

# 原子核质量的精密测量

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 730000)

## 一、引言:为什么要测量原子核的质量

自然界中万物都是由原子组成的,但是一个原子中的主要质量都集中于原子核,它占原子质量的99.9%以上。在原子核内,其质量与各种力的固有的内在联系,使得原子核的质量成为许多科学研究领域的支柱。因此,原子核的质量,作为它的最主要的特性,无论是在日常生活中,还是在科学技术中都具有主要的地位和作用。特别是在科学研究领域,不同学科对原子核质量数据的精度有不同的需求。一般来说,在普通物理和化学学科中,其基本信息对原子核质量分辨的要求在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ ;核物理研究要求原子核质量的分辨达到 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ ;原子物理中QED的研究要求更高的原子核质量分辨, $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-11}$ ;至于基础物理领域,要检验基本物理常数时,例如,要检验电荷共轭-宇称变换-时间反演(CPT)理论(假设),要求原子核质量测量分辨也要达到 $1 \times 10^{-11}$ 。

就核物理领域来说,原子核的质量是一个关键因素。原子核是由质子和中子组成,为什么他们能结合在一起?当然,现在的回答是由于强相互作用导致它们结合在一起。要问,强相互作用的大小如何?回答这个问题,从原子核的角度,就需要知道原子核的结合能(定义:原子核的质量与组成该原子核的所有中子和中子在自由状态下的总质量之差),这就必须测量原子核的质量以及质子和中子的质量。再者,原子核的结合能与原子核本身的壳结构及原子核的形状也有密切的关系:原子核的最

后两个质子的分离能和最后两个中子的分离能更能体现核内壳结构的状况。例如,对从铊到镅的一系列核而言,具有126个中子(中子满壳核)时与具有128个中子时的这些核相比,其最后两个中子的分离能出现一个明显的阶跃,从而成为判断原子核是否存在壳结构的一个标志(图1)。

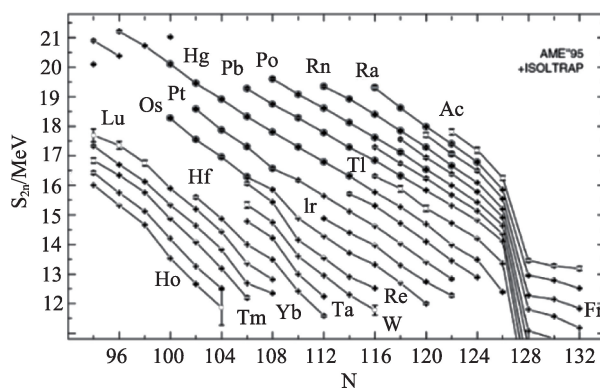


图1 铅区原子核的最后两个中子的分离能(图片来源 S. Schwarz et al. *Nuclear Physics A*, 693(3-4). (2001)p.533-545)

多年来,发展了许多预言原子核质量的理论,对已知的原子核的质量预测的结果与实验测量结果符合得还都比较好,但是,当预测未知的原子核的质量时,就显得千差万别,见图2。那个理论比较合适就必须进行实验检验。

在核天体物理的研究中,原子核合成是极其重要的研究对象。为此,需要有对恒星演化中原子核合成过程的可靠理论描述。这就涉及到不稳定原子核的诸多性质,如质量、半寿命、反应速率等。这里,质量是最重要的一个基本量,由它可以推算出任何一个核转化的速率和能量,甚至直接决定着快中子俘获和快质子俘获的演化路径,以及了解宇宙中元素丰度分布。

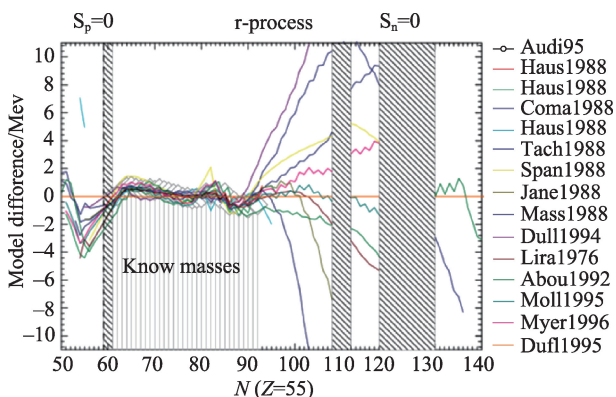


图2 不同模型预言的原子核质量的差别(图片来源J. Duflo, A.P. Zuker, *Phys. Rev. C*, 52 (1995) R23)

原子核的质量非常小,例如氢核只有  $1.67 \times 10^{-24}$  克,铀 238 的质量也只有大约  $4 \times 10^{-22}$  克。为了测量如此小的原子核质量,就必须有特殊的办法。到目前为止,测量原子核的质量可分为两大类方法:一类是间接测量法,例如通过衰变方法测量衰变后子核的质量。这里母核的质量和衰变时发射粒子的质量已知,只要测量粒子和子核的总动能,就可以推出子核的质量。或者是通过测量核反应中释放的动能,然后根据总能量(包括质量和动能)守恒计算出需要测量的原子核的质量。另一类是直接测量方法,即以精确测量的已知原子核质量为参考,得到未知原子核质量的方法。系统的原子核质量数据主要是利用直接测量方法得到的。

