

# 关于奇异夸克物质的性质\*

周乐明<sup>1</sup> 彭光雄<sup>1,2,3</sup> 宁平治<sup>1,2,4</sup>

1(南开大学物理系 天津 300071)

2(中国高等科技中心 北京 100080)

3(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

4(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘要** 基于以前的工作,导出了新的奇异夸克质量公式,并用于研究奇异夸克物质的性质,得到与 MIT 袋模型类似的结果.而且发现,新公式导致与以前有所不同的结果,即声速随能量密度的增加而趋向于极端相对论情况的速度减慢.

**关键词** 质量公式 奇异夸克物质 稳定性

## 1 引言

现代天体物理学的发展使大家认识到,在现存的宇宙中存在着大量的不可见物质(约占宇宙质量的80%),人们将其称为暗物质;对于暗物质的组成,人们进行了各种猜测.1984年 Witten<sup>[1]</sup>提出这些物质可能是奇异夸克物质.这种奇异夸克物质由大约相同数目的 u, d, s 夸克组成,在低能下, u, d, s 夸克填充了所有的量子态,这就使得奇异夸克物质可能是绝对稳定的,因而也就可能是真正的物质基态.对奇异夸克物质性质的研究在探索原子核的新形态、核内夸克自由度以及强相互作用动力学中奇异性的作用等方面具有十分重要的意义.奇异夸克物质可能构成最稳定的束缚态,这一性质使其成为夸克胶子等离子体(QGP)形成的重要信号,因而它的研究对量子色动力学、粒子物理学、天体物理学、宇宙学等多方面都有重要影响.所以 Witten 的猜想提出以后,很快引起了人们广泛的研究兴趣<sup>[2-7]</sup>.

## 2 理论框架

在强相互作用领域中,大家公认的正确理论是量子色动力学(QCD).但是量子色动力学在非微扰范围内存在难以克服的困难,为了研究奇异夸克物质的稳定性及其他性质,

1998-03-31收稿

\* 国家自然科学基金和国家教委博士学科点专项基金资助

人们一般采用的是费米气体理论再加上各种能反映夸克禁闭效应的唯象模型. 目前应用较多的是两种模型,其中之一是 MIT 袋模型<sup>[8]</sup>,截止目前已有许多人运用这一模型得出一些有意义的结果<sup>[2,9]</sup>;另一种是质量密度相关模型. 该模型的早期理论认为夸克质量是重子数密度  $n_b$  的单调递减函数,可以参数化为<sup>[10,14]</sup>

$$m_u = m_d = \frac{B}{3n_b}, \quad (1)$$

$$m_s = m_{s0} + \frac{B}{3n_b}, \quad (2)$$

这里  $B$  是用于模拟夸克禁闭效应的真空压强.

在近期的工作中<sup>[11]</sup>,我们注意到,最早提出质量密度相关模型的文献 [12] 对方程 (1) 的导出有详细的讨论和物理上的合理考虑,但对方程 (2) 的有效性却没有确证性的论述. 在质量密度相关模型的框架之下,我们得到一个夸克质量和夸克凝聚的关系式<sup>[13]</sup>:

$$\frac{m_q}{m_{q0}} = \frac{1}{1 - \langle \bar{q}q \rangle_{n_b} / \langle \bar{q}q \rangle_0}, \quad (3)$$

这里  $\langle \bar{q}q \rangle_0$  和  $\langle \bar{q}q \rangle_{n_b}$  分别是真空中的夸克凝聚和重子数密度为  $n_b$  的奇异夸克物质中的夸克凝聚.  $m_{q0}$  是一个参数,它可以认为是手征恢复密度下的夸克质量. 稍后将证明,以前人们在质量密度相关模型中使用的  $u, d$  夸克质量公式是这个一般公式的一级近似,而  $s$  夸克的质量公式需要修改.

在以前的工作中<sup>[13]</sup>,我们对  $s$  夸克质量公式取了零级近似,从而发现了奇异性盈余现象,即在正常核物质密度附近, $s$  夸克含量可能会高于  $u, d$  夸克含量,而目前的重离子碰撞实验难以保证奇异性盈余,从而使得我们无法在此条件下得到奇异夸克物质. 现在对夸克凝聚统一取一级近似,得到一个新的夸克质量公式,运用它进一步研究奇异夸克物质的稳定性及其它性质.

