

文章编号: 1007-4627(2004)02-0117-04

核子质量、半径及夸克凝聚的核物质密度依赖性*

刘玉鑫

(北京大学物理系, 北京 100871)

摘要: 简要介绍核物质中核子的质量、半径及夸克凝聚的密度依赖关系基于 QCD 模型和 QCD 有效场论研究的现状, 并具体介绍整体色对称模型(GCM)的研究结果. GCM 研究表明, 在小于临界密度的情况下, 核物质中核子的质量随核物质密度的增大而减小, 核子的半径和夸克凝聚随核物质密度的增大而增大. 当达到临界密度时, 核子质量减小为零, 核子半径变为无限大, 夸克凝聚突变为零, 进而提出一个核物质中手征对称性恢复的新机制.

关键词: 核子质量; 核子半径; 夸克凝聚; 密度依赖性; 手征对称性恢复

中图分类号: O571.21 **文献标识码:** A

1 引言

核物质性质、有限核性质(例如, 巨共振现象等)及高能重离子碰撞实验等研究表明, 核物质中核子的质量不同于自由空间中核子的质量. EMC 效应表明, 核物质中核子的半径较自由空间中核子的半径大. 从更深层次上讲, 关于这种变化的研究是探讨夸克退禁闭机制的一个重要途径. 因此, 核物质中核子的性质随核物质密度变化的定量规律一直是核物理和粒子物理等学科的专家共同关注的前沿课题. 目前, 人们提出了一些唯象模型和 QCD 有效场论模型等来确定核子的有效质量和半径随核物质密度的变化规律. 另一方面, 夸克凝聚是描述 QCD 真空性质和手征对称性破缺的重要物理量, 核物质中夸克凝聚随核物质密度变化的行为是核物质中手征对称性随核物质密度变化而恢复的方式或机制的重要标志. 因此, 人们在夸克胶子层次和强子层次都对夸克凝聚进行了广泛深入的研究, 可是不同方法得到的结果相去甚远. 本文简要介绍关于核子质量、半径及夸克凝聚随核物质密度变化规律的研究现状, 并具体地介绍一种具有较好 QCD 基础的有效场论模型——整体色对称模型的研究结果.

2 研究现状简介

较早的在夸克层次上描述核物质和有限核性质的理论模型是夸克介子耦合模型^[1], 其基本思想是, 核物质和有限核都由包括 3 个流夸克的不能互相重叠的“口袋”组成, 与袋模型^[2,3]一样, 这些口袋都有袋常数、袋半径和总能量. 袋半径即核子的半径, 与袋的总能量相联系确定核子质量为 $m_N = \sqrt{E_b^2 - \langle p_{cm}^2 \rangle}$, 核子(即口袋)性质的变化由通过介子传递的夸克-夸克相互作用决定, 介子场和夸克场由平均场近似方法确定. 为较好地统一描述随核物质密度增加核子质量减小、核子半径增大的规律, 人们唯象引入袋常数与标量介子场直接耦合、袋常数与核子质量间有标度关系等方法^[4,5]. 由于 QMC 模型中的夸克为流夸克, 标量介子引起的较强的吸引作用会使得其中夸克的质量变为负值. 为解决这一问题, 人们提出了夸克平均场(QMF)模型^[6,7]. 在 QMF 中, 核子由 3 个组分夸克组成, 这些组分夸克既与介子耦合, 又与胶子耦合, 夸克场和介子场等都由平均场近似方法确定. 尽管在描述核子质量等性质方面这些模型都取得了成功, 但从 QCD 的基础来讲, 它们都较唯象. 为在具有较好 QCD

收稿日期: 2004 - 02 - 27

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10075002, 10135030); 国家重大基础研究计划(973)基金资助项目(G2000077400); 教育部骨干教师基金资助项目

作者简介: 刘玉鑫(1962-), 男(汉族), 河南南阳人, 理学博士, 教授, 博士生导师, 从事原子核理论、物理学中的群论方法、计算物理等方面的研究.

基础的层次上描述强子的性质,人们提出了整体色对称模型(GCM)^[8-11].将 GCM 推广到有限化学势情况,可以较好地描述核物质中核子的性质^[12,13].

