

文章编号: 1007- 4627(2000)04-0195-06

# 相对论核多体研究进展\*

申 虹, 李 磊, 宁平治

(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要: 简要评述了相对论核多体理论最近的发展及其在核物质和有限核的微观描述方面的应用, 所涉及的理论框架主要是相对论 Brueckner-Hartree-Fock 理论和相对论平均场理论. 例举了某些最新的应用领域, 同时也讨论了若干待解决的问题和可能开展的工作.

关键词: 相对论核多体理论; 核物质; 有限核

中图分类号: O571.1 文献标识码: A

## 1 引言

由原子核内束缚粒子间的相互作用解释和预言原子核的整体性质是理论核物理的长期根本任务之一. 这种第一性原理计算的最早尝试可追溯到 1937 年海森堡的学生欧拉的工作. 自 50 年代到 70 年代, 人们构造了各种非相对论理论框架对核多体系统进行第一性原理计算, 并取得可观成绩, 其中最具有代表性的当属 Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 理论.

BHF 理论是建立在非相对论量子力学基础上的核多体方法, 它在解释核物质和有限核性质方面取得了一定成功, 但同时也存在若干根本性问题. 例如: (1) 在 BHF 理论框架下, 各家采用不同核子-核子相互作用势(NN 势) 计算所得到的核物质饱和点理论值与经验值有明显而系统的偏离<sup>[1]</sup> (参见图 1), 图 1 中的圆形、方形和三角形等符号表示采用不同的 NN 势计算得到的饱和点落在一个带状区域 (Coester 带), 从图中可清楚地看到, Coester 带与饱和点的经验值存在明显偏离; (2) BHF 理论中的 Goldstone 展开收敛较慢, 高阶项的贡献不容忽略. 从图中还可以看到, 由包含高阶项贡献的几个点 (内含十字符号) 所得到的 Coester 带虽向经验值方向移动, 但相差尚远; (3) 在改进非相对论多体问题的具体求解方法方面也已做了许多努力, 这些努力

虽对饱和点理论值有所修正, 但只能使理论饱和点沿着 Coester 带移动.

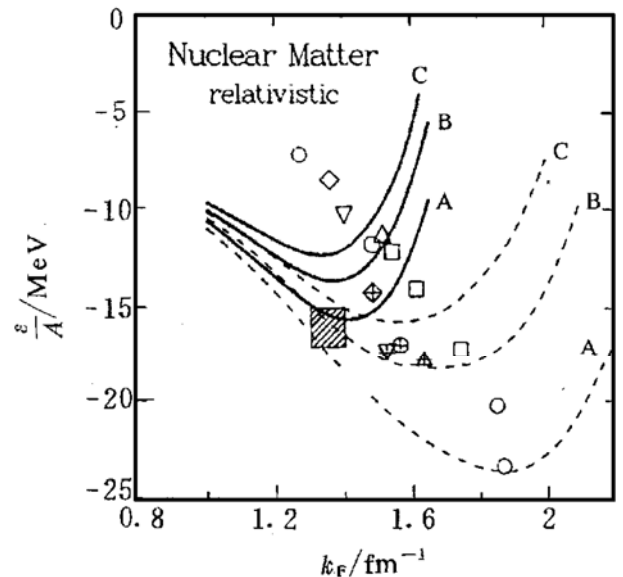


图 1 对称核物质每核子能量随费米动量的变化

— 为 RBHF 的理论结果, — 为 BHF 的理论结果, 其中 A, B 和 C 代表采用不同的 Bonn 势;  $\Delta$ ,  $\nabla$ ,  $\diamond$  和  $\circ$  分别表示采用不同 NN 势 (Paris, RSC, BJ 和 HJ) 所得到的 BHF 饱和点; 内含十字的符号为包含三穴线和四穴线贡献的结果; 阴影区域为饱和点的经验值范围.

人们一方面在努力克服非相对论核多体理论面临的困难, 同时也努力寻求新的途径发展核多体理论. 80 年代以来, 主要沿着以下两条途径进行.

