

# 质量与速度的关系

郭奕玲

(清华大学现代应用物理系)

本文介绍了经典理论中电磁质量概念的由来和从 Kaufmann 开始的实验验证工作,并围绕质量与速度的关系问题,论述了理论和实验相互依存的辩证关系。

运动物体的质量随速度增加,这是爱因斯坦狭义相对论的重要结论。这个现象只有在物体的速度接近光速时才表现明显。阴极射线是在强电场作用下经过加速所得到的电子束,测量它的荷质比  $e/m$  有可能观察到这一效应。1898—1900 年间,德国物理学家 P. Lenard 测阴极射线的荷质比时,电子的速度到达光速的三分之一,就曾测到过荷质比随速度增加而减小的数据。但是,由于实验的误差过大,数据反复无常,所以无法确定变化的规律。1901 年, W. Kaufmann 用镭放出的  $\beta$  射线做实验,第一次获得了电子质量随速度增加的确凿证据。爱因斯坦在建立狭义相对论(1905 年)之后,对 Kaufmann 实验曾给予很高评价。然而,作为经典物理学家的 Kaufmann 并不站在爱因斯坦一边。经典理论和相对论之间曾展开过一场持续相当长时间的争论。

## 一、经典电磁质量概念

19 世纪 80 年代人们开始研究运动带电体问题。1878 年, Rowland 发表运动电荷产生磁场的论文,激励人们从理论上进一步推测:由于磁场具有能量,让带电体运动比让不带电体运动一定要做更多的功,因为有一部分能量要用于建立新的磁场。所以,带电体的动能要比不带电体大。换句话说,带电体的质量要比不带电体大。这个由于电磁作用产生的“视在质量”也叫电磁质量。

1881 年, J. J. 汤姆孙<sup>[1]</sup>最先提出这个问题。他假设带电体是一个半径为  $a$  的导体球,球上带的总电荷为  $e$ , 导体球以速度  $v$  运动,得到由于带电而具有的动能为  $\frac{2\mu e^2 v^2}{15a}$ , 其中  $\mu$  为磁导率。这就相当于在力学质量  $m_0$  之外,还有一电磁质量

$$m_e = \frac{4\mu e^2}{15a},$$

对于真空,  $\mu = 1$ , 所以  $m_e = \frac{4e^2}{15a}$ 。

1889 年, O. Heaviside 改进了汤姆孙的计算,得到  $m_e = 2/3 \mu e^2/a$ 。他推导出运动带电体的速度接近光速时,总电能和总磁能都随速度增加。当运动速度等于光速时,能量值将为无穷大,条件是电荷集中在球体的赤道线上。

1897 年, G. F. C. Searle 假设电子相当于一无限薄的带电球壳,计算出快速运动的电子电磁质量为

$$m_e = \frac{e^2}{2av^2} \left[ \frac{2}{1-\beta^2} - \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{1+\beta}{1-\beta} \right) \right],$$

式中  $\beta \equiv v/c$ 。

这时已经确证,电子是物质的最小组成部分。既然如此,它究竟有没有可能在“真实”的质量之外,还有“视在”的质量? 这个问题在物理学家中间引起了广泛的讨论。W. Wien 在 1900 年强调指出:“只有实验才能判决有没有这种可能性”<sup>[2]</sup>。

## 二、Kaufmann 实验

Kaufmann 是一位技艺高超的实验物理学家，他测量阴极射线的荷质比得到很精确的结果，即  $e/m = 1.86 \times 10^7 \text{CGSM/g}$ 。这时贝克勒尔射线(即铀辐射)已经被发现，并且已经鉴别出其中的  $\beta$  射线正是高速电子流，速度达到  $0.9c$ 。Kaufmann 决定采用  $\beta$  射线来做实验，测量  $\beta$  粒子的荷质比，寻求电磁质量的依据。他在抽成真空的容器中进行实验，容器中有一个黄铜圆筒，筒底中央有一粒溴化镭作为  $\beta$  源。两块紧挨着的平行电极(间距为  $0.1525\text{cm}$ )上加有高电压(可达  $6750\text{V}$ )。高速电子穿过平板电极和直径为  $0.5\text{mm}$  的小孔，投射到照相底片上并留下痕迹。电磁铁产生与电场平行的磁场，其平均强度约为  $300\text{Gs}$ 。在未加电场和磁场时，不同速度的电子都落在底片的同一点上。加上电场和磁场后，由于洛伦兹力与运动方向总是垂直的，速度不同的电子所受洛伦兹力也不相同，因此在照片上留下的痕迹将是一条曲线。改变电场方向，可得到对称的另一条曲线。图1是经数日“曝光”后获得的照片。从照片的



