

## 封面文章

重离子储存环 CSRe 上类钠  $\text{Kr}^{25+}$  离子的  
双电子复合精密谱学实验研究\*

邵林<sup>1)2)</sup> 黄忠魁<sup>2)</sup> 汶伟强<sup>2)†</sup> 汪书兴<sup>3)</sup> 黄厚科<sup>2)</sup> 马万路<sup>3)</sup>  
刘畅<sup>3)</sup> 汪寒冰<sup>2)</sup> 陈冬阳<sup>2)</sup> 刘鑫<sup>2)</sup> 周晓鹏<sup>2)</sup> 赵冬梅<sup>2)</sup>  
张少锋<sup>2)</sup> 朱林繁<sup>3)‡</sup> 马新文<sup>2)††</sup>

1) (华南师范大学物理学院, 量子调控工程与材料重点实验室, 广州 510006)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) (中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2024 年 1 月 31 日收到; 2024 年 4 月 3 日收到修改稿)

高电荷态离子的双电子复合精密谱学实验研究, 不仅对天体等离子体和聚变等离子体的研究具有重要意义, 而且可以作为一种新的精密谱学工具, 用来检验强场量子电动力学效应、测量同位素移动及提取原子核电荷半径等. 在兰州重离子储存环 CSRe 上, 安装了专门用于电子-离子复合精密谱学实验的电子束能量调制系统, 质心系下电子-离子碰撞能量的调制范围达到 0—1 keV. 在 CSRe 电子冷却器下游安装了自主研制的塑料闪烁体探测器和多丝正比探测器, 用于探测复合离子. 在此基础上, 使用  $\text{Kr}^{25+}$  离子在 CSRe 上进行了首次双电子复合测试实验, 实验测量了质心系能量 0—70 eV 的双电子复合速率系数. 为了更好地理解实验测量结果, 利用 FAC (flexible atomic code) 程序计算了  $\text{Kr}^{25+}$  离子的双电子复合速率系数, 并与实验做了细致对比, 整体符合很好, 而且发现  $3s \rightarrow 4l$  ( $\Delta n = 1$ ) 的共振跃迁对实验谱线有很大的贡献. 实验结果表明, CSRe 双电子复合实验平台具有非常好的稳定性和可重复性, 能够为下一步开展更高电荷态离子的双电子复合精密谱学实验、检验强场量子电动力学效应以及原子核性质精密测量等前沿实验提供支持.

**关键词:** 双电子复合, 储存环 CSRe, 电子冷却器, 多丝正比探测器

**PACS:** 34.80.Lx

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240211

## 1 引言

高电荷态离子 (highly charged ions, HCIs) 精密谱学一直是原子物理的前沿研究方向之一<sup>[1,2]</sup>. 双电子复合 (dielectronic recombination, DR) 是一个共振过程, 精确测量双电子复合共振结构可以

解析出高电荷态离子的激发态能级, 进而开展如量子电动力学检验<sup>[3,4]</sup>、同位素移动测量<sup>[5-7]</sup>、超精细诱导跃迁寿命测量<sup>[8]</sup>等重要研究. 随着电子冷却技术的产生和发展<sup>[9,10]</sup>, 离子冷却储存环逐渐成为继核聚变反应装置 Tokamak 和电子束离子阱之后, 研究电子-离子复合精密谱学最理想的工具之一. 相比其他实验方法, 重离子冷却储存环可以通过冷

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1602500)、国家自然科学基金 (批准号: 12393824, 12334010, U1932207)、中国科学院战略先导科技专项 (B) (批准号: XDB34020000) 和中国科学院青年创新促进会资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenweiqiang@impcas.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lfzhu@ustc.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

却技术获得高亮度、高品质离子束,并能长时间储存和操控离子,从而为 DR 谱学实验提供了极高的能量分辨 (meV)、极大的能量调制范围 (meV—keV)、纯的单一电荷态离子以及绝对测量等独一无二的实验条件<sup>[11,12]</sup>. 过去十多年,人们在重离子储存环上开展了一系列高电荷态离子的双电子复合精密谱学实验研究,包括德国 TSR 上的类锂 Sc<sup>18+</sup>离子的超精细分裂<sup>[8]</sup>、德国 ESR 上的类锂重离子 U<sup>89+</sup>, Pb<sup>79+</sup>, Au<sup>76+</sup>精细结构<sup>[4]</sup>、瑞典 CRYRING 上的类铜 Pb<sup>53+</sup>的超精细分裂等<sup>[3]</sup>,基于储存环的双电子复合精密谱学实验也因此正在发展成为新一代的精密谱学测量方法——电子离子共振谱学技术. 此外,精确的双电子复合速率系数是天体物理和聚变等离子体模型中最基本的输入参数,双电子复合过程伴随的退激辐射往往可以作为诊断等离子体中电子温度和密度的有效探针<sup>[13,14]</sup>.

图 1 给出了双电子复合过程示意图,自由电子被非全裸离子  $Z^{q+}$  俘获的同时,共振激发离子的某个束缚电子,形成双激发态离子  $[Z^{(q-1)+}]^{**}$ ,最后这个双激发态离子通过发射光子退激到低于其电离阈的稳定态,DR 过程可用方程 (1) 表示:

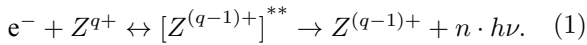


图 1 中标出的能量分别为电子-离子质心系相对能量  $E_{\text{rel}}$ ,被俘获电子所处的里德伯能级对应的电离能  $E_{\text{Ryd}}$  和内壳层电子的激发能  $\Delta E_{\text{exc}}$ ,发生 DR 过程的前提是满足能量守恒  $\Delta E_{\text{exc}} = E_{\text{rel}} + E_{\text{Rydberg}}$ ,

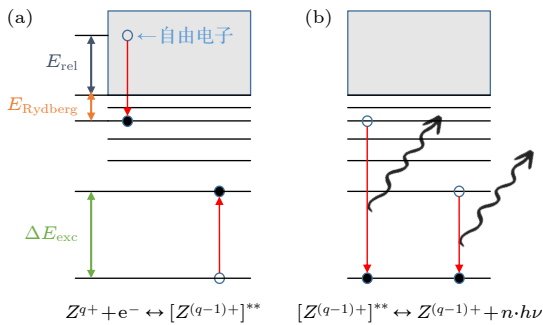
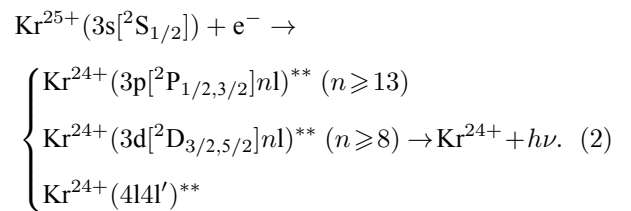


图 1  $Z^{q+}$  离子的双电子复合过程示意 (a) 第一步共振过程,离子在俘获一个自由电子的同时将一个内壳层电子激发,从而形成自电离态  $[Z^{(q-1)+}]^{**}$ ; (b) 第二步过程,自电离态离子通过辐射光子从而退激发到稳定态

Fig. 1. Schematic of DR of  $Z^{q+}$  ions: (a) The first resonance step, in which the ion captures a free electron and simultaneously excites an inner shell electron, resulting in the formation of the autoionized state  $[Z^{(q-1)+}]^{**}$ ; (b) the second step, in which the ion is deexcited to the stable state by radiative decay.

共振的 DR 过程也因此对原子能级结构非常敏感,通过调制电子和离子的相对能量,并测量共振复合 DR 谱,就可以解析出高电荷态离子能级结构信息.

