

奇异强子物质中的 Δ 自由度的影响*

孙宝玺

(南开大学物理系 天津 300071)

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

李磊 宁平治¹⁾

(南开大学物理系 天津 300071)

赵恩广

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 用相对论平均场方法研究了 Δ 自由度对奇异强子物质的影响,结果发现考虑 Δ 自由度后奇异强子物质在较高密度区出现第二个稳定态,同时通过反应 $\Lambda\Lambda-\Xi N$ 促进 Ξ 超子的产生.

关键词 奇异强子物质 相对论平均场 Δ 自由度

1 引言

关于奇异夸克物质 (SQM) 和奇异强子物质 (SHM) 的研究,近来引起人们很大兴趣^[1,2],这是因为,一方面,它们是相对论重离子碰撞形成的夸克胶子等离子体冷却后的可能产物,另一方面,它们可能是中子星等天体的内部物质形态,本文仅涉及 SHM.

迄今关于 SHM 的研究,没有考虑物质密度较高时核子可能处于激发态,并且把核子当作点粒子处理.这种理想化的处理可能丢掉某些重要因素的影响.本文目的是在相对论平均场框架下适当考虑核子激发态(Δ)对 SHM 的影响,考察这种效应是否会改变前人关于 SHM 可能是重子物质真实基态的预言,以及这些影响是否改变 SHM 中的超子成分.

在众多的超子($\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$)中,首选 Λ 超子作为奇异强子物质的组成部分,因为 Λ 超子的质量(1115.6MeV)最接近核子的质量,别的性质也有与核子相似之处.此外,在 SHM 中如果有其它超子,也很容易与核子 N 碰撞产生 Λ 超子^[3].

由于反应

1998-07-20收稿,1999-03-16收修改稿

* 国家自然科学基金和教育部博士学科点专项基金资助项目

1) 中国科学院理论物理研究所客座

$$\Xi^- p \rightarrow \Lambda \Lambda \quad (Q = 28 \text{ MeV}),$$

$$\Xi^0 n \rightarrow \Lambda \Lambda \quad (Q = 23 \text{ MeV}),$$

所释放的能量较少, 在 SHM 中, 当 Λ 超子的所有或大部分能级被填充满后, 上述两个反应的逆反应 $\Lambda \Lambda \rightarrow \Xi N$ 可能发生, 因此, SHM 中除 Λ 超子外, 还应该存在 Ξ 超子. 下面第二节研究 Δ 自由度对 SHM 的影响, 最后给出简要结论.

2 Δ 自由度对 SHM 的影响

2.1 理论框架

对于对称的无限大奇异强子物质, 质子数密度与中子数密度相等, $\rho_p = \rho_n$, 核子场 ψ_N , Δ 粒子场 ψ_Δ^ν ($\nu = 1, 2, 3, 4$), Λ 超子场 ψ_Λ , Ξ 超子场 ψ_Ξ 分别对应自旋为 1/2 的粒子的四分量波函数, 它们通过一个标量介子 (σ) 场和一个矢量介子 (ω) 场相互作用, 暂不计入其它介子场的贡献. 则包含矢量介子自相互作用的拉氏量密度可以写为:

$$\begin{aligned} L = & \bar{\psi}_N (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_N) \psi_N + \bar{\psi}_{\Delta\nu} (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_\Delta) \psi_\Delta^\nu + \bar{\psi}_\Lambda (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_\Lambda) \psi_\Lambda + \\ & \bar{\psi}_\Xi (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_\Xi) \psi_\Xi + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - U(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_V^2 V_\mu V^\mu \left(1 + \frac{g_V^2(N)}{2} \frac{V_\mu V^\mu}{Z^2} \right) - g_S(N) \bar{\psi}_N \psi_N \phi - g_S(\Delta) \bar{\psi}_{\Delta\nu} \psi_\Delta^\nu \phi - \\ & g_S(\Lambda) \bar{\psi}_\Lambda \psi_\Lambda \phi - g_S(\Xi) \bar{\psi}_\Xi \psi_\Xi \phi - g_V(N) \bar{\psi}_N \gamma_\mu \psi_N V^\mu - g_V(\Delta) \bar{\psi}_{\Delta\nu} \gamma_\mu \psi_\Delta^\nu V^\mu - \\ & g_V(\Lambda) \bar{\psi}_\Lambda \gamma_\mu \psi_\Lambda V^\mu - g_V(\Xi) \bar{\psi}_\Xi \gamma_\mu \psi_\Xi V^\mu, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$U(\phi) = \frac{1}{2} m_s^2 \phi^2 + \frac{1}{3} b \phi^3 + \frac{1}{4} c \phi^4, \quad (2)$$

$$F_{\mu\nu} = \frac{\partial V_\nu}{\partial x_\mu} - \frac{\partial V_\mu}{\partial x_\nu}. \quad (3)$$

