

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ*

Κάθε καθορισμός είναι άρνηση

SPINOZA

Το κείμενο που ακολουθεί αποτελεί μιὰ προσπάθεια νὰ ἀναλυθεῖ ἡ ἔννοια τοῦ φυσικοῦ συστήματος. Θὰ ἐπιμείνουμε κυρίως στὴν ἀνάλυση τῶν κβαντικῶν συστημάτων καὶ εἰδικὰ στὰ προβλήματα τοῦ διαχωρίσιμου καὶ τῆς πληρότητας τῆς μὴ ρελατιβιστικῆς κβαντικῆς μηχανικῆς.

1. Ὁρισμοὶ

Ὁνομάζουμε φυσικὸ σύστημα S ἓνα τμήμα τῆς πραγματικότητας γιὰ τὸ ὁποῖο μποροῦμε νὰ μιλάμε, χωρὶς νὰ ἀναφερόμαστε ἀπευθείας στὸν ὑπόλοιπο κόσμο.

Ὁ ὅρισμός αὐτὸς προϋποθέτει τρεῖς παραδοχές:

1ον. Ὅτι ὑπάρχει μιὰ φυσικὴ πραγματικότητα ἀνεξάρτητη ἀπὸ τὸν παρατηρητὴ καὶ τὰ ὄργανα τῆς μέτρησης (ρεαλιστικὸ ἀξίωμα). 2ον. Ὅτι μποροῦμε νὰ ἀπομονώσουμε ἓνα τμήμα αὐτῆς τῆς πραγματικότητας. 3ον. Προϋποθέτει ἐπίσης, ἔμμεσα, ὅτι μποροῦμε νὰ κάνουμε μετρήσεις σ' αὐτὸ τὸ τμήμα, χωρὶς νὰ διαταράσσουμε αἰσθητὰ τουλάχιστον ὀρισμένα ἀπὸ τὰ μεγέθη ποὺ τὸ χαρακτηρίζουν.

Ὅσον ἀφορᾷ τὴν πρώτη προϋπόθεση, ἂς δεχτοῦμε, σὲ συμφωνία μὲ τὸ ρεαλιστικὸ ἀξίωμα, ὅτι «ὑπάρχουν φυσικὰ ἀντικείμενα» (Ἀριστοτέλης), ὅτι δηλαδὴ ὑπάρχουν πραγματικότητες ἀνεξάρτητες ἀπὸ τὸν παρατηρητὴ καὶ τὰ πειραματικὰ ὄργανα. Ἡ παραδοχὴ αὐτὴ δὲν θὰ προκαλέσει σημαντικὲς ἀντιρρήσεις (καὶ πραγματικὰ δὲν προκαλεῖ, τουλάχιστον ἀνάμεσα στοὺς φυσικούς), ἂν πρόκειται γιὰ μακροσκοπικὰ συστήματα. Εἶναι πράγματι δύσκολο νὰ βρεθεῖ φυσικὸς ποὺ θάλεγε ὅτι τοῦτος ὁ ἐπιταχυντὴς ἢ ἐκεῖνο τὸ νεφέλωμα δὲν εἶναι παρὰ ἓνα σύνολο ἀπὸ ἀκατέργαστα δεδομένα (crude data). Ἀλλὰ οἱ ἀντιρρήσεις εἶναι ἔντονες καὶ οἱ δυσκολίες πραγματικὲς, ἂν θελήσει κανεὶς νὰ ἐφαρμόσει αὐτὸ τὸν ὅρισμὸ στὸ μικρόκοσμο.

Ἄς δεχτοῦμε ὡστόσο σὰν ἀφετηριακὸ σημεῖο, ὅτι «ἔχει νόημα νὰ μιλάμε γιὰ τοῦτο ἢ ἐκεῖνο τὸ μικροσύστημα, ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὸ ἂν ὑπάρχουν ὄργανα

* Ἡ ἐργασία αὐτὴ ἐγινε στὰ πλαίσια ἐρευνητικοῦ προγράμματος, ποὺ χρηματοδοτεῖται ἀπὸ τὸ Ἑθνικὸν Ἰδρυμα Ἑρευνῶν.

να με τὰ ὁποῖα ἀλληλεπιδρᾷ» καὶ ὅτι «ένα τέτοιο σύστημα μπορεῖ ἐπίσης νὰ ἔχει ὀρισμένες φυσικὲς ιδιότητες ἀνεξάρτητες ἀπὸ τὴν ὕπαρξη ἢ τὴ σκέψη τέτοιων ὀργάνων»¹. Ἄς δεχτοῦμε λοιπὸν ὅτι ἀκόμα καὶ τὰ μικροσκοπικὰ (κβαντικὰ) συστήματα κατέχουν ιδιότητες ἀνεξάρτητες ἀπὸ τὸ ὑποκείμενο. Θὰ δοῦμε στὴ συνέχεια τὶς ἀντιρρήσεις ποὺ προκαλεῖ αὐτὴ ἡ παραδοχὴ, σὲ συσχέτιση μὲ τὴν τρίτη ἀποδοχὴ μας: ὅτι μποροῦν νὰ ὑπάρξουν μετρήσεις οἱ ὁποῖες δὲν διαταράσσουν αἰσθητὰ τουλάχιστον μερικὰ ἀπὸ τὰ μεγέθη ποὺ χαρακτηρίζουν τὸ μικροσύστημα.

Ἄς ὑποθέσουμε λοιπὸν ὅτι ἀπομονώσαμε (τουλάχιστον νοητικὰ) ἓνα τμήμα τῆς πραγματικότητας: ὅτι βρισκόμαστε μπροστὰ σὲ ἓνα φυσικὸ σύστημα. Ἐνα τέτοιο σύστημα χαρακτηρίζεται, καθὼς εἶναι γνωστὸ, ἀπὸ ἓναν ἀριθμὸ μεταβλητῶν, δηλαδὴ μετρήσιμων ποσοτήτων ποὺ ἔχουν κάθε στιγμὴ ὀρισμένη ἀριθμητικὴ τιμὴ. Ἡ κατάσταση τοῦ συστήματος ὀρίζεται, ἂν δοθοῦν οἱ ἀριθμητικὲς τιμὲς ἑνὸς συνόλου μεταβλητῶν ποὺ ἐπιλέγονται σύμφωνα μὲ ὀρισμένα κριτήρια. Ἄν συμβολίζουμε τὶς μεταβολές αὐτὲς μὲ

$$[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$$

τότε ἡ κατάσταση τοῦ συστήματος εἶναι: $\psi(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$.

Δυὸ καταστάσεις τοῦ ἴδιου συστήματος ταυτίζονται ἂν $x_i = \psi_i$ γιὰ κάθε i τοῦ I .

Εἶναι φανερὸ ὅτι ὁ ὀρισμὸς αὐτὸς κάνει ἀφαίρεση ἀπὸ τὸ σύνολο τῶν καθορισμῶν τοῦ συστήματος: ὅτι θέλει νὰ ἐπιβάλλει μιὰ ταυτότητα, σὲ κάτι τὸ ὁποῖο, ὅπως κάθε ὑπαρκτό, ὑφίσταται ἀδιάκοπες μεταβολές. Ἀλλὰ ἡ ἀφαίρεση αὐτὴ εἶναι ἡ μόνη ποὺ μπορεῖ νὰ εἶναι λειτουργικὴ (opératoire) στὸ χῶρο τῆς φυσικῆς, καὶ ποὺ μπορεῖ νὰ ἐπιτρέψει τὴ γνώση ὀρισμένων ὄψεων (ἢ στιγμῶν) τοῦ ἀντικειμένου.

Γιὰ νὰ ἀποφύγουμε κάθε βιαστικὴ ἀπλούστευση, ὀφείλουμε νὰ ὑπογραμμίσουμε τὴ σχετικότητα τῶν ἐννοιῶν τοῦ φυσικοῦ συστήματος καὶ τῆς κατάστασης.

Ἡ σχετικότητα αὐτὴ ἔχει δυὸ ὄψεις, ποὺ συνδέονται ὀργανικὰ:

1. *Τὴν ὄντολογικὴ*: Κάθε φυσικὸ σύστημα (καὶ εἰδικὰ κάθε μικροσύστημα) ἀνήκει σὲ μιὰν ὀλότητα ποὺ τὸ ὑπερβαίνει. Βρίσκεται λοιπὸν σὲ συσχέτιση (corrélation) μὲ τὰ μέρη αὐτῆς τῆς ὀλότητας καὶ ἡ ἀπομόνωσή του εἶναι σχετικὴ. (Θεωρητικὰ, μιὰ πλήρης περιγραφή τοῦ συστήματος θὰ ἀπαιτοῦσε τὴν εἰσαγωγὴ ἑνὸς ἄπειρου ἀριθμοῦ μεταβλητῶν.) Ἀντίστοιχα, τὸ μικροσύστημα δὲν διατηρεῖ ἀπεριόριστα τὴν ταυτότητά του. Δὲν εἶναι ποτὲ «καθεαυτό», δηλαδὴ ἀπομονωμένο ἀπὸ τὸ «μεγάλο» σύστημα, ποὺ συνιστᾷ τὸ ὑπόλοιπο τῆς ὀλότητας στὴν ὁποῖα ἀνήκει.

2. *Τὴ γνωσιολογικὴ*: Ὁ ὀρισμὸς τοῦ συστήματος μὲ ἓνα σύνολο μεταβλητῶν σχετίζεται μὲ τὸ ἐπίπεδο ἀφαίρεσης ὅπου λειτουργεῖ ἡ θεωρία: ἂν λάβουμε ὑπόψη μας μ_1 μεταβλητές, τίποτα δὲν μᾶς ἐπιτρέπει νὰ ἀποκλείσουμε τὴν ὕπαρξη μ_2 συμπληρωματικῶν μεταβλητῶν τὶς ὁποῖες θὰ μπορούσαμε νὰ λάβουμε ὑπόψη, καὶ ποὺ ἡ εἰσαγωγὴ τους στὴν καταστατικὴ συνάρ-

τηση θα ὀδηγοῦσε σὲ μιὰ πληρέστερη ἐξειδίκευση (*specification*) τῆς κατάστασης. Ἐπίσης, ὁ χωρισμὸς τῶν μεταβλητῶν σὲ δύο τάξεις: τὶς οὐσιώδεις καὶ τὶς δευτερεύουσες (ἢ, μὴ-οὐσιώδεις) εἶναι κι αὐτὸς σχετικὸς: αὐτὸ πὺ εἶναι μὴ-οὐσιαστικὸ σὲ τοῦτο τὸ ἐπίπεδο ἀφαίρεσης, μπορεῖ νὰ γίνῃ οὐσιαστικὸ σ' ἓνα διαφορετικὸ ἐπίπεδο.

Ἡ ἔννοια τῆς κατάστασης εἶναι κατὰ συνέπειαν, καὶ αὐτὴ, σχετικὴ. Ἡ ταυτότητα δύο καταστάσεων δὲν ἀφορᾷ παρὰ τὸ σύνολο τῶν τιμῶν τῶν μεταβλητῶν πὺ ἐμεῖς ἐπιλέξαμε. Ἡ ὑπαρξὴ ἐκφυλισμένων καταστάσεων στὴ μικροφυσικὴ συγκεκριμενοποιεῖ τὴ σχετικότητα αὐτῆς τῆς ἔννοιας: σ' ἓνα ὀρισμένο ἐπίπεδο ἀφαίρεσης, ὀρίζεται μιὰ κατάσταση μὲ βάση ὀρισμένο ἀριθμὸ μεταβλητῶν. Ἄν ληφθοῦν ὑπόψη καὶ ἄλλα φαινόμενα (λ.χ. ρελατιβιστικὸ φαινόμενο, ἀλληλεπίδραση σπιν-τροχιᾶς, κτλ.), δηλαδὴ καὶ ἄλλες, συμπληρωματικὲς μεταβλητὲς, καταλήγουμε στὸ διαχωρισμὸ τοῦ ἀρχικοῦ συνόλου — πὺ θεωρούσαμε ὅτι ἀποτελεῖται ἀπὸ μικροσυστήματα πὺ ἀνήκουν ὅλα στὴν ἴδια κατάσταση — σὲ ὑποσύνολα, πὺ ἀνήκουν σὲ διαφορετικὲς καταστάσεις. Ἡ μεγάλη διαμάχη γιὰ τὶς λανθάνουσες παραμέτρους στὴν κβαντικὴ μηχανικὴ βασίζεται σ' αὐτὴ τὴ δυνατότητα γιὰ μιὰ πληρέστερη ἐξειδίκευση τῆς κατάστασης.

Ἡ κατάσταση εἶναι μιὰ ἔννοια μὲ ὄντολογικὸ *status*. Ἄλλὰ ἓνα σύστημα δὲν ταυτίζεται μὲ τὴν κατάστασή του. Αὐτοὶ πὺ λένε ὅτι ἓνα σύστημα ὀρίζεται σὰν ἓνα σύνολο μεταβλητῶν δέχονται σιωπηρὰ τὸ θετικιστικὸ ἀξίωμα, πὺ ταυτίζει τὸ ἀντικείμενο μὲ τὸ σύνολο τῶν δεδομένων πὺ διαθέτουμε γι' αὐτό. Ἄπὸ τὴν ἀφετηρία αὐτὴ μπορεῖ κανεὶς νὰ προχωρήσει πὺ πέρα: Στὴν κβαντικὴ μηχανικὴ μιᾶμε γενικὰ γιὰ παρατηρήσιμα μεγέθη, κι ὄχι γιὰ μεταβλητὲς. Ἐνα παρατηρήσιμο μέγεθος εἶναι ἓνα φυσικὸ μέγεθος πὺ χαρακτηρίζει τὸ σύστημα. Τὸ μέγεθος αὐτὸ παριστάνεται μὲ ἓναν τελεστή. Πολλοὶ λένε, σύμφωνα μ' αὐτὸ τὸν τρόπο συλλογισμοῦ, ὅτι ἓνα παρατηρήσιμο μέγεθος εἶναι ἓνας τελεστής. Ἄλλὰ τότε δὲν μένει παρὰ νὰ ποῦμε ὅτι τὸ φυσικὸ σύστημα, πὺ μ' αὐτὴ τὴ λογικὴ εἶναι τὸ σύνολο τῶν παρατηρήσιμων μεγεθῶν, δὲν εἶναι παρὰ τὸ σύνολο τῶν τελεστῶν, δηλαδὴ τῶν συμβόλων πὺ περιγράφουν τὴν κατάστασή του.

Ἄλλὰ χρειαζόμαστε ἀκόμα μερικὸς ὀρισμούς.

