

# Xe<sup>54+</sup> 离子与 Xe 原子碰撞过程中的辐射电子俘获及退激发辐射的理论研究\*

梁腾<sup>1)</sup> 马莖<sup>1)</sup> 陈曦<sup>1)</sup> 颌录有<sup>1)†</sup> 董晨钟<sup>1)‡</sup> 邵曹杰<sup>2)</sup>  
于得洋<sup>2)</sup> 蔡晓红<sup>2)</sup>

1)(甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

2)(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2015年1月22日收到; 2015年3月24日收到修改稿)

基于多组态 Dirac-Fock 理论方法和冲量近似, 对 Xe<sup>54+</sup> 与 Xe 在 197 MeV/u 碰撞能量下, 炮弹离子的俘获及退激发过程进行了理论研究. 计算了炮弹离子从中性靶原子俘获一个电子到  $nl$  ( $n = 1, 2, 3, 4, 5; l = s, p, d$ ) 轨道上的辐射电子俘获截面和相应的辐射光子能量, 以及俘获末态退激发辐射跃迁的能量和概率. 结合这些计算结果, 进一步模拟了碰撞产生的炮弹离子的退激发 X 射线谱的结构, 并与兰州重离子加速器装置上的最新实验观测结果进行了比较, 符合得很好.

**关键词:** 原子碰撞, 辐射电子俘获, 辐射退激发

**PACS:** 34.70.+e, 32.30.-r, 32.70.Fw

**DOI:** 10.7498/aps.64.153401

## 1 引言

辐射电子俘获 (REC) 是指在高离化态离子与原子 (分子) 高能碰撞过程中, 靶原子上一个电子转移到炮弹离子束缚轨道上, 同时放出一个光子的物理过程. REC 过程中的束缚态电子被俘获到炮弹离子的激发态后, 这些处于激发态的电子会进一步通过辐射退激发的方式达到稳定状态. 因此, 对这些过程的研究, 人们不仅可以进一步加深对原子激发态结构、相关碰撞动力学过程及其衰变规律的理解和认识<sup>[1]</sup>, 同时还可以为实验室聚变等离子体和天体等离子体的模拟提供重要的原子参数<sup>[2,3]</sup>. Raisbeck, Yiou<sup>[4]</sup> 和 Schnopper 等<sup>[5]</sup> 最早在实验室中观测到了高离化硫、氯、溴等离子体与不同靶原子碰撞过程的 REC 光谱. 在接下来的几十年里, 有大量的工作对 REC 过程进行了理论和实验方面的研究<sup>[6-9]</sup>. 1984 年, Anholt 等<sup>[10]</sup> 观测了

Xe<sup>54+</sup> 与 Be 原子在 197 MeV/u 碰撞能量下的 REC 过程, 测量了  $K$  壳层 REC 光子的角分布和截面, 实验测量的截面与该小组之前的计算结果符合得很好; 1995 年, Stöhlker 等<sup>[11]</sup> 研究了高能 U<sup>92+</sup> 离子和 U<sup>91+</sup> 离子分别与 N<sub>2</sub> 分子和 Ar 原子碰撞的 REC 过程, 测量了  $K$  壳层 REC 光子角微分截面、分截面以及俘获到所有壳层的总截面; 2009 年, Stöhlker 等<sup>[12]</sup> 又测量了 U<sup>89+</sup> 和 N<sub>2</sub> 在 98 MeV/u 能量下的 REC 光谱, 随后 Wan 等<sup>[13]</sup> 采用多组态 Dirac-Fock 方法和冲量近似对该实验光谱进行了理论模拟, 其模拟结果和实验测量具有很好的一致性; 2011 年, Yu 等<sup>[14]</sup> 基于兰州重离子加速器实验平台, 研究了 200 MeV/u 能量下 Xe<sup>54+</sup> 与 N<sub>2</sub> 的碰撞过程, 观测到了  $K$ -REC 光谱和  $L$ -REC 光谱.

