

## Η ΔΙΑΜΑΧΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

### 1. Είσαγωγή

Ἡ γέννηση τῆς Κβαντομηχανικῆς συνδέεται ἀναπόσπαστα μὲ ἓνα πολὺ-πλοκο φαινόμενο ἰσορροπίας «ὑλῆς» καὶ ἀκτινοβολίας γνωστὸ σὰν «ἀκτινοβολία μέλανος σώματος». Ἡ ἀνάγκη δικαιολόγησης τῶν πειραματικῶν δεδομένων ὁδήγησε τὸν Planck (1900) στὴν ὑπόθεση ὅτι ἡ ἀνταλλαγή ἐνέργειας μεταξὺ «ὑλῆς» καὶ ἀκτινοβολίας γίνεται κατὰ ἀσυνεχῆ τρόπο σὲ ἀντίθεση μὲ ὅλες τὶς μέχρι τότε ἀπόψεις. Ἡ ἐξέλιξη τοῦ νεογέννητου κλάδου τῆς Φυσικῆς ὑπῆρξε κάτι περισσότερο ἀπὸ ραγδαία. Τὸ φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο (Einstein 1905), οἱ κανόνες τοῦ Bohr (1913) ποὺ ἐξηγοῦσαν τὴν εὐστάθεια τοῦ ἀτόμου τοῦ Rutherford (1911), ὅπως καὶ οἱ γενικοὶ κβαντικοὶ κανόνες τοῦ Sommerfeld (1916) δημιούργησαν αὐτὸ ποὺ εἶναι γνωστὸ ὡς «παλαιὰ κβαντομηχανικὴ», δηλαδή τὴν πρώτη συστηματικὴ ἐπιστημονικὴ προσπάθεια τοῦ ἀνθρώπου γιὰ τὴν κατανόηση τοῦ μικρόκοσμου.

Ἡ καινούρια αὐτὴ θεωρία δὲν ἐπρόκειτο νὰ ζήσει πολὺ: οἱ ἐσωτερικὲς τῆς δυσκολίες (δὲν μποροῦσε νὰ χρησιμοποιηθεῖ σὲ ἀπεριοδικὰ συστήματα) καθὼς καὶ τὰ πειραματικὰ δεδομένα ἔδειχναν ἤδη ἀπὸ τὸ 1920 ὅτι ἐπρόκειτο γιὰ μιὰ μὴ ἱκανοποιητικὴ προσέγγιση τοῦ ὅλου προβλήματος. Ἀνεξάρτητα ὅμως ἀπὸ αὐτὲς τὶς δυσκολίες τῆς ἡ παλαιὰ Κβαντομηχανικὴ παρουσίαζε καὶ λογικὲς ἀδυναμίες. Δὲν μποροῦσε, μὲ ἄλλα λόγια, νὰ συμβιβάσει τὴ σωματιδιακὴ φύση τοῦ φωτονίου μὲ τὰ πειράματα περίθλασης καὶ ἀντιμετώπιζε τὸ ὀξὺ πρόβλημα τῆς δυαδικότητος τοῦ φωτός.

Ἦδη ἀπὸ τὸ 1925 μὲ τὴν ὑπόθεση τοῦ De Broglie γιὰ τὴν κυματικὴ φύση τῶν ἠλεκτρονίων, ὑπόθεση ποὺ βεβαιώθηκε μὲ τὰ πειράματα τῶν Davisson καὶ Germer (1927), ἡ *Κυματομηχανικὴ* διαδέχεται τὴν παλαιὰ Κβαντομηχανικὴ. Συγχρόνως ὅλο καὶ περισσότερες καινούριες ιδέες ρίχνονται στὴν ἀρένα. Ἡ ἀρχὴ τῆς ἀντιστοιχίας τοῦ Bohr (1923), ἡ ἀρχὴ τῆς ἀβεβαιότητος τοῦ Heisenberg (τὸ 1927), ἡ ἀρχὴ τῆς συμπληρωματικότητος τοῦ Bohr (τὸ 1928) δημιουργοῦν λίγο λίγο τὴ νέα Κβαντομηχανικὴ. Μέσα σ' αὐτὴ τὴ γένεση ὀλοένα καὶ περισσότερες κλασικὲς ἀπόψεις ἐγκαταλείπονται (π.χ. Κλασικὴ αἰτιότητα), ἐνῶ οἱ ιδέες μας γιὰ τὴ «μέτρηση» μιᾶς φυσικῆς ποσότητος προσαρμόζονται ὀλοένα καὶ περισσότερο στὴν Ἀρχὴ τῆς Ἀβεβαιότητος καὶ στὸν καινούριο μαθηματικὸν φορμαλισμὸν ποὺ τῆς ταιριάζει. Ἡ κυματομηχανικὴ ἀποψη τοῦ De Broglie ὑποχωρεῖ μπροστὰ στὴν πιθανοκρατικὴ ἔρμη-



νεία τῆς κυματικῆς ἐξίσωσης τοῦ Schrödinger (1926) [Born (1926), (1927)] ἢ ὁποῖα καὶ ὁλοένα ἐνισχύεται. Ἡ ἀπόδειξη ὅτι ἡ κυματομηχανικὴ τοῦ Schrödinger εἶναι ἰσοδύναμη μὲ τὴ θεωρία ποῦ ἐγκαινίασε ὁ Heisenberg\* καὶ ἡ ὁποῖα ἀναπτύχθηκε ἀπὸ τοὺς Born, Heisenberg, Jordan, καὶ ἀργότερα ἀπὸ τὸν Dirac ὁδήγησε σὲ αὐτὸ ποῦ εἶναι γνωστὸ ὡς «Θεωρία μετασχηματισμῶν». Ἡ νέα αὐτὴ μορφή τῆς θεωρίας, ἐφοδιασμένη μὲ τὴ γλώσσα τῶν χώρων Hilbert, ἀποτελεῖ τὴ σύγχρονη συμβατικὴ μορφή τῆς Κβαντομηχανικῆς [J. von Neumann (1935)], καὶ θεωρεῖται μιὰ πλήρης θεωρία, γιὰ τὰ ἀτομικὰ φαινόμενα.

