

# 类钠离子的电子碰撞电离截面

齐静波 陈重阳 王炎森

(复旦大学现代物理研究所, 上海 200433)

(2001 年 2 月 16 日收到)

利用相对论修正扭曲波玻恩交换近似, 计算了 8 个类钠离子的电子碰撞直接电离和激发自电离截面. 基于这些结果, 给出了计算类钠等电子系离子 ( $18 \leq Z \leq 39$ ) 直接电离和激发自电离截面的高精度拟合公式. 计算结果与现有的实验值和其他理论值比较, 相当一致.

关键词: 电离截面, 组态相互作用, 扭曲波玻恩交换近似, 拟合公式

PACC: 3480D

## 1 引 言

电子离子碰撞是原子物理中非常重要的一个基本过程, 在与等离子体密切相关的可控核聚变、X 射线激光及天体物理等研究中, 电子碰撞电离截面的数据都是必不可少的<sup>[1, 2]</sup>. 为了实际应用, 引入合适的拟合公式, 快速和准确地得到截面数据, 对等离子体模拟也是非常必要的.

对电子与类氢<sup>[3, 4]</sup>、类氦<sup>[4]</sup>、类锂<sup>[5]</sup>、类硼<sup>[6]</sup>和类氟<sup>[7]</sup>等大量等电子系离子的碰撞电离(对类锂离子, 还包括激发自电离)我们已做过较详细的计算, 并给出了计算截面的经验公式. 对较复杂类钠铜离子我们也从理论上研究了组态相互作用对激发自电离截面的影响<sup>[8]</sup>, 而电子与类钠离子的碰撞电离正是 X 射线激光研究中的重要过程. Younger<sup>[9]</sup>曾经计算过核电荷小于 18 的类钠离子  $Mg^+$ ,  $Al^{2+}$ ,  $P^{4+}$  和  $Ar^{7+}$  的直接电离截面. Zhang 和 Sampson<sup>[10]</sup>用相对论的扭曲波方法给出了  $Se^{23+}$ ,  $Au^{68+}$  和  $U^{81+}$  离子的 3s 壳层的直接电离截面. Griffin<sup>[11]</sup>和 Pindzola 等<sup>[12]</sup>分别用非相对论和相对论扭曲波方法计算了包括激发自电离在内的 4 个类钠离子  $Ti^{11+}$ ,  $Cr^{13+}$ ,  $Fe^{15+}$  和  $Ni^{17+}$  的电离截面. Chen 和 Reed 等<sup>[13-18]</sup>也用相对论扭曲波方法对  $Z$  较大的类钠离子:  $Ar^{7+}$ ,  $Fe^{15+}$ ,  $Se^{23+}$ ,  $Kr^{25+}$ ,  $Xe^{43+}$  和  $Au^{68+}$  进行了各种电离截面的计算, 包含直接电离、激发自电离和共振激发双自电离过程的截面计算. Tayal 和 Henry<sup>[19]</sup>用紧耦合方法对  $Fe^{15+}$  离子的电子碰撞电离截面做了详细计算. 在所有的上述工作当中, 都未对类钠等电子系大量离子

作过系统规律的研究, 而且入射电子的能量范围并不是很宽.

本文中我们利用了相对论修正扭曲波玻恩交换近似(DWBE)的方法计算了核电荷在 ( $18 \leq Z \leq 39$ ) 范围内 8 个类钠离子的电子碰撞电离截面, 并把计算结果与实验数据进行了比较, 结果相当一致. 在此基础上开展了系统规律的研究, 给出了直接电离和激发自电离精度较高的拟合公式. 这些拟合公式不仅对模拟等离子体行为非常有用, 且可用内插法求得其他 14 个离子的直接电离截面和激发自电离截面.

