

量子信息技术的新进展

——五光子纠缠和开放目的的量子隐形传态*

杨涛 潘建伟

(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 由中国科技大学合肥微尺度国家实验室(筹)量子物理和量子信息部所完成的“五光子纠缠和开放目的的量子隐形传态”研究成果以 Letter 的方式发表在 2004 年 7 月 1 日出版的 *Nature* 上,欧洲物理学会和美国物理协会都对该工作进行了专题报道。本文介绍了该成果的研究背景,意义,内容。

关键词 纠缠,相干,隐形传态

量子信息学主要是利用微观粒子作为载体,凭借着量子力学所特有的一些性质:不确定性、相干性、纠缠等,可以完成一些经典的通讯、计算、密码学无法实现的任务。包括,量子密钥分发具有绝对的安全性,量子计算机具有高并行性,因而在解决一些特定的复杂问题中具有经典计算机无法比拟的优势。量子隐形传态^[6-9]可以通过量子纠缠和一个经典信道,完整无误地传送一个量子态,量子密集编码的信道容量是经典信道的两倍等。

量子纠缠可以说是量子信息最核心部分,几乎所有的量子信息处理过程都与其有关。量子纠缠本来是爱因斯坦等科学家为了证明量子力学的不完备而提出的一种很奇妙的量子概念,而在量子信息学中却成为最重要一种资源,并有着大量的应用:如在量子密钥分发中,基于量子纠缠交换和量子纠缠纯化的量子中继器可以克服长距离所带来的噪声和消相干,量子计算机本身的启动就需要大量的量子纠缠源^[8],而运行过程中更是需要大量的基于量子纠缠的量子纠错过程,量子隐形传态和量子密集编码是基于量子纠缠而提出的概念。

量子纠缠是发生在多个微观粒子之间的一种物理现象,是指不论粒子间距离多远,一个粒子的

态都是与其它粒子的态相关联的,信息大部分都蕴涵在粒子之间的相互关系上,对一个粒子的测量会影响到其它粒子的态,粒子之间不论相距多远,从根本上讲它们还是相互联系的。

众所周知,经典信息处理的最基本单元是比特(Bit,即二进制数 0 或 1)。一个按照一定数学规则给出的随机二进制数据串就构成一个密钥,经典通信中信息的安全性依赖于数学问题求解的复杂性,因而经典密码也就不可能绝对保密。然而,基于量子力学线性叠加原理和不可克隆定理的量子密钥分配却可以解决这个问题。另外,经典计算中存在着一大类 NP 问题(难解的非指数问题),即问题的复杂度随着比特位数的增长而指数上升。这类问题在经典计算机上求解非常困难,但是量子计算可以把其中的一部分 NP 问题变成 P 问题(容易求解的指数问题),即问题的复杂度随着比特位数的增长以多项式上升。这类问题原则上是可以计算的。一个具体的例子就是大数分解定理,按经典计算复杂性理论,这个问题不存在有效算法,所以被利用来进行经典密钥分配。但是如果用量子计算机,使用 Shor 量子算法,这个问题就变成了 P 问题。例如,为了对一个 400 位的阿拉伯数字进行因子分解,目前最快的超级计算机将耗时上百亿年,这几乎等于宇宙的整个寿命,而具有相同时钟脉冲速度的量子计

* 收稿日期 2004 年 9 月 1 日

算机只需要大约 1 分钟。因此,对于目前的密码系统,即使人们几乎无法利用经典算法对其进行破解,但一旦人们拥有了一台量子计算机,那么目前的密码系统将毫无保密性可言!这一后果是对目前的密码系统的巨大挑战,因而对基于经典保密系统的行业(如军事、国家安全、金融等)的信息安全构成根本的威胁。因此,为了保证这些领域的信息安全,也为了拓宽人类对微观世界的认识,发展量子信息学刻不容缓:一方面,开发由量子力学基本原理保证其保密性的量子密码系统,另一方面,研制按照量子力学基本原理运行的量子计算机。为此,世界很多国家都投入了巨大的人力和财力积极地进行相关研究。

