Ο ρόλος της πιθανότητας και της στατιστικής στις φυσικές επιστήμες και στην καθημερινή ζωή

1. Γιατί μία οποιαδήποτε επιστημονική μέτρηση πρέπει να συνοδεύεται από το σφάλμα της;
2. Υπάρχουν βεβαιότητες στις φυσικές επιστήμες;
3. Πως μπορεί να διατυπωθεί αλλά και να ελεγχθεί επιστημονικά μία πρόγνωση;
4. Πως μπορούμε να συγκρίνουμε διάφορες προγνώσεις υπηρεσιών σχετικά με τον καιρό ή τα αποτελέσματα εκλογών κλπ;
5. Τι ονομάζουμε κανονική κατανομή πότε ισχύει και πότε δεν ισχύει;
6. Τι ακριβώς ισχυρίζεται η αρχή της αβεβαιότητας ή απροσδιοριστίας;
7. Αφού η κβαντομηχανική προβλέπει όχι τη τιμή ενός φυσικού μεγέθους αλλά την πιθανότητα μέτρησης κάποιας τιμής για το συγκεκριμένο μέγεθος, που διαφέρουν οι μέθοδοι της κβαντομηχανικής από τις μεθόδους της φαρμακολογίας, της ψυχιατρικής και τόσων άλλων επιστημών σχετικά με τη διεξαγωγή συμπερασμάτων;
8. Που διαφέρουν η κλασσική πιθανότητα-αβεβαιότητα από την κβαντική;
9. Τι είναι το φαινόμενο της κβαντικής διεμπλοκής;
10. Τι είναι το παράδοξο EPR Αϊστάιν, Πολντόσκι, Ρόουζεν;
11. Τελικά είχε δίκιο ο Αϊστάιν ή ο Μπορ;

Οι πιθανότητες στην καθημερινότητα

Πάρα πολλές πληροφορίες στην καθημερινή ζωή έχουν σχέση με τις πιθανότητες και τη στατιστική. Με πιθανότητες δίνεται πρόβλεψη του καιρού αλλά και η εξέλιξη μίας επιδημίας. Με πιθανότητες δίνονται οι παρενέργειες αλλά και η θεραπεία ενός φαρμάκου, ή η πρόγνωση ενός εκλογικού αποτελέσματος. Η νίκη σ' ένα τυχερό παιχνίδι αλλά και η ασφάλεια ενός μεταφορικού μέσου. Τα περισσότερα (αν όχι όλα) τα επιστημονικά συμπεράσματα είναι αποτελέσματα στατιστικής. Αυτό όμως σημαίνει ότι είναι και επισφαλή; Μήπως στην επιστήμη δεν υπάρχουν βεβαιότητες; Μήπως τελικά ισχύει ο ορισμός που είχε δώσει ένας αείμνηστος μαθηματικός για τη στατιστική λέγοντας ότι: *Στατιστική είναι η επιστήμη που μας πείθει «με επιστημονικό τρόπο» για την αλήθεια αυτού που εξ' αρχής θέλαμε ν' αποδείξουμε ως αληθές;* ☺

Δύο βασικές μεθοδολογίες των Φυσικών Επιστημών

Θεωρώ ότι μπορούμε να κατατάξουμε τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν οι Φυσικές Επιστήμες σε δύο βασικές κατηγορίες.

- Στη **Βαβυλώνια** μεθοδολογία που βασίζεται στη συλλογή δεδομένων και στην απόκτηση εμπειρίας μέσω αυτών. Αυτή τη μεθοδολογία χρησιμοποιείται κατά κόρον από τους μηχανικούς που η λειτουργικότητα των κατασκευών τους βασίζεται εν γένει στη λογική της δοκιμής και του λάθους. Αυτή είναι βασικά η αλγοριθμική μεθοδολογία. Είναι η μεθοδολογία εκμάθησης της γλώσσας αλλά και η λογική που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα AlphaZero το οποίο κερδίζει στο σκάκι τον πρωταθλητή κόσμου, χωρίς όμως ο κώδικας να εμπεριέχει στρατηγικές ή θεωρίες ανοιγμάτων ή φινάλε. Η αρχιτεκτονική του προγράμματος βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα που με την εμπειρία που αποκτούν παίζοντας το πρόγραμμα με τον εαυτό του διαρκώς βελτιώνονται. Με αυτή τη μεθοδολογία φτιάξαμε τα αεροπλάνα. Η βελτίωση της πτητικής τους ικανότητας βασίζεται κυρίως στην μεθοδολογία της δοκιμής και του λάθους.

- Από την άλλη έχουμε την **Ελληνική** μεθοδολογία η οποία στηρίζεται στην αυστηρή απόδειξη. Η μεθοδολογία αυτή αρχίζει με την διατύπωση κάποιων αξιωμάτων που πάνω σ' αυτά κτίζει το υπόλοιπο οικοδόμημα, αποδεικνύοντας αυστηρά κάθε επόμενη πρόταση. Κλασσική περίπτωση αυτής της μεθοδολογίας είναι η Ευκλείδεια γεωμετρία αλλά και όλες οι μαθηματικές και φυσικές θεωρίες, όπως πχ η Κλασσική φυσική, η ειδική και γενική θεωρία σχετικότητας, η θερμοδυναμική, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η κβαντική φυσική κλπ. Αυτή η μεθοδολογία βασίζεται πάντα σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο γι αυτό και όλες οι φυσικές θεωρίες εκφράζονται με εξισώσεις.

