

# Pentaquark $\Theta^+$ 对核物质状态方程的影响\*

高远<sup>1,2,3</sup> 李希国<sup>1,2</sup> 李永青<sup>1,3</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

3 (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 假定  $\Theta^+$  通过交换有效的同位旋标量介子  $\sigma$  和  $\omega$  与核子和它本身发生相互作用, 在密度相关的相对论平均场理论基础上研究了  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统状态方程和可能形成的亚稳定态. 讨论了在不同的重子密度下质子-中子同位旋比值以及 Pentaquark  $\Theta^+$  成分对系统单个重子能的影响. 计算结果表明, 在单个重子能取极小时,  $\Theta^+$  有可能在核物质中束缚存在.

**关键词** pentaquark  $\Theta^+$  密度相关 单个重子能

## 1 引言

近年来, 许多研究表明, 一些奇异强子系统可以在自然界相对稳定存在<sup>[1-3]</sup>. 对包含奇异成分的强子物质的性质研究, 成为强子物理领域的一大热点. 尤其是近几年五夸克奇异重子态  $\Theta^+$  存在迹象的实验发现, 更是成为强子物理和粒子物理关注的焦点之一. pentaquark  $\Theta^+$  最早是由 Diakonov 等人利用手征孤立子模型预言存在<sup>[4]</sup>. 1999 年, 高海燕和马伯强从 Fock 空间的夸克极小组成提出  $\Theta^+$  是 4 个夸克与一个反夸克的组合体<sup>[5]</sup>. 2003 年以来, 一系列实验提供了 pentaquark  $\Theta^+$  的确可能存在的实验迹象<sup>[6-11]</sup>. 尽管最近也有相当多的实验数据对这一结果进行了否定<sup>[12]</sup>, 但对于 pentaquark 到底是否真实存在以及其性质如何, 依然是物理学界研究争论的热点<sup>[13]</sup>.

对核物质以及奇异强子物质性质的描述, 相对论平均场理论迄今为止取得了巨大的成功. 其中, 密度相关的平均场 (DDRH) 理论<sup>[14-16]</sup>, 通过拟合 Dirac-Brueckner (DB) G 矩阵计算结果得到了介子-核子的耦合系数随密度变化的表达式<sup>[15]</sup>. 与标准的 Walecka 模型相比 DDRH 理论中耦合系数不再是一个常数, 因此, 这一理论在高压情况下对核物质及强子物质性质能够进行很好地描述.

本文在 DDRH 理论基础上, 假定  $\Theta^+$  和其他核子

通过交换有效的同位旋标量介子  $\sigma$  和  $\omega$  与其他重子发生相互作用<sup>[17]</sup>, 从而将 DDRH 理论运用于包含 pentaquark  $\Theta^+$  的奇异强子物质. 研究了  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统的状态方程, 讨论了不同重子密度分值比对系统单个重子能的影响. 采用文献[3]中求单个重子能极值的方法, 讨论了  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统的稳定性. 其计算结果表明, 适当的增加  $\Theta^+$ ,  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统会变得更加稳定, 也就是说  $\Theta^+$  完全可以在核物质中束缚存在.

## 2 包含 pentaquark $\Theta^+$ 的 DDRH 理论

在 DDRH 理论基础上<sup>[14]</sup>, 包含  $\Theta^+$  与  $\sigma, \omega$  的相互作用, 假设其有效拉氏量为

$$L = L_B + L_M + L_{\text{int}}, \quad (1)$$

$$L_B = \sum_{i=N, \Theta^+} \bar{\psi}_i [\gamma_\mu i \partial^\mu + M_i] \psi_i,$$

$$L_M = \frac{1}{2} \sum_{i=\sigma, \delta} (\partial_\mu \phi_i \partial^\mu \phi_i - m_i^2 \phi_i^2) - \frac{1}{2} \sum_{j=\omega, \rho} (F_{\mu\nu}^{(j)} F^{(j)\mu\nu} - m_j^2 A_\mu^{(j)} A^{(j)\mu}), \quad (2)$$

$$L_{\text{int}} = \sum_{i=N, \Theta^+} (\bar{\psi}_i \Gamma_\sigma^i(\rho) \psi_i \phi_\sigma - \bar{\psi}_i \Gamma_\omega^i(\rho) \gamma_\mu \psi_i A^{(\omega)\mu}) + \bar{\psi}_N \Gamma_\delta^N(\rho) \tau \psi_N \phi_\delta - \bar{\psi}_N \Gamma_\rho^N(\rho) \gamma_\mu \psi_N \tau A^{(\rho)\mu}, \quad (3)$$

