

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.02.021

S^{4+} 离子 $3s^2-3s3p$ 和 S^{5+} 离子 $3s-3p$ 电子碰撞激发截面

张春, 杨宁选, 范婷, 王锐, 孙茂珠

(石河子大学理学院物理系, 石河子 832000)

摘要: 利用全相对论扭曲波电子碰撞激发计算程序 REIE06, 系统计算了阈值附近不同入射电子能量下 S^{4+} 离子基态 $3s^2 1S_0$ 到激发态 $3s3p \ ^3P_{0,1,2} \ ^1P_1$ 和 S^{5+} 离子基态 $3s \ ^2S_{1/2}$ 到激发态 $3p \ ^2P_{1/2} \ ^2P_{2/3}$ 精细结构能级的碰撞截面, 在两种关联模型下, 分析了组态相互作用对碰撞截面的影响. 目前的计算结果与 Wallbank 实验值^[14] 相比, 得到很好的一致性.

关键词: 电子碰撞激发; 关联模型; 组态相互作用

中图分类号: O562.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)02-0307-06

Theoretical study on cross sections for electron impact excitation of S^{4+} ($3s^2-3s3p$) and S^{5+} ($3s-3p$)

ZHANG Chun, YANG Ning-Xuan, FAN Ting, WANG Rui, SUN Mao-Zhu

(Department of Physics, College of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: The electron impact excitation (EIE) cross sections of S^{4+} ion from the ground state $3s^2 1S_0$ to all of excited states $3s3p \ ^3P_{0,1,2} \ ^1P_1$, and S^{5+} ion from the ground state $3s \ ^2S_{1/2}$ to all of excited states $3p \ ^2P_{1/2} \ ^2P_{2/3}$ are calculated for energies of the near-threshold by using the fully relativistic distorted-wave program REIE06. The electron correlation effects for EIE cross sections are studied, and some important conclusions are summarized. An agreement is found when the present calculated results are consistent with the experimental values given by Wallbank *et al*^[14].

Keywords: Electron impact excitation; Correlation model; Configuration interaction effects

1 引言

电子与原子(离子)的非弹性碰撞激发是原子物理学中的基本物理过程,也是研究原子内部结构和性质的重要手段和方法之一^[1-18]. 电子与原子(离子)的碰撞最初被人们关注主要来自天体物理研究的需要^[11-18]. 在天体物理学中,通常人们观测到的许多光谱线,都是由于电子碰撞激发带正电的离子产生. 通过对这些谱线强度比的分析,可以确

定天体等离子体中电子的温度和密度;比如,人们利用类氦离子的 X 射线及其近邻离子的伴线分析了太阳等离子体的电子温度;利用一些禁戒跃迁谱线的强度比诊断宇宙光源产生的等离子体的电子密度. 近年来,随着现代太空观测技术的提高(比如哈勃太空望远镜、SOHO 太空探测器、美国航天局 Chandra 以及欧洲航天局 XMM-Newton X 射线太空望远镜的使用^[11-13]),人们已经获得了巨量的、高精度的天体光谱数据,而对这些光谱的分析急切

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 石河子大学科研计划项目(ZZZC201614)

