

# Εισαγωγικές σημειώσεις Κβαντικής Μηχανικής

Φοίβος Μαυρόπουλος

Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ

Αθήνα 2023

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Οι φυσικές καταστάσεις στην κβαντική μηχανική</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Η μέτρηση στην κβαντική μηχανική</b>	<b>9</b>
3.1	Ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές . . . . .	11
3.2	Προετοιμασία κατάστασης και φιλτράρισμα . . . . .	12
3.3	Συμβατά και ασύμβατα μεγέθη . . . . .	13
3.4	Το αξίωμα προβολής . . . . .	15
3.5	Αρχή της απροσδιοριστίας . . . . .	19
3.6	Είναι τα γινόμενα και οι μεταθέτες ερμιτιανών τελεστών ερμιτιανοί τελεστές; . . . . .	21
3.7	Παράρτημα: Μεγέθη με συνεχές φάσμα τιμών . . . . .	21
3.8	Προβλήματα . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Η γεωμετρική δομή των καταστάσεων: χώρος Hilbert</b>	<b>27</b>
4.1	Γενικά . . . . .	27
4.2	Πληρότητα ιδιοδιανυσμάτων και πιθανότητα μετάβασης . . . . .	31
4.3	Αναπαράσταση γραμμικών τελεστών από πίνακες . . . . .	32
4.4	Κοινά ιδιοδιανύσματα μετατιθέμενων τελεστών . . . . .	33
4.5	Ερμιτιανοί συζυγείς τελεστές . . . . .	34
4.6	Μοναδιαίοι τελεστές . . . . .	36
4.7	Μετασχηματισμός ορθοκανονικής βάσης . . . . .	37
4.8	Σχέση ερμιτιανών και μοναδιαίων τελεστών . . . . .	38
4.9	Προβλήματα . . . . .	39

<b>5</b>	<b>Χρονική εξέλιξη των καταστάσεων: η εξίσωση Schrödinger</b>	<b>42</b>
5.1	Χρονική εξάρτηση μέσων τιμών. Διατηρούμενα μεγέθη . . . . .	45
5.2	Ρεύμα πιθανότητας και εξίσωση συνέχειας . . . . .	46
5.3	Ανάπτυγμα σε ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής . . . . .	48
5.4	Ελεύθερο σωματίδιο και συνεχές ενεργειακό φάσμα . . . . .	50
5.5	Προβολικοί τελεστές στο συνεχές φάσμα. Γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις. Αναπαράσταση ορμής . . . . .	53
5.6	Προβλήματα . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Συνύπαρξη διακριτού και συνεχούς φάσματος: πηγάδι δυναμικού</b>	<b>62</b>
6.1	Περιγραφή του προβλήματος . . . . .	62
6.2	Συμμετρία ομοτιμίας (αντιστροφής χώρου) . . . . .	63
6.3	Δέσμιες καταστάσεις . . . . .	65
6.4	Θεωρήματα για δέσμιες καταστάσεις σε μονοδιάστατα προβλήματα . . . . .	68
6.5	Καταστάσεις σκέδασης . . . . .	70
6.6	Προβλήματα . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Φραγμός δυναμικού και φαινόμενο σήραγγας</b>	<b>78</b>
7.1	Βήμα δυναμικού. Πολλαπλή σκέδαση . . . . .	80
7.2	Προσέγγιση στο φαινόμενο σήραγγας για υψηλό ή πλατύ φραγμό . . . . .	82
7.3	Προβλήματα . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Δυναμικά συνάρτησης <math>\delta</math></b>	<b>85</b>
8.1	Η συνάρτηση $\delta$ . . . . .	85
8.2	Δυναμικό συνάρτησης $\delta$ . . . . .	86
8.3	Δέσμιες καταστάσεις σε δύο δυναμικά $\delta$ . . . . .	87
8.4	Προβλήματα . . . . .	90
<b>9</b>	<b>Ο αρμονικός ταλαντωτής</b>	<b>92</b>
9.1	Εισαγωγικά . . . . .	92
9.2	Αναλυτική μέθοδος επίλυσης . . . . .	92
9.3	Αλγεβρική μέθοδος επίλυσης . . . . .	95
9.4	Προβλήματα . . . . .	99
<b>10</b>	<b>Κίνηση σε τρεις διαστάσεις και στροφορμή</b>	<b>100</b>
10.1	Εισαγωγικά . . . . .	100
10.2	Η στροφορμή . . . . .	102
10.3	Συζήτηση περί των σχέσεων μετάθεσης των τελεστών στροφορμής . . . . .	105
10.4	Ιδιοδιανύσματα και ιδιοτιμές της στροφορμής . . . . .	106

10.5 Φυσική ερμηνεία του φάσματος . . . . .	111
<b>11 Κίνηση σε κεντρικό δυναμικό—το άτομο του Υδρογόνου</b>	<b>114</b>
11.1 Διατήρηση της στροφορμής . . . . .	114
11.2 Κινητική ενέργεια και στροφορμή . . . . .	115
11.3 Χωρισμός μεταβλητών και ακτινική εξίσωση . . . . .	116
11.4 Η λύση για το ελεύθερο σωματίδιο . . . . .	119
11.5 Λύσεις δέσμιων καταστάσεων για το άτομο του Υδρογόνου . . . . .	120
11.6 Το άτομο του Υδρογόνου ως σύστημα δύο χβαντικών σωματιδίων . . .	125
<b>Ευρετήριο</b>	<b>131</b>

# 1 Εισαγωγή

Η κβαντική μηχανική περιγράφει τη δυναμική στο μικρόκοσμο (ηλεκτρόνια, ατομικοί πυρήνες, άτομα, μόρια), ενώ στο μακρόκοσμο συνήθως δεν παρατηρούμε απευθείας κβαντική συμπεριφορά, παρά μόνο τις συνέπειές της σε διάφορα φαινόμενα. Η κβαντική μηχανική αναπτύχθηκε τις δεκαετίες 1920 και 1930 λόγω της αποτυχίας της κλασικής Φυσικής να εξηγήσει μια σειρά πειραματικών δεδομένων. Στις αρχές, προτάθηκαν *ad hoc* κβαντικές υποθέσεις από τους Planck, Einstein, Bohr, κ.α., οι οποίες οδήγησαν τελικά σε μια φυσική θεωρία. Παρακάτω παρατίθενται μερικά παραδείγματα φαινομένων όπου αποτυγχάνει κάθε απόπειρα εξήγησης με βάση την κλασική Φυσική. (Τέλη 19<sup>ου</sup>–αρχές 20<sup>ου</sup> αιώνα).<sup>(1)</sup>

- Ακτινοβολία μέλανος σώματος. *Μέλαν σώμα* χαρακτηρίζεται ένα σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Η απορροφούμενη ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα, και το σώμα επανεκπέμπει λόγω της θερμοκρασίας του (τυπικά παραδείγματα είναι ο Ήλιος και μια μικρή οπή σε κοιλότητα με μονωμένα τοιχώματα). Το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας δεν εξηγείται από την κλασική φυσική. Ερμηνεύθηκε από τον Max Planck (1900) βάσει κβαντικής υπόθεσης.
- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (1887). Σε αυτό, ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μεταλλικές επιφάνειες λόγω απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ένα πρόβλημα είναι ότι η εκπομπή σταματά όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας πέσει κάτω από μια κρίσιμη τιμή, φαινόμενο που δεν εξηγείται κλασικά. Ερμηνεύθηκε από τον Albert Einstein (1905) βάσει κβαντικής υπόθεσης. Επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τον Robert Millikan (1915).
- Φαινόμενο Compton (σκέδαση ηλεκτρονίων–φωτονίων). Ο κλασικός τύπος για τη γωνία σκέδασης δεν συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα. Η εξήγηση δόθηκε με βάση την κβαντική θεωρία.
- Σταθερότητα των ατόμων. Στο κλασικό *πλανητικό μοντέλο*, τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται σε τροχιές γύρω από τα άτομα, άρα βρίσκονται σε διαρκή επιτάχυνση. Λόγω του φορτίου τους και της επιτάχυνσης, θα έπρεπε να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, να χάνουν διαρκώς ενέργεια, και να πέφτουν στον πυρήνα σε περίπου 1 ns. Ερμηνεύθηκε από τους Niels Bohr και Ernest Rutherford (1913) βάσει κβαντικής υπόθεσης.
- Μαγνητισμός της ύλης σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Το θεώρημα van Leeuwen (1919) δείχνει ότι ένα κλασικό σύστημα κινούμενων φορτίων σε

---

<sup>(1)</sup>Βλ. π.χ. S. Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015), κεφ. 1.

κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας δεν μπορεί να έχει μαγνήτιση. Είναι προφανής η αντίφαση με την ύπαρξη μόνιμων μαγνητών. Η εξήγηση δίνεται με βάση την κβαντική θεωρία της ύλης.

Η κβαντική μηχανική προβλέπει κατανομές πιθανότητας στα αποτελέσματα μετρήσεων, σε αντίθεση με την κλασική μηχανική, που προβλέπει το ακριβές αποτέλεσμα κάθε μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, στην κλασική Φυσική υποθέτουμε το εξής. Έστω ότι μπορούμε να προετοιμάσουμε ένα σύστημα με αυθαίρετα μεγάλη ακρίβεια και να κάνουμε μέτρηση ενός μεγέθους  $A$  (θέση, ορμή, ενέργεια, στροφορμή, κλπ.) με αυθαίρετα υψηλή διακριτική ικανότητα, χάρη σε κατάλληλες πειραματικές τεχνικές. Αν προετοιμάσουμε το σύστημα στις ίδιες ακριβώς αρχικές συνθήκες πολλές φορές και κάνουμε κάθε φορά μια μέτρηση του  $A$ , τότε θα βρούμε κάθε φορά το ίδιο αποτέλεσμα  $a$ , το οποίο θα εξαρτάται μόνο από τις αρχικές συνθήκες.

Στην κβαντική Φυσική έχουμε το εξής φαινόμενο. Έστω και πάλι ότι έχουμε τη δυνατότητα αυθαίρετα μεγάλης ακρίβειας στην προετοιμασία του συστήματος και διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση. Προετοιμάζουμε το σύστημα πολλές φορές, έστω  $N$  τον αριθμό, στις ίδιες ακριβώς αρχικές συνθήκες. Μετράμε κάθε φορά ένα μέγεθος  $A$  με δυνατές τιμές  $a \in \mathbb{R}$  και βρίσκουμε αποτελέσματα  $a_1, a_2, \dots, a_N$ , ένα για κάθε μέτρηση. Κάποια από αυτά ίσως ταυτίζονται, κάποια διαφέρουν μεταξύ τους. Έχουμε μια κατανομή αποτελεσμάτων, η οποία στο όριο μεγάλου  $N$  θα δίνει μια κατανομή πιθανότητας  $P(a)$  (ή πυκνότητα πιθανότητας  $\rho(a)$ , αν έχουμε συνεχές φάσμα τιμών στο μέγεθος). Η κατανομή πιθανότητας είναι δυνατόν να είναι πολύ ευρεία, δηλαδή να έχει μεγάλη διασπορά ( $\Delta A$ ) γύρω από τη μέση τιμή  $\langle A \rangle$ , ή να είναι οξεία, δηλαδή να έχει μικρή διασπορά, ή ακόμα και να έχει μηδενική διασπορά, δηλαδή  $a_1 = a_2 = \dots = a_N$  και  $(\Delta A) = 0$ .

Η κατανομή πιθανότητας  $P(a)$  εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες προετοιμασίας και από το μέγεθος  $A$ . Δηλαδή, για δεδομένες αρχικές συνθήκες, υπάρχουν μετρήσιμα μεγέθη που δίνουν μεγάλη διασπορά, άλλα που δίνουν μικρή διασπορά, και άλλα που δίνουν ουσιαστικά μηδενική διασπορά. Αντίστροφα, και για δεδομένο μέγεθος  $A$ , υπάρχουν αρχικές συνθήκες που θα δώσουν μεγάλη, ή μικρή, ή ουσιαστικά μηδενική διασπορά στις μετρήσεις του μεγέθους.

Πρέπει να τονίσουμε ότι η ύπαρξη διασποράς στην κβαντική Φυσική δεν οφείλεται σε κάποια ατέλεια του πειράματος ή κατανομή στις αρχικές συνθήκες λόγω πεπερασμένης ακρίβειας, όπως στην κλασική στατιστική Φυσική, αλλά είναι εγγενής ιδιότητα της Φύσης για κατάλληλους συνδυασμούς αρχικών συνθηκών με μετρήσιμα μεγέθη. Αυτή η παραδοξότητα βρίσκεται στην καρδιά της κβαντικής Φυσικής. Ο συνδυασμός αρχικών συνθηκών με μετρήσιμο μέγεθος που δίνει διασπορά στα αποτελέσματα μπορεί να είναι πολύ απλός, π.χ., συμβαίνει εάν τεθεί ως αρχική συνθήκη η στροφορμή ενός ατόμου με

δεδομένη τιμή προβολής στην κατεύθυνση  $z$  και στη συνέχεια μετρηθεί η προβολή της στροφορμής στην κατεύθυνση  $x$ .

Η κβαντική μηχανική δύναται να προβλέψει την κατανομή πιθανότητας  $P(a)$  αν δοθούν οι αρχικές συνθήκες, αλλά δεν δύναται να προβλέψει τι αποτέλεσμα θα φέρει κάθε ξεχωριστή μέτρηση (εκτός από τις ειδικές περιπτώσεις που δεν έχουμε διασπορά, οπότε όλες οι μετρήσεις δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα). Απ' όσο μπορούμε να γνωρίζουμε, δεν υπάρχει μέθοδος πρόβλεψης για τις μεμονωμένες μετρήσεις: η κβαντική μηχανική αποτελεί ό,τι καλύτερο μπορούμε να καταφέρουμε σε επίπεδο πρόβλεψης, δηλαδή να υπολογίσουμε κατανομές πιθανότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ας εστιάσουμε για απλότητα στην περίπτωση ενός σωματιδίου σε κάποιο εξωτερικό πεδίο. Στην κλασική μηχανική, οι αρχικές συνθήκες, στις οποίες προετοιμάζεται πειραματικά ένα σύστημα, κωδικοποιούνται από τη θέση  $x$  και την ορμή  $p$  ενός σωματιδίου. Το σύνολο των ζευγών  $(x, p)$  αποτελούν τον χώρο των φάσεων. Λέμε ότι ένα ζεύγος  $(x, p)$ , δηλαδή ένα σημείο του χώρου των φάσεων, εκπροσωπεί μια κατάσταση του συστήματος. Η γνώση αυτής της κατάστασης επιτρέπει (α) την πρόβλεψη της κατάστασης σε οποιοδήποτε μελλοντικό χρόνο,  $(x(t), p(t))$ , μέσω ενός νόμου χρονικής εξέλιξης που εκφράζεται από τις εξισώσεις Hamilton, και (β) την πρόβλεψη του αποτελέσματος κάθε μέτρησης, που δίνεται ως κάποια συνάρτηση  $f(x, p)$ .

Στην κβαντική μηχανική, οι αρχικές συνθήκες έχουν αναγκαστικά πιο περίπλοκη έκφραση, διότι πρέπει να περιλαμβάνουν όλες τις δυνατές κατανομές πιθανότητας όλων των πειραμάτων. Μαθηματικά, οι αρχικές συνθήκες κωδικοποιούνται από ένα διάνυσμα  $\Psi$  μοναδιαίου μήκους το οποίο είναι στοιχείο ενός απειροδιάστατου μιγαδικού γραμμικού χώρου Hilbert. Το  $\Psi$  αναπαριστάται ως συνάρτηση  $\Psi(x)$  από το φυσικό χώρο της θέσης  $x$  στους μιγαδικούς αριθμούς και συνήθως ονομάζεται *κυματοσυνάρτηση*. Το σύνολο των συναρτήσεων  $\Psi$  περιέχει το σύνολο των αρχικών συνθηκών στις οποίες μπορεί να προετοιμαστεί πειραματικά το σύστημα και επομένως το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος.

Η γνώση μιας κατάστασης  $\Psi$  επιτρέπει (α) την πρόβλεψη της κατάστασης σε οποιοδήποτε μελλοντικό χρόνο,  $\Psi(t)$ , μέσω ενός νόμου χρονικής εξέλιξης που εκφράζεται από την εξίσωση του Schrödinger, *αν δεν μεσολαβήσει μέτρηση*. Επίσης, η γνώση μιας κατάστασης  $\Psi$  επιτρέπει (β) την πρόβλεψη του στατιστικού αποτελέσματος μετρήσεων ενός μεγέθους, δηλαδή την κατανομή πιθανότητας  $P(a)$  εάν μετρηθεί πολλές φορές το μέγεθος  $A$  ξεκινώντας κάθε φορά από την ίδια προετοιμασία. Με άλλα λόγια, η  $\Psi$  εκπροσωπεί μια συλλογή πανομοιότυπα προετοιμασμένων συστημάτων. Γνωρίζοντας την  $\Psi$ , και επιλέγοντας ένα φυσικό μέγεθος  $A$ , μπορούμε να προβλέψουμε το στατιστικό αποτέλεσμα πολλών μετρήσεων του  $A$ , μίας τέτοιας σε κάθε προετοιμασμένο σύστημα. Τέλος, η ίδια κατανομή πιθανότητας  $P(a)$  μας δίνει (γ) τις πιθανές νέες αρχικές συνθήκες στις οποίες δύναται να τεθεί το σύστημα μετά από μια μέτρηση. Δηλαδή, ο νόμος

χρονικής εξέλιξης παραβιάζεται εφόσον μεσολαβήσει μια μέτρηση, καθώς τότε αλλάζει απότομα η κατάσταση σε μια νέα, την οποία μόνο στατιστικά μπορούμε να γνωρίζουμε με βάση την  $P(a)$ . Αυτή είναι άλλη μια ιδιαιτερότητα της κβαντικής Φυσικής, η οποία μερικές φορές εκφράζεται λέγοντας ότι η μέτρηση υποχρεωτικά επηρεάζει το σύστημα.

Η κβαντική μηχανική χτίζεται πάνω σε δύο θεμελιώδεις έννοιες, τη γραμμικότητα και την αβεβαιότητα. Η γραμμικότητα σημαίνει πως, δεδομένων δύο καταστάσεων ενός συστήματος,  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$ , υπάρχουν όλες οι καταστάσεις της μορφής  $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ , όπου  $c_1$  και  $c_2$  μιγαδικοί αριθμοί. Η  $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ , ως μαθηματικό αντικείμενο, αντιστοιχεί σε αρχικές συνθήκες σε κάποιο πείραμα. Επειδή ως μαθηματικό αντικείμενο είναι διαφορετική και από την  $\Psi_1$  και από την  $\Psi_2$ , οι αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην  $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$  είναι διαφορετικές από εκείνες των δύο συστατικών της. Η κβαντική μηχανική δεν μας δίνει τις οδηγίες για να επιτύχουμε στο πείραμα την  $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ , παρά μόνον αξιώνει θεωρητικά την ύπαρξή της. Ενδέχεται σε κάποιες περιπτώσεις να είναι εύκολη η πειραματική υλοποίηση αυτών των αρχικών συνθηκών. Π.χ. στην περίπτωση που η  $\Psi_1$  αντιστοιχεί στην αρχική συνθήκη προσανατολισμού της στροφορμής ενός ατόμου στον άξονα  $z$  και η  $\Psi_2$  στον άξονα  $x$ , η  $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$  αντιστοιχεί στην αρχική συνθήκη προσανατολισμού της στροφορμής σε άλλον άξονα ο οποίος υπολογίζεται από τις τιμές των  $c_1$  και  $c_2$ . Σε άλλες περιπτώσεις, ενδέχεται να είναι δύσκολη ακόμα και η κατ' αρχήν επινόηση ενός πειράματος που να ανταποκρίνεται στην αρχική συνθήκη  $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ . Αλλά πάντα στη Φυσική ο μαθηματικός φορμαλισμός των καταστάσεων υπερβαίνει τις πρακτικές δυνατότητες πειραματικής υλοποίησης.

Η έννοια της αβεβαιότητας συνδέεται με την απαίτηση, για κάθε κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  (και ως εκ τούτου για κάθε μορφή αρχικών συνθηκών που υλοποιούνται πειραματικά), να υπάρχουν φυσικά μεγέθη των οποίων η μέτρηση να δίνει μη μηδενική διασπορά—ως εκ τούτου και αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα της κάθε μέτρησης. Οι έννοιες της γραμμικότητας και της αβεβαιότητας συνδέονται μεταξύ τους και μπορεί κανείς να χτίσει τη μία στη βάση της άλλης.

## 2 Οι φυσικές καταστάσεις στην κβαντική μηχανική

Θα ξεκινήσουμε τη συζήτηση των καταστάσεων στην κβαντική μηχανική με ένα παράδειγμα. Έστω ένα σωματίδιο που κινείται σε μια χωρική διάσταση,  $x \in \mathbb{R}$ . Οι κβαντικές καταστάσεις του συστήματος είναι μιγαδικές συναρτήσεις,  $\Psi(x) \in \mathbb{C}$ , οι οποίες ονομάζονται *κυματοσυναρτήσεις* και ικανοποιούν τη συνθήκη κανονικοποίησης

$$\int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x)\Psi(x)dx = 1. \quad (1)$$

Εάν μια κυματοσυνάρτηση ικανοποιεί τη συνθήκη  $0 < \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x)\Psi(x)dx = C < \infty$ , τότε ονομάζεται *τετραγωνικά ολοκληρώσιμη* (*square integrable*). Εάν  $C \neq 1$ , η αντίστοιχη κβαντική κατάσταση είναι η  $\frac{1}{\sqrt{C}}\Psi$ . Σε μια κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  κωδικοποιείται το μέξιμουμ της πληροφορίας που μπορεί κανείς να έχει για το σύστημα ως προς οποιοδήποτε μετρήσιμο μέγεθος (θέση, ορμή, ενέργεια, κ.ο.κ.).

Ίσως το απλούστερο φυσικό μέγεθος που προκύπτει από την κυματοσυνάρτηση είναι η *κατανομή πιθανότητας* (για την ακρίβεια, *πυκνότητα πιθανότητας*)  $\rho(x)$  να βρεθεί το σωματίδιο στη θέση  $x$ :

$$\rho(x) = \Psi^*(x)\Psi(x) = |\Psi(x)|^2. \quad (2)$$

Συνεπώς, η πιθανότητα να βρεθεί το σωματίδιο εντός του διαστήματος  $a < x < b$  είναι

$$P(a, b) = \int_a^b |\Psi(x)|^2 dx. \quad (3)$$

Η εξ. 1 έχει τη φυσική ερμηνεία ότι το σωματίδιο έχει πιθανότητα 1 να βρεθεί κάπου στο χώρο.

Αναφερθήκαμε σε πιθανότητα, η οποία έχει την ερμηνεία της σχετικής συχνότητας. Αυτό, διότι η  $\Psi$  δεν αντιπροσωπεύει ένα μόνο σύστημα, αλλά μια *συλλογή* (*ensemble*) από συστήματα, *προετοιμασμένα με πανομοιότυπο τρόπο*. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των συστημάτων της συλλογής, τόσο η σχετική συχνότητα εύρεσης σωματιδίων σε μια πολύ μικρή περιοχή  $\delta x$  γύρω από τη θέση  $x$  προσεγγίζεται από την ποσότητα  $|\Psi(x)|^2 \delta x$ .<sup>(2)</sup>

Αυτό είναι λοιπόν ένα βασικό χαρακτηριστικό των κβαντικών καταστάσεων: δεν αναφέρονται σε μεμονωμένα συστήματα, αλλά σε συλλογές πανομοιότυπα προετοιμασμένων συστημάτων.

Πώς μπορούν να υπολογιστούν άλλες ποσότητες με βάση την  $\Psi$ ; Σε κάθε φυσικό

---

<sup>(2)</sup>Είναι δυνατόν να κατασκευαστεί κυματοσυνάρτηση επαρκώς εντοπισμένη, ώστε να αναπαριστά πρακτική βεβαιότητα (πιθανότητα 1) εύρεσης κάθε σωματιδίου της συλλογής στην ίδια θέση  $x$ ; Ναι, είναι δυνατόν, ως όριο εντοπισμένων κυματοσυναρτήσεων, εφόσον το σύστημα προετοιμαστεί κατάλληλα. Θα συζητηθεί στο εδάφιο 3.7.



μέγεθος αντιστοιχεί ένας τελεστής που μετασχηματίζει την κυματοσυνάρτηση σε μια άλλη. Ας πάρουμε, για παράδειγμα, την ορμή. Συμβολίζουμε τον τελεστή της ορμής με  $\hat{p}$ . Για λόγους που εν μέρει αναλύονται στο εδάφιο 5.1, ο ορισμός του είναι

$$\hat{p}\Psi(x) = -i\hbar\frac{\partial\Psi(x)}{\partial x} \quad (4)$$

δηλ. συμπίπτει με την παράγωγο της κυματοσυνάρτησης επί  $-i\hbar$ , όπου  $\hbar = h/2\pi$  με  $h$  τη σταθερά του Planck.<sup>(3)</sup> Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, ο τελεστής ορμής μετασχηματίζει την  $\Psi$  σε μια άλλη κυματοσυνάρτηση, την  $\Phi(x) = -i\hbar\frac{\partial\Psi(x)}{\partial x}$ . Η κβαντική θεωρία μάς υπαγορεύει ότι η μέση τιμή των μετρήσεων της ορμής στη συλλογή που αντιστοιχεί στην  $\Psi$  είναι

$$\langle\hat{p}\rangle_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}}\Psi^*(x)\hat{p}\Psi(x)dx \quad (5)$$

$$= -i\hbar\int_{\mathbb{R}}\Psi^*(x)\frac{\partial\Psi(x)}{\partial x}dx \quad (6)$$

με προφανή συμβολισμό στο αριστερό μέλος.

Το ίδιο, φυσικά, μπορούμε να κάνουμε και για τη θέση του σωματιδίου. Όπως σε κάθε φυσικό μέγεθος, έτσι και στη θέση αντιστοιχεί ένας τελεστής. Συμβολίζεται με  $\hat{x}$  και δρα πολλαπλασιαστικά:  $\hat{x}\Psi(x) = x\Psi(x)$ . Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση τιμή της θέσης

$$\begin{aligned} \langle\hat{x}\rangle_{\Psi} &= \int_{\mathbb{R}}\Psi^*(x)\hat{x}\Psi(x)dx \\ &= \int_{\mathbb{R}}\Psi^*(x)x\Psi(x)dx \\ &= \int_{\mathbb{R}}|\Psi(x)|^2x dx \end{aligned} \quad (7)$$

σε συμφωνία και με τον τύπο (2).

Ήδη διαφαίνεται η σημασία της μιγαδικής κυματοσυνάρτησης  $\Psi(x)$ , σε σχέση με το να είχαμε μόνο μια πραγματική (θετική) πυκνότητα πιθανότητας στο χώρο  $\rho(x)$ . Η  $|\Psi(x)|^2$  περιέχει εμφανώς λιγότερη πληροφορία από την  $\Psi(x)$ . Εάν γράψουμε  $\Psi(x) = |\Psi(x)|e^{i\theta(x)}$  ( $\theta(x) \in \mathbb{R}$ ), βλέπουμε ότι η φάση  $\theta(x)$  θα συνεισφέρει στην ορμή λόγω της παραγωγισής (4), παρόλο που στη θέση συνεισφέρει μόνο η απόλυτη τιμή  $|\Psi(x)|$ .

Ωστόσο, κάθε μέτρηση φυσικού μεγέθους πρέπει να δίνει ως τιμή έναν πραγματικό αριθμό, επομένως και η μέση τιμή πρέπει να είναι πραγματικός αριθμός. Αυτό εξασφα-

<sup>(3)</sup>Το  $\hbar \approx 1,055 \times 10^{-34}$  Js είναι μια φυσική σταθερά εξίσου θεμελιώδης με την ταχύτητα του φωτός στο κενό  $c$ . Όπως η θεωρία της σχετικότητας αποκαλύπτει τη σύνδεση του χώρου με το χρόνο μέσω του συντελεστή αναλογίας  $c$ , έτσι και η κβαντική θεωρία αποκαλύπτει τη σύνδεση χρόνου-ενέργειας, ή, ακριβέστερα, συχνότητας-ενέργειας, μέσω του συντελεστή αναλογίας  $\hbar$ .

λίζεται από την εξής απαίτηση της κβαντικής θεωρίας: οι τελεστές που αντιστοιχούν σε μετρήσιμα μεγέθη πρέπει να είναι *ερμιτιανοί* (*hermitian*). Εξ' ορισμού, ένας τελεστής  $\hat{A}$  λέγεται ερμιτιανός, εάν πληροί τις ακόλουθες δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, να είναι γραμμικός, δηλαδή, για κυματοσυναρτήσεις  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  και (μιγαδικούς) αριθμούς  $c_1$  και  $c_2$ , να ισχύει

$$\hat{A}(c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2) = c_1\hat{A}\Psi_1 + c_2\hat{A}\Psi_2 \quad (8)$$

(υπό την αίρεση, βέβαια, να βρίσκονται οι κυματοσυναρτήσεις στο πεδίο ορισμού). Δεύτερον, για κάθε συνάρτηση  $\Psi \in \mathbb{C}$  (τέτοια ώστε να συγκλίνει το παρακάτω ολοκλήρωμα), να ισχύει

$$\int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{A} \Psi(x) dx \in \mathbb{R}. \quad (9)$$

Παραδείγματα ερμιτιανών τελεστών είναι οι τελεστές θέσης και ορμής. Πράγματι,

$$\int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{x} \Psi(x) dx = \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) x \Psi(x) dx = \int_{\mathbb{R}} x |\Psi(x)|^2 dx \in \mathbb{R} \quad (10)$$

(αφού όλες οι ολοκληρωτέες ποσότητες είναι πραγματικές). Εξάλλου,

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{p} \Psi(x) dx &= -i\hbar \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} dx \\ &= -i\hbar [\Psi^*(x)\Psi(x)]_{-\infty}^{\infty} + i\hbar \int_{\mathbb{R}} \frac{\partial \Psi(x)^*}{\partial x} \Psi(x) dx \\ &= 0 + \left( -i\hbar \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} dx \right)^* \\ &= \left( \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{p} \Psi(x) dx \right)^*, \end{aligned} \quad (11)$$

δηλαδή η τιμή του αριστερού μέλους ισούται με το μιγαδικό συζυγές της, επομένως είναι πραγματική. Εδώ χρησιμοποιήσαμε παραγοντική ολοκλήρωση και το γεγονός ότι οι κυματοσυναρτήσεις μηδενίζονται στο  $x \rightarrow \pm\infty$ .<sup>(4)</sup>

Στις ως τώρα εξισώσεις παρουσιάζεται συχνά η έκφραση του τύπου  $\int \Psi^* \Phi dx$ . Αυτή ονομάζεται *εσωτερικό γινόμενο* της  $\Psi$  με τη  $\Phi$  και συμβολίζεται ως εξής:

$$(\Psi, \Phi) \equiv \int \Psi^*(x) \Phi(x) dx. \quad (12)$$

Π.χ.,  $(\Psi, \hat{A} \Psi) \equiv \int \Psi^*(x) \hat{A} \Psi(x) dx$ . Είναι εύκολο να αποδειχθούν οι ακόλουθες ιδι-

<sup>(4)</sup> Αυτό αποτελεί εύλογη φυσική απαίτηση, διότι το  $|\Psi(x)|^2$  είναι πυκνότητα πιθανότητας. Είναι αδύνατον να πετύχει κανείς πειραματικά μια πυκνότητα πιθανότητας για τη θέση ενός σωματιδίου, η οποία να μη μηδενίζεται στο άπειρο. Τυπικά, όμως, είναι δυνατόν να κατασκευάσει κανείς τετραγωνικά ολοκληρώσιμη συνάρτηση η οποία να μην ικανοποιεί αυτή την απαίτηση. Για τέτοιες προβληματικές συναρτήσεις, η απόδειξη αποτυγχάνει.

ότητες του εσωτερικού γινομένου:<sup>(5)</sup>

$$(\Psi, \Phi) = (\Phi, \Psi)^*$$

$$(\Psi, c_1 \Phi_1 + c_2 \Phi_2) = c_1 (\Psi, \Phi_1) + c_2 (\Psi, \Phi_2) \text{ (γραμμικότητα ως προς το 2° όρισμα)} \quad (13)$$

$$(c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2, \Phi) = c_1^* (\Psi_1, \Phi) + c_2^* (\Psi_2, \Phi) \text{ (αντιγραμμικότητα ως προς το 1° όρισμα)}$$

Η ποσότητα  $\|\Psi\| = \sqrt{(\Psi, \Psi)}$  ονομάζεται *νόρμα* της  $\Psi$  και είναι προδήλως θετική, αν  $\Psi \neq 0$ , ή μηδέν, αν  $\Psi(x) = 0$  (σε όλο το πεδίο ορισμού πλην ενδεχομένως διακριτών σημείων). Δύο κυματοσυναρτήσεις  $\Psi$  και  $\Phi$  ονομάζονται *ορθογώνιες*, αν  $(\Psi, \Phi) = 0$ . Επίσης, ισχύει η ακόλουθη *ανισότητα Cauchy-Schwarz*:<sup>(6)</sup>

$$(\Phi, \Phi)(\Psi, \Psi) \geq |(\Phi, \Psi)|^2 \quad (14)$$

από την οποία προκύπτει ότι, για κανονικοποιημένες κυματοσυναρτήσεις (δηλ.  $(\Phi, \Phi) = (\Psi, \Psi) = 1$ ), έχουμε  $0 \leq |(\Phi, \Psi)| \leq 1$ .

Ο συμβολισμός του εσωτερικού γινομένου επιτρέπει την ακόλουθη συντομογραφία για τις ιδιότητες ερμιτιανών τελεστών  $\hat{A}$ :

$$(\Psi, \hat{A} \Psi) \in \mathbb{R} \quad (15)$$

$$(\Phi, \hat{A} \Psi) = (\hat{A} \Phi, \Psi), \quad (16)$$

για κάθε  $\Phi$  και  $\Psi$  στο πεδίο ορισμού. Η πρώτη ιδιότητα είναι συντομογραφία της εξ. (9) του ορισμού, ενώ η δεύτερη προκύπτει εύκολα από τον ορισμό.<sup>(7)</sup>

---

<sup>(5)</sup>Πρόβλημα 3.1.

<sup>(6)</sup>Πρόβλημα 3.1.

<sup>(7)</sup>Πρόβλημα 3.2.

### 3 Η μέτρηση στην κβαντική μηχανική

Έστω ένα σύστημα στο οποίο γίνεται μια σειρά από μετρήσεις, και το οποίο προετοιμάζουμε πριν από κάθε μέτρηση με τον ίδιο τρόπο.<sup>(8)</sup> Όπως είπαμε, η πανομοιότυπη προετοιμασία μάς δίνει μια συλλογή που εκφράζεται, μαθηματικά, με την κυματοσυνάρτηση  $\Psi$ . Αυτή περιέχει, κωδικοποιημένη, την κατανομή πιθανότητας για τις τιμές όλων των παρατηρήσιμων μεγεθών. Ας υποθέσουμε ότι μετράμε κάθε φορά το ίδιο μέγεθος. Οι τιμές των μετρήσεων θα παρουσιάζουν, εν γένει, μια διασπορά (πλην ειδικών περιπτώσεων που θα συζητηθούν πιο κάτω). Κάθε μέτρηση θα δώσει, προφανώς, μια μόνο τιμή, αλλά οποιαδήποτε μεμονωμένη τιμή δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί με βάση την  $\Psi$ . Μόνο η κατανομή πιθανότητας μπορεί να προβλεφθεί (δηλαδή, η σχετική συχνότητα που παρουσιάζει κάθε τιμή στο σύνολο των μετρήσεων).

Τα μετρήσιμα μεγέθη αναπαριστούνται από ερμιτιανούς τελεστές. Αν  $\hat{A}$  ένας τέτοιος τελεστής, και  $\Psi(x)$  η κυματοσυνάρτηση που αντιστοιχεί στην συλλογή, τότε η μέση τιμή και οι ροπές της κατανομής εκφράζονται από:<sup>(9)</sup>

$$\begin{aligned}\langle \hat{A} \rangle_{\Psi} &= \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{A} \Psi(x) dx \equiv (\Psi, \hat{A} \Psi) \\ \langle \hat{A}^2 \rangle_{\Psi} &= \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{A}^2 \Psi(x) dx \equiv (\Psi, \hat{A}^2 \Psi) \\ \text{και γενικά: } \langle \hat{A}^n \rangle_{\Psi} &= \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{A}^n \Psi(x) dx \equiv (\Psi, \hat{A}^n \Psi)\end{aligned}\quad (17)$$

Η  $n$ -οστή δύναμη ενός ερμιτιανού τελεστή επιδέχεται την ακόλουθη φυσική ερμηνεία: πραγματοποιούμε μια μέτρηση και παίρνουμε την  $n$ -οστή δύναμη της μετρημένης τιμής,  $a \rightarrow a^n$ . Επαναλαμβάνουμε πολλές φορές με πανομοιότυπη προετοιμασία του συστήματος, ώστε να αποκτήσουμε στατιστική εντός της συλλογής  $\Psi$ . Τότε, ο μέσος όρος των  $a^n$  αναπαριστάται, μαθηματικά, από το  $(\Psi, \hat{A}^n \Psi)$ .<sup>(10)</sup>

Οι παραπάνω εξισώσεις καταδεικνύουν ότι μια ολική φάση,  $e^{i\gamma}$  (με  $\gamma \in \mathbb{R}$  μια σταθερά), δεν παίζει κανένα ρόλο στα παρατηρήσιμα μεγέθη. Εάν κάνουμε την αλλαγή

<sup>(8)</sup>Ισοδύναμα, ένα σύνολο από πανομοιότυπα συστήματα, προετοιμασμένα κάθε φορά με τον ίδιο τρόπο.

<sup>(9)</sup>Αν ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός, δηλ.  $\forall \Psi, (\Psi, \hat{A} \Psi) \in \mathbb{R}$ , τότε και οι δυνάμεις  $\hat{A}^n$  είναι ερμιτιανοί. Αυτό φαίνεται ως εξής: Για  $n = 2$ ,  $(\Psi, \hat{A}^2 \Psi) = (\Psi, \hat{A} \hat{A} \Psi) = (\hat{A} \Psi, \hat{A} \Psi) = \|\hat{A} \Psi\|^2 \in \mathbb{R}$ , άρα ο  $\hat{A}^2$  είναι ερμιτιανός. Για  $n = 3$ ,  $(\Psi, \hat{A}^3 \Psi) = (\hat{A} \Psi, \hat{A}[\hat{A} \Psi]) \in \mathbb{R}$  (αφού ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός), άρα και ο  $\hat{A}^3$  είναι ερμιτιανός. Για ανώτερες δυνάμεις προχωρούμε με επαγωγή, κατ' αναλογία με την περίπτωση  $n = 2$  για τις άρτιες δυνάμεις, και με την περίπτωση  $n = 3$  για τις περιττές δυνάμεις. (Πρόβλημα 3.)

<sup>(10)</sup>Με ανάλογο τρόπο, αν  $f(z) = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots$  μια αναλυτική συνάρτηση, ορίζουμε τον τελεστή  $\hat{f}(\hat{A}) = c_0 + c_1 \hat{A} + c_2 \hat{A}^2 + \dots$ . Αν οι συντελεστές  $c_n$  είναι πραγματικοί, και αν  $\hat{A}$  ερμιτιανός, τότε και ο  $\hat{f}(\hat{A})$  είναι ερμιτιανός και επιδέχεται την ακόλουθη ερμηνεία: πραγματοποιούμε μια μέτρηση, παίρνουμε αποτέλεσμα  $a$ , και υπολογίζουμε την τιμή  $f(a)$ . Επαναλαμβάνουμε πολλές φορές με πανομοιότυπη προετοιμασία του συστήματος, ώστε να αποκτήσουμε στατιστική εντός της συλλογής  $\Psi$ . Ο μέσος όρος των  $f(a)$  αναπαριστάται, μαθηματικά, από το  $(\Psi, \hat{f}(\hat{A}) \Psi)$ .

$\Psi(x) \rightarrow \Psi(x)e^{i\gamma}$ , τότε  $\hat{A}^n\Psi(x) \rightarrow \hat{A}^n\Psi(x)e^{i\gamma} = e^{i\gamma}\hat{A}^n\Psi(x)$  λόγω γραμμικότητας του  $\hat{A}$  και άρα του  $\hat{A}^n$ , και εφόσον το  $\gamma$  είναι σταθερά. Επίσης,  $\Psi^*(x) \rightarrow \Psi^*(x)e^{-i\gamma}$ . Άρα οι παράγοντες  $e^{i\gamma}e^{-i\gamma}$  αλληλοαναιρούνται στο τελικό αποτέλεσμα των εξ. (17).<sup>(11)</sup>

Εφαρμόζοντας τις εξ. (17) για τη θέση λαμβάνουμε

$$\langle \hat{x} \rangle_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) x \Psi(x) dx \quad (18)$$

$$\langle \hat{x}^2 \rangle_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) x^2 \Psi(x) dx \quad (19)$$

κ.ο.κ., ενώ για την ορμή

$$\langle \hat{p} \rangle_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{p} \Psi(x) dx = -i\hbar \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} dx \quad (20)$$

$$\langle \hat{p}^2 \rangle_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{p}^2 \Psi(x) dx = (-i\hbar)^2 \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} dx \quad (21)$$

κ.ο.κ. Από τις ροπές προκύπτει η κατανομή πιθανότητας.

Θα εισαγάγουμε, τώρα, μια ειδική κατηγορία ερμιτιανών τελεστών, τους *προβολικούς τελεστές*. Ένας προβολικός τελεστής που αντιστοιχεί σε μια κανονικοποιημένη κυματοσυνάρτηση, έστω  $\Phi$  με  $(\Phi, \Phi) = 1$ , ορίζεται ως εξής.

$$\hat{P}_{\Phi} \Psi = (\Phi, \Psi) \Phi, \quad (22)$$

για τυχαία  $\Psi$ . Σε μια γεωμετρική ερμηνεία του χώρου καταστάσεων ως διανυσματικού χώρου, την οποία θα συζητήσουμε στο κεφάλαιο 4, αυτή η πράξη δίνει την προβολή της κυματοσυνάρτησης  $\Psi$  πάνω στη  $\Phi$ . Οι προβολικοί τελεστές έχουν την ιδιότητα  $\hat{P}_{\Phi}^2 = \hat{P}_{\Phi}$ , δηλαδή η απλή είτε πολλαπλή δράση τους έχει το ίδιο αποτέλεσμα. Είναι εύκολο να δείξει κανείς ότι πρόκειται για ερμιτιανούς τελεστές με ιδιοτιμές 0 ή 1.<sup>(12)</sup> Επιδέχονται την ακόλουθη ερμηνεία μετρήσιμου μεγέθους: Εξετάζουμε με μια μέτρηση αν το σύστημα θα βρεθεί στην κατάσταση  $\Phi$ : αν ναι, δίνουμε ως μετρημένη τιμή το 1, διαφορετικά το 0. Η έννοια του προβολικού τελεστή γενικεύεται και στην προβολή σε υπόχωρους περισσότερων διαστάσεων: αν  $\Phi_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  κυματοσυναρτήσεις ορθογώνιες μεταξύ τους, τότε σε αυτό το σύνολο αντιστοιχεί ο προβολικός τελεστής  $\hat{P} = \sum_i \hat{P}_{\Phi_i}$  με  $\hat{P} \Psi = (\Phi_1, \Psi) \Phi_1 + (\Phi_2, \Psi) \Phi_2 + \dots$ .

<sup>(11)</sup>Η σταθερά  $e^{i\gamma}$  έχει μέτρο τη μονάδα, ώστε δεν επηρεάζει τη νόρμα  $\|\Psi\|$ .

<sup>(12)</sup>Πρόβλημα 4.

### 3.1 Ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές

Είναι δυνατόν ένα μέγεθος να μην παρουσιάσει διασπορά στην κατανομή; Δηλαδή, είναι δυνατόν να έχουμε κατανομή μετρήσεων ουσιαστικά εντοπισμένη σε μια μοναδική τιμή; Ναι: για κάθε μέγεθος, υπάρχουν κυματοσυναρτήσεις που εξαρτώνται από αυτό, για τις οποίες ισχύει είτε η πλήρης απουσία διασποράς, είτε ότι η διασπορά γίνεται αυθαίρετα μικρή. Παρατηρούμε: Αν  $\hat{A}$  ο ερμιτιανός τελεστής που αντιστοιχεί στο μέγεθος, τότε, έστω ότι βρίσκουμε μια κατάλληλη κατάσταση  $\Psi_{\hat{A}}$ , τέτοια ώστε να ισχύει

$$\hat{A}\Psi_{\hat{A}} = a\Psi_{\hat{A}}, \quad (23)$$

όπου  $a$  αριθμός. Υπό αυτή τη συνθήκη, η  $\Psi_{\hat{A}}$  ονομάζεται *ιδιοκατάσταση* (*eigenstate*) του  $\hat{A}$  και ο αριθμός  $a$  *ιδιοτιμή* (*eigenvalue*) του  $\hat{A}$ . (Ένας τελεστής μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές.)

Η εξ. (23) μας δίνει αμέσως  $(\Psi_{\hat{A}}, \hat{A}\Psi_{\hat{A}}) = (\Psi_{\hat{A}}, a\Psi_{\hat{A}}) = a(\Psi_{\hat{A}}, \Psi_{\hat{A}}) = a$  (λόγω κανονικοποίησης). Επειδή ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός, το αριστερό μέλος πρέπει να είναι πραγματικό, άρα  $a \in \mathbb{R}$ . Συμπεραίνουμε ότι *οι ιδιοτιμές των ερμιτιανών τελεστών είναι πραγματικές*.<sup>(13)</sup> Οι ιδιοτιμές έχουν και μια επιπλέον εξέχουσα θέση στη θεωρία μέτρησης της κβαντικής Φυσικής: *κάθε μεμονωμένη μέτρηση δίνει ως τιμή μια ιδιοτιμή του τελεστή του μετρούμενου μεγέθους*.<sup>(14)(15)</sup> Επομένως, ναι μεν δεν μπορούμε εν γένει να προβλέψουμε το αποτέλεσμα κάθε μεμονωμένης μέτρησης, αλλά γνωρίζουμε ότι πρέπει να ανήκει στο σύνολο ιδιοτιμών.<sup>(16)</sup>

Ας εξετάσουμε τη διασπορά τιμών, όταν το σύστημα βρίσκεται σε ιδιοκατάσταση του  $\hat{A}$ . Θυμίζουμε ότι η διασπορά ποσοτικοποιείται από την τυπική απόκλιση  $(\Delta A)$ . Για

<sup>(13)</sup>Ιδιοτιμές μπορούν να έχουν και μη ερμιτιανοί τελεστές, αλλά αυτές δεν είναι κατ' ανάγκη πραγματικές.

<sup>(14)</sup>Στο εδάφιο 3.4 θα δούμε ότι αυτή η απαίτηση προκύπτει και από το αξίωμα προβολής.

<sup>(15)</sup>Υπάρχουν ερμιτιανοί τελεστές, οι οποίοι δεν έχουν ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές, αλλά χαρακτηρίζονται από ένα συνεχές φάσμα τιμών που μπορούν να λαμβάνουν τα αντίστοιχα μεγέθη. Για αυτούς μπορούμε να βρούμε καταστάσεις που προσεγγίζουν την ιδιότητα της ιδιοκατάστασης με αυθαίρετη ακρίβεια. Βλ. τη συζήτηση στο εδάφιο 3.7.

<sup>(16)</sup>Για παράδειγμα, το σπιν του ηλεκτρονίου έχει μόνο δύο ιδιοτιμές:  $\pm\hbar/2$ . Μια σειρά μετρήσεων θα εμφανίσει μια κατανομή αυτών των δυό τιμών: ποτέ δεν θα υπάρξει μετρημένη τιμή π.χ. 0, αν και η μέση τιμή των μετρήσεων ενδέχεται, αναλόγως την κατάσταση, να είναι οποιαδήποτε στο διάστημα  $[-\hbar/2, \hbar/2]$ .

τυχαία κατάσταση  $\Psi$  έχουμε (με το σύμβολο  $\langle \dots \rangle$  υπονούμε μέσο όρο στην  $\Psi$ ,  $\langle \dots \rangle_\Psi$ )

$$(\Delta A)^2 = \langle (\hat{A} - \langle \hat{A} \rangle)^2 \rangle \quad (\text{από ορισμό}) \quad (24)$$

$$= \langle \hat{A}^2 - 2\hat{A}\langle \hat{A} \rangle + \langle \hat{A} \rangle^2 \rangle \quad (\text{ταυτοτικά})$$

$$= \langle \hat{A}^2 \rangle - 2\langle \hat{A}\langle \hat{A} \rangle \rangle + \langle \hat{A} \rangle^2 \quad (\text{γραμμικότητα μέσης τιμής})$$

$$= \langle \hat{A}^2 \rangle - \langle \hat{A} \rangle^2 \quad (\text{το } \langle \hat{A} \rangle \text{ είναι αριθμός})$$

$$= (\Psi, \hat{A}^2 \Psi) - (\Psi, \hat{A} \Psi)^2 \quad (\text{από εξ. 17}) \quad (25)$$

Στην ειδική περίπτωση που έχουμε ιδιοκατάσταση, έστω  $\Psi_{\hat{A}}$ , με ιδιοτιμή  $a$ , παρατηρούμε ότι  $\hat{A}^2 \Psi_{\hat{A}} = \hat{A} \hat{A} \Psi_{\hat{A}} = \hat{A} a \Psi_{\hat{A}} = a \hat{A} \Psi_{\hat{A}} = a^2 \Psi_{\hat{A}}$  (λαμβάνοντας υπ' όψη και την κανονικοποίηση της  $\Psi$ ).<sup>(17)</sup> Εφαρμογή στην (25) δίνει  $(\Delta A)^2 = a^2 - a^2 = 0$ .

Έστω ότι ένα μέγεθος έχει μηδενική διασπορά,  $(\Delta A)^2 = 0$ . Για ευκολία, εξετάζουμε το μέγεθος  $\hat{A}' = \hat{A} - \langle \hat{A} \rangle$ , το οποίο έχει την ίδια τυπική απόκλιση με το  $\hat{A}$ , αλλά μέση τιμή μηδέν.<sup>(18)</sup> Τότε:  $0 = (\Delta A')^2 = (\Psi, \hat{A}'^2 \Psi) = (\hat{A}' \Psi, \hat{A}' \Psi) = \|\hat{A}' \Psi\|^2$ ,<sup>(19)</sup> δηλ. η νόρμα  $\|\hat{A}' \Psi\|$  μηδενίζεται, το οποίο είναι δυνατόν μόνον αν  $\hat{A}' \Psi = 0$ . Επομένως, η  $\Psi$  πρέπει να είναι ιδιοκατάσταση του  $\hat{A}'$  με ιδιοτιμή μηδέν:  $0 = \hat{A}' \Psi = \hat{A} \Psi - \langle \hat{A} \rangle \Psi$ , άρα  $\hat{A} \Psi = \langle \hat{A} \rangle \Psi$ . Δηλαδή, η  $\Psi$  είναι ιδιοκατάσταση του  $\hat{A}$  με ιδιοτιμή  $a = \langle \hat{A} \rangle$ .

Καταλήγουμε: Έστω μια συλλογή αναπαριστώμενη από μια κυματοσυνάρτηση και ένας ερμιτιανός τελεστής  $\hat{A}$ . Τότε, αυτή η κυματοσυνάρτηση είναι ιδιοκατάσταση του  $\hat{A}$ , αν και μόνο αν δεν υπάρχει διασπορά τιμών στη μέτρηση του μεγέθους που αντιστοιχεί στον  $\hat{A}$ .

Δίνουμε, τέλος, μια ιδιότητα των ερμιτιανών τελεστών: *Ιδιοκαταστάσεις ερμιτιανού τελεστή που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι ορθογώνιες μεταξύ τους.* Η απόδειξη είναι απλή: έστω  $\hat{A}$  ερμιτιανός τελεστής και  $\Psi_1, \Psi_2$  ιδιοκαταστάσεις του με ιδιοτιμές  $a_1, a_2$  αντίστοιχα. Τότε:  $(\Psi_1, \hat{A} \Psi_2) = (\Psi_1, a_2 \Psi_2) = a_2(\Psi_1, \Psi_2)$ . Επίσης:  $(\Psi_1, \hat{A} \Psi_2) = (\hat{A} \Psi_1, \Psi_2) = (a_1 \Psi_1, \Psi_2) = a_1(\Psi_1, \Psi_2)$  (το πρώτο βήμα προκύπτει από την ιδιότητα (16) των ερμιτιανών τελεστών και στο τελευταίο βήμα εκμεταλλευθήκαμε το γεγονός ότι  $a_2 \in \mathbb{R}$ ). Άρα,  $a_2(\Psi_1, \Psi_2) = a_1(\Psi_1, \Psi_2)$ . Αν  $a_1 \neq a_2$ , τότε, αναγκαστικά,  $(\Psi_1, \Psi_2) = 0$ , δηλ. οι  $\Psi_1, \Psi_2$  είναι ορθογώνιες.

### 3.2 Προετοιμασία κατάστασης και φιλτράρισμα

Ποιου είδους πειραματικές διατάξεις παράγουν συλλογές που αντιστοιχούν σε ιδιοκαταστάσεις τελεστών; Τα πειράματα αυτά πρέπει να κάνουν ένα είδος διαλογής, ή φιλτράρισματος, μιας αρχικής συλλογής, επιλέγοντας ένα κατάλληλο υποσύνολο συστημάτων

<sup>(17)</sup>Γενικά,  $\hat{A}^n \Psi_{\hat{A}} = a^n \Psi_{\hat{A}}$ , όπως προκύπτει με επαγωγή.

<sup>(18)</sup>Πρόβλημα 6.

<sup>(19)</sup>Στο δεύτερο βήμα χρησιμοποιήσαμε την ιδιότητα των ερμιτιανών τελεστών  $(\Psi, \hat{A} \Phi) = (\hat{A} \Psi, \Phi)$  (εξ. 16) με  $\Phi = \hat{A} \Psi$ .

ως νέα συλλογή. Παραδείγματα:

- Ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μια πηγή, τοποθετημένη στο χώρο σε  $z < 0$ , προς μια μεμβράνη που τα σταματά στο επίπεδο  $xy$  (δηλ.  $z = 0$ ). Ανοίγουμε μια μικρή οπή στη μεμβράνη στο σημείο  $x = y = 0$ , η οποία επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να διέλθουν. Όσα περάσουν την οπή, βρίσκονται, αμέσως αφού περάσουν ( $z > 0$  αλλά πολύ μικρό), σε κατάσταση που είναι με πολύ καλή προσέγγιση ιδιοκατάσταση των τελεστών θέσης  $\hat{x}$  και  $\hat{y}$ .
- Ηλεκτρόνια εκπέμπονται ευθύγραμμα από μια πηγή και διέρχονται μέσα από χωρικά εντοπισμένο μαγνητικό πεδίο. Λόγω της δύναμης Lorentz, αποκλίνουν της πορείας τους, με τη γωνία απόκλισης να εξαρτάται από το μέτρο της ορμής τους (δηλ. την κινητική τους ενέργεια). Επιλέγοντας τα ηλεκτρόνια που έχουν αποκλίνει υπό συγκεκριμένη γωνία (και σταματώντας τα υπόλοιπα), έχουμε μια νέα συλλογή, η οποία αντιστοιχεί με πολύ καλή προσέγγιση σε ιδιοκατάσταση του τελεστή της κινητικής ενέργειας.
- Άτομα (ηλεκτρικά ουδέτερα) με εσωτερική μαγνητική ροπή διέρχονται από ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο διασπά τη δέσμη των ατόμων και τα ανακατευθύνει, ανάλογα με τη σχετική κατεύθυνση της μαγνητικής ροπής προς την κατεύθυνση του πεδίου. Επιλέγοντας δέσμη συγκεκριμένης κατεύθυνσης, έχουμε μια νέα συλλογή, που αντιστοιχεί σε ιδιοκατάσταση του τελεστή της μαγνητικής ροπής.<sup>(20)</sup>
- Άτομα ψύχονται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία και αφήνονται αρκετό χρόνο, ώστε να απωλέσουν μέσω ακτινοβολίας την όποια ενέργεια διεγερμένων στιβάδων. Στο τέλος της διαδικασίας, έχουμε μια συλλογή ατόμων που αντιστοιχεί στην ιδιοκατάσταση της χαμηλότερης δυνατής ενέργειας.

### 3.3 Συμβατά και ασύμβατα μεγέθη

Έστω ότι, μετά από κατάλληλο φιλτράρισμα, έχουμε καταλήξει σε μια συλλογή που αντιστοιχεί σε ιδιοκατάσταση  $\Psi_A$ , με ιδιοτιμή  $a$ , ενός ερμιτιανού τελεστή  $\hat{A}$ . Εάν μετρήσουμε τώρα ένα άλλο μέγεθος, που αντιστοιχεί στον τελεστή  $\hat{B}$ , θα βρούμε διασπορά στις τιμές; Σύμφωνα με τα προηγούμενα, δεν θα έχουμε διασπορά στο  $\hat{B}$  αν και μόνο αν η  $\Psi_A$  τυγχάνει ιδιοκατάσταση και του  $\hat{B}$ .

<sup>(20)</sup>Ο τελεστής της μαγνητικής ροπής προκύπτει από συνδυασμό του τελεστή της τροχιακής στροφορμής,  $\hat{\mathbf{L}} = \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}$ , και της στροφορμής σπιν. Στην πράξη συνεισφέρουν εδώ μόνο τα ηλεκτρόνια και όχι οι πυρήνες. Οι Otto Stern και Walter Gerlach χρησιμοποίησαν το 1922 μια τέτοια διάταξη για να αποδείξουν την κβάντωση της στροφορμής.



Είναι δυνατόν δυο τελεστές να μην έχουν ούτε μια κοινή ιδιοκατάσταση; Ναι. Έστω  $\Psi$  μια κοινή ιδιοκατάσταση των  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$ , με  $\hat{A}\Psi = a\Psi$  και  $\hat{B}\Psi = b\Psi$ . Τότε,  $[\hat{A}, \hat{B}]\Psi \equiv (\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A})\Psi = \hat{A}b\Psi - \hat{B}a\Psi = b\hat{A}\Psi - a\hat{B}\Psi = (ba - ab)\Psi = 0$ . Δηλαδή, η δράση του μεταθέτη  $[\hat{A}, \hat{B}] \equiv \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$  στη συγκεκριμένη κατάσταση δίνει μηδέν. Επομένως, αν η δράση του  $[\hat{A}, \hat{B}]$  σε όλες τις καταστάσεις του πεδίου ορισμού του δεν μηδενίζεται, τότε οι  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  δεν έχουν ούτε μια κοινή ιδιοκατάσταση. Παράδειγμα αποτελεί το ζεύγος τελεστών θέσης και ορμής, για το οποίο (σε μία διάσταση)

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar, \quad (26)$$

δηλ.  $[\hat{x}, \hat{p}]\Psi = i\hbar\Psi$  για κάθε  $\Psi$ .<sup>(21)</sup> Ζεύγη μεγεθών, που ικανοποιούν τη σχέση  $[\hat{A}, \hat{B}] = i\hbar$ , ονομάζονται *κανονικά συζυγή (canonical conjugate)*. Άλλα παραδείγματα ζευγών που δεν έχουν ούτε μια κοινή ιδιοκατάσταση (χωρίς, απαραίτητα, να είναι κανονικά συζυγή) είναι η θέση και δυνάμεις της ορμής (π.χ., θέση και κινητική ενέργεια), ή, γενικότερα, συναρτήσεις της θέσης και συναρτήσεις της ορμής, και ανά δύο οι συνιστώσες του διανύσματος της στροφορμής.

Δυο μεγέθη, που αντιπροσωπεύονται από μετατιθέμενους ερμιτιανούς τελεστές κατά δράση τους σε όλες τις κυματοσυναρτήσεις (δηλ.  $[\hat{A}, \hat{B}]\Psi = 0, \forall\Psi$ ), ονομάζονται *συμβατά (compatible)*, σε διαφορετική περίπτωση ονομάζονται *ασύμβατα (incompatible)*. (Είναι δυνατόν, δύο ασύμβατα μεγέθη  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  να έχουν κάποιες κοινές ιδιοκαταστάσεις, έστω  $\Psi$ . Τότε, η δράση του μεταθέτη τους σε αυτές μηδενίζεται:  $[\hat{A}, \hat{B}]\Psi = 0$ , αλλά θα υπάρχουν άλλες, έστω  $\Phi$  για τις οποίες  $[\hat{A}, \hat{B}]\Phi \neq 0$ .) Λόγω της ύπαρξης ασύμβατων μεγεθών, παρουσιάζεται στην κβαντική Φυσική η εξής ιδιομορφία, η οποία είναι απύσχα στην κλασική Φυσική. Έστω ότι προετοιμάζουμε το σύστημα (π.χ. μέσω φιλτραρίσματος) σε μια ιδιοκατάσταση  $\Psi_{\hat{A}}$  του μεγέθους  $\hat{A}$ . Τότε, μπορούμε να βρούμε μέγεθος ασύμβατο με το  $\hat{A}$ , δηλαδή τέτοιο ώστε οι μετρήσεις του να παρουσιάζουν υποχρεωτικά διασπορά. Η διασπορά λόγω ασυμβατότητας δεν σχετίζεται με την ακρίβεια του οργάνου της μέτρησης, ούτε με την ακρίβεια της προετοιμασίας της συλλογής. Στην κλασική Φυσική δεχόμαστε ως αξίωμα ότι μπορούμε να προετοιμάσουμε ένα σύστημα με επαρκή ακρίβεια, και επιπρόσθετα να έχουμε επαρκή ακρίβεια στη μέτρηση, ώστε η διασπορά να καθίσταται αυθαίρετα μικρή, ή και να μηδενίζεται. Στην κβαντική Φυσική, αυτό είναι αδύνατον μεταξύ ασύμβατων μεγεθών, των οποίων την ύπαρξη δεχόμαστε, κατ' ουσία, αξιωματικά.

Γενικά, για οποιεσδήποτε δύο διαφορετικές κυματοσυναρτήσεις δεν είναι ορθογώνιες μεταξύ τους (δηλ.  $1 \neq |(\Phi, \Psi)| \neq 0$ ), οι αντίστοιχοι προβολικοί τελεστές αντιστοιχούν σε ασύμβατα μεγέθη. Αυτό προκύπτει από τη δράση του μεταθέτη  $[\hat{P}_{\Psi}, \hat{P}_{\Phi}]$  είτε στην

<sup>(21)</sup> Έχουμε  $[\hat{x}, \hat{p}]\Psi = \hat{x}(\hat{p}\Psi) - \hat{p}(\hat{x}\Psi) = -i\hbar x(\partial\Psi/\partial x) + i\hbar \partial(x\Psi)/\partial x = i\hbar(-x\partial\Psi/\partial x + \Psi + x\partial\Psi/\partial x) = i\hbar\Psi$ , για κάθε διαφορίσιμη  $\Psi$ .

