

文章编号: 1007-4627(2001)03-0143-04

用相对论性密度依赖 Hartree 方法 研究两体关联在晕核中的效应

朱志远, 蒋维洲

(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)

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

摘 要: 用相对论性密度依赖的 Hartree 方法研究晕核的基本性质, 在晕核的唯象图景中, 作为剩余相互作用的对关联效应对核晕的描述有关键作用. 用只有一个自由参数的模型, 同时给出了晕核 ^{11}Li , ^{11}Be 和 ^{19}C 的分离能和质量密度分布, 和实验数据符合很好.

关键词: 剩余相互作用; 晕核; 相对论密度依赖 Hartree

中图分类号: O413.3; O571.2 **文献标识码:** A

1 引言

滴线邻近区域晕核的发现对于人类进一步认识核结构和弱束缚态下核子-核子相互作用带来新的机遇. 然而, 对晕核的定量描述似乎是一个很大的挑战. 晕核的理论研究工作正在不断进行, 并获得了相当的成功^[1,2]. 在少体理论中, 像 ^{11}Li 这样的晕核在三体框架中进行了研究, 即 ^{11}Li 被描述为 $^9\text{Li} + n + n$ 相互作用系统, 其具有不同的二体势. 多体理论中, 研究方法之一就是平均场的方法研究晕核, 其中弱束缚态的核子运动在不同于核芯核子所处的势阱中^[3].

Bertsch 等^[4]以及 Sagawa^[5]在非相对论平均场中通过人为地引入因子改变弱束缚核子所处的势阱而重复了实验结果. Koepf 等^[6]首先在相对论平均场理论(RMF)中研究了晕核, 但未能给出 ^{11}Li 的晕性质. 与非相对论平均场所采取的方法一样, RMF 的唯象研究方法^[7]改善了晕核的理论结果, 并重复了中子晕的实验结果.

研究工作表明^[8], 为了更好地描述像 ^{11}Li 这样的晕核, 考虑对关联的贡献是必须的. 在本研究工作中, 我们试图在相对论性密度依赖的 Hartree (RDDH) 框架中, 研究关联的贡献对核性质的影响. 在这方面, 对关联就是一个很重要的贡献. 特

别是像 ^{11}Li 这样的晕核, 可以将晕核子间的对关联作为一种剩余相互作用, 而后者可以在相对论性二体关联(RDHF)框架中得到处理^[9].

2 理论框架

采用的拉氏量 L 是:

$$\begin{aligned} L_{\text{RDDH}} = & \bar{\Psi}[i\gamma_{\mu}\partial^{\mu} - M_N - g_{\sigma}\sigma - g_{\omega}\gamma_{\mu}\omega^{\mu} - \\ & g_{\rho}\gamma_{\mu}\tau_3 b_0^{\mu} + \frac{f_{\nu}}{2M_N}\sigma_{\mu}\tau_3\partial^{\mu}b_0^{\nu} - \\ & e\frac{1}{2}(1 + \tau_3)\gamma_{\mu}A^{\mu}]\Psi + \\ & \frac{1}{2}(\partial_{\mu}\sigma\partial^{\mu}\sigma - m_{\sigma}^2\sigma^2) - \\ & \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{\omega}^2\omega_{\mu}\omega^{\mu} - \\ & \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{\rho}^2b_0^{\mu}b_{0\mu} - \\ & \frac{1}{4}A_{\mu\nu}A^{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 Ψ , σ , ω 和 b_0 分别为核子场、标量介子、矢量矢子和中性同位旋矢量介子, 相应的质量是 M_N , m_{σ} , m_{ω} , m_{ρ} ; e 为电子电荷; A^{μ} 和 $A_{\mu\nu}$ 分别为光子场和其场强张量; g_i ($i = \sigma, \omega, \rho$) 和 f_{ν} 为对应的介子-核子耦合常数. $F_{\mu\nu}$ 和 $B_{\mu\nu}$ 分别为 ω 介子和 ρ 介子的

收稿日期: 2000-12-10; 修改日期: 2001-07-10

作者简介: 朱志远(1971-), 男(汉族), 江苏盱眙人, 研究员, 博导, 从事理论核物理研究.

张量, γ_μ , τ_i 分别为 Dirac 矩阵和 Pauli 矩阵的第三分量.

