

文章编号: 1672-8785(2017)10-0007-06

论光子分裂视角下二进制数据的量子态表达

王忆锋

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 根据相关的基本概念, 从量纲分析和思想实验的角度介绍了光速的起源, 并指出了超光速的不可能性。深入探讨了光量子 and 量子态等概念的内涵。基于光子分裂的视角, 分析了基于量子态表达二进制数据的物理实质, 提出了可控的光子分裂的概念。可控的光子分裂是实现二进制数据量子态表达的前提。讨论了量子通信的现有理论基础可能会面临的问题。

关键词: 光子分裂; 量子态; 二进制数据; 量子计算; 量子通信

中图分类号: O572.31 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.10.002

On the Quantum State Representation of Binary Data from the Perspective of Photon Splitting

WANG Yi-feng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: According to relevant basic concepts, the origin of the speed of light is presented from the point of dimensional analysis and thought experiment. The impossibility of faster-than-light is pointed out. The connotation of the concepts such as light quantum, quantum state, etc. is discussed in depth. On the basis of the view of photon splitting, the physical essence of quantum state representation of binary data is analyzed and the concept of controllable photon splitting is proposed. Controllable photon splitting is the precondition for realizing quantum state representation of binary data. The problems which the existing theoretical basis of quantum communication may face are discussed.

Key words: photon splitting; quantum state; binary data; quantum computation; quantum communication

0 引言

以 0 和 1 组成的二进制数据是现代数字信号体系的基础, 其表达、产生和复制也是量子计算/量子通信等技术的重要内容。本文从基本概念出发, 从量纲分析和思想实验的角度介绍了光速的起源, 指出了超光速的不可能性。然后对

光量子 and 量子态等概念的内涵进行了深入梳理和探讨。基于光子分裂^[1-5]的视角, 分析了基于量子态表达二进制数据的物理实质, 提出了可控的光子分裂的概念。最后提出了一个量子通信的基本模型, 并据此讨论了量子通信的现有理论基础可能面临的问题。

收稿日期: 2016-12-29

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

1 超光速的不可能性

在文献 [5-6] 中, 作者从量纲分析的角度提出了一个思想实验, 并从中推导出了光速的概念。因其十分简短且与本文内容相关, 故在此重述一下。

能量 (E) 的量纲为焦耳 (J), 其定义为

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 \quad (1)$$

式中, N 为力的量纲 (牛顿); kg 为质量 (M) 的量纲; m/s 为速度的量纲。

根据式 (1) 所示的能量量纲可以写出:

$$1 \text{ m/s} = \sqrt{\frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}}} \Rightarrow u = \sqrt{\frac{E}{M}} \quad (2)$$

式中, 比例系数 u 具有速度量纲, 简称为速度。

假设将整个宇宙体系压缩成唯一的一个质点, 称为初始质点。初始质点的速度 u 称为初始速度。初始质点具有整个宇宙的全部能量 E_U 和质量 M_U , 并有

$$u = \sqrt{\frac{E_U}{M_U}} = c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (3)$$

此时的初始速度 u 称为光速 c 。

如果认可速度变化与能量相关且不可能随心所欲 (即想提高多少就提高多少), 那么就要认可光速 c 是速度的极限, 不可能再增加。这是因为把整个宇宙的全部能量和质量都集中到一个初始质点上才得到了光速 c 。此时已经再也没有任何多余的能量或质量可用于把速度提高到光速以上, 这就意味着超光速是不可能的。指出这一点是因为有报道称可以实现超光速。例如, “非局域量子模拟器让信息以 1.9 倍光速传输^[7]”。如果认可上述分析过程及结论, 那么有关超光速等诸如此类的说法可能就应该重新考虑了。

将式 (3) 中的下标 “U” 去掉, 则可写出:

$$E = c^2 M \quad (4)$$

这也是爱因斯坦的狭义相对论所给出的表达式。它表明物质的质量与其能量成正比, 这一关系又称为质量守恒定律和能量守恒定律, 合称质能守恒定律。

式 (4) 表明, 从数值上来说, 光子质量的大小只是光子能量大小的 $1/c^2$ 左右。因此, 单光子质量的测量要比单光子能量的测量更为困难。反映在探测技术上, 就是至今还没有出现单光子质量探测器。这可能就是现有的光子探测器一般属于能量转换器 (换能器) 而不是质量转换器 (换质器) 的原因。

