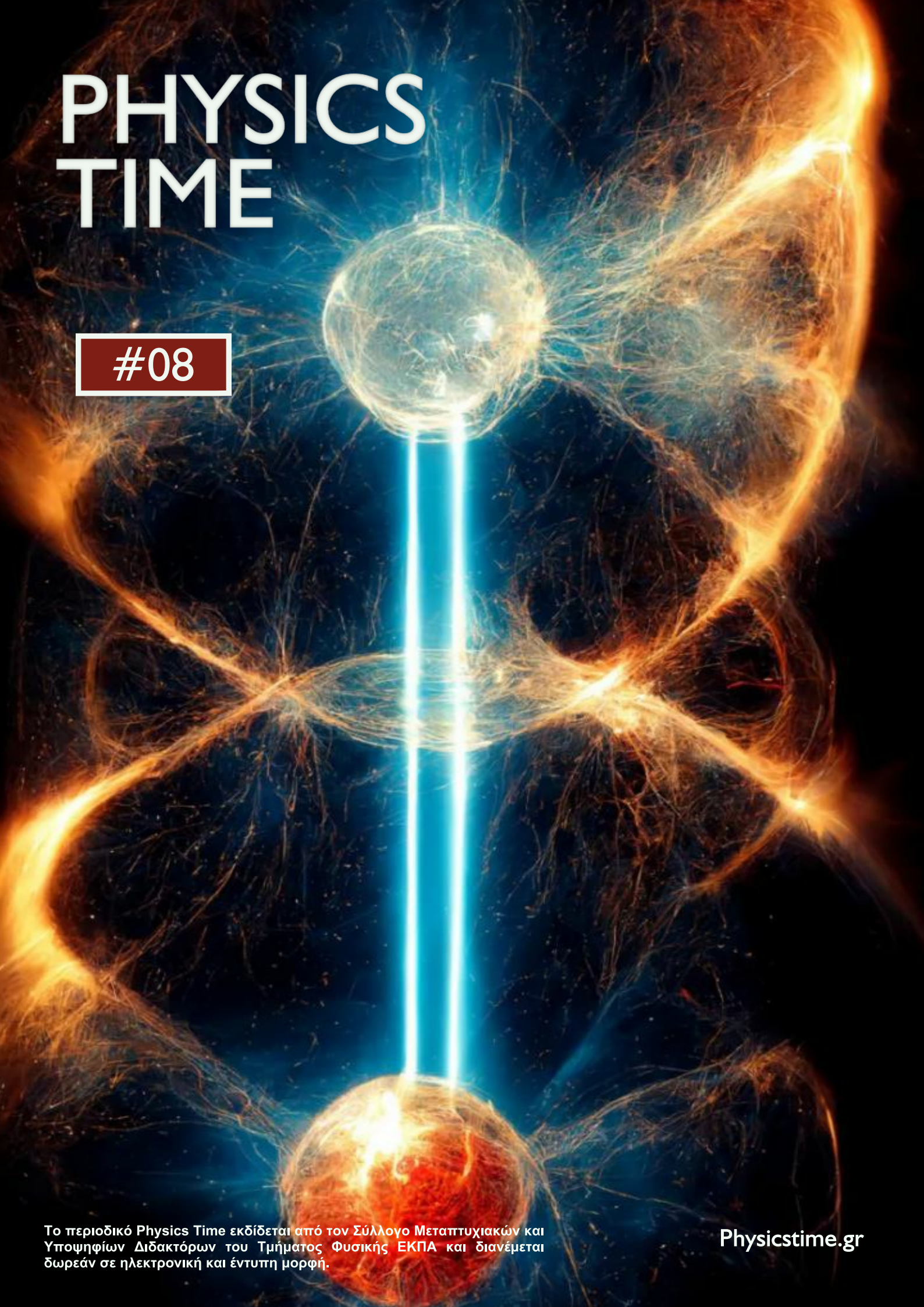
PHYSICS TIME

#08



Το περιοδικό Physics Time εκδίδεται από τον Σύλλογο Μεταπτυχιακών και Υποψηφίων Διδακτόρων του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και διανέμεται δωρεάν σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή.

Physicstime.gr

ΤΕΥΧΟΣ 8

Εξώφυλλο: Το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης ή της "αλλόκοτης δράσης από απόσταση" σε μία καλλιτεχνική δημιουργία που κρύβει μέσα της και την αδυναμία του ανθρώπου να απεικονίσει τη συμπεριφορά των θεμελιωδών συστατικών της ύλης με οπτικά κατανοητές παραστάσεις. (Πηγή: Augusto/Adobe Stock)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Πυρηνικοί Αντιδραστήρες: Το πρόβλημα της κρισιμότητας
2. Το ατύχημα του Samut Prakan
3. Παράδοξο EPR: Το περίεργο φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης
4. Κβαντικές Βόμβες και Παράλληλοι Κόσμοι

ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΕΚΔΟΣΗΣ

Το Physics Time μετά από μία σημαντική περίοδο δημοσίευσης μεμονωμένων άρθρων στην ιστοσελίδα του (physicstime.gr) επανέρχεται με το 8ο ηλεκτρονικό κι έντυπο τεύχος του το οποίο είναι αφιερωμένο στην πυρηνική φυσική και την κβαντομηχανική. Το τεύχος ξεκινά με δύο άρθρα για την πυρηνική τεχνολογία και τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας και συνεχίζει με άλλα δύο άρθρα αφιερωμένα σε δύο σημαντικές διαπιστώσεις της κβαντομηχανικής, τη κβαντική σύμπλεξη και την αρχή της αβεβαιότητας. Σε μία περίοδο που βλέπουμε ολοένα και περισσότερους "κβαντικούς μέντορες" με "κβαντικά" προϊόντα ή υπηρεσίες, να προσπαθούν να παραπλανήσουν το ανυποψίαστο κοινό, είναι σημαντικό να γίνουν κατανοητά κάποια φαινόμενα της κβαντομηχανικής που διαστρεβλώνονται ώστε να παρουσιαστούν ως απόδειξη διαφόρων ψευδεπιστημονικών θεωριών και φιλοσοφιών. Όπως πάντα, προσπαθούμε τα άρθρα του περιοδικού να είναι κατανοητά για όλους τους αναγνώστες μας και δίνουμε σημασία στις παραπομπές και αναφορές ώστε να είναι εύκολη η αναζήτηση επιπλέον πληροφοριών που μπορεί να ενδιαφέρουν. Μπορείτε να επικοινωνήσετε με τη συντακτική ομάδα (editing team) του Physics Time στέλνοντας email στο **et@physicstime.gr.**

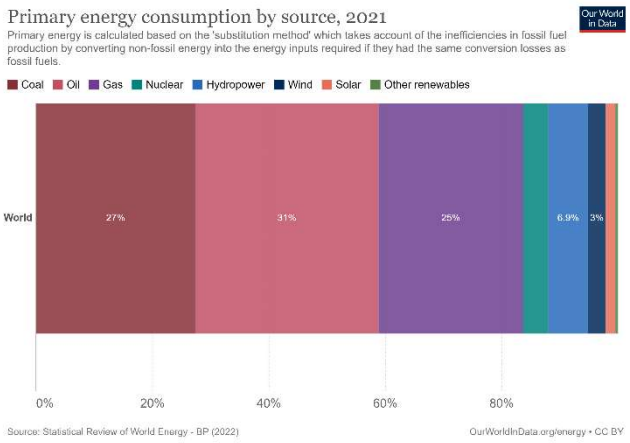
Το περιοδικό Physics Time εκδίδεται από τον Σύλλογο Μεταπτυχιακών και Υποψηφίων Διδακτόρων του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και διανέμεται δωρεάν σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή υπό τους όρους της άδειας Creative Commons, Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή CC BY-NC-SA 4.0.

1 Το πρόβλημα της κρισιμότητας. Μέρος 1ο.

Γράφει ο Δημήτρης Δημόπουλος

Η ανακάλυψη της Πυρηνικής Ενέργειας

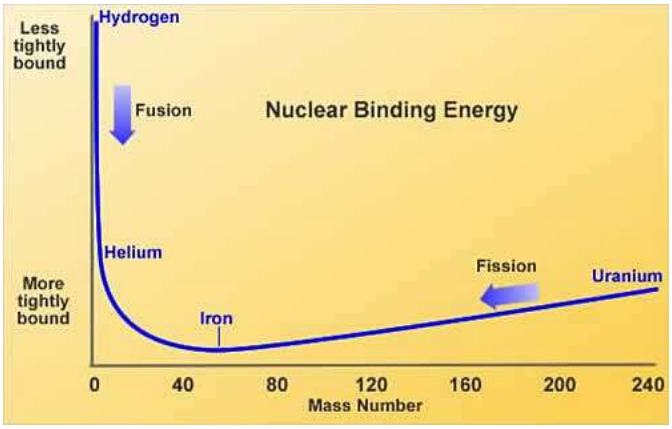
Η πυρηνική ενέργεια ήταν ένας άγνωστος μηχανισμός παραγωγής ενέργειας για τον άνθρωπο, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα. Αναμφίβολα, ο ίδιος ο πλανήτης μας και κάθε μορφή ζωής που γεννήθηκε και επιβιώνει σε αυτόν, διαμορφώθηκαν χάρις στην πυρηνική ενέργεια που παράγεται άφθονη στον πυρήνα του Ήλιου. Παρόλο όμως που το ηλιακό φως και η ζέστη του είναι κάτι άφθονο και δεδομένο για την ανθρωπότητα, στα πρώτα στάδια επιστημονικής και τεχνολογικής εξέλιξης των ανθρώπινων κοινωνιών, οι μόνοι τρόποι παραγωγής ή μετατροπής ενέργειας που μπορούσαν οι άνθρωποι να χρησιμοποιήσουν, ήταν από δευτερογενείς πηγές κυρίως μηχανικής ή χημικής φύσης. Ο δυνατός αέρας έσπρωχνε ιστιοφόρα καράβια, ο ορμητικός ποταμός έθετε σε περιστροφή τους νερόμυλους, η καύση υλικών παρήγαγε θερμότητα κτλ. Με την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού, η ηλεκτρική ενέργεια προστέθηκε στον ανθρώπινο πολιτισμό ως ένας εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο ενεργειακής μεταφοράς. Ένα τεράστιο πλήθος οικιακών και βιομηχανικών συσκευών, δε χρειάζονταν πλέον χειροκίνηση ή αυτόνομους καυστήρες και κινητήρες, αλλά μπορούσαν να λειτουργήσουν με ένα καλώδιο που θα συνέδεε το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον τόπο κατανάλωσης της. Η ίδια η παραγωγή όμως της ηλεκτρικής ενέργειας και της μηχανικής ενέργειας γενικότερα (κίνηση οχημάτων, πλοίων κτλ) βασίστηκε στις παλιές «πρωτόγονες» γνωστές μεθόδους. Κι αυτό εξακολουθεί μέχρι σήμερα. Το 2023, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας παγκοσμίως, βασίζεται σε ποσοστό 83% στην καύση υδρογονανθράκων (Εικόνα 1-1).



Εικόνα 1-1: Πρωτογενής ενεργειακή κατανάλωση ανά πηγή, 2021. (πηγή: Our World in Data)

Η καύση δεν είναι παρά μία χημική αντίδραση. Η ενέργεια προέρχεται από τη λύση χημικών δεσμών που κατά κανόνα είναι εξώθερμες χημικές διαδικασίες. Αλλά αυτή η αντίδραση έχει ένα πολύ μικρό ενεργειακό όφελος σε σχέση με τη μάζα των υλικών που συμμετέχουν στην αντίδραση. Πχ για να βράσουμε μία κατσαρόλα με νερό, χρειάζεται να «κάψουμε» 50ml πετρελαίου. Αν αναλογιστεί κανείς πόσες κατσαρόλες με νερό ζεσταίνονται καθημερινά, καταλαβαίνει ότι χρειάζονται θάλασσες πετρελαίου για να παραχθεί η απαραίτητη ενέργεια μόνο για το ημερήσιο μαγείρεμα. Υπάρχει όμως ένας πολύ πιο αποδοτικός τρόπος να δημιουργηθεί ένα τεράστιο ποσό ενέργειας. Αυτός ο τρόπος πηγάζει στις πιο βαθιές δομές της ύλης, πέρα από τους μοριακούς δεσμούς: στον ίδιο τον πυρήνα των ατόμων. Κάθε στοιχείο που υπάρχει στο σύμπαν, αποτελείται από έναν συγκεκριμένο αριθμό πρωτονίων που ονομάζουμε ατομικό αριθμό. Αν προσθέσουμε η αφαιρέσουμε πρωτόνια από έναν πυρήνα, δημιουργούμε ένα άλλο στοιχείο. Μαζί με τα πρωτόνια, στον πυρήνα του κάθε ατόμου βρίσκονται συνήθως και παραπλήσιος αριθμός νετρονίων. Αλλάζοντας τον αριθμό των νετρονίων δεν δημιουργούμε άλλο στοιχείο (αφού ο ατομικός αριθμός παραμένει ο ίδιος) αλλά άλλο ισότοπο του ίδιου στοιχείου. Για να ξεχωρίζουμε τα ισότοπα μεταξύ τους, χρησιμοποιούμε τον μαζικό αριθμό του ατόμου, που ορίζεται ως το άθροισμα πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα του. Τα ισότοπα ^{235}U και ^{238}U του ουρανίου, έχουν προφανώς ίδιο ατομικό αριθμό (92) αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων που μπορεί να υπολογιστεί με μια απλή αφαίρεση. Θα περίμενε κανείς να μπορούμε να υπολογίσουμε κι εύκολα την μάζα του πυρήνα του κάθε ισοτόπου, αν γνωρίζουμε απλά τον ατομικό και μαζικό αριθμό του και τη μάζα του πρωτονίου και του νετρονίου. Όπως όμως διαπιστώθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα, η μάζα ενός πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από το άθροισμα των πρωτονίων και των νετρονίων που τον αποτελούν! Αυτό το «έλλειμα μάζας» μπορεί να μεταφραστεί σε ενέργεια μέσω της εξίσωσης του Einstein, $E=mc^2$. Κάθε πυρήνας λοιπόν, με εξαίρεση τον πυρήνα του ^1H, χαρακτηρίζεται από ένα ποσό ενέργειας που υπολείπεται από το συνολικό ποσό ενέργειας που θα έπρεπε να έχει βάσει των συστατικών του. Αν με μία πυρηνική αντίδραση, από τον αρχικό πυρήνα προκύψει ένας πυρήνας με μεγαλύτερο έλλειμα μάζας, τότε αυτή η μάζα που χάνεται κατά τη μετατροπή, θα αποδοθεί στο περιβάλλον ως ενέργεια. Ξεκινώντας από το Η και πηγαίνοντας σε μεγαλύτερους πυρήνες, το έλλειμα μάζας αυξάνεται. Άρα σε κάθε σκαλοπάτι απελευθερώνεται ενέργεια. Αν δύο ^2H δημιουργήσουν έναν πυρήνα ^4He, αυτός θα είναι ελάχιστα

πιο ελαφρύς και κατά τη δημιουργία του θα απελευθερωθεί ενέργεια. Αντίστοιχα αν από βαρέα στοιχεία όπως το U, πάρουμε, με διάσπαση, ελαφρύτερους πυρήνες, αυτοί οι πυρήνες θα έχουν ελάχιστα μικρότερη συνολική μάζα άρα πάλι θα απελευθερωθεί ενέργεια. Και οι δύο κλάδοι, από τα ελαφρύτερα προς τα βαρύτερα και από τα βαρύτερα προς τα ελαφρύτερα, συγκλίνουν στο στοιχείο του σιδήρου. Το ισότοπο ^{56}Fe (σίδηρος) έχει το μεγαλύτερο έλλειμα μάζας από όλα τα γνωστά στοιχεία της φύσης. Τα στοιχεία με μικρότερο ατομικό αριθμό από τον σίδηρο, απελευθερώνουν ενέργεια μέσω της πυρηνικής σύντηξης (fusion) ενώ τα στοιχεία με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό από τον σίδηρο, πρέπει να διασπώνται με πυρηνική σχάση (fission) (Εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-2: Οι κλάδοι σύντηξης και σχάσης για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας (Πηγή: IAEA)

Lise Meitner και Otto Frisch

Η ανακάλυψη της σχάσης του ουρανίου έγινε το 1938 από δύο Αυστριακούς φυσικούς, την Lise Meitner και τον ανιψιό της Otto Frisch σε μία χριστουγεννιάτικη συνάντηση τους στη Σουηδία, όπου η Meitner είχε καταφύγει εξαιτίας της εβραϊκής καταγωγής της. Μετά την ανακάλυψη του νετρονίου, το 1932, οι φυσικοί στα μεγάλα πανεπιστήμια της εποχής, βρήκαν έναν ενδιαφέροντα τρόπο να πειραματίζονται με ατομικούς πυρήνες, χτυπώντας τους με νετρόνια. Στα πειράματα αυτά πρωτοστάτησε ο Ενρίκο Φέρμι, διάσημος επιστήμονας της εποχής και αργότερα νομπελίστας. Τα αποτελέσματα των κρούσεων είχαν περίεργα αποτελέσματα στην περίπτωση βομβαρδισμού εξαιρετικά βαρέων πυρήνων όπως αυτός του ουρανίου. Παρόλο που αρχικά πίστευαν ότι ο βομβαρδισμός ουρανίου με νετρόνια θα είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στοιχείων με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του ουρανίου, τα προϊόντα είχαν συμπεριφορά στοιχείων με μικρότερο ατομικό αριθμό. Όταν ένα από αυτά τα προϊόντα αναγνωρίστηκε ως το μέταλλο Βάριο ($_{56}Ba$) αμέσως θεωρήθηκε κάποιου είδους λάθος μέτρηση. Όμως η Meitner δείχνοντας εμπιστοσύνη στους πειραματικούς συναδέλφους της, προσπάθησε να εξηγήσει με ποιον μηχανισμό μπορεί ένας πυρήνας ουρανίου να μεταστοιχειωθεί στον πολύ ελαφρύτερο πυρήνα βαρίου. Γνωρίζοντας τη μάζα ενός πυρήνα ουρανίου, επεξεργάστηκε την ιδέα, αυτός να διασπάται σε δύο θυγατρικούς πυρήνες που θα αριθμούσαν τον ίδιο συνολικό αριθμό πρωτονίων. Οι συνδυασμοί θα μπορούσαν να είναι πολλοί. Θα μπορούσε να παραχθεί ένα ζευγάρι Στρόντιου (Sr) και Ξένου (Xe) ή Βάριου (Ba) και Κρυπτού (Kr) και μαζί τους 2 ή 3 ταχέα νετρόνια. Όποιος κι αν ήταν όμως ο συνδυασμός των αναμενόμενων προϊόντων, η συνολική τους μάζα θα ήταν μικρότερη κατά το 1/5 της μάζας ενός πρωτονίου από την αρχική μάζα του ουρανίου και του νετρονίου που προσέκρουσε πάνω του. Αυτό το 1/5 της μάζας του πρωτονίου θα αντιστοιχούσε (χρησιμοποιώντας τη διάσημη εξίσωση του Einstein) σε απελευθέρωση ενέργειας ίσης με 200 περίπου MeV ανά σχάση, 82 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από την καύση υδρογόνου, ένα τρομερό ποσό ενέργειας που όμοιο του δεν είχε κανένας επιστήμονας διανοηθεί ότι μπορούσε να παραχθεί από ένα μόνο άτομο.

