百年光子——纪念爱因斯坦“光量子论”诞生110周年

段开敏 郭光灿†
(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

2015－07－15收到
† email:gcguo@ustc.edu.cn
DOI:10.7693/wl20150801

A hundred years of the photon

DUAN Kai-Min GUO Guang-Can†
(Key Lab of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘 要 1905年爱因斯坦首次提出“光量子”概念，不仅宣告量子光学诞生，而且对其后量子物理发展产生重大推动作用。一百多年来，人类逐渐领略了光子的魅力，并且开始在量子密码、量子网络、量子模拟、量子计量和量子计算等领域展开了光子的应用。但时至今日，光子究竟是什么这一问题仍然是个谜。

关键词 光子，波粒二象性，量子信息

Abstract In 1905 Albert Einstein developed the theory of the photoelectric effect. That was the beginning of quantum optics, and it helped to initiate quantum physics. For over 100 years, people have gradually come to appreciate the allure of photons, and to exploit its applications in quantum cryptography, quantum networks, quantum simulation, quantum metrology and quantum computing. But even today the nature of the photon is still an outstanding issue.

Keywords photon, dual nature of light, quantum information

1 引言

19世纪末期，整个物理学界十分乐观地认为，物理学已经发展到登峰造极，除了迈克耳孙—莫雷实验否定了“以太”理论和黑体辐射实验导致“紫外灾难”两个问题外，所有物理现象都可以得到圆满解释，而且人们深信这两个问题迟早会得以解决。

为了解释黑体辐射实验，普朗克于1900年提出“量子”概念，即光辐射被物质吸收或发射时，其能量不是连续的，而是“一份一份”的(即“量子”)。由此推导出与实验结果完全吻合的理论曲线，圆满解决了“紫外灾难”问题。普朗克的“量子”概念宣告了“量子”时代的诞生。然而，以普朗克为首的物理学界并没有认识到“量子”概念对物理学所产生的深刻影响，他们反而致力于将“量子”拉回经典物理框架内来诠释。

只有爱因斯坦独具慧眼，他认为，光辐射不仅在与物质相互作用时其能量是一份一份的，光辐射的能量本身就是“量子化”的，一份能量就是能量的最小单元，后来称之为“光量子”或简称“光子”。“光子”的出现不仅宣告“量子光学”的诞生，而且极大地推动其后量子物理的深入发展，从而建立了“量子力学”——现代物理学的两大支柱之一。

继而，德布罗意在爱因斯坦“光子”概念的启发下提出，既然看似波动的光辐射，具有“粒

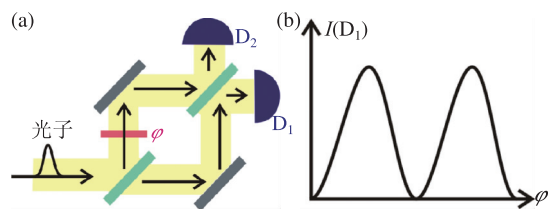

图1 (a)光子逐个经过马赫—曾德尔干涉仪。每次只有一个探测器D_i能够观测到光子，说明光子具有粒子性；(b)探测器光强分布，呈现出干涉现象，说明光子具有波动性

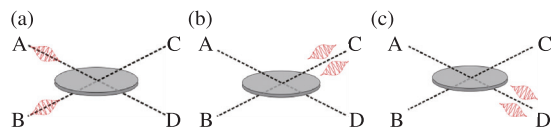

图2 (a)双光子同时入射；(b)和(c)分别为实验观测到两个光子成对被反射或透射

子”特性，那么，看成“粒子”的物质(如电子)，也应具有波动性，这就是所谓“德布罗意物质波”概念。由此引发后继的大量研究，证实所有微观粒子都具有波动和粒子二象性(图1)。这些奇异特性的微观粒子构成“量子世界”，遵从量子力学的运动规律。

2 光子的特性

光子是一种基本粒子，其特点是状态不确定性，单个光子在空间中的位置是不确定的，而且光子在空间运动轨迹也是不确定的。

光子可以用来传递信息，利用偏振自由度，一个光子最多只能传送一个比特的信息。人们发现，光子除偏振自由度外，还有路径自由度、轨道角动量自由度，以及多种自由度的杂化状态。因此，如果能制备出这些自由度，单个光子原则上可传送的信息量并无上限。

