

文章编号: 1007-4627(2004)02-0137-05

## 强和弱 Y-Y 相互作用下的奇异强子物质\*

宋宏秋<sup>1</sup>, 苏汝铿<sup>2</sup>, 鲁定辉<sup>3</sup>, 钱伟良<sup>2</sup>

(1 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2 复旦大学物理系, 上海 200433;

3 浙江大学物理系, 浙江杭州 310027)

**摘要:** 把修正的夸克-介子耦合模型推广到包含奇异性的情形, 并用来研究奇异强子物质的状态方程. 从最新的 ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  双超核的实验导出的弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用和过去采用的强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用同时被用于计算. 比较发现, 具有强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的系统束缚得比正常核物质要紧, 而具有弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的系统则比正常核物质束缚得要松得多. 无论强还是弱相互作用情况, 为了合适地描述修正的夸克-介子耦合模型中超子-超子(Y-Y)相互作用, 必须引进  $\sigma^*$  和  $\phi$  介子.

**关键词:** 修正的夸克-介子耦合模型; 奇异强子物质; 超子-超子相互作用

**中图分类号:** O571 **文献标识码:** A

### 1 引言

目前人们的共识是, 夸克是组成物质的基元, 在能量不太高的情况下, 涉及的夸克有 u, d 和 s 3 种, 正常物质由 u 和 d 两种夸克组成, 包含 s 夸克的物质称为奇异物质, s 夸克携带的特殊量子数——奇异数赋予物质一个新的维度. 奇异物质分为奇异夸克物质和奇异强子物质两类. 奇异夸克物质中夸克都处于退禁闭状态, 而奇异强子物质则是由核子和含有奇异数的超子组成. 理论上预言<sup>[1]</sup> 奇异夸克物质(strangelet)比正常核态更稳定, 多年来实验上<sup>[2]</sup> 一直在积极寻找, 但至今没有结果. 另一方面, 从 1953 年 Danysz 和 Pniawski 在乳胶中发现第一个超核<sup>[3]</sup> 以来, 人们一直在研究奇异强子物质. 由于技术上的困难, 实验上找到的超核不多,  $\Lambda$  超核有几十个,  $\Sigma$  超核和  $\Xi$  超核只有几个, 双  $\Lambda$  超核更少. 单超子超核可用来研究核子和超子之间的相互作用, 而双  $\Lambda$  超核则可用来研究超子之间的相互作用. 关于奇异强子物质的理论研究不少, Scharffener 等<sup>[4]</sup> 用相对论平均场研究了有限系统的性质. 发现稳定的系统具有大的奇异数比、小电荷比和高密度. 许多作者用不同理论研究了无限大

奇异强子物质的性质<sup>[5-13]</sup>. Schaffner-Bielich 和 Gal<sup>[14]</sup> 指出, 某些早期的关于奇异强子物质的讨论是不完全的, 要么只讨论  $\Lambda$  物质, 忽略了其他超子, 要么任意包含超子含量. 完整的计算必须考虑化学平衡. 迄今为止, 在核内包含多奇异数的探索工作十分不够, 实验上主要是技术性困难, 理论上是超子间相互作用的不确定性. 最近, Takahashi 等<sup>[15]</sup> 报告了他们对 ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  双超核的观测. 从实验数据得到  $\Lambda$  间的相互作用能为  $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = (1.01 \pm 0.20^{+0.18}_{-0.11}) \text{ MeV}$ . 这个数值比从早年实验数据导出的值  $\Delta B_{\Lambda\Lambda} \cong 4-5 \text{ MeV}$  要小得多. 因此, 用新的数据重新考察奇异强子物质的性质是有意义的, 这是本文的主要目的. 我们要用修正的夸克-介子耦合模型来进行研究. 考虑到反应  $\Lambda\Lambda \leftrightarrow \Xi^- + p$  和  $\Lambda\Lambda \leftrightarrow \Xi^0 + n$ , 我们还将引入  $\Xi$  超子, 从而必须考虑化学平衡. 简化起见, 我们把  $\Xi^0$  与  $\Xi^-$  及中子与质子的含量分别取为相等. 为了正确描述超子间的相互作用, 我们还将引入  $\sigma^*$  和  $\phi$  介子.

