



基于HIRFL-CSR测量丰中子重核质量的建议

刘明正 王猛 张玉虎 付超义 周旭 张敏 邢元明 孙铭泽

A Proposal for Mass Measurements of Heavy Neutron-rich Ions at HIRFL-CSR

LIU Mingzheng, WANG Meng, ZHANG Yuhu, FU Chaoyi, ZHOU Xu, ZHANG Min, XING Yuanming, SUN Mingze

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020009>

引用格式:

刘明正, 王猛, 张玉虎, 付超义, 周旭, 张敏, 邢元明, 孙铭泽. 基于HIRFL-CSR测量丰中子重核质量的建议[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(1):18–25. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020009

LIU Mingzheng, WANG Meng, ZHANG Yuhu, FU Chaoyi, ZHOU Xu, ZHANG Min, XING Yuanming, SUN Mingze. A Proposal for Mass Measurements of Heavy Neutron-rich Ions at HIRFL-CSR[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(1):18–25. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020009

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等时性质量谱仪中 $N=Z$ 核质量测量的方法探索

Study of Mass-measurement Method for $N=Z$ Nuclei with Isochronous Mass Spectrometry

原子核物理评论. 2019, 36(3): 294–304 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.294>

重离子核反应中丰中子余核产额的标度规律

Scaling of Information Uncertainty of Neutron-rich Isobars in Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2017, 34(3): 520–524 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.520>

储存环HIAF-SRing等时性模式的非线性磁场影响研究

Effects of Field Imperfections in the Isochronous Mode of the HIAF-Sring

原子核物理评论. 2018, 35(2): 147–153 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.147>

文章编号: 1007-4627(2020)01-0018-08

基于 HIRFL-CSR 测量丰中子重核质量的建议

刘明正^{1,2}, 王猛^{1,2,†}, 张玉虎^{1,2}, 付超义¹, 周旭^{1,2}, 张敏^{1,2}, 邢元明¹, 孙铭泽¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 丰中子重核区有大量原子核质量未知, 迫切需要实验测量。我们建议, 利用兰州重离子加速器研究装置 HIRFL-CSR 上的等时性质谱术, 高精度测量 ^{204}Pt 等丰中子重核的质量。CSR 质量测量实验中, 在目标核产额尽可能高的前提下, 需要每次注入都有多个离子同时储存在实验环 CSR_e 中, 才能针对逐次注入修正磁场晃动的影响, 得到高精度测量结果。但在丰中子核区, 当目标核产生截面非常低时, 每次注入能储存在环中的离子数目太少。为了解决这个问题, 我们提出了一种“混合厚度靶”的方法, 在不明显改变目标核产额的情况下, 显著增加同时储存在 CSR_e 中的离子数, 满足实验要求。模拟计算表明, 在 CSR_e 测量丰中子重核质量是可行的, 并推荐了实验的设置。

关键词: 丰中子重核; 等时性质谱术; 放射性束流线; 混合厚度靶

中图分类号: O571.21

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020009

1 引言

质量是原子核最基本的性质之一, 核质量数据广泛应用于核物理、核天体物理等多个研究领域^[1-2]。短寿命原子核质量的高精度测量是核物理的前沿研究课题^[3-5]。目前, 质量已被测量的原子核约有 2 500 个^[6-7], 质量仍然未知的原子核大都位于非常远离稳定线的区域。但在质子数 $68 < Z < 82$ 的丰中子核区, 质量未知核依然非常邻近稳定线。例如, 中子数为幻数 126 的质量已知最轻核素为 ^{206}Hg , 比最轻的稳定同中子核素 ^{208}Pb 仅少 2 个质子。作为对比, 对较轻核区 $N = 82$ 的同中子核素, 质量已知的最轻核素为 ^{130}Cd , 比最轻的稳定同中子核素 ^{136}Xe 少 6 个质子。丰中子重核区的原子核质量对核结构研究^[8-9]、核天体研究^[10] 都非常重要, 迫切需要进行实验测量。

和更轻的丰中子核素不同, 质子数 $68 < Z < 82$ 的丰中子核素无法由裂变产生, 因此在实验室产生较为困难。近年来有很多讨论, 建议以多核子转移反应来产生这些核素, 但需要进一步发展实验技术来分离和鉴别产生的目标核素。目前, 该区域的最丰中子核素都是在德国重离子研究中心 (GSI) 合成, 产生方式是 ^{238}U , ^{208}Pb 等重核的“冷碎裂”反应^[11-13], 并用放射性束流线 FRS

分离、鉴别。放射性束流线结合重离子储存环可以精确测量原子核的质量。GSI 的研究小组基于实验环 ESR, 利用肖特基质谱术 (Schottky Mass Spectrometry, SMS) 方法, 首次测量了一些丰中子重核的质量^[8, 14-16], 在国际上引起了广泛的关注。

与 SMS 方法相比, 基于重离子储存环的等时性质谱术 (Isochronous Mass Spectrometry, IMS) 能准确测量寿命更短原子核的质量, 是高精度测量短寿命原子核质量的有效手段。利用该方法, 中国科学院近代物理研究所的研究人员基于兰州重离子加速器研究装置 (HIRFL) 的冷却储存环 (CSR)^[17], 测量了多种原子核的质量并研究了相关的物理问题, 取得了一些重要的物理结果^[18-19]。2019 年 12 月, 近代物理研究所自行设计研制的连续波高电荷态强流重离子直线加速器 (SSC-Linac)^[20] 与分离扇回旋加速器 (SSC) 联合调试, 首次成功引出重离子束流, 为主环 CSR_m 提供高能的 Pb, U 等重离子束流奠定了基础。本文以 ^{208}Pb 为主束, 利用 IMS 测量 ^{204}Pt 等一批丰中子重核的质量。第二部分将介绍基于 HIRFL-CSR 的 IMS 实验方法和设置考虑的要点, 第三部分讨论了利用当前的实验条件, 模拟丰中子重核质量测量实验的设置及模拟计算, 最后给出总结和展望。

