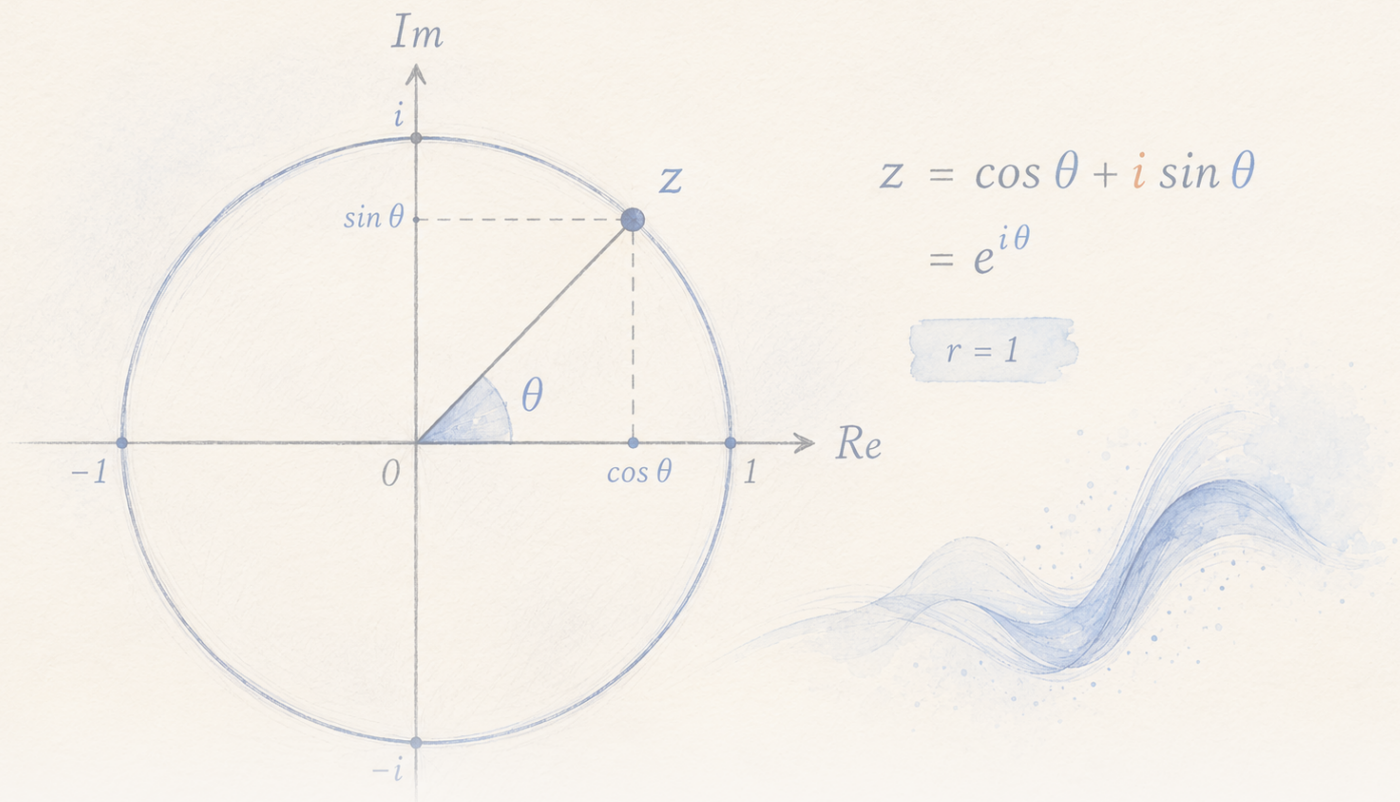




The CLEAN PAPER

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

Kvantmekaniken kan formuleras med enbart reella tal — haken ligger i hur system kombineras

År 2021 hävdade ett uppmärksammat resultat att en version av kvantmekaniken med reella tal kunde falsifieras experimentellt, och uppföljande experiment 2022 stämde överens med komplex standardkvantteori. Detta framställdes ofta i rubriker som ett bevis för att imaginära tal är fysiskt reella. En ny artikel i *Physical Review Letters* preciserar påståendet: om formuleringen med reella tal bygger på ett annat, möjligen mer fysikaliskt antagande om hur separata system kombineras reproducerar den varje förutsägelse från komplex kvantmekanik, inklusive flerparsystemtesten. Den uppriktiga tolkningen är att komplexa tal är praktiska snarare än strikt nödvändiga — och att de tidigare experimenten uteslöt en viss reell teori, inte reella tal i princip. Det är ett teoretiskt resultat om kvantmekanikens grunder, inte en ny mätning, och det uppmanar ingen att sluta använda komplexa tal.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · 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