在夸克-介子耦合(QMC)模型<sup>[16]</sup>中, 重子物质是由非重迭的重子口袋组成, 在平均场近似下这些口袋通过自洽交换介子束缚在一起. 考虑介质效应

收稿日期: 2003 - 12 - 08; 修改日期: 2004 - 03 - 01

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19975010, 10075071, 10047005, 19947001, 10235030); 中国科学院知识创新基础研究重要方向项目(KJCX2-No11)

作者简介: 宋宏秋(1939-), 男(汉族), 上海川沙人, 研究员, 从事原子核理论研究.

后<sup>[17, 18]</sup>就得到修正的 QMC(MQMC)模型. 我们通过引入 s 夸克把 MQMC 模型推广并用来研究奇异强子物质的性质. 然后比较强和弱两种  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的结果. 我们在第 2 节中介绍 MQMC 模型, 第 3 节中讨论耦合常数, 最后一节给出结果和讨论.

## 2 MQMC 模型

把 MQMC 模型<sup>[18]</sup>作如下推广: (1) 包括  $\Lambda$  和  $\Xi$  超子以描述奇异强子物质; (2) 引入描述超子-超子相互作用的奇异介子  $\sigma^*$  和  $\phi$ , 它们仅与超子相耦合. 另外, 由于我们研究的是非极化对称物质,  $\rho$  和  $\pi$  介子无贡献. 在 MQMC 模型中, 重子物质由描述重子的非重迭的重子袋组成, 在平均场近似下这些口袋靠自洽交换  $\sigma$ ,  $\omega$ ,  $\sigma^*$  和  $\phi$  介子束缚在一起. 重子袋中夸克场的 Dirac 方程为

$$[i\gamma\partial - (m_i - g_i^*\sigma - g_i^*\sigma^*) - \gamma^0(g_i^*\omega + g_i^*\phi)]\psi_{i,j} = 0, \quad (1)$$

其中  $g_i^*$  是夸克-介子耦合常数,  $i$  和  $j$  分别为第  $j$  种重子中的第  $i$  个夸克,  $\kappa$  代表  $\sigma$ ,  $\omega$ ,  $\sigma^*$  和  $\phi$  四种介子场. 通常假设, u 和 d 夸克只与  $\sigma$  和  $\omega$  场耦合并有相同的耦合常数, 标以  $g_u^*$  和  $g_d^*$ . s 夸克只与  $\sigma^*$  和  $\phi$  场耦合. 夸克场  $\psi_{i,j}$  解的形式及有关量的定义可在文献[16, 18]中找到. 有效重子质量可表为

$$M_j^*(R_j) = \frac{\sum_i n_{i,j} \Omega_{i,j-z_0^j}}{R_j} + \frac{4}{3} \pi B_j R_j^3, \quad (2)$$

其中,  $z_0^j$  是计及零点运动和胶子涨落修正的唯象参数,  $n_{i,j}$  是第  $j$  个重子中第  $i$  种夸克的数目,  $\Omega_{i,j}$  是重子半径、夸克本征频率及有效质量的函数, 其表达式见文献[18]. 考虑介质效应后, 口袋常数是  $\sigma$  场的函数

$$B_j = B_{j0} \exp\left(-\frac{4g_{i,j}^{Bj}\sigma}{M_j}\right), \quad (3)$$

其中  $g_{i,j}^{Bj}$  是  $\sigma$  场与第  $j$  个重子口袋的耦合常数,  $B_{j0}$  是自由空间的口袋常数.

