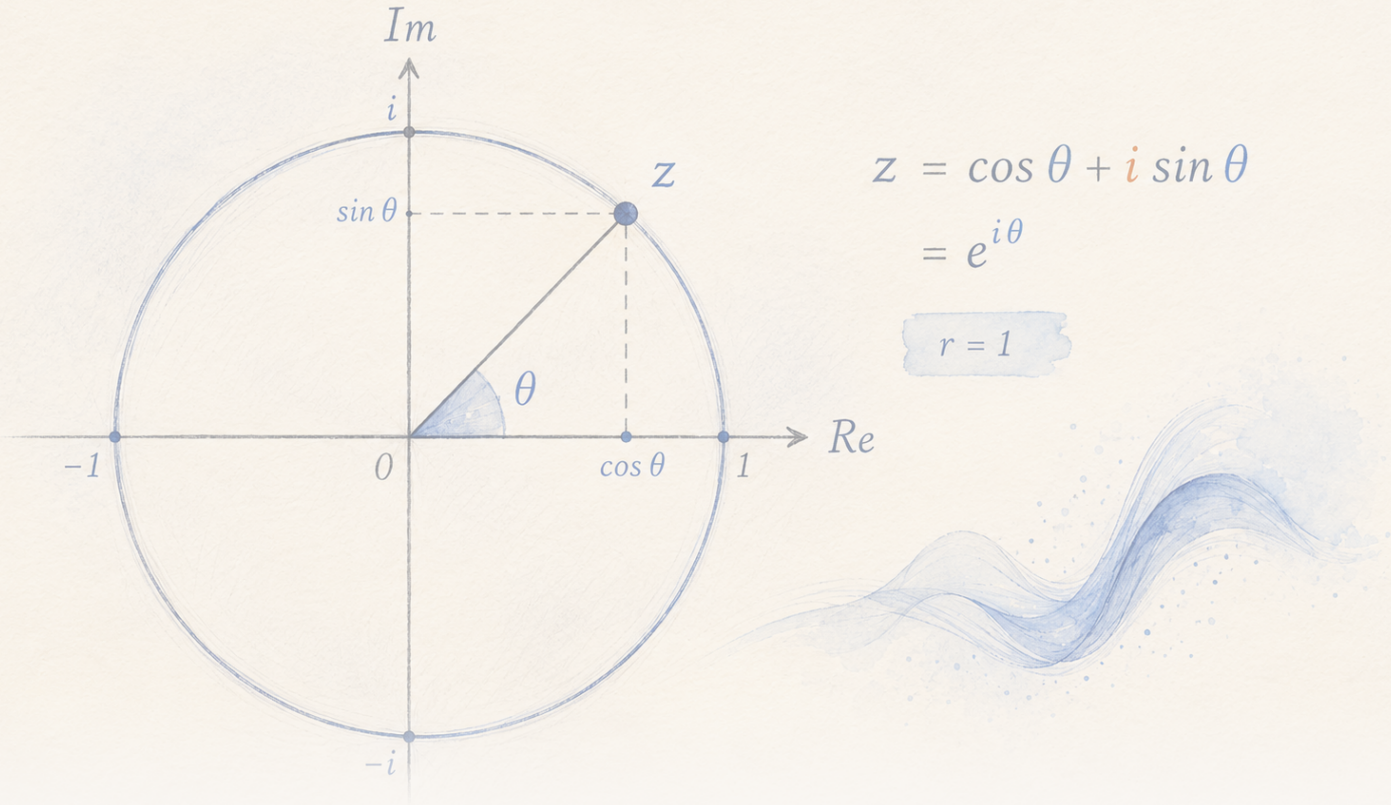


The Clean Paper

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

Fyrirsögn sem vert er að lesa aftur

Ný PRL-grein sýnir að skammtafræði má setja fram með rauntölum einum ef forsendunni um hvernig samsett kerfi eru byggð er breytt. Sú framsetning endurskapar spár venjulegrar tvinntöluskammtafræði, þar með talið fjölparta prófin frá 2021–22. Fyrri tilraunir útilokuðu því ákveðna rauntölukenningu, ekki rauntölur í grundvallaratriðum.

