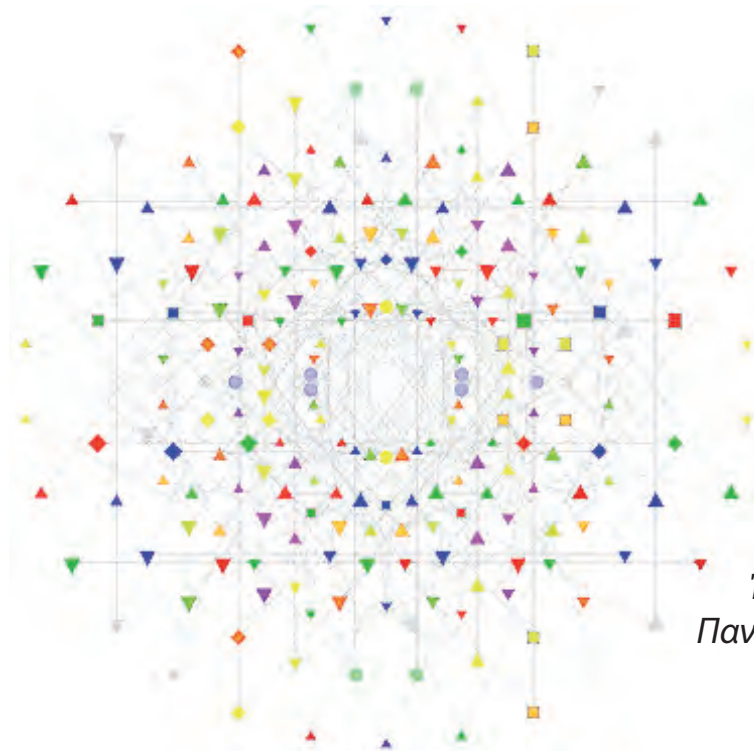


Κβαντική σύμπλεξη

Η νέα θεμελιώδης έννοια της φυσικής



Στέφανος Τραχανάς
Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
www.cup.gr



“ Ίσως η πιο εντυπωσιακή απ’ αυτές τις εξελίξεις βρίσκεται στη μελέτη της **κβαντικής σύμπλεξης**. Η σύμπλεξη είναι ένας κατ’ εξοχήν κβαντικός μηχανισμός που παίζει ρόλο-κλειδί στις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές της **κβαντικής πληροφορικής** και των **κβαντικών υπολογιστών**. Η σύμπλεξη είναι κάτι **όπως ο σίδηρος για την εποχή του χαλκού**. Στα τελευταία χρόνια έχει γίνει μια τεράστια προσπάθεια να κατανοηθούν καλύτερα οι ιδιότητες της σύμπλεξης, που θεωρείται πλέον ως ένας **θεμελιώδης φυσικός πόρος** (natural resource) συγκρίσιμης σπουδαιότητας με την **ενέργεια** ή την **εντροπία** ενός φυσικού συστήματος. ”

M. NIELSEN - I. CHUANG
Quantum Computation and Quantum Information



ΜΕΡΟΣ Α: Τί είναι η κβαντική σύμπλεξη; Μια απλή έννοια και οι αλλόκοτες συνέπειές της.

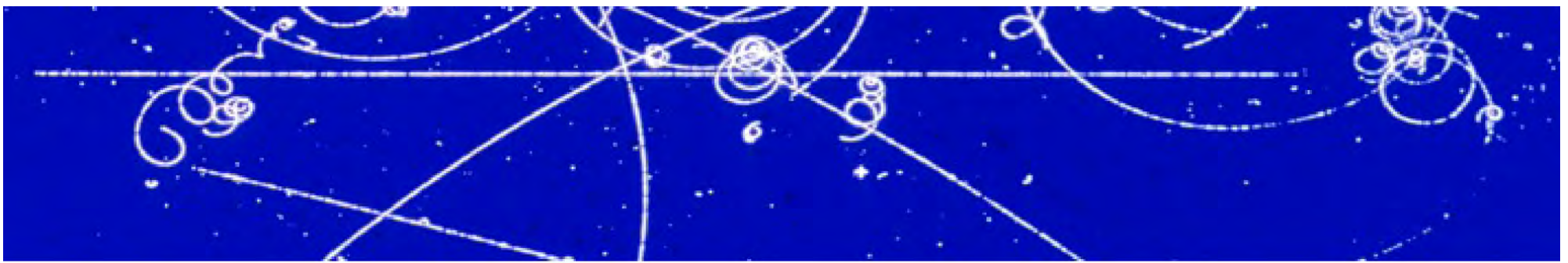
ΜΕΡΟΣ Β: Η κβαντική σύμπλεξη εν δράσει.

B1: Τελικά παίζει ζάρια ο Θεός; Πειραματικός έλεγχος ενός θεολογικού ερωτήματος.

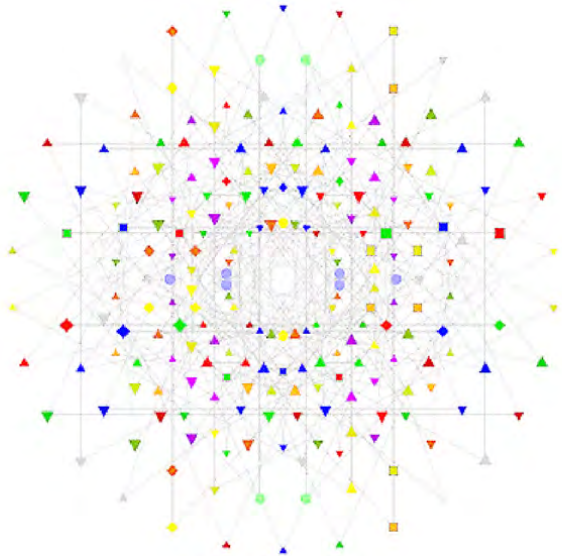
B2: Κβαντικοί υπολογιστές, κβαντική τηλεμεταφορά, κβαντική κρυπτογραφία κ.λπ. Η δεύτερη κβαντική επανάσταση;

[όχι
σε τούτη
την ομιλία...]

ΕΠΙΛΟΓΟΣ: Διδάγματα από μια ιστορία



Μ Ε Ρ Ο Σ Α



Τί είναι η κβαντική σύμπλεξη;



ΟΡΙΣΜΟΣ: Λέμε ότι δύο κβαντικά σωματίδια 1 και 2 βρίσκονται σε μια **κατάσταση σύμπλεξης** ή, ισοδύναμα, σε μια **σύμπλεκτη κατάσταση**, αν η κυματοσυνάρτησή τους **δεν έχει τη μορφή γινομένου**

$$\Psi = \psi_1 \psi_2 \quad (\text{A})$$

αλλά **είναι ένας γραμμικός συνδυασμός τέτοιων γινομένων.**

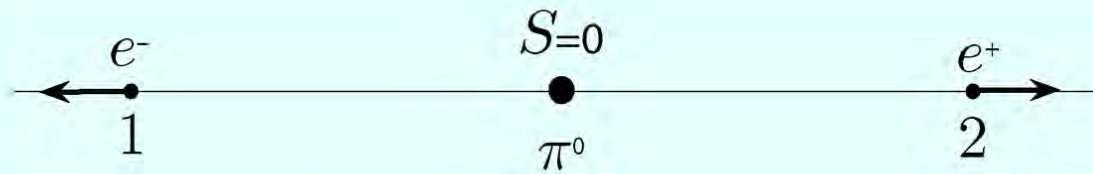
Δηλαδή

$$\Psi = c_1 \psi_1 \psi_2 + c_2 \phi_1 \phi_2 \quad (\text{B})$$

όπου ψ_1, ψ_2 κυματοσυναρτήσεις που αφορούν το σωματίδιο 1 και ϕ_1, ϕ_2 κυματοσυναρτήσεις του σωματιδίου 2.