最近, 中国科学院近代物理研究所蔡晓红研究小组利用兰州重离子加速器冷却储存环 (CSR) 装置, 测量了 197 MeV/u 等能量下 Xe<sup>54+</sup> 与 Xe 原

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11274254, U1332206, U1331122) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongcz@nwnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xiely@nwnu.edu.cn

子碰撞俘获导致的Xe<sup>53+</sup>的退激发X射线光谱。为了对相关碰撞实验结果进行分析,我们利用MCDF<sup>[15]</sup>理论方法和冲量近似,通过计算炮弹离子Xe<sup>54+</sup>的辐射复合截面和相应的辐射光子能量,同时考虑Xe靶中各轨道电子的动量分布,得到了该过程的REC截面;然后,进一步计算了炮弹离子不同俘获末态的退激发X射线能量和跃迁概率;最后,利用计算的REC截面和退激发X射线概率,模拟了Xe<sup>54+</sup>与Xe原子碰撞俘获后,Xe<sup>53+</sup>退激发X射线谱,结果与最新的实验进行了比较,很好地指出了实验测量到的各条谱线。

## 2 理论方法

### 2.1 辐射电子俘获截面的计算

根据冲量近似<sup>[16,17]</sup>,若靶电子相对于靶的运动速度远小于炮弹离子相对于靶的运动速度,则REC截面可以通过对辐射复合(RR)截面和靶电子的动量分布卷积得到,即在冲量近似下,REC截面<sup>[18]</sup>可以写成为

$$\sigma^{\text{REC}}(\omega^{\text{REC}}(p_z)) = \sum_{i,f} \sigma_{if}^{\text{RR}}(\omega^{\text{REC}}(p_z)) \frac{J(p_z)}{\gamma\nu_0}, \quad (1)$$

式中, $\gamma$ 是洛伦兹因子, $\nu_0$ 是炮弹离子和靶原子之间的相对速度, $p_z$ 是靶电子动量在入射方向的投影, $J(p_z)$ 是靶原子的总康普顿轮廓,它由各轨道电子的康普顿轮廓求和得到,具体可以表示为<sup>[19,20]</sup>

$$J(p_z) = \sum_k J(p_{kz}) = \sum_k N_k \iint dp_{kx} dp_{ky} \times |\psi(p_{kx}, p_{ky}, p_{kz})|^2, \quad (2)$$

其中, $N_k$ 是第 $k$ 个壳层填充的电子个数, $\psi(p_{kx}, p_{ky}, p_{kz})$ 是在动量表象下的电子波函数, $\omega^{\text{REC}}(p_z)$ 是炮弹离子参考系中REC光子的能量,它与相应的RR光子能量 $\omega^{\text{RR}}$ 之间有如下关系<sup>[21]</sup>:

$$\omega^{\text{REC}}(p_z) = \omega^{\text{RR}} + \gamma p_z \nu_0. \quad (3)$$

由于RR截面在某个能量为中心的较窄的区域内变化缓慢,因此REC谱线的宽度可以近似地由靶原子中电子的康普顿轮廓来确定,从而

$$\sigma^{\text{REC}}(\omega^{\text{REC}}(p_z)) \approx \sum_{i,f} \sigma_{if}^{\text{RR}}(\omega^{\text{RR}}) \frac{J(p_z)}{\gamma\nu_0}, \quad (4)$$

这里, $\sigma_{if}^{\text{RR}}$ 为辐射复合截面,它可以表示为

$$\sigma_{if}^{\text{RR}} = \frac{g_f}{g_i} \frac{\pi^2 a_0^2 \alpha^3 (\omega^{\text{RR}})^2}{\varepsilon} \frac{df_{if}}{d\varepsilon}, \quad (5)$$

