

δ 介子对确定 K 介子有效质量的影响^{*}

李希国^{1,2;1)} 高远^{2,3} 刘紫玉^{2,3} 郭艳蕊^{2,3} 左维^{1,2}

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 运用密度相关的平均场理论,分析了耦合常数随密度的变化及其对核子有效质量的影响.尤其引入 δ 介子后,质子和中子的同位旋效应得到体现,使非对称核物质中质子和中子的有效质量出现差别,从而对标量密度产生影响.利用含 δ 介子密度相关的相对论平均场理论,计算了在对称和非对称核物质中标量密度 ρ_S 和矢量密度 ρ_B 的关系,并由此研究了 K 介子有效质量随核物质密度的变化,分析了密度相关的耦合常数以及核物质非对称参数对 K 介子有效质量产生影响的大小,并与在耦合常数不依赖于核物质密度的情况下进行了比较.

关键词 K 介子 δ 介子 有效质量 密度相关

1 引言

研究 K 介子在高密物质中的性质及凝聚^[1,2],是近年来强子物理领域的热点之一.这不仅有助于人们对手征对称破缺恢复机制的研究,而且对认识中子星的性质结构产生重大影响^[3-6].核介质中 K 介子的性质和自由状态相比有很大的变化.K⁻ 介子的有效质量随着核子密度的增加而减小,在到达 3 倍饱和核密度以后,就有可能产生凝聚,这极有可能对超新星的爆发也产生作用^[7,8].利用色散关系,李国强等人得出了 K 介子有效质量对核物质标量密度和矢量密度的依赖关系^[9,10].因此有必要对核物质的标量密度 ρ_S 和矢量密度 ρ_B 的关系及其对 K 介子有效质量的影响进行研究.

利用线性 σ 模型,在相对论平均场近似下,讨论了标量密度 ρ_S 和矢量密度 ρ_B 的关系^[11],由此给出了 K 介子有效质量随核密度变化的关系.并讨论了不同模型及其参数对确定 K 介子有效质量的影响^[12,13],发现在低密度区($\leq 1.5\rho_0$)参数对 K 介子

有效质量几乎没有影响,而在高密度区,参数对确定 K 介子有效质量的影响是明显的.其实, ρ_S 和 ρ_B 的关系与核物质中的介子-核子的耦合常数密切相关.目前,各个模型的参数都是在饱和核密度下确定的,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,耦合常数随之发生改变,因此,当密度增大时,需要对耦合常数的变化进行考虑.耦合常数随密度相关的平均场理论在很多文献中都进行了讨论^[13-16].Hofmann 等人利用密度相关的相对论平均场(DDRH)理论,通过拟合 Dirac-Brueckner(DB)G 矩阵计算结果得到了介子-核子的耦合常数随密度变化的表达式^[17].同时,在文献^[17]中,因为引入 δ 介子,使非对称核物质中质子和中子的有效质量出现差别.在本文中,我们利用 Hofmann 等人的结果,分析了耦合常数随密度的变化以及 δ 介子的引入对核物质 ρ_S - ρ_B 关系的修正,并研究了对核物质中 K 介子有效质量的确定产生的影响.

2004-03-29 收稿

* 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJCX2-SW-No2),科技部基础重大项目前期研究专项基金(2002CCB00200)资助

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

2 密度相关的相对论平均场理论

假定核子通过交换有效的同位旋标量介子 σ 和 ω , 同位旋矢量介子 ρ 以及标量 - 同位旋矢量介子 δ 产生相互作用, 其有效拉氏量为

$$L = L_B + L_M + L_I,$$

$$L_B = \bar{\psi} [\gamma_\mu i \partial^\mu + M] \psi, \quad (1)$$

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

$$L_{Int} = \bar{\psi} \Gamma_\sigma(\rho) \psi \phi_\sigma - \bar{\psi} \Gamma_\omega(\rho) \gamma_\mu \psi A^{(\omega)\mu} + \bar{\psi} \Gamma_\delta(\rho) \tau \psi \phi_\delta - \bar{\psi} \Gamma_\rho(\rho) \gamma_\mu \psi \tau A^{(\rho)\mu}, \quad (3)$$

