

文章编号: 1007-4627(2017)03-0414-06

全剥离离子 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 的衰变研究

曾奇^{1,2}, 王猛^{2,†}, 张玉虎^{2,†}, 涂小林², 徐星², 陈瑞九², 陈相成², 付超义^{2,3}, 黄文嘉^{2,3},
刘君豪^{2,3}, 李宏福^{2,3}, 司敏^{2,3}, 帅鹏², 孙铭泽^{2,3}, 邢元明^{2,3}, 颜鑫亮², 杨建成²,
原有进², 张鹏^{2,3}, 章卫^{2,3}, 周小红², 徐珊珊², 肖国青²

(1. 中国科学技术大学, 合肥 230026;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)上, 用等时性质量谱仪首次研究了百微秒量级全剥离离子 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 的衰变。 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 由初级束流 ^{112}Sn 轰击 Be 靶产生, 经过放射性束流线 RIBLL2 的筛选后注入到等时性设置的实验环 CSR_e 中, 并利用安装在实验环中的飞行时间探测器测量离子在 CSR_e 中的循环周期。 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 退激引起的质量改变会带来其循环周期的变化, 由此直接观测到了 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 退激到基态的过程。确定了本次实验中衰变事例探测的灵敏区间, 并讨论了衰变发生时刻的测量精度。同时, 测量了短寿命核素 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 的质量, 其半衰期约为 100 μs , 这是目前储存环质量谱仪测量的最短寿命核素的质量。

关键词: HIRFL-CSR; 等时性质量谱仪; 全剥离离子; 原子核质量测量

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.414

1 引言

寿命是放射性原子核的一个基本性质。自从放射性现象被发现以来, 外部环境对原子核衰变性质的影响一直是一个热点研究课题^[1]。这些研究结果不仅可以促进人们对核衰变现象的了解, 而且在核废料处理等应用领域具有潜在应用价值。另外, 在天体演化过程中, 恒星内的环境温度可能达到 100 keV 或更高, 这导致在恒星等离子体中的离子具有很高的电离度, 大量处于部分或全剥离状态, 其衰变性质同中性原子相比会有很大的差别, 从而影响天体内核素生成的路径, 因此高离化态离子的衰变性质对核天体物理研究也具有重要意义^[2]。

原子核的 β 衰变、电子俘获和内转换等衰变过程都对原子核附近的电子密度非常敏感^[1]。尽管早有理论研究, 但由于实验条件限制, 一般仅能通过改变原子所处的压力、温度、电磁场、化学环境等环境参数改变核外电子密度, 观测到的原子核寿命改变一般小于 1%^[3]。对于极端电荷态条件下原子核衰变性质的实验研究还很少, 相关理论的可靠性难以验证。这是因为这类研究技术上有很大挑战, 需要满足两个基础条件: 一个是很高

电荷态甚至全剥离的放射性核素的产生; 另一个是高电荷态离子的储存和探测。近年来, 随着加速器及相关实验技术的发展, 为高电荷态重离子的半衰期的实验研究提供了重要的条件。例如在法国 GANIL 的 SPEG 装置上, 测量 ^{125}Te 的第一激发态在 47^+ 和 48^+ 电荷态下, 其半衰期比中性原子状态下 (1.49 ns) 分别增加了 300% 和 640%^[4, 5]。由于离子在磁谱仪中的飞行时间仅有 ns 量级, 因而仅适用于测量 ns 量级离子的半衰期而不适合测量长寿命的离子的半衰期。离子阱也可以用来储存高电荷态离子和并测量其衰变^[6], 但对重核不容易达到如类氢或全裸的极高电荷态。

重离子储存环和中高能加速器及放射性束流线配合, 为研究高电荷态离子的半衰期及质量提供了独特的实验平台。例如在德国的 GSI 实验储存环 ESR 上, 已经利用肖特基质谱仪 (SMS) 开展了多次高电荷态离子的衰变实验研究, 并有了一些重要的发现。如束缚态 β 衰变道的开放, 使中性原子状态下的稳定核素 ^{163}Dy , 在外层电子被全剥离后具有放射性, 半衰期为 47 d^[7]。利用 SMS 可以通过监测离子的循环周期直接观测衰变, 从而精细研究高电荷态离子衰变的奇异性质^[8, 9]。但由