兰州重离子加速器冷却储存环 CSRm 上已经成功开展了一系列重离子的 DR 实验<sup>[15-22]</sup>. 而相比 CSRm 上的 35 keV 电子冷却装置,重离子储存实验环 CSRe 上的 300 keV 电子冷却装置开展高电荷态离子双电子复合精密谱学实验具备独特优势:它可以被用来测量更重和更高电荷态的离子,可以将电子-离子质心系下的碰撞能量由 100 eV 增大至 1000 eV,将成为世界上主要开展超高电荷态离子和放射性核素双电子复合精密谱学的实验装置. 300 keV 电子冷却装置上的电子-离子复合实验的重点研究方向包括:开展天体物理相关的高电荷态离子双电子复合反应速率精确测量;开展强库仑场中量子电动力学效应研究;推动电子-离子谱学技术在研究放射性核素物理性质中的应用. CSRe 上使用了自主研发的多丝正比探测器,可以实时地、无破坏地进行离子束流包络监测,指导优化离子束,降低离子束的温度、动量分散和束流包络,提升离子束流的品质.为了验证 CSRe 上新安装的电子束能量调制系统和复合离子探测器的工作性能,选用 Kr<sup>25+</sup>离子进行了 DR 测试实验,实验测量了质心系下相对碰撞能量 0—70 eV 的 DR 速率系数谱,在这个能量范围内,主要的双电子复合通道有



对比实验结果与 FAC (flexible atomic code) 的理论计算,发现二者整体符合很好,差别小于 20%,在实验数据的不确定度 (约 30%) 范围之内<sup>[22]</sup>,且除了  $3s \rightarrow 3l$  ( $\Delta n = 0$ ) 通道外,  $3s \rightarrow 4l$  ( $\Delta n = 1$ ) 也是谱线的重要来源. 此外,由实验测量的 DR 速率系数谱得到了等离子体速率系数,并与理论计算结果进行了对比,提供了用于等离子体建模的基准数据. 本次实验结果表明,CSRe 上的双电子复合实验平台具有良好的稳定性和可靠性,可以用于未来的更高电荷态离子的双电子复合实验研究.

## 2 实验装置与数据处理

### 2.1 兰州重离子加速器

高电荷态离子双电子复合精密谱学实验是国家“九五”大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 的核心科学目标之一, 其实验装置示意图参见图 2. HIRFL-CSR 上的主环 CSRm 和实验环 CSR<sub>e</sub> 均配备了用于重离子束冷却的电子冷却器, 通过调制电子束能量可以获得非零的电子-离子质心系碰撞能量, 从而开展双电子复合精密谱学实验. 储存环 CSR<sub>m</sub> 上的离子注入能量在几 MeV/u 量级, 电子束能量调制系统的能量调制范围为 -1.5—1.5 kV, 对应于电子离子质心系的碰撞能量为 0—100 eV. 在 CSR<sub>m</sub> 双电子复合实验中, 电子回旋共振离子源 ECR 产生的离子束经由扇聚焦回旋加速器 SFC 加速至数 MeV/u 后注入到 CSR<sub>m</sub> 中进行冷却、储存, 在达到实验要求的流强后, 先经过 2—3 s 的电子束预冷却以优化束流品质, 随后再开展实验测量. 相比 CSR<sub>m</sub> 上的双电子复合实验, CSR<sub>e</sub> 上的重离子束流是经过 CSR<sub>m</sub> 冷却、积累、加速等过程得到的. 因此, CSR<sub>e</sub> 中离子束流能量更高, 能够达到几百 MeV/u, 离子与环内残余气体 (主要是 H<sub>2</sub>, He) 的电荷交换截面随着离子束能量的升高迅速减小<sup>[23]</sup>. 此外, 环内真空度也更高, 残余气体造成的本底很小, 实验中多次测量的可重复性很好, 实验装置的整体稳定性良好. 同时, CSR<sub>e</sub> 电子冷却器使用自主研发的电子束能量高压调制系统具备优异的性能, 其电子能量调制范围能够达到 -15—15 kV, 对应的电子离子质心系碰撞能量为 0—1 keV, 因而在储存环 CSR<sub>e</sub> 上可以进行更高电荷态离子的 DR 精密谱学实验.

在 CSR<sub>e</sub> 上进行 DR 实验时, 电子-离子相互作用段下游的复合离子探测器被放置在与真空环境分离的腔室里, 这一方面可以在储存环实验和真空烘烤的过程中方便地更换和移除探测器; 另一方面, 由于离子束能量较高, 腔室上的薄不锈钢窗可以保护探测器不受低能的杂散电子、离子和光子的影响. 此外, 与 CSR<sub>m</sub> 上仅使用晶体闪烁体探测器 (YAP:Ce) 不同, 在 CSR<sub>e</sub> 电子冷却器的下游, 装配有塑料闪烁体探测器 (plastic scintillation detector, PSD) 和多丝正比探测器 (multiwire proportional chamber, MWPC) 用于探测经过复合

或电离而改变电荷态的离子. 相较于 PSD 而言, MWPC 具有位置分辨能力, 在获取复合离子计数的同时可以提供离子的位置信息, 因而在实验中可以用 MWPC 实时地监测离子束的横向包络, 为离子束束流优化提供指导. CSR<sub>e</sub> 上 Kr<sup>25+</sup> 离子的双电子复合实验参数如表 1 所列 (1 G = 10<sup>-4</sup> T).

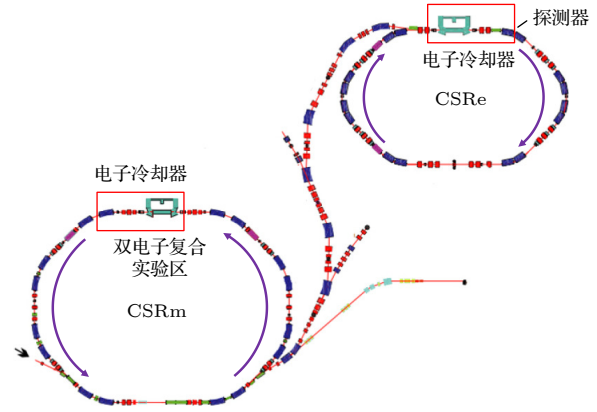


图 2 储存环 CSR<sub>m</sub> 与 CSR<sub>e</sub> 上的双电子复合实验平台示意图

Fig. 2. Schematic view of the DR experimental platforms at the storage ring CSR<sub>m</sub> and CSR<sub>e</sub>.

表 1 CSR<sub>e</sub> 上 Kr<sup>25+</sup> 离子双电子复合实验参数  
Table 1. Parameters of the DR experiment of Kr<sup>25+</sup> at CSR<sub>e</sub>.

实验参数	实验装置(CSR <sub>e</sub> )
储存环周长/m	128.8
相互作用长度/m	4.0
离子束能量/(MeV·u <sup>-1</sup> )	80
离子束流强/μA	300—450
电子束流强/mA	287.5
电子束半径/cm	2.60
横向电子温度/meV	75.14
纵向电子温度/meV	1.26
冷却段磁场强度/G	390
枪区磁场强度/G	1250

### 2.2 电子束能量调制系统

在储存环 DR 实验中, 通过电子束能量调制系统调节电子束能量, 可以得到非零的电子-离子碰撞能量. 为了在更高的束流能量下开展双电子复合实验, CSR<sub>e</sub> 上的电子冷却器安装了最新自主研发的电子束能量调制系统, 可以输出 300 kV 的电压, 相对于冷却点的电子束电压调制范围为 -15—15 kV, 对应质心系下的电子-离子碰撞能量调制范

围为 0—1 keV. 与 CSR<sub>m</sub> 的能量调制系统组成模块相似<sup>[24]</sup>, CSR<sub>e</sub> 能量调制系统中的高压电源系统由 10 个电压模块串联组成, 每一模块都有一个可以精确控制的电压源. 此外, 系统还附有专门的电压调制电路, 可以在 500 μs 内, 以总电压最大值 10% 的幅度快速调制电子束的能量. 在能量调制时, 考虑到高压电源系统的峰值电流为 300 mA, 在每个模块内部安装了特殊的高压放大器来提供 10 kW 的功率, 整个调制系统可以提供 100 kW 的调制功率, 从而获得 300 kV 的高压. 10 个受控模块的结构都相同, 其中电源部分由一个可以输出 0—30 kV 电压的接地高压模块与一个高压放大器串联而成, 高压模块与高压放大器分别由辅助电源和 ±6 kV 的电源供电<sup>[25]</sup>, 电子束能量调制系统示意图见图 3(a). 需要注意的是, 在调制电压作用一定时间后, 由于电子束对于离子束的库仑冷却力会使得离子束的速度朝着调制电子束的速度偏移, 因此在能量调制 10 ms 后, 会让电子束维持在冷却能量 190 ms 以维持离子束的能量稳定, 之后再继续进行电子束能量调制, 实验中的能量调制时序如图 3(b) 所示.