人们普遍认为夸克凝聚是随密度而变动的,这里可以写出一个很显然的等式:

$$\lim_{n_b \rightarrow 0} \frac{\langle \bar{q}q \rangle_{n_b}}{\langle \bar{q}q \rangle_0} = 1. \quad (4)$$

将相对夸克凝聚按密度作泰勒展开,得到以下的一般形式:

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_{n_b}}{\langle \bar{q}q \rangle_0} = 1 - \frac{n_b}{\alpha'_q} + n_b \text{的高阶项} + \dots, \quad (5)$$

这里

$$\alpha'_q = - \left( \frac{d}{dn_b} \frac{\langle \bar{q}q \rangle_{n_b}}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \right)_{n_b=0}^{-1}. \quad (6)$$

一般认为  $\langle \bar{q}q \rangle_{n_b} / \langle \bar{q}q \rangle_0$  是随密度增加而减小的,因而  $\alpha'_q$  是一个正值,它的量纲和密度的量纲是一样的. 如果密度不是太高,那么就可以忽略掉方程 (5) 中  $n_b$  的方次大于 1 的

项, 即有:

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_{n_b}}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \approx 1 - \frac{n_b}{\alpha'_q}. \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式, 则可得到夸克质量公式:

$$m_q = \frac{m_{q0} \alpha'_q}{n_b} \equiv \frac{\beta_q}{n_b}. \quad (8)$$

将它与公式(1)相比较, 可以看到:

$$B = 3\beta_q = 3m_{q0} \alpha'_q. \quad (9)$$

这里 $\beta_q$  ( $q = u, d, s$ ) 的物理意义是真空压强  $B$  的  $1/3$ .

对于  $u, d$  夸克, 忽略它们之间的质量差, 即  $m_{u0} = m_{d0} \equiv m_0$ , 另外用  $\alpha'_0$  表示  $\alpha'_{u,d}$ ,  $\beta$  表示  $\beta_{u,d}$  从而得到:

$$m_{u,d} = \frac{m_0 \alpha'_0}{n_b} = \frac{\beta_{u,d}}{n_b} = \frac{\beta}{n_b}. \quad (10)$$

对  $s$  夸克, 引入一个系数  $C$  以表示出  $\beta_s$  与  $\beta_{u,d}$  之间的关系, 即有:

$$m_s = \frac{m_{s0} \alpha'_s}{n_b} = \frac{\beta_s}{n_b} = \frac{C\beta}{n_b}. \quad (11)$$

假定奇异夸克物质是由  $u, d, s$  夸克和电子组成的费米气体混合物, 其内部通过如下的弱相互作用过程保持化学(或热力学)平衡:

$$d, s \leftrightarrow u + e + \bar{\nu}_e, \quad s + u \leftrightarrow u + d,$$

其中的中微子自由进出此系统. 系统的各组分粒子数目是涨落的, 因而采取巨正则系统. 系统的热力学势密度为<sup>[10]</sup>

$$\Omega = \sum_i \frac{g_i T}{(2\pi)^3} \int d^3p \ln[1 + e^{-(\epsilon_i - \mu)/T}], \quad (12)$$

这里,  $\Omega$  是热力学势密度,  $g_i$  ( $i = u, d, s, e$ ) 是简并因子, 对夸克  $g_i = 6$ , 对电子  $g_i = 2$ .  $\epsilon_i = (p^2 + m_i^2)^{1/2}$  是单个粒子的能量.

