειγμα, τα άλλα άστρα του γαλαξία μας σχηματίζουν μια φωτεινή λωρίδα που διασχίζει το νυχτερινό ουρανό, τον «Γαλαξία». Αλλά αν κοιτάξουμε στους μακρινούς γαλαξίες βλέπουμε ότι είναι διασκορπισμένοι περίπου ομοιόμορφα στον ουρανό. Έτσι το Σύμπαν φαίνεται πραγματικά το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, όταν το βλέπουμε όπως φαίνεται σε μεγάλη κλίμακα σε σχέση με τις αποστάσεις μεταξύ των γαλαξιών και αγνοήσουμε τις διαφορές του στις μικρότερες κλίμακες. Για πολλά χρόνια αυτή η εξήγηση ήταν αρκετή για να γίνει αποδεκτή η πρώτη υπόθεση του Friedmann, και ικανοποιητική για μια πρώτη προσέγγιση του πραγματικού Σύμπαντος. Αλλά πριν από είκοσι χρόνια μια ευτυχής συγκυρία αποκάλυψε πως η υπόθεση αυτή είναι πραγματικά ακριβής για την περιγραφή του Σύμπαντος.

Το 1965 δυο Αμερικανοί φυσικοί, ο Arno Penzias και ο Robert Wilson, δοκίμαζαν μια καινούργια κεραία ανίχνευσης μικροκυμάτων, μεγάλης ευαισθησίας. (Τα μικροκύματα είναι

ηλεκτρομαγνητικά κύματα μήκους κύματος μερικών εκατοστομέτρων). Συμπτωματικά, παρατήρησαν ότι η κεραία τους ανίχνευε κάποιον περίεργο «θόρυβο» και προσπάθησαν να εντοπίσουν την πηγή εκπομπής του. Το πιο περίεργο ήταν ότι ο θόρυβος δεν φαινόταν να έρχεται από συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αν προερχόταν από την ίδια την ατμόσφαιρα έπρεπε να ήταν δυνατότερος όταν η κεραία είχε κάποια κλίση και πιο αδύνατος όταν ήταν κατακόρυφη, επειδή οι πλάγιες διαδρομές μέσα στην ατμόσφαιρα είναι μακρύτερες από τις κατακόρυφες. Αλλά ο θόρυβος δεν φαινόταν να εξαρτάται από την κλίση της κεραίας· έπρεπε λοιπόν να προέρχεται από κάπου έξω από την ατμόσφαιρα. Ακόμη, επειδή ήταν ίδιος μέρα και νύχτα και όλες τις εποχές του χρόνου, ανεξάρτητα από την κίνηση της Γης γύρω από τον άξονα της και από τον Ήλιο, έπρεπε να προέρχεται από κάπου έξω από το ηλιακό σύστημα, και μάλιστα έξω και από το γαλαξία μας — αφού, καθώς η Γη κινείται, η κεραία στρέφεται προς διάφορες κατευθύνσεις στο γαλαξία. Στην πραγματικότητα, αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα πρέπει να έρχονται σε εμάς από όλο σχεδόν το παρατηρούμενο Σύμπαν και αφού φαίνονται τα ίδια σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, πρέπει και το Σύμπαν να είναι το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Σήμερα γνωρίζουμε ότι σε οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν κοιτάξουμε ο θόρυβος αυτός ποτέ δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 0,01%. Ο Penzias και ο Wilson λοιπόν, έπεσαν τυχαία πάνω σε μία πραγματικά ακριβή επιβεβαίωση της πρώτης υπόθεσης του Friedmann.

Περίπου την ίδια εποχή δύο άλλοι Αμερικανοί φυσικοί, ο Bob Dicke και ο Jim Peebles, ενδιαφέρονταν επίσης για τα μικροκύματα. Μελετούσαν μία υπόθεση του George Gamow (που ήταν κάποτε μαθητής του Friedmann) ότι το Σύμπαν στο μακρινό παρελθόν έπρεπε να είναι πολύ πυκνό και πυρακτωμένο από την μεγάλη του θερμοκρασία. Ο Dicke και ο Peebles υποστήριξαν ότι θα μπορούσαμε να δούμε ακόμη και σήμερα τη λάμψη αυτής της

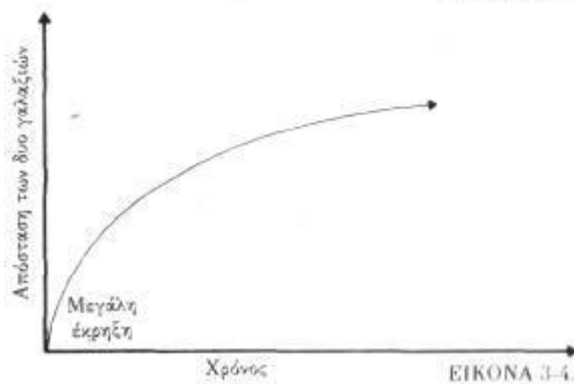
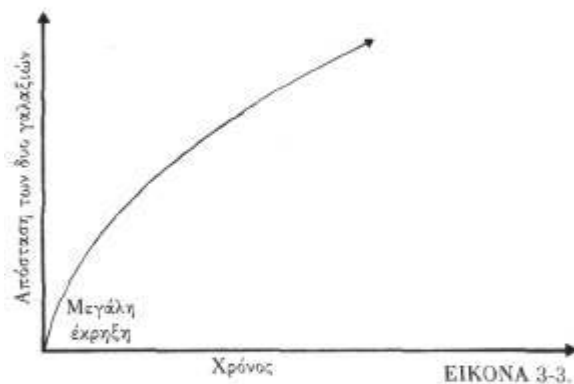
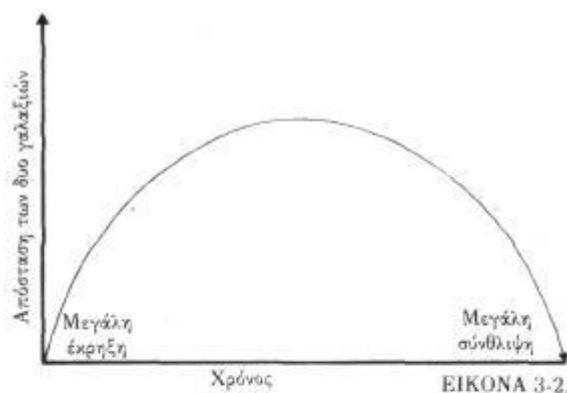
πυράκτωσης του Σύμπαντος, επειδή το φως κάποιων μακρινών περιοχών του θα έφτανε σε εμάς μόλις τώρα. Αλλά η διαστολή του Σύμπαντος θα προκαλούσε στο φως αυτό μια μεγάλη μετατόπιση προς το ερυθρό, τόσο ώστε να φτάνει σε εμάς με τη μορφή μικροκυμάτων (το μήκος κύματος από μερικά εκατομμυριοστά του εκατοστομετρου της λάμψης πυράκτωσης θα έφτανε ως εμάς μερικά εκατοστόμετρα των μικροκυμάτων). Μάλιστα ο Dicke και ο Peebles ετοιμάζονταν να αρχίσουν έρευνες για τα μικροκύματα αυτά όταν ο Penzias και ο Wilson έμαθαν για τις εργασίες τους και κατάλαβαν ότι επρόκειτο γι' αυτό που ήδη είχαν ανακαλύψει! (Για την ανακάλυψη τους αυτή, οι Penzias και Wilson πήραν το 1978 το βραβείο Nobel).

Όλες αυτές οι ενδείξεις ότι το Σύμπαν φαίνεται το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν κοιτάξουμε θα μπορούσαν να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι κατέχουμε μια ειδική θέση στο Σύμπαν: αφού παρατηρούμε ότι όλοι οι άλλοι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς, τότε εμείς βρισκόμαστε στο κέντρο του Σύμπαντος. Υπάρχει όμως και μία άλλη εξήγηση: το Σύμπαν μπορεί να φαίνεται το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και από τους άλλους γαλαξίες. Αυτή, όπως είδαμε, είναι η δεύτερη υπόθεση του Friedmann. Δεν έχουμε καμία ένδειξη ότι είναι σωστή ή όχι. Την πιστεύουμε από μετριοφροσύνη και μόνο: θα ήταν πολύ περίεργο αν το Σύμπαν φαινόταν το ίδιο γύρω από εμάς, αλλά όχι γύρω από οποιοδήποτε άλλο σημείο του! Στο Σύμπαν που ισχύουν οι δύο υποθέσεις του Friedmann, στο μοντέλο του Friedmann, όλοι οι γαλαξίες απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο. Κάτι ανάλογο συμβαίνει σε ένα μπαλόνι που φουσκώνει: αν παρατηρήσουμε οποιαδήποτε σημεία της επιφάνειας του καθώς διαστέλλεται, θα δούμε ότι απομακρύνονται το ένα από το άλλο" δεν υπάρχει όμως κάποιο σημείο που να μπορούμε να πούμε ότι είναι το κέντρο της διαστολής. Επιπλέον, όσο περισσότερο απέχουν τα σημεία τόσο ταχύτερα απομακρύνονται. Με παρόμοιο

τρόπο, στο μοντέλο του Friedmann η ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών είναι ανάλογη της απόστασης τους. Έτσι, το μοντέλο προέβλεπε ότι η μετατόπιση προς το ερυθρό θα πρέπει να είναι *ανάλογη της απόστασης* από εμάς, ακριβώς όπως το παρατήρησε ο Hubble. Παρ' όλη την επιτυχία του μοντέλου και την πρόβλεψη των παρατηρήσεων του Hubble, η εργασία του Friedmann έμεινε σχετικά άγνωστη για αρκετά χρόνια, ώσπου προτάθηκαν παρόμοια μοντέλα από άλλους φυσικούς για να εξηγηθούν αυτές οι παρατηρήσεις.

Αν και ο Friedmann βρήκε μόνο το ένα, στην πραγματικότητα υπάρχουν τρία διαφορετικά μοντέλα που πληρούν τις δύο βασικές υποθέσεις του Friedmann. Στο πρώτο μοντέλο (αυτό που βρήκε ο Friedmann), το Σύμπαν διαστέλλεται αρκετά αργά' έτσι η βαρυτική έλξη μεταξύ των γαλαξιών αναγκάζει τη διαστολή να επιβραδυνθεί και τελικά να σταματήσει. Τότε οι γαλαξίες αρχίζουν να πλησιάζουν μεταξύ τους και το Σύμπαν συστέλλεται. Η εικόνα 3-2 δείχνει πώς μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών γαλαξιών καθώς περνάει ο χρόνος. Αρχίζει από το μηδέν, αυξάνεται σε μία μέγιστη τιμή και ύστερα μειώνεται και φτάνει πάλι στο μηδέν. Στο δεύτερο μοντέλο, το Σύμπαν διαστέλλεται τόσο γρήγορα που η βαρυτική έλξη, αν και το επιβραδύνει κάπως, δεν μπορεί να το σταματήσει. Η εικόνα 3-3 δείχνει τη μεταβολή της απόστασης στο συγκεκριμένο μοντέλο. Αρχίζει από το μηδέν και συνεχίζει να αυξάνεται καθώς οι γαλαξίες απομακρύνονται με σταθερή ταχύτητα. Στο τρίτο μοντέλο, το Σύμπαν διαστέλλεται τόσο γρήγορα όσο ακριβώς χρειάζεται για να αποφύγει την τελική συστολή. Στην περίπτωση αυτή, όπως δείχνει η εικόνα 3-4, η απόσταση αρχίζει και πάλι από το μηδέν και αυξάνεται επ' άπειρον. Αλλά τώρα η ταχύτητα που απομακρύνονται οι γαλαξίες μεταξύ τους μειώνεται συνεχώς, αν και δεν μηδενίζεται ποτέ.

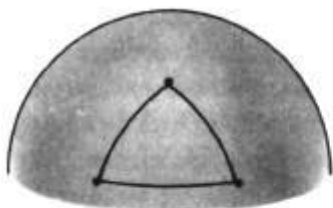
Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του πρώτου μοντέλου του



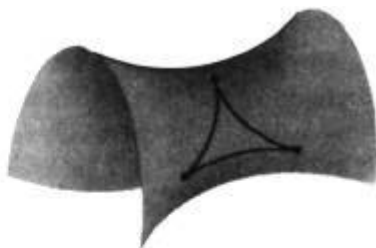
Friedmann είναι ότι το Σύμπαν δεν είναι άπειρο στο χώρο, αλλά και ότι ο χώρος δεν έχει κάποιο όριο. Η βαρύτητα είναι τόσο ισχυρή ώστε ο χώρος καμπυλώνεται προς τον εαυτό του· έτσι διαμορφώνεται μια κλειστή καμπύλη «επιφάνεια» τριών διαστάσεων, όπως είναι στις δύο διαστάσεις η επιφάνεια της Γης. (Αν κάποιος κινείται προς κάποια κατεύθυνση στην επιφάνεια της Γης δεν φτάνει ποτέ σε κάποια άκρη ή όριο, αλλά κάποτε ξαναγυρίζει στο σημείο εκκίνησης του). Σ' αυτό το μοντέλο ο χρόνος είναι επίσης πεπερασμένος και μοιάζει με ένα τμήμα γραμμής με δύο όρια, μία αρχή και ένα τέλος. Θα δούμε αργότερα ότι αν συνδυάσουμε τη γενική θεωρία της σχετικότητας με την αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής, είναι δυνατό να έχουμε πεπερασμένο χώρο και πεπερασμένο χρόνο χωρίς καθόλου άκρες ή όρια.

Η ιδέα ότι μπορούμε να κινηθούμε προς μία κατεύθυνση μέσα στο Σύμπαν και να επιστρέψουμε εκεί από όπου ξεκινήσαμε είναι καλή για τα μυθιστορήματα επιστημονικής φαντασίας, δεν έχει όμως μεγάλη πρακτική σημασία. Μπορούμε να αποδείξουμε ότι πριν προλάβει κανείς να ξαναγυρίσει, το Σύμπαν θα έχει προλάβει να συρρικνωθεί· για να ξαναγυρίσει κανείς πριν από το τέλος του Σύμπαντος πρέπει να κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη του φωτός — και αυτό δεν επιτρέπεται!

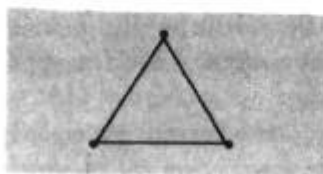
Στο πρώτο μοντέλο του Friedmann, που αρχικά διαστέλλεται και στη συνέχεια συστέλλεται, ο χώρος «κλείνεται» στον εαυτό του, όπως η επιφάνεια μιας σφαίρας. Συνεπώς, είναι πεπερασμένος σε έκταση. Στο δεύτερο μοντέλο, που διαστέλλεται για πάντα, ο χώρος «ανοίγει», είναι καμπυλωμένος κατά την αντίθετη έννοια, όπως η επιφάνεια ενός σαμαριού. Στην περίπτωση αυτή ο χώρος είναι άπειρος. Τέλος, στο τρίτο μοντέλο του Friedmann, που έχει ακριβώς το ρυθμό διαστολής που χρειάζεται για να μην καταλήξει σε συστολή, ο χώρος είναι επίπεδος (και συνεπώς είναι και πάλι άπειρος).



Θετικά καμπυλωμένος χώρος
(πρώτο μοντέλο του Friedmann)



Αρνητικά καμπυλωμένος χώρος
(δεύτερο μοντέλο του Friedmann)



Επίπεδος χώρος
(τρίτο μοντέλο του Friedmann)

Αλλά ποιά από τα τρία μοντέλα περιγράφει το Σύμπαν; Θα σταματήσει κάποτε το Σύμπαν να διαστέλλεται και θα αρχίσει να συστέλλεται ή θα συνεχίσει να διαστέλλεται επ' άπειρον; Για να απαντήσουμε χρειάζεται να γνωρίζουμε τον σημερινό ρυθμό διαστολής του Σύμπαντος και τη σημερινή του μέση πυκνότητα. Αν η πυκνότητα είναι μικρότερη μιας κρίσιμης τιμής, που προσδιορίζεται από το ρυθμό διαστολής, η βαρύτητα θα είναι αρκετά μικρή, οπότε δεν θα μπορεί να σταματήσει τη διαστολή. Αν όμως η πυκνότητα υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή, η βαρύτητα θα είναι αρκετά μεγάλη, οπότε κάποια στιγμή θα σταματήσει την διαστολή και στη συνέχεια θα αναγκάσει το Σύμπαν να συσταλλεί.

Μπορούμε να προσδιορίσουμε τον σημερινό ρυθμό διαστολής

αν υπολογίσουμε τις ταχύτητες απομάκρυνσης των άλλων γαλαξιών από εμάς, με τη βοήθεια του φαινομένου Doppler. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια. Αλλά οι αποστάσεις των γαλαξιών δεν είναι επακριβώς γνωστές, επειδή μπορεί να μετρηθούν μόνο έμμεσα. Έτσι, το μόνο που γνωρίζουμε είναι ότι το Σύμπαν διαστέλλεται κατά 5% με 10% περίπου κάθε ένα δισεκατομμύριο χρόνια. Η αβεβαιότητα μάλιστα για τη σημερινή μέση πυκνότητα του Σύμπαντος είναι ακόμη μεγαλύτερη. Αν προσθέσουμε τις μάζες όλων των άστρων που βλέπουμε στο Γαλαξία μας και στους άλλους γαλαξίες, η συνολική μάζα είναι το ένα εκατοστό όσης χρειάζεται για να σταματήσει η διαστολή του Σύμπαντος, ακόμη κι αν υποθέσουμε έναν πολύ μικρό ρυθμό διαστολής. Ο Γαλαξίας μας όμως και οι υπόλοιποι γαλαξίες πρέπει να περιέχουν μία μεγάλη ποσότητα «σκοτεινής ύλης» που δεν μπορούμε να τη δούμε, αλλά γνωρίζουμε ότι πρέπει να υπάρχει λόγω της βαρυτικής της έλξης στις τροχιές των άστρων μέσα στους γαλαξίες. Επιπλέον, επειδή οι περισσότεροι γαλαξίες βρίσκονται σε σμήνη, μπορούμε να συμπεράνουμε με ανάλογο τρόπο την παρουσία και άλλων ποσοτήτων σκοτεινής ύλης στα διαστήματα ανάμεσα στους γαλαξίες από τα αποτελέσματα της επίδρασης της στις κινήσεις των γαλαξιών. Κι αν ακόμη προσθέσουμε όλες αυτές τις ποσότητες σκοτεινής ύλης, δεν έχουμε παρά το ένα δέκατο του ποσού που χρειάζεται για να σταματήσει η διαστολή. Παρ' όλα αυτά δεν μπορούμε να αποκλείσουμε την δυνατότητα να υπάρχει και κάποια άλλη μορφή ύλης, κατανεμημένη σχεδόν ομοιόμορφα μέσα στο Σύμπαν, που δεν την έχουμε ανιχνεύσει ακόμη και η οποία μπορεί να επαρκεί (μαζί με την ήδη γνωστή) για να συμπληρωθεί το απαιτούμενο ποσό. Οι ενδείξεις που έχουμε προς το παρόν *οδηγούν στο* συμπέρασμα ότι πιθανόν το Σύμπαν θα συνεχίσει να διαστέλλεται επ' άπειρον αλλά για το μόνο που είμαστε πραγματικά βέβαιοι είναι ότι ακόμη κι αν καταλήξει

κάποτε να συρρικνωθεί, αυτό θα συμβεί στο μέλλον μετά από άλλα δέκα δισεκατομμύρια χρόνια περίπου, αφού ήδη διαστέλλεται για τόσα χρόνια τουλάχιστον στο παρελθόν. Δεν πρέπει όμως να ανησυχούμε: όταν θα φτάσει αυτή η εποχή, η ανθρωπότητα, αν δεν έχει αποικίσει άλλα αστρικά συστήματα, θα είναι ήδη νεκρή από πολύ καιρό αφού θα έχει εξαφανιστεί και αυτή μαζί με την εξαφάνιση του Ήλιου!

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των μοντέλων του Friedmann είναι ότι κάποια στιγμή στο παρελθόν (πριν από δέκα με είκοσι δισεκατομμύρια χρόνια) η απόσταση των γειτονικών γαλαξιών πρέπει να ήταν μηδενική. Τη στιγμή αυτή, που ονομάζεται *στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης*, η πυκνότητα του Σύμπαντος και η καμπυλότητα του χωροχρόνου πρέπει να ήταν άπειρη. Στα μαθηματικά όμως δεν μπορούμε να χειριστούμε τους άπειρα μεγάλους αριθμούς όπως τους υπόλοιπους· αυτό σημαίνει ότι η γενική θεωρία της σχετικότητας, (στην οποία βασίζονται τα μοντέλα του Friedmann) προβλέπει ότι υπάρχει ένα σημείο στο χωρόχρονο του Σύμπαντος όπου καταρρέει η ίδια η θεωρία. Στα μαθηματικά ένα τέτοιο σημείο ονομάζεται «ανωμαλία» (singularity)*. Στην πραγματικότητα, όλες οι θεωρίες της φυσικής προϋποθέτουν ότι ο χωρόχρονος είναι αρκετά ομαλός και σχεδόν επίπεδος, και γι' αυτό καταρρέουν στην ανωμαλία της Μεγάλης Έκρηξης, όπου η καμπυλότητα του χωροχρόνου είναι άπειρη. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη κι αν υπήρχαν συμβάντα πριν από τη Μεγάλη Έκρηξη, δεν θα μπορούσαμε να τα συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς μας για να προσδιορίσουμε τί θα συνέβαινε μετά από αυτήν: η ίδια η δυνατότητα πρόβλεψης καταρρέει τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης. Αντίστοιχα, αν ξέρουμε τι συνέβη

* Η "singularity" είναι ένα σημείο ή μια περιοχή του χωροχρόνου, όπου διακόπτεται η επέκταση όλων των τροχιών (γεωδαισιικών και μη). Ο όρος "singularity" θα μπορούσε να αποδοθεί και ως «ακρότητα» ή «μοναδικότητα». (Σ.τ.μ.).

μετά την Μεγάλη έκρηξη δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε τι συνέβη πριν. Σε ό,τι μας αφορά, τα γεγονότα πριν από τη Μεγάλη έκρηξη δεν έχουν συνέπειες· έτσι δεν μπορεί να περιλαμβάνονται σε ένα επιστημονικό μοντέλο για το Σύμπαν. Μπορούμε λοιπόν να τα αγνοούμε και να λέμε ότι ο χρόνος είχε μία αρχή τη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης.

Σε πολλούς δεν αρέσει η ιδέα της αρχής του χρόνου, ίσως επειδή φαίνεται σαν απίστευτο θαύμα. (Αντίθετα, η Ρωμαιοκαθολική χριστιανική εκκλησία χρησιμοποίησε το μοντέλο της Μεγάλης έκρηξης, και το 1951 διακήρυξε επίσημα ότι συμφωνεί με τις γραπτές της παραδόσεις). Μερικοί λοιπόν επιστήμονες προσπάθησαν να αποφύγουν το συμπέρασμα ότι πρέπει να υπήρξε μία τέτοια αρχή. Οι περισσότεροι από αυτούς υποστήριξαν τη «θεωρία της σταθερής κατάστασης». Η θεωρία αυτή που διατυπώθηκε το 1948 από δυο Αυστριακούς αστρονόμους, τον Herman Bontzi και τον Thomas Gold, και από τον Βρετανό Fred Hoyle, προέβλεπε τη *συνεχή δημιουργία* καινούργιας ύλης και καινούργιων γαλαξιών. Καθώς οι γαλαξίες απομακρύνονται μεταξύ τους οι καινούργιοι θα σχηματίζονταν στον ενδιάμεσο κενό χώρο. Έτσι το Σύμπαν θα έμοιαζε το ίδιο σε όλες τις στιγμές του χρόνου και σε όλα τα σημεία του χώρου. Η δημιουργία της καινούργιας ύλης απαιτούσε μία τροποποίηση της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, επειδή όμως ο ρυθμός δημιουργίας ήταν πολύ μικρός (σε έναν περίπου χρόνο ένα σωματίδιο κάθε κυβικό χιλιόμετρο), δεν ερχόταν σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα. Η θεωρία αυτή ήταν καλή, με την έννοια που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 1: ήταν απλή και έκανε συγκεκριμένες προβλέψεις που ήταν δυνατό να ελεγχθούν με βάση τις παρατηρήσεις. Μία από τις προβλέψεις της ήταν ότι ο αριθμός των γαλαξιών ή παρόμοιων αντικειμένων που βρίσκονται σε οποιαδήποτε περιοχή ορισμένης έκτασης θα ήταν ο ίδιος, οπουδήποτε και οποτεδήποτε μέσα στο Σύμπαν. Το 1960 ο Martin Ryle και άλλοι αστρονό-

μοι στο Cambridge ερεύνησαν την κατανομή των θέσεων στο Σύμπαν *κάποιων* πηγών ραδιοκυμάτων. Έδειξαν ότι οι περισσότερες απ' αυτές τις πηγές πρέπει να βρίσκονται έξω από το Γαλαξία μας. Κάποιες, μάλιστα, φαίνονταν πολύ ισχυρότερες από τις υπόλοιπες. Υπέθεσαν λοιπόν ότι οι πιο ισχυρές πηγές είναι όσες βρίσκονται πιο κοντά μας. Από την κατανομή των θέσεων όλων των πηγών ραδιοκυμάτων στο Σύμπαν φάνηκε ότι υπήρχαν λιγότερες πηγές στις περιοχές γύρω από το Γαλαξία μας από όσες σε άλλες πιο μακρινές περιοχές με την ίδια έκταση. Αυτό σήμαινε πως αλλού οι πηγές είναι περισσότερες απ' ό,τι εδώ ή πως άλλοτε (στο παρελθόν, όταν άρχισαν να απομακρύνονται από αυτές τα ραδιοκύματα που φτάνουν σήμερα εδώ) οι πηγές ήταν περισσότερες απ' ό,τι τώρα. Και οι δύο ερμηνείες αντιστέκονται στις προβλέψεις της θεωρίας της σταθερής κατάστασης. Επιπλέον, η ανακάλυψη του Penzias και του Wilson έδειχνε ότι το Σύμπαν πρέπει να ήταν πυκνότερο στο παρελθόν. Έτσι η θεωρία της σταθερής κατάστασης έπρεπε να εγκαταληφθεί.

Δύο άλλοι επιστήμονες, οι Σοβιετικοί Evgenii Lifshitz και Isaac Khalatnikov, προσπάθησαν το 1963 να αποφύγουν με διαφορετικό τρόπο το συμπέρασμα της Μεγάλης έκρηξης και της αρχής του χρόνου: υπέθεσαν ότι η Μεγάλη έκρηξη μπορεί να είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των μοντέλων του Friedmann, που μόνο προσεγγιστικά περιγράφουν το πραγματικό Σύμπαν. Ίσως όλα τα άλλα μοντέλα, που θα περιέγραφαν ακριβέστερα το Σύμπαν, δεν θα περιλάμβαναν μια ανωμαλία όπως η στιγμή της Μεγάλης έκρηξης. Στα μοντέλα του Friedmann οι γαλαξίες απομακρύνονται ο ένας από τον άλλον χωρίς να εκτελούν και κάποιες μικρές πλάγιες κινήσεις, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα. Έτσι θα μπορούσε να υπάρχουν κάποια άλλα μοντέλα όπου οι γαλαξίες αντί να βρίσκονταν κάποια στιγμή ακριβώς στο ίδιο σημείο, θα βρίσκονταν σε μία μικρή περιοχή

πολύ κοντά μεταξύ τους. Ίσως λοιπόν η διαστολή του Σύμπαντος δεν προήλθε από μια στιγμή αρχικής Μεγάλης έκρηξης αλλά από μια προηγούμενη φάση συστολής: καθώς το Σύμπαν συστελλόταν, τα κομμάτια της ύλης που το αποτελούν θα μπορούσαν να αποφύγουν τη σύγκρουση, να περάσουν το ένα δίπλα στο άλλο, και να αρχίσουν να απομακρύνονται, με αποτέλεσμα τη σημερινή φάση διαστολής. Ο Lifshitz και ο Khalatnikov μελέτησαν μοντέλα παρόμοια με αυτά του Friedmann, συνυπολογίζοντας τις άτακτες και τυχαίες κινήσεις των γαλαξιών που παρατηρούμε στο πραγματικό Σύμπαν. Έδειξαν ότι και αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν μια ανωμαλία, αλλά μόνον αν οι γαλαξίες κινούνταν με *κάποιον* πολύ ειδικό τρόπο. Συμπέραναν λοιπόν ότι αφού φαίνεται ότι στη γενική περίπτωση δεν οδηγούμαστε σε μοντέλα με μια ανωμαλία, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι στην πραγματικότητα δεν υπήρξε μια Μεγάλη έκρηξη. Αργότερα όμως βρήκαν ότι υπήρχαν και γενικότερες περιπτώσεις μοντέλων όπου, αν και οι γαλαξίες δεν κινούνταν με κάποιον ειδικό τρόπο, εξακολουθούσαν να προκύπτουν ανωμαλίες, όπως και στα μοντέλα του Friedmann. Έτσι το 1970 ο Lifshitz και ο Khalatnikov απέσυραν την αρχική υπόθεση τους.

Η εργασία του Lifshitz και του Khalatnikov ήταν πολύ χρήσιμη γιατί έδειξε ότι σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας θα *μπορούσε* να υπάρχει μία ανωμαλία στο πραγματικό Σύμπαν. Αλλά δεν έδωσε απάντηση στο καθοριστικό ερώτημα: *Έπρεπε* να υπάρχει μία ανωμαλία; Η ίδια η γενική θεωρία της σχετικότητας προέβλεπε την ύπαρξη μιας αρχής στο χρόνο; Η απάντηση προήλθε από μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση: το 1965, ο Βρετανός μαθηματικός και φυσικός Roger Penrose χρησιμοποίησε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κώνων του φωτός στη γενική θεωρία της σχετικότητας και το γεγονός ότι η βαρύτητα είναι πάντοτε ελκτική· έδειξε λοιπόν ότι όταν ένα άστρο καταρρέει εξαιτίας της ίδιας του της βαρύτητας, είναι εγκλωβι-

σμένο σε μια περιοχή που η έκταση της επιφάνειάς της τείνει να μηδενιστεί. Και αφού η επιφάνεια της περιοχής που περικλείει το άστρο μηδενίζεται, μηδενίζεται και ο όγκος της. Όλη η ύλη του άστρου συμπιέζεται σε μία περιοχή μηδενικού όγκου, οπότε η πυκνότητα και η καμπυλότητα του χωροχρόνου γίνονται άπειρες. Εμφανίζεται δηλαδή μια ανωμαλία σε μία περιοχή του χωροχρόνου που ονομάζεται «*μαύρη τρύπα*».

Εκ πρώτης όψεως, το αποτέλεσμα του Penrose, που ονομάστηκε *θεώρημα*, του Penrose, αφορούσε μόνον τα άστρα· δεν έδινε καμία απάντηση στο ερώτημα αν υπήρξε ή όχι μια ανάλογη ανωμαλία στο παρελθόν ολόκληρου του Σύμπαντος. Την εποχή που ο Penrose διατύπωνε το θεώρημα του, ήμουν μεταπτυχιακός φοιτητής και αναζητούσα απεγνωσμένα ένα πρόβλημα για να συμπληρώσω την διδακτορική διατριβή μου. Δύο χρόνια πριν είχα μάθει ότι έπασχα από μια παραλυτική αρρώστια, την μυοατροφική πλευρική σκλήρυνση. Είχα μπροστά μου μόνο ένα ή δύο χρόνια ζωής. Σε αυτές τις συνθήκες δεν φαινόταν να έχει νόημα το να συνεχίσω την εργασία μου για το διδακτορικό δίπλωμα· δεν περίμενα ότι θα ζήσω τόσο πολύ. Παρ' όλ' αυτά, πέρασαν δύο χρόνια και δεν ήμουν και πολύ χειρότερα. Στην πραγματικότητα, τα πράγματα πήγαιναν αρκετά καλά και είχα συνδεθεί μ' ένα πολύ καλό κορίτσι, την Jane Wilde. Αλλά για να κάνουμε οικογένεια χρειαζόμουν δουλειά, και για να βρω δουλειά χρειαζόμουν το διδακτορικό δίπλωμα.

Το 1965 διάβασα για το θεώρημα του Penrose, ότι κάθε σώμα που συστέλλεται και καταρρέει από την ίδια του την βαρύτητα πρέπει τελικά να σχηματίσει μια ανωμαλία. Κατάλαβα ότι αν κάποιος αντέστρεφε την κατεύθυνση του χρόνου στο θεώρημα του Penrose, έτσι που η συστολή να γίνει διαστολή, οι συνθήκες του θεωρήματος θα εξακολουθούσαν να ισχύουν (αρκούσε να αντιστοιχεί στη σημερινή κατάσταση του Σύμπαντος ένα μοντέλο του Friedmann). Το θεώρημα του Penrose έδειξε ότι σε κάθε

άστρο που καταρρέει πρέπει να υπάρχει ένα τέλος με μία ανωμαλία' το αντίστροφο στον χρόνο επιχείρημα έδειξε ότι σε κάθε Σύμπαν που διαστέλλεται (και αντιστοιχεί σε ένα μοντέλο του Friedmann) πρέπει να υπάρχει μία αρχή με μία ανωμαλία. Για μαθηματικούς λόγους, το θεώρημα του Penrose απαιτούσε να είναι άπειρος ο χώρος. Έτσι μπορούσα να το χρησιμοποιήσω για να αποδείξω ότι θα έπρεπε να υπάρχει μια ανωμαλία μόνο στην περίπτωση που το Σύμπαν διαστέλλεται αρκετά γρήγορα, ώστε να αποφύγει μία επόμενη φάση συστολής (γιατί μόνο σ' αυτή την περίπτωση αντιστοιχούν μοντέλα του Friedmann όπου ο χώρος είναι άπειρος).

Στα επόμενα χρόνια ανέπτυξα νέες μαθηματικές τεχνικές, προσπαθώντας να ανατρέσω τις ειδικές προϋποθέσεις των θεωρημάτων για τις ανωμαλίες. Το αποτέλεσμα ήταν να δημοσιευθεί μια κοινή εργασία από τον Penrose κι εμένα, το 1970, όπου επιτέλους αποδεικνυόταν ότι η ανωμαλία της Μεγάλης έκρηξης έπρεπε να υπάρχει, με τις μόνες προϋποθέσεις ότι η γενική θεωρία της σχετικότητας ισχύει και ότι το Σύμπαν περιέχει όση ποσότητα ύλης παρατηρούμε. Πολλοί επιστήμονες αντιτάχθηκαν αρχικά στην εργασία μας επειδή νόμιζαν πως η όλη ιδέα των ανωμαλιών ήταν αντίθετη στο πνεύμα της θεωρίας του Αϊνστάιν και κατέστρεφε την ομορφιά της. Παρ' όλα αυτά, κανείς δεν μπορεί να διαφωνήσει με ένα μαθηματικό θεώρημα. Έτσι, τελικά, η εργασία μας έγινε γενικά αποδεκτή. Σήμερα όλοι σχεδόν οι φυσικοί δέχονται ότι το Σύμπαν άρχισε να υπάρχει με μία ανωμαλία. Η μεγάλη ειρωνεία όμως βρίσκεται στο γεγονός ότι εγώ ο ίδιος έχω αλλάξει γνώμη· τώρα προσπαθώ να πείσω τους φυσικούς ότι στην πραγματικότητα δεν υπήρξε καμιά ανωμαλία στην αρχή του Σύμπαντος! Όπως θα δούμε αργότερα, οι ανωμαλίες μπορεί να εξαφανιστούν αν συμπεριλάβουμε και τα κβαντικά φαινόμενα στα μοντέλα μας για το Σύμπαν.

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε πώς μετασχηματίστηκε μέσα σε

μισό αιώνα η εικόνα του ανθρώπου για το Σύμπαν, μια εικόνα, που είχε διαμορφωθεί στη διάρκεια χιλιετιών. Αφετηρία στάθηκε η ανακάλυψη του Hubble ότι το Σύμπαν διαστέλλεται, και η συνειδητοποίηση της ασημαντότητας του πλανήτη μας μέσα στο αχανές Διάστημα· στη συνέχεια, καθώς συσσωρεύονταν συνεχώς περισσότερες θεωρητικές και πειραματικές ενδείξεις φαίνονταν όλο και σαφέστερα ότι το Σύμπαν πρέπει να είχε μία αρχή στον χρόνο. Τελικά, αυτό το αποδείξαμε ο Penrose και εγώ το 1970, με βάση τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν. Η γενική θεωρία της σχετικότητας δεν είναι λοιπόν μια πλήρης θεωρία: δεν μπορεί να μας πει πώς άρχισε να υπάρχει το Σύμπαν, επειδή προβλέπει ότι και η ίδια και οι άλλες φυσικές θεωρίες καταρρέουν στο αρχικό σημείο και στην αρχική στιγμή του Σύμπαντος. Παρ' όλα αυτά, επειδή η γενική θεωρία της σχετικότητας είναι μια επί μέρους θεωρία, αυτό που στην πραγματικότητα δείχνουν τα θεωρήματα για τις ανωμαλίες είναι ότι κάποτε το Σύμπαν ήταν τόσο μικροσκοπικό, που τα μικροσκοπικά φαινόμενα που περιγράφει η άλλη επιμέρους θεωρία του 20ού αιώνα, η κβαντική μηχανική, δεν θα μπορούσαν πια να αγνοούνται. Στις αρχές λοιπόν της δεκαετίας του 1970 αναγκαστήκαμε να στρέψουμε την ερευνά μας από τον μακρόκοσμο προς τον μικρόκοσμο. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε τη θεωρία της κβαντικής μηχανικής, και τις προσπάθειες να συνδυαστούν οι δύο επιμέρους θεωρίες σε μια *ενιαία κβαντική θεωρία της βαρύτητας*.

4

Η αρχή της απροσδιοριστίας

Η επιτυχία των επιστημονικών θεωριών, ιδιαίτερα της θεωρίας του Νεύτωνα για τη βαρύτητα, οδήγησε στις αρχές του 19ου αιώνα τον Γάλλο φυσικό Laplace να υποστηρίξει ότι το Σύμπαν είναι απολύτως *ντετερμινιστικό*: υπέθεσε ότι πρέπει να υπάρχει ένα σύνολο φυσικών νόμων που θα μας επέτρεπε να προβλέψουμε οτιδήποτε συμβαίνει στο Σύμπαν αν γνωρίζαμε απόλυτα την κατάσταση του κάποια χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, αν γνωρίζαμε τις θέσεις και τις ταχύτητες του Ήλιου και των πλανητών κάποια στιγμή θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους του Νεύτωνα και να υπολογίσουμε την κατάσταση του ηλιακού συστήματος οποιαδήποτε άλλη στιγμή. Ο Laplace όμως δεν περιορίστηκε σ' αυτό· υποστήριξε ότι υπάρχουν παρόμοιοι νόμοι που προσδιορίζουν τα πάντα, ακόμη και την ανθρώπινη συμπεριφορά.

Το δόγμα του επιστημονικού ντετερμινισμού καταπολεμήθηκε από πολλούς που αισθάνονταν ότι περιόριζε την ελευθερία του

Θεού να παρεμβαίνει στον κόσμο, παρέμεινε όμως βασικό αξίωμα της επιστήμης ως και τα πρώτα χρόνια του αιώνα μας. Μία από τις πρώτες ενδείξεις ότι η πεποίθηση αυτή έπρεπε ίσως να εγκαταλειφθεί, παρουσιάστηκε όταν οι υπολογισμοί δυο Βρετάνων φυσικών, του Rayleigh και του James Jeans, φαινόταν να οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ένα θερμό αντικείμενο, όπως ένα άστρο, πρέπει να αντινοβολεί άπειρη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Σύμφωνα με ό,τι πίστευαν εκείνη την εποχή, ένα θερμό αντικείμενο έπρεπε να στέλνει στο περιβάλλον του ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε όλες τις συχνότητες με την ίδια ένταση, δηλαδή να ακτινοβολεί την ίδια ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε κάθε περιοχή συχνοτήτων. Επειδή όμως οι δυνατές περιοχές συχνοτήτων είναι άπειρες (ο αριθμός των κυμάτων ανά δευτερόλεπτο μπορεί να αυξάνεται επ' άπειρον: περιοχή μικροκυμάτων, περιοχή ορατού φωτός, περιοχή ακτινών X, κ.τ.λ.) είναι άπειρη και η συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας σε όλες τις συχνότητες.

Για να αποφύγει αυτό το προφανώς απαράδεκτο συμπέρασμα, ο Γερμανός φυσικός Max Planck υπέθεσε το 1900 ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται κατά ορισμένα ποσά ενέργειας που ονομάστηκαν *κβάντα*. Επιπλέον, κάθε κβάντο μεταφέρει ποσότητα ενέργειας που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των κυμάτων που εκπέμπεται· έτσι, σε αρκετά μεγάλες συχνότητες η εκπομπή ενός κβάντου θα απαιτούσε περισσότερη ενέργεια από όση ήταν διαθέσιμη. Άρα η εκπομπή ακτινοβολίας στις μεγάλες συχνότητες θα περιοριζόταν, και έτσι η συνολική ποσότητα ενέργειας θα ήταν πεπερασμένη και όχι άπειρη.

Η υπόθεση των κβάντων εξήγησε πολύ καλά τις παρατηρούμενες ποσότητες ακτινοβολούμενης ενέργειας από τα θερμά αντικείμενα, οι επιπτώσεις της όμως στο δόγμα του ντετερμινισμού δεν κατανοήθηκαν παρά μόνον το 1926, όταν ένας άλλος

Γερμανός επιστήμονας, ο Werner Heisenberg, διατύπωσε την περίφημη αρχή του, την *αρχή της απροσδιοριστίας*. Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε τη μελλοντική θέση και ταχύτητα ενός σωματιδίου πρέπει να μπορούμε να μετρήσουμε επακριβώς την τωρινή του θέση και ταχύτητα. Ο προφανής τρόπος για να πετύχουμε κάτι τέτοιο είναι να φωτίσουμε το σωματίδιο: κάποια από τα κύματα του φωτός θα ανακλαστούν πάνω του και θα υποδείξουν το σημείο όπου βρίσκεται. Δεν θα μπορούσαμε όμως να προσδιορίσουμε τη θέση του με μεγαλύτερη προσέγγιση από την απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι για να μετρήσουμε με ακρίβεια τη θέση ενός σωματιδίου χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε φως με μικρό μήκος κύματος (δηλαδή με μικρή απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων). Αλλά, από την υπόθεση των κβάντων του Planck προκύπτει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οσοδήποτε μικρή ποσότητα φωτός· πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τουλάχιστον ένα κβάντο. Αυτό το κβάντο θα προκαλέσει μια απρόβλεπτη διαταραχή στη θέση και την ταχύτητα του σωματιδίου. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης της θέσης του σωματιδίου τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε και τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια του κβάντου. Έτσι η ταχύτητα του σωματιδίου θα υποστεί μία ακόμη μεγαλύτερη διαταραχή. Με άλλα λόγια, όσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια που προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση του σωματιδίου τόσο πιο μικρή είναι η ακρίβεια που μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητα του, και αντίστροφα. Ο Heisenberg έδειξε ότι αν πολλαπλασιάσουμε την απροσδιοριστία στη θέση του σωματιδίου επί την απροσδιοριστία στην ταχύτητα του επί τη μάζα του θα έχουμε έναν αριθμό που δεν μπορεί ποτέ να γίνει πιο μικρός από ορισμένη ποσότητα, τη λεγόμενη *σταθερά του Planck*. Αυτή η ποσότητα μάλιστα δεν εξαρτάται από τον τρόπο που προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση ή την ταχύτητα

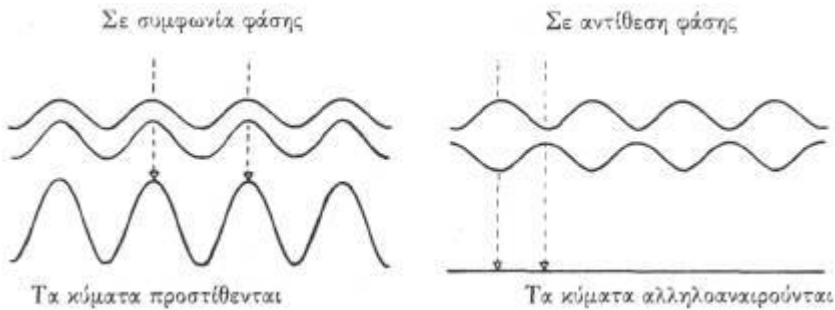
του σωματιδίου ή από το είδος του σωματιδίου: η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg είναι βασική, αναπόδραστη χαρακτηριστική ιδιότητα του Κόσμου.

Η αρχή της απροσδιοριστίας είχε βαθεία επίπτωση στην εικόνα του ανθρώπου για τον Κόσμο. Αν και πέρασαν περισσότερα από πενήντα χρόνια, αυτή η επίπτωση δεν έχει κατανοηθεί εντελώς από πολλούς φιλόσοφους, και εξακολουθεί να προκαλεί αμφισβητήσεις και αντιδικίες. Η αρχή της απροσδιοριστίας σήμαινε το τέλος του ονείρου του Laplace για μια θεωρία της φυσικής και ένα μοντέλο του Σύμπαντος που θα ήταν απόλυτα ντετερμινιστικά: δεν μπορούμε βέβαια να προβλέψουμε με απόλυτη ακρίβεια τα μελλοντικά γεγονότα του Σύμπαντος αν δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με απόλυτη ακρίβεια ούτε καν τη σημερινή του κατάσταση! Θα μπορούσαμε ίσως να φανταστούμε ότι, παρ' όλα αυτά, υπάρχει ένα σύνολο φυσικών νόμων που προσδιορίζουν απόλυτα τα μελλοντικά γεγονότα για κάποιο υπερφυσικό ον, ικανό να παρατηρεί τη σημερινή κατάσταση του Σύμπαντος χωρίς να την διαταράσσει καθόλου. Αλλά ένα τέτοιο μοντέλο του Σύμπαντος δεν θα είχε και μεγάλο ενδιαφέρον για εμάς τους θνητούς. Είναι καλύτερα να εφαρμόσουμε την αρχή της οικονομίας, γνωστή με το όνομα «ξυράφι του Occam» και να αποκόψουμε τις παραφυάδες της θεωρίας που δεν είναι δυνατό να παρατηρηθούν. Στη δεκαετία του 1920 αυτή η προσέγγιση οδήγησε τον Heisenberg, τον Erwin Schrodinger και τον Paul Dirac στο να επαναδιατυπώσουν τη μηχανική σε μία νέα θεωρία που ονομάστηκε *κβαντική μηχανική* και βασιζόταν στην αρχή της απροσδιοριστίας. Σύμφωνα με τη νέα θεωρία, τα σωματίδια δεν έχουν πια θέσεις και ταχύτητες διαχωρισμένες μεταξύ τους, σαφώς καθορισμένες και παρατηρήσιμες. Αντί γι' αυτές, έχουν μία κβαντική κατάσταση, που είναι ένας συνδυασμός θέσης και ταχύτητας.

Η κβαντική μηχανική δεν προβλέπει για ένα πείραμα ένα

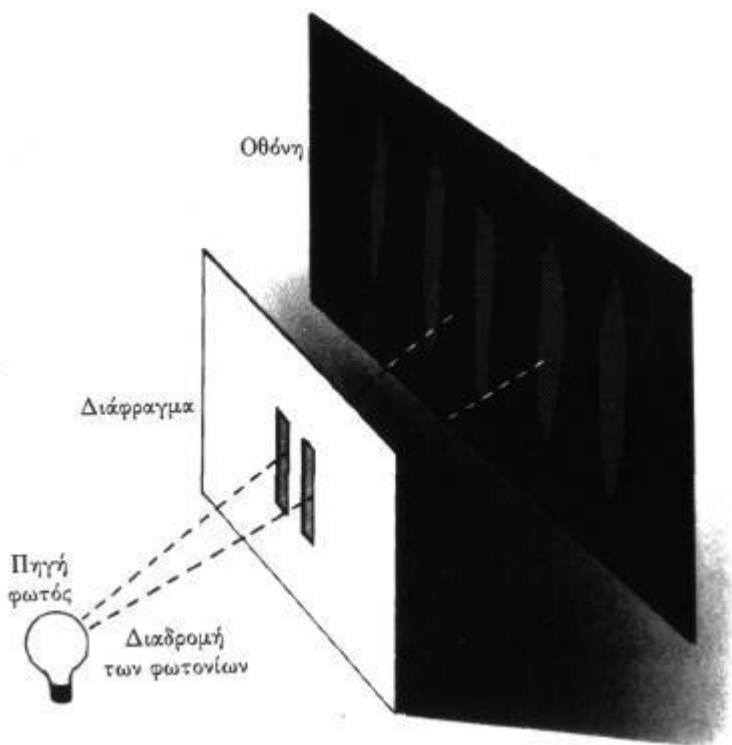
μοναδικά καθορισμένο αποτέλεσμα, αλλά έναν αριθμό διαφορετικών πιθανών αποτελεσμάτων, και μας πληροφορεί για το πόσο πιθανό είναι το καθένα τους. Αυτό σημαίνει ότι αν εκτελέσουμε την ίδια μέτρηση σε πολλά παρόμοια κβαντικά συστήματα που άρχισαν να εξελίσσονται με τον ίδιο τρόπο, θα βρούμε ότι το αποτέλεσμα της μέτρησης θα είναι Α σε κάποιες περιπτώσεις, Β σε κάποιες άλλες, κ.ο.κ. Μπορούμε να προβλέψουμε κατά προσέγγιση τον αριθμό των περιπτώσεων που το αποτέλεσμα θα είναι Α ή Β, αλλά δεν μπορούμε να προβλέψουμε το συγκεκριμένο αποτέλεσμα μίας συγκεκριμένης μέτρησης. Η κβαντική μηχανική, λοιπόν, εισάγει στην επιστήμη ένα αναπόφευκτο στοιχείο αδυναμίας πρόβλεψης και τυχαιότητας. Ο Αϊνστάιν αντιτάχθηκε σ' αυτό παρά τον σημαντικό ρόλο που είχε διαδραματίσει ως τότε στην ανάπτυξη αυτών των ιδεών. Δεν δέχτηκε ποτέ ότι η τύχη κυβερνά το Σύμπαν: οι απόψεις του συνοψίζονται από την περίφημη φράση του «Ο Θεός δεν παίζει ξάρια». Οι περισσότεροι φυσικοί όμως δέχτηκαν την κβαντική μηχανική επειδή συμφωνούσε απόλυτα με τα πειράματα. Πραγματικά είναι μία καταπληκτικά επιτυχημένη θεωρία: σήμερα αποτελεί, το υπόβαθρο σχεδόν όλης της σύγχρονης φυσικής και τεχνολογίας. Σε αυτήν στηρίζεται η ερμηνεία των ημιαγωγών και η λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, που είναι τα βασικά συστατικά των ηλεκτρονικών συσκευών, όπως οι τηλεοράσεις και οι υπολογιστές· είναι επίσης η βάση της σύγχρονης χημείας και βιολογίας. Οι μόνες περιοχές των φυσικών επιστημών όπου η κβαντική μηχανική δεν έχει συμπεριληφθεί ακόμη με κατάλληλο τρόπο είναι οι βαρυτικές επιδράσεις και η μακροσκοπική δομή του Σύμπαντος.

Αν και το φως αποτελείται από κύματα, η υπόθεση των κβάντων του Planck μας λέει ότι κατά κάποιο τρόπο συμπεριφέρεται σαν να αποτελείται από σωματίδια: εκπέμπεται ή απορροφάται μόνο σε ορισμένα ποσά ενέργειας ή κβάντα. Με τον ίδιο τρόπο, η



ΕΙΚΟΝΑ 4-1.

αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg υποδηλώνει ότι τα σωματίδια συμπεριφέρονται, κατά κάποια έννοια, σαν κύματα: δεν έχουν μια καθορισμένη θέση αλλά απλώνονται στον χώρο με μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανοτήτων. Η θεωρία της κβαντικής μηχανικής βασίζεται σε κάποια εντελώς καινούργια μαθηματικά εργαλεία που δεν περιγράφουν πια τον πραγματικό κόσμο με τις έννοιες των σωματιδίων και των κυμάτων: μόνο ο φαινομενικός κόσμος των παρατηρήσεων μπορεί να περιγραφεί με αυτές τις έννοιες. Υπάρχει έτσι στην κβαντική μηχανική ένας *διϊσμός* μεταξύ των κυμάτων και των σωματιδίων: κάποιες φορές είναι ευκολότερο να σκεφτόμαστε τα σωματίδια σαν κύματα, ενώ κάποιες άλλες είναι καλύτερο να σκεφτόμαστε τα κύματα σαν σωματίδια. Μία σημαντική συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι ότι μπορούμε να παρατηρήσουμε το *φαινόμενο συμβολής* μεταξύ δυο σειρών κυμάτων ή σωματιδίων. Στο φαινόμενο αυτό, όταν οι κορυφές της μιας σειράς κυμάτων συμπίπτουν με τις κοιλές της άλλης, τότε οι δύο σειρές κυμάτων αλληλοεξουδετερώνονται και δεν έχουμε φωτεινό κύμα. Όταν όμως οι κορυφές της μιας σειράς συμπίπτουν με τις κορυφές της άλλης τότε οι δυο σειρές κυμάτων προστίθενται και σχηματίζουν ένα μεγαλύτερο φωτεινό κύμα (βλ. εικ. 4-1). Ένα συνηθισμένο παράδειγμα συμβολής



ΕΙΚΟΝΑ 4-2.

στην περίπτωση των κυμάτων του ορατού φωτός είναι τα χρώματα που συχνά φαίνονται πάνω στις σαπουνόφουσκες. Αυτά τα χρώματα προκαλούνται όταν το φως ανακλάται και από τις δύο επιφάνειες της λεπτής μεμβράνης του νερού που σχηματίζει τη σαπουνόφουσκα. Το λευκό φως αποτελείται από κύματα όλων των μηκών κύματος, δηλαδή όλων των χρωμάτων. Για ορισμένα μήκη κύματος οι κορυφές των κυμάτων που ανακλώνται από τη μία επιφάνεια της μεμβράνης συμπίπτουν με τις κοιλίες που ανακλώνται από την άλλη. Τα χρώματα που αντιστοιχούν σε

αυτά τα μήκη κύματος λείπουν από το φάσμα του ανακλώμενου φωτός, και έτσι βλέπουμε τα υπόλοιπα χρώματα.

Σύμφωνα με τον δυϊσμό σωματιδίου - κύματος ανάλογα φαινόμενα συμβολής μπορεί να προκύψουν και στην περίπτωση των σωματιδίων. Ένα παράδειγμα αποτελεί το διάσημο πείραμα του διαφράγματος με τις δύο σχισμές (βλ. εικ. 4-2). Στη μία πλευρά του τοποθετούμε μία φωτεινή πηγή ενός συγκεκριμένου χρώματος (δηλαδή ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος). Το περισσότερο φως θα σταματήσει στο διάφραγμα, αλλά ένα μικρό μέρος θα περάσει μέσα από τις δύο σχισμές. Ας υποθέσουμε ότι τοποθετούμε μία οθόνη από την άλλη πλευρά του διαφράγματος. Σε κάθε σημείο της οθόνης θα φτάνουν σειρές κυμάτων και από τις δύο σχισμές. Αλλά γενικά η απόσταση που πρέπει να διανύσει το φως για να φτάσει από τη φωτεινή πηγή μέχρι κάποιο συγκεκριμένο σημείο στην οθόνη θα διαφέρει ανάλογα με τη σχισμή απ' την οποία θα περάσει. Αυτό σημαίνει ότι καθώς το φως θα φτάνει στο σημείο αυτό της οθόνης, οι κορυφές και οι κοιλίες των κυμάτων από τη μία διαδρομή δεν θα συμπίπτουν, γενικά, με τις αντίστοιχες κορυφές και κοιλίες των κυμάτων από την άλλη: έτσι σε μερικές περιοχές οι σειρές των κυμάτων θα αλληλοεξουδετερώνονται ενώ σε άλλες θα προστίθενται. Το αποτέλεσμα είναι μία χαρακτηριστική εικόνα με διαδοχικές σκοτεινές και φωτεινές περιοχές που ονομάζονται «κροσσοί συμβολής».

Το σημαντικό γεγονός είναι ότι έχουμε το ίδιο ακριβώς είδος κροσσών συμβολής αν αντικαταστήσουμε τη φωτεινή πηγή με μία πηγή που εκπέμπει σωματίδια (όπως ηλεκτρόνια) που έχουν κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα. Το γεγονός αυτό φαίνεται αρκετά παράξενο γιατί όταν κλείνουμε τη μία από τις δύο σχισμές δεν έχουμε καθόλου κροσσούς αλλά μόνο ομοιόμορφη κατανομή των ηλεκτρονίων πάνω στην οθόνη. Θα μπορούσαμε λοιπόν να σκεφτούμε ότι αν ανοίξουμε και τη δεύτερη σχισμή, θα αυξηθεί ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσκρούουν σε κάθε σημείο της

οθόνης. Στην πραγματικότητα ο αριθμός τους μειώνεται σε μερικές περιοχές, ακριβώς εξαιτίας του φαινομένου της συμβολής. Αν τώρα ο ρυθμός εκπομπής είναι τέτοιος ώστε να εκπέμπεται μόνο ένα ηλεκτρόνιο κάθε φορά, θα μπορούσαμε να περιμένουμε ότι κάθε ηλεκτρόνιο περνάει μέσα από τη μια ή την άλλη σχισμή, και ότι έτσι δεν θα έχουμε καθόλου κροσσούς αλλά μόνο μια ομοιόμορφη κατανομή ηλεκτρονίων πάνω στην οθόνη, ανάλογη με εκείνη που προέκυψε όταν κλείσαμε τη μία σχισμή. Στην πραγματικότητα όμως οι κροσσοί παραμένουν και όταν τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται με ρυθμό ένα την κάθε φορά. Κάθε ηλεκτρόνιο, λοιπόν, πρέπει να περνάει κάθε φορά μέσα *και από τις δύο* σχισμές!

Η σημασία του φαινομένου της συμβολής μεταξύ των σωματιδίων ήταν αποφασιστική για την κατανόηση της δομής των ατόμων, δηλαδή των βασικών μονάδων της χημείας και της βιολογίας, που αποτελούν και εμάς τους ίδιους και όλο το περιβάλλον μας. Στην αρχή του αιώνα μας φανταζόμασταν ότι τα άτομα μοιάζουν με μικρογραφίες του ηλιακού μας συστήματος, όπου τα ηλεκτρόνια, σωματίδια με αρνητικό ηλεκτρισμό, κινούνται γύρω από ένα κεντρικό πυρήνα που έχει θετικό ηλεκτρισμό. Υποθέταμε ότι η έλξη μεταξύ αρνητικού και θετικού ηλεκτρισμού συγκρατούσε τα ηλεκτρόνια στην τροχιά τους γύρω από τον πυρήνα, με τον ίδιο τρόπο που η βαρυτική έλξη συγκρατεί τους πλανήτες στην τροχιά τους γύρω από τον Ήλιο. Το πρόβλημα με αυτήν την εικόνα ήταν ότι οι νόμοι της μηχανικής και του ηλεκτρισμού — πριν από την κβαντική μηχανική — προέβλεπαν ότι τα ηλεκτρόνια έπρεπε να χάνουν ενέργεια και να διαγράφουν σπειροειδή τροχιά προς τον πυρήνα μέχρις ότου συγκρουστούν μαζί του. Αυτό θα σήμαινε ότι το κάθε άτομο, και στην πραγματικότητα όλη η ύλη, θα κατέρρεε πολύ γρήγορα σε μία κατάσταση πολύ μεγάλης πυκνότητας. Μία μερική λύση του προβλήματος έδωσε ο Δανός φυσικός Niels Bohr το 1913. Ο Bohr υπέθεσε

ότι τα ηλεκτρόνια δεν επιτρέπεται να ακολουθούν οποιαδήποτε τροχιά σε οποιαδήποτε απόσταση από τον πυρήνα, αλλά μόνον ορισμένες τροχιές σε ορισμένες αποστάσεις. Αν υποθέταμε επιπλέον ότι μόνο ένα ή δύο ηλεκτρόνια μπορούν να βρίσκονται σε καθεμιά τροχιά, αυτό θα αρκούσε για να λυθεί το πρόβλημα της κατάρρευσης του ατόμου· γιατί μ' αυτόν τον τρόπο τα ηλεκτρόνια δεν θα επιτρεπόταν ούτε να πλησιάσουν περισσότερο στον πυρήνα ούτε να συσσωρευθούν όλα σε κάποιες τροχιές γύρω από αυτόν, αλλά θα συμπλήρωναν τις τροχιές με τις μικρότερες αποστάσεις.

