

# Ni<sup>27+</sup> 离子 K $\alpha$ 和 K $\beta$ 型衰变的双电子复合 速率系数的计算<sup>\*</sup>

牟致栋<sup>†</sup> 魏琦瑛

(中国矿业大学理学院, 徐州 221008)

(2006 年 6 月 21 日收到, 2006 年 7 月 8 日收到修改稿)

用 HFR 波函数对低密度类氢 Ni<sup>27+</sup> 等离子体与电子相互作用的 KLn 和 KMn 共振激发的双电子复合过程进行了细致的理论计算研究. 根据可能的重要辐射衰变通道, 分析了 Ni<sup>27+</sup> 等离子体 K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰变的双电子复合速率系数随旁观电子主量子数  $n$  和轨道角动量子数  $l$  与电子温度的变化行为, 计算了 Ni<sup>27+</sup> 等离子体双电子复合过程的总速率系数. 研究表明, 在低密度条件下, K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰变的分支双电子复合速率系数与旁观电子主量子数  $n$  和轨道角动量子数  $l$  有重要关系, 前者的分支速率系数远大于后者.

关键词: Ni<sup>27+</sup> 离子, K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰变, 双电子复合, 速率系数

PACC: 3280D, 3480D, 3480L

## 1. 引 言

在托卡马克 (tokamak) 和激光核聚变装置中, 温度通常达到数千电子伏 (keV), 在这种条件下, 中低  $Z$  值的杂质等离子体通常被剥离成类 H 类 He 等离子态, 这些离子能够从等离子体中俘获一个能量略低于其电离能的自由电子, 形成自电离共振双激发态, 电离共振双激发态通过发射 X 射线衰变到一个低能亚稳定态, 这一过程称之为双电子复合 (DR). DR 过程有关参数准确的理论计算研究, 对于实验核聚变等离子体的诊断和正确理解等离子体的内部物理机理十分重要. 关于类 H 等电子序列离子的 DR 过程总速率系数的理论计算研究, Burgess 等人<sup>[1]</sup> 根据其著名的半经验公式进行了计算研究报道. Karim 等人<sup>[2-5]</sup> 运用 HFS 波函数对类 H 等电子序列 (Si, Ca, Fe, Ti, Cr, Ni 等) 离子的 KLn 激发的 DR 过程的复合伴线能谱, 分支速率系数和总速率系数进行了比较系统的计算研究. Mazzotta 等人<sup>[6]</sup> 在已有的最新理论研究结果的基础上, 根据文献 [1] 的半经验公式计算了类 H 等电子序列离子的 DR 总速率系数. 盛勇等人<sup>[7]</sup> 报道了类 H (Mg, Al) 离子 DR 速率系数的

HFR 理论计算的结果. Badnell 等人<sup>[8]</sup> 在 TFD 理论的基础上, 采用了 Breit-Pauli 中介耦合方案, 对包括 Ni<sup>27+</sup> 在内的类 H 等电子序列 32 个离子的 KLn 激发的 DR 速率系数进行了全面的理论计算研究. 近年来, 由于电子束离子阱 (EBIT) 和离子存储环 (ISR) 装置的不断发展<sup>[9-11]</sup>, 对中高  $Z$  原子体系甚至重原子体系的高剥离态等电子序列离子的 DR 的研究取得了重要的结果<sup>[12-14]</sup>, 这些研究成果, 使得从理论上更好地理解核聚变等离子体内部物理机理变得尤为重要和迫切, 与此相关的理论研究依然十分活跃<sup>[15-23]</sup>. 在天文等离子体中, Ni<sup>27+</sup> 离子是最后一个被剥离为类 H 离子的十分重要的离子, 显然, Ni<sup>27+</sup> 离子的 DR 过程的有关参数的理论计算研究, 对于天文等离子体的诊断探测同样具有重要意义. 根据我们对有关资料的分析, 理论计算研究并没有完全考虑 Ni<sup>27+</sup> 离子的 DR 过程中的激发和衰变的细致情况, 同时, 不同的理论计算方法得到的结果还有差异. 为此, 我们采用 HFR 波函数对高温低密度类氢 Ni<sup>27+</sup> 等离子体的 KLn 和 KMn 的共振激发的 DR 过程进行了细致的理论计算研究. 在理论计算研究的基础之上, 选择了满足电偶极辐射跃迁的重要衰变通道, 分析了 Ni<sup>27+</sup> 等离子体 K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰

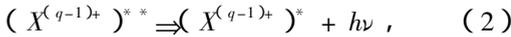
<sup>\*</sup> 中国矿业大学科技基金 (项目编号: OK4522) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: muzhidong@126.com

变过程 DR 的分支速率系数随等离子体的复合类型、旁观电子主量子数  $n$  和轨道角动量子数  $l$ , 电子温度的变化行为. 计算了 Ni<sup>27+</sup> 离子总的 DR 速率系数随电子温度的变化行为. 研究表明, 在低密度条件下, K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数与旁观电子主量子数  $n$  和轨道角动量子数  $l$  有重要关系, 对 Ni<sup>27+</sup> 离子而言, K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰变的 DR 通道仍然是重要的物理过程, 但就 DR 速率系数来说前者远大于后者.

## 2. 理论方法

DR 过程可以用下面的形式表示:



(1) 式表示一个  $X^{q+}$  的离子与电子之间相互作用形成  $(X^{(q-1)+})^{**}$  离子的无辐射俘获形成双激发自电离态的过程. 如果处于双激发自电离态的离子通过辐射一个 X 射线光子衰变到一个能量较低的亚稳态, 取 (2) 式所表示的过程, 则 DR 过程完成. 对给定离子而言, 如果这种离子的处于基态  $|m\rangle$  和处于俘获自电离激发态  $|j\rangle$  的离子数密度满足 Boltzman 和 Saha 方程, 在确定自由电子速率分布时设其满足 Maxwell-Boltzman 分布, 那么在局域热力学平衡 (LTE) 条件下, 根据细致平衡原理, 电子的俘获速率可以通过自电离离子的电离速率得到. 为此, 设处于  $|m\rangle$  态的离子俘获电子后形成双激发自电离  $|j\rangle$  态, 则在单位体积中处于  $|m\rangle$  态的离子俘获电子的速率可以表示为<sup>[24, 25]</sup>

$$\beta_{mj}^d(T) = \frac{4\pi^{3/2} a_0^3}{T^{3/2}} \frac{g_j A_{jm}^a}{g_m} e^{-E_{jm}/T}, \quad (3)$$

式中  $g_m$  和  $g_j$  分别为初始复合离子态和双激发自电离离子态的统计权重,  $E_{jm} = E^j - E^m$  为 Auger 电子的能量,  $T$  为等离子体电子温度, 单位均为 Ry.  $a_0$  为 Bohr 半径.

一旦处于  $|j\rangle$  态的离子形成后, 它可能以速率  $A_{jm}^a$  再次自电离过程到所有可能的  $|m\rangle$  态. 在低密度等离子体中, 碰撞去激发可以忽略不计, 这样唯一重要的过程就是处于  $|j\rangle$  态的自电离离子以速率  $A_{jk}^r$  衰变到低能  $|k\rangle$  态. 处于  $|j\rangle$  态的离子通过辐射衰变跃迁到低能  $|k\rangle$  态的概率由分支比给出:

$$B_{jk} = \frac{A_{jk}^r}{\sum_m A_{jm}^a + \sum_k A_{jk}^r}, \quad (4)$$

式中  $A_{jk}^r$  和  $A_{jm}^a$  分别为  $|j\rangle$  到  $|m\rangle$  的自电离速率和  $|j\rangle$  到  $|k\rangle$  的自发辐射速率. 如果采用扭曲波近似, 即把离子实作为一个球对称的原子体系, 而入射 Auger 电子看成其在外壳层轨道的一个电子, 那么整个体系的波函数则为类氢波函数. 这时根据多体微扰近似, 从  $|m\rangle$  到  $|j\rangle$  的自电离速率可以表示为

$$A_{jm}^a = \frac{2\pi}{h} \left| j \left| \frac{1}{r_{12}} \right| m \right|^2, \quad (5)$$

而  $|j\rangle$  到  $|k\rangle$  的电偶极辐射衰变速率表示成下面的形式:

$$A_{jk}^r = \frac{4(2\pi)^4 \sigma_{jk}^3}{3h^4 c^3 g_j} |j| P^{(1)} |i|^2, \quad (6)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $P^{(1)}$  为电偶极跃迁算符,  $\sigma_{jk}$  为电偶极跃迁的谱线波数. 通过路径  $|m\rangle \rightarrow |j\rangle \rightarrow |k\rangle$  的净复合速率系数是

$$\alpha_{mj}^d(T) = \beta_{mj}^d(T) B_{jk}, \quad (7)$$

而经过路径  $|j\rangle \rightarrow |k\rangle$ , 对于复合离子所有初始  $|m\rangle$  能态求平均的有效速率系数是

$$\alpha_{jk}^d(T) = \frac{4\pi^{3/2} a_0^3}{T^{3/2}} e^{-E_j/T} \left( \frac{g_j}{G_m} \right) \times \frac{\sum_m A_{jm}^a A_{jk}^r}{\sum_m A_{jm}^a + \sum_k A_{jk}^r}. \quad (8)$$

