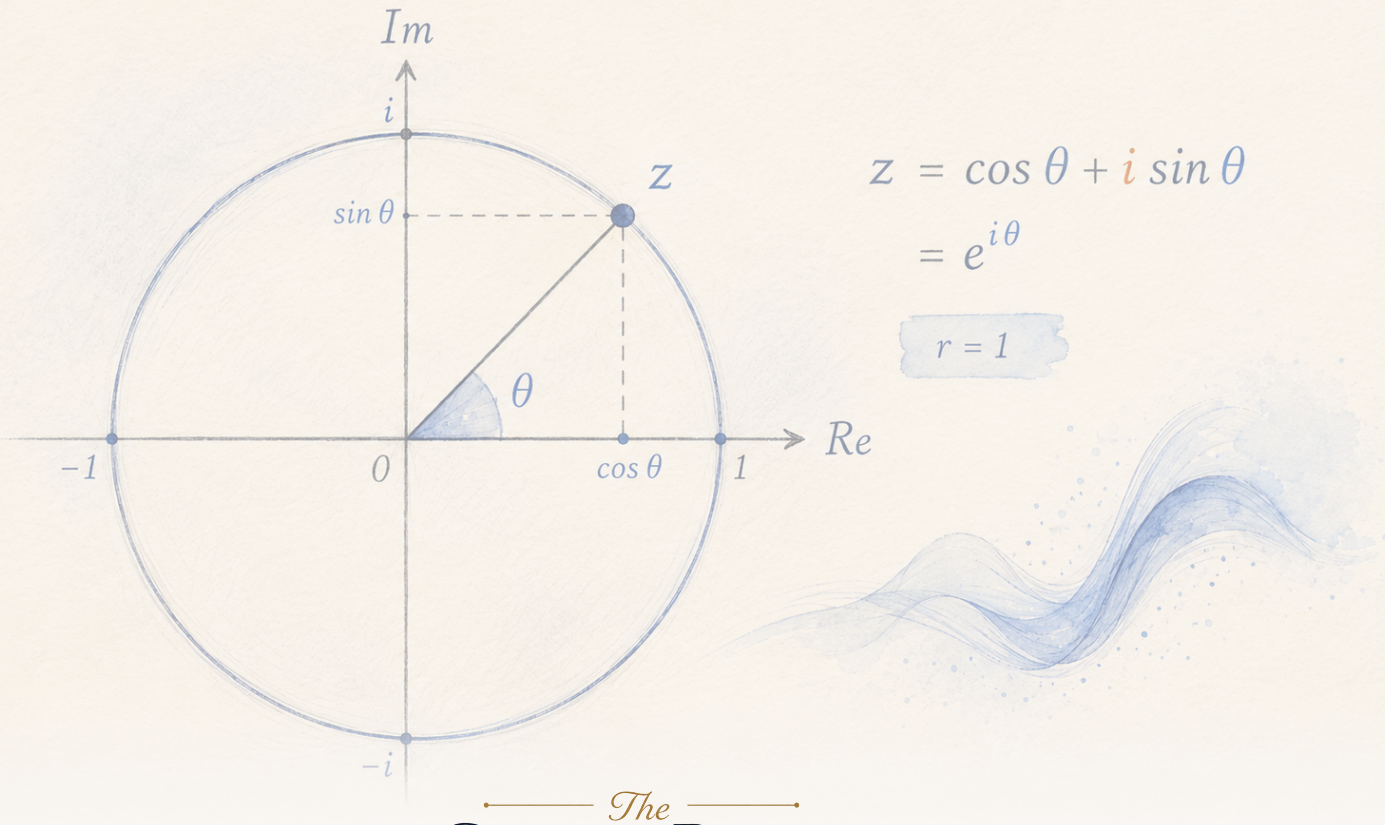



The Clean Paper

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

# Quantum mechanics केवल real numbers से भीलिखीजा सकतीहै — फर्क इस बात में पड़ताहै कि अलग systems कोकैसे जोड़ाजाए

*2021 के एक चर्चित परिणाम ने तर्क दियाकि quantum mechanics के real-number संस्करण कोexperiment से falsify कियाजासकताहै, और 2022 के follow-up experiments standard complex quantum theory से मेल खाए। इसे अक्सर इस तरह headline कियागयाकि "imaginary numbers भौतिक रूप से वास्तवकि हैं।" Physical Review Letters कानयाpaper दावाअधकि सटीक करताहै: यदि real-number