ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο του Γιάννη Ηλιόπουλου ξεκινά με μια ερώτηση. Γιατί, ενώ ήταν ήδη γνωστά πολλά στοιχειώδη συστατικά της ύλης, η αναγγελία του CERN την 4η Ιουλίου του 2012 ότι ανακαλύφθηκε ένα νέο σωματίδιο προβλήθηκε παγκοσμίως με τεράστια δημοσιότητα, ασυνήθιστη για τον τομέα των στοιχειωδών σωματιδίων; Διότι, μας λέει ο συγγραφέας, «δεν πρόκειται απλώς για ένα νέο σωματίδιο, αλλά –πολύ πιθανόν– για το απτό ίχνος ενός από τα πιο παράδοξα γεγονότα που σημάδεψαν το σύμπαν κατά τις πρώτες στιγμές του: το φαινόμενο που επέτρεψε σε όλα σχεδόν τα στοιχειώδη σωματίδια να αποκτήσουν μη μηδενικές μάζες».

Είναι αυτό το φαινόμενο, γνωστό στην ορολογία των φυσικών ως «αυθόρμητη ρήξη συμμετρίας παρουσία τοπικών εσωτερικών συμμετριών», που ο συγγραφέας θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε με μια απλή και προσιτή, αλλά εύστοχη προσέγγιση. Θα μας δείξει πώς το φαινόμενο αυτό εδράζεται στη σημερινή κατανόηση της φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων, όπως συνοψίζεται στο «Καθιερωμένο Μοντέλο», συνεισφέροντας άλλωστε ουσιωδώς στη συγκρότησή του. Στο βιβλίο αυτό θα δούμε επίσης γιατί, μετά την ανακάλυψη στο CERN, το *Καθιερωμένο Μοντέλο* οριοθετεί το γνωστό από το άγνωστο. Καθώς και γιατί το άγνωστο μας φαίνεται μέρος ενός οράματος όπου γνώση του «απειροστά μικρού» των στοιχειωδών σωματιδίων περιέχει εν δυνάμει και γνώση του «άπειρα μεγάλου» του παρατηρήσιμου σύμπαντος.

Η ανάγνωση αυτού του βιβλίου μάς εισάγει σε ένα μέρος της ιστορίας των αναζητήσεων που στοχεύουν στην ορθολογική κατανόηση του κόσμου. Θα ήθελα να κάνω μια σύντομη επισκόπηση αυτής της ιστορίας.

Η φυσική, όπως την προσδιορίζουμε σήμερα, είναι μια προσπάθεια να ερμηνευτούν μια ευρεία ποικιλία φαινομένων ως εκδηλώσεις γενικών νόμων που μπορούν να επαληθευτούν πειραματικά. Αυτή η έννοια ενός κόσμου που υπακούει σε *επαληθεύσιμους* γενικούς νόμους είναι μια σχετικά πρόσφατη ιδέα στην ανθρώπινη ιστορία. Αναδύθηκε στην Ευρώπη κατά την Αναγέννηση και, στη συνέχεια, γνώρισε μια εξαιρετικά γρήγορη ανάπτυξη. Η επιτυχία της οφείλεται εν πολλοίς στην καθολικότητα του επαναστατικού οράματος του Γαλιλαίου (1564-1642). Ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την αρχή της αδράνειας, η οποία διατείνεται ότι είναι αδύνατο να ανιχνευ-

τεί μια ομοιόμορφη ευθύγραμμη κίνηση οποιουδήποτε φυσικού συστήματος, έμψυχου ή άψυχου, με ένα πείραμα που εκτελείται αποκλειστικά εντός του συστήματος. Η αρχή αυτή υποδεικνύει ότι μια ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή ταχύτητα δεν χρειάζεται να είναι αποτέλεσμα κάποιας αιτίας.