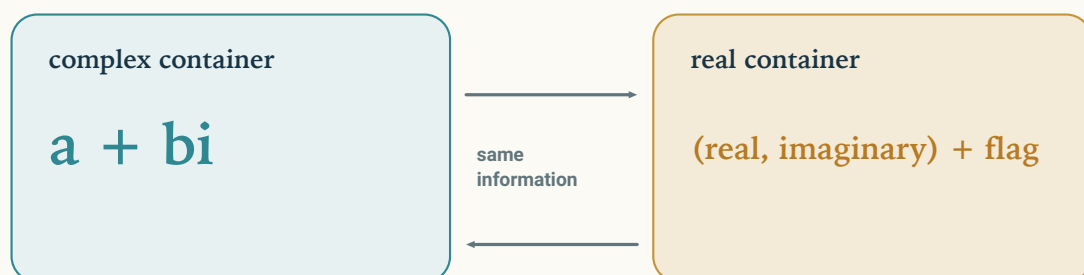
En rubrik värd att läsa igen

För några år sedan fick ett uppseendeväckande påstående stor spridning: experiment hade visat att imaginära tal är fysiskt reella och att kvantmekaniken inte kan formuleras utan dem. Påståendet hade sitt ursprung i gedigen, omsorgsfull fysik — ett förslag från 2021 i *Nature* av Marc-Olivier Renou och kollegor, samt experiment 2022 som omsatte det i praktiken. Men den populära versionen pressade ihop ett precist påstående till en slogan, och sloganen var starkare än resultatet.

En ny artikel i *Physical Review Letters* av Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping och Dagmar Bruß återställer den precisa formuleringen. Den konstruerar en version av kvantmekaniken som enbart använder reella tal och reproducerar varje förutsägelse från den komplexa standardteorin — inklusive just de flerpartsexperiment som sades utesluta reella tal. Tricket är inte att smyga in imaginära tal igen. Det är att ändra ett antagande om hur separata system kombineras. Den uppriktiga slutsatsen är, med författarnas egna ord, att komplexa tal inte är nödvändiga för att beskriva kvantmekaniken, men att de utan tvekan är mycket användbara.

Real quantum theory moves the bookkeeping

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

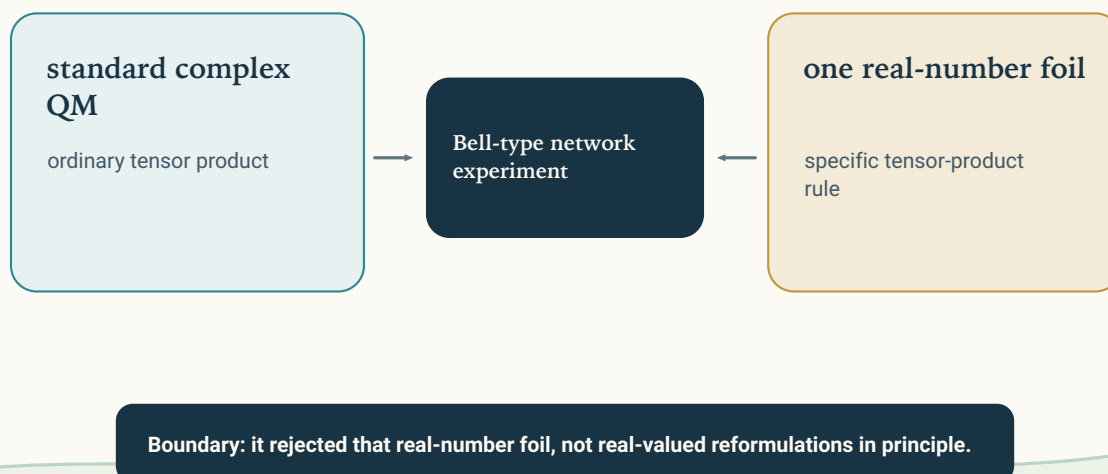


Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

En komplex amplitud $a+bi$ är ett par reella tal med en "flagga" som följer med varje system. Den reella formuleringen har inte färre beståndsdelar — bara en annan behållare, där kostnaden visar sig i hur system kombineras.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Experimenten 2021–22 jämförde två specifika teorier — komplex standardkvantmekanik med en reell "kontrastteori" som behåller tensorproduktregeln — och utfallet blev till den komplexa teorins fördel. De uteslöt denna kontrastteori, inte reella tal i princip.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Vilken roll komplexa tal spelar i teorin

I kvantmekaniken beskrivs ett systems tillstånd med amplituder, och för att få sannolikheten för ett utfall tar man kvadraten på amplitudens belopp. I standardteorin är dessa amplituder komplexa tal: vart och ett har ett belopp och en fas, en vinkel. Fasen är inte en utsmyckning. När två vägar till samma utfall kombineras avgör deras faser om de förstärker eller tar ut varandra — den interferens som är kvantbeteendets kännetecken. En övergripande fas som delas av hela systemet kan däremot aldrig mätas.

