

## 面向空间平台的小型化量子纠缠源

周晓妍<sup>1,2</sup>, 李波<sup>1,2</sup>, 李宇怀<sup>1,2</sup>, 曹原<sup>1,2</sup>, 印娟<sup>1,2\*</sup>, 彭承志<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;<sup>2</sup>中国科学院量子信息与量子科技创新研究院, 上海 201315

**摘要** 随着量子信息科学的迅速发展,以光子为物理载体的量子纠缠源已成为量子非定域性检验、量子通信、量子计算以及量子精密测量等领域必不可少的资源和重要技术手段。利用非线性介质中的自发参量下转换过程,从早期的 $\beta$ 相偏硼酸钡晶体到后来的基于准相位匹配的周期性极化晶体等,双光子极化纠缠源凭借其在亮度和品质方面的优势得到了快速发展,这为基于卫星平台的广域量子通信和量子物理的基础检验提供了可能。从基本原理出发,系统介绍了近年来面向空间平台应用的量子纠缠源的发展和最新成果,特别是以“墨子号”量子科学实验卫星为代表的星载量子纠缠源载荷;此外,对国际上近几年关于星载量子纠缠源的进展以及未来发展趋势也进行了较为全面的介绍和分析。

**关键词** 量子光学; 量子通信; 量子纠缠; 量子密钥分发; 量子纠缠分发; 量子隐形传态

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0327008

## Compact Quantum Entangled-Photon Source for Space Platform

Zhou Xiaoyan<sup>1,2</sup>, Li Bo<sup>1,2</sup>, Li Yuhuai<sup>1,2</sup>, Cao Yuan<sup>1,2</sup>, Yin Juan<sup>1,2\*</sup>, Peng Chengzhi<sup>1,2</sup><sup>1</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;<sup>2</sup>CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, Shanghai 201315, China

**Abstract** With the rapid development of quantum information science, quantum entangled-photon source has become an important resource for quantum nonlocality test, quantum communication, quantum computing, and quantum metrology. Using spontaneous parametric down-conversion process in a nonlinear medium, polarized two-photon entanglement sources have been rapidly developed in terms of brightness and quality. From the early bulk crystal of  $\beta$ -barium borate to the later periodically poled crystal based on quasi-phase-matching, the brightness of the entanglement source has been increased, providing the possibility of large-scale quantum communication and fundamental test of quantum physics with satellites. Here we systematically introduce the development and latest achievements of quantum entangled-photon sources for space platform application in recent years, especially the spaceborne entangled-photon source represented by the Micius quantum science satellite. In addition, the international progress and future trend of satellite-based quantum entanglement source in recent years are also introduced and analyzed.

**Key words** quantum optics; quantum communication; quantum entanglement; quantum key distribution; quantum entanglement distribution; quantum teleportation

## 1 引言

量子力学诞生之初, Einstein 等<sup>[1]</sup>提出了 EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 佯谬, 试图用量子纠缠

这种遥远地点之间的诡异互动特性来揭示量子力学与局域实在论之间存在矛盾, 从而得出量子力学是不完备的。1950 年, Wu 等<sup>[2]</sup>首次在正负电子湮灭辐射中发现量子纠缠。1964 年, Bell<sup>[3]</sup>提出了一种

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-11-19; 录用日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11822409, U1738201)、安徽省自然科学基金(1808085J18)

通信作者: \*yinjuan@ustc.edu.cn

可以区分量子力学与局域实在论孰对孰错的测试方法,即贝尔不等式。从 20 世纪 70 年代起, Freedman 等<sup>[4-6]</sup>在实验上进行了贝尔不等式检验,结果与量子论的预言完全符合。随后的几十年,大量的实验都证实了量子力学关于贝尔不等式的预言,但这些实验都或多或少地存在一些漏洞。随着实验技术的进步,这些漏洞可以分别在各自实验中关闭,如定域性漏洞<sup>[7-9]</sup>、公平采样漏洞<sup>[10-12]</sup>和自由选择漏洞等<sup>[13-15]</sup>。近年来,科学家们尝试同时关闭定域性漏洞和公平采样漏洞<sup>[16-19]</sup>,甚至使用人的自由意志选择测量事件<sup>[20-21]</sup>等方法来解决问题。虽然人们依然无法对这一争论进行最终判定,但在此过程中所发展的量子相干操纵技术不断得到突破和应用。其中,量子纠缠在量子密钥分发<sup>[22-29]</sup>、量子隐形传态<sup>[30-36]</sup>以及多粒子纠缠<sup>[37-42]</sup>等实验中发挥着至关重要的作用,也广泛应用于量子光刻、量子照明、量子成像和量子精密测量领域<sup>[43-46]</sup>,成为量子计算和量子信息处理中的核心资源。

作为量子信息领域最先走向实用化和产业化的量子信息技术,量子密钥分发技术利用量子态来加载信息,通过一定的协议使在遥远地点的通信双方共享密钥。量子力学的基本原理保证了密钥不可被窃听,从而可在原理上实现无条件安全的量子保密通信。量子通信通常采用单光子作为物理载体,最为直接的方式是通过光纤或者近地面自由空间信道来传输,但是这两种信道的损耗都随着距离的增加而呈指数增加。单光子量子信息因基于量子不可克隆原理,所以其不能像经典通信那样被放大,这使得之前量子通信的世界纪录为 100 km 量级。通过光纤实现城域量子通信、通过中继实现城际量子通信和通过卫星中转实现超远距离量子通信是国际上公认的构建广域量子通信网络的路线,自 21 世纪初已成为了国际学术界激烈角逐的焦点。近年来,新提出的量子密钥分发协议,如测量设备无关量子密钥分发协议<sup>[47-48]</sup>和双场量子密钥分发协议<sup>[49]</sup>已经将光纤量子密钥分发的距离提升至 500 km 水平<sup>[50-51]</sup>;利用“墨子号”量子科学实验卫星实现了 1000 km 级基于纠缠的无中继量子密钥分发<sup>[28]</sup>,将以往地面无中继量子密钥分发的空间距离提高一个数量级;联合“墨子号”量子卫星和“京沪干线”光纤量子通信网实现了跨越 4600 km 的天地一体化量子通信网络<sup>[52]</sup>。

综上,如何实现安全、长距离以及可实用化的量子通信是该领域的最大挑战,同时实现更远距离的

纠缠分发可以在更大空间尺度上检验量子力学非定域性,以及探索量子力学与广义相对论相融合等基本物理问题。更远距离的量子通信意味着要容忍更高的信道损耗<sup>[53]</sup>,发展高亮度和高品质的面向空间平台的集成化量子纠缠源具有非常重要的意义。

量子纠缠源较为成熟的技术是利用非线性晶体的自发参量下转换来产生纠缠光子对。在某些非中心对称的晶体中,一个高能量的光子可以通过二阶非线性效应自发地转换为两个能量较低的光子,这个过程需要满足能量守恒与相位匹配条件。自 1995 年美国的 Kwiat 等<sup>[54]</sup>利用 II 型  $\beta$  相偏硼酸钡 (BBO) 晶体产生极化纠缠的双光子纠缠态后,双光子纠缠源在亮度和品质方面均得到了迅猛发展<sup>[55-56]</sup>。到 2004 年,利用周期极化磷酸氧钛钾 (PPKTP) 晶体成功使纠缠源的亮度有了大幅度的飞跃<sup>[57-58]</sup>。2007 年, Fedrizzi 等<sup>[59]</sup>将该非线性晶体与 Sagnac 干涉环结合,实现了纠缠源的亮度为  $8.2 \times 10^4$  pair/(s · mW)。中国科学技术大学的研究团队基于 II 型 PPKTP 晶体和 Sagnac 环设计并研制了国际上首个星载量子纠缠源,建立了一套高精度的光机集成系统并进行了一系列空间环境模拟试验,于 2016 年 8 月随“墨子号”量子科学实验卫星成功入轨,源的亮度达到 5.9 MHz,基于该星载量子纠缠源完成了多个星地量子科学实验<sup>[15,25,28]</sup>。随后,该团队又发展了基于 0 型 PPKTP 晶体的量子纠缠源,将源的亮度进一步提升至 1 GHz 量级<sup>[21]</sup>,如图 1 所示,其中 MZ 为 Mach-Zehnder 干涉仪。

