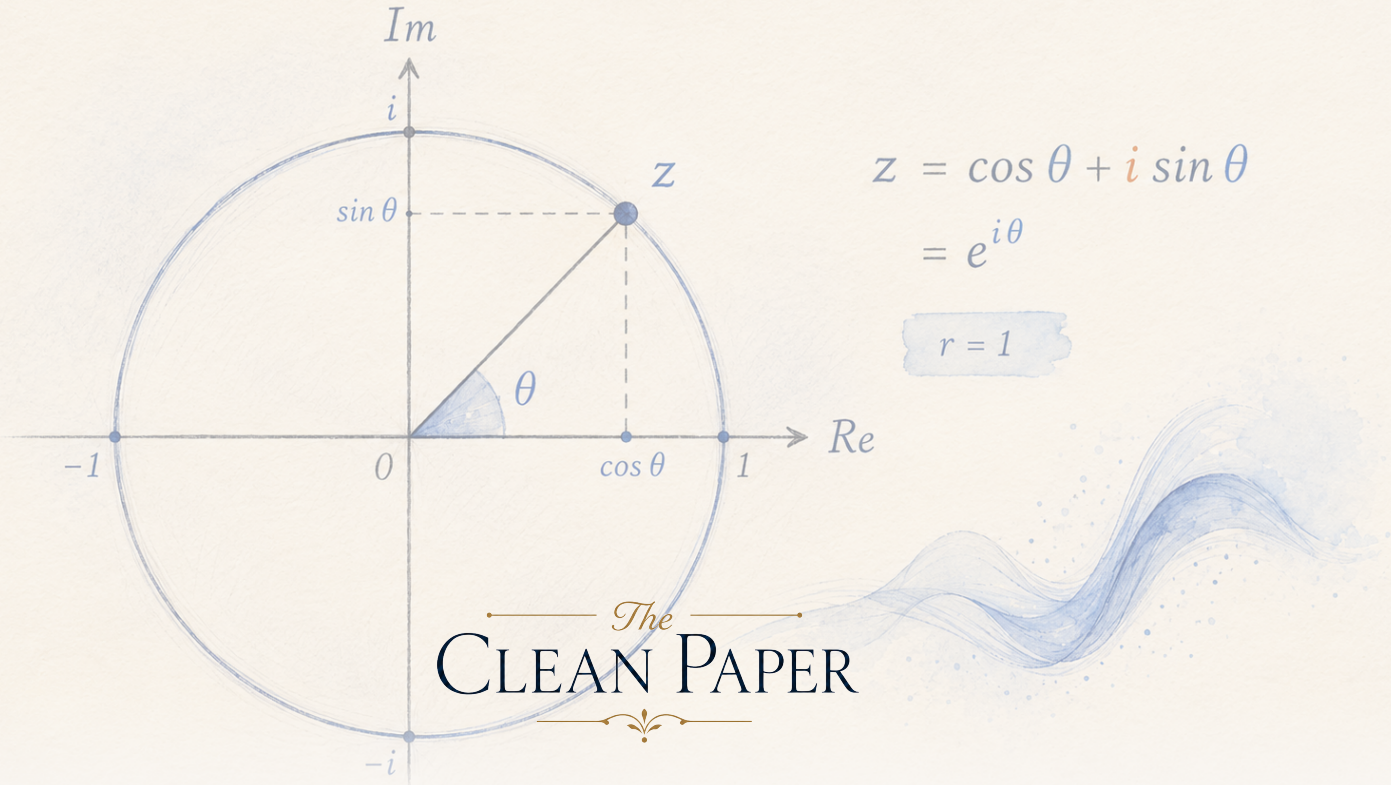


The Clean Paper

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

Квантовата механика може да се запише само с реални числа — уловката е в начина, по който съчетавате системите

През 2021 г. широко отразен резултат твърдеше, че версия на квантовата механика с реални числа може да бъде експериментално опровергана, а последвалите експерименти през 2022 г. се съгласуваха със стандартната комплексна квантова теория. Това често беше представяно като доказателство, че имагинерните числа са физически реални. Нова статия в Physical Review Letters уточнява твърдението: ако формулировката с реални числа се изгради върху различно и може би по-физично предположение за това как се съчетават отделни системи, тя възпроизвежда всички предсказания на комплексната квантова механика, включително многочастичните тестове. Трезвият прочит е, че комплексните числа са удобни, а не строго необходими — и че по-ранните експерименти са отхвърлили една конкретна реална теория, а не реалните числа по принцип. Това е теоретичен резултат за основите на квантовата механика, а не ново измерване, и не призовава никого да спира да използва комплексни числа.

