

电荷屏蔽对快中子俘获过程的影响^{*}

张 洁^{1)2)†} 王少峰¹⁾

1) (重庆大学结构与功能研究所, 重庆 400044)

2) (西华师范大学理论物理研究所, 南充 637002)

(2009 年 4 月 23 日收到; 2009 年 6 月 9 日收到修改稿)

本文计算在初生中子星中微子驱动的星风环境中弱电荷屏蔽对质子电子俘获反应的影响. 结果表明电荷屏蔽对星风中核子的比加热率、熵等物理参量基本没有影响. 但是可以明显提高电子丰度, 而这种提高有力地支持了最新的快中子俘获核合成结果.

关键词: 初生中子星, 电子俘获, 核合成, 电荷屏蔽

PACC: 9760B, 9760J, 2340

1. 引 言

快中子俘获过程(简称 r-过程)对质量数 $A > 60$ 的重元素的来源问题非常重要, 因为至少一半的比铁重的核素都是 r-过程的产物^[1]. r-过程发生的物理环境必定是高温下爆炸性核燃烧过程, 同时要求足够大的中子流量以及光致离解反应有效地进行^[2]. 通常认为, 塌缩型超新星爆炸(包括 II 型超新星和 Ib 型超新星)、中子星之间或中子星和黑洞的碰撞是 r-过程合成的天体物理环境. 最近的分析认为, 星系中超新星的爆发概率约 100 年 1 次, 这比中子星合并的概率高 1000 倍; 同时核塌缩型超新星 r-过程不会产生明显的从 Na 到 Ge 等质量数较小的元素. 这些证据强烈地支持核塌缩型超新星相比于中子星合并是主要的 r 元素的来源^[3,4]. 1986 年, Duncan 等^[5]首次提出超新星爆发十几毫秒后在初生中子星表面将形成由中微子驱动的星风. 他们主要关心中微子和光子光度对星风动力学过程的影响, 得到了熵、温度、质量溢出率等许多重要的物理参数, 但并没有讨论对 r-过程核合成的影响. 此后, Woosley 等^[6]仔细研究了中微子驱动的星风中核合成的物理条件, 认为中微子驱动的星风可能是 r-过程核合成的环境. 此后许多学者讨论过初生中子星

中微子驱动的星风动力学问题及其核合成问题. 包括牛顿力学框架^[7]、广义相对论框架^[8]、磁场效应^[9]、旋转效应^[10]等. 最近, Kuroda 等^[11]考虑了当超新星爆发失败时初生中子星外部驻激波或者后退激波对星风的影响; Arcones 等^[12]考虑了除质子、中子和电子以外其他核素的影响^[12]. 当前, 同时包括 6000 多种核素的大型 r-过程核反应数值模拟网络正在被广泛研究^[13]. 结果表明, r-过程核素的丰度在 $A = 80, 130, 195$ 附近出现三个峰值^[14]. 但是这些结果与实际天文观测到的太阳和极贫金属星的 r-过程核素丰度相比, 至今没有一个自洽的相符合的结果. 总的来讲, 超新星中 r-过程核素核合成与 4 个参量紧密相关: 中子-种子核的比率 n_n/n_{seed} 、核子熵 S 、膨胀时标和电子丰度 Y_e . 不同的作者采用不同方法得到的结果相差很大. 严格的模拟和理论计算表明, 失败的共同点是幻中子壳层的核素超丰, 如中子数 $N = 50$ 核素⁹⁰Zr. 同时, 高熵(高达 $400 k$, k 为 Boltzmann 常数)对合成第三个峰值的 r-过程核素几乎是必要条件, 而实际计算得到的熵却小于 $200k$. 最近, Wanajo 等^[13]的研究表明, r-过程核合成结果对 Y_e 特别依赖. 因此高熵和 Y_e 是使 r-过程成功进行的关键因素. 我们对大量前人的研究调研后发现, 尽管人们已经和正在进行大量初生中子星中微子驱动的星风动力学及其核合成的研究, 但一直

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10774196)、四川省教育厅青年基金(批准号:2007ZB090)和西华师范大学科研基金(批准号:09A004, 07A005)资助的课题.