利用自发参量下转换产生双光子对，是产生光子纠缠态的重要实验手段。产生的纠缠光子对之间存在“幽灵般”的超距作用，两个光子的这类特殊量子态在判别爱因斯坦和玻尔长期关于量子力学完备性的争论孰是孰非中起着至关重要的决定性作用，纠缠态的光子对违背Bell不等式的实验事实不仅支持量子力学的完备性，而且揭示出量子世界的本质特性即非局域性。

量子干涉在量子信息处理中得到了广泛的应用，也为理解量子力学提供了重要工具。双光子Hong—Ou—Mandel干涉[1]是量子世界最重要、最基本的干涉仪：当两个同类光子分别入射到分束器两边，它们将成对被反射或透射，不会一个光子透射，另一个光子反射(图2)。这个干涉仪可以用来验证Bell不等式[2]，进行Bell基测量[3]，以及进行量子门操作，是线性光学量子计算的核心[4]。2012年黄运锋等人率先制备了八光子GHZ态[5]，刷新了多光子纠缠制备与操控数目的世界纪录。利用八光子纠缠完成的八方通信复杂度实验，结果表明共享八光子纠缠能使成功的几率超过经典极限。

光的量子理论预言了激光的产生。自1960年Maiman发明了世界上第一台红宝石激光器以来，激光技术已经深刻改变了人类科技的面貌。但激光本身是经典光场。激光束是许许多多光子构成的，其量子特性很不显著。那么，光子的量子特性能否直接开发为可实用的技术？答案是肯定的。近30年已开拓出新型的量子信息技术，包括量子密码、量子网络、量子模拟、量子计量和量子计算等。

3 光子的魅力

3.1 量子密码

量子密码为信息安全带来了新的挑战和机遇。一方面，量子计算具有经典计算机无法企及的并行计算能力，对现有密码体系产生了严重的威胁；另一方面，量子密码技术为信息安全提供了全新的技术手段。不同于经典密码体系大多基于计算复杂度算法保证系统的安全性，量子密码的安全性由量子力学的物理原理保障。用量子密码实现量子密钥的安全分发，加以一次一密的加密方案，可以实现无条件安全的保密通信。

中国科学院量子信息重点实验室在国内率先研制在商用光纤上运行的量子密码系统，2004年实现了北京到天津125 km商用光纤的量子密码实验(图3)[6]，是国际上第一个城际量子密码实验，量

子线路的长度创下了当时的世界纪录。2007年在北京网通商用光纤中，成功实现了国际上第一个全时全通型量子密码网络[7]，也是国际上第二个现场实验网络。在该网络中，首次在实际线路中使用了“诱骗态”技术保证安全性。量子线路最长距离42 km。2009年在安徽芜湖实现了首个“量子政务网”[8]，连接科技局、招商局等5个政务机关，共包含7个节点，在量子密码的实用化道路上建立了第一个里程碑。2012年他们又实现了合肥—芜湖广域量子密码网络[9]，干线光纤超过150 km，总光线长度超过200 km，包含12个节点。是现有公开报道中规模最大、距离最长、稳定运行时间最长的实用化现场部署量子密码通信网络。

