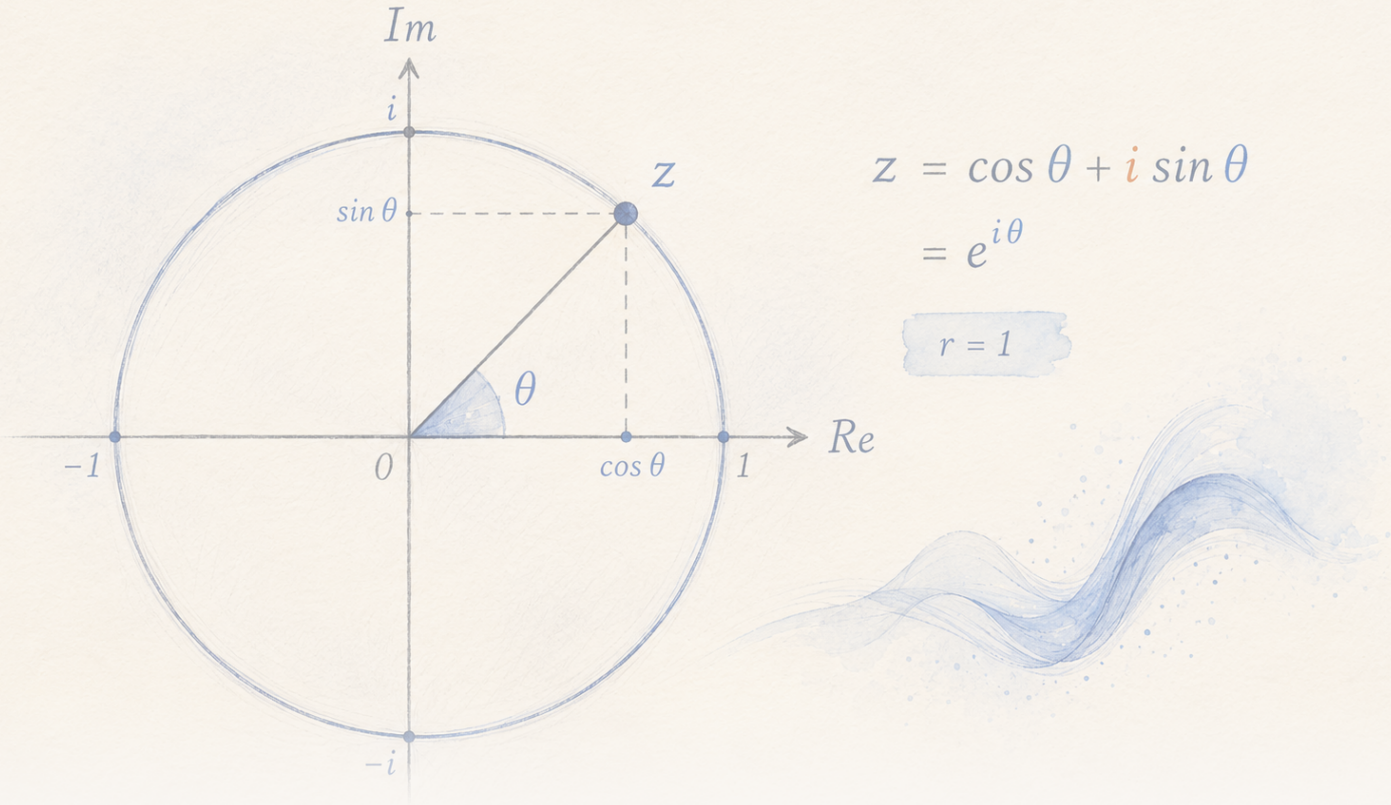


The Clean Paper

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

Mekanika kuantike mund të shkruhet vetëm me numra realë — çështja është si kombinohen sistemet

Në 2021 u propozua një test eksperimental që mund të falsifikonte një version me numra realë të mekanikës kuantike, dhe eksperimentet e 2022 përputheshin me teorinë standarde komplekse. Kjo u raportua shpesh si provë se numrat imagjinarë janë fizikisht realë. Një punim i ri në Physical Review Letters e ngushton pretendimin: me një supozim tjetër, të bazuar në lokalitet, për mënyrën si bashkohen sistemet, formulimi real riprodhon çdo parashikim të mekanikës komplekse, përfshirë testet shumëpalëshe. Leximi i ndershëm është se numrat kompleksë janë shumë të përshtatshëm, jo rreptësisht të domosdoshëm — dhe eksperimentet e mëparshme përjashtuan një teori reale specifike, jo numrat realë në parim.

