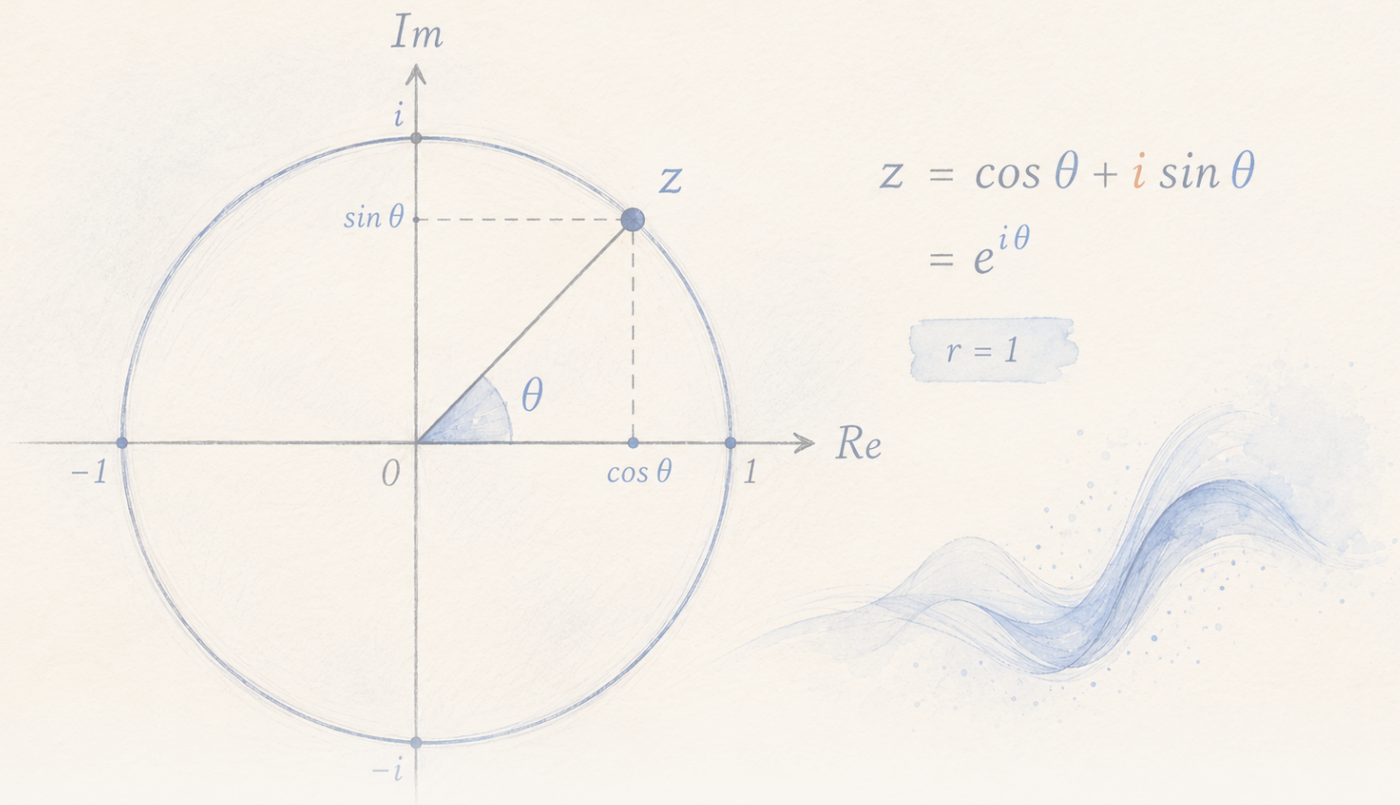




The CLEAN PAPER

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

مکانیک کوانتومی را می‌توان فقط با اعداد حقیقی نوشت – گیر کار در نحوه ترکیب سامانه‌هاست