自从 1912 年英国物理学家汤姆孙利用磁质谱仪(将具有不同荷质比  $q/m$  的离子在空间位置上分开)测量原子核的质量,发现氖元素有  $^{20}\text{Ne}$  和  $^{22}\text{Ne}$  两种同位素以来,原子核质量测量的方法和测量精确度都有了巨大的进步和扩展,不但对稳定的原子核的质量进行了精确测量,而且对远离稳定线的原子核,尽管它们的寿命都很短,在千分之一秒、百万分之一秒,甚至更短,也都进行了大量的质量测量工作,使得已知的 3435 种处于基态的原子核中,有 2497 种原子核的质量都已有实验测量数据,有 111 种原子核的质量精度达到 0.1 keV, 378 种原子核的质量精度比 1 keV 还好,其他绝大部分的质量精度也都好于 10 keV。

## 二、主要测量方法的工作原理

近年来,原子核质量的直接测量方法有了较快的发展,建立了许多先进的设备,原子核质量测量的精确度有了较大的提高,特别是对远离稳定线的短寿命原子核的质量进行了大量的高精度测量。典型的设备有:基于飞行时间和磁谱仪相结合的,如法国 GANIL 的 SPEG 以及两个加速器 CSS1 和 CSS2 连用;基于重离子冷却存储环的,像德国 GSI 的 ESR 和我国 HIRFL-CSR;基于离子阱技术的,像欧洲 ISOLDE 上的 ISOLTRAP 和 GSI 的 SHIPTRAP 等。下面分别对这几种核质量直接测量方法的工作原理加以叙述。

### 1. 飞行时间法

顾名思义,就是通过测量原子核飞行一段距离的时间及其动能,从而确定其质量。这是一种直接测量原子核质量的基本方法。假设一个原子核的动能为  $E$ , 质量为  $m$ , 则  $E = mv^2/2$ ,  $v$  为原子核的运动速度(在非相对论情况下)。如原子核通过一段距离  $d$  的时间为  $t$ , 则  $E = m(d/t)^2/2$  或者  $m = 2E(t/d)^2$ 。为了提高这种测量方法的精度,主要须提高时间测量精度,或者加长飞行距离以增加飞行时间,当然也要提高能量测量精度和距离测量精度。然而,在实验室中,飞行距离总是有限的,随着飞行距离的增加,对飞行管道的真空要求也会增加,能量测量精度也很有限,因此,这种测量方法的精度最高也只能达到  $10^{-3}$  量级。

为了进一步提高这种方法的测量质量的精度,

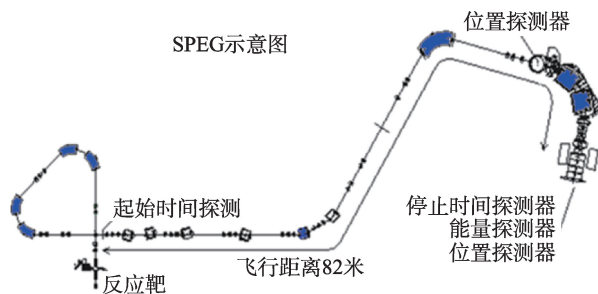


图3 SPEG 谱仪的示意图

法国 GANIL 建造了 SPEG 谱仪(图 3),由双消色差的分析束流线和磁谱仪组成。SPEG 谱仪巧妙地将飞行方法与磁谱仪结合起来,利用  $B\rho = \gamma m_0 v/q$ , 即  $m_0 = qB\rho/\gamma v$  关系,这里  $m_0, B\rho, q, v$  分别是待测核的静止质量、磁刚度、带的电荷数和速度,  $\gamma$  是洛伦兹系数,将质量测量转换为离子磁刚度(由离子在磁谱仪焦平面上的位置确定)和飞行时间的精确测量。由于飞行距离较长(82 m),典型的离子飞行时间都在 1 微秒左右,而且,由于应用了与束流脉冲不相关的高频时钟,使其时间信号的分辨达到约  $2 \times 10^{-4}$ 。SPEG 末端位置探测器的位置分辨保证了每个离子的动量分辨达到  $10^{-4}$ 。( $B\rho = B\rho_{\text{SPEG}}[1 - \delta(x_m - x_{fc})]$ ,  $\delta$  是位置分辨的不确定度,  $x_m$  是焦平面的中心位置,由已知质量、电荷和速度的离子确定),这样就保证了质量数在 40 左右的原子核质量测量的分辨达到  $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ 。后来,由于在实验中使用了较多的已知精确质量的原子核作为标准进行刻度,使得利用 SPEG 谱仪测量  $^{70}\text{Se}$  和  $^{71}\text{Se}$  的质量分辨达到  $5 \times 10^{-6}$ 。

## 2. 利用重离子冷却存储环精确测量原子核质量

存储环是一种环形同步粒子(包括重离子)加速器,它能够使连续或者脉冲离子束在其中循环运行较长时间,即存储。存储的离子(粒子)来源于外源离子(粒子)的注入。如果在存储环上加装电子冷却装置,使其对存储的离子(粒子)束具有冷却功能,那么,这就是电子冷却存储环。

如何利用重离子冷却存储环精确测量原子核质量呢?重离子在存储环中运动时遵循下面的规律:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{\gamma_i^2} \frac{\Delta(m/q)}{(m/q)} + \left(1 - \frac{\gamma^2}{\gamma_i^2}\right) \frac{\Delta v}{v} \quad (1)$$

其中,  $f$  为离子在存储环中的回旋运动频率,  $m$  是离子的质量,  $q$  为离子的电荷态,  $v$  是离子在存储环中的速度,  $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$ ,  $\gamma_i$  称为储存环的转变因子(transition point),即由于离子的磁刚度的增加,被加速离子在存储环中的路径比原来的路径要增加