当温度为零时, 可以得到:

$$\Omega_i = -\frac{g_i}{48\pi^2} \left[ \mu_i(\mu_i^2 - m_i^2)^{1/2}(2\mu_i^2 - 5m_i^2) + 3m_i^4 \ln \frac{\mu_i + \sqrt{\mu_i^2 - m_i^2}}{m_i} \right], \quad (13)$$

则每种粒子的数密度  $n_i$  可由(13)式得到:

$$n_i = -\frac{\partial \Omega_i}{\partial \mu_i} = \frac{g_i}{6\pi^2} (\mu_i^2 - m_i^2)^{3/2}. \quad (14)$$

在此系统中,各组分粒子的平均数目依赖于化学势 $\mu_i$ ,对于给定的系统总重子数 $n_b$ ,可以通过以下方程来确定化学势的值<sup>[2]</sup>:

$$\mu_d = \mu_s \equiv \mu, \quad (15)$$

$$\mu_u + \mu_c = \mu, \quad (16)$$

$$n_b = \frac{1}{3} (n_u + n_d + n_s), \quad (17)$$

$$\frac{2}{3} n_u - \frac{1}{3} n_d - \frac{1}{3} n_s - n_c = 0. \quad (18)$$

最后两个方程等价于:

$$n_u - n_c = n_b, \quad (19)$$

$$n_d + n_s + n_c = 2n_b. \quad (20)$$

将方程(14)代入方程(20)中,则如文献[11]中指出的那样,可以定义一个关于 $\mu_c$ 的函数:

$$F(\mu_c) = (\mu^2 - m_u^2)^{3/2} + (\mu^2 - m_s^2)^{3/2} + \frac{1}{3} (\mu_c^2 - m_c^2)^{3/2} - 2\pi^2 n_b. \quad (21)$$

由方程(14)和方程(19)可以得到:

$$\mu = \mu_c + \sqrt{m_u^2 + \left[ \pi^2 n_b + \frac{1}{3} (\mu_c^2 - m_c^2)^{3/2} \right]^{2/3}}. \quad (22)$$

解方程 $F(\mu_c) = 0$ ,可以得到 $\mu_c$ ,进而可得到 $\mu_u, \mu_d, \mu_s$ . 文献[10]给出了零温度下,系统压强和能量密度的表达式:

$$P = \sum_i \left( -\Omega_i + n_b \frac{\partial \Omega_i}{\partial n_b} \right), \quad (23)$$

$$E = -P + \sum_i \mu_i n_i. \quad (24)$$

将解方程所得的结果代入以上二式即可得到系统的状态值,从而可以得到奇异夸克物质的一些性质,并可比较它与普通核,超核或奇异强子物质的稳定性.

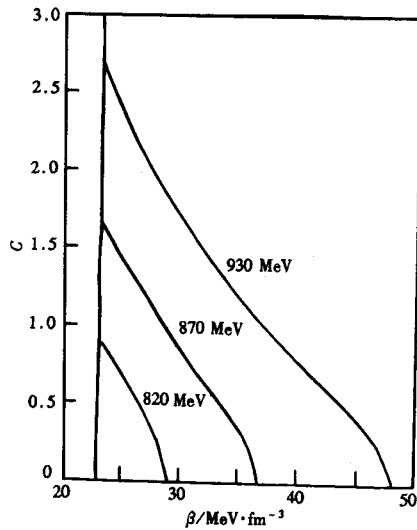
文献[14]给出了声速的计算公式:

$$C_s = \left| \frac{\partial P}{\partial E} \right|^{1/2}. \quad (25)$$

在解出系统的状态值后,可以用数值微分的方法得到对应的声速值,进而得到声速与能量密度之间的数量关系. 因为声速是可观测量,可以将计算值同实验值相比较,以检验模型的正确程度.

### 3 结果与讨论

在以前的工作中<sup>[13]</sup>,已经估计了 $\beta$ 的上下限: $23\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-3} \leq \beta \leq 48\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$ . 同时指出, $\beta \geq 23\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$ 意味着,对于仅由 u, d 夸克组成的普通核物质,在 $P = 0$ 时, $E/n_b$ 应当大于 $930\text{MeV}$ 从而不与标准核物理学理论相冲突.