以 $\rho_s(N), \rho_s(\Delta), \rho_s(\Lambda), \rho_s(\Xi)$ 和 $\rho_v(N), \rho_v(\Delta), \rho_v(\Lambda), \rho_v(\Xi)$ 分别表示核子、 Δ 粒子、 Λ 超子、 Ξ 超子的标量密度与矢量密度的基态平均值. 强子密度 ρ_B 是所有重子矢量密度之和

$$\rho_B = \rho_v(N) + \rho_v(\Delta) + \rho_v(\Lambda) + \rho_v(\Xi). \quad (4)$$

核子、 Δ 粒子、 Λ 超子、与 Ξ 超子的有效质量以 $m_N^*, m_\Delta^*, m_\Lambda^*$ 和 m_Ξ^* 表示, 则

$$m_i^* = m_i + g_s(i) \phi_0, \quad (5)$$

其中 $i = N, \Delta, \Lambda, \Xi$. 则核子的有效质量为

$$m_N^* = m_N - C_s^2 \left[\rho_s(N) + \frac{g_s(\Delta)}{g_s(N)} \rho_s(\Delta) + \frac{g_s(\Lambda)}{g_s(N)} \rho_s(\Lambda) + \frac{g_s(\Xi)}{g_s(N)} \rho_s(\Xi) + \right.$$

$$\left. B(m_N^* - m_N)^2 + C(m_N^* - m_N)^3 \right], \quad (6)$$

其中 $C_s = g_s(N)/m_s$, $B = b/g_s^3(N)$, $C = c/g_s^4(N)$. 用迭代法可以自洽求得核子的有效质量. Δ 粒子、 Λ 超子、与 Ξ 超子的有效质量

$$m_j^* = m_j + \frac{g_s(j)}{g_s(N)} (m_N^* - m_N), \quad (7)$$

其中 $j = \Delta, \Lambda, \Xi$.

核子与 Δ 粒子的费米动量分别以 $k_F(N)$ 和 $k_F(\Delta)$ 表示, 则相应的费米能量为

$$E_F(N) = g_v(N) V_0 + [k_F^2(N) + m_N^{*2}]^{1/2}, \quad (8)$$

$$E_F(\Delta) = g_v(\Delta) V_0 + [k_F^2(\Delta) + m_\Delta^{*2}]^{1/2}, \quad (9)$$

对于平衡态核物质或 SHM, 在零温情况下, 必有

$$E_F(N) = E_F(\Delta), \quad (10)$$

因此根据(8)–(10)式, 只有当

$$E_F(N) > g_v(\Delta) V_0 + m_\Delta^* \quad (11)$$

时, 核物质或 SHM 中才会出现 Δ 粒子.

SHM 中各种重子的矢量密度与标量密度分别为

$$\rho_v(i) = \frac{d_i}{(2\pi)^3} \int_i d^3k = \frac{d_i}{6\pi^2} k_F^3(i), \quad (12)$$

$$\rho_s(i) = \frac{d_i}{(2\pi)^3} \int_i d^3k \frac{m_i^*}{(k^2 + m_i^{*2})^{1/2}} =$$

$$\frac{d_i}{4\pi^2} m_i^* \left[k_F(i) E_F^*(i) - m_i^{*2} \ln \left[\frac{k_F(i) + E_F^*(i)}{m_i^*} \right] \right] \quad (13)$$

$$E_F^*(i) = [k_F^2(i) + m_i^{*2}]^{1/2}. \quad (14)$$

其中 $i = N, \Delta, \Lambda, \Xi$, d_i 为简并因子, 对于核子、 Δ 粒子、 Λ 超子、与 Ξ 超子, d_i 分别为 4, 16, 2,

4. $k_F(i)$ 为费米动量.

以 Y_j 表示 SHM 中第 j 种重子所占比例, 则系统的能量密度 E 可表示为

$$E = E_s + E_v + \sum_{i=N, \Delta, \Lambda, \Xi} E_i - \sum_{j=N, \Lambda, \Xi} Y_j m_j \rho_B, \quad (15)$$

$$E_s = \frac{1}{2} m_s^2 \phi_0^2 + \frac{1}{3} b \phi_0^3 + \frac{1}{4} c \phi_0^4, \quad (16)$$

$$E_V = g_V(N) \left[\rho_V(N) + \frac{g_V(\Delta)}{g_V(N)} \rho_V(\Delta) + \frac{g_V(\Lambda)}{g_V(N)} \rho_V(\Lambda) + \frac{g_V(\Xi)}{g_V(N)} \rho_V(\Xi) \right] V_0 - \frac{1}{2} m_V^2 V_0^2 \left(1 + \frac{g_V^2(N)}{2} \frac{V_0^2}{Z^2} \right), \quad (17)$$

$$E_i = \frac{d_i}{(2\pi)^3} \int d^3k (k^2 + m_i^{*2})^{1/2} = \frac{d_i}{8\pi^2} \left[k_F(i) E_F^{*3}(i) - \frac{1}{2} m_i^{*2} k_F(i) E_F^*(i) - \frac{1}{2} m_i^{*4} \ln \left[\frac{k_F(i) + E_F^*(i)}{m_i^*} \right] \right]. \quad (18)$$

