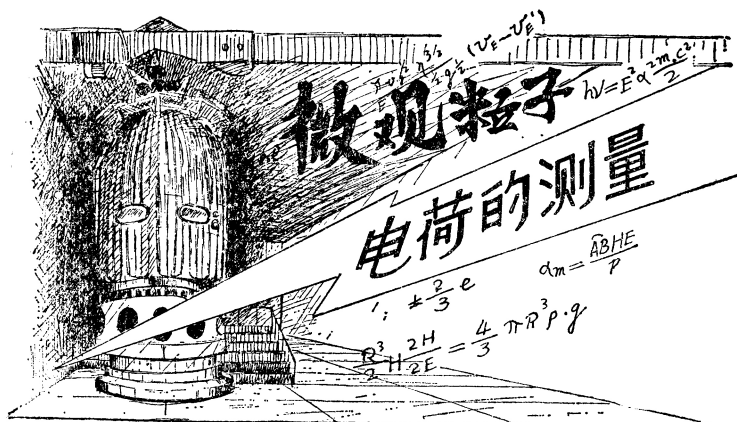




(一)

叶云秀

在微观物理中,实验测量占重要地位。基于物理量的测量,才能有理论依据;也只有物理量的测量,才能验证和修正理论假设;才能发现和鉴别各种新元素和新粒子。

物理量的测量是多方面的,如电荷、质量的测量;动量、能量的测量,以及自旋、宇称等等的测量。

一、电荷测量

电荷和质量是粒子和元素的基本属性,对它们的测量是最基本的。

我们知道,电现象在很早以前就被观察到,并得到了应用,对电的宏观性质也很早有了研究,但是对电的本质的认识,直到上世纪末还不是很清楚的。电荷是分立的还是连续的,这是上个世纪争论的问题之一。有些人曾设想电可能具有原子结构,有基本单位电荷量;另一些人则认为电可能是连续的,晚至1897年,十九世纪后叶物理学界中的一位大师开耳芬还这样写道:“电是一种连续的、均匀的液体”。争论、甚至哲学上的论证,都不能作为科学依据,最有力的证明是在实验上测量出来。化学上法拉第的电解定律,物理上1897年著名物理学家J.J. 汤姆逊对电子荷-质比的测定,都证明了电荷的分立性。更有力的证据是1911年密立根首先测定了电子电荷的数值。以后,有许多科学家相继用各种方法测定了各种元素和基本粒子的电荷。

以下分别介绍几种测量方法。

1. 整数电荷测量

所谓整数电荷是指所带电荷量是电子电荷的整数倍。在原子物理及核物理范围,所研究的元素和粒子所带的电荷都是整数电荷,但在微观的更深一层次,基本粒子(夸克)所带的电荷就不是整数的了。对于整数电荷的测量,我们讨论以下几种方法。

1. 油滴法测定电子电荷这是1911年密立根首创

的实验。我们可以想象,图1中的A、B两板是电容器极板,带电油滴置于两板之间。如果两板上不加电压,油滴就会自由落下,由于油滴的直径做得很小,当空气阻力与油滴的重力相平衡时,小油滴可达到等速下降。空气阻力:

$$F = 6\pi\eta av_g \quad (1)$$

这里 η 为空气的粘滞系数, a 是小油滴半径, v_g 为等速下降速度。重力与空气阻力相平衡时有

$$mg = 6\pi\eta av_g \quad (2)$$

这里 m 为油滴质量, g 为重力加速度。现在我们设想在电容器板上加上电位,选择电位差的数值和方向,使受到电场作用的油滴

上升,并达到匀速上升,这时油滴受到三种力(电场力、重力和空气阻力)的作用,并达到平衡,因此有

$$Ee - mg - 6\pi\eta av_E = 0 \quad (3)$$

这里 E 为电容器板上所加的电场强度

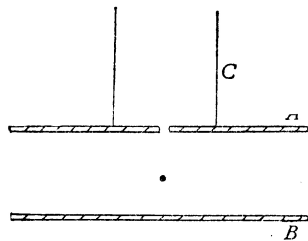


图1 油滴法实验示意图

度, e 为油滴所带的电荷, v_E 为油滴等速上升的速度。由(2)和(3)式得

$$e = \frac{6\pi\eta a}{E} (v_g + v_E) \quad (4)$$

如果选用适当的空气粘滞系数 η ,所加电场强度 E 为已知,实验上测出 v_g 和 v_E ,且能知道油滴半径 a 的话,就可知道油滴所带电荷 e 的数值。但到此为止,还有三个问题没有解决。首先油滴极小,半径如何测量?细心的同志也许会找到上述论说的漏洞,即未考虑进浮力的作用。重力 $mg = \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g$ 的油滴在空气中下

降时浮力为 $\frac{4}{3} \pi a^3 \rho g$ 。这里 σ 和 ρ 分别为油滴物质和空气的密度。这时(2)式应改写为

$$\frac{4}{3} \pi a^3 (\sigma - \rho) g = 6\pi\eta av_g \quad (5)$$

可得

$$a = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\eta^{1/2} v_g^{1/2}}{(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} \quad (6)$$

