

文章编号: 1007-4627(2016)03-0302-06

核素等时性质量测量实验中一种基于离子速度纯化次级束的方法

刘大委^{1,2}, 王猛¹, 徐星^{1,2}, 颜鑫亮¹, 帅鹏^{1,3}, 涂小林¹, 张玉虎¹,
陈瑞九¹, 邢元明^{1,2}, 原有进¹, 杨建成¹, 徐珊珊¹, 夏佳文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;

3. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 等时性质量谱仪 (Isochronous Mass Spectrometry, IMS) 是测量短寿命核素质量的有效实验装置。在 IMS 核素质量测量实验过程中, 目标核素通过弹核碎裂反应产生, 并被次级束流线分离、传输后注入到储存环内。由于远离稳定线的目标核素产额非常低, 经常伴随大量杂质核素产生, 这些杂质离子会加重飞行时间探测器 (Time of Flight, TOF) 系统的工作负担。在 HIRFL-CSR 利用 IMS 进行核素质量测量实验过程中, 发展了一种进一步纯化筛选次级离子的方法, 以减轻 TOF 系统的工作负担。基于次级离子在束流中飞行速度的差异性, 利用 HIRFL-CSR 踢轨磁铁 (Kicker) 系统, 调节次级束流注入 CSR 的时间, 使次级离子得到进一步筛选和纯化后注入到 CSR 内。在实验中, 我们测试并验证了该方法的可行性, 并讨论了它在纯化次级束流方面的作用。

关键词: 核素质量; 速度; 注入时间; 纯化次级束

中图分类号: TL67 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.302

1 引言

质量是原子核最基本的属性之一, 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, 是核天体和核结构等研究的重要物理参量之一^[1]。因此, 核素质量的精确测量成为实验核物理的研究热点之一, 等时性质量谱仪 (IMS) 是测量不稳定核素质量的有效实验手段^[2]。近年来, 中国科学院近代物理研究所 (IMP) 已利用 IMS 技术对多个不稳定核素的质量进行了高精度测量, 取得了一批具有重要意义的实验成果^[3-4]。在 IMP, 核素质量测量实验装置主要包括重离子同步加速器 CSRm, 实验冷却储存环 CSRc, 以及连接它们的束流传输线 RIBLL2 (Radioactive Ion Beam Line-2 at Lanzhou, RIBLL2) 等设备^[5]。实验过程简单如下: 初级束流被 CSRm 加速至几百 MeV/u, 然后被快引出与 ⁹Be 靶发生弹核碎裂反应, 产生包含目标核的次级离子 (大部分是裸核)。这些次级离子被次级

束流线磁刚度选择和传输, 最终被注入并存储在 CSRc 内。它们在 CSRc 中的回旋时间信息由安装在 CSRc 内的 TOF 探测器^[6]来获取。TOF 探测器主要有由微通道板 (Micro Channel Plate, MCP)、碳膜 (~19 μg/cm²) 及各种电势板组成 (见图 1)。

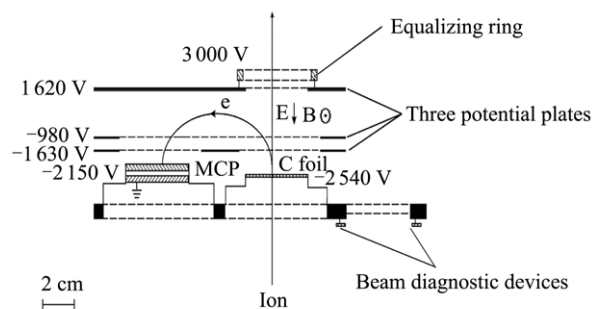


图 1 TOF 探测器结构示意图^[6]

实验过程中, TOF 探测器的碳膜被放置于 CSRc

收稿日期: 2015-09-27; 修改日期: 2015-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1232208, U1432125, 11205205); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB-834401); 亥姆霍兹-中科院联合研究小组(HCJRG-108)

作者简介: 刘大委(1990-), 男, 河南邓州人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究

通信作者: 王猛, E-mail: wangm@impcas.ac.cn.

