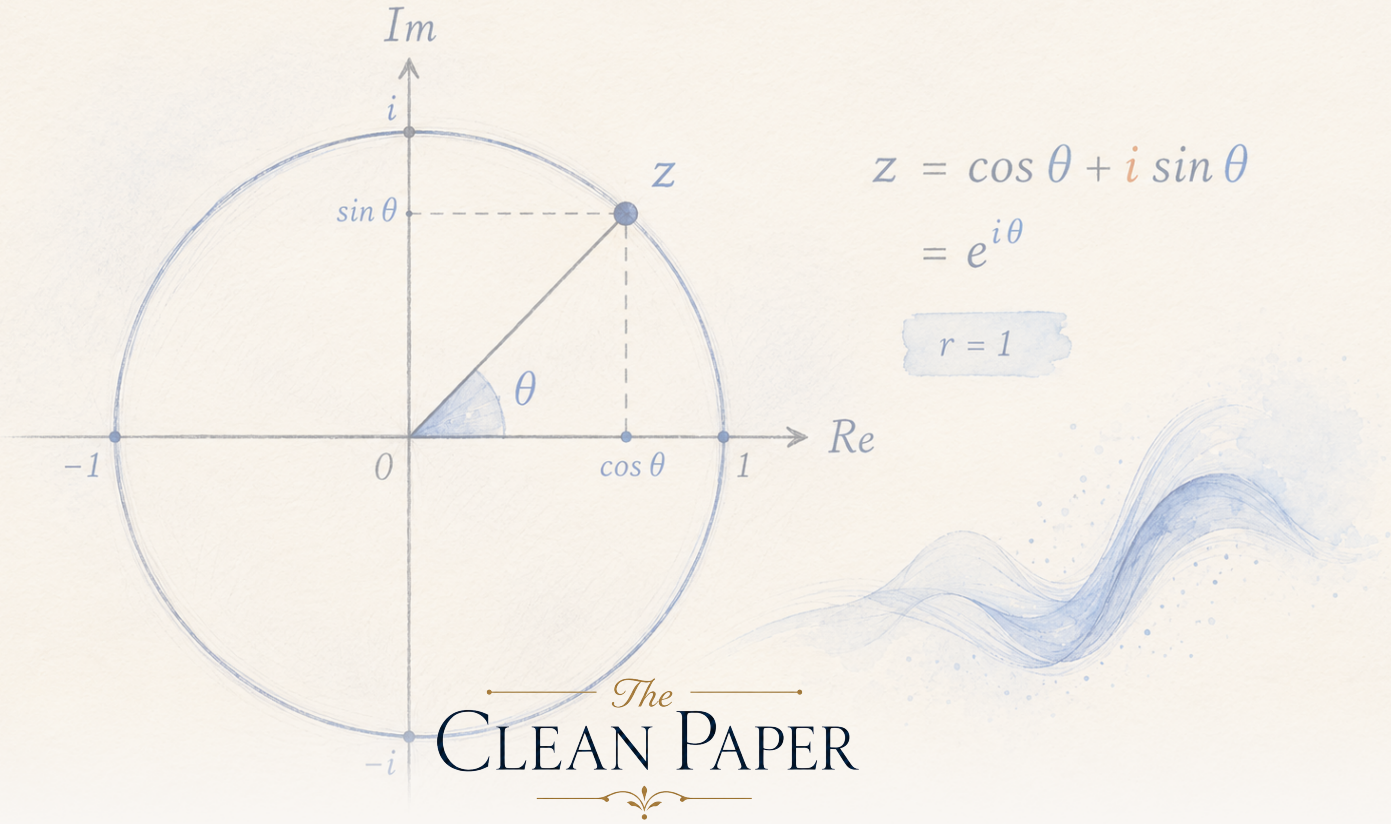


WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Квантната механика може да се напише само со реални броеви — цената е во начинот на комбинирање системи

Во 2021 широко пренесуван резултат тврдеше дека верзија на квантната механика со реални броеви може експериментално да се исклучи, а експериментите во 2022 се согласија со стандардната комплексна квантна теорија. Тоа често беше претставувано како доказ дека имагинарните броеви се физички реални. Нов труд во Physical Review Letters ја прецизира поентата: ако реалната формулација се изгради врз поинаква, веројатно пофизичка претпоставка за комбинирање одделни системи, таа ги репродуцира сите предвидувања на комплексната квантна механика, вклучувајќи ги мултипартитните тестови. Чесното читање е дека комплексните броеви се удобни, а не строго неопходни — и дека поранешните експерименти исклучиле една конкретна реална теорија, не реалните броеви во принцип. Ова е резултат за основите на хартија, не ново мерење, и не бара никој да престане да користи комплексни броеви.