图1 Kaufmann 所得的照片

轨迹可以求出不同速度的电子的荷质比。Kaufmann 在论文中写道<sup>[3]</sup>：

“从表1可见：能测量到的最快粒子速度仅略低于光速……，在观测到的速率范围内， $e/m$  变化激烈，随着  $v$  的增加， $e/m$  比值下降得非常显著。由此可以推断，确有并非微不足道的‘视在质量’，它以这样的方式随速度增大，达到光速时，它将变成无穷大。”

在论文中，他还将实验结果和理论进行比较，得出了如图2所示的结果。看起来实验

表1 Kaufmann 测量的结果

$v \cdot 10^{-10}$	$\frac{e}{m} \cdot 10^{-7}$
2.83	0.63
2.72	0.77
2.59	0.975
2.48	1.17
2.36	1.31

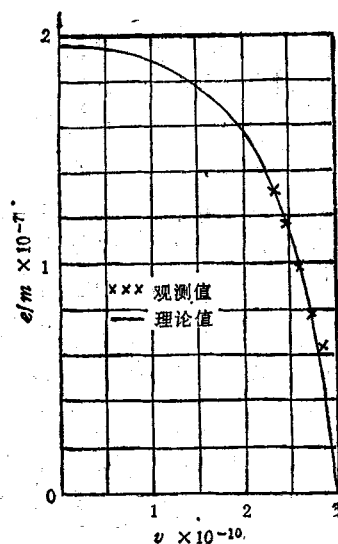


图2 Kaufmann 比较实验结果与理论曲线

与理论符合甚好，不过他所指的理论是 Searle 1897 年推出的电磁质量公式。实际上，他的实验精确度并不高，因为他的实验方法有重大缺陷：电场和磁场不是正交而是平行，致使他只能得到如图1那样的粗糙轨迹。他的实验毕竟是第一次确证电子质量随速度改变的性质，所以受到物理学家的普遍注意。在这个基础上，理论家进一步探讨电子质量与速度的关系。他们根据不同的电子模型，导出了不同的表达式，其中主要有三个：

(1) 1903 年，Kaufmann 的同事 M. Abraham 把电子看成完全刚性的球体，根据经典电磁理论，推出如下关系：

$$m = \frac{3}{4} \frac{m_0}{\beta^2} \left[ \frac{1 + \beta^2}{2\beta} \cdot \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta} - 1 \right],$$

式中  $m_0$  为电子的静止质量。

(2) 1904 年洛伦兹把收缩假说用于电子，推出如下关系：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

这一关系也可以从爱因斯坦的狭义相对论独立地推出。这就是著名的洛伦兹-爱因斯坦公式。

上述两个公式与 Kaufmann 的实验结果比较，似乎还是 Abraham 的公式更接近实验结果。Kaufmann 自己也倾向于 Abraham。1906 年，Kaufmann 根据他当时做的最新实验宣称：他的“量度结果与洛伦兹-爱因斯坦的基本假定不相容。”

(3) 1904 年德国玻恩大学的讲师 A. H. Bucherer 对收缩假说作了一些补充，也提出了一种电子模型。他假设电子在按收缩假说收缩时，保持体积不变。由此推出运动电子的（横向）质量为<sup>[4]</sup>

$$m = \frac{m_0}{(1 - \beta^2)^{1/3}}$$

Bucherer 的结果也在 Kaufmann 1906 年的实验误差范围之内。看来理论和实验的比较对洛伦兹和爱因斯坦不利。是 Kaufmann 的实验有问题，还是洛伦兹-爱因斯坦的公式不正确？普朗克很关心这件事，曾亲自核算过 Kaufmann 的数据，证明计算正确。

