

# 有限密度下的核子有效质量和 EMC 效应的一种可能解释\*

马 凤 才

(辽宁大学物理系 沈阳 110036)

高 嵩 苏汝铿

(复旦大学物理系 上海 200433)

1995-06-26 收稿

## 摘 要

用热场动力学方法计算了核物质中核子有效质量随密度的变化关系. 利用有限密度中核子质量的改变, 在  $x$  重新标度模型的基础上, 讨论了不同核的结构函数的比率  $R(x)$ , 与实验结果相符合. 还考察了 EMC 效应和 Brown-Rho 猜测之间的关系.

**关键词** 热场动力学, 核子有效质量, EMC 效应.

## 1 引 言

相对论重离子碰撞实验, 可望获得高温高密度的强子物质或夸克胶子等离子体, 同时天文学的观测实验也发现了越来越多的有关高密度物质的信息<sup>[1]</sup>. 因此, 研究高温高密度物质中粒子的性质及其相互作用的性质是一个重要的课题. 基于 QCD 的标度不变性, Brown 和 Rho 提出了以下猜测: 核物质中的矢量介子质量和核子质量满足<sup>[2]</sup>

$$\frac{M^*}{M} \simeq \frac{m_p^*}{m_p} \simeq \frac{m_\omega^*}{m_\omega} = 1 - \frac{\lambda\rho}{2\rho_0} . \quad (1)$$

这里  $M$  是核子的质量, 带星号的质量为核物质中的质量,  $\lambda$  为常数,  $\rho_0$  为核物质的饱和密度,  $\rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$ . 在理论上, 用 QCD 求和规则<sup>[3]</sup> 和有效场论<sup>[4]</sup> 都曾对有限密度物质中强子的性质作了研究, 其结果定性上支持 Brown-Rho 猜测.

如何从实验上观测物质中强子质量的变化, 是一个值得探讨的问题. 中能重离子碰撞可以在实验上形成一个有限密度的强子物质, 其密度  $\rho$  约为  $2-3\rho_0$ , 但是, 重离子碰撞所形成的有限密度物质仅以中间过程的形式存在非常短的时间, 直接研究其密度效应

\* 国家自然科学基金和辽宁省科学基金资助.

几乎是不可能的. 因此, 要研究有限密度中的强子性质, 需要寻找一个合适的观察量. 在有限密度物质中矢量  $\rho$  介子和  $\varphi$  介子的性质, 可以通过重离子碰撞过程中  $\pi^+\pi^-$  和  $K\bar{K}$  湮没过程产生的双轻子谱的性质决定<sup>[5]</sup>. 对于核物质中的核子质量, Walecka 模型的平均场结果表明<sup>[6]</sup>, 在核物质中核子的质量减小, 用手征  $\sigma-\omega$  模型及 QHD-II 模型, 在单圈近似下也有类似的结论<sup>[7]</sup>. 目前还没有直接的实验结果来证实这一结论. 我们认为, 利用 EMC 效应的实验结果, 可望为核子质量的密度效应提供实验上的验证.

EMC 效应表明: 束缚在原子核 A 内的核子的结构函数  $F_2^A(x)$  和自由核子的结构函数  $F_2^N(x)$  明显不同<sup>[8]</sup>, 即:  $R(x) = F_2^A(x) / F_2^N(x) \neq 1$ . EMC 效应已经有了许多理论解释<sup>[8]</sup>,  $x$  重新标度模型是其中的一种. 这个模型认为, 由于核内核子间的相互作用, 使得核内核子的质量减小, 并利用唯象的核子质量关系, 可以解释 EMC 效应<sup>[9]</sup>.

本文试图用热场动力学, 从有限温度和有限密度下场论的第一性原理出发, 研究有限密度中核子有效质量的变化, 并通过不同密度下的核子质量, 对  $x$  重新标度, 给出不同的核中核子结构函数与氦核的核子结构函数之比. 并由此出发研究 Brown-Rho 猜测和 EMC 效应.

