

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Πρόλογος – Ευχαριστίες</i>	15
-------------------------------------	----

ΜΕΡΟΣ Α'

ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΑ: Η ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΕΓΧΑΓΗΣ

1 Η κβαντομηχανική της Κοπεγχάγης I: Εξίσωση Schrödinger – Στατιστική ερμηνεία – Μετρητικό αξίωμα	21
1.1 Εισαγωγή	21
1.2 Η εξίσωση Schrödinger και η στατιστική της ερμηνεία	22
1.2.1 Η αρχή του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού: Υλικά κύματα	22
1.2.2 Η εξίσωση Schrödinger: Μια κυματική εξίσωση για τα υλικά κύματα	23
1.2.3 Τα κύματα Schrödinger ως κύματα πιθανότητας: Ο τύπος του Born	23
1.2.4 Επέκταση της στατιστικής ερμηνείας I: Ο γενικός τύπος της μέσης τιμής	24
1.2.5 Η έννοια του εσωτερικού γινομένου και του ερμιτιανού τελεστή: Γιατί οι μέσες τιμές είναι πάντα πραγματικές	25
1.2.6 Επέκταση της στατιστικής ερμηνείας II: Κυματοσυναρτήσεις μηδενικής αβεβαιότητας. Ο θεμελιώδης ρόλος της εξίσωσης ιδιοτιμών $\hat{A}\psi = a\psi$	27
1.2.7 Ο διανυσματικός χώρος των κυματοσυναρτήσεων και ο ρόλος των ιδιοσυναρτήσεων μέσα σε αυτόν	29
1.2.8 Ολοκλήρωση της στατιστικής ερμηνείας: Οι δυνατές τιμές ενός μεγέθους και οι πιθανότητες εμφάνισής τους. Ο γενικός τύπος του Born	31
1.2.9 Η ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης ως συνέπεια του γενικού τύπου του Born	33
1.2.10 Η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης σε μια μέτρηση: Το μετρητικό αξίωμα	34

1.3	Τα δύο «κουτιά» της Κοπεγχάγης	35
1.3.1	Γεμίζοντας τα κουτιά!	35
1.3.2	Η ανάγκη για ερμηνεία	37
1.3.3	Η προέλευση των κβαντικών πιθανοτήτων	38
1.3.4	Η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης σε μια μέτρηση	40
1.3.5	Οι μετρητικές συσκευές είναι καθαρά κλασικά αντικείμενα: Μια αναγκαία συνθήκη για να έχει νόημα η μετρητική διαδικασία	42
1.4	Χρονική εξέλιξη: Στάσιμες καταστάσεις και επαλληλίες	43
1.4.1	Η γενική λύση της εξίσωσης Schrödinger και το πρόβλημα των αρχικών συνθηκών	43
1.4.2	Στάσιμες καταστάσεις και οι επαλληλίες τους	46
1.4.3	Κβαντικά και κλασικά στάσιμα κύματα: Μια θεμελιώδης διαφορά αλλά και πολλές ομοιότητες	47
1.4.4	Η χρονανεξάρτητη εξίσωση Schrödinger: Εκεί που όλα καταλήγουν	48
1.4.5	Ελεύθερη κίνηση και η ανάγκη για επέκταση του φορμαλισμού στο συνεχές φάσμα: Το παράδειγμα του γκαουσιανού κυματοπακέτου	50
1.4.6	Δύο... εύκολες ασκήσεις! Απειρόβαθο πηγάδι και αρμονικός ταλαντωτής	57
1.5	Διατήρηση της πιθανότητας	59
1.5.1	Διατήρηση της ολικής πιθανότητας: Η έννοια της μοναδιαίας εξέλιξης	59
1.5.2	Τοπική διατήρηση της πιθανότητας: Το ρεύμα πιθανότητας	61
1.6	Το πείραμα των δύο σχισμών: Ένα πείραμα που τα λέει όλα	65
1.7	Κυματοσυναρτήσεις πολλών σωματιδίων: Διαχωρίσιμες και μη διαχωρίσιμες καταστάσεις – Η έννοια της κβαντικής σύμπλεξης	70
	<i>Προβλήματα</i>	72
2	Η κβαντομηχανική της Κοπεγχάγης II: Αρχή αβεβαιότητας – Σπιν – Κβαντική σύμπλεξη	75
2.1	Εισαγωγή	75
2.2	Ο θεμελιώδης ρόλος της μη μεταθετικότητας στην κβαντομηχανική: Η αρχή της αβεβαιότητας	76
2.2.1	Η μη μεταθετικότητα και οι συνέπειές της: Συμβιβαστά και ασυμβίβαστα φυσικά μεγέθη	76