### 2.3 闪烁体探测器与多丝正比室探测器

在 CSR<sub>e</sub> 电子冷却器下游的腔室中安装了用于探测复合离子的闪烁体 PSD 探测器<sup>[26-28]</sup> 和多丝正比 MWPC 探测器<sup>[29]</sup>, 这两种探测器性能优异, 探测效率接近于 100%. 在 CSR<sub>e</sub> 上, 探测器被

放置于真空环境外的腔室中, 可以在储存环进行高温烘烤时轻易地将探测器从腔室中移出, 此外, 离子束需要经过厚度约 30 μm 的不锈钢窗之后才能打到探测器上, 这种设计可以过滤掉一部分杂散光和杂散离子. PSD 由闪烁体、光电转换倍增器件和电子学系统三个部分构成, 在闪烁体和光电转换器之间一般配有光导用以传输闪烁光子. 当高电荷态离子入射到闪烁体时会引起闪烁体原子分子激发电离, 在退激后发出闪烁光子, 闪烁光子经过光导传输到光电转换器如光电倍增管上, 光电倍增管将闪烁光转换为电信号并放大传输到电子学系统处理.

本文主要是利用 MWPC 探测器开展实验, 在 DR 实验中使用的 MWPC 探测器结构如图 4 所示, 阳极面由 20 根水平的、直径为 20 μm 的镀金钨丝组成, 彼此间距 2 mm; Y 层阴极面则是由 80 根水平的、直径为 20 μm 的镀金钨丝组成, 丝的间距为 0.5 mm; 至于 X 层阴极平面, 使用了 1.8 mm 宽的印刷电路板取代纵向丝, 不仅解决了纵向丝固定的问题, 同时还可以将延迟读出模块嵌入背面以节省空间, 印刷电路板间隔 0.2 mm, 共 60 条. 阳极和两个阴极平面的距离均为 4 mm, 工作气体由 80% 的氩气和 20% 的二氧化碳气体混合而成, 气体流量为 1.60 L/h.

MWPC 的阳极信号的半高全宽约为 26 ns, 经放大、甄别和电平转换后用作复合离子的计数测量, 计数率可以达到 10<sup>6</sup>/s, 探测效率接近 100%,

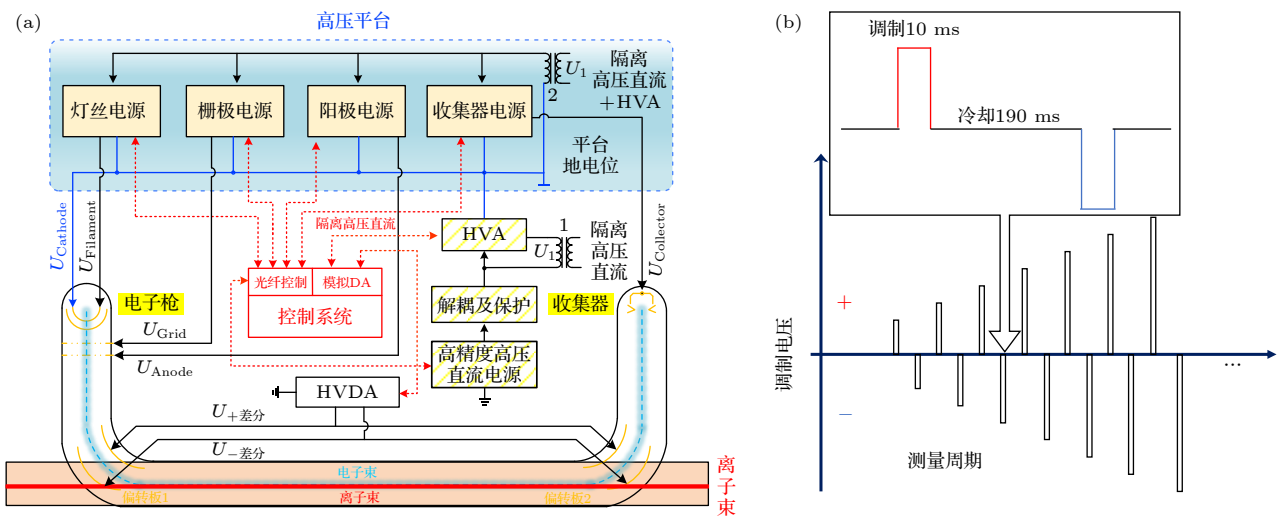


图 3 (a) CSR<sub>e</sub> 上的高压电源调制系统示意图; (b) 电子束能量调制时序图, 插图为放大后的一个周期内的调制电压变化图  
 Fig. 3. (a) Schematic diagram of the high voltage power supply modulation system of the CSR<sub>e</sub>; (b) the timing sequence of electron beam detuning voltage which is used in the DR experiment of Kr<sup>25+</sup>.

具备优异的性能. 另外, MWPC 的位置分辨能力可以实现实时的束流包络监测. 在阴极丝之间接入长度相同的延迟电阻, 由信号到达阴极两端的时间可以计算出离子的入射位置, 且两个阴极平面阴极丝的方向相互垂直以分别给出  $x$  方向和  $y$  方向的位置信息<sup>[30]</sup>. 在阴极面 X, 阴极两端之间的距离为  $L$ , 读出电路两端输出信号的时间  $t_1, t_2$ , 由此, 可通过下式

$$X = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \cdot \frac{L}{2} \quad (3)$$

求得入射离子的  $x$  坐标, 同理也可求得入射离子的  $y$  坐标.

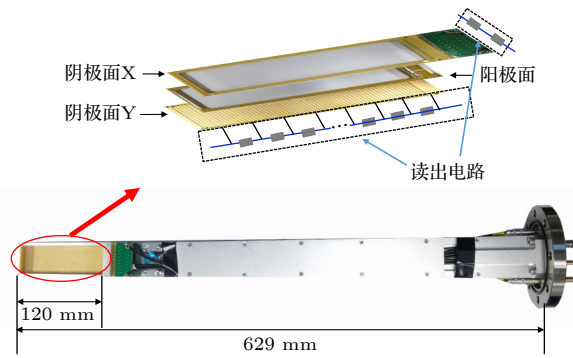


图 4 储存环 CSRe 上的多丝正比探测器实物图, 黑色虚线方框内为延迟读出电路

Fig. 4. Physical view of the MWPC detector, the black dashed box shows the delayed read-out circuitry.

图 5 为 MWPC 探测的电子束冷却前和冷却后的三维束流位置图, 可以清晰地看出经过电子冷却后, 离子束的包络显著缩小, 被很好地限制在 MWPC 的探测敏感区内, 证明了探测器的可靠性.

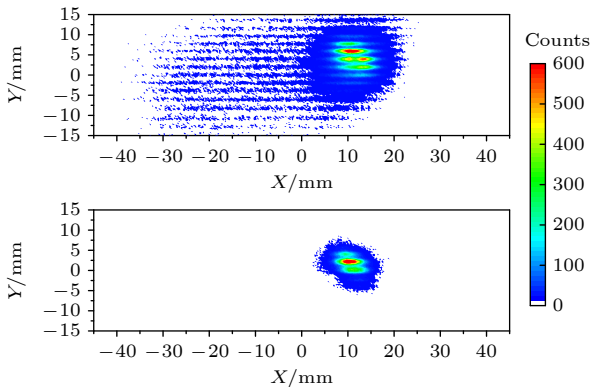


图 5 多丝正比探测器实时探测到的冷却前后的离子束包络分布图

Fig. 5. Experimentally measured beam profiles before and after electron-cooling by the MWPC detector.