Ζεύγη σωματιδίων σε κατάσταση σύμπλεξης προκύπτουν φυσιολογικά κατά τη διάσπαση ενός αρχικού σωματιδίου σε δύο άλλα, των οποίων το ολικό σπιν οφείλει να είναι –λόγω διατήρησης της στροφορμής– ίσο με το σπιν του αρχικού. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το ακόλουθο.



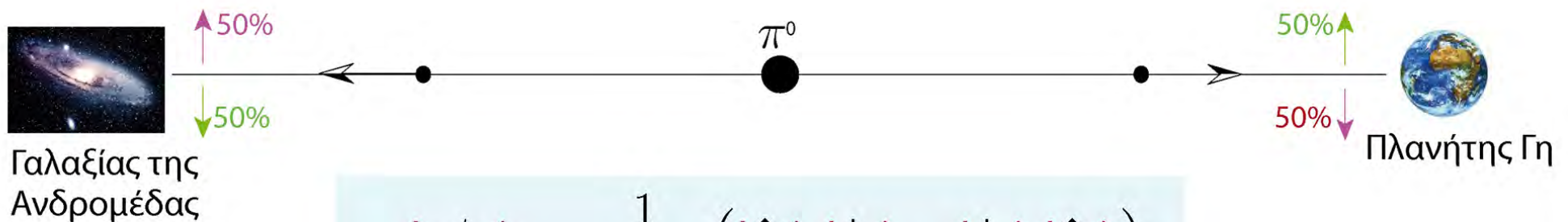
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)$$

Η κατάσταση του ζεύγους e^-e^+ που προκύπτει από τη διάσπαση

Επειδή ο μηδενισμός του ολικού σπιν μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους –το σωματίδιο #1 να έχει «σπιν πάνω» και το #2 «σπιν κάτω» ή το #1 «σπιν κάτω» και το #2 «σπιν πάνω»– η κατάσταση $|\psi\rangle$ του ζεύγους θα είναι μια επαλληλία αυτών των «τρόπων» –δηλαδή μια επαλληλία των σχετικών γινομένων $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ και $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$ – κι επομένως μια **σύμπλεκτη κατάσταση**.

« Αγκαλιασμένοι για πάντα »

Μια αλλόκοτη συνέπεια της κβαντικής σύμπλεξης



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)$$

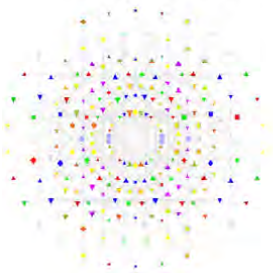
Πριν από μια μέτρηση, το σπιν του κάθε σωματιδίου μπορεί να είναι πάνω ή κάτω με ίση πιθανότητα. Αν όμως το σπιν του ενός από τα δύο σωματίδια –π.χ. αυτού που φτάνει στη Γη– μετρηθεί και βρεθεί π.χ. «πάνω», τότε το «ταίρι» του στον γαλαξία της Ανδρομέδας θα υποχρεωθεί να πραγματοποιήσει τον άλλο από τους δύο δυνατούς προσανατολισμούς του, δηλαδή το «σπιν κάτω». **Οι τύχες των δύο σωματιδίων είναι απολύτως αλληλένδετες όσο μακριά κι αν βρίσκονται.**

...και κάτι ακόμα πιο «τρελό»

Δεδομένου ότι μια κατάσταση ολικού σπιν $S = 0$ είναι σφαιρικά συμμετρική –δηλαδή δεν έχει προτιμώμενη διεύθυνση– θα είναι

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_z\rangle|\downarrow_z\rangle - |\downarrow_z\rangle|\uparrow_z\rangle) \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_u\rangle|\downarrow_u\rangle - |\downarrow_u\rangle|\uparrow_u\rangle)$$

όπου u μια τυχούσα κατεύθυνση. Επομένως, σε οποιαδήποτε διεύθυνση κι αν μετρηθεί το σπιν του «γήινου σωματιδίου», το ταίρι του στην Ανδρομέδα θα υποχρεωθεί επίσης να ευθυγραμμιστεί με αυτή τη διεύθυνση, και βέβαια αντιπαράλληλα προς το πρώτο. Με άλλα λόγια, είναι η δική μας αυθαίρετη απόφαση να στρέψουμε τον άξονα μέτρησης προς τη μία ή την άλλη διεύθυνση, που υποχρέωσε το «άλλο σωματίδιο» να προσανατολιστεί ανάλογα.



Αυτά είναι όντως «τρελά πράγματα».

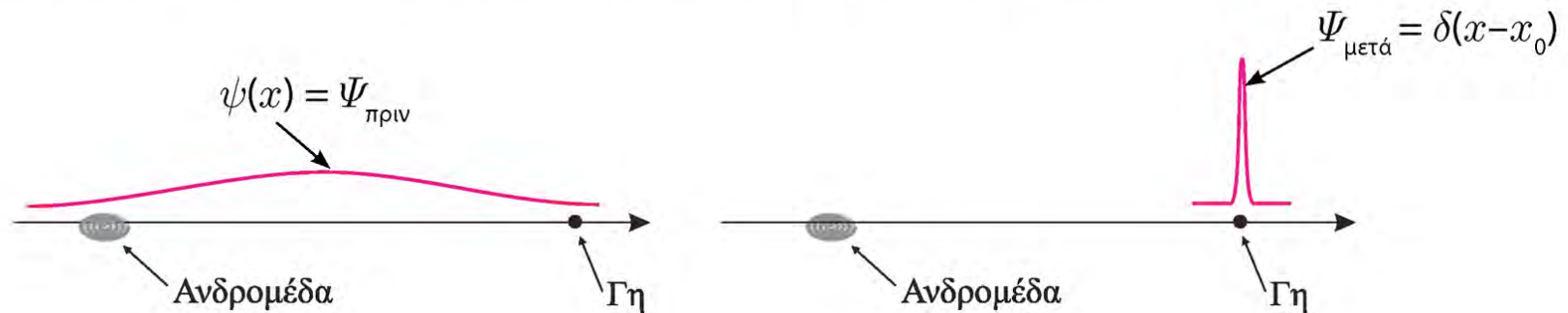


Τόσο «τρελά» που απαιτείται επειγόντως
–για να μην καταλήξουμε στον ...ψυχίατρο(!)–
να επιστρέψουμε στα θεμέλια της θεωρίας
για να δούμε πού είναι η «ρίζα» αυτής της «τρέλας»
και να επιχειρήσουμε να την «καταλάβουμε»,
ή έστω, να συμφιλιωθούμε κάπως μαζί της.

Πάμε λοιπόν στη «ρίζα του κακού»,
που δεν είναι άλλη από το **αξίωμα της μέτρησης**.