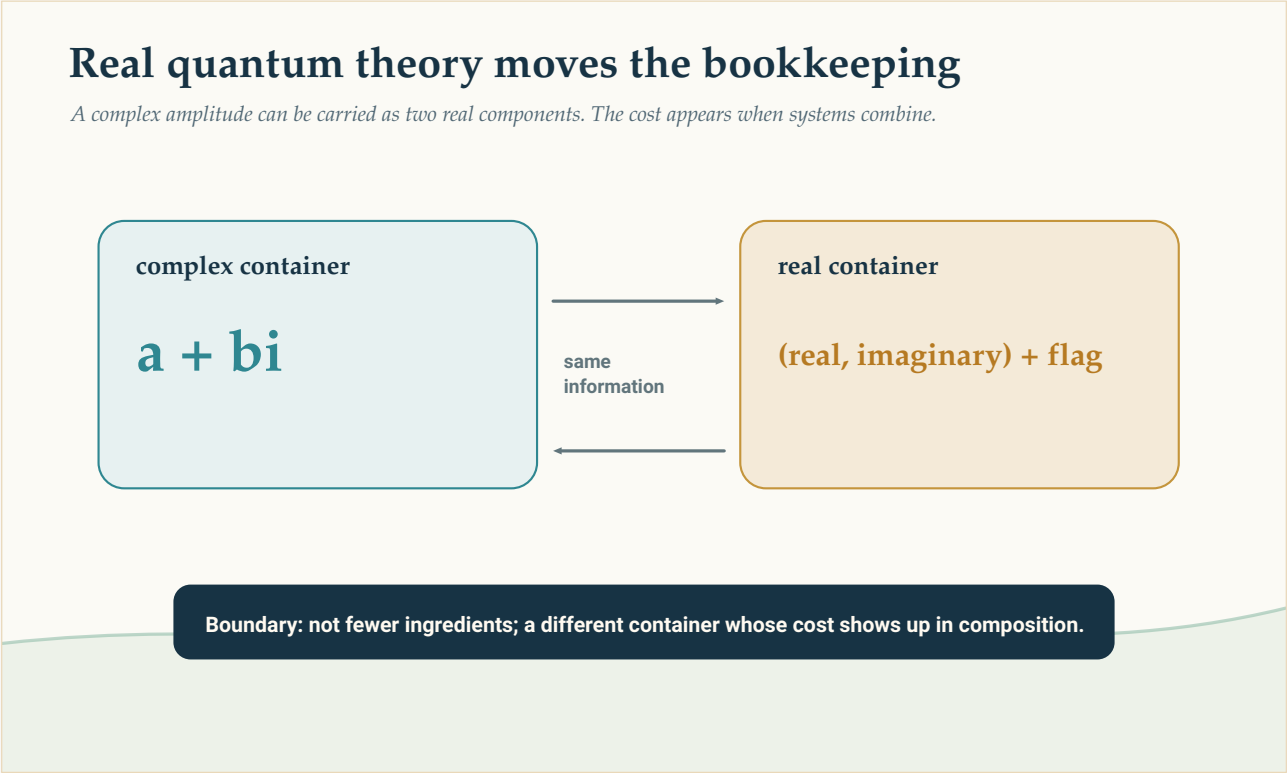
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Наслов што вреди да се прочита уште еднаш

