

# 光子的质量与静电场中的慢光子

阚学敏

(中国科学院 广州地球化学研究所 广东 广州 510640)

**摘要:** 先前的研究已经说明,根据至今在高频范围内对光速的测量结果,既不能证明真空中光速没有色散,也不能对光子有质量与否做出判断,因为光子质量引起光速的色散只会集中地发生在频率逼近于零的长波光子辐射的小频率范围之内。所以,为寻找光子质量引起的光速色散,本文关注于静电场的研究。按照波粒二象性,必须放弃“静电场的频率等于零”的观念;静电场应被视为长波光子的辐射场。由光子质量引起的光速色散就发生在静电场的小频率范围内,静电场的传播速度就是频率最低端的光速。计算表明,若光子有质量,则静电场中存在着可观数量的慢光子,它们的速度与极限速度  $c$  相比大约低 3% 到 10%。为证明光子质量引起光速的色散,应该测量并分解静电场的传播速度。

**关键词:** 光子的最小频率;光速的最小值;光速的色散带;长波光子辐射;静电场的频率范围

中图分类号: O412.1, O413.2, O442 文献标识码: A 文章编号: 2095-4298(2013)03-0039-03

## Photon mass and slow photon of static field

Kan Xuemin

(Guangzhou Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** Previous studies show that the determinations for the velocity of light within high frequency region can not prove non-dispersion of the velocity of light in vacuum and also can not decide whether the photon is massive or massless because the dispersion caused by photon mass takes place only within small frequency region of the long-wave photon radiation. Therefore, in order to find the dispersion, the present paper is devoted to study on static field. According to wave-particle duality the idea, which imagines that the frequency of static field is equal to zero, must be given up. The static field should be considered to be the long-wave photon radiation and has a certain frequency range, in which the dispersion of the velocity of light caused by photon mass takes place. The propagation velocity of static field is just the velocity of light of the lowest frequency region. Calculations show that there are in static field remarkable slow photons having velocities about 3% to 10% lower than constant  $c$ . To prove the dispersion caused by photon mass, the propagation velocity of static field should be determined and decomposed.

**Key words:** photon's minimum frequency; minimum velocity of light; dispersion zone of velocity of light; long-wave photon radiation; frequency range of static field

## 0 引言

对光子质量的讨论已有很长的历史。光子的质量必然要引起光速的色散<sup>[1-4]</sup>(指真空中光速的色散,本文不涉及介质中光速色散的问题)。但是,长期的测量结果表明“光速等于常量  $c$ ”,实验未能观察到由光子质量引起的光速的色散<sup>[2-4]</sup>,因此,“光子的质量为零”已经写进物理学的教科书。但是,至今所有对光速的精确测量毕竟只是在很高的频率下完成的;作者在文献<sup>[5]</sup>中已经证明:由光子质量引起的光速的色散只会集中地发生在频率逼近于零的狭窄的频率范围之内,形成光速的色散带,远离色散带的高频率的光速都是完全饱和的(等于极限速度  $c$ ),所以,根据至今对光速的测量结果——“光速等于常量  $c$ ”,既不能证明光速没有色散,也不能对光子有质量与否做出判断。本文主要研究低频率辐射场,特别是频率逼近于零的“长波光子”<sup>[6]</sup>辐射场,希望为观察由光子质量引起的光速的色散寻找新的线索。

按照现代观念,狭义相对论的第二项假设可以表述为<sup>[7]</sup>:自然界有一不变的速度极限  $c$ ,光速与它相等只是一个具体的例证,所以,本文不再把常量  $c$  称为光速。

收稿日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40873054)

作者简介: 阚学敏,男,副研究员,长期从事原子光谱和原子核伽马共振谱应用的研究。

引文格式: 阚学敏. 光子的质量与静电场中的慢光子. 江苏师范大学学报:自然科学版,2013,31(3):39-41.

Kan Xuemin. Photon mass and slow photon of static field. J Jiangsu Norm Univ: Nat Sci Ed, 2013, 31(3): 39-41.

