

# 等离子体屏蔽效应对原子能级和振子强度的影响\*

李永强 吴建华 袁建民†

(国防科技大学理学院物理系, 长沙 410073)

(2007 年 8 月 6 日收到, 2007 年 9 月 21 日收到修改稿)

利用 Debye 模型, 研究了等离子体屏蔽效应对热等离子体中原子能级和振子强度的影响. 通过在 MCDF 模型中引入等离子体屏蔽效应, 计算了 MnXXII-BrXXII 等 11 个类 Be 离子在等离子体环境下  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  和  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  跃迁的能级和振子强度. 计算结果表明, 等离子体屏蔽效应使得类 Be 离子  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  跃迁的激发能量增大, 从而导致谱线蓝移现象, 并且随着屏蔽效应的不断增强, 蓝移的程度会逐渐加大. 屏蔽效应对于  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  跃迁的振子强度也有类似的影响.

关键词: Debye, 等离子体屏蔽, 跃迁能级, 振子强度

PACC: 3120A, 3130L, 3270C, 5220

## 1. 引 言

近年来, 在实验技术的推动下, 高电离的高荷离子的实验观测与理论研究重新引起了人们的兴趣<sup>[1]</sup>, 人们在这方面已经开展了不少工作. 其中, 非常重要的一项工作就是准确地确定元素在等离子体环境中的能级结构和振子强度. 这些原子数据在等离子体诊断以及等离子体辐射不透明度研究中发挥着重要作用, 比如, Brage 等人<sup>[2]</sup>曾指出具有相同初态且末态能量相近的两个跃迁的振子强度的比值可用于等离子体中局域电子密度的诊断; Rubiano 等人<sup>[3]</sup>曾使用氢的屏蔽模型计算铝的辐射跃迁等原子数据, 进而用于铝的辐射不透明度的计算; Saha 等人<sup>[4]</sup>也曾提到类 Be 元素的谱线强度可以用于等离子体的温度和密度的诊断.

实际等离子体中含有大量的自由电子和各个价态的离子, 要想准确地计算等离子体屏蔽效应对能级结构和振子强度的影响是很困难的. 通常采用的方法是对等离子体环境的作用进行平均从而得出一个较为简单的表达式, 进而使得计算过程大大简化<sup>[5]</sup>. 通常用以下两种模型来计算等离子体环境中各个价态离子的特性<sup>[6]</sup>: 第一种是利用考虑了温度

效应和密度效应的自洽场模型<sup>[7-9]</sup>来求出势函数. 但是这种考虑了等离子体屏蔽效应的自洽场需要循环迭代才能求出, 如果需要计算大量的原子数据, 那么计算时间就会很长. 第二种方法是找出考虑了等离子体屏蔽效应的势函数的解析表达式, Debye 模型<sup>[10]</sup>就是其中的一种. 它的基本思想是假设考虑了等离子体屏蔽效应的电场势是由球对称的电荷分布决定的, 并且假设粒子的动能远远大于粒子之间的势能. 粒子在等离子体中的分布满足 Boltzmann 统计, 从而在 Debye 一级近似下从球对称的 Poisson 方程得到 Debye 屏蔽势. 自 Debye 等人于 1923 年提出 Debye 模型以来, 它在原子分子领域得到了广泛应用. Debye 模型不仅能用于计算类氢离子的各种截面、谱线位移和线型, 而且经过改进的模型可以用于多电子体系的研究. 特别是最近几十年来, 人们利用 Debye 模型做了大量的工作来研究等离子体屏蔽效应对类氢<sup>[11-15]</sup>, 类氦<sup>[1, 16-19]</sup>, 多电子体系<sup>[3, 6, 20-25]</sup>元素的原子结构的影响. 其中, Rubiano 等人<sup>[3]</sup>、Bielinska-Waz 等人<sup>[15]</sup>、Rodríguez 等人<sup>[23]</sup>、Saha 等人<sup>[24]</sup>考虑了相对论效应对原子辐射特性的影响. 但是, 对于等离子体中类 Be 中 Z 元素原子结构的研究却是很少的.

