

丰中子 $Z = 96—102$ 同位素链的 $N = 184$ 闭壳*

丁斌刚^{1,1)} 张大立¹ 鲁定辉²

1 (湖州师范学院理学院 浙江湖州 313000)

2 (浙江大学近代物理中心 杭州 310027)

摘要 在相对论平均场理论框架下, 首先证明了对力强度存在明显的壳效应, 然后用此方法研究了 $Z = 96—102$ 区域内超重同位素链中中子壳封闭问题, 证明了在超重元素中, $N = 184$ 处确实存在壳封闭. 并据此给出了一种检验壳封闭的新方法.

关键词 相对论平均场理论 壳闭合 对力强度

1 引言

在自然界存在的核素中, 有270多个稳定核素和60多个寿命较长的天然放射性元素, 此外, 数十年来人工合成了2千多种放射性核素, 而核结构理论预言存在超过7千种寿命比 μs 长的核素. 所以, 寻找、合成新核素并研究其性质, 一直是核科学研究的重要任务. 而超重元素, 由于存在丰富的同位素, 是寻找和合成新核素的首选区域. 按照原子核壳模型理论, 核子数是满壳层(壳封闭)的元素是最稳定的, 在自然界最容易存在. 所以, 从理论上预言新的幻数并据此寻找可能存在的较长寿命的新核素, 是合成新核素的有效途径. 数十年来已有许多人进行了这方面的研究^[1-5]. 最近, 邵非等在相对论平均场模型框架下, 用TMA和NL-Z2两组参数研究了 $Z = 96—102$ 超重核同位素链在 $N = 184$ 处是否存在中子壳效应的问题^[6]. 他们是通过计算四极形变参数和 α 衰变能的方法, 预言在 $N = 184$ 处存在壳封闭. 但由于缺少部分实验数据, 而且在 $N = 184$ 附近的四极形变参数变化不大, 故我们认为最好要有新的证据加以进一步的证明. 本文拟在相对论平均场加BCS理论模型的框架下, 通过研究对力强度随核子数的变化规律, 揭示对力强度的壳效应, 从而检验在 $N = 184$ 处是否是闭壳.

2 理论方法

不论是球对称单粒子模型还是形变的单粒子模型, 都是建立在平均势的基础上. 然而, 粒子除了受到平均势的作用外, 还受到剩余相互作用. 剩余相互作用将使单粒子受到扰动, 引起单粒子态的混合(组态混合)以及能级的移动和分裂. 剩余相互作用最重要的短程分量是所谓配对相互作用, 即对关联. BCS理论是研究对关联的最常见的方法, 它定义

$$\Delta = G \sum_i u_i v_i, \quad (1)$$

这里 Δ 是对能隙, 由原子核的奇偶质量差决定, G 是对力强度, u_i 和 v_i 是单粒子态空着和被占据的几率幅, 求和是针对所有可能存在的组态 i . 从公式(1)可知, 对于一定的 Δ , G 的大小取决于 $\sum_i u_i v_i$, $\sum_i u_i v_i$ 的大小应和核的壳结构有关, 当核处于满壳时, 原子核最稳定, 在费米面以下的态几乎全被占据, $u_i \approx 0$; 在费米面以上的态, 几乎全空着, $v_i \approx 0$. 所以, 可以猜想的结果是核处于满壳时, $\sum_i u_i v_i$ 最小, G 应是最大. 由此, 可以根据对力强度 G 随核子数的变化规律, 确定壳闭合是否存在. 这就是本文研究的理论出发点.

对力强度的计算, 依赖RMF+BCS模型. 下面仅

2005-11-04 收稿

*国家自然科学基金(10475026), 浙江省自然科学基金(Y604060)和浙江省教育厅高校一般项目(20051341)资助

1) E-mail: dingbingang@163.com

给出该模型的主要框架和相关的计算公式, 详细地阅读请参看相关文献[7—10]. 相对论平均场的出发点是一个包含核子和介子场的拉氏密度

$$L = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M)\psi + \frac{1}{2}\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - \frac{1}{2}m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3}g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4}g_3 \sigma^4 - \frac{1}{4}\Omega_{\mu\nu} \Omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu - \frac{1}{4}\mathbf{R}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{R}^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2 \boldsymbol{\rho}^\mu \cdot \boldsymbol{\rho}^\mu - \frac{1}{4}F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + g_\sigma \bar{\psi} \sigma \psi - g_\omega \bar{\psi} \gamma^\mu \omega_\mu \psi - g_\rho \bar{\psi} \boldsymbol{\gamma}^\mu \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\rho}_\mu \psi - e \bar{\psi} \gamma^\mu A_\mu \frac{1+\tau_3}{2} \psi, \quad (2)$$