## 2 基本理论框架与计算公式

关于扭曲波玻恩交换近似的理论, 我们以前就有过细致的描述<sup>[3, 5]</sup>. 在独立过程近似, 以及不考虑共振激发双自电离过程下, 对于基态离子总的电离截面可写为

$$Q(E_i) = Q_{2s}(E_i) + Q_{2p}(E_i) + Q_{3s}(E_i) + Q_{ea}(E_i), \quad (1)$$

其中  $Q_{2s}(E_i)$ ,  $Q_{2p}(E_i)$  和  $Q_{3s}(E_i)$  分别是 2s, 2p 和 3s 壳层电子的直接电离截面, 而  $Q_{ea}(E_i)$  是总的激发自电离截面. 后者又可表为

$$Q_{ea}(E_i) = \sum_j Q_{ea}^j(E_i) = \sum_j Q_{ea}^j(E_i) B_j^a, \quad (2)$$

其中  $Q_{ea}^j$  为来自自电离能级  $j$  的激发自电离截面,  $Q_{ea}^j$  为内壳层电子到能级  $j$  的激发截面,  $B_j^a$  能级  $j$  的自电离分支比, 定义为<sup>[8]</sup>

$$B_j^a = \frac{\sum_m A_d(j \rightarrow m)}{\sum_m A_d(j \rightarrow m) + \sum_k A_r(j \rightarrow k)}, \quad (3)$$

其中  $A_d(j \rightarrow m)$  是能级  $j$  到  $m$  的自电离速率,  $A_r(j \rightarrow k)$  是能级  $j$  到束缚能级  $k$  的辐射速率.

### 3 计算结果与讨论

#### 3.1 直接电离截面及拟合公式

我们选择了 8 个类钠离子:  $Ar^{7+}$ ,  $Ti^{11+}$ ,  $Cr^{13+}$ ,  $Fe^{15+}$ ,  $Zn^{19+}$ ,  $Ge^{21+}$ ,  $Se^{23+}$  和  $Y^{28+}$ , 计算了这些离子基态的直接电离截面. 为了便于讨论, 我们引入了约化能量, 定义如下:

$$u = E_i/I_d, \quad (4)$$

其中  $E_i$  为入射电子能量,  $I_d$  为各态的电离势(见表 1, 表 1 中电离势以 Rydberg 能量为单位,  $1Ry = 13.60eV$ ).

我们直接电离截面的计算与其他理论符合得相当好. 如对  $Ar^{7+}$  的  $2s$   $2p$  和  $3s$  的直接电离截面计算值与 Younger 的计算结果<sup>[9]</sup>比较, 误差在 2.5% 以内. 对  $Ti^{11+}$  离子, Griffin 等<sup>[11]</sup>给出了电子入射能量为 2 倍电离阈能的  $2s$   $2p$  和  $3s$  态的直接电离截面计算结果. 我们的计算值与其比较, 误差在 4% 以内(见表 2)在不同  $u$  下,  $Se^{23+}$  的  $3s$  态直接电离的计算值比文献 10 和 15 的相对论计算结果约小 5%.

