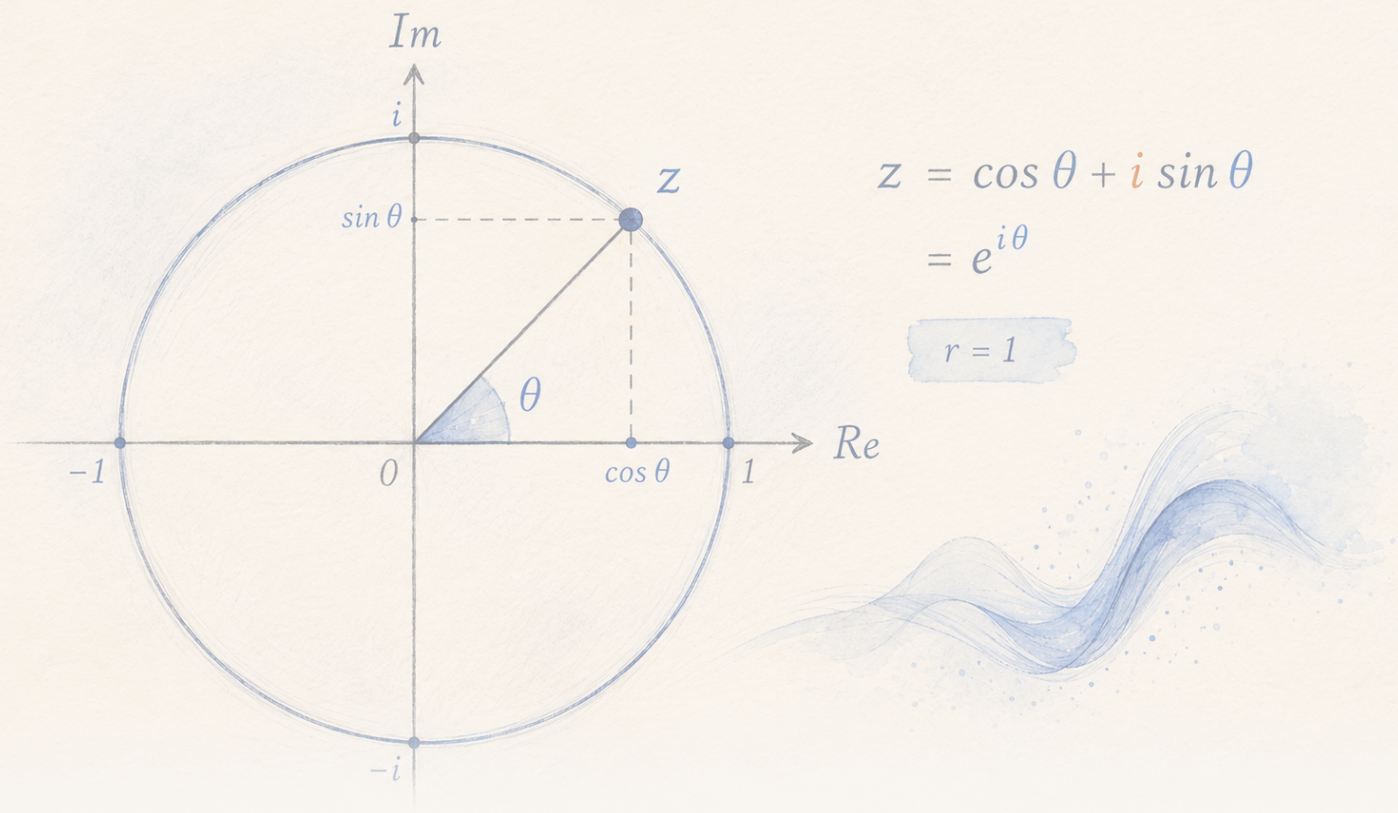




The CLEAN PAPER

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

Kvantemekanikken kan formuleres med bare reelle tall — haken ligger i hvordan systemer kombineres