其中 ψ 和 M 代表核子场和核子质量, 介子场分别为 σ , ω 和 $\boldsymbol{\rho}$, 相应的质量和耦合常数分别是 m_σ , m_ω , m_ρ 和 g_σ , g_ω , g_ρ . g_2 , g_3 是 σ 介子的自相互作用非线性耦合常数. A^μ 代表光子场, $\boldsymbol{\tau}$ 是同位旋泡利算符, τ_3 是其第三分量.

矢量介子场张量 $\Omega^{\mu\nu}$, $\mathbf{R}^{\mu\nu}$ 和电磁场张量 $A^{\mu\nu}$ 取如下形式:

$$\begin{aligned} \Omega^{\mu\nu} &= \partial^\mu \omega^\nu - \partial^\nu \omega^\mu, \\ \mathbf{R}^{\mu\nu} &= \partial^\mu \boldsymbol{\rho}^\nu - \partial^\nu \boldsymbol{\rho}^\mu, \\ F^{\mu\nu} &= \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu. \end{aligned} \quad (3)$$

运用变分原理可得出拉格朗日方程, 在相对论平均场近似下有核子场满足的 Dirac 方程

$$\{-i\boldsymbol{\alpha} \cdot \nabla + V(\mathbf{r}) + \beta[M + S(\mathbf{r})]\}\psi_i = \varepsilon_i \psi_i, \quad (4)$$

其中 $V(\mathbf{r})$ 表示矢量势

$$V(\mathbf{r}) = g_\omega \omega_0 + g_\rho \tau_3 \rho_0(\mathbf{r}) + e \frac{1+\tau_3}{2} A_0(\mathbf{r}). \quad (5)$$

$S(\mathbf{r})$ 表示标量势

$$S(\mathbf{r}) = g_\sigma \sigma(\mathbf{r}). \quad (6)$$

介子场的 Klein-Gordon 方程和电磁场方程分别为

$$(-\Delta + m_\sigma^2)\sigma(\mathbf{r}) = -g_\sigma \rho_s(\mathbf{r}) - g_2 \sigma^2(\mathbf{r}) - g_3 \sigma^3(\mathbf{r}), \quad (7)$$

$$(-\Delta + m_\omega^2)\omega_0(\mathbf{r}) = g_\omega \rho_v(\mathbf{r}), \quad (8)$$

$$(-\Delta + m_\rho^2)\rho_0(\mathbf{r}) = g_\rho \rho_3(\mathbf{r}), \quad (9)$$

$$-\Delta A_0 = e \rho_c(\mathbf{r}), \quad (10)$$

其中对应的源密度为

$$\rho_s = \sum_i n_i \bar{\psi}_i \psi_i, \quad (11)$$

$$\rho_v = \sum_i n_i \psi_i^+ \psi_i, \quad (12)$$

$$\rho_3 = \sum_p n_i \psi_p^+ \psi_p - \sum_n n_i \psi_n^+ \psi_n, \quad (13)$$

$$\rho_c = \sum_p n_i \psi_p^+ \psi_p. \quad (14)$$

这里只对价核子求和, 忽略了负能态和真空极化的贡献. σ_0 , ω_0 , ρ_0 和 A_0 是介子场和光子场的时间分量, τ_3 是同位旋泡利算符第三分量, n_i 是核子的占有数. 体系的对能

$$E_{\text{pair}} = \Delta \sum_i u_i v_i, \quad (15)$$

其中

$$u_i^2 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\varepsilon_i - \lambda}{\sqrt{(\varepsilon_i - \lambda)^2 + \Delta^2}} \right], \quad (16)$$

$$v_i^2 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\varepsilon_i - \lambda}{\sqrt{(\varepsilon_i - \lambda)^2 + \Delta^2}} \right]. \quad (17)$$

