

(二)

叶云秀

二、分数电荷测量

在粒子物理中,粒子分为强子、轻子和光子,强子又分为重子(如质子和中子)和介子(如 π 、 K 、 ρ 和 J 等).理论物理学家们推断强子是由更基本的粒子——层子或夸克组成的,称为强子的层子模型或夸克模型.目前人们已找到五种夸克存在的实验证据,这五种夸克是上夸克(u)、下夸克(d)、奇异夸克(s)、粲夸克(c)和底夸克(b).理论推测还存在第六种夸克——顶夸克(t).它们所带的电荷或是 $\pm \frac{1}{3}e$,或是 $\pm \frac{2}{3}e$.这种模

型得到了大量实验的支持,但是,谁也没有直接地测量到处于自由状态的带分数电荷的粒子.如果能够在实验上测出它们的电荷或质量,则对粒子物理学将是一个重大的贡献.

寻找夸克的实验,可以在加速器上做,也可以用宇宙射线做,还可以用普通物质来做.用普通物质做的实验就是在这些物质中寻找分数电荷存在的实验证据.

为什么可以通过普通物质来寻找夸克呢?人们认为,在宇宙大爆炸时,应有足够高的能量,可能产生自由夸克,它们都带有分数电荷.有些夸克,如d和s夸克,它们具有 $-\frac{1}{3}e$ 的电荷,它们在物质中有可能像电子一样,被俘获到玻尔轨道中去,结合成长寿命的带分数电荷的夸克原子.因为夸克比电子重得多,它们的轨道半径很小,夸克基本上处于原子核的范围内,这种俘获了夸克的原子保持着不被中和的 $-\frac{1}{3}e$ 的剩余电荷,因而可以由普通物质作为分数电荷源加以测量.

对分数电荷的测量,某些整数电荷的测量方法原则上还可使用,但是,分数电荷存在于待测样品中的几

率是非常小的,需要考虑有别于整数电荷的测量方法.

以下介绍两种分数电荷的测量方法.

(一)改进的密立根油滴实验 原始的密立根实验是用电场力 qE 把一定大小的油滴支撑住,克服空气阻力,匀速地向上运动.有

$$qE - mg = 6\pi\eta av_B,$$

第一项的电场力减去重力 mg ,剩余的力就是克服空气阻力而使油滴匀速运动.从这里可以看出,如果质量 m 太大,而实验室又不可能有更高的电场 E ,那么电场力就无法支撑油滴;如果质量很小,对

测整数电荷还是可用,因为油滴上很容易附着电子电荷,附着分数电荷的可能性也存在,但几率要小得多.为了使待测样品带有分数电荷的可能性增加,则样品最好尽可能的大.但是没有那么高的电场,怎么办?改进的密立根方法除了一个垂直电场外,还有一个水平电场.垂直电场只减慢油滴的下落速度,并不能完全支撑住样品,好在对油滴所带电荷的测量是靠水平电场完成的.带电油滴在水平电场的作用下作偏转运动,偏转的曲率半径与油滴所带的电荷量有关,

$$R \propto \frac{v^2}{qE},$$

这里 R 是油滴偏转的曲率半径, v 为速度, E 为水平电场强度, q 为油滴所带的电荷.这样,油滴的半径可以大大地加大,加大到10微米左右,提高了测量的灵敏度.如果对待测样品采用浓缩技术,测量灵敏度还可以进一步提高.

为探测夸克电荷的油滴方法有以下优点:

① 它直接测量电荷;

② 油滴中的分数电荷不管夸克经受化学反应,还是核反应,都能维持;

③ 实验比较简单,测量上得到的分数电荷值($\pm \frac{1}{3}e, \pm \frac{2}{3}e$)是确实可辨的;

④ 对六种夸克同样灵敏.

这种方法,可能是测定分数电荷的较有希望的方法之一.

(二)磁漂浮法 在磁漂浮法中,采用一个合适的磁场形态,把待测的样品漂浮起来,磁力支撑重力,再用水平电场或周期性垂直电场测定样品所带的电荷.

磁漂浮法的优点是:

① 它比密立根方法有更高的灵敏度,它漂浮的样品可以从几微克到几公斤,比原始的密立根方法的样

品质量大约 10^6 — 10^{15} 倍,它可以比密立根法测得更低浓度的样品,不需要采取浓缩措施就可能探测到夸克;

② 只要样品中存在分数电荷粒子,不管以什么形态存在,都会表现出不被中和的剩余电荷的特性;

③ 实验较简单,有肯定明确的结果,随时可以验证;

④ 对所有夸克和反夸克同样灵敏。

怎样才能把待测样品漂浮起来呢?待测样品应该是一些什么样的物质呢?

