

肖特基质谱仪*

戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 肖特基(Schottky)精密质量谱仪,是建立在 GSI 所(当今核研究的领导所)电子冷却存储环(ESR)上的精密质量谱仪,它对轻中量核与重核的测量精度 $\Delta m/m$ 分别达到 5×10^{-6} , 和 5×10^{-7} . 该谱仪为非阻挡型极灵敏的,甚至可测出一个裸核的测量设备,是冷却存储环束流诊断的可靠仪器,又是一台作核反应和核谱学研究的精密质量测定的谱仪.

关键词 肖特基精密质谱仪 电子冷却存储环

分类号 TL8

1 引 言

当代核物理研究开始摆脱核化学式的古老研究方法,进入了新型的大发展时期. 其中,一个引人注目的典型例子,就是建在 GSI 研究所的电子冷却存储环(ESR)上的肖特基质谱仪的成功使用^[1].

在 GSI 建造高能重离子加速器 SIS 及成功引出金束和铀束后,就把核放到运动坐标系中进行研究,这是核物理研究中一次重大的进步. 例如,过去中子使铀裂变,核化学家把碎片作化学分离,用 γ 探测器测量碎片的 γ 谱,从而得到一些核素的质量和半衰期等数据. 如今,用单核子能 250MeV 的铀束打靶,铀碎片都以 22cm/ns 的速度飞行,用电磁分析仪和位敏探测器,且结合飞行时间可十分清晰的以(A,Z)分出各种核素. 例如,首次使用这种方法一次就发现 50 个新核素.

继续用金和铋束打靶后,将其飞行的质量数大于 150 的重核素束送入电子冷却存储环中,经 20~30s 对这些束冷却后,用肖特基精密质量谱仪作分析,就出现奇迹:记录了 280 个核素,其中 90 个新核素是首次测出的. 这么多的不稳定核素,仅在三次实验就同

时记录下来,发现核素密度之高和数据的可靠性,是任何其它设备都无法比拟的. 加之 GSI 近年发现的 110 号与 112 号新核素、双 50 壳核¹⁰⁰ Sn 的合成及同核异位裸核的 β 衰变反置等研究成果表明:核物理因设备更新使得发展进程加快,这是一个令人关注的事例. 为此,对肖特基精密质量谱仪和它的应用作一介绍.

2 肖特基质谱仪的原理

肖特基噪声和散粒噪声是电子管在高频使用时发现的^[2]. 肖特基噪声的一个主要性能是,噪声电流的均方值 $\langle i^2 \rangle = 2Iedf$. 在此,平均电流 $I = Ne$, e 为电子电荷, N 为电子数, df 为所选频段.

电子冷却存储环上肖特基质谱仪的信号是束流在两片十分靠近金属窄板间穿过时感应的信号. 这对金属板称作拾取单元,带电荷 Ze 的束流离子在存储环中转一圈的时间为 T ,它是肖特基质谱仪信号的周期,通常在 10^{-6} s 量级;回转频率 f 和圆频率 ω 有 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ 的关系. 如环中仅一个离子, f 则是它每秒穿过拾取单元的次數. 这时肖特基

信号的均方值与 $2(Zef)^2$ 成比例, 所以对高 Z 离子更灵敏, 信号与噪声比和 Z^2 成正比. 肖特基信号中含有周期性, 其在 t 信号的乘积, 或关联函数 $R(t) = \langle U(t) \cdot U(t+\tau) \rangle$, 若单个离子在冷却存储环转一圈的回转周期为 T , 则 $\tau = T, 2T, 3T, \dots, nT (-\infty < n < +\infty)$ 时将出现肖特基信号.

实际工作时, 将从电子冷却存储环上肖特基质谱仪的信号拾取单元(见图 1)得到的信号送到电子设备进行频谱分析. 信号拾取单元是共振单元, 将其调谐到选定的频段, 以遏制噪声, 增加信噪比. 肖特基质谱仪的信号经过低噪声预放大器(放大 45dB)得到一个频谱. 对此频谱的处理有两种方法. 一是直接送入扫频分析器, 称作射频接收机法; 另一是送入到混频器, 和超外差收音机类似, 与本机频率 32.342MHz 混频, 得到低频为 100kHz 或 200kHz 的差频信号. 对差频信号作快速富利叶变换(FFT), 并且将它数字化, 得到肖特基谱, 如图 2 所示.

