

超新星核中的夸克相变及夸克质量效应*

赖祥军[†] 罗志全[‡] 刘晶晶 刘宏林

(西华师范大学理论物理研究所,南充 637002)

(2007 年 5 月 24 日收到 2007 年 7 月 4 日收到修改稿)

分别基于组夸克质量模型和流夸克质量模型,讨论了超新星核心区两味夸克物质到更稳定的三味夸克物质的相变过程.结果表明,两种质量模型下相变的特征时标都短于 10^{-8} s,且质量越小的流夸克质量模型的相变速率越快.组分夸克质量模型下所得到的超新星核区的 s 夸克丰度,中微子丰度及中微子总能量(除温度)相比前人的结果有轻微的增加,而流夸克质量模型下所得到的这些参量的增加更为明显,采用流夸克质量模型更有利于超新星的中微子延迟爆发机理的成功.

关键词:夸克相变,组分夸克质量,流夸克质量,超新星

PACC: 0570F, 1480B, 9760B

1. 引言

由 u, d, s 夸克构成的奇异夸克物质(SQM)被认为是最稳定的强作用体系^[1]. SQM 是一团还含有少量电子来维持电中性的一种夸克-胶子等离子体(QGP). 这种 QGP 的存在,可以通过一些可能的特征信号有望在实验上加以检验^[2,3]. 夸克物质(由 u, d 夸克构成)可能在几倍于核密度的环境下由强子物质通过夸克解禁而形成^[4,5],随后可能会经过夸克物质的相变到更稳定的 SQM 状态^[5-7]. 夸克物质转变为 SQM 的途径除包括有宇宙中极端相对论重粒子碰撞^[8], 高密低温的中子星内部或快速旋转的新生中子星内部外^[9,10], 大质量恒星坍缩(如超新星)也是一种可能的途径^[4,6,7]. 超新星爆发之前由电子简并压抵抗星体自引力而暂处平衡态,由于内部铁核的光致裂解和电子俘获^[11,12]使核区发生引力坍缩,结果使内核密度超过核密度,终止坍缩,从而形成激波并向外运动. 然而,基于中微子延迟爆发机理的几乎所有合理模型的计算都表明,形成的激波并不能冲出超新星外核使其成功爆发,包括考虑对流、流体动力学不稳定性、旋转和磁场等物理因素的二维或三维数值模拟(见文献[13]),结果均

因缺少足够的中微子能量而失败,中微子能量不足仍是解决超新星爆发的本质问题^[13,14]. 一种解决中微子能量问题的可能途径是通过超新星坍缩核心形成的前身中子星内出现的夸克物质到奇异夸克物质的相变来实现^[6,7,15]. Dai 等^[6]在 Gentile^[15]等的基础上,进一步研究了超新星核中两味夸克物质到三味夸克物质的相变过程,发现经夸克相变后,内核温度和整个核中的中微子能量都有显著地增加,这些结果将能提高复活激波的总能量和超新星成功爆发的概率. 随后,Anand 等^[7]进一步计入了夸克间相互作用,发现中微子的能量将有进一步地增加. 但他们的工作中都没有考虑 u, d 夸克的质量. 显然,当所选取的 u, d 夸克质量相比其费米动量不能忽略时, u, d 夸克的质量需同时予以考虑. 本文基于不同的质量模型,在超新星环境下,分析相变后的温度和中微子总能量对反弹激波的影响.

因夸克色禁闭的作用和实验技术上的局限,夸克质量的大小只能通过间接的途径获得,理论上则基于不同的模型去分析研究. 主要有两种:组分夸克模型和 QCD(量子色动力学)模型. 组分夸克质量相当于构成强子的几个夸克的平均质量,是描述强子夸克结构模型中的唯象参数. 组分夸克模型能成功地描述低能强子的基本性质. QCD 是描写强相互

* 国家自然科学基金(批准号:10778719),四川省教育厅重点科研基金(批准号:2006A079)和西华师范大学科研启动基金资助的课题.

[†] E-mail: lai jun820515@126.com

[‡] 通信作者. E-mail: zqluo@tom.com

作用的一种规范理论,在 QCD 拉氏量中的夸克质量被称为流夸克质量.这两种质量模型有着动力学的联系,在一定的参数条件下可以相互过渡^[17].尽管有相当多的模型认为夸克物质中夸克质量较小,接近于流夸克质量,但也有文献采用组分夸克质量研究过中子星中强子-夸克相变过程的可能性^[17],以及内核含夸克物质的混合星(hybrid star)的性质^[18].作为比较,将组分夸克质量作为尝试性的模型与流夸克质量模型作为不同的输入参数分别讨论了夸克质量在超新星中夸克相变的效应.我们发现组分夸克质量模型所得到的结果也能成功地描述超新星核心区中的相变过程.