其中, $g_i$ 和 $g_f$ 分别表示辐射复合初态 $i$ 和复合末态 $f$ 的权重因子, $\varepsilon$ 是入射电子的动能, $\alpha$ 是精细结构常数, $a_0$ 是波尔半径, $\frac{df_{if}}{d\varepsilon}$ 是振子强度密度<sup>[22]</sup>,它可以表示为

$$\frac{df_{if}}{d\varepsilon} = \sum_{\kappa,L} \frac{\pi c}{(2L+1)(\omega^{\text{RR}})^2} |\langle \alpha_f^N(P_f J_f M_f) | O^{\text{LM}} \times [|\alpha_{i'}^{N-1}(P_{i'} J_{i'} M_{i'})\rangle, \varepsilon \kappa]; \alpha_i^N(P_i J_i M_i) \rangle|^2, \quad (6)$$

其中, $O^{\text{LM}}$ 是多极辐射场算符, $|\alpha_{i'}^{N-1}(P_{i'} J_{i'} M_{i'})\rangle$ 和 $|\alpha_f^N(P_f J_f M_f)\rangle$ 分别对应辐射复合前、后的离子态波函数,初态体系波函数 $|\alpha_{i'}^{N-1}(P_{i'} J_{i'} M_{i'})\rangle, \varepsilon \kappa; \alpha_i^N(P_i J_i M_i)\rangle$ 由 $N-1$ 电子体系的离子态波函数 $|\alpha_{i'}^{N-1}(P_{i'} J_{i'} M_{i'})\rangle$ 和连续电子态波函数 $|\varepsilon \kappa\rangle$ 通过反对称化耦合得到。

### 2.2 辐射跃迁概率的计算

按照Fermi黄金定则,单位时间内从辐射初态 $|\alpha_i(P_i J_i M_i)\rangle$ 到辐射末态 $|\alpha_f(P_f J_f M_f)\rangle$ 的跃迁概率可以写成为<sup>[23]</sup>

$$A_{if} = \frac{2\pi}{2J_i + 1} \sum_{M_i} \sum_{M_f} |\langle \alpha_f(P_f J_f M_f) | O^{\text{LM}} \times |\alpha_i(P_i J_i M_i)\rangle|^2, \quad (7)$$

式中, $J_i$ 是初态离子的总角动量, $\langle \alpha_f(P_f J_f M_f) | O^{\text{LM}} | \alpha_i(P_i J_i M_i)\rangle$ 是跃迁矩阵元。在本文的计算中,我们仅考虑电偶极辐射跃迁。

### 2.3 波函数及能级的计算

一个核电荷数为 $Z$ ,具有 $N$ 个电子的原子或离子体系,其Dirac-Coulomb哈密顿量可以表示为

$$\hat{H}_{\text{DC}} = \sum_{i=1}^N \hat{H}_i + \sum_{i<j}^N |\hat{\mathbf{r}}_i - \hat{\mathbf{r}}_j|^{-1}, \quad (8)$$

$$\hat{H}_i = c\hat{\alpha} \cdot \hat{p}_i + (\beta - 1)c^2 + V_{\text{nuc}}(\hat{\mathbf{r}}_i), \quad (9)$$

式中, $V_{\text{nuc}}(\hat{\mathbf{r}}_i)$ 是核势场, $\hat{\alpha}$ 和 $\beta$ 分别是Dirac矢量和标量矩阵, $\hat{p}_i$ 是第 $i$ 个电子的动量算符, $c$ 是真空中光速。

在中心力场近似下的单电子自旋轨道波函数可表示为

$$\varphi_{n\kappa m}(r) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} P_{n\kappa}(r)\chi_{\kappa m}(\theta, \varphi) \\ iQ_{n\kappa}(r)\chi_{-\kappa m}(\theta, \varphi) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $\kappa$  为 Dirac 量子数,  $P_{n\kappa}(r)$  和  $Q_{n\kappa}(r)$  分别表示相对论径向轨道波函数的大、小分量,  $\chi_{\kappa m}(\theta, \varphi)$  为自旋角向波函数.

