

ΤΙ ΕΙΝΑΙ Η ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΚΟΣΜΩΝ;

Χρυσοβαλάντης Στεργίου

0.1. **Εισαγωγή.** Η ερμηνεία αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Hugh Everett III, στη διδακτορική διατριβή του με τίτλο *The theory of the Universal Wave Function* (1957). Η ερμηνεία συνάντησε την αποδοκιμασία του Νιελς Βοηρ και άλλων σημαντικών φυσικών της εποχής, γεγονός που οδήγησε τον Everett να εγκαταλείψει την ακαδημαϊκή καριέρα και να ασχοληθεί με την έρευνα για στρατιωτικούς σκοπούς. Το ενδιαφέρον για την ερμηνεία αναβιώνει το 1973 με τη δημοσίευση μιας συλλογής άρθρων στην οποία περιλαμβάνεται και η διατριβή του Everett με τίτλο, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, η οποία περιλαμβάνει άρθρα των Bryce de Witt (ο ένας εκ των επιμελητών της συλλογής) του John Wheeler και του Leon Cooper. Η θεωρία είναι από τις πιο δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια ενώ η βιβλος της, σύμφωνα με τον Σ. Τραχανά, είναι το βιβλίο του D.Wallace, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory according to the Everett interpretation* (2012).

Τα βασικά χαρακτηριστικά της θεωρίας είναι τα εξής: α) η απόρριψη της αναγωγής του διανύσματος κατάστασης, β) η διατήρηση της εξίσωσης του Schrödinger ως το μοναδικό νόμο που διέπει τη δυναμική εξέλιξη των κβαντικών συστημάτων, γ) η συναγωγή του κανόνα του Born από τις προϋποθέσεις της θεωρίας, δ) η άρνηση της ύπαρξης 'κλασικών' συστημάτων, ε) η δέσμευση σε ισχυρές μεταφυσικές προϋποθέσεις που έχουν να κάνουν με την ύπαρξη πολλών κόσμων σε καθένα εκ των οποίων καθίσταται πραγματική κάποια από τις δυνατότητες που περιγράφονται από μία κβαντική υπέρθεση.

0.2. **Πολλοί κόσμοι και το πρόβλημα της μέτρησης.** Το πρόβλημα της μέτρησης συνίσταται στο γεγονός ότι η διαδικασία που ονομάσαμε αναγωγή του διανύσματος κατάστασης, η οποία πραγματοποιείται κατά την κβαντική μέτρηση, δεν ανάγεται στην εξέλιξη της κατάστασης του σύνθετου συστήματος του αντικείμενου S και του οργάνου μέτρησης M που προβλέπεται από την εξίσωση Schrödinger.

Αν η αρχική κατάσταση του σύνθετου συστήματος είναι

$$\phi_0 = \psi \otimes \chi_0$$

με το σύστημα S αρχικά να βρίσκεται σε μια κατάσταση υπέρθεσης, $\psi = \lambda_1 \psi_1 + \lambda_2 \psi_2$ και το όργανο μέτρησης M να είναι στην κατάσταση χ_0 – «έτοιμο να εκτελέσει μέτρηση» – η τελική κατάσταση που προκύπτει από την εξίσωση Schrödinger θα είναι η υπέρθεση,

$$\phi_\tau = \lambda_1 \psi_1 \otimes \chi_1 + \lambda_2 \psi_2 \otimes \chi_2$$

Η θεωρία των πολλών κόσμων μας λέει ότι η εξίσωση Schrödinger είναι ο μοναδικός δυναμικός νόμος εξέλιξης ο οποίος διέπει τόσο τα μικροσκοπικά αντικείμενα μέτρησης όσο και τα μακροσκοπικά αντικείμενα όπως είναι οι συσκευές μέτρησης. Όταν μια

φυσική διαδικασία – η μέτρηση – οδηγεί σε σύμπλεκτες καταστάσεις με άλλα αντικείμενα, όπως είναι το όργανο μέτρησης, τότε το σύμπαν **διακλαδίζεται** σε τόσα μέρη «κόσμους» όσοι και οι διαφορετικοί όροι που εμφανίζονται στη σύμπλεκτη κατάσταση που προέκυψε από τη μέτρηση. Και ο κάθε όρος πραγματώνεται σε ένα διαφορετικό κόσμο που διαφέρει ως προς τον όρο της υπέρθεσης που πραγματώνεται στον κόσμο αυτόν και μόνο. Έτσι, στην περίπτωση μας, οι δύο όροι που συνιστούν την υπέρθεση ϕ_τ , $\psi_1 \otimes \chi_1$ και $\psi_2 \otimes \chi_2$, είναι εξίσου πραγματικές σε διαφορετικούς κόσμους και στον δικό μας κόσμο (στον οποίο έχουμε εμπειρική πρόσβαση) πραγματώνεται μόνο η κατάσταση που περιγράφεται από ένα εξ αυτών, π.χ.