目前,面向空间平台的小型化量子纠缠源的研究已成为量子信息技术研究领域的热点之一,故有必要对目前国内外该方向的发展现状进行梳理,并对未来的发展趋势进行展望。本文从自发参量下转换的基本原理出发,重点介绍以“墨子号”量子科学实验卫星为代表的星载量子纠缠源的研制历程及其

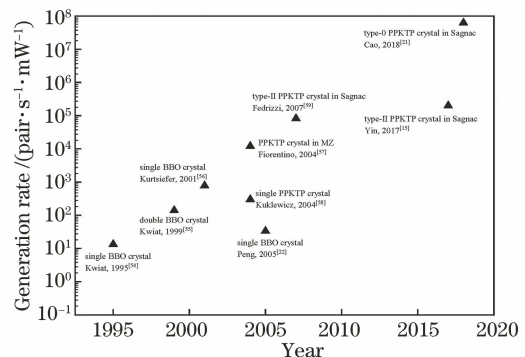


图 1 纠缠源的发展历程

Fig. 1 Development history of entangled-photon source

在轨运行性能,并对国际上相关量子卫星计划中星  
载量子纠缠源的进展和最新成果进行介绍,如表 1

所示。最后,对该领域未来发展的新技术和新方向  
进行展望。

表 1 已发射和计划中的量子纠缠源载荷的对比

Table 1 Comparison of launched and planned quantum entangled-photon source payloads

Satellite or space platform on board	Nation	Launch time	Type	Generation rate / (pair · s <sup>-1</sup> · mW <sup>-1</sup> )
Quantum science satellite Micius	China	2016.08	Type-II PPKTP crystal in Sagnac	~10 <sup>6</sup>
SpooQy-1	Singapore	2019.04	Double Type-I BBO crystal	~10 <sup>4</sup>
International space station	America	Planning	PPLN crystal in Sagnac	~10 <sup>6</sup>
Space-EPS (entangled-photon source)	Germany and Austria	Planning	Type-II PPKTP crystal in Sagnac	~10 <sup>6</sup>
Medium-to-high orbit quantum science satellite	China	Planning	Type-0 PPKTP crystal in Sagnac	~10 <sup>8</sup>

## 2 基本原理

### 2.1 自发参量下转换过程的原理

在光学系统中,构造纠缠光子对最常用的方法是利用非线性光学的自发参量下转换(SPDC)。在非线性光学中,光电场  $E$  与其在介质中所引起的电极化张量  $P$  的关系为

$$P = \epsilon_0 [\chi^{(1)} E_1 + \chi^{(2)} E_1 E_2 + \chi^{(3)} E_1 E_2 E_3 + \dots], \quad (1)$$

式中: $\epsilon_0$  为真空介电常数; $\chi^{(1)}$  为线性磁化率; $\chi^{(2)}$  和  $\chi^{(3)}$  为介质的二阶和三阶非线性磁化率; $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  分别为参与作用的三个光电场强度。 $\chi^{(2)}$  使三个电磁场在非中心对称的晶体中相互作用,导致场之间的能量发生转移,一个高能量的光子可以通过二阶非线性效应自发地转换为两个能量较低的光子,即一个频率为  $\omega_p$  的泵浦光子可以产生频率为  $\omega_s$  的信号光子和频率  $\omega_i$  的闲频光子,如图 2 所示<sup>[60]</sup>。

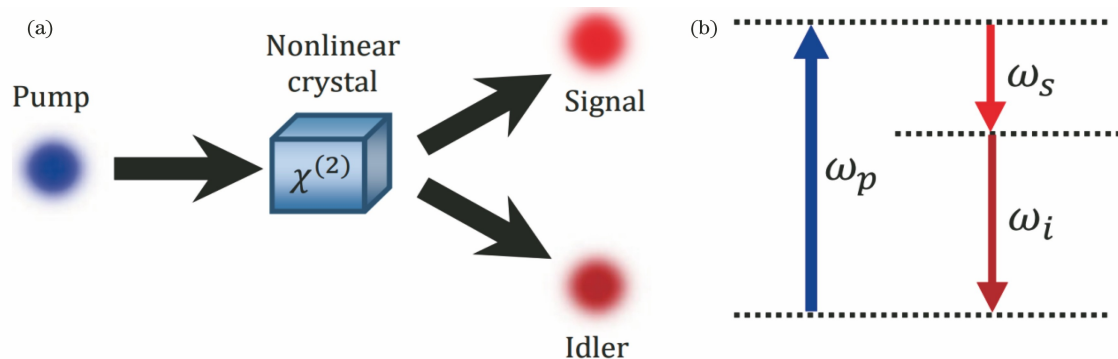


图 2 一个高能量的光子转换为两个能量较低的光子的过程和能级示意图<sup>[60]</sup>。(a)泵浦二阶非线性晶体发生 SPDC 后产生光子对的过程;(b)等效能级跃迁示意图

Fig. 2 Schematic of process and energy levels of converting high energy photon into two low energy photons<sup>[60]</sup>. (a) Process of generating photon pairs after SPDC in pumped second-order nonlinear crystal; (b) schematic of equivalent energy level transition

### 2.2 相位匹配与准相位匹配

当波长较短的泵浦光子在介质中传播时,其有一定的概率产生波长较长的参量光子。假设泵浦光  $p$ 、信号光  $s$  和闲频光  $i$  的频率和波矢大小分别为  $\omega_j$  和  $k_j$ ,其中  $j = \{p, s, i\}$ 。参量过程中,介质的状态不发生变化,因此泵浦光子和参量光子需要满足能量守恒和动量守恒,即

$$\begin{cases} \hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i \\ \hbar k_p = \hbar k_s + \hbar k_i \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\hbar$  为约化普朗克常数。

在双折射晶体中,上述相位匹配条件可以通过调整光束的传播方向和偏振方向来构造<sup>[61-62]</sup>。如图 3 所示,BBO 晶体可以产生两个参量光子偏振方向正交的 II 型 SPDC。两个锥面的交线 A 和 B 上

的光子既可能来自上面的光锥,也可能来自下面的光锥;由动量守恒可知,当某一个参量光子出现在 A 时,同一对参量光子中的另一个一定出现在 B。于是,当只收集 A 和 B 上的光子时,这个双光子态为

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|H\rangle_A |V\rangle_B + \exp(i\varphi) |V\rangle_A |H\rangle_B], \quad (3)$$

式中:|H⟩和|V⟩分别为水平和垂直方向的偏振。适当调节相位,就可以构造出最大纠缠态|ψ±⟩。

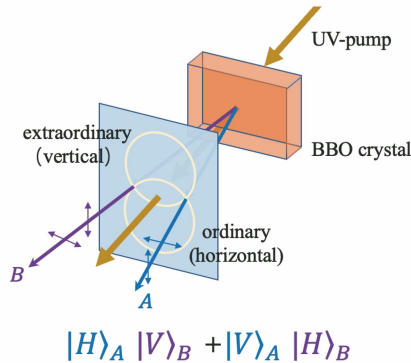


图 3 BBO 晶体上的 II 型 SPDC,产生偏振方向互相正交的两个参量光子

Fig. 3 Type-II SPDC on BBO crystal, generation of two parametric photons with orthogonal polarization

基于 BBO 晶体 II 型参量下转换的结构简单,在合适的泵浦光条件下产生的参量光接近变换极限,非常适合扩展到多光子纠缠源。但是这个方案的缺陷也很明显,即 BBO 晶体的轴向与光传输方向之间一般会有不小的夹角,存在走离效应。晶体越厚,走离效应越显著,这提升了光纤耦合的难度;晶体越薄,纠缠对的产率越低。因此,耦合效率与产率的权衡是一个较大的问题。并且,非共线的参量光模式使得大部分参量光无法被耦合。另一方面,参