Μέσα ἀπὸ τὴ σύντομη αὐτὴ παρουσίαση, φαίνεται καθαρὰ πὼς ἡ ἀνάγκη γιὰ μιὰ θεωρία ποῦ νὰ δίνει ποσοτικὲς ἀπαντήσεις, δηλ. ἀπαντήσεις συγκρίσιμες μὲ τὸ πείραμα, ὁδήγησε τοὺς Φυσικοὺς πρῶτα στὸ φορμαλισμὸ καὶ μόνον ἀργότερα σὲ μιὰ προσπάθεια ἐρμηνείας τῶν φαινομένων. Ἦδη ἀπὸ τὴ γένεσή της, ἡ πιθανοκρατικὴ ἐρμηνεία τῆς κυματοσυνάρτησης προκάλεσε τὸ ἐρώτημα τοῦ κατὰ πόσον αὐτὴ εἶναι οὐσιῶδες χαρακτηριστικὸ τοῦ φυσικοῦ συστήματος ἢ ἀπλῶς μέτρο τῆς ἄγνοιας μας. Τὸ ἐρώτημα αὐτὸ συνδέεται στενὰ μὲ τὴν ὑπαρξὴ «λανθανουσῶν παραμέτρων» στὴν περιγραφὴ τοῦ προβλήματος καὶ μὲ τὴ δυνατότητα γιὰ κάποια δυναμικὴ (αἰτιοκρατικὴ) ἐρμηνεία τῶν διαφόρων φαινομένων, καὶ τέθηκε κατὰ τρόπο δραματικὸ τὸ 1935 ἀπὸ τοὺς Einstein, Podolsky καὶ Rosen (συντομογραφικὰ EPR). Οἱ συγγραφεῖς αὐτοὶ χρησιμοποίησαν ἕναν ἀρκετὰ προσεγμένο ὄρισμὸ τῆς φυσικῆς πραγματικότητας καὶ ἕναν ἀντίστοιχο ὄρισμὸ γιὰ τὴν πληρότητα μιᾶς θεωρίας. Χρησιμοποιώντας τοὺς ὁρισμοὺς αὐτοὺς καὶ μὲ ἕνα εἰδικὸ παράδειγμα, «ἔδειξαν» ὅτι στὸ οἰκοδόμημα τῆς Κβαντομηχανικῆς ὑπάρχουν ἀντιφάσεις καὶ συμπέραναν ὅτι ἡ θεωρία δὲν μπορεῖ νὰ εἶναι πλήρης, ἀλλὰ μᾶλλον ἡ προσέγγιση κάποιας ἄλλης θεωρίας συμβιβαστῆς μὲ τὸν ὄρισμό τους γιὰ τὴ Φυσικὴ πραγματικότητα. Ὁ Bohr ἀπάντησε ἀμέσως (1935) στὴν ἀνακοίνωσή τους καί, χρησιμοποιώντας τὴν ἀρχὴ τῆς συμπληρωματικότητας, τόνισε ὅτι ἡ ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητας τῶν EPR εἶναι ἀσυμβίβαστη μὲ τὴν ἀντίστοιχη ἔννοια (γιὰ τὴ φυσικὴ πραγματικότητα) ποῦ διαμορφώνεται στὴν Κβαντομηχανικὴ ἀπὸ τὶς διάφορες ἀρχές της. Τὸ συμπέρασμα του ἦταν ὅτι δὲν ὑπάρχει ἀντίφαση καὶ ὅτι ἡ Κβαντομηχανικὴ εἶναι μιὰ πλήρης θεωρία. Ἡ διαμάχη αὐτὴ ἀναφέρεται συχνὰ σὰν τὸ παράδοξο τῶν Einstein, Podolsky, Rosen καὶ θὰ μᾶς ἀπασχολήσῃ στὶς ἐπόμενες παραγράφους. Ἀξίζει ἐπίσης νὰ σημειωθεῖ ὅτι στὰ 42 χρόνια ποῦ πέρασαν ἀπὸ τότε ἡ διαμάχη συνεχίζεται χωρὶς νὰ φαίνεται ἀκόμα δυνατὴ μιὰ τελικὴ συμφωνία.

Στὴν § 2 θὰ δώσουμε τὴν ἀρχικὴ θέση τῶν EPR ἀπέναντι στὸ πρόβλημα τῆς πληρότητας τῆς Κβαντομηχανικῆς καὶ θὰ παρακολουθήσουμε, ἀποφεύγοντας τὶς πολυπλοκότητες τοῦ μαθηματικοῦ φορμαλισμοῦ, ὅσο εἶναι δυ-

\*Ἡ θεωρία αὐτὴ εἶναι γνωστὴ σὰν «matrix mechanics».



νατόν, τὴν ἐπιχειρηματολογία τους. Στὴν § 3 θὰ δώσουμε περιληπτικά τὰ διάφορα σημεῖα τῆς ἀπάντησης τοῦ Bohr καὶ θὰ ἐπιχειρήσουμε νὰ συνοψίσουμε τὶς διαφορὲς κριτικὲς ποὺ ἐπακολούθησαν καὶ οἱ ὁποῖες λίγο πολὺ βρίσκονται κοντὰ στὸ πνεῦμα τῆς ἀρχικῆς ἀπάντησης τοῦ Bohr. Τέλος στὴν § 4 θὰ δώσουμε, πολὺ περιληπτικά, τὴν ἐξέλιξη τῆς ἀρχικῆς διαμάχης καθὼς καὶ τὶς νεότερες ἀπόψεις γιὰ τὴν ἐρμηνεία τῆς Κβαντομηχανικῆς. Ἡ παρουσίαση αὐτὴ κλείνει μὲ τὴν ἄποψη τοῦ Feynman γιὰ τὴν «ἐξαϋλωση» τοῦ ποζιτρονίου, μιὰ ἄποψη χαρακτηριστικὴ γιὰ τὴ στάση τῆς συμβατικῆς τωρινῆς Φυσικῆς ἀπέναντι στὸ πρόβλημα τῆς Ἑρμηνείας τῆς Κβαντομηχανικῆς.

