

量子信息科学

—— 一个令人惊奇的新兴领域

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)

关键词 量子密码, 量子纠缠, 量子信息

量子信息是量子物理与信息科学相融合的新兴交叉学科, 基于量子力学的特性, 如叠加性、纠缠性、非局域性和不可克隆性等, 量子信息可以突破现代信息技术的物理极限, 开拓出新的信息功能, 量子密码可以提供不可窃听、不可破译的绝对保密通信, 量子计算具有巨大的并行计算能力, 提供功能更强的新型运算模式。量子信息技术有望以崭新原理和方法开拓后莫尔时代的新一代信息技术。美国政府在《保持国家竞争力》计划中把“量子信息”列为重点支持的基础研究课题。

“量子通信与信息技术”是“国家重点基础研究发展计划”(“973”计划)项目, 立项于2001年, 2006年通过专家评审结题。项目由国内17个大学和研究所、50多名学术骨干组成的研究团队, 历经5年的协作研究, 在量子信息的理论和实验方面取得了一批重要成果, 在国际学术界获得高度评价。

1 量子密码

量子密码是量子信息领域中最可能得到实际应用的技术。美国人将“量子加密”称为“改变人类未来”的新技术。量子密码原理已在实验室内演示成功。目前国际学术界正在研究走向实用进程中的关键科学和技术问题。光纤量子密钥分配研究中最关键的问题是: 现在广泛研制的非等臂MZ干涉仪虽然安全但稳定性很差, 无法在实用光纤上运行, 而改进后的返回式光学系统虽然解决了稳定性问题, 但其安全性却出现漏洞。本项目解决了这个稳定性和安全性统一的难题。在实验上研究了光纤系统不稳定性的物理根源, 在理论上给出稳定性条件, 进而设计出满足稳定性条件的迈克逊-法拉第干涉仪, 在实验室内实现150公里的量子密钥分配, 在北京与天津之间的125公里实际光纤上实现了量子密钥分配和加密图像传送(图1)。这是迄今国际上报道的最远距离实用光纤量子密钥分配。

自由空间的量子通信是实现全球化量子通信的关键。本项目利用纠缠光子对首次在实验上验证了纠缠态可穿透大气层, 并用来实现了10.5公里自由空间的量子密钥分配(图2)。英国“新科学家”评价这项作为“突破性进展, 使得基于人造卫星的全球

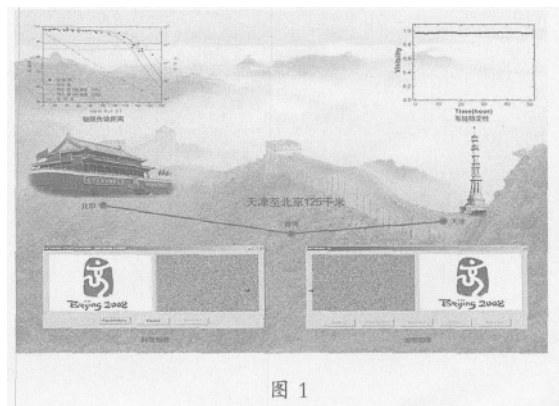


图 1

^{*} 中国科学院院士, 中国科学技术大学教授, 该项目首席科学家
收稿日期: 2006 年 12 月 20 日

量子通信成为可能。”

2 量子纠缠源的制备、操控和应用

量子纠缠是量子信息领域中最重要资源。当两个或多个粒子处于纠缠态时, 对其中的一个粒子进行操作, 其它的纠缠粒子不管位于何处, 其量子态会立即发生相应的变化。因此, 彼此纠缠的粒子之间便由这种基于量子非局域性的内禀通道构成一个量子网络, 它可以实现量子通信(即传送量子信息), 也可以实施分布式的量子计算。自从量子信息作为新兴学科诞生以来, 量子纠缠便成为国际学术界研究的焦点。本项目研制成功高亮度的光子纠缠源: 连续纠缠光子源, 每秒 12.8 万对, 对比度为 95%; 脉冲纠缠光子源, 每秒 1.4 万对, 对比度 87%, 在国际上处于先进或领先水平。

