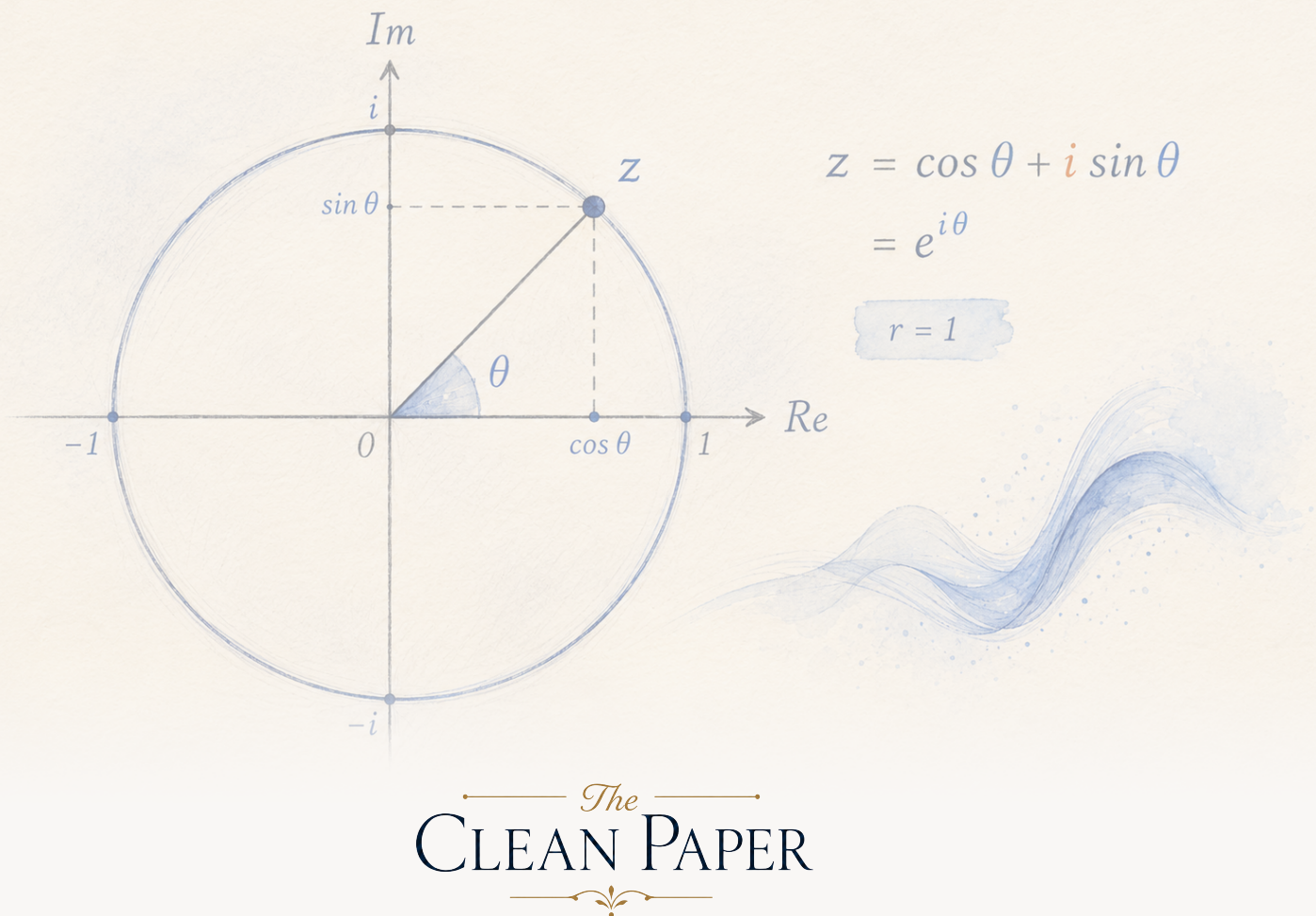




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

La meccanica quantistica può essere scritta solo con numeri reali — il punto è come combini i sistemi

