

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	11
1.1	Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων Σήμερα	11
1.2	Δομή και επίπεδο βιβλίου, προτεινόμενη διεθνής βιβλιογραφία	14
1.3	Σύστημα Μονάδων	17
2	Υπόβαθρο	19
2.1	Στοιχεία Ειδικής Σχετικότητας	19
2.1.1	Ιστορική Σημείωση	19
2.1.2	Αναλλοίωτα Διαστήματα και Κοσμικές Γραμμές (Invariant Intervals and World Lines)	19
2.1.3	Αρχή της “Ακραίας γήρανσης” (Principle of Extremal Aging) και νόμοι διατήρησης	21
2.1.4	Αναλλοίωτη μάζα	24
2.1.5	Συναλλοίωτη (Covariant) διατύπωση της Ειδικής Σχετικότητας	25
2.1.6	Συγκρούσεις σωματιδίων	28
2.1.7	Ηλεκτρομαγνητισμός στον συναλλοίωτο φορμαλισμό	31
2.2	Συμμετρίες - ομάδες Lie: σύντομη ανασκόπηση	32
2.2.1	Μαθηματικά αξιώματα ομάδων	33
2.2.2	Αναπαραστάσεις ομάδων	34
2.2.3	Ομάδες καί άλγεβρες Lie	35
2.2.4	Παραδείγματα ομάδων με φυσική σημασία	38
2.3	Σύντομη επισκόπηση της Φυσικής των σωματιδίων	47
2.3.1	Θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις και νόμοι διατήρησης	48
2.3.2	Ταξινόμηση σωματιδίων	49
3	Κλασσική Θεωρία Πεδίου	55
3.1	Η Αρχή της Ελάχιστης Δράσης (Action Principle) - εξισώσεις Lagrange	55
3.1.1	Εξισώσεις Lagrange στην Κλασική Μηχανική	55

3.1.2	Εξισώσεις Lagrange στη (σχετικιστική) θεωρία πεδίου	58
3.2	Παραδείγματα σχετικιστικών θεωριών πεδίου με φυσική σημασία	59
3.2.1	Βαθμωτά πεδία - η εξίσωση Klein-Gordon	59
3.2.2	Φερμιονικά, (spin- $\frac{1}{2}$) πεδία - η εξίσωση Dirac	61
3.2.3	Διανυσματικά σωματίδια εσωτερικής στροφορμής (spin) 1	71
3.3	Νόμοι διατήρησης	77
3.3.1	Θεώρημα της Noether	77
3.3.2	Θεώρημα της Noether στην Κλασσική Θεωρία Πεδίου	79
3.3.3	Χωροχρονικές συμμετρίες και τα σχετικά διατηρούμενα ρεύματα Noether	80
3.3.4	Νόμοι διατήρησης στην κβαντική φυσική	82
3.4	Αλληλεπιδρώσες θεωρίες πεδίου και συμμετρίες	84
3.4.1	Αλληλεπιδρώσες θεωρίες βαθμωτών πεδίων και εσωτερικές (Internal) συμ- μετρίες	84
3.4.2	Η μέθοδος Gell-Mann-Levy για την λήψη του διατηρούμενου ρεύματος Noether και της συναλλοίωτης τετρααπόκλισής του (covariant divergence) σε περι- πτωση μη ακριβούς συμμετρίας	91
3.4.3	Αυθόρμητη θραύση μιας συνεχούς συμμετρίας- το θεώρημα του Goldstone	94
3.4.4	Αυθόρμητη θραύση μιας ολικής Αβελιανής συμμετρίας: Το μοντέλο Goldstone	96
3.4.5	Αυθόρμητη θραύση μιας ολικής μη-Αβελιανής συμμετρίας	98
3.4.6	Μερικές ολικές συμμετρίες που ενδιαφέρουν τη σωματιδιακή φυσική	102
3.5	Τοπικές συμμετρίες βαθμίδας και η αυθόρμητη θραύση τους	109
3.5.1	Κβαντική Ηλεκτροδυναμική και Αβελιανή συμμετρία βαθμίδας $U(1)$	110
3.5.2	Βαθμωτή Ηλεκτροδυναμική (Scalar Electrodynamics) και Αβελιανή συμμε- τρία βαθμίδας $U(1)$	112
3.5.3	Αυθόρμητη θραύση τοπικής συμμετρίας $U(1)$ (μοντέλο Higgs) και το φαινό- μενο της υπεραγωγιμότητας	112
3.5.4	Μη-Αβελιανές συμμετρίες βαθμίδας	115
3.5.5	Αυθόρμητη θραύση μη-Αβελιανών συμμετριών βαθμίδας	120
3.6	Η Λαγκρανζιανή του Καθιερωμένου Προτύπου	123
3.6.1	Το Μοντέλο Ηλεκτρασθενούς Ενοποίησης των Glashow, Salam and Weinberg (GSW) - Λεπτόνια	124
3.6.2	Συμπεριλαμβάνοντας τα αδρόνια, και "συμμετρία" κουάρκ-λεπτονίων	130
3.6.3	Ισχυρές αλληλεπιδράσεις	133
3.6.4	Μοτίβα θραύσης συμμετρίας στο Καθιερωμένο Πρότυπο	136
3.7	Διακριτές συμμετρίες C,P,T στο Καθιερωμένο Πρότυπο - θεώρημα CPT	138
3.7.1	Μετασχηματισμός ισοτιμίας (Parity, \mathcal{P})	138