本文利用考虑了等离子体屏蔽效应的全相对论

\* 国家自然科学基金(批准号: 10676039), 国家重点基础研究发展计划(973)(批准号: 2007CB815105)和国家高技术惯性约束聚变专题资助的课题.

† 通信联系人, E-mail: jmyuan@nudt.edu.cn

的 MCDF (multi-configuration Dirac-Fork) 模型, 通过改进的 GRASP2 程序<sup>[26]</sup> 计算了 MnXXII-BrXXXII 等 11 个类 Be 离子的能级结构和振子强度, 重点讨论了最低两个组态的  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  和  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  的跃迁, 给出了它们在不同等离子体屏蔽条件下的能级和振子强度的变化情况. 这两条对等离子体诊断极其重要的谱线<sup>[27]</sup> 都曾在天体物理以及实验室中被人们大量观测到<sup>[28]</sup>. 本文第 2 部分给出了包含等离子体屏蔽效应的 Debye 势的 Hamilton 算符, 并对 Debye 模型的应用范围进行了简要地讨论; 第 3 部分给出了 Debye 模型的计算结果并对计算结果进行了详细分析, 第 4 部分为结论.

## 2. 理论模型

在 MCDF 模型中, ASF (原子波函数) 由具有相同宇称的 CSF (组态波函数) 的线性叠加近似给出

$$|\Gamma P J M\rangle = \sum_{r=1}^N c_r |\gamma P J M\rangle, \quad (1)$$

其中,  $N$  表示 CSF 总的个数,  $c_r$  表示 CSF 的系数. 一旦得到了 ASF, 能级结构和振子强度就可以计算出来. CSF 由单电子轨道波函数组合得到.

对于自由粒子, 其单电子轨道波函数由 Dirac-Hamilton 算符决定, 其表达式为

$$H = \sum_i \left( c\alpha \cdot p + \beta c^2 - \frac{Z}{r_i} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{1}{r_{ij}}, \quad (2)$$

其中右边第一个求和号中的前两项表示束缚电子的动能, 第三项表示核的势,  $r_i$ ,  $r_{ij}$  分别表示核与电子  $i$  之间的距离, 电子  $i$  与电子  $j$  的距离.

在等离子体环境中, 利用 Debye 屏蔽势, Dirac-Hamilton 算符可表示为

$$H_d = \sum_i (c\alpha \cdot p + \beta c^2) + V_d, \quad (3)$$

其中,  $V_d$  表示考虑了等离子体屏蔽效应以后的 Debye 势.

考虑一个处在温度为  $T$  的平衡态等离子体中的带有  $N$  个电子的原子序数为  $Z$  的元素. 需要找出的是处在该  $Z$  元素周围的电荷分布对时间平均的势的分布情况, 首先假定只有这样的时间平均势是唯一被  $Z$  元素感受到的势, 并且此势是由  $Z$  元素周围球对称分布的电荷密度决定的; 其次假定粒子满足 Boltzmann 统计. 在忽略了束缚电子的影响后<sup>[29]</sup>, 由 Poisson 方程可知

$$\nabla^2 V(r) = 4\pi \left[ \sum_i z_i n_i - n_e + Z\delta(r) \right], \quad (4)$$

其中  $n_i = n_i^0 \exp(-V(r)/kT_i)$ ,  $n_e = n_e^0 \exp(-V(r)/kT_e)$ ,  $z_i$ ,  $n_i$ ,  $n_e$  分别表示原子序数、原子序数为  $z_i$  的元素的离子数密度、自由电子数密度.  $n_i^0$ ,  $n_e^0$  分别表示  $V(r)=0$  时的离子数密度、自由电子数密度.

