

文章编号: 1007-4627(2004)04-0355-03

# RMF 理论框架下用粒子数守恒方法处理对关联\*

郭建友<sup>1, 2, 3</sup>, 孟 杰<sup>1, 2</sup>, 张双全<sup>1, 2</sup>

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 北京大学物理学院, 北京 100871;

3 安徽大学物理系, 安徽 合肥 230039)

**摘 要:** 在相对论平均场理论框架下, 利用粒子数守恒方法处理对关联, 给出了具体的理论公式和数值细节; 并以<sup>24</sup>Ne 为例, 用该方法研究了它的基态和低激发态性质.

**关键词:** 相对论平均场理论; 粒子数守恒方法; 对关联

**中图分类号:** O412; O571.21 **文献标识码:** A

## 1 引言

相对论平均场(RMF)理论是核物理中最为成功的微观理论模型之一, 近年来得到了迅速发展和广泛应用. 它不仅很好地描述了稳定核的基态性质, 对于奇特核的描述也非常成功. 和非相对论平均场理论相比, RMF 理论更好地再现了核物质的饱和性质, 自然地给出了自旋轨道耦合势. 关于 RMF 理论的评述性文章可参阅文献[1, 2].

在 RMF 理论中, 介子场被处理成经典场, 核子之间不含两体相互作用. 为了描述非满壳核, 需要考虑对关联, 特别是对于滴线核, 对关联起着重要的作用. 通常, 对关联可用简单的 BCS 近似或一般的 Bogoliubov 准粒子变换处理. 简单的 BCS 近似能够很好地描述稳定核, 但对于奇特核, 它将导致非物理的费米气. 为了统一处理对关联和平均场, 文献[3]利用 Bogoliubov 准粒子变换方法处理对关联, 导出了相对论的 Hartree-Bogoliubov (RHB) 理论. 将 RHB 理论在坐标空间中求解, 即为相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov (RCHB) 理论<sup>[4]</sup>. RCHB 理论能统一地处理束缚态、连续谱以及它们之间的耦合, 成功地描述了稳定核和奇特核的基态性质, 特别是该理论给出了<sup>11</sup>Li 双中子晕的微观自洽描述和巨晕现象的预言<sup>[5, 6]</sup>.

尽管 BCS 近似和 Bogoliubov 变换能够很好地

描述原子核的基态性质, 但是它们存在着一些缺点, 如破坏了粒子数守恒, 只能近似处理堵塞效应等. 为了避免由于粒子数不守恒带来的问题, 文献[7]提出了粒子数守恒(PNC)的对关联处理方法. 该方法不仅保持粒子数守恒, 而且能自洽处理堵塞效应. 近年来, PNC 方法已被用来研究正常形变和超形变原子核的转动谱以及高 K 准粒子谱等<sup>[8]</sup>, 取得了较大的成功.

本文在 RMF 理论框架下, 利用 PNC 方法处理对关联, 给出具体的理论和数值细节, 并用该方法具体研究了<sup>24</sup>Ne 的基态和低激发态性质.

## 2 理论框架

在 RMF 理论框架下, 核子之间的相互作用通过交换  $\sigma$ ,  $\omega$  和  $\rho$  等介子以及光子来描述. 体系的 Lagrangian 可写为

$$\begin{aligned} \Lambda = & \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M)\psi + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - U(\sigma) - \\ & \frac{1}{4} \Omega^{\mu\nu} \Omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \mu_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu - \frac{1}{4} \mathbf{P}^{\mu\nu} \mathbf{P}_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} \mu_\rho^2 \boldsymbol{\rho}^\mu \boldsymbol{\rho}_\mu - \frac{1}{4} \Phi^{\mu\nu} \Phi_{\mu\nu} - \gamma_5 \bar{\psi} \sigma \psi - \\ & \gamma_5 \bar{\psi} \boldsymbol{\gamma}^\mu \boldsymbol{\psi} \omega_\mu - \gamma_5 \bar{\psi} \boldsymbol{\gamma}^\mu \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\rho}_\mu \tau - \bar{\psi} \boldsymbol{\gamma}^\mu \frac{1 - \tau_3}{2} \psi A_\mu, \quad (1) \end{aligned}$$

收稿日期: 2004 - 08 - 16;

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077407); 国家自然科学基金资助项目(10025522, 10221003); 中国博士后基金资助项目

作者简介: 郭建友(1969-), 男(汉族), 安徽舒城人, 博士后, 副教授, 从事核结构理论研究.