Αυτό το μοντέλο εξήγησε αρκετά καλά τη δομή του απλούστερου ατόμου, του υδρογόνου, που έχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα. Δεν φαινόταν όμως πως θα μπορούσε κανείς να το γενικεύσει στις περιπτώσεις των πιο σύνθετων ατόμων. Επιπλέον, η ιδέα των συγκεκριμένων επιτρεπόμενων τροχιών έμοιαζε αυθαίρετη. Η νέα θεωρία της κβαντικής μηχανικής έλυσε όλα αυτά τα προβλήματα. Αποκάλυψε ότι ένα ηλεκτρόνιο που κινείται γύρω από τον πυρήνα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα κύμα, με μήκος κύματος που εξαρτάται από την ταχύτητα του. Έτσι, το μήκος ορισμένων τροχιών γύρω από τον πυρήνα θα ήταν ακριβώς ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του ηλεκτρονίου. (Αν δηλαδή πολλαπλασιάσαμε το μήκος κύματος του ηλεκτρονίου με έναν ακέραιο αριθμό θα βρίσκαμε το μήκος της τροχιάς). Σε αυτές τις τροχιές οι κορυφές των κυμάτων θα συνέπιπταν κάθε φορά στο ίδιο σημείο και έτσι τα κύματα θα προσθέτονταν: αυτές οι τροχιές αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες τροχιές του Bohr. Αλλά στις άλλες τροχιές (εκείνες που το μήκος τους δεν θα ήταν ακριβώς ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του ηλεκτρονίου) η κάθε κορυφή κύματος θα εξουδετερωνόταν τελικά από κάποια κοιλία που θα συνέπιπτε στο ίδιο σημείο: εκείνες οι τροχιές αντιστοιχούν σε μη επιτρεπόμενες τροχιές.

Ένας κομψός τρόπος να αποκτήσουμε μία εικόνα του δυϊσμού σωματιδίου - κύματος είναι η «άθροιση ιστοριών» που εισήγαγε ο Αμερικανός φυσικός Richard Feynman. Σε αυτή την προσέγγιση δεν θεωρείται ότι το σωματίδιο έχει μία μοναδική «ιστορία» ή διαδρομή στο χωρόχρονο, όπως θα έπρεπε σύμφωνα με την «κλασική» — μη κβαντική — θεωρία. Αντίθετα, θεωρείται ότι για να φύγει το σωματίδιο από το σημείο Α και να φτάσει στο σημείο Β ακολουθεί *κάθε δυνατή* διαδρομή. Σε κάθε διαδρομή αντιστοιχούν δύο αριθμοί: ο ένας δείχνει το μέγεθος ενός κύματος και ο άλλος τη φάση του (δηλαδή το κατά πόσον σε κάποια στιγμή το κύμα σχηματίζει κορυφή ή κοιλία). Η πιθανότητα να πάει το σωματίδιο από το Α στο Β υπολογίζεται αν αθροίσουμε τα κύματα όλων των δυνατών διαδρομών. Αν συγκρίνουμε κάποιες γειτονικές διαδρομές θα βρούμε ότι οι φάσεις των κυμάτων διαφέρουν γενικά πάρα πολύ. Αυτό σημαίνει ότι τα κύματα που αντιστοιχούν σε αυτές τις διαδρομές αλληλοεξουδετερώνονται. Για ορισμένες διαδρομές όμως οι φάσεις δεν διαφέρουν πολύ· έτσι τα κύματα που αντιστοιχούν σε αυτές δεν αλληλοεξουδετερώνονται. Αυτές ακριβώς οι διαδρομές αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες τροχιές του Bohr.

Με αυτές τις ιδέες, σε συγκεκριμένη μαθηματική μορφή, ήταν σχετικά απλό να υπολογιστούν στα επόμενα χρόνια οι επιτρεπόμενες τροχιές στα πιο σύνθετα άτομα, ακόμη και στα μόρια (που είναι συγκεντρώσεις ατόμων, όπου μερικά ηλεκτρόνια κινούνται σε τροχιές γύρω από πολλούς πυρήνες και έτσι τους συνδέουν μεταξύ τους). Αφού η δομή των μορίων και οι αντιδράσεις τους αποτελούν το υπόβαθρο όλης της χημείας και της βιολογίας, η κβαντική μηχανική μας επιτρέπει θεωρητικά να προβλέψουμε σχεδόν οτιδήποτε βλέπουμε γύρω μας, μέσα στα όρια της αρχής της απροσδιοριστίας. (Πρακτικά όμως οι μαθηματικοί υπολογισμοί για τα κβαντικά φαινόμενα όπου περιλαμβάνονται πολλά ηλεκτρόνια είναι τόσο πολύπλοκοι που δεν μπορούμε να τους χειριστούμε).

Φαίνεται ότι η γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν αφορά τη μακροσκοπική δομή του Σύμπαντος. Είναι μια «κλασική» θεωρία, δεν περιέχει δηλαδή την αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής, όπως θα έπρεπε για να μπορεί να συνδυαστεί με τις άλλες φυσικές θεωρίες. Παρ' όλα αυτά, δεν βρίσκεται σε ασυμφωνία με τις παρατηρήσεις· αυτό οφείλεται στο ότι οι βαρυτικές επιδράσεις που αντιμετωπίζουμε συνήθως είναι πολύ μικρές. Τα θεωρήματα όμως για τις ανωμαλίες, που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δείχνουν ότι οι βαρυτικές επιδράσεις πρέπει να είναι πολύ μεγάλες σε δύο τουλάχιστον περιπτώσεις: στις μαύρες τρύπες και στη Μεγάλη Έκρηξη. Σε τέτοιες μεγάλες βαρυτικές επιδράσεις τα κβαντικά φαινόμενα πρέπει να είναι πολύ σημαντικά. Έτσι, με κάποια έννοια, η κλασική γενική θεωρία της σχετικότητας, προβλέποντας ότι τα άστρα ή το Σύμπαν μπορεί να βρίσκονται σε κατάσταση άπειρης πυκνότητας, προβλέπει επίσης την κατάρρευση της — ακριβώς όπως και η κλασική (μη κβαντική) μηχανική, προβλέποντας ότι τα άτομα θα μπορούσαν να βρεθούν σε κατάσταση άπειρης πυκνότητας, προέβλεψε τη δική της κατάρρευση. Δεν έχουμε ακόμη μία πλήρη ενιαία θεωρία που να συνδυάζει την γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντική μηχανική, γνωρίζουμε όμως μερικά αναγκαία χαρακτηριστικά της. Οι συνέπειες μιας τέτοιας θεωρίας για τις μαύρες τρύπες και τη Μεγάλη Έκρηξη θα περιγραφούν στα επόμενα κεφάλαια. Προς το παρόν θα στραφούμε στις πρόσφατες προσπάθειες να ενοποιηθούν οι θεωρίες που περιγράφουν τα διάφορα σωματίδια και τις δυνάμεις της φύσης σε μία μοναδική, ενιαία κβαντική θεωρία.

5

Τα στοιχειώδη σωματίδια και οι δυνάμεις της Φύσης

Ο Αριστοτέλης πίστευε ότι όλη η ύλη στο Σύμπαν αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία: τη γη, τον αέρα, τη φωτιά και το νερό. Στα στοιχεία αυτά δρούσαν δύο δυνάμεις: η δύναμη της βαρύτητας, δηλαδή η τάση της γης και του νερού να πέφτουν προς τα κάτω, και η δύναμη της ελαφρότητας, δηλαδή η τάση της φωτιάς και του αέρα να υψώνονται προς τα πάνω. Αυτός ο διαχωρισμός των συστατικών του Σύμπαντος σε ύλη και δυνάμεις χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα.

Ο Αριστοτέλης πίστευε επίσης ότι η ύλη είναι συνεχής, ότι θα μπορούσαμε δηλαδή να τη διαιρέσουμε σε συνεχώς μικρότερα κομμάτια χωρίς κανένα όριο· έτσι δεν θα συναντούσαμε ποτέ έναν «κόκκο» ύλης που θα ήταν αδύνατο να διαιρεθεί σε μικρότερους «κόκκους». Μερικοί Έλληνες φιλόσοφοι όμως, όπως ο Δημόκριτος, υποστήριζαν ότι η ύλη δεν είναι συνεχής αλλά «κοκκώδης», αποτελείται δηλαδή από ένα μεγάλο πλήθος «ατόμων» διαφόρων ειδών. (Η λέξη *άτομο* σημαίνει ακριβώς αυτό

που δεν είναι δυνατό να τηθεί). Για αιώνες η συζήτηση συνεχιζόταν χωρίς καμιά πλευρά να μπορέσει να παρουσιάσει κάποια πραγματική απόδειξη. Το 1803 ο Βρετανός χημικός και φυσικός John Dalton προσπάθησε να εξηγήσει το γεγονός ότι τα χημικά στοιχεία ενώνονται σε ορισμένες μόνο αναλογίες· υπέθεσε λοιπόν ότι είναι άτομα που συμπλέκονται μεταξύ τους και διαμορφώνουν πιο σύνθετες συγκεντρώσεις ύλης, τα *μόρια* των χημικών ενώσεων. Παρ' όλα αυτά, η διαμάχη των υποστηρικτών των δύο απόψεων δεν διευθετήθηκε οριστικά παρά μόνον στις αρχές του 20ού αιώνα, όταν πολλαπλασιάστηκαν οι πειραματικές ενδείξεις για την ύπαρξη των ατόμων. Πολύ σημαντική ήταν η συμβολή του Αϊνστάιν: σε μία εργασία του το 1905, λίγες μόνο εβδομάδες πριν από τη διάσημη εργασία του για την σχετικότητα, έδειξε ότι το φαινόμενο που ονομάζεται «κίνηση Brown» (η ακανόνιστη, τυχαία κίνηση των μικροσκοπικών σωματιδίων της σκόνης πάνω στην επιφάνεια ενός υγρού) μπορεί να εξηγηθεί από την κίνηση των ατόμων του υγρού και τη σύγκρουσή τους με τα σωματίδια της σκόνης.

Εκείνη την εποχή υπήρχαν ήδη υποψίες ότι και τα ίδια τα άτομα δεν είναι τελικά αδιαίρετα. Μερικά χρόνια πριν ο J.J. Thomson είχε δείξει πειραματικά ότι υπάρχουν κάποια σωματίδια ύλης που ονομάζονται *ηλεκτρόνια*: τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο και μάζα μικρότερη από το ένα χιλιοστό της μάζας του ατόμου του υδρογόνου (που είναι το ελαφρύτερο άτομο). Ο Thomson χρησιμοποίησε μία πειραματική συσκευή όπου τα ηλεκτρόνια έφευγαν από ένα διάπυρο μέταλλο και προσέκρουαν σε μία οθόνη επιστρωμένη με φώσφορο (όπως η οθόνη της τηλεόρασης), παράγοντας λάμψεις φωτός. Σύντομα έγινε κατανοητό ότι τα ηλεκτρόνια πρέπει να προέρχονται από τα ίδια τα άτομα. Τελικά το 1911 ο Βρετανός φυσικός Ernest Rutherford έδειξε ότι τα άτομα της ύλης έχουν πραγματικά κάποια εσωτερική δομή: αποτελούνται από έναν πυρήνα με θετι-

κό ηλεκτρικό φορτίο, και γύρω του βρίσκονται τα ηλεκτρόνια. Ο Rutherford έφτασε στο συμπέρασμά του αναλύοντας τη διαδρομή που ακολουθούν τα σωματίδια «άλφα» (σωματίδια με θετικό ηλεκτρικό φορτίο που εκπέμπονται από τις ραδιενεργές ουσίες) όταν συγκρούονται με τα άτομα.

Στην αρχή οι επιστήμονες νόμιζαν ότι ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα *πρωτόνια*, είναι σωματίδια με θετικό ηλεκτρικό φορτίο· τα ονόμασαν έτσι από τις λέξεις «πρώτο» και «ον», επειδή πίστευαν ότι είναι οι θεμελιώδεις μονάδες της ύλης. Το 1932, όμως, ένας συνεργάτης του Rutherford, ο James Chadwick, ανακάλυψε ότι ο πυρήνας περιέχει και ένα άλλο είδος σωματιδίων, τα *νετρόνια* που έχουν περίπου την ίδια μάζα με το πρωτόνιο αλλά δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο. (Ο Chadwick πήρε αργότερα το βραβείο Nobel για την ανακάλυψη του αυτή).

Μέχρι πριν από είκοσι χρόνια θεωρούσαμε ότι τα συστατικά του πυρήνα, τα πρωτόνια και τα νετρόνια, είναι «στοιχειώδη» σωματίδια, δεν αποτελούνται δηλαδή και αυτά από άλλα μικρότερα σωματίδια. Όμως, σε διάφορα πειράματα όπου πρωτόνια συγκρούονταν με άλλα πρωτόνια ή ηλεκτρόνια με μεγάλες ταχύτητες, φάνηκε ότι, στην πραγματικότητα, και αυτά τα σωματίδια είναι σύνθετα, αποτελούμενα από τριάδες άλλων σωματιδίων, που ο φυσικός Gell-Mann ονόμασε *κουάρκς*. (Το όνομα αυτό προέρχεται από μια αινιγματική φράση του James Joyce). Το 1969, ο Gell-Mann τιμήθηκε με το βραβείο Nobel για την εργασία του στα κουάρκς.

Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές των κουάρκς· τουλάχιστον έξι «αρώματα» (που ονομάζονται «επάνω», «κάτω», «παράξενο», «γοητευτικό», «κορυφή», «πυθμένας»), και τρία «χρώματα» («κόκκινο», «πράσινο», «μπλε») για το κάθε άρωμα. Πρέπει να τονιστεί ότι αυτά τα ονόματα είναι τελείως συμβατικά· οι σύγχρονοι φυσικοί φαίνεται ότι είναι αρκετά ευφάνταστοι όταν ονο-

μάζουν τα νέα σωματίδια και τα νέα φαινόμενα — δεν περιορίζονται πια στην ελληνική γλώσσα! Τα πρωτόνια και τα νετρόνια αποτελούνται από τρία κουάρκς διαφορετικού «χρώματος»: τα πρωτόνια από δύο «επάνω» κουάρκς και ένα «κάτω», και τα νετρόνια από δύο «κάτω» κουάρκς και ένα «επάνω». Μπορούμε να δημιουργήσουμε σωματίδια και από τα κουάρκς των άλλων «αρωμάτων»: έχουν όμως πολύ μεγαλύτερες μάζες και διασπώνται πολύ γρήγορα σε πρωτόνια και νετρόνια.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι ούτε τα άτομα ούτε και τα πρωτόνια και τα νετρόνια που βρίσκονται μέσα στα άτομα είναι αδιαίρετα. Έτσι γεννάται το ερώτημα: Ποια είναι τα πραγματικά αδιαίρετα σωματίδια, οι βασικές δομικές μονάδες που συνθέτουν όλα τα πράγματα; Αφού το μήκος κύματος του φωτός είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος ενός ατόμου, δεν μπορούμε να ελπίζουμε ότι θα «δούμε» με τον συνηθισμένο τρόπο τα μέρη του ατόμου.

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η κβαντική μηχανική μας λέει ότι όλα τα σωματίδια είναι κύματα και ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των σωματιδίων τόσο μικρότερο είναι το μήκος του αντίστοιχου κύματος. Έτσι, η καλύτερη απάντηση που μπορούμε να δώσουμε στο ερώτημα για τις βασικές δομικές μονάδες που συνθέτουν τα πράγματα εξαρτάται από το πόσο μεγάλης ενέργειας σωματίδια διαθέτουμε, γιατί αυτό ακριβώς προσδιορίζει σε πόσο μικρή κλίμακα μπορούμε να κοιτάξουμε. Οι ενέργειες των σωματιδίων μετρούνται συνήθως σε μονάδες που ονομάζονται ηλεκτρονιοβόλτ. (Ένα ηλεκτρονιοβόλτ είναι η ενέργεια που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν επιταχυνθεί μεταξύ δυο σημείων που παρουσιάζουν τάση ενός βολτ). Τον 19ο αιώνα, όταν οι μεγαλύτερες ενέργειες σωματιδίων που γνώριζαν να χρησιμοποιούν οι άνθρωποι ήταν τα λίγα ηλεκτρονιοβόλτ που παράγουν οι χημικές αντιδράσεις, οι βασικές δομικές μονάδες ήταν τα άτομα. Στα πειράματα του Rutherford, τα θετικά φορτισμένα σωματίδια που χρησιμοποιούσε, τα σωματί-



ΕΙΚΟΝΑ 5-1.

δια άλφα, είχαν ενέργειες ενός εκατομμυρίου ηλεκτρονιοβόλτ. Πρόσφατα μάθαμε πώς να χρησιμοποιούμε σωματίδια με ενέργειες δισεκατομμυρίων ηλεκτρονιοβόλτ. Έτσι γνωρίζουμε ότι κάποια σωματίδια που είκοσι χρόνια πριν φαίνονταν «στοιχειώδη», στην πραγματικότητα αποτελούνται από άλλα μικρότερα. Μήπως όμως κάποτε στο μέλλον (όταν θα χρησιμοποιούμε ακόμη μεγαλύτερες ενέργειες) βρεθεί ότι και αυτά αποτελούνται από μικρότερα σωματίδια; Κάτι τέτοιο είναι βέβαια πιθανό· αλλά σήμερα υπάρχουν αρκετοί θεωρητικοί λόγοι για να πιστεύουμε ότι έχουμε ή είμαστε πολύ κοντά στο να αποκτήσουμε μία οριστική γνώση των απόλυτα στοιχειωδών δομικών μονάδων της Φύσης.

Χρησιμοποιώντας το δυϊσμό σωματιδίου - κύματος, που εκθέσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οτιδήποτε στο Σύμπαν μπορεί να περιγραφεί με όρους σωματιδίων, ακόμη και το φως και η βαρύτητα. Τα σωματίδια έχουν μία ιδιότητα που ονομάζεται «ιδιοστροφορμή» ή «σπιν». Δεν πρέπει όμως να φανταστούμε τα σωματίδια με σπιν σαν μικρές σβούρες που περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα, επειδή στην κβαντική μηχανική δεν μπορεί να υπάρχουν σαφώς καθορισμένοι άξονες. Αυτό που πραγματικά μας λέει το σπιν ενός σωματιδίου είναι το πώς φαίνεται το σωματίδιο από διαφορετικές διευθύνσεις. Ένα σωματίδιο με σπιν 0 είναι σαν μια τελεία: φαίνεται το ίδιο από οποιαδήποτε διεύθυνση (βλ. εικ. 5-1i). Αλλά ένα σωματίδιο με σπιν 1 είναι σαν ένα βέλος: φαίνεται διαφορετικό από διαφορετικές διευθύνσεις (βλ. εικ. 5-1ii). Μόνον αν το περιστρέψουμε κατά ένα ολόκληρο κύκλο (δηλαδή 360 μοίρες) θα φαίνεται το ίδιο με το αρχικό. Ένα σωματίδιο με σπιν 2 είναι σαν ένα διπλό βέλος (βλ. εικ. 5-1iii): φαίνεται ίδιο αν το στρέψουμε κατά μισό κύκλο (δηλαδή 180 μοίρες). Με παρόμοιο τρόπο τα σωματίδια με μεγαλύτερο σπιν φαίνονται τα ίδια αν τα στρέψουμε κατά μικρότερα κλάσματα του κύκλου. Όλα αυτά φαίνονται αρκετά λογικά, αλλά το παράξενο γεγονός είναι ότι υπάρχουν σωματίδια που δεν φαίνονται τα ίδια αν τα στρέψουμε κατά έναν μόνο ολόκληρο κύκλο· χρειάζεται να τα στρέψουμε κατά δύο ολόκληρους κύκλους! Αυτά τα σωματίδια ονομάζονται σωματίδια με σπιν $1/2$.

Όλα τα γνωστά σωματίδια στο Σύμπαν μπορεί να καταταχθούν σε δύο κατηγορίες: τα σωματίδια με σπιν $1/2$, που αποτελούν την ύλη στο Σύμπαν (ονομάζονται *σωματίδια ύλης*), και τα σωματίδια με σπιν 0, 1 και 2 στα οποία όπως θα δούμε οφείλονται οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων ύλης (ονομάζονται *σωματίδια αλληλεπίδρασης*). Τα σωματίδια ύλης υπακούουν στην ονομαζόμενη «απαγορευτική αρχή του Pauli». Ο Αυστρια-

κός φυσικός Wolfgang Pauli (που πήρε το βραβείο Nobel το 1945) ήταν ο αυθεντικός τύπος του θεωρητικού φυσικού· λέγεται ότι ακόμη και η απλή παρουσία του ήταν αρκετή για να αποτύχουν όλα τα πειράματα στην ίδια πόλη! Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, δύο όμοια σωματίδια δεν μπορεί να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση, δεν μπορεί δηλαδή να έχουν και τα δύο την ίδια θέση και την ίδια ταχύτητα, μέσα στα όρια της αρχής της απροσδιοριστίας. Η απαγορευτική αρχή είναι πολύ σημαντική επειδή εξηγεί γιατί τα σωματίδια ύλης δεν καταρρέουν σε μία κατάσταση πολύ μεγάλης πυκνότητας: αν δυο σωματίδια ύλης έχουν σχεδόν τις ίδιες θέσεις πρέπει να έχουν διαφορετικές ταχύτητες, και αυτό σημαίνει ότι δεν θα παραμείνουν στις ίδιες θέσεις για πολύ. Αν ο Κόσμος είχε δημιουργηθεί χωρίς την απαγορευτική αρχή, τα κουάρκ δεν θα σχημάτιζαν διαφορετικά, σαφώς καθορισμένα, πρωτόνια και νετρόνια. Και αυτά τα πρωτόνια και τα νετρόνια μαζί και με τα ηλεκτρόνια δεν θα σχημάτιζαν διαφορετικά, σαφώς καθορισμένα, άτομα. Θα είχαν καταρρεύσει όλα σχηματίζοντας μία περίπου ομοιόμορφη πυκνή «σούπα».

Μία βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του ηλεκτρονίου και των άλλων σωματιδίων με σπιν $1/2$ προήλθε το 1928 από μία θεωρία που διατύπωσε ο Paul Dirac. (Ο Dirac μετά από λίγα χρόνια εκλέχτηκε καθηγητής μαθηματικών στο Cambridge, στην έδρα που κατείχε κάποτε ο Νεύτων και σήμερα κατέχω εγώ). Η θεωρία του Dirac ήταν η πρώτη του είδους της που συμφωνούσε και με την κβαντική μηχανική και με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Εξηγούσε μαθηματικά γιατί το ηλεκτρόνιο έχει σπιν $1/2$, δηλαδή γιατί δεν φαίνεται το ίδιο όταν το στρέψουμε κατά έναν πλήρη κύκλο αλλά μόνο αν το στρέψουμε κατά δύο πλήρεις κύκλους. Η ίδια θεωρία προέβλεψε ότι το ηλεκτρόνιο πρέπει να έχει έναν σύντροφο: ένα *αντιηλεκτρόνιο* ή *ποζιτρόνιο*. Η ανακάλυψη του ποζιτρονίου το 1932 επιβεβαίωσε τη θεωρία του

Dirac, που το 1933 πήρε το βραβείο Nobel. Γνωρίζουμε σήμερα ότι κάθε είδος σωματιδίου έχει ένα αντισωματίδιο. Όταν το σωματίδιο και το αντισωματίδιο του συναντηθούν *εξαϋλώνονται*. (Στην περίπτωση των σωματιδίων με σπιν 0, 1 και 2 τα αντισωματίδια είναι τα ίδια με τα σωματίδια). Μπορεί να υπάρχουν ολόκληροι αντικόσμοι και αντιάνθρωποι που αποτελούνται από αντισωματίδια. Αν όμως δείτε μπροστά σας τον αντιεαυτό σας, μην τον χαιρετίσετε με χειραψία! Θα εξαφανιστείτε και οι δύο μέσα σε μία μεγάλη λάμψη φωτός. Το ερώτημα γιατί φαίνεται να υπάρχουν γύρω μας τόσο περισσότερα σωματίδια από αντισωματίδια είναι εξαιρετικά σημαντικό· θα επιστρέψουμε σ' αυτό αργότερα, στο ίδιο κεφάλαιο.

Στην κβαντική μηχανική θεωρείται ότι όλες οι δυνάμεις ή αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ύλης οφείλονται στα σωματίδια με ακέραιο αριθμό σπιν: 0, 1 και 2. Αυτό που συμβαίνει στη διάρκεια μίας αλληλεπίδρασης είναι ότι ένα σωματίδιο ύλης, ένα ηλεκτρόνιο ή ένα κουάρκ εκπέμπει ένα σωματίδιο αλληλεπίδρασης. Η εκπομπή αλλάζει τη διεύθυνση και την ταχύτητα του σωματιδίου ύλης. Στη συνέχεια το σωματίδιο αλληλεπίδρασης συγκρούεται με ένα άλλο σωματίδιο ύλης και απορροφάται απ' αυτό. Η σύγκρουση αλλάζει τη διεύθυνση και την ταχύτητα του δεύτερου σωματιδίου ύλης. Τελικά, οι μεταβολές στην κατάσταση κίνησης αυτών των δύο σωματιδίων ύλης φαίνεται σαν να προήλθαν από τη δράση κάποιας δύναμης μεταξύ τους.

Μία σημαντική ιδιότητα των σωματιδίων αλληλεπίδρασης είναι ότι δεν υπακούουν στην απαγορευτική αρχή. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει όριο στον αριθμό των σωματιδίων αλληλεπίδρασης που μπορεί να ανταλλάγουν μεταξύ δύο σωματιδίων ύλης, και έτσι οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να είναι πολύ ισχυρές. Αν όμως κάποια σωματίδια αλληλεπίδρασης έχουν μεγάλη μάζα δεν μπορεί να παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες και να ανταλλάγουν σε μεγάλες αποστάσεις· γι' αυτό και οι αλληλεπιδράσεις που

οφείλονται σε τέτοια σωματίδια έχουν μικρή εμβέλεια. Αντίθετα, αν κάποια σωματίδια αλληλεπίδρασης δεν έχουν καθόλου μάζα, οι αλληλεπιδράσεις που οφείλονται σ' αυτά έχουν μεγάλη εμβέλεια. Τα σωματίδια αλληλεπίδρασης που ανταλλάσσονται μεταξύ των σωματιδίων ύλης δεν μπορεί να ανιχνευτούν άμεσα από κάποια πειραματική συσκευή, όπως ανιχνεύονται τα σωματίδια ύλης. Η ύπαρξη τους εκδηλώνεται μόνο έμμεσα από τις μεταβολές που προκαλούν στην κατάσταση κίνησης των σωματιδίων ύλης· αυτές οι μεταβολές μπορούν να μετρηθούν άμεσα. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις μπορούν επίσης να ανιχνευτούν άμεσα και σωματίδια με σπιν 0, 1 και 2· τότε φαίνονται σαν αυτά που στην κλασική φυσική θα ονομάζαμε κύματα, όπως τα κύματα φωτός ή τα κύματα βαρύτητας. (Για παράδειγμα, η απωστική ηλεκτρική δύναμη μεταξύ δύο ηλεκτρονίων οφείλεται σε ανταλλαγή των σωματιδίων αλληλεπίδρασης που ονομάζονται, φωτόνια και που στην περίπτωση αυτή δεν ανιχνεύονται άμεσα· αλλά αν το ένα ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί από το άλλο, μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα φωτόνια που φαίνονται σαν κύματα φωτός).

Τα σωματίδια αλληλεπίδρασης μπορεί να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τη δύναμη της αλληλεπίδρασης που προκαλούν και ανάλογα με τα σωματίδια ύλης που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση. Πρέπει να τονιστεί ότι την ταξινόμηση σε τέσσερις κατηγορίες την κάνουν οι άνθρωποι: είναι κατάλληλη για τη δημιουργία επιμέρους θεωριών αλλά μπορεί να μην αντιστοιχεί σε κάποια διάκριση της φύσης. Οι περισσότεροι φυσικοί ελπίζουν ότι θα ανακαλύψουν τελικά μια ενιαία θεωρία που θα εξηγήσει και τις τέσσερις κατηγορίες αλληλεπιδράσεων ως διαφορετικές εκδηλώσεις μίας και μοναδικής αλληλεπίδρασης. Πραγματικά, πολλοί φυσικοί υποστηρίζουν ότι αυτός είναι σήμερα ο πρωταρχικός σκοπός της φυσικής. Πρόσφατα πραγματοποιήθηκαν σημαντικά βήματα για την ενοποίηση των τριών από τις τέσσερις κατηγορίες των αλληλεπιδράσεων — θα ανα-

φερθούμε σε αυτό στη συνέχεια του κεφαλαίου. Το ερώτημα της ενοποίησης της άλλης κατηγορίας, της βαρύτητας θα το αφήσουμε για αργότερα. Ας εξετάσουμε τώρα τις τέσσερις κατηγορίες ξεχωριστά.

Η πρώτη κατηγορία είναι η *βαρυτική* αλληλεπίδραση. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι καθολική· αυτό σημαίνει ότι κάθε σωματίδιο υφίσταται την επίδραση της βαρύτητας ανάλογα με τη μάζα και την ενέργεια του. Η βαρύτητα είναι η πιο αδύνατη από τις τέσσερις αλληλεπιδράσεις, με μεγάλη διαφορά από τις άλλες. Είναι τόσο αδύνατη που δεν θα την αντιλαμβανόμασταν καθόλου αν δεν διέθετε δύο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά: έχει μεγάλη εμβέλεια και είναι πάντοτε ελκτική. Έτσι οι αδύνατες βαρυτικές δυνάμεις μεταξύ των διαφορετικών σωματιδίων που αποτελούν δύο μεγάλα σώματα, όπως ο Ήλιος και η Γη, μπορεί να προστεθούν και να παράγουν κάποια σημαντική δύναμη. Οι άλλες τρεις αλληλεπιδράσεις είτε έχουν μικρή εμβέλεια είτε είναι άλλοτε ελκτικές και άλλοτε απωστικές (και έτσι τείνουν να αλληλοεξουδετερωθούν). Η κβαντική μηχανική θεωρεί ότι η βαρυτική δύναμη οφείλεται στην ανταλλαγή μεταξύ δύο σωματιδίων ύλης ενός σωματιδίου αλληλεπίδρασης με σπιν 2, που ονομάζεται *βαρυτόνιο*. Αυτό το σωματίδιο δεν έχει μάζα· έτσι η αλληλεπίδραση που οφείλεται σε αυτό έχει μεγάλη εμβέλεια. Η βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ του Ήλιου και της Γης οφείλεται στην ανταλλαγή βαρυτονίων μεταξύ των σωματιδίων ύλης που αποτελούν αυτά τα δύο σώματα. Αν και αυτά τα σωματίδια δεν μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα, προκαλούν κάποιες μεταβολές που μπορεί να μετρηθούν άμεσα — αναγκάζουν τη Γη να κινείται γύρω από τον Ήλιο! Τα βαρυτόνια που μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα φαίνονται σαν αυτά που στην κλασική φυσική θα ονομάζαμε *κύματα βαρύτητας*. Τα κύματα βαρύτητας είναι πολύ ασθενή και είναι τόσο δύσκολο να συλληφθούν που δεν έχουν παρατηρηθεί ακόμη.

Η επόμενη κατηγορία είναι η *ηλεκτρομαγνητική* αλληλεπίδραση. Αυτή δεν είναι καθολική όπως η βαρυτική: την υφίστανται μόνο όσα σωματίδια έχουν ηλεκτρικό φορτίο, όπως τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκς (δεν την υφίστανται όμως όσα σωματίδια δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο, όπως τα βαρυτόνια). Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση είναι πολύ πιο δυνατή από τη βαρυτική· η απωστική δύναμη μεταξύ δύο ηλεκτρονίων είναι περίπου ένα δεκατριάκις εκατομμύριο (η μονάδα ακολουθούμενη από 42 μηδενικά) φορές μεγαλύτερη από τη δύναμη της βαρυτικής αλληλεπίδρασης. Υπάρχουν όμως δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου, που τα ονομάζουμε «θετικό» και «αρνητικό». Η δύναμη μεταξύ δύο θετικών φορτίων είναι απωστική, όπως και μεταξύ δύο αρνητικών φορτίων αλλά η δύναμη μεταξύ ενός θετικού και ενός αρνητικού φορτίου είναι ελκτική. Ένα μεγάλο σώμα, όπως η Γη ή ο Ήλιος, περιέχει περίπου ίσα πλήθη σωματιδίων με θετικό και με αρνητικό φορτίο. Έτσι οι ελκτικές και απωστικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων σχεδόν αλληλοεξουδετερώνονται, και παραμένει τελικά μια πολύ μικρή ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Στις μικρές όμως κλίμακες των ατόμων και των μορίων οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις κυριαρχούν. Η ηλεκτρομαγνητική έλξη μεταξύ των ηλεκτρονίων (που έχουν αρνητικό φορτίο) και των πρωτονίων του πυρήνα (που έχουν θετικό φορτίο) αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινούνται γύρω από τον πυρήνα, ακριβώς όπως η βαρυτική έλξη αναγκάζει τη Γη να κινείται γύρω από τον Ήλιο. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική, η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση οφείλεται στην ανταλλαγή σωματιδίων αλληλεπίδρασης με σπιν 1 και χωρίς μάζα, που ονομάζονται *φωτόνια*. Και εδώ τα φωτόνια που ανταλλάσσονται δεν μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα. Όταν όμως ένα ηλεκτρόνιο αλλάζει επιτρεπόμενη τροχιά — από μία μακριά απ' τον πυρήνα σε μία κοντύτερα — απελευθερώνει ενέργεια εκπέμποντας ένα φωτόνιο που μπορεί να ανιχνευτεί άμεσα: μπορεί να παρατηρηθεί, αν έχει το κατάλληλο

μήκος κύματος, ως ορατό φως από το ανθρώπινο μάτι ή να καταγραφεί από έναν ανιχνευτή φωτονίων όπως είναι το φωτογραφικό φιλμ. Αντίστροφα, αν ένα φωτόνιο συγκρουστεί με ένα άτομο, μπορεί να μετακινήσει ένα ηλεκτρόνιο του από μία επιτρεπόμενη τροχιά κοντά τον πυρήνα σε μία άλλη μακρύτερα· γι' αυτή τη μετακίνηση το ηλεκτρόνιο χρησιμοποιεί ενέργεια απορροφώντας το φωτόνιο.

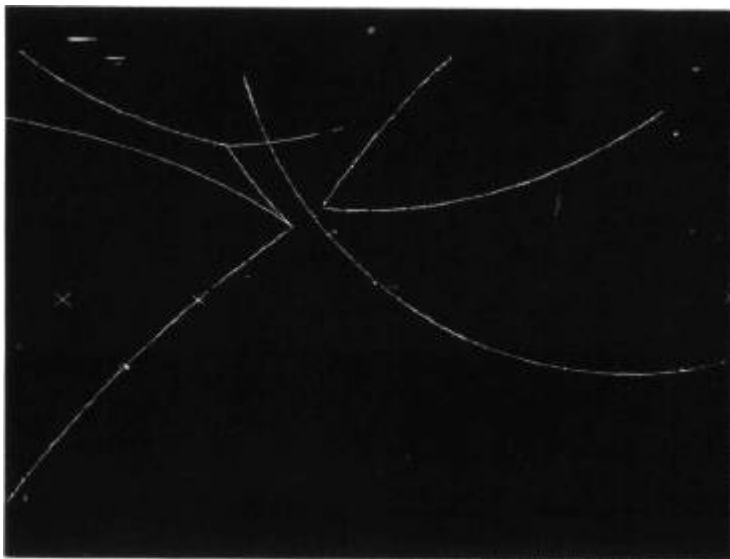
Η τρίτη κατηγορία είναι η *ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση*, που προκαλεί τη ραδιενέργεια. Την αλληλεπίδραση αυτή την υφίστανται όλα τα σωματίδια ύλης με σπιν $1/2$, αλλά όχι τα σωματίδια με σπιν 0 , 1 ή 2 , όπως τα βαρυτόνια και τα φωτόνια. Η ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση δεν είχε κατανοηθεί ακρετά ως το 1967, όταν ο Abdus Salam και ο Steven Weinberg πρότειναν θεωρίες που την ενοποίησαν με την ηλεκτρομαγνητική, ακριβώς όπως περίπου έναν αιώνα πριν ο Maxwell ενοποίησε τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό. Ο Salam και ο Weinberg υπέθεσαν ότι μαζί με το φωτόνιο υπάρχουν τρία ακόμη σωματίδια με σπιν 1 , γνωστά ως *βαριά διανυσματικά μποζόνια*, στα οποία οφείλεται η ασθενής αλληλεπίδραση. Τα σωματίδια ονομάστηκαν W^+ , W^- και Z^0 . Το καθένα έχει μάζα περίπου 100 δισεκατομμύρια ηλεκτρονιοβόλτ (ή 100 GeV). Η θεωρία των Weinberg και Salam εμφανίζει μία χαρακτηριστική ιδιότητα που αποκαλείται *αυτόματη ρήξη συμμετρίας*. Αυτό σημαίνει ότι τα εντελώς διαφορετικά είδη σωματιδίων που παρατηρούμε σε μικρές ενέργειες είναι στην πραγματικότητα ένα και μόνο σωματίδιο σε διαφορετικές καταστάσεις. Έτσι, σε μεγαλύτερες ενέργειες όλα αυτά τα διαφορετικά σωματίδια συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Το φαινόμενο αυτό μοιάζει με τη συμπεριφορά της μπίλιας της ρουλέτας. Σε μεγάλες ενέργειες, όταν δηλαδή η ρουλέτα γυρίζει γρήγορα, η μπίλια συμπεριφέρεται με έναν μόνο τρόπο· στριφογυρίζει μέσα στη ρουλέτα. Καθώς όμως η ρουλέτα επιβραδύνεται, η ενέργεια της μπίλιας γίνεται μικρότερη και τελικά η μπίλια

πέφτει μέσα σε μία από τις τριανταεφτά εγχοπές. Με άλλα λόγια στις μικρές ενέργειες υπάρχουν τριάντα εφτά διαφορετικές καταστάσεις όπου μπορεί να βρεθεί η μπίλια. Αν για κάποιο λόγο μπορούσαμε να παρατηρήσουμε την μπίλια μόνο στις μικρές ενέργειες, θα νομίζαμε πως υπάρχουν τριάντα εφτά είδη μπίλιας!

Σύμφωνα με τη θεωρία των Weinberg και Salam τα τρία νέα σωματίδια (W^+ , W^- , Z^0) και το φωτόνιο συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο σε πολύ μεγάλες ενέργειες — πολύ πιο μεγάλες από τα 100 GeV. Αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, όπου οι ενέργειες είναι μικρότερες, η συμμετρία μεταξύ των σωματιδίων καταστρέφεται. Τα W^+ , W^- και Z^0 αποκτούν μεγάλες μάζες, με αποτέλεσμα οι αλληλεπιδράσεις που οφείλονται σε αυτά να έχουν μικρή εμβέλεια. Στην εποχή που οι Salam και Weinberg διατύπωσαν τη θεωρία τους, λίγοι τους πίστεψαν. Άλλωστε οι επιταχυντές σωματιδίων δεν ήταν ακόμη αρκετά ισχυροί για να φτάσουν στην ενέργεια των 100 GeV, όση χρειαζόταν για να παραχθούν W^+ , W^- και Z^0 και να ανιχνευθούν άμεσα. Παρ' όλα αυτά στα επόμενα δέκα χρόνια οι υπόλοιπες προβλέψεις της θεωρίας για τις μικρότερες ενέργειες συμφωνούσαν τόσο πολύ με τα πειραματικά δεδομένα ώστε το 1979 ο Salam και ο Weinberg πήραν το βραβείο Nobel φυσικής (μαζί με τον Sheldon Glashow, που είχε προτείνει παρόμοιες ενοποιημένες θεωρίες). Όμως η επιτροπή του βραβείου Nobel έπαψε να ανησυχεί για τις επιπτώσεις ενός πιθανού λάθους της μόνον το 1983, όταν ανακαλύφθηκαν πειραματικά στο CERN (το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών) τα W^+ , W^- και Z^0 με τις σωστές μάζες και άλλες ιδιότητες, όπως προβλέπονταν από τη θεωρία. Οι φυσικοί οι επικεφαλής της ομάδας που πραγματοποίησε την ανακάλυψη, ο Carlo Rubbia και ο Simon van der Meer, πήραν το βραβείο Nobel φυσικής το 1984. (Είναι πολύ δύσκολο να πετύχει κάποιος σήμερα μία κορυφαία ανακάλυψη στην πειραματική φυσική αν δεν είναι ήδη στην κορυφή!)

Η τέταρτη κατηγορία είναι η *ισχυρή πυρηνική* αλληλεπίδραση, που συγκρατεί μεταξύ τους τα κουάρκ μέσα στα πρωτόνια και τα νετρόνια· επίσης συγκρατεί μεταξύ τους τα πρωτόνια και νετρόνια μέσα στους πυρήνες των ατόμων. Πιστεύεται ότι και αυτή η αλληλεπίδραση οφείλεται σε ένα άλλο σωματίδιο αλληλεπίδρασης με σπιν 1, που ονομάζεται *γλοιόνιο**, και αλληλεπιδρά μόνον με τον εαυτό του και με τα κουάρκ. Η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση έχει μία περίεργη ιδιότητα που αποκαλείται *περιορισμός*: συνενώνει πάντα τα σωματίδια σε συνδυασμούς που δεν έχουν «χρώμα». Δεν μπορούμε να έχουμε ένα κουάρκ μόνο του γιατί έχει χρώμα (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Ένα κόκκινο κουάρκ πρέπει να συνενωθεί με ένα πράσινο και ένα μπλε από ένα «σύνδεσμο» γλοιονίων (έτσι θα έχουμε κόκκινο + πράσινο + μπλε = άσπρο). Μία τέτοια τριάδα αποτελεί ένα πρωτόνιο ή ένα νετρόνιο. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα ζεύγος που να αποτελείται από ένα κουάρκ και το αντισωματίδιό του, το αντικουάρκ (κόκκινο + αντικόκκινο ή πράσινο + αντιπράσινο ή μπλε + αντιμπλε = άσπρο). Οι συνδυασμοί των κουάρκ με τα αντικουάρκ αποτελούν τα σωματίδια που ονομάζονται μεσόνια. Τα μεσόνια είναι ασταθή γιατί τα κουάρκ και τα αντικουάρκ μπορεί να εξαϋλωθούν μεταξύ τους, παράγοντας ηλεκτρόνια και άλλα σωματίδια. Με παρόμοιο τρόπο η ιδιότητα του περιορισμού δεν επιτρέπει να έχουμε ένα γλοιόνιο μόνο του, γιατί και τα γλοιόνια έχουν χρώμα. Πρέπει λοιπόν και τα γλοιόνια να συνενώνονται έτσι που τα χρώματα τους να αθροίζονται τελικά σε άσπρο· ένας τέτοιος συνδυασμός σχηματίζει ένα ασταθές σωματίδιο που ονομάζεται *γλοιοσφαιρόνιο*.

* Ο όρος "gluon" προέρχεται από την αγγλική λέξη glue; κόλα, που έχει τη ρίζα της στην ελληνική γλοιός: κολλώδες, (γλοιώδες) συγκολλητικό μέσο· γι' αυτό το έχουμε αποδώσει «γλοιόνιο» αντί «γλουόνιο». Θα μπορούσε ακόμη να αποδοθεί και ως «συγκολλητής». (Σ.τ.μ.).



ΕΙΚΟΝΑ 5-2.

Το γεγονός ότι ο περιορισμός δεν μας επιτρέπει να παρατηρήσουμε απομονωμένα κουάρκς ή γλοιόνια φαίνεται ίσως ότι καθιστά κάπως μεταφυσική την ίδια την έννοια αυτών των σωματιδίων. Όμως μια άλλη, χαρακτηριστική ιδιότητα της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπίδρασης, που αποκαλείται *ασυμπτωτική ελευθερία*, επιτρέπει στα κουάρκς και τα γλοιόνια να διατηρούν μια σαφώς καθορισμένη ύπαρξη. Σε μικρές ενέργειες η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι πραγματικά ισχυρή και δεσμεύει τα κουάρκς συγκρατώντας τα σφικτά συνενωμένα μεταξύ τους. Διάφορα όμως πειράματα που γίνονται με επιταχυντές σωματιδίων προσφέρουν συνεχώς περισσότερες ενδείξεις ότι στις μεγάλες ενέργειες η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση εξασθενεί πάρα πολύ, και τα κουάρκς και τα γλοιόνια συμπεριφέρονται σχεδόν

σαν ελεύθερα σωματίδια. Στην εικόνα 5-2 βλέπουμε μία φωτογραφία της σύγκρουσης ενός πρωτονίου και ενός αντιπρωτονίου με μεγάλες ενέργειες· παράγονται λοιπόν αρκετά σχεδόν ελεύθερα κουάρκ που προκαλούν τους «πίδακες» τροχιών συνθετόρων σωματιδίων που φαίνονται γύρω από το σημείο της σύγκρουσης.

Η επιτυχία της ενοποίησης των ηλεκτρομαγνητικών και των ασθενών πυρηνικών αλληλεπιδράσεων οδήγησε πολλούς φυσικούς να επιχειρήσουν να συνδυάσουν αυτές τις δύο αλληλεπιδράσεις με την ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση σε μία Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία. Ο τίτλος είναι μάλλον υπερβολικός: οι θεωρίες που προέκυψαν από τις σχετικές προσπάθειες δεν είναι ούτε τόσο «μεγάλες» ούτε εντελώς ενοποιημένες, αφού δεν περιλαμβάνουν τη βαρύτητα. Ούτε είναι πραγματικά πλήρεις θεωρίες, επειδή περιέχουν αρκετές περαμέτρους που τις τιμές τους δεν μπορεί να τις προβλέψει η θεωρία αλλά πρέπει να προσδιοριστούν από τα πειραματικά δεδομένα. Η βασική ιδέα των Μεγάλων Ενοποιημένων Θεωριών είναι η ακόλουθη: Όπως προαναφέρθηκε, η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση εξασθενεί στις μεγάλες ενέργειες. Από την άλλη πλευρά, οι ηλεκτρομαγνητικές και οι ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις, που δεν έχουν την ιδιότητα της ασυμπτωτικής ελευθερίας, γίνονται πιο ισχυρές στις μεγάλες ενέργειες. Σε κάποια πολύ μεγάλη ενέργεια, την *ενέργεια, της Μεγάλης Ενοποίησης*, και οι τρεις αυτές αλληλεπιδράσεις θα έχουν την ίδια ισχύ· έτσι θα είναι δυνατό να θεωρηθούν ως διαφορετικές εκδηλώσεις μίας και μοναδικής αλληλεπίδρασης. Οι Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες προέβλεψαν επίσης ότι σε αυτήν την ενέργεια τα διαφορετικά σωματίδια ύλης με σπιν $1/2$, όπως τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκ, θα είναι ουσιαστικά το ίδιο σωματίδιο, ολοκληρώνοντας έτσι την ενοποίηση των αλληλεπιδράσεων.

Δεν γνωρίζουμε ακριβώς ποια είναι η τιμή της ενέργειας της Μεγάλης Ενοποίησης, αλλά υπολογίζουμε ότι πρέπει να είναι

τουλάχιστον ένα τετράκις εκατομμύριο (η μονάδα ακολουθούμενη από 15 μηδενικά) GeV. Σήμερα, οι επιταχυντές σωματιδίων προσδίδουν στα σωματίδια ενέργειες εκατό περίπου GeV, ενώ όσοι σχεδιάζονται για τα επόμενα χρόνια θα επιτυγχάνουν ενέργειες μερικών χιλιάδων GeV. Αλλά ένας επιταχυντής τόσο ισχυρός που να επιταχύνει σωματίδια στην ενέργεια της Μεγάλης Ενοποίησης πρέπει να είναι τόσο μεγάλος όσο το ηλιακό σύστημα — και θα ήταν λίγο δύσκολο να χρηματοδοτηθεί με τη σημερινή οικονομική κατάσταση! Έτσι είναι αδύνατο να ελέγξουμε άμεσα με εργαστηριακά πειράματα τις Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες. Παρ' όλ' αυτά, όπως ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση της ενοποίησης της ηλεκτρομαγνητικής και της ασθενούς πυρηνικής αλληλεπίδρασης, υπάρχουν συνέπειες που εμφανίζονται σε μικρές ενέργειες και έτσι μπορεί να ελεγχθούν.

Η πιο ενδιαφέρουσα απ' αυτές έχει σχέση με την πρόβλεψη ότι τα πρωτόνια, που αποτελούν μεγάλο μέρος της συνολικής ύλης του Σύμπαντος, μπορούν να διασπαστούν αυτόματα σε ελαφρότερα σωματίδια, όπως αντιηλεκτρόνια. Αυτό μπορεί να συμβεί γιατί στην ενέργεια της Μεγάλης Ενοποίησης δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ ενός κουάρκ και ενός αντιηλεκτρονίου. Τα τρία κουάρκ που βρίσκονται μέσα σε ένα πρωτόνιο δεν έχουν συνήθως αρκετή ενέργεια για να μετατραπούν σε αντιηλεκτρόνια· κάποτε όμως, πολύ σπάνια, ένα από αυτά μπορεί να αποκτήσει αρκετή ενέργεια για τη μετατροπή αυτή, αφού σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας οι ενέργειες των κουάρκ μέσα στον πυρήνα δεν μπορεί να είναι ακριβώς καθορισμένες. Στην περίπτωση, λοιπόν, που ένα κουάρκ αποκτήσει τόση ενέργεια, το πρωτόνιο θα διασπαστεί. Η πιθανότητα όμως για ένα κουάρκ να αποκτήσει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει τη διάσπαση ενός πρωτονίου είναι τόσο μικρή που χρειάζεται να περιμένει κανείς τουλάχιστον ένα εννεάκις εκατομμύριο (η μονάδα ακολουθούμενη από 30 μηδενικά) χρόνια. Το χρονικό αυτό

διάστημα είναι πολύ πιο μεγάλο από την πιθανή ηλικία του Σύμπαντος μετά τη Μεγάλη Έκρηξη, που είναι «μόλις» δέκα δισεκατομμύρια (η μονάδα ακολουθούμενη από 10 μηδενικά) χρόνια. Έτσι μπορεί να νομίσει κανείς ότι η πιθανότητα μιας αυτόματης διάσπασης πρωτονίου δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί πειραματικά. Μπορούμε όμως να αυξήσουμε τις πιθανότητες ανίχνευσης της παρατηρώντας ένα μεγάλο ποσό ύλης που περιέχει πάμπολλα πρωτόνια. (Αν, για παράδειγμα, παρατηρούσαμε δέκα εννεάκις εκατομμύρια (η μονάδα ακολουθούμενη από 31 μηδενικά) πρωτόνια για χρονικό διάστημα ενός χρόνου, θα μπορούσαμε να περιμένουμε, σύμφωνα με την απλούστερη Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία, ότι θα παρατηρούσαμε περίπου δέκα διασπάσεις πρωτονίων).

Ανάλογα πειράματα έχουν ήδη διεξαχθεί, κανένα όμως δεν απέφερε κάποια θετική ένδειξη για διασπάσεις πρωτονίων ή νετρονίων. Σε ένα τέτοιο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οκτώ χιλιάδες τόνοι νερού που τοποθετήθηκαν σε ένα υπόγειο ορυχείο, για να αποφευχθεί η παρεμβολή κάποιων φαινομένων που οφείλονται στις κοσμικές ακτίνες και θα μπορούσε ίσως να εκληφθούν (κατά λάθος) ως διασπάσεις πρωτονίων. (Οι κοσμικές ακτίνες είναι σωματίδια μεγάλης ενέργειας που προέρχονται από το Διάστημα. Αυτά τα σωματίδια διαπερνούν την ατμόσφαιρα αλλά απορροφούνται από το έδαφος). Αφού δεν ανιχνεύθηκε καμία αυτόματη διάσπαση πρωτονίου σ' αυτά τα πειράματα, μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η πιθανή διάρκεια ζωής του πρωτονίου είναι μεγαλύτερη από δέκα εννεάκις εκατομμύρια (η μονάδα ακολουθούμενη από 31 μηδενικά) χρόνια που προβλέπει η απλούστερη Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία. Σε άλλες παρόμοιες θεωρίες οι προβλεπόμενες διάρκειες ζωής είναι ακόμη μεγαλύτερες. Για να ελεγχθούν λοιπόν και αυτές θα χρειαστούν πιο ευαίσθητες πειραματικές συσκευές που θα περιλαμβάνουν ακόμη μεγαλύτερες ποσότητες ύλης.

Αν και είναι πολύ δύσκολο να παρατηρήσουμε την αυτόματη διάσπαση των πρωτονίων, η αντίστροφη διαδικασία, η παραγωγή πρωτονίων, είναι ίσως η γενεσιουργός αιτία της ίδιας μας της ύπαρξης. Το φυσικότερο είναι να υποθέσουμε ότι σε μια αρχική φάση της δημιουργίας της ύλης υπήρχαν κουάρκ και αντι-κουάρκ σε ίσες ποσότητες. Σήμερα όμως η κατάσταση έχει μεταβληθεί. Η ύλη στη Γη αποτελείται βασικά από πρωτόνια και νετρόνια, που με τη σειρά τους αποτελούνται από κουάρκ. Δεν υπάρχουν αντιπρωτόνια και αντινετρόνια (που αποτελούνται από αντικουάρκ), εκτός από τα λίγα εκείνα που παράγουν οι φυσικοί στους μεγάλους επιταχυντές σωματιδίων. Έχουμε μάλιστα ενδείξεις από τις κοσμικές ακτίνες ότι το ίδιο συμβαίνει και σε όλη την ύλη του Γαλαξία μας: δεν υπάρχουν αντιπρωτόνια και αντινετρόνια εκτός απ' όσα παράγονται κατά ζεύγη σωματιδίων - αντισωματιδίων σε μεγάλες ενέργειες. Αν στο Γαλαξία μας υπήρχαν μεγάλες περιοχές με αντιύλη, θα περιμέναμε να παρατηρήσουμε μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας από τα κοινά όρια των περιοχών της ύλης και των περιοχών της αντιύλης· εκεί θα συγκρούονταν πολλά σωματίδια με τα αντισωματίδιά τους, με τελικό αποτέλεσμα την εξαϋλώσή τους και την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ακτινοβολίας.

Δεν έχουμε άμεσες ενδείξεις για το κατά πόσο στους άλλους γαλαξίες η ύλη αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια ή από αντιπρωτόνια και αντινετρόνια. Είναι όμως βέβαιο ότι θα συμβαίνει ή το ένα ή το άλλο: δεν μπορεί να υπάρχει μείγμα σωματιδίων και αντισωματιδίων στον ίδιο γαλαξία γιατί τότε θα παρατηρούσαμε και πάλι την ακτινοβολία των εξαϋλώσεων. Πιστεύουμε λοιπόν ότι και στους άλλους γαλαξίες η ύλη αποτελείται τελικά από κουάρκ και όχι αντικουάρκ, αφού φαίνεται απίθανο να υπάρχουν μερικοί γαλαξίες από ύλη και μερικοί από αντιύλη.

Γιατί λοιπόν υπάρχουν τόσα περισσότερα κουάρκ από αντί-

κούarks; Γιατί δεν υπάρχουν ίσες ποσότητες και από τα δύο; Είμαστε βέβαιοι πολύ τυχεροί που είναι έτσι τα πράγματα, γιατί αλλιώς όλα σχεδόν τα κούarks και τα αντικούarks θα είχαν εξαϋλωθεί στις αρχικές φάσεις του Σύμπαντος και θα είχαν αφήσει πίσω τους έναν «ωκεανό» ακτινοβολίας χωρίς σχεδόν καθόλου ύλη. Δεν θα είχαν δημιουργηθεί λοιπόν οι γαλαξίες, τα άστρα και οι πλανήτες όπου οφείλουμε και εμείς την ύπαρξή μας. Οι Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες μπορούν να εξηγήσουν αυτήν την μεγάλη μας τύχη, γιατί προβλέπουν ότι το Σύμπαν μπορεί πραγματικά να καταλήξει να περιέχει περισσότερα κούarks από αντικούarks, ακόμα και αν σε κάποια αρχική του φάση περιείχε ίσες ποσότητες και από τα δύο. Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, σε μεγάλες ενέργειες οι Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες επιτρέπουν στα κούarks να μετατρέπονται σε αντιηλεκτρόνια και στα αντικούarks να μετατρέπονται σε ηλεκτρόνια. Επιτρέπουν επίσης την αντίστροφη διαδικασία, την μετατροπή δηλαδή των αντιηλεκτρονίων σε κούarks και των ηλεκτρονίων σε αντικούarks. Υπήρχε κάποια εποχή όπου το Σύμπαν ήταν τόσο θερμό που οι ενέργειες των σωματιδίων ήταν αρκετά μεγάλες για τις παραπάνω μετατροπές. Αλλά γιατί αυτό θα οδηγούσε σε πιο πολλά κούarks από αντικούarks; λόγος είναι ότι οι φυσικοί νόμοι δεν είναι ακριβώς ίδιοι για τα σωματίδια και τα αντισωματίδια.

Μέχρι το 1956 υπήρχε η πεποίθηση ότι οι νόμοι της φυσικής υπάκουαν σε κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές *συμμετρίες* που ονομάζονται C, P και T. Η συμμετρία C σημαίνει ότι οι νόμοι είναι οι ίδιοι για τα σωματίδια και τα αντισωματίδια. Η συμμετρία P σημαίνει ότι οι νόμοι είναι οι ίδιοι για κάποια κατάσταση και την κατοπτρική της (για παράδειγμα η κατοπτρική κατάσταση ενός σωματιδίου που περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού είναι ένα σωματίδιο που περιστρέφεται κατά την αντίθετη φορά). Η συμμετρία T

σημαίνει ότι αν αντιστρέψουμε την κατεύθυνση της κίνησης όλων των σωματιδίων και των αντισωματιδίων σε κάποιο φυσικό σύστημα, αυτό θα επιστρέψει στην κατάσταση όπου βρισκόταν σε κάποια προηγούμενη χρονική στιγμή· με άλλα λόγια, η συμμετρία T σημαίνει ότι οι νόμοι είναι οι ίδιοι και στις δύο κατευθύνσεις του χρόνου.

Το 1956 όμως δύο Αμερικανοί φυσικοί, ο Lee και ο Yang υπέθεσαν ότι η ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση δεν υπακούει στη συμμετρία P. Αυτό σημαίνει ότι η ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση ανάγκασε το Σύμπαν να εξελιχθεί διαφορετικά απ' ό,τι θα εξελίσσονταν το κατοπτρικό του Σύμπαν. Τον ίδιο χρόνο η συνεργάτιδα τους κυρία Wu απέδειξε πειραματικά ότι η πρόβλεψη των Lee και Yang ήταν σωστή. Στο πείραμά της χρησιμοποίησε πυρήνες ραδιενεργών ατόμων που διασπώνται εκπέμποντας ηλεκτρόνια και περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους. Χρησιμοποιώντας ένα μαγνητικό πεδίο προσανατόλισε όλους τους πυρήνες ώστε οι άξονες περιστροφής τους να έχουν την ίδια διεύθυνση (ακριβώς όπως στο μαγνητικό πεδίο της Γης οι βελόνες των πυξίδων προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση, την διεύθυνση του μαγνητικού βορρά). Έδειξε λοιπόν ότι περισσότερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται προς μία κατεύθυνση παρά προς κάποια άλλη. Τον επόμενο χρόνο ο Lee και ο Yang πήραν το βραβείο Nobel για την ιδέα τους. Ανακαλύφθηκε επίσης ότι οι ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις δεν υπακούουν στη συμμετρία C. Αυτό σημαίνει ότι ένα Σύμπαν που αποτελείται από αντισωματίδια εξελίσσεται διαφορετικά από το δικό μας. Παρ' όλα αυτά φαινόταν ότι η ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση θα έπρεπε να υπακούει στη συνδυασμένη συμμετρία CP· φαινόταν δηλαδή ότι το Σύμπαν θα μπορούσε να εξελιχθεί με τον ίδιο τρόπο που θα εξελίσσονταν και το κατοπτρικό του, αν αντικαθιστούσαμε κάθε σωματίδιο με το αντίστοιχο αντισωματίδιό του! Το 1964, όμως, δυο άλλοι Αμερικανοί φυσικοί, ο J.W. Cronin

και ο Val Fitch ανακάλυψαν ότι, κατά τη διάσπαση κάποιων σωματιδίων που ονομάζονται Κ-μεσόνια, ακόμη και αυτή η συνδυασμένη συμμετρία CP έπαυε να ισχύει. Ο Cronin και ο Fitch πήραν το 1980 το βραβείο Nobel για αυτήν την ανακάλυψή τους. (Πολλά βραβεία Nobel απονέμονται όταν αποδεικνύεται ότι το Σύμπαν δεν είναι τόσο απλό όσο νομίζαμε!)

Σύμφωνα με κάποιο μαθηματικό θεώρημα, κάθε θεωρία που υπακούει στους νόμους της κβαντικής μηχανικής και της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας πρέπει επίσης να υπακούει στη συνδυασμένη συμμετρία CPT. Με άλλα λόγια το Σύμπαν πρέπει να εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο αν αντικαταστήσουμε τα σωματίδια με τα αντισωματίδιά τους, πάρουμε το κατοπτρικό του Σύμπαν και αντιστρέψουμε την κατεύθυνση του χρόνου. Ο Cronin και ο Fitch έδειξαν ότι αν αντικαταστήσουμε τα σωματίδια του Σύμπαντος με τα αντισωματίδιά τους και πάρουμε το κατοπτρικό του Σύμπαν αλλά δεν αντιστρέψουμε την κατεύθυνση του χρόνου, τότε το Σύμπαν δεν εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο. Η αντιστροφή του χρόνου, λοιπόν, πρέπει να αλλάζει κάποιους νόμους της φύσης· το Σύμπαν που υπακούει στη συνδυασμένη συμμετρία CPT, αφού δεν υπακούει στη συνδυασμένη συμμετρία CP δεν πρέπει να υπακούει και στη συμμετρία T.

