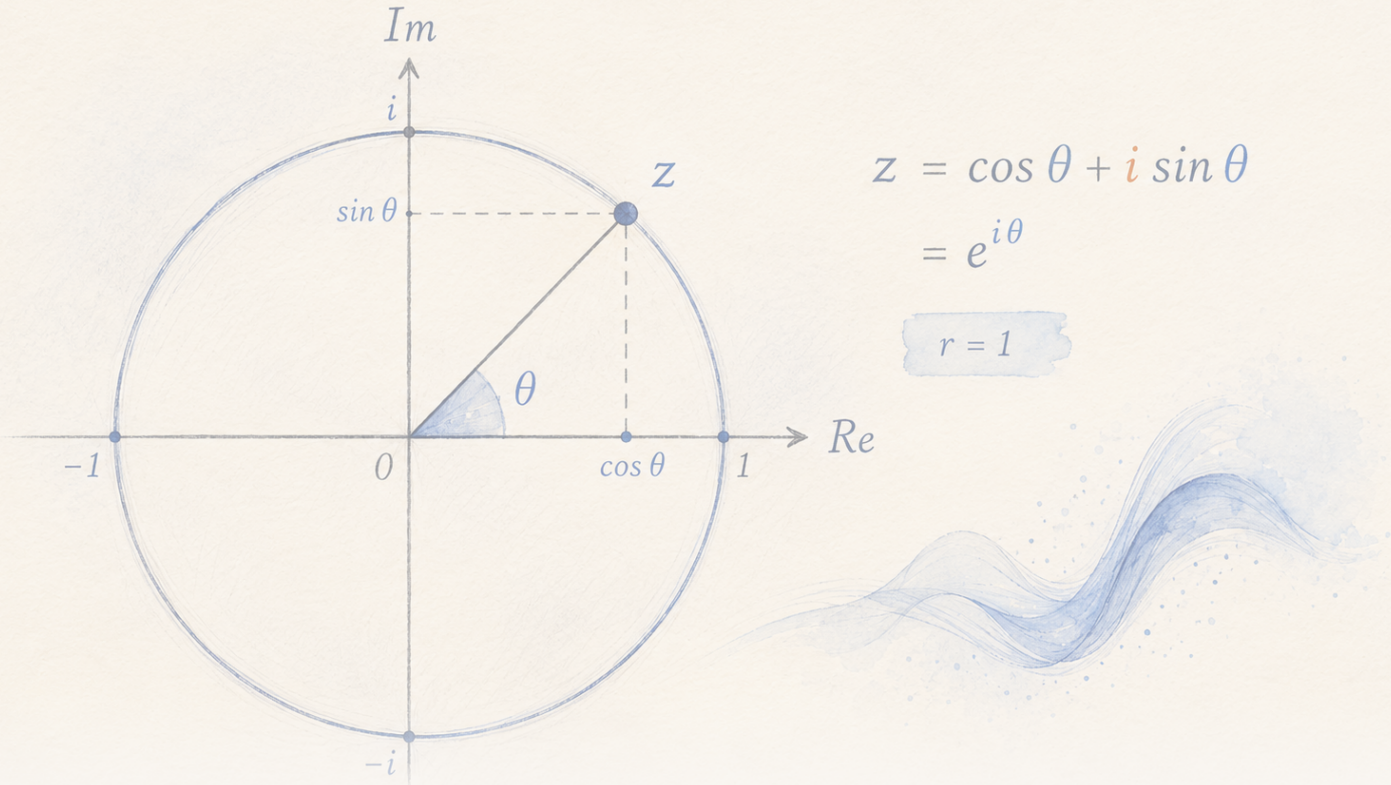


The Clean Paper

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

Kuantum mekaniği yalnızca reel sayılarla yazılabilir — püf noktası sistemleri nasıl birleştirdiğinizde

2021'de çok konuşulan bir sonuç, kuantum mekaniğinin reel sayılı bir sürümünün deneysel olarak yanlışlanabileceğini savundu; 2022'deki takip deneyleri de standart karmaşık kuantum teorisiyle uyumlu çıktı. Bu, sık sık sanal sayıların fiziksel olarak gerçek olduğunun kanıtı diye sunuldu. Physical Review Letters'taki yeni bir makale iddiayı keskinleştiriyor: reel sayılı formülasyonu ayrı sistemlerin nasıl birleştiğine ilişkin farklı ve tartışmaya açık biçimde daha fiziksel bir varsayım üzerine kurduğunuzda, çok taraflı testler dahil karmaşık kuantum mekaniğinin tüm öngörülerini yeniden üretiyor. Dürüst okuma, karmaşık sayıların kesin olarak gerekli değil, kullanışlı olduğudur — önceki deneyler reel sayıların kendisini değil, belirli bir reel teoriyi eledi. Bu, kâğıt üzerindeki bir temel-fizik sonucu; yeni bir ölçüm değil ve kimseye karmaşık sayıları bırakmasını söylemiyor.

