

1	Οι Απαρχές της Κβαντικής Φυσικής	1
1.1	Ιστορική αναδρομή – Από την κλασική στη σύγχρονη φυσική	1
1.1.1	1859–1900: Αποτυχία της Κλασικής Φυσικής στη Μικροσκοπική Κλίμακα	2
1.1.2	1900–1932: Έλευση της Κβαντομηχανικής – Νέα εποχή στη Φυσική	4
1.2	Σωματιδιακή φύση της ακτινοβολίας	12
1.2.1	Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	18
1.2.2	Φαινόμενο Compton	22
1.2.3	Δίδυμη γένεση	24
1.3	Η κυματική πλευρά των σωματιδίων	26
1.3.1	Η υπόθεση του de Broglie – Υλοκύματα	26
1.3.2	Πειραματική επιβεβαίωση της υπόθεσης του de Broglie	26
1.3.3	Κύματα ύλης για μακροσκοπικά αντικείμενα	28
1.4	Σωματίδια έναντι κυμάτων	29
1.4.1	Κλασική θεώρηση των σωματιδίων και των κυμάτων	30
1.4.2	Κβαντική θεώρηση των σωματιδίων και των κυμάτων	31
1.4.3	Δυϊσμός κύματος-σωματιδίου – Συμπληρωματικότητα	33
1.4.4	Η αρχή της γραμμικής υπέρθεσης	35
1.5	Η μη ντετερμινιστική φύση του μικροφυσικού κόσμου	36
1.5.1	Αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg	36
1.5.2	Πιθανοκρατική ερμηνεία	38
1.6	Το ατομικό μοντέλο του Bohr, ατομικές μεταπτώσεις και φασματοσκοπία	38
1.6.1	Το πλανητικό ατομικό μοντέλο του Rutherford	39
1.6.2	Το μοντέλο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου	39
1.7	Κανόνες κβάντωσης	46
1.8	Κυματοδέματα	48
1.8.1	Εντοπισμένα κυματοδέματα	48
1.8.2	Κυματοδέματα και σχέσεις αβεβαιότητας	51
1.8.3	Κίνηση των κυματοδεμάτων	52
1.9	Τελικές παρατηρήσεις	62
1.10	Λυμένα Προβλήματα	63
1.11	Ασκήσεις	79
2	Μαθηματικά Εργαλεία της Κβαντομηχανικής	87
2.1	Εισαγωγή	87
2.2	Ο χώρος Hilbert και οι κυματοσυναρτήσεις	87
2.2.1	Ο γραμμικός διανυσματικός χώρος	87

2.2.2	Ο χώρος Hilbert	88
2.2.3	Διάσταση και βάση ενός διανυσματικού χώρου	89
2.2.4	Τετραγωνικά ολοκληρώσιμες συναρτήσεις – Κυματοσυναρτήσεις	91
2.3	Συμβολισμός Dirac	92
2.4	Τελεστές	99
2.4.1	Γενικοί ορισμοί	99
2.4.2	Ερμιτιανός συζυγής	100
2.4.3	Προβολικοί τελεστές	102
2.4.4	Άλγεβρα μεταθετών	103
2.4.5	Σχέση αβεβαιότητας μεταξύ δύο τελεστών	104
2.4.6	Συναρτήσεις τελεστών	106
2.4.7	Αντίστροφος ενός τελεστή και μοναδιακοί τελεστές	107
2.4.8	Αντιγραμμικοί και αντιμοναδιακοί τελεστές – Θεώρημα Wigner	108
2.4.9	Ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα ενός τελεστή	111
2.4.10	Απειροστικοί και πεπερασμένοι μοναδιακοί μετασχηματισμοί	114
2.5	Αναπαράσταση σε διακριτές βάσεις	117
2.5.1	Αναπαράσταση των ket, bra και τελεστών με πίνακες	117
2.5.2	Αλλαγή βάσεων και μοναδιακοί μετασχηματισμοί	127
2.5.3	Αναπαράσταση πίνακα του προβλήματος ιδιοτιμών	130
2.6	Αναπαράσταση σε συνεχείς βάσεις	133
2.6.1	Γενική αντιμετώπιση	133
2.6.2	Αναπαράσταση θέσης	135
2.6.3	Αναπαράσταση ορμής	136
2.6.4	Σύνδεση των αναπαραστάσεων θέσης και ορμής	136
2.6.5	Τελεστής ισοτιμίας (parity)	140
2.7	Μηχανική πινάκων και κυμάτων	142
2.7.1	Μηχανική πινάκων	142
2.7.2	Κυματική μηχανική	143
2.8	Συμπερασματικές παρατηρήσεις	144
2.9	Λυμένα προβλήματα	145
2.10	Ασκήσεις	167
3	Τα Αξιώματα της Κβαντικής Μηχανικής	177
3.1	Εισαγωγή	177
3.2	Τα βασικά αξιώματα της Κβαντικής Μηχανικής	177
3.3	Η κατάσταση ενός συστήματος	180
3.3.1	Πυκνότητα πιθανότητας	180
3.3.2	Η αρχή της υπέρθεσης	181
3.4	Παρατηρήσιμα μεγέθη και τελεστές	182
3.5	Μέτρηση στην κβαντομηχανική	184
3.5.1	Πώς οι μετρήσεις διαταράσσουν τα συστήματα	184
3.5.2	Αναμενόμενες τιμές	185
3.5.3	Πλήρη σύνολα μετατιθέμενων τελεστών	187
3.5.4	Μέτρηση και οι σχέσεις αβεβαιότητας	189
3.6	Χρονική εξέλιξη της κατάστασης του συστήματος	190
3.6.1	Τελεστής χρονικής εξέλιξης	190
3.6.2	Στάσιμες καταστάσεις – Ανεξάρτητα από το χρόνο δυναμικά	191
3.6.3	Εξίσωση Schrödinger και κυματοπακέτα	192