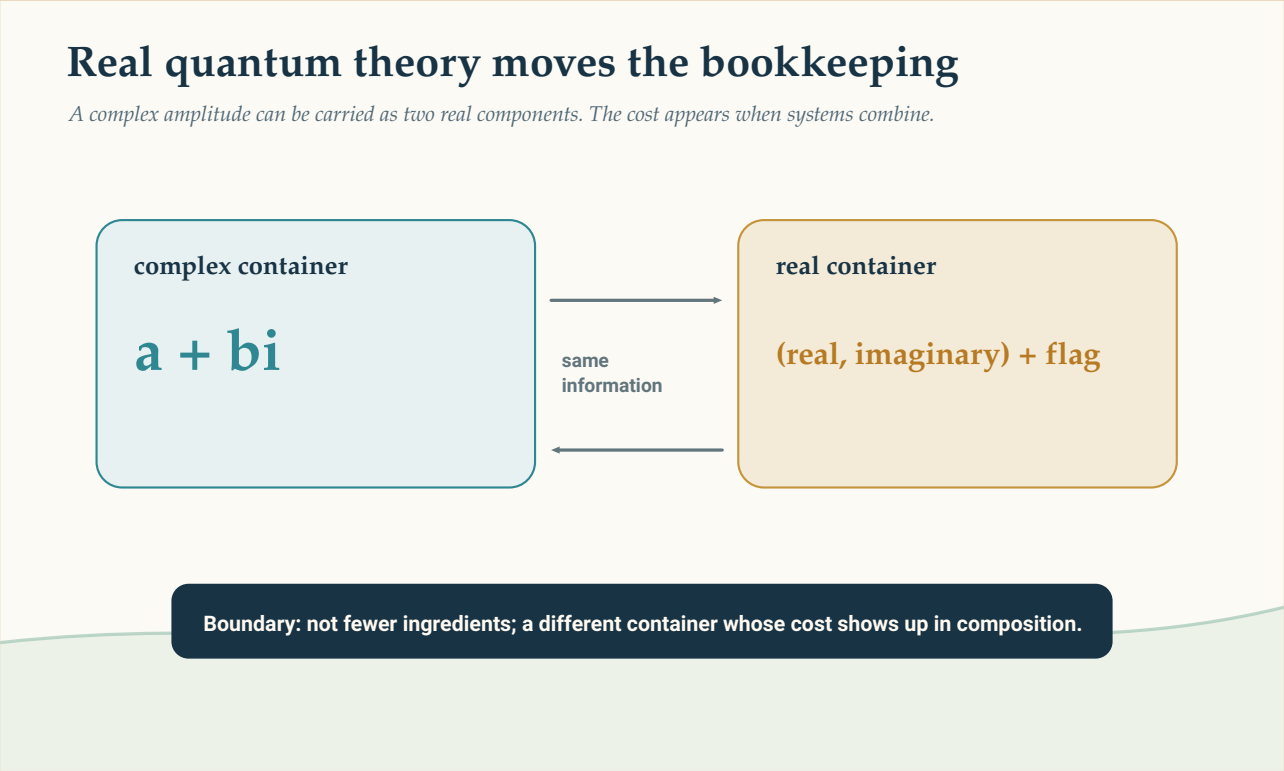
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Заглавие, което си струва да прочетем отново