Γενικὰ καλοῦνται μεταβλητὲς, τὸ σύνολο τῶν ἐσωτερικῶν μεταβλητῶν τοῦ συστήματος. Οἱ ἐξωτερικὲς μεταβλητὲς καλοῦνται ἐπίσης παράμετροι. Ἡ φύση τῶν δύο τύπων δὲν εἶναι ὑποχρεωτικὰ διαφορετικὴ, ἀλλὰ ὁ ρόλος τους εἶναι διαφορετικὸς: οἱ ἐξωτερικὲς μεταβλητὲς καθορίζουν τὶς συνθηκὲς καὶ δροῦν μέσα ἀπὸ τὶς ἐσωτερικὲς δομὲς τοῦ φυσικοῦ συστήματος. Ἡ σταθερότητα μιᾶς κατάστασης ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὶς δομὲς τοῦ συστήματος, ἀλλὰ καὶ ἀπὸ τὶς τιμὲς τῶν παραμέτρων του. Μιὰ κατάσταση εἶναι ἀσταθὴς ἂν μιὰ ἐλαφρὰ τροποποίηση τῶν παραμέτρων ὀδηγεῖ στὴ μεταβολὴ τῆς. Οἱ κρίσιμες καταστάσεις εἶναι ἰδιαίτερα ἀσταθεῖς. Μιὰ κατάσταση ἰσορροπίας ἀντίθετα εἶναι μιὰ ἄλλη ὀνομασία μιᾶς σταθερῆς κατάστασης.

2. Ἡ ἔννοια τοῦ κλασικοῦ συστήματος

Πρέπει τώρα νὰ ὀρίσουμε πιὸ συγκεκριμένα μερικὲς ἀπὸ τὶς προηγούμενες ἔννοιες.

Τὰ ἀντικείμενα τῆς κλασικῆς φυσικῆς ἦταν, τουλάχιστον στὴν ἀρχή, μακροσκοπικά. Ἡ ἰδιομορφία αὐτὴ ἔθρεψε τὸν λεγόμενο αὐθόρμη τούλισμὸ τῆς «χρυσῆς» αὐτῆς ἐποχῆς τῆς φυσικῆς (καλύτερα: τῆς παιδικῆς αὐτῆς ἡλικίας, ποὺ τὴ χαρακτήριζε μιὰ αἰσιοδοξία, ἀφελῆς πέρα ἀπὸ ἓνα σημεῖο). Εἶναι πραγματικὰ δύσκολο νὰ ἀρνηθεῖ κανεὶς τὴν ἀντικειμενικότητα ἐνὸς μακροσκοπικοῦ συστήματος. Καὶ εἶναι εὐκόλο νὰ ὑποθέσει ὅτι ἡ παρατήρηση (ἢ τὸ πείραμα) δὲν τροποποιεῖ τὸ σύστημα, νὰ ὑποθέσει, συνεπῶς, ὅτι τὰ μετρούμενα μεγέθη ἀντιστοιχοῦν στὰ πραγματικὰ μεγέθη τοῦ συστήματος. Ἀπὸ τὴ διπλὴ αὐτὴ ἀντικειμενικότητα ἀπορρέει ἡ γνωσιολογικὴ αἰσιοδοξία τῆς κλασικῆς φυσικῆς.

Τὸ πιὸ ἀπλὸ σύστημα ἀποτελεῖται ἀπὸ ἓνα μόνο σωματίο, ποὺ μέσα ἀπὸ μιὰ ἄκρα ἀφαίρεση, θεωρεῖται ὑλικὸ σημεῖο. Τὰ σωματῖα τῆς κλασικῆς φυσικῆς εἶναι συμπαγῆ, σκληρά, ἀδιαπέραστα, ἀφθαρτα, κτλ., σύμφωνα μὲ τὴ νευτώνεια ἀντίληψη². Τέτοια ποὺ εἶναι λοιπὸν — καὶ κατὰ μείζονα λόγο σὰν ὑλικά σημεῖα — δὲν μποροῦν νὰ ἔχουν ιδιότητες. Ὁ μόνος προσδιορισμὸς τους εἶναι ἡ ποσότητα (ἢ μάζα, λ.χ., ποὺ ταυτίζεται μὲ τὴν ὕλη). Ἡ ποιότητα ἀπουσιάζει (τουλάχιστον θεωρητικὰ) ἀπ' αὐτὸ τὸ σύμπαν.

Εἶναι ἀλήθεια ὅτι τὰ νευτώνεια σωματῖα ἀλληλεπιδροῦν καὶ καθορίζονται ἀμοιβαῖα. Ἀλλά: Οἱ δυνάμεις μὲ τὶς ὁποῖες ἀλληλεπιδροῦν ὑποτίθεται ὅτι διαδίδονται μὲ ἄπειρη ταχύτητα. Κι ἀκόμη δὲν θεωροῦνται «ὕλικές» καὶ δὲν καθορίζουν τὰ φαινόμενα μὲ τρόπο ἐξελικτικὸ. Μὲ τὴν πραγματιστικὴ σωφροσύνη τοῦ ὀ Νεύτων ἀπέφυγε ἀκόμα καὶ νὰ χαρακτηρίσει τὴ βαρύτητα σὰν ιδιότητα τῆς ὕλης. (Ὁ πειραματικὸς χαρακτήρας τοῦ νόμου τοῦ ἀρκοῦσε, καὶ «δὲν ἔκανε ὑποθέσεις».) Ἔτσι ἡ αἰτιότητα καὶ ὁ καθορισμὸς παρέμεναν γι' αὐτὰ τὰ συστήματα σχέσεις ἐξωτερικῆς.

Δὲν εἶναι ἐκπληκτικὸ ὅτι ὡς θεμελιώδης νόμος τῆς κίνησης αὐτῶν τῶν συστημάτων θεωρήθηκε ὁ νόμος τῆς ἀδράνειας: τὸ σύστημα διατηρεῖ τὴν κατάστασή τῆς εὐθύγραμμης καὶ ὁμαλῆς κίνησης (ἢ ἠρεμίας), ὅσο καμιὰ ἐξωτερικὴ δύναμη δὲν τὴν τροποποιεῖ. Ἀλλά καὶ ἡ ἀλλαγὴ τῆς κατάστασης δὲν εἶναι ποιοτικὴ: προκαλεῖται ἀπὸ ἐξωτερικοὺς παράγοντες καὶ δὲν ἀφορᾷ παρὰ τὴν ποσότητα κίνησης τοῦ συστήματος.

Ὁ Hegel ἔγραφε, ἓναν αἰῶνα μετὰ τὰ *Principia* τοῦ Νεύτωνα: «Αὐτὸ ποὺ χαρακτηρίζει τὸ μηχανισμό, εἶναι ὅτι, ὅποια κι ἂν εἶναι ἡ σχέση ἀνάμεσα στὰ συσχετιζόμενα στοιχεῖα, ἡ σχέση εἶναι πάντοτε ξένη μὲ τὴ φύση τους, καὶ ἐνῶ ἔχουν τὴν ἐπίφασή ἐνὸς ἐνιαίου ὅλου, πρόκειται πάντα γιὰ ἀπλή ἐπαγγελία, σύνθεση, μίγμα, συσσωρευση, κτλ.»³.

Ὁ Hegel ἦταν ἐναντίον τῶν ἀτόμων, κι ἀπὸ μιὰ ἄποψη εἶχε δίκιο: ἡ διαλεκτικὴ τοῦ ἀντίληψη δὲν μποροῦσε νὰ δεχτεῖ τὸν ἀπόλυτο χωρισμὸ τοῦ ἀν-

τικειμένου, τὴν ἄρνηση τῆς ποιότητας καὶ γενικότερα τὴ μηχανιστικὴ ἀντίληψη ποὺ συνδέθηκε μὲ τὴ νεότερη ἀτομιστικὴ.

Ἄλλὰ ἡ φυσικὴ ξεπέρασε σύντομα αὐτὴ τὴν κατάσταση: ὁ ἠλεκτρισμὸς, ἡ ὀπτικὴ, ἡ χημεία, ἡ βιολογία ἔθεταν ἀπὸ διάφορες πλευρὲς τὸ πρόβλημα τῆς ποιότητας, ἄρα τῆς *δομῆς* τῶν ἀτόμων καὶ τῶν ποιοτικῶν μετατροπῶν.

Μὲ τὴν ἀνάπτυξη τοῦ ἠλεκτρομαγνητισμοῦ, μιὰ νέα πραγματικότητα ἐμφανίστηκε στὸ σύμπαν τῆς φυσικῆς: τὸ *πεδίο*. Τὸ ἠλεκτρομαγνητικὸ πεδίο δὲν εἶναι πλέον μιὰ ἀπλή, βολικὴ παράσταση. Εἶναι *μία πραγματικότητα*: μεταδίδεται ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὴν πηγὴ του, εἶναι φορέας φυσικῶν ιδιοτήτων καὶ συνδέει τὰ φαινόμενα ἐξελικτικὰ στὸ χωρόχρονο (ἡ ταχύτητα του, ἀντίθετα μὲ τῶν νευτωνικῶν δυνάμεων, εἶναι πεπερασμένη).

Ἡ σχετικότητα, ποὺ γεννήθηκε ἀπὸ τὶς ἀντιφάσεις τοῦ ἠλεκτρομαγνητισμοῦ (θεωρητικὲς ἀντιφάσεις καὶ ἀντιθέσεις ἀνάμεσα στὴ θεωρία καὶ στὸ πείραμα), ὀδήγησε σὲ μιὰ νέα ἀντίληψη τοῦ φυσικοῦ συστήματος. Τὰ φυσικὰ μεγέθη συνδέονται μὲ τὸ σύστημα ἀναφορᾶς καί, μαζί του, μὲ τὴν κίνηση — καὶ τὸ ὅλον ἐπηρεάζεται ἀπὸ τὴν κατανομὴ τῆς ὕλης στὸ γύρω χῶρο.

Ἡ νέα κατάσταση ἀπαιτοῦσε νέους ὀρισμοὺς γιὰ τὸ φυσικὸ σύστημα. Γιὰ νὰ ἐξασφαλίσει τὴν *ἀντικειμενικότητά* της, ἡ νέα φυσικὴ ὄφειλε νὰ ἀναζητήσῃ ἀμετάβλητα μεγέθη καὶ νόμους ἀνεξάρτητους ἀπὸ τὸ σύστημα ἀναφορᾶς, ποὺ θὰ ἦταν ἡ ἄρνηση τοῦ σχετικοῦ χαρακτήρα ποὺ ἀπόκτησαν τὰ παλαιὰ μεγέθη μέσα στὸ νέο χωροχρονικὸ πλαίσιο.

Οἱ ἔννοιες καὶ οἱ σχέσεις ποὺ εἰσήγαγε ἡ νέα φυσικὴ τροποποίησαν βαθιὰ τὶς ἀντιλήψεις γιὰ τὴν πραγματικότητα καὶ εἰδικὰ γιὰ τὸ φυσικὸ σύστημα: ἡ ἐνότητα τῆς ὕλης καὶ τῆς κίνησης ἔκανε ἀνάγλυφη τὴν αὐτοανάπτυξη τῆς ὕλης. Οἱ νευτώνειες δυνάμεις καταργήθηκαν, ὅπως καὶ τὸ σχολαστικὸ «ὄτιδήποτε κινεῖται, τίθεται σὲ κίνηση ἀπὸ κάτι ἄλλο». Τὰ φυσικὰ συστήματα δὲν θεωροῦνται πλέον ὡς ἀποτελούμενα ἀπὸ σωματῖα μηχανικοῦ χαρακτήρα. Ἡ ποιότητα, καθὼς καὶ ἡ ἀλλαγή, ἔγιναν ἐνδογενεῖς ιδιότητες τοῦ συστήματος. Ἡ ἔννοια τῆς *ὀλότητας*, τέλος, ἔγινε ἀποδεκτὴ ἀπὸ μιὰ ἐπιστῆμη ποὺ βρισκόταν ἤδη πολὺ μακριὰ ἀπὸ τὴν ἐπιστῆμη τοῦ 18ου αἰώνα.

3. Τὸ κβαντικὸ σύστημα

Παρὰ τὸν ἀσυνεχῆ χαρακτήρα τῆς ὕλης, οἱ ἀλληλεπιδράσεις, ἄρα οἱ ἐνεργειακὲς ἀνταλλαγές, ἔθεωροῦντο συνεχεῖς ἀπὸ τὴν κλασικὴ φυσικὴ (μηχανικὴ, ἠλεκτρομαγνητικὴ, ρελατιβιστικὴ). Ἡ συνέχεια χαρακτηρίζει τόσο τὴν ἐξέλιξη τῶν φαινομένων, ὅσο καὶ τὸ μαθηματικὸ φορμαλισμὸ αὐτῆς τῆς ἐπιστῆμης (ἀπειροστικὸς λογισμὸς). Ὡστόσο τὸ *κβάντο δράσης* ἔκανε ἀπότομα τὴν εἴσοδό του στὴ φυσικὴ (1900), ἀνατρέποντας, καθὼς εἶναι

γνωστό, τις παλαιές αντιλήψεις για την αιτιότητα, τον καθορισμό, την αντικειμενικότητα και για άλλα θεμελιώδη θέματα της φυσικής και της φιλοσοφίας.

Όπως και στην κλασική φυσική, ή κατάσταση ενός κβαντικού συστήματος όρίζεται αν δοθούν οι τιμές ενός συνόλου μεταβλητών (το σύνολο αυτό θα όριστεί παρακάτω). Οι μεταβλητές αυτές όνομάζονται *παρατηρήσιμα μεγέθη*. Πρόκειται για μεγέθη που χαρακτηρίζουν το κβαντικό σύστημα και στα όποια μπορούμε να αποδώσουμε, κάτω από καθορισμένες συνθήκες, όρισμένη τιμή. Άλλα ποιές είναι αυτές οι συνθήκες;

Η κλασική φυσική δεχόταν ότι είναι δυνατόν, τουλάχιστον καταρχήν, να μετρήσουμε ταυτόχρονα (ή διαδοχικά) το σύνολο των μεταβλητών του συστήματος. Η παραδοχή αυτή προϋπόθετε μιάν άλλη: ότι έξαιτίας του μακροσκοπικού χαρακτήρα του συστήματος, ή παρατήρηση (ή το πείραμα) δέν τροποποιούσαν τις ούσιαστικές παραμέτρους του. Άλλα το κβάντο δράσης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τα κβαντικά συστήματα. Το πείραμα (παρατήρηση, μέτρηση) διαταράσσει κατά συνέπεια το σύστημα. Μπορούμε φυσικά να κάνουμε πειράματα που δέν τροποποιούν ούσιαστικά τούτη ή εκείνη τή μεταβλητή, άλλα το πείραμα αυτό θα τροποποιήσει άλλες μεταβλητές του συστήματος.

Καλούμε *συμβατά παρατηρήσιμα μεγέθη*, δυό μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα (ή διαδοχικά), δηλαδή τέτοια ώστε ή μέτρηση του ενός να μήν τροποποιεί τήν αριθμητική τιμή του άλλου. Καλούμε τα μεγέθη αυτά, με μιάν κατάχρηση της γλώσσας, «αντιμεταθετά» παρατηρήσιμα μεγέθη.* Σε τέτοια παρατηρήσιμα μεγέθη μπορεί να αποδώσει κανείς, τήν ίδια στιγμή, καθορισμένες τιμές.