的比例:  $\gamma_i^{-2} = \frac{1}{C_0} \oint \frac{D(s)}{\rho} ds$ , 或者  $dC/C_0 = \gamma_i^{-2} d(B\rho)/(B\rho)_0$ 。

$C_0$  为参考离子在存储环中飞行一圈的轨道长度,取决于离子的磁刚度  $B\rho (= \gamma m_0 v/q)$ ,  $\rho$  为参考离子在偏转磁铁中的轨道半径,  $D(s)$  为轨道离散。 $\gamma_i$  的范围是在加速器设计时已经确定的。从公式(1)可以看出,要对离子的质量进行精确测量,必须使公式右边的第二项变为最小甚至为零。

目前,有两种方法使其最小:一是使离子的洛伦兹因子与转换能因子相等或者极其相近。这时,就需要调节注入离子的能量,即选择离子的  $\gamma$  值,使其与  $\gamma_i$  相同。此时,同一种离子,平均而言,速度快的要沿着较大的轨道运动,速度小的沿较小轨道运动,从而保证了离子在环中的回旋频率  $f$  与其运动速度基本无关。也就是说同一种离子在环中运动一周的时间相同,即频率  $f$  相同,因此,这种方式称为等时性方法。另外一种方法是保持离子在环内运动的速度不变,即  $\Delta v \approx 0$ 。这就要利用电子冷却来保证环内离子运动速度始终不变,这样,离子的回旋频率仅与离子的质荷比( $m/q$ )有关,同时利用肖特基探测器测量离子的回旋频率,就可以推导出离子的质量。这种方法称为肖特基方法。早在 2000 年以前,德国 GSI 的一个研究小组就在重离子冷却存储环 ESR 上,分别利用这两种方法测量了一批原子核的质量,特别是短寿命原子质量。2011 年以后,中科院近代物理研究所在 HIRFL-CSR 上也利用等时性方法对一些天体演化中关键的短寿命核素,例如  $^{65}\text{As}$ 、 $^{63}\text{Ge}$  等的质量进行了测量。下面分别对这两种处理方法的原理进行较详细的描述。

### 2.1 肖特基方法

肖特基方法测量离子质量时,要求离子的速度保持不变,这就需要用电子束对离子束进行冷却。如何利用电子束对离子进行冷却呢?一团粒子的无规运动速度越小,则其温度越低,如果一团粒子向前作严格平行的匀速运动,其温度则为零。电子冷却就是用来自电子束产生装置的一束很“冷”的

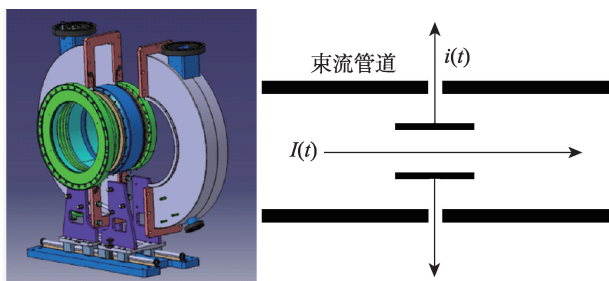


图4 肖特基探测器模型和原理图

电子束,与“热”的离子束混合,将“热”的离子束“冷”下来。冷却时需要大截面的“冷”电子束在环形加速器的直线段的螺旋管磁场中,与小截面的“热”离子束同轴结伴同行,通过电子与离子的相互碰撞使离子束的温度降下来。冷却后离子束的横向和纵向动量分散都大大降低。例如在兰州重离子冷却存储环实验环中,通过电子冷却可将离子束的动量分散从原来的  $10^{-3}$  降到  $10^{-6}$ 。这样可以满足利用肖特基方法测量原子核质量的要求。

利用肖特基方法测量原子核质量时需要用肖特基时间信号探测器。肖特基探测器有两种形式,一种是平板型,另一种是谐振腔型。当一个在环内循环运动的带电粒子通过探测器时,探测器上会感应出一个与离子循环运动频率相关的脉冲电流信号或者电压信号。对测得的肖特基信号进行傅立叶变换处理,就可获得所测离子的循环频率。例如 GSI 小组在利用肖特基方法测量原子核质量的过程中,首先利用弹核碎裂反应,同时产生一批需要测

量其质量的原子核。由于这些产物的质量范围、动量分散、荷质比分布都很大,因此,需要选择动量分散在 ESR 的接收范围内的合适目标核,其速度分辨约  $4 \times 10^{-3}$ ,注入到 ESR。经过电子冷却,其动量分辨最低可达  $7 \times 10^{-7}$ 。不同荷质比的离子在环中循环运动的路径不同,循环频率也不同。离子循环频率的分辨取决于离子的速度分辨。利用肖特基探测器记录这些离子在环中循环运动的肖特基噪声信号,经过傅里叶变换得到循环频率。最后根据上千次的傅里叶频谱进行平均,得到所测离子的最终频谱,经过与已知质量元和的频谱比较和计算修正,得到了 Pb-Bi 区一大批寿命在 10 s 以上的原子核的质量,精度大都在 100 keV,或者更小。通过利用质量精确已知的离子确定存储环的  $\gamma$ ,他们得到的质量分辨本领  $R_m = |-\alpha_p f / \delta f| = (\alpha_p / (1 - \gamma^2 \alpha_p)) v / \delta v = 350000$ 。

