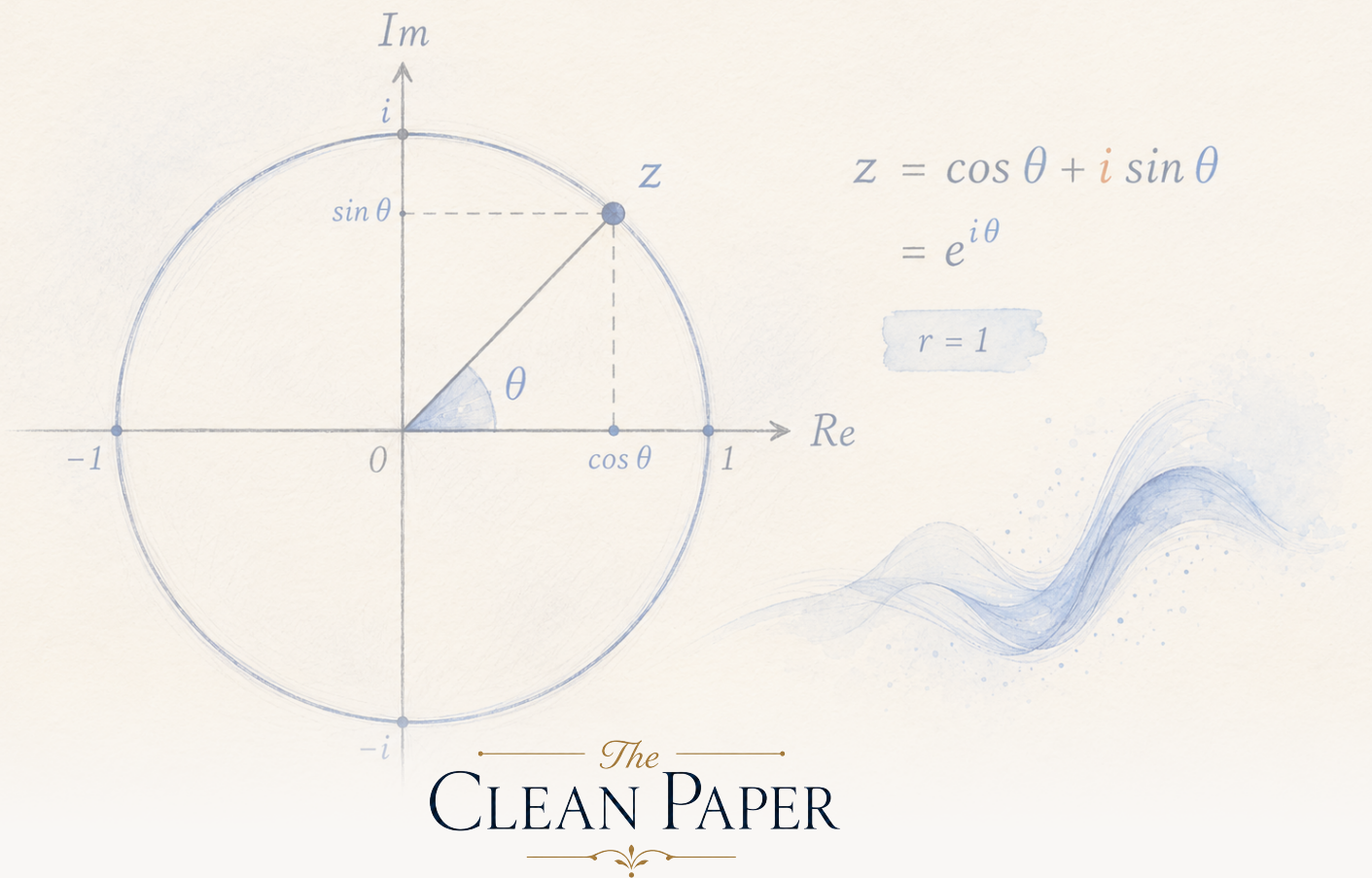




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

La mecánica cuántica puede escribirse solo con números reales — la trampa está en cómo se combinan los sistemas

*En 2021, un resultado ampliamente difundido sostuvo que una versión real de la mecánica cuántica podía falsarse experimentalmente, y experimentos de 2022 coincidieron con la teoría cuántica compleja estándar. Eso se tituló a menudo como prueba de que los números imaginarios son físicamente reales. Un nuevo artículo en *Physical Review Letters* precisa la afirmación: si se construye la formulación real sobre otra hipótesis, posiblemente más física, acerca de cómo se combinan sistemas separados, reproduce todas las predicciones de la mecánica cuántica compleja, incluidos los tests multipartitos. La lectura honesta es que los números complejos son convenientes más que estrictamente necesarios — y que los experimentos anteriores descartaron una teoría real concreta, no los números reales en principio. Es un resultado de fundamentos sobre el papel, no una nueva medición, y no pide a nadie que deje de usar números complejos.*

