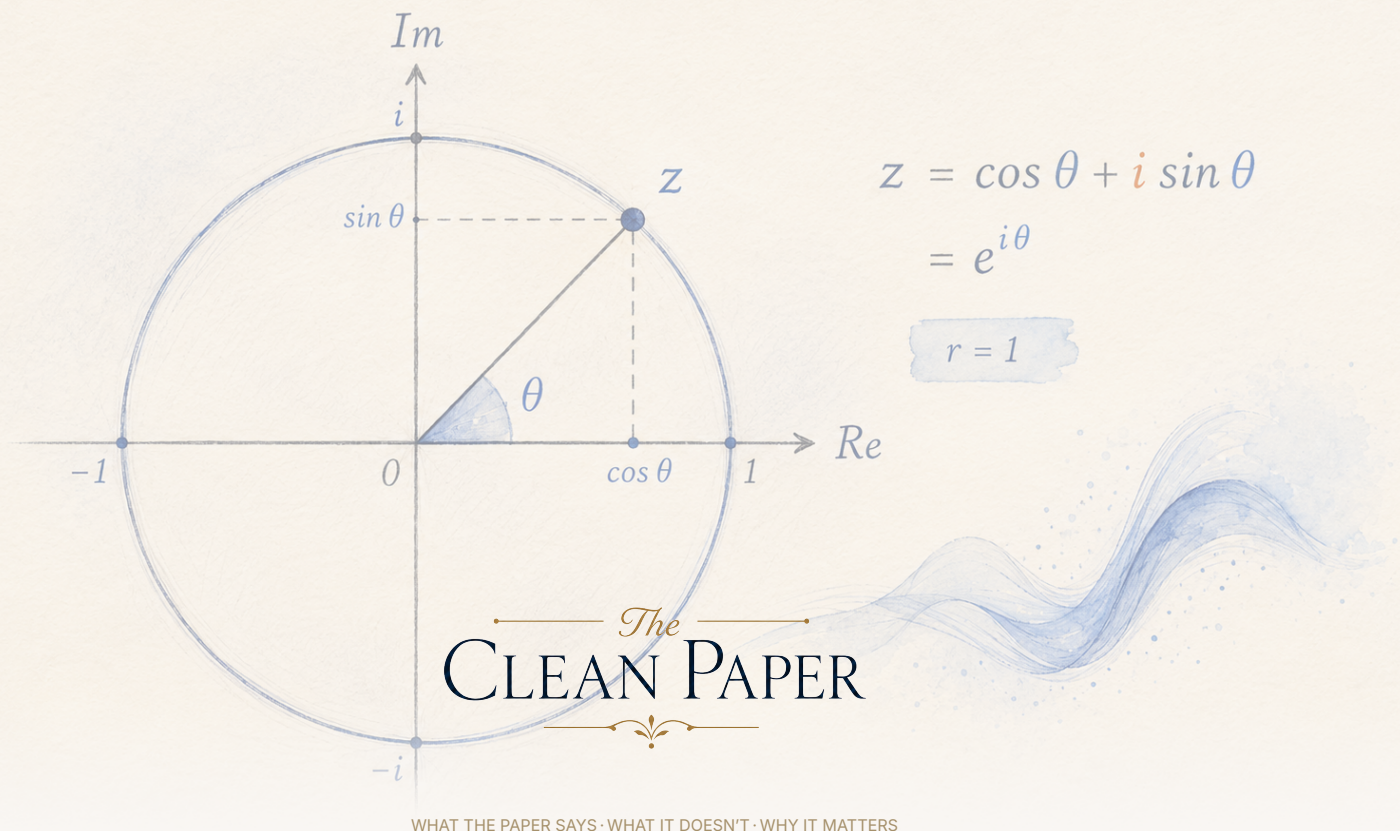




Квантовую механику можно записать только действительными числами — тонкость в том, как объединять системы