formulation में अलग systems कोजोड़ने के लिए एक दूसरी और शायद अधकि physical, assumption लीजाए तोवह complex quantum mechanics कीसभीpredictions — multipartite tests सहित — पुनरुत्पादित करतीहै। ईमानदार नष्किर्ष: complex numbers बहुत सुवधिाजनक हैं, लेकनि strictly necessary नहीं। पुराने experiments ने एक वशिष real theory कोrule out कियाथा, real numbers कोसद्धिांततः नहीं। यह foundations कातheoretical result है, नया measurement नहीं और complex numbers इस्तेमाल करनाबंद करने कीकोई वजह नहींदेता।*

---

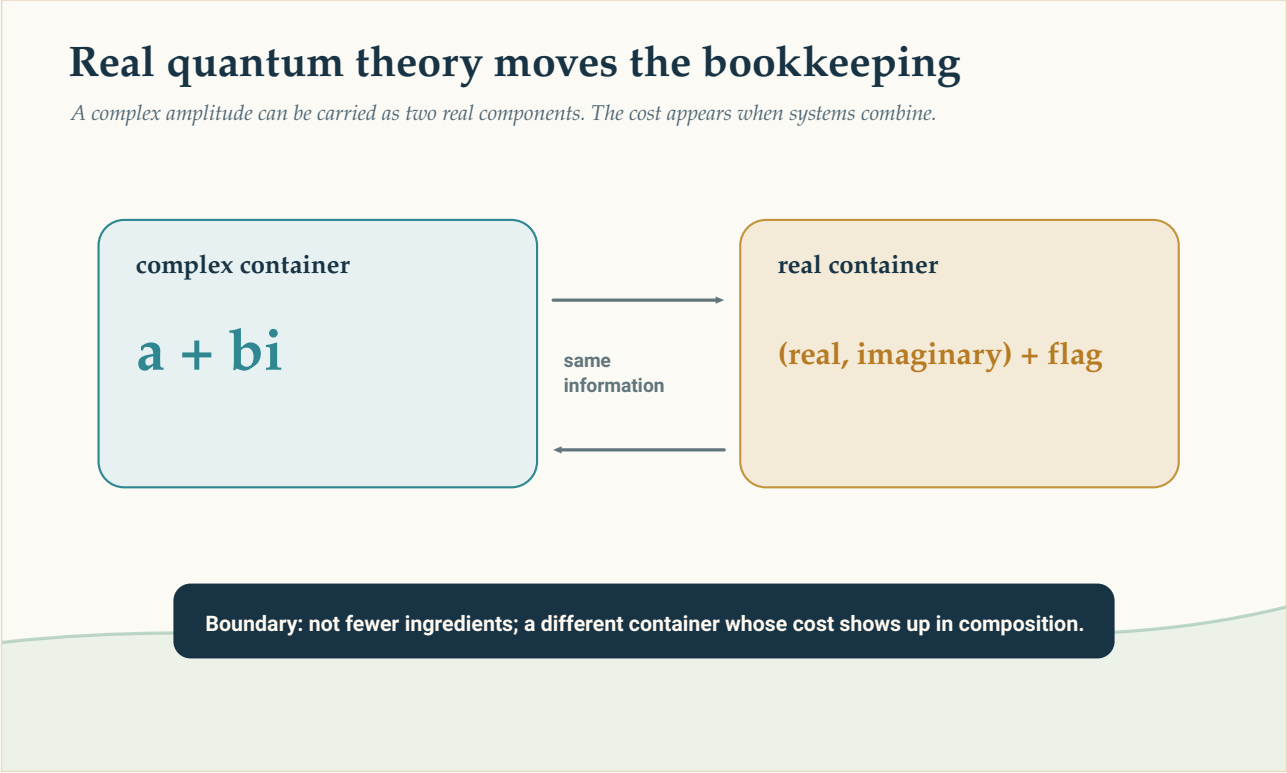
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

