

# 原子核质量的高精度测量<sup>\*</sup>

周小红<sup>†</sup> 颜鑫亮 涂小林 王猛

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 原子核的质量直接反映了核内强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的结果. 文章简要阐述了原子核质量测量的意义、现状和主要方法, 介绍了基于兰州重离子冷却储存环的原子核质量测量实验, 比较了首次得到的<sup>63</sup>Ge, <sup>65</sup>As, <sup>67</sup>Se 和<sup>71</sup>Kr 核质量测量值与理论计算结果, 探讨了<sup>65</sup>As 质量对天体物理快质子俘获过程的影响, 文章最后给出了今后的研究内容. 中国科学院近代物理研究所在轻质量丰中子区, 系统测量了从 Ne 到 Ca 核素的质量, 研究了  $N=20$  和 28 幻数随中子数和质子数变化的演化; 在丰质子区, 精确测量了快质子俘获路径上关键核素的质量, 为解释 X 射线暴等爆发性天体过程提供重要的质量数据; 在中重丰中子区, 系统地测量丰中子核质量, 通过天体网络计算模拟超新星爆发中的快中子俘获过程.

**关键词** 原子核质量, 综述, 冷却储存环, 快质子俘获过程

## Precise mass measurement of nuclides

ZHOU Xiao-Hong<sup>†</sup> YAN Xin-Liang TU Xiao-Lin WANG Meng

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

**Abstract** The mass of atomic nuclides reflects directly the sum effect of the strong, weak and electromagnetic interactions among the participating nucleons. A brief description of the importance, history and current status of nuclear mass measurements is given. With the recent commissioning of a cooler storage ring at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, the masses of <sup>63</sup>Ge, <sup>65</sup>As, <sup>67</sup>Se and <sup>71</sup>Kr have been measured for the first time. The values have been compared with the theoretical predictions, and the implication of the <sup>65</sup>As mass in the astrophysical rapid proton capture process has been addressed. Future research plans are presented. In the light mass region, precise mass measurements of the neutron-rich isotopes from Ne to Ca will be carried out, and the evolution of the  $N=20$  and 28 shell closures studied while changing the neutron or proton numbers. In the proton-rich mass region, measurements will focus on the nuclei located in the path of the rapid proton capture process in stellar nucleosynthesis, and this can improve our understanding of explosive astrophysical phenomena, such as Type I X-ray bursts. In the medium-heavy neutron-rich mass region, systematic mass measurements will be performed, and the experimental data will serve as important input in the theoretical simulation of the rapid neutron capture process in the explosion of supernova.

**Keywords** nuclide mass, review, cooler storage ring, rapid proton capture process

## 1 引言

质量是原子核最基本的性质之一, 它直接反映了核内强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的结

果. 基于原子核的质量测量结果, 人们解决了物理和化学上的一些重大的科学问题. 1912 年, 诺贝尔物理

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号: 11035007)资助项目  
2010-06-13 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: zhx@impcas.ac.cn

学奖获得者汤姆孙教授利用质谱仪发现了同位素的存在,确定了氖元素存在 $^{20}\text{Ne}$ 和 $^{22}\text{Ne}$ 两种同位素<sup>[1,2]</sup>.根据它们在氖气中的比例约为10:1,得到氖元素的平均原子量约为20.2.随后,英国物理学家阿斯顿研制了聚焦性能较高的质谱仪,测定了自然界存在的几乎所有元素的同位素<sup>[3,4]</sup>.实验结果表明,同位素是一个普遍存在的现象<sup>[3,4]</sup>.阿斯顿在71种元素中发现了202种同位素<sup>[3,4]</sup>.由于阿斯顿的杰出工作,人们发现元素具有非常丰富的内容.基于对大量同位素质量的测量,阿斯顿获得了1922年的诺贝尔化学奖.通过分析阿斯顿得到的实验数据,人们认识到在原子核中每核子的平均束缚能近似为常数,约为8MeV.这揭示了核子间强相互作用的饱和性,导致了原子核液滴模型的建立<sup>[5]</sup>.同位素质量的测量还解决了一个长期争论而又迷惑不解的问题,即在元素周期表中,钾和氩、钴和镍、碲和碘不是按原子量的大小顺序而是颠倒顺序排列的.回顾历史,系统的核素质量数据是核物理发展史上里程碑式重大发现和进展的基石,例如壳模型的建立、奇异衰变模式的预言和新对称性的确立等等.此外,核天体物理对宇宙演化和元素合成过程的研究也强烈依赖于精确的原子核质量数据<sup>[6-8]</sup>.因此,原子核质量测量结果极大地促进了人类对微观和宏观世界的认识.

