

# 如何探知原子核

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 730000)

都知道原子核是非常小的,它的尺寸在 $10^{-14}$ 米量级。这样的大小,不用说用显微镜看了,就是用电子显微镜也看不到。那么如何探知原子核呢?

要探知这么小的原子核,就要有新的方法和设备。前面讲过,原子核虽小,但是,高速运动的原子核/离子在一种介质中穿行时,会与介质原子相互作用,使介质原子激发,发射光子;或者使原子电离,产生电子-离子对;或者产生高能电子(也称为 $\delta$ 电子),随即发射或引起次级电离。这些过程中,产生的光子数和电子离子对数目与入射离子的能量和性质(离子的电荷数、质量数等)有关。如若将这些过程中产生的这些光子、电子离子对转换为电信号,并收集起来进行分析,则可以得出原子核/离子的信息。由此出发,可以选择不同的介质材料,制造成不同的探测器,用于不同离子(或原子核)的探测。再与精心设计的实验方法相结合,就可以获得原子核的各种信息。

## 一、探知原子核用的探测器

用于探测器的介质材料可以是气体,也可以是固体。首先,要求入射离子/粒子能量相同时,产生的光子或电子-离子对的数目必须要多,也就是能量的利用效率要高。再者是在不同时间和地点,相同能量的离子/粒子入射时,产生的光子或电子-离子对数目的差别要尽可能地小。还有,介质材料要比较容易获得。

目前为止,常用的探测器介质材料有:固体,包括半导体(硅、锗、金刚石等),闪烁体(碘化钠(Tl)碘化铯(Tl),氟化钡,溴化镧,锗酸铋等无机晶体,以及塑料闪烁体和液体闪烁体)和气体(Ar, Xe, CO<sub>2</sub>, 乙

丁烷,CF<sub>4</sub>等)。

不管用哪一种材料制作探测器,都需要辅以磁场或电场。对于闪烁体探测器而言,光电倍增管是不可少的。不管是固体探测器或是气体探测器,它们输出的电信号都比较小,为了记录的方便,后端的电子线路,包括电信号放大和数字化线路,以及记录用的仪器也是必需的。用如下的方框图表示探测原子核的流程:



图1 原子核探测的原理

下面简单介绍一下气体探测器和固体探测器。

### 气体电离探测器

气体电离探测器是利用气体作为介质,对各种离子(粒子)进行探测的核辐射探测器。气体探测器的结构包括一个密封的小室,里面充满探测气体。为增强电离电子的数目并收集这些电子信号,在小室内装有正负电极,并在电极之间施加一定的电压。探测器外面还有与之相连的电子学线路。

“云室(威尔逊云室)”是最早用于探测原子核的气体探测器。英国物理学家威尔逊(见图2)经过多年研究,发现无尘空气的体积适当膨胀后,离子也会成为凝聚核心。1895年,他以此原理设计了一套利用过饱和水蒸气作为探测介质的设备——云室,当射线穿云室时,云室内就会形成云雾径迹(见图3)。后来,威尔逊又为云室增设了拍摄带电粒子径迹的照相设备,使它成为研究射线的重要仪器。并用他的云室拍摄了 $\alpha$ 粒子的径迹图像。1927年,威尔逊因发明云室而与康普顿同获诺贝尔物理学奖。

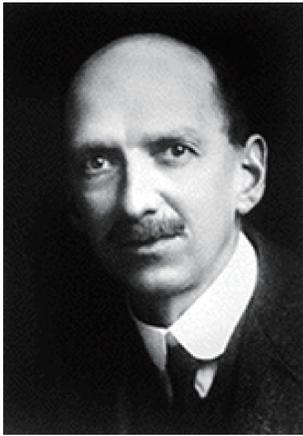


图2 查尔斯·汤姆逊·里斯·威尔逊

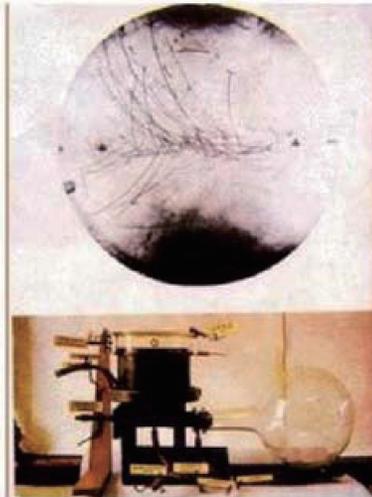


图3 云室及其获得的粒子径迹

当带电粒子在气体中穿过时,产生电子-离子对。在电场的作用下,离子的漂移速度非常慢,而电子的漂移速度非常快,具体数值则取决于气体的性质和外加电场与气压的比值。例如,在合适的外加电场与气压的比值下,电子在氩+10%甲烷气体中的漂移速度甚至可以达到上千米/秒。但是,在漂移过程中离子和电子还会发生复合,导致自由电子的数目下降。一般情况下,复合的概率比较小。入射离子电离气体分子产生的自由电子都具有一定的初始速度,在外加电场的作用下,会获得较高的动能,高能电子还会激发原子产生次级电离,产生新的电子-离子对。如果这一过程不断地持续下去,电离产生的电子-离子数目就会快速增加。这一现象称为雪崩现象。上述过程持续的程度与外

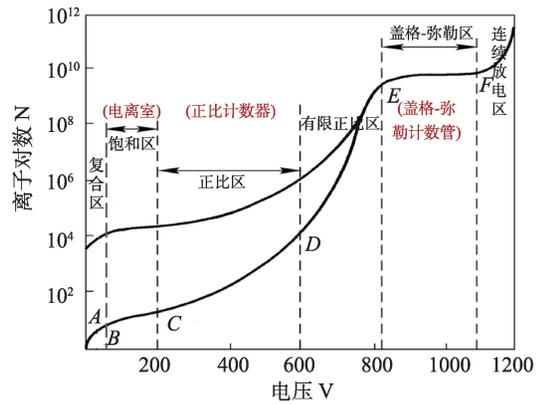


图4 收集到的电子-离子对数与外加电压的关系

加电压有关。随着电压的增加,气体电离程度可以分为五个区段:复合区(复合数大于电离数),饱和电离区(复合效应基本消失,电离达到饱和),正比区(由于雪崩现象,使得电离电子数目得到固定的放大倍数)和有限正比区(离子数的增加产生空间电荷效应,使得电子数目的放大倍数不固定),盖格-弥勒区(产生自激放电,收集到的电荷数再次饱和)。依据上述不同区域的气体电离特性,可以制作出不同的气体探测器。

盖格计数器是早期发明的一种气体射线探测器,直到现在还在使用。盖格计数器的结构很简单,就是在金属管中间插入一条金属丝,管内充满淬灭气体,金属丝与管壁之间加上适当的高电压而成。粒子入射时产生的电流输出可驱动发声装置或者显示装置(见图5)。

