

原子核质量精密测量的研究进展*

孙保华^{1,†} 孟杰^{1,2,††}

(1 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院 北京 100191)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

摘要 原子核质量的精密测量是原子核物理学的重要课题之一,它对探索奇特原子核的结构和性质、重元素核合成之谜等均具有重大意义.文章简要介绍了原子核质量高精度测量的两个主要设备——储存环和潘宁阱,并回顾了近年来原子核质量精密测量在核结构、元素核合成、新同核异能素等领域中的研究亮点,探讨原子核质量测量的发展趋势.

关键词 原子核,精密质量测量,储存环,潘宁阱,元素核合成

Progress in precision mass measurements of atomic nuclei

SUN Bao-Hua^{1,†} MENG Jie^{1,2,††}

(1 School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Precision mass measurement of atomic nuclei is one of the most challenging and important tasks in nuclear physics. It plays an essential role in nuclear structure studies and in understanding the role of atomic nuclei in the cosmos. In this paper, two major facilities for precision nuclear mass measurements, storage rings and Penning traps, will be briefly described. The progress in direct mass measurements in recent years and the highlights of applications such as nuclear structure determination, nucleosynthesis, and the search for new isomers will be reviewed. Future trends of nuclear mass measurement will also be discussed.

Keywords atomic nuclei, precision mass measurement, storage ring, Penning trap, nucleosynthesis

1 引言

利用基本粒子的属性及其相互作用解释宇宙中众多纷繁复杂的现象是现代物理和天文学的主要成就之一,其中最成功的例子包括太阳发光,即恒星核反应理论的建立^[1].但是,宇宙中尚有太多的未解之谜有待解答,例如,从铁到铀这些重元素在宇宙中是怎样制造出来的?铁的含量为什么比其他大多数元素更多?彻底解答这些问题,需要对物质结构的一个关键层次——原子核进行大量系统和精密的研究,其中一个重要的方面就是原子核的高精度质量测量.

地球上约有 300 个金、铁等天然存在的稳定原

子核,但理论上认为存在的原子核可能超过 6000 个^[2].其中大部分原子核不稳定,通过发射电子(β^-)、正电子(β^+)、 α 粒子等衰变,因而也称为放射性原子核;由于具有极端的中子数-质子数比值,这些放射性原子核常表现出异于稳定核的结构和性质,故也被称为奇特原子核.比稳定原子核中子数少的原子核一般称为缺中子核,反之称为丰中子核.

类似于人类的指纹,如果测量精度足够高,原子

* 国家自然科学基金项目(批准号:10720003,10775004,10975008,10947149)、新世纪优秀人才支持计划资助项目、中央高等学校基本科研业务费专项资金资助项目
2010-08-23 收到

† Email: bhsun@buaa.edu.cn

†† Email: mengj@pku.edu.cn

核可依据其质量被准确鉴别出来. 原子核 $^A X$ 的质量, $m(Z, N) = N \times m_n + Z \times m_p - B(Z, N)/c^2$, 其中 Z, N, A 分别代表原子核的质子数、中子数和质量数, 且 $A = Z + N$; $m_n, m_p, B(Z, N)$ 分别为单个中子、单个质子的质量以及原子核的总束缚能; c 为光速 3.0×10^8 m/s. 按照爱因斯坦质能方程, $B(Z, N)/c^2$ 等价于 N 个自由中子和 Z 个自由质子形成原子核时所产生的质量亏损.

近 20 年来, 随着放射性核束装置和实验技术的发展, 原子核质谱仪已从最简单的电磁系统发展到实验环^[3,4] 和潘宁阱^[5] 等复杂的离子光学系统, 质量测量的精度也越来越高. 以稳定原子核 ^{28}Si 为例, 其质量测量的相对误差从 1937 年第一次测量的 2.1×10^{-5} 减小至 1995 年的 7.0×10^{-11} , 提高了近 6 个数量级. 上世纪 70 年代末, 科学家已经完成了 β 稳定线附近原子核的质量测量. 随后, 质量测量对象由稳定线附近的原子核延伸到远离稳定线的短寿命奇特原子核. 截止到 2009 年, 共发现了 3000 多个核素, 其中已测质量的原子核约 2300 个^[6]. 然而, 对于很多已知质量的原子核, 实验误差仍然较大, 针对各种重要的物理问题, 亟需提高实验精度. 目前对远离 β 稳定线奇特原子核的精确质量测量, 已成为研究晕核、双质子发射等新现象的必要手段, 也为更加详细地研究大量微观过程以及基本相互作用的机制提供了一条新的途径^[5]. 例如, 精确地测定放射性衰变中母核和子核的质量, 会促进对弱相互作用基本机制的认识; 精确地测定丰中子原子核的质量, 对于探索宇宙中重元素起源之谜这一重大基本问题具有关键意义. 原子核质量的精确测量也已经融入到现代物理学的许多研究领域中, 包括具体应用(如千克单位的定义, 自然常数的确定)和基础理论(如检验质量模型等)两个方面.

