$N=100$ 附近同中子偶偶核高- K 转动带的组态限制计算

戴阿灿, 许甫荣*

北京大学物理学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: frxu@pku.edu.cn

2019-05-12 收稿, 2019-05-23 修回, 2019-05-24 接受, 2019-06-27 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404401)和国家自然科学基金(11835001, 11575007)资助

摘要 通过基于Skyrme Hartree-Fock(HF)的组态限制推转壳模型方法系统计算了 $N=100$ 附近同中子原子核的基态带和高- K 转动带. 采用粒子数守恒(particle-number-conserving, PNC)方法处理对相互作用. 计算的基带和边带都很好地描述了实验转动惯量. 对 ^{160}Sm , ^{164}Dy , ^{166}Er 和 ^{168}Yb 同中子核的 $K^\pi=6^-$ 转动带, ^{168}Er 和 ^{170}Yb 的 $K^\pi=4^-$ 转动带以及 ^{170}Er 和 ^{172}Yb 的 $K^\pi=6^-$ 转动带进行了系统的研究, 并对其进行了相应的微观解释. 同时, 还预言了 ^{158}Nd 和 ^{162}Gd 同中子核的 $K^\pi=6^-$ 转动带以及 ^{160}Nd , ^{162}Sm , ^{164}Gd 和 ^{166}Dy 同中子核的 $K^\pi=4^-$ 转动带. 深入研究了原子核转动特性, 并对将来的实验提供了有用的信息.

关键词 组态限制, 粒子数守恒, 同中子核, 高- K 转动带

多准粒子转动带在核物理领域里是一个研究热点, 它可以提供非常丰富的原子核结构信息, 比如原子核形变、单粒子能级、组态混合等. 稀土区($Z=57\sim 71$)是研究原子核高- K 态和高- K 转动的有利核区. 这片区域原子核的质子数和中子数都位于两个幻数之间, 在半满壳附近. 这使其具有好的轴对称形变, 容易形成所谓的“ K -trap”^[1], 即原子核高- K 态不容易通过 γ 跃迁而迅速衰变. 此外, 这片核区也是研究 r -过程核合成的有利核区. 在超过半满壳的 $A\sim 180$ ($Z\sim 72$)区域, 存在大量的同核异能态(isomer)以及建立在这些同核异能态上的转动带^[1~5], 即所谓的高- K 转动. 在这片区域, 中子和质子费米面附近存在着大量的高 j 轨道, 很容易形成同核异能态, 非常有利于研究高- K 态. 然而, 在 $A=160\sim 170$, 质子数低($Z<72$)一些的丰中子区域, 高- K 态和高- K 转动的实验数据还比较匮乏.

最近, 实验在 $A=160\sim 170$ 区域^[6~12]取得了一些进展, 发现了同中子核的同核异能态以及相应的转动带. 之

前的实验^[13,14]在同中子核 ^{164}Dy , ^{166}Er 和 ^{168}Yb 中发现了 $K^\pi=6^-$ 转动带. 之后Patel等人^[8]发现 ^{160}Sm 是目前最轻的具有四准粒子同核异能态的原子核, 并发现了 $K^\pi=6^-$ 转动带, 带头被认为是两中子组态. 同时, Ideguchi等人^[9]也在 ^{158}Nd 中发现了 $K^\pi=6^-$ 的isomer. 根据系统分析, 推测 $N=98$ 同中子偶偶核中的 $K^\pi=6^-$ 转动带更倾向于中子组态. $N=100$ 同中子核也存在类似的系统性, 实验^[15,16]发现了 ^{168}Er 和 ^{170}Yb 中的 $K^\pi=4^-$ 转动带. Yokoyama等人^[7]发现 ^{162}Sm 和 ^{164}Gd 也存在 $K^\pi=4^-$ 同核异能态, 并提到新发现的这个同核异能态能量和半衰期都与已知的同中子核 ^{168}Er 和 ^{170}Yb 的 $K^\pi=4^-$ 同核异能态^[15,16]很相似. 在质子数更低的 ^{160}Nd ^[9]中也发现了 $K^\pi=4^-$ 同核异能态. 根据系统性, ^{168}Er 和 ^{170}Yb 中的 $K^\pi=4^-$ 转动带也倾向于中子组态, 但是文献^[15,17,18]提到 ^{168}Er 中 $K^\pi=4^-$ 转动带存在两中子组态与两质子组态的混合, 并不是纯中子组态, 理论上有必要进一步研究. $N=102$ 的同中子原子核 ^{170}Er 和 ^{172}Yb 也存在着一样的 $K^\pi=6^-$ 转动带^[13,18], 带头被认为