利用低电压时的电离饱和特性可以制作各种各样的电离室。按照收集电荷工作的性质可分为



图5 盖格计数器



图6 漂移室

脉冲电离室、电流电离室和积分电离室。从事放射性工作的人员所佩戴的剂量笔就是积分型电离室。屏栅电离室可以用来较准确地测量低能离子和裂变碎片的能量。

测量低能中子计数的正比计数管中充有 $\text{BF}_3$ 气体,利用 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反应对中子进行计数。在高能物理实验和医学成像中,多丝正比室的应用比较广泛。多丝正比电离室一般是由两个阴极面和夹在中间的一个阳极面组成。阳极面由等距分布的镀金钨丝组成,阳极丝的直径约为十分之一毫米,间距约为一或几毫米。室内充有略高于大气压的工作气体,如氩和甲烷或二氧化碳等混合气体。每个阳极丝的输出信号单独输出,因此,这种正比计数电离室是位置灵敏的。每根丝附近即使每秒钟有几十万个离子/粒子入射,这根阳极丝也可以把它们一一记录下来。近年来又发展出一种微孔气体探测器(GEM),结构如图7。由漂移阴极、网格阴极和阳极,其中网格阴极上有密集规则排列的小孔,以便使在漂移室内产生的电子通过,并在阴极和阳极之间再次放大。阳极由平行的金属条组成,以便收集不同位置上的电子,达到位置灵敏。

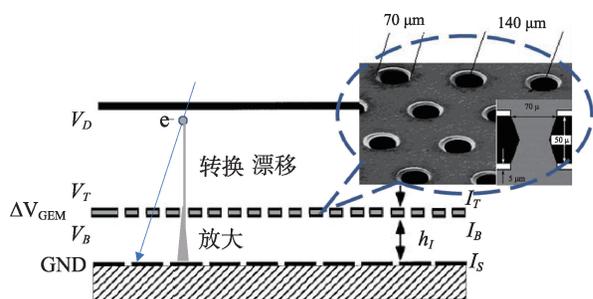


图7 GEM气体探测器

## 半导体探测器

半导体探测器是利用半导体材料制作的探测器,包括用于探测 $\gamma$ 射线和X射线的高纯锗探测器,探测离子的硅或金刚石等探测器。工作原理与气体电离探测器相同(见图8)。在电极K和A上加工作电压 $V$ ,使工作区D内部形成电场区。由于半导体的电阻很大,其漏电流很小,以此降低了本底噪声。离子入射后产生的电子和空穴分别向A和K漂移,并在 $R_L/C$ 上形成电信号输出。

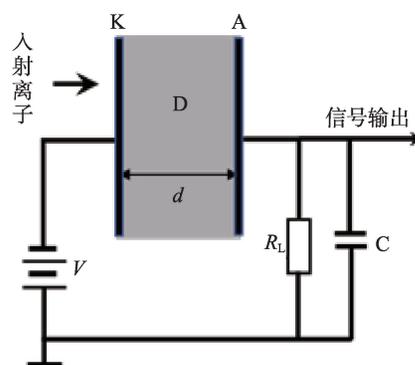


图8 半导体探测器工作原理

高纯锗探测器是应用很广的 $\gamma$ 探测器,能量分辨可达到2 keV。(相对)探测效率与其体积有关,大体积的高纯锗探测器的探测效率可达30%以上。近年来,基于高纯锗探测器又发展出各种各样的组合探测器,如反康谱仪,可将探测器的康普顿散射压低几十倍。四叶瓣探测器是将四个高纯锗晶体巧妙地组合成为一个探测器,相对探测效率可达130%左右。有人还将四叶瓣探测器的每个晶体分为8个区,进一步提高探测效率。跟踪探测器是将一块高纯锗晶体电分割成多个区域,每个区都可单独记录 $\gamma$ 射线在其中沉积的能量,最后将一条入射 $\gamma$ 射线同时沉积在不同区的能量加和,其探测效率更高。高纯锗探测器都是在极低温度下工作,以保证其有好的能量分辨。

半导体离子探测器以单晶硅为主要材料的离子探测器,能量分辨在20 keV左右。Si半导体探测器——多用于探测带电离子(粒子)的能量;其形式和结构多种多样,从Si(Au),到离子注入型,从单个

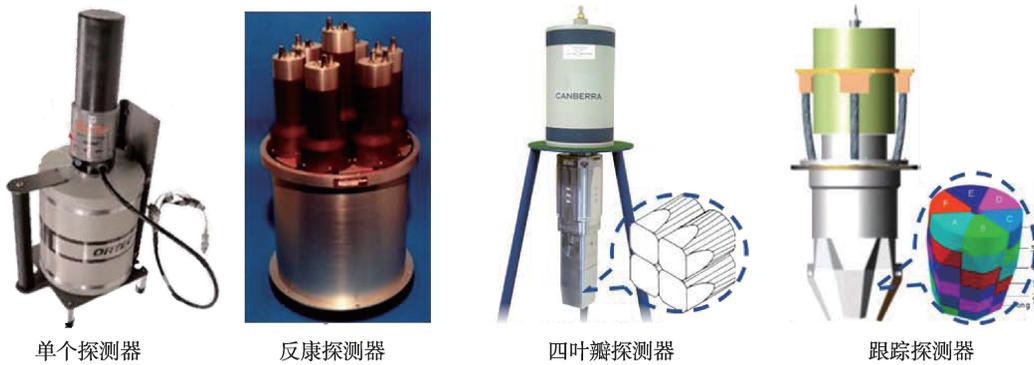


图9 各种高纯锗探测器

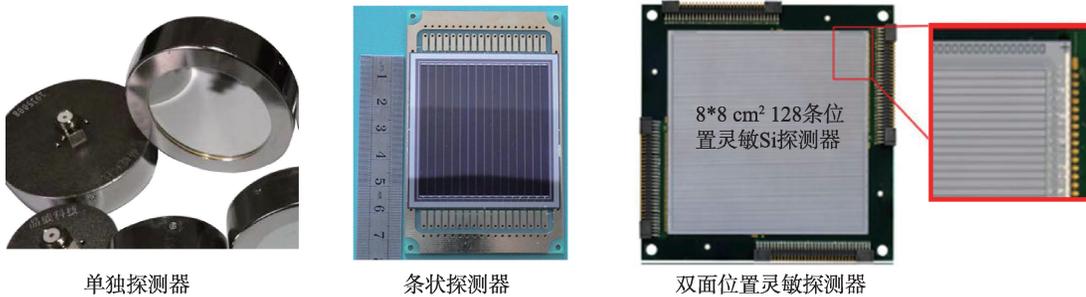


图10 各类SI半导体探测器

的探测器,到硅条探测器,再到位置灵敏条状探测器。以灵敏层的厚度又可分为透射型(探测器整个厚度都是耗尽层)和阻止型(耗尽层占整个或大部分厚度)。

闪烁体探测器是闪烁体与电子倍加管结合的探测器,主要有早期的碘化钠NaI探测器,碘化铯探测器,氟化钡探测器和塑料(液体)闪烁体探测器,以及近年来发展出的锗酸铋探测器和溴化镧探测器等。由于伽玛射线在闪烁体中的发光的特性,决定

了这类探测器的能量分辨较低,在3%~10%范围,但是探测效率较高。此类探测器不仅可以探测 $\gamma$ 射线,也常用来探测中子。有些闪烁体,如BaF<sub>2</sub>的响应时间很短,也常用于时间测量。

### 电磁分离器

带电粒子在磁场中的运动轨迹与磁场强度 $B$ ,离子的速度 $v$ 、质量 $m$ 和带电量 $q$ 有关,即 $R=mv/Bq$ 。因此,可以用电场或磁场将质量不同的带电粒子分开(同位素分离器)。常与时间和能量探测器联合,用于核反应中重产物核的分离、鉴别和核质量测量。

