

RMF+SLAP 方法对碳同位素链性质的研究*

王培伟¹ 陈洪^{1,3;1)} 李加兴¹ 刘朗² 孟杰^{2,3}

1(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

2(北京大学物理学院 北京 100871)

3(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 在相对论平均场理论框架下,用保持粒子数守恒的类壳模型方法处理对关联,计算了C同位素链的基态性质,并与可用的实验值进行了比较.

关键词 C同位素 相对论平均场 类壳模型方法 对关联

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,并广泛应用于描述稳定核和奇特核性质.在RMT理论中,介子场被处理成经典场,与非相对论平均场理论相比较,自然地给出了自旋自由度及自旋-轨道耦合相互作用.关于相对论平均场理论的评述性文章可以参阅文献[1, 2].然而,对非满壳核,需要考虑对关联,特别是滴线核,对关联起着重要作用.对关联表现在原子核质量,丰度,能谱以及转动惯量的奇偶质量差等方面.通常,对关联常采用BCS近似或一般Bogoliubov准粒子变换处理^[3],并由此导出了相对论连续谱Hartree-Bogoliubov(RCHB)理论^[4].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,特别是给出了中子晕的自洽描述,并预言了巨晕现象^[4, 5].尽管BCS和Bogoliubov变换能很好地描述原子核的基态性质,但是它们存在着破坏粒子数守恒,只能近似处理堵塞效应等不足.采用类壳模型方法(SLAP)处理对关联,不仅能保持粒子数守恒,而且能自洽地处理堵塞效应^[6].在RMF理论框架下,利用SLAP方法处理对关联,已成功地再现了Ne同位素链的基态性质^[7].本文在RMF框架下,采用粒子数守恒的类壳模型方法,即RMF+SLAP方法研究了碳同位素链的基态性质.

在相对论平均场理论框架下,核子-核子之间的相互作用通过交换 σ , ω , 和 ρ 介子来描述.体系的Lagrangian密度为

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\psi}(i\gamma\partial_{\mu}-M)\psi + \frac{1}{2}\partial^{\nu}\sigma\partial_{\nu}\sigma - \frac{1}{2}m_{\sigma}^2\sigma^2 - \\ & \frac{1}{3}g_2\sigma^3 - \frac{1}{4}g_3\sigma^4 - g_{\sigma}\bar{\psi}\sigma\psi - \frac{1}{4}\Omega^{\mu\nu}\Omega_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2}m_{\omega}^2\omega^{\mu}\omega_{\mu} - g_{\omega}\bar{\psi}\gamma^{\mu}\psi\omega_{\mu} + \frac{1}{4}g_4^2(\omega^{\mu}\omega_{\mu}) - \\ & \frac{1}{4}R^{\mu\nu}R_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{\rho}^2\rho^{\mu}\rho_{\mu} - g_{\rho}\bar{\psi}\gamma^{\mu}\tau\psi\rho_{\mu} - \\ & \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - e\bar{\psi}\gamma^{\mu}\frac{1-\tau_3}{2}A_{\mu}\psi, \end{aligned} \quad (1)$$

其中各种符号的物理意义与文献[3, 7, 8]相同,矢量介子与电磁场张量定义如下:

$$\begin{cases} \Omega^{uv} = \partial^u \omega^v - \partial^v \omega^u, \\ R^{\mu\nu} = \partial^{\mu} \rho^{\nu} - \partial^{\nu} \rho^{\mu}, \\ F^{\mu\nu} = \partial^{\mu} A^{\nu} - \partial^{\nu} A^{\mu}. \end{cases} \quad (2)$$

从式(1)出发,由经典的变分原理可以得到核子的Dirac方程以及介子,光子运动的Klein-Gordon方程.在平均场近似和无海近似下,这套耦合方程可以自洽迭代求解.用SLAP方法处理对关联,包含对相互作用的Hamilton量为

$$H = \sum_{\mu} \epsilon_{\nu} a_{\nu}^{\dagger} a_{\nu} - G \sum_{\substack{\mu \neq \nu \\ \mu\nu > 0}} a_{\mu}^{\dagger} a_{\mu}^{\dagger} a_{\nu} a_{\nu}, \quad (3)$$

其中G是平均对力强度,单粒子能级 ϵ_{ν} 和核子波函数由RMF理论计算得到.利用SLAP方法把上式的Hamilton量在多粒子组态空间中对角化.对偶数个粒子的系统($N=2n$),相应的多粒子组态空间为

