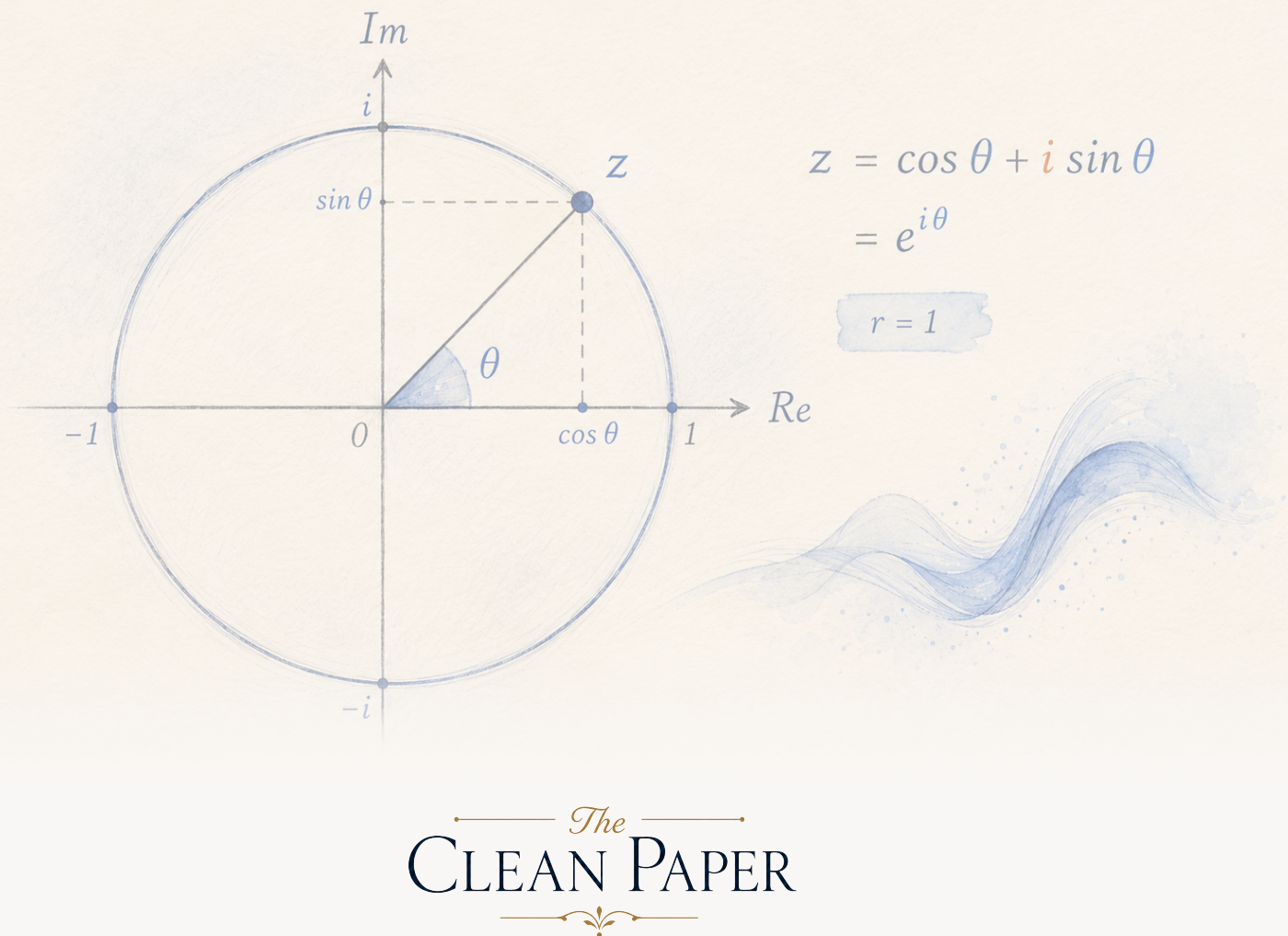




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

量子力学可以只用实数书写——问题在于你如何组合系统

2021 年一项被广泛报道的结果认为，一个实数版本的量子力学可以在实验上被证伪，随后的 2022 年实验与标准复数量子理论一致。这常被标题化为虚数是物理上真实的证据。一篇发表在《物理评论快报》上的新论文收紧了这一论断：将实数表述建立在一个不同的、可以说在物理上更为基本的关于分离系统如何组合的假设上，它就能重现复数量子力学的每一个预测，包括多体检验。诚实的解读是：复数是方便的，而非严格必要的——而早前的实验排除了一个特定的实数理论，而非原则上的实数。这是一个纸面上的基础结果，不是一次新的测量，它也不要求任何人停止使用复数。