I 2021 hevdet et mye omtalt resultat at en versjon av kvantemekanikken med reelle tall kunne falsifiseres eksperimentelt, og oppfølgende eksperimenter i 2022 stemte med kompleks standardkvanteteori. Dette ble ofte omtalt i overskrifter som et bevis på at imaginære tall er fysisk reelle. En ny artikkel i Physical Review Letters presiserer påstanden: Hvis formuleringen med reelle tall bygges på en annen, muligens mer fysisk antakelse om hvordan separate systemer kombineres, gjenskaper den enhver forutsigelse i kompleks kvantemekanikk, også flerpartstestene. Den ærlige tolkningen er at komplekse tall er praktiske snarere enn strengt nødvendige — og at de tidligere eksperimentene utelukket én bestemt reell teori, ikke reelle tall i prinsippet. Det er et teoretisk resultat om kvantemekanikkens grunnlag, ikke en ny måling, og det ber ingen om å slutte å bruke komplekse tall.

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

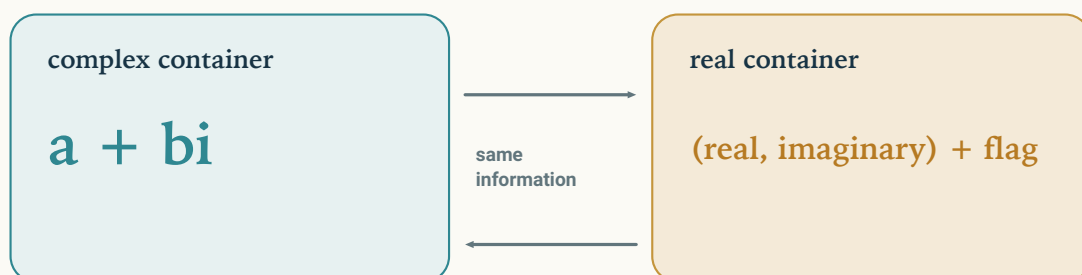
En overskrift det er verdt å lese på nytt

For noen år siden fikk en oppsiktsvekkende påstand stor utbredelse: Eksperimenter hadde vist at imaginære tall er fysisk reelle, og at kvantemekanikken ikke kan formuleres uten dem. Påstanden sprang ut av solid, grundig fysikk — et forslag fra 2021 i *Nature* av Marc-Olivier Renou og kolleger, samt eksperimenter i 2022 som gjennomførte det. Men den populære versjonen presset et presist utsagn sammen til et slagord, og slagordet var sterkere enn resultatet.

En ny artikkel i *Physical Review Letters* av Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping og Dagmar Bruß setter det presise utsagnet på plass igjen. Den konstruerer en versjon av kvantemekanikken som bare bruker reelle tall og gjenskaper enhver forutsigelse i den komplekse standardteorien — også nettopp de flerpartseksperimentene som ble sagt å utelukke reelle tall. Trikket er ikke å smugle imaginære tall inn igjen. Det er å endre én antakelse om hvordan separate systemer kombineres. Den ærlige konklusjonen er, med forfatterens egne ord, at komplekse tall ikke er nødvendige for å beskrive kvantemekanikken, men at de definitivt er svært nyttige.