## 2.2 等时性测量方法(Isochronous Mass Spectrometry)

利用等时性方法测量原子核质量时,从公式(1)可知,在保证加速器磁场  $B$  稳定,注入待测离子的动量分散  $\Delta p/p$  在一定范围的前提下,要求环内待测离子的  $\gamma = \gamma_1$ ,而与其速度无关,因此,不需要特别对待测离子进行电子冷却,待测离子注入后即刻就可以对其进行质量测量。这样就可以实现对更短寿命(毫秒量级甚至微秒量级)的原子核的质量进行测量。例如对天体演化中质子快吸收过程路径上,处

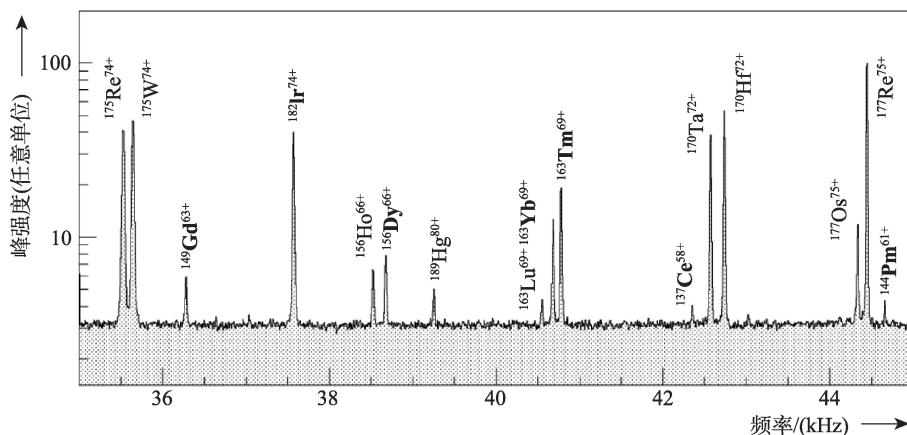


图5 高分辨(频带宽度 10 keV)肖特基频率谱图,黑体字母显示的是用于刻度的质量已知的核,其他是待测质量的核

于所谓“等待点”的原子核进行质量测量。

为了测量短寿命原子核的质量,首先需要选择合适的初始核反应,包括反应系统,入射弹核的能量,以便产生待测质量的原子核,并使这些原子核的速度,即 $\gamma$ 的范围限定在加速器的 $\gamma_1$ 可调范围内。在利用等时性测量方法测量原子核的质量的实验中,首先要调整 $\gamma_1$ ,使得 $\gamma$ 和 $\gamma_1$ 的值尽可能的相等。一般都是通过调整存储环的两块二极磁铁和两块六极磁铁,使其达到最好的匹配。例如在HIRFL-CSRe测量短寿命核素 $^{63}\text{Ge}^{32+}$ 的质量时,CSRe的 $\gamma_1=1.395$ ,利用 $368\text{ MeV/u } ^{78}\text{Kr}^{36+}$ 作为参考离子,通过优化两个四极磁铁,对其进行等时性修正,使 $\Delta f/f$ 测量精度达到 $2\times 10^{-5}$ 。进一步对相应的两个六极磁铁进行优化,满足 $\gamma=\gamma_1$ ,使 $\Delta f/f$ 测量精度达到 $4\times 10^{-6}$ 。对于质量测量感兴趣的核素,例如 $^{53}\text{Co}^{27+}$ 的 $\Delta f/f$ 精度达到了 $1\times 10^{-6}$ 。考虑二极磁铁的不稳定性引起的离子循环周期偏差,实验中,仔细测量每一个待测离子的循环周期相对于同时注入的参考离子循环周期的变化,以便对每一个待测离子的质量进行确定,从而使 $^{63}\text{Ge}$ 的质量测量误差降低到 $37\text{ keV}$ ,精度接近 $6\times 10^{-7}$ 。

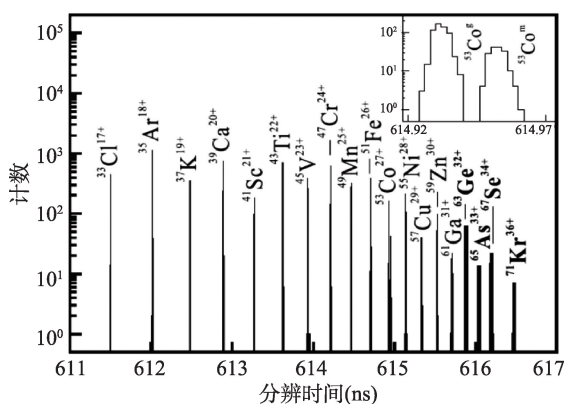


图6  $A=2Z-1$ 的原子核在CSRe中的循环时间谱

注入的待测离子的速度分布是比较宽的,通过调整也只能使其平均速度满足 $\gamma=\gamma_1$ 。为了进一步提高质量测量精度,要在存储环中离子轨道离散大的地方插入一定宽度的狭缝,限制动量分散。例如在CSRe上测量 $^{46}\text{Cr}$ 、 $^{50}\text{Fe}$ 、 $^{54}\text{Ni}$ 等核素的质量时,就插入

了 $60\text{ mm}$ 的狭缝,将离子的动量分散限制在 $\pm 0.5\%$ ,与其他措施联合,从而使得测量的质量精度达到了几个keV量级,质量分辨为 $1\times 10^{-7}$ ,比原有质量精度提高了一个数量级。根据这些数据,进一步获得了这几个核素从 $0+$ 态到 $0+$ 态的超允许 $\beta$ 发射的更精确的Q值。GSI的实验人员也是在离子注入前就通过插入狭缝的方法将带注入离子的动量分散限制在 $\sim 5\times 10^{-5}$ 。但这样就会大大减少能够注入的离子数,这对本来就非常难以产生的核素来说,这不是一种适用的方法。如何更好地判定环内存储离子是否满足 $\gamma=\gamma_1$ ,有必要对其在环内的速度进行直接测量。这可以在存储环的直线段放置两个时间探测器实现这一目的。模拟结果表明,在存储环内放置两个时间探测器测量每个离子的速度,可以在减少对注入离子动量分辨限制的同时,提高离子质量的分辨本领。