$\Psi$  είτε στη  $\Phi$ .<sup>(22)</sup>

Η ύπαρξη ασύμβατων μεγεθών στην κβαντική Φυσική επάγεται απ' ευθείας από την αρχή της επαλληλίας, χάρη στην οποία μπορούμε να κατασκευάσουμε ζεύγος μη ορθογώνιων κυματοσυναρτήσεων από οποιοδήποτε ζεύγος κυματοσυναρτήσεων, αρκεί αυτές είναι γραμμικά ανεξάρτητες. Έστω  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  δύο κυματοσυναρτήσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές συλλογές (δηλ., δεν είναι η μια πολλαπλάσιο της άλλης: δεν υπάρχει σταθερά  $c$ , τέτοια ώστε  $\Psi_1 = c\Psi_2$ ). Κατασκευάζουμε τώρα, μέσω επαλληλίας, μια νέα κυματοσυνάρτηση η οποία να αδυνατεί να είναι ταυτόχρονα ορθογώνια και στην  $\Psi_1$  και στην  $\Psi_2$ :  $\Phi = a_1\Psi_1 + a_2\Psi_2$ , με  $a_1 \neq 0 \neq a_2$  και  $|a_1|^2 + |a_2|^2 + 2\text{Re}[a_1^*a_2(\Psi_1, \Psi_2)] = 1$  ώστε να είναι κανονικοποιημένη [π.χ., αν οι  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  είναι ορθογώνιες,  $\Phi = (1/\sqrt{2})\Psi_1 + (1/\sqrt{2})\Psi_2$ ]. Τότε, ο προβολικός τελεστής της  $\Phi$  είναι μέγεθος ασύμβατο είτε με τον προβολικό τελεστή της  $\Psi_1$  είτε με εκείνον της  $\Psi_2$  είτε και με τους δύο.<sup>(23)</sup>

Από τα παραπάνω αναδεικνύεται η θεμελιώδης σημασία της αρχής της επαλληλίας στην κβαντική θεωρία. Κατασκευάζοντας την κυματοσυνάρτηση  $\Phi = a_1\Psi_1 + a_2\Psi_2$ , καταλήξαμε στην αναγκαιότητα ύπαρξης ασύμβατων μεγεθών. Είναι απαραίτητο να τονίσουμε ότι η  $\Phi$  είναι εξίσου έγκυρη κυματοσυνάρτηση με τις  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$ . Η κάθε μια από τις τρεις αντιστοιχεί και σε μια διαφορετική προετοιμασία της συλλογής. Η  $\Phi$  δεν επιδέχεται ερμηνεία άγνοιας: αν η συλλογή βρίσκεται στη  $\Phi$ , δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι είτε βρίσκεται στην  $\Psi_1$  είτε στην  $\Psi_2$ , και ότι απλώς αγνοούμε σε ποια από τις δύο. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι οποιαδήποτε κυματοσυνάρτηση μπορεί να γραφεί ως επαλληλία δύο ή περισσότερων άλλων κυματοσυναρτήσεων. Η δομή της κβαντικής θεωρίας είναι τέτοια που θεωρεί όλες τις κυματοσυναρτήσεις ισάξιες ως προετοιμασίες συλλογών.

### 3.4 Το αξίωμα προβολής

Ας συζητήσουμε τώρα τη διαδικασία μέτρησης. Αναφερόμαστε σε μετρήσεις οι οποίες δεν καταστρέφουν το σύστημα.<sup>(24)</sup> Δεχόμαστε ότι, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, το μετρούμενο σύστημα αλληλεπιδρά με τη μετρητική συσκευή, η οποία είναι ένα δεύτερο σύστημα. Στο τέλος της διαδικασίας, η αλληλεπίδραση σταματά, και η μετρητική συσκευή δείχνει μια τιμή (π.χ. μέσω της θέσης ενός δείκτη η οποία αντιστοιχεί σε πραγματικό αριθμό), την οποία καταγράφουμε. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, το σύστημα ενδέχεται να αλλάξει την κατάστασή του. Συγκεκριμένα, εάν η αρχική

<sup>(22)</sup>Θέτουμε  $Q(x) = [\hat{P}_\Psi, \hat{P}_\Phi]\Psi$  και υπολογίζουμε  $(Q, Q) = |(\Phi, \Psi)|^2 - |(\Psi, \Phi)|^2 \geq 0$  [προκύπτει από την ανισότητα Cauchy-Schwarz (14) αφού  $0 \leq |(\Phi, \Psi)| \leq 1$ ], το οποίο μηδενίζεται μόνο αν  $|(\Phi, \Psi)| = 0$  ή  $1$ , δηλ. μόνο αν οι  $\Psi$  και  $\Phi$  είναι ορθογώνιες ή ταυτίζονται. (Πρόβλημα 7.)

<sup>(23)</sup>Πρόβλημα 8.

<sup>(24)</sup>Υπάρχουν και μετρήσεις που καταστρέφουν το μετρούμενο σύστημα. Π.χ., η μέτρηση της ενέργειας ενός φωτονίου γίνεται μέσω της απορρόφησής του, οπότε και το φωτόνιο καταστρέφεται.

κυματοσυνάρτηση αντιστοιχεί σε μέγεθος ασύμβατο με το μετρούμενο μέγεθος, τότε η κατάσταση θα αλλάξει σίγουρα: η διαδικασία της μέτρησης επηρεάζει την κατάσταση του συστήματος.

Ποια η κατάσταση του συστήματος αμέσως μετά τη μέτρηση; Η χβαντική θεωρία απαντά με το αξίωμα προβολής (*projection postulate*): Δύο αλληπάλληλες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους θα δώσουν την ίδια τιμή. Με βάση όσα είπαμε ως τώρα, αυτό σημαίνει ότι μια μέτρηση φέρνει το σύστημα σε κυματοσυνάρτηση η οποία αντιστοιχεί σε ιδιοκατάσταση του μετρημένου μεγέθους, τέτοια ώστε να της αντιστοιχεί η μετρημένη τιμή ως ιδιοτιμή. Με άλλα λόγια, έστω μέγεθος  $\hat{A}$  με ζεύγη ιδιοκατάστασης-ιδιοτιμής  $\{\Psi_1, a_1\}, \{\Psi_2, a_2\}, \dots$ . Έστω ότι, δεδομένης μιας προετοιμασίας της συλλογής στην κατάσταση  $\Phi$ , πραγματοποιούμε μια μέτρηση του  $\hat{A}$ . Επαναλαμβάνοντας πολλές φορές, σε κάθε σύστημα της συλλογής, βρίσκουμε διαφορετικές τιμές  $\{a_i\}$ . Επιλέγοντας εκείνα τα συστήματα για τα οποία μετρήσαμε μια συγκεκριμένη τιμή, π.χ.  $a_1$ , δημιουργούμε μια νέα συλλογή. Αν επικεντρωθούμε στη νέα συλλογή και κάνουμε αμέσως (πριν προλάβει να εξελιχθεί χρονικά η κατάσταση) δεύτερο σετ μετρήσεων του μεγέθους  $\hat{A}$ , τότε, σύμφωνα με το αξίωμα προβολής, θα ξαναβρούμε σε όλες τις μετρήσεις του δεύτερου σετ την τιμή  $a_1$  χωρίς διασπορά. Σύμφωνα με το προηγούμενο εδάφιο, η απουσία διασποράς συνεπάγεται ότι η νέα συλλογή, ήδη πριν τη δεύτερη μέτρηση, βρίσκεται σε ιδιοκατάσταση του  $\hat{A}$  με ιδιοτιμή  $a_1$ , δηλαδή θα αντιπροσωπεύεται από την κατάσταση  $\Psi_1$ . Βλέπουμε ότι η μέτρηση μπορεί να ερμηνευθεί και ως διαδικασία φιλτραρίσματος της κατάστασης  $\Psi_1$ . Η διαδικασία ονομάζεται μερικές φορές και *αναγωγή (reduction)* ή *κατάρρευση (collapse)* της κατάστασης  $\Phi$  στην  $\Psi_1$ . Η αναγωγή είναι χρονικά ασυνεχής μεταβολή της κυματοσυνάρτησης, σε αντίθεση με τη χρονική εξέλιξη που είναι συνεχής μεταβολή (βλ. κεφ. 5).

Το αξίωμα προβολής συνάδει με την απαίτηση κάθε μέτρηση να δίνει ιδιοτιμή του τελεστή που αντιστοιχεί στο μετρούμενο μέγεθος (βλ. εδάφιο 3.1 *Ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές*). Ας δούμε πάλι το παράδειγμα της προηγούμενης παραγράφου, δεχόμενοι το αξίωμα προβολής, αλλά χωρίς κατ' αρχήν να απαιτήσουμε κάθε μέτρηση να δίνει ιδιοτιμή. Κάνουμε σειρά μετρήσεων του  $\hat{A}$  και επιλέγουμε ως νέα συλλογή το υποσύνολο των συστημάτων που έχουν δώσει  $a$  ως μετρημένη τιμή. Σύμφωνα με το αξίωμα προβολής, εάν κάναμε αμέσως δεύτερη μέτρηση στη νέα συλλογή, θα βρίσκαμε και πάλι μόνον  $a$  χωρίς διασπορά. Η απουσία διασποράς σημαίνει ότι το  $a$  είναι ιδιοτιμή του  $\hat{A}$ , δηλαδή, η μέτρηση έδωσε αναγκαστικά ιδιοτιμή ως αποτέλεσμα.

Έστω ότι κάνουμε μέτρηση του μεγέθους  $\hat{A}$  σε ένα σύστημα προετοιμασμένο στην κατάσταση  $\Phi$ . Η πιθανότητα να μεταβεί το σύστημα στην ιδιοκατάσταση  $\Psi_{\hat{A},i}$  κατά τη μέτρηση (δηλαδή η σχετική συχνότητα εμφάνισης της ιδιοτιμής  $a_i$  στις μετρήσεις εντός

της συλλογής), δίνεται μέσω της μέσης τιμής του προβολικού τελεστή της  $\Psi_{\hat{A},i}$ :

$$\begin{aligned}
 \langle \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \rangle_{\Phi} &= (\Phi, \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \Phi) \\
 &= (\Phi, (\Psi_{\hat{A},i}, \Phi) \Psi_{\hat{A},i}) \\
 &= (\Psi_{\hat{A},i}, \Phi)(\Phi, \Psi_{\hat{A},i}) \\
 &= |(\Psi_{\hat{A},i}, \Phi)|^2
 \end{aligned} \tag{27}$$

Εδώ χρησιμοποιήσαμε τον ορισμό (22) και την ιδιότητα του εσωτερικού γινομένου  $(\Phi, \Psi_{\hat{A},i}) = (\Psi_{\hat{A},i}, \Phi)^*$ . Η ποσότητα (27) ονομάζεται *πιθανότητα μετάβασης*, ενώ η μιγαδική ποσότητα  $(\Psi_{\hat{A},i}, \Phi)$ , δηλαδή η προβολή της  $\Phi$  στην  $\Psi_{\hat{A},i}$ , ονομάζεται *πλάτος μετάβασης*. Προφανώς, το άθροισμα των πιθανοτήτων μετάβασης σε όλες τις (ορθογώνιες μεταξύ τους) ιδιοκαταστάσεις του μετρούμενου μεγέθους πρέπει να δίνει μονάδα:

$$\sum_i \langle \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \rangle_{\Phi} = \sum_i |(\Psi_{\hat{A},i}, \Phi)|^2 = 1. \tag{28}$$

Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζεται μαθηματικά από το φασματικό θεώρημα (spectral theorem) της συναρτησιακής ανάλυσης.

Η παραπάνω παραδοχή πως η πιθανότητα μετάβασης δίνεται από την έκφραση  $\langle \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \rangle_{\Phi}$  δικαιολογείται ως εξής. Η μέτρηση του προβολικού τελεστή  $\hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}}$  δίνει την τιμή 1, εάν μετρηθεί τιμή  $a_i$ , οπότε και προκαλείται μετάβαση στην ιδιοκατάσταση  $\Psi_{\hat{A},i}$ , ή την τιμή 0, εάν μετρηθεί οποιαδήποτε άλλη τιμή, οπότε προκαλείται μετάβαση σε κατάσταση ορθογώνια στην  $\Psi_{\hat{A},i}$  (θυμηθείτε ότι οι ιδιοκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές ερμιτιανών τελεστών είναι ορθογώνιες). Η πιθανότητα  $P_i$  μετάβασης της  $\Phi$  στην  $\Psi_{\hat{A},i}$  και, ισοδύναμα, μέτρησης της τιμής  $a_i$ , ισούται με το κλάσμα

$$\begin{aligned}
 P_i &= \frac{\text{Αριθμός των μετρήσεων του } \hat{A} \text{ που έδωσαν } a_i}{\text{Συνολικός αριθμός των μετρήσεων}} \\
 &= \frac{\text{Αριθμός των μετρήσεων του } \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \text{ που έδωσαν } 1}{\text{Συνολικός αριθμός των μετρήσεων}}
 \end{aligned} \tag{29}$$

$$= \frac{1 \cdot (\text{Αρ. μετρήσεων του } \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \text{ που έδωσαν } 1) + 0 \cdot (\text{Αρ. μετρήσεων του } \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \text{ που έδωσαν } 0)}{\text{Συνολικός αριθμός των μετρήσεων}}$$

Η τελευταία έκφραση δεν είναι άλλη από τη μέση τιμή  $\langle \hat{P}_{\Psi_{\hat{A},i}} \rangle_{\Phi}$ .

Τέλος, ας δούμε το αξίωμα προβολής στην περίπτωση *εκφυλισμού*, δηλαδή δύο ή περισσότερων γραμμικά ανεξάρτητων ιδιοσυναρτήσεων του μετρούμενου μεγέθους  $\hat{A}$ ,  $\Psi_1, \Psi_2, \dots$ , οι οποίες τυγχάνει να αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή  $a$ . Ας υποθέσουμε ότι μετράμε το μέγεθος  $\hat{A}$  και βρίσκουμε  $a$ . Αυτή η πληροφορία δεν επαρκεί για να ξέρουμε σε ποια από τις  $\Psi_1, \Psi_2, \dots$  (ή σε ποιον γραμμικό συνδυασμό τους) βρίσκεται το

σύστημα. Τότε έχουμε ατελές φιλτράρισμα, η συλλογή που προκύπτει δεν αντιστοιχεί σε κυματοσυνάρτηση, και η μέτρηση πρέπει να συνοδευτεί από μέτρηση άλλου μεγέθους  $\hat{B}$ , συμβατού με το  $\hat{A}$ , ώστε η συλλογή να εκλεπτυνθεί περαιτέρω και να αντιστοιχεί τελικά σε κυματοσυνάρτηση. Η μέτρηση του  $\hat{B}$  γίνεται στα ίδια συστήματα στα οποία μετρήθηκε το  $\hat{A}$ , ώστε να εφαρμοστεί εκ νέου το αξίωμα προβολής. Εντός λοιπόν αυτού του υποσυνόλου των μετρημένων συστημάτων που ήδη έδωσαν  $a$ , η μέτρηση του  $\hat{B}$  θα δώσει αποτελέσματα  $\beta_1, \beta_2, \dots$ . Επιλέγοντας μόνο εκείνα τα συστήματα που έδωσαν π.χ.  $\beta_1$ , αποκτούμε πλέον μια συλλογή η οποία δεν έχει διασπορά ούτε ως προς το  $\hat{A}$  ούτε ως προς το  $\hat{B}$ .

Το δεύτερο μέγεθος  $\hat{B}$  πρέπει να είναι συμβατό με το  $\hat{A}$  ώστε η μέτρηση να μην επηρεάσει τη μετρημένη ιδιοτιμή του  $\hat{A}$ . Εάν το  $\hat{B}$  ήταν ασύμβατο με το  $\hat{A}$ , τότε μια εκ νέου μέτρηση του  $\hat{A}$  μετά από αυτή του  $\hat{B}$  θα έδινε διασπορά. Άρα η μέτρηση του  $\hat{B}$  θα μας απομάχρυνε από τις ιδιοσυναρτήσεις του  $\hat{A}$ . Αν όμως το  $\hat{B}$  είναι συμβατό με το  $\hat{A}$ , δηλ.  $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$ , η μέτρηση αφήνει τη συλλογή στο προηγούμενο σύνολο (στον υπόχωρο γραμμικών συνδυασμών) των ιδιοσυναρτήσεων του  $\hat{A}$  με την ίδια ιδιοτιμή  $a$ . Αυτό το ξέρουμε διότι, αν η  $\Psi_\alpha$  ανήκει στον υποχωρο, δηλ.  $\hat{A}\Psi_\alpha = a\Psi_\alpha$ , τότε η κυματοσυνάρτηση  $\hat{B}\Psi_\alpha$  είναι επίσης ιδιοσυνάρτηση του  $\hat{A}$  με ιδιοτιμή  $a$ :  $\hat{A}(\hat{B}\Psi_\alpha) = \hat{B}\hat{A}\Psi_\alpha = \hat{B}a\Psi_\alpha = a(\hat{B}\Psi_\alpha)$ , άρα ανήκει και αυτή στον υπόχωρο (ο υπόχωρος περιλαμβάνει όλες τις ιδιοσυναρτήσεις του  $\hat{A}$  με την ίδια ιδιοτιμή  $a$ ). Επομένως, το  $\hat{B}$  προσφέρει την επιθυμητή εκλέπτυνση μεταξύ αυτών, αρκεί να μην είναι και αυτό εκφυλισμένο στον υπόχωρο.

Εάν υπάρχουν και εκφυλισμένες ιδιοτιμές (έστω  $\beta$ ) του μεγέθους  $\hat{B}$ , τότε πρέπει να γίνει και τρίτη μέτρηση κάποιου κατάλληλου  $\hat{C}$ , συμβατού με τα  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$ , κ.ο.κ., έως ότου αρθθούν όλοι οι εκφυλισμοί. Μια οικογένεια μεγεθών που απαιτείται κατ' ελάχιστο να μετρηθούν ώστε να προκύψει κατάλληλη συλλογή που να αντιστοιχεί σε κυματοσυνάρτηση ονομάζεται *πλήρες σύστημα μετατιθέμενων μεγεθών* (*complete system of commuting observables*). Ένα παράδειγμα είναι οι ενεργειακές στάθμες του ατόμου του Υδρογόνου: η ενέργεια καθορίζεται από τον κύριο κβαντικό αριθμό  $n$ , ενώ σε ιδιοτιμή ενέργειας  $E_n$  αντιστοιχούν περισσότερες καταστάσεις που διακρίνονται με βάση τη στροφορμή. Τα μετατιθέμενα μεγέθη που αποτελούν το πλήρες σύστημα σε αυτό το πρόβλημα είναι η ενέργεια, το μέτρο της στροφορμής, η συνιστώσα  $z$  της στροφορμής, και η συνιστώσα  $z$  της ιδιοστροφορμής (σπιν) του ηλεκτρονίου.

Τα παραπάνω εκφράζονται μαθηματικά από αντίστοιχο θεώρημα, το οποίο θα δούμε στο εδάφιο 4.4.

### 3.5 Αρχή της απροσδιοριστίας

Για μεγέθη ασύμβατα,  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$ , είπαμε ότι, προετοιμάζοντας τη συλλογή σε ιδιοκατάσταση του ενός, παρατηρούμε διασπορά στη μέτρηση του άλλου (για τις καταστάσεις που δεν είναι κοινές ιδιοκαταστάσεις). Ας υποθέσουμε ότι προετοιμάζουμε τη συλλογή σε μια κατάσταση,  $\Psi$ , η οποία δεν είναι κατ' ανάγκη ιδιοκατάσταση κανενός από τα δύο μεγέθη. Τότε, αποδεικνύεται η αρχή της απροσδιοριστίας (*indeterminacy principle*) ή αλλιώς αρχή της αβεβαιότητας (*uncertainty principle*):

$$(\Delta A)_\Psi (\Delta B)_\Psi \geq \frac{1}{2} |\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle_\Psi| \quad (30)$$

Συντομεύουμε την απόδειξη καταφεύγοντας ξανά στο τέχνασμα να εξετάσουμε τα μεγέθη  $\hat{A}' = \hat{A} - \langle \hat{A} \rangle_\Psi$  και  $\hat{B}' = \hat{B} - \langle \hat{B} \rangle_\Psi$ , τα οποία έχουν την ίδια τυπική απόκλιση με τα  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$ , αντίστοιχα, αλλά μηδενική μέση τιμή. Για αυτά ισχύει, επομένως,  $(\Delta A)_\Psi^2 = (\Delta A')_\Psi^2 = \langle \hat{A}'^2 \rangle_\Psi$ , και αντίστοιχα για το  $\hat{B}'$ . Επίσης, ισχύει ότι  $[\hat{A}', \hat{B}'] = [\hat{A}, \hat{B}] - [\hat{A}, \langle \hat{B} \rangle_\Psi] - [\langle \hat{A} \rangle_\Psi, \hat{B}] + [\langle \hat{A} \rangle_\Psi, \langle \hat{B} \rangle_\Psi] = [\hat{A}, \hat{B}] - 0 - 0 + 0 = [\hat{A}, \hat{B}]$ , διότι οι μεταθέτες τελεστών με αριθμούς (ή αριθμών μεταξύ τους) μηδενίζονται.

Η απόδειξη προχωρεί σε δύο βήματα. Πρώτον, εκμεταλλευόμαστε την ανισότητα Cauchy-Schwarz (14):

$$\begin{aligned} (\Delta A)_\Psi^2 (\Delta B)_\Psi^2 &= \langle \hat{A}'^2 \rangle_\Psi \langle \hat{B}'^2 \rangle_\Psi \\ &= (\Psi, \hat{A}'^2 \Psi) (\Psi, \hat{B}'^2 \Psi) \\ &= (\hat{A}' \Psi, \hat{A}' \Psi) (\hat{B}' \Psi, \hat{B}' \Psi) \quad [\text{από ιδιότητα εξ. (16)}] \\ &\geq |(\hat{A}' \Psi, \hat{B}' \Psi)|^2 \quad (\text{από ανισότητα Cauchy-Schwarz}) \end{aligned} \quad (31)$$

Δεύτερον, εκμεταλλευόμαστε την ακόλουθη ιδιότητα οποιουδήποτε μιγαδικού αριθμού  $z$ :  $|z|^2 = |\text{Re}z|^2 + |\text{Im}z|^2 \geq |\text{Im}z|^2$ , δηλ.  $|z| \geq |\text{Im}z|$ . Θέτοντας  $z = (\hat{A}' \Psi, \hat{B}' \Psi)$ , έχουμε

$$\begin{aligned} |(\hat{A}' \Psi, \hat{B}' \Psi)| \geq |\text{Im}z| &= \frac{1}{2} |z - z^*| \\ &= \frac{1}{2} |(\hat{A}' \Psi, \hat{B}' \Psi) - (\hat{B}' \Psi, \hat{A}' \Psi)| \\ &= \frac{1}{2} |(\Psi, \hat{A}' \hat{B}' \Psi) - (\Psi, \hat{B}' \hat{A}' \Psi)| \quad [\text{από ιδιότητα εξ. (16)}] \\ &= \frac{1}{2} |(\Psi, [\hat{A}' \hat{B}' - \hat{B}' \hat{A}'] \Psi)| \quad (\text{γραμμικότητα εσωτ. γινομένου}) \\ &\equiv \frac{1}{2} |(\Psi, [\hat{A}', \hat{B}'] \Psi)| \\ &\equiv \frac{1}{2} |\langle [\hat{A}', \hat{B}'] \rangle_\Psi| \end{aligned} \quad (32)$$

Από τις (31) και (32) προκύπτει  $(\Delta A)_\Psi^2 (\Delta B)_\Psi^2 \geq \left( \frac{1}{2} |[\hat{A}', \hat{B}']_\Psi| \right)^2$ , που είναι ισοδύναμη με την (30).

Η αρχή της απροσδιοριστίας θέτει, λοιπόν, ένα ελάχιστο στη διασπορά δύο μεγεθών, μετρημένων σε συστήματα της ίδιας συλλογής (δηλ. σε συστήματα με πανομοιότυπη προετοιμασία).<sup>(25)</sup> Θα συζητήσουμε την ερμηνεία της αρχής στο παράδειγμα του ζεύγους μεγεθών ορμής-θέσης στον χώρο των καταστάσεων σωματιδίου σε μια διάσταση ( $x \in \mathbb{R}$ ). Για αυτά είδαμε ότι ισχύει  $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ , ανεξάρτητα της κυματοσυνάρτησης στην οποία που δρουν. Επομένως,  $|[\hat{x}, \hat{p}]| = |i\hbar(\Psi, \Psi)| = \hbar$ , ανεξάρτητα της  $\Psi$  (αρκεί  $\|\Psi\| = 1$ ). Λαμβάνουμε:

$$(\Delta x)(\Delta p) \geq \frac{1}{2}\hbar. \quad (33)$$

Αυτή η σχέση, διατυπωμένη από το Heisenberg, είναι ίσως η πιο διάσημη περίπτωση της αρχής της απροσδιοριστίας. Ποια είναι η ερμηνεία της; Ξεκινάμε με μια συλλογή, που αναπαριστάται από κάποια κυματοσυνάρτηση  $\Psi$ . Μετράμε σε κάποια συστήματα της συλλογής τη θέση, σε κάποια άλλα συστήματα της συλλογής την ορμή (αρκετα συστήματα, και στις δύο περιπτώσεις, ώστε να έχουμε επαρκείς μετρήσεις για στατιστική). Τότε, η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων στη θέση,  $(\Delta x)$ , και στην ορμή,  $(\Delta p)$ , ικανοποιούν την (33): το γινόμενο  $(\Delta x)(\Delta p)$  έχει κάτω φράγμα. Εναλλακτικά, αλλά στο ίδιο πνεύμα, από μια αρχική συλλογή δημιουργούμε με φιλτράρισμα μια υποσυλλογή με τυπική απόκλιση στη θέση  $(\Delta x)$ . Μετράμε σε αυτή την υποσυλλογή την ορμή και βρίσκουμε την τυπική απόκλιση  $(\Delta p)$ . Το γινόμενο  $(\Delta x)(\Delta p)$  έχει κάτω φράγμα.

Ενδέχεται το γινόμενο  $(\Delta x)(\Delta p)$  να είναι μεγαλύτερο από  $\frac{1}{2}\hbar$ . Αυτό εξαρτάται από τη συλλογή  $\Psi$ . Δεν υπάρχει, όμως, συλλογή, η οποία να δίνει γινόμενο μικρότερο από  $\frac{1}{2}\hbar$ .

Συνεπεία της ανισότητας (33), όσο πιο εντοπισμένη είναι η κατανομή στο ένα από τα δύο μεγέθη (θέση ή ορμή), δηλαδή, όσο πιο κοντά βρίσκεται η  $\Psi$  σε ιδιοκατάσταση ενός από τα δύο, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά στο άλλο μέγεθος (ασυμπτωτικά, αν η διασπορά του ενός γίνει απειροστά μικρή, τότε η διασπορά του άλλου απειρίζεται). Στα δύο αυτά μεγέθη δεν αντιστοιχούν ιδιοκαταστάσεις.<sup>(26)</sup> Επομένως, δεν είναι δυνατόν να μηδενιστεί κανένα από τα  $(\Delta x)$  και  $(\Delta p)$ . Ωστόσο, στη γενική περίπτωση, η σχέση απροσδιοριστίας (30) ισχύει και για μεγέθη που έχουν ιδιοκαταστάσεις. Εάν η  $\Psi$  τύχει να είναι ιδιοκατάσταση π.χ. του  $\hat{A}$ , τότε το γινόμενο  $(\Delta A)(\Delta B) = 0$  (και, υποχρεωτικά, το δεξιά μέλος της (30) επίσης μηδενίζεται).<sup>(27)</sup> Εάν, όμως, η  $\Psi$  δεν είναι ταυτόχρονα

<sup>(25)</sup> Πρέπει να τονίσουμε ότι δεν αναφερόμαστε σε διαδοχική μέτρηση των δύο μεγεθών στο ίδιο σύστημα: π.χ., δεν αναφερόμαστε σε μέτρηση πρώτα της θέσης και στη συνέχεια την ορμής του ίδιου ηλεκτρονίου. Αντίθετα, προετοιμάζουμε  $N$  ηλεκτρόνια με τον ίδιο τρόπο, και σε ένα υποσύνολο μετράμε τη θέση, ενώ σε άλλο υποσύνολο την ορμή.

<sup>(26)</sup> Βλ. συζήτηση για τα μεγέθη με συνεχές φάσμα τιμών και πρόβλημα 9.

<sup>(27)</sup> Πρόβλημα 13.

ιδιοκατάσταση και του  $\hat{B}$ , τότε το  $(\Delta B)$  θα είναι μη μηδενικό.

### 3.6 Είναι τα γινόμενα και οι μεταθέτες ερμιτιανών τελεστών ερμιτιανοί τελεστές;

Το γινόμενο ερμιτιανών τελεστών  $\hat{A}\hat{B}$  είναι ερμιτιανός τελεστής, αν και μόνο αν οι  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  μετατίθενται. Για να αποδειχθεί αυτό, έστω ότι το γινόμενο  $\hat{A}\hat{B}$  είναι ερμιτιανός τελεστής. Η δράση του μεταθέτη σε τυχαία κυματοσυνάρτηση  $\Phi$  δίνει:

$$\begin{aligned}
\|[\hat{A}, \hat{B}]\Phi\|^2 &= ([\hat{A}, \hat{B}]\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) \quad (\text{από ορισμό νόρμας}) \\
&= ([\hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}]\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) \\
&= (\hat{A}\hat{B}\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) - (\hat{B}\hat{A}\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) \quad (\text{από ιδιότητα εξ. 13}) \\
&= (\hat{A}\hat{B}\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) - (\hat{A}\Phi, \hat{B}[\hat{A}, \hat{B}]\Phi) \quad (\text{ο } \hat{B} \text{ είναι ερμιτιανός, βλ. εξ. 16}) \\
&= (\hat{A}\hat{B}\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) - (\Phi, \hat{A}\hat{B}[\hat{A}, \hat{B}]\Phi) \quad (\text{ο } \hat{A} \text{ είναι ερμιτιανός, βλ. εξ. 16}) \\
&= (\hat{A}\hat{B}\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) - (\hat{A}\hat{B}\Phi, [\hat{A}, \hat{B}]\Phi) \quad (\text{από υπόθεση ότι ο } \hat{A}\hat{B} \text{ είναι ερμιτιανός}) \\
&= 0
\end{aligned}$$

Δηλαδή, αν ο  $\hat{A}\hat{B}$  είναι ερμιτιανός, τότε  $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$ . Αντίστροφα, αν  $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$ , τότε, για οποιαδήποτε  $\Psi$ , έχουμε

$$\begin{aligned}
(\Psi, [\hat{A}, \hat{B}]\Psi) &= (\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi) - (\Psi, \hat{B}\hat{A}\Psi) \\
&= (\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi) - (\hat{B}\Psi, \hat{A}\Psi) \quad (\text{ο } \hat{B} \text{ είναι ερμιτιανός}) \\
&= (\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi) - (\hat{A}\hat{B}\Psi, \Psi) \quad (\text{ο } \hat{A} \text{ είναι ερμιτιανός}) \\
&= (\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi) - (\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi)^* \\
&\equiv 2i \operatorname{Im}(\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi) \quad (\text{διότι } z - z^* = 2i \operatorname{Im}z, \forall z \in \mathbb{C}). \quad (34)
\end{aligned}$$

Αν  $[\hat{A}, \hat{B}] = 0$ , τότε η έκφραση μηδενίζεται λόγω του αριστερού μέλους, επομένως το εσωτερικό γινόμενο  $(\Psi, \hat{A}\hat{B}\Psi)$  είναι πραγματικός αριθμός, που εξ' ορισμού σημαίνει ότι το γινόμενο  $\hat{A}\hat{B}$  είναι ερμιτιανός τελεστής.

Από την εξίσωση (34) προκύπτει αμέσως και το εξής συμπέρασμα, το οποίο θα χρειαστούμε αργότερα: για ερμιτιανούς τελεστές  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$ , η ποσότητα  $(\Psi, i[\hat{A}, \hat{B}]\Psi)$  είναι πάντα πραγματικός αριθμός, επομένως ο τελεστής  $i[\hat{A}, \hat{B}]$  είναι ερμιτιανός.

### 3.7 Παράρτημα: Μεγέθη με συνεχές φάσμα τιμών

Έχουν όλοι οι ερμιτιανοί τελεστές ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές; Όχι: υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις. Για παράδειγμα, ο τελεστής θέσης  $\hat{x}$  και ο τελεστής ορμής  $\hat{p}$  (στο



χώρο των κυματοσυναρτήσεων ορισμένων στο  $\mathbb{R}$ )<sup>(28)</sup> δεν έχουν ιδιοκαταστάσεις.<sup>(29)</sup> Η διαπίστωση αυτή έχει την ακόλουθη φυσική ερμηνεία. Μεγέθη όπως η θέση, με συνεχή, αντί για διακριτή, κατανομή τιμών, δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν με απόλυτη ακρίβεια. Οποιαδήποτε μετρητική συσκευή, όσο ακριβής και να είναι, θα δίνει τιμές  $a$  με κάποια διασπορά εντός ενός διαστήματος  $[a - \delta a, a + \delta a]$ , με το  $\delta a$  να γίνεται αυθαίρετα μικρό, αλλά ποτέ ακριβώς μηδέν. Όμοια, οποιαδήποτε προετοιμασία ή φιλτράρισμα μιας συλλογής θα δίνει μια αντίστοιχη διασπορά, έστω και αν αυτή γίνεται αυθαίρετα μικρή. Αυτό αντανακλάται στον αντίστοιχο ερμιτιανό τελεστή  $\hat{A}$ , ο οποίος δεν έχει ιδιοσυναρτήσεις και ιδιοτιμές. Μπορεί, όμως, να κατασκευάσει κανείς κυματοσυναρτήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε αυθαίρετα μικρή απόκλιση γύρω από μια επιθυμητή τιμή  $a$ , και οι οποίες επέχουν, υπό αυτό το πρίσμα, ρόλο των ιδιοκαταστάσεων με ιδιοτιμή  $a$ . Ένα παράδειγμα για τον τελεστή θέσης είναι η κυματοσυνάρτηση

$$\Phi_{x_0, \varepsilon}(x) = [\delta_\varepsilon(x - x_0)]^{1/2} \equiv \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon^2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\varepsilon^2}} \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{2\pi\varepsilon^2} \right]^{1/4} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4\varepsilon^2}}, \quad (35)$$

η οποία αντιστοιχεί σε γκαουσιανή κατανομή πιθανότητας  $|\Phi(x)|^2$  με μέση τιμή  $x_0$  και τυπική απόκλιση  $\varepsilon$  (προφανώς  $\varepsilon > 0$ ). Παίρνοντας  $\varepsilon$  ολοένα μικρότερο, αποκτούμε μια ολοένα πιο εντοπισμένη κυματοσυνάρτηση και μια ολοένα καλύτερη προσέγγιση σε κατάσταση με απουσία διασποράς. Δεν μπορούμε, ωστόσο, να πάρουμε  $\varepsilon = 0$ . Όμοια προσέγγιση αποκτούμε με την κυματοσυνάρτηση

$$\Phi_{x_0, \varepsilon}(x) = \begin{cases} 1/\sqrt{\varepsilon}, & \text{αν } x \in [x_0 - \frac{1}{2}\varepsilon, x_0 + \frac{1}{2}\varepsilon], \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (36)$$

καθώς και με άλλες επαρκώς εντοπισμένες κυματοσυναρτήσεις με ελεγχόμενη διασπορά.<sup>(30)</sup>

Με τη βοήθεια του τελεστή θέσης, μπορούμε να κατασκευάσουμε ερμιτιανούς τελεστές που να έχουν ιδιοσυναρτήσεις και ιδιοτιμές και να έχουν, στην πράξη, την ίδια φυσική σημασία με τον τελεστή θέσης. Ανάλογη δυνατότητα υπάρχει και με όλους τους τελεστές που αντιστοιχούν σε μεγέθη συνεχούς φάσματος τιμών.

Θα δείξουμε εδώ τη γενική ιδέα. Ας ονομάσουμε  $\hat{P}_{x_0, \varepsilon}$  τον προβολικό τελεστή στην κυματοσυνάρτηση  $\Phi_{x_0, \varepsilon}$  της εξ. (36). Για κάθε  $x_0$  έχουμε έναν τέτοιο τελεστή. Η δράση

<sup>(28)</sup>Θα δούμε και παραδείγματα, όπου ο τελεστής ορμής έχει ιδιοσυναρτήσεις, π.χ. για σωματίδιο περιορισμένο σε δακτύλιο με περιοδικές συνοριακές συνθήκες.

<sup>(29)</sup>Πρόβλημα 9.

<sup>(30)</sup>Πρόβλημα 14 κεφ. 4.

του σε κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  είναι

$$\begin{aligned}
\hat{P}_{x_0,\varepsilon}\Psi(x) &= (\Phi_{x_0,\varepsilon}, \Psi) \Phi_{x_0,\varepsilon}(x) \\
&= \left[ \int_{\mathbb{R}} \Phi_{x_0,\varepsilon}(x') \Psi(x') dx' \right] \Phi_{x_0,\varepsilon}(x) \\
&= \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left[ \int_{x_0-\varepsilon/2}^{x_0+\varepsilon/2} \Psi(x') dx' \right] \Phi_{x_0,\varepsilon}(x) \\
&\approx \sqrt{\varepsilon} \Psi(x_0) \Phi_{x_0,\varepsilon}(x) \\
&= \begin{cases} \Psi(x_0), & \text{αν } x \in [x_0 - \varepsilon/2, x_0 + \varepsilon/2]. \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases} \quad (37)
\end{aligned}$$

Η προσέγγιση του προτελευταίου βήματος γίνεται ολοένα και ακριβέστερη, όσο μικρότερο λαμβάνουμε το  $\varepsilon$  σε σχέση με το χαρακτηριστικό μήκος μεταβολής της  $\Psi(x)$ . Θεωρούμε τώρα μια διαμέριση του χώρου (της ευθείας  $x$  από το  $-\infty$  ως το  $+\infty$ ) σε αλληλάλληλα εφαπτόμενα διαστήματα μήκους  $\varepsilon$  και κέντρου  $x_i$ ,  $i \in \mathbb{Z}$ . Σε αυτά τα διαστήματα θεωρούμε αντίστοιχες κυματοσυναρτήσεις  $\Phi_{x_i,\varepsilon}$ , οι οποίες ορίζονται ακριβώς όπως η (36), με το  $x_i$  στη θέση του  $x_0$ . Επίσης, θεωρούμε τους αντίστοιχους προβολικούς τελεστές  $\hat{P}_{x_i,\varepsilon}$ . Ορίζουμε στη συνέχεια τον τελεστή  $\hat{X}_{i,\varepsilon} = x_i \hat{P}_{x_i,\varepsilon}$ , ο οποίος διαφέρει από τον προβολικό τελεστή μόνο κατά το ότι δίνει τιμή  $x_i$  εκεί όπου ο προβολικός τελεστής δίνει τιμή 1. Εφόσον ο  $\hat{X}_{i,\varepsilon}$  προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό ερμιτιανού τελεστή με πραγματικό αριθμό, είναι επίσης ερμιτιανός, με δύο ιδιοτιμές:  $x_i$  και 0.

Από την (37) λαμβάνουμε ότι, για  $\varepsilon \ll 1$ , δηλαδή στο όριο πυκνής διαμέρισης,  $\hat{X}_{i,\varepsilon}\Psi(x) = x_i \Psi(x_i)$ , για  $x \in [x_0 - \varepsilon/2, x_0 + \varepsilon/2]$ , και 0, διαφορετικά. Το τελευταίο βήμα του συλλογισμού έγκειται στο να πάρουμε το άθροισμα των τελεστών  $\hat{X}_{i,\varepsilon}$ , ώστε να καλύπτεται όλος ο χώρος (όλη η ευθεία  $x$ ) λόγω της διαμέρισης: ορίζουμε τον τελεστή

$$\hat{X} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \hat{X}_i, \quad (38)$$

ο οποίος είναι ερμιτιανός, ως άθροισμα ερμιτιανών τελεστών. Προκύπτει τότε

$$\hat{X}\Psi(x) = x_i \Psi(x_i) \approx x \Psi(x) \quad (39)$$

με  $x_i$  το κέντρο του διαστήματος όπου βρίσκεται το  $x$ . Η τελευταία προσέγγιση γίνεται ολοένα ακριβέστερη για πυκνότερες διαμερίσεις ( $\varepsilon \rightarrow 0$ ). Σε αυτό το όριο, επομένως, ο τελεστής  $\hat{X}$  τείνει στον τελεστή θέσης  $\hat{x}$ . Από την άλλη, ο  $\hat{X}$  είναι διακριτό (αν και άπειρο) άθροισμα ερμιτιανών τελεστών με καλά ορισμένες ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές, επομένως έχει άπειρες αλλά διακριτές ιδιοκαταστάσεις (τις  $\Phi_{x_i,\varepsilon}$ ) και ιδιοτιμές (τις  $x_i$ ).

Με αυτό τον τρόπο παρακάμπτουμε το πρόβλημα της απουσίας ιδιοκαταστάσεων και ιδιοτιμών του τελεστή θέσης.

Η ίδια φιλοσοφία που οδήγησε στον  $\hat{X}$ , δηλαδή η διαμέριση του συνεχούς φάσματος τιμών, ο ορισμός αντίστοιχων προβολικών τελεστών, και τέλος η διακριτοποίηση του τελεστή, μπορεί να εκλεπτυνθεί και να χρησιμοποιηθεί και σε τελεστές άλλων μεγεθών συνεχούς φάσματος. Η αντίστοιχη θεωρία οδηγεί στην εισαγωγή της έννοιας του φασματικού μέτρου (*spectral measure*) και στο θεώρημα φασματικής ανάλυσης (*spectral decomposition theorem*) για τελεστές συνεχούς φάσματος.

### 3.8 Προβλήματα

1. α) Πεισθείτε για τις ιδιότητες του εσωτερικού γινομένου (13). β) Δείξτε την ανισότητα Cauchy-Schwarz (14). Υπόδειξη: Δείξτε ότι  $\|\Phi\|^2 [\|\Psi\|^2\|\Phi\|^2 - |(\Phi, \Psi)|^2] = \|\|\Phi\|^2\Psi - (\Phi, \Psi)\Phi\|^2$  και εκμεταλλευτείτε το γεγονός ότι το δεξιό μέλος είναι θετικό.
2. Δείξτε ότι οι ερμιτιανοί τελεστές έχουν την ιδιότητα  $(\Psi, \hat{A}\Phi) = (\hat{A}\Psi, \Phi)$ , για κάθε  $\Psi$  και  $\Phi$  στο πεδίο ορισμού τους. Υπόδειξη: ξεκινήστε από την απαίτηση  $\text{Im}(\Phi + \Psi, \hat{A}(\Phi + \Psi)) = 0$  και ταυτόχρονα  $\text{Im}(\Phi + i\Psi, \hat{A}(\Phi + i\Psi)) = 0$  (από τον ορισμό του ερμιτιανού τελεστή). Επίσης, διαπιστώστε ότι το γινόμενο γραμμικών τελεστών είναι γραμμικός τελεστής.
3. Δείξτε ότι, αν ο τελεστής  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός, τότε και ο  $\hat{A}^n$  ( $n$  θετικός ακέραιος) είναι ερμιτιανός.
4. Δείξτε ότι, αν  $\hat{P}$  προβολικός τελεστής, τότε  $\hat{P}^2 = \hat{P}$ . Επίσης, δείξτε ότι οι προβολικοί τελεστές είναι ερμιτιανοί με ιδιοτιμές 0 ή 1.
5. Δείξτε ότι, αν ο τελεστής  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός, τότε το ίδιο ισχύει και για τον  $\hat{f}(\hat{A}) = \sum_n c_n \hat{A}^n$ , εάν  $c_n \in \mathbb{R}$  και εάν  $f(x) = \sum_n c_n x^n$  αναλυτική συνάρτηση.
6. Δείξτε ότι το μέγεθος  $\hat{A}' = \hat{A} - \langle \hat{A} \rangle$  έχει την ίδια τυπική απόκλιση με το  $\hat{A}$ , αλλά μέση τιμή μηδέν.
7. Δείξτε ότι, αν δύο καταστάσεις  $\Psi$  και  $\Phi$  (κυματοσυναρτήσεις με νόρμα 1) δεν είναι ορθογώνιες (και επίσης δεν είναι η μια πολλαπλάσιο της άλλης), τότε οι αντίστοιχοι προβολικοί τελεστές δεν μετατίθενται. Υπόδειξη: Θέστε  $Q(x) = [\hat{P}_\Psi, \hat{P}_\Phi]\Psi$  και δείξτε ότι  $(Q, Q) > 0$ . Χρησιμοποιήστε την ανισότητα Schwarz.
8. Έστω δύο κυματοσυναρτήσεις  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  με νόρμα 1 και τέτοιες ώστε να μην είναι η μια πολλαπλάσιο της άλλης. Θεωρήστε την  $\Phi = a_1\Psi_1 + a_2\Psi_2$ , με  $a_1$  και  $a_2$  μη μηδενικές σταθερές και  $|a_1|^2 + |a_2|^2 + 2\text{Re}[a_1^*a_2(\Psi_1, \Psi_2)] = 1$ . α) Δείξτε ότι η  $\Phi$

είναι κανονικοποιημένη. β) Δείξτε ότι η  $\Phi$  δεν είναι ταυτόχρονα ορθογώνια στην  $\Psi_1$  και στην  $\Psi_2$ . γ) Γιατί ο προβολικός τελεστής της  $\Phi$  είναι μέγεθος ασύμβατο είτε με την  $\Psi_1$  είτε με την  $\Psi_2$  είτε και με τις δύο;

9. Δείξτε ότι οι τελεστές θέσης και ορμής δεν έχουν ιδιοκαταστάσεις στο χώρο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων κυματοσυναρτήσεων στο  $\mathbb{R}$  (πλην, φυσικά, της τετριμμένης περίπτωσης  $\Psi(x) = 0$ , η οποία δεν αντιστοιχεί σε κατάσταση). (Υπόδειξη για τον τελεστή ορμής: βρείτε τις ιδιοσυναρτήσεις του και δείξτε ότι δεν είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες.) Δείξτε το ίδιο για τον τελεστή της κινητικής ενέργειας,  $\hat{T} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2$ .
10. Δείξτε την ακόλουθη ταυτότητα μεταθετών:  $[\hat{A}, \hat{B}\hat{C}] = [\hat{A}, \hat{B}]\hat{C} + \hat{B}[\hat{A}, \hat{C}]$ . Συγκρίνετε με τον κανόνα παραγώγισης γινομένου συναρτήσεων,  $\frac{\partial}{\partial x}[f(x)g(x)] = [\frac{\partial}{\partial x}f(x)]g(x) + f(x)[\frac{\partial}{\partial x}g(x)]$ .
11. Υπολογίστε τον μεταθέτη του τελεστή θέσης με τον τελεστή κινητικής ενέργειας,  $[\hat{x}, \frac{1}{2m}\hat{p}^2]$ . (Υπόδειξη: χρησιμοποιήστε την ταυτότητα του προβλήματος 10.) Εάν ερμηνεύσετε τον τελεστή  $\frac{1}{m}\hat{p} \equiv \hat{v}$  ως τελεστή ταχύτητας, τι λαμβάνετε;
12. Θεωρήστε κίνηση ενός σωματιδίου σε τρεις χωρικές διαστάσεις. Οι τελεστές θέσης  $\hat{\mathbf{r}} = (\hat{r}_x, \hat{r}_y, \hat{r}_z)$  και ορμής  $\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}_x, \hat{p}_y, \hat{p}_z)$  είναι διανυσματικοί. Δρουν με προφανή γενίκευση της μιας διάστασης:  $\hat{r}_i \Psi(\mathbf{r}) = r_i \Psi(\mathbf{r})$  και  $\hat{p}_i \Psi(\mathbf{r}) = -i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r})}{\partial r_i}$  ( $i \in \{x, y, z\}$ ). Υπολογίστε τους μεταθέτες  $[\hat{r}_i, \hat{p}_j]$ , τον τελεστή κινητικής ενέργειας  $\frac{1}{2m}\hat{\mathbf{p}}^2$ , και το μεταθέτη  $[\mathbf{r}_i, \frac{1}{2m}\hat{\mathbf{p}}^2]$ . Τι δίνει ο μεταθέτης, εάν ερμηνεύσουμε τον τελεστή  $\frac{1}{m}\hat{\mathbf{p}} \equiv \hat{\mathbf{v}}$  ως διανυσματικό τελεστή ταχύτητας;
13. Θεωρήστε τη σχέση απροσδιοριστίας (30). Υποθέστε ότι η  $\Psi$  είναι τέτοια, ώστε το αριστερό μέλος να μηδενίζεται:  $(\Delta A)(\Delta B) = 0$ . Δείξτε, με απ' ευθείας υπολογισμό της ποσότητας  $\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle_\Psi$  ότι και το δεξιό μέλος μηδενίζεται. (Υπόδειξη: για να μηδενίζεται το αριστερό μέλος, η  $\Psi$  πρέπει να είναι υποχρεωτικά ιδιοκατάσταση ενός των δύο τελεστών.)
14. Δείξτε ότι, για να ικανοποιείται το ελάχιστο γινόμενο απροσδιοριστίας, δηλαδή  $(\Delta A)_\Psi(\Delta B)_\Psi = \frac{1}{2}|\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle_\Psi|$ , θα πρέπει η  $\Psi$  να είναι τέτοια ώστε οι  $(\hat{A} - \langle \hat{A} \rangle_\Psi)\Psi$  και  $(\hat{B} - \langle \hat{B} \rangle_\Psi)\Psi$  να είναι γραμμικά εξαρτημένες, δηλ.  $(\hat{B} - \langle \hat{B} \rangle_\Psi)\Psi = i\lambda(\hat{A} - \langle \hat{A} \rangle_\Psi)\Psi$ , με  $\lambda \in \mathbb{R}$ . (Υπόδειξη: εξετάστε τότε η ανισότητα Cauchy-Schwarz μετατρέπεται σε ισότητα.)
15. Θεωρήστε σωματίδιο κινούμενο σε μία διάσταση στο διάστημα  $(-\infty, \infty)$ . Υποθέστε ότι η  $\Psi$  είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμη κατάσταση. Δείξτε ότι η μέση τιμή της κινητικής ενέργειας στην κατάσταση είναι πάντα γνήσια θετική:

$\left(\Psi, \frac{p^2}{2m}\Psi\right) > 0$ . (Υπόδειξη: κάνετε ολοκλήρωση κατά παράγοντες και χρησιμοποιήστε την ιδιότητα  $\Psi(x) \rightarrow 0$  και  $\frac{\partial}{\partial x}\Psi(x) \rightarrow 0$  για  $x \rightarrow \pm\infty$ . Εναλλακτικά, χρησιμοποιήστε την ερμιτιανή ιδιότητα του τελεστή ορμής.)

16. Θεωρήστε σωματίδιο σε απειρόβαθο πηγάδι δυναμικού, δηλ. κινούμενο στο διάστημα  $[-d, d]$  με  $\Psi(-d) = \Psi(d) = 0$ . Το σωματίδιο βρίσκεται σε κατάσταση  $\Psi(x) = c(x + d)$ , για  $x < 0$ , και  $\Psi(x) = -c(x - d)$ , για  $d \geq 0$ . Βρείτε την κατανομή πιθανότητας της κινητικής ενέργειας.

## 4 Η γεωμετρική δομή των καταστάσεων: χώρος Hilbert

### 4.1 Γενικά

Οι κυματοσυναρτήσεις στην κβαντική μηχανική ικανοποιούν τα αξιώματα του διανυσματικού χώρου. Συμβολίζουμε το σύνολο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων μιγαδικών συναρτήσεων στο  $\mathbb{R}$ , δηλ.  $\int_{\mathbb{R}} |\Psi(x)|^2 dx < \infty$  (συμπεριλαμβανόμενης και της σταθερής  $\Psi = 0$ ), με  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ . Όμοια, και αναλόγως τη φύση του προβλήματος, θεωρούμε το σύνολο των κυματοσυναρτήσεων  $\mathcal{L}^2([0, a])$  για σωματίδιο που κινείται σε μία διάσταση, αλλά περιορισμένο στο διάστημα  $[0, a]$ , το σύνολο των κυματοσυναρτήσεων  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R}^3)$  για σωματίδιο που κινείται στις τρεις διαστάσεις, κ.ο.κ. Το μόνο που αλλάζει στα ακόλουθα, αναλόγως την περίπτωση, είναι το όρισμα της κυματοσυνάρτησης ( $x$  στη μία διάσταση,  $\mathbf{r} \equiv (x, y, z)$  στις τρεις διαστάσεις) καθώς και η μεταβλητή και τα όρια ολοκλήρωσης στο εσωτερικό γινόμενο ( $\int_{\mathbb{R}} dx, \int_0^a dx, \int_{\mathbb{R}^3} d^3x$ , κ.ο.κ.).<sup>(31)</sup> Για απλότητα θα αναφερόμαστε συνήθως στον  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ .

Έστω  $\Psi, \Psi_1, \Psi_2 \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{R})$  και  $c \in \mathbb{C}$  μιγαδικός αριθμός. Τότε, είναι στοιχειώδες να αποδειχθούν τα ακόλουθα:

- $(\Psi_1 + \Psi_2) \in \mathcal{L}^2(\mathbb{R})$  (κλειστότητα ως προς πρόσθεση).
- $c\Psi \in \mathcal{L}^2(\mathbb{R})$  (κλειστότητα ως προς πολλαπλασιασμό με αριθμό).

Επίσης, ικανοποιούνται τα υπόλοιπα αξιώματα που ορίζουν ένα διανυσματικό χώρο επί του σώματος  $\mathbb{C}$ , με μηδενικό στοιχείο την  $\Psi = 0$ . Επομένως, οι κυματοσυναρτήσεις επέχουν το ρόλο διανυσμάτων.

Ο διανυσματικός χώρος είναι εφοδιασμένος με εσωτερικό γινόμενο  $(\Phi, \Psi)$  (εξ. 13), από το οποίο επάγεται η νόρμα  $\|\Psi\| = \sqrt{(\Psi, \Psi)}$ . Η νόρμα ερμηνεύεται ως μήκος του διανύσματος και επίσης ορίζει μια απόσταση μεταξύ οποιωνδήποτε δύο διανυσμάτων  $\Psi$  και  $\Phi$ :

$$\|\Psi - \Phi\| \equiv \sqrt{(\Psi - \Phi, \Psi - \Phi)} \equiv \left[ \int |\Psi(x) - \Phi(x)|^2 dx \right]^{1/2} \quad (40)$$

Εάν  $\|\Psi - \Phi\| = 0$ , τότε τα δύο διανύσματα ταυτίζονται. Αυτό φαίνεται από την ολοκληρωτέα ποσότητα  $|\Psi(x) - \Phi(x)|^2 \geq 0$ , η οποία πρέπει να μηδενίζεται, για να μηδενιστεί το ολοκλήρωμα, επομένως  $\Psi(x) = \Phi(x)$ .<sup>(32)</sup>

<sup>(31)</sup>Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλουμε στις κυματοσυναρτήσεις προκύπτουν από το φυσικό πρόβλημα που προσεγγίζουμε και παίζουν σημαντικό ρόλο στους τελεστές που αναπαριστούν φυσικά μεγέθη. Βλ. πρόβλημα 1.

<sup>(32)</sup>Στην πραγματικότητα, εάν  $\Psi(x) \neq \Phi(x)$  μόνο σε διακριτά σημεία  $x$  (η μαθηματική διατύπωση είναι υποσύνολο μηδενικού μέτρου του  $\mathbb{R}$ ), τότε το ολοκλήρωμα πάλι μηδενίζεται, χωρίς να ταυτίζονται οι συναρτήσεις σε όλα τα σημεία. Ωστόσο, συναρτήσεις που διαφέρουν μόνο σε διακριτά σημεία

Η ύπαρξη νόρμας επιτρέπει να μιλήσουμε για σύγκλιση ακολουθίας συναρτήσεων. Λέμε ότι μια ακολουθία  $\Psi_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , συγκλίνει στη  $\Phi$ , αν η ακολουθία θετικών αριθμών  $\|\Psi_n - \Phi\|$  (δηλ. η απόσταση μεταξύ των  $\Psi_n$  και  $\Phi$ ) συγκλίνει στο μηδέν.<sup>(33)</sup> Οι ιδιότητες εσωτερικού γινομένου και πληρότητας, που χαρακτηρίζουν το διανυσματικό χώρο, του δίνουν δομή χώρου *Hilbert*, ο οποίος συμβολίζεται συνήθως με  $\mathcal{H}$ .

Θυμίζουμε ότι  $N$  διανύσματα χαρακτηρίζονται γραμμικά ανεξάρτητα μεταξύ τους, αν δεν μπορεί να γραφεί κανένα από αυτά ως γραμμικός συνδυασμός των υπόλοιπων. Εάν οποιοδήποτε άλλο διάνυσμα αναπτύσσεται ως γραμμικός συνδυασμός αυτών, τότε λέμε ότι αυτά αποτελούν βάση, και ότι ο χώρος έχει διάσταση  $N$ . Για τον χώρο Hilbert  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ , προκύπτει ότι η διάσταση είναι άπειρη αριθμήσιμη ( $\aleph_0$ ).<sup>(34)</sup>

Σε πεπερασμένη διάσταση, μπορεί κανείς, χωρίς πρόβλημα, να επιλέξει οποιαδήποτε βάση για ανάπτυγμα των διανυσμάτων. Σε άπειρη διάσταση, η κατάσταση περιπλέκεται, λόγω του εν γένει άπειρου αθροίσματος που απαιτείται για να αναπτυχθεί ένα τυχαίο διάνυσμα. Οι περιορισμοί που τίθενται από την ανάγκη σύγκλισης του άπειρου αθροίσματος, οδηγούν στην απαίτηση για *ορθοκανονική βάση* (*orthonormal basis*). Ορίζουμε λοιπόν ως ορθοκανονική βάση στο χώρο Hilbert  $\mathcal{H}$  ένα αριθμήσιμο άπειρο σύνολο διανυσμάτων (κυματοσυναρτήσεων)  $u_1(x), u_2(x), \dots \in \mathcal{H}$ , τέτοιο, ώστε:

$$\begin{aligned} (u_i, u_i) &= 1 \\ (u_i, u_j) &= 0, \text{ αν } i \neq j \end{aligned} \quad (41)$$

[με συντομογραφία  $(u_i, u_j) = \delta_{ij}$ , όπου η συνάρτηση Kronecker  $\delta_{ij} = 1$ , αν  $i = j$ , και  $= 0$ , διαφορετικά] και επιπρόσθετα, για κάθε  $\Psi \in \mathcal{H}$ , να υπάρχει ακολουθία  $c_1, c_2 \dots \in \mathbb{C}$ , τέτοια, ώστε

$$\sum_{i=1}^{\infty} c_i u_i = \Psi. \quad (42)$$

Οι πρώτη εξίσωση απαιτεί την κανονικοποίηση των στοιχείων βάσης και η δεύτερη τη μεταξύ τους ορθογωνιότητα. Η τρίτη ερμηνεύεται ως σύγκλιση της άπειρης σειράς ως προς τη νόρμα του  $\mathcal{H}$ , δηλαδή  $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\sum_{i=1}^n c_i u_i - \Psi\| = 0$ .<sup>(35)</sup> Εάν έχουμε δεδομένη μια κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  και μια ορθοκανονική βάση  $\{u_i\}$ , τότε οι συντελεστές

---

δεχόμαστε ότι αντιστοιχούν στο ίδιο διάνυσμα. Οι κατανομές πιθανότητας που προκύπτουν από δυο τέτοιες συναρτήσεις ταυτίζονται μαθηματικά, διότι διαφορές σε διακριτά σημεία δεν συνεισφέρουν στο  $\int \Psi^* \dot{A} \Psi dx$ , για τον ίδιο λόγο που δεν συνεισφέρουν στο  $\int |\Psi - \Phi|^2 dx$ .

<sup>(33)</sup> Αξίζει να αναφέρουμε σχετικά τα εξής, αν και δεν θα μας απασχολήσουν εδώ. Κατ' επέκταση της έννοιας της σύγκλισης ορίζεται και η έννοια της συνέχειας. Επίσης, ορίζονται ακολουθίες Cauchy, για τις οποίες η νόρμα  $\|\Psi_n - \Psi_m\| \rightarrow 0$  καθώς τα  $n, m \rightarrow \infty$ , και οι οποίες συγκλίνουν σε τετραγωνικά ολοκληρώσιμες συναρτήσεις. Ως εκ τούτου, ο χώρος χαρακτηρίζεται πλήρης.

<sup>(34)</sup> Το ίδιο ισχύει και για τους  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R}^3)$  και  $\mathcal{L}^2([0, a])$  (βλ. προβλήματα 2 και 3).

<sup>(35)</sup> Αυτός ο ορισμός διαφοροποιείται από τον ορισμό της κατά σημείο σύγκλισης, σύμφωνα με τον οποίο  $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n c_i u_i(x) = \Psi(x)$ .

αναπτύγματος  $c_i$  βρίσκονται παίρνοντας το εσωτερικό γινόμενο<sup>(36)</sup>

$$c_i = (u_i, \Psi) = \int u_i^*(x) \Psi(x) dx. \quad (43)$$

Συνεπώς, η έκφραση (42) γράφεται και  $\sum_{i=1}^{\infty} (u_i, \Psi) u_i = \Psi$ . Παρατηρούμε ότι εδώ εμφανίζεται ο προβολικός τελεστής στη  $u_i$ ,  $\hat{P}_{u_i}$ , με  $\hat{P}_{u_i} \Psi \equiv (u_i, \Psi) u_i$  [βλ. τον ορισμό (22)]. Επομένως, το ανάπτυγμα σε ορθοκανονική βάση λαμβάνει τη μορφή

$$\sum_{i=1}^{\infty} \hat{P}_{u_i} \Psi = \Psi, \quad (44)$$

που είναι εμφανής γενίκευση της ανάλυσης ενός διανύσματος χώρου πεπερασμένης διάστασης σε ορθογώνιο σύστημα, με τις συντεταγμένες  $c_i$  να δίνονται μέσω της προβολής του διανύσματος στους άξονες. Οι κύριες διαφορές είναι, πρώτον, το άπειρο αντί πεπερασμένο ανάπτυγμα, και δεύτερον ότι το εσωτερικό γινόμενο  $c_i = (u_i, \Psi)$ , που εκφράζει την τιμή της προβολής, είναι μιγαδικός, αντί πραγματικός, αριθμός.

Το γεγονός ότι η εξ. (44) ισχύει για κάθε  $\Psi \in \mathcal{H}$ , συνεπάγεται ότι το άθροισμα των προβολικών τελεστών δίνει τον ταυτοτικό τελεστή  $\hat{I}$ :<sup>(37)</sup>

$$\sum_{i=1}^{\infty} \hat{P}_{u_i} = \hat{I}, \quad (45)$$

Αυτή ονομάζεται *σχέση πληρότητας*, και εκφράζει την ιδιότητα ότι το σύνολο των  $u_i$  δεν είναι μόνο γραμμικά ανεξάρτητο, αλλά αποτελεί βάση (παράγει όλο το χώρο  $\mathcal{H}$ ).<sup>(38)</sup>

<sup>(36)</sup>Πρόβλημα 4.

<sup>(37)</sup>Ο ταυτοτικός τελεστής ορίζεται από την ιδιότητα  $\hat{I} \Psi = \Psi$ .

<sup>(38)</sup>Σε πεπερασμένη διάσταση, ο αριθμός των  $u_i$  ταυτίζεται με τη διάσταση του χώρου. Σε άπειρη διάσταση, όμως, είναι δυνατόν τα  $u_i$  να είναι ορθοκανονικά και άπειρα, αλλά να μην επαρκούν ώστε να παράξουν όλα τα διανύσματα του χώρου. Αυτό φαίνεται στο πολύ απλό παράδειγμα του να θεωρήσουμε τη βάση πλην του  $u_1$ . Τα εναπομείναντα  $(u_2, u_2, \dots)$  είναι άπειρα και ορθοκανονικά, αλλά δεν μπορούν να παράξουν το  $u_1$  με γραμμικό συνδυασμό, διότι είναι όλα ορθογώνια σε αυτό.



Η νόρμα της  $\Psi$  συνδέεται με τους συντελεστές  $c_i$  ως εξής.<sup>(39)</sup>

$$\begin{aligned}
\|\Psi\|^2 &\equiv (\Psi, \Psi) \\
&= \left( \sum_i c_i u_i, \sum_j c_j u_j \right) \\
&= \sum_j c_j \left( \sum_i c_i u_i, u_j \right) \quad (\text{βλ. 2η από εξ. (13)}) \\
&= \sum_i \sum_j c_i^* c_j (u_i, u_j) \quad (\text{βλ. 3η από εξ. (13)}) \\
&= \sum_i c_i^* c_i (u_i, u_i) \quad (\text{διότι } (u_i, u_j) = 0, \text{ για } i \neq j) \\
&= \sum_i |c_i|^2 \quad (\text{διότι } (u_i, u_i) = 1). \tag{46}
\end{aligned}$$

Συνεπώς, η απαίτηση  $\|\Psi\|^2 < \infty$  συνεπάγεται την απαίτηση  $\sum_i |c_i|^2 < \infty$ .<sup>(40)</sup> Αλλά ισχύει και το αντίστροφο (δίνουμε το αποτέλεσμα χωρίς απόδειξη): εάν για μια ακολουθία αριθμών  $\{c_i\}$  ισχύει  $\sum_i |c_i|^2 < \infty$ , τότε η  $\sum_i c_i u_i$  συγκλίνει.

