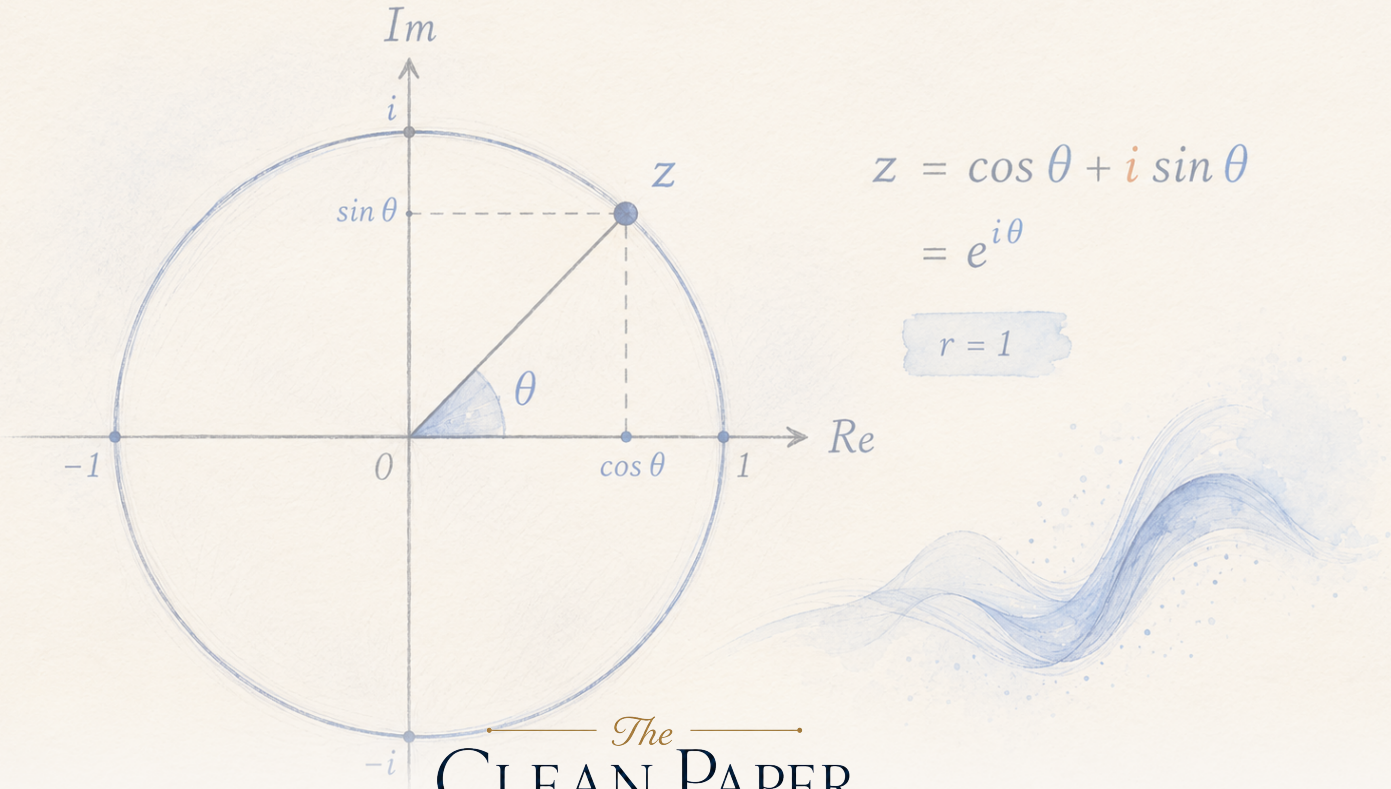


The Clean Paper

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

A mecânica quântica pode ser escrita apenas com números reais — a questão está em como se combinam os sistemas

Em 2021, um resultado amplamente divulgado argumentou que uma versão da mecânica quântica baseada em números reais podia ser falsificada experimentalmente, e experiências de seguimento em 2022 concordaram com a teoria quântica complexa padrão. Isso foi muitas vezes apresentado como prova de que os números imaginários são fisicamente reais. Um novo artigo na Physical Review Letters torna a afirmação mais precisa: construa-se a formulação real a partir de uma hipótese diferente, e discutivelmente mais física, sobre como sistemas separados se combinam, e ela reproduz todas as previsões da mecânica quântica complexa, incluindo os testes multipartidos. A leitura honesta é que os números complexos são convenientes, não estritamente necessários — e que as experiências anteriores excluíram uma teoria real específica, não os números reais em princípio. É um resultado teórico sobre fundações, não uma nova medição, e não pede a ninguém que deixe de usar números complexos.

