

Η ΔΙΠΛΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΤΗΛΕΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Άλλο ένα όνειρο και μάλιστα από τα πιο εξωτικά της Επιστημονικής Φαντασίας βγαίνει από την σφαίρα του μύθου και μπαίνει στον δρόμο της πραγματοποίησης. Η τηλεμεταφορά φωτονίων είναι γεγονός. Οι καπετάνιοι διαστημοπλοίων όμως θα πρέπει να περιμένουν αρκετά ακόμη.

Η εποχή μας μπορεί να χαρακτηριστεί σαν η εποχή της πληροφορίας. Η ταχύτερη ανάπτυξη των υπολογιστών και του δικτύου έχει ενώσει όλο τον κόσμο όχι μόνο οικονομικά, όπως φροντίζει τακτικά να μας ενημερώνει η κυβέρνηση, αλλά και κοινωνικά. Κάποιος θα μπορούσε ίσως να θεωρήσει ότι πλησιάζουμε στο όριο της εκπληκτικής αυτής ανάπτυξης καθώς οι υπολογιστές γίνονται όλο μικρότεροι και ταχύτεροι. Τα τελευταία χρόνια οι θεωρητικοί των υπολογιστών στην προσπάθειά τους να ξεπεράσουν αυτό το πρόβλημα στην γέννηση του και να κατασκευάσουν ακόμα ταχύτερους και ικανότερους υπολογιστές, στράφηκαν στην κβαντική μηχανική, τη φυσική θεωρία του μικρόκοσμου. Και αυτή η στροφή οδήγησε σε μερικά απίστευτα μέχρι πριν από λίγα χρόνια πειραματικά αποτελέσματα.

Ένα από αυτά (και ίσως το κυριότερο) που αναφέρεται στην τηλεμεταφορά ύλης και που οι περισσότεροι από σας ίσως να το έχουν ακούσει καθώς παρουσιάστηκε σε συντομία σε προηγούμενα τεύχη του περιοδικού (Mil. 5, Mil. 13), επιβεβαιώθηκε τους τελευταίους μήνες από δύο ανεξάρτητες πειραματικές ομάδες, μία στην Ρώμη και μία στο Ινσμπρουκ. Μην νομίσει όμως κανείς ότι βρήκε την ευκαιρία για γρήγορο χρήμα και αρχίζει να υπολογίζει την απόδοση μετοχών στο Χρηματιστήριο εταιρειών τηλεμεταφοράς. Θα περάσουν τουλάχιστον δεκαετίες ακόμα μέχρι να έρθει η εποχή (αν έρθει κιόλας) που τέτοιοι υπολογισμοί θα έχουν νόημα. Η πραγματικότητα είναι ότι ένα μονοπάτι άνοιξε, κάποια φωτόνια τηλεμεταφέρθηκαν κατά την διάρκεια των δύο πειραμάτων αλλά η λεωφόρος για την τηλεμεταφορά ξανθών η φαλακρών καπετάνιων διαστημοπλοίων από τροχιά στην επιφάνεια ενός πλανήτη είναι ακόμα μακρινή οπτασία.