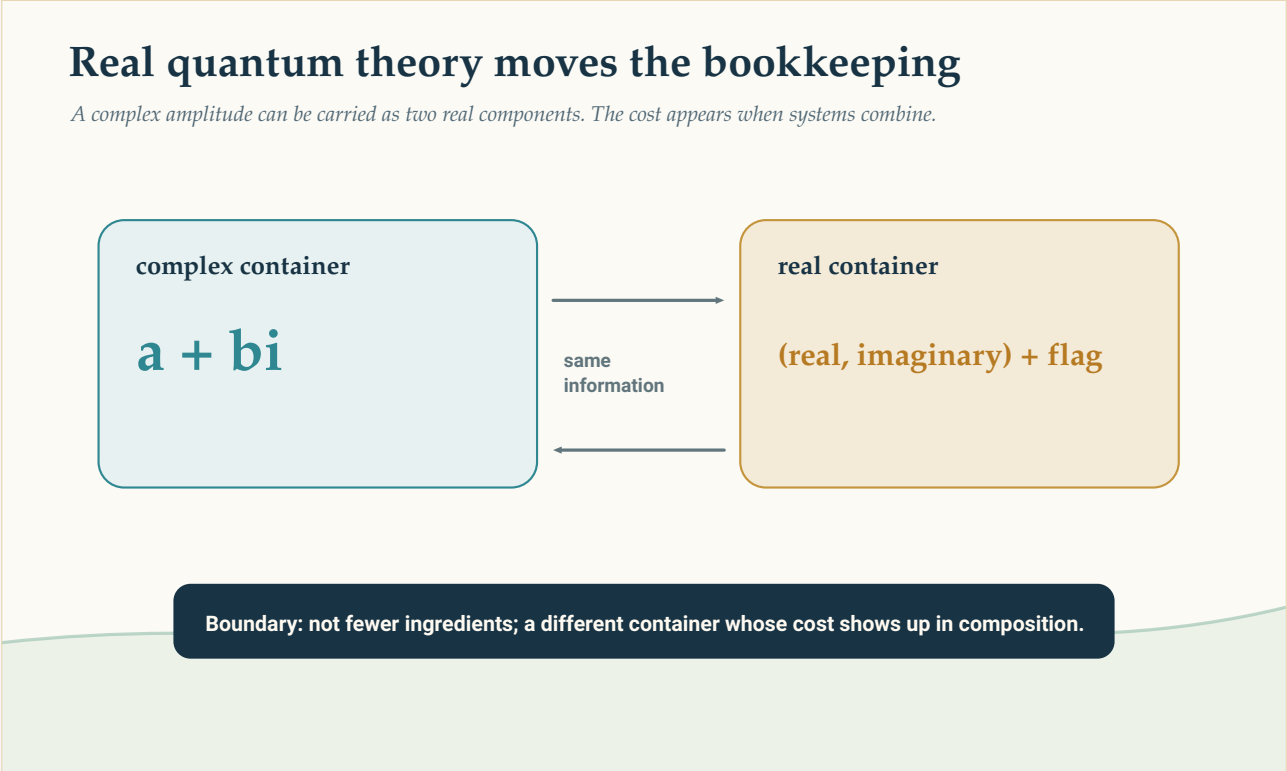
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Yeniden okumaya değer bir manşet

