

文章编号: 1007-4627(2018)04-0439-06

缺中子核素 ^{101}In 低位同核异能态的首次观测

刘君豪^{1,2}, 张玉虎¹, 邢元明¹, 徐星¹, 帅鹏¹, 王猛¹, 涂小林¹, 张鹏^{1,2}, 曾奇³, 陈瑞九¹,
陈相成¹, 付超义^{1,2}, 李宏福^{1,2}, 孙铭泽^{1,2}, 颜鑫亮¹, 高丙水¹, 杨建成¹, 原有进¹,
Yu. A. Litvinov⁴, K. Blaum⁵, S. Naimi⁶, 周小红¹, 徐珊珊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. 东华理工大学, 南昌 330013;
4. 德国GSI重离子研究中心, 达姆施塔特 64291;
5. 德国马克斯普朗克研究所, 海德堡 69117;
6. 日本理化研究所, 琦玉 351-0198)

摘要: 在兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)上, 用初级束流 $^{112}\text{Sn}^{35+}$ 轰击了靶厚约 10 mm 的 Be 靶, 产生了 ^{101}In 的基态和低位同核异能态。这些实验产生的碎片每 25 s 经过放射性束流线 RIBLL2 的筛选后注入到实验环 CSRe 中, 利用飞行时间探测器测量离子在 CSRe 中的回旋周期。在此次实验中, 磁场晃动会导致离子在环内的循环周期发生改变, 传统的离子鉴别方法难以完成大部分离子的鉴别。通过发展和运用单次注入离子鉴别这一新的离子鉴别方法, 有效地消除了磁场晃动对于离子鉴别的影响, 并清楚地将 ^{101}In 基态和低位同核异能态鉴别出来, 从而首次在实验中观测到 ^{101}In 的低位同核异能态。实验得到的激发能与理论外推值在 112 keV 的误差范围内一致, 其低位同核异能态的寿命大于 200 μs 。

关键词: HIRFL-CSR; 等时性质量谱仪; 单次注入离子鉴别; 原子核质量测量

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.35.04.439

1 引言

在现有的核结构理论中, 都认为 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, …… 为幻数, 当核内的中子数或质子数(不包括 126)等于幻数时, 该原子核就会变得相对稳定。幻数的形成被认为是核子相互作用的结果, 通过对幻数的研究能帮助人们更好地理解单粒子能级演化以及形变等性质。 ^{101}In 作为最靠近 ^{100}Sn 的核素之一, 于 1988 年首次被发现, 测量半衰期为 16(3) s^[1]。在 ^{100}Sn 核区附近 $N=52$ 的同中子链奇 A 核和 In 的同位素链奇 A 核中, 很多核素都存在着一个低位同核异能态, 其自旋宇称为 $1/2^-$ 。根据系统性推测 ^{101}In 也存在着一个自旋宇称为 $1/2^-$ 的同核异能态, 但实验上尚未被观测到。

在原子核物理实验中, 核反应往往会大量产生次级碎片, 为了对这些碎片进行研究, 首先就必须将它们鉴

别开来。鉴别的前提在于将不同粒子分离, 目前采用的分离方法可分为物理和化学两大类。物理分离大多通过电磁分离的方法^[2], 如在线同位素分离器、反冲核分离器、反冲质量谱仪和速度选择器等。化学分离方法^[3]包括了离线化学分离以及快速在线液、气相色谱化学分离。此外, 还有物理与化学相结合的分方法。对于 HIRFL-CSR 上的质量测量实验而言, 不同粒子在环内飞行一定距离所需要的时间各不相同, 根据这一特性, 就可以确定粒子种类, 这种鉴别方法被称之为飞行时间分辨法(TOF)^[4]。TOF 方法的优点在于可在很大的能量范围内, 对粒子进行鉴别, 这一方法对于探测器的时间分辨能力要求很高。在具体的数据处理过程中, 通过对比实验周期谱和计算周期谱, 就能完成离子鉴别^[5]。但是当储存环产生离子种类较多时, 特别是存储环磁场晃动比较大的时候, 回旋周期谱的分辨会变差, 导致荷质比接近的离子的周期相互重叠, 使用传统的离

