

天体环境下 $^{66}\text{Fe}$ 的电子俘获几率计算\*秦文韬<sup>1)2)</sup> 支启军<sup>1)2)†</sup> 杨友昌<sup>3)4)</sup>

1) (贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550001)

2) (贵州师范大学贵州省射电天文数据处理重点实验室, 贵阳 550001)

3) (贵州工程应用技术学院, 毕节 551700)

4) (遵义师范学院, 遵义 563006)

(2022年5月10日收到; 2022年6月13日收到修改稿)

弱相互作用几率的计算对于原子核物理和核天体物理具有非常重要的作用. 本文选取在天体环境中非常重要的核素 $^{66}\text{Fe}$ , 考虑一级禁戒跃迁, 利用壳模型计算了 $^{66}\text{Fe}$ 在不同天体环境下的电子俘获几率, 着重考察了容许 Gamow-Teller 跃迁和禁戒跃迁的贡献. 结果发现, 在一些天体环境下, 禁戒跃迁对于电子俘获几率有重要贡献, 其中非唯一型禁戒跃迁起主要作用. 我们的结果对于研究原子核弱相互作用和天体环境下的核素合成和演化具有重要作用.

**关键词:** 电子俘获几率, 容许跃迁, 禁戒跃迁, 天体环境

**PACS:** 21.10.-k, 21.60.Cs, 23.40.-s

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220929

## 1 引言

原子核的弱相互作用在原子核的核素合成和超新星坍缩的动力学研究中起着至关重要的作用<sup>[1,2]</sup>. 在这些弱相互作用过程中, 电子俘获是研究超新星爆发机制、核素合成和中子星演化的关键物理因素<sup>[3-5]</sup>. 研究表明: 一方面, 超新星主要由相对论的电子简并压强来平衡其引力效应, 当发生电子俘获时, 由于电子丰度减少导致相对论电子简并压强不足以抵抗引力, 从而导致坍缩的产生; 另一方面, 电子俘获反应产生的中微子将带走能量, 是中子星冷却的一种有效的物理机制, 会进一步加剧坍缩. 最后, 电子俘获过程导致的电子丰度将会使星体的核物理构成向丰中子和重核环境发展, 影响核素合成和星体演化<sup>[6]</sup>. 因此, 电子俘获研究对于超新星、

核素合成和星体演化具有十分重要的意义.

在过去的研究中, 科学家们积极开展电子俘获几率的理论计算, 并发展了一些计算天体环境下原子核电子俘获几率的方法. Fuller 等<sup>[7]</sup> 基于独立粒子模型, 对铁族元素的电子俘获几率进行了开创性的理论计算. 基于他们的工作, Caurier 等<sup>[8]</sup>, Langanke 和 Martinez-Pined<sup>[9]</sup>, Zhang 和 Wang<sup>[10]</sup> 利用相互作用壳模型和基于准粒子随机相位近似 (QRPA), 对一些天体环境下 $^{54}, ^{56}\text{Fe}$  等核的电子俘获几率进行了系统的计算研究, 发现铁族元素的电子俘获和衰变几率在天体环境中起着重要作用. 文献<sup>[11,12]</sup> 指出原子核不同能级之间的 Gamow-Teller (GT) 跃迁导致的电子俘获可能会对星体中能量、电子丰度产生重要的影响, 进而影响星体的演化. 一些文献在考虑禁戒跃迁的理论框架下, 对原子核弱相互作用几率及一些天体环境中重要核素的弱相互作用

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12273008, 11865019, U1731238)、贵州省科学技术基金 (批准号: (2016) 4008, [2017]5726-37, [2018]5769-02) 和贵州省教育厅 (批准号: 黔科合 KY 字 [2020]003 号) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjzhi@gznu.edu.cn

