

# Pentaquark $\Theta^+$ 的介质效应\*

高远<sup>1,2,3</sup> 李希国<sup>1,2;1)</sup> 李永青<sup>1,3</sup> 刘建业<sup>1,2</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** 在密度相关的相对论平均场理论基础上, 假定  $\Theta^+$  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, 研究了强子在包含  $\Theta^+$  的奇异核物质中的性质改变. 讨论并计算了介质中的  $\Theta^+$  和核子有效质量及其对重子密度的依赖关系, 分析了  $\Theta^+$  在核物质中包含的成分大小以及核子的同位旋效应对奇异核物质性质的影响, 进一步计算了不同重子组成比例下奇异核物质的标量密度  $\rho_S$  和矢量密度  $\rho_B$  的对应曲线.

**关键词** pentaquark  $\Theta^+$  有效质量 密度相关

## 1 引言

对于强子结构和强子谱的认识, 一直是强子物理研究的重要目标. 早在 1997 年, Diakonov 等人<sup>[1]</sup>利用手征孤立子模型预言了五夸克(pentaquark) 奇特重子态  $\Theta^+$  的存在, 其组成为 uudds, 奇异数 +1, 自旋 1/2, 宇称 +, 重子数为 1, 同位旋为 0. 1999 年, 高海燕和马伯强<sup>[2]</sup>从 Fock 空间的夸克极小组成提出 pentaquark 是 4 个夸克与一个反夸克的组合体. 2003 年以来, 一系列的实验表明, pentaquark  $\Theta^+$  可能存在<sup>[3-8]</sup>, 之后其结构和性质的研究, 成为这两年来强子物理领域的热点之一.

对核物质以及奇异核物质性质的描述, 相对论平均场理论迄今为止取得了巨大的成功<sup>[9]</sup>. 然而, 目前绝大多数模型的参数都是在饱和密度下确定的, 它们在低密情况下能够很好地描述核物质性质, 但随着密度的增加, 夸克部分的自由度增加, 耦合系数应该随之发生改变. 因此, 当密度增大时, 需要对耦合系数的变化进行考虑. 耦合系数随密度相关的平均场理论在很多文献中都进行了讨论<sup>[10-16]</sup>. Hofmann 等人利用密度相关的相对论平均场(DDRH)理论, 通过拟合 Dirac-Brueeknen(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>. 在文献 [15] 中密度相关的平均场理论中, 因为引入  $\delta$  介子, 使核子的同位旋非对称物质中质子和中子的有效质量出现差别.

本文中在密度相关的平均场理论基础上, 假定  $\Theta^+$  通过交换有效的同位旋标量介子  $\sigma$  和  $\omega$  与其重子发生相互作用, 研究了强子在介质中的性质改变; 讨论计算了  $\Theta^+$  和核子有效质量随密度变化的依赖关系, 并分析了  $\Theta^+$  在核物质中包含的成分大小以及核子的同位旋效应对有效质量的影响大小; 进一步计算了不同重子成分下核物质的标量密度  $\rho_S$  和矢量密度  $\rho_B$  的关系.

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

在 DDRH 理论基础上<sup>[15]</sup>, 包含  $\Theta^+$  与  $\sigma$ ,  $\omega$  的相互作用, 我们假设其有效拉氏量为

$$L = L_B + L_M + L_{\text{int}},$$

$$L_B = \sum_{i=N, \Theta^+} \bar{\psi}_i [\gamma_\mu i \partial^\mu + M_i] \psi_i, \quad (1)$$

$$L_M = \frac{1}{2} \sum_{i=\sigma, \delta} (\partial_\mu \phi_i \partial^\mu \phi_i - m_i^2 \phi_i^2), \quad (2)$$

2005 - 02 - 03 收稿

\* 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJCX2-SW-N02)和国家自然科学基金(10435080)资助