两个纠缠的光子构成一条量子通道, 通过对各个光子的操作可实现许多新奇的信息传输功能。1997 年在实验上实现了所谓“量子隐形传态”, 即将未知量子信息传送到远处的纠缠光子上而原先携带该量子信息的物理载体却留在原处不被传送。本项目进一步研究了量子信息传输的许多有趣的现象: (1) 在实验上实现了单光子量子态的远程操纵, 即局域地操作其中一个纠缠光子, 可将远处的另一纠缠光子制备在任意态上; (2) 局域地对一个纠缠光子实施任意相位旋转操作, 可将这个操作传送到远处, 旋加在另一个光子态上; (3) 在实验上演示了当纠缠通道被损坏时, 可通过单光子局域操作来实现纠缠纯化, 而不必通过非局域的操作。

多光子量子态具有许多重要性质, 例如 N 个光子态的干涉所呈现的德布罗意波长减少到 $1/N$, 这可使相位测量达到海森堡极限的精度, 用于光学刻蚀, 其精度可提高到 $1/N$ 。光子数越多的量子态, 蕴含着越丰富的量子现象, 但制备也更为困难。本项目在理论上提出一种所谓“NOON 态投影测量方法”可用来制备和识别多光子量子态, 在实验上用其演示了四光子和六光子的德布罗意波长, 并将著名的两光子 HOM 干涉推广到多光子场合, 在实验上证实了这种方法是多光子物理学中重要而有效的实验方法(图 3)。首次在实验上实现了五光子纠缠态, 并演示利用这个纠缠态可实现终端开放的量子隐形传态, 即未知量子态被隐形传到终端的三个光子纠缠态上, 然而按照三个粒子的合作可被制备在其中任一一个粒子上(图 4)。利用这个五光子纠缠态, 在实验上还演示了量子纠缠浓缩和纠缠交换, 为量子中继的实现研究迈开重要一步。