Real quantum theory moves the bookkeeping

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

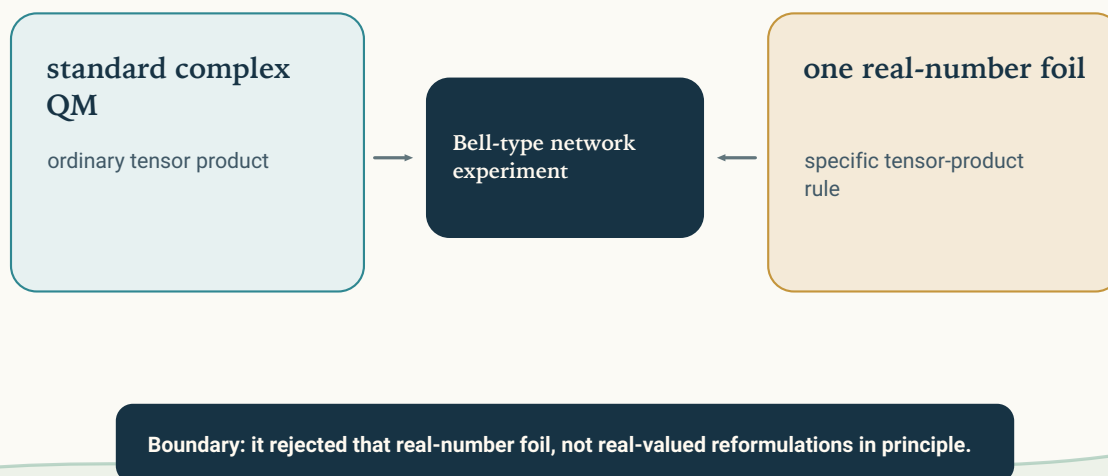


Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

En kompleks amplitude $a+bi$ er et par reelle tall med et «flagg» som følger med hvert system. Den reelle formuleringen har ikke færre bestanddeler — bare en annen beholder, der kostnaden viser seg i hvordan systemer kombineres.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Eksperimentene i 2021–22 sammenlignet to bestemte teorier — kompleks standardkvantemekanikk med en reell «kontrastteori» som beholder tensorproduktregelen — og falt ut til fordel for den komplekse teorien. De utelukket denne kontrastteorien, ikke reelle tall i prinsippet.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Hva komplekse tall gjør i teorien

I kvantemekanikken beskrives tilstanden til et system av amplituder, og for å få sannsynligheten for et utfall tar man kvadratet av amplitudens størrelse. I standardteorien er disse amplitudene komplekse tall: Hver av dem har en størrelse og en fase, en vinkel. Fasen er ikke pynt. Når to veier til samme utfall kombineres, avgjør fasene om de forsterker eller kansellerer hverandre — interferensen som er kjennetegnet på kvanteoppførsel. En overordnet fase som er felles for hele systemet, kan derimot aldri måles.

Et komplekst tall er egentlig bare et par reelle tall — en realdel og en imaginærdel — samlet med bestemte regler for hvordan de multipliseres. Et naturlig spørsmål er derfor om denne innpakningen er avgjørende. Kan man beholde de to reelle tallene, droppe den komplekse innpakningen og likevel få med hele kvantemekanikken? Multiplikasjonsreglene er det som gjør komplekse tall til mer enn to tall ved siden av hverandre, så svaret er ikke opplagt, og det er her nyansen ligger.

Hva resultatet fra 2021 faktisk fastslo

Renou og kollegene stilte nettopp dette spørsmålet og ga det en skarp, testbar form. De spurte ikke om reelle tall overhodet kan forekomme i kvanteteori; de spurte om en formulering med reelle tall kunne samsvare med alle forutsigelsene i den komplekse teorien gitt en bestemt regel for å kombinere systemer. Denne regelen — la oss kalle den tensorproduktregelen — er standardmetoden for å beskrive flere uavhengige deler som én helhet.

Med denne regelen fant de et scenario der tre parter deler sammenfiltrering fra to uavhengige kilder, og der en teori med reelle tall og den komplekse teorien forutsier ulike, målbare korrelasjoner — en flerpartersversjon av en Bell-test. I 2022 ble slike tester utført i eksperimenter med superledende kretser og med fotoner. De målte korrelasjonene stemte med kompleks kvantemekanikk og var uforenlige med det reelle alternativet.

Hvorfor testen trenger to kilder, ikke én

En vanlig Bell-test bruker én kilde som sender ett sammenfiltret par til to personer, Alice og Bob. I dette oppsettet kan en kvantemekanikk med reelle tall gjenskape nøyaktig de samme korrelasjonene som den komplekse teorien — de to kan ikke skilles fra hverandre, så én kilde kan ikke avgjøre saken.

