

# 光的本性

范良藻<sup>1</sup>, 冯劲松<sup>2</sup>

(1. 中国科学院中科集团, 北京 100086; 2. 重庆新大高技术研究所, 重庆 408200)

[摘要] 文献[1]提出每一个光量子  $hf$  都由个数不同的  $N(\lambda)$  个单光子组成的假设, 并在已公布的氢光谱的数据中找出和不同  $hf$  的光量子相对应的  $N(\lambda)$  值和单光子的质量。文章报告了进一步发现光量子  $hf$  的波长与  $N(\lambda)$  的乘积在某些特定条件下是一个不变量  $\zeta = N(\lambda)\lambda$ <sup>[2]</sup> 这一特征现象, 从而破解了波粒二象性近百年之迷端: 所谓光量子的波长不过是相邻两个单光子的间距, 而频率  $f$  则是在单位时间内通过空间坐标某处单光子的个数, 并用单光子的数形结构导出所有惯性系中光速  $c = \lambda f$  都是不变的结论。狭义相对论的光速不变原理, 不再是一个假设, 而是一个被确认的事实。但是不同惯性系中所测得的波长和频率却不尽相同, 这对相对性原理或许是一个挑战。还讨论了用单光子理论导出光的圆孔衍射、折射和反射的公式。

[关键词] 光量子; 波粒二象性; 原子光谱; 狭义相对论

[中图分类号] O431 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)02-0058-10

## 1 前言

关于光的本性, 是粒子还是波动? 爱因斯坦在晚年曾说: “关于光的本性经过 50 年的思考, 也没有使我接近解答光量子是什么的问题”<sup>[3]</sup>; “辐射的波粒二象性已由量子力学以巧妙而非常成功的方式作了解释。几乎当代所有的物理学家都认为, 这样的解释基本上是最最终的解释, 而在我看来, 它不过是一条暂时出路。”<sup>[3]</sup> 但是爱因斯坦的质疑, 并没有阻碍 20 世纪后 50 年量子理论的蓬勃发展。这说明无论是相对论, 还是量子论, 必有其合理成功之处, 但也绝非完美。

2004 年 6 月原中国科学院院长周光召先生在中关村理论物理研究所做的报告“如何发展中国的理论物理”时说, “20 世纪最光辉的是最基本的理论, 到现在为止, 仍有迹象表明, 像相对论和量子力学, 或者是量子场论都不是最终的理论。无论是关于基本粒子还是天体物理, 不断提出很多新的现

象, 使现有的理论无法完全加以解释。……毫无疑问, 基本理论还需要继续发展, 而且有可能继续发展……”<sup>[4]</sup>。

笔者的基本观点是: 科学基本理论的探讨, 离不开前人对科学疑难遗留的总结, 离不开科学实验对经验事实的占有与启迪, 离不开针对经验事实允许做出的科学假设。没有新的经验事实的发掘, 就很难有基本理论的突破。笔者建立本文理论框架的出发点有二: 一是不存在没有质量  $m$  作载体的能量  $E$ ; 二是带电体(如电子、质子)之间的相互作用不是超距的, 存在一个传播相互作用的极限速度光速  $c$ 。因此, 库伦定律相互作用力的大小不仅和带电体的距离有关, 也应和带电体之间的相对运动速度  $v$  的  $v/c$  项有关, 在  $v/c \ll 1$  时, 库伦定律近似有效。

## 2 单光子理论的萌生和发展

光量子  $hf$  以光速  $c$  在宇空中到处飞越, 如果

[收稿日期] 2006-08-15; 修回日期 2006-12-04

[作者简介] 范良藻 (1931-), 男, 上海市人, 中国科学院研究员, 研究方向: 爆炸力学及其测试、激波动力学、激波压力传感器的研制、量子光学等

视作微粒，它有大小吗？它有结构吗？X 光对人体有很大的穿透力而红外线穿透力则很弱。一个最初步的假设是认为不同能量的光子  $hf$  是由个数不同的  $N(\lambda)$  个单光子所组成。综合方程：

$$\begin{aligned} E &= hf, \\ E &= m_{hf}c^2, \\ C &= f\lambda, \\ m_{hf} &= N(\lambda)m_0, \end{aligned}$$

很容易得出普朗克常数

$$h = m_{hf}c\lambda = N(\lambda)\lambda m_0 \quad (1)$$

$m_{hf}$  定义为光量子的质量， $m_0$  定义为单光子的质量。

假设  $m_0$  是一个不变量，检验式 (1) 的真伪判据在于如何寻找出对应不同  $\lambda$  值的  $N(\lambda)$  这一正整数序列，根据实测  $\lambda$  的数据，令  $\zeta = N(\lambda)\lambda$ ,

则看  $\zeta = h/m_0c$  是不是一个不变量。为此，从原子结构最为简单的氢光谱巴尔末线系、紫外喇曼线系和氦离子谱线数据出发，来探讨单光子理论是否是一个自洽而又合理的学说。

由式 (1) 可知，在某一个  $\lambda$  值已知的情况下  $N(\lambda)m_0$  也是一个已知数。用不同的正整数  $N$  按式 (1) 列表算出不同的  $m_0$  值。通过选取不同的  $\lambda$  值再进行同样的计算，针对不同  $\lambda$  值的数据，就能发现在众多  $m_0$  中有一个共同值和其相应的  $N$  数。这个  $m_0$  的共同值就是要寻找的单光子的质量，在  $m_0$  这一不变量被确定后，由式 (1) 确定出不同  $\lambda$  值所对应的  $N$  值，即可惊奇地发现，在特定的条件下， $N\lambda$  确是一个不变量（见表 1 至表 3）。表明了单光子理论的自洽性和合理性。

