第 46 卷 第 3 期 天 文 学 报 Vol.46 No.3
2005 年 7 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jul., 2005

强电荷屏蔽下的电子俘获率*

罗志全 [1,2] 刘门全 [2] 林理彬 [1] 彭秋和 [3]

(1 四川大学物理系 四川成都 610065)
(2 西华师范大学理论物理研究所 四川南充 637002)
(3 南京大学天文系 南京 210093)
lzq_sc@sohu.com

摘要 分析了电荷屏蔽对超新星前身星环境下的电子俘获反应的影响，分析中强电荷屏蔽势能采用了最近人们利用线性响应理论给出的结果，对核素 ^{56}Co, ^{56}Fe, ^{56}Mn 电子俘获率的分析计算表明，在低温高密情形下，电荷屏蔽对电子俘获反应的影响较先前的分析的影响程度略小，但电荷屏蔽对电子俘获反应的影响仍然显著.

关键词 核合成，超新星：普通，电荷屏蔽，电子俘获，
中图分类号： P 145; **文献标识码**： A

1 引言

超新星的前身星及其核心区的结构在超新星爆发过程中起着重要作用，决定着后来的演化模式. 数据模拟的结果表明，超新星爆发的条件和爆发结果依赖于前身星模型，其演化模式对给定的物理参数是非常敏感的，而这些参数与超新星前身星阶段的电子丰度变化率紧密相关. 电子俘获率的高低是超新星爆发机制研究中一个最为关键的物理因素，在前身星坍缩之前的铁核心中，较低的熵有利于超新星爆发模型，一个较低的初始熵意味着存在一较低的总电子俘获速率.

由于弱相互作用率 (特别是电子俘获率) 在恒星晚期演化，尤其是在超新星爆发机制的理论研究中的重要性，多年来人们对恒星环境下的弱相互作用问题进行了较深入的研究. Bethe 等 [1] 认为， Gamow-Teller(GT) 共振跃迁能大大提高其电子俘获反应率，并可能影响 II 型超新星的前身星中铁核心的形成和核心区的坍缩. Fuller 等 [2−5](FFN) 做了许多先驱性的工作，采用了核壳层模型分析 GT 共振跃迁的共振能量和强度，并详细计算恒星内部 $21 \leq A \leq 60$ 的 226 种核素的弱相互作用率. Aufderheide (AFWH) 等 [6] 指出，由于前身星演化中产生的恒星核心区是由一些超富中子的核素组成，因而在理论分析中，必须考虑 $A > 60$ 的核素的影响，因此扩展了 FFN 的工作，讨论了一些 $A > 60$ 的核 GT 跃迁，并给出了 150 个具有较强跃迁的最丰的核素在一些较重要的温度 — 密度点的电子俘获率. AFWH 指出，一个较精确地提供超新星前身星阶段中各重要核的弱相互作用率的表对于超新星的爆发和核心区的坍缩的研究非常重要，最近 Langanke 等 [7]

2004-09-27 收到原稿， 2004-10-27 收到修改稿
* 国家自然科学基金 (10347008) 资助

对核素进行了大量壳层计算，极大地丰富了超新星前身星环境下的核素的弱相互作用率数据.

超新星的前身星环境是高密等离子体，其核素处于电子海的强屏蔽之下，考虑电荷屏蔽效应，电子俘获过程速率相对裸原子核而言会有所降低. 电荷屏蔽效应提高了电子俘获过程的有效能阈值，由此影响了爆前超新星核心坍缩的临界密度阈数值. 文 [8-11] 讨论了在恒星高密环境下电荷屏蔽对电子俘获率的影响，结果表明这一影响是较显著的，并指出在超新星的前身星的结构中及后来核心区的坍缩等演化模式的理论研究中应考虑电荷屏蔽的影响. 在先前的讨论中，我们采用的强电荷屏蔽势能是 salpeter 等 [12] 利用离子球模型给出的，最近 Itoh 等 [13] 在计算相对论简并电子流引起的电荷屏蔽时，采用了在固体物理中广泛采用的线性响应理论，使屏蔽势分析理论更加完善. 本文采用最近的屏蔽势能的新结果，对超新星前身环境下的电子俘获率的影响进行分析，以期给出对精确计算电子俘获率有用的结论.

2 高密等离子体中的电子的屏蔽势

在先前分析电荷屏蔽对电子俘获反应的影响中 [8−11], 我们采用的是等离子体的离子球模型, 在强屏蔽下每个 Wigner-Seitz 离子球总的屏蔽势为 $E_0 = 1.764\times10^{-5}Z^{5/3}Y_e^{1/3}\rho^{1/3}$ MeV, 故对某一核而言，平均每个电子的屏蔽势能为：

$$D_1 = 1.764\times10^{-5}Z^{2/3}Y_e^{1/3}\rho^{1/3}\,\mathrm{MeV}\,, \tag{1}$$

上式中 Z 、 ρ 和 Y_e 分别为核电荷数、质量密度和电子丰度.

