

文章编号: 1007-4627(2019)03-0305-08

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

陈瑞九¹, 葛文文^{1,2}, 颜鑫亮¹, 原有进^{1,†}, 王猛¹, 张玉虎¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 综述了兰州冷却储存环 CSRe 上转变能洛伦兹因子的测量与校正的最新进展, 详细阐述了基于等时性质谱仪实验数据测量储存环的转变能洛伦兹因子的方法, 以及利用 CSRe 二极、四极、六极磁铁校正转变能洛伦兹因子曲线的结果。实验结果表明, 二极磁铁和四极磁铁可以平移转变能洛伦兹因子曲线, 六极磁铁可以旋转转变能洛伦兹因子曲线。通过校正 CSRe 的转变能洛伦兹因子曲线, 将 CSRe 对目标离子的质量分辨能力 $R = m/\Delta m = 3.15(9) \times 10^4$ (FWHM) (回旋周期相对误差 $\sigma_T/T = 7.3(2) \times 10^{-6}$) 提高到 $1.72(4) \times 10^5$ (FWHM) ($\sigma_T/T = 1.34(3) \times 10^{-6}$)。

关键词: 原子核质量测量; 储存环等时性质谱仪; 储存环; 转变能洛伦兹因子曲线

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.03.305

1 引言

质量是原子核的基本属性, 反映了原子核内部核子相互作用的总和, 其在原子核结构研究和天体环境中核合成过程研究等领域有重要的应用^[1-2]。近年来, 随着放射性核素研究的深入开展, 世界上各大实验室建立了放射性同位素束流线和质谱仪用于测量远离 β 稳定线的原子核质量^[3]。其中, 基于储存环的等时性质谱仪具备中等的质量分辨能力和超短的测量时间, 已经成为一种越来越重要的实验手段^[4-6]。目前, 世界上已经有 3 台储存环等时性质谱仪用于测量远离 β 稳定线的原子核质量。它们分别是德国亥姆霍兹达姆施达特重离子研究所 (简称 GSI) 的 ESR^[7-11], 我国兰州中国科学院近代物理研究所的重离子冷却储存环谱仪 CSRe^[12-22] 以及日本理化学研究所 (简称 RIKEN) 的 Rare-RI ring^[23-27]。此外, 我国“十二五”重大科技基础设施项目强流重离子加速器 HIAF 装置^[28-32] 以及德国的 FAIR 装置^[33] 正在建设中。这两大科学装置都配备了新一代的储存环等时性质谱仪, 并且把短寿命原子核的精确质量测量作为重要的科学目标之一。

等时性质谱术最早于 1987 年由 WOLLNIK 等^[34] 提出, 其工作原理如公式 (1) 所示^[35-36]:

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

式中: T 是离子的回旋周期; m/q 是离子的静止质量与电荷比 (简称质荷比); γ 是离子的相对论洛伦兹系数; $B\rho$ 是离子的磁刚度。 γ_t 是储存环转变能洛伦兹因子 (简称, 转变能因子), $\gamma_t = 1/\sqrt{\alpha_p}$ 。 α_p 是储存环的动量压缩因子, 反映了储存环中离子的磁刚度 $B\rho$ 变化导致轨道 C 变化的比例大小, 其与储存环的色散 $D(s)$ 函数关系如下:

$$\alpha_p = \frac{\delta C/C}{\delta B\rho/B\rho} = \frac{1}{C_0} \oint \frac{D(s)}{\rho} ds, \quad (2)$$

式中: C_0 为储存环的中心轨道长度; ρ 表示储存环二极磁铁的偏转半径。等时性质谱仪是储存环工作在等时性模式下的一种特殊模式。在等时性模式下, $\gamma_t = \gamma$, 式 (1) 中的第二项可以忽略不计, 目标离子的回旋周期和它们的质荷比呈一一对应的关系。此时, 速度快的离子沿着长轨道飞行, 速度慢的离子沿着短轨道飞行, 速度不同但荷质比相同的离子回旋周期相等。

在质量测量实验中, 储存环设置在特定的磁刚度 $B\rho = mv\gamma/q$ 下, 不同荷质比的离子的 γ 不同, 储存环的转变能因子 γ_t 仅仅与目标离子的 γ 相同。与目标离子的质荷比不同的离子将不可避免地无法满足等时性条件。在实验中, 我们采用飞行时间探测器^[37-39] 测量离子的回旋周期及速度, 离子每回旋一周都要穿过飞行时间探测器^[37-39] 的碳膜, 损失少量动能。如果等时性设置不能在宽的能量 (动量) 范围内满足等时性条件, 离子

收稿日期: 2018-10-21; 修改日期: 2019-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFA0400504); 国家自然科学基金资助项目 (11605252, 11605248);

作者简介: 陈瑞九 (1985-), 男, 福建仙游人, 副研究员, 博士, 从事原子核与粒子物理研究, E-mail: chenrj13@impcas.ac.cn

† 通信作者: 原有进, E-mail: yuanyj@impcas.ac.cn.

回旋周期谱就会被展宽。对于同种离子，式(1)可简化为公式(3)：

$$\frac{\sigma_T}{T} = -\left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_c^2}\right) \frac{\sigma(B\rho)}{B\rho} \quad (3)$$

式中 σ_T 为离子回旋周期的分布展宽， $\sigma(B\rho)$ 为存储离子的磁刚度的分布展宽，由储存环的磁刚度(或动量)接收度决定。根据式(1)，等时性质谱仪的质量分辨能力 R 和式(3)中的 σ_T/T 的关系为

$$R(\text{FWHM}) = \frac{m}{\Delta m} = \frac{1}{2.35} \times \frac{1}{\gamma^2} \times \frac{T}{\sigma_T} \quad (4)$$

