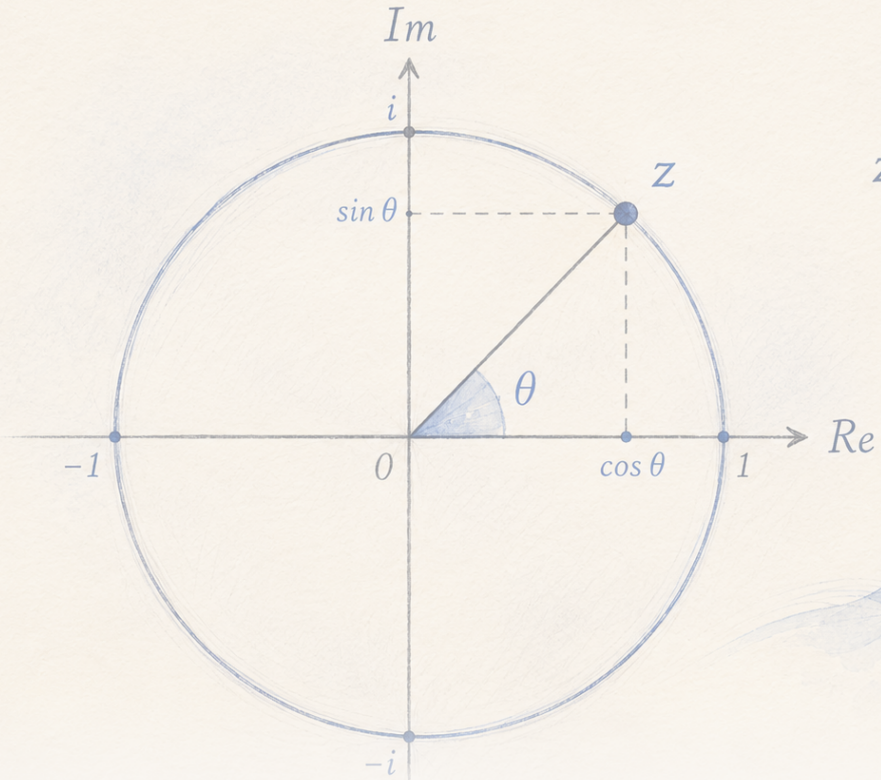


$$z = \cos\theta + i\sin\theta$$
$$= e^{i\theta}$$

$r = 1$

The Clean Paper

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

A kvantummechanika csak valós számokkal is leírható — a csavar a rendszerek kombinálásában van

Egy 2021-es, széles körben idézett eredmény szerint egy valós számokra épülő kvantummechanika kísérletileg megcáfolható, a 2022-es utánkövető kísérletek pedig a standard komplex kvantumelmélettel egyeztek. Ezt gyakran úgy címezték, mintha bizonyítaná, hogy a képzetes számok fizikailag valósak. Egy új Physical Review Letters-tanulmány pontosítja az állítást: ha a valós számokra épülő megfogalmazást más, vitathatóan fizikailag alapvetőbb feltételezésre építjük arról, hogyan kombinálódnak az elkülönült rendszerek, akkor a komplex kvantummechanika minden előrejelzését reprodukálja, beleértve a többrészes teszteket is. Az őszinte olvasat az, hogy a komplex számok kényelmesek, nem szigorúan szükségesek — és hogy a korábbi kísérletek egy konkrét valós elméletet zártak ki, nem a valós számokat elvben. Alapkutatási elméleti eredmény, nem új mérés, és nem kéri senkitől a komplex számok elhagyását.