表 1 氢原子巴尔末线系<sup>[5]</sup>

Table 1 Hydrogen atom Balmer spectral lines<sup>[5]</sup>

颜色	实测 $\lambda/\text{nm}$	一份光子 $hf$ 的 $m \times 10^{-34}/\text{g}$	$hf$ 含光子个数 $N$		光子质量 $m_0 \times 10^{-34}/\text{g}$	$N\lambda/\text{nm}$
			实测数	理论数		
红	656.210	33.682 038 7	10	10	3.368 203 87	6 562.10
绿	486.074	45.471 452 2	13.5	13	3.368 203 87	6 561.99
蓝	434.010	50.926 224 4	15.119	15	3.368 203 87	6 561.80
紫	410.120	53.892 740 3	16	16	3.368 203 87	6 564.90
紫外 1	386.059	57.259 465 5	17	17	3.368 203 87	6 563.00
紫外 2	364.581	60.624 362 3	17.999	18	3.368 203 87	6 562.46

表 2 氢原子紫外线喇曼线系<sup>[6]</sup>

Table 2 Hydrogen atom Lyman spectral lines<sup>[6]</sup>

实测 $\lambda/\text{nm}$	$hf$ 含光子个数 $N$		$N\lambda/\text{nm}$
	实测值	理论值	
121.566	54.008	54	6 564.50
102.588	63.909	64	6 565.60
97.254	67.510 0	67	6 565.60
94.976	69.130 3	69	6 553.30
93.786	70.010 4	70	6 565.70

表 3 氦离子的光谱线<sup>[5, 7]</sup>

Table 3 Helium ion spectral line<sup>[5, 7]</sup>

实测 $\lambda/\text{nm}$	$hf$ 含光子个数 $N$		$N\lambda/\text{nm}$
	实测值	理论值	
656.72	9.99	10	6 565.6
546.29	12.11	12	6 565.5
438.56	15.17	15	6 574.0
411.16	15.99	16	6 567.3
386.89	16.99	17	6 576.2

在表 1 至表 3 中出现少量  $N$  数非正整数的情况，可能是波长  $\lambda$  的测量值有差错的缘故。如将表 3 中的  $\lambda = 546.29 \text{ nm}$ <sup>[5]</sup> 改换为  $541.78 \text{ nm}$ <sup>[7]</sup>，那么  $N = 12.11$ ，也随之变为 12.01，两者的波长的差值只有 4.51 nm，落在测量精度的范围内。 $\zeta$  值的最大误差  $< 0.3\%$ ，从表 1、表 2 的数据中可得出如下结论：

1)  $N(\lambda)\lambda$  确为一常数，因此  $m_0$  也是一个常数，说明式 (1) 的合理性和自洽性；

2) 计算出的  $N(\lambda)$  是正整数，就证明了光子  $hf$  是由  $N(\lambda)$  个单光子组成的这一基本假定，对光子数  $N$  出现非正整数的情况是由于  $\lambda$  测量的精度不够带来的误差或个别记录有错，因为这些数据都是 20 世纪 50 年代前的实验结果，那时  $\lambda$  的测量精度还不到一个 nm，而当今光谱仪的测量精度已达到 0.035 nm 的水平；

3) 由于普朗克常数  $h$  的定义是 (长度)  $\times$

(动量), 因此由  $h = N(\lambda)\lambda mc$  可以设想光量子  $hf$  是由一串长度  $= N(\lambda)\lambda = 6\ 562\ \text{nm}$  的  $N$  个单光子组成。其数形分布是邻近 2 个单光子的间距为波长  $\lambda$ 。  $N$  个单光子在空间坐标某处的越渡时间为  $\Delta\tau$ , 那么  $N/\Delta\tau=f$  就是光量子的频率 (单位时间内通过某处的单光子数),  $(N-1)\lambda$  为光量子的长度。据此, 笔者自认为是破解了“波粒二象性”的百年谜端, 给出了光量子的数形结构分布。因而光的波动性不过是光量子的数形分布 (图 1)。

$$N\lambda = \zeta = \text{常数}, f = N/\Delta\tau$$

$$(N-1)\lambda = \text{光量子的长度}$$

光源 |  $\leftarrow (N-1)\lambda \rightarrow$  |

\*  $\cdot \lambda \cdot \lambda \cdot \lambda \cdot \dots \cdot \lambda \cdot \lambda \cdot \lambda \rightarrow m_0 c$

图 1 光量子数形的结构分布  
Fig.1 The distribution of the number  $N$  and spatial structure of photons

对复杂原子发射出的光量子是否满足  $\zeta = N(\lambda)\cdot\lambda$  和  $m_0$  值永远维持一个不变值, 尚待进一步研究。

### 3 应用举例和讨论

3.1 单光子新微粒说如何诠释光的衍射现象  
类似图 2 实验很多。

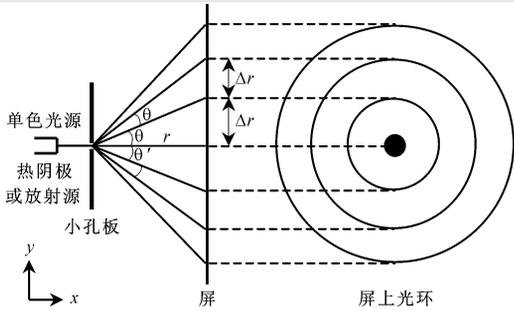


图 2 电子衍射和光衍射的示意  
Fig.2 Electrons' and photon diffraction

数据处理结果有

$$\Delta r = r/2\pi \tag{2}$$

$\Delta r$  为亮环的间距。

设图 2 衍射孔的直径为  $d$ 。若无档板, 电子或光子则直线运行, 无衍射。粒子在通过微孔或箔材时产生散射、使粒子落在亮环上,  $x, y$  方向的动量分别为  $p_x$  和  $p_y$ 。