用几率进行了唯象或者微观的理论计算研究,发现禁戒跃迁对原子核弱相互作用几率的计算有着重要贡献且在理论研究中必须考虑<sup>[13–16]</sup>.文献<sup>[17]</sup>计算<sup>76</sup>Se的电子俘获几率,指出由于核子-核子相互作用,在独立粒子模型下, $N = 40$ 附近所有被泡利阻塞的GT跃迁都可以发生电子俘获,并会对天体环境下原子核的电子俘获几率产生重要影响.文献<sup>[18]</sup>指出<sup>66</sup>Fe的穿过 $N = 40$ 次壳层的中子数将会增加使得 $g_{9/2}$ 中子轨道填充.由此可见,由于核子核子剩余相互作用或者核子数填充, $Z = 28$ 附近和 $N = 40$ 附近核素可能会出现 $f_{7/2}$ 质子到 $g_{9/2}$ 的弱相互作用跃迁,从而产生禁戒跃迁.基于Fe元素在天体物理过程中的作用,考虑到禁戒跃迁在精确计算原子核弱相互作用几率的重要性,在本文中,选取<sup>66</sup>Fe,研究其禁戒跃迁及其在不同天体环境下的电子俘获几率.

壳模型是研究原子核弱相互作用几率比较成功的模型,本文将在壳模型的理论框架下,考虑禁戒跃迁,对 $N = 40$ 附近比较典型的<sup>66</sup>Fe的电子俘获几率进行理论计算,讨论了在不同天体环境下容许GT跃迁和一级禁戒(FF)跃迁对电子俘获几率的贡献和影响.重点讨论禁戒跃迁及其对电子俘获几率的影响.

## 2 理论框架

壳模型是原子核物理中一个非常重要的模型,它在描述原子核的性质尤其是原子核能级、电磁跃迁等性质上取得了巨大的成功,并一直在不断的发展和完善的<sup>[19,20]</sup>.此外,在单极哈密顿相互作用量的基础上(Monopole Hamilton),考虑了多极哈密顿相互作用量、三体力和张量力等物理因素的壳模型(如无芯壳模型)在研究原子核的集体性质、壳结构及其变化等性质上也取得了巨大成功<sup>[21,22]</sup>.并且,在壳模型的基础上,人们可以计算各种算符的强度函数分布和相应的相互作用几率,例如beta衰变和电子俘获等弱相互作用算符的强度<sup>[23]</sup>,这使得除了在核物理方面,壳模型在天体物理方面也有着重要的应用<sup>[5,9,22]</sup>.在本文中,重点讨论原子核的电子俘获过程:

$$(Z, A) + e^- \rightarrow (Z - 1, A) + \nu. \quad (1)$$

电子俘获几率可按下式计算<sup>[9,24]</sup>:

$$\lambda = -\frac{m_e^5 c^4 G_V^2}{2\pi\hbar^2} \int_1^{W_0} C(W) F(Z, W) \times (W^2 - 1)^{1/2} W(W_0 - W)^2 dW, \quad (2)$$

式中, $C(W)$ 称为形状因子,它依赖于电子能量, $W$ 为电子能量, $W_0$ 为最大电子能量,两者以静止电子质量为单位. $F(Z, W)$ 是费米函数,它修正了原子核附近电子波函数的库仑畸变的相空间积分.对于容许跃迁,形状因子不依赖于电子能量, $C(W)$ 的形式如下:

$$C(W) = B(GT), \quad (3)$$

GT跃迁几率的形式如下:

$$B(GT) = \left(\frac{g_A}{g_V}\right)^2 \frac{\langle f | \sum_k \sigma^k t_-^k | i \rangle^2}{2J_i + 1}, \quad (4)$$

$(g_A/g_V) = -1.2701$ 是弱轴矢量和矢量耦合常数之比.

对于FF跃迁,形状因子为

$$C(W) = k + k_a W + \frac{k_b}{W} + k_c W^2, \quad (5)$$

其中 $k, k_a, k_b, k_c$ 为系数,它们可由FF跃迁矩阵元表示,对于唯一型一级禁戒(U1F)跃迁,即 $\Delta J = 2$ 的FF跃迁, $C(W)$ 中的 $k, k_a, k_b, k_c$ 分别为<sup>[25]</sup>

$$k = \left[ \frac{1}{12} z^2 (W_0^2 - \lambda_2) \right]^{(2)}, \quad (6)$$

$$k_a = \left[ -\frac{1}{6} z^2 W_0 \right]^{(2)}, \quad (7)$$

$$k_b = 0, \quad (8)$$

$$k_c = \left[ \frac{1}{12} z^2 (1 + \lambda_2) \right]^{(2)}. \quad (9)$$

对于非唯一型一级禁戒(non-U1F)跃迁,即 $\Delta J = 0, 1$ 的FF跃迁, $C(W)$ 中的 $k, k_a, k_b, k_c$ 分别为<sup>[25]</sup>