Δεδομένης μιας ορθοκανονικής βάσης  $\{u_i\}$ , το ανάπτυγμα (42), και ισοδύναμα το ανάπτυγμα (44), είναι μοναδικό. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι  $\sum_i c_i u_i = \Psi = \sum_i d_i u_i$ , τότε, υποχρεωτικά,  $d_i = c_i, \forall i$ .

Έχουμε μια πλήρη αντιστοιχία των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων συναρτήσεων  $\Psi \in \mathcal{H}$  με τις ακολουθίες  $\{c_i\}$ , για τις οποίες το  $\sum_i c_i u_i$  συγκλίνει. Αν  $c = \{c_i\}$  και  $d = \{d_i\}$  δυο τέτοιες ακολουθίες, με  $\Psi = \sum_i c_i u_i$  και  $\Phi = \sum_i d_i u_i$ , τότε  $(\Psi, \Phi) = \sum_i c_i^* d_i \equiv (c, d)$  (με προφανή συμβολισμό του εσωτερικού γινομένου ακολουθιών),  $\Psi + \Phi = \sum_i (c_i + d_i) u_i$ , και  $a\Psi = \sum_i (ac_i) u_i$ .<sup>(41)</sup> Επομένως, οι ακολουθίες και οι κυματοσυναρτήσεις είναι δύο διαφορετικοί τρόποι έκφρασης των ίδιων κβαντικών καταστάσεων. Ο χώρος των τετραγωνικά αθροίσιμων ακολουθιών συμβολίζεται με  $\ell^2(\mathbb{N})$  (εφόσον ο δείκτης  $i$  λαμβάνει τιμές στους φυσικούς), είναι ισόμορφος με τον  $\mathcal{H}$  και, επομένως, ικανοποιεί επίσης τα αξιώματα του χώρου Hilbert.

<sup>(39)</sup> Εδώ χρησιμοποιούμε κανόνες πεπερασμένων αθροισμάτων σε άπειρα αθροίσματα. Ωστόσο, το αποτέλεσμα ισχύει, διότι αποδεικνύεται με προσεκτικό χειρισμό των άπειρων αθροισμάτων.

<sup>(40)</sup> Αξίζει να τονίσουμε ότι η εξ. (46) είναι γενίκευση του πυθαγόριου θεωρήματος σε άπειρες διαστάσεις.

<sup>(41)</sup> Πρόβλημα 5.

## 4.2 Πληρότητα ιδιοδιανυσμάτων και πιθανότητα μετάβασης

Έστω ότι μια κυματοσυνάρτηση μπορεί να αναπτυχθεί σε ορθογώνιες ιδιοκαταστάσεις ενός ερμιτιανού τελεστή  $\hat{A}$ , δηλ.

$$\Psi = \sum_i c_i u_i, \quad (47)$$

με  $\hat{A}u_i = a_i u_i$  και  $(u_i, u_j) = \delta_{ij}$ . Τότε, η πιθανότητα μέτρησης τιμής  $a_i$  ταυτίζεται με την πιθανότητα μετάβασης στην κατάσταση  $u_i$  (εξ. 27):

$$P_i = |(u_i, \Psi)|^2 = |c_i|^2. \quad (48)$$

Η μέση τιμή των μετρήσεων του  $\hat{A}$  στη συλλογή  $\Psi$  και οι ροπές της κατανομής πιθανότητας των μετρήσεων θα είναι εξ ορισμού

$$\begin{aligned} \langle \hat{A} \rangle_{\Psi} &= \sum_i P_i a_i = \sum_i |c_i|^2 a_i \\ \langle \hat{A}^2 \rangle_{\Psi} &= \sum_i P_i a_i^2 = \sum_i |c_i|^2 a_i^2 \end{aligned} \quad (49)$$

$$\text{και γενικά: } \langle \hat{A}^n \rangle_{\Psi} = \sum_i P_i a_i^n = \sum_i |c_i|^2 a_i^n$$

κ.ο.κ. Από την άλλη, η εξίσωση (17) δίνει για την  $n$ -οστή ροπή:  $\langle \hat{A}^n \rangle_{\Psi} = (\Psi, \hat{A}^n \Psi) = (\sum_i c_i u_i, \hat{A}^n \sum_j c_j u_j) = \sum_{ij} c_i^* c_j (u_i, \hat{A}^n u_j) = \sum_{ij} c_i^* c_j a_j^n (u_i, u_j) = \sum_i |c_i|^2 a_i^n$ , δεδομένης της ορθοκανονικότητας. Επομένως, ο τύπος της μέσης τιμής (17) συμφωνεί με τον τύπο της πιθανότητας μετάβασης.

Τίθεται τώρα το ερώτημα, εάν μπορεί να βρεθεί ένα ανάπτυγμα (47) για οποιαδήποτε κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  και για οποιοδήποτε παρατηρήσιμο μέγεθος  $\hat{A}$ , ώστε να εφαρμοστούν οι τύποι (48) και (49). Η απάντηση είναι αρνητική, δεδομένου ότι υπάρχουν ερμιτιανοί τελεστές που δεν έχουν ιδιοδιανύσματα στο χώρο Hilbert (όπως ο τελεστής θέσης) ή τα ιδιοδιανύσματά τους δεν επαρκούν για να παράξουν το χώρο (δεν δίνουν πληρότητα). Τα αντίστοιχα μεγέθη έχουν συνεχές φάσμα τιμών. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να κάνουμε μια ανάλυση ανάλογη εκείνης του εδαφίου 3.7, χρησιμοποιώντας μια διαμέριση του συνεχούς φάσματος με τους αντίστοιχους προβολικούς τελεστές, και τροποποιώντας το μετρήσιμο μέγεθος και τον αντίστοιχο τελεστή, ώστε να έχει ιδιοσυναρτήσεις που δίνουν πληρότητα. Ο τροποποιημένος τελεστής έχει διακριτό φάσμα, ως διαμέριση του συνεχούς φάσματος, και δίνει κατανομή πιθανότητας είτε απ' ευθείας, σύμφωνα με τους τύπους (48) και (49), είτε μέσω των ροπών, σύμφωνα με τον τύπο (17). Στο όριο της πυκνής διαμέρισης, το φάσμα επανέρχεται στο συνεχές,

η κατανομή πιθανότητας τείνει σε πυκνότητα πιθανότητας, και πλέον εφαρμόζεται μόνο ο τύπος (17) για να βρεθεί η κατανομή.

### 4.3 Αναπαράσταση γραμμικών τελεστών από πίνακες

Πώς αναπαριστούνται οι γραμμικοί τελεστές (π.χ., οι ερμιτιανοί) στο χώρο των ακολουθιών; Αν  $\{u_i\}$  τα διανύσματα βάσης, και  $\hat{A}$  γραμμικός τελεστής, μπορούμε να πάρουμε το εσωτερικό γινόμενο

$$A_{ij} \equiv (u_i, \hat{A}u_j) \equiv \int u_i(x) \hat{A}u_j(x) dx. \quad (50)$$

Αν  $\Psi = \sum_j c_j u_j$  οποιαδήποτε κυματοσυνάρτηση, τότε η δράση του  $\hat{A}\Psi = \Phi$  γράφεται  $\hat{A}\Psi = \sum_j c_j \hat{A}u_j = \Phi$ . Παίρνοντας και το ανάπτυγμα της  $\Phi = \sum_k d_k u_k$ , λαμβάνουμε  $\sum_j c_j \hat{A}u_j = \sum_k d_k u_k$ . Σχηματίζουμε τώρα το εσωτερικό γινόμενο της  $u_i$  με το αριστερό και δεξιό μέλος της τελευταίας εξίσωσης. Δεδομένου ότι  $(u_i, u_k) = \delta_{ik}$  (εξ. 41), μηδενίζονται όλοι οι όροι πλην ενός στο δεξιό άθροισμα:  $\sum_j c_j (u_i, \hat{A}u_j) = d_i$ . Χρησιμοποιώντας το συμβολισμό (50), καταλήγουμε:

$$\sum_j A_{ij} c_j = d_i \quad (51)$$

Μέσω αυτής της έκφρασης μετασχηματίζονται οι συντεταγμένες μιας κυματοσυνάρτησης σε εκείνες μιας άλλης, λόγω της δράσης ενός τελεστή. Η έκφραση είναι αντίστοιχη με τον πολλαπλασιασμό ενός τετραγωνικού πίνακα, με στοιχεία  $A_{ij}$ , με έναν πίνακα-στήλη, με στοιχεία  $c_j$ , δίνοντας ως αποτέλεσμα έναν πίνακα-στήλη με στοιχεία  $d_i$ . Η μόνη διαφορά είναι ότι εδώ οι πίνακες έχουν διαστάσεις  $(\infty \times \infty)$  (ο  $A$ ) και  $(\infty \times 1)$  (οι  $c$  και  $d$ ). Όσο για τη δομή των τελεστών, οι μόνοι δύο περιορισμοί είναι α) να είναι γραμμικοί,<sup>(42)</sup> και β) να περιλαμβάνουν στο πεδίο ορισμού τους τις συναρτήσεις  $u_i$ , ώστε να εφαρμόζεται η εξ. (50). Κατά τα άλλα, οι τελεστές μπορεί να είναι διαφορικοί (όπως η ορμή), ολοκληρωτικοί, κ.λ.π., χωρίς αυτό να εμποδίζει την αναπαράστασή τους από πίνακες.<sup>(43)</sup>

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι το γινόμενο γραμμικών τελεστών αναπαριστάται από το αντίστοιχο γινόμενο πινάκων:<sup>(44)</sup>

$$\hat{C} = \hat{A}\hat{B} \longrightarrow C_{ij} = \sum_k A_{ik} B_{kj}. \quad (52)$$

<sup>(42)</sup> Η γραμμικότητα είναι απαραίτητη για την αναπαράσταση τελεστών από πίνακες, δεδομένου ότι ο πολλαπλασιασμός πινάκων είναι πάντα γραμμική πράξη.

<sup>(43)</sup> Πρόβλημα 6.

<sup>(44)</sup> Πρόβλημα 7.

Οι ερμιτιανοί τελεστές εκφράζονται από πίνακες με ιδιαίτερη συμμετρική δομή:

$$A_{ij} = A_{ji}^* \quad (\text{αν και μόνο αν ο } \hat{A} \text{ είναι ερμιτιανός}). \quad (53)$$

Αυτό το βλέπουμε παίρνοντας  $A_{ij} = (u_i, \hat{A}u_j) = (\hat{A}u_i, u_j) = (u_j, \hat{A}u_i)^* = A_{ji}^*$  [στο δεύτερο βήμα χρησιμοποιήσαμε την ιδιότητα (16)]. Αντίστροφα: έστω ότι, για κάποιον γραμμικό τελεστή  $\hat{A}$ , ισχύει  $(u_i, \hat{A}u_j) = (u_j, \hat{A}u_i)^*$  για κάθε ζεύγος στοιχείων βάσης  $u_i$  και  $u_j$ . Τότε, μπορούμε να δείξουμε ότι ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός.<sup>(45)</sup>

#### 4.4 Κοινά ιδιοδιανύσματα μετατιθέμενων τελεστών

Έστω δύο ερμιτιανοί τελεστές,  $\hat{A}$  με ιδιοδιανύσματα  $u_i$  και ιδιοτιμές  $\alpha_i$  και  $\hat{B}$  με ιδιοδιανύσματα  $v_i$  και ιδιοτιμές  $\beta_i$ . Έστω ότι το σύνολο  $\{u_i\}$  αποτελεί ορθοκανονική βάση στο χώρο Hilbert, και ότι το ίδιο ισχύει για το σύνολο  $\{v_i\}$ . Τότε, οι τελεστές μετατίθενται αν και μόνο αν μπορεί να βρεθεί κοινό σύνολο ιδιοδιανυσμάτων τους που να αποτελεί ορθοκανονική βάση, δηλαδή, αν και μόνο αν υπάρχει ορθοκανονική βάση  $f_i$  τέτοια ώστε  $\hat{A}f_i = \alpha'_i f_i$  και ταυτόχρονα  $\hat{B}f_i = \beta'_i f_i$ .

Η μία κατεύθυνση της ισοδυναμίας είναι απλή στην απόδειξη. Αν υπάρχει ορθοκανονική βάση  $f_i$  τέτοια ώστε  $\hat{A}f_i = \alpha'_i f_i$  και ταυτόχρονα  $\hat{B}f_i = \beta'_i f_i$ , τότε οποιοδήποτε διάνυσμα  $\Psi$  μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτή τη βάση:  $\Psi = \sum_i c_i f_i$ . Δρώντας με τους  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  έχουμε:

$$\begin{aligned} \hat{A}\hat{B}\Psi &= \sum_i c_i \hat{A}\hat{B}f_i = \sum_i c_i \hat{A}\beta'_i f_i = \sum_i c_i \alpha'_i \beta'_i f_i \\ \hat{B}\hat{A}\Psi &= \sum_i c_i \hat{B}\hat{A}f_i = \sum_i c_i \hat{B}\alpha'_i f_i = \sum_i c_i \beta'_i \alpha'_i f_i \end{aligned}$$

δηλαδή,  $\hat{A}\hat{B}\Psi = \hat{B}\hat{A}\Psi$ , ο.ε.δ.

Η αντίθετη κατεύθυνση της ισοδυναμίας είναι πιο περίπλοκη στην απόδειξη. Αν  $\hat{A}\hat{B} = \hat{B}\hat{A}$ , τότε εξετάζουμε τα διανύσματα  $\hat{B}u_i$ , δηλ. τη δράση του  $\hat{B}$  στα ιδιοδιανύσματα  $u_i$  του  $\hat{A}$ . Έχουμε  $\hat{A}(\hat{B}u_i) = \hat{B}\hat{A}u_i = \hat{B}\alpha_i u_i = \alpha_i(\hat{B}u_i)$ . Δηλαδή, το διάνυσμα  $\hat{B}u_i$  είναι επίσης ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{A}$  με την ίδια ιδιοτιμή,  $\alpha_i$ . Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις.

(α) Αν η  $\alpha_i$  δεν είναι εκφυλισμένη, δηλαδή, αν τα μόνα ιδιοδιανύσματα του  $\hat{A}$  με ιδιοτιμή  $\alpha_i$  είναι πολλαπλάσια του  $u_i$ , τότε αυτόματα το  $\hat{B}u_i$  είναι πολλαπλάσιο του  $u_i$ , δηλαδή,  $\hat{B}u_i = \beta'_i u_i$  για κάποιο  $\beta'_i$ , επομένως το  $u_i$  είναι ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{B}$  και ταυτίζεται με το ζητούμενο  $f_i$ .

(β) Αν η  $\alpha_i$  είναι εκφυλισμένη, δηλαδή αν υπάρχουν γραμμικά ανεξάρτητα ιδιοδια-

<sup>(45)</sup>Πρόβλημα 8.

νύσματα  $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots \in \{u_i\}$  με αντίστοιχες ιδιοτιμές ίσες,  $\alpha^{(1)} = \alpha^{(2)} = \dots \equiv \alpha$ , τότε αυτά παράγουν έναν διανυσματικό υπόχωρο  $\mathcal{H}_\alpha$ , οποιοδήποτε στοιχείο του οποίου είναι ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{A}$  με ιδιοτιμή  $\alpha$ . Αυτός ονομάζεται υπόχωρος ιδιοτιμής  $\alpha$ . Για ευκολία δεχόμαστε ότι ο υπόχωρος έχει πεπερασμένη διάσταση  $N$  (η απόδειξη για άπειρη διάσταση υπόχωρου είναι πιο περίπλοκη) και ότι τα  $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots$  είναι ανά δύο ορθογώνια μεταξύ τους, δηλαδή αποτελούν ορθοκανονική βάση του υπόχωρου (εάν δεν είναι, παράγουμε εύκολα μια ορθοκανονική βάση με τη μέθοδο Gram-Schmidt). Παρατηρούμε ότι τα διανύσματα  $\hat{B}u^{(n)}$  είναι ιδιοδιανύσματα του  $\hat{A}$  ιδιοτιμής  $\alpha$ , διότι η μεταθετικότητα των  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  δίνει  $\hat{A}(\hat{B}u^{(n)}) = \hat{B}\hat{A}u^{(n)} = \alpha(\hat{B}u^{(n)})$ , δηλαδή η δράση του  $\hat{B}$  στα  $u^{(n)}$  μάς αφήνει εντός του υπόχωρου  $\mathcal{H}_\alpha$ . Μένει να κατασκευάσουμε  $N$  τον αριθμό ορθοκανονικά ιδιοδιανύσματα του  $\hat{B}$  εντός του  $\mathcal{H}'$ , τα οποία θα είναι τα ζητούμενα  $f_i$  εντός του  $\mathcal{H}_\alpha$ . Προς τούτο, αναπτύσσουμε το  $f = \sum_{n'} c_{n'} u^{(n')}$  και γράφουμε την εξίσωση ιδιοτιμών  $\hat{B}f = \beta' f$ :

$$\hat{B} \sum_{n'} c_{n'} u^{(n')} = \beta' \sum_{n'} c_{n'} u^{(n')}.$$

Παίρνοντας το εσωτερικό γινόμενο από αριστερά με την  $u^{(n)}$ , και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση ορθοκανονικότητας  $(u^{(n)}, u^{(n')}) = \delta_{nn'}$ , λαμβάνουμε  $\sum_{n'} (B_{nn'} - \beta' \delta_{nn'}) c_{n'} = 0$ , όπου χρησιμοποιήσαμε το συμβολισμό  $B_{nn'} = (u^{(n)}, \hat{B}u^{(n')})$ . Η τελευταία εξίσωση ιδιοτιμών σε μορφή πίνακα έχει μη τετριμμένες λύσεις αν η αντίστοιχη ορίζουσα μηδενίζεται, δηλ. αν  $\det(B_{nn'} - \beta' \delta_{nn'}) = 0$ . Οι ρίζες της εξίσωσης είναι οι ζητούμενες ιδιοτιμές. Η ορίζουσα όμως είναι πολυώνυμο με  $N$  ρίζες  $\beta'_1, \dots, \beta'_N$  (ενδέχεται να μη διαφέρουν όλες μεταξύ τους). Άρα, κατασκευάζονται  $N$  διαφορετικά ιδιοδιανύσματα  $f_i$  του  $\hat{B}$  στον  $\mathcal{H}'$ , τα οποία είναι ταυτόχρονα ιδιοδιανύσματα του  $\hat{A}$ . Δεδομένου ότι ο  $\hat{B}$  είναι ερμιτιανός, τα ιδιοδιανύσματα είτε είναι ανά δύο ορθογώνια (αν αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές), είτε μπορούν να επιλεγούν ορθογώνια (εάν αντιστοιχούν στην ίδια ιδιοτιμή του  $\hat{B}$ ). Επαναλαμβάνοντας σε κάθε υπόχωρο εκφυλισμένης ιδιοτιμής του  $\hat{A}$ , και συμπεριλαμβάνοντας τις μη εκφυλισμένες ιδιοτιμές (περίπτωση  $\alpha$ ), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ύπαρξης κοινού συνόλου ιδιοδιανυσμάτων που αποτελούν ορθοκανονική βάση.

Η φυσική σημασία του παραπάνω θεωρήματος στη θεωρία μέτρησης σχετίζεται με τα πλήρη συστήματα μετατιθέμενων μεγεθών και παρουσιάστηκε στο εδάφιο 3.4.

## 4.5 Ερμιτιανοί συζυγείς τελεστές

Οι ερμιτιανοί τελεστές και αντίστοιχοι πίνακες είναι, κατά μια έννοια, το ανάλογο των πραγματικών αριθμών: τους αντιστοιχεί πραγματική μέση τιμή, πραγματικές ιδιοτιμές, και ικανοποιούν τη σχέση συμμετρίας (53), η οποία μπορεί να ιδωθεί ως γενίκευση της σχέσης  $z = z^*$ . Η αναλογία γενικεύεται και σε μη ερμιτιανούς γραμμικούς τελεστές:

αν  $\hat{A}$  μη ερμιτιανός γραμμικός τελεστής, ορίζουμε τον *ερμιτιανό συζυγή* (*hermitian adjoint*)  $\hat{A}^\dagger$  ως εξής:

$$(\hat{A}^\dagger \Phi, \Psi) = (\Phi, \hat{A} \Psi), \quad \forall \Phi, \Psi. \quad (54)$$

Ο ορισμός του  $\hat{A}^\dagger$  έχει την ιδιαιτερότητα να μη δίνεται εκπεφρασμένα, μέσω της δράσης του σε καταστάσεις, αλλά έμμεσα, μέσω της δράσης του σε εσωτερικά γινόμενα.<sup>(46)</sup> Ωστόσο, συνάγονται πολύ απλές ιδιότητες για τον  $\hat{A}^\dagger$ . Πρώτον, εξετάζοντας την εφαρμογή του ορισμού σε διανύσματα ορθοκανονικής βάσης  $\{u_i\}$ , και θέτοντας  $\Phi = u_i$ ,  $\Psi = u_j$ , παίρνουμε  $(u_j, \hat{A} u_i) = (\hat{A}^\dagger u_j, u_i) = (u_i, \hat{A}^\dagger u_j)^*$ , ή αλλιώς

$$A_{ij}^\dagger = A_{ji}^*. \quad (55)$$

Δηλαδή, ο πίνακας που αντιστοιχεί στον ερμιτιανό συζυγή δίνεται από αναστροφή και μιγαδική συζυγία του αρχικού πίνακα. Δεύτερον, εφόσον ορίσαμε τα στοιχεία πίνακα σε ορθοκανονική βάση, προκύπτει αμέσως η δράση του σε οποιοδήποτε διάνυσμα, διότι οποιοδήποτε διάνυσμα αναπτύσσεται σε ορθοκανονική βάση,  $\Psi = \sum_i c_i u_i$ . Σε πρώτο βήμα χρειαζόμαστε τη δράση του  $\hat{A}^\dagger$  στα στοιχεία βάσης  $u_i$  σε αναλογία με την εξ. (51) (όπου τη θέση του  $\hat{A}$  εκείνης της εξίσωσης λαμβάνει εδώ ο  $\hat{A}^\dagger$ ). Αναπτύσσοντας σε στοιχεία βάσης  $u_j$  την  $\hat{A}^\dagger u_i = \sum_j d_j u_j$ , βρίσκουμε ότι οι συντελεστές είναι  $d_j = (u_j, \hat{A}^\dagger u_i) \equiv A_{ji}^\dagger = A_{ij}^*$ . Δηλαδή,

$$\hat{A}^\dagger u_i = \sum_j A_{ji}^\dagger u_j = \sum_j A_{ij}^* u_j.$$

Σε δεύτερο βήμα προκύπτει η δράση του  $\hat{A}^\dagger$  στην  $\Psi = \sum_i c_i u_i$ :

$$\hat{A}^\dagger \Psi = \hat{A}^\dagger \sum_i c_i u_i = \sum_i c_i \hat{A}^\dagger u_i = \sum_{ij} c_i A_{ji}^\dagger u_j = \sum_{ij} c_i A_{ij}^* u_j$$

Θυμίζουμε ότι, σε αυτές τις εκφράσεις, τα  $u_j \equiv u_j(x)$  είναι συναρτήσεις βάσης, ενώ τα  $A_{ji}^\dagger = A_{ij}^*$  και  $c_i$  μιγαδικοί αριθμοί. Το αποτέλεσμα γράφτηκε σε δύο μορφές (με  $A_{ji}^\dagger$  και  $A_{ij}^*$ ) για να τονιστεί η δυνατότητα χρήσης της εξ. (55).

Εισάγουμε τώρα έναν βολικό συμβολισμό. Ήδη συμβολίσαμε τα στοιχεία πίνακα του τελεστή  $\hat{A}$  με  $A_{ij}$  και τα στοιχεία πίνακα του ανάστροφου και μιγαδικού συζυγούς (δηλ. ερμιτιανού συζυγούς) με  $A_{ji}^\dagger = A_{ij}^*$  (εξ. 55). Υιοθετούμε, αντίστοιχα, συμβολισμό για τις ακολουθίες που ορίζουν καταστάσεις: με  $c$  συμβολίζουμε, πέραν της ακολουθίας, τον πίνακα-στήλη που προκύπτει από τα στοιχεία της ακολουθίας  $c_i$ . Επιπλέον, με  $c^\dagger$  ορίζουμε τον ανάστροφο και μιγαδικό συζυγή πίνακα του  $c$ , δηλαδή τον πίνακα-γραμμή

<sup>(46)</sup>Ο ορισμός (54) προφανώς καθίσταται προβληματικός για τις καταστάσεις  $\Psi$  εκτός πεδίου ορισμού του  $\hat{A}$ . Για μαθηματικά αυστηρή αντιμετώπιση του προβλήματος, βλ. J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press (1955).

με στοιχεία  $c_i^*$ . Επομένως, εφαρμόζοντας τους κανόνες πολλαπλασιασμού πινάκων, το εσωτερικό γινόμενο δύο καταστάσεων που ορίζονται μέσω ακολουθιών  $c$  και  $d$  γράφεται

$$(c, d) = \sum_i c_i^* d_i = c^\dagger d. \quad (56)$$

Ομοίως, η δράση γραμμικού τελεστή αναπαριστάται από τον πίνακα-στήλη (βλ. εξ. 51)

$$d = A c \quad (57)$$

και το εσωτερικό γινόμενο  $(c, Ad) = (A^\dagger c, d)$  γράφεται σε μορφή πινάκων

$$(c, Ad) = c^\dagger A d = (A^\dagger c)^\dagger d, \quad (58)$$

όπως εύκολα επαληθεύεται εφαρμόζοντας τους κανόνες πολλαπλασιασμού πινάκων.

Θα δώσουμε τώρα επιπλέον ιδιότητες των ερμιτιανών συζυγών τελεστών. Έστω  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  γραμμικοί τελεστές. Τότε:<sup>(47)</sup>

1. Ο  $\hat{A}^\dagger$  είναι μοναδικός (δεν υπάρχουν δύο διαφορετικοί τελεστές που να είναι ερμιτιανοί συζυγείς του  $\hat{A}$ ).
2.  $(\hat{A}^\dagger)^\dagger = \hat{A}$ .
3. Ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός τελεστής, αν και μόνο αν  $\hat{A}^\dagger = \hat{A}$ .
4.  $(\hat{A}\hat{B})^\dagger = \hat{B}^\dagger\hat{A}^\dagger$ .<sup>(48)</sup>
5. Οι τελεστές  $\hat{A}\hat{A}^\dagger$  και  $\hat{A}^\dagger\hat{A}$  είναι ερμιτιανοί.<sup>(49)</sup>
6. Οι τελεστές  $\frac{1}{2}(\hat{A} + \hat{A}^\dagger)$  και  $\frac{1}{2i}(\hat{A} - \hat{A}^\dagger)$  είναι ερμιτιανοί και αντιστοιχούν στη γενίκευση του πραγματικού και φανταστικού μέρους, αντίστοιχα, ενός μιγαδικού αριθμού.

## 4.6 Μοναδιαίοι τελεστές

Θα ορίσουμε τώρα τη γενίκευση των ορθογώνιων πινάκων, οι οποίοι διατηρούν το μέτρο και το εσωτερικό γινόμενο διανυσμάτων και αντιστοιχούν σε στροφές στον  $\mathbb{R}^n$ . Στο χώρο Hilbert, τις στροφές εκφράζουν οι μοναδιαίοι τελεστές (*unitary operators*). Ένας γραμμικός τελεστής  $\hat{U}$  λέγεται μοναδιαίος, αν είναι «1-1 και επί» (δηλ. αντιστρέψιμος)

<sup>(47)</sup>Πρόβλημα 9.

<sup>(48)</sup>Απόδειξη: για τυχαίες  $\Psi$  και  $\Phi$  έχουμε  $(\Phi, \hat{A}\hat{B}\Psi) = (\hat{A}^\dagger\Phi, \hat{B}\Psi) = (\hat{A}^\dagger\hat{B}^\dagger\Phi, \Psi)$ .

<sup>(49)</sup>Απόδειξη: για τυχαία  $\Psi$  έχουμε  $(\Psi, \hat{A}\hat{A}^\dagger\Psi) = (\hat{A}^\dagger\Psi, \hat{A}^\dagger\Psi) = \|\hat{A}^\dagger\Psi\|^2 \in \mathbb{R}$ .

και ισομετρικός, δηλαδή η δράση του σε οποιαδήποτε διάνυσμα διατηρεί τη νόρμα:

$$\|\hat{U}\Psi\| = \|\Psi\| \quad (59)$$

Από τον ορισμό προκύπτει<sup>(50)</sup> ότι οι μοναδιαίοι τελεστές διατηρούν και το εσωτερικό γινόμενο:

$$(\hat{U}\Psi, \hat{U}\Phi) = (\Psi, \Phi) \quad (60)$$

για τυχαίες  $\Psi$  και  $\Phi \in \mathcal{H}$ . Κατά συνέπεια, διατηρούν την κατανομή πιθανότητας κατά τη μέτρηση (βλ. εξ. 27). Δεδομένου ότι οι κατανομές πιθανότητας συνδέουν την κβαντική θεωρία με τις μετρήσεις, οι μοναδιαίοι τελεστές παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη μαθηματική έκφραση της αρχής της σχετικότητας.<sup>(51)</sup> Θα δούμε, επίσης, ότι οι μοναδιαίοι τελεστές αντιστοιχούν σε αλλαγή ορθοκανονικής βάσης στο χώρο Hilbert.

Για τυχαίους μοναδιαίους τελεστές  $\hat{U}$  και  $\hat{U}'$  αποδεικνύονται ακόλουθες ιδιότητες:<sup>(52)</sup>

1. Ο αντίστροφος ισούται με τον ερμιτιανό συζυγή:  $\hat{U}\hat{U}^\dagger = \hat{U}'^\dagger\hat{U}' = \hat{I}$  (όπου  $\hat{I}$  ο ταυτοτικός τελεστής). Ο αντίστροφος ενός μοναδιαίου τελεστή αντιστοιχεί στην αντίστροφη στροφή στο χώρο Hilbert.
2. Το γινόμενο  $\hat{U}\hat{U}'$  είναι μοναδιαίος.
3. Οι ιδιοτιμές μοναδιαίων τελεστών έχουν μέτρο τη μονάδα, δηλαδή, αν  $\hat{U}\Psi_{\hat{U}} = \alpha\Psi_{\hat{U}}$ , τότε  $\alpha = e^{i\gamma}$ ,  $\gamma \in \mathbb{R}$ .

## 4.7 Μετασχηματισμός ορθοκανονικής βάσης

Η ορθοκανονική βάση δεν είναι, προφανώς, μοναδική. Όπως και στους χώρους πεπερασμένης διάστασης, γραμμικοί συνδυασμοί των διανυσμάτων βάσης μπορούν να παράξουν άπειρες διαφορετικές ορθοκανονικές βάσεις. Ένας μετασχηματισμός μεταξύ ορθοκανονικών βάσεων  $u = \{u_1, u_2, \dots\}$  και  $v = \{v_1, v_2, \dots\}$  εκφράζεται από το εσωτερικό γινόμενο

$$U_{ij} \equiv (v_i, u_j). \quad (61)$$

Δηλαδή, σε αναλογία με την προβολή οποιασδήποτε κυματοσυνάρτησης σε διανύσματα βάσης, που δίνει  $c_i = (u_i, \Psi)$  (βλ. τις εξ. 42 και 43), αναπτύσσουμε κάθε μία των συναρτήσεων βάσης  $u_j$  στη βάση  $\{v_i\}$ . Αν λοιπόν θέλουμε να βρούμε τις συντεταγμένες της  $\Psi = \sum_j c_j u_j$  στη νέα βάση  $\{v_i\}$ , ώστε να λάβουμε το νέο ανάπτυγμα  $\Psi = \sum_j d_j v_j$ ,

<sup>(50)</sup>Πρόβλημα 10.

<sup>(51)</sup>Με τον όρο «αρχή της σχετικότητας» δεν αναφερόμαστε στη θεωρία της σχετικότητας του Einstein, αλλά γενικότερα στην απαίτηση συμφωνίας φυσικών νόμων για παρατηρητές διαφορετικών συστημάτων αναφοράς.

<sup>(52)</sup>Πρόβλημα 11.



πρέπει να κάνουμε τα ακόλουθα βήματα:

$$d_i = (v_i, \Psi) = (v_i, \sum_j c_j u_j) = \sum_j (v_i, u_j) c_j \equiv \sum_j U_{ij} c_j. \quad (62)$$

Επομένως, ο πίνακας  $U$  (61) μετασχηματίζει τις συντεταγμένες της κυματοσυνάρτησης από τη βάση  $\{u_i\}$  στη βάση  $\{v_i\}$ . Επίσης, ο πίνακας  $U$  αντιστοιχεί στο μοναδιαίο τελεστή  $\hat{U}$ , ο οποίος ορίζεται από την απεικόνιση κάθε συνάρτησης βάσης  $v_j$  στη συνάρτηση βάσης  $u_j$ :

$$\hat{U} v_j = u_j. \quad (63)$$

Πράγματι, τα στοιχεία πίνακα του  $\hat{U}$  είναι  $(v_i, \hat{U} v_j) = (v_i, u_j) = U_{ij}$ , σε συμφωνία με την (61). Συνεπώς, ο πίνακας  $U$  είναι η αναπαράσταση του τελεστή (63) στη βάση  $v$ . Σημειώνουμε το εξής: ενώ ο τελεστής  $\hat{U}$  μετασχηματίζει τα στοιχεία βάσης από τα  $v$  στα  $u$ , ο αντίστοιχος πίνακας  $U$  μετασχηματίζει τις συντεταγμένες από τη βάση  $u$  στη βάση  $v$ .

Η απεικόνιση  $\hat{U}$  είναι 1 – 1 και επί, δηλαδή αντιστρέψιμη. Είναι αναμενόμενο, και εύκολο ναδειχθεί, ότι ο  $\hat{U}$  είναι μοναδιαίος, διότι η αλλαγή ορθοκανονικής βάσης εκφράζει μια στροφή.<sup>(53)</sup> Αλλά και αντίστροφα, αν ένας τελεστής είναι μοναδιαίος, τότε απεικονίζει οποιαδήποτε ορθοκανονική βάση  $v$  σε άλλη ορθοκανονική βάση  $u$ , δεδομένου ότι διατηρεί την ορθογωνιότητα και την κανονικοποίηση των στοιχείων βάσης και δεδομένου ότι είναι αντιστρέψιμος.

## 4.8 Σχέση ερμιτιανών και μοναδιαίων τελεστών

Θυμίζουμε ότι, αν  $f(z) = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots$  μια αναλυτική συνάρτηση, και  $\hat{A}$  κάποιος γραμμικός τελεστής, ορίζεται ο (επίσης γραμμικός) τελεστής  $\hat{f}(\hat{A}) = c_0 + c_1 \hat{A} + c_2 \hat{A}^2 + \dots$ .

Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να ορίσουμε την ακόλουθη εκθετική συνάρτηση ενός γραμμικού τελεστή  $\hat{A}$ :

$$e^{\lambda \hat{A}} = 1 + \lambda \hat{A} + \frac{1}{2} \lambda^2 \hat{A}^2 + \dots = \sum_n \frac{\lambda^n}{n!} \hat{A}^n \quad (\lambda \in \mathbb{C}). \quad (64)$$

Προκύπτει ότι

$$e^{\lambda \hat{A}} e^{\lambda \hat{B}} = e^{\lambda(\hat{A} + \hat{B})}, \quad \text{αν } [\hat{A}, \hat{B}] = 0. \quad (65)$$

Για να πεισθούμε για αυτό, αναπτύσσουμε τα εκθετικά:  $e^{\lambda \hat{A}} e^{\lambda \hat{B}} = \sum_n \frac{\lambda^n}{n!} \hat{A}^n \sum_m \frac{\lambda^m}{m!} \hat{B}^m$ . Παρατηρούμε ότι, εφόσον οι τελεστές μετατίθενται, τα γινόμενα των επιμέρους όρων των σειρών δεν διαφοροποιούνται φορμαλιστικά από τα αντίστοιχα γινόμενα που θα

<sup>(53)</sup>Πρόβλημα 12.

είχαμε, αν οι  $\hat{A}$  και  $\hat{B}$  ήταν αριθμοί. Επομένως, καταλήγουμε στην (65). Ειδικότερα έχουμε

$$e^{i\hat{A}} e^{-i\hat{A}} = 1. \quad (66)$$

Αν ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός, τότε οι τελεστές  $e^{i\hat{A}} e^{-i\hat{A}}$  είναι, επιπρόσθετα, ερμιτιανοί συζυγείς,<sup>(54)</sup> επομένως ο  $e^{i\hat{A}}$  είναι μοναδιαίος. Αντίστροφα, οι μοναδιαίοι τελεστές γράφονται στη μορφή  $\hat{U} = e^{i\hat{A}}$ , όπου  $\hat{A}$  κατάλληλος ερμιτιανός τελεστής.

## 4.9 Προβλήματα

1. Θεωρήστε ένα σωματίδιο που κινείται σε μία διάσταση, περιορισμένο στο διάστημα  $[0, a]$ . Οι κυματοσυναρτήσεις αυτού του προβλήματος είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες στο ίδιο διάστημα,  $\int_0^a |\Psi|^2 dx = C < \infty$ , και οι φυσικές καταστάσεις αντιστοιχούν σε κυματοσυναρτήσεις κανονικοποιημένες στη μονάδα:  $C = 1$ . Οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες μεταβάλλονται αναλόγως με το φυσικό πρόβλημα. Εξετάστε δύο διαφορετικές περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών: α) επιτρέπονται όλες οι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες κυματοσυναρτήσεις, ή β) επιτρέπονται μόνον εκείνες, για τις οποίες  $\Psi(0) = \Psi(a) = 0$ . • Εξετάστε στις δύο περιπτώσεις, (α) και (β), τον τελεστή ορμής  $\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$  και τον τελεστή κινητικής ενέργειας  $\hat{T} = -\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ , και χαρακτηρίστε το σύνολο των κυματοσυναρτήσεων, για τις οποίες είναι ερμιτιανοί. Θυμηθείτε ότι η δράση του τελεστή πρέπει να παράγει συναρτήσεις που ικανοποιούν τις συνοριακές συνθήκες, δηλαδή να παραμένει εντός του χώρου των φυσικών καταστάσεων. • Βρείτε, για τις περιπτώσεις (α) και (β), από ένα παράδειγμα κυματοσυνάρτησης, για την οποία η δράση του τελεστή παράγει συνάρτηση εκτός χώρου και η οποία, συνεπώς, δεν ανήκει στο πεδίο ορισμού του τελεστή. • Βρείτε κυματοσυναρτήσεις, για τις οποίες απλή δράση του τελεστή να μένει εντός του χώρου, ενώ διπλή να μην είναι επιτρεπτή, διότι οδηγεί εκτός του χώρου. • Βρείτε κυματοσυναρτήσεις, για τις οποίες απλή δράση του τελεστή να μένει εντός πεδίου ορισμού του τελεστή, ενώ διπλή να οδηγεί σε κυματοσυνάρτηση εντός χώρου, αλλά εκτός πεδίου ορισμού του τελεστή.
2. Δείξτε ότι οι κυματοσυναρτήσεις  $\sin(n\pi x)$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) αποτελούν ορθοκανονική βάση στον  $\mathcal{L}^2([0, 1])$  με συνοριακές συνθήκες  $\Psi(0) = \Psi(1) = 0$ . (Χρησιμοποιήστε την ανάλυση Fourier τυχαίας  $\Psi \in \mathcal{L}^2([0, 1])$  σε συναρτήσεις ημιτόνου.)
3. Βρείτε μια ορθοκανονική βάση στον  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ . (Υπόδειξη: χρησιμοποιήστε μια διαμέριση σε άπειρα αριθμήσιμα διαστήματα. Εφαρμόστε ανάπτυγμα Fourier σε κάθε διάστημα.)

<sup>(54)</sup> Αν ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός, τότε  $\hat{A}^n = (\hat{A}^\dagger)^n$ , άρα  $(i\hat{A})^n = (-i^* \hat{A}^\dagger)^n = [(-i\hat{A})^\dagger]^n$ , από όπου προκύπτει, μέσω της δυναμοσειράς,  $e^{-i\hat{A}} = [e^{i\hat{A}}]^\dagger$ .

4. Δείξτε ότι οι συντελεστές αναπτύγματος  $\Psi = \sum_{i=1}^{\infty} c_i u_i$  (όπου  $\{u_i\}$  ορθοκανονική βάση) ικανοποιούν τη σχέση  $c_i = (u_i, \Psi)$ .
5. Δείξτε ότι το εσωτερικό γινόμενο κυματοσυναρτήσεων  $(\Psi, \Phi)$ , με  $\Psi = \sum_i c_i u_i$  και  $\Phi = \sum_i c'_i u_i$ , επάγει εσωτερικό γινόμενο των ακολουθιών  $c \equiv \{c_i\}$  και  $c' \equiv \{c'_i\}$ , με τιμή  $(c, c') = \sum_i c_i^* c'_i$ . Δείξτε ότι αυτή η μορφή ικανοποιεί τις ιδιότητες του εσωτερικού γινομένου των κυματοσυναρτήσεων [βλ. εξ. (13): αντιγραμμικότητα ως προς το πρώτο όρισμα ( $c$ ), γραμμικότητα ως προς το δεύτερο ( $c'$ ), θετική νόρμα  $\|c\|^2 = (c, c)$ , και  $(c, c') = (c', c)^*$ ].
6. Θεωρήστε τον χώρο  $\mathcal{L}^2([0, 1])$  με συνοριακές συνθήκες  $\Psi(0) = \Psi(1) = 0$  και τη βάση  $u_n(x) = \sin(n\pi x)$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Βρείτε τα στοιχεία πίνακα α)  $T_{nm}$  του τελεστή της κινητικής ενέργειας  $\hat{T} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$  και β)  $x_{nm}$  του τελεστή θέσης  $\hat{x}$ . (Υπόδειξη: θα σας χρησιμεύσει η ταυτότητα  $2 \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$ . Θα χρειαστεί ολοκλήρωση κατά παράγοντες.)
7. Θεωρήστε ανάπτυγμα των κυματοσυναρτήσεων σε βάση. Δείξτε ότι ο πολλαπλασιασμός γραμμικών τελεστών αναπαριστάται από γινόμενο πινάκων (ενδεχομένως άπειρης διάστασης):  $\hat{C} = \hat{A}\hat{B} \rightarrow C_{ij} = \sum_k A_{ik} B_{kj}$  (σχ. 52). [Υπόδειξη: Γράψτε το ανάπτυγμα της δράση του  $\hat{B}$  σε μια  $\Psi = \sum_i c_i u_i$  και προχωρήστε σε αναλογία με την απόδειξη της σχ. 51.]
8. Υποθέστε ότι, για κάποιον γραμμικό τελεστή  $\hat{A}$ , ισχύει  $(u_i, \hat{A} u_j) = (u_j, \hat{A} u_i)^*$ , όπου  $u_i$  και  $u_j$  διανύσματα βάσης. Δείξτε ότι ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός. (Υπόδειξη: αναπτύξτε τυχαία κυματοσυνάρτηση στη δεδομένη βάση,  $\Psi = \sum_i c_i u_i$ , και ελέγξτε ότι το εσωτερικό γινόμενο  $(\Psi, \hat{A} \Psi)$  είναι πραγματικός αριθμός.)
9. Δείξτε τις ακόλουθες ιδιότητες ερμιτιανών συζυγών χρησιμοποιώντας την αναπαράστασή τους με πίνακες.
- Ο  $\hat{A}^\dagger$  είναι μοναδικός (δεν υπάρχουν δύο διαφορετικοί τελεστές που να είναι ερμιτιανοί συζυγείς του  $\hat{A}$ ).
  - $(\hat{A}^\dagger)^\dagger = \hat{A}$ .
  - Ο  $\hat{A}$  είναι ερμιτιανός τελεστής, αν και μόνο αν  $\hat{A}^\dagger = \hat{A}$ .
  - $(\hat{A}\hat{B})^\dagger = \hat{B}^\dagger \hat{A}^\dagger$ .
  - Οι τελεστές  $\hat{A}\hat{A}^\dagger$  και  $\hat{A}^\dagger \hat{A}$  είναι ερμιτιανοί.
  - Οι τελεστές  $\frac{1}{2}(\hat{A} + \hat{A}^\dagger)$  και  $\frac{1}{2i}(\hat{A} - \hat{A}^\dagger)$  είναι ερμιτιανοί.
10. Ξεκινώντας από τον ορισμό των μοναδιαίων τελεστών  $\hat{U}$  (διατήρηση νόρμας, εξ. 59), αποδείξτε ότι η δράση τους διατηρεί και το εσωτερικό γινόμενο (εξ. 60).

(Υπόδειξη: για δύο τυχαίες κυματοσυναρτήσεις,  $\Psi$  και  $\Phi$ , εξετάστε τις ποσότητες  $\|\hat{U}(\Psi + \Phi)\|^2$  και  $\|\hat{U}(\Psi + i\Phi)\|^2$ .)

11. Για τυχαίους μοναδιαίους τελεστές  $\hat{U}$  και  $\hat{U}'$ , δείξτε τις ακόλουθες ιδιότητες:
- Ο αντίστροφος ισούται με τον ερμιτιανό συζυγή:  $\hat{U}\hat{U}^\dagger = \hat{U}'\hat{U} = \hat{I}$  (όπου  $\hat{I}$  ο ταυτοτικός τελεστής).
  - Το γινόμενο  $\hat{U}\hat{U}'$  είναι μοναδιαίος.
  - Οι ιδιοτιμές μοναδιαίων τελεστών έχουν μέτρο τη μονάδα, δηλαδή, αν  $\hat{U}\Psi_{\hat{U}} = \alpha\Psi_{\hat{U}}$ , τότε  $\alpha = e^{i\gamma}$ ,  $\gamma \in \mathbb{R}$ .
12. Δείξτε ότι ο τελεστής μετασχηματισμού βάσης  $\hat{U}$  (εξ. 63) είναι μοναδιαίος. (Υπόδειξη: εξετάστε τη νόρμα  $\|\hat{U}\Psi\|$  για τυχαία  $\Psi = \sum_i d_i v_i$ .)
13. Θεωρήστε ένα σωματίδιο που κινείται σε μονοδιάστατα σε δακτύλιο μοναδιαίας περιφέρειας. Η θέση του στην περιφέρεια του δακτυλίου παραμετροποιείται, δηλαδή, από το  $x \in [0, 1)$ , ώστε το όριο  $x = 1$  να ταυτίζεται με το  $x = 0$ . Επομένως, το σύστημα χαρακτηρίζεται από περιοδικές συνοριακές συνθήκες,  $\Psi(0) = \Psi(1)$ . Γράψτε τον πίνακα που εκφράζει την αλλαγή βάσης στον  $\mathcal{L}^2([0, 1])$  από

$$u_n = \begin{cases} \sqrt{2} \sin(2n\pi x), & n < 0 \\ 1, & n = 0 \\ \sqrt{2} \cos(2n\pi x), & n > 0 \end{cases}$$

σε  $v_n = e^{2in\pi x}$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Εξετάστε αν ο πίνακας είναι μοναδιαίος.

14. Θεωρήστε την κυματοσυνάρτηση (36) (κεφ. 3),  $\Phi_{x_0, \varepsilon}(x)$ . Στο όριο  $\varepsilon \ll 1$ : α) δείξτε ότι η μέση τιμή του τελεστή θέσης είναι  $x_0$ , ενώ η τυπική απόκλιση τείνει στο μηδέν. β) υπολογίστε τη νόρμα  $\|\hat{x}\Phi_{x_0, \varepsilon} - x_0\Phi_{x_0, \varepsilon}\|$ . Εξετάστε αν η νόρμα τείνει στο μηδέν. Δικαιολογείται να πούμε ότι η  $\Phi_{x_0, \varepsilon}$  είναι, προσεγγιστικά, ιδιοκατάσταση του τελεστή θέσης με ιδιοτιμή  $x_0$ ; γ) Εξετάστε αν η νόρμα  $\|\Phi_{x_0, \varepsilon} - \Phi_{x_0, \varepsilon/2}\|$  τείνει στο μηδέν. Μια ακολουθία από κυματοσυναρτήσεις  $\Phi_{x_0, \varepsilon_n}$  με ολοένα μειούμενο  $\varepsilon_n$ , έτσι ώστε  $\lim_{n \rightarrow \infty} \varepsilon_n = 0$  (δηλαδή, με διασπορά να τείνει στο μηδέν), συγκλίνει στο χώρο Hilbert; Συγκρίνετε με το ερώτημα (β) και με το πρόβλημα 9 του κεφ. 3 και σχολιάστε.

## 5 Χρονική εξέλιξη των καταστάσεων: η εξίσωση Schrödinger

Ως τώρα μιλήσαμε για τις καταστάσεις, τα μετρήσιμα μεγέθη, και τη μαθηματική τους αναπαράσταση. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τη χρονική εξέλιξη των καταστάσεων.

Έστω μια συλλογή, αναπαριστούμενη, σε χρόνο  $t = t_1$ , από μια κυματοσυνάρτηση  $\Psi(t_1)$  με  $\|\Psi(t_1)\| = 1$ . Αφήνουμε το σύστημα να εξελιχθεί σε χρόνο  $t_2 > t_1$ . Με αυτό τον τρόπο, αποκτούμε μια νέα συλλογή,  $\Psi(t_2)$ , η οποία αντιστοιχεί στην προετοιμασία «προετοιμάζω τη συλλογή στην κατάσταση  $\Psi(t_1)$  και περιμένω χρόνο  $t = t_2 - t_1$ , πριν κάνω οποιαδήποτε μέτρηση».

Προφανώς, υπάρχει μια απεικόνιση της κατάστασης σε χρόνο  $t_1$  στην κατάσταση σε χρόνο  $t_2$ . Στη μαθηματική περιγραφή, ονομάζουμε αυτή την απεικόνιση  $\hat{U}(t_2, t_1)$ . Για την  $\Psi(t_2) = \hat{U}(t_2, t_1) \Psi(t_1)$  αξιώνουμε τα εξής. Πρώτον,  $\|\Psi(t_2)\| = \|\Psi(t_1)\| = 1$ , ώστε να αντιστοιχούν σε καταστάσεις. Δεύτερον, να ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή η απεικόνιση  $\hat{U}$  να είναι γραμμική:  $\hat{U}(t_2, t_1)(a\Phi + b\Psi) = a\hat{U}(t_2, t_1)\Phi + b\hat{U}(t_2, t_1)\Psi$ . Από τα δύο αξιώματα προκύπτει ότι ο τελεστής  $\hat{U}$  είναι μοναδιαίος.<sup>(55)</sup> Το γινόμενο

$$\hat{U}(t_3, t_1) = \hat{U}(t_3, t_2)\hat{U}(t_2, t_1) \quad (67)$$

είναι επίσης μοναδιαίος τελεστής (ως γινόμενο μοναδιαίων) και έχει εμφανή ερμηνεία: η αναμονή για χρόνο  $(t_2 - t_1)$  και περαιτέρω αναμονή για χρόνο  $(t_3 - t_2)$  (χωρίς ενδιάμεση μέτρηση ή άλλη αλληλεπίδραση με το σύστημα) δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με την αναμονή για χρόνο  $(t_3 - t_1)$ .

Ο τελεστής χρονικής εξέλιξης ενδέχεται να μην εξαρτάται από τον αρχικό χρόνο, παρά μόνον από τη διαφορά  $t_2 - t_1 = t$ . Δηλαδή, είτε ξεκινήσουμε από μια κατάσταση  $\Psi$  σε χρόνο  $t_1$  και κάνουμε μετρήσεις σε χρόνο  $t_1 + t$ , είτε ξεκινήσουμε από την ίδια  $\Psi$  σε χρόνο  $t'_1 \neq t_1$  και κάνουμε μετρήσεις σε χρόνο  $t'_1 + t$ , να έχουμε τα ίδια στατιστικά αποτελέσματα. Από φυσικής πλευράς, αυτό απαιτεί να μη δρούμε στο σύστημα με χρονικά μεταβαλλόμενες δυνάμεις ή πεδία. Τότε, λέμε ότι έχουμε *συμμετρία χρονικής μετατόπισης*. Σε αυτή την περίπτωση,  $\hat{U}(t_2, t_1) = \hat{U}(t_2 - t_1) \equiv \hat{U}(t)$ , δηλαδή, ο (μοναδιαίος) τελεστής χρονικής εξέλιξης εξαρτάται μόνο από μια χρονική παράμετρο. Τότε γράφεται στη μορφή (δίνουμε το αποτέλεσμα χωρίς απόδειξη)

$$\hat{U}(t) = e^{-it\hat{H}/\hbar}, \quad (68)$$

<sup>(55)</sup> Εξ' ορισμού, οι μοναδιαίοι τελεστές είναι γραμμικοί και διατηρούν τη νόρμα. Εδώ, αξιώσαμε τη διατήρηση της νόρμας για τα διανύσματα με μοναδιαία νόρμα, αλλά από τη γραμμικότητα προκύπτει η διατήρηση της νόρμας για όλα τα διανύσματα.

όπου  $\hat{H}$  ερμιτιανός τελεστής που ονομάζεται Χαμιλτονιανή του συστήματος και ερμηνεύεται ως τελεστής της ενέργειας. Η σταθερά του Planck  $\hbar$  υπεισέρχεται εδώ για την μετατροπή μονάδων μεταξύ χρόνου και ενέργειας.<sup>(56)</sup> Έχουμε, λοιπόν,

$$\Psi(t_1 + t) = \hat{U}(t) \Psi(t_1) = e^{-it\hat{H}/\hbar} \Psi(t_1), \quad (69)$$

για αρχική συνθήκη  $\Psi(t_1)$ . Διαφορίζοντας ως προς το χρόνο, το εκθετικό προσεγγίζεται από τον πρώτο όρο της σειράς,  $e^{-i\delta t\hat{H}/\hbar} = 1 - i\delta t\frac{1}{\hbar}\hat{H}$  ( $\delta t \rightarrow 0$ ). Λαμβάνουμε λοιπόν  $\delta\Psi = \Psi(t_1 + \delta t) - \Psi(t_1) = -i\delta t\frac{1}{\hbar}\hat{H}\Psi(t_1)$ , ή

$$i\hbar\frac{d\Psi(t)}{dt} = \hat{H}\Psi(t). \quad (70)$$

Αυτή ονομάζεται *εξίσωση του Schrödinger*, η οποία περιγράφει τη χρονική εξέλιξη των καταστάσεων στην κβαντική μηχανική.

Η ίδια εξίσωση (70) προκύπτει και αν δεν έχουμε συμμετρία χρονικής μετατόπισης, αλλά, τότε, ο τελεστής  $\hat{U}$  εξαρτάται από δύο παραμέτρους ( $t_2, t_1$ ) και δεν συνδέεται με τη Χαμιλτονιανή  $\hat{H}$  μέσω της εξ. (68). Ας δούμε τη γενική αυτή περίπτωση. Ξεκινώντας σε χρόνο  $t$  με μια κυματοσυνάρτηση  $\Psi(t)$ , έχουμε σε χρόνο  $t + \delta t$  την  $\Psi(t + \delta t) = \Psi(t) + \delta\Psi$ . Αξιώνουμε τα ακόλουθα.

1. Διατήρηση της νόρμας  $\|\Psi(t)\| = \|\Psi(t + \delta t)\| = 1$ , διότι και οι δύο εκφράζουν φυσικές καταστάσεις.
2. Συνέχεια, διότι η χρονική εξέλιξη κατανομής πιθανότητας των παρατηρήσιμων μεγεθών είναι συνεχής.<sup>(57)</sup>
3. Διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης ως προς το χρόνο, διότι ο χαρακτηρισμός της  $\Psi(t)$  ως κατάστασης, σημαίνει ότι περιέχει όλη τη δυνατή πληροφορία για το σύστημα και πρέπει να επαρκεί ως αρχική συνθήκη.<sup>(58)</sup> Από αυτή την απαίτηση

<sup>(56)</sup> Η σταθερά  $\hbar$  θα μπορούσε να απορροφηθεί στον ορισμό του τελεστή  $\hat{H}$ . Η εκπεφρασμένη παρουσία της στην εξίσωση έχει ιστορικούς λόγους.

<sup>(57)</sup> Εδώ τονίζουμε την ερμηνεία αυτής της πρότασης. Ξεκινάμε με μια συλλογή και κάνουμε μετρήσεις σε χρόνο  $t$ . Προετοιμάζουμε μια πανομοιότυπη συλλογή και κάνουμε μετρήσεις σε χρόνο  $t + \delta t$ . Για επαρκώς μικρά  $\delta t$ , τα δύο σετ μετρήσεων τείνουν στην ίδια στατιστική. Ποια *δεν είναι* η ερμηνεία: κάνουμε μετρήσεις σε χρόνο  $t$  και, στα ήδη μετρημένα συστήματα, κάνουμε επιπλέον μετρήσεις σε χρόνο  $t + \delta t$ .

<sup>(58)</sup> Σε περίπτωση διαφορικής εξίσωσης ανώτερης τάξης, θα χρειαζόμασταν και την παράγωγο  $\frac{d\Psi(t)}{dt}$ , ή και ανώτερες παραγώγους, ως αρχική συνθήκη. Τότε, όμως, η  $\Psi$  δεν θα κωδικοποιούσε πλήρως την προετοιμασία του συστήματος: οι παράγωγοι εκφράζουν τη χρονική μεταβολή της  $\Psi(t)$  σε προγενέστερους χρόνους και κωδικοποιούν επίσης την προετοιμασία. Σε σύγκριση, στην κλασική μηχανική, η κατάσταση δεν περιγράφεται μόνο από τη θέση, αλλά από το ζεύγος θέσης-ορμής, δηλαδή θέσης και χρονικής παραγώγου της, που απαιτούνται ως αρχικές συνθήκες. Δεν χρειάζεται, όμως, και η παράγωγος της ορμής ως αρχική συνθήκη.

προκύπτει ότι, για μικρά  $\delta t$ , η  $\|\delta\Psi\|$  θα είναι επίσης μικρή, και θα μηδενίζεται γραμμικά στο όριο  $\delta t \rightarrow 0$ :  $\delta\Psi \propto \delta t$ .

4. Αρχή της επαλληλίας: Αν, σε διάστημα  $\delta t$ , η  $\Psi_1(t)$  εξελίσσεται στην  $\Psi_1(t) + \delta\Psi_1$  και η  $\Psi_2(t)$  στην  $\Psi_2(t) + \delta\Psi_2$ , τότε η  $\Phi(t) \equiv a\Psi_1(t) + b\Psi_2(t)$  πρέπει να εξελίσσεται στην  $\Phi(t) + \delta\Phi \equiv a\Psi_1(t) + b\Psi_2(t) + a\delta\Psi_1 + b\delta\Psi_2$ .

Από τα παραπάνω αξιώματα λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned}
0 &= \|\Psi(t + \delta t)\|^2 - \|\Psi(t)\|^2 \\
&= (\Psi(t) + \delta\Psi, \Psi(t) + \delta\Psi) - (\Psi(t), \Psi(t)) \\
&= (\Psi(t), \Psi(t)) + (\delta\Psi, \Psi(t)) + (\Psi(t), \delta\Psi) + (\delta\Psi, \delta\Psi) - (\Psi(t), \Psi(t)) \\
&= (\Psi(t), \delta\Psi)^* + (\Psi(t), \delta\Psi) + (\delta\Psi, \delta\Psi) \\
&= 2\text{Re}(\Psi(t), \delta\Psi) + \|\delta\Psi\|^2.
\end{aligned}$$

Ο όρος  $\|\delta\Psi\|^2$  γίνεται αμελητέος για μικρά  $\delta t$  (είναι ανάλογος του  $\delta t^2$  λόγω της προαναφερθείσας γραμμικής σχέσης  $\delta\Psi \propto \delta t$ ). Επομένως,  $\text{Re}(\Psi(t), \delta\Psi) = 0$ .<sup>(59)</sup> Θέτοντας  $\delta\Psi = \hat{A}(t)\Psi(t)$ , και απαιτώντας ο  $\hat{A}$  να είναι γραμμικός, λόγω της αξίωσης της αρχής της επαλληλίας, συμπεραίνουμε ότι η ποσότητα  $(\Psi, \hat{A}\Psi) \equiv (\Psi, \delta\Psi)$  είναι καθαρά φανταστικό μέγεθος, ή, αλλιώς, ότι η ποσότητα  $i(\Psi, \hat{A}\Psi) = (\Psi, i\hat{A}\Psi) \in \mathbb{R}$ . Αυτό σημαίνει ότι ο τελεστής  $i\hat{A}$  είναι ερμιτιανός. Επίσης, λόγω του προαναφερθέντος αξιώματος 3 (πρωτοβάθμιας διαφορικής εξίσωσης), πρέπει  $\hat{A}\Psi = \delta\Psi \propto \delta t$ , οπότε πρέπει  $\hat{A} \propto \delta t$ . Με βάση αυτά, ο ερμιτιανός τελεστής  $i\hat{A}$  γράφεται στη μορφή  $i\hat{A}(t) = \frac{1}{\hbar}\hat{H}(t)\delta t$ , όπου  $\hat{H}(t)$  ερμιτιανός τελεστής, τον οποίο ερμηνεύουμε ως τη Χαμιλτονιανή. Καταλήγουμε:  $\delta\Psi = -i\frac{1}{\hbar}\hat{H}(t)\Psi\delta t$ , δηλ.

$$i\hbar\frac{d\Psi(t)}{dt} = \hat{H}(t)\Psi(t). \quad (71)$$

Αυτή είναι η εξ. Schrödinger (70), με τη διαφορά ότι εδώ η Χαμιλτονιανή επιτρέπεται να είναι συνάρτηση του χρόνου:  $\hat{H} = \hat{H}(t)$ . Στην ειδική περίπτωση, που η  $\hat{H}$  είναι ανεξάρτητη του χρόνου, η (71) ταυτίζεται με την (70). Τότε, ολοκληρώνοντας ως προς το χρόνο με αρχική συνθήκη  $\Psi(t_1)$ , λαμβάνουμε ως φορμαλιστική λύση την εξ. (69).

Επομένως, η εξ. Schrödinger είναι ανεξάρτητη της συμμετρίας μετατόπισης ως προς το χρόνο, και βασίζεται σε αξιώματα συνέχειας, διαφορικής εξίσωσης πρώτης τάξης, και επαλληλίας.

---

<sup>(59)</sup>Πρόβλημα 1.

## 5.1 Χρονική εξάρτηση μέσω των τιμών. Διατηρούμενα μεγέθη

Από την εξίσωση του Schrödinger, που μας δίνει τη χρονική εξάρτηση των καταστάσεων, επάγεται προφανώς και η χρονική εξάρτηση των μέσω των τιμών τελεστών, και επομένως των κατανομών πιθανότητας όλων των μετρήσιμων μεγεθών. Αν  $\hat{A}$  ερμιτιανός τελεστής, τότε η μέση τιμή του σε χρόνο  $t$  είναι  $\langle \hat{A} \rangle_t \equiv (\Psi(t), \hat{A} \Psi(t))$ , όπου  $\Psi(t)$  κατάσταση της συλλογής. Διαφορίζοντας ως προς το χρόνο, λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \langle \hat{A} \rangle_t &= \left( \frac{d}{dt} \Psi(t), \hat{A} \Psi(t) \right) + \left( \Psi(t), \hat{A} \frac{d}{dt} \Psi(t) \right) \\
 &= \left( \frac{1}{i\hbar} \hat{H} \Psi(t), \hat{A} \Psi(t) \right) + \left( \Psi(t), \hat{A} \frac{1}{i\hbar} \hat{H} \Psi(t) \right) \quad [\text{από εξ. Schrödinger}] \\
 &= -\frac{1}{i\hbar} (\hat{H} \Psi(t), \hat{A} \Psi(t)) + \frac{1}{i\hbar} (\Psi(t), \hat{A} \hat{H} \Psi(t)) \quad [\text{ιδιότητες (13) εσ. γινομένου}] \\
 &= -\frac{1}{i\hbar} (\Psi(t), \hat{H} \hat{A} \Psi(t)) + \frac{1}{i\hbar} (\Psi(t), \hat{A} \hat{H} \Psi(t)) \quad [\text{επειδή ο } \hat{H} \text{ είναι ερμιτιανός}] \\
 &= \frac{1}{i\hbar} (\Psi(t), [\hat{A}, \hat{H}] \Psi(t)) \\
 &\equiv \frac{1}{\hbar} \langle i[\hat{H}, \hat{A}] \rangle_t.
 \end{aligned} \tag{72}$$

Εδώ βλέπουμε μια εφαρμογή της διαπίστωσης ότι, για δύο ερμιτιανούς τελεστές  $\hat{A}$  και  $\hat{H}$ , η ποσότητα  $i[\hat{H}, \hat{A}]$  είναι ερμιτιανός τελεστής [βλ. συζήτηση μετά την εξ. (34)]. Εάν το μερούμενο μέγεθος έχει εκπεφρασμένη χρονική εξάρτηση, δηλ.  $\hat{A} = \hat{A}(t)$ , τότε πρέπει να ληφθεί υπ' όψη και η παραγωγήιση ( $\Psi(t)$ ,  $\frac{\partial \hat{A}}{\partial t} \Psi(t)$ ). Λαμβάνουμε:

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{A} \rangle_t = \frac{1}{\hbar} \langle i[\hat{H}, \hat{A}] \rangle_t + \left\langle \frac{\partial \hat{A}}{\partial t} \right\rangle_t \tag{73}$$

Αυτή ονομάζεται συχνά *σχέση του Ehrenfest*.