收稿日期: 2016-12-07; 修改日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1232208, U1432125, 11205205, 11035007); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB834401); 国家重点研发计划项目(2016YFA0400504)

作者简介: 曾奇(1988-), 男, 江西宁都人, 博士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: qzeng@impcas.ac.cn

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

在SMS实验中需要时间对储存的离子进行冷却, 冷却时间至少需要1 s, 因而SMS方法局限于半衰期大于1 s的离子研究。

通过调节储存环的设置, 可以使目标核在储存环的回旋周期不依赖速度分散, 这就实现了等时性质量谱仪(IMS)。因为不需要对离子进行冷却, IMS可以用来研究极短寿命的原子核。德国GSI和中国科学院近代物理研究所利用IMS精确测量了一批原子核的质量^[10, 11], 并发现和测量了一些原子核的同质异能态^[12, 13]。原则上利用IMS可以研究寿命短至数十微秒离子的性质, 但目前质量测量的最短寿命还在ms量级, 短寿命核素的衰变也没有被直接观测到。

我们选取同核异能态 ^{94m}Ru 作为本次实验目标, 其自旋和宇称为 8^+ , 在中性原子状态下半衰期为 $71(4)\mu\text{s}$ ^[14], 通过 γ 或电子内转换退激, 其内转换系数估算为0.335^[15]。在核外电子全剥离状态下, 内转换衰变道关闭, 预期半衰期为 $95(5)\mu\text{s}$ 。

2 实验介绍

本次实验的设置与等时性质量测量实验类似^[10]。目标核由弹核碎裂产生, 初级束流 $^{112}\text{Sn}^{26+}$ 在兰州重离子研究装置(HIRFL)的扇聚焦回旋加速器(SFC)中加速到3.7 MeV/u, 被剥离后注入到兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的主环CSRm中。束流 $^{112}\text{Sn}^{35+}$ 在CSRm中累积到约为150 μA 、加速到376.42 MeV/u后, 快引出在放射性束流线(RIBLL2)入口处轰击厚约10.0 mm的 ^9Be 靶发生弹核碎裂反应, 产生次级碎片。次级碎片经过RIBLL2的筛选及RIBLL2出口处的碳膜剥离后, 注入到实验环CSRe中储存和测量。

目标离子比较靠近 β 稳定线, 其它杂质离子产额较高。为了进一步纯化目标离子, 我们把RIBLL2和CSRe中心磁刚度 $B\rho$ 分别设置为5.963, 5.5294 Tm。在这种设置下, 类氢离子 $^{94m}\text{Ru}^{43+}$ 及其相近质荷比的次级离子通过RIBLL2。RIBLL2出口处设置0.2 mm厚的 ^{12}C 剥离膜, 类氢离子 $^{94m}\text{Ru}^{43+}$ 打靶成全剥离离子 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 后注入到CSRe。

CSRe针对目标离子 $^{94}\text{Ru}^{44+}$ 设置为等时性模式。储存在CSRe中的离子的回旋周期 T 与其质荷比、速度分散 $\Delta v/v$ 的关系式如下^[16]:

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

其中 γ , γ_t 分别为离子的相对论洛伦兹因子和储存环的转变点。如果等时性条件 $\gamma = \gamma_t$ 成立, 离子的回旋

周期与其速度无关, 只依赖于其质荷比。本次实验中, CSRe的转变点 $\gamma_t = 1.302$, 磁刚度 $B\rho$ 设置为5.5294 Tm。在这种情况下, 目标离子 $^{94}\text{Ru}^{44+}$ 在CSRe中每圈的平均回旋周期是一个恒定值。