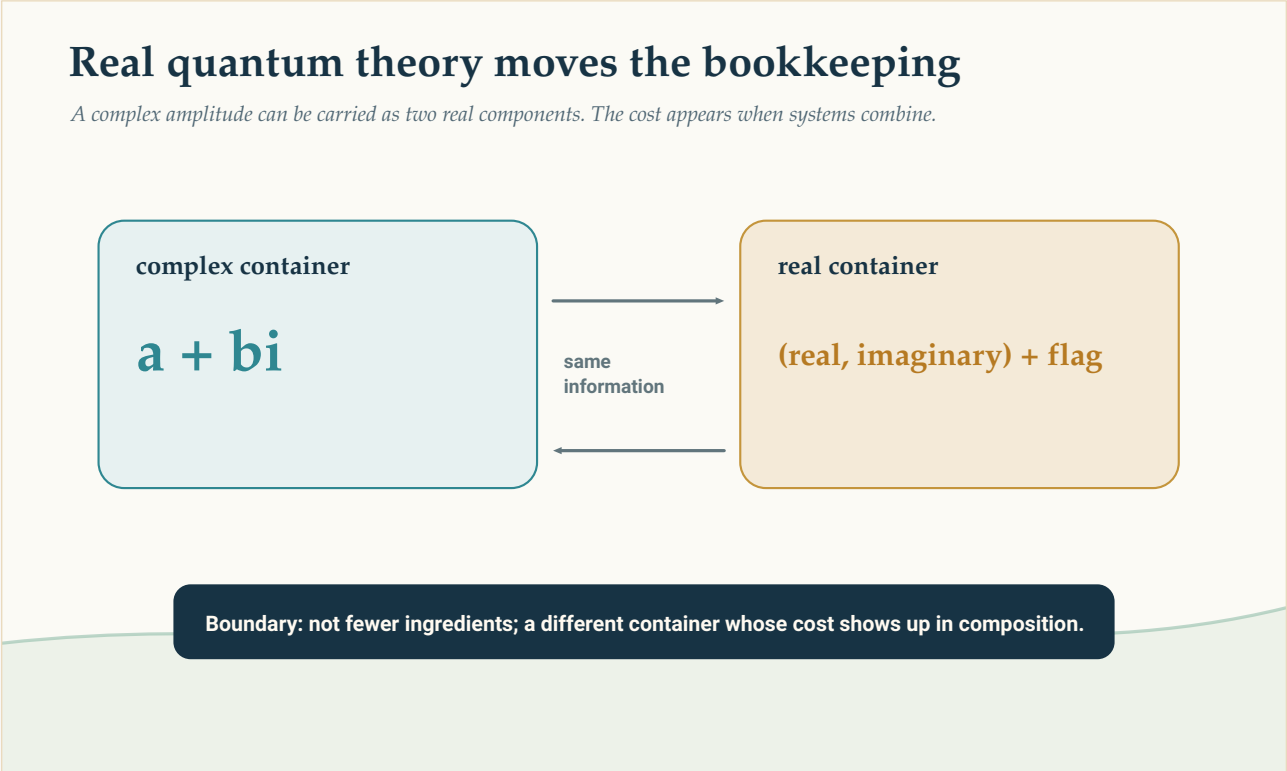
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Fyrirsögn sem vert er að lesa aftur