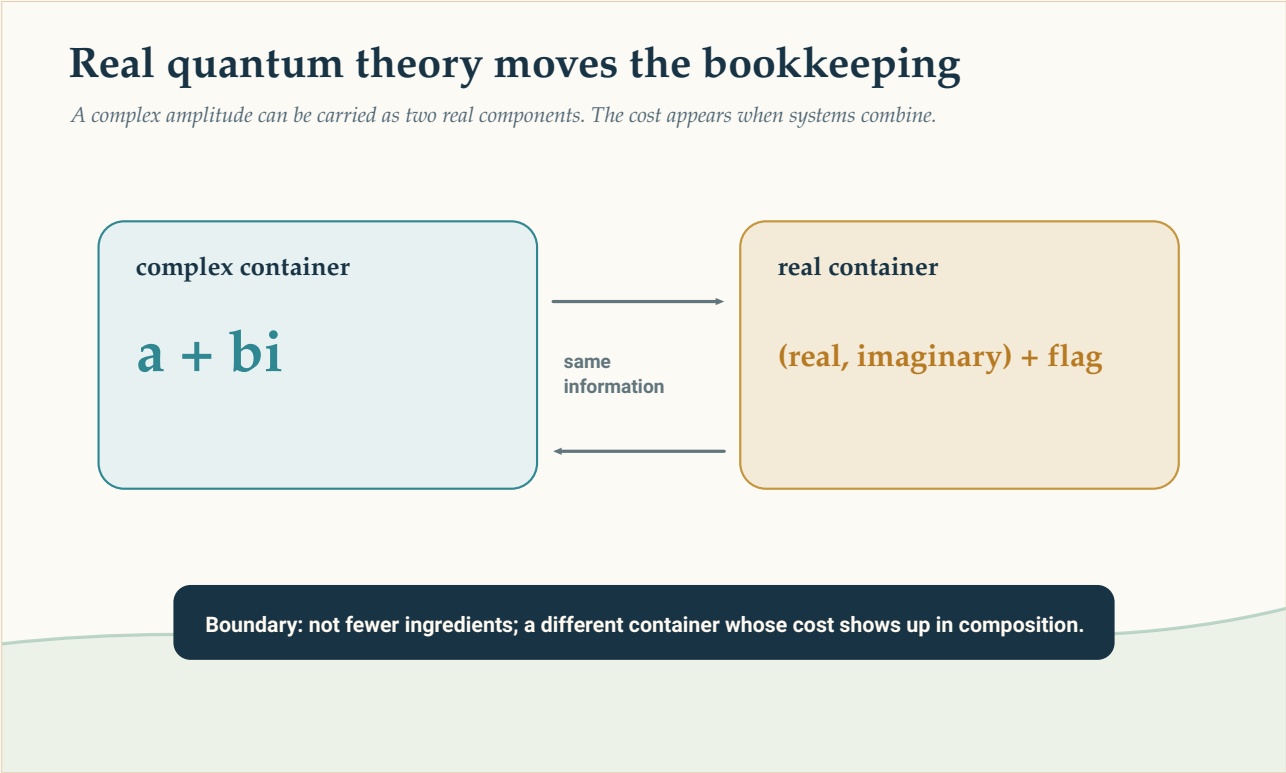
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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 a pena reler