量下转换的相位匹配条件需要通过晶体切割角度来控制,不能灵活调整。

为了解决上述问题,科研人员提出了准相位匹配(QPM)技术<sup>[63]</sup>,该技术使得非线性晶体突破了长度的限制,参量下的转换效率大大提高。

QPM 的基本原理如图 4 所示,其中  $P_s$  为极化方向,  $l_c$  为相干长度。图 4(a)中曲线 A 表示相位匹配的情况,此时随着作用距离的增长,信号光的光强不断增加;曲线 C 表示相位不匹配的情况,此时随着作用距离的增长,信号光的光强呈周期性振荡,甚至在晶体长度满足某种关系时信号光可能会完全消失;曲线  $B_1$  是 QPM 的结果,其使得信号光的光强持续增长,但是事实上并未实现完美的相位匹配,因此称为 QPM。QPM 技术是周期性地改变非线性晶体的极化方向,极化周期等于两个相干长度,这样在第一个相干长度中与曲线  $B_1$  一样使信号光的光强增加,就在即将进入后半周期,即在信号光的光强即将要下降时,晶体的极化方向发生改变,这样光再进行半个周期或者一个相干长度的增长。待到作用距离达到,极化方向再次发生改变,也就是说通过周期性地改变极化方向可以使参量光的光强永远只能实现半个周期的增长。在实际的工艺中并不是每半个周期就反转一次极化方向,而是在多个相干长度中变化极化方向,此时更贴近于图 4(b)的情况。虽然不如图 4(a)曲线  $B_1$  的增长幅度大,但总的趋势依然是随着作用距离的增长,信号光的强度逐渐增强。

实际应用中,在非线性晶体的上下两端施加呈周期性变化的强电场,使晶体中发生永久性的极化反转,从而制造出周期极化的非线性晶体。目前,常见的周期极化非线性晶体有周期极化铌酸锂(PPLN)晶体和周期极化磷酸氧钛(PPKTP)晶体

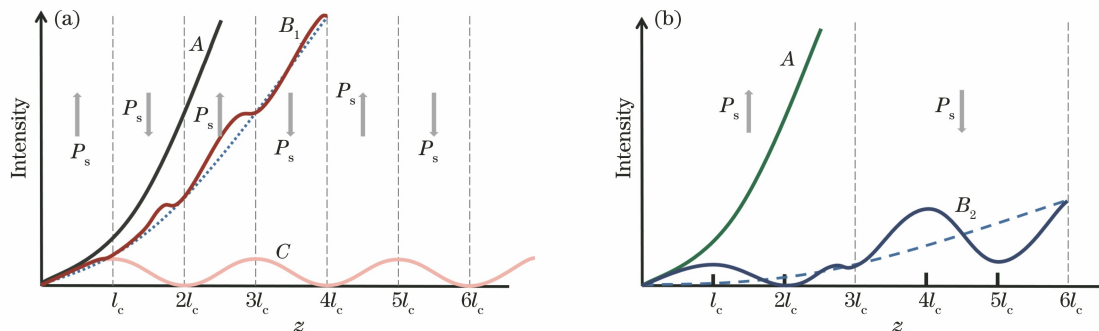


图 4 QPM 的基本原理。(a)利用周期极化实现准相位匹配的原理;(b)现实工艺中的极化反转和准相位匹配

Fig. 4 Fundamentals of QPM. (a) Principle of quasi-phase-matching using periodic polarization; (b) polarization inversion and quasi-phase-matching in real-world processes

等。其中,PPKTP 晶体在近紫外和可见光波段有较广泛的使用。在 QPM 条件下,泵浦光和两个参量光可以共线传播,晶体可以很长,而且在准匹配条件下可以通过极化周期和温度来调节,因此在效率、纠缠对产率和灵活性上都较相位匹配的方式有很大的提升。

相比于 BBO 晶体的纠缠源,基于周期性极化晶体产生纠缠光子的优势主要体现在如下两个方面。1) 纠缠光的产生效率和收集效率的大幅度提高,这降低了对泵浦光功率的需求,使其更符合自由空间量子通信的要求;2) 使用具有路径对称结构的 Sagnac 干涉环,使得纠缠源的相位控制更加具有鲁棒性。

### 3 星载量子纠缠源

#### 3.1 “墨子号”星载纠缠源

“墨子号”量子科学实验卫星是中国科学院空间科学战略性先导科技专项中首批确定的五颗科学实验卫星之一,于 2016 年 8 月在酒泉卫星发射中心成功发射入轨。目前,“墨子号”卫星已实现全部既定科学目标,获得了 1000 km 级的星地双向量子纠缠分发<sup>[15]</sup>、地星量子隐形传态<sup>[36]</sup>、星地高速量子密钥分发<sup>[64]</sup>和洲际量子密钥分发<sup>[65]</sup>等具有国际领先水平的科学成果。最近,研究团队还进一步实现了 1000 km 级基于纠缠的量子密钥分发。该实验成果不仅将以往地面无中继量子保密通信的空间距离提高了一个数量级,并且通过物理原理确保了即使在卫星被他方控制的极端情况下依然能实现安全的量子通信,故取得了量子通信现实应用的重要突破<sup>[28]</sup>。

“墨子号”星载量子纠缠源采用 II 型 PPKTP 晶体,结合 Sagnac 干涉仪可以产生极化纠缠双光子对<sup>[15]</sup>。如图 5 所示,泵浦光由波长为 405 nm 的窄线宽半导体连续激光器发出。如图 5(a) 所示,PPKTP 晶体的长度为 15 mm。一对离轴抛物反射镜将泵浦激光器聚焦在 PPKTP 晶体的中心。在 Sagnac 干涉环的输出端使用两个分色镜(DM)和长通滤波器将信号光子与泵浦光分离。两个可在地面远程控制的压电转向镜(PI)用于微调光束指向,以实现单模光纤的最佳收集效率。如图 5(b) 所示,由两个中心波长为 810 nm 的激光器产生 0°和 45°的偏振光,在分束器(BS)上合束后分成两部分,分别通过棱镜传输至纠缠源主光路并与两路纠缠光子合束。一块 PPKTP 晶体被放在 Sagnac 干涉环的中

间,光子进入 Sagnac 干涉环后使沿顺时针方向和逆时针方向到达 PPKTP 晶体的距离相等。在环的一臂中放置一个 45°的双波长半波片(HWP),可以同时作用于泵浦光子和参量光子。因此,对于一个处于偏振态 $|\psi\rangle_p = \alpha|H\rangle_p + \exp(i\varphi_p)\beta|V\rangle_p$ 的泵浦光子( $\alpha$ 和 $\beta$ 为实数振幅,满足 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ , $\varphi_p$ 为泵浦光的相对相位),其水平偏振分量 $|H\rangle_p$ 经偏振分束器(PBS)透射在 Sagnac 环中并沿顺时针方向传播,经过 PPKTP 晶体发生参量下转换,经过 HWP 后态演化过程为 $|H\rangle_p \rightarrow |H\rangle_{p,c} \rightarrow |H\rangle_{s,c}|V\rangle_{i,c} \rightarrow |V\rangle_{s,c}|H\rangle_{i,c}$ ,其中下标 c 代表顺时针方向;竖直偏振分量 $|V\rangle_p$ 沿逆时针方向传播,先经过 45°的 HWP,再在 PPKTP 晶体上发生参量下转换,态演化过程为 $|V\rangle_p \rightarrow |V\rangle_{p,a} \rightarrow |H\rangle_{p,a} \rightarrow |H\rangle_{s,a}|V\rangle_{i,a}$ ,其中下标 a 代表逆时针方向。两个方向的态最终在 PBS 上叠加干涉,得到的纠缠态为 $\alpha|V\rangle_s|H\rangle_i + \exp[i(\varphi_p + \varphi_s)]\beta|H\rangle_s|V\rangle_i$ ,其中 $\varphi_s$ 为 Sagnac 干涉环等原因所带来的额外相位差。取 $\alpha = \beta$ , $\varphi_p + \varphi_s = 0$ 或 $\pi$ ,即可得到最大纠缠态 $|\psi^\pm\rangle$ 。产生的纠缠光子对从 Sagnac 干涉环的 PBS 分成两路输出,分别耦合至两条单模光纤。纠缠光子对通过光纤传输到卫星上的两个望远镜,两个望远镜负责建立星地链路,将纠缠光子对下传到地球两地。

