

镜像核 ^{12}B 和 ^{12}N 的相对论平均场理论研究*

梅花¹ 陈洪^{1;1)} 尧江明² 孟杰^{1,2,3,4;2)}

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(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

4(兰州重粒子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 在包含了奇时间分量的三轴形变相对论平均场理论框架下,研究了轻奇-奇镜像核 ^{12}B 和 ^{12}N 的基态性质,如结合能差、均方根半径以及形变等,并且分析了矢量介子场空间分量对基态性质,特别是单粒子能级的影响.

关键词 相对论平均场理论 镜像核 结合能差异 单粒子能级

如果核力具有电荷对称性,并且中子和质子有相同的质量、电荷、磁矩,那么镜像核就应该具有相同的性质.但是由于u-d夸克质量差异以及核子内部夸克间电磁相互作用的不同导致了核力的电荷对称性破缺,镜像核束缚能差异就是一个重要的体现.理论上的计算值与实验值之间的差异,即所谓的ONS反常,是人们一直以来长期关注的问题^[1-3],人们试图通过考虑各种修正项来尽可能减小这种差异,但是到目前为止,关于ONS反常的解释仍然存在争议.

相对论平均场理论(RMF)在原子核的研究中取得了很大的成功,它能很好地描述原子核内的自旋轨道劈裂,赝自旋对称性,以及单核子分离能等^[4-7].对于时间反演对称性破缺的原子核,如奇A核、奇-奇核,由于未配对价核子引起原子核内存在空间流,导致非零矢量场的空间分量的存在.研究发现它在奇A核的核磁矩中起着重要的作用^[8-10],因此必须自洽地将它考虑进去.包括奇时间分量轴对称的RMF理论已经用于对镜像核束缚能差异的研究^[11],并给出了比非相对论情况下更好的结果,但仍然不能完全解释ONS反常.因此在相对论平均场理论框架下,镜像核束缚能差异值得进行深入研究.本文将采用包含奇时间分量的三轴相对论平均场理论详细地研究镜像核 ^{12}B 以及 ^{12}N 的基态性质.

相对论平均场理论的出发点是包含核子场 ψ , 同位旋标量-标量介子场 σ , 同位旋标量-矢量介子场 ω_μ , 同位旋矢量-矢量介子场 ρ_μ 以及电磁场 A_μ 的有效拉氏密度

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\psi} \left[i\gamma^\mu \partial_\mu - M - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - g_\rho \gamma^\mu \vec{\tau} \cdot \vec{\rho}_\mu - \right. \\ & \left. e\gamma^\mu A_\mu \frac{1-\tau_3}{2} \right] \psi + \\ & \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - \\ & \frac{1}{4} \Omega_{\mu\nu} \Omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu + \frac{1}{4} c_3 (\omega_\mu \omega^\mu)^2 - \\ & \frac{1}{4} \vec{R}_{\mu\nu} \cdot \vec{R}^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \vec{\rho}_\mu \cdot \vec{\rho}^\mu - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 M 和 m_i 分别是核子和介子的质量, g_i ($i = \sigma, \omega^\mu, \vec{\rho}^\mu$) 为相应场的耦合常数. 矢量介子场和电磁场的场张量为

$$\begin{aligned} \Omega_{\mu\nu} &= \partial_\mu \omega_\nu - \partial_\nu \omega_\mu, \\ \vec{R}_{\mu\nu} &= \partial_\mu \vec{\rho}_\nu - \partial_\nu \vec{\rho}_\mu, \\ F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu. \end{aligned} \quad (2)$$

箭头表示同位旋空间矢量, 黑体表示坐标空间矢量.

从拉氏密度(1)出发可导出核子场满足的静态 Dirac 方程:

$$[\boldsymbol{\alpha} \cdot (-i\nabla - \mathbf{V}(\mathbf{r})) + V_0(\mathbf{r}) + \beta(M + S(\mathbf{r}))] \psi_i = \varepsilon_i \psi_i, \quad (3)$$

* 国家自然科学基金(10575083)资助

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

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

其中标量吸引势 $S(\mathbf{r}) = g_\sigma \sigma(\mathbf{r})$, 矢量排斥势 $V_0(\mathbf{r}) = g_\omega \omega_0(\mathbf{r}) + g_\rho \tau_3 \rho_0^3(\mathbf{r}) + e \frac{1-\tau_3}{2} A_0(\mathbf{r})$, $V(\mathbf{r}) = g_\omega \omega(\mathbf{r}) + g_\rho \tau_3 \rho^3(\mathbf{r}) + e \frac{1-\tau_3}{2} \mathbf{A}(\mathbf{r})$ 是由矢量介子场和电磁场空间分量产生的磁势.