$$p_y/p_x = \tan \theta = \Delta r/r \tag{3}$$

根据量子力学测不准关系,

$$p_y d = h/2\pi \tag{4}$$

由式 (3)、式 (4) 得

$$p_y = h/2\pi d = p_x \Delta r/r \tag{5}$$

$$h/2\pi d = Nm_0 c\lambda/2\pi d = p_x \Delta r/r = m_0 c\Delta r/r \tag{6}$$

由式 (6) 可得  $\zeta/2\pi d = \Delta r/r$ 。

令  $d = \zeta$ , 即取  $\lambda$  的整倍数  $N$  得

$$\Delta r/r = 1/2\pi \tag{7}$$

$$\Delta r = r/2\pi \approx 0.159\ 2r$$

这就普遍证明了式 (2)。

### 3.2 用单光子学说求证几何光学的折射和反射定律

几何光学的折射、反射定律是由实验证实的定律, 也可用费马最短光程原理假设予以论证。但假设不能取代光子在介质中运行的物理机制。下面用单光子的光径差导出几何光学的反射和折射定律, 这样不但证明了费马定律的普遍性, 也证实了单光子学说本身。

设有一束平行光投向一个光学界面介质 II, 即设想有一束单光子的平行光束 (图 3)。介质 I 是空气, 入射角为  $\theta$ , 介质 II 的折射系数为  $n$ ,  $c$  为单光子的光速,  $v$  为单光子在介质 II 中的光速,

$$n = c/v \tag{8}$$

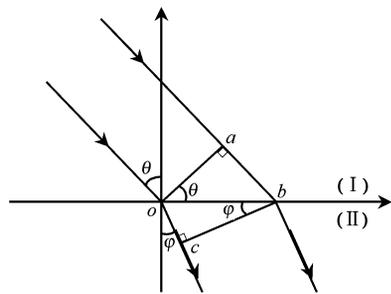


图 3 光的折射定律  
Fig.3 Refraction law of light

光线在 I, II 界面上的折射角为  $\varphi$ ; 单光子从  $a$  射向  $b$  的时间是  $\Delta t$ , 从  $o$  射向  $c$  的时间也是  $\Delta t$ ,

$$\overline{ab}/\overline{oc} = c\Delta t/v\Delta t = n,$$

$$\sin \theta = \overline{ab}/\overline{ob}, \sin \varphi = \overline{oc}/\overline{ob},$$

$$\sin \theta/\sin \varphi = \overline{ab}/\overline{oc} = n \tag{9}$$

此结果就是几何光学的折射定律。

光线的反射定律亦很容易用同样的方法证明 (图 4)。

### 3.3 实验数据进一步扫描

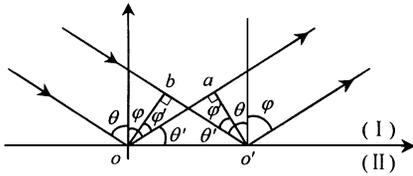


图 4 光的反射定律

Fig.4 Reflection law of light

表 2 取自文献 [6]，表中数据同样表明  $N\lambda = \zeta$ ， $\zeta$  是常数。这是对单光子学说进一步的支持。众所周知，原子中的电子从一个轨道跃迁到另一个低能量轨道时会发射光量子，或者说一次跃迁发射的单光子数为  $N$ 。这好像一把电子枪，每次发射的光子数为  $N$ ，光子的间距为  $\lambda$ 。这里有一个局限，即每次发射的光子数要大于或等于 1。那怎么解释由微波天线发射的电磁波的呢？唯一的解释是每次发射一个光子，过了一个  $\Delta t$  时间后，又发射第二个光子，第三个光子……，这就决定了波长  $\lambda$  和频率  $\nu$ ， $\lambda$  是发射光子的间隔时间  $\Delta t$  乘上光速  $c$ ， $\nu$  是单位时间发射的光子数。此时  $N\lambda = \zeta$  式不再成立，但是  $\lambda$  的物理意义并未改变，它代表前后两个光子在空间的距离。如果电视台主线的发射功率是 1 000 J/s，则单位时间向空间发射的光子数

$$N = 10^3 \times 10^7 / m_0 c^2 = 10^{10} / (3.336\ 98 \times 10^{-34} \times 2.997^2 \times 10^{20}) \approx 3.3364 \times 10^{22}.$$

如以 100 km 为传播半径  $R$ ，那么传到 100 km 处的光子数高达  $n$

$$n = N/4\pi R^2 = 3.336\ 4 \times 10^{22} / (12.566\ 4(10^7)^2) = 2.6769 \times 10^7 / \text{cm}^2$$

### 3.4 单光子实验求证

如果单光子学说成立，那么光子脉冲的间隔时间为  $\Delta t = \lambda/c = 1/f$ 。

以红光  $\lambda = 6\ 562.1 \times 10^{-8}$  cm 为例，

$$\Delta t = 6\ 562.1 \times 10^{-8} / 2.997\ 924\ 58 \times 10^{10} \approx 2.189 \times 10^{-15}$$

$$f = 2.997\ 924\ 58 \times 10^{10} / 6.562 \times 10^{-5} = 4.567 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

如果能设计一台仪器能测出脉冲时间分辨率为  $10^{-15}$  s 的仪器，则可验证单光子学说能否成立。

2004 年发射光谱仪的测试精度（美国太平洋光学仪器公司）已达 0.035~0.005 nm，包括红外光谱和  $\gamma$  射线光谱都应全新测试，以达更精确的