表 1 类钠离子 ( $18 \leq Z \leq 39$ ) 的  $2s$   $2p$  和  $3s$  态的电离势

Z	类钠离子	$I_d(2s)$	$I_d(2p)$	$I_d(3s)$
18	$Ar^{7+}$	$3.478 \times 10^1$	$2.908 \times 10^1$	$1.056 \times 10^1$
19	$K^{8+}$	$4.105 \times 10^1$	$3.488 \times 10^1$	$1.294 \times 10^1$
20	$Ca^{9+}$	$4.783 \times 10^1$	$4.118 \times 10^1$	$1.555 \times 10^1$
21	$Sc^{10+}$	$5.513 \times 10^1$	$4.799 \times 10^1$	$1.839 \times 10^1$
22	$Ti^{11+}$	$6.295 \times 10^1$	$5.531 \times 10^1$	$2.145 \times 10^1$
23	$V^{12+}$	$7.129 \times 10^1$	$6.313 \times 10^1$	$2.475 \times 10^1$
24	$Cr^{13+}$	$8.015 \times 10^1$	$7.146 \times 10^1$	$2.827 \times 10^1$
25	$Mn^{14+}$	$8.953 \times 10^1$	$8.030 \times 10^1$	$3.202 \times 10^1$
26	$Fe^{15+}$	$9.944 \times 10^1$	$8.965 \times 10^1$	$3.601 \times 10^1$
27	$Co^{16+}$	$1.099 \times 10^2$	$9.951 \times 10^1$	$4.022 \times 10^1$
28	$Ni^{17+}$	$1.209 \times 10^2$	$1.099 \times 10^2$	$4.467 \times 10^1$
29	$Cu^{18+}$	$1.324 \times 10^2$	$1.208 \times 10^2$	$4.935 \times 10^1$
30	$Zn^{19+}$	$1.444 \times 10^2$	$1.322 \times 10^2$	$5.427 \times 10^1$
31	$Ga^{20+}$	$1.570 \times 10^2$	$1.441 \times 10^2$	$5.941 \times 10^1$
32	$Ge^{21+}$	$1.701 \times 10^2$	$1.565 \times 10^2$	$6.480 \times 10^1$
33	$As^{22+}$	$1.838 \times 10^2$	$1.694 \times 10^2$	$7.042 \times 10^1$
34	$Se^{23+}$	$1.980 \times 10^2$	$1.829 \times 10^2$	$7.628 \times 10^1$
35	$Br^{24+}$	$2.128 \times 10^2$	$1.968 \times 10^2$	$8.238 \times 10^1$
36	$Kr^{25+}$	$2.281 \times 10^2$	$2.113 \times 10^2$	$8.872 \times 10^1$
37	$Rb^{26+}$	$2.440 \times 10^2$	$2.264 \times 10^2$	$9.530 \times 10^1$
38	$Sr^{27+}$	$2.605 \times 10^2$	$2.419 \times 10^2$	$1.021 \times 10^2$
39	$Y^{28+}$	$2.775 \times 10^2$	$2.579 \times 10^2$	$1.092 \times 10^2$

表 2  $Ti^{11+}$  离子直接电离截面(单位为  $cm^2$ )的严格计算值(a), 方程(6)的拟合值(b)和 Griffin 等<sup>[11]</sup>的计算值(c)之间的比较

$u$ 电离态	1.25	2.0	4.0	6.0	10.0	15.0
$2s^a$	$1.977 \times 10^{-20}$	$3.770 \times 10^{-20}$	$3.743 \times 10^{-20}$	$3.186 \times 10^{-20}$	$2.360 \times 10^{-20}$	$1.771 \times 10^{-20}$
$2s^b$	$1.971 \times 10^{-20}$	$3.801 \times 10^{-20}$	$3.756 \times 10^{-20}$	$3.168 \times 10^{-20}$	$2.349 \times 10^{-20}$	$1.773 \times 10^{-20}$
$2s^c$		$3.8 \times 10^{-20}$				
$2p^a$	$1.049 \times 10^{-19}$	$1.889 \times 10^{-19}$	$1.792 \times 10^{-19}$	$1.499 \times 10^{-19}$	$1.105 \times 10^{-19}$	$8.179 \times 10^{-20}$
$2p^b$	$1.046 \times 10^{-19}$	$1.880 \times 10^{-19}$	$1.790 \times 10^{-19}$	$1.495 \times 10^{-19}$	$1.096 \times 10^{-19}$	$8.197 \times 10^{-20}$
$2p^c$		$1.89 \times 10^{-19}$				
$3s^a$	$9.093 \times 10^{-20}$	$1.548 \times 10^{-19}$	$1.400 \times 10^{-19}$	$1.161 \times 10^{-19}$	$8.606 \times 10^{-19}$	$6.529 \times 10^{-19}$
$3s^b$	$9.063 \times 10^{-20}$	$1.551 \times 10^{-19}$	$1.401 \times 10^{-19}$	$1.157 \times 10^{-19}$	$8.507 \times 10^{-19}$	$6.440 \times 10^{-19}$
$3s^c$		$1.50 \times 10^{-19}$				

为了研究等电子系系统变化规律, 我们引入约化截面  $uI_d^2 Q_d$ , 其中  $Q_d$  为直接电离截面. 在图 1 中

给出了在一定  $u$  下(实际计算我们在  $u$  从 1 到 15 间取了 17 个能量点)  $2s$  壳层直接电离约化截面  $uI_{2s}^2$