在 Debye 近似下 (即  $V(r) \ll kT$  时), 利用公式  $e^x = 1 + x + x^2/2 + \dots$ , 可以把  $\exp(-V(r)/kT)$  进行展开, 并保留前两项. 考虑到电中性条件  $n_e^0 = \sum_i z_i n_i^0$  和边界条件  $r \rightarrow \infty, V(r) = 0$ ;  $r \rightarrow 0, V(r) = -Z/r$ , 由 Poisson 方程得出 Debye 势的表达式

$$V(r) = -\frac{Z}{r} e^{-r/\lambda_D}, \quad (5)$$

其中,  $\lambda_D$  表示德拜半径 (Debye length), 其表达式为

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e T_i}{4\pi (n_e^0 T_i + \sum_i z_i^2 n_i^0 T_e)}}. \quad (6)$$

事实上, 在较为稠密的等离子体中屏蔽效应主要是由自由电子引起的, 此时等离子体中的正离子可以做一个致密中性背景场来考虑. 此时, 德拜半径的表达式可简化为

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi n_e^0}}. \quad (7)$$

从 (5) 式可以看出, 各个粒子之间的库仑相互作用在等离子体环境中将以指数形式进行衰减, 即长程的库仑势在等离子体的屏蔽下会很快地被衰减掉. 在高温等离子体中, 可以用 Debye 势代替长程库仑势, 从而以一种简单的方式引入等离子体屏蔽效应. 此时, 该  $Z$  元素周围的考虑了等离子体屏蔽效应以后的 Debye 势为

$$V_d = -\sum_i \frac{Z}{r_i} e^{-ar_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{1}{r_{ij}} e^{-ar_{ij}}, \quad (8)$$

其中,  $a = 1/\lambda_D$  表示德拜屏蔽因子. 在实际计算中, 双电子项可以利用 Green 函数进行展开.

对于复杂的原子, 组态相互作用 (configure interaction, CI) 在原子结构计算中起了非常重要的作用, 但在实际计算中, 不可能包括所有可能的组态相互作用, 通常通过控制电子激发数目来选取组态. 本文在考虑组态相互作用时, 只包含了最多只能有两个电子向高能量轨道激发所形成的组态. 在用 CI 方法求解波函数时, 在逐步增加组态的过程中如果能级前后的误差小于  $10^{-5}$  时, 就认为 CI 已满足精度要求, 就不再增加组态了. 本文在计算中共包括 14 个相对论轨道:  $1s, 2s, 2p_-, 2p_+, 3s, 3p_-, 3p_+, 3d_-,$

$3d_+, 4s, 4p_-, 4p_+, 4d_-, 4d_+$ , 所有轨道均由自洽场方法得到.

事实上, Debye 模型并不需要高温条件, 只要  $r$  值足够大, 温度不需要太高, 体系也满足 Debye 近似. 但是, 当等离子体环境不满足 Debye 近似时, 等离子体屏蔽效应就需要其他的模型来引入, 比如离子球模型<sup>[30]</sup>. 幸运的是, 一般的高温等离子体都满足此条件<sup>[31]</sup>. 在上面的推导中, 只引入了静态屏蔽效应, 而忽略了动态屏蔽效应<sup>[32]</sup>. 若要更精确地计算等离子体屏蔽效应对原子结构的影响, 就要把上面的各个因素都考虑进来.

### 3. 结果与讨论

本文利用全相对论的 MCDF 模型, 通过改进的

GRASP2 程序计算并分析了等离子体屏蔽效应对 MnXXII-BrXXXII 等 11 个类 Be 离子的影响, 并着重分析了跃迁  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  和跃迁  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  在等离子体屏蔽效应下的能级和振子强度的变化情况. 在下面的计算中给出了屏蔽因子  $a$  分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 等值(其大致相当于温度  $T = 100$  eV, 电子密度  $n_e^0 = 10^{22}$  cm<sup>-3</sup>— $5 \times 10^{23}$  cm<sup>-3</sup> 时对应的 Debye 半径)的计算结果.