2.2.2	Η αρχή αβεβαιότητας θέσης-ορμής και η γενικευμένη σχέση αβεβαιότητας	78
2.2.3	Στροφορμή: Ένα μέγεθος ασυμβίβαστο με τον... εαυτό του	81
2.3	Νόμοι διατήρησης και κλασικό όριο	85
2.4	Το σπιν: Μια καθαρά κβαντική στροφορμή	89
2.4.1	Κβαντομηχανική περιγραφή του σπιν I: Ο χώρος των καταστάσεων	89
2.4.2	Κβαντομηχανική περιγραφή του σπιν II: Οι μήτρες του σπιν	91
2.4.3	Κβαντομηχανική περιγραφή του σπιν III: Ιδιοκαταστάσεις ως προς τους άξονες x και y	95
2.4.4	Μετρώντας το σπιν: Η συσκευή Stern-Gerlach	97
2.5	Κβαντική σύμπλεξη: Μια νέα θεμελιώδης έννοια της φυσικής	100
2.5.1	Σύμπλεκτες καταστάσεις I: Τι είναι και πώς προκύπτουν	100
2.5.2	Σύμπλεκτες καταστάσεις II: Το παράδοξο EPR	106
2.5.3	Σύμπλεκτες καταστάσεις III: Συσχετίσεις τύπου Bell και η ανισότητα του Bell – Ένας κρίσιμος έλεγχος για την Κοπεγχάγη ..	108
2.5.4	Πίσω από τη συσχέτιση του Bell και την πειραματική της επιβεβαίωση – Θεμελιώδης πιθανοκρατία και η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης	117
	<i>Προβλήματα</i>	121

ΜΕΡΟΣ Β'

ΚΥΜΑΤΑ-ΟΛΗΓΟΙ: Η ΕΡΜΗΝΕΙΑ DE BROGLIE-BOHM

3	Η θεωρία de Broglie-Bohm I: Τα βασικά	129
3.1	Εισαγωγή	129
3.2	Η μαθηματική διατύπωση: Η εξίσωση de Broglie-Bohm	130
3.3	Η φυσική ερμηνεία της θεωρίας de Broglie-Bohm: Η απροσδιοριστία στη θέση οφείλεται σε άγνοια των αρχικών θέσεων του σωματιδίου ...	132
3.4	Απλές ασκήσεις: Υπολογισμός των τροχιών Bohm στα πιο απλά κβαντικά συστήματα	134
3.4.1	Άσκηση 1: Τροχιές Bohm για την ελεύθερη κίνηση στη μία διάσταση	134
3.4.2	Άσκηση 2: Στάσιμες καταστάσεις – Στάσιμες τροχιές!	138
3.4.3	Άσκηση 3: Γενίκευση στις τρεις διαστάσεις και το άτομο του υδρογόνου	139

3.4.4	Άσκηση 4: Πώς οι τροχιές Bohm $x(t)$ μετατοπίζουν στον χρόνο την αρχική κατανομή θέσεων του σωματιδίου	141
3.4.5	Άσκηση 5: Τροχιές Bohm για μια κατάσταση επαλληλίας του αρμονικού ταλαντωτή	142
3.5	Το «κβαντικό δυναμικό»: Μια πολυσυζητημένη και απολύτως περιττή έννοια	148
3.6	Ρεύμα πιθανότητας και τροχιές Bohm: Μια χρήσιμη συμπληρωματική εικόνα της μπομιανής κίνησης στον χώρο	152
	<i>Προβλήματα – Εργασίες</i>	154
4	Η θεωρία de Broglie-Bohm II: Πέρα από τα βασικά	163
4.1	Εισαγωγή	163
4.2	Η κατανομή των ορμών: Τι προβλέπει γι' αυτήν η μπομιανή μηχανική; .	164
4.3	Πόσο συνεπής με τον εαυτό της είναι η μπομιανή μηχανική; Ένας διάλογος	167
4.4	Ισχύουν οι θεμελιώδεις αρχές διατήρησης στην μπομιανή μηχανική; Ένας πιο «σκληρός» διάλογος	172
4.5	Το πρόβλημα της μέτρησης στην μπομιανή μηχανική	180
4.6	Κριτική επισκόπηση της θεωρίας	188
4.6.1	Ποια είναι η θεωρία: Συμπληρώνοντας μόνοι μας το δεύτερο κουτί	188
4.6.2	Ο απολογισμός: Οι βασικές αδυναμίες της θεωρίας	194
4.7	Η μπομιανή μηχανική των μέσων όρων: Μία δεύτερη ευκαιρία στη θεωρία de Broglie-Bohm	203
4.7.1	Ο λογισμός των μέσων όρων και οι απροσδόκητες συνέπειές του .	203
4.7.2	Ούτε οι μέσοι όροι σώζουν τη θεωρία: Η παραβίαση των αρχών διατήρησης είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της	212
4.7.3	Τελικός απολογισμός: Οι τρεις δυνατές ερμηνείες της θεωρίας dBB στο φόντο της παραβίασης των νόμων διατήρησης	215
	<i>Προβλήματα – Εργασίες</i>	219

ΜΕΡΟΣ Γ'