Το πρόβλημα της κρισιμότητας

Η εξήγηση της σχάσης του ουρανίου οδήγησε τον Ενρίκο Φέρμι σε έναν φρενήρη αγώνα να κατασκευάσει μία διάταξη παραγωγής ενέργειας που θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία. Ο Φέρμι προσπάθησε να εφεύρει τον πρώτο πυρηνικό αντιδραστήρα που θα μπορούσε να αυτοσυντηρείται, θα μπορεί δηλαδή να παράγει με σχάση ίδιο αριθμό νετρονίων με αυτά που διαρρέουν ή απορροφώνται από τα υλικά του έτσι ώστε να μη σβήνει αλλά να μην οδηγείται και σε υπερθέρμανση ή ακόμα χειρότερα σε έκρηξη. Αν μπορούσε να επιτευχθεί το ισοζύγιο αυτό, ο αντιδραστήρας θα είχε κρισιμότητα (k) ίση με 1 και δε θα χρειαζόταν εξωτερική πηγή νετρονίων παρά μόνο κατά την έναρξη λειτουργίας του. Ο πρώτος αντιδραστήρας που το κατάφερε αυτό, ήταν ο πειραματικός αντιδραστήρας Chicago Pile-1 στις 2 Δεκεμβρίου 1942, την ίδια στιγμή που η Ευρώπη ήταν βυθισμένη στη τραγική αλληλοεξόντωση του Β παγκόσμιου πολέμου. Προφανώς η ιστορική συγκυρία οδήγησε την έρευνα και στην κατασκευή μίας διάταξης που θα είχε κρισιμότητα πολύ μεγαλύτερη από 1, την ατομική βόμβα. Εκείνη η μέρα του Δεκέμβρη όμως, ήταν η πρώτη μέρα μιας νέας εποχής για την ανθρωπότητα, της πυρηνικής εποχής. Οι Φυσικοί και οι Μηχανικοί, θα έπρεπε πλέον να μελετήσουν τρόπους ώστε να κατασκευαστούν ασφαλείς διατάξεις που θα μπορούσαν να πετύχουν και να διατηρήσουν την κρισιμότητα τους ακριβώς στη μονάδα, έτσι ώστε να μη σβήνουν αλλά και να μην καταστρέφονται. Η θερμότητα των πυρηνικών αντιδραστήρων που θα κατάφερναν να παραμένουν σε

κρίσιμη κατάσταση, θα μπορούσε στη συνέχεια να παράξει ηλεκτρισμό όπως στα εργοστάσια καύσης. Αλλά πόσο εύκολο θα ήταν να παραμένει ένας αντιδραστήρας κρίσιμος για μεγάλα χρονικά διαστήματα;

Εικόνα 1-3: Καλλιτεχνική απεικόνιση της στιγμής που το Chicago Pile-1 πέτυχε την πρώτη κρισιμότητα (Πηγή: Gary Sheehan)

Αλληλεπίδραση νετρονίων με ύλη

Τα νετρόνια είναι σωματίδια χωρίς φορτίο, τα οποία στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα έχουν 3 βασικές αλληλεπιδράσεις. Η πρώτη είναι η σκέδαση του νετρονίου στους πυρήνες των υλικών που συναντά κατά την οποία το νετρόνιο χάνει ενέργεια κι επιβραδύνεται (scattering). Η δεύτερη βασική αλληλεπίδραση είναι η απορρόφηση του νετρονίου από κάποιο μη σχάσιμο άτομο (capture). Η τρίτη και βασικότερη είναι η απορρόφηση του νετρονίου από άτομο ^{235}U η οποία οδηγεί στη σχάση (fission). Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης σε κάθε διαφορετική περίπτωση, εξαρτάται από ένα μέγεθος που ονομάζουμε μικροσκοπική διατομή του πυρήνα του κάθε στοιχείου, η οποία δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την κινητική ενέργεια του νετρονίου. Καθώς το νετρόνιο προσεγγίζει τον πυρήνα ενός ατόμου, εξαιτίας κβαντικών φαινομένων, η αλληλεπίδραση συμβαίνει όχι μόνο αν το σωματίδιο προσκρούσει στην απειροελάχιστη επιφάνεια του ίδιου του πυρήνα αλλά αν βρεθεί σε μία περιοχή γύρω του. Η περιοχή αυτή που ονομάζεται μικροσκοπική διατομή σ(E) μπορεί να είναι δεκάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την πραγματική επιφάνεια του πυρήνα. Σε γενικές γραμμές, για ταχέα νετρόνια με ενέργεια της τάξης των 1-10MeV, όπως δηλαδή συνήθως παράγονται από τη σχάση, οι μικροσκοπικές διατομές απορρόφησης είναι πολύ μικρές και τα νετρόνια αλληλεπιδρούν κυρίως με σκέδαση στα άτομα υδρογόνου ή γραφίτη. Το νετρόνιο ξεκινά με ενέργεια E και μετά τη σκέδαση έχει νέα ενέργεια E' για την οποία ισχύει:

$$\alpha E \leq E' \leq E \qquad (1)$$

$$\alpha = \left[\frac{A-1}{A+1}\right]^2 \qquad (2)$$

Όπου A είναι ο μαζικός αριθμός του πυρήνα με τον οποίο το νετρόνιο συγκρούεται. Για A=1 (υδρογόνο) η ενέργεια του νετρονίου μπορεί ακόμα και να μηδενιστεί με μία μόνο κρούση. Όταν το νετρόνιο πέσει κάτω από 1eV και γίνει θερμικό νετρόνιο οι μικροσκοπικές διατομές των υλικών του αντιδραστήρα μεγαλώνουν σημαντικά με αποτέλεσμα η πιθανότητα να αλληλεπιδράσει μαζί τους να γίνεται εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη (Πίνακας 1-1). Μέσα στον αντιδραστήρα όμως δεν υπάρχει ένα νετρόνιο κι ένα μόνο άτομο με τη μικροσκοπική διατομή του αλλά μία ροή νετρονίων και ένας μεγάλος αριθμός ατόμων N ανά μονάδα όγκου. Καθώς τα νετρόνια ταξιδεύουν μέσα στο υλικό, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση στόχων N, τόσο μεγαλύτερη κι η πιθανότητα να βρεθούν μέσα στη μικροσκοπική διατομή κάποιου από αυτούς και να αλληλεπιδράσουν μαζί του.

Το γινόμενο της μικροσκοπικής διατομής ενός στοιχείου με τη συγκέντρωση ατόμων αυτού του στοιχείου το ονομάζουμε <u>μακροσκοπική διατομή</u> ενός υλικού και οι μονάδες της είναι cm^{-1}.

$$\Sigma = \sigma N \left[\mathrm{cm}^2 \cdot \left(\frac{\#}{\mathrm{cm}^3}\right)\right] = \mathrm{cm}^{-1} \qquad (3)$$

Η μακροσκοπική διατομή μας επιτρέπει να υπολογίζουμε την πιθανότητα το νετρόνιο να αλληλεπιδράσει διασχίζοντας ένα δεδομένο μήκος μέσα στο εκάστοτε υλικό. Αν το νετρόνιο ταξιδέψει διάστημα x μέσα σε ένα υλικό με μακροσκοπική διατομή σκέδασης Σ_s, τότε η πιθανότητα[1] να σκεδαστεί δίνεται από το ολοκλήρωμα (4).

$$\int_0^x \Sigma_s \cdot e^{-\Sigma_s \cdot x} dx \qquad (4)$$

$$\int_0^x \Sigma \cdot e^{-\Sigma \cdot x} dx = \Sigma x - \Sigma^2 \frac{x^2}{2} \approx \Sigma x \qquad (5)$$

Η πιθανότητα λοιπόν αλληλεπίδρασης για μικρά x είναι γραμμική συνάρτηση του Σ_s. Αντίστοιχα συμβαίνει για τη μακροσκοπική διατομή της σχάσης Σ_f και της απορρόφησης (capture) χωρίς σχάση Σ_c.

Γνωρίζοντας τον ορισμό των μακροσκοπικών διατομών, μπορούμε πλέον να εκφράσουμε την κρισιμότητα ως

[1] Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης σ διάστημα x, υπολογίζεται αντίστοιχα με την πιθανότητα ραδιενεργής διάσπασης σε χρόνο t. Dudestadt J., **21**.

συνάρτηση αυτών των μεγεθών στη σχέση (6). Η σχέση αυτή προκύπτει από την εξίσωση διάχυσης, ένα μοντέλο υπολογισμού της ροής νετρονίων σε αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται ευρέως στην πυρηνική τεχνολογία.

$$k = \frac{\nu \cdot \Sigma_f}{\Sigma_a + DB_g^2} \qquad (6)$$

Όπου $\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c$ η συνολική μακροσκοπική διατομή όλων των αλληλεπιδράσεων νετρονίου με νουκλίδιο που καταλήγουν στην απορρόφηση του ενώ ο όρος $D \cdot B_g^2$ εκφράζει τη διαρροή νετρονίων από τα τοιχώματα του πυρηνικού αντιδραστήρα. Ο συντελεστής διάχυσης D, εκφράζει το μήκος που ταξιδεύει το νετρόνιο μέσα στον αντιδραστήρα μέχρι να γίνει θερμικό και το B_g (geometric buckling) προκύπτει από το μέγεθος και τη γεωμετρία του αντιδραστήρα. Όσο μεγαλύτερος ο αντιδραστήρας τόσο μικρότερο το geometric buckling άρα τόσο λιγότερες διαρροές έχουμε. Τέλος, το ν είναι ο μέσος αριθμός νετρονίων που παράγονται σε μία σχάση, που για το ουράνιο είναι 2,4. Στην ουσία η σχέση (6) έχει στον αριθμητή την πηγή νετρονίων και στον παρανομαστή τις απώλειες νετρονίων.

$$k = \frac{\text{κέρδος}}{\text{απώλειες}} = \frac{\text{νετρόνια που παράγονται}}{\text{νετρόνια που χάνονται}} \qquad (7)$$

Αν το κέρδος ισούται με τις απώλειες, τότε η κρισιμότητα είναι 1 και η σχάση ουρανίου συνεχίζεται χωρίς να σβήνει ή να υπερθερμαίνεται ο αντιδραστήρας. Προφανώς, αν ο αντιδραστήρας ξεφύγει από την κρίσιμη κατάσταση και θερμανθεί, απαιτούμε να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε η θέρμανση αυτή να τον καταστήσει υποκρίσιμο για να επανέλθει αυτόματα στην επιθυμητή ισορροπία.

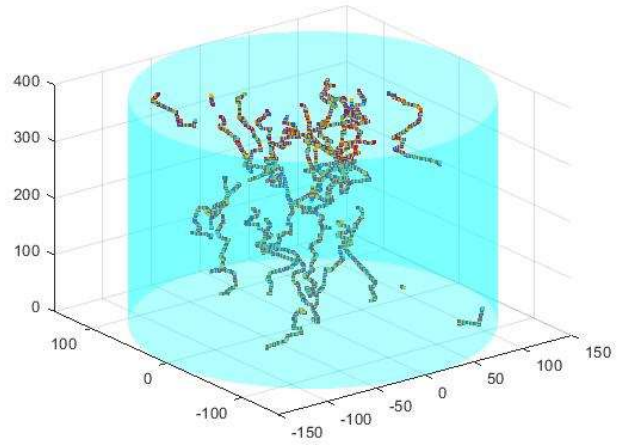
k<1 : υποκρίσιμος

k=1 : κρίσιμος

k>1 : υπερκρίσιμος

	Thermal cross section (barn)			Fast cross section (barn)		
	Scattering	Capture	Fission	Scattering	Capture	Fission
H	20	0,2	0	4	0,00004	0
U235	10	99	583	4	0,09	1
U238	9	2	0,00002	5	0,07	0,3
Ag	2	91	0	2	0,4	0
In	2	100	0	4	0,02	0
Cd	100	30000	0	4	0,05	0

Πίνακας 1-1: Μικροσκοπικές διατομές στοιχείων ομογενούς αντιδραστήρα για δύο ενεργειακές ομάδες (πηγή: JEFF-3.1.1 library using JANIS software)



Εικόνα 1-4: Σκέδαση ταχέων νετρονίων μέσα σε κυλινδρικό αντιδραστήρα.

Βήματα προς την κρισιμότητα

Για να γίνει αντιληπτό αυτό το ευαίσθητο ισοζύγιο νετρονίων που απαιτείται για να επιτευχθεί κρισιμότητα (k) ίση με 1, θα πρέπει να αναλύσουμε με ένα παράδειγμα πώς οι βασικές αλληλεπιδράσεις των νετρονίων μέσα σε έναν αντιδραστήρα προσθέτουν ή αφαιρούν νετρόνια από το ισοζύγιο. Έστω λοιπόν ότι αφήνουμε 1000 ταχέα νετρόνια στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα που έχει ουράνιο με τη φυσική αναλογία ισοτόπων του, 0,7% ^{235}U και 99,3% ^{238}U. Το ισότοπο 235 όταν απορροφά ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε ουράνιο 236 το οποίο είναι εξαιρετικά ασταθές και οδηγείται πολύ συχνά σε σχάση. Το ισότοπο 238 σκεδάζει το νετρόνιο ή το απορροφά και μετατρέπεται σε ^{239}U το οποίο όμως είναι σταθερό ισότοπο. Και τα δύο ισότοπα πάντως αλληλεπιδρούν πολύ συχνότερα με αργά νετρόνια ενέργειας <1eV. Τα 1000 ταχέα αρχικά νετρόνια, προσομοιώνουν τα νετρόνια που παράγονται μετά από σχάση και οι ενέργειες τους είναι 1-10MeV. Τι θα γίνει λοιπόν αν αφεθούν με τυχαίες διευθύνσεις μέσα στον αντιδραστήρα; Σχεδόν όλα θα σκεδαστούν πάνω στους πυρήνες ουρανίου χωρίς να χάσουν σημαντική ενέργεια (σχέση 1 και 2) καθώς οι πυρήνες είναι πολύ μεγαλύτεροι τους. Μετά από ελάχιστο χρόνο, θα φτάσουν στα όρια του αντιδραστήρα όπου θα διαρρεύσουν προς το περιβάλλον. Κάποια ίσως απορροφηθούν. Εισάγαμε λοιπόν 1000 νετρόνια και πολύ σύντομα χάθηκαν όλα, ως διαρροή, είτε ως απορρόφηση. Ο αντιδραστήρας σβήνει. Αυτό σημαίνει ότι η κρισιμότητα του είναι σχεδόν 0. Πρέπει να αυξηθεί η παραγωγή νέων νετρονίων από τα παλιά κι αυτό γίνεται (κυρίως) μέσω σχάσης αφού κατά τη δημιουργία των θυγατρικών πυρήνων απελευθερώνονται και 2-3 ταχέα νετρόνια στο περιβάλλον. Για να προκληθεί συχνότερα σχάση θα πρέπει με κάποιο τρόπο να μειώσουμε την ενέργεια των νετρονίων ώστε να προλάβουν να αλληλεπιδράσουν με το ισότοπο 235 και να το διασπάσουν πριν διαρρεύσουν στο

περιβάλλον. Χρειαζόμαστε έναν ρυθμιστή (moderator), ένα υλικό που να απορροφά σπάνια τα νετρόνια αλλά να τα σκεδάζει πολύ πιο συχνά και με κάθε σκέδαση να τους μειώνει την ενέργεια. Όσο πιο μικρός ο ατομικός αριθμός του ρυθμιστή, τόσο πιο πολύ ενέργεια αφαιρεί από το νετρόνιο σε κάθε σκέδαση. Ιδανικός ρυθμιστής είναι ο γραφίτης (άνθρακας) και το νερό (υδρογόνο). Στην περίπτωση του νερού, ο ίδιος ο ρυθμιστής θα μπορεί και να ψύχει τον αντιδραστήρα που όταν επιτύχει k=1 αναμένουμε να παράγει σημαντικά ποσά θερμότητας. Ας προσθέσουμε λοιπόν νερό και ας βυθίσουμε το καύσιμο μας μέσα σε αυτό. Τα 1000 αρχικά νετρόνια πλέον δεν αλληλεπιδρούν μόνο με το καύσιμο αλλά και με τα άτομα του Η και μάλιστα με κάθε σκέδαση τους, η ενέργεια τους μειώνεται μεσοσταθμικά στο μισό! Χρειάζονται περίπου 25 σκεδάσεις ώστε από ταχέα να γίνουν θερμικά δηλαδή αργά όπως τα μόρια ενός αερίου στην ίδια θερμοκρασία. Όταν γίνουν θερμικά θα πρέπει να συναντήσουν κάποιον πυρήνα 235 ώστε να προκαλέσουν σχάση. Όμως η αναλογία του ισότοπου αυτού είναι πολύ μικρή στη φύση, μόλις 0,7%, άρα πιο πιθανό είναι να απορροφηθούν από το ισότοπο 238 ή να διαρρεύσουν. Η κρισιμότητα μας δεν είναι μηδενική αλλά είναι ακόμα, μικρότερη του 1. Τα 1000 νετρόνια δίνουν λίγες σχάσεις, η επόμενη γενιά νετρονίων δεν αριθμεί 1000 αλλά λιγότερα. Μετά από λίγα εκατοστά του δευτερολέπτου ο αντιδραστήρας πάλι σβήνει. Εδώ θα πρέπει να σκεφτούμε τι είναι προτιμότερο για να αυξήσουμε την κρισιμότητα. Να βάλουμε καύσιμο αρκετά πιο εμπλουτισμένο σε ^{235}U σε ποσοστό περίπου 4%, με τη διαδικασία του εμπλουτισμού να είναι εξαιρετικά δαπανηρή και δύσκολη ή να προσθέσουμε ελαφρά πιο εμπλουτισμένο καύσιμο (1,8%) ανάμεσα σε μεγάλες ποσότητες γραφίτη ώστε να αυξήσουμε τη ρύθμιση και να μειώσουμε τη διαρροή νετρονίων; Ο δεύτερος τύπος αντιδραστήρα με γραφίτη είναι πολύ πιο μεγάλος σε μέγεθος αφού θα πρέπει να τοποθετήσουμε σωλήνες καυσίμου και νερού μέσα σε μεγάλα μπλοκ γραφίτη αλλά χρειάζεται λιγότερο εμπλουτισμένο καύσιμο, είναι πολύ πιο φθηνός και φαίνεται προτιμότερος. Η λύση που εφάρμοσε ο Φέρμι στον πειραματικό του αντιδραστήρα Chicago Pile-1 αλλά και οι Σοβιετικοί επιστήμονες σε όλα τα πυρηνικά εργοστάσια τους τη δεκαετία του ’60 ήταν ρύθμιση με γραφίτη. Και πράγματι αυτή η διάταξη λειτούργησε. Ο γραφίτης συγκρατεί τα νετρόνια εντός του αντιδραστήρα και μετά από χιλιάδες σκεδάσεις, αυτά μετατρέπονται σε θερμικά και συναντούν κάποιον πυρήνα 235 ώστε να προκαλέσουν σχάση. Υπάρχει όμως μία σημαντική διαφορά μεταξύ ενός αντιδραστήρα που ρυθμίζεται με νερό κι ενός που ρυθμίζεται με γραφίτη. Ο πρώτος αποδεικνύεται ότι μπορεί να λειτουργεί με μία συνθήκη που ονομάζεται αρνητικός συντελεστής κενού (negative void coefficient) ενώ ο δεύτερος με γραφίτη, έχει θετικό συντελεστή κενού (positive void coefficient). Ο θετικός συντελεστής κενού κάτω από εξαιρετικά σπάνιες συνθήκες, μπορεί να επιταχύνει ένα πυρηνικό ατύχημα. Η πρώτη και τελευταία φορά που διαπιστώθηκε η προβληματική λειτουργία ενός αντιδραστήρα με positive void coefficient, ήταν στο Τσερνόμπιλ.

Αναφορές

(1) Dudestadt J., 1976. Nuclear Reactor Analysis

(2) Faw R., et al., 2003. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)

(3) Bickel J., 2002. Fundamentals of Nuclear Engineering. Module 5, **9.**
https://www.nrc.gov/docs/ML1214/ML12142A083.pdf

(4) Murray R., 2015. Nuclear Energy. An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes Seventh Edition.

(5) U.S.N.R.C. Reactor Core & Vessel Design, AP1000 Technology, Chapter 2.0.
https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11221A080.pdf

(6) U.S.N.R.C. AP1000 Design Control Document, Chapter 4.

2 Το ατύχημα του Samut Prakan

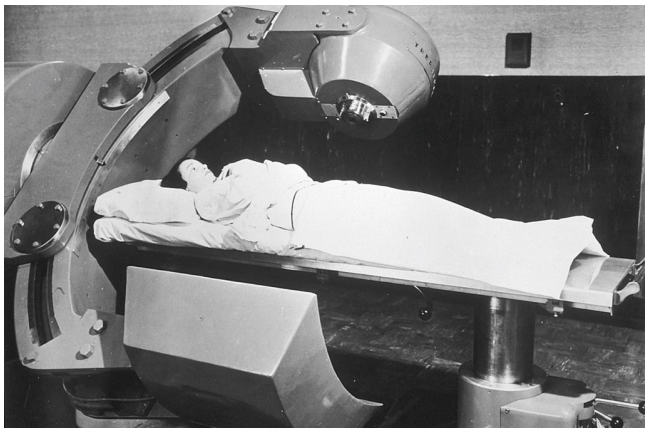
Γράφει ο Δημήτρης Δημόπουλος

Τα φτωχά προάστια της Μπανγκόκ

Το Σαμούτ Πρακάν είναι μια επαρχία που βρίσκεται στο δέλτα του ποταμού Τσάο Πράγια στη Ταϊλάνδη. Αποτελεί μέρος της Περιφέρειας της Μπανγκόκ που είναι γνωστή για τον ζωντανό πολιτισμό, την ιστορία και τις διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε αυτή. Γεωγραφικά, το Σαμούτ Πρακάν είναι κυρίως επίπεδο και γι' αυτό ευνοεί μια μίξη αστικών και αγροτικών περιοχών, με περισσότερη αστική ανάπτυξη στον βορρά και καλλιεργήσιμα εδάφη στον νότο. Η εγγύτητα της περιοχής με τη Μπανγκόκ έχει οδηγήσει στην ίδρυση διαφόρων βιομηχανικών μονάδων, συμβάλλοντας στη δημιουργία μίας αντιφατικής κοινωνικής σύνθεσης στην επαρχία. Ενώ ορισμένα μέρη του Σαμούτ Πρακάν θεωρούνται πλούσια προάστια και κατοικούνται από πληθυσμό υψηλού εισοδήματος, το μεγαλύτερο μέρος των κατοίκων της επαρχίας αντιμετωπίζει σοβαρά οικονομικά προβλήματα και ζει κάτω από τα όρια της φτώχιας. Όσοι λοιπόν δεν εργάζονται στις μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, προσπαθούν να εξασφαλίσουν εισόδημα με μικροδουλειές μέσα στις βιομηχανικές ζώνες με την επικρατέστερη να είναι «ανακυκλωτής μετάλλων», η αναζήτηση δηλαδή μετάλλων scrap για μεταπώληση σε μάντρες ανακύκλωσης. Η δραστηριότητα αυτή μπορεί να είναι εξαιρετικά επικίνδυνη καθώς η συγκομιδή μετάλλων οδηγεί τους ανακυκλωτές σε περιοχές απόθεσης επικίνδυνων τοξικών υλικών και βιομηχανικών υπολειμμάτων.

Η ιατρική εφαρμογή του κοβαλτίου-60

Η ραδιοθεραπεία είναι μία επεμβατική μέθοδος καταστροφής καρκινικών όγκων με ακτινοβόληση. Οι ιστοί που πρέπει να καταστραφούν ακτινοβολούνται με ακτίνες γ, την πιο ισχυρή ιονίζουσα ακτινοβολία που υπάρχει, με ειδικά μηχανήματα που στοχεύουν την ζητούμενη περιοχή προσπαθώντας να περιορίσουν τη βλάβη υγιών κυττάρων και να επιδώσουν τη σωστή δόση ραδιενέργειας. Ως πηγή ακτίνων γ, χρησιμοποιείται το ραδιενεργό ισότοπο ^{60}Co (κοβάλτιο 60) το οποίο συνδυάζει υψηλή ενεργότητα και υψηλής ενέργειας φωτόνια γ. Το κοβάλτιο 60 είναι τεχνητό ισότοπο και δημιουργείται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες με απορρόφηση ενός νετρονίου από το σταθερό ισότοπο του κοβαλτίου 59. Στη συνέχεια το κοβάλτιο 60 διασπάται με β διάσπαση (ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο με ταυτόχρονη αποβολή ενός ηλεκτρονίου) και μετατρέπεται σε νικέλιο 60 (^{60}Ni) το οποίο αποδιεγείρεται με την αποβολή δύο φωτονίων γ, ενέργειας 1,17 και 1,33 MeV.