σ 和 ρ 都是可测量的量。所得 a 代入(4)式得

$$e = 9\sqrt{2} \frac{\pi v_g^{1/2} \eta^{3/2}}{E(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} (v_g + v_E) \quad (7)$$

第二个问题是测量了油滴所带的电荷量,怎么就知道了电子的电荷量呢?我们可以通过改变油滴所带的电子数来改变所带的电荷量,相应的速度 v_E 改变为 v'_E ,得到两次测量的电荷差

$$\Delta e = 9\sqrt{2} \frac{\pi v_k^{1/2} \eta^{3/2}}{E(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} (v_E - v'_E) \quad (8)$$

改变电量时,电荷数值的改变与速度差($v_E - v'_E$)成正比,如果这个差表现出是同一数值的整数倍,则表明电荷的改变不是连续的.改变电荷数次,如 $\Delta e = 1, 2, \dots$,对同一滴油滴进行许多次测量,计算得到单个电子电荷数值.最后一个问题,也是实验最先要解决的问题,即如何得到带电油滴以及改变其所带的电荷量.可以用图1中喷雾器C扩散小油滴,当液体分散时,就会形成带电荷的小滴;当我们需要改变其带电量时,可以用X射线或紫外光照射电容器板间的空气,使之离化,油滴所带电荷量就会改变.

测量油滴的运动速度,我们只要用灯光照射极板之间,在其背景上有标尺,观察油滴走过标尺的一定间距所需要的时间即可.

由该法测得的电子电荷数值的精确度,除与实验上各种测量的精确测量有关外,还与所采用的空气粘滞系数有关.最初密立根实验所得的电子电荷的绝对值 $e = 4.770 \times 10^{-10}$ 静电单位.与以后用更精确的(X射线波长测量)方法得到的值 $e = (4.8025 \pm 0.0010) \times 10^{-10}$ 静电单位不同,经研究、讨论,确定取 $\eta = 1822.6 \times 10^{-7}$ 太小,以后科学家的研究确定 $\eta = 1832 \times 10^{-7}$,由此得 $e = 4.805 \times 10^{-10}$ 静电单位,这就精确多了.

2. 卢瑟福散射法 要测量物质元素及重放射性粒子的电荷,需要用其它方法,其中卢瑟福散射法是方法之一.1911年,卢瑟福用 α 粒子轰击用金做成的薄膜,

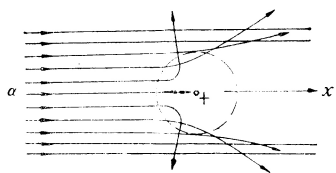


图2 卢瑟福散射实验示意图

由于 α 粒子与原子核都带正电,除了大部分 α 粒子穿过原子空间而继续向前外,有一部分粒子由于受到库仑排斥力的作用而拐大弯,甚至有个别粒子如小石子碰到大石头一样被弹回来,如图2所示.测量在偏离 x 轴的各个 θ 角上被散射的粒子数(称微分散射截面),可以得到靶物质(或入射粒子)的电荷数.

卢瑟福微分散射截面公式为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b^2}{16} \left(\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \right) \text{厘米}^2/\text{核} \quad (9)$$

这里 $b = \frac{2|Zz|e^2}{M_0 v^2}$, Z 和 z 分别为靶粒子和入射粒子电荷数,

v 为质心坐标中两粒子的速度, M_0 为碰撞粒子的折合质量 $= M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$, M_1 为入射粒子质量, M_2 为靶粒子质量, θ 为散射粒子运动方向与 x 轴的夹角, $d\Omega$ 为在质心系中散射角 θ 处的小立体角.如果两粒子的质量已知或用其它方法可测出,且知道其中一种粒子(如入射粒子)的电荷,则通过在一定角度 θ 处对散射强度的测量,就可知道另一粒子(如靶粒子)的电荷.入射粒子可以用质子(p),氘(D)或裂变碎片等.

用该法在早期测得了铜(Cu)、银(Ag)和铂(Pt)等核电荷绝对值分别为 $29.3e$ 、 $46.3e$ 、 $77.4e$,与用特征X射线谱法测得的 Z 值在2%的误差范围内.

3. 特征X射线谱法 特征X射线谱法在测定原子核电荷中有重要作用,在鉴别任何新元素时,最终的结论是由测量特征X射线的发射谱给出的.