利用等时性方法测量原子核质量时,无论是离子的回旋频率的测量,还是环内离子飞行时间的测量,都需要有时间分辨很好的时间探测器。这种探测器的结构如图7所示。探测器包括碳膜,电势板,微通道板探测器(MCP)。当离子穿过碳膜时,会激发出次级电子,电子在电场的作用下偏转到MCP,输出时间信号。关键在于优化电场,使得从碳膜以不同角度发射的不同能量的电子飞到MCP上的时间尽量相等。另外碳膜的厚度要尽量薄,离子穿过时损失能量尽可能的小。一般在每平方厘米20微

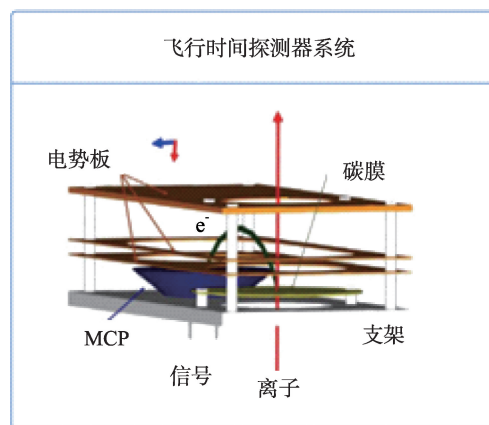


图7 时间探测器结构示意图

克以下,这样当一个离子多次穿过碳膜时也不至于有明显的能量损失,即速度不会有太明显变化。在CSRe上利用IMS方法测量核素质量时,所用碳膜直径为40 mm的时间探测器的时间分辨( $\delta$ )达到了~50 ps。

从1996年以来,在重离子存储环上利用等时性方法不仅测量大批短寿命原子核的质量,技术也在不断发展,使得测得的质量分辨不断提高,从最初的 $10^{-6}$ ,提高到 $10^{-7}$ ,甚至更好。近代物理研究所从2008年开始在HIRFL-CSRe上利用等时性方法精确测量了 $^{45}\text{Cr}$ , $^{46}\text{Cr}$ , $^{49}\text{Fe}$ , $^{50}\text{Fe}$ , $^{53}\text{Ni}$ , $^{54}\text{Ni}$ , $^{63}\text{Ge}$ , $^{65}\text{As}$ , $^{67}\text{Se}$ 等一批原子核质量,许多原子核的质量精度进一步提高,例如 $^{54}\text{Ni}$ 的质量测量不确定度仅为4 keV,即质量分辨进入 $10^{-8}$ 量级。

### 3. 彭宁离子阱测量原子核质量

彭宁阱主要用于原子核质量的高精度测量,对稳定原子核的质量测量精度可以达到 $10^{-11}$ 量级。现在国际上用于原子核质量测量的彭宁阱很多,例如欧洲核子中心的ISOTRAP,德国GSI的SHIP-TRAP等等。

彭宁离子阱的结构如图8(左)所示,同时由具有旋转双曲线形状的圆环和上下盖三个电极组成(也有设计为柱状的),将其置于均匀的强磁场中。上

下盖与环形电极之间加一弱的恒定电势( $U_{dc}$ ),在阱中形成一个轴向(Z方向)对称的电四极场。当极低能量的离子进入阱中后,就会具有一个复杂的运动模式,可将其分解三个独立部分(图8右):在磁场中受到洛伦兹力而作圆形回旋运动,但由于电场的存在,其运动频率会稍微有所变化,因此,称其为修正的回旋运动,频率记作 $\omega_+$ ;在上下盖之间沿轴线方向做简谐振荡,频率记作 $\omega_z$ ;离子阱中存在与磁场垂直的电场成分,从而产生对离子的径向作用力,引起离子的环形磁控运动(漂移),频率记作 $\omega_-$ 。如果注入离子(电荷与质量之比为 $q/m$ )在磁场B中的回旋运动频率为 $\omega_c = Bq/m$ ,那么,三种运动的频率分别为

$$\omega_z = \sqrt{\frac{qU_{dc}}{md^2}}, \omega_+ = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}, \omega_- = \frac{\omega_c}{2} - \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

公式中的 $d$ 是表示离子阱大小的参数, $d^2=1/2(z_0^2+r_0^2/2)$ ,其中 $z_0$ 是上下盖中间的最小距离之半, $r_0$ 是环形电极的最小半径。从上面的公式可得 $\omega_c = \omega_+ + \omega_-$ ,即离子在阱中作修改回旋运动的频率与磁控运动频率之和等于离子在没有电势时的磁场中作回旋运动(自由回旋运动)的频率。同时还满足 $\omega_c^2 = \omega_+^2 + \omega_z^2 + \omega_-^2$ (协变性)以及 $\omega_z^2 = 2\omega_+ \omega_-$ 。这些频率之间的大小关系是 $\omega_+ \gg \omega_z \gg \omega_-$ ,每两个之间都相差十至几十倍。如果能够精确测量 $\omega_+$ 和 $\omega_-$ 两个频率之和,或者能够精确测量每个频率,就能够得到 $\omega_c$ ,根据