关于超新星中所发生的相变过程,本文作以下近似处理,相变产生的中微子会囚禁,和其他粒子 u, d, s 夸克及电子一样近似处理为相对论高度简并的 Fermi-Dirac 气体^[6,19];按照 Gentile 关于超新星中所发生的一级相变计算结果,内核的 SQM 不到 $0.3M_{\odot}$ (M_{\odot} 为太阳质量),这将导致夸克色禁闭的强作用束缚占主导地位,而忽略引力束缚,所以将内核的 SQM 作均匀处理是一个很好地近似;假设重子数密度和轻子丰度在相变过程中不变^[6].

本文假设坍缩过程中,超新星内核区 ($\leq 0.3M_{\odot}$) 先发生强子-夸克相变,紧接着再从两味夸克物质相变到奇异夸克物质.然后详细计算后一过程的反应率并讨论这一过程的天体物理意义.

2. 相变反应率

对于超新星核心区中所发生的相变过程,有

$$u + e^- \leftrightarrow d + \nu_e, \quad (1)$$

$$u + e^- \leftrightarrow s + \nu_e, \quad (2)$$

$$u + d \leftrightarrow u + s. \quad (3)$$

在相变过程中所有粒子的温度因强相互作用而相同^[19],本文讨论时忽略夸克间强作用修正.夸克物质经弱相互作用后处于 β 平衡,费米子之间的化学平衡意味着

$$\mu_d + \mu_{\nu_e} = \mu_s + \mu_{\nu_e} = \mu_u + \mu_e. \quad (4)$$

因中微子囚禁,所以考虑了中微子的作用.

Heiselberg^[19]给出了反应(3)在有限温度 T ($T \sim \mu_q, q = u, d, s$) 和有限 s, d 夸克化学势之差 $\Delta\mu$ ($\Delta\mu \ll \mu_q$) 条件下的反应率解析表达式. Madsen^[20]也给出了零 m_s 和零温,任意夸克化学势 ($\mu_q, q = u, d, s$) 下该反应率的解析表达式,他们都忽略了 u, d, s 夸

克的质量.下面我们同时考虑 u, d, s 三夸克质量来计算以上三式的反应率.

考虑夸克质量后,粒子能量-动量关系为 $E_q = \sqrt{p_q^2 + m_q^2}$,为了简便令 $a_q = E_q/p_q, b_q = dE_q/dp_q$ ($q = u, d, s$). 定义相变核区的重子数密度 $n_b = (n_u + n_d + n_s)/3$,重子数密度 n_b 本文选为 $2.5n_0$ ^[6], n_0 为原子核的核子数密度 ($\sim 0.155 \text{ fm}^{-3}$),再定义重子和轻子的丰度 $Y_i = n_i/n_b, i = u, d, s, e, \nu_e$. 下标 i 分别对应于 u, d, s 夸克和电子及中微子.

为了简便令 $k = h = c = 1$,其中 k, h, c 分别为 Boltzmann 常数, Planck 常数,光速.对于反应(1)的单位时间单位体积每个核子的净反应数由 Weinberg-Salam 理论有

$$\Gamma_1 = \frac{\Gamma_{(u \leftrightarrow d, e^-)}}{n_b} = 1.22 \times 10^6 T_{11}^3 \frac{(Y_u Y_e Y_d Y_{\nu_e}^2)^{3/2}}{b_u b_d} \times A_1 \xi_1 (\xi_1^2 + 4\pi^2), \quad (5)$$

其中

$$A_1 = \frac{1}{p_f(4)} \int_0^\infty \frac{1}{x^2} dx \left\{ \prod_{i=1}^4 \sin p_f(i)x + c_1 f(p_f(1)) f(p_f(2)) \sin p_f(3)x \sin p_f(4)x + c_2 f(p_f(3)) f(p_f(4)) \sin p_f(1)x \sin p_f(2)x + c_1 c_2 \prod_{i=1}^4 f(p_f(i)) \right\}, \quad (6)$$

$f(p_f(i)) = \cos p_f(i)x - \frac{\sin p_f(i)x}{p_f(i)x}$,其中 $p_f(i)$ 为粒子 i 的费米动量, $i = 1-4$ 依次对应反应(1)中的粒子.这里 T_{11} 以 10^{11} K 为单位, $\xi_1 = (\mu_u + \mu_e - \mu_d - \mu_{\nu_e})/T$,由(4)式可知 ξ_1 表征 SQM 系统偏离平衡的程度, A_1 表征动量守恒定律^[6].