## 2.4 实验数据处理

对电子束能量进行调制后, 发生复合的离子在冷却器下游经过磁场偏转被探测器探测, 最终得到电子束调制能量下的复合离子计数率谱图, 如图 6(a). 在冷却阶段, 经过电子束的冷却, 离子的速度可以近似认为与冷却电子的速度相同. 当电子束处于调制阶段时, 考虑相对论效应后, 电子束与离子束在质心系下的碰撞能量可以表示为<sup>[22]</sup>

$$E_{\text{rel}} = \sqrt{m_e^2 c^4 + m_{\text{ion}}^2 c^4 + 2m_e m_{\text{ion}} \gamma_e \gamma_{\text{ion}} c^4 (1 - \beta_e \beta_{\text{ion}})} - m_e c^2 - m_{\text{ion}} c^2, \quad (4)$$

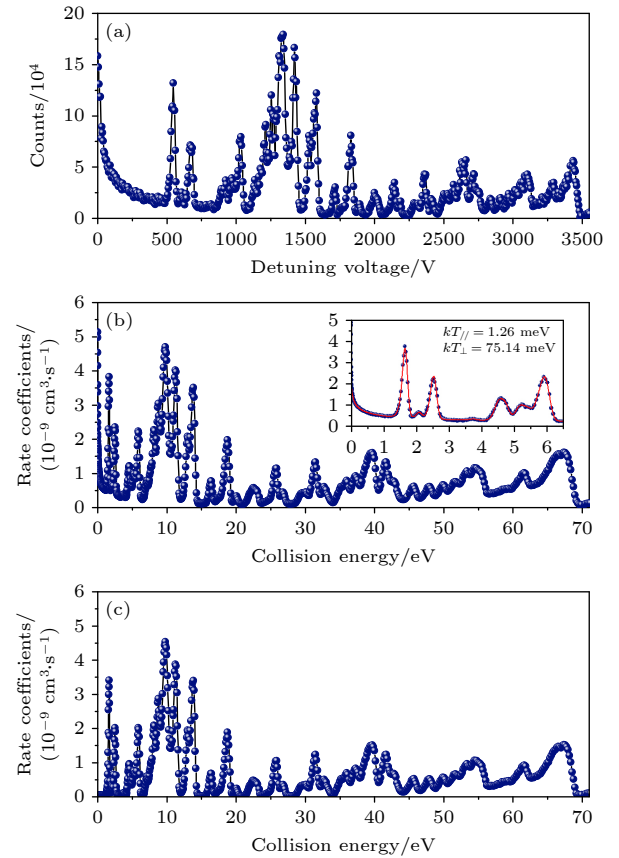


图 6 (a) 复合离子探测器探测的复合离子计数-电子束调制能量谱; (b) 总的复合速率系数-质心系碰撞能量谱, 插图中的红色曲线为拟合结果, 拟合得到了电子束的横向温度与纵向温度; (c) 减去背景与 RR 的贡献后得到的绝对 DR 速率系数-碰撞能量谱

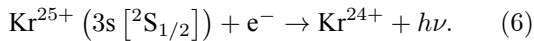
Fig. 6. (a) Counts of recombined ions detected by the ion detector as a function of the electron beam detuning voltage; (b) total recombinant rate coefficient at the center-of-mass collision energy; (c) the absolute DR rate coefficient by subtracting the contributions of the background and RR. In addition, the red curve in the inset of panel (b) is the fitting results.

其中  $E_{\text{rel}}$  为质心系碰撞能量;  $m_e, m_{\text{ion}}, \beta_e, \beta_{\text{ion}}, \gamma_e, \gamma_{\text{ion}}$  分别为电子和离子的静质量、相对论因子和洛伦兹因子;  $c$  为真空中的光速, 且碰撞能量的计算需要考虑空间电荷势的修正<sup>[31]</sup>. 为了得到图 6(b) 所示的依赖于质心碰撞能量的复合速率系数谱, 还需要将实验中测得的计数率转换为复合速率系数. 在考虑相对论效应影响后, 储存环上 DR 实验测量的复合速率系数可以表示为

$$\alpha(E_{\text{rel}}) = \frac{R}{N_{\text{ion}} n_e (1 - \beta_e \beta_{\text{ion}})} \frac{C}{L}, \quad (5)$$

其中  $\alpha(E_{\text{rel}})$  为复合速率系数;  $R$  为复合离子计数;  $N_{\text{ion}}$  为储存环中离子数目;  $n_e$  代表电子束空间密度;  $C = 128.8 \text{ m}$ ,  $L = 4.0 \text{ m}$  分别为储存环的周长和电子离子相互作用段的长度.

除了发生了 DR 的离子之外, 辐射复合 (radiative recombination, RR) 产生的复合离子同样会被下游的离子探测器探测, 在实验中, 需要去除 RR 和离子与残余气体碰撞的贡献才能得到绝对 DR 速率系数谱, 对于  $\text{Kr}^{25+}$  离子, 辐射复合通道为



通常使用经验公式拟合 RR 速率系数加本底<sup>[32]</sup>:

$$\alpha_B(E_{\text{rel}}) = \alpha_0 + \alpha_1 E_{\text{rel}} + \frac{\alpha_2}{(1 + \alpha_3 E_{\text{rel}} + \alpha_4 E_{\text{rel}}^2)}, \quad (7)$$

其中  $\alpha_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ) 为拟合所使用的拟合参数. 最终得到了纯粹的 DR 速率系数谱, 如图 6(c) 所示.

由于实验分辨远大于双电子复合共振的自然线宽, 实验测量的 DR 峰结构由扁平的麦克斯韦电子束速度分布决定<sup>[33]</sup>. 拟合测得的低能端的复合速率系数谱, 即图 6(b) 碰撞能量范围 0—6.5 eV 的部分, 可得电子束的纵向和横向温度分别为  $kT_{\parallel} = 1.26 \text{ meV}$  和  $kT_{\perp} = 75.14 \text{ meV}$ , 图中红色曲线为拟合得到的谱线.

## 2.5 理论计算方法

双电子复合过程的理论计算通常使用 AUTO STRUCTURE 和 FAC 程序包, 这两种理论模型经过多年的发展已经较为成熟<sup>[15,34,35]</sup>, 本文主要采用 FAC 理论结果与实验进行对比. FAC 程序是基于全相对论组态相互作用开发的, 使用独立共振近似模型计算双电子复合过程<sup>[36,37]</sup>. DR 是一个两步共振过程, 包含共振俘获过程和辐射退激过程, 其中, 如图 1(a) 所示的共振俘获作为自电离的逆过程, 原子单位制下的强度可以表示为<sup>[36]</sup>

$$S_{\text{DC}} = \frac{g_i}{2g_j} \frac{\pi^2}{E_{ij}} A_{ij}^a, \quad (8)$$

其中  $g_i, g_j$  分别是自电离过程初态和末态的统计权重;  $E_{ij}$  是共振能量;  $A^a$  则为自电离速率. 共振俘获过程形成的双激发态离子, 由于其能量高于自电离阈, 除了发射光子形成低于电离阈的稳定状态外, 还可以通过自电离回到初态, 共振俘获 DR 过程的占比, 可近似写为<sup>[36]</sup>

$$B(i) = \frac{\sum_k A_{ik}^r + \sum_a A_{ia}^r B(a)}{\sum_{k'} A_{ik'}^a + \sum_k A_{ik}^r + \sum_a A_{ia}^r}, \quad (9)$$