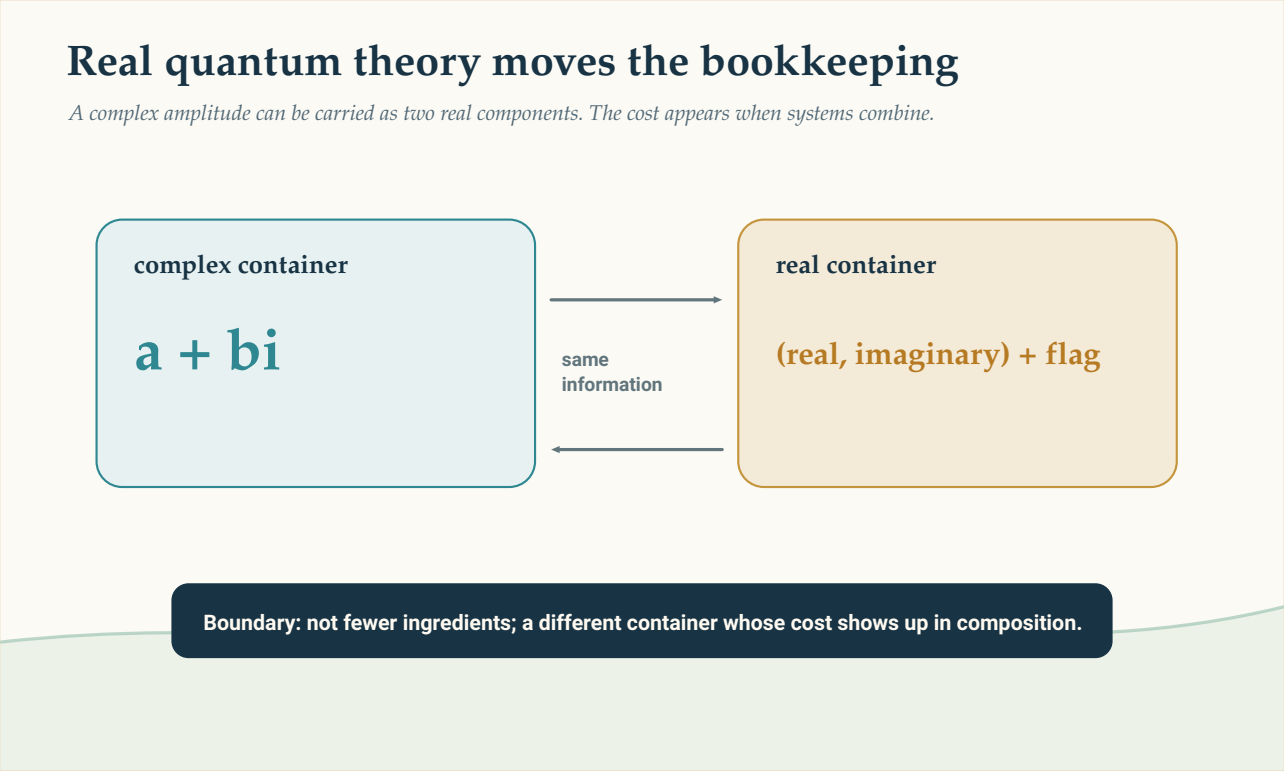
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Egy főcím, amelyet érdemes újra elolvasni