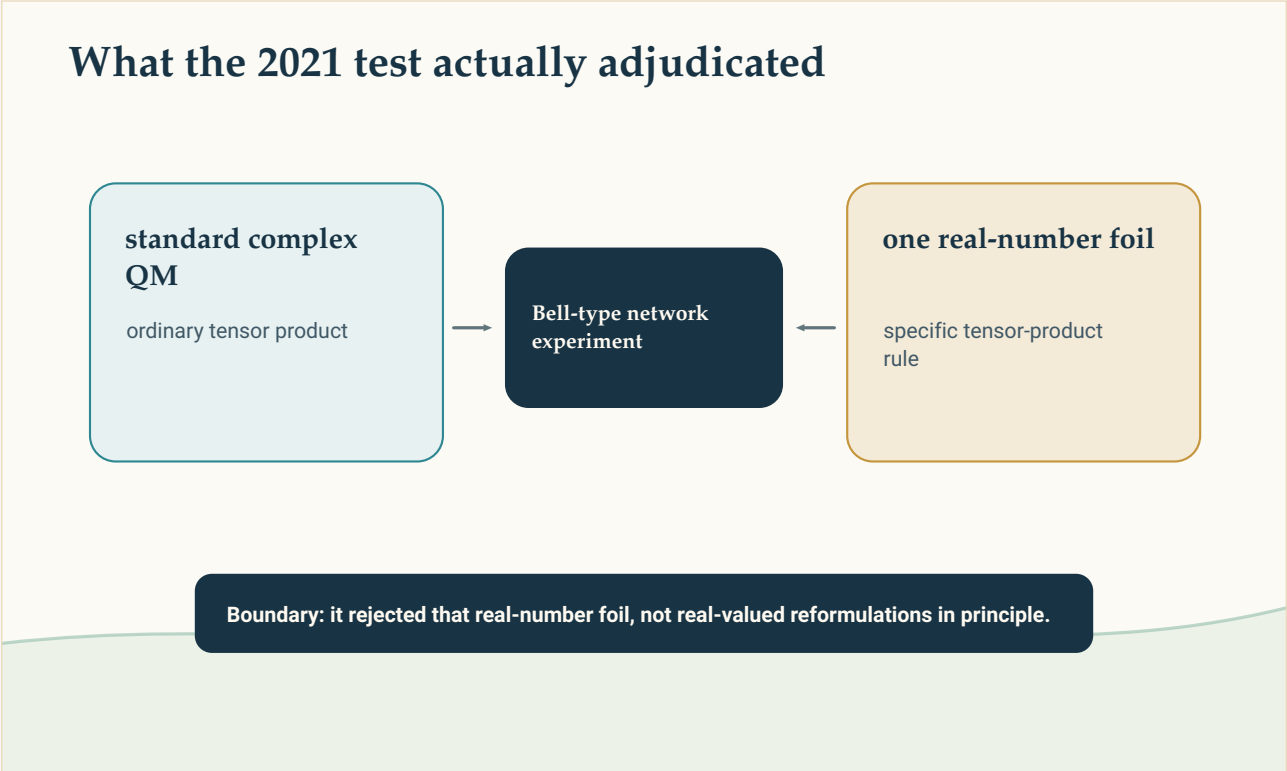
Há alguns anos circulou uma afirmação impressionante: experiências teriam mostrado que os números imaginários são fisicamente reais, que a mecânica quântica não pode ser escrita sem eles. A afirmação nasceu de física genuína e cuidadosa — uma proposta de 2021 na *Nature*, de Marc-Olivier Renou e colegas, e experiências em 2022 que a puseram à prova. Mas a versão popular comprimiu uma afirmação precisa num slogan, e o slogan era mais forte do que o resultado.

Um novo artigo na *Physical Review Letters*, de Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping e Dagmar Bruß, repõe a formulação precisa. Constrói uma versão da mecânica quântica que usa apenas números reais e reproduz todas as previsões da teoria complexa padrão — incluindo precisamente as experiências multipartidas que foram apresentadas como tendo excluído os números reais. O truque não consiste em reintroduzir números imaginários às escondidas. Consiste em mudar uma hipótese sobre a forma como sistemas separados se combinam. A conclusão honesta, nas palavras dos próprios autores, é que os números complexos não são necessários para descrever a mecânica quântica, mas são certamente muito úteis.



Uma amplitude complexa a+bi é um par de números reais acompanhado por uma «marca» associada a cada sistema. A formulação real não tem menos ingredientes — apenas usa um recipiente diferente, e o custo aparece na forma como os sistemas se combinam.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



As experiências de 2021–22 compararam duas teorias específicas — a mecânica quântica complexa padrão e uma teoria real de contraste que mantém a regra do produto tensorial — e favoreceram a primeira. Excluíram essa teoria de contraste, não os números reais em princípio.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

O que os 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, calcula-se o quadrado do módulo de uma amplitude. Na teoria padrão, essas amplitudes são números complexos: cada uma transporta um módulo e uma fase, isto é, um ângulo. Essa fase não é decoração. Quando dois caminhos para o mesmo resultado se combinam, as respetivas fases determinam se se reforçam ou se se anulam — a interferência que é uma das assinaturas do comportamento quântico. Já uma fase global comum a todo o sistema nunca pode ser medida.