作者简介: 张春(1981-), 男, 河北唐山人, 硕士, 从事凝聚态介观物理运输研究. E-mail: 361262008@QQ.com

通讯作者: 杨宁选. yangnx_1981@163.com

需要原子物理学界提供大量的高精度的高电荷态离子能级结构、光学振子强度以及电子碰撞激发强度、截面和速率系数等方面的参数。

电子与原子(离子)的碰撞激发过程也是各种高温天体和实验室等离子体中最重要的碰撞动力学过程. 等离子体中普遍存在着大量的电子、原子和各种电荷态的正离子以及分子, 由于电子的质量小, 其速度往往远大于其他粒子的速度. 因此, 自由电子与其它粒子的碰撞是等离子体中最普遍的原子过程, 其对于等离子体内部能量的传递和输运、离子电荷态的分布以及等离子体中光谱的形成都具有重要的影响^[8-10]. 由于等离子体中的碰撞动力学过程通常由电子和正离子及其相互作用所支配, 因此这些相互作用的详细信息对于模拟和诊断等离子体状态是至关重要的, 特别感兴趣的是电子与类钠离子和类镁离子的相互作用产生的辐射谱线常被用作等离子体参数的光谱分析^[14-18]. 由于类钠 S^{5+} 离子和类镁 S^{4+} 离子在 Io torus 和 AG 天龙星座的星云天体等离子体中发现, Wallbank 等人^[14]使用并合电子离子束能损实验技术首次测量了 S^{4+} 离子 $3s^{21}S \rightarrow 3s3p^1P$ 和 S^{5+} 离子 $3s^2S \rightarrow 3p^2P$ 阈值附近的碰撞激发截面. 其实验结果与 Kai 等人^[15]、Dufton 等人^[16,18] 和 Hundson 等人^[17] 用密耦合 R-matrix 方法计算值进行了比较, 但实验和理论之间有明显差异.

本文利用基于相对论多组态 Dirac-Fock (MCDF) 理论方法^[19,20] 发展的研究电子-原子(离子)碰撞过程的相对论扭曲波 REIE06 程序包^[21], 在考虑相对论效应、电子的关联效应、Breit 相互作用和高分波的贡献对碰撞强度的影响下, 系统计算了 S^{4+} 离子基态 $3s^{21}S_0$ 到激发态 $3s3p^3P_{0,1,2}^1P_1$ 精细结构能级和 S^{5+} 离子基态 $3s^2S_{1/2}$ 到激发态 $3p^2P_{1/2}^2P_{2/3}$ 精细结构能级的碰撞截面. 在两种关联模型下, 分析了碰撞截面随入射电子能量的变化; 讨论了组态相互作用对碰撞截面的影响; 并与 Wallbank 等人^[14] 的实验进行了比较.

2 理论方法

具有一定能量 ϵ (Ry) 的自由电子与靶离子碰撞, 使其从初态 i 激发到末态 f 的碰撞激发截面^[21] 为

$$Q_{if}(\epsilon) = \frac{\pi a_0^2}{k_i^2 g_i} \Omega_{if}(\epsilon) \quad (1)$$

其中, a_0 为玻尔半径; k_i 为入射电子的相对论波

数; g_i 为靶离子初态的统计权重; $\Omega_{if}(\epsilon)$ 为碰撞激发强度. 入射电子的相对论波数 k_i 与能量 ϵ 的关系为

$$k_i^2 = \epsilon \left[1 + \frac{\alpha^2}{4} \epsilon \right] \quad (2)$$

碰撞激发强度^[21] 可以表示为,

$$\Omega_{if}(\epsilon) = 8 \sum_J (2J+1) \sum_{\kappa, \kappa'} \left| \langle \gamma_i J_i, \epsilon, \kappa; i; J | J | \sum_{q, p; p < q}^{N+1} \left(\frac{1}{r_{qp}} + V_{\text{Breit}} \right) | \gamma_f J_f, \epsilon, \kappa; f; J \rangle \right|^2 \quad (3)$$

式中, J 为碰撞体系(电子+靶离子)的总角动量子数; κ 和 κ' 为入射和散射电子的相对论量子数. $|\gamma_i J_i, \epsilon, \kappa; i; J\rangle$ 、 $|\gamma_f J_f, \epsilon, \kappa; f; J\rangle$ 分别为碰撞体系初、末态的波函数.