2 光(量)子概念的辨析

在基本物理常数中, 普朗克常数 h 是一个最小的常数^[8], 其量值为

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (5)$$

因为普朗克常数 h 具有最小量值, 所以就有可能以 h 为基本单元并在其前面引入一个可变系数来表示某些变化的量值。例如, 普朗克常数 h 的量纲 $\text{J} \cdot \text{s}$ 被消掉 s 后就是能量的量纲, 进而表示能量 (ϵ)。为此可以引入一个量纲为 $1/\text{s}$ 的变量。事实上, 具有 $1/\text{s}$ 量纲的变量就是频率 ν , 即

$$\epsilon = h\nu \quad (6)$$

式 (6) 是普朗克在 1900 年提出的能量量子化假说, 即能量是一份一份的, 其中每份能量称为一个量子 (quantum)。

如果将普朗克常数 h 与前面导出的光速 c 组合在一起, 同时还要表示能量, 那么就要写为

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda} \quad (7)$$

式中, λ 具有长度的量纲, 称为波长。只有引入一个具有长度量纲的参数作用于普朗克常数 h 与光速 c 的乘积, 才能导出能量的量纲。式 (7) 是爱因斯坦在 1905 年提出的光量子 (light quantum) 概念, 即在空间中传播的光是一份一份的, 其中每份光称为一个光子。

本文作者指出, 光子是可以分裂的^[1-5]。光子分裂在本质上就是光子能量的分裂。一般

说来, 假设一个光子分裂成 n 份, 即有 n 个分裂光子, 则

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_1} + \frac{hc}{\lambda_2} + \cdots + \frac{hc}{\lambda_n} \quad (8)$$

并有

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \cdots + \frac{1}{\lambda_n} \quad (9)$$

从历史演化过程来看, 在英语中一开始是 light quantum (光量子)。1926 年, 美国物理化学家 Gilbert Lewis 提出了“光子 (photon)”一词^[9]。此后, light quantum 去掉 light 变成了 quantum。目前, 量子计算/量子通信中的“量子”在英语中都用 quantum。

从某些文献资料中可以看出, “量子”、“粒子”和“光子”等术语不加区别或者不加说明地出现。为了保持所用术语在逻辑上的一致性, 本文将光速 c 运动的质点称为光子, 并将以非光速运动的质点称为粒子。在有些资料中可以看到“光子的静止质量等于零”的说法。作者认为这一表述可能并不严谨。因为光子不静止, 静止的就不是光子, 所以光子没有所谓的静止质量。概念上比较完整的说法或许应该是: (低能) 光子的质量几乎为零。

在数量上可以将光子分为单光子和多光子。单光子特指一个光子。量子就是单光子。多光子是多个单光子的聚合, 当然这里所说的“多”是个幂次量级或者指数量级的概念。

为了建立有关光子数的具体概念, 这里介绍一个算例。假设照射到光电探测器光敏区的每个光子都可以产生一个电子电荷 q :

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s} \quad (10)$$

式中, C 为电荷量纲 (库仑); A 为电流量纲 (安培)。对于不太大的带宽, 典型的可检测电流值约在 pA (10^{-12} A) 量级^[10]。因此, 要产生 1 pA 的电流, 每秒钟所需的光子数为

$$N = \frac{10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 6.25 \times 10^6 \quad (11)$$

这意味着每秒钟至少要有 6.25×10^6 个光子照射到光电探测器的光敏区才能产生可检测的 1 pA 电流。如果有某种增益机制可以将 1 个电荷所产

生的电流放大 10^6 倍左右, 那么 1 个光子也可能产生 1 pA 电流。这种增益机制称为雪崩效应。相应的器件有雪崩光电二极管和光电倍增管等。

由于汉语一般不用复数的概念, 仅从字面上并不好看“光子”、“量子”、“粒子”等术语之间的差异。简单说来, 量子 and 光子在英语中就是单复数的区别。量子是 photon (单数), 光子是 photons (复数)。单光子写为 single photon (在 SPIE Digital Library 数据库中检索一下就可以看到这一点) 而不是写为 a photon, 例如单光子探测器 (Single Photon Detector, SPD)。

事实上, 除了量子计算/量子通信, 还有光 (子) 计算/光 (子) 通信。关于光 (子) 计算, 英语中的一种解释是 “Optical or photonic computing uses photons produced by lasers or diodes for computation^[11]”; 关于光 (子) 通信, 英语中的一种解释是 “Optical communication, also known as optical telecommunication, is communication at a distance using light to carry information^[12]”; 又如关于光 (light), 英语中的一个例句是 “Like all types of light, visible light is emitted and absorbed in tiny ‘packets’ called photons ...^[13]”。从这些英语表述中可以看出, 光 (子) 计算/光 (子) 通信是基于多光子的计算或通信, 而量子计算/量子通信则是基于单光子的计算或通信。