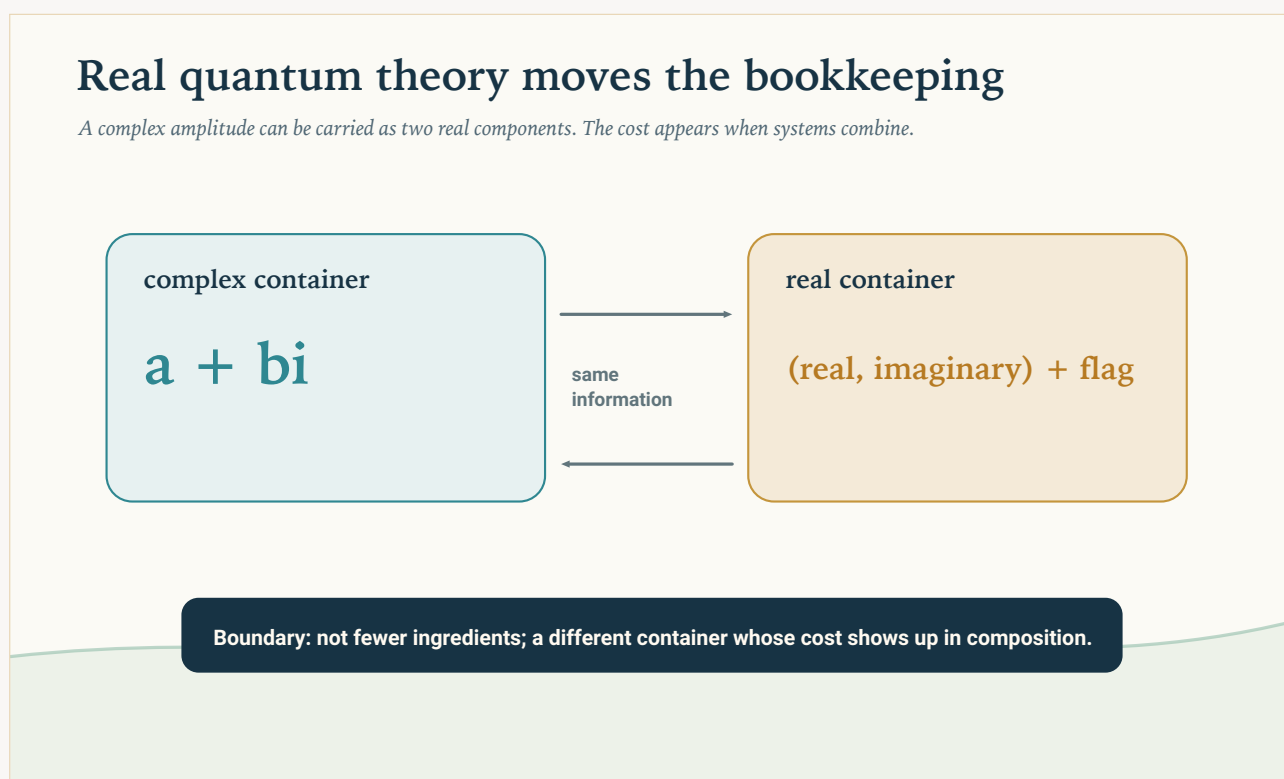
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · AI-assisted, human-reviewed

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

一个值得重读的标题

几年前，一个引人注目的说法流传开来：实验表明虚数是物理上真实的，量子力学无法在没有它们的情况下被书写。这一说法源于真正、仔细的物理学——Marc-Olivier Renou 及其同事于 2021 年在 *Nature* 上发表的一项提案，以及 2022 年执行了它的实验。但流行版本将一个精确的陈述压缩成了一则口号，而这则口号比结果更强。

