

实验检验光子静止质量的研究进展*

涂良成 罗俊[†]

(华中科技大学物理系 武汉 430074)

摘要 爱因斯坦狭义相对论的基本假设之一是光速不变性,其直接推论就是光子的静止质量必须为零,因此实验检验光子是否具有非零的静止质量一直备受关注.非零光子静止质量以 Proca 方程组为基础,其实验检验主要针对真空光速(频率)色散效应、库仑反平方定律和安培环路定律的偏离、寻找纵向电磁波以及磁偶极场的 Yukawa 势等几个方面.文章作者所在的实验小组采用精密扭秤调制方法将国际上同类实验结果提高了 2 个数量级,给出光子静止质量上限为 $m_\gamma \leq 1.5 \times 10^{-52} \text{g}$.对光子静止质量的实验检验,也是对光速不变原理的一种检验,即使光子仅有非常微小的静质量,如一旦得到实验的检验,将会对整个物理学的发展产生巨大而深刻的影响.

关键词 光子,静止质量上限,精密扭秤,调制法

Progress in experimental tests of the photon rest mass

TU Liang-Cheng LUO Jun[†]

(Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China)

Abstract One of the hypotheses of Einstein's special relativity is the constant speed of light, which directly implies that the photon should be massless, and hence experimental tests of its foundations are always of considerable interest. Based on Proca's equations, some far-reaching implications for nonzero photon mass, for example, the frequency dependence of the speed of light in free space, the deviations of Coulomb's Law and Ampère's Law, the existence of longitudinal electromagnetic waves and the additional Yukawa potential of magnetic dipole fields were seriously studied. Through use of a modulated torsion balance our experimental measurements improved the current upper limits on the photon rest mass by at least two orders, and gave $m_\gamma \leq 1.5 \times 10^{-52} \text{g}$. Experimental investigations of the photon rest mass are an indirect test of the constancy of the speed of light, and any conclusive evidence of a finite mass for the photon will greatly affect the development of all physics.

Keywords photon, upper limit on rest mass, precise torsion balance, modulation

1 引言

19 世纪物理学最伟大的成就之一是麦克斯韦经典电磁场理论的形成,即麦克斯韦方程组的建立.在麦克斯韦理论中,各种频率的电磁波在真空中的传播速度 c 是恒定不变的.同样,20 世纪爱因斯坦狭义相对论的基本假设之一同样要求光在真空中相对于一切惯性系都以恒定的速度 c 传播,因此,光不可能静止下来,也就不可能存在光子的静止系,即光子的静止质量必须是严格地等于零.现有的麦克斯韦电磁理论和量子电动力学都是建立在光子静止质

量为零这一基本假设之上,而电磁相互作用也是通过零静止质量的光子来传播的.现代量子电动力学的理论预言和实验结果的高精度吻合使人们似乎已经接受光子具有零静止质量这一概念.尽管如此,这并没有阻止实验物理学家们对光子静止质量直接或间接的实验检验,光子究竟是否具有微小的静止质量这一问题一直受到人们的关注^[1-3],其中包括德

* 国家自然科学基金创新研究群体(批准号:10121503)和国家重点基础研究发展规划(批准号:2003CB716300)资助项目
2005-10-31 收到初稿 2006-04-10 修回

[†] 通讯联系人. Email: junluo@mail.hust.edu.cn

布罗意、薛定谔和费曼这些量子力学的泰斗们。

实验检验光子静止质量始于卡文迪什年代(甚至更早,那时甚至还没有“光子”的概念)。至今为止,虽然已有许多实验通过多种方法对光子静止质量进行了大量的检验,但并没有证实光子具有非零的静止质量,所有实验都是给出越来越低的光子静止质量的上限,也就是说,光子静止质量在更高精度下是否仍然为零,需要更为精密的实验来检验。根据能量时间不确定原理,光子静止质量的可探测极限为 $m_\gamma \approx \hbar/(\Delta t)c^2 \approx 10^{-66} \text{ g}$, 其中 $\hbar (= h/2\pi)$ 是普朗克常数, Δt 取宇宙的年龄,约 10^{10} 年。显然,实验探测如此微小的质量将极度困难,几乎可以肯定的说,我们不可能“捕捉”一个光子,来“称”出它的质量。因此现有的实验检验都是寻找非零光子静止质量产生的各种效应,比如真空中光速的频率色散效应、静态电磁场的库仑反平方定律和安培环路定律的偏离、寻找纵向电磁波以及磁偶极场的 Yukawa 势等几个方面,所有这些效应都曾经作为实验室实验和宇宙天文观测确定光子静止质量的观察对象,并通过各自观测结果给出相应的光子静止质量上限。