## 1 静电场的频率范围

“光子有质量”仍然只是一种假设,实验未能观察到由光子质量引起的任何实在的物理效应(例如光速的色散),所以不可能测定出光子的质量.但是,已有一些实验方法<sup>[3-4]</sup>可以为光子的质量确定一个大小范围.通过测量地球上空的磁场求出的结果是 $0 \leq m_\gamma \leq 4 \times 10^{-48} \text{ g}$ <sup>[4]</sup>,这一结果并不能证明光子是有质量的,因为光子质量也可能为零.但是,有了这样的观测结果,即可对光速的色散过程进行数值分析<sup>[5]</sup>,为本文做了理论准备.

需要说明的是,检验静电场库伦定律的准确程度,是寻找光子质量的实验方法之一<sup>[1-4]</sup>.理论上,在把静电场的频率视为零( $\omega=0$ )的前提下,根据经过质量修正的电磁场方程(Proca 方程)可以证明:若光子有质量( $m_\gamma > 0$ ),则静电场除了遵守库伦平方反比定律之外,还应有一个附加的、随距离呈指数衰减的因子<sup>[1-4]</sup>,平方反比定律的正确程度自然会因此受到影响.不过,对于把静电场的频率视为零( $\omega=0$ ),可做如下的商榷.

按波粒二重性的观念,光子频率  $\omega$  的确切定义应该由德布罗意方程给出:

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

这里  $v$  是光子的速度,  $m_\gamma$  为光子的质量,  $h$  为普朗克常量.按照式(1),光子的频率与质量应遵守如下关系式:

$$\omega \geq \frac{m_\gamma c^2}{h} = \lambda, \quad (2)$$

以下将  $\lambda$  称为光子的静止频率<sup>[8]</sup>.所以,光子有质量( $m_\gamma > 0$ ),则光子的频率  $\omega$  不可能为零,静电场中的光子也不应例外,为了讨论与光子质量有关的问题,首先要放弃“静电场的频率等于零”的观念.

长波光子的辐射理论<sup>[6]</sup>得出的两项结论是:① 在频率逼近于零的小频率范围内,电子辐射光子的几率与光子的频率成反比;② 若光子有质量( $m_\gamma > 0$ ),则进入真空中的光子有一最小频率<sup>[5,7]</sup>

$$\omega_{\min} = 2.24\lambda. \quad (3)$$

与式(2)相比,光子的最小频率  $\omega_{\min}$  对频率下降逼近于零的程度有了更大的限制.“长波光子”指的是频率逼近于零的光子<sup>[6]</sup>,所以,把静电场视为长波光子的辐射场显然是合理的.将上述两项结论应用于静电场即可得出:静电场中单位频率范围内的光子数  $n$  应与频率  $\omega$  成反比,即

$$n \propto \frac{1}{\omega}. \quad (4)$$

静电场全部频率范围内光子总数则可近似地表示为

$$N = \int_{\omega_{\min}}^{k\omega_{\min}} n d\omega, \quad k > 1. \quad (5)$$

因为式(4)仅仅适用于小频率范围<sup>[6]</sup>,随着频率的增高, $n$  应比式(4)收敛得更快,只要为  $k$  选取足够大的数值,即可把更高频率( $k\omega_{\min} < \omega < \infty$ )范围内的光子数忽略不计.所以,式(5)的积分区间

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq k\omega_{\min} \quad (6)$$

就是静电场的频率范围.

## 2 静电场中的慢光子

根据式(1),可得出光速的表示式

$$v = c \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}}. \quad (7)$$

由德布罗意方程得出光子的最小频率  $\omega = \lambda$ (式(2)),代入式(7),得到光速  $v=0$ ,这样的结果使得“光子有质量”成为一项没有意义的、难以被接受的假设.

将长波光子辐射理论给出的最小频率(式(3)),代入式(7)即可求得光速的最小值

$$v_{\min} = 0.895c \approx 2.7 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad \text{当 } \omega = \omega_{\min} = 2.24\lambda \text{ 时}. \quad (8)$$

因此,即使光子是有质量的,通常情况下仍然不存在可以与光子相对静止的运动参照系,使“光子有质量”的假设变得合理可接受.光速随频率增高而增高,为简单地显示光速的色散过程,由式(7)求得光速

$$v_{10} = 0.999c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad \text{当 } \omega = 10\omega_{\min} \text{ 时}, \quad (9)$$

已接近速度极限  $c$ . 所以, 由光子质量引起的光速色散过程, 即光速由最小值  $v_{\min}$  到极限速度  $c$  的全部变化过程, 都集中地出现在

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq 10\omega_{\min} \quad (10)$$

频率范围内, 这就是光速的色散带<sup>[5]</sup>. 比较式(6)和(10)可知, 静电场的频率范围应该与光速的色散带全部或部分地互相重叠. 因此, 静电场辐射光子的速度可能包括由  $v_{\min}$  到  $c$  所有的速度值, 总体上, 把它们称为静电场的传播速度, 也就是频率最低端( $\omega \geq \omega_{\min}$ )的光速, 光子质量引起的色散就潜藏其中.