در ۲۰۲۱ نتیجه‌ای پرسروصدا استدلال کرد نسخه‌ای حقیقی از مکانیک کوانتومی می‌تواند آزمایشاً ابطال شود و آزمایش‌های ۲۰۲۲ با نظریهٔ مختلط استاندارد سازگار بودند. این نتیجه اغلب با این تیتربازگو شد که اعداد موهومی از نظر فیزیکی «واقعی» هستند. مقاله‌ای تازه در *Letters Review Physical* ادعا را دقیق‌تر می‌کند: اگر صورت‌بندی حقیقی بر فرض متفاوت و از نظر فیزیکی قابل‌دفاع‌تری دربارهٔ ترکیب سامانه‌های جدا بنا شود، می‌تواند همهٔ پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی مختلط، از جمله آزمون‌های چندبخشی، را بازتولید کند. خوانش صادقانه این است که آزمایش‌های قبلی اشتباه نبودند؛ آن‌ها یک نظریهٔ حقیقی مشخص با قاعدهٔ ترکیب مشخص را رد کردند، نه امکان استفاده از اعداد حقیقی در اصل.

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: 1103/4k13-sdjh.10

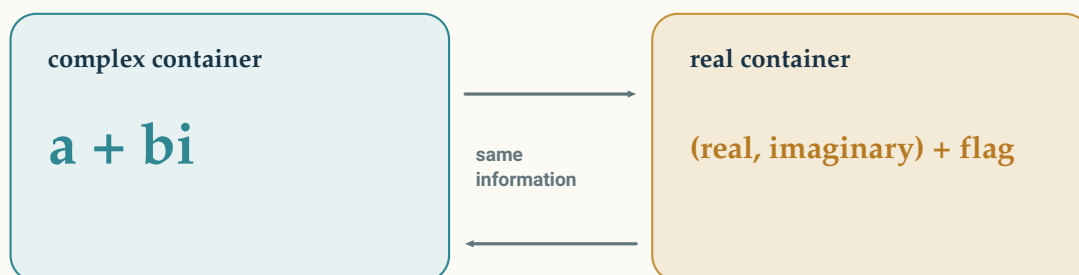
تئوری که ارزش دوباره خواندن دارد

چند سال پیش ادعایی چشمگیر همه‌جا چرخید: آزمایش‌ها نشان داده‌اند اعداد موهومی از نظر فیزیکی واقعی‌اند و مکانیک کوانتومی را نمی‌توان بدون آن‌ها نوشت. این ادعا از فیزیک واقعی و دقیقی رشد کرد — یک پیشنهاد سال ۲۰۲۱ در *Nature* از Marc-Olivier Renou و همکاران و آزمایش‌هایی در ۲۰۲۲ که آن را اجرا کردند. اما نسخهٔ عمومی یک گزارهٔ دقیق را به شعار فشرد و شعار از نتیجه قوی‌تر شد.

مقاله‌ای تازه در *Letters Review Physical* از Michael Kampermann، Hermann Trushechkin، Anton Hita، Barrios Pedro و Epping و Bruß Dagmar آن گزارهٔ دقیق را برمی‌گرداند. نسخه‌ای از مکانیک کوانتومی می‌سازد که فقط از اعداد حقیقی استفاده می‌کند و تمام پیش‌بینی‌های نظریهٔ مختلط استاندارد را بازتولید می‌کند — از جمله همان آزمایش‌های چندبخشی که گفته می‌شد اعداد حقیقی را رد کرده‌اند. ترفند، قاچاق اعداد موهومی از در پشتی نیست. یک فرض دربارهٔ اینکه سامانه‌های جدا چگونه با هم ترکیب می‌شوند تغییر می‌کند. نتیجهٔ صادقانه، به زبان خود نویسندگان، این است که اعداد مختلط برای توصیف مکانیک کوانتومی ضروری نیستند، اما قطعاً بسیار مفیدند.

