

# 类硼 S 离子高自旋态 ${}^6P^e-{}^6P^o$ 的辐射跃迁

孙 言<sup>1</sup>, 钱新宇<sup>1</sup>, 李文义<sup>1</sup>, 胡 峰<sup>1</sup>, 苟秉聪<sup>2</sup>

(1. 徐州工程学院数学与物理科学学院, 徐州 221018; 2. 北京理工大学物理学院, 北京 100081)

**摘要:** 利用 Rayleigh-Ritz 变分方法计算了类硼 S 离子内壳层激发高自旋六重态  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o$  ( $n=3-9$ ),  $1s2s2p^2n's$ ,  $1s2s2p^2n'd$   ${}^6P^e$  ( $n'=3-5$ ) 的电偶极辐射跃迁振子强度、辐射跃迁率、辐射跃迁波长, 讨论了类硼  $S^{11+}$  离子  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o$  里德堡系列激发态的辐射跃迁规律. 本文的计算结果将为相关实验光谱鉴定提供有价值的理论数据.

**关键词:** 辐射跃迁; 振子强度; 高自旋态

**中图分类号:** O562.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2016)06-1312-05

## ${}^6P^o-{}^6P^e$ transitions in boron-like S ion

SUN Yan<sup>1</sup>, QIAN Xin-Yu<sup>1</sup>, LI Wen-Yi<sup>1</sup>, HU Feng<sup>1</sup>, GOU Bing-Cong<sup>2</sup>

(1. School of Mathematic and Physical Science, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China;  
2. School of Physics, Beijing institute of Technology, China)

**Abstract:** The transition oscillator strengths, transition rates, and wavelengths for electric dipole transitions between  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o$  ( $n=3-9$ ), and  $1s2s2p^2n's$ ,  $1s2s2p^2n'd$   ${}^6P^e$  ( $n=3-5$ ) sextet Rydberg states of boron-like Sulfur ion are calculated using the multi-configuration Rayleigh-Ritz variation method. The transition rules for  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o$  Rydberg series of  $S^{11+}$  ion are discussed. Our calculated results will provide useful data for the related experimental study in the future.

**Keywords:** Radiative transition; Oscillator strength; High-spin state

## 1 引 言

近年来, 天文学家利用精密的仪器如多镜片 X 射线观测器、钱德拉 X 射线观测器、哈勃望远镜等观测到了大量的来自天体物理等离子体的光谱数据<sup>[1-2]</sup>, 而这些实验光谱的鉴定需要精确的理论数据. 作为宇宙中重要的元素 S, 其原子光谱的理论数据对天体物理和等离子物理有着重要的应用. 近年来, 一些相关的实验和理论数据被陆续报道<sup>[3-11]</sup>. 早期的实验主要是利用束箔实验技术和激光光谱技术来观测一些低激发态的光谱<sup>[3-4]</sup>, 近年来, 随着电子束离子阱(EBIT)和重离子储存环的投入使用, 一些内壳层高激发态的辐射跃迁数

据被报道. 如 Urrutia 等<sup>[5]</sup>利用利用 EBIT 装置测量了  $S^{14+}$  亚稳态  $1s2s$   ${}^3S$  的寿命; Yang<sup>[6]</sup>等报道了 SIX-SXIII 离子的 54 条波长范围在 170 - 500 Å 的光谱线. 最近, Beiersdorfer 等<sup>[7]</sup>利用 EBIT 装置测量了 S 离子的极紫外波长范围内的发射光谱线. 理论上, 主要的研究方法有: multiconfiguration Dirac-Fock (MCDF)方法<sup>[8]</sup>, many-body perturbation (RMBPT)理论<sup>[9]</sup>, R-矩阵方法<sup>[10]</sup>, 1/Z 微扰理论<sup>[11]</sup>, Relativistic Hartree Fork (HFR)等<sup>[12]</sup>. 这些理论计算方法各有各的优缺点和适用范围, 有些与实验相差较大, 理论之间也有较大差别. 目前理论的研究大多集中在较低的激发态, 对于高激发态的研究尤其是类硼 S 离子高自