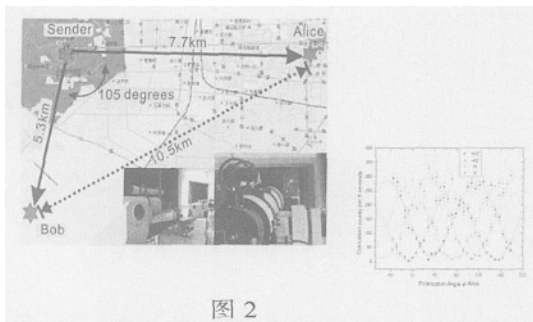


图 2

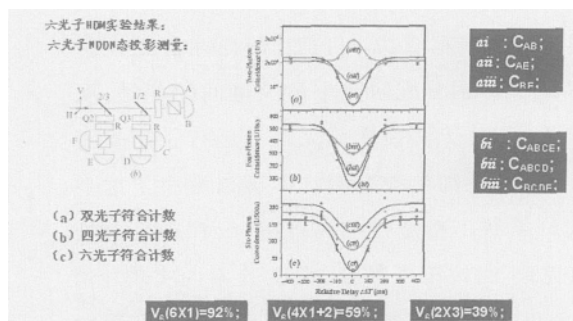


图 3

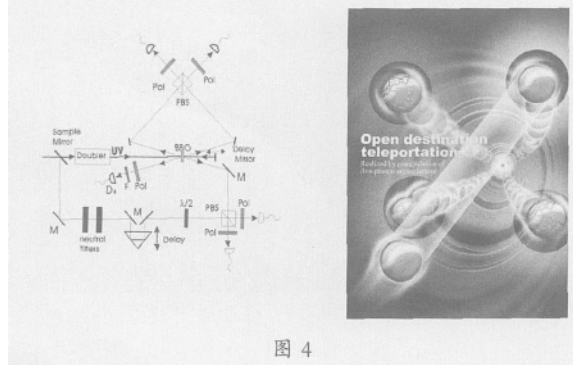


图 4

量子数越多的量子态, 蕴含着越丰富的量子现象, 但制备也更为困难。本项目在理论上提出一种所谓“NOON 态投影测量方法”可用来制备和识别多光子量子态, 在实验上用其演示了四光子和六光子的德布罗意波长, 并将著名的两光子 HOM 干涉推广到多光子场合, 在实验上证实了这种方法是多光子物理学中重要而有效的实验方法(图 3)。首次在实验上实现了五光子纠缠态, 并演示利用这个纠缠态可实现终端开放的量子隐形传态, 即未知量子态被隐形传到终端的三个光子纠缠态上, 然而按照三个粒子的合作可被制备在其中任一一个粒子上(图 4)。利用这个五光子纠缠态, 在实验上还演示了量子纠缠浓缩和纠缠交换, 为量子中继的实现研究迈开重要一步。

量子纠缠是量子物理的非局域性质, 它有

助于揭示物理学中更深层次的本质特征。本项目利用纠缠光子对在实验上检验了 Kochen-Specker 理论。

在量子物理学中隐变量理论一直在挑战着量子力学的完备性。Bell 不等式在实验上的违背证实了这种隐变量是不存在的,量子力学是完备的。但这个结论仅适合于类空事件的场合。KS 理论更深刻揭示出环境无关隐变量(NCHV)与量子力学的不相容性,但以往只有两个对 NCHV 进行统计性检验的实验。本项目完成了一个“全有或全无”类型的对 NCHV 的非统计性的实验检验,实验结果有力地支持了量子力学的正确性。

本项目首次利用核磁共振实现了量子博弈的实验,验证了在量子博弈中,如果两个参与人都选择量子策略,则他们将获得双赢的结果,而在经典博弈中,任何一个理性的参与人都不可获胜。这个有趣的研究成果,在国际学术媒体中引起广泛的兴趣,美英物理学会发表了许多报道和评价。

连续变量量子信息通常以不同模式的光场作为信息载体,其纠缠光源的制备不同于分离变量(如光子)纠缠源。本项目以制备双模压缩相干态作为纠缠源,在实验上实现了连续变量量子密集编码和纠缠交换,制备了三组分连续变量纠缠态等,得到学术界高度评价和广泛应用。

3 量子信息处理器

量子计算的最终实现取决于能否研制成功物理上可扩展的量子信息处理器,用它来有效地存储和处理量子信息。目前的研究水平离此目标还相差甚远,但科学家满怀着坚定信心正在向着这个目标步步逼近。本项目在基于固态物理、量子光学和核磁共振量子计算物理实现的基础研究方面取得一系列理论和实验的重要进展。

在理论上提出一种基于腔 QED 的新型量子信息处理器方案,通过对腔的泄漏光子进行单光子探测,来实现不同腔中原子之间的纠缠,该方案具有制备效率高,抗噪能力强,易于寻址等优点。PRL 的审稿人称赞道“在寻求随心所欲的产生量子态的方案中,这可能是一篇里程碑的文章”(图 5)。另外,利用高 Q 腔中单个原子与腔外部单

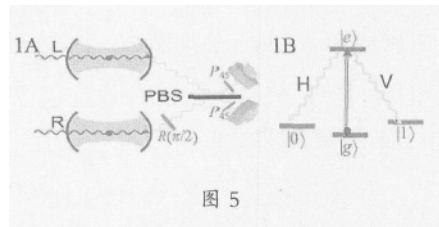


图 5

个光子的相互作用,设计了一种可行性很强的基于光子的量子计算方案;它以原子作为中介来实现光子与光子之间的受控相位门操作,该方案按目前的技术水平和抗噪能力是可以实现的,学术界对此给予很高评价。

固态量子计算被国际学术界认为是最有希望研究成功的途径之一,固态中量子比特之间的固有耦合是其易于扩展集成的优势根源,但在量子计算过程中往往要求断开量子比特间这种固有耦合,这是固态量子计算遇到的一个难题。本项目提出“无相互作用子空间(IFS)”的新概念,利用编码方法可实现逻辑比特之间的消耦合,同时证实在实际固态模型中实施逻辑比特的任意操作和受控操作是可行的。进一步,将学术界业已认可的无消相干子空间(DFS)与 IFS 相结合,提出固态容错量子计算新方案,并在实际的固态模型中证明了其可行性。