## 二、原子核性质的测量方法

### 1. 原子核质量测量

原子核的质量是原子核的基本性质,它不仅对认识原子核本身具有重要的意义,而且对其他学科的发展也有重要作用。核物理实验学家创造了许



图11 液体闪烁体探测器

多方法对原子核质量进行测量。

**原子核衰变方法**也称为质量差方法:如果母核的质量和其衰变时发射粒子的质量都已知,测量其衰变时发射粒子的能量,就可以定出子核的质量。

**飞行时间法**精确测量一个原子核飞过一段路程 $l$ 的时间 $t$ 和能量 $E$ ,根据 $E = \frac{1}{2}m(\frac{l}{t})^2$ 就可以得到离子的质量 $m$ 。为了利用此方法精确测量原子核的质量,通常都是加长离子的飞行路程,例如早年法国的SPEG谱仪中,离子的飞行路程达80米左右。在环形实验谱仪,如近代物理所的CSRe上,离子的飞行路程接近129米。近年来又研制出**多次反射飞行时间质谱仪**,即通过使离子在两个特殊电极板之间多次反射而延长离子的飞行路程,从而提高质量测量精度。此设备可以对单个离子(原子核)进行质量测量。与硅半导体探测器和离子阱相结合,质量分辨本领( $m/\Delta m$ )达到600000,而且有很高的测量效率,有利于测量短寿命核素的质量。

**重离子冷却存储环质量谱仪测量方法**利用电子冷却存储环测量原子核质量有两种方法:等时性方法和肖特基方法。根据离子在环中运动满足条件

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

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, $\gamma$ 是离子的洛伦兹因子, $\gamma_i$ 称为储存环的转变因子。选择合适的离子能量,使其 $\gamma$ 与 $\gamma_i$ 相等,这样可保证同一种离子在环中飞行一周的时间相同,即频率 $f$ 相同,这种方式称为**等时性方法**。另外一种方法是利用电子冷却方法保持离子在环内运动的速度始终不变,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**。利用等时性方法测量原子核质量的误差在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 量级。近代物理所在CSRe上利用等时性方法测量了许多短寿命原子核的质量,精度达到了 $10^{-8}$ 量级,测量结果为核物理和核天体物理研究提供了重要数据。

**彭宁离子阱质量测量方法**彭宁离子阱主体包括三个部分:旋转双曲线形状的圆环,上盖和下盖。主体置于均匀的强磁场中,圆环与上下盖分别加上合适的电压,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,频率分别记作 $\omega_+$ ;  $\omega_z$ ;  $\omega_-$ 。精确测量这三种频率,以便得到注入离子(电荷与质量之比为 $q/m$ )在

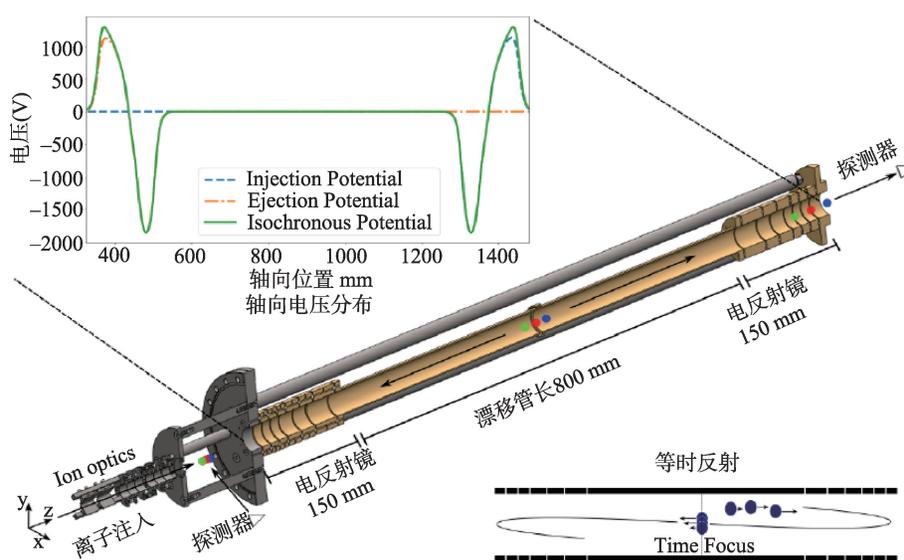


图12 多次反射飞行时间质量谱仪简图

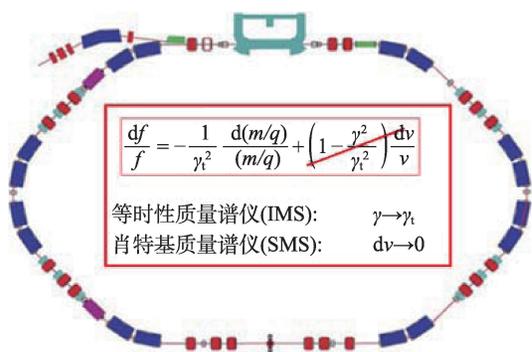


图13 冷却存储环质量谱仪

磁场  $B$  中的回旋运动频率为  $\omega_c (=Bq/m)$ , 从而计算出注入离子的质量。彭宁阱主要用于原子核的质量的高精度测量, 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 SHIPTRAP 等。

## 2. 原子核(离子)的鉴别方法

核反应中产生什么核素, 发射了什么粒子, 特别是在合成新元素时, 最后得到的是否是目标新核素, 都需要鉴别清楚。这对于了解核碰撞过程, 乃至新合成原子核的性质等都很重要。对于原子核的鉴别, 一般都是确定其质量数和电荷数。对于反应中发射的  $\gamma/X$  射线, 则是利用特殊探测器直接测量。对中子, 则是利用其在质子上的散射, 或者利用核反应进行测定。原子核质量数和电荷数的鉴

别方法很多, 主要包括以下几种: 组合半导体探测器, 电磁分离器, 多探测器组合等方法。

**组合半导体探测器方法** 也称半导体望远镜探测器 相同速度的离子穿过一个薄的全耗尽探测器时, 所损失的能量  $\Delta E$  与离子的电荷数  $z$  的平方成正比, 与其速度平方近似成反比。而离子的总能量  $E$  与其质量成正比。所以就有  $\Delta E \times E$  正比于  $mz^2$ 。如果利用一个较薄的探测器和一个厚探测器组合, 对离子在薄探测器中的能损 ( $\Delta E$ ) 和总能量 ( $\Delta E + E$ ) 分别进行测量, 就可以区分不同电荷数的离子。如果探测器的能量分辨足够好, 就可以通过此方法鉴别出较重元素的同位素(见图 15)。一般情况下, 由于硅探测器的能量分辨很好, 所以都用它的组合鉴别离子。对于能量非常高的离子, 则可以利用 Si 探测器和厚的闪烁体探测器组合进行鉴别。

**电磁分离器方法** 早在 20 世纪 20 年代, 弗朗西斯·威廉·阿斯顿(Francis William Aston)就创制了质谱仪, 随后又作了一系列的改进, 建立了第一台可对同种离子聚焦(能量聚焦)的磁谱仪。他利用此仪器对 50 多种元素进行了测试, 证明了多数化学元素都是由几种质量数不同的原子集合而成, 并据此提出了“整数法则”, 即原子质量是  $^{16}\text{O}$  标度的整数倍。随后, 他又不断改进, 最终使其质谱仪分辨本领达到 10000。