## 2 有限密度下核子的有效质量

在有限核及低密度核物质中, 与核子相关联的主要是  $\pi$  介子<sup>[10]</sup>. 为研究核子质量随密度的变化关系, 用  $\pi NN$  耦合模型<sup>[11]</sup>, 其拉格朗日密度为:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma_\mu \partial^\mu - ig_\pi \gamma_5 \vec{\tau} \cdot \vec{\varphi} - M)\psi + \frac{1}{2} (\partial_\mu \vec{\varphi} \cdot \partial^\mu \vec{\varphi} - m_\pi^2 \vec{\varphi}^2), \quad (2)$$

这里  $\psi$  和  $\vec{\varphi}$  分别为核子场和  $\pi$  介子场,  $M$  和  $m_\pi$  分别为核子和  $\pi$  介子的质量,  $g_\pi$  是耦合常数,  $\vec{\tau}$  是同位旋矢量. 核子的有效质量可以通过核物质中核子的自能修正给出. 在核物质中, 核子的自能可以表示为<sup>[12]</sup>:

$$\Sigma(p) = C - \gamma^0 p^0 A + \vec{\gamma} \cdot \mathbf{p} B, \quad (3)$$

这里  $A, B, C$  是依赖于密度的常数. 应用 Dyson 方程, 可以得到考虑自能修正后核子的传播子为:

$$S_F(p) = \frac{1}{\gamma \cdot p - M - \Sigma + i\epsilon}. \quad (4)$$

在一级近似下核子的有效质量为<sup>[6]</sup>:

$$M^* = M + C. \quad (5)$$

为了求出有限密度下核子的有效质量, 用热场动力学方法<sup>[13]</sup> 计算核子的自能修正. 热场动力学是一种实时有限温度量子场论, 由于场的自由度加倍, 其自能和传播子都用  $2 \times 2$  的矩阵表示, 在单圈近似下, 自能只涉及  $(1, 1)$  分量. 费米子传播子的  $(1, 1)$  分量为:

$$\Delta^{11}(K) = (K + M) \left[ \frac{1}{K^2 - M^2} + 2\pi i \delta(K^2 - M^2) N_F(K) \right], \quad (6)$$

其中,  $N_F(K) = \theta(K_0)n_F(K) + \theta(-K_0)\bar{n}_F(K)$ ,  $\theta(K_0)$  是阶跃函数,  $n_F(\bar{n}_F)$  是费米子(反费米子)的分布函数. 密度为:

$$\rho = \frac{\gamma}{(2\pi)^3} \int d^3K [n_F(K) - \bar{n}_F(K)]. \quad (7)$$

对核物质, 自旋-同位旋简并度  $\gamma=4$ . 玻色子传播子的(1, 1)分量则为:

$$D^1(K) = \frac{1}{K^2 - m^2} - 2\pi i \delta(K^2 - m^2) n_B(K). \quad (8)$$

由热场动力学的费曼规则, 在单圈近似下,  $\pi$ NN 耦合模型给出的核子自能(蝌蚪图的贡献为零)为:

$$\Sigma_N(p) = ig_\pi^2 \int \frac{d^4K}{(2\pi)^4} \gamma_5 \Delta^1(K) \gamma_5 D_\pi^1(K-p) (\tau_i \tau_i). \quad (9)$$

(9) 式所表示的自能, 可分成真空部分和物质部分, 真空部分是与温度和密度无关的, 可以归结到核子的重整化质量中去. 温度和密度相关的自能为:

$$\Sigma_N(p, T, \rho) = g_\pi^2 \int \frac{d^4K}{(2\pi)^3} (-K + M) \left[ \frac{\delta(K^2 - M^2)}{(K-p)^2 - m_\pi^2} N_F(K) - \frac{\delta[(K-p)^2 - m_\pi^2]}{K^2 - M^2} n_B(K-p) \right]. \quad (10)$$

完成上式中的积分, 代入(3)式可得:

$$C = \frac{g_\pi^2}{4\pi^2} M \left\{ \int \frac{|K|^2 d|K|}{\epsilon_\pi} \cdot \frac{2m_\pi^2}{4M^2\epsilon_\pi^2 - m_\pi^4} n_B^\pi + \int \frac{|K|^2 d|K|}{\epsilon_N} \left[ \frac{n_F}{2M^2 - m_\pi^2 - 2M\epsilon_N} + \frac{\bar{n}_F}{2M^2 - m_\pi^2 + 2M\epsilon_N} \right] \right\}, \quad (11)$$