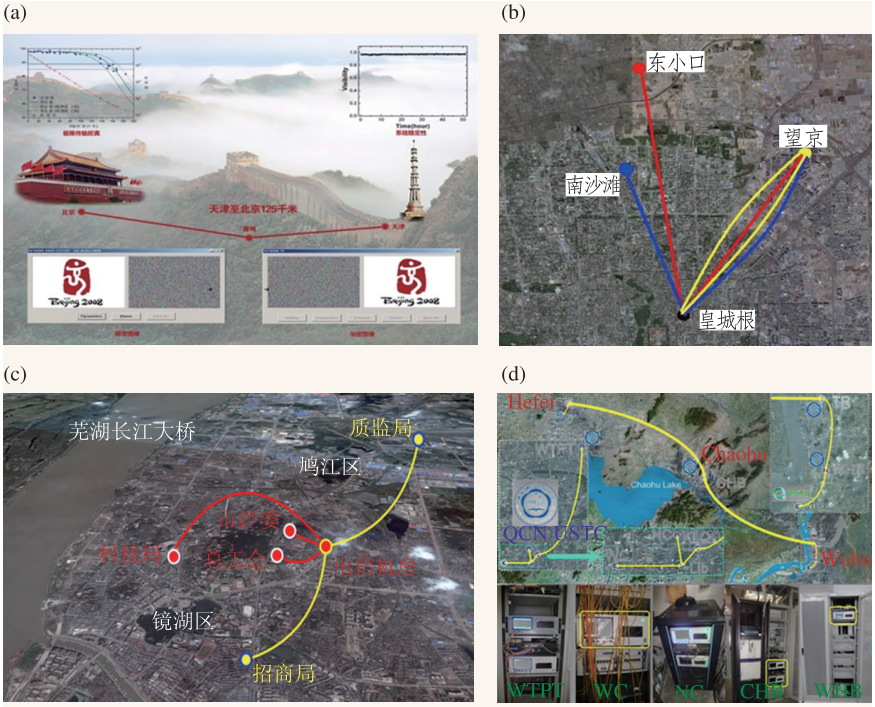

图3 (a) 北京到天津125 km商用光纤的量子密码实验；(b) 北京四用户商用光纤量子密码网络；(c) 芜湖 “量子政务网”；(d) 合肥—芜湖广域量子密码网络

3.2 量子纠缠网络

量子纠缠网络由量子节点和量子信道构成。量子节点分为存储节点和操作节点，分别完成量子信息的存储和操作，各量子节点之间通过量子通道共享多光子纠缠。量子纠缠网络可以实现分布式量子计算，集量子信息的传输和处理于一体，是未来的量子互联网，量子特性可确保其信息的安全。

通过量子中继把局域的量子纠缠网络连结起来(图4)，可扩展量子网络的规模，如若能将远距离的量子网络进一步经由量子中继连结，最终可实现“量子”云计算。

量子中继是远程量子传输的关键，实用化量子中继的核心是纠缠光子在物质系统中的量子存储。目前研制实用化量子中继的主要困难是，存储器的存储寿命和实际可达到的通信速率。当前基于固态晶体、冷原子系统等的量子存储器已经取得重要进展，但远未达到可实用的指标。

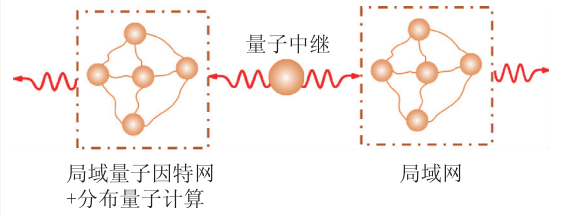

图4 远程量子网络

2012年李传锋等人首次实现了单光子偏振态的固态量子存储器[10]，保真度达到了99.9%，刷新了世界纪录。

Heinze等人于2013年实现了在稀土掺杂晶体中对经典光长达一分钟的存储[11]，有望达到可实用的分钟量级。在比特率提升方面有两种手段，一为高维编码[12, 13]，二为采用多模式的量子存储或者空间复用的量子存储器[14, 15]。

2013年史保森等人首次成功地实现了携带轨道角动量、具有空间结构的单光子脉冲的存储与释放，证明了高维量子态的存储是完全可行的[16]。他们通过两个磁光阱制备了两个冷原子团，利用其中一个冷原子团通过非线性过程制备标记

单光子，并通过螺旋相位片使该光子携带一定的轨道角动量，具有特殊的空间结构。然后利用电磁诱导透明效应将其存储于另一个作为存储介质的冷原子团中。实验结果清楚地证明了单光子携带的轨道角动量可以高保真地被存储(图5)。同时他们借助于精心设计的Sagnac干涉仪，通过量子层析技术和干涉技术成功地证明了单光子轨道角动量的叠加性也可以在存储过程中很好地保持。而态的叠加特性是量子信息之所以不同于经典信息的根本之处。

该研究成果引起人们的广泛关注：美国麻省理工学院(MIT)的Technology Review网站以“第一个存储单光子形状的量子存储器在中国揭开面纱——世界上第一个可以存储单光子空间结构的量子存储器在中国诞生”为题进行了积极评价，随后多家网站进行了转载和评述。