$Q_{2s}$  (单位为  $\pi a_0^2 \text{Ry}^2$ , 其中玻尔半径  $a_0 = 0.5292 \times 10^{-8} \text{cm}$ ) 随  $Z$  的变化. 在一定  $Z$  下, 约化截面随  $u$  光滑变化, 当  $u$  大时变化非常缓慢. 对一定  $Z$  下, 约化截面随  $u$  的变化可用下面 Younger 给出的公式很好地拟合<sup>[9]</sup>, 拟合值与严格值的平均偏差小于 0.5%.

$$uI_d^2 Q_d = A(1 - 1/u) + B(1 - 1/u)^2 + C \ln u + D \ln u / u. \quad (5)$$

由图 1 也可看到, 在  $u$  一定时约化截面随  $Z$  的变化不大, 且几乎是一条直线, 于是可用下面的公式进行拟合:

$$uI_d^2 Q_d = a(u) + b(u)(Z - 10), \quad (6)$$

式中参量  $a, b$  是约化能量  $u$  的函数. 它们有类似方程 (5) 的形式

$$a(u) = A_1(1 - 1/u) + B_1(1 - 1/u)^2 + C_1 \ln u + D_1 \ln u / u, \quad (7)$$

$$b(u) = A_2(1 - 1/u) + B_2(1 - 1/u)^2 + C_2 \ln u + D_2 \ln u / u, \quad (8)$$

其中  $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2$  和  $D_2$  为可调参数, 它们都有单位  $\pi a_0^2 \text{Ry}^2$  (见表 3). 由电离势和方程 (6) 可以快速得到在一定入射电子能量下类钠离子 ( $18 \leq Z \leq 39$ ) 的直接电离截面. 用拟合方程 (6) 算得的直接电离截面与严格计算值的偏差基本上都小于 1% (如表 2 中  $\text{Ti}^{11+}$  离子). 对于核电荷大于 39 的类钠离子, 因为有较强的相对论效应, 所以外推是不合适的. 对于核电荷小于 18 的类钠离子, 外推也不太合适, 因为线性标度方程 (6) 的近似变差了.

表 3 直接电离截面的拟合参数值  $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2$  和  $D_2$

跃迁	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$
$2s^2 2p^6 3s \rightarrow 2s 2p^6 3s$	$1.350 \times 10^1$	-4.101	1.579	-8.865E
$2s^2 2p^6 3s \rightarrow 2s^2 2p^5 3s$	$6.712 \times 10^1$	$-2.171 \times 10^1$	$7.825 \times 10^{-1}$	$-4.255 \times 10^1$
$2s^2 2p^6 3s \rightarrow 2s^2 2p^6$	$1.223 \times 10^1$	-5.025	$-5.451 \times 10^{-2}$	-8.720
跃迁	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_2$
$2s^2 2p^6 3s \rightarrow 2s 2p^6 3s$	$1.503 \times 10^1$	-5.117	$-3.866 \times 10^{-1}$	$-2.832 \times 10^1$
$2s^2 2p^6 3s \rightarrow 2s^2 2p^5 3s$	$7.552 \times 10^1$	$-6.699 \times 10^1$	$2.533 \times 10^1$	$-1.406 \times 10^2$
$2s^2 2p^6 3s \rightarrow 2s^2 2p^6$	$-8.911 \times 10^1$	$3.736 \times 10^1$	$1.288 \times 10^1$	$6.976 \times 10^1$