其中 E_S, E_V 分别为标量介子 (σ) 场与矢量介子 (ω) 场的有效能量密度; 而 E_N, E_Δ, E_Λ 和 E_Ξ 分别为核子、 Δ 粒子、 Λ 超子、 Ξ 超子的有效能量密度。

2.2 结果与分析

首先我们只考虑 Δ 自由度的影响, 采用点模型下计算 SHM 的参数^[4], $g_S(N) = 11.784$, $g_V(N) = 13.890$, $b = 13.466 \text{fm}^{-1}$, $c = 10.421$, $z = 3.637 \text{fm}^{-1}$. 取 σ 介子质量为 $m_S = 550 \text{MeV}$. 另外取 $g_V(\Delta) = 0.666 g_V(N)$, $g_S(\Delta) = 0.615 g_S(N)$, $g_V(\Xi) = 0.334 g_V(N)$, $g_S(\Xi) = 0.337 g_S(N)$ ^[5], 则对应正常核物质 $\rho_0 = 0.1485 \text{fm}^{-3}$, $E/A = -15.75 \text{MeV}$, $m_N^* = 0.6 m_N$.

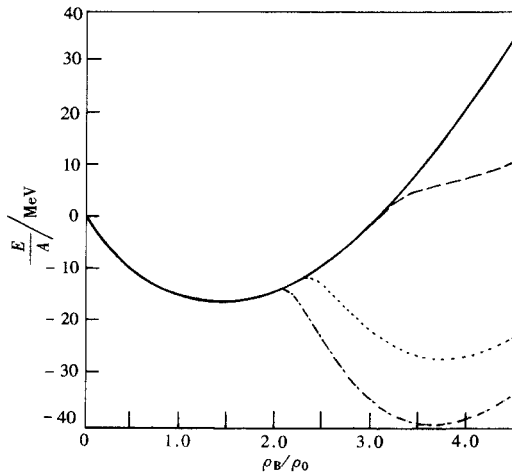


图 1 考虑 Δ 自由度的奇异强子物质 ($Y_\Lambda = 0.20$,

$Y_\Xi = 0.0665$ ($|S|/A = 0.333$)) 的状态方程

- 对应 $g_V(\Delta) = 1.00 g_V(N)$, $g_S(\Delta) = 1.00 g_S(N)$,
- 对应 $g_V(\Delta) = 1.00 g_V(N)$, $g_S(\Delta) = 1.20 g_S(N)$,
- 对应 $g_V(\Delta) = 1.00 g_V(N)$, $g_S(\Delta) = 1.31 g_S(N)$,
- 对应 $g_V(\Delta) = 1.00 g_V(N)$, $g_S(\Delta) = 1.35 g_S(N)$.

了单位重子的平均能量, 使 SHM 在较高密度区又出现了一个稳定态, 同时, 核子数目的减少使反应 $\Xi N \rightarrow \Lambda \Lambda$ 向着生成 Ξ 超子的方向进行。

下面给出按 (15) — (18) 式算出的单位核子平均结合能 E/A 随 SHM 密度变化的曲线, 其中图 1 给出 Δ 粒子耦合常数的变化对 SHM 状态方程的影响; 图 2、图 3 分别讨论相同奇异粒子丰度 $|S|/A$ 下, 不同超子比例引起的状态方程的变化, 计算中取 Δ 粒子耦合常数固定为 $g_V(\Delta) = 1.00 g_V(N)$, $g_S(\Delta) = 1.31 g_S(N)$.

由图 1 可以看出, 对于 $Y_\Lambda = 0.20$, $Y_\Xi = 0.0665$ ($|S|/A = 0.333$) 的 SHM, 设 $g_V(\Delta) = g_V(N)$, 则当 $g_S(\Delta)/g_S(N) > 1.20$ 时, 由于 Δ 粒子的出现, 在密度 $\rho > 3.5 \rho_0$ 处 SHM 状态方程出现第二个极小值, 当取某些参数时甚至比 SHM 基态还低, 这反映了 Δ 粒子之间通过标量场产生较强的吸引作用, 使体系的能量降低很多。