3.3 量子模拟

量子模拟是指利用一个人工构建的量子多体系统实验平台来模拟当前实验条件下无法操控的更为复杂的物理系统，以期获得这个未知系统的定性或者定量性质。1982年费曼提出这一物理思想[17]，在量子系统的相干保持实验技术已可实用之后，量子模拟一直是量子信息领域一个非常重要且富有活力的研究方向。它可以用当今的实验手段来求解物理学、化学、生物学中大量经典计算机难以模拟的问题，而且它并不需要去实现普适的量子门或纠错，只需要几个量子比特就可以实现，不像实现量子计算机那样需要成千上万个量子比特。

光子不需要低温的实验条件，不容易与环境作用，易于精确控制，因而使用光子作为量子模拟的体系有着非常突出的优点。

例如，2013年李传锋等人提出了一种新型的麦克斯韦妖式的量子算法冷却(图6)，并在光学系统中利用量子模拟技术实验演示了这种量子冷却方法的工作原理[18]。他们利用偏振依赖的干涉装置搭建成冷却模块，其中入射光子的路径信息作为辅助量子比特，而光子的偏振信息模拟待冷却

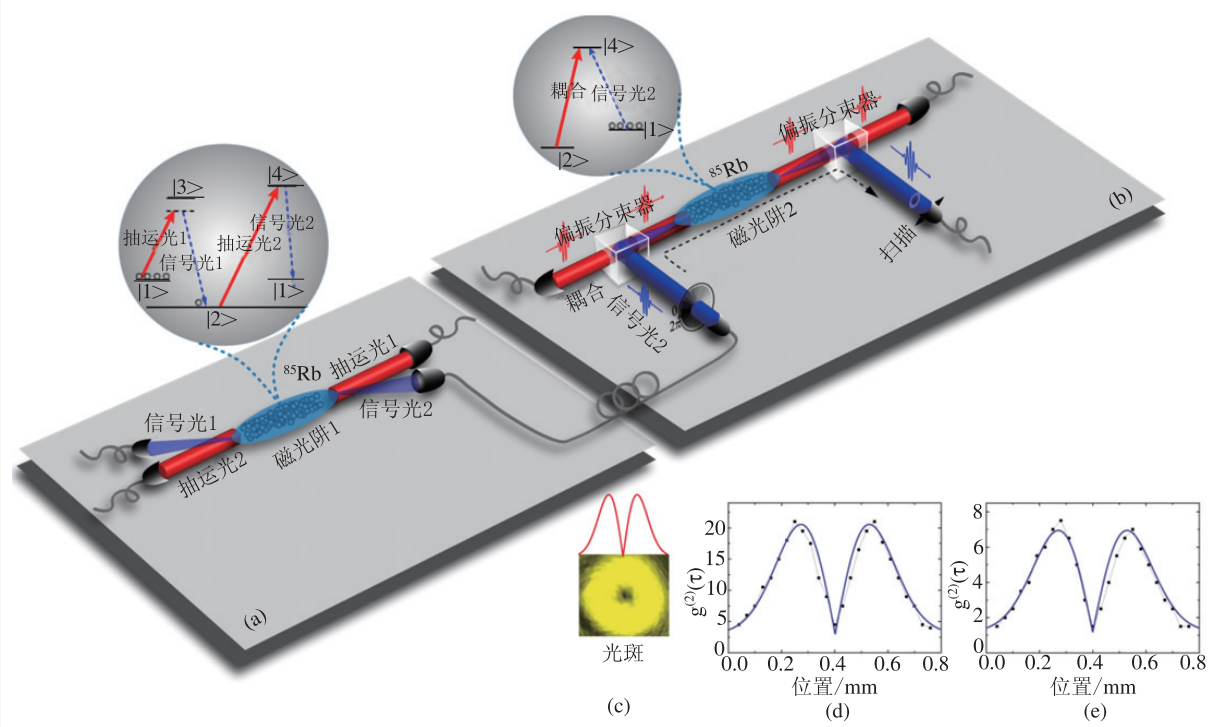

图5 (a)制备标记单光子的实验图；(b)实现单光子存储的实验图；(c)待存储光场的空间结构；(d) 输入的空间波包；(e)存储后读出的单光子波包

系统，最后通过对路径信息的探测后选择即可降低光子偏振态的平均能量。他们还利用光纤将不同的冷却模块连接起来，从而形成了一个光学冷却网络，通过多次调用冷却模块来实现量子系统的逐步冷却。在实验上实现并比较了蒸发冷却和循环冷却两种不同的量子冷却策略，实验结果和理论预言吻合得非常好，保真度达到97.8%以上。