Το Σύμπαν που διαστέλλεται, δεν υπακούει βέβαια στη συμμετρία T, γιατί αν αντιστρέψουμε την κατεύθυνση του χρόνου δεν διαστέλλεται πια αλλά συστέλλεται. Και αφού, όπως είδαμε, η αντιστροφή του χρόνου αλλάζει κάποιους νόμους της φύσης, συμπεραίνουμε ότι αυτοί ακριβώς οι νόμοι μπορεί να είναι η πραγματική αιτία που μετατρέπονται περισσότερα αντιηλεκτρόνια σε κουάρκ απ' όσα ηλεκτρόνια σε αντικουάρκ. Έτσι, καθώς μετά τη Μεγάλη έκρηξη το Σύμπαν διαστελλόταν και ψυχόταν, τα αντικουάρκ εξαϋλώνονταν με τα κουάρκ· επειδή όμως υπήρχαν περισσότερα κουάρκ από αντικουάρκ, θα παρέμεινε ένα μικρό υπόλοιπο κουάρκ. Είναι αυτά ακριβώς τα

κουάρκς που συνθέτουν την ύλη που αποτελεί τον Ήλιο, τους πλανήτες κι εμάς. Έτσι η ίδια μας η ύπαρξη μπορεί να θεωρηθεί επιβεβαίωση των Μεγάλων Ενοποιημένων Θεωριών. Οι αβεβαιότητες όμως των υπολογισμών είναι τόσες που δεν μπορούμε να προβλέψουμε πόσα κουάρκς παραμένουν μετά την εξαΰλωση, ούτε ακόμη κι αν όσα παραμένουν είναι κουάρκς ή αντικουάρκς. (Αν όμως προβλέπαμε ένα υπόλοιπο αντικουάρκς, θα μπορούσαμε πολύ απλά να μετονομάσουμε σε αντικουάρκς τα κουάρκς που παρατηρούμε.)

Οι Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες δεν περιλαμβάνουν τη βαρύτητα. Αυτό δεν έχει μεγάλη σημασία, γιατί η βαρύτητα είναι τόσο ασθενής που οι επιδράσεις της μπορεί να αγνοηθούν όταν εξετάζουμε τα στοιχειώδη σωματίδια και τα άτομα. Επειδή όμως έχει μεγάλη εμβέλεια και είναι πάντα ελκτική, οι επιδράσεις της αθροίζονται. Έτσι για αρκετά μεγάλες ποσότητες σωματιδίων ύλης, οι βαρυτικές δυνάμεις κυριαρχούν πάνω στις άλλες δυνάμεις. Αυτός είναι ο λόγος που η βαρύτητα καθορίζει την εξέλιξη του Σύμπαντος. Ακόμη και σε αντικείμενα του μεγέθους των άστρων, η ελκτική δύναμη μπορεί να κυριαρχήσει πάνω στις άλλες δυνάμεις και να αναγκάσει ένα άστρο να καταρρεύσει. Η εργασία μου στη δεκαετία του 1970 επικεντρώθηκε στις μαύρες τρύπες, που μπορεί να προκύψουν από μία τέτοια κατάρρευση άστρου, και στις περιοχές πολύ ισχυρής βαρυτικής επίδρασης που βρίσκονται γύρω τους. Αυτή η εργασία οδήγησε στις πρώτες νύξεις για το πώς μπορεί να επηρεάζονται μεταξύ τους οι δύο θεωρίες της κβαντικής μηχανικής και της γενικής σχετικότητας, και επέτρεψε μια φευγαλέα ματιά στο σχήμα της κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας, που ακόμη δεν έχει αποκαλυφθεί.

6

Οι Μαύρες τρύπες

Ο όρος *μαύρη τρύπα* είναι σχετικά πρόσφατος· επινοήθηκε το 1969 από τον Αμερικανό φυσικό John Wheeler που θέλησε να περιγράψει με γλαφυρό τρόπο μια παλαιότερη ιδέα· η ιδέα αυτή ανάγεται σε μια εποχή πριν διακόσια τουλάχιστον χρόνια, στα τέλη του 18ου αιώνα. Στην εποχή εκείνη υπήρχαν δύο θεωρίες για τη φύση του φωτός: κατά την πρώτη το φως αποτελείται από κύματα ενώ κατά την δεύτερη, που την υποστήριξε και ο Νεύτων, το φως αποτελείται από σωματίδια. Σήμερα γνωρίζουμε ότι, με κάποια έννοια, και οι δύο θεωρίες είναι στην πραγματικότητα σωστές, επειδή σύμφωνα με το δυϊσμό κυμάτων - σωματιδίων της κβαντικής μηχανικής το φως μπορεί να θεωρηθεί και ως κύμα και ως σωματίδιο. Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι το φως αποτελείται από σωματίδια, είναι λογικό να περιμένουμε ότι η βαρύτητα επιδρά πάνω τους όπως επιδρά και πάνω στα μήλα, τις πέτρες και τους πλανήτες. Στην αρχή οι επιστήμονες υπέθεσαν ότι η επίδραση της βαρύτητας δεν θα μπορούσε να επι-

βραδύνει ή να επιταχύνει την κίνηση των σωματιδίων του φωτός αφού, όπως νόμιζαν, το φως διαδίδεται πάντα με άπειρη ταχύτητα. Η ανακάλυψη όμως του Roemer ότι το φως διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα, σήμαινε ότι ίσως η επίδραση της βαρύτητας μπορούσε να έχει κάποια αποτελέσματα στην κίνηση αυτών των σωματιδίων.

Την υπόθεση αυτή την ανέπτυξε στα τέλη του 18ου αιώνα ένας καθηγητής του Πανεπιστημίου του Cambridge, ο John Michell. Σε μια εργασία του, που δημοσιεύτηκε το 1783, υποστήριξε ότι αν ένα άστρο έχει αρκετή μάζα και είναι αρκετά συμπαγές, η επίδραση της βαρύτητας του μπορεί να αναγκάσει όλα τα σωματίδια του φωτός που εκπέμπονται από την επιφάνεια του να επιστρέψουν σε αυτήν πριν κατορθώσουν να απομακρυνθούν πολύ. Άρα, το φως που ακτινοβολεί αυτό το άστρο δεν μπορεί να διαφύγει τελικά στο Διάστημα. Ο Michell υπέθεσε ότι ίσως υπάρχουν στο Σύμπαν πάμπολλα παρόμοια αντικείμενα. Αν και δεν θα μπορούσαμε να τα δούμε, αφού το φως τους δεν θα έφτανε ως εμάς, θα μπορούσαμε όμως να αισθανθούμε τη βαρυτική επίδραση τους. Τα αντικείμενα αυτά τα ονομάζουμε σήμερα «μαύρες τρύπες», επειδή μοιάζουν με μαύρα κενά μέσα στον διαστημικό χώρο. Παρόμοια υπόθεση διατύπωσε λίγα χρόνια αργότερα και ο Laplace· είναι μάλιστα ενδιαφέρον το ότι την περιέλαβε μόνον στην πρώτη και την δεύτερη έκδοση του βιβλίου του *Το σύστημα του Κόσμου*, αλλά όχι και στις επόμενες· ίσως αποφάσισε ότι η υπόθεση αυτή δεν έχει κάποια φυσική σημασία. (Ίσως επίσης επηρεάστηκε από το ότι στις αρχές του 19ου αιώνα, η σωματιδιακή θεωρία του φωτός υποχώρησε προς όφελος της κυματικής θεωρίας, που φαινόταν ικανή να εξηγήσει όλα τα ανάλογα φαινόμενα. Σύμφωνα όμως με την κυματική θεωρία δεν ήταν σαφές αν τελικά η βαρύτητα επιδρά κατά κάποιο τρόπο στο φως ή όχι).

Στην πραγματικότητα, δεν είναι συνεπές να θεωρούμε ότι τα

σωματίδια του φωτός συμπεριφέρονται όπως τα σώματα της νευτώνειας θεωρίας της βαρύτητας, γιατί γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του φωτός είναι πάντοτε σταθερή. (Αντίθετα, σύμφωνα με τη νευτώνεια θεωρία η ταχύτητα των σωμάτων μεταβάλλεται. Η βαρύτητα μπορεί να επιταχύνει ή να επιβραδύνει την κίνηση τους. Ένα σωματίδιο φωτός, όμως, ένα φωτόνιο, πρέπει να κινείται πάντα με σταθερή ταχύτητα. Πώς λοιπόν επιδρά η βαρύτητα στο φως;) Για πολλά χρόνια δεν υπήρχε μία συνεπής θεωρία για τη σχέση βαρύτητας και φωτός, μέχρις ότου, το 1915, ο Αϊνστάιν πρότεινε τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Χρειάστηκαν όμως πολλά χρόνια για να κατανοηθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής της θεωρίας στην περίπτωση των άστρων με πολύ μεγάλη μάζα.

Για να κατανοήσουμε πώς θα μπορούσε να σχηματιστεί μια μαύρη τρύπα χρειάζεται πρώτα να καταλάβουμε τον «κύκλο ζωής» ενός άστρου. Ένα άστρο σχηματίζεται όταν μια μεγάλη ποσότητα αέριας ύλης (κυρίως υδρογόνου) αρχίζει να καταρρέει εξ' αιτίας της ίδιας της βαρυτικής έλξης της. Καθώς ο όγκος του αερίου συστέλλεται, τα άτομα του συγκρούονται μεταξύ τους όλο και συχνότερα με όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες· έτσι το αέριο θερμαίνεται όλο και περισσότερο. Κάποτε γίνεται τόσο θερμό ώστε η μεγάλη ορμή της σύγκρουσης των ατόμων του υδρογόνου τα αναγκάζει να συγχωνεύονται μεταξύ τους και να σχηματίζουν άτομα ηλίου. Με αυτή τη διαδικασία συγχώνευσης (που ονομάζεται πυρηνική αντίδραση σύντηξης, επειδή περιλαμβάνει τη συνένωση πυρήνων υδρογόνου σε υψηλή θερμοκρασία) απελευθερώνεται και άλλη θερμότητα· η πρόσθετη αυτή θερμότητα είναι ακριβώς η αιτία που κάνει τα άστρα να φωτοβολούν. Αυξάνει επίσης την πίεση του αερίου μέχρι να εξισορροπηθεί η βαρυτική έλξη, και έτσι το άστρο παύει να συστέλλεται. Μοιάζει κάπως με ένα μπαλόνι: υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ της πίεσης του αέρα, που αναγκάζει το μπαλόνι να διασταλλεί, και της

τάσης του ελαστικού, που το αναγκάζει να συσταλλεί. Τα άστρα παραμένουν σε αυτή τη σταθερή κατάσταση για πολύ καιρό, με την πίεση από τη θερμότητα των πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης να εξισορροπεί την πίεση της βαρυτικής έλξης. Κάποτε όμως τα πυρηνικά καύσιμα του άστρου εξαντλούνται· φαίνεται μάλιστα αρκετά παράξενο το γεγονός ότι όσο περισσότερα είναι τα καύσιμα τόσο ταχύτερα εξαντλούνται. Αυτό οφείλεται στο ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός άστρου τόσο μεγαλύτερη πρέπει να γίνει η θερμοκρασία του για να εξισορροπηθεί η βαρυτική έλξη· και όσο μεγαλύτερη γίνεται η θερμοκρασία του τόσο ταχύτερα «καίγονται», δηλαδή συντήκονται, τα καύσιμα του. Ο Ήλιος μας έχει αρκετά καύσιμα για άλλα πέντε δισεκατομμύρια χρόνια περίπου. Άλλα άστρα όμως με μεγαλύτερη μάζα μπορεί να εξαντλήσουν τα καύσιμα τους σε λιγότερο χρόνο, ακόμη και σε εκατό εκατομμύρια χρόνια. Όταν ένα άστρο «μείνει» από καύσιμα, αρχίζει να ψύχεται και επειδή ψύχεται αρχίζει να συστέλλεται. Το τι μπορεί να συμβεί μετά έγινε κατανοητό μόνο στα τέλη της δεκαετίας του 1920.

Το 1928 ένας Ινδός φοιτητής, ο Sabrahmanyam Chandrasekhar έφυγε με πλοίο από τη χώρα του για να σπουδάσει στην Αγγλία, στο Πανεπιστήμιο του Cambridge, όπου καθηγητής ήταν ο αστρονόμος Sir Arthur Eddington, αυθεντία στη γενική θεωρία της σχετικότητας. (Κάποτε, στις αρχές της δεκαετίας του 1920, ένας δημοσιογράφος ρώτησε τον Eddington αν αληθεύει ότι, όπως είχε ακούσει, υπήρχαν μόνον τρεις άνθρωποι στον κόσμο που καταλάβαιναν τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Ο Eddington έμεινε για μια στιγμή σιωπηλός, και μετά απάντησε: «Προσπαθώ να σκεφτώ ποιός είναι ο τρίτος»!). Στη διάρκεια του ταξιδιού του από την Ινδία, ο Chandrasekhar βρήκε πόσο μεγάλο μπορεί να είναι ένα άστρο που, αν και έχει εξαντλήσει όλα τα πυρηνικά καύσιμά του, κατορθώνει ακόμη, με κάποιον τρόπο, να διατηρεί την ισορροπία του και να μην καταρρέει από

τη βαρυτική έλξη του. Ο τρόπος αυτός σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή του Pauli. Όταν το άστρο έχει συσταλλεί αρκετά, τα σωματίδια ύλης έχουν πλησιάσει πολύ μεταξύ τους και έτσι, σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, έχουν πολύ διαφορετικές ταχύτητες. Ακριβώς γι' αυτό, τείνουν να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο και έτσι το άστρο τείνει να διασταλλεί. Με αυτόν τον τρόπο το άστρο μπορεί να διατηρηθεί σε σταθερό μέγεθος όταν υπάρξει ισορροπία μεταξύ της έλξης της βαρύτητας και της άπωσης που σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή — ακριβώς όπως στην προηγούμενη φάση του κύκλου της ζωής του υπήρχε ισορροπία μεταξύ της έλξης της βαρύτητας και της άπωσης που οφειλόταν στη θερμότητα των πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης.

Ο Chandrasekhar κατάλαβε όμως ότι υπάρχει ένα όριο στην άπωση που οφείλεται σε αυτήν την διαφορά ταχυτήτων των σωματιδίων ύλης μέσα στο άστρο· η θεωρία της σχετικότητας προσδιορίζει ότι η μεγαλύτερη δυνατή διαφορά αυτών των ταχυτήτων δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός. (Τα σωματίδια δεν μπορούν να απομακρύνονται το ένα από το άλλο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός). Αυτό σημαίνει ότι όταν το άστρο γίνει αρκετά πυκνό η άπωση που σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή θα είναι μικρότερη από την έλξη της βαρύτητας. Ο Chandrasekhar υπολόγισε ότι ένα ψυχρό άστρο με μάζα περίπου *μιάμιση* φορά μεγαλύτερη από τη μάζα του Ήλιου δεν θα μπορεί να διατηρεί την ισορροπία του και έτσι θα καταρρεύσει από τη βαρυτική έλξη του. (Αυτή η μάζα είναι γνωστή σήμερα ως *όριο του Chandrasekhar*). Παρόμοια ανακάλυψη έκανε την ίδια περίπου εποχή και ο Ρώσος επιστήμονας Lev Davidovich Landau.

Το όριο του Chandrasekhar έχει σημαντικές επιπτώσεις στην τελική μοίρα των άστρων: αν η μάζα τους είναι μικρότερη από αυτό το όριο, το άστρο μπορεί κάποτε να σταματήσει να

συστέλλεται, και να παραμείνει σε ένα τελικό στάδιο έχοντας ακτίνα λίγων χιλιάδων χιλιομέτρων και πυκνότητα δεκάδων τόνων ανά κυβικό εκατοστόμετρο. Αυτά τα άστρα ονομάζονται *λευκοί νάνοι*. Ένας λευκός νάνος διατηρεί την ισορροπία βαρυτικής έλξης και άπωσης που σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή μεταξύ των ηλεκτρονίων της ύλης του. Σήμερα παρατηρούμε μεγάλο πλήθος από τέτοια άστρα. Ένα από τα πρώτα που ανακαλύφθηκαν κινείται σε τροχιά γύρω από τον Σείριο, το λαμπρότερο άστρο του νυχτερινού ουρανού.

Ο Landau έδειξε ότι υπήρχε και ένα άλλο πιθανό τελικό στάδιο για ένα άστρο, με οριακή μάζα περίπου δυόμισι φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του Ήλιου και ακτίνα μικρότερη και από αυτήν των λευκών νάνων. Και σε αυτά τα άστρα η άπωση που εξισορροπεί την πίεση της βαρυτικής έλξης σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή, αλλά τώρα μεταξύ των νετρονίων των πυρήνων της ύλης του. (Τα πρωτόνια των πυρήνων ενώνονται με τα ηλεκτρόνια και σχηματίζουν νετρόνια). Για το λόγο αυτό ονομάζονται *αστέρες νετρονίων*. Οι αστέρες νετρονίων έχουν ακτίνα περίπου δεκαπέντε χιλιομέτρων και πυκνότητα δεκάδων εκατομμυρίων τόνων ανά κυβικό εκατοστόμετρο. Την εποχή που προβλέφθηκε για πρώτη φορά η ύπαρξη τους δεν υπήρχε τρόπος να παρατηρηθούν. Η ανίχνευση τους έγινε δυνατή πολύ αργότερα.

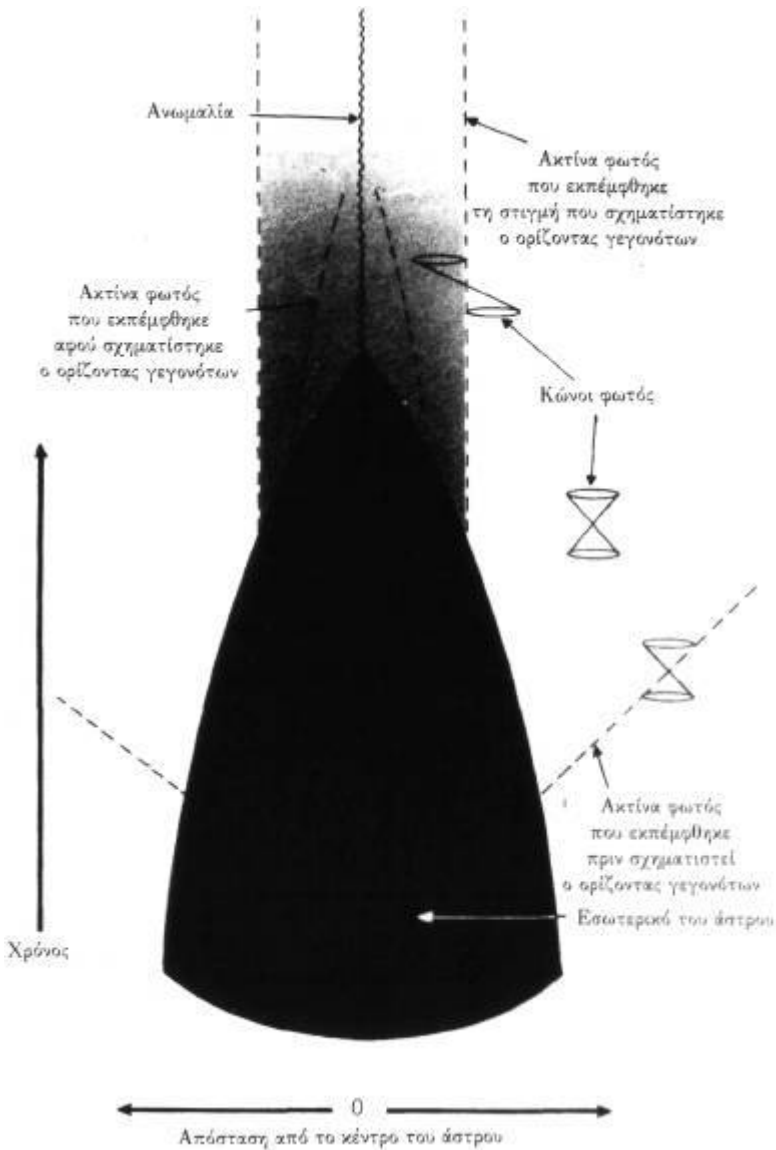
Τα άστρα που η μάζα τους είναι μεγαλύτερη είτε από το όριο του Chandrasekhar για τους λευκούς νάνους είτε από το αντίστοιχο όριο για τους αστέρες νετρονίων, αντιμετωπίζουν μεγάλα προβλήματα όταν εξαντλούν τα πυρηνικά καύσιμα τους. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να εκραγούν ή να καταφέρουν να εκτινάξουν αρκετή μάζα ώστε να μειώσουν την υπόλοιπη μάζα τους κάτω από αυτά τα όρια και έτσι να αποφύγουν την καταστροφική βαρυτική κατάρρευση. Είναι όμως δύσκολο να πιστέψουμε ότι συμβαίνει πάντοτε κάτι τέτοιο, ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλο είναι το άστρο. Με ποιό τρόπο ένα άστρο μπορεί

να γνωρίζει ότι πρέπει να «αδυνατίσει»; Και αν ακόμη τα άστρα κατάφερναν τελικά να χάσουν αρκετή μάζα για να αποφύγουν την κατάρρευση, τι θα συνέβαινε αν προσθέταμε περισσότερη μάζα σε ένα λευκό νάνο ή έναν αστέρα νετρονίων έτσι που να ξεπερνούσε τα αντίστοιχα όρια; Θα κατέρρεε σε άπειρη πυκνότητα; Ο Eddington ενοχλήθηκε από ένα τέτοιο συμπέρασμα και αρνήθηκε να πιστέψει στο αποτέλεσμα του Chandrasekhar νόμιζε ότι δεν είναι δυνατόν ένα άστρο να συρρικνωθεί στις μηδενικές διαστάσεις ενός σημείου. Αυτή ήταν και η άποψη των περισσότερων φυσικών. Ο ίδιος ο Αϊνστάιν δημοσίευσε μια εργασία όπου υποστήριζε ότι τα άστρα δεν συρρικνώνονται σε μηδενικό μέγεθος. Η εχθρότητα των άλλων φυσικών, και ιδιαίτερα του Eddington που ήταν ο καθηγητής του και η ηγετική αυθεντία της εποχής στα θέματα της δομής των άστρων, έπεισε τελικά τον Chandrasekhar να εγκαταλείψει αυτόν τον τομέα έρευνας και να στραφεί σε άλλα προβλήματα της αστρονομίας, όπως είναι η κίνηση των αστρικών σμηνών. Όμως το βραβείο Nobel που του απονεμήθηκε το 1983 αφορούσε, τουλάχιστον κατά ένα μέρος, ακριβώς την πρώτη του ανακάλυψη των οριακών μαζών των άστρων.

Ο Chandrasekhar απέδειξε ότι η απαγορευτική αρχή δεν θα μπορούσε να σταματήσει τη διαδικασία κατάρρευσης ενός άστρου με μάζα μεγαλύτερη από το όριο του Chandrasekhar· αλλά το πρόβλημα του τι θα συνέβαινε σε ένα τέτοιο άστρο σύμφωνα με την γενική θεωρία της σχετικότητας, το επέλυσε για πρώτη φορά το 1939 ο νεαρός Αμερικανός φυσικός Robert Oppenheimer. Τα αποτελέσματά του όμως οδηγούσαν στο συμπέρασμα ότι οι παρατηρήσιμες συνέπειες δεν ήταν δυνατό να ανιχνευτούν με τα τηλεσκόπια της εποχής. Ακολούθησε ο πόλεμος και ο Oppenheimer συνδέθηκε με την κατασκευή των πυρηνικών βομβών. Μετά τον πόλεμο το πρόβλημα της βαρυτικής κατάρρευσης ξεχάστηκε· οι περισσότεροι φυσικοί ασχολήθηκαν με το τι συμβαίνει στην κλίμακα του ατόμου και του πυρήνα του. Παρ' όλα

αυτά, στη δεκαετία του 1960 το ενδιαφέρον για τα προβλήματα στις μεγάλες κλίμακες της αστρονομίας και της κοσμολογίας ανανεώθηκε από την μεγάλη αύξηση, και στο πλήθος και στην έκταση, των αστρονομικών παρατηρήσεων που επέφερε η εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας. Η εργασία του Oppenheimer επανήλθε στην επικαιρότητα και η έρευνα συνεχίστηκε από πολλούς επιστήμονες.

Η εικόνα που έχουμε σήμερα από την εργασία του Oppenheimer είναι η ακόλουθη: Η βαρυτική επίδραση ενός άστρου μεταβάλλει τις διαδρομές των ακτίνων του φωτός στο χωρόχρονο· οι διαδρομές που υπάρχουν είναι διαφορετικές από αυτές που θα υπήρχαν αν το άστρο δεν βρισκόταν εκεί. Οι κώνοι του φωτός, που δείχνουν ενδεικτικά τις διαδρομές που θα ακολουθούσαν στο χωρόχρονο κάποιες ακτίνες φωτός που θα εκπέμπονταν από τα σημεία όπου βρίσκονται οι κορυφές τους, κλίνουν ελαφρά προς τα μέσα κοντά στην επιφάνεια του άστρου. (Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια μιας έκλειψης Ηλίου στην καμπύλωση των ακτίνων του φωτός από τα μακρινά άστρα). Καθώς το άστρο συστέλλεται, η βαρυτική επίδραση του πάνω σε αντικείμενα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του μεγαλώνει και οι κώνοι του φωτός κλίνουν περισσότερο προς τα μέσα. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται δυσκολότερο να διαφύγει το φως από το άστρο· σημαίνει επίσης ότι, για κάποιον παρατηρητή μακριά από το άστρο, το φως που εκπέμπεται απ' αυτό φαίνεται πιο αμυδρό και πιο κοκκινωπό (το φάσμα του μετατοπίζεται προς το ερυθρό). Τελικά, όταν το άστρο συρρικνώνεται σε κάποια οριακή ακτίνα, η βαρυτική επίδραση πάνω στους κώνους φωτός που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του γίνεται τόσο πολύ ισχυρή και οι κώνοι κλίνουν προς τα μέσα τόσο πολύ ώστε το φως δεν μπορεί πια να διαφύγει από την επιφάνεια του άστρου. Αν όμως δεν μπορεί να διαφύγει το φως, δεν μπορεί να διαφύγει και κανένα άλλο αντικείμενο αφού, σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότη-



ΕΙΚΟΝΑ 6-1.

τας, όλα τα αντικείμενα κινούνται με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός. (Οι διαδρομές που θα ακολουθούσαν στο χωρόχρονο κάποια αντικείμενα τα οποία θα εκτοξεύονταν από τις κορυφές των αντίστοιχων κώνων φωτός και θα κινούνταν με μικρότερη ταχύτητα από αυτήν του φωτός, βρίσκονται όλες στο εσωτερικό αυτών των κώνων. Αν λοιπόν η κλίση των κώνων φωτός είναι απαγορευτική για τις ακτίνες του φωτός που οι διαδρομές τους βρίσκονται στην επιφάνεια των κώνων, θα είναι απαγορευτική και για όλα τα αντικείμενα που οι διαδρομές τους βρίσκονται στο εσωτερικό των κώνων). Έτσι έχουμε ένα σύνολο γεγονότων, δηλαδή μια περιοχή του χωροχρόνου, από όπου *τίποτε* δεν μπορεί να διαφύγει και να φτάσει σε κάποιον παρατηρητή μακριά από το άστρο. Αυτή η περιοχή είναι αυτό που αποκαλούμε σήμερα «μαύρη τρύπα». Το όριο της ονομάζεται *ορίζοντας των γεγονότων* και ταυτίζεται με τις διαδρομές των ακτίνων του φωτός που μόλις και δεν κατορθώνουν να διαφύγουν από τη μαύρη τρύπα.

Για να καταλάβουμε τι θα βλέπαμε αν παρατηρούσαμε ένα άστρο που κατέρρεε σχηματίζοντας μία μαύρη τρύπα, πρέπει να θυμηθούμε ότι στη θεωρία της σχετικότητας δεν υπάρχει απόλυτος χρόνος: κάθε παρατηρητής έχει το δικό του μέτρο χρόνου. Ο χρόνος για έναν παρατηρητή που βρίσκεται πάνω σε ένα άστρο διαφέρει από το χρόνο για κάποιον που βρίσκεται μακριά από αυτό, αφού η βαρυτική έλξη του άστρου κάνει τα γεγονότα που συμβαίνουν στην περιοχή του πρώτου να φαίνονται ότι καθυστερούν σε σχέση με τα αντίστοιχα γεγονότα που συμβαίνουν στην περιοχή του δεύτερου. Ας υποθέσουμε ότι ένας ατρόμητος αστροναύτης βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια ενός άστρου που καταρρέει από την έλξη της βαρύτητας και ότι κάθε ένα δευτερόλεπτο — σύμφωνα με το δικό του ρολόι — στέλνει ένα φωτεινό σήμα προς το διαστημόπλοιο του, που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από το άστρο. Κάποια χρονική στιγμή — ας πούμε στις 11:00

του ρολογιού του αστροναύτη πάνω στο άστρο — η επιφάνεια του άστρου συρρικνώνεται κάτω από την οριακή ακτίνα όπου η βαρυτική έλξη γίνεται τόσο ισχυρή ώστε τίποτε πια δεν μπορεί να διαφύγει προς το Διάστημα· έτσι τα φωτεινά σήματα του αστροναύτη πάνω στο άστρο δεν μπορούν πια να φτάσουν στο διαστημόπλοιο. Καθώς θα πλησίαζε η ώρα 11:00, οι αστροναύτες από το διαστημόπλοιο θα έβρισκαν ότι τα σήματα του συναδέλφου τους πάνω στο άστρο θα καθυστερούσαν όλο και περισσότερο, δηλαδή τα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών σημάτων θα γίνονταν όλο και μεγαλύτερα από ένα δευτερόλεπτο. Οι διαφορές όμως αυτές θα ήταν πολύ μικρές ως τις 10:59:59. Θα έπρεπε λοιπόν να περιμένουν ένα χρονικό διάστημα ελάχιστα μεγαλύτερο από ένα δευτερόλεπτο για να πάρουν τα σήματα που έστειλε ο συνάδελφός τους στις 10:59:58 και στις 10:59:59. Αλλά θα έπρεπε να περιμένουν για πάντα το σήμα των 11:00. Τα κύματα του φωτός που θα εκπέμπονταν από την επιφάνεια του άστρου από τις 10:59:59 μέχρι και τις 11:00, σύμφωνα πάντοτε με το ρολόι του αστροναύτη πάνω στο άστρο, θα εξαπλώνονταν σε άπειρο χρονικό διάστημα σύμφωνα με το ρολόι του διαστημόπλοιου. Το χρονικό διάστημα λοιπόν μεταξύ της άφιξης δύο διαδοχικών κυμάτων στο διαστημόπλοιο θα μεγάλωνε συνεχώς, και έτσι το φως από το άστρο θα φαινόταν όλο και πιο αμυδρό και όλο πιο κοκκινωπό (το φάσμα του θα μετατοπιζόταν όλο και περισσότερο προς το ερυθρό). Τελικά, το φως από το άστρο θα γινόταν τόσο αμυδρό ώστε το άστρο δεν θα φαινόταν πια από το διαστημόπλοιο· στη θέση του στο Διάστημα θα παρέμενε ένα μαύρο κενό, μια μαύρη τρύπα. Το άστρο όμως θα συνέχιζε να ασκεί την ίδια βαρυτική επίδραση στο διαστημόπλοιο, το οποίο έτσι θα συνέχιζε να βρίσκεται στην ίδια τροχιά αλλά τώρα πια γύρω από τη μαύρη τρύπα.

Μια παρόμοια εξέλιξη όμως δεν θα μπορούσε να συμβεί στην πραγματικότητα, επειδή υπάρχει το εξής πρόβλημα: Η βαρύτητα

τα γίνεται πιο ισχυρή όσο πιο κοντά βρίσκεται κανείς στο άστρο· έτσι, η δύναμη της βαρυτικής έλξης της στα πόδια του ατρόμητου αστροναύτη μας θα ήταν μεγαλύτερη από τη δύναμη στο κεφάλι του. Η διαφορά αυτή θα επιμήκυνε το σώμα του αστροναύτη και θα τον διαμέλιζε πριν ακόμη συσταλλεί το άστρο στην οριακή ακτίνα όπου σχηματίζεται ο ορίζοντας των γεγονότων! Πιστεύουμε όμως ότι υπάρχουν πολύ μεγαλύτερα αντικείμενα στο Σύμπαν, όπως οι κεντρικές περιοχές των γαλαξιών, που μπορούν επίσης να υποστούν βαρυτική κατάρρευση και να σχηματίσουν μαύρες τρύπες. Ένας αστροναύτης πάνω τους δεν θα πάθει τίποτε πριν σχηματιστεί η μαύρη τρύπα. Στην πραγματικότητα δεν θα αισθανθεί τίποτε το ιδιαίτερο καθώς θα πλησιάζει στην οριακή ακτίνα, και θα περάσει από το σημείο της «μη επιστροφής» χωρίς να το καταλάβει. Παρ' όλα αυτά, στις επόμενες λίγες ώρες, καθώς η περιοχή θα συνεχίζει να καταρρέει, η διαφορά στις δυνάμεις της βαρυτικής έλξης στα πόδια του και στο κεφάλι του θα γίνει και πάλι τόσο μεγάλη που θα τον διαμελίσει.

Η εργασία που κάναμε ο Roger Penrose και εγώ, από το 1965 ως το 1970, έδειξε ότι σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας πρέπει να υπάρχει μέσα στη μαύρη τρύπα μια ανωμαλία με άπειρη πυκνότητα και χωροχρονική καμπυλότητα. Η ανωμαλία αυτή μοιάζει κάπως με τη Μεγάλη έκρηξη του Σύμπαντος που υπήρξε στην αρχή του χρόνου· μόνο που τώρα, για το άστρο που καταρρέει και για το σώμα του αστροναύτη πάνω σ' αυτό, θα υπάρξει αντίστροφα ένα τέλος του χρόνου. Σε αυτή την ανωμαλία καταρρέουν επίσης όλοι οι νόμοι της φυσικής και εκλείπει κάθε δυνατότητα πρόβλεψης των μελλοντικών γεγονότων. Παρ' όλα αυτά οι παρατηρητές που θα παρέμεναν έξω από τη μαύρη τρύπα δεν θα επηρεάζονταν από την έλλειψη προβλεψιμότητας, γιατί δεν θα μπορούσε να φτάσει σε αυτούς ούτε το φως ούτε οποιοδήποτε άλλο σήμα από την ανωμαλία.

Αυτό το αξιοσημείωτο γεγονός οδήγησε τον Penrose να προτείνει την υπόθεση της *κοσμικής λογοκρισίας* που μπορεί να παραφραστεί με την πρόταση: «ο Θεός απεχθάνεται μια γυμνή ανωμαλία», δηλαδή μια ανωμαλία που δεν περιβάλλεται από μια μαύρη τρύπα. Με άλλα λόγια οι ανωμαλίες που σχηματίζονται από τη βαρυτική κατάρρευση δεν είναι ποτέ «γυμνές», επειδή στα σημεία όπου βρίσκονται, όπως στο εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας, καλύπτονται πάντοτε από τα αδιάκριτα βλέμματα με έναν ορίζοντα γεγονότων! Για να ακριβολογούμε, έχουμε εδώ την «ασθενή» εκδοχή της υπόθεσης της κοσμικής λογοκρισίας: αυτή η υπόθεση, με τη συγκεκριμένη μορφή της, αν και προστατεύει τους παρατηρητές που παραμένουν στο εξωτερικό της μαύρης τρύπας από τις συνέπειες της έλλειψης προβλεψιμότητας που συμβαίνει στην ανωμαλία, δεν προστατεύει καθόλου τον άτυχο αστροναύτη που περνάει τον ορίζοντα των γεγονότων και πέφτει μέσα στη μαύρη τρύπα.

Υπάρχουν κάποιες λύσεις των εξισώσεων της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, σύμφωνα με τις οποίες ο αστροναύτης μας μπορεί να δει μια «γυμνή» ανωμαλία και έτσι να την αποφύγει. Αντί να περάσει από έναν ορίζοντα γεγονότων μπορεί να περάσει από ένα είδος κοσμικής σήραγγας, μια σωληνοειδή διαμόρφωση του χωροχρόνου, που συνδέει ένα σημείο του με κάποιο άλλο σε μια απομακρυσμένη περιοχή του Σύμπαντος. Μια τέτοια δυνατότητα θα προσφερόταν για μακρινά ταξίδια στο χώρο και το χρόνο' δυστυχώς, φαίνεται ότι όλες αυτές οι λύσεις των εξισώσεων της γενικής θεωρίας της σχετικότητας είναι πολύ ασταθείς: ακόμη και η παραμικρή διαταραχή, όπως αυτή που θα προκαλούσε η παρουσία του αστροναύτη, θα μπορούσε να τις τροποποιήσει· έτσι και πάλι ο αστροναύτης δεν θα μπορούσε να δει την ανωμαλία της βαρυτικής κατάρρευσης πριν πέσει πάνω της και ο χρόνος του φτάσει σε ένα τέλος. Με άλλα λόγια, η ανωμαλία της βαρυτικής κατάρρευσης θα βρίσκεται πάντα στο

μέλλον του και ποτέ στο παρελθόν του. Αυτή είναι η «ισχυρή» εκδοχή της υπόθεσης της κοσμικής λογοκρισίας: σε μια πραγματική λύση των εξισώσεων (όπου λαμβάνονται υπόψη ακόμη και οι παραμικρές διαταραχές), μια ανωμαλία θα βρίσκεται ολόκληρη πάντα στο μέλλον (όπως οι ανωμαλίες της βαρυτικής κατάρρευσης) ή πάντα στο παρελθόν (όπως η ανωμαλία της Μεγάλης έκρηξης). Ελπίζουμε ότι μία μορφή της υπόθεσης της κοσμικής λογοκρισίας θα πρέπει να ισχύει, γιατί αλλιώς θα υπήρχε η δυνατότητα κοντά σε μια «γυμνή» ανωμαλία να συνδέονται δυο απομακρυσμένα σημεία του χωροχρόνου· θα υπήρχε δηλαδή η δυνατότητα ενός ταξιδιού στο παρελθόν. Αυτό θα ήταν πολύ χρήσιμο στους συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας, αλλά θα σήμαινε ότι η ζωή όλων των ανθρώπων δεν θα ήταν ποτέ ασφαλής· θα μπορούσε κάποιος να ταξιδέψει στο παρελθόν και να σκοτώσει τον πατέρα ή τη μητέρα σας πριν καν γεννηθείτε!*

Ο ορίζοντας των γεγονότων, το όριο της περιοχής του χωροχρόνου απ' όπου τίποτε δεν μπορεί να διαφύγει, λειτουργεί κάπως σαν μεμβράνη μιας κατεύθυνσης γύρω από τη μαύρη τρύπα: κάποιο αντικείμενο, όπως ένας απρόσεκτος αστροναύτης, μπορεί, περνώντας τον ορίζοντα των γεγονότων, να μπει μέσα στη μαύρη τρύπα· τίποτε όμως δεν μπορεί ποτέ να βγει από

* Ο συγγραφέας σε ένα πρόσφατο άρθρο του (1988) υποστηρίζει ότι εάν υπάρχουν στο Σύμπαν τέτοιες χωροχρονικές σήραγγες, δεν μπορούμε να ανιχνεύσουμε τη παρουσία τους με κανένα τρόπο, γιατί έχουν μηδενική ενέργεια. Η ύπαρξή τους καθιστά προβληματική την διαδικασία «επανακανονικοποίησης» οποιασδήποτε κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας (που η σημασία της θα αναλυθεί στο κεφ. 10) και εισάγει στην φυσική ένα νέο στοιχείο απροσδιοριστίας, επιπλέον από την απροσδιοριστία της αρχής του Heisenberg. Φαίνεται λοιπόν ότι η κβαντική βαρύτητα μας υποχρεώνει να αρκестούμε σε μια περισσότερο απροσδιόριστη εικόνα για τον Κόσμο, γιατί μας εμποδίζει να αποκτήσουμε μία συνολική εσποπτεία. Ο συγγραφέας καταλήγει αναφέροντας χαρακτηριστικά ότι σε απάντηση της γνωστής αντίρρησης του Αϊνστάιν στην κβαντική μηχανική, μπορεί κανείς να πει: Ο Θεός όχι μόνον παίζει ζάρια, αλλά και τα ρίχνει μερικές φορές σε σημεία όπου δεν μπορούμε να τα δούμε! (Σ.τ.μ.).

αυτήν περνώντας τον ορίζοντα των γεγονότων κατά την αντίστροφη κατεύθυνση. (Θυμηθείτε ότι ο ορίζοντας των γεγονότων είναι οι διαδρομές στο χωρόχρονο των ακτίνων του φωτός που μόλις και δεν καταφέρνουν να διαφύγουν από τη μαύρη τρύπα, και πως τίποτα δεν μπορεί να κινηθεί ταχύτερα από το φως). Θα μπορούσε να πει κανείς για τον ορίζοντα των γεγονότων αυτό που είπε ο Δάντης πως ήταν γραμμένο πάνω από την είσοδο της Κόλασης: «Εγκαταλείψτε κάθε ελπίδα, ώ εσείς που εισέρχεστε εδώ». Καθετί που περνάει τον ορίζοντα των γεγονότων θα φτάσει σύντομα στην περιοχή της άπειρης πυκνότητας και στο τέλος του χρόνου.

Η γενική θεωρία της σχετικότητας προβλέπει ότι τα κινούμενα αντικείμενα προκαλούν την εκπομπή βαρυτικών κυμάτων, δηλαδή «ρυτιδώσεων» του χωροχρόνου που αποτελούνται από περιοδικές μεταβολές της καμπυλότητας του, τα οποία διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Τα βαρυτικά κύματα είναι παρόμοια με τα κύματα του φωτός, που είναι περιοδικές μεταβολές των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων ανιχνεύονται όμως πολύ δυσκολότερα. Όπως και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έτσι και αυτά μεταφέρουν ενέργεια την οποία αντλούν από την κίνηση των αντικειμένων που τα εκπέμπουν. Έτσι λοιπόν ένα σύστημα κινούμενων αντικειμένων θα καταλήξει κάποτε σε μια στατική κατάσταση, επειδή η ενέργεια κάθε κίνησης σταδιακά θα απάγεται από τα βαρυτικά κύματα. (Κάτι ανάλογο συμβαίνει όταν ρίξουμε από κάποιο ύψος ένα φελλό στην επιφάνεια του νερού' αρχικά ανεβοκατεβαίνει αρκετές φορές, καθώς όμως οι κυματισμοί του νερού απάγουν την ενέργεια της κίνησης του, καταλήγει κάποτε σε στατική κατάσταση). Για παράδειγμα, η κίνηση της Γης στην τροχιά της γύρω από τον Ήλιο παράγει βαρυτικά κύματα που απάγουν ενέργεια. Το αποτέλεσμα της απώλειας ενέργειας θα είναι να μεταβληθεί η τροχιά αυτή σταδιακά λοιπόν η Γη θα πλησιάζει όλο και περισσότερο στον

Ήλιο και κάποτε θα συγκρουστεί μαζί του, καταλήγοντας έτσι σε μια στατική κατάσταση. Ο ρυθμός της απώλειας ενέργειας στην περίπτωση του συστήματος Γης- Ήλιου είναι πολύ μικρός —περίπου όσος χρειάζεται για να λειτουργήσει ένα μικρό ηλεκτρικό θερμαντικό σώμα. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστεί περίπου ένα οκτάκις εκατομμύριο (η μονάδα ακολουθούμενη από 27 μηδενικά) χρόνια για να συγκρουστεί η Γη με τον Ήλιο· δεν υπάρχει λοιπόν άμεσος λόγος ανησυχίας! Η μεταβολή της τροχιάς της Γης είναι πάρα πολύ μικρή και δεν μπορεί να παρατηρηθεί, αλλά ένα ανάλογο φαινόμενο παρατηρήθηκε πριν από λίγα χρόνια σε ένα αστρικό σύστημα, το PSR 1913 + 16. (Τα αρχικά PSR προέρχονται από την ονομασία pulsar). Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει δυο αστέρες νετρονίων που περιστρέφονται ο ένας γύρω από τον άλλον η απώλεια ενέργειας από την εκπομπή βαρυτικών κυμάτων τους αναγκάζει να πλησιάζουν όλο και περισσότερο μεταξύ τους.

Κατά τη διάρκεια της βαρυτικής κατάρρευσης ενός άστρου και το σχηματισμό μιας μαύρης τρύπας οι κινήσεις της ύλης θα είναι πολύ πιο γρήγορες, άρα και ο ρυθμός της απώλειας ενέργειας πολύ πιο μεγάλος. Δεν θα αργήσει λοιπόν αυτό το άστρο να καταλήξει σε μια στατική κατάσταση. Πώς θα μοιάζει όμως αυτή η τελική κατάσταση; Θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι θα εξαρτάται από όλα τα σύνθετα χαρακτηριστικά του άστρου —όχι μόνον από τη μάζα του και το ρυθμό της περιστροφής του, αλλά και από τις διαφορετικές πυκνότητες των διαφόρων μερών του και από τις πολύπλοκες κινήσεις των αερίων στο εσωτερικό του. Αν λοιπόν οι μαύρες τρύπες ήταν τόσο διαφορετικές μεταξύ τους, όπως είναι τα αντικείμενα που τις σχηματίζουν με την κατάρρευσή τους, ίσως ήταν πολύ δύσκολο να κάνουμε γενικές προβλέψεις γι' αυτές.

Το 1967 όμως συνέβη στην κοσμολογία μια επαναστατική αλλαγή από τον Werner Israel, έναν Καναδό φυσικό που γεννή-

θηκε στο Βερολίνο, μεγάλωσε στη Νότια Αφρική και εκπόνησε τη διδακτορική του διατριβή στην Ιρλανδία. Ο Israel απέδειξε ότι σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας οι *μη περιστρεφόμενες* μαύρες τρύπες πρέπει να είναι πολύ απλά αντικείμενα: πρέπει να είναι απόλυτα σφαιρικές και το μέγεθος τους να εξαρτάται μόνον από τη μάζα τους. Επομένως, όλες οι μαύρες τρύπες που έχουν την ίδια μάζα πρέπει να είναι ίδιες. Στην πραγματικότητα, μπορούν να περιγραφούν από μια ειδική λύση των εξισώσεων του Αϊνστάιν, γνωστή ήδη από το 1917, όταν την ανακάλυψε ο Karl Schwarzschild, λίγο μετά τη δημιουργία της γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Στην αρχή, πολλοί φυσικοί, όπως και ο ίδιος ο Israel, υποστήριξαν ότι αφού οι μαύρες τρύπες πρέπει να είναι απόλυτα σφαιρικές, θα σχηματίζονται μόνον στην περίπτωση της βαρυτικής κατάρρευσης ενός απόλυτα σφαιρικού άστρου: κάθε πραγματικό άστρο, που ποτέ δεν μπορεί να είναι απόλυτα σφαιρικό, αν κατέρρεε θα σχημάτιζε μία «γυμνή» ανωμαλία (και όχι μια μαύρη τρύπα που ίσως θα περιείχε μια ανωμαλία).

Υπήρξε όμως και μια διαφορετική ερμηνεία του αποτελέσματος του Israel, που την πρότειναν οι Penrose και Wheeler. Υποστήριξαν πως οι γρήγορες κινήσεις που συντελούνται κατά τη διαδικασία της βαρυτικής κατάρρευσης του άστρου και η εκπομπή των βαρυτικών κυμάτων που οφείλεται σε αυτές θα το κάνουν όλο και πιο σφαιρικό· με τον τρόπο αυτό, το άστρο μέχρι να καταλήξει σε μια στατική κατάσταση θα έχει γίνει απολύτως σφαιρικό. Σύμφωνα με αυτήν την άποψη, κάθε μη περιστρεφόμενο άστρο, όσο πολύπλοκο και αν είναι το σχήμα του και η εσωτερική του δομή, θα καταλήξει μετά τη βαρυτική του κατάρρευση σε μια απολύτως σφαιρική μαύρη τρύπα, που το μέγεθός της θα εξαρτάται μόνον από τη μάζα της. Οι υπολογισμοί που έγιναν αργότερα στήριξαν την άποψη αυτή, η οποία σύντομα έγινε γενικά αποδεκτή.

Το αποτέλεσμα του Israel αναφερόταν μόνον στην περίπτωση που τα αντικείμενα και οι μαύρες τρύπες που σχηματίζονταν από αυτά δεν περιστρέφονταν. Το 1963 ο Roy Kerr από τη Νέα Ζηλανδία ανακάλυψε ένα σύνολο λύσεων των εξισώσεων της γενικής θεωρίας της σχετικότητας που αναφέρονταν σε *περιστρεφόμενες* μαύρες τρύπες. Οι «μαύρες τρύπες του Kerr» περιστρέφονται με σταθερό ρυθμό και το μέγεθος τους εξαρτάται μόνο από τη μάζα τους και τον εν λόγω ρυθμό. Αν ο ρυθμός περιστροφής είναι μηδέν, η μαύρη τρύπα είναι απόλυτα σφαιρική και η λύση των εξισώσεων που την περιγράφουν είναι η λύση του Schwarzschild. Αν ο ρυθμός περιστροφής δεν είναι μηδέν, η μαύρη τρύπα εξογκώνεται στις περιοχές γύρω από τον ισημερινό της (ακριβώς όπως η Γη και ο Ήλιος αποκτούν εξαιτίας της περιστροφής τους πεπλατυσμένο ελλειψοειδές σχήμα), και μάλιστα όσο ταχύτερα περιστρέφεται τόσο περισσότερο εξογκώνεται. Για να διευρυνθεί το αποτέλεσμα του Israel ώστε να περιλαμβάνει και τα περιστρεφόμενα αντικείμενα, προτάθηκε η υπόθεση ότι κάθε περιστρεφόμενο αντικείμενο που καταρρέει σχηματίζοντας μαύρη τρύπα καταλήγει σε μια στατική κατάσταση που περιγράφεται από τη λύση του Kerr.

Το 1970 ένας συνεργάτης και συμφοιτητής μου στο Cambridge, ο Brandon Carter, έκανε τα πρώτα βήματα για να αποδείξει αυτή την υπόθεση. Έδειξε ότι το μέγεθος και το σχήμα μιας περιστρεφόμενης μαύρης τρύπας εξαρτώνται μόνον από τη μάζα της και τον ρυθμό περιστροφής της, με την προϋπόθεση ότι έχει έναν άξονα συμμετρίας, όπως μια περιστρεφόμενη σβούρα. Έπειτα, το 1971, απέδειξα ότι κάθε περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα έχει πραγματικά έναν τέτοιο άξονα συμμετρίας. Τελικά, το 1973 ο David Robinson χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα του Carter και τα δικά μου για να δείξει ότι η υπόθεση που είχε προταθεί ήταν σωστή: κάθε περιστρεφόμενο αντικείμενο που καταρρέει σχηματίζει μια μαύρη τρύπα που περιγράφεται από τη

λύση του Kerr. Αυτό σημαίνει ότι μετά από μια βαρυτική κατάρρευση, η μαύρη τρύπα που θα σχηματιστεί, θα καταλήξει σε μια κατάσταση όπου θα μπορεί να περιστρέφεται αλλά όχι και να πάλλεται. Σημαίνει, επίσης, ότι το μέγεθος και το σχήμα της θα εξαρτώνται μόνο από τη μάζα της και το ρυθμό περιστροφής της, αλλά όχι από τη φύση του αντικειμένου που κατέρρευσε σχηματίζοντας την. Το αποτέλεσμα έγινε γνωστό με το απόφθεγμα: «Μια μαύρη τρύπα δεν αφήνει πίσω της ούτε τρίχα», με την έννοια ότι δεν αφήνει αποτυπώματα, ίχνη. Το θεώρημα αυτής της «εξάλειψης ιχνών» έχει μεγάλη πρακτική σημασία, γιατί περιορίζει πάρα πολύ τους δυνατούς τύπους που μπορεί να έχουν οι μαύρες τρύπες. Μπορεί λοιπόν κανείς να θεωρήσει λεπτομερή μοντέλα συστημάτων που ίσως περιέχουν μαύρες τρύπες και να συγκρίνει τις προβλέψεις των μοντέλων με τις παρατηρήσεις. Το θεώρημα αυτό σημαίνει επίσης ότι πολύ μεγάλη ποσότητα πληροφορίας που αφορούσε το αρχικό αντικείμενο πρέπει να χάνεται όταν σχηματίζεται η μαύρη τρύπα, αφού το μόνο που μπορούμε να μετρήσουμε από το αντικείμενο αυτό μετά το σχηματισμό της μαύρης τρύπας είναι η μάζα του και ο ρυθμός περιστροφής του. Τη σημασία αυτής της διαπίστωσης θα την εξετάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι μαύρες τρύπες αποτελούν μια από τις πολύ λίγες περιπτώσεις στην ιστορία της φυσικής όπου μια θεωρία αναπτύχθηκε σε λεπτομερές μαθηματικό μοντέλο *πριν* υπάρξει κάποια ένδειξη από τις παρατηρήσεις ότι ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Αυτό ήταν και το βασικό επιχείρημα όσων δεν δέχονταν τις μαύρες τρύπες: πώς μπορεί να πιστεύει κανείς σε αντικείμενα όταν η μόνη ένδειξη που έχουμε για την ύπαρξη τους είναι οι υπολογισμοί που βασίζονται στην αμφίβολη θεωρία της γενικής σχετικότητας; Το 1963, όμως, ο αστρονόμος Maarten Schmidt του αστεροσκοπείου του Palomar στην Καλιφόρνια μέτρησε τη μετατόπιση του φάσματος προς το ερυθρό του αμυδρού φωτός ενός

αντικείμενου που έμοιαζε με άστρο και βρισκόταν στην κατεύθυνση μιας πηγής ραδιοκυμάτων (της 3C273). Ο Schmidt βρήκε ότι η μετατόπιση αυτή ήταν πάρα πολύ μεγάλη για να οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας· αν πραγματικά οφειλόταν στην επίδραση της βαρύτητας, τότε το συγκεκριμένο αντικείμενο θα είχε τόσο μεγάλη μάζα και θα ήταν τόσο κοντά μας που θα διατάρασσε τις τροχιές των πλανητών στο ηλιακό σύστημα! Φαινόταν λοιπόν ότι η μετατόπιση προς το ερυθρό οφειλόταν στη διαστολή του Σύμπαντος, και ότι το αντικείμενο βρισκόταν σε πολύ μεγάλη απόσταση από εμάς. Για να είναι ορατό από τόσο μεγάλη απόσταση θα έπρεπε να είναι πολύ φωτεινό, με άλλα λόγια να εκπέμπει τεράστια ποσά ενέργειας. Για τους φυσικούς, ο μόνος μηχανισμός που μπορούσαν να φανταστούν ότι ήταν ικανός να παράγει τόσο μεγάλες ποσότητες ενέργειας ήταν η βαρυτική κατάρρευση όχι μόνον ενός άστρου αλλά ολόκληρης της κεντρικής περιοχής ενός γαλαξία. Από τότε έχουν ανακαλυφθεί αρκετά παρόμοια «ημιαστρικά αντικείμενα» ή *κβάζαρς*, όλα με μεγάλες μετατοπίσεις των φασμάτων τους προς το ερυθρό. Βρίσκονται όμως όλα τόσο μακριά που είναι πολύ δύσκολο να τα παρατηρήσουμε και να αποκτήσουμε ίσως κάποιες αποφασιστικές ενδείξεις για τις μαύρες τρύπες.

Μια ακόμη ενθάρρυνση στην έρευνα για την ανακάλυψη μιας μαύρης τρύπας δόθηκε το 1967 από τις παρατηρήσεις μιας μεταπτυχιακής ερευνήτριας στο Πανεπιστήμιο του Cambridge, της Jocelyn Bell. Η Bell ανακάλυψε κάποια αντικείμενα στον ουρανό που εξέπεμπαν παλμούς ραδιοκυμάτων σε κανονικά χρονικά διαστήματα. Στην αρχή η Bell και ο καθηγητής της Antony Hewish σκέφτηκαν ότι ίσως ήρθαν σε επαφή με κάποιον εξωγήινο πολιτισμό του γαλαξία! Πραγματικά, θυμάμαι ότι στη διάλεξη όπου ανακοίνωσαν την ανακάλυψη τους, ονόμασαν τα πρώτα τέτοια αντικείμενα που βρήκαν LGM, από τα αρχικά των λέξεων «Μικροί Πράσινοι Άνθρωποι» (Little Green Men). Στο τέλος

όμως και αυτοί και όλοι οι άλλοι φυσικοί κατέληξαν στο λιγότερο ρομαντικό συμπέρασμα ότι αυτά τα αντικείμενα, που ονομάστηκαν *πάλσαρς*, ήταν στην πραγματικότητα περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων που εξέπεμπαν παλμούς ραδιοκυμάτων. (Οι παλμοί αυτοί προκαλούνταν από μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου των αντικειμένων αυτών με τη μεσοαστρική ύλη που τα περιβάλλει). Τα νέα δεν ήταν τόσο ευχάριστα για τους συγγραφείς των διαστημικών γουέστερν, έδωσαν όμως ελπίδες στους λίγους που πιστεύαμε εκείνη την εποχή ότι υπάρχουν πραγματικά μαύρες τρύπες γιατί ήταν η πρώτη θετική ένδειξη ότι υπήρχαν αστέρες νετρονίων. Ένας αστέρας νετρονίων έχει ακτίνα περίπου δεκαπέντε χιλιομέτρων, δηλαδή λίγες μόνο φορές μεγαλύτερη από την οριακή ακτίνα όπου ένα άστρο γίνεται μαύρη τρύπα. Αν λοιπόν ένα άστρο μπορούσε να καταρρεύσει σε τόσο μικρό μέγεθος, φαινόταν ότι δεν θα ήταν παράλογο να περιμένει κανείς πως κάποια άλλα άστρα θα μπορούσαν να καταρρεύσουν σε ακόμη πιο μικρό μέγεθος, και να γίνουν έτσι μαύρες τρύπες.

Πώς μπορούμε να ανιχνεύσουμε μια μαύρη τρύπα, αφού σύμφωνα με τον ίδιο της τον ορισμό δεν εκπέμπει καθόλου φως; Μοιάζει σαν να ψάχνουμε για μια μαύρη γάτα μέσα σε μια αποθήκη με κάρβουνο! Ευτυχώς υπάρχει κάποιος τρόπος. Όπως έδειξε και ο John Michell στην πρωτοποριακή εργασία του το 1783, μία μαύρη τρύπα εξακολουθεί να ασκεί βαρυτική έλξη στα αντικείμενα που βρίσκονται κοντά της. Οι αστρονόμοι έχουν παρατηρήσει πολλές περιπτώσεις όπου δυο άστρα έλκονται μεταξύ τους και κινούνται το ένα γύρω από το άλλο. Έχουν επίσης παρατηρήσει άστρα που κινούνται γύρω από ένα αθέατο συνοδό τους. Δεν μπορεί βέβαια να συμπεράνει κανείς ότι αυτό το αθέατο άστρο πρέπει οπωσδήποτε να είναι μια μαύρη τρύπα. Μερικά όμως τέτοια συστήματα δύο άστρων, όπως αυτό που βρίσκεται στον αστερισμό του Κύκνου και ονομάζεται Κύκνος X-1 (βλ. ειχ.



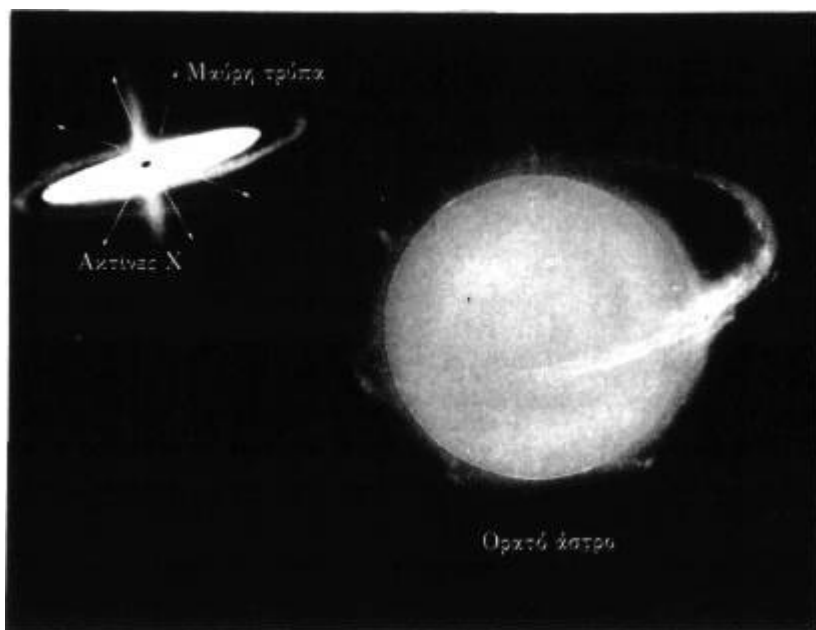
ΕΙΚΟΝΑ 6-2. Το φωτεινότερο από τα δυο άστρα στο κέντρο της εικόνας είναι ο Κύκνος X-1.

6-2) είναι επίσης ισχυρές πηγές ακτινών X. Η πιθανότερη εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι ότι κάποια ποσότητα ύλης που έχει εκτιναχθεί από την επιφάνεια του ορατού άστρου έλκεται από τον αθέατο σύνοδο του, και πέφτει πάνω του ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά (σαν το νερό που αδειάζει από το νιπτήρα). Κατά την κίνηση της αυτή η ύλη θερμαίνεται πολύ και εκπέμπει ακτίνες X (βλ. εικ. 6-3). Για να λειτουργήσει αυτός ο μηχανισμός, το αθέατο αντικείμενο πρέπει να έχει πολύ μικρό μέγεθος, όπως ένας λευκός νάνος, ένας αστέρας νετρονίων ή μια μαύρη τρύπα. Από την παρατηρήσιμη τροχιά του ορατού άστρου μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μικρότερη δυνατή μάζα που μπορεί να έχει αυτό το αντικείμενο. Στην περίπτωση του Κύκνου X-1, αυτή πρέπει να είναι περίπου έξι φορές η μάζα του Ήλιου. Τέτοια μάζα είναι πάρα πολύ μεγάλη για έναν λευκό νάνο, αλλά

και για έναν αστέρα νετρονίων. Φαίνεται λοιπόν ότι αυτό το αθέατο αντικείμενο πρέπει να είναι μια μαύρη τρύπα.

