

## 超新星中夸克相变的 u, d 夸克质量效应\*

赖祥军, 刘门全, 刘宏林, 罗志全

(西华师范大学 理论物理研究所, 四川 南充 637002)

摘要: 分析了超新星中从两味夸克物质到奇异夸克物质相变的 u, d 夸克质量作用, 研究表明, 相变平衡后, u, d 夸克质量对夸克丰度、温度和中微子总能量的影响不大. 在分析相变过程时, u, d 夸克的质量可以忽略. 进一步表明, 夸克味(u, d)不是好的量子相变参量. 光子的夸克结构模型也得到了支持.

关键词: 夸克相变; 超新星; 反应率

中图分类号: P 145.3 文献标识码: A 文章编号: 0258-7971(2007)06-0584-05

1984年 Witten<sup>[1]</sup>在 Itoh<sup>[2]</sup>和 Bodmer<sup>[3]</sup>基础上再次提出著名的猜想: 由 u, d, s 夸克构成的物质比强子物质更稳定, 奇异夸克星的理论预言深受这一思想启发. 同年, Farhi 和 Jaffe<sup>[4]</sup>基于口袋模型支持了这一猜想, 认为奇异星比中子星更稳定, 在自然界中是真正稳定存在的. 基于此, 人们对奇异星的形成、壳层组分、存在形式、Glitch 和  $\gamma$  爆发过大量有趣的研究(见文献[5]及所引的文章), 奇异夸克星所具有的天体物理意义早已超过 Witten 猜想本身.

超新星爆发是形成奇异星的一种可能方式<sup>[6]</sup>, 该过程中产生奇异星的夸克相变过程对超新星的爆发是有影响的<sup>[7]</sup>, 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<sup>[8-10]</sup>过程使核区发生引力塌缩, 结果使内核密度超过核密度, 塌缩终止, 形成激波并向外运动. Gentile 等<sup>[11]</sup>对超新星中一级相变作的研究和戴子高等<sup>[12]</sup>、Anand 等<sup>[13]</sup>对超新星中从两味夸克物质到奇异夸克物质(SQM)相变作的研究, 都表明相变会不同程度地提高复活激波的能量, 从而能增加超新星爆发的成功机会, 且相变过程中中微子的产生和发射对超新星和脉冲星的冷却<sup>[6, 14]</sup>具有重要意义.

Heiselberg<sup>[15]</sup>于 1992 年给出了由非轻子参与的弱作用( $u + d \leftrightarrow u + s$ )在有限温度  $T$  ( $T \ll \mu_q$ ,  $q = u, d, s$ )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. 不久, Madsen<sup>[16]</sup>也给出了零  $m_s$ , 零温和任意夸克化学势  $\mu_q$  下该反应率的解析表达式, 他们都忽略了 u, d, s 三夸克的质量. 随后戴子高等在忽略 u, d 质量而只考虑 s 夸克质量情况下, 讨论了超新星和中子星中的非奇异-奇异夸克物质相变. 1997 年 Anand 等考虑了超新星和中子星中夸克间有强相互作用的夸克相变, 也忽略了 u, d 夸克质量. 由夸克物质组成的奇异夸克星, 其性质可以由小到夸克甚至组成夸克的亚夸克<sup>[17]</sup>出发来讨论. 本文在夸克层次上, 考虑 u, d 质量, 计算夸克相变反应率对超新星爆发的影响.

关于超新星中相变过程, 本文作以下处理(参见文献[12, 15, 13]): ①相变产生的中微子和 u, d, s 及电子一样近似被处理为高度简并的 Fermi-Dirac 气体; ②将内核的 SQM 物质作均匀处理是一个很好的近似, 因为 Gentile 等关于超新星中所发生的一级相变计算结果内核 SQM 不到  $0.3 M_{\odot}$ , 这将导致夸克色禁闭引起的强作用束缚占主导地位, 而忽略引力束缚; ③所有粒子的温度因强相互作用而相同.

\* 收稿日期: 2007-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10347008); 西华师范大学科研启动基金资助课题.

作者简介: 赖祥军(1982-), 男, 四川人, 硕士生, 主要从事天体物理方面的研究.

通讯作者: 罗志全(1962-), 男, 四川人, 教授, 主要从事核天体物理方面的研究, E-mail: lzq\_sc@tom.com.