基于量子光学系统的量子计算物理实现是另一种有希望途径,其优点是量子相干性

好。但这类方案的不足之处是物理可扩展性差。分布量子计算方案是克服这个缺欠的有效方法,即以只含少数量子比特的系统作为节点,采用纠缠通道将这些节点连成量子网络,便可实现量子计算。该方案的可行性取决于在相距甚远的节点之间能否实现两比特的量子受控门操作这一关键问题。特别是,在光子与节点量子比特之间非强耦合的条件下能否实现确定性的受控门操作更是至关重要的问题。本项目运用纠缠光子对在实验上将某个节点的两比特受控门操作经由纠缠通道隐形传送到远处的另一个节点上,实现了两个节点之间的确定性受控门操作,这个操作的平均保真度达到 0.84。PRL 审稿人认为“这是向分布量子计算的实现迈出重要一步”。

光子之间的相互作用极其微弱,在实验上要实现两个独立光子之间的受控非门操作是相当困难的。本项目利用五光子纠缠技术首次实现了非破坏性可升级的独立光子之间的量子逻辑门,这是线性光学量子计算研究中最基本和重要一步。作为这种量子逻辑门的一个重要应用例子,还进一步在实验上用它来实现完全的量子隐形传态。

采用核磁共振系统在量子信息领域的实验研究上取得若干重要进展。(1)混合态量子几何相的实验研究。几何相是量子理论的重要概念,但什么是量子混态的几何相却尚未搞清楚。本项目利用 NMR 实验技术完成具有不同噪声的量子混态的制备,观测到了任意量子态的几何相。该工作受到国际学术界高度关注。(2)实验上演示了由多个量子比特构造的无消相干子空间(DFS)。本项目在理论上提出了基于二维 NMR 技术,使用 CH_3 系统来构造 DFS 的方案,并在实验上演示了这种 DFS 的避错能力和实现基本的量子逻辑门操作。(3)实验演示了 NMR 的七个量子比特量子算法,包括修正 D-J 量子算法和七级耦合变换等。

本项目在理论上提出多粒子纠缠的判据,提出了基于 Josephson 结的快速量子逻辑门方案;研究了固态强关联系统中量子信息的传输和自旋链量子相变等;在国内第一次在实验上实现了玻色-爱因斯坦凝聚,探索冷原子在量子信息处理器中的可能应用;在实验上研制成功 APD 红外探测器,量子效率大于 70%;研制基于参量上转换的红外单光子探测器,实现 95% 的单光子转换效率等。

4 项目实施效果

在项目执行期间,发表 SCI 论文 600 余篇,其中 Nature 1 篇,Phy. Rev. Lett. 37 篇,Phy. Rev. 174 篇,Appl.Phys.Lett. 5 篇,Opt.Lett. 9 篇,SCI 他引超过 1 500 次;荣获国家自然科学奖二等奖 1 项,省部级自然科学奖一等奖 2 项,基金委创新群体 1 个。有 2 人被评为中科院院士,5 人评为国家基金委杰出青年,2 人入选教育部“长江学者”,4 人入选中科院“百人计划”人才,1 人评为全国十大杰出青年,3 人评为教育部新世纪人才。培养博士后 36 人,博士 74 名,硕士 65 名,其中 2 人获全国百篇优秀论文奖,2 人获中科院院长特别奖。广泛地开展了国内外学术交流,举办国际会议 2 次,有 100 多人参加国际学术会议,28 人次应邀在国际会上做特邀报告,邀请 100 多人海外专家来访和学术交流。

项目所取得的理论和实验成果使我国在这个新兴交叉领域的国际竞争中占有一席之地;在涉及国家信息安全的量子密码研究方面取得显著进展,并具有独立知识产权,为增强我国信息安全做出了贡献;项目的实施造就了一支充满活力的研究队伍,建设了若干一流的研究基地,这为我国中长期规划“量子调控”重大基础研究计划的实施奠定了坚实基础。