

适用于轻核区的相对论平均场理论新参数*

孙保元¹ 孟杰^{1,2,3;1)}

1(北京大学物理学院 北京 100871)

2(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

3(兰州重离子加速器国家实验室核理论中心 兰州 730000)

摘要 考虑对关联和微观质心修正效应, 适用于轻核区的两组相对论平均场理论新参数被提出: 包含 σ , ω 介子非线性自耦合项的 NLLN 和包含密度依赖的介子-核子耦合项的 DDLN. 对于 $Z \leq 8$ 轻核区 β 稳定线附近以及远离 β 稳定线的原子核, 新参数对结合能等基态性质给出了比已有参数更好的描述. 同时, 新参数给出 O 同位素的中子滴线核为 ^{26}O , ^{24}O 中新幻数 $N = 16$ 的出现也能够被合理解释.

关键词 相对论平均场理论 对关联 微观质心修正 轻核 有效相互作用 结合能 壳层结构

近年来, 随着放射性核束技术的发展, 使得一些极端条件下的原子核结构的研究成为可能. 在轻核区, 晕核^[1]、核内集团结构^[2]、壳层结构变化^[3]等一些新的物理现象被相继发现. 在理论上对这些新现象进行研究, 无疑有着重要的意义.

建立在相对论核多体量子场论基础上的相对论平均场(Relativistic Mean Field, 以下简称 RMF)理论^[4-6], 在解决原子核多体问题方面取得了巨大的成功. 但是在轻核区, 平均势场不一定是一个很好的近似; 同时, 现有 RMF 理论不能对较轻的原子核给出很好的描述. 特别地, 对于 O 同位素, 几乎所有 RMF 参数都不能给出实验上的中子滴线结果.

为了描述开壳核的基态性质, 对关联效应必须被考虑. Relativistic Hartree-Bogoliubov(RHB)理论^[7-9]通过准粒子的引入, 统一自洽地处理了平均场与对关联的作用, 成功解释了轻核中子晕等现象^[10]. 另一方面, 对于轻核, 质心修正效应也变得更加重要. 由于轻核中平均势场作用减弱, 单粒子属性影响更加显著, 经验修正方法不能给出合适的结合能描述, 因此必须采用微观的质心修正方法^[11].

本文将在 RMF 理论中, 考虑对关联和微观质心修正效应, 提出适用于轻核区的分别包含 σ , ω 介子非线性自耦合项的新参数 NLLN 和包含密度依赖的介子-核子耦合项的新参数 DDLN, 并利用新参数计算

$Z \leq 8$ 原子核的基态性质, 与实验值以及现有参数计算结果进行比较.

RMF 理论的出发点是含有重子和介子自由度的有效拉氏量密度. 重子被看成 Dirac 粒子, 并通过交换介子和光子传递相互作用. 描述由核子、介子组成的核多体束缚系统的一般拉氏量密度及其参数的定义可参看文献[12]. 对于非线性 RMF 理论, σ 和 ω 介子的自耦合项为

$$U(\sigma) = \frac{1}{3}g_2\sigma^3 + \frac{1}{4}g_3\sigma^4, \quad U(\omega) = \frac{1}{4}c_3(\omega^\mu\omega_\mu)^2. \quad (1)$$

在密度依赖的 RMF 理论框架下, 以上两项被取为零, 而介子-核子相互作用变成与物质密度相关. 在这里, 我们采用已有文献[12]的做法, 假设介子-核子耦合系数为矢量密度 $\rho_v = \sqrt{j_\mu j^\mu}$ 的函数, 其中 $j_\mu = \bar{\psi}\gamma_\mu\psi$. 对于 σ 和 ω 介子, 耦合系数取为

$$g_i(\rho_v) = g_i(\rho_{\text{sat}})f_i(x) \quad \text{for } i = \sigma, \omega, \quad (2)$$

其中 $f_i(x) = a_i \frac{1+b_i(x+d_i)^2}{1+c_i(x+d_i)^2}$ 是 $x = \rho_v/\rho_{\text{sat}}$ 的函数, ρ_{sat} 是对称核物质在饱和点的重子密度值. 需要注意的是, $f_i(x)$ 有 5 个约束条件: $f_i(1) = 1$, $f'_\sigma(1) = f'_\omega(1)$ 和 $f'_i(0) = 0$, 因此 $f_i(x)$ 中实际只有 3 个自由参数. 对于 ρ 介子, 耦合系数的密度依赖取为指数形式

$$g_\rho(\rho_v) = g_\rho(\rho_{\text{sat}})\exp[-a_\rho(x-1)]. \quad (3)$$

对拉氏量密度进行变分, 就可以得到核子与介子场的

* 国家自然科学基金(10435010, 10575083, 10221003)资助

1) E-mail: mengj@pku.edu.cn

耦合运动方程, 具体推导过程可参看文献[6, 12].

对关联效应通过RHB理论^[7]被考虑. 在参数调试过程中, 为了提高调试效率, 采用了BCS近似来处理对力, 所用的有效对能隙 Δ 由RCHB^[8, 9]程序计算得到.