$$\psi_1 \otimes \chi_1$$

Με αυτόν τον τρόπο εξηγείται η φαινομενολογία της αναγωγής της κβαντικής κατάστασης.

0.3. Γιατί δεν παρατηρείται επανένωση δύο κόσμων; Στην ερμηνεία των πολλών κόσμων παρατηρούνται μόνο διακλαδώσεις στις οποίες πραγματώνονται οι όροι της υπέρθεσης. Γιατί δεν μπορεί να ακολουθηθεί η αντίστροφη πορεία δεδομένου ότι ο μοναδικός εν ισχύ δυναμικός νόμος, η εξίσωση Schrödinger είναι αντιστρεπτή; Για ποιον λόγο δεν μπορούν διαφορετικοί κόσμοι στους οποίους πραγματώνονται καταστάσεις του συστήματος - συσκευής οι οποίοι αντιστοιχούν σε διαφορετικούς όρους της κατάστασης υπέρθεσης δεν επανενώνονται ώστε να σχηματίσουν μια νέα υπέρθεση;

Για να απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα θα πρέπει να εξηγήσουμε την έννοια της **αποσυμφώνησης**:

Αν ένα κβαντικό βρίσκεται σε μία κατάσταση υπέρθεσης,

$$\psi = \lambda_1 \psi_1 + \lambda_2 \psi_2$$

και θέλουμε να υπολογίσουμε την αναμενόμενη τιμή ενός παρατηρήσιμου A , για το οποίο τα διανύσματα ψ_1, ψ_2 δεν είναι ιδιοδιανύσματα, έχουμε ότι

$$\langle A \rangle = |\lambda_1|^2 A_{11} + |\lambda_2|^2 A_{22} + \lambda_1^* \lambda_2 A_{12} + \lambda_1 \lambda_2^* A_{21}$$

όπου $A_{ij} = (\psi_i, A\psi_j)$ για $i, j = 1, 2$. Οι δύο πρώτοι όροι του παραπάνω αθροίσματος εκφράζουν τις αναμενόμενες τιμές του A στις καταστάσεις ψ_1 και ψ_2 . Επίσης, αν έλειπαν οι δύο τελευταίοι όροι του αθροίσματος, τότε η αναμενόμενη τιμή του $\langle A \rangle$ θα ήταν ίδια με εκείνη της κατάστασης μίγματος

$$\rho = |\lambda_1|^2 P_{\psi_1} + |\lambda_2|^2 P_{\psi_2}$$

$$\langle A \rangle = \text{tr}(\rho A)$$

όπου P_{ψ_1}, P_{ψ_2} οι προβολικοί τελεστές στις καταστάσεις ψ_1, ψ_2 αντίστοιχα.

Οι τελευταίοι όροι, $\lambda_1^* \lambda_2 A_{12}$ και $\lambda_1 \lambda_2^* A_{21}$ καλούνται **όροι συμβολής** και διακρίνουν ανάμεσα σε μια κλασική πιθανοκρατική θεωρία και την κβαντική μηχανική, στις υπερθέσεις και τα μίγματα.

Η αποσυμφώνηση, εξαφανίζει τους όρους συμβολής μέσω της «τυχαιοποίησης» της διαφοράς φάσης δ των όρων της υπέρθεσης η οποία οφείλεται σε εξωτερικές επιδράσεις.

Δηλαδή, αν $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$ με $\lambda_1 = |\lambda| e^{i\varphi_1}$ και $\lambda_2 = |\lambda| e^{i\varphi_2}$ και λόγω τυχαίων περιβαλλοντικών επιδράσεων όλες οι τιμές δ στο διάστημα $0 < \delta < 2\pi$ είναι ισοπίθανες, τότε η μέση τιμή επί των δυνατών τιμών του δ , όρων της μορφής $\lambda_1^* \lambda_2 = |\lambda|^2 e^{i\delta}$ είναι μηδέν.