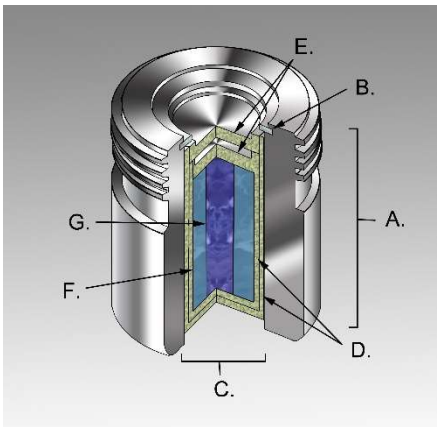
Εικόνα 1-2: Συσκευή ραδιοθεραπείας. Διακρίνουμε την κυλινδρική κεφαλή που περιέχει την ενεργή πηγή κοβαλτίου-60.. (πηγή: National Museum of American History)

Αυτά τα δύο φωτόνια γ είναι που θα καταστρέψουν τους καρκινικούς ιστούς όταν αλληλοεπιδράσουν με τα άτομα τους.

$$^{59}_{27}Co + n \rightarrow ^{60}_{27}Co \rightarrow ^{60}_{28}Ni + e^- + v_e^- + 2\gamma \qquad (1)$$

Το κοβάλτιο-60 διασπάται αυθόρμητα με μεγάλο ρυθμό, παρέχοντας έτσι μία μεγάλη ένταση ακτινοβολίας (υπό τη μορφή ακτινών γ) κι οι θεραπείες διαρκούν σύντομο χρονικό διάστημα. Η μέθοδος αυτή ήταν ήδη ευρέως διαδεδομένη από το 1960 και το 1999 στη Ταϊλάνδη λειτουργούσαν 25 μονάδες ραδιοθεραπείας. Η χρήση ραδιενεργών πηγών εποπτευόταν από την επιτροπή ατομικής ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς της Ταϊλάνδης. Στην Μπανγκόκ όμως, λειτουργούσε και μία εταιρεία, με την ονομασία KSE, που διαχειριζόταν αδήλωτες συσκευές ραδιοθεραπείας με εξασθενημένες πηγές κοβαλτίου-60 από τοπικά νοσοκομεία. Τα αδήλωτα μηχανήματα ήταν αποτέλεσμα ενός γραφειοκρατικού αδιεξόδου μεταξύ της Siemens που τα κατασκεύασε (αλλά το 1999 είχε πάψει να τα παράγει και να τα διαχειρίζεται) και της Nordon, μίας καναδικής εταιρείας που προμήθευε τα νοσοκομεία της Ταιλάνδης με συσκευές και πηγές ραδιοθεραπείας αλλά δε διαχειριζόταν τις εξασθενημένες πηγές από συσκευές που δεν είχε κατασκευάσει η ίδια. Το φθινόπωρο του 1999, η KSE μετακίνησε (χωρίς άδεια) 3 παλαιότερες συσκευές ραδιοθεραπείας (αλλά ακόμα εξαιρετικά ραδιενεργές) με πηγές κοβαλτίου-60, από τις αποθήκες της στην Μπανγκόκ σε έναν υπαίθριο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων στην επαρχία Σαμούτ Πρακάν. Οι συσκευές ήταν ογκώδεις μεταλλικές κατασκευές με κυλινδρικές κεφαλές από μόλυβδο και ανοξείδωτο ατσάλι που ζύγιζαν 120 περίπου κιλά. Στο κέντρο

του κάθε κυλίνδρου ήταν ασφαλισμένη μία κάψουλα κοβαλτίου-60. Η παρουσία τόσο μεγάλης ποσότητας ακριβού μετάλλου (όπως ο μόλυβδος) έγινε αμέσως αντιληπτή από τους «ανακυκλωτές» της περιοχής.



Εικόνα 1-2: Μία σύγχρονη κεφαλή θωράκισης στο κέντρο της οποίας τοποθετείται η ραδιενεργός πηγή κοβαλτίου-60. Το εξωτερικό περίβλημα αποτελείται από ανοξείδωτο ατσάλι ενώ στο εσωτερικό εναλλάσσονται στρώσεις μόλυβδου και ατσαλιού. (πηγή: Wikipedia)

Η εξέλιξη του ατυχήματος

Επειδή στο ατύχημα συμμετείχαν αρκετοί άνθρωποι που δε γνωρίζουμε τα ονόματα τους, θα αναφερθούμε σε αυτούς με τους διακριτικούς κωδικούς που τους απέδωσε η διεθνής επιτροπή ατομικής ενέργειας στις μετέπειτα αναφορές της. Στις 24 Ιανουαρίου του 2000, δύο πλανόδιοι ανακυκλωτές, ο 40χρονος P1, αρχηγός της ομάδας (Patient 1) και ο 25χρονος βοηθός του P2 βρέθηκαν με ένα από τα παρατημένα μηχανήματα της KSE, στην κατοχή τους. Οι ίδιοι ισχυρίστηκαν ότι την συσκευή αγόρασαν από άλλους ανακυκλωτές αλλά αυτό δεν αποδείχθηκε ποτέ. Το ενδιαφέρον τους κίνησε αμέσως η ογκώδης και βαριά κυλινδρική κεφαλή του μηχανήματος ραδιοθεραπείας. Η κεφαλή αυτή περιείχε στο εσωτερικό της, μία εξασθενημένη πηγή κοβαλτίου-60 που είχε τοποθετηθεί το 1981 από την Siemens. Το κοβάλτιο-60 έχει χρόνο ημιζωής[1] 5,3 χρόνια. Η ενεργότητα του εναπομείναντος ραδιενεργού υλικού υπολογίστηκε στα 15,7 TBq. Κάθε δευτερόλεπτο λοιπόν 15,7 τετράκις εκατομμύρια πυρήνες κοβαλτίου μετατρέπονταν σε νικέλιο απελευθερώνοντας ακτίνες γ, το ισοδύναμο με 15.700.000 αξονικές τομογραφίες. Η θωράκιση της κεφαλής με μόλυβδο και ατσάλι απορροφούσε σημαντικά τη ραδιενεργό εκπομπή. Ο P1 διέθετε ένα τρίκυκλο με το οποίο μετέφερε την κεφαλή στο σπίτι του για να την διαλύσει και να την πουλήσει ως παλιοσίδερα. Η κεφαλή αποδείχθηκε δύσκολη στην αποσυναρμολόγηση κι έτσι την άφησε στην αυλή του σπιτιού του για αρκετές μέρες. Μετά από μία βδομάδα, την 1η Φεβρουαρίου 2000, με τη βοήθεια άλλων δύο ανακυκλωτών (P3 και P4) προσπάθησαν πάλι με ένα καλέμι και σφυρί να ανοίξουν το εξωτερικό περίβλημα από ανοξείδωτο ατσάλι. Τον περισσότερο χρόνο εργασίας κατέβαλε ο P2. Κατάφεραν μόνο να ανοίξουν τη ραφή του καλύμματος και είδαν ότι στο εσωτερικό υπήρχε μεγάλο ποσότητα μόλυβδου. Ο P1 αποφάσισε να μεταφέρουν όλη τη κεφαλή σε μία μάντρα της περιοχής ώστε να μπορέσουν εκεί να την διαχωρίσουν με οξυγονοκοπή και να την πουλήσουν επί τόπου. Οι 4 τους σήκωσαν τα 120 κιλά μετάλλου και το τοποθέτησαν πάλι στο τρίκυκλο με οδηγό τον P1 και συνοδηγό τον P3 ο οποίος επειδή δεν χωρούσε, κάθισε με το δεξί του πόδι πάνω στον μεταλλικό κύλινδρο. Στη μάντρα με τα παλιοσίδερα, ο P1 ζήτησε από έναν εργάτη να χρησιμοποιήσει φλόγα οξυγόνου για να ανοίξουν τον κύλινδρο στη μέση. Ο μοιραίος αυτός εργάτης ονομάστηκε από τη διεθνή επιτροπή ατομικής ενέργειας ως P5. Ο P5 παρατήρησε ότι στο ανοξείδωτο κέλυφος ήταν χαραγμένα ένα σήμα και ένα μήνυμα σε γλώσσα που δεν καταλάβαινε. Το σήμα αυτό ήταν η διεθνής ένδειξη ραδιενέργειας ενώ το μήνυμα ήταν στα αγγλικά ή γερμανικά και προειδοποιούσε για τον κίνδυνο. Περίεργοι όλοι για το τι κρύβει το εσωτερικό ενός τόσο περίεργου αντικειμένου, παρατηρούσαν την κοπή του μετάλλου. Εξαιτίας του μεγάλου βάρους, ο χειριστής της φλόγας ζήτησε τη βοήθεια του 18χρονου P6 που κάθισε δίπλα και πίσω του. Όταν η θωράκιση κόπηκε, η κάψουλα του κοβαλτίου, στο μέγεθος μίας μπαταρίας, έπεσε στο έδαφος μέσα σε ένα σύννεφο κίτρινου δύσοσμου καπνού. Ο P5 περίεργος για το τι θησαυρό ανακάλυψε, έπιασε με το γυμνό του χέρι τα μεταλλικά αντικείμενα και τα περιεργάστηκε.

Εικόνα 1-3: Η ανοιγμένη κάψουλα που περιείχε το κοβάλτιο-60. (πηγή: IAEA)

Σε ελάχιστα δευτερόλεπτα το χέρι του μούδιασε και τα παράτησε σε ένα σημείο της μάντρας αρνούμενος να

[1] Ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να διασπαστεί η μισή ποσότητα από το αρχικό ραδιενεργό υλικό.

συνεχίσει την κοπή εξαιτίας του φόβου του για τον κίτρινο καπνό που εμφανίστηκε. Έτσι το βαρύ μέρος της κεφαλής το ξαναπήραν σπίτι τους ο P1 και P3 ενώ το κοβάλτιο-60 παρέμεινε ξεχασμένο στη μάντρα με τα παλιοσίδερα. Στην επιστροφή τους όμως ένοιωσαν μία έντονη αδιαθεσία με έντονο πονοκέφαλο και έκαναν κι οι δύο εμετό. Ειδικά ο P3 ένοιωσε κι ένα έντονο ερεθισμό στο δεξί του πόδι. Οι εργάτες P5 και P6 ένοιωσαν επίσης αμέσως αδιαθεσία με εμετό και διάρροια και δεν πήγαν στη δουλειά στις 3-4 Φεβρουαρίου. Επέστρεψαν στη δουλειά στις 7 Φεβρουαρίου εμφανώς αδυνατισμένοι και με μία αξιοπερίεργη ερυθρότητα στο πρόσωπο τους, σαν από ηλιακό έγκαυμα, παρόλο που ήταν χειμώνας. Ο P5 που έπιασε τις κάψουλες κοβαλτίου, είχε ήδη αρχίσει να αποκτά βαθιές πληγές εγκαύματος και στα δύο του χέρια ενώ τις επόμενες μέρες το πρόσωπο και η γλώσσα του πρήστηκαν. Τις μέρες που ακολούθησαν, τόσο οι ανακυκλωτές όσο κι οι εργάτες που εργάζονταν στην μάντρα με τα παλιοσίδερα έβλεπαν την υγεία τους να επιδεινώνεται ραγδαία. Στις 16-17 Φεβρουαρίου ο P1, P3, P5 και P6 εισήχθησαν εσπευσμένα στο νοσοκομείο. Λίγες μέρες αργότερα κι ο ιδιοκτήτης της μάντρας που ενώ δεν ήταν παρών στις εργασίες, ήταν πολλές ώρες σε έναν χώρο που ακόμα ακτινοβολούσαν δύο ισχυρές ραδιενεργές πηγές. Όλοι είχαν ελάχιστα λευκά κι αιμοσφαίρια και αιμοπετάλια, εγκαύματα που δεν θεραπεύονταν και τριχόπτωση. Το εκτεταμένο έγκαυμα στο πόδι του P3 καθώς και η εικόνα των εργαζόμενων στη μάντρα κίνησαν υποψίες στο ιατρικό προσωπικό του νοσοκομείου του Σαμούτ Πρακάν που ρώτησαν επίμονα τους ασθενείς αν χειρίστηκαν κάποιο περίεργο μέταλλο τις προηγούμενες βδομάδες. Η περιγραφή των εργασιών επιβεβαίωσε τους φόβους τους και αμέσως ζήτησαν τη βοήθεια της επιτροπής ατομικής ενέργειας της Ταϊλάνδης το πρωί της 18ης Φεβρουαρίου 2000.

Εικόνα 1-4: Το εκτεταμένο έγκαυμα στο αριστερό χέρι του ασθενή P1, 8 βδομάδες μετά την έκθεση στη ραδιενέργεια. (πηγή: IAEA)

Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας

Για να καταλάβει κάποιος τις μονάδες μέτρησης της ραδιενέργειας, πρέπει να ορίσουμε μία σειρά από ειδικούς όρους. Ο πρώτος όρος είναι η **απορροφόμενη δόση D**, που είναι το ποσό της ενέργειας ΔΕ που εναποτίθεται στην ακτινοβολούμενη μάζα m.

$$D = {}^{\Delta E}/_{m} \qquad (2)$$

Η ενέργεια ΔΕ προκαλεί ιονισμό των μορίων ή ατόμων του ακτινοβολούμενου στόχου. Η μονάδα με την οποία μετρούμε τη D είναι Joules/kg που για συντομία ονομάσαμε Gray (Gy). Παλαιότερα χρησιμοποιήθηκε κι η μονάδα rad (radiation absorbed dose) που ισοδυναμεί σε 0,01 Gy ή αλλιώς 100 rad = 1 Gy. Το βιολογικό αποτέλεσμα της ενέργειας ΔΕ όμως μπορεί να είναι διαφορετικό, μικρότερο ή μεγαλύτερο κι εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας. Μία ακτινοβόληση με ταχέα νετρόνια ή σωματίδια α (πυρήνες ηλίου) προκαλεί πολύ μεγαλύτερη ζημιά στους ιστούς από την ακτινοβολία ακτίνων γ όπως η ραδιενέργεια που εκπέμπει το κοβάλτιο-60. Σε γενικές γραμμές, τα βαριά σωματίδια χάνουν ενέργεια πολύ γρήγορα καθώς ταξιδεύουν στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε υλικά κι έχουν καταστροφικές επιπτώσεις αν η ακτινοβόληση γίνεται μέσα στο ανθρώπινο σώμα εξαιτίας της εισπνοής ή κατάποσης ραδιενεργών ισοτόπων. Για να μπορέσουμε να συμπεριλάβουμε λοιπόν τη βιολογική σημασία και αντίκτυπο της ραδιενέργειας, ορίζουμε την **ισοδύναμη δόση H** ως ένα μέγεθος που παίρνει υπόψη την αντίστοιχη βιολογική δράση. Η ισοδύναμη δόση H έχει μονάδες μέτρησης τα sieverts (Sv) αν η D μετρήθηκε σε Gy ή τα rem (radiation equivalent man) αν η D μετρήθηκε σε rad. Για τους σκοπούς του άρθρου θα κρατήσουμε τις πιο διαδεδομένες μονάδες για ατυχήματα σε ανθρώπους, που είναι τα Gy και τα Sv. Για να μετατρέψουμε τα Gy που είναι απλά Joules/kg σε Sv, πολλαπλασιάζουμε με έναν παράγοντα επικινδυνότητας της εκάστοτε ακτινοβολίας που δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Table 10.1 Radiation Quality Factors

Type of Radiation	QF
X-rays, gamma rays, beta particles	1
Lower energy neutrons (≤1 keV)	2
Neutrons of unknown energy	10
High-energy protons	10
Heavy ions, including alpha particles	20

Source: NRC 10CFR20.1004, www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020.

Πίνακας 1-5: Πίνακας συντελεστών ακτινοβολίας (πηγή: IAEA)

Παρατηρούμε πως στην περίπτωση του κοβαλτίου-60, οι ακτίνες γ έχουν συντελεστή 1, δηλαδή D = H. Η επίπτωση της ραδιενέργειας στον άνθρωπο εξαρτάται επίσης από το ρυθμό που απορροφήθηκε. Είναι διαφορετικό να δέχεται το ανθρώπινο σώμα 1 Sv σε 20 χρόνια ή σε μία ώρα. Γι' αυτό το λόγο η ισοδύναμη δόση H εκφράζεται σε Sv/hr έτσι ώστε να γίνεται αντιληπτό πόσο γρήγορα η ενέργεια από τις ραδιενεργές διασπάσεις των υλικών, εναποτίθεται στους ιστούς. Ο ρυθμός αυτός είναι στην ουσία ένας όρος ισχύος αφού οι μονάδες του είναι J/kgr/hr. Η τυπική δόση φυσικής ραδιενέργειας (από το έδαφος, το διάστημα ή κάποιες

ιατρικές εξετάσεις) που δέχεται ένας άνθρωπος είναι 3-4 mSv κάθε έτος. Μία ακτινογραφία θώρακος ισοδυναμεί με 0,1 mSv (10 μέρες φυσικής ραδιενέργειας) ενώ μία αξονική ολόκληρου του σώματος (PET/CT) ισοδυναμεί με 21 mSv, όση η φυσική ραδιενέργεια που θα δεχόμασταν σε 7 περίπου χρόνια. Οι αστροναύτες στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό δέχονται 80 mSv ακτινοβολίας κατά την 6μηνη παραμονή τους στο διάστημα (ισοδύναμη με 25 χρόνια φυσικής ραδιενέργειας). Σύντομες δόσεις μεγαλύτερες από 500 mSv προκαλούν σοβαρές βλάβες και εκδηλώσεις συμπτωμάτων ραδιενεργούς δηλητηρίασης. Δόσεις μεγαλύτερες των 4 Sv είναι συνήθως θανατηφόρες.

Εικόνα 1-6: Έγκαυμα στο δεξί πόδι του ασθενή P3, 7 βδομάδες μετά την έκθεση στη ραδιενέργεια. (πηγή: IAEA)

Η ανακάλυψη κι αντιμετώπιση του αόρατου κινδύνου

Πίσω στο νοσοκομείο της επαρχίας Σαμούτ Πρακάν, μέσα σε μία ώρα από την ειδοποίηση τους, το μεσημέρι της 18ης Φεβρουαρίου 2000, ένα κλιμάκιο από δύο επιθεωρητές πυρηνικούς φυσικούς επισκέφθηκε και ανέκρινε τους εργάτες P5 και P6. Η περιγραφή των δύο μικρών μεταλλικών κομματιών που ο P5 κράτησε στο χέρι του, οδήγησε τους επιθεωρητές στη μάντρα που εκτελέστηκε η οξυγονοκοπή, το ίδιο απόγευμα. Καθώς κατευθύνονταν προς το σημείο, άνοιξαν τους ανιχνευτές ραδιενέργειας Geiger, οι οποίοι κατέγραψαν κατευθείαν τιμές 20 φορές υψηλότερες από τη φυσική ραδιενέργεια. Συνέχισαν τη διαδρομή τους για άλλα 150 μέτρα και βρέθηκαν στην είσοδο της μάντρας όπου κατέγραψαν ραδιενέργεια 1mSv/hr, τρεις χιλιάδες φορές περίπου μεγαλύτερη από τη φυσική ραδιενέργεια. Κάποιος που απλά θα στεκόταν σε αυτό το σημείο, στα όρια της μάντρας, θα δεχόταν κάθε 4 ώρες δόση που αντιστοιχεί στην ετήσια δόση φυσικής ραδιενέργειας που δέχεται ένας κάτοικος στην Ελλάδα. Οι επιθεωρητές κατάλαβαν κατευθείαν ότι είχαν να κάνουν με μία πολύ ισχυρή πηγή ακτινών γ και αποχώρησαν αμέσως από το σημείο καλώντας ενισχύσεις και εκκενώνοντας τα διπλανά κτήρια. Οι μετρήσεις που ακολούθησαν, έδειξαν ότι η πηγή ήταν της τάξης των 10 Sv/hr. Αν κάποιος λοιπόν πλησίαζε τη πηγή για 20 μόνο λεπτά, θα είχε 50% πιθανότητα να πεθάνει τις επόμενες 30 ημέρες. Για τον εντοπισμό και την απομάκρυνση της κάψουλας κοβαλτίου 60, οργανώθηκε στις 19 Φεβρουαρίου μία μεγάλη επιχείρηση έρευνας με χρήση μίας ασπίδας μόλυβδου (πάχους 5cm) για την προστασία των εργαζομένων της επιτροπής ατομικής ενέργειας. Πίσω από την ασπίδα η έκθεση στη ραδιενέργεια μειωνόταν στο 1/20. Οι εργάτες που συμμετείχαν στην έρευνα φορούσαν επίσης στολές μόλυβδου για περαιτέρω προστασία. Η διαδικασία ήταν χρονοβόρα γιατί κάθε κομμάτι μετάλλου που μετακινούνταν με τη χρήση επιμηκών κατασκευών, έπρεπε να μετρηθεί με ανιχνευτές Geiger. Λίγο μετά τα μεσάνυχτα, η κάψουλα με το κοβάλτιο 60 βρέθηκε. Είχε ύψος μόλις 4 cm και 2,5 cm διάμετρο. Τοποθετήθηκε αμέσως σε ειδική μολύβδινη σαρκοφάγο για να απομακρυνθεί προς τις εγκαταστάσεις της επιτροπής ατομικής ενέργειας.

