

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ε. ΒΑΓΙΟΝΑΚΗΣ
Καθηγητής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Μια Εισαγωγή στη Βασική Δομή της Ύλης



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος Ε. Βαγιονάκης
Σωματιδιακή Φυσική, Μια Εισαγωγή στη Βασική Δομή της Ύλης
Copyright © 2013 Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Γλωσσική επιμέλεια
Μαρία Σ. Παπαδοπούλου

Ηλεκτρονική σελιδοποίηση
Ειρήνη Βούλγαρη, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*

Μακέτα εξωφύλλου
Ροζίτα Ταμπακοπούλου, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Ε.Μ.Π.
Θωμαΐδειο Κτήριο Εκδόσεων
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Ζωγράφου
Τηλ.: 210 772 2578, fax: 210 772 1127
e-mail: ntuapres@central.ntua.gr
www.ntua.gr/ntuapress

ISBN: 978-960-254-698-7

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην προσπάθεια του ανθρώπου για την κατανόηση της φύσης, πρωτεύοντα ρόλο έπαιζε πάντοτε, και εξακολουθεί να παίζει μέχρι σήμερα, η αναγωγή πολύπλοκων φαινομένων σε όλο και απλούστερες αρχές και δομές πάνω στις οποίες μπορεί κανείς να στηρίξει μια θεωρητική περιγραφή σε ένα βαθύτερο επίπεδο. Η φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων ενσαρκώνει ιδανικά μια τέτοια αναγωγική διαδικασία τόσο ως προς τις μεθόδους της όσο και ως προς το περιεχόμενό της.

Η έρευνα ενός περίπου αιώνα προς την κατεύθυνση αυτή έχει σήμερα καταλήξει σε αυτό που ονομάζουμε «καθιερωμένο πρότυπο» της σωματιδιακής φυσικής: μια θεωρία που περιγράφει επιτυχώς τις ηλεκτρομαγνητικές, τις ασθενείς πυρηνικές και τις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες αποτελούν τα τρία από τα τέσσερα είδη δυνάμεων που διέπουν τον κόσμο όπου ζούμε (το τέταρτο είναι βέβαια η βαρύτητα). Η θεωρία αυτή στηρίζεται σε μια βασική αρχή συμμετρίας, σε μια «συμμετρία βαθμίδας» όπως λέγεται, που με τη σειρά της εδράζεται στις δύο κύριες θεωρίες που έχουμε για τη φύση, την κβαντική θεωρία και τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας. Το καθιερωμένο πρότυπο περιγράφει με αυτόν τον τρόπο τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αυτά που θεωρούνται σήμερα ως τα στοιχειώδη σωματίδια της ύλης, δηλαδή τα λεπτόνια και τα κουάρκς.

Πέρα από το πειραματικά επιβεβαιωμένο σε πολύ καλό βαθμό καθιερωμένο πρότυπο, απόπειρες για ευρύτερες θεωρίες έχουν αποτελέσει τα τελευταία χρόνια αντικείμενο έντονης έρευνας. Σκοπός τους είναι να απαντήσουν σε ορισμένα αναπάντητα μέσα στο καθιερωμένο πρότυπο προβλήματα, όπως, για παράδειγμα, οι μικρές μη μηδενικές μάζες που φαίνεται να χρειάζονται για τα νετρίνα. Κυρίως, όμως, αυτές αποβλέπουν στο να περιλάβουν μέσα σε ένα ευρύτερο σχήμα και τη βαρύτητα, που και αυτή με τη μορφή της θεωρίας της γενικής σχετικότητας έχει τα χαρακτηριστικά μιας «θεωρίας βαθμίδας», αν και διαφορετικού χαρακτήρα. Είναι εξάλλου αξιοσημείωτο ότι όλες οι παραπάνω θεωρίες έχουν σημαντική επίδραση στην κατανόηση των προβλημάτων της σύγχρονης κοσμολογίας και αστροφυσικής.

Το βιβλίο αυτό αποτελεί, κατά πρώτο λόγο, μια εισαγωγή στο καθιερωμένο πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής, παρουσιάζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο χωρίς απομάκρυνση από ένα φαινομενολογικό πλαίσιο. Κατά δεύτερο λόγο, συζητά συνοπτικά πιθανές επεκτάσεις του. Όλα αυτά εν αναμονή των οριστικών αποτελεσμάτων του πιο μεγαλεπήβολου μέχρι σήμερα πειράματος, όπως αυτό εξελίσσεται στις μέρες μας στον επιταχυντή LHC στο ευρωπαϊκό κέντρο πυρηνικών ερευνών CERN.