作为基本粒子的一种,光子同中微子(neutrino)、引力子(graviton)、轴子(axion)等其他粒子一样,它们的基本属性,包括质量、电荷的确定(甚至它们的存在)都是物理学中极具挑战性的问题。对光子而言,其存在毋庸置疑,国际基本粒子数据组^[4](Particle Data Group)于2004年给出的光子质量上限为 $m_\gamma \leq 1 \times 10^{-49} \text{ g} = 6 \times 10^{-17} \text{ eV}$ 。该质量上限如此之小,竟比电子质量小了约22个数量级!尽管如此,一旦实验证实光子确实具有非零的静止质量,将对狭义相对论乃至整个现代物理学的构架产生巨大的影响。

2 非零光子静止质量理论基础

实验检验光子静止质量是以重电磁场理论——Proca 方程组^[5]为基础的:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} - \mu_\gamma^2 \phi \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu_\gamma^2 \mathbf{A}$$

方程中 ϕ 和 \mathbf{A} 分别代表电磁场的标势和矢势, μ_γ^{-1}

$= \hbar/m_\gamma c$ 是光子的康普顿波长,其中 m_γ 为光子静止质量。在 Proca 电磁场理论中, Lorentz 条件、电荷守恒定律以及能量守恒定律仍然成立,但是电磁场的标势和矢势直接进入到了能流密度和能量密度中,成为可观测的物理量,因此具有明确的物理意义。虽然 Proca 方程形式上保留了 Lorentz 不变性(它是电荷守恒定律的必然要求),但放弃了局域 U(1) 规范不变性。如果光子静止质量为零, Proca 方程组就会自动地过渡到麦克斯韦方程组。

Proca 方程的直接推论之一是真空中光速的色散效应^[1-3]。由 Proca 方程不难得到重电磁波在真空中的色散关系为 $k^2 = \omega^2/c^2 - \mu_\gamma^2$, 其中 k 为波矢, ω 为角频率。此时自由电磁波的相速度和群速度并不相等,常数 c 则是频率趋于无限大的自由电磁波在真空中的传播速度,而不同频率的电磁波在真空中传播的速度不同,这种传播速度随频率的变化现象称为色散效应。通过测量不同频率的光信号的速度差,或者测量不同频率的光传播相同的距离所用的时间差可以检验光速的色散效应,进而可以确定光子静止质量。

Proca 方程中非零光子静止质量的另一个效应是静态电磁场中 Yukawa 势的出现^[1-3]。对于处于原点的静止单位点电荷的势为 $\phi(r) \sim \exp(-\mu_\gamma r)/r$, 显然当 $\mu_\gamma = 0$ 时,点电荷之间的相互作用满足库仑反平方定律,而光子非零的静止质量效应就是使点电荷之间的作用偏离了库仑反平方定律。类似地,光子非零静止质量也会使安培环路定律出现非零的环路积分。因此,检验库仑反平方定律和安培环路定律的正确程度,提供了确定光子静止质量上限的又一类实验方法。

Proca 重电磁理论的第三个效应是纵电磁波的出现^[1-3]。麦克斯韦电磁波为横波,它的两个极化方向互相垂直,并都垂直于光的传播方向。光子非零静止质量使得重电磁波将出现第三个极化方向——沿着光的传播方向的极化,称为“纵光子”。然而,“纵光子”预期的各种可能的效应至今没有被实验观测到,因此,对“纵光子”存在的各种理论解释以及其他实验观测相结合如何形成自洽的解释(如普朗克辐射的实验观测)至今仍然存在分歧;同样由于光子获得有限质量的物理机制至今还不清楚,目前关于“纵光子”的结论是:其实验上的可观测效应非常小,即使在几个埃的尺度上也不明显,或者说,如果光子具有非零的静止质量,它一定非常非常小,以至于“纵光子”的各种效应的大小还没有达限光子

