

浅析光量子计算机中的物理原理和教育意义^{*}

凌铭杰 杨玉平 苏玉成

(中央民族大学理学院 北京 100081)

(收稿日期:2021-04-08)

摘要:光量子计算机是基于量子相干叠加原理和光学技术而实现的一种具有超快的并行计算和模拟能力的计算机。近几年,我国在光量子计算机领域不断取得重大突破,处于国际领先地位。光量子计算机是国家前沿技术重大成就的代表,涉及到众多经典物理学、光学和量子力学的知识,具有着重要的教育意义。

关键词:光量子 量子计算机 量子力学

1 引言

量子计算机(Quantum Computer)是一种运行规律遵循量子力学,能够进行高速数学和逻辑运算、存储及处理量子信息的物理装置^[1]。1982年费曼指出经典计算机在量子模拟上存在困难,提出采用遵循量子力学的机器来进行量子模拟^[2]。之后量子计算机逐渐受到重视,并得到快速的发展,也取得许多重大进展。量子计算机的物理实现路线有很多,包括超导、半导体、离子阱、光子、金刚石等。

近几年,我国光量子计算机技术不断取得重大突破,保持在世界“第一方阵”。2020年10月16日,习近平总书记在主持中共中央政治局学习时强调,要充分认识到推动量子科技发展的重要性和紧迫性,加强量子科技发展战略谋划和系统布局,把握大趋势,下好先手棋;要加快量子科技领域人才培养力度,加快培养一批量子科技领域的高精尖人才,建立适应量子科技发展的专门培养计划,打造体系化、高层次量子科技人才培养平台。光量子计算机作为国家前沿技术重大成就的代表,其背后的物理原理及其思想内涵有重大的教育意义。

本文将结合具体实例来论述光量子计算机的物理原理、我国光量子计算机的主要成就及教育意义。

2 光量子计算机的物理原理及实现

量子计算机的计算步骤一般包括初态制备、运算、测量3个步骤,所涉及的主要物理原理有叠加态、纠缠态、坍缩。以下将简要论述光量子计算机这3个步骤的物理原理和实现过程。

2.1 初态制备

初态制备即将信息转化为相应的量子态,初态可以由单个或多个量子比特构成。量子态是指微观粒子的存在状态,例如电子自旋向上和自旋向下就是两个不同的量子态。在经典计算机中信息一般以电平的高低状态存储并用二进制表示,高电平为1,低电平为0。二进制的一位所包含的信息就是1比特,如“01010”就是5比特。经典比特只能表示1或0,而量子比特可以同时表示1和0,依赖的物理原理是量子力学中的量子态叠加原理。在实验室中可以通过减弱激光输出获得单个光子,再利用分束器(Beam Splitter,BS)就可制备光子路径的叠加态,如图1所示。

^{*} 中央民族大学2020年度“一流课程”建设项目“量子物理”,项目编号:KC2062;2020年第一批教育部产学研合作协同育人项目“中央民族大学量子物理教学内容改革”;2019年第二批产学研合作协同育人项目“纳米材料与技术专业新工科创新人才培养体系的构建”的阶段性成果。

作者简介:凌铭杰(1996-),男,在读硕士研究生,研究方向为物理教育。

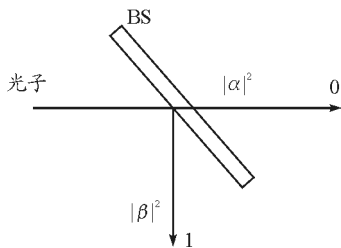


图1 光子的路径叠加态

一束光射入分束器后,一部分光被透射,一部分光被反射.如果将单个光子射入分束器会发生什么情况呢?该光子有反射和透射两个可能的状态,即两种本征态;根据量子力学的态叠加原理,此时该光子会同时被透射和反射,即处于两个本征态的叠加态.光子被透射记为 $|0\rangle$,光子被反射记为 $|1\rangle$,其量子态可以表示为 $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$,这样量子比特就可以同时表示1和0了. α 和 β 都是复常数,称为概率幅,许多情况下也可以视为实数.当处于叠加态的光子被测量时会以某种确定的本征态被观测到,即要么被透射要么被反射,这个过程称之为叠加态坍缩.概率幅的模的平方就是测量后坍缩到该本征态的概率,在上述例子中观测得到该光子被透射和被反射的概率分别为 $|\alpha|^2$ 和 $|\beta|^2$,因此 α 和 β 要满足归一化条件 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

在光量子计算机中量子比特通常可以由光子的偏振、角动量、路径等方式来实现,偏振是最普遍使用的.光子的偏振态制备系统可以由偏振分束器(Polarization beam splitter, PBS)、二分之一波片 $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ 、四分之一波片 $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ 构成,如图2所示.