Real quantum theory moves the bookkeeping

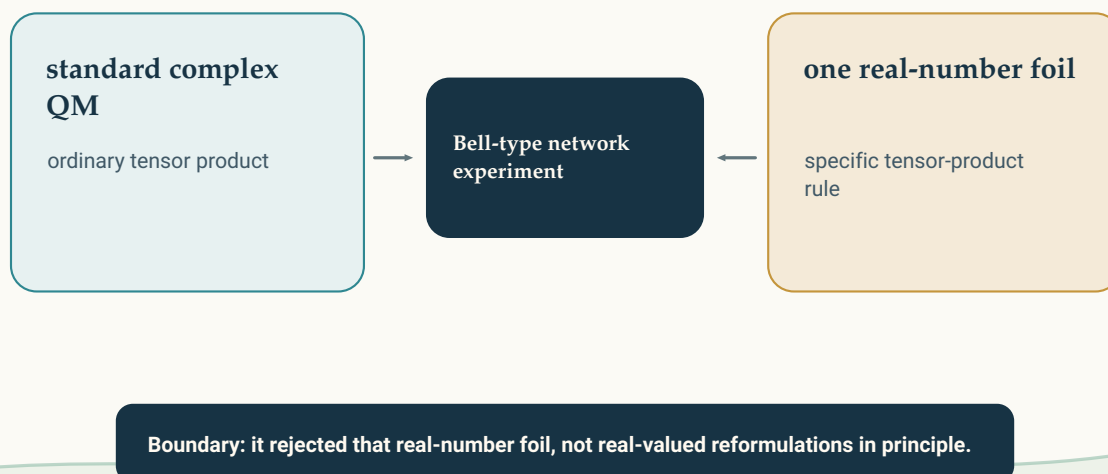
A complex amplitude can be carried as two real components. The cost appears when systems combine.



Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

دامنهٔ مختلط $a+bi$ را می‌توان به صورت جفتی از اعداد حقیقی با یک «پرچم» همراه هر سامانه نگه داشت. صورت‌بندی حقیقی مواد کمتری ندارد — فقط ظرف متفاوتی است و هزینه در قاعدهٔ ترکیب سامانه‌ها ظاهر می‌شود.

What the 2021 test actually adjudicated



آزمایش‌های ۲۰۲۱-۲۲ دو نظریهٔ مشخص را مقایسه کردند — مکانیک کوانتومی مختلط استاندارد با یک نظریهٔ حقیقی «foil» که قاعدهٔ tensor product را حفظ می‌کند — و نتیجه به نفع نظریهٔ مختلط بود. آن foil را رد کردند، نه اعداد حقیقی را در اصل.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 0.4

اعداد مختلط در نظریه چه می‌کنند

در مکانیک کوانتومی حالت یک سامانه با دامنه‌ها توصیف می‌شود و برای به‌دست آوردن احتمال یک نتیجه، اندازهٔ دامنه را به توان دو می‌رسانید. در نظریهٔ استاندارد این دامنه‌ها اعداد مختلط‌اند: هر یک اندازه و فاز، یعنی یک زاویه، دارند. فاز تزئین نیست. وقتی دو مسیر رسیدن به یک نتیجه ترکیب می‌شوند، فازهایشان تعیین می‌کند یکدیگر را تقویت کنند یا خنثی — همان تداخل که نشانهٔ رفتار کوانتومی است. در مقابل، فاز کلی مشترک کل سامانه هرگز قابل اندازه‌گیری نیست.

یک عدد مختلط در اصل جفتی از اعداد حقیقی است — بخش حقیقی و بخش موهومی — که با قواعد مشخصی برای ضرب بسته‌بندی شده‌اند. پس سؤال طبیعی این است که آیا خود این بسته‌بندی ضروری است. آیا می‌توان دو عدد حقیقی را نگه داشت، بسته‌بندی مختلط را کنار گذاشت و هنوز تمام مکانیک کوانتومی را داشت؟ قواعد ضرب همان چیزی‌اند که عدد مختلط را بیش از دو عدد کنار هم می‌کنند، پس پاسخ بدیهی نیست و ظرافت مسئله همان‌جاست.