表 1 给出了  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  跃迁的能级随屏蔽因子  $a$  的变化情况. 情形 1 只考虑了对核与电子之间相互作用的屏蔽, 情形 2 考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽. 可以看出, 在考虑了等离子体屏蔽效应以后, 跃迁能量增大, 谱线产生蓝移现象, 并且随着屏蔽因子  $a$  的不断增大, 谱线蓝移程度会逐渐加大. 以情形 1 中 MnXXII 为例, 当

表 1 在不同 Debye 半径( $\lambda_D = 1/a$ )下 MnXXII-BrXXXII 等 11 个类 Be 离子的  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  跃迁的能级. 情形 1 只考虑了对核与电子之间相互作用的屏蔽, 情形 2 考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽(其中,  $a$ (原子单位),  $E$ (单位 eV),  $Z$  分别表示 Debye 屏蔽因子、跃迁能级、原子序数)

$Z \backslash E$	$a$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
		Mn	1	44.85046	44.96349	45.29776	45.83817
	2		44.95393	45.25829	45.75347	46.43128	47.28393
Fe	1	47.25355	47.36718	47.70137	48.24611	48.99211	49.93048
	2		47.35728	47.66287	48.16382	48.84979	49.71358
Co	1	49.70150	49.81504	50.15223	50.70110	51.45336	52.40051
	2		49.80584	50.11481	50.62071	51.31484	52.18897
Ni	1	52.19394	52.30890	52.64745	53.20029	53.95820	54.91203
	2		52.29780	52.61079	53.12196	53.82329	54.70755
Cu	1	54.73029	54.84587	55.18650	55.74309	56.50718	57.46826
	2		54.83623	55.15057	55.66718	56.37490	57.26860
Zn	1	57.30855	57.42473	57.76731	58.32749	59.09736	60.06842
	2		57.41480	57.73237	58.25270	58.96786	59.87054
Ga	1	59.92665	60.04338	60.38790	60.95167	61.72674	62.70509
	2		60.02654	60.35359	60.87838	61.59980	62.51144
Ge	1	62.58147	62.69982	63.04617	63.61345	64.39342	65.38034
	2		62.69475	63.01228	63.54513	64.26889	65.18875
As	1	65.27493	65.39203	65.74015	66.31063	67.09545	68.08865
	2		65.38209	65.71093	66.24322	66.97372	67.90088
Se	1	67.99997	68.11828	68.46824	69.04165	69.83110	70.83042
	2		68.10632	68.43936	68.97552	69.71108	70.64595
Br	1	70.75824	70.87358	71.22862	71.80494	72.60101	73.60398
	2		70.86770	71.20000	71.73668	72.48065	73.42270

$a = 0.1$  和  $0.5$  时, 跃迁能级分别为  $44.96349$  和  $47.50682$ , 与自由粒子即  $a = 0$  时的能级  $44.85046$  相比, 其能级分别增加了  $0.25\%$  和  $6\%$ . 为了更清晰地看出等离子体屏蔽效应对能级的影响, 在图 1 中给出了 FeXXIII 的能级偏移  $\Delta E = E^d - E^f$  ( $E^d, E^f$  分别表示考虑了等离子体屏蔽效应的跃迁能级和自由粒子的跃迁能级) 随屏蔽因子的变化情况. 可以看出, 随着  $a$  值的不断增加, 能级偏移的程度逐渐加大, 偏移的速度逐渐加快, 近似以指数形式进行增长; 并且可以看出外部环境对电子之间相互作用的屏蔽效应是非常弱的. 如果让  $a$  值继续增大, 能级偏移的程度会越来越大大以至于达到电离限之上. 因此, 在考虑了等离子体屏蔽效应以后, 与自由粒子相比离子束缚态的个数会大量减少, 电离能会下降, 这就是所谓的压致电离现象. 从图 1(a)(b) 可以看出, FeXXIII 的计算结果与 Saha 等人<sup>[24]</sup> 的计算结果符合得很好.