## 2. Τὸ παράδοξο τῶν Einstein - Podolsky - Rosen

Ἡ ἀφετηρία τῆς ἀρχικῆς ἀνακοίνωσης τῶν EPR εἶναι οἱ ἔννοιες τῆς πληρότητας καὶ τῆς Φυσικῆς πραγματικότητας. Γιὰ νὰ διευκολύνουν τὴν παρουσίαση τῶν ἐπιχειρημάτων τους εἰσάγουν δύο βασικοὺς ὁρισμούς.

D1. Ἐὰν μιὰ θεωρία εἶναι πλήρης τότε κατ' ἀνάγκη κάθε στοιχεῖο τῆς φυσικῆς πραγματικότητας ἔχει τὸ ἀντίστοιχό του μέσα στὴ «Φυσικὴ Θεωρία».

D2. Ἐάν, χωρὶς νὰ διαταράξουμε τὸ ὑπὸ μελέτη σύστημα, μπορούμε νὰ προβλέψουμε μὲ βεβαιότητα (πιθανότητα ἴση μὲ τὴ μονάδα) τὴν τιμὴ κάποιου φυσικοῦ μεγέθους, τότε θὰ λέμε ὅτι ὑπάρχει ἓνα στοιχεῖο τῆς φυσικῆς πραγματικότητας ποὺ ἀντιστοιχεῖ σὲ αὐτὸ τὸ φυσικὸ μέγεθος.

Εἶναι τώρα βασικὸ νὰ δοῦμε πῶς δέρονται οἱ ὁρισμοὶ D1, D2 μὲ τὸν ὑπόλοιπο φορμαλισμὸ τῆς Κβαντομηχανικῆς. Ἐνα κβαντομηχανικὸ σύστημα χαρακτηρίζεται «πλήρως» ἀπὸ τὴν κυματοσυνάρτηση  $\psi$ , ὡς συνάρτηση τῶν μεταβλητῶν ποὺ περιγράφουν τὴν συμπεριφορά του, ἐνῶ σὲ κάθε παρατηρήσιμο φυσικὸ μέγεθος ἀντιστοιχεῖ ἓνας τελεστής.

Συνδυάζοντας αὐτὲς τὶς θεμελιώδεις ἔννοιες τῆς Κβαντομηχανικῆς μὲ τὸν ὁρισμὸ D2 ἔχουμε:

Ἐνα σύστημα ἔχει ἓνα στοιχεῖο φυσικῆς πραγματικότητας ἀντίστοιχο σὲ κάποιο παρατηρήσιμο μέγεθος  $EAN$  τὸ σύστημα περιγράφεται ἀπὸ μιὰ ἰδιοκατάσταση τοῦ τελεστή  $\sigma$  ποὺ ἀντιστοιχεῖ σ' αὐτὸ τὸ παρατηρήσιμο φυσικὸ μέγεθος.

Ἡ συνθήκη αὐτὴ εἶναι ἐπαρκῆς ὄχι ὅμως καὶ ἀναγκαία\*, κατὰ συνέπεια ἡ ὑπαρξὴ λανθανουσῶν παραμέτρων δὲν πρέπει νὰ ἀποκλείεται καὶ μιὰ δυναμικὴ (αἰτιοκρατικὴ) ἐρμηνεία εἶναι πάντοτε ἀνοιχτή. Στὸ φορμαλισμὸ ὅμως τῆς Κβαντομηχανικῆς ἓνα σύστημα δὲν μπορεῖ νὰ εἶναι συγχρόνως ἰδιοκατάσταση δύο μὴ ἀντιμεταθετῶν τελεστῶν. Ἐπομένως γιὰ μὴ ἀντιμε-

\*Θὰ μπορούσε κανεὶς νὰ περιορίσει τὴ συνθήκη αὐτὴ γράφοντας «...μέγεθος τότε καὶ μόνον τότε ἐάν...».



ταθετούς τελεστές, οί αντίστοιχες φυσικές ποσότητες δέν μποροῦν νά ἔχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα. Ἐάν λοιπόν δείξει κάποιος ὅτι ὑπάρχει φυσικό σύστημα τέτοιο ὥστε δύο φυσικά μεγέθη (πού χαρακτηρίζονται ἀπό μὴ ἀντιμεταθετούς τελεστές) νά μποροῦν νά προβλεφθοῦν ἀκριβῶς καί χωρίς διαταραχή τοῦ συστήματος, τότε τὸ σύστημα θά πρέπει (σύμφωνα μὲ τὸν ὄρισμό D2) νά βρισκόταν (πρὶν ἀπὸ ὁποιαδήποτε μέτρηση) σὲ μιὰ ἰδιοκατάσταση δύο μὴ ἀντιμεταθετῶν τελεστῶν, καί αὐτὸ εἶναι ἀδύνατο. Ἐχομε λοιπόν μιὰν ἀντίφαση μέσα στὴ θεωρία, ἢ ὁποία δέν εἶναι πλήρης ἀφοῦ ὑπάρχει στοιχεῖο πραγματικότητας πού δέν προβλέπεται ἀπὸ τὸν τωρινὸ φορμαλισμό.