目前，有三种方法可以用来降低回旋周期相对误差 σ_T/T ，提高质谱仪的质量分辨本领 R ^[41]。第一种方法是通过调节等时性质谱仪的转变能因子曲线，使得目标离子在磁刚度接收度范围内更好地满足等时性条件^[40, 42-43]。这种方法可以有效地提高质谱仪对目标离子的分辨本领，但是对那些与目标离子荷质比相差很大的离子提升作用不大。第二种方法是通过机械狭缝限制储存环的磁刚度接收度 $\sigma(B\rho)$ ，从而降低 σ_T/T ，提高质谱仪的分辨本领^[10-11, 44]。这种方法可以有效地提高质谱仪对所有存储离子的分辨本领，但会大大降低储存环中离子的产额，导致统计计数减少，获取相同统计计数所需的实验时间延长。因此，该方法不利于测量极端远离 β 稳定线的原子核质量。第三种方法则是通过在储存环的直线段安装两个飞行时间探测器直接测量离子的速度，并利用速度信息来降低离子的回旋周期的相对误差 σ_T/T ，从而提高质谱仪的分辨本领。这方法也被称为双飞行时间探测器等时性质谱仪^[45-48]。该方法原则上可以在不丢失统计计数的情况下有效地提高质谱仪的分辨本领，目前正应用在兰州中国科学院近代物理研究所重离子冷却储存环实验环(CSRe)上。在这三种方法中，如何精确测量并校正等时性质谱仪的转变能因子都是提高质谱仪分辨本领的一个无法回避的问题。

为了精确测量转变能因子曲线，并实时监测转变能因子随时间的变化，我们发展了一种利用等时性质质量测量实验数据来计算等时性质谱仪转变能因子的新方法^[49]。利用该方法，在CSRe上开展了二极磁铁、四极磁铁以及六极磁铁对转变能因子曲线影响的实验研究^[50]。

2 原理

在等时性质质量测量实验中，初级束流从离子源引出，经过扇形聚焦回旋加速器(SFC)加速并注入到冷却储存环主环(CSRm)中。初级束流在CSRm中累积

到 10^8 个离子，然后被加速到能量 $400\sim 500$ MeV/u，引出后轰击靶产生次级束流^[51-53]。次级束流经过次级束流线RIBLL2分离筛选后注入实验环(CSRe)^[51-52]。图1为次级束流线RIBLL2和CSRe的布局图。目前，已经有三套飞行时间探测器安装在CSRe中用于开展等时性质质量测量实验。TOF0飞行时间探测器单独使用可以测量离子的回旋周期 T ，进行传统单飞行时间探测器等时性质谱仪实验；TOF1和TOF2同时使用，测量离子的回旋周期 T 和速度 v ，进行双飞行时间探测器等时性质谱仪实验。

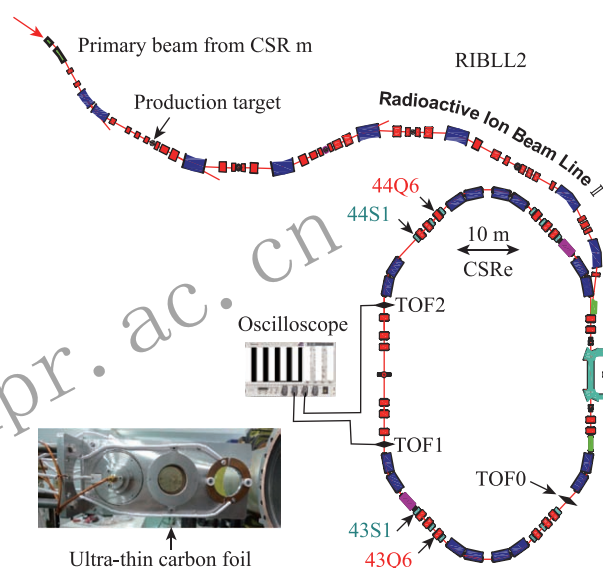


图1 (在线彩图) 次级束流线RIBLL2和CSRe的磁铁、探测器布局

左下角是飞行时间探测器的照片，离子每回旋一周都要穿过探测器的碳膜，损失少量动能。

飞行时间探测器主要由碳膜、微通道板以及电极板构成^[37-39]。碳膜的厚度约为 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ^[38-39]。实验中，离子每次穿过碳膜将在碳膜表面产生二次电子。这些二次电子在相互垂直的电磁场引导下，同时偏转到微通道板表面，经过微通道板倍增放大后形成电信号。电信号波形通过采样率为 50 GHz 的示波器记录在电脑硬盘上，供在线和离线数据分析。探测器的探测效率约为 $20\%\sim 70\%$ 。每次离子注入CSRe之后，示波器记录时间为 $200 \mu\text{s}\sim 1 \text{ ms}$ ，相当于离子在CSRe内飞行 $300\sim 1500$ 圈所需的时间。

在数据处理过程中，首先使用恒比定时算法为每个信号定时，然后利用周期性信号跟踪算法得到每个离子经过碳膜的时间序列^[13, 54]。每一个离子通过碳膜的時刻 t 和对应的圈数 N 用二次多项式曲线进行拟合：

$$t = A_0 + A_1 N + A_2 N^2, \quad (5)$$

离子的拟合回旋周期是圈数 N 的函数:

$$T(N) = \frac{dt}{dN} = A_1 + 2A_2N. \quad (6)$$

这是由于离子每次经过碳膜存在能损导致的。相邻两圈的回旋周期差为

$$\delta T = T(N+1) - T(N) = 2A_2. \quad (7)$$

根据相对论运动学公式, 离子每次穿过碳膜的磁刚度变化(或动量变化 $\delta p/p$) 和动能变化 $\delta E_k/E_k$ 的关系为

$$\frac{\delta B\rho}{B\rho} = \frac{\delta p}{p} = \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\delta E_k}{E_k}. \quad (8)$$

将式 (8) 和式 (3) 合并可得:

$$\frac{\delta T}{T} = -\left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_t^2}\right) \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\delta E_k}{E_k}. \quad (9)$$

代入式 (7) 得到 A_2 系数的表达式^[55-56]:

$$A_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_t^2}\right) \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\delta E_k}{E_k} T. \quad (10)$$