Ο αρχικός σκοπός ήταν να βρεθούν νέοι τρόποι καταχώρησης και ανάγνωσης πληροφορίας. Οι υπολογιστές που ξέρουμε όλοι, και που σε έναν από αυτούς γράφεται και αυτό το άρθρο, στηρίζονται στην "κλασική" αντίληψη για τη μέτρηση. Ένας συνηθισμένος υπολογιστής που χρησιμοποιεί το διαδικό σύστημα μετά από κάθε πράξη βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση (αντίστοιχη στο 0 η το 1) η οποία μπορεί να μετρηθεί επακριβώς. Η κλασική λοιπόν θεωρία υπολογιστών μελετά την μετάδοση πληροφοριών μέσα από κλασικές καταστάσεις. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τις σειρές χαρακτήρων. Σε αντίθεση με την κλασική αντίληψη η κβαντική θεωρία πληροφορίας μελετά την μεταφορά κβαντικών καταστάσεων από μια πηγή σε ένα δέκτη. Για να εξηγήσουμε την παραπάνω πολύ γενική πρόταση θα θεωρήσουμε ένα ηλεκτρόνιο. Ξέρουμε πολύ καλά ότι το ηλεκτρόνιο έχει δύο μόνο καταστάσεις ύπαρξης, μία που το σπίν του είναι $+1/2$ και μία που το σπίν του είναι $-1/2$ και που συνοπτικά θα τις λέμε σπιν πάνω και σπιν κάτω. Μπορώ λοιπόν να ορίσω τα μηδενικά και τους άσσους του διαδικού συστήματός μου εκμεταλλευόμενος αυτή την ιδιότητα των ηλεκτρονίων. Με αυτό τον τρόπο το ηλεκτρόνιο μου αποθήκευσε ένα bit πληροφορίας. Τέτοια συστήματα δύο καταστάσεων ονομάστηκαν "qubit" (από τις λέξεις "quantum" και "bit"). Με την πρώτη ματιά δεν φαίνονται ιδιαίτερα διαφορετικά από ένα διακόπτη που μπορεί να είναι ανοικτός (0) η κλειστός (1), μια εικόνα στην οποία στηρίχθηκε όλη η άλγεβρα Boole των υπολογιστών. Η πρώτη αυτή ματιά όμως μας δίνει μια απατηλή εικόνα. Σε προηγούμενο τεύχος στο άρθρο για την κβαντική μηχανική έχει αναφερθεί το πασίγνωστο πια παράδοξο της Γάτας του Shroedinger (Mil.15). Η γάτα στο κουτί είναι ένα qubit καθώς μπορεί να είναι ή ζωντανή (1) ή πεθαμένη (0). Όμως δεν ξέρουμε σε πια κατάσταση βρίσκεται μέχρι να ανοίξουμε το κουτί (μέτρηση). Άρα η γάτα

μπορεί να βρίσκεται σε ένα γραμμικό συνδιασμό των δύο καταστάσεων, σε μια "μεικτή" πραγματικότητα. Δηλαδή να είναι κατά 40% ζωντανή και κατά 60% πεθαμένη η κάτι παρόμοιο. Και επειδή αυτός ο γραμμικός συνδιασμός δεν είναι ορισμένος οι "μεικτές" αυτές πραγματικότητες θα είναι άπειρες. Κάθε τέτοια πραγματικότητα θα ονομάζεται κβαντική κατάσταση του συστήματος. Και εδώ έγκειται η διαφορά κλασσικών και κβαντικών συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας. Τα κλασσικά κρατούν σε όλη την διάρκεια της ύπαρξής τους την συγκεκριμένη πληροφορία ενώ τα κβαντικά περιέχουν την πληροφορία μόνο όταν τα μετράμε. Τον υπόλοιπο χρόνο, μπορεί να βρίσκονται σε μια από τις "μεικτές" πραγματικότητες που αναφέραμε προηγούμενα. Τελικά λοιπόν ένα "qubit" μπορεί να αποθηκεύσει ένα 0 η ένα άσσο η και ακόμα μια από τις άπειρες μεικτές καταστάσεις.