离子的循环周期由一个特殊设计的飞行时间探测器测定^[17]。飞行时间探测器上装有一个厚度约为19 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、直径为40 mm的碳膜。碳膜放置在实验环束流孔道的几何中心, 储存离子每次穿过碳膜时, 会产生二次电子。二次电子在正交电场(130 V/mm)、磁场(约80 Gs)的作用下边加速边偏转, 传输到微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)探测器上。电子在微通道板探测器被收集并放大形成信号, 这些信号通过高频同轴电缆传输到数字示波器Tektronix DPO71254上。示波器的采样频率为50 GHz, 纵向幅度的采样精度为0.8 mV。示波器的采集的时间长度为200 μs (10^7 个采样点), 在这段时间内离子在CSRe中回旋约300圈。

在一般的质量测量实验中, 采集数据的最初几圈信号叠加现象严重而无法使用。这是因为RIBLL2的接收度要比CSRe的接收度大, 许多注入到CSRe的离子并不能稳定储存在其中, 经过几圈到几十圈后就会超出CSRe的接收度, 从而碰到真空管道上丢失。而这些杂散离子会引起微通道板探测器发生饱和效应, 造成探测器探测效率的下降及信号幅度的减小。为了避免这个现象, 在本次实验中, 首次用了脉冲电源^[18]替代传统的直流电源为飞行时间探测器提供工作电压, 即用脉冲高压替代连续高压。在这种设置下, 次级离子刚进入CSRe实验环时, 探测器处于非工作状态。离子在CSRe飞行33 μs (约50圈)后, 脉冲电源提供高压使飞行时间探测器开始正常工作。离子的信号在开始获取数据时就能很好地鉴别, 使获取数据能被有效利用。

整个实验共采集了3304次注入获取的数据, 有效数据获取的时间为30 h, 回旋周期在660~685 ns之间的离子有16932个, 找到的离子的总信号数为5784461, 每次注入中的离子数约为5个, 平均每个离子的信号数为215个, 单个离子平均探测效率约为72%, 平均幅度约为219 mV。

3 数据处理和分析

储存在CSRe中的每个离子产生的信号都是周期性的。对周期性关联的信号进行搜索, 我们可以找到储存的每个离子并提取其相关信号, 详细过程可参考文献^[19]。这里需要指出, 如果离子 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 在储存过程中衰变到基态 $^{94}\text{Ru}^{44+}$, 则其质量变小, 平均回旋

周期将相应变小。已知 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 的激发能为 $2644(4)$ keV^[14], 根据公式(1)可估算出其衰变前后回旋周期变化约为 11.9 ps。我们在搜寻关联信号时采用的容忍区间为 220 ps, 这主要由飞行时间探测器的时间分辨和由于Betatron震荡引起的回旋周期变化^[20]决定。 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 衰变前后回旋周期的变化远小于搜寻的容忍区间, 因此不会对寻找在储存过程中发生衰变的事例产生影响。

数据处理中, 我们要求离子的储存寿命必须大于 186 μs (已扣除 33 μs 的时间延迟)且探测效率必须大于 20% 。非等时性窗口内的离子在碳膜上的能量损失对离子的平均回旋时间有较大影响, 因而我们用二阶多项式函数拟合离子的飞行时间与圈数的关系来计算离子的回旋周期。离子在CSR_e中的飞行时间 t_n 与回旋圈数 n 的关系如下:

$$t_n = c_0 + c_1 * n + c_2 * n^2, \quad (2)$$

其中 n 为离子的循环圈数, t_n 为第 n 圈的飞行时间, c_0, c_1, c_2 为自由参数。二阶多项式曲线(式2)的斜率即为离子的平均回旋周期 $T = c_1 + 2 * c_2 * n$, 我们选取 $n = 35$ 圈的周期作为离子的平均回旋周期。通过实验得到的回旋周期谱和模拟谱对比, 会鉴别出实验中每个离子的种类。从实验与模拟的回旋周期谱我们可知,