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

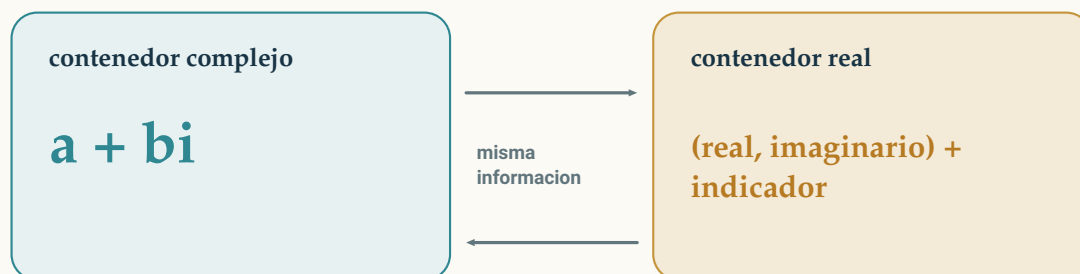
Un titular que conviene volver a leer

Hace unos años circuló una afirmación llamativa: unos experimentos habrían mostrado que los números imaginarios son físicamente reales, y que la mecánica cuántica no puede escribirse sin ellos. La afirmación salía de física real y cuidadosa — una propuesta de 2021 en *Nature* de Marc-Olivier Renou y colegas, y experimentos de 2022 que la pusieron en práctica. Pero la versión popular comprimió una afirmación precisa en un eslogan, y el eslogan era más fuerte que el resultado.

Un nuevo artículo en *Physical Review Letters*, de Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping y Dagmar Bruß, vuelve a poner la afirmación precisa en su sitio. Construye una versión de la mecánica cuántica que usa solo números reales y reproduce todas las predicciones de la teoría compleja estándar — incluidos los mismos experimentos multipartitos que supuestamente descartaban los números reales. El truco no consiste en colar de nuevo los números imaginarios. Consiste en cambiar una hipótesis sobre cómo se combinan sistemas separados. La conclusión honesta, en palabras de los propios autores, es que los números complejos no son necesarios para describir la mecánica cuántica, pero sí son ciertamente muy útiles.

La teoria cuantica real desplaza la contabilidad

Una amplitud compleja puede llevarse como dos componentes reales. El coste aparece cuando los sistemas se combinan.

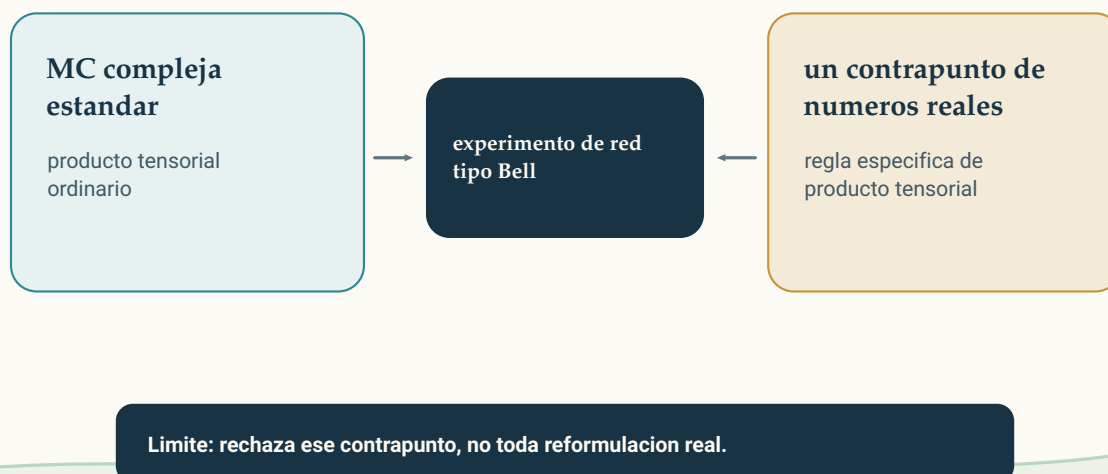


Limite: no menos ingredientes; otro contenedor cuyo coste aparece en la composicion.

