

光子的质量与光速的下限

阚学敏

(中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640)

摘要: 假设光子质量不为零, 最直接的物理效应是真空中光速不再是不变的, 随频率的增大, 光速的上限等于常数 c 。理论上, 这一假设面对的一个困难是, 它不能令人信服地回答, 随着频率的减小, 光速应该怎样变化。应用量子电动力学中已有的理论成果, 该文指出, 即使光子的质量不为零, 随着频率的减小, 光速也不会无限地变小并趋近于零, 而是有一个仅仅略低于常数 c 的、确定的下限值 ($\cong 0.89c$)。进而推论, 光速的下限 ($\cong 0.89c$) 就是静电场的传播速度。

关键词: 光子质量; 频率最小值; 光速的下限 $\cong 0.89c$

中图分类号: O412.1; O413.2; O442 **文献标识码:** A

PHOTON MASS AND LOWER LIMIT OF THE VELOCITY OF LIGHT

KAN Xue-min

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A direct effect of the hypothesis of nonzero photon mass is that the velocity of light in vacuum would not be invariant and its upper limit would equal the constant c as the frequency increases. However, the hypothesis of nonzero photon mass is faced with a theoretical difficulty that it can not satisfyingly answer how the velocity of light would vary with the decreasing of photon's frequency. Based on the relation between photon mass λ and minimum frequency ω_{\min} , which was derived in quantum electro-dynamics, it is pointed out that as the frequency decreases the velocity of light would not be close to zero without limit but have a definite lower limit ($\cong 0.89c$), i. e. a little lower than constant c , and that the velocity, with which the static fields propagate in vacuum, must be equal to the lower limit of the velocity of light ($\cong 0.89c$).

Key words: photon mass; minimum frequency; lower limit of the velocity of light ($\cong 0.89c$)

光子的质量等于零, 虽在很高的精度上与实验结果不发生抵触, 但仍然只是一项科学假设, 与此对应, 也有关于光子质量不等于零的假设和相关的研究^[1-5] (这里所说的“质量”是不变量, 本文不使用“静质量”一词)。光子质量不等于零, 理论上应该出现的许多效应, 至今都

未能得到实验的验证,也就是说,物理学未能找到光子质量不为零的确实证据. 如果光子具有有限的质量,理论上最直接的效应是光速不再等同于常数 c ,而与频率有关;尽管普罗卡(Proca)电磁方程的协变形式^[1-5]让“光子质量不为零”的假设在理论上显得是可以接受的,但是,随着频率变小,应该怎样解释光速的变化过程,一直是这一假设要面对的一个理论上的困难. 应用量子电动力学中已有的理论成果,本文指出,即使光子质量不为零,光速也不会无限地变慢,乃至趋近于零,而是有一个仅仅略低于常数 c 的、确定的下限,并做出推论:光速的下限就应该是静电场的传播速度.

1 光速的下限

即使不是出于对光子质量的考虑,当今,对狭义相对论的第二项假设也倾向于作如下表述:自然界存在一个不变的极限速度 c ,光速与它相等是一种巧合^[6],如果有事实证明二者之间存在差异,也无损于狭义相对论^[7].

把光子视为相对论粒子,设它的质量为 m_γ ,则它的能量应表示为:

$$E = \frac{m_\gamma c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \hbar\omega, \quad (1)$$

其中, v 为光子的速度,即真空中的光速, ω 为光子的频率. 按照波粒二重性,用这种方法计算光速,和根据普罗卡电磁方程计算的电磁波的群速度应该是等效的. 把粒子的质量用它的静止频率^[8] λ 来表示:

$$m_\gamma = \lambda \hbar / c^2, \quad (2)$$

这里, \hbar 为普朗克常数,代入式(1)得:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}}. \quad (3)$$

如所预期,该式和电磁波的群速度 V_g ^[2-5]的表示式是相同的. 显然,随着频率 ω 的增高,光速 v 的上限等于常数 c . 但是,随着频率的减小,如何解释光速与频率之间的关系,一直是“光子质量不为零”面对的一个理论上的困难;如果根据式(3)简单地认为,随频率的减小,光速应无限地趋近于零,显然是不合理的,因为经验表明,从高频光子到极限情况下的静电场都是快速传播的.

为处理“红外困难”,在量子电动力学中引入了不为零的光子质量 λ (以频率表示)和频率的最小值 ω_{\min} . 理论上的含意是,辐射体放出的质量为 λ 的光子,在真空中传播时,其最小频率是 ω_{\min} . 根据文献[9]导出的 ω_{\min} 和 λ 之间的关系式,可以求出:

$$\ln 2\omega_{\min} = \ln \lambda + 9/6, \quad (4)$$

亦即

$$\lambda / \omega_{\min} = 0.446. \quad (5)$$

显然,把式(5)代入式(3)即可求得 v 的最小值,即光速的下限. 但是,还必须指出的是,和光子的质量 λ 不同,频率最小值 ω_{\min} 不是不变量,式(4)和(5)只有相对于特定的惯性参照系 K' ——辐射体在其中处于静止状态的参照系——才是严格正确的. 为此,可以把式(5)代入式

(3),并在特定的惯性参照系 K' 内把结果写为:

$$v'_{\min} = c \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{(\omega_{\min})^2}} = 0.89 c. \quad (6)$$

因为 ω_{\min} 是 K' 参照系内频率的最小值,所以,式(6)表示的就是 K' 参照系内光速的下限.

