



## HIRFL-CSR上等时性质量测量进展

邓涵宇 王猛 张玉虎 付超义 周旭 孙铭泽 邢元明 张敏

### Progress of Isochronous Mass Spectrometry at HIRFL-CSR

DENG Hanyu, WANG Meng, ZHANG Yuhu, FU Chaoyi, ZHOU Xu, SUN Mingze, XING Yuanming, ZHANG Min

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC40>

#### 引用格式:

邓涵宇, 王猛, 张玉虎, 付超义, 周旭, 孙铭泽, 邢元明, 张敏. HIRFL-CSR上等时性质量测量进展[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):301-308. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC40

DENG Hanyu, WANG Meng, ZHANG Yuhu, FU Chaoyi, ZHOU Xu, SUN Mingze, XING Yuanming, ZHANG Min. Progress of Isochronous Mass Spectrometry at HIRFL-CSR[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):301-308. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC40

## 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>

#### CSRe储存环等时性模式转变能洛伦兹因子曲线的测量与校正

Measurements and Corrections of the Lorentz Factor of Transition Energy of the CSRe Storage Ring in the Isochronous Mode

原子核物理评论. 2019, 36(3): 305-312 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.305>

#### 原子核质量的测量和评估

Nuclear Mass Measurement and Evaluation

原子核物理评论. 2017, 34(3): 380-386 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.380>

#### 全剥离离子 $^{94m}\text{Ru}^{44+}$ 的衰变研究

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

原子核物理评论. 2017, 34(3): 414-419 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.414>

#### 缺中子核素 $^{101}\text{In}$ 低位同核异能态的首次观测

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

原子核物理评论. 2018, 35(4): 439-444 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.439>

#### 基于HIRFL-CSR测量丰中子重核质量的建议

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

原子核物理评论. 2020, 37(1): 18-25 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020009>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0301-08

## HIRFL-CSR 上等时性质量测量进展

邓涵宇<sup>1,2</sup>, 王猛<sup>1,2,†</sup>, 张玉虎<sup>1,2</sup>, 付超义<sup>1</sup>, 周旭<sup>1,2</sup>, 孙铭泽<sup>1</sup>, 邢元明<sup>1</sup>, 张敏<sup>1,2</sup>

(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:** 基于兰州重离子研究装置冷却储存环 (HIRFL-CSR) 发展了等时性质谱术 (Isochronous mass spectrometry, IMS), 高精度测量了一批短寿命原子核的质量并研究了核结构和核天体领域的相关物理问题。本文综述了 IMS 实验的原理和步骤, 重点介绍了目前正在发展的双 TOF 探测器谱仪。利用双 TOF 质量谱仪在测量离子回旋周期的同时测量了离子的速度, 用来修正实验结果, 可以在很宽的动量接收度内实现高质量分辨, 并消除离子动量分散带来的系统误差。双 TOF 等时性质谱术是全新的概念, 需要针对性开发相关实验技术。我们建立了基于 CSR 的模拟平台, 研制了高性能 TOF 探测器并安装在 CSR 直线段, 进行了在线束流测试, 发展了新的束流光学设置并进行优化, 开发了实验数据处理方法并在做进一步优化, 并对下一步工作进行了展望。

**关键词:** 原子核质量测量; 储存环等时性质量谱仪; 双 TOF 探测器

**中图分类号:** O571.1; O571.22

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC40

### 1 引言

原子核的质量是原子核的基本属性之一, 反映了原子核内部所有相互作用的总和。核物理、核天体等许多研究领域都把原子核质量作为重要的参数, 对质量精度的要求也有所差别<sup>[1]</sup>。

理论上预言的核素种类有 7000-9000 种<sup>[2-3]</sup>, 目前已经发现的核素只有约 3400 种, 质量已知的核素只有约 2500 种, 其中误差小于 100 keV 的核素只有约 2300 种<sup>[4]</sup>, 原子核的质量测量还有很大的发展空间。

目前未知质量的核素主要位于远离稳定线的核区, 这些核素产额低、寿命短, 其质量测量面临很大的困难。针对这些核素, 国际上发展的质量测量方法主要有飞行时间质谱仪、离子阱和储存环等<sup>[5-6]</sup>。其中, 基于储存环的等时性质谱仪 (Isochronous Mass Spectrometry, IMS) 是高精度测量短寿命原子核质量的有力手段。目前, 世界上正在运行的储存环等时性质谱仪有德国重离子研究中心 (GSI) 的实验储存环 (ESR)<sup>[7-11]</sup>, 中国科学院近代物理研究所 (IMP) 的重离子冷却储存环实验环 (CSR)<sup>[12-24]</sup>, 以及日本理化学研究所 (RIKEN) 的稀有放射性同位素储存环 (Rare-RI ring, R3)<sup>[25-30]</sup>。

目前, 中国科学院近代物理研究所的科研人员在

CSR 上已经测量了一批原子核的质量, 但是储存环中离子的动量分散影响了质量精度。一种解决方案是, 在测量离子循环周期的基础上, 额外测量离子的速度, 从而在较大动量接收度下消除动量分散的影响, 这可以通过在储存环的直线段安装两个飞行时间探测器 (TOF 探测器) 来实现。我们建造了两台 TOF 探测器并安装在 CSR 的直线段, 几次测试性实验的结果表明, 基于双 TOF 的等时性质谱术优于传统的单 TOF 等时性质谱术。本文简要介绍传统单 TOF 等时性质谱术的相关原理以及基于双 TOF 等时性质谱术的相关工作进展。