2005 - 12 - 15 收稿

\* 中国科学院知识创新工程重点方向性项目 (KJ951-A1-01, KJ951-A1-02) 和国家自然科学基金 (10435080, 10575123) 资助

其中  $\psi_N = (\psi_p, \psi_n)^T$ . 与文献[15]的区别是包含了  $\Theta^+$  与介子的相互作用. 因为假设  $\Theta^+$  的同位旋为 0, 因此  $\Theta^+$  与同位旋介子  $\delta$  和  $\rho$  之间没有相互作用. 另外, 与标准的 QHD 模型<sup>[18–22]</sup> 不同的是, 介子和重子之间的耦合常数  $\Gamma_i^N$  ( $i = \sigma, \omega, \delta, \rho$ ) 不再是常数, 而是重子场函数的泛函,  $\Gamma_i^N$  依赖于核子的矢量密度 (VDD), 从而使耦合常数依旧能满足相对论协变性.

在平均场近似下, 介子场方程可写为

$$(-\nabla^2 + m_\sigma^2)\phi_{\sigma 0} = \Gamma_\sigma^N(\rho)(\langle\bar{\psi}_p\psi_p\rangle + \langle\bar{\psi}_n\psi_n\rangle) + \Gamma_\sigma^{\Theta^+}(\rho)\langle\bar{\psi}_{\Theta^+}\psi_{\Theta^+}\rangle, \quad (4)$$

$$(-\nabla^2 + m_\omega^2)A_0^{(\omega)} = \Gamma_\omega^N(\rho)(\langle\bar{\psi}_p^+\psi_p\rangle + \langle\bar{\psi}_n^+\psi_n\rangle) + \Gamma_\omega^{\Theta^+}\psi_{\Theta^+}^+\psi_{\Theta^+}, \quad (5)$$

$$(-\nabla^2 + m_\delta^2)\phi_{\delta 0} = \Gamma_\delta^N(\rho)(\langle\bar{\psi}_p\psi_p\rangle - \langle\bar{\psi}_n\psi_n\rangle) = \Gamma_\delta^N(\rho)\rho_{S3}, \quad (6)$$

$$(-\nabla^2 + m_\rho^2)A_0^{(\rho)} = \Gamma_\rho^N(\rho)(\langle\bar{\psi}_p^+\psi_p\rangle - \langle\bar{\psi}_n^+\psi_n\rangle) = \Gamma_\rho^N(\rho)\rho_{B3}. \quad (7)$$

重子场方程为

$$\left[ i\gamma_\mu\partial^\mu - \Gamma_\omega^N\gamma^0A_0^{(\omega)} - \Gamma_\rho^N\gamma^0\tau_3A_0^{(\rho)} - (M_N - \Gamma_\sigma^N\phi_{\sigma 0} - \tau_3\Gamma_\delta^N\phi_{\delta 0}) \right] \psi_N = 0, \quad (8)$$

$$\left[ i\gamma_\mu\partial^\mu - \Gamma_\omega^{\Theta^+}\gamma^0A_0^{(\omega)} - (M_{\Theta^+} - \Gamma_\sigma^{\Theta^+}\phi_{\sigma 0}) \right] \psi_{\Theta^+} = 0. \quad (9)$$

在这里,  $\Gamma(\rho)$  中算符  $\rho$  已经用平均值  $\langle\rho\rangle$  代替. 重子的有效质量为

$$M_p^* = M_N - \Gamma_\sigma^N\phi_{\sigma 0} - \Gamma_\delta^N\phi_{\delta 0}, \quad (10)$$

$$M_n^* = M_N - \Gamma_\sigma^N\phi_{\sigma 0} + \Gamma_\delta^N\phi_{\delta 0}, \quad (11)$$

$$M_{\Theta^+}^* = M_{\Theta^+} - \Gamma_\sigma^{\Theta^+}\phi_{\sigma 0}. \quad (12)$$