这项工作提供了一种新的途径用以量子模拟经典方法难以实现的物理系统和化学系统的低温性质，并可以为普适量子计算和量子模拟提供初始量子资源。国际知名的量子信息学专家Seth Llyoyd教授还在同一期*Nature Photonics*的News and Views栏目上对这项工作进行了详细介绍[19]。

2014年，李传锋等人研制出由九级干涉装置组成的光学量子模拟器，这是首个真正意义上的光学量子模拟器。此前已有的光学量子模拟实验需要事先知道被模拟系统的量子态，因此实质上是量子态制备过程。他们利用这个光学量子模拟器以极高的精度(总可见度达到 97.5%)首次在纯量子模型中证实，描述相变过程的Kibble—Zurek（KZ）理论的绝热—脉冲假设近似成立[20]。这一成果为进一步验证KZ理论在量子相变中的有效性，以及为进一步研制解决更复杂问题的量子模拟器打下了坚实的基础。Zurek等人在为庆祝Kibble 80岁生日而撰写的关于KZ理论的综述性文章[21]中，专门用一节的篇幅介绍这一工作。

2013年南京大学刘辉等人采用简单而巧妙的旋涂加热工艺，利用微球表面与聚合物薄膜接触的表面张力，在一块微小的光子芯片上，实现了折射率具有类似中心引力场分布的光学微腔[22]。光子在这种微腔中的传播特性可以模拟出光子在天体引力场中传播时因受引力场吸引所产生的弯曲，从而模拟相对论引力透镜效应来捕获光子。实验结果与广义相对论的爱因斯坦方程很好地符合。

2014年，南京大学肖敏等人利用直接耦合的两个光学微腔，通过平衡其中一个光学微腔中的增益与另一个微腔中的损耗，在芯片上实现了光通信波段的宇称—时间对称，并观测到了宇称—时间对称到对称破缺的演化过程，在实验上实现了基于高品质因子有源—无源耦合光学微腔的宇称—时间对称和可调谐光学隔离[23]。这一工作对理解宇称—时间对称量子力学具有重要意义。

图6　通过引入辅助量子比特并对其测量，实现待冷却系统高能量部分和低能量部分的区分，将高能量部分剔除后就可以实现系统的量子冷却。这就像一只量子的麦克斯韦妖可以轻而易举地除去量子态中能量高的部分，因此这种方法被称为麦克斯韦妖式量子算法冷却。在该示意图中，麦克斯韦之妖控制着大门，并使用魔法把激发态量子(长着翅膀的红色小球)驱赶出去，而让基态量子(冷色小球)保留下来

3.4　量子计量

测量是人类观察自然的基本手段，提高测量精度一直是科学研究的主要课题和技术发展的主要追求目标。设想使用无任何经典噪声的任何经典单频激光进行测量，其测量精度受光的“颗粒性”限制，称为“散粒噪声极限(SNL)”，它是经典技术测量的物理极限。量子力学的不确定性给出的测量精度受制于海森伯不确定关系，称为

“海森伯极限”。随着量子力学的发展以及相关量子信息技术的开发和应用，量子测量一方面可以实现超越经典测量极限的高精度测量；另一方面可以实现经典方式无法完成的各种测量。

利用光子的量子特性突破经典理论极限，已经成为量子计量重要的研究方向。2011年，LSC (The LIGO Scientific Collaboration)把光子压缩态用于探测引力波，突破了经典散粒噪声极限[24]。2013年，孙方稳等人利用量子统计测量实现了超越经典瑞利散射极限的光学分辨[25]。他们在自己制备的金刚石氮—空穴(NV)色心样品上，非常巧妙地利用简单的光学收集装置，通过探测单光子以及双光子的光子数，基于单光子的量子反聚束效应成功实现了两个相距8.5 nm的氮—空穴色心独立成像和分辨，同时测量了每个色心的轴向。实验中的测量精度达2.4 nm，通过增加收集光子数，可以把精度提高到1 nm以内。实验测量中所需的光路简单，测量系统稳定，不受量子消相干的影响。