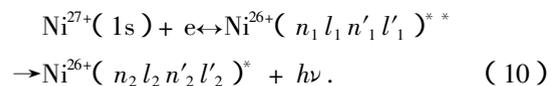
对于所有路径的总的速率系数为

$$\alpha^d(T) = \sum_j \sum_k \alpha_{jk}^d(T). \quad (9)$$

计算过程中, 采用了包括相对论质量项和达尔文项修正在内的单组态 HFR 波函数, 同时也包括了相关效应和 Breit 效应修正, 对连续态的波函数采用了扭曲波近似.

## 3. 结果与讨论

为了得到 Ni<sup>27+</sup> 离子 K $\alpha$  型和 K $\beta$  型辐射衰变的 DR 过程的特征, 就需要对上述包含这两类 DR 过程的可能通道作全面的计算分析. 对于 Ni<sup>27+</sup> 离子, 复合通道的一般形式如下:

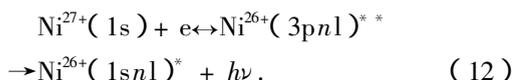
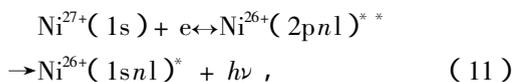


理论上 (10) 式表示的自电离双激发高能态 Ni<sup>26+</sup>( $n_1 l_1 n'_1 l'_1$ )<sup>\*\*</sup> 到低能亚稳态 Ni<sup>26+</sup>( $n_2 l_2 n'_2 l'_2$ )<sup>\*</sup> 的辐射衰变过程应该包括所有可能的全部衰变过程, 例如, 满足电偶极 (E1) 跃迁选择定则的衰变过程; 磁偶极 (M1) 和电四极 (E2) 等电磁多极衰变过程;

自电离双激发高能态到低能亚稳态的态-态辐射衰变过程中,还可能存在着复杂的级联衰变过程等.显然,如果理论计算中要包括上述全部衰变过程,那么这种辐射衰变过程实际上有无穷多个,具体计算上存在困难.理论研究表明<sup>[26,27]</sup>相对于电偶极辐射衰变过程的总 DR 速率系数而言,包括级联衰变在内的其他电磁多极衰变过程的复合速率系数很小,完全可以忽略.因此,本文计算中仅考虑满足电偶极跃迁选择定则辐射衰变过程.

### 3.1. $K\alpha$ 型和 $K\beta$ 型辐射衰变的 DR 速率系数随旁观电子主量子数 $n$ 的变化

$K\alpha$ 型辐射衰变的 DR 过程是指自电离双激发态原子体系内壳层  $2p$  到辐射衰变亚稳态  $1s$  的辐射衰变的 DR 过程,因此,自电离双激发态的形成成为  $KL_n$  双激发( $n$  为自电离双激发态外壳层旁观电子的主量子数标记)过程;与  $K\alpha$  辐射衰变的 DR 过程相似, $K\beta$ 型辐射衰变的 DR 过程是指自电离双激发态的形成过程为  $KM_n$  双激发过程,而辐射衰变过程为内壳层  $3p-1s$  的过程.两种 DR 过程的具体形式如下:



(11) 式和 (12) 式分别表示  $\text{Ni}^{27+}$  离子的  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 过程.

具体计算中,对 (11) 式所表示的  $K\alpha$  型辐射衰变,自电离双激发态和辐射衰变的亚稳态的外壳层旁观电子的主量子数取  $n = 2-9$ ,而外壳层旁观电子的轨道角动量子数取  $l = 0-7$ .图 1 表示了对于不同的主量子数取  $n$ , $K\alpha$  型辐射衰变的分支 DR 速率系数随  $\text{Ni}^{27+}$  等离子体电子温度的变化关系.从图中可以看到,对  $K\alpha$  型衰变的 DR 过程,外壳层不同旁观电子的主量子数  $n$  的分支复合速率系数在整个温度范围 (0.1—10 keV) 均随着  $n$  的增大而减小,而且不存在交叉现象.对 (12) 式所表示的  $K\beta$  辐射衰变,自电离双激发态和辐射衰变的亚稳态的外壳层旁观电子的主量子数取  $n = 3-9$ ,轨道角动量子数取  $l = 0-7$ ,图 2 表示了在  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数随  $\text{Ni}^{27+}$  等离子体电子温度  $T$  的变化关系,从图中可以看到对  $K\beta$  型辐射衰变,不同旁观电子的主量子数  $n$  的分支复合速率系数在整个温度范围内,均随着  $n$  的增大而减小,而且也不存在交

叉现象,其共振峰值也不明显.