为了考虑电子的交换, 碰撞体系初、末态的波函数采用了靶离子与连续电子波函数乘积构成的反对称化的耦合波函数^[21]

$$|\gamma_i J_i, \epsilon, \kappa; J\rangle = \frac{1}{(N+1)^{\frac{1}{2}}} \sum_{p=1}^{N+1} (-1)^{N+1-p} \sum_{M_i, m} C(J_i J_i M_i m; JM) |\alpha(P_i J_i M_i)\rangle |\epsilon \kappa m\rangle \quad (4)$$

其中, $C(J_i J_i M_i m; JM)$ 是 CG 系数; $|\alpha(P_i J_i M_i)\rangle$ 为靶离子的波函数; t 代表靶离子 ($t=i$ 为初态, $t=f$ 为末态); $|\epsilon \kappa m\rangle$ 为连续电子的波函数.

目前理论中, 靶离子的波函数采用了多组态 Dirac-Fock 理论方法的波函数^[19-21]. 其中, 任意一个原子态的波函数 $|\alpha(P_i J_i M_i)\rangle$ 由具有相同宇称 P 、总角动量 J 和总角动量磁分量 M 的组态波函数线性组合而成, 即

$$|\alpha(PJM)\rangle = \sum_{r=1}^{n_c} C_r(\alpha) |\Gamma_r(PJM)\rangle \quad (5)$$

式中, n_c 为组态波函数的个数; $C_r(\alpha)$ 为组态混合系数; $|\Gamma_r(P_i J_i M_i)\rangle$ 为组态波函数, 其由单电子的 Dirac 自旋轨道波函数构成的 N 阶 Slater 行列式线性组合而成. 具体计算中, 通过活动空间方法系统地扩大 n_c 以细致考虑电子关联效应, 以及作为微扰考虑 Breit 相互作用、QED 效应等对波函数的修正^[22]. 单电子的自旋轨道波函数、组态波函数以及靶离子原子态的波函数可以用国际上广泛使用的计算原子结构的程序包 Grasp92^[19] 得到.

在相对论框架下, 连续电子的波函数采用了类似于束缚电子的相对论 Dirac 自旋轨道波函数^[23,24], 可表示为

$$u_{\epsilon \kappa m} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} P_{\epsilon \kappa}(r) \chi_{\kappa m}(\theta, \varphi) \\ i Q_{\epsilon \kappa}(r) \chi_{-\kappa m}(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, ϵ 为连续电子的动能; κ 为相对论量子数, 对

应于 $l=j \pm 1/2, k = \pm(j+1/2); m$ 为磁量子数; $\chi_{lm}(\theta, \varphi)$ 为自旋球谐函数; $P_{nk}(r)$ 和 $Q_{nk}(r)$ 分别为径向波函数的大小分量, 其满足耦合的 Dirac 方程^[25, 26],

$$\left(\frac{d}{dr} + \frac{k}{r}\right)P_{ek}(r) - \left(2c - \frac{\epsilon}{c} + \frac{Y(r)}{cr}\right)Q_{ek}(r) = -\frac{\chi^{(P)}(r)}{r}$$

$$\left(\frac{d}{dr} - \frac{k}{r}\right)Q_{ek}(r) + \left(-\frac{\epsilon}{c} + \frac{Y(r)}{cr}\right)P_{ek}(r) = \frac{\chi^{(Q)}(r)}{r} \quad (7)$$

耦合 Dirac 方程的求解采用了相似于处理束缚电子态的自洽迭代的方法. 计算中细致考虑了连续电子与束缚电子间的直接效应和交换效应^[26, 27], 而连续电子波函数的归一化采用了 WKB 近似方法^[28].

Breit 相互作用对碰撞强度(或截面)的影响, 可以通过散射矩阵元的计算中包括 Breit 算符予以考虑. (6)式中 V_{Breit} 是 Breit 算符^[22, 27], 表示为

$$V_{\text{Breit}} = -2(\vec{\alpha}_1 \cdot \vec{\alpha}_2) \frac{\exp(i\omega r_{12})}{r_{12}} + 2(\vec{\alpha}_1 \cdot \nabla_1)(\vec{\alpha}_2 \cdot \nabla_2) \frac{\exp(i\omega r_{12}) - 1}{\omega^2 r_{12}} \quad (8)$$

式中, r_{12} 是两电子间距; $\vec{\alpha}_1$ 和 $\vec{\alpha}_2$ 是 Dirac 矩阵; ω 是交换两电子间虚光子的波数.