图 1 中总结了当前原子核质量精密测量的重要应用领域, 同时指出了应用在各个领域所需的测量精度 $\delta m/m$. 根据测量精度的不同, 原子核测量可用于探索物理等不同学科的重要课题. 例如, 在原子物理中, 为了检验量子电动力学, 相对测量精度应到达目前实验的极限 $\delta m/m = 10^{-11}$; 而 $\delta m/m = 10^{-6}$ 已可应用于核天体物理和检验原子核质量模型等前沿课题.

本文将简要介绍目前原子核质量测量的两个主要设备——储存环和潘宁阱, 着重回顾近 5 年来原子核质量精密测量在核结构、晕核、超重核、新的同核异能素、元素核合成等领域的研究亮点, 并探讨原子核高精度质量测量的发展趋势.

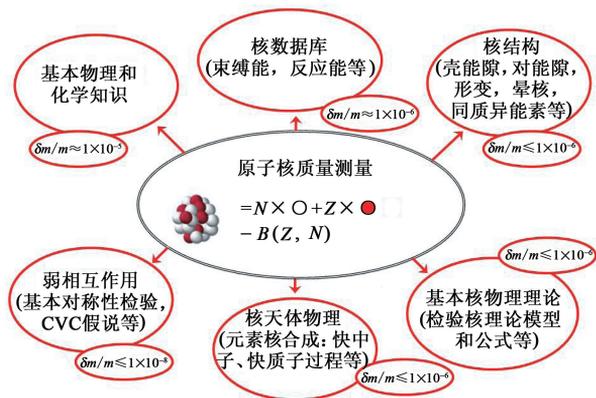


图 1 目前原子核质量精密测量的主要应用领域概述(其中包括应用于各个领域中所需的测量精度)

2 储存环和潘宁阱

目前世界上运行的精密质量测量设备主要分为两类: 储存环和潘宁阱(如图 2 所示), 主要分布在欧洲和美国. 2008 年前运行的储存环质谱仪只有德国亥姆霍兹 GSI 研究中心的 ESR, 它与高效的碎片分离器相连, 可以储存相对论能量下的全剥离或带少数几个电子的由氢至铀的所有元素. 利用 ESR 的这一特点, 发展了两种互补的质量测量方法, 即肖特基质量测量方法(SMS)^[7] 和等时性质量测量方法(IMS)^[8]. 目前肖特基质谱仪所达到的分辨率约为 10^6 , 测量的精度为 30keV ^[9], 然而肖特基质量测量方法局限于测量寿命长于秒量级的原子核质量. 等时性质量测量方法则是针对短寿命原子核质量的精确测量而设计的, 原则上可以测量寿命长于几十微秒的原子核的质量. 通过精确测量离子磁刚度(具有一定动量的带电粒子束对磁场强迫其弯转的“抗拒能力”称为离子磁刚度), 目前等时性质量测量方法所达到的分辨率约为 10^5 , 测量的精度为 100keV ^[10]. 相比其他方法, 基于储存环发展起来的两种测量方法具有以下优势: 例如, 具有单粒子灵敏度; 在一次实验中可以同时测量一个较大范围的原子核区; 并且可以同时研究所测量原子核的半衰期信息等. 2008 年, 我国“九五”大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环工程(CSR)通过了国家验收, 并实现了首次等时性模式下的质量测量^[11], 使兰州重离子加速器国家实验室成为国际上继德国亥姆霍兹 GSI 研究中心之后第二家具备这种能力的实验室. 目前在建和准备建造的储存环设备还包括德国 FAIR 的 NESR, HESR 和 CR.

与储存环设备相比, 近些年来潘宁阱质谱仪发

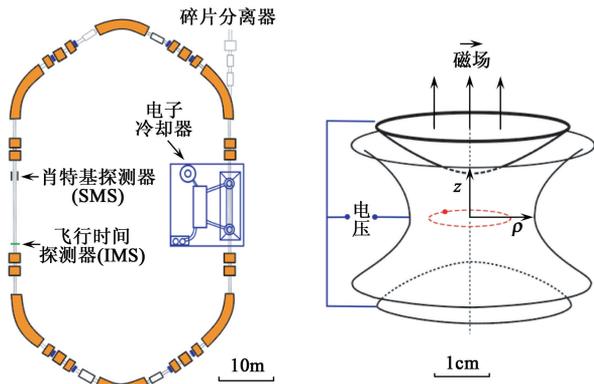


图2 两种原子核质量精确测量的设备示意图:储存环(左,以ESR为例)和潘宁阱(右)

展相当迅速,主要包括欧洲核子研究中心(CERN)的首个致力于原子核质量测量的潘宁阱设备 ISOLTRAP,2004 年投入使用的芬兰 Jyväskylä 大学的 JYFLTRAP,2006 年开始运行的美国 MSU 的 LEBIT,2007 年投入使用的德国 GSI 的 SHIPTRAP 等.在建和准备建造的潘宁阱设备还包括德国 GSI 的 HITRAP 和 MATS,德国慕尼黑大学的 MAFF-TRAP,日本 RIKEN 的 TRAP,以及法国 GANIL 的 SPIRAL2-TRAP 等.潘宁阱质谱仪的典型质量分辨率约为 10^6 ,测量的精度约为 $10\text{keV}^{[5]}$.