如上所述,量子信息学有着很重大的应用价值,如果实现,将是人类生产力的又一次飞跃。由于在量子计算中存在着不可避免的噪声,为了能够实现量子计算,需要采用量子纠错技术。理论研究表明,普适的量子纠错需要 5 个或者更多的粒子的纠缠技术^[1-2]。在 1999 年,潘建伟和他在奥地利的合作者们第一次在实验上制备了 3 个粒子的纠缠^[5-7],随后在 2000 年,他们又制备了 4 粒子的纠缠态^[3-4],并用它们验证了量子力学与定域实在论的矛盾。为了达到 5 粒子纠缠这一目标,在技术上面临着巨大的挑战。虽然对五光子纠缠的制备及操作的方案在理论上非常明确,但是它的实验实现非常难,迄今为止,自发的参量下转换(SPDC)依旧是最好的纠缠光子源,而且在最近的一些实验中仍被用来作为最基础的纠缠源。然而,由于参量下转换的必然性,导致五光子实验中 5 体符合计数会非常非常的低。

同时,在多粒子量子通讯以及量子计算中有个至关重要的极具挑战性的实验——开放目的的隐形传态,在所谓的开放目的的隐形传态中,一个未知的单光子态将会被传送到一个 N 粒子的相干叠加态上,以证明分布式的量子信息处理,接下来,通过对其中 N-1 个粒子做一定方向的投

影测量,原来的这个被传送的未知量子态可以在 N 个粒子的任何一个粒子上被读出。

我们首次报道了在实验上五光子纠缠跟开放目的的隐形传态的原则上实现^[10]。在实验中,我们用两对极化纠缠的纠缠光子对来制备一个 4 光子纠缠态,然后与一个合适亮度的单光子态交迭在一起以得到我们想要的态。为了克服 5 体符合计数的困难,我们首先在制备高亮度的 4 光子基础上,进一步改进探测效率,我们可以在合理的时间内收集到足够的实验数据以验证五光子纠缠的存在。

我们的实验取得了以下的创新性成果:

(1)首次实验实现五光子纠缠(如图 1)。为了证明五光子 GHZ 态已经被成功制备,我们在 H/V 基矢下对 32 种可能的组成成分做测量,实验结果表明其信噪比平均为 40:1,这证明了在实验的精度下只有我们所希望的 HHHHH 与 VVVVV 的成分存在(图 1a);为了进一步验证两种成分确实是相干叠加在一起的,我们对 5 个光子在 +/- 基矢下做符合测量,在 Delay2 在 0 延迟的情况下两种组合成分 +++++ 与 ++++- 的计数关于 Delay1 的位置的关系曲线说明了这 5 个光子确实是五光子 GHZ 纠缠态(图 1b)。

(2)首次用和五光子纠缠同样的装置实现了开放目的的隐形传态。我们首先制备了 4 个光子(2, 3, 4 和 5)的 4 体纠缠。将输入的光子 1 和纠缠态中其中一个光子(光子 2)做一个贝尔测量。在随后的实验中,经过适当的操作,光子 1 的量子态会隐形传输到剩下的 3 个光子(3, 4, 或 5)中任意一个指定