其中, $\psi = (\psi_p, \psi_n)^T$. 与标准的 QHD 模型^[18-20]不同的是, 介子和核子之间的耦合常数 $\Gamma_i (i = \sigma, \omega, \delta, \rho)$, 不再是固定常数, 而是核子场函数的泛函, Γ_α 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.

在平均场理论下, 介子场用经典场代替, 各个场的方程可写为

$$m_\sigma^2 \phi_{\sigma 0} = \Gamma_\sigma(\rho) \rho_S, \quad (4)$$

$$m_\omega^2 A_0^{(\omega)} = \Gamma_\omega(\rho) \rho_B, \quad (5)$$

$$m_\delta^2 \phi_{\delta 0} = \Gamma_\delta(\rho) (\rho_{Sp} - \rho_{Sn}) = \Gamma_\delta(\rho) \rho_{S3}, \quad (6)$$

$$m_\rho^2 A_0^{(\rho)} = \Gamma_\rho(\rho) (\rho_{Bp} - \rho_{Bn}) = \Gamma_\rho(\rho) \rho_{B3}, \quad (7)$$

核子场方程为

$$[i \gamma_\mu \partial^\mu - \Gamma_\omega \gamma^0 A_0^{(\omega)} - \Gamma_\rho \gamma^0 \tau_3 A_0^{(\rho)} - (M - \Gamma_\sigma \phi_{\sigma 0} - \tau_3 \Gamma_\delta \phi_{\delta 0})] \psi = 0, \quad (8)$$

在这里, $\Gamma_\rho(\rho)$ 中算符 ρ 已经用平均值 $\langle \rho \rangle$ 代替.

Hofmann 等人拟合得到的耦合常数为^[17]:

$$\Gamma_i = a_i \left[\frac{1 + b_i (\rho / \rho_0 + d_i)}{1 + c_i (\rho / \rho_0 + e_i)} \right], \quad i = \sigma, \omega, \delta, \rho, \quad (9)$$

其中参数见表 1.

表 1 公式(9)中的参数值 ($\rho_0 = 0.16 \text{ MeV}$)^[17]

Meson	m_i/MeV	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
σ	550	13.1334	0.4258	0.6578	0.7914	0.7914
ω	783	15.1640	0.3474	0.5152	0.5989	0.5989
δ	983	19.1023	1.3653	2.3054	0.0693	0.5388
ρ	770	12.8373	2.4822	5.8651	0.3671	0.3598

介子 - 核子耦合常数大小随标量密度的变化如图 1 中所示.

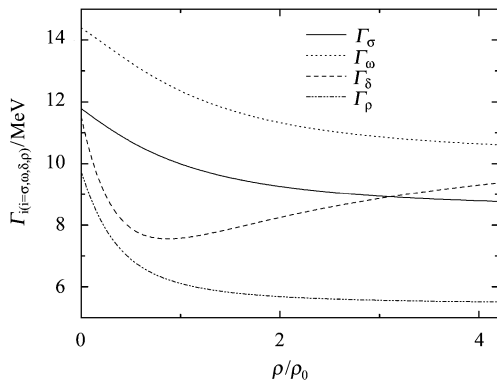


图 1 介子、核子耦合常数随标量密度的变化关系

核子的有效质量为^[17]