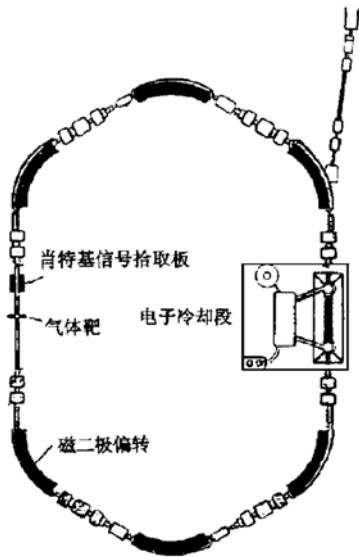


图 1 电子冷却存储环上肖特基质谱仪的信号拾取单元

单个离子若偏离中心轨道, 就会使肖特基谱存在线宽. 更何况若有 10^8 个离子在存储环中, 它们的速度无论在纵向或横向都有一些差别, 则肖特基谱很宽. 谱宽的 FWHM 相对值为

$$\begin{aligned} \delta f/f &= n\delta f/nf = \eta\delta p/p \\ &= \delta p/p(1/\gamma^2 - 1/\gamma_i^2) \end{aligned}$$

这里 γ 是相对论罗伦茨因子, 它由离子速度 $\beta = v/c$ 确定. γ_i 由存储环的磁场和注入条件所定, 是一常数. 电子冷却下 dp/p 将减小到 5×10^{-7} , γ 值也向 γ_i 趋近(通常 $\gamma < \gamma_i$); 而使 η 趋于零, 则肖特基谱变得非常窄, $\delta f/f$ 达到 2.5×10^{-7} 水平. 色散达到一级色散量级, 这时相对频宽为

$$\Delta f/f = -1/\gamma_i^2 [\Delta(A/Z)(A/Z)]$$

式中用原子序数 Z 代替电离电荷 Q , 通常存储的离子 Q 都很接近 Z 值.

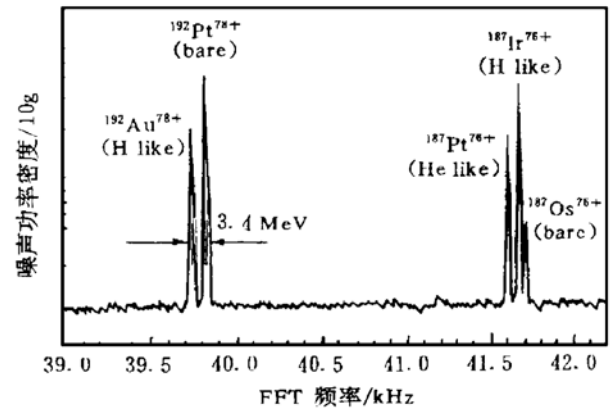


图 2 质量与电荷各为(197, 78+)和(187, 76+)的两组肖特基谱

3 肖特基质谱仪(高分辨重离子谱仪)的应用

质量分辨 $\Delta m/m$ 赖于质量数, 目前对于质量数 200 的核达到 5×10^{-7} , 而对于质量 50 的核达到 5×10^{-6} . 肖特基质谱仪最先的功绩是从实验上确定了裸核的 β 反置现象^[3]. 中性 ^{163}Dy 是稳定核, 天然丰度为 25%, 而全裸核 $^{163}\text{Dy}^{66+}$ 则通过 β_b 衰变到 $^{163}\text{Ho}^{66+}$; 这时衰变的电子添到 $^{163}\text{Ho}^{67+}$ 的 k 壳. 要知道中性 ^{163}Ho 核作 ϵ 俘获到 ^{163}Dy , 半衰期 33 年. 实验是把 $^{163}\text{Dy}^{66+}$ 注入到存储环中, 经一段时间后观察 $^{163}\text{Ho}^{67+}$ 的生长, 以确立 $^{163}\text{Dy}^{66+}$ 作 β_b 衰变的半衰期, 实验得到的半衰期为 51 天.

第二类应用, 是新核素的发现与衰变系列的测定. 通俗的说, 肖特基质谱仪可以拍照

核素家族的全家福照片或肖特基谱线. 从图 2 可以见到 $A=187$ 和 $A=192$ 的同质异位态:前者是祖父 (^{187}Pt), 父亲 (^{187}Ir) 和儿子 (^{187}Os), 后者为另一家族, 是 ^{192}Au 通过电子俘获达到 ^{192}Pt . 这样核寿命限制:大于 20s, 主要受电子冷却时间 20~30s 的限制.

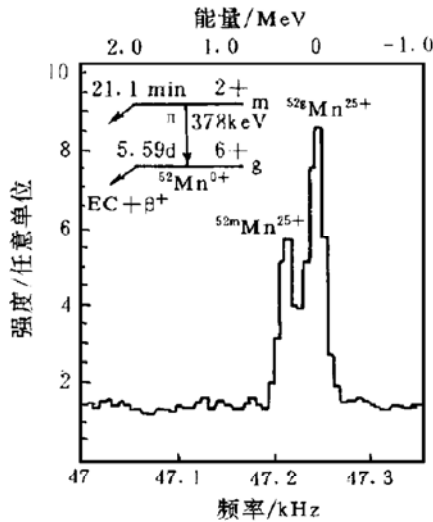


图 3 肖特基质谱仪测出的 ^{52}Mn 的基态和 364keV 同质异能态

第三类应用于核谱学. 图 3 中显示了用肖特基质谱仪测出的 ^{52}Mn 的基态和 364keV 同质异能态的谱线. 这时质量数为 52, 其质量分辨 $\Delta m/m = 0.5 \times 10^{-6}$ 对应 300keV, 对应于肖特基谱线间距仅 30Hz, 相当 2/3 的电子质量.

