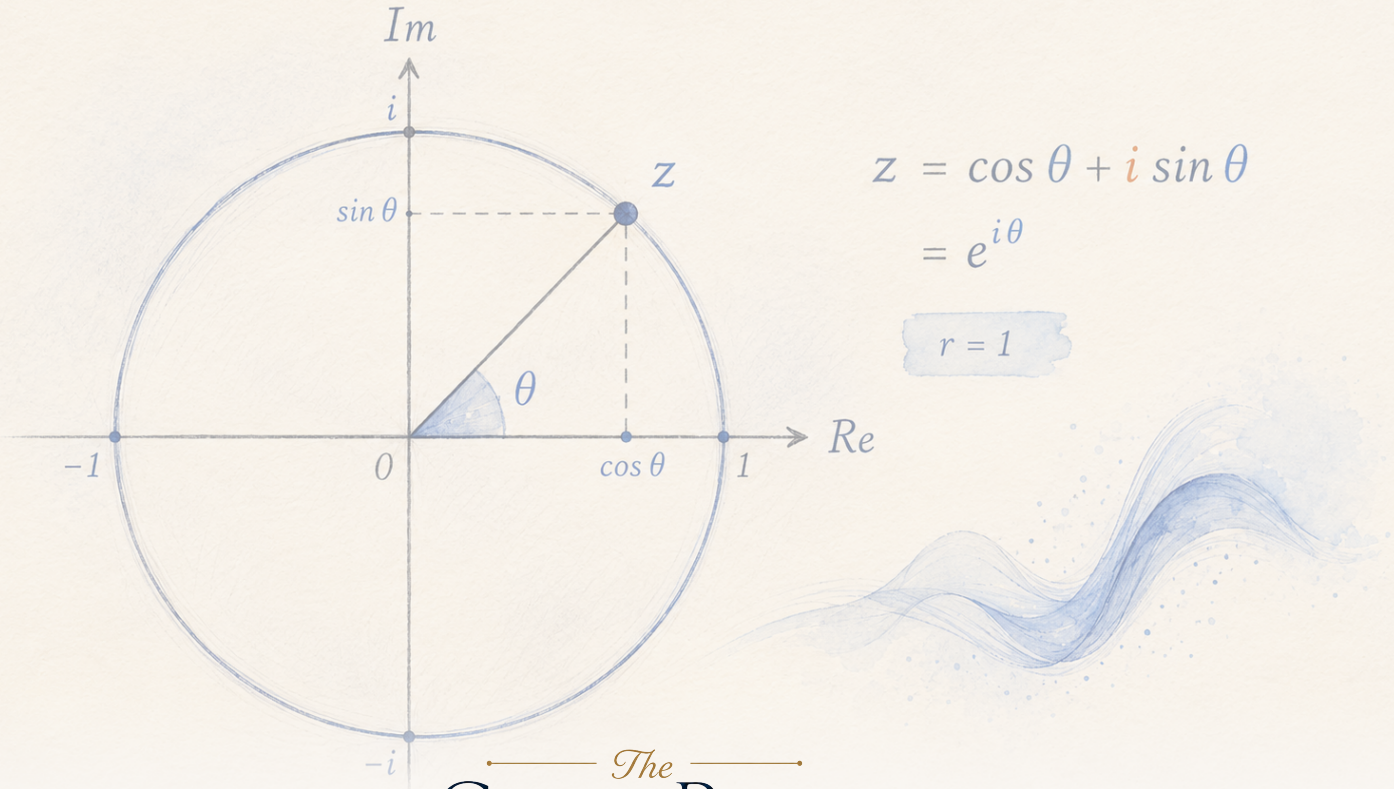


The Clean Paper

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

Квантову механіку можна записати лише дійсними числами — тонкість у тому, як поєднувати системи

У 2021 році широко обговорюваний результат стверджував, що версію квантової механіки на дійсних числах можна експериментально спростувати, а наступні експерименти 2022 року підтримали стандартну комплексну квантову теорію. Це часто подавали як доказ того, що уявні числа фізично реальні. Нова стаття в Physical Review Letters уточнює твердження: якщо побудувати дійсне формулювання на іншому, можливо фізично фундаментальнішому припущенні про те, як поєднуються окремі системи, воно відтворює кожне передбачення комплексної квантової механіки, включно з багаточастинковими тестами. Чесне прочитання: комплексні числа зручні, але не строго необхідні, а ранні експерименти виключили одну конкретну дійсну теорію, не дійсні числа в принципі. Це результат з основ теорії на папері, а не нове вимірювання, і він не просить нікого перестати користуватися комплексними числами.