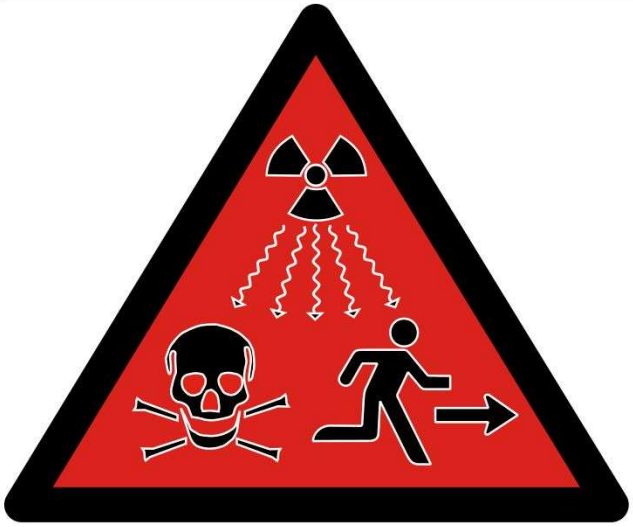
Οι απώλειες

Στις 8 Μαρτίου 2000, ο 18χρονος P6 πέθανε από σηψαιμία στο νοσοκομείο. Στις 18 Μαρτίου ο χειριστής της οξυγονοκοπής, P5, κατέληξε επίσης με σηψαιμία, αποτέλεσμα των χαμηλών λευκών αιμοσφαιρίων από την έκθεση στις ακτίνες γ. Το χέρι με το οποίο χειρίστηκε τις κάψουλες κοβαλτίου, είχε νεκρωθεί. Στις 24 Μαρτίου, ο ιδιοκτήτης της μάντρας P8 κατέληξε από καρδιακή ανακοπή, 52 μέρες μετά την έκθεση. Υπολογίζεται ότι οι 3 άτυχοι ασθενείς είχαν δεχθεί ο καθένας συνολική δόση 6 Sv. Οι ανακυκλωτές P1 και P3 επέζησαν με σοβαρές βλάβες στα άκρα τους, εγκαύματα από την επαφή με τη θωράκιση. Η συνολική δόση που δέχτηκαν ήταν 2 Sv. Το ειδικό προσωπικό που εργάστηκε για την απομάκρυνση της ραδιενεργής πηγής δέχτηκε δόσεις 20 mSv.

Ο διεθνής αντίκτυπος

Μετά το ατύχημα και τον θάνατο τριών ανθρώπων, η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας συνέταξε έκθεση πραγματογνωμοσύνης και διαπίστωσε σωρεία ελλείψεων και παραβάσεων κανονισμών τόσο από την εταιρεία KSE όσο και από τις Ταϊλανδέζικες αρχές. Την IAEA προβλημάτισε ιδιαίτερα το γεγονός ότι μία τόσο επικίνδυνη ραδιενεργή ουσία μπόρεσε να πέσει στα χέρια των ανακυκλωτών μετάλλων αλλά και να παραβιαστεί με πολύ απλή διαδικασία η θωράκιση της. Οι ανακυκλωτές δεν μπόρεσαν να καταλάβουν την επικινδυνότητα του υλικού που κατεργάζονταν γιατί δεν αναγνώρισαν το σήμα της ραδιενέργειας που ήταν χαραγμένο στη θωράκιση και δεν κατάλαβαν την προειδοποίηση που ήταν γραμμένη σε μία γλώσσα άγνωστη για αυτούς. Προβλημάτισε επίσης το γεγονός ότι η πηγή έμεινε μέσα σε μία μάντρα με παλιοσίδερα και θα μπορούσε να καταλήξει σε επιχείρηση χύτευσης μετάλλων μαζί με το υπόλοιπο ανακυκλώσιμο υλικό. Τέλος, παρόλο που ο πρώτος ασθενής εισήχθηκε στο νοσοκομείο στις 16 Φεβρουαρίου με προφανή σημάδια βλάβης από ιονίζουσα ακτινοβολία, πήρε στο ιατρικό

προσωπικό 2 ημέρες έτσι ώστε να υποψιαστούν τη φύση της ασθένειας και να ειδοποιήσουν τις αρμόδιες αρχές. Για την αντιμετώπιση μελλοντικών ατυχημάτων, η IAEA πρότεινε μία σειρά μέτρων ασφαλείας σε επίπεδο οργάνωσης και δράσης με το σημαντικότερο να είναι η αλλαγή της σήμανσης κινδύνου ραδιενέργειας σε κάτι που θα είναι παγκοσμίως αναγνωρίσιμο και κατανοητό ακόμα κι αν αυτός που το βλέπει δε γνωρίζει τη είναι ραδιενέργεια ή δε ξέρει καν να διαβάζει.



Εικόνα 1-7: Το νέο σήμα προειδοποίησης για πηγές ισχυρής ιονίζουσας ακτινοβολίας ώστε να είναι κατανοητό από κάθε άνθρωπο που το βλέπει. (πηγή: IAEA)

Αναφορές

(1) Murray R., 2015. Nuclear Energy. An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes Seventh Edition.

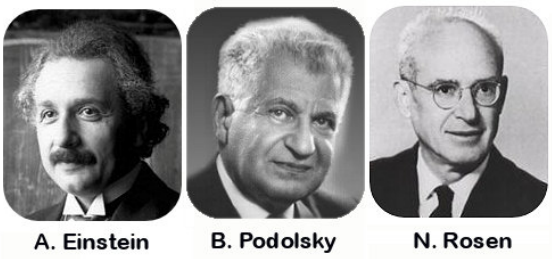
(2) IAEA, 2002. The Radiological Accident in Samut Prakarn. https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1124_scr.pdf

3 Παράδοξο EPR: Το περίεργο φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης

Γράφει ο Παναγιώτης Μαρινέλλης

Εισαγωγή

Για πολλές δεκαετίες, η κλασική φυσική, όπως αυτή θεμελιώθηκε από τον Γαλιλαίο, τον Νεύτωνα, τον Όιλερ κ.α., ήταν ικανή να εξηγήσει πληθώρα φαινομένων και έτσι κατείχε μία ακλόνητη θέση στην ιστορία. Αυτό τουλάχιστον ίσχυε μέχρι τις αρχές του 20 αιώνα, όπου δύο μεγάλα εμπόδια εμφανίστηκαν στο δρόμο μας: αυτό της μεγάλης ταχύτητας και αυτό της μικρής κλίμακας. Το πρώτο αντιμετωπίστηκε με επιτυχία από τον Άινσταιν με τη, γνωστή σε όλους, Θεωρία της Σχετικότητας[1] ενώ το δεύτερο λύθηκε με την εισαγωγή της κβαντικής μηχανικής από τους Μπορ, Χάιζενμπεργκ, Σρέντινγκερ, Ντιράκ και πολλών ακόμα. Η κβαντική μηχανική, όμως, παρά τις εκπληκτικές της εξηγήσεις για φαινόμενα που ήταν ανεξήγητα ως τότε, όπως η κίνηση του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου[2], εισήγαγε και μία πιθανοκρατική ερμηνεία της φύσης, κάτι που δεν ήταν καλοδεχούμενο στα μυαλά πολλών φυσικών εκείνης της εποχής. Ένας από αυτούς, μάλιστα, ήταν και ο ίδιος ο Άινσταιν. Προφανώς, δεν ήταν πως ο Άινσταιν και η υπόλοιπη κοινότητα των Φυσικών δεν αναγνώριζαν τα εκπληκτικά αποτελέσματα και τις προβλέψεις που έδινε η κβαντική Φυσική. Η δυσκολία ερχόταν όταν κάποιος προσπαθούσε να ερμηνεύσει τη διαδικασία με την οποία προέκυπτε το εκάστοτε αποτέλεσμα. Η πιθανοκρατική αυτή φύση του κόσμου της κβαντικής μηχανικής μπέρδευε τους επιστήμονες όχι μόνο της τότε εποχής, αλλά και της σημερινής. Στο παρόν άρθρο θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε την πιο διάσημη προσπάθεια απόδειξης της μη πληρότητας της θεωρίας της κβαντικής μηχανικής, που έγινε το 1935 από τους Άινσταιν, Ποντόλσκυ και Ρόζεν με τη δημοσίεση μιας εργασίας τους[3], όπου παρουσιάζεται το περίφημο "παράδοξο EPR", που πήρε το όνομα του από τα αρχικά των τριών συγγραφέων της εργασίας αυτής.



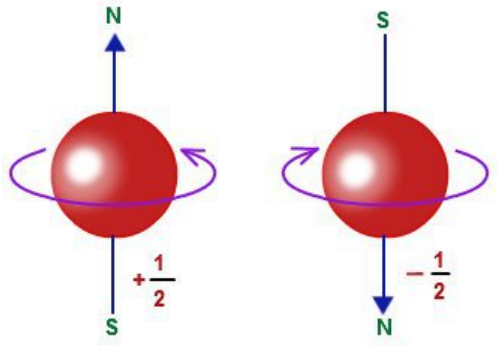
Σχήμα 3.1: Από αριστερά: Ά.Αινστάιν, Μ.Ποντόλσκι και Ν.Ρόζεν . Πηγή: https://physicsforme.com/2012/03/08/epr-before-epr-a-1930-einstein-bohr-thought-experiment-revisited/

Βασικά στοιχεία κβαντικής μηχανικής

Για να κατανοήσουμε το παράδοξο EPR θα πρέπει πρώτα να γίνει μία σύντομη περιήγηση στον σύμπαν της κβαντικής μηχανικής. Όταν μελετάμε αντικείμενα εδώ δεν χρησιμοποιούμε συνηθισμένες "κλασικές" έννοιες, όπως η θέση και η ορμή των σωματιδίων. Αντ' αυτού χρησιμοποιούμε ένα αντικείμενο που ονομάζεται *κυματοσυνάρτηση* και συμβολίζεται με ψ. "Και πως θα βρούμε την τιμή ενός φυσικού μεγέθους όπως η θέση ή η ορμή τότε;" θα διερωτάται ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης. Η απάντηση μόνο απλή δεν είναι για να περιγραφεί σε τόσες λίγες γραμμές. Αυτό που πρέπει, βέβαια, να μείνει στον αναγνώστη είναι πως, αν αναφερόμαστε για παράδειγμα στη θέση, η αντίστοιχη κυματοσυνάρτηση $\psi(x)$ δε μας δίνει πληροφορίες για το ποια *είναι* η θέση του σωματιδίου που εξετάζουμε, αλλά ποια η *πιθανότητα* να βρεθεί σε διάφορες θέσεις αν προσπαθήσουμε να μετρήσουμε το που βρίσκεται αυτό. Και πως υπολογίζουμε την πιθανότητα αυτή; Απλώς παίρνουμε το απόλυτο τετράγωνο της κυματοσυνάρτησης, $|\psi(x)|^2$! Δε χρειάζεται να μείνουμε ιδιαίτερα στα παραπάνω, καθώς στο άρθρο αυτό θα ενδιαφερθούμε για τη μέτρηση μιας άλλης φυσικής ποσότητας με την οποία οι περισσότεροι άνθρωποι δεν είμαστε τόσο εξοικειωμένοι: το κβαντικό σπιν των ηλεκτρονίων.

Η ύπαρξη του σπιν προκαλεί μέχρι και σήμερα περιέργεια, καθώς δεν υπάρχει κλασικό ανάλογο για να το κατανοήσουμε. Η πιο συνήθης αναλογία που δίνουν οι Φυσικοί για να έχετε μια εικόνα στο μυαλό σας είναι αυτή μιας μπάλας που περιστρέφεται, επομένως αποκτά στροφορμή στον άξονα περιστροφής της. Αν και ελλιπής, αυτή η εικόνα θα χρησιμοποιηθεί και εδώ. Βέβαια, τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να έχουν οποιοδήποτε σπιν. Οι δυνατές τιμές του σπιν (ακριβέστερα της προβολής του σπιν) όταν το μετρήσουμε μπορεί να είναι είτε $+\frac{1}{2}$ ή σπιν "πάνω", που κλασικά αντιστοιχεί σε δεξιόστροφη περιστροφή του ηλεκτρονίου, είτε $-\frac{1}{2}$ ή σπιν "κάτω", που κλασικά αντιστοιχεί σε αριστερόστροφη περιστροφή του ηλεκτρονίου (οι μονάδες της στροφορμής στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων S.I. είναι $kg \cdot m^2/s$ αλλά θα παραλειφθούν στο παρόν άρθρο για την απλούστερη παρουσίαση των εννοιών). Μάλιστα, αυτό ισχύει για οποιονδήποτε άξονα: Δηλαδή, είτε μετρήσουμε το σπιν στον άξονα x είτε στον y είτε στον z είτε σε οποιονδήποτε τυχαίο άξονα n, πάντα θα παίρνουμε πως σε αυτό τον άξονα το σπιν είναι είτε $+\frac{1}{2}$ (σαν το ηλεκτρόνιο να περιστρέφεται δεξιόστροφα ως προς τον άξονα αυτόν) είτε $-\frac{1}{2}$ (σαν το ηλεκτρόνιο να πε-

ριστρέφεται αριστερόστροφα ως προς τον άξονα αυτόν).



Σχήμα 3.2: *Ηλεκτρόνιο με σπιν "πάνω" και "κάτω". Πηγή: https://aminoapps.com/c/science/page/blog/quantum-spin/MYCk_uaqMmwM3graoz3ZwgkY6GQPE3*

Για να εξετάσουμε περαιτέρω την κβαντική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων, θα εισάγουμε τώρα τον συμβολισμό Dirac με ket ($|\rangle$) και bra ($\langle|$) - αν και για χάριν απλότητας, θα χρειαστούν μόνο τα ket για το παρόν άρθρο. Με λίγα λόγια: Όταν ο αναγνώστης βλέπει ένα ket θα πρέπει να σκέφτεται πως το/α σωματίδιο/α που αναφερόμαστε βρίσκεται/ονται στην κατάσταση που περιγράφεται από το όρισμα του ket. Για παράδειγμα: Αν κάποιος δει το ket $|$το ηλεκτρόνιο έχει ταχύτητα 80km/h$\rangle$ θα πρέπει να καταλάβει πως το ηλεκτρόνιο αυτό έχει ταχύτητα ίση με 80 km/h ενώ αν δεί το ket $|$τα δύο ηλεκτρόνια βρίσκονται στην Αθήνα$\rangle$ θα πρέπει να καταλάβει πως τα δύο ηλεκτρόνια που εξετάζονται και είναι σε αυτή την κατάσταση, βρίσκονται στην Αθήνα! Όσον αφορά το συμβολισμό που θα συμβολίσουμε εμείς, τα μόνα που θα χρειαστούμε είναι τα εξής:

- Με $|\psi\rangle$ θα συμβολίζουμε την κατάσταση στην οποία η συμπεριφορά του/ων ηλεκτρονίου/ων που αναφερόμαστε, περιγράφεται/ονται από την κυματοσυνάρτηση ψ. Μπορείτε να έχετε στο μυαλό σας την κβαντική κατάσταση $|\psi\rangle$ σαν ένα αντικείμενο το οποίο αναπαριστά *όλη τη δυνατή πληροφορία* που μπορούμε να έχουμε για το φυσικό σύστημα (π.χ. το τι συμβαίνει με τη θέση, την ορμή, το σπιν, την ενέργεια και οποιαδήποτε άλλη φυσική ποσότητα που χαρακτηρίζει το/τα σωματίδιο/α που περιγράφεται/ονται από την κατάσταση αυτή). Ο τρόπος, βέβαια, με τον οποίο μπορούμε εμείς να "εξάγουμε" την όποια πληροφορία θέλουμε δεν θα συζητηθεί σε αυτό το άρθρο.
- Με $|\uparrow_n\rangle$ θα συμβολίζουμε την κατάσταση στην οποία το σπιν ενός ηλεκτρονίου στη διεύθυνση n είναι πάνω (εννοείται πως η διεύθυνση n μπορεί να είναι οποιαδήποτε στον τρισδιάστατο χώρο που ζούμε).
- Με $|\downarrow_n\rangle$ θα συμβολίζουμε την κατάσταση στην οποία το σπιν ενός ηλεκτρονίου στη διεύθυνση n είναι κάτω.
- Αν περιγράφουμε δύο ηλεκτρόνια με την ίδια κυματοσυνάρτηση τότε το $|\uparrow_n\uparrow_n\rangle$ περιγράφει την κατάσταση στην οποία και τα δύο ηλεκτρόνια έχουν σπιν πάνω στη διεύθυνση n, το $|\uparrow_n\downarrow_n\rangle$ περιγράφει την κατάσταση στην οποία το πρώτο ηλεκτρόνιο έχει σπιν πάνω και το δεύτερο έχει σπιν κάτω (εννοείται στη διεύθυνση n και τα δύο) και αντίστοιχα μπορείτε να καταλάβετε τι θα σημαίνουν τα $|\downarrow_n\uparrow_n\rangle$ και τα $|\downarrow_n\downarrow_n\rangle$.

Τρία πράγματα μένουν, ακόμα, να κοιτάξουμε: α) Πώς υπολογίζουμε τις πιθανότητες για τα αποτελέσματα των μετρήσεων, β) το αξίωμα της μέτρησης και γ) την αρχή της αβεβαιότητας. Όσον αφορά το α), πρέπει να κατανοήσουμε τη βασική αρχή της κβαντικής μηχανικής, σύμφωνα με την οποία, το ηλεκτρόνιο μπορεί εν γένει να βρίσκεται σε μια *επαλληλία* καταστάσεων. Αυτό σημαίνει πως το ηλεκτρόνιο δεν είναι υποχρεωτικό να έχει σπιν πάνω ή σπιν κάτω πριν το μετρήσουμε. Μπορεί να έχει έναν (γραμμικό) συνδυασμό των δύο αυτών περιπτώσεων. Εννοείται, βέβαια, πως δεν έχουν μετρηθεί ποτέ ηλεκτρόνια που έχουν "λίγο" σπιν πάνω και άλλο "λίγο" σπιν κάτω. Όταν εμείς κάνουμε μέτρηση για το σπιν του ηλεκτρονίου θα βρούμε είτε σπιν πάνω είτε σπιν κάτω (εννοείται πως σε μία μέτρηση μπορούμε να μετρήσουμε το σπιν μόνο σε *έναν* άξονα). Τι μπορούμε να υπολογίσουμε εμείς αν ξέρουμε την αρχική καταστάση του ηλετκρονίου; Την *πιθανότητα* να εμφανιστεί σπιν πάνω ή σπιν κάτω. Θα γίνει πολύ πιο εύκολα κατανοητό με ένα παράδειγμα αυτό. Έστω η εξής κατάσταση σπιν ενός ηλεκτρονίου:

$$|\psi_e\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}}\,|\uparrow_n\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}\,|\downarrow_n\rangle\,, \qquad (3.1)$$

Έστω, λοιπόν, πως εμείς μετράμε το σπιν για αυτό το ηλεκτρόνιο στη διεύθυνση n. Για να βρείτε την πιθανότητα το σπιν του ηλεκτρονίου να είναι σε κάποια κατεύθυνση, απλώς *υψώστε τον συντελεστή της εκάστοτε κατάστασης στο τετράγωνο*. Στο παραπάνω παράδειγμα, ας πούμε, η πιθανότητα να βρούμε το ηλεκτρόνιο να έχει σπιν πάνω είναι $(\sqrt{\frac{2}{3}})^2 = \frac{2}{3}$, ενώ η πιθανότητα να το βρούμε να έχει σπιν κάτω είναι $\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 = \frac{1}{3}$. Παρατηρείστε πως οι πιθανότητες αυτές αθροίζονται στη μονάδα (αναμενόμενο αφού τα αποτελέσματα της μέτρησης είναι είτε "σπιν πάνω" είτε "σπιν κάτω", δεν υπάρχει τρίτη επιλογή). Η ίδια ακριβώς λογική χρησιμοποιείται και για την περίπτωση που η κυματοσυνάρτηση μας περιγράφει δύο ηλεκτρόνια. Ένα αντίστοιχο παράδειγμα θα ήταν:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_n\downarrow_n\rangle - |\downarrow_n\uparrow_n\rangle)$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow_n\downarrow_n\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow_n\uparrow_n\rangle\,, \qquad (3.2)$$

Τώρα η πιθανότητα να βρούμε το πρώτο ηλεκτρόνιο να έχει σπιν πάνω και το δεύτερο ηλεκτρόνιο σπιν κάτω, μετά από μέτρηση του σπιν στη διεύθυνση n στο σύνθετο σύστημα, είναι $(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$. Ομοίως, και η περίπτωση το πρώτο να έχει σπιν κάτω και το δεύτερο σπιν πάνω έχει πιθανότητα $(-\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$. Στο σημείο αυτό να τονιστεί ο λόγος που δίνεται πάντα έμφαση στη διεύθυνση στην οποία μετράμε το σπιν: Μπορεί να γράψαμε π.χ. την κατάσταση (3.1) με βάση τις καταστάσεις σπιν στη διεύθυνση n, αλλά αν θέλαμε να μετρήσουμε σε μια άλλη διεύθυνση, η *ίδια* κατάσταση $|\psi_e\rangle$ θα γραφόταν αλλιώς ως προς τις καταστάσεις της άλλης διεύθυνσης. Δεν θα ισχύει, δηλαδή, η σχέση (3.1) για κάθε διεύθυνση n. Για παράδειγμα, θα μπορούσε η ίδια κατάσταση $|\psi_e\rangle$ να γραφόταν με βάση τις καταστάσεις του σπιν στη διεύθυνση z ως $|\psi_e\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow_z\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|\downarrow_z\rangle$. Αν ίσχυε αυτό, τότε μετρήσεις του σπιν *στον άξονα z* θα έδινε σπιν πάνω με πιθανότητα $\frac{1}{4}$ και σπιν κάτω με πιθανότητα $\frac{3}{4}$. Όταν, λοιπόν, υπολογίζουμε τις πιθανότητες των αποτελεσμάτων μίας μέτρησης του σπιν *σε έναν άξονα*, πρέπει πάντα να προσέχουμε εάν η κατάσταση μας είναι γραμμένη με βάση τις καταστάσεις του σπιν *σε αυτόν τον άξονα*, ώστε οι πιθανότητες που θα υπολογίσουμε να είναι οι σωστές.