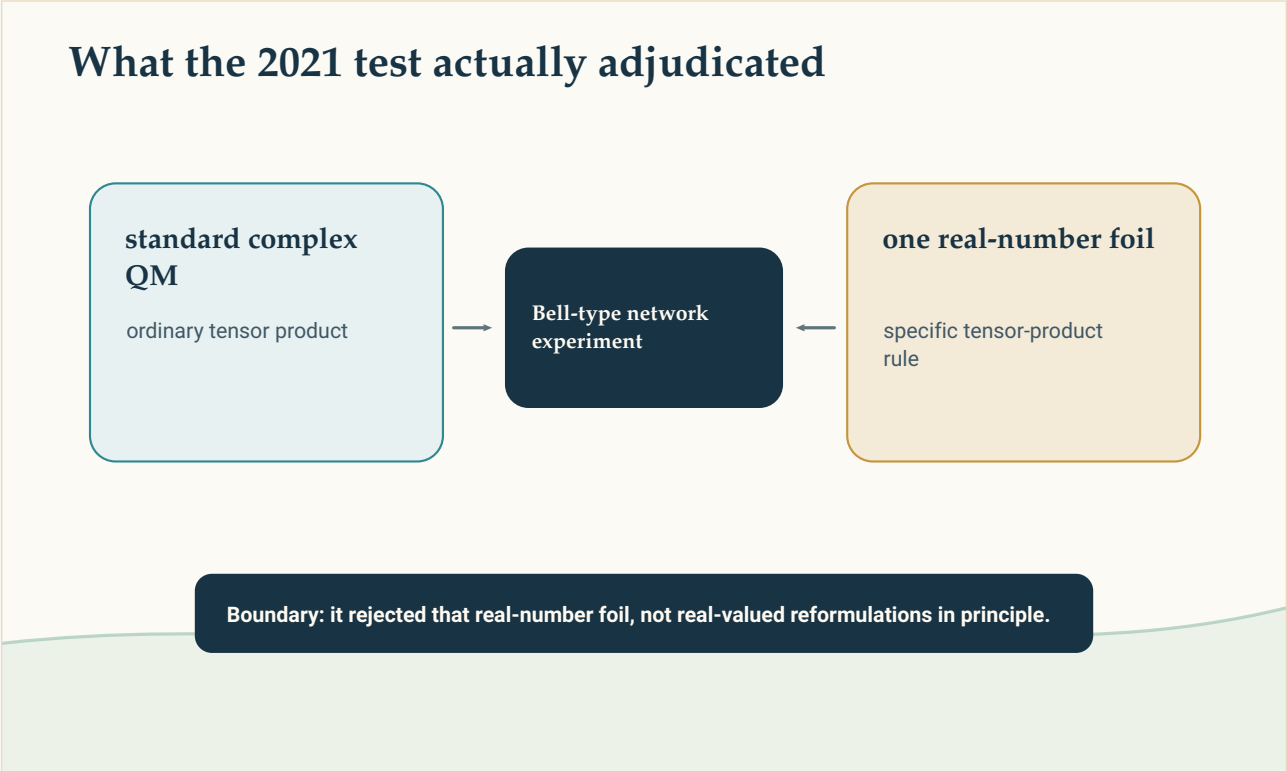
Fyrir nokkrum árum fór sláandi fullyrðing víða: tilraunir hefðu sýnt að þvertölur væru líkamlega raunverulegar og að ekki væri hægt að skrifa skammtafræði án þeirra. Fullyrðingin byggði á raunverulegri og vandaðri eðlisfræði — tillögu Marc-Olivier Renou og samstarfsmanna í *Nature* árið 2021 og tilraunum árið 2022 sem prófuðu hana. En vinsæla útgáfan þjappaði nákvæmri niðurstöðu niður í slagorð, og slagorðið var sterkara en niðurstaðan.

Ný grein í *Physical Review Letters* eftir Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping og Dagmar Bruß setur nákvæmnina aftur inn. Hún smíðar útgáfu af skammtafræði sem notar aðeins rauntölur og endurskapar allar spár hinnar venjulegu tvinntölukenningar — þar á meðal einmitt fjölpartatilraunirnar sem voru sagðar útiloka rauntölur. Brellan er ekki að smygla þvertölum aftur inn. Hún er að breyta einni forsendu um hvernig aðskilin kerfi eru sett saman. Heiðarlega niðurstaðan, með orðum höfundanna sjálfra, er að tvinntölur séu ekki nauðsynlegar til að lýsa skammtafræði, en þær séu vissulega mjög gagnlegar.



