

相对论类壳模型方法对轻核中的 α 集团现象的研究*

刘朗¹ 王培伟² 陈洪² 孟杰^{1,2,3,4,1)}

1(北京大学物理学院 北京 100871)

2(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

3(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

4(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 利用相对论类壳模型方法(RMF+SLAP),研究了包含对关联情况下,轻核⁸Be, ¹²C, ¹⁶O, ²⁰Ne中的可能出现的 α 集团效应.结果很好地再现了轻核的 α 集团结构.与没有考虑对关联的情形相比,对关联可以使原子核基态性质发生改变,导致不同的 α 集团结构.

关键词 相对论平均场理论 类壳模型方法 对关联 α 集团

相对论平均场理论^[1]成功地描述了稳定核^[2, 3]以及远离稳定线原子核许多奇特的核物理现象^[4, 5].相对论理论很好地再现了核物质的饱和性^[6],给出超形变全同带^[7]和中子晕的新解释^[8],预言了近中子滴线原子核的巨中子晕现象^[9],自动给出了自旋轨道势,给出赝自旋对称性^[10, 11]的合理解释^[12-14],预言反核子谱的自旋对称性^[15],很好地描述了磁转动^[16]和集体激发^[17],等等.

核子-核子之间的对关联在原子核的诸多性质中,如结合能,奇偶效应,单粒子能级占据几率,电磁跃迁,集体运动低级发能谱,转动惯量和晕现象等,扮演重要角色.文献[18]中,在相对论平均场理论框架下,用严格保持粒子数守恒的类壳模型方法^[19](SLAP方法)处理对关联(以下称RMF+SLAP方法),并把经过RMF+SLAP方法得到的核子密度重新代入耦合的核子-介子方程进行自洽迭代求解,不仅可以给出原子核基态性质的很好描述^[18, 20],而且由于采用了SLAP方法,还提供了描述原子核激发态性质的基础^[18].

α 集团结构普遍存在于轻核区,相对论平均场理论在不考虑对关联的情况下对轻核区的 α 集团结构给出了很好的描述^[21],但由于对关联对轻核的影响很大,有必要在研究轻核区的 α 集团结构时引入对力.我们利用文献[18, 20]发展的RMF+SLAP方法,研究轻核区原子核 α 集团结构.

相对论平均场理论中,核子之间通过交换 σ , ω , ρ 等介子和光子来提供相互作用.由Euler-Lagrange方程,通过对Lagrange密度作变分可得到描述核子运动的Dirac方程和介子以及光子场的Klein-Gordon方程.基于求解上述两个耦合方程得到的核子波函数和能量,构造了多粒子组态空间,并把包含单粒子能量和对相互作用的Hamiltonian在这个多粒子组态空间对角化,这样就能得到原子核体系的对能,以及激发态.其中,体系的Hamiltonian如下:

$$H = \sum_{\nu} \epsilon_{\nu} a_{\nu}^{\dagger} a_{\nu} - G \sum_{\substack{\mu \neq \nu \\ \mu, \nu > 0}} a_{\mu}^{\dagger} a_{\mu}^{\dagger} a_{\nu} a_{\nu}, \quad (1)$$

G 是平均对力强度,由相邻原子核的奇偶质量差决定.相对论类壳模型的具体理论细节参考文献[18, 20].

我们利用RMF+SLAP方法计算了⁸Be, ¹²C, ¹⁶O, ²⁰Ne原子核,基的主壳层数取为14,选取正确考虑微观质心修正的PK1参数组^[22].组态截断能量是50MeV.对于每一个原子核我们分别在不同的基矢形变下进行计算,以便得到不同四极形变下的能量局域极小点,同时对于⁸Be, ¹²C原子核,我们分别进行了不考虑对力和考虑对力的计算.具体理论细节参考文献[18, 20].

对于⁸Be原子核,基矢形变 $\beta_0=1.20$,分别考虑和
不考虑对力进行了计算.对于不考虑对力的情况,核

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

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

子集中分布在两个区域,以这两个区域的中心为原点,对密度作积分,在积分半径约为1.8fm时,核子数为4个,这说明出现了 α 集团.这个结论与文献[21]一致.考虑对力后,密度分布并没有发生显著改变, ^8Be 原子核仍然有两个 α 集团,这两个 α 粒子呈链式排布.

对 ^{12}C ,基矢形变 β_0 分别取为-0.30, 0, 2.63,同样考虑和不考虑对关联进行了计算,结果如下表.我们发现在 $\beta_0 = -0.30$ 和2.63时,是否考虑对关联对结果的影响只出现在结合能上,对 ^{12}C 原子核的其他性质,比如半径,四极形变并没有大的影响.但是在基矢形变为0时情况不同,考虑了对力后 ^{12}C 原子核从球形变成了扁椭圆形.从密度分布来看,考虑了对力后, ^{12}C 原子核从没有 α 集团变为出现了 α 集团,而且3个 α 粒子呈正三角形排列.

我们还计算了 ^{16}O 和 ^{20}Ne 原子核,在考虑对关联后,当基矢形变 $\beta_0=2.70$ 时, ^{16}O 原子核仍然能够出现4个 α 集团的链式结构,但是 ^{20}Ne 原子核不论基矢形变多少已经不能出现 α 集团的链式结构.