نتیجهٔ ۲۰۲۱ واقعاً چه چیزی را ثابت کرد

Renou و همکاران دقیقاً همین پرسش را به شکلی تیز و آزمون‌پذیر مطرح کردند. نرسیدند آیا اعداد حقیقی می‌توانند جایی در نظریهٔ کوانتومی ظاهر شوند؛ پرسیدند آیا صورت‌بندی حقیقی می‌تواند تمام پیش‌بینی‌های نظریهٔ مختلط را با یک قاعدهٔ مشخص برای ترکیب سامانه‌ها بازتولید کند. آن قاعده — **rule tensor-product** — نسخهٔ استاندارد توصیف چند بخش مستقل به‌عنوان یک کل است.

زیر این قاعده، سناریویی با سه طرف پیدا کردند که entanglement را از دو منبع مستقل دریافت می‌کنند و در آن نظریه حقیقی و نظریه مختلط همبستگی‌های متفاوت و قابل اندازه‌گیری پیش‌بینی می‌کنند — نسخه‌ای چندبخشی از test. Bell در ۲۰۲۲ آزمایش‌هایی با مدارهای ابررسانا و فوتون‌ها این آزمون‌ها را انجام دادند. همبستگی‌های اندازه‌گیری‌شده با مکانیک کوانتومی مختلط مطابقت داشتند و با گزینه حقیقی ناسازگار بودند.

چرا آزمون به دو منبع نیاز دارد، نه یکی

مکانیک آرایش، این در می‌فرستد. Bob و Alice برای درهم‌تنیده جفت یک که دارد منبع یک معمول Bell test یک منبع یک پس نیستند، قابل تشخیص نظریه دو — کند بازتولید را مختلط نظریه همبستگی‌های همان دقیقاً می‌تواند حقیقی کوانتومی کند. داوری می‌تواند نشان نمی‌تواند استدلال ۲۰۲۱ با افزودن منبع دوم و مستقل قدرت می‌گیرد. سه طرف را در خط تصور کنید: Charlie، Bob، Alice یک منبع Alice را با Bob درهم‌تنیده می‌کند؛ منبع جداگانه‌ای که گذشته مشترکی ندارد Bob را با Charlie درهم‌تنیده می‌کند. Bob وسط است و دو ذره‌اش را با هم اندازه می‌گیرد و دو نیمه را به هم پیوند می‌دهد. استقلال دو منبع — فرض اینکه جداگانه آماده شده‌اند — کار را انجام می‌دهد: زیر rule tensor-product استاندارد برای ترکیب سامانه‌های مستقل، نظریه حقیقی نمی‌تواند همبستگی سه‌طرفه‌ای را که مکانیک کوانتومی مختلط برای این شبکه پیش‌بینی می‌کند بازتولید کند؛ در حالی که آزمون تک‌منبعی دو نظریه را مساوی می‌گذارد. آزمایش‌ها همین شکاف را اندازه گرفتند.

این نتیجه‌ای واقعی و تمیز است. اما دقیق نگاه کنید چه چیزی مقایسه شد: نظریه کوانتومی مختلط استاندارد با یک نظریه حقیقی مشخص — همان که rule tensor-product معمول را حفظ می‌کند. آزمایش‌ها درباره همین جفت داوری کردند، نه درباره اعداد حقیقی به‌خودی‌خود. مقاله جدید، با اصطلاحی از foundations، گزینه رد شده را همان چیزی می‌نامد که هست: **theory foil** — نظریه‌ای که کسی آن را حقیقت پیشنهادی نمی‌داند، بلکه عمداً به‌عنوان نقطه مقابل نظریه پذیرفته‌شده ساخته می‌شود تا آزمایش بتواند میانشان فرق بگذارد. ارزشش دقیقاً قابل تمیز بودن است: رد foil نشان می‌دهد کدام فرض‌های نظریه حقیقی بار نتیجه را حمل می‌کردند.

مقاله جدید چه چیزی را تغییر می‌دهد

کار جدید تقریباً همه چیز را نگه می‌دارد و یک اصل را تغییر می‌دهد. به جای فرض rule tensor-product برای ترکیب سامانه‌ها، از شرط locality شروع می‌کند که نویسندگان آن را از نظریه فیزیکی بنیادی‌تری دانند: عملی که فقط روی یک زیرسامانه انجام می‌شود نباید اثر قابل اندازه‌گیری بر زیرسامانه دست‌نخورده دیگر داشته باشد.