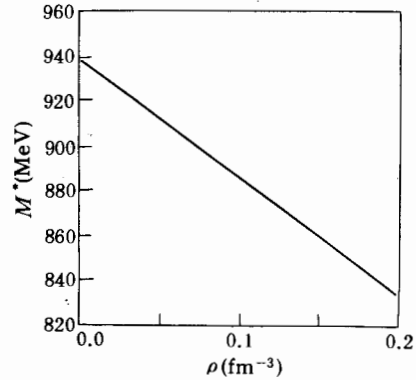


图1 核物质中核子有效质量随密度的变化曲线

这里  $\epsilon_\pi = \sqrt{|K|^2 + m_\pi^2}$ ,  $\epsilon_N = \sqrt{|K|^2 + M^2}$ . 联合求解(7)式和(11)式, 利用(5)式可得核物质中核子的有效质量随密度的变化关系, 结果如图1所示. 在数值计算中所取的参数是:  $g_\pi^2/4\pi = 13.0$ ,  $M = 939\text{MeV}$ ,  $m_\pi = 139\text{MeV}$ . 从图1可以看出, 核子的有效质量随密度的升高而单调地减小, 这一结果与 Walecka 模型平均场的结果以及 QCD 求和规则的结论定性上是一致的.

### 3 核子结构函数的比率

为研究核物质中核子质量减小的实验观测效应, 我们讨论核物质中核子质量的变化对重核中核子结构函数的影响, 并与 EMC 效应的实验结果相比较.

带电粒子和核子非弹性散射的单举微分散射截面通常可以写为:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \frac{F_2(x, Q^2)}{x} \left[ 1 - y - \frac{xyM}{2E} + \frac{y^2}{2} \frac{1 + 4M^2x^2/Q^2}{1 + R(x, Q^2)} \right], \quad (12)$$

这里  $F_2(x, Q^2)$  是靶核子的结构函数,  $Q^2 = -q^2$ ,  $q^2$  是由轻子到靶核的转换四动量的平方,  $\nu = E - E'$  是虚光子能量,  $y = \nu / E$ ,  $x$  是 Bjorken 标度变量, 定义为:

$$x = \frac{Q^2}{2M\nu}. \quad (13)$$

在深度非弹性极限 ( $Q^2 \rightarrow \infty$ ,  $\nu \rightarrow \infty$ , 但  $x$  有限) 下,  $F_2(x, Q^2)$  只与  $x$  有关. 实验上给出的是核子结构函数的比率  $R(x) = F_2^A(x) / F_2^N(x)$ , 这里,  $F_2^A(x)$  和  $F_2^N(x)$  分别表示原子数为  $A$  的核中的核子的结构函数和氘核的核子结构函数. 这两个结构函数是有差别的, 氘核中的核子可以近似地看成是自由的, 而在重核中的核子被许多其它核子所包围, 可以看作是一个核子处在有限密度的核子物质之中.

有限密度中核子质量的改变, 将导致 Bjorken 标度变量的变化:

$$x' = \frac{Q^2}{2M^* \nu}, \quad (14)$$

这就是  $x$  的重新标度. 这样核中的核子结构函数  $F_2^A(x)$  可以通过  $x$  重新标度的自由核子结构函数  $F_2^N(x')$  来表示:

$$F_2^A(x) = F_2^N(x'). \quad (15)$$

于是结构函数的比率  $R(x)$  可表示为:

$$R(x) = F_2^A(x) / F_2^N(x) = F_2^N(x') / F_2^N(x). \quad (16)$$

选取以下形式的自由核子结构函数<sup>[14]</sup>:

$$F_2^N(x) = \frac{5}{18} [u(x) + d(x)] + \frac{11}{9} \bar{u}(x), \quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned} u(x) &= 2N_u x^{1/2} (1-x)^3, \\ d(x) &= N_u x^{1/2} (1-x)^4, \\ \bar{u}(x) &= 0.1857(1-x)^7. \end{aligned} \quad (18)$$

$N_u = 1.094$ , 在大  $x$  区, 考虑了费米运动效应<sup>[15]</sup>.