(1) 适当考虑核内非核子自由度 在传统核多体理论中仅考虑了核内的核子自由度, 然而许多证据表明核内存在介子自由度. 例如: 1) 核力是由  $\pi$ ,

\* 收稿日期: 2000 -02 -03

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19875026); 国家教育部留学回国人员科研启动基金资助  
作者简介: 申 虹 (1964- ), 女 (满族), 河北人, 教授, 从事核多体理论和天体核物理研究.

$\alpha$ ,  $\rho$  和  $\omega$  等介子交换产生的; 2) 电子-核散射实验证实核内存在介子交换流, 即核子间传递带电介子而引起的电磁流; 3) 各种强子-核散射实验证实可从核内打出介子; 等等. 因而在核多体理论中纳入介子自由度的想法是很自然的. 这种建立在强子(核子+介子)层次上的理论称为量子强子动力学(QHD), 它是强子的相对论量子场论<sup>[2]</sup>.

(2) 把原有的非相对论理论做相对论推广 把前述非相对论 BHF 理论推广到相对论, 称为相对论 Brueckner-Hartree-Fock (RBHF) 方法, 或称 Dirac-Brueckner-Hartree-Fock (DBHF) 方法<sup>[1,3]</sup>, 这种考虑也是相当合理的. 熟知, 计及核内核子间的自旋-轨道耦合力( $S-L$  力) 为唯象的核壳层模型取得巨大成功奠定了理论基础, 而采用 Dirac 方程代替 Schrödinger 方程, 上述  $S-L$  力会在相对论理论框架中自然出现. 近年来, 核多体问题的相对论处理和应用取得很大进展.

## 2 相对论核多体理论简介

早期的相对论核多体理论是把建立在 Schrödinger 方程基础上的 Hartree-Fock 方法改造成建立在 Dirac 方程基础上的 DBHF 方法, 其特点是用 Dirac 方程描写单粒子运动. RBHF 理论是 BHF 理论的相对论推广, 它的输入量是由 NN 散射和核核数据确定的 NN 势, 没有自由可调参数.

### 2.1 RBHF 的基本框架

在 RBHF 理论中, 核物质内核子运动服从 Dirac 方程<sup>[1]</sup>:

$$(\alpha \cdot \mathbf{p} + \beta M + \beta U) \tilde{u}(\mathbf{p}, s) = \epsilon_p \tilde{u}(\mathbf{p}, s), \quad (1)$$

其中

$$U = U_s + \mathcal{Y} U_v \quad (2)$$

是单粒子势, 它等价于核物质内核子的自能  $\Sigma$ ,  $U_s$  和  $U_v$  分别是标势和矢势,  $M$  是自由核子质量,  $\mathbf{p}$  和  $s$  分别是核子的动量和自旋, 矩阵  $\alpha$  和  $\beta$  与 Dirac  $\mathcal{Y}$  矩阵的关系为:  $\beta = \mathcal{Y}^0$ ,  $\alpha = \mathcal{Y}^i \mathcal{Y}^i$ . 方程(1)的解为包含上分量和下分量的旋量形式:

$$\tilde{u}(\mathbf{p}, s) = \sqrt{\frac{\tilde{E}_p + \tilde{M}}{2\tilde{M}}} \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\sigma \cdot \mathbf{p}}{\tilde{E}_p + \tilde{M}} \end{vmatrix} \chi, \quad (3)$$

它与无相互作用的自由粒子 Dirac 方程的解具有相同的形式, 但其中

$$\tilde{M} = M + U_s, \quad (4)$$

$$\tilde{E}_p = \sqrt{\tilde{M}^2 + p^2}. \quad (5)$$

以上各式中字母上方的波纹号表示被修正的量. 类似于非相对论 BHF 理论, RBHF 理论中的基本量是相对论  $G$  矩阵:

$$\tilde{G}(\mathbf{q}', \mathbf{q} | \mathbf{P}, \tilde{z}) = \tilde{V}(\mathbf{q}', \mathbf{q}) + \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \tilde{V}(\mathbf{q}', \mathbf{k}) \cdot \frac{\tilde{M}^2}{\tilde{E}_{P/2+k}^2} \frac{O(\mathbf{k}, \mathbf{P})}{\tilde{Z} - 2\tilde{E}_{P/2+k}} \tilde{G}(\mathbf{k}, \mathbf{q} | \mathbf{P}, \tilde{z}), \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{P}$  是核物质中相互作用二核子的质心动量,  $\tilde{z} = 2\tilde{E}_{P/2+q}$  是二核子总能量,  $\mathbf{q}$ ,  $\mathbf{q}'$  和  $\mathbf{k}$  分别为初末态和中间态的相对动量, 泡利算符  $Q$  保证中间态在费米能级  $k_F$  以上. 势  $\tilde{V}$  的计算用到旋量解(3)式, 而(3)式是由包含单粒子势  $U$  的方程(1)解出的. 处于  $m$  态的单粒子势  $U(m)$  决定于相对论  $G$  矩阵

$$U(m) = \text{Re} \sum_{n \leq k_F} \frac{\tilde{M}^2}{\tilde{E}_n \tilde{E}_m} \langle mn | \tilde{G}(\tilde{z}) | mn - nm \rangle, \quad (7)$$

式中的二核子总能量  $\tilde{z} = \tilde{E}_m + \tilde{E}_n$ . 对上述诸方程自洽求解的方法与非相对论情况类似. 核物质内每核子能量由下式计算:

$$\frac{\epsilon}{A} = \frac{1}{A} \sum_{m \leq k_F} \frac{\tilde{M}}{\tilde{E}_m} \langle m | \mathcal{Y} \cdot \mathbf{p}_m + M | m \rangle + \frac{1}{2A} \sum_{m,n \leq k_F} \frac{\tilde{M}^2}{\tilde{E}_m \tilde{E}_n} \langle mn | \tilde{G}(\tilde{z}) | mn - nm \rangle - M, \quad (8)$$

根据以上各式, 利用 3 种不同 NN 势(Bonn 势 A, B 和 C, 详见文献[1])的 RBHF 计算结果如图 1 中实线所示, 它们比非相对论 BHF 的结果(图 1 中的虚线)大为改善, 尤其是曲线 A 的最低点几乎定量符合饱和点的经验值.

由于 RBHF 理论比较复杂繁琐, 通常仅适用于研究无限大核物质. 当用 RBHF 研究有限核时, 不得不采用一些比较强的近似, 例如, 定域密度近似(LDA)<sup>[4,5]</sup>. 采用 RBHF 研究某些有限核基态性质时, 所得结果虽较 BHF 结果有所改善, 但与经验值

尚有一定差距<sup>[4, 5]</sup>.

## 2.2 相对论平均场

引言中已指出, 核多体研究的进一步发展应在理论中适当考虑介子自由度, 传统核物理中使用的核力或核势应代之以相应的介子场相互作用. 核多体系统作为一个相互作用量子场体系应该满足相对论不变性的要求, 这种要求限制了体系的拉氏密度的具体形式.

在非相对论 Hartree-Fock 平均场方法中, 把核子当作服从非相对论 Schrodinger 方程的粒子, 它们之间的相互作用以密度相关的有效二体力来表示. 把这个理论框架转换到相对论平均场(RMF)理论, 其最简单的框架是, 把核子当作满足 Dirac 方程的相对论粒子, 而有效二体力则代之以有效介子场. 所谓有效介子场是指将体系的拉氏密度中出现的各种介子质量和各种耦合常数当作自由参数来处理. 待利用已知实验数据或某些成熟的理论结果确定这些参数后, 它们就成为理论中固定不变的参数. 因此, 这种显含介子自由度的相对论量子场论仍带有唯象模型的性质.