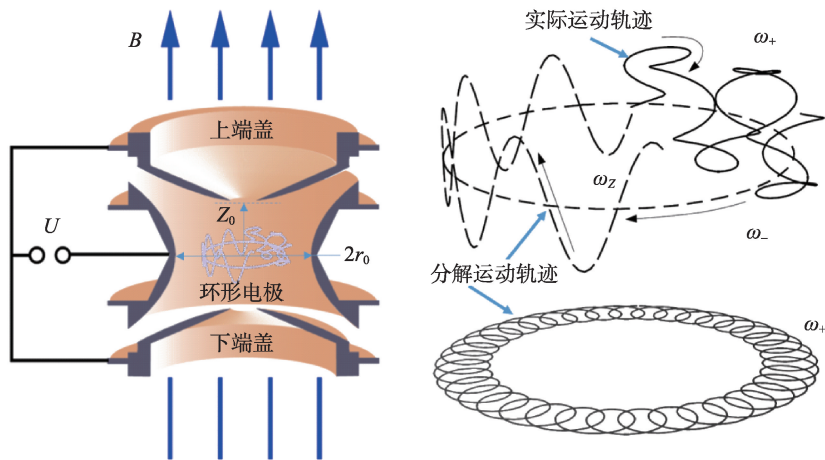


图8 离子阱结构及离子在阱中的运动轨迹示意图

$\omega_c = Bq/m$ , 从而确定离子的质量。由于在这三个频率中  $\omega_c$  最高, 在通过镜像电荷测量各运动频率时, 其测量精度至关重要。

如何精确测量这些频率呢? 一种方法是飞行时间方法, 另一种是镜像电荷测定方法。

### 3.1 飞行时间方法

由于离子阱内存在剩余气体或者充有阻尼气体, 阱内离子的运动会受到阻尼,  $Z$  方向的振动幅度和修正的回旋运动半径变得越来越小, 磁控运动半径变得越来越大, 以至于最后会碰到阱壁而损失掉。

在利用飞行时间方法测量被囚禁离子的质量时, 例如 ISOTRAP, 预先准备好的极低能量的离子在沿磁场轴线附近注入后, 首先分别利用频率为  $\omega_+$  和  $\omega_-$ , 幅度适当的二极高频电场, 在垂直于磁场轴线 ( $z$ ) 的平面内, 在很短的时间内 ( $\sim 10$  ms) 激发离子修正的回旋运动和磁控运动的幅度 (利用这种激发方法, 也可去除不需要的离子)。这两种运动的半径在激发过程中的演化与激发起始时刻离子的运动相位及激发时间有关。

第二步, 利用频率接近  $\omega_c$  的四极高频电场激发离子的运动, 将离子的磁控运动完全转化为离子修正的回旋运动, 根据需要在 100 ms 到几秒之间选择激发时间。这就要对四极激发场的频率进行扫描, 只有当激发频率与离子在纯磁场中作自由回旋运动的频率  $\omega_c = Bq/m = \omega_+ + \omega_-$  相等时, 才能将磁控运动完全转化为修正的回旋运动, 意味着最初的纯磁控运动 (半径为  $\rho_c$ ) 变为围绕  $Z$  轴的纯回旋运动, 且其回旋半径与  $\rho_c$  相等。在利用四极场激发离子径向运动的过程中, 修正的回旋运动半径逐渐增大, 也就是说回旋运动的径向能量  $E_r$  也在增加。

第三步, 测量离子的飞行时间。四极场激发后, 希望测量质量的离子就会围绕  $Z$  轴做回旋运动, 实际半径只有大约 1 mm。这时降低离子阱上盖的电势, 离子就会沿  $Z$  轴方向飞出离子阱, 从而被安放在阱外的探测器探测到。由于探测器位置上的磁场非常弱, 因此, 在离子的飞行路径上有很大的磁

场梯度  $\Delta B$ 。在四极场激发过程中, 离子有一个垂直于磁场的运动, 因此会产生磁矩  $\mu = E_r(\omega_c)/B$ , 使其在飞行过程中会受到一个沿  $Z$  轴方向的力  $F = -\mu(\nabla \times B) = -(E_r/B)(\partial B/\partial z)\hat{z}$ 。所以, 当四极激发频率等于  $\omega_c$  时, 受到的力最大, 从离子阱到探测器的飞行时间也就最短。多次重复上述步骤, 每次都改变第二步中的四极高频场的频率, 最后得到如图 9 的飞行时间与四极高频场频率的关系。这样, 就可以确定图中对应飞行时间最短的四极高频场的频率, 即  $\omega_c$ , 然后根据  $\omega_c = Bq/m$  的关系, 计算离子质量。但是为了排除磁场不稳定性和其他系统误差, 用一个已知精确质量的离子作为参考, 同时测量其自由回旋频率。两者进行比较, 从而得到待测离子的质量。这种方法的质量测量精度可达  $10^{-9}$ 。利用 ISOTRAP 对寿命只有 98 ms 的  $^{32}\text{Ar}$  的质量测量精度也达到  $6 \times 10^{-8}$ 。对寿命为 173 ms 的  $^{33}\text{Ar}$  的质量测量精度达到  $1.4 \times 10^{-8}$ 。

