

文章编号: 1007-4627(2005)04-0376-03

核介质中强子性质的手征 σ 模型研究*

申 虹

(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要: 采用手征 σ 模型描述核多体系统, 考虑真空极化的影响, 首先由核物质的饱和性质确定模型参数, 进一步研究了强子性质在核介质中的变化。手征 σ 模型的研究结果给出, 核子和 ω 介子的有效质量随核物质密度的增大而减小, 但 σ 介子的有效质量随密度的增大而增大。这些结果与不满足手征对称性的 Walecka 模型结果进行了比较。计算中采用的重整化方法会对结果有一定的影响。

关键词: 手征 σ 模型; 强子有效质量; 重整化方法

中图分类号: O572.33⁺⁹ **文献标识码:** A

1 引言

关于核介质中强子性质的研究是一个非常重要和有趣的课题。目前, 许多关于强子性质在介质中变化的研究采用了各种不同的理论方法和模型, 特别是一些能够体现强相互作用基本理论——量子色动力学(QCD)精神的有效模型。QCD 求和规则方法得到了随密度增大而减小的强子有效质量, 被认为是核介质中手征对称性随密度增加而逐渐恢复的重要标志^[1], Brown-Rho 标度给出了强子的有效质量在核介质中的变化规律^[2], 相对论平均场方法也给出了类似的结果^[3]。相对论平均场理论作为强子层次上研究多体系统的有效方法, 近年来得到了很大发展。相对论平均场理论已被广泛应用于各种有限核、超核、中子星、强子性质的介质效应等问题的研究^[4]。但是, 简单的相对论平均场模型(Walecka 模型)不满足手征对称性的要求, 因此, 采用满足手征对称性的线性 σ 模型来研究强子性质在核介质中的变化是一次有意义的尝试。

由于手征对称性限制了 σ 介子场的自相互作用项, 采用线性 σ 模型很难给出令人满意的核物质饱和性质^[5]。考虑了 ω 介子及其与核子和 σ 介子的耦合项后, 可以得到较好的核物质饱和性质^[6]。我们采用这一手征 σ 模型, 通过采用合理的重整化方法, 考虑真空极化的影响, 从而研究强子性质在核

介质中的变化, 特别是强子有效质量的密度依赖关系^[7]。本文将对这一模型及其应用于核介质中强子性质的研究作简要介绍。

2 模型和计算结果

采用手征 σ 模型研究核多体系统的性质以及核介质中强子性质的变化, 我们从如下拉氏量出发,

$$L = \bar{\Psi}[i\gamma_\mu \partial^\mu - g_\sigma(\sigma + i\gamma_5 \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\pi}) - g_\omega \gamma_\mu \omega^\mu] \Psi + \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma + \frac{1}{2} \partial_\mu \boldsymbol{\pi} \partial^\mu \boldsymbol{\pi} - \frac{\mu^2}{2} (\sigma^2 + \boldsymbol{\pi}^2) - \frac{\lambda}{4} (\sigma^2 + \boldsymbol{\pi}^2)^2 - \frac{1}{4} W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} + \frac{1}{2} \tilde{g}_\omega^2 (\sigma^2 + \boldsymbol{\pi}^2) \omega_\mu \omega^\mu + \varepsilon \sigma + \delta L, \quad (1)$$

这里 Ψ , π , σ 和 ω 是相应的场算符, $\varepsilon \sigma$ 为明显手征对称性破缺项, 可以给出非零的 π 介子质量, δL 是抵消项, 以便消除圈图计算中出现的无穷大。通过手征对称性自发破缺机制, 核子和 ω 介子获得质量。上式中的参数和物理质量之间有如下关系:

$$M = g_\sigma \sigma_0, \\ m_\pi^2 = \mu^2 + \lambda \sigma_0^2 = \frac{\varepsilon}{\sigma_0}, \\ m_\sigma^2 = \mu^2 + 3\lambda \sigma_0^2, \quad m_\omega^2 = \tilde{g}_\omega^2 \sigma_0^2, \quad (2)$$

收稿日期: 2005-08-02

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10135030, 90203004); 教育部博士点基金资助项目

作者简介: 申 虹(1964-), 女(满族), 河北承德人, 理学博士, 教授, 从事原子核理论研究;

E-mail: songtc@nankai.edu.cn

这里 σ_0 是 σ 介子场的真空期待值，通常可取 $\sigma_0 = f_\pi = 93 \text{ MeV}$ ，核子的质量取为 $M = 939 \text{ MeV}$ ，介子的质量取为 $m_\pi = 139 \text{ MeV}$ ； $m_\omega = 783 \text{ MeV}$ 。 σ 介子的质量 m_σ 和 ω 介子的耦合常数 g_ω 是该模型的两个自由参数，可以通过再现核物质饱和和性质来确定。

我们采用标准的重正化方法计算真空极化的贡献^[8]。手征 σ 模型中的抵消项 δL 应满足手征对称性的要求，这与不满足手征对称性的 Walecka 模型不同。在 Walecka 模型中，抵消项的选取具有更大的任意性。通过适当的重整化条件确定抵消项之后就可以数值求解核多体系统的性质。在对称核物质中，核子的有效质量满足如下自治方程：

$$M^* - M = -\frac{g_\sigma^2}{m_\sigma^2} \frac{4}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} d^3q \frac{M^*}{(q^2 + M^{*2})^{1/2}} - \frac{g_\sigma^2}{m_\sigma^2} [3\lambda f_\pi \sigma^2 + \lambda \sigma^3 - \tilde{g}_\omega^2 (f_\pi + \sigma) \omega^2] + \Delta M^*,$$

$$\Delta M^* = \frac{g_\sigma^2}{m_\sigma^2} \left[\frac{1}{\pi^2} M^{*3} \ln M^* - C_1 - C_2 (M^* - M) - \frac{1}{2} C_3 (M^* - M)^2 - \frac{1}{6} C_4 (M^* - M)^3 \right]. \quad (3)$$