В 2021 году широко обсуждавшийся результат утверждал, что версию квантовой механики на действительных числах можно экспериментально опровергнуть, а последующие эксперименты 2022 года поддержали стандартную комплексную квантовую теорию. Это часто подавали как доказательство того, что мнимые числа физически реальны. Новая статья в *Physical Review Letters* уточняет утверждение: если построить действительную формулировку на другом, возможно физически более фундаментальном предположении о том, как объединяются отдельные системы, она воспроизводит каждое предсказание комплексной квантовой механики, включая многочастичные тесты. Честное прочтение: комплексные числа удобны, но не строго необходимы, а ранние эксперименты исключили одну конкретную действительную теорию, а не действительные числа в принципе. Это результат по основаниям теории на бумаге, а не новое измерение, и он не просит никого перестать пользоваться комплексными числами.

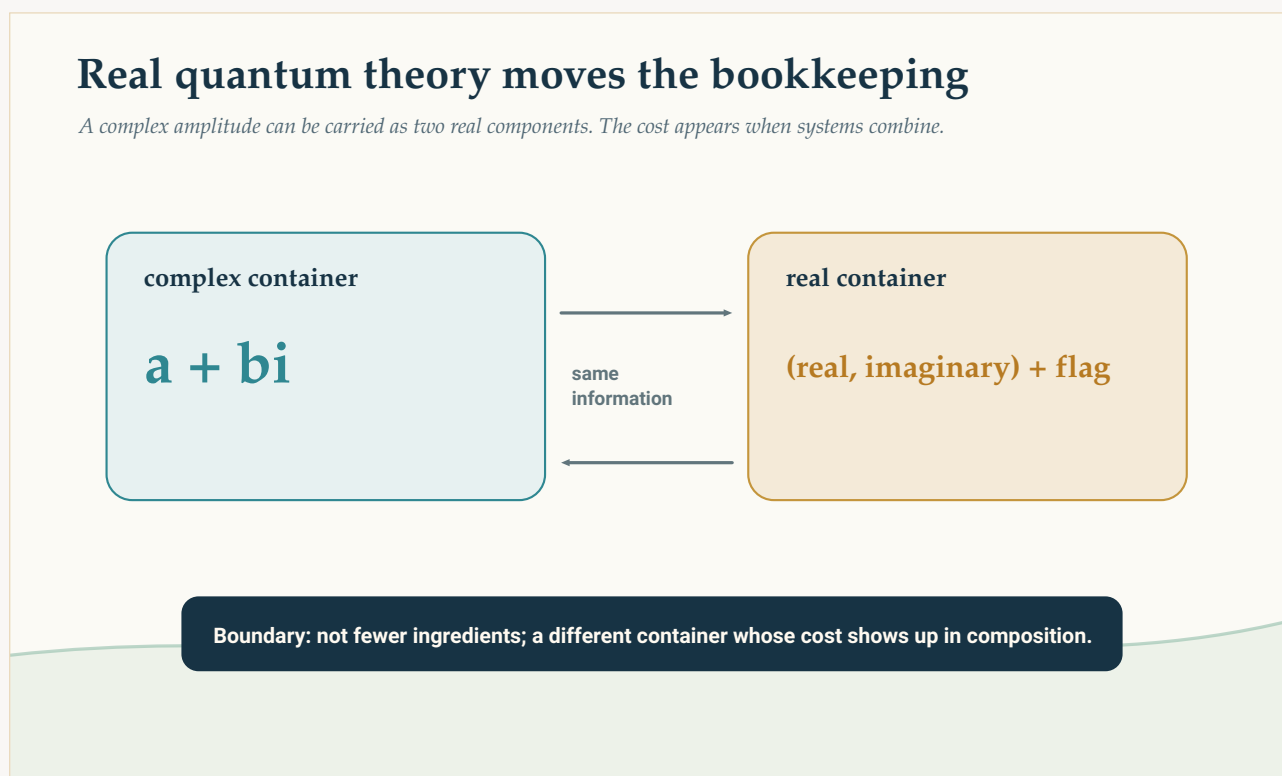
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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, который стоит перечитать

Несколько лет назад широко разошлось яркое утверждение: эксперименты якобы показали, что мнимые числа физически реальны и что квантовую механику невозможно записать без них. Оно выросло из настоящей и тщательной физики — предложения 2021 года Marc-Olivier Renou и коллег в *Nature* и экспериментов 2022 года, которые его реализовали. Но популярная версия сжала точное утверждение до лозунга, а лозунг оказался сильнее самого результата.