Στα τέλη του 17ου αιώνα ο Νεύτων διατύπωσε, σε συμφωνία με την αρχή της αδράνειας, τον διάσημο νόμο του για την παγκόσμια έλξη των μαζών. Ο Νεύτων θεωρούσε ότι ο κόσμος αποτελείται από πολύ μικρές οντότητες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω δυνάμεων, οι οποίες αλλάζουν τις ταχύτητές τους. Αυτές οι μικρότατες «σημειακές» οντότητες έχουν σήμερα γίνει τα στοιχειώδη σωματίδιά μας. Τον 19ο αιώνα ο Maxwell εισήγαγε την έννοια ενός πεδίου το οποίο, σε αντίθεση με τις μικρότατες οντότητες του Νεύτωνα, γέμιζε ολόκληρες περιοχές του χώρου. Στο νέο αυτό οντολογικό πλαίσιο διατύπωσε τους γενικούς νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, οι οποίοι διέπουν όλα τα φαινόμενα που συνδέονται με τον ηλεκτρισμό, τον μαγνητισμό και το φως. Οι έννοιες του πεδίου και του σωματιδίου ενοποιήθηκαν κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα στην κβαντομηχανική, με τα σωματίδια να γίνονται τα συστατικά «κβάντα» των κυμαινόμενων πεδίων. Επιπρόσθετα, στην αρχή του 20ού αιώνα, ο Αϊνστάιν επεξέτεινε την αρχή της γαλιλαϊκής αδράνειας στον ηλεκτρομαγνητισμό αναπτύσσοντας τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας, η οποία τροποποίησε τις παραδοσιακές έννοιες του χρόνου και του χώρου. Στη συνέχεια, γενίκευσε τον νόμο του Νεύτωνα για τη βαρυτική έλξη των μαζών και δημιούργησε τη θεωρία της γενικής σχετικότητας, η οποία άνοιξε τον δρόμο για την επιστημονική μελέτη της κοσμολογικής διαστολής του σύμπαντος.

Έτσι, χάρις ιδιαίτερα στην εντυπωσιακή πρόοδο κατά το πρώτο μισό του 20ού αιώνα, φτάσαμε σε μια εικόνα του κόσμου όπου όλα τα φαινόμενα, από το ατομικό επίπεδο ώς τα όρια του παρατηρήσιμου σύμπαντος, φαινόταν να διέπονται αποκλειστικά από δύο θεμελιώδεις και γνωστούς νόμους: τη γενική σχετικότητα του Αϊνστάιν και την κβαντική ηλεκτροδυναμική, που είναι η κβαντική μεταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell.

Οι βαρυτικές και ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις είναι *μακράς εμβέλειας*, δηλαδή η δράση τους εκτείνεται σε οσοδήποτε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, η ανακάλυψη υποατομικών δομών υποδείκνυε ότι υπάρχουν πρόσθετες θεμελιώδεις δυνάμεις *μικρής εμβέλειας*, των οποίων η επίδραση στη δική μας κλίμακα είναι αμελητέα. Στην αρχή της δεκαετίας του 1960 η θεωρητική τους ερμηνεία φαινόταν να παρουσιάζει ανυπέρβλητα προβλήματα. Η αφήγηση του Γιάννη Ηλιόπουλου επικεντρώνεται κυρίως από το σημείο αυτό και μετά.

Το 1960 ο Nambu εισήγαγε στη θεωρία στοιχειωδών σωματιδίων την έννοια της «αυθόρμητης ρήξης μιας συμμετρίας». Γενικεύοντας την ιδέα αυτή σε «τοπικές εσωτερικές συμμετρίες», οι Brout και Englert, και ανεξάρτητα ο Higgs, μπόρεσαν να διατυπώσουν έναν θεωρητικό «μηχανισμό» ο οποίος, προσδίδοντας μη μηδενικές μάζες στα σωματίδια που μεταδίδουν τη δύναμη, μεταλλάσσει αλληλεπιδράσεις μακράς εμβέλειας σε αλληλεπιδράσεις μικρής εμβέλειας. Γενικότερα, αυτός ο μηχανισμός των Brout – Englert – Higgs (ΒΕΗ) επέτρεπε να καταλάβουμε την προέλευση των μαζών των στοιχειωδών σωματιδίων. Αλλά τι σημαίνουν αυτές οι έννοιες και πώς επενεργεί αυτός ο μηχανισμός;

Ο Γιάννης Ηλιόπουλος εξηγεί αυτές τις έννοιες και στη συνέχεια δείχνει τον τρόπο συγκρότησης του Καθιερωμένου Μοντέλου εκκινώντας από τον μηχανισμό ΒΕΗ. Διεξέρχεται την πειραματική επιβεβαίωση της θεωρίας συνολικά και την επικύρωση του ίδιου του μηχανισμού με την ανίχνευση στο CERN του σωματιδίου που είναι ουσιώδες στοιχείο του. Η αφήγησή του μας καθοδηγεί στη συνέχεια σε θεωρητικές εικασίες που αφορούν ανεξερεύνητες ακόμα κλίμακες ενεργειών και προχωρούν πέρα από το Καθιερωμένο Μοντέλο.