引用格式: 戴阿灿, 许甫荣. $N=100$ 附近同中子偶偶核高- K 转动带的组态限制计算. 科学通报, 2019, 64: 2191~2198

Dai A C, Xu F R. Configuration-constrained calculations of high- K rotational bands in even-even isotones around $N=100$ (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2191~2198, doi: 10.1360/TB-2019-0044

是两中子组态,之后在相应的同中子核 ^{166}Gd 和 ^{164}Sm ^[11]中也发现了 $K^\pi=6^-$ 同核异能态.这些同中子偶偶核的同核异能态都有着相似的能量和半衰期,存在一定的系统性,建立在这些高- K 态上的转动带也很可能具有相似的转动特性.因此,有必要系统地研究这些同中子核的高- K 转动带.

理论上,组态限制势能面方法^[6]、投影壳模型^[19,20]、形变Hartree-Fock(HF)方法^[7]、blocked-BCS^[8]、组态限制TRS(configuration-constrained total Routhian surface, CCTRS)^[17]、准粒子转子模型(quasiparticle rotor model, QPRM)^[12]和准粒子随机相位近似(quasiparticle random phase approximation, QRPA)^[21]已经对这些原子核进行了研究,但是大部分理论都只能描述高- K 转动带的带头,很少系统地研究这些同中子核转动带.原子核转动谱的研究,除了基态带和带头,边带的转动特性也非常关键.本文用组态限制推转HF方法系统计算了 $N=98$ 同中子偶偶核的 $K^\pi=6^-$ 转动带, ^{168}Er 和 ^{170}Yb 的 $K^\pi=4^-$ 转动带以及 ^{170}Er 和 ^{172}Yb 的 $K^\pi=6^-$ 转动带.同时还计算了 $N=98$ 和 $N=100$ ($Z=60\sim 70$)同中子偶偶核的基态带,并预言了 ^{158}Nd 和 ^{162}Gd 的 $K^\pi=6^-$ 转动带以及 $N=100$ ($Z=60\sim 66$)同中子偶偶核的 $K^\pi=4^-$ 转动带.

1 方法

本文主要采用组态限制推转Hartree-Fock方法,对相互作用采用粒子数守恒(particle-number-conserving, PNC)方法^[22-29]处理.运用二次量子化,任意一个多体哈密顿量可以写成

$$\hat{H}^\omega = \sum_{ij} t_{ij} a_i^\dagger a_j + \frac{1}{4} \sum_{ijkl} \bar{V}_{ijkl} a_i^\dagger a_j^\dagger a_l a_k - \omega \sum_{ij} j_{ij}^y a_i^\dagger a_j, \quad (1)$$

其中, t_{ij} 表示单粒子动能的矩阵元, $\bar{V}_{ijkl}$ 是反对易的两体相互作用.本文所采用的是Skyrme相互作用.从形变的谐振子基出发,在体坐标系中定义一个HF基矢:

$$b_\mu^\dagger = \sum_i c_{i\mu} a_i^\dagger. \quad (2)$$

在体坐标系中HF波函数写作

$$|G^\omega\rangle = \prod_{\mu=1}^A b_\mu^\dagger |-\rangle. \quad (3)$$

波函数 $|G^\omega\rangle$ 给出了给定推转频率下的能量最低态.值得注意的是,这里的HF波函数并不包含剩余两体相互作用.总的HF能量写作

$$E_G^{\text{HF}}(\omega) = \langle G^\omega | \hat{H} | G^\omega \rangle = \sum_{ij} t_{ij} \rho_{ji}^\omega + \frac{1}{2} \sum_{ijkl} \bar{V}_{ijkl} \rho_{ik}^\omega \rho_{jl}^\omega - \omega \sum_{ij} j_{ij}^y \rho_{ji}^\omega. \quad (4)$$