Ως εφαρμογή αυτού του αποτελέσματος, εξετάζουμε τη μεταβολή της θέσης ενός σωματιδίου, για το οποίο  $\hat{H} = \hat{T} + \hat{V} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \hat{V}(\hat{x})$  με  $\hat{H} \Psi = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right) \Psi$  (δηλ. η Χαμιλτονιανή έχει όρο κινητικής ενέργειας και δυναμικού που εξαρτάται από τη θέση). Είναι εύκολο να υπολογίσουμε τους μεταθέτες  $[\frac{1}{2m} \hat{p}^2, \hat{x}] = -i\hbar \frac{1}{m} \hat{p}$ <sup>(60)</sup> και  $[\hat{V}(\hat{x}), \hat{x}] = 0$ . Αντικαθιστώντας στην (73), και λαμβάνοντας υπ' όψη ότι ο τελεστής  $\hat{x}$  δεν έχει χρονική εξάρτηση, λαμβάνουμε

$$\frac{d \langle \hat{x} \rangle}{dt} = \frac{1}{m} \langle \hat{p} \rangle, \tag{74}$$

δηλαδή τη γνωστή, κλασική σχέση ταχύτητας-ορμής,  $p = mv$ . Επίσης είναι εύκολο να

<sup>(60)</sup> Πρόβλημα 11 του κεφ. 3.



λάβουμε<sup>(61)</sup> τη σχέση

$$\frac{d\langle \hat{p} \rangle}{dt} = - \left\langle \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right\rangle. \quad (75)$$

Ερμηνεύοντας την ποσότητα  $F \equiv -\langle \frac{\partial V(x)}{\partial x} \rangle$  ως δύναμη, σε αντιστοιχία με την κλασική μηχανική, η προηγούμενη εξίσωση αντιστοιχεί στο δεύτερο νόμο του Newton,  $F = dp/dt = m d^2x/dt^2$ .

Από τα παραπάνω προκύπτει και το ακόλουθο πολύ σημαντικό πόρισμα. Εάν για κάποιο μετρήσιμο μέγεθος ο αντίστοιχος τελεστής μετατίθεται με τη Χαμιλτονιανή,  $[\hat{H}, \hat{A}] = 0$ , τότε η κατανομή πιθανότητας του μεγέθους δεν αλλάζει με το χρόνο. Αυτό, διότι, από την  $[\hat{H}, \hat{A}] = 0$  προκύπτει  $[\hat{H}, \hat{A}^n] = 0$ , δηλαδή, όλες οι δυνάμεις του  $\hat{A}$  μετατίθενται με τη Χαμιλτονιανή. Από την εξ. (73) (με  $\partial \hat{A}/\partial t = 0$ ) προκύπτει αμέσως

$$\frac{d}{dt} \langle \hat{A}^n \rangle = \frac{1}{\hbar} \langle i[\hat{H}, \hat{A}^n] \rangle = 0,$$

επομένως όλες οι ροπές της κατανομής είναι ανεξάρτητες του χρόνου.<sup>(62)</sup> Μεγέθη, για τα οποία  $[\hat{H}, \hat{A}] = 0$ , ονομάζονται διατηρούμενα.

## 5.2 Ρεύμα πιθανότητας και εξίσωση συνέχειας

Η χρονική εξέλιξη των κυματοσυναρτήσεων επάγει το νόμο χρονικής εξέλιξης της πυκνότητα πιθανότητας στο χώρο,  $\rho(x) = \Psi^*(x)\Psi(x) = |\Psi(x)|^2$  (εξ. 2). Ας θεωρήσουμε την απλή περίπτωση της Χαμιλτονιανής

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \hat{V}(\hat{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x). \quad (76)$$

Εφόσον το δυναμικό είναι ερμιτιανός τελεστής, πρέπει  $V(x) = V(x)^*$ , δηλ.  $V(x) \in \mathbb{R}$ . Θεωρώντας την κυματοσυνάρτηση ως συνάρτηση του χώρου και του χρόνου,  $\Psi = \Psi(x, t)$ , η εξ. Schrödinger (70) γράφεται

$$\frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x)\Psi(x, t) \right]. \quad (77)$$

<sup>(61)</sup>Πρόβλημα 2.

<sup>(62)</sup>Πρόβλημα 3.

Εξετάζουμε τώρα τη χρονική μεταβολή της πυκνότητας πιθανότητας:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} &\equiv \frac{\partial}{\partial t} [\Psi^*(x,t)\Psi(x,t)] \\
&= \left[ \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} \right]^* \Psi(x,t) + \Psi^*(x,t) \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} \\
&= +\frac{i}{\hbar} \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi^*(x,t)}{\partial x^2} + V(x)\Psi^*(x,t) \right] \Psi(x,t) \\
&\quad -\frac{i}{\hbar} \Psi^*(x,t) \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x)\Psi(x,t) \right] \quad [\text{από εξ. (77)}] \\
&= \frac{1}{2} \left[ -\frac{i\hbar}{m} \frac{\partial^2 \Psi^*(x,t)}{\partial x^2} \Psi(x,t) + \frac{i\hbar}{m} \Psi^*(x,t) \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} \right] \\
&= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Psi(x,t) \frac{(-i\hbar)}{m} \frac{\partial \Psi^*(x,t)}{\partial x} - \Psi^*(x,t) \frac{(-i\hbar)}{m} \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial x} \right] \\
&= -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Psi^*(x,t) \frac{\hat{p}}{m} \Psi(x,t) - \Psi(x,t) \frac{\hat{p}}{m} \Psi^*(x,t) \right].
\end{aligned}$$

Ορίζοντας το αρνητικό της ποσότητας στο δεξιό μέλος ως ρεύμα πιθανότητας

$$j(x,t) \equiv \frac{1}{2} \left[ \Psi^*(x,t) \frac{\hat{p}}{m} \Psi(x,t) - \Psi(x,t) \frac{\hat{p}}{m} \Psi^*(x,t) \right] \quad (78)$$

καταλήγουμε στην εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial j(x,t)}{\partial x} = 0. \quad (79)$$

Ολοκληρώνοντας σε διάστημα  $[a, b]$  λαμβάνουμε για την πιθανότητα  $P([a, b], t) = \int_a^b |\Psi(x,t)|^2 dx$ :

$$\frac{d}{dt} P([a, b], t) + j(b) - j(a) = 0. \quad (80)$$

Σε τρεις διαστάσεις, το ρεύμα πιθανότητας και η εξίσωση συνέχειας λαμβάνουν τη διανυσματική μορφή<sup>(63)</sup>

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \equiv \frac{1}{2} \left[ \Psi^*(\mathbf{r}, t) \frac{\hat{\mathbf{p}}}{m} \Psi(\mathbf{r}, t) - \Psi(\mathbf{r}, t) \frac{\hat{\mathbf{p}}}{m} \Psi^*(\mathbf{r}, t) \right] \quad (81)$$

$$\frac{\partial \rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = 0. \quad (82)$$

---

<sup>(63)</sup>Πρόβλημα 4.

Ολοκληρώνοντας σε όγκο  $\Omega$  περικλειόμενο σε επιφάνεια  $S$ , και κάνοντας χρήση του θεωρήματος απόκλισης (Gauss) λαμβάνουμε την ολοκληρωτική μορφή της εξ. συνέχειας:

$$\frac{d}{dt}P(\Omega, t) + \int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) dS = 0, \quad (83)$$

όπου  $P(\Omega, t) \equiv \int |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\Omega$  η πιθανότητα να βρεθεί το σωματίδιο στον όγκο  $\Omega$  τη στιγμή  $t$  και  $\mathbf{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια  $S$  στην κατεύθυνση προς το εξωτερικό του όγκου.

Η εξίσωση συνέχειας εκφράζει τη διατήρηση της πιθανότητας στο χρόνο, σε αναλογία με την εξίσωση συνέχειας στον ηλεκτρομαγνητισμό, η οποία εκφράζει τη διατήρηση του φορτίου. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην αύξηση της πιθανότητας να βρεθεί το σωματίδιο σε έναν όγκο (ή διάστημα, σε μια διάσταση) γύρω από τη θέση  $\mathbf{r}$ , ενώ ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στην έννοια της ροής πιθανότητας από τον όγκο προς τα έξω.

### 5.3 Ανάπτυγμα σε ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής

Έστω  $\Phi$  μια ιδιοκατάσταση της Χαμιλτονιανής με ιδιοτιμή  $E$ :  $\hat{H}\Phi = E\Phi$ . Από την εξ. (70) έχουμε:

$$i\hbar \frac{d\Phi}{dt} = \hat{H}\Phi = E\Phi, \quad (84)$$

η οποία έχει ως λύση

$$\Phi(t) = e^{-i\frac{E}{\hbar}t} \Phi(0), \quad (85)$$

ως ειδική περίπτωση της (69). Δηλαδή, η κυματοσυνάρτηση μένει αμετάβλητη, με την εξαίρεση πολλαπλασιασμού με έναν παράγοντα φάσης με μέτρο τη μονάδα ( $|e^{-i\frac{E}{\hbar}t}| = 1$ , διότι  $E \in \mathbb{R}$  ως ιδιοτιμή ερμιτιανού τελεστή), ο οποίος δεν παίζει ρόλο για τα παρατηρήσιμα μεγέθη.

Σε δεύτερο βήμα, έστω  $\Phi_1, \Phi_2, \dots$  ανεξάρτητες του χρόνου ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής (επίσης ανεξάρτητης του χρόνου) με ιδιοτιμές  $E_1, E_2, \dots$  και

$$\Psi(0) = \sum_n c_n(0) \Phi_n \quad (86)$$

ένας γραμμικός συνδυασμός τους σε χρόνο  $t = 0$  με  $c_n(0)$  κάποιους συντελεστές. Τότε, για  $t > 0$  παίρνουμε<sup>(64)</sup>

$$\Psi(t) = e^{-it\frac{1}{\hbar}\hat{H}} \Psi(0) = \sum_n c_n(0) e^{-it\frac{1}{\hbar}\hat{H}} \Phi_n = \sum_n c_n(0) e^{-i\frac{E_n}{\hbar}t} \Phi_n. \quad (87)$$

<sup>(64)</sup> Χρησιμοποιούμε την εξ. (69). Βλ. και Πρόβλημα 5.

Ορίζοντας

$$c_n(t) = e^{-i\frac{E_n}{\hbar}t} c_n(0), \quad (88)$$

η τελευταία εξίσωση ξαναγράφεται

$$\Psi(t) = \sum_n c_n(t) \Phi_n. \quad (89)$$

Επομένως, από τη χρονική εξέλιξη των συντελεστών  $c_n(t)$ , μπορούμε να ανασυνθέσουμε την κυματοσυνάρτηση σε οποιοδήποτε χρόνο  $t$ . Η εξ. (88) δίνει ισοδύναμα την αντίστοιχη διαφορική

$$i\hbar \frac{dc_n(t)}{dt} = E_n c_n(t). \quad (90)$$

με αρχική συνθήκη  $c_n(0)$  για  $t = 0$ .

Συμπερασματικά, το ανάπτυγμα μιας κυματοσυνάρτησης σε ιδιοκαταστάσεις της Χαμιλτονιανής επιτρέπει τον υπολογισμό της χρονικής εξέλιξης με απλό τρόπο.

Θα συζητήσουμε τώρα κατά πόσον οποιαδήποτε κυματοσυνάρτηση μπορεί να γραφεί στη μορφή (86), δηλαδή κατά πόσον οι ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής αποτελούν ορθοκανονική βάση. Για να συμβαίνει αυτό πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις. Η πρώτη είναι, οι ιδιοκαταστάσεις της Χαμιλτονιανής να ικανοποιούν πάντοτε τη σχέση ορθοκανονικότητας  $(\Phi_m, \Phi_n) = \delta_{mn}$ . Ειδικότερα, εφόσον πρόκειται για φυσικές καταστάσεις, θα ισχύει σίγουρα η συνθήκη κανονικοποίησης  $(\Phi_n, \Phi_n) = 1$ . Για τη συνθήκη ορθογωνιότητας,  $(\Phi_m, \Phi_n) = 0$  για  $n \neq m$ , παρατηρούμε ότι ισχύει, αν  $E_n \neq E_m$ , δηλαδή αν οι ιδιοτιμές διαφέρουν. Αυτό το έχουμε δείξει για τις ιδιοκαταστάσεις διαφορετικών ιδιοτιμών κάθε ερμιτιανού τελεστή.<sup>(65)</sup> Αν ένα υποσύνολο ιδιοκαταστάσεων  $\{\Phi_\lambda\}$  αντιστοιχεί στην ίδια ιδιοτιμή,  $E_\lambda$ , δηλαδή αν οι ιδιοκαταστάσεις είναι εκφυλισμένες,<sup>(66)</sup> τότε αυτές δεν είναι υποχρεωτικά ορθογώνιες, διότι, αν π.χ. οι  $\Phi_\lambda, \Phi'_\lambda$  είναι ορθογώνιες, μπορούμε να κατασκευάσουμε την  $\frac{1}{\sqrt{2}}(\Phi_\lambda + \Phi'_\lambda)$ , η οποία είναι εμφανώς ιδιοκατάσταση με την ίδια ιδιοτιμή, αλλά δεν είναι ορθογώνια σε καμία από τις  $\Phi_\lambda, \Phi'_\lambda$ . Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, το σύνολο εκφυλισμένων ιδιοκαταστάσεων με την ίδια ιδιοτιμή έχει δομή γραμμικού χώρου, υπόχωρου του χώρου Hilbert.<sup>(67)</sup> Τότε, μπορούμε να επιλέξουμε μια ορθοκανονική βάση  $\Phi_{\lambda,1}, \Phi_{\lambda,2}, \dots$  στον εκφυλισμένο υπόχωρο. Για οποιαδήποτε επιλεγμένη ορθοκανονική βάση του εκφυλισμένου υπόχωρου ισχύει προφανώς η ορθογωνιότητα μεταξύ των στοιχείων της και των ιδιοκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε άλλες ιδιοτιμές.

Η δεύτερη προϋπόθεση είναι αυτή της πληρότητας, δηλαδή να επαρκούν οι ιδιοκα-

<sup>(65)</sup> Βλ. κεφ. 3, τελευταία παράγραφο του εδαφίου «Ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές» σελ. 12.

<sup>(66)</sup> Ο αριθμός των γραμμικά ανεξάρτητων ιδιοκαταστάσεων με ίδια ιδιοτιμή ονομάζεται εκφυλισμός της ιδιοτιμής, και μπορεί να είναι απλός (=1), διπλός, κ.ο.κ., ή και άπειρος.

<sup>(67)</sup> Ο υπόχωρος ενδέχεται να έχει είτε πεπερασμένη είτε άπειρη διάσταση.

ταστάσεις της Χαμιλτονιανής για να παράξουν το χώρο Hilbert. Η απάντηση εδώ είναι αρνητική στη γενική περίπτωση: για παράδειγμα, η Χαμιλτονιανή του ελεύθερου σωματιδίου, που περιέχει μόνο την κινητική ενέργεια στον  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ , δεν έχει ιδιοκαταστάσεις (οι ιδιοσυναρτήσεις της δεν είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες). Ωστόσο, υπάρχουν Χαμιλτονιανές, π.χ., αυτή της κινητικής ενέργειας στον  $\mathcal{L}^2([0, 1])$ , ή του απλού αρμονικού ταλαντωτή (κεφάλαιο 9), οι οποίες όχι μόνον έχουν ιδιοκαταστάσεις, αλλά που οι ιδιοκαταστάσεις τους αποτελούν ορθοκανονική βάση.

Η εξίσωση ιδιοτιμών της Χαμιλτονιανής,

$$\hat{H} \Psi_n = E_n \Psi_n, \quad (91)$$

ονομάζεται και *χρονικά ανεξάρτητη εξίσωση του Schrödinger*. Σε πεπερασμένη διάσταση  $N$ , η εξίσωση δίνει ακριβώς  $N$  γραμμικά ανεξάρτητες ιδιοκαταστάσεις, οι οποίες, επομένως, αποτελούν βάση. Προκύπτει όμως ένα πρόβλημα στο όριο  $N \rightarrow \infty$ . Καθώς το  $N$  αυξάνεται, οι ιδιοτιμές ενδέχεται να ομαδοποιούνται και να πυκνώνουν στον πραγματικό άξονα, ώστε να σχηματίζουν, στο όριο  $N \rightarrow \infty$ , πυκνό σύνολο σε συνεχές διάστημα. Εάν συμβαίνει αυτό, τότε αποκτούμε ένα συνεχές φάσμα, αλλά δεν ικανοποιείται πλέον η εξ. (91) με  $\Psi_n$  εντός του χώρου Hilbert: οι  $\Psi_n$  είναι ιδιοσυναρτήσεις, αλλά όχι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες, άρα δεν αποτελούν βάση. Ωστόσο, με μια γενικευμένη έννοια, παράγουν το χώρο, και τις χρησιμοποιούμε φορμαλιστικά με ανάλογο τρόπο, όπως τα διανύσματα βάσης. Στα επόμενα δύο εδάφια θα συζητήσουμε αυτό το θέμα από φυσικής και μαθηματικής πλευράς.

## 5.4 Ελεύθερο σωματίδιο και συνεχές ενεργειακό φάσμα

Ας μελετήσουμε την περίπτωση που η Χαμιλτονιανή ταυτίζεται με τον τελεστή κινητικής ενέργειας

$$\hat{T} = \frac{\hat{p}^2}{2m} \quad (92)$$

στο χώρο  $\mathcal{L}^2([-\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L])$  με περιοδικές συνοριακές συνθήκες, δηλαδή, σωματιδίου περιορισμένου στο διάστημα  $[-\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L]$ , όμως με ταύτιση του σημείου  $+\frac{1}{2}L$  με το σημείο  $-\frac{1}{2}L$ , σαν να κλείνει δακτύλιος. Οι ιδιοκαταστάσεις βρίσκονται εύκολα:

$$u_k(x) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ikx}, \quad \text{με } k = \frac{2\pi n}{L}, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (93)$$

και ονομάζονται επίπεδα κύματα. Η απαίτηση  $k = \frac{2\pi n}{L}$  προκύπτει από τις συνοριακές συνθήκες  $u_k(-L/2) = u_k(L/2)$ . Οι ιδιοτιμές είναι

$$E_k = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^2 n^2, \quad (94)$$

όπως προκύπτει από τη δράση  $\frac{\hat{p}^2}{2m} e^{ikx} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} e^{ikx} = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 e^{ikx}$ . Κάθε ενεργειακή ιδιοτιμή, πλην αυτής για  $k = 0$  ( $E_0 = 0$ ), είναι διπλά εκφυλισμένη, διότι της αντιστοιχούν οι ιδιοκαταστάσεις  $u_k$  και  $u_{-k}$ .

Εύκολα βρίσκει κανείς ότι οι κυματοσυναρτήσεις  $u_k(x)$  είναι ορθοκανονικές, δηλ.  $(u_k, u_{k'}) = \delta_{kk'}$ . Επίσης, παράγουν οποιαδήποτε συνάρτηση με περιοδικές συνοριακές συνθήκες στο  $[-\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L]$ , όπως ξέρουμε από την ανάλυση Fourier. Συνεπώς, αποτελούν ορθοκανονική βάση στο χώρο Hilbert. Οι ενεργειακές ιδιοτιμές αποτελούν καταφανώς ένα διακριτό φάσμα.

Εξετάζουμε τώρα το όριο  $L \rightarrow \infty$ . Ας υποθέσουμε ότι η περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα το πείραμα βρίσκεται στο διάστημα  $[-\frac{1}{2}b, \frac{1}{2}b]$ . Το  $b$  μπορεί να είναι μεγάλο, ακόμα και μακροσκοπικό (περιλαμβάνοντας τον εργαστηριακό χώρο όπου πραγματοποιείται το πείραμα), αλλά σταθερό και, τελικά,  $b \ll L$ . Οποιαδήποτε φυσικά πραγματοποιήσιμη συλλογή πρέπει να αναπαριστάται, στην πράξη, από κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  που να είναι εντοπισμένη στο διάστημα  $[-\frac{1}{2}b, \frac{1}{2}b]$ , δηλ.  $\int_{-b/2}^{b/2} |\Psi|^2 dx = 1$  και άρα να μην είναι ιδιοσυνάρτηση (93) της κινητικής ενέργειας, για τις οποίες προκύπτει εύκολα  $\int_{-b/2}^{b/2} |u_k(x)|^2 dx = \frac{b}{L} \ll 1$ .

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται κατασκευάζοντας κυματοσυναρτήσεις εντοπισμένες στο  $[-\frac{1}{2}b, \frac{1}{2}b]$  μέσω επαλληλίας επίπεδων κυμάτων,

$$\Psi = \sum_k c_k u_k = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_k c_k e^{ikx}. \quad (95)$$

Εδώ, το πλάτος της  $\Psi$  είναι μόνον φαινομενικά ανάλογο του  $1/\sqrt{L}$ . Στην πραγματικότητα, το μήκος  $L$  πρέπει να απαλείφεται και να μην υπεισέρχεται στα αποτελέσματα των υπολογισμών, μια και πρόκειται για βοηθητική παράμετρο που θέσαμε για μαθηματική διευκόλυνση. Προχωρούμε προς αυτή την κατεύθυνση εκφράζοντας το  $c_k$  συναρτήσει της  $\Psi$ :

$$\begin{aligned} c_k = (u_k, \Psi) &= \frac{1}{\sqrt{L}} \int_{-L/2}^{L/2} e^{-ikx} \Psi(x) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{L}} \int_{-b/2}^{b/2} e^{-ikx} \Psi(x) dx \propto \frac{1}{\sqrt{L}}. \end{aligned}$$

Στο πρώτο βήμα χρησιμοποιήσαμε την ορθοκανονικότητα των  $u_k$ , στο δεύτερο το

ανάπτυγμα της  $\Psi$  και τον ορισμό των  $u_k$  και στο τρίτο το γεγονός ότι η  $\Psi$  περιγράφει σωματίδιο στο χώρο του εργαστηρίου, δηλαδή μηδενίζεται εκτός του διαστήματος  $[-\frac{1}{2}b, \frac{1}{2}b]$ .

Δεδομένου ότι ο δείκτης  $k = \frac{2\pi n}{L}$  δίνει μια πυκνή διαμέριση στο  $\mathbb{R}$  στο όριο  $L \rightarrow \infty$ , μπορούμε να τον προσεγγίσουμε με μια συνεχή μεταβλητή και να μετατρέψουμε το άθροισμα (95) σε ολοκλήρωμα. Από τη σχέση  $k = \frac{2\pi n}{L}$  προκύπτει ότι η διαφορά αλληλόκληρων σημείων  $k$  είναι  $\Delta k = \frac{2\pi}{L}$ , δηλ.  $\frac{L}{2\pi} \Delta k = 1$ . Παίρνοντας το άθροισμα  $\sum_k c_k e^{ikx} = \sum_k c_k e^{ikx} \frac{L}{2\pi} \Delta k$ , λαμβάνουμε

$$\Psi(x) = \frac{1}{2\pi} \sum_k c_k u_k(x) L \Delta k \quad (96)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sum_k c_k e^{ikx} \sqrt{L} \Delta k. \quad (97)$$

Θέτουμε τώρα  $f_k = \sqrt{L} c_k$ , το οποίο είναι ανεξάρτητο του  $L$ , διότι ο συντελεστής  $c_k$ , όπως είδαμε πιο πάνω, είναι ανάλογος του  $1/\sqrt{L}$ . Στο όριο απειροστού  $\Delta k \rightarrow dk$ , το άθροισμα μετατρέπεται σε ολοκλήρωμα:

$$\Psi(x) = \frac{1}{2\pi} \int f_k e^{ikx} dk. \quad (98)$$

Η σύμπτωση αυτής της έκφρασης με το μετασχηματισμό Fourier της  $f_k$  στην  $\Psi(x)$  οφείλεται στην ειδική μορφή των συναρτήσεων βάσης  $u_k(x)$ . Η χρονική εξέλιξη της  $\Psi$  προκύπτει από τη χρονική εξέλιξη των συντελεστών  $c_k$  (ισοδύναμα  $f_k$ ), σύμφωνα με τον κανόνα (87):

$$\Psi(x, t) = \int \frac{L}{2\pi} c_k u_k(x) e^{-iE_k t/\hbar} dk \quad (99)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int f_k e^{ikx} e^{-iE_k t/\hbar} dk. \quad (100)$$

Μια τέτοια κυματοσυνάρτηση, επαρκώς εντοπισμένη στο χώρο και αποτελούμενη από πολλές (άπειρες) συνιστώσες, ονομάζεται *κυματοπακέτο*. Λόγω του όρου  $e^{ikx} e^{-iE_k t/\hbar} = e^{ik(x - \frac{E_k}{\hbar k} t)}$ , το κυματοπακέτο εμφανίζεται να μετακινείται με το χρόνο. Λόγω της διαφορετικής χρονικής εξέλιξης διαφόρων συνιστωσών (διαφορετική τιμή του  $\frac{E_k}{\hbar k} t$  για διαφορετικά  $k$ ), το κυματοπακέτο αλλάζει μορφή με το χρόνο: μοιάζει να διασπείρεται. Γι αυτό το λόγο, η συνάρτηση  $E_k$  (βλ. εξ. 94) ονομάζεται *σχέση διασποράς*. Εάν η συνάρτηση  $c_k$  είναι ιδιαίτερα εντοπισμένη γύρω από ένα δεδομένο  $k_0$ , τότε οι συνιστώσες έχουν σχεδόν ίδια μεταβολή με το χρόνο και η διασπορά είναι αργή.

Από φυσικής πλευράς αναμένουμε ότι η συνοριακή συνθήκη στο  $\pm \frac{1}{2}L$  δεν θα παίζει ρόλο, εάν δώσουμε στο  $L$  τιμές μεγαλύτερες από οποιοδήποτε πρακτικά μετρήσιμο

μήκος. Πρόκειται για ένα μαθηματικό τέχνασμα, ώστε να προσεγγίσουμε τις συνοριακές συνθήκες και τη συνεπαγόμενη πυκνή κατανομή ιδιοτιμών, ενώ από φυσικής πλευράς το πείραμα περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο διάστημα  $[-\frac{1}{2}b, \frac{1}{2}b]$  γύρω από το 0, με  $b \ll L$ . Με άλλα λόγια, οι περιοδικές συνοριακές συνθήκες με  $L \rightarrow \infty$  πρέπει να δίνουν τα ίδια αποτελέσματα με το πρόβλημα σωματιδίου στο χώρο  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ . Παρατηρούμε, επίσης, ότι οι συναρτήσεις  $e^{ikx}$  είναι ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής (92), παρ' ότι δεν είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες σε όλο το  $\mathbb{R}$ . Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να σχηματίσουμε το γραμμικό συνδυασμό (98), αρκεί οι συντελεστές  $f_k$  να είναι κατάλληλοι, ώστε να σχηματιστεί τετραγωνικά ολοκληρώσιμη κυματοσυνάρτηση. Επομένως, η τιμή του  $L$  που υπεισέρχεται στις περιοδικές συνοριακές συνθήκες τελικά απαλείφεται από το πρόβλημα.

Από την άλλη, οι ενεργειακές ιδιοτιμές (94) πυκνώνουν στο όριο  $L \rightarrow \infty$ , παρ' ότι παραμένουν αριθμήσιμες όπως και τα  $k$ . Εάν θέσουμε ένα πειραματικό όριο  $\delta E$  ευκρίνειας στην ενέργεια, οσοδήποτε μικρό, οι ιδιοτιμές θα πυκνώσουν τελικά τόσο, ώστε να περιέχεται αυθαίρετα μεγάλος (εξαρτώμενος από το  $L$ ) αριθμός ιδιοτιμών στο  $\delta E$ . Τότε, μπορούμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα με μια συνεχή κατανομή ενεργειακού φάσματος, όπως προσεγγίσαμε τα διακριτά  $k$  με μια συνεχή κατανομή.

Τέλος, σημειώνουμε ότι οι περιοδικές συνοριακές συνθήκες δεν είναι απαραίτητες για την παραπάνω ανάλυση, παρά μόνο διευκολύνουν λόγω της χρήσης των επίπεδων κυμάτων ως ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής. Θα καταλήγαμε στα ίδια συμπεράσματα χρησιμοποιώντας συνοριακές συνθήκες μηδενισμού της κυματοσυνάρτησης στα όρια  $x = \pm \frac{1}{2}L$ , μόνο που τότε οι ιδιοσυναρτήσεις θα ήταν  $u_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos \frac{n\pi x}{L}$  και  $\sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L}$  για  $n$  περιττό και άρτιο, αντίστοιχα ( $n \in \mathbb{N}$ ).

## 5.5 Προβολικοί τελεστές στο συνεχές φάσμα. Γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις. Αναπαράσταση ορμής

### Προβολικοί τελεστές στο συνεχές φάσμα

Χρησιμοποιώντας την έννοια του προβολικού τελεστή, έχουμε μια ένα-προς-ένα αντιστοιχία των ορθογώνιων ιδιοκαταστάσεων μιας Χαμιλτονιανής,  $\Phi_n$ , με τους αντίστοιχους προβολικούς τελεστές  $\hat{P}_{\Phi_n}$ . Εάν οι  $\Phi_n$  επαρκούν για να αποτελέσουν ορθοκανονική βάση, τότε θα ισχύει η εξ. πληρότητας (45):  $\sum_n \hat{P}_{\Phi_n} = \hat{I}$ . Σε αυτή την περίπτωση, η Χαμιλτονιανή παίρνει, φορμαλιστικά, τη μορφή  $\hat{H} = \sum_n E_n \hat{P}_{\Phi_n}$ .<sup>(68)</sup>

Θυμόμαστε, τώρα, ότι οι προβολικοί τελεστές ορίζονται και στην περίπτωση υπόχωρων διάστασης μεγαλύτερης του 1. Π.χ., αν έχουμε ένα σύνολο από μονοδιάστατους

<sup>(68)</sup> Διότι υποθέσαμε πληρότητα των  $\Phi_n$ , επομένως η τυχαία κατάσταση αναλύεται ως  $\Psi = \sum_n c_n \Phi_n$   $\Psi = \sum_n (\Phi_n, \Psi) \Phi_n = \sum_n \hat{P}_{\Phi_n} \Psi$ . Άρα,  $\hat{H} \Psi = \sum_n E_n \hat{P}_{\Phi_n} \Psi$ , δηλ.  $\hat{H} = \sum_n E_n \hat{P}_{\Phi_n}$ .



προβολικούς τελεστές που μετατίθενται (ισοδύναμα, αν προβάλλουν σε ορθογώνιες μεταξύ τους κυματοσυναρτήσεις  $\{\Phi_n\}$ ), τότε το άθροισμά τους είναι προβολικός τελεστής στον υπόχωρο μεγαλύτερης διάστασης ο οποίος παράγεται από τις  $\{\Phi_n\}$  (βλ. συζήτηση μετά την εξ. 22). Καθώς το  $n$  αυξάνει στη σειρά  $\sum_n \hat{P}_{\Phi_n}$ , το άθροισμα προβάλλει σε ολοένα ευρύτερους υπόχωρους: ο υπόχωρος όπου προβάλλει ο  $\hat{P}_{\Phi_1}$  περιέχεται στον υπόχωρο όπου προβάλλει ο  $\hat{P}_{\Phi_1} + \hat{P}_{\Phi_2}$ , κ.ο.κ., ώσπου καταλήγουμε στον ταυτοτικό τελεστή  $\hat{I} = \sum_n \hat{P}_{\Phi_n}$ , ο οποίος είναι προβολικός τελεστής με την τετριμμένη έννοια διότι απλώς αναπαράγει οποιοδήποτε διάνυσμα. Εφόσον οι  $\hat{P}_{\Phi_n}$  μετατίθενται μεταξύ τους, το ίδιο συμβαίνει και με τους όρους της ακολουθίας μερικών αθροισμάτων  $\sum_n^N \hat{P}_{\Phi_n}$ ,  $\sum_n^{N+1} \hat{P}_{\Phi_n}$ ,  $\sum_n^{N+2} \hat{P}_{\Phi_n}$ , κ.ο.κ.

Εάν, όμως, το σύνολο όλων των ιδιοκαταστάσεων  $\Phi_n$  της Χαμιλτονιανής δεν επαρκεί ώστε αυτές να αποτελούν βάση, τότε η ταυτότητα  $\hat{I} = \sum_n \hat{P}_{\Phi_n}$  δεν ισχύει.<sup>(69)</sup> Ωστόσο, ισχύει κάτι αντίστοιχο, στο οποίο θα αναφερθούμε εδώ μόνο περιγραφικά. Οι ιδιοτιμές της Χαμιλτονιανής πυκνώνουν στο συνεχές των ενεργειών, δηλ. σε διαστήματα του  $\mathbb{R}$ , με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που περιγράψαμε στο εδάφιο 5.4 για τον  $\mathcal{L}^2([-\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L])$  ( $L \rightarrow \infty$ ). Ταυτόχρονα με τις πυκνές ιδιοτιμές, η Χαμιλτονιανή ενδέχεται να έχει και διακριτές (μη πυκνές) ιδιοτιμές  $E_n$ . Προκύπτει μια οικογένεια μετατιθέμενων προβολικών τελεστών,  $\hat{P}_E$ , η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχή παράμετρο  $E$ , ως επέκταση της οικογένειας προβολικών τελεστών στις ιδιοκαταστάσεις  $\Phi_n$  που χαρακτηρίζονται από τη διακριτή παράμετρο  $E_n$ . Η σχέση πληρότητας  $\sum_n \hat{P}_{\Phi_n} = \hat{I}$  αντικαθίσταται από την ακόλουθη:

$$\sum_n \hat{P}_{\Phi_n} + \int_{\text{cont}} d\hat{P}_E = \hat{I}, \quad (101)$$

όπου συνυπάρχουν οι διακριτές ιδιοκαταστάσεις με το συνεχές φάσμα, και όπου το ολοκλήρωμα λαμβάνεται στο συνεχές φάσμα. Η τελευταία σχέση είναι συμβολικός τρόπος γραφής της ακόλουθης πρότασης: για τυχαίες  $\Psi_1, \Psi_2$  τετραγωνικά ολοκληρώσιμες, ισχύει

$$\begin{aligned} \sum_n (\Psi_1, \hat{P}_{\Phi_n} \Psi_2) + \int_{\text{cont}} d(\Psi_1, \hat{P}_E \Psi_2) &= \sum_n (\Psi_1, \hat{P}_{\Phi_n} \Psi_2) + \int_{\text{cont}} \frac{d(\Psi_1, \hat{P}_E \Psi_2)}{dE} dE \\ &= (\Psi_1, \hat{I} \Psi_2) \\ &= (\Psi_1, \Psi_2). \end{aligned}$$

<sup>(69)</sup>Το συνηθέστερο παράδειγμα είναι η κινητική ενέργεια στον  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ , δηλαδή η περίπτωση του ελεύθερου σωματίου που κινείται σε όλο το χώρο. Οι ιδιοσυναρτήσεις είναι οι  $\exp(ikx)$ ,  $x \in (-\infty, \infty)$ , οι οποίες δεν είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες, άρα δεν ανήκουν στο χώρο Hilbert και δεν αποτελούν βάση.

Η Χαμιλτονιανή γράφεται όμοια:  $\hat{H} = \sum_n E_n \hat{P}_{\Phi_n} + \int_{\text{cont}} E d\hat{P}_E$ , με αντίστοιχη σημασία:

$$\begin{aligned} (\Psi_1, \hat{H} \Psi_2) &= \sum_n E_n (\Psi_1, \hat{P}_{\Phi_n} \Psi_2) + \int_{\text{cont}} E d(\Psi_1, \hat{P}_E \Psi_2) \\ &= \sum_n E_n (\Psi_1, \hat{P}_{\Phi_n} \Psi_2) + \int_{\text{cont}} E \frac{d(\Psi_1, \hat{P}_E \Psi_2)}{dE} dE. \end{aligned} \quad (102)$$

Το σύνολο των διακριτών ιδιοτιμών  $E_n$  μαζί με τις συνεχείς τιμές  $E$ , οι οποίες απαιτούνται για να γραφεί η σχέση πληρότητας και η ανάλυση της Χαμιλτονιανής σε προβολικούς τελεστές, ονομάζεται *φάσμα* του τελεστή  $\hat{H}$ . Η ύπαρξη τέτοιας οικογένειας τελεστών προκύπτει από το θεώρημα φασματικής ανάλυσης.<sup>(70)</sup>

Στο παράδειγμα του προηγούμενου εδαφίου (ελεύθερο σωματίδιο), προσεγγίσαμε το συνεχές φάσμα μέσω του ορίου  $L \rightarrow \infty$ . Οι προβολικοί τελεστές που συνθέτουν τη Χαμιλτονιανή, για πεπερασμένο  $L$  και διακριτές ιδιοτιμές, είναι της μορφής  $\hat{P}_k \Psi(x) = (u_k, \Psi) u_k(x)$ , και η δράση της Χαμιλτονιανής γράφεται  $\hat{H} \Psi(x) = \sum_k E_k (u_k, \Psi) u_k(x)$ . Παίρνοντας το όριο  $L \rightarrow \infty$ , και μετατρέποντας το άθροισμα σε ολοκλήρωμα, έχουμε  $\hat{H} \Psi(x) = \int \frac{L}{2\pi} E_k (u_k, \Psi) u_k(x) dk$ , το οποίο φαινομενικά μόνο εξαρτάται από την τιμή του  $L$ . Εφόσον οι ιδιοσυναρτήσεις είναι  $u_k = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ikx}$ , λαμβάνουμε

$$\hat{H} \Psi(x) = \frac{1}{2\pi} \int E_k \left[ \int e^{-ikx'} \Psi(x') dx' \right] e^{ikx} dk,$$

οπότε η τιμή του  $L$  απαλείφεται από την έκφραση. Στο επόμενο βήμα, μετατρέπουμε το ολοκλήρωμα ως προς  $k$  σε ολοκλήρωμα ως προς  $E$ . Έχουμε  $dk = d[(2mE/\hbar^2)^{1/2}] = (m/2\hbar^2)^{1/2} E^{-1/2} dE$ . Επίσης, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη ότι σε κάθε  $E$  αντιστοιχούν δύο ιδιοτιμές,  $\pm k = \pm \sqrt{2mE}/\hbar$ , δηλαδή ο προβολικός τελεστής που αντιστοιχεί σε ενέργεια  $E$  προβάλλει σε υπόχωρο δύο διαστάσεων. Καταλήγουμε, για το εσωτερικό γινόμενο  $(\Psi_1, \hat{H} \Psi_2)$  δύο τετραγωνικά ολοκληρώσιμων κυματοσυναρτήσεων, στο εξής:

$$\begin{aligned} (\Psi_1, \hat{H} \Psi_2) &= \int E \left[ \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{2\hbar^2}} \frac{1}{\sqrt{E}} \right. \\ &\quad \left. \times \iint \Psi_1^*(x) \left( e^{i\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}(x-x')} + e^{-i\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}(x-x')} \right) \Psi_2(x') dx' dx \right] dE \end{aligned}$$

Επομένως, η οικογένεια προβολικών τελεστών  $\hat{P}_E$  ορίζεται εδώ από την έκφραση μέσα στην αγκύλη παρενθέση. Το διπλό ολοκλήρωμα προκύπτει από το εσωτερικό γινόμενο  $(\Psi_1, \hat{P}_E \Psi_2)$  της εξ. (102): ένα ολοκλήρωμα λόγω του εσωτερικού γινομένου και ένα λόγω της δράσης του προβολικού τελεστή.

<sup>(70)</sup>Βλ. π.χ. J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press (1955).

Ένας άλλος τρόπος να δούμε το αποτέλεσμα είναι να πάρουμε:  $(\Psi_1, \hat{P}_k \Psi_2) = (\Psi_1, (u_k, \Psi_2) u_k) = (\Psi_1, u_k)(u_k, \Psi_2)$ . Προσθέτοντας τον αντίστοιχο όρο για το  $-k$ , καταλήγουμε στο  $(\Psi_1, \hat{P}_E \Psi_2) = (\Psi_1, (\hat{P}_k + \hat{P}_{-k}) \Psi_2)$ . Ολοκληρώνοντας ως προς  $E$  και λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή μετατροπής μεταξύ  $dE$  και  $dk$ , φτάνουμε στην ίδια εξίσωση.

Η ποσότητα  $n(E) \equiv \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{2\hbar^2}} \frac{1}{\sqrt{E}}$  που περιλαμβάνεται στην παραπάνω έκφραση ονομάζεται *πυκνότητα καταστάσεων* και το ολοκλήρωμα  $\int_{E_1}^{E_2} n(E) dE$  δίνει τον αριθμό των ιδιοκαταστάσεων της Χαμιλτονιανής μεταξύ  $E_1$  και  $E_2$  ανά μονάδα μήκους στον άξονα  $x$  (ή ανά μονάδα όγκου στις τρεις διαστάσεις).

Στην παραπάνω φασματική ανάλυση δεν εμφανίζεται το  $L$ . Με αντίστοιχο τρόπο απαλείφεται το  $L$ , εάν δεν έχουμε ελεύθερο σωματίδιο με συναρτήσεις βάσης επίπεδων κυμάτων, αλλά σωματίδιο που αλληλεπιδρά με δυναμικό και έχει διαφορετικές ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής. Θα μελετήσουμε μια τέτοια περίπτωση, με συνύπαρξη συνεχούς και διακριτού φάσματος, στο κεφάλαιο 6.

## Γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις. Αναπαράσταση ορμής

Ανάπτυγμα του τύπου (101) σε προβολικούς τελεστές μπορεί να βρεθεί όχι μόνο για τη Χαμιλτονιανή, αλλά γενικότερα για μια μεγάλη κλάση ερμιτιανών τελεστών. Σε αντιστοιχία με την (101), οι  $\Phi_n$  αντικαθίστανται από τις ιδιοκαταστάσεις του αντίστοιχου τελεστή,  $\Phi_a$ , και η μεταβλητή ολοκλήρωσης  $E$  αντικαθίσταται από την αντίστοιχη φυσική ποσότητα  $a$  στο συνεχές φάσμα. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, έχουμε  $\int |\Phi_a(x)|^2 dx = \infty$ . Η συνθήκη τετραγωνικής ολοκληρωσιμότητας  $\int |\Phi_n|^2 dx < \infty$  αντικαθίσταται από τη συνθήκη

$$|(\Phi_a, \Psi)| \equiv \left| \int \Phi_a^*(x) \Psi(x) dx \right| < \infty \quad (103)$$

για κάθε τετραγωνικά ολοκληρώσιμη κυματοσυνάρτηση  $\Psi(x)$ . Οι μη τετραγωνικά ολοκληρώσιμες ιδιοσυναρτήσεις ερμιτιανών τελεστών που ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη ονομάζονται *γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις*. Με τη βοήθεια των γενικευμένων ιδιοσυναρτήσεων ενός τελεστή, μπορούμε να κατασκευάσουμε τετραγωνικά ολοκληρώσιμες κυματοσυναρτήσεις οι οποίες να είναι σχεδόν ιδιοσυναρτήσεις του ίδιου τελεστή, ως εξής:

$$\Phi_{a_0} = \int f(a) \Phi_a da, \quad (104)$$

όπου  $f(a) > 0$  μια κατανομή περιορισμένη σε ένα στενό διάστημα γύρω από την τιμή  $a_0$ , π.χ.

$$\Phi_{a_0} = \int \left[ \frac{1}{2\pi\eta^2} \right]^{1/4} \exp \left[ -\frac{(a - a_0)^2}{4\eta^2} \right] \Phi_a da, \quad (105)$$

όπου  $\eta > 0$  αυθαίρετα μικρό.

Σε εφαρμογή των παραπάνω στον τελεστή της ορμής, έστω σύστημα με κίνηση σε όλο το χώρο,  $x \in (-\infty, \infty)$ , αντί για μεγάλο αλλά πεπερασμένο διάστημα  $[-\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L]$ , με οποιαδήποτε Χαμιλτονιανή (όχι απαραίτητα για το ελεύθερο σωματίδιο). Για τον τελεστή της ορμής λαμβάνουμε την ιδιοτιμή  $p = \hbar k$  ως συνεχή μεταβλητή, με (μη κανονικοποιήσιμες) ιδιοσυναρτήσεις τις  $u_k(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{ikx}$ . Προκύπτει η συνεχής οικογένεια προβολικών τελεστών  $\hat{P}_k$  με

$$\hat{P}_k \Psi(x) = (u_k, \Psi) u_k(x) = \left[ \int dx' \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ikx'} \Psi(x') \right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{ikx} \quad (106)$$

και στοιχεία πίνακα

$$\left( \Psi_1, \hat{P}_k \Psi_2 \right) = \int dx \Psi_1^*(x) \left[ \int dx' \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ikx'} \Psi_2(x') \right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{ikx} = \frac{1}{2\pi} (\Psi_1, e^{ikx}) (e^{ikx}, \Psi_2) \quad (107)$$

όπου, αντί τετραγωνικά ολοκληρώσιμων κυματοσυναρτήσεων βάσης, χρησιμοποιούνται οι μη τετραγωνικά ολοκληρώσιμες ιδιοσυναρτήσεις της ορμής, οι οποίες είναι εδώ οι γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις. Η απαίτηση (103) γίνεται  $|(u_k, \Psi)| < \infty$ , για κάθε τετραγωνικά ολοκληρώσιμη κυματοσυνάρτηση  $\Psi$ . Ο παράγοντας  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$  που συνοδεύει τα εκθετικά οφείλεται στην κανονικοποίηση  $\int \hat{P}_k dk = \hat{I}$ .

Εάν γνωρίζουμε τους συντελεστές  $\tilde{\Psi}(k) = (u_k, \Psi)$  (οι οποίοι ταυτίζονται με το μετασχηματισμό Fourier της κυματοσυνάρτησης  $\Psi$ ), μπορούμε προφανώς να ανασυνθέσουμε την  $\Psi$ . Γι αυτό το λόγο, ο μετασχηματισμός Fourier  $\tilde{\Psi}(k)$  ονομάζεται *κυματοσυνάρτηση σε αναπαράσταση ορμής*, σε αναλογία με τη συνήθη *κυματοσυνάρτηση σε αναπαράσταση θέσης*  $\Psi(x)$ .

Στα προβλήματα όπου εφαρμόζουμε την αναπαράσταση ορμής, συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε ως μεταβλητή την ιδιοτιμή της ορμής  $p = \hbar k$  αντί του κυματαριθμού  $k$ . Με αυτή την αλλαγή μεταβλητής ο μετασχηματισμός μεταξύ των αναπαραστάσεων θέσης  $\Psi(x)$  και ορμής  $\tilde{\Psi}(p)$  ορίζεται από τις σχέσεις

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{\mathbb{R}} \tilde{\Psi}(p) e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp, \quad \tilde{\Psi}(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{\mathbb{R}} \Psi(x) e^{-i\frac{p}{\hbar}x} dx \quad (108)$$

Εδώ, η αλλαγή μεταβλητής αλλάζει τη σταθερά κανονικοποίησης από  $1/\sqrt{2\pi}$  σε  $1/\sqrt{2\pi\hbar}$ . Από την ταυτότητα Parseval, προκύπτει ότι η κυματοσυνάρτηση σε αναπαράσταση ορμής ικανοποιεί την ίδια συνθήκη κανονικοποίησης όπως η  $\Psi(x)$ , δηλ.  $\int dp |\tilde{\Psi}(p)|^2 = 1$ .<sup>(71)</sup>

Έχει ενδιαφέρον να δούμε τη δράση των τελεστών θέσης και ορμής στις κυματο-

<sup>(71)</sup>Για την απόδειξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ταυτότητα  $\int_{-\infty}^{\infty} dx e^{i(k-k')x} = 2\pi\delta(k-k')$ .

συναρτήσεις σε αναπαράσταση ορμής. Δρώντας στην πρώτη εξίσωση των (108) με τον τελεστή θέσης, λαμβάνουμε

$$\begin{aligned}
\hat{x}\Psi(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} x \int_{\mathbb{R}} \tilde{\Psi}(p) e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} (-i) \int_{\mathbb{R}} \tilde{\Psi}(p) \frac{\partial e^{i\frac{p}{\hbar}x}}{\partial p} dp \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} (-i\hbar) \left\{ \left[ \tilde{\Psi}(p) e^{i\frac{p}{\hbar}x} \right]_{-\infty}^{\infty} - \int_{\mathbb{R}} \frac{\partial \tilde{\Psi}(p)}{\partial p} e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp \right\} \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{\mathbb{R}} i\hbar \frac{\partial \tilde{\Psi}(p)}{\partial p} e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp
\end{aligned} \tag{109}$$

Εδώ, εφαρμόσαμε ολοκλήρωση κατά παράγοντες και εκμεταλλευθήκαμε το ότι η  $\tilde{\Psi}(p)$  μηδενίζεται στο  $\pm\infty$ , ως μετασχηματισμός Fourier τετραγωνικά ολοκληρώσιμης συνάρτησης.

Δρώντας στη δεύτερη των (108) με τον τελεστή ορμής, και παρατηρώντας ότι η παραγώγιση ως προς  $x$  δρα στο εκθετικό εντός του ολοκληρώματος, λαμβάνουμε:

$$\hat{p}\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} (-i\hbar) \int_{\mathbb{R}} \tilde{\Psi}(p) \frac{\partial e^{i\frac{p}{\hbar}x}}{\partial x} dp = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{\mathbb{R}} p \tilde{\Psi}(p) e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp \tag{110}$$

Συνοψίζοντας,

$$\hat{x}\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{\mathbb{R}} i\hbar \frac{\partial \tilde{\Psi}(p)}{\partial p} e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp, \quad \hat{p}\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{\mathbb{R}} p \tilde{\Psi}(p) e^{i\frac{p}{\hbar}x} dp. \tag{111}$$

Επομένως, ο μετασχηματισμός Fourier της  $\hat{x}\Psi(x)$  είναι  $+i\hbar \frac{\partial \tilde{\Psi}(p)}{\partial p}$ , ενώ ο μετασχηματισμός Fourier της  $\hat{p}\Psi(x)$  είναι  $p \tilde{\Psi}(p)$ . Λέμε λοιπόν ότι, στην αναπαράσταση ορμής, ο τελεστής θέσης αναπαριστάται ως διαφορικός τελεστής,  $\hat{x}\tilde{\Psi}(p) \rightarrow +i\hbar \frac{\partial}{\partial p} \tilde{\Psi}(p)$ , ενώ ο τελεστής ορμής αναπαριστάται ως πολλαπλασιαστικός τελεστής,  $\hat{p}\tilde{\Psi}(p) \rightarrow p \tilde{\Psi}(p)$ .

Κατ' επέκταση, είναι εύκολο να δει κανείς ότι όλες οι δυνάμεις του τελεστή της ορμής αναπαριστούνται επίσης πολλαπλασιαστικά στην αναπαράσταση ορμής:  $\hat{p}^n \tilde{\Psi}(p) \rightarrow p^n \tilde{\Psi}(p)$ , δηλαδή, ο μετασχηματισμός Fourier της  $\hat{p}^n \Psi(x)$  είναι η  $p^n \tilde{\Psi}(p)$ .<sup>(72)</sup> Επίσης, τα εσωτερικά γινόμενα μετασχηματίζονται αντίστοιχα:

$$(\Phi, \Psi) \equiv \int_{\mathbb{R}} \Phi^*(x) \hat{p}^n \Psi(x) dx = \int_{\mathbb{R}} \left( \tilde{\Phi}(p) \right)^* p^n \tilde{\Psi}(p) dp, \tag{112}$$

όπου στην τελευταία σχέση ο τελεστής  $\hat{p}^n$  έχει αντικατασταθεί από το  $p^n$ . Επομένως, εάν μια κυματοσυνάρτηση δίνεται σε αναπαράσταση ορμής, είναι πολύ απλό να υπολογίσουμε την πυκνότητα πιθανότητας της ορμής. Η  $n$ -οστή ροπή της πυκνότητας

<sup>(72)</sup>Πρόβλημα 10

πιθανότητας είναι

$$\langle \hat{p}^n \rangle = \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{p}^n \Psi(x) dx = \int_{\mathbb{R}} p^n |\tilde{\Psi}(p)|^2 dp \quad (113)$$

και ειδικά η κινητική ενέργεια είναι

$$\langle \hat{T} \rangle = \frac{1}{2m} \int_{\mathbb{R}} \Psi^*(x) \hat{p}^2 \Psi(x) dx = \frac{1}{2m} \int_{\mathbb{R}} p^2 |\tilde{\Psi}(p)|^2 dp. \quad (114)$$

Η πιθανότητα να μετρηθεί η ορμή στο διάστημα  $(p_a, p_b)$  είναι

$$P(p_a, p_b) = \int_{p_a}^{p_b} |\tilde{\Psi}(p)|^2 dp, \quad (115)$$

Η τελευταία σχέση δεν είναι παρά η εφαρμογή του αξιώματος προβολής στη μέτρηση της ορμής. Εάν είχαμε περιορίσει το χώρο κίνησης του σωματιδίου στο  $[-\frac{1}{2}L, +\frac{1}{2}L]$  αντί για  $(-\infty, +\infty)$ , με το  $L$  να έχει πολύ μεγάλη τιμή, τότε οι ιδιοσυναρτήσεις ορμής θα ήταν κανονικοποιημένες, το ολοκλήρωμα Fourier (108) θα γινόταν αριθμήσιμο ανάπτυγμα  $\Psi(x) = \sum_n c_n \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ik_n x}$ , και οι συντελεστές  $\tilde{\Psi}(p)$  θα αντιστοιχούσαν στους συντελεστές  $c_n$ , θέτοντας  $p \rightarrow \hbar k_n$ . Η πιθανότητα να μετρήσουμε ορμή ίση με  $p = \hbar k_n$  θα ήταν  $|c_n|^2$ , λόγω του αξιώματος προβολής. Αντίστοιχα εδώ, η πυκνότητα πιθανότητας να μετρήσουμε ορμή  $p$  είναι  $|\tilde{\Psi}(p)|^2$ .

Από μαθηματικής πλευράς, η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων, δηλαδή (α)  $[-\frac{1}{2}L, +\frac{1}{2}L]$  και (β)  $(-\infty, +\infty)$ , είναι ότι, στην περίπτωση (α), οι συναρτήσεις  $\frac{1}{\sqrt{L}} e^{ik_n x}$  είναι αριθμήσιμες σε πλήθος και κανονικοποιήσιμες και αποτελούν στο σύνολό τους βάση για τον χώρο Hilbert των καταστάσεων, ενώ στην περίπτωση (β) οι συναρτήσεις  $\frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} e^{ikx} \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} e^{ipx/\hbar}$  είναι μη αριθμήσιμες σε πλήθος (λόγω της συνεχούς μεταβλητής  $p$ ), μη κανονικοποιήσιμες και δεν αποτελούν βάση, αλλά είναι γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις της ορμής. Από φυσικής πλευράς, η ερμηνεία είναι ότι στην περίπτωση (β) έχουμε συνεχές φάσμα τιμών της ορμής, επομένως ένα πείραμα δεν θα μας δώσει την ακριβή τιμή της ορμής, παρά μόνο ένα εύρος τιμών μεταξύ  $[p_a, p_b]$ , όπου τα άκρα του διαστήματος  $p_a$  και  $p_b$  εξαρτώνται από τη διακριτική ικανότητα της πειραματικής συσκευής. Αυτό εκπροσωπείται μαθηματικά από το σύνολο των προβολικών τελεστών εντός του διαστήματος, και όχι από μία μοναδική κυματοσυνάρτηση.

Τα παραπάνω συμπεράσματα έχουν ιδιαίτερη χρησιμότητα σε προβλήματα σκέδασης, στα οποία η αρχική κυματοσυνάρτηση αντιστοιχεί σε κυματοπακέτο που προσπίπτει σε ένα στόχο από μεγάλη απόσταση. Όσο το κυματοπακέτο βρίσκεται μακριά από το στόχο, αντιστοιχεί σε ελεύθερο σωματίδιο, οπότε εξυπηρετεί να κάνει κανείς ένα ανάπτυγμα της κυματοσυνάρτησης σε ιδιοσυναρτήσεις της ορμής.

Στη γενική περίπτωση ερμιτιανού τελεστή  $\hat{A}$ , η οικογένεια προβολικών τελεστών δεν

δίνεται από εκθετικές συναρτήσεις  $e^{ikx}$ , αλλά προσδιορίζεται από την εξίσωση ιδιοτιμών  $\hat{A}u_a = a u_a$ .

## 5.6 Προβλήματα

1. Θεωρήστε μια απειροστή στροφή στον τρισδιάστατο ευκλείδιο χώρο (και γενικότερα στον  $\mathbb{R}^n$ ,  $n \geq 2$ ), κατά την οποία ένα αρχικό διάνυσμα  $\mathbf{r}$  στρέφεται στο  $\mathbf{r} + \delta\mathbf{r}$ . Στο όριο  $\delta\mathbf{r} \rightarrow 0$  δείξτε ότι τα  $\mathbf{r}$  και  $\delta\mathbf{r}$  είναι ορθογώνια. Εξετάστε αν ισχύει το ίδιο και σε απειροστές στροφές στο χώρο Hilbert. Αν όχι, ποια η διαφορά;
2. Η Χαμιλτονιανή, για σωματίδιο που κινείται σε δυναμικό  $V(x)$ , είναι  $\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \hat{V}(\hat{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$ . Δείξτε τη σχέση  $\frac{d\langle p \rangle}{dt} = -\langle \frac{\partial V(x)}{\partial x} \rangle$ . (Υπόδειξη: Δείξτε ότι ο μεταθέτης της ορμής με μια συνάρτηση της θέσης είναι  $[\hat{p}, \hat{V}(\hat{x})] = -i\hbar\frac{\partial V}{\partial x}$ .)
3. α) Ξεκινάμε με μια συλλογή σε χρόνο  $t = 0$  και κάνουμε μετρήσεις ενέργειας σε χρόνο  $t$ . Λαμβάνουμε μια κατανομή πιθανότητας της ενέργειας. Δείξτε ότι η κατανομή είναι ανεξάρτητη από το χρόνο (υποθέτοντας ότι η Χαμιλτονιανή δεν έχει εξάρτηση από το χρόνο). β) Για σύστημα ελεύθερου σωματιδίου, ξεκινάμε με μια συλλογή σε χρόνο  $t = 0$  και κάνουμε μετρήσεις ορμής σε χρόνο  $t$ . Δείξτε ότι η κατανομή της ορμής είναι ανεξάρτητη από το χρόνο.
4. Δείξτε τη μορφή της εξ. συνέχειας στη διαφορική της μορφή (82) και στην ολοκληρωτική της μορφή (80) σε τρεις διαστάσεις.
5. Δείξτε ότι  $e^{-it\hat{H}/\hbar} \sum_n c_n(0)\Phi_n = \sum_n e^{-itE_n/\hbar} c_n(0)\Phi_n$ , εάν η Χαμιλτονιανή δεν εξαρτάται από το χρόνο και εάν οι  $\Phi_n$  είναι ιδιοκαταστάσεις της  $\hat{H}$  με ιδιοτιμές  $E_n$ . (Υπόδειξη: σε πρώτο βήμα δείξτε ότι οι  $\Phi_n$  είναι και ιδιοσυναρτήσεις του τελεστή  $e^{-it\hat{H}/\hbar}$  με ιδιοτιμή  $e^{-itE_n/\hbar}$ . Χρησιμοποιήστε προς τούτο το ανάπτυγμα της εκθετικής συνάρτησης.)
6. Δείξτε ότι η πρόσθεση μιας σταθεράς στη Χαμιλτονιανή, δηλαδή  $\hat{H} \rightarrow \hat{H} + \lambda \hat{I}$ , με  $\hat{I}$  τον ταυτοτικό τελεστή και  $\lambda \in \mathbb{R}$  σταθερά ανεξάρτητη του χρόνου, δεν επιφέρει αλλαγές στα μετρήσιμα μεγέθη και επομένως δεν έχει φυσική σημασία.
7. Για Χαμιλτονιανή της μορφής  $\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + V(x)$ , και υπό την προϋπόθεση πως η συνάρτηση  $V(x)$  έχει ελάχιστο  $V_{\min}$ , δείξτε ότι: α) η μέση τιμή της ενέργειας  $(\Psi, \hat{H}\Psi)$  σε οποιαδήποτε  $\Psi$  δεν μπορεί να είναι μικρότερη από  $V_{\min}$ , β) οποιαδήποτε ιδιοτιμή της Χαμιλτονιανής δεν μπορεί να είναι μικρότερη από  $V_{\min}$ . (Βλ. και κεφ. 3 πρόβλημα 15.)

8. Δείξτε το θεώρημα virial σε μία διάσταση:  $\langle \hat{T} \rangle_n = \frac{1}{2} \langle x \partial V(x) / \partial x \rangle_n$ , όπου η μέση τιμή λαμβάνεται σε οποιαδήποτε ιδιοκατάσταση  $\Psi_n$  της Χαμιλτονιανής  $\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}$ . Υπόδειξη: εξετάστε τη μέση τιμή του μεταθέτη  $\langle [\hat{H}, \hat{x}\hat{p}] \rangle_n$ .
9. α) Βρείτε την κυματοσυνάρτηση  $\Psi(x) = Ce^{-\gamma x^2}$ ,  $\gamma > 0$ , σε αναπαράσταση ορμής, αφού υπολογίσετε τη σταθερά κανονικοποίησης  $C$ .  
 β) Ένα σωματίδιο κινείται στο  $(-\infty, \infty)$  χαρακτηριζόμενο από την κυματοσυνάρτηση του (α). Γίνεται μέτρηση της ορμής. Βρείτε την πυκνότητα πιθανότητας να βρεθεί η τιμή  $p_0$ . Υπόδειξη:  $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2+bx} dx = \sqrt{\pi/a} e^{b^2/(4a)}$ ,  $a > 0$ ,  $b \in \mathbb{C}$ .
10. α) Πεισθείτε για τα αποτελέσματα 108,111. β) Δείξτε ότι η αναπαράσταση ορμής της  $\hat{p}^n \Psi(x)$  είναι η  $p^n \tilde{\Psi}(p)$ . Υπόδειξη: δοκιμάστε απόδειξη με επαγωγή.



## 6 Συνύπαρξη διακριτού και συνεχούς φάσματος: πηγάδι δυναμικού

### 6.1 Περιγραφή του προβλήματος

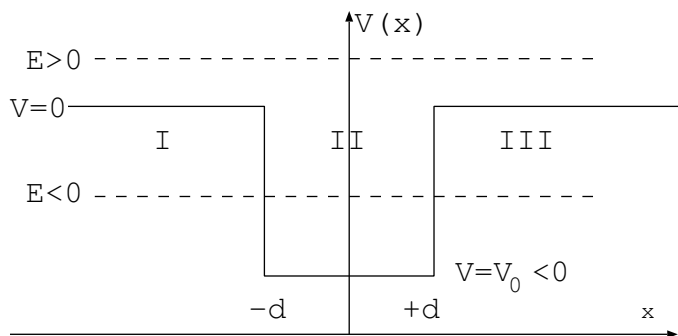
Θα λύσουμε τώρα το εξής πρόβλημα: σωματίδιο κινείται σε μια διάσταση υπό την επίδραση Χαμιλτονιανής της μορφής

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \hat{V}(\hat{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \quad (116)$$

με

$$V(x) = \begin{cases} V_0 (< 0), & \text{αν } -d < x < d \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (117)$$

Δηλαδή, το δυναμικό σχηματίζει ένα πηγάδι, βάρους  $V_0$  και πλάτους  $2d$ , γύρω από το  $x = 0$  (βλ. σχ. 1). Αυτό μπορεί να ιδωθεί και ως μοντέλο ατόμου σε μια ιδιαίτερα απλοϊκή μορφή.