同样可以得到反应(2)单位时间单位体积每个核子的净反应率

$$\Gamma_2 = \frac{\Gamma_{(u \leftrightarrow s, e^-)}}{n_b} = 3.26 \times 10^4 T_{11}^3 \frac{(Y_u Y_e Y_s Y_{\nu_e}^2)^{3/2}}{b_u b_s} A_2 \xi_2 (\xi_2^2 + 4\pi^2), \quad (7)$$

将 A_1 中的 c_1, c_2 分别换为 $1/a_u, 1/a_s$ 便可得 $A_2, \xi_2 = (\mu_u + \mu_e - \mu_s - \mu_{\nu_e})/T$.

反应(3)单位时间单位体积每个核子的净反应率为

$$\Gamma_3 = \frac{\Gamma_{(u \leftrightarrow d, s)}}{n_b} = 45.9 T_{11}^5 \frac{(Y_u^2 Y_d)^{3/2}}{b_u^2 b_d} \times A_3 [M(\xi_3) - M(-\xi_3)], \quad (8)$$

其中

$$M(\xi_3) = \int_{-\infty}^{\mu_s - m_s} \left(\frac{\mu_s}{T} - x \right) \times \sqrt{\left(\frac{\mu_s}{T} - x \right)^2 - \frac{m_s^2}{T^2}} \times \frac{(x + \xi_3)^2 + \pi^2}{(1 + e^x)(1 + e^{-x - \xi_3})} dx, \quad (9)$$

A_3 同样可以将 A_1 中的 c_1, c_2 分别换为 $1(a_u a_d)$, $1(a_u a_s)$ 得到 $\xi_3 = (\mu_d - \mu_s)T$.

3. 夸克相变

由前面推导的反应率应用于超新星核区相变过程, 建立方程组

$$\frac{dY_d}{dt} = \Gamma_1 - \Gamma_3, \quad (10)$$

$$\frac{dY_u}{dt} = \Gamma_1 - \Gamma_2, \quad (11)$$

另有重子数守恒和电中性要求

$$Y_s = 3 - Y_u - Y_d, \quad (12)$$

$$2Y_u = Y_d + Y_s + 3Y_e. \quad (13)$$

因中微子囚禁, 还有轻子丰度 Y_L 守恒即

$$Y_e + Y_{\nu_e} = Y_L, \quad (14)$$

粒子的化学势

$$\mu_i = \sqrt{p_f(i)^2 + m_i^2} \quad i = u, d, s, e, \nu_e, \quad (15)$$

其中

$$p_f(i) = 566.6 (Y_i/g_i)^{1/3} \text{ MeV}. \quad (16)$$

g_i 为自由粒子的简并度, 分别有 $g_u = g_d = g_s = 6$,

$g_e = 2, g_{\nu_e} = 1$. 温度随时间的变化由热力学第一定律可得^[6,7]

$$\frac{dT_{11}}{dt} = - \left(732.9 T_{11} \sum_i \frac{Y_i}{p_f(i)} \right)^{-1} \times \left[(\mu_u + \mu_e - \mu_s - \mu_{\nu_e}) \frac{dY_u}{dt} + (\mu_d - \mu_s) \frac{dY_d}{dt} \right]. \quad (17)$$

为分析夸克质量效应, 本文选取了几个不同的质量模型进行分析. 分别是对应于 u, d 夸克质量为零的模型 I: $m_u = m_d = 0, m_s = 200 \text{ MeV}$ ^[6]; 对应于 u, d 夸克质量不为零的模型 II^[21]: $m_u = 5.56 \text{ MeV}, m_d = 10 \text{ MeV}, m_s = 200 \text{ MeV}$ (其中 $m_u : m_d : m_s = 1 : 1.8 : 36$), 代表组分夸克质量模型的模型 III^[22]: $m_u = m_d = 309.15 \text{ MeV}, m_s = 354 \text{ MeV}$ 和代表流夸克质量模型的模型 IV^[23]: $m_u = 1.9 \text{ MeV}, m_d = 4.4 \text{ MeV}, m_s = 87 \text{ MeV}$ (模型 IV 中忽略了统计、模拟系统、微扰理论、电磁效应带来的误差). 相变的初始条件选取为^[6] 初始温度分别为 $10 \text{ MeV}, 20 \text{ MeV}, 30 \text{ MeV}$, 轻子丰度 Y_L 取为 0.36 . 核区中的重子数密度 n_b 为 $2.5n_0$, 对应超新星内核中夸克物质的质量为 $0.307M_\odot$. 初始中微子丰度可由下式求得^[24]:

$$Y_{\nu_e} = 0.38 Y_L^2 + 0.1 Y_L - 0.0145. \quad (18)$$

给定粒子初始丰度 Y_i 和温度 T_{11} 以及重子数密度 n_b , 夸克质量, 通过式 (10), (11) 和 (17) 的数值计算, 可以得到粒子丰度 Y_i , 温度 T_{11} , 核区中微子总产能率 ϵ_{ν_e} 随时间变化的数值结果及其平衡值.