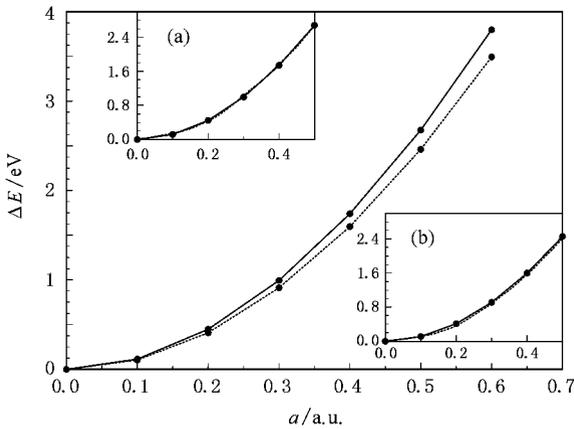


图 1 FeXXIII 的  $2s^2-[2s_{1/2} 2p_{1/2}]$  跃迁的能级偏移随屏蔽因子  $a$  的变化 (实线表示仅考虑了对核的屏蔽; 虚线表示既包括了对核的屏蔽, 又包括了对电子之间相互作用的屏蔽) (a) 表示仅考虑了对核的屏蔽效应的计算结果 (其中实线表示当前模型的计算结果; 虚线表示 Saha 等人<sup>[24]</sup> 的计算结果) (b) 表示考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽效应的计算结果 (其中实线表示当前模型的计算结果; 虚线表示 Saha 等人<sup>[24]</sup> 的计算结果)

从表 1 还可以看出, 随着原子序数的增加, 等离子体屏蔽效应的影响逐渐变弱. 这是由于对于一个等电子数序, 随着原子序数的增加, 束缚电子的轨道半径越来越小, 束缚电子的束缚能逐渐增大, 因而等离子体屏蔽效应的影响会逐渐变弱. 以情形 1 为例, 当屏蔽因子  $a = 0.2$  (大致相当于温度  $T = 100$  eV, 电子密度  $n_e^0 = 10^{23}$   $\text{cm}^{-3}$ ) 时, 可以看出, 对于跃迁  $2s^2-[2s_{1/2} 2p_{1/2}]$ , 各个元素所对应的相对于自

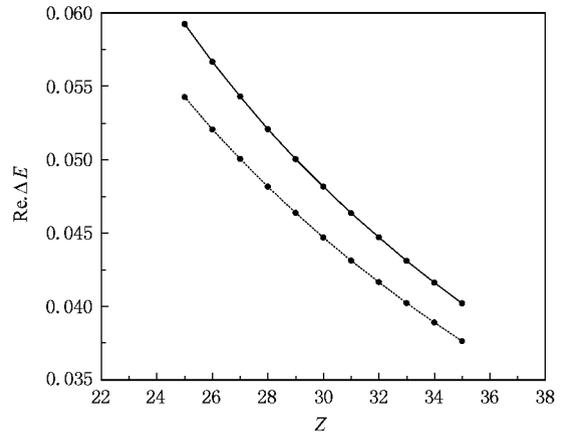


图 2 当  $a = 0.5$  时,  $2s^2-[2s_{1/2} 2p_{1/2}]$  跃迁的能级相对偏移量随原子序数  $Z$  的变化 (实线表示仅考虑了对核的屏蔽; 虚线表示考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽)