Μιάν κβαντομηχανική κατάσταση όρίζεται, αν δοθεί ένα πλήρες σύνολο παρατηρήσιμων μεγεθών που αντιμετατίθενται. Ο όρισμός αυτός γεννᾶ δυό έρωτήματα: 1) Είναι ο καθορισμός αυτός μέγιστος; Είναι λοιπόν ή κβαντομηχανική περιγραφή πλήρης; 2) Μπορεί κανείς να βεβαιώσει τήν ύπαρξη ενός παρατηρήσιμου μεγέθους που δέν έχει μετρηθεί; Άρα, δυό παρατηρήσιμα μεγέθη, που δέν αντιμετατίθενται, μπορούν να υπάρχουν τήν ίδια στιγμή; Ένα ήλεκτρόνιο, λ.χ., που έχει ακριβή όρμη, είναι «κάπου», κι αν αντίθετα είναι κάπου, τότε έχει καθορισμένη τιμή;

Η όρθόδοξη έρμηνεία (της Σχολής της Κοπεγχάγης) δίνει κατηγορηματική απάντηση: δυό ασύμβατα παρατηρήσιμα μεγέθη δέν μπορούν να υπάρχουν τήν ίδια στιγμή. Άλλα προτού αντιμετωπίσουμε αυτό το ζήτημα, θα πρέπει να καθορίσουμε ένα κριτήριο πραγματικότητας για τα μικροφυσικά μεγέθη.

*Αντιμεταθετά παρατηρήσιμα μεγέθη: τέτοια μεγέθη αντιπροσωπεύονται από τελεστές που αντιμετατίθενται. Έχουμε λοιπόν: $[A B - B A] = 0$. Αντίθετα, για παρατηρήσιμα μεγέθη που δέν αντιμετατίθενται, έχουμε: $[A B - B A] \neq 0$, άρα $A B \neq B A$ (λ.χ., $[p_x x] = i\hbar$). Η μη αντιμεταθετικότητα των τελεστών εκφράζει τυπικά το γεγονός ότι ή μέτρηση του ενός μεγέθους τροποποιεί τήν τιμή του άλλου.

Οί Einstein, Podolsky και Rosen (EPR), σ' ένα άρθρο κλασικό στην ιστορία τῆς φυσικῆς⁴, προσπάθησαν νὰ ὀρίσουν ἕνα κριτήριο ὑπαρξῆς γιὰ ἕνα στοιχεῖο τῆς φυσικῆς πραγματικότητας: «Ἄν, χωρίς καθόλου νὰ διαταράξουμε ἕνα σύστημα, μποροῦμε νὰ προβλέψουμε μὲ βεβαιότητα (δηλαδή μὲ πιθανότητα ἴση μὲ 1) τὴν τιμὴ μιᾶς φυσικῆς ποσότητας, τότε ὑπάρχει ἕνα στοιχεῖο φυσικῆς πραγματικότητας ποὺ ἀντιστοιχεῖ σ' αὐτὴ τὴ φυσικὴ ποσότητα». Τὸ κριτήριο δὲν θεωρεῖται ἀναγκαῖα, ἀλλὰ μόνο ἐπαρκῆς συνθήκη γιὰ τὴν ὑπαρξὴ ἑνὸς στοιχείου πραγματικότητας. Ἡ θέση αὐτὴ τῶν EPR εἶναι σύμφωνη μὲ τὸ ρεαλιστικὸ ἀξίωμα — τὸ ὁποῖο δέχεται τὴν ὑπαρξὴ φυσικῶν μεγεθῶν ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὴ μέτρηση — καὶ ἀσυμβίβαστη μὲ τὴν ἐπιστημολογικὴ ἀρχὴ ποὺ δὲν δέχεται τὴν ὑπαρξὴ μὴ μετρήσιμων (ἢ μὴ μετρηθέντων) μεγεθῶν.

Σύμφωνα μὲ τοὺς EPR, μιὰ ἀναγκαῖα συνθήκη γιὰ τὴν πληρότητα μιᾶς θεωρίας εἶναι ὅτι «κάθε στοιχεῖο τῆς φυσικῆς πραγματικότητας πρέπει νὰ ἔχει ἕνα ἀντίστοιχο μέρος στὴ φυσικὴ θεωρία». Ἀλλὰ προτοῦ ἀντιμετωπίσουμε τὸ πρόβλημα τῆς πληρότητας, θὰ ἔπρεπε νὰ ἐξετάσουμε τὸ πρακτικὸ νόημα τῆς ἔκφρασης: «χωρίς καθόλου νὰ διαταράξουμε τὸ σύστημα».

Ἕνα μικροφυσικὸ σύστημα διαταράσσεται πάντα ἀπὸ τὴ μέτρηση. Ὡστόσο εἶναι πρακτικὰ δυνατό νὰ φανταστοῦμε πειράματα (καὶ νὰ κατασκευάσουμε ὄργανα) ποὺ μετροῦν ἕνα ὀρισμένο παρατηρήσιμο μέγεθος, χωρίς νὰ ἐπηρεάζουν τὴν τιμὴ του. (Εἶναι προφανές ὅτι τὰ μὴ ἀντιμεταθετὰ μ' αὐτὸ παρατηρήσιμα μεγέθη — καὶ ποὺ ὀνομάζονται συζυγῆ παρατηρήσιμα μεγέθη — τροποποιοῦνται ἀπὸ τὸ πείραμα.) Ἔτσι, λ.χ., μποροῦμε νὰ μετρήσουμε τὴ συνιστώσα κατὰ τὸν ἄξονα OZ τοῦ σπῖν ἑνὸς σωματίου, μὲ ἕνα ὄργανο Stern-Gerlach. Ἡ μέτρηση δὲν τροποποιεῖ τὴ συνιστώσα κατ' αὐτὸ τὸν ἄξονα, ἀλλὰ τροποποιεῖ τὶς δυὸ ἄλλες συνιστώσες τοῦ σπῖν (κατὰ τοὺς ἄξονες OX καὶ OY)⁵.

Μποροῦμε νὰ δεχτοῦμε τὸ κριτήριο τῶν EPR, προκειμένου νὰ ἀποφασίσουμε γιὰ τὴν ὑπαρξὴ τούτου ἢ ἐκείνου τοῦ παρατηρήσιμου μεγέθους. Ἀλλὰ ἂν καταλήξουμε νὰ μετρήσουμε τὴν τιμὴ ἑνὸς παρατηρήσιμου μεγέθους (ἄρα νὰ συμπεράνουμε τὴν ἀντικειμενικότητά του), τότε τὰ παρατηρήσιμα μεγέθη ποὺ δὲν ἀντιμετατίθενται μ' αὐτό, διαταράσσονται· δὲν μποροῦμε λοιπὸν νὰ ἀποφανθοῦμε γιὰ τὴν ὑπαρξὴ τους στὸ χρόνο t_0 , ἀκριβῶς πρὶν ἀπὸ τὴ μέτρηση. Ἀλλὰ τότε, συμπεραίνουν οἱ EPR,—ἦ: (1) ἡ κβαντομηχανικὴ περιγραφή δὲν εἶναι πλήρης, ἢ: (2) ὅταν οἱ τελεστῆς ποὺ ἀντιπροσωπεύουν δυὸ μεγέθη δὲν ἀντιμετατίθενται, τότε τὰ δυὸ αὐτὰ μεγέθη δὲν μποροῦν νὰ ὑπάρχουν ταυτόχρονα.

Οἱ Einstein, Podolsky καὶ Rosen κατέληξαν στὸ ὅτι ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ δὲν εἶναι πλήρης θεωρία. Ἀντίθετα ὁ Bohr, εἰσάγοντας τὴν ἔννοια τοῦ μὴ διαχωρίσιμου τοῦ φυσικοῦ συστήματος καὶ τοῦ ὄργάνου τῆς μέτρησης, κατέληξε στὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ εἶναι μιὰ πλήρης θεωρία⁶. Ἀπὸ τὴν ἐποχὴ ἐκείνη χρονολογεῖται ἡ μεγάλη συζήτηση γιὰ τὴν

πληρότητα ἢ μὴ τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς καὶ γιὰ τὶς λανθάνουσες παραμέτρους, ἢ ὅποια, μὲ νέα ἐπιχειρήματα, μὲ τὴ διαμόρφωση συγκεκριμένου φορμαλισμοῦ καὶ μὲ τὴν παρέμβαση τοῦ πειράματος, γνωρίζει μιὰ νέα ἀνάπτυξη στὴ διάρκεια τῶν τελευταίων ἐτῶν.

Βρισκόμαστε λοιπὸν μπροστὰ σὲ ἓνα βασικὸ ἐρώτημα: τὸ ἐρώτημα γιὰ τὴν ταυτόχρονη ὑπαρξη μεγεθῶν ποὺ οἱ ἀντίστοιχοι τελεστές τους δὲν ἀντιμετατίθενται, καὶ γενικότερα γιὰ τὴν ὑπαρξη μεγεθῶν ποὺ δὲν ἔχουν μετρηθεῖ, ἢ ποὺ δὲν εἶναι μετρήσιμα.

Σύμφωνα μὲ τὴν τρέχουσα ἐρμηνεία, δυὸ τέτοια μεγέθη δὲν μποροῦν νὰ ὑπάρχουν ταυτόχρονα (γιὰ τὸ ἴδιο φυσικὸ σύστημα). Σ' αὐτὴ τὴν κατηγορηματικὴ βεβαίωση δόθηκαν δυὸ διαφορετικὲς ἐρμηνεῖες, ποὺ στηρίζονται ὡστόσο στὸ ἴδιο ἀξίωμα: Ἡ *ὀπερασιοναλιστικὴ* ἐρμηνεία, σύμφωνα μὲ τὴν ὁποία ἡ δῆθεν ἀνεξέλεγκτη διαταραχὴ ποὺ προκαλεῖται ἀπὸ τὸ ὄργανο μέτρησης τροποποιεῖ τὴν τιμὴ τῆς συζυγοῦς μεταβλητῆς. Ἀπὸ τὴ στιγμή λοιπὸν ποὺ δὲν μποροῦμε νὰ μετρήσουμε τὴν τιμὴ της, δὲν μποροῦμε καὶ νὰ ἀποφανθοῦμε γιὰ τὴν ὑπαρξή της. Ἡ δεύτερη, πιὸ κατηγορηματικὴ καὶ ὄντολογικοῦ χαρακτήρα, βεβαιώνει ὅτι, ἂν μιὰ μεταβλητὴ ἔχει ἀκριβῆ τιμὴ, τότε κάθε συζυγῆς μεταβλητὴ δὲν ἔχει νόημα.

Καὶ οἱ δυὸ ἐρμηνεῖες στηρίζονται στὸ (θετικιστικὸ) ἀξίωμα, κατὰ τὸ ὁποῖο δὲν ὑπάρχουν παρὰ τὰ δεδομένα τῶν αἰσθητηρίων ἢ τῶν ὀργάνων μέτρησης. Ἡ θέση αὐτὴ μπολιάστηκε στὴν κβαντικὴ μηχανικὴ, κυρίως ἀπὸ τὸν Heisenberg, μὲ τὴ μορφή ἑνὸς ἀξιώματος ποὺ δὲν δέχεται νὰ εἰσάγονται στὴ θεωρία παρὰ μόνο παρατηρήσιμα (ἢ μετρήσιμα) μεγέθη. Στὴ βάση αὐτὴ διαμορφώθηκε ἡ *ἀρχὴ τῆς ἀνυπαρξίας τῶν μεγεθῶν ἢ τῶν μικρο-συμβάντων*, ποὺ δὲν εἶναι παρατηρήσιμα.

Ἡ «λογικὴ» διατύπωση αὐτῆς τῆς «ἀρχῆς» βεβαιώνει τὴν *ἀπροσδιοριστία τῆς ἀλήθειας τῶν μὴ ἐπαληθευμένων προτάσεων*, σχετικὰ μὲ τὰ μικροσωμάτια. Ἔτσι, μιὰ πρόταση S , ποὺ ἀποδίδει στὸ μικρο-ἀντικείμενο σ , τὴν ιδιότητα π , δὲν εἶναι ἀληθινὴ, παρὰ ἂν καὶ μόνο ἂν ἔχει πραγματοποιηθεῖ μιὰ ἐμπειρικὴ ἐπαλήθευση τῆς S ⁷.

Ὅλοι οἱ ὀπαδοὶ τῆς Σχολῆς τῆς Κοπεγχάγης δὲν παίρνουν τόσο κατηγορηματικὲς θέσεις. Μὲ ἀφετηρία τὴν ἀλληλεπίδραση συστήματος — ὀργάνου μέτρησης καὶ τὴν ἔννοια τοῦ μὴ διαχωρίσιμου, μερικοὶ ὀδηγήθηκαν σὲ θέσεις ἀγνωστικιστικὲς, σχετικὰ μὲ τὴν ταυτόχρονη ὑπαρξη μεγεθῶν ποὺ οἱ τελεστές τους δὲν ἀντιμετατίθενται, ἢ τὴν ὑπαρξη φυσικῶν συστημάτων ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὴ μέτρηση. Ἡ θέση τοῦ Bohr, μὲ τὶς ἀποχρώσεις, τὰ διαφορούμενα καὶ τὴν ἐξέλιξή της, χαρακτηρίζεται ἀπὸ ἓνα δειλὸ ρεαλισμὸ, ἢ ἓνα ἐξίσου δειλὸ ἀγνωστικισμὸ⁸. Ἄλλοι, ἀντίθετα, ἀρνοῦνται κάθε ὑπαρξη ἀνεξάρτητη ἀπὸ τὸν «παρατηρητὴ», καὶ ἄλλοι, ὅπως ὁ Heisenberg, διακήρυξαν ὅτι τὰ μικρο-συστήματα ἀνάγονται στὴ διαύγεια τῶν μαθηματικῶν συμβόλων⁹.

Ἐδῶ ἐπιβάλλονται ὀρισμένες παρατηρήσεις.

Έχουμε δύο προτάσεις: 1) Δυο μεταβλητές, που οί τελεστές τους δέν αντιμετατίθενται, δέν μποροῦν νά ὑπάρχουν ταυτόχρονα. 2) Ένα μὴ παρατηρήσιμο (ἢ μὴ παρατηρηθέν) μέγεθος δέν ὑπάρχει. Ἡ δεύτερη πρόταση περιλαμβάνει τὴν πρώτη.

Εἶναι προφανές ὅτι βρισκόμαστε μπροστά σὲ ἓνα ἐπιστημολογικὸ ἀξίωμα, πού δέν μπορεῖ νά ἀνασκευαστεῖ, καὶ ὅπου μιὰ ἀπλή ἀντιπρόταση τοῦ ρεαλιστικοῦ ἀξιώματος δέν ἀποτελεῖ ἀπάντηση. Ὡστόσο ὑπάρχει μιὰ σειρά ἀπὸ ἐπιχειρήματα ἐναντίον αὐτῆς τῆς ἀρχῆς.