Τη Βαβυλώνια μεθοδολογία τη χρησιμοποιούμε εν γένει όταν μελετάμε πολύπλοκα – πολυπαραγοντικά συστήματα όπως αυτά εμφανίζονται στην Ιατρική, την Ψυχολογία, την Μηχανολογία, την Κοινωνιολογία κλπ στα οποία είναι πολύ δύσκολο έως αδύνατο να περιγράψουμε τα αντίστοιχα φαινόμενα μέσω μαθηματικών μοντέλων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις αυτό που κάνουμε είναι να καταλήγουμε σε συμπεράσματα μέσω της εμπειρίας. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πόσο μεγάλο ρόλο παίζει σ' αυτές τις περιπτώσεις η στατιστική ανάλυση, η οποία δεν είναι τίποτε άλλο παρά μία ορθολογική χρήση των data, δηλαδή της εμπειρίας. Άρα στη Βαβυλώνια μεθοδολογία, η στατιστική αποτελεί τον οδηγό της διεξαγωγής των κανόνων και των συμπερασμάτων.

Αλλά και στην Ελληνική μεθοδολογία η αναφορά στο σφάλμα της μέτρησης παίζει πρωτεύοντα ρόλο. Το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης πρέπει να συνοδεύεται από το σφάλμα του, ώστε η μετρούμενη πειραματική τιμή να μπορεί να συγκριθεί με το θεωρητικό αποτέλεσμα που δίνει το προτεινόμενο μοντέλο. Αν το μέγεθος που μετρήθηκε αποκλίνει από την αναμενόμενη θεωρητική τιμή, περισσότερο από την αναμενόμενη αβεβαιότητα-σφάλμα, τότε θα πρέπει να βελτιώσουμε (να επιδιορθώσουμε) το μοντέλο μας ή ενίοτε και να το απορρίψουμε τελείως δημιουργώντας ένα νέο μοντέλο. Έτσι όσο αυξάνεται η ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων, δηλαδή όσο ελαττώνεται το πειραματικό σφάλμα, τόσο λεπτότερο γίνεται το κόσκινο από το οποίο περνάει το προτεινόμενο μοντέλο. Με τη απόρριψη βέβαια ενός θεωρητικού μοντέλου, δεν σημαίνει ότι το παλαιό μοντέλο πετιέται στον κάλαθο των αχρήστων. Και αυτό γιατί το παλαιότερο μοντέλο μπορεί να εξακολουθεί να είναι λειτουργικό σε τεχνικές εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια. Έτσι οι μηχανικοί για να φτιάξουν ένα σπίτι, μία πολυκατοικία, έναν ουρανοξύστη, μία γέφυρα κλπ δεν χρησιμοποιούν την ειδική θεωρία της σχετικότητας ούτε την κβαντομηχανική, αφού η κλασσική μηχανική του Νεύτωνα καλύπτει τις τεχνικές τους ανάγκες. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο για την κατασκευή ενός συστήματος GPS, ή την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Μολονότι όλες οι επιστημονικές μετρήσεις συνοδεύονται με σφάλματα, άρα ενέχουν αβεβαιότητα, η επιστήμη σε αρκετές περιπτώσεις μιλάει με απόλυτη βεβαιότητα. Μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να στείλουμε ένα τηλεκατευθυνόμενο ρομπότ στον Άρη ή να προβλέψουμε την επόμενη ηλιακή έκλειψη. Άρα η επιστήμη καταλήγει σε προβλέψεις που ενίοτε εμπεριέχουν τόσο μικρό σφάλμα, που το θεωρούμε αμελητέο. Τότε μιλάμε πλέον για βεβαιότητες. Συνήθως όμως μία πρόβλεψη της επιστήμης εμπεριέχει κάποιο σφάλμα που η εκτίμησή του είναι τόσο χρήσιμη και σημαντική για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων, όσο και η ίδια η πρόβλεψη.

Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι και στις δύο προαναφερθείσες βασικές μεθοδολογίες, η στατιστική και η θεωρία πιθανοτήτων παίζουν κεντρικό ρόλο. Στην Βαβυλώνια-αλγοριθμική μεθοδολογία στατιστική θα αποτελέσει τον οδηγό για την διεξαγωγή συμπερασμάτων ενώ στην Ελληνική μεθοδολογία οι πιθανότητες και η θεωρία σφαλμάτων είναι το εργαλείο με το οποίο ελέγχεται η εγκυρότητα του μαθηματικού μοντέλου, δηλαδή κατά πόσο αυτό εναρμονίζεται με τα πειραματικά δεδομένα.

Ο διαχωρισμός βέβαια στις δύο προαναφερθείσες μεθοδολογίες δεν είναι απόλυτος, αφού αφενός υπάρχουν και τα εμπειρικά μαθηματικά μοντέλα που δεν βασίζονται σε αξιώματα (πχ εμπειρικοί νόμοι της τριβής) από τη μία ή και η ικανότητα μίας πρόβλεψης χωρίς συγκεκριμένο φυσικομαθηματικό μοντέλο από την άλλη. Ο Θαλής λέγεται ότι προέβλεψε μία ηλιακή έκλειψη. Η πρόβλεψη δεν οφειλόταν σε κάποιο φυσικομαθηματικό μοντέλο αλλά στην ανακάλυψη περιοδικότητας από πολλές αστρονομικές παρατηρήσεις που είχε στη διάθεσή του προερχόμενες πιθανά από τους Βαβυλωνίους τους Αιγύπτιους ή άλλους λαούς.