Δεν είναι όμως αυτή η μόνη διαφορά. Κάποιοι ίσως θεωρήσουν ότι αν ένα ηλεκτρόνιο είναι ένα "qubit" δύο ηλεκτρόνια θα είναι δύο "qubits". Οχι απαραίτητα. Τα δύο αυτά ηλεκτρόνια μπορούν να βρεθούν σε μια συσχετισμένη κατάσταση έτσι ώστε η κατάσταση του ενός να ορίζει απαραίτητα την κατάσταση του άλλου. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε τα ζευγάρια των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε μια στοιβάδα ενός ατόμου. Ξέρουμε καλά ότι τα ηλεκτρόνια κάθε ζευγαριού έχουν αντίθετο σπίν (δηλαδή το ολικό τους σπίν είναι 0). Το κάθε ηλεκτρόνιο που ανήκει σε ένα τέτοιο ζευγάρι βρίσκεται σε μια τέτοια συσχετισμένη κατάσταση όπου το σπίν του παρτενέρ του καθορίζει πλήρως και το δικό του σπίν και αντίστροφα. Μπορούμε όμως να φανταστούμε και μια παρόμοια κατάσταση για τις γάτες. Εστώ ότι έχουμε δύο κουτιά και δύο γάτες μέσα τους. Ανοίγουμε τα κουτιά και οι γάτες είναι ζωντανές. Τους αφήνουμε μέσα στα κουτιά φαγητό. Αν το φαγητό είναι δηλητηριασμένο τότε και οι δύο θα πεθάνουν, αν όχι θα ζήσουν. Βέβαια η αναλογία αυτή δεν είναι εντελώς ακριβής γιατί το δηλητηριασμένο η μη φαγητό είναι όπως αναφέρεται στην φυσική μια "λανθάνουσα παράμετρος" που καταστρέφει την τυχαιότητα. Αν το φαγητό είναι δηλητηριασμένο η μόνη δυνατή κατάσταση που θα πραγματοποιηθεί με την μέτρηση είναι αυτή της νεκρής γάτας. Αρκεί λοιπόν το άνοιγμα του ενός κουτιού μόνο για να πληροφορηθούμε την κατάσταση και των δύο γατιών. Αρα το σύστημα έχει αποθηκεύσει ένα μόνο "qubit" έστω και αν έχω δύο στοιχεία που το κάθε ένα μπορεί να αποθηκεύσει ένα "qubit" μόνο του. Η συσχέτιση αυτή μπορεί να υπάρξει ακόμα και αν απομακρυνθούν τα δύο στοιχεία μακριά. Ο Charles Bennet αναφέρει χαρακτηριστικά: "Σε μια συσχετισμένη κατάσταση απομακρυσμένα σωματίδια είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο που θα επιτρεπόταν κλασσικά μόνο αν βρίσκονταν στο ίδιο σημείο". Η συσχέτιση αυτή γνωστή ως EPR πρωτοδιατυπώθηκε το 1935 και περιγράφεται στο ένθετο.

Το μεγάλο όμως πρόβλημα είναι ότι ακόμα και αν το σύστημα μας (ηλεκτρόνιο) βρίσκεται σε μια "μεικτή" κατάσταση σπίν, όταν εμείς προσπαθήσουμε να το μετρήσουμε μετράμε πάντα σπίν πάνω η σπίν κάτω. Αν λοιπόν θέλουμε να μεταδώσουμε σε ένα δεύτερο ηλεκτρόνιο την κβαντική κατάσταση του πρώτου ηλεκτρονίου δυστυχώς αδυνατούμε. Και αυτό γιατί για να μεταδώσουμε την πληροφορία πρέπει πρώτα να την μετρήσουμε και όπως είδαμε η μέτρηση καταστρέφει την κβαντική κατάσταση. Και εδώ μπορούμε πια να αρχίσουμε να μιλάμε για τηλεμεταφορά. Το κάθε αντικείμενο στην ζωή γύρω μας αποτελείται από ένα τεράστιο αριθμό σωματιδίων που το καθένα βρίσκεται σε κάποια κβαντική κατάσταση. Αν λοιπόν θέλω να το τηλεμεταφέρω τότε θα πρέπει να μετρήσω τις κβαντικές καταστάσεις όλων αυτών των σωματιδίων και με κάποιο τρόπο να τις μεταφέρω σε ένα άλλο όμοιο σύστημα σωματιδίων και να τις πραγματοποιήσω εκεί. Ουσιαστικά λοιπόν για να τηλεμεταφέρω ένα κομμάτι γαλακτομούρεκο αρκεί να μεταφέρω την πληροφορία για τις κβαντικές καταστάσεις όλων των σωματιδίων του αρχικά και να υποχρεώσω ένα αντίστοιχο σύνολο σωματιδίων να αποκτήσει τις ίδιες καταστάσεις. Δηλαδή έχουμε μία διαδικασία δύο σταδίων. Κάτι αντίστοιχο με το τηλέφωνο όπου το μεταφερόμενο μέγεθος είναι η φωνή ή το FAX όπου το μεταφερόμενο μέγεθος είναι το κείμενο. Και εδώ εμφανίζεται ένα πολύ λεπτό σημείο. Δεν υπάρχει καμία μεταφορά ύλης από το ένα σημείο στο άλλο παρά μόνο πληροφορίας. Τζάμπα λοιπόν γκρινίαζε ο McCoy (ο γιατρός της πρώτης σειράς του Star Trek) ότι βαρέθηκε να τον διαλύουν συνέχεια και να μεταφέρουν τα άτομα του αλλού. Τα άτομα του δεν θα μεταφερθούν ποτέ αλλού, μόνο η πληροφορία των κβαντικών καταστάσεων που μετατρέπουν ένα κοινό σύνολο ατόμων σε γκρινιάρη McCoy