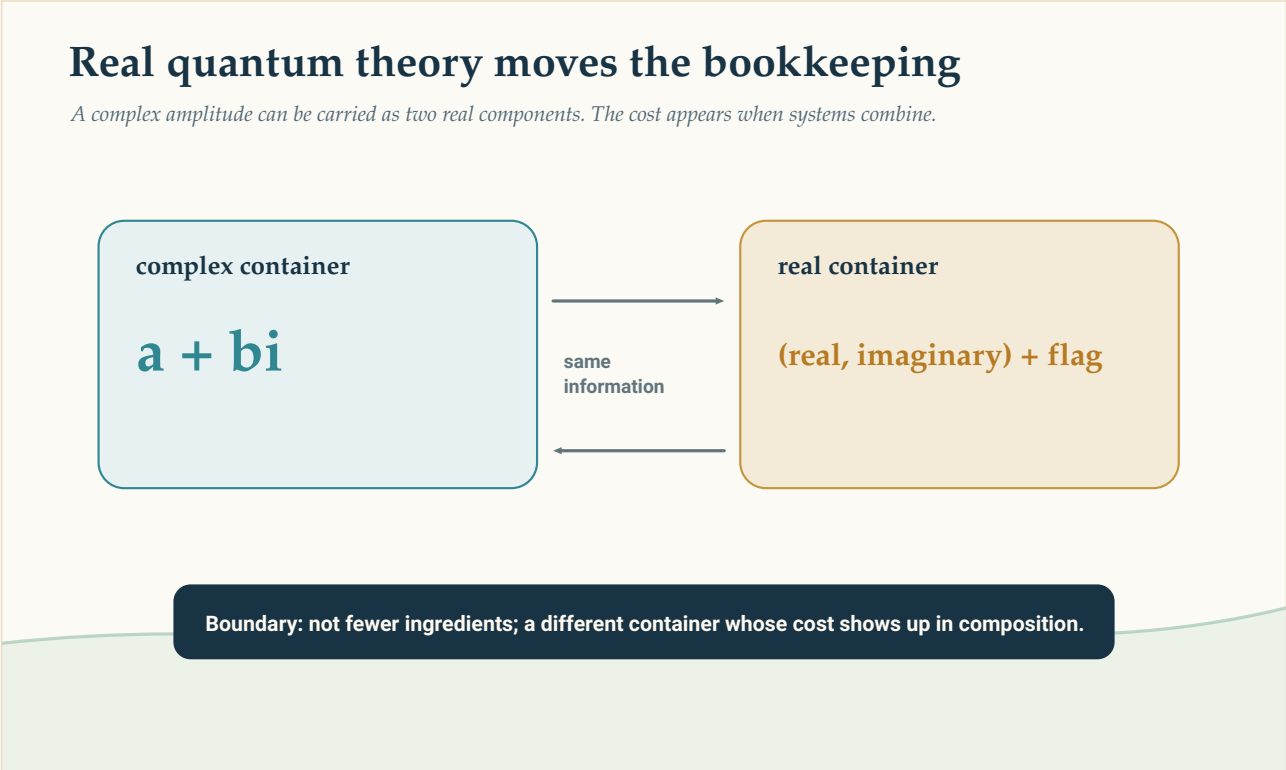
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Një titull që ia vlen ta lexosh sërish