近百年以来, 围绕不同的目的, 发展出各种各样

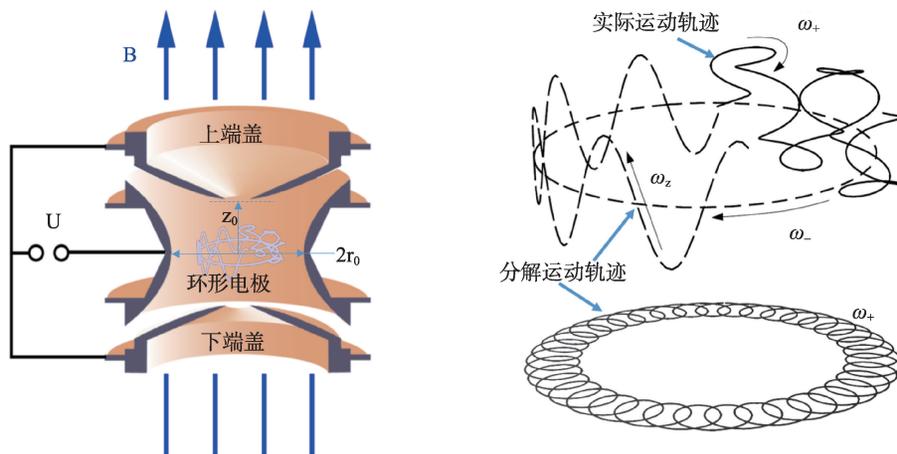


图14 离子阱结构及离子在阱中的运动轨迹示意图

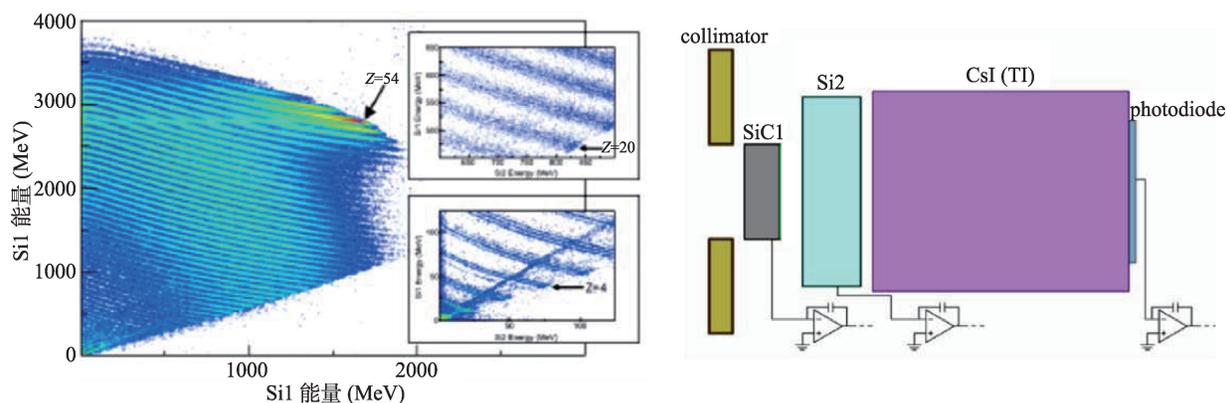


图 15 Si-Si-CsI(Tl)组合望远镜探测器及其离子鉴别结果



图 16 阿斯顿研制的第一台质谱仪

的电磁同位素分离器,为远离核性质的研究、新元素的合成鉴别和同位素的分离起到了不可或缺的作用。

近几十年来,质谱仪也成为鉴别反应产物离子的有力设备。例如法国的VAMOS++,将磁分离技术与位置灵敏的气体探测器、硅探测器结合,实现了离子的精确鉴别。随着不断地改进,对重碎片的

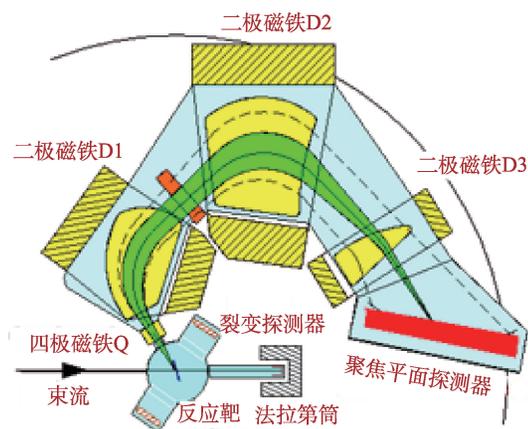


图 17 用于核反应研究的Q3D磁谱仪

鉴别能力达到4.5%(1/220),对轻碎片的鉴别能力达到9%(1/110)(图18)。

质谱仪配合飞行时间和能量损失方法,可以对高能裂变碎片进行有效的鉴别。例如,20世纪90年代,在利用高能弹核碎裂反应产生新核素(处于裸核状态)的实验中,就是利用这种方法鉴别反应产物的。根据设计参数,A/Z合适的产物核飞过磁

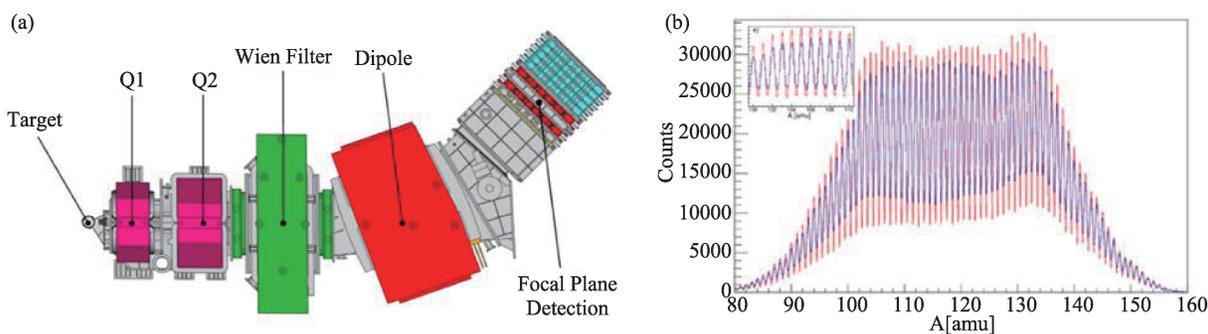


图 18 VAMOS++磁谱仪,及其对核碎片质量数鉴别的结果

谱仪,然后再穿过合适厚度的探测器,损失能量 $\Delta E$ ,同时利用时间探测器获得产物核在设定路径上的飞行时间(TOF)。这样就可以获得 $\Delta E$ —TOF图(见图19左)。从图中可以看到各种核素的分布,然后可以将其转换为 $Z$ — $A/Z$ 分布图(见图19右)。

**超重元素的鉴别方法** 超重元素合成中,由于其产生截面非常低,甚至一个月才能生成一个所期望的超重核素,同时还伴随有束流和巨大数量的非期望核素。因此,对超重核素的鉴别是一个艰巨的任务。为此,核物理实验学家不断地创新测量方

法,设计出新的鉴别设备。特别是德国GSI和俄罗斯JINR的核物理实验学家,很早就分别设计了电磁反冲核分离器SHIP和充气反冲核分离器DGFRS,作为超重核素进行在线分离的主要装置。其主要关键点是利用电场和磁场先将束流离子清除,再从剩余的产物核中将目标核分离出来,最后利用特殊的探测器系统确定目标核。