1) E-mail: xgl@impcas.ac.cn

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

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  $\delta$  和  $\rho$  介子之间没有相互作用. 另外, 与标准的 QHD 模型<sup>[17-21]</sup>不同的是, 介子和核子之间的耦合常数  $\Gamma_i^N$  ( $i = \sigma, \omega, \delta, \rho$ ) 不再是常数, 而是重子场函数的泛函,  $\Gamma_i^N$  依赖于核子的标量密度 (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

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

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

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

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

重子场方程为

$$[i\gamma_\mu \partial^\mu - \Gamma_\omega^N \gamma^0 A_0^{(\omega)} - \Gamma_\rho^N \gamma^0 \boldsymbol{\tau}_3 A_0^{(\rho)} - (M_N - \Gamma_\sigma^N \phi_{\sigma 0} - \tau_3 \Gamma_\delta^N \phi_{\delta 0})] \psi_N = 0, \quad (8)$$

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

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

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

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

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

Hofmann 等人拟合得到的核物质中核子-介子耦合系数为<sup>[15]</sup>

$$\Gamma_i^N = a_i \left[ \frac{1 + b_i \left( \frac{\rho}{\rho_0} + d_i \right)}{1 + c_i \left( \frac{\rho}{\rho_0} + e_i \right)} \right], \quad i = \sigma, \omega, \delta, \rho, \quad (13)$$

其中, (13) 式中参数的取值列于表 1 中.

表 1 公式(13)中的参数值 ( $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3}$ )<sup>[15]</sup>

meson	$m_i/\text{MeV}$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$
$\sigma$	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>[22]</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>[23]</sup>

$$\Gamma_i^{\Theta} = \frac{4}{3} \Gamma_i^N \quad i = \sigma, \omega, \quad (14)$$

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

因为同位旋标量介子  $\delta$  的引入, 使核子的有效质量分裂. 重子的有效质量不仅随密度变化, 而且受各种重子的组成比例影响. 这种影响可由下列公式表示:

$$Y_i = \frac{\rho_{B_i}}{\rho_{B_p} + \rho_{B_n} + \rho_{B_{\Theta^+}}}, \quad i = n, p, \Theta^+ \quad (15)$$

$$\rho_B = \rho_{B_p} + \rho_{B_n} + \rho_{B_{\Theta^+}} = \frac{1}{3\pi^2} k_{F_p}^3 + \frac{1}{3\pi^2} k_{F_n}^3 + \frac{1}{3\pi^2} k_{F_{\Theta^+}}^3, \quad (16)$$

$$\rho_S = \rho_{S_p} + \rho_{S_n} + \rho_{S_{\Theta^+}} =$$

$$\frac{1}{2\pi^2} M_p^* \left[ k_{F_p} E_{F_p}^* - M_p^{*2} \ln \frac{k_{F_p} + E_{F_p}^*}{M_p^*} \right] + \frac{1}{2\pi^2} M_{\Theta^+}^* \left[ k_{F_{\Theta^+}} E_{F_{\Theta^+}}^* - M_{\Theta^+}^{*2} \ln \frac{k_{F_{\Theta^+}} + E_{F_{\Theta^+}}^*}{M_{\Theta^+}^*} \right] + \frac{1}{2\pi^2} M_n^* \left[ k_{F_n} E_{F_n}^* - M_n^{*2} \ln \frac{k_{F_n} + E_{F_n}^*}{M_n^*} \right]. \quad (17)$$

### 3 结果和讨论

图 1 是核子-介子耦合系数随密度的依赖关系. 从图中可以看到, 介子和核子之间的耦合常数不再是常数, 而是随着密度的变化而变化. 除  $\Gamma_\delta^N(\rho)$  外, 其他 3 个耦合常数的大小都随着密度的增大而减小, 但  $\Gamma_\delta^N(\rho)$  在密度小于  $0.87\rho_0$  时, 随着  $\rho$  的增大而减小, 但之后随着密度的增大反而又增大.