另一方面，量子态检测也可以用来测量相关的经典物理量。通过检测外部环境如电磁场、温度、压力等的变化对量子态演化造成的影响，可以在量子态检测之后得到这些经典物理量的高精度量度。Kuscko等人在2013年利用单个金刚石NV色心实现了单个细胞温度的测量[26]，灵敏度达到了1 mK/$\sqrt{\text{Hz}}$，位置精度达到了100 nm。Wolfgramm等人于2012年利用纠缠双光子对实现了脆弱系统——Rb原子蒸汽的磁场测量[27]，得到了低于散粒噪声极限30%的结果。这种利用量子态测量相关物理量的方法在量子光学相干层析、量子定时定位、量子生物检测等方面有着广泛的应用。

3.5 光子的量子计算

量子计算一直是量子信息技术的主流方向。实现量子计算，多个比特之间的可控操作是必须的。然而光子之间的相互作用却非常微弱，并不易于实现可扩展的量子计算。Knill等人于2001年提出了一个有效的线性光学量子计算方案，利用单光子源、线性光学元件和测量过程实现普适的量子计算[28]。同年，Raussendorf和Briegel提出了另一种量子计算模型——簇态量子计算[29]。这种单向量子计算机(One-Way Quantum Computer)的新方案基于簇态这种特定的纠缠态，计算过程只需要进行单粒子测量，不需要各量子比特相互作用，提供了光子量子计算的全新思路。这样，制备多比特的簇态就成为最关键的步骤。2005年，段路明等人提出了利用概率门有效制备二维簇态的方案[30]。同年，Walther等人利用四光子纠缠态实验演示了单向 Grover搜索算法[31]。2009年，潘建伟等人成功制备了6光子簇态[32]，Briegel等人实现了拓扑容错的3维单向量子计算[33]。2012年，潘建伟等人又成功制备了8光子簇态，并用此簇态演示了拓扑量子纠错，证明容错量子计算的可行性[34]。

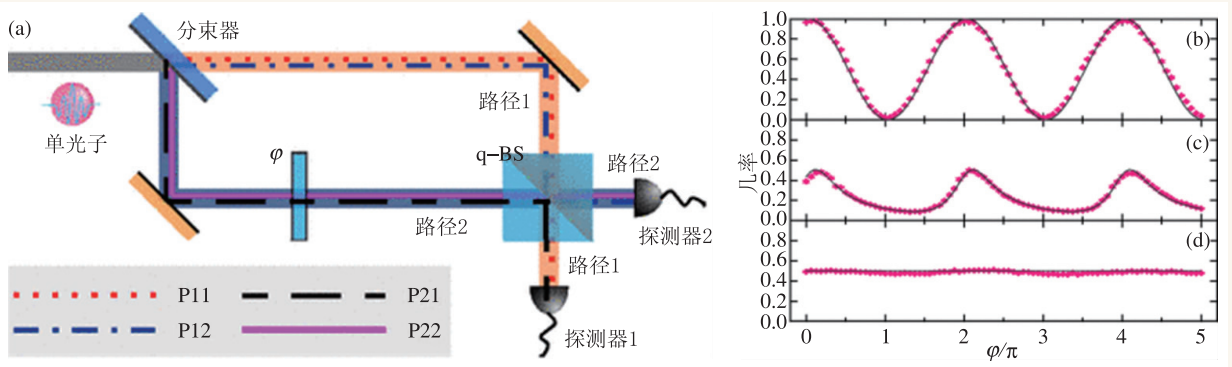

图7 (a) 使用了量子分束器(q–BS)的马赫—曾德尔干涉仪；(b)，(c)，(d)分别为不同情况下路径2探测到光子的概率。具体内容参见文献[37]

4 光子是什么

1951年，爱因斯坦在给一位老朋友的信中写道："光的本性之思考已在我心中萦绕了50年，然而并没有使我接近答案半步，现在，似乎每个人都认为他们能回答光是什么，然而他们错了。"[35]

曾被奉为圭臬的量子力学正统解释——哥本哈根诠释有三个支点，分别是互补原理、概率波和波包塌缩理论。互补原理认为波动性和粒子性这两种属性即对立又互补，一个实验中具体展示哪种属性取决于实验装置，不会同时观测到光子的波动性和粒子性。互补原理是哥本哈根学派的核心思想。

有一种隐变量理论认为，光子有自由意志，实验观察结果可展现其粒子性或波动性。为了检验这种隐变量理论和量子力学谁是谁非，玻尔的学生惠勒于1978年提出了著名的延迟选择实验。