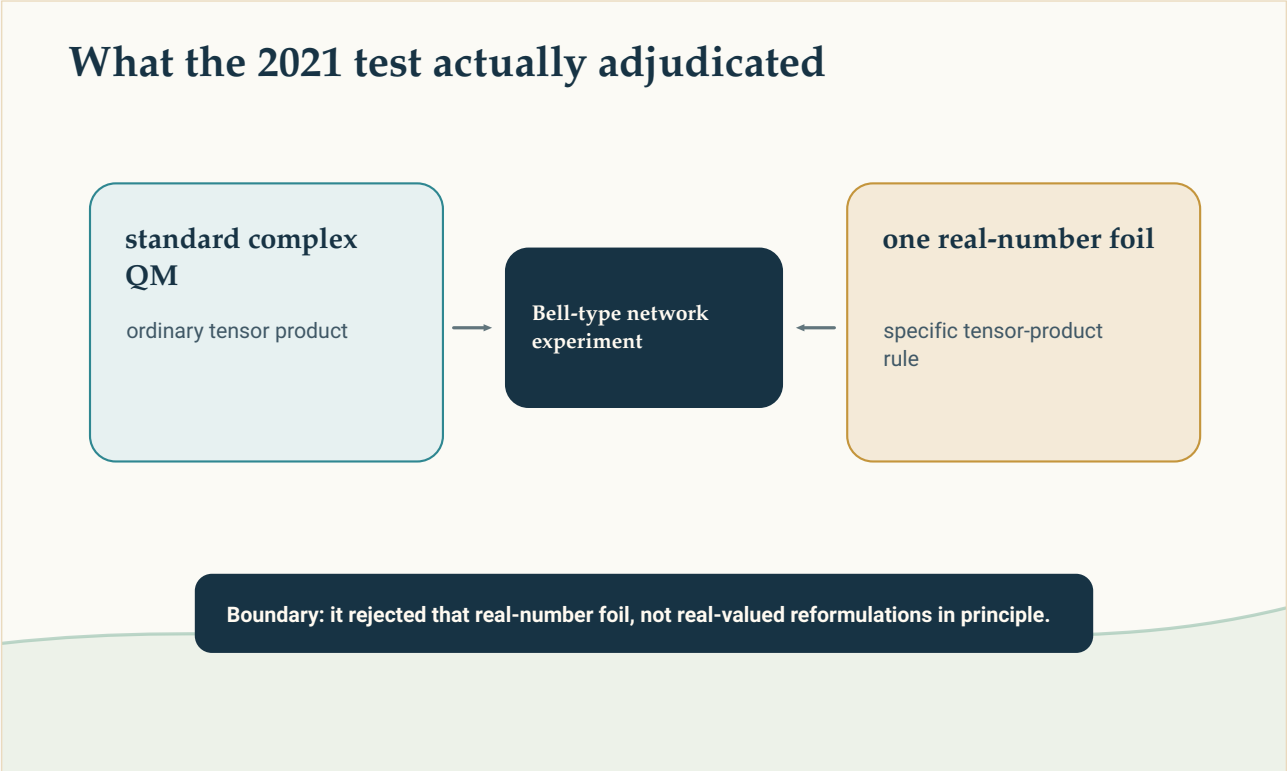
Пред неколку години кружеше впечатливо тврдење: експериментите покажале дека имагинарните броеви се физички реални, дека квантната механика не може да се напише без нив. Тврдењето произлезе од вистинска и внимателна физика — предлог од 2021 во *Nature* од Marc-Olivier Renou и колегите, а потоа и експерименти од 2022 што го реализираа. Но популарната верзија една прецизна изјава ја претвори во слоган, а слоганот беше посилен од резултатот.

Нов труд во *Physical Review Letters* од Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping и Dagmar Bruß повторно ја поставува прецизната формулација. Тој конструира верзија на квантната механика што користи само реални броеви и ги репродуцира сите предвидувања на стандардната комплексна теорија — вклучувајќи ги токму мултипартитните експерименти за кои се тврдеше дека ги исклучуваат реалните броеви. Трикот не е имагинарните броеви скришно да се вратат. Се менува една претпоставка за тоа како одделни системи се комбинираат. Чесниот заклучок, со зборовите на авторите, е дека комплексните броеви не се неопходни за опис на квантната механика, но несомнено се многу корисни.



Комплексна амплитуда a+bi е пар реални броеви со дополнителен „flag“ што се носи со секој систем. Реалната формулација нема помалку состојки — само различен начин на пакување, а цената се појавува во правилото според кое системите се комбинираат.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Експериментите од 2021–22 споредуваа две конкретни теории — стандардна комплексна квантна механика и реална „foil“ теорија што го задржува тензорскиот производ — и резултатите ја фаворизираа комплексната. Го исклучија тој конкретен реален модел, не реалните броеви во принцип.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Што прават комплексните броеви во теоријата

Во квантната механика состојбата на системот се опишува со амплитуди, а за да се добие веројатноста на еден исход се зема квадратот од големината на амплитудата. Во стандардната теорија тие амплитуди се комплексни броеви: секоја има големина и фаза, односно агол. Таа фаза не е украс. Кога два патишта до ист исход се комбинираат, нивните фази определуваат дали ќе се засилат или поништат — интерференцијата што е белег на квантното однесување. Од друга страна, вкупната фаза што ја споделува целиот систем не може да се измери.