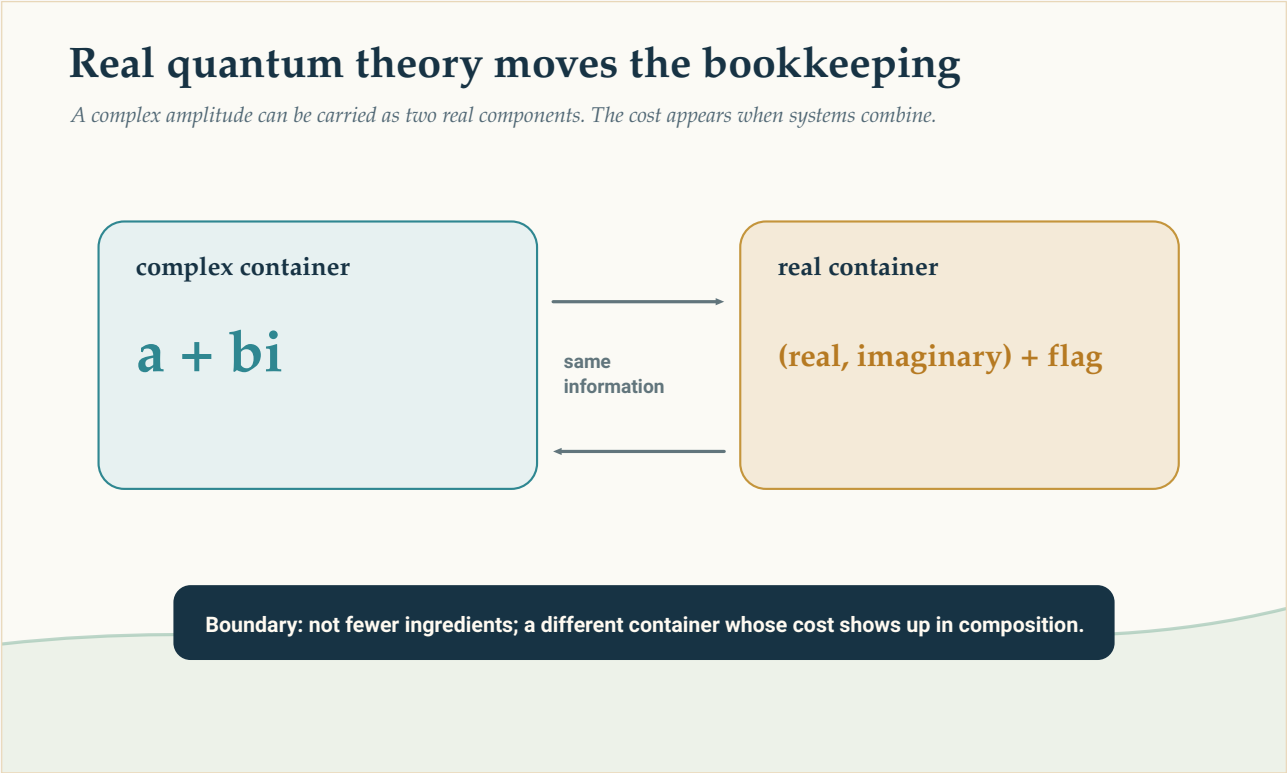
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Заголовок, який варто перечитати