其中  $A^r$  代表辐射退激速率,  $k'$  代表自电离末态,  $k$  代表低于电离阈的所有电子态,  $a$  代表可以进一步电离的电子态. 由 (8) 式和 (9) 式得到了理论计算得到的 DR 截面, 将其与实验电子束的扁平麦克斯韦速度分布卷积即可得到理论计算的 DR 速率系数:

$$\alpha_{\text{DR}}(E) = \langle \sigma \cdot v \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(v) v f(v, T_{\parallel}, T_{\perp}) d^3v, \quad (10)$$

其中包含电子束纵向温度和横向温度  $T_{\parallel}, T_{\perp}$  的  $f(v, T_{\parallel}, T_{\perp})$ , 代表实验中的扁平麦克斯韦电子束速度分布, 电子束的横向温度与纵向温度可以通过拟合低能量段的速率系数谱得到, 如图 6(b) 所示.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 DR 速率系数

实验最终得到了如图 7 所示的 DR 速率系数谱, 对比了质心能量范围 0—70 eV 的 FAC 理论计算与实验得到的  $\text{Kr}^{25+}$  离子的 DR 速率系数, 其中黑色 (蓝色数据点) 线为 CRe 上多丝正比室探测器测得的 DR 速率系数, 红色实线为 FAC 理论计算的结果, 图中不同颜色的短竖线代表不同的里德伯系列, 竖线的横坐标代表对应的双激发态共振能量, 由里德伯公式计算得到:

$$E_{\text{res}} = E_{\text{exc}} - R_y \frac{q^2}{n^2}, \quad (11)$$

其中  $n$  为俘获到里德伯能级的自由电子的主量子数,  $q$  为所测离子的核电荷数,  $R_y = 13.60569 \text{ eV}$  为里德伯常数,  $E_{\text{exc}}$  为内壳层电子的激发能. 从图 7 可以得出,  $2p^6 3p [^2P_{1/2}] nl$  与  $2p^6 3p [^2P_{3/2}] nl$  系列共振的线系限约为 56 eV 和 69 eV, 能级跃迁  $2p^6 3s [^2S_{1/2}] \rightarrow 2p^6 3d [^2D_{3/2}]$  与  $2p^6 3p [^2D_{5/2}]$  的能量分别为 144.340 eV 与 146.796 eV, 超过了图谱显示范围,

因而其线系限没有在图中得以体现. 俘获自由电子的里德伯能级的最小主量子数可以使用里德伯公式估算. DR 共振  $2p^63p[{}^2P_{1/2}]nl$ ,  $2p^63p[{}^2P_{3/2}]nl$ ,  $2p^63d[{}^2D_{3/2}]nl$  与  $2p^63p[{}^2D_{5/2}]nl$  线系的最小主量子数分别为 13, 12, 8, 8. 此外,  $3s \rightarrow 3l$  ( $\Delta n = 0$ ) 共振是谱线结构的主要来源, 而  $3s \rightarrow 4l$  ( $\Delta n = 1$ ) 的共振也对谱线有很大的贡献. 为了能够更加细致地对比实验与理论得到的 DR 速率系数谱, 拟合 0—35 eV 范围的实验结果得到了共振能量和强度, 结果如表 2 所列, 其中, 混合峰的共振能量取值为各峰的共振强度加权平均值. 在 3 eV 之上, 实验数据与理论计算结果符合得非常好, 两组数据展示的双电子复合共振结构在共振能量上基本一致, 1.695 eV 与 2.573 eV 两个共振峰的共振能量存在较大差别, 差值分别为 0.165 eV 与 0.168 eV. 此外, 在其余  $\Delta n = 1$  的共振位置处, 实验与理论的谱线差别在 0.1 eV 以内, 造成这些差别的原因是, 组态混合与较强的电子关联效应给  $3s \rightarrow 4l$  ( $\Delta n = 1$ ) 的双激发态理论计算带来很大困难<sup>[22]</sup>.

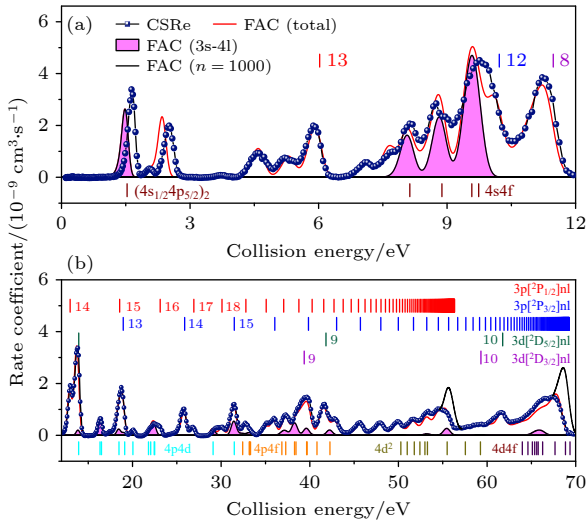


图 7 蓝色点线和红色实线分别为 CSRe 测量的  $Kr^{25+}$  离子双电子复合速率与 FAC 计算的理论结果, 阴影部分为  $\Delta n = 1$  的部分. 竖线为基于里德伯公式估算的双电子复合共振位置

Fig. 7. Experimental (dotted blue line) and theoretical (red solid line) dielectronic recombination rate coefficients of the Na-like  $Kr^{25+}$  ions. The shaded part is the part with  $\Delta n = 1$  core excitation.

需要注意的是, 处于高里德伯态的双激发态离子由于其能量与电离阈能量非常接近, 在离开相互作用区域后, 会在探测器上游因横向磁场引发的运动电场而发生电离, 即发生场电离效应, 高里德伯

态的截止主量子数为  $n_c$ . 由于发生场电离效应的复合离子电荷态和主束离子相同, 不会被复合离子探测器探测到, 最终导致实验测得的复合速率系数在线系限附近比实际情况低一些, 如图 7 所示, 实验结果在  $3p[{}^2P_{1/2}]$  与  $3p[{}^2P_{3/2}]$  的线系限处比理论计算即黑色直线的结果小一些. 此外, 考虑到处于双激发态的高里德伯态离子会通过辐射退激的方式退激发到末态, 而退激发之后的离子能够被探测器探测到, 所以, 离子只要满足辐射退激跃迁寿命小于其离开相互作用区到被探测器探测的间隔, 就依然会对计数产生贡献<sup>[31]</sup>, 将跃迁寿命刚好等于这个间隔的主量子数标记为  $n_{life}$ . 因此, 在对比实验与理论结果时, 需要采取  $n_c$  与  $n_{life}$  中较大的值作为理论计算的截止主量子数. 如图 7 所示, 在线系限处, 黑色直线为截止主量子数取 1000 的理论计算结果, 而红色直线为截止主量子数取 100 的结果. 在一般情况下, 场电离效应决定的截止主量子数较大, 由下式给出<sup>[38]</sup>:

$$n_c \cong \left( 6.2 \cdot \frac{10^{10} \text{ V}}{\text{m}} \cdot \frac{q^3}{v_{ion} B} \right)^{1/4}, \quad (12)$$

其中  $q$  为离子的电荷态,  $v_{ion}$  为离子运动速度,  $B$  为磁场强度. 本次实验的截止主量子数取值 100. 由于理论计算得到的线系限附近的复合速率系数比较准确, 在通过复合速率系数计算等离子体速率系数时, 可以将线系限处的实验结果, 替换为理论计算的结果, 如图 7 所示的黑色曲线, 从而得到准确的等离子体速率系数.

### 3.2 等离子体速率系数

与重离子储存环实验中各向异性的电子束速度分布不同, 在等离子体环境下, 电子的速度分布为各向同性的麦克斯韦速度分布, 与等离子体温度  $T$  有关. 由于实验中使用的电子束温度远小于等离子体温度, 采用以下近似得到实验测量的 DR 截面:

$$\sigma(E) = \alpha(E) \sqrt{m_e/(2E)}. \quad (13)$$

将截面与电子束速度分布卷积得到有关温度的等离子体速率系数<sup>[38]</sup>:

$$\alpha(T) = \langle \sigma \cdot v \rangle = (k_B T)^{-3/2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int \alpha(E) \sqrt{E} \times \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) dE. \quad (14)$$

由于场电离效应的存在, 将线系限附近的实验结

表 2 实验测量拟合结果与理论计算结果对比

Table 2. Comparison of experimental measurement fitting results with theoretical calculations.

