

文章编号: 1007-4627(2018)02-0196-08

## 重离子冷却储存环 CSRm 双电子复合实验研究 类锂 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$ 离子同位素移动

啜晓亚<sup>1,2</sup>, 黄忠魁<sup>1</sup>, 汶伟强<sup>1</sup>, 汪寒冰<sup>1</sup>, 许鑫<sup>3</sup>, 汪书兴<sup>3</sup>, 李冀光<sup>4</sup>, 豆丽君<sup>1,2</sup>, 赵冬梅<sup>1</sup>,  
朱小龙<sup>1</sup>, 冒立军<sup>1</sup>, 殷达钰<sup>1</sup>, 杨建成<sup>1</sup>, 原有进<sup>1</sup>, 马新文<sup>1,†</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;

3. 中国科学技术大学物理学院近代物理系, 合肥 230026;

4. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 配备电子冷却装置的重离子储存环为开展高电荷态离子的双电子复合 (dielectronic recombination, DR) 精密谱学研究提供了绝佳的实验平台。本工作在兰州重离子加速器冷却储存环主环 (HIRFL-CSRm) 上开展了类锂  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子的双电子复合实验, 实验观测了电子-离子质心系能量范围为 0~35 eV 的双电子复合速率系数谱。通过外推法获得了  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  的跃迁能量。同时利用 GRASP2K 程序理论计算了  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  跃迁的质量移动因子和场移动因子, 进而得到双电子复合谱的同位素移动值。 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  同位素移动分别为 0.861 meV 和 0.868 meV。它们均小于目前 CSRm 上双电子复合实验的实验分辨为  $\sim 10$  meV, 进而解释了实验测量的 DR 谱上未能观察到同位素移动的原因。然而, 高电荷态离子的同位素移动场效应与原子序数  $Z^5$  成正比, 因此, 在重离子加速器冷却储存环实验环 (HIRFL-CSRc) 以及未来大型加速器——强流重离子加速器装置 (HIAF) 上有望通过 DR 精密谱学方法研究高电荷态重离子甚至放射性离子的同位素移动, 进而获得相关原子核的核电荷半径等信息。

**关键词:** 重离子储存环; 高电荷态离子; 双电子复合; 同位素移动

**中图分类号:** O562.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.02.196

### 1 引言

同位素移动 (isotope shift) 是指由于原子核的质量和结构不同, 同一元素不同同位素的原子能级位置有微小的相对移动, 反映到原子能级的发射或吸收光谱上, 表现为不同同位素的谱线频率也有一个相对移动<sup>[1]</sup>。同位素光谱线的移动效应包括两个方面的贡献: 不同的原子核质量的差异引起的质量移动 (mass shift) 和同位素之间的核电荷分布不同引起的场移动 (field shift)。使用原子物理的方法测量同位素移动从而开展原子核电荷半径精密测量是目前原子物理和核物理的交叉前沿学科<sup>[2]</sup>。研究核理论模型的重要参数之一是核电荷半径, 特别在中子滴线和质子滴线附近远离稳定线区域, 其高精度的核电荷半径测量实验数据异常珍贵, 可用于验证原子核理论模型<sup>[3]</sup>。测量同位素原子核电荷半径的实验

方法主要包括 X 射线光谱学方法、电子散射方法以及激光精密谱学方法<sup>[4, 5]</sup>。前两种方法均局限于稳定核, 无法开展短寿命放射性原子核的核电荷半径测量。激光精密谱学测量同位素移动从而得到核电荷半径的方法虽然能够克服这一局限性并且具有极高的实验分辨, 但是它通常被用于研究原子或者单电荷态的离子, 而这些原子或者单电荷离子外层都有多个电子, 因此理论计算均涉及到原子多体问题, 不仅计算时间成本高, 而且计算的精度不高, 导致最终得到的原子核核电荷半径的实验精度很难提高<sup>[6, 7]</sup>。

对于少电子体系的高电荷态离子, 其核外电子与原子核重合的几率较大从而导致同位素移动较大, 其中场移动与  $Z^5$  成正比, 因此随着原子序数的增加, 高电荷态离子的同位素移动不断增大, 有利于实验观察; 此

收稿日期: 2018-03-14; 修改日期: 2018-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0402300); 国家自然科学基金资助项目 (11320101003); 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDY-SSW-SLH006)

作者简介: 啜晓亚 (1989-), 女, 河北张家口人, 硕士研究生; 从事原子与分子物理研究; E-mail: chuaixiaoya@impcas.ac.cn

† 通信作者: 马新文, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn.

外,目前的理论计算方法对于少电子体系可以达到很高的精确度,结合实验结果对数据进行分析,进而精密测量原子结构性质信息<sup>[8,9]</sup>。随着重离子冷却储存环技术<sup>[10-12]</sup>和电子束离子阱 (EBIT) 技术<sup>[13-15]</sup>的发展,双电子复合 (Dielectronic Recombination, DR) 共振技术逐渐发展成为测量高电荷态离子精密谱学的新方法,其已经在检验强场 QED 效应、电子电子关联效应以及相对论效应方面取得了重要进展<sup>[16-19]</sup>,并且被用于研究原子物理和核物理的交叉领域方向<sup>[20-22]</sup>。重离子冷却储存环上的 DR 精密谱学实验是目前测量高电荷态离子能级精度较高的实验方法。Schuch 等<sup>[23]</sup>利用重离子冷却储存环 CRYRING 开展了  $^{207,208}\text{Pb}^{53+}$  离子在极低能区的 DR 实验,成功观察到了  $^{207,208}\text{Pb}^{53+}$  离子的同位素移动,并且首次利用 DR 的方法观察到了高电荷态离子能级的超精细分裂。Brandau 等<sup>[24]</sup>在冷却储存环 ESR 上成功测量了类锂离子  $^{142,150}\text{Nd}^{57+}$  的 DR 谱和同位素移动值,结合精确的理论计算,得到了  $^{142,150}\text{Nd}^{57+}$  离子的核电荷均方根半径差  $\delta\langle r^2 \rangle^{142-150} = -1.36(1)(3)\text{fm}^2$ ,其核电荷均方根半径差的测量精度甚至超过光学精密测量的结果。这些实验证明,重离子冷却储存环上的 DR 精密谱学实验结合先进的理论计算是一种全新的研究高电荷态离子同位素移动的方法。