可以看出, A_2 系数是由离子的参数(离子在碳膜上的能损 δE_k 、洛伦兹系数 γ 、动能 E_k 以及回旋周期 T) 和储存环等时性质谱仪的机器参数 γ_t 两部分共同决定。

需要指出, 由于实验中的回旋周期 T 和 A_2 是通过拟合每一个离子通过碳膜的时刻和对应的圈数得到的, 故这里的 δE_k 表示离子在 CSR_e 飞行期间在碳膜上的平均能损。由于碳膜的厚度很薄, 质量测量过程中离子穿越碳膜的次数较少, 忽略了每圈能损与平均能损的差别。在相对论能区(离子的速度约为 $0.65c$, c 是真空中光速), 碳膜厚度 d 很薄(仅约为 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 等效于 88 nm) 的情况下, δE_k 近似与碳膜厚度 d 成正比:

$$\delta E_k = \frac{dE}{dx}(Z, \beta) \times d. \quad (11)$$

其中

$$\frac{dE}{dx}(Z, \beta) = 1.2750 \cdot 10^{-7} \times (1211.902 + Z) \times \left(\frac{Z}{\beta}\right)^2 \times [\ln(11880 \cdot \beta^2) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2], \quad (12)$$

为全裸离子 $\frac{A}{Z}X^{Z+}$ 以速度 βc 穿过碳膜的能损公式, 其单位为 $\text{keV}/(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ 。式 (12) 和 Lise++ 程序^[57] 计算得到的能损值最大相对差别为 0.1% , 如图 2(d) 所示。这个差别相对于碳膜厚度的拟合误差来说很小, 可以忽略。在实际的计算过程中, 我们采取式 (12) 计算的离子穿过碳膜的平均能损。

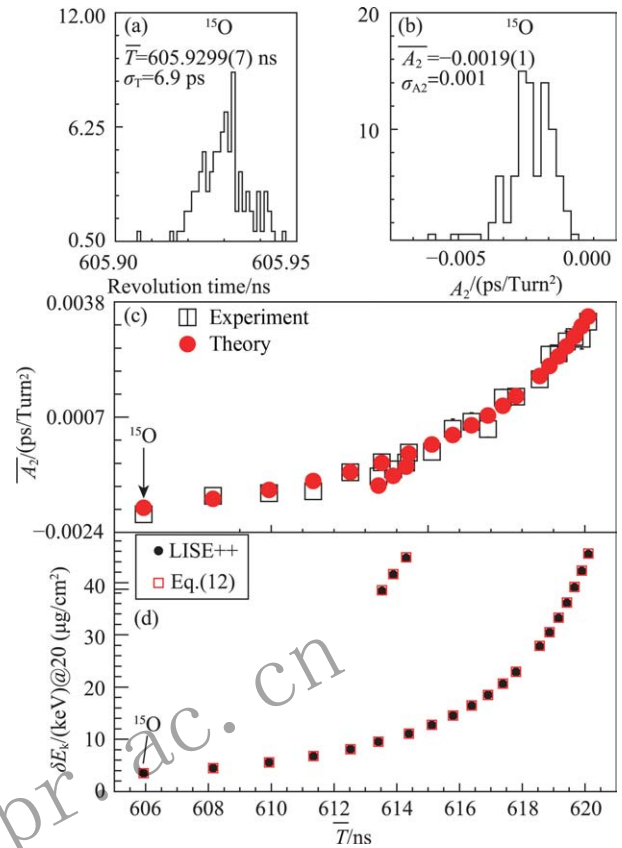


图 2 (在线彩图) 2014 年等时性质量测量实验中, 1 个小时内所有的 $^{15}\text{O}^{8+}$ 的实验回旋周期分布 (a) 和 A_2 系数 (b) 分布。(c) 为这段时间内, 所有种类离子的 A_2 系数平均值。横轴为不同种类离子的回旋周期。黑色的方框和红色实心圆圈分别为实验数据和用式 (10) 得到的最佳值。(d) 为图 (c) 中的所有离子在 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜中能损。黑色的圆点和红色方框分别表示用 LISE++ 程序^[57] 和式 (12) 计算的结果

此外, 在等时性质谱仪实验中, 可以通过实验数据得到离子的速度 β , 从而得到式 (10) 中的相对论因子 γ 。在单飞行时间探测器等时性质谱仪实验中, 用测得的离子回旋周期 T 和 CSR_e 的中心轨道长度设计值 128.801 m 计算离子的速度 β ; 在双飞行时间等时性质谱仪实验中, 用双 TOF 之间的距离以及离子在双 TOF 之间的飞行时间计算离子的速度 β 。然后鉴别出每一个回旋周期峰对应的离子种类^[13], 采用原子质量评估的数据库^[58] 计算带电离子的静止质量 m , 从而得到动能 $E_k = m(\gamma - 1)$ 。综上, A_2 系数公式中的未知参数就剩下 γ_t 和 d 。

采用最小二乘法用式 (10) 对 A_2 系数的实验数据进行拟合, 在 d 与 γ_t 的二维参数空间计算拟合结果的 χ^2 , 得到这两个参数的最佳估计值与 1σ 置信区间。 χ^2 值定义如下:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\overline{A_{2,i}^{\text{exp.}}} - A_{2,i}^{\text{theo.}})^2}{\epsilon_{A_{2,i}^{\text{exp.}}}^2} \quad (13)$$

式中 N 代表测得的离子种类数目； i 代表第 i 种离子。 $\overline{A_{2,i}^{\text{exp.}}}$ 和 $A_{2,i}^{\text{theo.}}$ 分别是第 i 种离子的 A_2 系数的实验平均值和用式 (10) 计算的理论值。 $\epsilon_{A_{2,i}^{\text{exp.}}}$ 是 $\overline{A_{2,i}^{\text{exp.}}}$ 的误差。