由图 2 和图 3 可以看出, Δ 粒子的出现降低核子的数密度及费米动量 $k_F(N)$, 降低

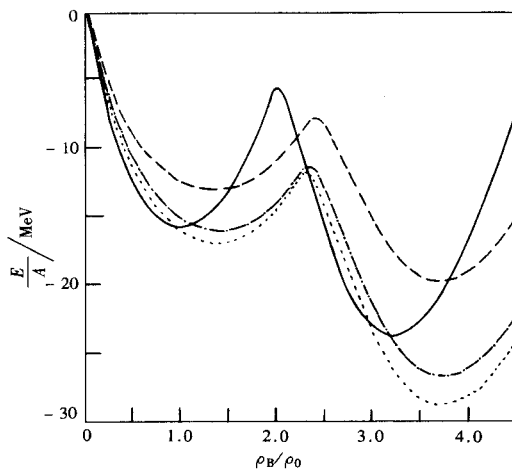


图 2 考虑 Δ 自由度的奇异强子物质 ($|S|/A = 0.333$) 的状态方程

--- 对应 $Y_\Lambda = 0.333, Y_\Sigma = 0.0$, -·-·- 对应 $Y_\Lambda = 0.20, Y_\Sigma = 0.0665$, ····· 对应 $Y_\Lambda = 0.113, Y_\Sigma = 0.11$, —— 对应 $Y_\Lambda = 0.0, Y_\Sigma = 0.0$ ($|S|/A = 0.0$).

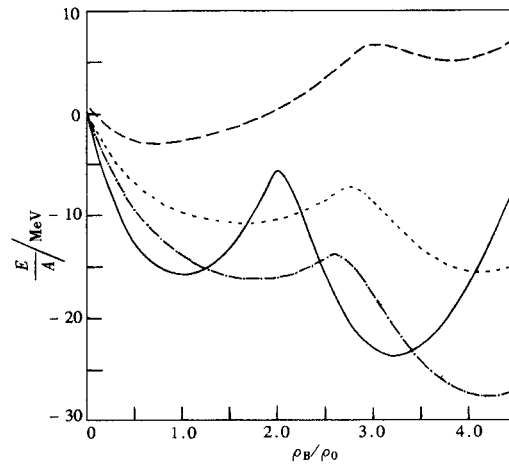


图 3 考虑 Δ 自由度的奇异强子物质 ($|S|/A = 0.6$) 的状态方程

--- 对应 $Y_\Lambda = 0.60, Y_\Sigma = 0.0$, ····· 对应 $Y_\Lambda = 0.40, Y_\Sigma = 0.1$, -·-·- 对应 $Y_\Lambda = 0.2, Y_\Sigma = 0.2$, —— 对应 $Y_\Lambda = 0.0, Y_\Sigma = 0.0$ ($|S|/A = 0.0$).

3 总结

在相对论平均场框架下分别考虑了奇异强子物质中 Δ 粒子机制. 该机制通过反应 $NN-\Delta N$ 降低核子数密度 (即核子矢量密度 $\rho_V(N)$), 降低核子的费米动量 $k_F(N)$, 使 SHM 在较高密度区出现第二个稳定态, 同时使反应 $\Lambda\Lambda-\Sigma N$ 向着 Σ 超子增多的方向进行, Δ 粒子机制进一步强化了奇异强子物质中包含 Σ 超子的可能性. 总之, 本文考虑 Δ 自由度的影响并不改变关于 SHM 可能是重子物质真实基态的预言.

参 考 文 献

- 1 Gal A, Dover C B. Nucl. Phys., 1995, A585:1
- 2 Schaffner J, Mishustin N. Phys. Rev., 1996, C53:1416
- 3 Zeng Yuexin, Peng Guangxiong, Ning Pingzhi. Nuclear Physics Review (in Chinese), 1997, 14:222 (曾月新, 彭光雄, 宁平治. 原子核物理评论, 1997, 14:222)
- 4 R. Bodmer A. Nucl. Phys., 1991, A526:703
- 5 Schaffner et al. Ann. Phys., 1994, 235:35

Effect of Δ -Isobar in Strange Hadronic Matter *

Sun Baoxi

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Li Lei Ning Pingzhi¹⁾

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Zhao Enguang

(Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The effect of in-medium Δ -isobar in strange hadronic matter(SHM) is studied within the framework of the relativistic mean field(RMF). As far as the effect of the in-medium Δ -isobar is concerned, we find a second stable state comes into being in the higher density scope in SHM and this effect promotes the producing of Ξ hyperons through the reaction $\Lambda\Lambda-\Xi N$. This effect is consistent with the conclusion that Ξ hyperons are constituents of SHM.

Key words strange hadronic matter (SHM), relativistic mean field(RMF), Δ -isobar

Received 20 July 1998, Revised 16 March 1999

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China and the Foundation for Ph. D. Training Program of China

1) Guest Professor of Institute of Theoretical Physics