因为用的是磁场漂浮,所以待测样品必须是铁磁体或抗磁体(包括天然抗磁体和超导体)。把磁体物质做成小球,置于磁场中。由计算得知,如果磁场是以 z 轴为对称轴的对称磁场,那么作用在磁体上的力 F_z 与磁场 H 及磁场的梯度 $\frac{\partial H}{\partial z}$ (磁场随空间距离的变化)有以下近似关系:

$$F_z = \frac{R^3}{2} H \frac{\partial H}{\partial z}$$

这里 R 是磁体小球的半径。选择磁场的方向,使得 F_z 力向上。当磁力与重力相平衡时,即 $F_z = F_g$ 时,磁体小球就可以悬浮在磁场中了。例如,当小球为超导铌球时(抗磁体),则因为

$$F_z = \frac{R^3}{2} H \frac{\partial H}{\partial z}, F_g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \cdot g,$$

达到平衡时为

$$\frac{R^3}{2} H \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho \cdot g$$

这里 ρ 为磁体密度, g 为重力加速度,计算得

$$H \frac{\partial H}{\partial z} = 7.04 \times 10^4 \text{ 平方高斯/厘米。}$$

即磁场与磁场梯度的乘积达每厘米 7.04×10^4 平方高斯时可使铌球漂浮。

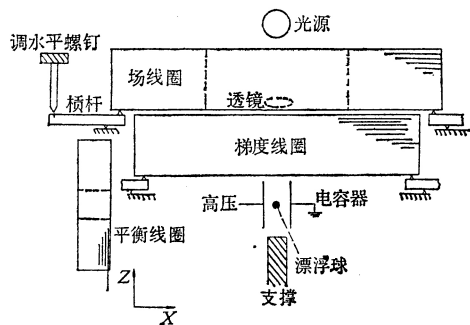


图1 动态平衡法

对于钢球(铁磁体),则

$$H \frac{\partial H}{\partial z} = 3.2 \times 10^4 \text{ 平方高斯/厘米}$$

时可使钢球漂浮。磁场的实现,只要用两个线圈,一个产生 z 方向的均匀磁场,一个产生随着 z 距离变化的梯度场即可。

漂浮在磁场中的磁体小球起什么作用呢?目的是要测它所带的分数电荷,就是说,它是作为一个分数电荷源加以利用的。

如何测量?

我们介绍两个典型实验,动态平衡法和周期振荡法。

图1所示是美国弗吉尼亚大学的动态平衡法的测量装置。场线圈和梯度线圈产生磁漂浮力 $H \frac{\partial H}{\partial z}$,使

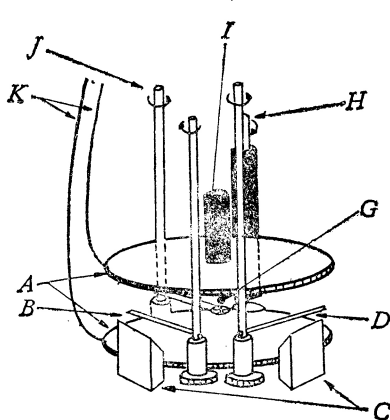


图2 周期振荡法测量装置

小球悬浮在空间,在漂浮小球的两侧为一对平板电容器,在电容器板上加上高电压,带电小球与电容器板之间的静电力相互作用产生一静电力,静电力使小球开始运动;用平衡线圈产生一个

平衡磁场,带电小球在其中得到一磁力,选择磁场的方向,使磁力与静电力方向相反;并调节磁场,使磁力刚好抵消静电力,小球就能保持平衡。图上方的光源用以照明,以便观察小球的平衡情况。

当小球带有电量 q 时,在电场 E 中受到的电场力 $F_E = Eq$;在平衡线圈产生的磁场 B 中受到的磁力 $F_m \propto B \cos I$, I 为产生平衡磁场 B 的电流。因此,只要测知保持平衡时所需电流 I 的大小,就知道了磁力,也即知道了电力的大小,由此就知道了小球所带电荷 q 的大小。

另一种方法是美国斯坦福大学的周期振荡法。图2是这种方法的测量装置。 G 是超导铌球,两个超导线圈产生的磁场使小球受到一磁力,克服重力而悬浮

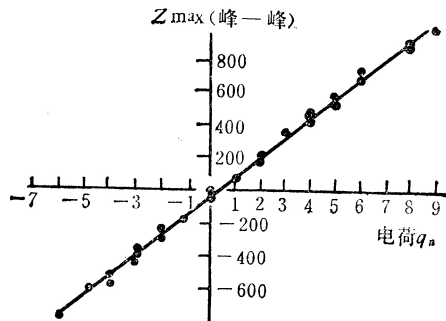


图3 共振振幅与电荷数之间关系的刻度曲线

在空间。A 是两个电容器平板，在电容器板上加周期方波电场。I 是磁量子干涉仪，用以测量铌球在电场中的位移大小。B、D 为电子源，用以改变超导铌球的带电量。C 为观察窗。

