

The New Process of the Study on Light Velocity and Photon Mass

Xuemin Kan

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong
Email: kanwang@gig.ac.cn

Received: Sep. 3rd, 2016; accepted: Sep. 18th, 2016; published: Sep. 23rd, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the theories of long wavelength photons and minimum frequency in quantum electrodynamics and on the experimental limits of photon mass, the relationship between photon mass and the light velocity has been theoretically explored in recent years. The lowest light velocity v_{\min} is approximately a constant about 10% lower than the limiting velocity c . The vacuum dispersion caused by photon mass, namely the total change of the light velocity from v_{\min} to c , takes place within only a small frequency region nearby the minimum frequency, in other words, only the velocity of the long wavelength photons is dispersed in vacuum. On the other hand, the light velocity with the frequency in common use is always accurately equal to the limiting velocity c without dispersion, therefore Maxwell equations are practically applicable, and the electromagnetic field keeps gauge invariance property so that the photon mass is concealed. A suggestion for how to seek the long wavelength photons is put forward in the paper.

Keywords

Minimum Frequency, Lowest Light Velocity, Long Wavelength Photons, Dispersion of Light Velocity, Saturation of Light Velocity

光速与光子质量研究的新进展

阚学敏

中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州
Email: kanwang@gig.ac.cn

摘要

基于量子电动力学中的长波光子和频率最小值理论，并应用光子质量范围的观测结果，对于光子质量与光速之间的关系，近年来有了新的理论探索。光速的最低值 v_{\min} 近似地也是一个常数，仅低于极限速度 c 大约10%。由光子质量引起的真空中光速的色散，即光速由 v_{\min} 到 c 的全部变化，只会发生在频率最小值附近很小的频率区间之内，换言之，只有长波光子的速度在真空中是色散的。另一方面，对于常用的频率而言，光速总是精确地等于极限值 c ，没有色散，所以，麦克斯韦方程适用，电磁场保持规范不变性，从而掩盖了光子的质量。本文还对如何寻找长波光子给出了建议。

关键词

频率最小值，最低光速，长波光子，光速色散，光速饱和

1. 引言

继麦克斯韦(Maxwell)方程之后，上世纪30年代法国物理学家普罗卡(Proca)提出的含有光子质量(本文不使用术语“静止质量”)的电磁场方程[1]-[4]是经典电磁理论的第二个版本。按照后者，光子的质量必然引起真空中光速色散，光速(指真空中，下同)不再是常数。八十多年来，寻找光速色散的努力始终没有结果[3][4]，“光子没有质量”的观点已被广泛接受，但是，迄今为止，对光速的精确测量所覆盖的频率范围毕竟有限，所以，光子有质量与否，还没有科学的结论。本文综合介绍近年来相关的研究结果，阐明了光子质量引起的光速色散是如何发生的，而在通常情况下又是如何消失的，为寻找光子的质量，指出了新的线索。

2. 频率最小值与最低光速

依据普罗卡电磁方程，电磁波的群速度应表示为[2]-[4]，

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

其中

$$\lambda = \frac{m_\gamma c^2}{\hbar} \quad (2)$$

这里， ω 为光子的频率， m_γ 为光子的质量， \hbar 为普朗克常数，按照当今对狭义相对论第二项假设的理解，常数 c 表示自然界不变的速度极限[5]。为叙述方便，本文不使用自然单位制，以下将在不同的地方分别使用 m_γ 和 λ 两个不同的符号，后者称为光子的“静止频率”[6]。再则，基于波粒二重性观念，电磁波是光子的德布罗意(de Broglie)波[7]，光子的速度可以由光子能量的德布罗意方程直接求出[8]，其结果与式(1)完全相同，所以，以下将把式(1)中的 v 称为光速。