## 1 反应率修正

在超新星中产生奇异夸克的弱作用

$$u(1) + d \leftrightarrow s(2) + s \quad (1)$$

是非常重要的, 具体体现<sup>[5]</sup>: ① 是地球实验室通过重离子碰撞探测奇异夸克物质滴(strangelets)的一条途径; ② 决定中子星燃烧为夸克星的速度; ③ 对早期宇宙夸克物质团(quark nuggets)的形成和蒸发起重要作用; ④ 决定夸克物质的体粘滞性(bulk viscosity), 进而决定中子星或奇异星的稳定性和最大旋转速度. 除反应(1)外夸克物质要达到平衡态还需以下两弱相互作用

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

$$u + e^- \leftrightarrow s + \nu_e. \quad (3)$$

因中微子在超新星内核相变中是高度简并且囚禁的, 所以这里没有考虑产生反中微子的反应, 也不考虑夸克之间强修正. 夸克物质因弱相互作用而处于平衡, 费米子之间的化学平衡意味着

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

这里因中微子囚禁而考虑了中微子的作用.

令  $k = h = c = 1$ , 对于反应(1)的单位时间单位体积的反应数由 Weinberg - Salam 理论有<sup>[12]</sup>

$$\Gamma_{(ud \rightarrow us)}^+ = \frac{2 \times 36}{(2\pi)^8} G_F^2 \cos^2 \theta_c \sin^2 \theta_c \int \left[ \prod_{i=1}^4 d\mathbf{p}_i^3 \right] \delta^{(4)}(P_1 + P_2 - P_3 - P_4) S(P_1 \cdot P_2)(P_3 \cdot P_4), \quad (5)$$

其中,  $S = f(E_1)f(E_2)[1 - f(E_3)][1 - f(E_4)]$ ,  $f(E_i) = \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_i - \mu_i}{T}\right) \right]^{-1}$ ,  $i = 1 \rightarrow 4$ . 依次对应反应(1)中的粒子.  $\mu_i$ ,  $E_i$ ,  $P_i = (E_i, \mathbf{p}_i)$  分别为粒子的化学势、能量和四维动量.  $T$  为温度,  $f(E_i)$  为粒子的 Fermi - Dirac 分布函数.  $G_F$  为费米常数( $1.435 \times 10^{-56} \text{ J} \cdot \text{cm}^3$ ),  $\theta_c$  为 Cabibbo 角( $\cos^2 \theta_c = 0.974$ ). 系数 36 为夸克的自旋和色简并态求和的结果. 考虑质量后粒子能量 - 动量关系为  $E_q = \sqrt{p_q^2 + m_q^2}$ , 为了简便令

$$a_q = \frac{E_q}{p_q}, \quad b_q = \frac{dE_q}{dp_q}, \quad q = u, d, s, \quad (6)$$

带入(5)式便得到反应(1)的正反应率

$$\Gamma_{(ud \rightarrow us)}^+ = \frac{18}{\pi^6} G_F^2 \cos^2 \theta_c \sin^2 \theta_c \frac{p_F(u)^2 p_F(d)}{b_u^2 b_d} T^5 A_1 M(\xi_1), \quad (7)$$

其中

$$A_1 = \frac{1}{p_F(4)} \int_0^\infty \frac{1}{x^2} dx \left\{ \prod_{i=1}^4 \sin p_F(i) x + c_1 c_2 \prod_{i=1}^4 \left[ \cos p_F(i) x - \frac{\sin p_F(i) x}{p_F(i) x} \right] + \right. \\ \left. c_1 \left[ \cos p_F(1) x - \frac{\sin p_F(1) x}{p_F(1) x} \right] \left[ \cos p_F(2) x - \frac{\sin p_F(2) x}{p_F(2) x} \right] \sin p_F(3) x \sin p_F(4) x + \right. \\ \left. c_2 \left[ \cos p_F(3) x - \frac{\sin p_F(3) x}{p_F(3) x} \right] \left[ \cos p_F(4) x - \frac{\sin p_F(4) x}{p_F(4) x} \right] \sin p_F(1) x \sin p_F(2) x \right\}, \quad (8)$$