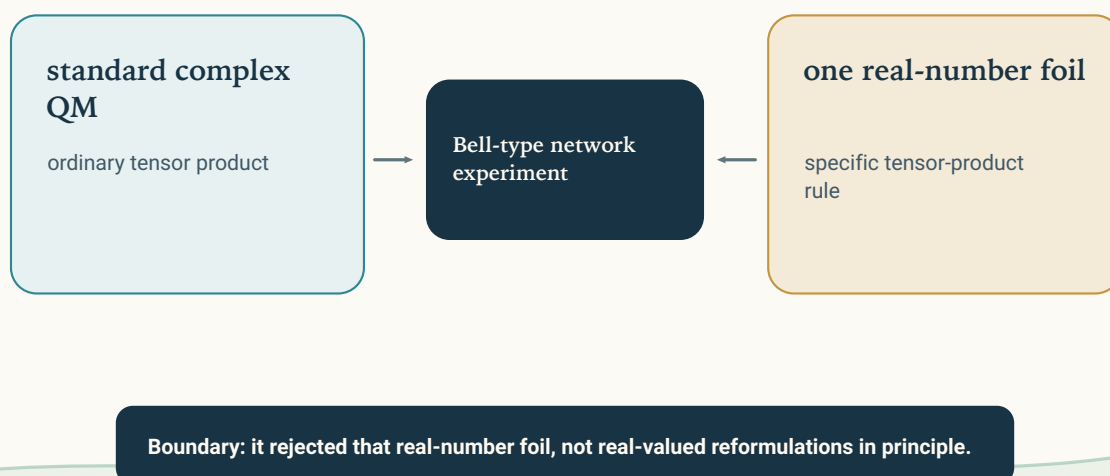
Pedro Barrios Hita、Anton Trushechkin、Hermann Kampermann、Michael Epping 和 Dagmar Bruß 在 *Physical Review Letters* 上发表的一篇新论文将精确的陈述放回了原处。它构造了一个仅使用实数的量子力学版本，并能重现标准复数理论的每一个预测——包括那些据称排除了实数的多体实验。诀窍不是将虚数偷偷带回来。而是改变了一个关于分离系统如何组合的假设。诚实的结论，用作者自己的话说，是：复数对描述量子力学并非必需，但它们确实非常有用。



复振幅 $a+bi$ 是一对实数，带有一个随每个系统一起携带的“标记”。实数表述并非更少的成分——只是一个不同的容器，其代价体现在系统如何组合上。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



2021-2022 年的实验比较了两种特定的理论——标准复数量子力学和一个保持张量积规则的实数“陪衬”——并落在了复数量子力学上。它们排除了那个陪衬，而不是原则上的实数。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

复数在理论中做什么

在量子力学中，系统的状态由振幅描述，而为了得到结果的概率，你取振幅的大小的平方。在标准理论中，这些振幅是复数：每一个都携带一个大小和一个相位，一个角度。那个相位不是装饰。当通向同一结果的两条路径组合时，它们的相位决定它们是增强还是抵消——这种干涉正是量子行为的标志。另一方面，整个系统共享的总体相位永远无法被测量。

一个复数实际上只是一对实数——一个实部和一个虚部——与关于它们如何相乘的特定规则捆绑在一起。因此一个自然的问题是，这种捆绑是否至关重要。你能否保留两个实数，去掉复数的包装，仍然拥有全部的量子力学？乘法正是使复数超越两个并排的数字的原因，所以答案并不显然，而这正是微妙之处所在。

2021 年的结果实际确立了

Renou 及其同事正是问的这个问题，并赋予它一个尖锐的、可检验的形式。他们没有问实数是否可以在量子理论的任何地方出现；他们问的是，一个实数表述能否在系统组合的特定规则下匹配复数理论的所有预测。那个规则——称之为张量积规则——是将几个独立部分作为一个整体来描述的标准处方。

在那条规则下，他们找到了一个涉及三方共享来自两个独立源的纠缠的场景，在这个场景中，实数理论和复数理论预测了不同的、可测量的相关性——一种贝尔检验的多体版本。2022 年，使用超导电路和光子的实验执行了这样的检验。测量到的相关性匹配复数量子力学，并与实数替代方案不一致。

为什么检验需要两个源，而不是一个

一个普通的贝尔检验使用一个向两个人（爱丽丝和鲍勃）发送一对纠缠粒子的单一源。对于这种设置，实数量子力学可以精确地重现与复数理论相同的相关性——两者不可区分，因此单一源无法在它们之间做出裁决。

2021 年的论证通过增加第二个**独立源**来获得立足点。想象排成一线的三方：爱丽丝、鲍勃、查理。一个源将爱丽丝与鲍勃纠缠；一个独立的源，没有共享的过去，将鲍勃与查理纠缠。鲍勃位于中间，将他的两个粒子一起测量，连接起两半。正是两个源的独立性——它们被分开制备的假设——完成了这项工作：在组合独立系统的标准张量积规则下，实数理论无法匹配复数量子力学为这一网络预测的三方相关性，而单源检验则使两个理论持平。这一差距正是实验所测量的。

这是一个真实而干净的结果。但请注意它仔细比较了：标准复数理论对一种特定的实数理论——保持普通张量积规则的那一种。正是这种配对，而非实数本身，才是实验所裁决的。这篇新论文，借用量子基础术语，将被排除的替代方案命名为它实际所是的东西：一个陪衬理论——一个没有人提出作为真实的理论，被设置为与被接受理论的刻意对比，以便实验能够区分两者。它的全部价值在于可区分性：排除陪衬显示了实数理论的哪些假设在起作用。