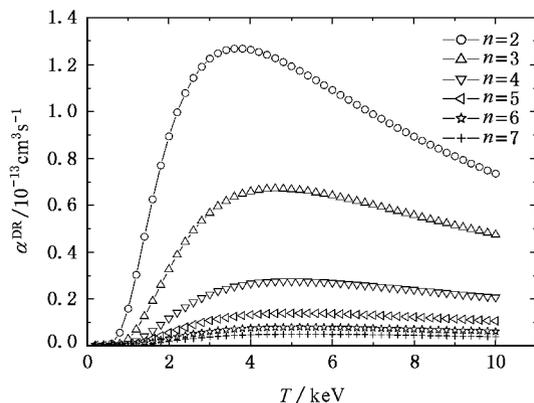


图 1  $K\alpha$ 型衰变的 DR 分支速率系数与  $n$  的关系

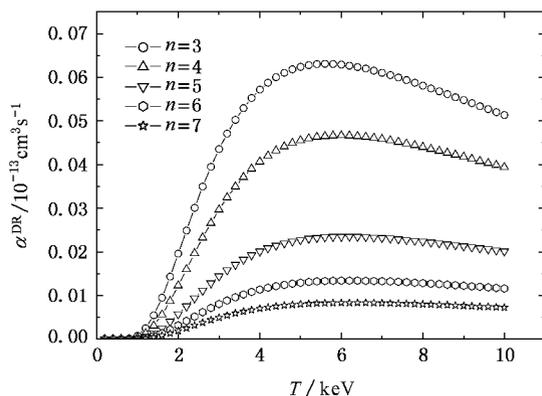


图 2  $K\beta$ 型衰变的 DR 分支速率系数与  $n$  的关系

为了对  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数随旁观电子主量子数  $n$  的变化有一个更好的理解,表 1 中列出了  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数的共振峰值位置随旁观电子主量子数  $n$  的变化,具体计算结果表明,在全部旁观电子的 Rydberg 组态中,对于  $K\alpha$  型辐射衰变的 DR 过程,当  $n = 2$  时的分支复合速率系数在温度  $T = 3.6$  keV 时,其共振峰值为最大 ( $1.268 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),而且随着  $n$  的增加,其相应的分支复合速率系数的共振峰值逐渐减小,当  $n = 9$  时,分支复合速率系数的共振峰值最小 ( $0.0229 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),约为最大值 ( $n = 2$ ) 的 1.8%.而  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 过程随旁观电子主量子数  $n$  的变化与  $K\alpha$  型基本相似,从表 1 可以看出, $n = 3$  的分支复合速率系数在温度  $T = 5.4$  keV 时,共振峰值最大 ( $0.0631 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),随着  $n$  的增加,其相应的分支复合速率系数的共振峰值逐渐减小,当  $n = 9$  时,分支复合速率系

数的共振峰值最小( $0.0039 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 约为最大值( $n = 3$ ) 的 6.2%。如果对两种 DR 过程不同  $n$  的 Rydberg 组态的分支复合速率系数的共振峰值的进行比较, 那么从表 1 就可以看出, 当  $n \geq 6$  时,  $K\alpha$  型 DR 速率系数变得很小, 而对于  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数, 当  $n \geq 7$  时, DR 速率系数变得很小。从表 1 还可以看出, 就 DR 速率系数的峰值而言, 对于相同旁观电子主量子数,  $K\beta$  型辐射衰变的分支 DR 速率系数小于  $K\alpha$  型辐射衰变的分支 DR 速率系数约一个数量级。