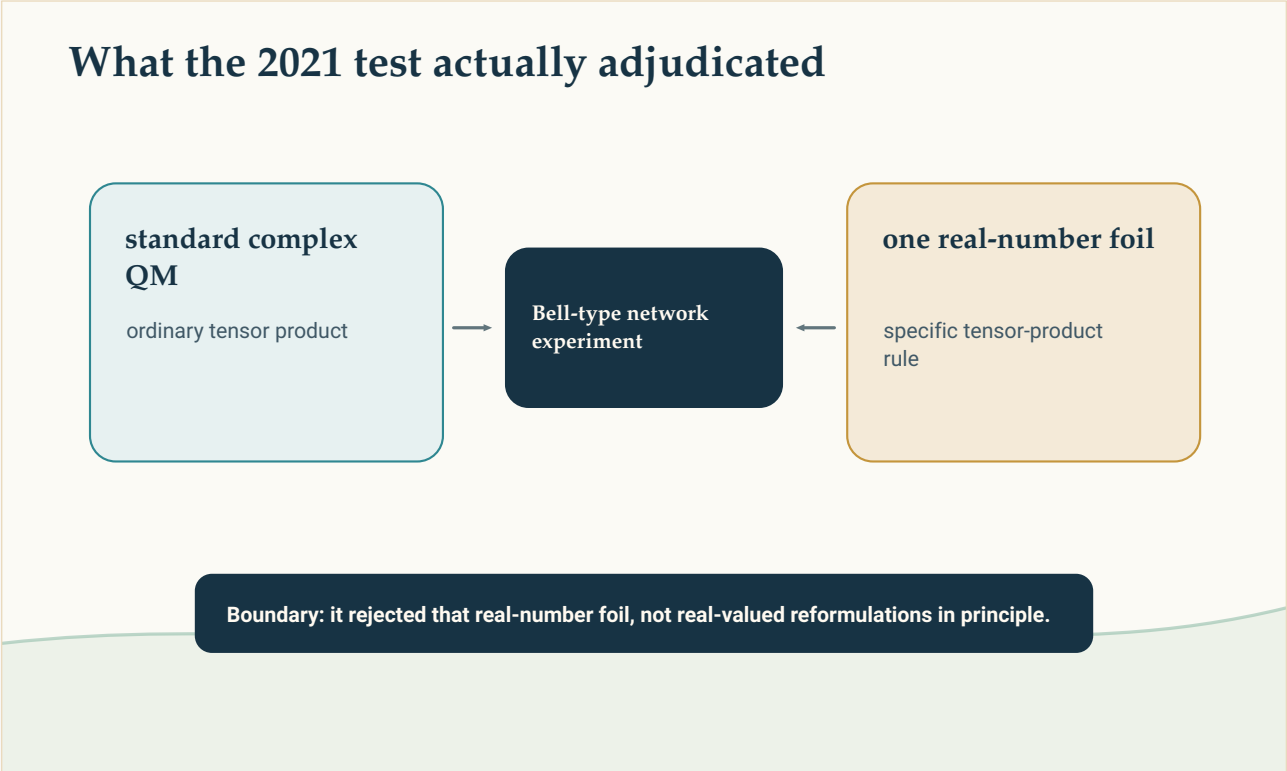
Birkaç yıl önce çarpıcı bir iddia dolaşıma girdi: deneylerin sanal sayıların fiziksel olarak gerçek olduğunu, kuantum mekaniğinin onlarsız yazılamayacağını gösterdiği söyleniyordu. İddia, gerçek ve özenli bir fizik çalışmasından doğmuştu — Marc-Olivier Renou ve çalışma arkadaşlarının 2021'de *Nature*'da yayımlanan önerisi ve bunu uygulayan 2022 deneyleri. Ancak popüler anlatı kesin bir ifadeyi slogana sıkıştırdı ve slogan, sonuçtan daha güçlüydü.

Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping ve Dagmar Bruß'un *Physical Review Letters*'ta yayımlanan yeni makalesi o kesin ifadeyi yerine koyuyor. Yalnızca reel sayıları kullanan ve standart karmaşık teorinin bütün öngörülerini — reel sayıları dışladığı söylenen çok taraflı deneyler de dahil — yeniden üreten bir kuantum mekaniği sürümü kuruyor. Hile, sanal sayıları arka kapıdan içeri sokmak değil. Ayrı sistemlerin nasıl birleştiğine ilişkin bir varsayımı değiştirmek. Yazarların kendi sözleriyle dürüst sonuç şu: karmaşık sayılar kuantum mekaniğini tanımlamak için gerekli değil, ama kesinlikle çok kullanışlı.



