

Η κβαντική σύμπλεξη ή διεμπλοκή

Η διαφορά της κλασσικής με τη κβαντική αβεβαιότητα-πιθανότητα.

Στην κλασσική φυσική τα μαθηματικά μοντέλα οδηγούν σε απόλυτες προβλέψεις. Όλες όμως οι μετρήσεις συνοδεύονται με κάποια αβεβαιότητα. Γι αυτό η κάθε μέτρηση συνοδεύεται με το σφάλμα της. Η αβεβαιότητα στην κλασσική φυσική δεν οφείλεται στους φυσικούς νόμους, αλλά στην ατέλεια των οργάνων μέτρησης. Γι αυτό λέμε ότι η κλασσική φυσική είναι **ντετερμινιστική**. Δηλαδή το ίδιο αίτιο φέρει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα. Τελειοποιώντας τα τεχνικά μέσα μέτρησης ενός μεγέθους, ελαττώνουμε και το σφάλμα μέτρησης. Δεν υπάρχει θεωρητικό όριο στο πόσο μπορεί να ελαττωθεί το σφάλμα μιας μέτρησης. Ας αναφέρουμε ένα παράδειγμα. Έστω ότι ένα αυτοκίνητο που κινείται ομαλά, περνάει κάποια στιγμή από μπροστά μας και μετράμε την ταχύτητά του. Εφαρμόζοντας τους νόμους της κλασσικής φυσικής, μπορούμε να προβλέψουμε που θα βρίσκεται το αυτοκίνητο κάποια χρονική στιγμή. Με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσαμε την ταχύτητα, με τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούμε ν' αποφανθούμε για τη θέση. Κάθε αυτοκίνητο που περνάει με την ίδια ταχύτητα, την ίδια στιγμή θα βρίσκεται στην ίδια θέση.

Αντίθετα στην κβαντομηχανική οι φυσικοί νόμοι δεν δίνουν απόλυτες προβλέψεις. Οι νόμοι της κβαντομηχανικής είναι **πιθανοκρατικοί**. Δηλαδή η κβαντομηχανική δεν προβλέπει την τιμή ενός φυσικού μεγέθους αλλά την πιθανότητα το μέγεθος αυτό να έχει μία συγκεκριμένη τιμή. Το μαθηματικό μοντέλο της κβαντομηχανικής προβλέπει τις πιθανότητες για κάποιες τιμές με τις οποίες θα μετρηθούν τα διάφορα φυσικά μεγέθη. Έτσι αν πάμε στον μικρόκοσμο που δεν ισχύουν οι νόμοι της κλασσικής φυσικής αλλά της κβαντομηχανικής και μετρήσουμε την ταχύτητα που πέρασε ένα σωματίδιο το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα από κάποια θέση, τότε δεν μπορούμε να αποφανθούμε που θα βρίσκεται μετά από κάποια στιγμή. Μπορούμε ν' αποφανθούμε μόνο για την πιθανότητα να το βρούμε σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Και μάλιστα συμβαίνει κάτι το πολύ περίεργο. Με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσουμε την ταχύτητα του σωματιδίου, τόσο αυξάνει η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της θέσης του κάποια μελλοντική στιγμή. Έτσι μολονότι κάποια σωματίδια περνάνε από την ίδια θέση με την ίδια ταχύτητα, κάποια στιγμή στο μέλλον θα βρίσκονται πιθανώς σε διαφορετικές θέσεις. Το μέλλον τους δηλαδή εξελίσσεται διαφορετικά. Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντομηχανικής είναι άραγε μία ενδογενής ιδιότητα της φύσης ή οφείλεται στην ελλιπή πληροφόρηση που έχουμε για τη φύση;