收稿日期: 2018-09-05; 修改日期: 2018-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1232208, U1432125, 11605248, 11605252, 11605249, 11605267); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2018YFA0404401, 2016YFA0400504); 欧洲研究理事会资助项目(ERCCG 682841 “ASTRUM”)

作者简介: 刘君豪(1992-), 男, 四川南充人, 博士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: liujunhao@impcas.ac.cn

† 通信作者: 邢元明, E-mail: xym@impcas.ac.cn。

子鉴别方法不能有效地完成离子鉴别。本工作在前人研究^[6]的基础上,通过引入单次注入离子鉴别这一方法,成功地解决了这一难题。

2 实验介绍

实验是在兰州重离子加速器国家实验室的兰州重离子研究装置(HIRFL)上进行的。HIRFL-CSR^[7]是一个双冷却储存环系统,由主环(CSRm)、实验环(CSRe)和连接它们的次级束流线(RIBLL2)构成。初级束流 $^{112}\text{Sn}^{35+}$ 在扇聚焦回旋加速器SFC中加速,被剥离后注入到CSRm中,进行累计,然后加速到400.88 MeV/u后,快引出在RIBLL2入口处打靶厚约10 mm的 ^9Be 靶,通过中高能弹核的碎裂反应产生大量远离稳定线的短寿命原子核。RIBLL2作为磁刚度过滤器,反应产物经过RIBLL2电磁分离和纯化后^[8],注入到CSRe中做回旋运动,利用TOF探测器^[9]测量离子的回旋时间。环中离子每次穿过TOF探测器,将会在碳膜上打出二次电子。二次电子在垂直的电磁场作用下,电子加速、偏转到微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)上,微通道板倍增电子得到时间信号,信号通过高频电缆传输到Tektronix DPO71254上。示波器的采样频率为40 GHz,示波器的采集时间长度为200 μs (8×10^6 个采样点),在这段时间内离子在CSRe中回旋约300圈。在等时性质谱仪中,实验环中的离子不需要电子冷却,原则上离子在环内飞行一圈就能被探测到,但受探测效率和周期提取等因素的限制,能测到的离子寿命下限为几十微秒^[10],测量的灵敏度为单个离子。近年来,以HIRFL-CSR装置为基础,中国科学院近代物理研究所在质量测量方面取得了一系列突出成果^[11],而在最近的实验中,我们清楚地鉴别了 ^{52}Co 的基态和同核异能态^[12],显示了等时性质谱仪的良好分辨能力;测量精度首次突破了 10^{-7} ,这是同类装置中目前达到的最高精度。

为了保证指定的目标核满足等时性条件,我们需要对RIBLL2和实验环的磁刚度进行设置,根据目标核的荷质比(m/q)和储存环的转变点 $\gamma_t=1.302$ 等信息,我们设置了RIBLL2和实验环的磁刚度 $B\rho=5.3448\text{ Tm}$ 。在这个设置下,目标离子的传输效率最高。

在等时性模式下,环中存储的离子具有较大的动量分布($dp/p \approx 2 \times 10^{-3}$)。满足等时性条件的离子只占少部分,其他离子都处在等时性窗外,处于等时性窗外的离子在环内回旋周期的分辨率较差。在此次实验中,为了获得更高的分辨率,在CSRe的散焦平面上设置了50 mm的狭缝。