Η κανονική κατανομή της στατιστικής

Η κανονική κατανομή είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει μία στατιστική κατανομή ενός μεγέθους του οποίου οι τιμές του μεταβάλλονται γύρω από μία μέση τιμή. Έτσι πχ αν πάρουμε το βάρος ή το ύψος ενός πληθυσμού θα διαπιστώσουμε ότι ακολουθείται η κανονική κατανομή. Η αξία της κανονικής κατανομής είναι αρκετά μεγαλύτερη από το να περιγράφει πάρα πολλά και διαφορετικά στατιστικά φαινόμενα λόγω του **κεντρικού οριακού θεωρήματος**, το οποίο αναφέρει ότι αν έχουμε ένα μέγεθος που μεταβάλλεται αλλά δεν ακολουθεί κανονική κατανομή όπως πχ τ' αποτελέσματα από ένα τεστ σ' ένα σχολείο, τότε αν πάρουμε ένα τυχαίο δείγμα από μαθητές και βρούμε το μέσο όρο των βαθμών τους, οι μέσοι όροι από πολλά τυχαία δείγματα, ακολουθούν εν γένει κανονική κατανομή. Βέβαια παρουσιάζει μεγάλο θεωρητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον ο προσδιορισμός των σπάνιων περιπτώσεων που μία κατανομή δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Η επιστήμη της στατιστικής μας δίνει τα εργαλεία ν' αποφανθούμε ποίες προβλέψεις είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Αν πχ έχουμε πολλές εταιρείες που δημοσιοποίησαν κάποιο εκλογικό αποτέλεσμα, μπορούμε με ασφαλή τρόπο ν' αποφανθούμε ποια από τις εταιρείες αυτές ήταν η πιο σωστή. Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε ν' αποφανθούμε για την αποτελεσματικότητα ενός φαρμάκου, ή ενός εμβολίου ή για την μεθοδολογία που πρέπει ν' ακολουθηθεί για τη θεραπεία ενός ψυχικού νοσήματος.

Η διαφορά της κλασσικής με τη κβαντική πιθανότητα ή αβεβαιότητα

Στη κλασσική φυσική είναι ντετερμινιστική. Με άλλα λόγια το ίδιο αίτιο φέρει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα. Η αβεβαιότητα δεν οφείλεται στους φυσικούς νόμους αλλά στις μετρήσεις. Τελειοποιώντας τα τεχνικά μέσα μέτρησης ενός μεγέθους, ελαττώνουμε και το σφάλμα. Δεν υπάρχει θεωρητικό όριο στο πόσο μπορεί να ελαττωθεί το σφάλμα μιας μέτρησης. Αντίθετα στη κβαντομηχανική οι νόμοι είναι πιθανοκρατικοί. Δηλαδή η κβαντομηχανική δεν προβλέπει την τιμή ενός φυσικού μεγέθους αλλά την πιθανότητα να εμφανιστεί μία συγκεκριμένη τιμή. Το μαθηματικό μοντέλο της κβαντομηχανικής δεν εκφράζεται με φυσικά μεγέθη, αλλά με τις πιθανότητες που θα μετρηθούν αυτά τα μεγέθη.

Ας αναφερθούμε με ένα παράδειγμα.

Έστω ότι έχουμε ένα αυτοκίνητο που κινείται με γνωστή σταθερή ταχύτητα πάνω σ' ένα δρόμο. Έστω ότι περνάει από μπροστά μας τη χρονική στιγμή t=0. Χρησιμοποιώντας τους νόμους της κλασσικής φυσικής μπορούμε ν' απαντήσουμε στο ερώτημα που βρίσκεται το αυτοκίνητο ανά πάσα χρονική στιγμή. Υπάρχει βέβαια και μία αβεβαιότητα στην απάντηση που θα δώσουμε, αλλά αυτή θα οφείλεται στα όργανα μέτρησής μας.

Πάμε τώρα στον μικρόκοσμο. Έστω ότι έχουμε ένα ηλεκτρόνιο που κινείται με γνωστή ταχύτητα και έστω ότι περνάει από ένα σημείο τη χρονική στιγμή t=0. Χρησιμοποιώντας τους νόμους της κβαντικής φυσικής δεν μπορούμε ν' απαντήσουμε στο ερώτημα που θα βρίσκεται το ηλεκτρόνιο μετά από χρόνο t. Οι εξισώσεις της κβαντομηχανικής μας δίνουν μόνο την πιθανότητα να το βρούμε σε κάποια περιοχή. Τίποτε παραπάνω. Και τα πράγματα γίνονται ακόμη χειρότερα. Στην κλασσική φυσική, με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γνωρίζουμε την ταχύτητα του ηλεκτρονίου τόσο ποιο ακριβή απάντηση θα δώσουμε στο ερώτημα το που θα βρίσκεται το ηλεκτρόνιο σε χρόνο t. Στην κβαντομηχανική συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γνωρίζουμε την ταχύτητα του ηλεκτρονίου, τόσο περισσότερο αδυνατούμε να προσδιορίσουμε τη θέση του. Η αρχή αυτή εκφράζεται από τη σχέση