能量-动量张量为

$$T^{\mu\nu} = \sum_i \frac{\partial L}{\partial(\partial^\mu\Phi_i)}\partial_\nu\Phi_i - g^{\mu\nu}L = \sum_i \bar{\Psi}_i\gamma_\mu\partial_\nu\Psi_i - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}(m_\omega^2A_0^{(\omega)2} + m_\rho^2A_0^{(\rho)2} - m_\sigma^2\phi_{\sigma 0}^2 - m_\delta^2\phi_{\delta 0}^2). \quad (13)$$

能量密度为

$$\begin{aligned} \varepsilon = \langle T^{00} \rangle = & \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{K_{F_n}} d^3k (k^2 + M_n^{*2})^{\frac{1}{2}} + \\ & \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{K_{F_p}} d^3k (k^2 + M_p^{*2})^{\frac{1}{2}} + \\ & \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{K_{F_{\Theta^+}}} d^3k (k^2 + M_{\Theta^+}^{*2})^{\frac{1}{2}} + \\ & \frac{1}{2} [m_\sigma^2\phi_{\sigma 0}^2 + m_\delta^2\phi_{\delta 0}^2 + m_\omega^2A_0^{(\omega)2} + m_\rho^2A_0^{(\rho)2}]. \end{aligned} \quad (14)$$

所以, 单个重子的能量为

$$\frac{E}{B} = \frac{\varepsilon}{\rho_B} - \sum_{i=n,p,\Theta^+} Y_i M_i, \quad (15)$$

其中  $Y_i$  为各重子的密度分值比, 定义为

$$Y_i = \frac{\rho_{Bi}}{\rho_{Bp} + \rho_{Bn} + \rho_{B\Theta^+}}, \quad i = n, p, \Theta^+, \quad (16)$$

$$\rho_B = \rho_{Bp} + \rho_{Bn} + \rho_{B\Theta^+} =$$

$$\frac{1}{3\pi^2} k_{F_p}^3 + \frac{1}{3\pi^2} k_{F_n}^3 + \frac{1}{3\pi^2} k_{F_{\Theta^+}}^3. \quad (17)$$

这里, 重子和介子之间的耦合强度不再是一个常数, 而是随着密度的变化而变化, Hofmann 等人拟合得到的核物质中核子-介子耦合系数为<sup>[15]</sup>

$$\Gamma_i^N = a_i \left[ \frac{1 + b_i(\rho/\rho_0 + d_i)}{1 + c_i(\rho/\rho_0 + e_i)} \right], \quad i = \sigma, \omega, \delta, \rho, \quad (18)$$

其中 (13) 式中参数的取值列于表 1 中.

表 1 公式 (18) 中的参数值 ( $\rho_0 = 0.16\text{MeV}$ )<sup>[15]</sup>

meson	$m_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$
$\sigma$	550	13.1334	0.4258	0.6578	0.7914	0.7914
$\omega$	783	15.1640	0.3474	0.5152	0.5989	0.5989
$\delta$	983	19.1023	1.3653	2.3054	0.0693	0.5388
$\rho$	770	12.8373	2.4822	5.8651	0.3671	0.3598

利用夸克-介子耦合模型<sup>[23]</sup>, 并且只考虑  $u$  和  $d$  夸克与介子的相互作用, 可以近似的得出  $\Theta^+$  与介子的耦合系数为<sup>[24]</sup>

$$\Gamma_i^{\Theta^+} = \frac{4}{3}\Gamma_i^N \quad i = \sigma, \omega, \quad (19)$$

因为假定  $\Theta^+$  同位旋为 0, 因此这里没有考虑与  $\delta$  和  $\rho$  的相互作用.

### 3 结果和讨论

为了讨论  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统的稳定性, 研究了系统在不同情况下的状态方程, 如图 1 所示. 图 1(a) 是质子-中子同位旋对称情况下, 单个重子能量在不同的

$\Theta^+$  分值比下随着密度的变化曲线. 从图中可以看到, 单个重子能随密度的变化曲线对  $\Theta^+$  的含量非常敏感. 当系统包含 23% 的  $\Theta^+$ , 单个重子能的绝对值在  $1.4\rho_0$  左右出现一个峰值, 此时达到了  $-24\text{MeV}$  左右. 但当  $\Theta^+$  的含量超过 56% 以后, 单个重子能不再出现负值, 也就是说, 系统将不再存在稳定态或亚稳定态.