Υπάρχουν και κάποια άλλα μοντέλα που μπορεί να εξηγήσουν τι συμβαίνει στον Κύκνο X-1 και τα οποία δεν περιλαμβάνουν μια μαύρη τρύπα, φαίνονται όμως όλα πολύ τεχνητά. Αντίθετα το μοντέλο της μαύρης τρύπας φαίνεται το μόνο που μπορεί να εξηγήσει με φυσικό τρόπο τα δεδομένα αυτών των παρατηρήσεων. Παρά το γεγονός αυτό στοιχημάτισα με το συνάδελφό μου Kip Thorne του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Καλιφόρνιας ότι ο Κύκνος X-1 δεν περιλαμβάνει στην πραγματικότητα μια μαύρη τρύπα! Το στοίχημα αυτό είναι για μένα ένα είδος εργασιακής ασφάλισης: έχω κάνει πολλή δουλειά για τις μαύρες τρύπες που θα αποδειχθεί άχρηστη αν κάποτε αποκαλυφθεί ότι δεν υπάρχουν τέτοιες στο Σύμπαν. Αλλά τότε θα με παρηγορήσει το κέρδος από το στοίχημά μου, που είναι μια συνδρομή για τέσσερα χρόνια στο περιοδικό "Private Eye". Αν οι μαύρες τρύπες υπάρχουν, ο Kip Thorne θα κερδίσει μια συνδρομή για ένα χρόνο στο "Penthouse". Όταν βάλαμε το στοίχημά μας οι πιθανότητες να είναι ο Κύκνος X-1 μαύρη τρύπα ήταν περίπου 80% (τέσσερα προς ένα). Σήμερα θα έλεγα πως είναι περίπου 95%, αλλά το στοίχημα δεν έχει ακόμη κριθεί οριστικά.

Σήμερα έχουμε αρκετές ενδείξεις ότι υπάρχουν μαύρες τρύπες και σε κάποια άλλα συστήματα άστρων σαν τον Κύκνο X-1 στον γαλαξία μας και σε δύο άλλους γειτονικούς γαλαξίες που ονομάζονται «νέφη του Μαγγελάνου». Είναι όμως σχεδόν βέβαιο ότι το πλήθος των άστρων που πρέπει να έχουν μετατραπεί σε μαύρες τρύπες στη μακραίωνη ιστορία του Σύμπαντος είναι πολύ πιο μεγάλο, αφού στη διάρκεια αυτή πολλά άστρα πρέπει να εξάντλησαν τα πυρηνικά τους καύσιμα και να κατέρρευσαν. Μάλιστα, οι μαύρες τρύπες μπορεί να είναι περισσότερες και από τα ορατά άστρα, τα οποία μόνο στο γαλαξία μας είναι περίπου εκατό δισεκατομμύρια. Η πρόσθετη βαρυτική έλξη από τόσο πολλές



ΕΙΚΟΝΑ 6-3.

μαύρες τρύπες μπορεί να εξηγήσει το ρυθμό περιστροφής του γαλαξία μας. (Η μάζα των ορατών άστρων δεν είναι από μόνη της αρκετά μεγάλη για να προκαλέσει ένα τέτοιο ρυθμό περιστροφής). Έχουμε επίσης κάποιες ενδείξεις ότι στο κέντρο του γαλαξία μας υπάρχει μια πολύ πιο μεγάλη μαύρη τρύπα, με μάζα εκατό χιλιάδες περίπου φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του Ήλιου. Τα άστρα του γαλαξία που θα πλησιάζουν πολύ αυτή τη μαύρη τρύπα θα διαλύονται από τη διαφορά των δυνάμεων της βαρυτικής έλξης στα σημεία που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από αυτήν. Τα υπολείμματα τους μαζί με τα αέρια που διαφεύγουν από άλλα άστρα θα πέφτουν προς τη μαύρη τρύπα· όπως συμβαίνει και στον Κύκνο X-1, όλη αυτή η ύλη θα

ακολουθεί σπειροειδή τροχιά και κατά την κίνηση της αυτή θα θερμαίνεται, όχι όμως τόσο που να εκπέμπει ακτίνες Χ. Μπορεί όμως σε αυτήν να οφείλεται η εκπομπή ραδιοκυμάτων και υπέρυθρων ακτίνων που παρατηρούμε ότι προέρχονται από μια πολύ μικρή περιοχή στο κέντρο του γαλαξία μας.

Έχει εξεταστεί επίσης η υπόθεση ότι παρόμοιες αλλά μεγαλύτερες μαύρες τρύπες, με μάζα ένα δισεκατομμύριο φορές τη μάζα του Ήλιου, υπάρχουν στα κέντρα των ημισφαιρικών αντικειμένων, των κβάρζαρς. Η ύλη που θα έπεφτε προς μια μαύρη τρύπα με τόσο τεράστια μάζα θα προκαλούσε την εκπομπή πολύ μεγάλων ποσών ακτινοβολίας, ανάλογων με αυτά που εκπέμπονται από τα κβάρζαρς. Αυτή η ύλη πέφτοντας κατά τη σπειροειδή τροχιά της προς τη μαύρη τρύπα, θα μπορούσε να την αναγκάσει να περιστραφεί κατά την ίδια κατεύθυνση και έτσι να δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο όπως αυτό της Γης. Στην περιοχή κοντά στη μαύρη τρύπα τα διάφορα σωματίδια της ύλης που θα έπεφταν προς αυτήν θα αποκτούσαν πολύ μεγάλη ενέργεια. Επειδή, λοιπόν, το μαγνητικό πεδίο της μαύρης τρύπας θα ήταν πολύ ισχυρό, θα μπορούσε να συγκεντρώσει αυτά τα σωματίδια σε μεγάλους πίδακες που θα εκτινάσσονταν προς τα έξω κατά μήκος του άξονα περιστροφής της, δηλαδή κατά τις κατευθύνσεις του βόρειου και του νότιου πόλου της. Πραγματικά, τέτοιοι πίδακες ύλης παρατηρούνται σε αρκετούς γαλαξίες και κβάρζαρς και θα ήταν δυνατό να προέρχονται από μαύρες τρύπες.

Μπορεί επίσης να εξετάσει κανείς την πιθανότητα να υπάρχουν μαύρες τρύπες με μάζα μικρότερη από αυτήν του Ήλιου. Τέτοιες μαύρες τρύπες δεν θα ήταν δυνατό να σχηματιστούν από μια διαδικασία βαρυτικής κατάρρευσης, γιατί οι μάζες τους βρίσκονται κάτω από το όριο του Chandrasekhar· τα άστρα με τόσο μικρή μάζα μπορούν να διατηρήσουν την ισορροπία τους παρά τις τάσεις συστολής από τη δύναμη της βαρύτητας τους ακόμη και όταν έχουν εξαντλήσει τα πυρηνικά τους καύσιμα. Μαύρες

τρύπες με μικρή μάζα μπορεί να σχηματιστούν μόνο αν η ύλη συμπιεστεί σε μεγάλες πυκνότητες από μεγάλες εξωτερικές πιέσεις. Ανάλογες συνθήκες θα ήταν δυνατό να υπάρξουν στην περίπτωση μιας μεγάλης πυρηνικής έκρηξης. Ο John Wheeler υπολόγισε κάποτε ότι αν συγκέντρωνε κανείς όλο το «βαρύ ύδωρ» των ωκεανών (το «βαρύ ύδωρ» είναι ένωση του οξυγόνου με το δευτέριο, ένα στοιχείο χημικά όμοιο με το υδρογόνο αλλά βαρύτερο, γιατί ο πυρήνας του έχει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο) θα μπορούσε να προκαλέσει μια πυρηνική έκρηξη ικανή να συμπίεσει την ύλη τόσο πολύ ώστε να σχηματιστεί μια μαύρη τρύπα. (Φυσικά δεν θα απέμενε κανείς για να επιβεβαιώσει το γεγονός!) Μια άλλη πιθανότητα είναι ότι μαύρες τρύπες μικρής μάζας μπορεί να σχηματίστηκαν στις μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις του Σύμπαντος, στην εποχή της Μεγάλης έκρηξης. Τέτοιες μαύρες τρύπες θα ήταν δυνατό να σχηματιστούν μόνο αν η ύλη στο Σύμπαν εκείνη την εποχή δεν ήταν κατανεμημένη με απόλυτη ομοιομορφία, γιατί μόνο μία μικρή περιοχή που θα ήταν πυκνότερη από τις υπόλοιπες θα μπορούσε να συμπιεστεί με αυτό τον τρόπο και να σχηματίσει μια μαύρη τρύπα. Γνωρίζουμε όμως ότι πρέπει πραγματικά να υπήρξαν κάποιες ανομοιομορφίες, αλλιώς η ύλη του Σύμπαντος θα εξακολουθούσε να είναι κατανεμημένη με απόλυτη ομοιομορφία ακόμη και στη σημερινή εποχή και δεν θα συγκεντρώνονταν σε άστρα και γαλαξίες.

Το αν και κατά πόσο οι ανομοιομορφίες, στις οποίες οφείλεται η δημιουργία των άστρων και των γαλαξιών, οδήγησαν στο σχηματισμό ενός σημαντικού πλήθους από *αρχέγονες μαύρες τρύπες*, εξαρτάται από τις λεπτομέρειες των συνθηκών που επικρατούσαν τότε στο Σύμπαν. Αν λοιπόν μπορούσαμε να προσδιορίσουμε πόσες αρχέγονες μαύρες τρύπες υπάρχουν σήμερα, θα μπορούσαμε να μάθουμε πολλά για τα αρχικά στάδια του Σύμπαντος. Αρχέγονες μαύρες τρύπες με μάζα ενός εκατομμυρίου τόνων (περίπου όση η μάζα ενός μεγάλου βουνού) θα ήταν

δυνατό να ανιχνευτούν μόνον από τη βαρυτική τους επίδραση πάνω σε κάποια άλλη ορατή ύλη ή πάνω στη διαστολή του Σύμπαντος. Όπως όμως θα μάθουμε στο επόμενο κεφάλαιο, οι μαύρες τρύπες δεν είναι τελικά πραγματικά μαύρες: λάμπουν όπως ένα θερμό σώμα, και όσο μικρότερες είναι τόσο περισσότερο λάμπουν! Έτσι, κατά παράδοξο τρόπο είναι ίσως ευκολότερο να ανιχνευτούν οι μικρότερες μαύρες τρύπες παρά οι μεγαλύτερες!

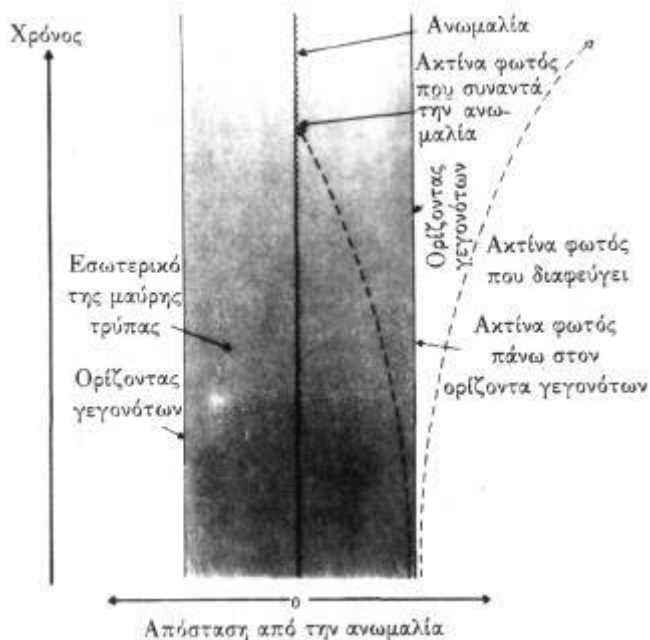
Οι Μαύρες τρύπες δεν είναι και τόσο μαύρες

Πριν από το 1970 οι έρευνές μου στη φυσική της γενικής θεωρίας της σχετικότητας είχαν επικεντρωθεί κατά κύριο λόγο στο ερώτημα αν υπήρξε ή όχι μία ανωμαλία τη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης. Εκείνο το χρόνο όμως, κάποιο βράδυ του Νοεμβρίου, λίγο μετά τη γέννηση της κόρης μου της Lucy, άρχισα να σκέφτομαι για τις μαύρες τρύπες καθώς ετοιμαζόμουν να ξαπλώσω στο κρεβάτι μου. Η αναπηρία μου κάνει αυτήν την ετοιμασία μια αρκετά αργή διαδικασία· έτσι είχα άφθονο χρόνο. Ως εκείνη την εποχή δεν υπήρχε ακριβής ορισμός για το ποιά σημεία του χωροχρόνου βρίσκονται μέσα στη μαύρη τρύπα και ποιά έξω απ' αυτήν. Είχαμε ήδη συζητήσει με τον Roger Penrose την ιδέα του ορισμού της μαύρης τρύπας ως του συνόλου των σημείων του χωροχρόνου (ή γεγονότων) από όπου δεν είναι δυνατό να διαφύγει κάτι σε μια μεγάλη απόσταση. Αυτός είναι σήμερα ο γενικά αποδεκτός ορισμός της μαύρης τρύπας. Σημαίνει ότι το όριο της, ο ορίζοντας των γεγονότων, σχηματίζεται

από τις διαδρομές στο χωρόχρονο των ακτίνων του φωτός που μόλις και δεν κατορθώνουν να διαφύγουν από τη μαύρη τρύπα και περιστρέφονται για πάντα ακριβώς πάνω στην περίμετρό της (βλ. ειχ. 7-1). Είναι σαν να τρέχει κανείς για να ξεφύγει από τους αστυνομικούς και να βρίσκεται ένα βήμα μπροστά τους, αλλά να μην κατορθώνει να απομακρυνθεί τόσο που να τον χάσουν από τα μάτια τους!

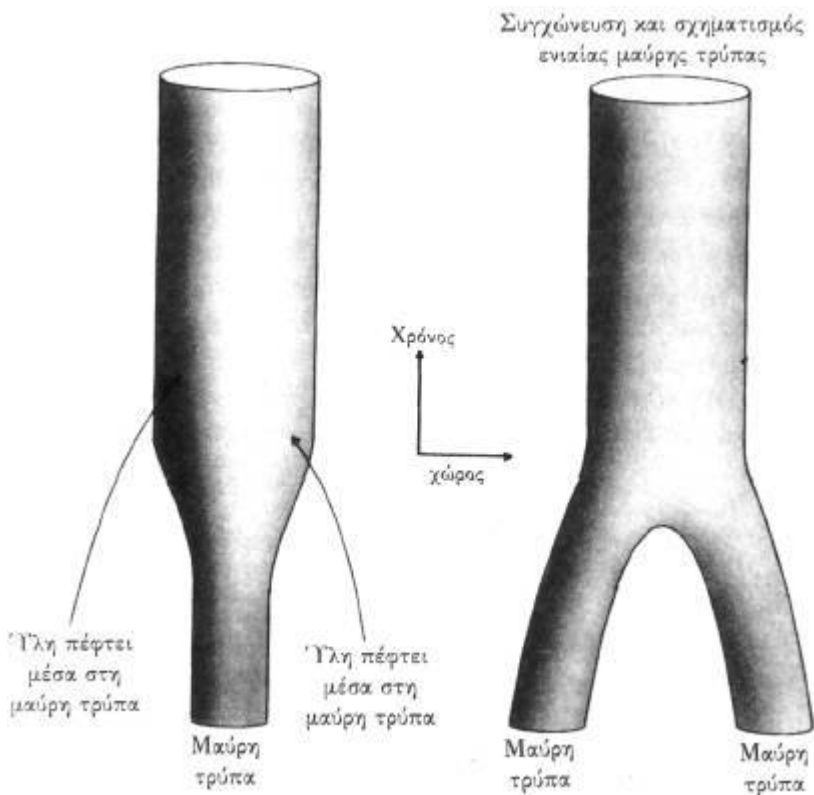
Ξαφνικά λοιπόν εκείνο το βράδυ κατάλαβα ότι οι διαδρομές αυτών των ακτίνων του φωτός δεν θα πλησιάζουν ποτέ η μια την άλλη. Αν πλησίαζαν θα έπρεπε κάποτε να διασταυρωθούν μεταξύ τους. Θα ήταν σαν να συναντούσατε κάποιον άλλον που θα έτρεχε και αυτός για να ξεφύγει από τους αστυνομικούς αλλά κατά την αντίθετη κατεύθυνση· θα σας συλλαμβάνανε και τους δυο! Αν λοιπόν αυτές οι ακτίνες του φωτός διασταυρώνονταν, θα έπεφταν μέσα στη μαύρη τρύπα. Αλλά αν έπεφταν μέσα στη μαύρη τρύπα δεν θα μπορούσαν να βρίσκονται και στην περίμετρο της, στον ορίζοντα των γεγονότων. Έτσι λοιπόν οι διαδρομές των ακτίνων του φωτός στον ορίζοντα γεγονότων μιας μαύρης τρύπας πρέπει πάντοτε να κινούνται παράλληλα ή να απομακρύνονται μεταξύ τους. Ένας άλλος τρόπος να σχηματίσουμε μια εικόνα αυτής της διαπίστωσης είναι να φανταστούμε τον ορίζοντα των γεγονότων, που είναι το όριο της μαύρης τρύπας, σαν το όριο μίας απειλητικής σκιάς που σχηματίζεται μέσα στη φωτεινή δέσμη μιας πολύ απομακρυσμένης φωτεινής πηγής, όπως ο Ήλιος. Στο όριο αυτής της σκιάς οι φωτεινές ακτίνες δεν πλησιάζουν ποτέ μεταξύ τους.

Αν οι ακτίνες του φωτός που σχηματίζουν τον ορίζοντα των γεγονότων της μαύρης τρύπας δεν μπορούν να πλησιάσουν ποτέ μεταξύ τους, το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων θα μπορεί ή να παραμείνει το ίδιο ή να μεγαλώσει με την πάροδο του χρόνου· δεν θα μπορεί όμως να μικρύνει ποτέ — γιατί αυτό θα σήμαινε ότι μερικές τουλάχιστον ακτίνες φωτός θα έπρεπε να



ΕΙΚΟΝΑ 7-1

αρχίζουν να πλησιάζουν μεταξύ τους. Στην πραγματικότητα το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων θα μεγαλώνει όποτε πέφτει μέσα στη μαύρη τρύπα κάποιο ποσό ύλης ή ακτινοβολίας (βλ. εικ. 7-2). Αν δύο μαύρες τρύπες συγκρουστούν και συγχωνευτούν, σχηματίζοντας μια ενιαία μαύρη τρύπα, το εμβαδόν που θα έχει ο ορίζοντας των γεγονότων της θα είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το άθροισμα των εμβαδών που είχαν οι ορίζοντες των γεγονότων στις αρχικές μαύρες τρύπες. Αυτή η ιδιότητα — το ότι δηλαδή το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων δεν μικραίνει ποτέ — επιβάλλει έναν σημαντικό περιορισμό στο πώς



συμπεριφέρονται οι μαύρες τρύπες. Εκείνη τη νύχτα του Νοεμβρίου του 1970 ήμουν τόσο ενθουσιασμένος από την ανακάλυψή μου, που τελικά δεν κοιμήθηκα καθόλου. Το επόμενο πρωί τηλεφώνησα στον Penrose. Συμφώνησε μαζί μου στην πραγματικότητα νομίζω πως ο Penrose γνώριζε ήδη αυτήν την ιδιότητα του εμβადού του ορίζοντα των γεγονότων. Χρησιμοποιούσε όμως έναν άλλον, λίγο διαφορετικό ορισμό της μαύρης τρύπας. Δεν είχε συνειδητοποιήσει ότι τα όρια της μαύρης τρύπας σύμφωνα και με τους δύο ορισμούς θα ήταν τα ίδια, και έτσι θα ήταν ίδια

και τα εμβαδά του ορίζοντα των γεγονότων της, με την προϋπόθεση ότι η μαύρη τρύπα θα έχει καταλήξει σε ένα στάδιο όπου δεν θα μεταβάλλεται πια με την πάροδο του χρόνου.

Η συμπεριφορά του εμβαδού μιας μαύρης τρύπας θύμιζε πολύ τη συμπεριφορά ενός φυσικού μεγέθους που ονομάζεται *εντροπία*: η εντροπία είναι το μέτρο του βαθμού αταξίας που υπάρχει σε ένα φυσικό σύστημα. Είναι σε όλους μας γνωστό, από την καθημερινή μας ζωή, ότι η αταξία τείνει να μεγαλώσει αν αφήσουμε τα πράγματα να εξελιχθούν από μόνα τους. (Αρκεί να σταματήσουμε να τακτοποιούμε το σπίτι και να επιδιορθώνουμε το αυτοκίνητο και πολύ σύντομα θα το διαπιστώσουμε). Μπορεί κανείς να δημιουργήσει τάξη όπου πριν υπήρχε αταξία, αλλά αυτό απαιτεί να καταναλωθεί προσπάθεια ή ενέργεια· έτσι όμως μικραίνει το διαθέσιμο ποσό της ενέργειας για δημιουργία τάξης.

Μια ακριβής διατύπωση αυτής της ιδέας περιέχεται στον *δευτερο νόμο της θερμοδυναμικής*. Ο νόμος αυτός αναφέρει ότι η εντροπία ενός απομονωμένου φυσικού συστήματος μεγαλώνει πάντοτε, και πως όταν συνδεθούν μεταξύ τους δυο συστήματα η εντροπία του ενιαίου τελικού συστήματος είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της εντροπίας των δυο αρχικών συστημάτων. Ας πάρουμε για παράδειγμα το φυσικό σύστημα που αποτελείται από τα μόρια ενός αερίου περιορισμένου σε ένα δοχείο. Μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτά τα μόρια συμπεριφέρονται όπως μικρές ελαστικές σφαίρες που συγκρούονται συνεχώς μεταξύ τους και με τα τοιχώματα του δοχείου. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του αερίου τόσο ταχύτερα κινούνται τα μόρια του, και με τόσο μεγαλύτερη συχνότητα και ορμή συγκρούονται με τα τοιχώματα του δοχείου — και τόσο μεγαλύτερη πίεση ασκούν πάνω τους. Ας υποθέσουμε ότι στην αρχή ένα διάφραγμα περιορίζει όλα τα μόρια μόνο στον μισό χώρο του δοχείου, στην αριστερή του πλευρά. Αν στη συνέχεια ανοίξουμε αυτό το διάφραγμα, τα μόρια, που έχουν την τάση να εξαπλώνονται, θα καταλάβουν ολό-

κληρο το χώρο του δοχείου, και την αριστερή και τη δεξιά του πλευρά. Σε κάποια χρονική στιγμή είναι δυνατόν να βρεθούν όλα ή στο αριστερό μισό ή στο δεξιό μισό του χώρου του δοχείου, αλλά είναι συντριπτικά περισσότερες οι πιθανότητες να υπάρξει ίσος περίπου αριθμός μορίων και στις δύο πλευρές. Αυτή η κατάσταση είναι μια κατάσταση λιγότερης τάξης, ή περισσότερης αταξίας, από την αρχική (πριν ανοίξουμε το διάφραγμα), όπου όλα τα μόρια βρίσκονταν στην αριστερή πλευρά του δοχείου. Λέμε λοιπόν ότι η εντροπία του αερίου έχει μεγαλώσει. Παρόμοια περίπτωση έχουμε όταν στην αρχή διαθέτουμε δύο δοχεία που το ένα περιέχει μόρια οξυγόνου και το άλλο μόρια αζώτου. Αν τοποθετήσουμε τα δυο δοχεία σε επαφή και απομακρύνουμε τα ενδιάμεσα τοιχώματα, τα μόρια του οξυγόνου και τα μόρια του αζώτου θα αρχίσουν να αναμειγνύονται. Σε κάποια χρονική στιγμή το πιθανότερο είναι ότι θα υπάρχει ένα αρκετά ομογενές μείγμα μορίων οξυγόνου και αζώτου και στα δύο δοχεία. Αυτή η κατάσταση θα χαρακτηρίζεται από λιγότερη τάξη, και έτσι μεγαλύτερη εντροπία, από την αρχική κατάσταση των δυο διαχωρισμένων δοχείων.

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής είναι κάπως διαφορετικός από τους άλλους νόμους της φυσικής, όπως για παράδειγμα το νόμο της βαρύτητας του Νεύτωνα, γιατί δεν ισχύει πάντα, παρά μόνον στην συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων. Η πιθανότητα να βρεθούν κάποτε όλα τα μόρια του αερίου στον μισό χώρο του δοχείου είναι μία στα πολλά τρισεκατομμύρια, αλλά όμως δεν αποκλείεται να συμβεί. Αλλά αν υπάρχει εκεί γύρω μια μαύρη τρύπα, φαίνεται ότι υπάρχει ένας κάπως ευκολότερος τρόπος να παραβιάσει κανείς την ισχύ του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής: αρκεί, πολύ απλά, να ρίξει μέσα στην μαύρη τρύπα κάποιο ποσό ύλης με μεγάλη εντροπία, όπως για παράδειγμα το δοχείο με τα μόρια του αερίου. Έτσι η συνολική εντροπία της ύλης έξω από τη μαύρη τρύπα θα μικρύνει. Θα

μπορούσε βέβαια να υποστηρίξει κανείς ότι η συνολική εντροπία της ύλης και στο εξωτερικό και στο εσωτερικό της μαύρης τρύπας δεν θα μειωθεί αλλά θα αυξηθεί — αφού όμως δεν υπάρχει κανένας τρόπος να κοιτάξουμε μέσα στη μαύρη τρύπα δεν μπορούμε να δούμε πόσο πολλή εντροπία έχει η ύλη που βρίσκεται στο εσωτερικό της. Θα ήταν χρήσιμο λοιπόν να υπήρχε κάποιο χαρακτηριστικό της μαύρης τρύπας που θα επέτρεπε στους παρατηρητές έξω από αυτήν να υπολογίσουν την εντροπία της — και που θα μεγάλωνε όποτε θα έπεφτε μέσα στη μαύρη τρύπα κάποιο ποσό ύλης που θα μετέφερε εντροπία από το εξωτερικό στο εσωτερικό της. Ακολουθώντας την ανακάλυψη που περιγράψαμε πιο πριν — ότι δηλαδή το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων μεγαλώνει όποτε πέφτει μέσα στη μαύρη τρύπα κάποιο ποσό ύλης —, ένας μεταπτυχιακός φοιτητής στο Princeton, ο Jacob Bekenstein, υπέθεσε ότι το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων είναι μέτρο της εντροπίας της μαύρης τρύπας. Καθώς το ποσό ύλης που μεταφέρει εντροπία θα πέφτει μέσα στη μαύρη τρύπα το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων θα μεγαλώνει· έτσι το άθροισμα της εντροπίας της ύλης στο εξωτερικό της μαύρης τρύπας και του εμβαδού του ορίζοντα των γεγονότων στα όρια της μαύρης τρύπας (που είναι μέτρο της εντροπίας της ύλης στο εσωτερικό της) δεν θα μικραίνει ποτέ.

Η υπόθεση αυτή φαινόταν ότι εμπόδιζε την παραβίαση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής στις περισσότερες περιπτώσεις*· είχε όμως ένα καταστροφικό ελάττωμα. Αν η μαύρη τρύπα έχει εντροπία, τότε πρέπει να έχει και θερμοκρασία. Αλλά ένα σώμα με συγκεκριμένη θερμοκρασία πρέπει να εκπέμπει ακτινοβολία με συγκεκριμένο ρυθμό! Είναι γνωστό από την καθημερινή ζωή ότι όταν ένα μεταλλικό αντικείμενο θερμαίνεται πολύ ερυθροπυρώνεται και λάμπει εκπέμποντας ακτινοβολία.

* Στις περιπτώσεις που δεν περιλαμβάνουν «γυμνές» ανωμαλίες.(Σ.τ.μ.).

Στην πραγματικότητα όλα τα θερμά σώματα, ακόμη και σε μικρότερες θερμοκρασίες, εκπέμπουν μια ποσότητα ακτινοβολίας· επειδή όμως στις μικρές θερμοκρασίες η ποσότητα αυτή είναι πολύ μικρή, συνήθως δεν την αντιλαμβανόμαστε. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα είναι ακριβώς όση χρειάζεται για να μην παραβιαστεί ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Αν λοιπόν οι μαύρες τρύπες έχουν εντροπία θα έχουν και θερμοκρασία· και αφού θα έχουν θερμοκρασία *θα πρέπει να εκπέμπουν ακτινοβολία*. Αλλά από τον ίδιο τους τον ορισμό οι μαύρες τρύπες είναι αντικείμενα που υποτίθεται ότι δεν εκπέμπουν τίποτε. Φαινόταν λοιπόν ότι το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων μιας μαύρης τρύπας δεν θα μπορούσε να είναι μέτρο της εντροπίας της. Το 1972, μαζί με τον Brandon Carter και έναν άλλο συνάδελφο μας, τον Αμερικανό Jim Bardeen, δημοσιεύσαμε μια εργασία όπου δείχναμε ότι, αν και υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ της εντροπίας και του εμβαδού του ορίζοντα των γεγονότων, υπάρχει αυτό το καταστροφικό, όπως φαινόταν, ελάττωμα. Πρέπει να παραδεχτώ ότι, σε κάποιο βαθμό, το κίνητρο της εργασίας αυτής ήταν η οργισμένη αντίδρασή μου στον Bekenstein· αισθανόμουν πως καταχράστηκε την ανακάλυψή μου ότι το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων δεν μικραίνει ποτέ. Παρ' όλα αυτά, στο τέλος αποδείχθηκε ότι βασικά είχε δίκιο, αν και με έναν τρόπο που είναι βέβαιο ότι δεν περίμενε.

Το Σεπτέμβριο του 1973, κατά τη διάρκεια μιας επίσκεψής μου στη Μόσχα, είχα κάποιες συζητήσεις για τις μαύρες τρύπες με δύο επιφανείς Σοβιετικούς ειδικούς, τον Yakov Zeldovich και τον Alexander Starobinsky. Με έπεισαν ότι, σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής, οι περιστρεφόμενες μαύρες τρύπες πρέπει να εκπέμπουν σωματίδια. Πίστεψα στα επιχειρήματα τους σε ό,τι αφορούσε τη φυσική σημασία αυτής της εκπομπής, δεν μου άρεσε όμως ο μαθηματικός τρόπος που χρησιμοποίησαν για τον υπολογισμό της. Προ-

σπάθησα λοιπόν να επινοήσω έναν άλλο και στα τέλη του Νοεμβρίου, σε ένα ανεπίσημο σεμινάριο στην Οξφόρδη, περιέγραφα τα γενικά χαρακτηριστικά του. Ός τότε δεν είχα ακόμη υπολογίσει ακριβώς την ποσότητα των σωματιδίων που θα εκπέμπονταν ούτε το ρυθμό της εκπομπής τους. Περίμενα ότι το αποτέλεσμα θα ήταν το ίδιο με αυτό που είχαν προβλέψει ο Zeldovich και ο Starobinsky. Όταν όμως τελείωσα τους υπολογισμούς ανακάλυψα, προς μεγάλη μου έκπληξη, ότι ακόμη και οι μη περιστρεφόμενες μαύρες τρύπες θα μπορούσαν να εκπέμψουν μια ποσότητα σωματιδίων με ένα σταθερό ρυθμό. Στην αρχή ενοχλήθηκα από το αποτέλεσμα και σκέφτηκα ότι ίσως ήταν μια ένδειξη πως κάποια από τις προσεγγίσεις που χρησιμοποίησα δεν ήταν σωστή. Φοβήθηκα μάλιστα ότι αν το μάθαινε ο Bekenstein θα το χρησιμοποιούσε ως ένα ακόμη επιχείρημα για να υποστηρίξει τις ιδέες του για την εντροπία της μαύρης τρύπας, ιδέες που εκείνη την εποχή δεν μου άρεσαν. Παρ' όλα αυτά, όσο περισσότερο σκεφτόμουν τις προσεγγίσεις που χρησιμοποίησα τόσο περισσότερο μου φαινόταν ότι έπρεπε πραγματικά να ισχύουν. Αλλά το γεγονός που με έπεισε τελικά ότι η εκπομπή σωματιδίων από μια μη περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα είχε φυσική σημασία ήταν ότι η ποσότητά τους ήταν ακριβώς όση εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα και ότι ο ρυθμός της εκπομπής τους ήταν ακριβώς όσος χρειάζεται για να μην παραβιαστεί ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής! Από τότε και άλλοι φυσικοί επανέλαβαν τους υπολογισμούς με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους. Όλοι επιβεβαιώνουν ότι *μια μαύρη τρύπα πρέπει να εκπέμπει ακτινοβολία και σωματίδια* σαν να είναι ένα θερμό σώμα με θερμοκρασία που εξαρτάται μόνο από τη μάζα της μαύρης τρύπας: όσο περισσότερη μάζα έχει τόσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία της*.

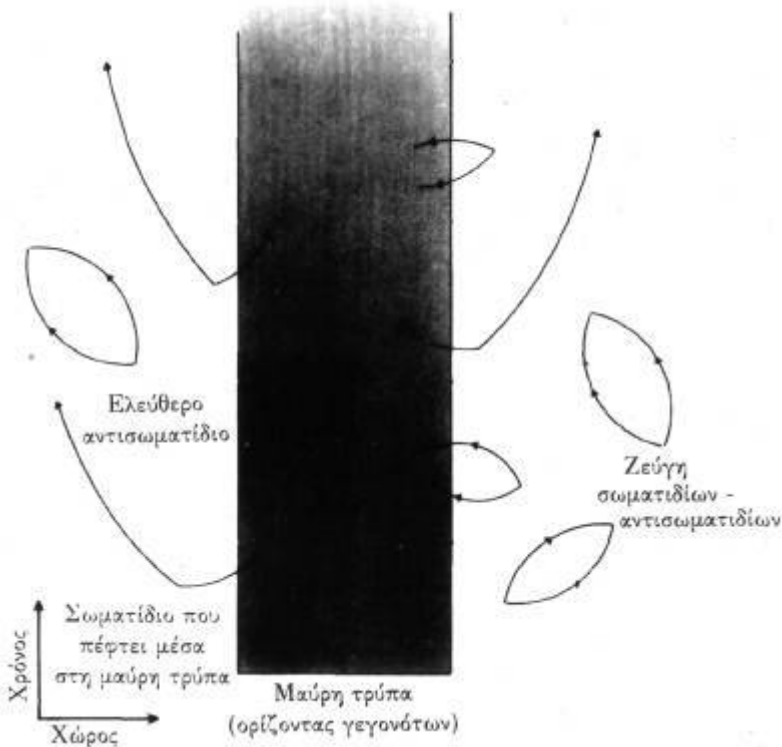
* Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται σήμερα «ακτινοβολία Hawking», προς τιμή του συγγραφέα. (Σ.τ.μ.).

Πώς είναι δυνατό να φαίνεται ότι μια μαύρη τρύπα εκπέμπει σωματίδια, όταν γνωρίζουμε πως τίποτα δεν μπορεί να διαφύγει από τα όρια του ορίζοντα των γεγονότων της; Η απάντηση που μας δίνει η κβαντική θεωρία είναι ότι τα σωματίδια δεν προέρχονται από το εσωτερικό της μαύρης τρύπας, αλλά από τον «κενό» χώρο έξω ακριβώς από τον ορίζοντα των γεγονότων της! Αυτό μπορούμε να το καταλάβουμε με τον ακόλουθο τρόπο: Ο χώρος που φανταζόμαστε ότι είναι «κενός» δεν μπορεί να είναι εντελώς άδειος, γιατί αυτό θα σήμαινε ότι η ένταση των διαφόρων αλληλεπιδράσεων από σημείο σε σημείο και από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή — με άλλα λόγια, η τιμή των διαφόρων πεδίων και ο ρυθμός της χρονικής μεταβολής τους — θα έπρεπε να ισούται με το μηδέν. Αλλά η τιμή και ο ρυθμός της χρονικής μεταβολής ενός πεδίου είναι δύο ποσότητες όπως η θέση και η ταχύτητα ενός σωματιδίου· σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής, όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της μίας από αυτές τις ποσότητες τόσο μικρότερη είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της άλλης. Έτσι στον κενό χώρο το πεδίο δεν μπορεί να διατηρείται ακριβώς ίσο με το μηδέν, γιατί τότε θα είχε και μια ακριβώς προσδιορισμένη τιμή (μηδέν) και έναν ακριβώς προσδιορισμένο ρυθμό χρονικής μεταβολής (επίσης μηδέν). Πρέπει να υπάρχει μία ορισμένη ελάχιστη ποσότητα απροσδιοριστίας, μία κβαντική διακύμανση, στην τιμή και το ρυθμό της χρονικής μεταβολής του πεδίου. Μπορεί να φανταστεί κανείς αυτές τις κβαντικές διακυμάνσεις σαν ζεύγη σωματιδίων αλληλεπιδράσεων των διαφόρων πεδίων (φωτόνια για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, βαρυτόνια για το βαρυτικό πεδίο κ.τ.λ.) που εμφανίζονται μαζί σε κάποιο σημείο σε κάποια χρονική στιγμή, απομακρύνονται και ύστερα πλησιάζουν πάλι, σε κάποιο άλλο σημείο σε κάποια άλλη χρονική στιγμή, και εξαυλώνονται. Αυτά τα σωματίδια έχουν ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό: όπως τα αντιστοιχα φωτόνια, στα οποία οφείλεται η απω-

στική ηλεκτρική δύναμη μεταξύ των ηλεκτρονίων, και τα αντίστοιχα βαρυτόνια, στα οποία οφείλεται η ελκτική βαρυτική δύναμη μεταξύ των σωμάτων του ηλιακού συστήματος, έτσι και τα σωματίδια αυτά δεν μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα από κάποια πειραματική συσκευή. Όσα σωματίδια σαν αυτά δεν μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα αλλά μόνον έμμεσα — από τις μεταβολές που προκαλούν στην κίνηση άλλων σωματιδίων — ονομάζονται «δυνάμει» σωματίδια. (Σε αντιδιαστολή με τα «δυνάμει» σωματίδια, τα κανονικά, που μπορούν να ανιχνευτούν άμεσα από κάποια πειραματική συσκευή — όπως τα ηλεκτρόνια των ατόμων ή τα φωτόνια του φωτός —, ονομάζονται «πραγματικά» σωματίδια). Οι επιδράσεις των «δυνάμει» σωματιδίων, όπως οι μικρές αλλαγές που προκαλούνται από τα «δυνάμει» φωτόνια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην ενέργεια των ηλεκτρονίων των ατόμων, μετρούνται πειραματικά και συγκρίνονται με τις θεωρητικές προβλέψεις. (Στην περίπτωση των επιδράσεων των «δυνάμει» φωτονίων στα ηλεκτρόνια των ατόμων, η συμφωνία των πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρητικές προβλέψεις είναι εκπληκτική). Επίσης, όπως, σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας, εμφανίζονται ζεύγη από «δυνάμει» σωματίδια αλληλεπίδρασης, έτσι εμφανίζονται και ζεύγη από «δυνάμει» σωματίδια ύλης («δυνάμει» ηλεκτρόνια και «δυνάμει» κουάρκς). Στην περίπτωση όμως αυτή το ένα μέλος του ζεύγους θα είναι ένα σωματίδιο και το άλλο ένα αντισωματίδιο. (Τα αντισωματίδια αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών και των βαρυτικών δυνάμεων είναι τα ίδια με τα σωματίδιά τους — δηλαδή τα φωτόνια και τα βαρυτόνια).

Επειδή η ενέργεια δεν μπορεί να παραχθεί από το μηδέν, το ένα μέλος του ζεύγους σωματιδίου-αντισωματιδίου θα έχει θετική ενέργεια και το άλλο αρνητική. Αυτό με την αρνητική ενέργεια είναι καταδικασμένο να παραμείνει ένα «δυνάμει» σωματίδιο ή αντισωματίδιο, επειδή σε κανονικές καταστάσεις,

δηλαδή έξω από τις μαύρες τρύπες, τα «πραγματικά» σωματίδια ή αντισωματίδια έχουν πάντα θετική ενέργεια. Πρέπει λοιπόν στο σύντομο χρονικό διάστημα της ζωής του να επιζητήσει μια συνάντηση με το άλλο μέρος του ζεύγους, αυτό με τη θετική ενέργεια, και να εξαϋλωθεί μαζί του. Αν όμως κοντά στην περιοχή όπου εμφανίζεται το ζεύγος υπάρχει μια μαύρη τρύπα, παρουσιάζεται και μια άλλη δυνατότητα. Όπως προαναφέρθηκε, ένα «πραγματικό» σωματίδιο ή αντισωματίδιο έχει θετική ενέργεια. Όταν όμως βρίσκεται κοντά σε ένα σώμα με μεγάλη μάζα, η ενέργειά του είναι μικρότερη απ' όση όταν βρισκόταν μακρύτερα (αφού στην περίπτωση εκείνη υπήρχε επίσης και η ενέργεια που χρειαζόταν για να μεταφερθεί μέχρις εκεί, αντίθετα από την κατεύθυνση της δύναμης έλξης που ασκούσε πάνω του το σώμα). Όσο πιο κοντά, λοιπόν, βρίσκεται στο σώμα τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια του. Σε κανονικές καταστάσεις αυτή η ενέργεια παραμένει πάντα θετική, στο εσωτερικό όμως μιας μαύρης τρύπας το βαρυτικό πεδίο είναι τόσο ισχυρό ώστε εκεί το σωματίδιο ή αντισωματίδιο μπορεί να έχει αρνητική ενέργεια. Αφού λοιπόν ένα «πραγματικό» σωματίδιο ή αντισωματίδιο μπορεί, στο εσωτερικό της μαύρης τρύπας, να έχει αρνητική ενέργεια, παρουσιάζεται η δυνατότητα στο «δυνάμει» σωματίδιο ή αντισωματίδιο με την αρνητική ενέργεια να πέσει μέσα στη μαύρη τρύπα και να γίνει «πραγματικό» σωματίδιο ή αντισωματίδιο. Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται πια να εξαϋλωθεί μαζί με το άλλο μέλος του ζεύγους. Το εγκαταλελειμμένο μέλος του ζεύγους, αυτό με τη θετική ενέργεια, μπορεί ή να πέσει και αυτό μέσα στη μαύρη τρύπα ή να διαφύγει από την περιοχή της. (βλ. ειχ. 7-4). Για κάποιον που παρατηρεί τα γεγονότα από μακριά, θα φαίνεται ότι το σωματίδιο αυτό το εξέπεμψε η μαύρη τρύπα. Όσο μικρότερη είναι η μαύρη τρύπα τόσο μικρότερη είναι η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει το «δυνάμει» σωματίδιο ή αντισωματίδιο πριν γίνει «πραγματικό», και τόσο μεγαλύ-



ΕΙΚΟΝΑ 7-4.

τερη είναι η θερμοκρασία της μαύρης τρύπας και ο ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας.

Η θετική ενέργεια της ακτινοβολίας που θα εκπέμπεται-από την μαύρη τρύπα θα εξισορροπείται από τη ροή των σωματιδίων ή αντισωματιδίων αρνητικής ενέργειας που θα πέφτουν μέσα της. Από την εξίσωση του Αϊνστάιν $E = m \cdot c^2$ (όπου E είναι η ενέργεια, m η μάζα και c η ταχύτητα του φωτός) βλέπουμε ότι η ενέργεια είναι ανάλογη με τη μάζα. Επομένως, η ροή αρνητικής ενέργειας μέσα στη μαύρη τρύπα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση

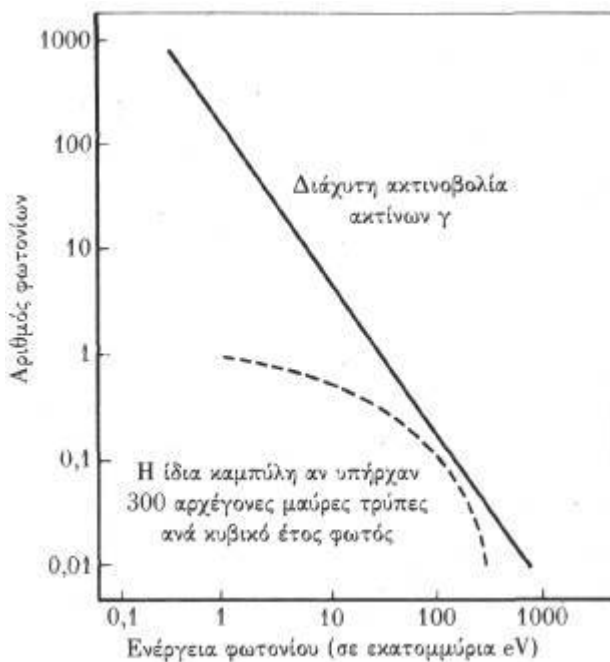
της μάζας της. Καθώς μειώνεται η μάζα της μαύρης τρύπας μειώνεται και το εμβαδόν του ορίζοντα των γεγονότων της (που είναι μέτρο της εντροπίας της). Η μείωση όμως της εντροπίας της μαύρης τρύπας εξισορροπείται από την εντροπία της ακτινοβολίας που εκπέμπεται, έτσι ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής δεν παραβιάζεται ποτέ.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, όσο μικρότερη είναι η μάζα της μαύρης τρύπας τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της και ο ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας. Καθώς λοιπόν η μάζα της μαύρης τρύπας μειώνεται, η θερμοκρασία και ο ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας μεγαλώνουν, και έτσι η μάζα της μειώνεται ακόμη περισσότερο. Δεν είναι σαφές τι ακριβώς θα συμβεί όταν κάποτε η μάζα της μαύρης τρύπας γίνει πάρα πολύ μικρή. Η πιο εύλογη εικασία είναι ότι ολόκληρη η μαύρη τρύπα θα εξαφανιστεί εντελώς μέσα σε μια τρομερή τελική έκρηξη.

Μια μαύρη τρύπα με μάζα λίγες φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του Ήλιου θα έχει πολύ μικρή θερμοκρασία: μόλις ένα δέκατο του εκατομμυριοστού του βαθμού Κέλβιν πάνω από το απόλυτο μηδέν (το απόλυτο μηδέν της κλίμακας Κέλβιν αντιστοιχεί στους -273 βαθμούς της κλίμακας Κελσίου). Αυτή η θερμοκρασία είναι πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία της διάχυτης ακτινοβολίας μικροκυμάτων που υπάρχει παντού στο Σύμπαν (περίπου 2,7 βαθμοί Κέλβιν). Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μαύρες τρύπες με ανάλογες μάζες είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία της ακτινοβολίας που απορροφάται από αυτές. Αν όμως το Σύμπαν συνεχίσει να διαστέλλεται για πάντα, η θερμοκρασία της διάχυτης ακτινοβολίας μικροκυμάτων θα μειώνεται, κάποτε λοιπόν μια μαύρη τρύπα με μάζα λίγες φορές μεγαλύτερη από την μάζα του Ήλιου, θα βρεθεί σε περιβάλλον με μικρότερη θερμοκρασία από τη δική της. Η ενέργεια που θα απορροφά θα είναι μικρότερη από αυτήν που θα εκπέμπει, έτσι θα αρχίσει να χάνει ενέργεια

και η μάζα της θα μειώνεται. Ακόμη και τότε όμως η θερμοκρασία της θα είναι τόσο μικρή που θα χρειαστούν περίπου χίλια εικοσάκις εκατομμύρια χρόνια (η μονάδα με 66 μηδενικά μετά απ' αυτήν!) για να εξαφανιστεί εντελώς. Αυτό το χρονικό διάστημα είναι πολύ πιο μεγάλο από την ηλικία του Σύμπαντος, η οποία είναι μόνον δέκα ή είκοσι δισεκατομμύρια χρόνια (το 1 ή το 2 με 10 μηδενικά μετά από αυτό). Όπως όμως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, μπορεί να υπάρχουν αρχέγονες μαύρες τρύπες με μάζα πολύ μικρότερη από εκείνη του Ήλιου που σχηματίστηκαν στις μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις κατά την εποχή της Μεγάλης έκρηξης, και προήλθαν από τη βαρυτική κατάρρευση κάποιων περιοχών της ανομοιόμορφα κατανεμημένης ύλης του Σύμπαντος. Αυτές οι μαύρες τρύπες θα έχουν και πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία και πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς εκπομπής ακτινοβολίας. Μια αρχέγονη μαύρη τρύπα, που έχει αρχική μάζα ενός δισεκατομμυρίου τόνων, θα έχει διάρκεια ζωής ίση περίπου με την ηλικία του Σύμπαντος. Οι αρχέγονες μαύρες τρύπες, που είχαν αρχικά μικρότερες μάζες, στη σημερινή εποχή θα έχουν ήδη εξαφανιστεί εντελώς. Όσες όμως είχαν μεγαλύτερες μάζες θα εκπέμπουν ακόμη ακτινοβολία με τη μορφή ακτίνων γ και X . (Οι ακτίνες γ και X είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως και το ορατό φως, αλλά με πολύ μικρότερα μήκη κύματος). Τέτοιες μαύρες τρύπες λοιπόν είναι παράξενο να φέρουν το επίθετο «μαύρες». Στην πραγματικότητα είναι «άσπρες» εξαιτίας της μεγάλης τους θερμοκρασίας, και εκπέμπουν ενέργεια με ρυθμό εκατό χιλιάδων περίπου μεγαβάτ (δηλαδή με τον ίδιο ρυθμό που εκπέμπουν ενέργεια εκατό εκατομμύρια λάμπες των 100 βατ).

Μια τέτοια μαύρη τρύπα θα μπορούσε να τροφοδοτήσει με ενέργεια δέκα μεγάλους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, αν φυσικά μπορούσαμε να τιθασεύσουμε τη δύναμη της. Αυτό όμως θα ήταν κάπως δύσκολο: μια μαύρη τρύπα με τέτοια μάζα, όση



ΕΙΚΟΝΑ 7-5.

περίπου η μάζα ενός βουνού, θα έχει το μέγεθος ενός πυρήνα ατόμου! Αν είχαμε μια τέτοια μαύρη τρύπα πάνω στην επιφάνεια της Γης δεν θα υπήρχε κανένας τρόπος να την εμποδίσουμε να πέσει μέσα από το δάπεδο και το έδαφος ως το κέντρο της Γης. Έτσι, το μόνο μέρος όπου θα μπορούσαμε να την τοποθετήσουμε — ώστε να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε την ενέργεια που εκπέμπει — είναι σε τροχιά γύρω από την Γη. Αλλά ο μόνος τρόπος να τη μεταφέρουμε σε τροχιά είναι να την παρασύρουμε έλκοντας την προς τα εκεί με μια μεγάλη μάζα που θα τη μετακινούμε συνεχώς μπροστά της σε μικρή απόσταση, όπως παρασύρουμε έναν γάιδαρο μ' ένα καρότο. Ένα τέτοιο σχέδιο

δεν φαίνεται πως θα μπορούσε να τεθεί σε πρακτική εφαρμογή, τουλάχιστον στο άμεσο μέλλον.

Αλλά ακόμη κι αν δεν μπορέσουμε τελικά να τιθασεύσουμε την ακτινοβολία που εκπέμπουν οι αρχέγονες μαύρες τρύπες, θα μπορέσουμε τουλάχιστον να τις παρατηρήσουμε; Θα ήταν ίσως δυνατό να ανιχνεύσουμε τις ακτίνες γ που εκπέμπουν σε όλη σχεδόν την διάρκεια της ζωής τους. Η ακτινοβολία που θα εκπέμψει η κάθεμιά τους θα φτάνει σε εμάς αδύναμη, αφού το πιθανότερο είναι να βρίσκεται πολύ μακριά. Ίσως όμως είναι δυνατό να ανιχνεύσουμε τη συνολική ακτινοβολία που εκπέμπουν όλες μαζί οι αρχέγονες μαύρες τρύπες του Σύμπαντος. Πραγματικά, στο Σύμπαν παρατηρούμε μια διάχυτη ακτινοβολία ακτίνων γ : στην εικόνα 7-5 παριστάνεται με συνεχή γραμμή η ένταση αυτής της ακτινοβολίας σε σχέση με τη συχνότητα της (τον αριθμό των κυμάτων ανά δευτερόλεπτο). Όμως αυτή η διάχυτη ακτινοβολία θα μπορούσε να είναι, και μάλλον είναι, προϊόν άλλων διαδικασιών, διαφορετικών από τις αρχέγονες μαύρες τρύπες. Η διακεκομμένη γραμμή στην εικόνα 7-5 παριστάνει το πώς θα μεταβαλλόταν η ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας των ακτίνων γ σε σχέση με τη συχνότητά της, αν υπήρχαν κατά μέσο όρο 300 αρχέγονες μαύρες τρύπες ανά κυβικό έτος φωτός. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι τα δεδομένα των παρατηρήσεων για τη διάχυτη ακτινοβολία ακτίνων γ δεν παρέχουν καμιά θετική ένδειξη για τις αρχέγονες μαύρες τρύπες, δείχνουν όμως ότι, αν αυτές υπάρχουν πραγματικά, δεν μπορεί να είναι περισσότερες από 300 σε κάθε κυβικό έτος φωτός. Αυτό το όριο σημαίνει ότι οι αρχέγονες μαύρες τρύπες μπορεί να αποτελούν το πολύ ένα εκατομμυριοστό της ύλης του Σύμπαντος.

Αφού οι αρχέγονες μαύρες τρύπες είναι τόσο σπάνιες θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί πως είναι απίθανο να βρίσκεται κάποια αρκετά κοντά μας, ώστε να μπορούμε να παρατηρήσουμε τις ακτίνες γ που εκπέμπει. Αλλά επειδή η βαρύτητα θα έλκει τις

αρχέγονες μαύρες τρύπες προς το μέρος κάθε συγκέντρωσης ύλης, πρέπει οι περισσότερες να βρίσκονται κοντά ή μέσα στους γαλαξίες. Η διάχυτη ακτινοβολία των ακτίνων γ μας λέει ότι δεν θα μπορούσε να υπάρχουν περισσότερες από 300, κατά μέσον όρο, αρχέγονες μαύρες τρύπες ανά κυβικό έτος φωτός μέσα σε ολόκληρο Σύμπαν. Δεν μας λέει όμως τίποτε για το πόσο περισσότερες αρχέγονες μαύρες τρύπες θα μπορούσε να υπάρχουν ανά κυβικό έτος φωτός μέσα στο γαλαξία μας. Αν λοιπόν υπήρχαν, για παράδειγμα, ένα εκατομμύριο φορές περισσότερες, τότε αυτή που θα βρισκόταν πιο κοντά μας θα απείχε πιθανότατα περίπου ένα δισεκατομμύριο χιλιόμετρα, σχεδόν όσο και ο Πλούτων, ο μακρινότερος γνωστός πλανήτης. Σε αυτήν την απόσταση θα ήταν πολύ δύσκολο να παρατηρήσουμε τη σταθερή ακτινοβολία μιας μαύρης τρύπας, ακόμη κι αν η ενέργειά της ήταν δέκα χιλιάδες μεγαβάτ. Για να παρατηρήσουμε μια αρχέγονη μαύρη τρύπα πρέπει να ανιχνεύσουμε αρκετά κβάντα ακτινοβολίας ακτίνων γ που να προέρχονται από την ίδια κατεύθυνση μέσα σε ένα λογικά μεγάλο χρονικό διάστημα, λόγου χάρη μια εβδομάδα. (Διαφορετικά τα κβάντα που θα ανιχνεύσουμε ίσως να μην είναι παρά ένα μέρος της διάχυτης ακτινοβολίας των ακτίνων γ). Σύμφωνα όμως με την αρχή των κβάντων του Planck, κάθε κβάντο ακτίνων γ έχει πολύ μεγάλη ενέργειας, επειδή οι ακτίνες γ έχουν πολύ μεγάλη συχνότητα: έτσι δεν χρειάζονται πολλά κβάντα ακτίνων γ για να ακτινοβοληθεί ακόμη και αυτή η πολύ μεγάλη ενέργεια των δέκα χιλιάδων μεγαβάτ. Για να παρατηρήσουμε όμως αυτά τα σχετικά λίγα κβάντα ακτίνων γ που προέρχονται από ένα αντικείμενο σε τόσο μεγάλη απόσταση (όσο ο Πλούτων), θα έπρεπε να διαθέτουμε έναν ανιχνευτή ακτίνων γ πολύ μεγαλύτερο απ' όσους έχουν κατασκευαστεί ως τώρα. Και θα έπρεπε μάλιστα να τον τοποθετήσουμε στο Διάστημα, επειδή οι ακτίνες γ δεν μπορούν να διαπεράσουν την ατμόσφαιρα της Γης.

Αν φυσικά μια μαύρη τρύπα που βρίσκεται σε απόσταση όση και ο Πλούτων έφτανε στο τέλος της ζωής της και εκρηγνύοταν, θα ήταν πιο εύκολο να παρατηρήσουμε την τελική εκπομπή ακτίνων γ. Αλλά αν μια μαύρη τρύπα εκπέμπει ακτινοβολία τα τελευταία δέκα ή είκοσι δισεκατομμύρια χρόνια, είναι πραγματικά πολύ μικρή η πιθανότητα να φτάσει στο τέλος της ζωής της μέσα στα επόμενα λίγα χρόνια, και όχι αρκετά εκατομμύρια χρόνια μετά! Έτσι, για να έχει κανείς κάποια πιθανότητα να παρατηρήσει μια έκρηξη μαύρης τρύπας πριν λήξει η περίοδος χρηματοδότησης της έρευνάς του, πρέπει να βρει έναν τρόπο να ανιχνεύει όλες τις εκρήξεις που γίνονται μέσα σε μια περιοχή γύρω από τη Γη με ακτίνα περίπου ένα έτος φωτός. Θα εξακολουθεί βέβαια να χρειάζεται έναν μεγάλο ανιχνευτή ακτίνων γ για να μπορεί να παρατηρήσει αρκετά κβάντα ακτίνων γ από την έκρηξη. Δεν θα είναι όμως απαραίτητο να προσδιορίσει πως όλα τα κβάντα προέρχονται από την ίδια κατεύθυνση· αρκεί να εξακριβώσει ότι όλα φτάνουν στη Γη σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Έτσι θα μπορεί να είναι βέβαιος ότι όλα είναι προϊόντα της ίδιας έκρηξης.

Ένας ανιχνευτής ακτίνων γ που θα μπορούσε να εντοπίσει αρχέγονες μαύρες τρύπες είναι η ατμόσφαιρα ολόκληρης της Γης. (Είναι μάλλον απίθανο να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε ποτέ έναν μεγαλύτερο!). Όταν ένα κβάντο ακτίνων γ μεγάλης ενέργειας συγκρουστεί με ένα άτομο στην ατμόσφαιρα, δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων και αντιηλεκτρονίων (ποζιτρονίων). Όταν αυτά με τη σειρά τους συγκρουστούν με άλλα άτομα δημιουργούν και άλλα ζεύγη ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων έτσι σε λίγο έχουμε έναν καταγισμό ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι' να δημιουργηθούν αναλαμπές φωτός, που ονομάζονται *ακτινοβολία Cerenkov*. Μπορεί λοιπόν κανείς να ανιχνεύσει τις ακτίνες γ που προέρχονται από κάποια μαύρη τρύπα αν παρατηρήσει προσεχτικά τις αναλαμπές φωτός

στο νυχτερινό ουρανό. Φυσικά υπάρχουν και διάφορα άλλα φαινόμενα που προκαλούν αναλαμπές φωτός, όπως οι ανακλάσεις του ηλιακού φωτός πάνω σε δορυφόρους και σε «διαστημικά σκουπίδια», δηλαδή υπολείμματα διαστημοπλοίων που συνεχίζουν να βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Μπορεί όμως κανείς να διακρίνει τις αναλαμπές φωτός που οφείλονται στις εκρήξεις ακτίνων γ από όσες οφείλονται σε άλλα φαινόμενα, με το να διαπιστώσει ότι κάποιες αναλαμπές φωτός παρουσιάζονται την ίδια στιγμή σε δύο ή περισσότερα απομακρυσμένα μεταξύ τους σημεία του ουρανού. Παρόμοια έρευνα πραγματοποίησαν δύο φυσικοί από το Δουβλίνο, ο Neil Porter και ο Trevor Weekes, χρησιμοποιώντας τηλεσκόπια στην Αριζόνα. Παρατήρησαν πολλές αναλαμπές φωτός αλλά καμιά που θα μπορούσε να αποδοθεί με βεβαιότητα σε εκρήξεις ακτίνων γ από αρχέγονες μαύρες τρύπες.*

Ακόμη κι αν η έρευνα για τις αρχέγονες μαύρες τρύπες αποδειχθεί τελικά άκαρπη, όπως φαίνεται ότι μπορεί να συμβεί, θα μας έχει δώσει σημαντικές πληροφορίες για τα αρχικά στάδια του Σύμπαντος. Αν στην εποχή εκείνη το Σύμπαν ήταν χαοτικό ή ανομοιόμορφο, ή αν η πίεση της ύλης ήταν μικρή, θα έπρεπε να έχουν παραχθεί πολύ περισσότερες αρχέγονες μαύρες τρύπες από το όριο που έχει τεθεί μετά τις παρατηρήσεις της διάχυτης ακτινοβολίας ακτίνων γ. Μόνον αν το Σύμπαν στα αρχικά του στάδια ήταν ομοιόμορφο και η πίεση της ύλης ήταν μεγάλη θα μπορούσαμε να εξηγήσουμε γιατί δεν παρατηρούμε σήμερα κάποιες αρχέγονες μαύρες τρύπες.