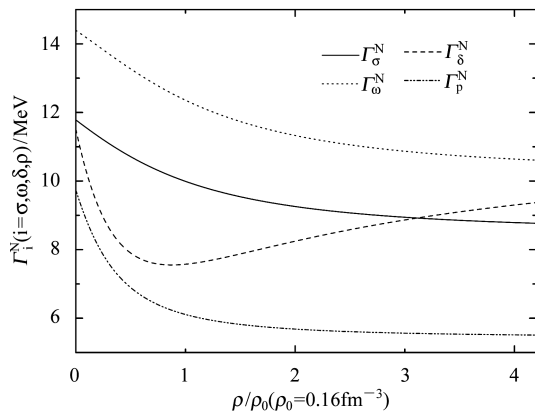


图 1 介子、核子耦合常数随标量密度的变化关系

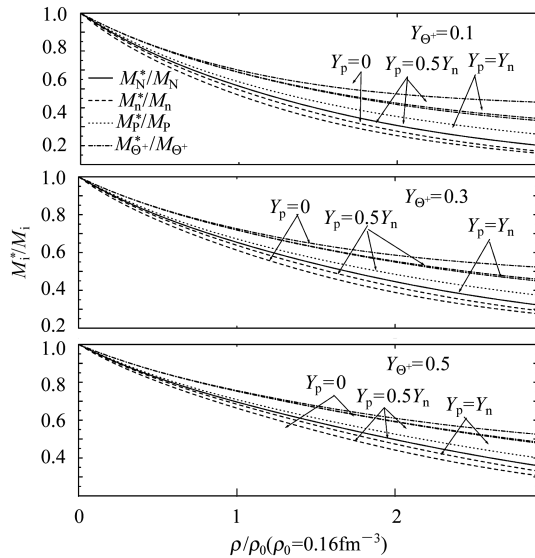


图 2 在不同的质子-中子比 ( $Y_p/Y_n = 0, 0.5, 1$ ) 下, 质子、中子、 $\Theta^+$  的有效质量随不同  $\Theta^+$  含量  $Y_{\Theta^+}$  的核密度变化而变化的曲线

利用(10)–(17)式, 数值计算了中子、质子以及  $\Theta^+$  在重子密度不同比值的情况下的有效质量. 其结果如图2中曲线所示. 可以看到, 无论核子还是  $\Theta^+$ , 其

有效质量都随着重子的密度增加而减小. 而增加  $\Theta^+$  在总的重子中的含量, 重子的有效质量变化不明显. 同时因为  $\delta$  介子的引入, 核子的同位旋效应对其有效质量的影响明显. 无论对质子还是  $\Theta^+$ , 增大中子-质子的比值, 其有效质量变大, 但对于中子, 情况则恰好相反. 在同位旋非对称物质中, 质子和中子的有效质量出现差别, 在丰中子物质中, 中子有效质量小于质子有效质量.

另外, 我们计算了不同的重子组成比例下的  $\rho_s - \rho_B$  关系曲线, 如图3中曲线所示.  $\Theta^+$  的含量对奇异物质的标量密度影响很大. 在同样的矢量密度下, 增加  $\Theta^+$  的密度, 使重子的标量密度降低. 这是因为  $\Theta^+$  与介子的耦合强度比核子与介子的耦合更大的缘故. 同样因为  $\delta$  介子的引入, 核子同位旋效应对重子的标量密度影响不可忽略. 对应相同的  $\rho_B$ , 质子-中子同位旋对称物质中的  $\rho_s$  大于丰中子时的情况.

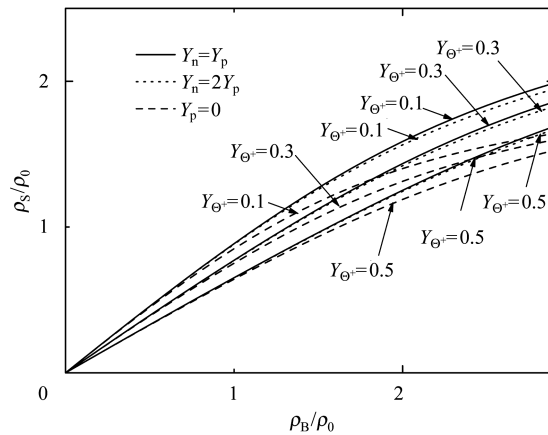


图 3 不同的重子组成比例下的  $\rho_s - \rho_B$  关系

关于 pentaquark  $\Theta^+$  对核状态方程的影响, 将在另外一篇文章中进行讨论.

