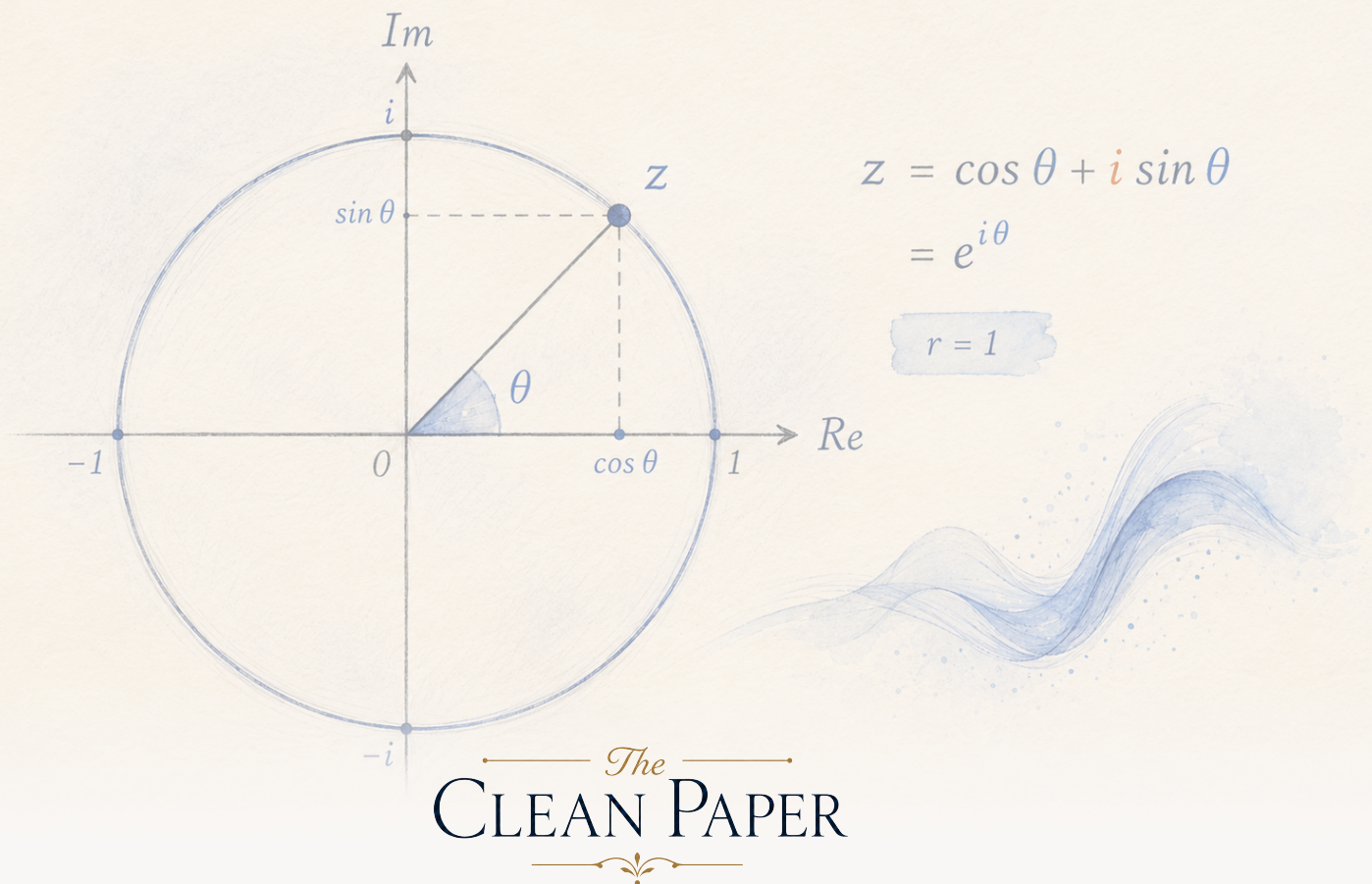




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Mechanikę kwantową można zapisać wyłącznie liczbami rzeczywistymi — haczyk tkwi w łączeniu układów

