

轻核中中子间的对相互作用和中子晕*

白新华¹⁾ 胡济民

(北京大学技术物理系 北京 100871)

1996-09-17收稿

摘 要

选择 Skyrme 势 E_0 作为两核子间唯象相互作用, 在 Hartree-Fock 理论中结合粒子数守恒方法处理同类核子间的对相互作用, 计算了 Li 和 Be 的丰中子同位素的结构. 计算表明中子间的对相互作用和双中子晕之间存在紧密的联系.

关键词 Skyrme 势 E_0 , 对相互作用, 粒子数守恒方法, 中子晕.

1 引 言

八十年代以来, 中、高能放射性核束在核物理实验中得到了广泛的应用^[1-3], 积累了大量的实验数据. 在轻核中, 发现的一个重要的新现象是中子晕^[1-3], 从它被发现起, 中子晕现象已经在实验和理论上得到了广泛的研究. 在平均场框架中, 理论上对远离 β 稳定线的轻核中同类核子间对相互作用的影响仍缺乏详细的考虑, 虽然文献 [6, 7] 曾经提到这个问题. 从中子滴线附近核素的单中子分离能数据能够看到, 具有偶数个中子的核素要比具有奇数个中子的核素更稳定, 结合它们的自旋宇称就能看到, 对这些核素, 在平均场框架内中子间对相互作用的影响是应该考虑的. 鉴于轻核中核子数较少, 本文采用密度相关的 Hartree-Fock 平均场理论, 结合处理同类核子间对相互作用的粒子数守恒 (PNC) 方法^[8], 计算了实验上发现的几个晕核及与它们相邻的一些核素的性质, 讨论了中子间的对相互作用和中子晕间的联系.

2 方法简介

Skyrme 势 Hartree-Fock 平均场近似方法曾经广泛地应用于 β 稳定线附近核素性质的计算中^[9-11]. 在此框架内采用 PNC 方法考虑同类核子间的对相互作用, 对轻核也进行过系统的计算^[12]. 结果表明, 在采用适当的等效相互作用时 (如 E_0 ^[13]), 理论仍能够较好地

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助.

1) 现通讯地址: 北京市第918信箱3分箱, 邮政编码100039.

描写绝大多数远离 β 稳定线的轻核基态的性质, 如结合能、基态自旋宇称等. 但是, 为了得到计算中所需的一组正交归一的基底, 采取了在离核中心一定远处设置无穷位垒的方法. 研究表明, 该无穷位垒位置 (R_∞) 的改变对原子核结合能的计算并无明显影响. 但对于离线核, 当无穷位垒位置移远时, 虽然对力强度已根据奇偶质量差做了调整, 计算出的核子分布的均方根半径仍将变大, 而且对离 β 稳定线越远的核素, 计算的均方根半径随无穷位垒位置变化的幅度也越大. 在远离 β 稳定线核素的研究中, 一个重要的问题是研究原子核从没有晕到有晕是如何过渡的, 这种研究也有助于阐明理论在滴线区适用的程度和研究不同因素在这些核区产生的影响. 为此, 在下面的计算中, 将通过拟合非晕核的半径以确定无穷位垒的位置, 然后在该无穷位垒位置下对其它核素进行计算 (确定无穷位垒位置时选用的是非晕核 ${}^9\text{Li}$ 和 ${}^{12}\text{Be}$ 的均方根半径实验值). 计算中采用的对力强度 (G) 是通过拟合滴线附近同位素的奇偶质量差而得到, 它们具体的值列在表 1 中.

表 1 计算中无穷位垒的位置 (R_∞) 和平均对力强度 (G) 的取值

同位素	Li	Be
R_∞ (fm)	11.80	11.80
G (MeV)	0.28	0.36

确定无穷位垒位置时所用的非晕核是 ${}^9\text{Li}$ 和 ${}^{12}\text{Be}$ 的均方根半径实验值.