Σχήμα 1: Πηγάδι δυναμικού σε μία διάσταση.

Αναζητούμε λύσεις της χρονικά ανεξάρτητης εξ. Schrödinger, η οποία γράφεται:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + \frac{2mE}{\hbar^2} \Psi &= 0, & x < -d \text{ (περιοχή I)} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + \frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2} \Psi &= 0, & -d < x < d \text{ (περιοχή II)} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + \frac{2mE}{\hbar^2} \Psi &= 0, & d < x \text{ (περιοχή III)} \end{aligned}$$

Ολοκληρώνοντας την εξ. Schrödinger σε ένα μικρό διάστημα πάχους  $2\epsilon$  γύρω από το

$d$ , έχουμε

$$\begin{aligned}
0 &= \int_{d-\epsilon}^{d+\epsilon} \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(x)) \Psi \right] dx \\
&= \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right]_{d-\epsilon}^{d+\epsilon} + \frac{2m}{\hbar^2} E \int_{d-\epsilon}^{d+\epsilon} \Psi(x) dx - \frac{2m}{\hbar^2} V_0 \int_{d-\epsilon}^d \Psi(x) dx \\
&\rightarrow \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{d^+} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{d^-} \right] + 0, \quad \text{για } \epsilon \rightarrow 0.
\end{aligned}$$

Στο τελευταίο βήμα δεχθήκαμε ότι η  $\Psi$  δεν απειρίζεται στο  $d$ . Εξάλλου, εξετάζοντας τις ποσότητες  $\Psi(d - \epsilon) = \int_{-\infty}^{d-\epsilon} \Psi'(x) dx$  και  $\Psi(d + \epsilon) = \int_{-\infty}^{d+\epsilon} \Psi'(x) dx$ , και δεχόμενοι ότι η  $\Psi'(x)$  δεν απειρίζεται, βλέπουμε ότι  $\Psi(d^-) = \Psi(d^+)$ , δηλαδή η  $\Psi$  είναι συνεχής. Εντελώς ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα στη θέση  $-d$ .

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε τα εξής. Σε σημείο πεπερασμένης ασυνέχειας δυναμικού κατά  $V_0$ :

- η δεύτερη παράγωγος της  $\Psi$  παρουσιάζει ασυνέχεια  $\frac{2m}{\hbar^2} V_0$ ,
- η πρώτη παράγωγος είναι συνεχής, και
- η  $\Psi$  είναι συνεχής.

Αυτά συνδέονται με το γεγονός ότι η διαφορική εξίσωση είναι δεύτερης τάξης. Η γενική λύση σε κάθε περιοχή  $\mu \in \{I, II, III\}$  και η παράγωγός της δίνονται, όπως είναι γνωστό, από τις σχέσεις

$$\Psi_\mu = a_\mu e^{ik_\mu x} + b_\mu e^{-ik_\mu x} \quad (118)$$

$$\frac{\partial \Psi_\mu}{\partial x} = ik_\mu (a_\mu e^{ik_\mu x} - b_\mu e^{-ik_\mu x}) \quad (119)$$

με  $k_I^2 = k_{III}^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \equiv q^2$  και  $k_{II}^2 = \frac{2m(E-V_0)}{\hbar^2} \equiv k^2$ , όπου απλοποιήσαμε το συμβολισμό εισάγοντας τα  $q$  και  $k$ . Οι συντελεστές  $a_\mu$  και  $b_\mu$  και οι ενέργεια  $E$  (συνολικά επτά άγνωστοι) προσδιορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες συνέχειας της κυματοσυνάρτησης και της παραγώγου στα  $-d$  και  $+d$ , από τις συνοριακές συνθήκες της κυματοσυνάρτησης στο  $\pm\infty$ , και από τη συνθήκη κανονικοποίησης (επτά εξισώσεις).

Πριν προχωρήσουμε στην επίλυση του συστήματος επτά εξισώσεων με επτά αγνώστους, παρατηρούμε ότι το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από συμμετρία, η οποία απλοποιεί τις εξισώσεις.

## 6.2 Συμμετρία ομοτιμίας (αντιστροφής χώρου)

Η Χαμιλτονιανή (116) με το δυναμικό (117) είναι αναλλοίωτη υπό το μετασχηματισμό  $x \rightarrow -x$ . Αυτό μας οδηγεί στο να ορίσουμε τον τελεστή της ομοτιμίας (*parity*) ή

αντιστροφής χώρου (*space inversion*)  $\hat{\mathcal{P}}$ , με

$$\hat{\mathcal{P}}\Psi(\mathbf{r}) = \Psi(-\mathbf{r}) \quad (120)$$

ή, σε μία διάσταση,  $\hat{\mathcal{P}}\Psi(x) = \Psi(-x)$ . Ο τελεστής είναι ερμιτιανός: πρώτον, είναι πρόδηλα γραμμικός, και δεύτερον, εύκολα βρίσκουμε ότι  $(\Psi, \hat{\mathcal{P}}\Psi) \in \mathbb{R}$ . Επίσης, εύκολα βρίσκουμε ότι  $\hat{\mathcal{P}}^2 = 1$ , ότι οι ιδιοκαταστάσεις του είναι είτε άρτιες είτε περιττές συναρτήσεις και ότι οι ιδιοτιμές του είναι το 1 (για άρτιες συναρτήσεις) και το  $-1$  (για περιττές).<sup>(73)</sup>

Δρούμε με τον  $\hat{\mathcal{P}}$  στη συνάρτηση  $\hat{H}\Psi(x)$ :  $\hat{\mathcal{P}}\hat{H}\Psi(x) = \hat{\mathcal{P}}[-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\Psi(x) + V(x)\Psi(x)]$ . Η δεύτερη παραγωγή ως προς τη θέση μένει αναλλοίωτη από το μετασχηματισμό  $x \rightarrow -x$ :  $\frac{\partial^2}{\partial(-x)^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ . Το δυναμικό του δεδομένου προβλήματος είναι άρτια συνάρτηση του  $x$ :  $V(-x) = V(x)$ . Επομένως,  $\hat{\mathcal{P}}\hat{H}\Psi(x) = \hat{H}\Psi(-x) = \hat{H}\hat{\mathcal{P}}\Psi(x)$ , δηλαδή  $[\hat{\mathcal{P}}, \hat{H}] = 0$ : ο τελεστής ομοτιμίας μετατίθεται με την άρτια Χαμιλτονιανή.

Από εδώ προκύπτει ότι οι ιδιοκαταστάσεις της Χαμιλτονιανής μπορούν να επιλεγούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι και ιδιοκαταστάσεις της ομοτιμίας. Αν  $\Phi$  ιδιοκατάσταση της Χαμιλτονιανής με ιδιοτιμή  $E$ , τότε  $\hat{H}(\hat{\mathcal{P}}\Phi) = \hat{\mathcal{P}}\hat{H}\Phi = E\hat{\mathcal{P}}\Phi$  (στο πρώτο βήμα χρησιμοποιήσαμε τη μεταθετική ιδιότητα των  $\hat{\mathcal{P}}$  και  $\hat{H}$ ), δηλαδή η  $\hat{\mathcal{P}}\Phi$  είναι επίσης ιδιοκατάσταση της Χαμιλτονιανής με την ίδια ιδιοτιμή (η  $\hat{\mathcal{P}}\Phi$  ενδέχεται και να ταυτίζεται με την  $\Phi$ ). Επομένως, οι κυματοσυναρτήσεις

$$\Phi_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\Phi + \hat{\mathcal{P}}\Phi) \quad \text{και} \quad \Phi_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(\Phi - \hat{\mathcal{P}}\Phi) \quad (121)$$

είναι επίσης ιδιοκαταστάσεις της Χαμιλτονιανής, αλλά, ταυτόχρονα, είναι και ιδιοκαταστάσεις της ομοτιμίας:  $\hat{\mathcal{P}}\Phi_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{\mathcal{P}}\Phi + \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{\mathcal{P}}^2\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{\mathcal{P}}\Phi + \frac{1}{\sqrt{2}}\Phi = \Phi_+$  και  $\hat{\mathcal{P}}\Phi_- = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{\mathcal{P}}\Phi - \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{\mathcal{P}}^2\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{\mathcal{P}}\Phi - \frac{1}{\sqrt{2}}\Phi = -\Phi_-$ . (Σε περίπτωση που  $\hat{\mathcal{P}}\Phi = \Phi$ , η  $\Phi_-$  μηδενίζεται.)

Εκμεταλλευόμενοι τα παραπάνω συμπεράσματα, θα αναζητήσουμε λύσεις της εξ. Schrödinger οι οποίες να είναι είτε άρτιες είτε περιττές συναρτήσεις. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο αριθμός των αγνώστων στις εξισώσεις προς επίλυση.

Γενικότερα, αν η Χαμιλτονιανή μετατίθεται με κάποιον ερμιτιανό τελεστή, μπορούμε να αναζητήσουμε κοινές ιδιοσυναρτήσεις, απλοποιώντας την επίλυση του προβλήματος. Π.χ. η κινητική ενέργεια μετατίθεται με τον τελεστή της ορμής, οπότε επιλέγουμε τις ιδιοσυναρτήσεις της ορμής  $e^{ikx}$  ως λύσεις. Όμοια, σε τρεις διαστάσεις, εάν η Χαμιλτονιανή να μετατίθεται με τον τελεστή της στροφορμής, τότε επιλέγουμε να λύσουμε το πρόβλημα σε βάση ιδιοκαταστάσεων της στροφορμής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, λέμε ότι η Χαμιλτονιανή υπακούει σε μια συμμετρία (εδώ, τη συμμετρία της ομοτιμίας), η οποία

<sup>(73)</sup>Πρόβλημα 4.10.

επίσης επάγει ένα διατηρούμενο μέγεθος (εδώ, την ομοτιμία των κυματοσυναρτήσεων: άρτιες εξελίσσονται χρονικά σε άρτιες, περιττές σε περιττές), όπως συζητήσαμε στο κεφάλαιο 5. Το πλεονέκτημα της χρήσης των συμμετριών είναι ότι οι ιδιοκαταστάσεις τους μπορούν συνήθως να βρεθούν με απλά επιχειρήματα, σε αντίθεση με τη Χαμιλτονιανή, της οποίας το πρόβλημα ιδιοτιμών είναι συνήθως πιο περίπλοκο. Για παράδειγμα, οποιαδήποτε Χαμιλτονιανή με κινητική ενέργεια και άρτια συνάρτηση δυναμικού έχει συμμετρία ομοτιμίας, ανεξάρτητα της ακριβούς μορφής του δυναμικού. Η αναζήτηση ιδιοσυναρτήσεων της Χαμιλτονιανής ξεχωριστά στον υπόχωρο των άρτιων και ξεχωριστά των περιττών συναρτήσεων μειώνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

### 6.3 Δέσμιες καταστάσεις

Προχωρούμε, τώρα, στην εύρεση των συντελεστών  $a_\mu$ ,  $b_\mu$  και της ενέργειας  $E$  (βλ. εξ. 118,119 και την παράγραφο που ακολουθεί). Πρώτα εξετάζουμε λύσεις δέσμιων καταστάσεων (*bound states*) εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία των κυματοσυναρτήσεων. Δέσμιες ονομάζονται εκείνες οι ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής, οι οποίες είναι ουσιαστικά εντοπισμένες σε πεπερασμένο χώρο (μηδενίζονται ή πέφτουν εκθετικά για μεγάλα  $|x|$ ).

Ήδη καταλήξαμε  $k_I^2 = k_{III}^2 \equiv q^2$ . Από τη συμμετρία ομοτιμίας,  $\Psi(-x) = \pm\Psi(x)$ , έχουμε  $a_I = \pm b_{III}$  και  $b_I = \pm a_{III}$  (+ για άρτιες συναρτήσεις, - για περιττές). Επίσης,  $a_{II} = \pm b_{II} \equiv c/2$ , δηλαδή, στην περιοχή II έχουμε ή  $\Psi = c \cos(kx)$  ή  $c \sin(kx)$ . Επομένως, η εξίσωση (118) γράφεται

$$\Psi_+ = \begin{cases} ae^{iqx} + be^{-iqx} \\ c \cos(kx) \\ be^{iqx} + ae^{-iqx} \end{cases} \quad \text{και} \quad \Psi_- = \begin{cases} ae^{iqx} + be^{-iqx} & x < -d \\ c \sin(kx) & -d < x < d \\ -(be^{iqx} + ae^{-iqx}) & d < x \end{cases} \quad (122)$$

για τις άρτιες ( $\Psi_+$ ) και τις περιττές ( $\Psi_-$ ) λύσεις. Το επόμενο βήμα είναι να θέσουμε τη συνοριακή συνθήκη  $|\Psi(x)|^2 \rightarrow 0$  για  $x \rightarrow \pm\infty$ , η οποία πρέπει να ικανοποιείται από δέσμιες καταστάσεις. Θυμόμαστε ότι  $q^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E$ , επομένως, το  $q$  θα είναι πραγματικό για  $E > 0$  και φανταστικό για  $E < 0$ . Αν  $q \in \mathbb{R}$ , τότε βλέπουμε αμέσως ότι δεν μηδενίζεται η κυματοσυνάρτηση για μεγάλα  $x$ : Για  $x > d$  και  $x < -d$ , έχουμε  $|\Psi(x)|^2 = |a|^2 + |b|^2 + 2\text{Re}[a b e^{2iqx}]$ , η οποία είναι ταλαντούμενη περιοδική συνάρτηση. Επομένως, πρέπει αναγκαστικά  $E < 0$ , ώστε το  $q$  να είναι φανταστικός αριθμός, έστω  $iq = \gamma$ ,  $\gamma \in \mathbb{R}$ . Θέτουμε  $\gamma > 0$  χωρίς βλάβη της γενικότητας, εφόσον εμφανίζεται και το  $\gamma$  και το  $-\gamma$  στην εξίσωση. Τότε, πρέπει να έχουμε  $b = 0$ , διότι, διαφορετικά, για  $x > d$  θα κυριαρχούσε ο όρος  $be^{iqx} = be^{\gamma x} \rightarrow \infty$  για  $x \rightarrow \infty$ . Ανάλογο συμπέρασμα βγάζουμε

για  $x < -d$ : και πάλι πρέπει  $b = 0$ . Έχουμε λοιπόν το ενδιαμέσο αποτέλεσμα:

$$\Psi_+ = \begin{cases} ae^{\gamma x} \\ c \cos(kx) \\ ae^{-\gamma x} \end{cases} \quad \text{και} \quad \Psi_- = \begin{cases} ae^{\gamma x} & x < -d \\ c \sin(kx) & -d < x < d \\ -ae^{-\gamma x} & d < x \end{cases} \quad (123)$$

με  $\gamma = \sqrt{2m|E|}/\hbar$  και  $k = \sqrt{2m(E - V_0)}/\hbar$ . Οι τρεις παράμετροι που απομένουν,  $a$ ,  $c$  και  $E$ , πρέπει να προσδιοριστούν από τις συνοριακές συνθήκες συνέχειας κυματοσυνάρτησης, συνέχειας παραγώγου και κανονικοποίησης. Λόγω της συμμετρίας  $\Psi(x) = \pm\Psi(-x)$ , η απαίτηση συνέχειας στα σημεία  $\pm d$  εμπεριέχει την ίδια πληροφορία, επομένως αρκεί να εφαρμοστεί σε ένα από τα δύο. Έχουμε, στο σημείο  $x = d$ ,

$$\begin{array}{ll} \text{για την } \Psi_+: & \text{για την } \Psi_-: \\ c \cos(kd) = a e^{-\gamma d} & c \sin(kd) = -a e^{-\gamma d} \\ k c \sin(kd) = \gamma a e^{-\gamma d} & k c \cos(kd) = \gamma a e^{-\gamma d} \end{array} \quad (124)$$

Η άνω σειρά προκύπτει από τη συνέχεια της κυματοσυνάρτησης και η κάτω από τη συνέχεια της παραγώγου. Διαιρώντας κατά μέλη, λαμβάνουμε

$$\begin{array}{ll} \text{για την } \Psi_+: & \text{για την } \Psi_-: \\ \tan(kd) = \frac{\gamma}{k} & \tan(kd) = -\frac{k}{\gamma} \end{array} \quad (125)$$

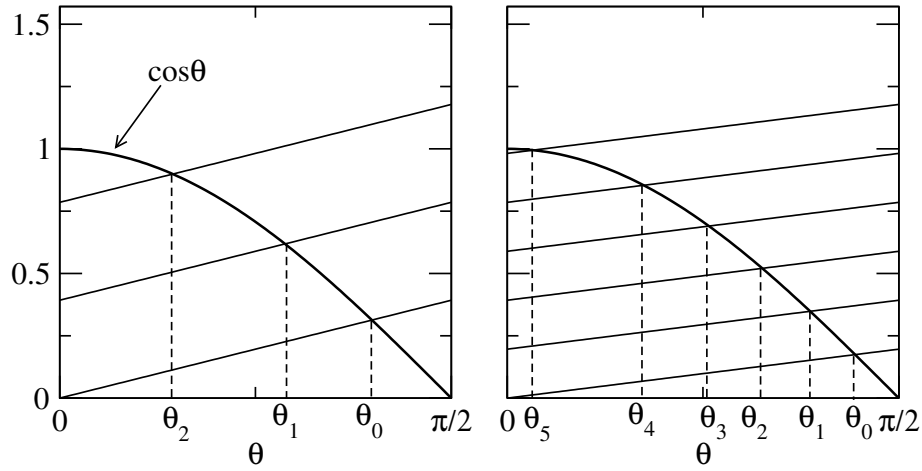
Δεδομένου ότι τα  $\gamma$  και  $k$  είναι συναρτήσεις της ενέργειας, οι παραπάνω εξισώσεις, αν λυθούν ως προς  $E$ , δίνουν τις δυνατές ιδιοτιμές της ενέργειας για άρτιες και περιττές δέσμιες καταστάσεις. Στη συνέχεια, με αντικατάσταση των ιδιοτιμών στην (124) λαμβάνουμε το λόγο  $a/c$  και σε τελευταίο βήμα, με χρήση της εξίσωσης κανονικοποίησης,  $\int |\Psi(x)|^2 dx = 1$ , λαμβάνουμε τις τιμές των  $a$  και  $c$ .

Προχωρούμε σε επίλυση των εξ. (125).<sup>(74)</sup> Παρατηρούμε ότι  $(kd)^2 + (\gamma d)^2 = [\frac{2m}{\hbar^2}(E - V_0) + \frac{2m}{\hbar^2}(-E)]d^2 = \frac{2m}{\hbar^2}|V_0|d^2 = \lambda^2$  (είναι  $E < 0$  και  $V_0 < 0$ ), όπου, για συντομία στο συμβολισμό, ορίσαμε την αδιάστατη παράμετρο  $\lambda^2 \equiv \frac{2m}{\hbar^2}|V_0|d^2$ ,  $\lambda > 0$ . Κάνουμε τώρα το μετασχηματισμό  $kd = \lambda \cos \theta$ ,  $\gamma d = \lambda \sin \theta$ , που δίνει  $k/\gamma = \cot \theta$  και  $\gamma/k = \tan \theta$ , ορίζοντας έτσι το  $\theta(E) \equiv \arcsin(\gamma(E)d/\lambda) \equiv \arcsin(\sqrt{|E/V_0|})$ . Οι εξ. (125) γίνονται

$$\begin{array}{ll} \text{για την } \Psi_+: & \text{για την } \Psi_-: \\ \tan(kd) = \tan \theta & \tan(kd) = -\cot \theta = \tan(\theta - \frac{\pi}{2}) \end{array} \quad (126)$$

Αυτές οι εξισώσεις έχουν τις λύσεις (δεδομένου ότι  $\cos \theta = kd/\lambda > 0$ ,  $\sin \theta = \gamma d/\lambda >$

<sup>(74)</sup> Ακολουθούμε τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο βιβλίο του Στέφανου Τραχανά, *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης (1991) (χεφ. 3).



Σχήμα 2: Γραφική λύση της εξ. (129) για  $\lambda = \frac{\sqrt{2m|V_0|}}{\hbar}d = 4$  (αριστερά) και  $\lambda = 8$  (δεξιά). Τα σημεία τομής των ευθειών με την καμπύλη  $\cos \theta$  αντιστοιχούν στις λύσεις  $\theta_n$  στον άξονα των  $\theta$ .

0, προκύπτει  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ )

$$\begin{aligned} &\text{για την } \Psi_+: \\ kd = \theta + n\pi = \theta + 2n\frac{\pi}{2}, \\ &(n = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{για την } \Psi_-: \\ kd = \theta - \frac{\pi}{2} + n\pi = \theta + (2n - 1)\frac{\pi}{2}, \\ &(n = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (127)$$

που συνοψίζονται στην

$$kd = \theta + n\frac{\pi}{2}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{άρτια } n \text{ για την } \Psi_+ \\ \text{περιττά } n \text{ για την } \Psi_- \end{array} \right. \quad (128)$$

Αλλά,  $kd = \lambda \cos \theta$ , επομένως

$$\begin{aligned} \cos \theta(E) &= \frac{1}{\lambda} \theta(E) + \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{2} n \\ &= \frac{\hbar}{\sqrt{2m|V_0|}d} \theta(E) + \frac{\hbar}{\sqrt{2m|V_0|}d} \frac{\pi}{2} n \end{aligned} \quad (129)$$

Οι λύσεις ως προς  $\theta = \theta_n$  της τελευταίας εξίσωσης μπορούν να βρεθούν γραφικά με απλό τρόπο, ως σημεία τομής της καμπύλης  $\cos \theta$  με την ευθεία  $\frac{1}{\lambda} \theta(E) + \frac{1}{\lambda} \frac{n\pi}{2}$ . Από τις  $\theta_n$  (βλ. Σχ. 2) υπολογίζονται οι ιδιοτιμές της ενέργειας:

$$E_n = -\frac{\hbar^2}{2m} \gamma^2 = -|V_0| \sin^2 \theta_n = -|V_0| + |V_0| \cos^2 \theta_n. \quad (130)$$

Παρατηρούμε τα ακόλουθα:

- Υπάρχει τουλάχιστον μία λύση (για  $n = 0$ ).

- Όλες οι λύσεις έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από  $V_0$ .
- Η ενέργεια των λύσεων αυξάνεται με το  $n$ .
- Ο αριθμός λύσεων είναι πεπερασμένος. Δεδομένου ότι  $\cos \theta \leq 1$ , έχουμε  $n_{\max} + 1$  λύσεις, με  $n_{\max}$  το ακέραιο μέρος του  $2\lambda/\pi$ .
- Ο αριθμός των λύσεων εξαρτάται από το  $1/\lambda$  μέσω του γινομένου των παραμέτρων  $1/(\sqrt{|V_0|}d)$ . Καθώς το  $\lambda$  αυξάνεται, δηλαδή για μεγαλύτερο  $\sqrt{|V_0|}d$  (βαθύτερα ή πλατύτερα πηγάδια), ο αριθμός των λύσεων επίσης αυξάνεται.

Για μεγάλα  $\lambda$  (στο όριο  $\sqrt{|V_0|}d \gg \hbar/\sqrt{2m}$ ), οι χαμηλότερες ενεργειακά λύσεις δίνονται από  $\theta_n = \frac{\pi}{2} - \delta\theta_n$ , με  $\delta\theta_n \ll 1$ . Προσεγγίζοντας  $\cos(\frac{\pi}{2} - \delta\theta_n) = \sin \delta\theta_n \approx \delta\theta_n$ , η εξ. (129) γράφεται  $\delta\theta_n = \frac{1}{\lambda}(\frac{\pi}{2} - \delta\theta_n) + \frac{1}{\lambda}\frac{\pi}{2}n$ , ή  $\delta\theta_n = \frac{1}{\lambda}\frac{1+n}{1+1/\lambda}\frac{\pi}{2} \approx \frac{1}{\lambda}\frac{\pi}{2}(n+1)$ . Αντικαθιστώντας στην (130) το  $\cos^2 \theta_n = \sin^2 \delta\theta_n \approx (\delta\theta_n)^2$ , προκύπτει

$$E_n - V_0 \approx \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2 (n+1)^2, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (131)$$

Η απόσταση των  $E_n$  από το ελάχιστο του δυναμικού,  $V_0$ , είναι η ίδια με τις γνωστές λύσεις για το σωματίδιο στον  $\mathcal{L}^2([-d, d])$  με συνοριακές συνθήκες  $\Psi(-d) = \Psi(d) = 0$ .

Η κατώτατη ιδιοτιμή ενέργειας ονομάζεται θεμελιώδης ή βασική στάθμη και η αντίστοιχη κατάσταση θεμελιώδης ή βασική κατάσταση (*ground state*). Παρατηρούμε ότι η θεμελιώδης στάθμη είναι υψηλότερη του ελάχιστου του δυναμικού:  $E_0 > V_0$ . Αυτό οφείλεται στην αναγκαστική ύπαρξη κινητικής ενέργειας.<sup>(75)</sup>

Οι δέσμιες καταστάσεις διεισδύουν στις περιοχές I,III όπου το δυναμικό  $V = 0$  υπερβαίνει την ενέργεια  $E_n < 0$ . Αυτό το φαινόμενο δεν παρουσιάζεται στην κλασική μηχανική. Όπως φαίνεται από την εξ. (123) η ιδιοσυνάρτηση φθίνει εκθετικά σε αυτές τις περιοχές,  $ae^{\pm\gamma x}$ . Ένα μέτρο της διείσδυσης είναι η ποσότητα  $1/\gamma$ , η οποία έχει διαστάσεις μήκους και ονομάζεται βάθος διείσδυσης. Στο όριο ( $\sqrt{|V_0|}d \gg \hbar/\sqrt{2m}$ ), το βάθος διείσδυσης των ενεργειακά χαμηλών κυματοσυναρτήσεων (μικρό  $n$ ) γίνεται απειροστό ( $1/\gamma \ll d$ ), και οι κυματοσυναρτήσεις παίρνουν, προσεγγιστικά, τη μορφή της λύσης για το πρόβλημα σωματιδίου περιορισμένου στο  $[-d, d]$ .<sup>(76)</sup>

## 6.4 Θεωρήματα για δέσμιες καταστάσεις σε μονοδιάστατα προβλήματα

Παρατηρούμε από τα προηγούμενα ότι για το πρόβλημα των δέσμιων καταστάσεων στο πηγάδι δυναμικού δεν υπάρχει εκφυλισμός. Επίσης παρατηρούμε ότι η θεμελιώδης

<sup>(75)</sup>Βλ. κεφ. 5 πρόβλημα 7.

<sup>(76)</sup>Προβλήματα 2 και 3.

κατάσταση δεν έχει κόμβους, η πρώτη διεγερμένη έχει έναν κόμβο, κ.ο.κ. Αυτά τα συμπεράσματα γενικεύονται για δέσμιες καταστάσεις σε μονοδιάστατα συστήματα.

- Σε μονοδιάστατα συστήματα, για οποιοδήποτε δυναμικό, οι ιδιοτιμές των δέσμιων καταστάσεων δεν έχουν εκφυλισμό (δεν υπάρχουν δύο δέσμιες καταστάσεις με την ίδια ιδιοτιμή ενέργειας.)

Για να το δείξουμε αυτό,<sup>(77)</sup> θεωρούμε την ορίζουσα Wronski δύο συναρτήσεων  $\Psi_1(x)$  και  $\Psi_2(x)$ ,  $W(x) = \Psi_1(x)\Psi_2'(x) - \Psi_1'(x)\Psi_2(x)$ . Αν  $W(x) = 0$ , τότε  $\Psi_1'/\Psi_1 = \Psi_2'/\Psi_2$ , από όπου προκύπτει  $\frac{d}{dx} \ln \Psi_1(x) = \frac{d}{dx} \ln \Psi_2(x)$ , δηλαδή  $\Psi_1 = c\Psi_2$ , όπου  $c$  σταθερά, δηλαδή οι δύο συναρτήσεις είναι γραμμικά εξαρτημένες. Για το πρόβλημά μας, αν οι  $\Psi_{1,2}$  ικανοποιούν τη χρονικά ανεξάρτητη εξ. Schrödinger με κοινή ιδιοτιμή  $E$ , τότε  $\Psi_{1,2}'' = \frac{2m}{\hbar^2}[V(x) - E]\Psi_{1,2}(x)$ . Τότε, προκύπτει  $\Psi_1'\Psi_2 - \Psi_1\Psi_2' = 0$ . Αλλά η έκφραση στο αριστερό μέλος ταυτίζεται με την παράγωγο της ορίζουσας Wronski, άρα  $W'(x) = 0$ , άρα  $W(x) = \Psi_1(x)\Psi_2'(x) - \Psi_1'(x)\Psi_2(x) = \text{σταθ.}$ . Παρατηρώντας ότι οι δέσμιες καταστάσεις μηδενίζονται για  $x \rightarrow \pm\infty$ , πρέπει η σταθερά να μηδενίζεται, δηλ.  $W(x) = 0$ . Άρα, οι  $\Psi_{1,2}$  είναι γραμμικά εξαρτημένες και αντιστοιχούν στην ίδια κατάσταση.

Προκύπτει το ακόλουθο πόρισμα:

- Σε μονοδιάστατα συστήματα, για οποιοδήποτε δυναμικό, οι κυματοσυναρτήσεις των δέσμιων καταστάσεων μπορούν να γραφούν σε πραγματική μορφή.

Για την απόδειξη, παρατηρούμε ότι αν  $\Psi(x)$  ιδιοσυνάρτηση της Χαμιλτονιανής με ιδιοτιμή  $E$ , τότε και η  $\Psi^*(x)$  είναι ιδιοσυνάρτηση με την ίδια ιδιοτιμή. Αυτό προκύπτει από την εξίσωση ιδιοτιμών και τη μιγαδική συζυγή της:

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m}\Psi''(x) + V(x)\Psi(x) &= E\Psi(x) \\ -\frac{\hbar^2}{2m}\Psi^{*''}(x) + V(x)\Psi^*(x) &= E\Psi^*(x). \end{aligned}$$

Η δεύτερη εξίσωση προκύπτει από την πρώτη δεδομένου ότι  $V(x) \in \mathbb{R}$  και  $E \in \mathbb{R}$ . Από το παραπάνω θεώρημα (απουσίας εκφυλισμού σε δέσμιες καταστάσεις σε μία διάσταση) προκύπτει ότι οι  $\Psi$  και  $\Psi^*$  είναι γραμμικά εξαρτημένες, δηλαδή  $\Psi^* = c\Psi$ , όπου  $c \in \mathbb{C}$  σταθερά. Εάν  $c \neq -1$ , θέτουμε ως  $\Phi$  το πραγματικό μέρος της  $\Psi$ :  $\Phi = \frac{1}{2}(\Psi + \Psi^*) = (1+c)\Psi \in \mathbb{R}$ , η οποία είναι ιδιοσυνάρτηση της  $\hat{H}$  με ιδιοτιμή  $E$ , ως πολλαπλάσιο της  $\Psi$ , άρα είναι η ζητούμενη. Εάν  $c = -1$ , θέτουμε ως  $\Phi$  το φανταστικό μέρος της  $\Psi$ :  $\Phi = \text{Im}\Psi = \frac{1}{2i}(\Psi - \Psi^*) = \frac{1}{2i}2\Psi = -i\Psi \in \mathbb{R}$ , η οποία είναι ιδιοσυνάρτηση της  $\hat{H}$  με ιδιοτιμή  $E$ , ως πολλαπλάσιο της  $\Psi$ , άρα είναι η ζητούμενη.

- Θεώρημα αυστηρής σύγκρισης του Sturm. Σε μονοδιάστατα συστήματα, εάν το δυναμικό είναι συνεχές, και εάν  $E_n < E_m$ , τότε μεταξύ δύο κόμβων της  $\Psi_n$  υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος της  $\Psi_m$ . Ως κόμβο εννοούμε ένα σημείο  $x_0$  όπου η κυμα-

<sup>(77)</sup>Βλ., π.χ., Στέφανος Τραχανάς, *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης (1991).



το συνάρτηση μηδενίζεται και αλλάζει πρόσημο: είτε  $\Psi(x_0^-) < 0$  και  $\Psi(x_0^+) > 0$ , είτε  $\Psi(x_0^-) > 0$  και  $\Psi(x_0^+) < 0$ .

• Θεώρημα ταλάντωσης (*oscillation theorem*) του Sturm ή Θεώρημα *Sturm-Liouville*. Σε μονοδιάστατα συστήματα, εάν το δυναμικό είναι συνεχές, η  $n$ -οστή κατά σειρά δέσμια κατάσταση έχει  $n$  κόμβους ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).<sup>(78)</sup> Ειδικότερα, η θεμελιώδης κατάσταση δεν έχει κόμβους.<sup>(79)</sup>

Στην πράξη, τα τελευταία δύο θεωρήματα μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως η  $\Psi_{n+1}$  έχει ακριβώς έναν κόμβο σε κάθε διάστημα κοιλίας της  $\Psi_n$ . Σε άρτιο δυναμικό, καταλήγουμε πως η ακολουθία των ιδιοσυναρτήσεων με αύξουσα ενέργεια είναι εναλλάξ άρτια, περιττή, άρτια, περιττή, κ.ο.κ., μια και οι άρτιες έχουν κοιλία στο μηδέν, ενώ οι περιττές υποχρεωτικά κόμβο.

## 6.5 Καταστάσεις σκέδασης

Εξετάζουμε τώρα λύσεις της εξ. Schrödinger για ενέργειες  $E > 0$ . Αυτές ανήκουν στο συνεχές φάσμα της Χαμιλτονιανής και ονομάζονται *καταστάσεις σκέδασης* (*scattering states*). Η θεμελιώδης διαφορά των δέσμιων καταστάσεων από τις καταστάσεις σκέδασης είναι η εξής. Θεωρούμε Χαμιλτονιανή με δυναμικό το οποίο είναι εντοπισμένο στο χώρο, δηλαδή, μηδενίζεται έξω από ένα διάστημα. Στο μοντέλο του σωματιδίου που κινείται στο διάστημα  $(-\infty, \infty)$ , με χώρο καταστάσεων τον  $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ , οι δέσμιες καταστάσεις είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής, ενώ οι καταστάσεις σκέδασης είναι ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής που δεν είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες (η νόρμα τους απειρίζεται), και, επομένως, ονομάζονται *καταχρηστικά* μόνον καταστάσεις. Προσεγγίζονται, όμως, με μια έννοια, από τετραγωνικά ολοκληρώσιμες συναρτήσεις. Στο μοντέλο του σωματιδίου που κινείται στο διάστημα  $[-\frac{1}{2}L, \frac{1}{2}L]$ , με το  $L$  να γίνεται αυθαίρετα μεγάλο, οι δέσμιες καταστάσεις είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμες ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής που δεν αλλάζουν καθώς το  $L$  αυξάνει πέρα από μια μεγάλη τιμή (πέρα από το όριο  $b$  που είχαμε ορίσει στη συζήτηση του κεφ. 5 για το συνεχές φάσμα), ενώ οι καταστάσεις σκέδασης αλλάζουν συνεχώς με το  $L$ , με την τιμή τους να φθίνει ως  $\Psi(x) \propto 1/\sqrt{L}$ .

Προτού προχωρήσουμε στην εξέταση των λύσεων, θα συζητήσουμε τα πειράματα που συνήθως αφορούν οι καταστάσεις σκέδασης και τις αντίστοιχες αρχικές και συ-

<sup>(78)</sup>Τα δύο τελευταία θεωρήματα αφορούν συναρτήσεις ορισμένες σε διάστημα  $[a, b]$ , με συνοριακές συνθήκες  $\Psi(a) = \Psi(b) = 0$ . Από φυσικής πλευράς, το θεώρημα αφορά πρακτικά οποιοδήποτε μονοδιάστατο φυσικό πρόβλημα, διότι μπορούμε να θέσουμε  $a = -\frac{1}{2}L$  και  $b = \frac{1}{2}L$  με  $L$  πολύ μεγάλο. Βλ. Ν. Δ. Αλικάκος και Γ. Η. Καλογερόπουλος, *Συνήθεις Διαφορικές Εξισώσεις*, εκδόσεις Σύγχρονη Εποχή, 2003. Επίσης, Β. Simon, *Sturm Oscillation and Comparison Theorems*, στο *Sturm-Liouville Theory: Past and Present*, edited by W. O. Armein, A. M. Hinz & D. B. Pearson, Birkhäuser Verlag 2000.

<sup>(79)</sup>Για να ισχύει το θεώρημα για τη θεμελιώδη κατάσταση, αρκεί το δυναμικό να μην έχει άπειρη ασυνέχεια. Βλ. Πρόβλημα 6.

νοριακές συνθήκες. Σε ένα πείραμα σκέδασης, σωματίδια προετοιμασμένα με ορισμένη ορμή κατευθύνονται προς ένα στόχο, από τον οποίο σχεδάζονται. Η αρχική και η τελική κατάσταση των σωματιδίων βρίσκεται μακριά από το στόχο, εκεί όπου τα σωματίδια κινούνται στον ελεύθερο χώρο. Κατά τη διάρκεια της σκέδασης, τα σωματίδια δέχονται την επίδραση του δυναμικού του στόχου. Από την κατανομή των σχεδασμένων σωματιδίων ως προς θέση, ορμή, κλπ., βγάζει κανείς συμπεράσματα για το δυναμικό και γενικότερα για τη δομή του στόχου. Η θεωρητική αντιμετώπιση είναι συνήθως αντίστροφη: υποθέτοντας μια μορφή του δυναμικού, και γνωρίζοντας την αρχική προετοιμασία του συστήματος (την αρχική κυματοσυνάρτηση), υπολογίζουμε την τελική κατανομή, και συγκρίνουμε με τη μετρημένη κατανομή. Αν τα αποτελέσματα συμφωνούν, τότε έχουμε ισχυρή ένδειξη ότι το δυναμικό που υποθέσαμε ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Η φύση του προβλήματος επιβάλλει να εξετάσουμε κυματοσυναρτήσεις που κινούνται προς το στόχο, εισερχόμενες από μακριά, και στο μακρινό παρελθόν δεν αλληλεπιδρούν με το δυναμικό (δηλαδή, στο συγκεκριμένο πρόβλημα του πηγαδιού δυναμικού, είναι αρχικά εντοπισμένες π.χ. σε μια περιοχή  $x \ll -d$  και κινούνται προς το  $x = 0$ ). Τέτοιες κυματοσυναρτήσεις είναι τα κυματοπακέτα στα οποία αναφερθήκαμε στο κεφ. 5 (εξ. 100):

$$\Psi(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int f_q e^{i(qx - E_q t/\hbar)} dq,$$

Ας υποθέσουμε ότι οι συντελεστές  $f_q$  είναι εντοπισμένοι γύρω από κάποιο  $q_0$  σε διάστημα  $(q_0 - \delta q, q_0 + \delta q)$  και μηδενίζονται για τιμές του  $q$  εκτός του διαστήματος. Με αυτό τον τρόπο, περιγράφουμε ένα κυματοπακέτο που είναι σχεδόν ιδιοσυνάρτηση της ορμής με ιδιοτιμή  $\hbar q_0$  (έχει διασπορά στην ορμή της τάξης του  $\delta p = \hbar \delta q$ ) και είναι εκτεταμένο ως προς τη θέση σε αρκετά μεγάλο διάστημα (έχει διασπορά ως προς τη θέση της τάξης του  $\Delta x \geq \hbar/(2\delta p) = 1/(2\delta q)$ , όπως προκύπτει από τη σχέση απροσδιοριστίας του Heisenberg). Η μορφή του μοιάζει με ένα επίπεδο κύμα περιορισμένο σε διάστημα  $\Delta x$  γύρω από κάποιο  $x$ , το οποίο σβήνει εκτός του διαστήματος, π.χ. ένα επίπεδο κύμα πολλαπλασιασμένο με μια γκαουσιανή συνάρτηση εύρους  $\Delta x$ .

Η φορά κίνησης του κυματοπακέτου συμφωνεί με το πρόσημο του  $q$ , όπως φαίνεται εκ πρώτης όψεως από τον όρο  $e^{i(qx - Et/\hbar)}$  και όπως βρίσκουμε υπολογίζοντας το ρεύμα

πιθανότητας για κάθε επίπεδο κύμα (78):<sup>(80)</sup>

$$\begin{aligned} j_q(x, t) &= \frac{(-i\hbar)}{2m} \left( e^{-i(qx-Et/\hbar)} \frac{\partial}{\partial x} e^{i(qx-Et/\hbar)} - e^{i(qx-Et/\hbar)} \frac{\partial}{\partial x} e^{-i(qx-Et/\hbar)} \right) \\ &= \frac{\hbar}{m} q. \end{aligned} \quad (132)$$

Όσο το κυματοπακέτο βρίσκεται μακριά από το στόχο, σε περιοχή όπου  $V(x) = 0$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη χρονική του εξέλιξη είτε την ελεύθερη Χαμιλτονιανή ( $\hat{H}_0 = \frac{1}{2m}\hat{p}^2$ ) είτε τη Χαμιλτονιανή που περιέχει το δυναμικό του στόχου: το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο, όσο έχουμε  $V(x)\Psi(x, t) = 0$ . Από τη χρονική στιγμή, όμως, που θα ξεκινήσει να ισχύει  $V(x)\Psi(x, t) \neq 0$ , καθώς το κυματοπακέτο πλησιάζει το στόχο, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την πλήρη Χαμιλτονιανή  $\hat{H} = \hat{H}_0 + V(x)$ . Τότε, η έκφραση της χρονικής εξέλιξης του κυματοπακέτου πρέπει να περιλαμβάνει τις ιδιοσυναρτήσεις  $\Psi_q$  και αντίστοιχες ιδιοτιμές ενέργειας  $E_q$  της  $\hat{H}$ :

$$\Psi(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int f_q \Psi_q(x) e^{-iE_q t/\hbar} dq, \quad (133)$$

Για την περίπτωση που εξετάζουμε, τυχαίνει το συνεχές μέρος του ενεργειακού φάσματος ( $E > 0$ ) να ταυτίζεται με εκείνο του ελεύθερου σωματιδίου, αλλά οι κυματοσυναρτήσεις αλλάζουν, σύμφωνα με την εξ. (118):

$$\Psi_q = \begin{cases} a_{\text{I}} e^{iqx} + b_{\text{I}} e^{-iqx}, & x < -d \\ a_{\text{II}} e^{ikx} + b_{\text{II}} e^{-ikx}, & -d < x < d \\ a_{\text{III}} e^{iqx} + b_{\text{III}} e^{-iqx}, & d < x \end{cases}$$

με  $k^2 = 2m(E - V_0)/\hbar^2$  και  $q^2 = 2mE/\hbar^2 > 0$ . Σε αντίθεση με το πρόβλημα δέσμιων καταστάσεων, εδώ έχουμε λύσεις για κάθε ενέργεια  $E$  στο συνεχές φάσμα. Το  $q$  και κατά συνέπεια η ενέργεια  $E_q$  δεν είναι άγνωστες παράμετροι προς προσδιορισμό μέσω των εξισώσεων, αλλά δεδομένες παράμετροι από την αρχική συνθήκη, οι οποίες, τελικά, προσδιορίζει και κάποιους από τους συντελεστές της παραπάνω εξίσωσης.

Λόγω της φύσης του προβλήματος σκέδασης, δεν προχωρούμε στην κατασκευή συμμετρικών και αντισυμμετρικών λύσεων, όπως κάναμε στις δέσμιες καταστάσεις, αλλά στην κατασκευή λύσεων που να ικανοποιούν την αρχική συνθήκη εισερχόμενου κυματοπακέτου προς το  $x = 0$  από το  $x \ll -d$ . Αυτή η αρχική συνθήκη κατασκευάζεται από επαλληλία των κυμάτων  $e^{iqx}$ ,  $q > 0$ , διότι εύκολα βρίσκουμε ότι το ρεύμα πιθανότητας που αντιστοιχεί στην  $a_{\text{I}} e^{iqx}$  ( $x < -d$ ) είναι  $j(x) = |a_{\text{I}}|^2 \frac{\hbar}{m} q > 0$ . (Ισοδύναμα

<sup>(80)</sup> Σε μια ακριβή αντιμετώπιση, πρέπει να πάρουμε το ρεύμα που αντιστοιχεί στην  $\Psi(x, t)$  του κυματοπακέτου στο όριο της εντοπισμένης κατανομής  $f_q$  γύρω από το  $q_0$  και να καταλήξουμε στην ταχύτητα ομάδας,  $v_{q_0} = \frac{1}{\hbar} \frac{dE_q}{dq} \Big|_{q_0} = \frac{\hbar}{m} q_0$ .

θα μπορούσαμε να είχαμε διαλέξει τα κύματα  $b_I e^{-iqx}$ , αλλά με  $q < 0$ .) Έχουμε, επίσης, αυτόματα  $b_{III} = 0$ , που εκφράζει το γεγονός ότι δεν εισέρχεται κύμα από το  $x \gg d$ . Αυτό προκύπτει, διότι το ρεύμα πιθανότητας που αντιστοιχεί στη συνάρτηση  $b_{III} e^{-iqx}$  ( $x > d$ ) υπολογίζεται εύκολα πως είναι  $j(x) = |b_{III}|^2 \left(-\frac{\hbar q}{m}\right) < 0$ .

Υπάρχει, επίσης, η οικογένεια λύσεων με αρχική συνθήκη εισερχόμενου κύματος από το  $x \gg d$  προς το  $x = 0$ , για την οποία θέτουμε, αντίστοιχα,  $q < 0$ ,  $b_I = 0$ . Το ποια από τις δύο επιλέγουμε, εξαρτάται από το πείραμα που θέλουμε να περιγράψουμε: από ποια πλευρά προσπίπτουν τα σωματίδια στο στόχο.

Συνεχίζουμε με την πρώτη οικογένεια λύσεων ( $q > 0$ ,  $b_{III} = 0$ ). Θα προσδιορίσουμε την κυματοσυνάρτηση μέσω των συνοριακών συνθηκών στα  $x = \pm d$ , θέτοντας  $a_I = 1$ . Αυτό μπορούμε να το κάνουμε, διότι το  $a_I$  θα μείνει στο τέλος ως ελεύθερη μεταβλητή, η οποία βρίσκεται από την αρχική μορφή του κυματοπακέτου: το  $a_I$  ταυτίζεται με το συντελεστή  $f_q/2\pi$  της εξ. (133). Ο συντελεστής  $r \equiv b_I$  ονομάζεται πλάτος ανάκλασης (*reflection amplitude*) και ο συντελεστής  $t \equiv a_{III}$  ονομάζεται πλάτος διέλευσης (*transmission amplitude*), διότι ο πρώτος δίνει το πλάτος του ανακλώμενου κύματος από το στόχο ( $r e^{-iqx}$ , με  $j(x) = |r|^2 \left(-\frac{\hbar}{m}q\right) < 0$  για  $x < -d$ ), ενώ ο δεύτερος δίνει το πλάτος του διερχόμενου κύματος ( $t e^{-iqx}$ , με  $j(x) = |t|^2 \frac{\hbar}{m}q < 0$  για  $x > d$ ). Συνοψίζοντας:

$$\Psi_q = \begin{cases} e^{iqx} + r e^{-iqx}, & x < -d \\ a e^{ikx} + b e^{-ikx}, & -d < x < d \\ t e^{iqx}, & d < x \end{cases} \quad (134)$$

Απλοποιήσαμε λίγο το συμβολισμό, θέτοντας  $a = a_{II}$  και  $b = b_{II}$ . Έχουμε τέσσερις αγνώστους ( $r, t, a, b$ ) οι οποίοι καθορίζονται από τέσσερις εξισώσεις (συνέχεια της κυματοσυνάρτησης και συνέχεια της παραγώγου στα σημεία  $\pm d$ ):

$$\begin{aligned} \text{Συνεχεια της } \Psi \text{ στο } -d: & \quad e^{-iqd} + r e^{iqd} = a e^{-ikd} + b e^{ikd} \\ \text{Συνεχεια της } \Psi' \text{ στο } -d: & \quad q(e^{-iqd} - r e^{iqd}) = k(a e^{-ikd} - b e^{ikd}) \\ \text{Συνεχεια της } \Psi \text{ στο } +d: & \quad a e^{ikd} + b e^{-ikd} = t e^{iqd} \\ \text{Συνεχεια της } \Psi' \text{ στο } +d: & \quad k(a e^{ikd} - b e^{-ikd}) = q t e^{iqd} \end{aligned} \quad (135)$$

Παρά ότι η λύση του συστήματος δίνει όλους τους συντελεστές, στα πειράματα μετράται συνήθως το ποσοστό των σωματιδίων που διέρχεται και το ποσοστό που ανακλάται. Αυτά δίνονται από τις ποσότητες είναι οι  $|t|^2$  και  $|r|^2$ , αντίστοιχα. Δίνουμε εδώ μόνο το

τελικό αποτέλεσμα για τα  $r$  και  $t$ :<sup>(81)</sup>

$$r = ie^{-2iqd} \frac{(k^2 - q^2) \sin(2kd)}{2qk \cos(2kd) - i(k^2 + q^2) \sin(2kd)} \quad (136)$$

$$t = e^{-2iqd} \frac{2kq}{2qk \cos(2kd) - i(k^2 + q^2) \sin(2kd)} \quad (137)$$

Η ποσότητα  $|t|^2 \frac{\hbar q}{m}$  δίνει το ρεύμα πιθανότητας που απομακρύνεται από την περιοχή του δυναμικού προς τα  $x \gg d$ . Αντίστοιχα, η ποσότητα  $-|r|^2 \frac{\hbar q}{m}$  δίνει το ρεύμα που απομακρύνεται προς τα  $x \ll -d$ , ενώ η ποσότητα  $\frac{\hbar q}{m}$  το προσπίπτον ρεύμα προερχόμενο από τα  $x \ll -d$ . Αυτό φαίνεται εύκολα, αν υπολογίσουμε την τιμή του ρεύματος  $j(x)$  στις συναρτήσεις  $e^{iqx}$ ,  $te^{iqx}$  και  $re^{-iqx}$ . Επίσης, λόγω του ότι έχουμε στάσιμη κατάσταση (ιδιοσυνάρτηση της εξ. Schrödinger) η οποία δεν μεταβάλλεται με το χρόνο παρά μόνο μέσω του παράγοντα φάσης  $e^{-iEt/\hbar}$  με μέτρο τη μονάδα, η πιθανότητα να βρίσκεται το σωματίδιο στο διάστημα  $[-d, d]$  είναι σταθερή στο χρόνο.<sup>(82)</sup> Η εξίσωση συνέχειας στην ολοκληρωτική μορφή της (80) μας δίνει λοιπόν

$$|t|^2 + |r|^2 = 1, \quad (138)$$

το οποίο ελέγχεται και με απ' ευθείας υπολογισμό και εκφράζει τη διατήρηση της πιθανότητας. Ο συντελεστής διέλευσης  $|t|^2$  προκύπτει (εφόσον  $V_0 < 0$ , δηλ.  $k^2 > 0$ ):

$$|t|^2 = \frac{4k^2 q^2}{4k^2 q^2 + (k^2 - q^2)^2 \sin^2(2kd)} = \frac{4k^2 q^2}{4k^2 q^2 + \left(\frac{2mV_0}{\hbar^2}\right)^2 \sin^2(2kd)}. \quad (139)$$

Ο συντελεστής διέλευσης δεν ταυτίζεται με τη μονάδα. Αυτό είναι αντίθετο στην κλασική φυσική, όπου ένα αντίστοιχο πηγάδι δυναμικού θα επέτρεπε σε οποιοδήποτε σωματίδιο με  $E > 0$  να διέλθει με βεβαιότητα, και πηγάζει από την κυματική φύση των κβαντικών καταστάσεων. Ωστόσο, στο όριο υψηλών ενεργειών, ο όρος  $\left(\frac{2mV_0}{\hbar^2}\right)^2 \sin^2(2kd)$  στον παρονομαστή γίνεται αμελητέος σε σχέση με τον όρο  $4k^2 q^2 \rightarrow 16m^2 E^2/\hbar^4$ , οπότε για το συντελεστή διέλευσης προκύπτει  $|t|^2 \rightarrow 1$ .

Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι οι συντελεστές  $|t|^2$  και  $|r|^2$  δεν είναι μονότονες συναρτήσεις της ενέργειας (ή του  $q$ ). Μάλιστα, για  $2kd = \nu\pi$  ( $\nu = 1, 2, 3, \dots$ ), ο αριθμητής της (136) μηδενίζεται και ο παρονομαστής της (137) εξισώνεται με τον αριθμητή. Τότε, έχουμε  $|r|^2 = 0$  και  $|t|^2 = 1$ , δηλαδή πλήρη διέλευση. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται *συντονισμός σκέδασης* (*scattering resonance*). Εμφανίζεται σε ενέργειες

<sup>(81)</sup>Βλ. S. Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015) (κεφ. 4). Στο συμβολισμό εδώ, τα  $k$  και  $q$  έχουν ανταλλαγή σε σχέση με το συμβολισμό του Gasiorowicz.

<sup>(82)</sup>Αυτό ισχύει μεν για την ιδιοσυνάρτηση της εξ. Schrödinger, αλλά όχι για το κυματοπακέτο, το οποίο προκύπτει από επαλληλία ιδιοσυνάρτησεων (εξ. 133) και χαρακτηρίζεται από χρονικά μεταβαλλόμενη πιθανότητα να βρεθεί το σωματίδιο σε οποιοδήποτε πεπερασμένο διάστημα.

$E_\nu = V_0 + \frac{\hbar^2}{2m} k^2 = V_0 + \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2 \nu^2$  (υπό την προϋπόθεση  $E_\nu > 0$ ), δηλαδή, η απόσταση των οποίων από το ελάχιστο του δυναμικού είναι ίδια με τις ιδιοενέργειες των καταστάσεων του πηγαδιού με πλήρως ανακλαστικά τοιχώματα (σωματίδιο περιορισμένο στο  $[-d, d]$ ). Θα ξαναδούμε το φαινόμενο στο επόμενο κεφάλαιο.

## 6.6 Προβλήματα

1. Για τον τελεστή ομοτιμίας  $\hat{\mathcal{P}}\Psi(x) = \Psi(-x)$  δείξτε τα ακόλουθα: α) είναι ερμιτιανός, β)  $\hat{\mathcal{P}}^2 = 1$ , γ) οι ιδιοκαταστάσεις του είναι είτε άρτιες είτε περιττές συναρτήσεις και δ) οι ιδιοτιμές του είναι το 1 (για άρτιες συναρτήσεις) και το  $-1$  (για περιττές).
2. Θεωρήστε το πρόβλημα που ορίζεται από τις σχέσεις (116) και (117) στο όριο  $|V_0|d^2 \gg \hbar^2/2m$ . Δείξτε ότι οι ιδιοκαταστάσεις χαμηλών ενεργειών  $E_n$  προσεγγίζουν εκείνες του προβλήματος σωματιδίου εγκλωβισμένου στο διάστημα  $[-d, d]$ , δηλαδή σε απειρόβαθο πηγάδι.
3. Εξετάστε το λεγόμενο κλασικό όριο στο πηγάδι δυναμικού: όταν η μάζα του σωματιδίου γίνεται πολύ μεγάλη, ή όταν το  $\hbar$  μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρό, δείξτε ότι οι ιδιοτιμές ενέργειας των δέσμιων καταστάσεων γίνονται πυκνές και επομένως χάνεται ο κβαντισμένος χαρακτήρας τους. Προσδιορίστε, σε σχέση με ποια ποσότητα πρέπει να γίνει πολύ μεγάλη η μάζα, ή ποια ποσότητα πρέπει να γίνει πολύ μεγάλη σε σχέση με το  $\hbar$ , για να ισχύουν τα παραπάνω.
4. Προσδιορίστε τη θεμελιώδη στάθμη και το βάθος διείσδυσης στην περίπτωση πηγαδιού δυναμικού πλάτους  $2d = 1\text{nm}$  ( $10^{-9}\text{m}$ ) και βάθους  $V_0 = -1\text{eV}$  ( $1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ ) για α) ένα ηλεκτρόνιο ( $m_e = 9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$ ), β) ένα πρωτόνιο ( $m_p \approx 1840m_e$ ), γ) ένα άτομο Ηλίου ( $m_{\text{He}} \approx 4m_p$ ), δ) ένα άτομο Ρουβιδίου ( $m_{\text{Rb}} \approx 85m_p$ ). Πόσο απέχει σε κάθε περίπτωση η θεμελιώδης στάθμη από το ελάχιστο του δυναμικού και πόσο από τη δεύτερη στάθμη;
5. Σε πηγάδι δυναμικού πλάτους  $2d = 1\text{nm}$  ( $10^{-9}\text{m}$ ) και μεγάλου βάθους εντοπίζουμε ένα σωματίδιο στο αριστερό μισό του πηγαδιού. Δείξτε ότι αυτό μπορεί να επιτευχθεί, κατά προσέγγιση, με κατάλληλη επαλληλία της βασικής και της πρώτης διεγερμένης κατάστασης,  $\Psi_0$  και  $\Psi_1$ . Εάν πριν τον εντοπισμό το σωματίδιο βρίσκεται στη θεμελιώδη στάθμη, προσδιορίστε την ενέργεια που απαιτείται για να επιτευχθεί ο εντοπισμός στην περίπτωση που το σωματίδιο είναι α) ένα ηλεκτρόνιο, β) ένα πρωτόνιο, γ) ένα άτομο Ηλίου, δ) ένα άτομο Ρουβιδίου. (Υπόδειξη: γράψτε  $\Psi = a\Psi_0 + b\Psi_1$  με  $|a|^2 + |b|^2 = 1$  για κανονικοποίηση και

υπολογίστε κατάλληλο συνδυασμό  $a$  και  $b$ , ώστε η  $|\Psi(x)|^2$  να είναι μέγιστα εντοπισμένη στην περιοχή  $x < 0$  και ελάχιστα στην περιοχή  $x > 0$ , δηλαδή, το  $\int_{-d}^0 |\Psi(x)|^2 dx$  να γίνεται μέγιστο.)

6. Αποδείξτε ότι σε μονοδιάστατα προβλήματα, εάν το δυναμικό δεν έχει άπειρη ασυνέχεια, η θεμελιώδης κατάσταση δεν έχει κόμβους.

Προφανώς πρόκειται για απευθείας πόρισμα του θεωρήματος ταλάντωσης του Sturm. Μπορεί να αποδειχθεί και ως εξής, ακολουθώντας μια μέθοδο των R. P. Feynman και M. Cohen. Θεωρήστε μια κατάσταση  $\Psi(x) \in \mathbb{R}$ , δεδομένου ότι οι δέσμιες καταστάσεις γράφονται σε πραγματική μορφή. Υποθέστε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι η  $\Psi$  έχει έναν κόμβο, έστω στο  $x = 0$ , όπου αλλάζει πρόσημο από τα αρνητικά στα θετικά. Θα κατασκευάσουμε μια  $\Phi(x)$  με χαμηλότερη ενέργεια.

Θέσετε  $\Phi(x) = |\Psi(x)|$ , εκτός από ένα πολύ στενό διάστημα  $[-\eta, \eta]$  γύρω από τον κόμβο. Στο διάστημα αυτό, θεωρήστε την  $\Psi$  σε πολύ καλή προσέγγιση γραμμική, δηλαδή  $\Psi(x) = ax$ ,  $x \in [-\eta, \eta]$ , με  $a > 0$ , και θέσετε την  $\Phi(x)$  ως μια παραβολική παρεμβολή που να ταιριάζει στην  $|\Psi(\pm\eta)|$  ως προς τη συνέχεια της συνάρτησης και της πρώτης παραγώγου:

$$\Phi(x) = \begin{cases} C|\Psi(x)|, & |x| \geq \eta \\ C \left( \frac{a}{2\eta} x^2 + \frac{a\eta}{2} \right), & |x| < \eta \end{cases}, \quad (140)$$

όπου  $C$  σταθερά κανονικοποίησης προς προσδιορισμό, υποθέτοντας ότι η  $\Psi$  είναι κανονικοποιημένη. Προφανώς  $\Phi(x) > 0$ , δηλαδή η  $\Phi$  δεν έχει κόμβο στο μηδέν. Υπολογίστε τώρα τη διαφορά στην ενέργεια μεταξύ των  $\Psi$  και  $\Phi$ . Εφόσον οι  $|\Psi(x)|$  και  $|\Phi(x)|$  ταυτίζονται εκτός του διαστήματος  $[-\eta, \eta]$ , η διαφορά στην κινητική ενέργεια προέρχεται μόνο από το χωρίο εντός του διαστήματος. Στις εκφράσεις με το  $\Phi$ , μπορείτε να αναπτύξετε τη σταθερά  $C$  κατά Taylor γύρω από το  $\eta = 0$  και να κρατήσετε τους χαμηλότερους όρους που εξυπηρετούν.

Για την κινητική ενέργεια, εξυπηρετεί να χρησιμοποιήσετε την έκφραση  $\langle \hat{T} \rangle = +\frac{\hbar^2}{2m} \int |\Psi'(x)|^2 dx$ , όπου όλες οι ποσότητες είναι θετικά ορισμένες. Η έκφραση αποδεικνύεται με ολοκλήρωση κατά παράγοντες:  $\langle \hat{T} \rangle = -\frac{\hbar^2}{2m} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x) \Psi''(x) dx = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[ \Psi^*(x) \Psi'(x) \Big|_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^{*'}(x) \Psi'(x) dx \right]$ , όπου ο πρώτος όρος μηδενίζεται επειδή η  $\Psi$  μηδενίζεται στο  $\pm\infty$ . Διαπιστώστε ότι για τη διαφορά της κινητικής ενέργειας ισχύει  $\langle \hat{T} \rangle_{\Phi} - \langle \hat{T} \rangle_{\Psi} < 0$ , και είναι της τάξης του  $\eta$ .

Για τη διαφορά της δυναμικής ενέργειας, θεωρήστε κατά προσέγγιση ότι  $V(x) = V(0)$  στο μικρό διάστημα  $[-\eta, \eta]$ , όπου, σε περίπτωση πεπερασμένης ασυνέχειας του δυναμικού στο μηδέν, θέτουμε  $V(0) = \frac{1}{2}[V(0_+) + V(0_-)]$ . Βρείτε ότι ι-

σχύει  $V(0) \left[ \langle \hat{V} \rangle_{\Phi} - \langle \hat{V} \rangle_{\Psi} \right] < 0$ , δηλαδή το πρόσημο στη διαφορά της δυναμικής ενέργειας εξαρτάται από το πρόσημο του  $V(0)$ . Βρείτε, ωστόσο, ότι η ποσότητα  $\left[ \langle \hat{V} \rangle_{\Phi} - \langle \hat{V} \rangle_{\Psi} \right]$  είναι της τάξης  $\eta^3$ , δηλαδή ασήμαντη σε σχέση με τη διαφορά της κινητικής ενέργειας.

Καταλήξτε στο συμπέρασμα ότι  $\langle \hat{H} \rangle_{\Phi} < \langle \hat{H} \rangle_{\Psi}$ , αρκεί το  $\eta$  να είναι επαρκώς μικρό, και αιτιολογήστε γιατί η  $\Psi$  δεν μπορεί να είναι θεμελιώδης.