其中, 介子和电磁场张量分别为

$$\begin{cases} \Omega^{\mu\nu} = \partial^\mu \omega^\nu - \partial^\nu \omega^\mu \\ \mathbf{R}^{\mu\nu} = \partial^\mu \boldsymbol{\rho}^\nu - \partial^\nu \boldsymbol{\rho}^\mu - g_\rho \boldsymbol{\rho}^\mu \times \boldsymbol{\rho}^\nu \\ F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \end{cases}$$

从(1)式出发, 通过经典变分原理可导出核子运动的 Dirac 方程以及介子和光子运动的 Klein-Gordon 方程. 在平均场近似和无海近似下, 这套耦合方程可自洽迭代求解.

用 PNC 方法处理对关联, 包含对相互作用的哈密顿量为

$$H = H_{sp} + H_{pair}, \quad (2)$$

其中,  $H_{sp} = \sum_v \epsilon_v a_v^\dagger a_v$  是哈密顿量的单粒子部分,  $H_{pair} = -G \sum_{\mu\nu>0} a_\mu^\dagger a_\nu^\dagger a_\nu a_\mu$  是对力哈密顿量,  $G$  是平均对力强度. 单粒子能级和核子波函数通过 RMF 理论计算得到. 为了求解相应的 Schrödinger 方程, 需要构造多粒子组态, 对于一个偶数粒子系统 ( $N = 2n$ ), 多粒子组态的构造方法如下:

完全配对组态 (Seniority=0):

$$|\rho_1 \bar{\rho}_1 \cdots \rho_n \bar{\rho}_n\rangle = a_{\rho_1}^+ a_{\bar{\rho}_1}^+ \cdots a_{\rho_n}^+ a_{\bar{\rho}_n}^+ |0\rangle, \quad (3)$$

一对粒子拆散组态 (Seniority=2):

$$|\mu \bar{\nu} \rho_1 \bar{\rho}_1 \cdots \rho_{n-1} \bar{\rho}_{n-1}\rangle = a_\mu^+ a_{\bar{\nu}}^+ a_{\rho_1}^+ a_{\bar{\rho}_1}^+ \cdots a_{\rho_{n-1}}^+ a_{\bar{\rho}_{n-1}}^+ |0\rangle, \quad (4)$$

等. 对于奇  $A$  核和奇奇核, 构造方法会自动考虑进奇核子的堵塞. 对于轴对称形变核, 宇称  $\pi$ , Seniority 和总角动量在第三轴的投影  $K$  是好量子数, 对力哈密顿量的对角化可以分别在具有确定的  $\pi$ 、Seniority 和  $K$  的子空间中进行. 对角化对力哈密顿量后, 可给出各单粒子能级的占据几率, 得到新的平均场, 通过自洽迭代平均场和对场, 直至结果收敛到给定的精度.

### 3 数值细节和结果

下面以  $^{24}\text{Ne}$  为例, 给出 PNC 方法处理对关联的具体细节. 求解 RMF 理论的基包含了 14 个谐振子壳. 其中, 基的形变和振子频率分别取为  $\beta_0 = 0.28$ ,  $\hbar\omega_0 = 41A^{-1/3}$  MeV. 通过验证, 基的形变对计算结果影响很小. 相互作用参数组取为 NL3, 平均对力强度  $G_n$  和  $G_p$  由奇偶质量差确定. 为了利用 PNC 方法处理对关联, 需要构造多粒子组态. 对于  $^{24}\text{Ne}$  的中子, 单粒子能级如图 1 所示, 费米面在  $[202]5/2^+$  附近. 冻结离费米面较远的  $N=0, 1$  大壳, 并且不考虑能量为正的的非束缚能级, 用于 PNC 计算的是  $[220]1/2^+$  到  $[330]1/2^-$  之间的 7 条单粒子能级. 价核子在这 7 条能级上所有可能的占居为我们选择的组态. 组态选择好以后, 通过计算不同组态之间对力哈密顿量的矩阵元并对角化对力哈密顿量, 即可给出原子核的基态和激发态能量和波函数等.