收稿日期: 2020-01-05; 修改日期: 2020-02-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2016YFA0400504, 2018YFA0404401)

作者简介: 刘明正 (1994-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 从事原子核与粒子物理研究; E-mail: liumingzheng@impcas.ac.cn

† 通信作者: 王猛, E-mail: wangm@impcas.ac.cn.

2 CSR 质量测量实验介绍

2.1 实验基本情况介绍

在 CSR 等时性质量测量实验^[21-22]中, 放射性核束由初级束离子的弹核碎裂反应产生。初级束离子由离子源产生, 经过扇聚焦回旋加速器 SFC 加速到 4~8 MeV/u 后注入到主环 CSR_m 中^[23]。在主环中累积到 $\sim 10^8$ 离子后, 加速到所需能量, 一般为 400~480 MeV/u, 之后快引出轰击放射性束流线 RIBLL2 入口处的 Be 靶, 弹核碎裂反应后产生多种核素共存的混合束流(鸡尾酒束), 经 RIBLL2 的选择、传输, 注入到实验环 CSR_e 并储存其中。利用环内的飞行时间 (TOF) 探测器, 测量离子的循环周期, 从中即可提取原子核的质量。储存环有一定的动量接收度, CSR_e 约为 0.2%。对同种离子, 在储存环中的回旋周期随速度的变化可用下式描述^[18-19]:

$$\frac{\delta T}{T} = \left(\frac{\gamma^2}{\gamma_t^2} - 1 \right) \frac{\delta v}{v}, \quad (1)$$

式中: γ 为离子的洛伦兹因子; γ_t 为储存环的转变能系数, 决定了储存环中离子运行轨道长度和离子磁刚度的关系。为了保证质量分辨能力和测量精度, 我们让目标核满足等时性条件, 即 $\gamma = \gamma_t$, 这时离子运行轨道长度的变化正好抵消了速度的变化, 其回旋周期不依赖于速度分散。储存在 CSR_e 内的目标核满足 $\gamma = \gamma_t$, 速度 v 即被确定, 则目标核的磁刚度也随即确定下来, 为

$$B\rho = \frac{mv\gamma}{q}, \quad (2)$$

式中 m/q 为目标核的质量电荷比。在质量测量实验过程中, RIBLL2 和 CSR_e 的中心轨道磁刚度按照目标核设置之后一般保持不变。针对不同目标核设置等时性模式时, 可以改变 CSR_e 光学设置的另一个重要参数 $\gamma = \gamma_t$ 。为此, 近物所的研究人员通过深入分析离子回旋周期在储存过程中随时间的变化规律, 实现在线监测 γ_t ^[24], 并可以在一定范围内进行微调优化^[25]。

在等时性质量测量实验中, 放射性核束的成分非常重要, 首先要保证目标核的产额尽可能高, 这样才能得到足够的统计。在此前提下, 储存在 CSR_e 中的离子个数要适中: 如果储存离子数太少, 会影响磁场修正的效果^[26]; 离子数太多, 会影响探测器的性能^[27]。理想情况下, 需有 10~20 个离子同时储存在 CSR_e 中。

离子在 CSR_e 中的回旋周期受储存环磁场强度的影响, 因此高精度测量需要磁场的长期高稳定性。但在实际情况下, CSR_e 受外界环境影响, 磁场强度有 $\sim 10^{-5}$

量级的晃动, 引起环内离子的循环周期发生相应改变, 严重影响目标核质量测量的精度。针对该问题, 我们先后发展了多种数据处理方法。在早期实验中, 利用不同原子核间的相对回旋周期代替绝对数值, 收到了较好的效果^[28], 但是因为需要产额较高的参考核, 该实验仅有 70% 的数据得到利用^[28-29]。在后面的实验中, 又发展了逐次注入修正的方法^[26], 很大程度上修正了磁场变化对回旋周期的影响, 使实验结果的精度满足了研究前沿物理的要求。这些方法要求每次注入都有多个离子同时储存在 CSR_e 中, 才能实现逐次注入修正回旋周期。

目前原子核质量测量的前沿是测量那些远离稳定线的原子核。随着目标核越来越远离稳定线, 他们及邻近核素的产生截面也越来越低。特别是在丰中子核区, 如果针对目标核的最优化设置放射性束流线, 则每次储存在实验环的离子数目太少, 无法针对逐次注入进行修正。例如, 在德国 GSI 开展的一次等时性质量测量实验中^[30], 每次注入能够储存在环中的离子数目平均值小于 1, 只能使用合并多次注入的方法修正磁场影响。如果储存环的磁场在不同次注入时有较大变化, 会严重影响测量结果的精度。针对该问题, 本文提出新方法, 在不明显降低目标核产额的前提下, 提高单次注入离子数, 并进行模拟验证其可行性。