$$k = \left[ \zeta_0^2 + \frac{1}{9} w^2 \right]^{(0)} + \left[ \zeta_1^2 + \frac{1}{9} (x + u)^2 - \frac{4}{9} \mu_1 \gamma_1 u (x + u) + \frac{1}{18} W_0^2 (2x + u)^2 - \frac{1}{18} \lambda_2 (2x - u)^2 \right]^{(1)}, \quad (10)$$

$$k_a = \left[ -\frac{3}{4} u Y - \frac{1}{9} W_0 (4x^2 + 5u^2) \right]^{(1)}, \quad (11)$$

$$k_b = \frac{2}{3} \mu_1 \gamma_1 \left\{ -[\zeta_0 w]^{(0)} + [\zeta_1 (x + u)]^{(1)} \right\}, \quad (12)$$

$$k_c = \frac{1}{18} [8u^2 + (2x + u)^2 + \lambda_2(2x - u)^2]^{(1)}, \quad (13)$$

其中中括号上的数字表示括号内算符的阶,  $k$ ,  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$  中 FF 跃迁矩阵元的计算具体参见文献 [24]. 利用壳模型计算出原子核 GT 跃迁强度和禁戒跃迁强度分布后, 我们可以很容易的去计算原子核的弱相互作用几率. 具体的计算方法参见文献 [9], 在此不做详细的叙述.

### 3 计算结果及分析

在本文的计算中采用文献 [24] 的壳模型计算程序, 对  $^{66}\text{Fe}$  的容许 GT 跃迁和 FF 跃迁进行了理论计算. 在此基础上对不同温度和密度环境下的电子俘获几率进行了计算研究. 下面将对这些结果进行详细的讨论.

#### 3.1 原子核能级

使用了三种不同的剩余相互作用对  $^{66}\text{Fe}$  的能级进行了计算. 其中, Ca48.core3 与 Ca48.copp 相互作用被成功用于描述 68 Ni 中库仑激发的能量, Ca48.copp 相互作用的矩阵元略高于 Ca48.core3 相互作用 [26,27]. GXPF1A 相互作用 [28] 最近被用于  $^{55}\text{Cr}$  激发态寿命的计算 [29]. 在计算中用 Ca48 做为核芯 (Ca40 核加上 f7/2 轨道上固定填充 8 个中子). 对于 GXPF1 A 相互作用, 质子空间为 f7/2, p3/2, f5/2, p1/2; 中子空间为 p3/2, f5/2, p1/2, 对于 Ca48.core3 和 Ca48.copp 相互作用, 质子空间为 f7/2, p3/2, f5/2, p1/2; 中子空间为 p3/2, f5/2, p1/2, g9/2.

为了验证相互作用的有效性, 将理论值与实验值 [30] 进行比较. 图 1 中, 我们得到了三种剩余相互作用计算的  $^{66}\text{Fe}$  低能级激发态并与实验值 [30] 进行对比. 基于 Ca48 核的相互作用计算出的激发态的结果都十分的一致, 计算结果很好的还原了低能级偶角动量的顺序与能量间隔. 这表明使用基于 Ca48 核的相互作用计算 GT 跃迁与 FF 跃迁是可靠的. 除非特别说明, 后续的计算我们都采用 Ca48.core3 相互作用.

#### 3.2 GT 与 FF 跃迁强度的贡献

使用 Lanczos 方法迭代 60 次得到了容许 GT 跃迁和 U1F 跃迁的强度分布. 在图 2(a) 中, 计

算了母核  $J_i = 0+$  态到子核  $J_f = 1+$  态的容许 GT 跃迁强度分布, 在计算中我们取淬灭因子  $q = 0.74$ . 从图 2(a) 中可以看到,  $^{66}\text{Fe}$  基态的 GT 强度在激发能  $E_{\text{ex}} = 0.34$  MeV 附近的跃迁强度最大, 其他激发态的 GT 强度较小, 比最大的强度低一个数量级左右, 这表明  $^{66}\text{Fe}$  的容许 GT 跃迁的贡献主要由单个激发态提供. 在图 2(b) 中, 仅考虑了基态  $J_i = 0+$  态到子核  $J_f = 2-$  态的 U1F 跃迁强度