表 1 一些代表性的光子静止质量实验结果及采用的方法(以时间为序)

作者 [参考文献]	时间/年	实验方法	光子质量上限/g
De Broglie [1]	1940	检验星光色散效应	8×10^{-40}
Bass <i>et al.</i> [6]	1955	分析地球磁场中的“外来场”	2.0×10^{-47}
Florman [7]	1955	检验无线电波色散效应	6×10^{-42}
Feinberg [8]	1969	分析脉冲星 NP0532 色散效应	10^{-44}
Williams <i>et al.</i> [9]	1971	检验库仑定律	1.6×10^{-47}
Bay <i>et al.</i> [10]	1972	脉冲星辐射色散效应	3×10^{-46}
Hollweg [11]	1974	星际等离子体介质中的色散	1.3×10^{-48}
Davis <i>et al.</i> [12]	1975	分析木星磁场中的“外来场”	8×10^{-49}
Ryan <i>et al.</i> [13]	1985	低温检验库仑定律	1.5×10^{-42}
Chernikov <i>et al.</i> [14]	1992	检验安培定律	8.4×10^{-46}
Fischbach <i>et al.</i> [15]	1994	分析地球磁场中的“外来场”	1×10^{-48}
Ryutov [16]	1997	分析太阳风磁场	10^{-49}
Lakes [17]	1998	静态扭秤实验	2×10^{-50}
Schaefer [18]	1999	分析伽马射线暴色散效应	4.2×10^{-44}
Luo <i>et al.</i> [19]	2003	动态扭秤调制实验	1.2×10^{-51}
Accioly <i>et al.</i> [20]	2004	分析电磁辐射的引力偏转效应	10^{-40}
Füllekrug [21]	2004	地球对流层放电观测	4×10^{-49}
Tu <i>et al.</i> [22]	2006	改进的动态扭秤调制实验	1.5×10^{-52}

质量到目前的可探测能力的范围。

除了上面讨论的三种效应之外,非零的光子静止质量与黑体辐射、波导和谐振腔的波场分布、磁单极子的存在与否、以及电荷量子化、带电黑洞的存在与否等等物理现象有着密切的关系,限于篇幅,不再一一详细叙述。原则上,采用麦克斯韦经典电磁理论描述的所有物理现象,如果加入有限光子质量的修正,都会产生相应的效应,但并不是所有的效应都是可以实际探测的,因此实验检验光子静止质量的方法也就受到一定的限制。

3 光子静止质量实验检验回顾

检验光子静止质量的实验,按照上面讨论的有的效应可以大致分为^[1-3]对光速色散效应的检验,对库仑定律和安培定律的零检验,对静磁场中“外来场”的检验,以及星际磁流体力学效应的检验等4大类,表1中给出一些有代表性的确立光子静止质量的典型实验,具体的实验方法和实验原理可以参考表1列出的相关原始文献。

4 扭秤调制法检验光子静止质量

精密扭秤作为弱力检测的重要工具和实验手

段,在引力实验领域有着广泛的应用,并随着不断发展的近代科学技术及加工工艺与巧妙的实验设计相结合,使扭秤以及与之相关的测量技术得到逐步完善,并为高精度实验测量做出了极大的贡献^[23]。两百多年来,卡文迪什和库仑设计的扭秤经过不断完善,被广泛应用于精确测量万有引力常数 G 、检验等效原理、验证非牛顿引力平方反比定律、研究引力对自旋的依赖性,以及寻找自然界中新的相互作用力等等。1998年,美国学者 Lakes 报道了一个新的检验光子静质量的实验方法^[17],其基本思想是利用扭秤来检验一个环状螺线管内部磁场与宇宙磁场矢势的相互作用。由于宇宙磁场矢势的大范围特征,此时悬挂磁环的扭秤相当于一个宇宙罗盘,如果光子质量存在,该罗盘就对宇宙磁场矢势敏感,通过精密扭秤来检测这一效应。由于扭秤对弱力(矩)信号特别灵敏,因而 Lakes 的实验结果给出的光子质量上限为 $m_\gamma \leq 2 \times 10^{-50} \text{ g}$ 。但由于理论分析和实验设计上的缺陷,Lakes 的实验结果在宇宙磁场矢势的方向正好与地球自转轴方向一致时没有意义,而且容易受到地球上其他周日波动效应的影响。