Комплексен број всушност е пар реални броеви — реален и имагинарен дел — спакувани со специфични правила за множење. Затоа природно е да се праша дали пакувањето е суштинско. Може ли да ги задржите двата реални броја, да ја отфрлите комплексната форма и сепак да ја добиете целата квантна механика? Правилата за множење се токму она што ги прави комплексните броеви повеќе од два броја ставени еден до друг, па одговорот не е очигледен — и тука лежи суптилноста.

Што всушност утврди резултатот од 2021 година

Renou и колегите го поставија токму тоа прашање во остра, проверлива форма. Не прашаа дали реални броеви можат некаде да се појавуваат во квантна теорија; прашаа дали формулација со реални броеви може да ги повтори сите предвидувања на комплексната теорија ако се прифати конкретно правило за комбинирање системи. Тоа правило — тензорскиот производ — е стандардниот рецепт за опис на повеќе независни делови како една целина.

Под тоа правило, најдоа сценарио со три страни што споделуваат заплетканост од два независни извори, во кое реална теорија и комплексната теорија предвидуваат различни, мерливи корелации — мултипартитна верзија на Bell тест. Во 2022 година, експерименти со суперспроводливи кола и со фотони изведоа такви тестови. Измерените корелации се совпаѓаа со комплексната квантна механика и не се совпаѓаа со реалната алтернатива.

> **Зошто тестот бара два извори, не еден**
>
> Обичен Bell тест користи еден извор што испраќа еден заплеткан пар до две лица, Alice и Bob. За таква поставеност, квантна механика со реални броеви може точно да ги репродуцира истите корелации како комплексната теорија — двете не можат да се разликуваат, па еден извор не може да одлучи меѓу нив.
> Аргументот од 2021 добива моќ со додавање втор, **независен** извор. Замислете три страни во линија: Alice, Bob, Charlie. Еден извор ја заплеткува Alice со Bob; посебен извор, без заедничко минато со првиот, го заплеткува Bob со Charlie. Bob е во средината и ги мери своите две честички заедно, поврзувајќи ги двете половини. Токму *независноста* на двата извори — претпоставката дека се подготвени одделно — е клучна: под стандардното правило на тензорски производ за независни системи, реална теорија не може да ги репродуцира тространите корелации што ги предвидува комплексната квантна механика, додека тестот со еден извор не ги разликува. Токму тој јаз го измерија експериментите.

Тоа е реален и чист резултат. Но внимателно забележете што споредувал: стандардната комплексна квантна теорија со една конкретна реална теорија — онаа што го задржува обичниот тензорски производ. Експериментите пресудиле меѓу тие две формулации, не за реалните броеви како такви. Новиот труд, користејќи термин од квантните основи, ја нарекува исклучената алтернатива она што е: *foil theory* — теорија што никој не ја предлага како точна, туку намерно се поставува како контраст на прифатената теорија за експериментот да може да ги разликува. Нејзината вредност е токму во тоа што е различлива: исклучувањето на foil теоријата покажува кои претпоставки на реалниот модел ја создавале разликата.

Што менува новиот труд

Новата работа го задржува речиси сè, а менува еден постулат. Наместо да го претпостави тензорскиот производ како правило за комбинирање системи, почнува од услов за локалност што авторите го сметаат за физички поосновен: операција извршена само врз еден подсистем не треба да има мерлив ефект врз друг, недопрен подсистем.

Од таа почетна точка експлицитно градат квантна механика со реални броеви. Реалниот и имагинарниот дел од вообичаените амплитуди се носат како дополнителна реална „сметководствена“ информација — трудот ја нарекува „flag“ прикачен на секој систем — а немерливата глобална фаза од комплексната теорија станува еднакво немерлива ротација во реалната. Цената се појавува точно таму каде што резултатот од 2021 ја лоцираше: во комбинирањето системи. Наивниот начин на лепење на реалните описи дури не дава добро дефиниран рецепт, па конструкцијата ги групира описите што претставуваат иста физика и работи со тие класи. Со таквото правило на комбинирање, реалната теорија ја репродуцира секоја очекувана вредност што ја предвидува комплексната — за еден систем и за многу системи, заплеткани меѓу оддалечени страни. Авторите покажуваат и дека конструкцијата е суштински единствена и еквивалентна на стандардната квантна механика.

Затоа мултипартитните експерименти не можат да ја разликуваат оваа реална теорија од комплексната, бидејќи двете се согласуваат за секое предвидување. Поранешните експерименти не биле неуспешни; едноставно тестирале друга, порестриктивна реална теорија.