از این نقطه یک مکانیک کوانتومی حقیقی را به‌صراحت می‌سازند. بخش‌های حقیقی و موهومی دامنه‌های معمول به‌صورت bookkeeping حقیقی اضافی حمل می‌شوند — مقاله آن را «پرچم» متصل به هر سامانه می‌نامد — و فاز کلی غیرقابل مشاهده نظریه مختلط به چرخشی به همان اندازه غیرقابل مشاهده در نظریه حقیقی تبدیل می‌شود. هزینه دقیقاً همان جایی ظاهر می‌شود که نتیجه ۲۰۲۱ نشان داد: نحوه ترکیب سامانه‌ها. روش ساده چسباندن این توصیف‌های حقیقی حتی recipe خوش‌تعریف نمی‌دهد، پس ساخت جدید توصیف‌هایی را که یک فیزیک را نمایش می‌دهند در یک کلاس قرار می‌دهد و با همان کلاس‌ها کار می‌کند. با این قاعده ترکیب، نظریه حقیقی هر value expectation نظریه مختلط را بازتولید می‌کند — برای یک سامانه و برای چند سامانه درهم‌تنیده در طرف‌های جدا. نویسندگان همچنین نشان می‌دهند ساخت اساساً یگانه با مکانیک کوانتومی استاندارد معادل است.

پس آزمایش‌های چندبخشی نمی‌توانند این نظریه حقیقی را از نظریه مختلط جدا کنند، چون در همه پیش‌بینی‌ها توافق دارند. آزمایش‌های قبلی شکست نخوردند؛ فقط علیه نظریه حقیقی متفاوت و محدودکننده‌تری آزمون می‌کردند.

چرا تناقض نیست

به راحتی می‌شود این را «آزمایش‌های ۲۰۲۱ غلط بودند» خواند. برعکس است. آزمایش‌ها درست بودند و مقاله جدید به درست بودنشان نیاز دارد: تمام همبستگی‌های اندازه‌گیری شده را می‌پذیرد و صورت‌بندی حقیقی‌ای نشان می‌دهد که همان‌ها را تولید می‌کند. چیزی که اصلاح می‌شود تفسیر است — جهش از «این نظریه حقیقی ابطال شد» به «اعداد حقیقی در مکانیک کوانتومی ناممکن‌اند». آن جهش فرض باربر را جا انداخته بود.

مقاله همچنین نمی‌گوید کسی باید اعداد مختلط را کنار بگذارد. خلاصه خودش در هر دو جهت محتاط است: اعداد مختلط الزام مطلق نیستند و بسیار مفیدند. ساخت حقیقی برای هر سامانه یک پرچم اضافه و قاعده ظریف‌تری برای ترکیب می‌خواهد؛ اعداد مختلط همه این را در یک حساب تمیز بسته‌بندی می‌کنند. راحتی چیز کوچکی نیست. در فیزیک اغلب تمام دلیل است که یک formalism برنده می‌شود.

چرا مهم است

پرسش زیرین این است که «ضروری» برای یک نظریه فیزیکی یعنی چه. آزمایش وقتی دو نظریه پیش‌بینی متفاوت دارند می‌تواند آن‌ها را جدا کند. اما به تنهایی نمی‌تواند بگوید یک جزء ریاضی تنها ظرف ممکن برای مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌هاست — آن پرسشی درباره وجود نظریه‌های جایگزین است و با ساخت نظریه حل می‌شود، نه اندازه‌گیری. این مقاله یک ساخت است: آلترناتیوی را نمایش می‌دهد که تصور می‌شد آزمایش‌ها حذفش کرده‌اند.