数据。

### 3.5 讨论

1) 笔者破解了普朗克常数  $h$  的物理意义，它反映的物理图像是一串间距为  $\lambda$  的  $N$  个光子（光子串的长度为  $(N-1)\lambda$ ）以光子串的动量  $Nm_0 c$  在空中穿行， $N$  数的不同代表颜色的不同，亦即进入视网膜的能量密度不同（不同的频率  $f$ ，即不同的波长  $\lambda$ ，对应不同的光子数  $N$ ）。

2) 测不准关系  $\Delta x \Delta p \approx h/2\pi$  不是一个精确关系，仅是一个量级的估算，常常用来定性估计体系的基本特征。

在论证公式 (2)  $\Delta r/r = 1/2\pi$  时，笔者用了测不准关系，并取  $d = N\lambda$  是说衍射圆孔的孔径应为  $\lambda$  正整数倍  $N$  时衍射环最清晰，它并不是出现衍射环的精确条件。可以认为本文的结论和立论都得到实验的支持。

3) 量子力学讲的几率波，同时也是物质波，这和惠更斯原理讲的电磁波有质的区别。光子经微孔因散射的不可控制性，才用了测不准的关系式，当光子穿过微孔后，其运动的轨迹仍是可循的。测不准并不代表轨道不存在。光子和电子是粒子，不是波。 $\lambda$  这看似波动的参数，指的不过是单光子间的间距。

4) 现在不清楚的是光子之间以何种方式联接，使  $N$  个光子串联成整体。假定光子同时还是一个谐振子，它有振动自由度，相互之间还有结合能。光子的动能是  $m_0 c^2/2$ ，光子之间似有一弹簧联接，其振动能为  $ka^2/2$ 。

单光子的总能  $= m_0 c^2$ ，光量子的能量  $hf = Nm_0 c^2$ ，光子的振动能  $= m_0 c^2/2 = ka^2/2$ ， $a$  为谐振子的振幅， $k$  为光谱振子的弹性系数， $T$  为振动周期，则

$$T = 2\pi(m_0/k)^{1/2}, a = \lambda/2\pi, k = 4\pi^2 hf^3/c^2.$$

这和光的衍射光环公式

$$\Delta r = r/2\pi$$

的形式完全一致。谐振子的振动当然是横向振动。它像一条飞龙在空中越过，至于  $k$  的来历肯定与“真空不空”的真空介质的性能有关。

5) 单光子微粒说受到几何光学的支持，并能解释光的衍射现象，使量子力学的波粒二象性之谜得以澄清和破解。

6) 不知不同元素原子的发射光谱是否都存在着一个  $\zeta$  常数。因此，可以按元素周期表的顺序

进一步测定  $\zeta$  值。这一数值在许多领域是很有用的。由氢离子光谱  $\zeta$  数值的实测数据表可知,不同元素原子的发射光谱的  $\zeta$  数值与氢原子光谱的  $\zeta$  常数可能稍微不同,这是由不同测量设备和测量方法所致,还是由于其他原因所造成,将进一步进行追踪研究。值得提出的是,由于单光子这一概念的提出,使我们能在氢原子发射光谱的数据中,找出对应的光子数。我们是有幸在埋藏了近百年的数据中发现了新的规律。

#### 4 爱因斯坦光速不变原理是单光子理论的必然结果

狭义相对论有两个基本假设。其一是光速不变原理,其内涵是:**a.** 所有惯性系都是平权的,光的传播速度  $c$  都是同一数值而且和光源是否在运动无关;**b.** 由于对钟的困难,目前所测到的光速,都是双程光速不变,而不是单程光速,因此,单程光速不变至今仍是一个假设。

现假设有  $N$  个单光子一头一尾,长度为  $(N-1)\lambda$ ,在纸面这一与实验室相对静止的物理空间或称优越参考系上以光速  $c$  向右传播,其他与纸面作相对运动的参考系,称为数学参考系。数学参考系相对优越参考系的速度是  $u$ 。在数学参考系中光速则以  $c-u$  或  $c+u$  在传播,  $A$  点是纸面上参考坐标,如第2节所述(图5)。

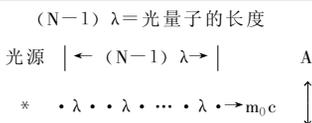


图5  $N$  个单光子在纸面上向右运行  
Fig.5  $N$  micro-photons moving rightwards on the paper surface

定义光源在  $\Delta t$  时间内发射  $N$  个单光子,  $\lambda$  为邻近两光子的间距。定义  $\Delta t$  为  $N$  个单光子穿过  $A$  处的越渡时间。在光源和纸面相对静止时,  $\Delta t = \Delta \tau$ , 则有

$$(N-1)\lambda = c\Delta\tau.$$

如果光源以速度  $u$  向右运动,虽然每一个单光子仍以光速前进(这是空间的性质),但第一个单光子和第  $N$  个单光子的间距被压缩为  $(N-1)\lambda'$ 。

$$(N-1)\lambda/(N-1)\lambda' = c/(c-u), \text{ 即} \\ \lambda' = \lambda(1-u/c) \quad (10)$$

此时,光量子在  $A$  处的越渡时间变短了,为  $\Delta\tau'$ , 则

$$\Delta\tau' = (N-1)\lambda'/c =$$

$$(N-1)\lambda(1-u/c)/c = \Delta\tau(1-u/c) \quad (11)$$

在  $\Delta\tau'$  时间内越过  $A$  点的单光子数仍为  $N$ , 那么在  $\Delta\tau$  时间内越过  $A$  点的光子数应为

$$N' = N\Delta\tau/\Delta\tau' = 1/(1-u/c) = \lambda/\lambda',$$

则有

$N'\lambda' = N\lambda = \zeta$  仍为不变量!  $N'$  与  $N$  的物理意义是单位时间通过  $A$  点的单光子数,必有  $N'/N = f'/f = \lambda/\lambda'$  和  $v'\lambda' = v\lambda = c$ 。不论光源是否在运动  $A$  处有一个钟,都是用同样的  $\Delta t$  时间内测量越过的光子数  $N$  和  $N'$ , 那就是测频率。从静止系看,运动光源在  $\Delta t$  时间内发射单光子的数目不变,但是光量子通过  $A$  点时,波长变短了 ( $\lambda \rightarrow \lambda'$ ), 频率也变快了 ( $f \rightarrow f'$ ), 但两者的乘积不变,此即光速  $c = \lambda f$  与光源运动无关的一个数学证明。在  $A$  处放两台仪器,一台是发射光谱仪,用以测波长;一台是频率计,以测通过  $A$  点的单位时间  $\Delta t$  内的单光子数。