Η ιδέα της ακτινοβολίας από τις μαύρες τρύπες ήταν το πρώτο παράδειγμα πρόβλεψης που εξαρτώνταν με ένα ουσιαστι-

* Το 1987 και 1988 ανιχνήθηκαν οι ενδείξεις για το «βομβαρδισμό» της Γης με ακτίνες γ από το Διάστημα. Δεν έχει όμως ακόμη διευκρινιστεί η προέλευση τους. (Σ.τ.μ.).

κό τρόπο και από τις δύο μεγάλες θεωρίες αυτού του αιώνα, την γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντική μηχανική. Στην αρχή προκάλεσε πολλές αντιδράσεις, γιατί ανέτρεψε την άποψη που υπήρχε: «Πώς είναι δυνατό μια μαύρη τρύπα να εκπέμπει κάτι;». Όταν για πρώτη φορά ανακοίνωσα τα αποτελέσματα των υπολογισμών μου σε ένα συνέδριο στο κέντρο ερευνών Rutherford - Appleton κοντά στην Οξφόρδη, αντιμετώπισα τη γενική δυσπιστία. Στο τέλος της ομιλίας μου ο πρόεδρος του συνεδρίου John G. Taylor δήλωσε ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν είχαν κανένα νόημα. Μάλιστα μετά από το συνέδριο δημοσίευσε μια εργασία όπου υποστήριξε αυτήν την άποψη. Τελικά όμως οι περισσότεροι φυσικοί, και ο ίδιος ο Taylor, οδηγήθηκαν στο ίδιο συμπέρασμα: οι μαύρες τρύπες πρέπει να εκπέμπουν ακτινοβολία όπως τα θερμά σώματα, αν είναι σωστές οι άλλες μας ιδέες για την γενική θεωρία της σχετικότητας και την κβαντική μηχανική. Έτσι, μολονότι δεν έχουμε καταφέρει ακόμη να ανακαλύψουμε μια αρχέγονη μαύρη τρύπα, όλοι συμφωνούν πως, αν ανακαλύψουμε κάποια, πρέπει να εκπέμπει ένα μεγάλο ποσό ακτίνων γ και X .

Η ύπαρξη ακτινοβολίας από τις μαύρες τρύπες φαίνεται να σημαίνει πως η βαρυτική κατάρρευση δεν είναι τόσο τελική και μη αντιστρέψιμη διαδικασία όπως νομίζαμε κάποτε. Αν ένας αστροναύτης πέσει μέσα σε μια μαύρη τρύπα, η μάζα της θα μεγαλώσει, αλλά τελικά η ισοδύναμη ενέργεια της πρόσθετης μάζας θα επιστρέψει στο Σύμπαν με τη μορφή της ακτινοβολίας. Έτσι, με μία έννοια, ο αστροναύτης θα «ανακυκλωθεί». Βέβαια το είδος της αθανασίας που θα του προσφερθεί με αυτόν τον τρόπο θα είναι αρκετά περιορισμένο, αφού κάθε προσωπική αντίληψη του χρόνου θα εξαφανιστεί μόλις το σώμα του αστροναύτη διαμελιστεί μέσα στη μαύρη τρύπα! Ακόμη και τα σωματίδια που θα εκπέμπει τελικά η μαύρη τρύπα θα είναι γενικά διαφορετικά από εκείνα που αποτελούσαν τον αστροναύτη: το μόνο

χαρακτηριστικό του αστροναύτη που θα επιβιώσει θα είναι η μάζα του ή η ισοδύναμη ενέργεια της.

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποίησα για να υπολογίσω την εκπομπή ακτινοβολίας από τις μαύρες τρύπες ισχύουν όταν η μάζα της μαύρης τρύπας είναι μεγαλύτερη από ένα κλάσμα του γραμμαρίου· παύουν όμως να ισχύουν στο τελικό στάδιο της ζωής της μαύρης τρύπας, όταν η μάζα της γίνει πολύ μικρή. Η πιθανότερη συνέχεια φαίνεται να είναι ότι η μαύρη τρύπα θα εξαφανιστεί, τουλάχιστον από τη δική μας περιοχή του Σύμπαντος, παίρνοντας μαζί της τον αστροναύτη και την ανωμαλία που ίσως υπάρχει στο εσωτερικό της, αν πραγματικά υπάρχει. Αυτή ήταν η πρώτη ένδειξη ότι τα φαινόμενα που προβλέπονται από την κβαντική μηχανική θα μπορούσαν να απομακρύνουν τις ανωμαλίες που προβλέπονται από τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Παρ' όλα αυτά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούσαμε το 1974 δεν μπορούσαν να μας βοηθήσουν να απαντήσουμε σε ερωτήματα όπως το αν θα σχηματίζονται ανωμαλίες στην κλίμακα των φαινομένων της κβαντικής βαρύτητας. Από το 1975 λοιπόν άρχισα να αναπτύσσω μια αποτελεσματικότερη προσέγγιση στην κβαντική βαρύτητα, βασισμένη στην ιδέα του Richard Feynman για την «άθροιση ιστοριών». Οι απαντήσεις που προτείνει αυτή η προσέγγιση για τη μοίρα του Σύμπαντος και των περιεχομένων του, όπως των αστροναυτών, θα περιγραφούν στα επόμενα δύο κεφάλαια. Θα δούμε πως, αν και η αρχή της απροσδιοριστίας θέτει όρια στην ακρίβεια όλων των προβλέψεων μας, μπορεί παράλληλα να απομακρύνει τη θεμελιώδη έλλειψη προβλεψιμότητας που υπάρχει σε μια χωροχρονική ανωμαλία.

8

Η μοίρα του Σύμπαντος Παρελθόν και Μέλλον

Η μία από τις δύο μεγάλες θεωρίες του αιώνα μας, η γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν, προέβλεπε ότι ο χωρό-χρονος είχε μία αρχή — στην ανωμαλία της Μεγάλης έκρηξης — και θα έχει ένα τέλος, είτε στην ανωμαλία της Μεγάλης σύνθλιψης (αν συσταλλεί και καταρρεύσει ολόκληρο το Σύμπαν) είτε στην ανωμαλία κάποιας μαύρης τρύπας (αν συσταλλεί και καταρρεύσει μια περιοχή του Σύμπαντος, όπως ένα άστρο). Η ύλη που θα πέφτει μέσα στη μαύρη τρύπα θα καταστρέφεται στην ανωμαλία που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο, και μόνο η βαρυτική έλξη της μάζας της θα συνεχίσει να επιδρά στον εξωτερικό χώρο. Αν όμως υπολογίσουμε και τις επιδράσεις που οφείλονται στα κβαντικά φαινόμενα, φαίνεται ότι κάποτε η μάζα (ή η ενέργεια) της ύλης θα επιστρέψει πάλι στο υπόλοιπο Σύμπαν και η ίδια η μαύρη τρύπα, μαζί με την ανωμαλία στο εσωτερικό της, θα «εξατμιστεί» και τελικά θα εξαφανιστεί εντελώς. Μήπως λοιπόν η άλλη μεγάλη θεωρία του αιώνα μας, η

κβαντική μηχανική, προβλέπει ανάλογα δραματικά γεγονότα και για τις άλλες ανωμαλίες, αυτές της Μεγάλης έκρηξης και της Μεγάλης σύνθλιψης; Τι πραγματικά συμβαίνει κατά τη διάρκεια των αρχικών και των τελικών σταδίων του Σύμπαντος, όταν τα βαρυτικά πεδία είναι πολύ ισχυρά και τα αντίστοιχα κβαντικά φαινόμενα πολύ σημαντικά; Τπήρξε στο παρελθόν μια αρχή του Σύμπαντος; Θα υπάρξει στο μέλλον ένα τέλος; Ποιά είναι η μοίρα του Σύμπαντος;

Στη δεκαετία του 1970 ασχολήθηκα κυρίως με προβλήματα που είχαν σχέση με τις μαύρες τρύπες. Το 1981 όμως το ενδιαφέρον μου για τα αρχικά και τα τελικά στάδια του Σύμπαντος αναζωπυρώθηκε όταν συμμετείχα σε ένα συνέδριο κοσμολογίας που οργάνωσε η θρησκευτική κοινότητα των Ιησουιτών στο Βατικανό. Η Ρωμαιοκαθολική εκκλησία είχε κάνει μεγάλο λάθος όταν, στην περίπτωση του Γαλιλαίου, προσπάθησε να αποφανθεί για ένα θέμα που ανήκε στην αρμοδιότητα της επιστήμης και υποστήριξε ότι ο Ήλιος κινείται γύρω από τη Γη. Τώρα, αιώνες μετά, αποφάσισε να προσκαλέσει μερικούς ειδικούς επιστήμονες και να ζητήσει τη συμβουλή τους για τα κοσμολογικά προβλήματα. Στο τέλος του συνεδρίου μας δέχτηκε ο Πάπας. Μας είπε ότι, αν και θα μπορούσαμε να ερευνούμε την εξέλιξη του Σύμπαντος μετά τη Μεγάλη έκρηξη, δεν θα έπρεπε να ερευνούμε την ίδια τη Μεγάλη έκρηξη, γιατί η Μεγάλη έκρηξη είναι η στιγμή της Δημιουργίας, και η στιγμή της Δημιουργίας είναι δουλειά του Θεού. Είχα λοιπόν κάθε λόγο να είμαι ευχαριστημένος από το ότι δεν γνώριζε το θέμα της διάλεξης που μόλις είχα δώσει στο συνέδριο — τη δυνατότητα να είναι ο χωρόχρονος πεπερασμένος (να μην είναι άπειρος), αλλά όχι περιορισμένος (να μην έχει όριο)· αυτό σημαίνει ότι δεν υπήρξε ποτέ μια αρχή του Σύμπαντος ούτε μια στιγμή Δημιουργίας. Δεν είχα καμία όρεξη να έχω και εγώ την τύχη του Γαλιλαίου. (Με τον Γαλιλαίο με συνδέει ένα αίσθημα συγγένειας που σε κάποιο βαθμό οφείλεται

και στη σύμπτωση του ότι γεννήθηκα τριακόσια ακριβώς χρόνια μετά το θάνατο του!).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξηγήσω τις ιδέες που είχαμε, μερικοί άλλοι φυσικοί και εγώ, για το πώς τα φαινόμενα που προβλέπει η θεωρία της κβαντικής μηχανικής θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αρχικά και τα τελικά στάδια του Σύμπαντος. Είναι απαραίτητο όμως να κατανοηθεί πρώτα η γενικά αποδεκτή ιστορία του Σύμπαντος σύμφωνα με το «μοντέλο της θερμής Μεγάλης έκρηξης». Σε αυτό προϋποτίθεται ότι τα διαδοχικά στάδια της ιστορίας του Σύμπαντος μετά τη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης περιγράφονται από ένα μοντέλο του Friedmann. Σε όλα τα μοντέλα του Friedmann παρατηρούμε ότι καθώς το Σύμπαν διαστέλλεται, η θερμοκρασία της ύλης και της ακτινοβολίας του μειώνεται. (Όταν το Σύμπαν γίνει δυο φορές μεγαλύτερο η θερμοκρασία του γίνεται η μισή). Αφού η θερμοκρασία είναι ένα μέτρο του μέσου όρου της ενέργειας (ή της ταχύτητας) των σωματιδίων της ύλης, η μεταβολή της θερμοκρασίας του Σύμπαντος θα επιδρά σημαντικά στην κίνησή τους. Σε πάρα πολύ μεγάλες θερμοκρασίες τα σωματίδια θα κινούνται με τόσο μεγάλες ταχύτητες που θα μπορούν να διαφεύγουν από τις μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητικές ή πυρηνικές δυνάμεις έλξης· καθώς όμως οι θερμοκρασίες και οι ταχύτητες θα αρχίσουν να μειώνονται, τα σωματίδια που έλκονται μεταξύ τους θα αρχίσουν να συνενώνονται και να δημιουργούν συνθετότερα σώματα. Αλλά ακόμη και το είδος των σωματιδίων που υπάρχουν στο Σύμπαν εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Σε αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες τα σωματίδια θα έχουν τόσο μεγάλη ενέργεια που όταν συγκρούονται μεταξύ τους θα παράγονται ζεύγη διαφόρων ειδών σωματιδίων/αντισωματιδίων. Αν και μερικά από αυτά τα σωματίδια θα εξαυλώνονται, επειδή θα συγκρούονται με τα αντίστοιχα τους αντισωματίδια, γενικά στις μεγάλες θερμοκρασίες θα παράγονται περισσότερα ζεύγη απ' όσα μπορεί να εξαυλωθούν. Στις μικρότερες θερμό-

κρασίες όμως, όταν τα σωματίδια που συγκρούονται μεταξύ τους έχουν μικρότερη ενέργεια, τα ζεύγη σωματιδίων/αντισωματιδίων θα παράγονται με πιο αργό ρυθμό — και η εξαϋλωση θα γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό από την παραγωγή.

Στην ίδια τη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης φανταζόμαστε ότι το Σύμπαν πρέπει να είχε μηδενικό μέγεθος, και ότι, για το λόγο αυτό, πρέπει να ήταν άπειρα θερμό. Αλλά καθώς το Σύμπαν διαστέλλοταν και το μέγεθος του μεγάλωνε, η θερμοκρασία του μειωνόταν. Ένα δευτερόλεπτο μετά τη Μεγάλη έκρηξη η θερμοκρασία του θα είχε ήδη πέσει στα δέκα περίπου δισεκατομμύρια βαθμούς. Η θερμοκρασία αυτή είναι χίλιες φορές μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στο κέντρο του Ήλιου. (Τόσο μεγάλες θερμοκρασίες σημειώνονται στις εκρήξεις των βομβών υδρογόνου). Στο στάδιο αυτό το Σύμπαν θα περιείχε κυρίως φωτόνια, ηλεκτρόνια και νετρίνα. (Τα νετρίνα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και εξαιρετικά ελαφρά σωματίδια ύλης που επηρεάζονται μόνον από τις ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις και τη βαρύτητα). Μαζί με τα σωματίδια αυτά θα υπήρχαν και τα αντίστοιχά τους αντισωματίδια, όπως και μερικά πρωτόνια και νετρόνια. Καθώς το Σύμπαν συνέχιζε να διαστέλλεται και η θερμοκρασία του να μειώνεται, ο ρυθμός παραγωγής ζευγών ηλεκτρονίων/αντιηλεκτρονίων θα γινόταν μικρότερος από το ρυθμό καταστροφής τους. Έτσι θα παρέμεναν λίγα μόνον σωματίδια, αφού τα περισσότερα ηλεκτρόνια και αντιηλεκτρόνια θα εξαϋλώνονταν μεταξύ τους παράγοντας φωτόνια. Δεν θα συνέβαινε όμως το ίδιο και για τα νετρίνα και τα αντινετρίνα, γιατί αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (και με τα άλλα είδη σωματιδίων) με τις ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις που είναι πολύ αδύναμες. Έτσι τα νετρίνα και τα αντινετρίνα που δημιουργήθηκαν στο πρώτο δευτερόλεπτο μετά τη Μεγάλη έκρηξη πρέπει να υπάρχουν ακόμη και σήμερα παντού μέσα στο Σύμπαν. Αν μπορούσαμε να τα παρατηρήσουμε θα μπορούσαμε και να ελέγξουμε το

αν και κατά πόσον η εικόνα αυτή των πολύ θερμών αρχικών σταδίων του Σύμπαντος ανταποκρίνεται στην πραγματική ιστορία του Σύμπαντος. Δυστυχώς, οι ενέργειες αυτών των σωματιδίων θα είναι σήμερα πάρα πολύ μικρές για να μπορέσουμε να τα ανιχνεύσουμε άμεσα. Αλλά αν τα νετρίνα και τα αντineτρίνα έχουν κάποια μικρή μάζα (όπως υποστηρίχθηκε μετά από κάποια πειράματα το 1981 στη Σοβιετική Ένωση, που όμως δεν επιβεβαιώθηκαν) θα μπορούσαμε να τα ανιχνεύσουμε έμμεσα: ίσως αποτελούν μια μορφή της «σκοτεινής ύλης» που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αν η μάζα και η βαρυτική επίδραση αυτής της ύλης είναι αρκετά μεγάλη η διαστολή του Σύμπαντος θα σταματήσει και θα αρχίσει μία φάση συρρίκνωσης και βαρυτικής κατάρρευσης .

Εκατό δευτερόλεπτα περίπου μετά τη Μεγάλη έκρηξη η θερμοκρασία θα είχε πέσει στο ένα δισεκατομμύριο βαθμούς, όση είναι και στο κέντρο των πιο θερμών άστρων. Στη θερμοκρασία αυτή τα πρωτόνια και τα νετρόνια δεν θα διαθέτουν πια αρκετή ενέργεια για να μπορούν να διαφεύγουν από την έλξη της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπίδρασης· έτσι θα αρχίσουν να συνενώνονται μεταξύ τους και να παράγουν πυρήνες δευτερίου (που αποτελούνται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο). Στη συνέχεια οι πυρήνες του δευτερίου θα αρχίσουν να συνενώνονται με άλλα πρωτόνια και νετρόνια και να παράγουν πυρήνες ηλίου (που αποτελούνται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια) αλλά και μικρές ποσότητες μερικών βαρύτερων στοιχείων, του λιθίου και του βηρυλίου. Μπορεί να υπολογίσει κανείς, σύμφωνα με το μοντέλο της θερμής Μεγάλης έκρηξης, ότι το ένα τέταρτο περίπου των πρωτονίων και νετρονίων συνενώθηκε σε πυρήνες ηλίου και σε μικρές ποσότητες πυρήνων δευτερίου, λιθίου και βηρυλίου. Τα υπόλοιπα νετρόνια διασπάστηκαν στα πρωτόνια που αποτελούν σήμερα τους πυρήνες των ατόμων υδρογόνου.

Η εικόνα αυτή των πολύ θερμών αρχικών σταδίων του

Σύμπαντος είναι αποτέλεσμα μιας φημισμένης εργασίας που δημοσίευσε το 1948 ο George Gamow μαζί με το μαθητή του Ralph Alpher. Ο Gamow είχε μεγάλη αίσθηση του χιούμορ — έπεισε τον πυρηνικό φυσικό Hans Bethe να προσθέσει και το δικό του επώνυμο στη δημοσίευση για να αντιστοιχούν τα επώνυμα των συγγραφέων "Alpher, Bethe, Gamow" στα τρία αρχικά γράμματα του ελληνικού αλφάβητου Α, Β, Γ: πραγματικά εύστοχη αντιστοιχία για μια δημοσίευση σχετική με την αρχή του Σύμπαντος! Στην εργασία τους οι Alpher, Bethe και Gamow διατύπωσαν τη σημαντική πρόβλεψη ότι η ακτινοβολία (με τη μορφή φωτονίων) που προέρχεται από τα πολύ θερμά αρχικά στάδια του Σύμπαντος πρέπει να υπάρχει ακόμη και σήμερα παντού στο Σύμπαν η θερμοκρασία της όμως θα έχει πέσει σε λίγους μόνον βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν. Αυτή ακριβώς την ακτινοβολία ανακάλυψαν οι Penzias και Wilson το 1965. Την εποχή που οι Alpher, Bethe και Gamow δημοσίευσαν την εργασία τους δεν γνωρίζαμε ακόμη πολλά πράγματα για τις πυρηνικές αντιδράσεις των πρωτονίων και νετρονίων. Οι προβλέψεις των αναλογιών των διαφόρων στοιχείων στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος δεν ήταν αρκετά ακριβείς. Σήμερα όμως οι θεωρητικοί υπολογισμοί, που γίνονται στο φως των σύγχρονων γνώσεων μας για τις πυρηνικές αντιδράσεις, συμφωνούν πολύ καλά με τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Εκτός από αυτό, είναι πολύ δύσκολο να εξηγήσουμε την παρουσία αυτής της ποσότητας ηλίου στο Σύμπαν με κάποιον άλλο τρόπο. Πιστεύουμε λοιπόν ότι έχουμε τη σωστή εικόνα για το τι συνέβη στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος, τουλάχιστον μετά το πρώτο περίπου δευτερόλεπτο από τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης.

Στις πρώτες λίγες ώρες του Σύμπαντος η παραγωγή ηλίου είχε ήδη συμπληρωθεί. Στο επόμενο ένα εκατομμύριο χρόνια το Σύμπαν συνέχιζε να διαστέλλεται, χωρίς να συμβαίνει τίποτε το σημαντικό. Όταν κάποτε η θερμοκρασία *έπεσε* σε μερικές χιλιά-

δες βαθμούς, τα ηλεκτρόνια και οι πυρήνες δεν είχαν πια αρκετή ενέργεια για να συνεχίσουν να διαφεύγουν από την έλξη της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ τους· έτσι άρχισαν να συνενώνονται και να σχηματίζουν άτομα. Το Σύμπαν συνέχιζε συνολικά να διαστέλλεται, αλλά σε μερικές περιοχές, που τύχαινε να είναι λίγο πυκνότερες από τον μέσο όρο, η διαστολή επιβραδυνόταν εξαιτίας της πρόσθετης βαρυτικής έλξης. Έτσι κάποιες περιοχές σταμάτησαν κάποτε να διαστέλλονται και άρχισαν να συρρικνώνονται και να καταρρέουν. Στη διάρκεια αυτής της κατάρρευσης η βαρυτική έλξη που ασκούσε πάνω τους η ύλη έξω από αυτές μπορούσε να τις αναγκάσει να αρχίσουν να περιστρέφονται με αργό ρυθμό. Καθώς μία περιοχή που κατέρρεε γινόταν όλο και μικρότερη, συνέχιζε να περιστρέφεται με όλο και ταχύτερο ρυθμό (ακριβώς όπως συμβαίνει με τους παγοδρόμους που περιστρέφονται σε ένα σημείο με απλωμένα χέρια' όταν τα μαζεύουν πάνω στο σώμα τους, μεγαλώνει η ταχύτητα περιστροφής τους). Τελικά, όταν η περιοχή που περιστρέφεται μικρύνει αρκετά, ο ρυθμός περιστροφής της θα γίνει αρκετά γρήγορος και θα εξισορροπήσει την έλξη της βαρύτητας. Με τον τρόπο αυτό γεννήθηκαν οι *διασκοιδείς περιστρεφόμενοι γαλαξίες*. Κάποιες άλλες περιοχές του Σύμπαντος που δεν έτυχε να αρχίσουν να περιστρέφονται, εξελίσσονται στους *ελλειψοειδείς γαλαξίες*. Αυτοί έχουν πάψει να καταρρέουν γιατί τα διάφορα τμήματά τους περιστρέφονται με γρήγορο ρυθμό γύρω από τα κέντρα τους, χωρίς όμως οι ίδιοι να περιστρέφονται ολόκληροι ως σύνολο.

Με την πάροδο του χρόνου τα αέρια υδρογόνου και ηλίου μέσα στους γαλαξίες διαχωρίζονται σε μικρότερα νέφη αερίων που καταρρέουν κάτω από την ίδια τους τη βαρύτητα. Καθώς τα νέφη αυτά συρρικνώνονται και τα άτομα στο εσωτερικό τους συγκρούονται μεταξύ τους, αυξάνεται η θερμοκρασία των αερίων υδρογόνου και ηλίου· κάποτε αυτά τα αέρια γίνονται τόσο θερμά

που αρχίζουν οι πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό τους. Οι αντιδράσεις αυτές μετατρέπουν το υδρογόνο σε ήλιο· η θερμότητα που απελευθερώνεται μεγαλώνει την εσωτερική πίεση των αερίων και έτσι τα εμποδίζει να συρρικνωθούν κι άλλο. Παραμένουν λοιπόν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αυτή τη σταθερή κατάσταση με τη μορφή άστρων, όπως ο Ήλιος μας, «καίγοντας» υδρογόνο σε ήλιο και ακτινοβολώντας την ενέργεια που απελευθερώνεται. Τα άστρα με μεγαλύτερη μάζα χρειάζεται να γίνουν θερμότερα για να εξισορροπήσουν τη μεγαλύτερη βαρυτική έλξη τους· έτσι οι πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό τους συντελούνται τόσο γρήγορα που εξαντλούν όλο το υδρογόνο τους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, εκατό εκατομμύρια χρόνια. Μετά το διάστημα αυτό συρρικνώνονται λίγο ακόμη και, καθώς θερμαίνονται κι άλλο, αρχίζουν να μετατρέπουν το ήλιο σε βαρύτερα στοιχεία, όπως άνθρακα ή οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία όμως δεν απελευθερώνει πια πολλή ενέργεια, και έτσι επέρχεται η κρίση που περιγράψαμε στο κεφάλαιο για τις μαύρες τρύπες. Το τι συμβαίνει μετά δεν είναι εντελώς σαφές. Φαίνεται όμως πιθανό ότι η κεντρική περιοχή του άστρου καταρρέει σε μια πολύ πυκνή κατάσταση, έναν αστέρα νετρονίων ή μια μαύρη τρύπα. Μερικές φορές μπορεί οι εξωτερικές περιοχές του άστρου να εκτιναχθούν μακριά με μια τρομερή έκρηξη που ονομάζεται *έκρηξη υπερκαινοφανούς* (supernova). Μια τέτοια έκρηξη είναι λαμπρότερη απ' όλα μαζί τα άστρα του γαλαξία στον οποίο συμβαίνει. Μερικά από τα βαρύτερα στοιχεία που παράγονται κατά το τέλος της ζωής του άστρου εκτινάσσονται μέσα στα νέφη του γαλαξία και χρησιμεύουν ως πρώτη ύλη για την επόμενη γενιά άστρων. Ο δικός μας Ήλιος περιέχει περίπου 2% από αυτά τα βαρύτερα στοιχεία γιατί είναι άστρο δεύτερης ή τρίτης γενιάς· σχηματίστηκε περίπου πέντε δισεκατομμύρια χρόνια πριν, από την ύλη ενός περιστρεφόμενου νέφους αερίων που περιείχε τα υπολείμματα προηγούμενων εκρή-

ξεων υπερκαινοφανών. Η περισσότερη ύλη αυτού του νέφους εκτινάχθηκε μακριά ή σχημάτισε τον Ήλιο, αλλά μια μικρή ποσότητα των βαρύτερων στοιχείων συγκεντρώθηκε σε μερικές περιοχές και σχημάτισε τα σώματα που κινούνται τώρα γύρω από τον Ήλιο, δηλαδή τη Γη και τους άλλους πλανήτες.

Στην αρχή η Γη ήταν πολύ θερμή και δεν είχε ατμόσφαιρα. Με την πάροδο του χρόνου άρχισε να ψύχεται και απέκτησε μια ατμόσφαιρα αερίων που αποδεσμεύθηκαν από τα πετρώματα. Με την αρχική αυτή ατμόσφαιρα δεν θα μπορούσε να επιβιώσει ο άνθρωπος. Δεν περιείχε οξυγόνο, παρά μόνον μεγάλες ποσότητες διαφόρων αερίων που είναι δηλητηριώδη για τον άνθρωπο, όπως το υδρόθειο (σ' αυτό οφείλεται η χαρακτηριστική μυρωδιά των κλούβιων αυγών). Υπήρξαν όμως κάποιες άλλες πρωτόγονες μορφές ζωής που μπόρεσαν να αναπτυχθούν και να εξελιχθούν σ' αυτές τις συνθήκες. Φανταζόμαστε ότι δημιουργήθηκαν στους ωκεανούς, ίσως εξαιτίας τυχαίων συνδυασμών ατόμων σε πιο σύνθετα σώματα, που ονομάζονται *μακρομόρια*. Τα μακρομόρια μπόρεσαν να συναρμολογήσουν άλλα άτομα από το περιβάλλον τους σε παρόμοια σύνθετα σώματα. Με τον τρόπο αυτό μπόρεσαν να αναπαράγουν τον εαυτό τους και να πολλαπλασιαστούν. Σε μερικές περιπτώσεις συνέβαιναν κάποια λάθη στη διαδικασία αναπαραγωγής· τα περισσότερα είχαν αποτέλεσμα να μην μπορούν τα καινούργια μακρομόρια να αναπαραχθούν, γι' αυτό και κάποτε καταστρέφονταν. Κάποια λάθη όμως είχαν το αντίθετο αποτέλεσμα: τα καινούργια μακρομόρια μπορούσαν να αναπαραχθούν με αποτελεσματικότερο τρόπο. Είχαν λοιπόν ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα αρχικά, και έτσι έτειναν σταδιακά να τα αντικαταστήσουν. Με τον τρόπο αυτό άρχισε μια *διαδικασία εξέλιξης* που οδήγησε στη δημιουργία ακόμη συνθετότερων, αυτοαναπαραγόμενων και πολλαπλασιαζόμενων οργανισμών. Οι πρώτες πρωτόγονες μορφές ζωής κατανάλωναν διάφορα υλικά, όπως υδρόθειο, και απελευθέρωναν διάφορα άλλα, όπως οξυγόνο.

Έτσι σιγά σιγά η ατμόσφαιρα άλλαξε και η σύνθεσή της έγινε ίδια με τη σημερινή. Αυτή η σύνθεση επέτρεψε να δημιουργηθούν ανώτερες μορφές ζωής, όπως ψάρια, αμφίβια, θηλαστικά, πίθηκοι και τελικά το ανθρώπινο είδος.

Η εικόνα ενός Σύμπαντος που υπήρξε κάποτε σε ένα πολύ θερμό αρχικό στάδιο και άρχισε να ψύχεται καθώς διασπείρονταν, συμφωνεί με όλα τα δεδομένα των παρατηρήσεων που έχουμε συγκεντρώσει μέχρι σήμερα. Παρ' όλα αυτά, αφήνει αναπάντητα μερικά πολύ σημαντικά ερωτήματα:

(1) Γιατί το Σύμπαν ήταν αρχικά τόσο θερμό;

(2) Γιατί το Σύμπαν είναι τόσο ομοιόμορφο σε μεγάλη κλίμακα; Γιατί φαίνεται το ίδιο σε όλα τα σημεία και προς όλες τις κατευθύνσεις; Ειδικότερα, γιατί η διάχυτη ακτινοβολία μικροκυμάτων φαίνεται να έχει τόσο σταθερή θερμοκρασία ανεξάρτητα από τη διεύθυνση απ' όπου προέρχεται; Μοιάζει σαν να διορθώνουμε τα διαγωνίσματα μιας τάξης και να βρίσκουμε πως όλοι οι μαθητές έχουν δώσει σε μία ερώτηση την ίδια ακριβώς απάντηση· μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι η απάντηση έχει την ίδια ακριβώς προέλευση — κάποιος μαθητής την «κοινοποίησε» στους υπόλοιπους. Αλλά στο μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως δεν μπορεί να έχει υπάρξει αρκετός χρόνος μετά τη Μεγάλη έκρηξη για να διαδοθεί το φως από μία περιοχή του Σύμπαντος σε κάποια άλλη μακριά της (αν και οι περιοχές που βρίσκονται σήμερα πολύ μακριά η μία από την άλλη, στα αρχικά στάδια της διαστολής του Σύμπαντος ήταν πιο κοντά). Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας, αν μέσα σε ένα χρονικό διάστημα δεν προλαβαίνει να διαδοθεί το φως από μια περιοχή σε κάποια άλλη, δεν προλαβαίνει να μεταδοθεί και καμία άλλη πληροφορία. Έτσι δεν υπάρχει κανένας τρόπος που να μπορούν να φτάσουν τελικά οι διάφορες περιοχές του Σύμπαντος στην ίδια ακριβώς θερμοκρασία, εκτός αν, για κάποιον ανεξήγητο λόγο, ξεκινήσουν αρχικά από την ίδια ακριβώς θερμοκρασία.

(3) Γιατί το Σύμπαν άρχισε να διαστέλλεται με ρυθμό τόσο πολύ ίδιο με τον οριακό ρυθμό διαστολής που διαχωρίζει τα μοντέλα όπου το Σύμπαν συνεχίζει να διαστέλλεται για πάντα από τα μοντέλα όπου το Σύμπαν αρχίζει κάποτε να συστέλλεται; (Έτσι, ακόμη και σήμερα, δέκα δισεκατομμύρια χρόνια μετά, ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος συνεχίζει να είναι σχεδόν ίδιος με τον οριακό ρυθμό διαστολής). Αν ένα δευτερόλεπτο μετά τη Μεγάλη έκρηξη ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος ήταν πιο μικρός κατά ένα μόνο μέρος στα εκατό τετράκις εκατομμύρια, το Σύμπαν θα είχε καταρρεύσει πριν ακόμη φτάσει στο σημερινό του μέγεθος.

(4) Παρά το γεγονός ότι το Σύμπαν είναι σε μεγάλη κλίμακα τόσο ομοιόμορφο και ομογενές, περιέχει τοπικές ανομοιομορφίες, όπως τα άστρα και οι γαλαξίες. Φανταζόμαστε πως αυτές δημιουργήθηκαν επειδή σε κάποιες περιοχές το Σύμπαν ήταν κατά τα αρχικά του στάδια πιο πυκνό απ' όσο σε κάποιες άλλες. Ποιά όμως ήταν η προέλευση αυτών των διακυμάνσεων της πυκνότητας;

Η γενική θεωρία της σχετικότητας δεν μπορεί από μόνη της να εξηγήσει αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του Σύμπαντος ή να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, επειδή προβλέπει ότι το Σύμπαν άρχισε να υπάρχει σε κατάσταση άπειρης πυκνότητας στην ανωμαλία της Μεγάλης έκρηξης. Σε κάθε ανωμαλία η γενική θεωρία της σχετικότητας και όλες οι άλλες θεωρίες της φυσικής καταρρέουν δεν μπορεί λοιπόν κανείς να προβλέψει τι θα προέλθει από μια ανωμαλία, όπως η ανωμαλία της Μεγάλης έκρηξης. Όπως εξηγήσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό σημαίνει πως μπορεί κανείς να αποκόψει τη Μεγάλη έκρηξη, και οποιαδήποτε γεγονότα πριν από αυτήν, από τον κύριο κορμό της θεωρίας, επειδή δεν μπορούν να έχουν καμιά συνέπεια σε ό,τι παρατηρούμε σήμερα. Με την έννοια αυτή, λοιπόν, ο χωρόχρονος έχει μία αρχή στη στιγμή της Μεγάλης έκρηξης.

Η φυσική φαίνεται ότι έχει αποκαλύψει ένα σύνολο νόμων που, μέσα στα όρια που θέτει η αρχή της απροσδιοριστίας, μας επιτρέπουν να προβλέψουμε πώς θα είναι το Σύμπαν σε κάποια χρονική στιγμή αν γνωρίζουμε πώς ήταν σε κάποια άλλη. Οι φυσικοί νόμοι μπορεί να είχαν θεσπιστεί αρχικά από το Θεό· φαίνεται όμως ότι ο Θεός άφησε το Σύμπαν να αναπτύσσεται σύμφωνα με αυτούς και δεν παρεμβάλλεται πια στην εξέλιξή του. Αλλά πώς επέλεξε την αρχική κατάσταση, το αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών του Σύμπαντος; Ποιες ήταν οι «οριακές συνθήκες» στην αρχή του χρόνου;

Μια πιθανή απάντηση είναι ότι ο Θεός επέλεξε το αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών του Σύμπαντος για κάποιους λόγους που δεν μπορούμε να ελπίζουμε ότι θα τους καταλάβουμε ποτέ. Κάτι τέτοιο είναι βέβαια μέσα στις δυνατότητες ενός παντοδύναμου όντος· αλλά αν αυτό το ον εγκαινίασε το Σύμπαν με έναν τρόπο που δεν μπορούμε να τον καταλάβουμε, γιατί στη συνέχεια το άφησε να εξελιχθεί σύμφωνα με νόμους που μπορούμε να τους καταλάβουμε; Ολόκληρη η ιστορία της επιστήμης ήταν μια σταδιακή κατανόηση του ότι τα γεγονότα δεν συμβαίνουν με αυθαίρετο τρόπο αλλά αντικατοπτρίζουν μια θεμελιώδη τάξη, που μπορεί να είναι αλλά μπορεί και να μην είναι προϊόν κάποιας θεϊκής δημιουργίας. Είναι λοιπόν φυσικό να υποθέσουμε ότι αυτή η θεμελιώδης τάξη περιλαμβάνει όχι μόνο τους νόμους αλλά και τις συνθήκες στα όρια του χωροχρόνου που προσδιορίζουν την αρχική κατάσταση του Σύμπαντος. Μπορεί να υπάρχουν πολλά μοντέλα του Σύμπαντος με διαφορετικές αρχικές συνθήκες που να υπακούουν όλα στους ίδιους νόμους. Πρέπει όμως να υπάρχει κάποια αρχή που να επιλέγει μια αρχική κατάσταση, επομένως και ένα μοντέλο, για να αναπαραστήσει το Σύμπαν μας.

Μια τέτοια δυνατότητα προσφέρει η άποψη των αποκαλούμενων *χαοτικών οριακών συνθηκών*, που προϋποθέτει παράλληλα ότι το Σύμπαν είναι χωρικά άπειρο. Σε χαοτικές οριακές συνθή-

κες η πιθανότητα να βρούμε, ακριβώς μετά τη Μεγάλη έκρηξη, μια περιοχή του Σύμπαντος με ένα συγκεκριμένο σύνολο χαρακτηριστικών είναι η ίδια, κατά κάποια έννοια, με την πιθανότητα να τη βρούμε με ένα οποιοδήποτε άλλο σύνολο χαρακτηριστικών: δηλαδή η αρχική κατάσταση του Σύμπαντος επιλέγεται εντελώς τυχαία. Αυτό σημαίνει ότι αρχικά το Σύμπαν ήταν πιθανότατα εντελώς χαοτικό και αποδιοργανωμένο και όχι τακτοποιημένο και οργανωμένο, επειδή τα χαοτικά και αποδιοργανωμένα σύνολα χαρακτηριστικών που θα ήταν δυνατό να υπάρχουν στο Σύμπαν είναι πολύ περισσότερα από τα τακτοποιημένα και οργανωμένα. (Αν κάθε σύνολο χαρακτηριστικών είναι το ίδιο πιθανό, είναι πολύ πιθανότερο η αρχική κατάσταση του Σύμπαντος να ήταν χαοτική και αποδιοργανωμένη, απλώς και μόνον γιατί τα χαοτικά και αποδιοργανωμένα σύνολα χαρακτηριστικών είναι πολύ περισσότερα από τα τακτοποιημένα και οργανωμένα). Είναι δύσκολο να καταλάβουμε πώς τόσο χαοτικές και αποδιοργανωμένες αρχικές συνθήκες θα οδηγούσαν κάποτε σε ένα Σύμπαν τόσο ομοιόμορφο και ομαλό σε μεγάλη κλίμακα όσο το δικό μας σήμερα. Θα περίμενε επίσης κανείς ότι οι διακυμάνσεις της πυκνότητας σε ένα τέτοιο Σύμπαν θα δημιουργούσαν περισσότερες αρχέγονες μαύρες τρύπες από το ανώτατο όριο που προσδιορίστηκε μετά τις παρατηρήσεις της διάχυτης ακτινοβολίας ακτίνων γ.

Αν πραγματικά το Σύμπαν είναι χωρικά άπειρο, πρέπει να υπάρχουν και κάποιες περιοχές που αρχικά ήταν ομοιόμορφες και ομαλές. Είναι λίγο σαν τον πίθηκο που χτυπάει τα πλήκτρα της γραφομηχανής — τα πιο πολλά από αυτά που γράφονται θα είναι σειρές χαρακτήρων χωρίς κανένα νόημα, αλλά πολύ σπάνια, από καθαρή τύχη, θα παρουσιαστεί στη σελίδα της γραφομηχανής ένα από τα ποιήματα του Σαίξπηρ. Μήπως λοιπόν με κάποιο παρόμοιο τρόπο, στην περίπτωση του Σύμπαντος, ζούμε σε μια σπανιότητα περιοχή που από *καθαρή τύχη* είναι ομοιόμορφη και

ομαλή; Κάτι τέτοιο μπορεί να φαίνεται απίθανο, επειδή αυτές οι περιοχές θα είναι πολύ λιγότερες από τις ανομοιόμορφες. Ας υποθέσουμε όμως ότι οι ομοιόμορφες και ομαλές περιοχές είναι οι μόνες που επιτρέπουν να σχηματιστούν άστρα και γαλαξίες και να εξελιχθούν πολυσύνθετοι αναπαραγόμενοι και πολλαπλασιαζόμενοι οργανισμοί, ικανοί να θέσουν κάποτε το ερώτημα: Γιατί το Σύμπαν είναι τόσο ομοιόμορφο και ομαλό; Η υπόθεση αυτή είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής της ονομαζόμενης *ανθρωπικής αρχής*, που μπορεί να παραφραστεί σαν «Αυτό (το Σύμπαν) είναι αυτό που είναι επειδή εμείς (οι άνθρωποι) είμαστε αυτοί που είμαστε. Παρατηρούμε το Σύμπαν όπως είναι επειδή εμείς υπάρχουμε».

Υπάρχουν δύο εκδοχές της ανθρωπικής αρχής, η *ασθενής* και η *ισχυρή*. Η ασθενής ανθρωπική αρχή αναφέρει ότι σε ένα πολύ μεγάλο ή άπειρο στο χώρο και το χρόνο Σύμπαν οι κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη νοήμονος ζωής θα υπάρξουν μόνο σε ορισμένες περιοχές περιορισμένες στο χώρο και το χρόνο. (Το ίδιο θα συμβαίνει και αν το Σύμπαν είναι πολύ μεγάλο ή άπειρο μόνο στο χώρο ή μόνο στο χρόνο). Τα νοήμονα όντα που θα βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές δεν θα πρέπει να εκπλήσσονται όταν ανακαλύπτουν ότι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της περιοχής τους πληρούν τις κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξή τους. Είναι κάπως σαν έναν πλούσιο άνθρωπο που ζει σε περιοχή πλουσίων και δεν βλέπει γύρω του καμία ένδειξη φτώχειας.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της ασθενούς ανθρωπικής αρχής είναι η «εξήγηση» του γιατί η Μεγάλη έκρηξη συνέβη πριν από δέκα δισεκατομμύρια χρόνια — *τόσα περίπου χρόνια χρειάζονται για να αναπτυχθεί η νοήμων ζωή*. Όπως περιγράψαμε προηγουμένως, στην αρχή σχηματίστηκαν οι πρώτες γενιές άστρων. Αυτά τα άστρα μετέτρεψαν κάποιο μέρος του αρχικού υδρογόνου

και ηλίου σε στοιχεία όπως ο άνθρακας και το οξυγόνο, που αποτέλεσαν τη βάση της ζωής. Μετά αυτά τα άστρα οδηγήθηκαν σε μια έκρηξη υπερκαινοφανούς, και τα υπολείμματα της έκρηξης σχημάτισαν άλλα άστρα και πλανήτες, όπως τον Ήλιο και τη Γη, που έχουν ηλικία περίπου πέντε δισεκατομμυρίων ετών. Στα πρώτα ένα ή δύο δισεκατομμύρια χρόνια η Γη ήταν τόσο θερμή που κανένα πολυσύνθετο μακρομόριο δεν μπορούσε να διατηρηθεί και να αναπτυχθεί. Τα επόμενα τρία δισεκατομμύρια χρόνια καταναλώθηκαν στην αργή διαδικασία της εξέλιξης, που οδήγησε από τους απλούστερους οργανισμούς στα νοήμονα όντα, τα οποία σήμερα είναι ικανά να μετρούν την ηλικία του Σύμπαντος και να θέτουν ερωτήματα σχετικά με τη μοίρα του, το απώτερο παρελθόν και το μακρινό μέλλον του.

Λίγοι επιστήμονες αρνούνται την αξία ή χρησιμότητα της ασθενούς ανθρωπικής αρχής. Μερικοί όμως προχωρούν περισσότερο, προτείνοντας μια ισχυρή εκδοχή της ανθρωπικής αρχής. Σύμφωνα με αυτήν υπάρχουν πολλά διαφορετικά «Σύμπαντα» — ή και πολλές εντελώς διαφορετικές περιοχές ενός Σύμπαντος —, το καθένα με το δικό του αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών και ίσως και με τους δικούς του φυσικούς νόμους. Στα περισσότερα οι συνθήκες δεν επιτρέπουν να αναπτυχθούν πολυσύνθετα μακρομόρια και οργανισμοί· μόνο στα λίγα που έχουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του δικού μας Σύμπαντος μπορούν να αναπτυχθούν νοήμονα όντα ικανά να θέτουν το ερώτημα: «Γιατί αυτό το Σύμπαν είναι αυτό που είναι;» Η απάντηση τότε είναι απλή: «Αν δεν ήταν αυτό που είναι εμείς δεν θα ήμασταν αυτοί που είμαστε!». Αν ήταν διαφορετικό, δεν θα υπήρχαμε!

Οι νόμοι της φυσικής, αυτοί που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα, περιέχουν πολλές θεμελιώδεις αριθμητικές ποσότητες, όπως τον αριθμό που περιγράφει την πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης φωτονίων από τα ηλεκτρόνια ή τον αριθμό που περιγράφει το πόσο μεγαλύτερη μάζα έχουν τα πρωτόνια από τα ήλεκτρο-

νια. Δεν μπορούμε, τουλάχιστον προς το παρόν, να προβλέψουμε την τιμή αυτών των αριθμών θεωρητικά· είμαστε αναγκασμένοι να τη μετράμε πειραματικά. Ίσως κάποια μέρα ανακαλύψουμε την πλήρη ενιαία θεωρία που θα προβλέπει όλες αυτές τις αριθμητικές ποσότητες. Αλλά είναι επίσης πιθανό ότι κάποιες από αυτές ή και όλες τους μεταβάλλονται στα διάφορα «Σύμπαντα» ή στις εντελώς διαφορετικές περιοχές του Σύμπαντος. Το αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι οι τιμές αυτών των αριθμών φαίνονται σαν να ανταποκρίνονται με μεγάλη ακρίβεια στις απαραίτητες συνθήκες για την ανάπτυξη της ζωής. Για παράδειγμα, αν η πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης φωτονίων από τα ηλεκτρόνια ήταν ελάχιστα μεγαλύτερη ή μικρότερη, τα άστρα ή θα είχαν εκραγεί ή δεν θα μπορούσαν να μετατρέψουν το υδρογόνο και το ήλιο σε άνθρακα και οξυγόνο. Θα ήταν βέβαια δυνατό να υπάρχουν άλλες μορφές νοήμονος ζωής που δεν μπορούν να τις φανταστούν ούτε οι συγγραφείς βιβλίων επιστημονικής φαντασίας· αυτές οι διαφορετικές μορφές νοήμονος ζωής μπορεί να μη χρειάζονται το φως ενός άστρου όπως ο Ήλιος ή τα βαρύτερα στοιχεία, όπως ο άνθρακας και το οξυγόνο, που εκτινάσσονται στον διαστημικό χώρο όταν εκρηγνύονται τα άστρα. Παρ' όλα αυτά φαίνεται ότι είναι σχετικά περιορισμένες οι τιμές των αριθμών που καθορίζουν τις απαραίτητες συνθήκες για την ανάπτυξη οποιασδήποτε μορφής νοήμονος ζωής. Οι περισσότερες τιμές θα αντιστοιχούσαν σε κάποιο Σύμπαν που αν και μπορεί να ήταν πολύ όμορφο, δεν θα περιείχε κανένα ον ικανό να θαυμάσει αυτήν την ομορφιά. Αυτό μπορούμε να το θεωρήσουμε ή σαν ένδειξη ενός θεϊκού σκοπού στη δημιουργία του Σύμπαντος και στην επιλογή των νόμων της φύσης ή σαν επιχείρημα που υποστηρίζει την ισχυρή ανθρωπική αρχή.

Μπορεί κανείς να διατυπώσει αρκετές αντιρρήσεις στην ισχυρή ανθρωπική αρχή. Μια πρώτη αντίρρηση αφορά την υπόθεση ότι υπάρχουν πολλά διαφορετικά «Σύμπαντα» ή πολλές εντελώς

διαφορετικές περιοχές του Σύμπαντος. Με ποιά έννοια μπορεί να πει κανείς ότι όλα αυτά τα διαφορετικά «Σύμπαντα» υπάρχουν; Αν είναι πραγματικά διαχωρισμένα μεταξύ τους, τα γεγονότα που συμβαίνουν σε κάποιο άλλο Σύμπαν δεν μπορούν να έχουν παρατηρήσιμες συνέπειες στο δικό μας Σύμπαν. Μπορούμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε την αρχή της οικονομίας και να τα αποκόψουμε από τον κύριο κορμό της θεωρίας. Αντίθετα αν δεν είναι διαχωρισμένα μεταξύ τους αλλά είναι απλώς διαφορετικές περιοχές του Σύμπαντος, οι νόμοι της φυσικής πρέπει να είναι οι ίδιοι σε κάθε μία από αυτές τις περιοχές, αλλιώς δεν θα υπήρχε συνέχεια μεταξύ τους και δεν θα μπορούσε κανείς να περάσει από τη μία περιοχή στην άλλη. Στην περίπτωση αυτή, η μόνη διαφορά μεταξύ των διαφορετικών περιοχών θα ήταν τα διαφορετικά αρχικά σύνολα χαρακτηριστικών τους, και έτσι η ισχυρή ανθρωπική αρχή θα εκφυλιζόταν στην ασθενή.

Μια δεύτερη αντίρρηση στην ισχυρή ανθρωπική αρχή είναι ότι κινείται αντίθετα προς το ρεύμα ολόκληρης της ιστορίας της φυσικής. Οι κοσμολογικές θεωρίες εξελίχθηκαν από τη γεωκεντρική θεωρία του Πτολεμαίου και των προδρόμων του στην ηλιοκεντρική θεωρία του Κοπέρνικου και του Γαλιλαίου, και από αυτή στη σύγχρονη εικόνα ότι η Γη είναι ένας κοινός πλανήτης που κινείται γύρω από ένα κοινό άστρο· αυτό το κοινό άστρο είναι ένα από τα εκατό δισεκατομμύρια άστρα ενός κοινού σπειροειδούς γαλαξία, που και αυτός είναι ένας από τους περίπου ένα τρισεκατομμύριο γαλαξίες του ορατού Σύμπαντος. Σύμφωνα όμως με την ισχυρή ανθρωπική αρχή, ολόκληρη αυτή η απέραντη κατασκευή υπάρχει απλώς και μόνον για χάρη μας! Είναι πολύ δύσκολο να πιστέψει κανείς κάτι τέτοιο. Το ηλιακό μας σύστημα είναι βέβαια απαραίτητο για την ύπαρξής μας και θα μπορούσε να το πει κανείς αυτό και για ολόκληρο το γαλαξία μας, αφού η προηγούμενη γενιά άστρων είναι απαραίτητη για τη δημιουργία των βαρύτερων στοιχείων. Αλλά δεν φαίνεται ότι υπάρχει

κάποια ανάγκη που θα μπορούσε να δικαιολογήσει την ύπαρξη όλων αυτών των γαλαξιών και την ομοιόμορφη και ομαλή κατανομή τους στο Σύμπαν.

Θα μέναμε περισσότερο ικανοποιημένοι από την ανθρωπική αρχή, τουλάχιστον από την ασθενή εκδοχή της, αν μπορούσαμε να δείξουμε ότι πολλά διαφορετικά αρχικά σύνολα χαρακτηριστικών του Σύμπαντος θα μπορούσαν να εξελιχθούν ώστε να οδηγήσουν τελικά σε ένα Σύμπαν όπως αυτό που παρατηρούμε σήμερα γύρω μας. Αν πραγματικά συμβαίνει κάτι τέτοιο, ένα Σύμπαν που εξελίχθηκε από κάποιο είδος τυχαίων αρχικών συνθηκών θα περιέχει μερικές περιοχές ομοιόμορφες και ομαλές, και επίσης κατάλληλες για την εμφάνιση και εξέλιξη της ζωής. Στην αντίθετη περίπτωση, οι αρχικές συνθήκες του Σύμπαντος θα έπρεπε να είχαν επιλεγεί εξαιρετικά προσεχτικά ώστε να οδηγήσουν σε κάτι όπως αυτό που παρατηρούμε σήμερα γύρω μας. Σύμφωνα με το μοντέλο της θερμής Μεγάλης έκρηξης δεν θα υπήρχε αρκετός χρόνος για να μεταδοθεί η θερμότητα από μία απομακρυσμένη περιοχή σε κάποια άλλη. Αυτό σημαίνει πως όλες οι περιοχές του Σύμπαντος θα έπρεπε να είχαν από την αρχή την ίδια ακριβώς θερμοκρασία· έτσι θα μπορούσε να εξηγηθεί το γεγονός ότι η διάχυτη ακτινοβολία μικροκυμάτων έχει σήμερα ακριβώς την ίδια θερμοκρασία σε οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν κοιτάξουμε. Ο αρχικός ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος θα έπρεπε επίσης να έχει επιλεγεί με μεγάλη ακρίβεια ώστε να διατηρείται ακόμη και σήμερα τόσο πολύ ίδιος με τον οριακό ρυθμό διαστολής που χρειάζεται για να αποτραπεί η βαρυτική κατάρρευση. Όλα αυτά σημαίνουν ότι οι αρχικές συνθήκες του Σύμπαντος θα έπρεπε πραγματικά να είχαν επιλεγεί εξαιρετικά προσεχτικά, αν το μοντέλο της θερμής Μεγάλης έκρηξης περιγράφει σωστά την εξέλιξη του Σύμπαντος αμέσως μετά την αρχή του χρόνου. Θα ήταν όμως πολύ δύσκολο να εξηγήσει κανείς γιατί το Σύμπαν άρχισε να υπάρχει με αυτόν ακριβώς τον τρόπο, εκτός αν επικαλεστεί μία Θεία Πρόνοια που αποσκοπούσε στη δημιουργία νοημόνων όντων

όπως εμείς.

Σε μία προσπάθεια να κατασκευαστεί ένα μοντέλο του Σύμπαντος όπου πολλά διαφορετικά αρχικά σύνολα χαρακτηριστικών θα μπορούσαν να εξελιχθούν σε κάτι σαν το σημερινό Σύμπαν, ο φυσικός Alan Guth από το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (Μ.Ι.Τ.) υπέθεσε ότι σε κάποιο αρχικό στάδιο του Σύμπαντος υπήρξε μία περίοδος εξαιρετικά μεγάλης διαστολής. Η διαστολή αυτή ονομάστηκε «πληθωριστική» επειδή κατά τη διάρκεια της ο ρυθμός διαστολής ήταν επιταχυνόμενος και όχι επιβραδυνόμενος όπως σήμερα. Ο Alan Guth υπολόγισε ότι η ακτίνα του Σύμπαντος μεγάλωσε κατά ένα εννέακις εκατομμύριο φορές (η μονάδα ακολουθούμενη από 30 μηδενικά), μέσα σε ένα πάρα πολύ μικρό κλάσμα του δευτερολέπτου.

Ο Guth υπέθεσε ότι το Σύμπαν άρχισε να υπάρχει μετά τη Μεγάλη έκρηξη σε μία πολύ θερμή αλλά και πολύ χαοτική κατάσταση. Οι μεγάλες θερμοκρασίες σημαίνουν ότι τα σωματίδια κινούνταν πολύ γρήγορα και είχαν πολύ μεγάλες ενέργειες. Όπως προαναφέραμε, σε τόσο μεγάλες θερμοκρασίες οι ισχυρές και ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις και οι ηλεκτρομαγνητικές ενοποιούνται σε μια ενιαία δύναμη. Καθώς το Σύμπαν διαστελλόταν, άρχισε παράλληλα να ψύχεται, και οι ενέργειες των σωματιδίων μίκραιναν. Κάποτε συνέβη αυτό που ονομάζεται «αλλαγή φάσης» και η συμμετρία μεταξύ των δυνάμεων καταστράφηκε, η ισχυρή δύναμη έγινε διαφορετική από τις ηλεκτρομαγνητικές και τις ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις. Ένα γνωστό παράδειγμα μιας αλλαγής φάσης είναι η μετατροπή του νερού που ψύχεται σε πάγο. Το νερό όσο είναι υγρό είναι συμμετρικό, φαίνεται δηλαδή το ίδιο σε κάθε σημείο και προς κάθε κατεύθυνση. Όταν όμως σχηματιστούν οι κρύσταλλοι του πάγου που βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις και έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό, το νερό θα φαίνεται διαφορετικό σε διάφορα σημεία και προς διάφορες κατευθύνσεις. Η ψύξη του θα έχει καταστρέψει την συμμετρία του.

Στην περίπτωση του νερού μπορούμε, αν είμαστε προσεχτικοί, να το «υπερψύξουμε», να το ψύξουμε δηλαδή με τέτοιο τρόπο ώστε να μη σχηματιστεί πάγος, ακόμη και όταν η θερμοκρασία κατεβεί κάτω από το σημείο πήξεως (0°C). Ο Guth υπέθεσε ότι το Σύμπαν μπορεί να παρουσιάσει ανάλογη συμπεριφορά: η θερμοκρασία του μπορεί να κατεβεί κάτω από την οριακή τιμή χωρίς να καταστραφεί η συμμετρία μεταξύ των δυνάμεων. Αν είχε συμβεί κάτι τέτοιο, το Σύμπαν θα βρισκόταν σε μια ασταθή κατάσταση, με περισσότερη ενέργεια από όση θα είχε κανονικά αν είχε καταστραφεί η συμμετρία. Ο Guth έδειξε ότι αυτή η πρόσθετη ενέργεια ασκεί αντιβαρυντική επίδραση: το αποτέλεσμα της είναι ίδιο με αυτό της *κοσμολογικής σταθεράς* του Αϊνστάιν. (Ο Αϊνστάιν εισήγαγε την κοσμολογική σταθερά στη γενική θεωρία της σχετικότητας όταν προσπαθούσε να κατασκευάσει ένα στατικό μοντέλο του Σύμπαντος). Αφού το Σύμπαν θα βρίσκεται ήδη σε μια διαδικασία διαστολής, όπως στο μοντέλο της θερμής Μεγάλης Έκρηξης, η απωστική επίδραση αυτής της κοσμολογικής σταθεράς θα αναγκάσει το Σύμπαν να διασταλλεί με ένα συνεχώς αυξανόμενο, επιταχυνόμενο ρυθμό. Ακόμη και στις περιοχές όπου θα υπάρχουν περισσότερα σωματίδια ύλης από τον μέσο όρο, η βαρυντική έλξη της ύλης θα εξακολουθεί να είναι μικρότερη από την άπωση που θα οφείλεται στην επίδραση της κοσμολογικής σταθεράς. Έτσι και αυτές οι περιοχές θα διαστέλλονται με επιταχυνόμενο πληθωριστικό τρόπο και τα σωματίδια ύλης θα απομακρύνονται όλο και περισσότερο μεταξύ τους. Θα έχουμε έτσι μια εικόνα ενός διαστελλόμενου Σύμπαντος που περιέχει πολύ λίγα σωματίδια ύλης και βρίσκεται ακόμη στην ασταθή κατάσταση «υπέρψυξης». Οποιοσδήποτε αρχικός ανομοιομορφίες κάποιων περιοχών του Σύμπαντος θα έχουν εξαλειφθεί από τη διαδικασία της διαστολής, ακριβώς όπως οι πτυχές και ανομοιομορφίες του ελαστικού ενός μπαλονιού εξαφανίζονται καθώς το μπαλόνι διαστέλλεται. Με τον τρόπο αυτό

η σημερινή ομοιόμορφη κατάσταση του Σύμπαντος θα μπορούσε να έχει προέλθει από πολλές διαφορετικές ανομοιόμορφες καταστάσεις.

Σε ένα τέτοιο Σύμπαν, όπου η διαστολή επιταχύνθηκε από την επίδραση μιας κοσμολογικής σταθεράς (και δεν επιβραδύνθηκε από την επίδραση της βαρυτικής έλξης της ύλης), θα υπήρχε αρκετός χρόνος στα αρχικά στάδια του για να διαδοθεί το φως από μια περιοχή σε κάποια άλλη, επειδή αυτές οι περιοχές θα βρίσκονταν πολύ πιο κοντά μεταξύ τους. (Η περιοχή του Σύμπαντος που παρατηρούμε σήμερα θα έχει προέλθει από μια πολύ μικρότερη περιοχή απ' όση προβλεπόταν για ένα Σύμπαν όπου δεν θα είχε υπάρξει τέτοια διαστολή). Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση στο πρόβλημα του γιατί οι διαφορετικές περιοχές του Σύμπαντος έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Επιπλέον, ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος πλησιάζει αυτόματα στον οριακό ρυθμό διαστολής που χρειάζεται για να αποτραπεί η βαρυτική κατάρρευση. Αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος διατηρείται ακόμη και σήμερα τόσο ίδιος με τον οριακό ρυθμό διαστολής, χωρίς να χρειάζεται να υποθέσουμε ότι ο αρχικός ρυθμός διαστολής είχε επιλεγεί πολύ προσεχτικά.