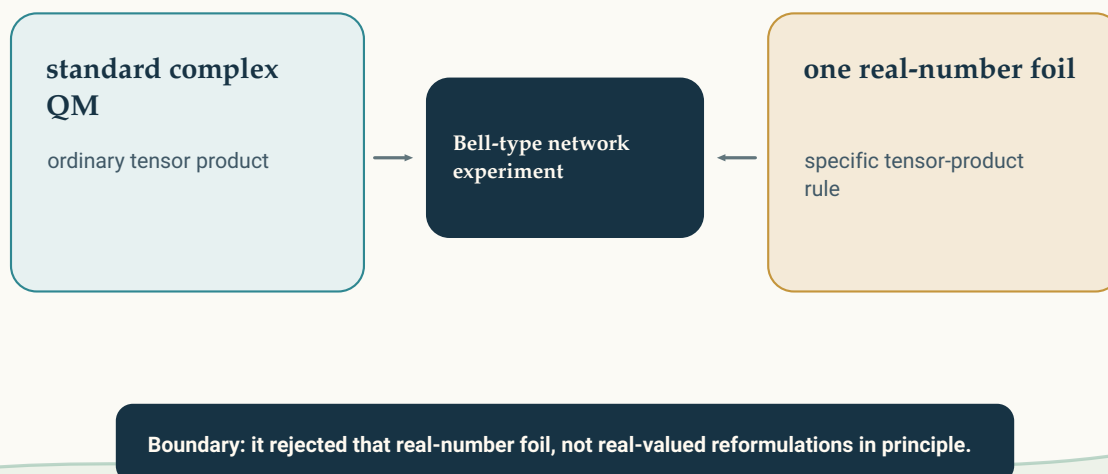
Новая статья в *Physical Review Letters* от Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping и Dagmar Bruß возвращает точность. Она строит версию квантовой механики, использующую только действительные числа и воспроизводящую все предсказания стандартной комплексной теории — включая те же многочастичные эксперименты, которые якобы исключили действительные числа. Трюк не в том, чтобы тайком вернуть мнимые числа. Меняется одно предположение о том, как объединяются отдельные системы. Честный вывод, словами самих авторов: комплексные числа не необходимы для описания квантовой механики, но они, безусловно, очень полезны.



Комплексная амплитуда $a+bi$ — это пара действительных чисел с дополнительным «флагом», который переносится вместе с каждой системой. У действительной формулировки не меньше составляющих — только другой контейнер, а цена проявляется в том, как системы объединяются.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Эксперименты 2021–22 годов сравнивали две конкретные теории — стандартную комплексную квантовую механику и действительную «контрастную» теорию, сохраняющую правило тензорного произведения, — и результат был в пользу комплексной. Они исключили именно эту контрастную теорию, а не действительные числа в принципе.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Что комплексные числа делают в теории

В квантовой механике состояние системы описывается амплитудами, а чтобы получить вероятность результата, берут квадрат модуля амплитуды. В стандартной теории эти амплитуды — комплексные числа: каждое несёт величину и фазу, то есть угол. Фаза — не украшение. Когда два пути к одному результату объединяются, именно их фазы определяют, усилят они друг друга или погасят — это интерференция, характерный признак квантового поведения. При этом общую фазу, общую для всей системы, измерить невозможно.

Комплексное число на самом деле — лишь пара действительных чисел, действительная и мнимая части, упакованных со специальными правилами умножения. Поэтому естественно спросить, нужна ли сама упаковка. Можно ли сохранить два действительных числа, отбросить комплексную форму и всё равно получить всю квантовую механику? Именно правила умножения делают комплексные числа чем-то большим, чем два числа рядом, поэтому ответ не очевиден — и именно здесь скрывается тонкость.