3 结果与讨论

采用全相对论 MCDF 理论的程序 Grasp92^[19] 计算靶离子的波函数, 选用扩展平均能级模型(EAL)进行计算. 为了讨论电子关联效应影响, 在目前 S^{4+} 和 S^{5+} 靶离子态的波函数以及电子碰撞激发截面的计算中, 采用两种关联模型来描述靶态.

3.1 S^{4+} 离子 $3s^2-3s3p$ 的电子碰撞激发

S^{4+} 离子的基组态为 $2s^2 2p^6 3s^2$, 模型 A 包括了 $2s^2 2p^6 3s^2$ 和 $2s^2 2p^6 3s3p$ 组态间的关联, 模型 B 包括了 $2s^2 2p^6 3s^2, 2s^2 2p^6 3s3p, 2s^2 2p^6 3s3d, 2s^2 2p^6 3s4s, 2s^2 2p^6 3s4p, 2s^2 2p^6 3s4d, 2s^2 2p^6 3s4f, 2s^2 2p^6 3p^2, 2s^2 2p^6 3p3d, 2s^2 2p^6 3p4s, 2s^2 2p^6 3p4p, 2s^2 2p^6 3p4d$ 和 $2s^2 2p^6 3p4f$ 组态间的关联. 为了确保激发截面的收敛, 在电子碰撞激发截面的计算中采用的最大分波数为 $|\kappa|=40$.

S^{4+} 离子能级的计算精度, 在一定程度上反映了波函数的计算精度, 而且影响碰撞激发截面的计算精度. 目前用模型 A 计算的 $2s^2 2p^6 3s^2 1S_0$ 到 $2s^2$

$2p^6 3s3p 1P_1$ 的激发能是 16.220 eV, 模型 B 计算的激发能是 15.938 eV. NIST 的数据^[29] 为 15.765 eV; Kai 等人^[15] 和 Dufton 等人^[16] 的理论计算结果分别为 15.85 和 15.91 eV. 可以看出目前用模型 B 计算出的结果与 NIST 实验数据的相对误差为 1.12%, 与其他理论结果的最大相对误差为 0.55%.

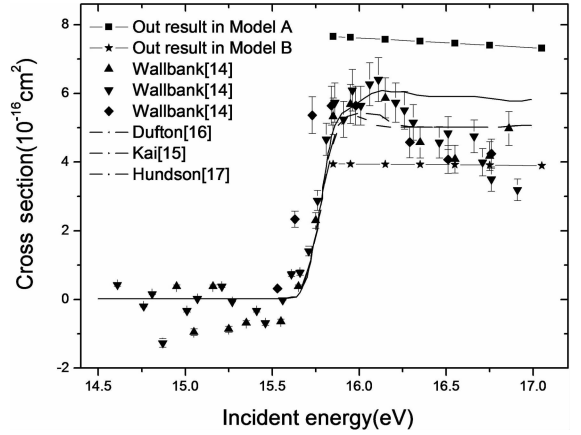


图 1 S^{4+} 离子 $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p 1P$ 碰撞激发截面的比较
Fig. 1 EIE cross sections of the $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p 1P$ for the S^{4+} ion

图 1 展示了 S^{4+} 离子基态 $2s^2 2p^6 3s^2 1S_0$ 到 $2s^2 2p^6 3s3p 1P_1$ 激发态碰撞激发截面随入射电子能量变化, 并与 Wallbank 等人^[14] 利用 Merged Electron-ion Beams Energy-loss (MEIBEL) 实验技术得到的实验结果和 Dufton 等人^[16] 利用 8-state Close-coupling R-matrix (CCR)、Kai 等人^[15] 利用 31-state CCR 及 Hundson 等人^[17] 利用 14-state CCR 理论计算计算的碰撞激发截面进行比较. 从图中可以看出, 激发阈附近, 在 16.15 eV 处, 出现了间接共振激发过程双电子共振峰. 目前理论结果只是给出直接的碰撞激发截面, 随着入射电子能量的增大, 目前用模型 B 计算的结果与 Wallbank 等人的实验数据符合得非常好, Dufton 等人、Kai 等人 和 Hundson 等人利用 CCR 计算的结果在共振峰处与 Wallbank 等人的实验数据符合得较好, 但是随着入射电子能量的增加, CCR 理论结果与实验数据差别逐渐变大.