3.7.2	Αναστροφή Χρόνου (Time Reversal, T)	142
3.7.3	Σύζυγία Φορτίου (Charge Conjugation, C)	143
3.7.4	Διακριτές συμμετρίες και σπίνορες Dirac	144
3.7.5	Το θεώρημα CPT	147
4	Δεύτερη Κβάντωση	149
4.1	Γραμμική αλυσίδα	149
4.1.1	Κλασική αντιμετώπιση της γραμμικής αλυσίδας	149
4.1.2	Κβάντωση της γραμμικής αλυσίδας	152
4.2	Συνεχές όριο	155
4.2.1	Κλασική χορδή	155
4.2.2	Κβαντική χορδή	157
4.3	Κβάντωση της εξίσωσης του Schrödinger	158
4.3.1	Εφαρμογές	159
4.4	Δυναμικές μεταβλητές	162
4.5	Σύνδεση με τα ταυτοτικά σωματίδια	163
5	Κβάντωση ελεύθερων πεδίων	165
5.1	Βαθμωτά πεδία	165
5.1.1	Αντισωματίδια	166
5.1.2	Βαθμωτό πραγματικό πεδίο: Κβάντωση και ανάπτυγμα Fourier	168
5.1.3	Χώρος του Fock	170
5.1.4	Μιγαδικό βαθμωτό πεδίο: Αντισωματίδια	172
5.1.5	Διαδότες	173
5.2	Φερμιονικό πεδίο	178
5.2.1	Ανάπτυγμα Fourier και κβάντωση	178
5.2.2	Φερμιονικός διαδότης	180
5.3	Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	181
5.3.1	Κλασική θεωρία	181
5.3.2	Βαθμίδα του Coulomb	183
5.3.3	Κβάντωση	184
5.3.4	Εναλλακτική διατύπωση της κλασικής Ηλεκτροδυναμικής.	185
5.3.5	Διαδότης	187
5.3.6	Ανάπτυγμα του Fourier	187
5.3.7	Παρατηρήσεις σχετικά με τον διαδότη	190
5.3.8	Κανόνες Feynman για τα φωτόνια	192

