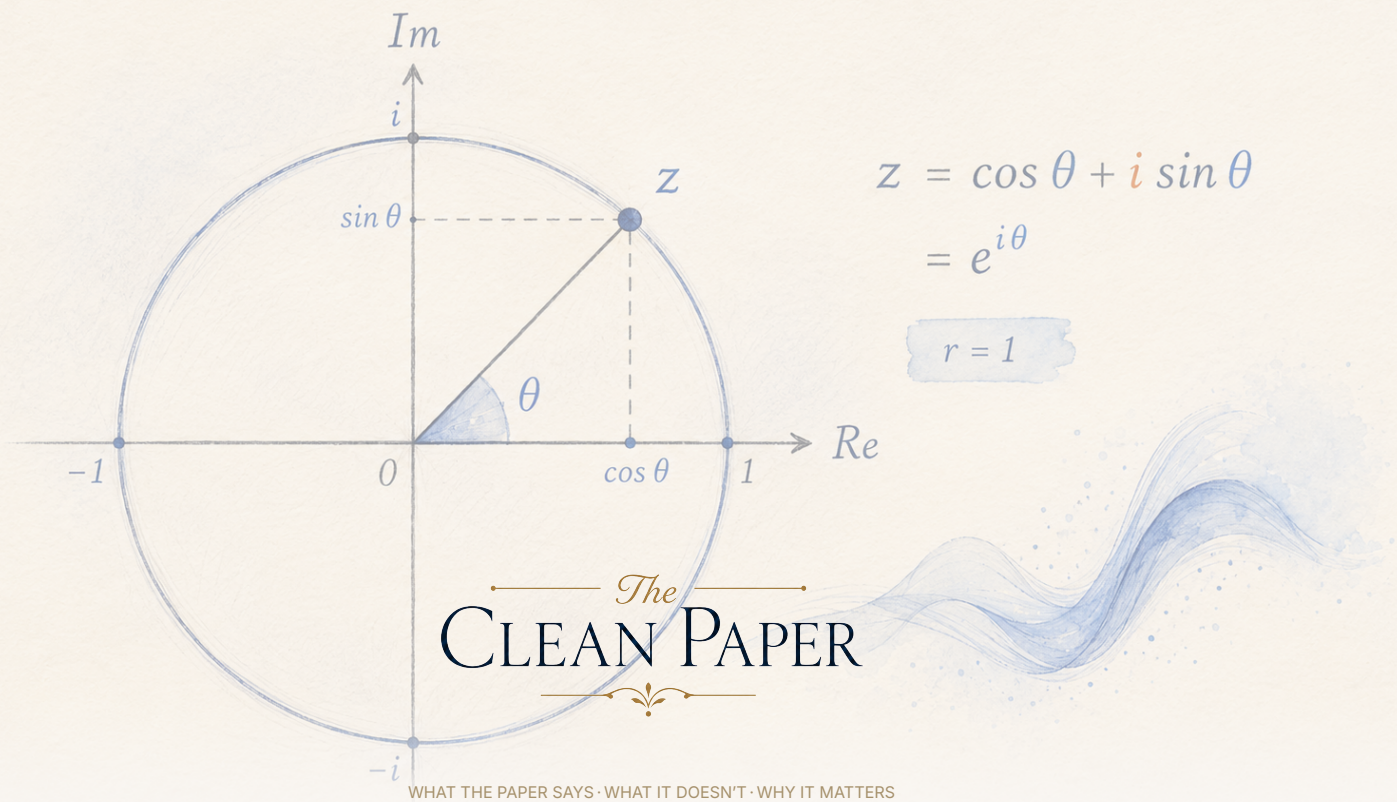




Η κβαντική μηχανική μπορεί να γραφτεί μόνο με πραγματικούς αριθμούς — το τίμημα βρίσκεται στον τρόπο που συνδυάζονται τα συστήματα