目标离子 $^{94}\text{Ru}^{44+}$ 的基态与同质异能态的回旋周期范围为 670.90 至 670.98 ns。我们锁定这个周期范围, 并在这个范围内寻找衰变事例以及计算其对应的衰变时刻。

3.1 衰变事例的确定

离子 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 在储存过程中发生衰变后, 平均回旋周期将相应变小 11.9 ps。实验中使用的飞行时间探测器的时间分辨为 50 ps (标准偏差)^[17]。另外离子在储存环中做Betatron震荡, 经模拟发现Betatron震荡幅度和离子发射度相关, 引起同一离子在不同圈的回旋周期差别可能达到 100 ps^[20]。综上, 比较相邻单圈的回旋周期无法确定离子是否发生衰变, 所以, 我们通过观测一段时间内平均回旋周期的变化来确定衰变事例。具体做法是, 针对候选离子: (1) 首先找出 1 至 N 圈内所有的信号点, 使用二阶多项式拟合这些信号点时刻随回旋圈数的变化, 提取中间圈数 $(N+1)/2$ 的回旋周期作为这段时间的平均回旋周期; (2) 取 2 至 $N+1$ 圈内所有的信号点, 拟合数据提取中间圈数 $(N+3)/2$ 的回旋周期作为这段时间的平均回旋周期; (3) 以此类推, 每 N 圈得到一个平均回旋周期值。图1为 N 取 $9, 29, 49$ 时, 得到的平均回旋周期随圈数的变化。图中a和b分别为未发生衰变和发生衰变的事例, 可以看出这种方法能很好地确定衰变事例, 并能直观地展现衰变发生后回旋周期的变化。

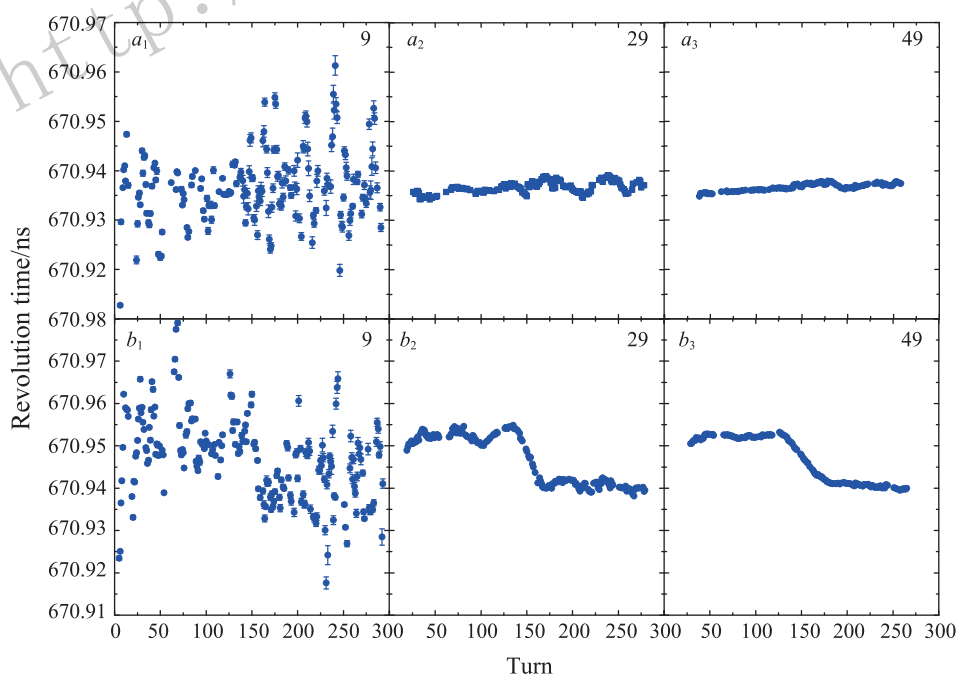


图 1 (在线彩图) a_1, a_2, a_3 和 b_1, b_2, b_3 分别为单次注入中未衰变事例和衰变事例在 N 取 $9, 29, 49$ 圈时, 平均回旋周期随回旋圈数的变化