Στο πλαίσιο αυτής της προοπτικής, ο συγγραφέας δείχνει πώς οδηγούμαστε στην αναγκαστική σύνδεση του «άπειρα μεγάλου» της κοσμολογίας με το «απειροστά μικρό» των στοιχειωδών σωματιδίων. Η ανακάλυψη, το 1965, της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου υπέδειξε την ύπαρξη ενός θερμού αρχέγονου σύμπαντος, η δομή του οποίου μας γίνεται όλο και πιο προσιτή. Από τη μια, βελτιούμενες τεχνικές παρατήρησης αυτής της αρχέγονης κοσμικής ακτινοβολίας, σε συνέργεια με θεωρητικές προόδους στην κοσμολογία, μας επιτρέπουν να δούμε πίσω στον χρόνο μέχρι την απαρχή των κβαντικών ταλαντώσεων αυτής της ακτινοβολίας σε μια εποχή κοντά στη γέννηση του σύμπαντός μας. Από την άλλη, θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα στη φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων μάς καθοδηγούν τώρα να αναλύσουμε τη φυσική σε ενέργειες που αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες περίπου ενός εκατομμυρίου δισεκατομμυρίων βαθμών και, συνεπώς, να μελετήσουμε την αρχέγονη δομή του σύμπαντος σε τέτοιες θερμοκρασίες, και στη συνέχεια να προχωρήσουμε σε διατύπωση εικασιών για ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες.

Έτσι, τα δεδομένα για το «άπειρα μεγάλο» και το «απειροστά μικρό» αλληλοσυμπλέκονται όλο και περισσότερο και καθιστούν αναπόφευκτη τη θεωρητική συγχώνευση αυτών των δύο περιοχών έρευνας. Θα φτάσουμε άραγε τόσο πίσω ώστε να κατανοήσουμε την ανάδυση του σύμπαντος από τις κβαντικές διακυμάνσεις της βαρύτητας; Δυστυχώς, η κβαντική επέκταση

της γενικής σχετικότητας –που ενδεχομένως θα μπορούσε να περιγράψει μια τέτοια εποχή– βρίσκεται, στην καλύτερη περίπτωση, στο εμβρυακό στάδιο, και είναι πολύ νωρίς να πούμε αν θα μπορέσουμε να αποκτήσουμε μια ορθολογική κατανόηση της γέννησης του ίδιου του σύμπαντος.

Η εκλαΐκευση της επιστήμης για το γενικό κοινό είναι μια δύσκολη τέχνη. Η εξήγηση των επιτευγμάτων της θεωρητικής φυσικής, και ιδιαίτερα της σύγχρονης φυσικής, σε ένα μη πληροφορημένο κοινό συναντά δύο εμπόδια. Η γλώσσα των μαθηματικών, η οποία προσφέρει στον φυσικό τη δυνατότητα να εκφράζει και να χειρίζεται τις σχετικές έννοιες με συνοπτικές νοητικές διαδικασίες, είναι απρόσιτη στο γενικό κοινό. Επιπλέον, οι έννοιες καθαυτές είναι τόσο απομακρυσμένες από τις οικείες ιδέες ώστε να μην έχουν κάποιο προφανές ανάλογο. Πώς να εξηγήσει κανείς το νόημα της «αυθόρμητης ρήξης της συμμετρίας» ή των «τοπικών εσωτερικών συμμετριών», που είναι ουσιώδεις έννοιες για την κατανόηση της σύγχρονης φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων; Ενώ η μαθηματική περιγραφή αυτών των εννοιών είναι σαφέστατη, η προσεγγιστική μετάφρασή τους στην καθημερινή γλώσσα απαιτεί την υπέρβαση μερικών συνηθισμένων τρόπων σκέψης.