Ett komplext tal är egentligen bara ett par reella tal — en realdel och en imaginärdel — sammanförda med särskilda regler för hur de multipliceras. En naturlig fråga är därför om denna paketering är nödvändig. Kan man behålla de två reella talen, slopa den komplexa förpackningen och ändå få med hela kvantmekaniken? Multiplikationsreglerna är det som gör komplexa tal till mer än två tal sida vid sida, så svaret är inte självklart, och det är där subtiliteten ligger.

Vad resultatet från 2021 faktiskt visade

Renou och kollegor ställde just den frågan och gav den en skarp, testbar form. De frågade inte om reella tal över huvud taget kan förekomma i kvantteorin; de frågade om en formulering med reella tal kunde motsvara alla förutsägelser i den komplexa teorin under en viss regel för att kombinera system. Denna regel — låt oss kalla den för tensorproduktregeln — är standardmetoden för att beskriva flera oberoende delar som en enda helhet.

Under den regeln fann de ett scenario där tre parter delar sammanflätning från två oberoende källor och där en teori med reella tal och den komplexa teorin förutsäger olika, mätbara korrelationer — en flerpartsvariant av ett Belltest. År 2022 genomfördes sådana test i experiment med supraledande kretsar och med fotoner. De uppmätta korrelationerna stämde med komplex kvantmekanik och var oförenliga med det reella alternativet.

Varför testet behöver två källor, inte en

Ett vanligt Belltest använder en enda källa som skickar ett sammanflätat par till två personer, Alice och Bob. I den uppställningen kan en kvantmekanik med reella tal reproducera exakt samma korrelationer som den komplexa teorin — de två går inte att skilja åt, så en enda källa kan inte avgöra saken.

Argumentet från 2021 får fäste genom att lägga till en andra, **oberoende** källa. Föreställ dig tre parter på rad: Alice, Bob, Charlie. En källa sammanflätar Alice med Bob; en separat källa, utan något gemensamt förflutet, sammanflätar Bob med Charlie. Bob sitter i mitten och mäter sina två partiklar gemensamt, vilket länkar samman de två halvorna. Det är de två källornas *oberoende* — antagandet att de förbereddes var för sig — som gör jobbet: under den vanliga tensorproduktregeln för att kombinera oberoende system kan en teori med reella tal inte motsvara de treparts-korrelationer som komplex kvantmekanik förutsäger för detta nätverk, medan ett test med en enda källa lämnar teorierna på lika fot. Det var denna skillnad som experimenten mätte.

Det är ett gediget och tydligt resultat. Men lägg noga märke till vad som jämfördes: komplex standard-kvantteori mot en specifik reell teori — den som behåller den vanliga tensorproduktregeln. Det var mellan just dessa två, inte om reella tal som sådana, som experimenten avgjorde. Den nya artikeln lånar en term från forskningen om kvantmekanikens grunder och kallar det uteslutna alternativet för vad det är: en *kontrastteori* — en teori som ingen framhåller som sann, utan som ställs upp som en avsiktlig kontrast till den accepterade teorin så att experiment kan skilja dem åt. Hela dess värde ligger i att den går att särskilja: genom att utesluta kontrastteorin ser man vilka av den reella teorins antaganden som gjorde jobbet.

Vad den nya artikeln ändrar

Det nya arbetet behåller nästan allt och ändrar ett postulat. I stället för att förutsätta tensorproduktregeln när system kombineras utgår det från ett lokalitetskrav som författarna hävdar är mer fysikaliskt grundläggande: en operation som utförs enbart på ett delsystem bör inte ha någon mätbar effekt på ett annat, orört delsystem.

Från denna utgångspunkt bygger de uttryckligen upp en kvantmekanik med reella tal. De vanliga amplitudernas real- och imaginärdelar förs med som extra bokföring i reella tal — artikeln kallar det en ”flagga” som är fäst vid varje system — och den komplexa teorins icke observerbara globala fas blir en lika icke observerbar rotation i den reella teorin. Priset visar sig precis där resultatet från 2021 placerade det: i hur system kombineras. Det naiva sättet att foga samman dessa reella beskrivningar ger inte ens ett väldefinierat recept, så konstruktionen grupperar i stället beskrivningar som representerar samma fysik och arbetar med dessa klasser. Med den kombinationsregeln reproducerar den reella teorin varje förväntningsvärde som den komplexa teorin förutsäger — för ett system såväl som för många, sammanflätade över åtskilda parter. Författarna visar också att konstruktionen i huvudsak är unik och likvärdig med standardkvantmekaniken.

Flerpartsexperimenten kan alltså inte skilja denna reella teori från den komplexa, eftersom de två är överens om varje förutsägelse. De tidigare experimenten misslyckades inte; de testade helt enkelt mot en annan, mer begränsad reell teori.