Ιούλιος 2012

Κωνσταντίνος Ε. Βαγιονάκης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγικές έννοιες και σχέσεις	27
1.1 ΕΠΙΠΕΔΑ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	27
1.2 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	32
1.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ	39
1.4 ΣΥΜΜΕΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ	47
ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	49
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σχετικιστικές κβαντικές εξισώσεις	59
2.1 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	59
2.2 ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ	62
2.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΛΕΙΝ – GORDON	71
2.4 ΕΞΙΣΩΣΗ DIRAC	73
2.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL	91
ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	96
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Λαγκρανζιανή διατύπωση, συμμετρίες και θεωρίες βαθμίδας	103
3.1 ΛΑΓΚΡΑΝΖΙΑΝΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ	103
3.2 ΣΥΜΜΕΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ	109
3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	114
3.4 ΣΥΜΜΕΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΟΜΑΔΕΣ	118
3.5 ΑΒΕΛΙΑΝΕΣ ΚΑΙ ΜΗ ΑΒΕΛΙΑΝΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	124
ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	131
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Το καθιερωμένο πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής	143
4.1 ΟΙ ΘΕΩΡΙΕΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ ΤΟΥ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	143

4.2 ΟΙ ΗΛΕΚΤΡΑΣΘΕΝΕΙΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	148
4.3 ΟΙ ΙΣΧΥΡΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	153
4.4 ΑΥΘΟΡΜΗΤΟ ΣΠΑΣΙΜΟ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ HIGGS	160
4.5 Η ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	171
ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	176
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	181

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ενεργές διατομές και ρυθμοί διάσπασης **183**

5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΚΑΙ ΡΥΘΜΩΝ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ	183
5.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΚΑΙ ΡΥΘΜΩΝ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ	187
ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	194
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	196

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμμετρίες σωματιδιακής φυσικής **199**

6.1 ΣΥΜΜΕΤΡΙΕΣ C , P ΚΑΙ T	199
6.2 Η ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ CP ΚΑΙ Η ΠΑΡΑΒΙΑΣΗ ΤΗΣ	209
6.3 ΒΑΡΥΟΝΙΚΟΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΝΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ – ΜΑΖΕΣ ΝΕΤΡΙΝΩΝ	229
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	238

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Πέρα από το καθιερωμένο πρότυπο: Υπερσυμμετρία, μεγάλη ενοποίηση και θεωρίες χορδών **241**

7.1 ΚΙΝΗΤΡΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	241
7.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ	246
7.3 ΜΙΑ ΑΠΛΗ ΥΠΕΡΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΛΑΓΚΡΑΝΖΙΑΝΗ	253
7.4 Η ΑΛΓΕΒΡΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ	256
7.5 ΙΔΙΟΣΤΡΟΦΕΣ ΥΠΕΡΠΟΛΛΑΠΛΟΤΗΤΕΣ	259
7.6 ΥΠΕΡΠΟΛΛΑΠΛΟΤΗΤΕΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	264
7.7 ΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΥΠΕΡΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ: ΕΥΚΠ	270
7.8 ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΖΕΥΞΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	274
7.9 ΣΠΑΣΙΜΟ ΥΠΕΡΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΑΣΘΕΝΟΥΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ΕΥΚΠ	280
7.10 ΘΕΩΡΙΕΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ	289
7.11 ΘΕΩΡΙΕΣ ΧΟΡΔΩΝ	294
ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	304
ΑΛΥΤΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	313

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Κβαντική θεωρία πεδίου	317
I. ΒΑΘΜΩΤΟ ΠΕΔΙΟ	318
II. ΠΕΔΙΟ DIRAC	327
III. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	329
IV. ΜΑΖΙΚΟ ΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	335
V. ΔΙΑΔΟΤΕΣ	337
VI. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	339
VII. ΚΑΝΟΝΕΣ ΦΕΥΝΜΑΝ ΚΑΙ ΑΝΑΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	342
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	345
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	347