

在相对论平均场框架下 Pr 同位素链中滴线核的确定*

周勇^{1,2} 李君清^{1,2} 马中玉^{1,3} 陈宝秋^{1,3}

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 在相对论平均场框架下研究了 Pr 同位素链中中子和质子滴线核的可能位置及相关性质. 对效应的处理采用了 BCS 方法, 并使用了与同位素有关的对力常数, 对不成对的核子采用了‘阻塞法’, 考虑了核的轴对称形变. 计算结果表明, 对不同物理量的研究都可得到¹⁸⁵Pr 为同位素链中丰中子边最后一个稳定核. 而在丰质子边, 采用本方法很难确定质子滴线核的位置. 原因是由于在丰质子边随着 A 的减少, 费米面比丰中子边的费米面更快地趋于连续态, BCS 方法不再成立, 并须考虑束缚态和连续态的耦合.

关键词 同位素链 滴线核 对关联

1 引言

人们迄今对于核结构的理解基于有限的 β 稳定线附近的核. 当靠近滴线时最突出的性质是最外面核子的弱束缚, 即只有很小的结合能. 在此弱结合区域, 人们还不知道当核子分布密度改变时核力如何变化? 对相互作用的形式是什么? 众所周知, 自由核子的相互作用与核子在正常核中的相互作用是不同的, 在中子严重过剩的奇特核中, 几乎是纯中子物质弥散的外部区域中核子之间的相互作用也不清楚. 极端丰质子核的特殊现象是质子放射性, 由于外层质子的束缚非常弱, 并接近粒子连续态, 须同时考虑束缚和非束缚态.

现有的原子核理论模型都是在符合稳定线附近核实验基础上建立起来的, 当推广到滴线区和近滴线区时, 由于核的费米面接近连续态, 核子的分离能很小, 核表面有极大的弥散, 束缚态和连续态之间的可能耦合及可能的低能散射, 加之各种有效相互作用的变化, 可能出现非物理的结构等, 使得某些传统的核结构方法, 如处理对关联的 BCS(Bard-
een-Cooper-Schrieffer)近似变得不适用. 为了检验这些模型理论以便发展和建立能统一描述

1999-07-07 收稿

* 国家自然科学基金(19675070, 19775057, 19847002)和中国科学院重大项目及院长特别支持基金共同资助

从稳定核到滴线核的新的理论模型,我们在相对论平均场(RMF)理论框架下研究了 Pr 同位素链从质子滴线,越过稳定区,到达中子滴线的基态性质^[1]. 本文拟将研究和确定质子和中子滴线位置. 由于以上提到的各种问题,在我们的理论框架下精确地确定质子和中子滴线位置是不可能的. 但是至少可以给出关于滴线核的一些初步性质,和确定滴线核时所出现的问题,为进一步的研究所借鉴.

2 理论模型

采用与文献[1]相同的处理. 在 RMF 模型中有效拉氏量中考虑了同位旋标量 σ , ω 介子和同位旋矢量 ρ 介子,它能够很好地描述稳定核以及远离 β 稳定线核的性质^[2]. 选择计算 Pr 同位素链性质,Pr 是稀土区核,质子数 $Z = 59$. 因质子处于开壳,具有特别大的形变,便于检验对相互作用的影响. 其中对相互作用的处理使用了 BCS 方法,并采用了与同位素有关的中子和质子对力常数. 由于 Pr 同位素链是由奇 A 核和奇奇核组成的,对未配对的奇核子采用了阻塞(Blocking)近似. 考虑了 Pr 同位素链的轴对称形变,Dirac 方程和 Klein-Gordon 方程都按轴对称谐振子势的本征函数作基展开^[3].

采用了以上的处理之后,在文献[1]中我们计算了 Pr 链的基态平均结合能和形变,得到了与有限程小液滴模型(FRDM)^[4]符合很好的结果,并检验了 BCS 方法在同位素链中的适用程度及原因,还计算了 Pr 同位素链中一些核的中子、质子沿长轴的密度分布及同位素位移等. 说明虽然 BCS 方法对处理滴线附近核不够精确,但整个理论仍能描述同位素链的大致性质.

3 Pr 链中滴线核的确定

3.1 中子滴线核的确定

滴线核表现在从核中移走最后一个核子所需要的能量为零或负,即分离能为零或负. 图 1 显示的是 RMF 和 FRDM 模型计算的单中子(a)、双中子(b)分离能. 单中子分离能显示了明显的奇偶效应. RMF 和 FRDM 的结果符合得很好,并可观察到中子数 $N = 82$ 和 126 两个满壳的存在. 在单中子分离能中可见当 $A = 185$ 时,单中子分离能为正, $A = 186$ 时单中子分离能为负;在双中子分离能中可见当 $A = 185$ 时,双中子分离能为正, $A = 187$ 时双中子分离能为负. 这都说明 $A = 185$ 是最后一个稳定核,即中子滴线核. 从图 2 显示的最后一个奇中子均方根半径中还可以发现,核 $A = 184$ 到核 $A = 186$ 有 0.8fm 的大突变, $A = 186$ 核的最后一个奇中子密度分布比 $A = 184$ 核有很大的弥散. 由于¹⁸⁶Pr₁₂₇的最后一个奇中子已经处于连续态,BCS 理论已经不再适用.