储存环和潘宁阱两种质谱仪的基本工作原理类似,即首先通过裂变、破裂或融合反应产生放射性次级束,在分离器中进行飞行或者在线分离出感兴趣的原子核,然后把待测离子注入实验储存环或者潘宁阱系统,并长时间束缚在其中,进而测量带电离子的飞行时间或回旋频率,最后用已精确测量的原子核定标,得到其他原子核的质量.

潘宁阱系统在现有方法中质量测量精度最高,典型的测量相对精度达到了 10^{-8} ,对于某些特定的长寿命原子核甚至可以达到 10^{-11} ;而储存环设备非常适于短寿命、产生率低的奇特原子核的大规模质量测量,目前的测量精度在 $10^{-6}-10^{-8}$,测量的灵敏度为单个粒子,原则上可以测量寿命长于几十微秒的原子核质量.因而,两种质谱仪在测量精度、测量对象等方面上互为补充.

3 研究进展

3.1 奇特原子核

大量研究表明,远离稳定线的原子核可能具有与稳定线附近原子核不同的结构和性质,而系统地测量奇特原子核的质量则是了解奇特原子核的最有

效途径之一^[12].此外,探索核素存在极限并进行精确质量测量一直是核物理研究的一个重要物理目标.过去的质量主要是通过 β 谱仪(如文献[13])等方法间接测量获得,然而由于它需要相关原子核详细的结构信息等,因此这种方法往往存在较大的系统误差.

近年来,高精度原子核质谱仪的发展加快了奇特原子核质量的测量进度.图3中总结了 $26 \leq Z \leq 56$ 区原子核质量的测量现状.从中可以看出,自2003年版原子质量评估(AME03)^[6]发表以来,利用储存环和潘宁阱对 $26 \leq Z \leq 56$ 区进行了大规模高精度的测量.其中约45个奇特原子核的质量为首次测量,另外还提高了约200个原子核质量的测量精度.相关的实验包括在GSI的等时性谱仪上完成的首次大规模丰中子原子核的质量测量^[10],以及利用ISOLTRAP, JYFLTRAP和SHIPTRAP等潘宁阱设备对丰中子和缺中子核区进行的系统的测量^[14-17].这些精密测量的原子核质量对于检验已有的原子核质量模型以及外推均具有重要意义.

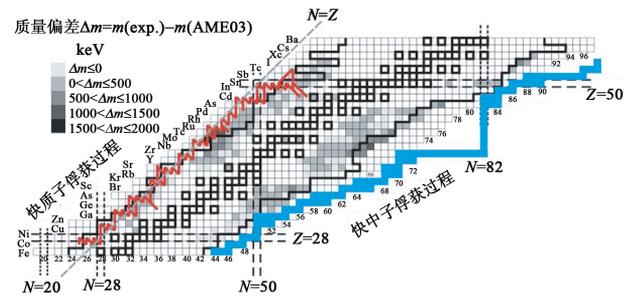


图3 $26 \leq Z \leq 56$ 区原子核质量测量的现状.空心方块代表目前已知的原子核.实线代表 AME03 中的实验测量边界.填充的方块代表最新的实验测量结果,颜色深浅代表与 AME03 中相应结果的差异($\Delta m = m(\text{exp.}) - m(\text{AME03})$).图中分别标记了快中子俘获过程^[19]和快质子俘获过程^[20],幻数以及 $N=Z$ 线.质量面的更新主要来自于 JYFLTRAP, SHIPTRAP, ISOLTRAP 以及 IMS 等相关实验

对于缺中子核区,目前的测量已经拓展到 $N=Z$ 线,主要进展包括利用潘宁阱设备首次测量 ^{70}Br (原子序数 35)的质量^[14],以及对 ^{54}Co (原子序数 27)^[15]、 ^{62}Ga (原子序数 31)^[16]和 ^{68}Se (原子序数 34)^[14]的重新测量.而且,还实现了质子滴线外原子核的首次直接质量测量.2007 年,在德国 GSI 的 SHIPTRAP 设备上开展的第一次实验中,测量了由铯(原子序数 65)到铊(原子序数 69)近质子滴线区 18 个缺中子原子核的质量^[17],其中 9 个为首次测量,并且证实 $^{144,145}\text{Ho}$ 和 $^{147,148}\text{Tm}$ 四个原子核处于质子滴线外,第一次确认了铱(原子序数 67)和铊同位素的质子滴线核分别处

在 $A=145-147$ 和 $A=149-151$. 在丰中子部分, 新测质量的原子核则主要集中在中子幻数核 50 和 82 之间, 非常接近于低中子密度条件下快中子俘获的演化路径^[18].

与 AME03 中收录的以往实验测量结果相比, 新测的奇特原子核质量一般较大(或束缚能较小). 以 ^{105}Nb (原子序数 41) 为例, 利用潘宁阱测量方法, 新测的质量比 AME03 中大 943(100) keV. 由于所有的原子核质量模型或公式均是基于已测的原子核质量, 因此过去对奇特核质量的系统低估可能会误导核质量模型, 给出一个不准确的同位旋依赖性. 这一因素的影响有待在将来的质量模型开发上进一步研究.