# एक सुरखीजसि दोबारापढ़नाचहएि

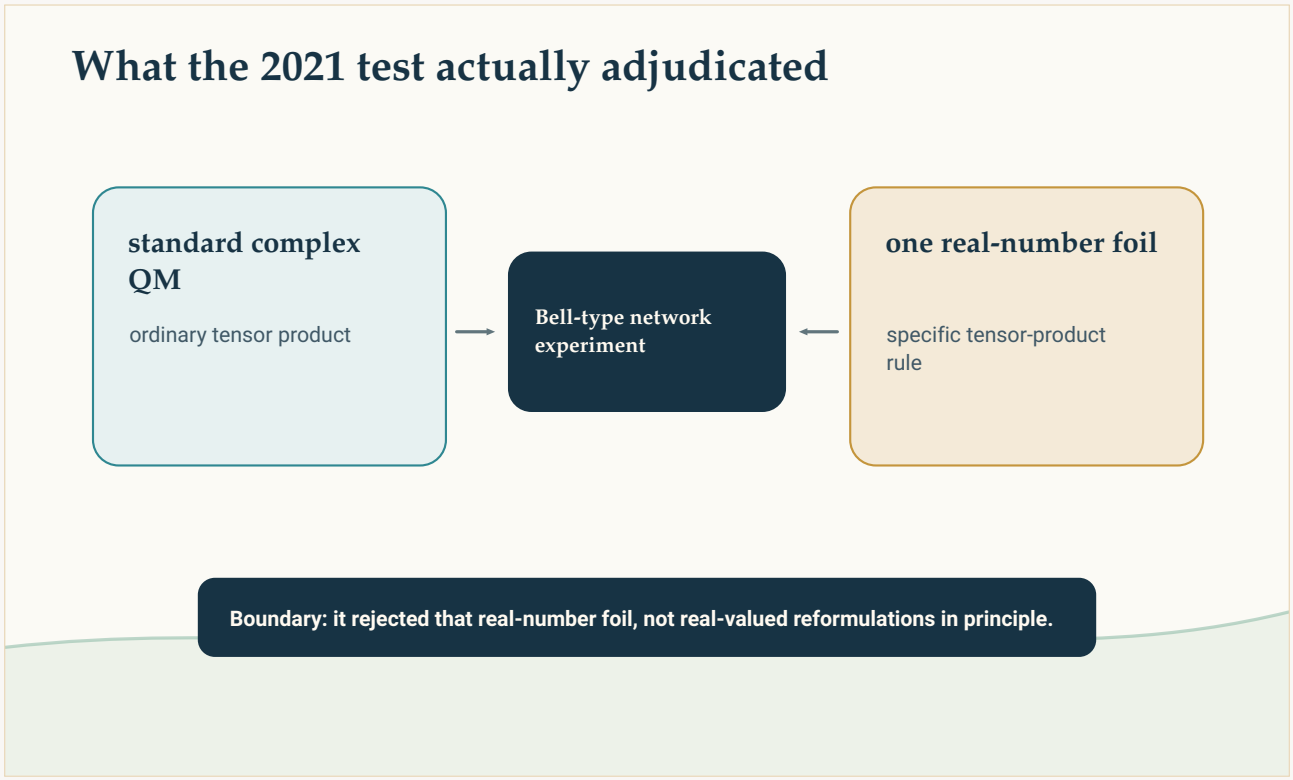
कुछ सल पहले एक चौंकने वलादावबहुत फैला प्रयोगोने दखिादयिाहै कि कल्पनकि संख्याएँ भौतकि रूप से वस्तवकि हैं और क्वंटम यंत्रकिीउनके बनिालखिीहीनहींजासकती। यह दावागंभीर और सावधान भौतकिीसे नकिलाथा—Marc-Olivier Renou और सहकर्मयिोके 2021 के Nature प्रस्तवा और 2022 में उसे परखने वले प्रयोगोसे। लेकनि लोकप्रयि रूप में सटीक कथन एक नारे में बदल गया, और वह नारावस्तवकि परणिाम से अधकि मजबूत था।

Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping और Dagmar Bruß कानया *Physical Review Letters* शोधपत्र इसीअंतर कोसाफ़ करताहै। लेखक क्वंटम यंत्रकिीकाऐसारूप बनाते हैं जोकेवल वस्तवकि संख्याओं काउपयोग करताहै, फरि भीसमानक जटलि-संख्यासद्धिंत कीसभीभवष्यिवाणयिाँदोहरताहै—उन बहु-पक्षीय प्रयोगोकीभी जनि्हें वस्तवकि-संख्याक्वंटम सद्धिंत कोखारजि करने वलासमझागयाथा। तरकीब कल्पनकि संख्याओं कोछपिाकर वापस लने कीनहींहै। बदलीजतीहै वह धारणाकि अलग-अलग प्रणालयिोंकोएक संयुक्त प्रणालीमें कैसे जोड़ा जाए। लेखकोंकासावधान नष्किर्ष है: जटलि संख्याएँ क्वंटम यंत्रकिीके लएि अनविार्य नहींहैं, लेकनि वे बेहद उपयोगीहैं।




जटलि आयाम a+bi कोदोवस्तवकि संख्याओं कीजोड़ीऔर हर प्रणालीके साथ चलने वालीएक अतरिक्ति संरचनाके रूप में लखिाजा सकताहै। वस्तवकि-संख्यारूप में भौतकि सामग्रीकम नहींहोती, केवल गणतिीय पैकेज बदलताहै, और उसकीकीमत प्रणालयिोंको आपस में जोड़ने के नयिम में दखिाई देतीहै।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0




2021–22 के प्रयोगों ने दो विशिष्ट सिद्धांतों की तुलना की थी। मानक जटिल-संख्या क्वांटम यांत्रिकी और टेन्सर-गुणन नियम को बनाए रखने वाला एक वास्तविक-संख्या "foil" सिद्धांत। परिणाम जटिल सिद्धांत के पक्ष में गए। इससे वह खास foil सिद्धांत खारिज हुआ, वास्तविक संख्याओं में लिखे जा सकने वाले हर संभव क्वांटम सिद्धांत नहीं।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

# सिद्धांत में जटिल संख्याएँ क्या करती हैं

क्वांटम यांत्रिकी में किसी प्रणाली की अवस्था आयाम से व्यक्त की जाती है, और किसी परिणाम की संभावना आयाम के परिमाण के वर्ग से निकलती है। मानक सिद्धांत में ये आयाम जटिल संख्याएँ होते हैं: हर आयाम में परिमाण और एक चरण होता है। यह चरण कोई सजावटी गणित नहीं है। जब एक ही परिणाम तक पहुँचने वाले दो रास्ते जुड़ते हैं, तो उनके चरण तय करते हैं कि वे एक-दूसरे को मजबूत करेंगे या काटेंगे—यही व्यतिकरण का आधार है। दूसरी ओर, पूरी अवस्था पर समान रूप से लगाया गया वैश्विक चरण सीधे माना नहीं जा सकता।

जटिल संख्या मूलतः दो वास्तविक संख्याओं—वास्तविक और काल्पनिक भाग—की जोड़ी है, लेकिन उनके गुणा करने के खास नियम भी होते हैं। इसलिए स्वाभाविक सवाल है: क्या यही पैकेज अनिवार्य है? क्या दो वास्तविक संख्याएँ अलग-अलग रखकर, जटिल-संख्या अंकन हटाकर, क्वांटम यांत्रिकी की सारी भविष्यवाणियाँ बचाई जा सकती हैं? कठिनाई केवल दो संख्याएँ रखने में नहीं, उनके बीच सही गणितीय संबंध बनाए रखने में है।

# 2021 के परिणाम ने वास्तव में क्या स्थापित किया

Renou और सहकर्मियों ने इसी प्रश्न का एक सटीक, परीक्षण-योग्य रूप पूछा। उन्होंने यह नहीं पूछा कि वास्तविक संख्याएँ क्वांटम सिद्धांत में कभी इस्तेमाल हो सकती हैं या नहीं। उन्होंने पूछा कि यदि संयुक्त प्रणालियों को बनाने के लिए मानक **टेन्सर-गुणन नियम** रखा जाए, तो क्या वास्तविक-संख्या क्वांटम यंत्र की जटिल सिद्धांत की सभी भविष्यवाणियाँ दोहरा सकती है। टेन्सर-गुणन नियम वह मानक गणितीय नुस्खा है जिससे कई स्वतंत्र हिस्सों को एक संयुक्त क्वांटम प्रणाली के रूप में लिखा जाता है।