Varför detta inte är en motsägelse

Det vore lätt att läsa detta som att ”experimenten från 2021 var fel”. Det är tvärtom. Experimenten var riktiga, och den här artikeln är beroende av att de var riktiga: den godtar varje uppmätt korrelation och visar en reell formulering som också ger dem. Det som revideras är tolkningen — språnget från ”denna reella teori är falsifierad” till ”reella tal är omöjliga i kvantmekaniken”. Det språnget hoppade över det antagande som gjorde jobbet.

Artikeln hävdar inte heller att någon bör överge komplexa tal. Dess egen sammanfattning är försiktig åt båda hållen: komplexa tal är inte strikt nödvändiga, och de är mycket användbara. Den reella konstruktionen behöver en extra flagga på varje system och en mer raffinerad regel för att kombinera dem; de komplexa talen paketerar allt detta i ett enda elegant stycke aritmetik. Bekvämlighet är inte oviktig. Inom fysiken är det ofta hela skälet till att en formalism vinner.

Varför det spelar roll

Den intressanta underliggande frågan är vad ordet ”nödvändig” betyder för en fysikalisk teori. Ett experiment kan skilja mellan två teorier när de förutsäger olika saker. Det kan inte i sig tala om för oss att en viss matematisk beståndsdel är den enda möjliga behållaren för en uppsättning förutsägelser —

det är en fråga om vilka teorier som existerar, och den avgörs genom konstruktion, inte mätning. Den här artikeln är en konstruktion: den visar upp det alternativ som experimenten antogs ha uteslutit.

Resultatet skärper också en distinktion som är värd att bevara generellt. ”Den här teorin är falsifierad” och ”det här matematiska verktyget är oundvikligt” är två olika påståenden, och glappet mellan dem är just där ett tydligt experimentresultat kan förvandlas till ett överdrivet påstående. Komplexa tal förblir kvantmekanikens naturliga och effektiva språk. Huruvida de är metafysiskt nödvändiga är en separat fråga, och på den frågan är svaret tills vidare nej.

Klar sammanfattning

Ett förslag från 2021 och experiment 2022 visade att en kvantmekanik med reella tal som bygger på den vanliga tensorproduktregeln för att kombinera system ger andra, testbara förutsägelser än komplex kvantmekanik, och experimenten utföll till den komplexa teorins fördel. Detta rapporterades allmänt som ett bevis för att imaginära tal är fysiskt nödvändiga. Den nya artikeln i *Physical Review Letters* konstruerar en kvantmekanik med reella tal utifrån ett annat, lokalitetsbaserat postulat som reproducerar den komplexa teorins alla förutsägelser, inklusive flerpartstesten — och visar därmed att komplexa tal är praktiska snarare än strikt nödvändiga. Det är en teoretisk konstruktion, den kullkastar inte de tidigare experimenten och den uppmanar ingen att omformulera kvantmekaniken i praktiken.

Kontroll utan omsvep

Vad artikeln visar: Att en självkonsistent formulering av kvantmekaniken som enbart använder reella tal kan reproducera varje förutsägelse från den komplexa standardteorin, inklusive flerpartsvarianter av Belleexperiment, om den bygger på ett lokalitetspostulat i stället för tensorproduktregeln för att kombinera system.

Vad som kan låta rimligt men inte är poängen: Att detta ”motbevisar” resultaten från 2021–2022. Det gör det inte. Det godtar experimenten som korrekta och omtolkar deras räckvidd: de uteslöt en specifik reell teori, den som behåller tensorproduktregeln, inte reella tal i princip.

Vad den inte visar: Att komplexa tal är felaktiga, oanvändbara eller värda att överge i praktiken — artikeln kallar dem uttryckligen mycket användbara. Det är inte heller ett nytt experiment: inga mätdata samlades in; påståendet är en matematisk konstruktion och ett konsistensbevis.

De viktigaste begränsningarna för en allmän läsare: Argumentet hänger på vilket antagande man betraktar som mer fysikaliskt grundläggande — tensorproduktregeln eller lokalitetspostulatet. Det är ett motiverat val i en pågående debatt om kvantmekanikens grunder, inte ett faktum som har slagits fast genom mätning, och den reella konstruktionen kan hävdas vara mindre naturlig än den komplexa konstruktion som den motsvarar.

Hur stor tilltro bör en allmän läsare ha? Stor tilltro till att konstruktionen är matematiskt konsekvent

— den är sakkunniggranskad och dess logik går att kontrollera. Den slutsats man kan lita på är den måttfulla: komplexa tal är kvantmekanikens praktiska språk, inte en bevisad metafysisk nödvändighet. Betrakta varje rubrik av typen ”imaginära tal är verkliga” som just den slogan som den här artikeln skrevs för att korrigera.

Källor

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>