图 1  $E/n_b$  为定值时的  $\beta$ - $C$  关系图

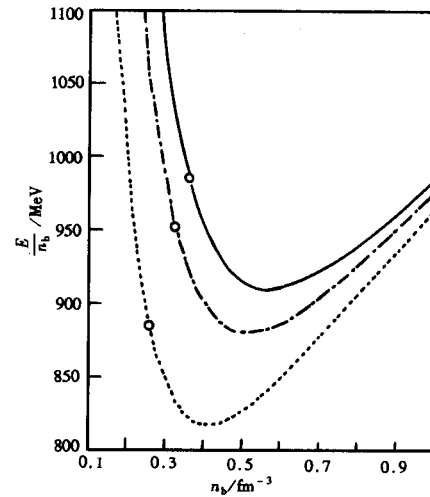
平均重子能量小于 930 MeV 的区域是稳定区.

左方的竖线对应于使两味夸克物质

不稳定的最小  $\beta$  值.

我们将所得的结果用曲线图显示出来, 现在对它们进行一些说明.

图 1 中所示“稳定窗”是三角形, 这和文献 [10, 13] 所得的结果类似. 从这个稳定图可知, 要保证稳定的奇异夸克物质存在, 唯象参数  $C$  有一定的取值范围, 在具体计算中, 选取  $C = 1.5$  作为例子. 将图 2 的结果与文献 [13] 的结果比较可知: 当参数  $\beta = 26 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$ ,

图 2  $E/n_b$  与重子数密度  $n_b$  的关系曲线

○: 零压点; 参数  $C = 1.5$ ; ...  $\beta = 26 \text{ MeV}/\text{fm}^3$ ;

- · -  $\beta = 35 \text{ MeV}/\text{fm}^3$ ; —  $\beta = 40 \text{ MeV}/\text{fm}^3$ .

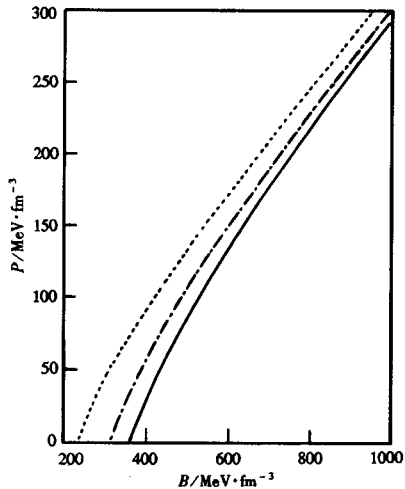


图 3 质量密度相关模型下, 奇异夸克物质的状态图

曲线对应的参数与图 2 相同

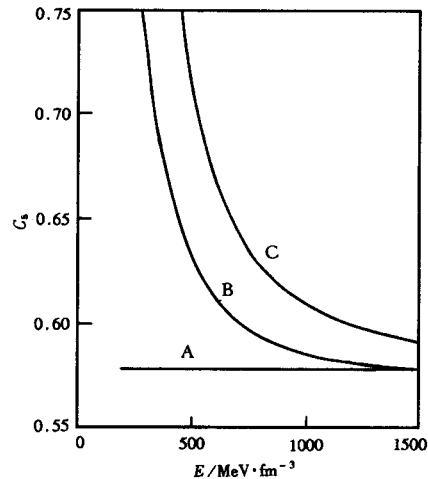


图 4 质量密度相关模型下, 声速与能量密度的关系曲线

A: 袋模型结果; B: 按文献 [13] 计算结果;

C: 本工作结果.

$C = 1.5$  时,二者十分接近,当参数  $\beta = 35\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$  或  $\beta = 40\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$  时,它们之间的差别较为明显. 图 3 表示状态方程的计算结果,与文献 [10] 和 [13] 的结果的主要区别在于零压时的能量密度. 从图 4 可以看出,在较高密度时,曲线 B 和曲线 C 都渐近地趋向于极端相对论情况  $C_s = 1/\sqrt{3}$ . 只是曲线 C 趋向这种情况的速度较慢. 这里参数  $\beta$  都取的是  $40\text{MeV} \cdot \text{fm}^{-3}$ , 曲线 B 中的参数  $m_{s0} = 120\text{MeV}$ .