[†] E-mail: zhangjie_mail@cqu.edu.cn

忽视了电荷屏蔽对于自由质子电子俘获反应的影响. 我们分析发现, 电子俘获反应是减小物质加热率的重要因素, 电荷屏蔽一方面将减小自由质子电子俘获, 从而增加物质的加热率, 进而有助于熵增大; 另一方面将影响中子-种子核的比率 n_n/n_{seed} 和电子丰度等重要物理量. 作为一个实际的物理过程, 电荷屏蔽应该引起人们的重视. 虽然电荷屏蔽对热核反应的影响已被大量研究, 但电荷屏蔽对于弱相互作用过程的影响在很长一段时间内被忽视. 罗志全等^[15,16]曾研究了电荷屏蔽对前身星阶段 pf 壳层核素的电子俘获率的影响, 指出电荷屏蔽效应提高了电子俘获过程的有效能阈值, 由此明显地降低超新星前身星中的电子俘获率和总的电子丰度. 但 r-过程的物理环境和前身星阶段的物理环境, 如物质组成、温度、密度等都完全不同, 因此研究电荷屏蔽对 r-过程的影响是非常必要的.

2. 电荷屏蔽下的中微子加热率和电子俘获率

在中微子驱动的星风条件下, 每个核子总的加热率(即比加热率)由加热反应和冷却反应两个部分组成^[7]. 加热反应主要包括中微子或反中微子被核子吸收, 各种中微子(包括 ν_e, ν_μ, ν_τ 及它们的反粒子)与电子和正电子的散射, 正反中微子对湮灭为正负电子对, 冷却反应主要包括电子和正电子被核子俘获, 正负电子对湮灭为中微子. 为了便于区分, 本文中下脚标表示参加反应的粒子, 如 $\dot{q}_{\nu N}$ 表示中微子被核子吸收的反应能. 核子核子的韧致辐射等其他中微子反应, 已经有学者指出并不重要^[8], 因此我们这里不予考虑. 每个核子总的比加热率 $\dot{q}$ 可以表示为^[7]

$$\begin{aligned}\dot{q} &= \dot{q}_{\text{heat}} - \dot{q}_{\text{cooling}} \\ &= \dot{q}_{\nu N} + \dot{q}_{\nu e} + \dot{q}_{\nu \bar{e}} - \dot{q}_{e N} - \dot{q}_{e^- e^+},\end{aligned}\tag{1}$$

式中各项都以 $\text{MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 为单位, 其中, $\dot{q}_{\text{heat}}$ 和 $\dot{q}_{\text{cooling}}$ 分别为加热和冷却反应的能量, $\dot{q}_{\nu N}, \dot{q}_{\nu e}$ 和 $\dot{q}_{\nu \bar{e}}$ 分别表示中微子被核子吸收、中微子与电子散射和正反中微子对湮灭的反应能, $\dot{q}_{e N}$ 和 $\dot{q}_{e^- e^+}$ 分别为电子俘获和正负电子对湮灭的反应能. 各反应能的表达式如下:

$$\dot{q}_{\nu N} = \dot{q}_{\nu e n} + \dot{q}_{\nu \bar{e} p} \approx 9.65 N_A [(1 - Y_e) L_{\nu_e, 51} \langle \varepsilon_{\nu_e}^2 \rangle$$

$$+ Y_e L_{\bar{\nu}_e, 51} \langle \varepsilon_{\bar{\nu}_e}^2 \rangle] \frac{1 - x}{R_{v6}^2},\tag{2}$$

其中 N_A 为 Avogadro 常数, Y_e 为电子丰度, $L_{\bar{\nu}_e, 51}$ 和 $L_{\nu_e, 51}$ 分别为以 $10^{51} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$) 为单位的反中微子和中微子光度, ε_{ν_e} 是以 MeV 为单位的中微子能量. $x = \sqrt{1 - R_v^2/r^2}$ (R_v 为中微子球半径, 近似等于初生中子星半径, r 为离中子星中心的距离, 要求 $r > R_v$ (2) 式才成立), R_{v6} 为以 10^6 cm 为单位的中微子球半径.

