

Theoretical Analysis of Photon Quality Based on Classical Electromagnetic Theory

Yu Wang¹, Guotong Sun², Hao Wang¹, Fuyun Ji¹, Zuozhi Liu¹, Yong Wan^{1*}

¹College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong

²Qingdao No. 58 High School, Qingdao Shandong

Email: *wanyongqd@hotmail.com

Received: Oct. 12th, 2018; accepted: Oct. 25th, 2018; published: Nov. 1st, 2018

Abstract

Photon is a gauge particle which has mass, energy and momentum. It has very high research value. Starting from the special theory of relativity, the relationship between mass and velocity, the relationship between mass and energy and the light quantum hypothesis of Einstein, this paper analyzes the concept of photons and the nature of the photon quality, and then finds that the rest mass of photons is zero while the movement quality is non-zero and the nature of the photon quality is the electromagnetic mass movement quality. In addition, this paper also gives two kinds of representation of photon energy and momentum in the vacuum and analyzes the difference and relationship between these two kinds of representation. Finally, this paper uses a new analysis method from the perspective of relationship between energy and momentum to discuss the changes of mass, momentum and energy when photons move from vacuum to the transparent medium, which makes it more comprehensive to discuss the quality of photons.

Keywords

Photon Quality, The Special Theory of Relativity, The Light Quantum Hypothesis, Energy, Momentum

基于经典电磁理论的光子质量理论分析

王 钰¹, 孙国同², 王 浩¹, 季福云¹, 刘作志¹, 万 勇^{1*}

¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛

²青岛58中学, 山东 青岛

Email: *wanyongqd@hotmail.com

收稿日期: 2018年10月12日; 录用日期: 2018年10月25日; 发布日期: 2018年11月1日

*通讯作者。

文章引用: 王钰, 孙国同, 王浩, 季福云, 刘作志, 万勇. 基于经典电磁理论的光子质量理论分析[J]. 现代物理, 2018, 8(6): 277-283. DOI: 10.12677/mp.2018.86031

摘要

光子是否存在静止质量一直存在争议。本文从狭义相对论的质速关系、质能关系和爱因斯坦的光量子假说出发,就光子的概念,光子的质量本质进行分析,给出了光子静止质量为零,运动质量非零的结论。并分析了光子运动质量的电磁质量本质,给出了在真空中光子能量和动量的两种表示形式,分析了两种表示形式之间的区别和联系。此外,从能量-动量关系角度出发的新的分析方法,讨论了光子从真空运动到透明介质时的质量、动量和能量变化。最后,本文给出了一些具有代表性的实验检测光子静止质量的研究数据,分析了在某些检测中光子具有微小数值静止质量的原因,使关于光子质量的讨论更为全面。

关键词

光子质量, 狹义相对论, 光量子假说, 能量, 动量

Copyright © 2018 by authors 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

1. 引言

众所周知, 19世纪, 麦克斯韦建立经典电磁理论的前提是光子的静止质量为零。但现有的教材中所给出的关于光子质量的公式及描述[1], 只简单的说明了一种光子质量的计算方法。但关于光子静止质量是否真正为零这一问题的研究, 一直是人们关注的焦点, 可以追溯到卡文迪什年代, 甚至更早。目前, 众多科学家在根据光子的非零静止质量所产生的一些现象例如真空中光速的频率色散, 静电场中的库仑反平方定律等来设计实验检测光子的静止质量。一些实验研究数据指出光子具有微小数值的静止质量[2][3], 给出光子静止质量的上限。也就是说光子静止质量可能在高精度的检测下并不为零。此外, 关于光子还有众多疑问[4], 例如: 教材中给出的基于经典电磁理论的光子能量的两种表示方式, 一种方式中能量与频率有关, 而在另一种表示方式即质能关系中, 能量看似为一恒定值。光子运动质量实质是什么, 光子质量的表达式可以在介质中还能否适用[5]-[9]?