在重子密度  $\rho_B$  处每个重子的能量为

$$E_{\text{tot}} = \frac{1}{(2\pi)^3 \rho_B} \sum_j \gamma_j \int^{k_{Fj}} dk \sqrt{M_j^{*2} + k^2} + \frac{1}{2\rho_B} (m_\sigma^2 \sigma^2 + m_\omega^2 \omega^2 + m_{\sigma^*}^2 \sigma^{*2} + m_\phi^2 \phi^2), \quad (4)$$

其中  $\gamma_j$  是自旋-同位旋简并度. 重子密度为  $\rho_B = \rho_N + \rho_\Lambda + \rho_\Xi$ .  $\omega$  和  $\phi$  场由重子密度确定:

$$\omega = g_\omega^* \frac{3\rho_N + 2\rho_\Lambda + \rho_\Xi}{m_\omega^2}, \quad (5)$$

$$\phi = g_\phi^* \frac{\rho_\Lambda + 2\rho_\Xi}{m_\phi^2}, \quad (6)$$

标量场  $\sigma$  和  $\sigma^*$  由以下自洽条件确定:

$$\sigma = \frac{1}{m_\sigma^2 (2\pi)^3} \sum_j \gamma_j \int^{k_{Fj}} dk \frac{M_j^*}{\sqrt{M_j^{*2} + k^2}} \left( \frac{\partial M_j^*}{\partial \sigma} \right)_{R_j}, \quad (7)$$

只要把  $\sigma$  换成  $\sigma^*$  就得到  $\sigma^*$  的自洽条件.

化学平衡条件表为

$$2\nu_\Lambda - \nu_N - \nu_\Xi = 0, \quad (8)$$

其中  $\nu_j = \sqrt{k_{Fj}^2 + M_j^{*2}}$ . 奇异数比定义为  $F_s = (\rho_\Lambda + 2\rho_\Xi)/\rho_B$ .

## 3 耦合常数

自由空间的口袋常数  $B_{j0}$  和唯象参数  $z_0^j$  是通过方程(2)和平衡条件  $\partial M_j^* / \partial R_{j0}$  去拟合自由强子质量  $M_j$  和半径  $R_{j0}$  来确定. 在我们的计算中取  $R_{j0} = 0.8$  fm,  $m_q = 0$  ( $q = u, d$ ). 取核子质量  $M_N = 939$  MeV, 得到  $B_{N0}^{\Lambda} = 170.28$  MeV,  $z_0^N = 3.273$ . 对于超子, 我们假设它们的自由空间口袋常数与核子的相同, 并取 s 夸克的质量为  $m_s = 250$  MeV. 通过拟合自由  $\Lambda$  超子质量  $M_\Lambda = 1116$  MeV 得到  $z_0^\Lambda = 3.117$  和  $R_{\Lambda 0} = 0.806$  fm, 通过拟合自由  $\Xi$  超子质量  $M_\Xi = 1318.1$  MeV 得到  $z_0^\Xi = 2.857$  和  $R_{\Xi 0} = 0.818$  fm.

下面讨论耦合常数. 参照文献[18],  $\sigma$  场与核子之间的耦合常数取为  $g_\sigma^{\text{BN}} = 2.8$ . 通过拟合饱和和密度  $\rho_0 = 0.15$  fm<sup>-3</sup> 处的比结合能 15.73 MeV 得到  $g_\sigma^* = 4.14$ ,  $g_\omega = 3g_\sigma^* = 9.34$ . 这样得到的有效核子质量  $M_N^*/M_N = 0.761$  很合理. 通过拟合饱和和密度对称核物质中单个  $\Lambda$  的能量  $E_\Lambda = -28$  MeV<sup>[23, 24]</sup> 及单个  $\Xi$  的能量  $E_\Xi = -18$  MeV<sup>[25]</sup>, 分别得到  $\sigma$  场与  $\Lambda$  口袋之间的耦合常数  $g_\sigma^{\text{B}\Lambda} = 1.663$  和  $\sigma$  场与  $\Lambda$  口袋之间的耦合常数  $g_\sigma^{\text{B}\Xi} = 1.109$ . 这样剩下  $g_\phi^*$  和  $g_{\sigma^*}^*$  两个耦合常数有待确定. 参照文献[4], 人们利用 SU(6) 关系  $g_\phi^*/g_\sigma^* = -\sqrt{2}$  来确定  $g_\phi^*$ . 然后通过拟合具有密度  $\rho_\Lambda = 0.5 \rho_0$  的  $\Lambda$  '浴' 中的单个  $\Lambda$  位能  $V_\Lambda^{(\Lambda)} \cong 20$  MeV 得到  $\sigma^*$  场与 s 夸克间的耦合常  $g_{\sigma^*}^* =$