Karmaşık bir a+bi genliği, her sistemle birlikte taşınan bir "bayrak" eşliğinde iki reel sayı olarak temsil edilebilir. Reel formülasyon daha az bileşen kullanmıyor; yalnızca farklı bir kap kullanıyor ve bunun bedeli sistemlerin nasıl birleştirildiğinde ortaya çıkıyor.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021–22 deneyleri iki belirli teoriyi karşılaştırdı: standart karmaşık kuantum mekaniği ile tensör-çarpım kuralını koruyan reel bir "karşıt teori". Sonuç karmaşık teoriden yana çıktı. Deneyler ilke olarak reel sayıları değil, bu karşıt teoriyi eledi.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Karmaşık sayılar teoride ne yapıyor?

Kuantum mekaniğinde bir sistemin durumu genliklerle tanımlanır; bir sonucun olasılığını elde etmek için genliğin büyüklüğünün karesi alınır. Standart teoride bu genlikler karmaşık sayılardır: her biri bir büyüklük ve bir faz, yani bir açı taşır. Bu faz süs değildir. Aynı sonuca giden iki yol birleştiğinde, fazları birbirlerini güçlendirip güçlendirmeyeceklerini ya da söndüreceklerini belirler — kuantum davranışının ayırt edici özelliği olan girişim budur. Buna karşılık tüm sistemin paylaştığı genel bir faz hiçbir zaman ölçülemez.

Bir karmaşık sayı aslında, belirli çarpma kurallarıyla paketlenmiş iki reel sayıdan — reel ve sanal kısımdan — oluşur. Dolayısıyla doğal soru, bu paketlemenin temel olup olmadığıdır. İki reel sayıyı tutup karmaşık sayı paketini bırakabilir ve yine de kuantum mekaniğinin tamamını elde edebilir misiniz? Karmaşık sayıları yan yana duran iki sayıdan fazlası yapan şey çarpma kurallarıdır; dolayısıyla yanıt açık değildir ve incelik tam burada yatar.

2021 sonucu gerçekte neyi ortaya koydu?

Renou ve çalışma arkadaşları tam olarak bu soruyu sordular ve onu keskin, sınanabilir bir biçime soktular. Reel sayıların kuantum teorisinin herhangi bir yerinde kullanılıp kullanılamayacağını sormadılar; sistemleri birleştirmek için belirli bir kural kabul edildiğinde reel sayılı bir formülasyonun karmaşık teorinin bütün öngörülerini eşleyip eşleyemeyeceğini sordular. Bu kural — buna tensör-çarpım kuralı diyelim — bağımsız birkaç parçayı tek bir bütün olarak tanımlamanın standart yoludur.

Bu kural altında, iki bağımsız kaynaktan dolaşıklık paylaşan üç taraflı bir senaryoda reel sayılı teori ile karmaşık teorinin farklı ve ölçülebilir korelasyonlar öngördüğünü buldular — Bell testinin çok taraflı bir sürümü. 2022'de süperiletken devreler ve fotonlar kullanan deneyler bu tür testleri gerçekleştirdi. Ölçülen korelasyonlar karmaşık kuantum mekaniğiyle uyumluydu ve reel alternatife uymuyordu.

> **Test neden bir değil, iki kaynak gerektiriyor?**
>
> Sıradan bir Bell testi, dolaşık bir çifti Alice ve Bob adlı iki kişiye gönderen tek bir kaynak kullanır. Bu düzende reel sayılı kuantum mekaniği, karmaşık teorinin ürettiği korelasyonların aynısını tam olarak yeniden üretebilir — iki teori ayırt edilemez, dolayısıyla tek kaynak aralarında karar veremez.
> 2021 argümanı ikinci ve **bağımsız** bir kaynak ekleyerek ayrımı mümkün kılar. Bir çizgi üzerinde üç taraf düşünün: Alice, Bob, Charlie. Bir kaynak Alice ile Bob'u dolaştırır; ortak bir geçmişi olmayan ayrı bir kaynak Bob ile Charlie'yi dolaştırır. Bob ortada oturur ve iki parçacığını birlikte ölçerek iki yarıyı birbirine bağlar. İşi yapan şey iki kaynağın *bağımsızlığıdır* — ayrı hazırlanmış oldukları varsayımı. Bağımsız sistemleri birleştiren standart tensör-çarpım kuralı altında reel sayılı bir teori bu ağ için karmaşık kuantum mekaniğinin öngördüğü üçlü korelasyonları eşleyemez; oysa tek kaynaklı bir testte iki teori başa baş kalır. Deneylerin ölçtüğü fark budur.