显然，高频率($\omega \gg \lambda$)情况下，光速 v 的上限值等于极限速度 c 。另一方面，能量的量子化是微观现象的一般原则，进入真空的光子所获得的能量也应是量子化的，所以，光子的频率不会无限制地、连续地逼近静止频率($\omega \rightarrow \lambda$)，而光子的速度 v 则不会按照式(1)无限制地、连续地逼近于零($v \rightarrow 0$)。但是，经典理论不能对频率 ω 逼近 λ 的程度做出界定，所以，要全面地说明光速、频率和光子质量之间的关系，式(1)是不完备的。

量子电动力学中, 频率趋近于零($\omega \rightarrow 0$)的光子称为长波光子。极低能量的电子辐射光子的几率, 随着光子频率的升高而迅速地衰减为零, 但在频率趋近于零的小频率范围内, 长波光子出现的几率则与光子的频率 ω 成反比, 所以, 长波光子的总辐射几率对数发散, 也称“红外灾难”[9]。费曼(R. P. Feynman)提出[10], 设想光子具有一定的质量, 则光子的频率便不会无限制地降低逼近于零, 而是有一最小值 ω_{\min} , 从而消除了发散。因此, 在以下的讨论中, 将把频率趋近于最小值 ω_{\min} 、小频率范围内的低能量光子称为长波光子。电子(辐射体)处于低能量极限的状态下辐射光子的最小频率 ω_{\min} 与光子质量之间的一般关系式[9]可以化简为[8],

$$\ln 2\omega_{\min} = \ln \lambda + 1.5 \quad (3)$$

或者

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

显然, 光子的频率最小值 ω_{\min} 可作为对经典理论的补充和修正, 光速的表示式(1)则应改写为:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}} \quad (\omega \geq \omega_{\min}) \quad (4)$$

将式(3a)代入式(4)即可求得最低光速:

$$v_{\min} = 0.895c \quad (5)$$

需要说明的是, 式(3)的导出, 涉及数值的近似计算, 其右端第二项的数值 1.5, 在文献[9]中是 5/6, 而在文献[10]中则是 1。不过, 由这三种不同的数值求得的最低光速 v_{\min} , 虽有差异, 但具有相同的数量级, 原则上对以下的讨论没有影响。

频率最小值 ω_{\min} 和最低光速 v_{\min} 都不是“不变量”, 式(3a)和(5)都是相对于辐射体(光源)参照系得出的结果, 但是, 最低光速($v_{\min} = 0.895c$)与极限速度 c 具有相同的数量级, 远远大于通常情况下宏观运动和分子(原子)热运动所能够达到的速度, 所以, 式(3a)和(5)近似地适用于现实世界中(例如地球上)任何的惯性参照系。再则, 根据式(3a)和(4), 不难看出, 最低光速 v_{\min} 与光子质量($m_\gamma \neq 0$)的大小无关, 所以, 它与极限速度 c 类似, 也是一个常数。

3. 光速的色散

根据式(4), 可把光子质量引起的光速的色散表示为[11],

$$D = \frac{dv}{d\omega} = c^2 \lambda^2 v^{-1} \omega^{-3} \quad (\omega \geq \omega_{\min}) \quad (6)$$

由于光速 v 的变化范围($v_{\min} \leq v \leq c$)不大, 故可认为: 色散与频率 ω 的三次方成反比, 应该随着频率的升高而迅速地消失, 换言之, 光子质量引起的光速变化, 实际上只会发生在频率最小值 ω_{\min} 附近不大的频率范围之内。为了对此做出更直观、更准确的说明, 在对光速色散的研究中[11], 利用“光子质量范围”的实验结果[3] [4], 对式(4)完成了具体的数值计算, 并在全部频率范围($\omega_{\min} \leq \omega < \infty$)内, 以图示的方法揭示了光速与频率的关系。对光子质量范围的观测, 不断取得新进展[12] [13]; 根据对光子康普顿波长的观测结果[13], 求得更精确的光子质量范围是,

$$0 \leq m_\gamma \leq 1.1 \times 10^{-49} \text{ g} \quad (7)$$

本文取其最大值 $m_\gamma = 1.1 \times 10^{-49} \text{ g}$ 作为光子的质量, 应用与[11]相同的方法, 完成了对光速表示式(4)的数值计算, 其结果用图1表示, 并与 $m_\gamma = 0$ 的结果相对照。