纠缠源载荷采用光机一体化的设计,光路采用背向双层的布局,纠缠源光路的正面一层产生纠缠光子对,背面一层用波长为 810 nm 的参考光来实现光纤偏振控制和星地链路测试。光学器件分别安装在整块厚度为 40 mm 的钛合金底板两面,钛合金底板在刚性、热膨胀和密度上有着优良特性。为了保障纠缠光子的发射和在轨时的性能,纠缠源中精度需求最高的 Sagnac 结构部分被单独集成到整块厚度为 15 mm 的殷钢上。纠缠源采用凹反镜聚焦的巧妙设计,保证了 Sagnac 环外的光束均为准直光,大大降低了其他光学器件的定位精度需求。压电陶瓷反射镜为了校准光束指向偏移,保障在轨时纠缠光子的耦合效率。为了延长纠缠源的寿命,光路中备份一只泵浦激光器,通过 PBS 和主激光器的合束可以防止激光器失效。Sagnac 干涉仪部分经历了一系列的环境适应性测试,包括热真空和力学振动,这可用来提前释放热力学应力,提高纠缠源的稳定性。纠缠源的光子对利用两根长度为 280 mm 和 410 mm 的单模光纤分别引到两个望远镜系统。对于纠缠光子的传播路径,在光束边缘放置了小的反射镜来截取 1% 的纠缠光和参考光。截取的部分

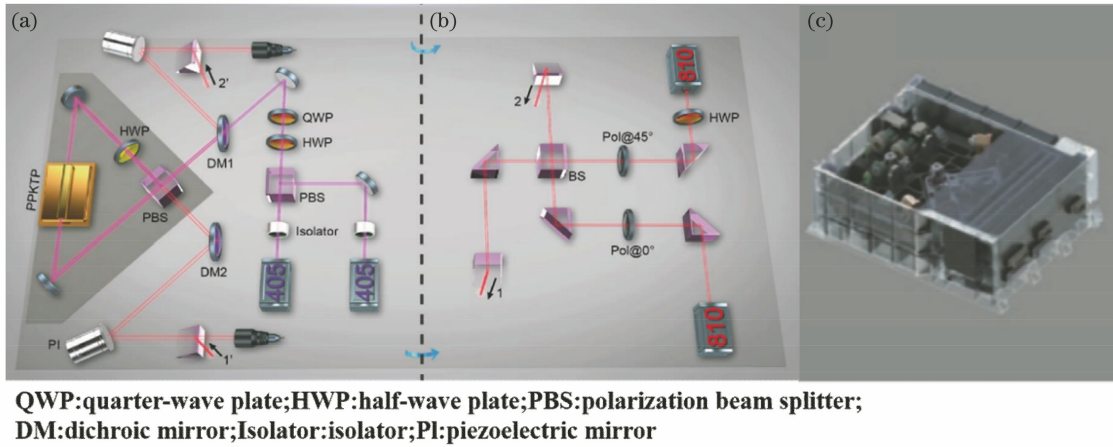


图 5 “墨子号”的星载纠缠源。(a)纠缠源主光路部分<sup>[15]</sup>;(b)纠缠源极化检测光部分<sup>[15]</sup>;  
(c)纠缠源工程样机三维模型图

Fig. 5 Satellite-based entangled-photon source of Micius. (a) Main optical path of entangled-photon source<sup>[15]</sup>; (b) polarization detection of entangled-photon source<sup>[15]</sup>; (c) 3D model diagram of entangled-photon source engineering prototype

通过星上的采样模块来实现 0°、45°、90°和 135°的 4 种偏振投影测量,利用 4 个探测器来完成在轨测量,从而可以实现纠缠源性能的在轨监测。通过这种采样测量,纠缠源的推算亮度约为 5.9 MHz,纠缠源的偏振保真度优于 0.91。墨子号的设计寿命为两年,目前仍然正常在轨运行。载荷的外包络尺寸为 430 mm×350 mm×150 mm,质量为 23.8 kg。

### 3.2 SpooQy-1 星载量子纠缠源

新加坡国立大学 Ling 团队<sup>[66-67]</sup>致力于基于立方体卫星 CubeSat 平台的量子纠缠源的设计和开发。2U(尺寸为 10 cm×10 cm×20 cm)立方体卫星 Galassia CubeSat(PSLV-C29)于 2015 年底发射并进入约为 550 km 轨道高度的圆形轨道,测试了基于 BBO 晶体参量下转换的关联光子对,这为基于空间的量子实验奠定了基础。2019 年 4 月,3U 立方体卫星 SpooQy-1 成功发射到国际空间站,其上搭载了基于 BBO 晶体的量子纠缠源,随后于 2019 年 6 月 17 日部署到近地轨道上<sup>[68]</sup>。

SpooQy-1 的纠缠源构型如图 6 所示,核心部分由纠缠光源和星载探测器构成,所占尺寸为 2U,它的主要功能是在地面实现纠缠源的远程在轨测试。纠缠光源采用了非简并的 I 型 SPDC,利用两块 BBO 晶体平行交叠的方式构造了共线的纠缠光子对。前后平行的两块 BBO 晶体分别产生了 HH 光子对,在 BBO 晶体之间插入 45°的 HWP 可以将第一个 BBO 晶体的光子转为 VV,两块 BBO 晶体之间通过钒酸钇(YVO<sub>4</sub>)晶体来补偿,最终构造出  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s\rangle|H_i\rangle+|V_s\rangle|V_i\rangle)$  的纠缠态。两路非简并

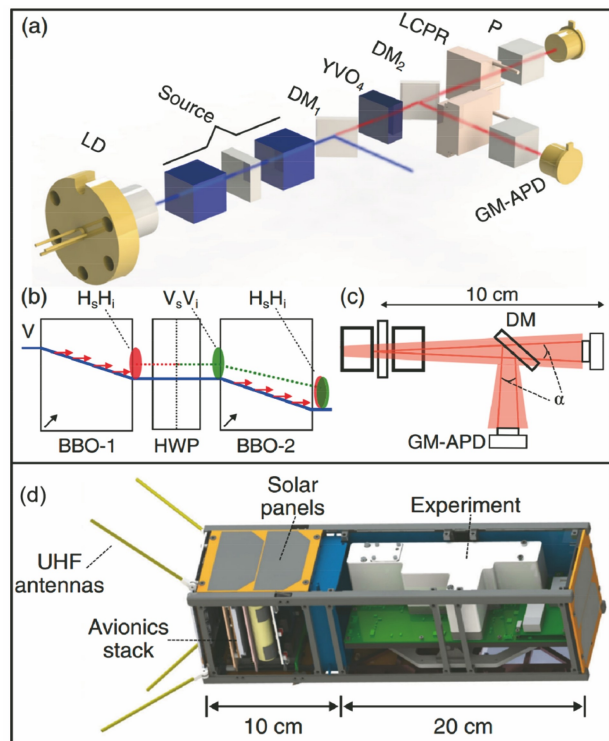


图 6 SpooQy-1 实验方案<sup>[68]</sup>。(a)光路中的重要光学元件;(b)两个 BBO 晶体产生纠缠源的原理图;  
(c) SPDC 产生的纠缠光子对的探测装置;  
(d) SpooQy-1 微纳卫星结构图