## 7 Φραγμός δυναμικού και φαινόμενο σήραγγας

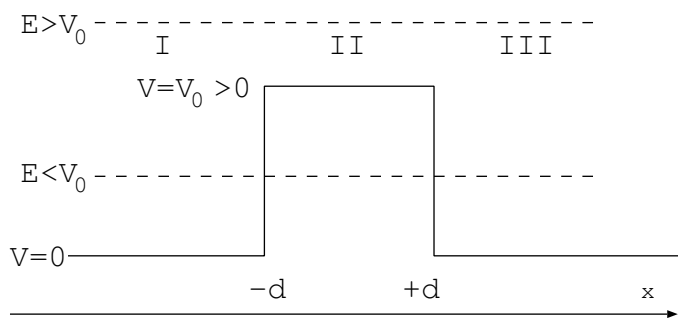
Θα μελετήσουμε τώρα το πρόβλημα σκέδασης σωματιδίου που κινείται σε μια διάσταση στο  $(-\infty, \infty)$  και υπόκειται σε ορθογώνιο φραγμό δυναμικού:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \hat{V}(\hat{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \quad (141)$$

με

$$V(x) = \begin{cases} V_0 (> 0), & \text{αν } -d < x < d \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (142)$$

Η Χαμιλτονιανή είναι ίδια με εκείνη του πηγαδιού δυναμικού (εξ. 116 και 117), με τη διαφορά ότι εδώ  $V_0 > 0$  (βλ. σχ. 3). Οι λύσεις δίνονται από την εξ. (134), την οποία



Σχήμα 3: Φραγμός δυναμικού σε μία διάσταση.

επαναλαμβάνουμε εδώ:

$$\Psi_q = \begin{cases} e^{iqx} + r e^{-iqx}, & x < -d \\ a e^{ikx} + b e^{-ikx}, & -d < x < d \\ t e^{iqx}, & d < x \end{cases}$$

με  $q^2 = 2mE/\hbar^2$  και  $k^2 = 2m(E - V_0)/\hbar^2$ . Σε αντίθεση με εκείνη την περίπτωση, εδώ έχουμε πάντα  $E > 0$ : όπως εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κανείς οι λύσεις με  $E < 0$  απειρίζονται στο  $x \rightarrow \pm\infty$ , και ως εκ τούτου απορρίπτονται. Οι λύσεις για τους συντελεστές ανάκλασης και διέλευσης δίνονται από τις εξ. (136) και (137), αντίστοιχα. Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

α) Για  $E > V_0$  ( $k \in \mathbb{R}$ ) απλώς επαναλαμβάνονται οι εξισώσεις (136), (137) και (139):

$$r = ie^{-2iqd} \frac{(k^2 - q^2) \sin(2kd)}{2qk \cos(2kd) - i(k^2 + q^2) \sin(2kd)} \quad (143)$$

$$t = e^{-2iqd} \frac{2kq}{2qk \cos(2kd) - i(k^2 + q^2) \sin(2kd)} \quad (144)$$

$$|t|^2 = \frac{4k^2q^2}{4k^2q^2 + (k^2 - q^2)^2 \sin^2(2kd)} = \frac{4k^2q^2}{4k^2q^2 + \left(\frac{2mV_0}{\hbar^2}\right)^2 \sin^2(2kd)}. \quad (145)$$

Όπως στην περίπτωση  $V_0 < 0$ , έτσι και εδώ συναντάμε συντονισμούς σκέδασης, δηλ.  $|t|^2 = 1$ , για  $2kd = \nu\pi$ , δηλ. σε ενέργειες

$$E_\nu = V_0 + \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2 \nu^2 \quad (146)$$

η απόσταση των οποίων από το ελάχιστο του δυναμικού είναι ίδια με τις ιδιοενέργειες των καταστάσεων του πηγαδιού με πλήρως ανακλαστικά τοιχώματα.

β) Για  $E < V_0$  έχουμε  $k^2 < 0$ . Για απλότητα θέτουμε τότε  $ik = \gamma \in \mathbb{R}$ . Οι εξ. (143) και (144) δεν αλλάζουν, παρά μετασχηματίζονται με την αλλαγή μεταβλητής  $[\cos(2kd) \rightarrow \cosh(2\gamma d), \sin(2kd) \rightarrow i \sinh(2\gamma d)]$ . Ο συντελεστής διέλευσης γράφεται

$$|t|^2 = \frac{4q^2\gamma^2}{4q^2\gamma^2 + (q^2 + \gamma^2)^2 \sinh^2(2\gamma d)} = \frac{4q^2\gamma^2}{4q^2\gamma^2 + \left(\frac{2m}{\hbar^2} V_0\right)^2 \sinh^2(2\gamma d)}. \quad (147)$$

Βλέπουμε ότι υπάρχει διέλευση ακόμα και για ενέργειες  $E < V_0$ , πράγμα αδύνατον στην κλασική μηχανική. Αυτή η δυνατότητα ονομάζεται *φαινόμενο σήραγγας* (*tunnel effect*). Η παρουσία του όρου  $\sinh^2(2\gamma d) = \sinh^2(2\sqrt{2m|E - V_0|}d/\hbar)$  στον παρονομαστή αναδεικνύει ότι ο συντελεστής διέλευσης έχει εκθετική εξάρτηση από την ενέργεια και είναι μικρή ποσότητα. Στο όριο  $\gamma d \gg 1$  ( $\sqrt{|E - V_0|}d \ll \hbar/\sqrt{m}$ ) έχουμε  $\sinh(2\gamma d) \approx \frac{1}{2}e^{2\gamma d}$  και ο όρος  $4q^2\gamma^2$  στον παρονομαστή γίνεται αμελητέος σε σχέση με το  $\frac{1}{2}e^{2\gamma d}$ . Τότε έχουμε:

$$|t|^2 \approx \left(\frac{\hbar^2\gamma q}{mV_0}\right)^2 e^{-4\gamma d}, \quad \text{για} \quad \sqrt{|E - V_0|}d \ll \frac{\hbar}{\sqrt{m}} \quad (148)$$

Το σημαντικό σε αυτόν τον τύπο είναι η εκθετική εξάρτηση του  $|t|^2$  από το πάχος και το ύψος του φράγματος ( $\gamma d = \sqrt{2m|E - V_0|}d/\hbar$ ). Ο όρος στην παρένθεση έχει, συγκριτικά, ασθενή εξάρτηση από τα  $d$  και  $V_0$ . Η εκθετική εξάρτηση κάνει το φαινόμενο σήραγγας εξαιρετικά ευαίσθητο σε μεταβολές των παραμέτρων του φράγματος και της μάζας του σωματιδίου.<sup>(83)</sup> Παράδειγμα της ευαισθησίας είναι ο χρόνος ζωής των πυρήνων που διασπώνται εκπέμποντας σωματίδια  $\alpha$ , ο οποίος διαφοροποιείται κατά τάξεις μεγέθους.

<sup>(83)</sup>Πρόβλημα 1.

## 7.1 Βήμα δυναμικού. Πολλαπλή σκέδαση

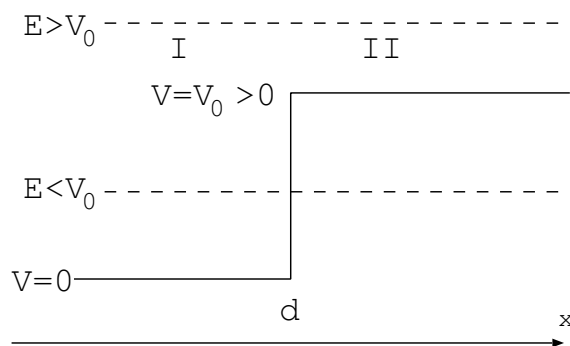
Θα μελετήσουμε το πρόβλημα σκέδασης σωματιδίου που κινείται σε μία διάσταση στο  $(-\infty, \infty)$  και προσπίπτει σε βήμα δυναμικού (βλ. σχ. 4):

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \hat{V}(\hat{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \quad (149)$$

με

$$V(x) = \begin{cases} 0, & \text{αν } x < d \\ V_0, & \text{αν } x \geq d \end{cases} \quad (150)$$

Η χρονικά ανεξάρτητη εξ. Schrödinger έχει τη γενική λύση



Σχήμα 4: Βήμα δυναμικού με  $V_0 > 0$ .

$$\Psi(x) = \begin{cases} ae^{iqx} + re^{-iqx}, & \text{αν } x < d \\ te^{ikx} + be^{-ikx}, & \text{αν } x \geq d \end{cases} \quad (151)$$

με  $q^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E$  και  $k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)$ . Μπορούμε εύκολα να πειστούμε ότι το δυναμικό δεν επιδέχεται δέσμιες καταστάσεις, και ότι αντιμετωπίζουμε μόνο ένα πρόβλημα σκέδασης. Εξετάζουμε πρόσπτωση από τα  $x < d$ , οπότε θέτουμε ήδη  $a = 1$ ,  $b = 0$ , και καλούμαστε να υπολογίσουμε τα πλάτη ανάκλασης και διέλευσης,  $r$  και  $t$ . Η συνέχεια της ιδιοσυνάρτησης και της παραγώγου στο  $x = d$  δίνουν

$$\begin{aligned} e^{iqd} + r e^{-iqd} &= t e^{ikd} \\ q(e^{iqd} - r e^{-iqd}) &= kt e^{ikd} \end{aligned}$$

οι οποίες έχουν τη λύση

$$t = e^{i(q-k)d} \frac{2q}{q+k} = e^{i(q-k)d} t_0 \quad (152)$$

$$r = e^{2iqd} \frac{q-k}{q+k} = e^{2iqd} r_0 \quad (153)$$

όπου  $t_0 = 2q/(q+k)$  και  $r_0 = (q-k)/(q+k)$  οι αντίστοιχες ποσότητες για βήμα δυναμικού στη θέση  $d = 0$ . Διακρίνουμε τις περιπτώσεις α)  $V_0 > 0$  και  $E > V_0$ , β)  $V_0 > 0$  και  $E < V_0$ . Η περίπτωση  $V_0 < 0$  αντιμετωπίζεται εντελώς ανάλογα.

α)  $V_0 > 0$  και  $E > V_0$ . Σε αυτή την περίπτωση,  $q \in \mathbb{R}$  και  $k \in \mathbb{R}$ . Έχουμε εν μέρει ανάκλαση και εν μέρει διέλευση. Από τους συντελεστές προκύπτει

$$|r|^2 q + |t|^2 k = q \rightsquigarrow |r|^2 + |t|^2 \frac{k}{q} = 1, \quad (154)$$

η οποία σχέση επάγεται και από την εξ. συνέχειας: το ρεύμα της  $e^{iqx}$  είναι  $\frac{\hbar}{m}q$ , το ρεύμα της  $r e^{-iqx}$  είναι  $\frac{\hbar}{m}(-q)|r|^2$ , και το ρεύμα της  $t e^{ikd}$  είναι  $\frac{\hbar}{m}(k)|t|^2$ .

β)  $V_0 > 0$  και  $E < V_0$ . Σε αυτή την περίπτωση,  $q \in \mathbb{R}$  και  $ik \in \mathbb{R}$ . Έχουμε πλήρη ανάκλαση: εύκολα βλέπει κανείς ότι  $|r|^2 = 1$ . Η κυματοσυνάρτηση για  $x > d$  είναι  $t e^{-\gamma x}$ ,  $\gamma > 0$ , και το αντίστοιχο ρεύμα μηδενίζεται.

Η πρόσπτωση από δεξιά (από τα  $x > d$  προς  $x < d$ ) αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο. Προκύπτουν οι ίδιες εξισώσεις (152 και 153), με τη διαφορά ότι τα  $k$  και  $q$  πρέπει να ανταλλάγουν, διότι το  $e^{ikx}$  (δηλ. το κύμα στην περιοχή, όπου  $V_0 \neq 0$ ) είναι πλέον προσπίπτον, το  $r e^{-ikx}$  ανακλώμενο, και το  $t e^{iqx}$  (δηλ. το κύμα στην περιοχή, όπου  $V_0 = 0$ ) διερχόμενο. Αντίστοιχα, πρέπει να τεθεί  $\text{Re } k < 0$  και  $\text{Re } q < 0$ , λόγω της απαίτησης για πρόσπτωση από δεξιά.

Έχει ενδιαφέρον να δει κανείς το πρόβλημα του φραγμού δυναμικού (βλ. εξ. 144) ως ένα πρόβλημα πολλαπλής σκέδασης μεταξύ δύο βημάτων δυναμικού, ενός στο  $-d$  από  $V = 0$  σε  $V = V_0$  και ενός στο  $d$  από  $V = V_0$  σε  $V = 0$ . Έστω ότι το πρώτο βήμα έχει πλάτη διέλευσης  $t'_1$  και ανάκλασης  $r'_1$  για πρόσπτωση από τα αριστερά και  $t_1$ ,  $r_1$  για πρόσπτωση από δεξιά, ενώ το δεύτερο έχει πλάτη διέλευσης  $t_2$  και ανάκλασης  $r_2$  για πρόσπτωση από αριστερά. Τότε η κυματοσυνάρτηση που εξέρχεται στα δεξιά του βήματος στο  $+d$  προκύπτει από επαλληλία των ακόλουθων βημάτων:

1. διέλευση από αριστερά στο  $-d$ , διάδοση και διέλευση στο  $+d$
2. διέλευση από αριστερά στο  $-d$ , διάδοση και ανάκλαση στο  $+d$ , διάδοση προς τα αριστερά και ανάκλαση στο  $-d$ , διάδοση προς τα δεξιά και διέλευση στο  $+d$

κ.ο.κ., λαμβάνοντας υπ' όψη τη διπλή, τετραπλή, κλπ., ανάκλαση. Αν  $t$  το συνολικό πλάτος διέλευσης, με  $\Psi(x) = t e^{iqx}$  για  $x > d$ , λαμβάνουμε

$$\begin{aligned} t &= t'_1 t_2 + t'_1 (r_2 r_1) t_2 + t'_1 (r_2 r_1 r_2 r_1) t_2 + \dots \\ &= t'_1 [1 + (r_2 r_1) + (r_2 r_1)^2 + \dots] t_2 \\ &= t'_1 [1 - r_1 r_2]^{-1} t_2 \end{aligned} \quad (155)$$

όπου χρησιμοποιήσαμε τον τύπο άθροισης γεωμετρικής σειράς,  $\sum_n \lambda^n = [1 - \lambda]^{-1}$ .

Στους συντελεστές  $r_{1,2}$  περιέχονται παράγοντες φάσης της μορφής  $e^{i2kd}$  οι οποίοι προκύπτουν από τη διάδοση μεταξύ  $-d$  και  $+d$ , σε αναλογία με την εξ. (153), αλλά με το  $k$  στη θέση του  $q$ , διότι εδώ το  $x$  είναι εντός του βήματος δυναμικού, οπότε  $k^2 = 2m(E - V_0)/\hbar^2$ . Όμοια, στους συντελεστές  $t'_1$  και  $t_{1,2}$  περιλαμβάνονται παράγοντες φάσης της μορφής  $e^{2i(q-k)d}$ . Εδώ λοιπόν πρέπει να αντικαταστήσουμε τα  $t'_1$ ,  $r_{1,2}$  και  $t_{1,2}$  για το βήμα δυναμικού που προκύπτουν από τις εξ. (152,153), λαμβάνοντας υπ' όψη την πρόσπτωση από δεξιά ή αριστερά στα  $d$  και  $-d$ . Μετά από λίγες πράξεις καταλήγουμε στο πλάτος διέλευσης του τετραγωνικού φραγμού.<sup>(84)</sup>

## 7.2 Προσέγγιση στο φαινόμενο σήραγγας για υψηλό ή πλατύ φραγμό

Η εξ. (155) μάς δίνει τη δυνατότητα προσέγγισης του συντελεστή διέλευσης στο φαινόμενο σήραγγας από μη τετραγωνικό φραγμό, αρκεί να είναι επαρκώς υψηλός ή πλατύς και να περιγράφεται από επαρκώς ομαλή συνάρτηση.

Σε πρώτο βήμα, παρατηρούμε ότι το γινόμενο  $r_1 r_2$  γίνεται αμελητέο, εάν το γινόμενο  $(V_0 - E) d^2$  είναι μεγάλο. Αυτό προκύπτει από την έκφραση (153), προσαρμοσμένη για την περίπτωση όπου το προσπίπτον κύμα είναι εντός του φραγμού με  $E < V_0$ . Τότε, το προσπίπτον κύμα έχει κυματαριθμό  $k$  και το διερχόμενο  $q$ , οπότε ανταλλάσσουμε τα  $q$  και  $k$  στην (153) και θέτουμε  $k = i\gamma$ ,  $\gamma \in \mathbb{R}$ . Βρίσκουμε  $r_1 = e^{-2\gamma d}(i\gamma + q)/(i\gamma - q)$ . Όμοια, το πλάτος  $r_2$  πέφτει εκθετικά ως  $e^{-2\gamma d}$ , άρα  $r_1 r_2 \propto e^{-4\gamma d}$ , που γίνεται αμελητέο. Ως αποτέλεσμα,  $t \approx t'_1 t_2$ , οπότε το  $|t|^2 = |t'_1 t_2|^2$  δίνεται από τον τύπο (148).

Σε δεύτερο βήμα, προσεγγίζουμε το δυναμικό  $V(x)$  με άθροισμα φραγμών δυναμικού σε  $N$  αλληπάλληλα εφαπτόμενα διαστήματα  $[x_i, x_i + d_i)$  μήκους  $d_i$  το καθένα:  $V(x) = \sum_i V_i \chi_i(x)$ , όπου  $V_i$  σταθερά και  $\chi_i(x) = 1$ , αν  $x_i \leq x < x_i + d_i$  και  $= 0$ , αλλιώς.<sup>(85)</sup> Ως  $x_0$  παίρνουμε το σημείο όπου ξεκινά η συνθήκη φαινόμενου σήραγγας,  $V(x) > E$ , και ως  $x_N$  το σημείο στο οποίο σταματά η συνθήκη. Δηλαδή κάνουμε μια διαμέριση του διαστήματος στο οποίο  $V(x) > E$  και προσεγγίζουμε τη συνάρτηση  $V(x)$  με μια κατά διαστήματα σταθερή συνάρτηση. Η διαμέριση, όμως, δεν γίνεται ολοένα και πυκνότερη, αλλά είναι τέτοια, ώστε τα διαστήματα να είναι επαρκώς πλατιά, ή η διαφορά  $V(x) - E$  επαρκώς μεγάλη, ώστε να ισχύει, ανά διάστημα, ο τύπος (148). Προφανώς, αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε συνάρτηση  $V(x)$ , παρά μόνο σε αργά μεταβαλλόμενες συναρτήσεις.

Σε τρίτο βήμα εφαρμόζουμε το ανάπτυγμα πολλαπλής σκέδασης, σε αντιστοιχία με την εξ. (155), στα αλληπάλληλα  $N + 1$  βήματα δυναμικού. Τα πλάτη ανάκλασης έχουν αμελητέα συνεισφορά, διότι το γινόμενο  $V_i d_i^2$  είναι από υπόθεση μεγάλο, οπότε κα-

<sup>(84)</sup> Πρόβλημα 2.

<sup>(85)</sup> Η  $\chi_i(x)$  λέγεται χαρακτηριστική συνάρτηση του διαστήματος  $[x_i, x_i + 2d_i)$ .

ταλήγουμε για το πλάτος διέλευσης  $t$  όλου του φραγμού:  $t \approx t_0 t_2 \cdots t_N$ . Για το  $t_i$  εφαρμόζουμε τον τύπο (152), κατάλληλα προσαρμοσμένο για σκέδαση σε βήμα δυναμικού στη θέση  $x_i$ . Αντικαθιστώντας τον κυματαριθμό του προσπίπτοντος με  $k_{i-1}$  και του διερχόμενου με  $k_i$ , λαμβάνουμε  $t_i = e^{i(k_{i-1}-k_i)x_i} (2k_{i-1}) / (k_{i-1} + k_i)$ . Εδώ όμως έχουμε πάντα  $V_i < E$ , επομένως θέτουμε  $k_i = i\gamma_i$ ,  $\gamma_i \in \mathbb{R}$ ,  $\gamma_i > 0$ . Εξαιρέση αποτελούν τα  $k_{-1} = k_N \equiv q \in \mathbb{R}$  (δηλαδή οι κυματαριθμοί εκτός φράγματος, για  $x < x_0$  και  $x > x_N$ ). Επομένως, η πιθανότητα διέλευσης γράφεται (παρατηρώντας ότι ο πρώτος και τελευταίος όρος του παρονομαστή γράφονται  $|q + i\gamma_0|^2 = \frac{2mV_0}{\hbar^2}$  και  $|q + i\gamma_{N-1}|^2 = \frac{2mV_{N-1}}{\hbar^2}$ ):

$$\begin{aligned}
|t|^2 &\approx |t_0|^2 |t_2|^2 \cdots |t_N|^2 \\
&= \frac{(2q 2\gamma_0 \cdots 2\gamma_{N-1})^2}{\frac{2mV_0}{\hbar^2} (\gamma_0 + \gamma_1)^2 \cdots (\gamma_{N-2} + \gamma_{N-1})^2 \frac{2mV_{N-1}}{\hbar^2}} \\
&\quad \times e^{-2\gamma_0 x_0} e^{-2(\gamma_1 - \gamma_0)x_1} \cdots e^{-2\gamma_{N-1}(x_N - x_{N-1})} \\
&= C(E) e^{-2[\gamma_0(x_1 - x_0) + \gamma_1(x_2 - x_1) + \cdots + \gamma_N(x_N - x_{N-1})]} \\
&= C(E) e^{-2 \sum \gamma_i d_i} \\
&\approx C(E) \exp \left[ -2 \int_{x_0}^{x_N} \gamma(x) dx \right] \\
&\equiv C(E) \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_0}^{x_N} \sqrt{2m(V(x) - E)} dx \right] \tag{156}
\end{aligned}$$

Η έκφραση αναδεικνύει την εκθετική συμπεριφορά του συντελεστή διέλευσης ως προς την ενέργεια στο φαινόμενο σήραγγας. Ο παράγοντας  $C(E)$  (το κλάσμα αριστερά του εκθετικού) εξαρτάται μεν από την ενέργεια, αλλά πολύ ασθενέστερα από το εκθετικό. Στην πράξη, η έκφραση χρησιμεύει ως πρώτη προσέγγιση σε προβλήματα όπου γνωρίζει κανείς τη γενική μορφή του δυναμικού, αλλά αγνοεί τις λεπτομέρειες. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο τύπος Fowler-Nordheim για την εκπομή ηλεκτρονίων από μέταλλα υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου και ο τύπος εκπομπής σωματιδίων  $\alpha$  από πυρήνες.<sup>(86)</sup>

### 7.3 Προβλήματα

1. Στο φαινόμενο σήραγγας, εξετάστε την κυματοσυνάρτηση εντός του φραγμού δυναμικού. Βρείτε το βάθος διείσδυσης. Εξετάστε το συντελεστή διέλευσης σε σύγκριση με το βάθος διείσδυσης. Στη συνέχεια, εξετάστε την εξάρτηση του συντελεστή διέλευσης,  $|t|^2$ , από τη μάζα του σωματιδίου. Συγκρίνετε το αποτέλεσμα για ηλεκτρόνια με εκείνο για πρωτόνια ( $m_p \approx 1840m_e$ ).

<sup>(86)</sup>Βλ. π.χ. Stephen Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015) (κεφ. 4 και παράρτημα Π6.).

2. Βρείτε τα πλάτη  $t_1$ ,  $t_2$  και  $r_{1,2}$  και το τελικό πλάτος διέλευσης  $t$  της εξ. (155). Συγκρίνετε με την εξ. (144).
3. Σωματίδιο ενέργειας γνωστής μάζας  $m$  και άγνωστου φορτίου  $q > 0$  προσπίπτει από αριστερά σε φραγμό δυναμικού της μορφής

$$V(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ -qDx + V_0, & x > 0 \end{cases}$$

Εδώ,  $D > 0$  είναι ηλεκτρικό πεδίο που ελέγχει την ισχύ του φραγμού. Δεχόμαστε ότι  $V_0 > 0$  και ότι η ενέργεια του σωματιδίου είναι γνωστή και βρίσκεται στο διάστημα  $0 < E < V_0$ .

Έστω ότι γίνονται δύο μετρήσεις του ρεύματος διέλευσης  $J$  με την ίδια ενέργεια  $E$ . Στην πρώτη, με  $D = D_1$  βρίσκουμε  $J = J_1$ . Στη δεύτερη, με  $D = 2D_1$ , βρίσκουμε  $J = 2J_1$ . Να υπολογιστεί το φορτίο  $q$ .

## 8 Δυναμικά συνάρτησης $\delta$

### 8.1 Η συνάρτηση $\delta$

Εισάγουμε τη συνάρτηση  $\delta$  του Dirac ως όριο κατανομών  $\delta_\varepsilon(x)$  με τις εξής ιδιότητες:

1. Για τυχαία συνάρτηση  $f$  συνεχή σε μια περιοχή γύρω από το μηδέν,  
$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int f(x) \delta_\varepsilon(x) dx = f(0).$$
2. Η  $\delta_\varepsilon(x)$  είναι αυθαίρετα πολλές φορές διαφορίσιμη.

Από την πρώτη ιδιότητα αναγνωρίζουμε ότι η  $\delta_\varepsilon(x)$  πρέπει να μηδενίζεται πρακτικά έξω από ένα πολύ στενό διάστημα  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  γύρω από το μηδέν και να λαμβάνει υψηλές τιμές εντός αυτού του διαστήματος. Στην ειδική περίπτωση  $f(x) = 1$ , έχουμε  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int \delta_\varepsilon(x) dx = 1$ . Μια συνάρτηση που ικανοποιεί τα προηγούμενα είναι η Γκαουσιανή

$$\delta_\varepsilon(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon^2}} e^{-\frac{x^2}{2\varepsilon^2}}. \quad (157)$$

Συνήθως παραλείπουμε, χάριν συντομίας, να γράψουμε το δείκτη  $\varepsilon$  και το σύμβολο  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0}$ , και αναφερόμαστε απλώς στη συνάρτηση  $\delta(x)$ . Ωστόσο, η συνάρτηση  $\delta$  αποκτά νόημα όταν περιλαμβάνεται σε ολοκλήρωμα με το προαναφερθέν όριο, δηλ.  $\int \delta(x) f(x) dx \equiv \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int f(x) \delta_\varepsilon(x) dx$ . Από τον ορισμό προκύπτουν τα ακόλουθα:<sup>(87)</sup>

$$\int \delta(x - x_0) f(x) dx = f(x_0) \quad (158)$$

$$\int \delta'(x - x_0) f(x) dx = -f'(x_0) \quad (\text{προκύπτει με παραγοντική ολοκλήρωση}) \quad (159)$$

$$\int \delta''(x - x_0) f(x) dx = +f''(x_0) \quad (160)$$

$$x \delta(x) = 0 \quad (161)$$

$$\delta(ax) = \frac{1}{|a|} \delta(x) \quad (162)$$

$$\delta(f(x)) = \sum_i \frac{1}{|f'(x_i)|} \delta(x - x_i) \quad (163)$$

$$(164)$$

όπου  $x_i$  οι ρίζες της εξίσωσης  $f(x) = 0$  (υποθέτοντας ότι πρόκειται για απλές ρίζες) και όπου η  $f$  είναι επαρκώς ομαλή συνάρτηση. Η διαφορισιμότητα της κατανομής  $\delta_\varepsilon$  δεν απαιτείται για όλες τις ιδιότητες, παρά μόνον για εκείνες που περιλαμβάνουν παραγώγους. Επίσης, η συνάρτηση  $\delta$  είναι η παράγωγος της συνάρτησης μοναδιαίου βήματος,

$$\delta(x) = \theta'(x), \quad (165)$$

---

<sup>(87)</sup>Πρόβλημα 1



με  $\theta(x) = 0$ , για  $x < 0$ , και  $\theta(x) = 1$  για  $x > 0$ . Οι μονάδες της συνάρτησης  $\delta(x)$  είναι  $1/[x]$  (όπου  $[x]$  οι μονάδες του μεγέθους  $x$ ), όπως προκύπτει από την απαίτηση το ολοκλήρωμα  $\int \delta(x) dx = 1$  να είναι αδιάστατο.

## 8.2 Δυναμικό συνάρτησης $\delta$

Θεωρούμε τώρα το δυναμικό  $V(x) = V_0 \delta(x)$ .<sup>(88)</sup> Αυτό μπορεί να εκληφθεί ως όριο του τετραγωνικού πηγαδιού δυναμικού, αν  $V_0 < 0$ , ή φραγμού δυναμικού, αν  $V_0 > 0$ , όταν εκείνο περιορίζεται σε ολοένα μικρότερο διάστημα  $[-d, d]$  και λαμβάνει αντίστοιχα υψηλή τιμή. Η χρονικά ανεξάρτητη εξ. Schrödinger γράφεται

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} + V_0 \delta(x) \Psi(x) = E \Psi(x). \quad (166)$$

Η συνοριακή συνθήκη στο  $x = 0$  βρίσκεται αν ολοκληρώσουμε την εξίσωση σε ένα στενό διάστημα  $[-\eta, \eta]$  γύρω από το μηδέν και πάρουμε το όριο  $\eta \rightarrow 0$ .

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m} \int_{-\eta}^{\eta} \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} dx + V_0 \int_{-\eta}^{\eta} \delta(x) \Psi(x) dx &= E \int_{-\eta}^{\eta} \Psi(x) dx, \quad \rightsquigarrow \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \Big|_{-\eta}^{\eta} dx + V_0 \Psi(0) &= E \int_{-\eta}^{\eta} \Psi(x) dx. \end{aligned}$$

Εφόσον η  $\Psi$  δεν απειρίζεται, το όριο  $\eta \rightarrow 0$  μηδενίζει το δεξιό μέλος και δίνει

$$\frac{2mV_0}{\hbar^2} \Psi(0) + \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \Big|_{0-} = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \Big|_{0+}, \quad (167)$$

δηλαδή, η παράγωγος της ιδιοσυνάρτησης παρουσιάζει πεπερασμένη ασυνέχεια στο  $x = 0$ . Ολοκληρώνοντας την παράγωγο με πεπερασμένη ασυνέχεια, βρίσκουμε ότι η ιδιοσυνάρτηση είναι συνεχής στο  $x = 0$ .<sup>(89)</sup>

Θεωρούμε την περίπτωση  $V_0 < 0$  και αναζητούμε δέσμιες καταστάσεις. Η γενική λύση της (166) γράφεται

$$\Psi(x) = \begin{cases} a_I e^{iqx} + b_I e^{-iqx} & x < 0 \\ a_{II} e^{iqx} + b_{II} e^{-iqx} & x > 0 \end{cases} \quad (168)$$

με  $q^2 \equiv 2mE/\hbar^2$ . Αν  $E > 0$ , τότε  $q \in \mathbb{R}$ , οπότε για  $x < 0$   $|\Psi(x)|^2 = |a_I|^2 + |b_I|^2 + 2\text{Re}[a_I b_I^* e^{2iqx}]$ , η οποία είναι περιοδική συνάρτηση του  $x$  με θετικές τιμές και το ολοκλήρωμά της στο  $(-\infty, 0)$  αποκλίνει. Άρα, για  $E > 0$  δεν έχουμε δέσμιες

<sup>(88)</sup>Εφόσον το  $V(x)$  έχει μονάδες ενέργειας και η  $\delta(x)$  μονάδες αντίστροφου μήκους, το  $V_0$  πρέπει να έχει μονάδες  $[\text{ενέργεια}] \times [\text{μήκος}]$ .

<sup>(89)</sup>Οι ιδιότητες συνέχειας της κυματοσυνάρτησης διαφοροποιούνται, επομένως, από εκείνες της περίπτωσης δυναμικού με πεπερασμένη μόνον ασυνέχεια.

καταστάσεις, όπως είχαμε βρει και στο πηγάδι δυναμικού. Αν  $E < 0$ , τότε θέτουμε  $iq = \gamma \in \mathbb{R}$ ,  $\gamma > 0$ , και η απαίτηση για μηδενισμό της  $\Psi(x)$  στο  $\pm\infty$  επιβάλλει  $b_I = a_{II} = 0$ . Δεδομένου αυτού, η συνέχεια της κυματοσυνάρτησης στο  $x = 0$  επιβάλλει  $b_{II} = a_I \equiv a$ . Επομένως:

$$\Psi(x) = \begin{cases} a e^{\gamma x} & x < 0 \\ a e^{-\gamma x} & x > 0. \end{cases} \quad (169)$$

Το  $\gamma$  προσδιορίζεται εφαρμόζοντας τη συνθήκη ασυνέχειας της πρώτης παραγώγου:

$$\frac{2mV_0}{\hbar^2}a + a\gamma = -a\gamma,$$

δηλ.  $\gamma = -\frac{mV_0}{\hbar^2}$ . Άρα έχουμε μία μόνο δέσμια κατάσταση με ενέργεια  $E = -\hbar^2\gamma^2/2m$ :

$$E = -\frac{mV_0^2}{2\hbar^2}. \quad (170)$$

Τέλος, η παράμετρος  $a$  προσδιορίζεται εύκολα μέσω της συνθήκης κανονικοποίησης:  $1 = \int_{-\infty}^0 |a|^2 (e^{\gamma x})^2 dx + \int_0^{\infty} |a|^2 (e^{-\gamma x})^2 dx = 2|a|^2 \int_0^{\infty} e^{-2\gamma x} dx = |a|^2/\gamma$ , δηλ.  $a = \sqrt{\gamma}$ .

Η εύρεση των καταστάσεων σκέδασης είναι απλή και βασίζεται στην ίδια συνοριακή συνθήκη συνέχειας της ιδιοσυνάρτησης και ασυνέχειας της πρώτης παραγώγου στο  $x = 0$ .<sup>(90)</sup>

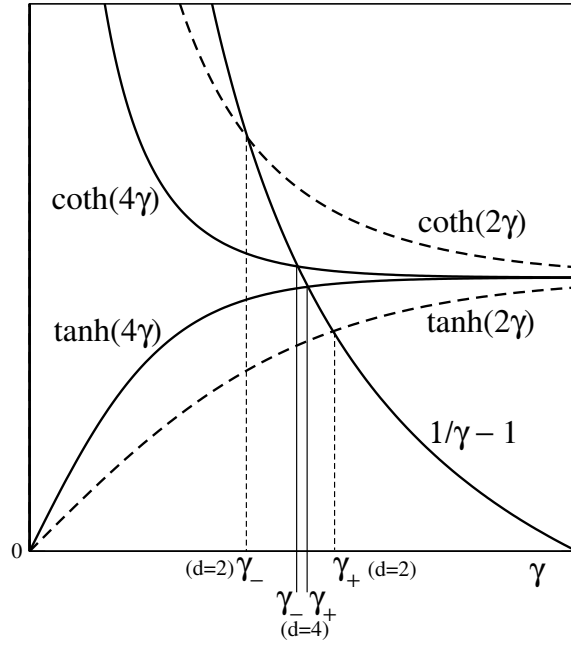
### 8.3 Δέσμιες καταστάσεις σε δύο δυναμικά $\delta$

Εξετάζουμε τώρα δύο δυναμικά  $\delta$  σε απόσταση  $2d$  μεταξύ τους,

$$V(x) = V_0 \delta(x + d) + V_0 \delta(x - d) \quad (171)$$

με  $V_0 < 0$  και αναζητούμε τις δέσμιες καταστάσεις. Εχμεταλλευόμαστε τη συμμετρία ομοτιμίας του δυναμικού,  $V(x) = V(-x)$ , και αναζητούμε ξεχωριστά άρτιες και περιττές ιδιοσυναρτήσεις,  $\Psi_+$  και  $\Psi_-$ . Σε αναλογία με την προηγούμενη περίπτωση γράφουμε τη γενική λύση και συμπεραίνουμε ότι η δέσμια κυματοσυνάρτηση πρέπει να πέφτει εκθετικά στο  $\pm\infty$ , επομένως  $E < 0$ , και ότι η κυματοσυνάρτηση πρέπει να είναι συνεχής στο  $x = \pm d$  ενώ η παράγωγος πρέπει να έχει ασυνέχεια  $\hbar^2 V_0/2m$  σε κάθε ένα από τα δύο

<sup>(90)</sup>Πρόβλημα 2.



Σχήμα 5: Γραφική λύση των εξ. (173) για  $d = 2$  και  $d = 4$ .

σημεία. Γράφουμε

$$\Psi_+ = \begin{cases} a_+ e^{\gamma_+ x} \\ b_+ \cosh(\gamma_+ x) \\ a_+ e^{-\gamma_+ x} \end{cases} \quad \text{και} \quad \Psi_- = \begin{cases} a_- e^{\gamma_- x}, & x < -d \\ b_- \sinh(\gamma_- x), & -d \leq x < d \\ -a_- e^{-\gamma_- x}, & x > d \end{cases} \quad (172)$$

με  $\gamma_{\pm} \equiv \sqrt{2m(-E_{\pm})}/\hbar$ . Η συνθήκη συνέχειας στο  $d$  (ισοδύναμα, στο  $-d$ ) δίνει  $b_+ = a_+ e^{-\gamma_+ d} / \cosh(\gamma_+ d)$  και  $b_- = -a_- e^{-\gamma_- d} / \sinh(\gamma_- d)$ . Μένει να προσδιοριστούν τα  $\gamma_{\pm}$  (μέσω της ασυνέχειας της παραγώγου είτε στο  $d$  είτε στο  $-d$ ) και από αυτά οι ιδιοτιμές της ενέργειας και τα  $a_{\pm}$  (μέσω της συνθήκη κανονικοποίησης). Η συνθήκη ασυνέχειας της πρώτης παραγώγου στο  $d$  γράφεται, σε αντιστοιχία με την (167),  $\frac{2mV_0}{\hbar^2} \Psi(d) + \Psi'(d^-) = \Psi'(d^+)$ , δηλ.

$$\frac{2mV_0}{\hbar^2} + \gamma_+ \tanh(\gamma_+ d) = -\gamma_+ \quad \text{και} \quad -\frac{2mV_0}{\hbar^2} - \gamma_- \coth(\gamma_- d) = \gamma_-,$$

ή (εφόσον  $V_0 < 0$ )

$$\tanh(\gamma_+ d) = \frac{2m|V_0|}{\hbar^2} \frac{1}{\gamma_+} - 1 \quad \text{και} \quad \coth(\gamma_- d) = \frac{2m|V_0|}{\hbar^2} \frac{1}{\gamma_-} - 1 \quad (173)$$

Αυτές οι εξισώσεις επιδέχονται αριθμητική ή γραφική λύση (βλ. σχ. 5). Παρατηρούμε ότι υπάρχει πάντα (για όλες τις τιμές του  $d$ ) ακριβώς μία λύση  $\gamma_+$  για την άρτια

κυματοσυνάρτηση, ενώ το πολύ μία λύση  $\gamma_-$  για την περιττή κυματοσυνάρτηση. <sup>(91)</sup>

Για επαρκώς μεγάλα  $d$ ,  $\tanh(\gamma_+d) \approx \coth(\gamma_-d) \approx 1$ , οπότε  $\gamma_+ \approx \gamma_- \approx m|V_0|/\hbar^2$  και οι ιδιοτιμές της ενέργειας είναι  $E_{\pm} = -\frac{\hbar^2}{2m}\gamma_{\pm}^2 \approx -\frac{mV_0^2}{2\hbar^2} \equiv E_0$ . Δηλαδή, αν τα σημεία  $\pm d$  είναι σε μεγάλη απόσταση, έχουμε δύο ιδιοτιμές σχεδόν ίσες με την ιδιοτιμή της ενέργειας  $E_0$  (εξ. 170) του απλού δυναμικού: τα δύο δυναμικά είναι πρακτικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση, αν συμβολίσουμε με  $\Phi$  την ιδιοσυνάρτηση (169) της περίπτωσης απλού δυναμικού, βρίσκουμε εύκολα ότι

$$\Psi_{\pm} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}\Phi(x+d) \pm \frac{1}{\sqrt{2}}\Phi(x-d), \quad (174)$$

όπου ο παράγοντας  $1/\sqrt{2}$  φροντίζει για κανονικοποίηση.<sup>(92)</sup> Σε αυτή την περίπτωση, οι  $\Phi(x+d)$  και  $\Phi(x-d)$  είναι σχεδόν ορθογώνιες, λόγω της μεγάλης απόστασης των κέντρων τους και της εκθετικής πτώσης κάθε μιας μακριά από το κέντρο της: εκεί, όπου αποκτά σημαντικό πλάτος η μία, μηδενίζεται πρακτικά η άλλη. Υπό αυτή την προσέγγιση, οποιοσδήποτε γραμμικός συνδυασμός των  $\Phi(x+d)$  και  $\Phi(x-d)$  παραμένει ιδιοσυνάρτηση. Η επιλογή (174) αντιστοιχεί στους δύο γραμμικούς συνδυασμούς που είναι, ταυτόχρονα, ιδιοσυναρτήσεις του τελεστή ομοτιμίας.

Καθώς η απόσταση  $2d$  μειώνεται, η προσέγγιση παύει να ισχύει και έχουμε  $E_+ < E_0$ ,  $E_- > E_0$ . Οι  $\Phi(x+d)$  και  $\Phi(x-d)$  παύουν να είναι ορθογώνιες και οι συναρτήσεις (174) δεν αποτελούν πλέον ιδιοσυναρτήσεις, όμως δίνουν μια πρώτη προσέγγιση στην ακριβή μορφή των  $\Psi_{\pm}$ . Η  $E_+$  είναι αύξουσα συνάρτηση του  $d$  ενώ η  $E_-$  φθίνουσα. Κάτω από κάποια κρίσιμη τιμή του  $d$ , για την οποία  $E_- = 0$ , παύουμε να έχουμε αντιδεσμική ( $\Psi_-$ ) δέσμια κατάσταση: επιβιώνει μόνο η δεσμική ( $\Psi_+$ ).

Η παραπάνω περιγραφή είναι ένα πρώτο βήμα για την κατανόηση του χημικού δεσμού. Ας υποθέσουμε ότι το δυναμικό (171) περιγράφει την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με τους πυρήνες δύο ατόμων σε μία διάσταση και σε απόσταση  $2d$  μεταξύ των ατόμων. Ας υποθέσουμε, επίσης, ότι σε κάθε άτομο αντιστοιχεί ένα ηλεκτρόνιο. Από την αρχή του Pauli γνωρίζουμε ότι τα δύο ηλεκτρόνια μπορούν να τοποθετηθούν στην ίδια κατάσταση, υπό την προϋπόθεση ότι έχουν διαφορετικό σπιν. Τότε, η θεμελιώδης κατάσταση του συστήματος θα είναι αυτή, στην οποία τα δύο ηλεκτρόνια τοποθετούνται στην  $\Psi_+$  με αντίθετα σπιν. Η ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης θα είναι  $2E_+ < 0$ . Εφόσον το  $E_+$  είναι αύξουσα συνάρτηση της απόστασης, το σύστημα μειώνει την ενέργειά του όσο πλησιάζουν τα άτομα μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια ελκτική τάση, η οποία οδηγεί στη διαμόρφωση σταθερού μορίου. Προφανώς, στην πραγματικότητα το πρόβλημα είναι εξαιρετικά πιο περίπλοκο: υπάρχει η άπωση μεταξύ των ηλεκτρονίων και των πυρήνων, η οποία θα εξισορροπήσει κάποια στιγμή την

<sup>(91)</sup>Πρόβλημα 3

<sup>(92)</sup>Η  $\Psi_+$  ονομάζεται δεσμική και η  $\Psi_-$  αντιδεσμική κατάσταση.

τάση για προσέγγιση. Το πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπιστεί στο χώρο Hilbert δύο ηλεκτρονίων και δύο πυρήνων. Τέλος, το δυναμικό της συνάρτησης  $\delta$  δεν αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση του δυναμικού Coulomb. Ωστόσο, η τάση για δημιουργία δεσμικών και αντιδεσμικών κυματοσυναρτήσεων και η επακόλουθη μείωση της ενέργειας επιβιώνει ανεξάρτητα από την προσέγγιση και αποτελεί βασικό στοιχείο κατανόησης του ομοιοπολικού χημικού δεσμού.

## 8.4 Προβλήματα

1. Αποδείξτε τις ιδιότητες (158-165) της συνάρτησης δέλτα. Επαληθεύστε ότι  $\delta(x^2 - a^2) = \frac{1}{2|a|}[\delta(x - a) + \delta(x + a)]$ . Για την ιδιότητα (165), θεωρήστε το ολοκλήρωμα  $\int_{-\infty}^x \delta(x') dx'$  και συγκρίνετέ το με τη  $\theta(x)$ . Σημειώστε πως η τιμή  $\theta(0)$  δεν παίζει ρόλο εδώ.
2. Λύστε το πρόβλημα σκέδασης για δυναμικό  $V_0\delta(x)$ . α) Βρείτε τα πλάτη και τους συντελεστές διέλευσης και ανάκλασης. β) Κατά πόσον διαφοροποιείται η περίπτωση  $V_0 > 0$  από την περίπτωση  $V_0 < 0$ ; γ) Προκύπτουν συντονισμοί σκέδασης; δ) Ποια η μορφή της  $|\Psi(x)|^2$  για  $x < 0$  και  $x > 0$ ; Σχολιάστε τις διαφορές.
3. Εξετάστε τις ιδιοτιμές της ενέργειας  $E_{\pm}$  για το διπλό δυναμικό  $\delta$  (εξ. 171). α) Δείξτε ότι η  $E_+$  είναι αύξουσα συνάρτηση και η  $E_-$  φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης  $2d$ . β) Λύστε γραφικά το πρόβλημα της ιδιοτιμής  $E_-$ . Δείξτε ότι η  $E_-$  μηδενίζεται για  $d$  μικρότερο ή ίσο κάποιου  $d_{\text{crit}}$ . Τι συμβαίνει τότε με τον συντελεστή  $\gamma_-$ ; Τι συμβαίνει με το μήκος διείσδυσης; Υπόδειξη για το (β): Το σχ. 5 δεν εξυπηρετεί στην εύρεση της  $\gamma_-$  για μικρά  $d$ , διότι το σημείο τομής των καμπύλων  $\coth(\gamma_-d)$  και  $\frac{2m|V_0|}{\hbar^2} \frac{1}{\gamma_-} - 1$  λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές στον άξονα  $y$ . Γι αυτό, ξαναγράψτε τη δεύτερη των (173) στη μορφή  $\tanh(\gamma_-d) = f(\gamma_-)$ , με  $f(\gamma_-) = \frac{\hbar^2}{2m|V_0|} \gamma_- / \left(1 - \frac{2m|V_0|}{\hbar^2} \gamma_-\right)$ . Σχεδιάστε τις καμπύλες του αριστερού και δεξιού μέλους και εξετάστε σε ποιο διάστημα ενδέχεται να τέμνονται, υπό την προϋπόθεση  $\gamma_- > 0$ . Εξετάστε την παράγωγο των δύο καμπύλων στο  $\gamma_- = 0$  και υπολογίστε την  $d_{\text{crit}} = \frac{\hbar^2}{2m|V_0|}$ .
4. Σωματίδιο βρίσκεται σε δυναμικό της μορφής

$$V(x) = -g\delta(x) + V_1\theta(x), \quad g, V_1 > 0$$

δηλαδή,  $V(x) = 0$  για  $x < 0$ ,  $V(x) = V_1$  (σταθερό) για  $x > 0$ , και επιπλέον  $V(x) = -g\delta(x)$  ακριβώς στο κέντρο. [ $\theta(x) = 0$  για  $x < 0$  και  $= 1$ , για  $x > 0$ , είναι η συνάρτηση μοναδιαίου βήματος.]

α) Να υπολογίσετε την ιδιοτιμή της ενέργειας της δέσμιας κατάστασης.

β) Να δείξετε ότι, καθώς το  $V_1$  αυξάνεται, φτάνει μια κρίσιμη τιμή, πάνω από την οποία δεν προκύπτει δέσμια κατάσταση. Να υπολογίσετε την κρίσιμη τιμή και να αιτιολογήσετε το αποτέλεσμα.

5. Σωματίδιο βρίσκεται σε δυναμικό της μορφής

$$V(x) = \begin{cases} -g\delta(x), & |x| < L/2 \\ \infty, & |x| > L/2 \end{cases}$$

με  $g, L > 0$ , δηλαδή, σε απειρόβαθο φρέαρ δυναμικού με μια συνάρτηση  $\delta$  στο κέντρο.

α) Να βρεθεί η θεμελιώδης κατάσταση και η αντίστοιχη ιδιοτιμή ενέργειας  $E_0$ .

β) Να διερευνηθεί για ποιες τιμές του  $g$  έχουμε  $E_0 < 0$ .

γ) Να βρεθούν οι ιδιοτιμές της ενέργειας όλων των περιπτώσεων ιδιοσυναρτήσεων και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες για την περίπτωση  $g = 0$ .

6. Θεωρήστε την κυματοσυνάρτηση  $\Psi(x) = a \exp(-\gamma|x|)$ . Λόγω της ασυνέχειας της πρώτης παραγώγου στο μηδέν, ο υπολογισμός της κινητικής ενέργειας χρειάζεται ειδική μεταχείριση. Διερευνήστε το πρόβλημα με δύο τρόπους:

α) Γράψτε την  $\Psi(x)$  στην προσεγγιστική μορφή  $\Psi_\eta(x) = \Psi(x)$ , για  $|x| > \eta$ , και  $\Psi_\eta(x) = -bx^2 + c$ , για  $|x| < \eta$ . Υπολογίστε τα  $b$  και  $c$  ώστε να υπάρχει συνέχεια της  $\Psi_\eta$  και της πρώτης παραγώγου στα σημεία  $\pm\eta$ . Υπολογίστε την κινητική ενέργεια της  $\Psi_\eta$  και πάρτε το όριο  $\eta \rightarrow 0$ .

β) Γράψτε την  $\Psi$  στη μορφή  $\Psi(x) = a \exp(\gamma x)\theta(-x) + a \exp(-\gamma x)\theta(x)$ . Βρείτε την  $\Psi''(x)$  εφαρμόζοντας τους κανόνες παραγωγισής της  $\theta(x)$  και τις ιδιότητες της  $\delta(x)$  και έπειτα υπολογίστε την κινητική ενέργεια. Τέλος, συγκρίνετε με το (α).

## 9 Ο αρμονικός ταλαντωτής

### 9.1 Εισαγωγικά

Ο αρμονικός ταλαντωτής είναι μαθηματικό υπόδειγμα φυσικών συστημάτων που βρίσκονται πλησίον κατάστασης ισορροπίας. Έχει εφαρμογές στην κλασική και κβαντική μηχανική, σε θεωρίες πεδίου, κλπ. Αν υποθέσουμε ότι ένα σωματίδιο μάζας  $m$  υπόκειται σε δυναμικό  $W(x)$  και κινείται πλησίον ενός τοπικού ελάχιστου, έστω στο  $x_0$ , τότε  $W'(x_0) = 0$ ,  $W''(x_0) > 0$  και ένα ανάπτυγμα σε μικρά  $(x - x_0)$  δίνει  $W(x) = W(x_0) + \frac{1}{2}(x - x_0)^2 W''(x_0) + O((x - x_0)^3)$ . Μετατοπίζοντας την αρχή του άξονα  $x$  στο  $x_0$ , αφαιρώντας τη σταθερά  $W(x_0)$  από το δυναμικό, και αγνοώντας όρους ανώτερης τάξης από την τετραγωνική, θέτουμε  $V(x) = W(x - x_0) - W(x_0)$  και λαμβάνουμε

$$V(x) = \frac{1}{2}Kx^2 \equiv \frac{1}{2}m\omega^2x^2, \quad (175)$$

το οποίο είναι το δυναμικό του αρμονικού ταλαντωτή. Η γενικότητα εφαρμογής του υποδείγματος του αρμονικού ταλαντωτή οφείλεται στην ευρεία δυνατότητα χρήσης αυτής της προσέγγισης. Η ποσότητα  $K \equiv V''(0) > 0$  ονομάζεται σταθερά ελατηρίου, λόγω της προέλευσης της θεωρίας από το νόμο του Hooke. Ένα χαρακτηριστικό του κλασικού αρμονικού ταλαντωτή είναι ότι το σωματίδιο εκτελεί περιοδική κίνηση, με την περίοδο  $T = 2\pi\sqrt{m/K}$  να είναι ανεξάρτητη του πλάτους (μέγιστης απομάκρυνσης). Από εκεί προκύπτει και η δεύτερη γραφή του δυναμικού, με  $\omega = 2\pi/T$  την κυκλική συχνότητα.

### 9.2 Αναλυτική μέθοδος επίλυσης

Ο κβαντικός αρμονικός ταλαντωτής ορίζεται από τη Χαμιλτονιανή

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2, \quad (176)$$

με εξίσωση ιδιοτιμών

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{1}{2}m\omega^2x^2\Psi = E\Psi. \quad (177)$$

Για ευκολία εφαρμόζουμε την αλλαγή μεταβλητής<sup>(93)</sup>

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x\sqrt{m\omega/\hbar} \\ \bar{E} &= E/\hbar\omega \end{aligned} \quad (178)$$

<sup>(93)</sup>Για την επίλυση ακολουθούμε το βιβλίο του Στέφανου Τραχανά *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης (1991).

οπότε η εξίσωση (177) γίνεται αδιάστατη:

$$\Psi''(\bar{x}) + (2\bar{E} - \bar{x}^2)\Psi(\bar{x}) = 0. \quad (179)$$

Θα αναζητήσουμε δέσμιες καταστάσεις. Για μεγάλα  $\bar{x}^2$ , η ενέργεια  $\bar{E}$  στην (179) γίνεται αμελητέα σε σύγκριση με το  $\bar{x}^2$ , οπότε έχουμε την ακόλουθη διαφορική εξίσωση που καθορίζει την ασυμπτωτική συμπεριφορά της κυματοσυνάρτησης:

$$\Psi''(\bar{x}) - \bar{x}^2 \Psi(\bar{x}) = 0, \quad (\bar{x} \gg \bar{E}).$$

Αυτή έχει λύσεις της μορφής  $\Psi = c e^{\pm \bar{x}^2/2}$ ,  $c$  σταθερά. Η λύση  $c e^{+\bar{x}^2/2}$  απορρίπτεται για δέσμιες καταστάσεις, διότι απειρίζεται την κυματοσυνάρτηση στο  $\pm\infty$ . Επομένως, η ασυμπτωτική συμπεριφορά πρέπει να είναι  $\Psi = c e^{-\bar{x}^2/2}$ . Γράφουμε λοιπόν

$$\Psi(\bar{x}) = c e^{-\bar{x}^2/2} h(\bar{x}) \quad (180)$$

όπου  $c$  σταθερά κανονικοποίησης και  $h(\bar{x})$  συνάρτηση προς προσδιορισμό. Αντικαθιστώντας στην (179) λαμβάνουμε την ακόλουθη διαφορική εξίσωση για την  $h(\bar{x})$ :

$$h''(\bar{x}) - 2\bar{x}h'(\bar{x}) + (2\bar{E} - 1)h(\bar{x}) = 0, \quad (181)$$

γνωστή και ως εξίσωση του Hermite. Επιχειρούμε επίλυση μέσω αναπτύγματος σε σειρά:

$$h(\bar{x}) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \bar{x}^k.$$

Παραγωγίζοντας τους όρους της σειράς και αντικαθιστώντας στην (181), βρίσκουμε:

$$\sum_{k=2}^{\infty} a_k k(k-1) \bar{x}^{k-2} - 2\bar{x} \sum_{k=1}^{\infty} a_k k \bar{x}^{k-1} + (2\bar{E} - 1) \sum_{k=0}^{\infty} a_k \bar{x}^k = 0.$$

Αναδεικτοδοτούμε τον πρώτο όρο με  $k \rightarrow k+2$ . Στον δεύτερο όρο, ο παράγοντας  $\bar{x}$  ενσωματώνεται στο άθροισμα δίνοντας  $-2 \sum_{k=1}^{\infty} k \bar{x}^k$ , ενώ το άθροισμα μπορεί να αρχίσει από  $k=0$ , δεδομένου ότι ο όρος  $k=0$  θα μηδενίζεται ούτως ή άλλως. Λαμβάνουμε:

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_{k+2} (k+2)(k+1) \bar{x}^k - 2 \sum_{k=0}^{\infty} a_k k \bar{x}^k + (2\bar{E} - 1) \sum_{k=0}^{\infty} a_k \bar{x}^k = 0.$$



Οι συναρτήσεις  $\bar{x}^k$  είναι γραμμικά ανεξάρτητες, επομένως οι συντελεστές τους πρέπει να εξισωθούν δύναμη προς δύναμη:

$$a_{k+2}(k+2)(k+1) - 2a_k k + (2\bar{E} - 1)a_k = 0.$$

Καταλήξαμε λοιπόν στην αναδρομική σχέση

$$a_{k+2} = \frac{2k - 2\bar{E} + 1}{(k+2)(k+1)} a_k \quad (182)$$

Αυτή συνδέει μεταξύ τους τους όρους με  $k = 0, 2, 4, \dots$  και, ξεχωριστά, εκείνους με  $k = 1, 3, 5, \dots$ , δηλαδή απεμπλέκει τους συντελεστές των άρτιων δυνάμεων από εκείνους των περιττών δυνάμεων. Αυτό είναι σε συμφωνία με το ότι το δυναμικό είναι άρτιο, επομένως οι ιδιοσυναρτήσεις θα είναι άρτιες ή περιττές, όπως είχε συζητηθεί στην παράγραφο 6.2, με συντελεστές τους  $a_0, a_2, a_4, \dots$  και  $a_1, a_3, a_5, \dots$ , αντίστοιχα. Για να οριστεί η ακολουθία  $a_k$ , πρέπει να επιλέξουμε μια αρχική τιμή  $a_0$  για τις άρτιες συναρτήσεις και, ξεχωριστά,  $a_1$  για τις περιττές. Δεδομένης της αναδρομικής σχέσης, όλοι οι συντελεστές εξαρτώνται γραμμικά από τον αρχικό. Επομένως, η επιλογή του αρχικού συντελεστή αντιστοιχεί σε πολλαπλασιασμό της συνάρτησης με μια σταθερά, η οποία δεν παίζει ρόλο διότι μπορεί να απορροφηθεί στον ολικό συντελεστή κανονικοποίησης στο τέλος.

Από τη σχέση (182) προκύπτει ότι η ακολουθία  $a_k$  πρέπει να τερματίζεται για κάποιο  $k = n$ , δηλ. πρέπει να υπάρχει  $n$ , τέτοιο ώστε  $a_{n+2} = 0$ . Διαφορετικά, για μεγάλα  $k$ , έχουμε  $a_{k+2}/a_k \approx 2/k$ , και η σειρά  $\sum_k a_k \bar{x}^k$  λαμβάνει ασυμπτωτικά τη μορφή  $e^{\bar{x}^2}$ ,<sup>(94)</sup> η οποία, πολλαπλασιαζόμενη με τον παράγοντα  $e^{-\bar{x}^2/2}$  της εξ. (180), δίνει  $\Psi \rightarrow e^{+\bar{x}^2/2}$  στο  $\bar{x} \rightarrow \pm\infty$  και είναι απαράδεκτη ως κυματοσυνάρτηση. Η συνθήκη τερματισμού της σειράς,  $a_{n+2} = 0$ , σημαίνει μηδενισμό του αριθμητή:  $2n - 2\bar{E} + 1 = 0$ . Επαναφέροντας τη μεταβλητή  $E = \hbar\omega\bar{E}$ , λαμβάνουμε την απαίτηση η ενέργεια να λαμβάνει ιδιοτιμές της μορφής

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega. \quad (183)$$

Αυτή είναι η ακολουθία ιδιοτιμών ενέργειας του χβαντικού αρμονικού ταλαντωτή. Οι λύσεις τερματιζόμενης σειράς στο  $n$ ,  $h_n(\bar{x}) = \sum_{k=0}^n a_k \bar{x}^k$ , ονομάζονται πολυώνυμα *Hermite* (όπου στο άθροισμα λαμβάνουμε είτε μόνον τα άρτια είτε μόνον τα περιττά  $k$ , όπως συζητήθηκε πιο πάνω). Ως αρχικές συνθήκες της αναδρομικής σχέσης (182) θέτουμε  $a_0 = 1$  και  $a_1 = 2$ , δηλ.  $h_0(\bar{x}) = 1$  και  $h_1(\bar{x}) = 2\bar{x}$ , οι οποίες εύκολα βλέπουμε

<sup>(94)</sup>Μπορούμε να πεισθούμε γι αυτό, αναπτύσσοντας σε σειρά το εκθετικό  $e^{\bar{x}^2} = \sum_{\nu} \frac{1}{\nu!} (\bar{x}^{\nu})^2 = \sum_{\nu} \frac{1}{\nu!} \bar{x}^{2\nu}$ . Θέτοντας  $k = 2\nu$  και  $a_k = \frac{1}{(k/2)!}$ , έχουμε  $e^{\bar{x}^2} = \sum_k \text{άρτιος } a_k \bar{x}^k$ . Τότε,  $a_{k+2}/a_k = (k/2)!/(k/2 + 1)! \approx 2/k$  για μεγάλα  $k$ . Για περισσότερες λεπτομέρειες, βλ. Stephen Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015).

ότι επαληθεύουν τη διαφορική εξ. (181) με  $\bar{E}_0 = 1/2$  και  $\bar{E}_1 = 3/2$ . Οι ιδιοσυναρτήσεις δίνονται με αντικατάσταση των πολυωνύμων Hermite στην εξ. (180). Υπολογίζοντας και τη σταθερά κανονικοποίησης βρίσκουμε:<sup>(95)</sup>

$$\Psi_n(x) = \left(\frac{m\omega}{\pi\hbar}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} h_n \left(\sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}} x\right) e^{-(m\omega/2\hbar)x^2} \quad (184)$$

Η θεμελιώδης κατάσταση είναι η

$$\Psi_0(x) = \left(\frac{m\omega}{\pi\hbar}\right)^{1/4} e^{-(m\omega/2\hbar)x^2} \quad (185)$$

με ιδιοτιμή ενέργειας  $\frac{1}{2}\hbar\omega$ . Η  $\Psi_0$  έχει την ιδιότητα να ελαχιστοποιεί το γινόμενο αβεβαιότητας θέσης-ορμής:  $(\Delta x)_{\Psi_0}(\Delta p)_{\Psi_0} = \frac{1}{2}\hbar$ , δηλ. ικανοποιείται η ισότητα στη σχέση (33).

### 9.3 Αλγεβρική μέθοδος επίλυσης

Το πρόβλημα του αρμονικού ταλαντωτή επιδέχεται και αλγεβρική μέθοδο επίλυσης. Ορίζουμε τους τελεστές καταστροφής και δημιουργίας

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \hat{x} + i \frac{1}{\sqrt{2m\omega\hbar}} \hat{p} \quad (186)$$

$$\hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \hat{x} - i \frac{1}{\sqrt{2m\omega\hbar}} \hat{p} \quad (187)$$

οι οποίοι είναι ερμιτιανοί συζυγείς αλλήλων, όπως εύκολα φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις και από το γεγονός ότι οι  $\hat{x}$  και  $\hat{p}$  είναι ερμιτιανοί. Με βάση τους  $\hat{a}$  και  $\hat{a}^\dagger$ , η Χαμιλτονιανή (176) γράφεται

$$\hat{H} = \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega. \quad (188)$$

Εύκολα βρίσκουμε ότι η μέση τιμή της Χαμιλτονιανής (188) σε οποιαδήποτε κατάσταση  $\Psi$  είναι θετική και μάλιστα μεγαλύτερη από  $\hbar\omega/2$ :

$$\begin{aligned} (\Psi, \hat{H}\Psi) &= \hbar\omega(\Psi, \hat{a}^\dagger \hat{a}\Psi) + \frac{\hbar\omega}{2}(\Psi, \Psi) \\ &= \hbar\omega(\hat{a}\Psi, \hat{a}\Psi) + \frac{\hbar\omega}{2}(\Psi, \Psi) \quad (\text{διότι ο } \hat{a} \text{ είναι συζυγής ερμιτιανός του } \hat{a}^\dagger) \\ &= \hbar\omega\|\hat{a}\Psi\|^2 + \frac{\hbar\omega}{2}\|\Psi\|^2 \geq \frac{1}{2}\hbar\omega, \end{aligned} \quad (189)$$

<sup>(95)</sup>Βλ. π.χ. A. Bohm, *Quantum Mechanics: Foundations and Applications*, 3rd ed., Springer 2003.

διότι ο πρώτος όρος είναι  $\geq 0$  και ο δεύτερος ίσος με  $\hbar\omega/2$ , εφόσον η  $\|\Psi\| = 1$ .