核子的运动方程为

$$\begin{aligned} & [i\gamma_\mu \partial^\mu - M_N - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma_\mu \omega^\mu - \\ & g_\rho \gamma_\mu \tau_3 b_\rho^a + \frac{f_\rho}{2M_N} \sigma_\mu \gamma_5 \tau_3 b_\rho^a + \\ & e \frac{1}{2} (1 + \tau_3) \gamma_\mu A^\mu + V_R] \Psi = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

这里 V_R 为与密度依赖耦合常数的微商有关的势^[10], 即

$$V_R = \frac{\partial g_\omega(\rho_i)}{\partial \rho_i} \rho_B \omega_0 - \frac{\partial g_\rho(\rho_i)}{\partial \rho_i} \rho_B \sigma, \quad i = c, h \quad (3)$$

其中 ρ_B 为总的核子密度, ρ_S 为总标量密度, ρ_c 和 ρ_h 分别为核芯和核晕的核子密度. 密度依赖的耦合常数的计算通过 Bonn A 势^[9,11]:

$$U_S(\rho) = -\frac{g_\sigma^2(\rho)}{m_\sigma^2} \rho, \quad U_V(\rho) = -\frac{g_\omega^2(\rho)}{m_\omega^2} \rho_B \quad (4)$$

得到. 在核的密度 ρ 处的 U_S, U_V 分别是 RDHF 计算的标量势和矢量势. 为简单起见, 在本工作中未考虑 ρ 介子的密度依赖耦合常数, 而是用 ρ 介子耦合常数 $g_\rho = 3.455 (g_\rho^2/4\pi = 0.95^{[9]})$, $f_\rho/g_\rho = 6.6$. 密度依赖耦合常数 g_σ 和 g_ω 由核芯密度决定, 即

$$g_{\sigma,c} = g_\sigma(\rho_c), \quad g_{\omega,c} = g_\omega(\rho_c). \quad (5)$$

而对晕中子而言, 当只有一个中子时, g_σ 和 g_ω 为经验值; 若晕中子数大于 1 时, 关联对平均场就有贡献. 假定核芯核子与晕核子间的关联效应足够弱, 可以忽略. 我们考虑晕中子间的关联, 则晕中子的耦合常数是经验值和密度依赖值的平均值, 即

$$g_{i,h} = \xi g_i + (1 - \xi) g_i(\rho_h), \quad i = \sigma, \omega \quad (6)$$

ξ 这一系数主要反映晕中子相互作用的关联和核芯

粒子与晕核子间的相互作用. 对晕中子, 二体相互作用数 $n_h = C_{N_c}^1 C_{N_h}^1 + C_{N_c}^2$, 这里 N_c 和 N_h 是核芯和晕的粒子数.

$$\xi = \frac{C_{N_c}^1 C_{N_c}^1}{C_{N_c}^1 C_{N_c}^1 + C_{N_h}^2}. \quad (7)$$

上式中, 当 $N_h < 2$ 时, $C_{N_h}^2 = 0$. 方程(7)对本工作中所研究的晕核有其具体的值: 对 ^{11}Li , $n_h = C_3^1 C_3^1 + 1 = 19$, $\xi = 0.947$, 而对 ^{13}C 和 ^{11}Be , $\xi = 1$. 密度无关的耦合常数则为 $g_\sigma = 9.01$, $g_\omega = 11.54$. 这里 g_σ 的值取自实验^[9]. 在计算中, g_σ 是唯一的可调参数, 它在经验取值范围之内.

3 计算结果

通过迭代过程可以数值求解核子与介子场的非线性微分方程. 计算表明, 如果不略去核芯与晕之间的关联效应, 或者不考虑晕核子间的关联, 就得不到晕核如 ^{11}Li 的分离能和质量密度分布. 这证明了我们在 RDDH 的理论框架里对晕核的具体处理的正确性, 我们的理论处理是与晕核的唯象图景相一致的.

晕中子的分离能 S_n 及均方根半径 r_{rms} 如表 1 所示. 从表中可看到, ^{11}Li 和 ^{11}Be 的单个中子的分离能、两个中子分离能及均方根半径的理论计算值与实验值相符合. 对 ^{13}C 而言, 其分离能与实验值有一定的差距, 但均方根半径与实验值符合很好.