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

3.6.4	Η διατήρηση της πιθανότητας	193
3.6.5	Χρονική εξέλιξη των αναμενόμενων τιμών	194
3.7	Συμμετρίες και νόμοι διατήρησης	196
3.7.1	Απειροστοί μοναδιακοί μετασχηματισμοί	196
3.7.2	Πεπερασμένοι μοναδιακοί μετασχηματισμοί	197
3.7.3	Συμμετρίες και νόμοι διατήρησης	198
3.8	Σύνδεση της Κβαντικής με την Κλασική Μηχανική	199
3.8.1	Αγκύλες Poisson και μεταθέτες	199
3.8.2	Το θεώρημα Ehrenfest	202
3.8.3	Κβαντική Μηχανική και Κλασική Μηχανική	203
3.9	Λυμένα προβλήματα	204
3.10	Ασκήσεις	221
4	Μονοδιάστατα Προβλήματα	227
4.1	Εισαγωγή	227
4.2	Ιδιότητες της μονοδιάστατης κίνησης	228
4.2.1	Διακριτό φάσμα (δέσμιες καταστάσεις)	228
4.2.2	Συνεχές φάσμα (αδέσμευτες καταστάσεις)	229
4.2.3	Μικτό φάσμα	229
4.2.4	Συμμετρικά δυναμικά και ισοτιμία	230
4.3	Το ελεύθερο σωματίδιο – Συνεχείς καταστάσεις	230
4.4	Το βήμα δυναμικού	232
4.5	Το φράγμα και το πηγάδι δυναμικού	236
4.5.1	Η περίπτωση $E > V_0$	236
4.5.2	Η περίπτωση $E < V_0$ – Φαινόμενο σήραγγος (τούνελ)	239
4.5.3	Το φαινόμενο σήραγγος	242
4.6	Το απειρόβαθο τετραγωνικό πηγάδι δυναμικού	243
4.6.1	Το ασύμμετρο τετραγωνικό πηγάδι	243
4.6.2	Το συμμετρικό πηγάδι δυναμικού	246
4.7	Το πεπερασμένο τετραγωνικό πηγάδι δυναμικού	247
4.7.1	Οι λύσεις σκέδασης ($E > V_0$)	247
4.7.2	Οι λύσεις δέσμιων καταστάσεων ($0 < E < V_0$)	247
4.8	Ο αρμονικός ταλαντωτής	251
4.8.1	Ενεργειακές ιδιοτιμές	253
4.8.2	Ενεργειακές ιδιοκαταστάσεις	255
4.8.3	Ενεργειακές ιδιοκαταστάσεις στο χώρο θέσεων	256
4.8.4	Η αναπαράσταση υπο μορφή πινάκων διαφόρων τελεστών	259
4.8.5	Αναμενόμενες τιμές διαφόρων τελεστών	260
4.9	Αριθμητική επίλυση της εξίσωσης Schrödinger	261
4.9.1	Αριθμητική διαδικασία	261
4.9.2	Αλγόριθμος	262
4.10	Λυμένα προβλήματα	264
4.11	Ασκήσεις	287
5	Στροφορμή	295
5.1	Εισαγωγή	295
5.2	Τροχιακή στροφορμή	295
5.3	Γενικός φορμαλισμός της στροφορμής	297