经过近一个世纪的努力,人们发展了各种直接和间接的原子核质量测量方法,已比较精确地测量了稳定核及靠近稳定线核素的质量<sup>[9]</sup>.但是,在远离稳定线核区,特别是在极丰中子核区,由于产生机制和原子核短寿命等因素的限制,精确的原子核质量测量依然是对实验工作的挑战.目前,世界上各大核物理实验室都在研制新的实验装置,发展新的测量方法和技术,以期能够精确测量质子滴线附近核素和极丰中子核素的质量.在远离稳定线的原子核中发现了许多令人激动的物理现象,例如,原子核基态的双质子衰变、传统幻数的变化、中子晕等<sup>[6-8]</sup>.这些新现象的理论准确预言和解释都需要原子核的精确质量实验数据.测量短寿命原子核的质量,可以提供原子核存在极限最直接的证据,能够揭示远离稳定线时原子核壳层结构、对能、形状等的演化;系统的原子核质量数据是多种理论模型最重要的输入参数.

在核天体物理学中需要对各种核合成过程进行合理的描述,理论描述的可靠性和准确性高度依赖于不稳定核素的基态质量和寿命等关键实验数据.精确的原子核质量实验数据对天体核反应率的估算和原子核转换的动力学计算,进而对理解宇宙中元

素的丰度分布是极其重要的<sup>[6-8]</sup>.但是,快质子俘获过程涉及的一些关键丰质子核素的质量数据精度不够,快中子俘获路径上很多核素的质量是未知的,因此,核天体物理学不得不采用理论模型计算的原子核质量.高精度的质量测量数据还广泛地应用于检验基本相互作用、中微子物理和标准模型等物理学领域<sup>[6-8]</sup>.目前,所有计算原子核质量的模型和公式都是通过拟合已测的原子核质量,外推得到未知的原子核质量.各个理论模型能够很好地再现实验已测的原子核质量,但外推到未知质量的远离稳定线原子核时,不同模型间差异很大.为了检验理论模型和进一步地改进模型的预言能力,就需要在实验上获得那些尽可能远离稳定线核素的质量.

## 2 原子核质量测量现状

自然界存在的稳定核素不到300个,大量的同位素是在实验室利用核反应合成的.理论预言可能存在约6000—8000种原子核<sup>[6-8]</sup>.目前,实验上已合成了约2970种原子核,并测量了其中约2350种核素的质量<sup>[9]</sup>.可见,大量原子核的质量有待实验测量.另外,对于很多已知质量的原子核,实验测量结果误差较大,不能满足物理要求,亟需高精度的实验结果.图1是至2003年原子核质量测量的状况.图中给出了理论预言的质子和中子滴线位置( $S_p=0$ 和 $S_n=0$ )<sup>[10]</sup>,以及快中子俘获路径(r-process path)<sup>[11]</sup>.

原子核质量测量有间接测量和直接测量两种方法<sup>[12]</sup>.通过测量原子核的衰变能或核反应的Q值,得到原子核间质量差异,从而可以利用已知原子核质量来确定未知原子核质量,这种方法称为间接测量;以精确测量的已知原子核质量作为参考,得到未知原子核质量的方法为直接测量.系统的原子核质量数据主要是利用直接测量方法得到的.1970年代,已经完成了稳定线附近核素的质量测量.近30年来,世界范围内建立了一批强流重离子加速器系统,研制了先进的质量测量实验设备,在不稳定核素的质量测量方面取得了巨大成功,使原子核质量测量进入了短寿命不稳定核区.目前,未知质量核素主要位于中重质子滴线区、丰中子核区和超重核区.在这些核区,原子核普遍具有很短的寿命,并且在现有的实验装置上产额很低.因此,测量远离稳定线短寿命核素的质量是对实验工作的挑战.目前,远离稳定线核素的产生方法主要有重离子诱发的熔合蒸发反