Ἡ μέθοδος τῶν EPR εἶναι ἀκριβῶς αὐτὴ πού περιγράψαμε. Θεωροῦν δύο σωματίδια 1, 2, τὰ ὁποία ἀρχικὰ ἀλληλεπιδροῦν, ἀλλὰ κατὰ τέτοιο τρόπο ὥστε μὲ τὴν πάροδο τοῦ χρόνου νά μποροῦν νά θεωρηθοῦν σὰν ἀνεξάρτητα (ἂν καί συνδεδεμένα λόγω τῆς ἀρχικῆς ἀλληλεπίδρασης). Διαλέγουν, ὕστερα, δύο μὴ ἀντιμεταθετὰ παρατηρήσιμα μεγέθη A, B. Τώρα, λόγω τῆς ἀρχικῆς τους παραδοχῆς, ὅτι τὰ σωματίδια δέν ἀλληλεπιδροῦν, μποροῦν νά ἐκφράσουν τὴν κυματοσυνάρτηση τοῦ ὕλικου συστήματος 1-|2 εἴτε ὡς πρὸς τὶς ἰδιοκαταστάσεις τοῦ τελεστή A, γιὰ τὸ σωματίδιο 1, εἴτε ὡς πρὸς τὶς ἰδιοκαταστάσεις τοῦ τελεστή B ὡς:

$$\psi(1, 2) = \sum_{\lambda=1}^{\infty} \zeta_{\lambda}(2) u_{\lambda}(1) \quad (1)$$

$$\psi(1, 2) = \sum_{\lambda=1}^{\infty} \varphi_{\lambda}(2) v_{\lambda}(1) \quad (2)$$

ὅπου  $Au_{\kappa}(1) = a_{\kappa} u_{\kappa}(1) \quad (3)$

$$Bv_{\rho}(1) = \beta_{\rho} v_{\rho}(1) \quad (4)$$

Οἱ ἐκφράσεις (1) καί (2) ἰσχύουν διότι, ὅπως τονίσαμε νωρίτερα, τὰ σωματίδια 1, 2 θεωροῦνται ἀνεξάρτητα μετὰ τὴν ἀλληλεπίδραση. Τώρα ἢ (3) σημαίνει ὅτι ἡ μέτρηση τοῦ A γιὰ τὸ σωματίδιο 1 δίδει κάποια τιμὴ  $a_{\kappa}$ , καί, κατὰ συνέπεια, ὕστερα ἀπὸ τὴν μέτρηση τὸ σωματίδιο 1 θά εἶναι στὴν κατάσταση  $u_{\kappa}(1)$ , ἐνῶ τὸ σωματίδιο 2, λόγω τῆς ἀναγωγῆς τῆς κυματοδέσμης, θά βρίσκεται στὴν κατάσταση  $\zeta_{\kappa}(2)$ . Ὅμοίως καταλήγουμε, χρησιμοποιώντας τὴν (4), στὸ συμπέρασμα ὅτι τὸ σωματίδιο 2 θά βρίσκεται στὴν κατάσταση  $\varphi_{\rho}(2)$ . Ἡ ἐφαρμογὴ τοῦ ὁρισμοῦ D2 γιὰ τὸ σωματίδιο 2 ὁδηγεῖ στὸ συμπέρασμα ὅτι τὸ σωματίδιο αὐτὸ θά ἔπρεπε νά εἶναι στὴν κατάσταση  $\zeta_{\kappa}(2)$ ,  $\varphi_{\rho}(2)$  ταυτόχρονα καί προτοῦ γίνει ὁποιαδήποτε μέτρηση στὸ 1. Τὸ μόνον πού μένει ὕστερα ἀπὸ αὐτὴ τὴν ἀνάλυση εἶναι νά βρεῖ κανεὶς μιὰ κυματοσυνάρτηση  $\psi(1, 2)$  γιὰ κάποιο πραγματοποιήσιμο φυσικὸ σύστημα τέτοια



ώστε τὰ  $\zeta_{\kappa}$  (2) καὶ  $\varphi_{\rho}$  (2) ποὺ προκύπτουν νὰ εἶναι ἰδιοκαταστάσεις μὴ ἀντιμεταθετῶν τελεστῶν. Οἱ EPR πράγματι δίνουν ἓνα τέτοιο παράδειγμα. Ἐπιλέγουν τὴν

$$\psi(1, 2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(x_1 - x_2 - x_0) p/h} \quad (5)$$

ὅπου  $x_0$  μία σταθερὰ καὶ  $x_1, x_2$  οἱ θέσεις τῶν σωματιδίων 1 καὶ 2. Ὑστερα, ἀκολουθώντας τὴν προηγούμενη διαδικασία, ὑπολογίζουν τὰ  $\zeta_{\kappa}$  (2),  $\varphi_{\rho}$  (2), τὰ ὁποῖα δὲν εἶναι τίποτα ἄλλο παρὰ ἰδιοκαταστάσεις τῶν τελεστῶν θέσης καὶ ὀρμῆς τοῦ σωματιδίου 2. Ἔτσι βρίσκουν μιὰν ἀντίφαση στὴ θεωρία τῆς Κβαντομηχανικῆς καὶ καταλήγουν στὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ Κβαντομηχανικὴ δὲν μπορεῖ νὰ εἶναι πλήρης θεωρία (Einstein, Podolsky, Rosen, 1935).

Προτοῦ προχωρήσουμε στὴν ἀπάντηση τοῦ Bohr, θὰ ἦτανε χρήσιμο νὰ τονίσουμε μερικὰ καθοριστικὰ σημεῖα τῆς ἐπιχειρηματολογίας τῶν EPR. Ἡ σπουδαιότητα τοῦ ὀρισμοῦ D2, λ.χ., γιὰ τὸ ἐπιχείρημα, εἶναι κάτι παραπάνω ἀπὸ φανερὴ. Ἡ τελικὴ ἀντίφαση εἶναι ἀποτέλεσμα τοῦ ὀρισμοῦ D2 καὶ τῆς ἀναγωγῆς τῆς κυματοδέσμης στὶς ἐκφράσεις (1) καὶ (2). Τὸ πόσο καθοριστικὴ εἶναι ἡ ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητος ποὺ περιέχεται στὸν ὀρισμὸ D2 φαίνεται καὶ ἀπὸ τὸ γεγονός ὅτι ἀλλάζοντας τὴν ἔννοια αὐτὴ ἡ ἀντίφαση ἐξαφανίζεται. Οἱ EPR παραδέχονται τὸ σημεῖο αὐτὸ λέγοντας ὅτι ἂν κανεὶς ἀλλάξει τὴν ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητος, ὑποθέτοντας, λ.χ., ὅτι δύο φυσικὲς ποσότητες μποροῦν νὰ εἶναι ταυτόχρονα στοιχεῖα τῆς φυσικῆς πραγματικότητος μόνο ἂν εἶναι ταυτόχρονα μετρήσιμες, τότε δὲν ὑπάρχει ἀντίφαση οὔτε παράδοξο. Ἀλλὰ οἱ EPR θεωροῦν τὸν ὀρισμὸ D2 σὰν τὸν πλέον εὐλογοφανῆ καὶ εἶναι ἡ βεβαιότητά τους αὐτὴ ποὺ κατὰ κάποιον τρόπο ὀδηγεῖ — μέσα ἀπὸ τὴν προηγούμενη διαδικασία — στὸ συμπέρασμά τους ὅτι ἡ Κβαντομηχανικὴ δὲν εἶναι μία πλήρης θεωρία.