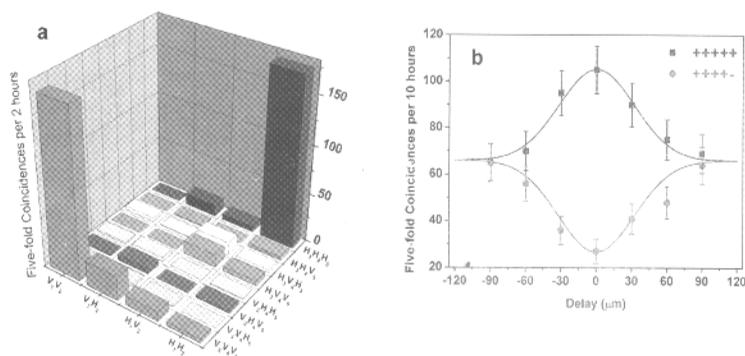


图 1 五光子纠缠的观测结果

的光子上。在实验中,对输出的两个出口 3、4 的光子做 45 度的投影测量,光子 1 的量子态会传输到光子 5 上;同样,对输出的两个出口 3、5 的光子做 45 度的投影测量,光子 1 的量子态会传输到光子 4 上;对输出的两个出口 4、5 的光子做 45 度的投影测量,光子 1 的量子态会传输到光子 3。为了演示开放目标的隐形传态对光子 1 的任意态都能工作,我们选择传送 45 度线性偏振 $|+\rangle$ 与 $|-\rangle$, 以及椭圆偏振右旋 $|R\rangle$ 与左旋 $|L\rangle$ 状态。在实验中,每次测量的时间为 10 小时,在极化分析测量中,我们所希望得到的 5 体符合在 0 延迟时最高计数率约为 100 的同时最低的计数率约为 20,每个点的测量时间均为 10 小时。我们来看将光子 1 传送到光子 5 或者光子 4 的保真度,我们分别将 $|+\rangle$ 线性偏振、 R/L 的圆偏振做光子 1 的初始状态作隐形传态的测量,对应的保真度参见表 1,从中我们可以看到所有观测到传送的保真度($\approx 0.80 \pm 0.04$)远远高于经典 $2/3$ 的限制,从而验证了开放目标的隐形传态。

表 1 两个不同目标的隐形传态保真度

被传送态的极化方向	保真度	
	目标光子 4	目标光子 5
$ +\rangle$	0.79 ± 0.04	0.80 ± 0.03
$ -\rangle$	0.81 ± 0.04	0.77 ± 0.04
$ R\rangle$	0.75 ± 0.04	0.79 ± 0.04
$ L\rangle$	0.79 ± 0.04	0.82 ± 0.03

我们的五光子纠缠以及开放目的的超空间传送实验实现的意义是相当深远的。首先,我们的工作是在第一次在实验上成功地操纵了 5 体纠缠态,这是普适的量子纠错所需要的最少的粒子数;其次,开放目的的超空间传送的实现打开了分布式量子信息处理的各种新的可能性;最后,我们的实验技术可以在实验上重新对很多量子方案进行验证,比如比特翻转的量子拒错以及量子计算中最常用的非破坏的控制非门。

Nature 杂志称赞说:“尽管五粒子纠缠以及终

端开放的量子隐形传输的实现非常困难,但是中国科技大学的潘建伟教授和他的同事们完成了这一壮举,他们的实验方法将量子计算和网格化的量子通信中有重要的应用”

致谢 该研究得到中国科学院知识创新工程、国家重点基础研究发展规划项目(“973”项目)、国家自然科学基金委项目的资助和支持。

主要参考文献

- 1 Bennett C H, DiVincenzo D P, Smolin J A *et al.* Mixed-state entanglement and quantum error correction. *Phys. Rev. A.*, 1996, 54 :3 824-3 851.
- 2 Laflamme R, Miquel C, Paz J P *et al.* Perfect Quantum Error Correcting Code. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77 :198-201.
- 3 Sackett C A *et al.* Experimental entanglement of four particles. *Nature*, 2000, 404 :256-259.
- 4 Pan J W, Daniell M, Gasparoni S *et al.* Experimental demonstration of four-photon entanglement and high-fidelity teleportation. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86 :4 435-4 439.
- 5 Pan J W, Bouwmeester D, Daniell M *et al.* Experimental test of quantum non-locality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Nature*, 2000, 403 :515-519.
- 6 Bennett C H *et al.* Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 83 :3 081-3 084.
- 7 Zeilinger A, Horne M A, Weinfurter, H *et al.* Three-particle entanglements from two entangled pairs. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78 :3 031-3 034.
- 8 Knill E, Laflamme R, Milburn G J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature*, 2001, 409 :46-52.
- 9 Bouwmeester D *et al.* Experimental quantum teleportation. *Nature*, 1997, 390, 575-579.
- 10 Zhi Zhao *et al.* Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation *Nature*, 2004, 430 :54-58.

