

核介质中五夸克奇特重子态 Θ^+ 的有效质量^{*}

郭艳蕊^{1,2} 李希国^{1,3;1)} 高远^{1,2} 刘建业^{1,3}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 利用非线性 σ - ω - ρ 模型,在相对论平均场近似下,通过能量密度函数,给出了五夸克奇特重子态 Θ^+ 有效质量随核密度的增加逐渐下降的依赖关系,并进行了数值计算.分析了不同参数对核物质中 Θ^+ 有效质量的影响,并考虑了耦合系数中 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的 3 个不同值,计算了不同耦合系数对 Θ^+ 有效质量的影响.

关键词 五夸克奇特重子态 Θ^+ 有效质量 非线性 σ - ω - ρ 模型 耦合系数

1 引言

自从量子色动力学(QCD)建立以来,人们在夸克层次上建立强子结构和强子谱的研究工作一直在持续进行着,并从理论上预言了四夸克态、五夸克态、双重子态以及混杂态和胶子球等新的强子物态.1997年,Diakonov等人^[1]利用手征孤立子模型预言了五夸克(pentaquark)奇特重子态 Θ^+ ,它的夸克组分是 $uudds$.他们假定手征孤立子第三转动态是反十重态, $\Theta^+(1540)$ 是其最轻的成员,并认为已知态 $N(1710)$ 是反十重态的一个成员,利用这个态推出 Θ^+ 的质量是 1530MeV ,宽度小于 15MeV ,其奇异数 $+1$,自旋 $1/2$,宇称 $+$,重子数为 1 .1999年,高海燕和马伯强^[2]从 Fock 空间的夸克极小组成明确地提出了 pentaquark 是 4 个夸克与一个反夸克的组合体.五夸克奇特重子态 Θ^+ 是强作用低能行为的结果,低能是 QCD 非微扰区,只能用有效手征理论描述低能强子.原始的夸克模型不能解释 pentaquark 奇特重子态小的宽度,而手征孤立子模型能够解释,五夸克奇特重子态是手征孤立子的激发谱,因此,pen-

taquark 奇特重子态的研究对探索 QCD 有效手征理论以及新的重子激发谱具有重要的意义.

2003年,先后有 12 个实验室^[3-8]报告了奇特重子态 Θ^+ 存在的实验信号,这引起了许多物理学家的兴趣,目前,五夸克态研究已经成为强子物理研究中的一个热点.许多理论和实验讨论了 pentaquark 的一些性质^[9-11]和产生机制^[12],但它的自旋和宇称还没有确定.手征孤立子模型给出了 Θ^+ 的宇称为正^[9],而格点 QCD 和 QCD 求和规则给出了 Θ^+ 的宇称为负^[10,11].Nam 等人^[12]利用 $NN \rightarrow \Theta Y$ 反应从理论上给出 Θ^+ 的宇称为正的反应截面是宇称为负时的 10 倍左右.

Kim 等人^[13]通过核子和 K 介子的传播子,利用自能计算了 Θ^+ 有效质量随 k_F 的变化曲线;庄鹏飞等人^[14]利用自能并将温度考虑进去也计算了 Θ^+ 有效质量随温度和化学势的变化情况;M. J. Vicente Vacas 等人^[15]利用自能计算了 Θ^+ 的有效质量.

本文中,从非线性 σ - ω - ρ 模型的 Lagrangian 出发,考虑 Θ^+ 与介子相互作用,通过能量密度函数,使用平均场方法,给出了不同模型参数下 pentaquark Θ^+ 有效

2004-12-10 收稿

^{*} 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ92-SW-N02),国家自然科学基金(10435080)资助

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

质量随核密度下降的变化曲线,并与线性 σ - ω 模型的情况进行了比较.同时,选择耦合系数中 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的不同比例,讨论了耦合系数对 pentaquark Θ^+ 有效质量的影响.

