

光子静质量 =



中国科学院物理研究所 张元仲

光子,作为一种物质存在,象其他微观粒子一样,也具有波粒二重性:在某些现象(例如光电效应)中光子表现出具有粒子性,在另一些现象(例如干涉和衍射)中它又表现具有波动性。光子又有一些独特的性质,例如它的运动速度每秒钟约三十万公里,这是至今我们所知道的最高的物质运动速度。既然光子是一种物质存在,那么它也应当具有质量。在这里,我们就谈谈什么是光子的质量,它是怎样量度的?在回答这些问题之前,让我们先说明什么是质量。

质量是物质所具有的一种普遍的属性。它可以表现为惯性质量、引力质量以及电磁质量等等。下面我们只讲惯性质量。什么叫惯性,什么又叫惯性质量呢?恩格斯指出:“**惯性只是运动不灭的反面表现**”。这就是说,惯性是物质从消极的方面保持其运动状态的一种属性。惯性质量则是物质惯性的一种量度,质量越大的物体其惯性越大,要改变它的运动状态就越困难。举例来说,一列火车的质量要比一辆自行车的质量大得多,如果火车和自行车以同样的速度滑行,那么火车的惯性要比自行车的惯性大得多,因此我们使火车停下来要比使自行车停下来费力得多。在古典物理学中,惯性质量是一个与速度和加速度无关的常量,在一个给定的(已知的)力的作用下,物体的加速度与质量成反比,惯性质量越大,加速度就越小。按照这样的关系,我们就能够去比较不同物体的质量大小,所以,在选取了一些标准的物体以后,我们就可以量度其他物体的质量。在宏观低速领域里,各种物理的和化学的现象曾经证明,封闭系统的质量保持不变,或者说质量既不会产生也不会消灭。这就是质量守恒定律。

但是,在微观领域深入研究高速运动现象的过程中,质量的概念得到了进一步的发展。二十世纪初,人们在实验中发现,高速运动电子的质量不再是常量,而是随着电子运动速度的增加而加大。在理论上,狭义相对论给出了质量与速度之间的正确的关系式。这个关系式为以后的更为精密的实验测量所证实。正如列宁指出的:“**迄今我们认识物质所达到的那个界限正在消失,我们的知识正在深化;那些从前以为是绝对的、不变的、原本的物质特性(不可人性、惯性、质量等**

等)正在消失,现在它们显现出是相对的、仅为物质的某些状态所特有的”。

现在我们就来谈谈相对论中的质量概念。按照狭义相对论力学,质量分为静止质量、运动质量和总质量。静止质量 m_0 是与物体运动速度无关的常量;运动质量 m_k (简称动质量)是与物体速度有关的量;总质量 m (通常称为相对论质量)等于静质量与动质量之和。用公式写出来是:

$$m = m_0 + m_k = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$
$$m_k = m_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

其中, u 是物体运动的速度, c 是真空中光速。另外,在狭义相对论力学中能量的概念也扩充了。一个物体的能量分为固有能量 E_0 , 动能 E_k 和总能量 E 。总能量等于固有能量与动能之和: $E = E_0 + E_k$ 。它们与质量的关系是:

$$E_0 = m_0 c^2, E_k = m_k c^2, E = m c^2.$$

从上面所讲的质量、能量与速度的关系式我们可以看出,当静质量不为零的物体的运动速度趋于光速 c 时,它所具有的总能量和总质量都趋于无穷大。因此,凡是以光速 c 运动的总质量有限的物体(例如光子),其静质量必须是零。这就是说光子没有静质量。但是,光子具有有限的动质量和总能量。我们知道,频率为 ν 的光子,它的能量等于 $h\nu$ (其中 h 是普朗克常数)。因此,按照上面给出的公式,光子的动质量和相对论质量是 $m_k = m = h\nu/c^2$ 。此外,虽然狭义相对论中的静质量是个与速度无关的常量,但它与古典物理学中的质量不同。在一个与外界隔绝的封闭系统中,各个物体的静质量之和可以随着这个系统内部的反应过程增大或减小。最典型的一个例子就是一个正电子和一个负电子湮灭变成两个光子的过程。在湮灭之前总的静质量等于二倍的电子静质量;湮灭后总的静质量是光子的静质量,即等于零。显然,在这个过程中静质量是不守恒的。分析微观粒子的各种反应过程,我们能够发现扩充的能量守恒及其转化定律成立;相应地,古典物