Fig. 6 SpooQy-1 experimental scheme<sup>[68]</sup>. (a) Important optical components in optical path; (b) schematic of entangled-photon source generated by two BBO crystals; (c) detection devices for entangled-photon pairs generated by SPDC; (d) SpooQy-1 micro-nano satellite structure diagram

的光子通过 DM 分成两路,两路分别插入液晶偏振

旋转器(LCPR)和极化片来设置偏振测量的基矢。两个在盖革模式下工作的单光子探测器,其探测效率约为 45%,感光面约为 500 μm,可用于直接探测两路光子的计数。将光束半高宽为 800 μm × 400 μm 的准直激光二极管(中心波长为 405 nm,光谱线宽为 160 MHz)作为 SPDC 的连续泵浦装置。泵浦光在两个 BBO(BBO-1 和 BBO-2)晶体(切割角为 28.8°,长度为 6 mm)中产生偏振光子对。在两个晶体之间有一个 45°的 HWP 来产生纠缠态,如图 6(d)所示。

星载纠缠源的在轨测试中的符合计数率为 2200 pair/s,纠缠对比度测试可满足 CHSH (Clauser-Horne-Shimony-Holt) 不等式的破缺,以证明该纠缠源方案的可行性。目前,该微纳卫星完成了在轨测试,下一步计划在微纳卫星上搭载望远镜开展星地纠缠分发实验。

### 3.3 计划中的星载纠缠源

此外,国际上其他团队也正积极投入到在卫星或国际空间站上利用纠缠源进行量子实验的相关研

究中<sup>[69-74]</sup>。Kwiat 小组<sup>[73]</sup>制备了一种具有偏振和时间维度的超纠缠光源,用来实现超密集量子隐形传态,如图 7 所示。该方案旨在实现星地之间的量子隐形传态,通过超纠缠的方式可以使超纠缠光源携带更多的信息,目前该方案只进行了室内的原理方案实验。该纠缠光源采用了波长为 532 nm 的脉冲激光来泵浦 Sagnac 结构中的 0 型 PPLN 晶体,可以产生波长为 810 nm 和 1550 nm 的非简并纠缠光子,分别用雪崩二极管和超导纳米线探测器来探测。纠缠双光子符合的平均符合效率为 1%。泵浦光通过了不等臂的 BS 产生 2.4 ns 的延迟,分别用来泵浦 PPLN 晶体。非简并光子通过方解石晶体来补偿色散,可产生  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{810}H_{1550}\rangle + |V_{810}V_{1550}\rangle) \otimes (|t_1\rangle + |t_2\rangle)$  的偏振-时间的超纠缠态,其中  $|t_1\rangle$  和  $|t_2\rangle$  分别为两个时间本征态,⊗为直积。该实验目前通过超纠缠态的演示得到保真度为 0.94±0.02,但其室内实验的符合率只有 1%,离可供远距离传输的目标仍有需改进之处。

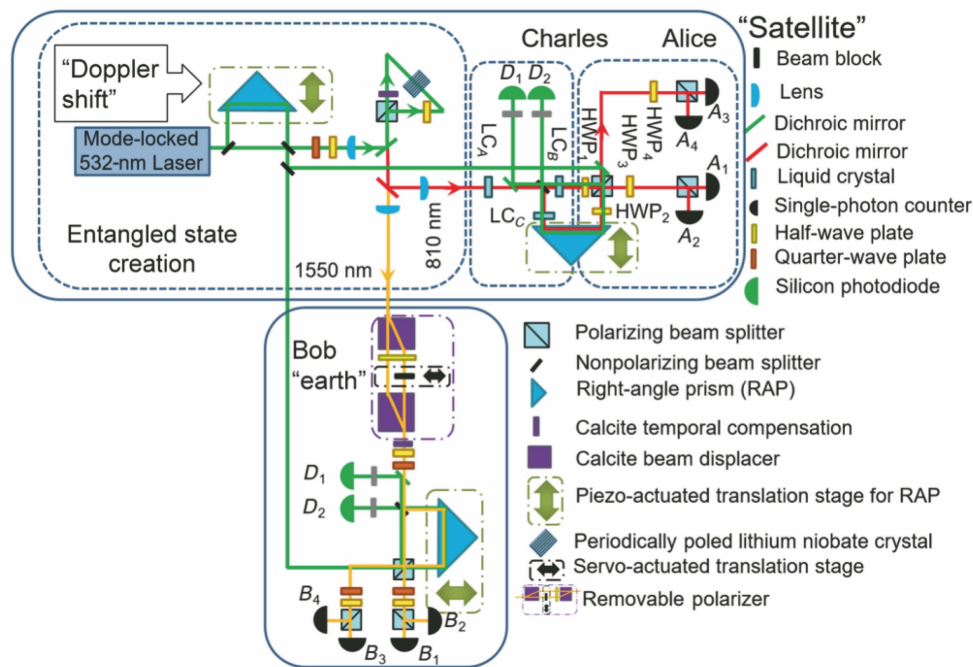


图 7 隐形传态方案的实验装置图<sup>[73]</sup>

Fig. 7 Experimental diagram of teleportation scheme<sup>[73]</sup>

2019 年,德国和奥地利团队合作参与欧洲航天局(ESA)中的一项量子科研项目,旨在研制星载纠缠源的工程样机<sup>[74]</sup>,如图 8 所示。该纠缠源采用长度为 30 mm 的 II 型 PPKTP 晶体,设计尺寸为 146 mm × 167 mm × 60 mm,质量为 1.84 kg,预计产率为 2.84 × 10<sup>5</sup> pair/s。据公开资料显示,他们在

对纠缠源原理样机进行性能测试时,通过观察干涉条纹的变化,可以发现 Sagnac 干涉环的两臂之间存在空间或角度的不匹配,另外对比产率可以进一步证明光路中的镜架安装组件是导致纠缠源性能下降的主要原因。在未来的实验规划中,该团队拟调整镜架的设计,考虑应用焊接技术来提高其稳定性,该

工艺已经在其他项目中得到成功证明。除此之外,该纠缠源样机的实施工艺仍有优化的空间,以确保满足空间环境适应性的需求。

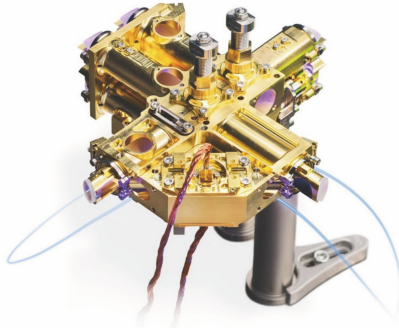


图 8 ESA 项目的纠缠源工程样机<sup>[74]</sup>

Fig. 8 Entangled-photon source engineering prototype of ESA project<sup>[74]</sup>

### 3.4 基于 0 型准相位匹配技术的量子纠缠源

基于 II 型 PPKTP 晶体的纠缠源已被应用于远距离自由空间量子纠缠分发的实验,然而光子对的产率之前只能接近  $10^6$  pair/(s · mW) 量级。为了满足更远距离纠缠分发纠缠光源亮度达到  $10^9$  pair/s, 对应平均功率为 1 W 的泵浦光。这将对泵浦激光器和光学元件的可靠性提出了极大挑战,而基于 0 型 PPKTP 晶体的 SPDC 可显著提高纠缠光子对的产率。

对于泵浦光和参量光为共线高斯空间模式的 SPDC, 光子对收集亮度<sup>[75-76]</sup>可以近似表示为

$$G \approx \frac{64\pi^3 \hbar c n_s n_i}{\epsilon_0 n_p |n'_s - n'_i|} \left( \frac{\chi_{\text{eff}}^{(2)}}{\lambda_s \lambda_i} \right)^2 \frac{\arctan \xi}{A_+ B_+} N_p, \quad (4)$$