3 数据处理和分析

3.1 获取离子回旋周期

本次实验获取实验周期的方法与之前等时性质量测量实验一致^[13]。要得到离子在环里的回旋周期,必须要将每次注入的波形进行平滑去噪、信号定时、匹配离子序列,拟合定时点与圈数的关系,最终得到离子的回旋周期。离子在CSRe中经过碳膜的时间 t_n 与回旋圈数 n 的关系如下:

$$t_n = a_0 + a_1 \cdot n + a_2 \cdot n^2, \quad (1)$$

其中 a_0, a_1, a_2 为待定的自由参数。由于此次实验一次注入采集时间为200 μs ,我们采用二阶多项式进行拟合^[14], a_2 值的大小反映了离子通过碳膜时的能量损失。在一次注入中,关联得到一个离子的信号数为 N 个,它们的定时点已知为 $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N$,定时点对应的回旋圈数 n 也已知。通过最小二乘法可求解 χ^2 最小时的多项式系数 a_0, a_1, a_2 。拟合曲线(式1)的斜率即为离子的回旋周期 $T=a_1+2a_2 \cdot n$,我们选取 $n=35$ 圈的周期作为离子的平均回旋周期。经过上述处理流程后,得到的实验周期谱如图1(a)所示。

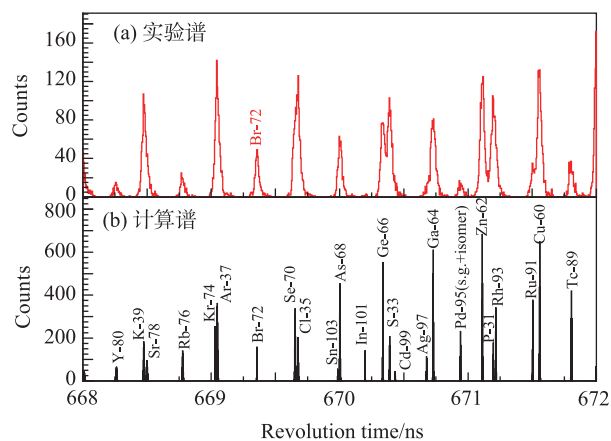


图 1 (在线彩图) 在时间区间 668~672 ns 内离子的实验周期谱(红色)和计算周期谱(黑色)

借鉴之前的办法^[5],通过比对离子的实验谱和计算谱,可以将荷质比相差较大的离子(如 $^{72}\text{Br}^{35+}$)鉴别出来。具体鉴别时,首先要构建一个计算周期谱,如图1(b)所示。通过LISE++^[15]模拟得到所有可能产生的离子,根据下式可以计算这些离子的回旋周期:

$$T_{\text{cal}} = \frac{C}{v} = C \sqrt{\left(\frac{m/q}{B\rho}\right)^2 + \frac{1}{V_c^2}}, \quad (2)$$

式中: C 是离子在环里的轨道长度; m/q 是离子的荷质比; $B\rho$ 是离子的磁刚度; V_c 是光速。具体计算

时, 根据实验设置, 选取 $C=(128.801\pm 0.334)\text{ m}$, $B\rho=(5.3448\pm 0.0107)\text{ Tm}$ (这种鉴别方法对于 C 和 $B\rho$ 的精度要求都不高)。本实验中, 测得的离子都是全剥离离子, 其质荷比可以从对应的原子质量计算得到。通过 AME'16^[16] 查表得到原子的质量亏损, 考虑电子的质量和电子总结合能后, 可以得到原子核的质量, 进而得到该离子的 m/q 。

通过图1(b)可以看出, 计算谱中荷质比相差较大的离子(如 $^{72}\text{Br}^{35+}$) 与其他离子的周期间隔较远, 可以直接确定它们在实验周期谱上对应的位置。即使磁场晃动会导致实验谱的底宽变大, 这些离子的实验谱也不会与其他离子重叠, 可以直接在实验谱中鉴别出来。荷质比接近的离子由于实验谱可能存在重叠, 不能通过这种方法进行鉴别, 因此需要改进离子鉴别方法。