5.4	Αναπαράσταση της στροφορμής με πίνακες	302
5.5	Γεωμετρική αναπαράσταση της στροφορμής	305
5.6	Ιδιοστροφορμή (σπιν)	306
5.6.1	Πειραματική απόδειξη της ιδιοστροφορμής	306
5.6.2	Η γενική θεωρία του σπιν	310
5.6.3	Σπιν 1/2 και οι πίνακες του Pauli	311
5.6.4	Η εξίσωση Schrödinger με σπιν – Η Χαμιλτονιανή του Pauli	314
5.7	Ιδιοσυναρτήσεις της στροφορμής	316
5.7.1	Ιδιοσυναρτήσεις και ιδιοτιμές του \hat{L}_z	317
5.7.2	Ιδιοτιμές του \hat{L}^2	317
5.7.3	Ιδιότητες των σφαιρικών αρμονικών	321
5.8	Λυμένα Προβλήματα	324
5.9	Άλυτες Ασκήσεις	339
6	Προβλήματα Τριών Διαστάσεων	345
6.1	Εισαγωγή	345
6.2	Προβλήματα τριών διαστάσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες	345
6.2.1	Γενική αντιμετώπιση – Χωρισμός των μεταβλητών	345
6.2.2	Το ελεύθερο σωματίδιο	347
6.2.3	Το δυναμικό κουτιού	348
6.2.4	Ο αρμονικός ταλαντωτής	349
6.3	Τρισδιάστατα προβλήματα σε σφαιρικές συντεταγμένες	351
6.3.1	Κεντρικό δυναμικό – Γενική θεώρηση	351
6.3.2	Το ελεύθερο σωματίδιο σε σφαιρικές συντεταγμένες	355
6.3.3	Το σφαιρικό τετράγωνο πηγάδι δυναμικό	357
6.3.4	Ο ισότροπος αρμονικός ταλαντωτής	359
6.3.5	Το άτομο του υδρογόνου	362
6.3.6	Επίδραση των μαγνητικών πεδίων στα κεντρικά δυναμικά	374
6.4	Εξίσωση Pauli για ένα σωματίδιο με σπιν 1/2 σε ένα μαγνητικό πεδίο	378
6.4.1	Εξίσωση Pauli για ένα ελεύθερο σωματίδιο με σπιν 1/2	379
6.4.2	Εξίσωση Pauli για ένα σωματίδιο με σπιν 1/2 σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	380
6.5	Τελικές παρατηρήσεις	382
6.6	Λυμένα Προβλήματα	384
6.7	Άλυτες Ασκήσεις	401
7	Περιστροφές και Πρόσθεση Στροφορμής	407
7.1	Περιστροφές στην Κλασική Φυσική	407
7.1.1	Ενεργές περιστροφές	407
7.1.2	Παθητικές περιστροφές	408
7.1.3	Ιδιότητες των πινάκων περιστροφής	410
7.2	Περιστροφές στην Κβαντική Μηχανική	411
7.2.1	Απειροελάχιστες περιστροφές	412
7.2.2	Πεπερασμένες περιστροφές	413
7.2.3	Ιδιότητες του τελεστή περιστροφής	414
7.2.4	Περιστροφές Euler	415
7.2.5	Αναπαράσταση του τελεστή περιστροφής	416
7.2.6	Πίνακες περιστροφής και οι σφαιρικές αρμονικές	419
7.3	Πρόσθεση στροφορμών	421