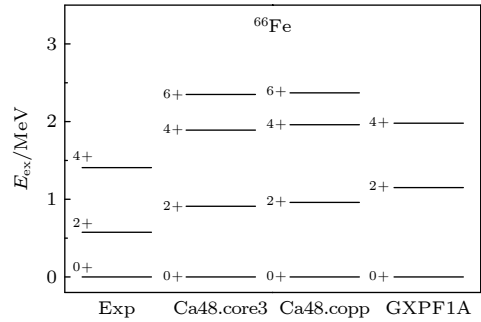


图 1 计算得到的  $^{66}\text{Fe}$  激发态与实验值 [30] 的比较

Fig. 1. Comparison of the calculated excited state of  $^{66}\text{Fe}$  and the experimental value [30].

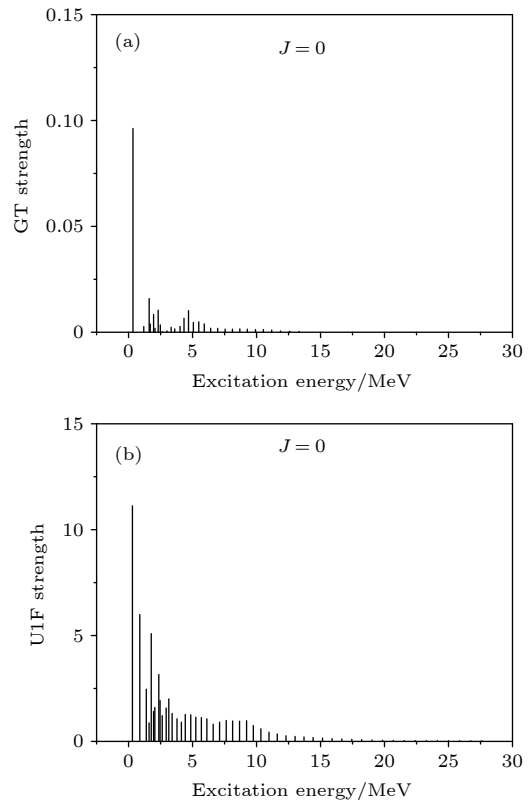


图 2  $^{66}\text{Fe}$  基态的 GT 与 U1F 强度分布 (a) GT 强度分布; (b) U1F 强度分布

Fig. 2. Strength distributions of GT and U1F of  $^{66}\text{Fe}$  ground state: (a) GT strength contributions; (b) U1F strength contributions.

分布. 在  $E_{\text{ex}} = 0\text{--}1.8$  MeV 范围内  $J_i = 0+$  向  $J_f = 2-$  的跃迁强度较高, 随着激发能的增加, U1F 跃迁强度趋近与零, 可以看出 U1F 跃迁通常集中在低激发态.

跃迁强度分布是计算原子核电子俘获几率重要的物理输入量, 下面将根据壳模型计算得到的跃迁强度分布对超新星环境下  $^{66}\text{Fe}$  基态到激发态电子俘获几率的影响进行讨论.

### 3.3 天体环境下的电子俘获几率

利用壳模型得到的  $^{66}\text{Fe}$  的跃迁强度, 计算了超新星环境下不同密度的电子俘获几率. 在 beta 衰变的计算中, 衰变  $Q$  值 ( $M_p - M_d$ , 其中  $M_p$  为母核质量,  $M_d$  为子核质量) 十分重要. 在我们的计算中, 衰变  $Q$  值以电子质量为单位, 即  $Q = 13.8$  MeV / 0.51 MeV. 图 3 和图 4 分别显示了在  $\lg(\rho Y_e) = 10.1, 11.1$  时,  $^{66}\text{Fe}$  随温度的电子俘获几率的变化. 在相对较低的密度下, 即  $\lg(\rho Y_e) = 10.1$ , 对于温度很小的区域 ( $T < 5$  GK), 电子俘获几率随着温度的升高而迅速上升, 随后趋于稳定. 这表明在低温低密度区域, 电子俘获对于温度的变化十分敏感, 并且 GT 和 FF 跃迁表现了出相同的温度依赖性. 这种依赖性在高密度环境下消失. 这可能是由于在温度较低时, 电子化学势  $\mu_e$  与衰变  $Q$  值接近, 导致电子俘获几率对于温度的变化十分敏感.