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

και λέγεται αρχή της αβεβαιότητας – απροσδιοριστίας του Χάιζενμπεργκ. Όπως παρατηρούμε από τη σχέση, η αβεβαιότητα της ταχύτητας αναφέρεται πιο συγκεκριμένα στην ορμή. Έτσι για το αυτοκίνητο που η μάζα του είναι πολύ μεγάλη, η ορμή θα είναι και αυτή πολύ μεγάλη, οπότε και η αβεβαιότητα της ορμής θα είναι και αυτή πολύ μεγάλη, οπότε η αβεβαιότητα στη θέση του αυτοκινήτου θα είναι πολύ μικρή. Έτσι για σώματα με μεγάλη μάζα ισχύει με πολύ καλή προσέγγιση η κλασσική φυσική.

Ας κάνουμε ένα παράδειγμα. Έστω ένα αυτοκίνητο μάζας 1000Kg που κινείται με μία πολύ μικρή ταχύτητα έστω 0,001m/s. Τότε η αβεβαιότητα στη θέση του αυτοκινήτου θα είναι

$$\Delta x \geq \frac{10^{-34}}{2 \cdot 10^{-3} 10^{3}} m = \frac{10^{-34}}{2} m$$

μία απόσταση πολύ μικρότερη από οποιαδήποτε δυνατότητα μέτρησης που διαθέτουμε. Αν όμως αναφερόμασταν σε ένα ηλεκτρόνιο τότε επειδή η μάζα του είναι $m \simeq 10^{-30} kg$ η αβεβαιότητα για τη θέση του, με την ίδια ταχύτητα των 0,001m/s θα ήταν $0,05m$, μία πολύ μεγάλη αβεβαιότητα σε σχέση με τις διαστάσεις του ηλεκτρονίου.

Η αρχή της αβεβαιότητας εκτός από τα μεγέθη θέση και ορμή αναφέρεται και στα μεγέθη χρόνο και ενέργεια λέγοντας το εξής: ότι η αρχή διατήρησης της ενέργειας (άρα και της μάζας) μπορεί να παραβιαστεί, αρκεί η παραβίασή της να μη ξεπερνά το χρονικό διάστημα Δt που δίνεται από την ανισότητα:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Η αρχή της αβεβαιότητας είναι ίσως η σπουδαιότερη αρχή της κβαντομηχανικής. Μέσω αυτής της αρχής μπορούν να ερμηνευτούν πολλά φαινόμενα του μικρόκοσμου αλλά και να αντιληφθούμε διαφορετικά την έννοια του κενού. Ένα σπουδαίο φαινόμενο που οφείλεται σε αυτή την αρχή είναι φαινόμενο σήραγγας. Ας φανταστούμε ένα μπαλάκι μέσα σ' ένα πηγάδι. Αυτό το μπαλάκι στην κλασσική φυσική είναι αδύνατο να το βρούμε ούτε στην επιφάνεια ούτε και σε ένα διπλανό πηγάδι. Στην κβαντομηχανική όμως αυτό είναι δυνατό.

Έστω ότι το πηγάδι έχει βάθος h. Μπορούμε να βρούμε το μπαλάκι στην επιφάνεια; Τότε θα είχαμε μία παραβίαση της ενέργειας τουλάχιστον κατά ΔΕ=mgh. Θα μπορούσε το μπαλάκι να βρεθεί έξω από το πηγάδι για χρονικό διάστημα μικρότερο του $\frac{\hbar}{2\Delta E} = \frac{\hbar}{2mgh}$

Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα το μπαλάκι θα πρέπει να ξαναβρεθεί στο πηγάδι ώστε να μην έχουμε παραβίαση της Α.Δ.Ε. Έστω όμως ότι δίπλα βρίσκεται ένα άλλο πηγάδι. Μήπως το μπαλάκι θα μπορούσε να βρεθεί μόνιμα στο διπλανό πηγάδι αντί γι αυτό το οποίο βρισκόταν αρχικά αφού τότε δεν θα είχαμε παραβίαση της Α.Δ.Ε; Πράγματι κάτι τέτοιο είναι πιθανό να συμβεί, αρκεί ο χρόνος Δt να είναι αρκετός ώστε να προλάβει το μπαλάκι να διανύσει την απαιτούμενη απόσταση από το ένα πηγάδι στο άλλο, με δεδομένο ότι η μέγιστη ταχύτητα στη φύση είναι η ταχύτητα του φωτός.

Αρκεί δηλαδή να ισχύει ότι $\Delta t \geq \frac{2h+x}{c}$ όπου h το βάθος του κάθε πηγαδιού και x η απόσταση των δύο πηγαδιών. Λόγω της πολύ μικρής τιμής της σταθεράς $\hbar \simeq 10^{-34}\ j \cdot s$ καθώς και των μεγάλων μαζών και ενεργειών, το φαινόμενο αυτό δεν εμφανίζεται στον μακρόκοσμο. Μπορεί όμως να εμφανιστεί στο μικρόκοσμο. Τότε είναι σαν να πέρασε το σωματίδιο από το ένα πηγάδι στο άλλο μέσα από ένα αόρατο – φανταστικό τούνελ. Γι αυτό και το φαινόμενο αυτό το ονομάζουμε φαινόμενο σήραγγας.