2.2 放射性束的产生

CSR 质量测量实验的目标核由弹核碎裂反应产生, 弹核为中重原子核, 加速到所需的能量后, 轰击放置于 RIBLL2 入口处的 Be 靶。在碰撞过程中, 弹核的核子被“擦除”一部分后, 形成一个新的碎片, 这个碎片处于较高激发态, 一般通过蒸发核子退激。由于反应中几乎没有能量沉积, 碎片的速度近似于弹核的速度, 即:

$$\mathbf{v}_{\text{frag}} \approx \mathbf{v}_{\text{proj}}, \quad (3)$$

其中: \mathbf{v}_{frag} 和 \mathbf{v}_{proj} 分别为碎片和弹核的速度。通过这一方式产生的放射性束流一般具有很小的动量分散, 被“擦除”的核子数目越少, 其动量分散越小^[31-32]。碎裂反应可以产生质子和中子数目比弹核少的所有核素。

利用“冷碎裂”反应可以产生非常靠近主束离子的放射性核素^[33]。反应中仅擦除极少核子, 产生的碎片处于较低的激发态, 不足以进一步蒸发核子, 因此可以产生极丰中子重核。近年来利用该类型的反应在新核素寻找^[11-12, 34]、衰变性质测量^[35-36]以及质量测量^[14-16]方面发挥了重要作用。GSI 实验已经测量了 ^{238}U , ^{208}Pb 等作为主束产生丰中子重核的截面^[11-12], 为我们的质量测量实验提供了重要参考。

在 CSR 质量测量实验中, RIBLL2 和 CSR_e 的中心

轨道磁刚度 $B\rho$ 预先设定后一般不再改变, 但可以通过调节主束的能量来改变放射性束流的成分。主环 CSRm 是一个同步加速器, 可以方便地改变主束的能量。当靶厚固定时, 主束能量增大, 则产生碎片的速度变大; 因为 RIBLL2 固定了 $B\rho$ 选择, 通过 RIBLL2 并储存在 CSRc 中的放射性核素整体趋向更小的质量电荷比 m/q , 即更偏向缺中子核素, 主束能量减小时, 得到的是质量电荷比更大的丰中子核素。

在 CSR 质量测量实验中, 我们可以通过调整靶厚、改变 RIBLL2 的设置和主束能量, 改变放射性核束的产额、成分以满足实验要求。下面以曾开展的一次实验作为实例进行讨论。

2.3 ^{86}Kr 实验设置的确定

在 CSR 开展的质量测量实验主要集中于缺中子核区, 仅有一次丰中子核素质量测量实验。这次实验利用 ^{86}Kr 作为主束, 测量目标核主要有 $^{53,54}\text{Sc}$ 等 [37-38]。实验中 CSRc 的 γ_t 设置为 1.395, 为了兼顾 $^{53,54}\text{Sc}$ 同时处于等时性窗口, RIBLL2 和 CSRc 的中心轨道磁刚度 $B\rho$ 设置为 7.6755 Tm。

两个目标核的产生截面有较大差异, 质荷比更大的丰中子的 ^{54}Sc 产生截面比 ^{53}Sc 小约一个数量级, 因此实验更倾向有利于 ^{54}Sc 产生的设置。为了产生尽可能多的目标核, 需要优化碎裂反应靶的厚度。当靶子太薄时, 反应率太低, 产额不够高; 当靶子太厚时, 次级产物的动量分散变得太大, 远远超过束流线和储存环的接收度, 反而降低有效产额 [39]。本次实验目标核距离主束较远, 其产生经历了较剧烈的核反应, 有较大的动量分散 [32]。通过 LISE++ 模拟 [40] 计算, 目标核的产额对靶厚变化不特别敏感。

我们首先确定产生靶的厚度。利用 LISE++ 进行模拟, 固定 RIBLL2 的设置, 分别选择 10 和 15 mm 厚度的 Be 靶, 扫描主束能量来寻找产生 ^{54}Sc 和 ^{53}Sc 的最佳主束能量值。计算结果显示, 在最优能量下, 10 mm 靶的 ^{54}Sc 产额比 15 mm 高 7%。但在最优能量下, 每次注入能够储存的离子总数平均值还不到 1, 无法修正磁场, 不能满足实验要求。提高主束能量, 会有利于较缺中子核素的传输, 他们有更的产额, 从而会提高次级束离子总数目。使用 10 mm 靶, 目标核产额受主束能量的影响较大, 主束能量比最佳值升高 10 MeV/u, 则 ^{54}Sc 产额已降低 20%。而使用 15 mm 靶, 目标核产额随主束能量变化较小, 主束能量升高 10 MeV/u, ^{54}Sc 产额仅降低 8%。这显示了在 CSR 实验中使用较厚的产生靶, 主束能量调节有较大的灵活性。使用 15 mm 靶产生的总

离子数也较多, 即参考核产额较高。考虑到以上因素, 实验中选用了 15 mm 靶。

^{54}Sc 产额最高的主束能量下, 次级束离子总数太小, 实验通过提高主束能量增加总离子数。在实验过程中扫描了几个能量点, 最终确定主束能量为 461.25 MeV/u。在该设置下, 每次注入 CSRc 能够储存 ~4 个离子, ^{54}Sc 产额相比较最优能量降低了 11%。如果使用 10 mm 靶, 为了得到相同的 ^{54}Sc 产额, 估算得到 CSRc 平均每次储存的离子数目仅有 1.6 个, 这进一步显示了靶厚的选择合理性。

本次实验达到了预期目标 [37-38]。总结经验有: 主束能量可以根据实验情况在一定范围内调节; 产生靶应该选择相对厚一些, 这样设置可以更加灵活。这次实验中, 目标核距离主束较远, 产额对靶厚变化不特别敏感。当目标核非常靠近主束离子时, 产额受靶厚影响会更加明显。