ΠΟΛΛΟΙ ΚΟΣΜΟΙ: Η ΕΡΜΗΝΕΙΑ EVERETT

5 Η ερμηνεία των πολλών κόσμων I: Τα βασικά	225
5.1 Εισαγωγή	225
5.2 Το μετρητικό αξίωμα στο απόσπασμα I: Είναι συμβιβαστή η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης με την εξίσωση Schrödinger; ...	226
5.3 Το μετρητικό αξίωμα στο απόσπασμα II: Μπορούν οι μετρητικές συσκευές να εξαιρεθούν από την εφαρμογή της εξίσωσης Schrödinger;	229
5.4 Η αυθερμήνευτη εξίσωση Schrödinger: Ένας διάλογος για τις προϋποθέσεις	232
5.5 Όλη η εξουσία στην εξίσωση Schrödinger I: Εφαρμογή στη μετρητική διαδικασία – Κβαντική σύμπλεξη και κβαντικές γάτες	238
5.6 Όλη η εξουσία στην εξίσωση Schrödinger II: Η πολυκοσμική ερμηνεία σε διαλογική μορφή	243
5.7 Αποσυμφώνηση και ο κρίσιμος ρόλος της στις εναλλακτικές θεωρίες για το πρόβλημα της μέτρησης: Μια σύντομη εισαγωγή	253
<i>Προβλήματα – Εργασίες</i>	255
6 Η ερμηνεία των πολλών κόσμων II: Πέρα από τα βασικά	259
6.1 Εισαγωγή	259
6.2 Αποσυμφώνηση (Decoherence): Ο κρίκος που λείπει	260
6.2.1 Αποσυμφώνηση σε μια μονοσωματιδιακή επαλληλία καταστάσεων	260
6.2.2 Σύμπλεξη και αποσυμφώνηση: Ένα νέο κβαντικό φαινόμενο	264
6.2.3 Αποσυμφώνηση και πολλοί κόσμοι	265
6.2.4 Είναι όμως πράγματι έτσι; Τυχαιότητα και αιτιοκρατία – Ένας διάλογος φοιτητή-δασκάλου	270
6.3 Ποσοτικές προβλέψεις: Μετρώντας κόσμους για να βρούμε τον κανόνα του Born	275
6.3.1 Εισαγωγικό ερώτημα: Είναι συμβιβαστός ο προβλεπτικός αλγόριθμος της Κοπεγχάγης με τις εναλλακτικές ερμηνείες;	275
6.3.2 Μετρώντας κόσμους για να βρούμε πιθανότητες!	277
6.4 Κριτική επισκόπηση	282
<i>Προβλήματα – Εργασίες</i>	287

ΜΕΡΟΣ Δ'
ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ

7 Κβαντομηχανική και φιλοσοφία I: Η γνωσιολογία της Κοπεγχάγης ...	293
7.1 Εισαγωγή	293
7.2 Θεμελιώδης τυχαιότητα: Ένα φιλοσοφικό σκάνδαλο που τελικά... δεν είναι!	294
7.3 Η γνωσιολογία της Κοπεγχάγης I: Παραδεκτά και μη παραδεκτά ερωτήματα για τη φύση της πραγματικότητας	301
7.4 Η γνωσιολογία της Κοπεγχάγης II: Είναι αναγκαία η ύπαρξη συνειδητών παρατηρητών;	309
7.5 Η γνωσιολογία της Κοπεγχάγης III: Πώς είναι δυνατόν ένας τόσο προβλέψιμος κόσμος να διέπεται από μια θεωρία θεμελιωδώς πιθανοκρατική;	315
<i>Προβλήματα – Εργασίες</i>	325
8 Κβαντομηχανική και φιλοσοφία II: Η μεγάλη εικόνα	329
8.1 Εισαγωγή	329
8.2 Υλισμός έναντι Ιδεαλισμού: Η κβαντομηχανική στο σταυροδρόμι των μεγάλων φιλοσοφικών συστημάτων	330
8.3 Κβαντομηχανική και λογικός εμπειρισμός I: Μια γόνιμη συνάντηση του «μέσα» με το «έξω»	337
8.4 Κβαντομηχανική και λογικός εμπειρισμός II: Μια εξίσου διδακτική συνέχεια	342
8.5 Φυσική και φιλοσοφία στον 20ό αιώνα: Η μεγάλη σύγκρουση για το κοσμολογικό μοντέλο	353
8.6 Κβαντομηχανική και ψευδοεπιστήμη: Η ετερογονία των σκοπών	360
8.7 Επιστήμη σε ανήσυχους καιρούς: Κβαντομηχανική και η Δημοκρατία της Βαϊμάρης	368
<i>Προβλήματα – Εργασίες</i>	374
<i>Επίλογος: Δύο ασκήσεις κι ένα... στοίχημα</i>	381
<i>Βιβλιογραφία</i>	385
<i>Ευρετήριο όρων</i>	391
<i>Ευρετήριο ονομάτων</i>	395