在平均场模型中, 由于系统质心被局限在平均场势场之内, 原子核平移对称性被破坏, 从而引起对结合能的多余贡献, 因此需要对结果做修正. 在RMF理论中, 目前有两种常用的经验修正方法: (1)

$$E_{c.m.}^{\text{osc}} = -\frac{3}{4}41A^{-1/3}\text{MeV}, (2) E_{c.m.}^{\text{fit}} \approx -17.2A^{-0.2}\text{MeV}.$$

采用第一种修正的RMF参数组有TM1^[14], NL3^[15]等, 采用第二种的有NL1^[16], NL2^[17]等. 对于轻核, 质心修正效应更加重要, 经验修正公式不能给出合适的结合能描述, 将采用更微观的修正方法^[11]:

$$E_{c.m.}^{\text{mic}} = -\frac{\langle P_{c.m.}^2 \rangle}{2MA}, (4)$$

其中 $P_{c.m.}$ 是原子核的总动量. 目前采用微观质心修正的RMF参数组有TM2^[14], PK1^[12], PKDD^[12], DD-ME1^[18], DD-ME2^[19]等. 在实际的计算过程中, 由于数值求解的困难, 微观质心修正一般在自洽求解过程

之后单独扣除.

我们的目标是提供适用于轻核区的RMF理论新参数, 数值调试方法可参看^[12]. 核子、 ω 和 ρ 介子质量固定取为实验值: $M = 938.9\text{MeV}$, $m_\omega = 783\text{MeV}$, $m_\rho = 763\text{MeV}$, 其他参数均自由可调. 将 ${}^4\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{12}\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{18}\text{C}$, ${}^{22}\text{C}$, ${}^{14}\text{O}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{22}\text{O}$, ${}^{24}\text{O}$ 的结合能实验值作为输入量, 经调试得到非线性RMF参数NLLN和密度依赖RMF参数DDLN(见表1,2).

表1 非线性RMF参数NLLN和密度依赖RMF参数DDLN

	NLLN	DDLN
m_σ/MeV	528.3428	550.6399
g_σ	11.5415	10.5447
g_ω	14.8198	13.0129
g_ρ	4.9914	4.1146
g_2/fm^{-1}	-2.7690	0
g_3	10.9524	0
c_3	99.2522	0

表2 DDLN的密度相关核子-介子耦合参数

Meson i	a_i	b_i	c_i	d_i
σ	1.379700	1.053333	1.633446	0.451738
ω	1.393423	0.656772	1.077622	0.556168
ρ	0.262647			

表3 利用参数组NLLN和DDLN计算得到的O同位素的总结合能值(单位MeV), 并与实验值^[20]以及参数组NL2^[17], NL3^[15], TM2^[14], PK1^[12], TW99^[12], DD-ME2^[19], PKDD^[12]的计算结果相比较, 其中实验方差定义为 $\Delta^2 = \frac{\sum_i (E_i^{\text{expt}} - E_i^{\text{calc}})^2}{N}$, $\delta^2 = \frac{\sum_i (E_i^{\text{expt}} - E_i^{\text{calc}})^2 / (E_i^{\text{expt}})^2}{N}$

Nucleus	Expt.	NLLN	DDLN	NL2	NL3	TM2	PK1	TW99	DD-ME2	PKDD
${}^{12}\text{O}$	-58.549	-58.164	-56.775	-53.252	-63.600	-60.089	-60.551	-60.091	-58.042	-57.583
${}^{14}\text{O}$	-98.732	-99.453	-99.460	-91.969	-100.313	-99.299	-98.479	-99.701	-98.156	-97.975
${}^{16}\text{O}$	-127.619	-127.088	-127.301	-124.232	-128.817	-126.907	-128.102	-129.159	-128.027	-127.809
${}^{18}\text{O}$	-139.806	-142.064	-140.496	-136.426	-142.130	-141.903	-142.521	-142.475	-141.166	-140.977
${}^{20}\text{O}$	-151.370	-153.771	-151.370	-145.101	-153.412	-153.954	-153.641	-153.304	-151.793	-151.943
${}^{22}\text{O}$	-162.026	-163.676	-160.769	-151.403	-163.396	-164.414	-162.767	-162.736	-160.912	-161.484
${}^{24}\text{O}$	-168.382	-168.315	-168.387	-155.668	-171.723	-170.219	-169.624	-170.071	-168.301	-168.537
${}^{26}\text{O}$	-167.882	-168.645	-168.664	-157.622	-175.999	-172.575	-173.438	-171.668	-170.395	-170.747
${}^{28}\text{O}$	-165.900	-168.301	-168.338	-158.216	-179.904	-174.290	-176.247	-172.670	-172.018	-172.560
Δ		1.5234	1.1733	7.9917	5.9072	3.5865	4.1747	2.9828	2.3040	2.4972
δ		0.0103	0.0120	0.0594	0.0449	0.0234	0.0276	0.0204	0.0143	0.0161