τηλεμεταφέρεται. Και φυσικά η ύλη που αποτελεί τον McCoy η το κάθε σύστημα που θα τηλεμεταφέρεται δεν εξαφανίζεται από τον πομπό, όπως δεν εξαφανίζεται και το πρωτότυπο της σελίδας που στέλνουμε μέσω FAX. Αυτό σημαίνει ότι αν θέλω να μιλήσω για απλή τηλεμεταφορά και όχι για αντιγραφή θα πρέπει η πληροφορία στην αρχική ομάδα σωματιδίων να καταστρέφεται. Στην προηγούμενη αναλογία με το FAX, όπου μεταφέρεται το κείμενο (η πληροφορία) και όχι το χαρτί (η ύλη) έχουμε διπλασιασμό των αντιγράφων. Και αυτό γιατί ο πομπός δεν καταστρέφει το πρωτότυπο. Αυτή είναι μια ανεπιθύμητη ενέργεια στην τηλεμεταφορά γιατί φανταστείτε κάθε φορά που κάποιος θα τηλεμεταφέρεται να παράγει και ένα αντίγραφο του εαυτού του, σε τι χάος θα καταλήγαμε.

Η μέθοδος αυτή μέχρι πριν από λίγα χρόνια φαινόταν αδύνατη. Και αυτό γιατί όπως εξηγήσαμε και παραπάνω είναι αδύνατο να μετρήσεις μια κβαντική κατάσταση χωρίς να την επηρεάσεις καταστρέφοντας την υπάρχουσα πληροφορία. Και ίσως τώρα γίνεται κατανοητό γιατί ενώ το θέμα μας ήταν η κβαντική τηλεμεταφορά ένα μεγάλο μέρος του άρθρου αναλώθηκε στην θεωρία της κβαντικής πληροφορίας. Το 1993 όμως ο Bennett χρησιμοποίησε την συσχέτιση που προέβλεψε το EPR, σαν το κανάλι μέσα από το οποίο θα μεταφερθεί η κβαντική πληροφορία και θα ξεπεραστεί το πρόβλημα. Το αξιοθαύμαστο στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι η κβαντική κατάσταση που μεταφέρεται μέσα από τη συσχέτιση είναι άγνωστη σε μας. Η διαδικασία αυτή περιγράφηκε αναλυτικά στο Mil. 5 και για λόγους πληρότητας επαναλαμβάνεται σύντομα εδώ. Κάποιος παρασκευαστής δίνει στην "Αλίκη" (με το όνομα Αλίκη ονομάζεται πάντα ο πομπός) ένα σωματίδιο του οποίου η κβαντική κατάσταση θα μεταφερθεί στον "Μπόμπ" (με το όνομα Μπόμπ ονομάζεται ο δέκτης). Η κβαντική κατάσταση είναι τυχαία και άγνωστη στην Αλίκη άρα δεν μπορεί να στείλει την πληροφορία κλασσικά στον Μπόμπ. Και η Αλίκη και ο Μπόμπ έχουν στη διάθεση τους από ένα σωματίδιο ενός συσχετισμένου κατά EPR ζεύγους σωματιδίων. Η Αλίκη κάνει μια ταυτόχρονη μέτρηση του EPR σωματιδίου της και του σωματιδίου που θέλει να τηλεμεταφέρει και στέλνει κλασσικά την πληροφορία της μέτρησης της στον