衰变事例的灵敏区间是由探测盲区 and 回旋周期的标准偏差共同确定的。当选取 N 圈数据计算平均回旋周期时, 如果衰变发生在数据获取开始的前 N 圈或获取结束前的最后 N 圈内, 则无法指认衰变事例, 形成探测盲区。在不设置探测盲区的条件下, 对所有候选事例进行了人工判别, 得到的衰变事例最早发生在 $17\ \mu\text{s}$, 最晚在 $170\ \mu\text{s}$ 。根据得到的所有事例, 估算在 $17\ \mu\text{s}$ 之前和 $170\ \mu\text{s}$ 之后没有衰变发生的几率分别仅有 0.02% 和 0.2% 。因此我们判断在这个区间有衰变发生, 但衰变事例没有被提取出来。故希望探测盲区越小越好, 即最少观测圈数越小越好。但从图 1 中可以看出, N 取值太小时, 不能有效地确定衰变事例。这是因为拟合中使用的数据点太少, 导致拟合结果的误差过大。同时, 还需考虑当观测圈数 N 不同时, 平均回旋周期的标准偏差的大小。我们考虑了离子在储存环中的震荡及探测器的分辨能力, 产生一批模拟数据进行分析, 拟合得到的回旋周期值的标准偏差 σ 随选取观测圈数的变化如图 2 所示。图 2 中观测圈数变大时, 标准偏差 σ 变小。当观测圈数 N 大于 20 时, 衰变事例能被鉴别。同时最少观测圈数还与具体的实验情况 (例如探测器的探测效率等) 相关。因此, 我们一方面希望最少观测圈数尽可能少, 这使得探测盲区小, 所探测的离子总数目能变得更多; 但另外一方面, 又希望观测圈数尽可能多, 这样衰变事例就能更为有效地鉴别和提取。综上, 本次实验选取的观测圈数为 29 圈 (约 $20\ \mu\text{s}$), 这样衰变事例就可以被有效地鉴别和提取而不会有较大的盲区。从而, 我们确定 $20\sim 180\ \mu\text{s}$ 为观测衰变事例的灵敏区间。在下面讨论中, 我们仅考虑衰变发生在灵敏区间内的事例。

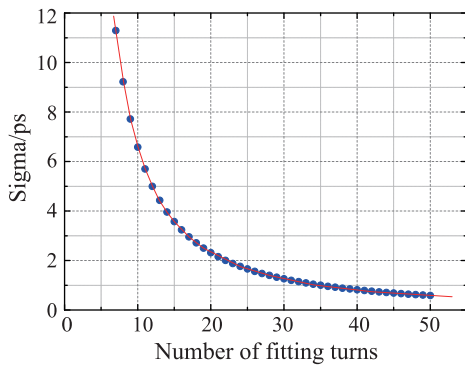


图 2 (在线彩图) 平均回旋周期的标准偏差随拟合圈数的变化

3.2 衰变时刻的测量

CSRe 针对 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 进行等时性设置, 目标离子每一圈的平均回旋周期是一个常数。如果离子不发生衰变, 可以用线性函数很好地拟合信号的时间与圈数的

关系。当离子在观测过程中发生衰变, 其周期将发生变化, 这条曲线的斜率将有一个明显的变化。图 3 显示线性拟合的残差随圈数变化关系。图 3(a), 3(b) 分别为同一次注入中衰变和未衰变事例的残差图。因为衰变前后的回旋周期有较大变化, 因而可以初步认为衰变发生在图 3(a) 的拐点处附近。确定衰变事例后, 选取图 3(a) 中拐点处的最高点作为分界点, 对分界点前后的飞行时间与圈数分别进行直线拟合, 这两条直线的交点所对应的时刻即为 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 的衰变时刻。