的中心轨道上。重离子经过碳膜时,在其表面诱发产生二次电子。在探测器中正交电磁场的作用下,二次电子被等时性地偏转到MCP的通道内进行倍增,倍增后的电子被收集到MCP后端的阳极上,产生脉冲信号并被采样率为50 GHz的Tektronix DPO 71254示波器记录。原始数据通过光滑去噪、恒比定时、离子追踪、提取回旋周期、离子鉴别和质量刻度等过程,最终可得出目标核素的质量^[7]。在实验时,我们每隔25 s将次级束注入到CSR_e中一次,并采集离子每次注入之后200 μs内的回旋时间信息,在此过程中离子在CSR_e中运动300圈左右。

TOF探测器的MCP一般由 $10^6 \sim 10^8$ 根平行堆积的单通道电子倍增器组成,其工作时,两端被加上电压而形成电势差(靠近阳极的一端为高电势,另一端为低电势),每个通道内就会产生轴向电场。MCP工作时可简单分为放电和充电两个过程,放电过程:外来带电离子进入MCP的通道内与通道壁碰撞产生大量电子,这些电子同样与通道壁继续碰撞产生更多电子,最终所有的电子在轴向电场作用下到达MCP后端的阳极上,产生脉冲信号,此过程约持续几百ps;充电过程:MCP从外部电源补充电子,此过程大约持续10 ms,在此过程中,通道尚未完全恢复至正常工作状态,进入其中的离子不能得到有效倍增,称之为MCP的饱和效应^[8]。当CSR_e中存储离子太多时,重离子经过TOF探测器的碳膜时,产生大量的二次电子并被偏转到MCP表面,导致其大部分通道饱和。由于MCP通道恢复正常工作的时间较长,在此期间,由碳膜产生的二次电子不能得到有效倍增。因此,随着储存在CSR_e中离子数目增加,TOF探测器的工作负担相应增加,其探测效率和输出信号幅度也随之而降低^[6]。

考虑到正在筹建的大科学实验装置强流重离子加速器(HIAF)^[9],其提供的束流强度更高,因此利用IMS技术测量核素质量时,MCP饱和效应而造成的影响会更加明显,因此有必要使用特殊的技术来解决这个问题,比如我们以前采用脉冲电源的方法^[10]。另一方面,在实验中我们发现初级束流打靶之后所产生的 $A = 2Z$ 次级离子,由于其动量分布较宽,其中一部分处于RIBLL2的磁刚度接受范围内,因此也会被选择并注入到CSR_e内,且所占的比例较大。但是这些离子具有相近的质荷比,其在CSR_e中的回旋周期十分接近,因此,我们无法利用回旋周期来准确地鉴别它们,在刻度质量时,也就无法利用这部分离子的实验数据。为此,我们可设法降低此部分离子的比例,使次级束进一步得到筛选后被注入到CSR_e中,以降低TOF

探测器的工作负担。在此,我们尝试利用HIRF-CSR的Kicker系统,基于次级离子在RIBLL2中飞行速度的差异性,测试了一种纯化次级束的方法。本文将在第二部分介绍纯化次级束的原理,第三部分介绍初级束团的纵向长度对次级离子飞行时间的影响,第四部分介绍实验的结果与讨论,最后是总结与展望。

2 纯化次级离子的原理

初级束打靶之后产生的次级束中包含有各种动量的离子,它们被RIBLL2选择后注入到CSR_e内。根据CSR_e的 γ_t 和目标核的 m/q ,我们设置RIBLL2的磁刚度,使目标核传输效率最大化。在RIBLL2磁刚度接受范围内($\sim 2\%$),经过其选择的次级离子具有相近的磁刚度

$$B\rho = \frac{\gamma m_0 v}{q}, \quad (1)$$

其中: γ , m_0 , v , q 分别是离子的洛伦兹因子、静止质量、速度和电荷。在近似情况下,可认为

$$\frac{A}{Z} \frac{L}{t_0} = \text{const}, \quad (2)$$

其中: A , Z , L , t_0 分别是离子的质量数、电荷数、RIBLL2的中心轨道长度(~ 120 m)和离子在其中的飞行时间。由公式(2)可知,被选择的次级离子 A/Z 正比于其在RIBLL2中飞行时间 t_0 。假设所有次级离子在同一时刻产生,并且作为计时零点,忽略其穿越⁹Be靶所需的时间,则次级离子的 A/Z 也就正比于其到达RIBLL2出口处的时刻 t_{end} 。