本文基于经典的电磁理论, 分析了光子的静止质量和运动质量及其本质, 讨论了光子的能量、动量关系式及其关系, 得到了以上问题的解释, 进而对光子从真空运动到介质的过程中质量、能量和动量的变化进行了计算。

2. 光子的电磁理论基础

粒子物理学中, 通常采用 *Lorentz-Einstein* 式(1)表示粒子的质量:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (1)$$

其中, v 是粒子的运动速度, c 是光速, m_0 是 $v = 0$ 时的静止质量。但是对于光子而言, 两个关系式同时成立, 即 $v = c$, $m_0 = 0$ 。认为真空中光速不变性成立, 即 $v = c$, 所以只有 $m_0 = 0$, (1)式才有意义。传统的物理理论如麦克斯韦电磁理论和狭义相对论都认为, 光子没有静止质量。

在量子场理论中, 光子被认为在电磁作用中扮演媒介。将光子的运动质量记为 m_γ , 即有 $h\nu = m_\gamma c^2$ 。以光速运动的光子静止质量为零, 此处静止应当是一种假设。光子的运动质量, 实质上是光子的电磁质量。因此光子的运动质量, 并不应该为零。

在经典的电磁理论中, 光子的能量和动量有两种表示方式, 通常会引起人们的思考。如根据狭义相对论, 由于真空中光子始终以光速运动, 运动质量并不为零, 因此根据质能关系, 光子具有能量, 并且可以表示为:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} = m_\gamma c^2 \quad (2)$$

而在爱因斯坦光子理论的描述中, 光和原子电子一样也具有粒子性, 光就是以光速运动着的粒子流, 把这种粒子叫光量子。同普朗克的能量子一样, 每个光量子的能量可以表示为

$$E = h\nu \quad (3)$$

3. 讨论

3.1. 光子静止质量为零的理论论证

采用两个参考系, 设惯性参考系 S' 相对 S 系运动速度为 U , 将光子视作静止质量为 m_0 的粒子, 光子在 S 、 S' 系中沿 OX 轴运动的速度分别为 V 、 V' , 则根据(2)式将一个光子在两个参考系中的能量分别记为 E 和 E' , 在 S 系的动量写成标量形式为公式(4):

$$P = \frac{m_0 V}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \quad (4)$$

洛伦兹速度变换为公式(5)

$$V' = \frac{V - U}{1 - \frac{UV}{c^2}} \quad (5)$$

将(5)代入(2)中, 可得另一参照系下的能量, 见公式(6):

$$E' = \frac{m_0 c^2 \left(1 - \frac{UV}{c^2}\right)}{\sqrt{\left(1 - \frac{U^2}{V^2}\right) \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}} = \frac{E - UP}{\sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}} \quad (6)$$

根据爱因斯坦光量子理论即(3)式, 设 ν 和 ν' 分别为光在 S 系和 S' 系中的频率。并带入(6)式, 可得公式(7):

$$h\nu' = \frac{h\nu - UP}{\sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}} \quad (7)$$

根据多普勒频移公式 $\nu' = \nu \sqrt{\frac{c-U}{c+U}}$, 两边同时乘以 h 得到[2]:

$$h\nu' = h\nu \sqrt{\frac{c-U}{c+U}} \quad (8)$$

同(7)式比较可以得到:

$$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c} \quad (9)$$

将(2)式和(4)式连立, 可以推导出相对论中的能量—动量关系式[3], 并将(9)式带入有:

$$E^2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (10)$$

若要(10)式成立, 显然由于光速 c 并不为零, 因此为使上式成立, 则 $m_0 = 0$, 即光子静止质量为零。

3.2. 光子运动质量的本质及分析

规范场理论中, 电磁场的量子, 即光子, 是一种规范玻色子。光子在带电粒子间的相互作用过程中扮演一种媒介的角色[4]。规范粒子的引力质量一定为零, 即只有电磁质量。因此光子只具有电磁质量, 其引力质量为零。由于光子在真空中始终以光速运动, 不可能静止, 故而光子的运动质量本质为电磁质量, 可将静止作为一种假设, 静止质量则可视为引力质量。