电磁反冲核分离器SHIP,也叫速度分离器,主要利用互相垂直分布的电场和磁场只让具有一定速度的反冲核通过,从而与其他不同速度的离子进

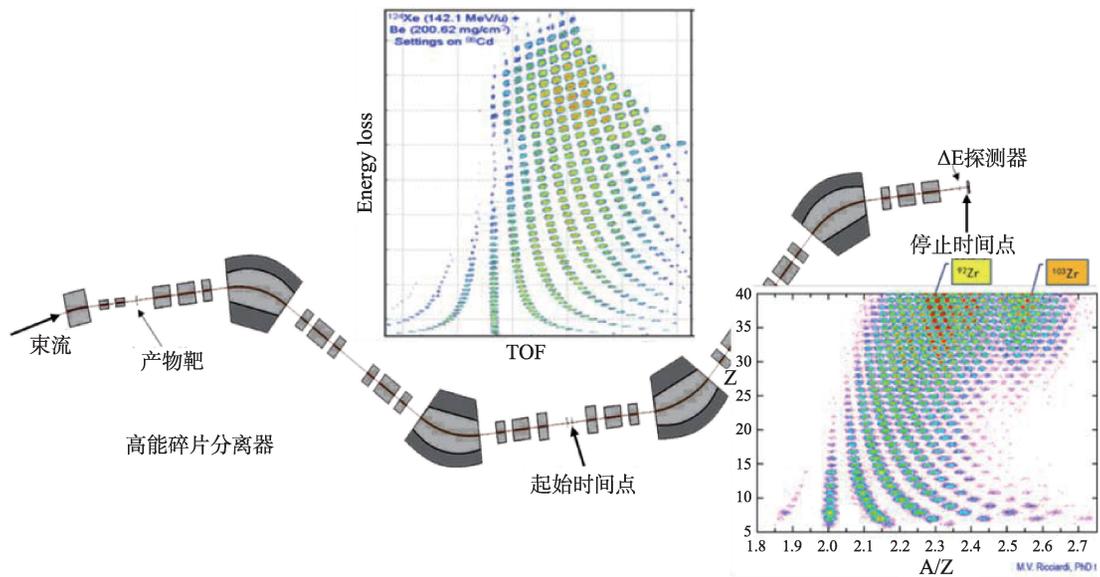


图19 弹核碎裂产物分离鉴别装置及其鉴别结果

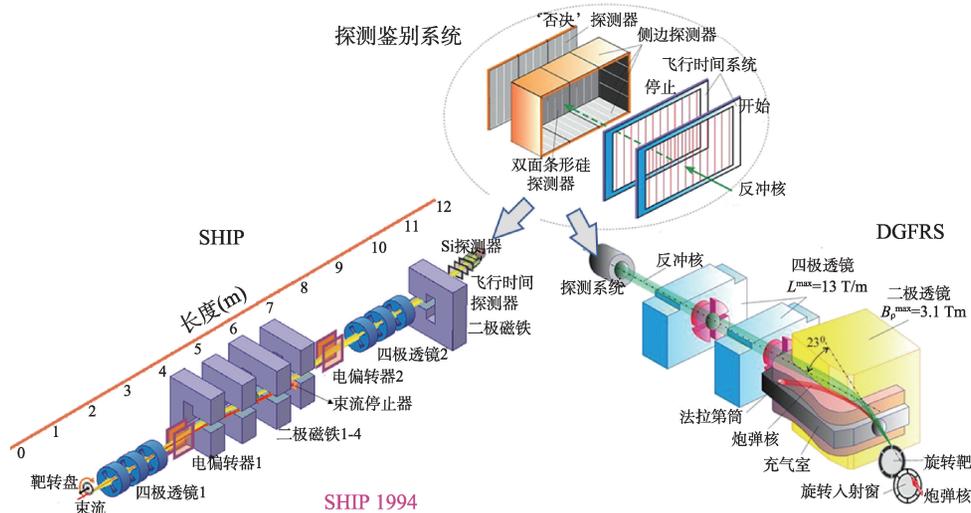


图20 超重核素合成的实验装置——SHIP(左)和DGFRS(右)示意图

行分离。而充气反冲核分离器 DGFRS, 则是在反冲核磁分离器的磁场真空腔内充进 1~2 毫巴压强的稀薄气体(多用氦气), 不同电荷态的反冲核在通过真空腔时, 会与气体分子碰撞, 达到一个平衡电荷态, 从而初步选择目标核。

不管是哪种超重核素的分离设备, 其末端都有一个复杂的探测鉴别系统。这个探测系统是依据一般超重核都是 $\alpha$ 衰变的特点设计的, 包含飞行时间探测器和五块高度位置灵敏的方形位置灵敏硅条探测器。利用这个探测系统测量目标核的飞行时间, 在探测器中的注入位置, 及其随后连续发射的几个 $\alpha$ 粒子的位置、能量和每两个之间的发射时间间隔。通过对这些数据的分析, 就可确定得到的母核是否是所希望的目标核。如对于 118 号核素  $^{294}\text{Og}$  的鉴别, 只要测量到了它的第二代、第三代,

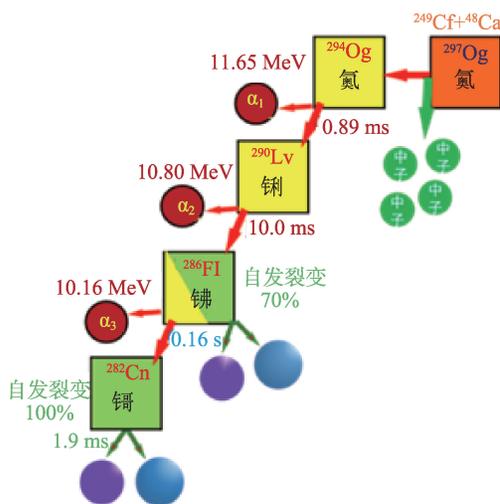


图 21 118 号元素的 $\alpha$ 衰变链

甚至第四代的衰变子核, 那么就可以根据一次 $\alpha$ 衰变中质子数减少 2、质量数减少 4 的规律进行反推, 从而对衰变的母核进行准确指认。

中国科学家在超重核研究领域也自主研发了充气反冲核分离器(SHANS1 和 SHANS2)。自从该实验装置建成以来, 进行了一系列有关重核和超重核衰变性质的实验研究工作。首次合成了  $^{204,205}\text{Ac}$ 、 $^{207}\text{Th}$ 、 $^{214,216}\text{U}$ 、 $^{219,220,222,223,224}\text{Np}$  等新核素, 并验证性地合成了 110 号超重元素  $^{217}\text{Ds}$ 。

**$\gamma$ 射线的测量方法** 当原子核处于高激发能级时, 就会通过发射 $\gamma$ 射线回到基态。通过测量这些退激发射的 $\gamma$ 射线, 可以得到原子核的许多信息, 如原子核的形变、原子核的结构等。 $\gamma$ 射线与介质相互作用的主要对象是电子, 作用过程可分为康普顿散射和光电效应。当 $\gamma$ 射线的能量大于两个电子的质量(1.022 MeV)时, 会产生正负电子对。通过光电效应和电子对效应可以测得伽马射线的全部能量。为了提高探测器对 $\gamma$ 射线的探测效率, 探测器介质的体积和原子序数要尽可能大, 以增加介质中的电子数量和密度。 $\gamma$ 探测器一般都是用金属外壳包裹, 不仅保护探测介质, 同时也阻止了较低能量的电子和较重的离子。早期主要用闪烁体探测器, 如 NaI(Tl) 探测器测量 $\gamma$ 射线, 其能量分辨率为 7% 左右。为了提高探测器的能量分辨, 研制出了高纯锗 $\gamma$ 探测器, 能量分辨率可达 2~3 keV。为了提高对高能 $\gamma$ 射线的探测效率, 采用了大体积的锗酸铋(BGO)闪烁体。为了研究短寿命核素的结构和