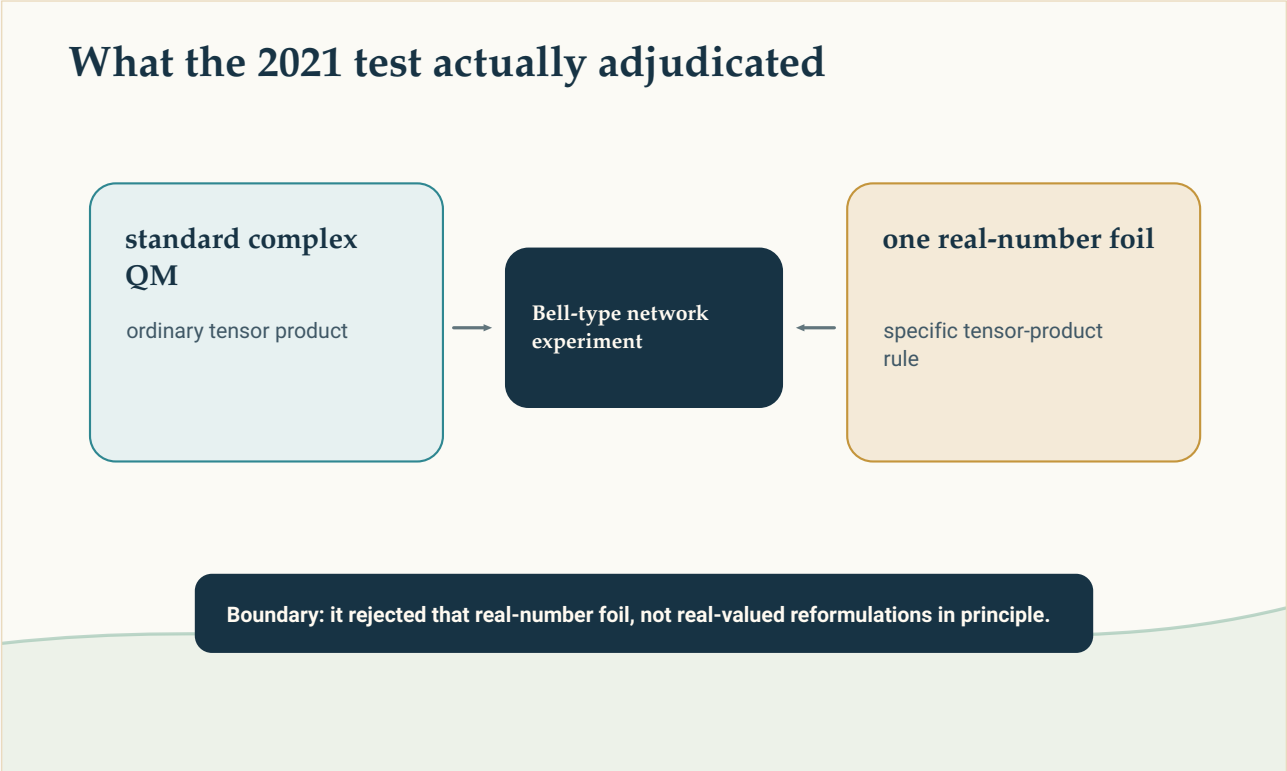
Преди няколко години започна да се разпространява впечатляващо твърдение: експерименти били показали, че имагинерните числа са физически реални и че квантовата механика не може да бъде записана без тях. Твърдението стъпваше върху истинска и внимателно направена физика — предложение от 2021 г. в *Nature* на Marc-Olivier Renou и колеги и експерименти през 2022 г., които го реализираха. Но популярната версия сви едно точно твърдение до лозунг, а лозунгът беше по-силен от самия резултат.

Нова статия в *Physical Review Letters* на Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping и Dagmar Bruß връща необходимата точност. Авторите конструират версия на квантовата механика, която използва само реални числа и възпроизвежда всяко предсказание на стандартната комплексна теория — включително точно онези многочастични експерименти, за които се казваше, че изключват реалните числа. Номерът не е имагинерните числа тайно да бъдат върнати в теорията. Променя се едно предположение за начина, по който отделни системи се съчетават. Честният извод, по думите на самите автори, е, че комплексните числа не са необходими за описанието на квантовата механика, но със сигурност са много полезни.



Комплексната амплитуда a+bi е двойка реални числа с „флаг“, който се носи заедно с всяка система. Реалната формулировка не използва по-малко съставки — просто различен начин на представяне, а цената се проявява в начина, по който системите се съчетават.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Експериментите от 2021–22 г. сравняват две конкретни теории — стандартната комплексна квантова механика и реална „контрастна теория“, която запазва правилото за тензорно произведение — и резултатите подкрепят комплексната. Те изключват тази конкретна контрастна теория, не реалните числа по принцип.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Какво правят комплексните числа в теорията

В квантовата механика състоянието на една система се описва чрез амплитуди, а вероятността за даден изход се получава от квадрата на големината на амплитудата. В стандартната теория тези амплитуди са комплексни числа: всяко има големина и фаза, тоест ъгъл. Фазата не е украса. Когато два пътя към един и същ резултат се съчетаят, фазите им определят дали те ще се усилят или взаимно ще се погасят — това е интерференцията, характерна за квантовото поведение. Общата фаза на цялата система, от друга страна, никога не може да бъде измерена.