Η ιδέα της πληθωριστικής διαστολής του Σύμπαντος θα μπορούσε επίσης να εξηγήσει γιατί υπάρχει τόσο πολλή ύλη στο Σύμπαν. Υπάρχουν περίπου εκατό εικοσιπεντάκις εκατομμύρια (η μονάδα ακολουθούμενη από 80 μηδενικά) σωματίδια στην περιοχή του Σύμπαντος που μπορούμε να παρατηρήσουμε. Από πού προήλθαν όλα αυτά; Η απάντηση είναι ότι, σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, τα σωματίδια μπορεί να δημιουργηθούν από την ενέργεια με τη διαδικασία σχηματισμού ζευγών σωματιδίων /αντισωματιδίων. Αλλά αυτή η απάντηση μεταθέτει το πρόβλημα στο από πού προέρχεται όλη αυτή η ενέργεια. Η απάντηση είναι ότι προέρχεται *από το μηδέν*. Η συνολική ενέργεια του

Σύμπαντος είναι ακριβώς ίση με το μηδέν και όμως η διαθέσιμη ενέργεια για την παραγωγή ύλης είναι τελικά πάρα πολύ μεγάλη! Ας δούμε πώς το μοντέλο της πληθωριστικής διαστολής εξηγεί αυτόν τον παράξενο ισολογισμό. Η ύλη στο Σύμπαν απο-τελείται από θετική ενέργεια. Αλλά η ύλη έλκεται εξαιτίας της βαρύτητας. Όταν δύο σώματα γειτνιάζουν έχουν μικρότερη ενέργεια απ' όση όταν βρίσκονται μακριά το ένα από το άλλο. Αυτό συμβαίνει επειδή πρέπει να καταναλώσουμε ενέργεια για να τα αναγκάσουμε να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο, αντί-θετα από τη βαρύτητα που τα αναγκάζει να πλησιάσουν μεταξύ τους. Έτσι, με κάποια έννοια, το βαρυτικό πεδίο έχει αρνητική ενέργεια. Στην περίπτωση ενός Σύμπαντος που είναι προσεγγι-στικά ομοιόμορφο στο χώρο μπορεί να αποδειχθεί ότι αυτή η αρνητική βαρυτική ενέργεια εξουδετερώνει ακριβώς τη θετική ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από την ύλη. Έτσι η συνολική ενέργεια του Σύμπαντος είναι ίση με το μηδέν.

Αλλά δύο φορές μηδέν ίσον μηδέν. Έτσι το Σύμπαν μπορεί να διπλασιάσει την ποσότητα της θετικής ενέργειας της ύλης και την ποσότητα της αρνητικής βαρυτικής ενέργειας και παρ' όλα αυτά η συνολική ενέργειά του να συνεχίσει να είναι ακριβώς ίση με το μηδέν (δηλαδή να διατηρείται η ίδια, έτσι λοιπόν δεν παραβιάζεται ο νόμος της διατήρησης της ενέργειας). Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην κανονική διαστολή του Σύμπαντος, όπου η πυκνότητα της θετικής ενέργειας της ύλης μειώνεται καθώς το Σύμπαν μεγαλώνει. Συμβαίνει όμως στην πληθωριστι-κή διαστολή γιατί σε αυτή η πυκνότητα ενέργειας της «υπέρφω-χρης» κατάστασης παραμένει σταθερή στη διάρκεια της φάσης διαστολής: όταν το Σύμπαν διπλασιάζεται σε μέγεθος, διπλασιά-ζεται και η θετική ενέργεια της ύλης και η αρνητική βαρυτική ενέργεια, έτσι η συνολική ενέργεια παραμένει ίση με το μηδέν. Κατά τη διάρκεια της πληθωριστικής διαστολής το μέγεθος του Σύμπαντος μεγαλώνει πάρα πολύ, οπότε και η διαθέσιμη ενέρ-

γεια για την παραγωγή ύλης γίνεται πάρα πολύ μεγάλη. Με τον τρόπο αυτό εξηγείται η ύπαρξη τόσο πολλής ύλης στο Σύμπαν, ενώ η συνολική ενέργεια του είναι ακριβώς ίση με το μηδέν. Όπως παρατήρησε ο Guth, «λέγεται ότι τα ωραία πράγματα είναι και ακριβά και δεν δίνονται δωρεάν. Αλλά τελικά ολόκληρο το Σύμπαν δίνεται εντελώς δωρεάν».

Το Σύμπαν δεν διαστέλλεται σήμερα με πληθωριστικό τρόπο. Πρέπει λοιπόν να λειτούργησε κάποιος μηχανισμός που εκμηδένισε τη μεγάλη επίδραση της κοσμολογικής σταθεράς, αλλάζοντας έτσι το ρυθμό διαστολής του Σύμπαντος: ο επιταχυνόμενος πληθωριστικός ρυθμός διαστολής έδωσε τη θέση του στον επιβραδυνόμενο από τη βαρύτητα ρυθμό διαστολής που παρατηρούμε σήμερα. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι στην πληθωριστική διαστολή η συμμετρία μεταξύ των δυνάμεων καταστρέφεται τελικά, ακριβώς όπως το «υπέρφυχρο» νερό γίνεται τελικά πάγος. Η πρόσθετη ενέργεια της ασταθούς κατάστασης απελευθερώνεται και θερμαίνει το Σύμπαν σε μια θερμοκρασία ακριβώς κάτω από την οριακή θερμοκρασία καταστροφής της συμμετρίας μεταξύ των δυνάμεων. Αφού η πρόσθετη ενέργεια εξαντλείται, η επίδραση της κοσμολογικής σταθεράς εκμηδενίζεται. Ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος θα αρχίσει να επιβραδύνεται εξαιτίας της επίδρασης της βαρυτικής έλξης και το Σύμπαν θα αρχίσει να ψύχεται, ακριβώς όπως συμβαίνει στο μοντέλο της θερμής Μεγάλης Έκρηξης. Από το τέλος λοιπόν της πληθωριστικής διαστολής και μετά, οι προβλέψεις του πληθωριστικού μοντέλου είναι οι ίδιες με τις προβλέψεις του μοντέλου της θερμής Μεγάλης Έκρηξης. Το πληθωριστικό μοντέλο όμως εξηγεί, όπως είδαμε, το πώς οι διάφορες περιοχές του Σύμπαντος μπορούσαν να έχουν τόσο ίδια θερμοκρασία μεταξύ τους και γιατί ο ρυθμός διαστολής ήταν ίδιος με τον οριακό ρυθμό.

Στο πληθωριστικό μοντέλο του Guth υποτίθεται πως η αλλαγή φάσης (δηλαδή η στιγμή καταστροφής της συμμετρίας)

συνέβη πολύ γρήγορα, σαν την ξαφνική εμφάνιση των κρυστάλλων του πάγου στο πολύ ψυχρό νερό. Η ιδέα ήταν ότι οι αφυσαλίδες» της νέας φάσης της κατεστραμμένης συμμετρίας δημιουργήθηκαν μέσα στην παλαιά φάση, όπως οι φυσαλίδες του ατμού που δημιουργούνται μέσα στο νερό όταν αρχίζει να βράζει. Οι φυσαλίδες αυτές άρχισαν σταδιακά να μεγαλώνουν και να ενώνονται η μία με την άλλη, μέχρις ότου ολόκληρο το Σύμπαν καλύφθηκε από τη νέα φάση. Το πρόβλημα στο μοντέλο του Guth ήταν, όπως δείξαμε εγώ και μερικοί άλλοι φυσικοί, ότι στη διάρκεια της φάσης της πληθωριστικής διαστολής, το Σύμπαν θα διαστελλόταν τόσο γρήγορα που ακόμη και αν οι φυσαλίδες μεγάλωναν με την ταχύτητα του φωτός, θα απομακρύνονταν μεταξύ τους και δεν θα προλάβαιναν να ενωθούν. Μετά τον Guth κάποιοι άλλοι φυσικοί, ο Andrei Linde στη Σοβιετική Ένωση και οι Paul Steinhardt και Andreas Albrecht στις Η.Π.Α., υπέθεσαν ότι αυτές οι φυσαλίδες θα μπορούσαν να είναι τόσο μεγάλες ώστε ολόκληρη η περιοχή του ορατού Σύμπαντος όπου βρισκόμαστε να περιέχεται σε μία μόνο τέτοια φυσαλίδα. Η ιδέα αυτή προϋπέθετε ότι η αλλαγή από τη φάση της συμμετρίας στη φάση της κατεστραμμένης συμμετρίας πρέπει να είχε συμβεί πολύ αργά στο εσωτερικό της φυσαλίδας, κάτι τέτοιο βρισκόταν σε συμφωνία με τις προβλέψεις των Μεγάλων Ενοποιημένων Θεωριών. Αυτό το τροποποιημένο μοντέλο ονομάζεται «*νέο*» *πληθωριστικό μοντέλο* και βασίζεται ακριβώς στην αργή καταστροφή της συμμετρίας, σε αντίθεση με το «*παλαιό*» *πληθωριστικό μοντέλο* του Guth, όπου η καταστροφή της συμμετρίας συνέβη πολύ γρήγορα με τη δημιουργία των φυσαλίδων.

Το νέο πληθωριστικό μοντέλο ήταν μια καλή προσπάθεια να εξηγηθεί γιατί το Σύμπαν είναι αυτό που είναι. Αρκετοί φυσικοί όμως, ανάμεσά τους κι εγώ, δείξαμε ότι το μοντέλο αυτό προέβλεπε πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία της διάχυτης ακρινοβολίας μικροκυμάτων απ' όσες έχουν παρατηρηθεί.

Κάποιες άλλες επίσης εργασίες αμφισβήτησαν το κατά πόσο θα μπορούσε να είχε υπάρξει στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος μια αλλαγή φάσης ανάλογου είδους με την αλλαγή φάσης αυτού του μοντέλου. Κατά την προσωπική μου γνώμη, το νέο πληθωριστικό μοντέλο είναι σήμερα μία νεκρή επιστημονική θεωρία, αν και πολλοί φυσικοί δεν φαίνεται να έχουν πληροφορηθεί το θάνατο της και συνεχίζουν να δημοσιεύουν εργασίες πάνω σε αυτήν.

Ένα καλύτερο μοντέλο, το *χαοτικό πληθωριστικό μοντέλο*, δημιουργήθηκε από τον Linde το 1983. Σύμφωνα με αυτό δεν υπήρξε αλλαγή φάσης ή «υπέρψυξη» του Σύμπαντος κάτω από την οριακή τιμή όπου συμβαίνει η καταστροφή της συμμετρίας του. Στη θέση τους υπάρχει ένα πεδίο με σπιν 0, που οι κβαντικές διακυμάνσεις του επιτρέπουν να έχει πολύ μεγάλες τιμές σε ορισμένες περιοχές του Σύμπαντος κατά τα αρχικά του στάδια. Η ενέργεια του πεδίου στις περιοχές αυτές θα λειτουργεί ως κοσμολογική σταθερά: θα ασκεί αντιβαρυτική απωστική επίδραση, αναγκάζοντας έτσι αυτές τις περιοχές να διαστέλλονται με πληθωριστικό τρόπο. Καθώς θα διαστέλλονται, η ενέργεια του πεδίου θα μειώνεται με αργό ρυθμό, μέχρις ότου η πληθωριστική διαστολή μεταβληθεί σε επιβραδυνόμενη διαστολή, όπως αυτή που προβλέπει το μοντέλο της θερμής Μεγάλης έκρηξης. Μια από αυτές τις περιοχές θα γίνει το μέρος του Σύμπαντος που παρατηρούμε σήμερα. Το χαοτικό πληθωριστικό μοντέλο έχει όλα τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων πληθωριστικών μοντέλων, αλλά δεν εξαρτάται από την αμφίβολη αλλαγή φάσης. Επίσης προβλέπει λογικές διαφορές στη θερμοκρασία της διάχυτης ακτινοβολίας μικροκυμάτων, οι οποίες μάλιστα συμφωνούν με τις παρατηρήσεις.*

* Ο Linde σε ένα πρόσφατο άρθρο του (1988) υποστηρίζει ότι, αν δεν παρεμβληθεί η επίδραση μίας ελάχιστης κοσμολογικής σταθεράς, η περιοχή του Σύμπαντος όπου ζούμε θα εξελιχθεί σε μία μαύρη τρύπα που θα μεγαλώσει με έναν επιταχυνόμενο πληθω-

Η έρευνα για τα πληθωριστικά μοντέλα έδειξε ότι η σημερινή κατάσταση του Σύμπαντος μπορεί να προήλθε από πολλά διαφορετικά αρχικά σύνολα χαρακτηριστικών. Κάτι τέτοιο είναι σημαντικό επειδή δείχνει ότι δεν χρειάστηκε να επιλεγεί πολύ προσεκτικά η αρχική κατάσταση του μέρους του Σύμπαντος όπου κατοικούμε. Έτσι μπορούμε, αν θέλουμε, να χρησιμοποιήσουμε την ασθενή ανθρωπική αρχή για να εξηγήσουμε γιατί το Σύμπαν είναι σήμερα αυτό που είναι. Δεν θα μπορούσε όμως *κάθε* αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών να έχει οδηγήσει σε ένα Σύμπαν όπως αυτό που παρατηρούμε. Αυτό είναι εύκολο να το δείξουμε: ας θεωρήσουμε μια πολύ διαφορετική κατάσταση για το Σύμπαν από αυτήν που παρατηρούμε σήμερα, όπως για παράδειγμα μια κατάσταση ενός ανομοιογενούς Σύμπαντος. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους της φυσικής και να εξελίξουμε αυτό το Σύμπαν προς την αντίστροφη φορά του χρόνου: έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε το δικό του αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών. (Σύμφωνα μάλιστα με τα θεωρήματα για τις ανωμαλίες της κλασικής γενικής σχετικότητας, και στην περίπτωση αυτή θα υπάρχει μια ανωμαλία Μεγάλης Έκρηξης). Αν μετά εξελίξουμε αυτό το Σύμπαν σύμφωνα και πάλι με τους νόμους της φυσικής προς την κανονική φορά του χρόνου, θα φτάσουμε κάποτε στο ίδιο ανομοιογενές Σύμπαν από όπου ξεκινήσαμε αρχικά. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσαν να έχουν υπάρξει διαφορετικά αρχικά σύνολα χαρακτηριστικών που θα οδηγούσαν

ριστικό ρυθμό. Μερικά όμως τμήματα αυτής της μαύρης τρύπας δεν θα καταρρεύσουν: η μαύρη τρύπα θα περιέχει στο εσωτερικό της κάποιες ομαλές περιοχές, μεγάλες σαν ένα πληθωριστικά διαστελλόμενο Σύμπαν, που με την πάροδο του χρόνου θα αναπαράγονται και θα πολλαπλασιάζονται. Ο συγγραφέας καταλήγει με μία παρήγορη διαπίστωση: Εάν κάποια νοήμονα όντα καταφέρουν να μετακινηθούν σε αυτές τις ομαλές περιοχές, η ζωή θα μπορέσει να επιβιώσει, μέσα στη νεκρική σαρκοφάγο μιας μαύρης τρύπας! (Σ.τ.μ.).

σε διαφορετικά Σύμπαντα από αυτό που παρατηρούμε. Έτσι ακόμη και το πληθωριστικό μοντέλο δεν μας λείπει γιατί το αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών δεν ήταν τέτοιο που να παράγει ένα διαφορετικό Σύμπαν από αυτό που παρατηρούμε. Πρέπει μήπως να στραφούμε στην ανθρωπική αρχή για κάποια εξήγηση; Είναι το Σύμπαν απλώς και μόνον προϊόν τύχης; Μία τέτοια άποψη θα ήταν μία πράξη απελπισίας, μία αποδοχή ότι όλες μας οι ελπίδες για κατανόηση της θεμελιώδους τάξης του Σύμπαντος είναι τελικά μάταιες.

Για να μπορέσει κανείς να καταλάβει πώς άρχισε να υπάρχει το Σύμπαν χρειάζεται φυσικούς νόμους που να ισχύουν από την αρχή του χρόνου. Αν η κλασική θεωρία της γενικής σχετικότητας ήταν σωστή, σύμφωνα με τα θεωρήματα για τις ανωμαλίες που αποδείξαμε ο Penrose και εγώ, η αρχή του χρόνου θα ήταν ένα σημείο με άπειρη πυκνότητα και άπειρη καμπυλότητα του χωροχρόνου. Όλοι λοιπόν οι γνωστοί νόμοι της φυσικής θα κατέρρεαν σε ένα τέτοιο σημείο. Θα μπορούσαμε βέβαια να υποθέσουμε ότι υπάρχουν κάποιοι καινούργιοι νόμοι που ισχύουν στις ανωμαλίες του Σύμπαντος, θα ήταν όμως πολύ δύσκολο να διατυπώσουμε οποιουσδήποτε νόμους που να ισχύουν σε περιοχές σημείων με τέτοια μη κανονική συμπεριφορά, και θα ήταν ακόμη δυσκολότερο να ανακαλύψουμε τους σωστούς νόμους αφού δεν θα υπήρχαν παρατηρήσεις που να μας οδηγήσουν σε αυτούς. Αυτό που υποδεικνύουν τα θεωρήματα για τις ανωμαλίες είναι πως όταν το βαρυτικό πεδίο γίνεται πολύ ισχυρό, τα κβαντικά βαρυτικά φαινόμενα γίνονται σημαντικά: η κλασική θεωρία της βαρύτητας δεν προσφέρει πια σωστή περιγραφή του Σύμπαντος. Έτσι, λοιπόν, για να ερευνήσουμε τα αρχικά στάδια του Σύμπαντος, όπου τα βαρυτικά πεδία είναι πολύ ισχυρά, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια κβαντική θεωρία της βαρύτητας. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι νόμοι που περιγράφει η κβαντική θεωρία μπορεί να ισχύουν παντού, ακόμη και στην αρχή του χρόνου· δεν

χρειάζεται λοιπόν να υποθέσουμε κάποιους καινούργιους νόμους που θα ισχύουν στις ανωμαλίες του Σύμπαντος, αφού σύμφωνα με την κβαντική θεωρία δεν χρειάζεται να υπάρχουν ανωμαλίες στο Σύμπαν.

Δεν διαθέτουμε ακόμη μια πλήρη και συνεπή θεωρία που να συνδυάζει την κβαντική μηχανική με τη βαρύτητα. Γνωρίζουμε όμως με αρκετή βεβαιότητα μερικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μια τέτοια ενιαία θεωρία. Ένα χαρακτηριστικό είναι ότι πρέπει να μπορεί να διατυπωθεί με ένα τρόπο ανάλογο με αυτόν που διατυπώθηκε η κβαντική μηχανική από τον Richard Feynman*. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση ένα σωματίδιο δεν διατρέχει μία μόνο διαδρομή στον χωρόχρονο, όπως στην κλασική μηχανική, λέμε λοιπόν ότι ένα σωματίδιο δεν έχει μία μόνο «ιστορία». Αντίθετα, θεωρείται ότι διατρέχει κάθε δυνατή διαδρομή του χωροχρόνου. Σε κάθε διαδρομή αντιστοιχεί ένα ζεύγος αριθμών, που χαρακτηρίζουν ένα κύμα: ο πρώτος αριθμός αντιπροσωπεύει το μέγεθος του κύματος και ο δεύτερος τη φάση του. Η πιθανότητα να περάσει ένα σωματίδιο από κάποιο συγκεκριμένο σημείο ισούται με το άθροισμα των κυμάτων τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε δυνατή διαδρομή που περνάει από αυτό το σημείο. Γι' αυτό ακριβώς η προσέγγιση Feynman της κβαντικής μηχανικής ονομάζεται «άθροιση ιστοριών» (sum over histories). Στην πραγματικότητα, όταν επιχειρούμε να υπολογίσουμε αυτό το άθροισμα βρισκόμαστε αντιμέτωποι με μεγάλα τεχνικά προβλήματα. Ο μόνος τρόπος να τα αντιμετωπίσουμε είναι να χρησιμοποιήσουμε την έννοια του *φανταστικού χρόνου*. Ο φανταστικός χρόνος μπορεί να φαίνεται σαν να προέρχεται από κάποιο μυθιστόρημα επιστημονικής φαντασίας αλλά στην πραγματικότητα είναι μαθηματική έννοια, ορισμένη με απόλυτα ακριβή τρό-

* Για περισσότερα δείτε το θαυμάσιο βιβλίο του R. Feynman "QED" — εκδ. Τροχαλία, 1987. (Σ.τ.μ.).

πο. Αν πάρουμε κάποιον αριθμό (από αυτούς που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή και ονομάζονται *πραγματικοί* αριθμοί), και τον πολλαπλασιάσουμε με τον εαυτό του, το αποτέλεσμα είναι πάντα ένας θετικός αριθμός. (Για παράδειγμα, 2 επί 2 ίσον 4, όπως και -2 επί -2 ίσον 4). Μπορούμε όμως να ορίσουμε κάποιους άλλους, ειδικούς αριθμούς (οι οποίοι ονομάζονται *φανταστικοί* αριθμοί) που όταν θα τους πολλαπλασιάζουμε με τον εαυτό τους το αποτέλεσμα θα είναι πάντα ένας αρνητικός αριθμός. (Οι αριθμοί αυτοί γράφονται i , $2i$, $3i$..., κ.ο.κ. Ορίζουμε ότι i επί i ίσον -1, $2i$ επί $2i$ ίσον -4, κ.ο.κ.). Για να υπολογίσουμε το άθροισμα των κυμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε δυνατή διαδρομή πρέπει να αθροίσουμε τα αντίστοιχα κύματα διαδρομών που δεν βρίσκονται στον «πραγματικό» χρόνο (δηλαδή το χρόνο που όλοι τον αντιλαμβανόμαστε από την καθημερινή μας εμπειρία και που τον μετράμε χρησιμοποιώντας τους πραγματικούς αριθμούς), αλλά βρίσκονται στον «φανταστικό» χρόνο (δηλαδή το χρόνο που τον μετράμε χρησιμοποιώντας τους φανταστικούς αριθμούς). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγουμε τα τεχνικά προβλήματα των υπολογισμών της προσέγγισης Feynman. Η χρησιμοποίηση του φανταστικού χρόνου έχει ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα και στο χωρόχρονο: η διάκριση μεταξύ του χρόνου και του χώρου εξαφανίζεται εντελώς. Ένας χωρόχρονος όπου οι συντεταγμένες χρόνου των γεγονότων μετρούνται με φανταστικούς αριθμούς ονομάζεται «ευκλείδειος χωρόχρονος», προς τιμήν του Έλληνα μαθηματικού Ευκλείδη που θεμελίωσε τη γεωμετρία των επιφανειών δύο διαστάσεων. Αυτό που σήμερα ονομάζουμε ευκλείδειο χωρόχρονο μοιάζει πολύ με τις επιφάνειες δύο διαστάσεων, μόνο που αντί για δύο διαστάσεις έχει τέσσερις. Στον ευκλείδειο χωρόχρονο δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ της διεύθυνσης στο χρόνο και των διευθύνσεων στο χώρο. Αντίθετα, στον πραγματικό χωρόχρονο όπου οι συντεταγμένες χρόνου των γεγονότων μετρούνται με κοινούς πραγματικούς αριθμούς, υπάρχει διαφορά

και είναι εύκολο να τη διακρίνουμε — η διεύθυνση του χρόνου για όλα τα γεγονότα βρίσκεται στο εσωτερικό του κώνου φωτός, ενώ οι διευθύνσεις του χώρου βρίσκονται στο εξωτερικό του. Όπως όμως και να έχουν τα πράγματα, η χρησιμοποίηση του φανταστικού χρόνου και του ευκλείδειου χωροχρόνου στην κβαντική θεωρία που δεν περιλαμβάνει τη βαρύτητα μπορεί να θεωρηθεί απλώς και μόνο ως μια μαθηματική τεχνική (ή επινόηση) για να υπολογίζουμε τις πιθανότητες γεγονότων που έχουν σχέση με τον πραγματικό χωρόχρονο.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που πιστεύουμε πως πρέπει να αποτελεί μέρος μιας κβαντικής θεωρίας της βαρύτητας είναι η ιδέα του Αϊνστάιν ότι το βαρυτικό πεδίο αντιπροσωπεύεται από τον καμπύλο χωρόχρονο: τα σωματίδια προσπαθούν να ακολουθήσουν την πιο σύντομη ή πιο «ευθεία» διαδρομή από ένα σημείο σε κάποιο άλλο, αλλά οι τροχιές τους φαίνονται να κάμπτονται — επειδή ο χωρόχρονος είναι καμπύλος — ακριβώς σαν να κάμπτονταν από την επίδραση ενός βαρυτικού πεδίου. Όταν εφαρμόσουμε την «άθροιση ιστοριών» του Feynman στην άποψη του Αϊνστάιν για τη βαρύτητα, το ανάλογο μιας ιστορίας ενός σωματιδίου είναι τώρα ένας πλήρης καμπύλος χωρόχρονος που αντιπροσωπεύει μια ιστορία ολόκληρου του Σύμπαντος. Για να αποφύγουμε τα τεχνικά προβλήματα του μαθηματικού υπολογισμού του «αθροίσματος των ιστοριών» θεωρούμε ότι οι καμπύλοι χωρόχρονοι που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές ιστορίες του Σύμπαντος είναι ευκλείδεια. (Στους ευκλείδειους χωροχρόνους ο χρόνος έχει φανταστική τιμή και η διεύθυνση του δεν διακρίνεται από τις διευθύνσεις του χώρου). Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα ενός πραγματικού χωροχρόνου με κάποια συγκεκριμένη ιδιότητα, όπως το να φαίνεται ο ίδιος σε κάθε σημείο και σε κάθε διεύθυνση, προσθέτουμε τα κύματα που αντιστοιχούν σε όλες τις ιστορίες που έχουν αυτή την ιδιότητα.

Στην κλασική θεωρία της γενικής σχετικότητας είναι δυνατό

να υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί καμπύλοι χωρόχρονοι· ο καθένας τους αντιστοιχεί σε μια διαφορετική αρχική κατάσταση του Σύμπαντος. Αν γνωρίζαμε την αρχική κατάσταση του δικού μας Σύμπαντος, θα γνωρίζαμε ολόκληρη την ιστορία του. Με παρόμοιο τρόπο, στην κβαντική θεωρία της βαρύτητας θα είναι δυνατό να υπάρχουν πολλές διαφορετικές κβαντικές καταστάσεις για το Σύμπαν. Αν γνωρίζαμε πώς συμπεριφέρονταν στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος όλοι οι ευκλείδειοι καμπύλοι χωρόχρονοι (που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές ιστορίες του Σύμπαντος), θα γνωρίζαμε την κβαντική κατάσταση του Σύμπαντος στη σημερινή εποχή.

Στην κλασική θεωρία της βαρύτητας, που βασίζεται στον πραγματικό χωρόχρονο, υπάρχουν μόνο δύο δυνατότητες για το Σύμπαν. ή υπήρχε από πάντα (δηλαδή ο χρόνος είναι άπειρος) ή είχε μία αρχή στον χρόνο, μία ανωμαλία στο παρελθόν (δηλαδή ο χρόνος είναι πεπερασμένος). Αντίθετα, στην κβαντική θεωρία της βαρύτητας θα υπήρχε και μια τρίτη δυνατότητα. Ακριβώς επειδή χρησιμοποιούμε ευκλείδειους χωροχρόνους, όπου δεν διακρίνεται η διεύθυνση του χρόνου από τις διευθύνσεις του χώρου, θα υπήρχε η δυνατότητα να ήταν ο χωρόχρονος πεπερασμένος και όμως να μην είχε καμία ανωμαλία (δηλαδή κανένα όριο, καμία άκρη. Μία ανωμαλία αποτελεί ένα όριο, μία άκρη της επιφάνειας όπου βρίσκεται). Ένας πεπερασμένος χωρόχρονος χωρίς όριο ή άκρη θα είναι σαν την επιφάνεια της Γης, μόνο που θα έχει δύο επιπλέον διαστάσεις. Η επιφάνεια της Γης είναι πεπερασμένη και όμως δεν έχει όριο ή άκρη: αν ταξιδέψετε προς το ηλιοβασίλεμα δεν θα γκρεμιστείτε από κάποια άκρη, ούτε θα γλιστρήσετε σε κάποια ανωμαλία. (Πιστέψτε με, έχω γυρίσει τον κόσμο και ξέρω!).

Αν ο ευκλείδειος χωρόχρονος επεκτείνεται προς τα πίσω σε άπειρο φανταστικό χρόνο, ή αν έχει μια αρχή στον φανταστικό χρόνο, θα έχουμε το ίδιο πρόβλημα που είχαμε και στην περι-

πτωση της κλασικής θεωρίας της βαρύτητας η οποία βασίζεται στον πραγματικό χωρόχρονο: δεν θα μπορούμε να προσδιορίσουμε την αρχική κατάσταση του Σύμπαντος γιατί δεν θα μπορούμε να έχουμε κάποιον ειδικό λόγο για να επιλέξουμε μια από όλες τις δυνατές αρχικές καταστάσεις. Αντίθετα, η κβαντική θεωρία της βαρύτητας επιτρέπει μια νέα δυνατότητα: δεν υπάρχει ένα όριο στο χωρόχρονο, και έτσι δεν υπάρχει η ανάγκη να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά του Σύμπαντος σε αυτό το όριο. Δεν υπάρχουν ανωμαλίες όπου οι νόμοι της φυσικής καταρρέουν δεν υπάρχει η ανάγκη για κάποιους νέους νόμους που θα καθορίζουν τις οριακές συνθήκες του χωροχρόνου· επομένως είναι περιττή η επίκληση ενός Θεού. Μπορεί κανείς να πει: «Οι οριακές συνθήκες του Σύμπαντος είναι ότι το Σύμπαν δεν έχει όρια». Το Σύμπαν περιέχει τον εαυτό του και δεν επηρεάζεται από οτιδήποτε άλλο έξω από αυτό. Δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται: ΥΠΑΡΧΕΙ.

Στο συνέδριο στο Βατικανό που προανάφερα πρότεινα για πρώτη φορά την υπόθεση ότι ο χρόνος και ο χώρος μπορεί να σχηματίζουν μια επιφάνεια που να είναι πεπερασμένη (να μην είναι άπειρη) αλλά όχι περιορισμένη (να μην έχει όριο ή άκρη). Η διάλεξη μου όμως είχε έναν μαθηματικό χαρακτήρα, και έτσι οι επιπτώσεις της υπόθεσης αυτής στο ρόλο του Θεού ως δημιουργού του Σύμπαντος δεν έγιναν αντιληπτές από τους υπόλοιπους φυσικούς, αλλά ούτε και από εμένα! Δεν γνώριζα ακόμη πώς να χρησιμοποιήσω την ιδέα της «έλλειψης ορίου» για να διατυπώσω κάποιες προβλέψεις. Το καλοκαίρι όμως εκείνου του χρόνου στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας μαζί με έναν φίλο και συνεργάτη μου, τον Jim Hartle, επεξεργαστήκαμε το ζήτημα του ποιές συνθήκες πρέπει να ικανοποιεί το Σύμπαν αν ο χωρόχρονος δεν είναι περιορισμένος. Όταν άρχισαν τα πανεπιστημιακά μαθήματα και επέστρεψα στο Cambridge συνέχισα την έρευνα αυτή με δύο από τους μεταπτυχιακούς φοιτητές μου, τον Julian Luttrell και τον Jonathan Halliwell.

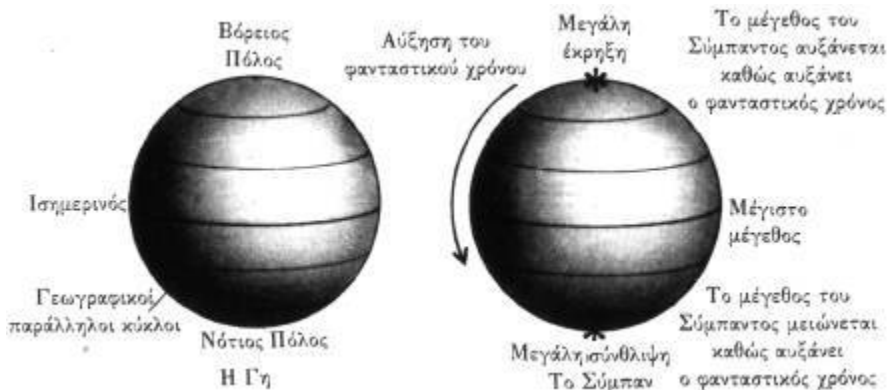
Θέλω να τονίσω ότι η ιδέα του πεπερασμένου αλλά όχι περιορισμένου χρόνου και χώρου είναι μόνον μια *πρόταση*: δεν μπορεί να αποτελεί συμπέρασμα κάποιας άλλης αρχής. Όπως συμβαίνει με κάθε φυσική θεωρία, η προέλευσή της ίσως οφείλεται σε αισθητικούς ή μεταφυσικούς λόγους, η επιβίωσή της όμως κρίνεται από τη δυνατότητά της να διατυπώνει προβλέψεις που να συμφωνούν με τις παρατηρήσεις. Στην περίπτωση όμως της κβαντικής βαρύτητας η δυνατότητα αυτή είναι περιορισμένη, για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι, όπως θα εξηγήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, δεν υπάρχει ακόμη απόλυτη βεβαιότητα για το ποια θεωρία συνδυάζει με επιτυχία τη γενική σχετικότητα με την κβαντική μηχανική, αν και είναι γνωστά πολλά στοιχεία για το γενικό σχήμα που πρέπει να έχει μια τέτοια θεωρία. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι κάθε μοντέλο που θα περιγράφει ολόκληρο το Σύμπαν με αρκετές λεπτομέρειες θα είναι μαθηματικά τόσο πολύπλοκο που θα είναι αδύνατο να διατυπώσουμε ακριβείς προβλέψεις. Πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε απλουστευτικές υποθέσεις και προσεγγίσεις — και ακόμη και τότε το πρόβλημα της διατύπωσης προβλέψεων θα παραμένει πολύ δύσκολο.

Στην «άθροιση ιστοριών» η κάθε ιστορία περιγράφει όχι μόνον το χωρόχρονο αλλά και οτιδήποτε μέσα σε αυτόν αυτό σημαίνει ότι περιγράφει και κάθε πολυσύνθετο οργανισμό, όπως είναι οι άνθρωποι που μπορούν να παρατηρούν την ιστορία του Σύμπαντος. Το γεγονός αυτό παρέχει ένα άλλο επιχείρημα στην ανθρωπική αρχή, γιατί αν όλες οι ιστορίες είναι δυνατό να υπάρχουν, τότε αφού υπάρχουμε μέσα σε μία από αυτές, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ανθρωπική αρχή για να εξηγήσουμε γιατί το Σύμπαν είναι αυτό που είναι. Δεν είναι όμως αρκετά σαφές ποιά ακριβώς σημασία μπορεί να αποδοθεί στις άλλες ιστορίες, εκεί όπου εμείς δεν υπάρχουμε. Η κβαντική θεωρία της βαρύτητας θα ήταν πολύ πιο ικανοποιητική αν μπορούσαμε να δείξουμε, χρησιμοποιώντας την «άθροιση ιστοριών», ότι το

Σύμπαν όπου υπάρχουμε δεν είναι απλώς μία από τις πολλές «ιστορίες» που είναι δυνατό να υπάρχουν, αλλά μία από τις πιθανότερες ιστορίες που είναι δυνατό να υπάρχουν. Για να επιτύχουμε αυτό πρέπει να υπολογίσουμε το «άθροισμα των ιστοριών» για όλους τους δυνατούς ευκλείδειους χωροχρόνους που δεν έχουν κάποιο όριο.

Από την πρόταση της «έλλειψης ορίου» μαθαίνουμε ότι η πιθανότητα να ακολουθεί το Σύμπαν τις περισσότερες από τις ιστορίες που είναι δυνατό να υπάρχουν είναι σχεδόν μηδαμινή, υπάρχει όμως μια ειδική οικογένεια ιστοριών που είναι πολύ πιθανότερες από τις άλλες. Αυτές οι ιστορίες μπορεί να απεικονιστούν σαν την επιφάνεια της Γης, με την απόσταση από τον Βόρειο Πόλο να αντιπροσωπεύει τον φανταστικό χρόνο, και το μέγεθος ενός κύκλου σταθερής απόστασης από τον Βόρειο Πόλο, ενός γεωγραφικού παραλλήλου, να αντιπροσωπεύει το μέγεθος του χώρου του Σύμπαντος. Το Σύμπαν αρχίζει να υπάρχει σαν σημείο μηδενικού μεγέθους στον Βόρειο Πόλο (βλ. εικ. 8-1). Όσο θα κινούμαστε προς το Νότο οι γεωγραφικοί παράλληλοι κύκλοι θα μεγαλώνουν και το Σύμπαν θα διαστέλλεται με την πάροδο του φανταστικού χρόνου. Το Σύμπαν θα φτάσει κάποτε σε ένα μέγιστο μέγεθος (στον ισημερινό). Μετά ο φανταστικός χρόνος θα συνεχίσει να μεγαλώνει αλλά το Σύμπαν θα συστέλλεται· στον Νότιο Πόλο το μέγεθος του Σύμπαντος θα μηδενιστεί και πάλι. Αν και το Σύμπαν θα έχει μηδενικό μέγεθος στον Βόρειο και στο Νότιο Πόλο, αυτά τα σημεία δεν θα είναι ανωμαλίες του χωροχρόνου όπως ακριβώς οι πόλοι της Γης δεν είναι ανωμαλίες της επιφάνειας της Γης. Οι νόμοι της φυσικής θα ισχύουν και σε αυτά τα σημεία, όπως ακριβώς ισχύουν και στους πόλους της Γης.

Η ιστορία του Σύμπαντος στον πραγματικό χρόνο, όμως, θα φαίνεται πολύ διαφορετική. Πριν από δέκα με είκοσι εκατομμύρια χρόνια το Σύμπαν θα είχε ένα ελάχιστο μέγεθος. Σε επόμε-



ΕΙΚΟΝΑ 8-1.

νους πραγματικούς χρόνους το Σύμπαν θα διαστέλλεται όπως στο χασοτικό πληθωριστικό μοντέλο του Linde. (Αλλά τώρα δεν θα χρειάζεται να υποθέσουμε ότι το Σύμπαν δημιουργήθηκε έχοντας με κάποιο ανεξήγητο τρόπο το σωστό αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών ώστε να εξελιχτεί στο Σύμπαν που παρατηρούμε). Το Σύμπαν θα συνεχίσει να διαστέλλεται και θα αποκτήσει πολύ μεγάλο μέγεθος· μετά θα συρρικνωθεί και θα καταρρεύσει σε κάτι που, στον πραγματικό χρόνο, φαίνεται σαν ανωμαλία. Έτσι, με κάποια έννοια, είμαστε όλοι καταδικασμένοι, ακόμη κι αν «διατηρούμε τις αποστάσεις» από τις μαύρες τρύπες. Μόνον όταν απεικονίζουμε το Σύμπαν χρησιμοποιώντας τον φανταστικό χρόνο αποφεύγουμε τις ανωμαλίες.

Αν το Σύμπαν είναι πραγματικά σε μια τέτοια κβαντική κατάσταση, δεν θα υπάρχουν ανωμαλίες στην ιστορία του Σύμπαντος στον φανταστικό χρόνο. Ίσως φαίνεται, λοιπόν, ότι η πρόσφατη ερευνά μου αναιρεί τα αποτελέσματα της προηγούμενης, και ότι όλα τα θεωρήματα για τις ανωμαλίες είναι πια εντελώς άχρηστα. Αλλά η πραγματική σημασία των θεωρημάτων για τις ανωμαλίες ήταν ότι έδειξαν πως όταν το βαρυτικό πεδίο γίνεται πολύ

ισχυρό, δεν μπορούμε πια να αγνοούμε τα κβαντικά βαρυτικά φαινόμενα. Αυτό οδήγησε στην ιδέα ότι το Σύμπαν μπορεί να είναι πεπερασμένο στον φανταστικό χρόνο αλλά όχι και περιορισμένο, ένα τέτοιο Σύμπαν δεν θα έχει κάποιο όριο ή κάποια ανωμαλία. Όταν όμως επιστρέφει κανείς στον πραγματικό χρόνο όπου ζούμε, θα εξακολουθούν να εμφανίζονται οι ανωμαλίες. Ο δύστυχος αστροναύτης που πέφτει μέσα σε μια μαύρη τρύπα θα εξακολουθεί να έχει θλιβερό τέλος. Μόνον αν ζούσε σε φανταστικό χρόνο δεν θα συναντούσε ανωμαλίες.

Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι ο ονομαζόμενος «φανταστικός» χρόνος είναι στην πραγματικότητα ο αληθινός πραγματικός χρόνος, και ο «πραγματικός» χρόνος είναι φανταστικός, δεν είναι δηλαδή παρά μια ψευδαίσθηση. Στον πραγματικό χρόνο, το Σύμπαν έχει μια αρχή και ένα τέλος σε ανωμαλίες που σχηματίζουν ένα όριο του χωροχρόνου και όπου οι νόμοι της φυσικής καταρρέουν. Αλλά στον φανταστικό χρόνο δεν υπάρχουν ανωμαλίες ή όρια. Έτσι, αυτό που αποκαλούμε «φανταστικό» χρόνο μπορεί στην πραγματικότητα να είναι κάτι πιο ουσιαστικό, ενώ αυτό που αποκαλούμε «πραγματικό» μπορεί να είναι απλώς μια ιδέα που την επινοήσαμε για να μας βοηθήσει να περιγράψουμε το Σύμπαν. Αλλά σύμφωνα με την άποψη που σκιαγραφήθηκε στο κεφάλαιο 1, μια επιστημονική θεωρία δεν είναι παρά ένα μαθηματικό μοντέλο που το κατασκευάζουμε για να περιγράψουμε τις παρατηρήσεις μας: υπάρχει μόνο στο μυαλό μας. Δεν έχει λοιπόν νόημα να αναρωτηθούμε ποιός είναι ο αληθινά πραγματικός χρόνος, ο «πραγματικός» ή ο «φανταστικός». Το θέμα είναι ποιός μας προσφέρει την πιο χρήσιμη περιγραφή των παρατηρήσεων.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση της «άθροισης ιστοριών» μαζί με την πρόταση της έλλειψης ορίου του χωροχρόνου για να υπολογίσουμε την πιθανότητα να συνυπάρχουν κάποιες καταστάσεις του Σύμπαντος κατά την ίδια хро-

νική περίοδο. Ας πάρουμε για παράδειγμα την κατάσταση όπου το Σύμπαν διαστέλλεται προς όλες τις διευθύνσεις με τον ίδιο περίπου ρυθμό, και την κατάσταση όπου το Σύμπαν έχει την ίδια πυκνότητα με τη σημερινή. Μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η πιθανότητα να συνυπάρχουν και οι δύο καταστάσεις στην ίδια χρονική περίοδο — για τα απλουστευμένα μοντέλα που εξετάσαμε ως τώρα — είναι πολύ μεγάλη. Η πρόταση της έλλειψης ορίου του χωροχρόνου οδηγεί λοιπόν στην πρόβλεψη ότι πιθανότατα ο ρυθμός διαστολής του Σύμπαντος είναι σχεδόν ο ίδιος προς όλες τις κατευθύνσεις. Η πρόβλεψη αυτή συμφωνεί με τα δεδομένα των παρατηρήσεων που δείχνουν ότι η ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας μικροκυμάτων είναι σχεδόν η ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Αν το Σύμπαν διαστελλόταν ταχύτερα προς κάποιες κατευθύνσεις, η ένταση της ακτινοβολίας που θα προερχόταν από αυτές θα ήταν μικρότερη (αφού θα ήταν μεγαλύτερη η μετατόπιση της προς το ερυθρό μέρος του φάσματος).

Η μελέτη της συνθήκης έλλειψης ορίου του χωροχρόνου ίσως οδηγήσει στη διατύπωση και άλλων προβλέψεων. Ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον πρόβλημα είναι το μέγεθος των αποκλίσεων από την ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας του Σύμπαντος κατά τα αρχικά στάδια της εξέλιξης του, που υπήρξε η αιτία σχηματισμού πρώτα των γαλαξιών, μετά των άστρων και τελικά των ιδίων των ανθρώπων. Η αρχή της απροσδιοριστίας συνεπάγεται ότι το Σύμπαν δεν θα μπορούσε να βρισκόταν σε κατάσταση απόλυτης ομοιομορφίας, επειδή θα έπρεπε να υπήρχαν κάποιες διακυμάνσεις στις τιμές των θέσεων και των ταχυτήτων των σωματιδίων του. Χρησιμοποιώντας την πρόταση της έλλειψης ορίου του χωροχρόνου βλέπουμε ότι το Σύμπαν θα έπρεπε στην πραγματικότητα να βρεθεί κάποτε στην κατάσταση της ελάχιστης δυνατής ανομοιομορφίας που επιτρέπεται από την αρχή της απροσδιοριστίας. Στη συνέχεια το Σύμπαν θα περνούσε από μία φάση γρήγορης διαστολής ανάλογης με αυτήν που προβλέπεται

από τα πληθωριστικά μοντέλα. Κατά την διάρκεια αυτής της διαστολής οι αρχικές ανομοιομορφίες θα ενισχύονταν θα γίνονταν τόσο μεγάλες ώστε να μπορούμε να αναγάγουμε σε αυτές την προέλευση των πολύπλοκων δομών που παρατηρούμε γύρω μας. Σε ένα διαστελλόμενο Σύμπαν, όπου η κατανομή της πυκνότητας της ύλης θα παρουσίαζε αρκετές αποκλίσεις από περιοχή σε περιοχή, η βαρύτητα θα ανάγκαζε τις πυκνότερες περιοχές να επιβραδύνουν το ρυθμό διαστολής τους και κάποτε να αρχίσουν να συρρικνώνονται. Αυτό θα οδηγούσε στο σχηματισμό γαλαξιών, άστρων και τελικά ακόμη και ασήμαντων πλάσμάτων όπως εμείς. Με τον τρόπο αυτό όλα τα πολυσύνθετα σώματα που βλέπουμε γύρω μας θα ήταν δυνατό να εξηγηθούν από τη συνθήκη της έλλειψης ορίου του χωροχρόνου μαζί με την αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής.

Η ιδέα ότι ο χώρος και ο χρόνος μπορεί να σχηματίζουν μία κλειστή επιφάνεια χωρίς όρια έχει σοβαρές επιπτώσεις για το ρόλο του Θεού στη δημιουργία του Σύμπαντος. Με την επιτυχία των επιστημονικών θεωριών που περιγράφουν τα διάφορα φυσικά φαινόμενα, οι περισσότεροι άνθρωποι άρχισαν να πιστεύουν ότι ο Θεός επιτρέπει στο Σύμπαν να εξελίσσεται σύμφωνα με ένα σύνολο νόμων και δεν επεμβαίνει στη λειτουργία του ανατρέποντας τους. Παρ' όλα αυτά, οι νόμοι του Σύμπαντος δεν μας πληροφορούν για το πώς θα έπρεπε να μοιάζει το Σύμπαν στην αρχή της εξέλιξης του — εξακολουθεί να ανήκει στον Θεό ο ρόλος να θέσει σε λειτουργία τον ωρολογιακό μηχανισμό και να επιλέξει τον τρόπο εκκίνησης του Σύμπαντος. Όσο καιρό φανταζόμασταν ότι το Σύμπαν είχε μια αρχή στο χρόνο, μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι είχε και έναν δημιουργό. Αλλά αν το Σύμπαν στην πραγματικότητα περιέχει πλήρως τον εαυτό του και δεν έχει όριο ή άκρη, δεν θα έχει ούτε μία αρχή ούτε ένα τέλος: απλώς θα υπάρχει. Ποιός λοιπόν ο λόγος ύπαρξης ενός δημιουργού του;

9

Το βέλος του Χρόνου

Σε προηγούμενα κεφάλαια είδαμε πώς μεταβλήθηκαν προοδευτικά οι απόψεις μας για τη φύση του χρόνου. Ώς τις αρχές του αιώνα μας οι άνθρωποι πίστευαν σε έναν απόλυτο χρόνο· πίστευαν δηλαδή ότι σε κάθε ένα γεγονός αντιστοιχούσε με μονοσήμαντο τρόπο ένας αριθμός — ο «χρόνος» του γεγονότος — και σε κάθε δύο γεγονότα ένας άλλος — το «χρονικό διάστημα» μεταξύ τους. Όλοι οι παρατηρητές θα συμφωνούσαν για τους χρόνους των γεγονότων και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους, αν τα ρολόγια τους ήταν σωστά ρυθμισμένα και συγχρονισμένα. Όταν όμως ανακαλύφθηκε ότι το φως φαίνεται να έχει την ίδια πάντα ταχύτητα για κάθε παρατηρητή, ανεξάρτητα από το πώς αυτός κινείται, οδηγηθήκαμε στη θεωρία της σχετικότητας — και στην εγκατάλειψη της ιδέας του μονοσήμαντα ορισμένου απόλυτου χρόνου. Ο κάθε παρατηρητής έχει τώρα το δικό του μέτρο του χρόνου, όπως τον καταγράφει το δικό του ρολόι· οι διάφοροι παρατηρητές δεν θα συμφωνούν για τους χρόνους των

γεγονότων και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους. Έτσι ο χρόνος έγινε μια περισσότερο υποκειμενική έννοια, σχετική με τον παρατηρητή που τον μετράει.

Όταν προσπαθούμε να ενοποιήσουμε τη βαρύτητα με την κβαντική μηχανική είμαστε αναγκασμένοι να εισαγάγουμε την ιδέα του φανταστικού χρόνου. Η κατεύθυνση στον φανταστικό χρόνο δεν διακρίνεται από τις ανάλογες κατευθύνσεις στο χώρο. Στο χώρο αν κανείς μπορεί να κατευθυνθεί προς το Βορρά, μπορεί να κατευθυνθεί και προς το Νότο, έτσι και στον φανταστικό χρόνο, αν κανείς μπορεί να κατευθυνθεί προς τα εμπρός, προς το μέλλον, θα πρέπει να μπορεί να κατευθυνθεί και προς τα πίσω, προς το παρελθόν. Στον φανταστικό χρόνο δηλαδή, δεν μπορεί να υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ της κατεύθυνσης προς το μέλλον και αυτής προς το παρελθόν. Αντίθετα, όπως όλοι γνωρίζουμε, στον πραγματικό χρόνο υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ της κατεύθυνσης προς το μέλλον και της κατεύθυνσης προς το παρελθόν. Από πού προέρχεται αυτή η διαφορά; Γιατί θυμόμαστε το παρελθόν αλλά όχι το μέλλον;

Οι νόμοι της φυσικής δεν διακρίνουν την κατεύθυνση προς το μέλλον από την κατεύθυνση προς το παρελθόν. Παραμένουν μάλιστα αμετάβλητοι αν, όπως εξηγήσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, υποβληθούν στο συνδυασμό των μετασχηματισμών (ή συμμετριών) γνωστών ως C,P,T. Ο μετασχηματισμός C σημαίνει να αντικαταστήσουμε τα σωματίδια με τα αντισωματίδιά τους, και αντίστροφα. Ο μετασχηματισμός P σημαίνει να σχηματίσουμε την κατοπτρική συμμετρική εικόνα κάποιας κατάστασης, έτσι ώστε η αριστερή της πλευρά να γίνει η δεξιά, και αντίστροφα. Και ο μετασχηματισμός T σημαίνει να αντιστρέψουμε την κατεύθυνση της κίνησης όλων των σωματιδίων, στην πραγματικότητα δηλαδή να αντιστρέψουμε την κατεύθυνση του χρόνου, ώστε η κίνηση των σωματιδίων να ακολουθεί αντίθετη φορά. Οι νόμοι της φυσικής που καθορίζουν τη συμπεριφορά της ύλης σε κανονι-

κές συνθήκες παραμένουν αμετάβλητοι αν υποβληθούν στο συνδυασμό των μετασχηματισμών C και P. Με άλλα λόγια, η ζωή θα ήταν ακριβώς η ίδια για τους κατοίκους ενός άλλου πλανήτη αποτελούμενου από αντιύλη, αντί για ύλη, και που θα ήταν κατοπτρικά συμμετρικοί με εμάς.

Αν οι νόμοι της φυσικής παραμένουν αμετάβλητοι όταν υποβληθούν στο συνδυασμό των μετασχηματισμών C και P ή το συνδυασμό των μετασχηματισμών C, P και T, τότε πρέπει να παραμένουν αμετάβλητοι και όταν υποβληθούν στον μετασχηματισμό T και μόνον. Παρ' όλα αυτά, στην καθημερινή μας ζωή υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ της κατεύθυνσης προς το μέλλον και εκείνης προς το παρελθόν. Φανταστείτε ένα γυάλινο ποτήρι που πέφτει από το τραπέζι και γίνεται κομμάτια στο δάπεδο. Κινηματογραφώντας το γεγονός και παρακολουθώντας μετά την ταινία, μπορείτε εύκολα να βρείτε αν προβάλλεται κατά την ορθή φορά ή την αντίθετη. Αν προβάλλεται κατά την αντίθετη φορά θα δείτε τα κομμάτια του γυαλιού στο δάπεδο να συγκεντρώνονται ξαφνικά σε ένα σημείο και να σχηματίζουν ένα ποτήρι που ανυψώνεται και στέκεται πάνω στο τραπέζι. Μπορείτε να πείτε ότι η ταινία προβάλλεται κατά την αντίθετη φορά γιατί τέτοια συμπεριφορά της ύλης δεν παρατηρείται ποτέ στην καθημερινή ζωή. Αν συνέβαιναν ανάλογα φαινόμενα οι κατασκευαστές γυαλικών θα έχαναν την πελατεία τους.

Η εξήγηση που δίνεται συνήθως στο γιατί δεν βλέπουμε τα κομμάτια του γυαλιού να συνενώνονται στο δάπεδο και να σχηματίζουν ποτήρια πάνω στα τραπέζια είναι ότι κάτι τέτοιο το απαγορεύει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Ο νόμος αυτός αναφέρει ότι σε κάθε κλειστό σύστημα με την πάροδο του χρόνου η αταξία (ή εντροπία) αυξάνεται πάντα. Με άλλα λόγια, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής είναι μια μορφή του γνωστού γνωμικού «ενός κακού μύρια έπονται», τα πράγματα πάνε πάντα «από το κακό στο χειρότερο»! Ένα γυάλινο ποτήρι πάνω

στο τραπέζι βρίσκεται σε κατάσταση τάξης, αλλά ένα σπασμένο ποτήρι στο δάπεδο βρίσκεται σε κατάσταση αταξίας. Ένα φαινόμενο μπορεί να εξελιχθεί στην κατεύθυνση του χρόνου που το ποτήρι πάνω στο τραπέζι (ένα γεγονός του παρελθόντος) καταλήγει στο σπασμένο ποτήρι στο δάπεδο (ένα γεγονός του μέλλοντος), όχι όμως αντίστροφα.

Η αύξηση της αταξίας (ή εντροπίας) με την πάροδο του χρόνου είναι ένα παράδειγμα αυτού που αποκαλείται *βέλος του χρόνου*. Το βέλος του χρόνου διακρίνει την κατεύθυνση προς το μέλλον από την κατεύθυνση προς το παρελθόν. Υπάρχουν τουλάχιστον τρία διαφορετικά βέλη του χρόνου. Υπάρχει το θερμοδυναμικό, που στρέφεται προς την κατεύθυνση όπου αυξάνεται η αταξία. Μετά υπάρχει το ψυχολογικό, που στρέφεται προς την κατεύθυνση όπου αισθανόμαστε ότι «ο χρόνος περνάει, φεύγει» και θυμόμαστε το παρελθόν αλλά όχι το μέλλον. Τέλος, υπάρχει το κοσμολογικό, που στρέφεται προς την κατεύθυνση όπου το Σύμπαν διαστέλλεται αντί να συστέλλεται.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε ότι η συνθήκη της έλλειψης ορίου του Σύμπαντος και η ασθενής ανθρωπική αρχή μπορούν να εξηγήσουν γιατί και τα τρία βέλη του χρόνου στρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση — και ακόμη γιατί τελικά πρέπει να υπάρχει ένα σαφώς καθορισμένο βέλος του χρόνου. Θα δούμε ότι το ψυχολογικό βέλος του χρόνου προσδιορίζεται από το θερμοδυναμικό, και ότι και τα δύο στρέφονται αναγκαστικά και πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Αν δεχτούμε τη συνθήκη της έλλειψης ορίου του Σύμπαντος θα δούμε ότι πρέπει να υπάρχουν σαφώς καθορισμένα θερμοδυναμικά και κοσμολογικά βέλη του χρόνου, που όμως δεν πρέπει αναγκαστικά να στρέφονται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Θα δούμε όμως ότι μόνον όταν στρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση, οι συνθήκες στο Σύμπαν είναι κατάλληλες για να αναπτυχθούν νοήμονα όντα ικανά θα θέσουν το ερώτημα: Γιατί η αταξία αυξάνεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση

του χρόνου, αυτήν όπου το Σύμπαν διαστέλλεται;

Θα αναφερθούμε πρώτα στο θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου. Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής προκύπτει από το γεγονός ότι για ένα φυσικό σύστημα οι δυνατές καταστάσεις αταξίας είναι πάντοτε πολύ περισσότερες από τις δυνατές καταστάσεις τάξης. Για παράδειγμα, φανταστείτε τα κομμάτια ενός «παζλ» σε ένα πλαίσιο. Υπάρχει μία και μόνο μία διάταξη όπου τα κομμάτια σχηματίζουν πλήρη εικόνα. Αντίθετα, υπάρχει τεράστιος αριθμός διατάξεων όπου τα κομμάτια βρίσκονται σε αταξία και δεν σχηματίζουν εικόνα.

Ας υποθέσουμε ότι ένα φυσικό σύστημα βρίσκεται κάποια χρονική στιγμή σε μία από τις λίγες δυνατές καταστάσεις τάξης. Με την πάροδο του χρόνου το σύστημα θα εξελιχθεί σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής και η κατάσταση του θα μεταβληθεί. Σε κάποια επόμενη χρονική στιγμή είναι πιθανότερο το σύστημα να βρίσκεται σε κατάσταση αταξίας παρά σε κατάσταση τάξης επειδή οι δυνατές καταστάσεις αταξίας είναι πολύ περισσότερες από τις καταστάσεις τάξης. Έτσι, αν το σύστημα βρίσκεται αρχικά σε κατάσταση μεγάλης τάξης, με την πάροδο του χρόνου η αταξία θα τείνει να αυξηθεί.

Ας υποθέσουμε ότι αρχικά τα κομμάτια του παζλ είναι διατεταγμένα έτσι που να σχηματίζουν πλήρη εικόνα. Αν αναταράξουμε το πλαίσιο, τα κομμάτια θα βρεθούν σε κάποια άλλη διάταξη. Η νέα διάταξη είναι πιθανότερο να είναι διάταξη αταξίας, όπου τα κομμάτια δεν σχηματίζουν πλήρη εικόνα, απλώς και μόνο επειδή υπάρχουν πολύ περισσότερες διατάξεις αταξίας από διατάξεις τάξης. Μερικές ομάδες κομματιών μπορεί να σχηματίζουν ακόμη τμήματα της εικόνας, αλλά όσο περισσότερο αναταράζουμε το πλαίσιο τόσο πιθανότερο είναι ότι και αυτές οι ομάδες θα διαλυθούν και τα κομμάτια τους θα βρεθούν σε κατάσταση μεγάλης αταξίας, όπου δεν θα σχηματίζουν πια κανένα τμήμα της εικόνας. Έτσι, αν τα κομμάτια βρίσκονταν αρχικά σε κατά-

σταση μεγάλης τάξης, αναταράσσοντας το πλαίσιο η αταξία τους πιθανότατα θα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

Ας υποθέσουμε όμως πως ο Θεός αποφάσισε ότι το Σύμπαν πρέπει να βρεθεί στα *τελικά* του στάδια σε κατάσταση μεγάλης τάξης, ανεξάρτητα σε ποιά κατάσταση βρισκόταν στα αρχικά στάδια του. Είναι πιθανότερο ότι στα αρχικά του στάδια θα βρισκόταν σε κατάσταση αταξίας αφού οι καταστάσεις αταξίας είναι πιθανότερες από τις καταστάσεις τάξης· αυτό σημαίνει ότι στη περίπτωση αυτή η αταξία θα μειωνόταν — και δεν θα αυξανόταν — με την πάροδο του χρόνου. Οι άνθρωποι που θα ζούσαν σε ένα τέτοιο Σύμπαν θα έβλεπαν κομμάτια γυαλιών από το δάπεδο να σχηματίζουν ένα ποτήρι πάνω στο τραπέζι. Αλλά, όπως θα δούμε, επειδή αυτοί οι άνθρωποι θα ζούσαν σε ένα Σύμπαν όπου η αταξία θα μειωνόταν με την πάροδο του χρόνου, το ψυχολογικό βέλος του χρόνου τους θα στρεφόταν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι θα θυμούνταν τα γεγονότα του μέλλοντος τους και όχι του παρελθόντος τους. Όταν τα κομμάτια του γυαλιού θα βρίσκονταν στο δάπεδο, θα θυμούνταν το ποτήρι πάνω στο τραπέζι, όταν όμως το ποτήρι θα βρισκόταν πάνω στο τραπέζι δεν θα θυμούνταν τα κομμάτια του γυαλιού στο δάπεδο.