8.675. 此值是由强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用  $\Delta B_{\Lambda\Lambda} \cong 4-5$  MeV 估算的, 我们称它为强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用. 如若用最新的数据  $\Delta B_{\Lambda\Lambda} \cong 1.01$  MeV, 我们就有  $V_{\Lambda}^{(\Lambda)} \cong 5$  MeV 和  $g_{\Lambda}^* = 2.875$ , 称为弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用. 介子的裸质量取为  $m_{\sigma} = 550$  MeV,  $m_{\omega} = 783$  MeV,  $m_{\rho} = 975$  MeV,  $m_4 = 1\ 020$  MeV.

### 4 结果和讨论

利用上两节中给出的公式和耦合常数, 我们研究了具有不同奇异数比  $F_s$  的奇异强子物质的饱和性质. 在平均能量中扣除重子质量后就得到如下的比结合能:

$$\frac{E}{B} = E_{tot} - M_N(1 - Y_{\Lambda} - Y_{\Xi}) - M_{\Lambda}Y_{\Lambda} - M_{\Xi}Y_{\Xi},$$

其中  $Y_{\Lambda} = \rho_{\Lambda} / \rho_B$  和  $Y_{\Xi} = \rho_{\Xi} / \rho_B$  分别是物质中的  $\Lambda$  和  $\Xi$  的含量. 图 1 给出用强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用计算的不同奇异数比的奇异强子物质的比结合能对重子密度的依赖关系. 随着奇异数比的增加, 饱和曲线先逐渐

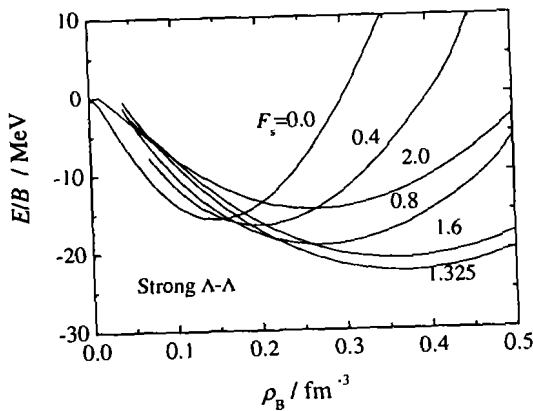


图 1 用强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用计算的奇异强子物质的比结合能与重子密度的关系

变深直到 1.33 左右的一个  $F_s$  值, 然后再变浅. 与此同时, 饱和点先向高密度方向移动直到  $\rho_B \approx 0.38$   $\text{fm}^{-3}$ , 然后反向移动.  $F_s$  值从 0 到 2 的每条曲线都有一个负的极小值, 这意味着在这一区域内奇异强子物质对于发射粒子是稳定的.  $F_s = 0$  和  $F_s = 2$  分别对应于正常核物质和纯  $\Xi$  物质, 它们不满足化学平衡条件. 图 2 给出用弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用计算的与图 1 同样的曲线, 但它们与图 1 给出的强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的结果完全不同. 随着  $F_s$  值的增加, 饱和曲线变得越来越浅. 当  $F_s$  值大于 1.0 时, 饱和曲线就

不再有负的极小值. 这一结果告诉我们, 具有弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的奇异强子物质没有正常核物质稳定.  $F_s$  值大于 1.0 的系统是不稳定的.