从以上各图中可以看到,运用我们的一般公式<sup>[13]</sup>,在对夸克凝聚统一取一级近似,得到一个新的夸克质量公式的情况下,仍然得到了与 MIT 袋模型类似的结果,这就进一步支持了可能有稳定奇异夸克物质存在的猜想.

但是目前正在进行着重离子碰撞实验却一直未给出肯定的结果,对此,许多人进行了研究并作出了相应的解释. 比如,在以前使用质量密度相关模型所做的工作以及我们目前的工作中,质量公式中  $n_b$  的指数都是取作 1,但是在文献 [11] 中指出,一个建立在较严格的理论基础上的推导表明,  $n_b$  的指数取  $1/3$  也是合理的. 在这种情况下,可以得到与文献 [14] 类似的结果:稳定的奇异夸克物质存在于高出正常核物质密度 2.7 倍的地方. 这一结果与使用 MIT 袋模型计算所得的结果有很大的差别. 对于实验结果的另外一种解释可以参看文献 [15], 该文作者指出,造成这一结果的原因是,现在的重离子碰撞实验的探测目标存在失误,奇异夸克物质并不是象以前所认为的那样带微量的正电荷,而是带着较大的负电荷,因而要想探测到奇异夸克物质,必须首先改变测量手段. 总之,尽管所有的理论计算都支持稳定奇异夸克物质的存在,但是关于奇异夸克物质可稳定存在的密度范围以及实验的可探测性等都是值得进一步深入研究的课题.

### 参 考 文 献

- 1 Witten E. Phys. Rev., 1984, **D30**:272; Bodmer A R. Phys. Rev., 1971, **4**:1601
- 2 Farhi E, Jaffe R L. Phys. Rev., 1984, **D30**:2379
- 3 He Y B, Gao C S, Li X Q et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:1903
- 4 Peng Guangxiong, Ning Pingzhi, Luo Shijun. CCAST-WL Workshop Series, Vol. 57. In: Chao W Q, Gao C S ed. CCAST-WL, Beijing: 1996, 1—20
- 5 Mustafa M G, Ansari A. Phys. Rev., 1996, **D53**:5136
- 6 Jensen D M, Madsen J. Phys. Rev., 1996, **D53**:R4719
- 7 Madsen J, Jensen D M, Christiansen M B. Phys. Rev., 1996, **C53**:1883
- 8 Jaffe R L, Johnson K, Thorn C B et al. Phys. Rev., 1974, **D9**:3471
- 9 Berger M S, Jaffe R L. Phys. Rev., 1987, **C35**:213; Gilson E P, Jaffe R L, Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:332
- 10 Benvenuto O G, Lugones G, Phys. Rev., 1995, **D51**:1989
- 11 Peng Guangxiong, Ning Pingzhi, Mass Formulae and Strange Quark Matter, HEP-PH/9706291
- 12 Fowler G N, Raha S, Weiner R M. Z. Phys., 1981, **C9**:271
- 13 Peng Guangxiong, Ning Pingzhi, Chiaug Huanqing, Phys. Rev., 1997, **C56**:491
- 14 Chakrabarty S et al. Phys. Lett., 1989, **B229**:112; Phys. Rev., 1991, **D42**:627; 1993, **D48**:93; Phys. Scr., 1991, **43**:11; Mod. Phys. Lett., 1994, **A9**:187; 1994, **9**:2691
- 15 Schaffner-Bielich J, Greiner C, Diener A et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:3038

## On the Properties of Strange Quark Matter \*

Zhou Leming<sup>1</sup> Peng Guangxiong<sup>1, 2, 3</sup> Ning Pingzhi<sup>1, 2, 4</sup>

*1(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)*

*2(CCAST-(World Laboratory), Beijing 100080)*

*3(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)*

*4(Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)*

**Abstract** According to our recent studies, we derive a new mass formula for strange quarks at zero temperature. We apply it to investigating the properties of strange quark matter and obtain similar results to those in the MIT bag model. A different point in our results is that the variation of sound velocity with energy density becomes a little slower.

**Key words** mass formula, strange quark matter, stability

---

Received 31 March 1998

\* Supported by National Natural Science Foundation of China and the Foundation for Ph. D. Training Program of China