3.2 单次注入离子鉴别

对此次实验而言, 所产生的离子的荷质比很多都十分接近, 磁场也不够稳定, 因此实验谱的回旋周期分辨能力较差, 如图1所示。为了精确地完成离子鉴别, 这里我们引入了单次注入粒子鉴别的方法。由于磁场的变化是相对缓慢的, 在每次注入采集数据的 $200\ \mu\text{s}$ 内, 磁场可认为是稳定的, 通过单次注入离子鉴别的方法可以消除磁场晃动对离子鉴别的影响。其具体做法如下:

步骤1 提取出一次注入中所有离子的实验周期, 一次典型的注入中, 离子的实验回旋周期如图2(a)所示。

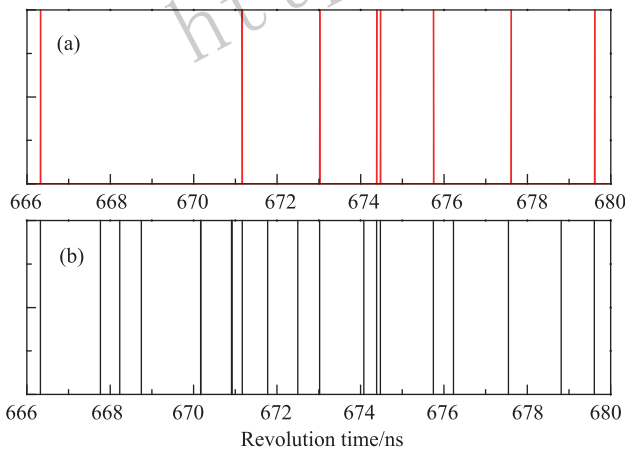


图2 (在线彩图) 一次注入中, 离子的实验回旋周期(a)与计算回旋周期(b)

步骤2 通过 LISE++ 模拟得到可能产生的离子, 根据式(2)计算出这些离子的回旋周期。具体计算时, 选取离子平均轨道 $C=128.801\text{ m}$ (C 的取值是否合适, 会在下面详细讨论)。经计算得到质量已知的离子的荷质比 m/q , 给定一个磁刚度 $B\rho$, 代入式(2), 从而计

算出离子的回旋周期, 见图2(b)。接下来要找到实验周期和计算周期的对应关系。已知某一离子的实验周期为 $T_{\text{exp}}^{(i)}$, 在计算周期 $T_{\text{exp}}^{(i)}\pm\Delta$ (由图1(a)可知, 磁场晃动导致的周期变化量不会超过 400 ps , 这里 Δ 选取为 400 ps) 区间内寻找与 $T_{\text{exp}}^{(i)}$ 差值最小的周期, 标记为 $T_{\text{cal}}^{(i)}$ 。若某一 $T_{\text{exp}}^{(i)}$ 未能找到对应的 $T_{\text{cal}}^{(i)}$, 则该 $T_{\text{exp}}^{(i)}$ 和 $T_{\text{cal}}^{(i)}$ 的值都取零。对其他的离子也做同样的处理, 得到多组 $T_{\text{exp}}^{(i)}$ 和 $T_{\text{cal}}^{(i)}$, 计算出该次注入的 RMS 值, RMS 定义如下:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(T_{\text{exp}}^{(i)} - T_{\text{cal}}^{(i)})^2}{N}}, \quad (3)$$

其中 N 为寻找到的离子数。

步骤3 由式(2)可知, 当 $B\rho$ 改变时, 离子的计算周期会改变, 该次注入的 RMS 值也会不同, 因此需要确定磁刚度的变化区间。前面已经将荷质比差异较大的离子(如 $^{72}\text{Br}^{35+}$) 完成了离子鉴别。由于这些离子的周期谱不存在重叠, 可以直接给出它们实验周期的变化范围。再将其余的已知量代入式(2), 从而计算出磁刚度的变化区间。由于磁场晃动对各种离子的贡献都差不多, 这里选取了 $^{72}\text{Br}^{35+}$ 作为参考核, 计算得到磁刚度变化区间为 $[5.342, 5.346]\text{ Tm}$ 。接着以固定的步长(这里选取为 0.000004) 从区间的最小值一直增加, 重复步骤2, 直至增加到区间的最大值, 进行 $B\rho$ 扫描。最终得到大量 $B\rho$ 值和对应的 RMS , 如图3所示。得到 RMS 的最小值和对应的 $B\rho$ 值, 分别标记为 RMS_{min} 和 $B\rho_{\text{best}}$ 。当 $B\rho$ 值取 RMS_{min} 时, 该注入中所有离子的计算周期与实验周期的整体差值最小。已知计算周期中离子的种类, 根据步骤2得到的实验周期