Τὸ κβαντομηχανικὸ σύστημα δέν εἶναι μηχανικό. Τὰ μικροσωμάτια δέν εἶναι νευτώνεια σωμάτια ἢ ὑλικά σημεῖα. Ἡ θέση, ἡ ὄρμη καὶ τὰ ἄλλα μεγέθη πού χαρακτηρίζουν τὴν κατάστασή τους, δέν μποροῦν νά ἔχουν τὴν ἔννοια πού τοὺς δίνει ἡ κλασικὴ φυσικὴ. Θὰ μποροῦσε ὡστόσο νά ἰσχυριστεῖ κανεὶς, χωρὶς νά ἔρχεται σὲ ἀντίθεση μὲ τὰ μικροφυσικὰ δεδομένα, ὅτι τὰ κβαντικὰ συστήματα εἶναι φυσικὲς ὀντότητες μέσα στὸ χῶρο καὶ στὸ χρόνο, ὅτι δέν εἶναι σημειακά, ὅτι ἔχουν ἐσωτερικὴ δομὴ — καὶ νά ἀναζητήσῃ μιὰ νέα διατύπωση τοῦ ἐρωτήματος καὶ ἐνδεχόμενα μιὰ ἀπάντηση, σύμφωνη μὲ τὰ δεδομένα τῆς σύγχρονης φυσικῆς.

Ἡ κίνηση τῶν μικροσωματίων περιγράφεται στὸ χῶρο καὶ στὸ χρόνο (τὸ καταστατικὸ διάνυσμα εἶναι συνάρτηση τῶν τριῶν συντεταγμένων τοῦ χώρου καὶ τῆς συντεταγμένης τοῦ χρόνου). Ἀλλὰ τὸ καταστατικὸ διάνυσμα εἶναι λύση μιᾶς ἐξίσωσης ὅπου ἐπεμβαίνουν ταυτόχρονα, τόσο ἡ θέση, ὅσο καὶ ἡ ὄρμη τοῦ σωματίου (ἢ χαμιλτονιακὴ συνάρτηση εἶναι ἄθροισμα τῆς κινητικῆς καὶ τῆς δυναμικῆς ἐνέργειας τοῦ συστήματος). Θὰ εἰπωθεῖ βέβαια ὅτι ἡ ὄρμη καὶ ἡ θέση δέν ἔχουν ἀκριβεῖς τιμές κάθε στιγμῆ, ἐξαιτίας τῆς ἰσχύος τῶν ἀνισοτήτων τοῦ Heisenberg.* Ἀλλὰ θὰ μποροῦσε νά ἀντιτάξῃ κανεὶς σ' αὐτὸ τὸ ἐπιχείρημα τὴν ἀποψη, ὅτι οἱ ἀνισότητες δέν προϋποθέτουν ἀναγκαστικὰ τὴν ταυτόχρονη μὴ ὑπαρξὴ γιὰ ἓνα καὶ τὸ αὐτὸ σωματίο καὶ ὅτι οἱ ἀνισότητες μποροῦν νά θεωρηθοῦν ὡς ἔκφραση τῆς στατιστικῆς διασπορᾶς τῶν τιμῶν τῶν παρατηρήσιμων μεγεθῶν ἑνὸς συνόλου N ἀπὸ μικροσωμάτια. Στὴν περίπτωση αὐτὴ κάθε σωματίο θὰ εἶχε ἀκριβῆ θέση καὶ ὄρμη (στὰ ὅρια πού ἐπιβάλλει ἡ μὴ σημειακὴ τους φύση) ἀλλὰ οἱ τιμές αὐτὲς θὰ μεταβάλλονταν μὲ τρόπο χασοτικὸ μέσα στὸ χῶρο καὶ στὸ χρόνο, ἐξαιτίας τῶν τυχαίων ἀλληλεπιδράσεων τοῦ σωματίου μὲ τὸ περιβάλλον του.

Τὸ γεγονός, ὅτι τὰ δυὸ συζυγῆ μεγέθη δέν μποροῦν νά μετρηθοῦν τὴν ἴδια στιγμῆ, δέν ἀποδείχνει ὅτι οἱ μεταβλητὲς αὐτὲς δέν ὑπάρχουν ταυτόχρονα πρὶν ἀπὸ τὴ μέτρηση. Τὸ ἀσύμβατο δέν θὰ ἔχει τότε ὀντικό, ἀλλὰ ὀπερασιοναλιστικὸ χαρακτήρα. Ἀπὸ τίς φωτογραφίες πού λαμβάνονται στοὺς θαλάμους φουσαλίδων, λ.χ., ὑπολογίζονται οἱ τιμές τῶν δυναμικῶν μεταβλητῶν

*Προτιμῶ τὸν ὄρο, ἀνισότητες τοῦ Heisenberg, πού πρότεινε ὁ J. M. Lévy - Leblond, ἀπὸ τοὺς κλασικοὺς ὄρους: ἀβεβαιότητες ἢ ἀπροσδιοριστία, γιατί ὁ ὄρος αὐτὸς εἶναι ἐλεύθερος ἀπὸ τὴν ἰδεολογικὴ φόρτιση πού ἔχουν οἱ δύο ἄλλοι.

ένος σωματίου, με άφετηρία τὰ γεωμετρικά δεδομένα τῆς τροχιᾶς καὶ τὴν ἔνταση τῶν πεδίων, πράγμα ποὺ ἀποτελεῖ μὴν ἔμμεση ἀποδοχὴ ὅτι τὰ μεγέθη αὐτὰ ὑπάρχουν ταυτόχρονα. Φυσικά αὐτὸ ποὺ παρατηρεῖται δὲν εἶναι ἡ τροχιά τοῦ σωματίου καθεαυτοῦ, ἀλλὰ τὸ τελικὸ ἀποτέλεσμα τῶν ἀδιάκοπων κρούσεών του μετὰ τὰ ἄτομα τοῦ ὑλικοῦ μέσου. Ὡστόσο τὸ γεγονός αὐτὸ δὲν σημαίνει ὅτι στὸ «ἀπόλυτο κενὸ» τὸ σωματίο δὲν θὰ εἶχε καθορισμένη τροχιά. Ἄλλὰ καθορισμένη τροχιά σημαίνει καὶ καθορισμένη τιμὴ τῆς ὀρμῆς του, τὴν κάθε στιγμῇ.

Τὸ ὄριο ἀκριβείας ποὺ καθορίζουν οἱ ἀνισότητες τοῦ Heisenberg ἀμφισβητεῖται, καὶ ὑπάρχουν ἐρμηνευτὲς ποὺ βεβαιώνουν ὅτι τὸ ὄριο αὐτὸ μπορεῖ νὰ ξεπεραστεῖ, ὄχι μόνον σὲ νοητικά, ἀλλὰ καὶ σὲ πραγματικὰ πειράματα.

Ὁ Bohr εἰσήγαγε τὴν ἔννοια τῆς *συμπληρωματικότητας* γιὰ νὰ ἀντιμετωπίσει τὸ γεγονός ὅτι ὑπάρχουν πειράματα καὶ περιγραφὲς ἀσύμβατες, ἀλλὰ ταυτόχρονα συμπληρωματικὲς (λ.χ. δυναμικὴ ἢ χωροχρονικὴ περιγραφή). Ἡ ἀσυμβατότητα αὐτὴ εἶχε γιὰ τὸν Bohr μᾶλλον ὀπερασιοναλιστικὸ χαρακτήρα. Ἄλλοι τῆς ἀπέδωσαν ὄντολογικὸ status, βεβαιώνοντας τὴν ἀνυπαρξία, γιὰ τὴν ἴδια στιγμῇ, τοῦ ἑνὸς ἀπὸ τὰ δύο συμπληρωματικὰ μεγέθη. Ἄλλὰ σὲ μιὰ ρεαλιστικὴ ἐρμηνεία τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς, ἡ συμπληρωματικὴ θὰ μπορούσε νὰ ἐκφράσει τὴν ἀντίθεση καὶ ταυτόχρονα τὴ φυσικὴ ἐνότητα τῶν συζυγῶν μεταβλητῶν.

Λέγεται ὅτι οἱ μεταβλητὲς τῶν κβαντικῶν συστημάτων δὲν εἶναι *ἐνεργεῖα* ἀλλὰ ὅτι ἀποτελοῦν ἀσαφῶς καθορισμένες δυναμικότητες, ποὺ *πραγματώνονται* κατὰ τὴ μέτρηση (ἢ κατὰ τὴν παρατήρηση). Ἄς ἀφήσουμε κατὰ μέρος τὸν παρατηρητὴ, καθὼς καὶ τὸν ὑποκειμενισμό ποὺ ἀπορρέει ἀπὸ τὴν ἀναφορά του, μιὰ καὶ ὁ ἐπιστήμονας γενικά δὲν συμμετέχει ἄμεσα στὰ μεγάλα πειράματα τῆς σύγχρονης μικροφυσικῆς. Τὸ πείραμα (ἢ ἡ μέτρηση) εἶναι μιὰ *ἀντικειμενικὴ* φυσικὴ διεργασία ἀνάμεσα σὲ φυσικὰ συστήματα. Ὑπάρχουν περιπτώσεις ὅπου πραγματώνεται κάποια δυναμικότητα (δημιουργία μιᾶς ἰδιοκατάστασης κατὰ τὴ μέτρηση). Ἄλλὰ ἡ πραγμάτωση αὐτὴ σημαίνει στὴν οὐσία μιὰ ποιοτικὴ μεταβολὴ τῆς κατάστασης ποὺ ὑπάρχει πρὶν ἀπὸ τὴ μέτρηση. Ὑπάρχουν ἐπίσης περιπτώσεις ὅπου ἡ μέτρηση *καταγράφει* ἄπλῶς ἓνα μέγεθος ποὺ προϋπάρχει, καὶ δὲν πραγματώνει καμιά δυναμικότητα.

Ἔχουμε δικαίωμα νὰ δεχτοῦμε τὴν ὑπαρξὴ μεγεθῶν ποὺ εἶναι «ἐνεργεῖα» καὶ ἄλλων ποὺ δημιουργοῦνται ἀπὸ τὴ μέτρηση. Ἐδῶ ἐκδηλώνεται ὁ ἐνεργητικὸς ρόλος τοῦ ὄργάνου. Ἄλλὰ μιὰ δυνατότητα ποὺ πραγματώνεται προϋποθέτει τὴν ὑπαρξὴ, *ἐνεργεῖα*, ὀρισμένων ἄλλων στοιχείων πραγματικότητας, τὰ ὁποῖα, κάτω ἀπὸ καθορισμένες συνθῆκες, μετασχηματίζονται σὲ στοιχεῖα χαρακτηριστικὰ τῆς νέας κατάστασης. (Ὁ Ἀριστοτέλης ἔλεγε ὅτι τὸ πραγματωμένο εἶναι μέτρο τοῦ δυνάμει, καὶ εἶχε δίκιο.) Ὑπάρχει λοιπὸν μιὰ ἀμφιμονοσήμαντὴ ἀντιστοιχία ἀνάμεσα στὰ στοιχεῖα αὐτὰ καὶ στὰ παρατηρήσιμα μεγέθη ποὺ πραγματώνονται ἀπὸ τὴ μέτρηση. Σ' ἄλλες

περιπτώσεις θα ήταν δυνατόν να υποθέσουμε ότι τα «μη συμβατά» παρατηρήσιμα μεγέθη συνυπάρχουν (π.χ. ή όρμη και ή θέση). Η μέτρηση ενός παρατηρήσιμου μεγέθους δεν σημαίνει λοιπόν υποχρεωτικά την άνυπαρξία κάθε μεγέθους ασύμβατου μ' αυτό.

Η απαγόρευση, από την άποψη της λογικής των προτάσεων, δεν αποδειχνει τίποτα, γιατί ή δομή αυτών των προτάσεων δεν εκφράζει παρά την τωρινή δομή της κβαντικής μηχανικής. Αν φτάσουμε να ξεπεράσουμε στην πράξη το όριο που θέτουν οί ανισότητες του Heisenberg, ή αν φτάσουμε να μετρήσουμε δυο ασύμβατα παρατηρήσιμα μεγέθη, τότε ή λογική των κβαντικών προτάσεων θα πρέπει να τροποποιηθεί.* Είναι γνωστό ότι μιὰ τέτοια δυνατότητα δεν αποκλείεται από τη σύγχρονη μικροφυσική.

Αλλά δεν υπάρχει μόνον τὸ πείραμα ή ή μέτρηση. Υπάρχει επίσης και προπαντός ή φύση, όπου βέβαια πραγματοποιούνται μικροφυσικά γεγονότα: ραδιενεργές διασπάσεις, έκπομπή ακτινοβολιών, κίνηση των μικροσωματίων στο χωρόχρονο, κτλ. Όλα αυτά τὰ γεγονότα, τὰ ὁποῖα δὲν «παρατηρούνται», υπάρχουν και θα ήταν γελοῖο νὰ ἀρνηθεῖ κανεὶς τὴν ὑπαρξή τους. Η ἀρχή της άνυπαρξίας των μεγεθών ή των συμβάντων, που δὲν ἔχουν παρατηρηθεῖ, δὲν εἶναι φυσική ἀρχή, ἀλλὰ ἀξίωμα ἐπιστημολογικό.

Θὰ μπορούσε νὰ διατυπώσει κανεὶς ὡς ἐξῆς ἓνα ἀντίθετο ἀξίωμα: *Εἶναι δυνατόν νὰ ὑπάρχουν μεγέθη και συμβάντα που δὲν εἶναι παρατηρήσιμα και δυο συζυγῆ μεγέθη μποροῦν νὰ ἔχουν ταυτόχρονη ὑπαρξη.* Πρέπει συνεπῶς νὰ ἀναζητήσουμε πειράματα που θα ἀπόδειχναν τὴν ὑπαρξή τους, και θεωρίες πληρέστερες ἀπὸ τις σημερινές. Μιὰ τέτοια ἀρχή θα μπορούσε νὰ παίξει τὸ ρόλο ἐπιστημολογικοῦ καταλύτη για τὴν ἔρμηνεία και ἔνδεχομένως για μιὰ νέα διατύπωση της κβαντικής φυσικής.

4. Η ἔννοια τοῦ ἡμι-άνοικτοῦ συστήματος

Η κλασική φυσική δέχεται τὴν ἔννοια τοῦ κλειστοῦ συστήματος: ἓνος συστήματος που δὲν ἀνταλλάσσει ἐνέργεια με τὸ περιβάλλον. Η πραγματική ὑπαρξη τέτοιων συστημάτων βρισκόταν βέβαια σὲ ἀντίφαση με τὴν ἀποδοχή ἀλληλεπιδράσεων με ἄπειρη ταχύτητα. Αλλά ή ἔννοια ἀποδείχτηκε γόνιμη και ἀποτέλεσε βασική ἔννοια της φυσικής (ή ἀρχή της ἀδράνειας προϋποθέτει τὴν ὑπαρξη ἀπομονωμένων, ἄρα κλειστῶν συστημάτων).

Και ή κβαντική μηχανική ἀποδέχεται αὐτή τὴν ἔννοια. Είναι ὅμως ή ἔννοια τόσο λειτουργική, ὅσο στήν κλασική φυσική; Τὸ κλασικὸ σωματίο, ἔστω κι ἂν ὑφίσταται τὴ δράση ἐξωτερικῶν «δυνάμεων», διατηρεῖ τὴν ταυτότητά του: τὸ μόνο που τροποποιεῖται εἶναι ή ποσότητα της κίνησής του.

*Τὸ σημερινό, μὴ μπούλειο πλέγμα θα πρέπει τότε νὰ ἐνσωματωθεῖ ἐν μέρει σὲ ἓνα κλασικὸ πλέγμα τοῦ Boole.