在经典的惠勒延迟选择实验中，光的波动性和粒子性不能够同时展现出来。2012年，李传锋等人设计出一种量子实验装置，巧妙地利用光子的偏振比特作为辅助，使测量装置处于量子叠加态，能同时探测光子的波动性与粒子性，从而实现了量子的惠勒延迟选择实验[36]。该实验排除了光子有自由意志的假设，并首次观测到波与粒子的叠加状态，处于这种叠加态的光子，既不像粒子态那样没有干涉条纹，也不像波动态那样表现出正弦形干涉条纹，而是呈现出锯齿形条纹这样一种"非波非粒，亦波亦粒"的表现形式(图7)。

英国著名量子物理学家阿迪索教授认为，"该实验挑战了互补原理设定的传统界限，在一个实验装置中展示了光子可以在波动和粒子两种行为之间相干地振荡"。*Nature Physics* 也在"研究高亮"栏目报道了该成果，称它"重新定义了波粒二象性的概念"。

光子究竟是什么？时至今日仍然是个谜！或许波动性和粒子性仅适用于经典世界，量子世界并不存在，如同"轨道"在量子力学中一开始就被抛弃那样。或许"光子"诞生后的第二个百年中人类可以找到正确答案。当下，量子力学的第二次革命已经来临，量子战鼓已敲响！[38]

参考文献

[1] Hong C, Ou Z Y, Mandel L. Phys. Rev. Lett., 1987, 59: 2044

[2] Ou Z Y, Mandel L. Phys. Rev. Lett., 1988, 61: 50

[3] Braunstein S, Mann A. Phys. Rev. A, 1995, 51: R1727

[4] Knill E, Laflamme R, Milburn G J. Nature, 2001, 409: 46

[5] Huang Y F, Liu B H, Peng L *et al*. Nature Communications, 2012, 2: 546

[6] Mo X F, Zhu B, Han Z F *et al*. Optics Letters, 2005, 30 (19): 2632

[7] Chen W, Han Z F, Zhang T *et al*. IEEE Photonic Technol. Lett., 2009, 21(9): 575

[8] Wang S, Chen W, Yin Z Q *et al*. Optics Letters, 2010, 35(14): 2454

[9] Wang S, Chen W, Yin Z Q *et al*. Optics Express, 2014, 22(18): 21739

[10] Zhou Z Q, Lin W B, Yang M *et al*. Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 190505

[11] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T. Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 033601

[12] Groelacher S, Jennewein T, Vaziri A *et al*. New J. of Phys., 2006, 8: 75

[13] Barreiro J T, Wei T, Kwiat P G. Nature Physics, 2008, 4: 282

[14] Simon C, Riedmatten H, Afzelius M *et al*. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 190503

[15] Collins O A, Jenkins S D, Kuzmich A *et al*. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 060502

[16] Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S *et al*. Nature Communications, 2013, 4: 2527

[17] Feynman R P. International Journal of Theoretical Physics, 1982, 21: 467

[18] Xu J S, Yung M H, Xu X Y *et al*. Nature Photonics, 2014, 8: 113

[19] Lloyd S. Nature Photonics, 2014, 8: 90

[20] Xu X Y, Han Y J, Sun K *et al*. Phys. Rev. Lett., 2014, 122: 035701

[21] Campo A, Zurek W H. arXiv: 1310.1600 (2014)

[22] Sheng C, Liu H, Wang Y *et al*. Nature Photonics, 2013, 7: 902

[23] Chang L, Jiang X, Hua S *et al*. Nature Photonics, 2014, 8: 524

[24] The LIGO Scientific Collaboration. Nature Phys., 2011, 7: 962

[25] Cui J M, Sun F W, Chen X D *et al*. Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 153901

[26] Kucsko G, Maurer P C, Yao N Y *et al*. Nature, 2013, 500: 54

[27] Wolfgramm F, Vitelli C, Bedunini F A *et al*. Nature Photonics,

2013,7:28
[28] Knill E,Laflamme R,Milburn G J. Nature,2001,409:46
[29] Raussendorf R,Briegel H J. Phys. Rev. Lett.,2001,86:5188
[30] Duan L M,Raussendorf R. Phys. Rev. Lett.,2005,95:080503
[31] Walther P,Resch K J,Rudolph T *et al*. Nature,2005,434:169
[32] Lu C Y,Gao W B,Gühne O *et al*. Phys. Rev. Lett.,2009,102:030502
[33] Briegel H J,Browne D E,Dür W *et al*.Nature Physics,2009,5:19
[34] Yao X C,Wang T X,Chen H Z *et al*. Nature,2012,482:489
[35] Moring G. The Complete Idiot's Guide to Understanding Einstein.US:Alpha,2004.152
[36] Tang J S,Li Y L,Xu X Y *et al*. Nature Photonics,2012,6:600
[37] Tang J S,Li Y L,Li C F *et al*. Phys. Rev. A,2013,88:014103
[38] Nature News,2014,510:312

