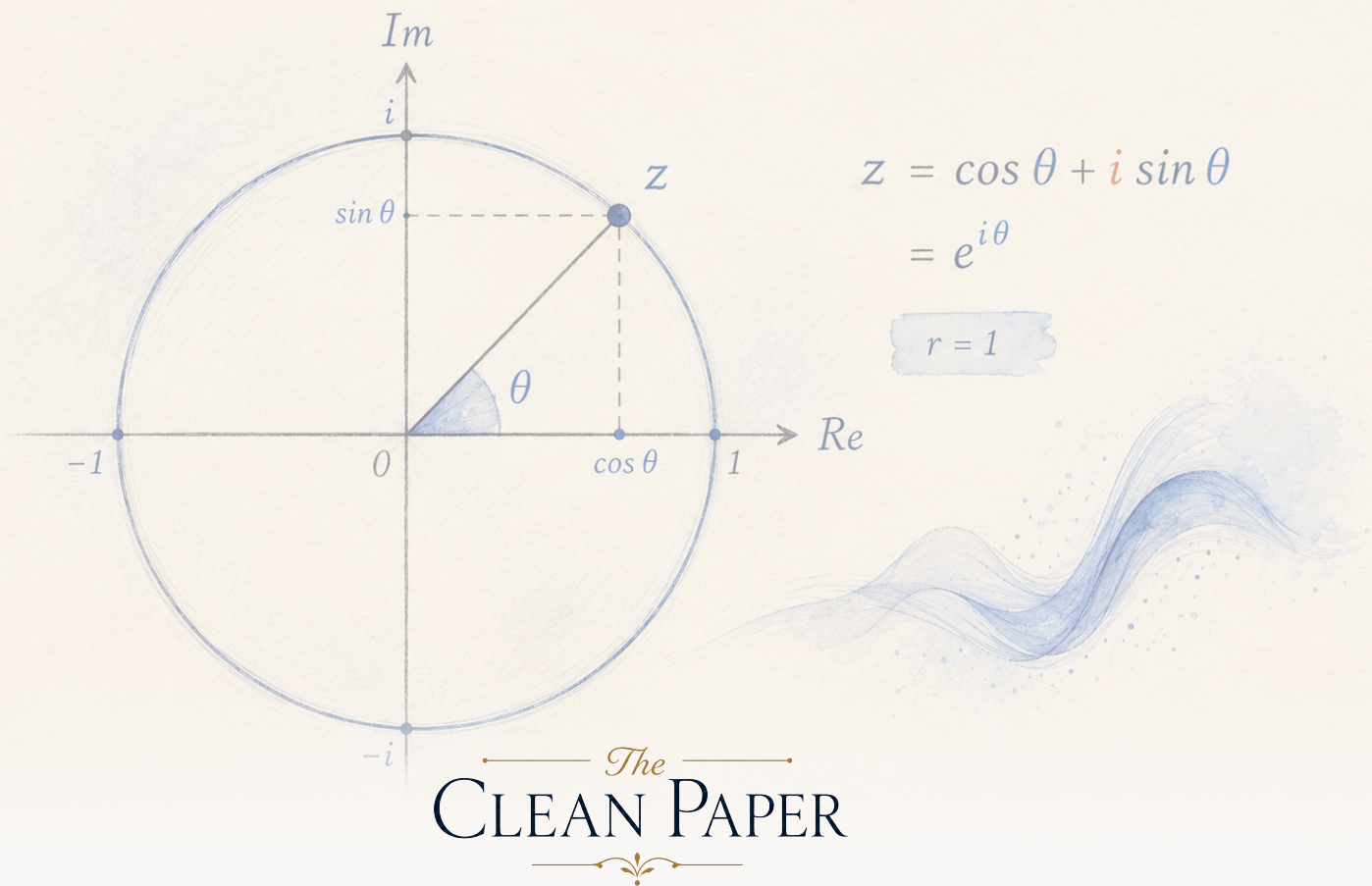




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

## A mecânica quântica pode ser escrita só com números reais — o ponto delicado está em como sistemas se combinam

*Em 2021, um resultado amplamente noticiado argumentou que uma versão da mecânica quântica com números reais poderia ser falsificada experimentalmente, e experimentos de acompanhamento em 2022 concordaram com a teoria quântica complexa padrão. Isso muitas vezes virou manchete como prova de que números imaginários são fisicamente reais. Um novo artigo na Physical Review Letters afia a alegação: construa a formulação real sobre uma suposição diferente, possivelmente mais física, sobre como sistemas separados se combinam, e ela reproduz toda previsão da mecânica quântica complexa, incluindo os testes multipartites. A leitura honesta é que números