表 1  $K\alpha$  和  $K\beta$  衰变的 DR 分支速率系数峰值与  $n$  的关系

$K\alpha$ 衰变			$K\beta$ 衰变		
$n$	$T/\text{keV}$	$\alpha^{\text{DR}}/10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$n$	$T/\text{keV}$	$\alpha^{\text{DR}}/10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
2	3.6	1.2678			
3	4.6	0.6698	3	5.6	0.0631
4	5.0	0.2758	4	6.0	0.0466
5	5.2	0.1384	5	6.2	0.0235
6	5.2	0.0789	6	6.2	0.0134
7	5.2	0.0492	7	6.2	0.0083
8	5.2	0.0328	8	6.2	0.0055
9	5.4	0.0229	9	6.4	0.0039

### 3.2. $K\alpha$ 和 $K\beta$ 衰变的 DR 速率系数与旁观电子角动量子数 $l$ 的关系

为了理解  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数随旁观电子角动量子数  $l$  的变化关系, 本文又按不同电子角动量子数 ( $l = 0-8$ ) 选取了一系列的复合通道进行了比较全面的计算研究。图 3 和图 4 分别为  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的分支 DR 速率系数随旁观电子角动量  $l$  与等离子体电子温度  $T$  的变化关系。从图中可以看到, 随旁观电子角动量子数  $l$  的增大, 其相应的分支 DR 速率系数峰值并不存在相应的减小, 而是当旁观电子角动量子数依次为  $l = 1, 2, 0, 3, 4, \dots, 8$ , 相应的分支 DR 速率系数由大到小变化的。

表 2 中列出了  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数的共振峰值随旁观电子轨道角动量子数  $l$  的变化,  $l \geq 6$  时的 DR 速率系数很小, 表中没有列出。计算结果表明, 在全部的旁观电子 Rydberg 组态中, 对  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 过程, 当  $l = 1$  时的分支 DR 复合速率系数的其共振峰值为最大。当  $l = 4$  时, 分支复合速率系数的共振峰值很小。当  $l \geq 4$  时,  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型 DR 速率系数变得很小, 分别为最大值的 0.44% 和 0.48%。因而当  $l \geq 4$  时, DR 速率系数变得很小, 完全可以忽略。

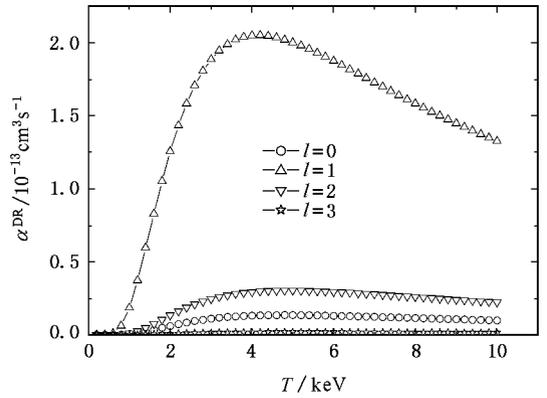


图 3  $K\alpha$  型衰变的 DR 分支速率系数与  $l$  的关系

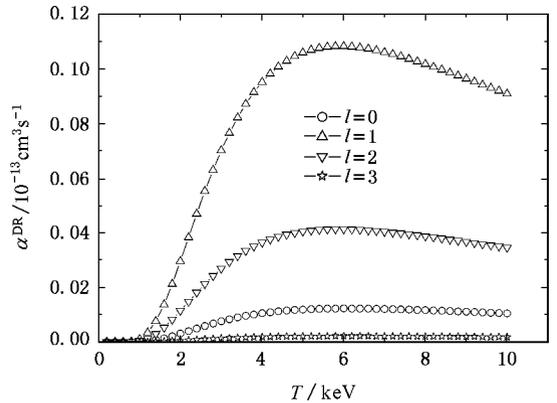


图 4  $K\beta$  型衰变的 DR 分支速率系数与  $l$  的关系

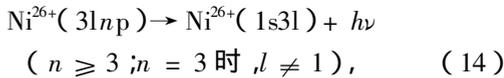
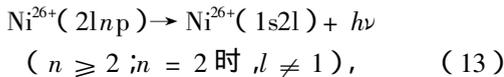
表 2  $K\alpha$  和  $K\beta$  衰变的 DR 分支速率系数峰值与  $l$  的关系

$K\alpha$ 辐射衰变			$K\beta$ 辐射衰变		
$l$	$T/\text{keV}$	$\alpha^{\text{DR}}/10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$l$	$T/\text{keV}$	$\alpha^{\text{DR}}/10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
0	4.8	0.1348	0	6.0	0.0123
1	4.2	2.0497	1	6.0	0.1083
2	4.8	0.3030	2	5.8	0.0413
3	5.2	0.0182	3	6.4	0.00214
4	5.2	0.00059	4	6.2	0.00006
5	5.2	0.000011	5	6.2	0.0000082