利用新参数NLLN和DDLN, 使用RCHB程序对O同位素链偶偶核进行了计算, 计算采用球形核近似, 结果见表3. 从表中可以看出, 新参数组对结合能的描述更加精确, 结合能的实验方差值相比其他参数有显著的减小, 对其他 $Z \leq 8$ 同位素链的考查也得到了相同的结论. 同时值得注意的是, 新参数NLLN和DDLN均给出 ${}^{28}\text{O}$ 不再束缚, 而其他参数得到的结果仍然是束缚的. 由于对关联效应, 新参数给出 ${}^{26}\text{O}$ 仍然是束缚的, 由此给出O同位素的中子滴线核为 ${}^{26}\text{O}$. 进一步考查表明, 对关联和质心修正效应对轻核结果影

响很大, 在轻的开壳核中对关联对结合能约有5%的贡献, 而质心修正在轻核区的影响则可达到10%. 同时计算得出, 微观质心修正与经验修正方法相比, 对一些核会有约1—5MeV的差别. 通过用RCHB理论自洽计算对能和使用微观的质心修正方法, 可以得到对结合能更好的描述.

实验表明^[21], 在丰中子的轻奇特核中, 由于自旋轨道劈裂的减小, 幻数 $N = 8, 20$ 可能消失, 而新幻数 $N = 6, 16$ 可能出现. 图1给出了各参数利用RCHB程序计算得到的 ${}^{24}\text{O}$ 正则基下的单粒子能级分布. 可以

看出, 对中子能级, NLLN和DDLN参数给出比其他参数更大的 $2s_{1/2}$ - $1d_{3/2}$ 劈裂, 而 $1d_{3/2}$ - $2p_{3/2}$ 劈裂则减小. 由此导致在O中子滴线核中幻数 $N = 20$ 消失而 $N = 16$ 成为了新的幻数, 新参数计算所得与实验结果^[3]更好地符合.

作为总结, 考虑对关联和微观质心修正效应的新参数NLLN和DDLN比已有参数更好的描述了 $Z \leq 8$ 轻核的基态性质. 同时, 两组新参数给出了O的中子滴线核为 ^{26}O , 有助于从理论上解释O同位素的中子滴线问题. 此外, 新参数中 ^{24}O 中子能级劈裂的变化更明显揭示了O中子滴线核中新幻数 $N = 16$ 的出现.

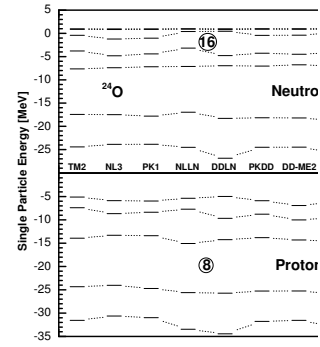


图1 利用新参数NLLN和DDLN计算得到的 ^{24}O 正则基下的单粒子能级分布并与其他参数结果的比较

参考文献(References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Freer M, Angélique J C, Axelsson L et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 1383
- 3 Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 5493
- 4 Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys., 1986, **16**: 1
- 5 Reinhard P G. Rep. Prog. Phys., 1989, **52**: 439
- 6 Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**: 193
- 7 Kucharek H, Ring P. Z. Phys., 1991, **A339**: 23—35
- 8 MENG J. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 3—42
- 9 MENG J, Toki H, ZHOU S G et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 2006, **57**: 470—563
- 10 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 3963
- 11 Bender M, Rutz K, Reinhard P G et al. Eur. Phys. J., 2000, **A7**: 467—478
- 12 LONG W H, MENG J, Giai N V et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034319
- 13 Typel S, Wolter H H. Nucl. Phys., 1999, **A656**: 331—364
- 14 Sugahara Y, Toki H. Nucl. Phys., 1994, **A579**: 557—572
- 15 Lalazissis G A, König J, Ring P. Phys. Rev., 1997, **C55**: 540
- 16 Reinhard P G, Rufa M, Maruhn J et al. Z. Phys., 1986, **A323**: 13—25
- 17 Lee S J, Fink J et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**: 2916
- 18 Nikšić T, Vretenar D, Finelli P et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 024306
- 19 Lalazissis G A, Nikšić T, Vretenar D et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 024312
- 20 Audi G, Wapstra A H, Thibault C. Nucl. Phys., 2003, **A729**: 337—676
- 21 Jonson B. Phys. Rep., 2004, **389**: 1—59

New Relativistic Mean Field Interactions for Light Nuclei*

SUN Bao-Yuan¹ MENG Jie^{1,2,3,1)}

¹(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

²(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

Abstract With pairing correlations and microscopic center-of-mass correction considered, new parameter sets for the Lagrangian density in the relativistic mean field (RMF) theory, NLLN with nonlinear σ - and ω -meson self-coupling and DDLN with the density-dependent meson-nucleon coupling are proposed for light nuclei. They are able to provide an excellent description for the properties of the $Z \leq 8$ nuclei in and far from the valley of β stability. The neutron drip line nucleus ^{26}O for Oxygen isotopes is obtained in new parameter sets. In addition new magic number $N = 16$ in ^{24}O can be well explained in new frame.

Key words relativistic mean field theory, pairing correlation, microscopic center-of-mass correction, light nuclei, effective interaction, binding energy, shell structure

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10435010, 10575083, 10221003)

1) E-mail: mengj@pku.edu.cn