对于具有  $N$  个电子的体系, 其组态波函数  $|\Gamma_r(PJM)\rangle$  是所有单电子自旋轨道波函数组成的  $N$  阶 Slater 行列式波函数  $|\psi_p\rangle$  的线性组合, 即

$$|\Gamma_r(PJM)\rangle = \sum_p B_{rp} |\psi_p(PJM)\rangle. \quad (11)$$

在 MCDF 方法中, 任一原子态波函数  $|\alpha(PJM)\rangle$  可通过具有相同  $P, J$  和  $M$  量子数的组态波函数  $|\Gamma_r(PJM)\rangle$  线性组合得到, 即

$$|\alpha(PJM)\rangle = \sum_{r=1}^{n_c} C_r^\alpha |\Gamma_r(PJM)\rangle, \quad (12)$$

式中  $n_c$  是组态波函数的个数,  $C_r^\alpha$  为组态混合系数. 通过对由原子态波函数 (12) 式构造的哈密顿矩阵进行对角化, 可得到原子态的能量和组态混合系数, 另外, 为了提高计算精度, 进一步包括的其他效

应, 例如 Breit 相互作用、量子电动力学效应 (包括自能和真空极化) 以及原子核的有效体积效应 [24], 并将其作为微扰, 对能级和波函数进行了修正. 本文的原子态波函数和能级采用全相对论原子结构计算程序包 GRASP2 K [25] 得到.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 辐射复合

利用 GRASP2 K 程序以及本小组开发的处理裸核离子 RR 过程的计算程序, 计算了  $\text{Xe}^{54+}$  离子俘获一个动能为 108.118 keV 自由电子到  $nl$  ( $n = 1, 2, 3, 4, 5; l = s, p, d$ ) 轨道上的辐射复合截面及相应的光子能量, 计算结果列于表 1. 根据能量守恒, 辐射复合过程释放的光子能量等于自由电子的动能加上初、末离子态本征能量之差. 在实际计算中, 我们选取了电子动能为 108.118 keV 的能量点, 这是因为该动能下的自由电子运动速度与 197 MeV/u 的炮弹离子运动速度等价. 从表 1 中可以看出, 随着俘获轨道主量子数和轨道量子数的增加, 俘获截面减小, 俘获到 1 s 轨道上的截面占总俘获截面的 78.5%.

表 1  $\text{Xe}^{54+}$  俘获电子到  $nl$  轨道的辐射复合截面和相应 RR 光子能量 ( $a[-b]$  表示  $a \times 10^{-b}$ )

Table 1. Radiative recombination cross sections and the corresponding emitted photon energies of  $\text{Xe}^{54+}$  ( $a[-b]$  express  $a \times 10^{-b}$ ).

轨道	能量/keV	截面/cm <sup>2</sup>	轨道	能量/keV	截面/cm <sup>2</sup>	轨道	能量/keV	截面/cm <sup>2</sup>
1s	149.470	6.93[-24]	3d <sub>3/2</sub>	112.584	9.38[-28]	5s	109.750	5.90[-26]
2s	118.562	1.04[-24]	3d <sub>5/2</sub>	112.545	6.98[-28]	5p <sub>1/2</sub>	109.750	1.93[-26]
2p <sub>1/2</sub>	118.562	1.37[-25]	4s	110.681	1.06[-25]	5p <sub>3/2</sub>	109.723	1.47[-26]
2p <sub>3/2</sub>	118.135	8.77[-26]	4p <sub>1/2</sub>	110.681	1.86[-26]	5d <sub>3/2</sub>	109.723	1.15[-27]
3s	112.711	3.18[-25]	4p <sub>3/2</sub>	110.628	1.13[-26]	5d <sub>5/2</sub>	109.714	1.38[-27]
3p <sub>1/2</sub>	112.711	4.90[-26]	4d <sub>3/2</sub>	110.628	1.61[-27]			
3p <sub>3/2</sub>	112.584	3.23[-26]	4d <sub>5/2</sub>	110.611	1.73[-27]			