选择HF波函数作为参考态,运用Wick定理,总的推转哈密顿量^[26]可以写为

$$\hat{H}^\omega = E_G^{\text{HF}}(\omega) + \sum_{ij} h_{ij}^\omega : a_i^\dagger a_j : + \frac{1}{4} \sum_{ijkl} \bar{V}_{ijkl} : a_i^\dagger a_j^\dagger a_l a_k :, \quad (5)$$

其中, $a_i^\dagger a_j :$ 和 $a_i^\dagger a_j^\dagger a_l a_k :$ 都是产生湮灭算符的正规乘积.正规乘积要求作用于真空态上为0的算符放在右边,不为0的算符放在左边;任意两个算符换位时,出现一个负号.

进一步写在推转Hartree-Fock基矢下,总的推转哈密顿量(详细过程参考文献^[26])可以写成

$$\hat{H}^\omega = E_G^{\text{HF}}(\omega) + \sum_{\mu \geq A+1} e_\mu^\omega b_\mu^\dagger b_\mu - \sum_{\mu=1}^A e_\mu^\omega b_\mu b_\mu^\dagger + \hat{H}', \quad (6)$$

其中

$$\hat{H}' = \frac{1}{4} \sum_{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4} \bar{V}_{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4} : b_{\mu_1}^\dagger b_{\mu_2}^\dagger b_{\mu_4} b_{\mu_3} :. \quad (7)$$

这里 $E_G^{\text{HF}}(\omega)$ 是给定推转频率 ω 下的最低HF能量.值得注意的是,这里的HF波函数忽略了剩余两体相互作用. e_μ^ω 是HF单粒子Routhian,也就是转动坐标系里HF单粒子能.第二项和第三项给出的是粒子-空穴(particle-hole)激发,最后一项 $\hat{H}'$ 是剩余两体相互作用.

对于形变核,壳模型严格求解剩余两体相互作用 $\hat{H}'$ 是非常困难的.在平均场计算中,这一项通常是用剩余对相互作用 $\hat{H}_p = -G \sum_{\zeta\eta} a_\zeta^\dagger a_\zeta^\dagger a_\eta a_\eta$ 来近似.本文采用粒子数守恒方法处理对相互作用^[17-19].这样,总的哈密顿量可以写为

$$\hat{H}^\omega = E_G^{\text{HF}}(\omega) + \sum_{\mu \geq A+1} e_\mu^\omega b_\mu^\dagger b_\mu - \sum_{\mu=1}^A e_\mu^\omega b_\mu b_\mu^\dagger + \hat{H}_p. \quad (8)$$

通常,原子核对关联采用Bogoliubov方法来处理.然而,在多准粒子态转动下,Bogoliubov数值计算会导致对崩溃,主要源自计算过程中的粒子数不守恒.为了克服这个问题,Zeng等人^[22,23]提出粒子数守恒方法.粒子数守恒方法采用的是固定形变计算^[22,23],并没有考虑推转过程中的形状演化,这样固定形变计算的结果就失去了预言性.因此,发展一种能够自洽处理形变的方法就很有必要.前几年,本课题组^[24]发展了组态限制