3 丰中子重核质量测量的讨论

目前, 中子 $N = 126$ 的质量已知最轻核素为 ^{206}Hg , 比最轻的稳定同中子核素 ^{208}Pb 仅少 2 个质子。利用 ^{208}Pb 作为主束, 可以以较大的截面产生 ^{205}Au 、 ^{204}Pt 等 $N = 126$ 核素, 其中 ^{204}Pt 的截面比 ^{205}Au 小 ~40 倍 [12], 因此下面的讨论以 ^{204}Pt 为主要目标核。目前, CSRm 需要 ~25 s 完成一次束流的累积、加速和引出, 即一次 CSRc 的注入和测量。目标核的产额需要大于 3×10^{-4} /次注入, 即每天可以得到一个事例, 才能进行有效测量。

下面讨论以 ^{208}Pb 为主束, 在 CSR 测量 ^{204}Pt 等目标核质量所需的设置。我们基于 CSR 的实际条件, 束流强度假定为 1×10^8 ppp (per particles pulse), 进行了相应的 LISE++ 模拟计算 [40]。在 LISE++ 计算中, 碎裂截面模型选择近期发展的 FRACS 经验公式 [41], 因为 FRACS 模型计算截面 [41] 与实验测量截面 [12] 符合得更好。在碎裂产物上主要有以下几方面的考虑:

- (1) ^{204}Pt 的产额要尽可能高;
- (2) 可以同时测量多个未知质量的核素;
- (3) 每次注入有较多离子储存到 CSRc 中, 满足磁场修正的要求;
- (4) 设置有较强的稳定性, 实验条件轻微改变时, 如主束能量未设置到最佳值时, 目标核的产额影响不大。

3.1 RIBLL2 的设置

我们假定储存环 γ_t 设置为 1.3, 针对 ^{204}Pt 目标核, CSRc 的 $B\rho$ 设置应为 6.748 Tm。如果在束流线上不使

用降能器进一步纯化次级束离子，经 LISE++ 估算有近千种核素可能储存到 CSR_e 中，其中绝大多数产额很低，为离子鉴别带来极大困难。我们在 RIBLL2 上使用一个非常薄的降能器，就能去除掉所有的轻离子，极大地简化离子鉴别。经计算，使用 100 mg/cm² 的 Al 降能器即可达到较好的束流纯化效果，相应的目标核 ²⁰⁴Pt 的产额会降低 ~30%。在下面的讨论中我们在 RIBLL2 的第一个色散点处使用 100 mg/cm² 的 Al 降能器。

对于 ²⁰⁴Pt 这样的重核，在约 400 MeV/u 的中能区，核外电子有较大的比例无法完全剥离。利用 GLOBAL 和 CHARGE 等程序 [42] 计算离子穿过物质后电荷态的分布，可以估算出 ²⁰⁴Pt 经过 Be 靶后几率最大的电荷态为类氢的 ²⁰⁴Pt⁷⁷⁺，经过 Al 降能器后几率最大的电荷态为全裸的 ²⁰⁴Pt⁷⁸⁺，最优电荷态离子占离子总数比例都略小于 50%。在 GSI 的 FRS 束流线上的实验中，常在 Be 靶后使用亲电子的 Nb 片做进一步剥离，以提升全裸离子的产生几率 [11–13]。CSR 质量测量实验对电荷态没有特别要求，只要求目标核传输效率要高。我们经过估算，发现在 Al 降能器前以 ²⁰⁴Pt⁷⁷⁺ 为中心，降能器后以 ²⁰⁴Pt⁷⁸⁺ 为中心进行设置，更有利于目标核传输至 CSR_e。因此确定 RIBLL2 的降能器前中心磁刚度设置为 6.955 Tm，降能器后 RIBLL2 和 CSR_e 的中心磁刚度设置为 6.748 Tm，在下面的讨论中保持设置不变。

3.2 靶厚的选择

我们选择从 2 mm 到 10 mm 的不同靶厚，以 0.5 mm 的间隔进行计算，研究靶厚对实验产物的影响。计算结果如图 1 所示。对每一个靶厚，产生目标核 ²⁰⁴Pt 有一个最优主束能量，反应靶越厚，最优能量也就越高。从图 1 中可以看到，不同靶厚的目标核 ²⁰⁴Pt 产额变化不算太大。仅看目标核，最优靶厚应为 ~4 mm，但是这种设置下离子的总产额较低。

比较靶厚在 4 和 10 mm 的情况下，目标核产额随主束能量的变化，结果如图 2 所示。在 4 mm 情况下，目标核 ²⁰⁴Pt 的产额对能量的变化十分敏感，主束能量偏离最优值 2 MeV/u 时，目标核产额就下降 ~30%。而对 10 mm 靶，主束能量在 9 MeV/u 范围内的变动下，目标核的产额都没有太大变化。同理在靶厚为 5 mm 附近，离子的总额虽然到达一个较高的值，但目标核的产额对主束能量的变化依然十分敏感。当主束能量升高时，倾向于缺中子核素的产生，图 2 未知质量核素总产额的升高是因为 ^{204,205}Au 产额的升高。