实验时,利用CSR_m-RIBLL2-CSR_e的Kicker系统实现初级束的快引出和次级束的注入。Kicker系统主要包括时序控制系统、Kicker磁铁电源、Kicker磁铁等部分。其主要原理是利用Kicker磁铁的磁场来改变离子的运动方向,从而实现束流的引出和注入^[11]。Kicker系统的控制时序如图2所示

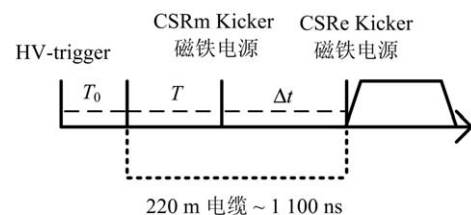


图2 Kicker系统控制时序示意图

其控制流程如下^[12]: 加速器的控制系统发出的 HV-trigger 信号被延迟 T_0 (可调) 后分为两路: 其中一路信号经过可调延迟时间 T 后到达 CSRm 的 Kicker 磁铁电源, 触发并使其工作, 在相应 Kicker 磁铁中产生脉冲磁场, 把初级束流从 CSRm 快引出到 RIBLL2 入口处并与 ^9Be 靶反应产生次级离子; 另一路信号经过电缆 (~ 220 m, 固定延迟时间 ~ 1100 ns) 传输至 CSRe 的 Kicker 磁铁电源, 同理, 负责把次级束流从 RIBLL2 出口处注入到 CSRe 内。CSRe 的 Kicker 磁铁电源工作时, 在 Kicker 磁铁中产生的脉冲励磁电流有一个约 600 ns 的平台持续时间, 只有处于此“窗口”期内的次级离子才能被注入到 CSRe 内。

假设所有次级离子是在 HV-trigger 信号触发 CSRm 的 Kicker 的磁铁电源时产生的, 如前所述, 次级离子 t_{end} 正比于其 A/Z 。如图 2 所示, 我们通过改变 T (同时改变 T_0 , 使 $T + T_0 = 1050$ ns, 保证初级束流被完全引出), 就能改变 CSRe 的 Kicker 磁铁工作“窗口”相对于次级离子产生时刻的时间间隔 $\Delta t = 1100 - T$, 从而使目标次级离子的 t_{end} 处于“窗口”期内, 而非目标次级离子的 t_{end} 处于“窗口”期外, 使次级离子得到进一步筛选后注入到 CSRe 内, 以减轻 TOF 探测器的工作负担。

3 初级束流束团纵向长度的影响

如前所述, 次级离子 A/Z 与 t_{end} 的线性关系是纯化次级束的关键。但是, 从 CSRm 快引出的初级束团离子在相空间中有一定的纵向分布, 同一束团中不同弹核与靶核反应的时刻 (相对于初级束刚被引出的时刻) 并不相同, 由此产生的次级离子就有不同的起始飞行时刻, 并最终影响次级离子 t_{end} 与其 A/Z 的线性关系。假设初级束团在纵向相空间上服从高斯分布, 定义其 σ 为束团纵向长度, 忽略弹核碎裂反应及次级离子穿越 ^9Be 靶所需的时间, 则次级离子在 RIBLL2 中的起始飞行时刻 (相对于 CSRm 的 Kicker 磁铁电源开始工作的时刻) 服从 $N(0, \sigma)$ 分布。

在 $^{78}\text{Kr}^{28+}$ 作为初级束流的核素质量测量实验中, 我们测量了其纵向长度, 实验过程如下: 初级束流被 CSRm 加速至 485.66 MeV/u 后被引出至 RIBLL2 入

口处, 被 ^9Be 靶剥离电子成为 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 后注入到 CSRe 内, TOF 探测器采集三个小时实验数据。实验时, CSRe 的 $\gamma_t = 1.4$, 且被设置在 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 的等时性光学模式上, CSRe 和 RIBLL2 的磁刚度分别被设为 6.5893 Tm, 则 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 在 CSRe 中的回旋周期约是 614 ns。原始数据经光滑去噪、恒比定时等过程处理后, 可得出 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 离子多次注入 CSRe 后 139 ~ 149 μs 内的分布, 如图 3 所示。