旋态的研究甚少. 因此, 本文利用多组态的 Rayleigh-Ritz 变分方法计算了电偶极跃迁  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o-1s2s2p^2n's$  和  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o-1s2s2p^2n'd$   ${}^6P^e$  的辐射跃迁振子强度、辐射跃迁率、辐射跃迁波长, 振子强度和辐射跃迁率的三个规范(长度规范、速度规范、加速度规范)的一致性验证了我们计算的波函数的准确性. 此外, 本文还讨论了  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o$  里德堡系列激发态的辐射跃迁规律.

## 2 理论方法

对于五电子的六重态系统, 类硼离子的非相对论哈密顿为(单位 a. u.):

$$\hat{H}_0 = \sum_{i=1}^5 \left[ -\frac{1}{2} \nabla_i^2 - \frac{Z}{r_i} \right] + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^5 \frac{1}{r_{ij}}. \quad (1)$$

式中第1、2项求和号中的每项表示第  $i$  个电子在库仑势作用下的哈密顿算符; 第3项表示电子之间的静电相互作用的哈密顿算符, 求和号中每一项  $\frac{1}{r_{ij}}$  表示第  $i$  个电子和第  $j$  个电子之间的静电相互作用, 其中  $r_{ij}$  表示第  $i$  个电子与第  $j$  个电子之间的距离. 采用 Slater 型径向波函数与轨道角动量和自旋波函数的积构成的基函数将总波函数展开, 于是激发态波函数可写为:

$$\Psi_b(1,2,3,4,5) = A \sum_i C_i \Phi_{n(i),l(i)}(1,2,3,4,5), \quad (2)$$

式中  $A$  为反对称化算符,  $C_i$  为线性参数,  $\Phi_{n(i),l(i)}(1,2,3,4,5)$  为

$$\Phi_{n(i),l(i)}(1,2,3,4,5) = \varphi_{n(i)}(R) Y_{l(i)}^{LM}(\Omega) \chi_{ss_z}, \quad (3)$$

其中  $R$  统一代表径向部分  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$ ,  $\Omega$  代表角度部分.  $\varphi_{n(i)}$  代表所有可能的径向基函数,  $Y_{l(i)}^{LM}$  代表所有可能的轨道角动量波函数,  $\chi_{ss_z}$  为自旋波函数.

径向部分波函数采用 Slater 型径向波函数展开:

$$\varphi_{n(i)}(R) = \prod_{j=1}^5 r_j^{\alpha_j} \exp(-\alpha_j r_j), \quad (4)$$

$\alpha_j$  对应电子的非线性参数, 利用(2)式, (1)对哈密顿的期望值就非线性参数集  $\alpha_j$  以及线性参数  $C_i$  变分优化极小为:

$$\delta \langle H_0 \rangle = \delta \frac{\langle \psi_b | \hat{H}_0 | \psi_b \rangle}{\langle \psi_b | \psi_b \rangle} = 0, \quad (5)$$

可得久期方程. 通过求解久期方程得到最佳的非相对论能量  $E_b$  及组态对应的波函数.

为进一步获得高精度的能量计算值, 还须考虑质量极化和相对论修正效应. 具体的计算过程在文献<sup>[13]</sup>有详细描述, 这里不再进行展开.

从初态  $i$  通过辐射跃迁衰变到末态  $k$  的振子强度和辐射衰变率可表示为:

$$f_{i \rightarrow k} = \frac{2}{3} \frac{\omega}{2J+1} |\langle \psi_i | \vec{D} | \psi_k \rangle|^2, \quad (6)$$

$$A_{i \rightarrow k} = \frac{2\omega^2}{c^3} f_{i \rightarrow k}. \quad (7)$$

$\vec{D}$  为偶极子电偶极矩,  $\omega$  为以里伯德能量为单位的跃迁光子频率,  $c$  为光速. 显然, 如果波函数计算绝对精确, 利用下面三种规范:

$$\text{长度规范: } \langle \psi_i | \sum_i r_i | \psi_k \rangle \quad (8)$$

$$\text{速度规范: } (E_i - E_k)^{-1} \langle \psi_i | \sum_i \nabla_i | \psi_k \rangle \quad (9)$$

$$\text{加速度规范: } (E_i - E_k)^{-2} \langle \psi_i | \sum_i \nabla_i V | \psi_k \rangle \quad (10)$$

所求得振子强度应相等, 且三者也是等效的. 这三种规范计算结果的一致性程度, 可判定出计算的波函数描述激发态的精确程度的好坏.