注 文献[9]在没有给出计算过程的情况下,将式(4)误写为: $\ln 2\omega_{\min} = \ln \lambda + 5/6$. 本文所做的计算如下,首先,根据给定的近似条件^[9]把 ω_{\min} 和 λ 之间的关系式^[9]化简为:

$$2(1 - 2\Phi \coth 2\Phi) \cdot \ln \frac{2\omega_{\min}}{\lambda} = 2 - \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} \cdot \cosh 2\Phi \cdot \int_{\cos \frac{\theta}{2}}^1 \frac{2\xi \cdot d\xi}{\sqrt{\xi^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}},$$

此处进行积分后得到: $\ln \frac{2\omega_{\min}}{\lambda} = \frac{1 - \cosh 2\Phi}{1 - 2\Phi \cdot \coth 2\Phi}$,把双曲函数展开并化简,求得:

$$\ln \frac{2\omega_{\min}}{\lambda} = \frac{9}{6} (1 + \frac{3}{5}\Phi^2 + \dots),$$

因为 $\Phi \ll 1$,所以得到本文的式(4).

现在考虑任一惯性参照系 K ,取最简单情况,设它的 x 轴同 K' 系的 x' 轴重合,它相对于 K' 的速度为 v 并沿着 x 轴的方向,同时假设光速的方向与 x 轴平行,按照速度变换关系,光子在 K 参照系内的速度的下限应表示为:

$$v_{\min} = \frac{v'_{\min} - V}{1 - v_{\min} V/c^2}. \quad (7)$$

若以通常情况下的宏观运动和原子(分子)的热运动能够达到的速度为限,即式(7)中的相对速度 $V \ll c$,可对式(7)直接取零级近似,得到:

$$v_{\min} \cong v'_{\min} = 0.89 c, \quad (8)$$

也就是说,即使光子质量不等于零,随着频率的减小,任何惯性参照系内的光速也不会无限地趋缓,而是有一近似确定的、略低于常数 c 的下限值 $0.89 c$. 因此,可以让真空中的光子在其中处于静止状态的惯性参照系,实际上仍然是不存在的. 以上的结果也许会使“光子质量不等于零”的假设变得更为可信,成为更值得探索的物理学问题.

2 关于静电场

按照光子质量 λ 和最小频率 ω_{\min} 之间关系式(4)或式(5),在真空中传播的光子,其频率的取值只可能是

$$\omega \geq \omega_{\min} = 2.24 \lambda, \quad (9)$$

也就是说,如果光子质量不为零,则在静止频率 λ 的邻近,光子的频率 ω 是不连续的. 式(6)与式(8)表明,真空中光速的下限与光子质量的大小无关;实际上,是式(9)所表示的频率 ω 的不连续状况,决定了光速的下限. 值得指出的另一与此相反的情况是,按照式(1),如果光子的频率 ω 在 $(0 \rightarrow \infty)$ 的范围内是连续的,则光子的质量只可能等于零,“光子的质量不等于零”就只能是一项没有意义的假设,是不能成立的,而真空中光速则与频率无关,只能等于常数 c .

在假设光子质量不等于零($m_\gamma \neq 0$, 即 $\lambda \neq 0$)的条件下,把静电场的频率视为零($\omega = 0$),进而得出结论,静电荷的势和电场应该包括一个与球对称形式的汤川(Yukawa)势相似的衰减因子^[1-5]. 这一推理的可商榷之处在于,按照式(1),如果光子的质量不等于零则频率就不可能等于零,也就是说($m_\gamma \neq 0$)与($\omega = 0$)是自相矛盾的.

传递电磁作用的是光子. 回顾上文可以作出如下推论:如果光子的质量不等于零,静电场就应该是频率为 ω_{\min} 的光子场,静电场在真空中的传播速度就是光速的下限($\cong 0.89c$). 所以,如果有了测量静电场传播速度的实验方法,将有助于对光子质量是否为零做出判断.

参考文献:

- [1] JACKSON J D. Classical Electrodynamics[M]. New York: John - Wiley & Sons Inc. 1975: 5 - 9; 597 - 601.
- [2] GOLDHABER A S, NIETO M M. Terrestrial and extraterrestrial limits on the photon mass [J]. Revs Mod Phys, 1971, 43: 277 - 296.
- [3] 张元仲. 狭义相对论实验基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 152 - 183.
- [4] 虞福春, 郑春开. 电动力学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1992: 305 - 307.
- [5] 蔡圣善, 朱 耘, 徐建军. 电动力学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 404 - 407.
- [6] JACKSON J D. The impact of special relativity on theoretical physics [J]. Phys Today, 1987, 40: 34 - 42.
- [7] UGAROV V A. Special Theory of Relativity [M]. Moscow: Mir Publishers, 1979: 38 - 41.
- [8] 威切曼 E H. 量子物理学(伯克利物理学教程): 4 卷 [M]. 复旦大学物理系译. 北京: 科学出版社, 1978: 246 - 248.
- [9] 阿希叶泽尔, 别列斯捷茨基. 量子电动力学 [M]. 于敏, 宋玉升, 曹昌祺, 等译. 北京: 科学出版社, 1964: 313 - 318.

【责任编辑 成文】