Η δυσκολία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο απομακρυσμένη από το αντικείμενο είναι η καθημερινή εμπειρία του αναγνώστη. Ένα πρόχειρο ξεφύλλισμα αυτού του βιβλίου, το κείμενο του οποίου περιέχει συγκεκριμένα ένθετα με μερικές εξισώσεις, ίσως δώσει την εντύπωση ότι απευθύνεται κυρίως σε όσους έχουν επιλέξει να ασχοληθούν με κάποια επιστήμη. Αν και αναμφίβολα τέτοιοι αναγνώστες θα το βρουν ιδιαίτερα χρήσιμο, το βιβλίο μπορεί να διαβαστεί με μεγάλο όφελος από πολύ ευρύτερο κοινό. Όποιος ενδιαφέρεται για τα θεμελιώδη ερωτήματα που ανακύπτουν κατά την αναζήτηση μιας ορθολογικής κατανόησης του κόσμου, θα βρει εδώ πολλές διαφωτιστικές απαντήσεις. Ένας αναγνώστης που τον απωθούν οι εξισώσεις μπορεί απλά να τις αγνοήσει και να διαβάσει προσεκτικά τις συνοδευτικές εξηγήσεις. Οι τελευταίες είναι επαρκώς διαυγείς για να δώσουν μια ποιοτική κατανόηση του θέματος, που είναι και ο βασικός στόχος της επιστημονικής εκλαΐκευσης.

Η μεταγραφή από τον συγγραφέα της μαθηματικής ανάλυσης στην κοινή γλώσσα, χωρίς απώλεια ακρίβειας στην εξήγηση των φυσικών εννοιών, είναι υποδειγματική. Απαιτεί βέβαια μια προσπάθεια από τον αναγνώστη· ο οποίος, ωστόσο, διευκολύνεται σημαντικά από το γεγονός ότι ο συγγραφέας, περιοριζόμενος στα ουσιώδη, κατάφερε τον άθλο να συνοψίσει σε μόλις εκατό και κάτι σελίδες μια σειρά από έννοιες και θέματα μη οικεία στο γενικό κοινό. Το νήμα της συζήτησης είναι ευδιάκριτο καθ' όλη την ανά-

γνωση του κειμένου, χωρίς να διακόπτεται από κάποια συσσώρευση δευτερευουσών λεπτομερειών. Η επιτυχία αυτού του μικρού βιβλίου να εξηγήσει ιδέες και γεγονότα τόσο ξένα στην καθημερινή εμπειρία με έναν ελκυστικό και προσιτό τρόπο χάρις στην εστίασή του στο ουσιώδες, το κάνει ένα βιβλίο σπάνιας ποιότητας.

François Englert
Ομότιμος καθηγητής
Université Libre de Bruxelles
Βραβείο Nobel 2013

1

Εισαγωγή

Στις 4 Ιουλίου του 2012 ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Πυρηνικών Ερευνών (CERN) ανήγγειλε μια ανακάλυψη που προβλήθηκε στα πρωτοσέλιδα των μέσων παγκοσμίως. Με ένα σύστημα τηλεδιασκέψεων, η ανακοίνωση έγινε ταυτόχρονα στη Μεγάλη Αίθουσα Διαλέξεων του CERN και στην Αυστραλία, όπου πραγματοποιούνταν το ετήσιο Διεθνές Συνέδριο Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, αλλά επίσης μεταδόθηκε ζωντανά μέσω του Διαδικτύου σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα όλου του κόσμου και σε μέσα ενημέρωσης γενικού κοινού. Επρόκειτο για την ανακάλυψη ενός νέου σωματιδίου με το οποίο ολοκληρώθηκε μια μάλλον πλούσια συγκομιδή σωματιδίων που οι φυσικοί ταυτοποίησαν με την πάροδο του χρόνου. Στο Παράρτημα Ι παρουσιάζουμε έναν πίνακα που συνοψίζει τις γνώσεις μας για ό,τι αποκαλούμε *στοιχειώδη σωματίδια*. Εκεί βλέπει κανείς έναν αρκετά μεγάλο αριθμό καταχωρίσεων με εξωτικά ονόματα, όπως *κουάρκ* (quarks), *λεπτόνια* (leptons), *γλοιόνια* (gluons), *μεσάζοντα μποζόνια* (intermediate bosons) κ.λπ. Γιατί λοιπόν τόση φασαρία γι' αυτό το τελευταίο σωματίδιο; Η απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα είναι το θέμα αυτού του βιβλίου. Στόχος μας είναι να δείξουμε ότι δεν πρόκειται απλώς για ένα νέο σωματίδιο, αλλά –πολύ πιθανόν– για το απτό ίχνος ενός από τα πιο παράδοξα γεγονότα που σημάδεψαν το σύμπαν κατά τις πρώτες στιγμές του: το φαινόμενο που επέτρεψε σε όλα σχεδόν τα στοιχειώδη σωματίδια να αποκτήσουν μη μηδενικές μάζες.