由于静止质量 $m_0 = 0$, 即(1)式中分子为零, 而在真空中, 分母也为零。此时 m 的值不能确定, 但显然并不为零, 否则将会导出光子的能量动量为零的错误结论。由于此时光子运动的速度为光速 c 并不为零, 故此质速公式中的质量 m 有光子运动质量的含义, 通常记光子质量为 m_γ , 即:

$$m_\gamma = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (11)$$

但由于该式是一个未定式, 光子的运动质量 m_γ 的值不能由该式确定。在光量子理论中, 光子的运动质量为:

$$m_\gamma = \frac{h\nu}{c^2} \quad (12)$$

即光子的运动质量与频率 ν 有关, 给定一种光的频率, 光子的运动质量就可以唯一确定。

3.3. 光子在真空中的能量、动量表示方式

光子能量的表达式(2)中, 能量与质量有着确定的关系, 而式中光子的运动质量 m_γ 是一个不确定、不可测量的物理量, 而光子能量的另一种表达形式(3)中, 光具有粒子性, 同普朗克的量子一样。式中光的频率 ν 则是一个确定的、可以测量的物理量。经过上述对光子运动质量两种表述的讨论, 可知关于能量的两种描述并不矛盾, 前者表示总能量, 后者则是可测量的光子能量。

同样, 在真空中, 狹义相对论中光子的动量描述的是总动量, 爱因斯坦光子理论中光子的动量是可测量的。

3.4. 光子在透明介质中的运动质量、能量和动量

透明介质是一种几乎不吸收入射光子使其无能量损耗, 只有动量方向发生改变的环境。光子进入此介质后, 与介质中的晶格不断碰撞的过程可以视为弹性碰撞, 不改变光子的能量, 而仅改变在介质中的运动方向[5], 光子和透明介质构成的系统总动量保持不变。光子最终以最大的几率沿一个固定方向出射, 即折射, 由此可以看出, 光子在介质中的运动距离比在真空中的长。宏观来看, 可以认为是光在透明介质中的运动速度变小(即 $v = \frac{c}{n}, n > 1$), 且光子进入介质后的动量也变小。在经典物理讨论的范围内, 通常

认为电子和光子的经典半径是相等的。介质的折射率和入射光的波长决定了光子在介质中的质量。

但由于在介质中，光速不等同于光子的运动速度，前者实质上是指“波包”的速度，即群速度，代表波包的能量传播速度，比中心的相速度小，因此用光在介质中的速度公式 $v = \frac{C}{n}$ 来代表光子的速度会引入“有效质量”概念。

假设在真空中，运动的光子能量为 E ，动量为 P 。根据能量-动量关系式，因为其静止质量为零，即 $E = Pc$ 。结合波长与速度的关系可以看出：

$$P = \frac{h}{\lambda} \quad (13)$$

光子进入透明介质后，能量为 E' 和动量为 P' ，由于光子与介质中的晶格的碰撞是弹性碰撞并不改变光子的能量，故有 $E' \approx E$ 。目前对光在介质中的波长有两种定义，一种方法是 *Abraham* 定义的[10][11][12]：

$\lambda = n\lambda_0$ ；另一种是 *Minkowski* 定义的： $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ 。最近的研究表明，这两种情况都是正确的，而前者与动能有关，后者则与介质中光子的动量有关。如果按照 *Abraham* 认为的那样，由于光在介质(介质折射率 $n > 1$)中的运动速度变小，动量也变小，因此定义一个“有效光子”，其波长为 $\lambda' = n\lambda$ 。这一有效光子的动量为：

$$P' = \frac{h}{\lambda'} = \frac{h}{n\lambda} \quad (14)$$

将(14)式代入，由 E' 和 P' 的能量-动量守恒关系，并利用 $E' \approx E = PC$ ，可以得到一个有效质量：

$$m' = \frac{h\nu}{c^2} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = \frac{h}{\lambda c} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} \quad (15)$$

因此，光子进入透明介质后，其运动质量不能由传统的计算方法即(12)式计算，而是取决于介质的折射率和入射光的波长。其动量和能量也有新的表示形式，光子从真空进入透明介质后(介质折射率 $n > 1$)质量变小，动量变小，能量几乎不变。

