

## 手征模型中奇异强子物质的性质\*

宋宏秋<sup>1</sup> 章利良<sup>1</sup> 苏汝铿<sup>2</sup> 王平<sup>2</sup>

1(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2(复旦大学物理系 上海 200433)

**摘要** 把FST模型推广到包含奇异数的情形,并在平均场近似下用来研究含有核子、 $\Lambda$ 和 $\Xi$ 超子的奇异强子物质的饱和性和稳定性.

**关键词** FST模型 奇异强子物质 稳定性

奇异数为核结构开辟了新的自由度,并越来越引起关注.这与天体物理及气象学均有密切关系.例如,中子星内可能包含大量超子.奇异物质分两类:奇异夸克物质和奇异强子物质.预期具有大奇异数比的夸克物质态可能比正常原子核更稳定.同时,人们对奇异强子物质或超核的性质也作了相应的研究.本工作研究无限大奇异强子物质的性质.关于奇异物质的一般评论,可参考文献[1].

研究结果依赖于理论模型. Ikeda等<sup>[2]</sup>用Brueckner理论及Nijmegen势研究了奇异强子物质的性质.发现不同势的结果差别太大. Barranco等<sup>[3]</sup>用导数耦合(ZM)模型研究了多 $\Lambda$ 物质.结果显示,系统对于发射粒子是稳定的. Schulze等<sup>[4]</sup>基于推广的BHF理论,用Paris核势和最新的软心Nijmegen超子-核子势研究了多 $\Lambda$ 物质,估算了能保持结合的最高奇异数含量.章利良等<sup>[5]</sup>用夸克-介子耦合(QMC)模型,王平等人<sup>[6]</sup>用修正的夸克-介子耦合(MQMC)模型也对奇异强子物质作了研究.

核系统最终应由量子色动力学(QCD)来描述.由于非微扰QCD的困难,人们只能求助于有效模型,但这些模型应受制于QCD的内在对称性. Furnstahl等提出一个强子模型<sup>[7]</sup>(称为FST模型).它把非线性手征对称性破缺标度不变性和矢量为主现象结合在一起,成功地描述了核物质和有限核的特性以及热核的库仑不稳定性<sup>[8]</sup>.因此,用它来研究奇异强子物质是有意义的.为了描述超子间的强相互作用,参照Schaffner等<sup>[9]</sup>,在模型中包含了 $\sigma$ 和 $\phi$ 介子.考虑到 $\Lambda + \Lambda \rightarrow \Xi^- + p$ 和 $\Lambda + \Lambda \rightarrow \Xi^0 + n$ 及其逆反应,除了 $\Lambda$ 以外,我们还在物质中考虑 $\Xi^-$ 和 $\Xi^0$ 的混杂.简单起见,假设它们以等量出现.因此,将用单一符号 $\Xi$ 来表示.

在FST模型中,引入一个新的轻标量场 $S(x) = S_0 - \sigma(x)$ 来代替通常的 $\sigma$ 场,其标度 $d$ 可不等于1. $\sigma(x)$ 场是 $S(x)$ 相对于平衡值 $S_0$ 的涨落.对非极化物质, $\pi$ 介子无贡献.

\*国家自然科学基金(10075071)和中国科学院“九五”重大基础研究基金(KJ951-A1-410)资助

在平均场近似下,推广了的 FST 模型的拉氏量为

$$L_{\text{MFT}} = \sum_j \bar{\Psi}_j (i\gamma^\mu \partial_\mu - g_{\omega} \gamma^0 V_0 - g_{\phi} \gamma^0 \phi_0 - M_j + g_{\text{S}\Lambda} \sigma_0 + g_{\sigma^*} \sigma_0^*) \Psi_j + \frac{1}{2} \left( 1 + \eta \frac{\sigma_0}{S_0} \right) m_\omega^2 V_0 + \frac{1}{4!} \zeta (g_{\omega\Lambda}^2 V_0)^2 + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi_0^2 + \frac{1}{2} m_{\sigma^*}^2 \sigma_0^{*2} - H_q \left( 1 - \frac{\sigma_0}{S_0} \right)^{4/d} \left[ \frac{1}{d} \ln \left( 1 - \frac{\sigma_0}{S_0} \right) - \frac{1}{4} \right], \quad (1)$$