TRS方法, 用PNC方法去处理传统的TRS方法中的Bogoliubov对相互作用. 这种方法被成功用于描述原子核转动带, 尤其是边带^[17,24,25]. 然而, 在计算包含单势的哈密顿量时会出现重复计算问题(double counting), 通常利用Strutinsky方法进行修正. 但在组态限制TRS计算中, 可以通过计算推转和非推转能量差来消除, 但并未完全移除. 在之前的文章^[26]中, 本课题组发展了自洽的组态限制推转Skyrme HF方法, 对相互作用部分用粒子数守恒方法处理. 对于一个给定的组态转动带, 可以计算每一条轨道的Nilsson量子数^[3,30,31], 通过追踪相应Nilsson轨道的占有概率来确定组态. 在目前的组态限制推转Skyrme HF计算中, 需要的组态一般会表现为特定轨道几乎完全占据(占有概率接近1), 而它的时间反演态几乎完全空着(占有概率接近0). 这样, 满足条件的组态一般会有多个, 我们通常考虑能量低的态. 在每一个推转频率 ω 下, 对角化求解总的哈密顿量(式(8)), 得到所需的本征态. 详细方法参考文献^[26].

2 计算结果与讨论

计算所选用的Skyrme参数是SKM*^[32], pairing强度通过三点公式质量奇偶差^[33]得到, $G_v=0.37$ MeV, $G_\pi=0.44$ MeV. 首先, 我们计算了 $N=98$ 同中子偶偶

核 ^{160}Sm , ^{164}Dy , ^{166}Er 和 ^{168}Yb 的 $K^\pi=6^-$ 转动带. 最近的实验中, Patel等人^[8]在 ^{160}Sm 中测到了建立在1468 keV上的 $K^\pi=6^-$ 转动带, 认为其是两中子 $\nu\frac{5}{2}^- [523] \otimes \frac{7}{2}^+ [633]$ 组态. 之前的实验^[14]发现了 ^{168}Yb 的 $K^\pi=6^-$ 转动带, 但并没有给出建议的组态. 图1给出了理论计算的 ^{160}Sm , ^{164}Dy , ^{166}Er 和 ^{168}Yb 四个核可能的两中子和两质子 $K^\pi=6^-$ 转动带, 结果都很好地重复了实验转动惯量. 对于 ^{160}Sm , 组态限制推转Skyrme HF计算只给出了两中子 $\nu\frac{5}{2}^- [523] \otimes \frac{7}{2}^+ [633]$ 组态, 在费米面附近并没有计算出合适的两质子 $K^\pi=6^-$ 态. 计算的两中子转动带很好地重复了实验转动惯量, 这与文献^[8]中blocked-BCS方法计算的结果相符. 对于 ^{168}Yb , 理论计算给出了两中子 $\nu\frac{5}{2}^- [523] \otimes \frac{7}{2}^+ [633]$ 组态, 也没有给出合适的两质子组态; 很明显两中子组态占据着主要成分, 理论计算也很好重复了回弯现象. 但是对于 ^{164}Dy 和 ^{166}Er 两个核^[13], 实验数据比较缺乏, 计算给出了可能的两中子 $\nu\frac{5}{2}^- [523] \otimes \frac{7}{2}^+ [633]$ 组态和两质子 $\pi\frac{7}{2}^- [523] \otimes \frac{5}{2}^+ [413]$ 组态, 可以看到这两个不同组态的转动惯量都比较接近. 计算的两中子组态 $\nu\frac{5}{2}^- [523] \otimes \frac{7}{2}^+ [633]$ 能量相比于

图1 (网络版彩色)计算得到的 $N=98$ 同中子核的 $K^\pi=6^-$ 转动带. 实验数据来自文献^[8,13]

Figure 1 (Color online) Calculated moments of inertia (MoI's) for $K^\pi=6^-$ bands in $N=98$ isotones. Experimental data are obtained from Refs. ^[8,13]

两质子 $\pi_{\frac{7}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{5}{2}^{+}[413]$ 组态能量要低一些, 并且从系统学的角度考虑, ^{164}Dy 和 ^{166}Er 两个核的 $K^{\pi}=6^{-}$ 态更倾向于两中子 $\nu_{\frac{5}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$ 组态占据着主要成分.