3 实验结果

3.1 γ_t 和碳膜厚度的拟合结果

本方法首次应用在 2014 年 ^{58}Ni 碎片的等时性质质量测量实验中^[18-19]。这次实验仅使用 TOF0 测量离子的回旋周期。CSRe 设置在 $\gamma_t=1.4$ 的等时性模式下。目标离子为 $^{52}\text{Co}^{27+}$ ，其回旋周期约为 $T = 614.1849$ ns，离子运行于 CSRe 的中心轨道上，其动能约为 372 MeV/u。该离子穿过一次厚度为 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜能损为 $\delta E_k = 0.0416$ MeV^[57]， A_2 的理论估计值约为 $0.0012 \text{ ps}/N^2$ 。

图 2 为 2014 年实验一个小时的数据分析与拟合结果^[18-19, 49]。(a) 和 (b) 为这段时间内所有的 $^{15}\text{O}^{8+}$ 离子的实验回旋周期和 A_2 系数的分布，(c) 为这段时间内所有测得离子的 A_2 系数平均值的实验结果以及相应的最佳拟合。图 3 为拟合结果的 χ^2 随着 γ_t 和碳膜厚度 d 的变化。图中不同的椭圆代表不同的置信度。从图 3 中可知最小二乘法的拟合结果为 $d=(21.6 \pm 1.4) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ， $\gamma_t=1.3971 \pm 0.0005$ 。

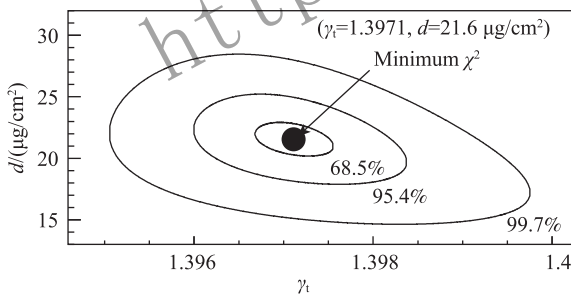


图 3 拟合结果的 χ^2 随着 γ_t 和碳膜厚度 d 的变化

3.2 CSRe 的 γ_t 随时间的变化

用相同的方法，我们分析了此次实验连续 24 小时的实验数据，得到 γ_t 和碳膜厚度 d 值随时间的变化趋势，如图 4 所示。在此次实验中，针对 CSRe 进行了两次调整。第一次调整了 CSRe 的四极磁铁的聚焦强度，第二次在 CSRe 中卡了 60 mm 狭缝来限制 CSRe 的磁刚度接收度。这两次调整的时间大概位于图 4(a) 中的 11:00 和 18:30 的位置。从图 4(a) 可以看出，第一次调整将 γ_t 从 1.396 调整为 1.402。第二次调整进一步将 γ_t 从 1.402 调整为 1.400。此结果展示了本方

法对 CSRe 的 γ_t 进行快速测量和实时监测的潜力。从图 4(b) 可以看出，虽然经过 2 次调整，CSRe 的 γ_t 发生变化，但是用这种方法提取得到的碳膜厚度 d 在误差范围之内一致。碳膜厚度平均值为 $(22.3 \pm 1.3) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。这个值和碳膜的理论设计值 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 接近。

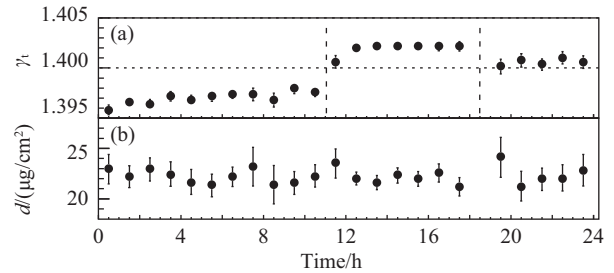


图 4 2014 年等时性质质量测量实验中， γ_t 和碳膜厚度 d 随时间的变化

需要指出，对于只采用一套飞行时间探测器的等时性质质量测量实验，由于离子速度是从平均轨道长度和回旋周期计算出来的，缺乏直接的测量。所以用该方法拟合得到的 γ_t 为储存环磁刚度接收度内所有轨道上 γ_t 分布的平均值。为了精确测量不同轨道对应的 γ_t ，必须直接测量速度信息，从而得到离子真实的闭合轨道长度。

3.3 CSRe 的 γ_t 随闭合轨道长度 C 的变化曲线

有了双飞行时间探测器等时性质谱仪，离子在 CSRe 中的速度可以直接测量^[46-48]，离子的闭合轨道长度等于回旋周期 T 和速度 v 的乘积。应用本文发展的方法，我们测量了 CSRe 的 $\gamma_t(C)$ 曲线^[50]。

2016 年我们利用 ^{36}Ar 碎片进行了一次双飞行时间探测器等时性质谱仪测试实验^[50]。CSRe 设置在 $\gamma_t=1.360$ 的光学模式下。实验中，利用 CSRe 的直线段两端的 TOF1 和 TOF2(位置参考图 1) 同时测量离子的回旋周期 T 和速度 v 。两个探测器之间的距离是 $18034(1) \text{ mm}$ ^[59]，因此实验中 $^{38}\text{S}^{16+}$ 离子在双 TOF 之间的飞行时间约为 87 ns。探测器的时间分辨率是 $\sigma \sim 18 \text{ ps}$ ^[39]，离子速度的单次测量精度为 3×10^{-4} 。每个离子在 CSRe 回旋至少 300 圈，多圈测量后，离子的平均速度测量精度约为 $\sigma_v/v = 3 \times 10^{-5}$ 。图 5(a) 为实验 1 h 内所有离子的轨道长度分布。按轨道长度将数据每隔 10 mm 进行分组，用本文发展的方法得到了 $\gamma_t(C)$ 和碳膜厚度 $d(C)$ 曲线，如图 5(b) 和 (c) 所示。

从图 5(b) 可以看到，在本次实验设置下，CSRe 的 γ_t 大概在 128700 mm 至 128900 mm 之间是平的，而在轨道小的地方 γ_t 快速下降。可能是 CSRe 磁铁的磁场强度沿着与束流轨道垂直的横向方向上分布不均