2000年,我们率先提出采用旋转扭秤调制法检验光子静止质量的上限^[24],这一方案不仅能有效地克服 Lakes 的静态扭秤实验方案中宇宙磁场矢势的

方向与磁环磁偶极矩的方向之间夹角不确定性问题,而且能有效抑制环境噪声的影响.实验原理如图1所示,整个实验系统由磁性扭秤系统、电容反馈控制系统、光杠杆系统、数据采集系统、真空系统和回转台系统(图中未画出)等部分组成.我们采用绕有线圈的软磁铁环作为检验质量,通过一根直径为 $100\mu\text{m}$ 的细钨丝悬挂在真空容器中,悬丝与秤杆连接部分粘有一面小平面对镜,用于反射检测扭秤角位移的激光束,电容反馈系统用于控制扭秤的运动,使整个实验中扭秤始终处于平衡位置.整个实验装置安放在我们的山洞实验室内,实验过程中真空容器内维持约 0.1Pa 的气压.绕在磁环上的螺线环通电后,其等效的磁偶极矩 a_d 的方向为环的法线方向.如果光子存在静止质量,环状磁体的磁偶极矩 a_d 将与宇宙磁场矢势 A_e 发生相互作用,从而产生力矩并且使扭秤偏转.

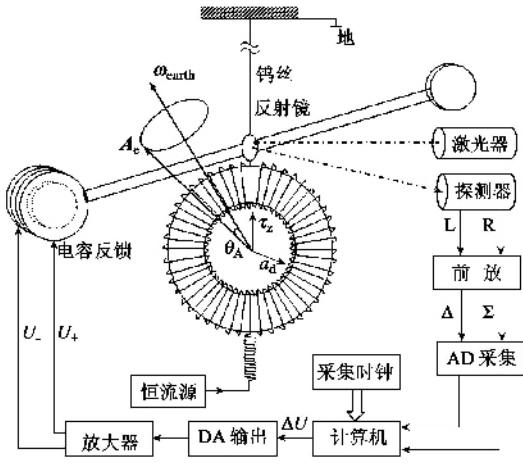


图1 扭秤调制法检验光子静止质量实验装置示意图

在Lakes的扭秤实验中,磁环扭秤系统固定在实验室中不动,由于地球的自转运动,非零的光子静止质量效应将通过扭秤检测到的24小时周期变化的信号体现出来,每个恒星日一个周期,这就是Lakes的实验中的待测效应,我们称这种检验源于地球自转引起的方法为静态实验方法.但是静态实验中存在至少两个缺陷:一是地球上呈24小时周期变化的物理现象很多,比如环境温度、气压等效应,以及人的活动规律等等,因此实验中必须将光子静止质量所产生的效应同这些效应区分开来;二是在此类扭秤实验中,宇宙磁场矢势 A_e 的方向与地球自转轴之间的夹角 θ_A 为未知参数,如果刚好 $\theta_A=0$,则即使光子具有非零的静止质量,静态扭秤实验也不能检测到源于非零光子静止质量的力矩.为

了有效地克服静态实验中的这两个缺陷,我们采取调制的实验方法,即让扭秤以某个周期旋转起来,如果光子静止质量不为零,则我们就可以检测到相应的周期性变化的力矩,这样一方面避免了24小时的周日效应,并大大降低了实验中的 $1/f$ 噪声;另一方面调制实验方法中待测力矩与参数 θ_A 无关,确保了实验结果的有效性.