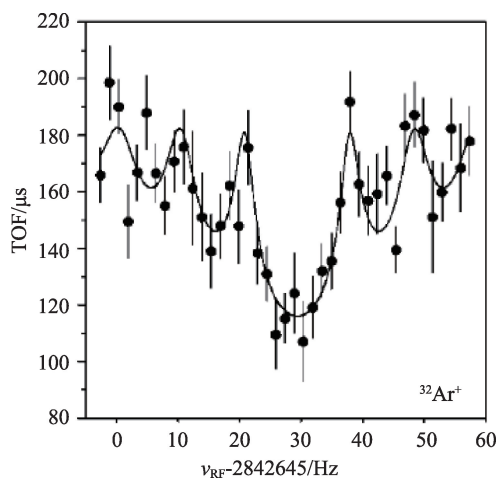


图9 飞行时间与激发频率的关系

### 3.2 镜像电荷(image charge)测定方法

离子在阱中的振荡, 包括上下振荡和回旋运动时, 接近电极时, 会在电极上产生感生电荷, 称为像电荷, 或者镜像电荷。由于离子的振荡频率很高, 所以产生的镜像电荷是一个很窄的脉冲信号。通过测量这些镜像电荷, 就可以得知其各种运动频率。这种方法的优点是载入一种离子后, 只要它的寿命足够长, 就可以对它进行反复测量。当然, 为

为了避免空间电荷效应的影响,进行质量精确测量时,一次只注入一个离子(或者清洗到只剩一个离子)。再者,为避免磁场的不均匀性的影响,离子的运动都限定在阱中心附近的很小范围内。但是,探测一个带宽非常窄的镜像电荷时,信号的信噪比与离子的运动半径、所带电荷和外部谐振电路 $Q$ 值的平方根等因素成正比,这使得镜像电荷信号不仅非常微弱,信噪比也非常小,所以要求探测镜像电荷的外电路一定是具有高 $Q$ ( $=v/\Delta v$ ,  $v=\omega/2\pi$ 为信号频率)值(用于共振探测电荷电流)的高度谐振的电路,而且要工作在极低温下( $T=4\text{K}$ )。轴向运动的镜像电流可以直接用高度谐振电路测量,然后根据傅里叶变换获得其频率。而最关键的 $\omega_+$ (或者磁控运动频率 $\omega_-$ )的具体测量途径有几种,一种称为相位灵敏技术(PnA, Phase and Amplify)的测量步骤如下:首先将注入阱中的离子冷却在阱中心,即三种运动幅度都非常小;然后,利用初始相位已知的二极射频场将离子激发到运动幅度和相位确定的位置,并完全脱离任何测量系统,让其在磁场中做回旋运动一定时间 $t$ ;再利用合适幅度的四极射频场(频率 $\omega_{rf}=\omega_+-\omega_-$ ),在一定时间内将修正的回旋运动耦合到轴向运动,随后,通过镜像电荷的测量离子的轴向运动的镜像电流信号,并通过复数傅里叶变换,获得

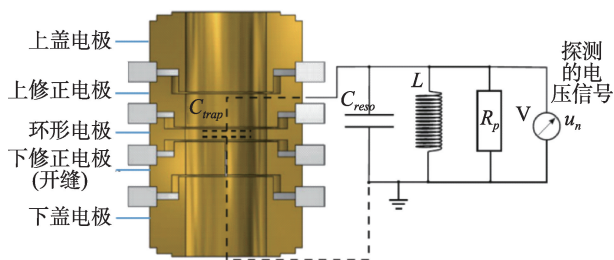


图10 轴向镜像电流测量等效电路图

轴向运动的信息,它携带了修正的回旋运动的初始相位和幅度的信息;然后,利用外辐射场(频率 $\omega_{rf}=\omega_+-\omega_-$ 或 $\omega_{rf}=\omega_--\omega_-$ )冷却离子一段时间,再重复测量。第一次测量时, $t$ 可一短一些,但是最后一次测量时, $t$ 要尽可能的长一些。利用两次测量得到的相位差,确定在 $t$ 时间内总共转过的圈数,这样就可以获 $\omega_+$ (或 $\omega_-$ )。这种测量方法不仅耗时较短,而且频率分辨(峰的半高宽)可以达到 $\sim 5 \times 10^{-10}$ 。

### 3.3 相位图形化测量方法

相位图形化测量自由回旋共振频率的方法是最近发展起来的技术。这种方法不是通过镜像电荷的测量确定相位,而是直接利用位置灵敏探测器确定离子的运动相位。下面以 SHIPTRAP 为例说明这种方法的测量过程。

有两种途径,一是分别测量修正的回旋频率和磁控频率,适用于有双重质量的离子质量测量;另一种是直接测量自由回旋共振频率。两种测量方法都需要在离子阱外的一定距离上,安放一个位置灵敏探测器 MCP,与 $z$ 轴垂直且中心与 $z$ 轴重合。用第一种方法测量离子质量时,首先将存储的离子冷却在离子阱的中心以半径为 $\Delta r$ (几十微米)的范围内,好像是半径为 $\Delta r$ 的一团电荷。如果测量离子的磁控频率 $\omega_-$ ,然后加上一个初始相位已知,频率为 $\omega_+$ 的二极射频场,将离子激发到距离阱中心 $r$ ( $\sim 1\text{mm}$ )的位置作圆周运动,经过一段时间 $t$ ,转动了若干( $n$ )圈,且与初始相位相差一个角度 $\phi$ 的位置。然后,施加一脉冲电压将离子引出并投射位置灵敏探测器上,得到一个有放大 $G$ 倍的图像。离子转过的总角度( $n2\pi+\phi$ ),根据运动时间 $t$ ,可以计算出离子的转动频率 $\omega=(n2\pi+\phi)/t$ 。