Experimental Demonstration of Five-photon Entanglement and Open-destination Teleportation

Yang Tao Pan Jianwei

(University of Science and Technology of China 230026 He Fei)

"Experimental Demonstration of Five-photon Entanglement and Open-destination Teleportation" finished by the department of Quantum Physics and Quantum Information of Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Micro scale of USTC was published in nature on July 1st 2004. This progress was also reported by European Physical Society's website——Physics Web and American Physical Society. This article is about its background, signification and its detail contents.

Keywords entanglement, interference, teleportation

课题组负责人简介：潘建伟 男，中国科技大学教授，博士生导师。1970 年出生。1998 年获奥地利维也纳大学物理学博士学位。2001 年，入选“中科院引进国外杰出人才”，并获国家杰出青年基金。2002 年，被国家教育部聘为“长江学者”。2003 年，由于在量子态隐形传输以及量子纠缠态纯化实验实现上的重要贡献，被奥地利科学院授予青年物理学家最高奖——Erich Schmid 奖。关于“量子态隐形传输实验研究”的工作分别于 1997 年入选欧洲物理学会“年度国际十大物理学新闻”、美国物理学会“年度国际十大物理学新闻”；于 1998 年入选美国 *Science* “年度国际十大科技新闻”；于 1999 年入选英国 *Nature* 特刊“百年物理学 21 篇经典论文”、入选国家科学技术部“1999 年基础研究十大新闻”。关于“三光子纠缠态以及量子力学非定域的实验检验”的工作于 2000 年入选美国物理学会“年度国际十大物理学新闻”。到目前为止，已在 *Nature* 发表论文 6 篇，*Physical Review Letters* 上发表论文 10 余篇。

(接 395 页)

(四) 实现资源共享,推进中外合作建所

利用青藏高原研究的国际化优势,与国外科研机构合作共建研究所。目前,中科院与德国德意志研究联合会(DFG)双方签署了“中-德合作共建青藏高原研究所谅解备忘录”。以此为契机,开展了一系列中德合作研讨会,并取得实质性进展。中科院与德国科研机构开展青藏高原合作研究的焦点集中在“青藏高原环境变化研究”和“青藏高原地球动力学研究”两个方向。联合建所有效

利用了中科院、国家自然科学基金委、德意志研究联合会(DFG)、德国马普学会(MPG)的资源,联合了资金、人才、设备、技术等多方优势,为项目实施和平台建设提供了有力的支持。

(五) 联合国际科研机构,建设野外监测研究平台和实验室

根据科技部、国家发改委、教育部、财政部联合制定的《2004—2010 年国家科技基础条件平台建设纲要》精神,我所将联合国外同类科研机构共同实施建立综合、集成、连续、长期和系统的野外监测研究平台和实验室建设计

划。以地球物理与地质、高分辨率记录、地表现代过程、高原大气等方面的观测台站为基础,在青藏高原建成北、南、中、东、西五个基本观测基地。这五个基地分别属于山地森林草原地带、山地灌丛草原地带、高寒草原地带、高寒荒漠地带和山地森林地带,具有典型的气候环境代表意义。通过野外研究监测和室内分析,科学数据提取,揭示该区域自然科学的发展规律,将有利于实现西藏经济社会的跨越式可持续发展,有利于国家西部大开发的深入实施。

(相关图片请见封三)