Μπόμπ. Λόγω της μέτρησης της Αλίκης η αρχική κατάσταση του σωματιδίου καταστρέφεται. Επίσης λόγω της συσχέτισης του ζεύγους EPR ο Μπόμπ ξέρει το δικό του σωματίδιο σε ποιά κατάσταση ακριβώς βρίσκεται χωρίς να χρειαστεί να το μετρήσει και άρα χωρίς να καταστρέψει την κατάσταση του λόγω μέτρησης και επίσης ξέρει ποιόν μετασχηματισμό να εφαρμόσει για να αποκτήσει το σωματίδιο του την τηλεμεταφερόμενη κατάσταση. Στην παραπάνω ιδέα μπορούμε να κάνουμε δύο παρατηρήσεις. Η πρώτη είναι ότι επειδή η μεταφορά της πληροφορίας γίνεται κλασσικά η ταχύτητα της διαδικασίας δεν μπορεί να ξεπερνά την ταχύτητα του φωτός. Η δεύτερη ότι όντως πρόκειται για τηλεμεταφορά και όχι αντιγραφή γιατί η αρχική κατάσταση καταστρέφεται με την μέτρηση της Αλίκης. Ο Bennett όρισε την πληροφορία που μεταφέρεται αστραπιαία μέσα από την συσχέτιση EPR σαν ένα ebit.

Η παραπάνω θεωρητική πρόβλεψη επιβεβαιώθηκε πειραματικά τους τελευταίους μήνες. Αν και κανένα από τα δύο πειράματα δεν ακολούθησαν επακριβώς την θεωρία, με αποτέλεσμα κάποιοι δύσπιστοι να αμφισβητήσουν την επιτυχία τους, ο Bennett είναι υπερ-ευχαριστημένος με το αποτέλεσμα που επιβεβαιώνει και μάλιστα πανηγυρικά την βασική ιδέα. Μάλιστα ο Alain Aspect του Ινστιτούτου Οπτικής στο Orsay της Γαλλίας δήλωσε χαρακτηριστικά: " Το πιο σημαντικό μάθημα αυτών των πειραμάτων είναι ότι μας επιτρέπουν να δούμε ότι η φύση ακολουθεί τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής όσο τρελές και αν φαίνονται". Και ίσως αυτό το σχόλιο να είναι η απάντηση στην δυσπιστία του Einstein απέναντι στην κβαντική μηχανική.

Όμως η πειραματική επαλήθευση της κβαντικής τηλεμεταφοράς δεν ήταν και τόσο εύκολη δουλειά. Το δυσκολότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η δημιουργία των ζευγών των συσχετισμένων σωματιδίων. Η μόνη εύκολη και πρακτική δυνατότητα είναι η δημιουργία συσχετισμένων φωτονίων μέσα από μια διαδικασία γνωστή σαν "parametric down conversion", όπου ένα φωτόνιο διασπάται σε δύο φωτόνια καθώς περνά μέσα από ένα κρύσταλλο. Και τα δύο πειράματα χρησιμοποίησαν αυτή την μέθοδο για την δημιουργία των συσχετισμένων σωματιδίων. Το επόμενο πρόβλημα που εμφανίστηκε ήταν η ταυτόχρονη