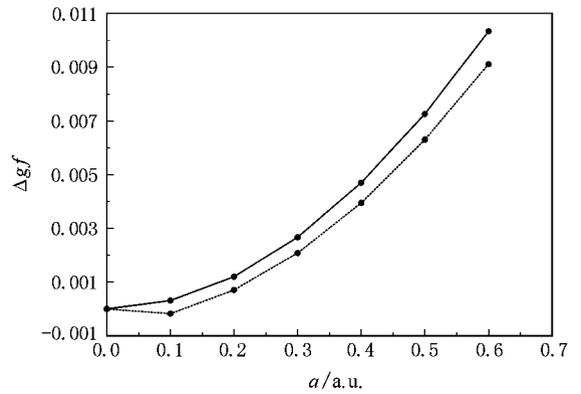


图 3 FeXXIII 的  $2s^2-[2s_{1/2} 2p_{3/2}]$  跃迁的振子强度偏移随屏蔽因子  $a$  的变化 (实线表示仅考虑了对核的屏蔽; 虚线表示考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽)

由粒子能级的能级相对偏移量  $\text{Re}\Delta E = (E^d - E^f) / E^f$  从 MnXXII 的  $0.99\%$  变化到 ZnXXVII 的  $0.80\%$ , 然后变化到 BrXXXII 的  $0.66\%$ , 能级相对偏移量逐渐变小. 在图 2 中, 给出了当屏蔽因子  $a = 0.5$  (大致相当于温度  $T = 100$  eV, 电子密度  $n_e^0 = 5 \times 10^{23}$   $\text{cm}^{-3}$ ) 时, 能级相对偏移量随原子序数的变化情况. 从图中可以看出, 随着原子序数的不断增大, 各个元素对应的能级相对偏移量逐渐变小.

表 2 给出了  $2s^2-[2s_{1/2} 2p_{3/2}]$  跃迁的振子强度随屏蔽因子  $a$  的变化情况. 情形 1 只考虑了对核与电子之间相互作用的屏蔽, 情形 2 考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽. 从表中可以看出, 随着  $a$  值的不断增大, 等离子体屏蔽效应逐渐增强, 振子强度的值逐渐变大. 以情形 1 中 MnXXII

为例,当  $a$  分别为 0.0, 0.2, 0.5 时,振子强度从 0.15833 增至 0.15965,然后又增至 0.16636,并且增加的速度逐渐加快.与自由粒子即  $a = 0.0$  时的振子强度相比,当  $a = 0.2$  与  $a = 0.5$  时振子强度分别增加了 0.8% 和 5.1%.由于振子强度要满足收敛性要求,即振子强度总和要等于 1,这就意味着在考虑了等离子体屏蔽效应以后,振子强度在各个跃迁之间会重新分布,即在等离子体环境下,有些跃迁对应的振子强度会增大,有些跃迁对应的振子强度会减

小.为了更加清晰地看出等离子体屏蔽效应对振子强度的影响,在图 3 中给出了 FeXXIII 的  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  跃迁的振子强度偏移  $\Delta gf = gf^d - gf^f$  (其中,  $gf^d$  表示考虑了等离子体屏蔽效应的振子强度,  $gf^f$  表示自由粒子的振子强度)随屏蔽因子  $a$  的变化情况.可以看出随着  $a$  的不断增大,振子强度偏移的程度逐渐增大,偏移的速度逐渐加快;并且可以看出,振子强度的变化主要是由外部环境对核与电子之间相互作用的屏蔽引起的.

表 2 在不同 Debye 半径 ( $\lambda_D = 1/a$ ) 下 MnXXII-BrXXXII 等 11 个类 Be 离子的  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  跃迁的振子强度.情形 1 只考虑了对核与电子之间相互作用的屏蔽,情形 2 考虑了对核与电子、电子与电子之间相互作用的屏蔽(其中,  $a$  原子单位),  $gf^f$ ,  $Z$  分别表示 Debye 屏蔽因子、带权重的振子强度、原子序数)