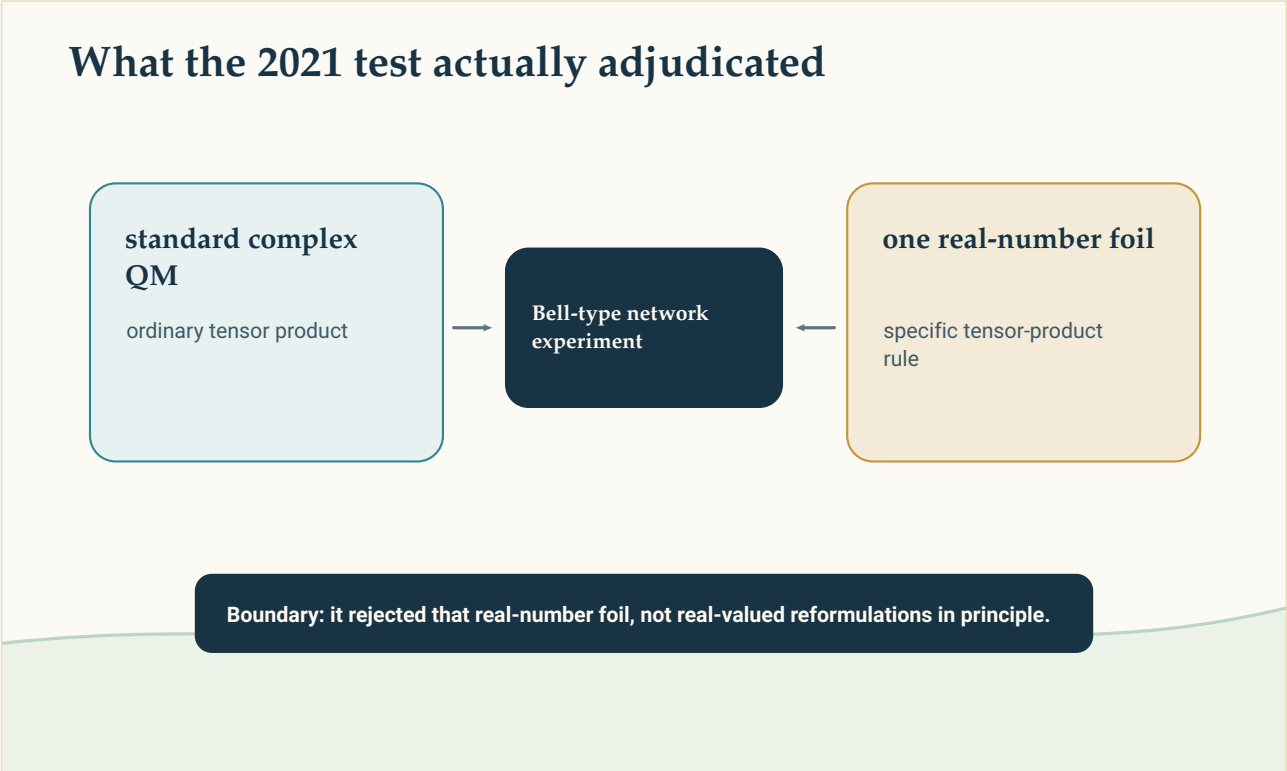
Кілька років тому широко розійшлося яскраве твердження: експерименти нібито показали, що уявні числа фізично реальні й що квантову механіку неможливо записати без них. Воно виросло зі справжньої й ретельної фізики — пропозиції 2021 року Marc-Olivier Renou та колег у *Nature* і експериментів 2022 року, що її реалізували. Але популярна версія стиснула точне твердження до гасла, а гасло виявилося сильнішим за сам результат.

Нова стаття в *Physical Review Letters* від Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping та Dagmar Bruß повертає точність. Вона будує версію квантової механіки, яка використовує лише дійсні числа й відтворює всі передбачення стандартної комплексної теорії — включно з тими самими багаточастинковими експериментами, які нібито виключили дійсні числа. Трюк не в тому, щоб потай повернути уявні числа. Змінюється одне припущення про те, як окремі системи поєднуються. Чесний висновок, словами самих авторів: комплексні числа не є необхідними для опису квантової механіки, але вони безумовно дуже корисні.



Комплексна амплітуда a+bi — це пара дійсних чисел із додатковим «прапорцем», що переноситься разом із кожною системою. Дійсне формулювання не має менше складників — лише інший контейнер, а ціна проявляється в тому, як системи поєднуються.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Експерименти 2021–22 років порівнювали дві конкретні теорії — стандартну комплексну квантову механіку й дійсну «контрастну» теорію, яка зберігає правило тензорного добутку, — і результат був на користь комплексної. Вони виключили саме цю контрастну теорію, а не дійсні числа в принципі.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Що комплексні числа роблять у теорії

У квантовій механіці стан системи описується амплітудами, а щоб отримати ймовірність результату, беруть квадрат модуля амплітуди. У стандартній теорії ці амплітуди — комплексні числа: кожне несе величину й фазу, тобто кут. Фаза — не прикраса. Коли два шляхи до одного результату поєднуються, саме їхні фази визначають, чи підсилять вони одне одного, чи погасять — це інтерференція, характерна ознака квантової поведінки. Водночас загальну фазу, спільну для всієї системи, неможливо виміряти.