$p_F(i)$  为粒子  $i$  的费米动量,  $c_1 = 1/(a_u a_d)$ ,  $c_2 = 1/(a_u a_s)$ ,  $M(\xi_1)$  的具体表达式见文献[12],  $\xi_1 = (\mu_d - \mu_s)/T$ , 由(4)式可知其表征了偏离平衡的特性,  $A_1$  表征动量能量守恒定律<sup>[12]</sup>. 由前面假设可以定义相变区重子数密度

$$n_b = \frac{n_u + n_d + n_s}{3}, \quad (9)$$

再定义粒子丰度

$$Y_i = \frac{n_i}{n_b}, \quad i = u, d, s, e, \nu_e, \quad (10)$$

将(7)式中的  $M(\xi_1)$  换为  $M(-\xi_1)$  便得反应(1)的逆反应率. 因而反应(1)的每个核子的净反应率为

$$\Gamma_1 = \frac{\Gamma_{(ud \rightarrow us)}}{n_b} = 45.9 T_{11}^5 \frac{(Y_u^2 Y_d)^{1/3}}{b_u^2 b_d} A_1 [M(\xi_1) - M(-\xi_1)], \quad (11)$$

这里  $T_{11}$  以  $10^{11}$  K 为单位. 同样可得反应(2) 每个核子的净反应率为

$$\Gamma_2 = \frac{\Gamma_{(ue \rightarrow d\nu_e)}}{n_b} = 6.64 \times 10^5 T_{11}^3 \left( \frac{n_b}{n_0} \right)^{2/3} \frac{(Y_u Y_e Y_d Y_{\nu_e}^2)^{1/3}}{b_u b_d} A_2 \xi_2 (\xi_2^2 + 4\pi^2), \quad (12)$$

$n_0$  为原子核的核子数密度 ( $\sim 0.155 \text{ fm}^{-3}$ ), 将  $A_1$  中的  $c_1, c_2$  分别换为  $1/a_u, 1/a_d$ , 便可得  $A_2, \xi_2 = (\mu_u + \mu_e - \mu_d - \mu_{\nu_e})/T$ . 还可以得到反应(2) 的中微子产能率(以每重子为单位)

$$\varepsilon_2(\xi_2) = 1.17 \times 10^{-2} T_{11}^6 \frac{(Y_u Y_e Y_d)^{1/3}}{b_u b_d} A_2 [I(\xi_2) - I(-\xi_2)] (\text{erg/s}), \quad (13)$$

其中

$$I(\xi_2) = \int_{-\infty}^{\mu_{\nu_e}/T} \frac{(\mu_{\nu_e}/T - x)^3 [(x + \xi_2)^2 + \pi^2]}{(1 + e^x)(1 + e^{-x - \xi_2})} dx. \quad (14)$$

反应(3) 每个核子的净反应率

$$\Gamma_3 = \frac{\Gamma_{(ue \rightarrow s\nu_e)}}{n_b} = 1.77 \times 10^4 T_{11}^3 \left( \frac{n_b}{n_0} \right)^{2/3} \frac{(Y_u Y_e Y_s^2 Y_{\nu_e}^2)^{1/3}}{b_u b_s} A_3 \xi_3 (\xi_3^2 + 4\pi^2), \quad (15)$$

$A_3$  同样可以将  $A_1$  中的  $c_1, c_2$  分别换为  $1/a_u, 1/a_s$ , 得到  $\xi_3 = (\mu_u + \mu_e - \mu_s - \mu_{\nu_e})/T$ . 中微子产能率为

$$\varepsilon_3(\xi_3) = 3.12 \times 10^{-4} T_{11}^6 \frac{(Y_u Y_e Y_s)^{1/3}}{b_u b_s} A_3 [I(\xi_3) - I(-\xi_3)] (\text{erg/s}), \quad (16)$$

将(14) 式中的  $\xi_2$  换为  $\xi_3$  可得  $I(\xi_3)$ , 则中微子总的产能率为

$$\varepsilon_{\nu_e} = \varepsilon_2(\xi_2) + \varepsilon_3(\xi_3). \quad (17)$$

中微子是囚禁的, 给定初始条件可以求得产生中微子的总能量.

## 2 夸克相变

将前面导出的反应率公式应用于超新星核区中的相变过程, 建立方程组

$$\frac{dY_d}{dt} = -\Gamma_1 + \Gamma_2, \quad (18)$$

$$\frac{dY_u}{dt} = -\Gamma_2 - \Gamma_3, \quad (19)$$

由重子数守恒和电中性要求有

$$Y_s = 3 - Y_u - Y_d, \quad (20)$$

$$2Y_u = Y_d + Y_s + 3Y_e, \quad (21)$$

因中微子囚禁, 则相变(2) 和(3) 不改变轻子丰度  $Y_L$ , 即

$$Y_e + Y_{\nu_e} = Y_L, \quad (22)$$

粒子的化学势

$$\mu_i = \sqrt{p_F(i)^2 + m_i^2}, \quad i = u, d, s, e, \nu_e, \quad (23)$$

其中粒子费米动量见文献[12].