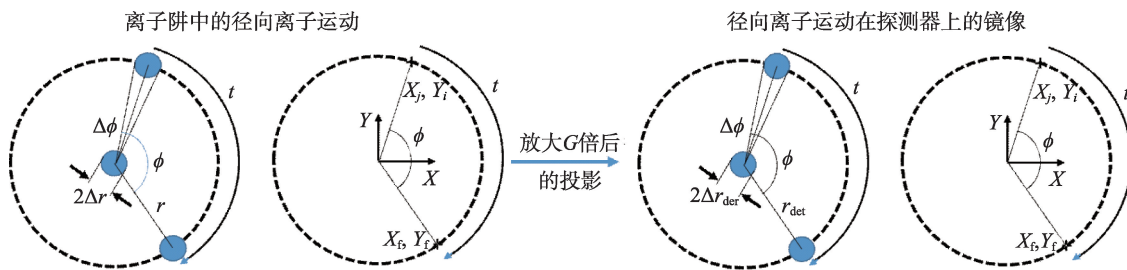


图11 离子在离子阱中的径向运动相位和这些运动投影到探测器上的相位示意图



如果测量修正的回旋运动频率 $\omega_+$ ,先用频率为 $\omega_+$ 的二极射频场将离子的磁控运动最小化,再用频率为 $\omega_+$ 的二极射频场激发起离子的回旋运动,并使其经历一段时间 $t$ 。引出之前,还要用频率为 $\omega_c$ 的 $\pi$ 形四极射频场脉冲将修正的回旋运动转换为磁控运动,然后引出,使其到达探测器上,以获得其相位。测量时激发脉冲的宽度要尽可能的比运动一周的时间小。

在直接测量自由回旋频率时,也有两种激发径向运动的模式,都与上述测量修正的回旋运动频率的过程相似,只不过用频率为 $\omega_c$ 的 $\pi$ 形四极射频场脉冲将修正的回旋运动转换为磁控运动的时刻不同,一个是在用 $\omega_+$ 的二极射频场激发起离子的回旋运动之后立刻转换,然后经历一段时间 $t$ 。另一个则是在用 $\omega_+$ 的二极射频场激发起离子的回旋运动后,先经过一段时间 $t$ ,然后再转换。据作者介绍,这种方法的测量时间相比 TOF-ICR 可缩短约 25 倍,测量精度也可提高约 40 倍。利用这种方法在 SHIPTRAP 上测量了镅-163(稳定)和 Ho-163(电子

俘获衰变)之间的质量差 $\Delta m=2883(30 \text{ 统计})(15 \text{ 系统})\text{eV}/c^2$ ,意味着精度达到了 $10^{-10}$ 。

在利用彭宁阱对原子核的质量进行测量的过程中,电场和磁场的稳定性以及外部的干扰都会对测量的精度带来影响,因此,在理论和实验两方面都进行了很多专门研究,尽量减少这些影响,以提高测量精度。

## 四、结语

原子核质量在科学研究和实际应用中都有非常重要的作用,因此,科学家们付出了大量心血,从理论和实验上进行了探索和实践,创造了许许多多的方法和相应的设备,并利用这些设备已经对几千个原子核的质量进行测量,而且测量精度一步步提高。从原来只能将同位素分开,到现在达到 $10^{-11}$ 量级的测量精度,这为物理学和其他相关学科的发展提供了有力支持。有理由相信,今后原子核质量测量的理论和方法还会进一步发展,质量测量的精度还会进一步提高。

封底照片说明

## 高科技助力世界杯

2018年世界杯足球赛终于在俄罗斯落幕了,这次比赛最大的看点是在这次比赛中对高科技的使用。下面就盘点一下在这次世界杯中都是用了哪些高科技设备:

**【VAR 系统】**在足球比赛中,决定比赛的因素除了教练的战术布置,球员的发挥外,现场裁判员也是个重要的方面。毕竟是人为吹裁判,这就难免会在裁判过程中产生错误,为此这次杯赛组委会引入了 VAR 系统。视频助理可借助 VAR 在第一时间对场上有争议的情况进行多角度的回放,通过现场语音系统告知主裁判,还可以让主裁判通过场边的侧屏现场亲自查看。

**【球门线判别系统】**4D 球门线判别系统,该系统通过架设在球门线的高速摄像机,能够快速获取彩色影像,并通过图像处理系统,来追踪目标,进行过滤和筛选,从中获取有价值的信息进行正确的判断。

**【智能足球】**这次赛场用球也极富科技元素,人可通过专用 APP 来了解每一颗足球的信息,能够记录球在

比赛中的运动轨迹,记录球是否出界,及球员踢球的力度与技巧,这些都源于在足球内部安装了 NFC 芯片。

**【裁判智能手表】**为每位裁判准备了一块智能手表,该表除了具有与普通智能表一样的功能外,还特别设计了时间提醒功能,能够记录场上比分、进球、红黄牌与场下双方替补队员的信息,并与其他系统进行联动。

**【数字化跟踪系统】**队员可穿戴微型系统,教练可以通过这个系统了解场上球员的各类信息,对教练及时掌握场上情况,制定战术以及救治受伤队员提供了方便。

**【4K 高动态直播与 VR 虚拟技术】**本届杯赛采用 4K 高动态拍摄,来保证超高清晰度和高动态画面的质量。同时还使用了 360 度虚拟现实技术,这个系统可将观众带进虚拟现实中观看球赛,画面逼真,仿佛身临其境,现场感极强,很受时下年轻人的欢迎。

本届俄罗斯世界杯与科技相关的应用还有很多,在这里就不一一列举了。相信随着科学的不断进步,将有更多的科学技术助力体育竞赛。