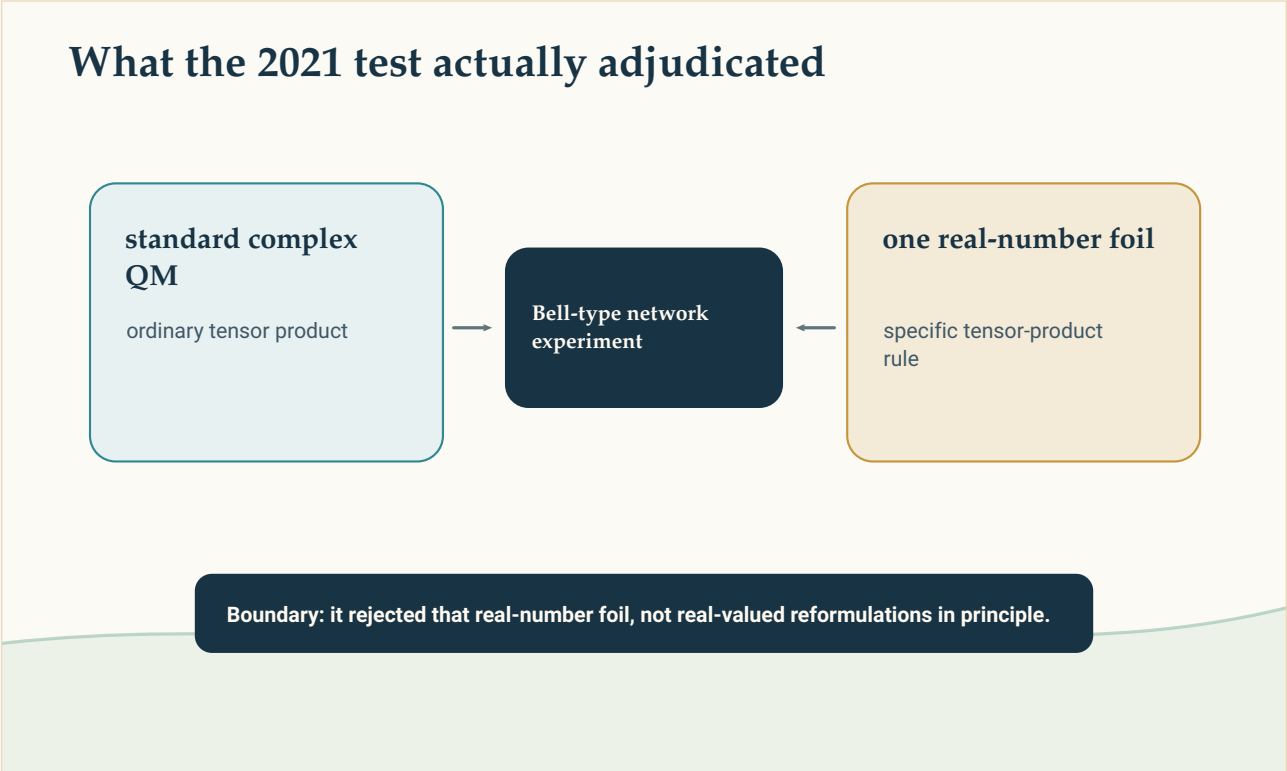
Néhány éve feltűnő állítás járta körbe a világot: a kísérletek állítólag megmutatták, hogy a képzetes számok fizikailag valósak, és a kvantummechanika nem írható le nélkülük. Az állítás valódi, gondos fizikából nőtt ki — Marc-Olivier Renou és munkatársai 2021-es Nature-javaslatából, majd a 2022-es kísérletekből, amelyek megvalósították azt. A népszerű változat azonban egy pontos állítást szlogenné tömörített, a szlogen pedig erősebb lett az eredménynél.

Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping és Dagmar Bruß új, *Physical Review Letters*-ben megjelent tanulmánya visszateszi a pontos állítást a helyére. Olyan kvantummechanikai megfogalmazást konstruál, amely csak valós számokat használ, mégis reprodukálja a standard komplex elmélet minden előrejelzését — beleértve éppen azokat a többrészes kísérleteket is, amelyekről korábban azt mondták, kizárják a valós számokat. A trükk nem az, hogy a képzetes számokat titokban visszacsempészik. Egyetlen feltételezést változtatnak meg arról, hogyan kombinálódnak az elkülönült rendszerek. Az őszinte következtetés, a szerzők saját szavaival: a komplex számok nem szükségesek a kvantummechanika leírásához, de kétségtelenül nagyon hasznosak.



Egy a+bi komplex amplitúdó két valós számból álló párként írható le, egy minden rendszer mellett hordozott „jelzővel”. A valós megfogalmazás nem kevesebb összetevőt használ — csak más tárolóformát, amelynek ára a rendszerek kombinálásakor jelenik meg.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



A 2021–22-es kísérletek két konkrét elméletet hasonlítottak össze — a standard komplex kvantummechanikát és egy valós „foil" elméletet, amely megtartja a tenzorszorzat szabályát —, és a komplex változatot támogatták. Ezt a foil elméletet zárták ki, nem a valós számokat elvben.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mit csinálnak a komplex számok az elméletben?