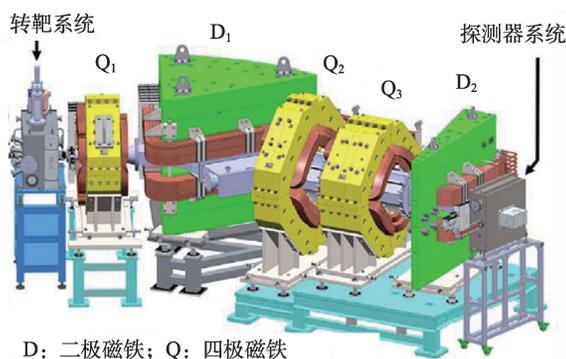


图 22 中国科学院兰州近代物理所研制的超重核鉴别设备 SHANS2



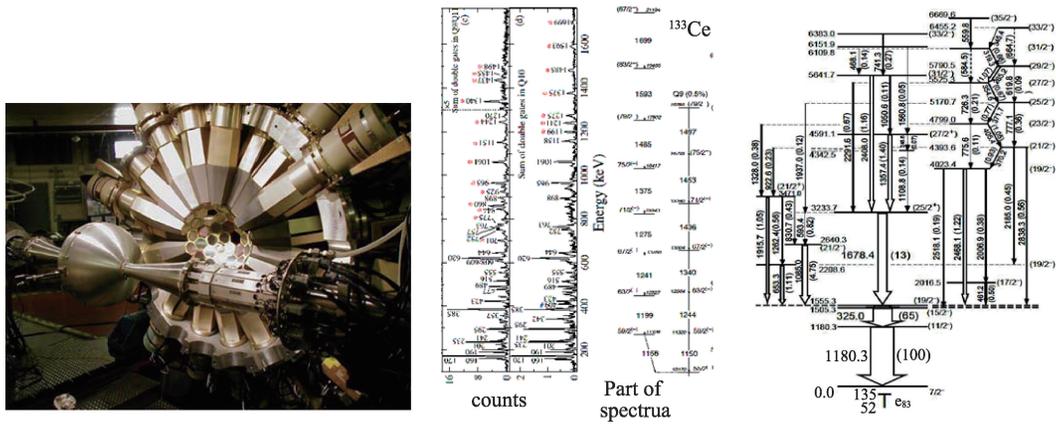


图23 GAMMASPHERE 探测装置与提出到的丰中子核的能谱

性质,实验学家设计了复杂的、几乎可以在 $4\pi$ 空间探测 $\gamma$ 射线的设备。例如美国伯克利实验室研制的GAMMASPHERE探测器,意大利实验室研制的AGATA $\gamma$ 探测器。这些设备都是由几十个 $\gamma$ 径迹探测器组成,不仅可以单独使用,而且也可以与离子探测器设备联合使用,以提高反应产物的鉴别能力。GAMMASPHERE的使用,将原子核的高自旋状态探测推到自旋值 $I=46$ 附近。同时利用此设备深入研究了铷-252裂变产生的丰中子核的核结构,获得了大量的结构信息。

**中子的测量方法** 原子核反应中,以及原子核裂变过程中都会发射许多中子,测量这些中子,对深入了解核反应过程和产物核的性质有重要作用,在核反应堆的研制中也极其重要。中子不带电,几

乎不能引起介质原子的电离。但是中子通过介质时与介质中的氢原子核(质子)碰撞,会将较多的能量转移给质子,而质子则会使介质的原子电离。有些原子核,如 $^{10}\text{B}$ , $^6\text{Li}$ , $^3\text{He}$ 等吸收中子后会发射带电粒子,继而引起介质的电离。有些原子核,如 $^{157}\text{Gd}$ (钆-157),吸收热中子(或低能中子)随后放出 $\gamma$ 射线的概率很大,有些重原子核,如 $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 等吸收热中子后的裂变截面很大。根据以上原理,制作出了不同类型的中子探测器,可以探测不同能量范围的中子。实验室中大多使用塑料(或有机)闪烁体探测器探测中子的产额或中子多重性(一次核反应中产生的中子个数)。也使用掺钆的液体闪烁体中子探测器。

核反应环境中会有大量的 $\gamma$ 本底存在,闪烁体

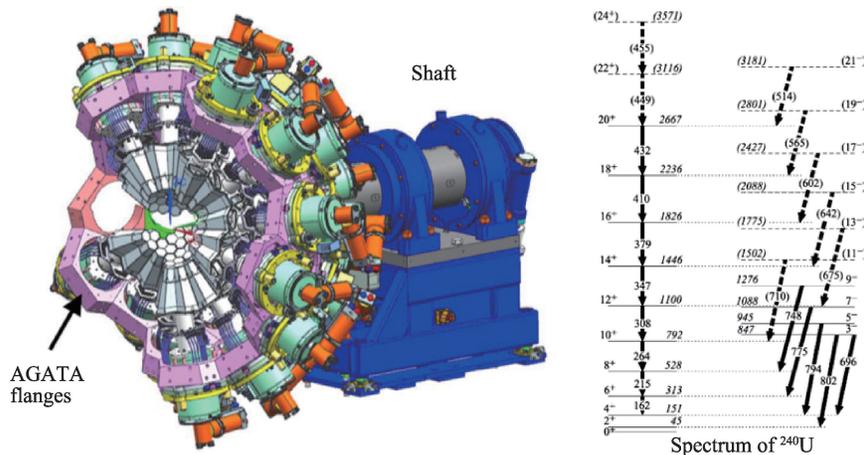


图24 AGATA  $\gamma$ 阵列探测器及其得到的 $^{240}\text{U}$   $\gamma$ 能谱

探测器测量中子时,同时也会记录 $\gamma$ 射线,从而会对中子的测量造成很大的影响。在测量中子时,常利用脉冲形状或脉冲电荷量分布的不同将 $\gamma$ 和中子区分开。 $\gamma$ 射线和中子在介质中产生的信号形状不同(见图25(a)),通过硬件和软件分析方法区分两种不

同形状的信号,进而将中子和 $\gamma$ 射线区分(见图25(b))。另外,还可以利用同时产生的 $\gamma$ 射线和中子到探测器的飞行时间差别,来鉴别它们。不过这种方法需要一个共同的起始时间信号,而且,飞行距离越长,鉴别能力越强。

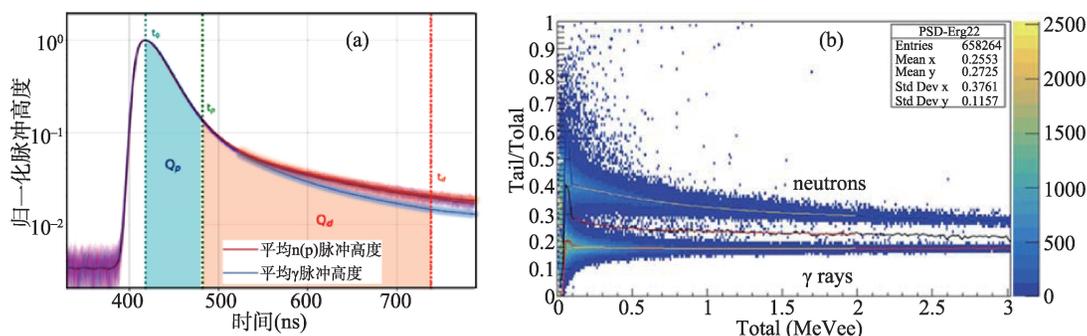


图25 中子与 $\gamma$ 脉冲形状和处理后的中子与 $\gamma$ 谱

近年来,有人也在探索直接利用如 $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ 晶体探测器测量中子。其原理也是利用CI吸收中子后发射带电粒子,从而产生电信号,以供测量和记录。