应、中高能弹核的碎裂反应和重核的裂变等<sup>[6-8]</sup>. 测量装置主要有飞行时间谱仪、离子阱和储存环等<sup>[13-15]</sup>. 飞行时间方法也称为  $B\rho$ -TOF 方法, 是在同样的磁刚度下, 同时测量一批已知质量的原子核与未知质量的原子核在特定距离的飞行时间, 通过比较得到未知质量原子核的质量. 典型的实验装置为法国 GANIL 的 SPEG 和 CSS1-CSS2<sup>[13]</sup>. 这种方法有很高的灵敏度, 但受限于飞行距离, 精度不是太高. 利用离子阱技术可以得到目前测量的最高质量精度, 实验测量精度达到了 1-10keV, 分辨率为  $10^6-10^7$ , 成熟的设备有欧洲 ISOLDE 上的 ISOLTRAP 等<sup>[14]</sup>. 由于实验技术的限制, 目前还不能利用离子阱测量寿命很短的原子核质量. 基于重离子储存环, 结合飞行中碎片分离装置, 可以对大批不稳定核素同时进行高精度的质量测量. 德国 GSI 研究所已利用储存环技术系统地测量了中重质量区原子核的质量<sup>[15]</sup>.

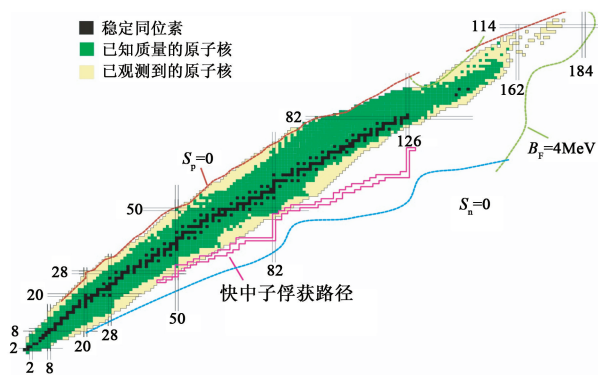


图1 至2003年原子核质量测量的状况. 图中给出了理论预言的质子和中子滴线位置( $S_p=0$ 和 $S_n=0$ )以及快中子俘获路径(r-process path)

### 3 基于 HIRFL-CSR 的短寿命原子核质量精确测量方法

国家大科学工程装置——兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)经过多年的建设和调试,已于2008年7月通过了国家验收并投入运行. 图2是兰州重离子加速器系统的总体结构示意图. 两台回旋加速器是冷却储存环的注入器, 能够提供从氢到铀的中低能离子束流. HIRFL-CSR 是一个双冷却储存环系统, 由主环 CSRm、实验环 CSRc 和连接它们的次级束流线 RIBLL2 构成. CSRm 首先将注入的重离子束流累计和加速, 然后将它引出到 RIBLL2 的入口处打靶, 通过中高能弹核的碎裂反

应产生众多远离稳定线的短寿命原子核. 反应产物经过 RIBLL2 电磁分离和纯化后, 被注入到 CSRc. CSRc 既是一个冷却储存环, 也是一个高精度磁谱仪, 可以精确测量储存的离子质量. 原则上, 利用冷却储存环可测量的原子核的寿命下限为几十微秒, 测量的灵敏度为单个离子, 分辨率为  $10^4-10^6$ . 因此, 兰州重离子加速器冷却储存环为精确测量远离稳定线短寿命核素的质量提供了良好的机遇和条件.

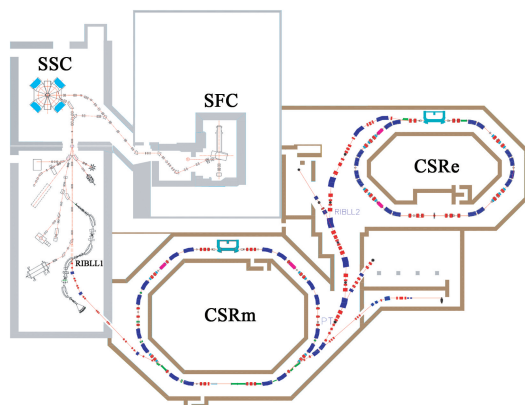


图2 兰州重离子加速器系统的总体结构示意图

利用储存环进行原子核质量测量所依据的基本公式如下<sup>[15]</sup>:

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

其中  $f$  为储存环中离子的回旋频率,  $m$  是离子的质量,  $q$  为电荷态,  $\gamma$  为离子的洛伦兹因子,  $\gamma_i$  为储存环的转变能因子(transition point). 要进行精确的质量测量, 必须使上式中的第二项最小化, 目前有两种方法实现这个目的<sup>[15]</sup>. 一种为 Schottky 质量谱仪. 通过电子冷却, 使离子在 CSR 中的速度弥散降至  $5 \times 10^{-7}$ , 这时环中储存离子速度趋于一致, 回旋频率仅仅取决于其荷质比. 利用 Schottky 探测器测量离子的回旋频率, 从而测出离子质量. 这种方法能够达到的分辨率为  $10^6$ , 测量精度为几十 keV. 由于电子冷却需要几十秒钟的时间, 该方法局限于测量寿命长于分钟量级的原子核质量. 另一种方法是等时性质量测量方法. 在这种方法中, 储存环工作在等时性模式下. 通过调节注入离子的能量, 使同一种离子速度大的沿较大轨道运动, 速度小的沿较小轨道运动, 从而实现离子在环中的回旋频率与运动速度无关. 离子的回旋频率由一个特殊设计的飞行时间探测器测定. 等时性质量测量方法能够测量寿命短至微秒量级原子核的质量, 分辨率为  $10^4-10^5$ . 利用重离子储存环, 可以同时大批不稳定原子核进

行高精度的质量测量. 在等时性模式下进行质量测量时, 环内储存的离子只有很少一部分满足等时性条件, 很多离子在等时性窗外. 处于等时性窗外的原子核, 其质量测量精度较差. 为了提高质量测量的精度, 德国 GSI 研究所采取了限制离子速度分散的方法, 得到了不错的效果<sup>[16]</sup>. 但是, 这样降低了离子的传输效率, 对本来产额就很低的奇异核更为不利. 为此, 中国科学院近代物理研究所计划在 CSR<sub>e</sub> 的直线段配置两套飞行时间探测器, 用来测量离子的速度改变对回旋频率的影响. 这样, 既可修正等时性窗外原子核质量的测量结果, 提高测量精度, 又能够保持高的传输效率. 利用在 CSR<sub>e</sub> 的直线段放置的两套时间探测器还可以测量极短寿命原子核的质量.

在 2008 年年初, 中国科学院近代物理研究所完成了首次等时性质量测量的实验. 利用 CSR<sub>m</sub> 提供的 400 MeV/u 的 <sup>36</sup>Ar 束流通过碎裂反应产生了  $A=2Z$  的核素, 反应产物经 RIBLL2 分离后注入 CSR<sub>e</sub>. 实验中, CSR<sub>e</sub> 设置在等时性模式下, 储存离子的回旋周期由一个飞行时间探测器测定. 以 <sup>32</sup>S, <sup>28</sup>Si, <sup>24</sup>Mg 和 <sup>26</sup>Al 为参考核, <sup>34</sup>Cl 和 <sup>30</sup>P 的质量测量精度分别达到了 101.7 keV 和 96.8 keV. 这个实验展示了 CSR<sub>e</sub> 在短寿命放射性核素质量测量方面的能力. 现在, 我们已研制了性能良好的飞行时间探测器, 发展了一套完整的数据分析方法, 掌握了利用储存环精确测量短寿命核素质量的关键技术.

#### 4 快质子俘获路径上关键核素质量的精确测量

在一些爆发性天体过程中, 例如 Type I 型的 X 射线暴, 快质子俘获过程被认为是主要的能量来源并且决定着最终形成的中子星外壳的组成成分<sup>[17-19]</sup>. 快质子俘获过程的路径在中重质量区非常靠近质子滴线. 基于 HIRFL-CSR, 我们完成了与快质子俘获过程相关的 <sup>63</sup>Ge, <sup>65</sup>As, <sup>67</sup>Se 和 <sup>71</sup>Kr 核的质量测量实验. 在实验中, 首先把前级加速器提供的能量为 4.0 MeV/u 的 <sup>78</sup>Kr 束流注入到主环 CSR<sub>m</sub> 中, 进行累积和加速. 当累积的 <sup>78</sup>Kr 达到每束团约  $10^8$  个离子后, 将 <sup>78</sup>Kr 能量加速到 483.4 MeV/u. 然后, 把束流从 CSR<sub>m</sub> 引出, 在 RIBLL2 的靶点与厚度为 15 mm 的铍靶作用, 通过碎裂反应产生远离稳定线核. 最后, 利用 RIBLL2 选择  $A=2Z-1$  的反应产物, 并把它们注入到实验环 CSR<sub>e</sub> 进行测量. CSR<sub>e</sub> 工作在等时性模式

下,  $A=2Z-1$  核素的能量满足等时性条件. 利用一个时间探测器测量储存在 CSR<sub>e</sub> 中的离子回旋周期. 探测器由厚度为  $16 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的碳膜和微通道板构成, 时间分辨为 83 ps, 探测效率为 30%—70%. 利用一台取样率为 50 GHz 的 Tektronix DPO 示波器, 记录时间探测器输出的信号. 在每个测量周期, 设置示波器的取样时间为  $200 \mu\text{s}$ , 对应于被储存的离子在 CSR<sub>e</sub> 中回旋约 320 圈. 在实验中总共获取了约 80000 个注入事件.