其中  $g_{ij}$  是重子与介子场的耦合常数. 量  $H_q$  定义为  $m_S^2 = 4H_q/(d^2 S_0^2)$ ,  $\phi_0, V_0, \sigma_0$  和  $\sigma_0^*$  是平均介子场. 通过场论运算可得到系统的平均能量密度  $\epsilon$  如下:

$$\epsilon = \sum_i \frac{\gamma_i}{(2\pi)^3} \int_0^{k_{\text{Fi}}} d^3 k E_i^*(k) + g_{\omega\Lambda} V_0 \rho_{\text{BN}} + (g_{\omega\Lambda} V_0 + g_{\phi\Lambda} \phi_0) \rho_{\text{BA}} + (g_{\omega\Sigma} V_0 + g_{\phi\Sigma} \phi_0) \rho_{\text{BE}} + H_q \left\{ \left( 1 - \frac{\sigma_0}{S_0} \right)^{4/d} \left[ \frac{1}{d} \ln \left( 1 - \frac{\sigma_0}{S_0} \right) - \frac{1}{4} \right] + \frac{1}{4} \right\} - \frac{1}{2} \left( 1 + \eta \frac{\sigma_0}{S_0} \right) m_\omega^2 V_0^2 - \frac{1}{4!} \zeta g_{\omega\Lambda}^4 V_0^4 - \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi_0^2 + \frac{1}{2} m_{\sigma^*}^2 \sigma_0^{*2}, \quad (2)$$

其中  $k_{\text{Fi}}$  是费米动量,  $\gamma_i$  是自旋-同位旋简并度.  $E_i^*(k) = \sqrt{M_i^{*2} + k^2}$ . 有效重子质量为  $M_i^* = M_i - g_{\text{S}\Lambda} \sigma_0 - g_{\sigma^*} \sigma_0^*$ . 考虑反应  $\Lambda + \Lambda \rightleftharpoons n + \Xi^0$  和  $\Lambda + \Lambda \rightleftharpoons p + \Xi^-$ , 化学平衡条件为:  $2v_\Lambda - v_N - v_\Xi = 0$  其中  $v_i = \sqrt{k_{\text{Fi}}^2 + M_i^{*2}}$  奇异性百分比定义为:  $f_S \equiv (\rho_{\text{BA}} + 2\rho_{\text{BE}})/\rho_B$ , 其中,  $\rho_B = \rho_{\text{BN}} + \rho_{\text{BA}} + \rho_{\text{BE}}$ . 给定  $\rho_B$  和  $f_S$ , 通过上面 3 个方程确定  $\rho_{\text{BN}}, \rho_{\text{BA}}, \rho_{\text{BE}}$ .

核子与介子的耦合常数由有限核性质确定<sup>[7]</sup>, 剩下 8 个耦合常数待定. 根据 OZI 规则<sup>[10]</sup>, 得到  $g_{\omega\Lambda}/g_{\omega\text{N}} = 2/3, g_{\omega\Sigma}/g_{\omega\text{N}} = 1/3$ . 然后再用一个  $\Lambda(\Xi)$  超子在饱和密度的对称核物质中的能量  $E_\Lambda = -28\text{MeV} (E_\Xi = -18\text{MeV})$  来确定  $g_{\text{S}\Lambda} (g_{\text{S}\Xi})$ . 对  $\phi$  介子, 采用夸克模型的关系<sup>[9]</sup>:  $g_{\phi\Sigma} = 2g_{\phi\Lambda} = -2\sqrt{2}g_{\omega\text{N}}/3$ . 对  $\sigma^*$  介子, 使耦合常数满足一个  $\Lambda$  超子或  $\Xi$  超子在  $\Xi$  物质中的势深  $U_\Lambda^{(\Xi)} = U_\Xi^{(\Xi)} = 40\text{MeV}$ , 其中  $\Xi$  物质密度  $\rho_\Xi \approx \rho_0$ . 所有参数列在表 1 中. 强子裸质量为:  $M_N = 939\text{MeV}, M_\Lambda = 1116\text{MeV}, M_\Xi = 1318.1\text{MeV}, m_\omega = 783\text{MeV}, m_{\sigma^*} = 975\text{MeV}$  和  $m_\phi = 1020\text{MeV}$ .