电子离子碰撞过程中 DR 的具体反应过程可用 (1) 式表示:

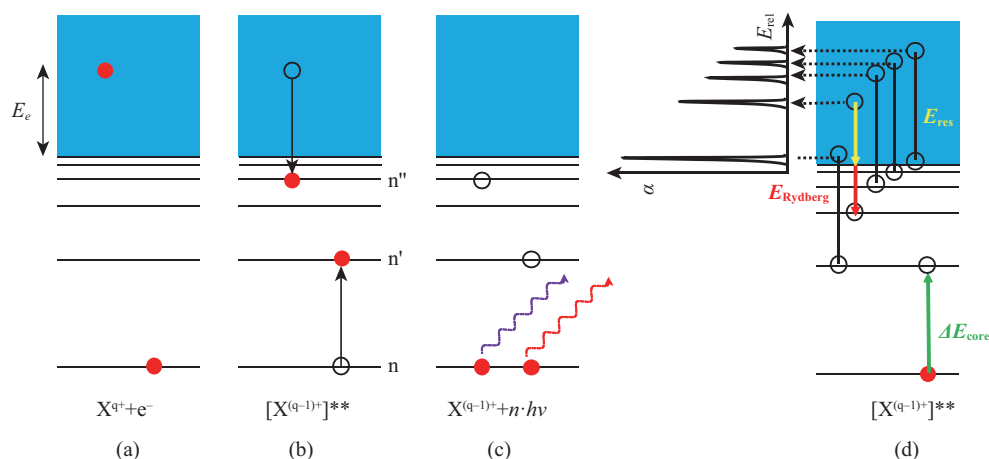
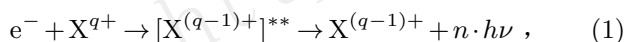


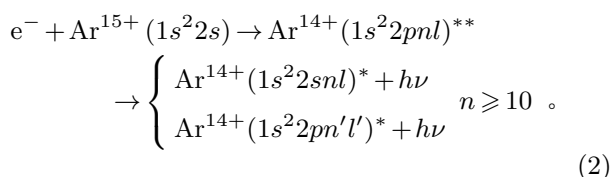
图 1 (在线彩图) DR 过程示意图

(a)→(b) 对应共振俘获过程; (b)→(c) 对应辐射稳定过程; (d) 是实验测量的典型 DR 谱和离子内部原子结构的对应关系示意图。

本文依托中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器冷却储存环主环 (HIRFL-CSRm), 测量了类锂的  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子的 DR 精密谱。实验中电子能量调制

DR 是两步共振过程,物理图像如图 1 所示, (a)→(b) 为共振俘获过程: 一个自由电子被俘获到离子  $\text{X}^{q+}$  的束缚态,在满足能量匹配条件时,同时离子  $\text{X}^{q+}$  的一个内壳层电子被共振激发,形成中间双激发态  $[\text{X}^{(q-1)+}]^{**}$ ,可以看作俄歇过程的逆过程; (b)→(c) 为辐射稳定过程: 处于中间双激发态的  $[\text{X}^{(q-1)+}]^{**}$  离子放出至少一个光子,退激到电离阈值以下,即稳定态。图 (d) 是实验测量的典型 DR 谱和高电荷态离子内部能级结构的对应关系示意图。如图 1 所示, DR 实验中,  $E_{\text{res}}$  为电子-离子质心系相对能量,  $\Delta E_{\text{core}}$  为内壳层电子从基态到激发态的激发能,  $E_{\text{Rydberg}}$  为被俘获电子的电离能,  $\alpha$  为速率系数, DR 过程满足的能量共振关系为  $\Delta E_{\text{core}} = E_{\text{Rydberg}} + E_{\text{res}}$ 。所以对于 DR 反应,仅当自由电子动能、离子内壳层电子的激发能和被俘获于里德堡态电子的电离能能量之间满足能量守恒关系时才会发生。如果对质量数为  $A$  和  $A'$  的某种离子的两种同位素分别开展 DR 精密谱学实验,处于基态的离子共振俘获一个自由电子,相对于内壳层电子,被俘获于里德堡态的电子离原子核较远,受原子核不同有限质量和不同有限体积的影响相对较小,其对应的同位素移动可以忽略,因此 DR 谱上的共振峰峰位移动值可近似认为完全来自于激发电子的跃迁能级对应的同位素移动,即  $\delta E^{A,A'} = h\delta\nu_k^{A,A'}$ 。因此,在 DR 精密谱学实验中,通过精确测量电子离子碰撞的相对能量,可以得到同位素移动,结合精确计算被俘获到里德堡态电子的电离能,精密测量高电荷态离子内壳层电子激发能,进而研究核电荷半径和原子核电荷分布<sup>[24]</sup>。

系统的电压范围从  $-800\text{ V}$  变化到  $800\text{ V}$ , 即对应质心系下  $0\sim 35\text{ eV}$  的相对能量,包括以下电子-离子复合反应通道:



实验中观测到了对应的共振激发能级, 外推给出了各自线系的激发能。此外, 利用 GRASP2K 程序包计算类锂  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子的质量移动因子和场移动因子, 给出  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  跃迁对应的 DR 谱的同位素移动。本文的第二部分展示了实验装置、方法以及基本的数据处理; 第三部分介绍了同位素移动的理论计算方法和结果; 第四部分将实验结果和理论计算结果进行了对比和讨论; 最后, 对未来兰州重离子加速器冷却储存环实验环 (HIRFL-CSR) 以及强流重离子加速器装置 (HIAF) 上<sup>[25, 26]</sup> 利用 DR 精密谱学实验研究同位素移动, 提取原子核电荷半径等原子核信息的工作进行了展望。

## 2 实验装置和方法

本文中的类锂  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子 DR 精密谱学实验是

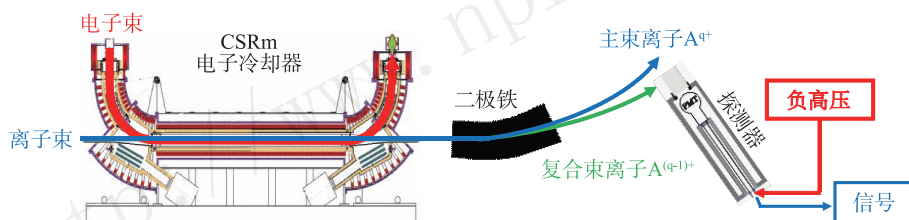


图 2 (在线彩图) CSRm 上 DR 实验装置示意图

电子冷却器下游的二极铁后安装了可移动位置的晶体探测器和二次电子 MCP 探测器用于探测复合离子。

的相对能量。我们在电子冷却器阴极上装备了一套电子能量快速调节系统, 简称调制系统, 调制电压直接加载于电子枪阴极以改变出射电子能量, 进而获得非零质心系相对能量。图 3 所示为本文实验所采用的调制系统的调制脉冲时序结构图, 即在 10 ms 的调制区间内加载偏压, 获得预期的相对能量, 在之后的 190 ms 内使得束流重新回到冷却点, 以保证束流的品质不被破坏。当调制电位满足 DR 共振条件, 冷却段的电子离子发生 DR 反应, 产生的复合离子束运动到重离子冷却储存环 CSRm 下游的第一块二极磁铁内部, 由于电荷态差异复合束从主束分离开来, 被可移动的闪烁体探测器 [YAP: Ce+ PMT] 探测, 探测效率为  $\sim 100\%$ <sup>[31]</sup>。实验中通过逐步扫描调制电位改变电子离子相对能量, 同时探测实验相关参数, 包括电子束流强、离子束流强、离子束能量和复合离子计数, 完成 DR 谱的测量。在 DR 实验中, 直流电流互感器 (DCCT) 用于实时监测

在 CSRm 上开展的, 图 2 展示了实验装置布局<sup>[27, 28]</sup>。离子束在电子回旋共振离子源 (ECRIS) 中产生, 经回旋加速器 SFC 加速, 沿前端输运线输运, 注入 CSRm, 在电子冷却器直线段经电子冷却 3 s, 束流达到最佳冷却状态。此时, 束流能量为 8.37 MeV/u, 最大束流强度为 200  $\mu\text{A}$ , 对应氩离子个数约为  $5 \times 10^8$ 。离子束存储寿命为 120 s, 其纵向动量展宽  $\Delta p/p \approx 2 \times 10^{-4}$ <sup>[29]</sup>。在 DR 实验中, 电子冷却器一方面用于压缩束流相空间体积、提高束流品质, 另一方面作为复合实验的自由电子靶。电子冷却器电子枪区域和实验反应区区域的横向磁场分别为 1250 和 390 Gs<sup>[29, 30]</sup>, 利用绝热膨胀技术使得电子束温度从  $K_B T_{\parallel} = 1 \text{ meV}$ ,  $K_B T_{\perp} = 100 \text{ meV}$  降低到  $K_B T_{\parallel} = 0.8 \text{ meV}$ ,  $K_B T_{\perp} = 40 \text{ meV}$ <sup>[27, 29]</sup>, 保证了较高的实验能量分辨。离子束注入后, 在 3 s 内的电子冷却作用下, 电子冷却作用与离子束内散射加热效应会逐渐达到动态平衡, 电子束和离子束平均速度趋于一致, 即质心系下相对能量逐渐趋于零, 我们称电子冷却器的该工作电位为电子冷却点。

为了开展储存环 DR 实验, 我们需要改变电子离子

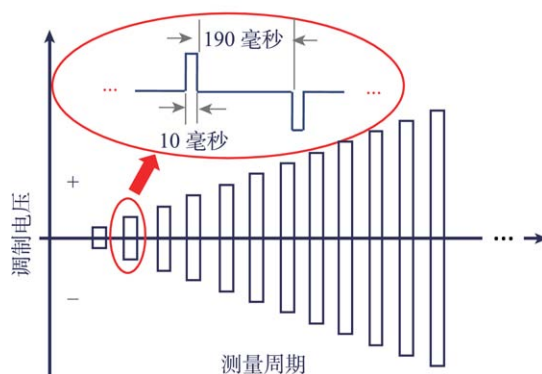


图 3 DR 实验所采用的电子能量调制脉冲时序

每个能量点的测量过程是由 10 ms 的调制和 190 ms 的冷却组成的调制序列。

束流强度和寿命, Schottky 频谱系统用于实时监测束流的纵向动量展宽和冷却状态, 离子束流位置探针 BPM 和单丝剖面探测器用于测量束流的水平、垂直位置, 配

合电子 BPM 从而判断电子束和离子束的共线状态和重合度。

重离子冷却储存环上的 DR 实验速率系数可用下式表示<sup>[32]</sup>:

$$\alpha(E_{\text{rel}}) = \frac{R}{N_i n_e (1 - \beta_e \beta_i)} \frac{C}{L} \quad (3)$$