Το 2021 ένα αποτέλεσμα που προβλήθηκε ευρέως υποστήριξε ότι μια εκδοχή της κβαντικής μηχανικής με πραγματικούς αριθμούς μπορούσε να διαψευστεί πειραματικά, και πειράματα το 2022 συμφώνησαν με τη συνήθη μιγαδική κβαντική θεωρία. Αυτό συχνά παρουσιάστηκε ως απόδειξη ότι οι φανταστικοί αριθμοί είναι φυσικά πραγματικοί. Μια νέα εργασία στο *Physical Review Letters* κάνει τον ισχυρισμό ακριβέστερο: αν η διατύπωση με πραγματικούς αριθμούς στηριχθεί σε διαφορετική, ίσως πιο φυσική παραδοχή για το πώς συνδυάζονται χωριστά συστήματα, αναπαράγει όλες τις προβλέψεις της μιγαδικής κβαντικής μηχανικής, μαζί και τις πολυμερείς δοκιμές. Η προσεκτική ανάγνωση είναι ότι οι μιγαδικοί αριθμοί είναι εξαιρετικά βολικοί αλλά όχι αυστηρά αναγκαίοι — και ότι τα προηγούμενα πειράματα απέκλεισαν μία συγκεκριμένη πραγματική θεωρία, όχι τους πραγματικούς αριθμούς κατ' αρχήν. Πρόκειται για θεωρητικό αποτέλεσμα στα θεμέλια της φυσικής, όχι για νέα μέτρηση, και δεν ζητά από κανέναν να σταματήσει να χρησιμοποιεί μιγαδικούς αριθμούς.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum Mechanics Based on Real Numbers: A Consistent Description*, Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping, Dagmar Bruss, *Physical Review Letters* · DOI: 10.1103/4k13-sdjh

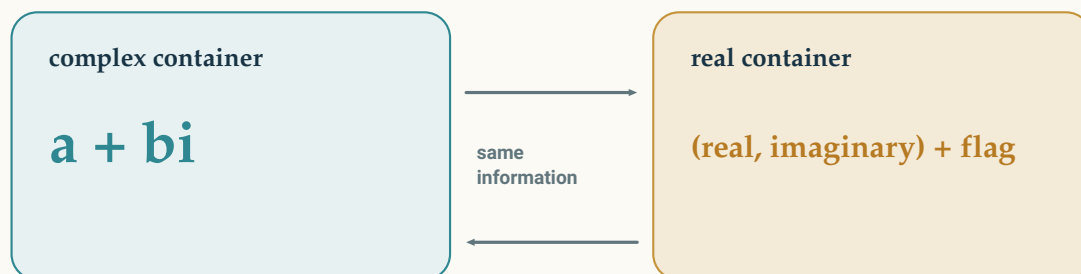
Ένας τίτλος που αξίζει να ξαναδιαβαστεί

Πριν από λίγα χρόνια κυκλοφόρησε ένας εντυπωσιακός ισχυρισμός: πειράματα είχαν δείξει ότι οι φανταστικοί αριθμοί είναι φυσικά πραγματικοί, ότι η κβαντική μηχανική δεν μπορεί να γραφτεί χωρίς αυτούς. Ο ισχυρισμός ξεκίνησε από πραγματική και προσεκτική φυσική — μια πρόταση του 2021 στο *Nature* από τον Marc-Olivier Renou και συνεργάτες και πειράματα του 2022 που την υλοποίησαν. Όμως η δημοφιλής εκδοχή συμπίεσε μια ακριβή πρόταση σε σύνθημα, και το σύνθημα ήταν ισχυρότερο από το αποτέλεσμα.

Μια νέα εργασία στο *Physical Review Letters* από τους Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping και Dagmar Bruß επαναφέρει την ακριβή διατύπωση. Κατασκευάζει μια εκδοχή της κβαντικής μηχανικής που χρησιμοποιεί μόνο πραγματικούς αριθμούς και αναπαράγει κάθε πρόβλεψη της τυπικής μιγαδικής θεωρίας — ακόμη και τα ίδια πολυμερή πειράματα που λέχθηκε ότι απέκλεισαν τους πραγματικούς αριθμούς. Το τέχνασμα δεν είναι να ξαναεισαχθούν κρυφά οι φανταστικοί αριθμοί. Είναι να αλλάξει μία παραδοχή για το πώς συνδυάζονται χωριστά συστήματα. Το έντιμο συμπέρασμα, με τα λόγια των ίδιων των συγγραφέων, είναι ότι οι μιγαδικοί αριθμοί δεν είναι αναγκαίοι για την περιγραφή της κβαντικής μηχανικής, αλλά είναι ασφαλώς πολύ χρήσιμοι.