Una amplitud compleja $a+bi$ es un par de números reales con una «bandera» llevada junto a cada sistema. La formulación real no tiene menos ingredientes — solo otro contenedor, cuyo coste aparece en cómo se combinan los sistemas.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Lo que realmente adjudico la prueba de 2021



Los experimentos de 2021–2022 compararon dos teorías concretas — la mecánica cuántica compleja estándar frente a una «teoría de contraste» real que conserva la regla del producto tensorial — y favorecieron a la compleja. Descartaron esa teoría de contraste, no los números reales en principio.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Qué hacen los números complejos en la teoría

En mecánica cuántica, el estado de un sistema se describe mediante amplitudes, y para obtener la probabilidad de un resultado se toma el tamaño al cuadrado de una amplitud. En la teoría estándar esas amplitudes son números complejos: cada una lleva un tamaño y una fase, un ángulo. Esa fase no es decoración. Cuando dos caminos hacia el mismo resultado se combinan, sus fases deciden si se refuerzan o se cancelan: la interferencia que es la firma del comportamiento cuántico. Una fase global compartida por todo el sistema, en cambio, nunca puede medirse.

Un número complejo no es en el fondo más que un par de números reales — una parte real y una parte imaginaria — empaquetado con reglas concretas para multiplicarlos. Así que la pregunta natural es si ese empaquetado es esencial. ¿Se pueden conservar los dos números reales, abandonar el envoltorio complejo y seguir teniendo toda la mecánica cuántica? Las reglas de multiplicación son lo que hace que los números complejos sean más que dos números puestos uno al lado del otro, así que la respuesta no es obvia, y ahí vive la sutileza.

Qué estableció realmente el resultado de 2021

Renou y sus colegas plantearon exactamente esa pregunta, y le dieron una forma precisa y comprobable. No preguntaron si los números reales pueden aparecer en alguna parte de la teoría cuántica; preguntaron si una formulación con números reales podía igualar todas las predicciones de la teoría compleja dada una regla concreta para combinar sistemas. Esa regla — llamémosla regla del producto tensorial — es la receta estándar para describir varias partes independientes como un solo todo.

Bajo esa regla, encontraron un escenario con tres partes que comparten entrelazamiento procedente de dos fuentes independientes en el que una teoría real y la teoría compleja predicen correlaciones diferentes y medibles: una versión multipartita de un test de Bell. En 2022, experimentos con circuitos superconductores y con fotones realizaron esos tests. Las correlaciones medidas coincidían con la mecánica cuántica compleja y eran incompatibles con la alternativa real.

Por qué el test necesita dos fuentes, no una

Un test de Bell ordinario usa una sola fuente que envía un par entrelazado a dos personas, Alice y Bob. En esa configuración, una mecánica cuántica con números reales puede reproducir exactamente las mismas correlaciones que la teoría compleja: las dos son indistinguibles, así que una sola fuente no puede decidir entre ellas.

El argumento de 2021 consigue tracción al añadir una segunda fuente, **independiente**. Imagina tres partes en línea: Alice, Bob, Charlie. Una fuente entrelaza a Alice con Bob; una fuente separada, sin pasado común, entrelaza a Bob con Charlie. Bob está en medio y mide sus dos partículas juntas, conectando las dos mitades. Es la *independencia* de las dos fuentes — la hipótesis de que fueron preparadas por separado — lo que hace el trabajo: bajo la regla estándar del producto tensorial para combinar sistemas independientes, una teoría con números reales no puede igualar las correlaciones a tres bandas que la mecánica cuántica compleja predice para esta red, mientras que un test con una sola fuente deja empatadas a las dos teorías. Esa brecha es lo que midieron los experimentos.

Ese es un resultado real y claro. Pero hay que fijarse bien en qué comparaba: la teoría cuántica compleja estándar frente a una teoría real concreta — la que conserva la regla ordinaria del producto tensorial. Ese emparejamiento, no los números reales como tales, es lo que los experimentos adjudicaron. El nuevo artículo, tomando prestado un término de los fundamentos cuánticos, llama a la alternativa descartada por lo que es: una *teoría de contraste* — una teoría que nadie presenta como verdadera, diseñada como contraste deliberado con la aceptada para que el experimento pueda distinguirlas. Todo su valor está en ser distinguible: descartar la teoría de contraste muestra qué hipótesis de la teoría real estaban haciendo el trabajo.

Qué cambia el nuevo artículo

El nuevo trabajo conserva casi todo y cambia un postulado. En lugar de asumir la regla del producto tensorial para combinar sistemas, parte de una exigencia de localidad que los autores consideran físicamente más fundamental: una operación realizada sobre un solo subsistema no debe tener ningún efecto medible sobre otro que no se ha tocado.

A partir de ahí construyen explícitamente una mecánica cuántica con números reales. Las partes real e imaginaria de las amplitudes habituales se llevan como contabilidad real adicional — el artículo la llama una “bandera” unida a cada sistema — y la fase global inobservable de la teoría compleja se convierte en una rotación igualmente inobservable en la teoría real. El precio aparece exactamente donde lo situaba el resultado de 2021: en cómo se combinan los sistemas. La forma ingenua de pegar estas descripciones reales ni siquiera da una receta bien definida, así que la construcción agrupa las descripciones que representan la misma física y trabaja con esas clases. Con esa regla de combinación, la teoría real reproduce todos los valores esperados que predice la teoría compleja — para un sistema y para muchos, entrelazados entre partes separadas. Los autores también muestran que la construcción es esencialmente única y equivalente a la mecánica cuántica estándar.