角频率 ω 的单位本应是(弧度/秒), 本文则以(2π 弧度/秒)作为角频率 ω 的单位, 目的是让横坐标 ω 的

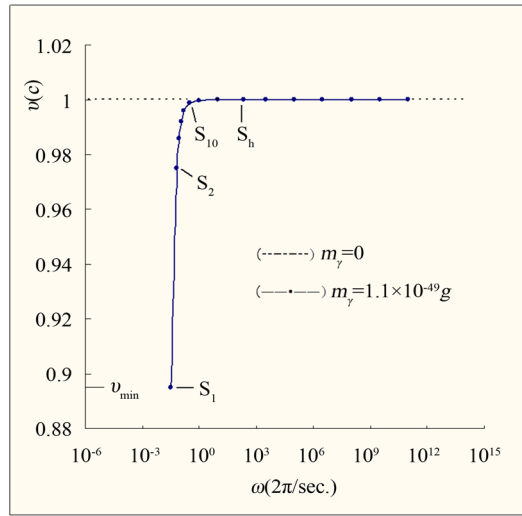


Figure 1. Relationship between the light velocity and frequency
图 1. 光速与频率的关系

单位与日常习惯使用的频率单位(赫兹)或(周/秒)相当,使图1更直观。图1中曲线($S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_{10} \rightarrow S_h \rightarrow \dots$)起点的位置坐标是:

$$S_1 [\omega_1 = \omega_{\min}; \nu_1 = \nu_{\min}] \tag{8}$$

如图1所示,光速的色散,即光速由 ν_{\min} 到 c 的变化,几乎全部(>99%)都集中地发生在($S_1 \rightarrow S_{10}$)的区域内,该区域称为光速的色散带[11],其频率范围是:

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq 10 \cdot \omega_{\min} \tag{9}$$

图1直观地表明,不能以常见的、光速在介质中的色散现象,来想象光子质量引起的色散。不难看出,在 S_{10} 的右侧远离色散带的常用频率范围内,迄今为寻找光速色散所做的努力,无异于“缘木求鱼”。换言之,根据迄今对光速的测量结果,不能认定“真空中光速没有色散”,不能认定“光子质量为零”。

另一方面,回顾上文,长波光子是频率最小值 ω_{\min} 附近小频率范围内的低能量光子,因此,可以为长波光子设定一个频率区间:

$$\omega_{\min} \leq \omega \leq k\omega_{\min} \quad (k > 1) \tag{10}$$

该频率范围内,长波光子出现的几率近似地与频率 ω 成反比,而更高频率范围($k\omega_{\min} < \omega < \infty$)内的几率则可以忽略不计,所以式(10)中的数值 k 大于 1,但不会是一个大数。

不难说明,曲线($S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_{10} \rightarrow S_h \rightarrow \dots$)的形状与光子质量($m_\gamma \neq 0$)的大小无关;只需沿着与横坐标轴平行的方向,将该曲线的位置向左(向着趋近 $10^{-\infty}$ 的方向)移动,该曲线在新的位置上便可以与任何可能的光子质量($0 < m_\gamma < 1.1 \times 10^{-49} \text{ g}$)相对应(参见式(7))。所以,由曲线($S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_{10} \rightarrow S_h \rightarrow \dots$)描述的光速色散过程,特别是光速色散带($S_1 \rightarrow S_{10}$)频率范围的表示式(9),不仅仅适用于光子质量的最大值 $m_\gamma = 1.1 \times 10^{-49} \text{ g}$,而是对不同的光子质量都适用。将式(9)与式(10)相对照,可以看出,光速色散带($S_1 \rightarrow S_{10}$)总是位于长波光子的频率范围之内,换言之,光子的质量只会引起长波光子的速度色散。