对于对称核物质(质子数密度等于中子数密度), 当密度不太低时, 其中核子彼此十分靠近, 可以近似地认为核子场  $\Psi$  只与两种介子场耦合, 即标量介子  $\sigma$  场  $\Phi$  和矢量介子  $\omega$  场  $V_\mu$ , 前者描述核力的中程吸引, 后者则部分地反映核力的短程排斥. 在这种简单的 RMF 模型(Walecka 模型)中, 总的拉氏密度可写为核子部分、介子部分和相互作用部分之和<sup>[3]</sup>:

$$L = L_N + L_m + L_i, \quad (9)$$

其中前两项对应于无相互作用的自由粒子场:

$$L_N = \Psi(i\gamma^\mu \partial_\mu - M)\Psi, \quad (10)$$

$$L_m = \frac{1}{2} \partial^\mu \Phi \partial_\mu \Phi - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \Phi^2 - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 V^\mu V_\mu, \quad (11)$$

这里  $F^{\mu\nu} = \partial^\mu V^\nu - \partial^\nu V^\mu$  是矢量场  $V_\mu$  的场强张量. 拉氏密度中的相互作用部分  $L_i$  对应于核子场与介子场之间的耦合:

$$L_i = g_\sigma \Psi \Psi \Phi - g_\omega \Psi \gamma^\mu \Psi V_\mu, \quad (12)$$

其中  $g_\sigma$  和  $g_\omega$  分别为核子场  $\Psi$  与  $\sigma$  介子场  $\Phi$  和  $\omega$  介子场  $V_\mu$  的耦合常数. 由欧拉-拉格朗日方程可以导出核子场和介子场分别满足的场方程, 它们是一组非线性耦合量子场方程, 很难精确求解. 通常采用平均场近似来处理, 即将介子场按经典场处理, 用它们的期待值代替场算符, 这样方程就大为简化并可精确求解. 在 Walecka 模型中, 对称核物质的能量密度为

$$\epsilon = \frac{m_\sigma^2}{2g_\sigma^2} (M - M^*)^2 + \frac{g_\omega^2}{2m_\omega} \rho_b^2 + \frac{4}{(2\pi)^3} \int_0^{\rho_b} d^3k \sqrt{k^2 + M^{*2}}, \quad (13)$$

其中重子密度  $\rho_b = 2k^3 / (3\pi^2)$ ,  $M^*$  是核物质内核子的有效质量, 它由以下自洽方程确定:

$$M^* = M - \frac{g_\sigma^2}{m_\sigma^2} \frac{4}{(2\pi)^3} \int_0^{\rho_b} d^3k \frac{M^*}{\sqrt{k^2 + M^{*2}}}. \quad (14)$$

这种简单的 RMF 只有两个自由参数  $g_\sigma$  和  $g_\omega$  (严格来说应是  $g_\sigma / m_\sigma$  和  $g_\omega / m_\omega$ ), 它们可由核物质饱和点的经验值定出.

RMF 为相对论核多体研究提供了一个简便而基本的理论框架. 对上述简单 RMF 模型的改进包括在拉氏密度中引入介子场的自耦合项以及引入  $\pi$  介子场和  $\rho$  介子场等. 引入  $\pi$  介子场和  $\rho$  介子场是考虑到它们也是传递核力的介子, 并且它们是同位旋矢量介子, 对非对称核物质有明显贡献, 包含它们才可能解释有限核的电磁性质. 近年来, 对于 RMF 方法及其应用的研究已做了大量工作<sup>[6-11]</sup>, 相当好地解释了核物质和有限核的性质. 但是, RMF 还存在一定问题, 对它的修正和改进是当前核多体研究的任务之一.

## 3 相对论核多体理论研究现状及问题

相对论核多体理论是一个内容广泛而丰富的研究课题. 近年来, 人们在发展和完善相对论核多体理论方面做了许多努力, 本节仅限于简要介绍与 RBHF 和 RMF 有关的研究动向.

RBHF 作为较微观的核多体理论, 从 NN 势出发, 不包含自由参数, 构成了它固有的优点. 但是, 由于 RBHF 理论比较复杂, 目前仅适用于研究零温对称核物质. 将 RBHF 推广至研究非对称核物质、

有限温度核物质及有限核还存在一些问题和争议<sup>[12, 13]</sup>.