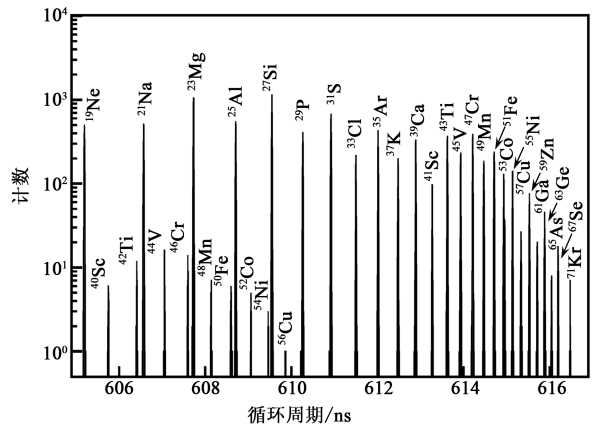


图 3  $A=2Z-1$  和  $2Z-2$  核素的回旋周期谱

基于德国 GSI 研究所发展的核素指认和数据分析方法<sup>[16,20]</sup>, 我们得到了  $A=2Z-1$  和  $A=2Z-2$  核素的回旋周期谱, 结果见图 3. 实验上已精确测量了从 <sup>19</sup>Ne 到 <sup>61</sup>Ga 原子核的基态质量<sup>[9]</sup>. 利用这些已知质量核素的回旋周期和质量就可以建立刻度关系, 从而外推得到未知质量核素的质量. 这样, 我们就首次测量了 <sup>63</sup>Ge, <sup>65</sup>As, <sup>67</sup>Se 和 <sup>71</sup>Kr 核的质量. 它们的质量剩余 (mass excess) 分别为  $-46916(69)$ ,  $-46748(143)$ ,  $-46361(114)$  和  $-45640(230)$  keV. 对于 <sup>65</sup>As, 其质子分离能为  $M(^{64}\text{Ge}) + M(\text{p}) - M(^{65}\text{As})$ . 利用已精确测量的 <sup>64</sup>Ge 和质子质量<sup>[9,21]</sup>, 得到 <sup>65</sup>As 的质子分离能为  $-279(143)$  keV. 因此, <sup>65</sup>As 是质子非束缚的. 现在, 已发展了各种计算原子核质量的模型. 对于靠近稳定线核素的质量, 模型计算值与实验测量值均符合得很好. 但是, 对于远离稳定线核素, 各种理论模型计算值之间经常有高达 MeV 量级的差别. 因此, 测量远离稳定线核素的质量可以对理论模型进行检验, 进而改进理论的预言能力. 图 4 比较了 <sup>63</sup>Ge, <sup>65</sup>As, <sup>67</sup>Se 和 <sup>71</sup>Kr 核质量的实验值和理论计算值. 其中, AME03 (atomic mass evaluation 2003) 值是国际上最权威的原子核质量数据<sup>[9]</sup>, 被广泛采用. 对于实验已测的原子核质量, AME03 是对实验数据的评估; 对于未知质量的原子核, 它综合了各种理论模型的计算值. 图 4

清楚地显示 $^{71}\text{Kr}$ 质量的 AME03 值与实验测量值的差别非常明显. 在较轻质量的质子滴线区, 人们普遍认为, 通过计算库仑位移能量 CDE(coulomb displacement energy)能够非常准确地得到原子核的质量<sup>[22]</sup>. 该方法的核心思想是基于核力的电荷无关性, 认为镜像核之间的质量差完全是由于电磁相互作用的不同造成的. 但是, 该方法的可靠性从未被实验检验. 从图 4 可见, 对于 $^{63}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{As}$  和 $^{67}\text{Se}$ , CDE 计算值与实验值符合很好.  $^{71}\text{Kr}$  的质量与 CDE 计算值存在明显差异, 这可能是由 $^{71}\text{Kr}$  的形变导致的.