4. 光速的饱和

根据式(4),极限速度 c 与光速 ν 之间的差值可表示为,

$$\delta = c - v \approx \frac{v}{2} \frac{\lambda^2}{\omega^2} \quad (\omega \gg \lambda) \quad (11)$$

设 Δ 为测量光速的实验误差，随频率增高，光速的测量结果只可能是，

$$v = c \quad (\text{若 } \delta < |\Delta|) \quad (12)$$

称为光速饱和[11]。不难证明，光子的能量 E 和动量 p 之间的一般关系，

$$E^2 - m_\gamma^2 c^4 - p^2 c^2 = 0 \quad (13)$$

可以改写为，

$$E^2 (v^2/c^2) - p^2 c^2 = 0 \quad (14)$$

所以，若光速饱和，式(13)即化简为众所周知的简单关系，

$$E = pc \quad (15)$$

当然，光子的质量仍然隐含其中。

如图 1 所示，在 S_{10} 右侧，光速接近或达到饱和，特别是在 S_h 的位置上 ($\omega = 2 \times 10^2$)，差值 δ 已经小于光速测量的最佳精度 (± 1 米/秒) [14]，即 ($\delta < |\Delta|$)，光速已经饱和。所以，对于 S_h 右侧的、迄今常用的频率而言，光速都精确地等于常数 c ，没有色散，光子的能量与动量遵守关系式(15)，麦克斯韦方程仍然适用，电磁场保持规范不变性，而光子的质量则因此被掩盖。

综上所述，根据常用的频率范围内“光速等于常数 c ”的实验结果，不能对光子有质量与否做出判断，不能得出“光子质量为零”的结论。因此，应该更全面地、重新理解光子的“波粒二重性”：康普顿散射[6]不仅证实了光子的动量，也表明光子可能具有一定的质量；再则，不应该把 1901 年列别杰夫发现的光压力仅仅归因于电磁波的动量(坡印亭矢量) [15]，也应归因于光子的动量；类似于气体分子在容器壁上形成压力，光压力则可以认为是大数目光子累积的结果，是光子质量显现的宏观效应。

要进一步地对光子是否具有质量做出判断，真空中光速的色散是充分而且必要的证据，而要观察光速的色散，首先必须找到极端低能量的光子——长波光子。

5. 静电场与长波光子

通过检测静电场对库仑定律的偏离来寻找光子的质量[1]-[4]，已有很长的历史，相关的内容不属于本文讨论的范围，但是极具启发意义。为了寻找长波光子，以下，将从另一种角度来研究静电场。

如上所述，电磁波是光子的德布罗意波；本文中，“光子”一词专指电磁波的横波。理论上的静电场不辐射电磁波横波，因为静电荷被认为(或被默许为)是完全静止的。但是，实际的静电荷不会处于完全静止状态，应该辐射极端低频的电磁波，而频率最小值 ω_{\min} 的表示式(3)则是电子(辐射体)处于低动能的极限状态[9]下导出的结果，因此可以假设[16]：除了遵守库仑定律之外，静电场还应包含有静电荷辐射的长波光子——频率最小值 ω_{\min} 附近、小频率范围内的低能量光子。

如图 1 所示，($S_1 \rightarrow S_2$)区域内的光子称为慢光子[16]，它们占有的频率区间是 ($\omega_{\min} \leq \omega \leq 2\omega_{\min}$)，它们的速度低于极限值 c 大约 2.5%→10%。将($S_1 \rightarrow S_2$)的频率区间与长波光子的频率区间(见式(10))相对照，不难看出，在静电场的长波光子总数 N 中，慢光子的数目 N' 所占的比例可以表示为，

$$R = \frac{N'}{N} = \frac{\int_{\omega_{\min}}^{2\omega_{\min}} \frac{1}{\omega} d\omega}{\int_{\omega_{\min}}^{k\omega_{\min}} \frac{1}{\omega} d\omega} = \frac{\ln 2}{\ln k} \quad (16)$$