Szeroko opisywany wynik z 2021 roku twierdził, że wersję mechaniki kwantowej opartą na liczbach rzeczywistych można sfalsyfikować eksperymentalnie, a eksperymenty z 2022 roku zgodziły się ze standardową teorią zespoloną. Nagłówki często przedstawiały to jako dowód fizycznej realności liczb urojonych. Nowa praca w *Physical Review Letters* wyostreza twierdzenie: gdy sformułowanie rzeczywiste oprze się na innym, być może bardziej fizycznym założeniu o łączeniu oddzielnych układów, odtwarza ono każde przewidywanie zespolonej mechaniki kwantowej, w tym testy wieloczęściowe. Uczciwy wniosek brzmi: liczby zespolone są wygodne, ale nie ściśle konieczne, a wcześniejsze eksperymenty wykluczyły jedną konkretną teorię rzeczywistą, nie liczby rzeczywiste jako takie. To wynik z podstaw teorii, nie nowy pomiar, i nie prosi nikogo o porzucenie liczb zespolonych.

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

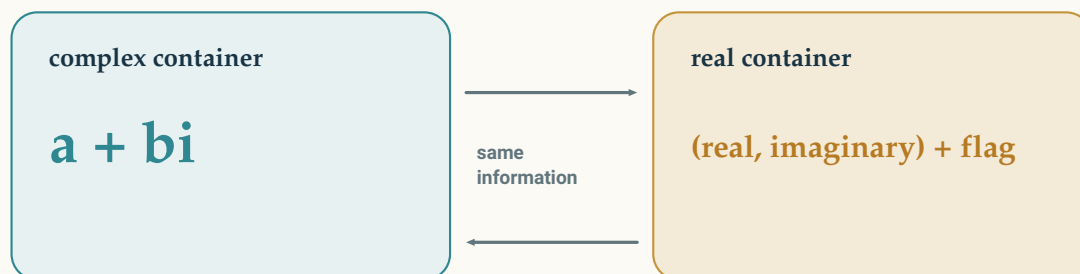
Nagłówek wart ponownej lektury

Kilka lat temu krążyło uderzające twierdzenie: eksperymenty wykazały, że liczby urojone są fizycznie rzeczywiste, a mechaniki kwantowej nie da się bez nich zapisać. Twierdzenie wyrosło z prawdziwej, starannej fizyki — propozycji Marca-Oliviera Renou i współpracowników opublikowanej w 2021 roku w *Nature* oraz eksperymentów z 2022 roku, które ją zrealizowały. Popularna wersja skompresowała jednak precyzyjne stwierdzenie do hasła, a hasło było silniejsze od wyniku.

Nowa praca Pedra Barriosy Hity, Antona Trushechkina, Hermanna Kampermanna, Michaela Eppinga i Dagmar Bruß w *Physical Review Letters* przywraca precyzyjne brzmienie. Konstruuje wersję mechaniki kwantowej używającą wyłącznie liczb rzeczywistych, która odtwarza każde przewidywanie standardowej teorii zespolonej — w tym właśnie te wieloczęściowe eksperymenty, które miały wykluczać liczby rzeczywiste. Sztuczka nie polega na przemyceniu liczb urojonych. Zmieniono jedno założenie dotyczące łączenia oddzielnych układów. Uczciwy wniosek, słowami autorów, brzmi: liczby zespolone nie są konieczne do opisu mechaniki kwantowej, ale z pewnością są bardzo użyteczne.

Real quantum theory moves the bookkeeping

A complex amplitude can be carried as two real components. The cost appears when systems combine.