图 2 展示了 S^{4+} 离子基态 $2s^2 2p^6 3s^2 1S_0$ 到激发态 $2s^2 2p^6 3s3p 3P_{0,1,2}$ 和 $1P_1$ 精细结构能级碰撞激发截面随入射电子能量变化. 从图 2 可看出, 在相同入射电子能量下, $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p 1P$ 的碰撞激发截面比 $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p 3P$ 的碰撞激发截面大 1~2 个数量级. 对于 $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p 3P$ 碰撞激发, 在相同入

射电子能量下, $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P_2$ 的碰撞激发截面最大; $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P_0$ 的碰撞激发截面最小. $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P$ 谱项能级之间的碰撞激发截面主要贡献来自于 $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P_2$ 的碰撞激发截面. 从图 2 还可看出, $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P$ 和 $1P$ 谱项能级的碰撞激发截面随入射电子能量的增大而缓慢减小.

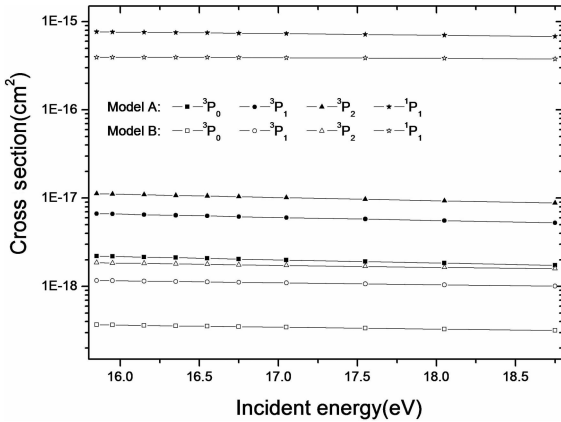


图 2 S^{4+} 离子 $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P_{0,1,2}$ 和 $1P_1$ 碰撞激发截面

Fig. 2 EIE cross sections of the $3s^2 1S_0 \rightarrow 3s3p^3 P_{0,1,2}$ and $1P_1$ for the S^{4+} ion

3.2 S^{5+} 离子 $3s-3p$ 的电子碰撞激发

S^{5+} 离子的基组态为 $2s^2 2p^6 3s$, 模型 A 包括了 $2s^2 2p^6 3s$ 和 $2s^2 2p^6 3p$ 组态间的关联, 模型 B 包括了 $2s^2 2p^6 3s, 2s^2 2p^6 3p, 2s^2 2p^6 3d, 2s^2 2p^6 4s, 2s^2 2p^6 4p, 2s^2 2p^6 4d$ 和 $2s^2 2p^6 4f$ 组态间的关联. 为了确保激发截面的收敛, 在电子碰撞激发截面的计算中我们采用的最大分波数为 $|\kappa| = 40$.

S^{5+} 离子能级的计算精度, 目前用模型 A 计算的 $2s^2 2p^6 3s^2 S_{1/2}$ 到 $2s^2 2p^6 3p^2 P_{1/2}$ 和 $2P_{3/2}$ 的激发能是分别是 13.097 和 13.252 eV; 模型 B 计算的激发能是 13.096 和 13.249 eV; NIST 的数据^[29] 为 13.126 和 13.283 eV. 可以看出目前计算与 NIST 的结果的最大相对误差不超过 0.5%.