Από τη μεταθετική σχέση  $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$  προκύπτει<sup>(96)</sup>

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1 \quad (190)$$

$$[\hat{H}, \hat{a}] = -\hbar\omega \hat{a} \quad (191)$$

$$[\hat{H}, \hat{a}^\dagger] = \hbar\omega \hat{a}^\dagger. \quad (192)$$

Με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων, μπορούμε να παράξουμε ιδιοσυναρτήσεις της Χαμιλτονιανής, αν έχουμε δεδομένη μία, έστω την  $\Psi_E \neq 0$ , με ιδιοτιμή  $E$ . Δηλαδή, έστω  $\hat{H}\Psi_E = E\Psi_E$ . Βρίσκουμε<sup>(97)</sup>

$$\hat{H}\hat{a}\Psi_E = (E - \hbar\omega)\hat{a}\Psi_E \quad (193)$$

$$\hat{H}\hat{a}^\dagger\Psi_E = (E + \hbar\omega)\hat{a}^\dagger\Psi_E \quad (194)$$

Δηλαδή, τα διανύσματα  $\hat{a}\Psi_E$  και  $\hat{a}^\dagger\Psi_E$  είναι ιδιοδιανύσματα (αλλά όχι απαραίτητα κανονικοποιημένα) της Χαμιλτονιανής με ιδιοτιμή  $(E - \hbar\omega)$  και  $(E + \hbar\omega)$ , αντίστοιχα. Η τιμή  $\hbar\omega$  είναι το χβάντο ενέργειας του αρμονικού ταλαντωτή. Οι παραπάνω σχέσεις δικαιολογούν την ονομασία των τελεστών καταστροφής και δημιουργίας λόγω της μείωσης ή της αύξησης, αντίστοιχα, του αριθμού χβάντων ενέργειας κατά μία μονάδα.

Στη συνέχεια δείχνουμε την ύπαρξη θεμελιώδους στάθμης. Αν επαναλάβουμε περισσότερες φορές τη δράση του  $\hat{a}$  στο διάνυσμα  $\Psi_E$ , θα λάβουμε νέα ιδιοδιανύσματα με ολοένα μειούμενη ιδιοτιμή ενέργειας. Δρώντας  $m$  φορές λαμβάνουμε το ιδιοδιάνυσμα  $\hat{a}^m\Psi_E$  με ιδιοτιμή  $(E - m\hbar\omega)$ . Για  $m$  αρκετά μεγάλο, η ιδιοτιμή θα γίνει αρνητική. Άρα, για τέτοιο  $m$  θα έχουμε  $(\hat{a}^m\Psi_E, \hat{H}\hat{a}^m\Psi_E) = (E - m\hbar\omega)(\hat{a}^m\Psi_E, \hat{a}^m\Psi_E) = (E - m\hbar\omega)\|\hat{a}^m\Psi_E\|^2 \leq 0$ , με την ισότητα να ισχύει στην περίπτωση  $\|\hat{a}^m\Psi_E\| = 0$ . Αυτό έρχεται σε αντίφαση με τη σχέση (189), σύμφωνα με την οποία η μέση τιμή της Χαμιλτονιανής του αρμονικού ταλαντωτή σε οποιαδήποτε κατάσταση είναι αναγκαστικά θετική, εκτός εάν  $\|\hat{a}^m\Psi_E\| = 0$ . Συνεπώς, για αρκετά μεγάλο  $m$ , θα ισχύει αναγκαστικά  $\|\hat{a}^m\Psi_E\| = 0$ . Έστω  $n$  ο μέγιστος δυνατός ακέραιος για τον οποίο  $\hat{a}^n\Psi_E \neq 0$ , ενώ  $\hat{a}^{n+1}\Psi_E = \hat{a}(\hat{a}^n\Psi_E) = 0$ . Δηλαδή, το διάνυσμα  $\Psi_0 \equiv \hat{a}^n\Psi_E$  έχει το χαρακτηριστικό  $\hat{a}\Psi_0 = 0$ . Το ονομάζουμε θεμελιώδη κατάσταση. Η ιδιοτιμή ενέργειας  $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$  της θεμελιώδους κατάστασης ονομάζεται θεμελιώδης στάθμη και υπολογίζεται εύκολα:

$$\hat{H}\Psi_0 = \hbar\omega(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2})\Psi_0 = \hbar\omega\frac{1}{2}\Psi_0,$$

όπου ο πρώτος όρος του αθροίσματος μηδενίζεται λόγω της υπόθεσης  $\hat{a}\Psi_0 = 0$ .

<sup>(96)</sup>Πρόβλημα 2.

<sup>(97)</sup>Πρόβλημα 2.

Η  $\Psi_0$  είναι μοναδική. Δηλαδή, αν υπάρχει  $\Phi_0 \neq 0$  τέτοια, ώστε  $\hat{a}\Phi_0 = 0$ , τότε αναγκαστικά  $\Psi_0 = c\Phi_0$  με  $c$  σταθερά. Αυτό, το συμπεραίνουμε από το γεγονός ότι η ιδιοτιμή της ενέργειας της  $\Phi_0$  θα είναι ίδια με εκείνη της  $\Psi_0$  (λόγω της παραπάνω απόδειξης) και στην ίδια ιδιοτιμή ενέργειας δεν αντιστοιχούν διαφορετικές δέσμιες καταστάσεις σε μονοδιάστατα προβλήματα (απουσία εκφυλισμού σε μία διάσταση).<sup>(98)</sup> Επίσης, από τα προηγούμενα είναι προφανές δεν υπάρχει ιδιοκατάσταση χαμηλότερης ενέργειας.

Έχοντας δείξει τη μοναδικότητα της θεμελιώδους κατάστασης, προχωρούμε αντίστροφα και παράγουμε όλες τις ιδιοκαταστάσεις  $\Psi_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) της Χαμιλτονιανής δρώντας στην  $\Psi_0$  με τον τελεστή  $(\hat{a}^\dagger)^n$ . Πρώτον, δείχνουμε ότι η δράση του  $\hat{a}^\dagger$  δεν μηδενίζει οποιοδήποτε (μη μηδενικό) διάνυσμα. Δηλαδή, αν  $\|\Psi\| > 0$ , τότε  $\|\hat{a}^\dagger\Psi\| > 0$ :

$$\begin{aligned} \|\hat{a}^\dagger\Psi\|^2 &= (\hat{a}^\dagger\Psi, \hat{a}^\dagger\Psi) \\ &= (\Psi, \hat{a}\hat{a}^\dagger\Psi) \quad (\text{διότι ο } \hat{a} \text{ είναι συζυγής ερμιτιανός του } \hat{a}^\dagger) \\ &= (\Psi, (\hat{a}^\dagger\hat{a} + 1)\Psi) \quad (\text{από τη σχ. μετάθεσης 190}) \\ &= (\Psi, \hat{a}^\dagger\hat{a}\Psi) + (\Psi, \Psi) \\ &= (\hat{a}\Psi, \hat{a}\Psi) + (\Psi, \Psi) \\ &= \|\hat{a}\Psi\|^2 + \|\Psi\|^2 > 0 \end{aligned}$$

δεδομένου ότι ο πρώτος όρος είναι  $\geq 0$  και ο δεύτερος  $> 0$ .

Δεύτερον, εφόσον η θεμελιώδης κατάσταση  $\Psi_0$  είναι ιδιοδιάνυσμα της Χαμιλτονιανής, ισχύει γι αυτήν η εξ. (194), δηλαδή, το διάνυσμα  $\Psi_1 \equiv \hat{a}^\dagger\Psi_0$  είναι ιδιοδιάνυσμα με ιδιοτιμή  $E_1 = E_0 + \hbar\omega$ . Εφαρμόζοντας το επιχείρημα διαδοχικά, βρίσκουμε το εξής σύνολο ιδιοδιανυσμάτων-ιδιοτιμών της Χαμιλτονιανής:

$$\hat{H}\Psi_n = E_n\Psi_n \quad (195)$$

$$\Psi_n = (\hat{a}^\dagger)^n\Psi_0, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (196)$$

$$E_n = E_0 + n\hbar\omega = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega \quad (197)$$

(όπου υπονοούμε  $(\hat{a}^\dagger)^0 \equiv 1$ ). Άρα, μπορούμε να παράξουμε άπειρα ιδιοδιανύσματα της Χαμιλτονιανής, ξεκινώντας από τη θεμελιώδη στάθμη, της οποίας η ύπαρξη προκύπτει από την υπόθεση ύπαρξης ενός τουλάχιστον ιδιοδιανύσματος. Αυτά είναι σίγουρα ορθογώνια μεταξύ τους, διότι αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές.<sup>(99)</sup>

Μπορούμε επίσης να πεισθούμε ότι το σύνολο είναι πλήρες, δηλαδή, ότι όλα τα ιδιοδιανύσματα γράφονται στη μορφή (196) (πλην πιθανού πολλαπλασιασμού με μια σταθερά). Έστω τυχαίο ιδιοδιάνυσμα  $\Psi_E$  με ιδιοτιμή  $E$  και  $n$  ο ακέραιος που δίνει  $\hat{a}^n\Psi_E = \Psi_0$ .

<sup>(98)</sup>Βλ. κεφ. 6.4, (σελ. 69).

<sup>(99)</sup>Βλ. κεφ. 3, τελευταία παράγραφο του εδαφίου «Ιδιοκαταστάσεις και ιδιοτιμές» (σελ. 12).

Από την εξ. (193) προκύπτει ότι  $E = E_0 + n\hbar\omega$ , δηλ.  $E = E_n$  με το συμβολισμό της εξ. (197). Εφόσον λοιπόν οι ιδιοτιμές των  $\Psi_E$  και  $\Psi_n$  ταυτίζονται και εφόσον σε μία διάσταση δεν υπάρχει εκφυλισμός, τα διανύσματα  $\Psi_E$  και  $\Psi_n$  είναι γραμμικά εξαρτημένα, δηλαδή το ένα πολλαπλάσιο του άλλου, και να εκφράζουν την ίδια κατάσταση. Συμπερασματικά, το σύνολο διανυσμάτων  $\Psi_n \equiv \hat{a}^n \Psi_0$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , είναι γραμμικά ανεξάρτητο και περιέχει όλα τα ιδιοδιανύσματα, αλλά εκκρεμεί η κανονικοποίησή τους.

Εξυπηρετεί να ορίσουμε τον τελεστή αρίθμησης (*number operator*),  $\hat{n} \equiv \hat{a}^\dagger \hat{a}$ , που εμφανίζεται στη Χαμιλτονιανή (188) και είναι πρόδηλα ερμιτιανός. Συγκρίνοντας με τις σχέσεις (195) και (197) προκύπτει αμέσως ότι τα ιδιοδιανύσματα της Χαμιλτονιανής είναι και ιδιοδιανύσματα του τελεστή αρίθμησης:

$$\hat{n}\Psi_n \equiv \hat{a}^\dagger \hat{a}\Psi_n = n\Psi_n. \quad (198)$$

Επομένως, ο τελεστής  $\hat{n}$  αριθμεί τα χβάντα ενέργειας ( $\hbar\omega$ ) που περιέχονται στην κατάσταση του διανύσματος  $\Psi_n$ .

Τέλος, προχωρούμε στην κανονικοποίηση των διανυσμάτων  $\Psi_n$ . Εφόσον η αλγεβρική μέθοδος δεν δίνει τη μορφή των κυματοσυναρτήσεων, παρά μόνο την αλγεβρική τους σχέση μέσω της δράσης τελεστών, πρέπει να δεχθούμε ότι μία κατάσταση είναι κανονικοποιημένη και να προσδιορίσουμε τον συντελεστή κανονικοποίησης των υπόλοιπων σε σχέση με αυτή. Το απλούστερο είναι να αξιώσουμε την κανονικοποίηση της θεμελιώδους κατάστασης:  $\|\Psi_0\|^2 = (\Psi_0, \Psi_0) = 1$ . Τότε, εφαρμόζοντας τη σχέση (196), βρίσκουμε για  $n \geq 1$ :

$$\begin{aligned} (\Psi_n, \Psi_n) &= ((\hat{a}^\dagger)^n \Psi_0, (\hat{a}^\dagger)^n \Psi_0) \\ &= (\hat{a}^\dagger \Psi_{n-1}, \hat{a}^\dagger \Psi_{n-1}) \\ &= (\Psi_{n-1}, \hat{a} \hat{a}^\dagger \Psi_{n-1}) \quad (\text{διότι ο } \hat{a} \text{ είναι ερμιτιανός συζυγής του } \hat{a}^\dagger) \\ &= (\Psi_{n-1}, (\hat{a}^\dagger \hat{a} + 1) \Psi_{n-1}) \quad (\text{από σχ. μετάθεσης 190}) \\ &= (\Psi_{n-1}, \hat{a}^\dagger \hat{a} \Psi_{n-1}) + (\Psi_{n-1}, \Psi_{n-1}) \\ &= (n-1)(\Psi_{n-1}, \Psi_{n-1}) + (\Psi_{n-1}, \Psi_{n-1}) \quad (\text{από σχ. 198}) \\ &= n(\Psi_{n-1}, \Psi_{n-1}). \end{aligned}$$

Καταλήξαμε λοιπόν στην αναδρομική σχέση  $\|\Psi_n\|^2 = n\|\Psi_{n-1}\|^2$ , η οποία, δεδομένης της παραδοχής  $\|\Psi_0\| = 1$ , δίνει  $\|\Psi_n\|^2 = n!$ . Δηλαδή, τα κανονικοποιημένα ιδιοδιανύσματα της Χαμιλτονιανής, που αποτελούν και ορθοκανονική βάση, είναι τα

$$\Phi_n \equiv \frac{1}{\sqrt{n!}} \Psi_n = \frac{1}{\sqrt{n!}} (\hat{a}^\dagger)^n \Psi_0. \quad (199)$$

Προκύπτει εύκολα η δράση των  $\hat{a}$  και  $\hat{a}^\dagger$  στα διανύσματα ορθοκανονικής βάσης:<sup>(100)</sup>

$$\hat{a}^\dagger \Phi_n = \sqrt{n+1} \Phi_{n+1} \quad (200)$$

$$\hat{a} \Phi_n = \sqrt{n} \Phi_{n-1}. \quad (201)$$

## 9.4 Προβλήματα

1. Δείξτε ότι η μέση τιμή της ενέργειας του αρμονικού ταλαντωτή είναι υποχρεωτικά θετική. Χρησιμοποιήστε τη μορφή της Χαμιλτονιανής (176) και το γεγονός ότι οι τελεστές  $\hat{p}$  και  $\hat{x}$  είναι ερμιτιανοί, χωρίς να καταφύγετε στους τελεστές δημιουργίας και καταστροφής.
2. Αποδείξτε τη σχέση (188) και τις σχέσεις μετάθεσης (190-192) των τελεστών  $\hat{a}$  και  $\hat{a}^\dagger$  του αρμονικού ταλαντωτή. Με βάση αυτές, δείξτε την ισχύ των εξισώσεων ιδιοτιμών (193) και (193).
3. Πεισθείτε για την ισχύ των σχέσεων (199-201).
4. Βρείτε τις ιδιοσυναρτήσεις και ιδιοτιμές της ακόλουθης Χαμιλτονιανής:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \frac{1}{2} m \omega^2 (\hat{x} - x_0)^2 + V_0,$$

με  $x_0, V_0$  σταθερές. Χρησιμοποιήστε για αυτό τη γνωστή θεωρία του αρμονικού ταλαντωτή με κατάλληλους μετασχηματισμούς, χωρίς να ξαναλύσετε το πρόβλημα από την αρχή.

5. Δείξτε ότι, σε οποιαδήποτε ιδιοκατάσταση  $\Phi_n$  του αρμονικού ταλαντωτή, η μέση τιμή της κινητικής ενέργειας και η μέση τιμή της δυναμικής ενέργειας είναι ίσες:  $\langle \hat{T} \rangle_n = \langle \hat{V} \rangle_n = \frac{1}{2} E_n$ . Δείξτε την πρόταση με τρεις διαφορετικούς τρόπους: α) Με απευθείας ολοκλήρωση των εσωτερικών γινομένων, β) χρησιμοποιώντας τους τελεστές δημιουργίας και καταστροφής, γ) εφαρμόζοντας το θεώρημα virial:  $\langle \hat{T} \rangle_n = \frac{1}{2} \langle x \partial V / \partial x \rangle_n$  για ιδιοκατάσταση  $\Psi_n$  οποιασδήποτε Χαμιλτονιανής.

---

<sup>(100)</sup>Πρόβλημα 3.

# 10 Κίνηση σε τρεις διαστάσεις και στροφορμή

## 10.1 Εισαγωγικά

Στην περιγραφή της κίνησης σωματιδίων σε τρεις διαστάσεις, δεν διαφοροποιούνται τα αξιώματα της κβαντομηχανικής (χώρος καταστάσεων, παρατηρήσιμα μεγέθη, αρχές μέτρησης, χρονική εξέλιξη καταστάσεων), παρά μόνο αλλάζει επί της ουσίας το πεδίο ορισμού των κυματοσυναρτήσεων: είναι συναρτήσεις από το  $\mathbb{R}^3$  στο  $\mathbb{C}$ , τετραγωνικά ολοκληρώσιμες. Δηλαδή:

$$\int_{\mathbb{R}^3} |\Psi(\mathbf{r})|^2 d^3r = 1, \quad \mathbf{r} = (x, y, z). \quad (202)$$

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται επίσης σε αναλογία με τη μονοδιάστατη περίπτωση:

$$(\Psi_1, \Psi_2) = \int_{\mathbb{R}^3} \Psi_1^*(\mathbf{r}) \Psi_2(\mathbf{r}) d^3r. \quad (203)$$

Σε αναλογία με τη μονοδιάστατη περίπτωση, η ποσότητα  $|\Psi(\mathbf{r})|^2$  δίνει την πυκνότητα πιθανότητας να μετρηθεί το σωματίδιο στη θέση  $\mathbf{r}$ . Ο τελεστής θέσης,  $\hat{\mathbf{r}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  είναι πλέον διάνυσμα με τρεις συνιστώσες. Η κάθε επιμέρους συνιστώσα δρα πολλαπλασιαστικά, π.χ.,  $\hat{x}\Psi(\mathbf{r}) = \hat{x}\Psi(x, y, z) = x\Psi(x, y, z)$ . Ο τελεστής ορμής είναι επίσης διανυσματική ποσότητα:

$$\hat{\mathbf{p}} = (\hat{p}_x, \hat{p}_y, \hat{p}_z) = (-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}, -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}, -i\hbar \frac{\partial}{\partial z}) = -i\hbar \nabla. \quad (204)$$

Οι σχέσεις μετάθεσης προκύπτουν εύκολα. Συμβολίζοντας με  $\hat{r}_\mu \in \{\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}\}$  την  $\mu$ -οστή συνιστώσα του  $\mathbf{r}$ , έχουμε

$$\begin{aligned} [\hat{r}_\mu, \hat{r}_\nu] &= 0 \\ [\hat{p}_\mu, \hat{p}_\nu] &= 0 \\ [\hat{r}_\mu, \hat{p}_\nu] &= i\hbar \delta_{\mu\nu}, \quad \mu, \nu \in \{x, y, z\}. \end{aligned} \quad (205)$$

Οι πρώτη σχέση προκύπτει από την πολλαπλασιαστική δράση των  $\hat{r}_\mu \hat{r}_\nu$ , η δεύτερη από τη μεταθετικότητα των μερικών παραγωγίσεων ως προς διαφορετικές συντεταγμένες και η τρίτη με αντίστοιχο τρόπο όπως η αντίστοιχη σχέση σε μία διάσταση.

Η κινητική ενέργεια είναι

$$\hat{T} = \frac{1}{2m} (\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2) \equiv \frac{1}{2m} \hat{p}^2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2. \quad (206)$$

Η χρονικά ανεξάρτητη εξ. Schrödinger (εξίσωση ιδιοτιμών της ενέργειας) για το σω-

ματίδιο απουσία δυναμικού γράφεται

$$\hat{T}\Psi_E(\mathbf{r}) \equiv -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi_E(\mathbf{r}) = E\Psi_E(\mathbf{r}). \quad (207)$$

Για την επίλυση της εξίσωσης δοκιμάζουμε χωρισμό μεταβλητών. Γράφοντας  $\Psi_E(x, y, z) = \Psi_1(x)\Psi_2(y)\Psi_3(z)$ , λαμβάνουμε

$$\Psi_1''(x)\Psi_2(y)\Psi_3(z) + \Psi_1(x)\Psi_2''(y)\Psi_3(z) + \Psi_1(x)\Psi_2(y)\Psi_3''(z) = -\frac{2mE}{\hbar^2}\Psi_1(x)\Psi_2(y)\Psi_3(z), \quad (208)$$

απόπου:

$$\frac{\Psi_1''(x)}{\Psi_1(x)} + \frac{\Psi_2''(y)}{\Psi_2(y)} + \frac{\Psi_3''(z)}{\Psi_3(z)} = -\frac{2mE}{\hbar^2} \quad (209)$$

Το δεξιό μέλος της εξίσωσης είναι μια σταθερά, ενώ το αριστερό μέλος είναι άθροισμα τριών συναρτήσεων διαφορετικών μεταβλητών. Ο μόνος τρόπος να ικανοποιείται η εξίσωση για κάθε τιμή των  $x, y, z$  είναι να είναι σταθερός ο κάθε όρος του αριστερού μέλους. Έτσι,

$$\frac{\Psi_1''(x)}{\Psi_1(x)} = -\frac{2mE_1}{\hbar^2}, \quad \frac{\Psi_2''(y)}{\Psi_2(y)} = -\frac{2mE_2}{\hbar^2}, \quad \frac{\Psi_3''(z)}{\Psi_3(z)} = -\frac{2mE_3}{\hbar^2}, \quad \text{με } E_1 + E_2 + E_3 = E \quad (210)$$

Οι λύσεις αυτών των εξισώσεων είναι

$$\Psi_1(x) = e^{ik_1x}, \quad \Psi_2(y) = e^{ik_2y}, \quad \Psi_3(z) = e^{ik_3z}, \quad \text{με } k_\mu = \sqrt{2mE_\mu}/\hbar. \quad (211)$$

Από εδώ και πέρα, η γενική λύση γράφεται στη μορφή

$$\Psi = \sum_{k_1, k_2, k_3} c_{k_1, k_2, k_3} e^{i(k_1x + k_2y + k_3z)} \equiv \sum_{\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}, \quad (212)$$

υπό τη συνθήκη  $k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = k^2 = 2mE/\hbar^2$ , με τις σταθερές  $c_{\mathbf{k}}$  και τις επιτρεπτές τιμές των  $k_\mu$  να καθορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες.

Για παράδειγμα, εάν οι συνοριακές συνθήκες δίνονται από πλήρως ανακλαστικά τοιχώματα στα επίπεδα  $x = 0, L$ ,  $y = 0, L$ ,  $z = 0, L$ , δηλαδή αν έχουμε το τριδιάστατο ανάλογο του απειρόβραχου πηγαδιού δυναμικού με  $\Psi_E(x, y, z) = 0$  σε αυτά τα επίπεδα, τότε λαμβάνουμε γραμμικούς συνδυασμούς των εκθετικών ώστε να σχηματίζονται συναρτήσεις  $\Psi_{n_1}(x) = \sin(n_1\pi x/L)$ ,  $\Psi_{n_2}(y) = \sin(n_2\pi y/L)$ ,  $\Psi_{n_3}(z) = \sin(n_3\pi z/L)$ , με τη γενική λύση

$$\Psi_E = \sum_{n_1 n_2 n_3} c_{n_1 n_2 n_3} \sin\left(\frac{n_1\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{n_2\pi y}{L}\right) \sin\left(\frac{n_3\pi z}{L}\right), \quad n_\mu = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (213)$$



υπό τη συνθήκη

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2). \quad (214)$$

Η άθροιση στη γενική λύση υφίσταται εάν περισσότερες της μίας τριάδες  $(n_x, n_y, n_z)$  ικανοποιούν τη συνθήκη (214) για την ενέργεια, οπότε και έχουμε εκφυλισμένη ιδιοτιμή. (Η τιμή  $n_\mu = 0$  αποκλείεται διότι δίνει μηδενική κυματοσυνάρτηση, ενώ οι τιμές  $n_\mu < 0$  παραλείπονται, διότι δίνουν μόνο μια αλλαγή προσήμου, άρα συναρτήσεις γραμμικά εξαρτημένες από τις αντίστοιχες με  $n_\mu > 0$ .)

Σε άλλο παράδειγμα, εάν υποθέσουμε ότι έχουμε περιοδικές συνοριακές συνθήκες στα  $x = 0, L, y = 0, L, z = 0, L$ , τότε οι λύσεις γράφονται στη μορφή (211,212), υπό τη συνθήκη  $k_\mu = 2\pi n_\mu/L, n_\mu \in \mathbb{Z}$ . (Εδώ επιτρέπεται η τιμή  $n_\mu = 0$ , που δίνει  $\Psi_\mu = 1$ , ενώ οι συναρτήσεις με  $n_\mu < 0$  και  $n_\mu > 0$  είναι γραμμικά ανεξάρτητες.)

Τέλος, εξετάζουμε το παράδειγμα πλήρως ανακλαστικών τοιχωμάτων στα επίπεδα  $x = 0, L, y = 0, L$  και ελεύθερης κίνησης για  $z \in (-\infty, \infty)$ . Αυτό είναι ένα μοντέλο για την κίνηση σε οδηγό τετραγωνικής διατομής  $L \times L$  και άπειρου μήκους, π.χ. για την κίνηση ηλεκτρονίου σε πολύ λεπτό μεταλλικό αγωγό. Εδώ έχουμε λύσεις της μορφής  $\Psi_{n_1}(x) = \sin(n_1\pi x/L), \Psi_{n_2}(y) = \sin(n_2\pi y/L), \Psi_3(z) = e^{ik_3z}$ , με τη γενική λύση

$$\Psi_E = \sum_{n_1 n_2} \sum_{n' = \pm 1} c_{n_1 n_2 n'}(k_3) \sin\left(\frac{n_1 \pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{n_2 \pi y}{L}\right) e^{in' k_3 z} dk_3, \quad n_1, n_2 = 1, 2, 3, \dots \quad (215)$$

με την ενέργεια να λαμβάνει τιμές

$$E_{n_1 n_2}(k_3) = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 (n_1^2 + n_2^2) + \frac{\hbar^2}{2m} k_3^2, \quad k_3 \in \mathbb{R}. \quad (216)$$

Εδώ, ο κυμαριθμός  $k_3$  μπορεί να πάρει οποιαδήποτε πραγματική τιμή (όπως επιτρέπουν οι συνοριακές συνθήκες), σε αναλογία με τη περίπτωση ελεύθερου σωματιδίου κινούμενου σε μία διάσταση χωρίς άλλο περιορισμό πέραν της εξ. (216). Το  $n'$  θέτει το πρόσημο του εκθέτη, διότι πρέπει να ληφθούν υπόψη οι δύο γραμμικά ανεξάρτητες λύσεις  $e^{\pm i k_3 z}$ . Η εξ. (216) δίνει μια παραβολή για κάθε ζεύγος  $(n_1, n_2)$ , μετατοπισμένη στον άξονα των ενεργειών κατά την ποσότητα  $\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 (n_1^2 + n_2^2)$ . Η ελάχιστη δυνατή τιμή της ενέργειας είναι  $E_0 \equiv E_{1,1}(0) = 2 \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\pi}{L} \right)^2$ . Δεδομένης μιας ενέργειας  $E > E_0$ , παρουσιάζεται εκφυλισμός που αντιστοιχεί στον αριθμό των τριάδων  $(n_1, n_2, k_3)$  που ικανοποιούν τη σχέση (216).

## 10.2 Η στροφορμή

Ας θεωρήσουμε σύστημα ενός σωματιδίου στον τριδιάστατο χώρο στην κατάσταση  $\Psi_0$ . Εξετάζουμε μια στροφή του συστήματος συντεταγμένων κατά γωνία  $\gamma$  γύρω από

άξονα  $\mathbf{e}$ , με τον αντίστοιχο  $3 \times 3$  ορθογώνιο πίνακα στροφής  $\mathcal{R}_{\gamma, \mathbf{e}}$ , ώστε η θέση στο χώρο να μετασχηματίζεται ως  $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}' = \mathcal{R}\mathbf{r}$ . Τότε η συνάρτηση  $\Psi_0$  μετασχηματίζεται, εκφρασμένη στο νέο σύστημα, ως  $\Psi_\gamma(\mathbf{r}) = \Psi_0(\mathcal{R}_{\gamma, \mathbf{e}}\mathbf{r})$ . Για ευκολία επιλέγουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, τον άξονα  $z$  κατά μήκος του άξονα στροφής  $\mathbf{e}$  και εκφράζουμε τις  $\Psi_0, \Psi$  σε σφαιρικές συντεταγμένες  $(r, \theta, \phi)$  με

$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi, \quad z = r \cos \theta. \quad (217)$$

Υποθέτουμε ότι η συναρτήσεις  $\Psi_0(r, \theta, \phi)$  και  $\Psi_\gamma(r, \theta, \phi)$  είναι αναλυτικές συναρτήσεις<sup>(101)</sup> της  $\phi$ . Τότε, δεδομένου ότι στο επιλεγμένο σύστημα συντεταγμένων η γωνία  $\gamma$  είναι στην κατεύθυνση της  $\phi$ , κάνουμε ένα ανάπτυγμα Taylor:

$$\begin{aligned} \Psi_\gamma(r, \theta, \phi) = \Psi_0(r, \theta, \phi + \gamma) &= \sum_n \frac{\gamma^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial \phi^n} \Psi_0(r, \theta, \phi) \\ &= \exp \left[ \gamma \frac{\partial}{\partial \phi} \right] \Psi_0(r, \theta, \phi) \\ &= \exp \left[ i \frac{\gamma}{\hbar} \left( -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi} \right) \right] \Psi_0(r, \theta, \phi) \\ &\equiv \exp \left[ i \frac{\gamma}{\hbar} \hat{L}_z \right] \Psi_0(r, \theta, \phi) \end{aligned} \quad (218)$$

Στο δεύτερο βήμα χρησιμοποιήσαμε τον ορισμό του εκθετικού αναπτύγματος του διαφορικού τελεστή  $\gamma(\partial/\partial\phi)$  και στο τελευταίο ορίσαμε τον τελεστή στροφορμής ως προς τον άξονα  $z$

$$\hat{L}_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi}. \quad (219)$$

Είναι απλό να δείξει κανείς ότι  $\frac{\partial}{\partial \phi} = x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x}$ . Ωστόσο, αυτή είναι η έκφραση της συνιστώσας  $z$  του διανύσματος  $\mathbf{r} \times \nabla$ , δηλαδή του εξωτερικού γινομένου των διανυσμάτων θέσης και βαθμίδας. Συμπεριλαμβάνοντας τη σταθερά  $-i\hbar$ , και χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ορμής σε τρεις διαστάσεις (204), γράφουμε:  $\hat{L}_z = (\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}})_z$ .

Αυτό το αποτέλεσμα γενικεύεται σε στροφές γύρω από οποιοδήποτε άξονα. Ένας τρόπος είναι να υπολογίσουμε το μετασχηματισμό του  $\partial/\partial\phi$  μεταξύ του αρχικού και ενός στραμμένου συστήματος συντεταγμένων. Είναι απλούστερο να παρατηρήσουμε ότι η ποσότητα  $(\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}})_z = \mathbf{e}_z \cdot (\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}})$  είναι το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος  $(\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}})$  με το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση  $z$ ,  $\mathbf{e}_z$ . Το εσωτερικό γινόμενο είναι βαθμωτή ποσότητα, ως εκ τούτου δεν αλλάζει τιμή σε στροφή του συστήματος συντεταγμένων. Εάν το εκφράσουμε σε νέο σύστημα συντεταγμένων, ως προς το οποίο ο προηγούμενος άξονας  $z$  βρίσκεται πλέον στην κατεύθυνση  $\mathbf{e}$ , καταλήγουμε στη γενική

<sup>(101)</sup> Αυτός ο περιορισμός δεν είναι ουσιώδης, διότι μπορούμε να εκφράσουμε οποιαδήποτε τετραγωνικά ολοκληρώσιμη συνάρτηση ως όριο ακολουθίας αναλυτικών συναρτήσεων.

έκφραση στροφής κατά γωνία  $\gamma$  γύρω από άξονα  $\mathbf{e}$ ,

$$\Psi_0(\mathcal{R}_{\gamma, \mathbf{e}} \mathbf{r}) = \exp \left[ i \frac{\gamma}{\hbar} \mathbf{e} \cdot (\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}) \right] \Psi_0(\mathbf{r}) \equiv \exp \left[ i \frac{\gamma}{\hbar} \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{L}} \right] \Psi_0(\mathbf{r}). \quad (220)$$

Εδώ, ορίσαμε τον διανυσματικό τελεστή της στροφορμής

$$\hat{\mathbf{L}} = \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}} \quad (221)$$

με συνιστώσες

$$\begin{aligned} \hat{L}_x &= \hat{y} \hat{p}_z - \hat{z} \hat{p}_y = -i\hbar \left( y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y} \right) \\ \hat{L}_y &= \hat{z} \hat{p}_x - \hat{x} \hat{p}_z = -i\hbar \left( z \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial z} \right) \\ \hat{L}_z &= \hat{x} \hat{p}_y - \hat{y} \hat{p}_x = -i\hbar \left( x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (222)$$

Ο μετασχηματισμός (220),  $\Psi_0(\mathbf{r}) \rightarrow \Psi_0(\mathcal{R}_{\gamma, \mathbf{e}} \mathbf{r})$ , είναι μια στροφή στο χώρο, η οποία αφήνει αναλλοίωτη τη νόρμα  $\int |\Psi_0|^2 d^3r = \|\Psi_0\|$ . Επίσης, πρόκειται εμφανώς για γραμμική απεικόνιση. Επομένως, ο τελεστής μετασχηματισμού,  $\exp \left[ i \frac{\gamma}{\hbar} \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{L}} \right]$ , είναι μοναδιαίος. Δεδομένης της φανταστικής μονάδας στον εκθέτη, η ποσότητα  $\frac{\gamma}{\hbar} \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{L}}$  πρέπει να είναι ερμιτιανός τελεστής. Λαμβάνοντας το  $\mathbf{e}$  στις κατευθύνσεις  $x, y, z$ , συμπεραίνουμε ότι οι τρεις συνιστώσες της στροφορμής είναι ερμιτιανοί τελεστές, όπως φαίνεται και από τον ορισμό (222), όπου οι συνιστώσες παράγονται από γινόμενα ερμιτιανών τελεστών οι οποίοι μετατίθενται (π.χ.,  $[\hat{x}, \hat{p}_y] = 0$ ). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε αν πάρουμε την εξίσωση (219) και ολοκληρώσουμε κατά παράγοντες στη γωνία  $\phi$ :

$$\begin{aligned} (\Psi, \hat{L}_z \Psi) &= \int_0^{2\pi} \Psi^*(r, \theta, \phi) \hat{L}_z \Psi(r, \theta, \phi) d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \Psi^*(r, \theta, \phi) \left( -i\hbar \frac{\partial \Psi(r, \theta, \phi)}{\partial \phi} \right) d\phi \\ &= -i\hbar [\Psi^* \Psi]_0^{2\pi} + i\hbar \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Psi^*(r, \theta, \phi)}{\partial \phi} \Psi(r, \theta, \phi) d\phi \\ &= 0 + \int_0^{2\pi} \left( -i\hbar \frac{\partial \Psi(r, \theta, \phi)}{\partial \phi} \right)^* \Psi(r, \theta, \phi) d\phi \\ &= \left[ \int_0^{2\pi} \left( -i\hbar \frac{\partial \Psi(r, \theta, \phi)}{\partial \phi} \right) \Psi^*(r, \theta, \phi) d\phi \right]^* \\ &= (\Psi, \hat{L}_z \Psi)^* \end{aligned}$$

όπου ο πρώτος όρος της ολοκλήρωσης κατά παράγοντες μηδενίστηκε επειδή η  $\Psi$  πρέπει να είναι μονότιμη συνάρτηση της γωνίας  $\phi$  ( $\Psi(r, \theta, 0) = \Psi(r, \theta, 2\pi)$ ). Επομένως,

$(\Psi, \hat{L}_z \Psi) \in \mathbb{R}$ , δηλαδή ο  $\hat{L}_z$  είναι ερμιτιανός τελεστής. Δεδομένου ότι οι  $\hat{L}_x$  και  $\hat{L}_y$  απλώς εκφράζουν τον  $\hat{L}_z$  σε στραμμένο σύστημα συντεταγμένων στο χώρο, συμπεραίνουμε ότι είναι επίσης ερμιτιανοί, χωρίς να επαναλάβουμε τις πράξεις. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε παρατηρώντας ότι κάθε συνιστώσα της στροφορμής (ρεφε:ανγκμομοζομπονεντς) αποτελείται από γινόμενα μετατιθέμενων ερμιτιανών τελεστών.

Περαιτέρω, ορίζουμε το μέτρο του τετραγώνου της στροφορμής ως

$$\hat{L}^2 = (\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}) \cdot (\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}) = \hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 + \hat{L}_z^2. \quad (223)$$

Λόγω της ερμιτιανότητας των  $\hat{L}_x, \hat{L}_y, \hat{L}_z$ , ο τελεστής  $\hat{L}^2$  είναι επίσης ερμιτιανός.

Οι σχέσεις μετάθεσης των τελεστών στροφορμής (222) προκύπτουν απευθείας από τις σχέσεις μετάθεσης των συνιστοσών της θέσης και της ορμής (205). Χρησιμοποιώντας τον κανόνα μεταθετών  $[\hat{A}\hat{B}, \hat{C}] = \hat{A}[\hat{B}, \hat{C}] + [\hat{A}, \hat{C}]\hat{B}$ , βρίσκουμε

$$\begin{aligned} [\hat{L}_x, \hat{L}_y] &= i\hbar \hat{L}_z \\ [\hat{L}_y, \hat{L}_z] &= i\hbar \hat{L}_x \\ [\hat{L}_z, \hat{L}_x] &= i\hbar \hat{L}_y \end{aligned} \quad (224)$$

που συνοψίζονται

$$[\hat{L}_\mu, \hat{L}_\nu] = i\hbar \epsilon_{\mu\nu\kappa} \hat{L}_\kappa \quad (225)$$

όπου εμφανίζεται το αντισυμμετρικό σύμβολο Levi-Civita,

$$\epsilon_{\mu\nu\kappa} = \begin{cases} 1, & \text{αν τα } (\mu, \nu, \kappa) \text{ είναι άρτια μετάθεση των } (x, y, z), \\ -1, & \text{αν τα } (\mu, \nu, \kappa) \text{ είναι περιττή μετάθεση των } (x, y, z), \\ 0, & \text{αν κάποια από τα } (\mu, \nu, \kappa) \text{ ταυτίζονται.} \end{cases} \quad (226)$$

Επίσης, βρίσκουμε εύκολα:

$$[\hat{L}^2, \hat{L}_x] = [\hat{L}^2, \hat{L}_y] = [\hat{L}^2, \hat{L}_z] = 0. \quad (227)$$

### 10.3 Συζήτηση περί των σχέσεων μετάθεσης των τελεστών στροφορμής

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι οι συνιστώσες του διανύσματος της στροφορμής είναι ασύμβατες ποσότητες. Σύμφωνα με το εδάφιο 4.4, αυτό συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει κοινό σύστημα ιδιοδιανυσμάτων που να αποτελεί βάση στο χώρο Hilbert, αν και μπορεί να υπάρχουν κάποια κοινά ιδιοδιανύσματα (μάλιστα, οι κυματοσυναρτήσεις μηδενικής στροφορμής προκύπτει ότι είναι κοινά ιδιοδιανύσματα των τριών τελεστών

με ιδιοτιμή μηδέν). Κατά συνέπεια, αν σε ένα πείραμα φιλτράρουμε τη συλλογή, για παράδειγμα, σε κατάσταση δεδομένης τιμής της προβολής  $\hat{L}_z$ , τότε αναμένουμε (πλην εξαιρέσεων) διασπορά στις μετρήσεις των  $\hat{L}_x$  και  $\hat{L}_y$ .

Αντίθετα, η μεταθετικότητα των τριών συνιστωσών του  $\hat{L}^2$  με οποιαδήποτε των τριών συνιστωσών (εξ. 227) σημαίνει ότι υπάρχει βάση κοινών ιδιοδιανυσμάτων του  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_x$ , άλλη βάση κοινών ιδιοδιανυσμάτων του  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_y$ , και άλλη βάση κοινών ιδιοδιανυσμάτων του  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$  (οι τρεις βάσεις δεν είναι δυνατόν να ταυτίζονται). Ας θεωρήσουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, την περίπτωση κοινής βάσης  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$ . Όπως θα δούμε, με εξαίρεση την ιδιοτιμή μηδενικής στροφορμής, κάθε ιδιοτιμή του  $\hat{L}^2$  αντιστοιχεί σε περισσότερες της μίας ιδιοτιμές του  $\hat{L}_z$ . Επομένως, εάν μια συλλογή φιλτραριστεί ως προς ιδιοτιμή του  $\hat{L}^2$ , το φιλτράρισμα είναι ατελές (δεν δίνει κυματοσυνάρτηση), και απαιτείται επιπλέον φιλτράρισμα ως προς το μέγεθος  $\hat{L}_z$  για να προσδιοριστεί πλήρως η κατάσταση. Αλλά και αντίστροφα, αν φιλτραριστεί μια συλλογή ως προς ιδιοτιμή του  $\hat{L}_z$ , το φιλτράρισμα είναι επίσης ατελές, διότι υπάρχουν πολλές (άπειρες, όπως θα δούμε) ιδιοτιμές του  $\hat{L}^2$  που αντιστοιχούν σε δεδομένη ιδιοτιμή του  $\hat{L}_z$ . Θα χρειαστεί τότε επιπλέον φιλτράρισμα ως προς το μέγεθος  $\hat{L}^2$  για να προσδιοριστεί πλήρως μια κυματοσυνάρτηση. Συνεπώς, οι τελεστές  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$  ανήκουν σε πλήρες σύστημα μετατιθεμένων μεγεθών.

Στην πραγματικότητα, βέβαια, η ταυτόχρονη γνώση των ιδιοτιμών των  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$  δεν αρκεί για πλήρη προσδιορισμό της κυματοσυνάρτησης, διότι η ακτινική εξάρτηση της κυματοσυνάρτησης δημιουργεί επιπλέον εκφυλισμό (γραμμικά ανεξάρτητες κυματοσυναρτήσεις ενδέχεται να ταυτίζονται ως προς την ιδιοτιμή τόσο του  $\hat{L}^2$  όσο και του  $\hat{L}_z$ , δεδομένου ότι η στροφορμή χαρακτηρίζει το σύστημα μόνον ως προς τη γωνιακή συμπεριφορά). Τότε απαιτούνται επιπλέον μεγέθη (π.χ., η ενέργεια) για να συμπληρωθεί το πλήρες σύστημα. Αυτές οι έννοιες θα διασαφηνιστούν περισσότερο στη μελέτη του ατόμου του Υδρογόνου.

## 10.4 Ιδιοδιανύσματα και ιδιοτιμές της στροφορμής

Θα αναζητήσουμε τις ιδιοτιμές και τα κοινά ιδιοδιανύσματα των τελεστών  $\hat{L}_z$  και  $\hat{L}^2$ . Τα ιδιοδιανύσματα των  $\hat{L}_x$ ,  $\hat{L}_y$  προκύπτουν από εκείνα του  $\hat{L}_z$ , φέρνοντας τον άξονα  $z$  στον  $x$  ή στον  $y$  με χρήση της σχέσης (220), ενώ οι αντίστοιχες ιδιοτιμές παραμένουν αναλλοίωτες, καθώς πρόκειται απλώς για έκφραση της ίδιας ποσότητας σε άλλο σύστημα συντεταγμένων.

Για την εξίσωση ιδιοτιμών του  $\hat{L}_z$  χρησιμοποιούμε τη μορφή (219). Δεδομένου ότι ο τελεστής περιέχει τη σταθερά  $\hbar$ , εξυπηρετεί να ορίσουμε την ιδιοτιμή ως  $m\hbar$ . Έχουμε

$$\hat{L}_z f_m(\phi) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi} f_m(\phi) = \hbar m f_m(\phi), \quad (228)$$

η οποία έχει ως λύση την  $f_m(\phi) = e^{im\phi}$ . Δεδομένου ότι  $f(2\pi) = f(0)$ , πρέπει  $m \in \mathbb{Z}$ . Γενικά, αν μια συνάρτηση  $\Psi$  γράφεται στη μορφή  $\Psi(r, \theta, \phi) = \Psi_1(r, \theta)e^{im\phi}$ ,  $m \in \mathbb{Z}$ , τότε είναι ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{L}_z$ .

Η εύρεση των ιδιοτιμών του  $\hat{L}^2$  είναι πιο περίπλοκη.<sup>(102)</sup> Για λόγους όμοιους με πριν, εξυπηρετεί να ορίζουμε τις ιδιοτιμές ως  $\lambda\hbar^2$  με το  $\lambda$  άγνωστο προς εύρεση. Γράφοντας την εξίσωση ιδιοτιμών ως

$$\hat{L}^2 Y = \hat{L}_x^2 Y + \hat{L}_y^2 Y + \hat{L}_z^2 Y = \lambda\hbar^2 Y, \quad (229)$$

όπου  $Y$  η ιδιοσυνάρτηση, βλέπουμε εύκολα ότι  $\lambda \geq 0$ :  $\lambda\hbar^2 \|Y\|^2 = \lambda\hbar^2 (Y, Y) = (Y, \hat{L}^2 Y) = (Y, \hat{L}_x^2 Y) + (Y, \hat{L}_y^2 Y) + (Y, \hat{L}_z^2 Y) = (\hat{L}_x Y, \hat{L}_x Y) + (\hat{L}_y Y, \hat{L}_y Y) + (\hat{L}_z Y, \hat{L}_z Y) = \|\hat{L}_x Y\|^2 + \|\hat{L}_y Y\|^2 + \|\hat{L}_z Y\|^2 \geq 0$ , όπου χρησιμοποιήσαμε την ερμιτιανή ιδιότητα των  $\hat{L}_i$ .

Μετασχηματίζοντας το  $\hat{L}^2$  από καρτεσιανές σε σφαιρικές συντεταγμένες, και συγκρίνοντας με το  $\nabla^2$  επίσης σε σφαιρικές συντεταγμένες, προκύπτει ότι η δράση του  $\hat{L}^2$  είναι η ίδια με αυτή του γωνιακού μέρους  $\nabla^2$  (πλέον του πολλαπλασιαστικού παράγοντα  $-\hbar^2$  και ενός παράγοντα  $r^2$ ). Η έκφραση για το  $\nabla^2$  είναι:

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\Psi) + \frac{1}{r^2} \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \phi^2} \right] \quad (230)$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\Psi) + \frac{(-1)}{\hbar^2} \frac{1}{r^2} \hat{L}^2 \Psi \quad (231)$$

Γράφουμε λοιπόν την εξίσωση ιδιοτιμών του  $\hat{L}^2$  σε σφαιρικές συντεταγμένες

$$\hat{L}^2 Y = -\hbar^2 \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial Y}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 Y}{\partial \phi^2} \right] = \lambda\hbar^2 Y, \quad (232)$$

όπου πλέον είναι φανερό ότι  $Y = Y(\theta, \phi)$ . Ο κανόνας της αλυσίδας μαζί με τριγωνομετρικές σχέσεις μάς δίνουν  $\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} = -\frac{\partial}{\partial \cos \theta}$  και  $\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} = (\cos^2 \theta - 1) \frac{\partial}{\partial \cos \theta}$ , οπότε η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται στην εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial \cos \theta} \left[ (1 - \cos^2 \theta) \frac{\partial Y}{\partial \cos \theta} \right] + \frac{1}{1 - \cos^2 \theta} \frac{\partial^2 Y}{\partial \phi^2} = -\lambda Y. \quad (233)$$

Εδώ γίνεται φανερό ότι η  $Y$  εξαρτάται από τη  $\theta$  μόνο μέσω του  $\cos \theta$ . Για συντομία στη γραφή, ορίζουμε τη μεταβλητή  $u = \cos \theta$ . Προχωρούμε με χωρισμό μεταβλητών,

$$Y(\theta, \phi) = P(\cos \theta) f(\phi) = P(u) f(\phi), \quad -1 < u < 1. \quad (234)$$

<sup>(102)</sup>Εδώ ακολουθούμε την αναλυτική μέθοδο επίλυσης της αντίστοιχης διαφορικής εξίσωσης, ενώ υπάρχει και η αλγεβρική μέθοδος. Οι μέθοδοι παρουσιάζονται π.χ. στο βιβλίο του Stephen Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015).

Πολλαπλασιάζοντας τα δύο μέλη της (233) με  $(1 - u^2)$  και διαιρώντας με  $Y = Pf$ , λαμβάνουμε

$$(1 - u^2) \frac{1}{P} \frac{\partial}{\partial u} \left[ (1 - u^2) \frac{\partial P}{\partial u} \right] + \lambda(1 - u^2) = -\frac{1}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2}. \quad (235)$$

Το αριστερό μέλος αυτής της εξίσωσης είναι συνάρτηση μόνο από του  $u$ , ενώ το δεξιό μόνο του  $\phi$ . Για να ισούνται τα δύο μέλη για κάθε  $(u, \phi)$  πρέπει να είναι ίσα με μια σταθερά  $\lambda_1$ . Από το δεξιό μέλος έχουμε

$$\frac{1}{f(\phi)} \frac{\partial^2 f(\phi)}{\partial \phi^2} = -\lambda_1 \quad (236)$$

που έχει ως λύση  $f(\phi) = e^{\pm i\sqrt{\lambda_1}\phi}$ , για  $\lambda_1 \neq 0$ , και  $f(\phi) = a\phi + b$ , για  $\lambda_1 = 0$ . Αλλά πρέπει  $f(2\pi) = f(\phi)$ , επομένως μένει μόνο η δυνατότητα  $e^{\pm i\sqrt{\lambda_1}\phi}$  με  $\sqrt{\lambda_1} = 0, 1, 2, \dots$ . Υιοθετώντας το συμβολισμό της (228), θέτουμε  $\pm\sqrt{\lambda_1} = m \in \mathbb{Z}$ . Για δεδομένο  $m$ , από τις δύο ορθογώνιες συναρτήσεις  $e^{\pm im\phi}$  μέσω γραμμικών συνδυασμών μπορούμε να φτιάξουμε άπειρα ζεύγη ορθογώνιων συναρτήσεων που να ικανοποιούν την (236) (π.χ., τις  $\cos m\phi$  και  $\sin m\phi$ ), αλλά παρατηρούμε ότι ειδικά η επιλογή του ζεύγους  $e^{\pm im\phi}$  ικανοποιεί ταυτόχρονα και την (228), δηλαδή δίνει ιδιοσυναρτήσεις των  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$  ταυτόχρονα. Συνεπώς, υιοθετούμε τις

$$f_m(\phi) = e^{im\phi}, \quad m \in \mathbb{Z} \quad (237)$$

με την (235) να γίνεται (αντικαθιστώντας  $\lambda_1 = m^2$  στο δεξιό μέλος και διαιρώντας με  $(1 - u^2)$ )

$$\frac{\partial}{\partial u} \left[ (1 - u^2) \frac{\partial P(u)}{\partial u} \right] + \left( \lambda - \frac{m^2}{1 - u^2} \right) P(u) = 0. \quad (238)$$

Έχουμε λοιπόν, για κάθε ιδιοτιμή  $m$  του  $\hat{L}_z$ , μια εξίσωση για τις ιδιοσυναρτήσεις  $Y(\theta, \phi) = P(\cos \theta)e^{im\phi}$  και τις ιδιοτιμές  $\lambda$  του  $\hat{L}^2$ . Θα συζητήσουμε την επίλυση της (238) για  $m = 0$  και θα δώσουμε τις λύσεις για  $m \neq 0$ .<sup>(103)</sup>

Για  $m = 0$ , η (238) γράφεται

$$\frac{\partial}{\partial u} \left[ (1 - u^2) \frac{\partial P(u)}{\partial u} \right] + \lambda P(u) = 0, \quad -1 < u < 1. \quad (239)$$

Επιχειρώντας λύση εκφρασμένη σε δυναμοσειρά, θέτουμε

$$P(u) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k u^k. \quad (240)$$

<sup>(103)</sup> Ακολουθούμε το βιβλίο του Stephen Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015).

Με αντικατάσταση στην (239) και επαναρίθμηση του πρώτου όρου, λαμβάνουμε

$$\sum_{k=0}^{\infty} [(k+1)(k+2)a_{k+2} - (k(k+1) + \lambda)a_k] u^k = 0. \quad (241)$$

Για να ισχύει η σχέση για κάθε  $u$ , πρέπει να μηδενίζεται ο συντελεστής κάθε δύναμης  $u_k$ . Αυτή η απαίτηση δίνει την αναδρομική σχέση

$$a_{k+2} = \frac{k(k+1) - \lambda}{(k+1)(k+2)} a_k. \quad (242)$$

Για  $k \gg \lambda$  και  $k \gg 1$ , η σχέση δίνει  $a_{k+2}/a_k \rightarrow 1$ . Τότε, για  $u \rightarrow \pm 1$ , η σειρά θα συμπεριφέρεται ως  $\sum_k u^k$  και θα αποκλίνει. Αλλά το όριο του  $P(u)$  για  $u = \cos \theta \rightarrow \pm 1$  είναι ουσιώδες να υπάρχει, διαφορετικά το αποτέλεσμα δεν θα ορίζεται για  $\theta = 0, \theta = \pi$ . Το πρόβλημα λύνεται εάν απαιτήσουμε να τερματίζεται η σειρά, δηλαδή να υπάρχει κάποιο  $k \equiv l$  τέτοιο ώστε  $a_{l+2} = 0$ . Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμητής θα πρέπει να μηδενίζεται, δηλαδή θα υπάρχει  $l$  τέτοιο ώστε

$$\lambda = l(l+1), \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (243)$$

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι ιδιοτιμές του  $\hat{L}^2$  για  $m = 0$  είναι της μορφής  $\hbar^2 l(l+1)$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots$ . Εξάλλου, παρατηρούμε ότι η σχέση (242) συνδέει κάθε δεύτερο  $k$ , δηλαδή είτε τα άρτια  $k$  μεταξύ τους είτε τα περιττά  $k$  μεταξύ τους. Αυτό συμφωνεί με την ιδιότητα των συντελεστών της διαφορικής εξίσωσης (239) να είναι άρτιες συναρτήσεις του  $u$ , επομένως οι λύσεις θα είναι είτε άρτιες είτε περιττές, περιλαμβάνοντας είτε μόνον άρτιες είτε μόνον περιττές δυνάμεις του  $u$ .

Ο τερματισμός της σειράς σημαίνει πολυωνυμικές λύσεις, οι οποίες ονομάζονται πολυώνυμα Legendre. Ο συντελεστής  $a_0$  (για τα άρτια πολυώνυμα) και  $a_1$  (για τα περιττά) μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα να είναι μονάδα, διότι η επιλογή οποιασδήποτε άλλης τιμής αντιστοιχεί απλώς σε πολλαπλασιασμό του πολυωνύμου με μια σταθερά, όπως φαίνεται από την αναδρομική σχέση. Τα πρώτα πολυώνυμα Legendre (για  $l = 0, 1, 2, 3$ ) είναι

$$\begin{aligned} P_0(u) &= 1 \\ P_1(u) &= x \\ P_2(u) &= \frac{1}{2}(3u^2 - 1) \\ P_3(u) &= \frac{1}{2}(5u^3 - 3u) \end{aligned} \quad (244)$$



Τα πολυώνυμα Legendre μπορούν να παραχθούν από τη σχέση του Rodriguez

$$P_l(u) = \frac{1}{2^l l!} \frac{d^l}{du^l} (u^2 - 1)^l \quad (245)$$

και υπακούν την ακόλουθη σχέση ορθογωνιότητας:

$$\int_{-1}^1 P_l(u) P_{l'}(u) du = \frac{2}{2l+1} \delta_{ll'}. \quad (246)$$

Επομένως, οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες συναρτήσεις είναι οι

$$\sqrt{\frac{2l+1}{2}} P_l(u) \quad (247)$$

οι οποίες αποτελούν ορθοκανονική βάση στον χώρο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων συναρτήσεων στο  $[-1, 1]$ . Η σχέση πληρότητας είναι η

$$\sum_{l=0}^{\infty} \frac{2}{2l+1} P_l(u) P_l(u') = \delta(u - u') = \delta(\cos \theta - \cos \theta'). \quad (248)$$

Για  $m \neq 0$ , οι λύσεις της διαφορικής εξίσωσης (238) είναι τα συναφή πολυώνυμα Legendre,

$$P_{l,m}(u) = (-1)^m (1-u^2)^{m/2} \frac{d^m}{du^m} P_l(u) \quad m > 0, \quad m \leq l \quad (249)$$

$$P_{l,-m}(u) = (-1)^m \frac{(l-m)!}{(l+m)!} P_{l,m}(u)$$

Ο περιορισμός  $|m| \leq l$  προκύπτει από το γεγονός ότι η  $m$ -οστή παραγώγιση στην πρώτη εξίσωση μηδενίζει το αποτέλεσμα για  $m > l$ , μια και το  $P_l(u)$  είναι πολυώνυμο βαθμού  $l$ . (Για  $m = 0$ ,  $P_{l,0}(u) = P_l(u)$ .)

Οι κοινές ιδιοσυναρτήσεις  $Y = P(\cos \theta) f(\phi)$  των  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$  μπορούν πλέον να γραφούν ως εξής:

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_{l,m}(\cos \theta) e^{im\phi}, \quad l = 0, 1, 2, \dots, \quad -l \leq m \leq l \quad (250)$$

Αυτές οι συναρτήσεις ονομάζονται σφαιρικές αρμονικές. Ικανοποιούν την ταυτότητα  $Y_{l,-m} = (-1)^m Y_{lm}$ . Για κάθε ιδιοτιμή  $l(l+1)\hbar^2$  του  $\hat{L}^2$  έχουμε  $2l+1$  ιδιοσυναρτήσεις του  $\hat{L}_z$ , με  $m = -l, -l+1, \dots, l-1, l$ . Ο αριθμητικός παράγοντας μπροστά φροντίζει για την

κανονικοποίηση των σφαιρικών αρμονικών, που ικανοποιούν τη σχέση ορθογωνιότητας

$$\int d\Omega Y_{lm}(\theta, \phi) Y_{l'm'}(\theta, \phi) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \sin \theta Y_{lm}(\theta, \phi) Y_{l'm'}(\theta, \phi) = \delta_{ll'} \delta_{mm'}, \quad (251)$$

τη σχέση πληρότητας

$$\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l Y_{lm}^*(\theta, \phi) Y_{lm}(\theta, \phi) = \delta(\phi - \phi') \delta(\cos \theta - \cos \theta') \quad (252)$$

και αποτελούν βάση στο χώρο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων συναρτήσεων ορισμένων στη μοναδιαία σφαίρα. Συνεπώς, οποιαδήποτε συνάρτηση  $\Psi(\theta, \phi)$  αναπτύσσεται σε σφαιρικές αρμονικές ως

$$\Psi(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (253)$$

με

$$a_{lm} = (Y_{lm}, \Psi) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \sin \theta Y_{lm}^*(\theta, \phi) \Psi(\theta, \phi). \quad (254)$$

Οι πρώτες μερικές σφαιρικές αρμονικές δίνονται παρακάτω.

$$\begin{aligned} Y_{0,0} &= \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \\ Y_{1,\pm 1} &= \mp \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{\pm i\phi} \\ Y_{1,0} &= \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta \\ Y_{2,\pm 2} &= \sqrt{\frac{15}{32\pi}} \sin^2 \theta e^{\pm 2i\phi} \\ Y_{2,\pm 1} &= \mp \sqrt{\frac{15}{8\pi}} \sin \theta \cos \theta e^{\pm i\phi} \\ Y_{2,0} &= \sqrt{\frac{5}{16\pi}} (3 \cos^2 \theta - 1) \end{aligned} \quad (255)$$

## 10.5 Φυσική ερμηνεία του φάσματος

Είδαμε ότι το μέτρο και η συνιστώσα  $z$  της στροφορμής είναι κβαντισμένες ποσότητες: δεν μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή, διότι το φάσμα τους είναι διακριτό.

Αναμένουμε ότι, σε μια μέτρηση, το μέτρο της στροφορμής δεν μπορεί να είναι μικρότερο από το μέτρο της συνιστώσας  $z$ . Αυτό προκύπτει μαθηματικά από τον περιορισμό  $-l \leq m \leq l$ , ο οποίος συνεπάγεται  $|m|\hbar \leq l\hbar < \sqrt{l(l+1)}\hbar$ . Η ποσότητα

$\sqrt{l(l+1)}\hbar$  ερμηνεύεται ως ιδιοτιμή του μέτρου της στροφορμής, δεδομένου ότι το  $l(l+1)\hbar^2$  είναι η ιδιοτιμή του  $\hat{L}^2$ . Άρα, για κάθε μετρημένη τιμή του μέτρου της στροφορμής, η μετρημένη τιμή της συνιστώσας  $z$  είναι αυστηρά μικρότερη κατ' απόλυτη τιμή (με μόνη εξαίρεση την κατάσταση μηδενικής ολικής στροφορμής,  $l = 0$ , για την οποία υποχρεωτικά  $m = 0$ ).

Διαισθητικά, αυτό σημαίνει ότι η στροφορμή ποτέ δεν μπορεί να είναι πλήρως παράλληλη στον άξονα  $z$  (ή οποιοδήποτε άξονα, μια και ο  $z$  επιλέγεται αυθαίρετα). Αυτό είναι ένα καθαρά κβαντικό φαινόμενο και συνδέεται με τις σχέσεις μετάθεσης (224) των  $\hat{L}_x$ ,  $\hat{L}_y$  και  $\hat{L}_z$ . Εφόσον οι μεταθέτες δεν μηδενίζονται, μια συλλογή προετοιμασμένη σε ιδιοκατάσταση της  $\hat{L}_z$ , με  $\hat{L}_z\Psi = m\hbar\Psi$ , θα έχει υποχρεωτικά διασπορά ως προς μετρήσεις των  $\hat{L}_x$  και  $\hat{L}_y$ . Οι τιμές της διασποράς στη δεδομένη  $\Psi$  θα ικανοποιούν τη σχέση αβεβαιότητας (30):

$$(\Delta L_x)(\Delta L_y) \geq \frac{1}{2} \left| \langle [\hat{L}_x, \hat{L}_y] \rangle \right| = \frac{1}{2} \left| i\hbar \langle \hat{L}_z \rangle \right| = \frac{\hbar}{2} \left| \langle \Psi, \hat{L}_z \Psi \rangle \right| = |m| \frac{\hbar^2}{2}. \quad (256)$$

Παράλληλα, η μέση τιμή  $\langle \hat{L}_x \rangle$  και  $\langle \hat{L}_y \rangle$  μηδενίζεται σε ιδιοκατάσταση του  $\hat{L}_z$ , διότι οι σχέσεις μετάθεσης (224) δίνουν

$$\begin{aligned} i\hbar \langle \hat{L}_x \rangle &= \langle [\hat{L}_y, \hat{L}_z] \rangle = \langle \Psi, [\hat{L}_y, \hat{L}_z] \Psi \rangle = \langle \Psi, \hat{L}_y \hat{L}_z \Psi \rangle - \langle \hat{L}_z \Psi, \hat{L}_y \Psi \rangle \\ &= \langle \Psi, \hat{L}_y \Psi \rangle m - m \langle \Psi, \hat{L}_y \Psi \rangle = 0 \end{aligned} \quad (257)$$

(και όμοια για την  $\langle \hat{L}_y \rangle$ ). Συνεπώς, οι συνιστώσες  $x$  και  $y$  της στροφορμής έχουν υποχρεωτικά διασπορά περί το μηδέν σε ιδιοκαταστάσεις της  $\hat{L}_z$ . Ακόμα και για τη μέγιστη δυνατή προβολή της στροφορμής στον άξονα  $z$ ,  $m = l$ , οι μετρήσεις θα δώσουν μη μηδενική προβολή της στροφορμής στους άξονες  $x$  και  $y$ , άρα η προβολή στον  $z$  πρέπει να είναι μικρότερη από το μέτρο της στροφορμής. Πέραν της σχέσης αβεβαιότητας, μπορούμε να υπολογίσουμε και το μέτρο της προβολής της στροφορμής στο επίπεδο  $xy$ . Αυτό δίνεται από τον τελεστή  $\hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 = \hat{L}^2 - \hat{L}_z^2$ . Επομένως, οι κοινές ιδιοκαταστάσεις των  $\hat{L}^2$  και  $\hat{L}_z$  είναι επίσης ιδιοκαταστάσεις του  $\hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2$ . Αν  $\Psi_{lm}$  μια τέτοια κατάσταση με  $\hat{L}^2\Psi_{lm} = l(l+1)^2\hbar^2\Psi_{lm}$  και  $\hat{L}_z\Psi_{lm} = m\hbar\Psi_{lm}$ , τότε

$$(\hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2)\Psi_{lm} = (\hat{L}^2 - \hat{L}_z^2)\Psi_{lm} = [l(l+1) - m^2]\hbar^2\Psi_{lm}. \quad (258)$$

Δηλαδή, το μέτρο της προβολής της στροφορμής στο επίπεδο  $xy$  είναι  $\sqrt{l(l+1) - m^2}\hbar$  με μηδενική διασπορά. Η ελάχιστη δυνατή τιμή του προκύπτει για  $m = \pm l$  να είναι  $\sqrt{l}\hbar$ .