### 2 储存环测原子核质量的原理与步骤

#### 2.1 基本原理

等时性质量测量方法通过测量离子在储存环中的回旋周期得到其质量。在储存环中循环的离子, 其回旋周期  $T$  与质荷比  $m/q$  满足:

$$T = \frac{C}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{mc}{q}\right)^2 \frac{1}{(B\rho)^2}}, \quad (1)$$

其中:  $C$  是离子循环时的轨道周长;  $c$  是光速;  $B\rho$  是离子的磁刚度 (其中  $B$  是磁场;  $\rho$  是储存环二极磁铁的

收稿日期: 2019-03-02; 修改日期: 2019-05-09

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

作者简介: 邓涵宇 (1993-), 男, 四川三台人, 博士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: denghanyu@impcas.ac.cn

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

偏转半径)。在等时性模式下,所有核素的平均磁刚度近似相同,由于磁刚度相同的离子轨道长度也相同,那么所有核素的平均轨道周长也近似相同的,因此可以通过测量循环周期  $T$  来刻度离子的质量  $m$ 。

对于同种离子,周期的统计误差  $\delta T$  与速度的分散  $\delta v$  有关:

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

其中:  $v$  是离子的速度;  $\gamma$  是离子的相对论洛伦兹因子;  $\gamma_t$  是储存环的转变能因子; 反映了储存环中离子轨道  $C$  变化导致磁刚度  $B\rho$  变化的比例大小。如果储存环的动量接受度约为  $10^{-3}$ , 目标核满足  $\gamma = \gamma_t$  的等时性条件, 那么除目标核之外的其他核素的循环周期  $T$  的相对误差约为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。

### 2.2 等时性质量测量的步骤

中国科学院近代物理研究所的兰州重离子研究装置冷却储存环(HIRFL-CSR)由冷却储存环主环(CSRm)、放射性束流线(RIBLL2)和冷却储存环实验环(CSRe)组成<sup>[31]</sup>。在等时性质量测量实验中,主束在CSRm中累积和加速,然后引出到RIBLL2,轰击RIBLL2入口处的实验靶,产生目标核。目标核经过分离提纯注入CSRe中存储起来,并由安装在CSRe的TOF探测器测量并记录数据,图1为RIBLL2和CSRe的布局图。经过一系列数据处理,如周期的提取、离子的鉴别、周期的磁场修正、质量的刻度等,可以得到核素的质量。以下是简要介绍。

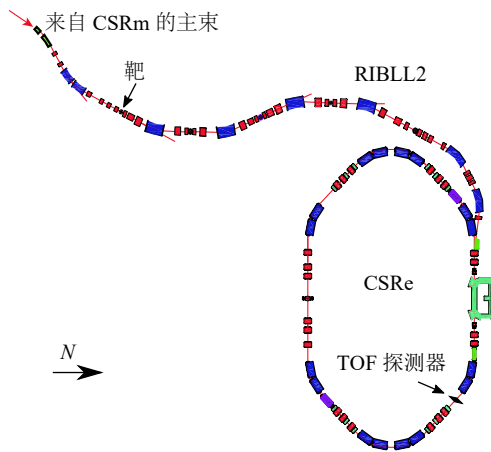


图 1 (在线彩图)RIBLL2 和 CSRe 的布局图  
在等时性质量测量实验中,目标核在 RIBLL2 中产生并分离提纯,然后储存在 CSRe 中。

#### (1) 目标核的产生、分离与储存

目前 HIRFL-CSR 上的质量测量实验的目标核都由

碎裂反应<sup>[32]</sup>产生,未来也可以采用<sup>238</sup>U 裂变反应来产生丰中子核素。如图1所示,CSRe 直接连接在 RIBLL2 后面,产生目标核并立刻进行测量,因此可以测量远离  $\beta$  稳定线、产额低、寿命短的核素。目标核的能量和产额与初级束种类、初级束能量及靶核种类等有关,这些设置需要在实验进行之前确定,目前我们使用 LISE++ 程序<sup>[33]</sup>进行模拟实验,并选择合适的参数。实验进行的时候,稳定核素作为初级束,在 CSRm 中累积和加速,快引出到 RIBLL2,轰击 RIBLL2 入口处的固定靶(目前实验中选择 <sup>9</sup>Be 作为靶核),进而产生目标核。目前 CSRm 一次引出需要约 25 s。

碎裂反应不仅产生目标核,还会产生大量其它的核素离子。这些离子会干扰我们对目标核的探测,需要将目标核从中分离出来。在 HIRFL-CSR 上所有的等时性质量测量实验中,分离采用磁刚度选择的方法。RIBLL2 的磁刚度设置为目标核的磁刚度,只有磁刚度接近 RIBLL2 设置的离子才能通过 RIBLL2 并注入 CSRe 中,从而实现目标核的分离。

CSRe 的设置由  $\gamma_t$  和  $B\rho$  两个参数确定。一方面,CSRe 的  $B\rho$  值应当等于 RIBLL2 的  $B\rho$  值,使目标核能在 CSRe 中储存。另一方面,CSRe 的  $\gamma_t$  值应当使目标核满足等时性条件  $\gamma = \gamma_t$ 。

#### (2) 目标核的测量与数据的存储

如图1,一台 TOF 探测器<sup>[34]</sup>被安装在 CSRe 上,时间分辨率约为 50 ps。每当有离子经过探测器,探测器便产生一个信号,与探测器相连的示波器将模拟信号转化为数字信号存储以供离线分析。一次注入信号的典型示例如图2所示,示波器对本次实验的每次注入采样时间为 200  $\mu$ s,采样频率是 40 GHz(有的实验的采样时