Με την αρχή της αβεβαιότητας άλλαξε και η αντίληψή μας για το κενό. Το κενό δεν είναι πλέον ένας χώρος που δεν περιέχει τίποτα. Λόγω της αρχής της αβεβαιότητας μπορεί να δημιουργηθεί ένα σωματίδιο και ένα αντισωματίδιο παραβιάζοντας έτσι την ΑΔΕ κατά τον παράγοντα $2mc^2$ αλλά τα δύο αυτά σωματίδια πρέπει και πάλι να εξαφανιστούν μέσα σε χρονικό διάστημα Δt τόσο όσο επιβάλλεται από την αρχή της αβεβαιότητας. Έτσι το κενό είναι πλέον ένας χώρος που «βράζει» από σωματίδια και αντισωματίδια που εμφανίζονται και εξαφανίζονται διαρκώς από το προσκήνιο. Το κενό κατ’ αυτή την εικόνα μόνο κενό δεν είναι. Είναι απλά μία κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, αφού προσθέτοντας οποιοδήποτε σωματίδιο σ’ αυτό το χώρο, η ενέργεια του χώρου θ’ αυξηθεί.

Το φαινόμενο σήραγγας όσο παράξενο και να φαίνεται έχει αποδειχτεί και πειραματικά. Στηριζόμενοι πάνω σ’ αυτό οι Μπίνιγκ (Binnig) και Ρόρερ (Rohrero) εφεύραν το μικροσκόπιο σήραγγας και για το λόγο αυτό πήραν το 1986 το βραβείο Νόμπελ. Στο φαινόμενο αυτό βασίστηκε η κατασκευή της διόδου τούνελ που αποτελεί ένα βασικό εξάρτημα των ηλεκτρονικών συσκευών. Το φαινόμενο σήραγγας ερμηνεύει τους χημικούς δεσμούς καθώς και τις πυρηνικές διασπάσεις. Κάθε ραδιενεργός πυρήνας έχει μία πιθανότητα να διασπαστεί. Η πιθανότητα αυτή περιγράφεται με το χρόνο ημιζωής ο οποίος ισούται με το χρόνο που πρέπει παρέλθει ώστε από τους Ν αρχικούς πυρήνες να διασπαστούν οι μισοί (ΚΑΤΑ ΠΑΣΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ). Το φαινόμενο μοιάζει με το σπάσιμο των αβγών σε μία κλωσσομηχανή.

Υπάρχουν βέβαια και φυσικά μεγέθη όπως η ενέργεια και η στροφορμή ενός ατόμου που μπορούν να καθοριστούν με απόλυτη ακρίβεια χωρίς να παραβιάζεται η αρχή της αβεβαιότητας, αφού σε μία σταθερή κατάσταση του ατόμου το $\Delta t \to \infty$ οπότε $\Delta E \to 0$

Από την άλλη όταν αναφερόμαστε σε ένα μέταλλο ή ένα αέριο, λόγω του τεράστιου αριθμού των ατόμων οι πιθανότητες οδηγούν σε βεβαιότητες.

Το φανταστικό πείραμα APR και η κβαντική διεμπλοκή

Μολονότι η διάσπαση ενός ραδιενεργού πυρήνα και ενός αβγού που εκκολάπτεται είναι και τα δύο φαινόμενα που διέπονται από τις πιθανότητες, υπάρχει μία ειδοποιός διαφορά. Ας πούμε ότι έχουμε ένα σύνολο αυγών έτοιμα προς εκκόλαψη. Μπορούμε άραγε να προσδιορίσουμε ποια αβγά θα σπάσουν πρώτα; Προφανώς όχι. Και αυτό γιατί δεν γνωρίζουμε τις διεργασίες που συμβαίνουν μέσα στο κάθε αβγό. Αν πχ είχαμε μία συσκευή αχτίνων x, τότε θα μπορούσαμε να δούμε αυτές τις διεργασίες και να δώσουμε απάντηση στο παραπάνω ερώτημα. Αν έχουμε τώρα κάποιους ραδιενεργούς πυρήνες μπορούμε άραγε να βρούμε ποιοι θα διασπαστούν πρώτοι; Η απάντηση και εδώ είναι όχι. Αυτό όμως που δίχασε τους φυσικούς για πάνω από 50 χρόνια είναι ότι μία μερίδα των φυσικών με εκπρόσωπο τον Αϊνστάιν πίστευε ότι και σ’ αυτή την περίπτωση συμβαίνει ότι και στ’ αβγά. Δεν μπορούμε να δώσουμε απάντηση γιατί δεν έχουμε τις κατάλληλες πληροφορίες. Αν στο μέλλον μπορούσαμε να δούμε τι συμβαίνει μέσα στον κάθε πυρήνα, τότε θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε ποιοι είναι «ποιο ώριμοι» και θα διασπαστούν πρώτοι.

Όπως και σ’ ένα μήλο, αν μπορούσαμε να μελετήσουμε το κοτσάνι του, θα μπορούσαμε να προβλέψουμε πότε θα πέσει. Όπως και σ’ ένα κέρμα. 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 έρθει κορώνα ή γράμματα.