再由公式(1)和(15), 马上得到

$$G = \frac{\Delta^2}{E_{\text{pair}}}. \quad (18)$$

若要区分中子和质子的对力强度 G_n 和 G_p , 则有

$$G_n = \frac{\Delta_n^2}{E(\mathbf{n})_{\text{pair}}}, \quad (19)$$

$$G_p = \frac{\Delta_p^2}{E(\mathbf{p})_{\text{pair}}}. \quad (20)$$

上述两公式, 就是以下进行计算的基本公式. 它们其实和用公式(1)在已知 $\Delta_n(\Delta_p)$ 的条件下用迭代方法求 $G_n(G_p)$ 本质上是一样的, 故求得的 $G_n(G_p)$ 应是由 BCS 理论定义的对力强度.

3 计算和结果

RMF+BCS 模型有几组不同的相互作用参数组, 本文采用常见的 NL-3^[11] 参数组, 在计算中, 形变的初始值 β_2 根据有限程液滴模型^[12] 的计算结果输入, 谐振子参数取 $b_0 = 41/A^{-1/3}$.

3.1 对力强度存在壳效应的证明

首先计算 Ca 和 K 两个同位素链. 根据公式(2)和我们的验算, 对力强度 $G_n(G_p)$ 分别随对能隙 $\Delta_n(\Delta_p)$ 的增加而增大, 故在计算中固定取 $\Delta_n(\Delta_p) = 1\text{MeV}$. 按有限程液滴模型的计算结果, Ca 同位素链大多是球形核, 有明显的球形壳结构, 且相互作用参数组在该区域和实验吻合得很好, 它是检验一个新理论的最好区域, 而 K 同位素链的质子数是奇数, 有一半核是奇奇核, 它是对一个新理论的更严格的检验, 计算结果见图 1.

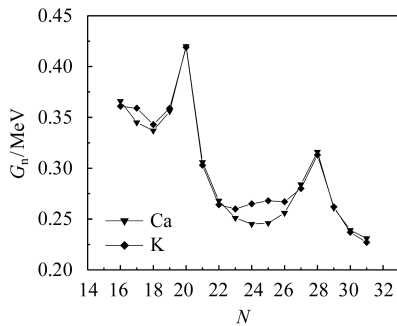


图1 同位素链Ca和K的对力强度 G_n 随中子数 N 的变化

进一步计算了稀土区的同位素链, 因为稀土区的核具有中等大小且有丰富的实验数据, 一直是各种核理论模型的最佳应用区域. 所以, 以它作为验证对象更具代表性. 在计算过程中, Δ_n 和 Δ_p 由下列公式计算:

$$\Delta_n = \frac{1}{4} [B(Z, N-2) - 3B(Z, N-1) + 3B(Z, N) - B(Z, N+1)],$$

$$\Delta_p = \frac{1}{4} [B(Z-2, N) - 3B(Z-1, N) + 3B(Z, N) - B(Z+1, N)].$$

计算结果如图2所示.

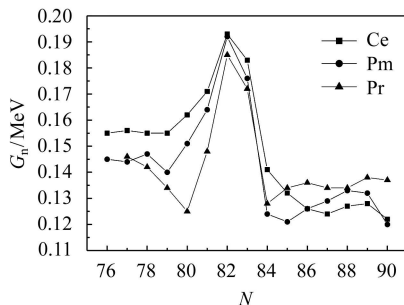


图2 Ce, Pr, Pm 3个同位素链的 G_n 随中子数 N 的变化

从以上计算结果可知, 不论对能隙按哪种方法取值, 也不论是轻核还是中等核, 也不论是偶偶核还是奇 A 核, 对力强度 G_n 都表现出明显的壳效应.

3.2 超重元素中子壳封闭的证明

通过3.1节的计算, 可以认定, 如果超重元素在 $N = 184$ 存在壳封闭, 则在该处的 G_n 将特别大. 为了和文献[6]比较, 同样选取 $Z = 96-102$ 超重区域中的偶核同位素链Cm, Cf, Fm和No作为研究对象, 让中子数 N 从162变化到190. 对能隙按经验公式 $\Delta_n(\Delta_p) = 11.2/\sqrt{A}$ 取值, 中子对力强度 G_n 的计算结果如图3所示.