complexos são convenientes, não estritamente necessários — e que os experimentos anteriores descartaram uma teoria real particular, não números reais em princípio. É um resultado de fundamentos no papel, não uma nova medição, e não pede que ninguém pare de usar números complexos.*

---

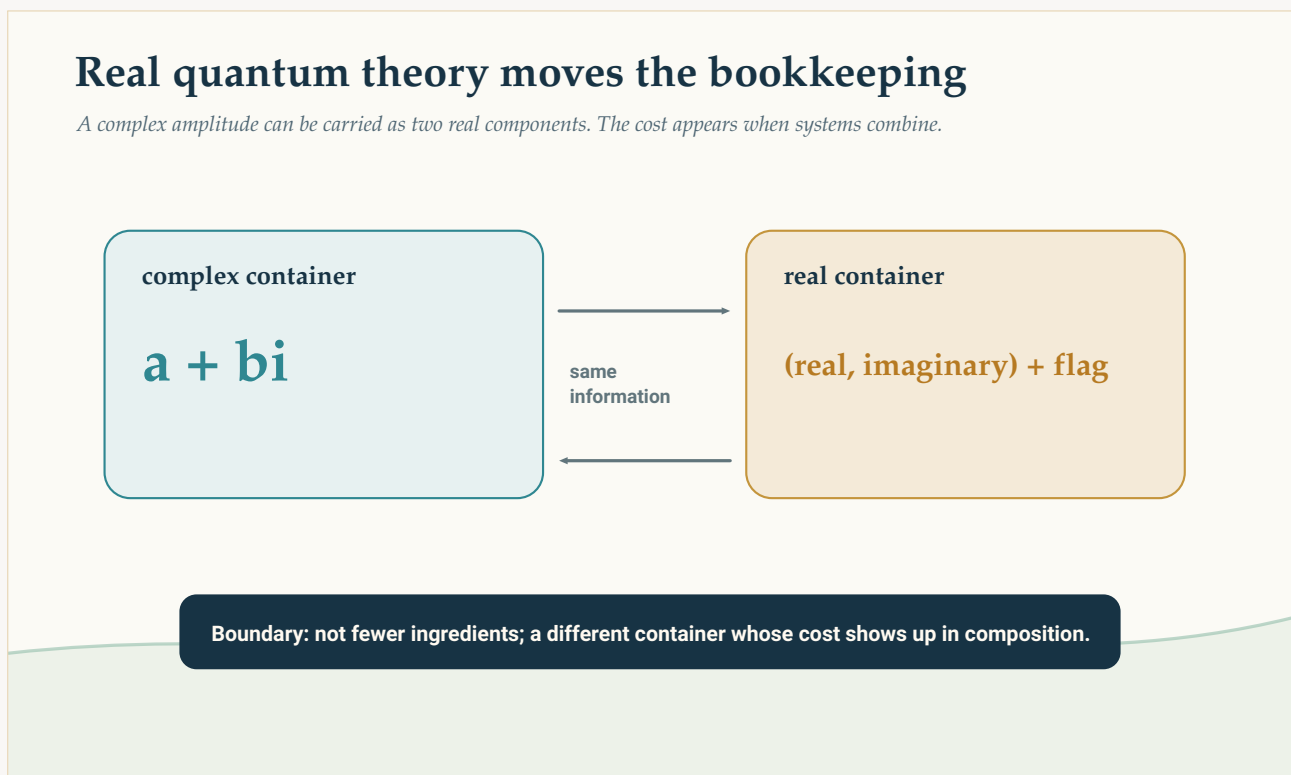
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

## Uma manchete que vale reler

Alguns anos atrás, uma alegação marcante circulou: experimentos haviam mostrado que números imaginários são fisicamente reais, que a mecânica quântica não pode ser escrita sem eles. A alegação cresceu a partir de física genuína e cuidadosa — uma proposta de 2021 na *Nature* por Marc-Olivier Renou e colegas, e experimentos em 2022 que a executaram. Mas a versão popular comprimiu uma afirmação precisa em um slogan, e o slogan era mais forte que o resultado.