图2中, 计算了 $N=100$ 的同中子核 ^{168}Er 和 ^{170}Yb 的 $K^{\pi}=4^{-}$ 转动带, 以及 $N=102$ 的同中子核 ^{170}Er 和 ^{172}Yb 的 $K^{\pi}=6^{-}$ 转动带. 理论计算很好地重复了实验值. 对于 ^{168}Er , 组态限制计算给出了可能的两中子 $\nu_{\frac{1}{2}}^{-}[521] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$ 组态和两质子 $\pi_{\frac{7}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{1}{2}^{+}[411]$ 组态. 可以看到, 随着推转频率变大, 两中子 $\nu_{\frac{1}{2}}^{-}[521] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$ 态符合得更好, 但也不能否认两者存在着混合. 文献[15,17,18]中提到这个带可能存在两中子 $\nu_{\frac{1}{2}}^{-}[521] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$ 组态与两质子 $\pi_{\frac{7}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{1}{2}^{+}[411]$ 组态的混合, 但中子组态占据主要成分. 对于 ^{170}Yb , 也计算了两中子 $\nu_{\frac{1}{2}}^{-}[521] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$ 与两质子 $\pi_{\frac{7}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{1}{2}^{+}[411]$ 组态, 很明显两中子组态更符合实验转动惯量. 这与文献[19]中给出的解释是一样的.

类似地, 又计算了 $N=102$ 同中子核 ^{170}Er 和 ^{172}Yb 的 $K^{\pi}=6^{-}$ 转动带, 也分别给出了相应的两中子、两质子组态. ^{170}Er 理论计算的两中子组态是 $\nu_{\frac{5}{2}}^{-}[512] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$, 两质子组态是 $\pi_{\frac{7}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{5}{2}^{+}[413]$. ^{172}Yb 理论计算的两中子组态也是 $\nu_{\frac{5}{2}}^{-}[512] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$, 而两质子组态是 $\pi_{\frac{7}{2}}^{-}[523] \otimes \frac{5}{2}^{+}[402]$. 计算结果表明, ^{170}Er 和 ^{172}Yb 的 $K^{\pi}=6^{-}$ 转动带的主要成分都是两中子 $\nu_{\frac{5}{2}}^{-}[512] \otimes \frac{7}{2}^{+}[633]$ 组态. 这些计算结果都表明, 这些同中子核存在着类似的转动结构.

进一步, 用组态限制推转Skyrme HF方法系统计算了 $N=98$ 同中子偶偶核基态带, 如图3所示. 理论计算很好重复了回弯现象, 成功描述了实验转动惯量. 从实验数据和理论计算结果来看, $N=98$ 同中子偶偶核基带转动惯量很相似, 存在着一定的系统性. 随着质子数增加, 上弯越来越明显, 在 ^{166}Er 和 ^{168}Yb 中 $\omega=0.30$ 附近发生了很明显的上弯. 类似地, 也计算了 $N=100$ 同中子偶偶核的基态带, 如图4所示. 计算也很好重复了实验值, 只是上弯频率相比实验值略微提前. $N=100$ 同中子偶偶核

图2 (网络版彩色) 计算得到的 ^{168}Er 和 ^{170}Yb 的 $K^{\pi}=4^{-}$ 转动带, ^{170}Er 和 ^{172}Yb 的 $K^{\pi}=6^{-}$ 转动带. 实验数据来自文献[13]

Figure 2 (Color online) Calculated Mol's for $K^{\pi}=4^{-}$ bands in ^{168}Er and ^{170}Yb , $K^{\pi}=6^{-}$ bands in ^{170}Er and ^{172}Yb . The experimental data are obtained from Ref. [13]

图 3 (网络版彩色)计算得到 $N=98$ 的同中子偶偶核的基态带. 实验数据来自文献[13]

Figure 3 (Color online) Calculated Mol's for ground-state bands in $N=98$ isotones. The experimental data are obtained from Ref. [13]

图 4 (网络版彩色)计算得到 $N=100$ 的同中子偶偶核的基态带. 实验数据来自文献[13]

Figure 4 (Color online) Calculated Mol's for ground-state bands in $N=100$ isotones. The experimental data are obtained from Ref. [13]

基带转动惯量也非常相近, 都在 $Z=70$ 这个核中出现了很明显的回弯现象.