最近， Itoh 等人采用了 Jancovici 的静态纵向绝缘函数 $\varepsilon(q,0)$, 分析了由相对论简并电子引起的电荷屏蔽，其屏蔽势能表达式为 [13]:

$$D_2 = 7.525\times10^{-3}Z(Y_e\rho_6)^{1/3}J(r_s,R)\,\mathrm{MeV}\,, \tag{2}$$

其中， ρ_6 是以 $10^6\,\mathrm{g/cm^3}$ 为单位的质量密度， $J=\dfrac{1}{R}\left\{1-\dfrac{2}{\pi}\displaystyle\int_0^\infty\frac{\sin(Rq)}{q\varepsilon(q,0)}\mathrm{d}q\right\}$, Itoh 等在文 [13] 中给出了 J 的近似表达式：

$$J(r_s,R)=\sum_{i,j=0}^{10}a_{ij}.s^i.u^j\,, \tag{3}$$

在 (3) 式中， $s=0.5(\log_{10}r_s+3)$, $u=0.04(R-25.0)$, 系数矩阵 a_{ij} 的值见文 [13], 这里 $R=6.3\times10^{-3}Z^{\frac{1}{3}}\rho_6^{\frac{1}{3}}$, $r_s=1.388\times10^{-2}(Y_e\rho_6)^{-\frac{1}{3}}$, (3) 式成立的近似条件是： $10^{-5}\le r_s\le10^{-1}$, $0\le R\le50.0$, 就我们所讨论的超新星的前身星阶段而言，密度范围满足这一近似要求. 表 1 列出了核素 ^{56}Mn 、 ^{56}Fe 和 ^{56}Co 的电子俘获反应时受到的屏蔽势能随密度的变化情况.

从表 1 中可以看出，在低密度时， Itoh 等人给出的屏蔽势 $D2$ 和经典离子球模型给出的结果 $D1$ 相差不大，但随着密度增大两者差值也随之增大，在密度较高时， $D1$ 与 $D2$ 相差近 1 倍. 对其他条件的计算表明，随着电子丰度的降低，两种屏蔽势的相差将会减小.

表 1　几个核素的电子俘获反应的屏蔽势能随密度的变化情况 (Y_e=0.46)

Table 1　The screen potential in electron capture with mass density for some nuclei(Y_e=0.46)

$\log(\rho/\mu_e)$	$^{56}\mathrm{Mn}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Cr}$		$^{56}\mathrm{Fe}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Mn}$		$^{56}\mathrm{Co}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Fe}$	
	$D1$	$D2$	$D1$	$D2$	$D1$	$D2$
4.00	0.0064	0.0076	0.0065	0.0080	0.0067	0.0083
4.50	0.0093	0.0094	0.0096	0.0099	0.0098	0.0104
5.00	0.0137	0.0118	0.0141	0.0124	0.0144	0.0130
5.50	0.0201	0.0151	0.0206	0.0158	0.0212	0.0166
6.00	0.0295	0.0198	0.0303	0.0208	0.0311	0.0218
6.50	0.0433	0.0268	0.0445	0.0282	0.0456	0.0296
7.00	0.0636	0.0374	0.0653	0.0394	0.0669	0.0413
7.50	0.0933	0.0534	0.0958	0.0562	0.0982	0.0591
8.00	0.1370	0.0773	0.1406	0.0814	0.1442	0.0856
8.50	0.2011	0.1126	0.2064	0.1187	0.2117	0.1248
9.00	0.2951	0.1647	0.3030	0.1735	0.3107	0.1824
9.50	0.4332	0.2411	0.4447	0.2540	0.4560	0.2671
10.00	0.6359	0.3531	0.6527	0.3721	0.6694	0.3913
10.50	0.9333	0.5175	0.9581	0.5452	0.9825	0.5733
11.00	1.3699	0.7578	1.4062	0.7984	1.4421	0.8396