Το ίδιο συμβαίνει και με τα ζάρια. Τη ρίψη των ζαριών τη θεωρούμε τυχερό παιχνίδι λόγω της άγνοιάς μας. Αν ήμασταν πάνσοφοι τότε θα μπορούσαμε να προβλέψουμε τι θα φέρει μία ρίψη. Δηλαδή ο Θεός δεν παίζει ζάρια. Από την άλλη όμως η υπήρχε η σχολή της Κοπεγχάγης με εκπρόσωπο τον Μπορ η οποία ισχυριζόταν ότι στη κβαντική φυσική η πιθανότητα δεν οφείλεται στην έλλειψη γνώσεων αλλά είναι μία ενδογενής ιδιότητα της φύσης. Μ’ άλλα λόγια, ποτέ δεν είναι δυνατό να προβλέψουμε με ακρίβεια πότε θα διασπαστεί ένας ραδιενεργός πυρήνας. Άρα ακόμη και ο Θεός παίζει ζάρια.

Η σχολή της Κοπεγχάγης πίστευε ότι τα κέρματα στη φύση βρίσκονται σε κουτιά ισορροπώντας στην κόχη τους. Ανοίγοντας το κουτί για να τα δούμε, διαταράσσεται η ευαίσθητη ισορροπία τους και πέφτουν είτε δείχνοντας κορώνα, είτε γράμματα. **Μ’ άλλα λόγια η παρατήρηση επιδρά στην κατάσταση του κέρματος. Αυτό οι φυσικοί το ονομάζουν κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης.** Ακριβώς γι αυτό το λόγο η σχολή της Κοπεγχάγης εισηγείται ότι τα ερωτήματα που μπορούμε να θέσουμε στη φύση, είναι μόνο αυτά και που μπορούμε να ελέγξουμε πειραματικά. Έτσι πχ δεν μπορούμε να ρωτήσουμε τι τροχιά ακολουθεί ένα ηλεκτρόνιο σε κάποιο άτομο, αφού δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε οποιοδήποτε πείραμα που να μας αποδίδει αυτή την τροχιά. Έτσι στο φαινόμενο του πειράματος της διπλής οπής δεν έχει νόημα να ρωτήσουμε από ποια οπή περνάει ένα φωτόνιο, αφού σεν έχουμε σχεδιάσει ένα πείραμα που να εξακριβώνει ένα τέτοιο γεγονός. Αν σχεδιάζαμε ένα πείραμα που να ελέγχει από ποια οπή περνάει το φωτόνιο, τότε θα αλλάξει και η εικόνα της συμβολής. Περισσότερα για το φαινόμενο της συμβολής λίγο παρακάτω.

Ο Σρέντιγκερ ο πατέρας της βασικής εξίσωσης της κβαντομηχανικής, που ανήκε στο στρατόπεδο του Αϊστάιν δεν δεχόταν μία τέτοια λογική. Και για να την αντικρούσει παρουσίασε το περίφημο φανταστικό πείραμα με τη γάτα. Στο πείραμα αυτό δεν δεχόταν την άποψη της σχολής της Κοπεγχάγης ότι δεν είναι επιστημονικό το ερώτημα αν η γάτα είναι ζωντανή ή νεκρή πριν ανοίξουμε το κουτί για να δούμε τι είναι. Δηλαδή πριν ανοίξουμε το κουτί η γάτα είναι νεκροζώντανη; Αναρωτιόταν ο Σρέντιγκερ.

Ο Αϊστάιν με τους συνεργάτες του Ποντόλσκι και Ρόζεν το 1935 παρουσίασε ένα φανταστικό πείραμα ώστε να αντικρούσει την άποψη που ισχυρίζονταν οι αντίπαλοι ότι η φύση των πραγμάτων αλλάζει με την παρατήρηση. Μία απλοποιημένη διατύπωση του πειράματος είναι η εξής: το κάθε σωματίδιο έχει αρκετές ιδιότητες. Μία από αυτές τις ιδιότητες όπως πχ το σπιν μπορεί να πάρει την τιμή είτε +1/2 είτε -1/2. 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 μιας διαδικασίας. Αν λοιπόν είχαμε ένα σωματίδιο που έχει σπιν 0 και διασπαστεί σε δύο άλλα σωματίδια που έχουν σπιν διάφορο του μηδενός, τότε αν το ένα έχει σπιν +1/2 τότε λόγω της αρχής διατήρησης του σπιν, το άλλο υποχρεωτικά θα έχει σπιν -1/2. Για να κάνουμε πιο απλά τα πράγματα ας πούμε ότι το +1/2 είναι κορώνα και το -1/2 γράμματα. Έχουμε λοιπόν δύο σωματίδια σαν να είναι δύο κουτιά που γνωρίζουμε με βεβαιότητα ότι αν το ένα κουτί το ανοίξουμε και το νόμισμα δείχνει κορώνα, τότε όποτε και ν' ανοίξουμε το άλλο σίγουρα θα δείχνει γράμματα. Παίρνουμε αυτά τα κουτιά και τα απομακρύνουμε πάρα πολύ μεταξύ τους. Τότε έστω ότι ανοίγουμε το ένα και το βλέπουμε ότι δείχνει γράμματα. Τότε το άλλο κουτί ξέρουμε ότι σίγουρα θα δείχνει κορώνα. Άρα η άποψη 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 στέκει. Γιατί αν έστεκε, τότε το άνοιγμα του ενός κουτιού εδώ, θα επηρέαζε ακαριαία το άλλο κουτί που βρίσκεται πολύ μακριά και θα ανάγκαζε το κέρμα να πέσει προς μεριά που δείχνουν τα γράμματα. Με άλλα λόγια ότι συμβαίνει εδώ, μπορεί ακαριαία να επηρεάσει κάτι που συμβαίνει κάπου πολύ μακριά. Αυτό στη φυσική το λέμε κβαντική διεμπλοκή ή κβαντικό εναγκαλισμό (quantum entanglement). Έτσι όμως η τοπικότητα καταργείται. Από την άλλη έχουμε μία πληροφορία να ταξιδεύει ταχύτερα από την ταχύτητα του φωτός. Ισχύει άραγε η κβαντική διεμπλοκή;