Όταν λαμβάνει χώρα η διακλάδωση λόγω της σύζευξης των δύο κβαντικών συστημάτων η οποία περιγράφεται από μία κατάσταση κβαντικής συμπλοκής πραγματοποιείται αποσυμφώνηση η οποία ακυρώνει τους όρους συμβολής. Η αποσυμφώνηση πραγματοποιείται λόγω της αλληλεπίδρασης της μετρητικής διάταξης με το περιβάλλον της. Και επειδή όταν μιλάμε για μετρητικές συσκευές μιλάμε για κβαντικά **μακροσκοπικά** αντικείμενα, με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, τα οποία επηρεάζονται έντονα από τον περιβαλλοντικό θόρυβο, η αποσυμφώνηση λαμβάνει χώρα σε αμελητέο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο αναιρείται η δυνατότητα των διακλαδούμενων κόσμων να συμβάλλουν ξανά και να συνθέσουν την αρχική κατάσταση.

Επομένως, για να έχουμε διακλάδωση δεν αρκεί το σύστημα αντικείμενο μέτρησης – μετρητικό όργανο να είναι σε κατάσταση υπέρθεσης αλλά **επιπλέον να λαμβάνει χώρα και αποσυμφώνηση**. Αυτή είναι η θέση του Wallace.

0.4. Πολλοί κόσμοι και ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντικής μηχανικής. Στη φυσική, κατά βάση η πιθανότητα είτε (α) εκφράζει την άγνοιά μας για την κατάσταση του συστήματος, είτε (β) εκφράζει τον μη μονοσήμαντο καθορισμό της κατάστασης του συστήματος σε κάποια χρονική στιγμή με δεδομένη κάποια αρχική κατάσταση του συστήματος (μη ντετερμινιστική χρονική εξέλιξη).

Η έννοια της πιθανότητας δεν μπορεί να γίνει κατανοητή με κανέναν από τους δύο τρόπους στο πλαίσιο της ερμηνείας των πολλών κόσμων. Αφενός η εξέλιξη της κβαντικής κατάστασης σύμφωνα με την εξίσωση Schrödinger είναι ντετερμινιστική και καθορίζει μονοσήμαντα την τελική κατάσταση του συστήματος δεδομένης κάποιας αρχικής κατάστασης. Αφετέρου, σημειώστε ότι στην ερμηνεία της άγνοιας οι πιθανότητες «βαθμολογούν» διαφορετικές εναλλακτικές δυνατότητες. Όμως στην ερμηνεία του πολλών κόσμων δεν μπορούμε να μιλήσουμε για εναλλακτικές δυνατότητες αφού όλοι οι όροι μιας υπέρθεσης αποτελούν πραγματωμένες δυνατότητες σε διαφορετικούς κόσμους – κλάδους.

Σε αυτή την περίπτωση, ποια θα ήταν η σημασία του κανόνα του Born;

Επιπλέον, αν οι προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής είναι πιθανοκρατικές και η έννοια της πιθανότητας δεν έχει θέση στην ερμηνεία των πολλών κόσμων, έπεται ότι μια τέτοια ερμηνεία έρχεται σε σύγκρουση με την εμπειρική επάρκεια της κβαντικής μηχανικής.

Υπάρχει, όμως, και ένα δεύτερο πρόβλημα, το οποίο έπεται της απόδοσης σημασίας στην έννοια «πιθανότητα» στην ερμηνεία των πολλών κόσμων: πώς μπορεί να συναχθεί ο κανόνας του Born από θεμελιωδέστερες υποθέσεις;

0.5. Πολλοί κόσμοι και καλά επικυρωμένες θεωρίες: η αρχή διατήρησης της ενέργειας και ανισότητα των κόσμων. Αν τα παράλληλα σύμπαντα είναι πραγματικά, τότε η δημιουργία νέων κόσμων δεν παραβιάζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας; Η απάντηση είναι ότι όχι, εφόσον θεωρήσουμε ότι η ολική ενέργεια μετά τη διακλάδωση είναι το σταθμισμένο άθροισμα των ενεργειών του κάθε κλάδου με συντελεστές βάρους το τετράγωνο των συντελεστών των συνιστωσών της υπέρθεσης. Βεβαίως, αν δεν αποδοθεί πιθανοκρατική ερμηνεία στη θεωρία, δεν μπορεί να ερμηνευθεί με συνέπεια η σημασία των συντελεστών βάρους.