Στην «καρδιά του προβλήματος»

ΤΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΑΞΙΩΜΑ: Η «κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης» κατά τη μέτρηση, και πώς να συμφιλιωθούμε μαζί της: Ένα παράδειγμα:



Ως αποτέλεσμα μιας μέτρησης θέσης που εντόπισε το σωματίδιο πάνω στη Γη, η κυματοσυνάρτησή του «καταρρέει» στην απόλυτα εντοπισμένη μορφή μιας συνάρτησης δέλτα (ή σχεδόν) και «εξαφανίζεται» **ακαριαία** από παντού αλλού. Είναι ως εάν η μέτρηση να «ρούφηξε» την κυματοσυνάρτηση για να την συγκεντρώσει **στιγμιαία** σ' ένα σημείο. Και είναι σαφές ότι μια τέτοια στιγμιαία κατάρρευση έχει εμφανώς **μη τοπικό χαρακτήρα**, δηλαδή προϋποθέτει κάτι σαν «**δράση εξ αποστάσεως**».



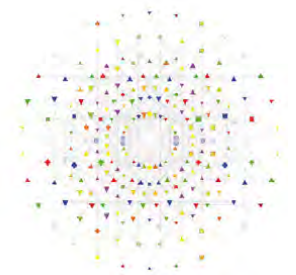
Ένα φάντασμα από τα παλιά: Δράση εξ αποστάσεως;

Δεν χρειάζεται λοιπόν να πάμε στα σύμπλεκτα σωματίδια για να διαπιστώσουμε ότι όντως κάτι τρελό συμβαίνει στο βασίλειο της Κβαντικής Μηχανικής. Και το «κακό» –με τη μορφή της **δράσης εξ αποστάσεως**– φαίνεται να είναι εγκατεστημένο στον ίδιο τον πυρήνα των θεμελιωδών παραδοχών της: Στο μετρητικό αξίωμα.

Ο Αϊνστάιν είχε δίκιο να ανατριχιάζει με την ιδέα ότι μια τέτοια «τρελή θεωρία» –τόσο «ξένη» προς το σχετικιστικό πλαίσιο– θα μπορούσε να είναι πραγματικά θεμελιώδης.

Εί ναι ό μ ω ς έ τ σ ι ;

**Υπάρχει όντως «δράση εξ αποστάσεως»
στον εννοιολογικό πυρήνα της κβαντικής θεωρίας;**





Απάντηση: Ο Χ Ι

Η τουλάχιστον **όχι τέτοια** που να παραβιάζει το σχετικιστικό αξίωμα ότι δεν είναι δυνατή η μεταφορά ύλης, ενέργειας ή πληροφορίας με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός.

Όμως τίποτε τέτοιο δεν συμβαίνει στην περίπτωση της κβαντικής μέτρησης. Διότι **η κυματοσυνάρτηση είναι μια καθαρά μαθηματική οντότητα** –και όχι ένα φυσικό κύμα με ενέργεια και ορμή κατανεμημένη στον χώρο–, οπότε η στιγμιαία κατάρρευσή της δεν συνεπάγεται αντίστοιχη ακαριαία μετακίνηση ενέργειας και ορμής, και επομένως δεν παραβιάζει τη θεωρία της σχετικότητας.

Με τη μέτρηση απλώς «αποσύρονται» από τον υπόλοιπο χώρο τα ενδεχόμενα να εμφανιστεί το σωματίδιο οπουδήποτε αλλού.



Ιδωμένη από αυτή τη σκοπιά,
η εξ αποστάσεως «επίδραση» που ασκεί η μέτρηση του ενός
πάνω στο άλλο σωματίδιο ενός σύμπλεκτου ζεύγους
δεν φαίνεται πια τόσο μυστηριώδης.

Η παρατήρηση του ενός δεν επέδρασε φυσικά
πάνω στο σπιν του άλλου –υποχρεώνοντάς το να
αντιπαραλληλιστεί μαζί του– αλλά απλώς εξαφάνισε
το ένα από τα δύο ενδεχόμενα που υπήρχαν πριν τη μέτρηση
(σπιν \uparrow ή \downarrow) και το οποίο δεν είναι πλέον συμβιβαστό
με το αποτέλεσμα που προέκυψε από αυτήν.

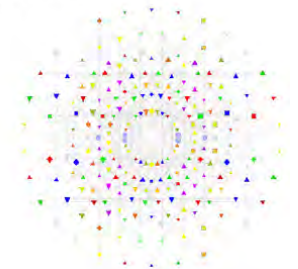


... ή, πιο τεχνικά,

$$\underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)}_{\text{Κατάσταση ΠΡΙΝ τη μέτρηση}} \xrightarrow[\text{που έδωσε «σπιν πάνω»}]{\text{μέτρηση του σωμα. 1}} \underbrace{|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle}_{\text{Κατάσταση ΜΕΤΑ τη μέτρηση}}$$

Ως αποτέλεσμα μιας μέτρησης του σπιν του σωματιδίου #1 που έδωσε «σπιν πάνω», η κατάσταση του ζεύγους καταρρέει στη μορφή γινομένου $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ υποχρεώνοντας έτσι και το σωματίδιο #2 να δεσμευθεί στην κατάσταση «σπιν κάτω». Η μέτρηση του ενός σωματιδίου συμπαρασύρει και το άλλο στην «συμπληρωματική» τιμή του σπιν. Το είπαμε και πριν,

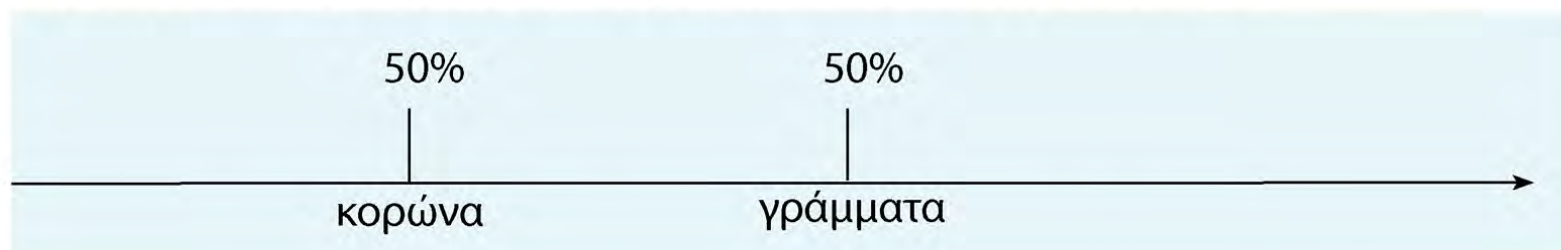
«αγκαλιασμένοι για πάντα»...



Κι ένα κλασικό παράδειγμα

για να το καταλάβουμε λίγο καλύτερα

Πριν ανοίξω τα μάτια μου για να δω το κέρμα που έχω ρίξει στο τραπέζι, το ιστόγραμμα πιθανότητας είναι το



Όμως, μόλις τα ανοίξω και δω, π.χ., ότι το κέρμα είναι ΚΟΡΩΝΑ, τότε το ιστόγραμμα θα καταρρεύσει ακαριαία στη μορφή



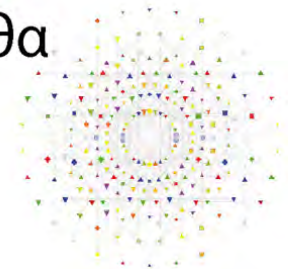
Σε ένα πρώτο κοίταγμα (χωρίς ...βάθος) η κατάρρευση της κβαντικής κυματοσυνάρτησης δεν είναι τίποτε περισσότερο απ' αυτό.