通过综合考虑实验质量系统趋势等因素, 在 AME03 中还外推了约 1000 个奇特原子核质量, 这些质量被广泛应用于奇特核结构以及元素核合成计算中. 与首次实验测量结果相比, AME03 中外推的结果同样显示出系统性地偏小, 例如利用潘宁阱测量方法, 新测的 $^{106,107}\text{Nb}$ 同位素质量比 AME03 中外推值分别大 905(100) 和 1205(400) keV.

3.2 晕核和超重核

在远离稳定线的原子核中, 存在与月晕类似的中子晕或者质子晕等奇特现象, 这些奇特原子核被形象地称为晕核. 作为一个弱束缚系统, 晕核的性质可对各种核模型提供非常有效的检验. 更为重要的是, 晕核提供了研究微观量子少体系统的一个绝佳实例, 因而对晕核结构现象的研究一直是实验和理论核物理学中研究的一个热点.

自上世纪 80 年代中期首次发现中子滴线附近轻核 ^{11}Li 具有很大的物质半径^[21] 以来, 核物理学家做了大量的实验和理论工作, 试图研究和理解 ^{11}Li 的结构特性和形成条件. 1987 年, Hansen 和 Jonson^[22] 首次提出晕核概念. 在他们的简单模型中, 把 ^{11}Li 中奇特核的物质半径与其最外层两个中子的弱束缚能(即双中子分离能 S_{2n}) 联系起来, 发现物质半径近似指数地依赖于 $\hbar/(2\mu S_{2n})^{1/2}$. 虽然随后发展了一些更为复杂和先进的物理模型, 但是 ^{11}Li 的束缚能一直是其中的一个关键参数.

近年来新实验技术的应用掀起了对晕核 ^{11}Li 研究的新高潮, 主要进展包括利用精密激光谱仪测定的电荷半径^[23] 和利用恒定质谱仪测定的软电偶极激发^[24]. 为了再现这两个实验结果, 许多理论模型均需利用 ^{11}Li 的双中子分离能 S_{2n} 来调整 ^9Li 与中子的相互作用(如文献^[25]). 2008 年, 首次利用潘宁

阱设备 TITAN 精确测量了晕核 ^{11}Li 的质量^[26], 这是迄今为止利用潘宁阱设备测量的寿命最短(8.8ms)的原子核. 与 $^{8,9}\text{Li}$ 结果相结合, ^{11}Li 的双中子分离能测定为 369.15(65) keV, 此精度比以往结果提高了 7 倍多(见图 4). 利用此结果, 通过同位素位移方法可进一步提取出 ^{11}Li 的电荷半径为 2.427(34) fm, 此结果表明, ^9Li 核心明显受到了核心外两个晕中子的扰动.

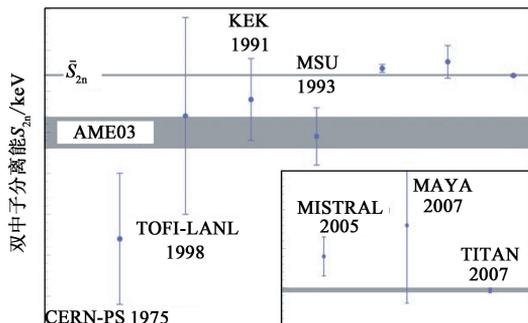


图 4 不同实验中得到的 ^{11}Li 双中子分离能(本图摘自文献^[26])

相对于最轻晕核, 近年来另外一个重要进展是, 首次成功地实现了超铀系元素的直接质量测量. 由于超重原子核极低的产生率, 超重元素的合成一直是物理学界具有挑战性的课题之一. 然而, 长期以来, 超重元素的鉴别及稳定性只能通过测量它们的 α 衰变链间接获得. 2010 年 2 月 Nature^[27] 上报了对 $^{252-254}\text{No}$ (原子序数 102) 开展的首例直接质量测量实验, 测量精度为 10 keV. 特别值得一提的是, ^{254}No 是利用质谱仪测量的质量最重的原子核. 该实验不仅开启了鉴别超重元素的一种新途径, 而且为探索超重核素的稳定性、检验核理论模型等均提供了非常重要的参照.

3.3 核结构信息

原子核质量的高精度测量一直影响着人们对于基本核结构的认识. 核物理发展早期的一个例子是质量过剩现象的发现^[28]. 质量过剩定义为原子核 AX 的质量 $m(Z, N)$ 与其质量数 A 的差值, 即 $D=[m(Z, N)-A]$ (单位为 keV), 它可通过原子核束缚能 $B(Z, N)$ 的知识来解释. 原子核的束缚能, 即 N 个自由中子和 Z 个自由质子形成原子核时所产生的质量亏损, 反映了束缚原子核系统内所有核子之间的各种相互作用的总和. 以自然界中最稳定的原子核 ^{62}Ni (原子序数 28) 为例, 它的质量比其组分(28 个质子和 34 个中子)的总质量略轻 0.545 GeV.