3 量子(状)态概念的辨析

量子态是量子状态的简称。如上所述, 量子就是单光子, 故量子态就是单光子的状态。利用单光子的状态即量子态实现的通信称为量子通信; 利用单光子的状态即量子态实现的计算称为量子计算。

量子态的概念源于人们对氢原子中电子轨道的研究^[14]。如图 1 所示, 电子轨道是一个椭圆。椭圆轨道有长轴和短轴之分。决定电子椭圆轨道长轴长度的是主量子数, 它同时还决定电子的总能量; 决定电子椭圆轨道短轴长度的是副量子数; 根据平面几何原理, 两条直线确定一个平面, 故电子椭圆轨道平面由其长轴和短轴确定, 而决定电子椭圆轨道平面方向的则是磁量子数。椭圆轨道描述的是电子围绕原子核旋

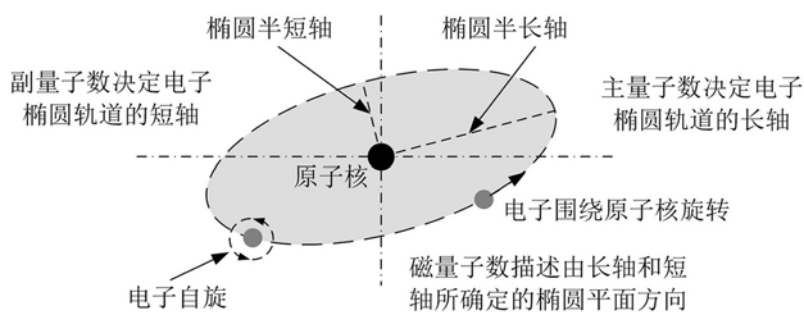


图 1 量子态概念源于氢原子中的电子轨道

转的情况。此外，电子还围绕自身的某个轴旋转，简称自旋。决定电子自旋状态的是自旋量子数。这样电子一共有四个量子数，其中每个量子数对应一个量子态。

光子的运动轨道或者轨迹是一条直线。从概念上来说，既然是直线，就没有椭圆轨道中的长轴和短轴；所以当把出自电子轨道的量子态概念推广到光子时，与椭圆相关的含义或者术语显然均没有存在的意义。这样四个量子态就只剩下两个：一个是主量子数，它用于决定光子的能量；另一个是自旋量子数，它用于描述光子的运动状态。

从概念完备性的角度来说，光子可能还要再加上一个量子态，即质量状态。这样从种类上划分的话，光子的量子态就有三个，包括能量状态、质量状态和运动状态。当然根据式(4)，光子的能量和质量是等价的。

4 二进制数据的量子态表达

信息或数据的表达可以有多种方式。在以电子计算机为典型代表的数字技术中，广泛采用二进制即 0 和 1 两个数码来表达数据。因为只有 0 和 1 两种状态，所以任何具有可识别的两个不同稳定状态的“器件”都可以用来表达二进制数据。这里所说的“器件”，可以是宏观尺度上的，也可以是微观尺度上的；而状态可以是基于能量的高或低、质量的大或小，也可以基于两个刚好相反的动作，比如(向)左旋(转)和(向)右旋(转)，等等。

左旋和右旋恰好是光子的两种自旋状态。光子的自旋可以想像成绕着某一个轴自转的微

陀螺。陀螺可以左旋，也可以右旋。光子一左一右两个相反的自旋状态非常适合于表达二进制数据 0 和 1。

假设用单光子的量子态来表达一串二进制代码 10010。如上所述，可以有以下几种方式：

(1) 基于单光子能量状态的表达。利用能量的相对大小来定义 1 和 0。例如，将能量较大的光子定义为 1，将能量较小的光子定义为 0。这样，通过选择 2 个能量较大的光子和 3 个能量较小的光子，就可以表达 10010。(2) 基于单光子质量状态的表达。利用质量的相对大小来定义 1 和 0。例如，将质量较大的光子定义为 1，将质量较小的光子定义为 0。这样，通过选择 2 个质量较大的光子和 3 个质量较小的光子，就可以表达 10010。(3) 基于单光子自旋状态的表达。将左旋的光子定义为 1，将右旋的光子定义为 0。这样，通过选择 2 个左旋的光子和 3 个右旋的光子，就可以表达 10010。这种方法总共用了 5 个光子。

我们可以想像一下，能否用 1 个光子表达 10010？如此就要用到光子分裂，即让 1 个光子分裂成 5 个光子，而且它们满足以下关系：有 2 个较大能量的光子和 3 个较小能量的光子；或者有 2 个较大质量的光子和 3 个较小质量的光子；或者有 2 个左旋的光子和 3 个右旋的光子。这样总体看来，基于光子分裂就可用 1 个光子表达 10010。