Tvinntalan a+bi er par af rauntölum, ásamt eins konar „flaggi“ sem fylgir hverju kerfi. Rauntöluútgáfan hefur ekki færri innihaldsefni — hún notar annan umbúnað, og kostnaðurinn kemur fram í því hvernig kerfi eru sameinuð.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Tilraunirnar 2021–22 báru saman tvær tilteknar kenningar — hefðbundna tvinntöluskammtafræði og rauntölu-„andkenningu“ sem heldur tensormargfeldisreglunni — og studdu þá fyrri. Þær útilokuðu þessa andkenningu, ekki rauntölur í grundvallaratriðum.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Hvað gera tvinntölur í kenningunni?

Í skammtafræði er ástand kerfis lýst með amplitúðum, og líkur á niðurstöðu fást með því að taka ferningsstærð amplitúðunnar. Í hefðbundnu kenningunni eru amplitúðurnar tvinntölur: hver þeirra ber bæði stærð og fasa, eins konar horn. Fasinn er ekki skraut. Þegar tvær leiðir að sömu niðurstöðu leggjast saman ræður fasamunurinn því hvort þær styrkja hvor aðra eða eyða hvor annarri — skammtavíxlverkunin sem er eitt helsta einkenni skammtahegðunar. Heildarfasi sem er sameiginlegur öllu kerfinu er hins vegar ómælanlegur.

Tvinntala er í grunninn par af rauntölum — raunhluti og þverhluti — sett saman með ákveðnum reglum um margföldun. Því er eðlilegt að spyrja hvort þessi samsetning sé nauðsynleg. Er hægt að halda tveimur rauntölum, sleppa tvinntöluumbúnaðinum og samt varðveita alla skammtafræðina? Margföldunarreglurnar eru einmitt það sem gerir tvinntölu að meira en tveimur tölum hlið við hlið, þannig að svarið er ekki augljóst. Þar liggur fíngerði hlutinn.

Hvað sýndi niðurstaðan frá 2021 í raun?

Renou og samstarfsmenn spurðu nákvæmlega þessarar spurningar og gáfu henni skýrt, prófanlegt form. Þeir spurðu ekki hvort rauntölur gætu komið fyrir einhvers staðar í skammtafræði; þeir spurðu hvort rauntöluform skammtafræðinnar gæti endurskapað allar spár tvinntölukenningarinnar **ef ákveðin regla um samsetningu kerfa væri haldin**. Sú regla — tensormargfeldisreglan — er hefðbundna leiðin til að lýsa mörgum sjálfstæðum hlutum sem einni heild.

Með þeirri reglu fundu þeir aðstæður með þremur aðilum sem deila skammtaflækju frá tveimur óháðum uppsprettum, þar sem rauntölukenning og tvinntölukenning spá fyrir um mismunandi, mælanleg fylgni — eins konar fjölparta Bell-próf. Árið 2022 framkvæmdu tilraunir með ofurleiðandi rásum og ljóseindum slík próf. Mæld fylgni passaði við tvinntöluskammtafræði og var ósamrýmanleg rauntöluvalkostinum.

> **Hvers vegna þarf prófið tvær uppsprettur, ekki eina**
>
> Venjulegt Bell-próf notar eina uppsprettu sem sendir flækt par til tveggja aðila, Alice og Bob. Í því tilviki getur skammtafræði byggð á rauntölum endurskapað nákvæmlega sömu fylgni og tvinntölukenningin — kenningarnar eru óaðgreinanlegar og ein uppspretta getur því ekki skorið úr um þær.
> Röksemdin frá 2021 fær afl sitt með annarri, **óháðri** uppsprettu. Hugsum okkur þrjá aðila í röð: Alice, Bob og Charlie. Ein uppspretta flækir Alice við Bob; önnur, sem hefur enga sameiginlega fortíð með þeirri fyrri, flækir Bob við Charlie. Bob er í miðjunni og mælir agnir sínar tvær saman, þannig að hann tengir helmingana. Það er *óhæði* uppsprettnanna tveggja — forsendan um að þær hafi verið undirbúnar sitt í hvoru lagi — sem skiptir máli. Með hefðbundnu tensormargfeldisreglunni getur rauntölukenning þá ekki endurskapað þríhliða fylgnina sem tvinntöluskammtafræði spáir fyrir um, á meðan ein uppspretta skilur kenningarnar jafnar. Þetta bil var það sem tilraunirnar mældu.