另一种情况是在  $A$  点观察者与光源一起,以速度  $u$  相对纸面运动。即运动光源与  $A$  截面相对静止。由于  $A$  截面也在跟随作向右后退运动,越渡时间也不再为  $\Delta\tau'$ ,  $N$  个单光子到达测点  $A$  的越渡时间为

$$N\lambda'/(c-u) = N\lambda(1-u/c)/c(1-u/c) = \\ N\lambda/c = \Delta\tau \quad (12)$$

则越渡时间仍为  $\Delta\tau$ , 其结果与光源和测点  $A$  相对静止无异。

结论:以  $f\lambda = c$  定义光速,那么在任何惯性系中测光速,测出的光速都是不变的。但是频率与波长却在变。在不变中有变化,发生红移或紫移。

光速的物理意义究竟是什么?它是物体间相互作用的传播速度,因此物体的相互作用不仅与物体间的距离有关,同时也与物体之间的相对运动的速度有关,2个以光速或超光速远离的物体之间是没有相互作用的。如果引力波的波速也是光速,其结果和上述运动光源的情况一样,引力波的传播速度也是不变的。

#### 5 讨论相对性原理

以伽利略时空证实光速不变原理。讨论的出发点是假定存在一个优越空间,但计算的结果表明,

定义光速  $c = \lambda f$  这一物理量而言，惯性系都是平权的，所以从伽利略时空看，光速不变原理和相对性原理并不矛盾。但是，并不能因此就推广说，所有的物理规律都必然满足相对性原理。

从洛伦兹变换的角度看，光速不变的成立，要以尺缩、钟慢为代价。而且，还要求物理方程必须满足洛伦兹协变性。事实上是，有的方程满足，有的方程不满足，正确的判据是看方程是否与人类的实践经验相符合。

以库仑定律为例，在电子绕核作高速运动时，库仑定律必须以  $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  因子修正<sup>[5]</sup>，2个以光速相互运动的带电体之间是没有相互作用的。如果说麦克斯威方程满足洛伦兹协变性，那么修正后的麦克斯威方程就不再满足洛伦兹协变性了，又将如何应对？

相对性原理要求物理规律和物体间相对速度无关，同时人们又必须承认物体间相互作用以光速在传播，不存在超距作用，这不是矛盾吗？

相对性原理的实质是要求把尺缩、钟慢和质增看成是物理学的最高准则，这只是少数物理学家的一厢情愿，所以才得出光子无静止质量的说法，否则，由质速公式光子的运动质量则为无穷大！现代实验不但在测量运动中光子的质量也在测量中微子的质量。因为物理学首先是一门以实验为基础的自然科学。

物理学必须尊重逻辑，但它决不是以数学方法的逻辑游戏，当人们一旦发现物理学的进展遇到逻辑困难时，意味着一个新的实验事实有待召唤来排除逻辑困难，历史已经多次说明，物理学就是以这种规则向前发展的。

相对性原理不常真，以偏概全。它对物理学的发展是思想禁锢，光子由单光子构成的学说对量子光学的发展，只是揭露了冰山一角。

## 6 答疑和讨论——氢原子结构内电子的运动规律

玻尔对氢原子巴末尔线系给出一个著名的公式

$$1/\lambda = R(1/2^2 - 1/n^2), n = 3, 4, 5, \dots \quad (13)$$

$$R = 2\pi^2 m_e e^4 / h^3 = 1.097\,373\,177 \times 10^5 \text{ cm}^{-1} \quad (14)$$

后来人们总结出氢原子光谱的经验公式还有：喇曼系

$$1/\lambda = R(1/1^2 - 1/n^2), n = 2, 3, 4, \dots ;$$

帕型系

$$1/\lambda = R(1/3^2 - 1/n^2), n = 4, 5, 6, \dots ;$$

布拉开系

$$1/\lambda = R(1/4^2 - 1/n^2), n = 5, 6, 7, \dots ;$$

普丰德系

$$1/\lambda = R(1/5^2 - 1/n^2), n = 6, 7, 8, \dots ;$$

对氢原子发射光谱线系则有

$$1/\lambda = R(1/4 - 1/(n/2)^2), n = 5, 6, 7, \dots .$$

但是一个共同的现象是用玻尔提供的里德堡常数计算出的  $\lambda$  的理论值无一例外的都小于  $\lambda$  的实测值，因此式 (13) 必须修正为

$$1/\lambda_{\text{实}} = R_{\text{实}}(1/2^2 - 1/n^2) \quad (15)$$

其中

$$R_{\text{实}} = (1 - v)^{1/2} R_{\text{理}} \quad (16)$$

此处  $v$  是电子绕核作轨道运动的瞬时速度， $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  是相对运动速度修正因子，那就是说，里德堡常数的修正值与电子轨道的瞬时速度  $v$  有如下的相应关系，改写式 (16) 为

$$v/c = (1 - R_{\text{实}}^2 / R^2)^{1/2} \quad (17)$$

其操作关系如下：在得知  $n$  数和  $\lambda$  实测值后就可计算出  $R_{\text{实}}$ ，再由  $R_{\text{实}}$  算出  $v/c$  值，即可得出表 4 至表 10 的所有数据，在  $R_{\text{实}} \approx R$  时，实测波长  $\lambda_{\text{实}}$  与理论波长  $\lambda$  非常接近，此时， $v/c \ll 1$ ；反之，当  $R_{\text{实}}$  和  $R$  值相差愈大，可以从表中的数据看出  $v/c$  项也在不断增大。