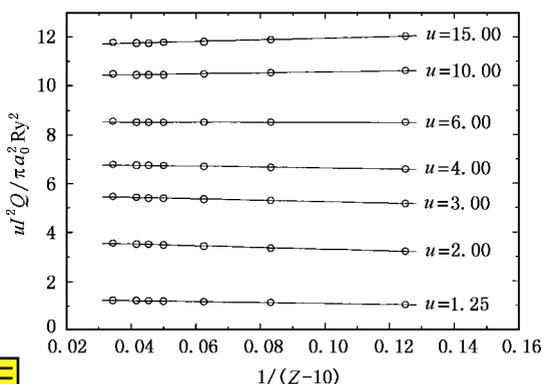


图 1  $2s$  壳层直接电离约化截面  $uI_d^2 Q_d$  (以空心圆点表示) 在不同  $u$  下随  $1/(Z - 10)$  的变化

### 3.2 激发自电离截面的计算

在对类钠离子激发自电离截面的计算过程中, 考虑了基态  $1s^2 2s^2 2p^6 3s$  到激发态  $2s 2p^6 3s l$  ( $l = 0, 1, 2$ )  $2s^2 2p^5 3s 3l$  ( $l = 0, 1, 2$ ) 和  $2s^2 2p^5 3s 4l$  ( $l = 1, 2$ ) 的

激发, 其他的跃迁可以被忽略. 在上述 8 种激发过程中  $2p^6 3s \rightarrow 2p^5 3s 3d$  的跃迁起到主要的贡献.

由 (2) 式可求得任何离子的  $Q_{\text{ea}}(E_i)$ , 但在计算激发截面和自电离分支比时, 必须考虑组态相互作用<sup>[8]</sup>. 值得指出的是, 我们在激发截面和激发自电离截面的计算过程中还发现由于  $2p^5 3s 3d$  和  $2p^5 3p^2$  组态混合比较强烈, 所以我们要对  $2p^5 3p^2$  组态中所混入的  $2p^5 3s 3d$  的贡献加以考虑. 实际计算中计入了  $2p^5 3s 3d$  的混合系数大于 0.1 的能级的贡献. 图 2 给出了单组态和多组态近似下  $\text{Ge}^{21+}$  离子基态到  $2p^5 3s 3d$  组态的总激发截面和总自电离截面. 由图 2 可见, 由单组态和多组态所计算的总激发截面差别很小, 而在考虑分支比后, 由多组态计算得到的自电离截面是单组态下的 2 倍左右. 可见考虑组态相互作用是极为重要的.

为了与实验比较, 我们在图 3 和图 4 中给出了  $\text{Ar}^{7+}$  和  $\text{Fe}^{15+}$  的总电离截面计算结果以及实验数据. 由图 3 和图 4 可见, 对于  $\text{Ar}^{7+}$  离子, 我们的结果介

于 Rachafi 等<sup>[20]</sup>和 Zhang 等<sup>[21]</sup>给出的两组实验值之间. 对  $\text{Fe}^{15+}$  离子, 我们的计算与 Linkemann 等<sup>[22]</sup>的实验结果符合得相当好, 和 Gregory 等<sup>[23]</sup>的实验数据相差较大. 由图 3 和图 4 也可看出, 对于类钠离子, 激发自电离截面对总截面的贡献还是很大的, 而且贡献随着核电荷的增加而增加. 例如: 对  $\text{Ar}^{7+}$  离子, 在所有的自电离道开放后, 激发自电离截面是直接电离截面的 1 倍左右, 而对  $\text{Fe}^{15+}$  离子, 前者大约是后者的 4 倍. 值得指出的是, 低能时计算结果与实验值存在的差别主要是由于在我们的计算中没有包含共振激发双自电离截面. 我们还比较了核电荷比较高的类钠离子  $\text{Se}^{23+}$  总截面的计算结果和 Chen 等<sup>[14]</sup>用全相对论的计算结果(包括直接电离和激发自电离截面)发现入射能量在 1.4—2.0keV 的范围内, 偏差小于 10%.