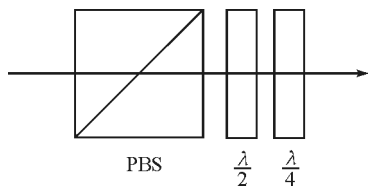


图2 偏振态制备系统

PBS可以使水平偏振(H)的光被透射,垂直偏振(V)的光被反射.波片通常由双折射晶体制成,二分之一波片可以改变线偏振光的偏振方向,四分之一波片可以将线偏振光转化为圆(或椭圆)偏振光.调整二分之一波片快轴(波片中传播速度快的光矢量方向)与水平方向的夹角可以将PBS透射出的 H

光变为任意偏振光,再调整四分之一波片的快轴与水平方向的夹角,线偏振光又可以变成任意形状的圆(或椭圆)偏振光,从而完成不同态的制备.理论上该系统可以制备任意的偏振态,例如二分之一波片角度为 -22.5° ,四分之一波片角度为 45° 时,输出的量子态为 $\frac{|H\rangle + |V\rangle}{\sqrt{2}}$.

量子的叠加态使得量子计算机的信息存储和表示能力以指数扩展.同样的 n 个比特,量子计算机可以同时存储 2^n 个数,而经典计算机只能同时表示这 2^n 个数中的一个,这是量子计算机的一大优势.

量子态的叠加原理是由微观粒子波粒二象性所决定的.微观粒子遵循的是统计规律,而不是经典物理的因果决定规律,这与我们的日常生活经验截然不同.但是,已有大量实验证明了量子叠加和概率诠释的真实性,在量子世界里我们不得不抛弃传统的思维.物理学通过定量的实验和逻辑分析不断揭示自然界的客观规律和各种现象的内在联系,有的与日常经验相符,有的与日常经验不符.在经典物理学中与人们日常经验和直觉不符的物理现象较为少见,而以“双光子纠缠”“电子双缝干涉”“薛定谔猫”为代表的量子态叠加现象则大大颠覆了人们对“宏观世界的认知”,与学生的日常经验和直觉造成强烈的对比,给学生一个深刻的感知体检和思考.

2.2 运算

量子计算机的运算过程是使初化的量子态遵循量子力学的基本原理进行演化.如果对处于叠加态的量子态进行操作,也就对叠加态中的所有可能的本征态进行了操作,这是量子计算机的并行性.量子计算机中要进行有效的并行操作需要依赖于量子纠缠.量子纠缠是指在量子体系中一个子系统的测量结果,无法独立于其他子体系的测量参数^[3].假设一个自旋为零的粒子,衰变为两个自旋为 $\frac{1}{2}$ 的粒子,

测量每个粒子在 Z 基的自旋状态,根据泡利不相容原理,如果其中一个粒子自旋向上,则另一粒子必定自旋向下,即 $|\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$ 或 $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2$.根据叠加态原理,测量前体系处于两种状态的叠加态,即

$$|\Psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 - |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2)$$

不管两个粒子间的距离多远,如果测量其中一个粒子的自旋使其坍缩为自旋向上的状态,则另一个粒子同时坍缩为自旋向下的状态.

量子计算机中经常用受控非门(CNOT)来构建纠缠态,并实现简单的并行运算. CNOT门有两个量子位,一个是控制量子位记为 x ,另一个是目标量子位记为 y . 令输入端为

$$x_{in} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$y_{in} = |0\rangle$$

就可以实现纠缠和简单的并行运算,如图3所示.

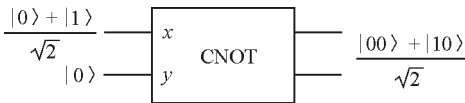


图3 CNOT门实现纠缠和简单并行运算

经CNOT门后 x 的输出不变,为

$$x_{out} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

y 的输出为

$$y_{out} = y \oplus x$$

算符 \oplus 可以视为经典逻辑门的异或操作,这样 y 就与 x 产生了纠缠. 因为

$$x_{in} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

处于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的叠加态,所以 y_{out} 也是叠加态,为

$$y_{out} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

最后总输出结果为 $\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$. 在 $|00\rangle$ 中,第1位表示 x 的输出,第2位表示 y 的输出. 如此只进行了一次操作就同时获得了两个输出值,实现了并行运算.

如果令

$$x_{in} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad y_{in} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

可以得到如下输出 $\frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{2}$,我们就得到了4种不同的输出. 这个过程可以推广到任

意个量子比特上^[4].

如图3中的CNOT门运算可以用PBS和 $\frac{|H\rangle + |V\rangle}{\sqrt{2}}$ 叠加态的光子来实现,如图4所示.