κι ένα παράγωγο ερώτημα

Μήπως είναι χρήσιμο –και ίσως πιο διαφωτιστικό για τη βαθύτερη φύση των πραγμάτων– να βλέπουμε την κυματοσυνάρτηση ως ένα «**κύμα πληροφορίας**» ή –γιατί όχι;– ένα «**κύμα γνώσης**» που αντιπροσωπεύει εκείνο που μπορούμε να γνωρίζουμε μία δεδομένη στιγμή για το θεωρούμενο κβαντικό σύστημα;

Μήπως αυτός είναι ο λόγος που πολλοί ισχυρίζονται ότι, στη βαθύτερή της έκφανση, **η πληροφορία είναι καθαρά κβαντική**; Και ότι, λόγω αυτού, η κβαντική πληροφορική θα είναι το αναπόδραστο μέλλον μας;



Παλεύοντας με τις λέξεις Σύμπλεξη, εναγκαλισμός, διαπλοκή ή διεμπλοκή;

Μια ματιά στα βασικά λεξικά:

α) Liddell- Scott, Μέγα Λεξικό της Ελληνικής Γλώσσας:

συμπλέκω, πλέκω ομού

σύμπλεκτος, ο ομού συμπλεκόμενος

σύμπλεξις, η συμπλοκή, η ένωσις

β) Δ. Δημητράκος, Μέγα Λεξικόν όλης της Ελληνικής Γλώσσης

συμπλέκω, πλέκω ομού, συνδέω, συνάπτω τι μετ' άλλου διά πλοκής

σύμπλεκτος, περιπεπλεγμένος μετ' άλλου, μαζί μπερδεμένος

σύμπλεξις, συμπλοκή

γ) Πάπυρος - Λαρούς-Μπριτάννικα, Ερμηνευτικό και ετυμολογικό λεξικό της ελληνικής γλώσσας

συμπλέκω, πλέκω κάτι μαζί με άλλο, σχηματίζω σύμπλεγμα, συνδέω

σύμπλεκτος, πλεγμένος, πλεκτός, αυτός που είναι περιπεπλεγμένος, μπερδεμένος μαζί με άλλον

σύμπλεξη, η ενέργεια και το αποτέλεσμα του συμπλέκω

δ) Γ. Μπαμπινιώτης, Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας

συμπλέκω, πλέκω μαζί δύο ή περισσότερα πράγματα, δημιουργώ σύμπλεγμα

σύμπλεκτος, σύμπλεξη: Δεν υπάρχουν (*)

(*) *Ηθικόν δίδαγμα*: Ας κοιτάζουμε λίγο και τα παλαιότερα λεξικά!



...και μια σύγκριση με εναλλακτικούς όρους

Αγγλικός όρος	Ελληνική απόδοση			
	σύμπλεξη	εναγκαλισμός	διαπλοκή	διεμπλοκή
quantum entanglement	κβαντική σύμπλεξη	κβαντικός εναγκαλισμός	κβαντική διαπλοκή	κβαντική διεμπλοκή
entangled states	σύμπλοκες καταστάσεις	εναγκαλισμένες καταστάσεις	διαπλεκόμενες καταστάσεις	διεμπλεκόμενες καταστάσεις
disentanglement	αποσύμπλεξη	;	;	;
non entangled states	ασύμπλεκτες καταστάσεις	μη εναγκαλισμένες καταστάσεις	μη διαπλεκόμενες καταστάσεις	μη διεμπλεκόμενες καταστάσεις

Κατά τη γνώμη μου, ο όρος **σύμπλεξη** είναι εμφανώς καταλληλότερος όχι μόνο για τη **νοηματική του διαύγεια** –σκεφτείτε τον συμπλέκτη του αυτοκινήτου σας– και την ικανότητά του να αποδώσει και όλους τους παράγωγους όρους (αποσύμπλεξη, ασύμπλεκτες καταστάσεις κ.λπ.), αλλά και το γεγονός ότι μπορεί να εκφράσει έναν αφηρημένο μηχανισμό –χωρίς ανθρωποκεντρικό περιεχόμενο– που προσδίδει μια πάγια ιδιότητα στις φερώνυμες καταστάσεις.

Αν συμφωνούμε, προτείνω να τον υιοθετήσουμε όλοι.





Μ Ε Ρ Ο Σ Β

Η κβαντική σύμπλεξη εν δράσει

B1.

Τελικά παίζει ζάρια ο Θεός;

Ο θεμελιώδης ρόλος της σύμπλεξης
στην πειραματική διερεύνηση της φύσης των κβαντικών πιθανοτήτων

B2.

Κβαντικοί υπολογιστές, κβαντική τηλεμεταφορά, κβαντική κρυπτογραφία, κ.λπ.:

Η δεύτερη κβαντική επανάσταση;



Το βασικό ερώτημα:

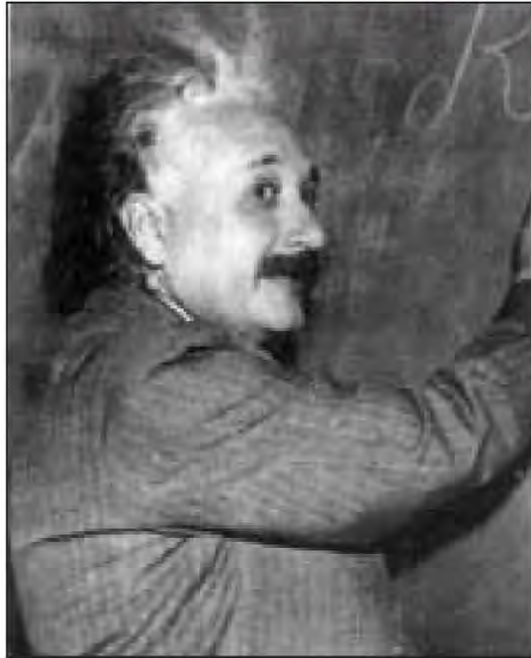
Είναι οι κβαντομηχανικές πιθανότητες **θεμελιώδεις**
ή **αποτέλεσμα ατελούς γνώσης;**

ή ισοδύναμα

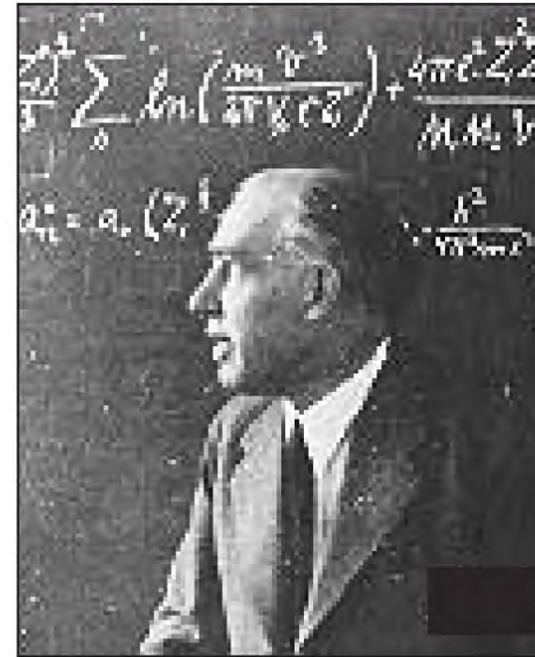
Είναι η κβαντομηχανική μια πλήρης θεωρία
ή εκκρεμεί η συμπλήρωσή της
με ένα βαθύτερο αιτιοκρατικό υπόστρωμα;

*[Όπως π.χ. η «συμπλήρωση» της κλασικής θερμοδυναμικής
με την κινητική θεωρία και τη στατιστική μηχανική;]*

...και οι απαντήσεις των δύο πρωταγωνιστών



Ο θεός δεν παίζει
ζάρια
με τον κόσμο



Αλβέρτο,
δεν χρειάζεται
να πεις στον θεό
τι να κάνει

(Ανεπιβεβαίωτη συνομιλία...)