原子核系统中核子间的不同相互作用可以从相邻原子核质量提取出来, 如单核子分离能、双核子分

离能、对能隙、壳能隙等物理量,从而直接确定滴线核的确切位置,以及了解远离 β 稳定线的核结构性质.在2008年发表的IMS实验中,第一次测定了原子核 ^{83}As 的壳能隙,证实接近中子滴线时 $N=50$ 壳能隙是逐渐减小的^[10];稍后报道的JYFLTRAP实验^[29]进一步加深了对 $N=50$ 中子壳能隙的理解,发现壳能隙持续减小到 $Z=32$,而后在 $Z=31$ 开始增加,这暗示在 ^{78}Ni (原子序数28)中子壳将仍然很强.

远离 β 稳定线原子核的双核子分离能的不规则变化,通常暗示可能存在壳(亚壳)结构或形状相变^[30].最近对丰中子区Sr,Zr和Mo进行的高精度质量测量^[31],结果揭示了形变与束缚能间的强的关联,即形变的出现增加了奇特原子核的稳定性.

原子核质量甚至可以作为核结构研究中非常灵敏的探针.一个例子是最外层质子与最外层中子间的平均相互作用 δV_{pn} ^[32],对于偶偶核 δV_{pn} 可从如下公式提取:

$$\delta V_{pn}(Z,N) = 1/4\{[m(Z,N) - m(Z,N-2)] - [m(Z-2,N) - m(Z-2,N-2)]\}.$$

在壳模型框架下,幻数核附近的 δV_{pn} 值可以通过最外层质子和中子间的轨道重叠理论来解释^[33].与粒子-空穴的情况相比,单粒子结构为粒子-粒子或空穴-空穴原子核的 δV_{pn} 值较大,而且原子核的集体性质也与 δV_{pn} 值有着明显的关联^[34].最近的研究还表明, δV_{pn} 或许也可作为八极关联的探针^[35],然而此结论仍有待实验检验.图5是从实验中提取出的质子幻数为82和中子幻数为126附近的 δV_{pn} 值.其中 ^{210}Pb (原子序数82) δV_{pn} 值取自2009年报道的储存环实验^[36],此结果首次证实了如上所述的重叠理论.

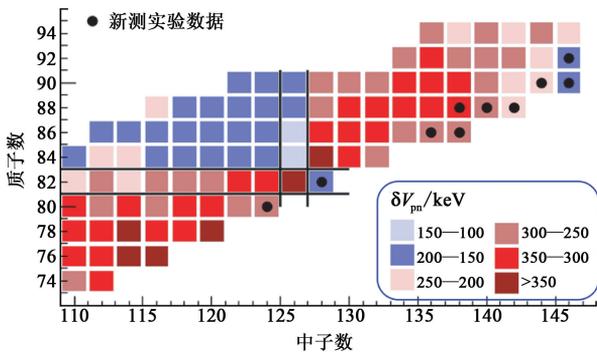


图5 质子幻数82和中子幻数126附近的 δV_{pn} 值(本图摘自文献^[36])

3.4 新同质异能素,新同位素

作为一个复杂的量子多体系统,原子核激发后,由于未配对核子的角动量耦合、形状演变等因素,可

以形成一些长寿命的亚稳态,即同核异能态,其寿命甚至可达 10^{15} 年.事实上,同核异能态是研究原子核结构中的集体和单粒子效应的天然实验室.对整个核素图上同核异能态的系统研究,对于了解其产生、衰变机制以及检验理论模型等均具有重要意义.目前实验上已经鉴别了上百个寿命长于1s的同核异能态.另一方面,在恒星剧烈演化(如超新星爆发)等天文环境下,环境温度可以达到 10^9 K,此时同核异能态可以通过热激发过程与原子核基态相互交换,进而可能会影响最终的元素丰度分布乃至宇宙中元素核合成过程的时间尺度.

实验上,同核异能态的精确观测可能受其半衰期、激发能级以及产生丰度比等多重因素的制约^[37].几十年来,传统的 γ 谱仪作为研究同核异能态的唯一可靠方法,在原子核结构尤其是高自旋物理的发展中扮演着非常重要的角色.然而,由于原理的限制, γ 谱仪无法探测寿命长于秒量级的同核异能态.另一方面,随着原子核质量和电荷数的增加,中重原子核的内转换衰变逐渐成为同核异能态的主要衰变模式,因此相应的同核异能态也很难直接利用 γ 谱仪探测.

相对于传统的粒子鉴别(通过衰变或电离等方法),质谱仪具有探测单粒子的超高灵敏度、高精度和高分辨率等特点,因此这种方法尤其适合鉴别反应截面非常小的同质异能素,并测量其质量.近年的主要进展包括利用等时性谱仪鉴别的 ^{133}Sb (原子序数51)中一个半衰期短至 $17\mu\text{s}$ 的同质异能素^[38],这是迄今为止利用质谱仪鉴别的寿命最短的原子核同质异能素(见图6(b));利用LEBIT鉴别的 ^{65}Fe (原子序数26)的一个新的同质异能态^[39].对于寿命长于1s的同核异能态,直接质量测量方法甚至是目前的唯一可靠选择.利用肖特基质谱仪,首次鉴别了近质子滴线核 ^{125}Ce (原子序数58)的一个长寿命同质异能态^[40],测定的激发能为 $102(12)\text{keV}$ (见图6(a)).随着实验条件的不断提升,高精度质谱仪有望在不久的将来提供纯的同质异能素束流,这将为奇特核结构性质的研究开辟一条新途径.