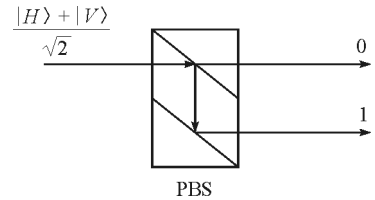


图4 CNOT门的物理实现

光子的偏振状态作为控制量子位 x ,其中 H 记为0, V 记为1. 路径作为目标量子位 y ,上行路径记为0,下行路径记为1. 将 $\frac{|H\rangle + |V\rangle}{\sqrt{2}}$ 的光子从上行路径射入PBS时,此时输入为

$$x_{in} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad y_{in} = 0$$

输出后的光子偏振状态不会改变,所以

$$x_{out} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

而路径的输出由光子的偏振状态决定,当光子偏振为0时被透射,路径的输出是上行即0. 当光子偏振为1时被反射,路径的输出是下行即1.

根据输入状态

$$x_{in} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad y_{in} = 0$$

可以得出路径的输出为

$$y_{out} = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

此时的总输出可以记为 $\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$,与图3一致. 该物理过程实现了光子的偏振、路径纠缠和并行运算.

量子计算机中的信息一般都是叠加态的,然而我们所需要的是一个确定的经典数据,因此需要从叠加态中测量出我们所需要的目标状态. 获得目标状态的可能性是与其概率有关的,为了提高目标状态的概率就需要我们采用量子算法. 以Grover搜索算法^[5]为例,从有 N 个数据的无序数据库中搜索1个目标数据,经典计算机算法平均需要搜索 $\frac{N}{2}$ 次,

而 Grover 搜索量子算法只需搜索 \sqrt{N} 次. Grover 的算法主要是重复进行 Grover 迭代, 每一次迭代都会使得叠加态中目标态的概率增大, 最后使目标态的概率足够大.

虽然人们已经开始应用量子态的一些特殊状态和过程, 但至于为什么量子态会发生叠加、坍塌和纠缠, 目前还没有一个公认的解释, 还需要人们不断的研究探索来完善. 物理学中一个新的发现, 又会带来新的问题, 所有目前已有的认为正确的理论都有可能被否定, 这正体现了物理学是一个不断发展的科学, 或许物理学的大厦永远也不会完工. 物理是一个充满未知并不断探索真理的学科, 驱动着人们的好

奇心, 使得众多学者不断地投身到物理研究中并对其孜孜不倦. 这些内容对激发学生的好奇心和学习兴趣都有重要作用.

2.3 测量

进行量子计算之后我们需要对结果进行测量, 也就是对光量子的物理状态测量. 测量会造成量子态坍塌, 使量子从叠加态转化为本征态从而获得经典数据, 也就是说只能从 N 个数据中读取出一个数据, 所以测量的过程会丢失掉大部分信息. 在 2.1 和 2.2 部分中, 已经涉及了光子的偏振叠加和路径叠加以及它们的纠缠态, 结合上述知识, 我们可以实现简单的光子偏振态测量, 如图 5 所示.

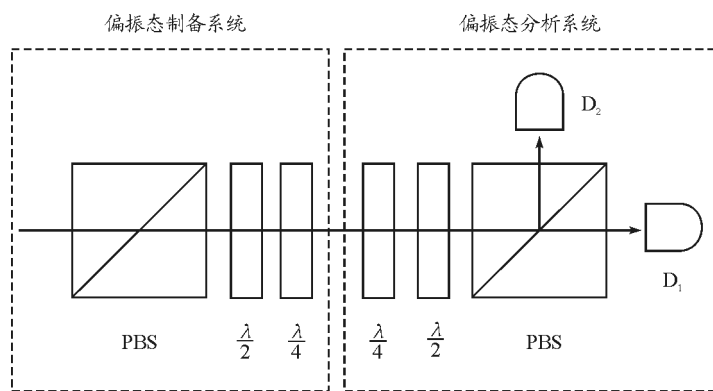


图 5 光子偏振状态测量

利用偏振态制备系统可以制备出水平和垂直的偏振叠加态 ($\alpha |H\rangle + \beta |V\rangle$) 的光子. 偏振态分析系统 (PAS) 可以测量光子的偏振状态, 它由四分之一波片 ($\frac{\lambda}{4}$)、二分之一波片 ($\frac{\lambda}{2}$)、PBS 和单光子探测器 (D) 构成. PAS 中的四分之一波片和二分之一波片的角度都为零时就可以测量光子是 H 偏振还是 V 偏振. PAS 中的 PBS 会透射 H 光, 反射 V 光, 这样就将路径和偏振纠缠起来了. 在两个路径分别放置一个单光子探测器作为测量手段, 因为测量会造成叠加态的坍塌, 所以两个光子探测器只能有一个接收到光子, 如果 D_1 接收到光子则光子的偏振状态为水平偏振, 反之则为垂直偏振.