#### 3.2 辐射电子俘获

束缚电子与具有单一动量的自由电子不同, 它们具有一定的动量分布. 因此, 与 RR 截面的离散线状谱不同, REC 谱具有轮廓结构, 它可以通过 (1) 式计算得到, 本文的康普顿轮廓来自于 Biggs [26] 的计算结果. 图 1 给出了  $\text{Xe}^{54+}$  离子与 Xe 原子在 197 MeV/u 能量碰撞下, Xe 原子各轨道电子被俘获到

$\text{Xe}^{54+}$  离子 K 壳层的 REC 截面. 从图中可以看出, Xe 原子不同轨道上的电子对总 K-REC 截面的贡献是不同的. 外壳层电子的束缚弱, 康普顿轮廓呈瘦高状, 而内壳层轨道的电子束缚紧, 康普顿轮廓成扁平状, 从而外壳层电子被俘获的概率较大, 内壳层电子被俘获的概率相对较小.

图 2 给出了所有靶电子被俘获到炮弹离子的所有轨道的 REC 光谱. 作为比较, 同时给出了来自

自由电子的RR辐射谱. 从图中可以看出, 来自Xe原子中的束缚电子导致REC谱具有一定的轮廓结构. 由于靶原子上的电子动量分布相对于炮弹的入射方向近似的对称分布的, 导致了与RR谱线相应的REC谱也具有左右对称的轮廓结构. 除K-REC谱峰外, L-REC, O-REC, N-REC和M-REC等谱峰重叠在一起. 由于目前实验谱仪的观测波段所限, 这些REC光谱没有在实验上观测到.

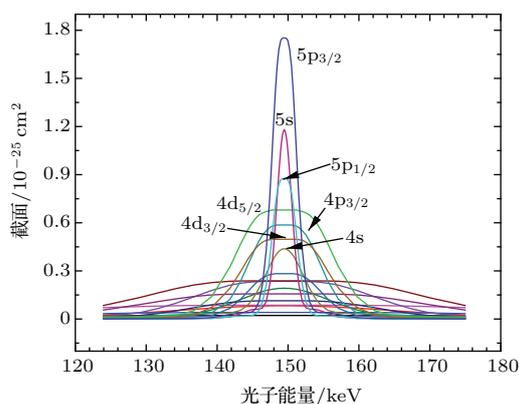


图1 Xe<sup>54+</sup>与Xe原子在197 MeV/u碰撞能量下, Xe各轨道电子被俘获到Xe<sup>54+</sup> K壳层的REC截面

Fig. 1. Radiative electron capture cross sections to K-shell of Xe<sup>54+</sup> in collision of Xe<sup>54+</sup> and Xe in 197 MeV/u.

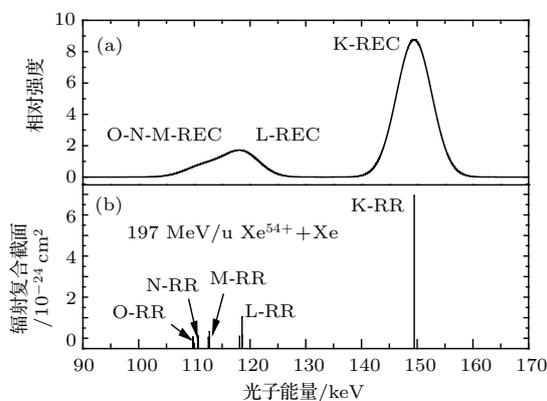


图2 Xe<sup>54+</sup>与Xe原子在197 MeV/u碰撞下的REC光谱 (a) REC辐射谱; (b) RR辐射谱

Fig. 2. REC spectra in collision of Xe<sup>54+</sup> and Xe in 197 MeV/u: (a) REC radiative spectra; (b) RR radiative spectra.

