

Το πρόβλημα της μέτρησης στην κβαντική φυσική

Τρία αιτήματα

1. Η κυματο-συνάρτηση ενός συστήματος είναι πλήρης, δηλ. η κυματο-συνάρτηση προσδιορίζει (έμμεσα ή άμεσα) όλες τις φυσικές ιδιότητες ενός συστήματος.
2. Η κυματο-συνάρτηση εξελίσσεται πάντοτε σύμφωνα με μια γραμμική δυναμική εξίσωση (π.χ., την εξίσωση του Schroedinger).
3. Οι μετρήσεις έχουν πάντα ένα καθορισμένο αποτέλεσμα, δηλ., στο τέλος της μέτρησης η συσκευή μέτρησης δίνει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα (π.χ., σπιν πάνω ή σπιν κάτω).

Τα τρία αυτά αιτήματα είναι ασύμβατα μεταξύ τους. Άρα κάποιο πρέπει να θυσιαστεί.

Γιατί είναι ασύμβατα;

Απόδειξη: ηλεκτρόνιο με σπιν 'πάνω' στην κατεύθυνση z και μετρητική συσκευή που μετρά το σπιν. Η συσκευή είναι έτσι προετοιμασμένη ώστε εάν το ηλεκτρόνιο έχει σπιν 'πάνω' στη z, τότε η συσκευή θα δείξει, με βεβαιότητα, σπιν 'πάνω' (και αντίστοιχα για το 'κάτω').

$$|z\text{-πάνω}\rangle_e \otimes |\text{έτοιμη}\rangle_\delta \rightarrow |z\text{-πάνω}\rangle_e \otimes |\text{'πάνω'}\rangle_\delta$$

$$|z\text{-κάτω}\rangle_e \otimes |\text{έτοιμη}\rangle_\delta \rightarrow |z\text{-κάτω}\rangle_e \otimes |\text{'κάτω'}\rangle_\delta$$

Τι συμβαίνει εάν το ηλεκτρόνιο είναι σε μια ιδιοκατάσταση του σπιν στην x;

$$|x\text{-πάνω}\rangle_e = 1/\sqrt{2} |z\text{-πάνω}\rangle_e + 1/\sqrt{2} |z\text{-κάτω}\rangle_e$$

Η S = $(1/\sqrt{2} |z\text{-πάνω}\rangle + 1/\sqrt{2} |z\text{-κάτω}\rangle) \otimes |\text{έτοιμη}\rangle_\delta$ σε τι θα εξελιχθεί;

Εάν το αίτημα 2 είναι ορθό, τότε η ανωτέρω αρχική κατάσταση S θα εξελιχθεί στην

$$S^* = 1/\sqrt{2} |z\text{-πάνω}\rangle \otimes |\text{'πάνω'}\rangle_\delta + 1/\sqrt{2} |z\text{-κάτω}\rangle \otimes |\text{'κάτω'}\rangle_\delta$$

Αλλά τι είδους κατάσταση είναι αυτή;

Εάν το αίτημα 1 είναι ορθό, η S* πρέπει να είναι πλήρης, δηλ. πρέπει να προσδιορίζει κάθε φυσικό γεγονός για την συσκευή μέτρησης. Αλλά, απλοί λόγοι συμμετρίας, δείχνουν ότι η S* δεν περιγράφει την συσκευή μέτρησης στην πάνω αλλά όχι στην κάτω κατάσταση (και αντίστροφα). Άρα, αν τα 1 και 2 είναι ορθά, τότε το αίτημα τρία δεν ικανοποιείται. Εάν τα 1 και 2 είναι ορθά, τότε μετρήσεις z-σπιν σε ηλεκτρόνια με x-σπιν ιδιοκαταστάσεις δεν έχουν καθορισμένο αποτέλεσμα.

Τρεις προφανείς τρόποι να βγούμε από το αδιέξοδο.