5 量子态表达的实现

表达的信息只有被接收才能被利用。以 10010 为例，一般是在发送方完成 10010 的信息表达，

即生成信息, 然后将其发送给接收方, 接着通过后续处理完成对所接收信息的解读或利用。

二进制信息的不同量子态表达需要不同的实现方式。从探测技术的角度来描述, 基于单光子能量表达的二进制信息需要能量探测器, 例如单光子雪崩二极管; 基于单光子质量表达的二进制信息需要质量探测器。从现有的技术水平来看, 暂时无法考虑光子质量探测器。基于单光子自旋状态表达的二进制信息需要单光子自旋状态探测器。

从某种意义上来说, 单光子能量探测器面临的是一个确定性问题。由于单光子的能量是确定的 (即具有单一性), 只要探测器的增益足够高、信噪比足够大, 那么就肯定可以探测到单光子。相比之下, 若不对单光子的状态加以控制, 则单光子自旋状态探测器面临的是一个不确定性问题。接收首先是一种物理接触, 简单地说, 就是光子与 (探测器) 介质的碰撞。碰撞必然会导致光子分裂, 而光子分裂又具有随机性。因此, 如果对其缺乏有效控制, 那么 1 个光子碰撞以后是分裂成 2 个光子还是 3 个光子, 各个分裂光子飞往哪一个方向, 分裂光子中又有几个左旋、几个右旋, 等等, 都具有随机性或者不确定性, 这是不可预料的; 每个分裂生成的光子都有一个自旋状态, 所以选取哪一个分裂光子的自旋状态作为发送过来的光子的自旋状态, 也是一个问题。

实际上, 对于自旋状态的产生来说, 这些问题也是存在的。由于并不是“想”让光子左旋就左旋, “想”让光子右旋就右旋的, 一定要通过对光子施加某种物理作用或者接触才能实现对自旋状态的控制。这就如同现实世界中陀螺的转动方向是由所用外力决定的一样。但是光子又有所不同, 陀螺受力不分裂, 光子受力就分裂。如果不能得到满足需求的自旋状态组合, 那就只有重头再来一次。换句话说, 可控的光子分裂是基于光子自旋态的量子技术实用化的前提。可控具体包括重复性、可靠性、准确性等方面的相应要求。

6 关于量子通信的讨论

前面讨论了利用单光子的量子态表达二进制数据的几种可能途径。这里仍以 10010 为例, 若要把这串二进制数据传送出去, 例如从 A 方发给 B 方, 如图 2(a) 所示, 则构成了一个量子通信系统。其中, A 是发送方, B 是接收方。如果在 A 方与 B 方之间插入一个第三者作为截听方 I, 那么就形成了一个通信中的截听或者窃听问题, 如图 2(b) 所示。假设截听方 I 没有信息复制能力, I 方每接收到一个光子, 由于光子湮灭, 相应地 B 方就少接收到一个光子。B 方根据所收到的光子数量的减少 (例如本来 B 方应该收到 5 个光子, 结果只收到 4 个), 即可判断通信被截听。

考虑到逻辑上的对称性或者平等性, 假设三方的技术能力完全相同, 即各方均可产生具有特定自旋方向的光子, 如图 2(c) 所示。于是截听方 I 每接收到 A 方发送的一个编码光子, 就测出并记下它的自旋状态, 例如是左旋还是右旋。由于截获光子是一种接触动作, 必然会导致 A 方发送过来的光子因分裂而失去原始信息。此时, 截听方 I 如果能够根据已经记录下来的自旋状态信息产生一个具有同样自旋状态的光子, 并将其作为替代编码光子发送给接收方 B, 那么就可实现光子自旋状态信息的完整复制。最终接收方 B 收到的光子数仍然保持不变 (还是 5 个), 于是发送方 A 和接收方 B 都无法判断是否存在截听方 I。

图 2 是根据单光子的自旋状态所作的讨论。显然, 对单光子的能量状态也能作类似分析。假如这种分析过程能被认可的话, 就说明量子通信仍然可复制, 其“无法克隆性”或者“绝对安全性”的优点并不存在。