### 3. 原子核大小的测定

原子核的直径大约在 $10^{-14}$  m,这么小的尺寸是如何鉴定出来的呢?理论指出,稳定原子核的半径 $r$ 与核质量数 $A$ 的关系是 $\langle r^2 \rangle = \frac{3}{5} (r_0 A^{1/3})^2$ 。但是对不稳定核就会发生偏离,因此有必要对稳定的和不稳定的原子核的大小进行测定。

**弹性散射方法** 带电粒子在原子核上的散射是一个很好的工具。库伦作用使得入射核/离子在接近原子核时会发生库伦散射。但是理论计算表明,由于核力的吸引作用,接近到一定距离时,入射核/离子的散射就会偏离纯粹的库伦散射。因为核力的作用距离在2 fm( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ )之内,也就是说,两个原子核即将接触时,其库伦散射过程会发生畸变。当入射核能量确定后,与靶核的碰撞距离不同,入射核散射的角度也不同,利用在不同角度上测得的散射截面与相同角度上理论计算的纯库伦散射截面相比较(见图26),就可以确定原子核的库伦半径。经过大量的实验和理论研究,认为

当测得的散射角分布截面下降到纯库伦散射截面的25%时,这个角度 $\theta$ 所对应的碰撞距离, $R_{\min} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_c} \left[ 1 + \csc\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$ 即为两核的半径之和。这样确定的核半径会有一些的误差。实验中为避免离子在靶中的多重散射对结果产生影响,选用了尽

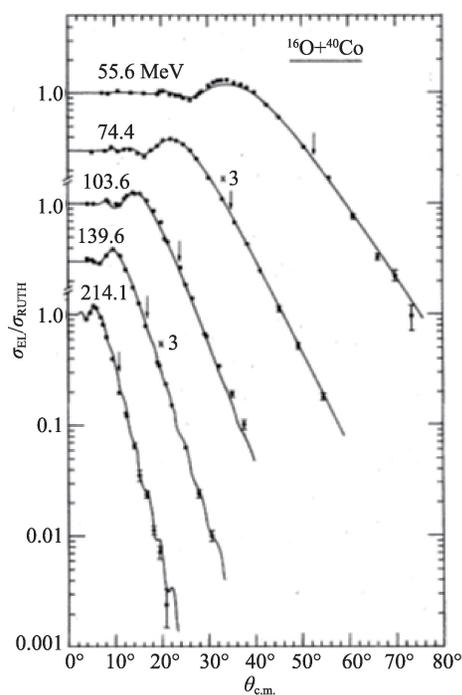


图26 原子核弹性散射角分布

量薄的靶子。入射离子可以选择一些较轻的核或者粒子,如 $\alpha$ 粒子,质子,中子, $\pi$ 介子等。

在研究奇特核性质中,常用测量反应总截面( $\sigma_r = \pi(R_1 + R_2)^2$ )的方法来确定它的核半径。实验中,鉴别出的奇特核穿过特定的靶(探测器作为靶子,以鉴别入射核)后,再测量其数目的变化,以确定有多少入射核与靶核发生了反应,即反应总截面。通过这种方法首次发现了一批具有晕结构的原子核。

**电子散射方法** 电子是一个点粒子,因此,电子在核上的散射也常用来确定原子核半径。一般是利用接近光速的电子轰击原子核,测得其衍射图像,据此确定核半径。从原理上讲,具有接近光速的电子,可以认为会像光一样具有一定的波长 $\lambda (=h/m_e v)$ ,如果利用波长等于或小于原子核大小的电束照射原子核时,就会发生衍射,其衍射图像符合 $\sin\theta = 0.61 \lambda/R$ ,其中, $R$ 是原子核的半径, $\theta$ 是衍射图像中第一条暗纹对应的角度。实验上测得高能,如1 GeV的电子( $\lambda \approx 1.2398$  fm)在原子核上的衍射图像,就可以根据上面关系确定原子核的半径。但是由于环境本底的影响,测量精度不是太高。为了精确测定质子的半径,科学家采用测量高能电子与质子碰撞时的电子约化碰撞截面随四动量转移平方 $Q^2$ 的变化。然后求出 $Q^2$ 趋近零时,质子的电四极矩 $G_E^p$ 随 $Q^2$ 的变化。根据 $\left. \frac{\langle r^2 \rangle}{6} = -\frac{dG_E^p(Q^2)}{dQ^2} \right|_{Q^2=0}$ ,  $G_E^p$ 随 $Q^2$ 的变化斜率则是质子的半径(见图27)。当然,实验测量是非常复杂的,涉及到入射电子与氢原子电子的碰撞,以及其他本底的贡献等一系列问题。

**激光光谱学方法** 由于原子的自旋与原子核的自旋有相关性,使得原子精细光谱的变化可以反映出原子核一些性质,如原子核的自旋、电磁矩和电荷半径等的变化。因此,早在20世纪70年代就创建了激光光谱学的方法,测量原子或离子能级的超精细谱结构及其随同位素的移动,从而获得原子核的性质变化。几十年来,激光光谱学技术不断发展,测量精度也不断提高。到目前为止,利用激光光谱学的方法对1000多个原子核,包括大量的远离稳定线原子核的性质进行了测量(见图28红、蓝、绿颜色)。

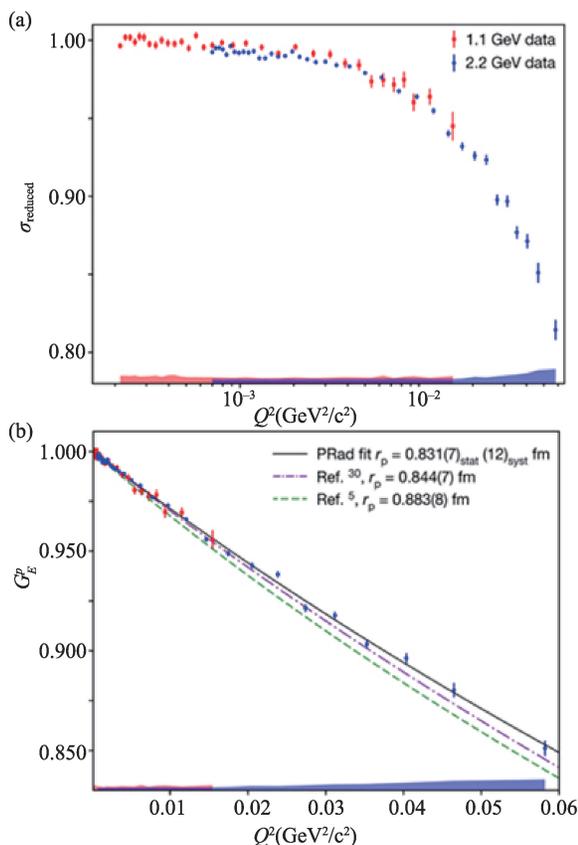


图27 1 GeV电子在质子上的约化散射截面及中子电四极矩随 $Q^2$ 的变化

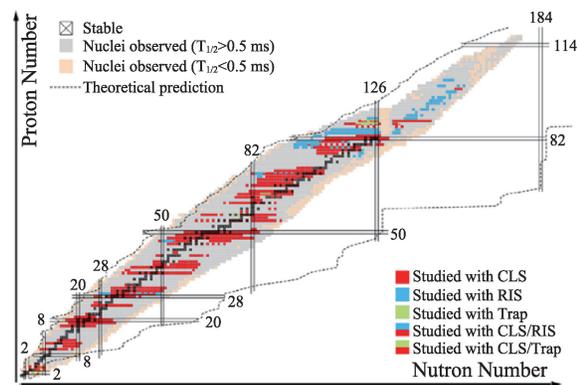


图28 利用激光光谱学的方法测量过的原子核分布

下面作为例子,简单介绍一下如何利用激光光谱学测量原子核半径的同位素移动。根据不同同位素 $A$ 和 $A'$ 之间光学跃迁频率的移动与其核半径变化的关系:

$$\delta\nu_{IS}^{A,A'} = K_{MS} \frac{M_A - M_{A'}}{M_A M_{A'}} + F\delta\langle r^2 \rangle^{A,A'}$$