表 1 核区重子数密度为 $2.5n_0$ 相变前后的粒子丰度、温度和总中微子能量. “i”为相变前的量, “f”为相变后的量. 温度 T 以 MeV 为单位, 能量 E 以 10^{45} J 为单位

质量模型	$Y_{e,i}$	$Y_{e,f}$	T_i	T_f	Y_{ui}	Y_{uf}	Y_{di}	Y_{df}	Y_{si}	Y_{sf}	Y_{ei}	Y_{ef}	$E_{\nu_e,i}$	$E_{\nu_e,f}$
I		0.1247		30.2891		1.2353		1.1756		0.5891		0.2353		2.7291
II	0.0707	0.1247	10	30.3142	1.2893	1.2353	1.7107	1.1749	0	0.5898	0.2893	0.2353	1.47	2.7295
III		0.1277		28.9016		1.2323		1.1029		0.6648		0.2323		2.7857
IV		0.1435		42.5004		1.2165		0.9477		0.8357		0.2165		3.5233
I		0.1247		34.8919		1.2353		1.1756		0.5891		0.2353		2.9801
II	0.0707	0.1247	20	34.9137	1.2893	1.2353	1.7107	1.1749	0	0.5898	0.2893	0.2353	1.69	2.9805
III		0.1277		33.6947		1.2323		1.1029		0.6648		0.2323		3.0425
IV		0.1435		45.8943		1.2165		0.9477		0.8357		0.2165		3.8244
I		0.1247		41.4421		1.2353		1.1756		0.5891		0.2353		3.4005
II	0.0707	0.1247	30	41.4605	1.2893	1.2353	1.7107	1.1749	0	0.5898	0.2893	0.2353	2.07	3.4010
III		0.1277		40.4394		1.2323		1.1029		0.6648		0.2323		3.4728
IV		0.1435		51.0519		1.2165		0.9477		0.8357		0.2165		4.3267

表 2 在 $n_b = 2.5n_0, Y_L = 0.36, T = 10 \text{ MeV}$ 下, 相变后粒子的丰度、温度和中微子总能量.

质量模型 IV* 为质量模型 IV 中不考虑 u, d 夸克质量的情形

质量模型	$Y_{\nu e f}$	T_f	Y_{uf}	Y_{df}	Y_{sf}	Y_{ef}	$E_{\nu f}$
IV	0.1435	42.5004	1.2165	0.9477	0.8357	0.2165	3.5233
IV*	0.1435	42.4954	1.2165	0.9479	0.8356	0.2165	2.1578

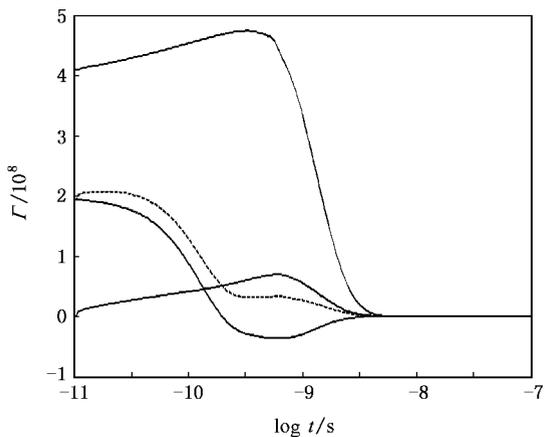


图 1 反应率随时间的变化(对应初始条件: $n_b = 2.5n_0$, 轻子丰度 $Y_L = 0.36$, 初始温度 $T = 20 \text{ MeV}$ 和质量模型 IV. 实线自上而下(图中靠近左侧纵坐标) 分别对应反应率 $\Gamma_3, \Gamma_1, \Gamma_2$, 虚线对应 $(\Gamma_1 + \Gamma_2)$)