Bu gerçek ve açık bir sonuçtur. Ancak tam olarak neyi karşılaştırdığına dikkat edin: standart karmaşık kuantum teorisini, sıradan tensör-çarpım kuralını koruyan belirli bir reel teoriyle. Deneylerin hüküm verdiği şey reel sayıların kendisi değil, bu eşleşmeydi. Yeni makale, kuantum temellerindeki terimi ödünç alarak elenen alternatifi olduğu gibi adlandırıyor: bir *foil theory*, yani kimsenin doğru olduğunu savunmadığı, deneyin kabul edilen teoriyle arasındaki farkı gösterebilmesi için bilinçli olarak karşıt örnek şeklinde kurulan bir teori. Değeri tam da ayırt edilebilir olmasındadır: karşıt teoriyi elemek, reel teoride hangi varsayımların sonucu belirlediğini gösterir.

Yeni makale neyi değiştiriyor?

Yeni çalışma neredeyse her şeyi koruyor ve tek bir postülayı değiştiriyor. Sistemleri birleştirmek için tensör-çarpım kuralını varsaymak yerine, yazarların fiziksel olarak daha temel olduğunu savunduğu bir yerellik koşulundan başlıyor: yalnızca bir alt sistem üzerinde yapılan işlem, dokunulmamış başka

bir alt sistem üzerinde ölçülebilir hiçbir etki yaratmamalı.

Bu başlangıçtan açıkça reel sayılı bir kuantum mekaniği inşa ediyorlar. Alışılagelmiş genliklerin reel ve sanal kısımları ek reel muhasebe değişkenleri olarak taşınıyor — makale buna her sisteme eklenmiş bir "bayrak" diyor — ve karmaşık teoride gözlenemeyen global faz, reel teoride aynı şekilde gözlenemeyen bir dönmeye dönüşüyor. Bedel, tam da 2021 sonucunun işaret ettiği yerde ortaya çıkıyor: sistemlerin nasıl birleştiğinde. Bu reel tanımları safça birbirine yapıştırmak iyi tanımlanmış bir reçete bile vermiyor; bu nedenle yapı, aynı fiziği temsil eden tanımları birlikte gruplayıp bu sınıflarla çalışıyor. Bu birleştirme kuralıyla reel teori, karmaşık teorinin öngördüğü her beklenen değeri — tek bir sistem için de, uzaktaki taraflar arasında dolaşık çok sayıda sistem için de — yeniden üretiyor. Yazarlar ayrıca yapının özünde tekil olduğunu ve standart kuantum mekaniğine eşdeğer olduğunu gösteriyor.

Dolayısıyla çok taraflı deneyler bu reel teoriyle karmaşık teoriyi ayırt edemez; çünkü ikisi her öngörüde aynı sonucu verir. Önceki deneyler başarısız olmadı; yalnızca farklı ve daha kısıtlayıcı bir reel teoriyi test ediyorlardı.

Bu neden bir çelişki değil?

Bunu "2021 deneyleri yanlıştı" diye okumak kolay olurdu. Tam tersi. Deneyler doğruydu ve bu makale onların doğru olmasına dayanıyor: ölçülen bütün korelasyonları kabul ediyor ve bunları da üreten reel bir formülasyon gösteriyor. Revize edilen şey yorum: "bu reel teori yanlışlandı" ifadesinden "kuantum mekaniğinde reel sayılar imkânsızdır" sonucuna atlanan sıçrama. Bu sıçrama, işi yapan varsayımı atlıyordu.

Makale kimsenin karmaşık sayıları bırakması gerektiğini de savunmuyor. Kendi özeti her iki yönde de dikkatli: karmaşık sayılar kesin olarak gerekli değil ve çok kullanışlı. Reel yapı her sistemde ek bir bayrak ve sistemleri birleştirmek için daha hassas bir kural gerektiriyor; karmaşık sayılar bütün bunları tek ve zarif bir aritmetik yapı içinde topluyor. Kullanışlılık önemsiz değildir. Fizikte çoğu zaman bir formalizmin kazanmasının bütün nedeni budur.

Neden önemli?