Ἀκόμα καὶ ἡ κλασικὴ στατιστικὴ φυσικὴ δέχεται αὐτὴ τὴν ἐξιδανίκευση: τὴν ποσοτικὴ μεταβολή, κάτω ἀπὸ τὴν ἐπίδραση ἐξωτερικῶν δυνάμεων, ὀρισμένων ἀπὸ τὰ μεγέθη τοῦ συστήματος. Ἀλλὰ τὰ κβαντικὰ συστήματα δὲν εἶναι ἀπογυμνωμένα ἀπὸ ιδιότητες, στὸν ἴδιο βαθμὸ μὲ τὰ κλασικά. Τὰ νέα συστήματα μποροῦν νὰ ὑποστοῦν ποιοτικὲς ἀλλαγές. Ἡ ρελατιβιστικὴ κβαντικὴ μηχανικὴ περιγράφει φαινόμενα δημιουργίας καὶ καταστροφῆς (ἄρα μετασχηματισμοὺς καὶ μεταβολές τοῦ ἀριθμοῦ τῶν σωματίων τοῦ συστήματος) καὶ τὰ φαινόμενα αὐτὰ πραγματοποιοῦνται καὶ στὸ ἐργαστήριον, προπαντὸς στὶς ὑψηλές ἐνέργειες. Εἶναι λοιπὸν ἀκόμα δυνατὸν νὰ διατηρήσουμε τὴν ἔννοια τοῦ κλειστοῦ συστήματος, καὶ ταυτόχρονα νὰ ἔχουμε μιὰν ἱκανοποιητικὴ παράσταση τῆς μικροφυσικῆς πραγματικότητος;

Ἡ ἀλληλεπίδραση δὲν εἶναι πλέον τὸ φάντασμα τῆς νευτώνειας φυσικῆς. Εἶναι μιὰ φυσικὴ πραγματικότης μὲ ποσοτικὰ καὶ ποιοτικὰ χαρακτηριστικά. Οἱ ἀλληλεπιδράσεις, ἐπιπλέον, ἔχουν διαφοροποιηθεῖ καὶ συγκεκριμενοποιηθεῖ ἀπὸ τὴ σύγχρονη φυσικὴ. Σήμερα εἶναι γνωστὲς τέσσερις μορφές ἀλληλεπίδρασης, ποὺ βρίσκονται στὴ βάση ὅλων τῶν γνωστῶν φυσικῶν φαινομένων.

Οἱ τέσσερις φυσικὲς ἀλληλεπιδράσεις

Ἀλληλεπίδραση	Σταθερὰ συζεύξεως	Σχετικὴ ἔνταση	Ἀκτίνια	Χαρακτηριστικὸς χρόνος	Κβάντο	Ἀθροιστικότης
Ἴσχυρὲς	$\Gamma = 1$	1	10^{-13}cm	10^{-23}sec	π-μεσόνια	μικτὴ
Ἡλεκτρομαγνητικὲς	$a = 1/137$	10^{-4}	∞	10^{-16}sec	φωτόνια	ἀλγεβρικὴ
Ἀσθενεῖς	$G = \frac{10^{-3}}{M\rho^2}$	10^{-13}	$< 10^{-14}\text{cm}$	10^{-8}sec	W^+, W^-, W^0	ἀλγεβρικὴ
Βαρυτικὲς		10^{-30}	∞		βαρυτόνιο	ἀθροιστικὴ

Οἱ τέσσερις αὐτὲς ἀλληλεπιδράσεις εἶναι οἱ φορεῖς τῶν ἐνεργειακῶν ἀνταλλαγῶν ἀνάμεσα στὰ φυσικὰ συστήματα. Ἔτσι οἱ ἰσχυρὲς ἀλληλεπιδράσεις εἶναι ὑπεύθυνες, ἀνάμεσα στὰ ἄλλα, γιὰ τὶς πυρηνικὲς «δυνάμεις» καὶ γιὰ ὀρισμένους μετασχηματισμοὺς στοιχειωδῶν σωματίων (ἄδρονίων). Οἱ ἠλεκτρομαγνητικὲς ἀλληλεπιδράσεις εἶναι ὑπεύθυνες γιὰ ὅλα τὰ ἠλεκτρομαγνητικά, χημικά, βιολογικά κτλ. — φαινόμενα. Οἱ ἀσθενεῖς ἐπεμβαίνουν σὲ

όρισμένες διασπάσεις στοιχειωδών σωματίων (από ασθενή όδό, λ.χ.: $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$). Η βαρυτική αλληλεπίδραση, τέλος, παίζει θεμελιώδη ρόλο στην κλίμακα του μεγάκοσμου, στα γήινα φαινόμενα, κτλ.

Οί φυσικές αλληλεπιδράσεις δέν αποτελούν μόνο οργανικό μέρος τών φαινομένων. Συνιστούν επίσης τόν έννοιολογικό πυρήνα τών φυσικών θεωριών. Πράγματι, ανάλογα με τὰ κύρια χαρακτηριστικά (πλασματικά ή πραγματικά) τών αλληλεπιδράσεων, οί φυσικοί όδηγήθηκαν σέ τούτη ή εκείνη τή μορφή φυσικής θεωρίας. Έτσι οί συνεχείς αλληλεπιδράσεις με άπειρη ταχύτητα αποτελούν τόν έννοιολογικό πυρήνα τής κλασικής μηχανικής και τών άλλων κλάδων τής προρελατιβιστικής φυσικής. Συνεχείς αλληλεπιδράσεις με πεπερασμένη ταχύτητα όδηγούν στή ρελατιβιστική φυσική. Άσυνέχεια και άπειρη ταχύτητα αποτελούν τò σημείο άφετηρίας τής μη ρελατιβιστικής κβαντικής μηχανικής. Η ρελατιβιστική κβαντική μηχανική, τέλος, προϋποθέτει αλληλεπιδράσεις άσυνεχείς και με πεπερασμένη ταχύτητα.

Βλέπουμε τò δρόμο πού διανύθηκε: από τήν κατηγορία τής αλληλεπίδρασης, περάσαμε στή φυσική έννοια. Η αλληλεπίδραση είναι τώρα συγκεκριμένη και ειδική, είναι μετρήσιμη και μετέχει στα φαινόμενα μέσα από λίγο-πολύ γνωστές διαδικασίες. Με ένα είδος επιστροφής, μπορεί νά φτάσει κανείς στήν άφετηρία, έχοντας κάνει στή μεταξύ ένα βήμα πρòς τὰ εμπρός: ή κατηγορία τής αλληλεπίδρασης ούσιαστικοποιείται πλέον με συγκεκριμένες μορφές: δέν είναι τò καθολικό άφηρημένο, αλλά τò καθολικό πού συνδέεται με τò ειδικό, μέσα από ειδικές σχέσεις.

Οί αλληλεπιδράσεις αυτές (και προπαντός οί τρεις πρώτες, γιατί ή βαρυτική είναι άμελητέα σέ μικροσκοπική κλίμακα) δέν είναι έξωτερικές σέ σχέση με τò κβαντικό σύστημα. Ο ρόλος τους, επιπλέον, δέν είναι νά προκαλούν μόνο ποσοτικές αλλαγές. Η ποιότητα, άρα ή φύση του κβαντικού αντικειμένου, έξαρτάται συχνά από τήν ένταση αυτών τών αλληλεπιδράσεων, πού συνιστούν ένα «μέσον» ή ένα «ύπόβαθρο» οργανικά δεμένο με τò σωματίο.

Μπορούμε, άκολουθώντας τόν A. Müller, νά κατατάξουμε τις φυσικές αλληλεπιδράσεις σέ τρεις τύπους: A, B και C¹⁰.

Αλληλεπιδράσεις τύπου A: Πρόκειται για τις έσωτερικές αλληλεπιδράσεις πού καθορίζουν τήν ποιότητα και τή (σχετική) σταθερότητα του συστήματος. Πρόκειται, ανάλογα με τή φύση του συστήματος, για ισχυρές, άσθενείς ή ήλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις (ή και άλλες ίσως άγνωστες άκόμα). Οί αλληλεπιδράσεις αυτές άποκαθιστούν ανταλλαγές και δομές ανάμεσα στα μέρη του αντικειμένου, πού παρουσιάζεται σαν μιá όλότητα, σχετικά αυτόνομη πρòς τò περιβάλλον της.

Αλληλεπιδράσεις τύπου B: Πρόκειται για τις αλληλεπιδράσεις του κβαντικού συστήματος με τò περιβάλλον. Μπορούν νά ανήκουν σέ όποιαδήποτε μορφή αλληλεπιδράσεων. Συνιστούν τις συνθήκες τής ταυτότητας ή τής μεταβολής του αντικειμένου και δρούν με τò διάμεσο τών έσωτερικών δο-

μῶν του. Μεταβάλλονται μὲ τρόπο ἄτακτο, τυχαῖο (aléatoire). Ὁ χαρακτήρας αὐτὸς μπορεῖ νὰ ἐξηγήσει τὴν χαοτικὴν κίνησιν τοῦ μικροσωματίου. Ἐτσι, θὰ μπορούσε νὰ ὑποστηρίξει κανεὶς τὴν ἄποψιν, ὅτι οἱ νόμοι τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς, πού εἶναι κυρίως πιθανοκρατικοί, εἶναι δυνατόν νὰ ἐξηγηθοῦν, τουλάχιστον καταρχήν, ἀπὸ τὶς τυχαῖες διακυμάνσεις τῶν ἀλληλεπιδράσεων τύπου Β. Ἀλλὰ ἔτσι τὸ τυχαῖο (hasard) παρουσιάζεται σὰν ὄντολογικὴ, καὶ ὄχι ἀπλᾶ ἐπιστημολογικὴ κατηγορία.

Ἀλληλεπιδράσεις τύπου C: Πρόκειται γιὰ τὶς ἀλληλεπιδράσεις τοῦ κβαντικοῦ συστήματος μὲ τὰ ὄργανα τῆς μέτρησης. Μποροῦν νὰ διαχωρίσουν ἓνα μίγμα (στατιστικὸ σύνολο σωματίων πού βρίσκονται σὲ διαφορετικὲς καταστάσεις) στὰ συστατικά του. Ὄταν πρόκειται γιὰ τὶς λεγόμενες καταστάσεις ἐπαλληλίας, σ' αὐτὲς θὰ ὀφειλόταν ἡ πραγματοποίησις τούτης ἢ ἐκείνης τῆς δυναμικότητος, μὲ μιὰ καθορισμένη πιθανότητα. Καὶ ἐδῶ τὸ τυχαῖο δὲν θὰ ἦταν οὔτε ἀναίτιο, οὔτε ἀπροσδιόριστο.

Ἡ κλασικὴ μηχανικὴ ἀγνοεῖ τὶς ἀλληλεπιδράσεις τύπου Α: τὰ κλασικὰ σωματῖα δὲν ἔχουν δομὴ, ἐσωτερικὴ δυναμικὴ, ποιότητα. Ἐπίσης οἱ ἀλληλεπιδράσεις Β καὶ C θεωροῦνται ὅτι μεταβάλλονται μὲ τρόπο συνεχῆ, καὶ ὅτι ἡ ἔντασίς τους μπορεῖ νὰ γίνῃ ὅσοδήποτε μικρὴ. Μπορεῖ λοιπὸν νὰ θεωρηθεῖ ὅτι, σὲ κατάλληλες συνθήκες, δὲν μεταβάλλουν τὴν κατάστασιν τοῦ συστήματος.

Ἡ ἀπλούστευσις αὐτὴ δὲν εἶναι δυνατὴ γιὰ τὴν κβαντικὴν μηχανικὴν. Ἐδῶ τὸ σωματῖο συνδέεται ὀργανικᾶ μὲ τὸ περιβάλλον. Στὴν πραγματικότητα πρόκειται γιὰ ἓνα μισο-ἀνοικτὸ (ἢ ἀνοικτὸ-κλειστὸ) σύστημα. Μισο-ἀνοικτὸ ἢ ἀνοικτὸ-κλειστὸ σύστημα σημαίνει ἓνα σύστημα πού ἀνταλλάσσει ὕλη (φωτόνια ἢ ἄλλα σωματῖα) μὲ τὸ περιβάλλον του, ἐνῶ ταυτόχρονα διατηρεῖ, ὑπὸ ὀρισμένους ὄρους, τὶς δομὲς καὶ συνεπῶς τὴν ταυτότητά του.

Εἶναι προφανὲς ὅτι ἡ τυπικὴ λογικὴ δὲν ἀρκεῖ γιὰ νὰ χαρακτηρίσει ἓνα τέτοιο σύστημα: Ἡ κατάστασις ἐδῶ τροποποιεῖται μὲ χαοτικὸν τρόπο. Τὸ σύστημα μπορεῖ ἐπίσης νὰ ὑποστῇ ποιοτικὸς μετασχηματισμὸς πού ἀκολουθοῦν τοὺς νόμους τοῦ τυχαίου. Ὄριακά, ἂν ὑποθέσουμε ὅτι $B \rightarrow 0$ καὶ $C \rightarrow 0$, ξαναβρίσκουμε τὴν κλασικὴν ἀφαίρεσιν. Ἀλλὰ ἡ προσέγγισις αὐτὴ δὲν σημαίνει ὅτι ἀνάμεσα στὸ κλασικὸ καὶ στὸ κβαντικὸ σύστημα δὲν ὑπάρχει παρὰ μόνον ποσοτικὴ διαφορά. Ἡ προσέγγισις αὐτὴ δὲν πρέπει νὰ ἀποκρύπτει τὴν ποιοτικὴν διαφοράν ἀνάμεσα στὰ δύο συστήματα καὶ, συνεπῶς, ἀνάμεσα στὶς κλασικὲς καὶ στὶς κβαντικὲς ἔννοιες.

5. Τὸ πρόβλημα τοῦ διαχωρίσιμου τῶν κβαντικῶν συστημάτων.

Ἡ ἔννοια τοῦ κλειστοῦ, ἀπομονωμένου συστήματος εἶναι μιὰ ἀφαίρεσις πού γίνεται ὅλο καὶ λιγότερο λειτουργικὴ στὶς φυσικὲς ἐπιστῆμες καὶ ἰδιαίτερα στὴν κβαντικὴν μηχανικὴν. Μποροῦμε βέβαια νὰ μιλάμε πάντα γιὰ

«ἐλεύθερα» σωμάτια, καὶ νὰ τοὺς ἀποδίδουμε ἓνα καταστατικὸ διάνυσμα (εἶναι ἄραγε τυχαῖο ὅτι πρέπει νὰ χρησιμοποιήσουμε εἰδικές μαθηματικές τεχνικές, γιὰ νὰ «νορμαλίσουμε» αὐτὸ τὸ διάνυσμα;). Ἄλλὰ τὸ σωμάτιο αὐτὸ εἶναι σκιά φυσικοῦ σωματίου, χωρὶς πραγματικές ιδιότητες. Ἡ ἴδια ἢ ὕπαρξή του ἐξασφαλίζεται μόνο χάρι στο πλάσμα τῆς κυματοδέσμης, καὶ ἡ ὕπαρξη αὐτὴ εἶναι καθὼς γνωρίζουμε πολὺ ἐφήμερη: ἡ δέσμη «διαστέλλεται», καὶ τὸ σωμάτιο μπορεῖ νὰ καταλάβει ἓνα χῶρο ὅσοδήποτε μεγάλο.