Um número complexo é, no fundo, um par de números reais — uma parte real e uma parte imaginária — reunidos com regras específicas sobre a forma como se multiplicam. Por isso, é natural perguntar se esse empacotamento é essencial. Seria possível conservar os dois números reais, abandonar a embalagem complexa e manter toda a mecânica quântica? São precisamente as regras de multiplicação que fazem dos números complexos algo mais do que dois números colocados lado a lado, pelo que a resposta não é óbvia — e é aí que reside a subtileza.

O que o resultado de 2021 estabeleceu realmente

Renou e colegas fizeram exatamente essa pergunta e deram-lhe uma forma clara e testável. Não perguntaram se números reais podem aparecer algures na teoria quântica; perguntaram se uma formulação baseada em números reais poderia reproduzir todas as previsões da teoria complexa sob uma determinada regra para combinar sistemas. Essa regra — chamemos-lhe regra do produto tensorial — é a prescrição padrão para descrever várias partes independentes como um único todo.

Sob essa regra, encontraram um cenário com três partes que partilham emaranhamento proveniente de duas fontes independentes no qual uma teoria de números reais e a teoria complexa preveem correlações diferentes e mensuráveis — uma versão multipartida de um teste de Bell. Em 2022, experiências com circuitos supercondutores e com fotões realizaram testes desse tipo. As correlações medidas coincidiram com a mecânica quântica complexa e foram incompatíveis com a alternativa real.

> **Porque é que o teste precisa de duas fontes, e não apenas uma**
>
> Um teste de Bell convencional usa uma única fonte que envia um par emaranhado para duas pessoas, Alice e Bob. Nessa configuração, uma mecânica quântica baseada em números reais consegue reproduzir exatamente as mesmas correlações que a teoria complexa — as duas são indistinguíveis, pelo que uma única fonte não permite decidir entre elas.
> O argumento de 2021 ganha força ao acrescentar uma segunda fonte **independente**. Imagine três participantes em linha: Alice, Bob e Charlie. Uma fonte emaranha Alice com Bob; uma fonte separada, sem passado comum, emaranha Bob com Charlie. Bob fica no meio e mede em conjunto as suas duas partículas, ligando as duas metades. É a *independência* das duas fontes — a hipótese de que foram preparadas separadamente — que faz o trabalho: sob a regra padrão do produto tensorial para combinar sistemas independentes, uma teoria real não consegue reproduzir as correlações a três que a mecânica quântica complexa prevê para esta rede, enquanto um teste com uma única fonte deixa as duas teorias empatadas. Foi essa diferença que as experiências mediram.

É um resultado real e limpo. Mas repare-se cuidadosamente no que foi comparado: a teoria quântica complexa padrão contra uma teoria real específica — aquela que conserva a regra habitual do produto tensorial. Foram essas duas teorias, e não os números reais em si, que as experiências decidiram entre si. O novo artigo, usando um termo das fundações da mecânica quântica, chama à alternativa excluída aquilo que ela é: uma *foil theory*, uma teoria de contraste — uma teoria que ninguém propõe como verdadeira, construída deliberadamente em oposição à teoria aceite para que a experiência consiga distingui-las. O seu valor está precisamente em ser distinguível: excluir a teoria de contraste mostra quais hipóteses da teoria real estavam a produzir a diferença.

O que o novo artigo muda

O novo trabalho mantém quase tudo e altera um postulado. Em vez de assumir a regra do produto tensorial para combinar sistemas, parte de um requisito de localidade que os autores consideram fisicamente mais fundamental: uma operação realizada apenas num subsistema não deve produzir qualquer efeito mensurável noutro subsistema que não tenha sido tocado.

A partir daí, constroem explicitamente uma mecânica quântica baseada em números reais. As partes real e imaginária das amplitudes habituais são transportadas como informação real adicional — o artigo chama-lhe uma «marca» (*flag*) associada a cada sistema — e a fase global não observável da teoria complexa transforma-se numa rotação igualmente não observável na teoria real. O preço aparece exatamente onde o resultado de 2021 o localizou: na forma como os sistemas se combinam. A maneira ingénua de juntar estas descrições reais nem sequer produz uma receita bem definida; por isso, a construção agrupa descrições que representam a mesma física e trabalha com essas classes. Com essa regra de combinação, a teoria real reproduz todos os valores esperados previstos pela teoria complexa — para um único sistema e para muitos sistemas, emaranhados entre participantes separados. Os autores mostram ainda que a construção é essencialmente única e equivalente à mecânica quântica padrão.