3.5. 实验检验光子静止质量的研究进展

研究与澄清光子的质量、能量与动量的根本含义对于深入了解光子的运动情况和理解关于光子的经典电磁理论有着十分重要的意义。以上仅从理论上就光子零静止质量进行论证，并提出其运动质量的本质。物理学家们一直在尝试用实验检验光子的静止质量。至今已有多种实验方法，并进行了大量的检验。根据量子力学中的能量时间不确定性关系，即 $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$ ，可以知道光子可探测的极限静止质量 $m_0 \approx \frac{\hbar}{\Delta t \cdot c^2} \approx 10^{-61} \text{ kg}$ ，上面的估算式中 Δt 取宇宙的年龄，即 10^{10} 年。显然实验探测如此小的质量十分困难。因此实验检验光子静止质量方法都是寻找其质量非零而引发的各种效应。表 1 列出了历史上科学家们对光子静止质量的测定方法及结果[13][14]。

提高实验检验光子静止质量的检验精度是十分必要，亦是十分困难的。一方面因为如果假设静止质量非零，则必将是一个微小量，且在检验探测过程中需要排除各种系统误差。另一方面，关于光子为何静止质量非零的理论机制尚未健全。因此无法给实验直接测量光子静止质量提供直接的途径和方法。

3.6. 关于光子静止质量的另一点讨论

据德国海德堡大学的(*T. Prokopec*)和伦敦皇家学院的(*O. Tornkvist*)研究认为[9]，因为宇宙快速膨胀时，

Table 1. Representative testing results and methods of photon rest mass experiments
表 1. 代表性的光子静止质量实验检验结果及(以时间为序)

作者	时间(年)	研究方法	光子的质量上限(克)
De Broglie	1940	检验星光色散效应	8×10^{-40}
Bass <i>et al.</i>	1955	分析地球磁场中的“外来场”	2.0×10^{-47}
Florman	1955	检验无线电波色散效应	6×10^{-42}
Feinberg	1969	分析脉冲星 NP0532 色散效应	10^{-44}
Williams <i>et al.</i>	1971	检验库仑定律	1.6×10^{-47}
Bay <i>et al.</i>	1972	脉冲星辐射色散效应	3×10^{-46}
Hollweg	1974	星际等离子体介质中的色散	1.3×10^{-48}
Davis <i>et al.</i>	1975	分析木星磁场中的“外来场”	8×10^{-49}
Ryan <i>et al.</i>	1985	低温检验库仑定律	1.5×10^{-42}
Chemikov <i>et al.</i>	1992	检验安培定律	8.4×10^{-46}
Fisehbaeh <i>et al.</i>	1994	分析地球磁场中的“外来场”	1×10^{-48}
Ryutov	1997	分析太阳风磁场	10^{-49}
Lakes	1998	静态扭秤实验	2×10^{-50}
Schaefer	1999	分析伽马射线暴色散效应	4.2×10^{-44}
Luo <i>et al.</i>	2003	动态扭秤调制实验	1.2×10^{-51}
Accioly <i>et al.</i>	2004	分析电磁辐射的引力偏转效应	10^{-40}
Ftillekrug	2004	地球对流层放电观测	4×10^{-49}
Tu <i>et al.</i>	2006	改进的动态扭秤调制实验	1.5×10^{-52}

光子具有静止质量导致了目前宇宙中的天体星系周围环绕磁场。这可以作为证明光子具有一定微小静止质量的检验方法，本文对此作简要讨论。

在第 2.2 的讨论中，可以发现，光子静止质量为零是与规范不变性紧密联系的。电磁作用满足这种规范理论，这似乎与上述检验结果相悖。事实上，可以认为，光子是具有零静止质量的，在天体周围观察到磁场而证明的静止质量是由于在宇宙中，不仅在快速膨胀时引起，由于宇宙的温度经历了从高到低的漫长变化，真空的对称性遭到了破坏。也可以理解为，在真空中，光子具有零静止质量，而真空环境可能发生某种变化，在这种变化了的空间里，光子则会表现出微小数值的静止质量。