在强调物体间的相互作用必然随着相对运动速度增大而减少，此时，库仑定律  $F = kq_1 q_2 / r^2$  应修正为

$$F = (1 - v^2/c^2)^{1/2} kq_1 q_2 / r^2 \quad (18)$$

同理，反映计算光子数  $N$  的普朗克公式  $h = N\lambda_{\text{实}} m_0 c$  也应修正为

$$h/(1 - v^2/c^2)^{1/2} = N\lambda_{\text{实}} m_0 c$$

因此，光子数  $N$  应改写为

$$N = h/(1 - v^2/c^2)^{1/2} \lambda_{\text{实}} m_0 c \quad (19)$$

式中  $N$  为一份光子数内的光子数； $h$  为普朗克常数， $6.626\,16 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ； $c$  为光速， $2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$ ； $m_0$  为单光子质量， $3.368\,203\,88 \times 10^{-37} \text{ kg}$ 。

结论  $N\lambda$  在电子轨道运动速度  $v/c \ll 1$  时，是一个不变量，当  $v/c$  不断增加时， $N\lambda$  也随之增加，但是经归一化以后  $N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  仍接近一个不变量，其数值和  $65\,621.0 \text{ nm}$  值相差甚微。其最大偏差不超过  $0.4\%$ 。另外，由于仪器的精度不够，

$N$  值和正整数有所偏离也是必然的。

## 7 试错和修正

本文的主要论点是引用表 1、表 2、表 3 光谱线的数据来论证单光子的存在。但是有人会问，并不是所有的气体光谱数据都满足  $\zeta$  是一个不变量这一诉求。这是否就能反证单光子不存在呢？笔者用单光子理论证明了光的衍射经验公式、光的折射定律和反射定律，这难道不是对单光子假设的合理性一个极大的支持吗？

必须明确指出，这 100 年传承下来的原子光谱学，还不是一个定量的理论，谁又能购买到氢原子气体做光谱实验呢？所有光谱数据，实际上反映的是氢分子的光谱数据，因为从未买到氢原子气体。把氢分子看成 2 个氢原子的近独立子系，这只能认为是氢分子光谱的一级近似。至今，在分子层面上的量子化学还没有一个定性的理论。各式各样的化学键理论，仍处于经验半定量状态，这就是玻尔电子绕核运动轨道量子化的理论必须进行修正的原因所在。文献[5]提出用电子瞬时运动速度  $v/c$  项来修正里德伯常数的理论值，并用波长  $\lambda$  的实测值来获得里德伯常数的修正值，就是这样的一种修正模式：

$$1/\lambda_{\text{实}} = R_{\text{实}}(1/4 - 1/n^2),$$

并用  $R_{\text{实}} = (1 - v^2/c^2)^{1/2} R_{\text{理}}$  这一假设就可算出电

子轨道运动速度，表 1 至表 6 的  $v/c$  值为 1/60, 1/30, 1/10,，此时  $(1 - v^2/c^2)^{1/2} \approx 1$ ；所以  $N\lambda$  在电子轨道运动速度  $v/c \ll 1$  时，是一个不变量，当  $v/c$  不断增加时， $N\lambda$  也随之增加，但是经归一化以后  $N\lambda(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  仍接近一个不变量，其数值和 65 621.0 nm 值相差甚微。其最大偏差不超过 0.4%，另外，由于仪器的精度不够， $N$  值和正整数有所偏离也是必然的。

$$v/c = (1 - (R_{\text{实}}/R_{\text{理}})^2)^{1/2}; \text{ 在 } v/c \ll 1 \text{ 时,}$$

$$R_{\text{实}} \approx R_{\text{理}}.$$

从表 4、表 5、表 6 数据看，电子运动瞬时速度等于几千米/秒时，满足  $v/c \ll 1$ ，此时  $\zeta$  接近为常数，运动速度达到  $(2 \sim 3) \times 10^4$  m/s 如表 5 所示，则有些数据偏离很小，有些数据偏离较大，当电子运动速度达到光速一半时（见表 6），数据的偏离则更大，此时，既找不到一个正整数  $N$ ，也找不到不变量  $\zeta$  值，由于黑体辐射实验是在一般实验室高温条件下进行的，因此，在这一温度段，拟合出来的普朗克常数  $h$  值未必适用于电子高速运动情况下的超高温状态，此时  $h = N\lambda m_0 c$ ，应修正为  $h(1 - v^2/c^2)^{-1/2} = N\lambda m_0 c$ ，此时， $N\lambda(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  才更接近不变量，并从  $\lambda$  和  $v/c$  两个参数中去寻找  $N$  正整数序列。这就回答了并不是所有光谱数据都能满足  $\zeta$  是一不变量的问题。

表 4 巴尔末线系实测波长<sup>[7]</sup>

Table 4 Hydrogen Balmen spectral lines<sup>[7]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的光子数 $N$	可见光的颜色	$N\lambda/\text{nm}$
3	656.21	1.097 209 735	5 173.974 0	10	红	6 562.10
4	486.074	1.097 226 622	4 899.416 4	13.5	绿	6 561.99
5	434.010	1.097 187 798	5 510.239 3	15.119	蓝	6 561.70
6	410.120	1.097 239 832	4 673.408 7	16	紫	6 561.70
7	386.059	1.097 163 515	5 860.410 0	17	紫外 1	6 563.00
8	3 645.81	1.097 259 605	4 313.033 0	17.999	紫外 2	6 562.00

