

核物质中 K 介子有效质量

高远¹ 李希国^{1,2;1)} 贾多杰¹

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)

摘要 分析了 K 介子在核物质中有效质量的变化受到核物质标量密度和矢量密度的双重影响. 使用 Walecka 模型和相对论平均场理论, 讨论了核物质标量密度与矢量密度的关系, 利用这一关系改进了 K 介子有效质量和核物质密度之间存在的依赖关系.

关键词 K 介子 有效质量 核物质

1 引言

近年来, 人们普遍认为, 热密核物质中强子性质的改变意味着手征对称破缺得到部分恢复. 研究核物质中 K 介子的有效质量、凝聚及传播不但可以帮助理解手征对称破缺恢复机制, 而且也能加深认识核状态方程的程度, 从而研究中子星的形成和结构.

自从 1986 年 Kaplan 和 Nelson^[1,2] 提出了核物质中可能存在 K 介子的凝聚以来, 核物质中 K 介子的性质引起了人们的极大兴趣, 一些重要的工作相继给出^[3]. 文献[4,5]得到了核密度下的色散关系, 发现 K⁺ 介子有效质量随核密度增加而有所增加, 而 K⁻ 介子有效质量随核密度的增加而明显下降, 这^[4]与夸克凝聚^[6]随核密度增大而明显降低紧密相关. 核物质中 K 介子质量的变化可能是 K 介子阈下产生的一种新机制^[7,8].

本文讨论核子的标量密度和矢量密度的不同关系对 K 介子有效质量的影响, 并运用 Walecka 模型和相对论平均场理论, 分析了核子的标量密度和矢量密度之间的关系, 由此改进了 K 介子有效质量与核密度之间存在的依赖关系.

2 有效质量与核密度的关系

复标量介子和重子之间的相互作用是通过 $SU(3)_L \otimes SU(3)_R$ 非线性手征拉氏量来描述的, 也

就是^[1-3,9],

$$L_{KB} = \frac{1}{4} f_\pi^2 \text{Tr} \partial^\mu \Sigma \partial_\mu \Sigma^\dagger + \frac{1}{2} f_\pi^2 \Lambda \{ \text{Tr} \hat{M}^0 (\Sigma - 1) + \text{h.c.} \} + \text{Tr} \bar{B} (i \gamma^\mu \partial_\mu - M_B) B + i \text{Tr} \bar{B} \gamma^\mu [V_\mu, B] + D \text{Tr} \bar{B} \gamma^\mu \gamma^5 \{ A_\mu, B \} + F \text{Tr} \bar{B} \gamma^\mu \gamma^5 [A_\mu, B] + a_1 \text{Tr} \bar{B} (\xi \hat{M}^0 \xi + \text{h.c.}) B + a_2 \text{Tr} \bar{B} B (\xi \hat{M}^0 \xi + \text{h.c.}) + a_3 (\text{Tr} \hat{M}^0 \Sigma + \text{h.c.}) \text{Tr} B B, \quad (1)$$

其中 B 是重子八重态, 其静止质量为 M_B , \hat{M}^0 是夸克质量矩阵, Λ , D , F , a_1 , a_2 , a_3 分别是自由参数. 而 Σ , ξ 是手征场, 定义为

$$\Sigma = \exp(2i\pi_8/f_\pi),$$

$$\xi = U = \exp(i\pi_8/f_\pi),$$

这里 π_8 是赝标量介子八重态. 矢量流及轴矢量流分别定义为

$$V_\mu = \frac{1}{2} (\xi^\dagger \partial_\mu \xi + \xi \partial_\mu \xi^\dagger),$$

$$A_\mu = \frac{i}{2} (\xi^\dagger \partial_\mu \xi - \xi \partial_\mu \xi^\dagger).$$

经过近似和计算, 可以得到 K 介子^[3,9]与核子相互作用的拉氏函数

$$L = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \partial_\mu - M_N) \psi - \frac{3i}{8f_K^2} \bar{\psi} \gamma^0 \psi \bar{K} p \ddot{\partial} K + \partial^\mu \bar{K} \partial_\mu K - \left(m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2} \bar{\psi} \psi \right) \bar{K} K + \dots, \quad (2)$$

2003-01-23 收稿

* 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJCX2-SW-N02), 科技部基础重大项目前期研究专项(2002CCB00200)资助