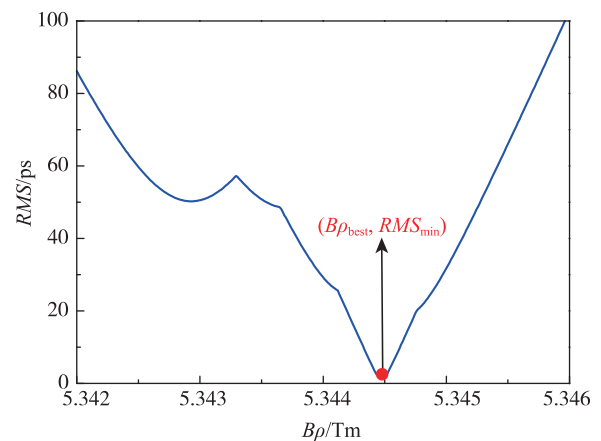


图3 (在线彩图) 一次注入中, 对磁刚度 $B\rho$ 进行扫描, 得到 RMS 的最小值 RMS_{min} 和对应的 $B\rho$ 值 $B\rho_{\text{best}}$, 如图中红点所示

和计算周期的对应关系，从而知道实验周期中离子的种类，即完成了离子鉴别。

完成上述步骤后，我们需要对 C 的取值进行检验。因为已经完成离子鉴别，我们可以明确地知道该注入中每个实验周期 T 的归属，即属于哪个离子和对应的 m/q 。得到这两个值后，从式(2)出发，通过最小二乘法拟合，得到该次注入下的磁刚度 $B\rho_{\text{fit}}$ 和离子轨道 C_{fit} ，再对其他的注入也做同样的处理，结果如图4所示。统计得到 $B\rho_{\text{fit}}$ 的平均值 $\overline{B\rho_{\text{best}}}=5.3444$ Tm, C_{fit} 的平均值 $\overline{C_{\text{fit}}}=128.8026$ m。把得到的 $\overline{C_{\text{fit}}}$ 作为新的 C 代入步骤2和3，再次进行粒子鉴别。对在两次不同 C 下进行的离子鉴别结果进行比较，将鉴别出的每个离子的个数分别统计，得知在这两次鉴别中同一种离子的个数都相等，即鉴别结果一样。这说明了步骤2所使用的 C 对于离子鉴别是合适的。

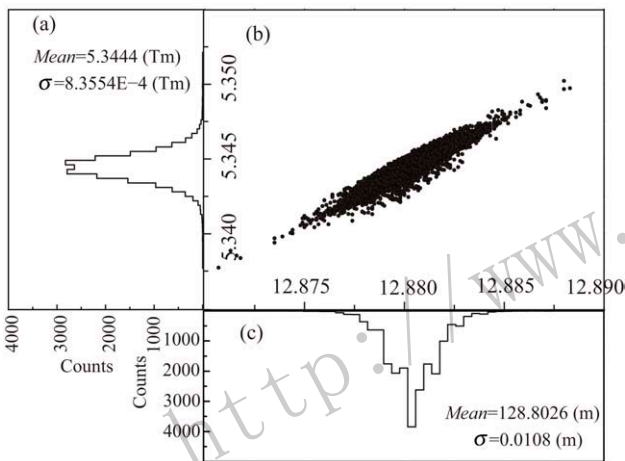


图4 通过最小二乘法拟合得到所有注入中 $B\rho_{\text{fit}}$ 与 C_{fit} 的关系图(图b), $B\rho_{\text{fit}}$ 的统计图(图a)以及 C_{fit} 的统计图(图c)