表 1 列出了 RMF+PNC 方法对于  $^{24}\text{Ne}$  基态的计算结果. 从表 1 可以看出, 由于 RMF+PNC 方法计算考虑了对关联, 原子核的每核子结合能中包含了能对贡献, 从而使 RMF+PNC 计算的每核子结合能比 RMF 计算的结果大. 图 2 给出了对于  $^{24}\text{Ne}$ , RMF+PNC 计算的  $K=0^+$  激发谱. 其中,

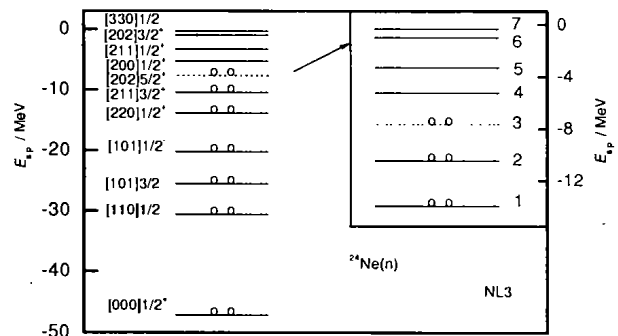


图 1 RMF 计算给出的  $^{24}\text{Ne}$  的中子单粒子能级

表 1  $^{24}\text{Ne}$  的基态每核子结合能、能对、方均根半径和形变\*

	$(E/A) / \text{MeV}$	$E_{\text{pair}} / \text{MeV}$	$R_n / \text{fm}$	$R_p / \text{fm}$	$R_m / \text{fm}$	$\beta_2$
Exp	7.993					0.410
RMF+PNC	8.079	7.372	2.984	2.768	2.896	0.190
RMF	7.869	0.000	2.994	2.780	2.907	0.280

\*  $E/A$  表示每核子结合能,  $E_{\text{pair}}$  表示能对,  $R_n$ ,  $R_p$  和  $R_m$  分别表示中子、质子和物质的方均根半径,  $\beta_2$  表示四极形变.

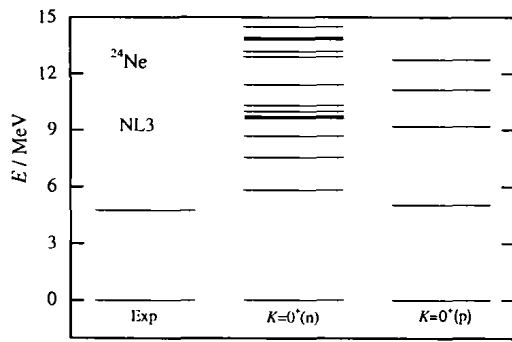


图 2 RMF+PNC 方法计算的 $^{24}\text{Ne}$ 的中子和质子激发谱  
中子和质子的第一  $0^+$  激发谱都与实验观测的  $0^+$  谱  
较为一致, 尤其是质子  $0^+$  谱与实验符合得更好一

些. 这表明, 实验上观测到的第一  $0^+$  激发可能是质子对激发.

## 4 结论

本文在 RMF 理论框架下, 利用 PNC 方法处理对关联, 计算了 $^{24}\text{Ne}$ 核的基态结合能、形变、中子和质子均方根半径. 计算结果表明, RMF+PNC 方法能够合理地描述 $^{24}\text{Ne}$ 核的基态性质, 计算出的每核子结合能与实验结果相符合. 同时, 我们也计算了 $^{24}\text{Ne}$ 的  $K=0^+$  激发谱, 得到了与实验一致的结果.

## 参 考 文 献:

- [1] Serot B D, Walecka J D. *Adv Nucl Phys*, 1986, **16**: 1.  
 [2] Ring P. *Prog Part Nucl Phys*, 1996, **37**: 193.  
 [3] Kucharek H, Ring P. *Z Phys* 1991, **A339**: 23.  
 [4] Meng J. *Nucl Phys*, 1998, **A635**: 3.  
 [5] Meng J, Ring P. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**: 3 963.  
 [6] Meng J, Ring P. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**: 460.  
 [7] Zeng J Y, Cheng T S. *Nucl Phys*, 1983, **A405**: 1.  
 [8] Zeng Y J, Liu S X, Gong L X, *et al.* *Phys Rev*, 2002, **C65**: 044307.

# Particle Number Conserving Treatment of Pairing in Relativistic Mean Field Theory\*

GUO Jian-you<sup>1, 2, 3</sup>, MENG Jie<sup>1, 2</sup>, ZHANG Shuang-quan<sup>1, 2</sup>

(1 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion  
Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

2 *School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

3 *Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039, China)*

**Abstract:** Particle-number conserving method is adopted to treat the pairing correlations in the relativistic mean-field theory. The formalism and numerical techniques are presented. As an example, the ground state properties and low-lying excited states in  $^{24}\text{Ne}$  are studied.

**Key words:** relativistic mean-field theory; particle-number conserving method; pairing correlation

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program (G2000077407); National Natural Science Foundation of China (10025522, 10221003); Special Program of Higher Education Science Foundation of China