Real quantum theory moves the bookkeeping

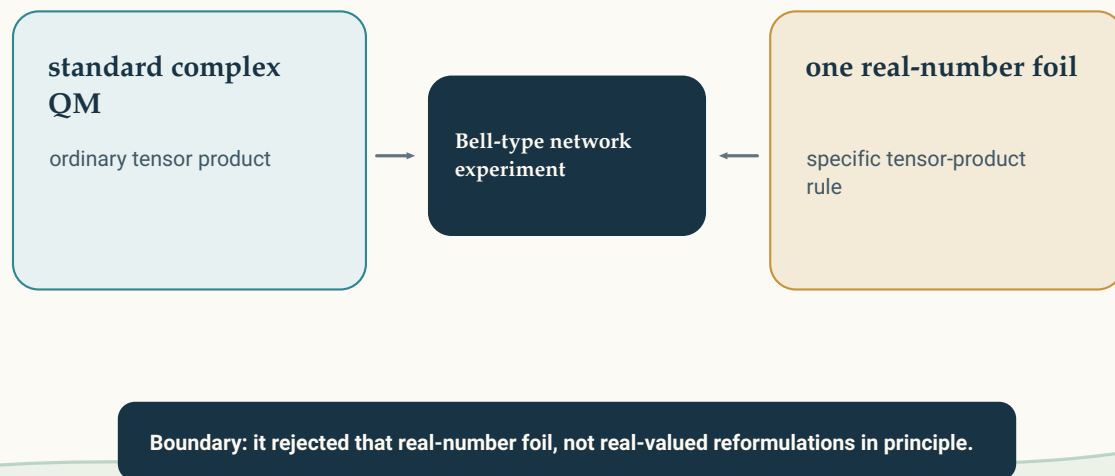
A complex amplitude can be carried as two real components. The cost appears when systems combine.



Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

Ένα μιγαδικό πλάτος $a+bi$ είναι ένα ζεύγος πραγματικών αριθμών μαζί με μια «σημαία» που μεταφέρεται δίπλα σε κάθε σύστημα. Η πραγματική διατύπωση δεν έχει λιγότερα συστατικά — είναι απλώς διαφορετικό δοχείο για την ίδια πληροφορία, με το κόστος να εμφανίζεται στον τρόπο συνδυασμού των συστημάτων.

What the 2021 test actually adjudicated



Τα πειράματα του 2021–22 συνέκριναν δύο συγκεκριμένες θεωρίες — την τυπική μιγαδική κβαντική μηχανική με μια πραγματική «συγκριτική» θεωρία που διατηρεί τον κανόνα του τανυστικού γινομένου — και ευνόησαν τη μιγαδική. Απέκλεισαν αυτή τη συγκριτική θεωρία, όχι τους πραγματικούς αριθμούς κατ' αρχήν.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Τι κάνουν οι μιγαδικοί αριθμοί μέσα στη θεωρία

Στην κβαντική μηχανική, η κατάσταση ενός συστήματος περιγράφεται από πλάτη και για να πάρουμε την πιθανότητα ενός αποτελέσματος υπολογίζουμε το τετράγωνο του μέτρου ενός πλάτους. Στην τυπική θεωρία αυτά τα πλάτη είναι μιγαδικοί αριθμοί: καθένα έχει μέτρο και φάση, δηλαδή μια γωνία. Η φάση δεν είναι διακοσμητική. Όταν δύο διαδρομές προς το ίδιο αποτέλεσμα συνδυάζονται, οι φάσεις τους καθορίζουν αν θα ενισχυθούν ή θα αλληλοαναιρεθούν — τη συμβολή που αποτελεί χαρακτηριστικό της κβαντικής συμπεριφοράς. Αντίθετα, μια συνολική φάση που μοιράζεται ολόκληρο το σύστημα δεν μπορεί ποτέ να μετρηθεί.