6	Εικόνες	193
6.1	Εικόνες στην Κβαντική Μηχανική	193
6.1.1	Εικόνα του Schrödinger	193
6.1.2	Εικόνα του Heisenberg	194
6.1.3	Εικόνα της αλληλεπίδρασης	194
6.2	Ακτινοβολία: παράδειγμα χρήσης της εικόνας αλληλεπίδρασης.	195
6.3	Λύση της εξίσωσης $i\frac{d}{dt}U_I(t) = \hat{H}'_I(t)U_I(t)$: Ανάπτυγμα του Dyson	196
6.4	Πίνακας σκέδασης	198
7	Θεώρημα του Wick και εφαρμογές	201
7.1	Θεώρημα του Wick	201
7.2	Εφαρμογή του θεωρήματος Wick: Σκέδαση μποζονίων	204
7.3	Εφαρμογή του θεωρήματος του Wick: διάσπαση σωματιδίου	210
7.4	Κανονικοποιημένες κυματοσυναρτήσεις	214
7.5	Υπολογισμοί στοιχείων πίνακα	216
7.6	Εφαρμογή του θεωρήματος Wick: σκέδαση φερμιονίων	218
7.7	Διαγράμματα Feynman	221
7.7.1	Γραφική παράσταση των διαγραμμάτων	221
7.7.2	Τιμή των διαγραμμάτων	221
7.8	Εικονικά σωματίδια	223
7.9	Δοκιμές του καθιερωμένου προτύπου: Υπολογίζοντας πλάτη σκέδασης	229
7.9.1	Γενικές έννοιες και μέθοδοι στην κβαντική θεωρία σκέδασης.	229
7.9.2	Εξίσωση Lehmann-Symanzik-Zimmermann (LSZ) για τα πλάτη Κβαντικής Σκέδασης	232
7.9.3	Σκέδαση σε επίπεδο δένδρου (Tree-level scattering) στην Κβαντική Ηλεκτροδυναμική και αντιστοιχία με την κλασική Φυσική	236
7.9.4	Σκέδαση στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις και το Καθιερωμένο Πρότυπο	249
7.10	Μοναδιαία Πλάτη Σκέδασης	257
8	Ολοκληρώματα διαδρομής	263
8.1	Ολοκλήρωμα διαδρομής στην Κβαντική Μηχανική	263
8.2	Ολοκληρώματα διαδρομής ελεύθερων βαθμωτών πεδίων	267
8.3	Ολοκληρώματα διαδρομής αλληλεπιδρώντων βαθμωτών πεδίων	271
8.3.1	Επανεξέταση της θεωρίας σκέδασης - ο μη τετριμμένος ρόλος μόνο των συνδεδεμένων γραφημάτων	283
8.3.2	Διορθώσεις βρόχου στον (βαθμωτό) διαδότη	287

8.3.3	Αυτοενέργεια της (επανακανονικοποιήσιμης) θεωρίας ϕ^3 σε έξι διαστάσεις	293
8.3.4	Διορθώσεις βρόχου στην κορυφή της εξαδιάστατης θεωρίας ϕ^3	294
8.3.5	Μια σύντομη σημείωση για τις υπέρυθρες (infrared (IR)) απειρίες	298
8.4	Ομάδα Επανακανονικοποίησης	299
8.4.1	Πρελούδιο στη προσέγγιση της Ομάδας Επανακανονικοποίησης: Σχήμα ελάχιστης αφαίρεσης για την αυτοενέργεια της εξαδιάστατης θεωρίας ϕ^3	300
8.4.2	Οι βασικές ιδέες και έννοιες της Ομάδας Επανακανονικοποίησης	302
8.5	Ολοκληρώματα διαδρομής για μιγαδικά βαθμωτά πεδία	308
8.6	Ολοκληρώματα διαδρομής για πεδία φερμιονίων	309
8.6.1	Ολοκληρώματα διαδρομής για φερμιόνια Dirac	309
8.6.2	Ολοκληρώματα διαδρομής για φερμιόνια Majorana	310
8.7	Ολοκληρώματα διαδρομής για θεωρίες βαθμίδας	318
8.7.1	Αβελιανές θεωρίες βαθμίδας: Ολοκλήρωμα διαδρομής για φωτόνια	318
8.7.2	Μη-Αβελιανές θεωρίες βαθμίδας: σύντομα σχόλια	320
8.8	Ενεργές Θεωρίες Πεδίου (Effective Field Theories)	324
9	Χειραλική ανωμαλία	333
9.1	Παραβίαση του χειραλικού ρεύματος	334
9.2	Το Ανώμαλο Τρίγωνο	338
9.3	Ακύρωση της ανωμαλίας	341
9.4	Άλλες εφαρμογές	344
9.4.1	Οι ιδιοτιμές του τελεστή Dirac	344
9.4.2	Κβαντική Χρωμοδυναμική	346
10	Θεωρίες Yang-Mills	349
10.1	Κανόνες Feynman	350
10.2	Διαγράμματα ενός βρόχου	351
10.3	Επανακανονικοποίηση	356
10.4	Συνάρτηση β και Τροχιές Επανακανονικοποίησης	359
10.5	Δράση στο πλέγμα	364
10.5.1	Αβελιανό πεδίο βαθμίδας	364
10.5.2	Ασθενής ζεύξη	365
10.5.3	Βρόχος του Wilson	366
10.5.4	Ισχυρή ζεύξη	368
10.5.5	Μη αβελιανά πεδία βαθμίδας	369
10.5.6	Ασθενής ζεύξη	371