双激发态组态	共振能量/eV		共振强度/( $10^{-19}$ eV·cm <sup>2</sup> )	
	FAC	实验	FAC	实验
4s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 2$ )	1.530	1.695±0.001	75.2	93.8±0.6
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8s ( $J = 1$ )	2.090	2.119±0.009	7.1	8.4±0.6
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8s ( $J = 2$ )	2.405	2.573±0.001	62.2	56.1±0.6
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]13s	3.869	3.804±0.049	1.5	1.9±0.6
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8s ( $J = 3$ )	4.530		7.3	
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]13p <sub>1/2</sub>	4.565 <sup>a</sup>		4.4	
Blend	4.543 <sup>a</sup>	4.561±0.012	11.7	17.4±1.2
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8p <sub>1/2</sub> ( $J = 2$ )	4.660		6.4	
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8s ( $J = 2$ )	4.690		11.0	
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8p <sub>1/2</sub> ( $J = 1$ )	4.754		3.9	
Blend	4.693 <sup>a</sup>	4.789±0.013	21.2	15.8±1.2
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8p <sub>3/2</sub>	5.338	5.216±0.021	14.8	13.8±1.7
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]13d	5.384 <sup>a</sup>	5.448±0.032	7.2	11.5±1.4
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]13f	5.838 <sup>a</sup>	5.747±0.029	12.4	13.9±1.5
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]13l ( $l \geq g$ )	6.003 <sup>a</sup>	6.000±0.006	40.4	44.7±1.9
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8p <sub>1/2</sub> ( $J = 2, 3$ )	7.129 <sup>a</sup>	7.154±0.022	14.6	12.5±1.3
3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]12s ( $J = 1, 2$ )	7.465 <sup>a</sup>	7.494±0.095	2.0	6.8±2.3
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8p <sub>3/2</sub> ( $J = 2, 3, 4$ )	7.705 <sup>a</sup>	7.767±0.034	26.8	18.6±2.2
4s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> ]4f <sub>5/2</sub> ( $J = 2$ )	8.129	8.161±0.028	37.9	39.2±5.2
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8p <sub>3/2</sub> ( $J = 1$ )	8.063		2.3	
3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]12p <sub>1/2</sub>	8.245		2.2	
3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]12p <sub>3/2</sub> ( $J = 1, 2, 3$ )	8.404 <sup>a</sup>		3.8	
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8d <sub>3/2</sub>	8.596		12.7	
Blend	8.466 <sup>a</sup>	8.391±0.045	21.0	20.1±5.2
4s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> ]4f <sub>5/2</sub> ( $J = 3$ )	8.880	8.790±0.010	53.9	58.2±1.3
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8d <sub>5/2</sub>	8.813 <sup>a</sup>		21.1	
3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]12d	9.404 <sup>a</sup>		8.9	
Blend	8.988 <sup>a</sup>	9.143±0.014	30.0	41.2±1.3
4s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> ]4f <sub>5/2</sub> ( $J = 4$ )	9.577	9.546±0.018	65.7	60.6±4.0
4s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> ]4f <sub>5/2</sub> ( $J = 3$ )	9.737	9.842±0.023	55.8	75.1±3.2
3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]12l ( $l \geq f$ )	10.139 <sup>a</sup>	10.138±0.020	77.5	67.0±3.8
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8f	10.721 <sup>a</sup>	10.694±0.041	39.8	51.9±2.0
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8d	11.227 <sup>a</sup>	11.224±0.023	33.1	58.3±2.8
3d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ]8l ( $l \geq g$ )	11.313 <sup>a</sup>	11.504±0.009	70.7	60.3±4.5
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]14d	12.443 <sup>a</sup>	12.732±0.044	3.5	10.1±1.7
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]14l ( $l \geq f$ )	12.907 <sup>a</sup>	13.101±0.013	19.4	41.0±1.4
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8f	13.276 <sup>a</sup>	13.616±0.018	25.4	39.2±1.8
3d <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> ]8l ( $l \geq g$ )	13.770 <sup>a</sup>	13.964±0.006	83.4	67.5±2.2
4p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 3$ )	16.337		12.3	
4p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 2$ )	16.500		4.0	
Blend	16.377 <sup>a</sup>	16.482±0.013	16.3	14.1±1.0
3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]13p	17.491 <sup>a</sup>	17.36±0.14	2.4	2.0±1.0
3p <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]15p	17.601 <sup>a</sup>	17.74±0.12	0.8	3.0±0.8

表 2 (续) 实验测量拟合结果与理论计算结果对比  
Table 2 (continued). Comparison of experimental measurement fitting results with theoretical calculations.

双激发态组态	共振能量/eV		共振强度/( $10^{-19}$ eV·cm <sup>2</sup> )	
	FAC	实验	FAC	实验
Blend	17.517 <sup>a</sup>	17.579±0.036	3.2	3.3±0.3
3p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]15d	18.131 <sup>a</sup>		1.4	
3p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]13d	18.313 <sup>a</sup>		3.6	
Blend	18.262 <sup>a</sup>	18.226±0.057	5.1	7.2±1.4
4p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 1$ )	18.466		5.2	
3p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]15l ( $l \geq f$ )	18.533 <sup>a</sup>		8.8	
Blend	18.508 <sup>a</sup>	18.609±0.031	14.0	21.6±1.0
3p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]13l ( $l \geq f$ )	18.930 <sup>a</sup>	18.976±0.008	25.5	32.2±1.6
4p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 2$ )	20.038	20.162±0.022	5.1	4.2±0.3
4p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 0$ )	21.802		1.7	
4p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 1$ )	22.054		4.2	
Blend	21.984 <sup>a</sup>	22.086±0.025	5.9	5.1±0.3
4p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 3$ )	22.444		4.3	
4p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]4d <sub>5/2</sub> ( $J = 2$ )	22.502		5.4	
Blend	22.476 <sup>a</sup>	22.614±0.020	9.7	8.7±0.3
3p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]16l	23.005 <sup>a</sup>	23.164±0.018	9.5	7.3±0.3
3p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]14p	24.715 <sup>a</sup>		1.4	
3p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]14d	25.371 <sup>a</sup>		2.2	
Blend	25.111 <sup>a</sup>	25.480±0.052	3.6	7.1±1.0
3p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]14l ( $l \geq f$ )	25.865 <sup>a</sup>	25.941±0.013	20.7	21.2±1.0
3p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]17l	26.821 <sup>a</sup>	26.917±0.022	7.2	7.0±0.4
3p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]18l	30.020 <sup>a</sup>	30.277±0.024	6.1	6.8±0.3
3p[ <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ]15l	31.348 <sup>a</sup>	31.695±0.011	16.4	22.6±0.9
4p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]4f <sub>5/2</sub> ( $J = 3$ )	32.424		1.6	
3p[ <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> ]19l	32.739 <sup>a</sup>		7.5	
Blend	32.683 <sup>a</sup>	32.804±0.028	9.2	9.5±0.5

<sup>a</sup> Weighted energy:  $E_d = \sum E_d S_d / \sum S_d$

果替换为 FAC 理论计算的结果. 如图 8 所示, 理论计算的结果在温度低于  $10^4$  K 时略低于实验导出的等离子速率系数, 主要原因是上文中提到的低能量共振位置与共振强度理论计算不准确. 我们还将 AUTOSTRUCTURE 程序理论、FAC 理论导出的等离子体速率系数和上述方法得到的实验等离子体速率系数进行了对比, 整体符合得很好, 在温度小于  $10^6$  K 的区间, 相差不到 20%, 在温度大于  $10^6$  K 小于  $10^7$  K 的区间, 相差不到 10%.