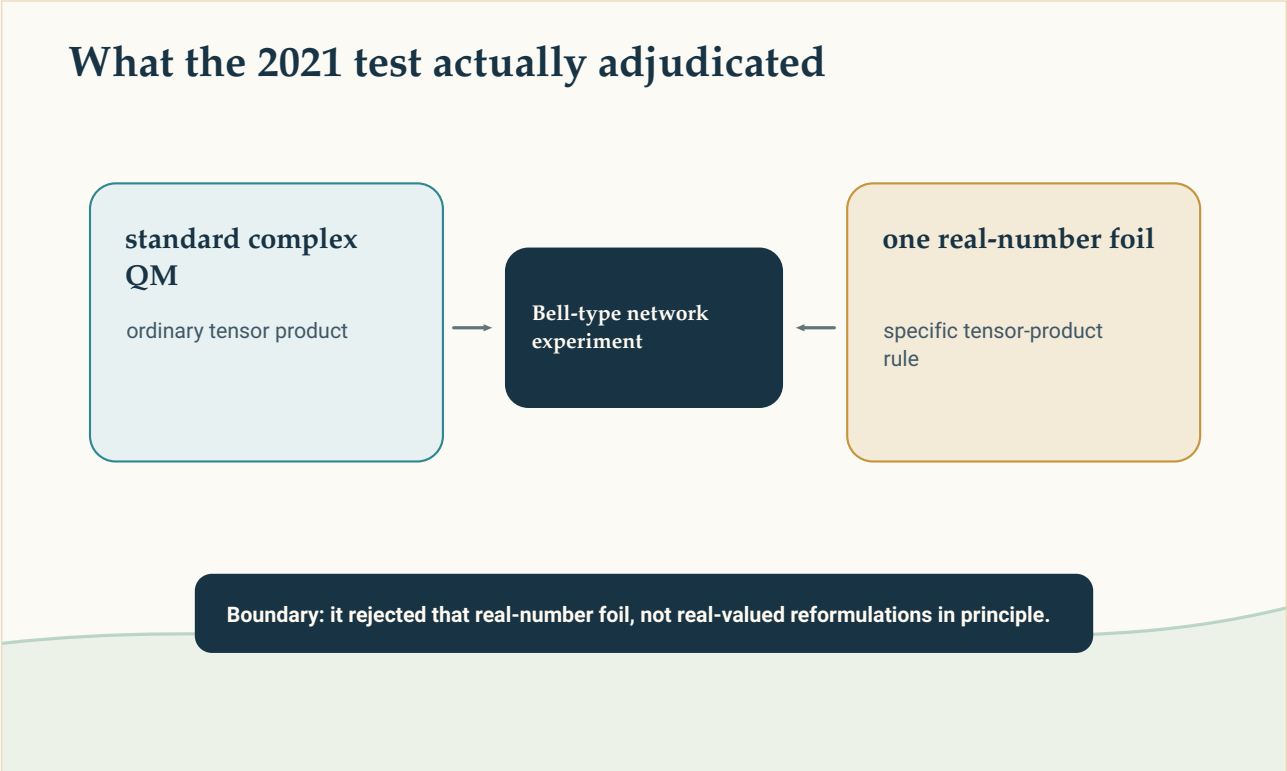
Disa vjet më parë qarkulloi një pretendim goditës: eksperimentet kishin treguar se numrat imagjinarë janë fizikisht realë dhe se mekanika kuantike nuk mund të shkruhet pa ta. Pretendimi doli nga fizikë e kujdesshme dhe reale — një propozim i vitit 2021 në *Nature* nga Marc-Olivier Renou dhe kolegët, dhe eksperimente në 2022 që e vunë në provë. Por versioni popullor e ngjeshi një pohim të saktë në një slogan, dhe slogani ishte më i fortë se rezultati.

Një punim i ri në *Physical Review Letters* nga Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping dhe Dagmar Bruß e rikthen formulimin e saktë. Ai ndërton një version të mekanikës kuantike që përdor vetëm numra realë dhe riprodhon çdo parashikim të teorisë standarde komplekse — përfshirë pikërisht eksperimentet shumëpalëshe që thuhej se i përjashtonin numrat realë. Truku nuk është të futen fshehurazi numrat imagjinarë. Është të ndryshohet një supozim për mënyrën si bashkohen sistemet e veçanta. Përfundimi i ndershëm, sipas vetë autorëve, është se numrat kompleksë nuk janë të domosdoshëm për të përshkruar mekanikën kuantike, por janë sigurisht shumë të dobishëm.