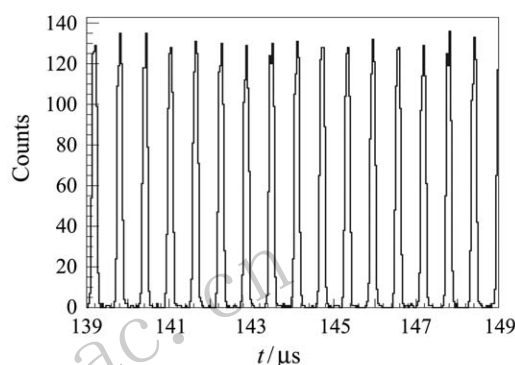


图 3 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 多次注入到 CSRe 后 139 ~ 149 μs (23 圈 ~ 36 圈) 内的分布图

图 3 中每个峰代表 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 束团在 CSRe 中每回旋一周时的分布, 相邻两峰中心值的时间差大约是 614 ns, 对应 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 的回旋周期。用高斯函数拟合图 3 中每个峰的分布, 可得出对应圈数的束团的纵向长度 σ , 如图 4 所示。从图 4 可看出 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 束团纵向长度在误差范围内基本一致, 说明在 CSRe 内飞行过程中, 其动量分散其本保持不变。重离子的电子被剥离过程不仅致使其电荷态发生变化, 同时, 也会造成束流发射度增加和束流品质变差, 所以剥离电子后的束团离子动量分散

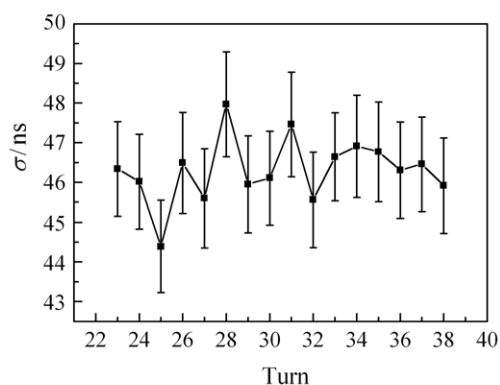


图 4 用高斯函数拟合的 CSRe 中 $^{78}\text{Kr}^{36+}$ 束团的纵向长度与其在 CSRe 中回旋圈数关系

较剥离前稍有增加^[13]。因此, 初级束 $^{78}\text{Kr}^{28+}$ 的实际纵向长度更小。

在 $^{112}\text{Sn}^{28+}$ 作为初级束的质量测量实验中, 我们测试了基于离子速度纯化次级束方法的实际效果。实验前, 我们评估了初级束团纵向长度对次级束离子 t_{end} 与 A/Z 线性关系的影响。由于从CSRm快引出的束团纵向长度主要由CSRm高频设备决定, 所以不同初级束的纵向长度相差不大。参照 $^{78}\text{Kr}^{28+}$ 束团长度, 我们分别取 $^{112}\text{Sn}^{28+}$ 束团纵向长度 $\sigma = 0, 45 \text{ ns}$ 两种情况, 用LISE模拟并计算了弹核碎片 t_{end} 与其 A/Z 的相关系数。模拟时, RIBLL2的参数、初级束的能量与实验情况一致, 结果分别如图5, 6所示。

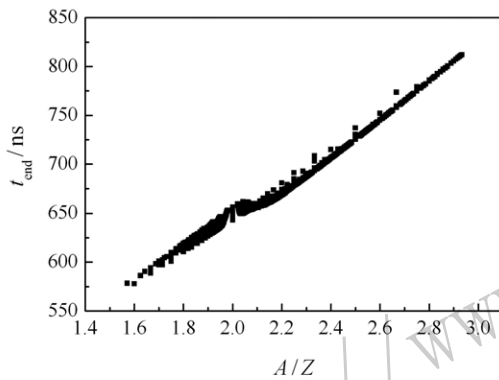


图5 假设初级束纵向长度 $\sigma = 0 \text{ ns}$ 时, 即所有的次级离子起始飞行时刻相同, 次级离子 t_{end} 与其 A/Z 的关系, 相关系数 $r = 0.9682$