1. Να αρνηθούμε το αίτημα 1. Θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών (καλύτερα, θεωρίες πρόσθετων μεταβλητών). Υπάρχουν στοιχεία πραγματικότητας που δεν αντιπροσωπεύονται στην κυματο-συνάρτηση. Πχ. Η θεωρία του Bohm

2. Να αρνηθούμε το αίτημα 2. Θεωρίες ‘αναγωγής’ (collapse). Η εξέλιξη της κυματο-συνάρτησης δεν είναι πάντα γραμμική—υπάρχουν μη γραμμικές εξελίξεις που ανάγουν το κυματοπακέτο. Πχ. Κλασική θεωρία της Κοπεγχάγης. Αλλά επίσης η θεωρία του Αυθόρμητου Εντοπισμού (Spontaneous Localisation) από τους Ghirardi, Rimini και Weber.
3. Να αρνηθούμε το αίτημα 3. Θεωρίες των πολλών κόσμων του Everett. Η συσκευή μέτρησης δείχνει και τα δύο αποτελέσματα, αλλά σε διαφορετικούς κόσμους.

Προβλήματα:

Άρνηση του 1. Ποιες είναι οι επιπρόσθετες μεταβλητές και ποιοι νόμοι τις διέπουν (π.χ η εξίσωση του Bohm).

Προσθήκη νέας φυσικής θεωρίας.

Άρνηση του 2. Πότε η εξέλιξη είναι γραμμική και πότε δεν είναι. Η ορθόδοξη ερμηνεία αφήνει το θέμα ανοιχτό: η αναγωγή απλά συμβαίνει. Άρα η εξέλιξη είναι γραμμική εκτός εάν δεν είναι.

Ξανά προσθήκη νέας φυσικής θεωρίας.

Άρνηση του 3. Γιατί φαίνεται ότι μετρήσεις έχουν καθορισμένο αποτέλεσμα, ή γιατί φαίνεται ότι φαίνεται ότι οι μετρήσεις έχουν καθορισμένο αποτέλεσμα;

Μια διέξοδος; Η ερμηνεία του συνόλου (ensemble). Η κυματο-συνάρτηση δεν περιγράφει εξατομικευμένα συστήματα αλλά μάλλον στατιστικά σύνολα. (Μισά από αυτά δείχνουν ‘σπιν πάνω’ και μισά ‘σπιν κάτω’. Αλλά, στη ουσία η προσέγγιση αυτή αρνείται το αίτημα 1.

Μερικές παρατηρήσεις

1. Τι συνεπάγονται όλα αυτά για τον ρεαλισμό; Όχι πολλά. Όλες οι ερμηνείες επιδέχονται ρεαλιστικής εξήγησης. Σε κάθε περίπτωση, αν ο κόσμος είναι όπως τον περιγράφει μια συγκεκριμένη ερμηνεία, τότε ο ρεαλιστής πρέπει να την αποδεχθεί.
2. Επιβάλλονται ακραίες αντι-ρεαλιστικές ερμηνείες της κβαντικής φυσικής; Όχι. Βλέπε GRW.
3. Γιατί τόση φασαρία γύρω από την κβαντική; Όχι τόσο για το θέμα του ρεαλισμού, όσο για α) την ανατροπή μερικών κλασικών παραδοχών και β) την σχέση της με την σχετικότητα.
4. Ο Μπιτσάκης φαίνεται να ταλαντεύεται. Από τη μια έχουμε την αποδοχή του στατιστικού μοντέλου (σ. 165) ενώ από την άλλη φαίνεται να δέχεται την ‘αναγωγή’ του κυματοπακέτου ως ενός «ποιοτικού μετασχηματισμού του συστήματος» (σ. 166).
5. Η σημαντική συμβολή του Μπιτσάκη: ότι η αιτιότητα και η κβαντική αναμειγνύονται. «κβαντικός στατιστικός καθορισμός» (σ. 184). Αλλά αυτό δεν πρέπει να συγγέεται με την αιτιοκρατία. Μπορεί να υπάρχουν τυχαία γεγονότα (άρα η αιτιοκρατία να αποτυγχάνει) αλλά ταυτόχρονα η αιτιότητα (όπου υπάρχει) να είναι πιθανοκρατική.