QCD 求和规则提出不久,人们即开始研究核物质中夸克凝聚随核物质密度变化的规律,并提出

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_{\rho_N}}{\langle \bar{q}q \rangle_{\text{vac}}} = 1 - \frac{\sigma_N}{m_\pi^2 f_\pi^2} \rho_N + \dots,$$

于是得到随核物质密度增大夸克凝聚“单调减小”的结果(系统综述可参阅文献[14]).之后,利用复合算子方法得到临界密度以下夸克凝聚“单调减小”、临界密度时夸克凝聚突变为零的结果^[15],利用瞬子模型和 Dyson-Schwinger 方程方法得到临界密度以下夸克凝聚基本保持不变、临界密度时夸克凝聚突变为零的结果^[16-18].基于 Hellmann-Feynman 定理^[19],人们还利用 σ - ω 模型^[20]、Dirac-Brueckner 方法^[21]、Schminger-Dyson 方程^[22]等在强子层次上对夸克凝聚的密度依赖关系进行了系统研究.结果表明,在低密度下,夸克凝聚随核物质密度增大而下降,继而发生“反转”,在高密度下随核物质密度增大而增大.显然,不同方法得到不同结果.并且,从夸克凝聚的变化特征来讲,对于核物质中手征对称性恢复的机制和过程尚未达到共识,但人们认为核物质中手征对称性是逐渐恢复的.为深化对核物质中夸克凝聚和手征对称性恢复机制的认识,我们也利用 GCM 研究了夸克凝聚随核物质密度变化的规律^[23].

3 GCM 及其关于核子质量、半径和夸克凝聚研究的结果

从 QCD 的拉氏量出发,近似到保留两胶子外源项,可得作用量^[8]:

$$S = \int d^4x d^4y [\bar{q}(x) (\gamma \cdot \partial + m) \delta(x-y) q(y) - \frac{g^2}{2} j_\mu^a(x) D_{\mu\nu}^a(x-y) j_\nu^b(y)],$$

其中, $j_\mu^a = \bar{q}(x) \frac{\lambda^a}{2} \gamma_\mu q(x)$ 为夸克流, $D_{\mu\nu}^a(x-y)$ 为有效胶子传播子, m 为流夸克质量, g 为夸克胶子耦合常数.取 $D_{\mu\nu}^a(x-y) = \delta^{ab} t_{\mu\nu} D(x-y)$ (其中 $t_{\mu\nu}$ 为横动量投影算子)并对夸克场进行 Fierz 变换,则可将上述不同位置的定域流间的作用转化为非定

域流间的作用.由于这样的非定域流 $j^a(x, y) = \bar{q}(x) \Lambda^a q(y)$ 具有标量、矢量、赝标量和轴矢量等形式,将之量子化则可近似为具有相同量子数的双定域玻色场,于是有作用量

$$S(B) = \int d^4x d^4y \bar{q}(x) [\gamma \cdot \partial \delta(x-y) + \Lambda^a B^a(x, y)] q(y) + \int d^4x d^4y \frac{B^0(x, y) B^0(y, x)}{2g^2 D(x-y)},$$

其中 $B^a(x, y)$ 即通过变换而引入的双定域玻色场.由于前述近似,使得该作用量仅保留有 QCD 中夸克的色对称性,因此称这一模型为整体色对称模型(global color symmetry model, 简称 GCM).利用这一模型可以较好地描述自由空间中核子、 π 介子、 ρ 介子、手征展开参数、夸克凝聚等性质.

为描述核物质中强子的性质和夸克凝聚等的规律,需要将前述自由空间的 GCM 推广到有限密度(或有限化学势).为此,需要将生成泛函对应的正则系综(夸克)推广到包含夸克和强子的巨正则系综.相应地,夸克场按化学势 μ 作变换 $q(x) \rightarrow q'(x) = e^{\mu x_4} q(x)$, 双定域场作变换 $B^0(x, y) \rightarrow B^0(x, y; \mu) \equiv e^{\mu x_4} B^0(x, y) e^{-\mu y_4}$, 则可得作用量

$$S(B^0, \mu) = -\text{Tr} \ln [(\gamma \cdot \partial - \mu \gamma_4) \delta(x-y) + \Lambda^a B^a(x, y; \mu)] + \int d^4x d^4y \frac{B^0(x, y; \mu) B^0(y, x; \mu)}{2g^2 D(x-y)}. \quad (1)$$

一般地,双定域场可以展开为^[11]

$$B^0(x, y; \mu) = B_0^0(x, y; \mu) + \sum_i \Gamma_i^0(x, y; \mu) \phi_i^0\left(\frac{x+y}{2}\right), \quad (2)$$

其中, $B_0^0(x, y; \mu) = B_0^0(x-y; \mu) = B^0(x-y; \mu)$ 为真空组态, $\sum_i \Gamma_i^0(x, y; \mu) \phi_i^0\left(\frac{x+y}{2}\right)$ 为相对于真空激发的介子场,在最低阶近似下, ϕ_i^0 仅包括 Goldstone 玻色子,即 π 和 σ 介子.可以证明^[11], $\Gamma_i^0 = B_0^0$.那么,只要确定了双定域场的真空组态 B_0^0 ,即可确定 GCM 的作用量和夸克的传播子,进而确定可观测量.由于化学势的引入,能量动量四维空间不再具有 $O(4)$ 对称性,因此在有限化学势下,夸克的传播子 $G(p, \mu)$ 应表示为

$$G^{-1}(p, \mu) = iA(p, \mu)\gamma \cdot p + iC(p, \mu)\gamma_4(p_4 + i\mu) + B(p, \mu), \quad (3)$$

其中 $B(p, \mu)$ 为动量空间中的真空组态. 对于 B_0^0 , 可以通过求解 Dyson-Schwinger 方程确定^[8,13], 也可以将之与 instanton 模型下夸克的动力学质量对应起来确定^[11].