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

7.3.1	Προσθήκη δύο στροφορμών – Γενικός φορμαλισμός	422
7.3.2	Υπολογισμός των συντελεστών Clebsch-Gordan	427
7.3.3	Σύζευξη τροχιακής στροφορμής και σπιν	433
7.3.4	Πρόσθεση περισσότερων από δύο στροφορμών	437
7.3.5	Πίνακες περιστροφής για σύζευξη δύο στροφορμών	438
7.3.6	Ισοσπίν (isospin)	440
7.4	Μετασχηματισμός βαθμωτών, διανυσματικών και τανυστικών τελεστών κάτω από περιστροφές	443
7.4.1	Μετασχηματισμός βαθμωτών τελεστών υπό περιστροφές	443
7.4.2	Μετασχηματισμός διανυσματικών τελεστών κάτω από περιστροφές	443
7.4.3	Μετασχηματισμός τανυστικών τελεστών κάτω από περιστροφές	445
7.4.4	Θεώρημα Wigner-Eckart για σφαιρικούς τανυστικούς τελεστές	447
7.5	Λυμένα Προβλήματα	450
7.6	Ασκήσεις	464
8	Ταυτοτικά Σωματίδια	469
8.1	Συστήματα πολλών σωματιδίων	469
8.1.1	Εξίσωση Schrödinger	469
8.1.2	Συμμετρία ανταλλαγής	471
8.1.3	Συστήματα διακριτών μη αλληλεπιδρώντων σωματιδίων	472
8.2	Συστήματα ταυτοτικών σωματιδίων	474
8.2.1	Ταυτοτικά σωματίδια στην Κλασική Μηχανική και στην Κβαντομηχανική	474
8.2.2	Εκφυλισμός ανταλλαγής	475
8.2.3	Αξίωμα συμμετρίας	476
8.2.4	Κατασκευή συμμετρικών και αντισυμμετρικών συναρτήσεων	477
8.2.5	Συστήματα ταυτοτικών μη αλληλεπιδρώντων σωματιδίων	477
8.3	Η απαγορευτική αρχή του Pauli	479
8.4	Η απαγορευτική αρχή του Pauli και ο περιοδικός πίνακας	481
8.5	Λυμένα Προβλήματα	486
8.6	Ασκήσεις	494
9	Προσεγγιστικές Μέθοδοι για Στάσιμες Καταστάσεις	497
9.1	Εισαγωγή	497
9.2	Χρονοανεξάρτητη θεωρία διαταραχών	498
9.2.1	Μη εκφυλισμένη θεωρία διαταραχών	498
9.2.2	Θεωρία διαταραχών εκφυλισμένων καταστάσεων	503
9.2.3	Λεπτή υφή και ανώμαλο φαινόμενο Zeeman	506
9.3	Η μέθοδος των μεταβολών	515
9.4	Η μέθοδος Wentzel-Kramers-Brillouin	521
9.4.1	Γενικός φορμαλισμός	522
9.4.2	Δέσιμες καταστάσεις για πηγάδια δυναμικού χωρίς άκαμπτα τοιχώματα	524
9.4.3	Δέσιμες καταστάσεις για πηγάδια δυναμικού με ένα άκαμπτο τοίχωμα	529
9.4.4	Δέσιμες καταστάσεις για πηγάδια δυναμικού με δύο άκαμπτα τοιχώματα	530
9.4.5	Φαινόμενο σήραγγας μέσω ενός φράγματος δυναμικού	532
9.5	Συμπερασματικά σχόλια	534
9.6	Λυμένα προβλήματα	535
9.7	Ασκήσεις	562