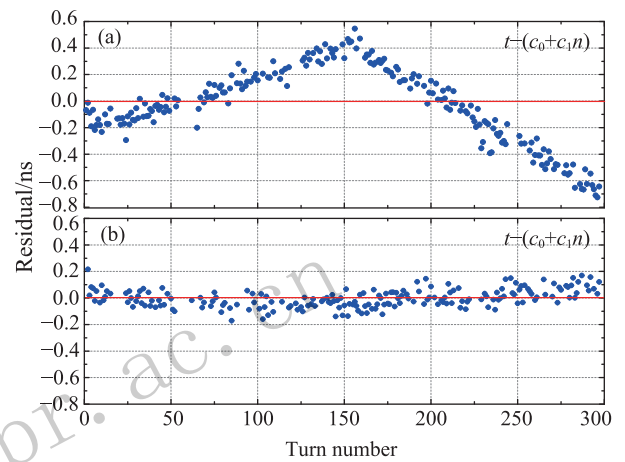


图 3 (在线彩图) (a) 和 (b) 分别为同一次注入中衰变和未衰变事例直线拟合残差图

我们通过模拟数据来确定衰变时刻的测量精度。首先不考虑离子的 Betatron 震荡及探测器的定时误差。假设一个离子的衰变时刻在 150 圈时, 得到的拟合残差如图 4(a) 所示, 其衰变时刻直接被能精确确定。但如果考虑离子的 Betatron 震荡及探测器定时误差, 得到的

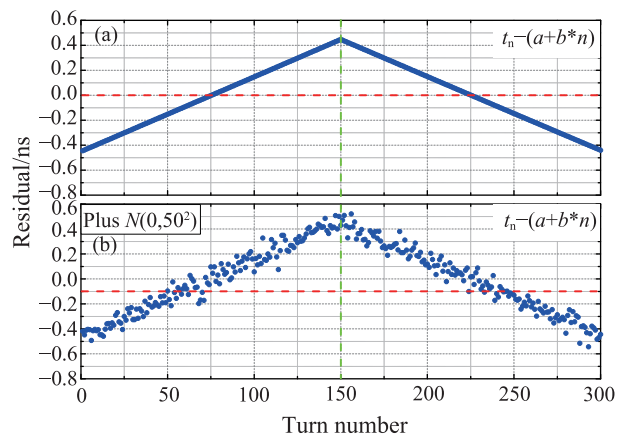


图 4 (在线彩图) 模拟得到衰变事例的时间与圈数关系的直线拟合残差

(a) 为不考虑离子的 Betatron 震荡及探测器的定时误差时, 衰变事例的残差图; (b) 为加上离子的 Betatron 震荡及探测器定时误差 (中心值为 0, $\sigma=50$ 的高斯分布随机数) 后, 衰变事例的直线拟合残差图。

拟合残差如图 4(b) 所示, 其衰变时刻不能被直接确定。图 4(b) 的模拟数据较好地再现了图 3(a) 中 $^{94}\text{mRu}^{44+}$ 衰变的实验数据。因此, 我们用模拟数据衰变时刻的标准偏差作为实验中衰变时刻的测量精度。我们对离子在同一时刻发生衰变进行了 N 次模拟, 并用 3.2 节中所介绍的方法计算这 N 次模拟衰变事例的衰变时刻。随后我们计算这 N 个衰变时刻的标准偏差。通过以上方法, 我们得到了衰变发生在 20~180 μs 内的衰变时刻的标准偏差。通过这些标准偏差可知, 衰变时刻在 20 μs (约 29 圈) 和 180 μs (约 271 圈) 处的标准偏差最大, 其值为 1.0 μs 。衰变时刻在中间圈 100 μs (150 圈) 处的标准偏差最小, 其值为 0.2 μs 。因而本次实验中, 所有衰变时刻的测量精度定为 1.0 μs (约 1.5 圈)。