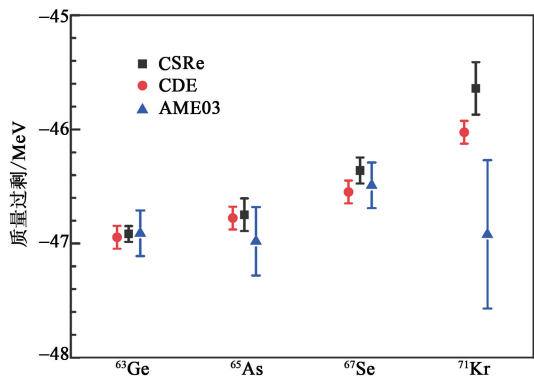


图 4  $^{63}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{As}$ ,  $^{67}\text{Se}$  和 $^{71}\text{Kr}$  核质量的实验值和理论计算值比较. AME03 值取自文献[9], CDE 值取自文献[22]

$^{63}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{As}$ ,  $^{67}\text{Se}$  和 $^{71}\text{Kr}$  核处于天体物理快质子俘获过程的路径上, 它们的实验质量值对于理论模拟快质子俘获过程是非常重要的<sup>[17-19]</sup>. 核天体物理网络计算表明<sup>[21]</sup>, 如果 $^{65}\text{As}$  是质子非束缚的, 且质子的分离能小于 $-500\text{keV}$ , 则 $^{64}\text{Ge}$  是一个标准的“等待点”核; 如果 $^{65}\text{As}$  是质子束缚的, 快质子俘获过程会通过 $^{64}\text{Ge} + p \rightarrow ^{65}\text{As} + p \rightarrow ^{66}\text{Se}$  来进行, 这样 $^{64}\text{Ge}$  在快质子俘获过程中的等待作用将弱化. 在典型的 X 射线暴环境中,  $^{66}\text{Se}$  的光致解离反应截面很小, 可以忽略<sup>[21]</sup>. 因此,  $^{64}\text{Ge}$  的有效寿命  $\tau_{\text{eff}}$  取决于它的  $\beta$  衰变和连续两质子俘获之间的竞争, 它可以通过下式计算得到<sup>[23,24]</sup>:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\beta} + Y_p^2 \rho^2 N_{\lambda}^2 \left(\frac{2\pi\hbar^2}{\kappa T}\right)^{3/2} \frac{G_2(T)}{G_1(T)} \exp\left(\frac{Q_1}{\kappa T}\right) \langle \sigma, \nu \rangle_{(p, \gamma)}, \quad (2)$$

这里  $Y_p$  是氢的丰度,  $G_1(T)$  和  $G_2(T)$  是 $^{64}\text{Ge}$  和 $^{65}\text{As}$  的配分函数,  $Q_1$  是 $^{64}\text{Ge}(p, \gamma)^{65}\text{As}$  反应的  $Q$  值,  $\langle \sigma, \nu \rangle_{(p, \gamma)}$  是 $^{65}\text{As}(p, \gamma)^{66}\text{Se}$  的反应率. 在 Type I 型的 X 射线暴环境中, 计算得到的 $^{64}\text{Ge}$  有效寿命随 $^{65}\text{As}$  质子分离能的变化如图 5 所示. 在 $^{65}\text{As}$  质量剩余的误差范围内,  $^{64}\text{Ge}$  的有效寿命在 $0.5-4.0\text{s}$  之间. 因此,  $^{64}\text{Ge}$  是一个有效的“等待点”核, 它显著延迟了 X 射线

暴的进程.

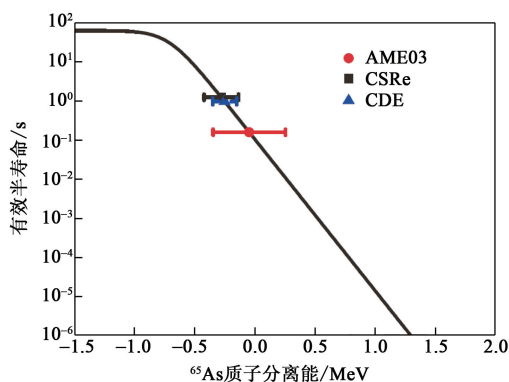


图 5  $^{64}\text{Ge}$  的有效寿命随 $^{65}\text{As}$  质子分离能的变化, 同时给出了利用 CDE 和 AME03 质量值的计算结果

## 5 基于 HIRFL-CSR 的短寿命原子核质量精确测量目标

经过与国内外同行广泛而深入的讨论, 中国科学院近代物理研究所已确定将短寿命不稳定原子核的精确质量测量作为今后的重要科研目标. 通过中高能弹核的碎裂反应产生远离稳定线的核素, 利用 Schottky 质量谱仪和等时性质量测量方法, 系统地精确测量了质子滴线附近核和丰中子核的质量.