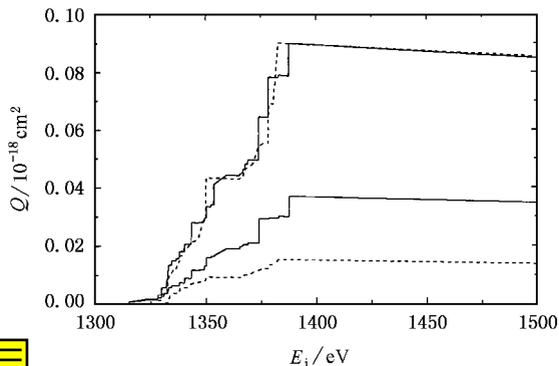


图 2  $\text{Ge}^{21+}$  离子在单组态和多组态下, 基态到  $2p^5 3s 3d$  组态的总激发截面和通过该组态的总自电离截面. 较高的虚线和实线分别是单组态和多组态近似下的总激发截面. 较低的虚线和实线分别是单组态和多组态近似下的自电离截面.

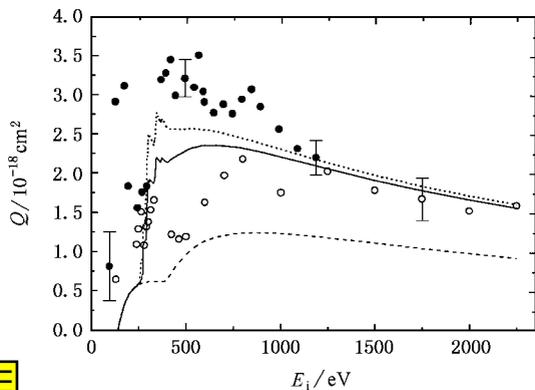


图 3  $\text{Ar}^{7+}$  离子的总电离截面. 点线为不考虑分支比的计算值; 实线为考虑分支比的计算值; 虚线为总的直接电离截面值; 空心圈点取自文献 20 的实验值, 实圈点取自文献 21 的实验值.

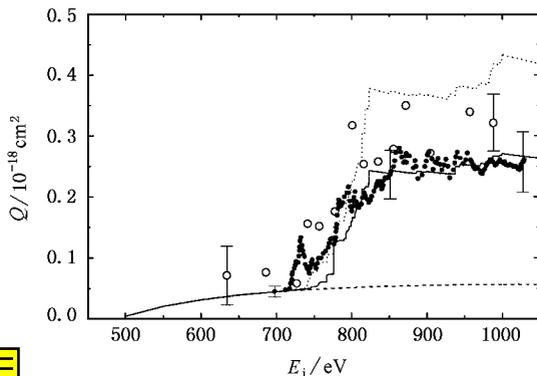


图 4  $\text{Fe}^{15+}$  离子总的电离截面. 虚线为我们算的直接电离截面计算值; 实线是直接电离和激发自电离截面的相加值; 点线为直接电离和激发截面之和; 实心圈点取自文献 22 的实验值; 空心圈点为取自文献 23 的实验值.

### 3.3 激发自电离截面的拟合公式

在上述 8 个离子激发自电离截面计算的基础上, 可以用如下的拟合公式(9)给出类钠等电子系离子的电离截面, 显然在自电离道开放的阈能附近只能给出平均变化趋势.

$$Q_{\text{ea}}(u, Z) = \frac{A_3(Z)}{Z^4} \left(1 - \frac{1}{u^{10}}\right) \left(\frac{1}{u^{1/2}} + \frac{B_3(Z)}{u}\right), \quad (9)$$

其中  $A_3(Z)$  和  $B_3(Z)$  是依赖于  $Z$  的参数,  $u$  为约化能量, 定义为

$$u = E_i / I_{\text{ea}}, \quad (10)$$

$I_{\text{ea}}$  为  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5 3s^2 P_{3/2}$  的激发能. 对于类钠离子 ( $18 \leq Z \leq 39$ ) 的  $I_{\text{ea}}$  值见表 4. 在方程(9)中,  $A_3(Z)/Z^4$  与截面曲线的平均高度有关, 因子  $(1 - 1/u^{10})$  描绘了阈能附近的截面曲线迅速上升的趋势, 高能处截面的减少可以用因子  $[1/u^{1/2} + B_3(Z)/u]$  来描述.