在上述测量中, 当一个光子入射的时候只能由一个单光子探测器接收到光子, 体现的是光的粒子性. 而哪个单光子探测器能接收到光子, 由光子的偏振状态决定, 偏振又是波动性所特有的, 这就印证了

光的波粒二象性. 在中学和普通的大学物理课程中光的波动性和粒子性都是由不同的实验分别体现并且需要多个光子参与, 而本例仅通过一个实验和一个光子同时体现了单光子的波粒二象性.

3 我国光量子计算机主要成就及教育意义

量子计算机的提出已经有 40 余年, 其发展大致分为算法和物理实现两部分. 算法上已经取得了许多重大突破, 最著名的是 Shor 算法. Shor 提出通过量子并行运算可以快速解决经典计算机难以处理的大数分解问题, 能轻松破解目前最有影响力的 RSA 密码加密算法^[6]. 相比于算法, 物理实现显得有点落后, 包括 Shor 算法在内的很多算法无法在工程中实现. 目前量子计算机只是解决某些特定问题上优于经典计算机, 要达到经典计算机那样的通用计算阶段还有很长的路要走. 我们需要理性看待量子计算

机,不能盲目听信一些过分夸大的言论,更不能吹捧.简而言之,量子计算机还是一个不成熟的技术,但是有着巨大的发展前景.量子计算机带来算力的飞跃未来可能会颠覆基础科研、医药和新材料研发、信息安全和人工智能等领域,因此发展量子计算机对于国家而言十分重要.

我国在光量子信息和计算技术上取得了许多重大突破.2017年我国实现了世界上首台超越经典计算机的单光子量子计算机,在特定的玻色采样问题中比世界第一台通用经典计算机 ENIAC 快 220 倍,远超国际同行水平^[7].2018年我国又实现了 6 个光子 3 个自由度的 18 量子比特纠缠,再次刷新世界纪录继续领跑^[8].2020年我国研发的“九章”光量子计算完成一个高斯玻色采样模拟只花了 200 s,而目前最快的超级计算机“富岳”预计要花费 6 亿年的时间,证明了量子计算机的优越性^[9].这每一项成就背后都是对已有理论和技术的突破创新.我国不仅在光量子计算机技术上位于世界前列,在超导量子计算机上也是一流的.在经典计算机上我国起步较晚,没有跟上发达国家的脚步,又因为《瓦森纳协定》以西方国家为主的 42 个国家限制向中国在内的非成员国提供军民两用产品和高新技术,使得在很多“卡脖子”高新技术领域失去了自主权.特别是近年来的一些发达国家恶意阻碍我国发展,使得我国发展遭遇一定的阻力.

太多的历史经验告诉我们,落后就要挨打.为此我们奋起直追,不光在光量子计算机上位于世界前列,在量子通信、5G、航天等领域也是世界一流水平.向学生普及我国量子计算的发展历史和成就不仅让学生对量子计算机有一个科学正确的认识,还可以激发学生的爱国情怀和民族自豪感;也让学生知道掌握核心技术和创新能力对于一个国家的重要性,激发学生对学习物理甚至投身科学研究的热情和社会责任感;使学生更加重视创新思维和能力,以发挥物理学科的立德树人功能.

4 结束语

光量子计算机涉及众多中学物理和大学物理的

知识,包括不确定性原理、光的波粒二象性、光的偏振和干涉等,通过学习这些物理知识不仅可以帮助学生理解量子计算机的内部原理形成科学正确的认识,还能让学生将课堂上学习到的知识结合本国最新的科学技术发展.这在深化学生已有的知识的同时,还超越了课本上的知识、扩展学生的视野、培养学生严谨的科学态度、全方位渗透了科学技术社会(STS)教育.另外,我国光量子计算机的发展历程与所取得的成就也蕴含了丰富的教育资源,结合时事适当地向学生讲解,可以对学生起到良好的思想教育作用.

参考文献

- 1 郭光灿,陈以鹏,王琴.量子计算机研究进展[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2020,40(5):3~10
- 2 Feynman R. Simulating physics with computers[J]. International Journal of Theoretical Physics,1982, 21(6/7):467~488
- 3 苏晓琴,郭光灿.量子通信与量子计算[J].量子电子学报,2004(6):706~718
- 4 Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang. 量子计算和量子信息(一)——量子计算部分.赵千川,译.北京:清华大学出版社,2003.30
- 5 Grover L K. A fast quantum mechanical algorithm for database search[C]//Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing. 1996.212~219
- 6 Shor P W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring[C]//Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science. IEEE,1994.124~134
- 7 Wang H, He Y, Li Y H, et al. High-efficiency multiphoton boson sampling[J]. Nature Photonics, 2017,11(6):361~365
- 8 Wang X L, Luo Y H, Huang H L, et al. 18-qubit entanglement with six photons' three degrees of freedom[J]. Physical review letters, 2018, 120(26): 260502
- 9 Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. Science, 2020,370(6523):1460~1463