Εικονα 1.1 Η ανακοίνωση της ανακάλυψης στο CERN. Στο κέντρο του πόντιουμ βλέπουμε την Fabiola Gianotti, εκπρόσωπο της σύμπραξης πειραματικών ομάδων ATLAS (εμφανίζεται επίσης πάνω δεξιά), τον Rolf-Dieter Heuer, γενικό διευθυντή του CERN, και τον Joe Incandela, εκπρόσωπο της σύμπραξης πειραματικών ομάδων CMS (εμφανίζεται επίσης πάνω αριστερά). Κάτω δεξιά: ο François Englert και ο Peter Higgs. Μοντάζ: Dr A. Hoecker, CERN.

Καθώς θα προχωράμε στην παρουσίαση του εξαιρετικού αυτού φαινομένου, θα χρειαστεί να θίξουμε πολλά θέματα φυσικής και μαθηματικών που υπεισέρχονται στην κατανόησή του. Δεν θα είναι μόνο θέματα φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων, αλλά και κοσμολογίας και, σε κάποιον βαθμό, φυσικής των μεταβάσεων φάσης (δηλ. μεταβάσεων μεταξύ ποιοτικά διαφορετικών καταστάσεων ενός φυσικού συστήματος). Για να αποφύγουμε κάθε παρανόηση, ας τονίσουμε εδώ τι ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ στις προθέσεις αυτού του βιβλίου: δεν είναι ένα βιβλίο με θέμα τα στοιχειώδη σωματίδια, δεν είναι ένα βιβλίο για την κοσμολογία και δεν είναι ένα βιβλίο για τις μεταβάσεις φάσης. Δεν είναι καν ένα βιβλίο για την ανακάλυψη αυτού του νέου σωματιδίου. Η ίδια η ανακάλυψη, ενώ θα μπορούσε να αποτελέσει υλικό για μια συναρπαστική ιστορία, δεν θα περιγραφεί.

Το βιβλίο εστιάζει στην *ξεχωριστή φυσική σημασία* της ανακάλυψης. Απ' όλα τα παραπάνω θέματα θα παρουσιάσουμε μόνο εκείνα τα στοιχεία που

Εικονα 1.2 Μια συλλογή αποκομμάτων από τον διεθνή Τύπο που ανήγγειλαν την ανακάλυψη του νέου μποζονίου στο CERN. Μοντάζ: Dr A. Hoecker, CERN.

είναι απαραίτητα για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της δημιουργίας μάζας στο πρώιμο σύμπαν. Θα περιγράψουμε λοιπόν ένα σημαντικό μέρος της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων, αλλά χωρίς να παρουσιαστεί η πλήρης θεωρία των σωματιδίων και των αλληλεπιδράσεών τους. Ο αναγνώστης που είναι ήδη εξοικειωμένος με το πεδίο θα παρακολουθήσει ευκολότερα τη συλλογιστική και την επιχειρηματολογία. Για να τον διευκολύνουμε, αλλά και για να βοηθήσουμε εκείνους που δεν έχουν κάποια οικειότητα με το αντικείμενο, συμπεριλάβαμε ένα μάλλον εκτενές Παράρτημα που συνοψίζει όλες τις προαπαιτούμενες πληροφορίες για τα έσχατα συστατικά της ύλης. Ο αναγνώστης που ήδη κατέχει αυτές τις γνώσεις μπορεί ασφαλώς να το αγνοήσει, αλλά συνιστούμε θερμά στον αρχάριο να το διαβάσει *πριν* προχωρήσει στα κύρια κεφάλαια του βιβλίου.

Σε ένα δεύτερο Παράρτημα επεξηγούνται μερικές μαθηματικές έννοιες στις οποίες αναφερόμαστε σποραδικά στο κυρίως κείμενο. Είναι μερικές έννοιες της θεωρίας ομάδων που είναι χρήσιμες όταν εξετάζουμε τις ιδιότητες συμμετρίας ενός φυσικού συστήματος. Έχουν συμπεριληφθεί για λόγους πληρότητας και δεν είναι απαραίτητες για την κατανόηση του κύριου θέματος του βιβλίου.