Δηλαδή...



1 • Η απάντηση του Einstein

Οι κβαντομηχανικές πιθανότητες δεν είναι θεμελιώδεις. Είναι αποτέλεσμα ατελούς γνώσης.

Η κβαντομηχανική –παρά τις αναμφισβήτητες επιτυχίες της– δεν πρέπει να θεωρηθεί ως μια τελική θεωρία. Θα πρέπει **να συμπληρωθεί**, πιθανόν με την εισαγωγή κάποιων **κρυμμένων μεταβλητών**, των οποίων η γνώση θα μας επιτρέψει να προβλέπουμε χωρίς απροσδιοριστία την έκβαση κάθε κβαντομηχανικού πειράματος. Σε ένα βαθύτερο «μετα-κβαντικό» επίπεδο, ο κόσμος θα αποδειχθεί ξανά ντετερμινιστικός.



2 • Η απάντηση του Bohr (Η Σχολή της Κοπεγχάγης)

Οι κβαντομηχανικές πιθανότητες δεν είναι αποτέλεσμα ατελούς γνώσης. Είναι θεμελιώδεις. **Η φύση είναι εγγενώς πιθανοκρατική.**





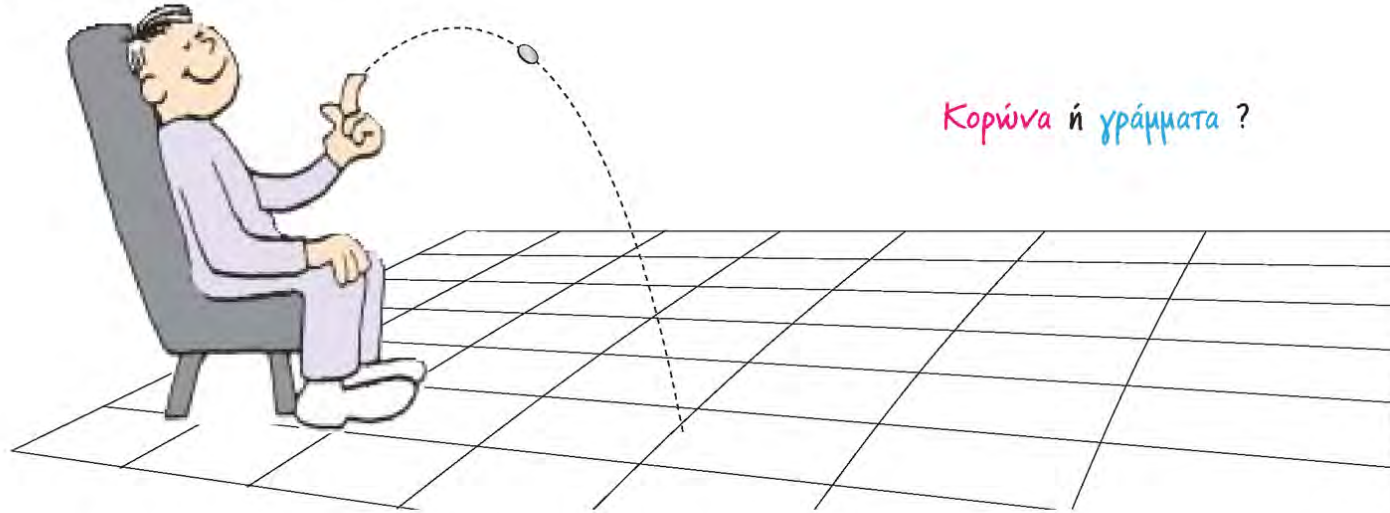
Μια αναγκαία διάκριση

*Κλασικές
έναντι
κβαντικών
πιθανοτήτων*

Δύο ενδεικτικά παραδείγματα

1. Κλασικές πιθανότητες

Η ρίψη ενός κέρματος



Εδώ η αδυναμία πρόβλεψης δεν είναι θεμελιώδης, αλλά αποτέλεσμα ατελούς γνώσης των παραγόντων που επηρεάζουν την κίνηση του κέρματος (τρόπος ρίψης, διακυμάνσεις της πυκνότητας του αέρα, ανωμαλίες του εδάφους, κ.λπ....). Αν όλοι αυτοί οι παράγοντες ήταν γνωστοί και διαθέταμε και ένα υπερυπολογιστή ελεγχόμενης ακρίβειας για να λύσει τις κλασικές εξισώσεις κίνησης, τότε η έκβαση κάθε συγκεκριμένης ρίψης του κέρματος θα ήταν απολύτως προβλέψιμη.

Οι κλασικές πιθανότητες

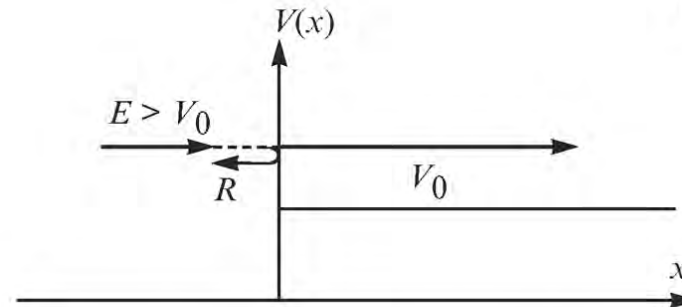
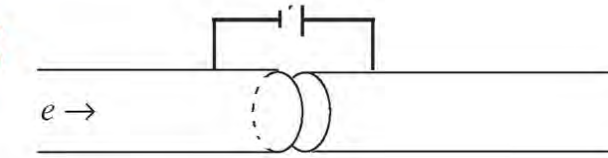
είναι πάντοτε

αποτέλεσμα ατελούς γνώσης.



2. Κβαντικές πιθανότητες

Ένα (παραμελημένο)
«σχολικό» παράδειγμα:
Πρόσπτωση σωματιδίου
σε σκαλοπάτι δυναμικού



$$R = \left(\frac{\sqrt{E} - \sqrt{E - V_0}}{\sqrt{E} + \sqrt{E - V_0}} \right)^2$$

Το προφανές ερώτημα:

Γιατί το σωματίδιο άλλοτε «περνάει» και άλλοτε ανακλάται, ενώ οι συνθήκες της κίνησής του είναι πάντοτε οι ίδιες και απόλυτα γνωστές και καθορισμένες; Πού οφείλεται ότι το σωματίδιο άλλοτε περνάει και άλλοτε δεν περνάει;

...και η απάντηση της Κβαντομηχανικής:

...Πουθενά: Είναι στη φύση των πραγμάτων. Το τι θα κάνει το σωματίδιο σε κάθε συγκεκριμένο πείραμα –αν θα ανακλαστεί ή θα περάσει– δεν το ξέρει, κι ούτε πρόκειται να το μάθει, κανείς!

Πρόκειται για **θεμελιώδη απροσδιοριστία**.