Едно комплексно число всъщност е просто двойка реални числа — реална и имагинерна част — снабдена със специфични правила за умножение. Затова естественият въпрос е дали тази опаковка е съществена. Може ли да запазите двете реални числа, да премахнете комплексната форма и въпреки това да получите цялата квантова механика? Именно правилата за умножение правят комплексните числа нещо повече от две числа, поставени едно до друго, така че отговорът не е очевиден — и точно там се крие тънкостта.

Какво всъщност установи резултатът от 2021 г.

Renou и колегите му задават точно този въпрос и го превръщат в ясно проверимо твърдение. Те не питат дали реални числа могат изобщо да се появяват в квантова теория; питат дали формулировка с реални числа може да възпроизведе всички предсказания на комплексната теория при дадено конкретно правило за съчетаване на системи. Това правило — нека го наречем правило за тензорно произведение — е стандартният начин няколко независими части да се описват като едно цяло.

При това правило авторите откриват сценарий с три страни, които споделят заплитане от два независими източника, в който теория с реални числа и комплексната теория предсказват различни, измерими корелации — многочастичен вариант на тест на Бел. През 2022 г. такива тестове са проведени със свръхпроводящи вериги и с фотони. Измерените корелации съвпадат с комплексната квантова механика и са несъвместими с разглежданата реална алтернатива.

> **Защо тестът се нуждае от два източника, а не от един**
>
> Обикновеният тест на Бел използва един източник, който изпраща една заплетена двойка към двама участници, Alice и Bob. При такава постановка квантова механика с реални числа може да възпроизведе точно същите корелации като комплексната теория — двете са неразличими и един източник не може да реши между тях.
> Аргументът от 2021 г. става различителен, когато се добави втори, **независим** източник. Представете си трима участници в редица: Alice, Bob, Charlie. Единият източник заплита Alice с Bob; отделен източник, без общо минало с първия, заплита Bob с Charlie. Bob е по средата и измерва двете си частици заедно, свързвайки двете половини. Именно *независимостта* на двата източника — предположението, че те са подготвени поотделно — върши съществената работа: при стандартното правило за тензорно произведение за съчетаване на независими системи теория с реални числа не може да възпроизведе тристранните корелации, които комплексната квантова механика предсказва за тази мрежа, докато тест с един източник оставя двете теории равностойни. Точно тази разлика измерват експериментите.

Това е реален и чист резултат. Но трябва внимателно да се отбележи какво е сравнено: стандартната комплексна квантова теория срещу една конкретна реална теория — онази, която запазва обичайното правило за тензорно произведение. Експериментите решават между тази двойка, а не между комплексните и реалните числа като такива. Новата статия използва термин от основите на квантовата механика и нарича отхвърлената алтернатива такава, каквато е: *foil theory*, или контрастна теория — теория, която никой не предлага като вярна, а се изгражда нарочно като различима алтернатива на приетата теория, за да може експериментът да ги раздели. Цялата ѝ стойност е именно в това, че е различима: когато контрастната теория бъде

отхвърлена, виждаме кои нейни допускания са определяли резултата.

Какво променя новата статия

Новата работа запазва почти всичко и променя един постулат. Вместо да приема правилото за тензорно произведение при съчетаването на системи, тя започва от изискване за локалност, което според авторите е по-фундаментално физически: операция, извършена само върху една подсистема, не трябва да има измерим ефект върху друга, незасегната подсистема.

От тази отправна точка те изграждат изрично квантова механика с реални числа. Реалната и имагинерната част на обичайните амплитуди се носят като допълнителна реална информация — статията я нарича „флаг“, прикрепен към всяка система — а ненаблюдаемата глобална фаза на комплексната теория се превръща в също толкова ненаблюдаемо завъртане в реалната. Цената се появява точно там, където резултатът от 2021 г. я локализира: при съчетаването на системи. Наивният начин тези реални описания просто да се „залепят“ едно за друго дори не дава добре дефинирана рецепта, затова конструкцията групира описанията, които представят една и съща физика, и работи с тези класове. При това правило за съчетаване реалната теория възпроизвежда всяка очаквана стойност, предсказана от комплексната теория — за една система и за много системи, заплетени между разделени страни. Авторите показват също, че конструкцията е по същество единствена и е еквивалентна на стандартната квантова механика.

Следователно многочастичните експерименти не могат да различат тази реална теория от комплексната, защото двете дават едни и същи предсказания за всичко. По-ранните експерименти не са се провалили; те просто са тествали друга, по-ограничителна реална теория.