Ἐνα πραγματικὸ σωμάτιο βρίσκεται πάντα σὲ ἀλληλεπίδραση μὲ τὸ περιβάλλον του. Μποροῦμε νὰ τοῦ ἀποδώσουμε ἓνα «κύτταρο» στὸ χῶρο τῶν φάσεων. Ὡστόσο ἡ μορφή αὐτοῦ τοῦ κυττάρου ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὶς ἀλληλεπιδράσεις τοῦ σωματίου. Στὰ πραγματικὰ κβαντικὰ συστήματα, τὰ σωμάτια ἀλληλεπιδροῦν πάντα, καὶ τὰ φαινόμενα, ἄρα οἱ ἀλλαγές, ὀφείλονται σ' αὐτὲς τὶς ἀλληλεπιδράσεις.

Ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ δέχεται τὴν ἐξιδανίκευση τοῦ ἀπομονωμένου συστήματος. Ὑπάρχουν ὡστόσο περιπτώσεις, ὅπου τὸ διαχωρισμὸς δὲν εἶναι καθόλου προφανές. Στὴν ἱστορία τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς τὸ πρόβλημα αὐτὸ συνδέθηκε κυρίως μὲ τὸ νοητικὸ πείραμα τῶν Einstein - Podolsky - Rosen (EPR), ποὺ ἀφορᾷ συστήματα ἀπομακρυσμένα στὸ χῶρο, ἀλλὰ τὰ ὁποῖα εἶχαν ἀλληλεπιδράσει στὸ παρελθόν. Ἄς συγκεκριμενοποιήσουμε αὐτὸ τὸ πρόβλημα.

Ἐστω ἓνα σύστημα ποὺ ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο σωμάτια, μὲ συνολικὸ σπῖν μηδέν. Χωρίζουμε τὰ σωμάτια μὲ κάποια μέθοδο ποὺ διατηρεῖ τὸ ὅλικὸ σπῖν. Μὲ τὴ βοήθεια ἑνὸς ὀργάνου Stern-Gerlach, μετροῦμε σὲ συνέχεια τὴ συνιστώσα τοῦ σπῖν τοῦ ἑνὸς σωματίου, ὡς πρὸς ἓναν ἄξονα. Ἐστω ὅτι μετρήσαμε τὴ συνιστώσα ὡς πρὸς τὸν ἄξονα OZ, τοῦ S_1 . Ἄν βρήκαμε τὴν τιμὴ $+1/2$, τότε μποροῦμε νὰ προβλέψουμε μὲ βεβαιότητα ὅτι μιὰ μέτρηση τῆς ἴδιας συνιστώσας στὸ S_2 θὰ ἔδινε τὴν τιμὴ $-1/2$.

Αὐτὴ ἡ δυνατότητα γιὰ πρόβλεψη δὲν θὰ εἶχε τίποτα τὸ ἐκπληκτικὸ, ἂν ἐπρόκειτο γιὰ κλασικὰ συστήματα. Ἄλλὰ στὴν κβαντικὴ μηχανικὴ γίνεται γενικὰ δεκτὸ ὅτι οἱ συνιστώσες τοῦ σπῖν (γενικότερα οἱ ἰδιοτιμὲς τῶν παρατηρήσιμων μεγεθῶν) δὲν εἶναι «ἐνεργεῖα», ἀλλὰ πραγματώνονται κατὰ τὴ μέτρηση. Γιατί λοιπὸν τὸ S_2 πραγματώνει μιὰ ὀρισμένη δυναμικότητα μόλις γίνε μιὰ μέτρηση στὸ S_1 ; Πῶς «γνωρίζει» ὅτι ἔγινε κάποια μέτρηση στὸ S_1 παρὰ τὸ γεγονὸς ὅτι τὰ δύο σωμάτια εἶναι ἀπομακρυσμένα στὸ χῶρο;

Σύμφωνα μὲ τοὺς EPR, ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ δὲν εἶναι πλήρης θεωρία, ἀπὸ τὴ στιγμή ποὺ δὲν προβλέπει τέτοιες συσχετίσεις¹¹. Ὁ Einstein ὑπερασπίσθηκε τὸν πραγματικὸ διαχωρισμὸ τῶν συστημάτων, ἄρα τὴν ἀπουσία ἀλληλεπίδρασης ἀνάμεσα στὸ S_1 καὶ στὸ S_2 κατὰ τὴ μέτρηση¹². Γιὰ τὸν Bohr, ἀντίθετα, ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ εἶναι πλήρης. Ὁ συσχετισμὸς ἀνάμεσα στὰ S_1 καὶ S_2 ἐξηγεῖται, κατ' αὐτόν, ἀπὸ τὸ γεγονὸς ὅτι δύο συστήματα, τὰ ὁποῖα ἔχουν ἀλληλεπιδράσει κατὰ τὸ παρελθόν, συνεχίζουν νὰ ἀποτελοῦν ἓνα καὶ

μοναδικό, αδιαίρετο σύστημα, όσο μεγάλη κι αν είναι ή απόσταση που τα χωρίζει¹³.

Η συλλογιστική του Bohr προϋποθέτει, έμμεσα, την ύπαρξη αλληλεπιδράσεων με άπειρη ταχύτητα, που εξασφαλίζουν την άμεση αντίδραση του S_2 , στη μέτρηση που έγινε στο S_1 . Άλλα τέτοιες αλληλεπιδράσεις, που η φύση τους δεν προσδιορίζεται, βρίσκονται σε αντίθεση με το ρελατιβιστικό αξίωμα (για την ύπαρξη ενός ανώτερου όριου ταχύτητας των φυσικών αλληλεπιδράσεων).

Η επιχειρηματολογία του Bohr θεωρήθηκε ότι λύνει το παράδοξο. Στην πραγματικότητα η απάντηση απλώς επικαλύπτει και αποφεύγει το πρόβλημα, με την εισαγωγή μιας άοριστης και ελάχιστα φυσικής υπόθεσης. Μπορούμε να δεχτούμε αντίθετα, σύμφωνα με τον Einstein, τον πραγματικό διαχωρισμό των S_1 και S_2 , και να θεωρήσουμε ότι οι συσχετισμοί των μετρήσεων οφείλονται σε συσχετισμούς που αποκαταστάθηκαν κατά το χρονικό διάστημα όπου τα δυο συστήματα βρίσκονταν σε αλληλεπίδραση. Σ' αυτή την περίπτωση θα έχουμε συσχετισμό των αποτελεσμάτων, χωρίς να έχουμε αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα δύο συστήματα. Η κβαντική μηχανική δεν προβλέπει αυτό το φαινόμενο.

Άλλα η δυνατότητα για πρόβλεψη δεν σημαίνει υποχρεωτικά ότι το S_2 έχει πραγματοποιήσει τη συνιστώσα του σπίν, μόλις πραγματοποιήθηκε η μέτρηση στο S_1 . Η μέτρηση αυτή δεν ασκεί καμιά επίδραση πάνω του. Είναι έντελως λογικό να υποθέσουμε ότι, εξαιτίας της προηγούμενης αλληλεπίδρασής τους, το S_2 κατέχει ήδη την τιμή $-1/2$ για την συνιστώσα OZ του σπίν, ή τουλάχιστον κατέχει τα στοιχεία εκείνα πραγματικότητας, τα όποια, αν γίνει μια μέτρηση της συνιστώσας OZ , θα πραγματοποιήσουν την τιμή $-1/2$.

Ποιά είναι όμως η αλήθεια της θέσης ότι τα παρατηρήσιμα μεγέθη δεν έχουν ακριβείς τιμές πριν από τη μέτρηση; Προφανώς δεν πρόκειται για γενική αλήθεια: υπάρχουν πράγματι περιπτώσεις, όπου η μέτρηση απλώς καταγράφει μια προϋπάρχουσα ιδιοτιμή. Άλλα ακόμα και στην περίπτωση «δημιουργίας» μιας ιδιοτιμής (κατά τη λεγόμενη αναγωγή της κυματοδέσμης), το διαχωρίσιμο προϋποθέτει συσχετίσεις που δεν προβλέπονται από την υπάρχουσα θεωρία. Θέτει λοιπόν το πρόβλημα της πληρότητας και των λανθανουσών παραμέτρων.

Η Σχολή της Κοπεγχάγης θεωρεί ότι οι θεωρίες με λανθάνουσες παραμέτρους είναι ανέφικτες. Ωστόσο θεωρίες με λανθάνουσες παραμέτρους υπάρχουν. Άλλα η απάντησή τους στο ερώτημά μας δεν είναι ενιαία.

Έτσι η θεωρία του D. Bohm (1952) προβλέπει, καθώς είναι γνωστό, την ύπαρξη ενός «κβαντικού δυναμικού», που, κατ' αυτόν, εξηγεί αιτιοκρατικά τον πιθανοκρατικό χαρακτήρα των κβαντικών φαινομένων. Η θεωρία αυτή εισάγει ένα είδος μη-διαχωρίσιμου των κβαντικών συστημάτων. Άλλα έτσι υποχρεώνεται να εισαγάγει μιαν ad hoc αλληλεπίδραση, που, επιπλέον, δια-

δίδεται με άπειρη ταχύτητα¹⁴. Για να συμβιβάσει τη θεωρία του με τις ρελατιβιστικές απαιτήσεις ο Bohm, και μαζί του ο Hiley, υποθέτουν ότι η στιγμιαία αλληλεπίδραση που πραγματοποιείται με το κβαντικό δυναμικό δεν μεταφέρει κάποιο σήμα, το οποίο έχει περίπλοκη δομή και αποτελείται από μία σειρά συμβάντων¹⁵. Ωστόσο θα ήταν πραγματικά δύσκολο να φανταστεί κανείς μια αλληλεπίδραση, με παρατηρήσιμες συνέπειες, ή οποία θα εξασφάλιζε το μη-διαχωρίσιμο δυο συστημάτων, και ή οποία δεν θα μετέφερε ενέργεια, δηλαδή «σήμα» με πεπερασμένη ταχύτητα.

Οι ανισότητες του Bell¹⁶, αντίθετα, σημαίνουν ότι μπορεί να υπάρξουν τοπικές θεωρίες με λανθάνουσες παραμέτρους, δηλαδή θεωρίες που αποκαθιστούν την αιτιοκρατία και τον έντοπισμό (το διαχωρίσιμο) στο κβαντικό επίπεδο. Άλλα στην περίπτωση αυτή το πείραμα θα μπορούσε να διαψεύσει όρισμένες από τις προβλέψεις της σημερινής κβαντικής μηχανικής. Έτσι θα μπορούσαν να εκδηλωθούν οι λανθάνουσες παράμετροι.

Η επαλήθευση των ανισοτήτων του Bell θα ήταν ένα αποφασιστικό επιχείρημα υπέρ του διαχωρίσιμου. Ωστόσο όρισμένα αρνητικά πειραματικά αποτελέσματα θεωρήθηκαν, αν όχι σαν απόδειξη, τουλάχιστον σχεδόν σαν βέβαιο επιχείρημα υπέρ του μη-διαχωρίσιμου. Σύμφωνα με όρισμένους συγγραφείς, οι ανισότητες του Bell συνιστούσαν μιάν όδο διαφυγής απέναντι στο μη-διαχωρίσιμο, αλλά με την παραβίαση αυτών των ανισοτήτων και ή τελευταία αυτή έλπίδα εξατμίζεται. Είναι ωστόσο γνωστό ότι υπάρχουν και πειραματικά αποτελέσματα υπέρ των ανισοτήτων και ότι το πρόβλημα κάθε άλλο παρά κρίθηκε στο πειραματικό επίπεδο¹⁷.

Ο Louis de Broglie, τέλος, υποστηρίζει την άποψη ότι οι ανισότητες του Bell δεν είναι ακριβείς. Κατ' αυτόν οι λανθάνουσες παράμετροι είναι συμβιβαστές με τις προβλέψεις της σημερινής κβαντικής μηχανικής. Κατά τον de Broglie επίσης, οι μετρήσεις των σπιν των ηλεκτρονίων δεν σχετίζονται, άρα το διαχωρίσιμο (και ο έντοπισμός) δεν παραβιάζονται από πειράματα αυτού του είδους¹⁸.

Είναι αυτόνομο ότι το διαχωρίσιμο δεν μπορεί να έχει το νόημα μιας γενικής ιδιότητας των φυσικών συστημάτων. Οι συγκεκριμένες εκφάνσεις του πρέπει να έναρμονίζονται με την αλληλοσύνδεση και τον άμοιβαίο καθορισμό των φυσικών συστημάτων. Απαιτεί για τον έαυτό του την ιδιότητα του συγκεκριμένου, έναντίον της άοριστίας του μη-διαχωρίσιμου της όρθόδοξης σχολής, ή των μη τοπικών θεωριών με λανθάνουσες παραμέτρους.

Θα μπορούσε να συμφωνήσει κανείς με τους Bohm και Hiley στο να θεωρήσει το μη-διαχωρίσιμο σαν τη γενική ιδιότητα των κβαντικών συστημάτων και να αναζητήσει τον έντοπισμό (και το διαχωρίσιμο) σαν ειδικές όριακές περιπτώσεις. Άλλά ο μη-έντοπισμός, όπως εισάχθηκε από τον Bohr, καθώς και με το κβαντικό δυναμικό, είναι άόριστος, ενώ το διαχωρίσιμο (στην περίπτωση του πειράματος των EPR) είναι συγκεκριμένο και σύμφωνο με την αρχή της σχετικότητας.

Κάθε σύστημα ανήκει, σὲ τελευταία ἀνάλυση, σὲ μίαν εὐρύτερη ὁλότητα. Ἡ ταυτότητά του εἶναι λίγο-πολύ μιὰ ἀφαίρεση, καὶ προπαντὸς μιὰ ταυτότητα στιγμιαία. Ἐπίσης, καθὼς ὑπογραμμίσαμε, ἡ κατάσταση εἶναι καὶ αὐτὴ σχετικὴ ἔννοια, ἀπὸ δύο ἀπόψεις: τὴν *ὀντολογικὴ*, ποὺ σημαίνει ὅτι ἡ κατάσταση δὲν ὑπάρχει ἔξω ἀπὸ τὶς συσχετίσεις τοῦ συστήματος, καὶ τὴν *γνωσιολογικὴ*, ποὺ σημαίνει ὅτι κάθε ὀρισμὸς δὲν ἀφορᾷ παρὰ ἕναν ὀρισμένο ἀριθμὸ ἀπὸ τοὺς καθορισμοὺς τοῦ συστήματος. Καί, ἀκόμα, ὁ χαρακτήρας τῆς κατάστασης ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὶς μεταβλητὲς ποὺ ἐπιλέξαμε καὶ μπορεῖ νὰ εἶναι διαφορετικὸς, ἀνάλογα μὲ τὴν ἐπιλογή.* Τελικὰ, τὸ διαχωρίσιμο δὲν εἶναι παρὰ μιὰ στιγμή τοῦ μὴ-διαχωρίσιμου, δηλαδή τῆς ἀλληλοσύνδεσης τῶν φυσικῶν συστημάτων. Καὶ τὸ ἓνα καὶ τὸ ἄλλο πρέπει νὰ θεωροῦνται μὲ τρόπο συγκεκριμένο.