理学中的质量守恒定律应扩充为质量守恒及其转化定律。这就是说,对于任何过程,总能量既不能产生也不能消灭,它只能从一种形式转化为另一种形式,例如固有能量和动能之间可以互相转化。同样地,质量既不能产生也不能消灭,它只能从一种形式转化为另一种形式。具体地说,对于一个封闭系统,总的相对论质量是不会改变的。但是静质量和动质量之间可以互相转化,例如在上面例举的正电子和负电子湮灭的过程中,正负电子的静质量转变成了光子的动质量。

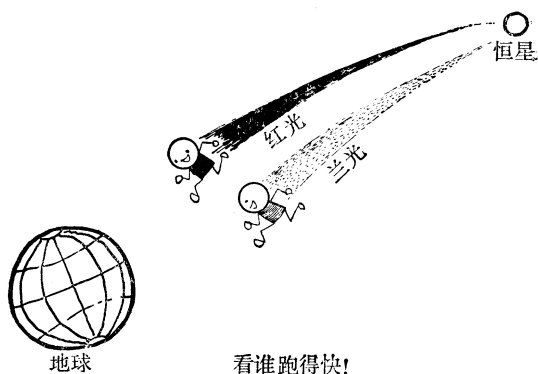
以上,我们说明了古典物理学中的质量概念和狭义相对论中的质量概念,指出了光子的静质量是零,光子的总质量等于它的动质量。光子的总质量可以通过测量光子的能量(或频率)而间接地由质能关系算出来: $m = \hbar\nu/c^2$ 。但是光子的静质量如何测量呢?要想知道光子的静质量,既不能象对待宏观物体那样使用天平称或别的通常方式测量,也不能象对待微带带电粒子那样用电磁方法测量它的动量和能量,并通过有关的相对论公式算出来,因为光子既不带电,也不能使它静止下来。所以,需要用另外的方法来检验它的静质量。

上面我们已经指出,光子静质量为零的结论是狭义相对论给出的,而狭义相对论的建立是与电磁现象的深入研究分不开的。因此,光子静质量为零的结论与麦克斯韦电磁理论的正确性紧密相连。这使我们自然考虑到,检验光子静质量为零的结论可以通过对麦克斯韦电磁理论进行实验检验来实现。但是,观察电磁现象与麦克斯韦电磁理论的预言有无差别并不是直接观察光子的静质量。由此而来的问题是:我们如何才能从这类实验的观测结果中取得对光子静质量的定量认识呢?回答这个问题正是理论分析的任务。我们知道,狭义相对论不仅适用于电磁现象,也适用于其他现象如弱相互作用和强相互作用现象等。因此,通常都是在狭义相对论的范围内考虑光子静质量效应的。具体地说,我们假定光子具有有限的静质量 μ (这样的光子叫做重光子);狭义相对论中的常数 c 已不再代表光速而只是一个具有速度量纲的普适常数,一切具有有限频率(或能量)的重光子其传播速度都小于常数 c 。这样就可以将重光子当做是普通的具有静质量的微观粒子来处理,它的运动规律也应满足相对性原理的要求。描写重光子运动规律的方程就是普洛卡方程,它与麦克斯韦方程的差别就在于重光子的静质量效应。因此,用普洛卡方程来对有关的电磁现象和电磁实验结果进行理论分析就能够确定重光子的静质量。已有的实验或资料分析给出的结果可分为两类:一类是零结果,即在实验误差范围以内被观察的电磁现象与通常的麦克斯韦理论所预言的结果相同;另一类是正结果,但是除了可以用光子的静质量效应解释这种正结果之外,也可以用其他的效应来解释,或者还