A kvantummechanikában egy rendszer állapotát amplitúdók írják le, egy kimenetel valószínűségét pedig az amplitúdó nagyságának négyzetéből kapjuk. A standard elméletben ezek az amplitúdók komplex számok: mindegyiknek van nagysága és fázisa, vagyis szöge. Ez a fázis nem dísz. Amikor ugyanahhoz az eredményhez vezető két út egyesül, fázisaik határozzák meg, erősítik vagy kioltják-e egymást — ez az interferencia a kvantumviselkedés egyik jellegzetes vonása. Az egész rendszer közös, globális fázisa ugyanakkor soha nem mérhető.

Egy komplex szám valójában két valós szám — egy valós és egy képzetes rész — meghatározott szorzási szabályokkal egy csomagba kötve. Ez természetesen felveti a kérdést, hogy maga a csomagolás szükséges-e. Megtarthatnánk-e a két valós számot, elhagyhatnánk-e a komplex formát, és mégis megkaphatnánk-e a teljes kvantummechanikát? A szorzási szabályok teszik a komplex számot többé két egymás mellé írt valós számnál, ezért a válasz nem magától értetődő — és itt rejtőzik a finomság.

Mit állapított meg valójában a 2021-es eredmény?

Renou és munkatársai pontosan ezt kérdezték, és éles, tesztelhető formába öntötték. Nem azt kérdezték, hogy valós számok egyáltalán szerepelhetnek-e kvantumelméletben; azt vizsgálták, képes-e egy valós számokra épülő megfogalmazás mindenben egyezni a komplex elmélettel egy konkrét szabály mellett, amely meghatározza, hogyan kombinálódnak a rendszerek. Ez a szabály — nevezzük tenzorszorzat-szabálynak — a több független részből álló rendszer standard matematikai leírása.

E szabály mellett találtak egy három résztvevős helyzetet, amelyben két független forrás oszt meg összefonódást, és ahol a valós számokra épülő elmélet és a komplex elmélet különböző, mérhető korrelációkat jósol — egy Bell-teszt többrészes változatát. 2022-ben szupravezető áramkörökkel és fotonokkal végzett kísérletek hajtottak végre ilyen teszteket. A mért korrelációk egyeztek a komplex kvantummechanikával, és nem egyeztek a valós alternatívával.

> **Miért kell a teszthez két forrás, nem egy?**
>
> Egy szokásos Bell-tesztben egyetlen forrás küld egy összefonódott párt két félnek, Alice-nek és Bobnak. Ebben az elrendezésben egy valós számokra épülő kvantummechanika pontosan ugyanazokat a korrelációkat képes reprodukálni, mint a komplex elmélet — a kettő megkülönböztethetetlen, így egyetlen forrás nem dönthet közöttük.
> A 2021-es érvelés egy második, **független** forrás hozzáadásával kap fogást. Képzeljünk el három résztvevőt egy sorban: Alice, Bob, Charlie. Az egyik forrás Alice-et és Bobot fonja össze; egy másik, közös múlt nélküli forrás Bobot és Charlie-t. Bob középen együtt méri két részecskéjét, összekötve a két oldalt. A két forrás *függetlensége* — az a feltételezés, hogy külön készítették őket — végzi a döntő munkát: a független rendszerek kombinálására használt standard tenzorszorzat-szabály mellett a valós elmélet nem tudja reprodukálni azokat a háromoldalú korrelációkat, amelyeket a komplex kvantummechanika erre a hálózatra jósol, míg egyetlen forrás esetén döntetlen marad. Ezt a különbséget mérték a kísérletek.