经过综合考虑，我们倾向于采用厚度为 10 mm 的

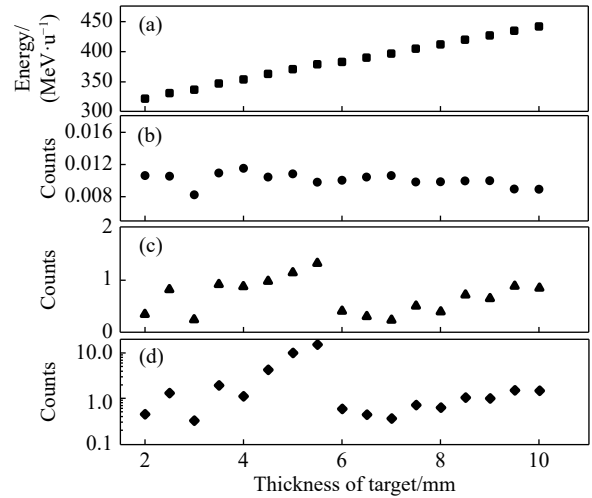


图 1 不同靶厚情况下，(a) 产生目标核 ²⁰⁴Pt 的最优主束能量，(b) 目标核 ²⁰⁴Pt 的产额，(c) 所有质量未知核素的产额，以及 (d) 所有核素的总产额

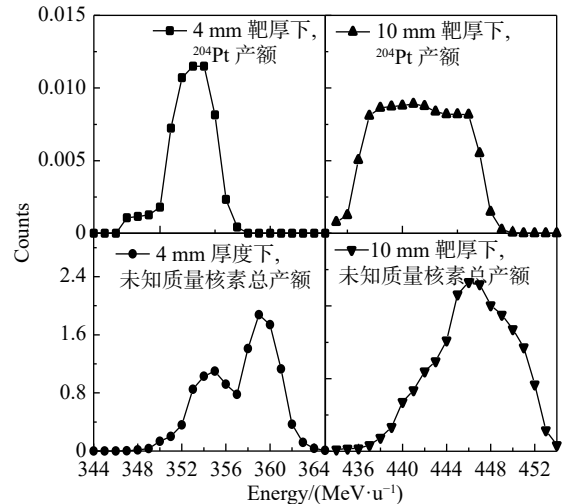


图 2 使用 4 和 10 mm 的 Be 靶，不同主束能量下目标核 ²⁰⁴Pt 产额以及所有未知核素的总产额

Be 靶。针对目标核 ²⁰⁴Pt，10 mm 比 4 mm 的 Be 靶产额降低 25%，但 10 mm 的 Be 靶对主束能量有较大容忍度，不要求设置必须精准。主束能量选为 442 MeV/u。

尽管升高主束能量，单次注入储存的离子总数会增加，但是在保证目标核 ²⁰⁴Pt 产额的情况下，CSR_e 储存的总离子数仍然较少，不能满足逐次注入修正磁场的要求。我们知道改变主束能量可以改变次级束离子成分，类似地改变反应靶的厚度，也可以得到同样效果。在主束能量和靶后面的束流传输线设置确定的情况下，当靶厚变薄时，次级束离子能损减小，速度变大；因为次级束流线的 $B\rho$ 设置已固定，选择传输的放射性核素整体趋向更小的质量电荷比 m/q ，即更偏向缺中子核素。反之，当反应靶变厚时，会得到质荷比更大的丰中子核

素。法国 GANIL(大加速器实验室)的一个研究小组利用高精度磁谱仪 SPEG^[43]建立起 $B\rho$ -TOF(磁刚度-飞行时间谱仪)方法完成质量测量实验,曾经使用不同厚度分布的靶,在同一设置下覆盖了更大的测量区域。在 ^{48}Ca 碎片质量测量实验中,将 Ta 靶设计成多种不同的厚度用于产生放射性束,能同时产生多个参考核和目标核,测量了一批轻丰中子原子核的质量^[44]。

我们尝试改变反应靶的厚度以调节次级束种类及产额,将反应靶的一小部分变薄,使单次注入总离子数升高以满足要求。反应靶的主要部分厚度为 10mm,将 RIBLL2 的设置按照目标核的传输优化。固定主束能量,将靶厚从 10mm 逐渐减小到 9mm,以 0.1mm 为间隔计算单次注入可以产生的目标核和总离子的数目,结果如图 3 所示。

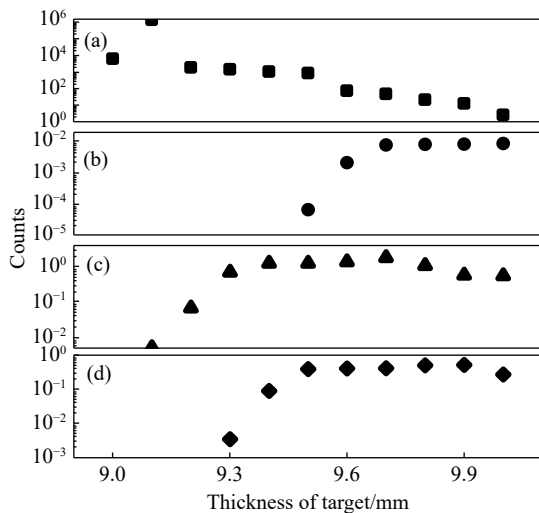


图 3 固定主束能量和 RIBLL2 的设置,不同反应靶厚的情况下注入的 (a) 总离子数目以及 (b) 目标核 ^{204}Pt 、(c) ^{204}Au 、(d) ^{205}Au 的数目