存在其他的不清楚的因素。总起来看,不管是第一类结果还是第二类结果,都只能提供一种上限,即光子的静止质量 μ 应小于某个值。下面我们来介绍检验光子静质量的几个主要方法⁽¹⁾:

1. 真空光速的色散效应

我们知道,在通常的麦克斯韦电磁理论中光在真空中传播的速度与光波的频率无关。但是,如果光子有静止质量 μ ,那末,光在真空中的传播速度 v 就等于 $c\left(1 - \frac{\mu^2 c^2}{\omega^2}\right)^{1/2}$,其中 ω 是光波的角频率。这就意味着,不同频率的电磁波具有不同的传播速度,这种现象叫做色散现象。这是光子静质量 $\mu \neq 0$ 的直接结果。因此,我们比较不同频率的光速就可以确定光子的静质量。



在地球上对电磁波的传播速度所做的直接测量表明,频率从 1.73×10^8 赫兹到 10^{15} 赫兹的自由电磁辐射在真空中传播的速度在 10^{-3} 的精度内是个常数。这就是说,如果有色散存在的话,那么光速的相对变化应小于 10^{-3} ,即 $\frac{\Delta v}{c} \leq 10^{-3}$,由此我们可以得到光子静质量 μ 的上限是: $\mu \leq 1.6 \times 10^{-4} (\text{厘米})^{-1} \equiv 5.6 \times 10^{-42}$ 克。

另外,观测从恒星同时发射出来的不同频率的星光到达地球的时间差(即星光的色散效应)也可以确定光子的静质量。适合于做这种观测的是双星和脉冲星。对于双星的情况,观察双星中的一颗星从另一颗星的背后显露出来的那一瞬间所发射的不同颜色(频率)的光线到达地球的时间差;对于脉冲星的情况,则观察同一次电磁脉冲辐射中不同频率的波到达地球的时间差。但是,遗憾的是,在恒星与地球之间的宏大空间里存在着空间介质(等离子体),而等离子体也可以产生光的色散效应,这就是说我们既可以用光子静质量也可以用星际介质的色散效应来解释星光的色散现象,两者是不能分辨的。因此,从观察到的星光色散效应也只能提供光子静质量的上限。双星观测给出的上限是 $\mu \leq 2.3 \times 10^{-2} (\text{厘米})^{-1} \equiv 0.8 \times 10^{-39}$ 克;脉冲星

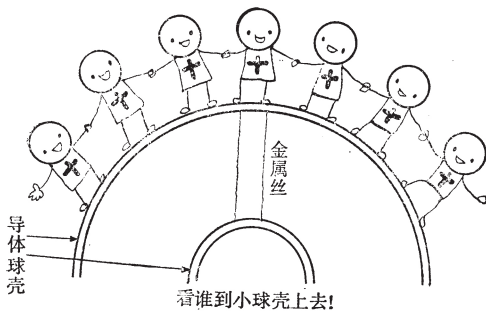
观测给出的上限是 $\mu \leq 3 \times 10^{-7} (\text{厘米})^{-1} \equiv 10^{-44}$ 克。

2. 对库仑定律的检验

在通常的麦克斯韦电磁理论中，两个点电荷之间的相互作用力与它们之间的距离的平方成反比，这种静电规律称为电的反平方定律，也就是库仑定律。

但是，如果光子的静质量不为零的话，那么点电荷之间的相互作用力的规律将会偏离库仑定律。所以通过库仑定律也可以检验光子的静质量。

通常用于检验库仑定律的装置是两个半径不同的同心导体球壳，内有一根细金属丝把内外导体球连接起来。如果给外部那个大的导体球壳充上电的话，那么库仑定律告诉我们，电荷只分布在外部球壳上，内部导体球不会有电荷存在。但是当光子静质量不为零时，由于点电荷之间作用力的规律偏离反平方定律，因而外部球壳上的电荷将有一部分通过连接两导体球的金属丝迁移到内部球上去。所以，在把金属丝拉断并将外部球壳拿走(或接地)之后，测量内部导体球上的电荷(或测量内外导体球的电位差)就可以确定光子有没有静质量。用这种装置所做的各个测量都没有发现内部导体球上存在电荷。后来进一步改进了实验技术，给外部球壳加上一个交变电压，测量内外球壳之间的电位差。多年来进行的各次精密测量也都没有观察到对库仑定律的偏离。最精密实验的零结果给出的光子静质量上限是 $\mu \leq 4.7 \times 10^{-10} (\text{厘米})^{-1} \equiv 1.6 \times 10^{-47}$ 克。



