

# 反射不对称壳模型对 $^{221,223}\text{Ra}$ 的描述\*

陈永静<sup>1,1)</sup> 陈永寿<sup>2</sup> 朱胜江<sup>1</sup> 高早春<sup>2</sup>

1 (清华大学物理系 北京 100084)

2 (中国原子能科学研究院核物理所 北京 102413)

**摘要** 用反射不对称壳模型描述了奇  $A$  核  $^{221,223}\text{Ra}$  的低激发态能谱, 计算结果非常好地再现了  $^{221,223}\text{Ra}$  基态的自旋、宇称以及具有相反宇称的基态宇称二重带. 基态宇称二重带的存在表明  $^{221,223}\text{Ra}$  的基态确实具有反射不对称形状, 即八极形变.

**关键词** 壳模型 反射不对称形状 八极形变 宇称二重带

## 1 引言

20世纪50年代, 人们发现Ra和Th偶偶核中的正宇称态附近伴随着很低的负宇称激发态<sup>[1]</sup>, 且正负宇称态按  $0^+, 1^-, 2^+ \dots$  系列交替出现, 类似反射不对称分子的能谱特征. 于是人们想到了有些原子核可能具有内禀反射不对称形状, 可以用具有反射对称性被破坏的内禀平均场来描述, 体现为原子核具有八极形变. 有人预言原子核平均场中的八极形变成分会影响原子核的一些单粒子轨道, 进而影响原子核的转动带结构. 在奇  $A$  核中, 由于最后一个奇核子的存在, 八极形变的影响会有更清楚的表现. 文献[2]曾预言奇  $A$  核内禀反射不对称性表现为存在“宇称二重带”, 每一个带头总有另一个与它能量接近且具有相同  $K$  值和相反宇称的带头出现.

因为奇  $A$  核的能谱性质直接与内禀宇称被破坏的单粒子轨道密切相关, 所以八极形变奇  $A$  核能谱的研究在原子核反射不对称性研究方面占有特别重要的地位. 有许多理论模型和方法被用来描述  $A \sim 219-229$  质量区奇  $A$  核的反射不对称性<sup>[3-5]</sup>, 特别指出的是文献[3]中的反射不对称转子模型, 此模型在描述该质量区奇  $A$  核的低激发能谱和电磁跃迁方面取得了很大的成功. 但是粒子-转子模型是一个唯象的模型, 其核确实没有任何内禀结构, 因此需要一种合适的微观理论对八极形变奇  $A$  核的高自旋态进行细致的描述.

## 2 理论模型

反射不对称壳模型(RASM)是近年来发展起来的一种新的描述八极形变核的原子核模型<sup>[6]</sup>, 是投影壳模型<sup>[7]</sup>的延伸. 它采用变形的Nilsson + BCS多准粒子态作为基矢, 这种基矢破坏了内禀体系的转动对称性和反射对称性, 在实验室坐标系下可以通过角动量投影和宇称投影将其恢复. RASM已经成功地描述了Ra偶偶八极形变核的能谱<sup>[6]</sup>, 本文将把它推广到奇  $A$  核, 初步用它来描述Ra奇质量核的八极形变. 下面简单介绍反射不对称壳模型理论.

选定一系列变形准粒子态  $\{|\Phi_\kappa\rangle\}$ ,  $\kappa$  代表准粒子组态, 可以构造如下形式的试探波函数:

$$|\Psi\rangle = \sum_{IMKp\kappa} F_{MK\kappa}^{Ip} P^p P_{MK}^I |\Phi_\kappa\rangle, \quad (1)$$

式中  $\{P^p P_{MK}^I |\Phi_\kappa\rangle\}$  是形成壳模型空间的一系列角动量和宇称同时投影的多准粒子组态, 且允许组态混合.  $P_{MK}^I, P^p$  和  $F_{MK\kappa}^{Ip}$  分别表示角动量和宇称投影算符及变分系数. 变分系数可以通过对角化壳模型哈密顿量来获得(它实际上与磁量子数  $M$  无关, 所以省去脚标  $M$ ), 也就是解下列本征方程:

$$\sum_{K\kappa} F_{K\kappa}^{Ip} (\langle \Phi_{\kappa'} | H P^p P_{K'K}^I | \Phi_\kappa \rangle - E^{Ip} \langle \Phi_{\kappa'} | P^p P_{K'K}^I | \Phi_\kappa \rangle) = 0, \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金(10375032, 10305019)资助

1) E-mail: yj-chen@mail.tsinghua.edu.cn

归一化条件为

$$\sum_{K\kappa K'\kappa'} F_{K'\kappa'}^{I_p^*} \langle \Phi_{K'} | P^p P_{K'\kappa}^I | \Phi_{K\kappa} \rangle F_{K\kappa}^{I_p} = 1, \quad (3)$$