在图 3 中给出了费米面附近核¹¹⁸Pr 和¹¹⁹Pr 的质子能级及核¹⁸⁵Pr 和¹⁸⁶Pr 的中子能级. 可以看到¹⁸⁵Pr 的最后两个中子分布在态 $\frac{13}{2}^+$ (分布几率 97.2%)处,而¹⁸⁶Pr 的最后一个中子则分布在正能态 $\frac{1}{2}^+$ (分布几率 100%)位置上,因此从我们的计算得到中子滴线核是¹⁸⁶Pr.

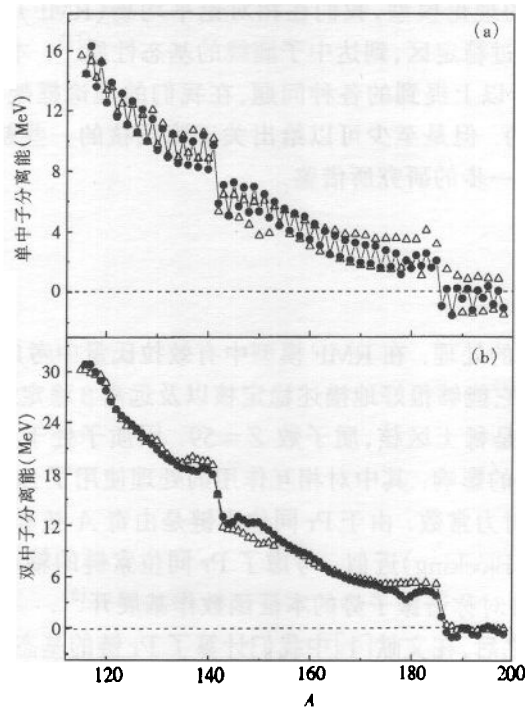


图 1 分离能随 A 的变化

(a)单中子分离能,(b)双中子分离能. Δ 代表 RMF 结果, \bullet 代表 FRDM 结果.

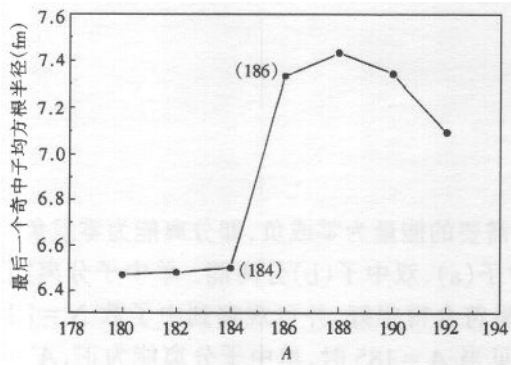


图 2 最后一个奇中子均方根半径

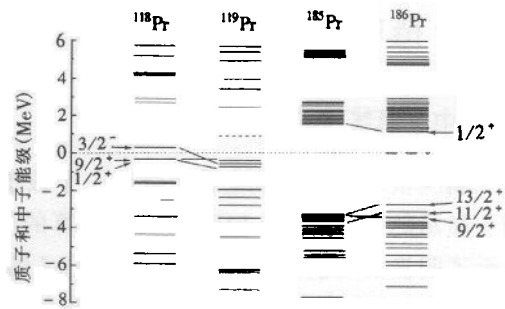


图 3 费米面附近质子和中子能级图

3.2 质子滴线核的确定

在图 4 中给出了质子数 $Z = 59$ 时单质子分离能随中子数 N 的变化曲线. 随着中子数的减少, Pr 同位素链逐渐接近质子滴线. 从图中看到 ^{122}Pr , ^{121}Pr 核的单质子分离能接近零, $N \leq 62$ 的核单质子分离能为负值.

从图 3 可以看到, 丰质子核 ^{119}Pr 的最后一个质子分布在态 $\frac{9}{2}^+$ (分布几率 100%) 处, 而 ^{118}Pr 的最后一个质子分布在已经处于连续态的 $\frac{3}{2}$ (分布几率 100%) 上. 所以如果忽

略库仑位垒, ^{118}Pr 可能是质子滴线核. 这个结果与最后一个质子分离能的结果并不一致, 其原因是由于这些核的费米面已处于连续态. 在文献[1]图 2(b)中给出 ^{120}Pr 核的费米面已处于连续态. 在质子滴线附近, 平均场十分微弱. 当费米面从 $-4\text{—}0\text{MeV}$ 时, 我们计算得到的质子对修正强度为 $1.3\text{—}0.6\text{MeV}$, 平均值约为 1MeV , 这时对效应和平均场强度差不多大, 甚至比平均场强. 因此在丰质子边, BCS 方法将对相互作用处理为微扰是不适合的^[5], 不能由此确定质子滴线位置. 在丰中子边, 由于 $N=126$ 满壳的存在, 费米面在很大的质量区域保持在 -3MeV 左右, 而在 $A=161\text{—}185$ 区域中子对修正强度除了在 $N=126$ 满壳外平均约为 0.9MeV , 这时将对修正当作微扰虽然不精确, 但还能从不同物理量得到一致的结果.