Ένας μιγαδικός αριθμός είναι ουσιαστικά ένα ζεύγος πραγματικών αριθμών — ένα πραγματικό και ένα φανταστικό μέρος — δεμένο με συγκεκριμένους κανόνες για τον πολλαπλασιασμό τους. Έτσι προκύπτει μια φυσική ερώτηση: είναι απαραίτητο αυτό το πακέτο; Θα μπορούσαμε να κρατήσουμε τους δύο πραγματικούς αριθμούς, να εγκαταλείψουμε τη μιγαδική συσκευασία και να διατηρήσουμε όλη την κβαντική μηχανική; Οι κανόνες πολλαπλασιασμού είναι αυτό που κάνει έναν μιγαδικό αριθμό κάτι περισσότερο από δύο αριθμούς δίπλα-δίπλα, άρα η απάντηση δεν είναι προφανής — και εκεί βρίσκεται η λεπτότητα.

Τι απέδειξε πραγματικά το αποτέλεσμα του 2021

Ο Renou και οι συνεργάτες του έθεσαν ακριβώς αυτό το ερώτημα και του έδωσαν μια σαφή, ελέγξιμη μορφή. Δεν ρώτησαν αν μπορούν να εμφανίζονται πραγματικοί αριθμοί οπουδήποτε στην κβαντική θεωρία· ρώτησαν αν μια διατύπωση με πραγματικούς αριθμούς μπορεί να ταιριάζει όλες τις προβλέψεις της μιγαδικής θεωρίας δεδομένου ενός συγκεκριμένου κανόνα για τον συνδυασμό συστημάτων. Αυτός ο κανόνας — ας τον πούμε κανόνα του τανυστικού γινομένου — είναι η συνηθής συνταγή για την περιγραφή πολλών ανεξάρτητων μερών ως ενός ενιαίου συνόλου.

Με αυτόν τον κανόνα βρήκαν ένα σενάριο με τρία μέρη που μοιράζονται διεμπλοκή από δύο ανεξάρτητες πηγές, στο οποίο η θεωρία πραγματικών αριθμών και η μιγαδική θεωρία προβλέπουν διαφορετικές, μετρήσιμες συσχετίσεις — μια πολυμερής εκδοχή δοκιμής Bell. Το 2022, πειράματα με υπεραγώγιμα κυκλώματα και με φωτόνια πραγματοποίησαν τέτοιες δοκιμές. Οι μετρημένες συσχετίσεις συμφωνούσαν με τη μιγαδική κβαντική μηχανική και ήταν ασύμβατες με την πραγματική εναλλακτική.

Γιατί η δοκιμή χρειάζεται δύο πηγές, όχι μία

Μια συνηθισμένη δοκιμή Bell χρησιμοποιεί μία πηγή που στέλνει ένα διεμπλεγμένο ζεύγος σε δύο ανθρώπους, την Alice και τον Bob. Για αυτή τη διάταξη, μια κβαντική μηχανική πραγματικών αριθμών μπορεί να αναπαράγει ακριβώς τις ίδιες συσχετίσεις με τη μιγαδική θεωρία — οι δύο είναι αδιαχώριστες, οπότε μία πηγή δεν μπορεί να αποφασίσει ανάμεσά τους.

Το επιχείρημα του 2021 αποκτά δύναμη προσθέτοντας μια δεύτερη, **ανεξάρτητη** πηγή. Φανταστείτε τρία μέρη σε σειρά: Alice, Bob, Charlie. Η μία πηγή διεμπλέκει την Alice με τον Bob· μια ξεχωριστή πηγή, χωρίς κοινό παρελθόν με την πρώτη, διεμπλέκει τον Bob με τον Charlie. Ο Bob βρίσκεται στη μέση και μετρά μαζί τα δύο σωματίδιά του, συνδέοντας τα δύο μισά. Η ανεξαρτησία των δύο πηγών — η παραδοχή ότι προετοιμάστηκαν χωριστά — είναι αυτή που κάνει τη δουλειά: με τον τυπικό κανόνα του τανυστικού γινομένου για τον συνδυασμό ανεξάρτητων συστημάτων, μια θεωρία πραγματικών αριθμών δεν μπορεί να αναπαράγει τις τριμερείς συσχετίσεις που προβλέπει η μιγαδική κβαντική μηχανική για αυτό το δίκτυο, ενώ με μία μόνο πηγή οι δύο θεωρίες παραμένουν ισοδύναμες. Αυτό το χάσμα μέτρησαν τα πειράματα.