Η σχέση (256) αφήνει ένα ερωτηματικό σε σχέση με την περίπτωση  $m = 0$ . Μπορεί κανείς να δείξει ότι το μόνο κοινό ιδιοδιάνυσμα  $\Psi$  των  $\hat{L}_z$  και  $\hat{L}^2$  για το οποίο  $(\Delta L_x)_\Psi(\Delta L_y)_\Psi = 0$  είναι εκείνο για το οποίο  $l = m = 0$ . Πράγματι, αν

$(\Delta L_x)_\Psi(\Delta L_y)_\Psi = 0$ , τότε ένας από τους δύο παράγοντες θα μηδενίζεται. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, έστω  $(\Delta L_x)_\Psi = 0$ , δηλαδή δεν υπάρχει διασπορά του  $\hat{L}_x$  στη δεδομένη  $\Psi$ . Τότε, η  $\Psi$  θα είναι εξ ορισμού ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{L}_x$ . Μπορούμε να βρούμε και την αντίστοιχη ιδιοτιμή: εφόσον πιο πάνω είδαμε ότι  $(\Psi, \hat{L}_x \Psi) = 0$  για οποιοδήποτε ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{L}_z$ , συμπεραίνουμε ότι  $\hat{L}_x \Psi = 0$ , δηλαδή η δεδομένη  $\Psi$  αντιστοιχεί σε ιδιοτιμή μηδέν. Συνοψίζοντας, ως τώρα έχουμε βρει  $\hat{L}_z \Psi = \hat{L}_x \Psi = 0$ . Αλλά από εδώ βρίσκουμε και τη δράση του  $\hat{L}_y$ , αξιοποιώντας τις σχέσεις μετάθεσης:  $i\hbar \hat{L}_y \Psi = [\hat{L}_z, \hat{L}_x] \Psi = [0 \cdot m - m \cdot 0] \Psi = 0$ . Άρα, η  $\Psi$  είναι ιδιοδιάνυσμα και του  $\hat{L}_y$  με ιδιοτιμή μηδέν. Τέλος, από την (256) γνωρίζουμε ήδη ότι για να έχουμε  $(\Delta L_x)_\Psi(\Delta L_y)_\Psi = 0$  πρέπει υποχρεωτικά  $m = 0$ , δηλαδή η  $\Psi$  έχει μηδενική ιδιοτιμή και ως προς την  $\hat{L}_z$ . Συμπεραίνουμε:

$$\hat{L}^2 \Psi = (\hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 + \hat{L}_z^2) \Psi = (0 + 0 + 0) \Psi = 0. \quad (259)$$

Καταλήγουμε ότι η  $\Psi$  είναι ιδιοδιάνυσμα του  $\hat{L}^2$  μηδενικής ιδιοτιμής, άρα  $l = 0$ .

Τα παραπάνω ισχύουν και για τις ιδιοσυναρτήσεις είτε του  $\hat{L}_x$  είτε του  $\hat{L}_y$  στη θέση του  $\hat{L}_z$ , δεδομένου ότι η επιλογή του άξονα  $z$  στο χώρο ήταν εξ αρχής αυθαίρετη.

# 11 Κίνηση σε κεντρικό δυναμικό—το άτομο του Υδρογόνου

## 11.1 Διατήρηση της στροφορμής

Ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο σε κεντρικό δυναμικό, δηλαδή, σε δυναμικό για το οποίο  $V(\mathbf{r}) = V(r)$  ( $r \equiv |\mathbf{r}|$ ). Το σύστημα παρουσιάζει ισοτροπία, δηλαδή δεν υπάρχει προτιμητέα κατεύθυνση στο χώρο στη Χαμιλτονιανή (και συνεπώς στη χρονική εξέλιξη). Αυτό είναι φανερό από τη μορφή του δυναμικού και από το γεγονός ότι η κινητική ενέργεια είναι επίσης ισοτροπική.

Έστω μια κυματοσυνάρτηση  $\Psi_0(\mathbf{r}; 0)$  σε χρόνο  $t = 0$ , η οποία εξελίσσεται χρονικά στην

$$\Psi_0(\mathbf{r}; t) = e^{-i\hat{H}t/\hbar} \Psi_0(\mathbf{r}; 0). \quad (260)$$

Εξετάζουμε παράλληλα μιαν άλλη κυματοσυνάρτηση, η οποία συνδέεται με την πρώτη μέσω μιας στροφής στο χώρο  $\mathcal{R}_{\gamma, \mathbf{e}}$  κατά γωνία  $\gamma$  γύρω από άξονα  $\mathbf{e}$ :

$$\Psi_\gamma(\mathbf{r}; 0) = \Psi_0(\mathcal{R}_{\gamma, \mathbf{e}}\mathbf{r}; 0) = e^{i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar} \Psi_0(\mathbf{r}; 0) \quad (261)$$

σύμφωνα με τον τύπο (220).

Λόγω της ισοτροπίας του συστήματος, αναμένουμε ότι είτε πάρουμε τη χρονική εξέλιξη τις στραμμένης κυματοσυνάρτησης σε χρόνο  $t$ , είτε πάρουμε τη χρονική εξέλιξη της μη στραμμένης και τη στρέψουμε σε χρόνο  $t$ , θα έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα. Δηλαδή αναμένουμε

$$\Psi_\gamma(\mathbf{r}; t) = e^{i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar} \Psi_0(\mathbf{r}; t) \quad (262)$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις στο αριστερό και δεξιό μέλος, λαμβάνουμε

$$e^{-i\hat{H}t/\hbar} e^{i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar} \Psi_0(\mathbf{r}; 0) = e^{i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar} e^{-i\hat{H}t/\hbar} \Psi_0(\mathbf{r}; 0) \quad (263)$$

Η ισότητα πρέπει να ισχύει για οποιαδήποτε  $\Psi_0$ , επομένως έχουμε ισότητα των τελεστών στα δύο μέλη:

$$e^{-i\hat{H}t/\hbar} e^{i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar} = e^{i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar} e^{-i\hat{H}t/\hbar}. \quad (264)$$

Αλλά αυτή η έκφραση σημαίνει ότι οι δύο μοναδιαίοι τελεστές, εκείνος της χρονικής εξέλιξης και εκείνος της τυχαίας στροφής στο χώρο, μετατίθενται. Γράφοντας τον τελεστή χρονικής εξέλιξης για μικρό χρόνο,  $\exp[-i\hat{H}t/\hbar] \approx 1 - i(t/\hbar)\hat{H}$ , και εκείνον της στροφής για μικρή γωνία,  $\exp[i\gamma\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}/\hbar] \approx 1 + i(\gamma/\hbar)\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}$ , η παραπάνω σχέση γίνεται

$$(1 - i\frac{t}{\hbar}\hat{H})(1 + i\frac{\gamma}{\hbar}\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}}) = (1 + i\frac{\gamma}{\hbar}\mathbf{e}\cdot\hat{\mathbf{L}})(1 - i\frac{t}{\hbar}\hat{H})$$

από όπου προκύπτει αμέσως  $\hat{H} \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{L}} = \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{L}} \hat{H}$ , δηλαδή οι δύο ερμιτιανοί τελεστές,  $\hat{H}$  και  $\mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{L}}$  μετατίθενται. Εφόσον αυτό ισχύει για άξονα περιστροφής γύρω από τυχαία διεύθυνση  $\mathbf{e}$ , θα ισχύει για κάθε συνιστώσα της στροφορμής  $\hat{L}_x, \hat{L}_y, \hat{L}_z$ . Καταλήγουμε λοιπόν στη σχέση

$$[\hat{H}, \hat{L}_i] = 0, \quad i \in x, y, z \quad (265)$$

Αλλά αυτή η σχέση σημαίνει ότι η στροφορμή είναι διατηρούμενο μέγεθος (βλ. εδάφιο 5.1). Επομένως, καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα: *Σε ισοτροπικά συστήματα, και ειδικότερα στην περίπτωση κεντρικού δυναμικού, η στροφορμή είναι διατηρούμενο μέγεθος.*

## 11.2 Κινητική ενέργεια και στροφορμή

Στο εδάφιο (11.1) καταλήξαμε στη διατήρηση της στροφορμής υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε ισοτροπικό σύστημα. Ένα κεντρικό δυναμικό είναι προφανώς ισοτροπικό, διότι εξαρτάται μόνο από την απόσταση από το κέντρο των αξόνων. Η κινητική ενέργεια είναι επίσης ισοτροπική, διότι εξαρτάται από το  $\hat{p}^2 = \hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\mathbf{p}}$ , το οποίο είναι εσωτερικό γινόμενο, επομένως μένει αναλλοίωτο σε στροφές στο χώρο.

Εδώ θα γράψουμε τον τελεστή της κινητικής ενέργειας σε άλλη μορφή, η οποία αναδεικνύει την εξάρτησή της από τη στροφορμή. Αυτό γίνεται σε αναλογία με την κλασική μηχανική, όπου χωρίζουμε το πρόβλημα του κεντρικού δυναμικού σε ακτινική και γωνιακή κίνηση, ορίζουμε την ακτινική συνιστώσα της ορμής,  $p_r = \mathbf{p} \cdot \mathbf{r}/r$  και γράφουμε την κινητική ενέργεια στη μορφή  $\frac{1}{2m}(p_r^2 + \frac{1}{r^2}L^2)$ , με  $L$  τη στροφορμή. Όμοια, εδώ ορίζουμε την ακτινική συνιστώσα της ορμής,

$$\hat{p}_r = \frac{1}{2} \left( \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r} \cdot \hat{\mathbf{p}} + \hat{\mathbf{p}} \cdot \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r} \right) \quad (266)$$

$$= -i\hbar \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r. \quad (267)$$

Η ποσότητα  $\hat{\mathbf{r}}/r$  είναι ο τελεστής που αντιστοιχεί στο μοναδιαίο διάνυσμα στην ακτινική κατεύθυνση. Λόγω του ότι η ορμή και η θέση δεν μετατίθενται, τόσο ο πρώτος όσο και ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους της (266) δεν είναι ερμιτιανοί τελεστές, όμως ο συμμετροποιημένος τελεστής  $\hat{p}_r$  είναι ερμιτιανός. Η μορφή (267) προκύπτει αν γράψουμε την (266) σε σφαιρικές συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη μορφή του  $\nabla$  που υπεισέρχεται στην ορμή. Η δράση του (267) σε κυματοσυνάρτηση  $\Psi(\mathbf{r})$  δίνει  $\hat{p}_r \Psi(r, \theta, \phi) = -i\hbar \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \Psi(r, \theta, \phi)]$ . Για την κινητική ενέργεια, που περιέχει το τετράγωνο της ορμής, θα χρειαστούμε τον τελεστή

$$\hat{p}_r^2 = -\hbar^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r \quad (268)$$

με δράση  $\hat{p}_r^2 \Psi(r, \theta, \phi) = -\hbar^2 \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} [r \Psi(r, \theta, \phi)]$ .<sup>(104)</sup>

Δεδομένου ότι  $\hat{p}^2 = -\hbar^2 \nabla^2$ , μπορούμε, με βάση τις εξ. (231) και (268) να γράψουμε

$$\hat{p}^2 = \hat{p}_r^2 + \frac{1}{r^2} \hat{L}^2. \quad (269)$$

Καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση για τον τελεστή κινητικής ενέργειας:

$$\hat{T} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 = \frac{1}{2m} \hat{p}_r^2 + \frac{1}{2mr^2} \hat{L}^2 \quad (270)$$

όπου ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους εξαρτάται μόνον από το  $r$  και ο δεύτερος μόνον από τις  $(\theta, \phi)$ . Αυτό είναι το κβαντικό ανάλογο της κλασικής έκφρασης στην οποία αναφερθήκαμε στην αρχή του εδαφίου.

Η έκφραση (270) είναι καλά ορισμένη παντού εκτός από την αρχή των αξόνων, λόγω του όρου  $1/r$  στο  $\hat{p}_r^2$  και του  $1/r^2$  που συνοδεύει το  $\hat{L}^2$ . Ως αποτέλεσμα, η δράση της σε κυματοσυνάρτηση (και ειδικότερα κατά την εύρεση ιδιοσυναρτήσεων της Χαμιλτονιανής) χρειάζεται έλεγχο στο όριο  $r \rightarrow 0$ .

Συνεπεία της έκφρασης (270) και του γεγονότος ότι ο όρος  $\hat{p}_r^2$  εξαρτάται μόνον από το  $r$ , ενώ η στροφορμή είναι ανεξάρτητη του  $r$ , καταλήγουμε στο συμπέρασμα

$$[\hat{T}, \hat{\mathbf{L}}] = [\hat{T}, \hat{L}^2] = 0. \quad (271)$$

το οποίο ειχαμε δικαιολογήσει στο εδάφιο 11.1 με βάση τη φυσική απαίτηση ισοτροπίας της κινητικής ενέργειας. Εάν η Χαμιλτονιανή περιέχει και κεντρικό δυναμικό, γράφεται

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}_r^2 + \frac{1}{2mr^2} \hat{L}^2 + V(r), \quad (272)$$

με αποτέλεσμα να μετατίθεται με κάθε συνιστώσα και με το τετράγωνο της στροφορμής:

$$[\hat{H}, \hat{L}^2] = [\hat{H}, \hat{L}_i] = 0, \quad i \in x, y, z. \quad (273)$$

### 11.3 Χωρισμός μεταβλητών και ακτινική εξίσωση

Η χρονικά ανεξάρτητη εξίσωση Schrödinger για σωματίδιο σε κεντρικό δυναμικό γράφεται πλέον στη μορφή

$$(\hat{T} + \hat{V})\Psi(r, \theta, \phi) = \left[ \frac{1}{2m} \hat{p}_r^2 + \frac{1}{2mr^2} \hat{L}^2 + V(r) \right] \Psi(r, \theta, \phi) = E \Psi(r, \theta, \phi). \quad (274)$$

<sup>(104)</sup> Σημειώνουμε ότι  $\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ .

Επιχειρούμε επίλυση με τη μέθοδο του διαχωρισμού μεταβλητών. Γράφοντας  $\Psi(r, \theta, \phi) = R(r)Y_{lm}(\theta, \phi)$ , η εξίσωση ιδιοτιμών γίνεται

$$\left[ \frac{1}{2m} \hat{p}_r^2 + \frac{1}{2mr^2} l(l+1)\hbar^2 + V(r) \right] R(r)Y_{lm}(\theta, \phi) = E R(r)Y_{lm}(\theta, \phi), \quad (275)$$

μια και ο τελεστής  $\hat{L}^2$  δρα μόνο στη συνάρτηση  $Y_{lm}(\theta, \phi)$ , δίνοντας την ιδιοτιμή  $l(l+1)\hbar^2$ . Από την άλλη, ο τελεστής  $\hat{p}_r^2$  δρα μόνο στην ακτινική συνάρτηση  $R(r)$ . Επομένως, η  $Y_{lm}$  απλοποιείται και λαμβάνουμε την *ακτινική εξίσωση* για την  $R(r)$  εξαρτώμενη από την ιδιοτιμή  $l$ , η οποία υπεισέρχεται ως παράμετρος και με την οποία στο εξής δεικτοδοτούμε την ακτινική συνάρτηση, γράφοντας  $R_l(r)$ :

$$\left[ \frac{1}{2m} \hat{p}_r^2 + \frac{1}{2mr^2} l(l+1)\hbar^2 + V(r) \right] R_l(r) = E R_l(r). \quad (276)$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση (268) για το  $\hat{p}_r^2$ , πολλαπλασιάζοντας με  $r$  και θέτοντας

$$u_l(r) = rR_l(r), \quad (277)$$

λαμβάνουμε

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{l(l+1)}{r^2} + V(r) \right] u_l(r) = E u_l(r). \quad (278)$$

Έχουμε λοιπόν μια εξίσωση για τη συνάρτηση  $u_l(r)$ , η οποία είναι φορμαλιστικά ίδια με τη μονοδιάστατη εξίσωση Schrödinger στο διάστημα  $(0, \infty)$ , εάν εκείνη είχε δυναμικό

$$V_{\text{eff}}(r) = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{l(l+1)}{r^2} + V(r). \quad (279)$$

Το  $V_{\text{eff}}(r)$  καλείται *ενεργό δυναμικό*. Ο όρος  $\frac{\hbar^2}{2m} \frac{l(l+1)}{r^2}$  είναι πάντα θετικός (ή μηδέν, για  $l = 0$ ) και καλείται *φυγοκεντρικό δυναμικό*, κατ' αναλογία προς την κλασική μηχανική. Απλοποιούμε περαιτέρω τη μορφή της εξίσωσης, θέτοντας  $k^2 = 2mE/\hbar^2$ :

$$\left[ -\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{l(l+1)}{r^2} + \frac{2m}{\hbar^2} V(r) \right] u_l(r) = k^2 u_l(r). \quad (280)$$

### Διερεύνηση της ακτινικής συνάρτησης για $r \rightarrow 0$

Διερευνούμε τη συμπεριφορά της λύσης για  $r \rightarrow 0$ , διότι η διαφορική εξίσωση δεν ορίζεται μεν στο  $r = 0$ , όμως η κυματοσυνάρτηση πρέπει να είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμη σε όλο το χώρο, μαζί με το  $r = 0$ . Κοντά στο  $r = 0$ , για τα δυναμικά που εξετάζουμε ( $V(r) \sim 1/r$  ή  $V(r) \rightarrow (\text{σταθ.})$  για  $r \rightarrow 0$ ), ο όρος του δυναμικού και ο όρος στο δεξιό μέλος γίνονται αμελητέοι σε σχέση με το φυγοκεντρικό δυναμικό (για  $l > 0$ ). Έχουμε



τότε

$$\left[ -\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{l(l+1)}{r^2} \right] u_l(r) = 0, \quad \text{για } r \rightarrow 0, \quad l \geq 1. \quad (281)$$

Εάν υποθέσουμε ότι  $u_l(r) \rightarrow r^s$ , καθώς  $r \rightarrow 0$ , μπορούμε να βρούμε τη σταθερά  $s$  με αντικατάσταση στην παραπάνω εξίσωση και να καταλήξουμε  $s(s-1) = l(l+1)$  με λύσεις  $s = l+1$  και  $s = -l$ . Εξετάζουμε την τετραγωνική ολοκληρωσιμότητα των λύσεων. Το ολοκλήρωμα της  $|\Psi|^2$  εντός μιας σφαίρας μικρής ακτίνας  $a$  κοντά στο μηδέν συμπεριφέρεται ως  $\int d^3r |\Psi|^2 \sim \int_0^a dr r^2 |R_l(r)|^2 = \int_0^a dr |u_l(r)|^2$ . Διακρίνουμε τις δύο περιπτώσεις

- Αν  $s = l+1$ , τότε  $\int_0^a dr |u_l(r)|^2 \sim \int_0^a dr r^{l+1} < \infty$ , δηλαδή έχουμε τετραγωνική ολοκληρωσιμότητα.
- Αν  $s = -l$ , τότε  $\int_0^a dr |u_l(r)|^2 \sim \int_0^a dr r^{-l} \rightarrow \infty$  (για  $l \geq 1$ ), δηλαδή δεν έχουμε τετραγωνικά ολοκληρώσιμη συνάρτηση, επομένως η λύση απορρίπτεται.

Για  $l = 0$ , το φυγοκεντρικό δυναμικό μηδενίζεται. Αν  $V(r) \rightarrow C = (\text{σταθ.})$  για  $r \rightarrow 0$ , έχουμε

$$u_0''(r) + q^2 u_0(r) = 0, \quad r \rightarrow 0, \quad l = 0, \quad (282)$$

όπου  $q^2 = 2m(E - C)/\hbar^2$ , με γραμμικά ανεξάρτητες λύσεις  $u_0 = \sin qr$  και  $u_0 = \cos qr$ , δηλαδή  $R_0(r) = \sin qr/(qr) \sim r^0$  και  $R_0(r) = \cos qr/(qr) \sim r^{-1}$ . Από αυτές, η πρώτη είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμη στο μηδέν, εφόσον τείνει σε μια σταθερά. Η δεύτερη είναι επίσης τετραγωνικά ολοκληρώσιμη, διότι  $\int d^2r |r^{-1}|^2 \sim \int_0^a dr r^2 r^{-2} = \int_0^a dr < \infty$ . Ωστόσο, η λύση  $r^{-1}$  δεν ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση του Schrödinger σε τρεις διαστάσεις στο ειδικό σημείο  $r = 0$ , διότι είναι γνωστό πως  $\nabla^2 r^{-1} = -4\pi\delta(\mathbf{r})$ . Άρα και πάλι δεχόμαστε μόνο λύσεις της μορφής  $u_0(r) \rightarrow r$ , δηλαδή  $R_0(r) \rightarrow r^0 = (\text{σταθ.})$ , για  $r \rightarrow 0$ .

Μια όμοια διερεύνηση για την περίπτωση  $V(r) \sim 1/r$  και  $l = 0$  δίνει  $u_0(r) \sim r$  άρα  $R_0(r) \sim r^0 = (\text{σταθ.})$ .

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, αν  $V(r) \rightarrow (\text{σταθ.})$  ή  $V(r) \rightarrow C/r$  για  $r \rightarrow 0$ , τότε οι αποδεκτές λύσεις έχουν την ασυμπτωτική συμπεριφορά

$$u_l(r) \sim r^{l+1} \quad \text{και} \quad R_l(r) \sim r^l, \quad r \rightarrow 0, \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (283)$$

### Διερεύνηση της ακτινικής συνάρτησης για $r \rightarrow \infty$ , αν $V(r) \rightarrow 0$

Διερευνούμε στη συνέχεια τη συμπεριφορά της λύσης ασυμπτωτικά, εάν το δυναμικό  $V(r) \rightarrow 0$  για  $r \rightarrow \infty$  (όπως είναι η περίπτωση του δυναμικού Coulomb ή του ελεύθερου σωματιδίου). Τότε η εξίσωση γράφεται  $u_l''(r) + k^2 u_l(r) = 0$ , που έχει ως γενική λύση

$$u_l(r) = k^{-1}(A \sin kr + B \cos kr) \quad \text{και} \quad R_l(r) = A \frac{\sin kr}{kr} + B \frac{\cos kr}{kr}, \quad r \rightarrow \infty, \quad (284)$$

όπου η σταθερά  $k^{-1}$  τέθηκε για διευκόλυνση αργότερα (θα μπορούσε να απορροφηθεί στα  $A$  και  $B$ ).

## 11.4 Η λύση για το ελεύθερο σωματίδιο

Η απλούστερη εφαρμογή των παραπάνω συμπερασμάτων γίνεται στην περίπτωση του ελεύθερου σωματιδίου,  $V(r) = 0$ . Η εξίσωση (280) γράφεται

$$\left[ -\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{l(l+1)}{r^2} \right] u_l(r) = k^2 u_l(r). \quad (285)$$

Ειδικά για  $l = 0$ , έχουμε  $u_0''(r) + k^2 u_0(r) = 0$  με γενική λύση την (284) σε όλο το διάστημα  $(0, \infty)$ . Εδώ, η συνοριακή συνθήκη (283) επιβάλλει να δεχτούμε μόνο τον όρο  $A \sin kr/(kr)$ , διότι συγχλίνει στο  $r \rightarrow 0$  ( $\sin kr/(kr) \rightarrow 1$ ), ενώ η λύση  $B \cos kr/(kr)$  αποκλίνει ως  $B/(kr)$  για  $r \rightarrow 0$  και απορρίπτεται (δηλ. πρέπει  $B = 0$ ).

Στη γενικότερη περίπτωση ( $l \geq 0$ ), οι λύσεις  $R_l(r) = u_l(r)/r$  που συγχλίνουν στο μηδέν (ικανοποιούν την 283) ονομάζονται *σφαιρικές συναρτήσεις Bessel* και παράγονται από τη σχέση<sup>(105)</sup>

$$R_l(r) = j_l(kr) = (-1)^l (kr)^l \left( \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} \right)^l \left( \frac{\sin kr}{kr} \right). \quad (286)$$

Οι λύσεις εξαρτώνται από το γινόμενο  $kr$ , διότι αν διαιρεθούν τα δύο μέλη της εξ. (285) με  $k^2$ , και κάνουμε την αλλαγή μεταβλητής  $\rho = kr$ ,  $k^{-2} \partial^2 / \partial r^2 = \partial^2 / \partial \rho^2$ , προκύπτει  $[-\partial^2 / \partial \rho^2 + l(l+1)/\rho^2] u_l = u_l$ , δηλαδή εξάρτηση της  $u_l$  μόνο από το γινόμενο  $\rho = kr$ .

Οι πρώτες μερικές συναρτήσεις Bessel είναι

$$\begin{aligned} j_0(kr) &= \frac{\sin kr}{kr} \\ j_1(kr) &= \frac{\sin kr}{(kr)^2} - \frac{\cos kr}{kr} \\ j_2(kr) &= \left( \frac{3}{(kr)^2} - \frac{1}{kr} \right) \sin kr - \frac{3}{(kr)^2} \cos kr \end{aligned} \quad (287)$$

Εξέταση των παραπάνω συναρτήσεων επιβεβαιώνει τη συμπεριφορά  $j_l(kr) \sim (kr)^l$  στο όριο  $kr \rightarrow 0$ . Πρόκειται για σφαιρικά κύματα μήκους κύματος  $2\pi/k$ .

Οι λύσεις του ελεύθερου σωματιδίου στην αναπαράσταση σφαιρικών κυμάτων, δηλαδή οι λύσεις σε σφαιρικές συντεταγμένες που είδαμε στο παρόν εδάφιο, πρέπει να συνδέονται με τις λύσεις επιπέδων κυμάτων που βρισκόμαστε σε καρτεσιανές συντεταγ-

<sup>(105)</sup>Βλ. π.χ. S. Gasiorowicz, *Κβαντική Φυσική*, εκδόσεις Κλειδάριθμος (2015), κεφ. 8.

μένες. Η σύνδεση γίνεται μέσω της ταυτότητας

$$e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} = 4\pi \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l i^l j_l(kr) Y_{lm}^*(\mathbf{k}) Y_{lm}(\mathbf{r}), \quad (288)$$

όπου υπονοείται πως λαμβάνονται η πολική και η αζιμουθιακή γωνία,  $\theta, \phi$ , του διανύσματος στο όρισμα των σφαιρικών αρμονικών.

## 11.5 Λύσεις δέσμιων καταστάσεων για το άτομο του Υδρογόνου

Το άτομο του Υδρογόνου χαρακτηρίζεται από το ελκτικό δυναμικό Coulomb

$$V(r) = -\frac{e^2}{r}, \quad (289)$$

όπου  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου.<sup>(106)(107)</sup> Δεδομένου ότι  $V(r) < 0$  και  $V(r) \rightarrow 0$  για  $r \rightarrow \infty$ , αναμένουμε ότι οι λύσεις αρνητικής ενέργειας θα αφορούν το άτομο του Υδρογόνου, δηλαδή ηλεκτρόνιο δεσμευμένο στο δυναμικό του πυρήνα, ενώ οι λύσεις θετικής ενέργειας θα αφορούν το σύστημα ηλεκτρονίου και πρωτονίου που αλληλεπιδρούν μεν αλλά τελικά απομακρύνονται μεταξύ τους, δηλαδή επί της ουσίας δεν αποτελούν άτομο Υδρογόνου. Αναζητούμε επομένως τις λύσεις της εξ. (278) για  $E < 0$ . Θέτουμε για συντομία

$$\kappa^2 = \frac{2m(-E)}{\hbar^2} > 0. \quad (290)$$

Τότε, η ακτινική εξίσωση παίρνει τη μορφή (280), με  $-\kappa^2$  στη θέση του  $k^2$ :

$$\left[ -\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{l(l+1)}{r^2} - \frac{2m e^2}{\hbar^2 r} \right] u_l(r) = -\kappa^2 u_l(r). \quad (291)$$

Ορίζουμε επίσης την ακτίνα Bohr,<sup>(108)</sup>

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} \approx 0,529\text{\AA}. \quad (292)$$

<sup>(106)</sup> Για υδρογονοειδή ιόντα ατομικού αριθμού  $Z$ , π.χ. το  $\text{He}^+$  με  $Z = 2$  ή το  $\text{Li}^{2+}$  με  $Z = 3$ , το δυναμικό γίνεται  $-Ze^2/r$  και η επίλυση είναι ουσιαστικά ίδια.

<sup>(107)</sup> Εδώ χρησιμοποιήθηκε το σύστημα μονάδων Gauss, στο οποίο το  $e^2$  έχει μονάδες [ενέργεια] $\times$ [μήκος]. Στο SI έχουμε  $V(r) = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r)$ , με  $\epsilon_0$  την ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού.

<sup>(108)</sup> Στο σύστημα SI, η ακτίνα Bohr είναι  $a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/(me^2)$ .

Διευκολυνόμεστε ορίζοντας τη νέα, αδιάστατη μεταβλητή

$$\rho = 2\kappa r, \quad (293)$$

οπότε η ακτινική εξίσωση γράφεται στην αδιάστατη μορφή

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} - \frac{l(l+1)}{\rho^2} + \frac{1}{\kappa a_0} \frac{1}{\rho} - \frac{1}{4} \right] u_l = 0. \quad (294)$$

Η ιδιοτιμή της ενέργειας περιέχεται στη σταθερά  $\kappa$ .

Ασυμπτωτικά στο μηδέν, ξέρουμε ήδη από το εδάφιο 11.3 ότι  $u_l(\rho) \sim \rho^{l+1}$ . Ασυμπτωτικά στο  $\rho \rightarrow \infty$ , οι όροι ανάλογοι του  $1/\rho^2$  και  $1/\rho$  μηδενίζονται, οπότε έχουμε  $u_l'' - \frac{1}{4}u_l = 0$ , η οποία έχει λύσεις τις  $u_l \sim e^{\pm\rho/2}$ . Από αυτές, μόνον η  $u_l \sim e^{-\rho/2}$  είναι αποδεκτή, διότι η  $u_l \sim e^{+\rho/2}$  οδηγεί σε μη τετραγωνικά ολοκληρώσιμη συνάρτηση. Γράφουμε λοιπόν τη λύση  $u_l$  ως γινόμενο τριών συναρτήσεων,

$$u_l(\rho) = \rho^{l+1} e^{-\rho/2} v_l(\rho), \quad (295)$$

όπου  $v_l(\rho)$  άγνωστη συνάρτηση προς προσδιορισμό. Αντικαθιστώντας στην (294) λαμβάνουμε την ακόλουθη εξίσωση για τη  $v_l$ :

$$\left[ \rho \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + (2l+2-\rho) \frac{\partial}{\partial \rho} - \left( l+1 - \frac{1}{\kappa a_0} \right) \right] v_l(\rho) = 0. \quad (296)$$

Επιχειρούμε ανάπτυγμα της λύσης σε σειρά:

$$v_l(\rho) = \sum_{j=0}^{\infty} b_j \rho^j \quad v_l'(\rho) = \sum_{j=1}^{\infty} b_j j \rho^{j-1} \quad v_l''(\rho) = \sum_{j=2}^{\infty} b_j j(j-1) \rho^{j-2}$$

Αντικαθιστώντας στην (296) και εξισώνοντας τους συντελεστές ομοβάθμιων όρων, καταλήγουμε στην αναδρομική σχέση

$$b_{j+1} = \frac{l+j+1 - (\kappa a_0)^{-1}}{(2l+2+j)(j+1)} b_j. \quad (297)$$

Για μεγάλες τιμές του  $j$  ( $j \gg l, j \gg (\kappa a_0)^{-1}$ ) η σχέση δίνει  $b_{j+1}/b_j \approx 1/(j+1)$ , δηλαδή  $b_j \sim 1/j!$ , ως ασυμπτωτική συμπεριφορά. Αλλά τότε, ασυμπτωτικά,  $v_l(\rho) \sim \sum_j \rho^j/j! = e^\rho$ . Αυτό σημαίνει ότι  $u_l(\rho) = \rho^{l+1} e^{-\rho/2} v_l(\rho) \sim e^{+\rho/2}$ , οπότε η  $u_l$  θα προέκυπτε μη κανονικοποιήσιμη. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση τερματισμού της σειράς σε κάποιο  $j$ , δηλαδή εκείνες οι τιμές του  $\kappa$  για τις οποίες συμβαίνει να μηδενίζεται ο αριθμητής

της (297) για κάποια τιμή  $j = n'$ . Τότε, η σειρά είναι ένα πολυώνυμο βαθμού  $n'$ :

$$v_l(\rho) = \sum_{j=0}^{n'} b_j \rho^j, \quad \text{για } (\kappa a_0)^{-1} = l + n' + 1. \quad (298)$$

Αυτή είναι η συνθήκη χβάντωσης, δηλαδή, η συνθήκη που καθορίζει τις φυσικά αποδεκτές, διακριτές τιμές του  $\kappa$  και επομένως της ενέργειας. Βάσει της (290), η συνθήκη γράφεται:

$$E = -\frac{\hbar^2}{2m} \kappa^2 = -\frac{\hbar^2}{2ma_0^2} \frac{1}{(l + n' + 1)}, \quad n' = 0, 1, 2, \dots \quad (299)$$

Ο ακέραιος  $n = l + n' + 1$  που εμφανίζεται στον παρονομαστή είναι κοινός για όλους τους συνδυασμούς των ακέραιων  $l \geq 0$ ,  $n' \geq 0$  που δίνουν άθροισμα θετικό ακέραιο. Αυτό σημαίνει εκφυλισμό ως προς τα  $l$ : στην ίδια τιμή ενέργειας, δεδομένης από τον ακέραιο δείκτη  $n \geq 1$ , αντιστοιχούν όλες οι τιμές  $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ . Επίσης υπάρχει εκφυλισμός ως προς τις δυνατές τιμές του  $m_l = -l, \dots, +l$ .<sup>(109)</sup> Λαμβάνοντας υπ' όψη τον ορισμό του  $a_0$ , οι ιδιοτιμές της ενέργειας γράφονται

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{a_0} \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad l = 0, 1, 2, \dots, n - 1, \quad m_l = -l, \dots, l \quad (300)$$

Ο εκφυλισμός της ενέργειας  $E_n$  είναι

$$\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{m=-l}^l 1 = \sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = n^2. \quad (301)$$

Ο ακέραιος  $n$  ονομάζεται *κύριος κβαντικός αριθμός*. Η θεμελιώδης στάθμη είναι η

$$E_1 = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{a_0} = -1\text{Ry} \approx -13,6 \text{ eV} \quad (302)$$

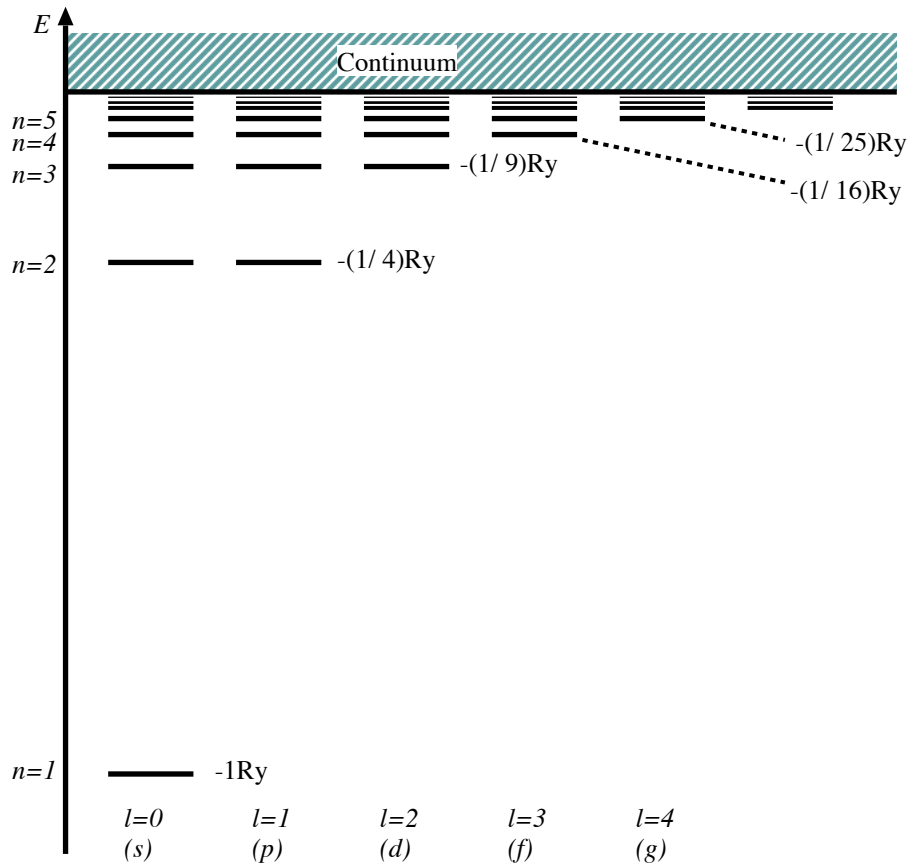
και είναι μη εκφυλισμένη.

Οι ακτινικές ιδιοσυναρτήσεις των δέσμιων καταστάσεων δίνονται από την (295), με τους συντελεστές του πολυώνυμου  $v_l(\rho)$  να ικανοποιούν την αναδρομική σχέση (297) και τη συνθήκη τερματισμού (298). Δεδομένου ότι  $n = l + n' + 1$ , η συνθήκη γράφεται ισοδύναμα

$$v_l(\rho) = \sum_{j=0}^{n-l-1} b_j \rho^j, \quad \text{για } (\kappa a_0)^{-1} = n = 1, 2, 3, \dots \quad (303)$$

Τα πολυώνυμα  $v_l(\rho)$  ονομάζονται *συναφή πολυώνυμα Laguerre* και, για δεδομένο  $n$ ,

<sup>(109)</sup> Ο κβαντικός αριθμός της ιδιοτιμής του  $\hat{L}_z$  συμβολίζεται εδώ με  $m_l$ , για να διαφοροποιηθεί από τη μάζα  $m$ .



Σχήμα 6: Αναπαράσταση του ενεργειακού φάσματος του ατόμου του Υδρογόνου. Παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές της ενέργειας  $E_n$  σε σχέση με τον κύριο κβαντικό αριθμό  $n = 1, 2, 3, \dots$  και τον δευτερεύοντα κβαντικό αριθμό της στροφορμής  $l = 0, 1, 2, \dots$ . Για κάθε ζεύγος  $(n, l)$  υπάρχει εκφυλισμός τάξης  $(2l + 1)$  λόγω του μαγνητικού κβαντικού αριθμού  $m$ . Η θεμελιώδης στάθμη είναι η  $E_1 = -1Ry \approx -13,6 \text{ eV}$ . Για  $E > 0$  έχουμε το συνεχές ενεργειακό φάσμα των καταστάσεων εκέδασης.

λαμβάνουν τη μορφή<sup>(110)</sup>

$$v_l(\rho) = L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) = \sum_{j=0}^{n-l-1} (-1)^j \frac{(n-l-1)! (2l+1)!}{(n-l-1-j)! (2l+1+j)! j!} \rho^j. \quad (304)$$

Η ακτινική συνάρτηση  $u_l = rR_l$  έχει  $n-l-1$  κόμβους για  $r > 0$ , ίδια τιμή με το βαθμό του πολυωνύμου  $v_l$ . (Υπάρχει και ένας επιπλέον μηδενισμός στο  $r = 0$  λόγω του όρου  $r^{l+1}$ .)<sup>(111)</sup>

Η θεμελιώδης κατάσταση είναι η  $\Psi_{1,0,0} = R_{1,0}Y_{00}$  (όπου η  $Y_{00} = 1/\sqrt{4\pi}$  δεν έχει εξάρτηση από τις γωνίες), με

$$R_{1,0} = 2(a_0)^{-3/2} e^{-r/a_0}, \quad (305)$$

όπου συμπεριλάβαμε και τη σταθερά κανονικοποίησης. Από αυτήν προκύπτουν οι μέσες τιμές σχετιζόμενες με την απόσταση  $r$  του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα:

$$\begin{aligned} \langle r \rangle_{1,0} &= \int_0^\infty dr r^2 R_{1,0}^2(r) r = \frac{3}{2} a_0 \\ \langle r^2 \rangle_{1,0} &= 3 a_0^2 \\ (\Delta r)^2 &= \langle r^2 \rangle_{1,0} - \langle r \rangle_{1,0}^2 = \frac{3}{4} a_0^2 \\ \left\langle \frac{1}{r} \right\rangle_{1,0} &= \frac{1}{a_0} \end{aligned} \quad (306)$$

Από την τελευταία έκφραση φαίνεται ότι η δυναμική ενέργεια της θεμελιώδους στάθμης είναι, κατά μέση τιμή, ίδια με τη δυναμική ενέργεια κλασικού ηλεκτρονίου σε απόσταση  $a_0$ :  $\langle V \rangle_{1,0} = -e^2/a_0$ .

Κλείνοντας, σημειώνουμε ότι οι ιδιοσυναρτήσεις και ιδιοτιμές ενέργειας υδρογονοειδών ατόμων, δηλαδή ιόντων με ατομικό αριθμό  $Z > 1$  αλλά μόνον ένα ηλεκτρόνιο, δίνονται από τους ίδιους τύπους με την αντικατάσταση  $e^2 \rightarrow Ze^2$  (η αντικατάσταση πρέπει να γίνει και στον ορισμό της ακτίνας Bohr  $a_0$ , εξ. (292)).

<sup>(110)</sup>Τα συναφή πολυώνυμα Laguerre δίνονται σε διαφορετικές, ισοδύναμες μορφές από διαφορετικούς συγγραφείς. Για τη μορφή που παρουσιάζεται εδώ, βλ. A. Messiah, *Quantum Mechanics*, Vol. I, North Holland (1991).

<sup>(111)</sup>Η ακόλουθη ονοματολογία υιοθετείται στη φασματοσκοπία: οι κβαντικοί αριθμοί  $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  συμβολίζονται με  $s, p, d, f, g, h$ , αντίστοιχα. Οι καταστάσεις με κβαντικούς αριθμούς  $(n, l)$  συμβολίζονται ως  $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d$ , κλπ.

## 11.6 Το άτομο του Υδρογόνου ως σύστημα δύο χβαντικών σωματιδίων

Το άτομο του Υδρογόνου αντιμετωπίστηκε στο εδάφιο 11.5 ως ένα χβαντικό σωματίδιο (ηλεκτρόνιο) σε δυναμικό Coulomb. Αυτή είναι μια καλή προσέγγιση, μια και η μάζα του πυρήνα (μάζα πρωτονίου) είναι περίπου 1836 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου. Ωστόσο, στην πραγματικότητα πρόκειται για δύο χβαντικά σωματίδια σε αλληλεπίδραση. Εδώ, θα δούμε πώς μπορεί να γίνει ακριβέστερη αντιμετώπιση του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη αυτό το γεγονός.

Ας θεωρήσουμε το σύστημα των δύο σωματιδίων, πυρήνα, με χωρικές συντεταγμένες θέσης  $\mathbf{r}_N$  και μάζα  $m_N$ , και ηλεκτρονίου, με χωρικές συντεταγμένες θέσης  $\mathbf{r}_e$  και μάζα  $m_e$ . Ο χώρος των καταστάσεων του συστήματος είναι εκείνος των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων κυματοσυναρτήσεων έξι μεταβλητών (τριών από την  $\mathbf{r}_N$  και τριών από την  $\mathbf{r}_e$ ):

$$\Psi(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) \in \mathbb{C}, \text{ με } \int d^3r_N \int d^3r_e |\Psi(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e)|^2 = 1. \quad (307)$$

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται κατά γενίκευση της περίπτωσης του ενός σωματιδίου από τη σχέση

$$(\Psi_1, \Psi_2) = \int d^3r_N \int d^3r_e \Psi_1^*(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) \Psi_2(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) \quad (308)$$

Ο χώρος των καταστάσεων παράγεται από γινόμενα κυματοσυναρτήσεων ενός σωματιδίου. Δηλαδή, αν  $\Psi_N(\mathbf{r}_N)$  μια κυματοσυνάρτηση του πυρήνα εάν το ηλεκτρόνιο απουσιάζει, και  $\Psi_e(\mathbf{r}_e)$  μια κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου εάν ο πυρήνας απουσιάζει, τότε τα γινόμενα του τύπου

$$\Psi_{\text{prod}}(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) = \Psi_N(\mathbf{r}_N)\Psi_e(\mathbf{r}_e) \quad (309)$$

είναι κυματοσυναρτήσεις του συστήματος των δύο σωματιδίων. Όμως, μπορεί κανείς να πάρει γραμμικούς συνδυασμούς, πεπερασμένων ή άπειρων σε αριθμό όρων, από κυματοσυναρτήσεις γινόμενα και να κατασκευάσει νέες κυματοσυναρτήσεις του συστήματος με τη μορφής

$$\Psi(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) = \sum_n a_n \Psi_{\text{prod},n}(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) = \sum_{i,j} a_{ij} \Psi_{N,i}(\mathbf{r}_N)\Psi_{e,j}(\mathbf{r}_e) \quad (310)$$

οι οποίες δεν είναι παραγοντοποιήσιμες, δηλαδή δεν μπορούν γενικά να γραφούν ως ένα γινόμενο από δύο κυματοσυναρτήσεις, μία του πυρήνα και μία του ηλεκτρονίου. Ωστόσο, οποιαδήποτε κυματοσυνάρτηση του συστήματος δύο σωματιδίων, παραγοντοποιήσιμη ή μη, μπορεί να γραφεί ως τέτοιος γραμμικός συνδυασμός.



Η ορμή του πυρήνα και του ηλεκτρονίου δίνονται, αντίστοιχα, από τους τελεστές

$$\hat{\mathbf{p}}_N = -i\hbar\nabla_N \quad \text{και} \quad \hat{\mathbf{p}}_e = -i\hbar\nabla_e \quad (311)$$

όπου  $\nabla_N$  ο τελεστής παραγώγισης ως προς τις συντεταγμένες του πυρήνα,

$$\nabla_N = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x_N} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y_N} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z_N}, \quad (312)$$

και όμοια  $\nabla_e$  ο τελεστής παραγώγισης ως προς τις συντεταγμένες του ηλεκτρονίου.

Η Χαμιλτονιανή του συστήματος δίνεται από την κινητική ενέργεια του κάθε σωματιδίου συν την ενέργεια αλληλεπίδρασης,

$$\begin{aligned} \hat{H} &= \frac{1}{2m_N} \hat{p}_N^2 + \frac{1}{2m_e} \hat{p}_e^2 + V(|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N|) \\ &= -\frac{\hbar^2}{2m_N} \nabla_N^2 - \frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_e^2 + V(|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N|). \end{aligned} \quad (313)$$

Στην τετριμμένη περίπτωση απουσίας αλληλεπίδρασης,  $V(|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N|) = 0$ , η χρονικά ανεξάρτητη εξίσωση Schrödinger προσφέρεται για χωρισμό μεταβλητών, οπότε η ιδιοσυναρτήσεις της  $\hat{H}$  γράφονται στη μορφή (309):

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m_N} \nabla_N^2 - \frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_e^2 \right) \Psi_N(\mathbf{r}_N) \Psi_e(\mathbf{r}_e) = E \Psi_N(\mathbf{r}_N) \Psi_e(\mathbf{r}_e) \quad (314)$$

η οποία ξαναγράφεται

$$-\frac{1}{\Psi_N(\mathbf{r}_N)} \frac{\hbar^2}{2m_N} \nabla_N^2 \Psi_N(\mathbf{r}_N) - \frac{1}{\Psi_e(\mathbf{r}_e)} \frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_e^2 \Psi_e(\mathbf{r}_e) = E \quad (315)$$

Ο μόνος τρόπος να είναι το άθροισμα των δύο όρων του αριστερού μέλους σταθερό ( $E$ ) για κάθε τιμή των  $\mathbf{r}_N$  και  $\mathbf{r}_e$ , είναι να είναι ο κάθε όρος ίσος με μια σταθερά. Άρα:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\Psi_N(\mathbf{r}_N)} \frac{\hbar^2}{2m_N} \nabla_N^2 \Psi_N(\mathbf{r}_N) &= E_N \\ -\frac{1}{\Psi_e(\mathbf{r}_e)} \frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_e^2 \Psi_e(\mathbf{r}_e) &= E_e \end{aligned} \quad (316)$$

με  $E_N + E_e = E$ . Η λύση αυτών των εξισώσεων είναι

$$\begin{aligned} \Psi_N(\mathbf{r}_N) &= \exp(i\mathbf{k}_N \cdot \mathbf{r}_N) \\ \Psi_e(\mathbf{r}_e) &= \exp(i\mathbf{k}_e \cdot \mathbf{r}_e) \end{aligned} \quad (317)$$

υπό τις συνθήκες  $\mathbf{k}_N^2 = 2m_N E_N / \hbar^2$  και  $\mathbf{k}_e^2 = 2m_e E_e / \hbar^2$ . Δηλαδή, απουσία δυναμι-

κού αλληλεπίδρασης, οι ειδικές λύσεις είναι επίπεδα κύματα και η γεννική λύση είναι επαλληλία επιπέδων κυμάτων ίδιας ενέργειας.

Αν  $V(|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N|) \neq 0$ , ο χωρισμός μεταβλητών του τύπου (309) δεν είναι δυνατός εν γένει. Όμως, χάρη στην εξάρτηση του δυναμικού από τη διαφορά  $\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N$ , το πρόβλημα προσφέρεται για ένα μετασχηματισμό σε νέο σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο είναι δυνατός ο χωρισμός μεταβλητών. Το νέο σύστημα είναι οι συντεταγμένες κέντρου μάζας,  $\mathbf{R}$ , και σχετικής θέσης,  $\mathbf{r}$ :

$$\begin{aligned}\mathbf{R} &= \frac{m_N \mathbf{r}_N + m_e \mathbf{r}_e}{m_N + m_e} = \frac{m_N}{M} \mathbf{r}_N + \frac{m_e}{M} \mathbf{r}_e \\ \mathbf{r} &= \mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N.\end{aligned}\quad (318)$$

Ορίζουμε την ολική μάζα του συστήματος,  $M$ , και την ανηγμένη μάζα, (*reduced mass*)  $m$ , ως

$$\begin{aligned}M &= m_N + m_e \\ m &= \frac{m_N m_e}{m_N + m_e}.\end{aligned}\quad (319)$$

Η ανηγμένη μάζα γράφεται και ως

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_N} + \frac{1}{m_e}\quad (320)$$

και, λόγω του ότι  $m_N \approx 1836 m_e$ , είναι λίγο μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου ( $m \approx 0,99946 m_e$ ).

Ως προς τις νέες συντεταγμένες (318) ορίζονται οι αντίστοιχοι τελεστές παραγωγής:  $\nabla_{\text{CM}}$  ως προς τις συντεταγμένες κέντρου μάζας και  $\nabla$  ως προς τις σχετικές συντεταγμένες. Μπορούμε να βρούμε τις αντίστοιχες εκφράσεις αν αντιστρέψουμε τις σχέσεις (318), εκφράζοντας τα  $\mathbf{R}$  και  $\mathbf{r}$  συναρτήσει των  $\mathbf{r}_N$  και  $\mathbf{r}_e$ , και χρησιμοποιώντας τον κανόνα αλυσίδας στην παραγωγή. Για την  $\nu$ -οστή συνιστώσα του  $\nabla_{\text{CM}}$  έχουμε

$$(\nabla_{\text{CM}})_\nu = \frac{\partial}{\partial R_\nu} = \sum_{\nu'} \left[ \frac{\partial r_{N,\nu'}}{\partial R_\nu} \frac{\partial}{\partial r_{N,\nu'}} + \frac{\partial r_{e,\nu'}}{\partial R_\nu} \frac{\partial}{\partial r_{e,\nu'}} \right].\quad (321)$$

Για το  $\nabla$  έχουμε την ίδια σχέση, μόνο με το  $r_\nu$  στη θέση του  $R_\nu$ . Με βάση τους νέους τελεστές παραγωγής, ορίζουμε τη συζυγή ορμή ως προς  $\mathbf{R}$  και ως  $\mathbf{r}$ :

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{CM}} = -i\hbar\nabla_{\text{CM}} \quad \text{και} \quad \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\nabla\quad (322)$$

Προκύπτει η ακόλουθη σχέση μεταξύ των τελεστών ορμής στις αρχικές και στις νέες

συντεταγμένες:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{P}}_{\text{CM}} &= \hat{\mathbf{p}}_N + \hat{\mathbf{p}}_e \\ \hat{\mathbf{p}} &= \frac{m_N \hat{\mathbf{p}}_e - m_e \hat{\mathbf{p}}_N}{m_N + m_e} = \frac{m}{m_e} \hat{\mathbf{p}}_e - \frac{m}{m_N} \hat{\mathbf{p}}_N\end{aligned}\quad (323)$$

Δηλαδή,  $\hat{\mathbf{P}}_{\text{CM}}$  είναι η ολική ορμή του συστήματος και  $\hat{\mathbf{p}}$  ένα σταθμισμένο άθροισμα ορμών των δύο σωματιδίων. Δεδομένου ότι  $m \approx m_e$  και  $m \ll m_N$ , αναμένουμε η ορμή  $\hat{\mathbf{p}}$  να είναι σχεδόν ίση με την ορμή του ηλεκτρονίου, σε σύστημα αναφοράς όπου το κέντρο μάζας είναι ακίνητο.

Από τον ορισμό (311) προκύπτουν οι σχέσεις μετάθεσης θέσης-ορμής για το ηλεκτρόνιο και τον πυρήνα:

$$[\hat{r}_{N,\mu}, \hat{p}_{N,\nu}] = i\hbar\delta_{\mu\nu} \quad [\hat{r}_{e,\mu}, \hat{p}_{e,\nu}] = i\hbar\delta_{\mu\nu}\quad (324)$$

και οι υπόλοιποι μεταθέτες μεταξύ θέσεων, μεταξύ ορμών, και μεταξύ τελεστών θέσης/ορμής του πυρήνα και τελεστών ορμής/θέσης του ηλεκτρονίου μηδενίζονται. Από αυτές τις σχέσεις μετάθεσης, μαζί με τον ορισμό (322) ή, εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (323) και εφαρμόζοντας κανόνες μεταθετών, καταλήγουμε στις σχέσεις μετάθεσης θέσης-ορμής για το σύστημα κέντρου μάζας και σχετικής κίνησης. Βρίσκουμε

$$[\hat{R}_\mu, \hat{P}_{\text{CM},\nu}] = i\hbar\delta_{\mu\nu} \quad [\hat{r}_\mu, \hat{p}_\nu] = i\hbar\delta_{\mu\nu}\quad (325)$$

και οι υπόλοιποι μεταθέτες μεταξύ θέσεων, μεταξύ ορμών, και μεταξύ τελεστών θέσης/ορμής του συστήματος κέντρου μάζας και τελεστών ορμής/θέσης του συστήματος σχετικής κίνησης μηδενίζονται.

Προκύπτουν, επίσης, οι ακόλουθες σχέσεις

$$m_N m_e = M m\quad (326)$$

$$\frac{1}{2m_N} \hat{p}_N^2 + \frac{1}{2m_e} \hat{p}_e^2 = \frac{1}{2M} \hat{P}_{\text{CM}}^2 + \frac{1}{2m} \hat{p}^2\quad (327)$$

$$\hat{\mathbf{L}}_N + \hat{\mathbf{L}}_e = \hat{\mathbf{L}} + \hat{\mathbf{I}},\quad (328)$$

όπου ορίσαμε τη στροφορμή για κάθε επιμέρους σύστημα (πυρήνα, ηλεκτρονίου, κέντρου μάζας και σχετικής κίνησης):

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{L}}_N &= \mathbf{r}_N \times \hat{\mathbf{p}}_N, & \hat{\mathbf{L}}_e &= \mathbf{r}_N \times \hat{\mathbf{p}}_e \\ \hat{\mathbf{L}} &= \hat{\mathbf{R}} \times \hat{\mathbf{P}}_{\text{CM}}, & \hat{\mathbf{I}} &= \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{p}}.\end{aligned}\quad (329)$$

Με βάση τα προηγούμενα, η Χαμιλτονιανή του συστήματος μετασχηματίζεται στις

νέες μεταβλητές ως εξής:

$$\begin{aligned}\hat{H} &= \frac{1}{2m_N}\hat{p}_N^2 + \frac{1}{2m_e}\hat{p}_e^2 + V(|\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_N|) \\ &= \frac{1}{2M}\hat{P}_{\text{CM}}^2 + \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + V(r).\end{aligned}\quad (330)$$

Σε αυτή τη μορφή της Χαμιλτονιανής, η χρονικά ανεξάρτητη εξίσωση του Schrödinger προσφέρεται για χωρισμό μεταβλητών ως προς τις νέες μεταβλητές,  $\mathbf{R}$  και  $\mathbf{r}$ . Θέτοντας για την ιδιοσυνάρτηση της Χαμιλτονιανής

$$\Psi(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_e) \rightarrow \Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}) = \Phi(\mathbf{R})\phi(\mathbf{r}), \quad (331)$$

η εξίσωση ιδιοτιμών γράφεται

$$\begin{aligned}\hat{H}\Psi &= \left( \frac{1}{2M}\hat{P}_{\text{CM}}^2 + \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + V(r) \right) \Phi(\mathbf{R})\phi(\mathbf{r}) \\ &= \phi(\mathbf{r})\frac{1}{2M}\hat{P}_{\text{CM}}^2\Phi(\mathbf{R}) + \Phi(\mathbf{R})\frac{1}{2m}\hat{p}^2\phi(\mathbf{r}) + V(r)\phi(\mathbf{r}) \\ &= E\Phi(\mathbf{R})\phi(\mathbf{r}).\end{aligned}\quad (332)$$

Προκύπτουν λοιπόν δύο ανεξάρτητες εξισώσεις, μία για το σύστημα κέντρου μάζας και μία για τη σχετική κίνηση:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2M}\hat{P}_{\text{CM}}^2\Phi(\mathbf{R}) &= E_{\text{CM}}\Phi(\mathbf{R}) \\ \frac{1}{2m}\hat{p}^2\phi(\mathbf{r}) + V(r)\phi(\mathbf{r}) &= E_{\text{H}}\phi(\mathbf{r})\end{aligned}\quad (333)$$

με  $E = E_{\text{CM}} + E_{\text{H}}$  την ολική ενέργεια. Η πρώτη των εξισώσεων έχει τις γνωστές λύσεις επίπεδων κυμάτων,

$$\Phi(\mathbf{R}) = \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{R}), \quad K^2 = 2ME_{\text{CM}}/\hbar^2, \quad (334)$$

και αντιστοιχεί στην ελεύθερη κίνηση του ατόμου. Η δεύτερη εξίσωση είναι πανομοιότυπη με την εξίσωση σωματιδίου σε κεντρικό δυναμικό  $V(r)$  και ισοδύναμη με την εξίσωση (274), με τη διαφορά ότι εδώ εμφανίζεται η ανηγμένη μάζα στη θέση της μάζας του σωματιδίου. Εάν το δυναμικό είναι αυτό του ατόμου του Υδρογόνου, τότε οι λύσεις της είναι πανομοιότυπες με αυτές που γράψαμε για το άτομο του Υδρογόνου, με την ανηγμένη μάζα να εμφανίζεται στη θέση της μάζας του ηλεκτρονίου. Από την εξ. (300) βλέπουμε πως οι ιδιοτιμές της ενέργειας είναι ευθέως ανάλογες της μάζας, επομένως τα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης (διαφορά ενέργειας μεταξύ σταθμών) διαμορφώνονται αντίστοιχα. Ωστόσο, η μεταβολή είναι μικρή, δεδομένου ότι  $m \approx 0,99946 m_e$ .

Στην περίπτωση του Δευτερίου (με ένα νετρόνιο και ένα πρωτόνιο στον πυρήνα, δηλαδή μάζα πυρήνα περίπου διπλάσια αυτής του ατόμου Υδρογόνου), η διαφορά είναι ακόμα μικρότερη: εκεί,  $m \approx 0,99973 m_e$ .

# Ευρετήριο

- άτομο
  - Υδρογόνου, 120
  - υδρογονοειδές, 124
- άτομο Υδρογόνου
  - εκφυλισμός ενέργειας, 122
  - ιδιοτιμές ενέργειας, 122
  - θεμελιώδης κατάσταση, 124
- ακτινική εξίσωση, 117
- αναπαράσταση
  - ορμής, 57
  - θέσης, 57
- ανηγμένη μάζα, 127
- ανισότητα Cauchy-Schwarz, 8
- αρχή
  - της αβεβαιότητας, 19
  - της απροσδιοριστίας, 19
  - της επαλληλίας, 15
- αρμονικός ταλαντωτής, 92
- αξίωμα προβολής, 16
- δυναμικό
  - ενεργό, 117
  - φυγοκεντρικό, 117
- εκφυλισμός, 49
- επίπεδα κύματα, 51
- ερμηνεία άγνοιας, 15
- εσωτερικό γινόμενο, 7
- εξίσωση συνέχειας, 47
- εξίσωση του Schrödinger
  - χρονικά ανεξάρτητη, 50
  - χρονικά εξαρτώμενη, 43
- ιδιοκατάσταση, 11
- ιδιοσυνάρτηση
  - γενικευμένη, 56
  - ιδιοτιμή, 11
  - κανονικοποίηση, 5
  - κατάσταση
    - βασική, 68
    - θεμελιώδης, 68
  - κατανομή πιθανότητας, 5
  - καταστάσεις
    - δέσμιες, 65
    - εκφυλισμένες, 17, 49
    - χβαντικές, 5
    - σκέδασης, 70
  - κυματοπακέτο, 52
  - κυματοσυνάρτηση, 5
    - τετραγωνικά ολοκληρώσιμη, 5
  - μέση τιμή, 6
  - μεγέθη
    - ασύμβατα, 14
    - διατηρούμενα, 46
    - κανονικά συζυγή, 14
    - μετρήσιμα, 5, 7
    - συμβατά, 14
  - μεταθέτης, 14
  - νόρμα, 8
  - ορθογώνιες κυματοσυναρτήσεις, 8
  - ορθοκανονική βάση, 28
  - πιθανότητα μετάβασης, 17
  - πλάτος
    - ανάκλασης, 73
    - διέλευσης, 73
  - πλάτος μετάβασης, 17
  - πλήρες σύστημα μετατιθέμενων μεγεθών,  
18
  - πολυώνυμα
    - Hermite, 94

Laguerre, 122  
Legendre, 109  
πυκνότητα πιθανότητας, 5  
ρεύμα πιθανότητας, 47  
ροπές κατανομής, 9  
σχέση  
    διασποράς, 52  
    πληρότητας, 29  
    του Ehrenfest, 45  
σφαιρικές αρμονικές, 110  
σφαιρικές συναρτήσεις Bessel, 119  
στάθμη  
    βασική, 68  
    θεμελιώδης, 68  
στροφορμή, 104  
συλλογή, 9  
συνάρτηση  $\delta$ , 85  
συντονισμός σκέδασης, 74  
τελεστής  
    αντιστροφής χώρου, 64  
    αρίθμησης, 98  
    δημιουργίας, 95  
    ερμιτιανός, 7  
    ερμιτιανός συζυγής, 35  
    καταστροφής, 95  
    μοναδιαίος, 36  
    ομοτιμίας, 63  
    ορμής, 6  
    προβολικός, 10  
    θέσης, 6  
τυπική απόλιση, 11  
θεώρημα  
    virial, 61  
φάση, 6  
φαινόμενο σήραγγας, 79  
χώρος Hilbert, 28  
χαμιλτονιανή, 43