μέτρηση των καταστάσεων των δύο φωτονίων. Μια διαδικασία που μπορεί να ακούγεται εύκολη αλλά μόνο τέτοια δεν ήταν. Όταν ο Bennett πρωτοπρότεινε την κβαντική τηλεμεταφορά κανείς δεν φανταζόταν πόσο δύσκολη θα ήταν αυτή η μέτρηση. Και αυτό γιατί τα φωτόνια που χρησιμοποιήθηκαν "ξεχνούσαν το παρελθόν τους". Δηλαδή ήταν αδύνατο να ξεχωρίσουμε ποίο φωτόνιο άνηκε στο συσχετισμένο ζεύγος και ποίο όχι. Τελικά χρησιμοποιώντας πολύ σύντομους παλμούς και ισχυρά φίλτρα κατορθώθηκε μερικά το ξεπέρασμα αυτού του προβλήματος. Ακόμα και τότε όμως στο πείραμα του Ινσμπρουκ δεν κατορθώθηκε η μέτρηση και των τεσσάρων δυνατών καταστάσεων, αλλά μόνο της μίας. Αυτό σήμαινε ότι η μέγιστη δυνατότητα τηλεμεταφοράς ήταν το 25%. Στο υπόλοιπο 75% η κβαντική κατάσταση χανόταν. Το μέλος της αυστριακής ομάδας A. Zeilinger υποστηρίζει ότι γρήγορα θα βρεθεί ένας τρόπος μέτρησης των δύο από τις τέσσερις δυνατές καταστάσεις, αλλά για την μέτρηση και των τεσσάρων χρειάζεται μια "κβαντική πύλη" που δεν υπάρχει ακόμα. Στο πείραμα του Ινσμπρουκ παρατηρήθηκε τηλεμεταφορά 5 διαφορετικών καταστάσεων σε ποσοστό 70% που αν και είναι σημαντικά χαμηλότερο από το ιδεατό 100%, είναι ικανοποιητικό.

Η ιταλική ομάδα ξεπέρασε το πρόβλημα της ταυτόχρονης μέτρησης στηριζόμενη σε μια ιδέα του Popescu. Σύμφωνα με αυτή, αντί να έχω δύο σωματίδια έχω δύο κβαντικές καταστάσεις κωδικοποιημένες σε διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας ενός σωματιδίου (σαν παράδειγμα στην πόλωση, και στην τροχιά που ακολουθεί το φωτόνιο). Αυτό το κόλπο μετατρέπει μία δύσκολη μέτρηση συμβολής σε μια διαδικασία ρουτίνας: παρατήρηση ενός φωτονίου συγκεκριμένης πόλωσης σε μια συγκεκριμένη θέση. Με αυτή την τεχνική η Αλίκη στην ομάδα της Ρώμης κατάφερε να μετρήσει και τις τέσσερις πιθανές καταστάσεις πληρώνοντας όμως ένα σοβαρό τίμημα. Χάθηκε η τυχαιότητα της αρχικής κατάστασης. Στο πείραμα της Ρώμης ο παρασκευαστής διαλέγει μια συγκεκριμένη κατάσταση και την κωδικοποιεί πάνω στην πόλωση του EPR φωτονίου που παρατηρεί η Αλίκη. Η διάταξη αυτή θεωρητικά πετυχαίνει τηλεμεταφορά σε ποσοστό 100%. Στην πράξη όμως παρατηρήθηκε ακρίβεια συμφωνίας με την θεωρία που ξεπερνούσε το 80%.