介子场和电磁场满足静态的 Klein-Gordon 方程:

$$\begin{aligned} (-\nabla^2 + m_\sigma^2)\sigma(\mathbf{r}) &= -g_\sigma \rho_s(\mathbf{r}) - g_2 \sigma^2(\mathbf{r}) - g_3 \sigma^3(\mathbf{r}), \\ (-\nabla^2 + m_\omega^2)\omega^\mu(\mathbf{r}) &= g_\omega j_B^\mu(\mathbf{r}) - c_3 \omega^\nu \omega_\nu \omega^\mu(\mathbf{r}), \\ (-\nabla^2 + m_\rho^2)\rho^\mu(\mathbf{r}) &= g_\rho \hat{j}_R^\mu(\mathbf{r}), \\ -\nabla^2 A^\mu(\mathbf{r}) &= e j_p^\mu(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 Klein-Gordon 方程的源项参见文献[10].

系统的总能量为

$$E_{\text{total}} = E_N + E_\sigma + E_\omega + E_\rho + E_c + E_{\text{cm}}, \quad (5)$$

E_N 是单粒子能量之和, $E_i (i = \sigma, \omega, \rho, A)$ 为相应介子场和库仑场能量, E_{cm} 是质心修正, 本文采用微观质心修正^[12] $E_{\text{cm}}^{\text{mic}} = -\frac{1}{2mA} \langle \hat{\mathbf{P}}_{\text{cm}}^2 \rangle$, 其中 $\hat{\mathbf{P}}_{\text{cm}} = \sum_i^A \hat{\mathbf{p}}_i$ 是质心坐标系中的核子总动量.

计算中采用 PK1 有效耦合参数. 同时, 由于 ρ 介子场和电磁场空间分量的贡献与 ω 介子场空间分量的贡献相比很小^[13], 因此空间分量部分只考虑了 ω 介

子场. 其次, 由于奇-奇核中对关联效应很小, 并且对关联效应在镜像核束缚能差异中的贡献几乎相消^[11], 因此本文没有考虑它的影响.

将核子场和介子场都用三维谐振子基展开进行求解, 谐振子基的壳数目对于费米子取为 $n_f = 12$, 玻色子取为 $n_b = 10$. 展开费米子的谐振子长度 $b_0 = \sqrt{\hbar/M_N \omega_0}$ (M_N 是核子质量), 其中 $\hbar \omega_0 = 41 A^{-1/3}$; 玻色子的为 $b_B = b_0/\sqrt{2}$.

表1中列出了是否考虑 ω 介子场空间分量两种情况下 ^{12}B 和 ^{12}N 的总结合能(5)式以及其中各项贡献的情况. *号表示没有考虑 ω 空间分量计算的结果, Δ 表示 ^{12}B 与 ^{12}N 中相应各项之差.

从表1中可以看出, 考虑 ω 介子场空间分量后原子核结合能增大, 核束缚得更紧. 其次, ω 介子场空间分量的考虑会引起核子场、介子场、库仑场和质心修正对镜像核束缚能差异的贡献发生变化, 考虑 ω 介子场空间分量以后束缚能差异从 5.92MeV 变为 6.14MeV, 增大了 220keV. 其中, 核子场、介子场和库仑场这三项对镜像核束缚能差异的贡献之和在 ω 介子场空间分量考虑前后变化很小(仅为 20keV), 而质心修正能的贡献在 ω 介子场空间分量考虑之后变化很显著(200keV), 因此, 微观质心修正在轻镜像核结合能差的研究中起着很关键的作用.

表 1 ω 介子场空间分量考虑与不考虑(*)两种情况下 ^{12}B 和 ^{12}N 的结合能以及各项的贡献

nuclei	$^{12}\text{B}^*$	$^{12}\text{N}^*$	Δ_{BN}^*	^{12}B	^{12}N	Δ_{BN}
E_N	-267.25	-254.11	-13.14	-270.26	-257.04	-13.22
E_σ	1302.05	1283.93	18.12	1316.13	1297.68	18.45
E_ω	-1093.56	-1077.03	-16.53	-1105.43	-1088.61	-16.82
E_ρ	-2.21	-1.93	-0.28	-2.23	-1.96	-0.27
E_c	-7.57	-13.41	5.84	-7.61	-13.47	5.86
E_{cm}	-11.71	-11.78	0.07	-12.01	-11.88	-0.13
E_{total}	-80.25	-74.33	-5.92	-81.41	-75.28	-6.14
$E_{\text{total}}^{\text{exp. [14]}}$				-79.57	-74.04	-5.53

表 2 ω 介子场空间分量考虑与不考虑(*)两种情况下 ^{12}B 和 ^{12}N 的均方根半径以及形变

nuclei	E/A	r_m	r_c	r_n	r_p	β	γ
$^{12}\text{B}^*$	6.69	2.44	2.45	2.53	2.32	0.185	0.16
^{12}B	6.79	2.43	2.44	2.51	2.30	0.180	3.13
$^{12}\text{B}(\text{exp.})$	6.63	2.48(2) ^[15]				0.39 ^[16]	
$^{12}\text{N}^*$	6.19	2.47	2.69	2.31	2.57	0.191	0.07
^{12}N	6.27	2.45	2.68	2.29	2.56	0.187	2.99
$^{12}\text{N}(\text{exp.})$	6.17	2.47(7) ^[15]	2.62(7) ^[15]	2.43(7) ^[15]	2.49(7) ^[15]	0.30 ^[16]	