据此，如果实际的静电场辐射电磁波的频率范围很小，例如 $1 < k \leq 2$ ，则式(16)应改写为 $N' = N$ ， $R = 100\%$ ；若静电场的频率范围较大，例如达到色散带($S_1 \rightarrow S_{10}$)频率范围的十倍，即 $k \leq 100$ (参见图 1

和式(9)), 仍然有 $R \geq 15\%$ 。总之, 慢光子虽然仅占有很小的频率区间, 但它们在静电场的长波光子总数中应占有可观的比例。显然, 探测静电场的电磁波辐射, 测量其速度, 等同于观测光速的色散。通过探测静电场的电磁波辐射来观察光子质量引起的光速色散, 实验上会遇到的困难是不言而喻的, 本文建议: 首先检测静电场辐射电磁波的光压力。

6. 结论

若光子的质量 $m_\gamma \neq 0$, 则其频率有一最小值 $\omega_{\min} = 2.24 \times (m_\gamma c^2 / \hbar)$, 光速则有最低值 $v_{\min} = 0.895c$ 。光速由 v_{\min} 到 c 的全部色散过程, 只会发生在频率最小值 ω_{\min} 附近很小的频率区间之内, 因此, 只有长波光子的速度是色散的。在常用的频率范围内, “光速等于常数 c ” 的经验结果, 掩盖了光子的质量。实际的静电荷应该辐射极低频率的电磁波, 即辐射长波光子; 为利用静电场寻找光子的质量, 本文建议: 首先设计实验方法探测静电荷辐射电磁波的光压力。

致 谢

作者衷心感谢陈式刚院士对本文提出的意见和建议。

参考文献 (References)

- [1] Jackson, J.D. (1975) *Classical Electrodynamics*. John-Wiley & Sons Inc., New York, 5-9, 597-601.
- [2] 蔡圣善, 朱耘, 徐建军. 电动力学[M]. 第二版. 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. and Nieto, M.M. (1971) Terrestrial and Extraterrestrial Limits on the Photon Mass. *Reviews of Modern Physics*, **43**, 277-296. <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.43.277>
- [5] Jackson, J.D. (1987) The Impact of Special Relativity on Theoretical Physics. *Physics Today*, **40**, 34-42. <http://dx.doi.org/10.1063/1.881108>
- [6] Wichmann, E.H. (1971) *Quantum Physics*. Berkeley Physics Course Vol. 4. Education Development Center, Inc., Newton, 152-155, 196-197.
- [7] 彭桓武. 量子理论的诞生和发展——从量子论到量子力学[J]. 物理, 2001, 30(5): 265-270.
- [8] 阚学敏. 光子的质量与光速的下限[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2008(1): 67-70.
- [9] 阿希叶泽尔, 别列斯捷茨基. 量子电动力学[M]. 于敏, 等译. 北京: 科学出版社, 1964: 306-318.
- [10] Feynman, R.P. (1948) Relativistic Cut-Off for Quantum Electrodynamics. *Physical Review*, **74**, 1430-1438. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.74.1430>
- [11] 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, 44(3): 71-74.
- [12] Tu, L.-C., Luo, J. and Gillies, G.T. (2005) The Mass of the Photon. *Reports on Progress in Physics*, **68**, 77-130. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/68/1/R02>
- [13] Lakes, R. (1998) Experimental Limits on the Photon Mass and Cosmic Magnetic Vector Potential. *Physical Review Letters*, **80**, 1826-1829. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.1826>
- [14] Kaye, G.W.C. and Laby, T.H. (1986) *Tables of Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions*. 15th Edition, Longman, London and New York, 14-15.
- [15] 塔姆. 电学原理(下册) [M]. 钱尚武, 赵祖森, 译. 第二版. 北京: 人民教育出版社, 1960: 498-505.
- [16] 阚学敏. 光子的质量与静电场中的慢光子[J]. 江苏师范大学学报: 自然科学版, 2013, 31(3): 39-41.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mp@hanspub.org