

通过路径全同性实现独立粒子间的纠缠

王凯 侯兆华 马小松[†]

(南京大学物理学院 固体微结构物理国家重点实验室 人工微结构科学与技术协同创新中心 江苏省物理科学研究中心 南京 210093)

2024-12-23 收到

[†] email: xiaosong.ma@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250208

CSTR: 32040.14.wl20250208

1 背景介绍

量子纠缠是量子力学基础研究和量子信息技术应用中的核心资源。通常，纠缠的产生主要有两种途径：一是依赖粒子之间的直接相互作用，例如散射湮灭辐射^[1]、原子级联^[2, 3]、非线性光学效应^[4-6]，以及光、微波、声子与物质的相互作用^[7-12]；二是通过纠缠交换，可以在无直接相互作用和共享历史关联的光子之间建立纠缠^[13, 14]。纠缠交换的基本流程是：首先预先制备两对纠缠光子，然后从每对光子中分别取出一个光子，对这两个光子进行贝尔态测量，并将其投影到某一特定的贝尔态上。通过这一过程，剩余未参与测量的两个光子之间便会建立起纠缠关系。1998年，潘建伟等人首次通过实验验证了纠缠交换^[15]。此后，纠缠交换迅速成为构建量子通信网络的重要模块^[16-18]，同时也为量子力学基础实验提供了重要的技术手段^[19-21]。

然而，纠缠交换并非是独立粒子间实现纠缠的唯一方法。随着人工智能(AI)技术的快速发展，AI在量子光学领域的应用也逐渐受到关注^[22, 23]。PyTheus是一个专门用于量子光学研究的人工智能框架，它通过图的表示法对复杂的量子实验进行抽象化，支持自动化设计与优化^[24]。基于这一框架，Krenn等人发现了一种无需依赖于纠缠交换，即可在独立光子间实现纠缠的新方法^[24]。该方法的核心在于利用一种特殊的量子干涉现象——诱导相干。这一现象最早由Zou、Wang和Mandel于1991年在非线性量子干涉仪中观测到^[25]。

诱导相干实验中使用了两个双光子量子源，其中来自两个光源的闲频光路径完全重合，而信号光则在分束器上发生干涉。实验结果显示，尽管闲频光子本身并未处于信号光子的干涉路径上，但信号光子的干涉效应依赖于闲频光路径的全同性。这一现象深刻揭示了“量子态所反映的并非我们关于系统的已知信息，而是原则上可以获知的信息”^[26]。随后，Herzog等人于1994年在类似迈克耳孙干涉仪的实验中，将两个双光子源的信号光子和闲置光子的路径都完全对齐，进一步展示了自发参量下转换过程中由诱导相干所引发的受抑制双光子态的产生^[27]。他们通过调节干涉仪的相位，成功实现了光子对产生概率的增强与抑制。

近期，我们基于多光子受挫干涉^[28, 29]，利用光子的路径全同性，成功实现了一种无需粒子间直接相互作用，在独立粒子间产生纠缠的方案^[30]。这一方案具有以下显著特点：(1)无需预先制备纠缠态；(2)无需进行贝尔态测量；(3)无需对所有辅助光子进行测量。这些特性与传统的纠缠交换方法截然不同，为量子信息处理提供了一种全新的纠缠生成机制。该方法不仅拓展了纠缠制备的理论实验途径，同时也降低了资源消耗，具有重要的应用潜力。

2 在无相互作用光子之间产生纠缠

纠缠的产生原理如图1(a)所示。在实验中，使用了4个基于自发参量下转换过程的光子对源(P_1-P_4)。每个光源均概率性地产生偏振直积态 $|HV\rangle$ 。来自光源 P_1 和 P_2 的光子路径与来自光源 P_3 和 P_4 的光子路径重合，以确保光子路径的不可区

分性。在信号光路径1和4中，引入了偏振旋转器，将来自 P_1 和 P_2 的水平偏振信号光子(s_1 和 s_2)转化为垂直偏振光子。而路径2(i_2 和 i_3)及路径3(i_1 和 i_4)上的闲置光子始终保持垂直偏振，并且在所有自由度上保持不可区分性。

在上述过程中，所有光子对源提供的是概率性的偏振可分离态。如果仅探测四光子符合事件(即每条路径上均只检测到一个光子)，则有两种可能的情况贡献于四重符合事件：一是光子对同时在光源 P_1 和 P_2 中产生，二是光子对同时在光源 P_3 和 P_4 中产生。由于光子路径的全同性，这两种情况会发生相干叠加，从而得到如下的量子态：

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle)_{14} |VV\rangle_{23}. \quad (1)$$