Alttaki ilginç soru, fiziksel bir teori için "gerekli" kelimesinin ne anlama geldiğidir. Bir deney, farklı şeyler öngörüyorlarsa iki teoriyi birbirinden ayırabilir. Ancak tek başına, belirli bir matematiksel bileşenin belirli bir öngörü kümesini taşıyabilecek tek olası yapı olduğunu söyleyemez. Bu, hangi teorilerin var olduğuyla ilgili bir sorudur ve ölçümle değil, inşa ederek çözülür. Bu makale tam da böyle bir inşa: deneylerin dışladığı sanılan alternatifi açıkça ortaya koyuyor.

Sonuç daha genel bir ayrımı da keskinleştiriyor. "Bu teori yanlışlandı" ile "bu matematiksel araç kaçınılmazdır" farklı ifadelerdir ve aralarındaki boşluk, açık bir deneysel sonucun kolayca aşırı iddiaya dönüşebildiği yerdir. Karmaşık sayılar kuantum mekaniğinin doğal ve verimli dili olmaya devam

ediyor. Metafizik olarak zorunlu olup olmadıkları ayrı bir soru; şimdilik bu sorunun yanıtı hayır.

Kısa özet

2021'deki bir öneri ve 2022 deneyleri, sistemleri birleştirmek için standart tensör-çarpım kuralı üzerine kurulan reel sayılı bir kuantum mekaniğinin karmaşık kuantum mekaniğinden farklı ve sınanabilir öngörüler yaptığını gösterdi; deneyler karmaşık teoriyi destekledi. Bu sonuç yaygın biçimde sanal sayıların fiziksel olarak gerekli olduğunun kanıtı diye haberleştirildi. Yeni *Physical Review Letters* makalesi, farklı ve yerellik temelli bir postülaya dayanan reel sayılı bir kuantum mekaniği kuruyor ve bu teori çok taraflı testler dahil karmaşık teorinin bütün öngörülerini yeniden üretiyor. Bu, karmaşık sayıların kesin olarak gerekli olmaktan çok kullanışlı olduğunu gösteriyor. Çalışma teorik bir inşa; önceki deneyleri geçersiz kılmıyor ve pratikte kuantum mekaniğini yeniden yazmayı önermiyor.

Abartısız değerlendirme

Makale neyi gösteriyor: Sistemleri birleştirmek için tensör-çarpım kuralı yerine bir yerellik postülası temel alındığında, yalnızca reel sayıları kullanan kendi içinde tutarlı bir kuantum mekaniği formülasyonunun çok taraflı Bell türü deneyler dahil standart karmaşık teorinin bütün öngörülerini yeniden üretebildiğini.

Makul ama asıl mesele olmayan yorum: Bunun 2021–2022 sonuçlarını "çürüttüğü". Çürütmüyor. Bu deneylerin doğru olduğunu kabul ediyor ve kapsamlarını yeniden yorumluyor: deneyler ilke olarak reel sayıları değil, tensör-çarpım kuralını koruyan belirli bir reel teoriyi eledi.

Neyi göstermiyor: Karmaşık sayıların yanlış, yararsız ya da pratikte terk edilmeye değer olduğunu göstermiyor — makale onları açıkça çok kullanışlı olarak tanımlıyor. Ayrıca yeni bir deney değil: yeni veri ölçülmedi; iddia matematiksel bir inşa ve tutarlılık kanıtı.

Genel okuyucu için başlıca sınırlamalar: Argüman, hangi varsayımı fiziksel olarak daha temel gördüğünüze dayanıyor — tensör-çarpım kuralını mı, yerellik postülasını mı. Bu, ölçümün tek başına belirlediği bir gerçek değil, kuantum temellerinde süren tartışmada gerekçelendirilmiş bir seçim. Reel sayılı yapı da eşlediği karmaşık yapıya göre daha az doğal görülebilir.

Genel okuyucu ne kadar güvenmeli? Yapının matematiksel olarak tutarlı olduğuna güven yüksek olmalı — çalışma hakemli ve mantığı denetlenebilir. Güvenilecek mütevazı sonuç şu: karmaşık sayılar kuantum mekaniğinin kullanışlı dili, kanıtlanmış metafizik zorunluluğu değil. "Sanal sayılar gerçektir" türü başlıkları, bu makalenin düzeltmek için yazıldığı slogan olarak görün.

Kaynaklar

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