这里我们给出了 8 个类钠离子的  $A_3$  和  $B_3$  参数(见表 5). 作为拟合的例子, 图 5 给出了  $\text{Fe}^{15+}$  离子的激发自电离截面随  $u$  变化的曲线. 实线为用相对论修正扭曲波交换近似方法的计算值, 虚线为方程的拟合值. 由图 5 可见, 除了阈能附近, 我们的拟合是相当好的. 我们也可通过线性内插快速的得到其他类钠离子的参数  $A_3(Z)$  和  $B_3(Z)$  的值. 这样就可得到 ( $18 \leq Z \leq 39$ ) 范围内所有类钠离子的自电离截面了.

表 4 类钠离子  $2p^6 3s^2 S_{1/2} \rightarrow 2p^5 3s^2 {}^2P_{3/2}$  跃迁的激发能

Z	$I_{ea}/eV$	Z	$I_{ea}/eV$	Z	$I_{ea}/eV$	Z	$I_{ea}/eV$
18	$2.439 \times 10^2$	24	$5.737 \times 10^2$	30	$1.037 \times 10^3$	36	$1.632 \times 10^3$
19	$2.895 \times 10^2$	25	$6.417 \times 10^2$	31	$1.127 \times 10^3$	37	$1.744 \times 10^3$
20	$3.389 \times 10^2$	26	$7.134 \times 10^2$	32	$1.221 \times 10^3$	38	$1.859 \times 10^3$
21	$3.920 \times 10^2$	27	$7.887 \times 10^2$	33	$1.318 \times 10^3$	39	$1.978 \times 10^3$
22	$4.488 \times 10^2$	28	$8.678 \times 10^2$	34	$1.419 \times 10^3$		
23	$5.094 \times 10^2$	29	$9.505 \times 10^2$	35	$1.524 \times 10^3$		

表 5 类钠离子激发自电离截面拟合参数值  $A_3, B_3$

Z	$A_3/cm^2$	$B_3$
18	$2.11 \times 10^{-13}$	$-6.22 \times 10^{-2}$
22	$1.51 \times 10^{-13}$	$3.52 \times 10^{-2}$
24	$9.58 \times 10^{-14}$	$3.24 \times 10^{-1}$
26	$8.57 \times 10^{-14}$	$3.97 \times 10^{-1}$
30	$7.10 \times 10^{-14}$	$4.23 \times 10^{-1}$
32	$6.08 \times 10^{-14}$	$5.08 \times 10^{-1}$
34	$5.54 \times 10^{-14}$	$5.34 \times 10^{-1}$
39	$4.88 \times 10^{-14}$	$6.50 \times 10^{-1}$

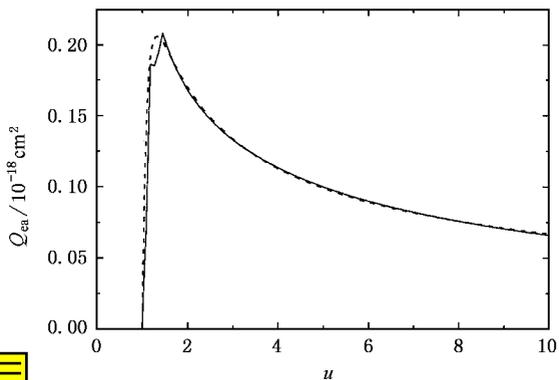


图 5  $Fe^{15+}$  激发自电离截面的计算值与拟合值的比较

### 4 结 论

本文利用相对论修正扭曲波玻恩交换近似方法, 在较宽的能区范围内所计算得到的类钠离子的电子碰撞直接电离截面和激发自电离截面与实验值和其他理论计算结果比较, 相当一致. 我们所给出的直接电离和激发自电离截面的拟合公式精度高, 便于应用.

感谢中国原子分子数据联合体和中路-玻尔奖学金对本课题的资助.

[ 1 ] T. D. Mark, G. H. Duan, *Electron Impact Ionization*( Springer-Verlag, Berlin, 1986).

[ 2 ] International Bulletin on Atomic and Molecular Data for Fusion. IAEA, VIENNA ( 1995—2000 ).