Argumentet fra 2021 får feste ved å legge til en annen, **uavhengig** kilde. Se for deg tre parter på en linje: Alice, Bob, Charlie. Én kilde sammenfiltrer Alice med Bob; en separat kilde, uten noen felles fortid, sammenfiltrer Bob med Charlie. Bob sitter i midten og måler de to partiklene sine samlet, slik at de to halvdelene knyttes sammen. Det er de to kildenes *uavhengighet* — antakelsen om at de ble klargjort hver for seg — som gjør jobben: Med den vanlige tensorproduktregelen for å kombinere uavhengige systemer kan en teori med reelle tall ikke samsvare med trepartskorrelasjonene som kompleks kvantemekanikk forutsier for dette nettverket, mens en test med én kilde lar de to teoriene stå likt. Det var denne forskjellen eksperimentene målte.

Det er et solid og tydelig resultat. Men legg nøye merke til hva som ble sammenlignet: kompleks standardkvanteteori mot én bestemt reell teori — den som beholder den vanlige tensorproduktregelen. Det eksperimentene avgjorde mellom, var disse to teoriene — ikke reelle tall som sådan. Den nye artikkelen låner et begrep fra forskningen på kvantemekanikkens grunnlag og kaller det utelukkede alternativet det det er: en *kontrastteori* — en teori ingen hevder er sann, men som stilles opp som en bevisst kontrast til den aksepterte teorien slik at eksperimenter kan skille dem fra hverandre. Hele verdien ligger i at den kan skilles fra den andre: Ved å utelukke kontrastteorien ser man hvilke av den reelle teoriens antakelser som gjorde jobben.

Hva den nye artikkelen endrer

Det nye arbeidet beholder nesten alt og endrer ett postulat. I stedet for å forutsette tensorproduktregelen når systemer kombineres, tar det utgangspunkt i et lokalitetskrav som forfatterne mener er mer fysisk grunnleggende: En operasjon som bare utføres på ett delsystem, bør ikke ha noen målbar virkning på et annet, urørt delsystem.

Fra dette utgangspunktet bygger de eksplisitt opp en kvantemekanikk med reelle tall. Real- og imaginærdelene til de vanlige amplitudene føres med som ekstra bokføring i reelle tall — artikkelen kaller dette et «flagg» festet til hvert system — og den komplekse teoriens ikke-observerbare globale fase blir til en like ikke-observerbar rotasjon i den reelle teorien. Prisen viser seg akkurat der resultatet fra 2021 plasserte den: i hvordan systemer kombineres. Den naive måten å sette disse reelle beskrivelsene sammen på gir ikke engang en veldefinert fremgangsmåte, så konstruksjonen grupperer i stedet beskrivelser som representerer den samme fysikken, og arbeider med disse klassene. Med denne kombinasjonsregelen gjenskaper den reelle teorien enhver forventningsverdi den komplekse teorien forutsier — for ett system og for mange, sammenfiltret på tvers av atskilte parter. Forfatterne viser også at konstruksjonen i hovedsak er entydig og ekvivalent med standard kvantemekanikk.

Flerpartseksperimentene kan derfor ikke skille denne reelle teorien fra den komplekse, fordi de to er enige om enhver forutsigelse. De tidligere eksperimentene slo ikke feil; de testet ganske enkelt mot en annen, mer begrenset reell teori.

Hvorfor dette ikke er en selvmotsigelse

Det ville være lett å lese dette som at «eksperimentene fra 2021 tok feil». Det motsatte er tilfellet. Eksperimentene var riktige, og denne artikkelen er avhengig av at de var riktige: Den godtar alle målte korrelasjoner og viser en reell formulering som også frembringer dem. Det som revideres, er tolkningen — spranget fra «denne reelle teorien er falsifisert» til «reelle tall er umulige i kvantemekanikken». Dette spranget hoppet over antakelsen som gjorde jobben.

Artikkelen hevder heller ikke at noen bør gi avkall på komplekse tall. Artikkelens egen oppsummering er forsiktig i begge retninger: Komplekse tall er ikke strengt nødvendige, og de er svært nyttige. Den reelle konstruksjonen trenger et ekstra flagg på hvert system og en mer finstemt regel for å kombinere dem; de komplekse tallene pakker alt dette inn i ett ryddig stykke matematikk. Bekvemmelighet er ikke uviktig. I fysikken er det ofte hele grunnen til at en formalisme vinner frem.