无论在低密度 ( $\lg(\rho Y_e) = 10.1$ ) 还是高密度 ( $\lg(\rho Y_e) = 11.1$ ) 下, U1F 跃迁电子俘获几率总是略低于 GT 值, 这表明在仅考虑 U1F 跃迁的情况下, 容许 GT 跃迁依旧占据主导地位, 但这并不代表禁戒跃迁的影响可以被忽略. 有趣的是, 在我们目前的计算中 FF 跃迁仅考虑了  $J_i = 0+$  跃迁到  $J_f = 2-$  的情况, 注意到,  $^{66}\text{Fe}$  禁戒跃迁的贡献不仅与从 f5/2 质子轨道跃迁到 g9/2 中子轨道的 U1F 跃迁有关, 并且还从 f7/2 质子轨道跃迁到 g9/2 中子轨道的 non-U1F 跃迁有关. 由图 1 可知,  $^{66}\text{Fe}$  从  $J_i = 0+$  到  $J_f = 1-$  的 non-U1F 跃迁是可行的, 并且它的强度很可能大于  $J_i = 0+$  到  $J_f = 2-$  的 U1F 跃迁, 所以考虑  $\Delta\pi = -1, \Delta J = 1$  跃迁的贡献可能对天体环境下  $^{66}\text{Fe}$  的电子俘获几率产生显著的影响.

为了比较 U1F 跃迁与 non-U1F 跃迁的贡献, 图 5 显示了温度  $T = 1\text{--}20$  (GK),  $\lg(\rho Y_e) = 10.65$  的环境中, U1F 跃迁与 non-U1F 跃迁贡献的比值

(在我们所考虑的轨道模型计算中, 没有来自  $J_i = 0+$  到  $J_f = 0-$  的贡献). 从图 5 中可以看到, 禁戒跃迁中 U1F 跃迁的贡献只有 non-U1F 跃迁贡献的 14% 左右, 且随着温度的增加, 这一比值没有明显变化. 这表明 non-U1F 跃迁有贡献, 且明显大于 U1F 跃迁.

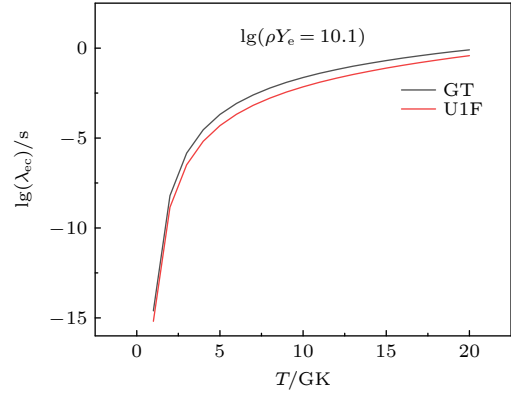


图 3 超新星环境下  $\lg(\rho Y_e) = 10.1$  的  $^{66}\text{Fe}$  电子俘获几率  
Fig. 3.  $^{66}\text{Fe}$  electron captures rates at  $\lg(\rho Y_e) = 10.1$  in supernova environment.

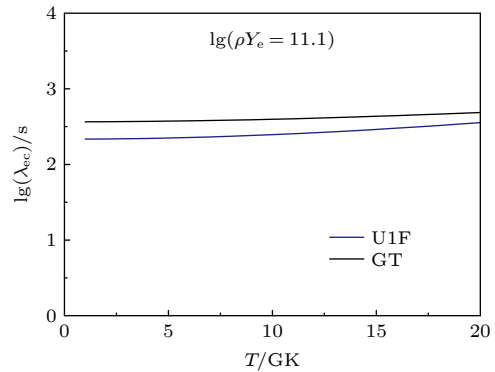


图 4 超新星环境下  $\lg(\rho Y_e) = 11.1$  的  $^{66}\text{Fe}$  电子俘获几率  
Fig. 4.  $^{66}\text{Fe}$  electron captures rates at  $\lg(\rho Y_e) = 11.1$  in supernova environment.