为了方便等离子体建模, 可以使用温度相关的经验公式拟合等离子体速率系数<sup>[15,39]</sup>:

$$\alpha_{\text{fit}}(T) = T^{-3/2} \sum_{i=1}^7 c_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), \quad (15)$$

其中  $c_i$  与  $E_i$  为拟合参数, 拟合的结果见表 3.

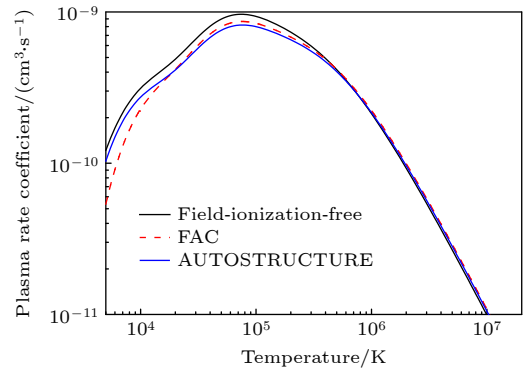


图 8 Kr<sup>25+</sup>离子的实验(黑色实线)与FAC(红色虚线)及AUTOSTRUCTURE<sup>[22]</sup>(蓝色实线)理论导出的等离子速率系数谱对比

Fig. 8. Comparison of plasma rate coefficients of sodium-like Kr<sup>25+</sup> ions between experimental results (black solid line) and calculations by FAC (red dashed line) and AUTOSTRUCTURE (blue line) code.

表 3 实验与 FAC 理论计算得到的复合速率系数导出的等离子体速率系数拟合参数,  $c_i$  与  $E_i$  的单位分别为  $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$  与 eV, 括号内的数字为 10 的幂  
Table 3. Fitted coefficients for the plasma rate coefficients of DR experiment and FAC, the  $c_i$  are in units of  $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , and the  $E_i$  are in eV. The numbers in the square brackets are power of 10.

$i$	实验		FAC	
	$c_i$	$E_i$	$c_i$	$E_i$
1	1.01[-1]	37.1	4.65[-2]	24.7
2	2.28[-1]	63.9	2.07[-1]	53.4
3	1.95[-3]	1.74	7.35[-2]	92.9
4	3.30[-2]	121	1.05[-2]	6.15
5	3.99[-2]	15.5	8.90[-4]	1.42
6	4.34[-2]	9.07	1.57[-3]	2.36
7	3.88[-3]	4.17	5.37[-2]	5.37

## 4 总结与展望

我们对兰州重离子加速器冷却储存环 CSR<sub>e</sub> 的电子冷却器进行了升级改造, 适于开展高电荷态离子双电子复合精密谱学实验. 更换了 300 kV 高压系统, 增加了电子能量快速调制系统, 该系统支持从 -15 kV 到 +15 kV 的调制高压, 比 CSR<sub>m</sub> 上的双电子复合实验平台提高了一个数量级. 此外, 我们自主研发并安装了塑料闪烁探测器和多丝正比探测器, 用于测量复合离子. 利用类钠  $\text{Kr}^{25+}$  离子开展了测试实验, 测量了质心能量范围 0—70 eV 的 DR 速率系数谱, 并与 FAC 理论计算结果进行了对比, 发现除了  $3s \rightarrow 3l(\Delta n = 0)$  通道外,  $3s \rightarrow 4l(\Delta n = 1)$  也是谱线的重要来源. 对实验获得的 DR 速率系数谱线进行拟合, 得到了共振能量和共振强度, 并与理论计算结果进行对比, 除了低能量处两个共振峰的共振能量有一定的偏移外, 实验结果与理论结果整体上符合得很好. 由实验测量的 DR 速率系数导出的等离子体速率系数与 FAC 和 AUTO STRUCTURE 的理论计算结果符合得也很好.

本次实验结果表明当前 CSR<sub>e</sub> 双电子复合实验平台的电子束能量调制系统和 MWPC 探测器的性能良好, 具有非常好的稳定性和可重复性, 为我们接下来开展高电荷态离子双电子复合精密谱学实验检验强场量子电动力学效应以及原子核性质精密测量等前沿实验提供了保障.

## 参考文献

- [1] Gillaspay J D 2001 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **34** R93
- [2] Kozlov M, Safronova M, López-Urrutia J C, Schmidt P 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 045005
- [3] Lindroth E, Danared H, Glans P, Pešić Z, Tokman M, Viktor G, Schuch R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5027
- [4] Brandau C, Kozhuharov C, Müller A, et al. 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 073202
- [5] Schuch R, Lindroth E, Madzunkov S, Fogle M, Mohamed T, Indelicato P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 183003
- [6] Brandau C, Kozhuharov C, Harman Z A, et al. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 073201
- [7] Chuai X Y, Huang Z K, Wen W Q, et al. 2018 *Nucl. Phys. Rev.* **35** 196 (in Chinese) [啜晓亚, 黄忠魁, 汶伟强, 等 2018 原子核物理评论 **35** 196]
- [8] Kieslich S, Schippers S, Shi W, et al. 2004 *Phys. Rev. A* **70** 042714
- [9] Budker G, Kiselev A, Konkov N, Naumov A, Nifontov V, Ostreiko G, Petrov V, Yudin L, Yasnov G 1965 *V International Conference on High Energy Accelerators Proceedings Frascati, September 9–16, 1965* p455
- [10] Poth H 1990 *Phys. Rep.* **196** 135
- [11] Mitchell J, Ng C, Forand J, Levac D, Mitchell R, Sen A, Miko D, McGowan J W 1983 *Phys. Rev. Lett.* **50** 335
- [12] Dittner P, Datz S, Miller P, et al. 1983 *Phys. Rev. Lett.* **51** 31
- [13] Müller A 2008 *Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics* (Academic Press) pp293–417
- [14] Schippers S 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **350** 61
- [15] Huang Z K, Wen W Q, Xu X, et al. 2018 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235** 2
- [16] Khan N, Huang Z K, Wen W Q, Mahmood S, et al. 2018 *Chin. Phys. C* **42** 064001
- [17] Wang S X, Xu X, Huang Z K, et al. 2018 *Astrophys. J.* **862** 134
- [18] Wang S X, Huang Z K, Wen W Q, et al. 2019 *Astron. Astrophys.* **627** 171
- [19] Huang Z K, Wang S X, Wen W Q, et al. 2020 *X-Ray Spectrom.* **49** 155
- [20] Wen W Q, Huang Z K, Wang S X, et al. 2020 *Astrophys. J.* **905** 36
- [21] Khan N, Huang Z K, Wen W Q, et al. 2022 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **55** 035001
- [22] Huang Z K, Wen W Q, Wang S X, et al. 2020 *Phys. Rev. A* **102** 062823
- [23] Shevelko V P, Stöhlker T, Tawara H, Tolstikhina I Y, Weber G 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **268** 2611
- [24] Yan K, Zhou Y, Ma X, Tang M, Gao D, Zhao H, Huang Z, Wen W, Mao L 2023 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **1046** 167699
- [25] Skorobogatov D, Bryzgunov M, Kondaurov M, Putnikov A, Reva V, Repkov V 2019 *Proceedings of the 12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics Novosibirsk, Russia, September 24–27, 2019* pp86–88
- [26] Menz E B, Hahn C, Pfäfflein P, Weber G, Stöhlker T 2020 *J. Phys. Conf. Ser.* **1412** 232006
- [27] Westman S, Kerek A, Klamra W, Norlin L O, Novak D 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **481** 655
- [28] Miersch G, Habs D, Kemtner J, Schwalm D, Wolf A 1996 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **369** 277
- [29] Klepper O, Kozhuharov C 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **204** 553