### 5.1 轻质量丰中子区原子核质量精确测量

在丰中子核结构的研究中发现, 当中子数与质子数严重不平衡时, 一些基于稳定线附近实验数据建立起来的传统幻数消失了或出现了新幻数<sup>[6-8]</sup>, 例如, 发现在丰中子核中  $N=20$  和  $28$  的中子闭壳消失了<sup>[6-8]</sup>. 因此, 从实验上系统研究  $N=20$  和  $28$  幻数如何随中子数和质子数演化具有重要的意义. 利用兰州重离子加速器系统提供的 $^{36}\text{S}$  和 $^{48}\text{Ca}$  等弹核的碎裂反应, 产生从  $\text{Ne}$  到  $\text{Ca}$  的丰中子同位素, 系统地精确测量这些核素的质量, 能够提取相关同位素链(同中子异位素链)的单核子分离能和双核子分离能随中子数(质子数)变化的系统性数据. 这些实验数据可以揭示  $N=20$  和  $28$  幻数随核子数变化的演化, 检验各种核理论模型.

### 5.2 中重质量区近质子滴线核质量精确测量

丰质子核素的精确质量实验数据对于理解核天体物理中的快质子俘获过程是非常重要的<sup>[17-19]</sup>. 在快质子俘获过程中, 质子通过一系列爆炸性的俘获而熔合到较重元素中, 从而形成直到  $\text{Te}$  的核素<sup>[6-8]</sup>. 那些被称为“等待点”的核素位于质子滴线

附近,进一步的质子俘获过程被质子弱束缚核(或质子非束缚核)的光致解离( $\gamma, p$ )反应所阻碍,使俘获过程不得不“等待”一定的时间,从而进行慢的电子俘获过程和 $\beta^+$ 衰变.这样,“等待点”核就延迟了爆炸中核能量的释放,从而影响爆炸持续的时间和光产额随时间变化曲线的形状.原子核的质量非常灵敏地决定着质子俘获与其逆过程( $\gamma, p$ )光致解离之间的平衡.这些“等待点”核的有效寿命决定着快质子俘获过程总的时间尺度、能量产生以及最终的核素丰度分布情况.我们将利用兰州重离子加速器系统提供的 Kr 和 Sn 等弹核的碎裂反应产生 $^{64}\text{Ge}$ , $^{68}\text{Se}$ 和 $^{72}\text{Kr}$ “等待点”周围的原子核,并进行精确的质量测量.精确的质量数据还可以确定质子滴线的位置,揭示原子核壳层结构的演化.

### 5.3 中重质量区丰中子核质量精确测量

在星体中,人们认为所有比铁重的元素都是在热核爆炸过程中产生的,快中子俘获过程是产生重元素的主要途径<sup>[6-8]</sup>.目前,快中子俘获过程路径上所涉及的绝大多数核素的基态质量是未知的.因此,有关天体演化和恒星核合成等研究还必须依赖于理论模型的计算结果.但是,各种理论计算结果之间不一致,对于核素的质量计算结果经常有高达 MeV 量级的偏差.为了检验和改进这些理论模型,就需要获得那些尽可能远离稳定线核素的质量数据.快中子俘获过程的路径在丰中子核区.其中,对快中子俘获过程影响最大的核素位于 $^{78}\text{Ni}$ 和 $^{130}\text{Cd}$ 核附近.在这里,核结构效应,例如壳效应的减弱或新闭壳的形成,会对快中子俘获过程的路径产生重要影响.核结构效应可以在质量测量中被直接观测到.我们将利用存储环技术系统地精确测量中重质量区丰中子核的质量,为理论模拟快中子俘获过程的天体网络计算提供关键的质量数据.

## 6 总结和展望

本文概括地介绍了原子核质量测量的意义、主要方法和现状.国家大科学工程装置——兰州重离子加速器冷却储存环的建成和投入运行,为我国开展远离稳定线短寿命原子核的精确质量测量提供了非常先进的实验平台.本文着重介绍了利用冷却储存环精确测量原子核质量的技术方法,讨论了在兰州重离子加速器冷却储存环上测量的 $^{63}\text{Ge}$ , $^{65}\text{As}$ , $^{67}\text{Se}$ 和 $^{71}\text{Kr}$ 核的质量结果.利用质量数据,我们得到了 $^{65}\text{As}$ 核的质子分离能为 $-279(143)\text{keV}$ ,确定了 $^{65}\text{As}$ 是质子非束

缚的. $^{63}\text{Ge}$ , $^{65}\text{As}$ , $^{67}\text{Se}$ 和 $^{71}\text{Kr}$ 核处于天体物理快质子俘获过程的路径上,特别是 $^{65}\text{As}$ 核的质量决定着“等待点”核 $^{64}\text{Ge}$ 的有效寿命.利用测量的 $^{65}\text{As}$ 质量,得到 $^{64}\text{Ge}$ 的有效寿命在 $0.5-4.0\text{s}$ 之间.因此, $^{64}\text{Ge}$ 是一个有效的“等待点”核,它显著延迟了 X 射线暴的进程.本文给出了今后基于兰州重离子加速器冷却储存环的主要研究内容,即系统地精确测量质子滴线附近核和丰中子核的质量,研究相关核区原子核的结构和一些爆发性天体过程.