其中:  $R$  是扣除背景计数之后的复合离子计数率;  $N_i$  是 CSRm 中冷却储存的离子个数;  $n_e$  是电子冷却器 EC-35 平行段内的电子束密度;  $L$  是电子离子共线段长度;  $C$  是 CSRm 中离子束运动的平均闭轨长度;  $\beta_e$  是电子相对论因子;  $\beta_i$  是离子相对论因子, 表示各自的平均速度。

DR 精密谱学实验的关键是精确测量电子离子相对能量。重离子冷却储存环中的离子通常能量较高, 需要考虑相对论效应。在相对论情况下, 电子-离子质心系相对能量为<sup>[29]</sup>

$$E_{\text{rel}} = \sqrt{m_e^2 c^4 + m_i^2 c^4 + 2m_e m_i \gamma_e \gamma_i c^4 (1 - \beta_e \beta_i \cos \theta)} - m_e c^2 - m_i c^2, \quad (4)$$

其中:  $m_e$  是电子质量;  $m_i$  是离子质量;  $c$  是光速;  $\gamma_e$  是电子洛伦兹因子;  $\gamma_i$  是离子洛伦兹因子;  $\theta$  为电子和离子在共线段的夹角。

在 DR 实验中, 电子冷却器出射电子的能量主要来源于三部分: 第一部分是电子枪阴极工作电压  $U_{\text{cath}}$ , 该电压在冷却点和调制点均存在; 第二部分是调制系统的输出电压  $U_d$ , 该电压仅在调制点不为零; 第三部分是由于电子束在电子冷却器电子离子共线段的空间分布所产生的空间电荷势  $U_{\text{sp}}$ , 当电子束和离子束平行, 并且它们和束流管道轴满足共轴心分布特征时, 空间电荷势的具体表达式为<sup>[29]</sup>

$$U_{\text{sp}} = \frac{I_e}{4\pi\epsilon_0\beta_e c} \left[ 1 + 2\ln\left(\frac{b}{a}\right) \right], \quad (5)$$

其中:  $I_e = en_e \pi a^2 \beta_e c$ ;  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $a = 2.6$  cm 是电子束半径;  $b = 12.5$  cm 是束流管道半径。利用式 (5) 计算可知轴线处的空间电荷势  $U_{\text{sp}} \approx 90$  V, 该实验中电子枪阴极电位  $U_{\text{cath}} = -4.582$  kV, 调制系统的输出电压  $U_d$  在  $-800$  V 到  $800$  V 范围内<sup>[29]</sup>, 由此可知数据处理中必须对电子能量和离子能量进行空间电荷势修正。则电子能量的表达式为<sup>[29]</sup>

$$E_e = e(U_{\text{cath}} + U_d - U_{\text{sp}}) = e(U_{\text{cath}} + U_d) - \frac{eI_e}{4\pi\epsilon_0\beta_e c} \left[ 1 + 2\ln\left(\frac{b}{a}\right) \right], \quad (6)$$

将修正后的电子束能量代入速率系数表达式 (3) 以及电子离子相对能量表达式 (4) 中, 则可得到复合速率系数随着质心系相对能量的变化关系, 即 DR 谱。

### 3 类锂 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$ 离子同位素移动理论计算

对于同位素  $A$  和  $A'$ , 两个能级  $u$  和  $l$  之间的跃迁  $k$ , 该跃迁涉及到的光子的频率差就是总的同位素移动。由于  $A$  和  $A'$  原子核质量不同引起的移动称为质量移动 (Mass Shift, MS), 由于原子核核物质分布不同引起的移动称为场移动 (Field Shift, FS)。在一阶微扰理论近似下, 同位素移动可以写成<sup>[33]</sup>

$$\delta\nu_k^{A,A'} = \Delta\tilde{K}_{\text{MS}} \left( \frac{M' - M}{MM'} \right) + F_k \delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}, \quad (7)$$

其中: 第一项质量移动又称为核反冲效应, 质量移动因子  $\Delta\tilde{K}_{\text{MS}}$  与相对论核反冲哈密顿量的期望值有关。  $\Delta K_{\text{MS}} = K_{\text{MS}}^u - K_{\text{MS}}^l$  是指能级  $u$  和  $l$  的质量移动参数之差, 质量移动参数除以普朗克常数  $h$  定义为质量移动因子, 即  $\Delta\tilde{K}_{\text{MS}} \equiv \Delta K_{\text{MS}}/h$ , 定义质量移动参数  $K_{\text{MS}}$  为

$$\frac{K_{\text{MS}}}{M} \equiv \langle \psi | H_{\text{RMS}} | \psi \rangle, \quad (8)$$

其中相对论核反冲哈密顿量为<sup>[34]</sup>

$$H_{\text{RMS}} = \frac{1}{2M} \sum_{i,j}^N \left[ \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{p}_j - \frac{\alpha Z}{r_i} \left( \alpha_i + \frac{(\alpha_i \cdot \mathbf{r}_i) \mathbf{r}_i}{r_i^2} \right) \cdot \mathbf{p}_j \right], \quad (9)$$

其中, 式 (8) 中的  $|\psi\rangle$  表示原子态波函数; 式 (9) 中的  $\alpha$  是精细结构常数;  $M$  是原子质量;  $\alpha_i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ \sigma_i & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\sigma_i$  是泡利矩阵;  $\mathbf{r}_i$  是第  $i$  个电子到原子核的位置矢量;  $\mathbf{p}_i$  是第  $i$  个电子的动量。

对于同位素  $A$  和  $A'$ , 一阶近似下场移动可以写为

$$\delta\nu_{k,\text{FS}}^{A,A'} = F_k \delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}, \quad (10)$$

其中场移动因子  $F_k$  为

$$F_k = \frac{2\pi}{3h} Z \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \Delta |\Psi(0)|_k^2. \quad (11)$$