Η δομή του βιβλίου έχει ως εξής. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε μια συνοπτική ιστορία της κοσμολογίας: τις απαρχές και την εξέλιξή της, μαζί με τις σημερινές ιδέες (κάποιοι ίσως θα έλεγαν προκαταλήψεις) μας αναφορικά με την ιστορία του σύμπαντος. Η επιλογή αυτή απαιτεί μια εξήγηση: όντως, δεν είναι προφανές να μαντέψει κανείς τη σημασία της κοσμολογίας για τον μικρόκοσμο εν γένει, και ειδικότερα για την πρόσφατη ανακάλυψη στο CERN. Πρώτος μας στόχος, όπως είναι εύλογο, θα είναι να δείξουμε ότι αυτή η επιλογή είναι δικαιολογημένη, αλλά στην πραγματικότητα θέλουμε να προχωρήσουμε παραπέρα και να καταδείξουμε μια βαθιά σύνδεση ανάμεσα στο άπειρα μεγάλο και το απειροστά μικρό. Η σύνδεση αυτή θα αναπτυχθεί σε όλη την έκταση του βιβλίου. Θέλουμε να πείσουμε τον αναγνώστη ότι η δομή του σύμπαντος σε όλη του την απεραντοσύνη οφείλεται στους νόμους της μικροφυσικής, ότι το σύμπαν είναι το καλύτερο εργαστήριο για να εφαρμόσουμε τις ιδέες μας για τις θεμελιώδεις ιδιότητες της ύλης.

Στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσεται το κεντρικό θέμα του βιβλίου. Η κατευθύνουσα ιδέα είναι εκείνη της συμμετρίας, μιας έννοιας που έπαιξε καταλυτικό ρόλο σε όλη την πρόοδο στην κατανόηση του φυσικού κόσμου κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Πρώτα παρουσιάζουμε τις πιο διαισθητικές εκφάνσεις αυτής της έννοιας, συγκεκριμένα τις συμμετρίες του οικείου μας χώρου. Όπως θα δούμε στα συγκεκριμένα παραδείγματα, μέσω της έννοιας αυτής προσεγγίζουμε τη γεωμετρία στην απλούστερη μορφή της. Βαθμιαία, η έννοια της συμμετρίας, και μαζί της και οι συναφείς γεωμετρικές ιδέες, παίρνουν πιο αφηρημένη μορφή. Η γεωμετρία, στην κάπως πιο αφηρημένη μαθηματική της διατύπωση, θα ήταν η πιο εύστοχη γλώσσα γι' αυτό το βιβλίο, αλλά αποφασίσαμε εξαρχής να αποφύγουμε όσο είναι δυνατόν τα μαθηματικά. Έτσι, η κύρια δυσκολία του εγχειρήματός μας θα είναι να μεταφράσουμε ορισμένες μαθηματικές σχέσεις σε κατανοητά σε όλους ελληνικά. Θα το επιδιώξουμε περισσότερο ή λιγότερο επιτυχημένα, πιθανότατα λιγότερο από την αρχική μας πρόθεση. Με βήματα αυξανόμενων αφαιρέσεων θα οδηγήσουμε τον αναγνώστη προς ένα σύνθετο θεωρητικό οικοδόμημα που αποκαλείται *το καθιερωμένο μοντέλο*. Μέσα σε αυτό το θεωρητικό πλαίσιο, όπου συνοψίζεται όλη η γνώση μας για τον υποατομικό κόσμο, θα μας αποκαλυφθεί η ιδιαίτερη σημασία της τελευταίας ανακάλυψης στο CERN.

Μια παρατήρηση, που είναι και προειδοποίηση: τα φαινόμενα που θα παρουσιαστούν σε αυτό το βιβλίο είναι εκείνα που μελετάμε στα πειράματα φυσικής υψηλών ενεργειών ή στα παρατηρησιακά δεδομένα στην κοσμολογία. Σχεδόν όλα είναι φαινόμενα που διέπονται από τους νόμους της κβα-

ντικής μηχανικής. Θα προσπαθήσουμε να τα περιγράψουμε χρησιμοποιώντας αναλογίες από την κλασική φυσική, οι οποίες είναι πλησιέστερες προς την καθημερινή μας εμπειρία. Οι αναλογίες αυτές έχουν περιορισμένη ισχύ. Στην καλύτερη περίπτωση μπορούν να συλλάβουν μερικές πλευρές ενός τέτοιου φαινομένου, ποτέ την πλήρη κβαντική του υπόσταση. Ο αναγνώστης δεν πρέπει να τις εκλάβει κατά λέξη.