उस नियम के तहत उन्हें तीन पक्षों और दो स्वतंत्र उलझाव-स्रोतों वाला ऐसा परिदृश्य मिला जिसमें वास्तविक-संख्या और जटिल-संख्या सिद्धांत अलग, मापने योग्य सहसंबंधों की भविष्यवाणी करते हैं—यह बहु-पक्षीय Bell परीक्षण का एक रूप है। 2022 में सुपरकंडक्टिंग सर्किट और फोटॉन का उपयोग करके ऐसे प्रयोग किए गए। मापे गए सहसंबंध जटिल क्वांटम यंत्र के मेल खाते थे और उस खास वास्तविक-संख्या विकल्प से नहीं।

> **इस परीक्षण को एक नहीं, दो स्वतंत्र स्रोत क्यों चाहिए**
>
> सामान्य Bell परीक्षण में एक स्रोत उलझी हुई जोड़ी Alice और Bob को भेजता है। उस व्यवस्था में वास्तविक-संख्या क्वांटम यंत्र की ठीक वही सहसंबंध दोहरा सकती है जो जटिल सिद्धांत देता है; इसलिए एक स्रोत दोनों के बीच फैसला नहीं कर सकता।
> 2021 के तर्क में दूसरा **स्वतंत्र** स्रोत जोड़ने से अंतर पैदा होता है। तीन पक्षों को एक पंक्ति में सोचें: Alice, Bob और Charlie। एक स्रोत Alice और Bob को जोड़ता है; दूसरा स्वतंत्र स्रोत Bob और Charlie को। Bob बीच में अपने दोनों कणों का संयुक्त माप करता है। दोनों स्रोतों की स्वतंत्रता महत्वपूर्ण है। मानक टेन्सर-गुणन नियम के साथ वास्तविक-संख्या सिद्धांत उस तीन-पक्षीय सहसंबंध को दोहरा नहीं पाता जिसकी भविष्यवाणी जटिल क्वांटम यंत्र की करती है। प्रयोग ने इसी अंतर को मापा।

यह साफ और वास्तविक परिणाम था। लेकिन तुलना किसके बीच हुई थी, यही निर्णायक बात है: मानक जटिल क्वांटम सिद्धांत और **एक खास वास्तविक-संख्या सिद्धांत** के बीच, जो सामान्य टेन्सर-गुणन नियम को बनाए रखता था। नया शोधपत्र quantum foundations की भाषा में उस खारिज किए गए विकल्प को *foil theory* कहता है—ऐसा तुलना-सिद्धांत जिसे जरूरी नहीं कि कोई प्रकृति का अंतिम सिद्धांत मानता हो, उसका काम यह दिखाना है कि किसी प्रयोग में कौन-सी धारणा निर्णायक है। उस foil को खारिज करने से यह पता चलता है कि उसके कौन-से नियम नहीं चल सकते। इससे वास्तविक संख्याएँ अपने-आप निषिद्ध नहीं हो जातीं।

## नया शोधपत्र क्या बदलता है

नया काम लगभग सब कुछ बनाए रखता है और एक मूल मान्यता बदलता है। संयुक्त प्रणालियों के लिए टेन्सर-गुणन नियम को प्रारंभिक सिद्धांत मानने के बजाय लेखक **स्थानीयता** की एक आवश्यकता से शुरू करते हैं: यदि किसी एक उप-तंत्र पर अकेले कोई क्रिया की जाए, तो उससे दूसरे, अछूते उप-तंत्र पर मापने योग्य असर नहीं पड़ना चाहिए।

इस आधार से वे वास्तविक-संख्या क्वांटम यंत्र की कास्पष्ट निर्माण करते हैं। सामान्य जटिल आयामों के वास्तविक और काल्पनिक हिस्से अतिरिक्त वास्तविक संरचना के रूप में साथ चलते हैं; शोधपत्र इसे हर प्रणाली से जुड़ा एक “flag” कहता है। जटिल सिद्धांत का अप्रेक्षणीय वैश्विक चरण वास्तविक सिद्धांत में अप्रेक्षणीय घूर्णन बन जाता है। कीमत वहीं चुकानी पड़ती है जहाँ 2021 के परिणाम ने समस्या दिखाई थी: अलग प्रणालियों को संयुक्त प्रणाली में जोड़ने के नियम में।