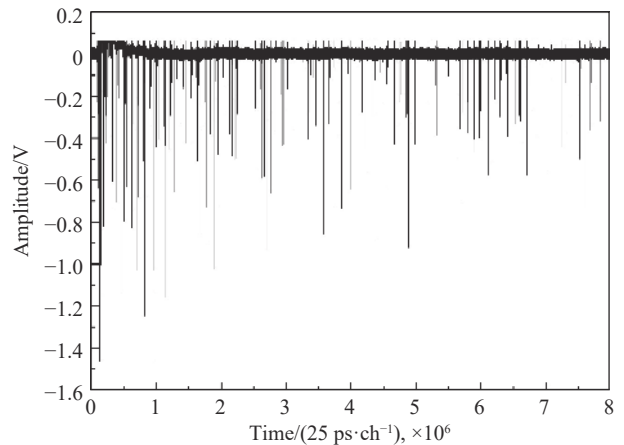


图 2 示波器一次注入采集的信号的一个典型例子  
在这个示例中,主束为 <sup>36</sup>Ar<sup>18+</sup>,示波器的 trigger 信号由实验环注入时的 kicker 信号提供,采样时间为 200  $\mu$ s,采样率为 40 GHz,摘自文献<sup>[12]</sup>。

间是 400  $\mu\text{s}$ , 大多数实验的采样率是 50 GHz)。

### (3) 数据的后续处理

离子循环周期的提取。在提取离子周期之前, 需要对原始信号进行初步处理, 如平滑降噪、去除基线、信号定时等。信号降噪<sup>[35]</sup>有邻域平均法、小波变换法等, 现在在 CSR<sub>e</sub>上常用的是邻域平均法, 这种方法对于幅度较小的信号的信噪比提高较大, 对幅度较大的信号的影响很小, 会丢失一些原始数据, 但是造成的定时误差与飞行时间探测器的时间分辨相比可以忽略。信号定时有前沿定时、幅度和上升时间补偿定时<sup>[36]</sup>、延拓至零域定时<sup>[37]</sup>等。前沿定时受信号幅度和上升时间的影响; 幅度和上升时间补偿定时消除了信号幅度和上升时间的影响, 但是要求信号前沿近似为直线; 延拓至零域定时消除了信号幅度和上升时间的影响, 但是要求信号前沿近似为直线且会引入外推误差。现在在 CSR<sub>e</sub>上常用的是幅度和上升时间补偿定时。一个离子在 CSR<sub>e</sub>中循环, 反映在信号谱上就是一串有周期规律的信号。根据信号

的周期性, 我们将属于同一个离子的信号序列辨别并提取出来, 拟合得到该离子的循环周期<sup>[38]</sup>。

离子的鉴别。采用离子模拟谱和实验谱匹配的方法<sup>[13]</sup>, 就能鉴别出大部分离子。然而对于部分质荷比接近的离子, 如  $^{51}\text{Co}$  和  $^{34}\text{Ar}$ , 上面的方法并不能分辨。此时, 可以使用另一种基于信号幅度的方法鉴别离子<sup>[17, 39]</sup>。

磁场晃动的修正。实验过程中, CSR<sub>e</sub>的磁场会随环境产生变化。对于任意离子, 磁场漂移  $\Delta B$  会导致其循环周期  $T$  产生漂移  $\Delta T$ <sup>[40]</sup>:

$$\Delta T = -\frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta B}{B} T, \quad (3)$$

根据测量, 磁场晃动的幅度约为  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。目前, 在数据处理中修正磁场的方法有相对循环周期法<sup>[13]</sup>、分组匹配法<sup>[15]</sup>和加权平移法<sup>[41]</sup>。当然, 提高磁铁磁场稳定性是更根本的方法。图 3 给出一个典型的经过离子鉴别和磁场修正的循环周期谱。

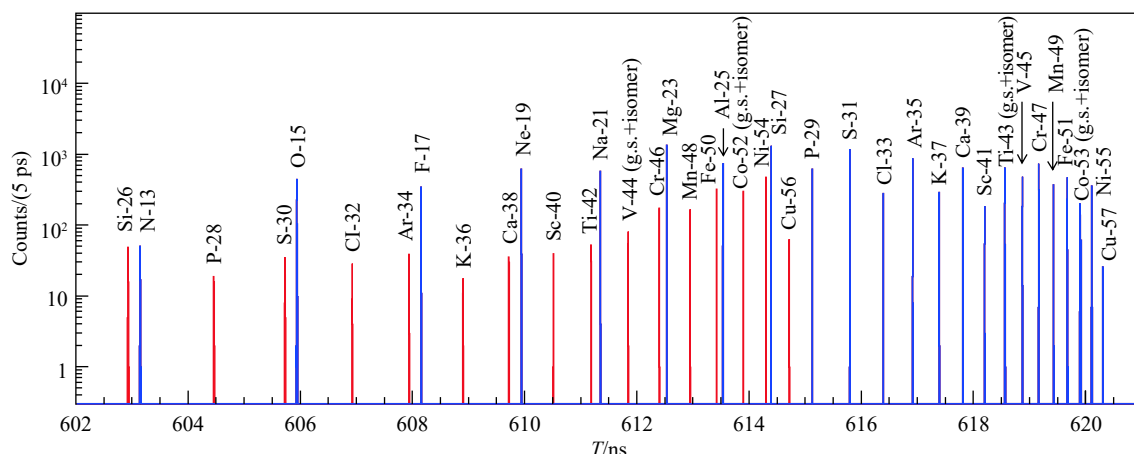


图 3 (在线彩图) 循环周期谱的一个典型例子, 只显示了 602 到 622  $\mu\text{s}$  的一部分, 已经过离子鉴别和磁场修正。摘自文献<sup>[22]</sup>