3. 静磁场方法

上面说明了光子静质量对库仑定律的影响，现在再来谈谈它对永久磁场的影响。

我们知道，按照通常的麦克斯韦电磁理论，对地磁力的各个分量的分析表明，地磁场分为三种类型。一种是偶极磁场；一种是外来磁场；另一种是非势磁场。偶极场是指向地磁南极的磁偶极产生的磁场；外来场是一种在地球内部找不到磁源的磁场，它在地球表面是一个均匀磁场，方向与地球的磁偶极矩方向反向；非势场是恒定电流产生的磁场。

如果我们用重电磁理论解释地磁场，我们会发现重电磁场理论给出的磁偶极场可分为二部分。一部分

与麦克斯韦理论($\mu = 0$)中的磁偶极场形式一样。另一部分是与光子静质量有关的磁场，其方向与磁偶极矩的方向相反，在地球表面是均匀的。如果我们把这后一部分磁场解释为地磁数据分析中的外来磁场，那么地磁数据给出的光子静质量上限是 $\mu \leq 1.15 \times 10^{-10} (\text{厘米})^{-1} \equiv 4.0 \times 10^{-48}$ 克，而木星周围的磁场数据可以给出更小的上限： $\mu \leq 2 \times 10^{-11} (\text{厘米})^{-1} \equiv 7 \times 10^{-49}$ 克。

另外，将重电磁理论中的偶极磁场随高度的变化规律与地球周围的磁场随高度的分布情况进行比较得到的光子静质量上限是 3×10^{-38} 克。

4. 星际等离子体效应

在各个星体之间的广阔宇宙空间中存在着稀薄的星际介质(等离子体)，而且从宇宙射线的总能量以及星光被星际质点散射的偏振现象可以说明宇宙空间中普遍存在着磁场。如果光子具有静质量，那么对宇宙空间中的等离子体现象例如磁流体力学波⁽²⁾、等离子体中磁场的耗散效应等将产生影响。对这些现象进行观测和分析也可以确定光子静质量。例如利用地球卫星测得的地球磁层中的磁场数据可以给出光子静质量上限 $\mu < 10^{-9} (\text{厘米})^{-1} \equiv 4 \times 10^{-47}$ 克。利用蟹状星云中的磁流体力学波可以建立光子静质量的上限是 $m \leq 10^{-34}$ 克。

此外，利用银河系的一个旋臂中的磁场的存在范围也可以估计光子静质量，这种估计给出的上限是 $m \leq 4 \times 10^{-39}$ 克。但是，这个上限的准确性较差。

从上面的介绍我们看到，到目前为止，各种实验或资料分析都没有发现光子具有静止质量。此外，狭义相对论的许多实验检验和成功的应用也为光子无静质量的结论提供了证据。当然，用更精密的各种其他类型的实验去做进一步的检验仍然是有意义的。

附注：

1. 质量单位。文中光子静质量 μ 的量纲是 $(\text{厘米})^{-1}$ ，这是 $\frac{c}{\hbar} = 1$ 的单位制。若换算成克，需用下列公式： $m = \mu \frac{\hbar}{c}$ ，即 $1 (\text{厘米})^{-1} \equiv 3.5 \times 10^{-38}$ 克。

2. 磁流体力学波

在有磁场存在的等离子体内可以出现频率小于该等离子体中离子回转频率的波动，这种波动就叫做磁流体力学波，这种波动有横波和纵波。例如阿尔芬波和磁声波。阿尔芬波是横波，它的传播方向与磁场方向平行；磁声波是一种纵波，传播方向与磁场方向垂直。