匀所导致^[50]。这是我们用等时性质量测量实验首次获得的转变能因子曲线。从图 5(c) 可得碳膜厚度 d 分布在 $(39.2 \pm 6) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的误差范围之内, 这个值与 2 个碳膜厚度之和 ($40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 一致。

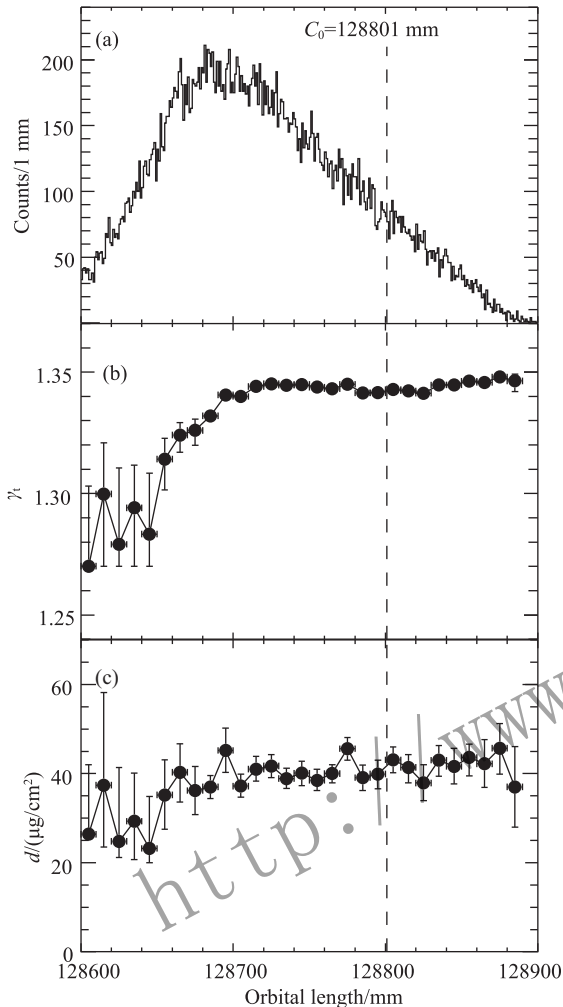


图 5 2016 年双飞行时间探测器等时性质量测量实验 1 h 数据的分析结果

(a) 离子的闭合轨道长度 C 分布, (b) 对轨道每隔 10 mm 进行分组, 拟合得到转变能因子 γ_t 和 (c) 碳膜厚度 d 。

3.4 CSRe 的二极磁铁、四极磁铁以及六极磁铁对转变能因子曲线的影响

根据研究的结果, 我们可以有针对性地将储存环的转变能因子 γ_t 准确地设置在目标核的 γ 上, 并在实验的过程中根据需求快速调整转变能因子曲线的形状, 从而提高谱仪的分辨能力。此工作为等时性质谱仪的改进和未来谱仪的设计提供了依据^[50]。

图 6(a) 中黑色、红色以及蓝色的点线分别表示二极磁铁的磁场强度在初始磁场强度 B_0 、磁场强度增减 0.2% 情况下测得的转变能因子曲线。从图 6(a) 可知 CSRe 的二极磁铁磁场不稳定将会导致转变能

因子曲线发生移动。CSRe 当前的磁场强度稳定度约为 $dB/B \sim 2 \times 10^{-5}$, 对应转变能因子曲线变化为 $d\gamma_t/\gamma_t \sim 7.3 \times 10^{-5}$ 。这说明了 CSRe 的二极磁铁磁场的的不稳定除了会影响 CSRe 的磁刚度, 也会对 γ_t 造成影响, 其量级大约为 $\delta(\gamma_t)/\gamma_t \approx -3.5 \times \delta B/B$ 。如果磁场晃动发生在两次注入之间, 那么注入离子的中心磁刚度会发生变化, 导致离子的转变能因子曲线发生上下平移, 量级大约为 $\delta\gamma/\gamma = (1 - 1/\gamma^2)\delta B\rho/B\rho \approx 0.46 \times \delta B/B$ 。两个效果叠加, 使得原本 $\gamma_t = \gamma$ 的等时性状态越来越不能得到满足。这表明二极磁铁磁场的长期稳定性必须得