* 国家自然科学基金(10575083,10435080)资助

1) E-mail: chenhs@swu.edu.cn

(a) 完全配对的组态 (seniority $s=0$)

$$|\rho_1 \bar{\rho}_1 \cdots \rho_n \bar{\rho}_n\rangle = a_{\rho_1}^\dagger a_{\bar{\rho}_1} \cdots a_{\rho_n}^\dagger a_{\bar{\rho}_n} |0\rangle, \quad (4)$$

(b) 一对粒子被拆散的组态 (seniority $s=2$)

$$|\mu \bar{\nu} \rho_1 \bar{\rho}_1 \cdots \rho_{n-1} \bar{\rho}_{n-1}\rangle = a_\mu^\dagger a_{\bar{\nu}}^\dagger a_{\rho_1}^\dagger a_{\bar{\rho}_1} \cdots a_{\rho_{n-1}}^\dagger a_{\bar{\rho}_{n-1}} |0\rangle \quad (5)$$

等. 对于奇 A 核和奇奇核, 多粒子组态空间构造方法中自动地考虑进奇 A 核的堵塞效应. 考虑轴对称系统, 宇称 π , 总角动量第三分量 Ω_i , 同位旋 t_i 是好量子数. 在多粒子组态空间中对角化对力 Hamilton 量 (3), 可以得到单粒子能级占据几率, 进而得到新的平均场, 通过自洽迭代求解, 直至收敛到给定的精度.

计算中费米子和波色子场展开的谐振子基最大壳层为 14, 基的最大截断能量为 $99\hbar\omega_0$, 选取合适的谐振子基的形变使体系处于最低的能量状态. 截断能量 E_c 取为 50MeV, 通过符合实验值的奇偶质量差来确定平均对力强度 G_n . 奇偶质量差用以下公式表示:

$$\Delta_n = \frac{1}{2}[B(Z, N-1) + B(Z, N+1)] - B(Z, N). \quad (6)$$

图1是截断能量为 50MeV 时, RMF+SLAP 计算得到的 C 同位素链的奇偶质量差 (○) 与实验值 (●) 的比较.

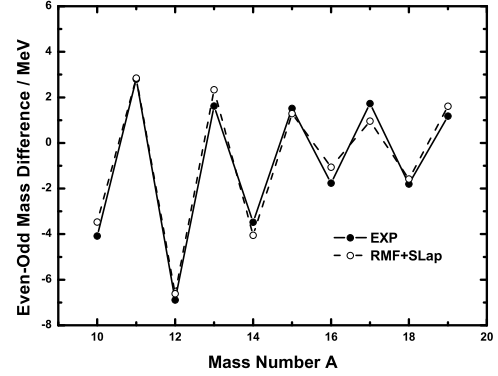


图1 截断能量为 50MeV 时, RMF+SLAP 计算得到的 C 同位素链的奇偶质量差 (○) 与实验值 (●) 的比较

表1是由图1拟和得到平均对力强度后, 对 C 同位素链进行计算得到的结果. 并且列出了质量数, 中子数, 单核子结合能的实验值^[9], 单核子结合能, 中子, 质子, 物质, 电荷半径和中子, 质子, 总的四极形变. 由表看出, RMF+SLAP 计算给出了 C 同位素单核子结合能很好的描述.

表1 C 同位素的质量数, 中子数, 单核子结合能实验值, 单核子结合能, 中子, 质子, 物质和电荷半径及中子, 质子和总的四极形变

A	N	$E/A_{(\text{exp})}$	E/A	R_n	R_p	R_m	R_c	β_{2n}	β_{2p}	β_{2m}
9	3	-4.337	-4.839	2.134	2.688	2.517	2.804	0.4548	0.3471	0.3830
10	4	-6.032	-6.280	2.349	2.565	2.481	2.687	0.5133	0.3551	0.4183
11	5	-6.676	-6.829	2.322	2.427	2.380	2.555	0.3178	0.2449	0.2780
12	6	-7.680	-7.760	2.418	2.346	2.382	2.479	0.0534	0.0380	0.0457
13	7	-7.470	-7.530	2.452	2.351	2.406	2.483	0.001	0.0007	0.0009
14	8	-7.520	-7.666	2.563	2.377	2.485	2.508	0.002	0.0003	0.0014
15	9	-7.100	-7.244	2.754	2.398	2.617	2.527	0.3147	0.1565	0.2515
16	10	-6.923	-7.035	2.917	2.425	2.743	2.554	0.5083	0.2447	0.4094
17	11	-6.558	-6.726	2.991	2.445	2.811	2.573	0.5371	0.2757	0.4448
18	12	-6.426	-6.558	3.136	2.459	2.927	2.586	0.5194	0.2756	0.4381
19	13	-6.118	-6.241	3.244	2.462	3.019	2.589	0.4156	0.2469	0.3623
20	14	-5.959	-6.118	3.394	2.465	3.144	2.592	0.3492	0.2099	0.3074