与 RBHF 相比较, RMF 带有更强的唯象色彩, RMF 所包含的自由参数是通过核物质饱和点的经验值和某些有限核的性质来确定的. RMF 以其理论框架简单和物理图象清楚被广泛应用于许多领域. 例如: (1) 核结构 RMF 可用于研究有限核的性质, 包括对远离  $\beta$  稳定线核素的研究, 以及关于形变核、超核和激发核的研究<sup>[14-17]</sup>; (2) 核反应 RMF 可用于强子-核散射的相对论光学势研究, 也在一定程度上被应用于高能电子-核散射和相对论重离子碰撞的研究中<sup>[18, 19]</sup>; (3) 核天体 采用 RMF 理论可以构造范围广泛的核物质状态方程, 以便用于超新星爆发和中子星性质的研究<sup>[20, 21]</sup>; (4) 夸克自由度 采用 RMF 的物理思想考虑核子结构, 可以开展核介质效应和夸克凝聚等前沿课题的研究<sup>[22, 23]</sup>.

以下分别介绍并讨论一些 RBHF 和 RMF 所涉及的研究现状和存在的问题.

### 3.1 RBHF 推广至研究非对称核物质

目前, RBHF 理论开始被推广用于研究非对称核物质<sup>[12, 13]</sup>, 但遇到了一些困难, 主要问题在于标势和矢势的提取方法上. 通常采用的方法是由单粒子势  $U(m)$  来确定标势  $U_s$  和矢势  $U_v$ . 处于  $m$  态的单粒子势  $U(m)$  可通过方程(7)由相对论  $G$  矩阵计算得到, 同时,  $U(m)$  又满足如下关系式

$$\begin{aligned} U(m) &= \frac{\tilde{M}}{\tilde{E}_m} \langle m | U | m \rangle = \frac{\tilde{M}}{\tilde{E}_m} \langle m | U_s + \gamma^0 U_v | m \rangle \\ &= \frac{\tilde{M}}{\tilde{E}_m} U_s + U_v, \end{aligned} \quad (15)$$

这里, 假设  $U_s$  和  $U_v$  是与单粒子状态  $m$  无关的常量, 从而可由两个态的单粒子势来确定  $U_s$  和  $U_v$ . 这一假设对于对称核物质近似成立, 但用于非对称核物质时却偏离较大. 在文献[13]中, 作者详细地讨论了标势和矢势的状态相关性, 并探讨了其它确定标势和矢势的方法.

### 3.2 各种 RMF 模型的特点及问题

在 2.2 节中, 我们介绍了最简单的 RMF 模型 (Walecka 模型) 的基本框架. Walecka 模型仅考虑

了核子场与  $\sigma$  介子场和  $\omega$  介子场的耦合, 这一模型只有两个自由参数, 它们可由核物质饱和点的经验值定出. Walecka 模型的问题在于: 它给出的不可压缩系数过大且无法同时得到满意的有限核的结合能和电荷半径.

目前, 包含非线性项的 RMF 模型应用更为广泛. 在拉氏密度中引入  $\sigma$  介子场的自耦合项 ( $\sigma^3$  和  $\sigma^4$ ) 的 RMF 模型<sup>[6, 14]</sup>, 可给出较好的不可压缩系数和有限核性质. 通常引入同位旋矢量介子场—— $\rho$  介子场, 以便研究非对称核物质和质子、中子数相差较大的有限核. 这样的 RMF 模型的自由参数增加为 6 个 ( $g_\sigma, g_\omega, g_\rho, g_2, g_3$  和  $m_\sigma$ ), 其问题在于它给出的矢势  $U_v$  随密度线性增加, 这与 RBHF 的结果相差较大. 另一包含非线性项的 RMF 模型是在拉氏密度中同时引入  $\sigma$  介子场的自耦合项 ( $\sigma^3$  和  $\sigma^4$ ) 和  $\omega$  介子场的自耦合项 ( $\omega^4$ )<sup>[17]</sup>, 这样, 既可以得到较好的核物质及有限核性质, 又与较微观的核多体理论 RBHF 的结果比较接近. 在这一模型中增加了另一个自由参数—— $\omega$  介子场的自耦合常数  $c_3$ .

采用导数耦合的 RMF 模型 (Z-M 模型) 能够在不引入其它自由参数的前提下克服 Walecka 模型的一些弊病<sup>[24]</sup>. Z-M 模型仍仅有两个自由参数, 它可以给出较好的不可压缩系数和有效质量, 但由于 Z-M 模型采用导数耦合, 这一模型是不可重整的.