Από τα παραπάνω είναι ξεκάθαρο ότι ακόμα βρισκόμαστε στην αρχή του δρόμου για την πραγματοποίηση της τηλεμεταφοράς. Και όσο και αν η παροιμία υποστηρίζει ότι η "αρχή είναι το ήμισυ του παντός" το σίγουρο είναι ότι υπάρχουν πολλά προβλήματα που ίσως τελικά να καταστήσουν την τηλεμεταφορά μακροσκοπικών αντικειμένων αδύνατη. Το κυριότερο από αυτά (με βάση την σημερινή φυσική κατανόηση) είναι το γεγονός ότι η κβαντική σύνδεση μεταξύ των συσχετισμένων σωματιδίων είναι πολύ ευαίσθητη σε εξωτερικές διαταραχές και για να διατηρηθεί θα πρέπει το εργαστήριο να είναι εντελώς αποκομμένο από τον υπόλοιπο κόσμο, πράγμα πολύ δύσκολο. Παρά το πρόβλημα αυτό ο A. Zeilinger αισιοδοξεί ότι την επόμενη δεκαετία θα είμαστε σε θέση να τηλεμεταφέρουμε άτομα, μόρια η ακόμα και μικρούς ιούς. Μέχρι όμως να γίνει δυνατή η πρακτική εφαρμογή της θεωρίας αυτά τα πειράματα κυρίως θα χρησιμεύουν στην ανάπτυξη κβαντικών υπολογιστών και στην επιβεβαίωση της κβαντικής μηχανικής.

ΕΝΘΕΤΟ ΠΡΩΤΟ: EPR

Η κβαντική μηχανική από την δημιουργία της έδρασε επαναστατικά στις μέχρι τότε τεκμηριωμένες φιλοσοφικές αντιλήψεις. Το παράδειγμα της μισής ζωντανής-μισής πεθαμένης γάτας του Shroedinger είναι χαρακτηριστικό. Μέχρι την καθιέρωση της κβαντικής μηχανικής κυριαρχούσε η αιτιοκρατία, δηλαδή η τέλεια πρόβλεψη του κάθε αποτελέσματος αν γνωρίζαμε το αίτιο που το προκαλούσε. Η κβαντική μηχανική με τον πιθανολογικό χαρακτήρα της προκάλεσε μεγάλους σεισμούς στην επικρατούσα αντίληψη. Ο Einstein μη μπορώντας να αποδεχθεί την κβαντική μηχανική ακόμα και αν πήρε το βραβείο Nobel το 1921, για την συνεισφορά του στα αρχικά στάδια της δημιουργία της με την εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, προσπαθούσε να βρει τρόπους να αποκαταστήσει