Një amplitudë komplekse a+bi është një çift numrash realë, me një "flamur" shtesë të mbajtur krahas secilit sistem. Formulimi real nuk ka më pak përbërës — thjesht i paketojnë ndryshe, dhe kostoja shfaqet në mënyrën si kombinohen sistemet.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Eksperimentet 2021–22 krahasuan dy teori specifike — mekanikën kuantike standarde komplekse dhe një teori reale “foil” që ruante rregullin e produktit tensorial — dhe mbështetën të parën. Ato përjashtuan atë teori foil, jo numrat realë në parim.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Çfarë bëjnë numrat kompleksë në teori

Në mekanikën kuantike, gjendja e një sistemi përshkruhet me amplituda dhe probabiliteti i një rezultati merret nga madhësia në katror e amplitudës. Në teorinë standarde këto amplituda janë numra kompleksë: secila ka një madhësi dhe një fazë, pra një kënd. Faza nuk është dekor. Kur dy rrugë drejt të njëjtit rezultat bashkohen, fazat vendosin nëse ato përforcohen apo anulohen — interferenca që është shenjë dalluese e sjelljes kuantike. Një fazë globale e përbashkët për të gjithë sistemin, nga ana tjetër, nuk mund të matet kurrë.

Një numër kompleks në thelb është një çift numrash realë — pjesa reale dhe pjesa imagjinare — të paketuar me rregulla të veçanta shumëzimi. Prandaj pyetja e natyrshme është nëse kjo paketë është thelbësore. A mund t’i mbash dy numrat realë, të heqësh paketimin kompleks dhe të ruash gjithë mekanikën kuantike? Rregullat e shumëzimit janë pikërisht ato që i bëjnë numrat kompleksë më shumë se dy numra krah për krah, ndaj përgjigjja nuk është e vetëkuptueshme.

Çfarë vendosi vërtet rezultati i vitit 2021

Renou dhe kolegët e shndërruan pyetjen në një test të qartë. Ata nuk pyetën nëse numrat realë mund të shfaqen diku në teorinë kuantike; pyetën nëse një formulim me numra realë mund të përputhet me çdo parashikim të teorisë komplekse duke ruajtur një rregull të caktuar për bashkimin e sistemeve. Ai rregull — produkti tensorial — është receta standarde për të përshkruar disa pjesë të pavarura si një tërësi.

Nën atë rregull, ata gjetën një skenar me tri palë që ndajnë ngatërrim kuantik nga dy burime të pavarura, ku teoria reale dhe ajo komplekse parashikojnë korrelacione të ndryshme e të matshme — një version shumëpalësh i testit Bell. Në 2022, eksperimente me qarqe superpërcjellëse dhe fotone i kryen këto teste. Korrelacionet e matura përputheshin me mekanikën kuantike komplekse dhe jo me alternativën reale.

> **Pse testi ka nevojë për dy burime, jo një**
>
> Një test Bell i zakonshëm përdor një burim të vetëm që dërgon një çift të ngatërruar te Alice dhe Bob. Në atë konfigurim, një mekanikë kuantike me numra realë mund të riprodhojë saktësisht të njëjtat korrelacione si teoria komplekse — pra një burim i vetëm nuk i dallon dot.
> Argumenti i vitit 2021 fiton fuqi duke shtuar një burim të dytë, **të pavarur**. Imagjinoni Alice, Bob dhe Charlie në vijë: një burim ngatërron Alice me Bob; një burim tjetër, pa histori të përbashkët me të parin, ngatërron Bob me Charlie. Bob mat bashkë dy grimcat e tij dhe lidh dy gjysmat. Pikërisht *pavarësia* e burimeve — supozimi se u përgatitën veçmas — bën punën: me rregullin standard të produktit tensorial, teoria reale nuk mund të riprodhojë korrelacionet treshe që parashikon teoria komplekse për këtë rrjet. Ky ishte hendeku që matën eksperimentet.