图 1(b) 是纯中子物质中加入  $\Theta^+$  的单个重子能变化曲线. 加入少量的  $\Theta^+$ , 由 n 和  $\Theta^+$  组成的系统也能形成一个稳定的束缚态, 但  $\Theta^+$  的重子密度始终不能大于 50%.

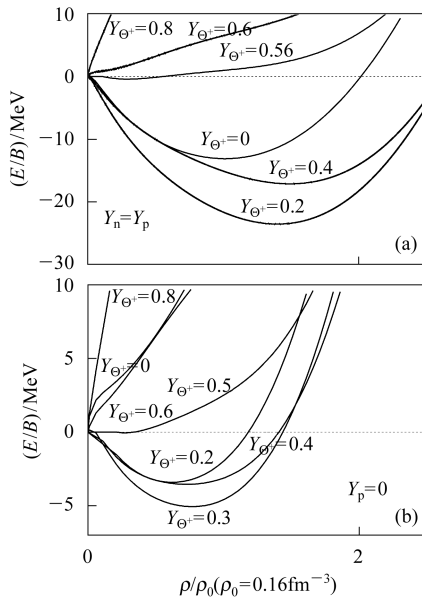


图 1 系统在不同情况下的状态方程

(a), (b) 分别是  $\Theta^+$  在质子-中子对称核物质和非对称核物质中两种情况.

将每个重子能对  $Y_{\Theta^+}$  和  $Y_p$  进行变分, 得到了各重子密度分值比以及对应的单个重子能极小值, 分别在图 2(a) 和 (b) 所示. 可以看到, 为了能在核物质中形成束缚态,  $\Theta^+$  的密度分值比随着密度的增大而逐渐增大. 在  $2.5\rho_0$  处达到 28% 左右. 而在计算的区域内, 质子、中子的密度分值比几乎始终相等. 只是在密度极低的区域, 有一些细微的差别. 这与我们对普通核物质的性质认识是完全一致的. 在普通核物质中, 同位旋对称时的稳定性远远大非对称的情况.

图 2(b) 中曲线显示的是对应的单个重子能. 其绝对值的峰值出现在  $1.4\rho_0$  处. 此时对应的  $\Theta^+$  的密度分值比在 23%. 在低密情况下 ( $\rho \leq 1.4\rho_0$ ), 单个重子能的绝对值随着密度的增大而增大, 之后则刚好相反. 在我们计算的密度区域内,  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统的单个重子能始终是负值. 这表明, 适当的调节各重子密度分值比,  $\Theta^+$  完全可能在核物质中和质子、中子形成一个束缚态. 当重子密度在  $1.4\rho_0$ ,  $Y_{\Theta^+} = 0.23$  时,  $\{p, n, \Theta^+\}$  系统是最稳定的. 当然, 我们的计算并没有考虑电磁相互作用. 考虑到  $\Theta^+$  和质子都是带正电, 具有排斥的库仑势, 因此实际对应的单个重子能绝对值的峰值出现密度应该小于  $1.4\rho_0$ .

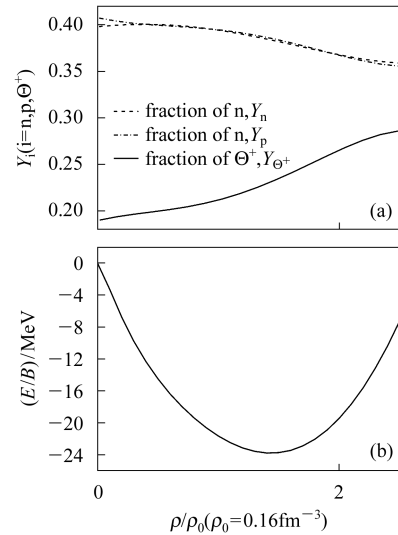


图 2 (a) 各重子密度分值比; (b) 对应的结合能

如果考虑反应  $n + p \rightarrow \Lambda + \Theta^+$ , 这一反应中电荷数、重子数、奇异数均守恒, 如果反应前后的化学势相等, 系统有可能在强作用下形成平衡态. 经过计算,  $\Theta^+$  开始出现的密度为  $7.36\rho_0$  左右, 但此时重子的单个重子能为正, 这种情况只有在中子星内部有可能出现.