图2是 RMF+SLAP 方法计算得到的 ^{16}C 的中子的单粒子能级占据几率 (A) 和无对关联时中子的单粒子占据几率 (B), 其中 $[220]1/2^+$ 以上的单粒子能级占据几率都扩大了 10 倍. 这儿, $[220]1/2^+$ 是 ^{16}C 的费米面. 由图得出, 在没有考虑对关联时, 一对中子完全占据一条单粒子能级, 考虑对关联时, $[220]1/2^+$ 以上的能级被部分的占据, 相应的费米面以下的能级占据几率减少.

图3是 RMF+SLAP 方法计算得到的 C 同位素链质子 (○), 中子 (●) 半径随质量数 A 的变化. 由图上看

出, C 同位素链质子的半径基本不变化, 而中子半径随着中子数的增加而变大.

本文在相对论 (RMF) 理论框架下, 利用保持粒子数守恒的类壳模型方法, 即 RMF+SLAP 方法计算了 C 同位素单核子结合能, 中子, 质子, 物质, 电荷半径, 中子, 质子, 总的四极形变, 以及质子, 中子半径随质量数的变化. 结果表明, RMF+SLAP 方法合理地描述了 C 同位素的基态性质, 计算得到的每核子结合能与实验值相符合.

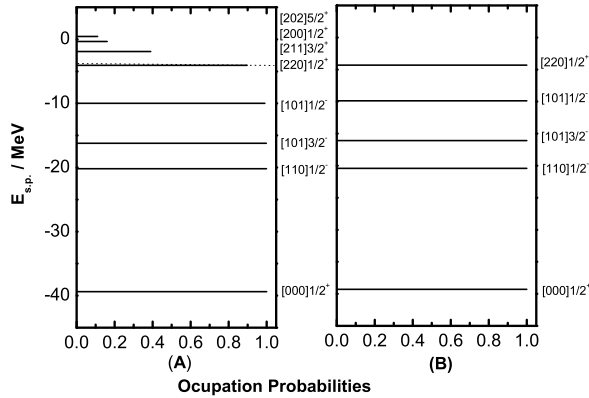


图 2 ^{16}C 的中子的单粒子能级占据几率, 其中 [220]1/2⁺ 以上的单粒子能级占据几率都扩大了 10 倍, (A) RMF+SLAP 的结果; (B) RMF 的结果

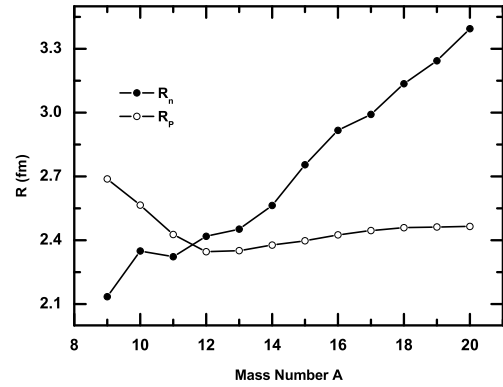


图 3 RMF+SLAP 方法计算得到的 C 同位素链质子 (○), 中子 (●) 半径随质量数 A 的变化

作者感谢北京大学物理学院孟杰教授, 刘郎同学的有益讨论。

参考文献 (References)

- 1 Serot B D, Walecka J D. *Adv. Nucl. Phys.*, 1986, **16**: 1
- 2 Reinhard P G. *Rep. Prog. Phys.*, 1989, **52**: 439
- 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**: 3963; 1998, **80**: 460
- 6 ZENG J Y, CHENG T S. *Nucl. Phys.*, 1983, **A405**: 1
- 7 MENG J, GUO J Y, LIU L et al. *Frontiers of Physics*, 2006, **1**: 38
- 8 Ring P. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 1996, **37**: 193
- 9 Audi G, Wapstra A H, Thibault C. *Nucl. Phys.*, 2001, **A729**: 337

Properties of C Isotopes in RMF+SLAP Approach*

WANG Pei-Wei¹ CHEN Hong^{1,2;1)} LI Jia-Xing¹ LIU Lang² MENG Jie^{2,3}

¹ (School of Physics Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

² (School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

³ (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract Shell-model-like approach (SLAP) is adopted to treat the pairing correlations in relativistic mean field theory (MFT). The ground state properties of C isotopes are studied and the obtained results are compared with available data.

Key words C isotopes, relativistic mean-field theory, shell-model-like approach, pairing correlation

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10575083, 10435080)

1) E-mail: chenhs@swu.edu.cn