铌球在重力场和一定的磁场作用下，可作固有周期的振荡，这时如在电容器板上加上周期方波电场，周期与小球固有振荡周期相同，则可达到共振。经计算，得到在振荡 N 个周期后的小球振荡位移 z_N (峰-峰值) 与最大共振振幅 z_{\max} 之间有下列关系：

$$z_N = z_{\max} - (z_{\max} - z_0) \exp(-\pi N/Q)$$

这里 z_0 为初始振幅， Q 为品质因素 (即贮存能与每周期损失的能量之比)， $z_{\max} = qET^2Q/\pi^3 \cdot m \cdot q$ 为小球所带的电荷， E 为所加方波电场的幅度， T 为振荡周期， m 为小球质量。我们可以看到，测量 z_N 、 z_{\max} 这两个量，就可得到小球所带的电荷量 q 。小球位移 z_N 或 z_{\max} 使磁量子干涉仪有一电压信号输出，信号的大小与位移量成正比。但因无法直接测知位移，所以需通过一组数据来校刻仪器，得到共振振幅 z_{\max} 或 z_N 与电荷量 q 之间的关系曲线，如图 3 所示。校刻实验可以这样做，由控制 B、D 电荷源，改变铌球所带的电荷量，改变的是所带的整数电荷量。如果铌球带有分数电荷，它并不受到影响。对应一系列的电荷数 q_n ，得到一系列的正比于 q_n 的 z_{\max} 值，得到一条直线。实验中，如果得到一条电荷截距为非整数的直线，比如截距在 q_n 为 $\frac{1}{3}e$ 处，则说明测得了分数值电荷的电荷力。

测得了分数电荷力，是否就一定表明分数电荷的存在呢？不一定。需要排除各种假电荷力的因素后才能得出结论。

有哪些假电荷力干扰真电荷力呢？又如何判断和消除呢？

不管是动态平衡法还是周期振荡法中，实际上都是通过测量小球受到的静电力的的大小来量度所带的电荷量的。小球所受到的电力除了带电量 q 在电场 E 中的库仑力 qE 外 (这是真电荷力)，是否还存在别的什么假电荷力呢？存在的，这就是受到所谓的附加多极力。附加多极力是这样产生的：带电 (q) 小球在电场作用下产生偶极矩 p ，如果电容器板之间的电场是绝对均匀而无梯度变化的，则不会产生偶极力。但往往不可能。纵使外加电场做到尽可能均匀，使其形成的偶极力减到最小，但还因为电容器板的金属表面不可

能做到绝对的等位面，而往往有局部的电位变化，称之为斑块效应，偶极矩在这种不均匀场的作用下产生一个偶极力。

带电小球所受到的第二个附加力是由于小球本身的金属面也不可能为绝对的等位面，因而产生一个电偶极层，形成一个永久偶极矩 p' ，它在电场梯度作用下也呈现出一个偶极力。

由此可见，要鉴别出真正的剩余电荷力，实验上的要求是很高的，电场要尽可能均匀，小球和电容器板表面要尽可能完好。在实验上，一定程度上也可判断真假电荷效应。因斑块效应产生的偶极力，与小球和极板之间的距离有关，因此，改变极板距离，看振幅的变化 Δz 是否随板距增大而减小，甚至减小到零，如果是这样，则说明原来表现出来的剩余电荷是假电荷。对于永久偶极距产生的偶极力作用，可以移动整个电容器板的位置 (保持板间距离)，以找到电场梯度为零的位置，使振幅达到最小值而判断真假电荷。

如果上面几个因素都排除了，就有可能判断剩余电荷的真实程度。如果剩余电荷是 $\pm(1/3)e$ ，或 $\pm(2/3)e$ ，则就可能是夸克。

目前，分数电荷的测量得到了一些具有参考价值的结果。如 1974 年，弗吉尼亚大学报道的用动态平衡法测量小钢球的带电状态，得到一些初步结果，但因它的实验结果与实验误差为同数量级，所以不能得到肯定的结论。1977 年，美国斯坦福大学用周期振荡法测量热处理过的铌球，其中三个球的剩余电荷分别为 $(0.337 \pm 0.009)e$ ， $(-0.001 \pm 0.025)e$ ， $(-0.331 \pm 0.070)e$ 。1978 年，斯坦福大学在改进仪器、提高实验精度的基础上，又测得铌球的分数电荷为 $(0.304 \pm 0.040)e$ 和 $(0.345 \pm 0.035)e$ 。

据最近文章 (1981 年) 报道，斯坦福大学的铌球分数电荷实验又取得了新的进展。在 21 个新的测量中，找到四个是带 $+\frac{1}{3}e$ 电荷的，四个带 $-\frac{1}{3}e$ 电荷，十三个球所带电荷为零。他们的测量范围是广的，分析也是严格的，因此他们认为，电荷力以外的本底力，如多极力等，或者是可以忽略，或者是已测出和考虑进去了。

虽然有了一些初步结果，还不能作出肯定的结果，需要进一步提高实验精度，需要积累更多的数据，需要排除各种假电荷力，这是目前寻找分数电荷的实验工作者的努力目标。