实验中我们选择背景噪声较低的1小时为调制周期,连续进行了约82小时的实验.通过数据分析给出,在我们的实验精度下,实验曲线上没有发现待测的效应(见图2),由此给出光子静止质量的上限为 $m_\gamma \leq 1.2 \times 10^{-51}\text{g}$.该实验结果将Lakes的实验结果提高了一个多数量级,同时调制的实验方法有效地克服了宇宙磁场矢势对方向的依赖关系.该实验结果被美国物理学会新闻通报以“*A new limit on photon mass*”为题进行了报道,并且被2004年的Particle Data Group收录^[4].与其他的实验结果比较,该上限将实验室检验库仑定律给出的光子静止质量上限提高了4个多数量级,比检验光的色散效应给出的上限提高了至少5个数量级,比由观测地球磁场和木星磁场给出的上限分别提高了3个和2个数量级.

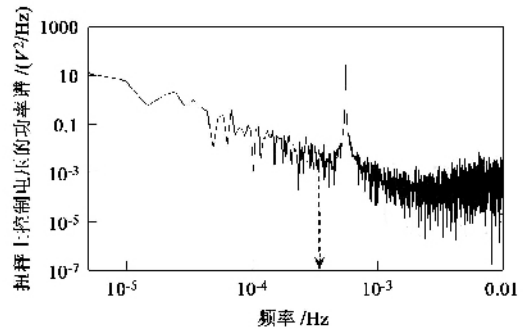


图2 扭秤调制法检验光子静止质量实验中扭秤控制极板上反馈电压的功率谱曲线(图中箭头所示的调制频率处没有看到存在光子静止质量的信号,尖峰处为扭秤调制频率的倍频,源于旋转扭秤对实验环境背景极不均匀引力场的响应)

针对第一次实验数据中出现的背景引力场极不均匀等所引起的问题,最近我们对实验又进行了改进.新的实验设计主要针对以下几个方面进行改进:一是重新选择了一个背景引力场更加对称的实验地点(仍然在山洞实验室内),同时将扭秤设计成具有质量四极矩构型,极大地减少了背景引力场的影响;二是将扭秤系统放到高真空容器中(优于 10^{-5}Pa),进一步减少气流扰动的影响,降低实验噪声水平;三是实验中扭秤的各个部件,除了磁环外,均进行了镀

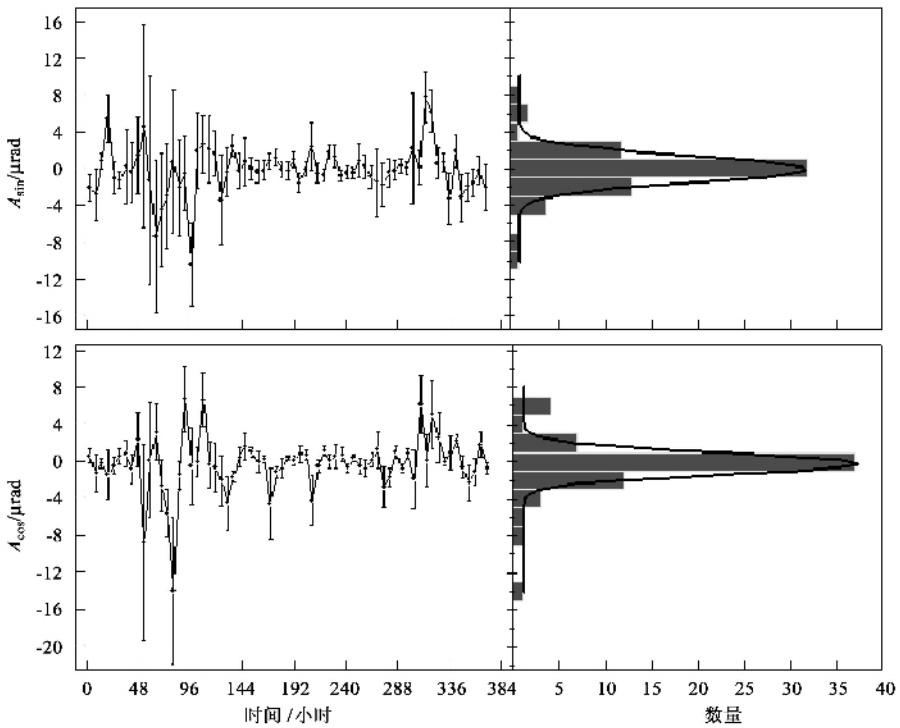


图3 分段合成后的调制信号的幅度分量以及对应的直方图和高斯分布拟合曲线(图中每个数据点代表10个调制周期,其误差为10个拟合值的统计标准差)