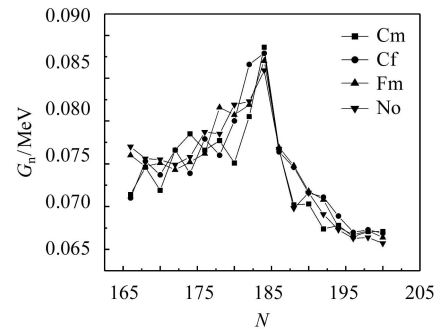


图3 Cm, Cf, Fm和No 4个同位素链的中子对力强度 G_n 随中子数 N 的变化

从图3可知, Cm, Cf, Fm和No 4个同位素链无一例外地在 $N = 184$ 处有 G_n 的极大值, 因此, 结合文献[6], 可以进一步认定, 在超重元素中, $N = 184$ 处确实存在中子壳层.

4 结论

通过上述计算, 我们认为在RMF+BCS理论模型下计算的对力强度, 确实存在明显的壳效应, 它是原子核壳层结构的必然反映. 根据对力强度的壳效应, 可以比较方便地检验壳封闭的存在, 并且证明了在超重元素 $N = 184$ 处是一个封闭的壳层.

参考文献(References)

- DING Bin-Gang, SHEN Shui-Fa. Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry, 2005, **265**: 515
- Hofmann S, Munzenberg G. Reviews of Modern Physics, 2000, **72**: 733
- CHEN Ding-Han, TAI Fei, REN Zhong-Zhou. HEP & NP, 2003, **27**(8): 707 (in Chinese)
(陈鼎汉, 邰非, 任中洲. 高能物理与核物理, 2003, **27**(8): 707)
- TAI Fei, CHEN Ding-Han, REN Zhong-Zhou. Nuclear Physics Review, 2003, **20**(2): 154 (in Chinese)
(邰非, 陈鼎汉, 任中洲. 原子核物理评论, 2003, **20**(2): 154)
- REN Zhong-Zhou, TAI Fei, CHEN Ding-Han. Phys. Rev., 2002, **C60**: 064306
- TAI Fei, CHEN Ding-Han, REN Zhong-Zhou. HEP & NP, 2005, **29**(2): 152 (in Chinese)
(邰非, 陈鼎汉, 任中洲. 高能物理与核物理, 2005, **29**(2): 152)
- Lalazissis G A, Konig J, Ring P. Phys. Rev., 1997, **C55**: 540
- RING P, Gambhir Y K, Lalazissis G A. Comp. Phys. Commun., 1997, **105**: 77
- LONG Wen-Hui, MENG Jie, ZHOU Shan-Gui. HEP & NP, 2002, **26**: 823 (in Chinese)
(龙文辉, 孟杰, 周善贵. 高能物理与核物理, 2002, **26**: 823)
- ZHONG Xian-Hui, LI Lei, ZHANG Xiao-Bing et al. HEP

- & NP, 2003, **27**: 598 (in Chinese) 132
(钟显辉, 李磊, 张小兵等. 高能物理与核物理, 2003, **27**: 598) 12 Moeller P, Nix J R, Myers W D et al. At. Data Nucl. Data
11 Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. Ann. Phys., 1990, **198**: Tables, 1995, **59**: 185

Closed Shell at $N = 184$ for the Isotope Chain of Neutron Rich Nuclei $Z = 96-102$ *

DING Bin-Gang^{1;1)} ZHANG Da-Li¹ LU Ding-Hui²

1 (College of Science, Huzhou Teacher's College, Zhejiang Huzhou 313000, China)

2 (Institute of Modern Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract The clear shell effect of the pairing strength is proved based on the frame of the relativistic mean field theory. With the same theory, the closed shell problem of the superheavy isotope chain around $Z = 96-102$ is studied. The results show that $N = 184$ for neutron is a closed shell. According to the study, a new method to check the shell closure is given.

Key words relativistic mean field theory, shell closure, pairing strength

Received 4 November 2005

*Supported by NSFC (10475026), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y604060) and University General Project of Zhejiang Province (20051341)

1) E-mail: dingbingang@163.com