3　电荷屏蔽对电子俘获率的影响

在先前的工作中，我们详细分析和讨论了电荷屏蔽对电子俘获反应的影响，在文 [8-11] 中已给出了详细的分析计算方法，这里不再重述. 通常定义一屏蔽因子 C 来表征电荷屏蔽对电子俘获反应的影响，$C=\dfrac{\lambda^s}{\lambda}$, λ 为未考虑屏蔽时，裸原子核的电子俘获率，λ^s 为考虑屏蔽时的电子俘获率，λ 和 λ^s 可进一步表示为，$\lambda=\lambda_0+\lambda_{GT}$ 、$\lambda^s=\lambda_0^s+\lambda_{GT}^s$ 、λ_0 和 λ_{GT} 分别代表无屏蔽时基态附近的低能跃迁和 Gamow-Teller(GT) 共振跃迁的电子俘获率，λ_0^s 和 λ_{GT}^s 分别代表考虑屏蔽时基态附近的低能跃迁和高能区的 GT 共振跃迁的电子俘获率. 因此，

$$C=\frac{\lambda_0^s+\lambda_{GT}^s}{\lambda_0+\lambda_{GT}}\,. \tag{4}$$

作为例子，我们分析计算了在温度 $T=10^9\,\mathrm{K}$ 时，电荷屏蔽对核素 ^{56}Mn, ^{56}Fe, ^{56}Co 对电子俘获反应的影响. 表 2 分别给出了核素 ^{56}Mn, ^{56}Fe, ^{56}Co 的电子俘获在温度为 $10^9\,\mathrm{K}$ 时，屏蔽因子随密度变化的情况，表中屏蔽因子 $C1$ 和 $C2$ 分别对应与采用屏蔽势 $D1$ 和 $D2$ 的情形. 比较表 2 中的屏蔽因子 $C1$ 和 $C2$, 可以看出，屏蔽因子 $C2$ 普遍较因子 $C1$ 要大，也就是说采用线性响应理论给出的屏蔽对电子俘获反应的影响较经典的离子球模型给出的屏蔽对俘获反应的影响要小 (这和前面的屏蔽势 $D1$ 和 $D2$ 比较结果相对应), 在低密度时二者相差不大，在密度较高时二者差值要大一些 (特别是在某些温度密度点). 表 3 给出了在温度 $T=5\times10^9\,\mathrm{K}$ 时，屏蔽因子随密度的变化情况，可以看出，屏蔽因子的变化情况和表 2 给出的结果类似，电荷屏蔽的影响随温度的增加而减小，同时屏蔽因子

$C1$ 和 $C2$ 的差异也随温度的增加而减小.

表 2 ^{56}Mn 、 ^{56}Fe 和 ^{56}Co 的电子俘获反应中，屏蔽因子随密度变化的情况
($T = 10^9$ K, $Y_e = 0.46$)

Table 2 The Screen factor C with mass density in electron capture for ^{56}Mn, ^{56}Fe and^{56}Co ($T = 10^9$ K, Y_e=0.46)

$\log(\rho/\mu_e)$	$^{56}\mathrm{Mn}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Cr}$		$^{56}\mathrm{Fe}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Mn}$		$^{56}\mathrm{Co}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Fe}$	
	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$
4.00	0.9630	0.9559	0.9621	0.9538	0.9616	0.9523
4.50	0.9462	0.9456	0.9448	0.9430	0.9454	0.9425
5.00	0.9220	0.9324	0.9201	0.9292	0.9259	0.9332
5.50	0.8877	0.9146	0.8849	0.9106	0.9092	0.9284
6.00	0.8396	0.8895	0.8357	0.8843	0.9034	0.9316
6.50	0.7736	0.8532	0.7684	0.8463	0.9032	0.9365
7.00	0.6861	0.8012	0.6793	0.7920	0.9005	0.9377
7.50	0.5754	0.7289	0.5669	0.7167	0.8733	0.9217
8.00	0.5770	0.7385	0.4347	0.6174	0.8321	0.8971
8.50	0.7630	0.8612	0.2944	0.4951	0.8302	0.8968
9.00	0.8155	0.8934	0.5858	0.7431	0.8376	0.9019
9.50	0.8340	0.9040	0.7719	0.8642	0.8439	0.9060
10.00	0.7377	0.8467	0.6948	0.8158	0.8482	0.9089
10.05	0.8062	0.8885	0.7933	0.8778	0.8512	0.9109
11.00	0.8328	0.9045	0.8256	0.8978	0.8534	0.9124

表 3 ^{56}Mn 、 ^{56}Fe 和 ^{56}Co 的电子俘获反应中，屏蔽因子随密度变化的情况
($T = 5 \times 10^9$ K, Y_e=0.43)

Table 3 The Screen factor C with mass density in electron capture for ^{56}Mn, ^{56}Fe and ^{56}Co ($T = 5 \times 10^9$ K, Y_e=0.43)