Μια τελευταία παρατήρηση αφορά το σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιήσουμε. Στην κλασική φυσική συχνά επιλέγουμε το μέτρο ως μονάδα μήκους (m), το χιλιόγραμμο ως μονάδα μάζας (kg) και το δευτερόλεπτο ως μονάδα χρόνου (s). Το σύστημα αυτό είναι δύσχρηστο όταν πραγματευόμαστε φαινόμενα σχετικιστικής κβαντικής φυσικής, τα οποία χαρακτηρίζονται από δύο φυσικές σταθερές: την ταχύτητα του φωτός στο κενό c και τη σταθερά του Planck h. Οι αριθμητικές τιμές αυτών των σταθερών στο προαναφερθέν σύστημα MKS (meter – kilogram – second) είναι $c = 299.792.458\,\mathrm{ms}^{-1}$ και $\hbar = h/2\pi = 1{,}054571726(47) \cdot 10^{-34}$ Js,[1] τιμές άβολες όταν εμφανίζονται σε πολλές φυσικές σχέσεις. Βλέπουμε ότι το c έχει διαστάσεις ταχύτητας, $[c] = [\text{απόσταση}] \cdot [\text{χρόνος}]^{-1}$ και το $\hbar$ έχει διαστάσεις *δράσης*, δηλαδή $[\hbar] = [\text{ενέργεια}] \cdot [\text{χρόνος}]$. Ορμώμενοι από τις παρατηρήσεις αυτές, θα διαλέξουμε ένα σύστημα φυσικών μονάδων όπου η καθεμιά από τις δύο αυτές σταθερές θα ισούται με τον αδιάστατο αριθμό 1. Αυτό σημαίνει ότι θα μετράμε όλες τις ταχύτητες ως κλάσματα της ταχύτητας του φωτός και όλες τις δράσεις ως πολλαπλάσια του $\hbar$. Στο σύστημα αυτό οι διαστάσεις όλων των φυσικών μεγεθών σχετίζονται μεταξύ τους και βρίσκουμε, για παράδειγμα, ως διαστατικές σχέσεις, ότι

$$[\text{μήκος}] = [\text{χρόνος}]$$
$$[\text{μάζα}] = [\text{ενέργεια}] = [\text{μήκος}]^{-1}$$

Με την επιλογή αυτή απομένει μόνο μία μονάδα για να συμπληρώσουμε το σύστημά μας, και διαλέγουμε το *ηλεκτρονιοβόλτ*, που γράφεται eV, ως μονάδα ενέργειας.[2] Θα χρησιμοποιούμε κυρίως τα πολλαπλάσιά της, το Mega-eV, $1\,\mathrm{MeV} = 10^6\,\mathrm{eV}$ και το Giga-eV, $1\,\mathrm{GeV} = 10^9\,\mathrm{eV}$. Οι προηγούμενες σχέσεις δείχνουν ότι ο χρόνος και η απόσταση θα μετρώνται σε

[1] Το Js δηλώνει Joule × second, όπου $1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{kg\,m^2\,s^{-2}}$. Ο αριθμός στην παρένθεση στην τιμή του $\hbar$ καταγράφει την πειραματική αβεβαιότητα. Δεν υπάρχει κάτι ανάλογο στην τιμή του c, διότι από το 1983 η τιμή αυτή είναι μέρος του ορισμού του διεθνούς συστήματος μονάδων.

[2] Ορίζεται ως η κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που επιταχύνθηκε από μια διαφορά δυναμικού 1 Volt. $1\,\mathrm{eV} = 1{,}602176565 \cdot 10^{-19}$ J.

αντίστροφα eV και, χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές τιμές των c και $\hbar$, βρίσκουμε την προσεγγιστική σχέση

$$10^{-15}\,\mathrm{m} = (200\,\mathrm{MeV})^{-1} \tag{1.1}$$

Αποκαλούμε συχνά την απόσταση 10^{-15} m ένα φέρμι, δηλώνοντάς το 1 f.