यदि इन वास्तविक-संख्या वरणों को सीधे-सादे ढंग से जोड़ दिया जाए, तो एक सुसंगत नियम नहीं मिलता। इसलिए निर्माण

उन वर्णनोंको समतुल्य वर्गोंमें रखता है जो एक ही भौतिक अवस्थाको दर्शाते हैं, और संयोजन का नियम उन ही वर्गों पर परिभाषित करता है। इस नियम के साथ वास्तविक-संख्या सिद्धांत जटिल सिद्धांत के हर प्रत्यय शामिल मान को दोहराता है—एक प्रणाली के लिए भी और कई अलग, उलझी प्रणालियों के लिए भी। लेखक यह भी दिखाते हैं कि यह निर्माण मूलतः अद्वितीय है और मानक क्वांटम यंत्रिकी के समतुल्य है।

इसलिए बहु-पक्षीय प्रयोग इस नए वास्तविक-संख्या रूप और मानक जटिल रूप के बीच अंतर नहीं कर सकते; दोनों सभी भौतिक भविष्यवाणियों पर सहमत हैं। पहले के प्रयोग विफल नहीं हुए थे; वे बस एक अधिक प्रतिबंधित वास्तविक-संख्या सिद्धांत की जाँच कर रहे थे।

## यह विरोधाभास क्यों नहीं है

इसे “2021 के प्रयोग गलत थे” कहना गलत होगा। वे प्रयोग सही थे, और नया शोधपत्र उनके मापे हुए सहसंबंधों को पूरी तरह स्वीकार करता है। संशोधन व्याख्या में है: “यह खास वास्तविक-संख्या सिद्धांत खारिज हुआ” से “क्वांटम यंत्रिकी में वास्तविक संख्याएँ असंभव हैं” तक की छलाँग में। उस छलाँग में एक महत्वपूर्ण धारणा—संयुक्त प्रणालियों के लिए चुना गया नियम—गायब होगई थी।

शोधपत्र यह भी नहीं कहता कि हमें जटिल संख्याएँ छोड़ देनी चाहिए। उलटे, उसका निष्कर्ष दोनों बातों को साथ रखता है: वे सख्ती से अनिवार्य नहीं हैं, लेकिन अत्यंत उपयोगी हैं। वास्तविक-संख्या निर्माण में हर प्रणाली के साथ अतिरिक्त संरचना रखनी पड़ती है और प्रणालियों को जोड़ने का नियम अधिक जटिल हो जाता है। जटिल संख्याएँ यह सब एक साफ़ गणितीय पैकेज में समेट देती हैं। भौतिकी में अक्सर किसी औपचारिक ढाँचे के टिके रहने की यही पर्याप्त वजह होती है।

## यह क्यों महत्वपूर्ण है

नीचे का असली प्रश्न यह है कि किसी भौतिक सिद्धांत में “अनिवार्य” का अर्थ क्या होता है। प्रयोग दो सिद्धांतों को अलग कर सकता है यदि उनकी भविष्यवाणियाँ अलग हों। लेकिन वह अपने-आप यह साबित नहीं कर सकता कि किसी विशेष गणितीय उपकरण के बिना वही भविष्यवाणियाँ किसी और तरह लिखी ही नहीं जा सकतीं। यह दूसरा प्रश्न वैकल्पिक सिद्धांतों के अस्तित्व का है, और उसका जवाब निर्माण से मिलता है, केवल मापन से नहीं। नया शोधपत्र ऐसा ही एक वैकल्पिक निर्माण सामने रखता है।

यह एक सामान्य भेद भी यह दिखाता है। “यह सिद्धांत खारिज हो गया” और “यह गणितीय उपकरण अपरिहार्य है” एक ही बात नहीं हैं। साफ़ प्रयोग कि परिणाम से बहुत बड़ा दार्शनिक निष्कर्ष निकालने पर यही गलती हो सकती है। जटिल संख्याएँ क्वांटम यंत्रिकी की स्वाभाविक और कुशल भाषा बनी रहती हैं। वे किसी गहरे अर्थ में अनिवार्य हैं या नहीं, यह अलग सवाल है—और इस शोधपत्र के अनुसार फिलहाल उत्तर ‘नहीं’ है।