نتیجه همچنین تمایزی عمومی را تیز می‌کند: «این نظریه ابطال شده» و «این ابزار ریاضی اجتناب‌ناپذیر است» دو جمله متفاوت‌اند، و دقیقاً در فاصله میانشان یک نتیجه آزمایشی تمیز می‌تواند به overclaim تبدیل شود. اعداد مختلط همچنان زبان طبیعی و کارآمد مکانیک کوانتومی‌اند. اینکه از نظر متافیزیکی اجباری‌اند پرسش دیگری است و فعلاً پاسخ آن نه است.

خلاصه تمیز

یک پیشنهاد ۲۰۲۱ و آزمایش‌های ۲۰۲۲ نشان دادند مکانیک کوانتومی حقیقی که از rule tensor-product استاندارد برای ترکیب سامانه‌ها استفاده می‌کند پیش‌بینی‌های آزمون‌پذیر متفاوتی از مکانیک کوانتومی مختلط می‌دهد و آزمایش‌ها نظریه مختلط را تأیید کردند. این نتیجه اغلب به عنوان اثبات «ضرورت فیزیکی اعداد موهومی» گزارش شد. مقاله جدید *Letters Review Physical* مکانیک کوانتومی حقیقی‌ای روی اصل locality متفاوت می‌سازد که تمام پیش‌بینی‌های نظریه مختلط، از جمله همان آزمون‌های چندبخشی، را بازتولید می‌کند؛ بنابراین اعداد مختلط راحت و بسیار مفیدند، نه الزام مطلق. این یک ساخت نظری است، آزمایش‌های قبلی را رد نمی‌کند و نمی‌گوید در عمل مکانیک کوانتومی را باید دوباره با اعداد حقیقی نوشت.

بررسی بی‌پرده

آنچه مقاله نشان می‌دهد: یک صورت‌بندی سازگار از مکانیک کوانتومی فقط با اعداد حقیقی می‌تواند تمام پیش‌بینی‌های نظریه مختلط استاندارد، از جمله آزمون‌های Bell چندبخشی، را بازتولید کند اگر به جای rule tensor-product برای ترکیب سامانه‌ها از یک اصل locality ساخته شود.

آنچه ممکن است گفته شود اما نکته مقاله نیست: اینکه این نتیجه کار ۲۰۲۱-۲۰۲۲ را «رد» می‌کند. نمی‌کند. آزمایش‌ها را درست می‌پذیرد و دامنه تفسیرشان را اصلاح می‌کند: آن‌ها یک نظریه حقیقی مشخص با rule tensor-product را رد کردند، نه اعداد حقیقی را در اصل.

آنچه نشان نمی‌دهد: اینکه اعداد مختلط غلط، بی‌فایده یا در عمل قابل حذف‌اند — مقاله صریحاً آن‌ها را بسیار مفید می‌خواند. آزمایش جدید هم نیست؛ داده‌ای اندازه‌گیری نشده و ادعا یک ساخت ریاضی و اثبات سازگاری است.

محدودیت اصلی برای خواننده عمومی: استدلال به این بستگی دارد که کدام فرض را بنیادی‌تر می‌دانید — rule tensor-product یا اصل locality. این انتخاب استدلال‌شده‌ای در بحث باز foundations است، نه واقعیتی که اندازه‌گیری به‌تنهایی تثبیت کند، و ساخت حقیقی احتمالاً از نظریه مختلطی که بازتولید می‌کند کمتر طبیعی است.

یک خواننده عمومی چقدر باید مطمئن باشد؟ اطمینان بالا که ساخت از نظر ریاضی سازگار است — داوری شده و منطقی قابل بررسی است. takeaway مطمئن نسخه متواضع است: اعداد مختلط زبان راحت مکانیک کوانتومی‌اند، نه ضرورت متافیزیکی اثبات‌شده. هر تیتز «اعداد موهومی واقعی‌اند» را همان شعاری بدانید که این مقاله برای اصلاحش نوشته شده است.

منابع

240202 ,136 Letters Review Physical Bruss, D. and Epping M. Kampermann, H. Trushechkin, A. Hita, Barrios P. 1103/4k13-sdjh.10 DOI ,(2026)
<https://doi.org/10.1103/4k13-sdjh>