根据非拓扑孤立子袋模型^[3], 形成核子的袋的袋常数由袋外和袋内手征场间的相互作用自治确定. 计算得, 袋常数可以表示为

$$B = 12 \int \frac{d^4 p}{(2\pi)^4} \cdot \left[\ln \frac{A^2(p, \mu)p^2 + C^2(p, \mu)(p_4 + i\mu)^2 + B^2(p, \mu)}{A^2(p, \mu)p^2 + C^2(p, \mu)(p_4 + i\mu)^2} - \frac{B^2(p, \mu)}{A^2(p, \mu)p^2 + C^2(p, \mu)(p_4 + i\mu)^2 + B^2(p, \mu)} \right]. \quad (4)$$

袋半径为

$$R = \left(\frac{a}{4\pi B} \right)^{1/4}, \quad (5)$$

袋能量为

$$E = \frac{4a}{3} \left(\frac{4\pi B}{a} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

其中, $a = 3(\omega_0 - \mu) - Z_0$, $\omega_0 = 2.04$, Z_0 为考虑质心运动修正等因素影响引入的参量.

对于夸克凝聚可通过完成下述计算直接得到

$$\langle : \bar{q}q : \rangle = -\text{Tr}_r G(x, x) = -12 \int \frac{d^4 p}{(2\pi)^4} \cdot \frac{B(\tilde{p}^2)}{p^2 A^2(\tilde{p}^2) + \tilde{p}_4^2 C^2(\tilde{p}^2) + B^2(\tilde{p}^2)}. \quad (7)$$

为具体讨论核子性质及夸克凝聚对核物质密度的依赖关系, 还需要将前述的化学势依赖转化为密度依赖, 即需要确定核物质密度与化学势之间的关系. 利用有限温度场论方法^[25]可以证明, GCM 中核物质密度与化学势之间的关系为^[13]

$$\rho_n = \int d^4 x$$

$$\approx \frac{2}{(2\pi)^4} \frac{\partial}{\partial \mu} \int d^4 p \frac{[B(p, p_4 + i\mu)]^2}{p^2}. \quad (8)$$

近似地取有效胶子传播子为 δ -函数^[24,8]和既包括非微扰又包括微扰效应的形式^[26,27]的情况下, 计算表明^[13,23,26,27]存在一个临界密度 ρ_c . 在临界密度以下, 核子袋常数和核子质量随核物质密度的增大而减小, 核子半径和核物质中夸克凝聚与真空中夸克凝聚的比值随核物质密度的增大而增大. 在核物质密度为临界密度的情况下, 袋常数和核子质量渐变零, 核子半径突变为无限大, 夸克凝聚突变为零. 在费米气体近似下, 临界密度 $\rho_c \approx 1.6 \rho_0$; 在考虑 δ -函数作用下, 临界密度 $\rho_c \approx 12 \rho_0$; 在考虑既包括非微扰又包括微扰效应的作用下, 临界密度 $\rho_c \approx 3 \rho_0$.

4 结论与讨论

本文简要介绍核物质中核子的质量、半径及夸克凝聚的密度依赖关系基于 QCD 模型研究和 QCD 有效场论研究的现状, 并具体介绍 GCM 的研究结果. GCM 研究表明, 在小于临界密度的情况下, 核物质中核子的质量随核物质密度的增大而减小, 核子的半径和夸克凝聚随核物质密度的增大而增大. 当达到临界密度时, 核子质量减小为零, 核子半径变为无限大, 夸克凝聚突变为零. 根据夸克凝聚随核物质密度增大而增大, 并且在密度为临界密度的情况下突变为零, 我们提出, 核物质中手征对称性恢复的机制可能是先随核物质密度增大破缺越来越严重, 然后突然恢复.

尽管对于核子性质和夸克凝聚的核物质依赖关系的研究已取得相当大的进展, 但无论是基本的理论方法, 还是具体的定量数值计算等方面都需要进一步系统深入的研究. 例如, 具有更好 QCD 基础的研究方法、对于手征场影响的超出平均场的自治处理方法、色超导态的影响、高阶和多夸克凝聚及其与核子性质的关系, 等等, 这些方面的工作都是目前非常活跃的前沿研究.

