

“非纠缠光子”也能违背贝尔不等式

——解读一项新的量子物理实验

文 | 徐令予

不久前，一篇题为《Violation of Bell inequality with unentangled photons》的论文引起了一定的关注。标题本身就很“醒目”，违背贝尔不等式，通常被视为量子纠缠和量子非定域性的典型标志，而“非纠缠光子”似乎与这一传统认知正面冲突。更让人困惑的是，贝尔实验正是 2022 年诺贝尔物理学奖表彰的核心内容之一。那么，这项工作是否动摇了我们对量子纠缠和量子力学的基本理解[1]？

SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

PHYSICS

Violation of Bell inequality with unentangled photons

Kai Wang^{1†}, Zhaohua Hou^{1†}, Kaiyi Qian¹, Leizhen Chen¹, Mario Krenn^{2,3*}, Markus Aspelmeyer^{4,5*}, Anton Zeilinger^{4,5*}, Shining Zhu^{1*}, Xiao-Song Ma^{1,6,7*}

Violation of local realism via Bell inequality—a profound and counterintuitive manifestation of quantum theory that conflicts with the prediction of local realism—is viewed to be intimately linked with quantum entanglement. Experimental demonstrations of such a phenomenon using quantum entangled states are among the landmark experiments of modern physics and paved the way for quantum technology. Here, we report the violation of the Bell inequality that cannot be described by quantum entanglement in the system but arises from quantum indistinguishability by path identity, shown by the multiphoton frustrated interference. By analyzing the measurement of four-photon frustrated interference within the standard Bell-test formalism, we find a violation of Bell inequality by more than four SDs. Our work establishes a connection between quantum correlation and quantum indistinguishability, providing insights into the fundamental origin of the counterintuitive characteristics observed in quantum physics.

要回答这个问题，需要先看清这项实验究竟做了什么，以及它的结论真正意味着什么。

这项工作使用多个非线性晶体作为光子源，通过精心设计的干涉结构，让来自不同“产生路径”的多光子概率振幅发生相干叠加。实验者关注的是四光子同时被探测到的事件，并在贝尔实验常用的 CHSH 框架下，观察到统计结果明显违背经典局域实在论所允许的界限。作者强调，这种违背并非来自预先制备好的纠缠态，而是源于“路径不可区分性”和产生过程中的量子相

干。换句话说，量子关联并不一定要体现在一个清晰可写下的“纠缠态”上，它也可以深藏在量子过程本身。这并不是对诺贝尔奖所表彰工作的否定，而是对“贝尔违背从何而来”这一问题边界的进一步澄清。

这个结论很容易引发误解。下面用问答的方式，澄清几个最常见的困惑。

一、CHSH 与“真正的贝尔不等式”等价吗？

很多科普文章中常把“违背 CHSH 不等式”直接称为“违背贝尔不等式”。严格说，这是一种约定俗成的简化。贝尔最初提出的不等式适用条件较为理想化，而 CHSH 是后来发展出的、更适合真实实验环境的一种检测方式。二者在物理含义上是等价的：都是检验自然界是否可以用“局域隐变量模型”来解释。但在数学上，CHSH 只是贝尔思想的一种常用实现形式，并不能覆盖所有可能的贝尔型不等式。因此，论文中所谓“违背贝尔不等式”，更准确的说法是：在 CHSH 框架下排除了局域实在论的解释。

二、CHSH 违背是否等价于“存在量子纠缠”？CHSH 能否作为纠缠的判定实验？

答案是否定的。CHSH 检验的是相关性是否强到无法由任何局域隐变量模型复现，它刻画的是“非局域性”；而纠缠描述的是复合量子态在数学意义上的不可分性。这两者并不等价。存在一些纠缠态，其相关性不足以违背 CHSH，不少带噪声的纠缠态就属于这一类。反过来，在特定实验设计中，也可能出现违背 CHSH 的统计关联，而并未显式制备出标准形式的纠缠态。因此，CHSH 不是纠缠的判定实验，它只能作为排除经典局域模型的工具。在工程实践中，人们常把“CHSH 违背”视为“纠缠制备成功”的证据，但这更多是一种特定实验范式下的经验等价，而非严格的逻辑等价。