在本文中, 因为重子中奇异成分的相对密度较低, 因此并没有考虑超子-超子之间奇异夸克的相互作用. 但在中子星内部, 奇异成分有可能占了大部分, 因此需要考虑奇异夸克间的相互作用. 我们已经讨论了这个问题, 其结果将在下一篇文章中进行叙述.

## 参考文献 (References)

- Schaffner J, Dover C B, Gal A et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**: 1328
- Schaffner J, Dover C B, Gal A et al. Ann. Phys., 1994, **235**: 35
- GUO Hua, YANG Shu, HU Xiang et al. Chin. Phys., 2001, **10**: 805
- Diakonov D, Petrov V, Polyakov M V. Z. Phys., 1997, **A359**(3): 305
- GAO Hai-Yan, MA Bo-Qiang. Mod. Phys. Lett., 1999, **A14**: 2313
- Nakano T et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 012002
- Barmin V V, Borisov V S, Davidenko G V et al. Phys. Atom. Nucl., 2003, **66**: 1715

- 8 Stepanyan S et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 252001
- 9 Airapetian A et al. Phys. Lett., 2004, **B585**: 213
- 10 Asratyan A E, Dolgolenko A G, Kubantsev M A. Phys. Atom. Nucl., 2004, **67**: 682
- 11 ZHU Shi-Lin. Int. J. Mod. Phys., 2004, **A19**: 3439
- 12 Michael Danilov. hep-ex/0509012
- 13 ZOU Bing-Song, Riska D O. Phys. Rev. Lett., 2005, **95**: 072001
- 14 Brockmann R, Toki H. Phys. Rev. Lett., 1992, **68**: 3408
- 15 Hofmann F, Keil C M, Lenske H. Phys. Rev., 2001, **C64**: 034314
- 16 LI Xi-Guo, GAO Yuan, LIU Zi-Yu. HEP & NP, 2004, **28**(11): 1150(in Chinese)  
(李希国, 高远, 刘紫玉. 高能物理与核物理, 2004, **28**(11): 1150)
- 17 GAO Yuan, LI Xi-Guo, LI Yong-Qing. HEP & NP, 2005, **29**(11): 1067(in Chinese)  
(高远, 李希国, 李永青. 高能物理与核物理, 2005, **29**(11): 1067)
- 18 Walecka J D. Ann. Phys., (N.Y.) 1974, **83**: 491
- 19 Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys., 1986, **16**: 1
- 20 Serot B D, Walecka J D. Int. J. Mod. Phys., 1997, **E6**: 515
- 21 GAO Yuan, LI Xi-Guo, JIA Duo-Jie. HEP & NP, 2003, **27**(11): 995(in Chinese)  
(高远, 李希国, 贾多杰. 高能物理与核物理, 2003, **27**(11): 995)
- 22 LI Xi-Guo, GAO Yuan. HEP & NP, 2004, **28**(9): 973(in Chinese)  
(李希国, 高远. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 973)
- 23 Pierre A M, Guichon, Koichi Saito et al. Nucl. Phys., 1996, **A601**: 349
- 24 ZHONG X H, TAN Y H, LI L et al. nucl-th/0408046

## Effect of Pentaquark $\Theta^+$ on the Equation of State of Nuclear Matter\*

GAO Yuan<sup>1,2,3</sup> LI Xi-Guo<sup>1,2</sup> LI Yong-Qing<sup>1,3</sup>

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

3 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Assuming  $\Theta^+$  interacts with nucleon or  $\Theta^+$  by exchanging isoscalar mesons  $\sigma$  and  $\omega$ , the equation of state of  $\{p, n, \Theta^+\}$  and possible metastable state are studied in the framework of the density dependent relativistic hadron field theory(DDRH). The ratio of the proton isospin to the neutron isospin with different baryon densities and the effect of the  $\Theta^+$  component on the binding energy per baryon of the system are also discussed. It is shown that when the binding energy per baryon of the system takes the maximal value,  $\Theta^+$  might be bound in the nuclear matter.

**Key words** pentaquark  $\Theta^+$ , density dependent, the energy per baryon

Received 15 December 2005

\* Supported by Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJ CX2-SW-N016, KJ CX2-SW-N02) and National Natural Science Foundation of China (10435080, 10575123)