近年来,国际上的主要核物理实验室对短寿命原子核质量的精确测量极其重视,研制了一批先进的实验装置<sup>[6-8]</sup>.激烈的国际竞争使得原子核质量测量在轻质量区和质子滴线区取得了很大的进展.然而,由于缺乏有效的核素产生方法,质量测量在人们最感兴趣的极丰中子核区进展比较缓慢.精确测量极丰中子原子核的质量,将有助于我们了解远离稳定线原子核的壳层结构、对能和形状等的演化,为研究可能存在的巨晕结构、集团自组织、新幻数、连续态耦合、同位旋相变等量子多体体系的新现象奠定基础<sup>[6-8]</sup>.此外,核天体物理中重要的快中子俘获路径位于丰中子核区.精确测量位于快中子俘获路径上原子核的质量,将最终促进人们了解宇宙中的元素起源问题<sup>[6-8]</sup>.目前,国际上正在升级或新建若干大型重离子研究装置,短寿命原子核质量的精确测量,特别是极丰中子原子核的质量测量,是这些装置的主要科学目标之一.因此,在相当长的时间内,远离稳定线短寿命原子核质量的精确测量,将是国际核物理的最重要前沿研究领域之一.

### 参考文献

- [1] Thomson J J. *Philos. Mag.*, 1907,13;561
- [2] Thomson J J. *Philos. Mag.*, 1912,24;209
- [3] Aston W F. *Isotopes*, Edward Arnold, London, 1922
- [4] Aston W F. *Mass spectra and isotopes*, Second ed., Edward Arnold, London, 1942
- [5] Bethe A H, Bacher F R. *Rev. Mod. Phys.*, 1936,8;82
- [6] The Frontiers of Nuclear Science, The DOE/NSF Science Advisory Committee, <http://www.sc.doe.gov/np/nsac/nsac.html>
- [7] NuPECC Long Range Plan 2004, [http://www.nupecc.org/lrp02/long\\_range\\_plan\\_2004.pdf](http://www.nupecc.org/lrp02/long_range_plan_2004.pdf)
- [8] Opportunities in Nuclear Science: A Long-Range Plan for the Next Decade, The DOE/NSF Science Advisory Committee, April 2002
- [9] Audi G, Wapstra H A, Thibault C. *Nucl. Phys. A*, 2003, 729;337

- [10] Moeller P, Nix J R, Myers W D *et al.* Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, 59:185
- [11] Sun B, Montes F, Geng L S *et al.* Phys. Rev. C, 2008, 78: 025806
- [12] Lunney D, Pearson M J, Thibault C. Rev. Mod. Phys., 2003, 75:1021
- [13] Sarazin F, Savajols H, Mittig W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84:5062
- [14] Mukherjee M, Beck D, Blaum K *et al.* Eur. Phys. J. A, 2008, 35:1
- [15] Franzke B, Geissel H, Muenzenberg G. Mass Spectrom. Rev., 2008, 27:428
- [16] Sun B, Knobel R, Litvinov Yu A *et al.* Nucl. Phys. A, 2008, 812:1
- [17] Winger J A, Bazin D P, Benenson W *et al.* Phys. Rev. C, 1993, 48:3097
- [18] Savory J, Schury P, Bachelet C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102:132501
- [19] Clark J A, Savard G, Sharma K S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92:192501
- [20] Radon T, Geissel H, Munzenberg G *et al.* Nucl. Phys. A, 2000, 677:75
- [21] Schury P, Bachelet C, Block M *et al.* Phys. Rev. C, 2007, 75:055801
- [22] Brown B A, Clement P R C, Schatz H *et al.* Phys. Rev. C, 2002, 65:045802
- [23] Wohr A, Aprahamian A, Boutachkov P *et al.* Nucl. Phys. A, 2004, 742:349
- [24] Schatz H, Aprahamian A, Gorres J *et al.* Phys. Rep., 1998, 294:167