参 考 文 献:

- [1] Guichon P A M. Phys Lett, 1988, B200: 235.
[2] Chodos A, Jaffe R L, Jonson K, et al. Phys Rev, 1974, D9:

- 3 471; Chodos A, Jaffe R L, Jonson K, et al. Phys Rev, 1974, D10: 2 599; DeGrand T A, Jaffe R L, Jonson K, et al.

- Phys Rev, 1975, **D12**: 2 060.
- [3] Friedberg R, Lee T D. Phys Rev, 1977, **D15**: 1 694; Friedberg R, Lee T D. Phys Rev, **D16**: 1 069; Friedberg R, Lee T D. Phys Rev, 1978, **D18**: 2 623.
- [4] Jin X M, Jennings B K. Phys Rev, 1996, **B374**: 13; Jin X M, Jennings B K. Phys Rev, 1996, **C54**: 1 427; Jin Xuemin, Jennings B K. Phys Rev, 1997, **C55**: 1 567.
- [5] Lu D H, Tsushima K, Thomas A W, *et al.* Nucl Phys, 1998, **A634**: 443.
- [6] Toki H, Meyer U, Faessler A, *et al.* Phys Rev, 1998, **C58**: 3 749.
- [7] Shen H, Toki H. Phys Rev, 2000, **C61**: 045205.
- [8] Cahill R T, Roberts C D. Phys Rev, 1985, **D32**: 2 419; Praschifka J, Roberts C D, Cahill R T. Phys Rev, 1987, **D36**: 209; Cahill R T, Roberts C D, Praschifka J. Ann Phys (N Y) 1988, **188**: 20; Roberts C D, Cahill R T, Sevier M E, *et al.* Phys Rev, 1994, **D49**: 125.
- [9] Frank M R, Tandy P C, Fai G, *et al.* Phys Rev, 1991, **C43**: 2 808; Frank M R, Tandy P C. Phys Rev, 1992, **C46**: 338; Johnson C W, Fai G. Phys Rev, 1997, **C56**: 3 353.
- [10] Tandy P C. Prog Part Nucl Phys, 1997, **39**: 177.
- [11] Lü X F, Liu Y X, Zong H S, *et al.* Phys Rev, 1998, **C58**: 1 195.
- [12] Liu Y X, Gao D F, Guo H. Nucl Phys, 2001, **A695**: 353.
- [13] Liu Y X, Gao D F, Zhou J H, *et al.* Nucl Phys, 2003, **A725**: 127.
- [14] Drukarev E G, Ryskin M G, Sadovnikova V A. Prog Part Nucl Phys, 2001, **47**: 73; and References Therein.
- [15] Barducci A, Casalbuoni R, De Curtis S, *et al.* Phys Rev, 1990, **D41**: 1 610.
- [16] Carter G W, Diakonov D. Nucl Phys, 1998, **A642**: 78.
- [17] Maris P, Roberts C D, Schmidt S. Phys Rev, 1998, **C57**: R2 821.
- [18] Bender A, Poulies G I, Roberts C D, *et al.* Phys Lett, 1998, **B431**: 263.
- [19] Cohen T D, Furnstahl R J, Griegel D K. Phys Rev, 1992, **C45**: 1 881.
- [20] Malheiro M, Dey M, Delfino A, *et al.* Phys Rev, 1997, **C55**: 521.
- [21] Li G Q, Ko C M. Phys Lett, 1994, **B338**: 118.
- [22] Mitsuomi T, Noda N, Kouno H, *et al.* Phys Rev, 1997, **C55**: 1 577.
- [23] Liu Y X, Gao D F, Guo H. Phys Rev, 2003, **C68**: 035204.
- [24] Munczek H J, Nemirovsky A M. Phys Rev, 1983, **D28**: 181.
- [25] Kapusta J I. Finite-temperature Field Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [26] Liu Y X, Chang L, to be published.
- [27] Chang L, Liu Y X, to be published.

Density Dependence of Mass and Radius of a Nucleon and Quark Condensate in Nuclear Matter*

LIU Yu-xin

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The status of the investigations on the nucleon mass, nucleon radius and quark condensate in the framework of QCD-inspired models and QCD effective field theories is briefly reviewed. The results in the global color symmetry model (GCM) are described a little detailedly. The calculated results indicate that, before the maximal density is reached, the mass of a nucleon in nuclear matter decreases, the radius of a nucleon and the quark condensate increase very slowly, with the increase of the nuclear matter density. As the maximal nuclear matter density is reached, the mass of the nucleon vanishes gradually. The radius becomes infinite and the quark condensate vanishes suddenly. A new mechanism for the chiral symmetry restoration in nuclear matter is proposed.

Key words: nucleon mass; nucleon radius; quark condensate; density dependence; chiral symmetry

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10075002, 10135030); Major State Basic Research Development Program in China (G2000077400); Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education