目标核质量的计算。首先用质量已知核刻度质荷比与循环周期的关系, 再根据目标核的循环周期计算质量<sup>[13]</sup>。

## 3 部分质量结果

在 HIRFL 上, 我们已经进行了多次等时性质量测量实验, 得到了 50 多个核素的质量<sup>[19-24]</sup>, 其中既有以前没有测量过的核, 也有虽有质量但精度不高的核, 对于  $^{44}\text{V}$ ,  $^{65}\text{As}$ ,  $^{101}\text{In}$  等丰质子核素, 分别选择  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{78}\text{Kr}$ ,  $^{112}\text{Sn}$  作为主束, 对于  $^{52}\text{Sc}$  等丰中子核素, 选择  $^{86}\text{Kr}$  作为主束, 如图 4。经过不断发展, CSR 质量测量实验水平持续提高, 图 5 显示了测量精度的进步。我们早期工作的精度为约  $10^{-6}$ <sup>[12-13]</sup>, 和德国 GSI 研究所同

类技术水平相当。目前的典型测量精度为  $10^{-7}$ <sup>[24]</sup>, 最高精度达到  $8 \times 10^{-8}$ <sup>[19]</sup>, 代表着国际上同类方法的最好水平。测量精度的提高, 使我们可以深入研究更加精细的物理问题。这些数据对核天体<sup>[21]</sup>、核结构<sup>[22-24]</sup>等领域作出了贡献。

近年来, 除了远离  $\beta$  稳定线的质量未知核素外, 我们对有质量数据但精度不高的核素也加强了关注, 这要求我们对质量测量方法做进一步改进。

## 4 基于双 TOF 等时性质谱术的相关工作进展

为了进一步提高质量测量的分辨能力和准确度, 基

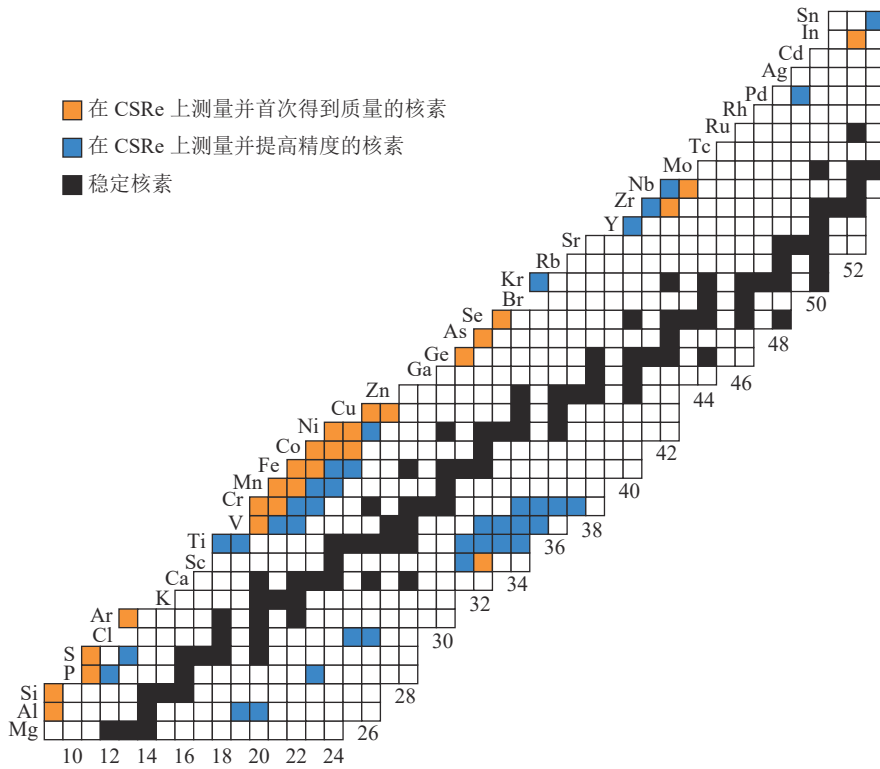


图 4 (在线彩图) 近年来在 CSR-e 上使用等时性质量测量方法测得质量的核素

其中, 稳定核素为黑色, 在 CSR-e 上测量并首次得到质量的核素为橙色, 在 CSR-e 上测量并提高精度的核素为蓝色。结果主要来自 5 次实验, 其中 4 次实验测量丰质子核素质量, 主束分别为  $^{78}\text{Kr}^{[13-14]}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{[15-16]}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{[18-19, 22]}$ ,  $^{112}\text{Sn}^{[21, 24]}$ , 一次实验测量丰中子核素质量, 主束为  $^{86}\text{Kr}^{[23]}$ 。

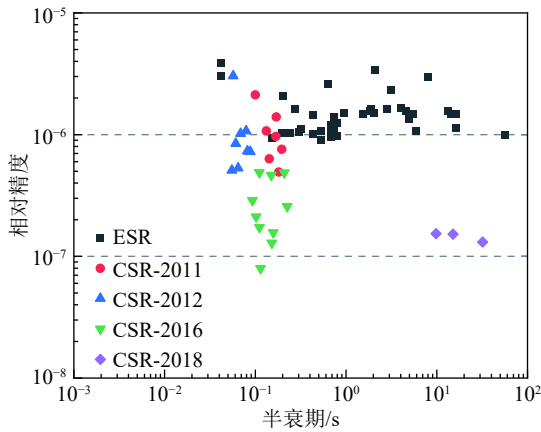


图 5 (在线彩图) 近年来等时性质谱术测量结果的质量相对误差和原子核半衰期的关系

黑色方块为在德国 GSI 的 ESR 实验环使用同类技术测量结果, 来自文献 [9-10]。CSR 结果来自 4 次实验, 主束分别为  $^{78}\text{Kr}^{[13-14]}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{[15-16]}$ ,  $^{58}\text{Ni}^{[18-19, 22]}$ ,  $^{112}\text{Sn}^{[21, 24]}$ 。