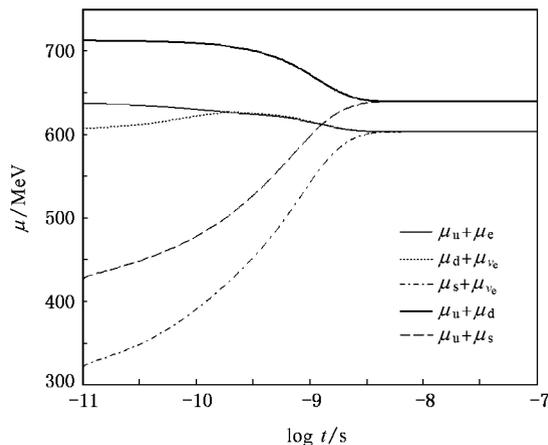


图 3 化学势随时间的变化(对应初始条件: $n_b = 2.5n_0$, 轻子丰度 $Y_L = 0.36$, 初始温度 $T = 20 \text{ MeV}$ 和质量模型 IV. 每条线对应两粒子的化学势之和)

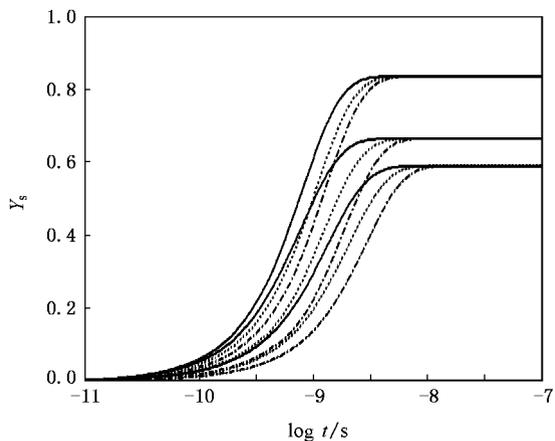


图 2 s 夸克丰度随时间的变化(实线, 点线和点画线均对应于重子数密度 $n_b = 2.5n_0$ 和轻子丰度 $Y_L = 0.36$, 对应的初始温度分别为 $T = 30 \text{ MeV}, 20 \text{ MeV}, 10 \text{ MeV}$; 每一类线自上而下分别对应于质量模型 IV, III, I 和 II, 其中 I 和 II 重合)

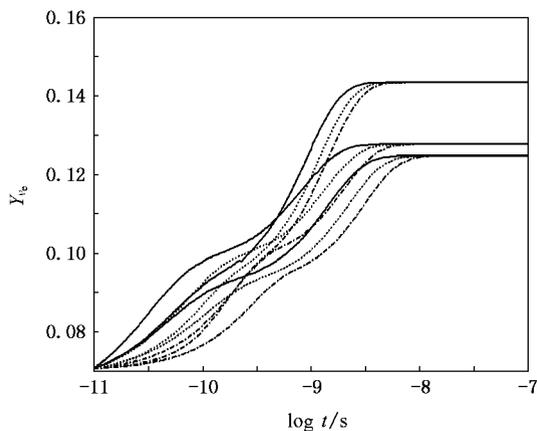


图 4 中微子丰度随时间的变化(实线, 点线和点画线均对应于重子数密度 $n_b = 2.5n_0$ 和轻子丰度 $Y_L = 0.36$, 对应的初始温度分别为 $T = 30 \text{ MeV}, 20 \text{ MeV}, 10 \text{ MeV}$; 每一类线自上而下(图中 10^{-8} s 以后) 分别对应于质量模型 IV, III, I 和 II, 其中 I 和 II 重合)

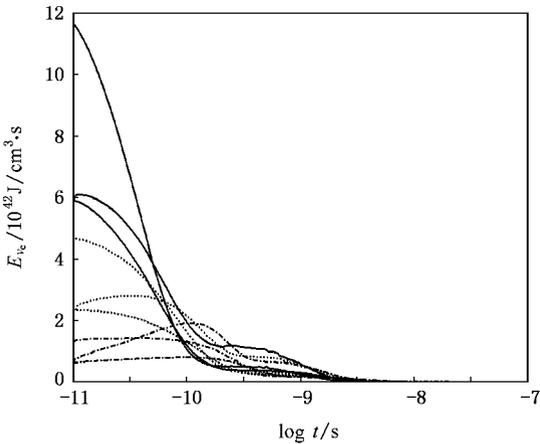


图 5 中微子产能率随时间的变化(实线,点线和点画线均对应于重子数密度 $n_b = 2.5n_0$ 和轻子丰度 $Y_L = 0.36$,对应的初始温度分别为 $T = 30$ MeV, 20 MeV, 10 MeV;每一类线自上而下(图中靠近左侧纵坐标)分别对应于质量模型 III, IV, I 和 II,其中 I 和 II 重合)