为了通过测量静电场的传播速度来观察光速的色散, 我们关心的是静电场的频率范围内, 速度明显低于极限速度  $c$  的光子能占有多大的比例. 为此, 首先由(7)式求出光速

$$v_{1.8} = 0.969c \approx 2.9 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad \text{当 } \omega = 1.8\omega_{\min} \text{ 时}. \quad (11)$$

以下将速度处于最小值  $v_{\min}$  与  $v_{1.8}$  之间的光子称为慢光子, 它们的速度明显低于极限速度  $c$ .

现在还无法从理论上给出静电场频率的准确范围(即  $k$  的数值), 具体的实验条件也会对  $k$  的数值有所影响. 以下仅根据式(4)和(5), 简单地讨论两种情况, 对慢光子在光子总数中能占有多大的比例进行粗略的估计.

第一, 静电场的频率范围较宽( $k > 1.8$ ), 应用式(4)和(5), 可把静电场中的慢光子数  $N'$  在光子总数  $N$  中所占的比例表示为

$$R = \frac{N'}{N} = \frac{\int_{\omega_{\min}}^{1.8\omega_{\min}} \frac{1}{\omega} d\omega}{\int_{\omega_{\min}}^{k\omega_{\min}} \frac{1}{\omega} d\omega} = \frac{\ln 1.8}{\ln k}, \quad k > 1.8, \quad (12)$$

其中一种可能的情况是  $k$  的数值非常大, 比值  $R$  很小, 难以检测到静电场的慢光子; 或者, 光子质量确实等于零, 本来就没有慢光子, 静电场的传播速度与极限速度  $c$  相等.

不过, 如式(12)所示, 比值  $R$  仅与  $k$  的对数成反比, 当  $k = 10^2$ , 即静场频率范围(式(6))超过色散带频率宽度(式(10))的 10 倍,  $R = 13\%$ ; 即使  $k = 10^3$ , 即静场的频率范围超过色散带频率宽度的 100 倍, 静电场中仍有可观数量的慢光子,  $R = 8.6\%$ . 测量并分解静电场的传播速度, 可以检测到慢光子.

第二, 静电场的频率范围很窄, 例如:  $1 < k \leq 1.8$ , 则式(12)应改写为

$$R = \frac{\ln k}{\ln k} = 100\%, \quad 1 < k \leq 1.8, \quad (13)$$

即静电场中所有的光子都是慢光子, 其传播速度包括由  $v_{\min} = 2.7 \times 10^8 \text{ m/s}$  到  $v_{1.8} = 2.9 \times 10^8 \text{ m/s}$  所有的速度值, 比极限速度  $c$  大约低 3% 到 10%.

以上两种情况都可以证明光子的质量引起了光速的色散.

### 3 结论

静电场是长波光子的辐射场, 光子质量引起的光速色散发生在静电场的频率范围内, 静电场的传播速度就是最低端频率的光速. 为证明光速的色散, 寻找光子的质量, 应该测量并分解静电场的传播速度.

#### 参考文献:

- [1] Jackson J D. Classical electrodynamics[M]. New York: John-Wiley & Sons Inc, 1975: 5-9, 597-601.
- [2] 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.
- [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] Goldhaber A S, Nieto M M. Terrestrial and extraterrestrial limits on the photon mass[J]. Revs Mod Phys, 1971, 43: 277.
- [5] 阚学敏. 光子的质量与真空中光速的色散[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2012(3): 71.
- [6] 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.
- [7] Jackson J D. The impact of special relativity on theoretical physics[J]. Phys Today, 1987, 40: 34.
- [8] 威切曼 E H. 量子物理学[M]. 复旦大学物理系译. 北京: 科学出版社, 1978: 246-250.

[责任编辑: 史成娣]