Þetta er raunveruleg og skýr niðurstaða. En takið eftir hvað var borið saman: hefðbundin tvinntöluskammtafræði og **ein tiltekin rauntölukenning** — sú sem heldur venjulegu tensormargfeldisreglunni. Tilraunirnar skáru úr um þetta par, ekki um rauntölur sem slíkar. Nýja greinin notar hugtak úr undirstöðum skammtafræðinnar og kallar útilokaða valkostinn það sem hann er: *andkenningu* (*foil theory*) — kenningu sem enginn heldur fram að sé sönn, heldur er sett upp sem markviss andstæða við viðtekna kenningu svo tilraun geti greint þær að. Gildi hennar felst einmitt í því að hægt sé að útiloka hana og sjá hvaða forsendur hennar báru niðurstöðuna.

Hverju breytir nýja greinin?

Nýja vinnan heldur nánast öllu en breytir einni frumforsendu. Í stað þess að taka tensormargfeldisregluna sem gefna byrjar hún á staðbundniskröfu sem höfundarnir telja eðlisfræðilega grundvallarlegri: aðgerð sem er aðeins framkvæmd á einu undirkerfi á ekki að hafa mælanleg áhrif á annað

undirkerfi sem ekki var snert.

Út frá þessu byggja höfundarnir rauntöluútgáfu af skammtafræði á skýran hátt. Raun- og þverhluta venjulegra amplitúða er haldið utan um með viðbótarrauntölubreytum — greinin kallar þetta „flagg“ sem fylgir hverju kerfi — og ómælanlegi heildarfasinn í tvinntölukenningunni verður að jafnáóaðgengilegri snúningabreytingu í rauntölukenningunni. Kostnaðurinn kemur nákvæmlega fram þar sem niðurstaðan frá 2021 benti á hann: í því hvernig kerfi eru sameinuð. Naífa leiðin til að líma þessar rauntölulýsingar saman gefur ekki einu sinni vel skilgreinda reglu, þannig að smíðin flokkar saman lýsingar sem tákna sömu eðlisfræði og vinnur með þá jafngildisflokka. Með þeirri samsetningarreglu endurskapar rauntölukenningin hvert væntigildi sem tvinntölukenningin spáir fyrir um — bæði fyrir eitt kerfi og mörg, flækt yfir aðskilda aðila. Höfundarnir sýna einnig að smíðin er í meginatriðum ótvíræð og jafngild hefðbundinni skammtafræði.

Þess vegna geta fjölpartatilraunirnar ekki greint þessa rauntölukenningu frá tvinntölukenningunni: þær spá nákvæmlega því sama. Fyrri tilraunirnar brugðust ekki; þær voru einfaldlega að prófa aðra og þrengri rauntölukenningu.

Hvers vegna er þetta ekki mótsögn?

Auðvelt væri að lesa þetta sem „tilraunirnar frá 2021 voru rangar“. Það er öfugt. Tilraunirnar voru réttar, og nýja greinin byggir á því að þær séu réttar: hún samþykkir alla mælda fylgni og sýnir rauntöluform sem gefur hana líka. Það sem breytist er túlkunin — stökkið frá „þessi rauntölukenning er hrakin“ yfir í „rauntölur eru ómögulegar í skammtafræði“. Það stökk sleppti forsendunni sem gerði muninn.

Greinin heldur heldur ekki fram að eðlisfræðingar ættu að hætta að nota tvinntölur. Samantekt hennar er varfærin í báðar áttir: tvinntölur eru ekki stranglega nauðsynlegar, en þær eru mjög gagnlegar. Rauntölusmíðin þarf aukaflagg á hvert kerfi og viðkvæmari reglu um hvernig kerfi eru sameinuð; tvinntölur pakka öllu þessu inn í eitt hreint reiknikerfi. Þægindi skipta máli. Í eðlisfræði er það oft einmitt ástæðan fyrir því að eitt formmál vinnur.

Hvers vegna skiptir þetta máli?