于单 TOF 的等时性质谱术需要改进。单 TOF 质量测量实验中, 最多只有一种核素严格满足等时性条件  $\gamma = \gamma_t$ , 其他核素或多或少都偏离了等时性条件, 图 6 是一个偏离等时性条件且  $\gamma < \gamma_t$  的核素。如图 6(a) 所示, 该核素轨道越长, 回旋周期越小。在单 TOF 情况下, 我们仅能测量离子的回旋周期, 即散点图在  $y$  方向的投影,

投影结果如图 6(b) 黑色线条所示。可以看出, 当远离等时性条件时, 测量回旋周期的误差非常大。

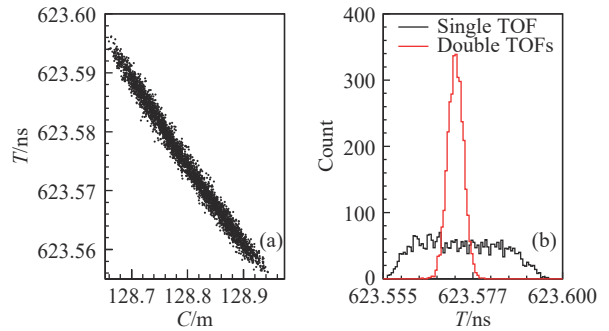


图 6 (在线彩图) 偏离等时性条件的一个典型例子, 该核素的  $\gamma < \gamma_t$

(a) 该核素回旋周期随轨道长度的变化。(b) 该核素在单 TOF 模式和双 TOF 模式下的循环周期分布。摘自文献 [42]。

其次, 基于单 TOF 的等时性质谱术有一个基本前假设, 即不同离子在储存环中的平均轨道近似一致。而不同核素在 CSR-e 中的动量分布存在差别, 相应的平均轨道也不相同, 这可能带来测量的系统偏差。

如果能够同时测量离子的循环周期和速度(轨道), 就可以得到如图 6(a) 所示的双维散点图, 这样通过速度(轨道)信息修正循环周期, 可以在很宽的动量接收度内

实现高质量分辨, 并消除离子动量分散带来的系统偏差。

这个思路是由 GSI 的研究人员首先提出的<sup>[43-44]</sup>。他们建议, 可以在储存环前面的束流线上、储存环某处或者储存环后面连接的装置中测量离子的速度。但在 HIRFL-CSR 上, 需要束流的快引出, 即在几百 ns 时间范围内把所有离子从同步加速器引出, 打靶后反应产物经束流线注入到实验环中, 无法在束流线上进行速度测量。储存环后引出也非常复杂, 难以实现。在储存环上的直线段安装两台 TOF 探测器, 是实现速度测量的最优方式。

如果在 CSR 直线段有两台 TOF 探测器 TOF1 和 TOF2, 如图 7 所示, 知道离子飞过两个探测器之间的距离  $L$ , 以及离子在某一圈分别通过 TOF1 和 TOF2 的时刻  $t_{i, \text{TOF1}}$  和  $t_{i, \text{TOF2}}$ , 那么我们可以计算离子当前的速度  $v_i$ :

$$v_i = \frac{L}{t_{i, \text{TOF2}} - t_{i, \text{TOF1}}} \quad (4)$$

我们建立了基于 CSR 的模拟平台进行研究<sup>[45]</sup>, 针对模拟数据详细讨论了双 TOF 谱仪数据处理方法<sup>[42]</sup>。通过模拟发现, TOF 探测器的时间分辨对双 TOF 质量谱仪的性能有很大影响。为此, 我们研制了新的高性能 TOF 探测器, 综合采用多个技术手段提高其时间性能, 离线测量显示其时间分辨好于 20 ps<sup>[46]</sup>。

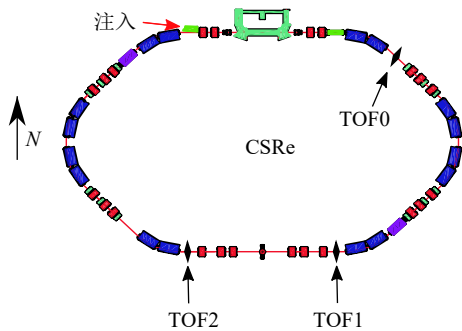


图 7 (在线彩图) 安装在 CSR 上的两个新研制的探测器 TOF1 和 TOF2, 以及单 TOF 实验的探测器 TOF0

我们将新研制的两台 TOF 探测器 TOF1 和 TOF2 安装在 CSR 的直线段上, 如图 7 所示。在此基础上, 我们进行了几次测试性实验和几次正式实验, 以下是简要介绍。

#### 4.1 双 TOF 的可行性测试

我们在 HIRFL 的 CSR 上进行了双 TOF 的可行性测试。实验选择  $^{78}\text{Kr}^{28+}$  作为初级束, 快引出轰击 RIBLL2 入口处的 Be 靶, 次级产物经过 RIBLL2 分离注入 CSR, CSR 的等时性中心设置在  $^{52}\text{Fe}^{26+}$  附近。

实验中探测器运行正常, 性能符合预期<sup>[46]</sup>。两台

TOF 探测器相距约 18 m, 较长的信号传输线会引起高频段信号的损失, 影响定时准确性。实验中采用两台示波器, 分别靠近两台 TOF 探测器采集数据, 两台示波器由同一触发信号分成两路触发。两路数据采集不会完全同步, 我们希望通过离线数据分析进行校正。但实验结果发现<sup>[47]</sup>, 不同次注入, 两台示波器的触发时间差存在很大的随机性, 为数据处理带来很大困难。