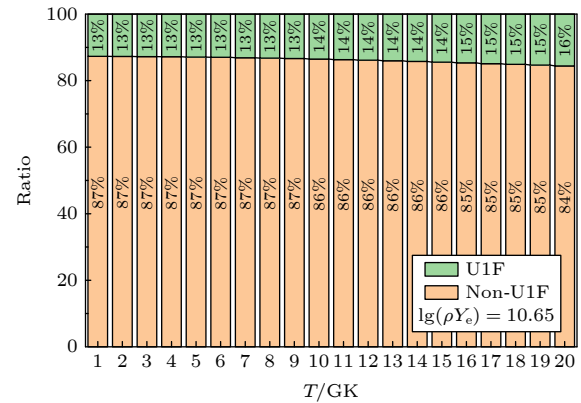


图 5 non-U1F 跃迁与 U1F 跃迁在不同温度下贡献的比例  
Fig. 5. Ratio of non-ulf transition and ulf transition at different temperatures.

为了讨论考虑 non-U1F 跃迁后禁戒跃迁对  $^{66}\text{Fe}$  电子俘获几率的影响, 图 6 画出了在  $\lg(\rho Y_e) = 10.1$  的环境下, 温度  $T = 1\text{--}40$  (GK) 范围内 GT 跃迁和 FF 跃迁 (non-U1F 跃迁与 U1F 跃迁贡献的总和), 以及总的 (GT+FF) 电子俘获几率. 由图可知, 考虑 non-U1F 跃迁的贡献后, FF 跃迁对电子俘获几率的贡献明显高于容许 GT 跃迁, 并且随着温度的升高 FF 跃迁的贡献占总电子俘获几率的 80% 以上. 这表明, 在天体环境中, FF 跃迁极大的提高了  $^{66}\text{Fe}$  原子核的电子俘获几率, 并且在 FF 跃迁中, non-U1F 跃迁的贡献尤为重要.

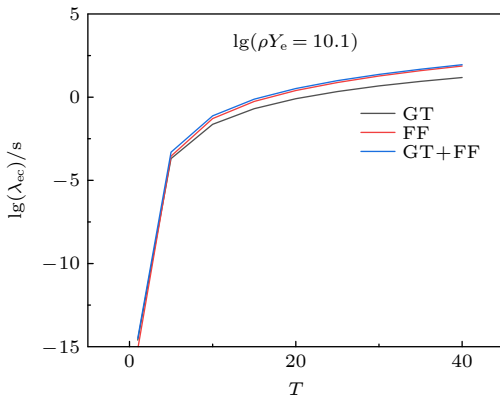


图 6 超新星环境下  $\lg(\rho Y_e) = 10.1$  的  $^{66}\text{Fe}$  电子俘获几率, 考虑了 non-U1F 的贡献  
Fig. 6. In supernova environment at  $\lg(\rho Y_e) = 10.1$   $^{66}\text{Fe}$  electron captures rates which considering the contribution of non-ulf transition.

## 4 结 论

弱相互作用几率的计算对于原子核物理和核天体物理具有非常重要的作用. 本文我们选取天体环境非常重要的核素  $^{66}\text{Fe}$ , 考虑 FF 跃迁, 利用壳模型计算了  $^{66}\text{Fe}$  在不同天体环境下的电子俘获几率, 着重考察了容许 GT 跃迁、U1F 跃迁和 non-U1F 跃迁的贡献. 结果发现, 在高温高密度的天体环境中, 禁戒跃迁对于电子俘获几率有重要贡献. FF 跃迁的贡献占总电子俘获几率的 80% 以上, 特别是 non-U1F 跃迁, 占 FF 跃迁总贡献的 85% 以上, 所以在天体演化过程中必须考虑到这些核素的弱相互作用几率. 我们的结果对于研究原子核弱相互作用和天体环境下的核素合成和演化具有重要作用.

作者感谢在德国期间, GSI 理论物理组的热忱接待.