这里，系数 $C_i (i=1, 2, 3, 4)$ 是抵消项中的有限部分，由重整化条件确定。在核物质中， σ 介子和 ω 介子的有效质量由相应的介质内传播子分母为零条件确定，

$$D_\sigma(M^*, q^2 = m_\sigma^{*2}) = q^2 - m_\sigma^2 - 6\lambda f_\pi \varphi - 3\lambda \varphi^2 + \tilde{g}_\omega^2 \omega^2 - \Pi_\sigma^R(M^*, q^2) = 0,$$

$$D_\omega(M^*, q^2 = m_\omega^{*2}) = q^2 - m_\omega^2 + \delta m_\omega^2 - 2\tilde{g}_\omega^2 f_\pi \varphi - \tilde{g}_\omega^2 \varphi^2 - q^2 \Pi_\omega^R(M^*, q^2) = 0, \quad (4)$$

Π_σ^R 和 Π_ω^R 是相应介子的重整化自能。这样计算所得

到的核介质中强子有效质量的变化如图 1 所示，核子和 ω 介子的有效质量随核物质密度的增大而减小，但 σ 介子的有效质量却随核物质密度的增大而增大。该结果与 Walecka 模型的结果有所不同，采用 Walecka 模型计算所得到的 σ 介子的有效质量随核物质密度的增大，先减小而后再增大^[7]。这一区别主要是由于抵消项的不同所造成的。

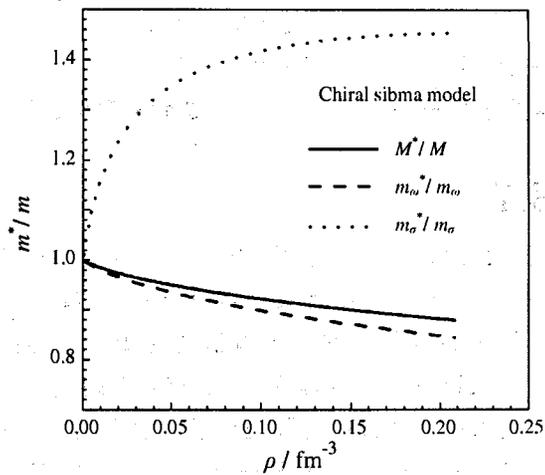


图 1 强子的有效质量随核物质密度的变化

3 结论

手征 σ 模型通过手征对称性自发破缺机制，使得核子和 ω 介子获得质量。该模型采用标准的重正化方法考虑了真空极化的影响，它能够成功地给出核物质的饱和性质。采用手征 σ 模型计算得到强子的有效质量，对于核子和 ω 介子，有效质量随核物质密度的增大而减小；对于 σ 介子，有效质量随密度的增大而增大。

参 考 文 献：

[1] Hatsuda T, Kunihiro T, Shimizu H. Phys Rev Lett, 1999, **82**: 2 840.
 [2] Brown G E, Rho M. Phys Rev Lett, 1991, **66**: 2 720.
 [3] Kurasawa H, Suzuki T. Prog Theor Phys, 1990, **84**: 1 030.
 [4] Ring P. Prog Part Nucl Phys, 1996, **37**: 193.
 [5] Furnstahl R J, Serot B D, Tang H B. Nucl Phys, 1996, **598**: 539.
 [6] Boguta J. Phys Lett, 1983, **B120**: 34.
 [7] Shen H, Tamenaga S, Toki H. Nucl Phys, 2004, **A745**: 121.
 [8] Matsui T, Serot B D. Ann Phys, 1982, **144**: 107.

- shinaga N, Yamaji S. Phys Rev, 2000, **C62**(1): 014304. [6] Zhao Y M, Arima A, Yoshinaga N. Phys Rept, 2004, **400**
 [5] Johnson C W, Bertsch G, Dean D J. Phys Rev Lett, 1998, **80** (1): 1.
 (13): 2 749.

Systematic Study of Low-lying States in Atomic Nuclei*

ZHAO Yu-min

(Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: I would like to discuss low-lying systematics of $N_n N_p$ suggested by Rick Casten, Nucleon-pair approximation of the nuclear shell model and its applications, and intrinsic properties of many-body systems in the presence of random interactions. I shall emphasize on backgrounds and perspectives of these problems, and summarize our basic understanding on these problems, after many efforts made by my collaborators and me.

Key words: systematics; nucleon-pair approximation; many-body system; spin

(上接第 377 页)

Hadron Properties in Chiral Sigma Model**

SHEN Hong

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The modification of hadron masses in nuclear medium is studied by using the chiral sigma model, which is extended to generate the omega meson mass by the sigma condensation in the vacuum in the same way as the nucleon mass. The chiral sigma model provides proper equilibrium properties of nuclear matter. It is shown that the effective masses of both nucleons and omega mesons decrease in nuclear medium, while the effective mass of sigma mesons increases at finite density in the chiral sigma model. The results obtained in the chiral sigma model are compared with those obtained in the Walecka model, which includes sigma and omega mesons in a non-chiral fashion.

Key words: chiral sigma model; effective mass of hadron; renormalization

* **Foundation item:** Minister Foundation of National Science and Technology Ministry of China; National Natural Science Foundation of China(10575070, 10545001)

** **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10135030, 90203004); SRFDP Program of MOE of China