Είναι αρκετά δύσκολο να μιλήσουμε για την ίδια την ανθρώπινη μνήμη γιατί δεν γνωρίζουμε ακόμη τις λεπτομέρειες της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Γνωρίζουμε όμως πώς ακριβώς λειτουργεί η μνήμη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Θα εξετάσουμε λοιπόν το θέμα του ψυχολογικού βέλους του χρόνου για τη μνήμη των υπολογιστών. Είναι λογικό νομίζω να υποθέσουμε ότι το βέλος του χρόνου για τη μνήμη των υπολογιστών και το αντίστοιχο βέλος του χρόνου για τη μνήμη των ανθρώπων στρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση. Αν δεν συνέβαινε αυτό θα μπορούσε κάποιος, χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή, να θησαυρίσει στο χρηματιστήριο αφού η μνήμη του υπολογιστή του θα θυμόταν τις τιμές των μετοχών της επόμενης ημέρας! Η μνή-

μη του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι βασικά ένας μηχανισμός με πολλά στοιχεία που το καθένα τους μπορεί να βρίσκεται στη μία από δύο διαφορετικές δυνατές καταστάσεις. Πριν καταγραφεί η κατάσταση ενός συστήματος πάνω της, η μνήμη βρίσκεται σε κατάσταση αταξίας, με ίσες πιθανότητες και για τις δυο δυνατές καταστάσεις κάθε στοιχείου. Μετά την επίδραση του συστήματος πάνω της, το κάθε στοιχείο της μνήμης θα βρίσκεται οριστικά στην μία ή την άλλη κατάσταση. Έτσι η μνήμη θα έχει περάσει από μία κατάσταση αταξίας σε μία κατάσταση τάξης. Αλλά για να επιδράσει το σύστημα με πλήρη και οριστικό τρόπο πάνω στα στοιχεία της μνήμης χρειάζεται να καταναλωθεί ένα ποσό ενέργειας. Αυτή η ενέργεια αποβάλλεται τελικά στο Σύμπαν με τη μορφή θερμικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι το ποσό της αταξίας του. Μπορούμε να αποδείξουμε ότι αυτή η αύξηση της αταξίας είναι πάντα μεγαλύτερη από την αύξηση της τάξης στο μηχανισμό της μνήμης. Έτσι η θερμότητα που αποβάλλει ο ανεμιστήρας του υπολογιστή όταν καταγράφεται κάτι στη μνήμη του, σημαίνει ότι εξακολουθεί να αυξάνεται η συνολική αταξία στο Σύμπαν. Η κατεύθυνση του χρόνου όπου ο υπολογιστής καταγράφει το παρελθόν είναι η ίδια με αυτήν όπου αυξάνεται η αταξία του Σύμπαντος.

Η υποκειμενική μας, λοιπόν, αίσθηση του περάσματος του χρόνου, το ψυχολογικό βέλος του χρόνου, προσδιορίζεται στον εγκέφαλο μας από το θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου. Ακριβώς όπως ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, πρέπει να καταγράφουμε στη μνήμη μας τα διαδοχικά γεγονότα με τη σειρά του θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου που στρέφεται προς την κατεύθυνση όπου αυξάνεται η αταξία. Αυτό κάνει τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής να φαίνεται σχεδόν αυταπόδεικτος. Η αταξία αυξάνεται με τον χρόνο γιατί καταγράφουμε το χρόνο προς την κατεύθυνση όπου η αταξία αυξάνεται. Δεν θα μπορούσατε να είστε πιο βέβαιοι για κάτι απ' όσο γι' αυτό!

Αλλά γιατί πρέπει τελικά να υπάρχει ένα θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου; Ή, με άλλα λόγια, γιατί πρέπει να βρίσκεται το Σύμπαν σε κατάσταση μεγάλης τάξης στην μία άκρη του χρόνου, την άκρη που ονομάζουμε παρελθόν; Γιατί δεν βρίσκεται από πάντα σε κατάσταση απόλυτης αταξίας; Κάτι τέτοιο ίσως φαίνεται ότι θα ήταν πιθανότερο. Και γιατί η κατεύθυνση του χρόνου όπου η αταξία αυξάνεται είναι ίδια με την κατεύθυνση του χρόνου όπου το Σύμπαν διαστέλλεται;

Στην κλασική θεωρία της γενικής σχετικότητας δεν μπορούμε να προβλέψουμε πώς άρχισε να υπάρχει το Σύμπαν γιατί όλοι οι γνωστοί νόμοι της φυσικής καταρρέουν στην ανωμαλία της Μεγάλης έκρηξης. Η αρχική κατάσταση του Σύμπαντος θα μπορούσε να ήταν μια κατάσταση μεγάλης ομοιομορφίας και τάξης. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε σαφώς καθορισμένα θερμοδυναμικά και κοσμολογικά βέλη του χρόνου, αυτά που παρατηρούμε σήμερα. Αλλά θα μπορούσε να ήταν και μία κατάσταση μεγάλης ανομοιομορφίας και αταξίας, οπότε το Σύμπαν θα βρισκόταν από την αρχή σε κατάσταση απόλυτης αταξίας: έτσι η αταξία δεν θα μπορούσε να αυξηθεί άλλο: θα μπορούσε είτε να παραμείνει σταθερή, οπότε δεν θα υπήρχε ένα σαφώς καθορισμένο θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου, είτε να μειωθεί, οπότε το θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου θα στρεφόταν προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του κοσμολογικού βέλους του χρόνου. Καμιά από αυτές τις δύο δυνατότητες δεν συμφωνεί με ό,τι παρατηρούμε σήμερα. Αλλά, όπως έχουμε αναφέρει, η κλασική θεωρία της γενικής σχετικότητας προβλέπει την ίδια της την κατάρρευση. Όταν η καμπυλότητα του χωροχρόνου μεγαλώνει, τα κβαντικά βαρυτικά φαινόμενα γίνονται σημαντικά, έτσι η κλασική θεωρία παύει να αποτελεί μια καλή περιγραφή του Σύμπαντος. Για να κατανοήσουμε πώς άρχισε να υπάρχει το Σύμπαν πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μία κβαντική θεωρία της βαρύτητας.

Όπως είδαμε όμως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να

προσδιορίσουμε την κατάσταση του Σύμπαντος χρησιμοποιώντας μια κβαντική θεωρία της βαρύτητας, πρέπει και πάλι να γνωρίζουμε πώς ακριβώς συμπεριφέρονταν οι δυνατές «ιστορίες» του Σύμπαντος στα όρια του χωροχρόνου στο παρελθόν. Μπορούμε να το αποφύγουμε αυτό (την ανάγκη δηλαδή να περιγράψουμε καταστάσεις που ούτε τις γνωρίζουμε ούτε μπορούμε να τις γνωρίσουμε) μόνον αν οι δυνατές «ιστορίες» του Σύμπαντος ικανοποιούν την συνθήκη έλλειψης ορίου: είναι πεπερασμένες σε έκταση αλλά δεν έχουν όρια, ανωμαλίες ή άκρες. Στην περίπτωση αυτή η αρχή του χρόνου θα μπορούσε να είναι ένα κανονικό, ομαλό σημείο του χωροχρόνου, και το Σύμπαν θα μπορούσε να αρχίσει να διαστέλλεται σε μία κατάσταση μεγάλης ομοιομορφίας και τάξης. Βέβαια, δεν θα ήταν δυνατό να είναι εντελώς ομοιόμορφο, επειδή κάτι τέτοιο θα παραβίαζε την αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής. Πρέπει λοιπόν να υπήρχαν μικρές διακυμάνσεις στην κατανομή της πυκνότητας της ύλης και στις ταχύτητες των σωματιδίων. Όμως η συνθήκη της έλλειψης ορίου συνεπάγεται ότι οι διακυμάνσεις αυτές θα ήταν τόσο μικρές όσο θα μπορούσαν να είναι σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας.

Στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος θα υπήρξε μία περίοδος επιταχυνόμενης ή «πληθωριστικής» διαστολής, όπου το μέγεθος του Σύμπαντος θα αυξανόταν με πολύ μεγάλο ρυθμό. Στη διάρκεια αυτής της διαστολής οι διακυμάνσεις στην κατανομή της πυκνότητας της ύλης θα παρέμεναν αρχικά μικρές, στη συνέχεια όμως θα μεγάλωναν. Στις περιοχές όπου η πυκνότητα της ύλης ήταν μεγαλύτερη από τον μέσο όρο η διαστολή θα άρχιζε να επιβραδύνεται εξαιτίας της βαρυτικής έλξης της πρόσθετης μάζας τους. Έτσι αυτές οι περιοχές θα σταματούσαν κάποτε να διαστέλλονται και θα άρχιζαν να συρρικνώνονται και να καταρρέουν σχηματίζοντας γαλαξίες, άστρα και όντα όπως εμείς. Το Σύμπαν λοιπόν θα είχε αρχίσει να υπάρχει σε κατάσταση μεγά-

λης ομοιομορφίας και τάξης που, καθώς θα περνούσε ο χρόνος, θα μεταβαλλόταν σε κατάσταση μεγάλης ανομοιομορφίας και αταξίας. Η μεταβολή αυτή εξηγεί την ύπαρξη του θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου.

Αλλά τι θα συμβεί αν και όταν το Σύμπαν σταματήσει να διαστέλλεται και αρχίσει να συστέλλεται; Η κατεύθυνση του θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου θα αναστραφεί και η αταξία θα αρχίσει να μειώνεται με την πάροδο του χρόνου; Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε διάφορες παράξενες καταστάσεις, ανάλογες με αυτές που περιγράφουν τα μυθιστορήματα επιστημονικής φαντασίας για ανθρώπους που επέζησαν από τη φάση διαστολής και άρχισαν να ζουν στη φάση συστολής. Οι άνθρωποι αυτοί θα βλέπουν κομμάτια γυαλιών στο δάπεδο να συνενώνονται και να σχηματίζουν ποτήρια πάνω στα τραπέζια; Θα θυμούνται τις αυριανές τιμές των μετοχών και θα θησαυρίζουν στα χρηματιστήρια; Ίσως φαίνεται ότι το να αναρωτιόμαστε τι θα συμβεί όταν το Σύμπαν αρχίσει να συστέλλεται δεν παρουσιάζει παρά μόνο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, αφού η φάση συστολής θα έρθει μετά από δέκα δισεκατομμύρια χρόνια τουλάχιστον. Υπάρχει όμως κάποιος συντομότερος τρόπος να ανακαλύψουμε τι θα συμβεί: να πέσουμε μέσα σε μια μαύρη τρύπα! Η βαρυτική κατάρρευση ενός άστρου και ο σχηματισμός μίας μαύρης τρύπας είναι ανάλογες καταστάσεις με την βαρυτική κατάρρευση ολόκληρου του Σύμπαντος και το σχηματισμό της ανωμαλίας της Μεγάλης σύνθλιψης. Έτσι, αν πραγματικά η αταξία μειώνεται κατά τη διάρκεια της φάσης συστολής του Σύμπαντος, το ίδιο θα πρέπει να συμβαίνει και στο εσωτερικό μιας μαύρης τρύπας. Ίσως λοιπόν όταν πέσουμε μέσα στη μαύρη τρύπα να μπορούμε να κερδίζουμε στην ρουλέτα, αφού θα θυμόμαστε τον αριθμό όπου θα πέσει η μπίλια πριν ακόμη διαλέξουμε πού θα βάλουμε τις μάρκες μας. Δυστυχώς όμως, δεν θα έχουμε στη διάθεση μας πολλή ώρα παιχνιδιού, γιατί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα θα διαλυθούμε

από τις μεγάλες διαφορές της βαρυτικής έλξης στα διάφορα σημεία του σώματος μας. Δεν θα μπορούμε λοιπόν να πληροφορήσουμε τους επιστήμονες για την αντιστροφή του θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου ούτε να καταθέσουμε χα κέρδη μας στην τράπεζα, γιατί θα βρισκόμαστε παγιδευμένοι για πάντα μέσα στα όρια του ορίζοντα των γεγονότων της μαύρης τρύπας.

Στην αρχή των ερευνών μου για τη σχέση του θερμοδυναμικού και του κοσμολογικού βέλους του χρόνου πίστευα ότι όταν το Σύμπαν θα αρχίσει να συστέλλεται η αταξία θα αρχίσει να μειώνεται. Και το πίστευα γιατί νόμιζα πως όταν το Σύμπαν γίνει και πάλι πολύ μικρό, πρέπει να επιστρέψει σε κατάσταση ομοιομορφίας και τάξης. Αυτό θα σήμαινε ότι η φάση συστολής θα έμοιαζε με τη χρονικά αντίστροφη της φάσης διαστολής. Οι άνθρωποι που θα ζούσαν στη φάση συστολής θα πέθαιναν πριν γεννηθούν και θα γίνονταν πιο νέοι καθώς το Σύμπαν θα συστελλόταν.

Η ιδέα αυτή είναι γοητευτική γιατί παρουσιάζει μία όμορφη συμμετρία μεταξύ της φάσης διαστολής και της φάσης συστολής. Παρ' όλα αυτά δεν μπορούμε να την αποδεχούμε πριν εξετάσουμε τη σχέση της με τις άλλες ιδέες για το Σύμπαν. Τίθεται λοιπόν το ερώτημα αν η ιδέα αυτή προκύπτει από την συνθήκη έλλειψης ορίου ή είναι ασυμβίβαστη μαζί της. Όπως προανέφερα, στην αρχή νόμιζα πως η συνθήκη έλλειψης ορίου συνεπαγόταν πραγματικά το ότι η αταξία πρέπει να μειώνεται στη διάρκεια της φάσης συστολής. Παρασύρθηκα σε αυτή την άποψη από την αναλογία με την επιφάνεια της Γης: Αν θεωρήσουμε ότι η αρχή του Σύμπαντος αντιστοιχεί στον Βόρειο Πόλο, τότε το τέλος του θα είναι παρόμοιο με την αρχή του, ακριβώς όπως ο Βόρειος Πόλος είναι παρόμοιος με το Νότιο. Αλλά η αναλογία Βόρειου και Νότιου Πόλου με την αρχή και το τέλος του Σύμπαντος αναφέρεται στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τον φανταστικό χρόνο. Στον πραγματικό χρόνο, η αρχή και το

τέλος του Σύμπαντος μπορεί να διαφέρουν πολύ. Παρασύρθηκα επίσης από κάποια εργασία μου σε ένα απλουστευμένο μοντέλο του Σύμπαντος όπου η φάση συστολής έμοιαζε πραγματικά με τη φάση διαστολής. Όμως ο συνεργάτης μου Don Page έδειξε ότι η συνθήκη έλλειψης ορίου δεν απαιτούσε αναγκαστικά ότι η φάση συστολής πρέπει να είναι η χρονικά αντίστροφη της φάσης διαστολής. Στη συνέχεια, ένας μαθητής μου, ο Raymond Laflamme, βρήκε ότι σε ένα λιγότερο απλουστευμένο μοντέλο η συστολή του Σύμπαντος διέφερε σημαντικά από τη διαστολή του. Κατάλαβα λοιπόν ότι είχα κάνει λάθος: στην πραγματικότητα η συνθήκη έλλειψης ορίου συνεπάγεται ότι η αταξία του Σύμπαντος θα συνεχίσει να αυξάνεται και στη διάρκεια της φάσης συστολής. Το θερμοδυναμικό και το ψυχολογικό βέλος του χρόνου δεν αναστρέφονται ούτε όταν το Σύμπαν συστέλλεται ούτε μέσα στις μαύρες τρύπες.

Πώς πρέπει να αντιδράσει κανείς όταν καταλάβει ότι έκανε ένα λάθος σαν αυτό; Μερικοί δεν το παραδέχονται ποτέ και συνεχίζουν να προβάλλουν καινούργια (και συχνά αντιφατικά) επιχειρήματα για να υποστηρίξουν τη θέση τους — όπως έκανε ο Eddington όταν αρνήθηκε να δεχτεί τη δυνατότητα βαρυτικής κατάρρευσης άστρων σε μαύρες τρύπες. Άλλοι ισχυρίζονται ότι στην πραγματικότητα δεν υποστήριξαν ποτέ τη λανθασμένη άποψη ή ότι, ακόμη και αν το έκαναν, το έκαναν μόνο και μόνο για να δείξουν ότι περιείχε αντιφάσεις. Πιστεύω πως η ορθότερη και λιγότερο συγκεχυμένη αντιμετώπιση ενός τέτοιου λάθους είναι να το παραδεχτεί κανείς δημόσια. Ένα καλό παράδειγμα τέτοιας αντιμετώπισης έδωσε ο Αϊνστάιν όταν αποκάλεσε την κοσμολογική σταθερά — που την είχε εισαγάγει για να επιτύχει ένα στατικό μοντέλο του Σύμπαντος — το μεγαλύτερο λάθος της ζωής του.

Για να επιστρέψουμε στο βέλος του χρόνου, το ερώτημα παραμένει: Γιατί παρατηρούμε ότι το θερμοδυναμικό και το

κοσμολογικό βέλος του χρόνου στρέφονται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση; Ή, με άλλα λόγια, γιατί η αταξία αυξάνεται στην ίδια κατεύθυνση του χρόνου με αυτήν όπου το Σύμπαν διαστέλλεται; Αν πιστεύει κανείς ότι το Σύμπαν θα διασταλλεί και μετά θα συσταλλεί, όπως φαίνεται ότι συνεπάγεται η συνθήκη έλλειψης ορίου, το ερώτημα ανάγεται τελικά στο γιατί εμείς οι ίδιοι υπάρχουμε στη φάση διαστολής και όχι στη φάση συστολής.

Μπορούμε να απαντήσουμε σ' αυτό το ερώτημα στη βάση της ασθενούς ανθρωπικής αρχής: Οι συνθήκες που θα επικρατούν στη φάση συστολής δεν θα είναι κατάλληλες για την ύπαρξη νοημόνων όντων ικανών να θέσουν το ερώτημα «Γιατί η αταξία αυξάνεται κατά την ίδια κατεύθυνση μ' αυτήν όπου το Σύμπαν διαστέλλεται;». Η πληθωριστική διαστολή στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος, που την προβλέπει η συνθήκη έλλειψης ορίου, σημαίνει ότι το Σύμπαν πρέπει να διαστέλλεται με ρυθμό πολύ κοντά στον οριακό ρυθμό που απαιτείται για να αποφευχθεί η βαρυτική συρρίκνωση. Έτσι το Σύμπαν δεν θα αρχίσει να συρρικνώνεται παρά μόνο αφού περάσει ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Αλλά ως τότε όλα τα άστρα θα έχουν εξαντλήσει τα πυρηνικά τους καύσιμα, και τα πρωτόνια και νετρόνια τους θα έχουν διασπαστεί σε ελαφρά σωματίδια και ακτινοβολία. Το Σύμπαν θα βρίσκεται σε κατάσταση σχεδόν απόλυτης αταξίας. Δεν θα υπάρχει λοιπόν ένα ισχυρό θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου. Η αταξία δεν θα μπορεί να αυξηθεί πολύ γιατί το Σύμπαν θα βρίσκεται ήδη στην κατάσταση της σχεδόν απόλυτης αταξίας: Εν τούτοις, ένα ισχυρό θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου είναι αναγκαίο για τις λειτουργίες της νοήμονος ζωής. Για να επιβιώσουν οι άνθρωποι πρέπει να καταναλώνουν τροφή, που είναι μορφή ενέργειας σε κατάσταση τάξης, και να τη μετατρέπουν σε θερμότητα, που είναι μορφή ενέργειας σε κατάσταση αταξίας. Η νοήμων ζωή λοιπόν δεν θα μπορεί να υπάρξει στη φάση συστολής του Σύμπαντος. Έτσι εξηγείται γιατί παρατηρούμε ότι το

κοσμολογικό και το θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου στρέφονται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση: όχι γιατί η διαστολή του Σύμπαντος αναγκάζει την αταξία να αυξάνεται, αλλά γιατί η συνθήκη έλλειψης ορίου αναγκάζει την αταξία να αυξάνεται· και επιτρέπει να υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη νοήμονος ζωής μόνο στη φάση διαστολής του Σύμπαντος.

Για να ανακεφαλαιώσουμε, οι νόμοι της φυσικής δεν κάνουν καμιά διάκριση μεταξύ της κατεύθυνσης του χρόνου προς τα εμπρός, προς το μέλλον, και της κατεύθυνσης του χρόνου προς τα πίσω, προς το παρελθόν. Υπάρχουν όμως τρία τουλάχιστον βέλη του χρόνου που διακρίνουν το μέλλον από το παρελθόν: το θερμοδυναμικό, στην κατεύθυνση του χρόνου όπου η αταξία αυξάνεται· το ψυχολογικό, στην κατεύθυνση του χρόνου όπου θυμόμαστε το παρελθόν αντί για το μέλλον και το κοσμολογικό, στην κατεύθυνση του χρόνου όπου το Σύμπαν διαστέλλεται αντί να συστέλλεται. Δείξαμε ότι το ψυχολογικό βέλος είναι ουσιαστικά το ίδιο με το θερμοδυναμικό, οπότε στρέφονται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Η συνθήκη έλλειψης ορίου του Σύμπαντος προβλέπει την ύπαρξη ενός σαφώς καθορισμένου θερμοδυναμικού βέλους του χρόνου, γιατί το Σύμπαν πρέπει να αρχίσει να υπάρχει σε μία κατάσταση ομοιομορφίας και τάξης. Παρατηρούμε ότι το θερμοδυναμικό βέλος προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του κοσμολογικού επειδή μόνο στη φάση διαστολής μπορούν να υπάρχουν νοήμονα όντα. Η φάση συστολής είναι ακατάλληλη γιατί δεν διαθέτει ισχυρό θερμοδυναμικό βέλος του χρόνου.

Η πρόοδος του ανθρώπινου είδους στην πορεία κατανόησης του Σύμπαντος έχει συγκεντρώσει ένα μικρό απόθεμα τάξης μέσα σε έναν Κόσμο αυξανόμενης αταξίας. Αν θυμάστε όλες τις λέξεις αυτού του βιβλίου, η μνήμη σας θα έχει καταγράψει περίπου δύο εκατομμύρια μονάδες πληροφορίας: τόση θα είναι η αύξηση της τάξης στον εγκέφαλό σας. Όσο όμως διαβάζατε το

βιβλίο μετατρέπατε χίλιες τουλάχιστον θερμίδες «οργανωμένης» ενέργειας (που είχατε προσλάβει με τη μορφή τροφής) σε «αποδιοργανωμένη» ενέργεια (που αποβάλατε στο περιβάλλον σας με τη μορφή θερμότητας). Συνολικά αυτή η μετατροπή θα αυξήσει την αταξία του Σύμπαντος κατά είκοσι επτάκις εκατομμύρια μονάδες, ή αλλιώς κατά δέκα πεντάκις εκατομμύρια φορές την αντίστοιχη αύξηση της τάξης στη μνήμη του εγκεφάλου σας — και αυτό για να κατανοήσετε ό,τι βρίσκεται μέσα σε αυτό το βιβλίο. Στο επόμενο κεφάλαιο θα προσπαθήσω να αυξήσω λίγο ακόμη αυτό το μικρό απόθεμα τάξης, εξηγώντας πώς οι άνθρωποι προσπαθούν να συνδυάσουν τις επιμέρους θεωρίες που περιέγραφα και να σχηματίσουν μια πλήρη ενιαία θεωρία που θα τους επιτρέψει να κατανοήσουν ό,τι βρίσκεται μέσα σε ολόκληρο το Σύμπαν.

10

Η ενοποίηση των φυσικών θεωριών

Όπως εξηγήσαμε στο πρώτο κεφάλαιο, θα ήταν πολύ δύσκολο να δημιουργήσουμε κατευθείαν μια πλήρη ενιαία θεωρία για ό,τι βρίσκεται μέσα στο Σύμπαν. Αντί γι' αυτό, η επιστήμη σημείωσε προόδους ανακαλύπτοντας επιμέρους θεωρίες που η καθεμιά περιγράφει ένα περιορισμένο αριθμό φαινομένων τις επιδράσεις των άλλων φαινομένων είτε τις προσεγγίζει αριθμητικά είτε τις παραβλέπει εντελώς. (Η χημεία, για παράδειγμα, μας επιτρέπει να υπολογίζουμε τις επιδράσεις μεταξύ των ατόμων χωρίς να γνωρίζουμε την εσωτερική δομή των πυρήνων τους). Ελπίζουμε όμως ότι κάποτε θα ανακαλύψουμε μια πλήρη, συνεπή ενιαία θεωρία, που θα περιλαμβάνει όλες τις επιμέρους θεωρίες και δεν θα περιέχει αυθαίρετα επιλεγμένες παραμέτρους που να ρυθμίζουν «εκ των υστέρων» τη συμφωνία της με τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Η πορεία προς μια τέτοια θεωρία ονομάζεται *ενοποίηση των φυσικών θεωριών*. Ο Αϊνστάιν αφιέρωσε τα περισσότερα από τα τελευταία χρόνια της ζωής του

στην προσπάθεια του να ανακαλύψει μια ενιαία θεωρία, αλλά χωρίς επιτυχία. Οι συνθήκες δεν ήταν ακόμη ώριμες: υπήρχαν επιμέρους θεωρίες για τη βαρύτητα και την ηλεκτρομαγνητική δύναμη, αλλά πολύ λίγα ήταν γνωστά για τις πυρηνικές δυνάμεις. Επίσης ο Αϊνστάιν αρνήθηκε να πιστέψει στην κβαντική μηχανική αν και ο ίδιος διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της. Φαίνεται όμως ότι η αρχή της απροσδιοριστίας, όπου βασίζεται η κβαντική μηχανική, είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του Σύμπαντος. Μια επιτυχής λοιπόν ενιαία θεωρία πρέπει αναγκαστικά να ενσωματώνει την αρχή αυτή.

Όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι προοπτικές να ανακαλυφθεί μια τέτοια θεωρία φαίνονται σήμερα πολύ μεγαλύτερες, επειδή γνωρίζουμε πολύ περισσότερα πράγματα για το Σύμπαν. Αλλά πρέπει να αποφύγουμε να είμαστε υπερβολικά αισιόδοξοι! Και άλλες φορές στο παρελθόν είχαμε πιστέψει ότι εμφανίστηκαν ανάλογες προοπτικές. Στην αρχή του αιώνα μας, για παράδειγμα, οι φυσικοί ήλπιζαν ότι μπορούσαν να εξηγήσουν όλα τα φαινόμενα με όρους που περιέγραφαν τις ιδιότητες της συνεχούς ύλης, όπως ελαστικότητα και μετάδοση θερμότητας. Η ανακάλυψη της ατομικής δομής και της αρχής της απροσδιοριστίας εξανέμισε αυτές τις ελπίδες. Το 1928 ο φυσικός Max Born (που τιμήθηκε με το βραβείο Nobel για τη συμμετοχή του στη διαμόρφωση της κβαντικής μηχανικής) δήλωνε σε μία ομάδα επισκεπτών του Πανεπιστημίου του Göttingen: «Η φυσική θα τελειώσει σε έξι μήνες». Η αισιοδοξία του βασιζόταν στην πρόσφατη τότε ανακάλυψη από τον Dirac της εξίσωσης που περιγράφει τη συμπεριφορά του ηλεκτρονίου. Οι φυσικοί ισχυρίζονταν ότι μια παρόμοια εξίσωση θα περιέγραφε και την συμπεριφορά του πρωτονίου (που την εποχή εκείνη ήταν το μόνο άλλο γνωστό σωματίδιο), και έτσι θα φτάναμε στο τέλος της θεωρητικής φυσικής. Η ανακάλυψη όμως του νετρονίου και των πυρηνικών δυνάμεων έθεσε τέλος στους ισχυρισμούς αυτούς. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθώ να πιστεύω ότι

σήμερα υπάρχει σταθερό έδαφος για να στηρίξουμε την ελπίδα πως μπορεί να βρισκόμαστε κοντά στο τέλος της έρευνας για την πλήρη ενιαία θεωρία.

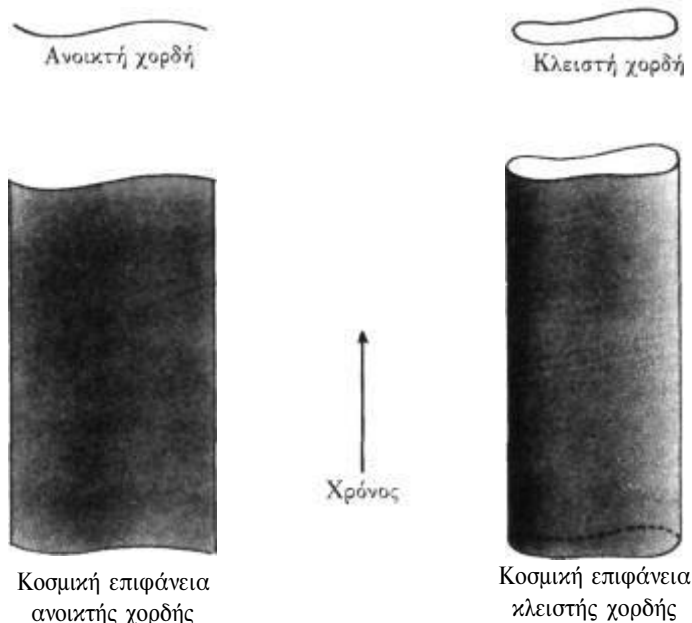
Σε προηγούμενα κεφάλαια περιγράψαμε την γενική θεωρία της σχετικότητας, δηλαδή την επιμέρους θεωρία της βαρύτητας, όπως επίσης και τις επιμέρους θεωρίες για την ασθενή πυρηνική δύναμη, την ισχυρή πυρηνική δύναμη και την ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Οι τρεις τελευταίες μπορούν να συνδυαστούν στις ονομαζόμενες Μεγάλες Ενοποιημένες Θεωρίες, που δεν είναι πολύ ικανοποιητικές επειδή δεν περιλαμβάνουν τη βαρύτητα και περιέχουν κάποιες ποσότητες (όπως οι σχετικές μάζες των διαφόρων σωματιδίων) που η θεωρία δεν μπορεί να προβλέψει (και που πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να συμφωνούν με τα δεδομένα των παρατηρήσεων). Η βασική δυσκολία στο να ανακαλύψουμε μία θεωρία που να ενοποιεί τη βαρύτητα με τις άλλες δυνάμεις οφείλεται στο ότι η γενική σχετικότητα είναι μια «κλασική» θεωρία, δεν ενσωματώνει δηλαδή την αρχή της απροσδιοριστίας. Αντίθετα, οι άλλες επιμέρους θεωρίες εξαρτώνται καθοριστικά από την κβαντική μηχανική (που βασίζεται στην αρχή της απροσδιοριστίας). Ένα αναγκαίο πρώτο βήμα λοιπόν είναι να συνδυάσουμε τη γενική θεωρία της σχετικότητας με την αρχή της απροσδιοριστίας. Όπως ήδη αναφέραμε, αυτό έχει μερικές αξιοσημείωτες συνέπειες, όπως οι μαύρες τρύπες (που δεν είναι μαύρες) και το Σύμπαν που δεν περιέχει ανωμαλίες ή όρια, αλλά περιέχεται πλήρως στον εαυτό του. Το πρόβλημα συνίσταται στο ότι, όπως εξηγήσαμε στο κεφάλαιο 7, η αρχή της απροσδιοριστίας σημαίνει πως ακόμη και ο κενός χώρος είναι γεμάτος από ζεύγη «δυνάμεις» σωματιδίων και αντισωματιδίων. Αυτά τα ζεύγη θα έχουν ένα άπειρο ποσό ενέργειας· έτσι, σύμφωνα με τη διάσημη εξίσωση του Αϊνστάιν $E = mc^2$, θα έχουν και ένα άπειρο ποσό ισοδύναμης μάζας. Η βαρυτική τους έλξη θα έπρεπε λοιπόν να καμπυλώνει το Σύμπαν σε ένα μέγεθος άπειρα μικρό.

Με σχεδόν παρόμοιο τρόπο, ανάλογες καταστάσεις ύπαρξης άπειρων ποσοτήτων εμφανίζονται και στις υπόλοιπες επιμέρους θεωρίες· σε όλες όμως τις περιπτώσεις είναι δυνατόν να εξαλειφθούν από μια διαδικασία που ονομάζεται *επανακανονικοποίηση*. Η διαδικασία αυτή εξαλείφει τις άπειρες ποσότητες εισάγοντας άλλες άπειρες ποσότητες· έτσι, τελικά, παραμένουν πάντα πεπερασμένα υπόλοιπα. Αν και αυτή η τεχνική είναι από μαθηματική άποψη αμφισβητήσιμη, στην πράξη φαίνεται ότι λειτουργεί ικανοποιητικά και χρησιμοποιείται μαζί με τις κβαντικές θεωρίες για τη διατύπωση προβλέψεων που συμφωνούν σε καταπληκτικό βαθμό με τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Η επανακανονικοποίηση όμως παρουσιάζει ένα σοβαρό ελάττωμα από την άποψη της προσπάθειας ανακάλυψης μίας πλήρους θεωρίας, επειδή σημαίνει ότι οι πραγματικές τιμές της μάζας των σωματιδίων και της έντασης των μεταξύ τους δυνάμεων δεν μπορεί να προβλεφθούν από τη θεωρία αλλά πρέπει να επιλέγονται έτσι που να συμφωνούν με τα δεδομένα των παρατηρήσεων.

Όταν προσπαθούμε να ενσωματώσουμε την αρχή της απροσδιοριστίας στη γενική σχετικότητα, διαθέτουμε δύο μόνο ποσότητες που τα μεγέθη τους μπορούν να ρυθμιστούν: την ένταση της βαρυτικής έλξης και την κοσμολογική σταθερά. Αλλά η ρύθμιση αυτών των μεγεθών δεν επαρκεί για να εξαλειφθούν όλες οι άπειρες ποσότητες που εμφανίζονται. Έτσι η θεωρία που προκύπτει φαίνεται ότι προβλέπει πως κάποιες ποσότητες, όπως η καμπυλότητα του χωροχρόνου, πρέπει να είναι άπειρες· στην πραγματικότητα όμως μπορούμε να διαπιστώσουμε πως οι ποσότητες αυτές — που μπορεί να παρατηρηθούν και να μετρηθούν — έχουν σαφώς πεπερασμένες τιμές! Αυτή η δυσκολία που παρουσιάζεται όταν προσπαθούμε να συνδυάσουμε τη γενική σχετικότητα με την αρχή της απροσδιοριστίας ήταν για αρκετό καιρό αμφιλεγόμενη, αλλά τελικά επιβεβαιώθηκε από λεπτομερείς υπολογισμούς το 1972. Τέσσερα χρόνια μετά προτάθηκε

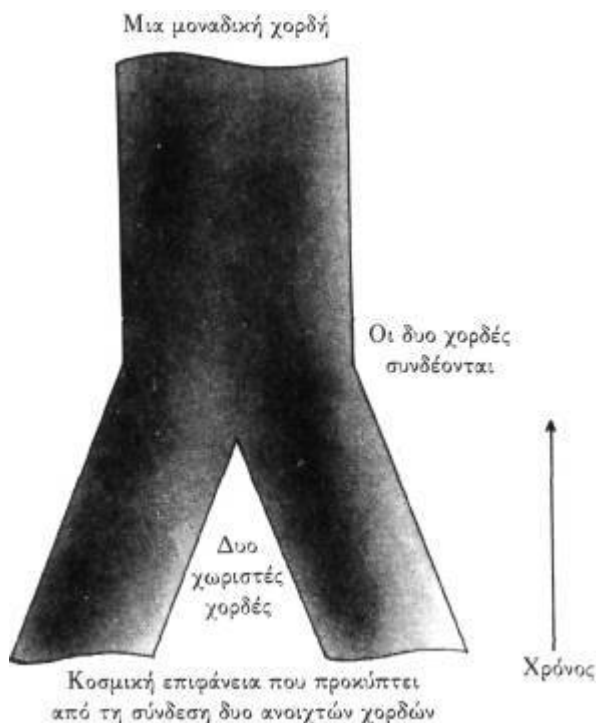
μία πιθανή διέξοδος από μία ομάδα θεωριών που ονομάζονται «θεωρίες υπερβαρύτητας». Η βασική ιδέα τους ήταν να συνδυαστεί το σωματίδιο αλληλεπίδρασης της βαρύτητας, που έχει σπιν 2 και ονομάζεται *βαρυτόνιο*, με κάποια άλλα νέα σωματίδια με σπιν 3/2, 1, 1/2 και 0. Με μία έννοια, όλα αυτά τα σωματίδια θεωρούνταν διαφορετικές καταστάσεις του ίδιου «υπερσωματιδίου», με τον τρόπο αυτό τα σωματίδια ύλης με σπιν 1/2 και 3/2 ενοποιούνταν με τα σωματίδια αλληλεπίδρασης με σπιν 0, 1 και 2. Τα ζεύγη των «δυνάμει» σωματιδίων και αντισωματιδίων με σπιν 1/2 και 3/2 θα είχαν αρνητική ενέργεια, τείνοντας έτσι να εξαλείψουν τις συνεισφορές σε θετική ενέργεια των αντίστοιχων ζευγών με σπιν 0, 1 και 2. Αυτό θα εξάλειφε πολλές από τις πιθανές άπειρες ποσότητες· υπήρχαν όμως υποψίες ότι κάποιες απ' αυτές θα εξακολουθούσαν να παραμένουν. Οι υπολογισμοί που απαιτούνταν για να εξακριβωθεί αυτό ήταν τόσο μεγάλοι και δύσκολοι που κανένας δεν ήταν διατεθειμένος να αναλάβει να τους φέρει σε πέρας. Ακόμη και αν χρησιμοποιούσε ηλεκτρονικό υπολογιστή, είχε εκτιμηθεί ότι θα χρειαζόταν τουλάχιστον τέσσερα χρόνια· υπήρχαν μάλιστα πολλές πιθανότητες να γίνει τουλάχιστον ένα λάθος, ίσως και περισσότερα. Έτσι, όποιος έκανε τους υπολογισμούς θα γνώριζε ότι έφτασε στο σωστό αποτέλεσμα μόνον αν κάποιος άλλος τους επαναλάμβανε και τους επιβεβαίωνε, πράγμα που δεν φαινόταν και πολύ πιθανό!

Παρ' όλα αυτά τα προβλήματα και το γεγονός ότι τα σωματίδια των θεωριών υπερβαρύτητας δεν φαινόταν πως θα σχετιζόνταν με τα παρατηρούμενα σωματίδια, οι περισσότεροι φυσικοί πίστευαν ότι η υπερβαρύτητα ήταν πιθανότατα η σωστή απάντηση στο πρόβλημα της ενοποίησης των φυσικών θεωριών, γιατί έμοιαζε να είναι ο καλύτερος τρόπος για να ενοποιηθεί η βαρύτητα με τις άλλες δυνάμεις. Το 1984 όμως σημειώθηκε μία στροφή των προτιμήσεων των φυσικών προς τις ονομαζόμενες *θεωρίες χορδών*. Σ' αυτές οι βασικές δομικές μονάδες δεν



ΕΙΚΟΝΕΣ 10-1 και 10-2.

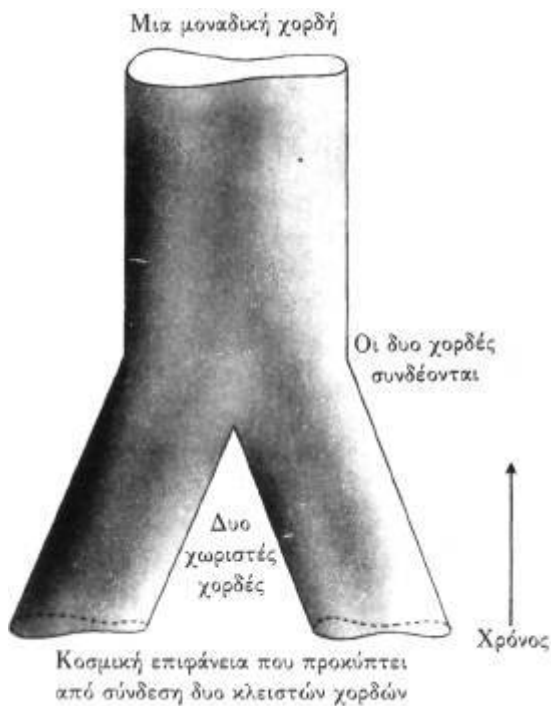
είναι τα σωματίδια, που καταλαμβάνουν ένα μόνον σημείο του χώρου, αλλά κάποια αντικείμενα που έχουν μόνο μήκος, και καμιά άλλη διάσταση, μοιάζουν δηλαδή με απείρως λεπτές χορδές. Οι χορδές αυτές μπορεί να έχουν άκρα (ανοικτές χορδές) ή να είναι συνδεδεμένες με τον εαυτό τους σχηματίζοντας απείρως λεπτούς δακτυλίους (κλειστές χορδές) (βλ. εικ. 10-1 και εικ. 10-2). Ένα σωματίδιο καταλαμβάνει ένα σημείο στο χώρο σε κάθε χρονική στιγμή. Έτσι η ιστορία του στο χωρόχρονο μπορεί να αναπαρασταθεί με μία γραμμή, που λέγεται *κοσμική γραμμή*. Μία χορδή όμως καταλαμβάνει μία γραμμή στον χώρο σε κάθε χρονική στιγμή. Έτσι η ιστορία της στο χωρόχρονο μπορεί να αναπαρασταθεί από μία επιφάνεια δύο δια-



ΕΙΚΟΝΑ 10-3.

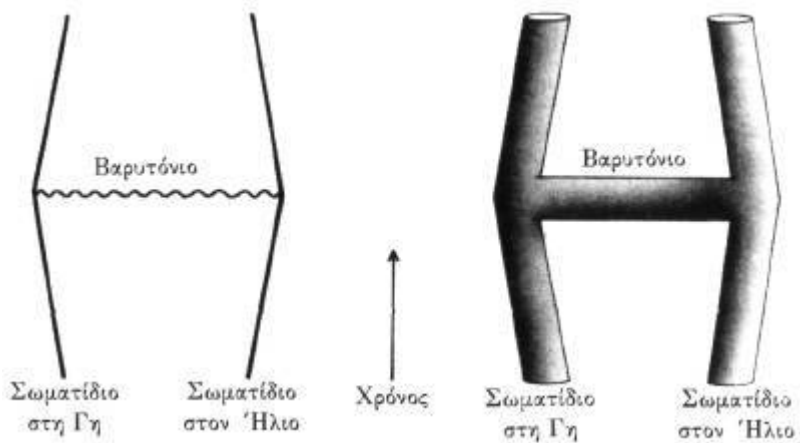
στάσεων που λέγεται *κοσμική επιφάνεια*.. (Κάθε σημείο σε μία τέτοια κοσμική επιφάνεια μπορεί να προσδιοριστεί από δύο αριθμούς: ο ένας προσδιορίζει το χρόνο και ο άλλος τη θέση του σημείου στη χορδή). Η κοσμική επιφάνεια μίας ανοιχτής χορδής είναι μια ταινία: οι άκρες της αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές στο χωρόχρονο των άκρων της χορδής (εικ. 10-1). Η κοσμική επιφάνεια μιας κλειστής χορδής είναι ένας κύλινδρος ή σωλήνας (εικ. 10-2). Μία τομή κάθετα στον άξονα του κυλίνδρου ή σωλήνα είναι ένας δακτύλιος, που αντιπροσωπεύει τη θέση της χορδής σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Δύο τμήματα χορδής μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους και



ΕΙΚΟΝΑ 10-4.

να σχηματίσουν μια ενιαία χορδή. Στην περίπτωση της ανοιχτής χορδής η μία άκρη του ενός τμήματος συνδέεται με τη μία άκρη του άλλου, σχηματίζοντας μία επιφάνεια όπως εκείνη του οδοστρώματος δύο λωρίδων κυκλοφορίας που συμβάλλουν σε μία (βλ. εικ. 10-3). Στην περίπτωση της κλειστής χορδής η επιφάνεια που σχηματίζεται μοιάζει με ένα παντελόνι, όπου τα δύο σκέλη συνενώνονται στο τμήμα της μέσης (βλ. εικ. 10-4). Με παρόμοιο τρόπο, ένα ενιαίο τμήμα χορδής μπορεί να διαιρεθεί σε δύο χορδές. Στις θεωρίες χορδών, ό,τι προηγουμένως εκλαμβανόταν ως σωματίδιο τώρα απεικονίζεται ως κύμα που διατρέχει την χορδή, σαν τα κύματα που μπορούμε να προκαλέσουμε πάνω



ΕΙΚΟΝΕΣ 10-5 και 10-6.

σε ένα μακρύ τεντωμένο σχοινί. Η εκπομπή ή απορρόφηση ενός σωματιδίου από κάποιο άλλο αντιστοιχεί στο διαχωρισμό ή τη σύνδεση των χορδών. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις θεωρίες των «σημειακών» σωματιδίων η βαρυτική αλληλεπίδραση δύο σωματιδίων που βρίσκονται το ένα στον Ήλιο και το άλλο στη Γη, προκαλείται από την εκπομπή ενός βαρυτονίου από το σωματίδιο στον Ήλιο και την απορρόφηση του από το σωματίδιο στη Γη (βλ. εικ. 10-5). Στις θεωρίες χορδών η διαδικασία αυτή αντιστοιχεί σε δύο «σωλήνες» που συνδέονται μεταξύ τους με έναν τρίτο (βλ. εικ. 10-6). (Με μια έννοια, οι διαδικασίες στις θεωρίες χορδών μοιάζουν σαν τις εργασίες συνδέσεων και αποσυνδέσεων των υδραυλικών εγκαταστάσεων). Οι δύο μεγάλοι «σωλήνες» αντιστοιχούν στα δύο σωματίδια στον Ήλιο και στη Γη, και αυτός που τους συνδέει αντιστοιχεί στο βαρυτόνιο που ανταλλάσσουν μεταξύ τους.

Η θεωρία των χορδών έχει περίεργη ιστορία. Δημιουργήθηκε αρχικά στα τέλη της δεκαετίας του 1960 στην προσπάθεια να ανακαλυφθεί μια θεωρία που να περιγράφει τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις. Η βασική ιδέα της ήταν ότι τα σωματίδια όπως το

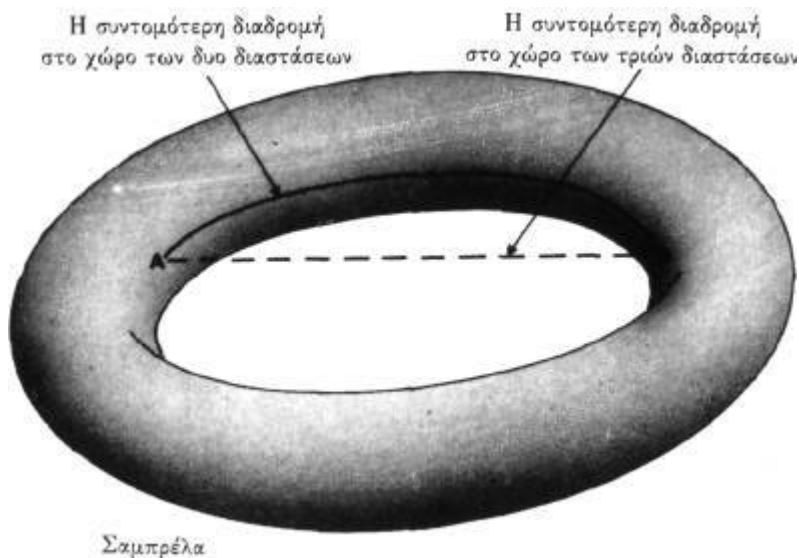
πρωτόνιο και το νετρόνιο μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχούν σε κύματα πάνω σε μία χορδή. Οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων θα αντιστοιχούσαν σε κάποια τμήματα χορδών που συνδέονται με κάποια άλλα, όπως στον ιστό της αράχνης. Για να προβλέψει αυτή η θεωρία τις παρατηρούμενες τιμές έντασης της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, θα έπρεπε οι χορδές να μοιάζουν με ελαστικές ταινίες που καθεμιά τους θα ασκούσε τάση δέκα περίπου τόννων.

Το 1974, ο Joel Scherk του Πανεπιστημίου του Παρισιού και ο John Schwarz του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Καλιφόρνιας δημοσίευσαν μια εργασία όπου υποστήριζαν ότι η θεωρία των χορδών θα μπορούσε να περιγράψει τη βαρυτική δύναμη, μόνον όμως αν η τάση των χορδών ήταν πολύ μεγαλύτερη, περίπου ένα δωδεκάκις εκατομμύριο τόννοι (η μονάδα ακολουθούμενη από 39 μηδενικά). Οι προβλέψεις της θεωρίας των χορδών θα ήταν ακριβώς οι ίδιες με αυτές της γενικής θεωρίας της σχετικότητας στις κανονικές κλίμακες μεγέθους, αλλά θα διέφεραν στις πάρα πολύ μικρές κλίμακες, μικρότερες του ενός δεκάκις εκατομμυριοστού του εκατοστομέτρου. (Ένα εκατοστόμετρο διαιρεμένο με τον αριθμό που αποτελείται απ' τη μονάδα και 33 μηδενικά μετά απ' αυτήν). Η εργασία αυτή όμως δεν προσέχτηκε πολύ γιατί εκείνη ακριβώς την εποχή οι περισσότεροι φυσικοί εγκατέλειψαν την αρχική θεωρία χορδών για τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις και στράφηκαν προς τη θεωρία που βασιζόταν στα κουάρκ και τα γλοιόνια και φαίνονταν να ταιριάζει περισσότερο στα δεδομένα των παρατηρήσεων. Ο Joel Scherk πέθανε κάτω από τραγικές συνθήκες (υπέφερε από διαβήτη και έπεσε σε κώμα κάποια στιγμή που δεν βρισκόταν κανείς κοντά του για να του κάνει μια ένεση ινσουλίνης). Έτσι ο Schwarz έμεινε μόνος του, και σχεδόν ο μοναδικός υποστηρικτής της θεωρίας των χορδών μεγάλης τάσης.

Το 1984 αναβίωσε ξαφνικά το ενδιαφέρον για τις θεωρίες των χορδών, για δύο λόγους. Ο πρώτος ήταν ότι οι φυσικοί δεν έκαναν και μεγάλες προόδους στην προσπάθειά τους να δείξουν ότι η θεωρία της υπερβαρύτητας οδηγούσε σε πεπερασμένα μεγέθη ή ότι μπορούσε να εξηγήσει τα είδη των σωματιδίων που παρατηρούμε στο Σύμπαν. Ο δεύτερος ήταν η δημοσίευση μιας εργασίας του Schwarz με τον Mike Green του Πανεπιστημίου Queen Mary του Λονδίνου, όπου αποδεικνύεται ότι η θεωρία των χορδών θα μπορούσε να εξηγήσει την ύπαρξη σωματιδίων που έχουν μια ενδογενή αριστερόστροφη ιδιότητα, ακριβώς όπως κάποια από τα σωματίδια που παρατηρούμε. Όποιοι και αν ήταν οι λόγοι της αναβίωσης της θεωρίας των χορδών, πολλοί φυσικοί άρχισαν να εργάζονται πάνω σε αυτήν. Σύντομα αναπτύχθηκε μία καινούργια εκδοχή, η ονομαζόμενη θεωρία των *ετεροτικών χορδών* που ίσως μπορέσει να εξηγήσει όλα τα είδη των σωματιδίων που παρατηρούμε.*

Οι θεωρίες των χορδών εμφανίζουν και αυτές καταστάσεις υπαρξης απείρων ποσοτήτων θεωρείται όμως ότι όλες οι άπειρες ποσότητες θα εξαλειφθούν σε κάποιες εκδοχές τους, όπως οι ετεροτικές χορδές (αν και αυτό δεν είναι ακόμη βέβαιο). Οι θεωρίες αυτές όμως παρουσιάζουν ένα μεγαλύτερο πρόβλημα: φαίνεται ότι είναι συνεπείς και δεν περιέχουν αντιφάσεις μόνο όταν ο χωρόχρονος έχει είτε δέκα είτε είκοσι έξι διαστάσεις (αντί για τις γνωστές μας τέσσερις)! Οι πολλές πρόσθετες διαστάσεις είναι φυσικά κοινός τόπος στα μυθιστορήματα επιστημονικής φαντασίας, στην πραγματικότητα είναι σχεδόν αναγκαστικές,

* Το επίθετο «ετεροτικές» σχηματίζεται από την ελληνική λέξη «ετέρωσις», που σημαίνει την αυξημένη ρώμη ζώων ή φυτών που προέρχονται από κατάλληλες διασταυρώσεις. Στις «ετεροτικές» χορδές παρουσιάζεται μία σύζευξη χαρακτηριστικών από τις χορδές στις δέκα και στις εικοσιέξι διαστάσεις. Έτσι οι χορδές αυτές διαθέτουν μία αυξημένη θεωρητική αποτελεσματικότητα. Φαίνεται λοιπόν ότι μερικοί φυσικοί εξακολουθούν να βρίσκουν γόνιμη την ελληνική γλώσσα! (Σ.τ.μ.).



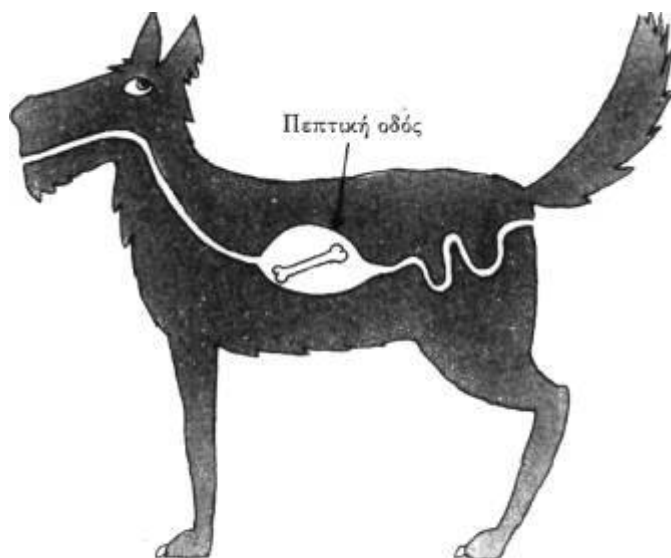
ΕΙΚΟΝΑ 10-7.

αφού χωρίς αυτές το γεγονός ότι η θεωρία της σχετικότητας συνεπάγεται πως δεν μπορούμε να κινηθούμε με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός, σημαίνει ότι χρειαζόμαστε υπερβολικά πολύ χρόνο για τα ταξίδια μεταξύ των άστρων και των γαλαξιών. Η ιδέα που εμφανίζεται συχνά στα μυθιστορήματα επιστημονικής φαντασίας είναι ότι μπορεί κανείς να ανακαλύψει μια συντομότερη διαδρομή μέσα από μία άλλη διάσταση. Μπορούμε να απεικονίσουμε κάτι ανάλογο με τον εξής τρόπο: Φανταστείτε ότι ο χώρος όπου ζούμε έχει δύο μόνο διαστάσεις και είναι καμπύλος όπως η επιφάνεια ενός δακτυλίου ή μιας σαμπρέλας, (βλ. εικ. 10-7). Αν βρισκόσασταν στη μία πλευρά του δακτυλίου και θέλατε να πάτε σε κάποιο σημείο της άλλης, θα έπρεπε να ακολουθήσετε μια διαδρομή πάνω στην επιφάνεια κατά μήκος του δακτυλίου. Αν όμως μπορούσατε να ταξιδέψετε

στη τρίτη διάσταση θα περνούσατε συντομότερα κατευθείαν απέναντι.

Γιατί δεν παρατηρούμε όλες αυτές τις πρόσθετες διαστάσεις αν πραγματικά υπάρχουν; Γιατί βλέπουμε μόνον τρεις διαστάσεις χώρου και μία χρόνου; Η υπόθεση της θεωρίας των χορδών είναι ότι οι άλλες διαστάσεις είναι καμπυλωμένες σε ένα χώρο με πολύ μικρό μέγεθος, περίπου ένα εννέακις εκατομμυριοστό του εκατοστομέτρου, ένα μέγεθος τόσο μικρό που δεν το προσέχουμε· βλέπουμε μόνον τις τρεις διαστάσεις του χώρου και τη μία του χρόνου, όπου ο χωρόχρονος είναι σχεδόν επίπεδος. Κάτι ανάλογο συμβαίνει με την επιφάνεια ενός πορτοκαλιού: αν την κοιτάξετε προσεκτικά από μικρή απόσταση βλέπετε ότι έχει πτυχές και εξογκώματα. Αν τη δείτε όμως από μεγαλύτερη απόσταση δεν βλέπετε αυτές τις καμπύλες διαμορφώσεις της και έτσι σας φαίνεται λεία. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με το χωρόχρονο: σε πολύ μικρή κλίμακα έχει δέκα διαστάσεις και είναι εντονότατα καμπυλωμένος, σε μεγαλύτερες κλίμακες όμως δεν βλέπουμε την καμπυλότητά του ή τις πρόσθετες διαστάσεις του. Αν η εικόνα αυτή είναι σωστή, τα νέα για τους ταξιδιώτες του Διαστήματος δεν είναι πολύ ευχάριστα: οι πρόσθετες διαστάσεις, απ' όπου ήλπιζαν ότι θα συντόμευαν τα ταξίδια τους, θα είναι τώρα για το διαστημόπλοιό τους παρά πολύ μικρές για να μπορεί να περάσει από μέσα τους. Προκύπτει όμως και ένα άλλο ερώτημα: γιατί μόνο μερικές διαστάσεις είναι καμπυλωμένες και όχι όλες; Γιατί το Σύμπαν δεν είναι μια πολύ μικρή σφαίρα πολλών διαστάσεων; Υποτίθεται ότι στα πρώτα στάδια του Σύμπαντος όλες οι διαστάσεις ήταν πολύ καμπυλωμένες. Γιατί οι τρεις διαστάσεις του χώρου και η μία του *χρόνου* έγιναν σχεδόν επίπεδες ενώ οι υπόλοιπες παρέμειναν έντονα καμπυλωμένες;

Μία πιθανή απάντηση δίνει η ανθρωπική αρχή. Αν ο χώρος είχε δύο μόνο διαστάσεις, δεν φαίνεται πως θα ήταν δυνατή η ανάπτυξη πολύπλοκων όντων όπως εμείς. Για παράδειγμα, αν



Ένας σκύλος δυο διαστάσεων

ΕΙΚΟΝΑ 10-8.

ένα ζώο δύο διαστάσεων έτρωγε κάτι που δεν μπορούσε να το χωνέψει, θα έπρεπε να το αποβάλλει από την ίδια οδό που το κατάπιε, γιατί αν υπήρχε μία συνέχεια αυτής της οδού και μία έξοδος, το ζώο θα χωριζόταν σε δύο κομμάτια και θα διαλύονταν (βλ. εικ. 10-8). Με παρόμοιο τρόπο φαίνεται ότι θα ήταν αδύνατη και η κυκλοφορία του αίματος.

Θα υπήρχαν επίσης προβλήματα αν ο χώρος είχε περισσότερες από τρεις διαστάσεις. Η βαρυτική δύναμη μεταξύ δύο σωμάτων θα μειωνόταν ταχύτερα με την αύξηση της απόστασης απ' όσο μειώνεται στις τρεις διαστάσεις. (Στις τρεις διαστάσεις, αν η απόσταση διπλασιαστεί η βαρυτική δύναμη μειώνεται στο $1/4$ της αρχικής. Στις τέσσερις διαστάσεις θα μειωνόταν στο $1/8$,

στις πέντε στο 1/16, κ.ο.κ.). Αυτό θα σήμαινε ότι οι τροχιές των πλανητών γύρω από τον Ήλιο θα ήταν ασταθείς: ακόμη και η παραμικρή διαταραχή της ελλειψοειδούς τροχιάς ενός πλανήτη όπως η Γη (που θα μπορούσε να προκληθεί από τις βαρυτικές επιδράσεις των υπόλοιπων πλανητών πάνω της) θα μετέτρεπε την τροχιά σε σπειροειδή, οπότε η Γη ή θα έπεφτε προς τον Ήλιο ή θα απομακρυνόταν απ' αυτόν πολύ σύντομα λοιπόν ή θα ψηνόμασταν ή θα παγώναμε. Στην πραγματικότητα, αυτή η σχέση βαρύτητας και απόστασης σημαίνει ότι σε χώρους με περισσότερες από τρεις διαστάσεις ο Ήλιος δε θα βρισκόταν σε σταθερή κατάσταση ισορροπίας (όπου η πίεση των πυρηνικών αντιδράσεων αντισταθμίζει την πίεση της βαρυτικής έλξης). Έτσι θα έπρεπε ή να διαλυθεί στον διαστημικό χώρο ή να καταρρεύσει σχηματίζοντας μια μαύρη τρύπα. Σε οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις δεν θα μπορούσε να είναι και πολύ χρήσιμος ως πηγή θερμότητας και φωτός για τη ζωή πάνω στη Γη. Σε μικρότερη κλίμακα, οι ηλεκτρικές δυνάμεις που συγκρατούν τα ηλεκτρόνια γύρω από τους πυρήνες των ατόμων θα παρουσίαζαν ανάλογη συμπεριφορά με τις βαρυτικές. Έτσι τα ηλεκτρόνια των ατόμων ή θα διέφευγαν από την έλξη των πυρήνων ή θα έπεφταν πάνω τους. Σε οποιαδήποτε από τις δυο περιπτώσεις δεν θα μπορούσαμε να έχουμε άτομα όπως αυτά που αποτελούν τα δομικά στοιχεία της ζωής στη Γη.

Φαίνεται σαφές ότι η ζωή, τουλάχιστον όπως τη γνωρίζουμε, μπορεί να υπάρξει μόνο σε περιοχές του χωροχρόνου όπου τρεις διαστάσεις χώρου και μία χρόνου δεν είναι έντονα καμπυλωμένες. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να επικαλεστούμε την ασθενή ανθρωπική αρχή, αρκεί να μπορέσουμε να αποδείξουμε ότι η θεωρία των χορδών επιτρέπει να υπάρχουν στο Σύμπαν παρόμοιες περιοχές — και φαίνεται ότι πραγματικά το επιτρέπει. Μπορεί πολύ καλά να υπάρχουν άλλες περιοχές του Σύμπαντος (ή ακόμη και άλλα «Σύμπαντα», ό,τι και αν σημαίνει κάτι

τέτοιο) όπου όλες οι διαστάσεις είναι έντονα καμπυλωμένες ή όπου περισσότερες από τέσσερις διαστάσεις είναι σχεδόν επίπεδες, αλλά στις περιοχές εκείνες δεν θα υπάρχουν νοήμονα όντα που να παρατηρούν τον αριθμό των διαστάσεων του περιβάλλοντος τους.