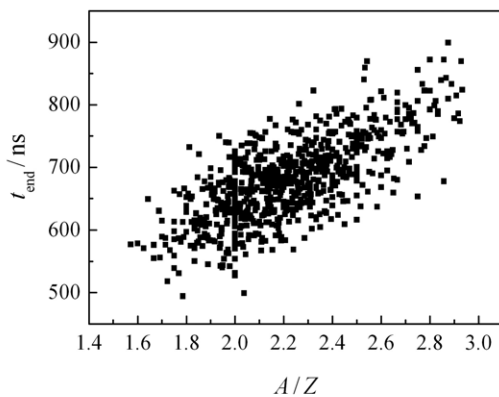


图6 假设初级束的纵向长度 $\sigma = 45 \text{ ns}$ 时, 即次级离子的起时飞行时刻服从 $N(0, 45 \text{ ns})$ 的分布, 次级离子 t_{end} 与 A/Z 的关系, 其相关系数 $r = 0.7122$

对比图5, 6可看出, 初级束纵向长度的增加显著降低了次级离子 t_{end} 与其 A/Z 的线性关系, 但

在 $\sigma = 45 \text{ ns}$ 时, 次级离子 t_{end} 与其 A/Z 的相关系数 $r = 0.7122$, 二者中度相关, 因此, 基于离子 t_{end} 的差异性纯化次级束有一定可行性。

4 实验过程和结果讨论

在 $^{112}\text{Sn}^{28+}$ 束流实验中, CSR的 $\gamma_t = 1.302$, 且被设置在 $^{82}\text{Zr}^{40+}$ 等时性光学模式上, RIBLL2和CSR的 $B\rho$ 设为 5.3065 Tm 。初级束被加速至 391.6 MeV/u 后被引出与 10 mm 的 ^9Be 靶反应, 弹核碎片被RIBLL2选择后注入到CSR中。为了改变CSR的Kicker磁铁“窗口”的相对工作时间, 我们设定了七组不同的延迟时间 T , 在相应的每个 $\Delta t = 250, 300, 320, 350, 450, 500, 900 \text{ ns}$ 的设置下, 用TOF探测器采集两小时的实验数据, 原始的实验数据经后续的恒比定时、离子追踪、离子鉴别等过程, 计算出每个 Δt 设置下的次级离子 A/Z 的归一化分布, $A = 2Z$ 离子的比例, 结果如图7~9所示。