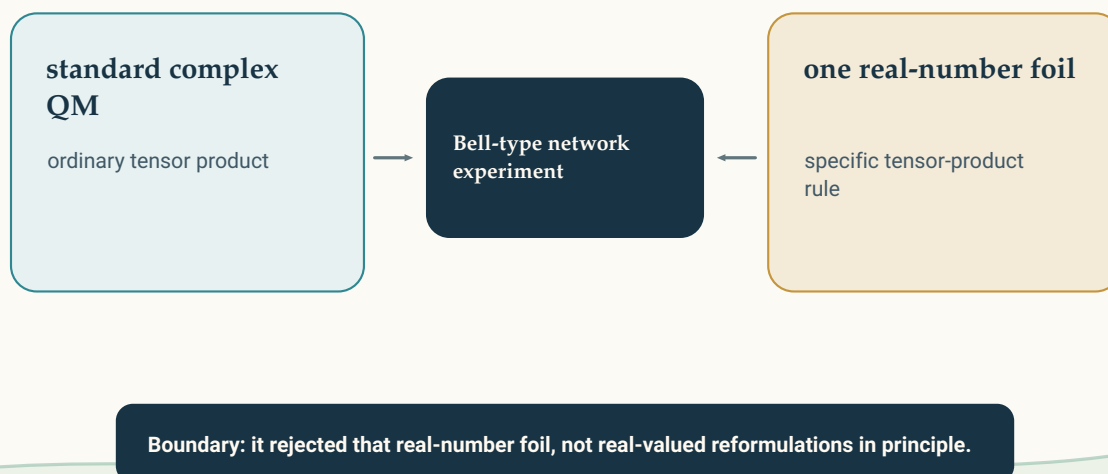
Um novo artigo na *Physical Review Letters* por Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping e Dagmar Bruß recoloca a afirmação precisa no lugar. Ele constrói uma versão da mecânica quântica que usa apenas números reais e reproduz toda previsão da teoria complexa padrão — incluindo os próprios experimentos multipartites que teriam descartado os números reais. O truque não é contrabandear números imaginários de volta. É mudar uma suposição sobre como sistemas separados se combinam. A conclusão honesta, nas palavras dos próprios autores, é que números complexos não são necessários para descrever a mecânica quântica, mas certamente são muito úteis.



Uma amplitude complexa  $a+bi$  é um par de números reais com uma “bandeira” carregada junto a cada sistema. A formulação real não tem menos ingredientes — apenas um recipiente diferente, com o custo aparecendo em como os sistemas se combinam.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

## What the 2021 test actually adjudicated



Os experimentos de 2021-22 compararam duas teorias específicas — a mecânica quântica complexa padrão contra uma “teoria contraste” real que mantém a regra do produto tensorial — e favoreceram a complexa. Eles descartaram essa teoria contraste, não os números reais em princípio.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

## O que números complexos fazem na teoria

Na mecânica quântica, o estado de um sistema é descrito por amplitudes, e para obter a probabilidade de um resultado você toma o tamanho ao quadrado de uma amplitude. Na teoria padrão, essas amplitudes são números complexos: cada uma carrega um tamanho e uma fase, um ângulo. Essa fase não é decoração. Quando dois caminhos para o mesmo resultado se combinam, suas fases decidem se eles se reforçam ou se cancelam — a interferência que é a assinatura do comportamento quântico. Uma fase global compartilhada por todo o sistema, por outro lado, nunca pode ser medida.

Um número complexo é na verdade apenas um par de números reais — uma parte real e uma parte imaginária — empacotado com regras específicas de multiplicação. Então uma pergunta natural é se o empacotamento é essencial. Você poderia manter os dois números reais, abandonar a embalagem complexa e ainda ter toda a mecânica quântica? As regras de multiplicação são o que fazem números complexos ser mais que dois números lado a lado, então a resposta não é óbvia, e é aí que mora a sutileza.