Защо това не е противоречие

Лесно би било човек да прочете резултата като „експериментите от 2021 г. са били грешни“. Истината е обратната. Експериментите са правилни и новата статия разчита на това: тя приема всички измерени корелации и показва реална формулировка, която също ги възпроизвежда. Това, което се променя, е интерпретацията — скокът от „тази реална теория е опровергана“ до „реалните числа са невъзможни в квантовата механика“. При този скок е било прескочено допускането, което всъщност върши работата.

Статията не твърди и че някой трябва да изостави комплексните числа. Собственото ѝ резюме е внимателно и в двете посоки: комплексните числа не са строго необходими и са много полезни. Реалната конструкция се нуждае от допълнителен флаг за

всяка система и от по-деликатно правило за съчетаването им; комплексните числа пакетират всичко това в една чиста аритметична структура. Удобството не е незначително. Във физиката то често е цялата причина един формализъм да надделее.

Защо това има значение

Интересният въпрос отдолу е какво означава думата „необходимо“ за една физическа теория. Експериментът може да различи две теории, когато те предсказват различни неща. Сам по себе си обаче той не може да ви каже, че дадена математическа съставка е единственият възможен начин за представяне на определен набор от предсказания — това е въпрос за това какви теории изобщо могат да бъдат конструирани и се решава чрез конструкция, не чрез измерване. Тази статия е именно конструкция: тя показва алтернативата, за която се смяташе, че експериментите са изключили.

Резултатът изостря и едно разграничение, което си струва да се пази и извън този конкретен случай. „Тази теория е опровергана“ и „този математически инструмент е неизбежен“ са различни твърдения, а пропастта между тях е точно мястото, където чист експериментален резултат може да се превърне в преувеличение. Комплексните числа остават естественият и ефективен език на квантовата механика. Дали са метафизично задължителни е отделен въпрос, а засега отговорът на него е „не“.

Кратко и ясно

Предложение от 2021 г. и експерименти от 2022 г. показаха, че квантова механика с реални числа, изградена върху стандартното правило за тензорно произведение при съчетаването на системи, прави различни и проверими предсказания от комплексната квантова механика, а експериментите подкрепиха комплексната теория. Това беше широко представяно като доказателство, че имагинерните числа са физически необходими. Новата статия в *Physical Review Letters* конструира квантова механика с реални числа върху различен постулат, основан на локалността, която възпроизвежда всички предсказания на комплексната теория, включително многочастичните тестове — и показва, че комплексните числа са удобни, а не строго необходими. Това е теоретична конструкция, не отменя по-ранните експерименти и не е призив квантовата механика на практика да бъде преформулирана.

Проверка без излишен шум

Какво показва статията: Че самосъгласувана формулировка на квантовата механика, използваща само реални числа, може да възпроизведе всяко предсказание на стандартната

комплексна теория, включително многочастични тестове от типа на Бел, ако бъде изградена върху постулат за локалност вместо върху правилото за тензорно произведение при съчетаване на системи.

Какво е правдоподобно, но не е основният извод: Че това „опровергава“ резултатите от 2021–2022 г. Не ги опровергава. Новата работа приема експериментите като правилни и прецизира обхвата им: те отхвърлят една конкретна реална теория, запазваща правилото за тензорно произведение, а не реалните числа по принцип.

Какво не показва: Че комплексните числа са грешни, безполезни или си струва да бъдат изоставени на практика — статията изрично ги нарича много полезни. Това не е и нов експеримент: не са измервани нови данни; твърдението е математическа конструкция и доказателство за съгласуваност.

Основни ограничения за общия читател: Аргументът зависи от това кое допускане смятате за по-фундаментално физически — правилото за тензорно произведение или постулата за локалност. Това е аргументиран избор в продължаващ дебат за основите на квантовата механика, а не факт, фиксиран от измерване, и реалната конструкция може да изглежда по-малко естествена от комплексната теория, с която е еквивалентна.

Колко уверен трябва да бъде общият читател? Висока увереност, че конструкцията е математически съгласувана — тя е рецензирана и логиката ѝ може да бъде проверена. Изводът, на който си струва да се доверим, е скромният: комплексните числа са удобният език на квантовата механика, а не доказана метафизична необходимост. Заглавия от рода на „имагинерните числа са реални“ трябва да се четат като лозунга, който тази статия е написана да коригира.

Източници

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