Ez valódi és egyértelmű eredmény. De figyeljük meg pontosan, mit hasonlított össze: a standard komplex kvantumelméletet egy konkrét valós elmélettel — azzal, amely megtartja a szokásos tenzorszorzat-szabályt. A kísérlet ezt a párost döntötte el, nem a valós számokat általában. Az új tanulmány a kvantumalapok terminológiáját kölcsönözve annak nevezi a kizárt alternatívát, ami: *foil theory*, azaz szándékosan felállított kontrasztelmélet. Olyan elmélet, amelyet senki nem feltétlenül állít igaznak, hanem azért fogalmazzák meg, hogy kísérlettel megkülönböztethető legyen az elfogadott elmélettől. Értéke éppen a megkülönböztethetőségében rejlik: a foil kizárása megmutatja, mely feltételezések végezték a munkát.

Mit változtat az új tanulmány?

Az új munka szinte mindent megtart, és egy posztulátumot módosít. A rendszerek kombinálására vonatkozó tenzorszorzat-szabály feltételezése helyett egy lokalitási követelményből indul ki, amelyet a szerzők fizikailag alapvetőbbnek tartanak: egy kizárólag az egyik alrendszeren végzett műveletnek nem lehet mérhető hatása egy másik, érintetlen alrendszerre.

Ebből kiindulva explicit módon felépítenek egy valós számokra támaszkodó kvantummechanikát. A szokásos amplitúdók valós és képzetes része extra valós könyvelésként fut tovább — a tanulmány „flagnek", jelzőnek nevezi, amely minden rendszerhez kapcsolódik —, a komplex elmélet mérhetetlen globális fázisa pedig a valós elméletben ugyanilyen mérhetetlen forgássá válik. Az ár pontosan ott jelenik meg, ahol a 2021-es eredmény megtalálta: a rendszerek kombinálásában. A valós leírások naiv összeragasztása még jól definiált receptet sem ad, ezért a konstrukció az azonos fizikát reprezentáló leírásokat csoportokba rendezi, és ezekkel az ekvivalenciaosztályokkal dolgozik. E kombinációs szabály mellett a valós elmélet minden várható értéket reprodukál, amelyet a komplex elmélet jósol — egy rendszerre és sok, térben elkülönülten összefonódott rendszerre is. A szerzők azt is megmutatják, hogy a konstrukció lényegében egyedi, és ekvivalens a standard kvantummechanikával.

Így a többrészes kísérletek ezt a valós elméletet nem tudják megkülönböztetni a komplex elmélettől, mert minden előrejelzésük azonos. A korábbi kísérletek nem hibáztak; egyszerűen egy másik, szigorúbb valós elmélettel szemben teszteltek.

Miért nem ellentmondás?

Könnyű volna ezt úgy olvasni, hogy „a 2021-es kísérletek tévedtek". Ennek éppen az ellenkezője igaz. A kísérletek helyesek voltak, és ez a tanulmány arra épít, hogy helyesek: elfogad minden mért korrelációt, és megmutat egy valós megfogalmazást, amely ugyanazokat adja. Amit felülvizsgál, az az értelmezés — az ugrás onnan, hogy „ezt a valós elméletet megcáfoltuk" oda, hogy „valós számokkal lehetetlen a kvantummechanika". Ez az ugrás átugrotta azt a feltételezést, amely valójában a különbséget okozta.

A tanulmány azt sem állítja, hogy bárkinek el kellene hagynia a komplex számokat. Saját összefoglalója mindkét irányban óvatos: a komplex számok nem szigorúan szükségesek, ugyanakkor nagyon hasznosak. A valós konstrukció minden rendszerhez plusz jelzőt és finomabb kombinációs szabályt igényel; a komplex számok mindezt egyetlen tiszta aritmetikai objektumba csomagolják. A kényelem nem jelentéktelen. A fizikában gyakran éppen ezért győz egy formalizmus.