以上计算结果都表明, 对于同中子核, 存在一些系统性的现象. 实验上^[8,13,14]在 $N=98$ 的同中子核¹⁶⁰Sm,

¹⁶⁴Dy, ¹⁶⁶Er和¹⁶⁸Yb中发现了 $K^\pi=6^-$ 转动带, 并在¹⁵⁸Nd中发现了 $K^\pi=6^-$ 同核异能态. 在 $N=100$ 同中子核^[13,15]¹⁶⁸Er和¹⁷⁰Yb中发现了 $K^\pi=4^-$ 转动带, 并在低 Z 的同中子^[6,7,9]原子核¹⁶⁴Gd, ¹⁶²Sm和¹⁶⁰Nd中发现了 $K^\pi=4^-$ 同核异能态,

图5 (网络版彩色)计算预言的 $N=98$ 和 $N=100$ 同中子偶偶核的边带
Figure 5 (Color online) Calculated Mol's for sidebands in $N=98$ and $N=100$ isotones

但还没测到相应的带结构, 这些同核异能态的激发能和半衰期都与 ^{168}Er 和 ^{170}Yb 的 $K^\pi=4^-$ 同核异能态相似. 在 $N=102$ 的同中子核 ^{170}Er 和 ^{172}Yb 中也测到了 $K^\pi=6^-$ 转动带, 在低 Z 的同中子 ^{166}Gd 和 ^{164}Sm 中也测到了 $K^\pi=6^-$ 同核异能态. 这些实验现象都显示这些同中子核存在很多的相似性, 但是目前对于质子数稍低一些的同中子核实验数据还比较匮乏, 仅仅测到相应的激发态. 根据这些相似的转动特性, 用组态限制推转Skyrme HF方法预言了同中子偶偶核的边带, 见图5. 对于 $N=98$, 预言的 $K^\pi=6^-$ 转动带组态是两中子 $\nu_{1/2}^-[523] \otimes \gamma_{7/2}^+[633]$; 对于 $N=100$ 同中子核, 预言的 $K^\pi=4^-$ 转动带组态是两中子

$\nu_{1/2}^-[521] \otimes \gamma_{7/2}^+[633]$. 这些计算结果为未来的实验提供了很好的参考价值.

3 结论

用自洽的组态限制Skyrme HF方法(pairing部分用PNC方法处理)系统计算了 $N=98$, 100和102的同中子偶偶核的边带, 给出了详细的解释, 并给出了可能的组态成分, 很好描述了实验现象. 同时, 系统计算了 $N=98$ 和 $N=100$ 的同中子偶偶核($Z=60\sim 70$)基带, 计算也很好描述了实验转动惯量. 这些信息都对进一步理解核结构非常有用. 最后, 还预言了 $N=98$ 和 $N=100$ 同中子偶偶核边带, 可能为将来的实验提供有用的信息.

参考文献

- Walker P, Dracoulis G. Energy traps in atomic nuclei. *Nature*, 1999, 399: 35–40
- Dracoulis G D, Kondev F G, Walker P M. Pairing reduction and rotational motion in multi-quasiparticle states. *Phys Lett B*, 1998, 419: 7–13
- Xu F R, Walker P M, Sheikh J A, et al. Multi-quasiparticle potential-energy surfaces. *Phys Lett B*, 1998, 435: 257–263
- Xu F R, Walker P M, Wyss R. Limit to high-spin isomerism in hafnium isotopes. *Phys Rev C*, 2000, 62: 014301
- Walker P M, Dracoulis G D. Exotic isomers in deformed atomic nuclei. *Hyperfine Interactions*, 2001, 135: 83–107
- Patel Z, Walker P M, Podolyák Z, et al. Isomer-delayed γ -ray spectroscopy of $A=159\sim 164$ midshell nuclei and the variation of K -forbidden $E1$ transition hindrance factors. *Phys Rev C*, 2017, 96: 034305
- Yokoyama R, Go S, Kameda D, et al. New K isomers in the neutron-rich $N=100$ isotones ^{162}Sm , ^{163}Eu , and ^{164}Gd . *Phys Rev C*, 2017, 95: 034313
- Patel Z, Podolyák Z, Walker P M, et al. Decay spectroscopy of ^{160}Sm : The lightest four-quasiparticle K isomer. *Phys Lett B*, 2016, 753: 182–186