新论文改变了什么

这项新工作保留了一切，并改变了一个公设。它没有假设组合系统的张量积规则，而是从一个局域性要求出发，作者认为这个要求在物理上更为基本：对一个子系统单独执行的操作应对另一个未被触及的子系统没有可测量的影响。

从那个起点出发，他们显式地构建了一个实数量子力学。通常振幅的实部和虚部被作为额外的实数簿记携带——论文称之为附加在每个系统上的一个“标记”——而复数理论中不可观测的全局相位变成了实数理论中同样不可观测的旋转。代价恰好出现在 2021 年结果所指出的地方：在系统如何组合上。将这些实数描述粘合在一起的朴素方式甚至不能给出一个良定义的配方，因此该构造转而将代表相同物理的描述归为一组，并使用这些类进行工作。使用这种组合规则，实数理论重现了复数理论预测的每一个期望值——对单个系统和多个系统，跨分离方纠缠。作者还展示了该构造本质上是唯一的，并与标准量子力学等价。

因此，多体实验无法区分这一实数理论与复数理论，因为两者在每一个预测上都一致。早前的实验没有失败；它们只是针对一个不同的、限制更强的实数理论进行了检验。

为什么这不是一个矛盾

很容易将这解读为“2021 年的实验错了”。恰恰相反。实验是正确的，而这篇论文依赖于实验的正确性：它接受了每一个测量到的相关性，并展示了一个也能产生它们的实数表述。它所修正的是解释——从“这一实数理论被证伪”到“实数在量子力学中不可能”的跳跃。那个跳跃跳过了在起作用的假设。

论文也没有主张任何人应该放弃复数。它自己的总结在两方面都很谨慎：复数不是严格必要的，而且它们非常有用。实数构造需要在每个系统上额外附加一个标记，并使用一个更微妙的组合规则；复数将所有这些打包成一块干净的算术。便利不是无物。在物理学中，它往往是整个形式体系获胜的全部理由。

为什么重要

底下有趣的问题是“必要”一词对物理理论意味着什么。实验可以在两个理论预测不同事物时区分它们。但它本身不能告诉你，某一特定数学成分是一组预测的唯一可能容器——这是一个关于哪些理论存在的问题，它由构造来回答，而不是由测量来回答。这篇论文是一个构造：它展示了实验被认为已排除的替代方案。

该结果还澄清了一个普遍值得保持的区分。“这一理论被证伪”和“这一数学工具是不可避免的”是不同的陈述，两者之间的差距正是一个干净的实验结果可能变成一个过度声称的地方。复数仍然是量子力学的自然且高效的语言。它们在形而上学上是否必需是一个单独的问题，而在这个问题上，目前的答案是：不。

简洁摘要

一份 2021 年的提案和 2022 年的实验表明，建立在组合系统的标准张量积规则上的实数量子力学做出了与复数量子力学不同、可检验的预测，而实验偏好复数理论。这被广泛报道为虚数是物理上必要的证据。这篇新的 *Physical Review Letters* 论文基于一个不同的、以局域性为基础的公设，构造了一个实数量子力学，它能重现复数理论的所有预测，包括那些多体检验——表明复数是方便的而非严格必要的。它是一个理论构造，不推翻早前的实验，也不呼吁在实践中重新表述量子力学。

No-BS 检查

论文所展示的：一个仅使用实数的自治量子力学表述可以重现标准复数理论的每一个预测，包括多体贝尔型实验，如果它是建立在局域性公设而非张量积规则的基础上。

合理但非重点：这“反驳”了 2021–2022 年的结果。并非如此。它接受那些实验为正确，并重新解释了它们的范围：它们排除了一个特定的实数理论——保持张量积规则的那个——而不是原则上的实数。

它所没有显示的：复数是错的、无用的或在实践中值得放弃——论文明确称它们为非常有用。它也不是一个新实验：没有测量任何数据；声称的是一个数学构造和一致性证明。

对普通读者的主要局限：论证转向你认为哪个假设在物理上更基本——张量积规则还是局域性公设。这是一个在持续的基础争议中的理性选择，而不是一个由测量固定的事实，而实数构造可以说它匹配的复数构造更不自然。

普通读者应抱有多大信心？对构造在数学上是一致的——高度信心，它经过了同行评议，其逻辑是可检验的。值得信任的教训是谦逊的：复数是量子力学的便利语言，而不是一个被证明的形而上学必然。将任何形如“虚数是真实的”的标题视为这篇论文被撰写出来以纠正的口号。

来源

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>