Ky është një rezultat real dhe i pastër. Por duhet parë me kujdes çfarë krahasoi: teorinë standarde komplekse me një teori reale specifike — atë që ruan produktin tensorial të zakonshëm. Eksperimentet vendosën mes atij çifti teorish, jo mbi numrat realë si të tillë. Punimi i ri e quan alternativën e përjashtuar me termin e fushës: një *foil theory* — teori që nuk pretendohet si e vërtetë, por ndërtohet si kontrast i dallueshëm ndaj teorisë së pranuar. Vlera e saj është pikërisht se mund të përjashtohet dhe kështu të tregohet cilat supozime të saj kishin pasoja të matshme.

Çfarë ndryshon punimi i ri

Puna e re ruan pothuajse gjithçka dhe ndryshon një postulat. Në vend që të marrë produktin tensorial si rregull të dhënë për bashkimin e sistemeve, nis nga një kërkesë lokaliteti që autorët e konsiderojnë fizikisht më themelore: një operacion mbi një nënsistem nuk duhet të ketë efekt të matshëm mbi një nënsistem tjetër të paprekur.

Nga kjo pikënisje ndërtojnë shprehimisht një mekanikë kuantike me numra realë. Pjesët reale dhe imagjinare të amplitudave të zakonshme mbahen si informacion real shtesë — punimi e quan një

"flamur" të bashkangjitur secilit sistem — ndërsa faza globale e pamatshme e teorisë komplekse kthehet në një rrotullim po aq të pamatshëm në teorinë reale. Çmimi shfaqet pikërisht aty ku e gjeti rezultati i vitit 2021: te mënyra si kombinohen sistemet. Bashkimi naiv i këtyre përshkrimeve reale nuk jep madje një recetë të përcaktuar mirë, ndaj ndërtimi grupon përshkrime që përfaqësojnë të njëjtën fizikë dhe punon me këto klasa. Me këtë rregull bashkimi, teoria reale riprodhon çdo vlerë pritshmërie të teorisë komplekse — si për një sistem, ashtu edhe për shumë sisteme të ngatërruara në vende të ndara. Autorët tregojnë gjithashtu se ndërtimi është në thelb unik dhe ekuivalent me mekanikën kuantike standarde.

Prandaj eksperimentet shumëpalëshe nuk mund ta dallojnë këtë teori reale nga ajo komplekse, sepse parashikimet përputhen në çdo rast. Eksperimentet e mëparshme nuk dështuan; ato thjesht testuan një teori reale tjetër, më kufizuese.

Pse kjo nuk është kundërshti

Do të ishte e lehtë të lexohej si "eksperimentet e 2021 ishin gabim". Është e kundërta. Eksperimentet ishin të sakta dhe ky punim varet prej tyre: pranon çdo korrelacion të matur dhe tregon një formulim real që i prodhon gjithashtu. Ajo që rishikon është interpretimi — kërcimi nga "kjo teori reale u falsifikua" në "numrat realë janë të pamundur në mekanikën kuantike". Ai kërcim anashkaloi supozimin që po bënte punën.

Punimi nuk argumenton as që duhet të braktisim numrat kompleksë. Përmbledhja e tij është e kujdesshme në të dy drejtimet: numrat kompleksë nuk janë rreptësisht të nevojshëm dhe janë shumë të dobishëm. Ndërtimi real kërkon një flamur shtesë në çdo sistem dhe një rregull më delikat për kombinimin e tyre; numrat kompleksë e paketojnë gjithë këtë në një aritmetikë të pastër. Lehtësia e përdorimit nuk është gjë e vogël. Në fizikë shpesh është arsyeja pse një formalizëm fiton.