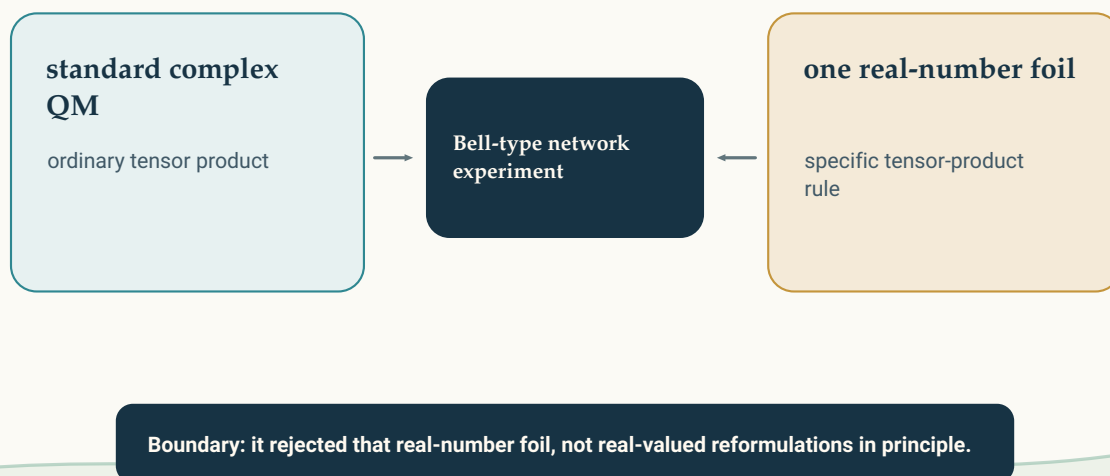


Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

Amplituda zespolona $a+bi$ jest parą liczb rzeczywistych z „flagą” przenoszoną wraz z każdym układem. Sformułowanie rzeczywiste nie ma mniej składników — używa tylko innego pojemnika, a koszt ujawnia się przy łączeniu układów.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Eksperymenty z lat 2021–2022 porównały dwie konkretne teorie — standardową zespoloną mechanikę kwantową z rzeczywistą „teorią kontrastową”, która zachowuje regułę iloczynu tensorowego — i wskazały pierwszą z nich. Wykluczyły tę teorię kontrastową, nie liczby rzeczywiste jako takie.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Rola liczb zespolonych w teorii

W mechanice kwantowej stan układu opisują amplitudy, a prawdopodobieństwo wyniku otrzymuje się przez podniesienie modułu amplitudy do kwadratu. W teorii standardowej amplitudy są liczbami zespolonymi: każda ma wartość i fazę, czyli kąt. Faza nie jest ozdobą. Kiedy dwie drogi prowadzące do tego samego wyniku się łączą, ich fazy decydują, czy się wzmacniają, czy wygaszają — to interferencja będąca znakiem rozpoznawczym zachowania kwantowego. Wspólnej fazy globalnej całego układu nie da się natomiast zmierzyć.

Liczba zespolona jest w istocie parą liczb rzeczywistych — częścią rzeczywistą i urojoną — połączonych szczególnymi regułami mnożenia. Naturalne pytanie brzmi więc, czy to połączenie jest niezbędne. Czy można zachować dwie liczby rzeczywiste, odrzucić zespolone opakowanie i nadal otrzymać całą mechanikę kwantową? Reguły mnożenia sprawiają, że liczby zespolone są czymś więcej niż dwiema liczbami ustawionymi obok siebie, dlatego odpowiedź nie jest oczywista; właśnie tu kryje się subtelność.

Co naprawdę ustalił wynik z 2021 roku

Renou i współpracownicy postawili dokładnie to pytanie i nadali mu ostrą, testowalną postać. Nie pytali, czy liczby rzeczywiste mogą występować gdziekolwiek w teorii kwantowej; pytali, czy sformułowanie rzeczywiste może odtworzyć wszystkie przewidywania teorii zespolonej przy określonej regule łączenia układów. Ta reguła — nazwijmy ją regułą iloczynu tensorowego — jest standardowym sposobem opisywania kilku niezależnych części jako jednej całości.

Przy tej regule znaleźli scenariusz z trzema stronami współdzielącymi splątanie z dwóch niezależnych źródeł, w którym teoria rzeczywista i zespolona przewidują różne, mierzalne korelacje — wieloczęściową wersję testu Bella. W 2022 roku takie testy przeprowadzono za pomocą obwodów nadprzewodzących i fotonów. Zmierzone korelacje odpowiadały zespolonej mechanice kwantowej i były niezgodne z alternatywą rzeczywistą.

Dlaczego test wymaga dwóch źródeł, a nie jednego

Zwykły test Bella wykorzystuje jedno źródło, które wysyła splątaną parę do dwóch osób, Alicji i Boba. Dla takiego układu mechanika kwantowa oparta na liczbach rzeczywistych może dokładnie odtworzyć te same korelacje co teoria zespolona — obie są nierozróżnialne, więc jedno źródło nie potrafi między nimi rozstrzygnąć.