表 5 氢原子赖曼线系波长<sup>[6]</sup>

Table 5 Hydrogen Lyman spectral lines<sup>[6]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的 光子数 $N$	$N\lambda/\text{nm}$
2	121.566	1.096 797 899	9 706.004 4	54.008 0	6 564.5
3	102.583	1.096 672 938	10 708.099 2	64.009 5	6 565.3
4	97.254	1.096 784 365	9 819.482 3	67.510 0	6 565.6
5	94.976	1.096 768 306	9 952.451 2	69.130 3	6 565.7
6	93.782	1.096 768 493	9 950.913 1	70.010 4	6 565.7

表 6 氦离子谱线波长<sup>[8]</sup>  
Table 6 Helium ion spectral lines<sup>[8]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时 速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的光子数 $N$	$N\lambda/\text{nm}$	$N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}/\text{nm}$
6	656.72	1.096 357 656	12 894.440 0	9.996 7	6 565.6	6 559.5
7	541.78	1.096 274 122	13 414.036 6	12.118 4	6 565.5	6 561.9
8	483.15			13.4955		
9	454.63	1.096 411 452	12 548.413 2	14.439 6	6 564.6	6 558.9
10	435.37	1.093 760 425	24 306.356 7	15.115 0	6 574.0	6 252.3
11	422.95	1.089 850 765	35 042.214 7	15.614 6	6 604.1	6 558.8
12	411.16	1.094 464 442	21 813.363 1	15.994 7	6 567.3	6 549.9
13	404.09	1.093 395 198	25 503.268 1	16.290 5	6 582.8	6 558.1
14	398.35	1.093 399 160	25 490.587 6	16.5251	6 582.7	6 558.9
15	394.78	1.090 789 831	32 789.103 3	16.714 5	6 598.0	6 519.2
16	389.04	1.096 716 704	10 368.167 8	16.869 4	6 562.0	6 558.1
17	386.89	1.094 479 628	21 756.422 1	16.997 8	6 576.2	6 541.6
18	384.43	1.094 553 549	21 477.082 5	17.105 4	6 575.8	6 558.9
				17.2749		
	368.62	1.085 128 316	44 660.1901	17.2743		

表 7 氦原子发射光谱线波长<sup>[9]</sup>  
Table 7 Helium atom spectral lines<sup>[9]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时 速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的 光子数 $N$	$N\lambda/\text{nm}$	$N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}/\text{nm}$
6	706.52	1.019 079 432	111 207.523 6	9.996 7	7 062.9	6 559
7	667.81	0.889 383 798	175 614.072 7	12.118 4	8 092.7	6 561
8	587.56	0.907 708 716	168 471.095 7	13.495 5	7 929.4	6 561
9	504.77	0.987 502 305	130 751.809 9	14.439 6	7 288.7	6 557
10	501.57	0.949 499 837	150 346.368 3	15.115 0	7 581.2	6 565.5
11	492.19	0.936 533 414	156 253.076 3	15.614 6	7 708.4	6 580.2
12	471.31	0.954 785 598	147 778.988 5	15.994 7	7 538.5	6 560.8
13	447.15	0.988 102 573	130 412.916 2	16.290 5	7 284.3	6 560.1
14	443.75	0.981 533 646	134 064.029 9	16.525 1	7 333.0	6 560.0
15	438.79	0.981 385 195	134 145.115 7	16.714 5	7 334.1	6 560.0
16	414.38	1.029 650 723	103 685.706 4	16.869 4	6 990.4	6 559.0
17	412.08	1.027 575 285	105 211.147 5	16.997 8	7 004.5	6 556
18	402.62	1.045 102 630	91 422.448 5	17.105 4	6 887.0	6 559.4
19	396.47	1.055 693 305	81 838.614 9	17.274 9	6 849	6 589.2
20	388.86	1.071 508 169	64 705.406 2	17.274 3	6 717.3	6 554.2

表 8 氖原子发射光谱<sup>[9]</sup>  
Table 8 Neon atom spectral lines<sup>[9]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时 速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的 光子数 $N$	$N\lambda/\text{nm}$	$N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}/$ nm
11	692.95	0.831 503 68	195 637.845 0	12.497 7	8 660.3	6 565.5
12	671.70	0.487 230 50	268 622.504 3	21.328 5	14 376	6 380.0
13	667.83	0.366 751 32	282 554.153 7	35.766 3	23 885	8 005.0
14	659.90	0.309 390 31	287 630.736 6	35.270 5	23 275	6 614.7
15	653.29	0.275 528 47	290 189.007 2	40.005 9	26 135	6 625.6
16	650.65	0.252 213 27	291 766.993 2	43.881 5	28 551	6 643.8
17	640.22	0.238 839 85	292 605.707 0	47.093 5	30 150	6 653.0
18	638.30	0.226 606 38	293 330.979 5	49.785 2	29 862	6 261.7
19	633.44	0.218 354 02	293 797.745 2	50.167 1	31 778	6 429.0
20	630.48	0.211 479 08	294 172.844 2	54.008 0	34 050	6 679.3
21	626.65	0.206 375 90	294 443.219 5	55.681 7	34 892	6 685.2
22	621.73	0.202 727 33	294 632.330 7	57.132 4	35 520	6 689.6
23	616.36	0.200 061 69	294 768.287 6	58.398 1	35 994	6 778.9
24	614.31	0.196 982 63	294 923.014 3	59.508 8	36 557	6 697.0
25	609.62	0.195 281 68	295 007.425 9	60.490 9	36 876	6 599.0
26	607.43	0.193 209 27	295 109.250 2	61.358 2	37 270	6 705.0
27	603.00	0.192 202 73	295 157.300 3	62.126 0	39 462	6 704.0
28	597.55	0.191 816 38	295 177.057 5	62.825 6	37 514	6 707.0
29	594.48	0.190 915 21	295 220.657 8	63.448 2	37 718	6 707.0
30	588.19	0.191 264 72	295 203.773 0	64.009 5	37 649	6 705.0
31	585.25	0.190 712 34	295 230.443 8	64.517 4	37 759	6 701.0
32	582.02	0.190 410 14	295 245.001 4	64.978 4	37 815	6 706.0
33	576.44	0.191 019 40	295 215.627 7	65.398	37 695	6 706.0
34	540.06	0.202 699 13	294 633.778 8	65.781 4	35 525	6 689.0
35	534.11	0.203 869 78	294 573.491 5	66.132 2	35 322	6 688.8
36	533.08	0.203 273 81	294 604.228 2	66.453 4	35 424	6 688.4