据说，洛伦兹在得知 Kaufmann 的实验结果后，曾写信给彭加勒（Poincaré）说：“不幸我的电子变形假说与 Kaufmann 的新结果矛盾，我只好放弃它了”<sup>[5]</sup>。

然而爱因斯坦却持另一种态度。他在 1907 年写道<sup>[6]</sup>：“Abraham 和 Bucherer 的电子运动理论所给出的曲线显然比相对论得出的曲线更符合观测结果。但是，在我看来，那些理论在很大程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符，因为它们关于运动电子质量的基本假设不是从总结了大量现象的理论体系得出来的。”

Bucherer 也怀疑为什么实验数据会对收缩假说不利。1908 年，他亲自动手做电子荷质比的实验。

### 三、Bucherer 实验

Bucherer 的实验比 Kaufmann 有重大改  
物理

进。他吸取了许多实验家的长处，例如，J. J. 汤姆孙测量阴极射线荷质比的实验是让电场和磁场彼此垂直，以便电偏转和磁偏转可以互相替代；1906 年 A. Bestelmeyer 首创速度选择器，用正交的电场和磁场分选阴极射线的不同速度。Bucherer 在他们的基础上又加以发展，从而取得了更精确的结果。实验原理如图 3(a) 所示，在圆柱形抽空容器中央放置两平行电极板，是直径为  $D = 8\text{cm}$  的圆盘。两电极相距

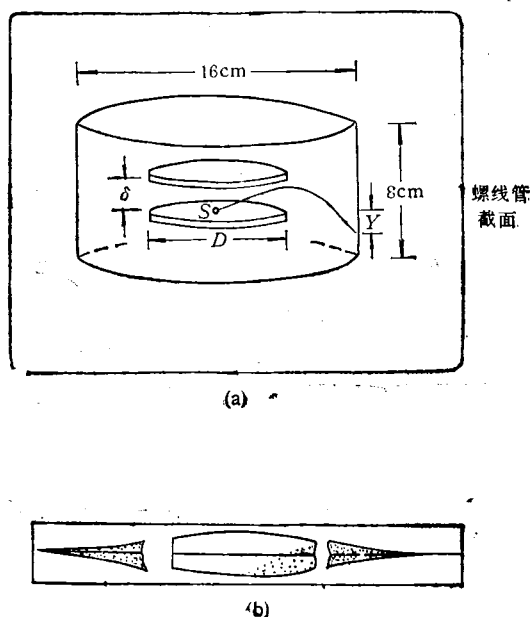


图 3 Bucherer 实验原理图和所得照片

仅  $\delta = 0.25\text{mm}$ 。下极板中心放置一粒氟化镭作为辐射  $\beta$  射线的放射源。螺线管的轴线与圆盘的轴线正交，保证磁场与电场相互垂直。圆柱容器的壁贴有照相底片。当未加电场和磁场时，从镭源发出的电子以高速作直线运动，打在底片的中间，形成一条直线。加磁场  $B$  和电场  $E$  后，不同速度的电子沿不同路径运动。可以证明，对于某一方向  $\theta$  ( $\theta$  角是沿平行电极平面的某一方向与磁场方向的夹角，图中未画)，只有那些速度符合下式要求的电子才能穿出平板电极：

$$v = cE/B \sin\theta.$$

这样做实际上是要从不同的方向选取不同速度的电子，而这些电子以不同的速度离开电极间

隙后,受磁场作用又以不同的曲率作圆周运动,到达底片时距中心线为  $Y$ , 由  $Y$  值可计算其  $e/m$  值。

图 3(b) 是 Bucherer 发表的照片影迹,电场和磁场均经过反向。照片原来是弧形的,展开后就成了图 3(b) 的形状。

Bucherer 将所测数据代入洛伦兹公式,求出的  $e/m_0$  值(静止荷质比)彼此十分接近,而代入 Abraham 公式则偏差甚大,证明符合 Bucherer 实验结果的是洛伦兹公式,而不是 Abraham 公式。表 2 是 Bucherer 发表的一组数据。值得注意的是数据表中只列出了  $\beta = 0.3173-0.6870$  的数据, $\beta > 0.7$  的情况却未见发表。1908 年 9 月 7 日, Bucherer 致信爱因斯坦说:“我经过仔细的多次实验,判定相对论原理毫无疑问。”这时,他已经放弃自己的电子模型,转到爱因斯坦这一边了。