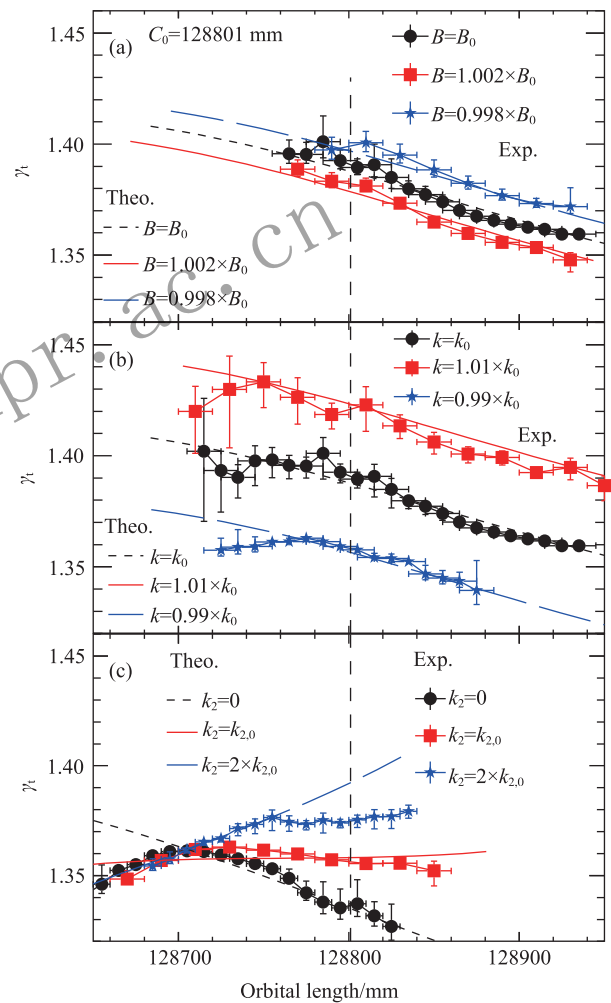


图 6 (在线彩图) 不同的二极磁铁磁场强度, 四极磁铁聚焦强度以及六极磁铁强度对转变能因子曲线的影响

(a) 黑色、红色以及蓝色的点线分别表示二极磁铁的磁场强度在初始磁场强度 B_0 、磁场强度增减 0.2% 情况下测得的转变能因子曲线; (b) 黑色、红色以及蓝色的点线分别表示 43Q6 和 44Q6 两组四极磁铁的聚焦强度 k 在初始聚焦强度 k_0 以及增减 1% 情况下测得的转变能因子曲线; (c) 黑色、红色以及蓝色的点线分别表示在 43S1 和 44S1 两组六极磁铁的强度 k_2 为 0、 k_{20} 和 $2k_{20}$ 情况下测得的转变能因子曲线。 k_{20} 为理论计算的六极磁铁强度。图(a), (b), (c) 中的黑色虚线, 蓝色断续线以及红色的点划线分别表示对应的理论计算曲线

到重视。

图 6(b) 中黑色、红色以及蓝色的点线分别表示 43Q6 和 44Q6 两组四极磁铁的聚焦强度 k 在初始聚焦强度 k_0 以及增减 1% 情况下测得的转变能因子曲线。43Q6 和 44Q6 两组四极磁铁位于实验环等时性模式色散最大的位置^[50](参考图 1)。从图 6(b) 可知, 通过增加或减小 43Q6 和 44Q6 两组四极磁铁的聚焦强度可以上下平移转变能因子曲线。从图中可知, 这两组四级磁铁磁场强度变化对 γ_t 造成的影响量级大约为 $\delta(\gamma_t)/\gamma_t \approx 3 \times \delta k/k_0$ 。

图 6(c) 中黑色、红色以及蓝色的点线分别表示在 43S1 和 44S1 两组六极磁铁的强度 k_2 为 0, k_{20} 和 $2k_{20}$ 情况下测得的转变能因子曲线。 k_{20} 为理论计算的六极磁铁强度。从图 6(c) 中可知, 通过调节六极磁铁强度可以旋转转变能因子曲线。

图 6(a), (b), (c) 中的黑色的虚线、蓝色的断续线以及红色的点划线分别表示对应的理论计算曲线。从图中可以看出, 理论计算结果的变化趋势和实验数据基本一致, 表明转变能因子曲线得到了有效的调整。

3.5 CSRe 转变能因子曲线的校正

根据以上的经验, 我们利用四极磁铁和六极磁铁调整了 CSRe 的转变能因子曲线, 使其与目标离子 $^{38}\text{S}^{16+}$ 的 $\gamma(C)$ 曲线接近。注意到, $\gamma(C)$ 曲线的计算是根据离子的磁刚度 $B\rho = m\gamma v/q$ 与轨道长度 C 的对应关系, 从离子的 $\gamma(B\rho)$ 曲线映射得到的。CSRe 磁刚度设置在 5.72135 Tm, 目标离子 $^{38}\text{S}^{16+}$ 的设置 $\gamma = 1.36$ 。图 7 中黑色点线为初始的转变能因子曲线。如果定义满足等时性条件的区域为 $\gamma_t = 1.36 \pm 0.005$, 那么在初始设置下, 满足等时性条件的区域很窄。为了扩大这个区域, 我们综合使用四极磁铁和六极磁铁校正了 CSRe 的转变能因子曲线。首先, 用四极磁铁校正可将转变能因子曲线往下移动至蓝色的曲线。然后用六极磁铁将转变能因子曲线逆时针旋转至红色的曲线位置。值得注意的是, 在储存环磁刚度接受度范围内 γ 的变化非常小, 而 γ_t 的变化远比 γ 的变化大。这反映了对转变能因子曲线进行精确调控的困难性。

图 8(a), (b), (c) 分别为图 7 中黑色、蓝色以及红色的设置下对应的离子的回旋周期分布宽度和回旋周期分布的中心值的关系图。从该图可以看到, 经过校正后 CSRe 对目标离子的质量分辨能力 $R = 3.15(9) \times 10^4$ (FWHM) (回旋周期相对误差 $\sigma_T/T = 7.3(2) \times 10^{-6}$) 提高到 $1.72(4) \times 10^5$ (FWHM) ($\sigma_T/T = 1.34(3) \times 10^{-6}$)。

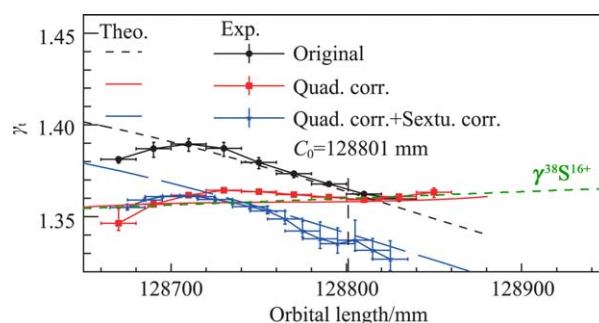


图 7 (在线彩图) 用四极磁铁和六极磁铁对转变能因子曲线进行校正

黑色的实心点为初始的转变能因子曲线。蓝色实心点为经过四极磁铁校正后的转变能因子曲线, 红色实心点为经过四极磁铁和六极磁铁校正后的转变能因子曲线。虚线、断续线以及点划线表示对应的理论曲线。绿色的点线是本次实验的目标离子 $^{38}\text{S}^{16+}$ 的 γ 曲线。