式中:  $\lambda_j$ 、 $n_j$  和  $n'_j$  分别为光场  $j$  在真空中的波长、相折射率和群折射率;  $\chi_{\text{eff}}^{(2)}$  为有效非线性系数;  $N_p$  为泵浦光的平均光子数,  $c$  为真空中的光速;  $\epsilon_0$ 、 $\xi$ 、 $A_+$  和  $B_+$  均为辅助无量纲量。当对比泵浦光、信号光和闲频光波长和空间模式相近、类型不同的 SPDC 时,  $n_p$ 、 $n_s$ 、 $n_i$ 、 $\lambda_s$ 、 $\lambda_i$ 、 $\epsilon_0$ 、 $\xi$ 、 $A_+$  和  $B_+$  可近似为常数。因此,在相同的泵浦功率下, SPDC 的产率大致与

$(\chi_{\text{eff}}^{(2)})^2 \cdot \frac{1}{|n'_s - n'_i|}$  成正比。0 型 SPDC 过程利用二阶非线性系数  $d_{33}$ , 其有效非线性系数为 16.9 pm/V, 远大于 II 型 SPDC 过程的  $d_{24}$  (有效非线性系数为 3.64 pm/V), 因此可以获得比 II 型大很多的纠缠光子对产率和谱产率。

0 型 PPKTP 晶体纠缠源的装置如图 9 所示。泵浦激光器是连续光激光二极管, 中心波长为 405 nm, 频谱宽小于 160 MHz, 可认为其是单色光。

由于信号光的偏振态和闲频光相同, 故它们需要在频率上不简并。通过将长度为 30 mm、 $x$  轴向切割和极化周期为  $3.425 \mu\text{m}$  的 PPKTP 晶体置于 Sagnac 干涉环中心, 信号光和闲频光的中心波长分别为 780 nm 和 842 nm, 这足以在 DM 上分光。Sagnac 干涉环中的 PBS 和 HWP 均为消色差器件, 在上述波长处均有良好的性能。PPKTP 晶体所处的位置经过仔细优化可以最大化纠缠可见度。泵浦光、信号光和闲频光由两个定制的 DM 分开, 信号光和闲频光分别由两个焦距为 8 mm 的非球面镜耦合到单模光纤, 顺时针方向和逆时针方向的泵浦光的相对振幅和相位通过一个 HWP 和一个 QWP 来调节, 这可以产生最大纠缠态, 即  $|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s\rangle|H_i\rangle + |V_s\rangle|V_i\rangle)$ 。

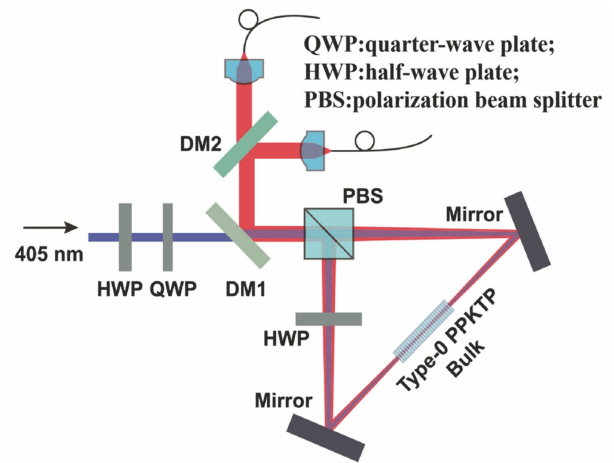


图 9 0 型 PPKTP 晶体纠缠源装置<sup>[21]</sup>

Fig. 9 Setup of type-0 PPKTP entangled-photon source<sup>[21]</sup>

纠缠光子对的产率近似为  $N_s N_i / N_c$ , 其中  $N_s$  和  $N_i$  分别为信号光和闲频光的计数率,  $N_c$  为符合计数率。为了避免单光子探测器的最大计数率受到限制, 在高泵浦功率下需增加适当的衰减器。每秒产生  $10^9$  对纠缠光子对只需功率为 16 mW 的泵浦光, 因此很容易用激光二极管来实现, 其在  $Z$  基矢和  $X$  基矢下的可见度分别为 96.1% 和 94.7%。

这种高亮度的纠缠源可以克服地球与月球之间自由空间链路的超高损耗, 从而完成纠缠分发和贝尔不等式检验的实验。值得注意的是, 在这样的距离下使用人代替物理设备来选择测量基矢或直接观察测量结果, 局域性漏洞和自由选择漏洞也可以被关闭。如使用人的自由意志决定贝尔不等式检验的测量基矢, 该想法可以追溯到 Bell 等<sup>[77-80]</sup>。如果存在自由意志, 由于其自由和独立



的内在属性,所以很自然地成为随机性的来源。“自由选择漏洞”正在受到日益增长的关注,一些研究人员认为人的自由意志可能是关闭这一漏洞的有效手段。

如图 10 所示,其中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  和  $L_5$  均为地月拉格朗日点, $L_4$  和  $L_5$  与地月之间呈等边三角形,可用于放置纠缠源。地月系统的拉格朗日点是放置纠缠源的理想位置,其中  $L_4$  或  $L_5$  点是稳定点,并且在 5 个拉格朗日点中具有最合适的空间布

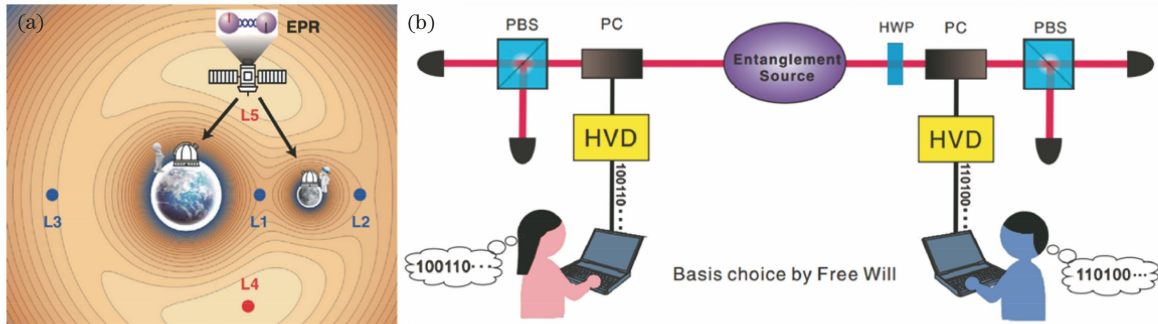


图 10 有人类自由意志参与的贝尔不等式检验实验<sup>[21]</sup>。(a)实验方案的概念图;(b)模拟实验图

Fig. 10 Bell inequality test experiment with human free will<sup>[21]</sup>. (a) Concept diagram of experimental setup; (b) simulation experiment diagram

## 4 展望和结语

随着高亮度、高品质和高集成度的纠缠源技术的不断发展和突破,量子信息领域将进入新的发展阶段,这为建立覆盖全球的量子通信网打下坚实的基础。当前中国研究团队已经率先在 2016 年成功发射了集成化量子纠缠源并进入了空间平台,演示了 1000 km 级的星地量子纠缠分发和无中继量子密码实验;新加坡团队于 2019 年随空间站发射了纠缠源立方星并开展了在轨测试;美国、德国和奥地利等也在积极发展能够应用于空间平台的集成化量子纠缠源,希望利用卫星或国际空间站在量子力学非定域性检验和空间量子通信方面取得突破。最近,基于无人机等空域平台的量子纠缠源也开始发展起来<sup>[81-82]</sup>,其中在无人机上搭载的纠缠源可以进一步轻量化和集成化,达到仅 kg 级别。

此外,集成光学系统在集成度和量产成本方面具有巨大的优势,在近几十年来取得了飞速的发展。随着片上激光器、高速电光调制器、热光调制器、光电探测器、耦合器和光栅等各种光电器件制备工艺的成熟,基于集成光学的高集成度光电子技术已在高速数据互联等领域逐步占据一席之地。与此同时,在 SOI(Silicon On Insulator)、硅基激光直写、