场移动因子和电子在两个能级之间的概率密度相关,

$$\Delta |\Psi(0)|_k^2 = \rho_u^e(\mathbf{0}) - \rho_l^e(\mathbf{0}), \quad (12)$$

其中,  $\rho^e(\mathbf{0})$  是原点处电子概率密度, 可由下式得到:

$$\rho^e(\mathbf{0}) = \left\langle \psi \left| \sum_i \delta(\mathbf{r}_i) \right| \psi \right\rangle. \quad (13)$$

因此在一阶近似下场移动可以写为<sup>[7]</sup>

$$\delta\nu_{k,FS}^{A,A'} \simeq \frac{2\pi}{3h} Z \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \Delta |\Psi(0)|_k^2 \delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}, \quad (14)$$

其中  $\delta \langle r^2 \rangle^{A,A'} = \langle r^2 \rangle^A - \langle r^2 \rangle^{A'}$ ，即核电荷均方根半径差。

根据该理论计算方法，并用文献[6]中的QED值修正了理论计算结果，我们给出了类锂的 $^{40}\text{Ar}^{15+}$ 离子的质量移动因子和场移动因子，如表1所列。我们的计算结果与Zubova等<sup>[8]</sup>和Li等<sup>[7]</sup>的理论计算结果符合得较好。

表 1  $^{40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  对应的质量移动因子  $\Delta\tilde{K}_{\text{MS}} (10^4 \text{ GHz amu})$  和场移动因子  $F_k (10^4 \text{ MHz fm}^{-2})$

| 移动因子                          | 跃迁                              | This work | Zubova <sup>[8]</sup> | Li <sup>[7]</sup> |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------|
| $\Delta\tilde{K}_{\text{MS}}$ | $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$ | -7.678 4  | -7.668 9              | -7.669            |
|                               | $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ | -7.736 4  | -7.725 8              | -7.727            |
| $F_k$                         | $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$ | -1.982 1  | -1.975 1              | -1.984            |
|                               | $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ | -1.985 1  | -1.978 1              | -1.987            |

利用表1给出的质量移动因子和场移动因子，以及文献[35]给出的核电荷半径，我们给出了类锂氩离子各种同位素之间的DR谱上 $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$ 和 $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ 跃迁对应的共振峰峰位的移动数值，如图4所示，其中 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$ 离子 $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$ 跃迁的同位素移动为0.861 meV， $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ 跃迁的同位素移动为0.868 meV。需要说明的是，使用储存环DR实验来测量同位素移动的方法需要考虑到同位素的寿命，因此在图4中仅给出了同位素寿命大于10 s的不同质量数 $^A\text{Ar}^{15+}$ 离子与 $^{36}\text{Ar}^{15+}$ 离子在DR谱上对应的同位素移动值。

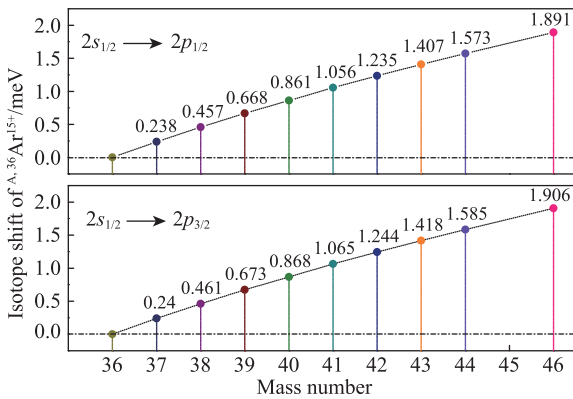


图 4 (在线彩图) 类锂  $^{A,36}\text{Ar}^{15+}$  离子 DR 谱上  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  与  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  跃迁对应的同位素移动计算结果

## 4 实验结果和讨论

图5所示为CSRm上DR实验测量得到的类锂 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$ 离子的复合速率系数随着电子离子相对能量的变化关系。实验所测量的电子离子相对能量为0~35 eV。该测量范围包括了 $1s^2 2s \rightarrow 1s^2 2p$ 对应的共振跃迁。图5蓝色和橘色短线的位置对应的是 $1s^2 2p_{1/2,3/2}$ nl里德堡态能级位置。一般采用两种方法从DR谱中获得质量数是36和40的 $\text{Ar}^{15+}$ 离子 $2s \rightarrow 2p_{1/2,3/2}$ 跃迁的同位素移动值，第一种方法是直接对比DR谱中共振峰峰位的移动，该移动值即是对应跃迁的同位素移动，第二种方法是从实验共振峰的峰位外推得到不同同位素相同跃迁下各种的激发能，相同跃迁下激发能之差即为同位素移动。本文采用了第二种方法测量类锂 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$ 离子的同位素移动。

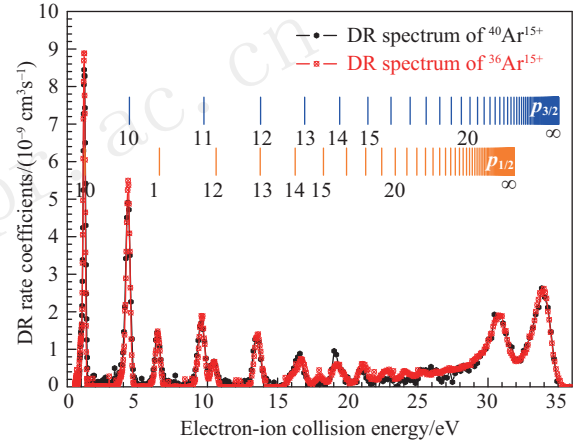


图 5 (在线彩图) 实验测量得到的 $^{36}\text{Ar}^{15+}$ 离子(红色点线)和 $^{40}\text{Ar}^{15+}$ 离子DR速率系数(黑色点线)随着电子离子碰撞能量变化关系图