在此，可以举一个例子证明。在完美的真空中，光子满足(16)式中提到的色散关系。

$$w^2 - k^2 c^2 = 0 \quad (16)$$

式中， w 和 k 分别表示光子的圆频率和波矢。而在均匀无磁场 *Plasma* 环境中，光子满足的色散关系变为(17)式：

$$w^2 - w_0^2 = k^2 c^2 \quad (17)$$

式中， w_0 表示 *Plasma* 的振荡频率。即：

$$w_0 = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n}{m_e}} \quad (18)$$

式中， n 表示单位体积内的电子数，即电子密度， m_e 表示电子的质量。(17)式的表示形式可以得出光子

具有静止质量的结论,但可以认为这个静止质量是由于 *Plasma* 的环境引起的。由此也可以设想,当加热某种稀薄气体环境时,就可以构造出 *Plasma* 环境,进而使光子具有静止质量。总之,可以想象,在宇宙中,光子静止质量与宇宙环境的温度有关。

4. 结论

本文根据经典电磁理论利用理论推导的方法,介绍并论证了光子静止质量可以为零,运动质量本质是电磁质量。同时,分析了关于光子运动质量和光子的能量、动量两种描述方式的等价性以及光子从真空中运动到透明介质中的质量、动量和能量变化。目前,关于光子质量上下限的讨论仍是关注的焦点,分析部分自然现象如天体周围的磁场和一些实验检测光子质量的结论发现:光子可能存在一定的静止质量。经众多的实验测定,这一光子静止质量近似在 10^{-66} g 左右,上限在 10^{-49} g 附近。这个数值很小,一般情况下可以近似忽略,即认为光子是零静止质量,本文理论推导得出的结论仍近似成立。最后本文对于光子具有测得的微小数值静止质量的原因进行了讨论分析,对于解释和研究众多物理现象及原理有着十分重要的意义。

基金项目

国家自然科学基金(11144007)和山东省自然科学基金(ZR2016AM27)资助课题。

参考文献

- [1] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [2] 黄志洵. 光子是什么[J]. 前沿科学, 2016, 10(3): 75-96.
- [3] 王成艳. 光子静止质量的分析[J]. 黄冈师范学院学报, 2004(3): 71-93.
- [4] 吕军. 光的物理性质[J]. 教育学文摘, 2016, 12.
- [5] 赵坚. 光子在真空中和透明介质中的能量和动量问题[J]. 物理通报, 2014(12): 105-108.
- [6] 涂良成, 罗俊. 实验检验光子静止质量的研究进展[J]. 物理, 2006, 35(9).
- [7] 吴齐全. 光子静止质量上限的实验检测[J]. 物理教师, 2008, 29(1): 58.
- [8] 刘华. 光子静止质量和能量特性的相对论证明[J]. 广西教育学院学报, 2007(5): 79-80.
- [9] Tu, L.C., Luo, J. and Gillies, G.T. (2005) The Mass of the Photon. *Reports on Progress in Physics*, **68**, 77-130.
- [10] Arbab, A.I. (2016) Propagation of Photons in a Medium and Refractive Index. *OPTIK, International Journal for Light and Electron Optics*, **127**, 10758-10765. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.08.084>
- [11] Eddington, A.S. (1931) Preliminary Note on the Masses of the Electron, the Proton, and the Universe. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **27**, 15-19. <https://doi.org/10.1017/S0305004100009269>
- [12] Arbab, A.I. (2015) Derivation of Dirac, Klein-Gordon, Schrodinger, Diffusion and Quantum Heat Transport Equations from a Universal Quantum Wave Equation. *EPL*, **92**, 2333-2358.
- [13] Arbab, A.I. (2015) The Quaternionic Quantum Mechanics. *Applied Physics Research*, **3**, 160.
- [14] Tan, C.Z. (2015) Imaginary Rest Mass of a Photon in a Dispersive Medium. *OPTIK, International Journal for Light and Electron Optics*, **126**, 5304-5306. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.009>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>

下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-0916，即可查询

2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>

左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

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

期刊邮箱：mp@hanspub.org