Τελικά ποιός έχει δίκιο; Ο Einstein ή ο Bohr;

Επεισόδια μιας γιγαντομαχίας

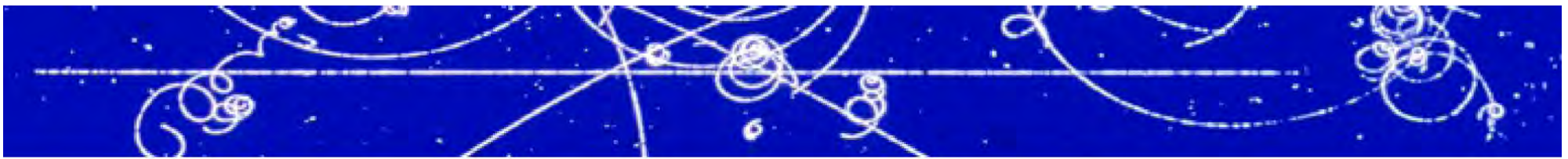
Επεισόδιο 1 • 1927: Το Συνέδριο του Solvay: **Ο Bohr επικρατεί κατά κράτος** και η Σχολή της Κοπεγχάγης γίνεται το επίσημο σύνταγμα της Φυσικής.

Επεισόδιο 2 • 1935: Το Παράδοξο EPR (Einstein-Podolsky-Rosen): **Ο Einstein παίρνει τη ρεβάνς.** Αντιλαμβάνεται ότι οι κβαντικές καταστάσεις που θέτουν υπό ακραία δοκιμασία την κατά Bohr ερμηνεία της κβαντομηχανικής είναι οι σύμπλεκτες καταστάσεις (η ονομασία θα δοθεί πολύ αργότερα) και χρησιμοποιεί μία από αυτές –τη γνωστή μας–

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

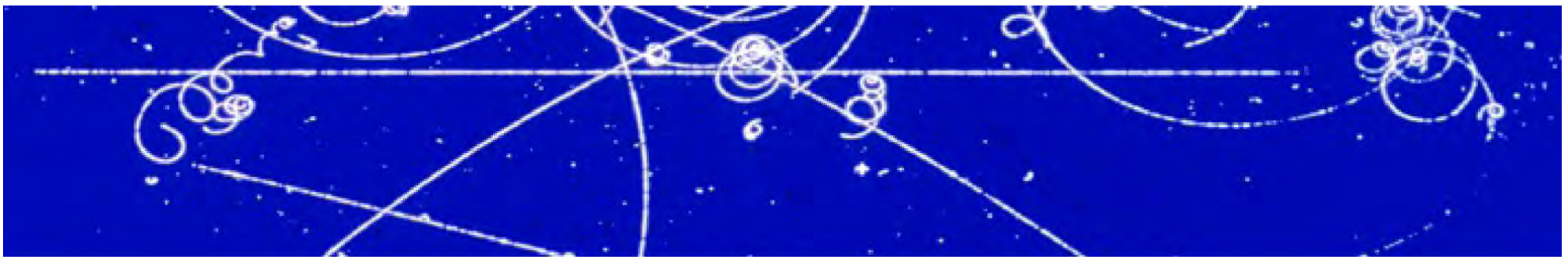
■ Η κατάσταση EPR: Η πιο διάσημη σύμπλεκτη κατάσταση στην ιστορία.

για να αναδείξει τις θεμελιώδεις (όπως πίστευε) αδυναμίες της κβαντομηχανικής και να δικαιολογήσει την πεποίθησή του ότι τελικά η κβαντομηχανική θα αντικατασταθεί από μια κλασικού τύπου αιτιοκρατική θεωρία με την εισαγωγή κάποιων **κρυμμένων μεταβλητών**, των οποίων η γνώση θα μας επιτρέψει να προβλέπουμε με ακρίβεια την έκβαση κάθε κβαντομηχανικού πειράματος. **Ο Θεός δεν μπορεί να παίζει ζάρια με τον κόσμο.**



Όμως: Είναι η διαφωνία Einstein - Bohr **πειραματικά ελέγξιμη** ή πρόκειται για μια **διαφωνία φιλοσοφικού**, ή ακόμα και **θεολογικού χαρακτήρα**, όπου η συζήτηση θα μπορεί να συνεχίζεται επ' άπειρον και όλοι να έχουν δίκιο;

Κι αν έτσι είναι, τότε μήπως είχαν δίκιο εκείνοι οι φυσικοί –δηλαδή **περίπου όλοι**– που **έστρεψαν την πλάτη στο πρόβλημα** και **στρώθηκαν στη δουλειά** εφαρμόζοντας την κβαντομηχανική σε μια διαρκώς διευρυνόμενη ποικιλία προβλημάτων με θαυμαστό αποτέλεσμα –μεταξύ άλλων– μια τεχνολογική επανάσταση χωρίς προηγούμενο στην ανθρώπινη ιστορία; Οι φυσικοί είναι πρακτικοί άνθρωποι, δεν είναι ...φιλόσοφοι!



Εκτός από μερικούς «περίεργους τύπους»

όπως

ο ...**Einstein**, ο **David Bohm** και ελάχιστοι άλλοι

που παρέμειναν αιρετικοί

–στο πείσμα της θριαμβεύουσας ορθοδοξίας–

και κράτησαν το ζήτημα ζωντανό (έστω και στο περιθώριο)

μέχρις ότου ήλθε το πλήρωμα του χρόνου

στο όνομα του

John Bell

Σωτήριον έτος 1964!



Ο Bell συνειδητοποιεί τα εξής βασικά πράγματα:

Πρώτον:

Ότι η δυσκολία του ζητήματος –σε αντίθεση με οποιοδήποτε άλλο στη μέχρι τότε φυσική– έγκειται στο γεγονός ότι θα πρέπει να συγκρίνει κανείς την κβαντομηχανική όχι με μια συγκεκριμένη θεωρία κρυμμένων μεταβλητών (διότι μια τέτοια θεωρία δεν προτάθηκε ποτέ) αλλά με κάθε δυνατή θεωρία αυτού του τύπου. Και απολύτως πρωτόγνωρο στην ιστορία της επιστήμης. Να ζητείται από μια φυσική θεωρία να υπερασπιστεί τον εαυτό της όχι απέναντι σε μια συγκεκριμένη αντίπαλη θεωρία αλλά απέναντι σε κάθε πιθανή αντίπαλη θεωρία (ή σχεδόν!) Δηλαδή να νικήσει έναν αόρατο εχθρό. **Τρελά πράγματα (πάλι)!**



Δεύτερον:

Αν είναι να γίνει εφικτή μια τέτοια (αδιανόητη!) σύγκριση, θα πρέπει να εντοπιστεί μια θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα στις πιθανότητες που έχουν κλασικό υπόβαθρο –δηλαδή οφείλονται σε ατελή γνώση κάποιων φυσικών παραμέτρων– και στις πιθανότητες κβαντομηχανικής προέλευσης. Και η διαφορά αυτή είναι τούτη: Οι κβαντικές πιθανότητες προέρχονται από **πλάτη πιθανότητας** μεταξύ των οποίων μπορούν να λάβουν χώρα **φαινόμενα συμβολής** τα οποία δεν έχουν καμία θέση στον κόσμο των κλασικών πιθανοτήτων.