表 2 Bucherer 1908 年发表的数据

$\beta$	$e/m_0$ (洛伦兹)	$e/m_0$ (Abraham)
0.3173	1.752	1.726
0.3787	1.761	1.733
0.4281	1.760	1.723
0.5154	1.763	1.706
0.6870	1.767	1.642

30 年后, C. T. Zahn 和 A. H. Spees 重新分析了 Bucherer 的实验,指出由于电容器极板边沿对电子的散射效应,限制了速度选择器的分辨率,使得速度大于  $0.7c$  的电子不服从相对论公式<sup>[7]</sup>。

他们在 Bucherer 实验的基础上作了一个关键性的改进,即把电子的运动方向颠倒一下,放射源 S 和探测器 G 的位置互换,如图 4 中的 (b) 所示。电子从外部穿越电容器的间隙,而不是从电容器飞出。探测器是用盖革计数器代替照相底片。用盖革计数器计数比用照相底片进行光度测量要精确得多,而且由于它只要求强度极低的电子束,因而避免了器壁的散射。

由于这一改进, Zahn 和 Spees 把实验精确度由 Bucherer 的 10% 提高到 1.5%<sup>[8]</sup>。

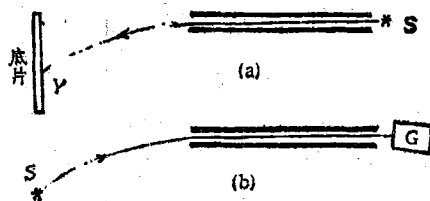


图 4 Zahn 和 Spees 的改进

1940 年, M. M. Rogers 等人采用径向静电场聚焦的方法,对高速电子的荷质比作了更精确的测定,证实速度大到  $v \leq 0.75c$  时,电子质量的变化仍服从洛伦兹-爱因斯坦公式,其不确定度小于 1%<sup>[9]</sup>。

此后,加速器得到发展。各种类型的加速器的设计和运转为带电粒子的质量对速度的依赖关系提供了更为丰富的例证。1963 年, V. Meyer 等人比较电子和质子的磁偏转,以 0.04% 的精度证实速度高达  $0.987-0.990c$  的电子仍服从质量的相对论公式。至此,质量-速度的相对论公式得到了严格的验证。

在处理理论和实验的关系上,爱因斯坦为我们提供了光辉的范例。他尊重实验事实,但又不拘泥于个别实验的结果。个别实验总难免有误差,甚至失误,会造成理论和实验的不符。Kaufmann 的实验曾一度否定了爱因斯坦的相对论质量-速度关系。但爱因斯坦没有动摇,坚定地相信自己的狭义相对论是“总结了大量现象得到的理论体系”,是经得起考验的。历史证明,真理在他这边。

- [1] J. J. Thomson, *Phil. Mag.*, **11**(1881), 229.
- [2] A. I. Miller, *Einstein's Special Theory of Relativity*, Addison-Wesley, (1981), 47.
- [3] H. A. Boors and L. Notz, *The World of the Atom*, Vol. 1, Basic, (1966), 506.
- [4] J. T. Cushing, *Am. J. Phys.*, **49** (1981), 1133.
- [5] 同[2], p. 334.
- [6] 范岱年等编译, *爱因斯坦文集(第二卷)*, 商务印书馆, (1979), 181.
- [7] C. T. Zahn and A. H. Spees, *Phys. Rev.*, **53** (1938), 511.
- [8] C. T. Zahn and A. H. Spees, *Phys. Rev.*, **53** (1938), 365.
- [9] M. M. Rogers et al., *Phys. Rev.*, **57** (1940), 379.