根据核子密度可以得到相应的均方根半径 (RMS), 电荷密度半径为 $r_c = \sqrt{r_p^2 + 0.64}$. 由核的四极矩 Q_{20} , Q_{22} 可得核的形变参数 β 和 γ , 计算结果列于表2中. 从表中可以看出, 镜像核的半径近似具有同位旋对称性. 同时发现 ω 空间分量的考虑使核的

RMS 半径减小, 但这种影响并不是很显著. 其次, 它压低了核的 β 形变, 使核更接近球形, 这是 ω 介子空间分量使核束缚得更紧的结果.

表1的计算结果表明单粒子能量之和在镜像核束缚能差异中起着重要的作用. 图1给出了 ω 介子空间

分量对 ^{12}B 和 ^{12}N 的单粒子能级的影响. 图1显示在考虑 ω 空间分量后单粒子能级发生分裂, Krammer 筒并消除. 其中, $1s_{1/2}$ 轨道劈裂最大, $1p_{3/2,1/2}$ 劈裂最小, 对于 $1p_{3/2}$ 态则是 $1p_{3/2,3/2}$ 态的劈裂大, 这是因为能级劈裂的大小近似正比于角动量第三分量投影 $m^{[10]}$. 镜像核 ^{12}N 的单粒子能量之和比 ^{12}B 的小, 为结合能差异提供了 13.22MeV 的贡献.

本文采用包含奇时间分量的三轴相对论平均场理论, 对轻核区的镜像核 ^{12}N 和 ^{12}B 的性质作了详细的计算, 分析了奇时间分量对镜像核性质的影响, 研究发现, 奇时间分量使核束缚更紧, 增大了镜像核结合能差, 其中微观质心修正效应表现得很重要. 另外, ω 空间分量使得 ^{12}N 和 ^{12}B 中互为时间反演态的单粒子能级发生劈裂. 对于 $1s_{1/2}$ 轨道, ^{12}N 和 ^{12}B 中质子和中子

的单粒子能级劈裂都高达 $\sim 2\text{MeV}$.

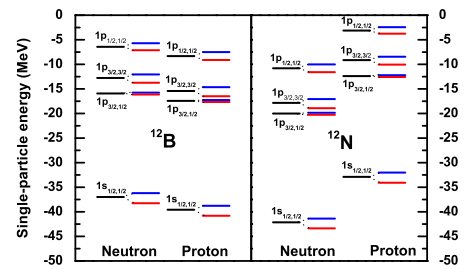


图 1 ^{12}B 和 ^{12}N 的单粒子能级

其中黑线是没有考虑奇时间分量的情况. 考虑奇时间分量后, 角动量第三分量为正(红线)和负(蓝线)的时间反演态发生劈裂. 单粒子能级采用了近似好量子数 l_{jm} 标记.

参考文献(References)

- 1 Okamoto K. Phys. Lett., 1964, **11**: 150
- 2 Nolen Jr J A, Schiffer J P. Ann. Rev. Nucl. Sci., 1969, **19**: 471
- 3 Shlomo S. Rep. Prog. Phys., 1978, **41**: 957
- 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. Phys., 1996, **37**: 193
- 7 MENG J, Toki H, ZHOU S G et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 2006 in press
- 8 Hofmann U, Ring P. Phys. Lett., 1988, **214B**: 307
- 9 Furnstahl R J, Price C E. Phys. Rev., 1989, **C40**: 1398
- 10 JAO J M, CHEN H, MENG J. to be published in Phys. Rev. C or nucl-th/0606040
- 11 Koepf W, Krein G, Barreiro L A. Phys. Lett., 1996, **B381**: 385—390
- 12 Bender M, Rutz K, Reinhard P G et al. Eur. Phys. J., 2000, **A7**: 467—478
- 13 König J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**: 3079
- 14 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 409
- 15 Ozawa A et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**: 807
- 16 Nakada H, Otsuka T. Phys. Rev., 1994, **C49**: 886

Mirror Nuclei ^{12}N and ^{12}B in Relativistic Mean Field Theory*

MEI Hua¹ CHEN Hong¹ YAO Jiang-Ming² MENG Jie^{1,2,3,4;2}

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

2(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, 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, Lanzhou 730000, China)

Abstract The ground-state properties of light odd-odd mirror nuclei ^{12}N and ^{12}B have been investigated within the time-odd triaxial relativistic mean-field theory. The influences of spatial-component of vector meson fields on the ground-state properties, especially the single-particle energies have been analyzed.

Key words relativistic mean field theory, mirror nuclei, binding energy difference, single particle energy

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

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

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