这表明，当路径2和3上探测到垂直偏振光子时，路径1和4上的光子将形成偏振最大纠缠态。因此，与传统的纠缠交换不同，这一方法无需预先制备纠缠态，所有的光源只产生双光子可分离态，同时也不需要中间两个辅助光子进行贝尔态测量。

对于 Alice 与 Bob 共享量子态

$$|\psi\rangle_{14} = 1/\sqrt{2} (|HH\rangle + |VV\rangle)$$

的纠缠验证，分为两个方面进行。一方面是验证其对于 CHSH 不等式的违反。根据 Alice (偏振分析器角度为 θ_A) 和 Bob (偏振分析器角度为 θ_B) 的偏振测量结果，可以得到归一化的关联函数

$E(\theta_A, \theta_B)$ ，如图2(a)所示。实验结果表明，在 Alice 的不同测量基下，其最大值分别为 0.8827 ($\theta_A=0^\circ$) 和 0.7370 ($\theta_A=45^\circ$)，均超过了 CHSH 不等式违反的理论界限 $1/\sqrt{2}$ ，这表明构成纠缠态的两项的相干性。基于特定 θ_A 、 θ_B 角度下的关联函数 $E(\theta_A, \theta_B)$ ，如图2(b)所示，计算得到 CHSH 不等式的 S 值为： $S = |E(0, 22.5^\circ) - E(0, 67.5^\circ) + E(45^\circ, 22.5^\circ) + E(45^\circ, 67.5^\circ)| = 2.2724 \pm 0.0822$ 。第二方面是对量子态的层析。通过对 Alice 和 Bob 共享的纠缠态进行量子态层析重构，得到如图2(c)所示的量子态密度矩阵。实验中，所制备的纠缠态 $|\psi\rangle_{14}$ (绿色柱)相对于 Bell 态 $|\phi^+\rangle = 1/\sqrt{2} (|HH\rangle + |VV\rangle)$ (虚线柱)的保真度为 $F = 0.868 \pm 0.007$ ，进一步证明了光子1与光子4之间确实存在量子纠缠。

3 基于部分辅助光子测量的纠缠生成机制

与纠缠交换相比，基于路径全同性的纠缠产生方式具有一个重要优势：只需探测一个辅助光子，即可在独立的粒子之间建立纠缠，如图1(b)所示。在实验中，只需要对光子1、2和4进行三重符合计数，而无需探测光子3。在这种情况下，只有三种可能性会贡献于三重符合计数：

- (1) 光源 P_1 和 P_2 同时产生一对光子；
- (2) 光源 P_3 和 P_4 同时产生一对光子；

上面两种情况同时也会贡献四重符合计数，是生成纠缠态的主要来源，见公式(1)；

(3) 光源 P_2 和 P_3 同时产生一对光子，这种情况会产生噪声项 $|HV\rangle_{14}|V^2\rangle_2$ 。其中， $|V^2\rangle_2$ 表示路径2上同时产生两个垂直偏振光子。

为了抑制噪声项，通过适当降低光源 P_2 和 P_3 的产生效率，同时提高光源 P_1 和 P_4 的产生效率，可以使噪声项的概率幅远小于上述前两种情况((1)和(2))。因此，

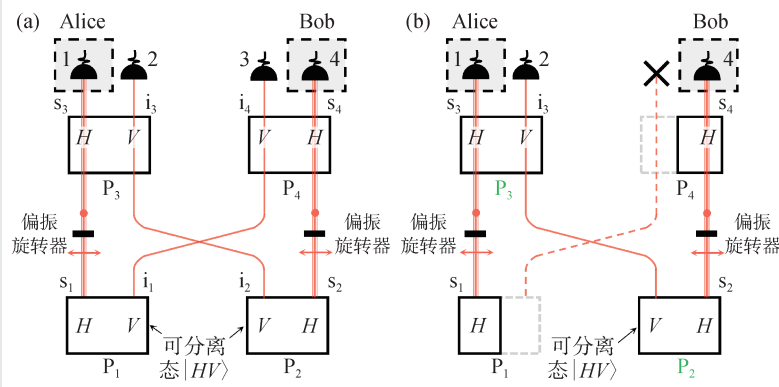


图1 (a)通过路径全同性建立纠缠；(b)只探测一个辅助光子，在无相互作用的粒子间建立纠缠

仅通过探测辅助光子2, 就能够
在光子1和光子4之间生成纠缠。

对于图1(b), 有一个有趣的
解释: 由于路径3上的光子从未被
探测, 因此可以视为实际上不需
要产生这个光子。换句话说, 图1
(b)可以等效为一个包含两个双光
子源(P_2 和 P_3)以及两个概率性单光
子源(P_1 和 P_4 , 分别位于路径1和
路径4)的系统。这一系统要求双
光子源与单光子源之间发生相干
叠加, 从而生成纠缠态。