Πέρναμε τώρα στο β). Το αξίωμα της μέτρησης μας λέει πως, οποιαδήποτε κι αν ήταν η κατάσταση του συστήματος πριν τη μέτρηση, η κατάσταση του μετά τη μέτρηση θα είναι η κατάσταση η οποία αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα της μέτρησης μας. Δηλαδή αν, για παράδειγμα, μετρήσουμε το σπιν (στη διεύθυνση n) του συστήματος δύο ηλεκτρονίων που περιγράφεται από την κυματοσυνάρτηση (3.2) και βρούμε τελικά πως το πρώτο ηλεκτρόνιο έχει σπιν πάνω, ενώ το δεύτερο σπιν κάτω, τότε *αμέσως* μετά τη μέτρηση η κυματοσυνάρτηση του συστήματος *θα έπαυε να είναι η* (3.2) *και θα γινόταν η:*

$$|\psi'\rangle = |\uparrow_n\downarrow_n\rangle\,, \qquad (3.3)$$

Έστω, λοιπόν ότι κάναμε μία μέτρηση και προέκυπτε το παραπάνω αποτέλεσμα. Τότε αν προσπαθούσαμε να ξαναμετρήσουμε το σπιν των δύο σωματιδίων την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή (θέλουμε το χρονικό διάστημα που να μεσολαβεί ανάμεσα στις δύο μετρήσεις να είναι απειροστά μικρό, διότι η κυματοσυνάρτηση μπορεί εν γένει να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου), θα βρίσκαμε με πιθανότητα 1 (100% βεβαιότητα) ότι το σπιν του πρώτου ηλεκτρονίου είναι πάνω και το σπιν του δευτέρου κάτω, αφού δεν υπάρχει άλλο ενδεχόμενο, όπως φαίνεται στη σχέση (3.3). Προφανώς, αν στην αρχική μας μέτρηση έβγαινε πως το πρώτο ηλεκτρόνιο έχει σπιν κάτω και το δεύτερο έχει σπιν πάνω, τότε η κυματοσυνάρτηση του συστήματος αμέσως μετά τη μέτρηση αυτή θα ήταν $|\psi''\rangle = |\downarrow_n\uparrow_n\rangle$ και αν αμέσως ξαναμετρούσαμε το σπιν των δύο σωματιδίων θα βρίσακμε πάλι σπιν κάτω για το πρώτο ηλεκτρόνιο και σπιν πάνω για το δεύτερο.

Μας έχει μείνει το γ). Καθώς αυτό είναι ένα σύνθετο ζήτημα δεν θα μπούμε καθόλου στις τεχνικές λεπτομέρειες παρά θα επικεντρωθούμε την ιδεά που θα χρειαστούμε. Σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας του Χάιζενμπεργκ, είναι αδύνατο να μετρηθούν ταυτόχρονα και με ακρίβεια η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου. Ή τουλάχιστον αυτή είναι η πιο γνωστή μορφή της αρχής της αβεβαιότητας που παρουσιάζεται, δεν παύει, όμως, να είναι μία εκλαϊκευμένη περιγραφή της.

Σχήμα 3.3: *Ο Βέρνερ Χάιζενμπεργκ. Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Heisenberg_10.jpg*

Στην πραγματικότητα, η αρχή της αβεβαιότητας είναι μια πολύ γενικότερη αρχή που αναφέρεται σε δύο μεγέθη, έστω A και B, και μας λέει πως είναι αδύνατο να μετρηθούν τα A και B ταυτόχρονα και με ακρίβεια. Βασική σημείωση: αυτό *δεν* ισχύει για όλα τα μεγέθη A και B που μπορείτε να σκεφτείτε (δεν θα αναλυθεί το για ποια ισχύει και για ποια όχι, καθώς ξεφεύγει από το σκοπό του άρθρου αυτού). Προφανώς η αρχή της αβεβαιότητας ισχύει αν το A είναι η θέση και το B η ορμή, όπως είδαμε πιο πριν. Καθώς εμείς, όμως, ενδιαφερόμαστε για σπιν θα επικεντρωθούμε εκεί: Αυτό που πρέπει να συγκρατήσετε είναι πως *δεν* μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα (πιθανότητα 1) το σπιν σε δύο διαφορετικούς άξονες. Για παράδειγμα, αν γνωρίζουμε πως η κατάσταση

σπιν ενός σωματιδίου δίνεται ως $|\psi\rangle = |\uparrow_z\rangle$ (που σημαίνει πως το σωματίδιο έχει με βεβαιότητα σπιν πάνω στον άξονα z) τότε το σπιν σε οποιονδήποτε άλλο άξονα εκτός του z *δεν* είναι καθορισμένο. Δηλαδή, σε όποιον άξονα n και αν επιλέξουμε να μετρήσουμε το σπιν, θα υπάρχει μη μηδενική πιθανότητα να βρούμε την κατάσταση $|\uparrow_n\rangle$, αλλά και μη μηδενική πιθανότητα να βρούμε την κατάσταση $|\downarrow_n\rangle$.

Η "μονή" κατάσταση και η "αλλόκοτη δράση από απόσταση"

Πριν πάμε στο παράδοξο EPR, μένει μόνο να συζητήσουμε λίγο για την "μονή" κατάσταση (singlet state) δύο σωματιδίων, που δεν είναι άλλη από την κατάσταση που περιγράφεται στη σχέση (3.2). Το σύνθετο σύστημα των δύο ηλεκτρονίων που βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση λέμε πως έχει *συνολικό σπιν* ίσο με μηδέν (δεν χρειάζεται να μπούμε σε λεπτομέρειες του πως ορίζεται το συνολικό σπιν στα πλαίσια του άρθρου αυτού). Ένα χαρακτηριστικό της κατάστασης αυτής είναι ότι η καταστάση αυτή είναι η *ίδια* για οποιαδήποτε διεύθυνση n! Αυτό είναι κάτι μη τετριμμένο, καθώς προηγουμένως τόνισα πως αυτό *δεν* είναι η γενική περίπτωση. Επίσης μπορούμε να δούμε και κάτι άλλο, ακόμα πιο περίεργο. Έστω πως εμείς δημιουργούμε με κάποιο τρόπο στο εργαστήριο μία κατάσταση δύο ηλεκτρονίων που περιγράφεται από την (3.2) και έστω πως στη συνέχεια "στέλνουμε" το ένα από τα δύο ηλεκτρόνια στο φεγγάρι μαζί με έναν συνάδελφο μας, *χωρίς, βέβαια, να κάνουμε καμία μέτρηση στο σύστημα αυτό, καθώς αυτό θα οδηγούσε σε αλλαγή της συνολικής κατάστασης του συστήματος σύμφωνα με το αξίωμα της μέτρησης*. Τώρα λοιπόν που έχουμε εμείς το ηλεκτρόνιο 1 στη Γη και ο συνάδελφος μας έχει το ηλεκτρόνιο 2 στο φεγγάρι, πηγαίνουμε και κάνουμε μέτρηση του σπιν του ηλεκτρονίου 1 σε οποιαδήποτε διεύθυνση n. Το αποτέλεσμα θα είναι είτε σπιν πάνω με 50% πιθανότητα, είτε σπιν κάτω με επίσης 50% πιθανότητα (φαίνεται κατευθείαν από την (3.2)). Ναι, αλλά η κατάσταση $|\psi\rangle$ δεν έπαψε ποτέ να περιγράφει το σύνθετο σύστημα των δύο ηλεκτρονίων. Αυτό σημαίνει πως αν εμείς μετρήσουμε το σπιν για το ηλεκτρόνιο 1 στη διεύθυνση n και το βρούμε π.χ. να είναι σπιν πάνω, τότε η κατάσταση $|\psi\rangle$ αμέσως μετά τη μέτρηση θα αλλάξει στιγμιαία στην $|\psi'\rangle$ της (3.3), καθώς η μόνη άλλη δυνατότητα θα ήταν η κατάσταση $|\psi''\rangle = |\downarrow_n\uparrow_n\rangle$, στην οποία όμως το ηλεκτρόνιο 1 έχει σπιν κάτω (το οποίο δε συμφωνεί με το αποτέλεσμα της μέτρησης μας). Επομένως, ενώ εμείς μετράμε το ηλεκτρόνιο 1 στη Γη, την ίδια χρονική στιγμή το ηλεκτρόνιο 2 στο φεγγάρι πηγαίνει και σε κατάσταση με σπιν κάτω στη διεύθυνση n, *χωρίς να έχουμε κάνει τίποτα σε αυτό* (παρατηρείστε τη σχέση (3.3) για να βεβαιωθείτε). Η ιδέα αυτή, αν και θεωρητικά αναγκαία, μπέρδευε τους φυσικούς για πολύ καιρό. Υποθέτω πως και ο αναγνώστης μπαίνει στον πειρασμό να σκεφτεί πως μια πραγματική φυσική επίδραση άλλαξε το σπιν του ηλεκτρονίου 2 και το έκανε να είναι αντιπαράλληλο με το σπιν του ηλεκτρονίου 1. Θα δούμε, όμως, στην επόμενη παράγραφο πως τα πράγματα είναι λίγο πιο σύνθετα από ότι θα υπόθετε κανείς αρχικά. Καταστάσεις, όπως η $|\psi\rangle$ αποκαλούνται σύμπλεκτες καταστάσεις (entangled states)και οι ισχυρες συσχετίσεις μεταξύ των δύο ηλεκτρονίων που παρατηρούνται σε τέτοιες καταστάσεις αποδίδονται με τον όρο κβαντική σύμπλεξη (quantum entanglement)

Συχνά λέγεται πως ο Άινσταιν, αναφερόμενος σε ένα τέτοιο παράδειγμα, σε ένα γράμμα του προς τον Μαξ Μπορν το 1947 χαρακτήρισε την αλληλεπίδραση αυτή "αλλόκοτη δράση από απόσταση" ("spooky action at a distance") [4]. Βέβαια, το σε τι ακριβώς αναφερόταν με αυτή τη φράση δεν εξακριβώθηκε ποτέ από τον ίδιο, αλλά αυτή είναι μάλλον η πιθανότερη εκδοχή. Ο όρος "αλλόκοτη" προσδίδεται σε αυτήν, καθώς είναι γνωστό από την ειδική θεωρία της σχετικότητας πως τίποτα δεν ταξιδεύει γρηγορότερα από το φως. Ωστόσο, αυτή δεν είναι μία αυστηρή διατύπωση όσων μας λέει η ειδική σχετικότητα. Όπως προαναφέραμε, στην επόμενη παράγραφο θα αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα πιο διεξοδικά, καθώς ας επαναλάβουμε: *το πρόβλημα είναι πιο σύνθετο από ότι φαίνεται.*

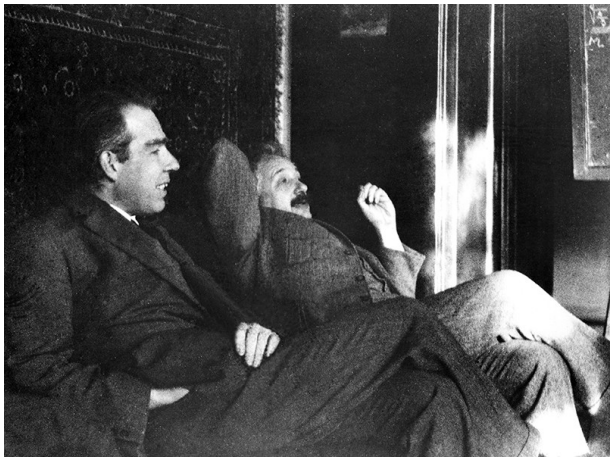
Το παράδοξο EPR

Το πρόβλημα με την κβαντική μηχανική

Φτάνοντας, λοιπόν, στον τελικό σκοπό αυτού του άρθρου που είναι η παρουσίαση του παραδόξου EPR, μένει να εξετάσουμε τα επιχειρήματα των Άινσταιν, Ποντόλσκι και Ρόζεν, βάσει των οποίων καταλήγουν στο ότι η κβαντική θεωρία δεν μπορεί να είναι μία πλήρης θεωρία. Οι συγγραφείς προσπαθούν να εισάγουν μία έννοια, που μάλλον δύσκολα θα σκεφτόμασταν πως εμπεριέχεται σε επιστημονικό άρθρο Φυσικής: *τη φυσική πραγματικότητα*. Ο λόγος για τον οποίο το άρθρο τους προσπαθούσε να προσεγγίσει με έναν τρόπο την έννοια της πραγματικότητας, ήταν διότι εκείνη την εποχή υπήρχε μεγάλη συζήτηση πάνω στη φύση αυτής, λόγω της εμφάνισης της κβαντικής μηχανικής. Χαρακτηριστικές φιγούρες στην "μάχη" αυτή ήταν ο Μπορ και ο Άινσταιν. Ο πρώτος θεωρούσε πως δεν έχει νόημα να προσπαθούμε να αντιστοιχήσουμε μία πραγματικότητα στο σύμπαν εν απουσία μετρήσεων[5]. Όταν εμείς δεν "παρατηρούμε" ένα σύστημα, τότε αυτό βρίσκεται σε μία επαλληλία καταστάσεων που κυβερνώνται από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής και η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει το σύστημα είναι μία πλήρης περιγραφή του συστήματος. Οτιδήποτε εμείς παρατηρούμε και θεωρούμε "πραγματικό", αποκτά νόημα

μόνο όταν κάνουμε μετρήσεις πάνω του (ερμηνεία της Κοπεγχάγης [6]). Από την άλλη μεριά, ο Άινσταιν πίστευε στο ρεαλισμό, δηλαδή σε μία αντικειμενική πραγματικότητα: μία πραγματικότητα που υπάρχει *ανεξάρτητη από το αν εμείς κάνουμε μετρήσεις ή όχι*. Γι' αυτό το λόγο, άλλωστε επέμενε πως η κβαντική ερμηνεία του κόσμου μέσω των κυματοσυναρτήσεων δεν μπορεί να είναι μία πλήρης θεωρία [5].

Βέβαια, το εγχείρημα των συγγραφέων φαίνεται μεγαλόπνοο, καθώς ο ορισμός της πραγματικότητας στην οποία ζούμε αγγίζει τα όρια της φιλοσοφίας, επομένως είναι ένα θέμα δύσκολο να προσεγγιστεί με την αυστηρότητα των Μαθηματικών και της Φυσικής. Παρ' όλ' αυτά, τα επιχειρήματα τους δε φαίνεται να αντιβαίνουν τη διαίσθηση μας.



Σχήμα 3.4: *Ο Μπορ και ο Άινσταιν . Πηγή: https://www.nature.com/articles/d41586-018-03793-2*

Στο σημείο αυτό αναφέρουμε πως θα παρουσιάσουμε, για λόγους απλότητας, το παράδοξο EPR, όπως αυτό αναλύθηκε από τον Ντέιβιντ Μπομ, ύστερα από το άρθρο των Άινσταιν, Ποντόλσκι και Ρόζεν και το οποίο αναφέρεται στα σπιν [7] (στην ομώνυμη εργασία, οι συγγραφείς προσπάθησαν να κάνουν κάτι παρόμοιο με τη θέση και την ορμή αντί για τα σπιν).

Το άρθρο

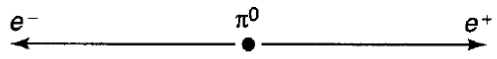
Πρώτα από όλα, οι συγγραφείς ορίζουν πως μία φυσική θεωρία για να είναι πλήρης, πρέπει κάθε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας να έχει και ένα αντίστοιχο στη φυσική αυτή θεωρία. Αυτό φαίνεται απόλυτα λογικό: Αν υπάρχει κάτι πραγματικό το οποίο δεν εντάσσεται στη θεωρία μας, είναι αδύνατον αυτή η θεωρία να περιγράφει την πραγματικότητα, άρα δεν μπορούμε να τη θεωρούμε μία *πλήρη* θεωρία.

Στη συνέχεια οι συγγραφείς προχωράνε και θέτουν ένα επαρκές (αλλά όχι αναγκαίο) κριτήριο, με βάση το οποίο θα κρίνουν αν ένα στοιχείο μίας θεωρίας είναι κομμάτι της φυσικής πραγματικότητας. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο *εάν, χωρίς να επηρεάσουμε με κανένα τρόπο ένα σύστημα, μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα (πιθανότητα ίση με 1) την τιμή μίας φυσικής ποσότητας, τότε υπάρχει ένα στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας που αντιστοιχεί σε αυτή την ποσότητα*. Για παράδειγμα, αν ένα ηλεκτρόνιο βρίσκεται στην κατάσταση $|\psi\rangle = |\uparrow_z\rangle$, τότε το σπιν του στον άξονα z αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας του ηλεκτρονίου, εφόσον αν μετρηθεί, θα βρούμε με βεβαιότητα την τιμή $+\frac{1}{2}$ (σπιν πάνω). Αντιθέτως, για ένα άλλο ηλεκτρόνιο στην κατάσταση $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_z\rangle + |\downarrow_z\rangle)$, δεν μπορούμε να πούμε πως το σπιν του στον άξονα αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της φυσικής του πραγματικότητας, αφού μία μέτρηση του σπιν στον άξονα z έχει 50% πιθανότητα να μας δώσει σπιν πάνω και 50% πιθανότητα να μας δώσει σπίν κάτω. Παρατηρείστε πως, επομένως, η φυσική πραγματικότητα ενός συστήματος (στο παράδειγμα μας του κάθε ηλεκτρονίου) μπορεί να είναι, εν γένει, διαφορετική από τη φυσική πραγματικότητα ενός άλλου συστήματος(αρκεί βέβαια το σύστημα στο οποίο αναφερόμαστε να είναι απομωνομένο, δηλαδή να μην αλληλεπιδρά με κανέναν άλλο σύστημα).

Έπειτα, οι συγγραφείς σημειώνουν ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα βάσει των προηγουμένων: Στο πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής, δύο μεγέθη A και B τα οποία ικανοποιούν την αρχή της αβεβαιότητας δεν μπορούν να ανήκουν στην ίδια φυσική πραγματικότητα. Αν το σκεφτείτε λίγο, αυτό είναι κάτι προφανές, αφού η αρχή της αβεβαιότητας μας λέει πως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ταυτόχρονα και με βεβαιότητα δύο μεγέθη που την υπακούουν. Επομένως, αν γνωρίζουμε το αποτέλεσμα μέτρησης του A με πιθανότητα 1 είναι αδύνατο να γνωρίζουμε με πιθανότητα 1 και το αποτέλεσμα μέτρησης του B. Άρα το A και το B δεν μπορούν να αντιστοιχούν σε στοιχεία της ίδιας πραγματικότητας, αφού αν άνηκαν, θα μπορούσαμε να γνωρίζαμε το αποτέλεσμα της μέτρησης οποιουδήποτε από τα δύο με πιθανότητα 1. Όσον αφορά τα σπιν, το παραπάνω μας πληροφορεί πως δεν γίνεται τα σπιν σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις να αντιστοιχούν σε στοιχεία της ίδιας πραγματικότητας, αφού έχουμε δει πως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε το σπιν σε δύο διαφορετικούς άξονες με βεβαιότητα. Αυτά, βέβαια, ισχύουν με την υπόθεση πως η κβαντική περιγραφή της φύσης είναι πλήρης, δηλαδή δεν υπάρχει μία άλλη "πιο θεμελιώδης¨ θεωρία που να μπορεί να αντικαταστήσει την κβαντική μηχανική!

Ας δούμε, τώρα, ένα νοητικό πείραμα. Γνωρίζουμε πως το ουδέτερο πιόνιο (π^0), είναι ένα σωματίδιο που μπορεί να διασπαστεί σε ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα ποζιτρό-

νιο (e^+) (που είναι το αντι-ηλεκτρόνιο και στο πλαίσιο της συζήτησης μας για τα σπιν, δεν χρειάζεται να σκέφτεστε πως διαφέρει ιδιαίτερα από ένα ηλεκτρόνιο). Θεώρουμε πως η διάσπαση αυτή έγινε όταν το πιόνιο ήταν σε ηρεμία (ακίνητο), επομένως το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο θα κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.5: *Ουδέτερο πιόνιο διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Πηγή: [8]*

Το πιόνιο, όμως, γνωρίζουμε πως έχει σπιν μηδέν. Εφόσον, λοιπόν, πρέπει η συνολική στροφορμή του συστήματος να διατηρείται (αντιμετωπίζουμε προφανώς το σπιν σαν μία στροφορμή), θα πρέπει και η τελική κατάσταση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου να έχει και αυτή *συνολικό σπιν μηδέν*. Από τη σκοπιά της κβαντικής μηχανικής αυτό ισοδυναμεί με το να "μοιράζονται" το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο της "μονή" κατάσταση, αφού πιο πάνω αναφέραμε πως αυτή έχει συνολικό σπιν μηδέν:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_n\downarrow_n\rangle - |\downarrow_n\uparrow_n\rangle)$$

Όσο και να απομακρύνονται το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο, δεδομένου πως δεν γίνεται καμία μέτρηση του σπιν των σωματιδίων, θα συνεχίζουν να "μοιράζονται" την κατάσταση αυτή $|\psi\rangle$. Σημειώνεται πως από τη στιγμή που τα σωματίδια άρχισαν να απομακρύνονται δεν συμβαίνει *καμία* αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Ίσως ο προσεκτικός αναγνώστης σκεφτεί πως αυτό δεν ισχύει εφόσον έχουν ηλεκτρικό φορτίο και άρα έλκονται: Αυτό είναι κάτι που μπορούμε με ασφάλεια να αγνοήσουμε αφού α) τα επιχειρήματα αυτά μπορούν να αναπαραχθούν και για μη φορτισμένα σωματίδια, απλώς χρησιμοποιούνται ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια που είναι πιο "οικεία" στους περισσότερους και β) πάντα μπορούμε να αφήσουμε τα σωματίδια να βρεθούν σε άπειρη απόσταση μεταξύ τους, οπότε και πράγματι δεν θα υπάρχει καμία αλληλεπίδραση. Όπως και να 'χει, στην περίπτωση μας το ηλεκτρικό φορτίο δεν επηρεάζει το σπιν των σωματιδίων με κανέναν τρόπο.