图 1—图 3 显示的是 ^{11}Li 、 ^{11}Be 和 ^{13}C 核的密度分布. 可以看到, 计算的密度分布处于实验值^[3, 11-15] 的范围内, 晕中子对密度分布的晕尾巴的贡献是极其重要的, 这同时说明了晕中子的正确处理对晕核的描述至关重要.

表 1 ^{11}Li , ^{11}Be , ^{13}C 晕中子分离能 S_n 和均方根半径 r_{rms} 的比较

核子	S_n	S_n^{exp}	S_{2n}	S_{2n}^{exp}	r_{rms}	r_{rms}^{exp}
^{11}Li	0.719	0.73	0.295	0.295 ± 0.035	3.125	3.12 ± 0.30
^{11}Be	0.454	0.503	2.252	2.316	2.817	2.56 ± 0.04
^{13}C	0.328	0.24 ± 0.1	3.224	4.350	3.216	3.13 ± 0.07
		0.53 ± 0.13				3.10 ± 0.1

* S_n 的单位为 MeV, r_{rms} 的单位为 fm. 实验数据取自文献[12-15].

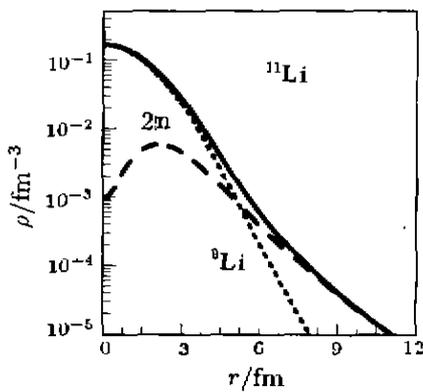


图1 ^{11}Li 的质量密度分布
—、-- 和 ... 分别代表 ^{11}Li 、核芯 ^9Li 和晕中子的分布。

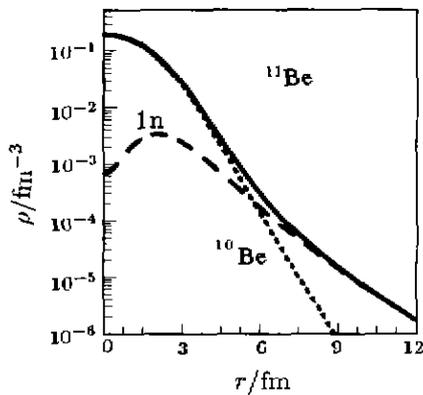


图2 同图1, 但为 ^{11}Be 的质量密度分布

需要指出的是, 核的形变效应和核芯极化效应等对于给出正确的描述和考虑宇称反转性质具有重要的作用^[16, 17], 在本文中未加以讨论. 但因为考虑了密度依赖的相互作用, 至少唯象的核芯极化效应已被包括在模型中. 我们的模型在平均场的框架里考虑了平均场之外剩余相互作用的贡献, 给出了对晕核结构性质很好的描述, 证明了在研究晕核性

质时考虑平均场之外的密度依赖效应的必要性和重要性. 模型中晕和核芯相互作用的图像在物理和直观上简单而正确, 结果和实验符合得非常好. 鉴于该模型的优点, 可立足于实验数据对新发现的晕核结构性质作出可信分析, 我们已根据在兰州重离子加速器次级束流线上测得的有关质子晕核 ^{27}P 和 ^{28}Al 的数据对其结构作了计算, 得到很好的结果.

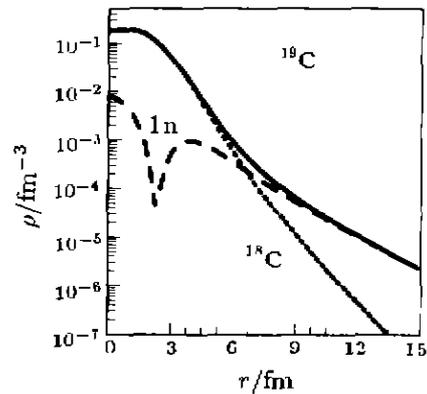


图3 同图1, 但为 ^{19}C 的质量密度分布

4 结论

我们用平均场图像加上通过二体关联来考虑对关联的贡献, 在只有一个自由参数的理论模型里对典型的晕核 ^{11}Li , ^{11}Be 和 ^{19}C 进行了理论计算, 得到了与实验结果相一致的结果. 在具体处理中, 晕中子与核芯内的核子的关联被合理地略去了, 而核芯内核子间的关联、晕粒子关联则分别通过定域密度依赖的耦合分别给予了考虑. 通过本工作可以说, 关联效应对晕核子的正确描述, 从而对改善晕核的描述是很重要的. 这一方面的深入研究工作还将继续下去.