Nel 2021 un risultato molto ripreso sosteneva che una versione a numeri reali della meccanica quantistica potesse essere falsificata sperimentalmente, e gli esperimenti successivi del 2022 concordavano con la teoria quantistica complessa standard. Spesso questo è diventato un titolo sulla prova che i numeri immaginari sono fisicamente reali. Un nuovo articolo su Physical Review Letters precisa il claim: se costruisci la formulazione a numeri reali su un'assunzione diversa, probabilmente più fisica, su come si combinano sistemi separati, riproduce ogni previsione della meccanica quantistica complessa, compresi i test multipartiti. La lettura onesta è che i numeri complessi sono comodi più che strettamente necessari — e che gli esperimenti precedenti hanno escluso una particolare teoria reale, non i numeri reali in principio. È un risultato sui fondamenti, su carta, non una nuova misura, e non chiede a nessuno di smettere di usare i numeri complessi.

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

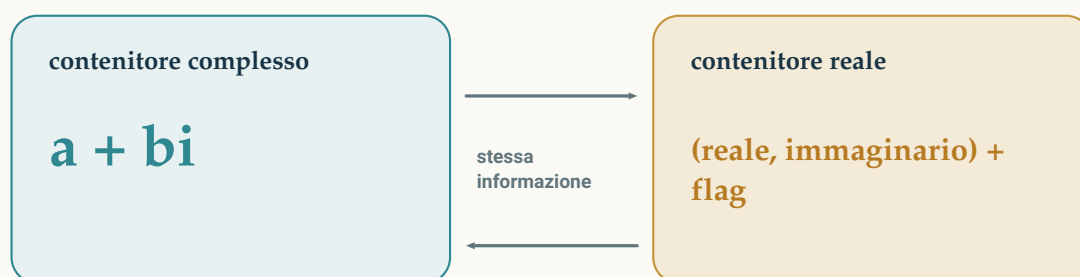
Un titolo da rileggere

Qualche anno fa circolò un'affermazione molto forte: gli esperimenti avrebbero mostrato che i numeri immaginari sono fisicamente reali, che la meccanica quantistica non può essere scritta senza di loro. L'affermazione nasceva da fisica genuina e attenta — una proposta del 2021 su *Nature* di Marc-Olivier Renou e colleghi, e dagli esperimenti del 2022 che l'hanno realizzata. Ma la versione popolare ha compresso una frase precisa in uno slogan, e lo slogan era più forte del risultato.

Un nuovo articolo su *Physical Review Letters* di Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping e Dagmar Bruß rimette a posto la frase precisa. Costruisce una versione della meccanica quantistica che usa solo numeri reali e riproduce ogni previsione della teoria complessa standard — compresi proprio gli esperimenti multipartiti che avrebbero dovuto escludere i numeri reali. Il trucco non è rimettere di nascosto i numeri immaginari. È cambiare un'assunzione su come si combinano sistemi separati. La conclusione onesta, nelle parole degli autori, è che i numeri complessi non sono necessari per descrivere la meccanica quantistica, ma sono certamente molto utili.

La teoria reale sposta la contabilità

Un'ampiezza complessa può essere portata come due componenti reali. Il costo appare quando i sistemi si combinano.