6. Διαχωρίσιμο καὶ μετασχηματισμὸς τῶν κβαντικῶν συστημάτων.

Ἀντιμετώπισαμε τὸ πρόβλημα τοῦ διαχωρίσιμου, κυρίως ἀπὸ τὴν ἄποψη τῶν συστημάτων ποὺ ἔχουν χωριστεῖ, ἀφοῦ ἀλληλεπίδρασαν ἐπὶ ἓνα χρονικὸ διάστημα Δt . Ἀλλὰ τὸ ζήτημα παρουσιάζει καὶ ἄλλες οὐσιαστικὲς ὁψεις.

Ἐστω ἓνα κβαντικὸ σύστημα S , τὸ ὁποῖο ἀλληλεπίδρα μὲ ἓνα ὄργανο μέτρησης A . Ἄν τὸ σύστημα ἀντιπροσωπεύεται ἀπὸ τὸ καταστατικὸ διάνυσμα $|\psi\rangle$, τότε ἡ μέτρηση θὰ μᾶς δώσει ἓνα σύνολο καταστάσεων $|\psi_i\rangle$, μὲ πιθανότητες:

$$\text{Prob } \psi_i = |\langle \psi | \psi_i \rangle|^2 \quad (1)$$

Πῶς μπορεῖ νὰ ἐρμηνευθεῖ ἡ δημιουργία ἰδιοκαταστάσεων, μὲ τὴν ἀλληλεπίδραση τοῦ κβαντικοῦ συστήματος καὶ τοῦ ὄργάνου;

Κατὰ τοὺς ὁπαδοὺς τοῦ μὴ διαχωρίσιμου, τὸ σύστημα καὶ τὸ ὄργανο σχηματίζουν ἓνα καὶ μοναδικό, ἀδιαίρετο σύστημα, $S + A$. Ἀλλὰ σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση, τὸ ὄλο θὰ ἔπρεπε νὰ ἐξελισσεται μὲ αἰτιοκρατικὸ τρόπο, σύμφωνα μὲ τὴν ἐξίσωση τοῦ Schrödinger: $\partial\Psi/\partial t = \Lambda\Psi$. Τότε ὅμως θὰ ἦταν ἀδύνατη ὁποιαδήποτε «ἀναγωγὴ κυματοδέσμης», κανένα συμβάν δὲν θὰ πραγματοποιοῦταν, καὶ ἡ (1) δὲν θὰ εἶχε ἀξία.

Γιὰ νὰ ἀντιμετώπισει τὸ ζήτημα, ὁ Bohr ἐφεῦρε ἕναν ἀπὸ μηχανῆς θεό:

*Ἄς συγκεκριμενοποιήσουμε μὲ ἓνα παράδειγμα: ἔστω ἓνα σύνολο ἀπὸ N σωματῖα, ὅπου ἓνα παρατηρήσιμο μέγεθος μπορεῖ νὰ πάρει δύο διαφορετικὲς τιμές, μὲ ἴσες πιθανότητες. Τὸ σύνολο βρίσκεται στὴν κατάσταση $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |u+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |u-\rangle$. Βρίσκεται λοιπὸν σὲ ἐπαλληλία καταστάσεων. Ἄς θεωρήσουμε τώρα ἓνα ἄλλο παρατηρήσιμο μέγεθος ποὺ δὲν ἐπιδέχεται παρὰ μία μόνη τιμὴ: τὸ ἴδιο σύνολο περιγράφεται τώρα ἀπὸ ἓνα καταστατικὸ διάνυσμα $|\Psi\rangle = \lambda |u\rangle$, ποὺ χαρακτηρίζει μιὰ καθαρή κατάσταση.

τὸν παρατηρητή. Ἡ ἐπέμβαση τοῦ παρατηρητῆ προκαλεῖ τὴν «ἀναγωγὴ τῆς κυματοδέσμης» καὶ πραγματοποιεῖ τὴν ἰδιοκατάσταση Ψ_i . Ἡ ἐπέμβαση αὐτὴ ἐνὸς «ὑποκειμένου», μιᾶς «συνείδησης» σ' ἓνα φυσικὸ φαινόμενο, εἶναι παράδοξη καὶ ὀδηγεῖ σὲ παράδοξες καταστάσεις.

Ἄν πράγματι ὁ παρατηρητὴς ἦταν παρὼν ἀπὸ τὴν ἀρχὴ τοῦ πειράματος, θὰ ἀποτελοῦσε καὶ αὐτὸς μέρος τοῦ ἐνιαίου συστήματος $S+A+O$. Ἀλλὰ σ' αὐτὴ τὴν περίπτωσιν ἢ συνείδησίν του θὰ ἔχανε τὴ μαγικὴ δύναμις γιὰ «ἀναγωγὴ». Θὰ ἔπρεπε λοιπὸν νὰ βρεθεῖ ἓνας ἄλλος παρατηρητὴς, O' , κ.ο.κ.

Μὲ τὴ λογικὴ τοῦ μὴ διαχωρίσιμου, θὰ ἔπρεπε, ὀριακά, νὰ θεωρήσουμε ὀλόκληρο τὸ σύμπαν U , σὰν ἐνιαῖο καὶ μὴ διαχωρίσιμο σύστημα. Ἀλλὰ τότε δὲν θὰ ὑπῆρχε ἐξωτερικὸς παρατηρητὴς ποὺ θὰ μποροῦσε νὰ προκαλέσει τὸ πέρασμα ἀπὸ τὴ μιὰ κατάσταση στὴν ἄλλη. Ἔτσι στὸ σύμπαν αὐτὸ δὲν θὰ συνέβαινε τίποτα¹⁹.

Ὅλοι αὐτοὶ οἱ διαλογισμοὶ δὲν λαβαίνουν ὑπόψιν τοὺς τὸ κύριο χαρακτηριστικὸ μιᾶς πραγματικῆς ἀλληλεπίδρασης: νὰ προκαλεῖ ποιοτικὲς μεταβολὲς στὸ κβαντικὸ σύστημα.

Ἡ ἀδυναμία αὐτῆς τῆς ἐρμηνείας ἀπεικονίζεται μὲ χτυπητὸ τρόπο στὸ παράδοξο τοῦ Schrödinger.

Ἔστω μιὰ μικρὴ ποσότητα ραδιενεργοῦ ὑλικοῦ, ποὺ στὸ χρονικὸ διάστημα Δt ἐκπέμπει ἓνα σωματίο. Τὸ ὑλικὸ αὐτὸ κλείνεται σὲ μιὰ σφαῖρα, τῆς ὁποίας τὸ δεξιὸ μισὸ συνδέεται μὲ ἓνα φωτοενισχυτὴ. Ὁ τελευταῖος, μέσω ἐνὸς μηχανισμοῦ, συνδέεται μὲ ἓνα κλουβὶ ποὺ περιέχει μιὰ γάτα καὶ μιὰ ἀμπούλα ὕδροκυάνιο. Ἄν τὸ σωματίο ἐκπεμφθεῖ πρὸς τὰ ἀριστερά, τὸ ζῶο σώζεται. Ἄν ἐκπεμφθεῖ πρὸς τὰ δεξιὰ, τὸ σύστημα τίθεται σὲ κίνηση, ἢ ἀμπούλα θραύεται καὶ δηλητηριάζει τὸ ζῶο. Οἱ πιθανότητες ἐκπομπῆς πρὸς τὰ δεξιὰ ἢ πρὸς τὰ ἀριστερά εἶναι ἴσες (1/2).

Πῶς θὰ ἐρμηνεύσουμε αὐτὸ τὸ φαινομενικὰ μὴ παράδοξο φαινόμενο; Κατὰ τὴν τρέχουσα ἐρμηνεία, τὸ ραδιενεργὸ ἄτομο βρίσκεται σὲ ἐπαλληλία καταστάσεων: $\Psi = 1/\sqrt{2} (\Psi_B + \Psi_D)$. Τὸ ὄργανο περιγράφεται ἀπὸ τὴ συνάρτηση $\Phi_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$. (Τὸ ὄργανο περιέχει τὸ μηχανισμό καὶ τὴ γάτα.) Πρὶν ἀπὸ τὴν ἀλληλεπίδραση, τὸ σύστημα: ραδιενεργὸ ὑλικὸ + ὄργανο + γάτα, περιγράφεται ἀπὸ τὴ συνάρτηση $\Psi = \Psi \cdot \Phi$, ἢ ὁποία ἐξελίσσεται αἰτιοκρατικὰ στὸ χρόνο. Μετὰ ἀπὸ τὴν ἀλληλεπίδραση πραγματοποιεῖται ἡ «ἀναγωγὴ τῆς κυματοδέσμης» καὶ ἡ γάτα θὰ εἶναι ἢ ζωντανὴ ἢ νεκρὴ.

Ἀλλὰ ἡ ἀναγωγὴ αὐτὴ εἶναι ἀδύνατη γιὰ τὸ ἐνιαῖο σύστημα $S+A$, ποὺ περιέχει ζωντανὴ καὶ νεκρὴ γάτα σὲ ἴση ποσότητα. Μᾶς χρειάζεται λοιπὸν ἓνας παρατηρητὴς, ποὺ ἢ «συνείδηση» του θὰ πραγματοποιήσῃ τὴν ἀναγωγὴ, καὶ θὰ σώσει ἢ θὰ σκοτώσῃ τὸ φτωχὸ ζῶο. Ἡ παράδοξη αὐτὴ, ἀλλὰ ἀναπόφευκτη στὰ ὀρθόδοξα πλαίσια, «ἐξήγησις» ἔχει πολλὰς ἀδύνατες πλευρὰς, ἀπὸ καθαρὰ φυσικὴ ἄποψιν.

Καταρχὴν ἐξομοιώνει δυὸ διαφορετικὰ συστήματα: τὸ κβαντικὸ σύστημα S καὶ τὸ ὄργανο A , ποὺ εἶναι μακροσκοπικὸ σύστημα καὶ γιὰ τὸ λόγο αὐτὸ

δέν μπορεί νά περιγραφεί ἀπό ἕνα κβαντικό καταστατικό διάνυσμα. Ἡ ἀδυναμία αὐτή γίνεται περισσότερο φανερή, μέ τήν παρουσία τοῦ παρατηρητῆ. Ἐπιπλέον, τὸ ὄργανο καί ὁ παρατηρητής εἶναι συστήματα ποιοτικῶς διαφορετικά μεταξύ τους καί ἀπό τὸ S (τὸ δεύτερο εἶναι ἕνα βιολογικὸ σύστημα) καί δέν μποροῦν νά περιγραφοῦν ἀπό τοὺς νόμους τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς. Κατὰ τήν ὀρθόδοξη ἄποψη, ἡ διαδικασία τῆς μέτρησης ἀφορᾷ τὸ ἐνιαῖο σύστημα $S + A + O$: ἡ «ἀναγωγή τῆς κυματοδέσμης» ἀφορᾷ ὀλόκληρο τὸ σύστημα. Ἀλλὰ τὸ πραγματικὰ κβαντικὸ φαινόμενο περιορίζεται στὸ S καί στὸ κβαντικὸ μέρος m τοῦ ὄργάνου. Τὸ ἀποτέλεσμα αὐτῆς τῆς ἀλληλεπίδρασης ἐνισχύεται καί μετατρέπεται σὲ μακροσκοπικὸ συμβάν.

Μποροῦμε συνεπῶς νά θεωρήσουμε ὅτι τὸ ὄργανο ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο μέρη: τὸ μικροσκοπικὸ m καί τὸ μακροσκοπικὸ M , καί νά φανταστοῦμε ἀνάμεσά τους ἕνα σύνορο, ἐκεῖ ὅπου ἀρχίζει τὸ γεγονός τῆς ἐνίσχυσης. Στὴν περίπτωση αὐτῆ ἡ παραγοντισμένη συνάρτηση θὰ ἦταν: $\Psi = \Psi \cdot \Phi_m$, ὅπου Φ_m εἶναι τὸ καταστατικὸ διάνυσμα τοῦ μικροσκοπικοῦ μέρους τοῦ ὄργάνου. Αὐτοῦ τοῦ μέρους ἡ «ἀναγωγή» καθορίζει τὸ ἀποτέλεσμα τῆς μέτρησης (τὴ δημιουργία τῆς ἰδιοκατάστασης Ψ_1 , τὴν ἐπιβίωση ἢ τὸ θάνατο τοῦ ζώου, στὸ παράδοξο τοῦ Schrödinger).

Ἀλλὰ πῶς πραγματοποιεῖται αὐτῆ ἡ «ἀναγωγή»; Τὸ φαινόμενο αὐτὸ δέν περιγράφεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση τοῦ Schrödinger. Ἡ ἐρμηνεία τῆς Κοπεγχάγης καί ἡ ἐπέμβαση τοῦ παρατηρητῆ δέν ἐξηγοῦν τὸ φαινόμενο: τὸ καθιστοῦν ἀκόμα περισσότερο παράδοξο. Καί θὰ πρέπει νά ὑπογραμμισθεῖ ὅτι, σύμφωνα μέ αὐτὴ τὴν ἐρμηνεία, ἡ ἐπαλληλία τῶν καταστάσεων φαίνεται νά σημαίνει ὅτι οἱ ἰδιοκαταστάσεις προϋπάρχουν καί πῶς ἡ μέτρηση δέν κάνει ἄλλο ἀπὸ τὸ νά ἐπιλέγει τούτη ἢ ἐκείνη τὴν ἰδιοκατάσταση. ("Ὅπως σὲ μιὰ παλλόμενη χορδή, οἱ ἰδιοκαταστάσεις ἐπιπροστίθενται, εἶναι ἀναλύσιμες θεωρητικὰ κατὰ τὴ μέθοδο Fourier, καί διαχωρίζονται πρακτικὰ ἀπὸ τὸ ὄργανο τῆς μέτρησης.) Ἀλλὰ μιὰ τέτοια ἀντίληψη γιὰ τὰ μικροσωμάτια εἶναι ἐλάχιστα ἀληθοφανής.

Ἡ ἐπαλληλία καί ἡ ἔννοια τῆς κυματοδέσμης εἶναι οὐσιαστικὰ προκβαντικῆς (κλασικῆς) ἔννοιες, πὸν εἰσάχθηκαν στὴν κυματομηχανικὴ μέ ἕνα εἶδος ἐπιστημονικῆς μεταφορᾶς, κατὰ τὴ διάρκεια τῆς διαμόρφωσης αὐτοῦ τοῦ κλάδου.

Ἡ ἔννοια τῆς κυματοδέσμης καί ἡ ἀναγωγή της βρίσκονται σὲ ἀντίθεση μέ τὰ δεδομένα τῆς φυσικῆς τῶν στοιχειωδῶν σωματίων, πὸν σύμφωνα μέ τίς ὑπάρχουσες ἐνδείξεις ἔχουν ἐσωτερικὴ δομὴ καί ἐνδεχομένως ἀποτελοῦνται ἀπὸ ὑπο-σωμάτια. Ἐνα τέτοιο σωματίο δέν μπορεί, φυσικά, νά εἶναι κυματοδέσμη.