### 3. Κριτικὴ τοῦ παραδόξου τῶν EPR

Στὴν ἀπάντησή του ὁ Bohr (1935) τονίζει ὅτι ἡ ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητος, ὅπως θεωρεῖται ἀπὸ τοὺς EPR, εἶναι ἀσυμβίβαστη μὲ τὴν ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητος ποὺ ἀπορρέει ἀπὸ τὸν ὀρισμὸν καὶ τὶς ἀρχὲς τῆς Κβαντομηχανικῆς. Ὁ Bohr συνοψίζει τὴν θέση τῶν EPR μὲ τὸν ἀκόλουθο τρόπο:

«... Σύμφωνα μὲ τὸ κριτήριό τους ἐπιθυμοῦν νὰ ἀποδώσουν ἓνα στοιχεῖο φυσικῆς πραγματικότητος σὲ κάθε ποσότητα ποὺ παριστάνεται ἀπὸ μεταβλητὲς ποὺ ἀναφέρονται στὴν περιγραφὴ ἑνὸς Φυσικοῦ συστήματος καὶ οἱ ὁποῖες προσδιορίζονται ἀπὸ μετρήσεις ποὺ γίνονται ἀποκλειστικὰ σὲ ἄλλα συστήματα ποὺ ἦσαν πρὶν σὲ ἀλληλεπίδραση μὲ αὐτό...».



Και δίνει την δική του απάντηση γράφοντας: «Η πεπερασμένη αλληλεπίδραση αντικειμένου και πειραματικής διάταξης. . . συνεπάγεται την ανάγκη μιᾶς τελικῆς ἀπόρνησης τῆς κλασικῆς ιδέας τῆς αἰτιότητας και μιᾶ ριζικῆ ἀναθεώρηση τῆς στάσης μας ἀπέναντι στο πρόβλημα τῆς φυσικῆς πραγματικότητας».

Γιὰ νὰ ἀντικρούσει τὸ συγκεκριμένο παράδειγμα τῶν EPR, ὁ Bohr ἰσχυρίζεται ὅτι ἡ περίπτωση τῶν δύο ἐλεύθερων σωματιδίων ποὺ αὐτοὶ ἐξετάζουν μπορεῖ (καταρχὴν) νὰ θεωρηθεῖ σὰν μιᾶ πειραματικὴ διάταξη ποὺ ἀποτελεῖται ἀπὸ ἕνα διάφραγμα μὲ δυὸ ὀπές (παράλληλες και πολὺ στενές σὲ σύγκριση μὲ τὴν ἀπόσταση ποὺ τὶς χωρίζει). Μέσα ἀπὸ τὶς ὀπές αὐτὲς μπορεῖ νὰ περάσει ἀπὸ ἕνα σωματίδιο μὲ δοσμένη ἀρχικὴ ὄρμη, τὸ ἕνα ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὸ ἄλλο. Ἐφαρμόζοντας τὴν ἀρχὴ τῆς συμπληρωματικότητας\* και τὴν ἀρχὴ τῆς ἀβεβαιότητας σ' αὐτὴ τὴν πειραματικὴ διάταξη, ὁ Bohr καταλήγει στὸ συμπέρασμα ὅτι ὑπάρχει κάποια ἀσάφεια στὴν ὑπόθεση τῶν EPR «. . . χωρὶς νὰ διαταράξουμε τὸ σύστημα. . .». Ὑπογραμμίζοντας τὸ σημεῖο αὐτὸ γράφει ὅτι οἱ συνθῆκες διεξαγωγῆς τοῦ πειράματος ἀποτελοῦν ἕνα ἐσωτερικὸ συστατικὸ στὴν περιγραφή ὁποιοῦδήποτε φαινομένου στὸ ὁποῖο μπορεῖ ὀρθὰ νὰ ἀποδοθεῖ ὁ ὅρος «φυσικὴ πραγματικότητα». «Ὁ σκοπός μου. . .» γράφει «εἶναι νὰ τονίσω πὼς δὲν πρόκειται γιὰ μιᾶ ἐλλιπῆ περιγραφή ποὺ χαρακτηρίζεται ἀπὸ τὸ αὐθαίρετο ξεδιάλεγμα διαφορῶν στοιχείων τῆς φυσικῆς πραγματικότητας, μὲ συνέπεια τὴν ἀναπόφευκτη θυσία ἄλλων τέτοιων στοιχείων, ἀλλὰ γιὰ μιᾶ λογικὴ διάκριση μεταξὺ οὐσιαστικῶν διαφορετικῶν διαδικασιῶν οἱ ὁποῖες εἶναι κατάλληλες εἴτε γιὰ μιᾶ (ἀναμφίβολη) χρῆση τῆς ιδέας τοῦ χωρικοῦ προσδιορισμοῦ, εἴτε γιὰ μιᾶ νόμιμη ἐφαρμογὴ τῆς ιδέας τῆς διατήρησης τῆς ὀρμῆς».