参 考 文 献:

- [1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* Measurements of Interaction Cross-sections and Nuclear Radii in the Light Shell Region[J]. Phys Rev Lett, 1985, 55: 2 676—2 679.
- [2] Meng J, Ring P. Giant Halo at the Neutron Drip Line[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80: 460—463.
- [3] Tanihata I, Kobayashi T, Suzuki T, *et al.* Determination of the Density Distribution and the Correlation of Halo Neutrons in ^{11}Li [J]. Phys Lett, 1992, B287: 307—311.
- [4] Bertsch G F, Brown B A, Sagawa H. High-energy Reaction Cross-sections of Light Nuclei[J]. Phys Rev, 1929, C59: 1 154—1 160.
- [5] Sagawa H. Density Distributions of Halo Nuclei[J]. Phys Lett, 1992, B286: 7—12.
- [6] Koepf W, Gambhir Y K, Ring P, *et al.* Neutron Halo in Lithium Nuclei: A relativistic mean-field approach [J]. Z Phys, 1991, A340: 119—124.
- [7] Zhu Z Y, Shen W Q, Cai Y H, *et al.* Study of Halo Nuclei with Phenomenological Relativistic Mean Field Approach[J].

- Phys Lett. 1994, B325: 1-4.
- [8] Bertsch G F, Esbensen H. Pair Correlation near the Neutron Drop Line[J]. Ann Phys (N Y), 1991, 203: 327-363.
- [9] Brockmann R, Machleidt R. Relativistic Nuclear Structure. I: Nuclear matter[J]. Phys Rev. 1990, C42: 1965-1980.
- [10] Fuchs C, Lenske H, Wolter H. Density Dependent Hadron Field Theory[J]. Phys Rev. 1995, C52: 3013-3050.
- [11] Brockmann R, Toki H. Relativistic Density Dependent Hartree Approach[J]. Phys Rev Lett. 1992, 68: 3408-3411.
- [12] Ueta K, Miyake H, Bund G W. Three-body Faddeev Calculation for ^{11}Li with Separable Potentials[J]. Phys Rev. 1999, C59: 1806-1812; Tanhata I. Recent Studies with Radioactive Beams at RIKEN[J]. J Phys G. 1996, 22: 157-163 (review topic, references therein).
- [13] Fukuda M, Ichihara T, Inabe N, *et al.* Neutron Halo in ^{12}Be Studied via Reaction Cross Sections[J]. Phys Lett. 1991, B268: 339-343.
- [14] Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L, *et al.* Measurements of Interaction Cross-sections for Carbon Isotopes at Relativistic Energies and the Halo Structure in ^{16}C [Z]. RIKEN-AF-NP-234, 1998, preprint.
- [15] Mau N V. Particle-vibration Coupling in One-neutron Halo Nuclei[J]. Nucl Phys. 1995, A592: 33-44.
- [16] Al-Khalil, Tostevin J A, Thompson I J. Radii of Halo Nuclei from Cross Section Measurement[J]. Phys Rev. 1990, C54: 1843-1852.
- [17] Al-Khalil, Tostevin J A, Thompson I J. Radii of Halo Nuclei from Cross Section Measurement [J]. Phys Rev. 1996, C54: 1843-1852.

Two-body Correlation Contributions in Halo Nuclei in Relativistic Density Dependent Hartree Approach

ZHU Zhi-yuan, JIANG Wei-zhou

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

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The basic properties of halo nuclei are investigated in the relativistic density dependent Hartree approach, where the correlation effects among halo-particles are crucial for the description of the halo property. Adapting only one free parameter, we have calculated the separation energies and mass density distributions of halo nuclei ^{11}Li , ^{11}Be and ^{19}C and they are in good agreement with the experimental data.

Key words: residual interaction; halo nuclei; relativistic density dependent Hartree