## 3 结果与讨论

表1和表2分别给出了类硼  $S^{11+}$  离子高自旋六重态  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o-1s2s2p^2n's$  和  $1s2s2p^2np$   ${}^6P^o-1s2s2p^2n'd$   ${}^6P^e$  的辐射跃迁振子强度、辐射跃迁率、跃迁波长. 从表中数据可以看出, 本文计算的电偶极跃迁的振子强度和跃迁率的三个规范(长度规范、速度规范、加速度规范)符合的较好, 如表1中对于  $1s2s2p^26p$   ${}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^23s$   ${}^6P^e$  跃迁, 对应振子强度的三个规范分别为  $1.28 \times 10^{-2}$ 、 $1.28 \times 10^{-2}$ 、 $1.29 \times 10^{-2}$ , 三者符合的非常好. 再如表2中, 对于  $1s2s2p^24p$   ${}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^23d$   ${}^6P^e$  跃迁, 对于振子强度的三个规范分别是  $2.13 \times 10^{-2}$ 、 $2.15 \times 10^{-2}$ 、 $2.15 \times 10^{-2}$ . 本文计算的电偶极跃迁的振子强度和辐射跃迁率的三个规范大多数都符合的很好, 从而证明了计算的激发态的波函数和辐射跃迁数据是足够精确的. 对于  $S^{11+}$  离子高自旋六重态的辐射跃迁的相关数据, 目前报道甚少, 因此这里我们无法列出相关的参考数据作比较. 然而, 在我们的前期工作已使用此方法对类硼等电子序列( $Z=8-13$ )的相关离子进行了成功计算<sup>[14]</sup>, 得到了与实验和其它理论吻合较好的结果, 因此我们相信本文的计算结果是准确的.

表 1  $S^{11+}$  离子高自旋六重态  $1s2s2p^2np\ ^6P^o-1s2s2p^2n's$  的辐射跃迁振子强度、跃迁率和跃迁波长. 括号中的数字代表幂指数.

Tab.1 Transition oscillator strengths, transition rates, and wavelengths for transitions of  $1s2s2p^2np\ ^6P^o-1s2s2p^2n's$  in  $S^{11+}$  ion. The number in brackets indicates the power of 10.