测量能量范围为0~35 eV，图中蓝色和橘色短线的位置对应的是 $1s^2 2p_{1/2,3/2}$ nl里德堡态能级的位置。

对于重离子冷却储存环上的DR实验，电子冷却装置EC-35通过加速和绝热膨胀来得到低温电子束，电子束纵向温度远远小于其横向温度。经绝热膨胀之后的电子束冷却离子束，此时离子束分布是扁平的麦克斯韦分布<sup>[36]</sup>：

$$f(v_{\text{rel}}, \mathbf{v}) = \left( \frac{m_e}{2\pi k T_{\parallel}} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{m_e (v_{\parallel} - v_{\text{rel}})^2}{2k T_{\parallel}} \right] \times \frac{m_e}{2\pi k T_{\perp}} \exp \left( -\frac{m_e v_{\perp}^2}{2k T_{\perp}} \right), \quad (15)$$

其中： $k$ 是玻尔兹曼常数； $v_{\parallel}$ 和 $v_{\perp}$ 是电子速度 $\mathbf{v}$ 的纵向分量和横向分量。DR共振的自然线宽( $<1$  meV)远远小于我们的实验能量分辨( $\sim 10$  meV)。利用式(16)拟合DR速率系数谱中可分辨的单DR共振峰，

$$\alpha_d(v_{\text{rel}}) = \frac{\hat{\sigma}_d v_d}{m_e \sigma_{\perp}^2 \xi} \exp\left(-\frac{v_d^2 - v_{\text{rel}}^2 \xi^{-2}}{\sigma_{\perp}^2}\right) \times \left[ \text{erf}\left(\frac{v_{\text{rel}} + v_d \xi^2}{\sigma_{\parallel} \xi}\right) - \text{erf}\left(\frac{v_{\text{rel}} - v_d \xi^2}{\sigma_{\parallel} \xi}\right) \right], \quad (16)$$

其中: 下标 d 表示被拟合的 DR 共振峰;  $\int \alpha_d(v_0(E_0)) \cdot dE_0 = \hat{\sigma}_d v_d$ ,  $E_d$  是共振能量,  $v_d$  是该共振能量所对应的相对速度;  $\sigma_{\parallel, \perp} = (2kT_{\parallel, \perp}/m_e)^{1/2}$ ;  $\xi = (1 - T_{\parallel}/T_{\perp})^{1/2}$ ;  $\hat{\sigma}_d, v_d, T_{\parallel, \perp}$  均是拟合参数。根据拟合得出的共振峰位置  $E_d$  及其对应的主量子数  $n$ , 使用里德堡公式外推得出  $n \rightarrow \infty$  对应线系限能量  $E_{\infty}$ :

$$E_n = E_{\infty} - R \left( \frac{q}{n - \delta} \right)^2, \quad (17)$$

其中  $\delta$  是量子亏损数。通过该方法求得  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2p_{1/2}nl$  和  $2p_{3/2}nl$  的线系限能量, 即  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  的跃迁能。如图 5 所示, 但是目前实验能够分辨的里德堡态  $n$  从 10 到 15, 因此外推法只能利用这 5 个峰位的外推拟合得到跃迁能量, 而双电子复合实验的实验精度随着电子离子碰撞能量的增大, 实验分辨随之下降, 在碰撞能量为 10 eV 以后的实验分辨大于 100 meV, 所以拟合得到的实验误差较大, 还需要考虑系统误差约为 100 meV。最终  $^{36}\text{Ar}^{15+}$  和  $^{40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  的跃迁能分别是  $(31.95 \pm 0.15)$  eV 和  $(31.79 \pm 0.16)$  eV,  $^{36}\text{Ar}^{15+}$  和  $^{40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  的跃迁能分别是  $(35.00 \pm 0.18)$  eV 和  $(34.96 \pm 0.15)$  eV<sup>[29]</sup>。NIST 给出数据:  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  的跃迁能是 31.867 2 eV,  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  的跃迁能是 35.038 3 eV<sup>[37]</sup>。可见我们通过实验数据外推出的结果与其符合得较好, 相对误差均不大于 0.26%。但是 NIST 给出的数据针对的是质量数是 38 的  $\text{Ar}^{15+}$  离子, 没有给出质量数是 36 和 40 的  $\text{Ar}^{15+}$  离子的跃迁能。 $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子的同位素移动等于质量数不同的同位素相同跃迁下跃迁能的差值, 则  $\delta^{36,40}\text{Ar}^{15+}(2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}) = (160 \pm 219)$  meV,  $\delta^{36,40}\text{Ar}^{15+}(2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}) = (40 \pm 234)$  meV。根据图 4 中的计算结果,  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  跃迁下的同位素移动为 0.861 meV,  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  跃迁下的同位素移动为 0.868 meV, 均远远小于实验数据外推得到的同位素移动值, 因此目前实验测量的 DR 谱中未能直接观测到同位素移动。

需要说明的是, 对于类锂离子在原子序数  $Z=18 \sim 35$  附近, 由于质量移动和场移动大小相当, 贡献相反, 二者相互抵消, 导致同位素移动减小, 因此对于实验的精度要求就很高<sup>[7]</sup>。对于高电荷态离子, 场移动与  $Z^5$  成正比, 随着  $Z$  增加, 场移动的增速远远大于质量移