3.3 ^{94}Ru 基态和同质异能态的质量

实验中我们同时得到了 ^{94}Ru 基态和同质异能态的质量。去除发现的衰变事例后, 我们对磁场不稳定带来的回旋周期变化进行了修正^[21], 修正后的回旋周期谱如图 5 所示, 可以看出 ^{94}Ru 基态和同质异能态被清楚区分。用高斯函数同时拟合这两个峰, 可以得到 ^{94}Ru 的同质异能态和基态的回旋周期平均值分别为 670.938 3(4) ns 和 670.926 61(7) ns, 差值为 11.7(4) ps。选用 $T_z=3$ 系列核素中没有同核异能态污染的 6 个核素 (^{82}Sr , ^{86}Zr , ^{90}Mo , ^{92}Tc , ^{98}Pd 和 ^{100}Ag) 做为参考核, 我们用二阶多项式拟合来确定质荷比 m/q 与回旋周期 T 的关系。得到的 ^{94}Ru 的同质异能态和基态质量过剩分别为 -79905(132) keV 和 -82531(72) keV, 得到 ^{94}Ru 的激发能为 $E^* = 2626(150)$ keV, 和文献值在误差范围内符合。我们首次测量了短寿命原子核的质量, 该核的半衰期约为 100 μs , 这是目前储存环质量谱仪达到的最短寿命。

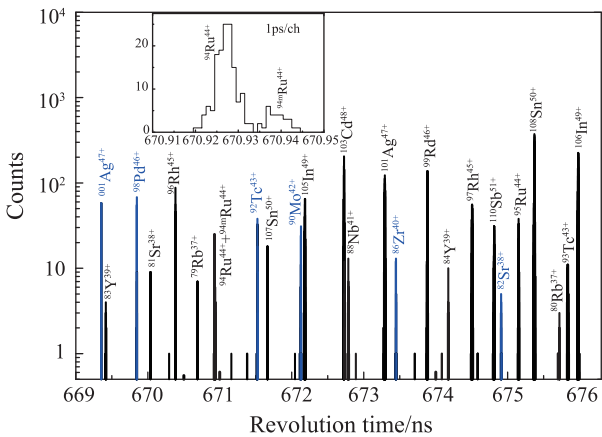


图 5 修正磁场不稳定带来的回旋周期变化后, 在时间区间 669~676.5 ns 内的回旋周期谱
插图为 $^{94}\text{Ru}^{44+}$ 同质异能态和基态的回旋周期谱。

4 总结

在 CSRe 原子核质量测量实验的基础上, 我们利用等时性质量谱仪开展了全剥离离子的衰变研究。我们通过观测 $^{94}\text{mRu}^{44+}$ 退激引起的循环周期变化, 直接记录到了 $^{94}\text{mRu}^{44+}$ 退激到基态的过程。我们结合模拟数据确定了本次实验中衰变事例探测的灵敏区间为 20~180 μs 。对衰变事例进行研究, 提取了衰变时刻, 确定其测量精度为 1 μs 。我们首次测量了短寿命原子核的质量, 该核的半衰期约为 100 μs , 这是目前储存环质量谱仪达到的最短寿命。在后续工作中, 我们将提取 $^{94}\text{mRu}^{44+}$ 的半衰期, 并为检验内转换系数计算的可靠性提供数据。本工作为短寿命核 (1 ms 内) 的半衰期测量及质量测量提供了实验参考和数据处理经验, 也将为下一代储存环 HIAF 上开展滴线附近短寿命、高电荷离子的衰变测量打下坚实的基础。