$L_4$ ( $L_5$ )、地球和月球组成形成边长为  $3.8 \times 10^5$  km 的近似等边三角形。

该方案使用两个实验者敲击键盘来随机选择测量基矢。一般来说,人的反应时间在 0.2~0.4 s 之间。方案中纠缠源距离两个测量端以及两个测量端之间的距离均约为 1.28 光秒,因此在适当的时间配置下,该方案可以在关闭局域性漏洞和自由选择漏洞的情况下实现地球与月球之间的贝尔不等式检验<sup>[21]</sup>。

$\text{Si}_3\text{N}_4$ 、LN、GaAs 和 InP 等各种集成光学工艺平台上,基于片上集成的光学量子信息处理的工作也开始大量涌现。其中,SOI 工艺与 CMOS 技术兼容,有望借助成熟的 CMOS 平台的经验实现 SOI 平台上硅基光子系统的稳定量产; $\text{Si}_3\text{N}_4$  波导有极低的损耗和很宽的波长窗口;激光直写技术可以构造复杂的三维构型;LN、GaAs 和 InP 等具有较大的电光系数,可以实现单光子的高速调制。基于这些工艺的发展,片上集成量子纠缠源的研究在近年来也取得了长足的发展,如表 2 所示。

表 2 集成光学纠缠源

Table 2 Integrated optical entanglement source

Scheme	Material	Generation rate / (pair · s <sup>-1</sup> · mW <sup>-1</sup> )
Ref. [83]	PPLN	$1.00 \times 10^6$
Ref. [84]	Bragg reflection waveguide	—
Ref. [85]	AlGaAs	$1.15 \times 10^7$
Ref. [86]	MgO:PPLN	$1.96 \times 10^6$
Ref. [87]	AlN	$3.00 \times 10^6$
Ref. [88]	PPLN	$2.20 \times 10^9$
Ref. [89]	PPKTP	$5.60 \times 10^6$
Ref. [90]	Ti:LiNbO <sub>3</sub>	$2.80 \times 10^7$
Ref. [91]	PPLN	$2.50 \times 10^9$ (3.4 μW) $2.70 \times 10^9$ (13.4 μW)
Ref. [92]	PPLN	$2.79 \times 10^{11}$

未来,集成化、轻量化乃至片上的量子纠缠源可以以低廉的成本方便在量子网络的各个节点之间共享,真正成为量子通信和量子精密测量等大空间尺度上量子信息处理的实用化资源。

### 参 考 文 献

- [1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777-780.
- [2] Wu C S, Shaknov I. The angular correlation of scattered annihilation radiation[J]. *Physical Review*, 1950, 77(1): 136.
- [3] Bell J S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox [J]. *Physics Physique Fizika*, 1964, 1(3): 195-200.
- [4] Freedman S J, Clauser J F. Experimental test of local hidden-variable theories[J]. *Physical Review Letters*, 1972, 28(14): 938-941.
- [5] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem [J]. *Physical Review Letters*, 1981, 47(7): 460-463.
- [6] Aspect A, Grangier P, Roger G. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *gedankenexperiment*: a new violation of Bell's inequalities[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(2): 91-94.
- [7] Aspect A, Dalibard J, Roger G. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers[J]. *Physical Review Letters*, 1982, 49(25): 1804-1807.
- [8] Weihs G, Jennewein T, Simon C, et al. Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(23): 5039-5043.
- [9] Tittel W, Brendel J, Gisin B, et al. Experimental demonstration of quantum correlations over more than 10 km [J]. *Physical Review A*, 1998, 57(5): 3229-3232.
- [10] Rowe M A, Kielinski D, Meyer V, et al. Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection [J]. *Nature*, 2001, 409(6822): 791-794.
- [11] Ansmann M, Wang H, Bialczak R C, et al. Violation of Bell's inequality in Josephson phase qubits[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 504-506.
- [12] Giustina M, Mech A, Ramelow S, et al. Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption [J]. *Nature*, 2013, 497(7448): 227-230.
- [13] Scheidl T, Ursin R, Kofler J, et al. Violation of local realism with freedom of choice [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(46): 19708-19713.
- [14] Yin J, Cao Y, Yong H L, et al. Lower bound on the speed of nonlocal correlations without locality and measurement choice loopholes [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(26): 260407.
- [15] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers [J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140-1144.
- [16] Hensen B, Bernien H, Dréau A E, et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres [J]. *Nature*, 2015, 526(7575): 682-686.
- [17] Giustina M, Versteegh M, Wengerowsky S, et al. Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(25): 250401.
- [18] Shalm L K, Meyer-Scott E, Christensen B G, et al. Strong loophole-free test of local realism [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(25): 250402.
- [19] Rosenfeld W, Burchardt D, Garthoff R, et al. Event-ready Bell test using entangled atoms simultaneously closing detection and locality loopholes [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(1): 010402.
- [20] BIG Bell Test Collaboration. Challenging local realism with human choices [J]. *Nature*, 2018, 557(7704): 212-216.
- [21] Cao Y, Li Y H, Zou W J, et al. Bell test over extremely high-loss channels: towards distributing entangled photon pairs between earth and the moon [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(14): 140405.
- [22] Peng C Z, Yang T, Bao X H, et al. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: towards satellite-based global quantum communication [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 150501.
- [23] Ursin R, Tiefenbacher F, Schmitt-Manderbach T, et al. Entanglement-based quantum communication over 144 km [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(7): 481-486.
- [24] Cao Y, Liang H, Yin J, et al. Entanglement-based quantum key distribution with biased basis choice via free space [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27260-27268.
- [25] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-to-ground entanglement-based quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(20): 200501.
- [26] Wengerowsky S, Joshi S K, Steinlechner F, et al. An entanglement-based wavelength-multiplexed quantum communication network [J]. *Nature*, 2018,

- 564(7735): 225-228.
- [27] Wengerowsky S, Joshi S K, Steinlechner F, et al. Entanglement distribution over a 96-km-long submarine optical fiber [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(14): 6684-6688.
- [28] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1, 120 kilometres [J]. Nature, 2020, 582(7813): 501-505.
- [29] Wengerowsky S, Joshi S K, Steinlechner F, et al. Passively stable distribution of polarisation entanglement over 192 km of deployed optical fibre [J]. npj Quantum Information, 2020, 6: 5.
- [30] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation [J]. Nature, 1997, 390(6660): 575-579.
- [31] Marcikic I, de Riedmatten H, Tittel W, et al. Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths [J]. Nature, 2003, 421(6922): 509-513.
- [32] Ursin R, Jennewein T, Aspelmeyer M, et al. Communications: quantum teleportation across the Danube [J]. Nature, 2004, 430(7002): 849.
- [33] Yin J, Ren J G, Lu H, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. Nature, 2012, 488(7410): 185-188.
- [34] Ma X S, Herbst T, Scheidl T, et al. Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward [J]. Nature, 2012, 489(7415): 269-273.
- [35] Sun Q C, Mao Y L, Chen S J, et al. Quantum teleportation with independent sources and prior entanglement distribution over a network [J]. Nature Photonics, 2016, 10(10): 671-675.
- [36] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation [J]. Nature, 2017, 549(7670): 70-73.
- [37] Bouwmeester D, Pan J W, Daniell M, et al. Observation of three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement [J]. Physical Review Letters, 1999, 82(7): 1345-1349.
- [38] Sackett C A, Kielpinski D, King B E, et al. Experimental entanglement of four particles [J]. Nature, 2000, 404(6775): 256-259.
- [39] Zhao Z, Chen Y A, Zhang A N, et al. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation [J]. Nature, 2004, 430(6995): 54-58.
- [40] Hübel H, Hamel D R, Fedrizzi A, et al. Direct generation of photon triplets using cascaded photon-pair sources [J]. Nature, 2010, 466(7306): 601-603.
- [41] Yao X C, Wang T X, Xu P, et al. Observation of eight-photon entanglement [J]. Nature Photonics, 2012, 6(4): 225-228.
- [42] Wang X L, Chen L K, Li W, et al. Experimental ten-photon entanglement [J]. Physical Review Letters, 2016, 117(21): 210502.
- [43] Boto A N, Kok P, Abrams D S, et al. Quantum interferometric optical lithography: exploiting entanglement to beat the diffraction limit [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(13): 2733-2736.
- [44] Björk G, Sánchez-Soto L L, Söderholm J. Entangled-state lithography: tailoring any pattern with a single state [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(20): 4516-4519.
- [45] D'Angelo M, Chekhova M V, Shih Y. Two-photon diffraction and quantum lithography [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(1/2): 013602.
- [46] Lloyd S. Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination [J]. Science, 2008, 321(5895): 1463-1465.
- [47] Lo H K, Curty M, Qi B. Measurement-device-independent quantum key distribution [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(13): 130503.
- [48] Braunstein S L, Pirandola S. Side-channel-free quantum key distribution [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(13): 130502.
- [49] Lucamarini M, Yuan Z L, Dynes J F, et al. Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters [J]. Nature, 2018, 557(7705): 400-403.
- [50] Chen J P, Zhang C, Liu Y, et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(7): 070501.
- [51] Chen J P, Zhang C, Liu Y, et al. Twin-field quantum key distribution over a 511 km optical fibre linking two distant metropolitan areas [J]. Nature Photonics, 2021, 15(8): 570-575.
- [52] Chen Y A, Zhang Q, Chen T Y, et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4, 600 kilometres [J]. Nature, 2021, 589(7841): 214-219.
- [53] Yin J, Yong H L, Wu Y P, et al. Experimental simulation of quantum entanglement distribution over a high-loss channel [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 060307.  
印娟, 雍海林, 吴裕平, 等. 基于高损耗信道的纠缠分发实验模拟 [J]. 物理学报, 2011, 60(6): 060307.
- [54] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H, et al. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs [J]. Physical Review Letters, 1995, 75(24):