Ας φανταστούμε ένα εκκολαπτήριο στο οποίο κάθε τόσο σπάει ένα αυγό και βγαίνει ένα πουλάκι. Μπορούμε άραγε να προσδιορίσουμε ποια αυγά θα σπάσουν πρώτα; Προφανώς όχι. Και αυτό γιατί δεν γνωρίζουμε τις διεργασίες που συμβαίνουν μέσα στο κάθε αυγό. Αν όμως είχαμε μία συσκευή ακτίνων x και βλέπαμε τι συμβαίνει μέσα στο κάθε αυγό, τότε θα μπορούσαμε να δώσουμε απάντηση στο παραπάνω ερώτημα. Μήπως κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και για τους πιθανοκρατικούς νόμους της κβαντομηχανικής; Μήπως αν γνωρίζαμε κάποιες επιπλέον πληροφορίες για τα φαινόμενα να μπορούσαμε με απόλυτη ακρίβεια και όχι με πιθανότητες να προβλέψουμε την εξέλιξή τους;



Ας αναφερθούμε σε ένα δεύτερο παράδειγμα που έχει να κάνει με τη ρίψη ενός νομίσματος. Αν γνωρίζαμε όλες τις λεπτομέρειες με τις οποίες το ρίχνουμε, όλες τις λεπτομέρειες του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται και όλες τις ιδιότητες της κρούσης του με το έδαφος, θα μπορούσαμε με βεβαιότητα να προβλέψουμε αν το κέρμα έρθει κορώνα ή γράμματα. Τη ρίψη των κερμάτων ή των ζαριών τη θεωρούμε τυχερό παιχνίδι λόγω της άγνοιάς μας. Αν ήμασταν πάνσοφοι τότε θα μπορούσαμε να προβλέψουμε τι θα φέρει μία ρίψη. Με άλλα λόγια, **ο Θεός δεν παίζει ζάρια** κατά τη ρήση του Αϊστάιν, αφού γνωρίζοντας όλες τις λεπτομέρειες της ρίψης, μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια το αποτέλεσμα. Από την άλλη όμως, κατά την άποψη της ομάδας του Μπορ η αδυναμία πρόβλεψης στην κβαντομηχανική δεν οφείλεται στην έλλειψη γνώσεων όπως στα ζάρια ή στο εκκολαπτήριο, αλλά είναι μία ενδογενής ιδιότητα της φύσης. Μ' άλλα λόγια, ποτέ δεν είναι δυνατό να προβλέψουμε με ακρίβεια ένα κβαντομηχανικό φαινόμενο όπως π.χ το πότε θα διασπαστεί ένας ραδιενεργός πυρήνας. **Σταμάτα να λες στο Θεό τι να κάνει**, ήταν η απάντηση του Μπορ στην παραπάνω ρήση του Αϊστάιν.

Η σχολή της Κοπεγχάγης πίστευε ότι τα κβαντικά φαινόμενα μοιάζουν σαν κέρματα που βρίσκονται σε κλειστά κουτιά ισορροπώντας όμως οριακά στην κόχη τους όπως στην πρώτη εικόνα. Κάνοντας ένα πείραμα, δηλαδή ανοίγοντας το κουτί για να δούμε ένα κέρμα, τότε διαταράσσεται η ευαίσθητη ισορροπία του και πέφτει από τη μία ή την άλλη πλευρά δείχνοντας είτε κορώνα, είτε γράμματα. **Μ' άλλα λόγια η ομάδα αυτή πίστευε ότι η παρατήρηση επιδρά στο αποτέλεσμα του πειράματος**. Ακριβώς γι αυτό το λόγο η σχολή της Κοπεγχάγης ισχυρίζεται ότι τα ερωτήματα που μπορούμε να θέσουμε στη φύση, είναι μόνο αυτά που μπορούμε να ελέγξουμε πειραματικά. Έτσι πχ δεν μπορούμε να ρωτήσουμε τι τροχιά ακολουθεί ένα ηλεκτρόνιο σε κάποιο άτομο, αφού δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε κάποιο πείραμα που να μας αποδίδει αυτή την τροχιά.