金处理,以降低静电的影响;四是进行连续长时间的数据采集,进一步降低噪声水平;五是对回转周期进行了同步检测,并且对环境磁场进行了调制实验,确保实验结果的可靠性。

我们于2005年3月到4月间进行了新的实验^[22],此次实验采用的调制周期为2003.5s,实验数据一共积累了15.7天,扭秤一共旋转了677圈。对实验原始数据进行谱分析后,在功率谱曲线中的基频、倍频处都没有出现信号,这表明我们的四极矩质量配置的扭秤补偿背景引力场的效果非常明显。在随后的实验数据处理中,我们采用如下步骤进行:首先将原始实验数据按照调制频率进行移相半个调制周期后与原数据作差,以去掉原始实验数据中超低频分量的影响,然后将实验数据进行分段,使每个数据段长度为10个调制周期(因此共有67个数据段),再将每段数据按照 $\theta_i(\omega t) = (A_{sin})_i \sin\omega t + (A_{cos})_i \cos\omega t$ 拟合调制频率的两个幅度分量 $(A_{sin})_i$ 和 $(A_{cos})_i$,得到的拟合结果以及其对应的直方图和高斯分布拟合曲线如图3所示。根据拟合系数在每个数据段的拟合误差,采用加权平均合成得到调制频率的信号的幅度为 $A \approx (0.07 \pm 0.18) \mu\text{rad}$ 。由此,我们给出新的光子静止质量上限为 $m_\gamma = (0.9 \pm 1.5) \times 10^{-52} \text{g}$,该上限值与我们2002年实验结果比

较,提高了近1个数量级,将Lakes的实验结果提高了2个数量级。

我们采用动态扭秤调制实验能够有效地克服静态实验中存在的一些缺陷,但是该类实验方法确定光子静止质量还是存在一个开放的问题,即如何有效地确定宇宙磁场矢势的大小?目前虽然已经有许多天体磁场观测手段和方法,但还是不能精确地获得大尺度下宇宙磁场矢势的大小^[25-28]。因为天体磁场,特别是宇宙大尺度下的磁场,到目前为止,还有许多人们未知的或者不确定因素,譬如一个最基本的问题就是宇宙磁场的起源问题到目前为止还没有定论。一般来说,涉及的尺度越大,目前知道的就越少。尽管如此,我们可以根据目前的观测资料,大概估计不同尺度下的宇宙磁场矢势的大小。假设宇宙中存在一个尺度为 L ,并且大体上均匀的磁场 B ,则我们可以近似认为该尺度下的磁场矢势的大小为 $A \sim BL$,这里的特征尺度 L 是指磁场均匀的范围,超出该尺度,磁场的大小就会发生显著的变化。依据该方法,并不失一般性地假定我们实验地点磁场矢势的大小与宇宙中最为普遍的、星系团尺度的磁场矢势的典型大小近似相同,即 $A_e \approx 10^{12} \text{Tm}$,对应于尺度约为 $5 \times 10^{22} \text{m}$,磁场约为 $0.2 \mu\text{G}$ ^[27,28],以此来最终确定由扭秤实验给出的光子静止质量的上限。