Έστω, λοιπόν, πως αφήνουμε το ένα από τα δύο σωματίδια, π.χ. το ηλεκτρόνιο, να ταξιδέψει μέχρι πολύ μακριά (αυτή τη φορά ας φτάσουμε στο Γαλαξία της Ανδρομέδας, ακόμα πιο μακριά από το φεγγάρι) όπου έχουμε στήσει μία μετρητική συσκευή του σπιν, ενώ το άλλο ηλεκτρόνιο είναι στο εργαστήριο μας στη Γη. Η μετρητική συσκευή που διαθέτουμε μπορεί να μετρήσει οποιονδήποτε άξονα του σπιν, αλλά η επιλογή του ποιον άξονα θα μετρήσει είναι τυχαία (επομένως δεν υπάρχει κανένας τρόπος να είναι γνωστό σε ποια διεύθυνση θα μετρηθεί το σπιν). Όταν, λοιπόν, φτάσει το ηλεκτρόνιο στο Γαλαξία της Ανδρομέδας και περάσει από τη μετρητική συσκευή θα μετρηθεί το σπιν του σε μία τυχαία διεύθυνση, ας πούμε τη διεύθυνση x. Τότε το σπιν του στη διεύθυνση x θα γίνει καθορισμένο (είτε σπιν πάνω είτε σπιν κάτω). Τι θα συμβεί τότε στη Γη, μερικά εκατομμύρια έτη φωτός μακριά; Όπως είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα, στιγμιαία, *, χωρίς καμία χρονική διαφορά,* το σπιν του ποζιτρονίου στον άξονα x θα γίνει αντιπαράλληλο με το σπιν του ηλεκτρονίου στον άξονα x, που βρίσκεται στο Γαλαξία της Ανδρομέδας. Ας το επαναλάβουμε άλλη μία φορά, ώστε να συνειδητοποιήσουμε τη σημασία του γεγονότος αυτού: *μπορούμε στο απομονωμένο σύστημα ενός ηλεκτρονίου να γνωρίζουμε με απόλυτη βεβαιότητα το αποτέλεσμα μίας μέτρησης, χωρίς να το επηρεάσουμε με κανένα τρόπο*. Μα αυτή είναι μία επανάληψη του κριτηρίου που αναφέραμε προηγουμένως για το τι θα θεωρούμε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως το σπιν του ποζιτρονίου στον άξονα x αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας του ποζιτρονίου. Ωραία μέχρι εδώ. Τι θα γινόταν, όμως, εάν η μετρητική μας συσκευή είχε τυχαία επιλέξει να μετρήσει το σπιν του ηλεκτρονίου σε έναν άλλον άξονα, π.χ. τον z (οι άξονες z και x επιλέγονται για απλότητα, αλλά τα ίδια επιχειρήματα ισχύουν για οποιονδήποτε άξονα); Μα τότε το σπιν του ηλεκτρονίου στον άξονα z θα γινόταν καθορισμένο και σαν αποτέλεσμα, θα έπρεπε και το σπιν του ποζιτρονίου στον άξονα z να γίνει καθορισμένο και να "δείχνει" προς την αντίθετη κατεύθυνση. Και σε αυτή την περίπτωση, όμως, έχουμε ένα απομονωμένο σύστημα (το ποζιτρόνιο), δεν αλληλεπιδράμε καθόλου με αυτό (δεν γίνεται καμία μέτρηση στο ποζιτρόνιο) και παρόλ' αυτά εμείς ξέρουμε με πιθανότητα 1 την κατεύθυνση του σπιν του στον άξονα z. Είναι λογικό να συμπεράνουμε, λοιπόν, πως και το σπιν στον άξονα z αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας του ποζιτρονίου. Συνεπώς το σπιν στον άξονα x και το σπιν στον άξονα z αντιστοίχουν σε στοιχεία της ίδιας φυσικής πραγματικότητας, αυτής του ποζιτρονίου. Με λίγα λόγια, λέμε πως το ποζιτρόνιο "κατέχει από μόνο του" την ιδιότητα να έχει καθορισμένο σπιν στον άξονα x και στον άξονα z (καθώς και σε οποιονδήποτε άλλον άξονα), εφόσον το ποζιτρόνιο δεν αλληλεπιδρά με κανένα άλλο σύστημα και η επιλογή του άξονα μέτρησης του σπιν του ηλεκτρονίου είναι τυχαία. Μια χαρά και εδώ. Ή μήπως όχι;

Προηγουμένως είδαμε πως είναι αδύνατον δύο σπιν σε διαφορετικούς άξονες να αντιστοιχούν σε στοιχείας της ίδια φυσικής πραγματικότητας, εφόσον αυτό θα παραβί-

αζε την αρχή της αβεβαιότητας. Επομένως, με λογικά επιχειρήματα, έχουμε καταλήξει σε ένα *παράδοξο*, το οποίο μάλιστα φαίνεται να αντιβαίνει και την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας: προηγουμένως απαιτήσαμε οι δύο μετρητικές συσκευές του σπιν α)να βρίσκονται πολύ μακριά και β)η επιλογή του άξονα στον οποίον θα γίνει μέτρηση του σπιν να είναι τυχαία. Επομένως, έχουμε έτσι αποκλείσει οποιαδήποτε πιθανή πρωθύστερη επικοινωνία σχετικά με το ποιος άξονας πρόκειται να μετρηθεί (από άποψης Φυσικής, το γεγονός της μέτρησης του σπιν του ηλεκτρονίου και η "κατάρρευση" της κυματοσυνάρτησης του ηλεκτρονίου σε μία συγκεκριμένη κατάσταση σπιν είναι δύο χωροειδός απομακρυσμένα γεγονότα). Συνεπώς, πρέπει τώρα να γυρίσουμε πίσω, ώστε να κατανοήσουμε από που προέκυψε αυτό το παράδοξο. Θεωρώντας πως οι αρχικές υποθέσεις των συγγραφέων για τη φυσική πραγματικότητα ήταν σωστές, το παράδοξο αυτό προέκυψε επειδή θεωρήσαμε πως η κβαντική περιγραφή της φύσης ήταν πλήρης, δηλαδή ότι κάθε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας έχει και ένα αντίστοιχο στην κβαντική μηχανική. Συνεπώς, κάποιος πρέπει αναγκαστικά να δεχτεί πως η κβαντική περιγραφή της φύσης δεν μπορεί να είναι πλήρης.

Μία απλούστερη εξήγηση

Καθώς το επιχείρημα και η λογική πορεία του αρχικού άρθρου χρησιμοποιεί διάφορες έννοιες στις οποίες πιθανόν να μην είναι συνηθισμένες για τον αναγνώστη, θα γίνει μία προσπάθεια στο σημείο αυτό για μία απλή και σύντομη εξήγηση του παραδόξου. Το όλο θέμα υπάρχει στο ότι η επιλογή για το σε ποιον άξονα θα μετρηθεί το σπιν του ηλεκτρονίου είναι τελείως αυθαίρετη. Επομένως, πως γίνεται το ποζιτρόνιο στη Γη, το οποίο έχουμε βεβαιώσει πως δεν αλληλεπιδρά με κανένα τρόπο με το ηλεκτρόνιο στο Γαλαξία της Ανδρομέδας, να "αντιπαραλληλίζει" το σπιν του *, αμέσως, στον ίδιο άξονα που εμείς επιλέξαμε να μετρήσουμε*;. Φαίνεται πραγματικά απίστευτο, τα αποτελέσματα μίας μέτρησης να εξαρτώνται από το σε ποιον άξονα θα τύχει να μετρήσει η μετρητική μας συσκευή. Η άποψη που οι συγγραφείς ουσιαστικά στηρίζαν, ήταν πως τα δύο σωματίδια θα πρέπει να είχαν ήδη "αντιπαραλληλίσει" τα σπιν τους σε κάθε άξονα τη στιγμή που παράχθηκαν (όταν υπήρξε αλληλεπίδραση μεταξύ τους) και αυτή η πληροφορία έμενε με κάποιο τρόπο "αποθηκευμένη" στο σύστημα του ηλεκτρονίου και στο σύστημα το ποζιτρονίου. Επομένως, δεν είναι η μέτρηση που κάνει την κατάσταση $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_n\downarrow_n\rangle - |\downarrow_n\uparrow_n\rangle)$ να "καταρρέει" στιγμιαία στην $|\uparrow_n\downarrow_n\rangle$ ή στην $|\downarrow_n\uparrow_n\rangle$ (για οποιονδήποτε άξονα n), σύμφωνα και με το αξίωμα της μέτρησης. Πίστευαν πως τα σπιν ήταν ήδη καθορισμένα ποιο θα είναι πάνω και πιο κάτω, απλώς εμείς δεν έχουμε μία πλήρη θεωρία ακόμα που θα μπορούσε να το προβλέψει αυτό και γι' αυτό χρησιμοποιούμε την (ημιτελή) πιθανοκρατική κβαντική μηχανική. Διαφορετικά, παραθέτοντας τα λόγια του Άινσταιν: "Ο Θεός δεν παίζει ζάρια" [5].

Ο απόηχος του άρθρου

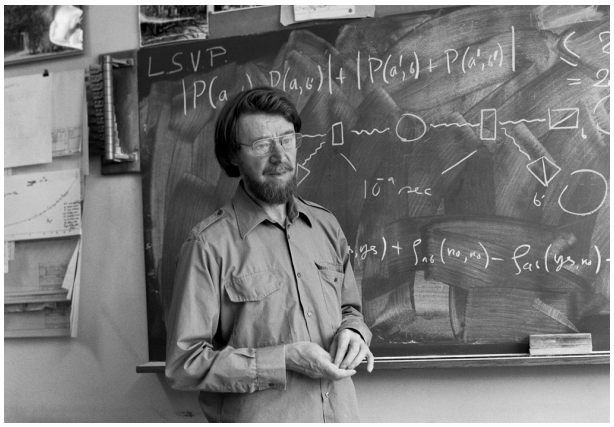
Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται αναμφισβήτητο, αλλά δεν είναι καθόλου έτσι τα πράγματα. Και οι ίδιοι οι συγγραφείς του άρθρου σημειώνουν πως αν κάποιος δεχτεί τη συνθήκη πως *για να είναι δύο ή περισσότερες φυσικές ποσότητες στοιχεία της ίδιας φυσικής πραγματικότητας πρέπει υποχρεωτικά να μπορούν ταυτόχρονα να μετρηθούν ή να προβλεφθούν*, τότε το παράδοξο δεν υφίσταται (παρ' όλ' αυτά μία τέτοια ιδέα τους φαίνεται μη λογική). Αυτό που πρέπει οπωσδήποτε να μείνει στον αναγνώστη είναι το εξής: το παράδοξο EPR θεωρεί μία συνθήκη για να εντάξει φυσικές ποσότητες στη φυσική πραγματικότητα, η οποία είναι σύμφωνη με την καθημερινή μας εμπειρία: για να ορίσουμε κάτι πραγματικό θέλουμε να το γνωρίζουμε με βεβαιότητα. Η άποψη αυτή, αν και εύλογη, δεν παύει να είναι μία *άποψη*. Πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί όταν προσπαθούμε να επεξηγήσουμε όρους όπως η "πραγματικότητα" και γι' αυτό το λόγο και το παράδοξο EPR *δεν αποδεικνύει* πως η κβαντική μηχανική δεν είναι μία πλήρης θεωρία. Αντ' αυτού, αποδεικνύει πως η κβαντική μηχανική δεν είναι πλήρης, αν θεωρήσουμε την υπόθεση των Άινσταν, Ποντόλσκι και Ρόζεν για τη φυσική πραγματικότητα σωστή. Πέραν αυτού, αξίζει να σημειωθεί πως ακόμα και αν η κβαντική μηχανική δεν είναι μία πλήρης θεωρία, δεν υπάρχει καμία απόδειξη πως μία τέτοια πλήρης θεωρία υπάρχει (αν και οι συγγραφείς κλείνουν το άρθρο παραθέτονας την απόψη τους πως μια τέτοια θεωρία υπάρχει).

Ένα σημείο του παραδόξου στο οποίο αξίζει να σταθούμε είναι το ότι η μέτρηση του σπιν του ενός σωματιδίου φαίνεται να επηρεάζει *αμέσως* το άλλο σωματίδιο με το οποίο είναι "συμπλεγμένο" (αυτό που στην προηγούμενη ενότητα αναφέραμε ως "αλλόκοτη δράση από απόσταση"). Μοιάζει σαν τα δύο σωματίδια να παραμένουν με κάποιο τρόπο "συνδεδεμένα" έτσι ώστε η μέτρηση του ενός να δίνει στιγμιαία ένα σήμα στο άλλο, ώστε να διατηρηθεί η συσχέτιση των σπιν των δύο σωματιδίων. Ίσως δελεάζεστε να υποθέσετε πως υπάρχει πράγματι κάποιου είδους αλληλεπίδραση η οποία, όμως, ταξιδεύει με πεπερασμένη ταχύτητα (μικρότερη ή ίση από την ταχύτητα του φωτός για να μην παραβαίνουμε τους νόμους της ειδικής σχετικότητας) και "ειδοποιεί" το δεύτερο σωματίδιο σε ποια κατεύθυνση να δείχνει το σπιν του στον άξονα που έγινε η μέτρηση. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν είναι εφικτό αφού θα οδηγούσε σε παραβίαση της στροφορμής για όση ώρα "ταξιδεύουν τα νέα", εφόσον αν μετρούσαμε το σπιν του σωματιδίου στη Γη στον άξονα αυτόν πριν φτάσει η πληροφορία αυτή, οι πιθανότητες να το βρίσκαμε πάνω ή κάτω θα ήταν 50-50 (άρα στο 50% των περιπτώσεων θα παραβιάζοταν η αρχή διατήρησης της στροφορ-

μής). Επομένως, πρέπει πράγματι, αν υπάρχει κάποια επίδραση, αυτή να γίνεται στιγμιαία, χωρίς καμία χρονική καθυστέρηση. Αυτή ακριβώς ήταν και μία από τις μεγάλες ανησυχίες του Άινσταιν. Αυτό δεν θα έπρεπε να αντιβαίνει την ειδική σχετικότητα και να παραβιάζει το όριο της ταχύτητας του φωτός; Στην πραγματικότητα, πρέπει να είμαστε προσεκτικοί ακόμα και όταν αναφέρουμε αυτό το συμπέρασμα της ειδικής σχετικότητας. Μία αυστηρότερη διατύπωση της πρότασης αυτής είναι πως *καμία πληροφορία δεν μπορεί να μεταδοθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός*. Και αυτό είναι κάτι που εδώ πράγματι δε συμβαίνει! [9]. Ας το σκεφτούμε λίγο: μπορεί να μεταδοθεί οποιαδήποτε πληροφορία μέσω του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης; Η απάντηση είναι πως όχι, καθώς τα αποτελέσματα της πρώτης μέτρησης είναι τελείως τυχαία! Δηλαδή, ο συνάδελφος μας στο Γαλαξία της Ανδρομέδας δεν μπορεί να καθορίσει το τι σπιν θα μετρήσει (πάνω ή κάτω) πριν κάνει τη μέτρηση. Επομένως, ακόμα κι αν έπειτα μετρήσουμε εμείς στη Γη, με μια δική μας μετρητική συσκευή, το σπιν του ποζιτρονίου στον ίδιο άξονα δεν θα μπορέσουμε να βγάλουμε κάποιο "μήνυμα", αφού απλά θα παρατηρήσουμε ένα αποτέλεσμα που προήλθε με τελείως τυχαίο τρόπο και όχι κάτι που ήθελε ο συνάδελφος μας να παρατηρήσουμε. Ο μόνος τρόπος για να μεταδώσουμε κάπως πληροφορία με αυτό τον τρόπο θα ήταν να επικοινωνήσουμε με το συνάδελφο μας, ώστε να συμφωνήσουμε πως θα ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα αυτά. Η επικοινωνία αυτή, όμως, θα έπρεπε να γίνει με έναν τρόπο που δεν θα παραβιάζει την ειδική σχετικότητα (π.χ. χρησιμοποιώντας το φως μίας λάμπας για να στείλουμε σήματα Μορς). Άρα, μέχρι να καταφέρναμε να επικοινωνήσουμε, θα έχει περάσει σίγουρα ο απαιτούμενος χρόνος για να ταξιδέψει το φως από το σημείο που βρισκόταν ο συνάδελφος μας μέχρι εμάς. Τα παραπάνω θα μπορούσαν να κατανοηθούν, βέβαια, καλύτερα αν κανείς όριζε αυστηρά την έννοια της πληροφορίας, αλλά αυτό ίσως χρειαζόταν ένα ακόμα άρθρο από μόνο του!

Επίλογος

Αν και η κβαντική μηχανική παραμένει μέχρι και σήμερα μια θεωρία που χρησιμοποιείται συνεχώς και δίνει επιτυχημένα αποτελέσματα, το παράδοξο EPR, καθώς και οι ανησυχίες των συγγραφέων του ομώνυμου άρθρου ήταν πολύ σημαντικές, ώστε να κατανοήσουμε βαθύτερα την ερμηνεία των φαινομένων του κλάδου αυτού. Ας υπογραμμιστεί πως οι Άινσταιν, Ποντόλσκι και Ρόζεν δεν αμφισβητούν στο άρθρο τους την επιτυχία της κβαντικής μηχανικής. Πίστευαν, όμως, πως ενώ έδινε μεν σωστά αποτελέσματα, ήταν ακόμα μια ημιτελής θεωρία της φύσης. Ειδικότερα, στο άρθρο τους φαίνεται να υποθέτουν την ύπαρξη κάποιας "Θεωρίας Κρυφών Μεταβλητών" στη θέση της πιθανοκρατικής φύσης της κβαντικής μηχανικής. Αν, υποθετικά, είχαμε αυτές τις κρυφές μεταβλητές στα χέρια μας θα μπορούσαμε με βεβαιότητα να υπολογίσουμε π.χ. το σπιν των ηλεκτρονίων κάθε χρονική στιγμή [10]. Γι' αυτό το λόγο, πιστεύαν πως στο μέλλον, η κβαντική μηχανική θα αντικατασταθεί από μία άλλη πιο θεμελιώδη θεωρία. Αυτό, βέβαια, δε συνέβη ποτέ (τουλάχιστον δεν έχει συμβεί μέχρι σήμερα). Αντιθέτως, από τότε μέχρι σήμερα, στοιχεία για την ισχύ της κβαντομηχανικής θεωρίας πληθαίνουν. Η "Θεωρία Κρυφών Μεταβλητών" έχει ήδη δειχθεί πως αποκλείεται πειραματικά [11]. Σημαντική στην προσπάθεια κατανόησης των παραπάνω ήταν η συμβολή του Ιρλανδού Φυσικού Τζον Στιούαρτ Μπελ, ο οποίος το 1964 σε ένα άρθρο του [12] έδειξε το δρόμο για την πειραματική απόδειξη του κατά πόσον ο κόσμος στον οποίο ζούμε είναι "κλασικός" (δηλαδή υπάρχει κάποια θεωρία μη πιθανοκρατική που απλώς δεν γνωρίζουμε ακόμα) ή "κβαντομηχανικός" (δηλαδή η πιθανοκρατική φύση της κβαντικής μηχανικής δεν είναι αποτέλεσμα έλλειψης γνώσης). Το 2015, μάλιστα, τα αποτελέσματα ενός πειράματος δημοσιεύτηκαν σε ένα άρθρο[13] και υποδεικνύουν πως η πιθανοκρατική συμπεριφορά των κβαντικών συστημάτων δεν προκύπτει από άγνοια μας για ορισμένα "δεδομένα", αλλά είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό της φύσης(σας προτείνω να ξαναδιάβασετε την πρόταση αυτή για να εκτιμήσετε σε βάθος το περιεχόμενο της)!



Σχήμα 3.6: *Ο Τζον Στιούαρτ Μπελ. Πηγή: https://home.cern/news/news/physics/fifty-years-bells-theorem*

Επομένως, φαίνεται ότι "στενεύουν τα όρια" για να μείνει ζωντανή η ελπίδα των Αινστάιν, Ποντόλσκι και Ρόζεν πως η κβαντική θεωρία θα αντικατασταθεί από μια "Θεωρία Κρυφών Μεταβλητών" που θα συμφωνεί με την εμπερία μας. Βέβαια, ο οποιοσδήποτε ενθουσιασμός πρέπει να είναι πάντα συγκρατημένος. Τα πειραματικά δεδομένα θα μπορούσαν να δεχτούν κριτική στο μέλλον, καθώς η απόψη του "τοπικού ρεαλισμού (όπως συχνά αναφέρε-

ται η άποψη που υποστήριζε ο Άινσταιν) είναι βαθια ριζωμένη στο μυαλό των ανθρώπων και οι Φυσικοί δεν αποτελούν εξαίρεση [14].

Θα μπορούσαμε να κλείσουμε το άρθρο παραθέτοντας τα λόγια του Στίβεν Χόκινγκ, ενός από τους πιο γνωστούς φυσικούς της εποχής μας, που είπε σε μία ομιλία του το 1999 πως "[...] ο Θεός παίζει ζάρια με το σύμπαν. Όλα τα στοιχεία υποδεικνύουν πως είναι ένας μανιώδης τζογαδόρος, που παίζει ζάρια σε κάθε δυνατή περίσταση" (Πηγή: https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/does-god-play-dice). Η φράση αυτή, όμως, αποκρύπτει το βασικό σκοπό σύνταξης του άρθρου αυτού: η Φυσική όπως και κάθε επιστήμη, έχει μοναδικό σκοπό να υπηρετεί και να ανακαλύπτει την αλήθεια, όσο δύσκολη και κόντρα στη διαίσθηση μας κι αν είναι αυτή και ακόμα και αν χρειαστεί κάποια στιγμή στο μέλλον να εγκαταλείψουμε και τις πιο επιτυχημένες θεωρίες μας, όπως η κβαντική μηχανική. Γι' αυτό θα προτιμήσουμε μία διαφορετική προσέγγιση. Σύμφωνα με τον Χάιζενμπεργκ, τον Οκτώβρη του 1927, σε ένα συνέδριο Φυσικής, ο Άινσταιν παρέθεσε πάλι τα επιχειρήματα που υποστήριζαν την άποψη του πως ο Θεός δεν παίζει ζάρια. Πάνω σε αυτό, ο Μπορ μπόρεσε μόνο να απαντήσει το εξής: "Ωστόσο, δεν μπορούμε εμείς να πούμε στο Θεό, πως να διευθύνει τον κόσμο" [15].

Αναφορές

[1] Albert Einstein. *Relativity: The Special and General Theory*. Henry Holt and Company, 1916 (Μετάφραση στα αγγλικά:1920).

[2] Luca Nanni. "The Hydrogen Atom: a Review on the Birth of Modern Quantum Mechanics." In: (2015). URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1501/1501.05894.pdf.

[3] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?" In: *Physical Review* 47 (1935), pp. 777–780. URL: https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777.

[4] Stephen Boughn. "There Is No Action at a Distance in Quantum Mechanics, Spooky or Otherwise." In: (2018). URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.07925.pdf.