Το κέρμα πριν ανοίξουμε το κουτί για να το δούμε



Το κέρμα όπως το βλέπουμε όταν ανοίξουμε το κουτί

Το νοητικό πείραμα EPR

Τελικά η παρατήρηση επιδρά ή όχι στο αποτέλεσμα του πειράματος; Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας των φυσικών νόμων της κβαντομηχανικής οφείλεται στην έλλειψη γνώσεων ή είναι ενδογενές χαρακτηριστικό της ίδιας της φύσης; Η διαμάχη αυτή ανάμεσα στις δύο σχολές συνεχιζόταν για αρκετά χρόνια. Σε μία τελευταία του προσπάθεια ο Αϊστάιν με τους συνεργάτες του Ποντόλσκι και Ρόζεν το 1935 παρουσίασε ένα νοητικό - φανταστικό πείραμα με στόχο να υπερασπιστεί τις ιδέες του, αντικρούοντας την άποψη της σχολής της Κοπεγχάγης που ισχυριζόταν ότι η φύση των πραγμάτων αλλάζει με την παρατήρηση. Το νοητικό αυτό πείραμα έχει μείνει στην ιστορία ως πείραμα **EPR** από τα αρχικά των ονομάτων των εμπνευστών του.

Μία απλοποιημένη διατύπωση του πειράματος είναι η εξής:

Το κάθε σωματίδιο στο μικρόκοσμο έχει αρκετές ιδιότητες. Μία από αυτές τις ιδιότητες είναι το λεγόμενο σπιν που μπορεί να πάρει διάφορες τιμές όπως 0, 1, -1 κλπ. Υπάρχουν διαδικασίες στη φύση που κάποια σωματίδια μετατρέπονται σε κάποια άλλα και στις διαδικασίες αυτές διατηρείται το σπιν. Δηλαδή έχει την ίδια τιμή τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της διαδικασίας. Αν λοιπόν είχαμε ένα σωματίδιο που αρχικά έχει σπιν 0 και αυτό διασπαστεί σε δύο άλλα σωματίδια που το ένα έχει σπιν +1, τότε το άλλο υποχρεωτικά θα έχει σπιν -1 λόγω της αρχής διατήρησης του σπιν αφού $0 = +1 - 1$.

Ας παρομοιάσουμε την κατάσταση αυτή με το παιχνίδι κορώνα γράμματα που προαναφέραμε και ας πούμε ότι το σπιν +1 αντιστοιχεί στην κορώνα και το -1 στα γράμματα. Τα δύο λοιπόν σωματίδια που προκύπτουν από τη διάσπαση είναι σαν δύο κουτιά που γνωρίζουμε με βεβαιότητα ότι αν το ένα κουτί το ανοίξουμε και δούμε το νόμισμα να δείχνει κορώνα, τότε, όποτε και ν' ανοίξουμε το άλλο κουτί, με απόλυτη βεβαιότητα θα δούμε το κέρμα να δείχνει γράμματα. Παίρνουμε λοιπόν αυτά τα κουτιά και τα απομακρύνουμε πάρα πολύ μεταξύ τους. Κάποια στιγμή ανοίγουμε το ένα κουτί και έστω ότι βλέπουμε το κέρμα να δείχνει γράμματα. Τότε στο άλλο κουτί θα ξέρουμε όποτε και να το ανοίξουμε, ότι το κέρμα θα δείχνει κορώνα. Άρα η άποψη της σχολής της Κοπεγχάγης ότι τα κέρματα μέσα στα κουτιά βρίσκονται στην κόχη τους και με το πείραμα, δηλαδή με το άνοιγμα του κουτιού το κέρμα πέφτει ώστε να δείξει κορώνα ή γράμματα, δεν μπορεί να ευσταθεί. Γιατί αν ευσταθούσε, τότε το άνοιγμα του ενός κουτιού εδώ, δεν θα επηρέαζε μόνο την ισορροπία του κέρματος στο κουτί που ανοίξαμε, αλλά θα επηρέαζε ακαριαία και την ισορροπία του κέρματος του άλλου κουτιού που βρίσκεται πολύ μακριά, αφού στα δύο κουτιά τα κέρματα θα πρέπει να βρεθούν με αντίθετες όψεις. Με άλλα λόγια ότι συμβαίνει εδώ, θα μπορεί ακαριαία να επηρεάσει κάτι που συμβαίνει κάπου πολύ μακριά. Έτσι όμως καταργείται η **τοπικότητα**, δηλαδή ότι ένα συμβάν μπορεί να επηρεάσει ακαριαία μόνο το άμεσο περιβάλλον του. Το φαινόμενο αυτό το ονομάζουμε κβαντική σύμπλεξη, ή διεμπλοκή ή κβαντικό εναγκαλισμό (quantum entanglement).