从计算结果看出,在主束能量和 RIBLL2 设置不变的情况下,目标核 ^{204}Pt 的产额在靶厚大于 9.7mm 时变化不大,小于 9.7mm 后剧烈减小。 ^{204}Au 的产额随靶厚先变大后,再变小。随着靶厚变薄,单次注入产生的总离子数目逐渐增大,产生截面更大的缺中子核素变得更有利于传输,相应的产额最大的核素依次为 ^{205}Hg , ^{206}Hg , ^{206}Tl , ^{207}Tl 等。当靶厚为 9.1mm 时,主束有较大的几率进入到储存环中,使储存的离子总数远远超过探测器可以承受的范围。

我们考虑将 Be 靶设计成两种不同厚度,厚度差别越大,产生离子种类差别也越大;然后利用 LISE++ 模拟计算出初级束打在厚度分布为 10mm(99%)+9.3mm(1%)的 Be 靶上得到次级离子的种类、产额,并根据它

们的质荷比计算出它们的循环周期。

3.3 储存的离子及循环周期谱

根据上面的讨论,假设初级束可以均匀照射到两种不同厚度的反应靶上,产生并储存在 CSRe 中的原子核如图 4 所示。可以看出, $^{204,205}\text{Au}$, $^{203,204}\text{Pt}$, $^{198,200,201}\text{Ir}$, $^{197,198}\text{Os}$, ^{194}Re 等 10 种质量未知的核素有合理的产额,可以进行测量,其中 ^{204}Pt 的产额约为每天 30 个。这些质量未知核素近乎全部是在 10mm 靶上产生,而 9.3mm 靶产生大量参考核。产额最大的离子为 $^{206}\text{Tl}^{80+}$,每次注入可以产生~9 个,占总离子数的~55%。实验中可以根据具体情况,调节主束能量:能量越低,产物越偏向丰中子区域,离子总产额越低;能量越高,离子总产额越高。

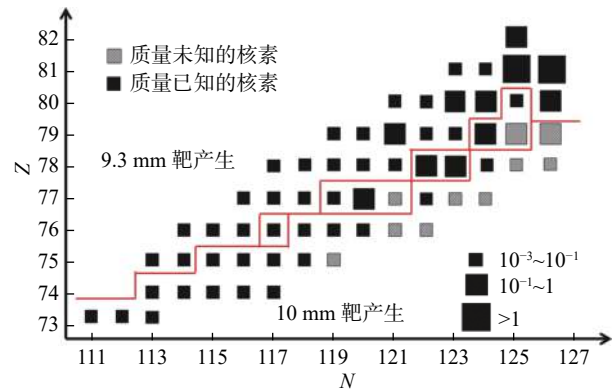


图 4 (在线彩图)初级束可以均匀照射到两种不同厚度的反应靶上,单次注入储存在 CSRe 中的原子核产额图中靠右折线的左边即为为 9.3mm 靶成分上产生的核素,靠左折线的右边为 10mm 靶成分上产生的核素。

根据储存环的设置,可以模拟得到离子的回旋周期谱,图 5 和图 6 分别表示 442MeV/u 的 ^{208}Pb 打在 9.3mm 厚度和 10mm 厚度的 Be 靶上得到的次级离子以及它们的循环周期谱。其中质量未知核素在 10mm 靶上产生,在图 6 中用红色标注。可以看出,9.3mm 靶上产生的核素主要集中在回旋周期谱的左侧,10mm 靶上产生的核素主要集中在右侧,两者在 663~670ns 区间有充分的重叠。

在该实验设置下,CSRe 中储存的离子有很多没有完全剥离,如 ^{204}Au 会有全裸和类氢两种状态存在,其中类氢的 $^{204}\text{Au}^{78+}$ 和全裸的 $^{204}\text{Pt}^{78+}$ 有非常相近的质量电荷比 m/q ,两种离子在回旋周期谱上仅相距~5ps,需要质谱仪有较高分辨能力才能把两个峰区分开。近期的结果显示^[45],CSRe 的质量分辨能力已经达到 320 000,可以把 ^{101}In 的同核异能态同基态清楚地分开。目前正