图 3 展示了 S^{5+} 离子的基组态为 $2p^6 3s^2 S$ 到 $2p^6 3p^2 P$ 谱项能级 $2p^6 3s^1 S \rightarrow 2p^6 3p^2 P$ 碰撞激发截面随入射电子能量变化, 并与 Wallbank 等人^[14] 的实验结果及 Dufton 等人^[18] 理论计算的碰撞激发截面进行比较. 从图 3 可以看出, 在激发阈值能量附近, 目前用模型 A 和模型 B 计算的结果相差不大, 且都与 Dufton 等人的理论计算符合得非常好. Wallbank 等人利用 MEIBEL 实验技术测量的实验结果表明, 在 13.7 eV 附近出现明显间接共振激发过程双电子共振峰. 目前理论计算只是给出了

激发阈附近直接的碰撞激发截面. Dufton 等人利用 5-state CCR 理论计算的结果, 在共振峰处与 Wallbank 等人的实验数据也相差甚远.

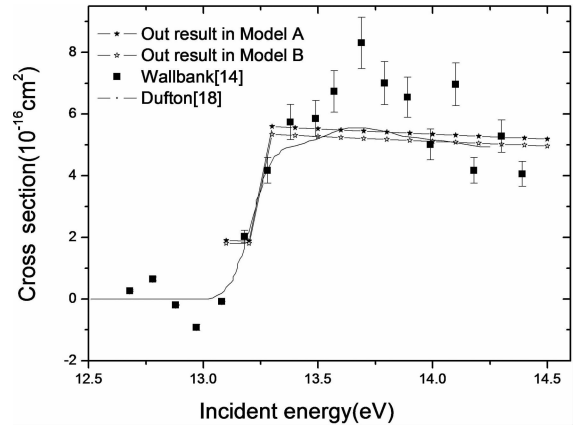


图 3 S^{5+} 离子 $3s^2 S \rightarrow 3p^2 P$ 碰撞激发截面的比较
Fig. 3 Comparison of EIE cross sections in the $3s^2 S \rightarrow 3p^2 P$ for S^{5+} ion

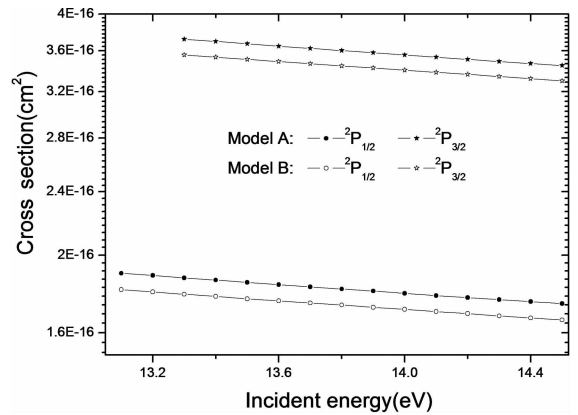


图 4 S^{5+} 离子 $3s^2 S_{1/2} \rightarrow 3p^2 P_{1/2}$ 和 $2P_{3/2}$ 碰撞激发截面

Fig. 4 EIE cross sections in the $3s^2 S_{1/2} \rightarrow 3p^2 P_{1/2}$ and $2P_{3/2}$ for S^{5+} ion

图 4 给出了 S^{5+} 离子 $2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 2p^6 3p^2 P_{1/2}$ 和 $2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 2p^6 3p^2 P_{3/2}$ 碰撞激发截面随入射电子能量变化. 从图 4 可以看出, 目前用模型 A 和模型 B 计算的结果相差不大, 且随着入射电子能量的增加, 电子碰撞激发截面都在缓慢的减小. 在相同入射电子能量下, $2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 2p^6 3p^2 P_{3/2}$ 的碰撞激发截面要比 $2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 2p^6 3p^2 P_{1/2}$ 碰撞激发截面大 1 倍左右. 因此, $2p^6 3s^1 S_{1/2} \rightarrow 2p^6 3p^2 P$ 谱项能级之间的碰撞激发截面主要贡献来自于 $2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 2p^6 3p^2 P_{3/2}$ 的碰撞激发.