元素发射的特征X射线,其能量与物质的原子特征(原子序数)相关,并与跃迁能级有关,它们的关系如下:

$$h\nu = Z^2 \frac{m_0 c^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = Z^2 \alpha^2 \frac{m_0 c^2}{2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (10)$$

这里 $h\nu$ 是发射的特征X射线的能量, Z 为元素的原子序数,

$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, 为精细结构常数, m_0 为电子质量, e 为电子电荷, n_1, n_2 分别为电子跃迁前后(初末态)的主量子数,它们的数值如下,对于X射线的 K_α 系列, $n_1 = 1, n_2 = 2$; 对于 L_α 系列,则 $n_1 = 2, n_2 = 3$.原则上,在实验上测定 $h\nu$,并确定 n_1, n_2 ,则可得 Z 值.但这是不够精确的,因为这忽略了轨道量子数 l 、自旋 s 和总角动量 j ,并且忽略了原子电子对核电荷造成的屏蔽效应.电子的屏蔽作用使得测得的核电荷数比实际的核电荷数小.1913年,莫斯里通过对一系列已知 Z 值元素的测定,确定了电子电荷对核电荷屏蔽的数量关系.对于 K_α 系列,有

$$(h\nu)^{1/2} = \text{常数} \times (Z - 1) \quad (11)$$

与(10)式比较,可知实验测量得到的电荷数比实际的核电荷减少1.对于 L_α 系列有

$$(h\nu)^{1/2} = \text{常数} \times (Z - 7.4) \quad (12)$$

这时的有效屏蔽常数为7.4 e .

原子在什么情况下能够发射特征X射线呢?一种情况是“电子俘获”,处于原子轨道中的电子被原子核俘获,轨道电子的位置留出空位,在较高能级的电子跃迁到该空位,伴随发射X射线.一般K层电子靠近原子核,被俘获的几率最大,其次是L层、M层电子.另一种情况是内转换过程,处于激发态的原子核,把能量直接传递给轨道电子,把它们从轨道中“驱逐”出去,轨道中留出空位,同样,在电子跃迁到空位的过程中伴随

发射 X 射线。

对特征 X 射线的测量,经常使用弯晶 X 射线谱仪,硅(锂)或锗(锂)半导体探测器等来测量。

用特征 X 射线谱法,历史上测定了大量元素的原子序数。有时还能找到新元素。因为元素从轻到重,对应的发射谱线的波长有规则地减小。如钨(^{43}W)的几种同位素就是借助于钼(^{42}Mo)的 X 射线发射得到的,这里的钼是钨俘获了一个电子而变成的,同时发射 X 射线。在找到这新元素之前,测得的元素 42 和 44

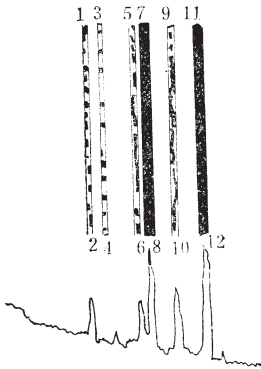


图 3 元素 43 的发现

线 鉴 别

	元素	线		元素	线
1	Ru	K_{β_1}	7	Ru	K_{α_1}
2	Ru	K_{β_2}	8	Ru	K_{α_2}
3	43	K_{β_1}	9	43	K_{α_1}
4	43	K_{β_2}	10	43	K_{α_2}
5	Mo	K_{β_1}	11	Mo	K_{α_1}
6	Mo	K_{β_2}	12	Mo	K_{α_2}

的 X 射线谱分离得很远,因而认为两条 KX 射线之间有元素 43 的 X 射线,1948 年的测量,如图 3 所示,清楚地表明了元素 43 的存在。

4. 磁偏转法 我们知道,当带电粒子在磁场中运动时,将受到洛伦兹力的作用,粒子运动轨道将随之改变。如粒子运动方向垂直于磁场,如图 4 所示,磁场垂直于纸面,则粒子将作圆周运动,运动轨道为 $\widehat{AB}(\text{cm})$,偏转角为 α_m ,曲率半径为 $\rho(\text{cm})$ 。则有以下关系:

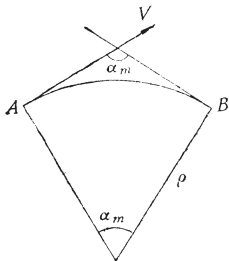


图 4 带电粒子在磁场中的运动

运动时,将受到洛伦兹力的作用,粒子运动轨道将随之改变。如粒子运动方向垂直于磁场,如图 4 所示,磁场垂直于纸面,则粒子将作圆周运动,运动轨道为 $\widehat{AB}(\text{cm})$,偏转角为 α_m ,曲率半径为 $\rho(\text{cm})$ 。则有以下关系:

$$Mv = p = 300H\rho Z \quad (13)$$

或

$$\alpha_m = \frac{\widehat{AB}}{\rho} = \frac{\widehat{AB}HZ}{p} \quad (14)$$

这里 p 为粒子动量 (MeV/c), H 为磁场强度 (高斯), Z 为入射粒子电荷数。

H 往往是已知的,实验上如能独立地测定动量 p (或速度、或质量),结合测定曲率半径 ρ ,或磁偏转角 α_m ,则可相当精确地测定电荷 Z 。许多粒子的电荷数是用这种方法测定的。

测量可以在真空或普通空气磁场中,也可以在泡室中或在乳胶(稀释或夹心的乳胶)中测量。

以上我们介绍了整数电荷的测量方法,以下我们将介绍分数电荷的测量方法。

(待续)