Η κατάρρευση του ρεαλισμού και της τοπικότητας

Αυτή η διαμάχη, δηλαδή αν στη κβαντομηχανική ισχύει ή όχι η τοπικότητα οπότε και η κβαντική διεμπλοκή κράτησε για πολλά χρόνια. Ήταν όμως μία διαμάχη σε φιλοσοφικό επίπεδο, αφού δεν υπήρχε κάποιο πραγματικό και όχι νοητικό πείραμα που να αποδεικνυε ποια ομάδα είχε δίκιο. Το 1963 όμως συνέβη κάτι εξαιρετικό!. Ο Ιρλανδός Φυσικομαθηματικός Μπελ απέδειξε ότι είναι δυνατόν να διαπιστώσουμε ποια ομάδα έχει δίκιο πραγματοποιώντας ένα συγκεκριμένο τύπο πειράματος, το οποίο μετράει μια παράμετρο γνωστή ως παράμετρο S. Για να το θέσουμε πιο απλά, αν ισχύει η τοπικότητα όπως πίστευε ο Αϊνστάιν και η ομάδα του, τότε η παράμετρος S θα πρέπει να έχει τιμή μικρότερη του 2, ενώ αν δεν ισχύει η τοπικότητα και ισχύει η κβαντική διεμπλοκή στην οποία πίστευαν ο Μπορ και η ομάδα του, τότε η παράμετρος S θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 2 και πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να ισούται με 2,82. Αρκεί λοιπόν να μπορούσαμε να μετρήσουμε το S. Αν το βρίσκαμε μικρότερο του 2 θα είχε δίκιο ο Αϊνστάιν. Αν το βρίσκαμε μεγαλύτερο του 2 θα είχε δίκιο ο Μπορ.

Μετά το 1970 πέρανε οι πρώτες ιδέες από τους πειραματιστές σχετικά με τη μέτρηση του S. Τελικά το S μετρήθηκε και βρέθηκε μεγαλύτερο του 2. Για τα πειράματα αυτά βραβεύτηκαν το 2022 με το βραβείο Νόμπελ ο Γάλλος Ασπέκτ, ο Αμερικάνος Κλάουζερ και ο Αυστριακός Ζηλινγκερ. Έτσι, αυτά τα πειράματα έχουν αποκλείσει όλες τις θεωρίες περί κρυμμένων μεταβλητών, που βασίζονται στις κοινές υποθέσεις **του ρεαλισμού, ο οποίος δέχεται ότι η πραγματικότητα υπάρχει ακόμη και όταν δεν την παρατηρούμε και της τοπικότητας που σημαίνει ότι γεγονότα σε άλλες περιοχές δεν μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο στιγμιαία.**

Το συμπέρασμα είναι ότι είτε ο ρεαλισμός είτε η τοπικότητα είτε και τα δύο είναι σε ασυμφωνία με την κβαντομηχανική, με ότι αυτό συνεπάγεται. Νικητής αυτής της διαμάχης ανακηρύχτηκε περίτρανα ο Μπορ και η σχολή της Κοπεγχάγης.

©Πάνος Μουρούζης 2024