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

其中 M_K 是核子质量. 由此得 K^+ 和 K^- 介子的运动方程分别为

$$\square K^+ + \left(m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2} \rho_S \right) K^+ + \frac{3i}{4f_K^2} \rho_B \partial_0 K^+ = 0, \quad (3)$$

$$\square K^- + \left(m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2} \rho_S \right) K^- - \frac{3i}{4f_K^2} \rho_B \partial_0 K^- = 0, \quad (4)$$

其中

$$f_\pi \approx 93 \text{ MeV}, \quad \Sigma_{KN} \approx 350 \text{ MeV},$$

这里对 $\bar{\psi}\psi$, $\bar{\psi}\gamma^0\psi$ 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. 在动表象对 K^+ 展开

$$K^+ = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int e^{i(kx - \omega_{K^+} t)} f(k) (dk d\omega_{K^+}), \quad (5)$$

代入(3)式得到

$$\omega_{K^+}^2 - \frac{3\rho_B}{4f_K^2} \omega_{K^+} + \left(\frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2} \rho_S - m_K^2 - k^2 \right) = 0, \quad (6)$$

对 K^- 同样可以得到

$$\omega_{K^-}^2 + \frac{3\rho_B}{4f_K^2} \omega_{K^-} + \left(\frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2} \rho_S - m_K^2 - k^2 \right) = 0. \quad (7)$$

在自然单位下, 有相对论质能关系

$$p^2 + m_K^{*2} = k^2 + m_K^2 = E_{K^*}^2 = \omega_{K^*}^2,$$

令 k 为零, 便可以得到有效质量为^[3,4,9]

$$\begin{aligned} &= \omega_{K^*} (k=0) = m_K \left[1 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2 m_K^2} \rho_S + \left(\frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2 m_K} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2}, \quad (8) \end{aligned}$$

$$= \omega_{K^*} (k=0) = m_K \left[1 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_K^2 m_K^2} \rho_S + \right.$$

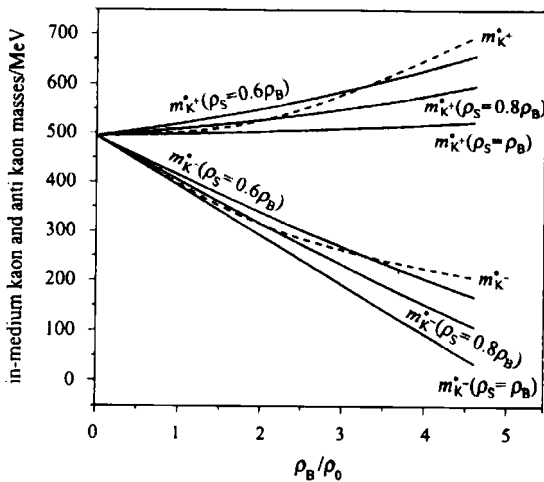


图 1 不同的 ρ_S/ρ_B 比值固定条件下的 K 介子的有效质量(—); ρ_S/ρ_B 比值变化条件下 K 介子的有效质量(---)

$$\left. \left(\frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2 m_K} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{3}{8} \frac{\rho_B}{f_K^2}, \quad (9)$$

因此, 核的标量密度和矢量密度都对 m_{K^*} 产生影响. 利用文献[10]所给出的 ρ_S/ρ_B (0.6, 0.8, 1) 数据, 使用(8,9)式, 我们计算了 K 介子有效质量随核密度的变化, 如图 1 中的实线所示. 标量密度和矢量密度的关系明显影响到 K 介子有效质量随核密度的变化, 尤其是在 $1.5\rho_0$ 以上的核密度区域. ρ_S/ρ_B 比值越大, m_{K^+} 下降的越快, 而 m_{K^-} 的上升则得到延缓. 总体而言, 随着 ρ_S/ρ_B 的减小, 整个 K 介子的有效质量曲线沿逆时针方向旋转.

3 标量密度和矢量密度的关系

为了研究标量密度和矢量密度的关系对 K 介子有效质量的影响, 必须知道核物质的标量密度和矢量密度之间存在的关系. 假定核子通过交换有效的同位旋标量介子 σ 和 ω 相互作用, 包含核子、中性的标量介子和矢量介子的有效拉氏量可表示为^[10]

$$\begin{aligned} L_1 = & \bar{\psi} [\gamma_\mu (i \partial^\mu - g_s V^\mu) + (M - g_s \phi)] \psi + \\ & \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - m_s^2 \phi^2) - \frac{1}{4} F_{\nu\mu} F^{\nu\mu} + \\ & \frac{1}{2} m_v^2 V_\mu V^\mu + \delta L, \quad (10) \end{aligned}$$