Προχωρώντας πρὸ πέρα τὴν κριτικὴ του, ὁ Bohr παρατηρεῖ ὅτι ἡ φυσικὴ πραγματοποίηση τοῦ παραδείγματος τῶν EPR παρουσιάζει δυσκολίες\* και εἰδικότερα τὴν ἀνάγκη τοῦ νὰ ἀφαιρέσουμε ἐντελῶς τὸ χρόνο ἀπὸ τὶς συνθῆκες διεξαγωγῆς του, πράγμα ποὺ δὲν εἶναι φυσικὰ παραδεκτό. Ἐτσι καταλήγει στὸ τελικὸ συμπέρασμα ὅτι: «. . . ἡ φαινομενικὴ ἀντίφαση (τῶν EPR) στὴν πραγματικὴ ἀποκαλύπτει τὴν ἀνεπάρκεια τῆς συμβατικῆς Φυσικῆς Φιλοσοφίας γιὰ μιᾶ λογικὴ ἀπόδοση ἐκείνων τῶν φαινομένων ποὺ ἀφοροῦν τὴν Κβαντικὴ Μηχανικὴ.»

Τὶς ἀπόψεις τοῦ Bohr ἐπεξεργάστηκε (ἂν και μὲ διαφορετικὴ μέθοδο) ὁ Furry (1936). Ξεκινώντας ἀπὸ τὴν ἄποψη τοῦ Bohr, ὅτι δηλ. ἕνα φυσικὸ σύστημα δὲν εἶναι ἕνας ἀνεξάρτητος φορέας πραγματικῶν ιδιοτήτων μόνο

\*Ἡ ἀρχὴ τῆς συμπληρωματικότητας [Bohr (1928)], ποὺ ἀναφέρεται στὶς πειραματικὲς διαδικασίες μέτρησης μιᾶς φυσικῆς ποσότητας, βεβαιώνει ὅτι κάθε πειραματικὴ συσκευὴ ἔχει τέτοιες ιδιότητες ὥστε μιᾶ ἀκρίβεια μεγαλύτερη ἀπὸ αὐτὴν ποὺ ἐπιτρέπει ἡ ἀρχὴ τῆς ἀβεβαιότητας νὰ εἶναι πάντοτε ἀνέφικτη.

\*Αὐτὸ φαίνεται και ἀπὸ τὸ μαθηματικὸ φορμαλισμὸ γιὰτὶ ἡ (5) εἶναι μιᾶ δ-συνάρτηση.



καί μόνο ἐπειδὴ ἔπαψε νὰ ἀλληλεπιδρᾷ δυναμικά μὲ ἄλλα συστήματα, δίνει μιὰ συγκεκριμένη μορφή στὴν ἀντίθετη ἄποψη. Μὲ ἄλλα λόγια ὀνομάζει *ὑπόθεση καὶ μέθοδο A* τὴν ἀποψη τὴν ἀντίθετη τῆς ἄποψης τοῦ Bohr καὶ χρησιμοποιώντας τὸ μαθηματικὸ φορμαλισμὸ τῆς Κβαντομηχανικῆς δείχνει ὅτι ἡ ὑπόθεση A ἔρχεται σὲ ἀντίθεση μὲ τὴν ἀρχὴ τῆς ἀβεβαιότητας καὶ κατὰ συνέπεια δίνει διαφορετικὰ ἀποτελέσματα ἀπὸ τὴν Κβαντομηχανική. Ἀπορρίπτοντας τὴ μέθοδο A, ὁ Furry καταλήγει στὸ συμπέρασμα ὅτι δὲν τίθεται θέμα πληρότητας τῆς Κβαντομηχανικῆς. Οἱ δυσκολίες της (ἂν ὑπάρχουν) εἶναι δυσκολίες στὴ διάκριση ἀντικειμένου καὶ ὑποκειμένου (πειραματικῆς συσκευῆς).

Εἶναι ἐνδιαφέρον νὰ σημειώσουμε ὅτι σαράντα χρόνια ὕστερα ἀπὸ τὴν ἀρχικὴ ἐρώτηση τῶν EPR, ἡ κριτικὴ γιὰ τὸ παράδοξο αὐτὸ δὲν φαίνεται νὰ ἀπομακρύνεται πολὺ ἀπὸ τὶς ἀρχικὲς ἀπαντήσεις τῶν Bohr καὶ Furry. Ὁ Kellel (1975) καταλήγει στὸ συμπέρασμα ὅτι τὰ ἀρχικὰ ἐπιχειρήματα τῶν EPR δὲν εἶναι ἱκανοποιητικὰ γιὰ δύο λόγους:

- (i) γιὰ τὸ παράδειγμά τους δὲν εἶναι φυσικῶς πραγματοποιήσιμο
- (ii) γιὰ τὸ οἱ βασικὲς τους παραδοχὲς (δηλ. οἱ D1, D2) εἶναι ἰσοδύναμες μὲ τὴν ἀρχὴ A τοῦ Furry.