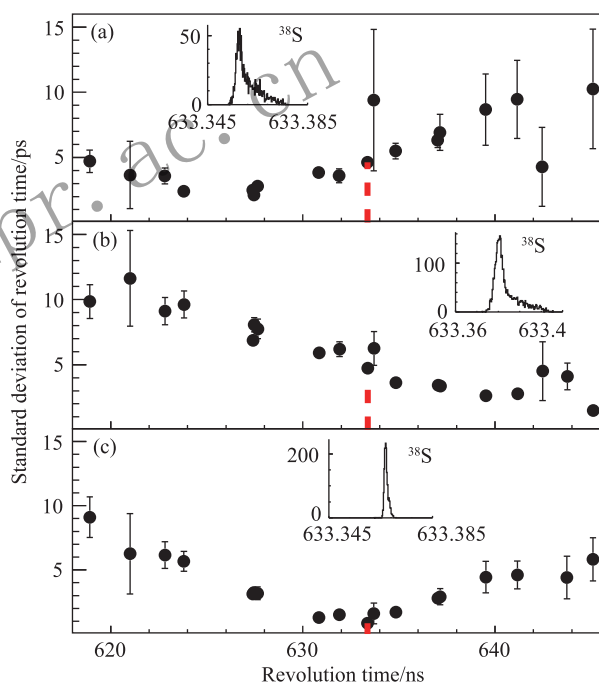


图 8 (在线彩图) 不同设置下实验测得离子的回旋周期分布宽度和回旋周期分布中心值的关系图

(a), (b), (c) 分别对应图 7 中黑色、蓝色以及红色的设置。

4 结论与展望

本文推导了储存环等时性质质量测量实验中 A_2 系数的理论公式, 利用该公式拟合实验数据得到了 CSRe 的转变能因子以及飞行时间探测器碳膜厚度值。基于此方法, 结合双 TOF 等时性质谱仪获得的离子速度信息, 本文进一步测量了 CSRe 的转变能因子随轨道长度 C 的变化曲线, 研究了 CSRe 的二极磁铁、四极磁铁以及六极磁铁对转变能因子曲线的影响。实验结果表明, 二极磁铁和四极磁铁可以平移转变能因子

曲线, 六极磁铁可以旋转转变能因子曲线。通过对转变能因子曲线的校正, 等时性质谱仪对目标离子的质量分辨能力 $R = m/\Delta m = 3.15(9) \times 10^4$ (FWHM) (回旋周期相对误差 $\sigma_T/T = 7.3(2) \times 10^{-6}$) 提高到了 $1.72(4) \times 10^5$ (FWHM) ($\sigma_T/T = 1.34(3) \times 10^{-6}$)。原则上, 结合肖特基共振探针, 本文所发展的方法也可用于 CSR_e 的内靶实验测量气体靶的厚度。

目前, 在 CSR_e 的磁刚度接收度范围内, 转变能因子的变化远比目标离子的 γ 变化要大。若要使转变能因子曲线与目标离子的 γ 曲线完全重合(理想等时性条件), 必须对转变能因子曲线的非线性部分进行精确校正, 这需要引入更高阶的磁场。未来, 我们计划在 CSR_e 上安装八极铁进一步校正 CSR_e 的转变能因子曲线, 提高谱仪的分辨本领。本文所建立的方法可以直接应用到将来新一代强流重离子加速器 HIAF 装置的 SRing 储存环^[28-32]以及德国 FAIR 装置的 CRing 储存环上^[33]。

致谢 我们衷心地感谢中国科学院近代物理研究所加速器部门及相关部门的同事, 为实验的顺利开展提供了优质的束流。颜鑫亮感谢 FRIB-CSC 博士后项目的资金支持。陈瑞九感谢中德博士后项目(OCPC No. 16)的资金支持。

参考文献:

- [1] LUNNEY D, PEARSON J M, THIBAUT C. *Reviews of Modern Physics*, 2003, **75**(3): 1021.
- [2] BLAUM K. *Physics Reports*, 2006, **425**(1): 1.
- [3] BLAUM K, LITVINOV Y A. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, **349-350**: 1.
- [4] ZHANG Y H, LITVINOV Y A, UESAKA T, *et al. Physica Scripta*, 2016, **91**(7): 073002.
- [5] LITVINOV Y A, GEISSEL H, KNÖBEL R, *et al. Acta Physica Polonica B*, 2010, **41**(2): 511.
- [6] BOSCH F, LITVINOV Y A, STÖHLKER T. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2013, **73**: 84.
- [7] HAUSMANN M, STADLMANN J, ATTALLAH F, *et al. Hyperfine Interactions*, 2001, **132**(1): 291.
- [8] STADLMANN J, HAUSMANN M, ATTALLAH F, *et al. Physics Letters B*, 2004, **586**(1): 27.
- [9] SUN B, KNÖBEL R, LITVINOV Y A, *et al. Nuclear Physics A*, 2008, **812**: 1.
- [10] KNÖBEL R, DIWISCH M, BOSCH F, *et al. Physics Letters 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*, 2009, **18**(2): 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. Physical Review Letters*, 2011, **106**(112501).
- [15] ZHANG Y H, XU H S, LITVINOV Y A, *et al. Physical Review Letters*, 2012, **109**(102501).
- [16] YAN X L, XU H S, LITVINOV Y A, *et al. The Astrophysical Journal*, 2013, **766**(1): L8.
- [17] SHUAI P, XU H S, TU X L, *et al. Physics Letters B*, 2014, **735**: 327.
- [18] XU X, ZHANG P, SHUAI P, *et al. Physical Review Letters*, 2016, **117**(18): 182503.
- [19] ZHANG P, XU X, SHUAI P, *et al. Physics Letters B*, 2017, **767**: 20.
- [20] FU C Y, ZHANG Y H, ZHOU X H, *et al. Physical Review C*, 2018, **98**(1): 014315.
- [21] XING Y M, LI K A, ZHANG Y H, *et al. Physics Letters B*, 2018, **781**: 358.
- [22] ZHANG Y H, ZHANG P, ZHOU X H, *et al. Physical Review C*, 2018, **98**(1): 014319.
- [23] OZAWA A, UESAKA T, WAKASUGI M. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2012, **2012**(1): 03C009.
- [24] YAMAGUCHI T, YAMAGUCHI Y, OZAWA A. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, **349-350**: 240-246.
- [25] YAMAGUCHI Y, WAKASUGI M, UESAKA T, *et al. Nucl Instr and Meth B*, 2013, **317**: 629.
- [26] YAMAGUCHI Y, MIURA H, WAKASUGI M, *et al. Physica Scripta*, 2015, **2015**(T166): 014056.
- [27] YAMAGUCHI T for the Rare-RI Ring collaboration. *Physica Scripta*, 2015, **2015**(T166): 014039.
- [28] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al. Nucl Instr and Meth B*, 2013, **317**: 263.
- [29] WU B, YANG J C, XIA J W, *et al. Nucl Instr and Meth A*, 2018, **881**: 27.
- [30] WU Bo, YANG Jiancheng, GE Wenwen, *et al. Nuclear Physics Review*, 2018, **35**(3): 270. (in Chinese) (吴波, 杨建成, 葛文文, 等. *原子核物理评论*, 2018, **35**(3): 270.)
- [31] GE Wenwen, YUAN Youjin, YANG Jiancheng, *et al. Nuclear Physics Review*, 2018, **35**(2): 147. (in Chinese) (葛文文, 原有进, 杨建成, 等. *原子核物理评论*, 2018, **35**(2): 147.)
- [32] MA X, WEN W Q, ZHANG S F, *et al. Nucl Instr and Meth B*, 2017, **408**: 169.
- [33] FAIR. Baseline Technical Report[EB/OL][2018-09-20].
- [34] WOLLNIK H. *Nucl Instr and Meth B*, 1987, **26**: 267.
- [35] HAUSMANN M, ATTALLAH F, BECKERT K, *et al. Nucl Instr and Meth A*, 2000, **446**(3): 569.
- [36] FRANZKE B, GEISSEL H, MUNZENBERG G. *Mass Spectrometry Reviews*, 2008, **27**(5): 428.
- [37] TRÖTSCHER J, BALOG K, EICKHOFF H, *et al. Nucl Instr and Meth B*, 1992, **70**(1-4): 455.
- [38] MEI B, TU X L, WANG M, *et al. Nucl Instr and Meth A*, 2010, **624**(1): 109.
- [39] ZHANG W, TU X L, WANG M, *et al. Nucl Instr and Meth A*, 2014, **756**: 1.