Комплексне число насправді є лише парою дійсних чисел — дійсною й уявною частиною, — упакованих зі спеціальними правилами множення. Тому природно запитати, чи сама упаковка необхідна. Чи можна зберегти два дійсні числа, відкинути комплексну форму й усе одно отримати всю квантову механіку? Саме правила множення роблять комплексні числа чимось більшим, ніж два числа поруч, тому відповідь не очевидна — і саме тут ховається тонкість.

Що насправді встановив результат 2021 року

Renou та колеги поставили саме це питання й надали йому гострої, експериментально перевірної форми. Вони не питали, чи можуть дійсні числа взагалі десь з'являтися у квантовій теорії; вони питали, чи здатне формулювання на дійсних числах відтворити всі передбачення комплексної теорії за певного правила об'єднання систем. Це правило — назвімо його правилом тензорного добутку — є стандартним способом описати кілька незалежних частин як одне ціле.

За цього правила вони знайшли сценарій із трьома сторонами, які отримують заплутаність від двох незалежних джерел, де дійсна теорія й комплексна теорія передбачають різні, вимірювані кореляції — багаточастинковий аналог тесту Белла. У 2022 році експерименти на надпровідних схемах і на фотонах виконали такі тести. Виміряні кореляції збіглися з комплексною квантовою механікою й суперечили дійсній альтернативі.

> **Чому тесту потрібні два джерела, а не одне**
>
> Звичайний тест Белла використовує одне джерело, яке надсилає одну заплутану пару двом людям — Alice і Bob. Для такої схеми квантова механіка на дійсних числах може відтворити точно ті самі кореляції, що й комплексна теорія: вони невідрізненні, тому одне джерело не може вирішити суперечку.
> Аргумент 2021 року отримує силу, додаючи друге, **незалежне** джерело. Уявіть три сторони в ряд: Alice, Bob, Charlie. Одне джерело заплутує Alice з Bob; окреме джерело, яке не має з першим спільного минулого, заплутує Bob з Charlie. Bob сидить посередині й вимірює свої дві частинки разом, пов'язуючи дві половини. Саме *незалежність* двох джерел — припущення, що вони підготовлені окремо, — робить різницю: за стандартного правила тензорного добутку для об'єднання незалежних систем дійсна теорія не може відтворити тристоронні кореляції, які передбачає комплексна квантова механіка для такої мережі, тоді як тест з одним джерелом залишає теорії нерозрізненними. Саме цей розрив і виміряли експерименти.

Це реальний і чистий результат. Але уважно подивіться, що саме порівнювали: стандартну комплексну квантову теорію з однією конкретною дійсною теорією — тією, що зберігає звичайне правило тензорного добутку. Експерименти вирішували саме цю пару, а не питання про дійсні числа взагалі. Нова стаття, використовуючи термін із основ квантової теорії, називає відкинуту альтернативу тим, чим вона є: *foil theory* — контрастною теорією, яку ніхто не пропонує як істинну, а навмисно ставлять поруч із прийнятою, щоб експеримент міг їх розрізнити. Її цінність саме в тому, що вона відрізняється: виключення foil показує, які припущення дійсної теорії справді несли навантаження.

Що змінює нова стаття

Нова робота зберігає майже все й змінює один постулат. Замість правила тензорного добутку для об’єднання систем вона починає з вимоги локальності, яку автори вважають фізично фундаментальнішою: операція, виконана лише над однією підсистемою, не повинна мати вимірюваного ефекту на іншу, недоторкану підсистему.

Виходячи з цього, вони явно будують квантову механіку на дійсних числах. Дійсна та уявна частини звичайних амплітуд переносяться як додаткова дійсна бухгалтерія — у статті це називається «прапорцем», прикріпленим до кожної системи, — а неспостережувана глобальна фаза комплексної теорії перетворюється на таке саме неспостережуване обертання в дійсній. Ціна проявляється саме там, де її локалізував результат 2021 року: у способі об’єднання систем. Наївне «склеювання» цих дійсних описів навіть не дає добре визначеного правила, тому конструкція натомість групує описи, які представляють ту саму фізику, і працює з такими класами. За цього правила об’єднання дійсна теорія відтворює кожне математичне очікуване значення комплексної теорії — для однієї системи й для багатьох, заплутаних між віддаленими сторонами. Автори також показують, що конструкція по суті єдина й еквівалентна стандартній квантовій механіці.