Miért fontos

A mélyebb kérdés az, mit jelent egy fizikai elméletben az, hogy valami „szükséges". Egy kísérlet meg tud különböztetni két elméletet, ha különböző dolgokat jósolnak. Önmagában azonban nem

tudja megmutatni, hogy egy adott matematikai összetevő az egyetlen lehetséges tartály ugyanazon előrejelzések számára — ez annak kérdése, milyen elméletek léteznek, és konstrukcióval, nem méréssel dől el. Ez a tanulmány ilyen konstrukció: bemutatja azt az alternatívát, amelyről sokan úgy értelmezték, hogy a kísérletek kizárták.

Az eredmény egy általánosan hasznos különbséget is élesít. „Ez az elmélet megcáfolódott" és „ez a matematikai eszköz elkerülhetetlen" két külön állítás, és éppen a köztük lévő résben válhat egy tiszta kísérleti eredmény túlzó következtetéssé. A komplex számok továbbra is a kvantummechanika természetes és hatékony nyelve. Az, hogy metafizikailag szükségesek-e, külön kérdés — és erre jelenleg a válasz: nem.

Röviden

Egy 2021-es javaslat és 2022-es kísérletek megmutatták, hogy a rendszerek kombinálására a standard tenzorszorzat-szabályt használó, valós számokra épülő kvantummechanika eltérő, tesztelhető előrejelzéseket ad a komplex kvantummechanikához képest, a kísérletek pedig a komplex elméletet támogatták. Ezt széles körben úgy tálalták, mint bizonyítékot arra, hogy a képzetes számok fizikailag szükségesek. Az új *Physical Review Letters*-tanulmány más, lokalitásalapú posztulátumból kiindulva konstruál olyan valós számokra épülő kvantummechanikát, amely a komplex elmélet minden előrejelzését reprodukálja, beleértve a többrészes teszteket is — vagyis a komplex számok kényelmesek, nem szigorúan szükségesek. Ez elméleti konstrukció, nem írja felül a korábbi kísérleteket, és nem javasolja a kvantummechanika gyakorlati újraírását.

Tárgyilagos mérleg

Mit mutat a tanulmány: Hogy felépíthető csak valós számokat használó, önkonzisztens kvantummechanika, amely a standard komplex elmélet minden előrejelzését reprodukálja — a többrészes Bell-típusú kísérleteket is —, ha a rendszerek kombinálását nem a tenzorszorzat-szabályból, hanem lokalitási posztulátumból vezetik le.

Mi hihető, de nem ez a lényeg: Hogy ez „megcáfolja" a 2021–2022-es eredményeket. Nem teszi. Helyesnek fogadja el a kísérleteket, és pontosítja hatókörüket: egy konkrét, a tenzorszorzat-szabályt megtartó valós elméletet zártak ki, nem a valós számokat általában.

Mit nem mutat: Hogy a komplex számok hibásak, haszontalanok vagy érdemes volna elhagyni őket — a tanulmány kifejezetten nagyon hasznosnak nevezi őket. Nem új kísérlet sem: nem mértek új adatot; az állítás matematikai konstrukció és konzisztenciabizonyítás.

Fő korlátok egy általános olvasó számára: Az érvelés azon fordul, mely feltételezést tekintjük fizikailag alapvetőbbnek — a tenzorszorzat-szabályt vagy a lokalitási posztulátumot. Ez érvekkel alátámasztott választás egy folyamatban lévő alapkutatási vitában, nem mérés által rögzített tény; a valós számokra épülő konstrukció ráadásul kevésbé természetesnek tűnhet, mint a vele ekvivalens

komplex formalizmus.

Mennyire bízhat benne egy általános olvasó? Nagy bizalommal abban, hogy a konstrukció matematikailag konzisztens — szakmailag lektorált, és logikája ellenőrizhető. A megbízható tanulság a szerényebb: a komplex számok a kvantummechanika kényelmes nyelve, nem bizonyított metafizikai szükségszerűség. Az „a képzetes számok valósak” típusú főcímeket érdemes annak a szlogennek tekinteni, amelyet ez a tanulmány pontosítani próbál.

Források

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