参考文献(References)

- 1 Diakonov D, Petrov V, Polyakov M V. Z. Phys., 1997, **A359**(3): 305
- 2 GAO Hai-Yan, MA Bo-Qiang. Mod. Phys. Lett., 1999, **A14**: 2313
- 3 Nakano T et al. Rev. Lett., 2003, **91**: 012002
- 4 Barmin V V, Borisov V S, Davidenko G V et al. Phys. Atom. Nucl., 2003, **66**: 1715
- 5 Stepanyan S et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 252001
- 6 Airapetian A et al. Phys. Lett., 2004, **B585**: 213
- 7 Asratyan A E, Dolgolenko A G, Kubantsev M A. Phys. Atom. Nucl., 2004, **67**: 682
- 8 ZHU Shi-Lin. Int. J. Mod. Phys., 2004, **A19**: 3439
- 9 Dobaczewski J et al. Phys. Rev., 1996, **C53**: 2809
- 10 Brockmann R, Toki H. Phys. Rev. Lett., 1992, **68**: 3408
- 11 Lenske H, Fuchs C. Phys. Lett., 1995, **B345**: 355
- 12 Fuchs C, Lenske H, Wolter H H. Phys. Rev., 1995, **C52**: 3043
- 13 Ineichen F, Weigel M K, Von-Eiff D. Phys. Rev., 1996, **C53**: 2158
- 14 Cescato M L, Ring P. Phys. Rev., 1998, **C57**: 134
- 15 Hofmann F, Keil C M, Lenske H. Phys. Rev., 2001, **C64**: 034314
- 16 LI Xi-Guo, GAO Yuan, LIU Zi-Yu. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 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 Walecka J D. Ann. Phys.(N.Y.), 1974, **83**: 491  
 18 Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys., 1986, **16**: 1  
 19 Serot B D, Walecka J D. Int. J. Mod. Phys., 1997, **E6**: 515  
 20 GAO Yuan, LI Xi-Guo, JIA Duo-Jie. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 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)  
 21 LI Xi-Guo, GAO Yuan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**(9): 973(in Chinese)  
 (李希国, 高远. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 973)  
 22 Pierre A M, Guichon, Koichi Saito et al. Nucl. Phys., 1996, **A601**: 349  
 23 ZHONG X H, TAN Y H, LI L et al. arxiv: nucl-th/0408046

## In-Medium Effect of Pentaquark $\Theta^+$ in the Density Dependent Relativistic Hadron Field Theory<sup>\*</sup>

GAO Yuan<sup>1,2,3</sup> LI Xi-Guo<sup>1,2;1)</sup> LI Yong-Qing<sup>1,3</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup>

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

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

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

**Abstract** The density dependent relativistic hadron field theory is extended to inclusions of pentaquark  $\Theta^+$ . We have investigated the mass modifications of nucleons and pentaquark  $\Theta^+$  in the framework of relativistic mean field theory. We find that the effective mass, of either the nucleon or the pentaquark  $\Theta^+$  decreases as baryon density increases. We have studied the effects of the fractions of  $\Theta^+$  and neutron on the baryon masses. We also discussed the relations between scale density  $\rho_s$  and vector density  $\rho_B$  at different baryon fractions.

**Key words** pentaquark  $\Theta^+$ , effective mass, density dependent

---

Received 3 February 2005

<sup>\*</sup>Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJCX2-SW-N02) and National Natural Science Foundation of China(10435080)

1) E-mail: xgl@impcas.ac.cn