Αυτό είναι ένα πραγματικό και καθαρό αποτέλεσμα. Προσέξτε όμως ακριβώς τι συνέκρινε: την τυπική μιγαδική κβαντική θεωρία με μία συγκεκριμένη πραγματική θεωρία — εκείνη που κρατά τον συνηθισμένο κανόνα του τανυστικού γινομένου. Τα πειράματα έκριναν αυτό το ζεύγος, όχι τους πραγματικούς αριθμούς ως τέτοιους. Η νέα εργασία, δανειζόμενη έναν όρο από τα θεμέλια της κβαντικής θεωρίας, ονομάζει την αποκλεισμένη εναλλακτική γι' αυτό που είναι: μια *foil theory*, μια εσκεμμένα συγκριτική θεωρία που κανείς δεν προτείνει ως αληθινή, σχεδιασμένη ώστε το πείραμα να μπορεί να τη διακρίνει από την αποδεκτή θεωρία. Η αξία της είναι ακριβώς ότι διακρίνεται: ο αποκλεισμός της αποκαλύπτει ποιες παραδοχές της πραγματικής θεωρίας έκαναν τη διαφορά.

Τι αλλάζει η νέα εργασία

Η νέα δουλειά κρατά σχεδόν τα πάντα και αλλάζει ένα αξίωμα. Αντί να υποθέτει τον κανόνα του τανυστικού γινομένου για τον συνδυασμό συστημάτων, ξεκινά από μια απαίτηση τοπικότητας που οι συγγραφείς θεωρούν φυσικά θεμελιωδέστερη: μια πράξη που γίνεται μόνο σε ένα υποσύστημα δεν θα πρέπει να έχει μετρήσιμη επίδραση σε ένα άλλο, ανέγγιχτο υποσύστημα.

Από αυτή την αφετηρία κατασκευάζουν ρητά μια κβαντική μηχανική πραγματικών αριθμών. Το πραγματικό και το φανταστικό μέρος των συνηθισμένων πλατών μεταφέρονται ως πρόσθετη πραγματική «λογιστική» — η εργασία την αποκαλεί «σημαία» προσαρτημένη σε κάθε σύστημα — και η μη παρατηρήσιμη συνολική φάση της μιγαδικής θεωρίας γίνεται μια εξίσου μη παρατηρήσιμη περιστροφή στην πραγματική. Το τίμημα εμφανίζεται ακριβώς εκεί όπου το είχε εντοπίσει το αποτέλεσμα του 2021: στον τρόπο συνδυασμού των συστημάτων. Ο αφελής τρόπος να κολλήσουμε αυτές τις πραγματικές περιγραφές μεταξύ τους δεν δίνει καν καλά ορισμένη συνταγή, οπότε η κατασκευή ομαδοποιεί περιγραφές που αντιπροσωπεύουν την ίδια φυσική και δουλεύει με αυτές τις κλάσεις. Με αυτόν τον κανόνα συνδυασμού, η πραγματική θεωρία αναπαράγει κάθε αναμενόμενη τιμή που προβλέπει η μιγαδική — για ένα σύστημα και για πολλά, διεμπλεγμένα ανάμεσα σε χωριστά μέρη. Οι συγγραφείς δείχνουν επίσης ότι η κατασκευή είναι ουσιαστικά μοναδική και ισοδύναμη με την τυπική κβαντική μηχανική.

Έτσι τα πολυμερή πειράματα δεν μπορούν να διακρίνουν αυτή την πραγματική θεωρία από τη μιγαδική, επειδή συμφωνούν σε κάθε πρόβλεψη. Τα προηγούμενα πειράματα δεν απέτυχαν· απλώς δοκίμαζαν μια διαφορετική, πιο περιοριστική πραγματική θεωρία.