本文考虑质量对相变的影响, 除夸克质量外其它初始条件按文献[12] 选取: ①核区重子数密度  $n_b$  取  $1.5 n_0$  和  $2.5 n_0$  2 种情况, 对应超新星内核中夸克物质的质量分别为  $0.245 M_\odot$  和  $0.307 M_\odot$ ; ②初始温度取 10, 20, 30 MeV; ③轻子丰度  $Y_L$  取为 0.32, 0.36 和 0.40, 中微子丰度由下式可求得<sup>[18]</sup>

$$Y_{\nu_e} = 0.38 Y_L^2 + 0.1 Y_L - 0.0145, \quad (24)$$

为便于比较, 分考虑  $u, d$  质量为零和不为零的 2 种情形, 其相应的质量模型分别是质量模型 I:  $m_u = m_d = 0, m_s = 200 \text{ MeV}$  和质量模型 II:  $m_u = 5.56 \text{ MeV}, m_d = 10 \text{ MeV}, m_s = 200 \text{ MeV}$ . 模型的选取参见文献[12, 19], 其中模型 II 中  $m_u : m_d : m_s = 1 : 1.8 : 36$ . 给定粒子初始丰度  $Y_i$  和温度  $T_{11}$  以及重子数密度  $n_b$ , 通过式(11)~(24) 以及温度和核子比熵随时间变化关系式<sup>[12, 13]</sup> 的数值计算, 可以得到粒子丰度  $Y_i$ , 温度  $T_{11}$ , 核子比熵  $S$  和内外核区总中微子能量  $E_{\nu_e}$  的平衡值.

### 3 数值结果与讨论

对超新星中两味夸克到三味夸克的相变过程, 得到了相应模型的数值结果, 除中微子能量为内外核区总能量外, 其余参量均指内核区的数值结果, 见表 1, 2.

表 1 内核区为  $1.5 n_0$  相变前后的粒子丰度、温度、熵和内外核区总中微子能量

Tab. 1 The neutrino abundance, the temperature (in units of MeV), the entropy and the total neutrino energies (in units of  $10^{45}$  J) before and after the conversion for  $n_b = 1.5 n_0$  in the inner core

质量模型	$Y_{\nu_e}$	$Y_{\nu_f}$	$T_i$	$T_f$	$Y_{\bar{u}}$	$Y_{uf}$	$Y_{di}$	$Y_{df}$
I	0.056 4	0.101 0	10	22.195 5	1.263 6	1.219 0	1.736 4	1.300 5
II	0.056 4	0.100 9	10	22.223 4	1.263 6	1.219 1	1.736 4	1.299 5
I	0.070 7	0.116 7	20	27.842 4	1.289 3	1.243 3	1.710 7	1.286 4
II	0.070 7	0.116 7	20	27.863 9	1.289 3	1.243 3	1.710 7	1.285 3
I	0.086 3	0.132 9	30	35.475 1	1.313 7	1.267 1	1.686 3	1.272 5
II	0.086 3	0.132 9	30	35.491 5	1.313 7	1.267 1	1.686 3	1.271 4
质量模型	$Y_{si}$	$Y_{sf}$	$Y_{ei}$	$Y_{ef}$	$S_i^{[12]}$	$S_f$	$E_{\nu_e}^{[12]}$	$E_{\nu_f}$
I	0	0.480 5	0.263 6	0.219 0	1.31	2.762 3	1.10	1.661 3
II	0	0.481 5	0.263 6	0.219 1	1.31	2.766 0	1.10	1.659 5
I	0	0.470 4	0.289 3	0.243 3	2.65	3.494 5	1.69	2.320 8
II	0	0.471 3	0.289 3	0.243 3	2.65	3.497 5	1.69	2.321 1
I	0	0.460 4	0.313 7	0.267 1	4.03	4.488 3	2.59	3.309 5
II	0	0.461 4	0.313 7	0.267 1	4.03	4.490 7	2.59	3.310 0

“ $i$ ”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

表 2 内核区为  $2.5 n_0$  相变前后的粒子丰度、温度、熵和内外核区总中微子能量

Tab. 2 The neutrino abundance, the temperature (in units of MeV), the entropy and the total neutrino energies (in units of  $10^{45}$  J) before and after the conversion for  $n_b = 2.5 n_0$  in the inner core