10 Χρονοεξαρτημένη Θεωρία Διαταραχών	569
10.1 Εισαγωγή	569
10.2 Οι εικόνες στην κβαντομηχανική	569
10.2.1 Η εικόνα Schrödinger	569
10.2.2 Η εικόνα Heisenberg	570
10.2.3 Η εικόνα αλληλεπίδρασης	571
10.3 Χρονοεξαρτημένη θεωρία διαταραχών	572
10.3.1 Πιθανότητα μετάβασης	574
10.3.2 Πιθανότητα μετάβασης για σταθερή διαταραχή	574
10.3.3 Πιθανότητα μετάβασης για αρμονική διαταραχή	576
10.4 Αδιαβατικές και απότομες προσεγγίσεις	578
10.4.1 Αδιαβατική προσέγγιση	579
10.4.2 Απότομη προσέγγιση	579
10.5 Αλληλεπίδραση ατόμων με ακτινοβολία	581
10.5.1 Κλασική περιγραφή της ακτινοβολίας	582
10.5.2 Κβάντωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	584
10.5.3 Δείκτες μετάβασης για απορρόφηση και εκπομπή ακτινοβολίας	586
10.5.4 Δείκτες μετάβασης στη διπολική προσέγγιση	587
10.5.5 Ηλεκτρικοί διπολικοί κανόνες επιλογής	588
10.5.6 Αυθόρμητη εκπομπή	589
10.6 Λυμένα Προβλήματα	591
10.7 Ασκήσεις	604
11 Θεωρία Σκέδασης	609
11.1 Σκέδαση και Ενεργός Διατομή	609
11.1.1 Συσχετισμοί γωνιών στα συστήματα LAB και CM	610
11.1.2 Σχετίζοντας τις ενεργές διατομές στα LAB και CM συστήματα	612
11.2 Πλάτος σκέδασης σωματιδίων χωρίς σπιν	613
11.2.1 Πλάτος σκέδασης και διαφορική ενεργός διατομή	614
11.2.2 Πλάτος σκέδασης	615
11.3 Η προσέγγιση Born	618
11.3.1 Η πρώτη προσέγγιση Born	618
11.3.2 Εγκυρότητα της πρώτης προσέγγισης Born	619
11.4 Ανάλυση μερικών κυμάτων (partial wave analysis)	620
11.4.1 Ανάλυση μερικών κυμάτων για ελαστική σκέδαση	620
11.4.2 Ανάλυση μερικών κυμάτων για μη-ελαστική σκέδαση	624
11.5 Σκέδαση ταυτόσημων σωματιδίων	625
11.6 Λυμένα Προβλήματα	627
11.7 Ασκήσεις	636
12 Σχετικιστική Κβαντική Μηχανική	639
12.1 Εισαγωγή	639
12.2 Τετραδιανύσματα και μετρική Minkowski	641
12.2.1 Ευκλείδεια μετρική	641
12.2.2 Χωροχρόνος Minkowski και μετασχηματισμός Lorentz	642
12.2.3 Τετραδιανύσματα	642
12.2.4 Η μετρική Minkowski	643
12.3 Η εξίσωση Klein-Gordon	646

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

12.3.1	Ιστορική αναδρομή της γέννησης της εξίσωσης Klein-Gordon	646
12.3.2	Εξίσωση Klein-Gordon και συναλλοιωτότητα για ένα ελεύθερο σωματίδιο	647
12.3.3	Μη-σχετικιστικό όριο της εξίσωσης Klein-Gordon	649
12.3.4	Εννοιολογικά προβλήματα της εξίσωσης Klein-Gordon	651
12.3.5	Παράδοξο Klein για σπιν-μηδέν σωματίδια	654
12.3.6	Η εξίσωση Klein-Gordon σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	659
12.3.7	Μη-σχετικιστικό όριο της εξίσωσης KG σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	660
12.4	Εξίσωση Dirac	662
12.4.1	Εξίσωση Dirac για το ελεύθερο σωματίδιο	663
12.4.2	Αναπαράσταση των πινάκων Dirac	664
12.4.3	Οι πίνακες Dirac και οι ιδιότητές τους	667
12.4.4	Αναπαραστάσεις Dirac, Weyl, και Majorana των γ πινάκων	672
12.4.5	Η εξίσωση Dirac σε συναλλοιώτη μορφή	674
12.4.6	Αναλλοιωτότητα κατά Lorentz της εξίσωσης Dirac	674
12.4.7	Εξίσωση συνέχειας και διατήρηση του ρεύματος	678
12.4.8	Λύσεις της εξίσωσης Dirac για το ελεύθερο σωματίδιο σε ηρεμία	680
12.4.9	Λύσεις της εξίσωσης Dirac για το ελεύθερο σωματίδιο σε κίνηση	684
12.4.10	Ερμηνεία αρνητικών ενεργειών – Θεωρία οπών του Dirac	686
12.4.11	Ερμηνεία αρνητικών ενεργειών – Μέθοδος των Feynman-Stückelberg	689
12.4.12	Ερμηνεία αρνητικών ενεργειών – Παράδοξο Klein για σωματίδια με σπιν-1/2	694
12.4.13	Λύσεις ημι-ακέραιου σπιν της εξίσωσης Dirac	698
12.4.14	Ελικότητα	702
12.4.15	Εξίσωση Dirac για σωματίδια χωρίς μάζα – Φερμιόνια Weyl	704
12.4.16	Σπινόρες Weyl και παραβίαση της ισοτιμίας	705
12.4.17	Φερμιόνια Weyl και νετρίνα	706
12.4.18	Χειρομορφία	708
12.4.19	Εξίσωση Dirac σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	712
12.4.20	Μη-σχετικιστικό όριο της εξίσωσης Dirac	713
12.4.21	Διακριτές συμμετρίες της εξίσωσης Dirac	717
12.4.22	Συζυγία φορτίου και αναλλοιωτότητα της εξίσωσης Dirac	717
12.4.23	Ισοτιμία και συναλλοιωτότητα της εξίσωσης Dirac	721
12.4.24	Χρονο-αναστροφή και συναλλοιωτότητα της εξίσωσης Dirac	726
12.4.25	Το θεώρημα CPT	730
12.5	Επιτυχίες και περιορισμοί της σχετικιστικής κβαντομηχανικής	732
12.6	Πέρα από τη σχετικιστική κβαντομηχανική	733
12.7	Λυμένα Προβλήματα	734
12.8	Ασκήσεις	795
13	Πέραν της Σχετικιστικής Κβαντομηχανικής	801
13.1	Εισαγωγή	801
13.2	Πλεονεκτήματα Λαγκρανζιανών σε θεωρίες πεδίων	802
13.3	Λαγκρανζιανές στην Κλασική Θεωρία Πεδίου	803
13.4	Λαγκρανζιανή εξαγωγή των εξισώσεων Maxwell	805
13.4.1	Εξισώσεις Maxwell σε διαφορική μορφή	806
13.4.2	Εξισώσεις Maxwell σε συναλλοιώτη μορφή	807
13.4.3	Λαγκρανζιανή εξαγωγή των εξισώσεων Maxwell	811
13.5	Λαγκρανζιανή εξαγωγή της εξίσωσης Klein-Gordon	812
13.6	Λαγκρανζιανός προσδιορισμός της εξίσωσης Dirac	816