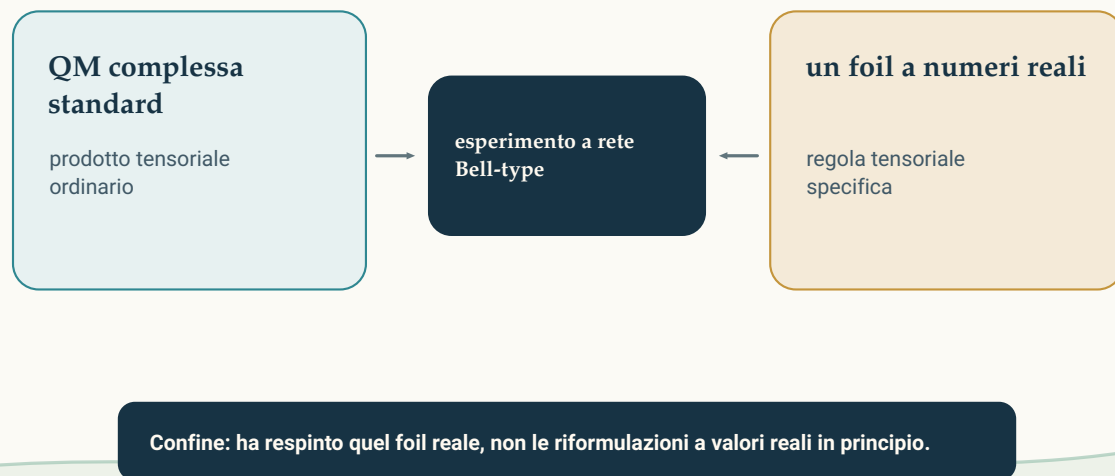


Confine: non meno ingredienti; un contenitore diverso il cui costo appare nella composizione.

Un'ampiezza complessa $a+bi$ è una coppia di numeri reali con una "flag" portata accanto a ciascun sistema. La formulazione reale non usa meno ingredienti: è solo un contenitore diverso, con il costo che compare nel modo in cui i sistemi si combinano.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Che cosa ha davvero arbitrato il test del 2021



Gli esperimenti del 2021-2022 hanno confrontato due teorie specifiche — la meccanica quantistica complessa standard contro una "foil" reale che mantiene la regola del prodotto tensoriale — e hanno favorito quella complessa. Hanno escluso quella foil, non i numeri reali in principio.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Che cosa fanno i numeri complessi nella teoria

In meccanica quantistica, lo stato di un sistema è descritto da ampiezze, e per ottenere la probabilità di un risultato si prende la grandezza al quadrato di un'ampiezza. Nella teoria standard quelle ampiezze sono numeri complessi: ciascuna porta una grandezza e una fase, cioè un angolo. Quella fase non è decorazione. Quando due strade verso lo stesso risultato si combinano, le loro fasi decidono se si rafforzano o si cancellano — l'interferenza che è il segno distintivo del comportamento quantistico. Una fase globale condivisa da tutto il sistema, invece, non può mai essere misurata.

Un numero complesso è in realtà solo una coppia di numeri reali — una parte reale e una parte immaginaria — impacchettata con regole specifiche per moltiplicarle. Quindi la domanda naturale è se quell'impacchettamento sia essenziale. Puoi tenere i due numeri reali, buttare via la confezione complessa, e avere ancora tutta la meccanica quantistica? Le regole di moltiplicazione sono ciò che rende i numeri complessi qualcosa di più di due numeri messi uno accanto all'altro, quindi la risposta non è ovvia, ed è lì che vive la sottigliezza.

Che cosa aveva stabilito davvero il risultato del 2021

Renou e colleghi hanno posto esattamente quella domanda, e le hanno dato una forma netta e testabile. Non hanno chiesto se i numeri reali possano comparire da qualche parte nella teoria quantistica; hanno chiesto se una formulazione con numeri reali potesse uguagliare tutte le previsioni della teoria complessa data una particolare regola per combinare i sistemi. Quella regola — chiamiamola regola del prodotto tensoriale — è la prescrizione standard per descrivere più parti indipendenti come un unico tutto.

Sotto quella regola, hanno trovato uno scenario con tre parti che condividono entanglement da due sorgenti indipendenti in cui una teoria a numeri reali e la teoria complessa prevedono correlazioni diverse e misurabili — una versione multipartita di un test di Bell. Nel 2022, esperimenti con circuiti superconduttivi e con fotoni hanno eseguito test di quel tipo. Le correlazioni misurate concordavano con la meccanica quantistica complessa ed erano incompatibili con l'alternativa reale.