### 3.3. $\text{Ni}^{27+}$ 离子 DR 总速率系数随电子温度 $T$ 的变化

为了得到  $\text{Ni}^{27+}$  离子 DR 总速率系数随电子温度  $T$  的变化关系, 本文对(10)式表示的 DR 的许多可能的辐射通道进行了细致的理论计算研究。首先根据(11)和(12)式表示的  $K\alpha$  和  $K\beta$  辐射衰变的 DR 过程, 计算了这两类通道总的 DR 分支速率系数随温

度  $T$  的变化情况. 结果表明, 在整个温度范围,  $K\alpha$  型辐射衰变过程的总 DR 速率系数大于  $K\beta$  辐射衰变过程的总 DR 速率系数, 后者的共振峰值 ( $T = 6.0$  keV,  $\alpha^{\text{DR}} = 0.15266 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 约为前者 ( $T = 4.4$  keV,  $\alpha^{\text{DR}} = 2.48745 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的 6%, 表明在  $\text{Ni}^{27+}$  等离子体中,  $K\alpha$  型 DR 过程较之  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 过程具有十分明显的优势. 除了 (11) 式和 (12) 式所表示的内壳层  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变的两个通道外, 本文计算研究发现, 下面两类满足电偶极选择定则的跃迁的全部辐射衰变通道对  $\text{Ni}^{27+}$  离子 DR 总速率系数有重要的贡献.



(13) 和 (14) 式分别表示了双激发自电离态外壳层  $np$  到亚稳态内壳层  $1s$  的跃迁. 在 (13) 式所表示的 DR 过程中 ( $n = 2$  时,  $l \neq 1$ ) 的分支复合速率系数在温度  $T = 4.4$  keV 时, 其共振峰值为最大 ( $1.1346 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). 在 (14) 式所表示的 DR 过程中 ( $n = 3$  时,  $l \neq 1$ ), 当  $n = 3$  的分支复合速率系数在温度  $T = 6.0$  keV 时, 其共振峰值为最大 ( $0.08788 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $n \geq 9$  的分支复合速率系数的共振峰值很小. 在 (13) 式中, 双激发自电离态内壳层和亚稳态外内壳层  $2l$  电子云相互重叠, 而在 (14) 式中, 双激发自电离态内壳层和亚稳态外壳层  $3l$  电子云相互重叠, 计算研究发现, 这种重叠使自电离态到亚稳态之间有相对较大的跃迁速率.

图 5 表示了本文计算过程中的四类主要复合通道各自的总分支速率系数和  $\text{Ni}^{27+}$  离子总速率系数随等离子体电子温度的变化关系. 从图 5 可以看出, 在  $0.1$ — $10$  keV 的电子温度范围内, (11) 式表示的  $K\alpha$  型辐射衰变的 DR 速率系数最大, 其次为 (13) 式表示的 DR 速率系数, (12) 式表示的  $K\beta$  型辐射衰变的 DR 速率系数较小, 而 (14) 式表示的 DR 速率系数最小. 从图 5 还可以看出, 随着等离子体电子温度的变化,  $\text{Ni}^{27+}$  离子 DR 总速率系数共振峰值位置十分明显, 当电子温度  $T = 4.4$  时, DR 总速率系数的峰值为  $3.8659 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . 如果把本文计算结果与 Burgess 等人<sup>[1]</sup>运用其提出的半经验公式计算报道的  $\text{Ni}^{27+}$  离子 DR 总速率系数共振峰值为  $4.065 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  进行比较可以看出, 本文计算结果的相对偏差约为 5%. Karim 等<sup>[2]</sup>计算报道了  $\text{Ni}^{27+}$  离