Áhugaverða spurningin undir niðri er hvað orðið „nauðsynlegt“ merkir í eðlisfræðilegri kenningu. Tilraun getur greint kenningar að þegar þær spá ólíku. Hún getur ekki ein og sér sagt að ákveðið stærðfræðilegt innihaldsefni sé **eina mögulega** leiðin til að setja fram sömu spár — það er spurning um hvaða kenningar er hægt að smíða, og henni er svarað með smíði, ekki mælingu. Þessi grein er slík smíð: hún sýnir þann valkost sem margir töldu tilraunirnar hafa útilokað.

Niðurstaðan skerpir líka almenna aðgreiningu sem vert er að halda. „Þessi kenning er hrakin“ og „þetta stærðfræðilega verkfæri er óhjákvæmilegt“ eru ólíkar fullyrðingar. Bilið á milli þeirra er einmitt þar sem skýr tilraunaniðurstaða getur breyst í ofsterka ályktun. Tvinntölur eru áfram náttúrulegt

og skilvirkt tungumál skammtafræðinnar. Hvort þær séu heimspekilega óhjákvæmilegar er önnur spurning, og svarið við henni er, að minnsta kosti enn sem komið er, nei.

Í stuttu máli

Tillaga frá 2021 og tilraunir árið 2022 sýndu að rauntöluskammtafræði sem notar hefðbundnu tensormargfeldisregluna fyrir samsetningu kerfa gefur mælanlega aðrar spár en tvinntöluskammtafræði, og tilraunirnar studdu tvinntölukenninguna. Þetta var víða túlkað sem sönnun þess að þvertölur væru líkamlega nauðsynlegar. Nýja greinin í *Physical Review Letters* smíðar hins vegar rauntöluskammtafræði á annarri, staðbundinni frumforsendu sem endurskapar allar spár tvinntölukenningarinnar, þar með talin fjölpartaprófin. Hún sýnir því að tvinntölur eru þægilegt og öflugt formmál fremur en stranglega nauðsynlegt. Þetta er fræðileg smíð, hún ógildir ekki fyrri tilraunir og hún er ekki ákall um að endurskrifa skammtafræði í framkvæmd.

Raunhæf yfirferð

Það sem greinin sýnir: Að sjálfu sér samkvæm skammtafræði sem notar aðeins rauntölur getur endurskapað allar spár hefðbundinnar tvinntölukenningar, þar á meðal fjölparta Bell-lík próf, ef hún byggir samsetningu kerfa á staðbundniskröfu í stað hefðbundinnar tensormargfeldisreglu.

Það sem er mögulegt en er ekki meginatriðið: Að þetta „hrekji“ niðurstöðurnar 2021–2022. Það gerir það ekki. Greinin samþykkir tilraunirnar og þrengir aðeins túlkun þeirra: þær útilokuðu eina tiltekna rauntölukenningu, ekki rauntölur í grundvallaratriðum.

Það sem greinin sýnir ekki: Að tvinntölur séu rangar, gagnslausar eða þess virði að yfirgefa í daglegri eðlisfræði — höfundarnir kalla þær beinlínis mjög gagnlegar. Þetta er heldur ekki ný tilraun; engin ný gögn voru mæld. Fullyrðingin er stærðfræðileg smíð og samkvæmnissönnun.

Helstu takmarkanir fyrir almennan lesanda: Röksemdin veltur á því hvaða frumforsendu maður telur eðlisfræðilega grundvallarlegri — tensormargfeldisregluna eða staðbundniskröfuna. Það er rökstutt val í lifandi umræðu um undirstöður skammtafræðinnar, ekki staðreynd sem mæling ein og sér ákveður. Rauntölusmíðin er einnig flóknari og minna náttúruleg en tvinntöluformið sem hún endurskapar.

Hversu mikið traust ætti almennur lesandi að bera til niðurstöðunnar? Mikið traust á því að smíðin sé stærðfræðilega samkvæm — greinin er ritrýnd og rök hennar eru athuganleg. Rétta niðurstaðan er hófleg: tvinntölur eru þægilegt tungumál skammtafræðinnar, ekki sönnuð heimspekileg nauðsyn. Fyrirsagnir á borð við „þvertölur eru raunverulegar“ ætti að lesa sem slagorðið sem þessi grein hjálpar til við að leiðrétta.

Heimildir

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