Πράγματι ἀφοῦ ἡ ἀρχὴ A δίνει ἀντίθετα ἀποτελέσματα μὲ τὴν Κβαντομηχανική τότε καὶ οἱ D1, D2 θὰ ὀδηγοῦν καὶ αὐτοὶ σὲ ἀντίθετα ἀποτελέσματα. Ἄρα θὰ ὑπάρχει ἓνα τουλάχιστον πραγματοποιήσιμο πείραμα, ὅπου οἱ ὀρισμοὶ D1, D2 γιὰ τὴ φυσικὴ πραγματικότητα θὰ μποροῦν νὰ ἐφαρμοσθοῦν καὶ ὅπου οἱ προβλέψεις τους θὰ μποροῦν νὰ διαψευσθοῦν ἀπὸ τὸ πείραμα. Σύμφωνα μὲ τὶς ἀνισότητες τοῦ Bell, [Bell (1964), 1966 καὶ 1970] μία θεωρία, ποὺ θὰ ἀποκαθιστοῦσε τὴν τοπικότητα (locality), τὸ διαχωρίσιμο καὶ τὴν αἰτιότητα στὸ χῶρο τῆς Κβαντικῆς μηχανικῆς, θὰ μποροῦσε νὰ διαψεύσει ὀρισμένες ἀπὸ τὶς στατιστικὲς προβλέψεις τῆς τωρινῆς θεωρίας. Μιὰ πειραματικὴ ἐπαλήθευση αὐτῶν τῶν ἀνισοτήτων θὰ ἰσοδυναμοῦσε μὲ ἀπόδειξη τῆς ὑπαρξῆς λανθανουσῶν παραμέτρων. Τὰ πειραματικὰ ἀποτελέσματα ὅμως δὲν φαίνεται νὰ δίνουν μέχρι σήμερα κατηγορηματικὴ ἀπάντηση. Ὁ Kellel ὅμως θεωρεῖ τὰ ἀποτελέσματα τῶν Freedman - Clauser (1972) ἀποφασιστικὰ καὶ συμπεραίνει ὅτι ἀφοῦ τὰ ἀρχικὰ ἐπιχειρήματα τῶν EPR εἶναι ἀντίθετα μὲ τὸ πείραμα καὶ ἀφοῦ κανεὶς δὲν ἔχει ἀποδείξει ὅτι ὑπάρχει ἀντίφαση μέσα στὸν ἴδιο τὸ φορμαλισμὸ τῆς Κβαντομηχανικῆς, ἡ Κβαντομηχανικὴ εἶναι πλήρης θεωρία.

#### 4. Συμπεράσματα

Ἐπειδὴ ἀπὸ τὴ συζήτηση τῶν § 2, § 3 εἴμαστε σὲ θέση νὰ ρωτήσουμε τί ἀπομένει ἀπὸ τὸ ἀρχικὸ παράδοξο τῶν EPR. Θὰ μπορούσαμε νὰ παρατηρήσουμε ὅτι ἡ ἀπάντηση τοῦ Bohr προϋποθέτει τὸ μὴ διαχωρίσιμο (ἀντικειμέ-



νου, πειραματικής συσκευής) και αυτό παρουσιάζει δυσκολίες γιατί είναι σαν να δέχεται αλληλεπιδράσεις με άπειρη ταχύτητα. Άλλα κι αν ακόμα δεχτούμε την άποψη του Kellert (1975), ότι τα επιχειρήματα των EPR δεν ευσταθούν, κανείς δεν μπορεί να αποκλείσει την πιθανή ύπαρξη μιας θεωρίας ή όποια να συμπεριλαμβάνει την έννοια της Φυσικής πραγματικότητας των EPR και ή όποια να συμφωνεί με όλα τα πειραματικά δεδομένα (πειράματα συσχετισμού πόλωσης δύο φωτονίων).

Αυτή ή άποψη οδηγεί στο ερώτημα ύπαρξης θεωριών με λανθάνουσες παραμέτρους (hidden variable theories) και σε μια άλλη διαμάχη: στη διαμάχη του αν μια τέτοια θεωρία μπορεί να δώσει όλες τις προβλέψεις της Κβαντομηχανικής. Τέτοιες θεωρίες έχουν προταθεί (Bohm 1952, Bohm και Bub 1966) και υπάρχουν διάφορα θεωρήματα [J. von Neumann (1955), Bell [(1964), (1966), (1970)] τα όποια δείχνουν ότι είναι αδύνατο αυτές οι θεωρίες να συμφωνούν σε όλα τα σημεία με την Κβαντομηχανική. Οι αποδείξεις όμως αυτών των θεωρημάτων εξαρτώνται αποφασιστικά από την παραδοχή ότι ή Κβαντομηχανική είναι μία *ορθή* θεωρία (Kellert 1975). Πράγματι λοιπόν, ή δυνατότητα για μια πιο σωστή Θεωρία από την Κβαντομηχανική μπορεί να θεωρηθεί σαν ανοιχτή, αλλά μια τέτοια θεωρία θα εξαρτάται αποφασιστικά από το ποῦ θα αρχίσει να καταρρέει ή Κβαντομηχανική και δεν υπάρχει κανένας a priori λόγος για να υποθέσουμε ότι ή νέα αυτή θεωρία θα είναι του τύπου των «λανθανουσών παραμέτρων».

Μία άλλη έρμηνεία της Κβαντομηχανικής που παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον είναι ή Στατιστική έρμηνεία\* (Ballentine 1970). Σύμφωνα με αυτήν, ο φορμαλισμός της κβαντομηχανικής μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο σε σύνολα από όμοια προπαρασκευασμένα συστήματα και όχι σε μεμονωμένα φυσικά συστήματα. Η έρμηνεία αυτή παρ' όλο το ενδιαφέρον της παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες σχετικά με τα θεωρήματα διατήρησης που είναι ένα ουσιαστικό στοιχείο του Κβαντομηχανικού φορμαλισμού. Ο Ballentine εξάλλου θεωρεί ότι ή Κβαντομηχανική δεν είναι ασυμβίβαστη με την υπόθεση ότι ένα σωματίο έχει καθορισμένη θέση και όρμη (Ballentine 1970, σελ. 372). Ο Kellert (1975) απορρίπτει αυτή την άποψη κατηγορηματικά, χρησιμοποιώντας τα επιχειρήματα του Furry (1936), ενώ ο Ballentine (1970, παραπομπή 13) θεωρεί τα επιχειρήματα του Furry ως άσχετα με το όλο πρόβλημα και ως όφειλόμενα μάλλον σε κακή έρμηνεία του όρου «στοιχείο πραγματικότητας» που παρουσιάζεται στο αρχικό κείμενο των EPR. Στο σημείο αυτό μια καινούρια διαμάχη αρχίζει ανάμεσα στη στατιστική έρμηνεία και την κβαντομηχανική, μια διαμάχη που δεν θα μας απασχολήσει εδώ.