LHCb实验观测到五夸克态

北京时间2015年7月14日，欧洲核子研究中心(European Organization of Nuclear Research)大型强子对撞机(Large Hadron Collider)上的LHCb实验组宣布在实验中观测到了由五夸克组成的重子态，欧洲核子研究中心专门对此进行了新闻发布(http://press.web.cern.ch/)。这项研究由中国清华大学的研究人员以及LHCb国际合作组成员共同完成。LHCb国际合作组已将论文(Observation of J/ψp resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \to J/\psi K^- p$ decays. arXiv：1507.03414v1)提交《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)，网站报道见http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/。

在Λ_b^0重子衰变到$J/\psi K^- p$过程中，研究人员发现J/φp不变质量谱中存在明显的增强结构。进一步的分析表明，需要两个共振态才能很好地描述这个增强结构的效应，分别命名为$P_c^+(4450)$和$P_c^+(4380)$。由于这两个共振态通过强作用衰变到J/φp，所以它们至少由5个夸克组成。论文还报道了关于这两个共振态的质量、衰变宽度和自旋宇称量子数的实验分析结果。

1964年美国物理学家盖尔曼(Murray Gell–Mann)提出“夸克模型”，认为质子和中子不是基本粒子，而是由3个夸克组成的，这类粒子统称为重子，另外一类被称为介子的粒子则是由一对正反夸克组成的。“夸克模型”的建立使人类对物质结构的认识达到了全新的高度，盖尔曼因此于1969年获得了诺贝尔物理学奖。除了已知类型的重子和介子，盖尔曼在论文中还提到了可能存在奇特类型的粒子，如在介子或重子中加入一对正反夸克形成四夸克介子或五夸克重子。

LHCb的实验发现首次确认了五夸克态的存在。而之前关于四夸克态的研究也已经有很多重要进展，Belle实验发现的Z(4430)粒子(后来得到了LHCb实验的证实)、$Z_b(10610)$和$Z_b(10650)$等粒子均被认为是四夸克态的可能候选者，2013年北京谱仪（BESIII）实验上发现$Z_c(3900)$和$Z_c(4020)$等粒子则确认了四夸克态的存在。这些被称为奇特粒子的发现极大地扩展了人类对物质结构的认识。

对于5个夸克如何构成奇特重子这个非常令人感兴趣的问题，“一种观点认为5个夸克构成紧密的统一体，另一种观点则认为这是由一个重子和一个介子相互作用构成的类似于分子的结构，”清华大学副教授、“青年千人计划”入选者张黎明指出：“目前还无法确定哪种观点正确，我们正在进行更深入的实验研究。”

LHCb是欧洲核子研究中心大型强子对撞机上的粒子物理实验装置之一，合作组由来自16个国家68个单位的1133名成员组成。在2011—2012年间，LHCb实验获取了大量质子对撞数据，基于这些数据已经发表了260多篇学术论文。“这是LHCb实验在强子谱研究上最激动人心的结果，”清华大学副教授杨振伟表示。他目前是LHCb实验“底强子与夸克偶素(B–hadron and Quarkonia)”物理工作组的召集人，这项研究就是在该工作组完成的。

2000年，LHCb国际合作接受清华大学为正式成员，目前中国组由清华大学、华中师范大学和中国科学院大学的研究人员组成，近年来研究成绩突出，在LHCb实验的8个物理课题工作组中，中国组成员担任了两个工作组的召集人。“通过参加大型国际合作，我们可以在国际最高水平的科学装置上从事前沿课题研究。”LHCb中国组负责人、清华大学高原宁教授高度评价国际合作对学科建设和人才培养的重要性：“在国际合作组中，国际上最高水平的专家和学生一起工作，共同探索物质的基本结构和相互作用，不断促进人类对自然界本质的认识。”

（清华大学　高原宁　供稿）