计算中使用的哈密顿量为

$$H = H_0 - \frac{1}{2} \sum_{\lambda=2}^4 \chi_{\lambda} \sum_{\mu=-\lambda}^{\lambda} Q_{\lambda\mu}^+ Q_{\lambda\mu} - G_0 P_{00}^+ P_{00} - G_2 \sum_{\mu=-2}^2 P_{2\mu}^+ P_{2\mu}, \quad (4)$$

(4)式中  $H_0$  是球形Nilsson哈密顿量, 第二项包括四极、八极和十六极相互作用, 第三项和第四项分别为单极对力和四极对力相互作用项. 解不同角动量和宇称的本征方程即可得到对应于不同角动量和宇称的本征能量, 进而得到原子核的八极转动带, 从中可以挑选出基态带以及准粒子激发带.

在RASM中, 构成奇  $A$  核的基矢有一准粒子和三准粒子变形态, 作为该理论对奇  $A$  核的初步应用, 这里只考虑了一准粒子变形态.

哈密顿量  $H$  中的单极对力强度取为  $G_0 = (g_1 \pm g_2(N - Z)/A)/A$ , 其中负号和正号分别对应于质子和中子;  $g_1$  和  $g_2$  取值分别为17.52和10.83. 计算Nilsson单粒子态时中子(质子)大壳分别取  $N = 4, 5, 6(3, 4, 5)$  3个主壳. Nilsson参数  $\kappa$  和  $\mu$  取自文献[6]. 所计算的Ra的单中子Nilsson能级如图1所示, 可以看出在中子数  $N = 132$  和  $138$  的地方出现明显的能隙.

### 3 计算结果及分析

限于文章篇幅, 这里只给出RASM对典型八极形变奇  $A$  核  $^{221,223}\text{Ra}$  能谱的计算结果. 计算  $^{221}\text{Ra}$  使用的形变参数为  $\varepsilon_2 = 0.11$ ,  $\varepsilon_3 = 0.1$ ,  $\varepsilon_4 = -0.08$ ; 计算  $^{223}\text{Ra}$  使用的形变参数为  $\varepsilon_2 = 0.125$ ,  $\varepsilon_3 = 0.09$ ,  $\varepsilon_4 = -0.07$ . 计算结果中能量最低的态我们认为基态. 实验上给出  $^{221}\text{Ra}$  的基态自旋为  $5/2$  [8]. 在 RASM 对  $^{221}\text{Ra}$  的计算结果中, 最低的能级属于  $K = 5/2$  宇称二重带, 在这个宇称二重带中正宇称转动带带首能量最低, 所以把它定为基态带, 相应的基态自旋是  $5/2$ , 宇称为正, 这与实验结果是一致的, 从图1的单粒子能级图上也可以得到解释.  $^{221}\text{Ra}$  的中子数  $N = 133$ , 当八极形变  $\varepsilon_3 = 0.1$  时, 基态时最后一个粒子正好填在  $N = 132$  费米面之上的  $K = 5/2$  单粒子轨道上, 所以基态自旋是  $5/2$ . 对  $^{223}\text{Ra}$ , RASM 计算结果中能级最低的属于  $K = 3/2$  宇称对二重带, 其

中正宇称转动带带首能量最低, 因此这条带就是理论计算的基态带, 对应的带首自旋  $3/2$  是基态的自旋, 宇称为正, 这与实验上给出的  $3/2^+$  也是一致的 [9]. 从单粒子能级图1可以看到, 当八极形变  $\varepsilon_3 = 0.09$  时,  $^{223}\text{Ra}$  ( $N = 135$ ) 的最后一个中子在基态时正好填在  $N = 132$  和  $N = 138$  中子费米面中间的  $K = 3/2$  轨道上, 因此它的基态自旋是  $3/2$ .

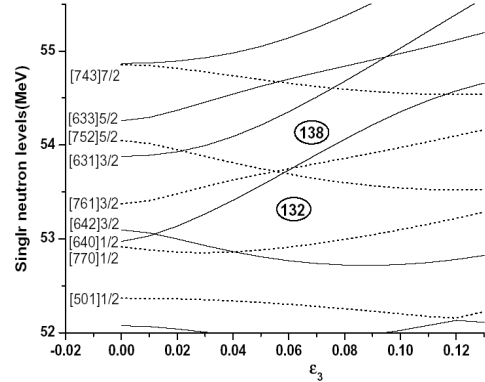


图1 Ra同位素中子的Nilsson能级

$\varepsilon_2 = 0.12$ ,  $\varepsilon_4 = -0.06$  实线代表正宇称, 虚线代表负宇称.