动的增速, 场移动逐渐在同位素移动中起决定性作用。因此对于原子序数较大的高电荷态离子, DR 共振结构对于原子核均方半径极其敏感, DR 精密谱学方法适用于测量高电荷态离子的同位素移动。Zubova 等<sup>[8]</sup>的理论计算结果表明类锂高电荷态离子  $^{232,230}\text{Th}^{87+}$  离子,  $^{238,236}\text{U}^{89+}$  离子和  $^{238,234}\text{U}^{89+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  能级跃迁的同位素移动分别为  $-111.9$  meV,  $-114.3$  meV 和  $-225.6$  meV, 这为我们通过 DR 精密谱学方法开展高电荷态离子同位素移动研究提供了支持。图 6 所示为类锂  $^{234,238}\text{U}^{89+}$  同位素离子的 DR 谱, 而这两个同位素的原子核电荷均方根半径相差仅为 0.028 fm, 但是 DR 共振峰峰位的移动达到了  $-225.6$  meV<sup>[38]</sup>。在这种同位素移动能量尺度下, 目前我们在 CSRe 上的 DR 实验可以精密测量其双电子复合谱的同位素移动值, 结合理论计算, 能够得到精确的原子核均方半径差值。CSRe 和未来 HIAF 可以提供强流离子束产生远离  $\beta$  稳定线的放射性核素<sup>[39]</sup>, 另外 HIAF 上的重离子冷却储存环 SRing 配备了单独用于 DR 实验的超冷电子靶<sup>[40, 41]</sup>, 实验分辨有望达到  $\sim 1$  meV。在不久的将来, CSRe 和 HIAF 可以选择沿同位素链或者同中子链进行 DR 实验, 旨在得到包括放射性核素在内的电子离子共振谱系统数据集, 结合精确的理论计算, 从中提取能够反映核电荷数分布规律的重要信息, 以此为基础确立与原子核模型相互独立的原子核核物质分布特征和基态自旋特征, 为研究弱束缚核素的核物质分布规律提供关键的系统数据集。

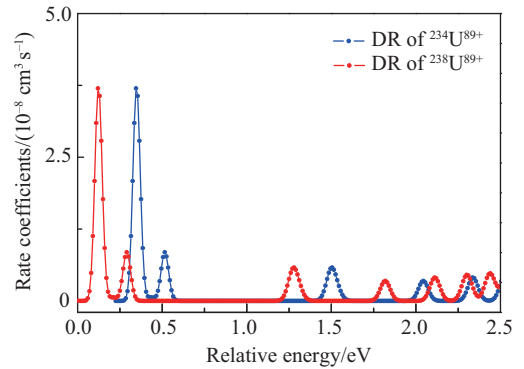


图 6 (在线彩图) 类锂  $^{234,238}\text{U}^{89+}$  同位素离子对应的双电子复合谱  
其中  $^{234,238}\text{U}^{89+}$  同位素的原子核电荷均方根半径相差仅为 0.028 fm。

## 5 结论和展望

依托于重离子加速器冷却储存环开展高电荷态离子精密谱学实验, 结合先进的理论计算, 研究强场中的相对论效应、QED 效应、电子关联和原子核尺寸效

应,是当前国际上高电荷态离子研究的前沿方向。本文在 HIRFL-CSRm 上开展了类锂  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子的 DR 实验,实验中电子离子碰撞能量范围为 0~35 eV。实验中观察到了  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  和  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  跃迁对应的共振激发能级,并且测量了共振跃迁对应的激发能。采用 GRASP2K 程序包对其同位素移动进行了计算,由于  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子的同位素移动中质量移动和场移动大小相当,但是贡献相反,导致同位素移动较小,理论计算给出了类锂  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  离子  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  跃迁的同位素移动仅为 0.861 meV,  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  跃迁的同位素移动仅为 0.868 meV,其远小于当前 CSRm 上 DR 实验的分辨能力  $\sim 10$  meV,因此在 DR 谱上没有观察到明显的同位素移动现象。但是理论计算表明,类锂高电荷态离子的同位素移动与  $Z^5$  成正比,因此在 CSRm 以及未来 HIAF 上开展包括放射性核素在内的高电荷态离子的 DR 实验,来研究其同位素移动和超精细分裂,结合精确的理论计算,可以获得相关原子核的核电荷半径和核自旋等信息。