表 1 FST 模型参数

Set	$g_{\text{S}\text{N}}^2$	$m_S/\text{MeV}$	$g_{\omega\text{N}}^2$	$S_0/\text{MeV}$	$\zeta$	$\eta$	$D$	$g_{\text{S}\Lambda}^2$	$g_{\text{S}\Xi}^2$	$g_{\sigma^*\Lambda}^2$	$g_{\sigma^*\Xi}^2$
T1	99.3	509	154.5	90.6	0.0402	-0.496	2.70	37.32	9.99	48.31	154.62
T3	109.5	508	178.6	89.8	0.0346	-0.160	3.50	41.51	11.12	53.87	175.24

现在讨论物质的饱和性质. 重子比结合能为:  $E/B = \epsilon/\rho_B - M_N(1 - Y_\Lambda - Y_\Xi) - M_\Lambda Y_\Lambda - M_\Xi Y_\Xi$ , 其中  $Y_j$  是超子百分含量. 先研究由对称核物质与  $\Lambda$  组成的系统. 图 1 给出由参数 T1 得到的重子比结合能与重子密度的关系. 当  $f_S = Y_\Lambda$  由小到大变化时, 曲线先变深后

变浅. 最小值大概发生在  $Y_\Lambda = 0.1$  处. 与正常核物质相比,  $Y_\Lambda = 0.1$  物质的比结合能增加了约  $0.6\text{MeV}$ , 意味着它比正常核物质更稳定. 这个能量与其它理论结果<sup>[3-6]</sup>类似, 但比 Ikehada 等人<sup>[2]</sup>用 D 型 Nijmegen 势得到的  $4\text{MeV}$  小得多. 还可发现, 随着  $Y_\Lambda$  的增加, 饱和密度从正常核物质的  $0.148\text{fm}^{-3}$  增加到  $0.24\text{fm}^{-3}$ , 这时  $Y_\Lambda$  约为  $0.4$ .  $\Lambda$  含量的进一步增加, 饱和点密度持续下降, 直至  $Y_\Lambda \sim 0.8$  饱和点消失. 直到  $Y_\Lambda = 0.75$  时, 曲线有负的最小值. 说明一个含有多至  $75\%$   $\Lambda$  超子的系统对粒子发射而言还是稳定的.