13.7 Πέραν της Κλασικής Θεωρίας Πεδίου – Κβαντική Θεωρία Πεδίου	819
13.8 Η Λαγκρανζιανή της Κβαντικής Ηλεκτροδυναμικής	820
13.9 Συμπεράσματα	821
13.10 Λυμένα Προβλήματα	822
13.11 Ασκήσεις	831
14 Επιπρόσθετο Υλικό	833
14.1 Η συνάρτηση δέλτα	833
14.1.1 Η συνάρτηση δέλτα μιας διάστασης	833
14.1.2 Η συνάρτηση δέλτα στις τρεις διαστάσεις	836
14.2 Η στροφορμή σε σφαιρικές συντεταγμένες	836
14.2.1 Παραγωγή μερικών γενικών σχέσεων	836
14.2.2 Κλίση (gradient) και Λαπλασιανή (Laplacian) σε σφαιρικές συντεταγμένες	837
14.2.3 Στροφορμή σε σφαιρικές συντεταγμένες	838
14.3 Κώδικας C++ για την επίλυση της εξίσωσης Schrödinger	838
14.4 Συμβολισμός δεικτών για τετραδιανύσματα	842
14.4.1 Συμβολισμός δεικτών για διανύσματα σε 3 και 4 διαστάσεις	842
14.4.2 Η μετρική Minkowski	847
14.5 Ο σχετικιστικός συμβολισμός και τετραδιανύσματα	849
14.5.1 Εισαγωγή	849
14.5.2 Μετασχηματισμός Lorentz	849
14.5.3 Χωροχρόνος Minkowski	851
14.5.4 Ο φορμαλισμός των τετραδιανυσμάτων	852
14.5.5 Ανταλλοίωτος και συναλλοίωτος φορμαλισμός	855
14.5.6 Μετασχηματισμός Lorentz στον ανταλλοίωτο-συναλλοίωτο φορμαλισμό	860
14.5.7 Αναλλοιότητα υπό μετασχηματισμούς Lorentz	863
14.6 Λαγκρανζιανός και Χαμιλτονιανός φορμαλισμός της Κλασικής Μηχανικής	864
14.6.1 Λαγκρανζιανός φορμαλισμός της Κλασικής Μηχανικής	864
14.6.2 Χαμιλτονιανός φορμαλισμός της Κλασικής Μηχανικής	868
14.6.3 Κανονική κβάντωση: από την Κλασική στην Κβαντική Μηχανική	872
ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ	875
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	878