- 9 Ideguchi E, Simpson G S, Yokoyama R, et al. μ s isomers of $^{158,160}\text{Nd}$. *Phys Rev C*, 2016, 94: 064322
- 10 Söderström P A, Walker P M, Wu J, et al. K -mixing in the doubly mid-shell nuclide ^{170}Dy and the role of vibrational degeneracy. *Phys Lett B*, 2016, 762: 404–408
- 11 Patel Z, Söderström P A, Podolyák Z, et al. Isomer decay spectroscopy of ^{164}Sm and ^{166}Gd : Midshell collectivity around $N=100$. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 262502
- 12 Simpson G S, Urban W, Genevey J, et al. Two-quasiparticle isomers and bands of $^{154,156}\text{Nd}$ and $^{156,158,160}\text{Sm}$. *Phys Rev C*, 2009, 80: 024304
- 13 Data extracted using the NNDC On-Line Data Service, <http://www.nndc.bnl.gov/>
- 14 Oliveira J R B, Frauendorf S, Deleplanque M A, et al. Rotation-induced transition from superfluid to normal phase in mesoscopic systems: ^{168}Yb and adjacent nuclei. *Phys Rev C*, 1993, 47: R926–R929
- 15 Wu C Y, Cline D, Simon M W, et al. $K^\pi=4^-$ isomers and their rotational bands in $^{168,170}\text{Er}$. *Phys Rev C*, 2003, 68: 044305
- 16 Walker P M, Bentley W H, Faber S R, et al. Rotational bands in ^{170}Yb observed following (α, xn) reactions. *Nucl Phys A*, 1981, 365: 61–92
- 17 Fu X M, Jiao C F, Xu F R, et al. Multi-quasiparticle rotational bands in neutron-rich erbium isotopes. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2013, 56: 1423–1427
- 18 Dracoulis G D, Lane G J, Kondev F G, et al. Two-quasiparticle structures and isomers in ^{168}Er , ^{170}Er , and ^{172}Er . *Phys Rev C*, 2010, 81: 054313
- 19 Archer D E, Riley M A, Brown T B, et al. Rotational bands in ^{170}Yb and ^{171}Yb and the projected shell model. *Phys Rev C*, 1998, 57: 2924–2943
- 20 Yang Y C, Sun Y, Zhu S J, et al. Two-quasiparticle K -isomeric states in strongly deformed neutron-rich Nd and Sm isotopes: A projected shell-model analysis. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2010, 37: 085110
- 21 Gaudefroy L, Péro S, Arnal N, et al. Impact of Coriolis mixing on a two-quasi-neutron isomer in $^{164}\text{Gd}_{100}$ and other $N=100$ isotones. *Phys Rev C*, 2018, 97: 064317
- 22 Zeng J Y, Chen T S. Particle-number-conserving method for treating the nuclear pairing correlation. *Nucl Phys A*, 1983, 405: 1–28
- 23 Zeng J Y, Jin T H, Zhao Z J. Reduction of nuclear moment of inertia due to pairing interaction. *Phys Rev C*, 1994, 50: 1388–1397
- 24 Fu X M, Xu F R, Pei J C, et al. Configuration-constrained total Routhian surfaces with particle-number-conserving pairing. *Phys Rev C*, 2013, 87: 044319
- 25 Fu X M, Xu F R, Jiao C F, et al. Irregularity in $K^\pi=8^-$ rotational bands of $N=150$ isotones. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054301
- 26 Liang W Y, Jiao C F, Wu Q, et al. Configuration-constrained cranking Hartree-Fock pairing calculations for sidebands of nuclei. *Phys Rev C*, 2016, 92: 064325
- 27 Zhang Z H. Systematic investigation of the high- K isomers and the high-spin rotational bands in the neutron-rich Nd and Sm isotopes by a particle-number conserving method. *Phys Rev C*, 2018, 98: 034304
- 28 He X T, Li Y C. Insight into nuclear midshell structures by studying K isomers in rare-earth neutron-rich nuclei. *Phys Rev C*, 2018, 98: 064314
- 29 He X, Ren Z, Liu S, et al. Influence of high- j intruder orbitals in odd mass transfermium nuclei ^{253}No and ^{251}Md . *Nucl Phys A*, 2009, 817: 45–60
- 30 Xu F R, Zhao E G, Wyss R, et al. Enhanced stability of superheavy nuclei due to high-spin isomerism. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 252501
- 31 Liu H L, Xu F R, Walker P M, et al. Effects of high-order deformation on high- K isomers in superheavy nuclei. *Phys Rev C*, 2011, 83: 011303
- 32 Bartel J, Quentin P, Brack M, et al. Towards a better parametrisation of Skyrme-like effective forces: A critical study of the SkM force. *Nucl Phys A*, 1982, 386: 79–100
- 33 Xu F R, Wyss R, Walker P M. Mean-field and blocking effects on odd-even mass differences and rotational motion of nuclei. *Phys Rev C*, 1999, 60: 051301