其中, $M$ 是相应原子核的质量,在相对论效应可以

忽略的情况下,  $K$  和  $F$  是常数。因此, 通过测量不同同位素的超精细能谱的中心频率与参考同位素原子中心频率的偏移  $\delta\nu_{\text{IS}}^{A,A'}$ , 从而推导出  $\delta\langle r^2 \rangle^{A,A'}$ 。如何测量  $\delta\nu_{\text{IS}}^{A,A'}$  呢? 在离子束与激光束共线(在同一条线上, 同向或反向运动)的测量方法中, 首先选择接近超精细共振能级能量的激光频率  $\nu_0$ , 并将这一频率固定。由于多普勒效应的存在, 运动的原子或离子与激光光子相互作用时, 感受的光子能量与光子的原始能量有一定差别。通过调节原子或离子束的能量(速度), 或者调节激光的频率, 直至其超精细共振能级与其感受到的激光频率产生共振, 从而被激发。多普勒移动频率为:

$$\nu = \nu_0 \times \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1 \pm \beta}, \quad \beta = \frac{v}{c} = \frac{m^2 c^4}{(E + mc^2)^2}$$

其中,  $\nu_0$  是激光原始频率,  $m$  是原子(离子)质量,  $E$  是离子能量,  $+$  表示激光与离子束同向,  $-$  表示激光与

离子束反向。利用光电管测量退激发时发射的荧光。这样就可以得到原子的超精细光谱。通过对不同同位素超精细光谱的测量, 就可以获得它们之间的差别  $\delta\nu_{\text{IS}}^{A,A'} = (\nu^{A'} - \nu^A)$ 。

例如对  $^{62-80}\text{Zn}$  同位素的电荷半径移动的测量。离子源提供所需的确能能量的 Zn 同位素离子  $^A\text{Zn}^+$ , 同位素离子脉冲化后在电荷交换室内中性化, 并使其处于  $4s4p \ ^3P^o_2$  稳定能级, 同时, 共线激光的波长固定在  $480.7254 \text{ nm}$ 。然后调节离子速度, 产生多普勒移动共振激发将其激发到相应的  $4s5s \ ^3S_1$  能级。在电荷交换室外的光子探测设备对同位素退激发时发射的荧光进行测量。从而得到各同位素的多普勒移动频率的差别, 进而得到个同位素的半径移动, 如图 30。

总之, 近百年来, 在核物理理论的预言下, 实验物理学家不断创造出新的探测设备, 设计出新的实

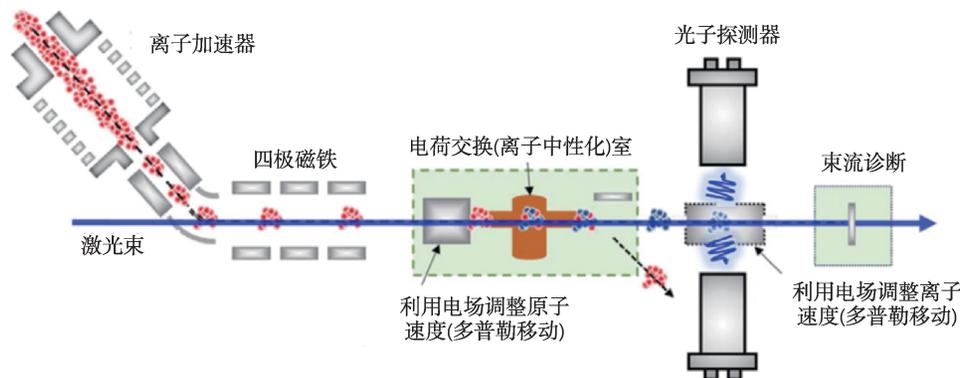


图 29 激光谱学测量装置

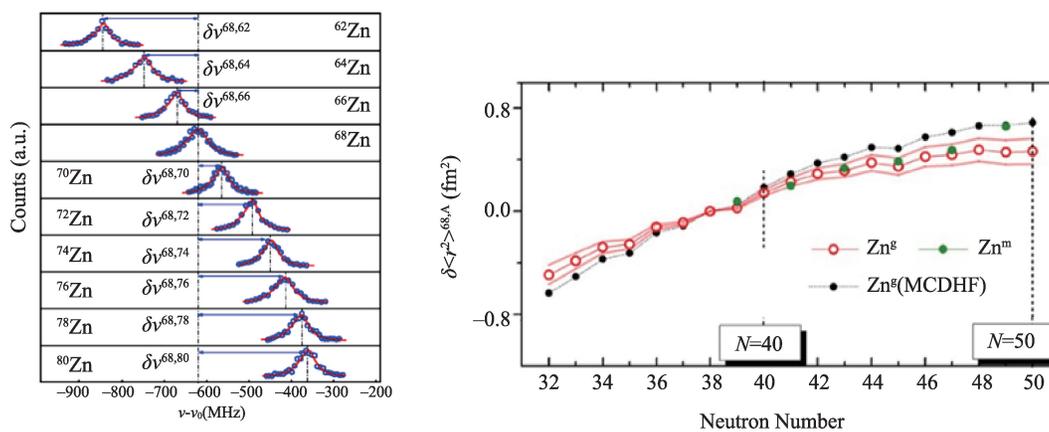


图 30 利用激光谱学方法测的  $^{62-80}\text{Zn}$  同位素的超精细谱频率移动及推导出的半径变化

验方法,加上核电子学的飞速发展,很好地测定了稳定原子核和远离稳定线原子核的各种性质。为了更深入地了解原子核物质性质,以及极端天体,如中子星的性质,需要在实验中对处于更高温度和更高密度的原子核物质性质进行深入研究,国际上许多实验室联合建造了几个大型的实验设备。利用这些设备,通过几十年的实验研究发现了新的物

质状态——夸克-胶子等离子,还对其性质进行了深入探讨。近二十年来,核理论学家根据原子核对称能的实验测量结果,预测了中子星的密度和大小,基本上与天文观测结果相符。今后,根据核物理发展的需求,还会创造出更多更好的实验设备和实验方法,以更精确地测量原子核,特别是非常远离稳定线的原子核性质。



## 她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋、科学正听和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2024年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:  
2010~2021年单行本每期10元;2022~2023年单行本每期15元;2010~2019年合订本每本60元。

### 订阅方式

- (1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。
- (2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识\*\*年\*\*期”)  
名称:中国科学院高能物理研究所  
开户行:工商银行北京永定路支行  
账号:0200004909014451557
- (3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;
- (4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;淘宝购买链接:



淘宝网购刊



微信购刊