Argument z 2021 roku działa po dodaniu drugiego, **niezależnego** źródła. Wyobraźmy sobie trzy strony w szeregu: Alicję, Boba i Charliego. Jedno źródło splątuje Alicję z Bobem; oddzielne źródło, bez wspólnej przeszłości z pierwszym, splątuje Boba z Charliem. Bob znajduje się pośrodku i wspólnie mierzy swoje dwie cząstki, łącząc obie połowy. Decyduje *niezależność* źródeł — założenie, że przygotowano je osobno: przy standardowej regule iloczynu tensorowego dla niezależnych układów teoria rzeczywista nie potrafi odtworzyć trójstronnych korelacji przewidywanych przez zespoloną mechanikę kwantową, choć test z jednym źródłem pozostawia obie teorie na równi. Eksperymenty zmierzyły właśnie tę różnicę.

To prawdziwy i przejrzysty wynik. Trzeba jednak uważnie zauważyć, co porównywał: standardową zespoloną teorię kwantową z jedną konkretną teorią rzeczywistą — taką, która zachowuje zwykłą regułę iloczynu tensorowego. Eksperymenty rozstrzygały między tą parą, nie przeciwko liczbom rzeczywistym jako takim. Nowa praca zapożycza termin z podstaw teorii kwantowej i nazywa wykluczoną alternatywę zgodnie z jej rolą: *teorią kontrastową* — teorią, której nikt nie przedstawia jako prawdziwej, lecz tworzy ją celowo jako przeciwieństwo teorii przyjętej, aby eksperyment mógł je odróżnić. Cała jej wartość polega na odróżnialności: wykluczenie teorii kontrastowej pokazuje, które założenia teorii rzeczywistej wykonywały zasadniczą pracę.

Co zmienia nowa praca

Nowa praca zachowuje niemal wszystko i zmienia jeden postulat. Zamiast zakładać regułę iloczynu tensorowego przy łączeniu układów, wychodzi od wymogu lokalności, który autorzy uznają za

bardziej fundamentalny fizycznie: operacja wykonana tylko na jednym podukładzie nie powinna mieć mierzalnego wpływu na inny, nietknięty podukład.

Na tej podstawie jawnie budują mechanikę kwantową opartą na liczbach rzeczywistych. Rzeczywiste i urojone części zwykłych amplitud są przenoszone jako dodatkowy rzeczywisty zapis — praca nazywa go „flagą” dołączoną do każdego układu — a nieobserwowalna faza globalna teorii zespolonej staje się równie nieobserwowalnym obrotem w teorii rzeczywistej. Cena ujawnia się dokładnie tam, gdzie wskazał ją wynik z 2021 roku: przy łączeniu układów. Naiwny sposób sklejanie tych opisów rzeczywistych nie daje nawet dobrze określonej procedury, dlatego konstrukcja grupuje opisy reprezentujące tę samą fizykę i pracuje na ich klasach. Przy takiej regule łączenia teoria rzeczywista odtwarza każdą wartość oczekiwaną przewidywaną przez teorię zespoloną — dla jednego układu i wielu układów splątanych między oddzielnymi stronami. Autorzy pokazują także, że konstrukcja jest zasadniczo jedyna i równoważna standardowej mechanice kwantowej.

Wieloczęściowe eksperymenty nie mogą więc odróżnić tej teorii rzeczywistej od zespolonej, ponieważ obie zgadzają się w każdym przewidywaniu. Wcześniejsze eksperymenty nie zawiodły; po prostu testowały inną, bardziej restrykcyjną teorię rzeczywistą.

Dlaczego nie ma tu sprzeczności

Łatwo byłoby odczytać to jako „eksperymenty z 2021 roku były błędne”. Jest odwrotnie. Eksperymenty były poprawne, a praca opiera się na ich poprawności: przyjmuje wszystkie zmierzone korelacje i pokazuje sformułowanie rzeczywiste, które także je wytwarza. Rewizji podlega interpretacja — przeskok od „ta teoria rzeczywista została sfalsyfikowana” do „liczby rzeczywiste są niemożliwe w mechanice kwantowej”. W tym przeskoku pominięto założenie wykonujące właściwą pracę.

Praca nie twierdzi też, że ktokolwiek powinien porzucić liczby zespolone. Jej własne podsumowanie jest ostrożne w obu kierunkach: liczby zespolone nie są ściśle konieczne i są bardzo użyteczne. Konstrukcja rzeczywista potrzebuje dodatkowej flagi w każdym układzie i subtelniejszej reguły ich łączenia; liczby zespolone pakują wszystko w jeden przejrzysty aparat arytmetyczny. Wygoda nie jest błahostką. W fizyce często stanowi cały powód zwycięstwa formalizmu.