对于不同的原子核, 其密度由以下关系式确定<sup>[16]</sup>:

$$\rho = \frac{A}{\frac{4}{3} \pi \left( \frac{5}{3} \langle r^2 \rangle \right)^{3/2}}, \quad (19)$$

其中  $\langle r^2 \rangle$  为核的电荷半径平方的平均值, 不同原子核  $\langle r^2 \rangle$  值在文献[16]的表中可以查到. 对于 C, Ca, Fe 和 Au 原子核,  $\sqrt{\langle r^2 \rangle}$  分别为: 2.472, 3.480, 3.729 和 5.330, 由(19)式可以得到 C, Ca, Fe 及 Au 原子核的密度  $\rho$  分别为: 0.088, 0.1053, 0.1198 和 0.144 fm<sup>-3</sup>. 由上一节给出的核子有效质量, 以及(14)式和(16) — (18)式, 就可以给出比率  $R(x)$ . 对四个不同的原子核, 其核子结构函数与自由核子结构函数的比率  $R(x)$  的数值结果如

图 2 中的实线所示.

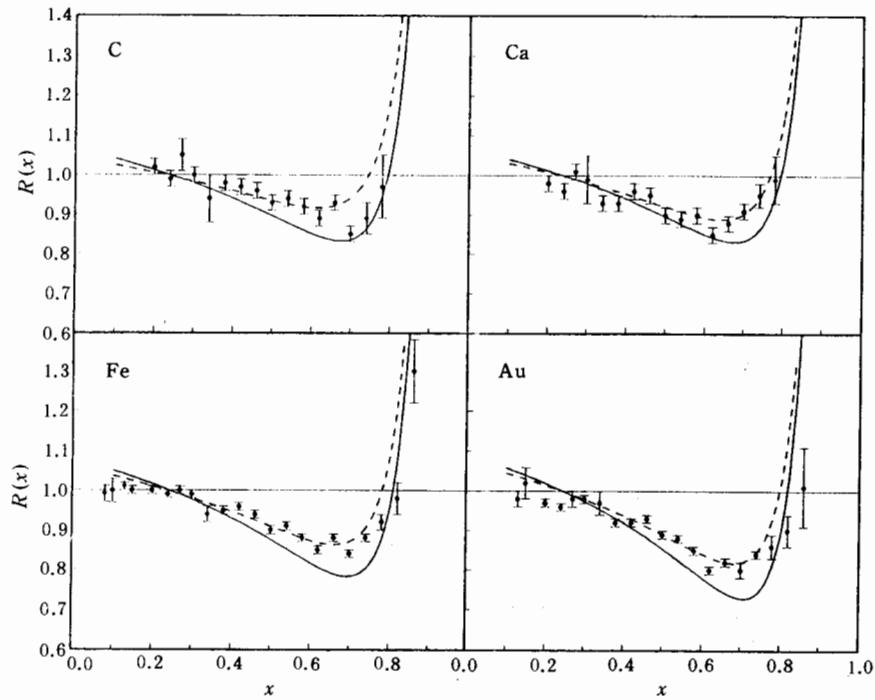


图 2 比率  $R(x)$  的计算值与实验值的比较(实验值取自 Arneodo<sup>[8]</sup>)

上述计算没有考虑夸克自由度,在  $\pi$ NN 相互作用的基础上,考虑核物质中的夸克凝聚的贡献,可以得到核物质中的核子有效质量<sup>[17]</sup>:

$$\frac{M^*}{M} = \left(1 - \frac{\rho}{0.88}\right)^{1/3}, \quad (20)$$

这里  $\rho$  为核物质的密度,其单位为  $\text{fm}^{-3}$ . 这里的计算只考虑了  $\pi$  介子的自由度,对于原子核内的低密度条件是成立的,由(20)式可知,在饱和密度  $\rho=0.17\text{fm}^{-3}$  下,  $M^*/M=0.93$ . 而 G. E. Brown 和 M. Rho 给出的通常是  $M^*/M=0.75-0.8$ , 因为他们讨论的是核物质中的核子质量,考虑了所有介子自由度激发的贡献. 这两个结果在定性上是一致的. 由以上给出的不同核的密度,根据(20)式可以给出不同原子核中相应的核子的质量. 依据  $x$  重新标度模型,可以相应地给出这四个原子核中的核子结构函数与自由核子结构函数的比率  $R(x)$ , 其数值结果如图 2 中虚线所示. 图 2 中实心点表示的是实验结果,我们的计算结果与实验结果相符合. 最近,对 EMC 效应的研究又有新的进展<sup>[18]</sup>.