其中,

$$F_{\nu\mu} = \partial_\mu V_\nu - \partial_\nu V_\mu.$$

这里忽略了 K 介子对核状态方程的影响作用. 在相对论平均场近似下, 对于静态的无限核物质, 可以得到

$$\phi \rightarrow \langle \phi \rangle = \phi_0 = \frac{g_s}{m_s} \langle \bar{\psi}\psi \rangle = \frac{g_s}{m_s} \rho_S. \quad (11)$$

$$V_\mu \rightarrow \langle V_\mu \rangle = \delta_{\mu 0} V_0 = \frac{g_v}{m_v} \langle \psi^\dagger \psi \rangle = \frac{g_v}{m_v} \rho_B, \quad (12)$$

其中 $g_s^2 = 91.64$, $g_v^2 = 136.2$, $m_s = 550 \text{ MeV}$, $m_v = 783 \text{ MeV}$ ^[11]. 平均场理论中的拉氏量形式简化为^[8]

$$\begin{aligned} L_{\text{MFI}} = & \bar{\psi} [i \gamma_\mu \partial^\mu - g_s \gamma^0 V_0 - (M - g_s \phi_0)] \psi - \\ & \frac{1}{2} m_s^2 \phi_0^2 + \frac{1}{2} m_v^2 V_0^2, \quad (13) \end{aligned}$$

核子的旋量场函数解满足

$$(\alpha \cdot k + \beta M^*) \psi(k, \lambda) = [\epsilon(k) - g_s V_0] \psi(k, \lambda), \quad (14)$$

$$M^* = M - g_s \phi_0. \quad (15)$$

而 ρ_S 和 ρ_B 的关系可以表示为^[10,12,13]

$$\rho_B = \frac{\gamma}{6\pi^2} k_F^3, \quad (16)$$

$$\rho_s = \frac{8}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} d^3 k \frac{M^*}{\sqrt{k^2 + M^{*2}}}, \quad (17)$$

对于核物质, γ 取为 4, 对于中子物质, γ 取为 2. 因为 $M^*/E^*(k) < 1$, 所以 ρ_s 小于 ρ_B , 这是 Lorentz 收缩效应^[13]. ρ_s 和 ρ_B 的关系为非线性的, 因此其对应关系很难给出明显的解析表达式. 为此, 先求出能量密度为^[12]

$$\begin{aligned} \epsilon = \langle T_{00} \rangle &= \frac{g_s^2}{2m_s^2} \rho_B^2 + \frac{m_s^2}{2g_s^2} (M - M^*)^2 + \\ &\frac{\gamma}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} d^3 k (k^2 + M^{*2})^{1/2}. \end{aligned} \quad (18)$$

为确定有效质量 M^* , 对 $\epsilon(M^*)$ 关于 M^* 变分, 得出

$$\begin{aligned} &= M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \frac{\gamma}{(2\pi)^3} \times \\ &\int_0^{k_F} d^3 k \frac{M^*}{(k^2 + M^{*2})^{1/2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

它和式(15)是等价的. 对式(19)中的积分计算得出^[10]

$$\begin{aligned} &= M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \frac{\gamma M^*}{4\pi^2} \left[k_F E_F^* - \right. \\ &\left. M^{*2} \ln \left(\frac{k_F + E_F^*}{M^*} \right) \right], \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$E_F^* = (k_F^2 + M^{*2})^{1/2}$$

将式(15), (16)均代入式(20)并利用平均场关系式(11)得到 ρ_s 和 ρ_B 的关系式为

$$\begin{aligned} &4\pi^2 \rho_s - \gamma^{2/3} \left(M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \rho_s \right) (6\rho_B \pi^2)^{1/3} \times \\ &\left(\left(\frac{6\rho_B \pi^2}{\gamma} \right)^{2/3} + \left(M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \rho_s \right)^2 \right)^{1/2} + \\ &\gamma \left(M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \rho_s \right)^3 \ln \left\{ \left(\frac{6\rho_B \pi^2}{\gamma} \right)^{1/3} + \right. \\ &\left. \left[\left(\frac{6\rho_B \pi^2}{\gamma} \right)^{2/3} + \left(M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \rho_s \right)^2 \right]^{1/2} \right\} - \end{aligned}$$

$$\gamma \left(M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \rho_s \right)^3 \ln \left(M - \frac{g_s^2}{m_s^2} \rho_s \right) = 0, \quad (21)$$

由方程(21)可以得到 ρ_s 和 ρ_B 的函数关系, 如图 2 所示. 从图中可以看出, 标量密度随着矢量密度的增加而非线性增加.