初态	末态	振子强度 ( $f_i/f_v/f_a$ )	跃迁率( $A_i/A_v/A_a$ ) ( $s^{-1}$ )	跃迁波长(nm)
$1s2s2p^23p\ ^6P^o$	$1s2s2p^23s\ ^6P^e$	$8.03[-2]/7.94[-2]/2.31[-1]$	$4.57[8]/4.52[8]/1.32[9]$	104.10
$1s2s2p^25p\ ^6P^o$		$9.88[-2]/9.87[-2]/9.43[-2]$	$6.62[10]/6.21[10]/5.94[10]$	10.24
$1s2s2p^26p\ ^6P^o$		$2.85[-2]/2.86[-2]/2.78[-2]$	$3.53[10]/3.54[10]/3.44[10]$	7.31
$1s2s2p^27p\ ^6P^o$		$1.28[-2]/1.28[-2]/1.29[-2]$	$2.10[10]/2.11[10]/2.13[10]$	6.34
$1s2s2p^28p\ ^6P^o$		$7.02[-3]/7.01[-3]/7.15[-3]$	$1.35[10]/1.34[10]/1.37[10]$	5.88
$1s2s2p^29p\ ^6P^o$		$4.35[-3]/4.35[-3]/4.68[-3]$	$9.14[9]/9.14[9]/9.83[9]$	5.61
$1s2s2p^24p\ ^6P^o$		$2.86[-3]/2.86[-3]/3.33[-3]$	$6.39[9]/6.39[9]/7.45[9]$	5.44
$1s2s2p^24s\ ^6P^e$	$1s2s2p^23p\ ^6P^o$	$4.71[-2]/4.89[-2]/5.02[-2]$	$2.23[10]/2.31[10]/2.38[10]$	11.87
$1s2s2p^24p\ ^6P^o$	$1s2s2p^24s\ ^6P^e$	$1.18[-1]/8.56[-2]/1.18[-1]$	$1.05[8]/7.60[7]/1.05[8]$	263.86
$1s2s2p^25p\ ^6P^o$		$1.16[-1]/1.15[-1]/1.12[-1]$	$1.41[10]/1.40[10]/1.36[10]$	23.28
$1s2s2p^26p\ ^6P^o$		$3.72[-2]/3.28[-2]/3.48[-2]$	$1.00[10]/8.85[9]/9.38[9]$	15.68
$1s2s2p^27p\ ^6P^o$		$1.56[-2]/1.47[-2]/1.68[-2]$	$6.03[9]/5.69[9]/6.49[9]$	13.11
$1s2s2p^28p\ ^6P^o$		$8.34[-3]/8.16[-3]/1.00[-2]$	$3.93[9]/3.85[9]/4.72[9]$	11.86
$1s2s2p^29p\ ^6P^o$		$5.09[-3]/5.12[-3]/7.42[-3]$	$2.73[9]/2.74[9]/3.98[9]$	11.12
$1s2s2p^25s\ ^6P^e$	$1s2s2p^23p\ ^6P^o$	$1.29[-2]/1.28[-2]/1.32[-2]$	$1.35[10]/1.35[10]/1.39[10]$	7.95
	$1s2s2p^24p\ ^6P^o$	$8.09[-2]/9.19[-2]/8.73[-2]$	$7.60[9]/8.62[9]/8.19[9]$	26.51
$1s2s2p^25p\ ^6P^o$	$1s2s2p^25s\ ^6P^e$	$1.35[-1]/1.06[-1]/4.04[-1]$	$2.27[7]/1.79[7]/6.81[7]$	692.97
$1s2s2p^26p\ ^6P^o$		$1.66[-1]/1.30[-1]/1.03[-1]$	$5.55[9]/4.36[9]/3.46[9]$	44.87
$1s2s2p^27p\ ^6P^o$		$3.70[-2]/3.43[-2]/3.70[-2]$	$3.00[9]/2.78[9]/3.00[9]$	28.78
$1s2s2p^28p\ ^6P^o$		$1.57[-2]/1.55[-2]/2.05[-2]$	$1.92[9]/1.90[9]/2.52[9]$	23.37
$1s2s2p^29p\ ^6P^o$		$8.32[-3]/8.47[-3]/1.24[-2]$	$1.29[9]/1.33[9]/1.94[9]$	20.67

表 2  $S^{11+}$  离子高自旋六重态  $1s2s2p^2np\ ^6P^o-1s2s2p^2nd$  的辐射跃迁振子强度、跃迁率和跃迁波长. 括号中的数字代表幂指数.

Tab.2 Transition oscillator strengths, transition rates, and wavelengths for transitions of  $1s2s2p^2np\ ^6P^o-1s2s2p^2nd$  in  $S^{11+}$  ion. The number in brackets indicates the power of 10.