$Z$	$a$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Mn	1	0.15833	0.15866	0.15965	0.16128	0.16352	0.16636
	2		0.15820	0.15914	0.16066	0.16272	0.16532
Fe	1	0.15792	0.15823	0.15912	0.16059	0.16262	0.16518
	2		0.15774	0.15862	0.16000	0.16186	0.16422
Co	1	0.15449	0.15477	0.15559	0.15695	0.15881	0.16117
	2		0.15433	0.15514	0.15640	0.15813	0.16030
Ni	1	0.15151	0.15177	0.15253	0.15377	0.15550	0.15767
	2		0.15139	0.15212	0.15328	0.15487	0.15688
Cu	1	0.14894	0.14918	0.14988	0.15103	0.15262	0.15464
	2		0.14882	0.14951	0.15059	0.15206	0.15392
Zn	1	0.14675	0.14697	0.14762	0.14869	0.15016	0.15203
	2		0.14620	0.14728	0.14828	0.14965	0.15137
Ga	1	0.14491	0.14511	0.14571	0.14671	0.14807	0.14981
	2		0.14490	0.14541	0.14634	0.14761	0.14921
Ge	1	0.14339	0.14358	0.14414	0.14506	0.14633	0.14795
	2		0.14328	0.14387	0.14472	0.14591	0.14740
As	1	0.14219	0.14236	0.14289	0.14374	0.14493	0.14643
	2		0.14213	0.14263	0.14343	0.14454	0.14593
Se	1	0.14128	0.14144	0.14192	0.14272	0.14383	0.14523
	2		0.14124	0.14169	0.14244	0.14347	0.14477
Br	1	0.14064	0.14080	0.14125	0.14200	0.14303	0.14434
	2		0.14063	0.14104	0.14174	0.14270	0.14392

## 4. 结 论

本文用 MCDF 模型研究了等离子体屏蔽效应对类 Be 离子的原子结构、跃迁能级、振子强度的影响.计算了 MnXXII-BrXXXII 等 11 个类 Be 离子的最低两个组态的  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  和  $2s^2-[2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  的

跃迁.计算结果表明,在考虑了等离子体屏蔽效应以后,谱线及其相应的振子强度都会出现蓝移现象,并且可以看出蓝移现象对等离子体屏蔽效应是非常敏感的,在一定的温度下,随着电子密度的增加,蓝移会迅速地以近似于指数的形式增加.对于中  $Z$  元素来讲,谱线蓝移主要来自于外部环境对核与电子之间相互作用的屏蔽效应上,而外部环境对电子之间

相互作用的屏蔽效应是比较弱的.

Debye 模型有其适用的范围,它只有在粒子耦合不太强的等离子体中才成立<sup>[31]</sup>,比如高温低密度的等离子体.除此之外,还要求德拜半径足够大,以

至于在德拜半径内能够包含足够多的自由电子.在本文计算中只考虑了静态屏蔽效应,而没有考虑动态屏蔽效应.如果要想进一步研究等离子体屏蔽效应的影响,就很有必要考虑这方面因素的影响.