在仅探测光子2的条件下,
对光子1和光子4的量子态 $|\psi\rangle_{14}$
进行纠缠验证, 分为两个方面:

(1) 保真度验证: 实验测得
量子态密度矩阵(图2(d)中的绿色
柱)相对于贝尔态(虚线柱)的保真
度为 $F = 0.614 \pm 0.011$;

(2) 纠缠判据: 实验结果表明, 纠缠判据
为 $-0.114 \pm 0.011 < 0$, 证明所制备的量子态具有
纠缠性质。此外, 实验测得量子态的纠缠度为
 0.265 ± 0.0200 。

这些结果明确证明了 Alice 和 Bob 之间存在量
子纠缠。值得注意的是, 这种基于路径全同性的
方法在概念上不同于传统的纠缠交换: 即使存在
未探测的辅助光子, 通过路径重合依然能够实现
纠缠的生成。

4 展望

除了纠缠交换, 路径全同性也可以在独立光
子之间生成纠缠, 而无需直接相互作用。与传统的
纠缠交换不同, 这种方法不依赖于预先生成的
纠缠或贝尔态测量, 其主要优势在于无需探测所
有辅助光子。通过调节泵浦光的强度, 即使部分
辅助光子未被探测, 仍能成功实现纠缠生成。

从基本原理来看, 纠缠交换依赖于贝尔态测
量, 这一过程可以看作是一种量子擦除器。纠缠
交换需要利用分束器以及对两个辅助光子的符合

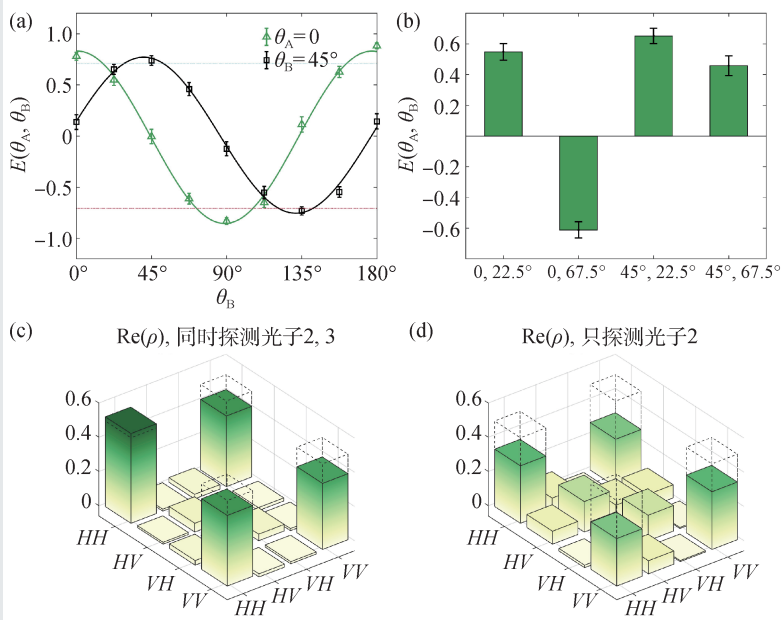


图2 (a) Alice 与 Bob 测量的关联函数曲线; (b)用于构造 CHSH 不等式的期望值 $E(\theta_A, \theta_B)$; (c)测量所有辅助光子得到的纠缠态密度矩阵; (d)只探测一个辅助光子得到的纠缠态密度矩阵

测量, 以消除粒子间可区分的路径信息。而基于
路径全同性的方法, 通过其内在特性有效避免了
可区分信息的产生, 因此无需额外操作去抹除路
径信息。

这种方法特别适用于量子通信, 有助于减少
复杂多节点量子网络的资源需求。此外, 对该技
术的进一步推广, 可以显著减少多对纠缠交换所
需的粒子数量^[24]。这些结果表明, 通过替代性方
法降低资源需求, 可能为其他量子网络或通信协
议的实现提供新思路。未来的研究方向包括分析
复杂量子传输任务以及复杂结构量子网络中的资
源需求, 并探索优化方案。

基于纠缠生成的新原理及其实验实现, 为未
来开发基于这一原理的实用量子信息协议提供了
重要基础。此外, 相关文献^[31]指出, 通过分束器
和光束移位器构成的线性光学网络, 也能使两个
独立光子产生纠缠。这些研究为探索更多基于路
径全同性的新方案提供了宝贵的参考。