Θὰ ἦταν ὥστόσο δυνατόν νά ἐπιχειρηθεῖ μιὰ περισσότερο φυσικὴ ἐρμηνεία τοῦ φαινομένου: Τὸ κβαντικὸ σύστημα δέν εἶναι κυματοδέσμη. Εἶναι ἕνα σωματίο ἐντοπισμένο στὸ χῶρο, πὸν ἔχει ἐσωτερικὴ δομὴ, καί ἕνα δυναμισμό καί ἰδιότητες πὸν ἀπορρέουν ἀπ' αὐτὴ τὴ δομὴ. Τὸ σωματίο μπο-

ρεί να υποστεί ποιοτικούς μετασχηματισμούς κάτω από την επίδραση του ὄργάνου (ἀλληλεπιδράσεις τύπου C). Οί δυναμικότητες που θα πραγματοποιούν, ἄρα ἡ δημιουργία ἑνὸς ὀρισμένου συνόλου ἰδιοκαταστάσεων (Ψ_i), ἐξαρτῶνται ἀπὸ τὴ φύση τοῦ συστήματος, τὴ φύση τοῦ ὄργάνου καὶ τὶς συν-
θῆκες.

Ἔχουμε λοιπὸν τὸ σχῆμα:



Ἀλλὰ τὸ σχῆμα αὐτὸ δὲν ἐκφράζει τὴν ἀναγωγή ἑνὸς πλασματικοῦ ὄντος. Σημαίνει τὸν ποιοτικὸ μετασχηματισμὸ ἑνὸς φυσικοῦ συστήματος (S), ἐξαιτίας τῆς ἀλληλεπίδρασής του μὲ ἓνα ἄλλο φυσικὸ σύστημα (m). Αὐτὴ ἡ μεταβολὴ δὲν περιγράφεται ἀπὸ τὴν τωρινὴ κβαντικὴ μηχανικὴ, ὅπως δὲν περιγράφεται καὶ ἡ λεγόμενη ἀναγωγή τῆς κυματοδέσμης. Ἀλλὰ ἡ σκιαγραφούμενη ἀντίληψη ἔχει τὸ πλεονέκτημα ὅτι ἀποσπᾶται ἀπὸ τὶς προ-
κβαντικὲς ἔννοιες καὶ ἐρμηνεῖες, πού κατέληξαν νὰ ἀποτελοῦν ἐπιστημο-
λογικὸ ἔμπόδιο γιὰ τὴν κατανόηση τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς, καὶ ὅτι διευκολύνει ἓνα ρεαλιστικὸ πλησίασμα τοῦ προβλήματος²⁰: ὁδηγεῖ στὴν ἀναζήτησι τῶν φυσικῶν διαδικασιῶν πού καθορίζουν τὴν ποιοτικὴ μετα-
τροπὴ τοῦ κβαντικοῦ συστήματος.

6. Ἡ φυσικὴ ἀντικειμενικότητα

Ἡ ἀντικειμενικότητα εἶναι τὸ οὐσιαστικὸ χαρακτηριστικὸ τῶν ἐπιστη-
μῶν καὶ εἰδικὰ τῆς φυσικῆς. Ἀλλὰ ἡ γνωσιολογικὴ αὐτὴ ἀντικειμενικότητα (ἢ ὅποια συχνὰ ὑπερβάλλεται καὶ ὠθεῖται ὡς τὸ ἀπόλυτο, καὶ ἐπίσης συχνὰ ἀμφισβητεῖται μὲ μιὰ ἐξίσου ἀπόλυτη ἀρνητικὴ ἀντικειμενικότητα) προϋποθέτει μιὰν ἄλλη ἀντικειμενικότητα: τὴν ὑπαρξὴ μιᾶς φυσικῆς πραγματικότητας, ἀνεξάρτητης ἀπὸ τὸν ἄνθρωπο καὶ τὴν ἐπιστήμη του. Οί δυὸ αὐτὲς ὄψεις τῆς ἀντικειμενικότητας εἶναι ἀξεχώριστες: ἡ κριτικὴ σκέψη ἀντιμετώπισε πάντα τὸ πρόβλημα τῆς ἀντικειμενικῆς ἀλήθειας, σὲ σύνδεση μὲ τὸ ἐρώτημα τῆς ὑπαρξῆς μιᾶς ἀντικειμενικῆς πραγματικότητας. Εἰπώθηκε ἤδη ὅτι ἡ γνωσιολογικὴ αἰσιοδοξία τῆς κλασικῆς φυσικῆς στηριζόταν στὴν προφανῆ ὑπαρξὴ μιᾶς πραγματικότητας πού ἦταν ἀντικείμενο τῆς ἐπιστήμης.

Ἡ κλασικὴ ἀντικειμενικότητα ἀμφισβητήθηκε συχνὰ. Πολλοὶ θεώρησαν τὴν ἐπιστημονικὴ ἀλήθεια σὰν ἀπλή *διὑποκειμενικότητα*. Ἡ διαμόρφωση τῆς κβαντικῆς μηχανικῆς ἔκανε πιὸ ἔντονη τὴν ὑποκειμενικὴ τάση. Γιὰ τὸ συνεπὲς θετικιστικὸ ρεῦμα δὲν τίθεται κὰν θέμα ἀντικειμενικῆς ἀλήθειας:

ἀπὸ τῆ στιγμῆ πού τὸ φυσικὸ σύστημα δὲν ἔχει ὕπαρξη (ἢ ιδιότητες) ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὸ ὄργανο τῆς μέτρησης καί, συχνά, τὸν παρατηρητῆ, ἢ ἀλήθεια περιορίζεται στὶς τυπικὲς σχέσεις ἀνάμεσα στὰ δεδομένα τοῦ πειράματος.

Ἐποχρεωθήκαμε νὰ ἀπαλείψουμε τὸν παρατηρητῆ καί νὰ δοῦμε τὴ μέτρηση ὡς ἀλληλεπίδραση ἀνάμεσα σὲ φυσικὰ συστήματα: σὰν μιὰ ἀντικειμενικὴ διαδικασία. Τὸ ἀποτέλεσμα τοῦ πειράματος μπορεῖ νὰ εἶναι ἡ μέτρηση ἑνὸς μεγέθους πού προϋπάρχει, ἢ ἡ μέτρηση ἑνὸς μεγέθους πού ἐνυπάρχει «δυνάμει» καί πού πραγματοποιεῖται κατὰ τὴ μέτρηση. Καί στὴ μιὰ καί στὴν ἄλλη περίπτωση, πρόκειται γιὰ ἀντικειμενικὲς διαδικασίες μὲ συγκεκριμένη φυσικὴ βάση, πού ἐξηγοῦνται (ἢ πού μποροῦν νὰ ἐξηγηθοῦν) ἀπὸ τὴ θεωρία. Ἐπιχειρήσαμε ἔτσι νὰ ὀρίσουμε τὸ φυσικὸ σύστημα καί τὴν κατάστασή σὰν ὄντοτες ἢ καταστάσεις ἀντικειμενικὲς. Ἡ σχετικότητά τους εἶναι ἐπίσης ἀντικειμενικὴ (ἀλληλεπίδραση, ἀμοιβαῖος καθορισμός) καί δὲν ἔχει σχέση μὲ τὸ ρελατιβισμό.*

Ἡ φυσικὴ εἶναι, ἀπὸ μιὰν ἄποψη, ἡ προσπάθεια νὰ κατανοήσουμε καί νὰ ἐκφράσουμε, μὲ τὴ βοήθεια τῶν δικῶν μας μέσων, ὀρισμένους ἀπὸ τοὺς νόμους τῆς πραγματικότητας, ὅπως ὑπάρχει ἀνεξάρτητα ἀπὸ μᾶς. Ἀλλὰ ἡ πραγματικότητα δὲν εἶναι ἀπλὴ στὸ μικροφυσικὸ ἐπίπεδο. Αὐτὴ ἡ ιδιομορφία δὲν ἀποτελεῖ ὅμως ἐπιχείρημα ἐναντίον τῆς ὄντολογικῆς ἀντικειμενικότητας. Ἄν τὰ φυσικὰ συστήματα πραγματώνουν διάφορες δυναμικότητες κάτω ἀπὸ τὶς «ἴδιες συνθῆκες», δὲν εἶναι πιὸ «ἐπιστημονικό», νὰ ἀναζητήσουμε τὶς βαθύτερες ἀντικειμενικὲς αἰτίες αὐτῶν τῶν δυναμιכוτήτων, ἀντὶ νὰ διακηρύσσουμε τὴν αὐταρχία καί τὴν ἐξαφάνιση τῆς φυσικῆς πραγματικότητας; Ἐπίσης οἱ περιορισμοὶ τῶν πειραματικῶν δυνατοτήτων μας δὲν εἶναι ἐπιχείρημα γιὰ νὰ ἀρνηθοῦμε τὴν ὕπαρξη μὴ μετρήσιμων μεγεθῶν. Ἄλλωστε ἡ ἀρχὴ τῆς μὴ ὕπαρξης, κτλ., δὲν ἀφορᾷ παρὰ τὰ συμβατικὰ μεγέθη τῶν φυσικῶν συστημάτων. Καθὼς γράφει ὁ Mehlberg, ἡ «ἀρχὴ» αὐτὴ δὲν ἀφορᾷ τὰ μὴ συμβατικὰ μεγέθη, ὅπως ἡ κβαντικὴ κατάσταση, οἱ πιθανότητες μετάπτωσης πού χαρακτηρίζουν τὰ μικροφυσικὰ συστήματα, κτλ.²¹.

Προτάθηκε κατὰ καιροὺς ὁ ὅρος *ἰσχυρὴ ἀντικειμενικότητα* γιὰ τὴν κλασικὴ φυσικὴ καί ὁ ὅρος *ἀσθενὴς ἀντικειμενικότητα* γιὰ τὴν κβαντικὴ μηχανικὴ. Μιὰ τέτοια διάκριση δὲν φαίνεται βάσιμη. Τίποτα στὴ μικροφυσικὴ

*Ὁ Κ. Popper προσπάθησε σ' ἕνα πρόσφατο κείμενό του νὰ «ἐξορκίσει τὸ φάντασμα πού λέγεται «συνείδηση» ἢ «παρατηρητῆς» ἀπὸ τὴν κβαντικὴ μηχανικὴ καί νὰ δείξει ὅτι ἡ κβαντικὴ μηχανικὴ εἶναι τόσο «ἀντικειμενικὴ» ὡς θεωρία, ὅσο, ἄς ποῦμε, καί ἡ κλασικὴ στατιστικὴ μηχανικὴ». Καί ὁ Popper συνεχίζει: «Ἡ θέση μου εἶναι ὅτι ὁ παρατηρητῆς, ἢ καλύτερα, ὁ πειραματιστής, παίξει στὴν κβαντικὴ μηχανικὴ ἀκριβῶς τὸν ἴδιο ρόλο πού παίξει στὴν κλασικὴ φυσικὴ. Ἔργο του εἶναι νὰ ἐλέγχει τὴ θεωρία». Στὴ συνηγορία τοῦ ὑπὲρ τοῦ ρεαλισμοῦ, ὁ Popper ὑποστηρίζει ὅτι «τίποτα δὲν ἄλλαξε ἀπὸ τὴν ἐποχὴ τοῦ Γαλιλαίου καί τοῦ Νεύτωνα, ἢ τοῦ Faraday, σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὸ ρόλο τοῦ «παρατηρητῆ» ἢ τῆς «συνείδησης» ἢ τὶς «πληροφορίες» στὴ Φυσικὴ». (στό: *Quantum Theory and Reality*, Springer - Verlag, 1967).

δέν ἔρχεται σὲ ἀντίθεση μὲ τὴν ὕπαρξη τοῦ πράγματος καθεαυτοῦ, δηλαδὴ τοῦ ἀντικειμένου ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὴ συνείδηση. Μόνο ποὺ ἀντίθετα μὲ τὸ «πράγμα καθεαυτὸ» τῆς καντιανῆς φιλοσοφίας:

1. Τὸ «πράγμα καθεαυτὸ» δέν εἶναι ὑπερβατικό.

2. Δέν εἶναι ἀπρόσιτο στὴ γνώση.

3. Βεβαιώνει τὴν ταυτότητά του, στὶς σχέσεις του μὲ τὸ περιβάλλον του.

Ἄν θὰ χρειαζόταν νὰ διατυπωθεῖ μιὰ ἀντιπρόταση, τότε θὰ μπορούσε νὰ προτείνει κανεὶς γιὰ τὴ μικροφυσικὴ τὸν ὄρο *δυναμικὴ ἀντικειμενικότητα*, σὰν ἀντί-ὄρο στὴν *παθητικὴ ἀντικειμενικότητα* τῆς κλασικῆς μηχανικῆς.

Σημειώσεις

1. B. d'Espagnat, *Conceptions de la Physique Contemporaine*, Hermann, 1965, Paris.

2. Newton, *Opticks*, Dover Publ.

3. *Science de la Logique*, Aubier, Paris 1947, I, σελ. 40.

4. *Phys. Rev.*, 47, 777 (1935).

5. Βλ. σχετικὰ: D. Bohm, *Quantum Theory*, Constable, 1954.

6. *Phys. Rev.*, 48, 696 (1935).

7. Βλ., λ.χ., H. Mehlberg, στό: *Quantum Theory and Reality*, Springer-Verlag, 1967.

8. Βλ., λ.χ., *Atomic Physics and Human Knowledge*, Wiley, 1958, ὅπως καὶ τὸ βιβλίο τοῦ Scheibe, *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*, Pergamon Press (1973).

9. Βλ., Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Allen and Unwin, London 1958.

10. Βλ., *Quantum Theory, A Physical World Picture*, Pergamon Press, 1974.

11. *Phys. Rev.*, 47, 777 (1935).

12. Βλ. Αὐτοβιογραφ. σημειώσεις στό: *A. Einstein, Philosopher-Scientist*, The Library of living Philosophers N.Y. 1951 καὶ *Einstein - Born, Correspondance*, 1916 - 1965, Seuil, Paris 1972.

13. *Phys. Rev.*, 48, 696 (1935).

14. *Phys. Rev.*, 85, 166 καὶ 180 (1952).

15. *Fundamenta Scientiae*, 36, 1976.

16. *Physics* I, 195 (1964) καὶ *Rev. Mod. Phys.*, 38, 447 (1966).

17. Βλ., λ.χ., E. Bitsakis, *Revue des questions Scientifiques*, Avril et Juillet, 1977.

18. *C. R. Ac. Sc. Paris*, 278, 721 (1974).

19. Βλ. λ.χ., H. Everett, *Rev. Mod. Phys.* 19, 454 (1957).

20. Γιὰ μιὰ ἀναλυτικὴ ἐκθεση τοῦ προβλήματος, βλ. E. Bitsakis, *Interaction et Determination. Essai sur les lois Physiques* (ὑπὸ ἐκδοση).

21. Στό: *Quantum Theory and Reality*, Springer - Verlag, 1967.