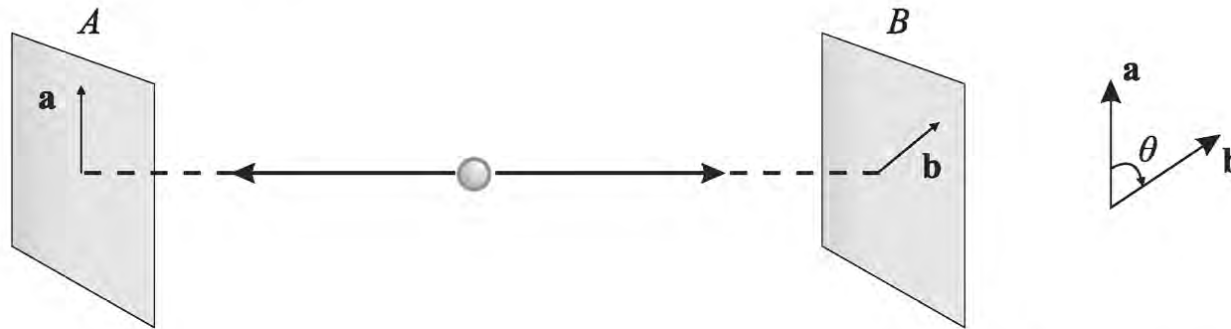


Τρίτον:

Αν αυτή η **θεμελιώδης διαφορά** πρόκειται να έχει κάπου μετρήσιμες συνέπειες, θα είναι σε φαινόμενα όπως η **κβαντική σύμπλεξη** όπου –όπως έδειξε η ανάλυση του Einstein– οι συνέπειες της κβαντομηχανικής είναι τόσο ακραίες ώστε ενδεχομένως να μην μπορούν να αναπαραχθούν από καμία θεωρία κρυμμένων μεταβλητών. Επιπλέον, **οι σύμπλεκτες καταστάσεις είναι κατ' εξοχήν εκείνες όπου η κβαντομηχανική δεν έχει υποβληθεί σε κατ' ευθείαν πειραματικό έλεγχο**. Και άρα μπορεί κάλλιστα να αποδειχθεί εσφαλμένη. **Εκεί ίσως βρίσκεται η Αχίλλειος πτέρνα της.**

Τέταρτον

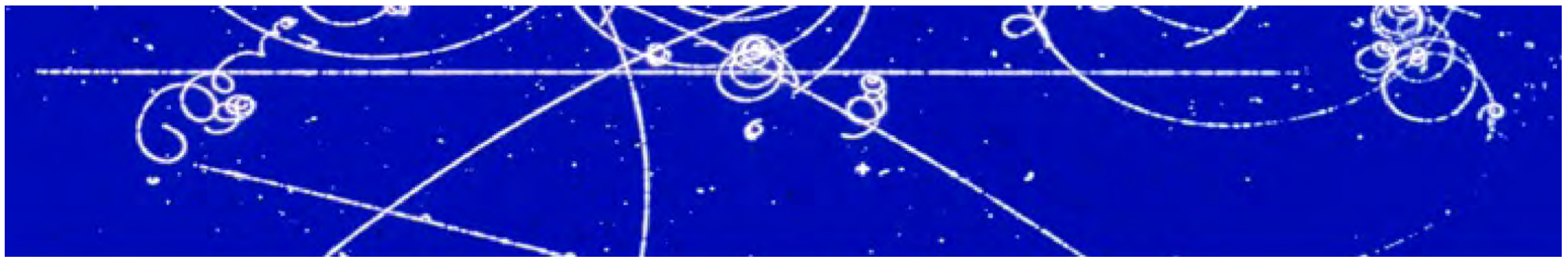
(πιο συγκεκριμένα): Αφού το κατ' εξοχήν γνώρισμα –το «σήμα κατατεθέν»– της κβαντικής σύμπλεξης σε ένα σύστημα όπως εκείνο των EPR είναι **η ακραία συσχέτιση του προσανατολισμού των σπιν τους σε μια μέτρηση** (πάνω το ένα, κάτω το άλλο), γιατί να μην εξετάσουμε **τον βαθμό συσχέτισής τους όταν οι κατευθύνσεις μέτρησης είναι διαφορετικές για τα δύο σωματίδια**, όπως στο ακόλουθο σχήμα



$$C(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \equiv C(\theta) = \frac{N_{++} - N_{+-} - N_{-+} + N_{--}}{N} \equiv \left(\begin{array}{l} \text{μέση τιμή των γινομένων } \pm \text{ επί } \pm \text{ που αντιστοιχούν} \\ \text{στις μετρούμενες προβολές των δύο σπιν κατά} \\ \text{τις κατευθύνσεις } \mathbf{a} \text{ και } \mathbf{b} \end{array} \right) \quad (1)$$

όπου η συνάρτηση $C(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ –που ορίζεται πειραματικά όπως στην (1)– είναι γνωστή ως **συνάρτηση συσχέτισης** και αποτελεί την ποσότητα-κλειδί στην προσπάθεια του Bell να λύσει το μυστήριο των κβαντικών πιθανοτήτων.

...και νά η λύση του



Από τη μεταφυσική στη φυσική

Η διάσημη «ανισότητα του Bell»

$$|C(\theta') - C(\theta)| - C(\theta' - \theta) \leq 1$$

Η ανισότητα του Bell

(2)

«Η συνάρτηση συσχέτισης που προέρχεται από μια τυχούσα τοπική θεωρία κρυμμένων μεταβλητών θα πρέπει υποχρεωτικά να ικανοποιεί την ανισότητα (2)».

Από θεωρητικής πλευράς, τα υπόλοιπα είναι απλές ασκήσεις

Άσκηση 1: Να αποδειχθεί ότι η κβαντομηχανική συνάρτηση συσχέτισης –όπως ορίζεται από την κβαντομηχανική μέση τιμή–

$$C_{\text{qu}}(\theta) = \langle \psi | \sigma_a^{(A)} \sigma_b^{(B)} | \psi \rangle$$

σωματίδιο A
σωματίδιο B
κατεύθυνση a
κατεύθυνση b

ισούται με

$$C_{\text{qu}}(\theta) = -\cos \theta \quad (3)$$

Άσκηση 2: Να αποδειχθεί ότι η κβαντομηχανική συνάρτηση συσχέτισης (3) δεν ικανοποιεί την ανισότητα του Bell. (Θέστε π.χ. $\theta' = 2\theta$ και $\theta = \theta_0 = \pi/3$ και θα δείτε ότι η ανισότητα (2) παραβιάζεται κατά κράτος!)



Επομένως; Επομένως η πειραματική διάκριση μεταξύ κβαντομηχανικής και μιας οποιασδήποτε θεωρίας κρυμμένων μεταβλητών είναι απολύτως εφικτή. Δεν έχουμε παρά να μετρήσουμε πειραματικά τη συνάρτηση συσχέτισης $C(\theta)$ και αν οι μετρήσεις συμφωνούν με την κβαντομηχανική έκφραση (3) τότε ...τελειώσαμε. Οι θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών θα είναι μια για πάντα νεκρές.

Διαφορετικά, μια βόμβα θα έχει τοποθετηθεί στα θεμέλια της κβαντομηχανικής του Bohr. Συμβιβασμός δεν μπορεί να υπάρξει.