## संक्षेप में

2021 के प्रस्ताव और 2022 के प्रयोगों ने दिखाया था कि मानक टेन्सर-गुणन नियम पर बनी वास्तविक-संख्या क्वांटम यंत्रिकी कुछ बहु-पक्षीय परिस्थितियों में जटिल क्वांटम यंत्रिकी से अलग, परीक्षण-योग्य भविष्यवाणियाँ देती है, और प्रयोग जटिल सिद्धांत के पक्ष में गए। इसे अक्सर इस प्रमाण की तरह पेश किया गया कि काल्पनिक संख्याएँ भौतिक रूप

से अनविार्य हैं। नया*Physical Review Letters* शोधपत्र स्थानीयतापर आधारति अलग संयोजन-नयिम के साथ वास्तवकि-संख्याक्वंटम यंत्रकिीबनताहै, जोजटलि सद्धिंत कीसभीभवष्यिवाणयिाँ—उन बहु-पक्षीय परीक्षणोंसहति—दोहरादेती है। नष्किर्ष यह नहींकि जटलि संख्याएँ बेकार हैं, बल्कि यह कि वे अत्यंत सुवधिाजनक हैं, अनविार्य नहीं। यह एक सैद्धंतकि नरि्माण है; यह पहले के प्रयोगोंकोपलटतानहींऔर व्यवहारकि क्वंटम यंत्रकिीकोवास्तवकि संख्याओं में दोबारा लखिने कीमांग भीनहींकरता।

## बनिाबढ़ा-चढ़ाकर जाँच

**शोधपत्र क्यादखिाताहै:** केवल वास्तवकि संख्याओं काउपयोग करने वालाएक सुसंगत क्वंटम-यंत्रकिीढाँचामानक जटलि सद्धिंत कीसभीभवष्यिवाणयिाँ, बहु-पक्षीय Bell-प्रकार के प्रयोगोंसहति, दोहरासकताहै—यदि संयुक्त प्रणालयिोंके लएि मानक टेन्सर-गुणन नयिम कोमूल धारणान मानकर स्थानीयतासे नयासंयोजन-नयिम बनायाजाए।

**क्यासंभवति है लेकनि मुख्य बदिु नहीं** यह 2021–2022 के परणिामोंकाखंडन नहींहै। वे प्रयोग सहीथे; उन्होंने टेन्सर-गुणन नयिम बनाए रखने वाले एक वशिष्टि वास्तवकि-संख्यासद्धिंत कोखारजि कयिाथा, वास्तवकि संख्याओं के हर संभव उपयोग कोनहीं।

**यह क्यानहींदखिाता** जटलि संख्याएँ गलत, बेकार यावयवहार में छोड़ देने लायक हैं। शोधपत्र उन्हें स्पष्ट रूप से बहुत उपयोगीमानताहै। यह नयाप्रयोग भीनहींहै; कोई नयाभौतकि डेटानहींलयिागया। दावागणतिीय नरि्माण और उसकीसंगतपि र है।

**सामान्य पाठक के लएि मुख्य सीमा** तर्क इस चुनाव पर नरि्भर करताहै कि संयुक्त प्रणालयिोंके मानक टेन्सर-गुणन नयिम और स्थानीयताकीमांग में कसिे अधकि बुनयिादीमानाजाए। यह quantum foundations कीचलतीबहस में एक सुवचिारति वकिल्प है, प्रयोग से तय होचुकातथ्य नहीं। वास्तवकि-संख्यारूप जटलि-संख्यारूप से कम स्वाभावकि भीलग सकताहै।

**कतिनाभरोसा?** गणतिीय नरि्माण कीआंतरकि संगतपि र उच्च भरोसा। अधकि सावधान नष्किर्ष पर भीअच्छाभरोसा। जटलि संख्याएँ क्वंटम यंत्रकिीकीबेहद सुवधिाजनक भाषाहैं, लेकनि उनकीदार्शनकि अनविार्यतासद्धि नहींहै। “काल्पनकि संख्याएँ सचमुच भौतकि वस्तुएँ हैं” जैसीसुर्खीकोउसीअतशियोक्तपि ूर्ण कीतरह पढ़नाचाहएि जसिे यह काम ठीक कर रहाहै।

## स्रोत

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