3.3 ^{101}In 基态和同核异能态的鉴别

经过单次注入离子鉴别后，我们对质量已知的离子完成了离子鉴别，但由于 ^{101}In 基态和同核异能态质量未知，还不能鉴别出来。利用加权平移的磁场修正方法^[17]对周期进行了修正，消除了磁场晃动对离子回旋周期的影响，修正后的回旋周期谱如图5所示。

图5中红色代表了 $T_z=3/2$ 的原子核，根据系统性并结合 LISE++ 模拟，可以得知在 ^{103}Sn 和 ^{99}Cd 之间还存在着 ^{101}In 。由于其他的离子已经被鉴别出，因此可以明确地指出 ^{101}In 。将图5中 ^{101}In 的周期谱放大，如图5左上方所示，可以看出 ^{101}In 基态和同核异能态被清楚区分，从而完成了 ^{101}In 基态和同核异能态的鉴别。已知 AME'16 中 ^{101}In 的基态和同质异能态的

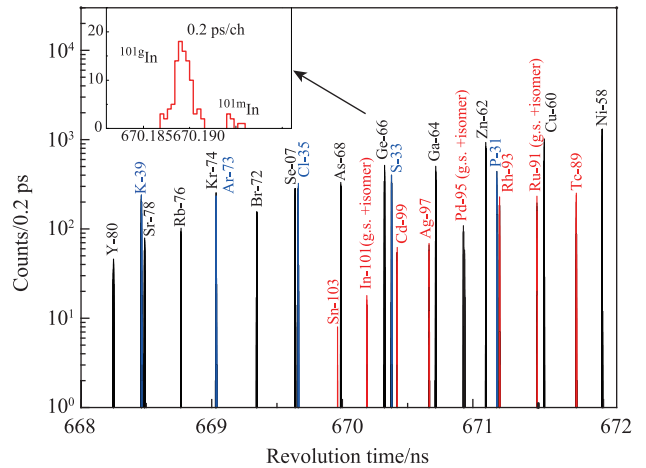


图5 (在线彩图) 经过磁场修正后，在时间区间 $668 \text{ ns} \leq t \leq 672 \text{ ns}$ 内离子的回旋周期谱
黑色、蓝色、红色分别代表 $T_z=1/2$, $T_z=1$, $T_z=3/2$ 的原子核；内插图为 ^{101}In 基态和同核异能态的回旋周期谱，上标 g 和 m 分别为离子的基态和同核异能态。

理论质量亏损分别为 $-68610(200)$ 和 $-68060(220)$ keV，选用质量精度在 10 keV 内的离子作为参考核，通过二阶多项式拟合来确定质荷比与实验周期的关系，得到对应的理论周期分别为 $670.1868(85)$ 和 $670.1891(90)$ ns。 ^{101}In 的基态和同质异能态的实验周期分布为 $670.1870(5)$ 和 $670.1898(4)$ ns。实验周期在理论周期在误差范围内一致，这也证明了对 ^{101}In 的指认是正确的。实验得到 ^{101}In 的激发能 $E^*=659(50)$ keV，AME'16 理论外推值 $550(100)$ keV 与实验值在 $\sqrt{50^2+100^2}=112$ keV 的误差范围内一致。对 ^{101}In 而言，其基态的组态为 $(\pi 1g_{9/2})$ 。当其受激发时，占据 $\pi 2p_{1/2}$ 能级上的两个质子会拆对，并有一个受激发跃迁到 $\pi 1g_{9/2}$ 能级上，从而形成了组态为 $(\pi 2p_{1/2}^{-1})$ 的单质子空穴态。由此可知，该同核异能态的激发能包含了 $\pi 1g_{9/2}$ 和 $\pi 2p_{1/2}$ 两个单粒子能级差这一信息。有了 ^{101}In 的激发能，结合其他已知的 In 同位素的激发能，通过分析这些核素中激发能的变化趋势，能帮助我们更好地理解壳层附近能级演化等问题，具体工作将在后续的工作中加以研究。