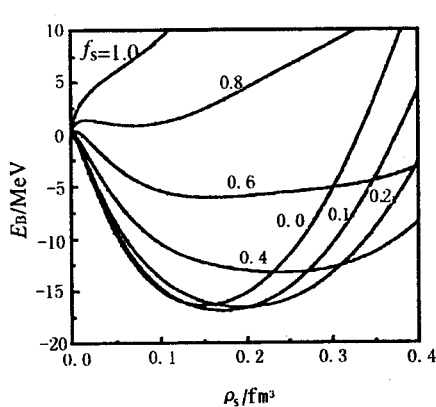


图1 由参数组 T1 算得的 N- $\Lambda$  物质中重子比结合能与重子密度的关系

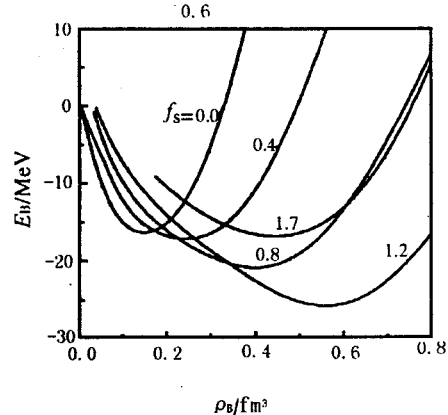


图2 参数组 T1 算得的 N- $\Lambda$ - $\Sigma$  物质中重子比结合能与重子密度的关系

现在研究包含有核子,  $\Lambda$  和  $\Sigma$  超子的物质. 图 2 给出在不同的  $f_s$  下, T1 参数给出的比结合能与重子密度的关系. 曲线走向与图 1 大致相同. 但在  $f_s \sim 1.2$  时得到最大的结合能, 比结合能增量约  $9.0\text{MeV}$ . 说明  $\Sigma$  超子的加入大幅提高了结合能, 系统更为稳定. 这主要是  $\Sigma$  超子间强烈吸引的结果. 在达到最低点时, 物质密度达到  $0.56\text{fm}^{-3}$ . 另外, 一直到  $f_s = 1.8$  在  $E/B - \rho_B$  曲线上有一负的最小值. 这意味着包含了  $\Sigma$  超子的系统能够拥有更大的奇异数含量.

为了看清系统对  $f_s$  的稳定性, 把  $E/B$  对  $\rho_B$  求极值. 在图 3(a) 中画出比结合能极值对  $f_s$  的关系. 图 3(b) 和 (c) 中分别是相应的重子密度和  $\Lambda$  及  $\Sigma$  的百分含量. 作为对比, 图中也给出了核子- $\Lambda$  物质的结果. 先看参数组 T1 的结果. 可看出, 系统的最低能量点从 N- $\Lambda$  系统的  $(E/B, f_s) \approx (-16.9\text{MeV}, 0.1\text{MeV})$  变为 N- $\Lambda$ - $\Sigma$  系统的  $(E/B, f_s) \approx (-26.0\text{MeV}, 1.23)$ , 与 N- $\Lambda$  系统相比, N- $\Lambda$ - $\Sigma$  系统的比结合能增加了  $9\text{MeV}$  左右. 从图 3(b) 可见, 这时物质的密度约为  $0.56\text{fm}^{-3}$ . 从图 3(c) 可看出, 在  $f_s$  较小的时候 ( $Y_\Lambda < 0.5$ ),  $Y_\Lambda$  比  $Y_\Sigma$  大. 这表明, 这时稳定的系统将含有更多的  $\Lambda$  超子. 当  $f_s \geq 0.2$  时,  $Y_\Sigma$  几乎直线增加. 大概在  $f_s = 0.75$  时  $Y_\Sigma$  与  $Y_\Lambda$  相等. 在  $f_s$  较大时,  $\Sigma$  超子含量远远超过  $\Lambda$  超子. 从上面分析可以看出, 有可能存在这样一个系统, 它的奇异数含量可达  $f_s \approx 1.23$ , 密度可高达  $\rho_B \approx 0.56\text{fm}^{-3}$ . 这时  $\Sigma$  含量甚至超过核子的含量. 这个结果与 Schaffner 等<sup>[9]</sup>给出的结果及 MQMC 模型<sup>[6]</sup>给出的结果相一致. 在图 3(c) 中, 可以看到在  $f_s \leq 0.2$  时,  $Y_\Sigma$  的值为零. 这是由于在化学平衡条件下,  $Y_\Sigma$  没有正解. 在这种情况下,  $\Lambda$  和  $\Sigma$  不能共存, 系统只包含核子与  $\Lambda$  超子.

采用参数  $T3$  的结果与  $T1$  的结果在定性上类似,但在定量上有较大的区别.最低点为  $(E/B, f_s, \rho_B) \approx (-21.5 \text{ MeV}, 1.25, 0.45 \text{ fm}^{-3})$ .