致谢 感谢 HIRFL 加速器部门的同事在本次实验中提供的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] TAKAHASHI K, YOKOI K. Nucl Phys A, 1983, **404**: 578.
- [2] SCHATZ H, APRAHAMIAN A, GÓRRES J, *et al.* Phys Rep, 1998, **294**: 167.
- [3] MAZZOCCHI C, JANAS Z, BACZYK P, *et al.* Acta Phys Pol B, 2012, **43**: 279.
- [4] ATTALLAH F, AICHE M, CHEMIN J F, *et al.* Phys Rev C, 1997, **55**: 1665.
- [5] ATTALLAH F, AICHE M, CHEMIN J F, *et al.* Phys Rev Lett, 1995, **75**: 1715.
- [6] LENNARZ A, GROSSHEIM A, LEACH K G, *et al.* Phys Rev Lett, 2014, **113**: 082502.
- [7] JUNG M, BOSCH F, BECKERT K, *et al.* Phys Rev Lett, 1992, **69**: 2164.
- [8] LITVINOV Y A, BOSCH F, GEISSEL H, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, **99**: 262501.
- [9] LITVINOV Y A, BOSCH F, WINCKLER N, *et al.* Phys Lett B, 2008, **664**: 162.
- [10] ZHANG Y H, XU H S, LITVINOV Y A. *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **109**: 102501.
- [11] KNÖBEL R, DIWISCH M, GEISSEL H, *et al.* Eur Phys J A, 2016, **52**: 138.
- [12] SUN B, KNÖBEL R, GEISSEL H, *et al.* Phys Lett B, 2010, **688**: 294.
- [13] XU X, ZHANG P, SHUAI P, *et al.* Phys Rev Lett, 2016, **117**: 182503.
- [14] AUDI G, KONDEV F G, WANG M, *et al.* Chin Phys C, 2017, **41**: 030001.
- [15] KIBÉDI T, BURROWS T W, TRZHASKOVSKAYA M B, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2008, **589**: 202.
- [16] HAUSMANN M, ATTALLAH F, BECHERT K, *et al.* Hy-

- perfine Interact, 2000, **132**: 289.
- [17] MEI B, TU X L, WANG M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2010, **624**: 109.
- [18] ZHANG W, TU X L, WANG M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2014, **755**: 38.
- [19] TU X L, XU H S, WANG M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2011, **654**: 613.
- [20] CHEN R J, YUAN Y J, WANG M, *et al.* Phys Scrip, 2015, **T166**: 014044.
- [21] SHUAI P, *et al.* arViv: 1407.3459.

Study on the Decay of the Fully Stripped Ion $^{94m}\text{Ru}^{44+}$

ZENG Qi^{1,2}, WANG Meng^{2,†}, ZHANG Yuhu^{2,†}, TU Xiaolin², XU Xing², CHEN Ruijiu², CHEN Xiangcheng², FU Chaoyi^{2,3}, HUANG Wenjia^{2,3}, LIU Junhao^{2,3}, LI Hongfu^{2,3}, SI Min^{2,3}, SHUAI Peng², SUN Mingze^{2,3}, XING Yuanming^{2,3}, YAN Xinliang², YANG Jiancheng², YUAN Youjin², ZHANG Peng^{2,3}, ZHANG Wei^{2,3}, ZHOU Xiaohong², XU Hushan², XIAO Guoqing²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The decay of the fully stripped ion $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ in the order of one hundred microseconds has been studied for the first time by using the Isochronous Mass Spectrometry (IMS) at the HIRFL-CSR facility in Lanzhou. $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ was produced via projectile fragmentation of a ^{112}Sn primary beam bombarding on a ^9Be production target. After the in-flight separation with RIBLL2, the ions were injected into the experimental ring (CSRe) and then stored there. The revolution times of the stored ions were measured by a Time-of-Flight (TOF) detector. Due to the mass change of a $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ ion caused by its de-excitation to the ground state, hence the revolution time change, the decay process of $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ could be directly observed in the CSRe. The sensitive window for detection of the decay events and the measurement precision of the decay time have been determined in this work. At the same time, we measured the mass of short-lived $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ with the half-life about one hundred microseconds, which is the shortest among nuclides that have been studied by using storage-ring mass-spectrometry.

Key words: HIRFL-CSR; isochronous mass spectrometry; fully stripped ion; nuclear mass measurement

Received date: 7 Dec. 2016; **Revised date:** 2 Mar. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1232208, U1432125, 11205205, 11035007); National Basic Research Program of China(2013CB834401); National Key Program for Sci.&Tech. Research and Development(2016YFA0400504)

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