4 结论

本文利用 MCDF 理论方法和基于全相对论扭

曲波方法研究电子-离子碰撞激发过程的计算程序, 在系统地考虑电子的关联效应基础上, 详细地计算了 S^{4+} 离子 $3s^2\ ^1S_0 \rightarrow 3s3p\ ^3P_{0,1,2}$ 和 1P_1 的电子碰撞激发截面, 以及 S^{5+} 离子 $2p^6\ 3s\ ^2S_{1/2} \rightarrow 2p^6\ 3p\ ^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 的电子碰撞激发截面; 研究了电子关联效应对碰撞激发截面的影响; 分析了碰撞激发截面随入射电子能量变化. 希望以上的研究能解决实验和理论之间的分歧.

参考文献:

- [1] Smith S J, Chutjian A, Mitroy J, *et al.* Excitation cross sections for the $ns\ ^2S \rightarrow np\ ^2P$ resonance transitions in Mg^+ ($n=3$) and Zn^+ ($n=4$) using electron-energy-loss and merged-beams methods [J]. *Phys Rev A*, 1993, 48: 292.
- [2] Bannister M E, Krause H F, Djuric, *et al.* Merged-beam measurements of electron-impact excitation of Al^{2+} ($3s\ ^2S \rightarrow 3p\ ^2P$) [J]. *Phys Rev A*, 2002, 66: 032707.
- [3] Wählin E K, Thompson J S, Dunn G H, *et al.* Electron-impact excitation of Si^{3+} ($3s \rightarrow 3p$) using a merged-beam electron-energy-loss technique [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 66: 157.
- [4] Djuric N, Bannister M E, Derkach A M, *et al.* Absolute cross sections for near-threshold electron-impact excitation of the dipole-allowed transitions $3s\ ^1S \rightarrow 3s3p\ ^1P$ in Cl^{5+} and $3s\ ^2S \rightarrow 3p\ ^2P$ in Cl^{6+} [J]. *Phys Rev A*, 2002, 65: 052711.
- [5] Guo X Q, Bell E W, Thompson J S, *et al.* Evidence for significant backscattering in near-threshold electron-impact excitation of Ar^{7+} ($3s \rightarrow 3p$) [J]. *Phys Rev A*, 1993, 47: R9.
- [6] Wallbank B, Djuric N, Voitke O, *et al.* Absolute cross sections for near-threshold electron-impact excitation of the $3s^2\ ^1S \rightarrow 3s3p\ ^1P$ and $3s^2\ ^1S \rightarrow 3s3p\ ^3P$ transitions in Si^{2+} [J]. *Phys Rev A*, 1997, 56: 3714.
- [7] Chung Y S, Djuric N, Wallbank B, *et al.* Resonance interference and absolute cross sections in near-threshold electron-impact excitation of the $3s^2\ t\ ^1S \rightarrow 3s3p\ t\ ^3P$ and $3s2t\ ^1S \rightarrow 3s3p\ t\ ^1P$ transitions in Ar^{6+} [J]. *Phys Rev A*, 1997, 55: 2044.
- [8] Silver E H, Kahn S M. UV and X-ray spectroscopy of laboratory and astrophysical plasmas [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [9] Delamere P A, Steffl A J, Bagenal F. Modeling temporal variability of plasma conditions in the Io torus during the Cassini era [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: A10216.
- [10] Young P R, Dupree A K, Espey B R. Far ultraviolet spectroscopic explorer observations of the symbiotic star AG draconis [J]. *Astrophys J*, 2005, 618: 891.
- [11] Reisenfeld D B, Gardner L D, Janzen P H, *et al.* Absolute cross section for Si^{2+} ($3s\ ^1S \rightarrow 3s3p\ ^1P$) electron-impact excitation [J]. *Phys Rev A*, 1999, 60: 1153.
- [12] Doron R, Behar E. The X-ray spectrum of Fe^{16+} revisited with a multi-ion model [J]. *Astrophys J*, 2002, 574: 518.
- [13] Bhatia A K, Saba J L R. Resonance scattering of Fe XVII X-ray and extreme-ultraviolet lines [J]. *Astrophys J*, 2001, 563: 434.
- [14] Wallbank B, Bannister M E, Krause H F, *et al.* Merged-beam measurements of absolute cross sections for electron-impact excitation of S^{4+} ($3s^2\ ^1S \rightarrow 3s3p\ ^1P$) and S^{5+} ($3s\ ^2S \rightarrow 3p\ ^2P$) [J]. *Phys Rev A*, 2007, 75: 052703.
- [15] Kai T, Srivastava R, Nakazaki S. Electron-impact excitation of the $3s3p\ ^1P^o$ state of Mg-like ions: S^{4+} , Ar^{6+} , and Ca^{8+} [J]. *Phys Rev A*, 2004, 70: 062705.
- [16] Dufton P L, Kingston A E. Electron impact collision rates for SV [J]. *J Phys B: At Mol Opt*, 1984, 17: 3321.
- [17] Hudson C E, Bell K L. Fine structure effective collision strengths for the electron impact excitation of SV [J]. *Astron Astrophys*, 2006, 452: 1113.
- [18] Dufton P L, Kingston A E. Electron impact collision rates for the sodium isoelectronic sequence [J]. *J Phys B: At Mol Opt*, 1987, 20: 3899.
- [19] Parpia F A, Fischer C F, Grant I P, *et al.* GRASP92: a package for large-scale relativistic atomic structure calculations [J]. *Comput Phys Commun*, 1996, 94: 249.
- [20] Fritzsche S. Ratip-a toolbox for studying the properties of open-shell atoms and ions [J]. *J Electron Spectrosc*, 2001, 114: 1155.
- [21] Jiang J, Dong C Z, Xie L Y, *et al.* Relativistic distorted-wave calculations of electron impact excitation cross sections of Be-Like C^{2+} ions [J]. *Chin Phy Lett*, 2007, 24: 691.
- [22] Dong C Z, Fritzsche S. Relativistic, relaxation, and correlation effects in spectra of Cu II [J]. *Phys Rev A*, 2005, 72: 012507.
- [23] Milisavljevic S, Sevic D, Pejcev V, *et al.* Differenti-