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\nu e} &= \dot{q}_{\nu_e e^-} + \dot{q}_{\nu_e e^+} + \dot{q}_{\bar{\nu}_e e^-} + \dot{q}_{\bar{\nu}_e e^+} \\ &\quad + 2(\dot{q}_{\nu_\mu e^-} + \dot{q}_{\bar{\nu}_\mu e^+} + \dot{q}_{\bar{\nu}_\mu e^-} + \dot{q}_{\nu_\mu e^+}) \\ &\approx 2.17 N_A \times \frac{T^4}{\rho_8} \left(L_{\nu_e, 51} \langle \varepsilon_{\nu_e} \rangle + L_{\bar{\nu}_e, 51} \langle \varepsilon_{\bar{\nu}_e} \rangle \right. \\ &\quad \left. + \frac{6}{7} L_{\nu_\mu, 51} \langle \varepsilon_{\nu_\mu} \rangle \right) \frac{1 - x}{R_{v6}^2},\end{aligned}\tag{3}$$

其中 T 是以 MeV 为单位的温度, ρ_8 是以 $10^8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为单位的质量密度, ε_{ν_μ} 与 ε_{ν_e} 相同, 也是以 MeV 为单位, $L_{\nu_\mu, 51}$ 是以 $10^{51} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位的 μ 子中微子光度.

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\nu \bar{e}} &\approx 12.0 N_A \left[L_{\nu_e, 51} L_{\bar{\nu}_e, 51} (\langle \varepsilon_{\nu_e} \rangle + \langle \varepsilon_{\bar{\nu}_e} \rangle) \right. \\ &\quad \left. + \frac{6}{7} L_{\nu_\mu, 51}^2 \langle \varepsilon_{\nu_\mu} \rangle \right] \frac{\Phi(x)}{\rho_8 R_{v6}^4},\end{aligned}\tag{4}$$

其中 $\Phi(x) = (1 - x)^4 (x^2 + 4x + 5)$.

$$\dot{q}_{e^- e^+} \approx 0.144 N_A \frac{T^9}{\rho_8},\tag{5}$$

$$\dot{q}_{e N} = \dot{q}_{e^- p} + \dot{q}_{e^+ n} \approx 2.27 N_A T^6.\tag{6}$$

接下来以初生中子星质量 $M_{\text{NS}} = 1.4 M_\odot$ 和中微子球半径 $R_v = 10 \text{ km}$ 的模型为例来说明以上各种中微子加热或者放热过程中的能量交换值. 由于涉及的加热区域很广, 这里选取比加热率最大处来研究. 这是一个重要区域, 不仅加热率最大, 而且溢出物质经过此半径区域后电子丰度基本不变, 近似可以把该点的电子丰度作为 r-过程核合成的初始丰度(详细分析请参见文献[8]). 同时由于中微子光度的不确定性, 我们选取中微子光度的两种极限情况, 光度最大和最小时的物理参数来计算, 各种参数均来自文献[8]. 中微子光度最大时: $L_{\bar{\nu}_e, 51} = 8$, $L_{\nu_e, 51} = 6.15$, $T = 2.8 \text{ MeV}$, $Y_e = 0.47$, $\rho \approx 3.09 \times 10^8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\varepsilon_{\bar{\nu}_e} = 14 \text{ MeV}$, $\varepsilon_{\nu_e} = 11 \text{ MeV}$, $\varepsilon_{\nu_\mu} = 23 \text{ MeV}$. 中微子光度最小时: $L_{\bar{\nu}_e, 51} = 1$, $L_{\nu_e, 51} = 0.77$, T