[ 3 ] W. Hu *et al.*, *Phys. Rev.*, **A49**( 1994 ), 989.

[ 4 ] D. Fang *et al.*, *At. Data and Nucl. Data Tabl.*, **61**( 1995 ), 91; D. F. Fang *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **41**( 1992 ), 744( in Chinese ) [ 方渡飞、王炎森、胡 畏等, *物理学报* **41**( 1992 ), 744 ].

[ 5 ] C. Chen *et al.*, *At. Data and Nucl. Data Tabl.*, **64**( 1996 ), 301; W. Hu *et al.*, *Acta Phys. Sin. ( Overseas Edition )*, **5**( 1996 ) 721; W. Hu *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **42**( 1993 ), 1414( in Chinese ) [ 胡 畏等, *物理学报* **42**( 1993 ), 1414 ].

[ 6 ] D. F. Fang, Y. S. Wang *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **42**( 1993 ), 40 ( in Chinese ) [ 方渡飞、王炎森等, *物理学报*, **42**( 1993 ), 40 ].

[ 7 ] C. Chen *et al.*, *At. Data and Nucl. Data Tables*, **70**( 1998 ), 255.

[ 8 ] H. G. Teng, C. Y. Chen *et al.*, *J. Phys.*, **B29**( 1996 ), 2209.

[ 9 ] S. M. Younger, *Phys. Rev.*, **A24**( 1982 ), 1272.

[ 10 ] H. L. Zhang, D. H. Sampson, *Phys. Rev.*, **A42**( 1990 ), 5378.

[ 11 ] D. C. Griffin, M. S. Pindzola, C. Botzcher, *Phys. Rev.*, **A36**( 1987 ), 3642.

[ 12 ] M. S. Pindzola, D. M. Mitnik *et al.*, *Phys. Scrip.*, **57**( 1998 ), 514.

[ 13 ] K. J. Reed, M. H. Chen, *Phys. Rev.*, **A54**( 1996 ), 2967.

[ 14 ] M. H. Chen, K. J. Reed, D. L. Moores, *Phys. Rev. Lett.*, **64**( 1990 ), 1350.

[ 15 ] M. H. Chen, K. J. Reed, D. M. McWilliams, *Phys. Rev.*, **A52**( 1995 ), 2881.

[ 16 ] M. H. Chen, K. J. Reed, *Phys. Rev.*, **A47**( 1993 ), 1874.

[ 17 ] K. J. Reed, M. H. Chen, D. L. Moores, *Phys. Rev.*, **A42**( 1990 ), 5315.

[ 18 ] K. J. Reed, M. H. Chen, D. L. Moores, *Phys. Rev.*, **A41**( 1990 ), 550.

[ 19 ] S. S. Tayal, Ronald J. W. Henry, *Phys. Rev.*, **A39**( 1989 ), 3890.

[ 20 ] S. Rachafi *et al.*, *J. Phys.*, **B24**( 1996 ), 1037.

[ 21 ] Y. Zhang, C. B. Reddy *et al.*, *Phys. Rev.*, **A45**( 1992 ), 29.

[ 22 ] J. Linkemann, A. Müller, J. Kenntner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**( 1995 ), 4173.

[ 23 ] D. C. Gregory *et al.*, *Phys. Rev.*, **A35**( 1987 ), 3256.

# ELECTRON IMPACT IONIZATION CROSS SECTIONS FOR THE Na-LIKE IONS

QI JING-BO CHEN CHONG-YANG WANG YAN-SEN

( *Institute of Modern Physics , Fudan University , Shanghai 200433 ,China* )

( Received 16 February 2001 )

## ABSTRACT

By using a distorted-wave Born exchange( DWBE ) approximation method including the relativistic correction , we calculated the direct ionization and excitation autoionization cross sections of eight Na-like ions . Based on the calculated results , we present two empirical formulas with high accuracy for calculating direct ionization and excitation autoionization cross sections . Our results are in good agreement with the experiment data and other theoretical values .

**Keywords** : ionization cross section , configurations interaction , distorted-wave Born exchange approximation , empirical formula

**PACC** : 3480D