初态	末态	振子强度 ( $f_i/f_v/f_a$ )	跃迁率( $A_i/A_v/A_a$ ) ( $s^{-1}$ )	跃迁波长(nm)
$1s2s2p^23d\ ^6P^e$	$1s2s2p^23p\ ^6P^o$	$4.52[-2]/4.49[-2]/5.64[-2]$	$4.48[8]/4.45[8]/5.59[8]$	80.59
$1s2s2p^24p\ ^6P^o$	$1s2s2p^23d\ ^6P^e$	$2.13[-2]/2.15[-2]/2.15[-2]$	$8.15[9]/8.23[9]/8.20[9]$	13.23
$1s2s2p^25p\ ^6P^o$		$4.02[-3]/4.00[-3]/4.13[-3]$	$3.53[9]/3.52[9]/3.63[9]$	8.71
$1s2s2p^26p\ ^6P^o$		$1.55[-3]/1.51[-3]/1.27[-3]$	$1.91[9]/1.85[9]/1.56[9]$	7.37
$1s2s2p^27p\ ^6P^o$		$7.50[-4]/7.30[-4]/6.37[-4]$	$1.10[9]/1.07[9]/9.32[8]$	6.75
$1s2s2p^28p\ ^6P^o$		$4.46[-4]/4.50[-4]/4.65[-4]$	$7.24[8]/7.32[8]/7.56[8]$	6.41
$1s2s2p^29p\ ^6P^o$		$2.86[-4]/2.95[-3]/3.28[-4]$	$4.99[8]/5.15[8]/5.71[8]$	6.18
$1s2s2p^24d\ ^6P^e$	$1s2s2p^23p\ ^6P^o$	$1.09[-1]/1.09[-1]/1.01[-1]$	$6.24[10]/6.23[10]/5.75[10]$	10.78
	$1s2s2p^24p\ ^6P^o$	$7.94[-2]/7.70[-2]/1.06[-1]$	$1.11[8]/1.07[8]/1.49[8]$	211.75
$1s2s2p^25p\ ^6P^o$	$1s2s2p^24d\ ^6P^e$	$3.81[-2]/3.84[-2]/3.77[-2]$	$3.03[9]/3.05[9]/3.00[9]$	29.04
$1s2s2p^26p\ ^6P^o$		$7.54[-3]/7.32[-3]/5.27[-3]$	$1.54[9]/1.50[9]/1.08[9]$	18.09
$1s2s2p^27p\ ^6P^o$		$2.90[-3]/2.76[-3]/2.18[-3]$	$8.89[8]/8.47[8]/6.70[8]$	14.76
$1s2s2p^28p\ ^6P^o$		$1.47[-3]/1.44[-3]/1.34[-4]$	$5.63[8]/5.52[8]/5.15[8]$	13.19
$1s2s2p^29p\ ^6P^o$		$8.58[-4]/8.07[-4]/6.43[-4]$	$3.79[8]/3.57[8]/2.84[8]$	12.29
$1s2s2p^25d\ ^6P^e$	$1s2s2p^23p\ ^6P^o$	$3.14[-2]/3.06[-2]/2.54[-2]$	$3.50[10]/3.41[10]/2.83[10]$	7.73
	$1s2s2p^24p\ ^6P^o$	$9.95[-2]/9.93[-2]/6.47[-2]$	$1.13[10]/1.13[10]/7.37[9]$	24.14
	$1s2s2p^25p\ ^6P^o$	$1.10[-1]/1.06[-1]/7.67[-1]$	$3.65[7]/3.52[7]/2.54[8]$	442.69
$1s2s2p^26p\ ^6P^o$	$1s2s2p^25d\ ^6P^e$	$7.14[-2]/5.86[-2]/5.66[-2]$	$1.65[9]/1.35[9]/1.31[9]$	53.81
$1s2s2p^27p\ ^6P^o$		$8.04[-3]/1.10[-2]/1.12[-2]$	$5.17[8]/7.10[8]/7.17[8]$	32.21
$1s2s2p^28p\ ^6P^o$		$3.31[-3]/4.39[-3]/2.82[-3]$	$3.37[8]/4.47[8]/2.87[8]$	25.58
$1s2s2p^29p\ ^6P^o$		$1.68[-3]/2.27[-3]/1.46[-3]$	$2.23[8]/3.01[8]/1.94[8]$	22.38