την αιτιοκρατία. Χαρακτηριστική είναι η φράση που είπε αναφερόμενος στον πιθανολογικό χαρακτήρα της κβαντικής μηχανικής "Ο Θεός δεν μπορεί να παίζει ζάρια". Το 1935 οι Einstein, Podolsky και Rosen σε μια πασίγνωστη εργασία τους προσπάθησαν να αποδείξουν βάση ενός νοητικού πειράματος ότι η κβαντομηχανική δεν είναι πλήρης θεωρία. Το πείραμα αυτό γνωστό πια σαν "EPR" όπως το περιγράφει ο καθηγητής της Φιλοσοφίας του Πανεπιστημίου των Ιωαννίνων Ευτύχης Μπιτσάκης είναι το ακόλουθο: "Στο πείραμα Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) θεωρούμε δύο σωματίδια, A και B, μηδενικού ολικού σπίν, τα οποία έχουν αλληλεπιδράσει επί ένα χρονικό διάστημα Δt , και χωρίζονται στην συνέχεια με κάποια μέθοδο που διατηρεί το ολικό σπίν. Μετράμε, μετά τον χωρισμό, μιά από τις συνιστώσες του σπιν του A. Μπορούμε τότε χωρίς καμμία μέτρηση στο B να προβλέψουμε με βεβαιότητα την τιμή της αντίστοιχης συνιστώσας του. Για τους EPR, η δυνατότητα να προβλέψουμε ένα στοιχείο πραγματικότητας του B, είναι απόδειξη ότι η σημερινή θεωρία δεν είναι πλήρης. Για τον Bohr, αντίθετα, η "πραγμάτωση" από το B μιας ορισμένης ιδιοτιμής, αποτελεί απόδειξη του μη διαχωρίσιμου του κβαντικού συστήματος και του οργάνου μέτρησης." Το πρόβλημα λοιπόν υπάρχει στον τρόπο που συνδέονται τα δύο σωματίδια. Αν δεχθούμε ότι το σπίν του αυτού που μετράμε δεν είναι καθορισμένο αλλά ορίζεται την στιγμή της μέτρησης τότε αυτό το σωματίδιο θα έπρεπε να αλληλεπιδρά στιγμιαία και να καθορίζει την τιμή του σπίν του B. Όμως μια τέτοια αλληλεπίδραση ταχύτερη από το φώς έρχεται σε αντίθεση με την θεωρία της Σχετικότητας. Και για να γίνει πιο κατανοητή η όλη ιδέα ας ξαναγυρίσουμε στα δύο συσχετισμένα ηλεκτρόνια που αναφέραμε και πιο πάνω συνολικού σπίν 0. Αν τα απομακρύνουμε και μετρήσουμε το σπίν του ενός και το βρούμε $+1/2$ τότε υποχρεωτικά το σπίν του άλλου θα είναι $-1/2$. Αν λοιπόν το σπίν αποκτά αυτή την τιμή την στιγμή της μέτρησης του πρώτου ηλεκτρονίου το ερώτημα που τίθεται είναι το πώς ειδοποιείται το δεύτερο και αποκτά την αντίθετη τιμή. Αυτό είναι όλο το πρόβλημα και με αυτό τον συλλογισμό προσπάθησε να αποδείξει ο Einstein και οι συνεργάτες του την αναγκαιότητα συμπλήρωσης της κβαντικής μηχανικής. Το πείραμα EPR βρέθηκε στην καρδιά των φιλοσοφικών συζητήσεων των θεωρητικών φυσικών για πάνω από 40 χρόνια. Πολλοί φυσικοί που προσπάθησαν να το λύσουν με βάση θεωρίες "λανθάνουσων παραμέτρων" παρόμοιων με το φαγητό των γατιών της αναλογίας, απέτυχαν. Υποστήριξαν ότι η συσχέτιση οφειλόταν σε κάποιο αίτιο που επιδρούσε όταν τα δύο σωματίδια βρίσκονταν στον ίδιο χώρο. Εξ αιτίας αυτού του αίτιου το κάθε σωματίδιο μπορούσε να πραγματώσει με την μέτρηση μια μόνο συγκεκριμένη κατάσταση. Με αυτό τον τρόπο όχι μόνο αποκαθίστατο η αιτιοκρατία αλλά και απορριπτόταν η στιγμιαία επικοινωνία των δύο σωματιδίων τη στιγμή της μέτρησης. Δυστυχώς όμως όλες αυτές οι θεωρητικές απόπειρες δεν επαληθεύτηκαν πειραματικά. Και τελικά στο λυκόφως του 20ου αιώνα, 63 χρόνια μετά από την διατύπωση του, το EPR χρησιμοποιήθηκε για τις πρώτες τηλεμεταφορές σωματιδίων.

Βιβλιογραφία

1. D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy and S. Popescu, Phys.Rev.Lett. **80**, 1121 (1998).
2. D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter and A. Zeilinger, Nature **390**, 575 (1997).
3. G.P. Collins, Physics Today **51** (February) 18 (1998).
4. C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, W. Wootters, Phys.Rev.Lett. **70**, 1895 (1993).
5. M. Buchanan, New Scientist **2125**, 27 (1998).
6. S. Popescu, preprint quant-ph/9501020
7. E. Bitsakis, Physique et Materialisme Ed. Sociales 1983.

Βαγγέλης Κανακάρης

Απρίλης 1998