Что на самом деле установил результат 2021 года

Renou и коллеги поставили именно этот вопрос и придали ему острую, экспериментально проверяемую форму. Они не спрашивали, могут ли действительные числа вообще где-то появляться в квантовой теории; они спрашивали, способна ли формулировка на действительных числах воспроизвести все предсказания комплексной теории при определённом правиле объединения систем. Это правило — назовём его правилом тензорного произведения — является стандартным способом описать несколько независимых частей как одно целое.

При этом правиле они нашли сценарий с тремя сторонами, получающими запутанность от двух независимых источников, где действительная теория и комплексная теория предсказывают разные измеримые корреляции — многочастичный аналог теста Белла. В 2022 году эксперименты на сверхпроводящих схемах и на фотонах выполнили такие тесты. Измеренные корреляции совпали с комплексной квантовой механикой и противоречили действительной альтернативе.

Почему тесту нужны два источника, а не один

Обычный тест Белла использует один источник, который посылает одну запутанную пару двум людям — Alice и Bob. Для такой схемы квантовая механика на действительных числах может воспроизвести точно те же корреляции, что и комплексная теория: они неразличимы, поэтому один источник не может решить спор.

Аргумент 2021 года получает силу при добавлении второго, **независимого** источника. Представьте три стороны в ряд: Alice, Bob, Charlie. Один источник запутывает Alice с Bob; отдельный источник, не имеющий с первым общего прошлого, запутывает Bob с Charlie. Bob сидит посередине и измеряет свои две частицы вместе, связывая две половины. Именно *независимость* двух источников — предположение, что они подготовлены отдельно, — создаёт различие: при стандартном правиле тензорного произведения для объединения независимых систем действительная теория не может воспроизвести трёхсторонние корреляции, предсказываемые комплексной квантовой механикой для такой сети, тогда как тест с одним источником оставляет теории неразличимыми. Именно этот разрыв и измерили эксперименты.

Это реальный и вполне однозначный результат. Но внимательно посмотрите, что именно сравнивали: стандартную комплексную квантовую теорию с одной конкретной действительной теорией — той, которая сохраняет обычное правило тензорного произведения. Эксперименты решали именно эту пару, а не вопрос о действительных числах вообще. Новая статья, используя термин из оснований квантовой теории, называет отвергнутую альтернативу тем, чем она является: *foil theory* — контрастной теорией, которую никто не предлагает как истинную, а намеренно ставят рядом с принятой, чтобы эксперимент мог их различить. Её ценность именно в том, что

она отличается: исключение *foil* показывает, какие предположения действительной теории действительно несли нагрузку.

Что меняет новая статья

Новая работа сохраняет почти всё и меняет один постулат. Вместо правила тензорного произведения для объединения систем она начинается с требования локальности, которое авторы считают физически более фундаментальным: операция, выполненная только над одной подсистемой, не должна иметь измеримого эффекта на другую, нетронутую подсистему.

Исходя из этого, они явно строят квантовую механику на действительных числах. Действительная и мнимая части обычных амплитуд кодируются дополнительными действительными переменными — в статье это называют «флагом», прикреплённым к каждой системе, — а ненаблюдаемая глобальная фаза комплексной теории превращается в столь же ненаблюдаемое вращение в действительной формулировке. Цена проявляется именно там, где её локализовал результат 2021 года: в способе объединения систем. Наивное «склеивание» этих действительных описаний даже не даёт хорошо определённого правила, поэтому конструкция вместо этого группирует описания, представляющие одну и ту же физику, и работает с такими классами. При этом правиле объединения действительная теория воспроизводит каждое математическое ожидаемое значение комплексной теории — для одной системы и для многих, запутанных между удалёнными сторонами. Авторы также показывают, что конструкция по существу единственна и эквивалентна стандартной квантовой механике.

Следовательно, многочастичные эксперименты не могут отличить эту действительную теорию от комплексной, потому что их предсказания везде совпадают. Ранние эксперименты не ошиблись; они просто тестировали другую, более ограниченную действительную теорию.