Perché il test ha bisogno di due sorgenti, non di una

Un test di Bell ordinario usa una sola sorgente che invia una coppia entangled a due persone, Alice e Bob. Per quella configurazione, una meccanica quantistica a numeri reali può riprodurre esattamente le stesse correlazioni della teoria complessa — le due sono indistinguibili, quindi una sola sorgente non può decidere tra loro.

L'argomento del 2021 prende forza aggiungendo una seconda sorgente **indipendente**. Immagina tre parti in linea: Alice, Bob, Charlie. Una sorgente entangle Alice con Bob; una seconda sorgente, senza passato comune con la prima, entangle Bob con Charlie. Bob sta in mezzo e misura insieme le sue due particelle, collegando le due metà. È l'*indipendenza* delle due sorgenti — l'assunzione che siano state preparate separatamente — a fare il lavoro: sotto la regola standard del prodotto tensoriale per combinare sistemi indipendenti, una teoria a numeri reali non può uguagliare le correlazioni a tre vie che la meccanica quantistica complessa prevede per questa rete, mentre un test a sorgente singola lascia le due teorie in parità. Quel divario è ciò che gli esperimenti hanno misurato.

Questo è un risultato reale e pulito. Ma nota con attenzione che cosa confrontava: la teoria quantistica complessa standard contro una specifica teoria reale — quella che mantiene la regola ordinaria del prodotto tensoriale. È quell'abbinamento, non i numeri reali in quanto tali, che gli esperimenti hanno giudicato. Il nuovo articolo, prendendo in prestito il termine dai fondamenti della meccanica quantistica, chiama l'alternativa esclusa per quello che è: una *foil theory* — una teoria che nessuno propone come vera, costruita come contrasto deliberato con quella accettata, così che l'esperimento possa distinguerle. Il suo valore sta tutto nell'essere distinguibile: escludere la foil theory mostra quali assunzioni della teoria reale stavano facendo il lavoro.

Che cosa cambia il nuovo articolo

Il nuovo lavoro conserva quasi tutto e cambia un postulato. Invece di assumere la regola del prodotto tensoriale per combinare i sistemi, parte da un requisito di località che gli autori considerano fisicamente più fondamentale: un'operazione eseguita su un sottosistema soltanto non dovrebbe avere alcun effetto misurabile su un altro sottosistema non toccato.

Da quel punto di partenza costruiscono esplicitamente una meccanica quantistica a numeri reali. Le parti reale e immaginaria delle ampiezze usuali vengono portate avanti come contabilità reale extra — l'articolo la chiama una “flag” attaccata a ogni sistema — e la fase globale non osservabile della teoria complessa diventa una rotazione ugualmente non osservabile nella teoria reale. Il prezzo compare esattamente dove il risultato del 2021 lo aveva localizzato: nel modo in cui si combinano i sistemi. Il modo ingenuo di incollare queste descrizioni reali non dà nemmeno una ricetta ben definita, quindi la costruzione raggruppa invece le descrizioni che rappresentano la stessa fisica e lavora con quelle classi. Con quella regola di combinazione, la teoria reale riproduce ogni valore atteso previsto dalla teoria complessa — per un sistema e per molti, entangled tra parti separate. Gli autori mostrano anche che la costruzione è sostanzialmente unica, ed equivalente alla meccanica quantistica standard.

Quindi gli esperimenti multipartiti non possono distinguere questa teoria reale da quella complessa, perché le due concordano su ogni previsione. Gli esperimenti precedenti non erano falliti; stavano semplicemente testando contro una teoria reale diversa e più restrittiva.

Perché non è una contraddizione

Sarebbe facile leggerlo come “gli esperimenti del 2021 erano sbagliati”. È il contrario. Gli esperimenti erano giusti, e questo articolo dipende dal fatto che fossero giusti: accetta ogni correlazione misurata e mostra una formulazione reale che la produce anch'essa. Ciò che rivede è l'interpretazione — il salto da “questa teoria reale è falsificata” a “i numeri reali sono impossibili in meccanica quantistica”. Quel salto saltava proprio l'assunzione che faceva il lavoro.