- al and integrated cross sections for the electron excitation of the 4^1P^o state of calcium atom [J]. *J Phys B: At Mol Opt*, 2004, 37: 3571.
- [24] Srivastava R, Zuo T, McEachran R P, *et al.* Excitation of the 1^3P_1 states of calcium, strontium and barium in the relativistic distorted-wave approximation [J]. *J Phys B: At Mol Opt*, 1992, 25: 3709.
- [25] Sampson D H, Zhang H L, Mohanty A K. Dirac-Fock-Slater approach to atomic structure for highly charged ions [J]. *Phys Rev A*, 1989, 40: 604.
- [26] Zhang H L, Sampson D H. Rapid relativistic distorted-wave approach for calculating cross sections for ionization of highly charged ions [J]. *Phys Rev A*, 1990, 42: 5378.
- [27] Bar-Shalom A. Electron collision excitations in complex spectra of ionized heavy atoms [J]. *Phys Rev A*, 1988, 38: 1773.
- [28] Ong W, Russek A. Simple asymptotic wave function for a continuum Dirac electron [J]. *Phys Rev A*, 1978, 17: 120.
- [29] Ralchenko Y, Kramida A E, Reader J. 2006 NIST atomic spectra database [EB/OL]. [2017-08-06]. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>.

引用本文格式:

中文: 张春, 杨宁选, 范婷, 等. S^{4+} 离子 $3s^2-3s3p$ 和 S^{5+} 离子 $3s-3p$ 电子碰撞激发截面 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 307.

英文: Zhang C, Yang N X, Fan T, *et al.* Theoretical study on cross sections for electron impact excitation of S^{4+} ($3s^2-3s3p$) and S^{5+} ($3s-3p$) [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 307.