Почему это не противоречие

Было бы легко прочитать это как «эксперименты 2021 года были неправильными». Наоборот. Эксперименты были правильными, и эта статья зависит от того, что они правильны: она принимает все измеренные корреляции и показывает действительную формулировку, которая тоже их порождает. Меняется интерпретация — скачок от «эта действительная теория сфальсифицирована» к «действительные числа невозможны в квантовой механике». В этом скачке потерялось предположение, которое на самом деле делало всю работу.

Статья также не призывает отказаться от комплексных чисел. Её собственный итог осторожен в обе стороны: комплексные числа не являются строго необходимыми, но

они очень полезны. Действительная конструкция требует дополнительного «флага» на каждой системе и более деликатного правила их объединения; комплексные числа упаковывают всё это в одну чистую арифметическую структуру. Удобство — не мелочь. В физике именно поэтому формализм часто и побеждает.

Почему это важно

Более глубокий вопрос здесь — что означает слово «необходимый» для физической теории. Эксперимент может различить две теории, когда они предсказывают разные результаты. Но сам по себе он не может сказать, что конкретный математический ингредиент является единственным возможным контейнером для определённого набора предсказаний — это вопрос о том, какие теории вообще можно построить, и решается он конструкцией, а не измерением. Эта статья и является такой конструкцией: она явно показывает альтернативу, которую эксперименты якобы должны были исключить.

Результат также заостряет полезное общее различие. «Эта теория сфальсифицирована» и «этот математический инструмент неизбежен» — разные утверждения, и именно в разрыве между ними чистый экспериментальный результат может превратиться в преувеличение. Комплексные числа остаются естественным и эффективным языком квантовой механики. Являются ли они метафизически обязательными — отдельный вопрос, и на него ответ сейчас: нет.

Краткий итог

Предложение 2021 года и эксперименты 2022 года показали, что квантовая механика на действительных числах, построенная со стандартным правилом тензорного произведения для объединения систем, даёт отличные и проверяемые предсказания от комплексной квантовой механики, а эксперименты поддержали комплексную теорию. Это широко подавали как доказательство того, что мнимые числа физически необходимы. Новая статья в *Physical Review Letters* строит квантовую механику на действительных числах, исходя из другого, основанного на локальности постулата, и воспроизводит все предсказания комплексной теории, включая многочастичные тесты. Следовательно, комплексные числа удобны, но не строго необходимы. Это теоретическая конструкция, она не отменяет ранние эксперименты и не призывает практически переписывать квантовую механику.

Проверка без прикрас

Что показывает статья: самосогласованная формулировка квантовой механики, использующая только действительные числа, может воспроизвести каждое предсказание стандартной комплексной теории, включая многочастичные тесты типа Bell, если она построена на постулате локальности, а не на правиле тензорного произведения для объединения систем.

Что правдоподобно, но не является сутью: что это «опровергает» результаты 2021–2022 годов. Нет. Статья принимает те эксперименты как правильные и уточняет их масштаб: они исключили одну конкретную действительную теорию — ту, которая сохраняет правило тензорного произведения, — а не действительные числа в принципе.

Чего это не показывает: что комплексные числа неправильны, бесполезны или от них стоит отказаться на практике — статья прямо называет их очень полезными. Это также не новый эксперимент: новых данных не измеряли; утверждение является математической конструкцией и доказательством согласованности.

Основные ограничения для неспециалиста: аргумент зависит от того, какое предположение вы считаете физически более фундаментальным — правило тензорного произведения или постулат локальности. Это обоснованный выбор в текущей дискуссии об основаниях, а не факт, зафиксированный измерением; к тому же действительная конструкция, вероятно, менее естественна, чем комплексная, которой она эквивалентна.

Насколько уверенным может быть обычный читатель? Высокая уверенность, что конструкция математически согласована: она прошла рецензирование, а логику можно проверить. Стоит доверять скромному выводу: комплексные числа — удобный язык квантовой механики, а не доказанная метафизическая необходимость. К любому заголовку вроде «мнимые числа реальны» следует относиться как к лозунгу, который эта статья как раз призвана исправить.

Источники

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>