参考文献

- [1] Wu C S, Shakhnov I. Phys. Rev., 1950, 77(1): 136
- [2] Freedman S J, Clauser J F. Phys. Rev. Lett., 1972, 28(14): 938

- [3] Aspect A, Dalibard J, Roger G. Phys. Rev. Lett., 1982, 49(25): 1804
- [4] Shih Y H, Alley C O. Phys. Rev. Lett., 1988, 61(26):2921
- [5] Ou Z Y, Mandel L. Phys. Rev. Lett., 1988, 61(1):50
- [6] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75(24):4337
- [7] Hagley E, Maitre X, Nogues G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 79(1):1
- [8] Majer J, Chow J M, Gambetta J M *et al.* Nature, 2007, 449(7161): 443
- [9] Jost J D, Home J P, Amini J M *et al.* Nature, 2009, 459(7247):683
- [10] Ockeloen-Korppi C F, Damskäg E, Pirkkalainen J M *et al.* Nature, 2018, 556(7702):478
- [11] Kurpiers P, Magnard P, Walter T *et al.* Nature, 2018, 558(7709): 264
- [12] Bienfait A, Satzinger K J, Zhong Y P *et al.* Science, 2019, 364(6438):368
- [13] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 70(13):1895
- [14] Zukowski M, Zeilinger A, Horne M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 71(26):4287
- [15] Pan J W, Bouwmeester D, Weinfurter H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80(18):3891
- [16] Briegel H J, Dür W, Cirac J I *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81(26):5932
- [17] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I *et al.* Nature, 2001, 414(6862):413
- [18] Azuma K, Economou S E, Elkouss D *et al.* Rev. Mod. Phys., 2023, 95(4):045006
- [19] Ma X, Zotter S, Kofler J *et al.* Nat. Phys., 2012, 8(6):479
- [20] Hensen B, Bernien H, Dréau A E *et al.* Nature, 2015, 526(7575): 682
- [21] Rosenfeld W, Burchardt D, Garthoff R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119(1):010402
- [22] Krenn M, Malik M, Fickler R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116(9):090405
- [23] Krenn M, Erhard M, Zeilinger A. Nat. Rev. Phys., 2020, 2(11):649
- [24] Ruiz-Gonzalez C, Arlt S, Petermann J *et al.* Quantum, 2023, 7: 1204
- [25] Zou X Y, Wang L J, Mandel L. Phys. Rev. Lett., 1991, 67(3):318
- [26] Mandel L. Rev. Mod. Phys., 1999, 71(2):S274
- [27] Herzog T J, Rarity J G, Weinfurter H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1994, 72(5):629
- [28] Feng L T, Zhang M, Liu D *et al.* Optica, 2023, 10(1):105
- [29] Qian K, Wang K, Chen L *et al.* Nat. Commun., 2023, 14(1):1480
- [30] Wang K, Hou Z, Qian K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2024, 133(23): 233601
- [31] Wang Y, Hao Z Y, Liu Z H *et al.* Phys. Rev. A, 2022, 106(3): 032609

新书推荐

读者和编者

《物理夜航船：直觉与猜算》一书以徐一鸿先生无与伦比、引人入胜的风格，向学习物理的学生介绍如何利用物理推理和明智的猜测来找到问题的关键。在典型的物理课堂上，学生们试图掌握一套庞大的数学工具，来进行物理中的精确计算。因此，学生往往会产生一种不幸的印象，认为物理由定义明确的问题组成，可以通过严密的推理和合乎逻辑的步骤来解决。理想化的课本练习和家庭作业问题强化了这种错误印象。因此，即使是最优秀的学生也会发现自己完全没有准备好应对实际研究中的挑战。实际上，物理学充满了各种近似、简要估计、对数量级的猜测和跳跃的逻辑。这本不可或缺的书包括与物理学前沿主题相关的令人兴奋的问题

(从霍金辐射到引力波)，通过精妙的“夜行法”分析，帮助学生深入理解他们所学的方程，并期待能对研究者们产生物理直觉有所帮助。

在书中有两点值得读者反复思考：一是，物理不是数学，物理思维不等同于数学思维，物理需要数学，但是数学学得好并不意味着就能够掌握物理；二是，研究不等于学习，实际工作和课堂学习是不一样的，考试考得再好，也只是重复前人的工作，而科学研究是在黑暗中摸索，寻找前人未能发现的道路。《物理夜航船》的重点不是讲述知识，而是传授方法，用一些生动有趣的例子，向读者讲述物理学家思考问题的方法，特别强调了物理图像的重要性。



作者：徐一鸿

译者：姬扬

出版社：中国出版集团有限公司
世界图书出版公司

出版时间：2024年10月

定价：63.00元

页码：392页