由于八极形变原子核的内禀组态的宇称是混合的, 因此建立在同一内部态上的各转动带具有相反的宇称, 我们的计算结果很好地再现了这一特征. 图2和图3给出了RASM计算的  $^{221,223}\text{Ra}$  正负宇称混合的转动带(图中虚线), 同时为了方便比较在图中也给出实验结果(图中实线). 相对来说, 两个核正宇称转动带能级的RASM计算值与实验能级符合的较好, 特别是  $^{221}\text{Ra}$  的  $K = 5/2$  正宇称转动带, 在角动量小于  $23/2$  时符合的更好. 对于  $^{221}\text{Ra}$  的  $K = 5/2$  负宇称带, 较低自旋的能级计算值与实验能级符合的比较好, 但是后面几个能级计算结果有偏差. 另外, 自旋等于  $5/2, 7/2, 9/2$  和  $11/2$  的实验能级还没有测出, 我们给

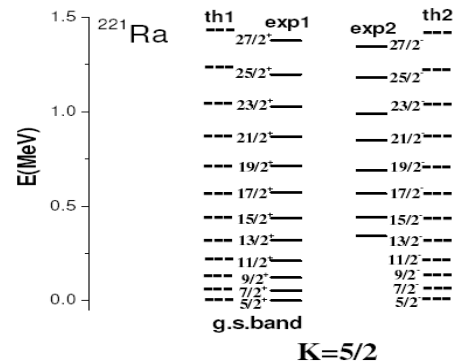


图2  $^{221}\text{Ra}$  的计算结果与实验值比较

实线exp1和exp2分别表示正负宇称带的实验值 [8], 虚线th1和th2表示正负宇称带的RASM理论计算值, 图中所标为能级对应的自旋和宇称.

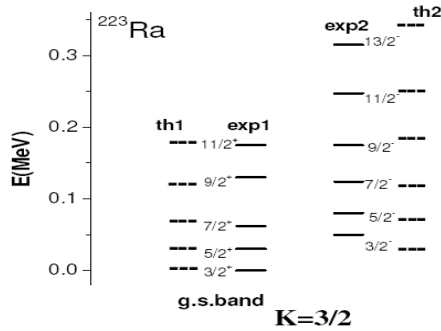


图 3  $^{223}\text{Ra}$  的计算结果与实验值的比较  
实验值取自文献[9]. 图中的说明同图2.

出这几条能级的RASM理论计算值, 并有待与实验结果进行比较. 对于  $^{223}\text{Ra}$ ,  $K=3/2$  负宇称带的计算

结果与实验测得的能级有一定的非系统的差距. 总体来说, 目前RASM还是能很好地描述奇  $A$  核的八极形变.

## 4 结论

本文把反射不对称壳模型推广到奇  $A$  核, 并用它对典型八极形变奇  $A$  核  $^{221,223}\text{Ra}$  的高自旋态进行了描述. 能谱的理论计算值与实验值比较有这样好的符合说明了基于壳模型基础的该理论模型相当好地描述了奇  $A$  核的八极形变, 对于进一步理解原子核结构是非常有益的尝试.

## 参考文献(References)

- Asaro F et al. Phys. Rev., 1953, **92**: 1495
- Chasman R R. Phys. Lett., 1980, **B96**: 7
- Leander G A, CHEN Y S. Phys. Rev., 1988, **C37**: 2744
- Leander G A, Sheline R K. Nucl. Phys., 1984, **A413**: 375
- Sheline R K et al. Phys. Lett., 1989, **B219**: 47
- CHEN Y S, GAO Z C. Phys. Rev., 2000, **C63**: 014314
- Hara K, Sun Y. Int. J. Mod. Phys., 1995, **E4**: 637
- Fernández-Niello et al. Nucl. Phys., 1991, **A531**: 164
- Sheline R K, CHEN YS, Leader G A. Nucl. Phys., 1988, **A486**: 306

# Reflection-Asymmetric Shell Model Description of the Nuclei $^{221,223}\text{Ra}$ \*

CHEN Yong-Jing <sup>1;1)</sup> CHEN Yong-Shou <sup>2</sup> ZHU Sheng-Jiang <sup>1</sup> GAO Zao-Chun <sup>2</sup>

<sup>1</sup> (Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>2</sup> (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** Reflection asymmetric shell model is applied for the description of the low-energy level spectrum in odd- $A$   $^{221,223}\text{Ra}$  nuclei. The ground-state spin parity and the ground-state parity doublet bands are well reproduced by the present model. The presence of parity doublets suggests reflection-asymmetric (octupole deformed) shapes for nuclei  $^{221}\text{Ra}$  and  $^{223}\text{Ra}$ .

**Key words** shell model, reflection-asymmetric shape, octupole-deformation, parity doublets

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(10375032, 10305019)

1) E-mail: yj-chen@mail.tsinghua.edu.cn