Отже, багаточастинкові експерименти не можуть відрізнити цю дійсну теорію від комплексної, бо їхні передбачення всюди збігаються. Ранніші експерименти не помилилися; вони просто тестували іншу, більш обмежену дійсну теорію.

Чому це не суперечність

Було б легко прочитати це як «експерименти 2021 року були неправильними». Навпаки. Експерименти були правильними, і ця стаття залежить від того, що вони правильні: вона приймає всі виміряні кореляції й показує дійсне формулювання, яке також їх породжує. Змінюється інтерпретація — стрибок від «ця дійсна теорія сфальсифікована» до «дійсні числа неможливі у квантовій механіці». У цьому стрибку загубилося припущення, яке насправді робило всю роботу.

Стаття також не закликає відмовлятися від комплексних чисел. Її власний підсумок обережний в обидва боки: комплексні числа не є строго необхідними, але вони дуже корисні. Дійсна конструкція потребує додаткового «прапорця» на кожній системі й делікатнішого правила їх об’єднання; комплексні числа пакують усе це в одну чисту арифметичну структуру. Зручність — не дрібниця. У фізиці саме через неї формалізм часто й перемагає.

Чому це важливо

Глибше питання тут — що означає слово «необхідний» для фізичної теорії. Експеримент може розрізнити дві теорії, коли вони передбачають різні результати. Але сам по собі він не може сказати, що конкретний математичний інгредієнт є єдиним можливим контейнером для певного набору передбачень — це питання про те, які теорії взагалі можна побудувати, і вирішується воно конструкцією, а не вимірюванням. Ця стаття є такою конструкцією: вона явно показує альтернативу, яку експерименти нібито мали виключити.

Результат також загострює корисне загальне розрізнення. «Цю теорію сфальсифіковано» і «цей математичний інструмент неминучий» — різні твердження, і саме в розриві між ними чистий експериментальний результат може перетворитися на перебільшення. Комплексні числа залишаються природною та ефективною мовою квантової механіки. Чи є вони метафізично обов'язковими — окреме питання, і на нього відповідь наразі: ні.

Короткий підсумок

Пропозиція 2021 року й експерименти 2022 року показали, що квантова механіка на дійсних числах, побудована зі стандартним правилом тензорного добутку для об'єднання систем, дає відмінні й перевірні передбачення від комплексної квантової механіки, а експерименти підтримали комплексну теорію. Це широко подавали як доказ того, що уявні числа фізично необхідні. Нова стаття в *Physical Review Letters* будує квантову механіку на дійсних числах, виходячи з іншого, заснованого на локальності постулату, й відтворює всі передбачення комплексної теорії, включно з багаточастинковими тестами. Отже, комплексні числа зручні, але не строго необхідні. Це теоретична конструкція, вона не скасовує ранні експерименти й не закликає практично переписувати квантову механіку.

Твереза оцінка

Що показує стаття: самосумісне формулювання квантової механіки, яке використовує лише дійсні числа, може відтворити кожне передбачення стандартної комплексної теорії, включно з багаточастинковими тестами типу Bell, якщо воно побудоване на постулаті локальності, а не на правилі тензорного добутку для об'єднання систем.

Що правдоподібне, але не є суттю: що це «спростовує» результати 2021–2022 років. Ні. Стаття приймає ті експерименти як правильні й уточнює їхній масштаб: вони виключили одну конкретну дійсну теорію — ту, що зберігає правило тензорного добутку, — а не дійсні числа в принципі.

Чого це не показує: що комплексні числа неправильні, марні або що від них варто відмовитися на практиці — стаття прямо називає їх дуже корисними. Це також не новий експеримент: нових даних не вимірювали; твердження є математичною конструкцією та доведенням узгодженості.

Основні обмеження для неспеціаліста: аргумент залежить від того, яке припущення ви вважаєте фізично фундаментальнішим — правило тензорного добутку чи постулат локальності. Це обґрунтований вибір у поточній дискусії про основи, а не факт, зафіксований вимірюванням; до того ж дійсна конструкція, ймовірно, менш природна, ніж комплексна, з якою вона еквівалентна.

Наскільки впевненим може бути звичайний читач? Висока впевненість, що конструкція математично узгоджена: вона рецензована, а логіку можна перевірити. Варто довіряти скромному висновку: комплексні числа — зручна мова квантової механіки, а не доведена метафізична необхідність. До будь-якого заголовка на кшталт «уявні числа реальні» слід ставитися як до гасла, яке ця стаття саме й покликана виправити.

Джерела

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