Pse ka rëndësi

Pyetja interesante poshtë gjithë kësaj është çfarë do të thotë "e domosdoshme" për një teori fizike. Një eksperiment mund të dallojë dy teori kur ato parashikojnë rezultate të ndryshme. Por një eksperiment, vetë, nuk mund të tregojë se një objekt matematikor i veçantë është i vetmi mënyrë për të paketuar një grup parashikimesh — kjo është pyetje për ekzistencën e teorive alternative dhe zgjidhet me ndërtim, jo me matje. Ky punim është pikërisht një ndërtim: ekspozon alternativën që interpretime të mëparshme kishin supozuar se ishte përjashtuar.

Rezultati mpreh edhe një dallim të dobishëm në përgjithësi. "Kjo teori u falsifikua" dhe "ky mjet matematikor është i pashmangshëm" janë pohime të ndryshme. Pikërisht në hendekun mes tyre një rezultat i pastër eksperimental mund të kthehet në teprim. Numrat kompleksë mbeten gjuha natyrore dhe efikase e mekanikës kuantike. Nëse janë metafizikisht të detyrueshëm është pyetje tjetër dhe, sipas këtij punimi, për momentin përgjigjja është jo.

Përmbledhje e shkurtër

Një propozim i vitit 2021 dhe eksperimente në 2022 treguan se një mekanikë kuantike me numra realë, e ndërtuar me rregullin standard të produktit tensorial për kombinimin e sistemeve, bën parashikime të ndryshme dhe të testueshme nga mekanika kuantike komplekse; eksperimentet favorizuan teorinë komplekse. Kjo u raportua gjerësisht si provë se numrat imagjinarë janë fizikisht të domosdoshëm. Punimi i ri në *Physical Review Letters* ndërton një mekanikë kuantike me numra realë mbi një postulat tjetër, të bazuar në lokalitet, që riprodhon të gjitha parashikimet e teorisë komplekse, përfshirë testet shumëpalëshe — duke treguar se numrat kompleksë janë të përshtatshëm, jo rreptësisht të domosdoshëm. Është ndërtim teorik, nuk i rrëzon eksperimentet e mëparshme dhe nuk propozon që në praktikë të rishkruajmë mekanikën kuantike.

Kontroll pa teprime

Çfarë tregon punimi: Një formulim vetëkonsistent i mekanikës kuantike që përdor vetëm numra realë mund të riprodhojë çdo parashikim të teorisë standarde komplekse, përfshirë eksperimentet shumëpalëshe të tipit Bell, nëse ndërtohet mbi një postulat lokaliteti dhe jo mbi rregullin e produktit tensorial për kombinimin e sistemeve.

Çfarë është e besueshme, por jo pika kryesore: Që kjo "rrëzon" rezultatet 2021–2022. Nuk i rrëzon. I pranon si të sakta dhe rishikon fushën e tyre: ato përjashtuan një teori reale specifike, atë që ruante rregullin tensorial, jo numrat realë në parim.

Çfarë nuk tregon: Që numrat kompleksë janë të gabuar, të padobishëm ose duhen hequr nga praktika — vetë punimi i quan shumë të dobishëm. Nuk është as eksperiment i ri: nuk u matën të dhëna; pretendimi është ndërtim matematikor dhe provë konsistence.

Kufizimi kryesor për një lexues të përgjithshëm: Argumenti varet nga cili supozim konsiderohet më themelor fizikisht — rregulli i produktit tensorial apo postulati i lokalitetit. Kjo është zgjedhje e arsyetuar në një debat të vazhdueshëm për themelet, jo fakt i fiksuar nga matja, dhe ndërtimi real mund të duket më pak natyral se ai kompleks që riprodhon.

Sa besim duhet të ketë një lexues i përgjithshëm? Të lartë se ndërtimi është matematikisht konsistent — është i rishikuar nga kolegët dhe logjika mund të kontrollohet. Përfundimi i besueshëm është modest: numrat kompleksë janë gjuha shumë e përshtatshme e mekanikës kuantike, jo domosdoshmëri metafizike e provuar. Titujt "numrat imagjinarë janë realë" duhen trajtuar si slogani që ky punim synon të korrigjojë.

Burimet

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