Γιατί αυτό δεν είναι αντίφαση

Θα ήταν εύκολο να διαβαστεί ως «τα πειράματα του 2021 ήταν λάθος». Ισχύει το αντίθετο. Τα πειράματα ήταν σωστά, και αυτή η εργασία εξαρτάται από το να είναι σωστά: αποδέχεται κάθε μετρημένη συσχέτιση και δείχνει μια πραγματική διατύπωση που επίσης τις παράγει. Αυτό που αναθεωρεί είναι η ερμηνεία — το άλμα από το «αυτή η πραγματική θεωρία διαψεύστηκε» στο «οι πραγματικοί αριθμοί είναι αδύνατοι στην κβαντική μηχανική». Αυτό το άλμα παρέκαμψε την παραδοχή που έκανε τη δουλειά.

Ούτε υποστηρίζει η εργασία ότι κάποιος πρέπει να εγκαταλείψει τους μιγαδικούς αριθμούς. Η ίδια η σύνοψή της είναι προσεκτική και προς τις δύο κατευθύνσεις: οι μιγαδικοί αριθμοί δεν είναι αυστηρά αναγκαίοι και είναι πολύ χρήσιμοι. Η πραγματική κατασκευή χρειάζεται μια πρόσθετη σημαία σε κάθε σύστημα και έναν πιο λεπτό κανόνα για τον συνδυασμό τους· οι μιγαδικοί αριθμοί πακετάρουν όλα αυτά σε ένα καθαρό κομμάτι αριθμητικής. Η ευκολία δεν είναι αμελητέα. Στη φυσική είναι συχνά ολόκληρος ο λόγος που ένας φορμαλισμός επικρατεί.

Γιατί έχει σημασία

Το ενδιαφέρον ερώτημα από κάτω είναι τι σημαίνει η λέξη «αναγκαίο» για μια φυσική θεωρία. Ένα πείραμα μπορεί να ξεχωρίσει δύο θεωρίες όταν προβλέπουν διαφορετικά πράγματα. Δεν μπορεί, από μόνο του, να σας πει ότι ένα συγκεκριμένο μαθηματικό συστατικό είναι το μοναδικό δυνατό δοχείο για ένα σύνολο προβλέψεων — αυτό είναι ερώτημα για το ποιες θεωρίες υπάρχουν και λύνεται με κατασκευή, όχι με μέτρηση. Αυτή η εργασία είναι μια κατασκευή: παρουσιάζει την εναλλακτική που θεωρήθηκε ότι είχαν αποκλείσει τα πειράματα.

Το αποτέλεσμα οξύνει επίσης μια διάκριση που αξίζει να διατηρούμε γενικά. «Αυτή η θεωρία διαψεύστηκε» και «αυτό το μαθηματικό εργαλείο είναι αναπόφευκτο» είναι διαφορετικές προτάσεις, και το χάσμα ανάμεσά τους είναι ακριβώς το σημείο όπου ένα καθαρό πειραματικό αποτέλεσμα μπορεί να μετατραπεί σε υπερβολικό ισχυρισμό. Οι μιγαδικοί αριθμοί παραμένουν η φυσική και αποτελεσματική γλώσσα της κβαντικής μηχανικής. Το αν είναι μεταφυσικά αναγκαίοι είναι ξεχωριστή ερώτηση και, ως προς αυτή, η απάντηση προς το παρόν είναι όχι.