## O que o resultado de 2021 realmente estabeleceu

Renou e colegas fizeram exatamente essa pergunta, e lhe deram uma forma afiada e testável. Eles não perguntaram se números reais podem aparecer em algum lugar da teoria quântica; perguntaram se uma formulação com números reais poderia igualar todas as previsões da teoria complexa dada uma regra particular para combinar sistemas. Essa regra — chamemo-la de regra do produto tensorial — é a prescrição padrão para descrever várias partes independentes como um todo.

Sob essa regra, eles encontraram um cenário com três partes compartilhando emaranhamento de duas fontes independentes em que uma teoria de números reais e a teoria complexa preveem correlações diferentes e mensuráveis — uma versão multipartite de um teste de Bell. Em 2022, experimentos usando circuitos supercondutores e usando fótons realizaram esses testes. As correlações medidas combinaram com a mecânica quântica complexa e foram inconsistentes com a alternativa real.

### Por que o teste precisa de duas fontes, não uma

Um teste de Bell comum usa uma única fonte que envia um par emaranhado para duas pessoas, Alice e Bob. Para esse arranjo, uma mecânica quântica de números reais consegue reproduzir exatamente as mesmas correlações da teoria complexa — as duas são indistinguíveis, então uma única fonte não consegue decidir entre elas.

O argumento de 2021 ganha força acrescentando uma segunda fonte **independente**. Imagine três partes em linha: Alice, Bob, Charlie. Uma fonte emaranha Alice com Bob; uma fonte separada, sem passado comum compartilhado, emaranha Bob com Charlie. Bob fica no meio e mede suas duas partículas juntas, ligando as duas metades. É a *independência* das duas fontes — a suposição de que elas foram preparadas separadamente — que faz o trabalho: sob a regra padrão do produto tensorial para combinar sistemas independentes, uma teoria real não consegue igualar as correlações de três vias que a mecânica quântica complexa prevê para essa rede, enquanto um teste de fonte única deixa as duas teorias empatadas. Essa lacuna é o que os experimentos mediram.

Esse é um resultado claro e importante. Mas note com cuidado o que ele comparou: teoria quântica complexa padrão contra uma teoria real específica — aquela que mantém a regra comum do produto tensorial. É esse pareamento, não números reais como tais, que os experimentos adjudicaram. O novo artigo, tomando emprestado o termo dos fundamentos quânticos, nomeia a alternativa descartada pelo que ela é: uma *teoria contraste* — uma teoria que ninguém propõe como verdadeira, montada como contraste deliberado à aceita para que o experimento possa distinguir as duas. Todo o seu valor é ser distinguível: descartar a teoria contraste mostra quais suposições da teoria real estavam fazendo o trabalho.

## O que o novo artigo muda

O novo trabalho mantém quase tudo e muda um postulado. Em vez de assumir a regra do produto tensorial para combinar sistemas, parte de uma exigência de localidade que os autores argumentam ser mais fisicamente fundamental: uma operação realizada apenas em um subsistema não deve ter efeito mensurável sobre outro subsistema, intocado.

A partir daí, eles constroem explicitamente uma mecânica quântica de números reais. As partes real e imaginária das amplitudes usuais são mantidas por meio de informação real adicional — o artigo chama isso de uma “bandeira” anexada a cada sistema — e a fase global inobservável da teoria complexa se torna uma rotação igualmente inobservável na real. O preço aparece exatamente onde o resultado de 2021 o localizou: em como os sistemas se combinam. A forma ingênua de colar essas descrições reais nem sequer dá uma receita bem definida, então a construção agrupa descrições que representam a mesma física e trabalha com essas classes. Com essa regra de combinação, a teoria real reproduz todo valor esperado previsto pela teoria complexa — para um sistema e para muitos, emaranhados entre partes separadas. Os autores também mostram que a construção é essencialmente única e equivalente à mecânica quântica padrão.

Então os experimentos multipartites não conseguem distinguir essa teoria real da complexa, porque as duas concordam em toda previsão. Os experimentos anteriores não falharam; estavam simplesmente testando contra uma teoria real diferente e mais restritiva.