[5] Ramin Skibba. "Einstein, Bohr and the war over quantum theory." In: *Nature* 555 (2018), pp. 582–584. URL: https://www.nature.com/articles/d41586-018-03793-2.

[6] Hermann Wimmel. *Quantum Physics And Observed Reality: A Critical Interpretation Of Quantum Mechanics*. World Scientific, 1992.

[7] David Bohm. *Quantum Theory*. Dover Publications, 1989.

[8] David J. Griffiths. *Introduction to Quantum Mechanics*. Pearson Education, 1995.

[9] Gyong Luck Khym, Hyung Jin Yang. "Quantum entanglement does not violate the principle of special theory of relativity." In: *Physics Essays* 29(4) (2016), pp. 553–554. URL: https://www.researchgate.net/publication/311218348_Quantum_entanglement_does_not_violate_the_principle_of_special_theory_of_relativity.

[10] Marco Genovese. "Research on Hidden Variable Theories: a review of recent progresses." In: *Physics Reports* 413 (2005), pp. 319–396. URL: https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0701071.pdf.

[11] Simon Groeblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek, Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer, Anton Zeilinger. "An experimental test of non-local realism." In: *Nature* 446 (2007), pp. 871–875. URL: https://arxiv.org/pdf/0704.2529.pdf.

[12] John S. Bell. "On the Einstein Podolsky Rosen paradox." In: *Physics Physique Fizika* 1(3) (1964), pp. 195–200. URL: https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200_001.pdf.

[13] B. Hensen, H. Bernien, A.E. Dréau, A. Reiserer, N. Kalb, M.S. Blok, J. Ruitenberg, R.F.L. Vermeulen, R.N. Schouten, C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri, M. W. Mitchell, M. Markham, D.J. Twitchen, D. Elkouss, S. Wehner, T.H. Taminiau, R. Hanson. "Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km." In: *Nature* 526 (2015), pp. 682–686. URL: https://arxiv.org/pdf/1508.05949.pdf.

[14] Rebecca Holmes. "Local realism is dead, long live local realism?"" In: *Physics World* 30(6) (2015), pp. 21–25. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-7058/30/6/41.

[15] Werner Heisenberg. *Encounters with Einstein*. Princeton University Press, 1989.

[16] Στέφανος Λ. Τραχανάς. *Κβαντομηχανική 2*. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ, 2008.

[17] Ramamurti Shankar. *Principles of Quantum Mechanics, Second edition*. Plenum Press, 2011.

[18] Asher Peres, Daniel R. Terno. "Quantum Information and Relativity Theory." In: *Rev. Mod. Phys.* 76(1) (2003), pp. 93–123. URL: https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0212023.pdf.

4 Κβαντικές Βόμβες και Παράλληλοι Κόσμοι

Γράφει η Εμμανουέλα Χρύσανδρου

Η σύγχρονη κοινωνία μας κατακλύζεται από παραπληροφόρηση, με το επίθετο *κβαντικός, -ή, -ό* να χρησιμοποιείται συχνά καταχρηστικά, συνήθως για να αναδείξει οτιδήποτε προβάλλεται ως καινοτόμο ή υπερσύγχρονο. Ωστόσο, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις στις οποίες επιστρατεύεται για να προσδώσει μια αύρα μυστικισμού σε κάποιο εμπορικό προϊόν ή ψευδοεπιστημονική θεωρία με σκοπό την οικονομική εκμετάλλευση, η οποία βέβαια βρίσκει στην επιστημονική άγνοια (π.χ. ενεργειακοί κρύσταλλοι) ή σε πηγαίες ανθρώπινες ανάγκες (π.χ. βιβλία αυτοβοήθειας) το κατάλληλο έδαφος για να ευδοκιμήσει. Θα μπορούσε κανείς να πει πως η λέξη «κβαντικός» είναι η νέα εκδοχή του προθέματος *νανο-*, το οποίο πριν ξεπεραστεί είχε χρησιμοποιηθεί για να διαφημίσει πληθώρα προϊόντων [1].

Δεδομένων αυτών, είναι μάλλον χρέος όλων μας να απομυθοποιούμε την ψευδοεπιστημονική φλυαρία, ρίχνοντας φως στο πώς αυτή διαφέρει από την επιστημονικά εδραιωμένη ορολογία και τις πραγματικές προβλέψεις της κβαντικής θεωρίας. Έτσι, ο στόχος του παρόντος άρθρου είναι να συζητήσει από καθαρά φυσική σκοπιά ένα από τα λεγόμενα «παράδοξα» της κβαντικής φυσικής, χωρίς να κάνει την παραμικρή έκπτωση σχετικά με όσα αναγράφονται στον τίτλο του. Με άλλα λόγια, μπορεί ο τίτλος του άρθρου (σκόπιμα) να μοιάζει με clickbait[(1)], αλλά στην πραγματικότητα αποτυπώνει ακριβώς το περιεχόμενό του: ένα νοητικό πείραμα (Gedankenexperiment) που δημοσιεύθηκε από τους A. C. Elitzur και L. Vaidman [2] για να αναδείξει πως στο πλαίσιο της καθιερωμένης ερμηνείας της κβαντικής φυσικής προβλέπεται μια διαδικασία μέτρησης η οποία δεν προϋποθέτει αλληλεπίδραση με το σύστημα το οποίο υπόκειται σε αυτήν.

Πριν ξεκινήσουμε, τονίζεται πως το άρθρο δεν απευθύνεται αποκλειστικά σε κόσμο που έχει παρακολουθήσει κάποιο εισαγωγικό μάθημα κβαντικής φυσικής, αρκεί όμως να έχει μια ξεκάθαρη εικόνα για βασικούς όρους όπως η υπέρθεση (superposition) ή η μέτρηση. Σε διαφορετική περίπτωση, μπορεί κανείς να φρεσκάρει πρώτα τη μνήμη του διαβάζοντας το τρίτο μέρος της σειράς άρθρων *Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου* του περιοδικού Physics Time [3] ή το εισαγωγικό (και σε κάποιο βαθμό εκλαϊκευμένο) βιβλίο των L. Susskind και A. Friedman *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum* [4].

Μια νοητή πειραματική διάταξη

Ας φανταστούμε ένα εργοστάσιο παραγωγής βομβών[(2)], ο πυροδοτικός μηχανισμός των οποίων ενεργοποιείται όταν επάνω του προσπέσει κάποιο φωτόνιο. Η εικόνα μιας βόμβας που πυροδοτείται από ένα μόλις φωτόνιο είναι μάλλον αρκετά τρομακτική, αλλά επίσης καθαρά φανταστική: το φωτόνιο που θα έπρεπε να ανακλαστεί από τη βόμβα για να προσπέσει στα μάτια μας επιτρέποντάς μας να τη δούμε, θα την είχε ήδη πυροδοτήσει, ανατινάσσοντάς μας. Μια ημέρα, λόγω κάποιου μηχανικού σφάλματος, σε ορισμένες από τις βόμβες που παράχθηκαν φαίνεται να απουσιάζει ο πυροδοτικός μηχανισμός, καθιστώντας τες άχρηστες.

Σχήμα 4.1: *Μια ημέρα στο φανταστικό εργοστάσιο κάτι πάει στραβά. Η εικόνα παράχθηκε από το μοντέλο μηχανικής μάθησης DALL·E 3.*

Οι βόμβες, λειτουργικές ή μη, μοιάζουν πανομοιότυπες, επομένως στην προσπάθειά του κανείς να τις διαχωρίσει, θα έπρεπε να τις ελέγξει μία προς μία. Εντούτοις, για να ελέγξει τη λειτουργικότητα μιας βόμβας θα έπρεπε να την πυροδοτήσει, καταλήγοντας έτσι στο τέλος της ημέρας να έχει ανατινάξει όλες τις λειτουργικές βόμβες και να έχει μείνει μόνο με τις ελαττωματικές. Έτσι, το αφεντικό του εργοστασίου διατάζει να πεταχτούν εξ αρχής όλες οι βόμβες της παρτίδας και η παραγωγή να ξεκινήσει από την αρχή, αφού δε μπορεί να ρισκάρει τη χρήση

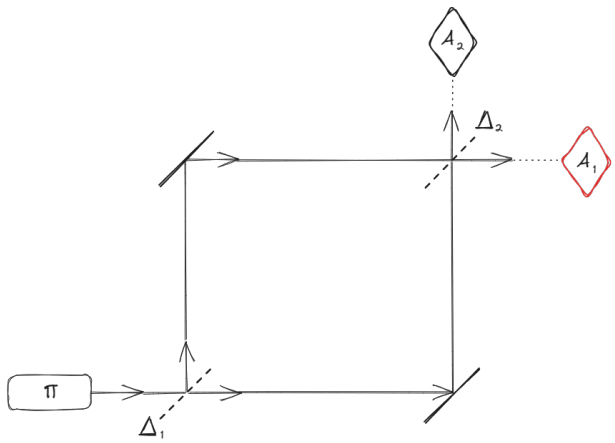
(1) Ο όρος clickbait είναι διαδικτυακή αργκό χωρίς ελληνική απόδοση και αναφέρεται σε διαδικτυακά άρθρα με «πιασάρικους» τίτλους, οι οποίοι όμως δεν ανταποκρίνονται στο περιεχόμενό τους.

(2) Μην ξεχνάμε πως η εργασία των Elitzur-Vaidman εκπονήθηκε στο Ισραήλ, όπου κάτι τέτοιο είναι όχι απλώς κανονικοποιημένο, αλλά και ενθαρρύνεται διαχρονικά από τον «πολιτισμένο» δυτικό κόσμο.

πιθανώς ελαττωματικών βομβών σε αποστολές ειρήνης. Στο σημείο αυτό, ένας εργάτης που στο παρελθόν διεξήγαγε έρευνα στη θεμελιώδη φυσική αλλά δε μπορούσε να βιοποριστεί μέσω αυτής, προτείνει μια εναλλακτική: ισχυρίζεται πως έχει έναν τρόπο να διαχωρίσει τις ελαττωματικές από τις λειτουργικές βόμβες, πυροδοτώντας ορισμένες λειτουργικές στην πορεία, όμως όχι όλες. Πριν όμως περιγράψει τη διαδικασία, κάνει μια λίστα με τα πράγματα τα οποία χρειάζεται:

- μία πηγή φωτονίων (Π) τέτοια, ώστε κάθε φορά να μπορεί να εκπέμψει ένα και μόνο φωτόνιο
- δύο διαχωριστές δέσμης (Δ_1, Δ_2) που ανακλούν ελαστικά προσπίπτοντα φωτόνια με πιθανότητα 50% ή επιτρέπουν τη διέλευσή τους με πιθανότητα 50%
- δύο κάτοπτρα τέτοια, ώστε όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει επάνω τους να ανακλάται ελαστικά από αυτά
- δύο ανιχνευτές φωτονίων (A_1, A_2)

Ένας συνάδελφός του, πειραματικός φυσικός, φέρνει αμέσως όλα όσα ζητήθηκαν, μιας και τα είχε πρόχειρα στο αμάξι του από όταν το εργαστήριό του έκλεισε λόγω υποχρηματοδότησης. Κατόπιν, ο θεωρητικός φυσικός του ζητά να τα τοποθετήσει με τρόπο τέτοιο, ώστε να σχηματίζεται η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Ο πειραματικός φυσικός έχει πολύ καλές γνώσεις κβαντικής φυσικής και έτσι, μόλις ολοκληρώνει το στήσιμο, στρέφεται με απορία προς το θεωρητικό φυσικό, ρωτώντας τον γιατί του ζήτησε δύο ανιχνευτές, αφού ο ένας είναι άχρηστος.

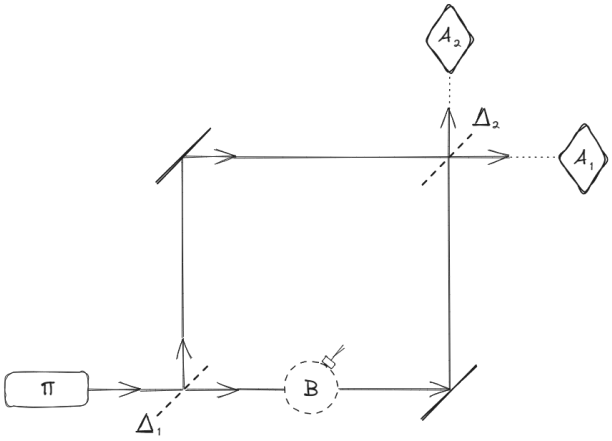


Σχήμα 4.2: *Πειραματική διάταξη που αποτελείται από μια πηγή φωτονίων, Π, δύο διαχωριστές δέσμης, Δ_1 και Δ_2, δύο πανομοιότυπα κάτοπτρα, καθώς και δύο ανιχνευτές, A_1 και A_2, οι οποίοι σχηματίζουν ένα ορθογώνιο ισοσκελές τρίγωνο μαζί με τον διαχωριστή Δ_2.*

Το σκεπτικό του είναι το ακόλουθο: η κατάσταση ενός φωτονίου μόλις συναντήσει τον διαχωριστή Δ_1 περιγράφεται πλέον ως η υπέρθεση δύο ισοπίθανων καταστάσεων. Στη μία κατάσταση το φωτόνιο έχει ανακλαστεί από το διαχωριστή, ενώ στην άλλη έχει διέλθει από αυτόν. Δεδομένου πως στο φωτόνιο μπορεί να αντιστοιχιστεί κάποια κυματοσυνάρτηση, και σε αναλογία με το πείραμα της διπλής σχισμής [5], μπορούμε να φανταζόμαστε ένα μέρος ενός κύματος να διέρχεται από το διαχωριστή και το υπόλοιπο να ανακλάται[3]. Κατόπιν, καθένα από τα δύο προκύπτοντα κύματα ανακλάται πλήρως σε ένα κάτοπτρο, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται συμβολή στη θέση του διαχωριστή Δ_2. Εκεί, λόγω της διαφοράς φάσης τους, η συμβολή τους είναι ακυρωτική στον κατακόρυφο άξονα και ενισχυτική στον οριζόντιο, με αποτέλεσμα το αρχικό φωτόνιο να ανιχνεύεται πάντα από τον ανιχνευτή A_1.

Ο θεωρητικός φυσικός συγχαίρει το συνάδελφό του για την εύστοχη παρατήρησή του, όμως ένα μειδίαμα σχηματίζεται στο πρόσωπό του.

Προς αποφυγή εκρήξεων

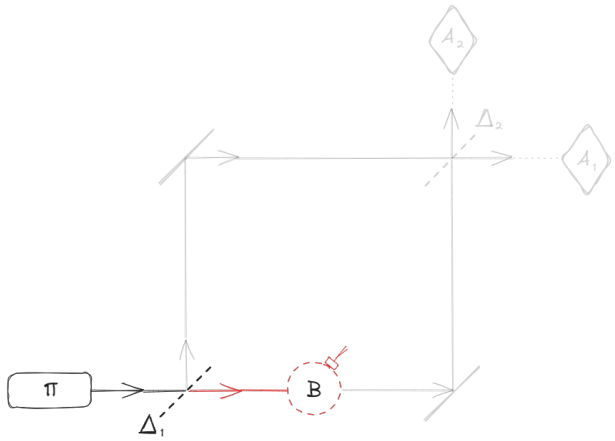


Σχήμα 4.3: *Στην πειραματική διάταξη έχει τώρα προστεθεί μια βόμβα, η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα στον διαχωριστή Δ_1 και το ένα από τα δύο κάτοπτρα.*

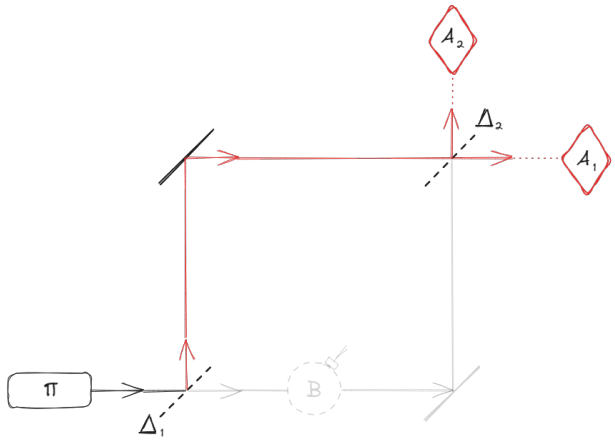
Στο σημείο αυτό ο θεωρητικός φυσικός ξεκινά να εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο θα καταφέρουν να ξεχωρίσουν τις ελαττωματικές από τις λειτουργικές βόμβες, πυροδοτώντας μερικές από τις λειτουργικές βόμβες στην πορεία. Κάθε βόμβα προς έλεγχο θα πρέπει να τοποθετηθεί ανάμεσα στο διαχωριστή Δ_1 και το κάτω κάτοπτρο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3 (στην πραγματικότητα, η βόμβα μπορεί να τοποθετηθεί ανάμεσα στον Δ_1 και οποιοδήποτε από τα δύο κάτοπτρα με ισοδύναμο τελικό αποτέ-

[3] Στο σημείο αυτό χρειάζεται προσοχή, καθώς πουθενά δεν κάνουμε ισχυρισμούς της μορφής «τα φωτόνια έχουν σωματιδιακή και κυματική φύση». Δε μιλάμε για τη φύση των σωματιδίων, παρά μόνο, ορμώμενοι από τη μαθηματική περιγραφή των λεγόμενων «καταστάσεων» του φωτονίου, δημιουργούμε μια πιο οικεία εικόνα για να περιγράψουμε τη συμπεριφορά του χωρίς μαθηματικά.

λεσμα). Εάν η βόμβα είναι ελαττωματική, η διάταξη ισοδυναμεί με αυτήν του Σχήματος 4.2, με αποτέλεσμα το φωτόνιο να ενιχνεύεται πάντοτε στον ανιχνευτή A_1, αφού η βόμβα δε μπορεί να πυροδοτηθεί[4]. Έτσι, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αυτή αρκετές φορές, μπορεί κανείς να βεβαιωθεί πως η βόμβα είναι σίγουρα ελαττωματική[5]. Τι συμβαίνει όμως εάν η βόμβα είναι λειτουργική;



Σχήμα 4.4: *Στη μια διαδρομή το φωτόνιο διέρχεται από τον διαχωριστή Δ_1 και απορροφάται από την ενεργή βόμβα, με αποτέλεσμα αυτή να εκραγεί.*



Σχήμα 4.5: *Στην άλλη διαδρομή το φωτόνιο ανακλάται από το διαχωριστή Δ_1, με αποτέλεσμα να μπορεί τελικά να εντοπιστεί είτε από τον ανιχνευτή A_1 είτε από τον ανιχνευτή A_2.*

Στην περίπτωση αυτή, τα ενδεχόμενα είναι τα εξής: εάν το φωτόνιο διαπεράσει το διαχωριστή Δ_1, τότε με βεβαιότητα θα προσπέσει στον πυροδοτικό μηχανισμό της λειτουργικής βόμβας, με αποτέλεσμα αυτή να εκραγεί (βλ. Σχήμα 4.4). Η πιθανότητα αυτού του ενδεχομένου είναι προφανώς 50%. Από την άλλη, εάν το φωτόνιο ανακλαστεί από τον Δ_1, θα ανακλαστεί και από το κάτοπτρο, προσπίπτοντας τελικά στο διαχωριστή Δ_2. Εκεί είναι που τα πράγματα γίνονται ενδιαφέροντα. Προηγουμένως, ο λόγος για τον οποίο πάντοτε ο ανιχνευτής A_1 ανίχνευε το φωτόνιο ήταν πως τα δύο κύματα που το περιέγραφαν συνέβαλαν στη θέση του Δ_2. Τώρα, λόγω της λειτουργικής βόμβας, η συμβολή αυτή δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα το φωτόνιο στη θέση του Δ_2 να μπορεί ισοπίθανα να διέλθει από το διαχωριστή και να ανιχνευτεί από τον A_1, ή να ανακλαστεί από το διαχωριστή και να ανιχνευτεί από τον A_2 (βλ. Σχήμα 4.5). Η συνολική πιθανότητα καθενός εκ των δύο αυτών τελικών αποτελεσμάτων είναι 25%.

Φυσικά, στην περίπτωση που το φωτόνιο ανιχνεύεται από τον A_1, δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα ως προς το εάν η βόμβα είναι λειτουργική ή όχι. Το πείραμα πρέπει τότε να επαναληφθεί όσες φορές χρειάζεται μέχρι είτε η βόμβα να εκραγεί, είτε το φωτόνιο να ανιχνευτεί από τον A_2. Αυτό σημαίνει πως, ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία, στατιστικά περισσότερες από το 25% και λιγότερες από το 50% των λειτουργικών βομβών μπορούν να διαχωριστούν από τις μη λειτουργικές, χωρίς να πυροδοτηθούν.

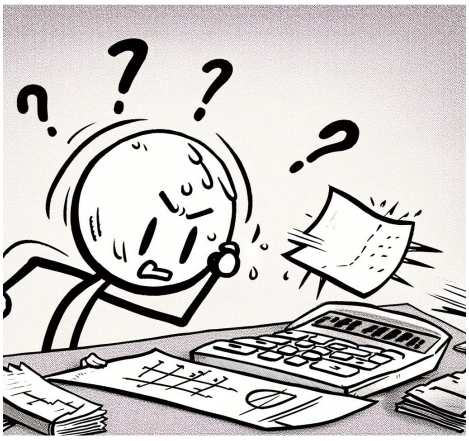
Εργάτες και αφεντικό στέκονται μπερδεμένοι να παρατηρούν τους δύο φυσικούς, όμως έχουν μια αίσθηση αισιοδοξίας πως μια ενδιάμεση λύση έχει βρεθεί. Οι μεν εργάτες σκέφτονται πως ίσως να μη χρειαστεί να κατασκευάσουν από την αρχή όλες τις βόμβες της παρτίδας, το δε αφεντικό πως δεν θα έχει τόσο μεγάλη ζημία όσο φανταζόταν. Σε μια γωνιά, ένας εργάτης φαίνεται φοβερά προβληματισμένος. Και αυτός θεωρητικός φυσικός, όμως από εκείνους που πάντοτε έλεγαν στους φοιτητές τους πως δεν έχει σημασία να προσπαθεί κανείς να ερμηνεύσει την κβαντική θεωρία φιλοσοφικά, παρά μόνο να κάνει πράξεις χρησιμοποιώντας την ως εργαλείο. Μιας και οι υπολογισμοί είναι το φόρτε και του ίδιου, στρώνεται αμέσως στη δουλειά για να δει εάν οι ισχυρισμοί του συναδέλφου του βγάζουν νόημα.