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

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

因为 δ 介子的引入, 当核物质不对称参数 $\alpha = (\rho_n - \rho_p) / \rho$ 不为 0 时, 质子和中子的有效质量在非对称核物质中将会分裂. 又因为

$$\rho_B = \rho_{Bp} + \rho_{Bn} = \frac{1}{3\pi^2} k_{Fp}^3 + \frac{1}{3\pi^2} k_{Fn}^3, \quad (12)$$

$$\rho_S = \rho_{Sp} + \rho_{Sn} = \frac{1}{2\pi^2} M_p^* \left[k_{Fp} E_{Fp}^* - M_p^{*2} \ln \frac{k_{Fp} + E_{Fp}^*}{M_p^*} \right] + \frac{1}{2\pi^2} M_n^* \left[k_{Fn} E_{Fn}^* - M_n^{*2} \ln \frac{k_{Fn} + E_{Fn}^*}{M_n^*} \right], \quad (13)$$

其中,

$$k_{Fp} = [(3\pi^3/2) \rho_B (1 - \alpha)]^{1/3},$$

$$k_{Fn} = [(3\pi^3/2) \rho_B (1 + \alpha)]^{1/3}.$$

为了进行比较, 我们计算了耦合常数随密度变化和不变的两种情况下的 $\rho_S - \rho_B$ 关系曲线, 如图 2 所示.

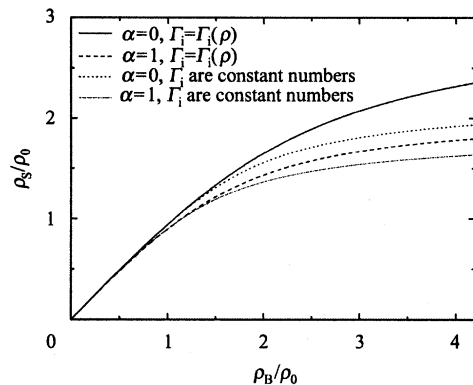


图 2 耦合常数随密度变化和常数两种情况下的 $\rho_S - \rho_B$ 关系 $\alpha = 0$ 对应对称核物质, $\alpha = 1$ 对应纯中子物质.

当不对称参数 α 确定, 质子和中子以及总的重子标量密度和矢量密度便确定下来. α 分别等于 0 和 1 时核子有效质量随密度的变化如图 3 中曲线所示, 图中, 当 $\alpha = 0$ 时, 质子和中子的有效质量没有差别, 当 $\alpha = 1$ 时是纯中子物质, 此时的核子有效质量即为中子的有效质量.

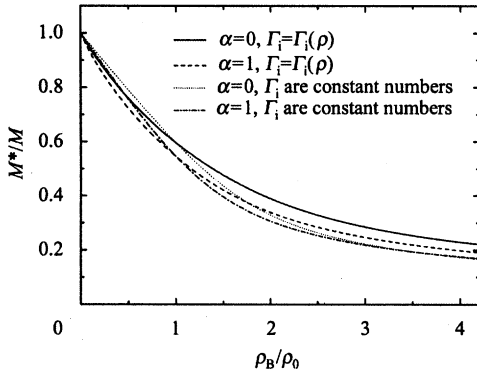


图 3 核子分别在对称核物质和纯中子物质中的有效质量 $\alpha = 0$ 对应对称核物质, $\alpha = 1$ 对应纯中子物质.

3 K 介子有效质量对 ρ 的依赖关系

从 $SU(3)_L \otimes SU(3)_R$ 非线性手征拉氏量出发, 可以得出 K 介子和核子相互作用的拉氏函数^[1,2,21,22], 经过一些简单的推导给出 K^\pm 的有效质量为^[11,22]

$$m_{K^+}^* = m_K \left[1 - \frac{\sum_{KN}}{f_K^2 m_K^2} \rho_S + \left(\frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2 m_K} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2}, \quad (14)$$

$$m_{K^-}^* = m_K \left[1 - \frac{\sum_{KN}}{f_K^2 m_K^2} \rho_S + \left(\frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2 m_K} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2}, \quad (15)$$

其中, $f_\pi \approx 93 \text{ MeV}$, $\sum_{KN} \approx 350 \text{ MeV}$. 在这里, 我们已经对 $\bar{\psi}\psi$, $\bar{\psi}\gamma^0\psi$ 分别用其期望值 $\rho_S = \langle \bar{\psi}\psi \rangle$, $\rho_B = \langle \bar{\psi}\gamma^0\psi \rangle$ 代替. ρ_S 和 ρ_B 分别是重子 (在这里也就是核子) 的标量密度和矢量密度.