**致谢** 感谢 HIRFL-CSR 加速器运行人员辛苦调束和技术支持。

## 参考文献:

- [1] KING W H. Isotope Shifts in Atomic Spectra[M]. New York: Plenum Press, 1984: 54.
- [2] PÁLFFY A. *Contemporary Physics*, 2010, **51**: 471.
- [3] CAMPBELL P, MOORE I D, PEARSON M R. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2016, **86**: 127.
- [4] NÖRTERSHÄUSER W, SÁNCHEZ R, EWALD G, *et al.* *Physical Review A*, 2011, **83**: 012516.
- [5] NEUGART R, BILLOWES J, BISSELL M L, *et al.* *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2017, **44**: 064002.
- [6] KOZHEDUB Y S, VOLOTKA A V, ARTEMYEV A N, *et al.* *Physical Review A*, 2010, **81**: 042513.
- [7] LI J, NAZÉ C, GODEFROID M, *et al.* *Physical Review A*, 2012, **86**: 022518.
- [8] ZUBOVA N A, KOZHEDUB Y S, SHABAEV V M, *et al.* *Physical Review A*, 2014, **90**: 062512.
- [9] NAZÉ C, VERDEBOUT S, RYNKUN P, *et al.* *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2014, **100**: 1197.
- [10] FRANZKE B. *Nucl Instr Meth B*, 1987, **24**: 18.
- [11] SCHUCH R, BÁRÁNY A, DANARED H, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 1989, **43**: 411.
- [12] WOLF A, BERGER J, BOCK M, *et al.* *Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters*, 1991, **21**: S69.
- [13] ELLIOTT S, BEIERSDORFER P, CHEN M H. *Physical Review Letters*, 1996, **76**: 1031.
- [14] NAKAMURA N, KAVANAGH A P, WATANABE H, *et al.* *Physical Review Letters*, 2008, **100**: 073203.
- [15] TU B, XIAO J, YAO K, *et al.* *Physical Review A*, 2015, **91**: 060502.
- [16] BRANDAU C, KOZHUHAROV C, MÜLLER A, *et al.* *Physical Review Letters*, 2003, **91**: 073202.
- [17] LESTINSKY M, LINDROTH E, ORLOV D A, *et al.* *Physical Review Letters*, 2008, **100**: 033001.
- [18] MÜLLER A. *Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2008, **55**: 293.
- [19] SCHIPPERS S. *Nucl Instr Meth B*, 2015, **350**: 61.
- [20] BRANDAU C, KOZHUHAROV C, LESTINSKY M, *et al.* *Physica Scripta*, 2015, **2015**: 014022.
- [21] MA X, WEN W Q, HUANG Z K, *et al.* *Physica Scripta*, 2015, **2015**: 014012.
- [22] BRANDAU C, KOZHUHAROV C, MÜLLER A, *et al.* *Physica Scripta*, 2013, **2013**: 014050.
- [23] SCHUCH R, LINDROTH E, MADZUNKOV S, *et al.* *Physical Review Letters*, 2005, **95**: 183003.
- [24] BRANDAU C, KOZHUHAROV C, HARMAN Z, *et al.* *Physical Review Letters*, 2008, **100**: 073201.
- [25] HUANG Z K, WEN W Q, XU X, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2017, **408**: 135.
- [26] MA X, WEN W Q, ZHANG S F, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2017, **408**: 169.
- [27] HUANG Z K, WEN W Q, WANG H B, *et al.* *Physica Scripta*, 2015, **2015**: 014023.
- [28] HUANG Z K, WEN W Q, XU X, *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **875**: 012020.
- [29] HUANG Z K. Studies of DR Experiments of Li-like and Be-like Argon Ions at the CSRm[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017(4): 25. (in Chinese)  
(黄忠魁. 基于重离子冷却储存环 CSRm 开展的类锂、类铍氩离子双电子复合实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017(4): 25.)
- [30] XU W Q. Investigations on Fine Spectroscopy of Doubly-Excited States in Strongly-Correlated Ion Systems[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014(2): 32. (in Chinese)  
(徐卫青. 强关联离子体系双激发态的精细谱学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014(2): 32.)
- [31] WEN W Q, MA X, XU W Q, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**: 731.
- [32] KILGUS G, HABS D, SCHWALM D, *et al.* *Physical Review A*, 1992, **46**: 5730.
- [33] FRICKE G, BERNHARDT C, HEILIG K, *et al.* *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1995, **60**: 177.
- [34] SHABAEV V M. *Physical Review A*, 1998, **57**: 59.
- [35] ANGELI I, MARINOVA K P. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2013, **99**: 69.
- [36] HUANG Z K, WEN W Q, XU X, *et al.* *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, **235**: 2.
- [37] SALOMAN E B. *J Phys Chem Ref Data*, 2010, **39**: 033101.
- [38] HENNING W F. GSI-Darmstadt. November, 2001.

<http://www.fair-center.eu/for-users/publications/fair-publications.html>.

[39] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**: 263.

[40] MAO L J, YANG J C, XIA J W, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2015, **786**: 91.

[41] WU B, YANG J C, XIA J W, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2018, **881**: 27.

## Investigation of Isotope Shift Effect of Li-like $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$ by Dielectronic Recombination Spectroscopy at the CSRm

CHUAI Xiaoya<sup>1,2</sup>, HUANG Zhongkui<sup>1</sup>, WEN Weiqiang<sup>1</sup>, WANG Hanbing<sup>1</sup>, XU Xin<sup>3</sup>, WANG Shuxing<sup>3</sup>, LI Jiguang<sup>4</sup>,  
DOU Lijun<sup>1,2</sup>, ZHAO Dongmei<sup>1</sup>, ZHU Xiaolong<sup>1</sup>, MAO Lijun<sup>1</sup>, YIN Dayu<sup>1</sup>,  
YANG Jiancheng<sup>1</sup>, YUAN Youjin<sup>1</sup>, MA Xinwen<sup>1,†</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Modern Physics, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The cooler storage ring is equipped with an electron-cooler. It is an excellent experimental platform for dielectronic recombination (DR) experiment of highly-charged ions. In this paper, the dielectronic recombination experiments of lithium-like  $\text{Ar}^{15+}$  ions with mass number 36 and 40 are conducted at the HIRFL-CSRm (main ring of the Cooling Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou). The experimental electron-ion collision energy scale is from 0 eV to 35 eV. Extrapolation method is exploited to obtain the excitation energies of transitions  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  and  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  of the  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  ions from experimental data. Meanwhile, GRASP2K program is utilized to calculate the mass shift factors and field shift factors of  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  ions for  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  and  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  transitions to obtain isotope shifts in DR spectra. In theoretical calculation, isotope shifts of  $^{36,40}\text{Ar}^{15+}$  ions corresponding to  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  and  $2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  are 0.861 meV and 0.868 meV, respectively. They are both less than the experimental precision ( $\sim 10$  meV) of these dielectronic recombination experiments at the CSRm, which explains that isotope shifts cannot be distinguished from the experimental dielectronic recombination spectra. However, the field shift of highly-charged ions is proportional to  $Z^5$ . In the future, the dielectronic recombination experiments of highly-charged heavy ions even radioactive ions will be conducted at the HIRFL-CSRe (experimental ring of the Cooling Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou) and the future large accelerator facility—HIAF (High intensity Heavy-ion Accelerator Facility) to measure isotope shifts to obtain the nuclear charge radius information.

**Key words:** heavy ion storage ring; highly-charged ion; dielectronic recombination; isotope shift

**Received date:** 14 Mar. 2018; **Revised date:** 20 Apr. 2018

**Foundation item:** National Key R&D Program of China (2017YFA0402300); National Natural Science Foundation of China (11320101003); Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (QYZDY-SSW-SLH006)

**† Corresponding author:** MA Xinwen, E-mail: [x.ma@impcas.ac.cn](mailto:x.ma@impcas.ac.cn).