- 4337-4341.
- [55] Kwiat P G, Waks E, White A G, et al. Ultrabright source of polarization-entangled photons[J]. *Physical Review A*, 1999, 60(2): R773-R776.
- [56] Kurtsiefer C, Oberparleiter M, Weinfurter H. High-efficiency entangled photon pair collection in type-II parametric fluorescence [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(2): 023802.
- [57] Fiorentino M, Messin G, Kuklewicz C E, et al. Generation of ultrabright tunable polarization entanglement without spatial, spectral, or temporal constraints[J]. *Physical Review A*, 2004, 69(4): 041801.
- [58] Kuklewicz C E, Fiorentino M, Messin G, et al. High-flux source of polarization-entangled photons from a periodically poled  $\text{KTiOPO}_4$  parametric down-converter[J]. *Physical Review A*, 2004, 69(1): 013807.
- [59] Fedrizzi A, Herbst T, Poppe A, et al. A wavelength-tunable fiber-coupled source of narrowband entangled photons[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15377-15386.
- [60] Anwar A, Perumangatt C, Steinlechner F, et al. Entangled photon-pair sources based on three-wave mixing in bulk crystals [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 041101.
- [61] Burnham D C, Weinberg D L. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 25(2): 84-87.
- [62] Ghosh R, Mandel L. Observation of nonclassical effects in the interference of two photons [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(17): 1903-1905.
- [63] Fejer M M, Magel G A, Jundt D H, et al. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(11): 2631-2654.
- [64] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 43-47.
- [65] Liao S K, Cai W Q, Handsteiner J, et al. Satellite-relayed intercontinental quantum network [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(3): 030501.
- [66] Tang Z K, Chandrasekara R, Tan Y C, et al. Generation and analysis of correlated pairs of photons aboard a nanosatellite[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(5): 054022.
- [67] Bedington R, Bai X, Truong-Cao E, et al. Nanosatellite experiments to enable future space-based QKD missions[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2016, 3(1): 12.
- [68] Villar A, Lohrmann A, Bai X L, et al. Entanglement demonstration on board a nano-satellite [J]. *Optica*, 2020, 7(7): 734-737.
- [69] Armengol J M P, Furch B, de Matos C J, et al. Quantum communications at ESA: towards a space experiment on the ISS[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63: 165-178.
- [70] Scheidl T, Wille E, Ursin R. Quantum optics experiments using the international space station: a proposal[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(4): 043008.
- [71] Jennewein T, Grant C, Choi E, et al. The NanoQKEY mission: ground to space quantum key and entanglement distribution using a nanosatellite [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9254: 925402.
- [72] Oi D K L, Ling A, Grieve J A, et al. Nanosatellites for quantum science and technology [J]. *Contemporary Physics*, 2017, 58(1): 25-52.
- [73] Chapman J C, Graham T M, Zeitler C K, et al. Time-bin and polarization superdense teleportation for space applications [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014044.
- [74] Beckett E, de Vries O, Ursin R, et al. A space-suitable, high brilliant entangled photon source for satellite based quantum key distribution [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10910: 1091016.
- [75] Bennink R S. Optimal collinear Gaussian beams for spontaneous parametric down-conversion [J]. *Physical Review A*, 2010, 81(5): 053805.
- [76] Ling A, Lamas-Linares A, Kurtsiefer C. Absolute emission rates of spontaneous parametric down-conversion into single transverse Gaussian modes[J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 043834.
- [77] Bell J S. Speakable and unspeakable in quantum mechanics [M]//Speakable and unspeakable in quantum mechanics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 169-172.
- [78] Hardy L. Proposal to use humans to switch settings in a Bell experiment[EB/OL]. (2017-05-12) [2021-02-08]. <http://arxiv.org/abs/1705.04620>.
- [79] Kent A. Causal quantum theory and the collapse locality loophole[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(1): 012107.
- [80] Manasseh G, de Balthasar C, Sanguinetti B, et al. Retinal and post-retinal contributions to the quantum efficiency of the human eye revealed by electrical neuroimaging[J]. *Frontiers in Psychology*, 2013, 4: 845.
- [81] Liu H Y, Tian X H, Gu C S, et al. Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks[J]. *National Science Review*, 2020, 7(5):

- 921-928.
- [82] Liu H Y, Tian X H, Gu C S, et al. Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(2): 020503.
- [83] Herrmann H, Yang X, Thomas A, et al. Post-selection free, integrated optical source of non-degenerate, polarization entangled photon pairs[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 27981-27991.
- [84] Vallés A, Hendrych M, Svozilik J, et al. Generation of polarization-entangled photon pairs in a Bragg reflection waveguide[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10841-10849.
- [85] Autebert C, Bruno N, Martin A, et al. Integrated AlGaAs source of highly indistinguishable and energy-time entangled photons[J]. *Optica*, 2015, 3(2): 143-146.
- [86] Vergyris P, Kaiser F, Gouzien E, et al. Fully guided-wave photon pair source for quantum applications[J]. *Quantum Science and Technology*, 2017, 2(2): 024007.
- [87] Guo X, Zou C L, Schuck C, et al. Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(5): e16249.
- [88] Meyer-Scott E, Prasanna N, Eigner C, et al. High-performance source of spectrally pure, polarization entangled photon pairs based on hybrid integrated-bulk optics[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32475-32490.
- [89] Atzeni S, Rab A S, Corrielli G, et al. Integrated sources of entangled photons at the telecom wavelength in femtosecond-laser-written circuits[J]. *Optica*, 2018, 5(3): 311-314.
- [90] Sun C W, Wu S H, Duan J C, et al. Compact polarization-entangled photon-pair source based on a dual-periodically-poled Ti: LiNbO<sub>3</sub> waveguide[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5598-5601.
- [91] Ma Z, Chen J Y, Li Z, et al. Ultrabright quantum photon sources on chip[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 263602.
- [92] Xue G T, Niu Y F, Liu X Y, et al. Ultrabright multiplexed energy-time-entangled photon generation from lithium niobate on insulator chip[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(6): 064059.