表 9 氢分子激光发射光谱实测——紫外线谱一份光子数<sup>[10]</sup>

Table 9 Hydrogen molecular laser spectral lines<sup>[10]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时 速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的 光子数 $N$	$N\lambda/\text{nm}$	$N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}/$ nm
2	123.956	1.075 650 500 0	59 354.711 17	54.008 0	6 694.6	6 559
3	123.004	0.914 604 403 1	165 664.297 7	64.009 5	7 873.4	6 558
4	122.358	0.871 758 827 9	182 090.434 3	67.510 0	8 260.0	6 566
5	121.900	0.854 525 567 4	188 088.358 8	69.130 2	8 411.0	6 563
6	121.734	0.844 933 567 1	191 295.175 7	70.010 4	8 522.0	6 567
7	120.668	0.845 985 127 2	190 947.999 6	70.540 0	8 511.0	6 565
8	120.497	0.843 069 135 2	191 908.123 0	70.885 5	8 441.0	6 565

表 10 钠原子发射光谱<sup>[9]</sup>  
Table 10 Na atom spectral lines<sup>[9]</sup>

自然数 $n$	实测波长 $\lambda_{\text{实}}/\text{nm}$	实测里德伯常数 $R_{\text{实}} \times 10^7/\text{m}^{-1}$	电子运动瞬时 速度 $v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	实测 ( $hf$ ) 的 光子数 $N$	$N\lambda/\text{nm}$	$N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}/$ $\text{nm}$
12	589.3	1.062 424 837	75 056.136 8	11.501 7	6 771.0	6 561.5
13	330.3	1.065 950 164	71 228.039 84	20.452 7	6 755.5	6 562.3
14	285.3	0.915 994 859 2	165 089.948 5	27.555 1	7 861.5	6 564.0
15	268.0	0.807 261 768 1	203 074.148 3	33.284 9	8 920.3	6 603.0
16	259.4	0.731 031 725 6	223 586.502 1	37.974 4	9 850.5	6 567.0
17	254.4	0.663 160 406 8	238 858.013 1	42.683 6	10 858.7	6 575.0
18	251.2	0.635 373 850 8	244 430.060 2	45.117 8	11 333.6	6 571.0
19	249.1	0.603 840 492 4	250 324.728 6	47.892 8	11 737.0	6 469.0
20	247.6	0.579 035 442 8	254 661.162 9	50.227 4	12 436.3	6 573.0
21	246.4	0.559 303 977 3	257 931.492 1	52.252 6	12 875.0	6 575.0
22	245.6	0.542 888 165	260 536.031 0	54.008 0	13 264.4	6 576.0
23	244.9	0.529 427 777 6	262 595.249 2	55.539 4	13 601.6	6 567.0
24	244.4	0.517 976 295 4	264 294.232 6	56.883 4	13 902.3	6 578.0
25	244.0	0.508 229 248	265 702.764 7	58.069 4	14 168.0	6 578.0
26	243.7	0.499 862 223 2	266 884.751 8	59.114 1	14 406.1	6 604.0
27	243.4	0.492 610 171 7	267 889.233 9	60.058 3	14 618.2	6 580.0

从表 4 至表 10 的数据可以看出：

1) 只有在  $v/c \ll 1$  时， $N(\lambda) \lambda = \zeta$  才是一个不变量；

2) 在数据归一化处理，对氢气、氦气而言， $N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  经修正后，也接近于一个全程误差远小于 1% 的不变量，这说明用  $R_{\text{实}} = R_{\text{理}} (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  来修正电磁波的频率公式是有足够的精确度。从归一化条件  $N\lambda (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  处理后的数据看，所做的假设是完全合理的。

参考文献

[1] 冯劲松. 单光子质量的实验测定[J]. 量子光学学报, 2004, 10(增刊), 45  
[2] 范良藻, 冯劲松. AQIS 2006 - Asian Conference on Quantum Information Science [C]. BeiJing, China, September 14, 2006

[3] 爱因斯坦. 爱因斯坦文集(第 3 卷)[M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 485, 23  
[4] 周光召. 如何发展中国的理论物理[J]. 科学, 2004, 56(6): 3~8  
[5] 冯劲松. 用原子的发射光谱对氢原子、氦离子、氦原子内电子的运动瞬时速度和轨道半径的实测与研究[J]. 原子与分子物理学报, 2006, (增刊): 78~86  
[6] 林美荣, 张包铮编著. 原子光谱学[M] 北京: 科学出版社, 1990. 20  
[7] 倪光炯, 李洪芳. 近代物理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 127  
[8] 中国大百科全书—物理学 II [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987. 719  
[9] 母国光, 战元龄编. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1978. 649  
[10] 贝克 R, 恩利斯 W, 居斯 K. 气体和蒸气激光谱线表 [M]. 张丽娟译. 北京: 科学出版社, 1987. 57

(下转第 78 页)