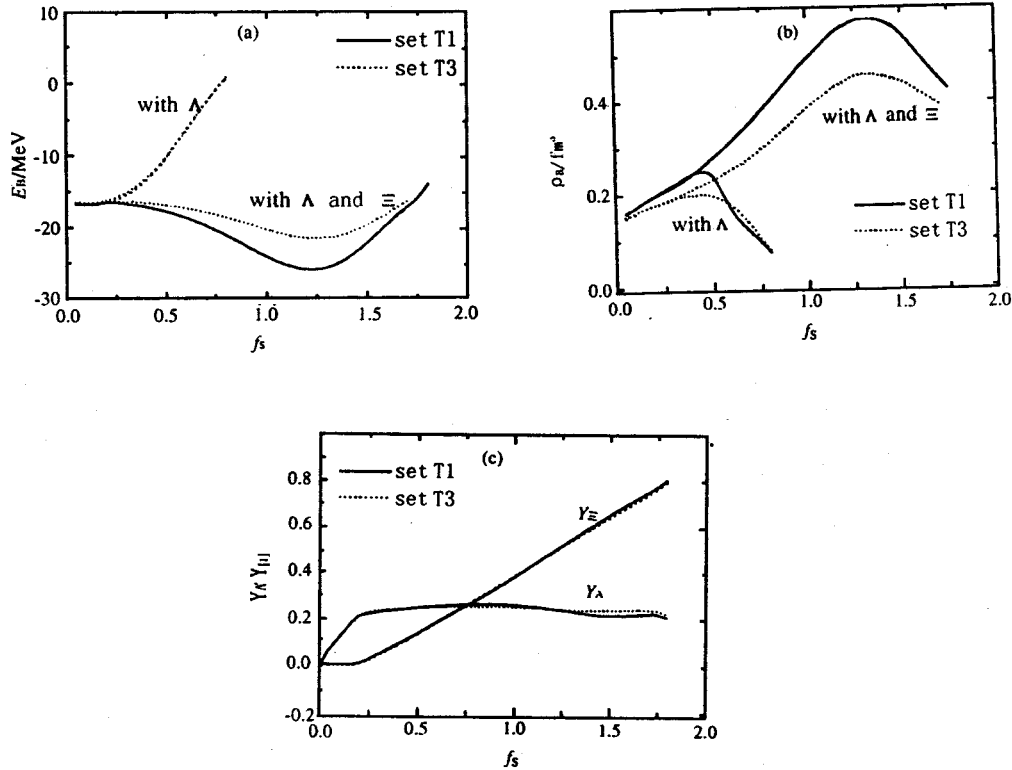


图 3 (a)在核子- $\Lambda$ 及核子- $\Lambda$ - $\Xi$ 混合物中,每个重子最小结合能与奇异百分数  $f_s$  的关系  
 (b)与(a)中最小结合能对应的重子密度与奇异百分数  $f_s$  的关系  
 (c)与(a)中最小结合能对应的  $\Lambda$  超子以及  $\Xi$  超子的百分比

### 参考文献(References)

- 1 Greiner C. J. Phys., 1999, G25:389
- 2 Ikeda K, Bando H, Motoba T. Prog. Theor. Phys. Supplement, 1985,81:147
- 3 Barranco M et al. Phys. Rev., 1991, C44:178
- 4 Schulze H J et al. Phys. Rev., 1998, C57 :704
- 5 ZHANG L L, SONG H Q, SU R K. J. Phys., 1997, G23:557
- 6 WANG P et al. Nucl. Phys., 1999, A653:166
- 7 Furnstahl R J, TANG H B, Serot B D. Phys. Rev., 1995, C52:1368
- 8 ZHANG L L et al. Phys. Rev., 1999, C59:3292
- 9 Schaffner J et al. Ann. Phys., 1994, 235:35
- 10 Dover C B et al. Prog. Part. Nucl. Phys., Wilkinson Ded, 1984, 12 :171—239(Pergamon, Oxford)

## Strange Hadronic Matter in A Chiral Model \*

SONG Hong-Qiu<sup>1</sup> ZHANG Li-Liang<sup>1</sup> SU Ru-Keng<sup>2</sup> WANG Ping<sup>2</sup>

*1(Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)*

*2(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)*

**Abstract** The FST model was extended to contain strangeness and then used in mean-field approximation to study the saturation properties and stabilities of the strange hadronic matter containing nucleons,  $\Lambda$  and  $\Xi$  hyperons.

**Key words** FST model, strange hadronic matter, stability

---

\* Supported by NSFC(10075071) and CAS(KJ951-A1-4410)