Μαθηματικός φορμαλισμός

Ας προσπαθήσουμε τώρα να φανταστούμε τι γράφει ο δεύτερος αυτός θεωρητικός φυσικός, στην προσπάθειά του να προσεγγίσει το ίδιο πρόβλημα μέσω ενός καθαρά μαθηματικού φορμαλισμού, χρησιμοποιώντας μάλιστα τον περίφημο συμβολισμό του Dirac (bra-ket notation) για τις απαραίτητες πράξεις γραμμικής άλγεβρας. Για τους αναγνώστες που δε μπορούν ή δεν επιθυμούν να ακολουθήσουν τις πράξεις, μην ανησυχείτε, αφού μπο-

[4] Αγνοούμε την περίπτωση στην οποία το φωτόνιο σκεδάζεται από τη βόμβα εκτός της πορείας του ή απορροφάται από αυτήν.

[5] Θεωρητικά, θα έπρεπε η διαδικασία να επαναληφθεί άπειρες φορές προκειμένου να συμπεράνει κανείς με απόλυτη σιγουριά πως η βόμβα είναι ελαττωματική).



Σχήμα 4.6: Ο δεύτερος θεωρητικός φυσικός, στην προσπάθειά του να επαληθεύσει μαθηματικά τους ισχυρισμούς του πρώτου. Η εικόνα παράχθηκε από το μοντέλο μηχανικής μάθησης DALL·E 3.

ρείτε να παρακάμψετε εντελώς αυτήν την ενότητα και να προχωρήσετε κατευθείαν στην επόμενη. Για τους υπομονετικούς (ή τους δύσπιστους) που ενδιαφέρονται για το πώς μπορούμε να οδηγηθούμε στα παραπάνω συμπεράσματα με αυστηρά μαθηματικά δίνεται ένα επιπλέον κίνητρο: αντί να θεωρήσουμε πως οι διαχωριστές δέσμης έχουν ίσους συντελεστές ανάκλασης και διέλευσης, θα γενικεύσουμε τη νοητή πειραματική διάταξη θεωρώντας πως η πιθανότητα ένα φωτόνιο να διαπεράσει το διαχωριστή Δ_1 είναι t^2, ενώ η πιθανότητα να ανακλαστεί από αυτόν είναι r^2. Σε ό,τι αφορά το διαχωριστή Δ_2, οι πιθανότητες θα πρέπει να είναι, αντίστροφα, r^2 για τη διέλευση και t^2 για την ανάκλαση. Επιπλέον, θα υπολογίσουμε με ακρίβεια το ποσοστό των λειτουργικών βομβών που μπορούν να «σωθούν».

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να θεωρήσουμε πως $0 < r, t \in \mathbb{R}$. Επιπλέον, η συνθήκη $r^2 + t^2 = 1$ θα πρέπει να ικανοποιείται, αφού τα μόνα επιτρεπτά ενδεχόμενα κατά την πρόσπτωση ενός φωτονίου στο διαχωριστή είναι το φωτόνιο να τον διαπεράσει ή να ανακλαστεί από αυτόν. Κάνοντας μια μικρή κατάχρηση συμβολισμού (όπως εξάλλου και οι συγγραφείς της πρωτότυπης δημοσίευσης), θα συμβολίσουμε τις καταστάσεις «προς τα δεξιά» με $|\delta\rangle$ και τις καταστάσες «προς τα πάνω» με $|\pi\rangle$ (βάσει του Σχήματος 4.3). Δεδομένου πως κάθε φορά που το φωτόνιο ανακλάται από κάποιο κάτοπτρο ή διαχωριστή η φάση της κυματοσυνάρτησής του μεταβάλλεται κατά $\pi/2$, η δράση κάθε κατόπτρου στις δύο πιθανές καταστάσεις μπορεί να γραφεί ως

$$|\delta\rangle \to \mathrm{i}\,|\pi\rangle\,, \qquad |\pi\rangle \to \mathrm{i}\,|\delta\rangle\,. \tag{4.1}$$

Υπενθυμίζεται πως η φανταστική μονάδα προκύπτει από τη σχέση $\exp(\mathrm{i}\pi/2) = \mathrm{i}$. Κατ' αντιστοιχία, η δράση του διαχωριστή Δ_1 στην κατάσταση $|\delta\rangle$ μπορεί να γραφεί ως

$$|\delta\rangle \xrightarrow{\Delta_1} t\,|\delta\rangle + \mathrm{i}r\,|\pi\rangle\,, \tag{4.2}$$

ενώ η δράση του διαχωριστή Δ_2 σε κάθε κατάσταση μπορεί να γραφεί ως

$$|\delta\rangle \xrightarrow{\Delta_2} r\,|\delta\rangle + \mathrm{i}t\,|\pi\rangle\,, \qquad |\pi\rangle \xrightarrow{\Delta_2} r\,|\pi\rangle + \mathrm{i}t\,|\delta\rangle\,. \tag{4.3}$$

Ας επαληθεύσουμε αρχικά πως στην περίπτωση μιας ελαττωματικής βόμβας το φωτόνιο ανιχνεύεται πάντοτε από τον ανιχνευτή A_1. Συμβολίζοντας την αρχική κατάσταση με $|i\rangle$ και την τελική κατάσταση με $|f\rangle$, προκύπτει:

$$\begin{aligned}
|i\rangle = |\delta\rangle &\xrightarrow{\Delta_1} t\,|\delta\rangle + \mathrm{i}r\,|\pi\rangle \\
&\longrightarrow \mathrm{i}t\,|\pi\rangle - r\,|\delta\rangle \\
&\xrightarrow{\Delta_2} \mathrm{i}tr\,|\pi\rangle - t^2\,|\delta\rangle - \mathrm{i}tr\,|\pi\rangle - r^2\,|\delta\rangle \\
&= -\left(t^2 + r^2\right)|\delta\rangle = -\,|\delta\rangle \equiv |f\rangle
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Πράγματι, βλέπουμε πως $|f\rangle = -\,|\delta\rangle$, επομένως χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Born παίρνουμε την πιθανότητα να ανιχνευτεί το φωτόνιο από τον ανιχνευτή A_1 ως $|\langle\delta|f\rangle|^2 = 1$, καθώς και την πιθανότητα να ανιχνευτεί από τον ανιχνευτή A_2 ως $|\langle\pi|f\rangle|^2 = 0$.

Θεωρώντας πως η απορρόφηση του φωτονίου από τον πυροδοτικό μηχανισμό της βόμβας και η επακόλουθη έκρηξή της μπορεί να συμβολιστεί με την κατάσταση $|B\rangle$, οι αντίστοιχες πράξεις για τη λειτουργική βόμβα δίνουν:

$$\begin{aligned}
|i\rangle = |\delta\rangle &\xrightarrow{\Delta_1} t\,|\delta\rangle + \mathrm{i}r\,|\pi\rangle \\
&\longrightarrow t\,|B\rangle - r\,|\delta\rangle \\
&\xrightarrow{\Delta_2} t\,|B\rangle - \mathrm{i}tr\,|\pi\rangle - r^2\,|\delta\rangle \equiv |f\rangle
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Εδώ, ο κανόνας του Born δίνει τις ακόλουθες πιθανότητες για καθένα από τα τρία πιθανά ενδεχόμενα:

1. Πυροδότηση βόμβας: $|\langle B|f\rangle|^2 = t^2$
2. Ανίχνευση από τον A_1: $|\langle\delta|f\rangle|^2 = r^4$
3. Ανίχνευση από τον A_2: $|\langle\pi|f\rangle|^2 = t^2 r^2$

Εάν κανείς αντικαταστήσει τις τιμές $t = r = 1/\sqrt{2}$ προκειμένου να ταυτίζονται με την παραγγελία του πρώτου

θεωρητικού φυσικού, θα δει με ευκολία να προκύπτουν ακριβώς οι προβλέψεις του.

Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν στο πείραμα με ένα μόνο φωτόνιο. Όπως εξήγησε ο πρώτος θεωρητικός φυσικός, κάθε φορά που το φωτόνιο ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή A_1, θα πρέπει το πείραμα να επαναλαμβάνεται εκ νέου με ένα νέο φωτόνιο, μέχρι τελικά η βόμβα να πυροδοτηθεί ή το φωτόνιο να ανιχνευτεί από τον ανιχνευτή A_2. Έτσι, το ποσοστό των λειτουργικών βομβών που οι εργάτες μπορούν να ανιχνεύσουν χωρίς να τις πυροδοτήσουν δίνεται από το λόγο

$$\frac{|\langle\pi|f\rangle|^2}{|\langle\pi|f\rangle|^2+|\langle\delta|f\rangle|^2}=\frac{t^2r^2}{t^2r^2+t^2}=\frac{r^2}{1+r^2}. \qquad (4.6)$$

Αντικαθιστώντας και εδώ την τιμή $r = 1/\sqrt{2}$, βρίσκει κανείς πως οι εργάτες του εργοστασίου θα καταφέρουν να ανιχνεύσουν το 1/3 από τις λειτουργικές βόμβες, με τα υπόλοιπα 2/3 να εκρήγνυνται. Επιπλέον, φαίνεται πως εάν κανείς επιλέξει τους διαχωριστές δέσμης έτσι, ώστε $r \gg t$, τότε μπορεί να εξασφαλίσει πως θα «σώσει» περίπου τις μισές από τις λειτουργικές βόμβες.

Ο δεύτερος θεωρητικός φυσικός, ικανοποιημένος από τις πράξεις του και πλέον πεπεισμένος για την ορθότητα όσων είπε ο πρώτος θεωρητικός φυσικός, αφήνει τα χαρτιά του στην άκρη και σπεύδει να βοηθήσει τους συναδέλφους του με τη διαδικασία ανίχνευσης. Στο μεταξύ, το αφεντικό έχει απομακρυνθεί αρκετά, για λόγους ασφάλειας.

Το πρόβλημα της κβαντικής φυσικής

Το νοητό πείραμα που παρουσιάστηκε παραπάνω έχει μείνει γνωστό ως *Elitzur-Vaidman bomb tester* και έχει μάλιστα χαρακτηριστεί από το περιοδικό New Scientist ως «ένα από τα επτά θαύματα του κβαντικού κόσμου». Παρότι η εκδοχή που παρουσιάσαμε είναι ένα ιδεατό, εκπαιδευτικό κατασκεύασμα, το βασικό του συμπέρασμα επαληθεύτηκε πειραματικά και δημοσιεύτηκε μόλις 2 χρόνια μετά τη δημοσίευση των Elitzur, Vaidman [6]. Αξίζει να αναφερθεί πως στη συγκεκριμένη πειραματική δουλειά εξετάζεται μια εναλλακτική διάταξη η οποία επιτρέπει την επιτυχή ανίχνευση σχεδόν του 100% των λειτουργικών βομβών.

Για να κατανοήσει κανείς τη σημασία αυτού του πειράματος, ή το λόγο για τον οποίο συχνά αποκαλείται «παράδοξο», πρέπει να λάβει υπ' όψιν πως, διαχρονικά, μια από τις πιο βασικές ειδοποιούς διαφορές μεταξύ κλασικής και κβαντικής φυσικής αφορά στη διαδικασία της μέτρησης. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής θεωρείται πως η διαταραχή του υπό παρατήρηση συστήματος για τους λόγους μιας μέτρησης μπορεί να περιοριστεί οσοδήποτε χρειάζεται. Αντιθέτως, στην κβαντική φυσική η διαδικασία της μέτρησης διαταράσσει αναπόφευκτα το σύστημα. Μάλιστα, στα πλαίσιο της καθιερωμένης ερμηνείας[6] της κβαντικής φυσικής, γίνεται λόγος για «κατάρρευση» της κυματοσυνάρτησης που το περιγράφει, δημιουργώντας έτσι το λεγόμενο *πρόβλημα της μέτρησης*, δηλαδή την αδυναμία περιγραφής αυτής της κατάρρευσης.

Στο συγκεκριμένο νοητό πείραμα υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι να πραγματοποιηθεί μέτρηση: μέσω του ανιχνευτή A_1, μέσω του ανιχνευτή A_2 και μέσω της πυροδότησης της βόμβας. Στις περιπτώσεις όπου η μέτρηση πραγματοποιείται μέσω του ανιχνευτή A_2, κάποιος υπέρμαχος της καθιερωμένης ερμηνείας θα ισχυριζόταν πως η κυματοσυνάρτηση του φωτονίου καταρρέει στην κατάσταση $|\pi\rangle$, ενημερώνοντάς μας για τη θέση του φωτονίου. Ταυτόχρονα, όμως, συμβαίνει κάτι εκπληκτικό: λαμβάνουμε έμμεσα την πληροφορία πως όχι μόνο υπάρχει μια πλήρως λειτουργική βόμβα ανάμεσα στο διαχωριστή Δ_1 και στο κάτοπτρο, αλλά η πληροφορία αυτή προκύπτει χωρίς να αλληλεπιδράσουμε με οποιοδήποτε τρόπο με τη βόμβα, διαταράσσοντας την κατάστασή της. Με άλλα λόγια, στο πείραμα των Elitzur-Vaidman αναδύεται ένα νέο είδος μη-τοπικότητας, στο οποίο είναι εφικτό να λάβουμε πληροφορία για μια περιοχή του χώρου χωρίς την ύπαρξη αλληλεπίδρασης στην περιοχή αυτή, τόσο στο παρόν, όσο και στο παρελθόν[7].

Πώς λύνεται, λοιπόν, αυτό το παράδοξο; Η απάντηση είναι πολύ απλή: το πείραμα των Elitzur-Vaidman δεν οδηγεί σε κάποιο παράδοξο, αρκεί κανείς να το ερμηνεύσει χρησιμοποιώντας εργαλεία διαφορετικά από αυτά που παρέχει η καθιερωμένη ερμηνεία. Ένα τέτοιο σύνολο εργαλείων παρέχει η «Ερμηνεία Πολλαπλών Κόσμων» (Many Worlds Interpretation - MWI) ή αλλιώς «Ερμηνεία

[6] Συνήθως, η καθιερωμένη αυτή ερμηνεία αναφέρεται ως «Ερμηνεία της Κοπεγχάγης», με τον W. Heisenberg να είναι ο εμπνευστής του όρου. Εντούτοις, δεν υπάρχει κάποια ιστορική καταγραφή ενός συνόλου ιδεών οι οποίες να μπορούν να μπουν κάτω από αυτήν την ομπρέλα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στο παρόν άρθρο επιλέγεται η αναφορά στην καθιερωμένη ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής περιφραστικά, χωρίς να της δίνεται κάποιος τίτλος.

[7] Για τους αναγνώστες στους οποίους οι περίφημες ανισότητες Bell και το παράδοξο EPR είναι γνώριμα, δηλαδή για όλους όσους διάβασαν το προηγούμενο άρθρο του παρόντος τεύχους, αναφέρουμε πως η τελευταία προσθήκη στην πρόταση αυτή είναι που καθιστά το πείραμα των Elitzur-Vaidman κάτι ακόμα πιο «αλλόκοτο» από το λεγόμενο «Spooky action at a distance» του A. Einstein: σε καταστάσεις τύπου EPR μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορία για ένα σύστημα μετρώντας κάποιο άλλο, ενδεχομένως απεριόριστα μακριά του, όμως δεν παύει να ισχύει πως η σύζευξη των δύο αυτών συστημάτων, η οποία επιτρέπει την άντληση πληροφορίας, πραγματοποιήθηκε κάποια στιγμή στο παρελθόν τοπικά. Εδώ, δεν υπάρχει πρότερη πληροφορία για τη βόμβα.

του Everett»[8], προς τιμήν του H. Everett που πρώτος την πρότεινε το 1957 [7].

Σε πολύ αδρές γραμμές, μιας και η πλήρης παρουσίασή της αποτελεί στην πραγματικότητα μια σειρά άρθρων από μόνη της, η MWI προβλέπει μια «κυματοσυνάρτηση του σύμπαντος», δηλαδή μια καθολική κυματοσυνάρτηση η οποία εξελίσσεται στο χρόνο ντετερμινιστικά σύμφωνα με την εξίσωση του Schrödinger. Η διαδικασία της μέτρησης μοντελοποιείται ως ένας μοναδιακός μετασχηματισμός (σε αντίθεση με την καθιερωμένη ερμηνεία στην οποία έχουμε το προαναφερθέν πρόβλημα της μέτρησης), αφού το μετρούμενο σύστημα, η μετρητική συσκευή και ο παρατηρητής θεωρούνται όλα κβαντικά συστήματα και εξετάζονται ως τέτοια. Έτσι, η μέτρηση δεν οδηγεί σε κατάρρευση σε μία και μόνο πραγματική κατάσταση, αλλά σε μια «διακλάδωση» σε διαφορετικούς κόσμους[9], με κάθε εφικτό αποτέλεσμα μέτρησης να είναι πραγματικό στον αντίστοιχο κόσμο (και συνολικά όλα τους να είναι πραγματικά στο σύμπαν).

Θα μπορούσε λοιπόν κανείς να πει πως, στα πλαίσια της MWI, το πείραμα των Elitzur-Vaidman δεν περιγράφει τίποτα το συγκλονιστικό. Εφόσον δεν υφίσταται κατάρρευση, και τα τρία πιθανά αποτελέσματα μετρήσεων του φωτονίου είναι πραγματικά, απλώς σε διαφορετικές διακλαδώσεις του ίδιου σύμπαντος. Στη μία διακλάδωση το φωτόνιο απορροφάται από τη λειτουργική βόμβα, η οποία εκρήγνυται, όμως στις άλλες δύο αυτό δε συμβαίνει. Και οι τρεις διακλαδώσεις ανήκουν στο ίδιο «φυσικό» σύμπαν, επομένως η πρόταση «*όταν ο ανιχνευτής A_2 ανιχνεύει το φωτόνιο δεν έχει υπάρξει αλληλεπίδραση με τη βόμβα*» είναι λάθος, αφού όλα τα ενδεχόμενα συμβαίνουν, απλώς όχι στην ίδια διακλάδωση!

Οφείλουμε να τονίσουμε πως το γεγονός ότι προσφέρει κάποιες λύσεις σε ορισμένα παράδοξα κατά την καθιερωμένη ερμηνεία δεν καθιστά τη MWI ως «σωστότερή» της, αφού και για τη MWI υπάρχουν μέχρι και σήμερα ορισμένα άλυτα προβλήματα, τόσο από φυσική, όσο και από φιλοσοφική σκοπιά. Βέβαια, το γιατί η καθιερωμένη ερμηνεία... καθιερώθηκε, και μάλιστα συχνά διδάσκεται ως η μόνη αλήθεια, είναι ένα ερώτημα που πρέπει αρχικά να θέσουμε όλοι στους εαυτούς μας και κατόπιν να διερευνήσουμε ιστορικά, υιοθετώντας μια κριτική σκοπιά [8].

Αν, πάντως, υπάρχει ένα πρόβλημα με την κβαντική φυσική, αυτό δεν είναι ούτε τα παράδοξα των διάφορων ερμηνειών της, ούτε η δυσκολία της να εγκολπώσει τη βαρύτητα. Είναι η θέση πως η κβαντική φυσική είναι για τους φυσικούς ενώ η ερμηνεία της για τους φιλοσόφους, επομένως οι πρώτοι οφείλουν να ασχολούνται μόνο με υπολογισμούς.

Η μόνη κακή ερμηνεία της κβαντικής φυσικής, είναι η «*σκάσε και υπολόγιζε*».

Αναφορές

[1] *Γνωστός τηλεβιβλιοπώλης λανσάρει τώρα και ειδικά νανογιλέκα για καύση λίπους*. https://luben.tv/stream/134266. Ανακτήθηκε στις 14-10-2023.

[2] A. C. Elitzur και L. Vaidman. "Quantum mechanical interaction-free measurements." In: *Foundations of Physics* 23.7 (1993), pp. 987—997. DOI: 10.1007/BF00736012.

[3] Γ. Μελαχροινός. "Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου – Μέρος Τρίτο: Οι τελεστές, οι σχέσεις μετάθεσης και η εξίσωση του Schrödinger." In: *Physics Time* 4.4 (2020), pp. 14–19.

[4] L. Susskind και A. Friedman. *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum*. Penguin Books Limited, 2014. ISBN: 9780141977829.

[5] R. P. Feynman, R. B. Leighton και M. Sands. *The Feynman lectures on physics: The Definitive Edition (Vol. 3)*. Pearson, 2009. ISBN: 9788131721698.

[6] P. Kwiat et al. "Interaction-Free Measurement." In: *Phys. Rev. Lett.* 74.24 (1995), pp. 4763–4766. DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.4763.

[7] B. S. DeWitt και N. Graham. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, 1973.

[8] D. Kaiser, μτφ. Γ. Πανουτσόπουλος και Θ. Χαλικιάς. *Κβαντική Κληρονομιά*. Εκδόσεις Ροπή, 2022.

[8] Αυτό δε σημαίνει πως είναι η μόνη ερμηνεία που λύνει το παράδοξο. Μάλιστα, λύση στο παράδοξο έχει δοθεί και στο πλαίσιο της ερμηνείας της Μπομιανής μηχανικής, η οποία ανήκει μαζί με την MWI και την καθιερωμένη ερμηνεία στις τρεις επικρατέστερες ερμηνείες για την κβαντική φυσική.

[9] Στην καθημερινότητα γίνεται συχνά λόγος για «παράλληλα σύμπαντα», σχεδόν πάντα βέβαια με μια Sci-Fi (στην καλύτερη) ή μυστικιστική (στη χειρότερη) χροιά. Στο παρόν άρθρο, ακολουθώντας την αγγλική ορολογία, επιλέγουμε να δεσμεύσουμε τη λέξη «σύμπαν» για να αναφερθούμε στο «όλον» το οποίο περιγράφεται από μία ντετερμινιστικά εξελισσόμενη κυματοσυνάρτηση και τη λέξη «κόσμοι» για να περιγράψουμε τις διακλαδώσεις αυτού.