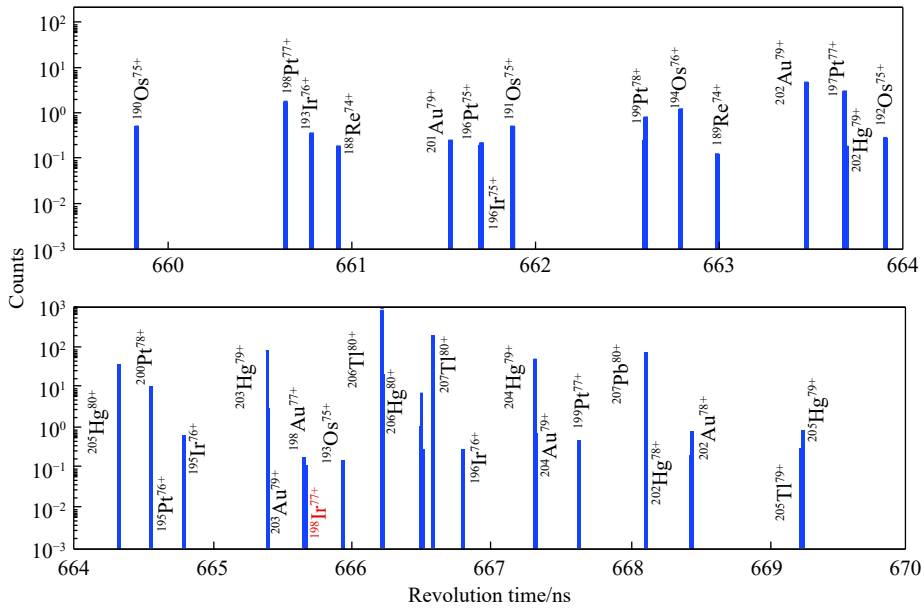


图 5 (在线彩图) 模拟得到的 9.3mm 靶上产生离子的回旋周期谱

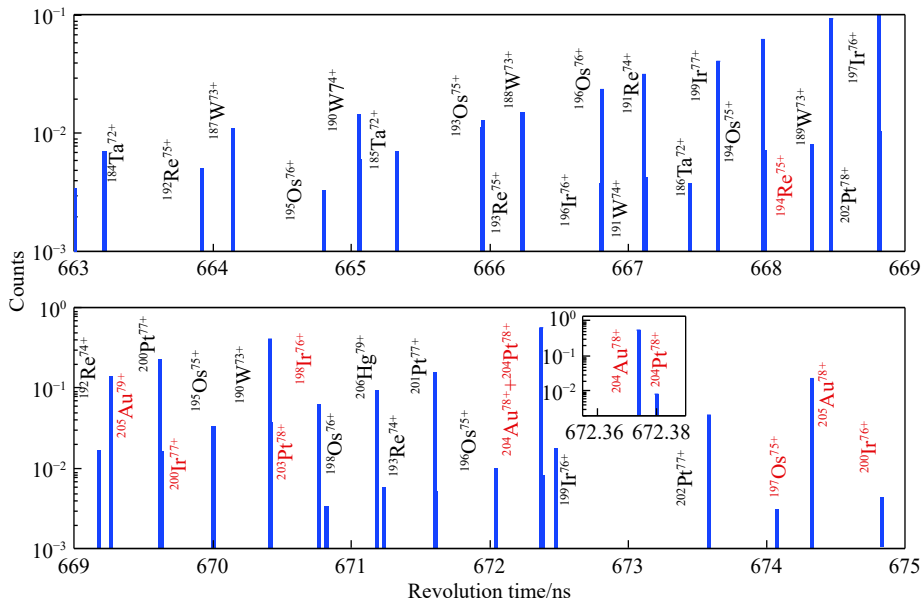


图 6 (在线彩图) 模拟得到的 10mm 靶上产生离子的回旋周期谱

在 CSRe 发展双飞行时间质谱术，预期会在较大回旋周期窗口同时实现高分辨，因此实验中类氢离子的分辨不存在问题。假设本次实验的质量分辨能力和文献 [45] 相当，如果有 6 天的实验数据采集时间，则 ^{204}Pt 的质量精度可以达到 $\sim 50\text{keV}$ ，而 ^{205}Au 的质量精度可以好于 10keV 。

CSRe 质量测量实验中的初级束流为快引出的脉冲束，即在 $\sim 300\text{ns}$ 的时间内将 CSRm 中的所有离子引出打靶。如何保持初级束可以均匀照射到两种不同厚度的反应靶上，在技术上有一定难度。实验中可以将反应靶偏离聚焦点，使束团形成较大的剖面照射到反应靶上。初

步设想反应靶中较薄部分可设计成一个 3.6° 的扇形，束流均匀辐照其上。反应靶的具体结构在进一步讨论中。

4 总结和展望

丰中子重核的质量测量是质量测量领域的一个研究热点，在 CSRe 测量丰中子重核质量是可行的。本文讨论了实验所需的设置。在丰中子核区，当目标核产生截面非常低时，仅针对目标核的最优化传输设置束流线和储存环，则每次注入得到离子数目太少，无法满足针对逐次注入修正磁场的要求。我们建议了一种混合厚度靶

的方法,在无明显改变目标核产额的情况下,显著增加单次注入储存的离子数,满足了实验要求。该方法在更远离稳定线区域有更重要的作用。例如,如果主束流强提高一个量级,我们可以测量更丰中子核素 ^{203}Ir 的质量,针对目标核的最优设置下,每次注入能够储存的平均总离子数小于0.1个,正常设置下无法开展实验。本文讨论的方法提供了一个可行的解决方案。

利用本文讨论的方法,我们可以使用 ^{198}Pt , ^{192}Os , ^{186}W 等重核作为主束,系统地测量 $68 < Z < 82$ 的丰中子核区的质量,深入研究相应的核结构和核天体问题。

参考文献:

- [1] LUNNEY D, PEARSON J M, THIBAUT C. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75: 1021.
- [2] BLAUM K. *Phys Rep*, 2006, 425: 1.
- [3] WANG M. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(3): 380. (in Chinese)
(王猛. *原子核物理评论*, 2017, 34(3): 380.)
- [4] WANG M. *JPS Conf Proc*, 2017, 14: 011001.
- [5] WANG M, ZHANG Y H, ZHOU X H. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica Astronomica*, 2020, 50(5): 052006. (in Chinese)
(王猛, 张玉虎, 周小红. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2020, 50(5): 052006.)
- [6] HUANG W J, AUDI G, WANG M, et al. *Chin Phys C*, 2017, 41: 030002.
- [7] AUDI G, KONDEV F G, WANG M, et al. *Chin Phys C*, 2017, 41: 030001.
- [8] REED M W, CULLEN I J, WALKER P M, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 172501.
- [9] SHUBINA D, CAKIRLI R B, LITVINOV Yu A, et al. *Phys Rev C*, 2013, 88: 024310.
- [10] MUMPOWER M R, SURMAN R, MCLAUGHLIN G C, APRAHAMIAN A. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 86: 86.
- [11] ALVAREZ-POL H, BENLLIURE J, CASAREJOS E, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 041602.
- [12] KURTUKIAN-NIETO T, BENLLIURE J, SCHMIDT K-H, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 024616.
- [13] KURCEWICZ J, FARINON F, GEISSEL H, et al. *Phys Lett B*, 2012, 717: 371.
- [14] CHEN L, LITVINOV Yu A, PLAß W R, et al. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 122503.
- [15] CHEN L, PLAß W R, GEISSEL H, et al. *Nucl Phys A*, 2012, 882: 71.
- [16] CHEN L, WALKER P M, GEISSEL H, et al. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 122502.
- [17] ZHAN W L, XU H S, XIAO G Q, et al. *Nucl Phys A*, 2010, 834: 694c.
- [18] SUN M Z, ZHOU X H, WANG M, et al. *Front Phys*, 2018, 13(6): 132112.
- [19] ZHANG Y H, WANG M, LITVINOV Yu A, et al. *Nuclear Physics Review*, 2016, 33(2): 122.
- [20] HE Y, WANG Z J, XIAO C, et al. Conceptual Design of Linear Injector for SSC of HIRFL[C]. Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, 2010: 482. <http://ir.ihep.ac.cn/handle/311005/252909>.
- [21] MEI B, XU H S, TU X L, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054612.
- [22] MEI B, XU H S, ZHANG Y H, et al. *Phys Rev C*, 2016, 94: 044615.
- [23] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2002, 488: 11.
- [24] CHEN R J, YAN X L, GE W W, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2018, 898: 111.
- [25] GE W W, YUAN Y J, YANG J C, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2018, 908: 388.
- [26] XING Y M, ZHANG Y H, WANG M, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2019, 941: 162331.
- [27] MEI B, TU X L, WANG M, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2010, 624(1): 109.
- [28] TU X L, WANG M, LITVINOV Yu A, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2011, 654: 213.
- [29] TU X L, XU H S, WANG M, et al. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 112501.
- [30] SUN B, KNÖBEL R, LITVINOV Yu A, et al. *Nucl Phys A*, 2008, 812: 1.
- [31] GOLDBERGER A S. *Phys Lett B*, 1974, 53(4): 306.
- [32] TARASOV O. *Nucl Phys A*, 2004, 734: 536.
- [33] BENLLIURE J, SCHMIDT K-H, CORTINA-GIL D, et al. *Nucl Phys A*, 1999, 660: 87.
- [34] CHEN L, PLAß W R, GEISSEL H, et al. *Phys Lett B*, 2010, 691: 234.
- [35] CABALLERO-FOLCH R, DOMINGO-PARDO C, AGRAMUNT J, et al. *Phys Rev C*, 2017, 95: 064322.
- [36] MORALES A I, BENLLIURE J, KURTUKIÁN-NIETO T, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 022702.
- [37] XU X, WANG M, ZHANG Y H, et al. *Chin Phys C*, 2015, 39: 104001.
- [38] XU X, WANG M, BLAUM K, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 064303.
- [39] DUFOUR J P, DEL MORAL R, EMMERMANN H, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1986, 248: 267.
- [40] TARASOV O B, BAZIN D. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2008, 266: 4657.
- [41] MEI B. *Phys Rev C*, 2017, 95: 034608.
- [42] SCHEIDENBERGER C, STÖHLKER TH, MEYERHOF W E, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 1998, 142: 441.
- [43] BIANCHI L, FERNANDEZ B, GASTEBOIS J, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 1989, 276: 509.
- [44] SARAZIN F, SAVAJOLS H, MITTIG W, et al. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 5062.
- [45] XU X, LIU J H, YUAN C X, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100: 051303.

A Proposal for Mass Measurements of Heavy Neutron-rich Ions at HIRFL-CSR

LIU Mingzheng^{1,2}, WANG Meng^{1,2,†}, ZHANG Yuhu^{1,2}, FU Chaoyi¹, ZHOU Xu^{1,2},
ZHANG Min^{1,2}, XING Yuanming¹, SUN Mingze¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: There are a large number of nuclides with unknown mass in heavy neutron-rich region, which urgently need to be measured. We propose to measure the mass of ^{204}Pt and other heavy neutron-rich nuclides by using the isochronous mass spectrometry (IMS) at the research facility HIRFL-CSR. In the IMS experiments, the nuclides of interest are produced by using projectile fragmentation and stored in the storage ring CSRe. The revolution times of the stored ions are measured, from which the nuclear masses are extracted. To obtain high-precision results from the IMS experiments, it is required that several ions are stored in the Experimental Cooling Storage Ring (CSRe) simultaneously to correct for the effect of the magnetic-field instability. However, the production cross sections of the heavy neutron-rich nuclides are very small, so that the number of ions that can be stored in the CSRe is too low to fulfill the requirement. To solve this problem, it is proposed to use a production target with two different thicknesses at different areas. In this way, a sufficiently large number of ions can be produced and stored in the CSRe at the same time without reducing the yield of the target nucleus significantly. The simulations show that it is feasible to measure the masses of heavy neutron-rich nuclides at CSRe. The experimental settings are recommended.

Key words: heavy neutron-rich nuclide; isochronous mass spectrometry; radioactive ion beam line; production target with different thicknesses at different areas

Received date: 05 Jan. 2020; **Revised date:** 15 Feb. 2020

Foundation item: National Basic Research Program of China (2016YFA0400504, 2018YFA0404401)

† **Corresponding author:** WANG Meng, E-mail: wangm@impcas.ac.cn