$= 1.58 \text{ MeV}$, $Y_e = 0.47$, $\rho \approx 2.52 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\varepsilon_{\bar{\nu}_e} = 8.32 \text{ MeV}$, $\varepsilon_{\nu} = 6.54 \text{ MeV}$, $\varepsilon_{\nu_\mu} = 13.7 \text{ MeV}$. 在两种情况下 $L_{\bar{\nu}_e}$ 和 L_{ν_μ} 满足关系 $L_{\nu_\mu} = L_{\bar{\nu}_e} / 1.4$. 把参数代入(1)–(6)式, 可以得到在中微子光度最大时 $\dot{q}$ 为 $4.84 \times 10^{27} \text{ MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中加热反应 $\dot{q}_{\nu N}$, $\dot{q}_{\nu e}$ 和 $\dot{q}_{\nu\bar{\nu}}$ 的速率分别为 2.37×10^{27} , 2.82×10^{27} 和 $6.1 \times 10^{26} \text{ MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 冷却反应 $\dot{q}_{e^-e^+}$ 和 $\dot{q}_{eN}$ 的速率分别为 3.06×10^{26} 和 $6.59 \times 10^{26} \text{ MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$. 在中微子光度最小时 $\dot{q}$ 为 $3.86 \times 10^{26} \text{ MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中加热反应 $\dot{q}_{\nu N}$, $\dot{q}_{\nu e}$ 和 $\dot{q}_{\nu\bar{\nu}}$ 的速率分别为 1.07×10^{26} , 2.53×10^{26} 和 $6.75 \times 10^{25} \text{ MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 冷却反应 $\dot{q}_{e^-e^+}$ 和 $\dot{q}_{eN}$ 的速率分别为 2.1×10^{25} 和 $2.13 \times 10^{25} \text{ MeV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$. 比较两组数据可以看出, 无论是高光度还是低光度中微子流, 电子和正电子被核子吸收的能量比加热物质的能量小很多, 即此时主要是以中微子加热物质为主导的. 而且电子俘获只占 $\dot{q}_{eN}$ 的一部分, 因此电子俘获在这时对熵和加热率的贡献非常有限.

下面我们考虑屏蔽对质子电子俘获的影响. 电子的屏蔽能 E_c 为

$$E_c = 1.764 \times 10^{-5} Z^{2/3} (\rho Y_e)^{1/3}, \tag{7}$$

其中 Z 为核电荷数. 代入中微子光度最大时的参数可得 $E_c = 0.0093 \text{ MeV}$. 很明显, 反应粒子的最可几能量远大于 E_c , 且 $kT \gg E_c$. 所以与前面我们讨论超新星前身星演化的情况完全不同^[15–17], 这里强屏蔽条件不成立, 弱屏蔽成立^[18]. 按照 Bahcall 等的方法^[19], 弱屏蔽因子可以表达为

$$f = \exp(0.188 Z_1 Z_2 \zeta \rho^{1/2} T_6^{-1.5}), \tag{8}$$

式中, Z_1, Z_2 为两反应粒子的电量; $\zeta = \left[\sum_i (X_i Z_i^2 / A_i + X_i Z_i / A_i) \right]$, 其中 X_i, Z_i, A_i , 分别为组成粒子的质量丰度、电量和质量数; T_6 是以 10^6 K 为单位的温度. 代入中微子光度最大时的参数, 得到 $f = 0.9995$. 即屏蔽修正只有一万分之五. 代入中微子光度最小时的参数可得 $f = 0.9997$, 说明此时的屏蔽修正略微减小. 这是因为中微子光度最小时的密度要低很多, 而屏蔽与密度非常相关. 如果更靠近初生中子星的区域, 屏蔽影响应该稍大; 而远离中子星的区域, 屏蔽影响应该减小, 但总体上屏蔽修正会很小. 这可能就是长期以来没有引起国内外众多学者注意的主要原因. 在中微子加热过程中, 屏蔽理论上能减小电子俘获率, 增加比加热

率, 等效于提高核子熵, 但是从前面的分析可以看出, 这种影响是完全可以忽略的, 即对熵基本没有影响. 但是屏蔽对物质电子丰度和最终核合成的结果可能有重要影响, 自由质子的电子俘获是影响电子丰度的重要物理过程.