Υπάρχει ένα τελευταίο ερώτημα σχετικά με τη στάση της τωρινής (συμβατικής) Φυσικής Έπιστήμης απέναντι στην έννοια της Φυσικής πραγματικότητας των EPR. Άς πάρουμε για παράδειγμα την «εξαύλωση» ενός

---

\*Και ή κβαντομηχανική είναι κατά κάποιο τρόπο μια στατιστική θεωρία, Born (1926).



$^1S_0^1$  ποζιτρονίου σέ δυò φωτόνια. Τò πείραμα αὐτò εἶναι τοῦ τύπου τῶν πειραμάτων ποὺ ἀναφέραμε καὶ προηγούμενα καὶ ἔχει μελετηθεῖ ἀπὸ τοὺς Wu καὶ Shaknov (1950). Κατὰ γενικὴ ἀποδοχὴ τὸ πείραμα εἶναι τέτοιο, ὥστε ἡ ἔννοια τῆς Φυσικῆς πραγματικότητος τῶν EPR νὰ μπορεῖ νὰ ἐφαρμοσθεῖ (Kellet 1975). Ἐφαρμόζοντας τὴ διατήρηση τῆς στροφορμῆς ἔχουμε:

(i) Ἐὰν τὸ ἓνα φωτόνιο εἶναι δεξιόστροφο ἢ ἀριστερόστροφο τότε καὶ τὸ ἄλλο ἔχει ἀκριβῶς τὴν ἴδια πόλωση.

(ii) Τὰ φωτόνια εἶναι εἴτε δεξιόστροφα εἴτε ἀριστερόστροφα.

(iii) Ὅποιαδήποτε μέτρηση δὲν μπορεῖ νὰ ἀλλάξει τὴ φύση τῶν φωτονίων. Τὰ φωτόνια θὰ εἶναι ἢ δεξιόστροφα ἢ ἀριστερόστροφα.

(iv) Ἄν τώρα ἀλλάξεις τὴ συσκευή καὶ χωρίσεις τὰ φωτόνια σέ δυò γραμμικὰ πολωμένες δέσμες μπορεῖς νὰ πετύχεις ὥστε τὰ φωτόνια νὰ ἀκολουθοῦν ἢ τὴν  $x$  διεύθυνση ἢ τὴν  $y$ .

(v) Ἐφόσον κάθε φωτόνιο εἶναι ἢ δεξιόστροφο ἢ ἀριστερόστροφο σύμφωνα μὲ τὶς (ii) καὶ (iii) καὶ λόγω τῆς ἀρχῆς τῆς ἐπαλληλίας, τὸ κάθε φωτόνιο θὰ ἔχει μία πιθανότητα 50 - 50 νὰ βρίσκεται στὴν  $x$  ἢ στὴν  $y$  δέσμη.

(vi) Ἡ θεωρία βεβαιώνει ὅτι ἂν τὸ ἓνα φωτόνιο εἶναι στὴν  $x$ -δέσμη τότε τὸ ἄλλο φωτόνιο θὰ εἶναι στὴν  $y$ -δέσμη.

Τὸ ἀποτέλεσμα (vi) ἀντιφάσκει μὲ τὸ (v) καὶ ἐπομένως ἔχουμε ἓνα παράδοξο. Τὸ παράδοξο αὐτὸ εἶναι τὸ ἴδιο τὸ ἀρχικὸ παράδοξο τῶν EPR ἀλλὰ σέ μιὰ διαφορετικὴ, φυσικῶς πραγματοποιήσιμη περίπτωση. Ὁ Feynman (1965) γράφει: «... Ἡ φύση δὲν βλέπει τὸ παράδοξο...» γιὰ τὸ βῆμα (iii) — ὅπου χρησιμοποιήθηκε ὁ ὀρισμὸς τῆς φυσικῆς πραγματικότητος τῶν EPR — δὲν εἶναι σωστὸ καὶ ἄρα καὶ τὸ βῆμα (v). Ἐπομένως ἡ μόνη ἀντίφαση εἶναι ἡ σύγκρουση ἀνάμεσα στὴ φυσικὴ πραγματικότητα, ὅπως αὐτὴ ἐκφράζεται ἀπὸ τὸ πείραμα (βῆμα vi) καὶ στὰ αἰσθήματά μας, γιὰ τὸ ποιά θὰ ἔπρεπε νὰ εἶναι ἡ ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητος (Feynman 1965). Μὲ ἄλλα λόγια, ξαναγυρίζουμε στὴν ἄποψη τοῦ Bohr καὶ ἡ συμβατικὴ φυσικὴ ἀπορρίπτει τὴν ἔννοια τῆς φυσικῆς πραγματικότητος τῶν EPR ὡς ἀντίθετη μὲ τὰ πειραματικὰ δεδομένα. Τὸ πρόβλημα ὅμως γιὰ μιὰ ἱκανοποιητικὴ ἐρμηνεία αὐτῆς τῆς συμβατικῆς Κβαντομηχανικῆς δὲν παύει νὰ παραμένει ἀκόμα ἀνοιχτό.\*

\* Θὰ ἠθελα νὰ εὐχαριστήσω τὸν κ. Ε. Μπιτσάκη γιὰ πολυάριθμες παρατηρήσεις καὶ γιὰ πολύτιμες ὑποδείξεις ποὺ ἔκανε μελετώντας τὸ χειρόγραφό μου.

## Βιβλιογραφία

1. BALLENTINE, L. E, Rev. of Math. Phys. Vol 42, No 4, 358 (1970).
2. BOHR N., Phys. Rev., Vol 48, 696 (1935).



3. EINSTEIN PODOLSKY, ROSEN, Phys. Rev., Vol. 47, 777 (1935).
4. FEYNMAN R. P., Lectures on Physics, Vol. III, Reading, Mass. 1972
5. FURRY W. H., Phys., Rev., Vol 49, 393 (1936).
6. KELLETT B., Preprint of Univ. of Glasgow G12-8QQ (1975).
7. von NEUMANN J., "Mathematical foundations of Quantum Mechanics",  
Princeton 1955.

Λεπτομερή βιβλιογραφία θα βρει ο αναγνώστης στους αριθμούς 1 και 6.