$\log(\rho/\mu_e)$	$^{56}\mathrm{Mn}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Cr}$		$^{56}\mathrm{Fe}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Mn}$		$^{56}\mathrm{Co}(e^-,\nu_e)^{56}\mathrm{Fe}$	
	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$
4.00	0.9925	0.9909	0.9923	0.9905	0.9922	0.9901
4.50	0.9890	0.9887	0.9887	0.9882	0.9885	0.9878
5.00	0.9839	0.9859	0.9835	0.9852	0.9832	0.9847
5.50	0.9765	0.9820	0.9758	0.9812	0.9755	0.9805
6.00	0.9656	0.9765	0.9647	0.9753	0.9644	0.9745
6.50	0.9500	0.9682	0.9487	0.9666	0.9490	0.9660
7.00	0.9276	0.9559	0.9256	0.9535	0.9289	0.9546
7.50	0.8964	0.9381	0.8927	0.9342	0.9037	0.9398
8.00	0.8584	0.9159	0.8466	0.9062	0.8763	0.9232
8.50	0.8349	0.9029	0.7853	0.8676	0.8573	0.9117
9.00	0.8351	0.9023	0.7477	0.8445	0.8503	0.9078
9.50	0.7902	0.8736	0.7278	0.8299	0.8497	0.9076
10.00	0.7556	0.8545	0.7221	0.8294	0.8510	0.9086
10.05	0.8095	0.8881	0.7971	0.8776	0.8525	0.9097
11.00	0.8338	0.9030	0.8267	0.8962	0.8539	0.9108

4 结论

通过分析计算可以看出，由于线性响应理论给出的屏蔽势能的值较经典的离子球模型给出的屏蔽势能值要小，因而对电子俘获反应的影响较先前的讨论程度有所减小. 尽管如此，电荷屏蔽对电子俘获反应的影响仍然比较明显. 从表 2 中可以看出，在某些温度密度点，屏蔽因子 $C2$ 仍小于 0.7, 即屏蔽的影响可以使某些核在某些温度密度点的电子俘获率降低 30% 以上，因而电荷屏蔽的影响仍是比较明显的. 电子俘获是引起 SNII (也包括 SN I_b 、 SN I_c) 核心塌缩的首要因素，电子俘获率的高低对超新星前身星的演化模式的数值模拟非常敏感 [14], 因此我们仍然认为，在精确分析前身星阶段的电子丰度变化率时，有必要考虑电荷屏蔽对电子俘获反应的影响.

参 考 文 献

1 Bethe H A, Brown G E, Applegate J, et al. Nucl Phys, 1979, A324: 487
2 Fuller G M, Fowler W A, Newman M J. ApJS, 1980, 42: 447
3 Fuller G M, Fowler W A, Newman M J. ApJ, 1982a, 252 715
4 Fuller G M, Fowler W A, Newman M J. ApJS, 1982b, 48: 279
5 Fuller G M, Fowler W A, Newman M J. ApJ, 1985, 293: 1
6 Aufderheide M B, Fushi I, Woosley S E, et al. ApJS, 1994, 91: 389
7 Langanke K, Martinez-Pinedo. Nucl Phys, 2000, A673: 481
8 Luo Zhi-quan, Peng Qiu-he. ChA&A, 1997, 21: 28
9 Luo Zhi-quan, Peng Qiu-he. AcASn, 1996, 37(4): 430 (罗志全，彭秋和. 天文学报， 1996, 37(4): 430)
10 Luo Zhi-quan, Peng Qiu-he. ChA&A, 2001, 25: 1
11 Luo Zhi-quan, Peng Qiu-he. AcASn, 2001, 42(3): 302 (罗志全，彭秋和. 天文学报， 2001, 42(3): 302)
12 Salpeter E E, Van Horn H M. ApJ, 1969, 155: 183
13 Itoh I, Tomizawa N, Tamamura T, et al. ApJ, 2002, 579: 380
14 Heger A, Woosley S E, Martinez-pinedo G, et al. ApJ, 2001, 560: 307

Electron Capture in Strong Electron Screening

LUO Zhi-quan[1,2] LIU Men-quan[2] LIN Li-bin[1] PENG Qiu-he[3]

(1 *Department of Physics, Sichuan University, Chengdu* 610065)

(2 *Institute of Theoretical physics, China West Normal University, Nanchong, Sichuan* 637002)

(3 *Department of Astronomy , Nanjing University, Nanjing* 210093)

Abstract The influence of electron screening on electron capture in massive stars at the presupernova stage is discussed. The strong screening potential devierd by linear response theory is used in the discussion. It is showed by calculating the capture rates for ^{56}Co, ^{56}Fe and ^{56}Mn that the effect of the electron screening on electron capture in the paper is slightly smaller than it in previously analysis. However, the effect of the electron screening on electron capture is still obvious.

Key words nucleosynthesis, supernoval: general, electron capture, electron screening