综上,我们发现相对论类壳模型方法能够描述 ^8Be , ^{12}C 等轻核的 α 集团结构,这说明在考虑轻核 α 集团结构时,RMF+SLAP不失为一种有效的手段.由于对关联效应在轻核中影响较大,研究原子核四级形变时正确考虑对关联尤为重要.通过对 ^{12}C 的理论计

算很好的说明了这一问题.轻核中 α 集团处于链式结构通常具有相当大的四极形变和较小的结合能,当 α 粒子数目大于等于5个时,原子核不再具有 α 集团的链式结构.

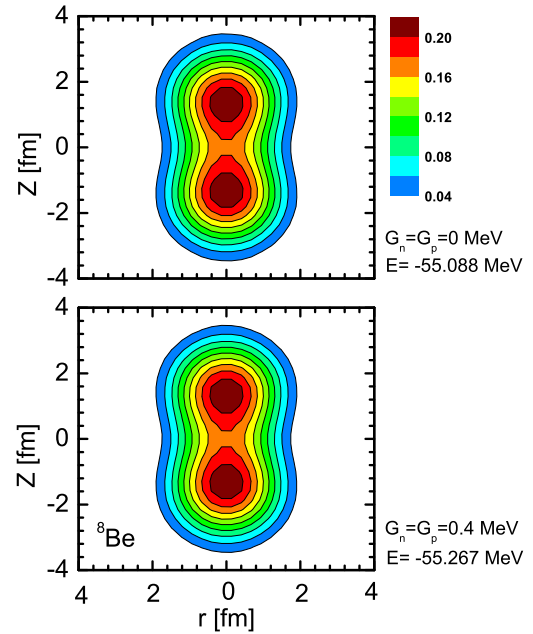


图1 RMF+SLAP 分别考虑和不考虑对力得到的 ^8Be 原子核密度分布

表1 分别列出了 ^{12}C 在不同基矢形变下,分别考虑和不考虑对关联得到的总结合能,单核子结合能,中子,质子,物质,半径和中子,质子,总的四极形变与实验值^[23]的比较.

β_0	G	E	E/A	R_n	R_p	R_m	β_{2n}	β_{2p}	β_{2m}
-0.30	0	-89.58	-7.46	2.34	2.36	2.35	-0.28	-0.29	-0.28
	0.4	-94.53	-7.88	2.37	2.39	2.38	-0.36	-0.39	-0.37
0	0	-89.48	-7.46	2.30	2.32	2.31	0.00	0.00	0.00
	0.4	-94.78	-7.91	2.37	2.39	2.38	-0.36	-0.37	-0.38
2.63	0	-75.95	-6.33	3.10	3.11	3.11	2.25	2.24	2.25
	0.4	-76.84	-6.40	3.12	3.13	3.12	3.26	3.26	3.26
EXP		-92.16	-7.68						0.58

参考文献(References)

- Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys., 1986, **16**: 1
- Reinhard P G. Rep. Prog. Phys., 1989, **52**: 439
- Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**: 193
- MENG J. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 3
- MENG J, Toki H, ZHOU S G et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 2006, **57**: 470
- Brockmann R, Machleidt R. Phys. Rev., 1990, **C42**: 1965
- König J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**: 3079
- MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 3963
- MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 460
- Arima A, Harvey M, Shimizu K. Phys. Lett., 1969, **B30**: 517
- Hecht K T, Adler A. Nucl. Phys., 1969, **A137**: 129
- Ginocchio J N. Phys. Ref. Lett., 1997, **78**: 436
- MENG J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: R628
- MENG J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 154
- ZHOU S G, MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 262501
- Madokoro H, MENG J, Matsuzaki M et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 061301
- MA Z Y, Wandelt A, Giai N V et al. Nucl. Phys., 2002, **A703**: 222
- MENG J, GUO J Y, LIU L et al. Front. Phys., China, 2006,

- 1: 38
19 ZENG J Y, CHENG T S. Nucl. Phys., 1983, **A405**: 1
20 LIU L, MENG J, ZHANG S Q. HEP & NP, 2006, **30**: 299
21 Arumugam P, Sharma B K, Patra S K. Phys. Rev., 2005, **C71**: 064308
22 LONG W H, MENG J, Giai N V et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034319
23 Audi G, Wapstra A H, Thibault C. Nucl. Phys., 2003, **A729**: 337

Investigation of α -Clustering Structure in Light Nuclei with RMF+SLAP Method*

LIU Lang¹ WANG Pei-Wei² CHEN Hong² MENG Jie^{1,2,3,4;1)}

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

2(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

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

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

Abstract The clustering phenomenon in light stable nuclei is studied within the shell- model-like approach in relativistic mean field theory. The result reproduces α -clustering phenomenon in light stable nuclei by calculating ^8Be , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne . Comparison of our result with RMF calculation indicates that the pairing correlation could change the properties of clear ground state and lead to different α -clustering structure.

Key words relativistic mean field theory, pairing correlation, shell-model-like approach, α -cluster

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

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