### 3.3 退激发X射线谱

通过REC过程, 那些被俘获到炮弹离子的激发态上的电子是不稳定的, 它们会进一步通过退激发辐射方式达到稳定状态, 同时放出X射线. 本文采用多组态Dirac-Fock理论方法, 具体计算了Xe<sup>53+</sup>激发态 $np$  ( $n = 2-5$ )退激到基态的辐射跃

迁能量和跃迁概率, 结果在图3 (a)中给出. 考虑到实验测量的分辨率, 对图3 (a)按照FWHM = 290 eV进行高斯展宽, 得到图3 (b). 为了与实验测量的辐射退激发X谱线谱进行比较, 需要进一步考虑第一步的俘获过程. 为此, 我们结合前面计算的REC截面, 得到了Xe<sup>54+</sup>离子与Xe原子在197 MeV/u碰撞能量下, Xe<sup>53+</sup>离子退激发辐射X射线谱, 即图3 (c). 作为比较, 图3 (d)给出了在相应条件下的实验观测谱. 从图中可以看出, 本文理论模拟谱与实验测量谱位置和强度均符合的较好. 但这里需要特别指出的是, 高离化态离子与靶原子的高能碰撞, 除了通过REC过程从靶中俘获电子外, 还有可能通过非辐射(NRC)过程俘获电子, 该过程也会对辐射上能级的布居及其退激发谱线的相对强度产生影响. 为此, 我们分析了REC与NRC过程在本文所研究条件下的相对贡献情况. 若NRC在此过程中占主导作用, 则根据文献[8]给出的NRC到 $2p_{1/2}$ 和 $2p_{3/2}$ 壳层的截面之比为1:2, 由这个比例得到的 $2p_{1/2}$ 和 $2p_{3/2}$ 退激发谱的强度比为0.53:1, 与实验测量出来的结果1.47:1相差很大; 若REC在此过程占主导作用, 则 $2p_{1/2}$ 和 $2p_{3/2}$ 退激发谱的强度比例为1.63:1, 该比例与实验测量值非常接近, 即本文模拟的理论谱. 由此, 我们可以得出结论,

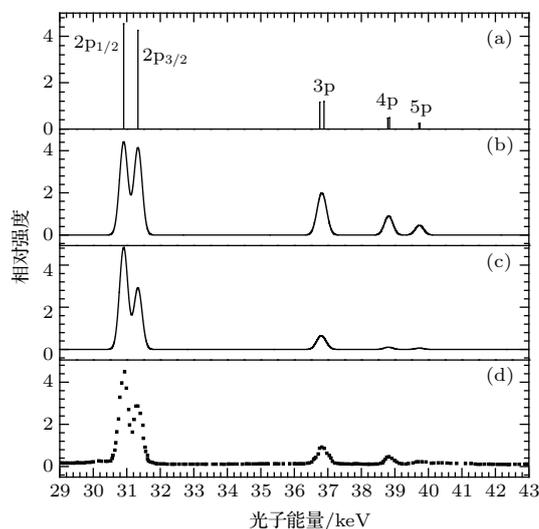


图3 Xe<sup>53+</sup>退激发光谱的理论计算结果与实验的比较 (a) Xe<sup>53+</sup>离子退激发的理论计算结果; (b) 按照半高全宽为290 eV对(a)图进行高斯展宽; (c) 考虑第一步俘获过程之后的退激发辐射光谱; (d) 实验观测谱

Fig. 3. Comparison between theoretical and experimental spectra of radiative decay of Xe<sup>53+</sup>: (a) theoretical results; (b) with the experimental FWHM of 290 eV; (c) considered the populations from the capture process; (d) experimental spectra.

在本文的碰撞条件下, REC 占主导地位. 这一推论与文献 [27] 的结论也是一致的, 即对于高离化态、少电子炮弹离子与中性靶原子的高能碰撞中, REC 过程占主导地位, 而 NRC 过程可以忽略. 当然, 我们看到, 当仅考虑 REC 过程时, 计算得到的  $2p_{1/2}$  和  $2p_{3/2}$  退激发谱强度之比仍然比实验测量的结果稍大, 这一差别很有可能来源于更高激发态对  $2p_{1/2}$  和  $2p_{3/2}$  壳层的级联效应的贡献. 按照文献 [28] 关于级联效应的详细研究结果, 级联效应会导致  $2p_{1/2}$  和  $2p_{3/2}$  退激发谱强度之比减小.