除此之外,高精度质谱仪还在鉴别新的同位素方面取得了巨大成功.利用ISOLTRAP和肖特基质谱仪,分别首次鉴别了 ^{229}Rn (原子序数86)^[35]、 ^{213}Tl (原子序数81)^[41]、 ^{221}Po (原子序数84)^[41]、 ^{222}Po (原子序数84)^[41]、 ^{224}At (原子序数85)^[41]和 ^{236}Ac (原子序数89)^[41],得出了这些新同位素的质量和寿命.这些原子核对于质量和衰变模型的发展均具有重要意义.

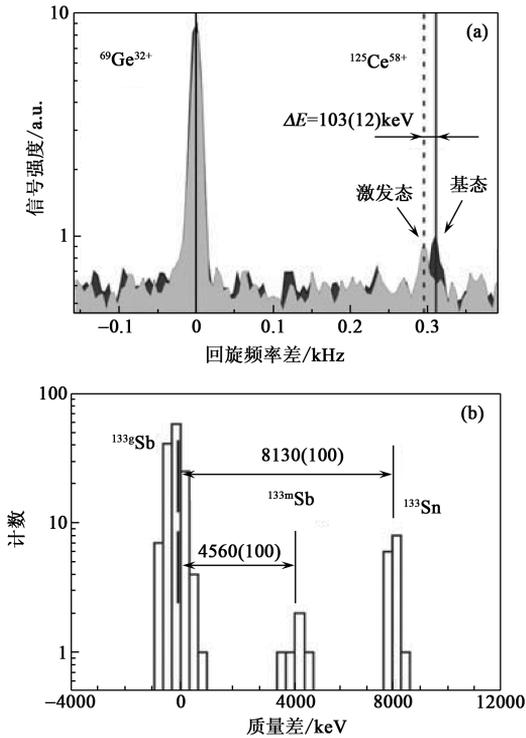


图 6 利用肖特基和等时性谱仪分别鉴别出的(a) $^{125}\text{Ce}^{58+}$ 中的一个长寿命的同核异能素;(b) ^{133}Sb 中一个寿命为 $16\mu\text{s}$ 的同核异能素. 本图摘自文献[37]

3.5 核合成研究

原子核质量测量与天体物理的紧密联系可以追溯到 19 世纪 20 年代. 当时, 英国科学家埃丁顿(Arthur Eddington)发展了一套数学模型, 利用已测的氢、氦等原子核的质量, 发现太阳通过聚变反应能维持数十亿年之久. 这是人类在理解太阳能之谜的征程上的一个重要进展. 随着天文学家们对恒星能源和演化等研究的不断深入, 逐步形成了一门新的学科——核天体物理学.

2003 年, 美国国家科学院设立的宇宙物理学委

员会, 总结了新世纪的 11 个重大科学问题, 其中的一个问题是“从铁到铀这些重元素是怎样制造出来的?”通常, 人们认为重元素可以在恒星内经由慢中子捕获过程, 或是在爆炸的环境下经由快中子俘获或者质子俘获等过程产生, 然而对这一机制的深入探索需要大量奇特原子核的物理数据[42], 其中质量是最为关键一个输入参数.

在一级近似下, 单中子、单质子分离能直接决定着快中子、快质子俘获的演化路径; 另一方面, 通过提供 β 衰变能、中子俘获等反应能, 原子核质量会影响相应的衰变寿命或反应截面的理论计算, 例如 β 半衰期近似指数依赖于衰变能. 大量的理论研究表明, 远离稳定线时, $N=82$ 和 126 处的原子核壳团簇的强弱直接决定了 $A=130$ 和 195 处丰度峰的大小[43], 同时, 较强的幻数特征将会导致在 $A=120$ 和 170 处的丰度低估[19, 44]. 然而快中子俘获路径上包括很多寿命短、产生截面极小的奇特原子核(见图 3), 由于实验条件的限制, 近期尚无法对这些原子核进行大规模、精确的质量测量.

相对于快中子俘获过程, 人们对质子滴线附近进行的快质子俘获过程有较深入的认识, 一般认为其发生的天文环境为孪生中子星引发的 I 型 X 射线暴[45], 而且目前的核物理实验也已经扩展到质子滴线附近(见图 3). 利用简化的 X 射线暴模型, 文献[20]指出, 快质子俘获过程(rp)最终会止于一个很强的锡—铟—碲(Sn—Sb—Te)循环, 这是因为碲元素(原子序数 52)的 α 衰变限制了质子俘获进一步形成较重核的过程. Sn—Sb—Te 循环还会强烈地影响 X 射线暴后的产物分布, 而且在 X 射线暴末期发射 α 粒子的同时, 会伴随着大量能量产生, 新产生的 α 粒子则可能通过 3α 过程消耗更多的氢, 进而为 rp 过程提供额外的种子核. 然