3 计算结果

3.1 结合能和奇偶质量差

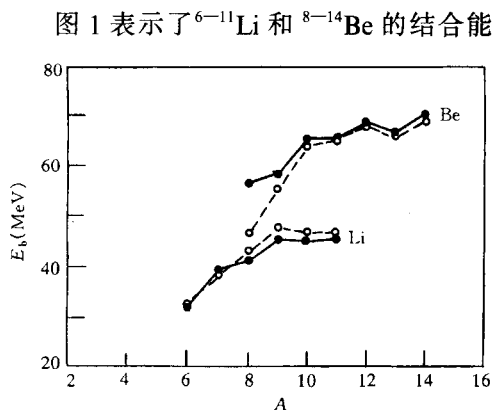


图 1 计算的 Li、Be 的丰中子同位素结合能与实验数据^[14]的比较

---○--- 理论; —●— 实验.

图 1 表示了 ${}^6-{}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^8-{}^{14}\text{Be}$ 的结合能的计算值与实验数据^[14]的比较. 图 2(a)、(b) 分别表示了它们的奇偶质量差的计算值与实验数据的比较. 从中可以看到, 除了 ${}^8\text{Be}$ 的结合能外, 实验数据的一般趋势得到了较好的再现. 比较 ${}^8\text{Be}$ 与 ${}^4\text{He}$ 的结合能, 估计它很可能是个集团效应明显的变形核.

3.2 中子皮和中子晕

图 3 表示了 ${}^6-{}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^8-{}^{14}\text{Be}$ 的均方根半径的计算值和实验数据的比较. 很明显, 对 ${}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^{14}\text{Be}$ 这两个具有双中子晕的核, 均方根半径的计算值在误差范围内和实验数据吻合. 对 ${}^{11}\text{Be}$, 理论上给出的基态自旋宇称为

$(1/2)^-$, 计算值和实验数据有较明显的差别. 但是, 若取其基态自旋宇称为实验上的 $(1/2)^+$, 计算结果与实验数据相近. 实验中发现 ${}^{11}\text{Be}$ 为单中子晕核^[3]. 这里的计算仅表明其中未配对中子是否占据 $2S_{1/2}$ 态与能否再现该核的单中子晕密切相关. 值得一提的是, 在考虑变形^[15]或在壳模型中引入质子中子间相互作用^[16]时都曾经给出正确的基态自旋宇称.

为了研究不同种类核子的空间分布及对相互作用对它们的影响, 我们分别在考虑对

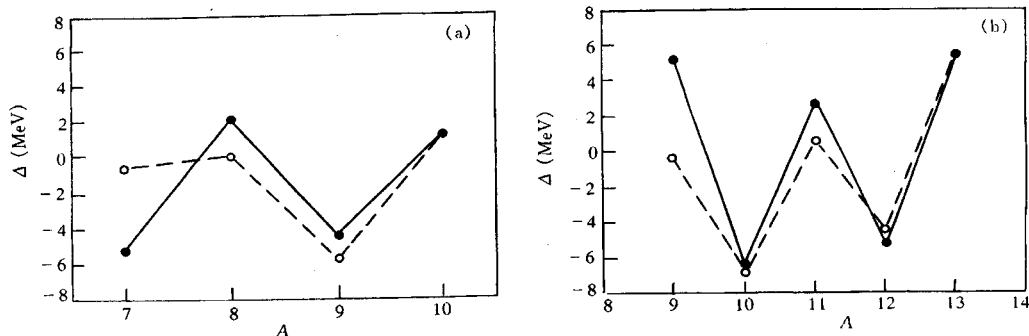


图2 计算的Li(a)和Be(b)的丰中子同位素的奇偶质量差与实验数据^[14]的比较

---○---理论; —●—实验.