## 4 结 论

本文利用 MCDF 理论方法和冲量近似, 研究了  $Xe^{54+}$  离子与 Xe 原子碰撞 REC 过程, 以及炮弹离子俘获电子之后的退激发辐射过程. 首先, 计算了  $Xe^{54+}$  离子俘获单电子的 RR 辐射谱及相应的 REC 辐射谱. 由于目前实验测量谱仪测量波段的限制, 没有观察到 REC 谱, 本文给出的 REC 谱可以为进一步的实验观测提供参考. 通过 Xe 靶原子各壳层电子康普顿轮廓的分析发现, 在  $Xe^{54+}$  离子与 Xe 原子碰撞的 REC 过程中, 靶的外壳层电子束缚弱, 对 REC 的贡献大, 内壳层电子束缚强, 对 REC 的贡献小; 通过对 REC 光谱分析发现, 电子被俘获到炮弹离子  $K$  壳层的截面最大, 到其他壳层的截面随着壳层主量子数的增大而迅速减小. 此外, 进一步计算了炮弹离子俘获末态  $Xe^{53+}(nl)$  辐射退激发跃迁的能量和跃迁概率, 并结合第一步 REC 的计算结果, 给出了理论模拟的辐射退激发 X 射线谱, 理论模拟的结果与最新的实验测量在谱线位置和强度上均符合得很好.

## 参考文献

- [1] Koziol K 2014 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **149** 138
- [2] Eichler J 1990 *Phys. Rep.* **193** 165
- [3] Vane C R, Datz S, Dittner P F, Giese J, Jones N L, Krause H F, Rosseel T M, Peterson R S 1994 *Phys. Rev. A* **49** 1847
- [4] Raisbeck G, Yiou F 1971 *Phys. Rev. A* **4** 1858
- [5] Schnopper H W, Betz Hans D, Delvaile J P, Kalata K, Sohval A R, Jones K W, Wegner H E 1972 *Phys. Rev. Lett.* **29** 898
- [6] Surzhykov A, Jentschura U D, Stöhlker T, Fritzsche S 2006 *Phys. Rev. A* **73** 032716
- [7] Fritzsche S, Surzhykov A, Stöhlker T 2005 *Phys. Rev. A* **72** 012704
- [8] Ma X, Stöhlker T, Bosch F, Brinzaescu O, Fritzsche S, Kozhuharov C, Ludziejewski T, Mokler P H, Stachura Z, Warczak A 2001 *Phys. Rev. A* **64** 012704
- [9] Eichler J, Stöhlker T 2007 *Phys. Rep.* **439** 1
- [10] Anholt R, Andriamonje S A, Morenzoni E, Stoller C, Monlitoris J D, Meyerhof W E, Bowman H, Xu J S, Xu Z Z, Rasmussen J O, Hoffmann D H H 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 234
- [11] Stöhlker T, Kozhuharov C, Mokler P H, Warczak A, Bosch F, Geissel H, Moshhammer R, Scheidenberger C, Eichler J, Ichihara A, Shirai T, Stachura Z, Rymuza P 1995 *Phys. Rev. A* **51** 2098
- [12] Rzakiewicz J, Stöhlker T, Bana D, Beyer H F, Bosch F, Brandau C, Dong C Z, Fritzsche S, Gojska A, Gumberidze A, Hagmann S, Ionescu D C, Kozhuharov C, Nandi T, Reuschl R, Sierpowski D, Spillmann U, Surzhykov A, Tashenov S, Trassinelli M, Trotsenko S 2006 *Phys. Rev. A* **74** 012511
- [13] Wan J J, Dong C Z, Ding X B, Ma X W, Rzakiewicz J, Stöhlker T, Fritzsche S 2009 *Phys. Rev. A* **79** 022707
- [14] Yu D Y, Xue Y L, Shao C J, Song Z Y, Lu R C, Ruan F F, Wang W, Chen J, Yang B, Yang Z H, Wan J J, Dong C Z, Cai X H 2011 *Nucl. Instr. Meth. B* **269** 692
- [15] Fritzsche S 2002 *Phys. Scripta* **T110** 37
- [16] Brandt D 1983 *Phys. Rev. A* **27** 1314
- [17] Dong C Z, Fu Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 108 (in Chinese) [董晨钟, 符彦飙 2006 物理学报 **55** 108]
- [18] Ichihara A, Shirai T, Eichler J 1994 *Phys. Rev. A* **49** 1875
- [19] Lee J S 1977 *J. Chem. Phys.* **66** 4906
- [20] Koga T, Mastsuyama H 1992 *Phys. Rev. A* **45** 5266
- [21] Ma X W, Stöhlker T, Beyer H F, Bosch F, Brinzaescu O, Kozhuharov C, Mokler P H, Ludziejewski T, Stachura Z, Warczak A 2002 *Nucl. Phys. Rev.* **19** 131
- [22] Sang C C, Wan J J, Dong C Z, Ding X B, Jiang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2152 (in Chinese) [桑萃萃, 万建杰, 董晨钟, 丁晓彬, 蒋军 2008 物理学报 **57** 2152]
- [23] Grant I P 1974 *J. Phys. B* **7** 1458
- [24] Dyal K G, Grant I P, Johnson C T, Parpia F A, Plummer E P 1989 *Comp. Phys. Commun.* **55** 425
- [25] Jönsson P, He X, Fischer C F 2007 *Comput. Phys. Commun.* **177** 597
- [26] Biggs F, Mendelsohn L B, Mann J B 1975 *At. Data And Nucl. Data Tables* **16** 201
- [27] Tolstikhina I Y, Shevelko V P 2013 *Phys. Usp.* **56**(3) 213
- [28] Wang Y J, Wan J J, Ding X B, Dong C Z, Ma X W, Wang J G, Wu Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2358 (in Chinese) [王永军, 万建杰, 丁晓彬, 董晨钟, 马新文, 王建国, 吴勇 2009 物理学报 **58** 2358]