利用前面讨论的 ρ_S 和 ρ_B 的关系, 我们讨论了 K 介子有效质量对核物质密度的依赖关系, 分别计算了 $\alpha = 0$ 以及 $\alpha = 1$ 两种情况下 K^+ 和 K^- 介子有效质量. 同时, 为了进行对比, 计算了当耦合常数不随密度变化情况下的结果, 如图 4 所示.

4 结果和讨论

从图 1 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 $\Gamma_\delta(\rho)$ 外, 其他三个耦合常数的大小都随着密度的

增大而减小, 但 $\Gamma_\delta(\rho)$ 在密度小于 $0.87\rho_0$ 时, 随着 ρ 的增大而减小, 但之后随着密度的增大反而又增大.

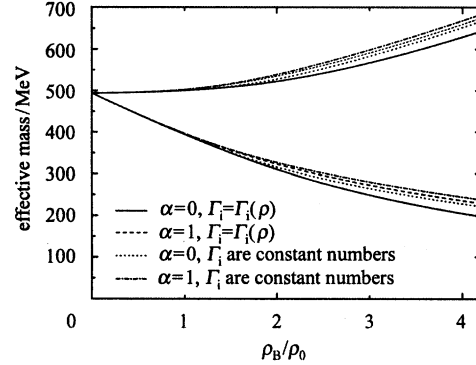


图 4 耦合常数随密度变化和不变两种情况下, K^+ 和 K^- 介子有效质量在对称和纯中子核物质中随核密度的依赖关系 上面的一组曲线对应 K^+ 介子, 下面一组则对应 K^- 介子.

从图 2 中可以看到, 因为 δ 介子的引入, 非对称核物质中同位旋效应对核子标量密度产生影响. 对应相同的 ρ_B , 对称核物质中的 ρ_S 大于当 $\alpha = 1$ 时的情况. 而对相同的不对称参数 α , 在低密情况下, 耦合常数随密度的变化对核物质的标量密度的影响微乎其微. 随着密度增大, 密度相关的耦合常数的影响得到体现.

从图 3 中可以看到, 使用包含 δ 介子的密度相关的平均场理论后, 核子的同位旋效应对其有效质量影响明显. 其影响来自于 δ 介子的作用. 在纯中子物质中, 核子的有效质量小于在对称核物质中的情况. 这是因为非对称核物质中, ρ_{S3} 不再为零, 而且从图 1 中可以看到 $\Gamma_\delta(\rho)$ 也随密度增大而增大, 因此, 核子有效质量的同位旋效应得到体现. 而对于同样的不对称参数, 在饱和核密度以内, 使用密度相关的耦合常数得到的核子有效质量小于耦合常数密度无关时的情况, 但当密度增大到饱和核密度以上时, 情况则刚好相反.

K^+ 和 K^- 介子在核物质中的有效质量随核物质密度的变化关系如图 4 中曲线所示. 不对称参数对 K 介子有效质量产生影响. 在纯中子物质中的, K^+ 和 K^- 介子有效质量均明显大于在对称核物质中的情况. 而 Γ_i ($i = \sigma, \delta$) 差别在低密情况下对 K 介子有效质量几乎没有影响. 随着密度的增大, 其差别尽管变大, 但其影响依然小于 δ 介子对 K 介子有效质量所带来的影响. 在密度到达 $4.2\rho_0$ 时, 使用密度相关的平均场理论计算得出的 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 1$ 时的 K 介子有效质量的差别达到 30 MeV 左右.