## 参考文献

- [1] Bethe H A, Brown G E, Applegate J, Lattimer J M 1979 *Nucl. Phys. A* **324** 487
- [2] Bethe H A 1990 *Rev. Mod. Phys.* **62** 801
- [3] Fuller G M, Fowler W A, Newman M J 1980 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **42** 447
- [4] Fuller G M, Fowler W A, Newman M J 1982 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **48** 279
- [5] Langanke K, Martínez-Pinedo G 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 819
- [6] Janka H T, Langanke K, Marek A, Martínez-Pinedo G, Müller B 2007 *Phys. Rep.* **442** 38
- [7] Fuller G M, Fowler W A, Newman M J 1982 *Astrophys. J.* **252** 715
- [8] Caurier E, Langanke K, Martínez-Pinedo G, Nowacki F 1999 *Nucl. Phys. A* **653** 439
- [9] Langanke K, Martínez-Pinedo G 2000 *Nucl. Phys. A* **673** 481
- [10] Zhang J, Wang S F 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 1391 (in Chinese) [张洁, 王少峰 2010 物理学报 **59** 1391]
- [11] Zegers R G T, Brown E F, Akimune H, Austin S M, Vanden Berg A M, Brown B A, Chamulak D A, Fujita Y, Fujiwara M, Galès S, Harakeh M N, Hashimoto H, Hayami R, Hitt G W, Itoh M, Kawabata T, Kawase K, Kinoshita M, Nakanishi K, Nakayama S, Okumura S, Shimbara Y, Uchida M, Ueno H, Yamagata T, Yosoi M 2008 *Phys. Rev. C* **77** 024307
- [12] Zhi Q, Zheng Q 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 102301 (in Chinese) [支启军, 郑强 2011 物理学报 **60** 102301]
- [13] 张绍庆, 谢娟, 张小平, 支启军 2016 *Acta. Phys. Sin.* **65** 092101 (in Chinese) [Zhang S Q, Xie J, Zhang X P, Zhi Q J 2016 物理学报 **65** 092101]
- [14] You J L, Wu Q D, Zhang X P, Zhi Q 2019 *Commun. Theor. Phys.* **71** 293
- [15] You J L, Zhang X P, Zhi Q J, Ren Z Z, Wu Q D 2019 *Chin. Phys. C* **43** 114104
- [16] Mukai M, Hirayama Y, Watanabe Y X, Watanabe H, Koura H, Jeong S C, Miyatake H, Brunet M, Ishizawa S, Kondev F G, Lane G J, Litvinov Y A, Niwase T, Oyaizu M, Podolyak Z, Rosenbusch M, Schury P, Wada M, Walker P M 2022 *Phys. Rev. C* **105** 034331
- [17] Zhi Q, Langanke K, Martínez-Pinedo G, Nowacki F, Sieja K 2011 *Nucl. Phys. A* **859** 172
- [18] Stryjczyk M, Tsunoda Y, Darby I G, Witte H D, Diriken J, Fedorov D V, Fedosseev V N, Fraile L M, Huyse M, Köster U, Marsh B A, Otsuka T, Pauwels D, Popescu L, Radulov D, Seliverstov M D, Sjödin A M, P. Van den Bergh, Van Duppen P, Venhart M, Walters W B, Wimmer K 2018 *Phys. Rev. C* **98** 064326
- [19] Qi C and Xu F. R 2008 *Nucl. Phys. A* **800** 47
- [20] Qi C and Xu F. R 2008 *Nucl. Phys. A* **814** 48
- [21] Zhi Q J 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 052101 (in Chinese) [支启军 2011 物理学报 **60** 052101]
- [22] Caurier E, Martínez-pinedo G, Nowacki F, Poves A, Zuker A P 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 427
- [23] Zhang Y M, Xu F R 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4826 (in Chinese) [张玉美, 许甫荣 2008 物理学报 **57** 4826]
- [24] Zhi Q, Caurier E, Cuenca-García J J, Langanke K, Martínez-Pinedo G, Sieja K 2013 *Phys. Rev. C* **87** 025803
- [25] Toshio S, Takashi Y, Toshitaka K, Takaharu O 2012 *Phys. Rev. C* **85** 015802
- [26] Sorlin O, Leenhardt S, Donzaud C, Duprat J, Azaiez F, Nowacki F, Grawe H, Dombrádi Z, Amorini F, Astier A, Baiborodin D, Bellegruic M, Borcea C, Bourgeois C, Cullen D M, Dlouhy Z, Dragulescu E, Górska M, Grévy S, Guillemaud-