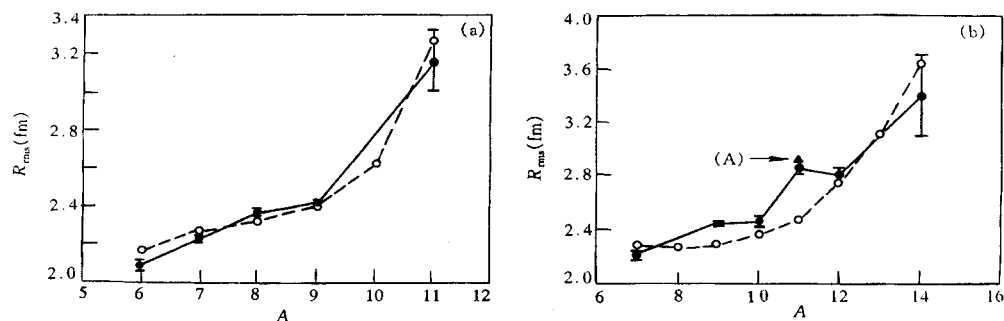


图3 计算的⁶⁻¹¹Li(a)和⁸⁻¹⁴Be(b)的均方根半径与实验数据^[1,2,7]的比较

---○---理论; —●—实验. (A)表示取自旋宇称为(1/2)⁺的结果.

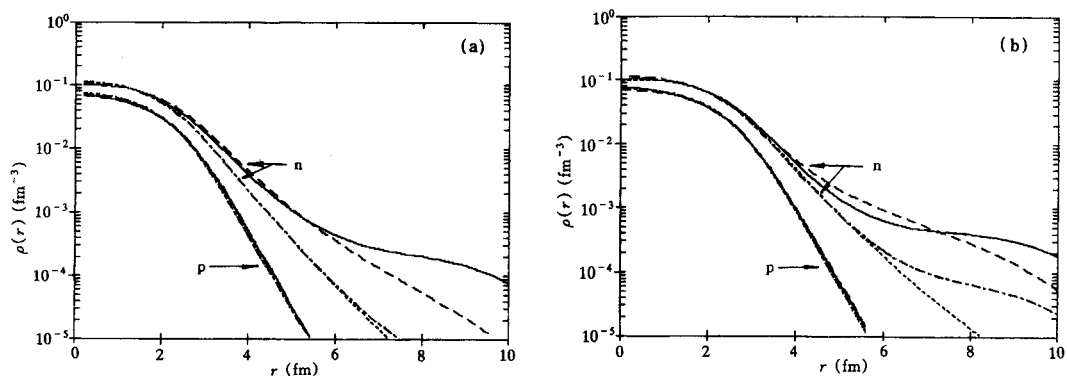


图4 有(无)中子间对相互作用的情况下计算得到的^{9,11}Li(a)、^{12,14}Be(b)中的质子和中子的空间分布

⁹Li: ----- $G_n=0.00$, - - - - - $G_n=0.28$; ¹¹Li: - - - - - $G_n=0.00$, ———— $G_n=0.28$.

¹²Be: ----- $G_n=0.00$, - - - - - $G_n=0.36$; ¹⁴Be: - - - - - $G_n=0.00$, ———— $G_n=0.36$.

作用和不考虑对作用时对某些丰中子同位素中的核子分布做了计算。对于这些同位素，计算表明质子间对相互作用对计算结果基本没有影响。因此这里在对丰中子核素的计算中，将不改变质子间对相互作用的强度。图4(a)、(b)分别表示在有(无)中子间对相互作用

用的情况下计算得到的 ${}^9, {}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^{12, 14}\text{Be}$ 中的质子和中子的空间分布. 从图 4(a)可以看出, 在 ${}^9\text{Li}$ 中增加的两个中子对 ${}^{11}\text{Li}$ 中质子分布的影响很小, 这和文献 [17, 18] 的结论相一致. 从图 4(a)还能够发现 ${}^{11}\text{Li}$ 中空间分布较广的核子就是中子, 即反映了实验上发现的中子晕, 中子间的对相互作用对 ${}^{11}\text{Li}$ 中的中子能否形成晕状分布有明显的影响. 同时, 在相同的对强度下, 中子间对相互作用对 ${}^9, {}^{11}\text{Li}$ 的中子分布影响的程度有较为明显的差别. 其原因在于 ${}^{11}\text{Li}$ 中的外层中子占据的 HF 单粒子态的能量更接近于零. 一般而言, 越是靠近中子滴线的核素, 其外层中子所在的单粒子态的能量越接近于零. 按这里的方法, 中子间的对相互作用对其中的中子分布的影响也越明显. 结合以往的一些研究结果^[7], 应该认为, 在平均场框架内 ${}^{11}\text{Li}$ 的双中子晕和中子占据的单粒子态具有弱束缚的特点及中子间存在的对相互作用有关. 在图 4(b)中能发现上面这些结论对 ${}^{12, 14}\text{Be}$ 也基本成立.