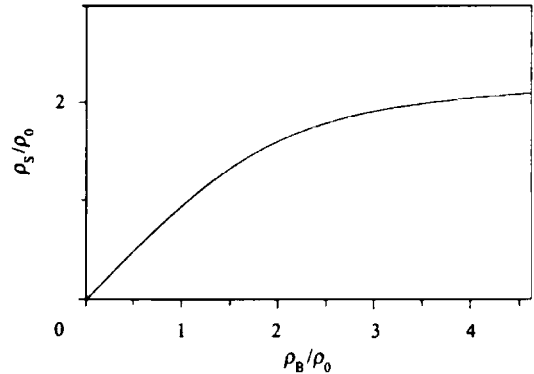


图 2 标量密度和矢量密度关系曲线

4 结果和讨论

结合标量密度和矢量密度的关系(21)式, 我们计算了 K 介子的有效质量随核密度变化的依赖关系, 如图 1 中虚线所示. 随着核密度的增加, K^- 介子的有效质量明显减少, 而 K^+ 介子的质量缓慢上升. 在 0 到 2 倍标准核密度下, K^- 下降较快, 在 2.0—3.0 倍 ρ_0 , 有效质量的下降明显减缓, 形成一个转折点. 而在到达 4.0 ρ_0 以后, 有效质量趋向于平衡, 不再随着密度的增加而明显下降. K^+ 却恰恰相反, 有效质量随着密度的增大而增加, 在 0—2.0 倍 ρ_0 , 平缓上升, 2.0—3.0 倍 ρ_0 区间, 上升较为明显, 到达 4.0 ρ_0 以后, 有效质量随着密度明显增加. 这与文献[14, 15]中 NJL 模型给出核物质中夸克凝聚的结果十分相似. 因此, 核物质中 K 介子的有效质量改变也可能是 K 介子阈下产生机制之一, 手征对称破缺在核物质密度区域 2.0—3.0 倍 ρ_0 得到部分恢复.

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 Classing W, Bratkovskaya. *Phys. Rep.*, 1999, **308**: 65
- 4 LI G Q, Ko C M, FANG X S. *Phys. Lett.*, 1994, **B329**: 149
- 5 LI G Q, Ko C M, LI Bao-An. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**: 235
- 6 Cohen Thomas D, Furnatahl R J, Grieger David K. *Phys. Rev.*, 1992, **C45**: 1881
- 7 Barth R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**: 4007
- 8 Laue F et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**: 1640
- 9 LI G Q, Brown G E. *Nucl. Phys.*, 1997, **A625**: 372
- 10 Serot B D, Walecka J D. *Adv. Nucl. Phys.*, 1986, **16**: 1
- 11 Walecka J D. *Ann. Phys. (N. Y.)*, 1974, **83**: 491
- 12 Ko C M, LI Qi, WANG Ren-Chuan. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**: 1084
- 13 DING Da-Zhao, CHEN Yong-Shou, ZHANG Huan-Qiao. *Progress of Nuclear Physics*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1997(in Chinese)
(丁大钊,陈永寿,张焕乔. 原子核物理进展,上海:上海科学技术出版社,1997)
- 14 ZHUANG Peng-Fei, HUANG M. YANG Z. *Phys. Rev.*, 2000, **C62**: 054901
- 15 ZHUANG Peng-Fei. *Nuclear Physics Review*. 2000, **19**(3): 306(in Chinese)
(庄鹏飞. 原子核物理评论,2000, **19**(3): 306)

Kaon Effective Mass in Nuclear Matter *

GAO Yuan² LI Xi-Guo^{1,2,1)} JIA Duoje²¹(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Collisions, Lanzhou 730000, China)²(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Using different ratios of ρ_S to ρ_B , we have calculated the in-medium kaon and antikaon effective masses which are not only dependent on the nuclear vector density ρ_B but also on the scalar density ρ_S . Based on the Walecka model and in the relativistic mean field approximation, the relation between the two nuclear densities is also discussed and then the dependence of in-medium kaon and antikaon effective masses are improved.

Key words kaon, effective mass, nuclear matter

Received 23 January 2003

* Supported by CAS Knowledge Innovation Project (KJ9X2-SW-N02), Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (2002CCB00200)

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