质量模型	$Y_{\nu_e}$	$Y_{\nu_f}$	$T_i$	$T_f$	$Y_{\bar{u}}$	$Y_{uf}$	$Y_{di}$	$Y_{df}$
I	0.056 4	0.108 3	10	30.814 7	1.263 6	1.211 7	1.736 4	1.188 8
II	0.056 4	0.108 3	10	30.840 0	1.263 6	1.211 7	1.736 4	1.188 0
I	0.070 7	0.124 7	20	34.891 9	1.289 3	1.235 3	1.710 7	1.175 6
II	0.070 7	0.124 7	20	34.913 7	1.289 3	1.235 3	1.710 7	1.174 9
I	0.086 3	0.141 5	30	41.069 3	1.313 7	1.258 5	1.686 3	1.162 7
II	0.086 3	0.141 5	30	41.087 3	1.313 7	1.258 5	1.686 3	1.161 9
质量模型	$Y_{si}$	$Y_{sf}$	$Y_{ei}$	$Y_{ef}$	$S_i^{[12]}$	$S_f$	$E_{\nu_e}^{[12]}$	$E_{\nu_f}$
I	0	0.599 6	0.263 6	0.211 7	1.31	3.257 8	1.10	2.241 3
II	0	0.600 3	0.263 6	0.211 7	1.31	3.260 5	1.10	2.241 7
I	0	0.589 1	0.289 3	0.235 3	2.65	3.720 2	1.69	2.980 1
II	0	0.589 8	0.289 3	0.235 3	2.65	3.722 6	1.69	2.980 5
I	0	0.578 8	0.313 7	0.258 5	4.03	4.414 1	2.59	4.009 2
II	0	0.579 5	0.313 7	0.258 5	4.03	4.416 2	2.59	4.009 7

“ $i$ ”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

从数据表可以看出,考虑  $u, d$  夸克质量,终态温度,  $s$  夸克的丰度和中微子总能量的最大偏离分别只有 0.13%, 0.21% 和 0.1%, 除  $n_b = 1.5 n_0$ ,  $Y_L = 0.32$  中微子丰度平衡值仅有 0.1% 偏差外,其余参数的结果基本相同,且各参量随时间的变化与没有考虑  $u, d$  夸克质量的模型 I 几乎是重合的. 本文的结论是在分析计算超新星环境中的夸克相变时,  $u, d$  夸克的质量可以不考虑.

受理论和实验关于中微子有质量的启发<sup>[20]</sup>, 光子是由胶子弦把夸克及其反夸克( $u$  或  $d$ ) 粘合在一起的系统也有实验和理论上的证实<sup>[21, 22]</sup>, 忽略  $u, d$  夸克质量, 是对光子由夸克组成的很好支持. 在维象计算夸克质量谱时, 由于味修正与质量修正是等价的, 可以通过计算轻夸克( $u, d$ ) 的碎裂函数、动力学参数定出重夸克的质量<sup>[23]</sup>.  $u, d$  夸克质量可以忽略, 则表明夸克味不是好的“量子相变参量”.