子 DR 总速率系数有重要贡献的  $\text{KL}_n$  的激发过程, 对  $n > 8$  高激发组态的伴线强度因子按  $n^{-3}$  标度的外推方法得到, 其报道的  $\text{Ni}^{27+}$  离子  $\text{KL}_n$  激发的 DR 总速率系数峰值为  $3.424 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 与本文计算的  $\text{Ni}^{27+}$  离子  $\text{KL}_n$  激发的 DR 总速率系数峰值为  $3.6321 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  相比较, 相对偏差约为 6%, 与 Mazzotta 等人<sup>[6]</sup>利用前人计算结果基础上外推计算值为  $3.202 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 相对偏差约为 12%. Badnell<sup>[8]</sup>在 TFD 的框架内采用了 Breit-Pauli 中介耦合方案计算的  $\text{Ni}^{27+}$  离子  $\text{KL}_n$  激发的 DR 总速率系数峰值为  $3.08 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 尽管这一结果与 Karim 等<sup>[5]</sup>的计算值一致, 但与 Karim 等<sup>[2]</sup>(2000 年) 考虑更多复合通道计算报道的结果不同, 与本文计算的  $\text{KL}_n$  激发的总 DR 速率系数的相对偏差约为 15%. 从上面的分析可以看出, 本文计算的  $\text{Ni}^{27+}$  离子  $\text{KL}_n$  激发的 DR 总速率系数峰值与文献 [2] 的结果十分一致, 而 DR 总速率系数的峰值与文献 [1] 的结果十分符合. 本文计算结果可以为实验等离子体和激光核聚变等离子体应用和其他理论研究提供数据参考.

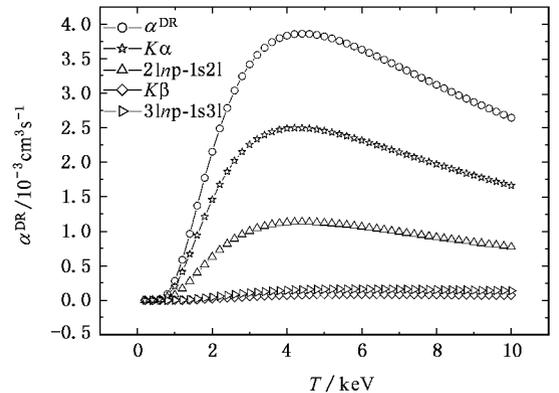


图 5  $\text{Ni}^{27+}$  离子总速率系数和各分支速率系数随  $T$  的变化

## 4. 结 论

根据本文的计算研究, 对高温低密度  $\text{Ni}^{27+}$  等离子体的 DR 物理过程得出如下结论:

1. 高温低密度  $\text{Ni}^{27+}$  等离子体的 DR 过程中,  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变过程为重要的物理过程, 相对于各自的速率系数而言,  $K\alpha$  型辐射衰变远大于  $K\beta$  型辐射衰变.
2.  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变过程的 DR 速率系数随着旁观电子主量子数  $n$  的增加而减小. 在  $K\alpha$

型辐射衰变中  $2p2p-1s2l$  的辐射衰变通道对分支 DR 速率系数贡献较大, 在  $K\beta$  型辐射衰变中  $3p3p-1s3l$  的贡献较大.

3. 研究发现, 在  $\text{KL}_n$  和  $\text{KM}_n$  的共振双激发的 Rydberg 组态中 (13) 和 (14) 式表示的辐射衰变过程对  $\text{Ni}^{27+}$  离子 DR 总速率系数的贡献较大, 表明在电偶极复合类型中除了  $K\alpha$  型和  $K\beta$  型辐射衰变过程之外, 双电离激发态外壳层高 Rydberg 组态的 p 电子到亚稳态内壳层  $1s$  的辐射衰变的 DR 过程依然是十分重要.

4. 对  $\text{Ni}^{27+}$  离子 DR 总速率系数而言, 在  $\text{KL}_n$  和  $\text{KM}_n$  的共振双激发的 Rydberg 组态中, 旁观电子主量子数  $n \geq 6$  的 Rydberg 组态对总 DR 速率系数的贡献较小, 对每一个 Rydberg 组态来说, 旁观电子的轨道角动量对其分支速率系数的影响很大, 但是, 对于可能的旁观电子的轨道角动量, 当  $l \geq 4$  时的双激发的 Rydberg 组态对其分支速率系数的影响的贡献很小.

感谢 Karim K. R. 教授和 Badnell N. R. 教授的帮助.