2 pentaquark Θ^+ 的有效质量

包含核子和 Θ^+ 的非线性 σ - ω - ρ 模型下有效拉氏密度为^[16-18]:

$$L = L_N + L_{\Theta^+}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L_N = & \bar{\psi}_N (i\gamma^\mu \partial_\mu - M_N) \psi_N - g_\sigma^N \bar{\psi}_N \sigma \psi_N - \\ & g_\omega^N \bar{\psi}_N \gamma^\mu \omega_\mu \psi_N - g_\rho^N \bar{\psi}_N \gamma^\mu \rho_\mu^a \tau^a \psi_N + \\ & \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \\ & \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - \frac{1}{4} \Omega^{\mu\nu} \Omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu - \\ & \frac{1}{4} R^{a\mu\nu} R_{\mu\nu}^a + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho^{a\mu} \rho_\mu^a, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} L_{\Theta^+} = & \bar{\psi}_{\Theta^+} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M_{\Theta^+}) \psi_{\Theta^+} - g_\sigma^{\Theta^+} \bar{\psi}_{\Theta^+} \sigma \psi_{\Theta^+} - \\ & g_\omega^{\Theta^+} \bar{\psi}_{\Theta^+} \gamma^\mu \omega_\mu \psi_{\Theta^+} - g_\rho^{\Theta^+} \bar{\psi}_{\Theta^+} \gamma^\mu \rho_\mu^a \tau^a \psi_{\Theta^+}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$\Omega^{\mu\nu} = \partial^\mu \omega^\nu - \partial^\nu \omega^\mu,$$

$$R^{a\mu\nu} = \partial^\mu \rho^{a\nu} - \partial^\nu \rho^{a\mu},$$

介子场分别为 $\sigma, \omega_\mu, \rho_\mu$, 质量分别为 $m_\sigma, m_\omega, m_\rho$; 重子场为 ψ_N, ψ_{Θ^+} , 质量分别为 M_N, M_{Θ^+} ; $g_\sigma^N (g_\sigma^\Theta)$, $g_\omega^N (g_\omega^\Theta)$, $g_\rho^N (g_\rho^\Theta)$ 分别为 $\sigma - N(\sigma - \Theta), \omega - N(\omega - \Theta), \rho - N(\rho - \Theta)$ 的耦合常数; g_2, g_3 为非线性参数. τ^3 是 τ^a 的第三分量, 对于 Θ^+ , 由于 $I = 0, \tau^a = 0$, 不与 ρ 介子耦合.

在相对论平均场近似下, $\bar{\psi}\psi, \bar{\psi}\gamma^0\psi$ 分别用其期望值 $\rho_S = \langle \bar{\psi}\psi \rangle, \rho_B$ 表示所有重子的标量密度. $\rho_B = \langle \bar{\psi}\gamma^0\psi \rangle$ 代替. 对于静态无限大核物质, 拉氏量形式简化为^[18]

$$L_{\text{MFI}} = \bar{L}_N + \bar{L}_{\Theta^+},$$

$$\begin{aligned} \bar{L}_N = & \bar{\psi}_N (i\gamma^\mu \partial_\mu - M_N) \psi_N - g_\sigma^N \bar{\psi}_N \phi_{\sigma 0} \psi_N - \\ & g_\omega^N \bar{\psi}_N \gamma^0 \omega_0 \psi_N - g_\rho^N \bar{\psi}_N \gamma^0 \tau^3 b_0 \psi_N - \\ & \frac{1}{2} m_\sigma^2 \phi_{\sigma 0}^2 - \frac{1}{3} g_2 \phi_{\sigma 0}^3 - \frac{1}{4} g_3 \phi_{\sigma 0}^4 + \\ & \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 b_0^2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{L}_{\Theta^+} = \bar{\psi}_{\Theta^+} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M_{\Theta^+}) \psi_{\Theta^+} - g_\sigma^{\Theta^+} \bar{\psi}_{\Theta^+} \phi_{\sigma 0} \psi_{\Theta^+} -$$

$$g_\rho^{\Theta^+} \bar{\psi}_{\Theta^+} \gamma^0 \omega_0 \psi_{\Theta^+} - g_\rho^{\Theta^+} \bar{\psi}_{\Theta^+} \gamma^0 \tau^3 b_0 \psi_{\Theta^+}, \quad (5)$$