- [30] Ye Y L, Di Z Y, Li Z H, Wang Q J, Zheng T, Chen T, Jiang D X, Ge Y C, Pang D Y, Li X Q 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **515** 718
- [31] Kilgus G, Habs D, Schwalm D, Wolf A, Badnell N R, Muller A 1992 *Phys. Rev. A* **46** 5730
- [32] Schippers S, Bartsch T, Brandau C, Müller A, Gwinner G, Wissler G, Beutelspacher M, Grieser M, Wolf A, Phaneuf R A 2000 *Phys. Rev. A* **62** 022708
- [33] Danared H 1995 *Phys. Scr.* **59** 121
- [34] Badnell N R 2011 *Comput. Phys. Commun.* **182** 1528
- [35] Badnell N 2006 *Astrophys. J.* **651** L73
- [36] Gu M F 2008 *Can. J. Phys.* **86** 675
- [37] Gu M F 2003 *Astrophys. J.* **590** 1131
- [38] Schippers S, Müller A, Gwinner G, Linkemann J, Saghir A, Wolf A 2001 *Astrophys. J.* **555** 1027
- [39] Schippers S, Schnell M, Brandau C, Kieslich S, Müller A, Wolf A 2004 *Astron. Astrophys.* **421** 1185

## COVER ARTICLE

# Dielectronic recombination experiment of Na-like Kr<sup>25+</sup> at heavy ion storage ring CSRe\*

Shao Lin<sup>1)2)</sup> Huang Zhong-Kui<sup>2)</sup> Wen Wei-Qiang<sup>2)†</sup> Wang Shu-Xing<sup>3)</sup>  
 Huang Hou-Ke<sup>2)</sup> Ma Wan-Lu<sup>3)</sup> Liu Chang<sup>3)</sup> Wang Han-Bing<sup>2)</sup>  
 Chen Dong-Yang<sup>2)</sup> Liu Xin<sup>2)</sup> Zhou Xiao-Peng<sup>2)</sup> Zhao Dong-Mei<sup>2)</sup>  
 Zhang Shao-Feng<sup>2)</sup> Zhu Lin-Fan<sup>3)‡</sup> Ma Xin-Wen<sup>2)††</sup>

1) (*Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

3) (*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

( Received 31 January 2024; revised manuscript received 3 April 2024 )

### Abstract

The experimental study of precision spectroscopy of dielectronic recombination (DR) of highly charged ions is not only important for astronomical plasma and fusion plasma, but also can be used as a new precision spectroscopy to test the strong-field quantum electrodynamic effect, measure isotope shift, and extract the radius of atomic nuclei. An specially designed electron beam energy detuning system for electron-ion recombination precision spectroscopy experiments has been installed on the heavy ion storage ring CSRe in Lanzhou, China, where the electron-ion collision energy in the center-of-mass system can be detuned to 1 keV, and an independently-developed plastic scintillator detector and multiwire proportional chamber detector have been installed downstream of the electron cooler of the CSRe for detecting recombined ions. The multiwire proportional chamber detector has the ability to non-destructively monitor the profile of the ion beam in real-

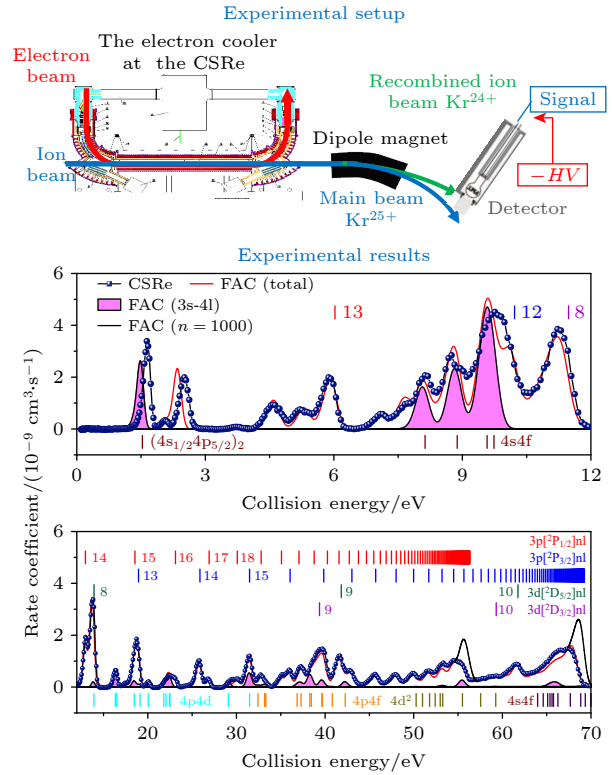
\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1602500), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12393824, 12334010, U1932207), the Strategic Priority Research Program (B) of Chinese Academy of Science (Grant No. XDB34020000), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Science.

† Corresponding author. E-mail: [wenweiqiang@impcas.ac.cn](mailto:wenweiqiang@impcas.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [lfzhu@ustc.edu.cn](mailto:lfzhu@ustc.edu.cn)

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

time while acquiring the recombined ion counts, providing guidance for optimizing the ion beam. On this basis, the first test experiment on dielectronic recombination of  $\text{Kr}^{25+}$  ions is carried out at the CSRe, and the dielectronic recombination rate coefficients in a range of 0–70 eV in the frame of center-of-mass are measured. In order to fully understand the experimental results, we calculate the dielectronic recombination rate coefficient of the  $\text{Kr}^{25+}$  ion by using the flexible atomic code (FAC) and make a detailed comparison with the experimental result, showing that they are in good agreement with each other, and only the resonance energy values of the two resonance peaks at 1.695 eV and 2.573 eV are significantly different. In addition, the DR resonance energy values and intensities are obtained by fitting the experimental results in a range of 0–35 eV, and we find that the transition  $3s \rightarrow 4l$  ( $\Delta n = 1$ ) contributes significantly to the experimental spectral lines. Furthermore, we compare the plasma rate coefficients derived from the DR rate coefficients with those derived from the AUTOSTRUCTURE and FAC theories, which differ by 20 percent in a temperature range less than  $10^6$  K. The experimental results show that the DR experimental platform of the CSRe has very good stability and reproducibility, and can provide support for the future DR experiments of highly charged ion, i.e. for testing strong-field quantum electrodynamics effect and measuring the properties of atomic nuclei.



**Keywords:** dielectronic recombination, storage ring CSRe, electron cooler, multiwire proportional chamber detector

**PACS:** 34.80.Lx

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240211

## 重离子储存环CSRe上类钠Kr<sup>25+</sup>离子的双电子复合精密谱学实验研究

邵林 黄忠魁 汶伟强 汪书兴 黄厚科 马万路 刘畅 汪寒冰 陈冬阳 刘鑫 周晓鹏 赵冬梅 张少锋 朱林繁 马新文

## Dielectronic recombination experiment of Na-like Kr<sup>25+</sup> at heavy ion storage ring CSRe

Shao Lin Huang Zhong-Kui Wen Wei-Qiang Wang Shu-Xing Huang Hou-Ke Ma Wan-Lu Liu Chang  
Wang Han-Bing Chen Dong-Yang Liu Xin Zhou Xiao-Peng Zhao Dong-Mei Zhang Shao-Feng  
Zhu Lin-Fan Ma Xin-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 123402 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240211

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

基于TiO<sub>2</sub>纳米柱的多波段响应Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>双钙钛矿光电探测器

Multi-band response Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> double perovskite photodetector based on TiO<sub>2</sub> nanopillars

物理学报. 2024, 73(7): 078502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231919>

基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

环形正负电子对撞机带电粒子鉴别的飞行时间探测器

Time of flight detector for charged particle identification based on circular electron-positron collider

物理学报. 2023, 72(12): 122901 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222271>

放电室长度对电子回旋共振离子推力器性能的影响机理

Study on the effect of discharge chamber length on the performance of electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2023, 72(17): 175204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230719>

超导动态电感探测器的噪声谱分析

Noise spectrum analysis of superconducting kinetic inductance detectors

物理学报. 2024, 73(3): 038501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231504>

圆环孔阵列超材料对热释电太赫兹探测器性能影响关系研究

Study on influence of ring hole array metamaterial on performance of pyroelectric terahertz detectors

物理学报. 2023, 72(4): 048701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221174>