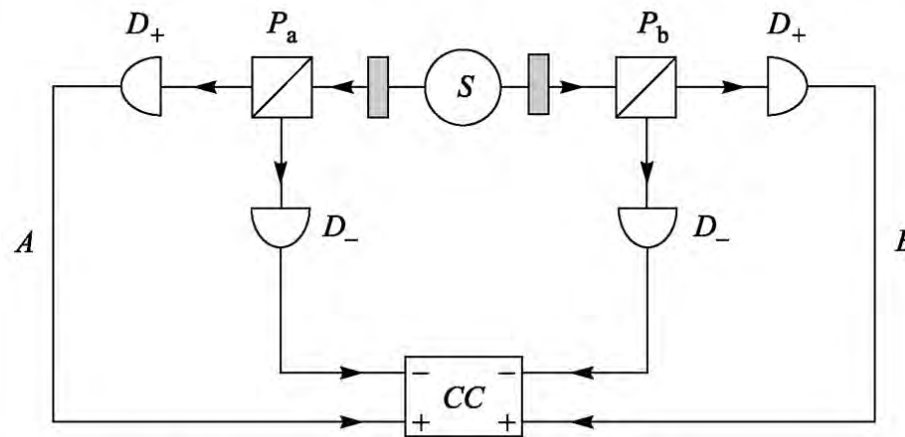
Einstein ή Bohr.



Και η ετυμηγορία του πειράματος

Το πείραμα του Aspect

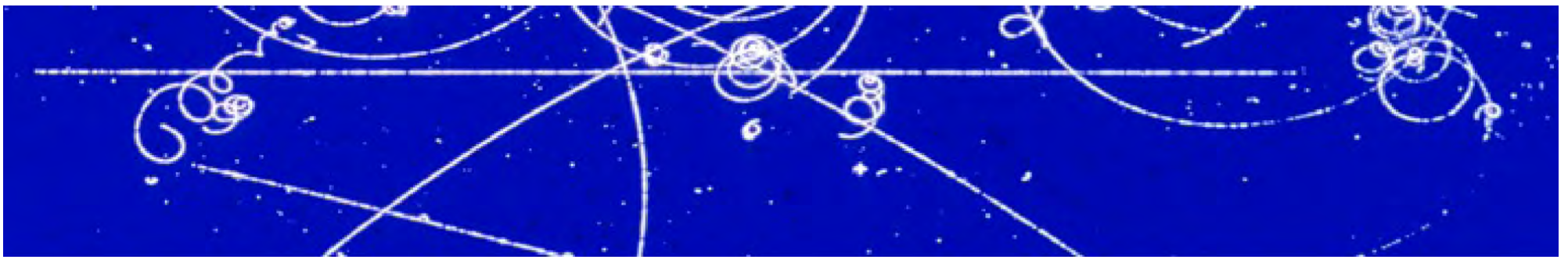
[Χρησιμοποιεί φωτόνια και μετρητές πόλωσης αντί σπιν, και οι ανισότητες του Bell είναι λίγο διαφορετικές αλλά της ίδιας ακριβώς φύσεως]



Και το αποτέλεσμα: Τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συνάρτηση συσχέτισης $C(\theta)$ όχι μόνο **παραβιάζουν τις ανισότητες του Bell αλλά ακολουθούν ακριβώς τη γωνιακή εξάρτηση που προβλέπει η κβαντομηχανική**. Το συμπέρασμα είναι αναμφίβολο: **Ο Bohr είχε δίκιο**. Οι κβαντομηχανικές πιθανότητες δεν οφείλονται σε ατελή γνώση, είναι θεμελιώδεις. Είτε μας αρέσει είτε όχι, τελικά...



*Ο Θεός παίζει ζάρια
με τον κόσμο....*

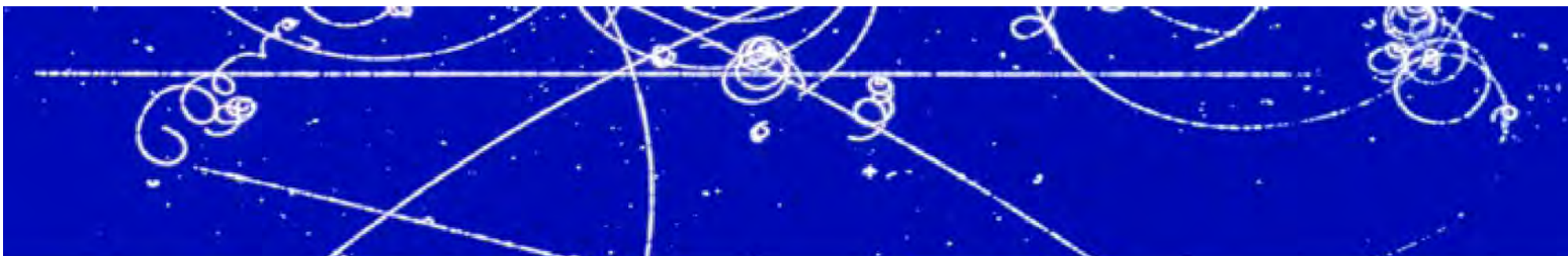


Επίλογος

Διδάγματα από μια «ιστορία»



Η υπόθεση των «ανισοτήτων του Bell» είναι ίσως ένα μοναδικό επεισόδιο στην ιστορία της επιστήμης. Στην ουσία, ένας μόνο άνθρωπος κατάφερε –ενάντια στη γενική ομοφωνία– να πάρει ένα ζήτημα που όλοι πλέον το θεωρούσαν «καθαρή μεταφυσική» και να το κάνει πειραματικά ελέγξιμο. Και να απαντηθεί έτσι ένα από τα βαθύτερα ερωτήματα που απασχόλησαν ποτέ το ανθρώπινο μυαλό. Ενώ ανακαλύφθηκε ταυτόχρονα κι ένα θεμελιώδες νέο εργαλείο της φυσικής. Η **κβαντική σύμπλεξη**. Απ' ό,τι φαίνεται, «ο δρόμος που χάραξε ο Bell» θα είναι μακρύς και ίσως μια **«δεύτερη κβαντική επανάσταση»** μας περιμένει στο βάθος.



Όμως η δουλειά του Bell αποτελεί ταυτόχρονα κι έναν «φόρο τιμής» στις πιο θεμελιώδεις αξίες της επιστήμης.

1. Την αξία της βασικής έρευνας

Εκείνης που δεν εμπνέεται από άμεσους πρακτικούς σκοπούς, αλλά από τη θεμελιώδη ανθρώπινη ανάγκη να καταλάβουμε τον κόσμο· την «όρεξη του ειδέναι».

2. Την αξία της ανεξάρτητης σκέψης

Τη σημασία –για την επιστήμη **και την κοινωνία**– του να υπάρχουν **ανεξάρτητα μυαλά**. Άνθρωποι που επιμένουν να σκέφτονται διαφορετικά και είναι διατεθειμένοι να πάρουν το ρίσκο μιας **μοναχικής διαδρομής**.



Κι επειδή ούτε η δουλειά του Bell θα ήταν δυνατή αν ο Einstein –**ίσως το πιο ανεξάρτητο μυαλό της ιστορίας της επιστήμης**– δεν είχε κρατήσει το θέμα ζωντανό για τόσα χρόνια, δεν θεωρώ ακατάλληλη την περίπτωση να αφιερώσω (-ουμε) **σε όλους τους μοναχικούς περιπατητές της επιστήμης –σε όσους βάδισαν σε δρόμους απερπάτητους**– τους στίχους του αμερικανού ποιητή.



Όταν ο δρόμος στο δάσος χώριζε
εγώ πήρα τον λιγότερο περπατημένο.
Κι αυτό έκανε όλη τη διαφορά.

Robert Frost, *The Road not taken*

Τ Ε Λ Ο Σ