Né l'articolo sostiene che si debbano abbandonare i numeri complessi. Il suo stesso riassunto è prudente da entrambe le parti: i numeri complessi non sono strettamente necessari, e sono molto utili. La costruzione reale ha bisogno di una flag extra su ogni sistema e di una regola più delicata per combinarli; i numeri complessi impacchettano tutto questo in un pezzo di aritmetica pulito. La comodità non è niente. In fisica è spesso l'intera ragione per cui un formalismo vince.

Perché conta

La domanda interessante sotto tutto questo è che cosa significhi “necessario” per una teoria fisica. Un esperimento può distinguere due teorie quando prevedono cose diverse. Non può, da solo, dirti

che un particolare ingrediente matematico è l'unico contenitore possibile per un insieme di previsioni — questa è una domanda su quali teorie esistono, e si risolve con una costruzione, non con una misura. Questo articolo è una costruzione: esibisce l'alternativa che si pensava gli esperimenti avessero escluso.

Il risultato affina anche una distinzione da tenere a mente in generale. “Questa teoria è falsificata” e “questo strumento matematico è inevitabile” sono frasi diverse, e lo spazio tra loro è esattamente dove un risultato sperimentale pulito può trasformarsi in un overclaim. I numeri complessi restano il linguaggio naturale ed efficiente della meccanica quantistica. Se siano richiesti metafisicamente è una domanda separata, e su quella domanda la risposta, per ora, è no.

In breve

Una proposta del 2021 e gli esperimenti del 2022 hanno mostrato che una meccanica quantistica a numeri reali costruita sulla regola standard del prodotto tensoriale per combinare sistemi fa previsioni diverse e testabili rispetto alla meccanica quantistica complessa, e gli esperimenti hanno favorito la teoria complessa. Questo è stato spesso raccontato come prova che i numeri immaginari sono fisicamente necessari. Il nuovo articolo su *Physical Review Letters* costruisce una meccanica quantistica a numeri reali su un postulato diverso, basato sulla località, che riproduce tutte le previsioni della teoria complessa, compresi i test multipartiti — mostrando che i numeri complessi sono comodi più che strettamente necessari. È una costruzione teorica, non ribalta gli esperimenti precedenti, e non chiede di riformulare la meccanica quantistica in pratica.

Valutazione critica

Che cosa mostra l'articolo: Che una formulazione coerente della meccanica quantistica usando solo numeri reali può riprodurre ogni previsione della teoria complessa standard, compresi gli esperimenti multipartiti di tipo Bell, se è costruita su un postulato di località invece che sulla regola del prodotto tensoriale per combinare sistemi.

Che cosa è plausibile ma non è il punto: Che questo “confuti” i risultati del 2021-2022. Non lo fa. Accetta quegli esperimenti come corretti e ne reinterpreta il perimetro: hanno escluso una teoria reale specifica, quella che mantiene la regola del prodotto tensoriale, non i numeri reali in principio.

Che cosa non mostra: Che i numeri complessi siano sbagliati, inutili o da abbandonare in pratica — l'articolo li chiama esplicitamente molto utili. E non è un nuovo esperimento: non sono stati misurati nuovi dati; l'affermazione è una costruzione matematica e una prova di coerenza.

Limiti principali per un lettore generale: L'argomento dipende da quale assunzione consideri più fisicamente fondamentale — la regola del prodotto tensoriale o il postulato di località. È una scelta ragionata in un dibattito ancora aperto sui fondamenti, non un fatto fissato dalla misura, e la costruzione a numeri reali è probabilmente meno naturale di quella complessa che riesce a

uguagliare.

Quanta fiducia dovrebbe avere un lettore generale? Alta sul fatto che la costruzione sia matematicamente coerente — è sottoposta a revisione paritaria, e la sua logica è controllabile. Il punto da conservare è quello modesto: i numeri complessi sono il linguaggio comodo della meccanica quantistica, non una necessità metafisica dimostrata. Tratta ogni titolo del tipo “i numeri immaginari sono reali” come lo slogan che questo articolo è stato scritto per correggere.

Fonti

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>