- [40] DOLINSKII A, GEISSEL H, LITVINOV S, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2008, **266**(19-20): 4579.
- [41] CHEN R J, YUAN Y J, WANG M, *et al.* *Physica Scripta*, 2015, **T166**: 014044.
- [42] DOLINSKII A, LITVINOV S, STECK M, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2007, **574**(2): 207.
- [43] LITVINOV S, TOPREK D, WEICK H, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2013, **724**: 20.
- [44] GEISSEL H, KNÖBEL R, LITVINOV Y A, *et al.* *Hyperfine Interactions*, 2006, **173**(1-3): 49.
- [45] GEISSEL H, LITVINOV Y A. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2005, **31**(10): S1779.
- [46] XING Y M, WANG M, ZHANG Y H, *et al.* *Physica Scripta*, 2015, **T166**: 014010.
- [47] XU X, WANG M, SHUAI P, *et al.* *Chinese Physics C*, 2015, **39**(10): 106201.
- [48] SHUAI P, XU X, ZHANG Y H, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2016, **376**: 311.
- [49] CHEN R J, YAN X L, GE W W, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2018, **898**: 111.
- [50] GE W W, YUAN Y J, YANG J C, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2018, **908**: 388.
- [51] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2002, **488**(1-2): 11.
- [52] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **11**: 1787.
- [53] 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.)
- [54] CHEN R J, WANG M, YAN X L, *et al.* *Computer Physics Communications*, 2017, **221**(Supplement C): 216.
- [55] YAN Xinliang. Precision Mass Measurements of Neutron-deficient Nuclei in Storage Rings[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
(颜鑫亮. 储存环上短寿命缺中子核素的精确质量测量[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.)
- [56] SHUAI Peng. Accurate Mass Measurements of Short-lived Nuclides at the HIRF-CSR facility[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
(帅鹏. HIRFL-CSR上短寿命核素质量的精确测量[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.)
- [57] TARASOV O B, BAZIN D. *Nucl Instr and Meth B*, 2008, **266**(19-20): 4657. <http://lise.nslc.msui.edu> and <https://web-docs.gsi.de/weick/atima/>
- [58] HUANG W J, AUDIG, WANG M, *et al.* *Chinese Physics C*, 2017, **41**(3).
- [59] YAN X L, CHEN R J, WANG M, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2019, **931**: 52.

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

CHEN Ruiju¹, GE Wenwen^{1,2}, YAN Xinliang^{1,†}, YUAN Youjin¹, WANG Meng¹, ZHANG Yuhu¹

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The latest developments of measurements and corrections of the transition energy of the cooling storage ring CSRe at the Lanzhou are reviewed in this paper. The principle of the method used to measure the transition energy of the storage ring CSRe is introduced. This method was used to investigate the influence of dipole magnetic fields, quadrupole magnetic fields and sextupole magnetic fields on the transition energy curve. Experimental results show that the transition energy curve can be horizontally, vertically shifted as well as rotated, by varying dipole magnetic fields, quadrupole magnetic fields and sextupole magnetic fields, respectively. With the corrections of the quadrupole magnets and sextupole magnets at the CSRe, the mass resolving power R for the target nuclei was improved from $R = 3.15(9) \times 10^4$ (relative error of revolution time $\sigma_T/T = 7.3(2) \times 10^{-6}$) to $1.72(4) \times 10^5$ ($\sigma_T/T = 1.34(3) \times 10^{-6}$).

Key words: nuclear mass measurement; isochronous mass spectrometry; heavy-ion storage rings; Lorentz factor of transition energy

Received date: 21 Oct. 2018; **Revised date:** 6 Mar. 2019

Foundation item: National Key R&D Program of China (2016YFA0400504); National Natural Science Foundation of China (11605252, 11605248)

† **Corresponding author:** YUAN Youjin, E-mail: yuanyj@impcas.ac.cn.