Así que los experimentos multipartitos no pueden distinguir esta teoría real de la compleja, porque las dos están de acuerdo en todas las predicciones. Los experimentos anteriores no fallaron; simplemente estaban contrastando con una teoría real distinta y más restrictiva.

Por qué esto no es una contradicción

Sería fácil leer esto como “los experimentos de 2021 estaban equivocados”. Es lo contrario. Los experimentos estaban bien, y este artículo depende de que lo estuvieran: acepta todas las correlaciones medidas y muestra una formulación real que también las produce. Lo que revisa es la interpretación: el salto de “esta teoría real está falsada” a “los números reales son imposibles en mecánica cuántica”. Ese salto se saltaba la hipótesis que estaba haciendo el trabajo.

El artículo tampoco sostiene que nadie deba abandonar los números complejos. Su propio resumen es cuidadoso por ambos lados: los números complejos no son estrictamente necesarios, y son muy útiles. La construcción real necesita una bandera adicional en cada sistema y una regla más delicada para combinarlos; los números complejos empaquetan todo eso en una pieza limpia de aritmética. La comodidad no es poca cosa. En física, a menudo es toda la razón por la que gana un formalismo.

Por qué importa

La pregunta interesante de fondo es qué significa “necesario” para una teoría física. Un experimento puede distinguir dos teorías cuando predicen cosas distintas. No puede, por sí solo, decirte que un ingrediente matemático concreto es el único contenedor posible para un conjunto de predicciones;

esa es una pregunta sobre qué teorías existen, y se resuelve por construcción, no por medición. Este artículo es una construcción: exhibe la alternativa que se entendió que los experimentos habían excluido.

El resultado también afina una distinción que conviene conservar en general. “Esta teoría está falsada” y “esta herramienta matemática es inevitable” son afirmaciones distintas, y la brecha entre ambas es exactamente donde un resultado experimental claro puede convertirse en una sobreafirmación. Los números complejos siguen siendo el lenguaje natural y eficiente de la mecánica cuántica. Si son metafísicamente necesarios es una pregunta separada, y sobre esa pregunta la respuesta, por ahora, es no.

En pocas palabras

Una propuesta de 2021 y experimentos de 2022 mostraron que una mecánica cuántica con números reales construida sobre la regla estándar del producto tensorial para combinar sistemas hace predicciones distintas y comprobables de las de la mecánica cuántica compleja, y los experimentos favorecieron la teoría compleja. Esto se presentó ampliamente como prueba de que los números imaginarios son físicamente necesarios. El nuevo artículo de *Physical Review Letters* construye una mecánica cuántica con números reales sobre otro postulado, basado en la localidad, que reproduce todas las predicciones de la teoría compleja, incluidos los tests multipartitos — mostrando que los números complejos son convenientes más que estrictamente necesarios. Es una construcción teórica, no revoca los experimentos anteriores y no pide reformular la mecánica cuántica en la práctica.

Sin rodeos

Lo que muestra el artículo: que una formulación autoconsistente de la mecánica cuántica usando solo números reales puede reproducir todas las predicciones de la teoría compleja estándar, incluidos los experimentos multipartitos de tipo Bell, si se construye sobre un postulado de localidad y no sobre la regla del producto tensorial para combinar sistemas.

Lo que es plausible pero no es el punto: que esto “refuta” los resultados de 2021-2022. No lo hace. Acepta esos experimentos como correctos y reinterpreta su alcance: descartaron una teoría real concreta, la que mantenía la regla del producto tensorial, no los números reales en principio.

Lo que no muestra: que los números complejos sean erróneos, inútiles o merezca la pena abandonarlos en la práctica — el artículo los llama explícitamente muy útiles. Tampoco es un nuevo experimento: no se midieron datos; la afirmación es una construcción matemática y una prueba de consistencia.

Principales limitaciones para un lector general: el argumento gira en torno a qué hipótesis se considera más físicamente fundamental: la regla del producto tensorial o el postulado de localidad. Es

una elección razonada en un debate abierto sobre fundamentos, no un hecho fijado por medición, y la construcción real es probablemente menos natural que la compleja a la que iguala.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Alta en que la construcción es matemáticamente consistente: está revisada por pares y su lógica es comprobable. La conclusión en la que conviene confiar es la modesta: los números complejos son el lenguaje cómodo de la mecánica cuántica, no una necesidad metafísica demostrada. Trata cualquier titular del tipo “los números imaginarios son reales” como el eslogan que este artículo fue escrito para corregir.

Fuentes

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>