上述 RMF 模型能够在只包含几个自由参数的情况下, 符合众多核物质及有限核的性质, 这说明 RMF 理论框架具有一定的合理性. 但也还存在一些问题, 目前关于 RMF 方法的修正和改进仍然是核多体研究的任务之一.

### 3.3 RBHF 与 RMF 的结合

RBHF 是一个较微观的理论方法, 它是从 NN 势出发进行多体计算的, 对有限核的计算十分困难且难于得到满意的结果, 而 RMF 具有简便易行的特点, 却带有唯象性质. 如果把这两种理论框架适当结合起来, 互相取长补短, 可能是一种可行的途径<sup>[11, 25-27]</sup>. 由 RBHF 理论计算出的标势  $U_s$  和矢势  $U_v$  都是密度相关的, 它们通过下式可与 RMF 中的耦合常数联系起来<sup>[25]</sup>:

$$U_s(\rho) = - \frac{g_\sigma^2(\rho)}{m_\sigma^2} \langle \Psi | \Psi \rangle, \quad (16)$$

$$U_v(\rho) = \frac{g_{\omega}^2(\rho)}{m_{\omega}^2} \langle \Psi | \gamma^0 \Psi \rangle. \quad (17)$$

于是耦合常数也是密度相关的, 它可利用以上关系由 RBHF 核物质的结果确定, 然后把这种密度相关的耦合常数置于 RMF 框架中进行有限核性质的计算(不再有自由参数), 得到的结果与实验数据符合很好<sup>[11, 25, 27]</sup>.

由于耦合常数的密度相关性, 在 RMF 框架中推导场方程时会出现一些重整项<sup>[26]</sup>, 这些重整项可以保持 RMF 理论的热力学自洽性. 重整项贡献的大小与耦合常数关于密度的导数有关.

### 3.4 夸克层次上的 RMF 模型

以上所讨论的几种 RMF 模型和 RBHF 理论均是建立在强子层次上的多体理论, 核子被当作无结构的点粒子来处理, 核子之间通过交换介子来实现相互作用而结合在一起. 80 年代以来, 人们认识到强子的夸克结构以及强子性质在核介质中的变化均不容忽视, 著名的 EMC 效应揭示出核子半径会在核介质中一定程度地增大. 人们希望能够从目前最基本的理论——量子色动力学(QCD)出发来研究核多体性质, 但直接采用 QCD 研究有限核性质尚存在很大困难, 人们不得不借助某些合理的模型来讨论强子的夸克结构对核多体性质的影响. 80 年代末, Guichon 提出的夸克介子耦合模型(QMC)为在夸克层次上研究核多体性质开辟了一个新的方向<sup>[28]</sup>. QMC 模型延伸了 RMF 的物理思想, 认为核子可由 MIT 口袋模型来描述, 核子间的  $\sigma$  介子场和  $\omega$  介子场直接与核子内的夸克相互耦合, 这样可以得到核子有效质量  $M^*$  随  $\sigma$  介子场的变化关系式, 然后再将这一关系式用于核物质及有限核性质

的计算. QMC 模型与 RMF 模型极其相似, 或者说它是夸克层次上的 RMF 模型. 它与 Walecka 模型的主要区别在于: (1) QMC 模型的自由参数为核子内的夸克与介子场之间的耦合常数  $g_{\sigma}^q$  和  $g_{\omega}^q$ , 而 Walecka 模型的自由参数为核子场与介子场之间的耦合常数  $g_{\sigma}$  和  $g_{\omega}$ . 它们都是由核物质饱和点的经验值来确定的; (2) Walecka 模型的有效质量  $M^*$  随  $\sigma$  介子场的变化呈线性关系  $M^* = M - g_{\sigma}\sigma$ , 而 QMC 模型的有效质量与  $\sigma$  介子场之间的关系较为复杂.

近年来, 人们致力于发展 QMC 模型<sup>[29-32]</sup>, 对 Guichon 提出的简单 QMC 模型做了许多改进和推广, 例如, 考虑介子场的自耦合项以及引入密度相关的口袋常数等. 但是, 这一模型仍然存在一些弊病, 例如, 夸克的有效质量在核物质中不得不变为负值; 采用密度无关的口袋常数计算得到的核子半径不随密度增加而变大(与实验中得到的 EMC 效应不符); 虽然采用密度相关的口袋常数可以再现 EMC 效应, 但口袋常数随密度的变化关系带有较强的任意性.