4 总 结

根据上述计算, 采用 E_0 势的 HF + PNC 方法在能够较好地再现中子滴线附近同位素的结合能和奇偶质量差的同时, 也能较好地反映出像 ${}^{11}\text{Li}$ 和 ${}^{14}\text{Be}$ 中的双中子晕现象. 计算表明, 在平均场框架中, 中子间的对相互作用与双中子晕现象有明显的关系. 当然, 中子滴线附近具有奇数中子的核素, 如 ${}^{10}\text{Li}$ 、 ${}^{13}\text{Be}$ 本身就是中子发射不稳定的, 这突出了从实验上看到的同位素链中这些核素均方根半径随核子数增加而变大的不连续性. 从平均场角度来看这也与中子间的对作用的影响有关.

采用这里所用的方法给出了核素从无中子晕到有中子晕的过渡. 对其它的丰中子同位素甚至丰质子同位素进行类似的计算并与将来的实验数据比较将是件有意义的工作.

须指出的是, 对 ${}^{11}\text{Be}$ 计算中仅仅考虑中子间的对相互作用不能给出正确的基态自旋宇称和它的单中子晕结构. 此外, 计算中除了对相互作用强度和组态能量截断外, 为了得到计算中所需的一组正交基底, 还引入了无穷位垒位置参量. 它们的取值都是通过拟合特定的实验数据得到. 这些参量本身还有待理论上的进一步研究.

参 考 文 献

- [1] I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985)2676.
- [2] I. Tanihata, T. Kobayashi, O. Yamakawa *et al.*, *Phys. Lett.*, **B206**(1988)592.
- [3] Fukuda, T. Ichihara, N. Inabe *et al.*, *Phys. Lett.*, **B268**(1991)339.
- [4] T. Kobayash *et al.*, *Phys. Lett.*, **B232**(1989)51.
- [5] I. Tanihata *et al.*, *Phys. Lett.*, **B287**(1992)307.
- [6] W. Koepf, Y.K.Gambhir, P. Ring *et al.*, *Z. Phys.*, **A340**(1991)119.
- [7] H. Sagawa, *Phys. Lett.*, **B286**(1992)7.
- [8] J. Y. Zeng, T. S. Cheng., *Nucl. Phys.*, **A405**(1983)1.
- [9] D. Vautherin, D. M. Brink, *Phys. Rev.*, **C5**(1972)626.
- [10] D. Vautherin, *Phys. Rev.*, **C7**(1973)296.
- [11] M. Beiner, H. Flocard, N. V. Giai *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A238**(1975)28.
- [12] 白新华, 胡济民, 高能物理与核物理, **21**(1997)235.
- [13] J. Friedrich, P. G. Reinhard, *Phys. Rev.*, **C33**(1986)335.

- [14] G. Audi, A. H. Wapstra, *Nucl. Phys.*, **A565**(1993)1.
[15] I. Ragnarsson, S. Aberg, H.-B. Hakasson *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A361**(1981)1.
[16] I. Talmi, *Rev. Mod. Phys.*, **34**(1962)704.
[17] E. Arnold, J. Bonn, A. Klein *et al.*, *Phys. Lett.*, **B281**(1992)16.
[18] B. Blank, J. J. Gaimard, H. Geissel *et al.*, *Z. Phys.*, **A340**(1991)41.

Pairing Interaction Between Neutrons and Neutron Halo in Light Nuclei

Bai Xinhua Hu Jimin

(Technical Physics Department, Peking University, Beijing 100871)

Received 17 September 1996

Abstract

With the Skyrme force E_σ and Hartree-Fock approximation, the structure of neutron rich isotopes of Li and Be are studied. Special attention is paid to the neutron pairing interaction, which is treated with a particle number conservation method. Close connection between the neutron pairing interaction and the double neutron halo is demonstrated.

Key words Skyrme force E_σ , pairing interaction, particle number conservation method, neutron halo.