K^- 介子有效质量在随着密度的增大而减小,将直接影响到在核物质中的凝聚.因此,因为 δ 介子的引入,使之在纯中子物质中产生凝聚的临界密度将大于在对称核物质中的临界密度.而平均场理论中

的耦合常数对密度的依赖关系也影响到 K^- 介子的凝聚,使之的临界密度提高,尽管这种影响相对核子的同位旋效应并不是很明显.

参考文献 (References)

- 1 Kaplan D B, Nelson A E. Phys. Lett., 1986, **B175**:57
- 2 Nelson A E, Kaplan D B. Phys. Lett., 1987, **B192**:193
- 3 Brown G E, Kubodera K, Rho M. Phys. Lett., 1987, **B192**:273
- 4 Yabu H, Nakamura S, Myhrer F. Phys. Lett., 1993, **B315**:17
- 5 DAI Z G, CHENG K S. Phys. Lett., 1997, **B401**:219
- 6 GUO Hua, LIU Bo, LI Xi-Guo. HEP & NP, 2003, **27**(2):113(in Chinese)
(郭华,刘波,李希国.高能物理与核物理, 2003, **27**(2):113)
- 7 Brown G E, Bethe H A. Astrophys. Jour., 1994, **423**:659
- 8 LI G Q, LEE C H, Brown G E. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:5214
- 9 LI G Q, Ko C M, FANG X S. Phys. Lett., 1994, **B329**:149
- 10 LI G Q, Ko C M, LI Bao-An. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:235
- 11 GAO Yuan, LI Xi-Guo, JIA Due-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)
- 12 LI Xi-Guo, GAO Yuan, GUO Yan-Rui et al. HEP & NP, 2004, **28**(9):973(in Chinese)
(李希国,高远,郭艳蕊等.高能物理与核物理, 2004, **28**(9):973)
- 13 LI Xi-Guo, GUO Yan-Rui, GAO Yuan et al. Rev. Nuc. Phys., 2004, **21**(3):183(in Chinese)
(李希国,郭艳蕊,高远等.原子核物理评论, 2004, **21**(3):183)
- 14 Lenske H, Fuchs C. Phys. Lett., 1995, **B345**:355
- 15 Fuchs C, Lenske H, Wolter H. Phys. Rev., 1995, **C52**:3043
- 16 Keil C M, Hofmann F, Lenske H. Phys. Rev., 2000, **C61**:064309
- 17 Hofmann F, Keil C M, Lenske H. Phys. Rev., 2001, **C64**:034314
- 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 Classing W, Bratkovskaya. Phys. Rep., 1999, **308**:65
- 22 LI G Q, Brown G E. Nucl. Phys., 1997, **A625**:372

Effect of δ Meson on Kaon Effective Mass *

LI Xi-Guo^{1,2; 1)} GAO Yuan^{2,3} LIU Zi-Yu^{2,3} GUO Yan-Rui^{2,3} ZUO Wei^{1,2}

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

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

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

Abstract The density dependent relativistic hadron field theory(DDRH) containing meson δ is applied to very asymmetric nuclear matter. Because of the interaction between the nucleons and the scalar-isovector meson δ , the property of the asymmetric nuclear matter is so different from symmetric nuclear matter. The relations between scale density ρ_S and vector density ρ_B have been calculated. We also investigate the effective masses of nucleons in symmetric and asymmetric nuclear matter by using DDRH. The density dependence of in-medium kaon and antikaon effective masses has been obtained and then the effects of both the density dependence of the coupling constant $\Gamma_i(\rho)$ ($i = \sigma, \omega, \delta, \rho$) and the scalar-isovector meson δ were discussed.

Key words kaon, δ meson, effective mass, density dependent

Received 29 March 2004

* Supported by the CAS Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-No2) and Ministry of Science and Technology of China (2002CCB00200)

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