10.5.7	Ισχυρή ζεύξη	371
10.6	Η ενεργός χορδή και ο όρος Lüscher	372
11	Θεωρία ϕ^4	379
11.1	Ανώμαλες διαστάσεις	379
11.1.1	Τροχιές Επανακανονικοποίησης (RG flows)	385
11.1.2	Σημείο Wilson-Fisher και κρίσιμοι εκθέτες	389
11.1.3	Υπολογισμός των Κρίσιμων Εκθετών γ και η	391
11.1.4	Ανάμειξη Τελεστών και Περιττοί Τελεστές	394
11.2	Τελεστές υψηλής διάστασης και η αστάθεια Ostrogradsky	395
11.3	Επανακανονικοποιησιμότητα - ή μή	404
12	Ο Κβαντικός Μηχανισμός Higgs	411
12.1	Το Κβαντικό Ενεργό Δυναμικό	412
12.1.1	Η ϕ^4 θεωρία	414
12.1.2	Βαθμωτή Ηλεκτροδυναμική	416
12.1.3	Το άμαζο όριο και ο μηχανισμός Coleman-Weinberg	423
12.2	Βαθμωτή Ηλεκτροδυναμική στη Μοναδιαία Βαθμίδα	424
12.2.1	Γυρίνοι	428
12.2.2	Μάζα του Z	429
12.2.3	Μάζα του Higgs	431
12.2.4	Η τριπλή κορυφή του Higgs	433
12.2.5	Η τετραπλή κορυφή του Higgs	436
12.2.6	Επανακανονικοποίηση του Δυναμικού Higgs	440
12.2.7	Οι συναρτήσεις β	444
13	Σύμμορφη Θεωρία Πεδίου	447
13.1	Η σύμμορφη ομάδα	449
13.2	Συσχετιστές 2 και 3 βαθμωτών τελεστών	458
13.2.1	Ο συσχετιστής Σ_2	459
13.2.2	Το θεώρημα- c	463
13.2.3	Ο συσχετιστής Σ_3	468
13.3	Συσχετιστής N βαθμωτών τελεστών	469
13.4	Ο ταυιστής Ενέργειας-Ορμής	480
13.5	Κρίσιμοι Εκθέτες από την Σύμμορφη Θεωρία Πεδίου	490
14	Θερμοκρασία σε πραγματικό χρόνο	501

14.1 Το ολοκλήρωμα διαδρομής Schwinger-Keldysh	503
14.2 Θερμοκρασία	510
14.2.1 Ο θερμικός διαδότης	511
14.3 Η βάση των σύμφωνων καταστάσεων	517
15 Επίλογος	523
16 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	525
16.1 Α: Σπινωριακή (Spinor) Αναπαράσταση της ομάδας Lorentz	525
16.2 Β: Ταυτότητες πινάκων γ του Dirac	528
16.3 Γ: Υπολογισμός Ολοκληρωμάτων Ορμής	529
16.3.1 Παράμετροι Feynman	529
16.3.2 Περιστροφή Wick και υπολογισμός ολοκληρωμάτων ορμής	530
16.3.3 Διαστατική Εξομάλυνση - Βασικοί Μαθηματικοί τύποι	533
16.3.4 Παράγοντες Συμμετρίας διαγραμμάτων Feynman	536
16.3.5 Το λεξιλόγιο Passarino – Veltman	537
16.3.6 U -ολοκληρώματα σε Γυρίνους	543
16.3.7 U -ολοκληρώματα σε διορθώσεις μάζας	544
16.3.8 U -ολοκληρώματα σε Τρίγωνα	544
16.3.9 U -ολοκληρώματα σε Τετράγωνα	546
16.4 Δ: Διακριτές ομάδες	546
16.4.1 Διεδρικές ομάδες και η περιστροφική συμμετρία κανονικών πολυγώνων	549
16.4.2 Συμμετρία κανονικών στερεών	553
16.5 Ε: Συνεχείς ομάδες Lie	555
16.5.1 Η γεωμετρία των ομάδων Lie	562
16.5.2 Κατηγοριοποίηση των ημι-απλών αλγεβρών Lie	572
16.5.3 Αναπαραστάσεις	580
16.5.4 Ολοκληρώματα και χαρακτήρες	583
16.5.5 Κατασκευή αναπαραστάσεων	587