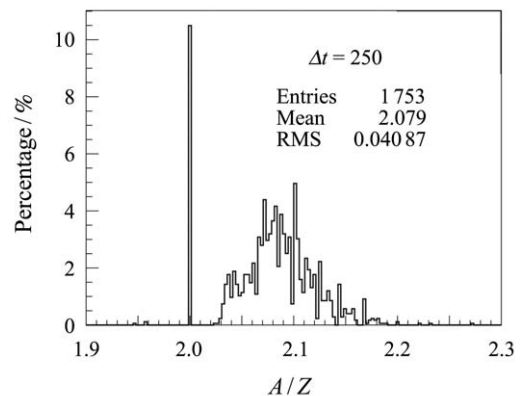


图7 $\Delta t = 250 \text{ ns}$ 时, 次级离子 A/Z 的归一化分布图

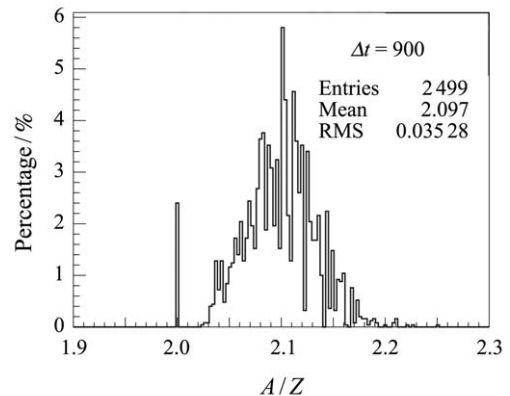


图8 $\Delta t = 900 \text{ ns}$ 时, 次级离子 A/Z 的归一化分布图

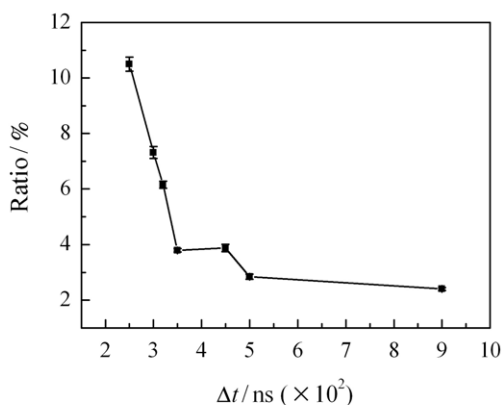


图 9 $A = 2Z$ 的离子在次级束中所占比例随 Δt 的变化趋势

对比图 7, 8, 可以明显看出次级束离子中所占比例最高的离子由 $\Delta t = 250 \text{ ns}$ 时的 $A = 2Z$ 离子变为 $\Delta t = 900 \text{ ns}$ 时 $A \sim 2.1Z$ 离子。从图 9 可以看出, 随着 Δt 的增加, $A = 2Z$ 离子所占的比例总体上呈下降趋势, 由最高的 10.5% 减少到 2.5%。这是由于其 t_{end} 较小, 随着 Δt 的增加, 处于 CSRe 的 Kicker 磁铁工作“窗口”内的比例减少, 注入到 CSRe 中比例的也就相应地减少。

为了考察 CSRe 的 Kicker 磁铁“窗口”工作时间的相对移动对次级束中 A/Z 值较大离子比例的影响, 我们选择 A/Z 在 [2.1262, 2.2246] 范围内的离子所占比例的变化(若在此范围内只选择 A/Z 某一特定值的离子, 因其统计较少, 变化趋势不明显), 结果如图 10 所示。

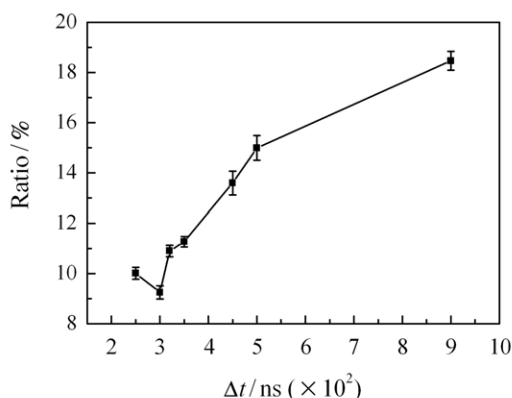


图 10 次级离子 A/Z 在 [2.1262, 2.2246] 范围内的离子在次级束中的比例随 Δt 的变化

从图 10 中可看出, 随着 Δt 增大, A/Z 在 [2.1262, 2.2246] 范围内离子所占的比例呈增加的趋势。次级束中 A/Z 值较大离子比例的增加, 而 A/Z 值较小离子比

例的减少, 会使次级束离子 A/Z 平均值增加。 A/Z 平均值的变化如图 11 所示, 可以看出, 随着 Δt 的增加, 次级束离子的 A/Z 平均值呈增加趋势, 符合预期结果。

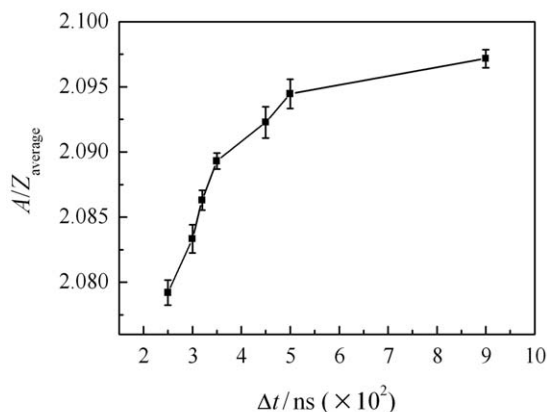


图 11 A/Z 的平均值随 Δt 的变化趋势

此外, 本次实验的目标核是 $^{82}\text{Zr}^{40+}$, 其 $A/Z = 2.05$, 所以在刻度核素质量时, 我们要用到 $A/Z = 2.05$ 附近的离子。结合图 9, 10 的结果分析可知, 当 $\Delta t = 350 \text{ ns}$ 时, $A = 2Z$ 和 A/Z 较大的离子的比例都较低, 最有利于纯化次级束离子和减轻 TOF 探测器工作负担。

5 总结与展望

基于次级离子速度的差异性造成其到达 RIBLL2 出口处时刻的不同, 利用现有实验装置的 Kicker 系统, 我们测试了一种筛选次级束离子的新方法。从实验结果分析, 只要选择合适的延迟时间 T , 可以大幅度降低非相关核的比例, 在一定程度上使次级束得到纯化, 从而减轻了 TOF 探测器的工作负担。总之, 本次实验验证了在 IMS 实验中利用次级束离子速度的差异性纯化次级束的可行性, 并为以后的实验提供了参考依据。