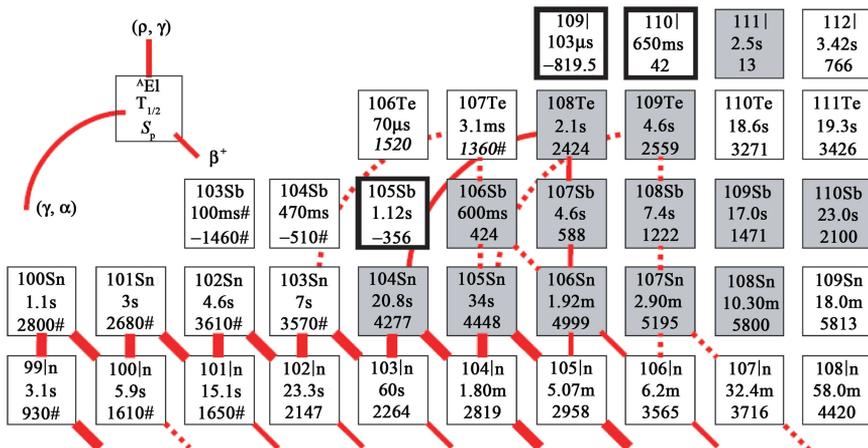


图 7 新测的缺中子锡—铟—碲原子核质量导致较弱的锡—铟—碲(Sn—Sb—Te)循环. 本图摘自文献[47]

而,在 X 射线暴天文环境下,快质子俘获是否可到达 Sn—Sb—Te 循环以及此循环的强度,则主要取决于近滴线区原子核的质量,尤其是缺中子锑原子核(原子序数 51)的单质子分离能.在过去的模拟计算中,相关核的质量、单质子分离能主要是基于 1995 年版质量表的实验外推^[46].2008 年,JYFLTRAP 课题组报道了新测的^{104–108}Sn、^{106–110}Sb、^{108,109}Te 和¹¹¹I 的质量^[47];相关快质子俘获计算表明,新测的原子核质量会导致 Sn—Sb—Te 循环减弱(见图 7).

3.6 理论模型和基本相互作用检验

由于缺乏对核力的精确认识以及多体系统的本身复杂性,目前原子核质量尚无法运用第一性原理精确计算,因而预言未知的原子核质量只能依赖于各种质量模型^[12].虽然许多理论模型已能较好地再现已测原子核的质量(对实验的均方根偏差在 600keV 左右),但是外推到远离 β 稳定线的原子核时,各个理论模型之间显示了很大的差异^[19];同时,对于新测的原子核质量,图 8 表明大多数质量模型或公式预言能力变弱(即 $R > 1$,其中 R 代表各个质量模型对新实验数据的标准偏差 $\sigma_{\text{mod}}(2001)$ 与对已有实验数据的标准偏差 $\sigma_{\text{mod}}(1995)$ 的比值).

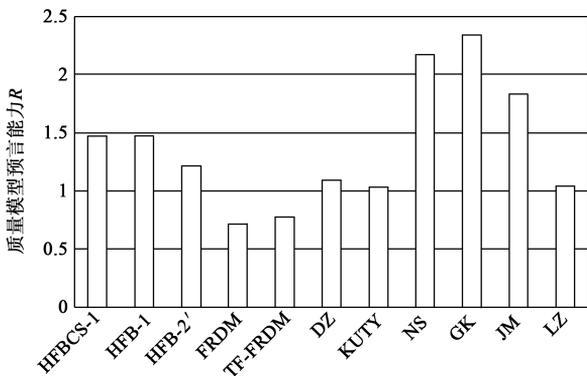


图 8 不同原子核质量模型或公式对新测原子核质量预言能力的比较(本图摘自文献^[12])

尽管如此,过去的数年间在构建基于自洽平均场的微观质量模型方面已经取得了丰硕的成果.通过拟合已测的原子核质量,并考虑了一些唯像的修正后,最新的 Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov 质量模型(HFB-17)^[48]已经完全可以和现存最好的宏观—微观模型^[49]相比,对实验的均方根偏差首次降到 600keV 以下.利用类似的方法,基于 Gogny 相互作用的 Hartree-Fock-Bogoliubov 质量模型^[50]对实验相应的均方根偏差也从 2MeV 降到约 800keV.另外,在相对论平均场框架下发展的点耦合质量模型^[51],通过拟合数十个球形核的质量,其预言能力

也从 2.2MeV 降到约 1 MeV.

除了对核理论模型等的推动外,高精度的质量测量还成功应用于检验基本相互作用和标准模型等粒子物理学和中微子物理学领域.例如,通过测量超允许 β 衰变的衰变能,可以得到弱矢量耦合常数并进而检验 CKM 夸克混合矩阵的幺正性^[52].

4 结论与展望

伴随着放射性束技术的发展,近年来高精度储存环和潘宁阱质谱仪已成功应用于超过 1000 个(约占所有已知原子核总数的 1/3)原子核的质量测量,典型的测量精度为 10—100keV,测量的对象从弱束缚的晕核到超重元素锘.这些高精度原子核质量对于相关的奇特核结构、核天体物理以及原子核理论的发展起到了非常关键的推动作用.

在下一代放射性离子束装置中,如德国 GSI 的 FAIR,法国 GANIL 的 SPIRAL2,日本 RIKEN 的 RIBF 以及美国的 RIA,奇特核束流的强度和品质都将获得大幅度的提升,这将极大地推动奇特核质量的实验研究.目前兰州大科学工程 CSR 已经成功出束,高精度的原子核质量测量也是其重要科学目标之一.