Εκτός από το ερώτημα του αριθμού των διαστάσεων που φαίνεται να έχει ο χωρόχρονος, η θεωρία των χορδών παρουσιάζει και άλλα προβλήματα που πρέπει να λυθούν πριν ανακηρυχθεί ως η τελική θεωρία της φυσικής. Δεν γνωρίζουμε ακόμη αν όλες οι άπειρες ποσότητες εξαλείφονται τελικά μεταξύ τους, ή με ποιον ακριβώς τρόπο τα κύματα πάνω στις χορδές συσχετίζονται με τα συγκεκριμένα είδη σωματιδίων που παρατηρούμε. Παρ' όλα αυτά, είναι πιθανό ότι οι λύσεις αυτών των προβλημάτων θα ανακαλυφθούν στα επόμενα λίγα χρόνια, και μέχρι το τέλος του αιώνα θα γνωρίζουμε αν η θεωρία των χορδών είναι πραγματικά η πλήρης ενιαία θεωρία της φυσικής που τόσα χρόνια αναζητούμε.

Αλλά μπορεί πραγματικά να υπάρχει μια τέτοια ενιαία θεωρία; Ή μήπως κυνηγάμε φαντάσματα; Φαίνεται ότι υπάρχουν τρεις δυνατότητες:

1) Υπάρχει πραγματικά μια πλήρης ενιαία θεωρία για το Σύμπαν που κάποτε θα την ανακαλύψουμε, αν είμαστε αρκετά ικανοί.

2) Δεν υπάρχει μια τελική θεωρία για το Σύμπαν, παρά μόνον μια άπειρη σειρά θεωριών που το περιγράφουν με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια.

3) Δεν υπάρχει μια θεωρία για το Σύμπαν τα γεγονότα δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν πέρα από κάποια όρια, αλλά συμβαίνουν με έναν αυθαίρετο και τυχαίο τρόπο.

Μερικοί θα υποστήριζαν την τρίτη περίπτωση, επειδή αν υπήρχε ένα πλήρες σύνολο νόμων, αυτό θα περιόριζε την ελευθερία του Θεού να αλλάξει γνώμη και να παρεμβαίνει στον Κόσμο.

Είναι κάπως σαν το παλαιό παράδοξο: Μπορεί ο Θεός να δημιουργήσει μια πέτρα τόσο βαριά που να μην μπορεί να τη σηκώσει; Αλλά η ιδέα ότι ο Θεός μπορεί κάποτε να θελήσει να αλλάξει γνώμη είναι ένα παράδειγμα της αντίφασης που υπόδειξε ο Αυγουστίνος: κάτι τέτοιο ισοδυναμεί με το να φανταζόμαστε ότι ο Θεός υπάρχει μέσα στο χρόνο, αλλά ο χρόνος δεν είναι παρά μια ιδιότητα του Σύμπαντος που δημιουργήσε ο Θεός· δημιουργώντας λοιπόν το Σύμπαν και το χρόνο ο Θεός πρέπει να ήξερε τι έκανε!

Με την ανακάλυψη της κβαντικής μηχανικής οδηγηθήκαμε να αναγνωρίσουμε ότι τα γεγονότα δεν μπορούν να προβλεφθούν με απόλυτη ακρίβεια αλλά υπάρχει πάντα ένας βαθμός απροσδιοριστίας, ένα στοιχείο τυχαιότητας. Αν ήθελε κανείς θα μπορούσε να θεωρήσει ότι η τυχαιότητα αυτή οφείλεται στην παρέμβαση του Θεού· μια τέτοια παρέμβαση όμως θα ήταν πολύ παράξενη γιατί δεν υπάρχει καμιά ένδειξη ότι έχει οποιονδήποτε σκοπό. Αν απέβλεπε κάπου, τότε εξ ορισμού δεν θα ήταν τυχαία. Στη σύγχρονη εποχή έχουμε λοιπόν ουσιαστικά αποκλείσει την τρίτη δυνατότητα επαναπροσδιορίζοντας το σκοπό της φυσικής επιστήμης: αποβλέπουμε στο να διατυπώσουμε ένα σύνολο νόμων που να μας επιτρέπει να προβλέπουμε γεγονότα μέσα στα όρια ακριβείας που θέτει η αρχή της απροσδιοριστίας.

Η δεύτερη περίπτωση (ότι υπάρχει μια άπειρη σειρά όλο και πιο επεξεργασμένων θεωριών που περιγράφουν το Σύμπαν με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια) συμφωνεί με όλες τις εμπειρίες που έχουμε μέχρι σήμερα. Σε πολλές περιπτώσεις στην ιστορία της φυσικής αυξήσαμε την ευαισθησία των οργάνων μέτρησης ή προχωρήσαμε σε μια καινούργια σειρά παρατηρήσεων, ανακαλύπτοντας έτσι νέα φαινόμενα που δεν τα προέβλεπε η θεωρία που διαθέταμε ως τότε, για να τα εξηγήσουμε χρειάστηκε να αναπτύξουμε μια πιο επεξεργασμένη θεωρία. Δεν θα αποτελέσει λοιπόν έκπληξη αν τελικά αποδειχθεί λανθασμένη και η σημερινή γενιά

των Μεγάλων Ενοποιημένων Θεωριών — που προβλέπει ότι δεν συμβαίνει τίποτε το ουσιαστικά καινούργιο μεταξύ της ενέργειας ενοποίησης των ασθενών πυρηνικών αλληλεπιδράσεων με τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις (100 GeV) και της ενέργειας της Μεγάλης Ενοποίησης (ένα τετράκις εκατομμύριο GeV). Θα μπορούσαμε πραγματικά να περιμένουμε ότι θα ανακαλύψουμε αρκετά καινούργια επίπεδα δομών, βασικότερων από τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκς, που σήμερα τα θεωρούμε «στοιχειώδη» σωματίδια.

Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ότι η βαρύτητα μπορεί να παρέχει κάποια όρια σε αυτήν την άπειρη σειρά των θεωριών που περιέχουν η κάθε επόμενη την προηγούμενη σαν τις Ματρούσκες, τις γνωστές ρωσικές κούκλες. Αν είχαμε ένα σωματίδιο με ενέργεια μεγαλύτερη από την οριακή ενέργεια που ονομάζεται *ενέργεια Planck* (10 πεντάκις εκατομμύρια GeV, δηλαδή η μονάδα ακολουθούμενη από 19 μηδενικά), η μάζα του θα ήταν τόσο συμπεκνωμένη ώστε θα διαχωριζόταν από το υπόλοιπο Σύμπαν και θα σχημάτιζε μόνο του μία μικρή μαύρη τρύπα. Έτσι φαίνεται ότι η σειρά των όλο και περισσότερο επεξεργασμένων θεωριών πρέπει να έχει κάποιο ανώτατο όριο όσο προχωρούμε σε μεγαλύτερες ενέργειες· πρέπει λοιπόν να υπάρχει κάποια τελική θεωρία του Σύμπαντος. Φυσικά η ενέργεια Planck απέχει πάρα πολύ από τις ενέργειες των εκατό περίπου GeV, τις μεγαλύτερες ενέργειες που μπορούμε σήμερα να παραγάγουμε εργαστηριακά. Δεν είναι δυνατό να καλύψουμε αυτή τη διαφορά με επιταχυντές σωματιδίων, τουλάχιστον στο ορατό μέλλον! Όμως στα πρώτα στάδια του Σύμπαντος πρέπει να υπήρχαν τέτοιες ενέργειες. Νομίζω ότι υπάρχουν πολλές πιθανότητες να οδηγηθούμε σε μια πλήρη ενιαία θεωρία από τις απαιτήσεις μαθηματικής συνέπειας που θα πρέπει να ικανοποιεί και από τη μελέτη του Σύμπαντος όπως πρέπει να ήταν στα πρώτα του στάδια. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί στη διάρκεια ζωής μερικών από εμάς,

με την προϋπόθεση βέβαια ότι δεν θα εξαφανιστούμε όλοι από έναν πυρηνικό πόλεμο.

Τι θα σήμαινε το να ανακαλύψουμε κάποτε την τελική θεωρία του Σύμπαντος; Όπως εξηγήσαμε στο κεφάλαιο 1, δεν θα μπορούσαμε ποτέ να είμαστε απόλυτα βέβαιοι ότι ανακαλύψαμε πραγματικά τη σωστή θεωρία, αφού οι θεωρίες δεν είναι δυνατό να αποδειχτούν. Αλλά αν η θεωρία αυτή είναι μαθηματικά συνεπής και οι προβλέψεις της συμφωνούν πάντα με τις παρατηρήσεις, θα μπορούσαμε να πιστεύουμε ότι λογικά είναι πραγματικά η σωστή θεωρία. Μια τέτοια ανακάλυψη θα ήταν το ένδοξο τέλος ενός μακραίωνου κεφαλαίου στην ιστορία της ανθρώπινης προσπάθειας να κατανοήσει τον Κόσμο. Αλλά θα επέφερε επίσης και μια άλλη επαναστατική αλλαγή: ο κάθε μη ειδικός θα μπορούσε να καταλάβει τους νόμους που κυβερνούν το Σύμπαν. Στην εποχή του Νεύτωνα ένας μορφωμένος άνθρωπος μπορούσε να έχει αντίληψη ολόκληρης της ανθρώπινης γνώσης, τουλάχιστον στις γενικές γραμμές της. Αλλά στη συνέχεια η πολύ μεγάλη ανάπτυξη της επιστήμης του στέρησε αυτή τη δυνατότητα. Οι θεωρίες άλλαξαν συνεχώς για να μπορούν να ανταποκρίνονται στα καινούργια δεδομένα των παρατηρήσεων, και γι' αυτό ουδέποτε παρουσιάζονταν σε κατ'άλληλα περιληπτική και απλουστευμένη μορφή, ώστε να μπορούν να τις κατανοήσουν και οι μη ειδικοί. Σήμερα, ακόμη και οι ειδικοί δεν μπορούν να κατανοήσουν παρά ένα μικρό μόνο μέρος του συνόλου των επιστημονικών θεωριών. Ο ρυθμός προόδου είναι τόσο γρήγορος ώστε όσα μαθαίνει κανείς στο σχολείο ή το πανεπιστήμιο είναι σχεδόν πάντα ξεπερασμένα. Μόνο λίγοι άνθρωποι μπορούν να διατηρήσουν την επαφή τους με τις πιο πρόσφατες προόδους της επιστημονικής γνώσης, και για να το κατορθώσουν πρέπει να αφιερώσουν ολόκληρο το χρόνο τους και να ειδικευτούν σε μια μικρή περιοχή της επιστήμης τους. Οι υπόλοιποι δεν αντιλαμβάνονται το μέγεθος της προόδου που συντελείται και του ενθουσιασμού που προκαλεί. Αν όμως

ανακαλυφθεί μια τελική θεωρία του Σύμπαντος η κατάσταση αυτή θα αλλάξει. Αν πιστέψουμε τον Eddington, πριν από εβδομήντα χρόνια μόνο δύο άνθρωποι καταλάβαιναν τη γενική θεωρία της σχετικότητας. Σήμερα την καταλαβαίνουν δεκάδες χιλιάδες απόφοιτοι πανεπιστημίων και πολλά εκατομμύρια άλλων ανθρώπων έχουν τουλάχιστον μια γενική ιδέα γι' αυτήν. Έτσι, λοιπόν, αν κάποτε ανακαλυφθεί μια πλήρης ενιαία θεωρία δεν θα είναι παρά μόνο θέμα χρόνου να παρουσιαστεί με περιληπτική και απλουστευμένη μορφή και να διδαχτεί στα *σχολεία*, τουλάχιστον στις γενικές γραμμές της. Όλοι τότε θα μπορούμε να καταλάβουμε τους νόμους που κυβερνούν το Σύμπαν και καθορίζουν την ίδια μας την ύπαρξη.

Ακόμη και αν ανακαλύψουμε μια πλήρη ενιαία θεωρία, αυτό δεν σημαίνει πως θα μπορούμε να προβλέπουμε όλα γενικά τα γεγονότα. Δύο είναι οι λόγοι. Ο πρώτος είναι τα όρια που θέτει στις δυνατότητες μας για προβλέψεις η αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής, δεν μπορούμε να κάνουμε τίποτε για να αποφύγουμε αυτά τα όρια. Στην πράξη όμως αυτός ο πρώτος λόγος είναι λιγότερο περιοριστικός από τον δεύτερο, που προκύπτει από το γεγονός ότι δεν θα μπορούμε να επιλύσουμε ακριβώς τις εξισώσεις της θεωρίας, παρά μόνο σε πολύ απλές περιπτώσεις. (Ακόμη και σήμερα δεν μπορούμε να επιλύσουμε με ακρίβεια ούτε τις εξισώσεις της νευτώνειας θεωρίας της βαρύτητας για την κίνηση τριών σωμάτων, που το καθένα έλκει τα δύο άλλα. Η δυσκολία αυξάνεται με το πλήθος των σωμάτων και την πολυπλοκότητα της θεωρίας). Γνωρίζουμε ήδη τους νόμους που καθορίζουν τη συμπεριφορά της ύλης σε όλες τις καταστάσεις, εκτός από τις πολύ ακραίες. Συγκεκριμένα, γνωρίζουμε τους βασικούς νόμους στους οποίους υπόκεινται όλα τα φαινόμενα της χημείας και της βιολογίας. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούμε βέβαια να ισχυριστούμε ότι ολόκληρες αυτές οι επισημονικές περιοχές ανάγονται πιά σε συγκεκριμένα προβλήμα-

τα που έχουν επιλυθεί, μέχρι σήμερα έχουμε σημειώσει πολύ λίγες επιτυχίες στην πρόβλεψη της ανθρώπινης συμπεριφοράς απ' τη λύση μαθηματικών εξισώσεων! Έτσι, ακόμη κι αν ανακαλύψουμε τελικά ένα πλήρες σύνολο βασικών νόμων, θα εξακολουθεί να παραμένει για τα επόμενα χρόνια η επιστημονική πρόκληση της ανάπτυξης καλύτερων προσεγγιστικών μεθόδων, έτσι που να μπορούμε να διατυπώσουμε χρήσιμες προβλέψεις της πιθανής εξέλιξης πολύπλοκων και πραγματικών — όχι υπερ-πλουστευμένων — καταστάσεων. Μια πλήρης, συνεπής ενιαία θεωρία θα είναι το πρώτο μόνο βήμα: ο τελικός σκοπός μας είναι η *πλήρης κατανόηση* των φαινομένων γύρω μας και της ίδιας της ύπαρξής μας.

11

Συμπεράσματα

Ζούμε σε έναν περίπλοκο κόσμο. Θέλουμε να κατανοήσουμε όσα βλέπουμε γύρω μας και αναρωτιόμαστε: Ποια είναι η φύση του Σύμπαντος; Από πού προήλθε; Γιατί είναι έτσι όπως είναι; Ποιά η δική μας θέση μέσα σε αυτό;

Προσπαθώντας να απαντήσουμε, αποδεχόμαστε κάποια «Εικόνα για τον Κόσμο». Μια επίπεδη Γη που στηρίζεται σε μία άπειρη σειρά από τραπουλόχαρτα είναι μια τέτοια εικόνα, όπως ακριβώς και η θεωρία των χορδών. Και οι δύο είναι θεωρίες για το Σύμπαν, αν και η θεωρία ότι τα πάντα αποτελούνται από χορδές είναι πολύ πιο επεξεργασμένη μαθηματικά και ακριβής από τη θεωρία ότι το Σύμπαν είναι μία τεράστια τράπουλα. Και οι δύο θεωρίες δεν βασίζονται σε δεδομένα των παρατηρήσεων: κανείς δεν είδε ποτέ μια στήλη από τραπουλόχαρτα που να στηρίζει τη Γη, αλλά ούτε και μία χορδή. Η θεωρία όμως της στήλης από τραπουλόχαρτα δεν μπορεί να έχει τη θέση μίας καλής επιστημονικής θεωρίας, γιατί προβλέπει ότι θα μπορούσε

κάποιος να πέσει από την άκρη της και να εξαφανιστεί από το πρόσωπο της Γης. Μια τέτοια δυνατότητα δεν συμφωνεί με τα εμπειρικά δεδομένα, εκτός και αν τελικά αποδειχθεί ότι αποτελεί την εξήγηση για τα πλοία που υποτίθεται ότι εξαφανίζονται στις πλευρές του «Τριγώνου των Βερμούδων»!

Οι πρώτες θεωρητικές προσπάθειες περιγραφής και εξήγησης του Σύμπαντος περιλάμβαναν την ιδέα ότι τα διάφορα γεγονότα και φυσικά φαινόμενα οφείλονται στις πράξεις κάποιων υποτιθέμενων «πνευμάτων» με ανθρώπινες παρορμήσεις, που δρούσαν με τρόπο κυκλοθυμικό και απρόβλεπτο. Τα πνεύματα αυτά κατοικούσαν στα φυσικά αντικείμενα, όπως τα βουνά και οι θάλασσες, ή ακόμη και στα ουράνια σώματα, όπως ο Ήλιος και η Σελήνη. Οι άνθρωποι νόμιζαν ότι έπρεπε να τα εξευμενίζουν και να ικανοποιούν διαρκώς τις διάφορες επιθυμίες τους, για να εξασφαλίζουν έτσι τη γονιμότητα του εδάφους και τη διαδοχή των εποχών. Σταδιακά όμως πρέπει να παρατήρησαν ορισμένες κανονικότητες: ο Ήλιος ανέτελλε πάντοτε στην ανατολή και έδυε στη δύση, ανεξάρτητα από το αν είχαν εκτελέσει κάποια θυσία στο θεό Ήλιο ή όχι. Επίσης ο Ήλιος, η Σελήνη και οι πλανήτες ακολουθούσαν κάποιες διαδρομές στον ουρανό που ήταν δυνατό να προβλεφθούν με αρκετή ακρίβεια. Ο Ήλιος και η Σελήνη μπορούσαν να εξακολουθούν να είναι θεοί, αλλά θεοί που υπάκουαν σε νόμους.

Στην αρχή, αυτές οι κανονικότητες και οι νόμοι είχαν παρατηρηθεί μόνον στην αστρονομία και σε λίγες άλλες περιπτώσεις φυσικών φαινομένων. Όπως όμως αναπτυσσόταν ο πολιτισμός, και ειδικά στα προηγούμενα τριακόσια χρόνια, ανακαλύπτονταν συνεχώς περισσότερες κανονικότητες και νόμοι. Η επιτυχία στην πρόβλεψη των γεγονότων και των φυσικών φαινομένων οδήγησε τον Laplace, στην αρχή του 19ου αιώνα, στο αίτημα του επιστημονικού ντετερμινισμού: ο Laplace υπέθεσε ότι υπήρχε ένα σύνολο νόμων που θα μπορούσε να προσδιορίσει με απόλυτη ακρίβεια

την εξέλιξη του Σύμπαντος, αν ήταν γνωστή η κατάσταση του σε κάποια χρονική στιγμή.

Ο ντετερμινισμός του Laplace δεν ήταν πλήρης: δυο σημεία παρέμεναν έξω από αυτόν: δεν αναφερόταν στο πώς έπρεπε να επιλεγούν οι φυσικοί νόμοι του Σύμπαντος και δεν προσδιόριζε το αρχικό σύνολο χαρακτηριστικών του. Αυτά αφήνονταν στην δικαιοδοσία του Θεού. Ο Θεός θα επέλεγε τα αρχικά χαρακτηριστικά του Σύμπαντος και τους φυσικούς νόμους, αλλά στη συνέχεια δεν θα παρενέβαινε καθόλου στη λειτουργία του. Στην πραγματικότητα, ο Θεός περιορίστηκε στις περιοχές όπου δεν είχε φτάσει η επιστήμη ως τον 19ο αιώνα.

Γνωρίζουμε σήμερα ότι οι ελπίδες για τον ντετερμινισμό του Laplace δεν μπορεί να πραγματοποιηθούν, τουλάχιστον με τους όρους που εννοούσαν οι επιστήμονες του 19ου αιώνα. Η αρχή της απροσδιοριστίας της κβαντικής μηχανικής συνεπάγεται ότι ορισμένες ποσότητες, όπως η θέση και η ταχύτητα ενός σωματιδίου, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν και οι δύο με απόλυτη ακρίβεια.

Η κβαντική μηχανική αντιμετωπίζει αυτή την κατάσταση με μία ομάδα κβαντικών θεωριών όπου τα σωματίδια δεν έχουν σαφώς προσδιορισμένες θέσεις και ταχύτητες αλλά αντιπροσωπεύονται από ένα κύμα. Οι κβαντικές θεωρίες είναι ντετερμινιστικές, με την έννοια ότι παρέχουν νόμους για την εξέλιξη του κύματος με την πάροδο του χρόνου. Έτσι αν κάποιος γνωρίζει τη μορφή του κύματος σε μία χρονική στιγμή, μπορεί να την υπολογίσει σε οποιαδήποτε άλλη. Το απρόβλεπτο, τυχαίο στοιχείο εμφανίζεται μόνον όταν προσπαθούμε να ερμηνεύσουμε το κύμα με όρους θέσεων και ταχυτήτων σωματιδίων. Αλλά αυτό μπορεί να είναι δικό μας λάθος: μπορεί να μην υπάρχουν θέσεις και ταχύτητες σωματιδίων, αλλά μόνον κύματα. Προσπαθούμε να προσαρμόσουμε τα κύματα στις ιδέες των θέσεων και ταχυτήτων σωματιδίων που έχουμε διαμορφώσει από την κλασική

μηχανική. Η αδυναμία να το πετύχουμε αυτό είναι η αιτία της φαινομενικής αδυναμίας πρόβλεψης.

Στην πραγματικότητα, σήμερα έχουμε επαναπροσδιορίσει τους στόχους της φυσικής επιστήμης. Η φυσική αποσκοπεί στην ανακάλυψη νόμων που θα μας επιτρέπουν να προβλέπουμε τα γεγονότα μέσα στα όρια που θέτει η αρχή της απροσδιοριστίας. Το ερώτημα όμως παραμένει: Πώς και γιατί έχουν επιλεγεί οι νόμοι και η αρχική κατάσταση του Σύμπαντος;

Σε αυτό το βιβλίο έδωσα ιδιαίτερη έμφαση στους νόμους της βαρύτητας, ακριβώς επειδή η βαρύτητα διαμορφώνει τη μακροσκοπική δομή του Σύμπαντος, αν και είναι η ασθενέστερη από τις τέσσερις κατηγορίες δυνάμεων. Οι νόμοι της βαρύτητας είναι ασυμβίβαστοι με την άποψη ότι το Σύμπαν δεν αλλάζει στο χρόνο: το γεγονός ότι η βαρύτητα είναι πάντοτε ελκτική συνεπάγεται ότι το Σύμπαν πρέπει ή να διαστέλλεται ή να συστέλλεται. Σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας, πρέπει να είχε υπάρξει στο παρελθόν μία κατάσταση άπειρης πυκνότητας, η Μεγάλη έκρηξη, που θα μπορούσε στην πραγματικότητα να αποτελέσει την αρχή του χρόνου. Με παρόμοιο τρόπο αν το Σύμπαν συσταλλεί και καταρρεύσει, πρέπει να υπάρξει στο μέλλον μία άλλη κατάσταση άπειρης πυκνότητας, η Μεγάλη σύνθλιψη, που θα αποτελούσε το τέλος του χρόνου. Ακόμη και αν το Σύμπαν δεν καταρρεύσει ολόκληρο, πρέπει να υπάρχουν ανωμαλίες εντοπισμένες σε περιοχές του που κατέρρευσαν σχηματίζοντας μαύρες τρύπες. Αυτές οι ανωμαλίες θα αποτελούν το τέλος του χρόνου για όποιον διασχίσει τον ορίζοντα των γεγονότων και πέσει μέσα στη μαύρη τρύπα. Και στη Μεγάλη έκρηξη, όπως και στις άλλες ανωμαλίες, όλοι οι νόμοι της φυσικής θα κατέρρευναν. Έτσι ο Θεός θα εξακολουθούσε να διατηρεί απόλυτη ελευθερία επιλογής των αρχικών χαρακτηριστικών του Σύμπαντος.

Φαίνεται όμως ότι όταν συνδυάζουμε την κβαντική μηχανική με τη γενική σχετικότητα παρουσιάζεται μία νέα δυνατότητα: ο

χώρος και ο χρόνος μαζί μπορούν να σχηματίσουν έναν πεπερασμένο χώρο τεσσάρων διαστάσεων χωρίς ανωμαλίες ή όρια (όπως η επιφάνεια της Γης, αλλά με περισσότερες διαστάσεις). Αυτή η ιδέα μπορεί να εξηγήσει πολλά από τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά του Σύμπαντος: την ομοιομορφία του σε μεγάλες κλίμακες αλλά και τις ανομοιογένειές του σε μικρότερες κλίμακες, όπως τους γαλαξίες, τα άστρα και τα ανθρώπινα όντα. Μπορεί ακόμη να εξηγήσει το βέλος του χρόνου που παρατηρούμε, το γεγονός δηλαδή ότι ο χρόνος φαίνεται να ρέει προς μια κατεύθυνση. Αλλά αν το Σύμπαν περιέχεται πλήρως στον εαυτό του (χωρίς όρια και ανωμαλίες), και περιγράφεται πλήρως από κάποια ενιαία θεωρία, αυτό έχει σοβαρές συνέπειες για το ρόλο του Θεού ως Δημιουργού.

Ο Αϊνστάιν έκανε κάποτε την ερώτηση: «Πόση ελευθερία επιλογής είχε ο Θεός στη δημιουργία του Σύμπαντος;». Αν η πρόταση της έλλειψης ορίου είναι σωστή, ο Θεός δεν είχε καμιά ελευθερία επιλογής των αρχικών χαρακτηριστικών του Σύμπαντος. Θα μπορούσε βέβαια να εξακολουθεί να διατηρεί την ελευθερία επιλογής των νόμων του Σύμπαντος. Στην πραγματικότητα όμως αυτή η ελευθερία δεν θα ήταν και πολύ μεγάλη: μπορεί να υπάρχει ένας πολύ μικρός αριθμός πλήρων ενιαίων θεωριών (ίσως μάλιστα και μόνο μία) που να είναι συνεπείς και να επιτρέπουν την ύπαρξη δομών στο Σύμπαν δομών τόσο πολύπλοκων όσο τα ανθρώπινα όντα που μπορούν να ερευνήσουν τους νόμους της Φύσης και να αναρωτηθούν για τη φύση του Θεού.

Αλλά ακόμη και αν υπάρχει μία μόνο δυνατή ενιαία θεωρία, αυτή δεν αποτελείται παρά από ένα σύνολο κανόνων και εξισώσεων. Τί όμως εμψυχώνει τις εξισώσεις και δημιουργεί ένα Σύμπαν που περιγράφεται απ' αυτές; Η συνήθης προσέγγιση της φυσικής επιστήμης συνίσταται στο να κατασκευάζει ένα μαθηματικό μοντέλο και όχι να εξετάζει γιατί πρέπει να υπάρχει κάποιο Σύμπαν που να περιγράφεται από το μοντέλο αυτό. Για-

τί το Σύμπαν μπαίνει στον κόπο να υπάρχει; Είναι τόσο αναγκαία η ενιαία θεωρία που περιέχει την ίδια της την αυτοπραγμάτωση; Ή χρειάζεται ένας Δημιουργός; Και αν είναι έτσι, η ύπαρξη του έχει καμία άλλη επίπτωση στο Σύμπαν; Και ποιος δημιούργησε τον Δημιουργό;

Μέχρι σήμερα οι περισσότεροι φυσικοί ήταν πολύ απασχολημένοι με την ανάπτυξη νέων θεωριών που περιγράφουν το πώς είναι το Σύμπαν και δεν έθεταν το ερώτημα του *γιατί* υπάρχει ένα Σύμπαν που περιγράφεται από αυτές. Και αυτοί που η σχολία τους είναι ακριβώς να θέτουν το ερώτημα του *γιατί*, οι φιλόσοφοι, δεν μπόρεσαν να παρακολουθήσουν την πρόοδο των επιστημονικών θεωριών. Ώς τον 18ο αιώνα οι φιλόσοφοι θεωρούσαν πεδίο των ερευνών τους το σύνολο των ανθρώπινων γνώσεων, συμπεριλαμβανομένης της φυσικής επιστήμης, και έθεταν ερωτήματα όπως: «Είχε το Σύμπαν μία αρχή στον χρόνο;» Τον 19ο και τον 20ό αιώνα όμως η φυσική επιστήμη έγινε πολύ πολύπλοκη και μαθηματική για τους φιλόσοφους, όπως και για όλους, εκτός από μερικούς ειδικούς. Οι φιλόσοφοι περιόρισαν το πεδίο των ερευνών τους τόσο πολύ που ο Wittgenstein, ο πιο διάσημος φιλόσοφος του αιώνα μας, έλεγε ότι «ο μόνος σκοπός της φιλοσοφίας είναι η ανάλυση της γλώσσας». Πόση διαφορά από τη μεγάλη παράδοση της φιλοσοφίας από τον Αριστοτέλη ως τον Kant!

Παρ' όλα αυτά, αν ανακαλύψουμε μία πλήρη ενιαία θεωρία σύντομα θα γίνει κατανοητή στις γενικές της αρχές από οποιονδήποτε, όχι μόνο από λίγους φυσικούς. Τότε θα μπορούμε όλοι, φιλόσοφοι, φυσικοί και απλοί άνθρωποι, να συμμετάσχουμε στη συζήτηση του γιατί συμβαίνει να υπάρχει το Σύμπαν και εμείς. Αν βρούμε την απάντηση σε αυτό το ερώτημα θα έχει συντελεστεί ο τελικός θρίαμβος του ανθρώπινου νου — γιατί τότε θα έχουμε γνωρίσει το νου του Θεού.

Γαλιλαίος (1564-1642)



Ο Γαλιλαίος δικαιούται, ίσως περισσότερο από κάθε άλλον, να διεκδικήσει την πατρότητα της νεότερης επιστήμης. Η περίφημη διαμάχη του με την καθολική εκκλησία ήταν βασικό στοιχείο της φιλοσοφίας του, γιατί στάθηκε ο πρώτος που υποστήριξε ότι ο άνθρωπος μπορεί να ελπίζει πως θα κατανοήσει τη λειτουργία του Κόσμου, και επίσης ότι αυτή η γνώση θα γινόταν δυνατή με την παρατήρηση του πραγματικού κόσμου.

Από πολύ νωρίς ο Γαλιλαίος ήταν οπαδός της κοπερνίκειας θεωρίας για την κίνηση των πλανητών γύρω από τον Ήλιο, δημόσια όμως την υποστήριξε μόνο όταν ανακάλυψε την απόδειξη που χρειαζόταν. Δημοσίευσε τις απόψεις του για τη θεωρία του Κοπέρνικου στην ιταλική γλώσσα (και όχι στο σύννηθες ακαδημαϊκό λατινικό ιδίωμα). Πολύ σύντομα, οι θέσεις του έγιναν ευρύτατα αποδεκτές από την ακαδημαϊκή κοινότητα. Το γεγονός αυτό ενόχλησε τους αριστοτελικούς καθηγητές, που ενώθηκαν εναντίον του και προσπάθησαν να πείσουν την καθολική εκκλησία να καταδικάσει τη θεωρία του Κοπέρνικου.

Ο Γαλιλαίος ανησύχησε και ταξίδεψε στη Ρώμη για να απευθυνθεί στις εκκλησιαστικές αρχές. Υποστήριξε πως η Βίβλος δεν έχει καμία πρόθεση να διατυπώσει επιστημονικές θεωρίες, και ότι, όπως συνηθιζόταν, όταν υπάρχει αντίθεση ανάμεσα στο βιβλικό κείμενο και την κοινή αντίληψη, θεωρούμε πως οι Γραφές είναι αλληγορικές. Η εκκλησία όμως φοβήθηκε ένα σκάνδαλο που θα υπονόμει τον αγώνα της εναντίον του προτεσταντισμού, γι' αυτό και προχώρησε σε διάφορα καταπιεστικά μέτρα. Το 1616 διακήρυξε πως η θεωρία του Κοπέρνικου είναι «ψευδής και λανθασμένη» και πρόσταξε τον Γαλιλαίο να «μην την υπερασπίσει ή στηρίξει» ποτέ πια. Ο Γαλιλαίος συγκατατέθηκε.

Το 1623 εξελέγη Πάπας ένας παλιός φίλος του Γαλιλαίου. Γρήγορα όμως διαψεύστηκαν οι ελπίδες του πως θα ανακληθεί το διάταγμα του 1616. Κατόρθωσε πάντως να του δοθεί η άδεια να γράψει ένα βιβλίο με θέμα την αριστοτελική και την κοπερνίκεια θεωρία. Έπρεπε όμως να τηρήσει δύο περιορισμούς:

- να μην υποστηρίξει καμιά από τις δύο απόψεις,
- να καταλήξει στο συμπέρασμα πως ουδέποτε άνθρωπος θα προσδιορίσει τη λειτουργία του Σύμπαντος, επειδή ο Θεός μπορεί να παρουσιάσει τα διάφορα φαινόμενα με τρόπους που ο άνθρωπος δεν μπορεί ούτε καν να τους φανταστεί, μια και δεν μπορεί να θέτει όρια στην παντοδυναμία του Θεού.

Αυτό το βιβλίο, «*Διάλογος* με θέμα τα δύο κύρια συστήματα του Σύμπαντος», ολοκληρώθηκε και κυκλοφόρησε το 1632, με την πλήρη έγκριση των παπικών λογοκριτών. Αμέσως αναγνωρίστηκε σε όλη την Ευρώπη ως αριστούργημα, τόσο για τη λογοτεχνική του αξία όσο και το φιλοσοφικό του περιεχόμενο. Πολύ σύντομα όμως ο Πάπας διαπίστωσε ότι το κοινό θεωρούσε το βιβλίο αυτό ως ένα πειστικό επιχείρημα υπέρ της κοπερνίκειας θεωρίας. Μετάνιωσε λοιπόν για το «τυπωθήτω» που είχε παραχωρήσει. Θεώρησε πως, παρά την άδεια των λογοκριτών, ο Γαλιλαίος παρέβη το διάταγμα του 1616. Έτσι τον υποχρέωσε

να παρουσιαστεί στην Ιερά Εξέταση. Καταδικάστηκε σε ισόβιο κατ' οίκον περιορισμό και υποχρεώθηκε να αποκηρύξει δημόσια την κοπερνίκεια θεωρία. Για δεύτερη φορά, ο Γαλιλαίος συγκατατέθηκε.

Ο Γαλιλαίος υπήρξε πιστός καθολικός αλλά η πίστη του στην ανεξαρτησία της επιστήμης παρέμεινε ακλόνητη. Τέσσερα χρόνια πριν από το θάνατο του το 1642, ενώ ήταν ακόμη υπό περιορισμό, έστειλε κρυφά σε έναν εκδότη στην Ολλανδία το χειρόγραφο του δεύτερου βιβλίου του. Το έργο αυτό, με τον τίτλο «*Δύο νέες επισήμες*», αποτέλεσε κάτι περισσότερο από μια υποστήριξη του Κοπέρνικου· ήταν η ληξιαρχική πράξη της γέννησης της μοντέρνας φυσικής.

Ισαάκ Νεύτων (1642-1727)



Ο Ισαάκ Νεύτων δεν ήταν εύκολος χαρακτήρας. Είναι πασίγνωστες οι έντονες διαμάχες του στις σχέσεις του με τους άλλους πανεπιστημιακούς, όπου ξόδεψε τα περισσότερα από τα τελευταία χρόνια της ζωής του. Μετά την έκδοση των *Μαθηματικών Αρχών της Φυσικής Φιλοσοφίας* (Principia Mathematica Philosophiæ Naturalis) —του πιο σημαντικού βιβλίου φυσικής που γράφηκε ποτέ— ο Νεύτων απέκτησε τεράστιο κύρος. Ορίστηκε πρόεδρος της Βασιλικής Εταιρείας και στάθηκε ο πρώτος επιστήμονας που χρίστηκε ιππότης.

Πολύ γρήγορα φιλονίκησε με τον βασιλικό αστρονόμο, τον John Flamsteed, ο οποίος παλαιότερα του είχε δώσει τα δεδομένα που χρειαζόταν για τα Principia, τώρα όμως του απέκρυπτε τις απαιτούμενες πληροφορίες. Ο Νεύτων δεν ανεχόταν αρνήσεις, όρισε τον εαυτό του διευθυντή του βασιλικού αστεροσκοπείου και μετά προσπάθησε να εκβιάσει την άμεση δημοσίευση των πληροφοριών. Τελικά πέτυχε την κατάσχεση της εργασίας

αυτής και την έκδοση της από τον Edmond Halley, τον θανάσιμο εχθρό του Flamsteed. Αυτός όμως προσέφυγε στα δικαστήρια, που αποφάσισαν να απαγορευτεί η διανομή της κλεμμένης εργασίας. Ο Νεύτων έγινε έξω φρενών για να εκδικηθεί τον Flamsteed στις επόμενες εκδόσεις των *Principia* απάλειψε συστηματικά κάθε παραπομπή στο όνομα του.

Η διαμάχη του με τον Gottfried Leibnitz ήταν πολύ σοβαρότερη. Και οι δύο διανοητές είχαν ανακαλύψει και αναπτύξει (ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο) τον απειροστικό λογισμό, που αποτελεί την βάση της νεότερης φυσικής. Όπως γνωρίζουμε σήμερα, ο Νεύτων είχε ανακαλύψει αρκετά χρόνια πριν από τον Leibnitz τον απειροστικό λογισμό, δημοσίευσε όμως την εργασία του πολύ αργότερα από αυτόν. Η έντονη διαμάχη συνίστατο στη διεκδίκηση της πρωτιάς, πράγμα που δίχασε την ακαδημαϊκή κοινότητα. Είναι όμως ιδιαίτερα αξιοσημείωτο ότι τα περισσότερα άρθρα που υποστήριζαν τον Νεύτωνα, τα είχε γράψει ο ίδιος και απλώς τα υπέγραφαν οι διάφοροι φίλοι του! Η όξυνση της αντίθεσης τους οδήγησε τον Leibnitz να κάνει το λάθος και να προσφύγει στη Βασιλική Εταιρεία, η οποία θα αναλάμβανε να λύσει το πρόβλημα! Ο Νεύτων, ως πρόεδρος, όρισε μια «αμερόληπτη» εξεταστική επιτροπή που «εντελώς τυχαία» αποτελούνταν αποκλειστικά από φίλους του! Και σαν να μην έφτανε αυτό, έγραψε ο ίδιος το πόρισμα όπου ο Leibnitz κατηγορείται ως αντιγραφέας, και υποχρέωσε την Εταιρεία να το δημοσιοποιήσει. Κι όμως όλα αυτά δεν τον ικανοποίησαν πλήρως. Έγραψε λοιπόν ανώνυμα μια περίληψη του πορίσματος και τη δημοσίευσε στο περιοδικό της Βασιλικής Εταιρείας. Λέγεται πως μετά το θάνατο του αντιπάλου του διακήρυξε πως ευχαριστήθηκε πολύ «ραγίζοντας την καρδιά του Leibnitz».

Κατά τη διάρκεια της διαμάχης του με τον Flamsteed και τον Leibnitz, ο Νεύτων εγκατέλειψε το Cambridge και την ακαδημαϊκή καριέρα. Επειδή στάθηκε σφοδρός αντίπαλος του καθολικι-

σμού στο Cambridge και στο Κοινοβούλιο, τον αντάμειψαν με την κερδοφόρα θέση του διευθυντή του Βασιλικού Νομισματοκοπείου. Εδώ χρησιμοποίησε την ικανότητά του για ελιγμούς και τη μνησικακία του σε δραστηριότητες περισσότερο αποδεκτές κοινωνικά. Καθοδήγησε λοιπόν με επιτυχία μια μεγάλη εκστρατεία εναντίον των κιβδηλοποιών, και αρκετούς από αυτούς τους έστειλε στην αγχόνη.

Αλβέρτος Αϊνστάιν (1879-1955)



Οι σχέσεις του Αϊνστάιν με την πολιτική της πυρηνικής βόμβας είναι γνωστές: υπέγραψε την περίφημη επιστολή προς τον πρόεδρο Φρανκλίνο Ρούσβελτ που έπεισε τις Ηνωμένες Πολιτείες να αντιμετωπίσουν το θέμα με σοβαρότητα, ενώ μεταπολεμικά έκανε σημαντικές προσπάθειες να αποφευχθεί ένας πυρηνικός πόλεμος. Αυτά όμως δεν ήταν κάποιες μεμονωμένες προσπάθειες ενός επιστήμονα που παρασύρθηκε στο χώρο της πολιτικής. Η ζωή του Αϊνστάιν ήταν πραγματικά — για να χρησιμοποιήσουμε και τα δικά του λόγια — «μοιρασμένη ανάμεσα στην πολιτική και τις εξισώσεις».

Για πρώτη φορά ο Αϊνστάιν δραστηριοποιήθηκε πολιτικά κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου, όταν ήταν καθηγητής στο Βερολίνο. Αηδιάζοντας από τις εκατόμβες, συμμετείχε έντονα σε αντιπολεμικές διαδηλώσεις. Οι δημόσιες προτροπές του στους πολίτες για απείθεια και άρνηση της στρατολόγησης δεν τον έκαναν ιδιαίτερα προσφιλή στους συναδέλφους

του. Αργότερα, μετά το τέλος του πολέμου, έστρεψε τις προσπάθειες του στη συμφιλίωση και τη βελτίωση των διεθνών σχέσεων. Αλλά και αυτό τον εμπόδισε να γίνει δημοφιλής· σύντομα η πολιτική δράση του δυσκόλεψε τις επισκέψεις του στις Ηνωμένες Πολιτείες, ακόμη και για να δώσει διαλέξεις.

Η δεύτερη μεγάλη υπόθεση για τον Αϊνστάιν ήταν ο σιωνισμός. Αν και Εβραίος στην καταγωγή, αρνήθηκε τη βιβλική άποψη περί Θεού. Όμως ένα αναπτυσσόμενο αντισημιτικό κλίμα, πριν και κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου, τον οδήγησε βαθμιαία να ενταχθεί στην ισραηλιτική κοινότητα, και στη συνέχεια να γίνει ένθερμος υποστηρικτής του σιωνισμού. Η αντιδημοτικότητα δεν τον εμπόδισε να αναπτύξει τις ιδέες του. Οι θεωρίες του δέχτηκαν μεγάλες επιθέσεις. Δημιουργήθηκε ακόμη και μια οργάνωση εναντίον του. Κάποιος καταδικάστηκε επειδή υποκίνησε άλλους να τον σκοτώσουν (και πλήρως γι' αυτό πρόστιμο έξι δολαρίων!). Όμως ο Αϊνστάιν ήταν φλεγματικός: όταν κάποτε εκδόθηκε το βιβλίο *Εκατό συγγραφείς κατά του Αϊνστάιν*, δήλωσε: «Αν είχα κάνει λάθος, ένας συγγραφέας θα ήταν αρκετός!».

Το 1933 ήταν η χρονιά της ανόδου του Χίτλερ. Ο Αϊνστάιν που βρισκόταν στην Αμερική δήλωσε ότι δεν επιθυμούσε να επιστρέψει στη Γερμανία. Και τότε, ενώ η ναζιστική εθνοφυλακή είχε εισβάλει στο σπίτι του και οι καταθέσεις του στην τράπεζα είχαν δημευτεί, μια βερολινέζικη εφημερίδα έγραψε με πηχυαίους τίτλους «Καλά νέα από τον Αϊνστάιν — Δεν επιστρέφει στη Γερμανία». Η ναζιστική απειλή τον οδήγησε να απαρνηθεί τον ειρηνισμό ενώ οι φόβοι του ότι οι Γερμανοί επιστήμονες θα κατασκευάσουν την ατομική βόμβα τον οδήγησαν να προτείνει στις Η.Π.Α. να ενεργοποιήσουν το ανάλογο δικό τους πρόγραμμα. Όμως πριν ακόμη εκτοξευτεί η πρώτη ατομική βόμβα, είχε προειδοποιήσει δημόσια για τους κινδύνους ενός πυρηνικού πολέμου, προτείνοντας διεθνή έλεγχο στα ατομικά οπλοστάσια.

Οι συνεχείς ειρηνιστικές προσπάθειες του ίσως πέτυχαν ελάχιστα πράγματα που να διαρκούν, και σίγουρα δεν τον έκαναν πολύ προσφιλή. Η ανοικτή υποστήριξη του όμως στην υπόθεση του σιωνισμού αναγνωρίστηκε το 1952, όταν του προσφέρθηκε η προεδρία του Ισραήλ. Ο ίδιος την αρνήθηκε λέγοντας ότι δεν είχε πείρα στην πολιτική. Όμως ο πραγματικός λόγος ήταν μάλλον διαφορετικός. Με τα ίδια του τα λόγια: «Οι εξισώσεις είναι περισσότερο ενδιαφέρουσες για μένα· η πολιτική είναι για το παρόν ενώ οι εξισώσεις είναι για την αιωνιότητα».

Λεξιλόγιο

Αχτίνες γ (gamma rayes): Ηλεκτρομαγνητικά κύματα πολύ μεγάλης συχνότητας που παράγονται κατά τις ραδιενεργές διασπάσεις ή τις συγκρούσεις στοιχειωδών σωματιδίων.

Ανάλογο (proportional): «Το x είναι ανάλογο του y » σημαίνει ότι όταν το y πολλαπλασιάζεται με κάποιον αριθμό, και το x πολλαπλασιάζεται με τον ίδιο αριθμό. «Το x είναι αντιστρόφως ανάλογο του y » σημαίνει ότι όταν το y πολλαπλασιάζεται με κάποιον αριθμό το x διαιρείται με τον ίδιο αριθμό.

Ανθρωπική αρχή (anthropic principle): Βλέπουμε το Σύμπαν να είναι αυτό που είναι, γιατί αν ήταν διαφορετικό δεν θα βρισκόμασταν εδώ για να το παρατηρούμε.

Αντισωματίδιο (antiparticle): κάθε είδος σωματιδίου ύλης έχει ένα αντίστοιχο αντισωματίδιο. Όταν ένα σωματίδιο συγκρούεται με το αντισωματίδιο του εξαϋλώνεται, αφήνοντας πίσω τους μόνο ενέργεια.

Ανωμαλία, [ή μοναδικότητα ή ακρότητα] (singularity): Ένα σημείο του χωροχρόνου στο οποίο η καμπυλότητα του γίνεται άπειρη.

Απαγορευτική αρχή του Pauli (exclusion principle): Δύο ίδια σωματίδια με σπιν $1/2$ δεν μπορούν να έχουν (μέσα στα όρια της αρχής της απροσδιοριστίας) και τα δύο την ίδια θέση και την ίδια ταχύτητα.

Απόλυτο μηδέν (absolute zero): Η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία στην οποία μία ουσία δεν περικλείει καθόλου θερμική ενέργεια. Αντιστοιχεί στους -273 βαθμούς Κελσίου ή στους 0 βαθμούς Κέλβιν.

Αρχέγονη μαύρη τρύπα, (primordial black hole): Μια μαύρη τρύπα που δημιουργήθηκε στα αρχικά στάδια του Σύμπαντος.

Αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg (uncertainty principle): Δεν μπορεί κανείς να προσδιορίσει με απόλυτη ακρίβεια και τη θέση και την ταχύτητα ενός σωματιδίου· όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της μίας τόσο μικρότερη είναι της άλλης.

Αρχή των κβάντα του Planck (Planck's quantum principle): Η ιδέα ότι το φως (ή οποιοδήποτε κλασικό κύμα) μπορεί να εκπνευφθεί ή να απορροφηθεί μόνο σε ασυνεχή κβάντα, που η ενέργεια τους είναι ανάλογη της συχνότητάς τους.

Ασθενής πυρηνική δύναμη (Weak force): Η δεύτερη ασθενέστερη από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις, με πολύ μικρή ακτίνα δράσης. Επιδρά σε όλα τα σωματίδια ύλης αλλά όχι στα σωματίδια αλληλεπίδρασης.

Αστέρας νετρονίων (neutron star): Ένα ψυχρό άστρο, που η ισορροπία του σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή μεταξύ των νετρονίων που το αποτελούν.

Άτομο (atom): Η βασική μονάδα ύλης· αποτελείται από έναν μικροσκοπικό πυρήνα πρωτονίων και νετρονίων ο οποίος περιβάλλεται από ηλεκτρόνια.

Αυτόματη ρήξη συμμετρίας (spontaneous symmetry breaking): Η μεταβολή κάποιων χαρακτηριστικών των σωματιδίων όταν η ενέργειά τους γίνει μικρότερη από μία οριακή τιμή: σωμα-

τίδια που σε μεγαλύτερες ενέργειες συμπεριφέρονταν με τον ίδιο τρόπο τώρα φαίνονται εντελώς διαφορετικά.

Βάρος (weight): Η δύναμη που ασκείται πάνω σ' ένα σώμα από τη βαρύτητα. Είναι ανάλογο (αλλά όχι ίδιο) με τη μάζα του σώματος.

Βαρυτόνια (gravitons): Τα σωματίδια αλληλεπίδρασης στα οποία οφείλεται, σύμφωνα με την κβαντική θεωρία της βαρύτητας, η βαρυτική δύναμη.

Γεγονός [ή συμβάν] (event): Ένα σημείο του χωροχρόνου, προσδιορισμένο από τη θέση του και τη χρονική στιγμή του.

Γενική θεωρία σχετικότητας (general relativity): Η θεωρία του Αϊνστάιν που βασίζεται στην ιδέα ότι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να είναι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές, ανεξάρτητα από το πώς κινούνται. Εξηγεί τη βαρυτική δύναμη με βάση την καμπυλότητα ενός τετραδιάστατου χωροχρόνου.

Γεωδαισική (geodesic): Η διαδρομή με τη μικρότερη απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία.

Γλοΐνια (gluons): Τα σωματίδια αλληλεπίδρασης στα οποία οφείλεται η ισχυρή πυρηνική δύναμη. Ανταλλάσσονται μεταξύ των κουάρκ που αποτελούν τα πρωτόνια και τα νετρόνια των πυρήνων.

Γλοιοσφαιρόνια (glueballs): Σωματίδια που σχηματίζονται από συσσωματώσεις γλοιονίων.

«Γυμνή» ανωμαλία (naked singularity): Χωροχρονική ανωμαλία που δεν περιβάλλεται από μαύρη τρύπα.

Διατήρηση της ενέργειας (conservation of energy): Ο νόμος της φυσικής που αναφέρει ότι η ενέργεια (ή η ισοδύναμη μάζα της) δεν μπορεί να δημιουργηθεί (από το τίποτα) ή να εξαφανιστεί.

Διάχυτη ακτινοβολία μικροκυμάτων (microwave background radiation): Η ακτινοβολία του περιβάλλοντος που προέρχεται από τη θερμότητα των αρχικών σταδίων του Σύμπαντος.

Σήμερα είναι τόσο πολύ μετατοπισμένη προς το ερυθρό μέρος του φάσματος ώστε εμφανίζεται όχι ως ορατό φως αλλά ως μικροκύματα.

Διϊσμός σωματιδίου - κύματος (wave - particle duality): Η άποψη της κβαντικής μηχανικής ότι δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ των κυμάτων και των σωματιδίων τα κύματα μπορεί κάποτε να συμπεριφέρονται σαν σωματίδια και τα σωματίδια σαν κύματα.

«*Δυνάμει*» *σωματίδιο* (virtual particle): Στην κβαντική μηχανική είναι ένα σωματίδιο που δεν μπορεί ποτέ να ανιχνευτεί άμεσα, αλλά η ύπαρξη του έχει μετρήσιμες επιπτώσεις σε άλλα σωματίδια.

Ειδική θεωρία σχετικότητας (special relativity): Η θεωρία του Αϊνστάιν η οποία βασίζεται στην ιδέα ότι οι νόμοι της φυσικής πρέπει να είναι ίδιοι για όλους τους παρατηρητές που κινούνται με σταθερή ταχύτητα μεταξύ τους, ανεξάρτητα από το πόση είναι αυτή.

Ενέργεια ενοποίησης ηλεκτρομαγνητικών και ασθενών πυρηνικών δυνάμεων (electroweak unification energy): Η ενέργεια (περίπου 100 δισεκατομμύρια ηλεκτρονιοβόλτ ή 100 GeV) όπου αρχίζει να εξαφανίζεται η διάκριση μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και της ασθενούς πυρηνικής δύναμης.

Ενέργεια Μεγάλης Ενοποίησης (grand unification energy): Η ενέργεια όπου αρχίζει να εξαφανίζεται η διάκριση των άλλων δυνάμεων, εκτός από τη δύναμη της βαρύτητας.

Επιτάχυνση (acceleration): Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ενός σώματος.

Επιταχυντής σωματιδίων (particle accelerator): Μια μηχανή που μπορεί, με τη χρήση ηλεκτρομαγνητών, να επιταχύνει κινούμενα ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, προσδίδοντας τους μεγαλύτερη κινητική ενέργεια.

Έτος φωτός (light-year): Η απόσταση που διανύει το φως σε ένα έτος.

Ηλεκτρικό φορτίο (electric charge): Η ιδιότητα κάποιων σωματιδίων να απωθούν (ή να έλκουν) άλλα σωματίδια που διαθέτουν φορτίο με το ίδιο (ή το αντίθετο) πρόσημο.

Ηλεκτρομαγνητική δύναμη ή αλληλεπίδραση (electromagnetic force): Η δύναμη μεταξύ σωματιδίων με ηλεκτρικό φορτίο. Η δεύτερη πιο ισχυρή από τις τέσσερις θεμελιώδεις.

Ηλεκτρόνιο (electron): Ένα σωματίδιο με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο που κινείται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου.

Θεώρημα για τις ανωμαλίες (singularity theorem): Ένα θεώρημα που αποδεικνύει ότι, σε ορισμένες συνθήκες, ο σχηματισμός μιας ανωμαλίας είναι αναπόφευκτος· ειδικότερα ότι το Σύμπαν πρέπει να έχει αρχίσει τη διαστολή του από μία ανωμαλία.

Θεώρημα εξάλειψης ιχνών ("no hair" theorem). Ένα θεώρημα που αποδεικνύει ότι τα μόνα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου που «επιβιώνουν» μετά από την κατάρρευση του σε μαύρη τρύπα είναι η μάζα του και ο ρυθμός περιστροφής του.

Ισχυρή πυρηνική δύναμη (strong force): Η ισχυρότερη από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις, με τη μικρότερη ακτίνα δράσης. Συγκρατεί μεταξύ τους τα κουάρκ στο σχηματισμό των πρωτονίων και των νετρονίων επίσης συγκρατεί μεταξύ τους τα πρωτόνια και νετρόνια στο σχηματισμό των πυρήνων.

Κβαντική μηχανική (quantum mechanics): Η θεωρία που αναπτύχθηκε με βάση την αρχή των κβάντα του Planck και την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg.

Κοσμολογία (cosmology): Η μελέτη του Σύμπαντος ως συνόλου.

Κοσμολογική σταθερά (cosmological constant): Μια μαθηματική έκφραση που τη δημιούργησε ο Αϊνστάιν ώστε ο χωρόχρονος να αποκτήσει μια ενδογενή τάση να διαστέλλεται.

Κουάρκ (quark): Φορτισμένο στοιχειώδες σωματίο που υφίσταται τη δράση της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Τα πρωτόνια

και τα νετρόνια αποτελούνται από τρία κουάρκς το καθένα.

Κώνος φωτός (light cone): Μια επιφάνεια στο χωρόχρονο που αντιστοιχεί στο σύνολο των δυνατών διαδρομών των ακτίνων του φωτός που διέρχονται από το γεγονός που βρίσκεται στην κορυφή του κώνου. Αποτελείται από τον μελλοντικό και τον παρελθοντικό κώνο φωτός.

Λευκός νάνος (white dwarf): Ένα ψυχρό άστρο σε στατική κατάσταση που η ισορροπία του σχετίζεται με την απαγορευτική αρχή του Pauli μεταξύ των ηλεκτρονίων που το αποτελούν.

Μαγνητικό πεδίο (magnetic field): Το πεδίο που είναι υπεύθυνο για τις μαγνητικές δυνάμεις. Το μαγνητικό πεδίο μαζί με το ηλεκτρικό αποτελούν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Μάζα (mass): Η ποσότητα ύλης που περιέχει ένα σώμα: η αδράνειά του ή η αντίστασή του στη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης.

Μαύρη τρύπα [ή μελανή οπή] (black hole): Μια περιοχή του χωροχρόνου από όπου τίποτε, ούτε καν το φως, δεν μπορεί να διαφύγει επειδή η έλξη της βαρύτητας είναι πολύ δυνατή.

Μεγάλη έκρηξη (big bang): Η ανωμαλία στην αρχή του Σύμπαντος.

Μεγάλη σύνθλιψη (big crunch): Η ανωμαλία στο τέλος του Σύμπαντος.

Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία (Grand Unified Theory): Η θεωρία που ενοποιεί την ηλεκτρομαγνητική, την ασθενή και την ισχυρή πυρηνική δύναμη.

Μετατόπιση προς το ερυθρό μέρος του φάσματος (red shift): Η μεταβολή του χρώματος (δηλαδή της συχνότητας) του φωτός ενός άστρου που απομακρύνεται από εμάς. Οφείλεται στο φαινόμενο Doppler.

Μήκος κύματος (wavelength): Η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών ενός κύματος.

Νετρίνο (neutrino): Ένα εξαιρετικά ελαφρό σωματίδιο (ίσως

χωρίς μάζα) που επηρεάζεται μόνο από την ασθενή πυρηνική δύναμη και τη βαρύτητα.

Νετρόνιο (neutron): Ένα σωματίδιο χωρίς ηλεκτρικό φορτίο, παρόμοιο με το πρωτόνιο. Ο πυρήνας των περισσότερων ατόμων αποτελείται από περίπου ίσο αριθμό νετρονίων και πρωτονίων.

Ορίζοντας των γεγονότων (event horizon): Το όριο μιας μαύρης τρύπας.

Όριο Chandrasekhar (Chandrasekhar limit): Η μεγαλύτερη δυνατή μάζα ενός ψυχρού άστρου που βρίσκεται σε στατική κατάσταση· αν αυτό αποκτήσει μεγαλύτερη μάζα πρέπει να καταρρεύσει σε μαύρη τρύπα.

Πεδίο (field): Κάτι που υπάρχει σε όλα τα σημεία του χώρου και του χρόνου, αντίθετα με ένα σωματίδιο που υπάρχει σε ένα μόνο σημείο του χώρου και του χρόνου.

Ποζιτρόνιο ή αντιηλεκτρόνιο (positron): Το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου· έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο.

Πρωτόνιο (proton): Ένα σωματίδιο με θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια συνθέτουν τους πυρήνες των ατόμων.

Πυρήνας (nucleus): Το κεντρικό τμήμα του ατόμου· αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια που συγκρατούνται μεταξύ τους με τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις.

Πυρηνική σύντηξη (nuclear fusion): Η διαδικασία όπου δύο πυρήνες συγκρούονται και συγχωνεύονται σχηματίζοντας ενιαίο και βαρύτερο πυρήνα.

Ραδιενέργεια (radioactivity): Η ακτινοβολία που εκπέμπεται όταν ένας πυρήνας διασπαστεί σχηματίζοντας κάποιον άλλο.

Ραντάρ (radar): Σύστημα που χρησιμοποιεί παλμούς ραδιοκυμάτων για να εντοπίσει τη θέση ενός αντικειμένου μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός για να φτάσει στο αντικείμενο, και αφού ανακλαστεί σ' αυτό, να επιστρέψει στην κεραία εκπομπής του.

Σπιν ή ιδιοστροφορμή (spin): Ιδιότητα των στοιχειωδών σωματιδίων που σχετίζεται (χωρίς όμως και να ταυτίζεται) με την περιστροφή τους γύρω από τον εαυτό τους.

Στατική ή στάσιμη κατάσταση (stationary state): Μια κατάσταση που δεν μεταβάλλεται με το χρόνο: μια σφαίρα που περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό βρίσκεται σε στατική κατάσταση επειδή φαίνεται ίδια κάθε στιγμή, αν και δεν είναι ακίνητη.

Στοιχειώδες σωματίδιο (elementary particle): Ένα σωματίδιο που, όπως πιστεύουμε, δεν μπορεί να διασπαστεί σε άλλα μικρότερα.

Συνθήκη έλλειψης ορίου (no boundary condition): Η ιδέα ότι το Σύμπαν είναι πεπερασμένο (δεν είναι άπειρο) αλλά δεν είναι περιορισμένο (δεν έχει όρια) στον φανταστικό χρόνο.

Συντεταγμένες (coordinates): Αριθμοί που προσδιορίζουν τη θέση ενός σημείου στο χώρο και το χρόνο.

Συχνότητα (frequency): Για ένα κύμα είναι ο αριθμός των κορυφών του που περνούν από ένα σημείο κάθε δευτερόλεπτο.

Φανταστικός χρόνος (imaginary time): Ο χρόνος που μετρείται με τη χρήση των φανταστικών αριθμών.

Φάσμα (spectrum): Ο διαχωρισμός ενός κύματος στις διάφορες συχνότητες που το αποτελούν.

Φωτόνιο (photon): Η μικρότερη ποσότητα (κβάντο) φωτός.

Χωρόχρονος (space-time): Ο τετραδιάστατος χώρος που τα σημεία του είναι γεγονότα.

Ευρετήριο όρων και ονομάτων

Αφαιρέθηκε