Το 1963 ο Ιρλανδός Φυσικομαθηματικός Μπελ O Bell και άλλοι έδειξαν ότι είναι δυνατόν να διακρίνουμε μεταξύ κβαντομηχανικής και των θεωριών με τις κρυμμένες μεταβλητές που πίστευε ο Αιστάιν χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο τύπο πειράματος, το οποίο μετράει μια παράμετρο γνωστή ως S παράμετρο. Για να το θέσουμε απλά, οι τοπικές θεωρίες προβλέπουν ότι η S θα έχει πάντα τιμή μικρότερη του 2, ενώ η κβαντική πρόβλεψη δίνει $S = 2\sqrt{2}$. Όταν η S είναι μεγαλύτερη από 2, λέμε ότι παραβιάζεται η ανισότητα του Bell.

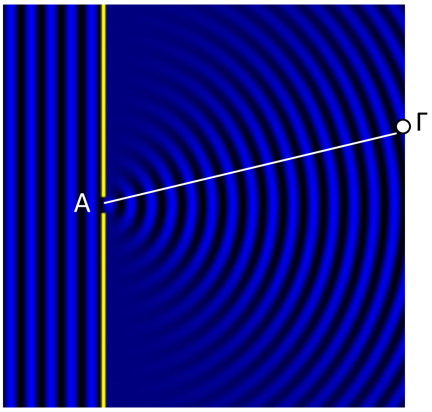
Μετά το 1970 σχεδιάστηκαν πειράματα που απέδειξαν ότι η ανισότητα του Bell παραβιάζεται. Για τα πειράματα αυτά βραβεύτηκαν το 2022 με το βραβείο Νόμπελ ο Γάλλος Ασπέκτ, ο Αμερικάνος Κλάουζερ και ο Αυστριακός Ζηλινγκερ. Έτσι, αυτά τα πειράματα έχουν αποκλείσει όλες τις θεωρίες περί κρυμμένων μεταβλητών, που βασίζονται στις κοινές υποθέσεις **του ρεαλισμού, (που η τελευταία δέχεται ότι η πραγματικότητα υπάρχει όταν δεν την παρατηρούμε) και της τοπικότητας που σημαίνει ότι γεγονότα σε άλλες περιοχές δεν μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο στιγμιαία.**

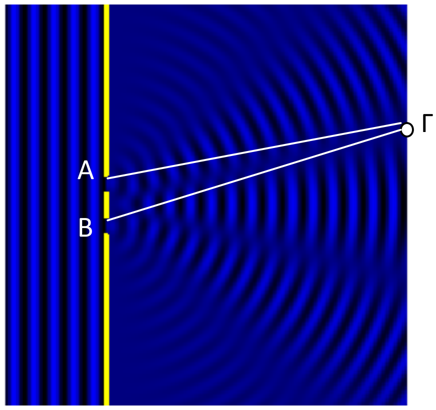
Το συμπέρασμα είναι ότι είτε ο ρεαλισμός είτε η τοπικότητα είτε και τα δύο είναι σε ασυμφωνία με την κβαντομηχανική, με ότι αυτό συνεπάγεται.

Η αναζήτηση της βεβαιότητας είναι φυσική ανάγκη για τον άνθρωπο αλλά ταυτόχρονα είναι και ένα πνευματικό μειονέκτημά του. Φυσική ανάγκη είναι προκειμένου για την επιβίωσή του αλλά μειονέκτημα για την πνευματική του ανέλιξη.

Η μύηση ενός νέου ανθρώπου στις Φυσικές επιστήμες τον οπλίζει με τη συνείδηση ότι οι κρίσεις του, οι αξιολογήσεις του και οι επιλογές του δεν εκφράζουν κάποια απόλυτη οριστική και αναντίρρητη αλήθεια. Αυτό κάνει, επομένως, τους ανθρώπους πιο προσεκτικούς, μετριοπαθείς, ανεκτικούς και τους δημιουργεί αντισώματα στο δηλητήριο της μισαλλοδοξίας. Ταυτόχρονα ενώ μειώνει το αίσθημα της βεβαιότητας για το «πώς είναι τα πράγματα» αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τη γνώση μας για το «πώς πιθανόν να είναι αυτά».