由(4)和(5)式得到各介子场方程为

$$\begin{aligned} m_\sigma^2 \phi_{\sigma 0} + g_2 \phi_{\sigma 0}^2 + g_3 \phi_{\sigma 0}^3 = \\ g_\sigma^N (\langle \bar{\psi}_p \psi_p \rangle + \langle \bar{\psi}_n \psi_n \rangle) + g_\sigma^{\Theta^+} \langle \bar{\psi}_{\Theta^+} \psi_{\Theta^+} \rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

$$m_\omega^2 \omega = g_\omega^N (\langle \psi_p^+ \psi_p \rangle + \langle \psi_n^+ \psi_n \rangle) + g_\omega^{\Theta^+} \psi_{\Theta^+} \psi_{\Theta^+}, \quad (7)$$

$$m_\rho^2 b_0 = g_\rho^N (\langle \psi_p^+ \psi_p \rangle - \langle \psi_n^+ \psi_n \rangle) = g_\rho^N \rho_{\text{B3}}, \quad (8)$$

$$\rho_{\text{B3}} = \langle \bar{\psi} \tau_3 \psi \rangle = \rho_p - \rho_n,$$

重子场方程分别为:

$$\begin{aligned} [i\gamma_\mu \partial^\mu - g_\omega^N \gamma^0 \omega_0 - g_\rho^N \gamma^0 \tau_3 b_0 - \\ (M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0})] \psi_N = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$[i\gamma_\mu \partial^\mu - g_\omega^{\Theta^+} \gamma^0 \omega_0 - (M_{\Theta^+} - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0})] \psi_{\Theta^+} = 0, \quad (10)$$

其中重子的有效质量可以由下式给出:

$$M_\Theta^* = M_\Theta - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0}, \quad (11)$$

$$M_N^* = M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0}. \quad (12)$$

ρ_S 和 ρ_B 的关系由下面两个公式给出^[18,19]:

$$\rho_B = \frac{\gamma}{6\pi^2} k_F^3,$$

$$\rho_S = \frac{8}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} d^3 k \frac{M^*}{\sqrt{k^2 + M^{*2}}},$$

对于核物质, γ 取为 4, 对于中子物质, γ 取为 2.

通过能量密度我们已经算过 k 介子有效质量在核介质中的变化情况^[20-23], 下面我们用同样的方法计算核介质中五夸克奇特重子态 Θ^+ 的有效质量.

利用约束条件 $\frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_{\sigma 0}} = 0$ 得到

$$m_\sigma^2 \phi_{\sigma 0} + g_2 \phi_{\sigma 0}^2 + g_3 \phi_{\sigma 0}^3 - \frac{\gamma (M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0})}{4\pi^2} \times$$

$$\begin{aligned} \left\{ k_{\text{FN}} [k_{\text{FN}}^2 + (M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0})^2]^{\frac{1}{2}} - (M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0})^2 \times \right. \\ \left. \ln \frac{k_{\text{FN}} + [k_{\text{FN}}^2 + (M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0})^2]^{\frac{1}{2}}}{(M_N - g_\sigma^N \phi_{\sigma 0})} \right\} - \\ \frac{\gamma (M_\Theta - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0})}{4\pi^2} \left\{ k_{\text{F}\Theta} [k_{\text{F}\Theta}^2 + (M_\Theta - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0})^2]^{\frac{1}{2}} - (M_\Theta - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0})^2 \times \right. \\ \left. \ln \frac{k_{\text{F}\Theta} + [k_{\text{F}\Theta}^2 + (M_\Theta - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0})^2]^{\frac{1}{2}}}{(M_\Theta - g_\sigma^{\Theta^+} \phi_{\sigma 0})} \right\} = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