为了方便研究类硼  $S^{11+}$  离子高自旋六重态  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o$  里德堡系列的辐射跃迁规律, 在图 1(a) 和图 1(b) 中分别画出了  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$  和  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  的辐射跃迁率随主量子数  $n$  的变化规律. 从图 1(a) 和图 1(b) 可以看出, 当  $n'$  固定, 当  $n = n'$  时对应的跃迁率要明显小于  $n > n'$  时的跃迁率; 当  $n > n'$  时, 随着主量子数  $n$  的增大, 辐射跃迁率逐渐减小, 且在  $n = n' + 1$  时, 对应的辐射跃迁率为最大值; 当  $n$  为定值时, 随着  $n'$  的增大, 辐射跃迁率越来越小. 图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$  和  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  的辐射跃迁波长随主量子数  $n$  的变化规律, 从图 2 可以看出: 当  $n'$  为定值,  $n > n'$  时, 随着  $n$  的增大, 对应跃迁的波长逐渐减小, 且趋于平稳. 此外, 当  $n$  为定值, 跃迁波长随着  $n'$  的增大而逐渐增大. 本文计算的  $S^{11+}$  离子高自旋态的电偶极辐射跃迁的波长均在极紫外和软 X 射线范围内, 本文的计算结果可为相关的实验光谱和天体宇宙射线的鉴定提供有价值的理论数据.

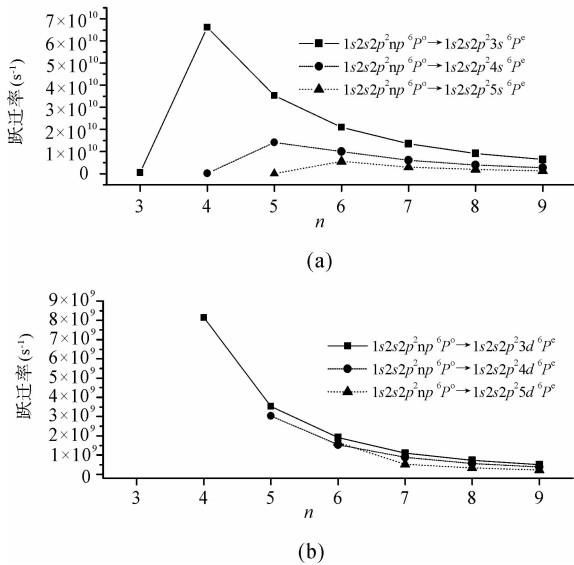


图 1 类硼  $S^{11+}$  离子  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$  (a) 和  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  (b) 的辐射跃迁率随主量子数  $n$  的变化规律.  
Fig. 1 The transition rates trend curves of transitions  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$  (a) and  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  (b) with the increase of principal quantum number  $n$  in  $S^{11+}$  ion.

### 4 结 论

本文计算了类硼 S 离子内壳层激发高自旋六

重态  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$ 、 $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  的电偶极辐射跃迁振子强度、辐射跃迁率、辐射跃迁波长, 并讨论了  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o$  ( $n=3-9$ ) 里德堡系列激发态的辐射跃迁规律. 研究发现, 当  $n = n'$  时对应跃迁的辐射跃迁率要明显小于  $n > n'$  时对应跃迁率的值, 且随着主量子数  $n$  和  $n'$  的增大, 辐射跃迁率逐渐减小. 随着  $n$  的增大和  $n'$  的减小, 对应的跃迁波长逐渐减小.