4 结束语

比起 $\Delta E-E$ 望远镜质量分辨 ($1.25 \sim 2$) $\times 10^2$, 肖特基质谱仪分辨要好 1 万倍, 它可与精密 Nier 质谱仪质量分辨相比拟, 见表 1. 肖特基质谱仪是建立在电子冷却存储环基础上的现代化的大型设备. 它对测量的对象并不阻挡, 仅仅采拾很弱的感应信号, 被测量后的核束还可用于核反应等其他目的. 这个特点是其他质谱仪无法做到的. 另一特点是待测核的超微量. 从表 1 可见, 仅仅一个 $^{183}\text{W}^{74+}$ 核也可以测出来, 竟达到 3.8×10^{-6} 精度!

表 1^[4]

核素	被测核存储数目	已公布的裸核质量 (amu) ^[5]	肖特基质谱测量值 (amu)
$^{197}\text{Hg}^{80+}$	4	196.923882(5)	196.924262(600)
$^{193}\text{Pt}^{78+}$	70	192.920733(3)	192.920805(109)
$^{190}\text{Ir}^{77+}$	20	189.918872(210)	189.918713(451)
$^{183}\text{W}^{74+}$	1	182.910101(3)	182.910014(678)

早年, 肖特基在电子管中发现的散粒噪声, 是白噪声, 是限制高频段灵敏度的主要障碍. 目前, 基于肖特基感应(周期性)而研制的肖特基质谱仪, 变消极为积极. 这时肖特基信号之中隐含了周期性的频谱, 只有在快速富利叶变换仪的分析和存储束的高度冷却下才能使其发挥效力. 有人担心存储环磁场的长期不稳定性, 会影响测量精度; 其实不然, 由于同时存在许多已知谱线, 它们可用作谱仪的瞬时校准, 所以使相对测量精度无影响.

参 考 文 献

- GSI-Nachrichten. The ESR Experimental Storage Ring: "Cooler" and Mass Spectrometer for Highly- charged Ions. 1996, 4: 8~12
- 赖祖武. 核物理电子学方法, 上海: 上海科学技术出版社, 1961, 88: 608~612
- 戴光曦. 裸核与重类氢离子研究. 核物理动态, 1996, 13 (1): 10; 实验原子核物理学. 北京: 原子能出版社, 1995, 74~76
- Schlitt B, Beckert K et al. Performance of Schottky Mass Spectrometry (SMS) at the ESR; GSI, Sci Rep, 1994, 242
- Audi G, Wapstra AH. Nucl Phys, 1993, A565: 1

Schottky Mass Spectroscope

DAI Guangxi

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract A Schottky precise mass spectroscope in light-medium and in heavier nuclei with the mass resolution of $\Delta m/m = 5 \times 10^{-6}$ or 5×10^{-7} , respectively, has been successfully built up and operated well at ESR (Experimental Storage Ring cooled by electron beam) in G SI, the leading nuclear research institute. The spectroscope is anon-stop of the beam type with quite sensitive, even one nucleus can be measured, set-up that is a beam diagnosis reliable instrument for the cooling beam in ESR, now it becomes a precise mass spectroscope for nuclear reaction and nuclear spectroscopy study.

Key Words schottky precise mass spectroscope storage ring cooled by electron

(上接第 226 页)

- | | |
|--|--|
| <p>11 Madsen J. Shell Model Versus Liquid Drop Model for Strange</p> <p>12 Satpathy L, Sahu P K, Maheswari V S Um a. Masses of Multiquark Droplets. Phys Rev, 1994, D49(9):4642 ~4648</p> <p>13 Chakrabarty S. Stability of Strange Quark Matter at T</p> | <p>$\neq 0$. Phys Rev, 1993, D48(3):1409~1417</p> <p>14 Benvenuto O G, Lugones G. Strange Matter Equation of State in the Quark Mass-density-dependent Model. Phys Rev, 1995, D51(4):1989~1993</p> <p>15 Parija B C. Collective Modes in a Strangelet. Phys Rev, 1995, C51(3):1473~1479</p> |
|--|--|

Multi—strange Nucleus

ZENG Yuexin PENG Guangxiong NING Pingzhus

(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract Can nucleus consists only of nonstrange nucleons (strangeness quantum number $S=0$)? Recent theoretical investigations suggest that in addition to known hypernuclei with $S=-1, -2$, there is existing possibility to produce multi-strange nuclear systems with $S \leq -3$, which may be conventional bound systems made up of A baryons (nucleons and hyperons) or more deeply bound many-body systems consisting of $3A$ quarks (u, d, s quarks) which are confined in a “bag”. These systems are underway or planned experimentally.

Key Words strange hadron cluster strange quark cluster