## Por que isto não é uma contradição

Seria fácil ler isso como “os experimentos de 2021 estavam errados”. É o oposto. Os experimentos estavam certos, e este artigo depende de eles estarem certos: aceita toda correlação medida e mostra uma formulação real que também as produz. O que ele revisa é a interpretação — o salto de “esta teoria real é falsificada” para “números reais são impossíveis na mecânica quântica”. Esse salto pulou a suposição que fazia o trabalho.

O artigo tampouco argumenta que alguém deva abandonar números complexos. Seu próprio resumo é cuidadoso dos dois lados: números complexos não são estritamente necessários, e são muito úteis. A construção real precisa de uma bandeira extra em cada sistema e de uma regra mais delicada para combiná-los; os números complexos empacotam tudo isso em um formalismo aritmético compacto. Conveniência não é nada. Na física, muitas vezes é toda a razão pela qual um formalismo vence.

## Por que isso importa

A pergunta interessante por baixo é o que a palavra “necessário” significa para uma teoria física. Um experimento pode distinguir duas teorias quando elas preveem coisas diferentes. Ele não pode, por si só, dizer que um ingrediente matemático particular é o único recipiente possível para um conjunto

de previsões — isso é uma pergunta sobre quais teorias existem, e é resolvida por construção, não por medição. Este artigo é uma construção: exhibe a alternativa que os experimentos foram tomados como tendo excluído.

O resultado também afia uma distinção que vale manter em geral. “Esta teoria é falsificada” e “esta ferramenta matemática é inevitável” são afirmações diferentes, e a lacuna entre elas é exatamente onde um resultado experimental claro pode ser transformado em uma afirmação exagerada. Números complexos continuam sendo a linguagem natural e eficiente da mecânica quântica. Se eles são metafisicamente exigidos é uma pergunta separada, e nessa pergunta a resposta, por enquanto, é não.

## Em resumo

Uma proposta de 2021 e experimentos de 2022 mostraram que uma mecânica quântica de números reais construída sobre a regra padrão do produto tensorial para combinar sistemas faz previsões diferentes e testáveis da mecânica quântica complexa, e os experimentos favoreceram a teoria complexa. Isso foi amplamente reportado como prova de que números imaginários são fisicamente necessários. O novo artigo da *Physical Review Letters* constrói uma mecânica quântica de números reais sobre um postulado diferente, baseado em localidade, que reproduz todas as previsões da teoria complexa, incluindo os testes multipartites — mostrando que números complexos são convenientes, não estritamente necessários. É uma construção teórica, não derruba os experimentos anteriores e não pede que a mecânica quântica seja reformulada na prática.

## Leitura crítica

**O que o artigo mostra:** Que uma formulação autoconsistente da mecânica quântica usando apenas números reais pode reproduzir toda previsão da teoria complexa padrão, incluindo experimentos multipartites do tipo Bell, se for construída sobre um postulado de localidade em vez da regra do produto tensorial para combinar sistemas.

**O que é plausível, mas não é o ponto:** Que isso “refute” os resultados de 2021-2022. Não refuta. Aceita esses experimentos como corretos e reinterpreta seu escopo: eles descartaram uma teoria real específica, aquela que mantém a regra do produto tensorial, não números reais em princípio.

**O que ele não mostra:** Que números complexos estejam errados, sejam inúteis ou valham ser abandonados na prática — o artigo explicitamente os chama de muito úteis. Também não é um novo experimento: nenhum dado foi medido; a alegação é uma construção matemática e uma prova de consistência.

**Principais limitações para um leitor geral:** O argumento depende de qual suposição você considera mais fisicamente fundamental — a regra do produto tensorial ou o postulado de localidade. Essa é uma escolha argumentada em um debate contínuo de fundamentos, não um fato fixado por medição,

e a construção com números reais é possivelmente menos natural que a complexa que ela iguala.

**Quanta confiança um leitor geral deve ter?** Alta de que a construção é matematicamente consistente — ela é revisada por pares, e sua lógica é checável. A conclusão em que confiar é a modesta: números complexos são a linguagem conveniente da mecânica quântica, não uma necessidade metafísica provada. Trate qualquer manchete do tipo “números imaginários são reais” como o slogan que este artigo foi escrito para corrigir.

---

## Fontes

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>