- [ 1 ] Burgess A , Tworkowski A S 1976 *The Astrophysics Journal* **205** L105
- [ 2 ] Karim K R , Logan L 2000 *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer* **64** 609
- [ 3 ] Karim K R , Ruesink M , Bhalla C P 1996 *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer* **55** 431
- [ 4 ] Karim K R , Ruesink M , Bhalla C P 1992 *Phys. Rev. A* **46** 3904
- [ 5 ] Karim K R , Bhalla C P 1988 *Phys. Rev. A* **37** 2599
- [ 6 ] Mazzotta P , Mazzitelli G , Colafrancesco S *et al* 1998 *Astronomy & Astrophysics Supplement Series* **133** 403
- [ 7 ] Sheng Y , Jiang G , Zhu Z H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 501 ( in Chinese ) [ 盛 勇、蒋 刚、朱正和 2002 物理学报 **51** 501 ]
- [ 8 ] Badnell N R 2006 *Astronomy & Astrophysics* **447** 389
- [ 9 ] Bombarda F , Giannella R , Kallne E *et al* 1988 *Phys. Rev. A* **37** 504
- [ 10 ] Watanabe H , Kavanagh A P , Kuramoto H *et al* 2005 *Nucl. and Meth. In Phys. Res. B* **235** 261
- [ 11 ] Moribayashi K , Kato T , Safronova U I 1997 *Fusion Engineering and Design* **34** 755
- [ 12 ] Schnell M , Bannister M E , Bohn S *et al* 2003 *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B* **205** 367
- [ 13 ] Yerokhin V A , Artemyev A N , Indelicato P *et al* 2003 *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B* **205** 47
- [ 14 ] Zschornack G , Landgraf S , Grossmann F *et al* 2005 *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B* **23** 160
- [ 15 ] Zhang D H , Dong C Z , Xie L Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 112 ( in Chinese ) [ 张登红、董晨钟、颌录有等 2006 物理学报 **55** 112 ]
- [ 16 ] Dong C Z , Fu Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 107 ( in Chinese ) [ 董晨钟、符彦飙 2006 物理学报 **55** 107 ]
- [ 17 ] Zeng S L , Pang J Q , Li P *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2625 ( in Chinese ) [ 曾思良、逢锦桥、李 萍等 2005 物理学报 **54** 2625 ]
- [ 18 ] Shi X H , Wang Y S , Chen C Y *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 959
- [ 19 ] Yang T L , Jiang G , Zhu Z H 2004 *Chin. Phys.* **13** 850
- [ 20 ] Chen B , Zhu Z H 2003 *Acta Phys. Sin.* **53** 2145 ( in Chinese ) [ 陈波、朱正和 2003 物理学报 **53** 2145 ]
- [ 21 ] Sheng Y , Zhu Z H 2002 *Chin. Phys.* **11** 700
- [ 22 ] Yan J , Li P , Liu C L 2001 *Chin. Phys.* **10** 1124
- [ 23 ] Yi Y G , Zheng Z J , Yan J *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2740 ( in Chinese ) [ 易有根、郑志坚、颜 君等 2002 物理学报 **51** 2740 ]
- [ 24 ] Phillips K J , Lemen J R , Cowan R D *et al* 1983 *The Astrophysics Journal* **265** 1120
- [ 25 ] Cowan R D 1981 *Theory of Atomic Structure and Spectra* ( Berkeley : University of California Press )
- [ 26 ] Chen M H 1988 *Phys. Rev. A* **38** 3280
- [ 27 ] Chen M H , Reed K J , Guo D S *et al* 1998 *Phys. Rev. A* **58** 4539

# Calculation of dielectronic recombination rate coefficients of $K\alpha$ - and $K\beta$ -type decays of $Ni^{27+}$ \*

Mu Zhi-Dong<sup>†</sup> Wei Qi-Ying

( College of Science , China University of Mining and Technology , Xuzhou 221008 , China )

( Received 21 June 2006 ; revised manuscript received 8 July 2006 )

## Abstract

The dielectronic recombination( DR ) rate coefficients are investigated for low-density hydrogen-like  $Ni^{27+}$  at plasma temperatures 0.1—10 keV by the wavefunction from Hartree-Fock with relativistic Correction( HFR ) method. Based on the  $KLn$  and  $KMn$  resonance excitation , the partial DR rate coefficients of the DR processes are calculated by taking into account the important radiative decay tunnel including the  $K\alpha$ - and  $K\beta$ -type decays. It was found that the  $K\alpha$ - and  $K\beta$ -type radiative decays are important in the DR processes of hydrogen-like  $Ni^{27+}$  . The partial DR rate coefficient of  $K\alpha$  processes is much larger than that of  $K\beta$ .

**Keywords :**  $Ni^{27+}$  ,  $K\alpha$ - and  $K\beta$ -type decay , dielectronic recombination , rate coefficients

**PACC :** 3280D , 3480D , 3480L

\* Project supported by the Sci-Tech Foundation of China University of Mining & Technology ( Grant No. OK4522 ).

<sup>†</sup> E-mail : muzhidong@126.com