相信在未来很长的一段时间内,关于原子核质量测量方面的研究热点仍将集中在如下几个方面:

(1) 极丰中子原子核:其质量不仅会揭示出由于强的中子—质子比率所导致的新的核结构现象(如壳演化、“巨晕”现象^[53]),而且是破解宇宙中元素合成过程之谜的关键因素.然而,鉴于极丰中子原子核产生截面极小,寿命短,基于存储环发展的高灵敏等时性质谱仪将无疑会扮演更为重要的角色.

(2) 质子滴线附近原子核:对这些原子核开展高精度的质量测量,不仅会进一步完善人们对快质子俘获过程的认识,而且还是探索质子滴线附近奇特现象(如质子、双质子衰变)的必要补充.

(3) 稳定线附近原子核:在这方面,我们应致力于更高精度的实验测量,寻找长寿命的同质异能素,测量并选取合适的系统用于检验诸如基本相互作用等重要课题的研究.同时,这些原子核也将对奇特核的大规模质量测量提供更为可靠的参照.肖特基谱仪以及潘宁阱设备将会更充分地发挥其优势.

(4) 超重原子核:其主要研究目标将是与当前超重核合成研究相结合,例如直接测量 $Z = 116$ 原子核的 α 衰变链上的原子核质量.

参考文献

- [1] Bethe H A. *Phys. Rev.*, 1939, 55:436
- [2] Bohr A, Mottelson B. *Nuclear Structure*. Singapore: World Scientific, 1998
- [3] Bosch F. *Lect. Notes Phys.*, 2004, 651:137
- [4] Franzke B, Geissel H, Münzenberg G. *Mass Spectrom. Rev.*, 2008, 27:428
- [5] Blaum K. *Phys. Rep.*, 2006, 425:1
- [6] Audi G, Wapstra A H, Thibault C. *Nucl. Phys. A*, 2003, 729:337
- [7] Radon T *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2000, 677:75
- [8] Hausmann M *et al.* *Nucl. Instrum. Methods A*, 2000, 446: 569
- [9] Yu A Litvinov *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2005, 756:3
- [10] Sun B *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2008, 812:1
- [11] Xu H S *et al.* *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54:4749
- [12] Lunney D, Pearson J M, Thibault C. *Rev. Mod. Phys.*, 2003, 75:1021
- [13] Fogelberg B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82:1823
- [14] Savory J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:132501
- [15] Eronen T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100:132502
- [16] Eronen T *et al.* *Phys. Lett. B*, 2006, 636:191
- [17] Rauth C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100:012501
- [18] Sun B *et al.* *Int. J. Mod. Phys. E*, 2009, 18:346
- [19] Sun B *et al.* *Phys. Rev. C*, 2008, 78:025806
- [20] Schatz H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86:3471
- [21] Tanihata I *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 55:2676
- [22] Hansen P G, Jonson B. *Europhys. Lett.*, 1987, 4:409
- [23] Sanchez R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96:033002
- [24] Nakamura T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96:252502
- [25] Brida I, Nunes F M, Brown B A. *Nucl. Phys. A*, 2006, 775:23
- [26] Smith M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:202501
- [27] Block M *et al.* *Nature*, 2010, 463:785
- [28] Aston F W. *Proc. Phys. Soc.*, 1927, 115:484
- [29] Hakala J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:052502
- [30] Cejnar P, Jolie J, Casten R F. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 2155
- [31] Hager U *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:202501
- [32] Zhang J Y, Casten R F, Brenner D S. *Phys. Lett. B*, 1989, 227:1
- [33] Cakirli R B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94:092501
- [34] Cakirli R B, Casten R F. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96: 132501
- [35] Neidherr D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:112501
- [36] Chen L X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:122503
- [37] Sun B *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2010, 834:476c
- [38] Sun B *et al.* *Phys. Lett. B*, 2010, 688:294
- [39] Sun B *et al.* *Eur. Phys. J. A*, 2007, 31:393
- [40] Block M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100:132501
- [41] Chen L *et al.* *Phys. Lett. B*, 2010, 688:294
- [42] Burbidge E *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2007, 29:547
- [43] Arnould M, Goriely S, Takahashi K. *Phys. Rept.*, 2007, 450:97
- [44] Sun B, Meng J. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25:2429
- [45] Schatz H *et al.* *Phys. Rep.*, 1998, 294:167
- [46] Audi G, Berrillon O, Blachot J *et al.* *Nucl. Phys. A*, 1997, 624:1
- [47] Elomaa V V *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:252502
- [48] Goriely S, Chamel N, Pearson J M. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:152503
- [49] Möller P, Nix J R, Myers W D *et al.* *Atom Data Nucl. Data Tables*, 1995, 59:185
- [50] Goriely S, Hilaire S, Girod M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:242501
- [51] Zhao P W, Li Z P, Yao J M *et al.* arXiv, 1002.1789v1 [nucl-th]
- [52] Douysset G, Fritioff T, Carlberg C. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86:4259
- [53] Meng J, Ring P. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 80:460