另外, 本次实验中 CSR 的束流光学设置仍然是以前单 TOF 时的设置, 束流在 TOF1 和 TOF2 位置色散非常大, 束流包络远大于探测器的孔径, 传输效率非常低。我们需要针对双 TOF 模式重新设计束流光学。

#### 4.2 束流光学的测试

为了解上次实验中遇到的两个问题, 我们设计了新的束流光学并进行了测试。首先使用一台示波器代替上次两台来采集信号。实验采用两条高带宽数据线将两个探测器的信号传输到中间的一台示波器上, 虽然信号线很长, 信号有延迟的问题, 但两路信号在不同次注入时的时间差别问题得到很大改善。其次, 针对双 TOF 实验专门设计了新的束流光学设置<sup>[48-49]</sup>, 在两个 TOF 探测器处的色散接近为零, 束流包络更小, 提高了传输效率。

这次实验, 选择  $^{36}\text{Ar}^{15+}$  作为初级束, CSR 的等时性中心设置在  $^{15}\text{O}^{8+}$ , 转变能  $\gamma_t = 1.359$ 。

这次实验表明, 基于双 TOF 等时性质量测量方法相对于单 TOF, 一方面能降低离子因为远离  $\gamma_t$  而产生的误差<sup>[50]</sup>, 另一方面也能够减小系统性偏差。

在这次实验中发现, 储存环的  $\gamma_t$  曲线, 即  $\gamma_t$  值随轨道长度的变化, 对测量结果的准确性有非常大的影响。理想情况下,  $\gamma_t$  在不同轨道上为一个常数。双 TOF 实验有了离子的速度信息, 从而能够比较精确地计算不同轨道上的  $\gamma_t$  值<sup>[51]</sup>。实验中的  $\gamma_t$  曲线如图 8 所示,  $\gamma_t$  值在某些轨道有比较剧烈的变化, 为数据分析带来很大难度。因此, 一个新的问题是如何优化设置储存环的  $\gamma_t$  曲线,  $\gamma_t$  的值与什么因素相关, 能否使得更多离子的  $\gamma$  值接近  $\gamma_t$  的值?

#### 4.3 束流光学的优化

我们进行了束流光学设置的优化实验。这次实验的主要目的是, 研究二极磁铁、四极磁铁和六极磁铁对于  $\gamma_t$  值的影响。选择能量为 407.63 MeV/u 的  $^{40}\text{Ar}^{15+}$  作为初级束, CSR 的等时性中心设置在  $^{34}\text{Al}^{13+}$ , 转变能  $\gamma_t = 1.359$ 。改变 CSR 磁铁的电流值, 观察  $\gamma_t$  随轨道周长  $C$  的变化规律。

实验发现<sup>[48-49]</sup>, 二极磁铁磁场的增减使得  $\gamma_t$  曲线

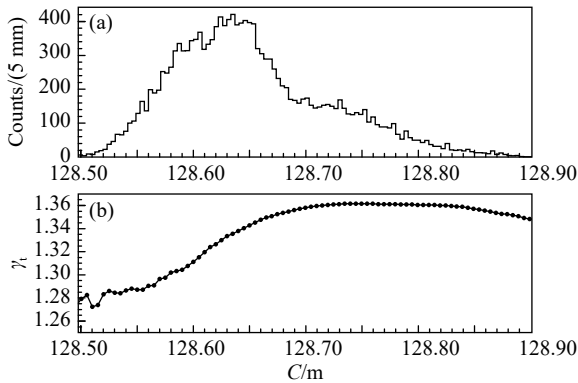


图 8 在束流光学设置测试中, 离子轨道长度的分布以及  $\gamma_t$  随轨道长度的变化

(a) 离子轨道长度的分布, (b) 储存环的  $\gamma_t$  值与离子轨道长度的关系。摘自文献 [50]。

分别向左或向右平移, 四极磁铁磁场的增减使得  $\gamma_t$  曲线分别向上或向下平移, 六极磁铁磁场的增减使得  $\gamma_t$  曲线分别逆时针或顺时针转动。本次实验使我们在双 TOF 实验过程中能在线监测实验环设置并针对目标核进行相应调整, 如图 9 所示。但是,  $\gamma_t$  曲线在远离中心轨道处仍有较大变化, 这需要更高阶磁场, 如八极磁铁, 进行校正, 这项工作在讨论中。本次实验发现, 双 TOF 束流光学设置下, 储存环的动量接收度和单 TOF 设置下相当。因此, 双 TOF 模式可以完全替代单 TOF 模式, 用来测量远离稳定线的短寿命原子核的质量。

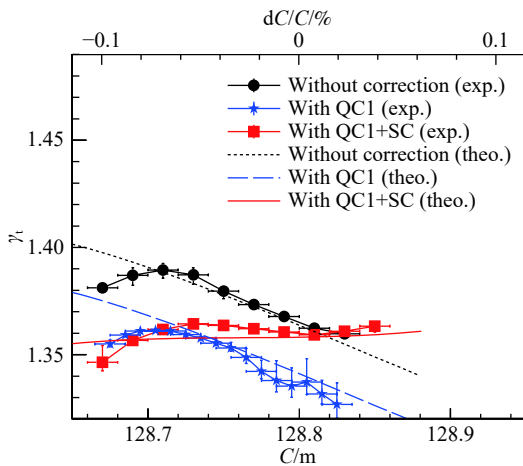


图 9 (在线彩图) 利用磁铁修正  $\gamma_t$  曲线

其中 QC 表示四极磁铁, SC 表示六极磁铁。摘自文献 [48]。

#### 4.4 正式实验

在前几次双 TOF 测试实验的基础上, 我们进行了两次双 TOF 正式实验, 在这两次实验的过程中, 我们利用了之前束流光学优化实验得到的结果, 通过调节磁场来优化  $\gamma_t$  曲线。