同时, 由于初级束团的纵向长度会降低次级离子的 t_{end} 与其 A/Z 的线性关系, 所以此方法更适合于初级束团纵向长度较短的次级离子纯化。另外, 延长次级离子在传输线中的飞行时间, 可以扩大不同 A/Z 离子飞行时间的差异性, 增强离子 t_{end} 与 A/Z 的线性相关程度, 也利于提高纯化效率。此外, 由于此方法需要通过调节 Kicker 时序实现, 所以更精确的 Kicker 时序控制系统也有助于纯化次级束离子。

参考文献:

- [1] BLAUM K. Phys Rep, 2006, **425**: 1.
- [2] HAUSMANN M, ATTALLAH F, BECKERT K, *et al.* NIM A, 2000, **446**: 569.
- [3] TU X L, XU H S, WANG M, *et al.* Phys Rev Lett, 2011, **106**: 112501.
- [4] ZHANG Yuhu, WANG Meng, YU A.LITVINOV, *et al.* Nucl Rhys Rev, 2016, **33(2)**: 122.
- [5] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2002, **488**: 11.
- [6] MEI B, TU X L, WANG M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2010, **624**: 109.
- [7] TU Xiaolin. The Measurement of Masses for Short-Lived $A = 2Z - 1$ Nuclides Conducted at the HIRF-CSR[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010(4). (in Chinese)
(涂小林. HIRF-CSR上 $A = 2Z - 1$ 短寿命核质量测量[D], 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2010(4).)
- [8] WIZE J L. Nucl Instr Meth A, 1979, **162**: 587.
- [9] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2013, **317**: 263.
- [10] ZHANG W, TU X L, WANG M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2014, **755**: 38.
- [11] YUAN Youjin, SONG Mingtao, DONG Jinmei, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**: 275. (in Chinese)
(原有进, 宋明涛, 董金梅, 等. 强激光束与粒子束, 2005, **17**: 275.)
- [12] WANG Yanyu, GUO Yuhui, LIN Feiyu, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2008, **08**: 1353. (in Chinese)
(王彦瑜, 郭玉辉, 林飞宇, 等. 强激光束与粒子束, 2008, **08**: 1353.)
- [13] CHAI Weiping, XIA Jiawei, YANG Jiancheng, *et al.* Nuclear Science and Engineering, 2013, **23**: 38. (in Chinese)
(柴伟平, 夏佳文, 杨建成, 等. 核科学与工程, 2013, **23**: 38.)

A Method of Purifying the Secondary Beam Based on the Ions Velocities in Isochronous Atomic Mass Measurements

LIU Dawei^{1,2}, WANG Meng¹, XU Xing^{1,2}, YAN Xinliang¹, SHUAI Peng^{1,3}, TU Xiaolin¹, ZHANG Yuhu¹, CHENG Ruijiu¹, XING Yuanming^{1,2}, YUAN Youjing¹, YANG Jiancheng¹, XU Hushan¹, XIA Jiawen¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The isochronous Mass Spectrometry(IMS) is a powerful experimental instrument for measuring masses of short-lived nuclides. In the IMS, the nuclides of interest are produced via the projectile fragmentation reaction, then injected into the storage ring after the in-flight separation with beam line. The yields of the nuclides of interest are usually very small accompanying a huge amount of contaminant nuclides, aggravating the load of time-of-flight(TOF) detector. In the IMS nuclear mass measurement experiment conducted at the HIRFL-CSR, we developed a method of purifying the secondary beam fragments to ease the burden of the TOF detector, which is based on the differences of the ions' velocities in the beam line and realized by adjusting the injection time of secondary fragments using the Kicker system of the HIRFL-CSR. We tested and verified the method in an online experiment, and its performance is discussed in this paper.

Key words: nuclides mass; velocity; injection time; purifying the secondary beam

Received date: 27 Sep. 2015; Revised date: 11 Nov. 2015

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1232208, U1432125, 11205205); National Basic Research Program of China(973Program)(2013CB834401); Helmholtz-CAS Join Research Group(HCJRG-108)

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