最近提出的夸克平均场模型(QMF)与 QMC 模型十分相似<sup>[33]</sup>, QMF 模型采用组元夸克模型描述核子, 核子间的介子场通过与核内夸克的相互作用来改变核子的性质. QMF 模型可以克服 QMC 的上述困难, 能够自然得到束缚核子的膨胀效应(EMC 效应). 目前, QMF 模型已被推广用于研究有限核的性质<sup>[34]</sup>.

本文简要介绍和评述了当前与 RBHF 和 RMF 有关的相对论核多体理论的发展及其应用, 例举了该领域的一些新动向和问题, 这些都可能成为进一步的工作方向.

### 参 考 文 献:

- [1] Brockmann R, Machleidt R. Relativistic Nuclear Structure I Nuclear Matter [J]. Phys Rev, 1990, C42: 1 965- 1 980.
- [2] Serot B D, Walecka J D. The Relativistic Nuclear Many-body Problem [J]. Adv Nucl Phys, 1986, 16: 1- 326.
- [3] Machleidt R, Li G Q. Nucleon-nucleon Potentials in Comparison Physics or Polemics [J]. Phys Rep, 1994, 242: 5- 35.
- [4] Muther H, Machleidt R, Brockmann R. Relativistic Nuclear Structure II Finite Nuclei [J]. Phys Rev, 1990, C42: 1 981 - 1 988.
- [5] Muther H. Finite Nuclei Just a Droplet of Nuclear Matter [J]. Phys Rep, 1994, 242: 93- 101.
- [6] Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. Relativistic Mean Field Theory for Finite Nuclei [J]. Ann Phys, 1990, 198: 132- 179.
- [7] Sugahara Y, Toki H. Relativistic Mean-field Theory for Unstable Nuclei with Non-linear  $\sigma$  and  $\omega$  Terms [J]. Nucl Phys, 1994, A579: 557- 572.
- [8] Ren Z Z, Xu G O, Chen B Q *et al.* Structure of Halo Nuclei  $^{14}\text{Be}$  and  $^{32}\text{Ne}$  [J]. Phys Lett, 1995, B351: 11- 17.
- [9] Su R K, Long T, Zhang Y J *et al.* Thermodynamical