5 结束语

检验光子静止质量是否为零,也是对光速不变性原理和经典电磁理论 $U(1)$ 规范不变性的一种检验,因此,一个高精度的检验光子静止质量实验,无论是肯定还是否定的结果都具有非常重要的意义.在未来的实验检验中,由于各种介质的干扰,地面观测光速的色散效应很难取得实质性的进展,只有通过射电天文观测高能的伽马射线暴或者是脉冲星中毫秒级的色散效应,才有可能将目前的实验精度提高几个数量级.就实验检验库仑反平方定律而言,原则上采取毫开尔文级的低温实验,进行长时间的数据累计,以及采用更高频率的高压,也有可能提高实验精度,但实际困难可想而知;采用薛定谔“外来场”方法确定光子静止质量上限,最有可能取得突破性进展的仍然是观测木星磁场,如果对其磁场的观测高度由原来的4倍木星半径增加到100倍(如同伽利略探针计划的一样),光子静止质量的上限有望提高2—4个数量级.利用星际等离子体效应确立光子静止质量,由于涉及太多的不确定假设条件,其中的一部分至今仍然受到置疑,因此,即使这种方法能够给出比其他方法高几个量级的限制,其置信水平仍然得不到提高.

进行高精度的光子静止质量实验检验是非常困难的,一方面是因为光子如果存在有限的静止质量,它一定非常小,需要将巧妙的实验设计与先进的探测技术有机结合,切实排除各种可能的系统误差,才可能进一步提高实验精度,增加实验结果的可信度;另一方面,由于目前关于光子如何获得静止质量的理论机制尚未形成,因此这给如何更有效、更直接地寻找测量光子静止质量的可能途径造成一定的困难.一个高精度的“零”实验结果仅仅给出光子静止质量的上限并不意味着光子就具有零静止质量,目前实验物理学家们所能做的就是如何将该上限值一步一步地向由不确定原理确定的可探测极限逼近,如同寻找中微子质量的过程一样,也许下一个更高精度的实验结果就可能给出光子静止质量的值,而

不是其上限!

参 考 文 献

- [1] Tu L C, Luo J, Gillies G T. *Rep. Prog. Phys.*, 2005, 68 : 77
- [2] 张元仲. 狭义相对论实验基础. 北京: 科学出版社, 1979; Zhang Y Z. *Special Relativity and Its Experimental Foundations*. Singapore: World Scientific Press, 1998, 245
- [3] Goldhaber A S, Nieto M M. *Rev. Mod. Phys.*, 1971, 43 : 277
- [4] Eidelman S, Hayes K G, Olive K A *et al.* *Phys. Lett. B*, 2004, 592 : 1
- [5] Proca A. *J. Phys. Radium*, 1937, 8 : 23
- [6] Bass L, Schrödinger E. *Proc. R. Soc. London, A*, 1955, 232 : 1
- [7] Florman E F. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 1955, 54 : 335
- [8] Feinberg G. *Science*, 1969, 166 : 879
- [9] Williams E R, Faller J E, Hill H A. *Phys. Rev. Lett.*, 1971, 26 : 721
- [10] Bay Z, White J A. *Phys. Rev. D*, 1972, 5 : 796
- [11] Hollweg J V. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, 32 : 961
- [12] Davis L, Goldhaber A S, Nieto M M. *Phys. Rev. Lett.*, 1975, 35 : 1402
- [13] Ryan J J, Accetta F, Austin R H. *Phys. Rev. D*, 1985, 32 : 802
- [14] Chernikov M A, Gerber C J, Ott H R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68 : 3383
- [15] Fischbach E, Kloor H, Langel R A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73 : 514
- [16] Ryutov D D. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 1997, 39 : A73
- [17] Lakes R. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80 : 1826
- [18] Schaefer B E. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82 : 4964
- [19] Luo J, Tu L C, Hu Z K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90 : 081801
- [20] Accioly A, Paszko R. *Phys. Rev. D*, 2004, 69 : 107501
- [21] Füllekrug M. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93 : 043901
- [22] Tu L C, Shao C C, Luo J *et al.* *Phys. Lett. A*, 2006, 352 : 267
- [23] Gillies G T, Ritter T C. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, 64 : 283
- [24] Luo J, Shao C C, Liu Z Z *et al.* *Phys. Lett. A*, 2000, 270 : 288
- [25] Kronberg P P. *Physics Today*, 2002, 55 : 40
- [26] Han J L. *Astrophys. Space Sci.*, 2001, 278 : 181
- [27] Asseo E, Sol H. *Extragalactic magnetic fields*. *Phys. Rep.*, 1987, 148 : 307
- [28] Kronberg P P. *Rep. Prog. Phys.*, 1994, 57 : 325