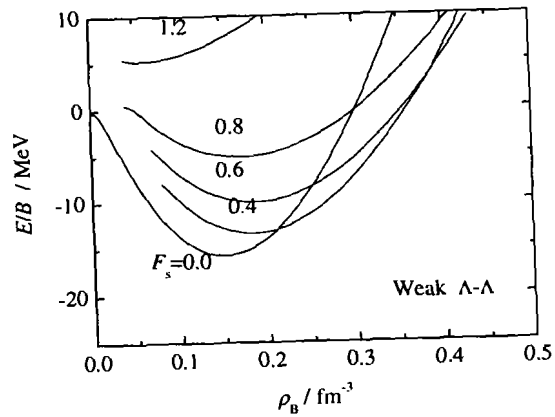


图 2 用弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用计算的奇异强子物质的比结合能与重子密度的关系

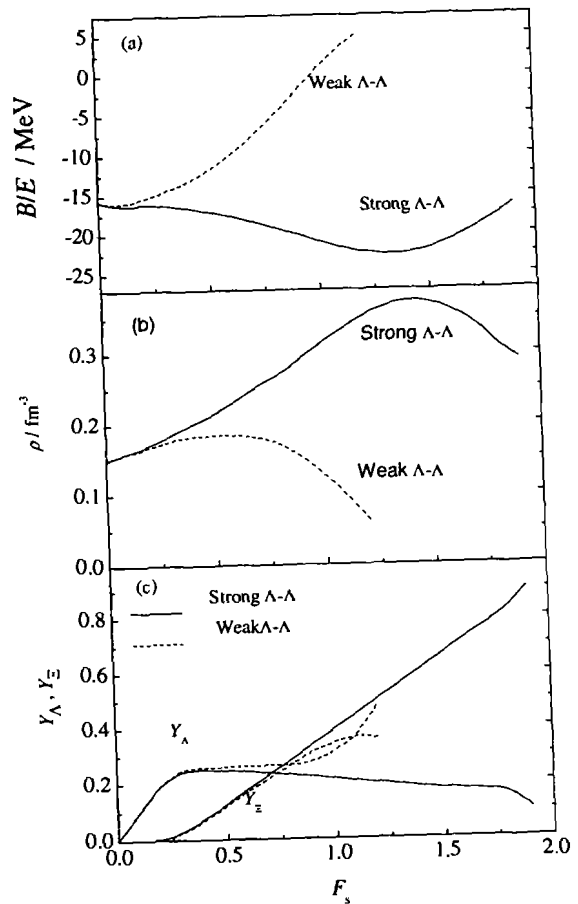


图 3 用强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用(—)和弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用(---)计算的奇异强子物质的极小能量(a)对应的重子密度(b)和对应的  $\Lambda$  和  $\Xi$  含量(c)对奇异数比的依赖关系

为了考察系统对于  $F_s$  的稳定性, 我们在每个

$F_s$  值处把  $E/B$  对  $\rho_B$  求极小. 作为  $F_s$  的函数, 我们在图 3(a) 中给出这个极小比结合能, 在图 3(b) 中给出对应的重子密度, 在图 3(c) 中给出对应的  $\Lambda$  和  $\Xi$  含量. 其中实线和虚线分别对应于强和弱的  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用. 在这个图中两种情况的差别变得很明显. 在强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用及这里考虑的大多数  $F_s$  情况下, 奇异强子物质比正常核物质要束缚得紧. 束缚得最紧的态出现在重子密度约为  $0.38 \text{ fm}^{-3}$ 、奇异数比约为 1.33 处. 这时系统中  $\Xi$  超子为主. 如果  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用是弱的, 那么具有任何奇异数比的奇异强子物质都不如正常核物质稳定. 奇异数比越大, 系统越不稳定. 极小能量随  $F_s$  值增加而增加. 当  $F_s$  值大于 1.0 时就没有负的极小. 实际上, 即使在强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用情况下, 无论核子与超子间还是超子与超子间的相互作用都比核子间的相互作用要弱. 新的自由度的开放使得超子填充低于核子费米面的能级, 而使得奇异强子物质有较低的能量.