接下来研究屏蔽对质子电子俘获的影响, 其俘获的方程为

$$\rho N_A \dot{Y}_{ep} = - \int dn_e \langle \sigma c \rangle n_p, \tag{9}$$

式中, $\dot{Y}_{ep}$ 为由于质子电子俘获导致的电子丰度变化率; n_e 和 n_p 分别为电子和质子的数密度; $dn_e = \frac{8\pi}{(hc)^3} \frac{\varepsilon_e \sqrt{\varepsilon_e^2 - 1}}{\exp((\varepsilon_e - \mu_e - 1)/kT) + 1} d\varepsilon_e$ (以 $m_e c^2$ 为单位), 其中 h 为普朗克常数, c 为光速, ε_e 为电子包含静止质量的能量; $n_p = \chi_p \rho N_A$, 其中 χ_p 为质子丰度, 由电中性要求 $\chi_p = Y_e$; $\sigma = 1.18 \times 10^{-44} \left(\frac{\varepsilon_v^2}{m_e c^2} \right)^2$ 为自由质子的电子俘获截面^[20].

电子化学势 μ_e 由下面的方程决定:

$$\rho Y_e = \frac{1}{\pi^2 N_A} \left(\frac{m_e c^2}{h} \right)^3 \int_0^\infty (S_- - S_+) p^2 dp, \tag{10}$$

其中 h 为约化普朗克常数,

$$S_- = \left(\exp\left(\frac{\varepsilon_e - 1 - \mu_e}{kT} \right) + 1 \right)^{-1},$$
$$S_+ = \left(\exp\left(\frac{\varepsilon_e + 1 + \mu_e}{kT} \right) + 1 \right)^{-1},$$

p 为电子动量. 将中微子光度最大时的参数代入(9)式得到 $\dot{Y}_{ep} = -42.5 \text{ s}^{-1}$ (负号表示电子丰度减小, 下同), 屏蔽增加的电子丰度变化率为 0.0213 s^{-1} , 如果质子在星风中俘获的时标为 10 s , 则总的电子丰度的增加是 0.21 . 当中微子光度最小时, $\dot{Y}_{ep} = -2.67 \text{ s}^{-1}$, 则总的电子丰度的增加为 0.01 . 当然这是考虑只有电子俘获的情况, 实际过程中肯定有反馈效应, 因为反应 $e^- + p \rightarrow \nu_e + n$ 实际是互逆的. 但是屏蔽不会影响中微子俘获, 这种反馈效应不会被完全抹去. 更重要的是, 初生中子星中微子驱动的星风过程可以看作是一个准稳态的过程, 在半径大于最大加热率时电子丰度基本保持恒定. 即此半径之外虽然速度、温度、密度等都剧烈变化, 但电子丰度却基本不变. 这就使得在最大加热率处的物质电子丰度直接影响 r-过程核合成. 换句话说, 电荷屏蔽将影响 r-过程核合成的初始电子丰度. 最近, 采用超过 6300 种核素以及尽可能多的反应道和改进的反应截面的大规模 r-过程核合成模拟表明, 核

合成的结果极大地依赖于 Y_e . Wanajo 等^[13] 采用调节 Y_e 的方法, 发现在现行比较公认的模型参数下, 只要增加电子丰度 1%—2% 就可以解释核素 ^{90}Zr 等超丰以及 O—Ne—Mg 超新星在星系中爆发概率的重大问题. 显然, 人为的调节不是一个好的解决方案. 我们的结果有力地支持了他们的核合成结论, 可以作为其物理依据.

3. 结 论

我们采用 Bahcall 等的弱电荷屏蔽方法讨论了初生中子星环境下的质子电子俘获问题. 由于电荷

屏蔽因子很小, 电荷屏蔽对星风中核子比加热率、熵、膨胀时标等其他物理参量基本没有影响, 但是对星风物质的电子丰度的提高很明显, 而这种提高有力地支持了最新核合成的结果^[13]. 本文只考虑了中微子光度的两种极端情形, 根据中微子的延迟爆发机理, 不同模型的中微子光度应该在两者之间, 对电子丰度修正也应该在两者之间. 另外, 相对于其他物理因素的影响, 屏蔽具有普遍性, 如考虑磁场影响时, 只有在临界磁场 ($B > 10^{13}$ Gs) 以上效果才显著^[21], 因此考虑中微子驱动的星风中的屏蔽效应是合理的, 意义重大.