第 1 次正式实验选择  $^{58}\text{Ni}^{19+}$  作为主束, 目标核是

$^{44}\text{V}^{23+}$ , 希望测量  $^{44}\text{V}^{23+}$  的同质异能态。在这次实验中, 我们还进行了离线激光刻度实验 [52]。通过离线激光刻度, 我们不仅可以测量两路信号间的延迟, 还可以精确测量两个 TOF 探测器之间的纵向距离、横向错位距离、夹角、碳膜的平整度等, 对于实验前的装置校准和实验后的数据处理都有作用。不过, 离线激光刻度将来可以进一步改进为在线激光刻度, 以更准确地测量离子速度。

第 2 次正式实验选择  $^{86}\text{Kr}^{30+}$  作为主束, 目标核在  $^{53}\text{Sc}^{21+}$  附近, 希望测量  $^{52-54}\text{Sc}$ 、 $^{55}$ 、 $^{56}\text{Ti}$  原子核质量, 来研究  $N=32$  新中子亚壳的演化。

由于双 TOF 实验与传统单 TOF 实验的差别, 需要开发新的数据处理方法。例如, 在双 TOF 实验测量离子速度时, 需要测量离子在某一圈通过 TOF1 和 TOF2 的时刻  $t_{i,\text{TOF1}}$  和  $t_{i,\text{TOF2}}$ , 从而利用式 4 计算离子当前的速度  $v_i$ 。然而, TOF 探测器探测离子的效率并不是 100%, 尤其对于某些轻核, 探测效率小于 20%。这样一来, 两个 TOF 探测器在某一圈同时探测到这些轻核的概率不到 4%, 不利于速度测量。因此, 需要寻找更合适的方法。这两次实验数据仍在分析中。

## 5 总结与展望

在 HIRFL 上基于 CSR 的等时性质量测量实验已经进行了数十次, 在此期间, 我们不断改进质量测量的方法, 测量了一批以前没有测量过质量的原子核, 提高了一批原子核的质量精度, 研究了核天体、核结构领域的几个重要问题。

目前, CSR 单 TOF 质量测量精度已经接近该方法的极限, 我们适时发展了双 TOF 的方法。经过一系列测试实验, 初步建立了双 TOF 质量测量方法, 有效降低了单 TOF 方法中的系统性偏差和非等时性误差。

测量精度的提高, 对实验方法提出了更高的要求。我们下一步计划建立基于激光的在线刻度系统, 以更准确地测量离子速度。两个 TOF 探测器的数据获取不完全同步, 存在延迟误差。为了确保速度信息的准确性, 需要测量两个探测器之间的信号延迟时间。虽然第 1 次双 TOF 正式实验中的离线激光刻度实验能提供两路信号的延迟时间, 但我们希望将来能够在实验中, 每次注入都进行一次刻度, 使得速度信息更精确。另外, 模拟结果表明, 探测器的时间分辨率制约着双 TOF 实验精度的进一步提升, 因此持续改进 TOF 探测器的时间分辨率也在考虑中。双 TOF 实验的数据处理方法也在进一步发展中。