- Fluctuations of Meson Field for the Zimanyi-Moszkowski Model [J]. *Phys Rev*, 1997, C55: 2 373– 2 378.
- [10] Wang Z S, Ma Z Y, Zhuo Y Z. Running Coupling Constants in Walecka Model and Renormalization-group Equations [J]. *Phys Rev*, 1997, C55: 3 159– 3 162.
- [11] Shen H, Sugahara Y, Toki H. Relativistic Mean Field Approach with Density Dependent Couplings for Finite Nuclei [J]. *Phys Rev*, 1997, C55: 1 211– 1 217.
- [12] Engvik L, Osnes E, Hjorth-Jensen M *et al.* Asymmetric Nuclear Matter and Neutron Star Properties [J]. *AP J*, 1996, 469: 794– 813.
- [13] Ulrych S, Muther H. Relativistic Structure of the Nucleon Self-energy in Asymmetric Nuclei [J]. *Phys Rev*, 1998, C56: 1 788– 1 794.
- [14] Lalazissis G A, Konig J, Ring P. New Parametrization for the Lagrangian Density of Relativistic Mean Field Theory [J]. *Phys Rev*, 1997, C55: 540– 543.
- [15] Hirata D, Sumiyoshi K, Carlson B V *et al.* Triaxial Deformation of Unstable Nuclei in the Relativistic Mean Field Theory [J]. *Nucl Phys*, 1996, A609: 131– 146.
- [16] Ma Z Y, Speth J, Krewald S *et al.* Hypernuclei with Meson-exchange Hyperon-nucleon Interactions [J]. *Nucl Phys*, 1996, A608: 305– 315.
- [17] Ma Z Y, Toki H, Chen B Q *et al.* The Giant Dipole Resonance in Ar-isotopes in the Relativistic RPA [J]. *Prog Theor Phys*, 1997, 98: 917– 926.
- [18] Li G Q, Ko C M. Antikaon Flow in Heavy-ion Collisions Effects of Absorption and Mean Field Potential [J]. *Phys Rev*, 1996, C54: R2 159– 2 162.
- [19] Rashdan M. Elastic Scattering of a Halo Nucleus in the Relativistic Mean Field Theory [J]. *Phys Rev*, 1996, C54: 315– 318.
- [20] Shen H, Toki H, Oyamatsu K *et al.* Relativistic Equation of State of Nuclear Matter for Supernova and Neutron Star [J]. *Nucl Phys*, 1998, A637: 435– 450.
- [21] Shen H, Toki H, Oyamatsu K *et al.* Relativistic Equation of State of Nuclear Matter for Supernova Explosion [J]. *Prog Theor Phys*, 1998, 100: 1 013– 1 031.
- [22] Guichon P A M, Saito K, Rodionov E *et al.* The Role of Nucleon Structure in Finite Nuclei [J]. *Nucl Phys*, 1996, A601: 349– 379.
- [23] Li L, Cai C H, Ning P Z. Unconventional Medium Effect in K-nucleus Scattering [J]. *Nucl Phys*, 1998, A639: 493c– 496c.
- [24] Zimanyi J, Moszkowski S A. Nuclear Equation of State with Derivative Scalar Coupling [J]. *Phys Rev*, 1990, C42: 1 416 – 1 421.
- [25] Brockmann R, Toki H. Relativistic Density -dependent Hartree Approach for Finite Nuclei [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68: 3 408– 3 411.
- [26] Fuchs C, Lenske H, Wolter H H. Density Dependent Hadron Field Theory [J]. *Phys Rev*, 1995, C52: 3 043– 3 060.
- [27] Ineichen F, Weigel M K, Von-Eiff D. Nuclear Structure Calculations in the Density-dependent Relativistic Hartree Theory [J]. *Phys Rev*, 1996, C53: 2 158– 2 162.
- [28] Guichon P A M. A Possible Quark Mechanism for the Saturation of Nuclear Matter [J]. *Phys Lett*, 1988, B200: 235– 239.
- [29] Saito K, Tsushima K, Thomas A W. Variation of Hadron Masses in Finite Nuclei [J]. *Phys Rev*, 1997, C55: 2 637– 2 648.
- [30] Wang P, Su R K, Song H Q *et al.* Strange Hadronic Matter in a Modified Quark-meson Coupling Model [J]. *Nucl Phys*, 1999, A653: 166– 184.
- [31] Jin X M, Jennings B K. Change of MIT Bag Constant in Nuclear Medium and Implication for the EMC Effect [J]. *Phys Rev*, 1997, C55: 1 567– 1 570.
- [32] Muller H, Jennings B K. Critical Analysis of Quark-meson Coupling Models for Nuclear Matter and Finite Nuclei [J]. *Nucl Phys*, 1998, A640: 55– 76.
- [33] Toki H, Meyer U, Faessler A *et al.* Quark Mean Field Model for Nucleons in Nuclei [J]. *Phys Rev*, 1998, C58: 3 749– 3 752.
- [34] Shen H, Toki H. Quark Mean Field Model for Nuclear Matter and Finite Nuclei [J]. *Phys Rev*, 2000, C61: 045 205-1– 045 205-7.

## Progress on Relativistic Many-body Theory<sup>\*</sup>

SHEN Hong, LI Lei, NING Ping-zhi

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

**Abstract:** Relativistic many-body methods, which include the relativistic Brueckner-Hartree-Fock (RBHF) theory and the relativistic mean field (RMF) approach, were introduced, while their progress and application for nuclear matter and finite nuclei were presented. The open questions in this field and the trend in future were also discussed.

**Key words:** relativistic many-body theory; nuclear matter; finite nuclei

\* **Foundation item:** NSFC (19875026); The Project Sponsored by SRF for ROCS, SEM.