根据之前确定衰变事例的方法^[10]，选择了某一 ^{101}In 的同核异能态进行观测，其最后的信号点时刻约为 $200 \mu\text{s}$ 。通过直线拟合得到了信号点时刻和回旋圈数的拟合残差图，如图6所示。当离子在观测过程中发生衰变时，拟合残差将有一个明显的变化^[10]。通过图6可以看见，拟合残差分布在0值附近，未出现明显变化，说明了该核素在 $200 \mu\text{s}$ 内没有发生衰变。对其它 ^{101}In 的同核异能态也做同样的处理，都没有观测到衰变事例，说明了 ^{101}In 的同核异能态的寿命大于 $200 \mu\text{s}$ 。

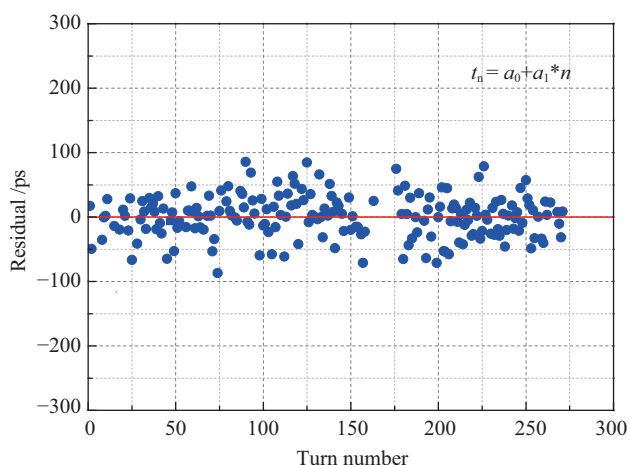


图6 (在线彩图) 一次注入中 ^{101}In 同核异能态信号点时刻和回旋圈数的直线拟合残差图

4 总结

对于受磁场晃动影响的荷质比相近的离子, 利用单次注入的离子鉴别方法完成了质量已知离子的鉴别工作, 结合磁场修正, 在 ^{112}Sn 实验的数据处理中成功地区分出 ^{101}In 基态和同核异能态并给出其激发能 $E^*=659(50)$ keV, 这也是首次在实验上观测到 ^{101}In 的同质异能态。实验得到的激发能信息十分重要, 将在接下来为研究原子核结构等热点物理问题提供关键实验数据。由于重核的碎裂反应中会产生大量荷质比相近的离子, 未来在实验环 CSR_e 以及下一代储存环 HIAF 上质量测量实验的数据处理中, 单次注入的离子鉴别将会有更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] HUYSE M, MARMOL P DEL, COENEN E, *et al.* *Z Phys A*, 1988, **330**: 121.
- [2] XU Hushan, ZHOU Xiaohong, XIAO Guoqing, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2003, **20(2)**: 76. (in Chinese)
(徐珊珊, 周小红, 肖国青, 等. *原子核物理评论*, 2003, **20(2)**: 76.)
- [3] XIE Xiujun, MU Wantong, SUN Xiurong, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 1985, **19(4)**: 0476. (in Chinese)
(谢秀君, 牟万统, 孙秀荣, 等. *原子能科学技术*, 1985, **19(4)**: 476.)
- [4] HE Ming, JIANG Shan, JIANG Songsheng, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 1999, **33(2)**: 34. (in Chinese)
(何明, 姜山, 蒋崧生, 等. *原子能科学技术*, 1999, **33(2)**: 34.)
- [5] SUN B H, GEISSEL H, HAUSMANN H, *et al.* *Chin Phys C*, 2009, **33(S1)**: 161.
- [6] TU X L, XU H S, WANG M, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2011, **654**: 613.
- [7] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* *High Power Laser And Particle Beams*, 2008, **20(11)**: 1787. (in Chinese)
(夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. *强激光与粒子束*, 2008, **20(11)**: 1787.)
- [8] LIU Dawei, WANG Meng, XU Xing, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2016, **33(3)**: 302. (in Chinese)
(刘大委, 王猛, 徐星, 等. *原子核物理评论*, 2016, **33(3)**: 302.)
- [9] MEI B, TU X L, WANG M, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2010, **624**: 109.
- [10] ZENG Qi, WANG Meng, ZHANG Yuhu, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2017, **34(3)**: 414. (in Chinese)
(曾奇, 王猛, 张玉虎, 等. *原子核物理评论*, 2017, **34(3)**: 414.)
- [11] ZHANG Yuhu, WANG Meng, Yu A Litvinov, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2016, **33(2)**: 122.
- [12] XU X, ZHANG P, SHUAI P, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2016, **117**: 1082503.
- [13] ZHANG Y H, XU H S, LITVINOV Y A, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2012, **109**: 102501.
- [14] ZHU Yongsheng. *Probability and Statistics in Experimental Physics*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 303. (in Chinese)
(朱永生. *实验物理中的概率和统计*[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 303.)
- [15] TARASOV O B, BAZIN D, *et al.* *Nucl Instrum Meth B*, 2008, **266(19-20)**: 4657.
- [16] AUDI G, KONDEV F G, WANG M, *et al.* *Chin Phys C*, 2017, **44(3)**: 30002.
- [17] SHUAI Peng, TU Xiaolin, ZHANG Yuhu, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2016, **33(2)**: 173. (in Chinese)
(帅鹏, 涂小林, 张玉虎, 等. *原子核物理评论*, 2016, **33(2)**: 173.)