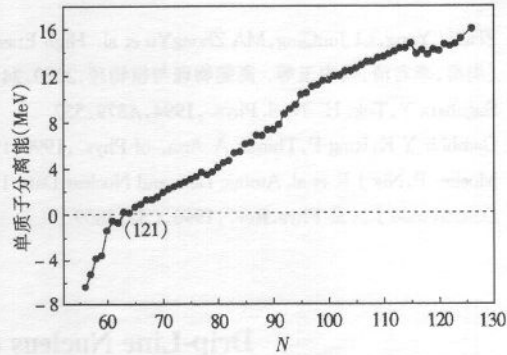


图 4 $Z=59$ 时单质子分离能随中子数的变化

确定质子滴线位置的困难与极端丰质子核的质子放射性这一特殊现象相联系. 在重核如所考虑的稀土区 Pr 同位素链的丰质子边, 库仑排斥较强. 由文献[1]图 2(b)中可看到接近滴线时, 平均场是非常浅的. 库仑位垒和离心位垒的存在使接近连续区的地方有许多亚稳态能级, 这些亚稳态能级与连续态之间存在相互作用, 使一些质子可能占据非束缚能级, 位于粒子连续态. 由于系统处于亚稳态, 用解定态方程的方法很难定义质子滴线位置. 深入地研究必须考虑质子发射过程的衰变率, 这个衰变率对量子数、对父态和子态的结构都很敏感, 本文尚未涉及到这方面的研究.

4 结果和讨论

我们采用包含非线性介子自相互作用的相对论平均场理论, 用 BCS 方法处理对相互作用, 并采用了与同位旋有关的中子和质子对力常数. 对单独未配对的核子采用了阻塞近似. 并考虑了轴对称形变, 将 Dirac 方程和 Klein-Gordon 方程以轴对称谐振子势的本征波函数为基作展开. 在此基础上研究了 Pr 同位素链的质子和中子滴线位置. 从不同的物理量观察的结果发现, 当 Pr 链远离稳定区到达丰中子滴线时, 由于 $N=126$ 满壳的存在, 使费米面处在束缚区内, 这时从单中子、双中子分离能, 从最后一个奇中子的均方根半径, 从费米面附近中子的能谱及填充来研究中子滴线时都得到一致的结果, 即 ^{186}Pr 为中子滴线核. 而在丰质子边, 随着 Pr 链中子数的减少, 费米面很快地趋于连续态, 用 BCS 方法将对相互作用处理为微扰不再成立. 因此从最后一个质子的分离能、费米面附近质子的能谱及填充得到不一致的结果. 正确的方法显然是应对相互作用放到动力学方程里面去, 并要考虑库仑相互作用, 同时处理束缚态和连续态, 考虑它们之间的相互作用和巨共振现象. 这将是下一步我们将考虑的问题.

参考文献 (References)

- 1 ZHOU Yong, LI JunQing, MA ZhongYu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 2000, **24**(8):748
(周勇, 李君清, 马中玉等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(8):748)
- 2 Sugahara Y, Toki H. Nucl. Phys. , 1994, **A579**:557
- 3 Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. Ann. of Phys. , 1990, **198**:132
- 4 Moeller P, Nix J R et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, **59**:185
- 5 Dobaczewski J et al. Phys. Rev. , 1996, **C53**:2809

Drip-Line Nucleus of $Z = 59$ Nuclei in the Relativistic Mean-Field Theory *ZHOU Yong^{1,2} LI JunQing^{1,2} MA ZhongYu^{1,3} CHEN BaoQiu^{1,3}

1 (Research Center of Nuclear Theory of National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

2 (Institute of Modern Physics, Lanzhou, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

3 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The possible neutron and proton drip-line nuclei and their corresponding properties of Pr isotope chain are studied in the framework of the relativistic mean-field(RMF) theory with non-linear meson self-interactions. The pairing effect is treated by BCS method and the isospin dependent pairing strengths have been adopted. The 'blocking' method is used to deal with the last unpaired nucleon and the axially symmetric deformation is assumed. The theoretical results show that the nucleus ^{185}Pr could be determined as the last stable nucleus with respect to the nucleon emission on the neutron rich side from various aspects, while on the proton rich side, it is difficult to determine the proton drip-line nucleus in present studies. The reason is that on the proton rich side the Fermi surface increases faster towards the continuum state than that on the neutron rich side, where the BCS method fails, and the coupling between bound and continuum states should be taken into account.

Key words isotope chain, drip-line nuclei, pairing correlation

Received 7 July 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19675057, 19775057, 19847002), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences and Special Foundation of the Director of The Chinese Academy of Sciences