由(13)式可看出, 矢量介子对重子有效质量没有直接影响, 这是因为另一个限制条件 $\frac{\partial \epsilon}{\partial \omega_0} = 0$. 其中,

$$E_{\Theta} = \sqrt{\mathbf{k}^2 + M_{\Theta}^{*2}}, \quad (14)$$

$$E_N = \sqrt{\mathbf{k}^2 + M_N^{*2}}. \quad (15)$$

重子与介子的耦合系数^[17,24]

$$g_{\sigma}^{\Theta} = \frac{4}{3} g_{\sigma}^N \Gamma_{\Theta/B}, g_{\omega}^{\Theta} = \frac{4}{3} g_{\omega}^N. \quad (16)$$

3 结果与讨论

相对论平均场理论中,不同的参数对应不同的模型,在本文计算中,当 $g_2 = g_3 = 0$ 时,(2)式变为线性 σ - ω 模型.对线性 σ - ω 模型,采用 L-W^[25]参数组,对非线性 σ - ω - ρ 模型采用 NL2, NLB, NLD^[25]参数组,如表 1 所示.

表 1 本文所采用的参数组

	M_N/MeV	m_{σ}/MeV	M_{Θ^+}/MeV	g_2	g_3	g_{σ}^N
NLD	939	476.70	1540	3.7997	8.3333	8.26559
NL2	938	504.89	1540	2.30404	13.784	9.11122
NLB	939	510.0	1540	2.02714	1.6667	9.69588

图 1 给出了不同模型参数下 pentaquark Θ^+ 的有效质量.由图可知,pentaquark Θ^+ 有效质量都随密度的增加而逐渐下降,这与 Kim 和庄鹏飞计算的结果相似^[15,16];对于同一数值的 ρ_B ,无论在线性还是非线性核物质模型中,在低密度区间,不同参数组得出的曲线几乎完全重合,表明各个参数组在此区间上

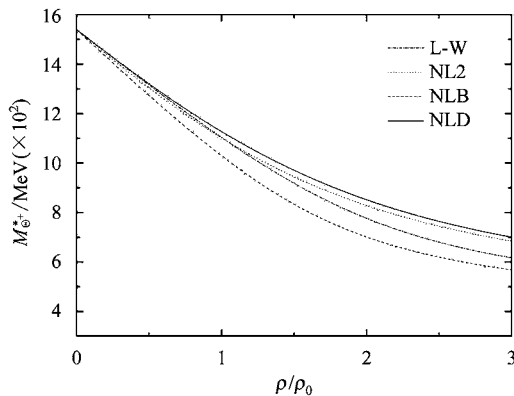


图 1 Θ^+ 在不同参数下的有效质量

对 pentaquark Θ^+ 有效质量的影响几乎没有差别.在 ρ_B 到达 $2\rho_0$ 之后,各组参数对 pentaquark Θ^+ 有效质量的影响出现了明显的差别.

当(16)式中选择不同耦合系数时,也对 Θ^+ 有效质量有所影响,如图 2 所示.

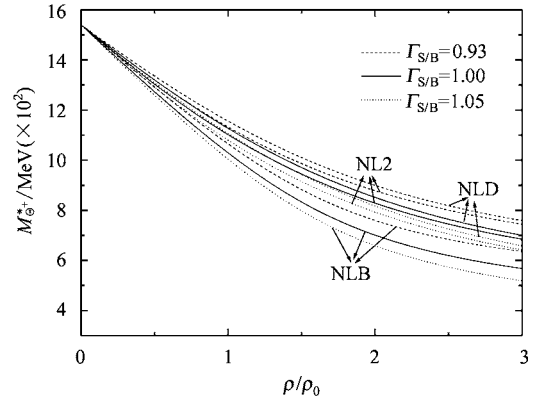


图 2 耦合系数中 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的不同比例对 Θ^+ 有效质量的影响

从图中可以看出,无论哪种参数,当密度小于 1 倍的饱和点密度下,不同耦合系数对 Θ^+ 有效质量的影响差别不大,随着核密度的增加,出现了明显的差别;对于同一数值的 ρ/ρ_0 ,耦合系数中 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的比例影响 pentaquark Θ^+ 有效质量,随着 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的增加曲线下下降越明显,从而说明 Θ^+ 的有效质量与 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的选取有关.