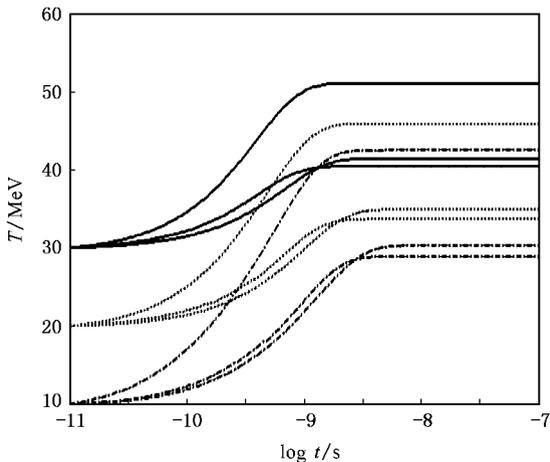


图 6 温度随时间的变化(实线,点线和点画线均对应于重子数密度 $n_b = 2.5n_0$ 和轻子丰度 $Y_L = 0.36$,对应的初始温度分别为 $T = 30$ MeV, 20 MeV, 10 MeV;每一类线自上而下(图中 10^{-8} s 以后)分别对应于质量模型 IV, I, II 和 III,其中 I 和 II 重合)

4. 讨 论

4.1. 相变过程

在超新星核坍缩过程中,伴随着相变所产生的中微子因其自由程远小于超新星半径而被囚禁,中微子动量的作用不能被忽略,中微子的动量、u 夸克的动量与电子的动量一起构成反应能进行的动量

三角形关系. 因而奇异夸克所参与的半轻子反应(2)一开始就能启动. 在重子数密度 $n_b = 2.5n_0$, 轻子丰度 $Y_L = 0.36$, 温度 $T = 20$ MeV 的初始条件下, 采用质量模型 IV 对相变过程进行了分析, 图 1 给出了三个反应率的大小随时间变化的关系, 可以看出反应(3)是生成 s 夸克的主要过程. 反应开始时, d 夸克和 s 夸克之间化学势的差异较大, 费米积分 $M(\xi_3)$ 在反应中起较大的作用, 同时反应率 Γ_3 与 T_{11}^6 成正比, 生成了较多的 s 夸克, 故反应开始后 s 夸克丰度便迅速增加(见图 2).

反应开始时因为较小的 s 夸克丰度 Y_s 及其费米动量, 使反应(2)的反应率 Γ_2 小于反应(1)的反应率 Γ_1 . 但在反应进行中, Γ_1 会因 d 夸克的丰度及其动量的降低而逐渐减小, 且随着 s 夸克丰度及其动量的增加, Γ_2 会逐渐增加, 加之反应(2)反应前后化学势的差异较大, Γ_2 会逐渐接近直至超过 Γ_1 , 这样反应(2)成为相变后阶段生成中微子的唯一过程. 电子丰度的降低和中微子数密度的增加使 $(\mu_d + \mu_e)$ 和 $(\mu_u + \mu_e)$ 的大小在反应过程中会发生倒转(图 3 中约 $10^{-9.5}$ s 处), 反应(1)便开始逆向进行, Γ_1 开始出现负值, 生成的 u 夸克和电子反过来会使反应(2)的反应率继续增加, 中微子丰度会出现第二次较快增长. 这就是图 4 中中微子丰度随时间变化有两次较快的增长和其间有一次较平缓的增长(相应的中微子产能率随时间变化有两次平缓的增加(见图 5))的物理原因, 这与图 1 中 Γ_1 与 Γ_2 之和随时间的变化趋势相一致. 反应率 Γ_1 和 Γ_2 一大一小的交替出现, 结果反应(1)的总反应数与反应(2)的总反应数是同量级的, 这与文献[25]讨论奇异星环境下的结论一致, 但不同于文献[26]讨论中子星时的结论, 中微子能量损失的过程主要由反应(2)决定.

当相变过程中生成的 s 夸克和中微子丰度增加到一定程度使(4)式成立时, 相变停止, 系统达到平衡态. 如对质量模型 IV 而言, $\mu_u + \mu_e$, $\mu_d + \mu_e$ 和 $\mu_s + \mu_e$ 的大小约在 $10^{-8.5}$ s 后趋于相同(见图 3), 这时相变已接近停止(见图 1), 其他参量几乎也在这时趋于稳定.

以上所有分析是基于流夸克模型而言的, 进一步的计算表明, 不同的质量模型下得到的结论几乎都是一致的(见图 2, 4, 5, 6).