总结本文,得出:

(1) 利用  $\pi$ NN 模型给出的核子有效质量满足 Brown-Rho 猜测. 从图 1 可以看出,  $M^*/M$  与密度  $\rho$  确实满足线性关系,且  $\lambda=0.2$ .

(2) 利用 Brown-Rho 猜测及热场动力学对  $M^*$  的计算,重新标度  $x$  后,可以给出

EMC效应的一种可能解释.

(3) 本文只考虑了 $\pi$ NN相互作用, 可以证明<sup>[4,7,11]</sup>, 在密度不太高的情况下, 即使计及其它介子, 如 $\omega$ 介子,  $\rho$ 介子,  $\sigma$ 介子等,  $M^*/M$ 仍随 $\rho$ 的增大而线性下降, Brown-Rho猜测仍成立, 但 $\lambda$ 取不同的值.

### 参 考 文 献

- [1] Quark Matter'93, *Nucl. Phys.*, **A566**(1994)1c.
- [2] G. E. Brown, M. Rho, *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991)2720; G. E. Brown, *Z. Phys.*, **C38**(1988)291.
- [3] M. Asakawa, C. M. Ko, *Phys. Rev.*, **C48**(1993)R526; *Nucl. Phys.*, **A560**(1993)399.
- [4] S. Gao, R. K. Su, P. K. N. Yu, *Phys. Rev.*, **C49**(1994)40; Y. J. Zhang, R. K. Su, *Chin. Phys. Lett.*, **12**(1993)709; H. Shiomi, T. Hatsuda, *Phys. Lett.*, **B334**(1994)281.
- [5] G. Q. Li, C. M. Ko, *Nucl. Phys.*, **A582**(1995)731.
- [6] B. D. Serot, J. D. Walecka, *Adv. Nucl. Phys.*, **16**(1986)1.
- [7] S. Gao, Y. J. Zhang, R. K. Su, *Phys. Rev.*, **C**(1995, June); R. K. Su, S. J. Yang, S. Gao *et al.*, *Jour. Phys.*, **G20**(1994)1757.
- [8] M. Arneodo, *Phys. Rep.*, **240**(1994)301; 厉光烈、沈建平、曹志军, 物理学进展, **9**(1989)273.
- [9] C. A. Garcia Canal, E. M. Santangelo, H. Vucetich, *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984)1430; G. L. Li, K. F. Liu, G. E. Brown, *Phys. Lett.*, **B213**(1988)531.
- [10] G. Preparata, P. G. Ratchiffe, *Phys. Lett.*, **B276**(1992)219.
- [11] Z. X. Qian, C. G. Su, R. K. Su, *Phys. Rev.*, **C47**(1993)877.
- [12] R. L. Kobes, G. W. Semenoff, *Nucl. Phys.*, **B260**(1985)714.
- [13] I. Ojima, *Ann. Phys.*, **137**(1981)1.
- [14] D. W. Duke, J. F. Owens, *Phys. Rev.*, **D30**(1984)49.
- [15] L. Frankfurt, M. Strikman, *Nucl. Phys.*, **B181**(1981)22.
- [16] H. de Vries *et al.*, *Atomic Data and Nucl. Data Tabl.*, **36**(1987)495.
- [17] T. D. Cohen, R. J. Furnstahl, D. K. Griedel, *Phys. Rev.*, **C45**(1992)1881.
- [18] 于明俭、沈建平、厉光烈等, 高能物理与核物理, **18**(1994)1107.

## Nucleon Effective Mass at Finite Density and a Possible Explanation of the EMC Effect

Ma Fengcai

*(Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036)*

Gao Song    Su Rukeng

*(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433)*

Received 26 June 1995

### Abstract

By means of the thermo field dynamics, the change of nucleon effective mass in nuclear matter with density is discussed. Based on the  $x$ -rescaling model, the ratios  $R(x)$  of the structure function for different nuclei are calculated from the shift of nucleon mass in nuclear matter. Our result is in agreement with the experiment. The relation between Brown-Rho conjecture and EMC effect is explored.

**Key words** thermo field dynamics, nucleon effective mass, EMC effect.