4 结论

根据有效质量与核密度的关系,由图 1 可以看出,在低密情况下,无论线性模型还是非线性模型,各组参数计算得到的结果几乎没有差别,不同耦合系数对 Θ^+ 有效质量的影响差别也不大.但在高密核物质中,不同参数组计算的结果差别就明显了,不同耦合系数对 Θ^+ 有效质量的影响也明显增大,同时,pentaquark Θ^+ 的有效质量与 $\Gamma_{\Theta/B}$ 的选取的比例也有关.无论哪种参数, Θ^+ 有效质量都随核密度的增加而下降,这与 Kim 和庄鹏飞利用 NLJ 模型的计算结果相似,说明在有限核密度下,pentaquark Θ^+ 有效质量随核密度的逐渐增加曲线下下降越明显.

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. Thys., 2004, **A19**:3439
- 9 Praszalowicz M. Phys. Lett., 2003, **B575**:234
- 10 ZHU S L. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**:232002
- 11 Csikor F, Fodor Z, Katz S D et al. JHEP, 2003, **0311**:070
- 12 Nam S I, Hosaka A, Kim H-Ch. Phys. Lett., 2004, **B602**:180
- 13 Kim Hyun-Chul, Lee Chang-Hwan, Lee Hee-Jung. arXiv: hep-ph/0402141
- 14 HUANG Xu-Guang, HAO Xue-Wen. arxiv: nuch-th/0409001
- 15 Vicente Vacas M J, Cabrera D, Li Q B et al. arXiv: nucl-th/0410056
- 16 LI G Q, Lee C H, Brown G E. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:5214
- 17 ZHONG X H, TAN Y H, LI L et al. arxiv: nucl-th/0408046
- 18 Boguta J, Bodmer A R. Nucl. Phys., 1977, **A292**:413
- 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, GUO Yan-Rui, GAO Yuan, JIN Gen-Ming. Nucl. Phys. Rev., 2004, **21**(3):183 (in Chinese)
(李希国, 郭艳蕊, 高远, 靳根明. 原子核物理评论, 2004, **21**(3):183)
- 22 LI Xi-Guo, GAO Yuan, GUO Yan-Rui, ZUO Wei. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**(9):973 (in Chinese)
(李希国, 高远, 郭艳蕊, 左维. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9):973)
- 23 LI Xi-Guo, GAO Yuan, LIU Zi-Yu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**(11):1150 (in Chinese)
(李希国, 高远, 刘紫玉等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(11):1150)
- 24 Guichon Pierre A M, Evgenii Koichi Saito, Rodionov N et al. Nucl. Phys., 1996, **A601**:349
- 25 Chung K C, Wang C S, Santiago A J et al. Eur. Phys. J., 2000, **A9**:453

Effective Mass of Pentaquark Θ^+ in Dense Matter*GUO Yan-Rui^{1,2} LI Xi-Guo^{1,3;1)} GAO Yuan^{1,2} LIU Jian-Ye^{1,3}

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

2 (Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

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

Abstract Based on the nonlinear σ - ω - ρ mode in the relativistic mean fields approximation, we have obtained a relation between nuclear density ρ and effective masses $M_{\Theta^+}^*$ of the pentaquark Θ^+ by using the function of energy density. We have investigated the effects of the parameter of the different models on the effective masses $M_{\Theta^+}^*$ of Θ^+ . At the same time, we also tried to study the effect of the couple coefficient $\Gamma_{\Theta/B}$ on the effective masses $M_{\Theta^+}^*$ in different parameters.

Key words penlaquake exotic baryon Θ^+ , effective mass, nonlinear σ - ω - ρ model, couple coefficient

Received 10 December 2004

* Supported by Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJ9X2-SW-N02), National Natural Science Foundation of China(10435080)

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