4.2. 质量效应

表 1 为各质量模型下相变前后各参量的平衡值,可见,在文献 [6] 给出的质量模型的基础上考虑 u, d 夸克质量,终态的温度和 s 夸克丰度的最大相对偏离分别只有 0.08% 和 0.12%,终态中微子的丰度几乎完全相同.且从图 2,图 4 和图 6 中可以看出,各参量随时间变化的趋势与没有考虑 u, d 夸克质量时的质量模型 I 下的结果符合得很好.可见,在该质量模型下讨论超新星核中的夸克相变时 u, d 夸克的质量是完全可以忽略的.

对于组分夸克质量模型 III 而言,其所得结果相对于质量模型 I 下的结果有一定的差异.相变时标明显较短(其典型时标还不到 10^{-8} s);终态的 s 夸克和中微子丰度的结果最高分别增加 13% 和 2.4%,终态温度有所降低.对流夸克质量模型 IV 而言,相变时标比组分夸克质量模型 III 的结果还要短,平衡态的温度相比于质量模型 I 的结果有明显的提高,最高可增加 40%,最低也有 23%.中微子丰度和 s 夸克丰度分别可增加 15% 和 42%.从图 2,4,6 还可以看出,不同质量模型下的结果随时间变化趋势是相同的.可见,组分夸克质量模型也能成功地描述超新星核中的夸克相变.在一组典型参数情形下(见表 2),计算了流夸克质量模型 IV 中忽略 u, d 夸克质量对相变的影响,结果表明,在该模型下 u, d 夸克质量对结果影响是很小的,在讨论超新星核区中的相变过程时可以不予考虑.

由表 1 和图 2,4 可见,对每种质量模型而言,相变平衡后的 u, d, s 夸克丰度,中微子丰度和电子丰度对所有的初始温度几乎都趋于同一值,这是因为,对于相对论强简并的 Fermi-Dirac 粒子而言,其费米动量与温度无关,仅依赖于粒子的数密度.也就是说初始温度不影响粒子(u, d, s, e, ν_e)的终态丰度.

夸克相变的质量修正主要体现在各反应率中表征化学势差异的 ξ_i ($i = 1, 2, 3$) 和 b_q 上,而表征动量守恒定律的 A_1, A_2 和 A_3 主要依赖于粒子的费米动量,质量变化的影响较小.组分夸克质量模型 III 下的 b_q 和 ξ_i 和质量模型 I 和 II 中的 b_q 和 ξ_i 尽管

有所差别,但它们的共同作用使这三种质量模型下的总反应数相差不大,反应后各参量值比较接近.在所有的质量模型中,流夸克质量模型下的总反应数最大,是因为该质量模型下,反应(3)的化学势差异较大引起的.

从表 1 和图 6 可以看出,各质量模型下终态温度相比于初始温度都有较为显著的增加,在组分夸克质量模型和流夸克质量模型下,其增幅最高分别可达 190%, 320%,最低增幅也有 35%, 70%,中微子丰度均分别增加 80%, 103%,相应中微子能量最高可增加 90%, 140%.超新星核区的温度是一个非常重要的参量,因为它对超新星延迟爆发机理中所要求的中微子加热机理中的平均中微子能量起主要决定作用^[10, 27],中心温度和中微子数密度极大地影响激波向外运动中发生的核区退轻子化过程和质子-中子加热过程^[24].本文研究结论有利于提高复活激波的能量,相应的也会提高中微子延迟爆发的成功机会,对更进一步研究超新星演化的动力学是有积极意义的.

5. 结 论

在讨论了超新星核区中可能发生的两味夸克物质到奇异夸克物质的相变过程后.我们发现,反应(1)和(2)对中微子产生的贡献是相当的,而非轻子参与的反应(3)是生成 s 夸克的主要途径,该结论对所有的质量模型均成立.

比较组分夸克质量模型和流夸克质量模型对相变的影响,发现两种质量模型下相变的特征时标都短于 10^{-8} s,且质量越小的流夸克质量模型的相变速率越快;流夸克质量模型中 u, d 夸克质量是可以忽略的;组分夸克质量也能成功描述超新星核区中夸克的相变过程.相比于前人的质量模型结果而言,本文采用的质量模型的分析结果表明,组分夸克质量下所得到的超新星核区的 s 夸克丰度,中微子丰度及中微子总能量(除温度)有轻微的增加,而流夸克质量模型下所得到的这些参量的增加更为明显,采用流夸克质量模型更有利于超新星中微子延迟爆发机理的成功.