为了考察奇异介子  $\sigma^*$  和  $\phi$  的作用, 我们在去除它们贡献的情况下重新计算了饱和曲线, 结果在图 4 中给出. 我们发现这个情况介于强和弱两种相互作用之间, 也就是说, 这时系统束缚得比强作用时要松, 而比弱作用时要紧. 实际上在这种情况下, 单个  $\Lambda$  超子在  $\Lambda$ '浴'中的位能为  $13.8 \text{ MeV}$ , 比最新实验数据要求的  $5 \text{ MeV}$  要深得多. 因此, 为了描写合适的超子间的相互作用, 引进  $\sigma^*$  和  $\phi$  介子是必

要的.

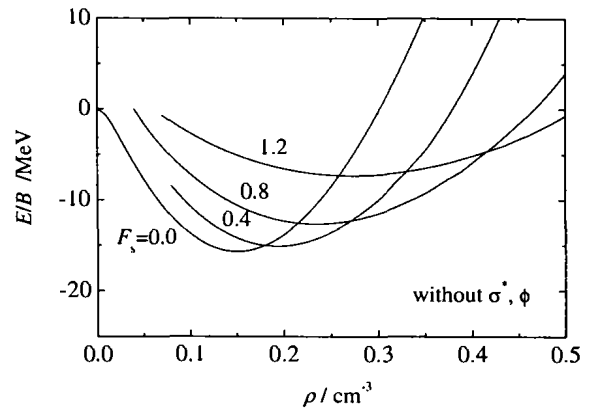


图 4 没有  $\sigma^*$  和  $\phi$  情况下计算的奇异强子物质每个重子结合能与重子密度的关系

综上所述, 我们已把 MQMC 模型推广到奇异强子物质情形, 并用来研究奇异强子物质的性质. 研究发现不同的 Y-Y 相互作用给出完全不同的系统. 具有强  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的系统, 在相当大的奇异数比的区域内束缚得比正常核物质要紧, 而具有弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用的系统则比正常核物质束缚得要松得多. 无论强还是弱相互作用情况, 为了合适地描述 MQMC 模型中 Y-Y 相互作用, 必须引进  $\sigma^*$  和  $\phi$  介子. 如果弱  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用是可信的话, 那么过去对于奇异强子物质的讨论及其推论都要重新考虑. 因此, 对双超核的进一步精确测量是必需的.

参 考 文 献:

[1] Witten E. Phys Rev, 1984, D30: 272; Gilson E, Jaffe R. Phys Rev Lett, 1993, 71: 332.  
 [2] Armstrong T A, Barish K N, Batsouli S, et al. Phys Rev, 2001, C63: 054903; Arsenescu R, Baglin C, Beck H P, et al. J Phys, 2001, G27: 487; Hill John C. Nucl Phys, 2000, A675: 226c.  
 [3] Danysz M, Pniewski J. Phil Mag, 1953, 44: 348.  
 [4] Schaffner J, Dover C B, Gal A, et al. Phys Rev Lett, 1993, 71: 1 328; Schaffner J, Dover C B, Gal A, et al. Ann Phys, 1994, 235: 35.  
 [5] Ikeda K, Bando H, Motoba T. Prog Theor Phys, 1985, Supplement 81: 147.  
 [6] Barranco M, Lombard R J, Marcos S, et al. Phys Phys, 1991, C44: 178.  
 [7] Schulze H J, Baldo M, Lombardo U, et al. Phys Rev, 1998, C57: 704.  
 [8] Vidana I, Polls A, Ramos A, et al. Phys Rev, 2000, C61: 025802-1.  
 [9] Zhang L L, Song H Q, Su R K. J Phys, 1997, G23: 557.  
 [10] Wang P, Su R K, Song H Q, et al. Nucl Phys, 1999, A653: 166.  
 [11] Zhang L L, Song H Q, Wang P, et al. J Phys, 2000, 26: 1 301.  
 [12] Wang P, Zhang Z Y, Yu Y W, et al. Nucl Phys, 2002, A705: 455.  
 [13] Wang P, Zhang Z Y, Yu Y W, et al. Nucl Phys, 2001, A688: 791.  
 [14] Schaffner-Bielich J, Gal A. Phys Rev, 2000, C62: 034311.  
 [15] Takahashi H, Ahn J K, Akikawa H, et al. Phys Rev Lett, 2001, 87: 212502-1.

- [16] Saito K, Thomas A W. *Phys Lett*, 1994, **B327**: 9; Guichon P A M, Saito K, Rodionov E, *et al.* *Nucl Phys*, 1996, **A601**: 349.
- [17] Jin X, Jennings B K. *Phys Lett*, 1996, **B374**: 13.
- [18] Lu D H, Tsushima K, Thomas A W, *et al.* *Nucl Phys*, 1998, **A634**: 443.
- [19] Balberg S, Gal A, Schaffner J. *Prog Theor Phys Suppl*, 1994, **117**: 325.
- [20] Stoks V G J, Lee T S H. *Phys Rev*, 1999, **C60**: 024006-1.
- [21] Mares J, Tiedman E, Gal A, *et al.* *Nucl Phys*, 1995, **A594**: 311.
- [22] Dover C B, Millener D J, Gal A. *Phys Rep*, 1989, **184**: 1.
- [23] Bouyssy A. *Nucl Phys*, 1977, **A290**: 324.
- [24] Hausmann R, Weise W. *Nucl Phys*, 1989, **A491**: 601.
- [25] Fukuda T, Higashi A, Matsuyama Y, *et al.* *Phys Rev*, 1998, **C58**: 1 306.

## Strange Hadronic Matter with Strong and Weak Y-Y Interactions\*

SONG Hong-qiu<sup>1</sup>, SU Ru-keng<sup>2</sup>, LU Ding-hui<sup>3</sup>, QIAN Wei-liang<sup>2</sup>

(1 *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

2 *Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

3 *Department of Physics, Zhejiang University, HangZhou 310027, Zhejiang, China)*

**Abstract:** A modified quark meson coupling (MQMC) model is extended to include  $\Lambda$ -hyperons and  $\Xi$ -hyperons. The extended model is then used to study the equation of state (EOS) for strange hadronic matter. A weak  $\Lambda$ - $\Lambda$  interaction deduced from recent observation of  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  double hypernucleus is adopted in the calculation. The resultant EOS is compared with that deduced from a strong  $\Lambda$ - $\Lambda$  interaction. It is found that while the system with the strong  $\Lambda$ - $\Lambda$  interaction is more deeply bound than ordinary nuclear matter due to the opening of new degrees of freedom, the system with the weak  $\Lambda$ - $\Lambda$  interaction is rather loosely bound compared to the later. It is necessary to introduce the strange mesons  $\sigma^*$  and  $\phi$  in the MQMC model to describe properly the interaction between the hyperons in either strong or weak  $\Lambda$ - $\Lambda$  interaction case.

**Key words:** modified quark meson coupling model; strange hadronic matter; Y-Y interaction

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10075071, 10047005, 19947001, 19975010, 10235030); Knowledge Innovation Project, Chinese Academy of Sciences (KJCX2-No11)