Σημείωση: Το πείραμα της διπλής σχισμής





Το πείραμα της διπλής σχισμής ερμηνεύεται με πολύ απλό στη κλασσική φυσική. Αν έχουμε ανοικτή μόνο τη σχισμή Α το φως θα φθάσει στο απέναντι σημείο Γ. Αν έχουμε ανοικτή μόνο τη σχισμή Β το φως λόγω του φαινομένου της περίθλασης (Αρχή Χόιχενς) θα φωτίσει το σημείο Γ. Αν όμως είναι ανοικτές και οι δύο σχισμές τότε το σημείο Γ δεν θα φωτιστεί εφόσον ΒΓ-ΑΓ=λ/2 λόγω της αποσβεστικής συμβολής. Ποια είναι όμως η ερμηνεία του ίδιου του φαινομένου στο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας; Στο πλαίσιο αυτής της θεωρίας μπορούμε να ελαττώσουμε την ένταση του φωτός και να εκπέμπουμε κάθε φορά ένα και μοναδικό φωτόνιο. Τότε το φωτόνιο μπορεί να βρεθεί σε διάφορες θέσεις του διαφράγματος με διαφορετική πιθανότητα. Μετά από αρκετές ρίψεις θα αρχίσουν να εμφανίζονται οι κροσσοί ενίσχυσης και απόσβεσης, δηλαδή οι φωτεινές και σκοτεινές λωρίδες. Το περίεργο είναι ότι εάν είναι ανοικτή μόνο μία από τις δύο σχισμές είτε η Α είτε η Β, η πιθανότητα να βρεθεί το φωτόνιο στη θέση Γ είναι διάφορη του μηδενός. Ανοίγοντας τώρα και τις δύο σχισμές, η πιθανότητα αυτή μηδενίζεται. Ενώ δηλαδή δίνουμε έναν ακομη δρόμο για να πάει το φωτόνιο στη θέση Γ και λογικά θα περιμέναμε ν' αυξάνεται η πιθανότητα να βρεθεί το φωτόνιο στη θέση Γ, στην πράξη η πιθανότητα μηδενίζεται. !!!Και το ερώτημα που μπαίνει είναι πως γνωρίζει το φωτόνιο ότι είναι ανοικτές και οι δύο σχισμές ώστε να μηδενίζει την πιθανότητα να βρεθεί στη θέση Γ; Είναι δυνατό να περνάει ταυτόχρονα και από τις δύο σχισμές, δηλαδή να διαχωρίζεται και μετά να επανενώνεται ώστε να βρεθεί σε κάποια συγκεκριμένη θέση στο διάφραγμα; Το ακόμη πιο περίεργο είναι ότι αν με κάποια πειραματική διάταξη επιχειρήσουμε να προσδιορίσουμε από ποια σχισμή πέρασε το φωτόνιο, τότε το φαινόμενο της συμβολής καταστρέφεται και η πιθανότητα να βρούμε το ηλεκτρόνιο στο Γ γίνεται πλέον διάφορη του μηδενός.

Η ερμηνεία που δίνει ο Φάινμαν στο φαινόμενο είναι εξωφρενική, αλλά τα πειραματικά δεδομένα την επαληθεύουν πλήρως. Ο Φάινμαν λοιπόν ισχυρίζεται ότι το φωτόνιο μπορεί ν' ακολουθήσει οποιαδήποτε δυνατή διαδρομή. Μπορεί δηλαδή εν προκειμένω ν' ακολουθήσει και τη διαδρομή ΑΓ και τη διαδρομή ΒΓ. Για να βρούμε την πιθανότητα να βρεθεί το φωτόνιο (ή και οποιαδήποτε άλλο σωματίδιο) στη θέση Γ εργαζόμαστε ως εξής. Φανταζόμαστε για την κάθε διαδρομή ένα περιστρεφόμενο διάνυσμα. Το διάνυσμα αυτό περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Έτσι το πόσο Α Β Γ Εισαγωγή στη Κβαντομηχανική Μουρούζης Π -22- περιστράφηκε φθάνοντας από τη θέση Α στη θέση Γ εξαρτάται από το χρόνο που χρειάστηκε για να καλύψει αυτή τη διαδρομή. Για το φωτόνιο αυτός ο χρόνος είναι ΑΓ/c. Αφού σχεδιάσουμε τα διανύσματα στη θέση Γ για όλες τις δυνατές διαδρομές, τα προσθέτουμε διανυσματικά. Το μέτρο της συνισταμένης, δίνει την πιθανότητα να βρούμε το φωτόνιο στη θέση Γ. Στη προκειμένη περίπτωση η πιθανότητα για το σημείο Γ μηδενίζεται γιατί τα δύο διανύσματα που αντιστοιχούν στις δύο δυνατές διαδρομές ΑΓ και ΒΓ είναι αντίθετα. Ο ίδιος ο Φάινμαν είπε ότι δεν γνωρίζει για ποιο λόγο η φύση λειτουργεί με έναν τόσο παράξενο τρόπο. Στη συνέχεια ανέφερε ότι αυτό δεν θα πρέπει να μας απασχολεί ιδιαίτερα, αφού αυτό που θα πρέπει να μα ενδιαφέρει και που μπορούμε να διερευνήσουμε είναι το πώς λειτουργεί η φύση και όχι το γιατί. Η κατάσταση προσομοιάζεται με έναν παρατηρητή που παρακολουθεί διάφορες παρτίδες σκακιού. Μετά από πολλές παρατηρήσεις θα μπορέσει να ανακαλύψει τους κανόνες κίνησης ενός ίππου πάνω στη σκακιέρα. Ποτέ όμως δεν θα καταλάβει γιατί κινείται ο ίππος με αυτόν τον περίεργο τρόπο.