- [1] Witten E 1984 *Phys. Rev. D* **30** 272
- [2] Huo Z J, Long J L, Ma G L, Ma Y G, Zhang J J, Liu B 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2831 (in Chinese) 贺泽君、龙家丽、马国亮、马余刚、张家驹、刘波 2003 物理学报 **52** 2831]
- [3] Li Q, Jiang Z J, Xia H F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5161 (in Chinese) 李强、姜志进、夏宏福 2006 物理学报 **55** 5161]
- [4] Xu R X, Zhang B, Qiao G J 2001 *Astropart. Phys.* **15** 101
- [5] Weber F 2005 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **54** 193
- [6] Dai Z G, Peng Q H, Lu T 1995 *Astrophys. J.* **440** 815
- [7] Anand J D, Goyal A, Gupta V K, Singh S 1997 *Astrophys. J.* **481** 954
- [8] Madsen J 1999 *Lect. Notes Phys.* **516** 162
- [9] Staff J E, Ouyed R, Jaikumar P 2006 *Astrophys. J. Lett.* **645** L145
- [10] Keränen P, Ouyed R, Jaikumar P 2005 *Astrophys. J.* **618** 485
- [11] Luo Z Q, Peng Q H 2001 *Acta Phys. Sin.* **42** 302 (in Chinese) 罗志全、彭秋和 2001 物理学报 **42** 302]
- [12] Luo Z Q, Liu M Q, Lin L B, Peng Q H 2005 *Chin. Phys.* **14** 1272
- [13] Kotake K, Sato K, Takahashi K 2006 *Rept. Prog. Phys.* **69** 971
- [14] Peng Q H 2001 *Prog. in Phys.* **21** 225 (in Chinese) 彭秋和 2001 物理学进展 **21** 225]
- [15] Gentile N A, Aufderheide M B, Mathews G J 1993 *Astrophys. J.* **414** 701
- [16] Zhu J Z, Lu J, Zhou L J 2004 *Nucl. Phys. Rev.* **21** 148 (in Chinese) 朱基珍、卢 鹏、周丽娟 2004 原子核物理评论 **21** 148]
- [17] Buballa M, Neumann F, Oertel M, Shovkovy I 2004 *Phys. Lett. B* **595** 36
- [18] Drago A 1999 *Nucl. Phys. A* **661** 633
- [19] Heiselberg H 1992 *Phys. Scr.* **46** 485
- [20] Madsen J 1993 *Phys. Rev. D* **47** 325
- [21] Kapusta J I 1979 *Nucl. Phys. B* **148** 461
- [22] Cabo A, Rigol M 2002 *Eur. Phys. J. C* **23** 289
- [23] Mason Q, Trottier H D, Horgan R, Davies C T H, Lepage G P 2006 *Phys. Rev. D* **73** 4501
- [24] Burrows A, Mazurek T J, Lattimer J M 1981 *Astrophys. J.* **251** 325
- [25] Cheng K S, Dai Z G 1996 *Astrophys. J.* **468** 819
- [26] Dai Z G, Lu T, Peng Q H 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1210 (in Chinese) 戴子高、陆 彭秋和 1993 物理学报 **42** 1210]
- [27] Mayle R W, Tavani M, RWilson J 1993 *Astrophys. J.* **418** 398

Quark phase transition in supernova and the effect of quark mass on the process^{*}

Lai Xiang-Jun[†] Luo Zhi-Quan[‡] Liu Jing-Jing Liu Hong-Lin

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

(Received 24 May 2007 ; revised manuscript received 4 July 2007)

Abstract

Based on constituent quark mass and current quark mass model, the phase transition of two-flavor quark matter to more stable three-flavor quark matter in the core of supernova is studied. It is shown that the timescale of the process is shorter than 10^{-8} seconds for both cases, and the smaller the quark mass (current quark mass), the quicker the process; and the equilibrium parameters, except the temperature, such as s-quark abundance, neutrino abundance and total neutrino energy in supernova core, have a slight increase compared to the former result after the conversion according to constituent quark mass model. But the values of those parameters (including temperature) increase significantly based on current quark mass model. The current quark mass will be more favorable for the success of the delayed neutrino-heating mechanism for the explosion.

Keywords : quark phase transition, constituent quark mass, current quark mass, supernova

PACC : 0570F, 1480B, 9760B

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10778719) and by Scientific Research and Fund of Sichuan Provincial Education Department (Grant No. 2006A079) and by Science and Technological Foundation of China West Normal University.

[†] E-mail : laijun820515@126.com

[‡] Corresponding author. E-mail : zqluo@tom.com