三、论文所说的“unentangled photons”在严格意义下成立吗？

这里的关键在于“纠缠”依赖于如何划分系统。若把每个光子视为一个独立子系统，在这一分割方式下，实验并未制备出传统意义上的纠缠态，因此作者可以说使用的是“非纠缠光子”。但从光学模式或制备过程的角度看，相关性仍然来源于量子概率振幅的相干叠加。换言之，这里所谓的“非纠缠”，更多是指实验中并没有先制备一对标准意义上的纠缠光子对，而是通

过让不同产生路径彼此不可区分，使量子干涉在产生过程中形成强相关性。从更广义的角度看，这并不是绕开了量子非经典性的物理根源，而是换了一种呈现方式。

四、既然 CHSH 可以在“非纠缠”实验中被违反，这是否意味着量子纠缠并未真正得到实验验证？

这同样是一个常见误解。量子纠缠的实验验证从来不只依赖贝尔不等式。通过量子态层析、纠缠见证算符，以及在光子、离子阱、超导量子比特等多种平台上的可重复制备和操纵，纠缠早已作为一种可控的物理资源被充分验证。这项工作削弱的，是“贝尔违背等同于纠缠存在”的直觉对应关系，而不是否定纠缠本身的实验实在性。它澄清的是概念边界，而非推翻量子信息技术以纠缠为核心资源的事实基础。

综合来看，这项工作的意义主要在于基础理解层面。它提醒我们：量子非经典关联的来源，并不局限于“纠缠态”这一单一表象，量子不可区分性和产生过程中的相干结构同样可以导致对经典世界观的挑战。与此同时，它并没有改变量子信息技术对高质量纠缠资源的现实依赖。对工程而言，这仍是一种经过现实条件校正后的“谨慎乐观”；但对我们如何理解量子世界的运作方式，这项工作无疑拓展了视野，也帮助我们更清楚地区分“纠缠”“贝尔违背”和“量子关联”这些常被混用的概念。

从这个角度看，这篇论文的价值不在于颠覆既有结论，而在于帮助我们更清楚地区分量子物理中若干核心概念的边界与适用范围。

注释

[1] 什么是“否定局域隐变量模型”？它与贝尔不等式有什么关系？

在经典直觉中，人们往往认为：物理对象在被测量之前就已经“具有确定属性”，测量只是把这些属性揭示出来；同时，一个地方发生的事情不应立即影响到远处的另一个地方。这两种直觉合在一起，构成了所谓的“局域隐变量模型”：每个粒子的行为由某些隐藏的内部参数（隐变量）预先决定，且信息传播不超光速（局域性）。可以把它理解为：经典物理假定自然界像一台早已写好程序的机器，而贝尔实验表明，这种“预先写好答案”的图景在微观世界并不成立。

1964年，物理学家贝尔证明了一个重要结论：如果世界真的满足“局域隐变量模型”，那么不同测量结果之间的统计相关性必须满足一类数学不等式，这类约束统称为“贝尔不等式”。换言之，贝尔不等式并不是量子力学的假设，而是所有局域隐变量理论都必须遵守的统计上限。

量子力学则给出了另一套预测。对于某些量子态，在合适的测量设置下，相关性可以超过贝尔不等式所允许的范围。大量实验（包括近年来获得诺贝尔奖表彰的工作）已经反复证实，自然界的实验结果确实违背了这些不等式。其物理含义是：不存在任何同时满足“局域性”和“隐变量预先决定结果”的经典模型，能够完整解释量子实验的统计结果。

需要强调的是，“否定局域隐变量模型”并不等同于“证明存在某种超光速信号”。实验所否定的是一种经典世界观：认为粒子携带着预先写好的“答案”，且彼此之间只通过局域方式相互影响。量子力学所展示的，是一种不同于经典直觉的相关结构：测量结果之间存在无法由任何局域经典机制复现的关联。

因此，贝尔不等式的意义不在于为某种具体量子态“贴标签”，而在于提供了一把可操作的标尺，用来检验自然界是否可以被还原为局域隐变量模型。一旦实验违背了贝尔不等式，我们就必须放弃这一经典图景，承认量子世界具有更深层的非经典关联结构。

徐令予 作于美国南加州 (2026年2月23日)