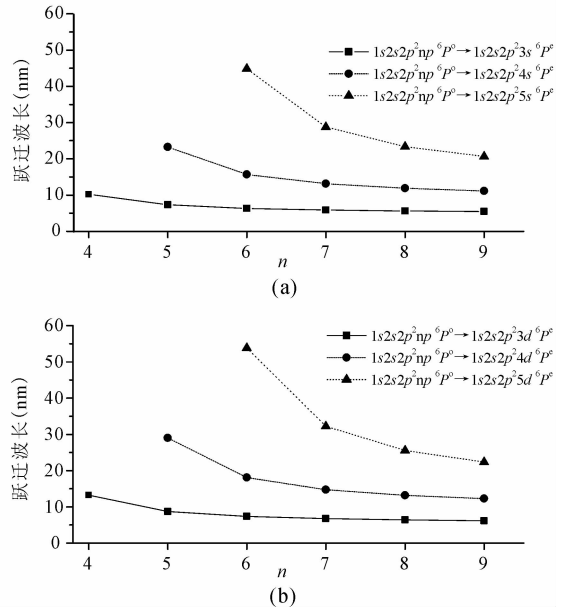


图 2 类硼  $S^{11+}$  离子  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$  (a) 和  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  (b) 的辐射跃迁波长随主量子数  $n$  的变化规律.

Fig. 2 The transition wavelengths trend curves of transitions  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n's\ {}^6P^e$  (a) and  $1s2s2p^2np\ {}^6P^o \rightarrow 1s2s2p^2n'd\ {}^6P^e$  (b) with the increase of principal quantum number  $n$  in  $S^{11+}$  ion.

### 参考文献:

[1] Shkolnik E L, Barman T S, Hazmat, I. The evolution of far-UV and near-UV emission from early M stars [J], *Astron J*, 2014, 148: 64.  
 [2] Doschek G A, Feldman U. The solar UV-X-ray spectrum from 1.5 to 2000 Å [J], *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2010, 43: 232001.  
 [3] Fawcett B C, Hayes R W. Classification of sulphur VII to XIV spectra between 22 and 73 Å with wavelengths, oscillator strengths and energy levels [J], *Phys Scr*, 1987, 36: 80.  
 [4] Yang Z H, Ma X W, Wang Y D, and *et al.* Highly Ionized spectra of the transition sulfur [J], *Astro-*

- phys J, 2000, 544: 572.
- [5] López-Urrutia J R C, Beiersdorfer P, Widmann K. Lifetime of the  $1s2s\ ^3S_1$  metastable level in He-like  $S^{14+}$  measured with an electron beam ion trap [J], Phys Rev A, 2006, 74: 012507.
- [6] Yang Z H, Du S B, Zeng X T, and *et al.* Sulfur IX to XIII spectral measurements between 170 and 500 Å [J], Astronomical J, 2009, 37: 4020.
- [7] Beiersdorfer P, Träbert E, Lepson J K, and *et al.* High-resolution laboratory measurements of coronal lines in the 198-218 Å region [J], Astrophys J, 2014, 788: 25.
- [8] Fan Q, Liao Z J, Yang J H, and *et al.* Relativistic configuration interaction calculations on the  $K\alpha$  x-ray spectra of sulfur [J], Phys Scr, 2009, 79: 015301.
- [9] Nataraj H S, Sahoo B K, Das B P, and *et al.* Theoretical studies of the atomic transitions in boron-like ions: Mg VIII, SiX and SXII [J], J Phys B: At Mol Opt Phys, 2007, 40: 3153.
- [10] Grieve M F R, Ramsbottom C A, Hudson C E, and *et al.* Electron-impact excitation collision strengths and theoretical line intensities for transitions in SIII [J], Astrophys J, 2014, 780: 110.
- [11] Safronova U I, Shlyaptseva A S. Inner-Shell Excitation Energy and Autoionization Rates for Li-, Be-, B-like ions with  $Z = 6-54$  [J], Phys Scr, 1996, 54: 254.
- [12] 李继红. 4d 波函数塌缩对类 Kr 离子  $4p6 \rightarrow 4p6nd$  辐射跃迁性质影响研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2013, 50: 1277.
- [13] Sun Y, Liu D D, Mei M F, and *et al.* Energies, fine structures, and transitions of the core-excited sextet states  $^6S^{e,o}(n)$  and  $^6P^{e,o}(n)$  ( $n=1-5$ ) of B-like ions [J], J Quant Spectrosc RA, 2015, 167: 145.
- [14] Zhang J, Sun Y, Sang C C, and *et al.*  $^6P^{e-6}P^o$  transitions in boron-like ions with  $Z=8-13$  [J], Can J Phys, 2016, 94: 283.