First Observation of the Low-lying Isomer State of ^{101}In

LIU Junhao^{1,2}, ZHANG Yuhu¹, XING Yuanming^{1,†}, XU Xing¹, SHUAI Peng¹, WANG Meng¹, TU Xiaolin¹,
ZHANG Peng^{1,2}, ZENG Qi^{1,3}, CHEN Ruijiu¹, CHEN Xiangcheng¹, FU Chaoyi^{1,2}, LI Hongfu^{1,2},
SUN Mingze^{1,2}, YAN Xinliang¹, GAO Bingshui¹, YANG Jiancheng¹, YUAN Youjin¹,
Yu. A. Litvinov⁴, K. Blaum⁵, S. Naimi⁵, ZHOU Xiaohong¹, XU Hushan¹

- (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;
4. GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, 64291 Germany;
5. Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, Heidelberg, 69117 Germany;
6. RIKEN Nishina Center, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

Abstract: Isochronous mass spectrometry has been applied to ^{112}Sn projectile fragments at the HIRFL-CSR facility in Lanzhou. To produce short-lived nuclei of interest, we used projectile fragmentation of $^{112}\text{Sn}^{35+}$ primary beams in a ~ 10 mm thick ^9Be production target. The fragments were selected and analyzed by RIBLL2 and injected into the experimental storage ring (CSR) every 25 s. To measure revolution times of stored ions, we used a Time-Of-Flight detector installed in CSR. A new particle identification method was developed to distinguish ions on the measured revolution time spectrum for each injection. Based on this method, the shifts of the revolution time due to instable dipole magnet fields can be corrected and the ground and isomeric states of ^{101}In have been well-resolved. The measured excitation energy is consistent with the theoretical value in the error range of 112 keV. The lifetime of the isomeric states of ^{101}In is more than 200 μs .

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

Received date: 5 Sep. 2018; **Revised date:** 2 Nov. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U1232208, U1432125, 11605248, 11605252, 11605249, 11605267, 11575112, 11575007); National Basic Research Program of China (2018YFA0404401, 2016YFA0400504); European Research Council (ERCCG 682841 “ASTRUM”)

† **Corresponding author:** XING Yuanming, E-mail: xym@impcas.ac.cn.