## 参考文献:

- [ 1 ] WITTEN E. Cosmic separation of phases[ J ]. Phys Rev D, 1984, 30: 272-285.
- [ 2 ] ITOH N. Hydrostatic equilibrium of Hypothetical quark stars[ J ]. Prog Theor Phys, 1970, 44: 291-292.
- [ 3 ] BODMER A R. Collapsed nuclei[ J ]. Phys Rev D, 1971, 4: 1601-1606.
- [ 4 ] FARHI E, JAFFE R L. Strange matter[ J ]. Phys Rev D, 1984, 30: 3279-3290.
- [ 5 ] MADSEN J. Physics and astrophysics of strange quark matter[ J ]. LNP, 1999, 516: 162-207.
- [ 6 ] ALCOCK C, FARHI E, OLINTO A. Strange stars[ J ]. ApJ, 1986, 310: 261-272.
- [ 7 ] (a) TAKAHARA M, SATO K. Can phase transitions of superdense matter strengthen supernova explosions? [ J ]. Phys Lett B, 1985, 156: 17-21.  
(b) TAKAHARA M, SATO K. The phase transitions of superdense matter and supernova explosions[ J ]. Ap&SS, 1986, 119: 45-49.
- [ 8 ] LUO Zhì qian, LIU Merr guan, LIN Li bin, et al. Electron capture in strong electron screening[ J ]. Acta Phys Sin, 2005, 46: 253-257.
- [ 9 ] LUO Zhì qian, PENG Qir he H. The influence of electron screening on electron capture in pre-supernova[ J ]. Acta Phys Sin, 2001, 42: 302-306.
- [ 10 ] LUO Zhì qian, PENG Qir he. The effect of magnetic field on electron capture in non-zero temperature crusts of neutron stars[ J ]. ChA&A, 1997, 21: 254-255.
- [ 11 ] GENTILE N A, AUFDERHEIDE M B, MATHEWS G J. The QCD phase transition and supernova core collapse[ J ]. ApJ, 1993, 414: 701-711.
- [ 12 ] DAI Zi gao, PENG Qir he, LU Tan. The conversion of two-flavor to three-flavor quark matter in a supernova core[ J ]. ApJ, 1995, 440: 815-820.
- [ 13 ] ANAND J D, GOYAL A, GUPTA V K, et al. Burning of two-flavor quark matter into strange matter in neutron stars and in supernova cores[ J ]. ApJ, 1997, 481: 954-962.
- [ 14 ] SCHAAB C, HERMANN B, WEBER F, et al. Differences in the cooling behavior of strange quark matter stars and neutron stars[ J ]. ApJ, 1997, 480: L111-L114.
- [ 15 ] HEISELBERG H. The weak conversion rate in quark matter[ J ]. Phys Scr, 1992, 46: 485-488.
- [ 16 ] MADSEN J. Rate of the weak reaction in quark matter[ J ]. Phys Rev. D, 1993, 47: 325-330.
- [ 17 ] 焦善庆, 张金伟, 杨本立, 等. 亚夸克粒子的  $B$  分布、 $\Gamma$  分布和超对称性[ J ]. 云南大学学报: 自然科学版, 2002, 24(1): 34-37.
- [ 18 ] BURROWS A, MAZUREK T J, LATTIMER J M. The deleptonization and heating of proton-neutron stars[ J ]. ApJ, 1981, 251: 352-336.
- [ 19 ] KAPUSTA J I. Quantum chromodynamics at high temperature[ J ]. Nucl Phys B, 1979, 148: 461-498.
- [ 20 ] 焦善庆, 易兆雄. 中微子质量讨论[ J ]. 大自然探索, 1999, 18(2): 79-80.
- [ 21 ] 焦善庆, 杨本立, 江光佐, 等. 多成分宇宙中稳定粒子的质量和半径估算[ J ]. 云南大学学报: 自然科学版, 2001, 23(2): 119-121.
- [ 22 ] 焦善庆, 许弟余, 龚自正, 等. 编内与“编外”粒子的超对称性及某些奇异现象[ J ]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 616-620.
- [ 23 ] 焦善庆, 雷晓蔚. 夸克质量谱的维象计算[ J ]. 大自然探索, 1995, 14(2): 101-102.

3. Department of Physics and Information Engineering, Shangqiu Teachers College, Shangqiu 476000, China)

**Abstract:** Mei symmetry and Mei conserved quantity for Appell equation in Chetaev constraint mechanical systems are investigated. Appell equations and differential equations of motion for Chetaev constraint mechanical systems are established. The relation between Lagrange function and A function is analyzed. An general research approach of Mei symmetry and Mei conserved quantity for Appell equation in Chetaev constraint mechanical system is discussed. The definition and the criterion of Mei symmetry of Appell equations under the infinitesimal transformations of groups are given. The constructional equation of Mei symmetry and the expression of Mei conserved quantity are also obtained. An example is given to illustrate the application of the results.

**Key words:** Appell equation; Chetaev constraint mechanical system; Mei symmetry; Mei conserved quantity

\* \* \* \* \*

(上接第 588 页)

### Effect of u and d quark mass on the phase transition of quark matter in supernova

LAI Xiang-jun, LIU Mei-quan, LIU Hong-lin, LUO Zhi-quan

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

**Abstract:** The effect of u and d quark mass on the conversion of the two-flavor quark matter to more stable strange quark matter has been analyzed. It is shown that the u and d quark mass has slight influence on equilibrium parameters, involving quark temperature, quark abundances and total neutrino energies. So the u and d quark mass can reasonably be neglected when the conversion processes are studied in a supernova core. It further indicates that the u, d quarks are not good quantum transition flavors and the structure of photon comprised of quarks is also supported.

**Key words:** quark transitions; supernova; reaction rates