Καθαρή σύνοψη

Μια πρόταση του 2021 και πειράματα του 2022 έδειξαν ότι μια κβαντική μηχανική πραγματικών αριθμών χτισμένη στον τυπικό κανόνα του τανυστικού γινομένου για τον συνδυασμό συστημάτων κάνει διαφορετικές, ελέγξιμες προβλέψεις από τη μιγαδική κβαντική μηχανική, και τα πειράματα ευνόησαν τη μιγαδική θεωρία. Αυτό παρουσιάστηκε ευρέως ως απόδειξη ότι οι φανταστικοί αριθμοί είναι φυσικά αναγκαίοι. Η νέα εργασία στο *Physical Review Letters* κατασκευάζει μια κβαντική μηχανική πραγματικών αριθμών πάνω σε διαφορετικό αξίωμα, βασισμένο στην τοπικότητα, που αναπαράγει όλες τις προβλέψεις της μιγαδικής θεωρίας, μαζί και τις πολυμερείς δοκιμές — δείχνοντας ότι οι μιγαδικοί αριθμοί είναι βολικοί και όχι αυστηρά αναγκαίοι. Πρόκειται για θεωρητική κατασκευή, δεν ανατρέπει τα προηγούμενα πειράματα και δεν προτείνει να αναδιατυπώσουμε την κβαντική μηχανική στην πράξη.

Έλεγχος χωρίς υπερβολές

Τι δείχνει η εργασία: Ότι μια αυτοσυνεπής διατύπωση της κβαντικής μηχανικής που χρησιμοποιεί μόνο πραγματικούς αριθμούς μπορεί να αναπαράγει κάθε πρόβλεψη της τυπικής μιγαδικής θεωρίας, μαζί με πολυμερή πειράματα τύπου Bell, εφόσον χτιστεί πάνω σε αξίωμα τοπικότητας αντί στον κανόνα του τανυστικού γινομένου για τον συνδυασμό συστημάτων.

Τι είναι εύλογο αλλά δεν είναι το σημείο: Ότι αυτό «διαψεύδει» τα αποτελέσματα του 2021–2022. Δεν τα διαψεύδει. Αποδέχεται αυτά τα πειράματα ως σωστά και επανερμηνεύει το εύρος τους: απέκλεισαν μία συγκεκριμένη πραγματική θεωρία, εκείνη που διατηρεί τον κανόνα του τανυστικού γινομένου, όχι τους πραγματικούς αριθμούς κατ' αρχήν.

Τι δεν δείχνει: Ότι οι μιγαδικοί αριθμοί είναι λάθος, άχρηστοι ή αξίζει να εγκαταλειφθούν στην πράξη — η εργασία τους χαρακτηρίζει ρητά πολύ χρήσιμους. Δεν είναι επίσης νέο πείραμα: δεν μετρήθηκαν νέα δεδομένα· ο ισχυρισμός είναι μαθηματική κατασκευή και απόδειξη συνέπειας.

Κύριοι περιορισμοί για έναν γενικό αναγνώστη: Το επιχείρημα εξαρτάται από το ποια παραδοχή θεωρεί κανείς φυσικά πιο θεμελιώδη — τον κανόνα του τανυστικού γινομένου ή το αξίωμα τοπικότητας. Αυτή είναι αιτιολογημένη επιλογή σε μια συνεχιζόμενη συζήτηση για τα θεμέλια, όχι γεγονός που καθορίζεται από μέτρηση, και η κατασκευή με πραγματικούς αριθμούς μπορεί εύλογα να θεωρηθεί λιγότερο φυσική από τη μιγαδική εκδοχή που αναπαράγει.

Πόση εμπιστοσύνη πρέπει να έχει ένας γενικός αναγνώστης; Υψηλή ότι η κατασκευή είναι μαθηματικά συνεπής — έχει περάσει αξιολόγηση από ομοτίμους και η λογική της μπορεί να ελεγχθεί. Το συμπέρασμα που αξίζει να κρατήσουμε είναι το μετριοπαθές: οι μιγαδικοί αριθμοί είναι η βολική γλώσσα της κβαντικής μηχανικής, όχι μια αποδεδειγμένη μεταφυσική αναγκαιότητα. Οποιονδήποτε τίτλο του τύπου «οι φανταστικοί αριθμοί είναι πραγματικοί» καλό είναι να τον αντιμετωπίζουμε ως το σύνθημα που αυτή η εργασία γράφτηκε για να διορθώσει.

Πηγές

P. Barrios Hita, A. Trushechkin, H. Kampermann, M. Epping and D. Bruss, Physical Review Letters 136, 240202 (2026), DOI 10.1103/4k13-sdjh
<https://doi.org/10.1103/4k13-sdjh>