Dlaczego to ważne

Pod spodem kryje się ciekawe pytanie o znaczenie słowa „konieczny” w teorii fizycznej. Eksperyment potrafi odróżnić dwie teorie, jeśli przewidują różne wyniki. Sam nie może wykazać, że konkretny składnik matematyczny jest jedynym możliwym nośnikiem danego zbioru przewidywań — to pytanie o istnienie teorii, rozstrzygane przez konstrukcję, nie pomiar. Ta praca jest właśnie konstrukcją: przedstawia alternatywę, którą eksperymenty miały rzekomo wykluczyć.

Wynik wyostrza też rozróżnienie przydatne znacznie szerzej. „Ta teoria została sfalsyfikowana” i „to narzędzie matematyczne jest nieuniknione” to różne stwierdzenia, a w luce między nimi jed-

noznaczny wynik eksperymentalny może zmienić się w przesadę. Liczby zespolone pozostają naturalnym i wydajnym językiem mechaniki kwantowej. Pytanie, czy są wymagane metafizycznie, jest odrębne, a obecna odpowiedź brzmi: nie.

Zwięzłe podsumowanie

Propozycja z 2021 roku i eksperymenty z 2022 roku wykazały, że mechanika kwantowa oparta na liczbach rzeczywistych i standardowej regule iloczynu tensorowego dla łączenia układów daje inne, testowalne przewidywania niż zespolona mechanika kwantowa, a eksperymenty wskazały teorię zespoloną. Powszechnie przedstawiano to jako dowód, że liczby urojone są fizycznie konieczne. Nowa praca w *Physical Review Letters* konstruuje mechanikę kwantową opartą na liczbach rzeczywistych i innym postulatcie lokalności, która odtwarza wszystkie przewidywania teorii zespolonej, w tym testy wieloczęściowe — pokazując, że liczby zespolone są wygodne, ale nie ściśle konieczne. Jest to konstrukcja teoretyczna, nie obala wcześniejszych eksperymentów i nie wzywa do praktycznego przeformułowania mechaniki kwantowej.

Kontrola bez upiększeń

Co pokazuje praca: Spójne sformułowanie mechaniki kwantowej używające wyłącznie liczb rzeczywistych może odtworzyć każde przewidywanie standardowej teorii zespolonej, w tym wieloczęściowe eksperymenty typu Bella, jeśli opiera się na postulatcie lokalności zamiast reguły iloczynu tensorowego przy łączeniu układów.

Co jest możliwe, ale nie stanowi sedna: Że wynik „obala” rezultaty z lat 2021–2022. Nie obala. Przyjmuje eksperymenty jako poprawne i reinterpretuje ich zakres: wykluczyły jedną konkretną teorię rzeczywistą, zachowującą regułę iloczynu tensorowego, a nie liczby rzeczywiste jako takie.

Czego praca nie pokazuje: Że liczby zespolone są błędne, bezużyteczne albo że warto je odrzucić w praktyce — autorzy jawnie nazywają je bardzo użytecznymi. Nie jest to też nowy eksperyment: nie zmierzono żadnych danych; twierdzenie ma postać konstrukcji matematycznej i dowodu spójności.

Główne ograniczenia dla niespecjalisty: Argument zależy od tego, które założenie uznamy za bardziej fundamentalne fizycznie — regułę iloczynu tensorowego czy postulat lokalności. To uzasadniony wybór w trwającej debacie o podstawach, a nie fakt ustalony przez pomiar, i konstrukcja rzeczywista jest zapewne mniej naturalna niż odpowiadająca jej konstrukcja zespolona.

Jak duże zaufanie powinien mieć zwykły czytelnik? Duże, że konstrukcja jest matematycznie spójna — została zrecenzowana, a jej logikę można sprawdzić. Warto ufać skromnemu wnioskowi: liczby zespolone są wygodnym językiem mechaniki kwantowej, nie udowodnioną koniecznością metafizyczną. Nagłówki w rodzaju „liczby urojone są rzeczywiste” należy traktować jak hasło, które ta praca ma skorygować.

Źródła

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>