- Mueller D, Hagemann G, Herskind B, Kiener J, Lemmon R, Lewitowicz M, Lukyanov S M, Mayet P, De Oliveira Santos F, Pantalica D, Penionzhkevich Y E, Pougheon F, Poves A, Redon N, Saint-Laurent M G, Scarpaci J A, Sletten G, Stanoiu M, Tarasov O, Theisen C 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 092501
- [27] Langanke K, Terasaki J, Nowacki F, Dean D J, Nazarewicz W 2003 *Phys. Rev. C* **67** 044314
- [28] Honma M, Otsuka T, Brown B A, Mizusaki T 2002 *Phys. Rev. C* **65** 061301
- [29] Kleis H, Seidlitz M, Blazhev A, Kaya L, Reiter P, Arnswald K, Dewald A, Droste M, Fransen C, Moller O, Shimizu N, Tsunoda Y, Utsuno Y, von Brentano P, Zell K O 2021 *Phys. Rev. C* **104** 034310
- [30] Hannawald M, Kautzsch T, Wohr A, Walters W B, Kratz K L, Fedoseyev V N, Mishin V I, Bohmer W, Pfeiffer B, Sebastian V, Jading Y, Koster U, Lettry J, Ravn H L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1391

## Calculations of electron capture rates of $^{66}\text{Fe}$ in astrophysical environment\*

Qing Wen-Tao<sup>1)2)</sup> Zhi Qi-Jun<sup>1)2)†</sup> Yang You-Chang<sup>3)4)</sup>

1) (*School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China*)

2) (*Guizhou Provincial Key Laboratory of Radio Astronomy and Data Processing, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China*)

3) (*Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China*)

4) (*Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China*)

( Received 10 May 2022; revised manuscript received 13 June 2022 )

### Abstract

The calculation of weak interaction rates plays a very important role in studying nuclear physics and nuclear astrophysics. In this work, we calculate the electron capture rate of  $^{66}\text{Fe}$  in the framework of shell model. We mainly focus on the contribution of allowed transition and forbidden transition to the total rate. It is found that in some astrophysical environments the forbidden transition is very important in contribution to the electron capture rate, in which the non-unique forbidden transition plays a major role. This is very important for nuclear structures and astrophysics.

**Keywords:** electron capture rate, allowed transition, forbidden transition, astrophysical environment

**PACS:** 21.10.-k, 21.60.Cs, 23.40.-s

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220929

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12273008, 11865019, U1731238), the Guizhou Provincial Science and Technology Foundation, China (Grant Nos. (2016) 4008, [2017]5726-37, [2018]5769-02), and the Foundation of Education Bureau of Guizhou Province, China (Grant No. KY (2020) 003).

† Corresponding author. E-mail: [qjzhi@gznu.edu.cn](mailto:qjzhi@gznu.edu.cn)

天体环境下 $^{66}\text{Fe}$ 的电子俘获几率计算

秦文韬 支启军 杨友昌

Calculations of electron capture rates of  $^{66}\text{Fe}$  in astrophysical environment

Qing Wen-Tao Zhi Qi-Jun Yang You-Chang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 192101 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220929

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220929>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

电子束离子阱光谱标定和 $\text{Ar}^{13+}$ 离子M1跃迁波长精密测量

Spectral calibration for electron beam ion trap and precision measurement of M1 transition wavelength in  $\text{Ar}^{13+}$

物理学报. 2022, 71(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211663>

类氢O、N离子入射Al表面俘获电子布居几率的理论与实验研究

Theoretical and experimental studies on the captured electron population probability of hydrogen-like O and N ions in collision with Al surface

物理学报. 2022, 71(13): 133201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212434>

正负电子对产生过程中不同外场宽度下的多光子跃迁效应

Multi-photon transition effects under different external field widths in electron-positron-pair creation process

物理学报. 2021, 70(23): 231202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202101>

空间电子辐射环境中绝缘介质电荷沉积特性及陷阱参数研究综述

Review of charge deposition characteristics and trap parameters of dielectric in space electron radiation environment

物理学报. 2019, 68(23): 239401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191252>

Stark效应诱导的类氢离子 $2s_{1/2}-1s_{1/2}$ 跃迁几率的理论研究

Theoretical investigation on Stark-induced transition probabilities of hydrogen-like ions

物理学报. 2021, 70(17): 173201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210181>

$\text{SeH}^+$ 离子低激发态的电子结构和跃迁性质的理论研究

Theoretical study on electronic structure and transition properties of excited states for  $\text{SeH}^+$  anion

物理学报. 2020, 69(15): 153101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200278>