# Theoretical study on radiative electron capture and subsequent radiative decay in collision of $\text{Xe}^{54+}$ with $\text{Xe}^*$

Liang Teng<sup>1)</sup> Ma Kun<sup>1)</sup> Chen Xi<sup>1)</sup> Xie Lu-You<sup>1)†</sup> Dong Chen-Zhong<sup>1)‡</sup> Shao Cao-Jie<sup>2)</sup>  
Yu De-Yang<sup>2)</sup> Cai Xiao-Hong<sup>2)</sup>

1) (*Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics & Functional Materials of Gansu Province, College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*)

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

( Received 22 January 2015; revised manuscript received 24 March 2015 )

## Abstract

Based on the multiconfiguration Dirac-Fock method and impulse approximation, the electron capture and following radiation decay of the projectile ion are studied theoretically for Xe atom which is bombarded by  $\text{Xe}^{54+}$  ion at 197 MeV/u. The radiative electron capture (REC) cross-sections and the corresponding emitted photon energies have been calculated in detail. Meanwhile, the probabilities of the radiative decay and energies of the REC final states are also calculated; combined with the calculated results in this paper, the X-ray spectra structure of radiative decay from projectile ion is further simulated. It is found that the simulated spectra are in good agreement with the newly measured results at Lanzhou Heavy-Ion Accelerator Device.

**Keywords:** atom collision, radiative electron capture, radiative decay

**PACS:** 34.70.+e, 32.30.-r, 32.70.Fw

**DOI:** 10.7498/aps.64.153401

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274254, U1332206, U1331122).

† Corresponding author. E-mail: [dongcz@nwnu.edu.cn](mailto:dongcz@nwnu.edu.cn)

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