量子通信的另一个理论基础是光量子的不可分割性。如果认可光子分裂的话, 那么也就意味着量子通信的这一理论基础遭到否定。

7 结束语

量子态是指单光子的状态, 包括能量状态、

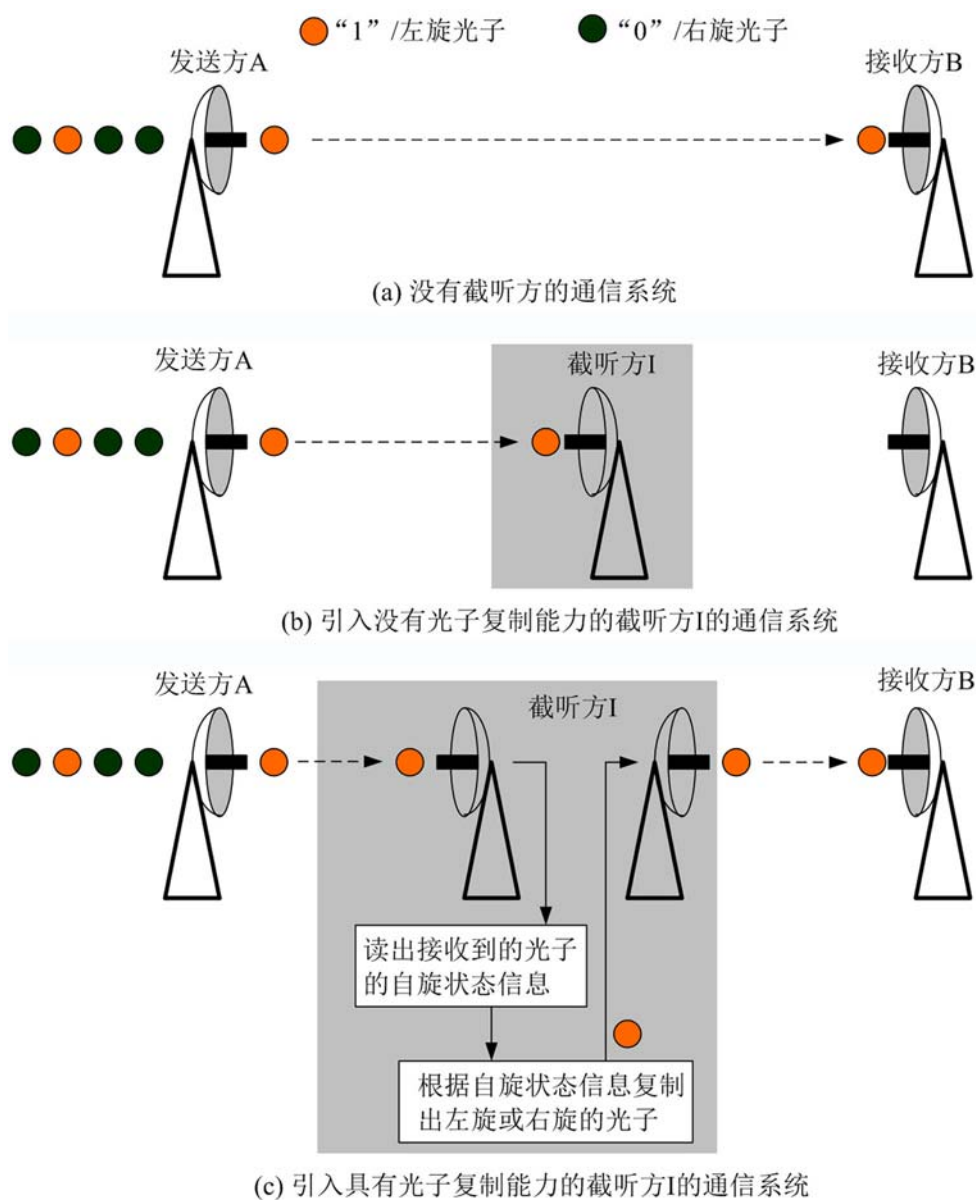


图 2 量子通信系统

质量状态和运动状态。二进制数据的量子态既可以用单光子的能量状态来表达,也可以用单光子的质量状态来表达,还可以用单光子的自旋状态来表达。

单光子的两个自旋状态非常适合表达二进制数据。但是自旋状态的产生和接收会涉及到光子分裂的问题。可控的光子分裂是利用单光子自旋状态表达二进制数据的前提。为了实现量子计算/量子通信的实用化,首先要有可控的光子分裂,其次需要将可控的光子分裂做到工程化。

目前的量子通信研究具有两个理论基础:第一个是光量子的不可分割性;第二个是光量子的无法克隆性。如果认可光子分裂,那么就意味着光量子的不可分割性遭到否定。如果能够实现可控的光子分裂,那么也就意味着光量子的无法克隆性不复存在。即使没有光子分裂,只要接收到一个光子,就把它记录下来,并读出其特性参数。然后再根据这些特性参数产生一个相同的光子并将其发送出去。这样做同样否定了光量子的无法克隆性。

(下转第 30 页)