Hvorfor det er viktig

Det interessante underliggende spørsmålet er hva ordet «nødvendig» betyr for en fysisk teori. Et eksperiment kan skille mellom to teorier når de forutsier forskjellige ting. Det kan ikke i seg selv fortelle deg at en bestemt matematisk bestanddel er den eneste mulige beholderen for et sett med

forutsigelser — det er et spørsmål om hvilke teorier som finnes, og det avgjøres gjennom konstruksjon, ikke måling. Denne artikkelen er en konstruksjon: Den viser frem alternativet som eksperimentene ble antatt å ha utelukket.

Resultatet tydeliggjør også et skille det er verdt å holde fast ved generelt. «Denne teorien er falsifisert» og «dette matematiske verktøyet er uunngåelig» er forskjellige utsagn, og gapet mellom dem er nettopp der et klart eksperimentelt resultat kan bli til en overdreven påstand. Komplekse tall er fortsatt kvantemekanikkens naturlige og effektive språk. Om de er metafysisk nødvendige, er et eget spørsmål, og på det spørsmålet er svaret foreløpig nei.

Kort fortalt

Et forslag fra 2021 og eksperimenter i 2022 viste at en kvantemekanikk med reelle tall som bygger på standardregelen for tensorprodukter ved kombinasjon av systemer, gir andre, testbare forutsigelser enn kompleks kvantemekanikk, og eksperimentene falt ut til fordel for den komplekse teorien. Dette ble ofte omtalt som et bevis på at imaginære tall er fysisk nødvendige. Den nye artikkelen i *Physical Review Letters* konstruerer en kvantemekanikk med reelle tall basert på et annet, lokalitetsbasert postulat som gjensker alle forutsigelsene i den komplekse teorien, også flerpartstestene — og viser dermed at komplekse tall er praktiske snarere enn strengt nødvendige. Det er en teoretisk konstruksjon, den omstøter ikke de tidligere eksperimentene, og den ber ingen om å omformulere kvantemekanikken i praksis.

Sjekk uten omsvøp

Hva artikkelen viser: At en selvkonsistent formulering av kvantemekanikken som bare bruker reelle tall, kan gjensker enhver forutsigelse i den komplekse standardteorien, også flerparts Bell-type-eksperimenter, hvis den bygger på et lokalitetspostulat i stedet for tensorproduktregelen for å kombinere systemer.

Hva som kan høres rimelig ut, men ikke er poenget: At dette «motbeviser» resultatene fra 2021–2022. Det gjør det ikke. Det godtar eksperimentene som riktige og tolker rekkevidden deres på nytt: De utelukket én bestemt reell teori, den som beholder tensorproduktregelen, ikke reelle tall i prinsippet.

Hva den ikke viser: At komplekse tall er feil, ubrukelige eller verdt å droppe i praksis — artikkelen kaller dem uttrykkelig svært nyttige. Det er heller ikke et nytt eksperiment: Ingen data ble målt; påstanden er en matematisk konstruksjon og et konsistensbevis.

De viktigste begrensningene for en allmenn leser: Argumentet avhenger av hvilken antakelse man regner som mer fysisk grunnleggende — tensorproduktregelen eller lokalitetspostulatet. Dette er et begrunnet valg i en pågående debatt om kvantemekanikkens grunnlag, ikke et faktum som er fastslått ved måling, og den reelle konstruksjonen kan hevdes å være mindre naturlig enn den komplekse konstruksjonen som den samsvarer med.

Hvor stor tillit bør en allmenn leser ha? Stor tillit til at konstruksjonen er matematisk konsistent — den er fagfellevurdert, og logikken kan etterprøves. Konklusjonen man kan stole på, er den nøkterne: Komplekse tall er kvantemekanikkens praktiske språk, ikke en bevist metafysisk nødvendighet. Les enhver overskrift av typen «imaginære tall er virkelige» som nettopp det slagordet denne artikkelen ble skrevet for å korrigere.

Kilder

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>