Assim, as experiências multipartidas não conseguem distinguir esta teoria real da complexa, porque ambas concordam em todas as previsões. As experiências anteriores não falharam; estavam simplesmente a testar uma teoria real diferente e mais restritiva.

Porque isto não é uma contradição

Seria fácil ler o novo resultado como «as experiências de 2021 estavam erradas». É o contrário. As experiências estavam certas, e este artigo depende de estarem certas: aceita todas as correlações medidas e mostra uma formulação real que também as produz. O que revê é a interpretação — o salto de «esta teoria real foi falsificada» para «os números reais são impossíveis na mecânica quântica». Esse salto ignorava a hipótese que estava, de facto, a fazer o trabalho.

O artigo também não defende que se abandonem os números complexos. O próprio resumo é cuidadoso nos dois sentidos: os números complexos não são estritamente necessários e são muito úteis. A construção real precisa de uma marca adicional em cada sistema e de uma regra mais delicada para os combinar; os números complexos empacotam tudo isso numa peça de aritmética limpa. A conveniência não é irrelevante. Em física, é muitas vezes toda a razão pela qual um formalismo prevalece.

Porque importa

A pergunta interessante por baixo de tudo isto é o que significa a palavra «necessário» numa teoria física. Uma experiência consegue distinguir duas teorias quando elas fazem previsões diferentes. Por si só, não consegue dizer-nos que um determinado ingrediente matemático é o único recipiente possível para um conjunto de previsões — isso é uma questão sobre que teorias podem existir, resolvida por construção, não por medição. Este artigo é precisamente uma construção: apresenta a alternativa que se tinha interpretado que as experiências haviam excluído.

O resultado também torna mais nítida uma distinção útil em geral. «Esta teoria foi falsificada» e «esta ferramenta matemática é inevitável» são afirmações diferentes, e é justamente no espaço entre ambas que um resultado experimental limpo pode transformar-se numa afirmação excessiva. Os números complexos continuam a ser a linguagem natural e eficiente da mecânica quântica. Se são metafisicamente indispensáveis é outra pergunta — e, quanto a essa, a resposta por agora é não.

Resumo claro

Uma proposta de 2021 e experiências de 2022 mostraram que uma mecânica quântica baseada em números reais e construída com a regra padrão do produto tensorial para combinar sistemas faz previsões diferentes e testáveis da mecânica quântica complexa, e as experiências favoreceram a teoria complexa. Isto foi amplamente noticiado como prova de que os números imaginários são fisicamente necessários. O novo artigo na *Physical Review Letters* constrói uma mecânica quântica de números reais a partir de um postulado diferente, baseado na localidade, que reproduz todas as previsões da teoria complexa, incluindo os testes multipartidos — mostrando que os números complexos são convenientes, mas não estritamente necessários. É uma construção teórica, não invalida as experiências anteriores e não propõe reformular a mecânica quântica na prática.

Verificação sem exageros

O que o artigo mostra: Que uma formulação autoconsistente da mecânica quântica usando apenas números reais pode reproduzir todas as previsões da teoria complexa padrão, incluindo experiências de tipo Bell multipartidas, 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 principal: Que isto «refuta» os resultados de 2021–2022. Não refuta. Aceita essas experiências como corretas e reinterpreta o seu alcance: elas excluíram uma teoria real específica, aquela que conserva a regra do produto tensorial, e não os números reais em princípio.

O que não mostra: Que os números complexos estão errados, são inúteis ou devam ser abandonados na prática — o artigo chama-lhes explicitamente muito úteis. Também não é uma nova experiência:

não foram medidos novos dados; a afirmação assenta numa construção matemática e numa prova de consistência.

Principais limitações para um leitor não especialista: O argumento depende de qual hipótese se considera fisicamente mais fundamental — a regra do produto tensorial ou o postulado de localidade. É uma escolha fundamentada dentro de um debate em curso sobre as fundações da teoria, não um facto decidido por medição, e a construção com números reais é discutivelmente menos natural do que a formulação complexa que reproduz.

Que grau de confiança deve ter um leitor não especialista? Elevado quanto à consistência matemática da construção — o trabalho foi revisto por pares e a sua lógica pode ser verificada. A conclusão em que vale a pena confiar é a modesta: os números complexos são a linguagem conveniente da mecânica quântica, não uma necessidade metafísica demonstrada. Qualquer manchete do género «os números imaginários são reais» deve ser tratada 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