- 
- [ 1 ] Dai S T , Solovyova A 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016408
- [ 2 ] Brage T , Judge P G , Brekke P 1996 *Astrophys. J.* **464** 1030
- [ 3 ] Rubiano J G , Florido R , Rodriguez R , Gil J M , Martel P , Minguez E 2004 *JQSRT* **83** 159
- [ 4 ] Saha B , Fritzsche S 2007 *J. Phys. B* **40** 259
- [ 5 ] Hahn Y , Krstic P 1993 *Phys. Scr.* **48** 340
- [ 6 ] Gil J M , Martel P , Minguez E , Rubiano J G , Rodriguez R , Ruano F H 2002 *JQSRT* **75** 539
- [ 7 ] Salzmann D , Wendin G 1978 *Phys. Rev. A* **18** 2695
- [ 8 ] Skupsky S 1980 *Phys. Rev. A* **21** 1316
- [ 9 ] Crowley B J B 1990 *Phys. Rev. A* **41** 2179
- [ 10 ] Debye P , Huckel E 1923 *Phys. Z.* **24** 185
- [ 11 ] Iafate G J , Mendelsohn L B 1969 *Phys. Rev.* **182** 244
- [ 12 ] Hatton G J , Lane N F , Weisheit J C 1981 *J. Phys. B* **14** 4879
- [ 13 ] Seidel J , Arndt S , Kraeft W D 1995 *Phys. Rev. E* **52** 5387
- [ 14 ] Bertini L , Mella M , Bressanini D , Morosi G 2004 *Phys. Rev. A* **69** 042504
- [ 15 ] Bielinska-Waz D , Karwowski J , Saha B , Mukherjee P K 2004 *Phys. Rev. E* **69** 016404
- [ 16 ] Winkler P 1996 *Phys. Rev. E* **53** 5517
- [ 17 ] Ugalde J M , Sarasola C , Lopez X 1997 *Phys. Rev. A* **56** 1642
- [ 18 ] Ray D , Mukherjee P K 1998 *J. Phys. B* **31** 3479
- [ 19 ] Kar S , Ho Y K 2004 *Phys. Rev. E* **70** 066411
- [ 20 ] Griem H R 1962 *Phys. Rev.* **128** 515
- [ 21 ] Silanes I , Mercero J M , Ugalde J M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 026408
- [ 22 ] Gupta U , Rajagopal A K 1979 *J. Phys. B* **12** L703
- [ 23 ] Rodríguez R , Gil J M , Rubiano J G , Florido R , Martel P , Minguez E 2005 *JQSRT* **91** 393
- [ 24 ] Saha B , Fritzsche S 2006 *Phys. Rev. E* **73** 036405
- [ 25 ] Feng R , Zou Y , Fang Q Y 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 738 ( in Chinese )[ 冯 蓉、邹 宇、方泉玉 1998 物理学报 **47** 738 ]
- [ 26 ] Dylla K G , Grant I P , Johnson C T , Parpia F A , Plummer E P 1989 *Comput. Phys. Commun* **55** 425
- [ 27 ] Brage T , Judge P G , Proffit C R 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 281101
- [ 28 ] Keenan F P 1996 *Space Sci. Rev.* **75** 537
- [ 29 ] Nguyen H , Koenig M , Benredjem D , Cabry M , Coulaud G 1986 *Phys. Rev. A* **33** 1279
- [ 30 ] Zhang L , Li X D , Jang X G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4501 ( in Chinese )[ 张 丽、李向东、蒋新革 2006 物理学报 **55** 4501 ]
- [ 31 ] Murillo M S , Weisheit J C 1998 *Phys. Rep.* **302** 1
- [ 32 ] Yuan J K , Dun Y S , Zheng D T 1996 *J. Phys. B* **29** 153

# Influence of Debye-screening on atomic energy levels and oscillator strengths<sup>\*</sup>

Li Yong-Qiang, Wu Jian-Hua, Yuan Jian-Min<sup>†</sup>

(*Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 6 August 2007; revised manuscript received 21 September 2007)

## Abstract

The influence of plasma screening on the energy levels and oscillator strength for ions in a high-temporary plasma is investigated by using the Debye-model. The  $2s^2 \rightarrow [2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  and  $2s^2 \rightarrow [2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  transitions of 11 beryllium-like ions from MnXXII to BrXXXII are calculated by including the effect of plasma-screening. The results show that the effect of plasma-screening increases the  $2s^2 \rightarrow [2s_{1/2}, 2p_{1/2}]$  transition energy of beryllium-like ions, which leads to a blue-shift; it also shows that the blue-shift becomes more and more obvious as the plasma-screening increases. The overall trend for the oscillator strength of the  $2s^2 \rightarrow [2s_{1/2}, 2p_{3/2}]$  transition is similar to that of the transition energy.

**Keywords** : Debye, plasma-screening, transition energy, oscillator strength

**PACC** : 3120A, 3130L, 3270C, 5220

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10676039), the National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant No. 2007CB815105) and the National High-Tech ICF Committee in China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jmyuan@nuct.edu.cn