## 参考文献:

- [1] BLAUM K. *Phys Rep*, 2006, 425(1): 1.
- [2] ERLER J, BIRGE N, KORTELAINEN M, et al. *Nature*, 2012, 486(7404): 509.
- [3] XIA X W, LIM Y, ZHAO P W, et al. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2018, 121-122: 1.
- [4] WANG M, AUDI G, KONDEV F G, et al. *Chinese Physics C*, 2017, 41(3): 030003.
- [5] WANG M. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(3): 380. (in Chinese)  
(王猛. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 380.)
- [6] WANG M, ZHANG Y H, ZHOU X H. *Sci Sin-Phys Mech & Astron*, 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.)
- [7] HAUSMANN M, STADLMANN J, ATTALLAH F, et al. *Hyperfine Interactions*, 2001, 132(1): 289.
- [8] STADLMANN J, HAUSMANN M, ATTALLAH F, et al. *Phys Lett B*, 2004, 586(1/2): 27.
- [9] SUN B, KNÖBEL R, LITVINOV Y A, et al. *Nucl Phys A*, 2008, 812(1/4): 1.
- [10] KNÖBEL R, DIWISCH M, BOSCH F, et al. *Phys Lett B*, 2016, 754: 288.
- [11] KNÖBEL R, DIWISCH M, GEISSEL H, et al. *The European Physical Journal A*, 2016, 52(5): 138.
- [12] WANG M, XU H S, XIA J W, et al. *International Journal of Modern Physics E-Nuclear Physics*, 2009, 18(02): 352.
- [13] TU X L, WANG M, LITVINOV Y A, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2011, 654(1): 213.
- [14] TU X L, XU H S, WANG M, et al. *Phys Rev Lett*, 2011, 106(11): 112501.
- [15] ZHANG Y H, XU H S, LITVINOV Y A, et al. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(10): 102501.
- [16] YAN X L, XU H S, LITVINOV Y A, et al. *Astrophysical Journal Letters*, 2013, 766(1).
- [17] SHUAI P, XU H S, TU X L, et al. *Phys Lett B*, 2014, 735: 327.
- [18] XU X, ZHANG P, SHUAI P, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 117(18): 182503.
- [19] ZHANG P, XU X, SHUAI P, et al. *Phys Lett B*, 2017, 767: 20.
- [20] FU C Y, ZHANG Y H, ZHOU X H, et al. *Phys Rev C*, 2018, 98(1): 014315.
- [21] XING Y M, LI K A, ZHANG Y H, et al. *Phys Lett B*, 2018, 781: 358.
- [22] ZHANG Y H, ZHANG P, ZHOU X H, et al. *Phys Rev C*, 2018, 98(1): 014319.
- [23] XU X, WANG M, BLAUM K, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99(6): 064303.
- [24] XU X, LIU J H, YUAN C X, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100(5): 051303.
- [25] OZAWA A, UESAKA T, WAKASUGI M. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2012, 2012(1): 03C009.
- [26] YAMAGUCHI T, YAMAGUCHI Y, OZAWA A. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, 349-350: 240.
- [27] YAMAGUCHI Y, WAKASUGI M, UESAKA T, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, 317: 629.
- [28] YAMAGUCHI T (for the Rare-RI Ring collaboration). *Physica Scripta*, 2015, T166: 014039.
- [29] YAMAGUCHI Y, MIURA H, WAKASUGI M, et al. *Physica Scripta*, 2015, 2015(T166): 014056.
- [30] GE Z, WANG Q, WANG M, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(3): 294. (in Chinese)  
(葛壮, 王茜, 王猛, 等. 原子核物理评论, 2019, 36(3): 294.)
- [31] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 488(1-2): 11.
- [32] GEISSEL H, MUNZENBERG G, RIISAGER K. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1995, 45(1): 163.
- [33] TARASOV O B, BAZIN D. *Nucl Instr Meth B*, 2008, 266: 4657.
- [34] MEI B, TU X L, WANG M, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2010, 624(1): 109.
- [35] ZANG Yongdong. Data Analysis of Isochronous Mass Measurement via  $^{58}\text{Ni}$  Fragmentation[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)  
(臧永东.  $^{58}\text{Ni}$ 碎片质量测量数据处理方法[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.)
- [36] WANG Jingjin, FAN Tianmin, QIAN Yonggeng. *Nuclear Electronics*[M]. Atomic Energy Press, 1983. (in Chinese)  
(王经瑾, 范天民, 钱永庚. 核电子学[M]. 原子能出版社, 1983.)
- [37] SUN Baohua. Direct Mass Measurement for Short-lived Neutron-rich nuclides[D]. Beijing: Peking University, 2008. (in Chinese)  
(孙保华. 短寿命丰中子原子核的直接质量测量[D]. 北京: 北京大学, 2008.)
- [38] CHEN R J, WANG M, YAN X L, et al. *Computer Physics Communications*, 2017, 221: 216.
- [39] SHUAI P, TU X L, ZHANG Y H, 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.)
- [40] XING Y M, ZHANG Y H, WANG M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 941: 162331.
- [41] SHUAI P, XU H S, ZHANG Y H, et al. arXiv: 1407.3459.
- [42] XU X, WANG M, SHUAI P, et al. *Chinese Physics C*, 2015, 39(10): 106201.
- [43] GEISSEL H, LITVINOV Y A. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2005, 31(10): S1779.
- [44] GEISSEL H, KNÖBEL R, LITVINOV Y A, et al. *Hyperfine Interactions*, 2006, 173(1): 49.
- [45] CHEN R J, YUAN Y J, WANG M, et al. *Physica Scripta*, 2015, T166: 014044.
- [46] ZHANG W, TU X L, WANG M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2014, 756: 1.
- [47] XING Y M, WANG M, ZHANG Y H, et al. *Physica Scripta*, 2015, T166: 014010.
- [48] GE W W, YUAN Y J, YANG J C, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018, 908: 388.
- [49] CHEN R J, GE W W, YAN X L, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(3): 305. (in Chinese)  
(陈瑞九, 葛文文, 颜鑫亮, 等. 原子核物理评论, 2019, 36(3): 305.)



- [50] SUN M Z, ZHOU X H, WANG M, et al. *Frontiers of Physics*, 2018, 13(6): 132112. [52] YAN X L, CHEN R J, WANG M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018, 898: 111.
- [51] CHEN R J, YAN X L, GE W W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 931: 52.

## Progress of Isochronous Mass Spectrometry at HIRFL-CSR

DENG Hanyu<sup>1,2</sup>, WANG Meng<sup>1,2,†</sup>, ZHANG Yuhu<sup>1,2</sup>, FU Chaoyi<sup>1</sup>, ZHOU Xu<sup>1,2</sup>,  
SUN Mingze<sup>1</sup>, XING Yuanming<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In recent years, high-precision mass measurements of short-lived nuclides were conducted using isochronous mass spectrometry (IMS) based on the Cooler Storage Ring at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL-CSR). The new data enable us to discuss some related physical problems in the realm of nuclear structure and astrophysics. In this contribution, details of the measurements and data analysis are described. The IMS with two Time-Of-Flight (TOF) detectors is mainly introduced. In order to improve the mass resolving power while preserving the acceptance of the storage ring, additional velocity information beside the revolution time in the ring is obtained for each of the stored ions by using the double TOF detector system. The IMS with two TOF detectors is a brand new concept, and relevant experimental techniques need to be developed. We have established a simulation platform based on CSRe, developed high-performance TOF detectors and installed them in a straight section of the CSRe, performed online beam testing, developed new ion optics and optimized them, and developed data analysis methods and optimized them. Furthermore, planned technical developments are outlined in this contribution.

**Key words:** nuclear mass measurement; isochronous mass spectrometry; double TOF detectors

---

Received date: 02 Mar. 2019; Revised date: 09 May 2019

Foundation item: National Key R&D Program of China(2016YFA0400504, 2018YFA0404401)

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