Зошто ова не е противречност

Лесно би било да се прочита како „експериментите од 2021 биле погрешни“. Напротив. Експериментите биле точни, а овој труд зависи од тоа да бидат точни: ги прифаќа сите измерени корелации и покажува реална формулација што исто така ги произведува. Она што се ревидира е толкувањето — скокот од „оваа реална теорија е фалсификувана“ до „реалните броеви се невозможни во квантната механика“. Во тој скок се прескокнала претпоставката што ја создава разликата.

Ниту трудот тврди дека треба да се напуштат комплексните броеви. Неговото сопствено резиме е внимателно од двете страни: комплексните броеви не се строго неопходни и се многу корисни. Реалната конструкција бара дополнителен flag за секој систем и посуптилно правило за нивно комбинирање; комплексните броеви го пакуваат сето тоа во едно чисто аритметичко средство. Практичноста не е безначајна. Во физиката таа често е главната причина некој формализам да победи.

Зошто е важно

Подлабокото прашање е што значи зборот „неопходно“ во физичка теорија. Експеримент може да разликува две теории кога тие предвидуваат различни нешта. Но сам по себе не може да ви каже дека одредена математичка состојка е единствениот можен начин да се содржи еден сет предвидувања — тоа е прашање за тоа кои теории воопшто можат да се конструираат и се решава со конструкција, не со мерење. Овој труд токму тоа го прави: ја покажува алтернативата што се мислеше дека експериментите ја исклучиле.

Резултатот јасно одделува и две изјави што вреди да се разликуваат општо. „Оваа теорија е фалсификувана“ и „оваа математичка алатка е неизбежна“ не се исто. Токму во јазот меѓу нив чист експериментален резултат може да се претвори во претерано тврдење. Комплексните броеви остануваат природниот и ефикасен јазик на квантната механика. Дали се метафизички неопходни е друго прашање, а според овој резултат одговорот засега е не.

Кратко резиме

Предлог од 2021 и експерименти од 2022 покажаа дека квантна механика со реални броеви изградена врз стандардниот тензорски производ за комбинирање системи дава различни, проверливи предвидувања од комплексната квантна механика, а експериментите ја фаворизираа комплексната теорија. Тоа често беше претставувано како доказ дека имагинарните броеви се физички неопходни. Новиот труд во *Physical Review Letters* конструира квантна механика со реални броеви врз различен, локалност-базиран постулат што ги репродуцира сите предвидувања на комплексната теорија, вклучувајќи ги мултипартитните тестови — покажувајќи дека комплексните броеви се практични, а не строго неопходни. Тоа е теоретска конструкција, не ги побива поранешните експерименти и не предлага квантната механика практично да се препишува без комплексни броеви.

Проверка без претерување

Што покажува трудот: Дека самоконзистентна формулација на квантната механика што користи само реални броеви може да го репродуцира секое предвидување на стандардната комплексна теорија, вклучувајќи мултипартитни Bell тестови, ако се изгради врз постулат за локалност наместо врз тензорскиот производ за комбинирање системи.

Што е правдоподобно, но не е поентата: Дека ова ги „побива“ резултатите од 2021–2022. Не ги побива. Ги прифаќа експериментите како точни и го прецизира нивниот

опсег: тие исклучиле една конкретна реална теорија, онаа со стандардно правило на тензорски производ, не реалните броеви во принцип.

Што не покажува: Дека комплексните броеви се погрешни, бескорисни или вреди да се исфрлат во практиката — трудот експлицитно ги нарекува многу корисни. Исто така не е нов експеримент: нема нови податоци; тврдењето е математичка конструкција и доказ за конзистентност.

Главни ограничувања за општ читател: Аргументот зависи од тоа која претпоставка ја сметате за физички поосновна — тензорскиот производ или постулатот за локалност. Тоа е аргументиран избор во тековна дебата за основите, не факт фиксиран со мерење, а реалната конструкција веројатно е помалку природна од комплексната што ја репродуцира.

Колкава доверба треба да има општ читател? Висока дека конструкцијата е математички конзистентна — трудот е рецензиран и логиката е проверлива. Најбезбедната поента е скромната: комплексните броеви се удобниот јазик на квантната механика, не докажана метафизичка неопходност. Наслови од типот „имагинарните броеви се реални“ треба да се читаат како слоган што овој труд го коригира.

Извори

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