- [1] Panov I V, Janka H T 2009 *Astron. Astrophys.* **494** 829
- [2] Peng Q H 1998 *Stellar Structure, Evolution and Nuclear Astrophysics* (Nanjing: Nanjing University Press) (in Chinese) [彭秋和 1998 恒星的结构、演化与核天体物理 (南京: 南京大学出版社)]
- [3] Farouqi K, Kratz K L, Mashonkina L I, Pfeiffer B, Cowan J J, Thielemann F K, Truran J W 2009 *ApJ* **694** L49
- [4] Qian Y Z 2008 *Proceedings of the 10th Symposium on Nuclei in the Cosmos* Mackinac Island, Michigan, USA, July 27—August 1, 2008 p1—9
- [5] Duncan R C, Shapiro S L, Wasserman I 1986 *ApJ* **309** 141
- [6] Woosley S E, Wilson J R, Mathews G J, Hoffman R D, Meyer B S 1994 *ApJ* **433** 209
- [7] Qian Y Z, Woosley S E 1996 *ApJ* **471** 331
- [8] Thompson T A, Burrows A, Meyer B S 2001 *ApJ* **562** 887
- [9] Thompson T A 2003 *ApJ* **585** L33
- [10] Metzger B D, Thompson T A, Quataert E 2007 *ApJ* **659** 561

- [11] Kuroda T, Wanajo S, Nomoto K 2008 *ApJ* **672** 1068
- [12] Arcones A, Martinez-Pinedo G, O'Connor E, Schwenk A, Janka H T, Horowitz C J, Langanke K 2008 *Phys. Rev. C* **78** 015806
- [13] Wanajo S, Nomoto K, Janka H T, Kitaura F S, Muller B 2009 *ApJ* **695** 208
- [14] Ning H, Qian Y Z, Meyer B S 2007 *ApJ* **667** L159
- [15] Luo Z Q, Peng Q H 1996 *Sci. Chin. Ser. A* **39** 776
- [16] Li M Q, Zhang J, Luo Z Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3197 (in Chinese) [刘门全、张 洁、罗志全 2006 物理学报 **55** 3197]
- [17] Liu M Q, Zhang J, Luo Z Q 2007 *Astron. Astrophys.* **463** 261
- [18] Salpeter E E, van Horn H M 1969 *ApJ* **155** 183
- [19] Bahcall J N, Chen X, Kamionkowski M 1998 *Phys. Rev. C* **57** 2756
- [20] Bethe H A, Brown G E, Applegate J, Lattimer J M 1979 *Nucl. Phys. A* **324** 487
- [21] Zhang J, Liu M Q, Luo Z Q 2007 *Chin. Phys.* **16** 1477

Effect of electron screening on the rapid neutron capture process^{*}

Zhang Jie^{1)2)†} Wang Shao-Feng¹⁾

1) (*Institute of Structure and Function, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

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

(Received 23 April 2009; revised manuscript received 9 June 2008)

Abstract

We investigate a weak electron screening effect on the electron capture of proton in the neutrino-driven wind of proto-neutron stars. Our results show that the electron screening has little influence on specific heating rate, entropy and other physical parameters in the wind. However, it improves electron fraction obviously, which strongly supports the latest nucleosynthesis of rapid neutron capture process.

Keywords: proton neutron stars, electron capture, nucleosynthesis, electron screening

PACC: 9760B, 9760J, 2340

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774196), the Youths Fund of Sichuan Provincial Education Department, China (Grant No. 2007ZB090), and the Science and Technological Foundation of China West Normal University, China (Grant Nos. 09A004, 07A005).

[†] E-mail: zhangjie_mail@cqu.edu.cn