Summary for “ $N=100$ 附近同中子偶偶核高- K 转动带的组态限制计算”

Configuration-constrained calculations of high- K rotational bands in even-even isotones around $N=100$

Acan Dai & Furong Xu*

School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: frxu@pku.edu.cn

Nuclear rotational spectroscopy has been extensively investigated in experimental and theoretical studies. In the collective model, a nucleus can be excited in two ways. One is by breaking pairs of nucleons and exciting nucleons to a higher level. An excited state with a higher K -value sometimes has a long lifetime. Usually those states with lifetimes longer than 1 ns are called isomeric state because of forbidden transitions from high K to low K state. The other way is by collective motions, like rotation and vibration. A rotational band built on the multi-particle state is called a sideband. In general, a nucleus can have more than one sideband. Investigations of sidebands can provide rich information about the nucleus structure, like single-particle level, nuclear shape, and electromagnetic transitions and so on. The traditional total Routhian surface method, which is a powerful tool for investigating nuclear rotation, has been successfully used to describe yrast bands. However, it often encounters non-convergence problems when calculating sidebands. To overcome this problem, we recently developed a configuration-constrained cranking Skyrme Hartree-Fock mean-field calculation with pairing treated by the particle-number-conserving (PNC) method for sidebands. The PNC pairing method follows the technique of a “standard” shell model, which diagonalizes the Hamiltonian in a truncated model space and guarantees the conservation of the particle number.

The rare-earth ($Z=57-71$) neutron-rich nuclides are good candidates for investigating the high- K rotational bands. In this mass region, nuclei with $N \geq 90$ are known to be well deformed and many high- j orbitals exist near the neutron and proton Fermi surfaces. These orbitals can form various multi-particle configurations and lead to high- K rotational sidebands. We perform configuration-constrained cranking Skyrme Hartree-Fock mean-field calculations with pairing treated using the PNC method for the high- K rotational bands in even-even isotones near $N=100$. The $K^\pi=6^-$ rotational bands in ^{160}Sm , ^{164}Dy , ^{166}Er , ^{168}Yb , ^{170}Er , and ^{172}Yb and the $K^\pi=4^-$ rotational bands in ^{168}Er and ^{170}Yb have been observed during experiments. $K^\pi=6^-$ isomers were first observed in very neutron-rich nuclei, i.e., ^{158}Nd , ^{164}Sm , and ^{166}Gd . Further, $K^\pi=4^-$ isomers were first observed in neutron-rich $N=100$ isotones, i.e., ^{160}Nd , ^{162}Sm , and ^{164}Gd . Theoretically, several models have been used to study these neutron-rich nuclei, including the cranked shell model, projected shell model, deformed Hartree-Fock method, cranking PNC method, and quasiparticle random phase approximation. We systematically investigated these high- K rotational bands and the ground state bands in $N=98$, 100, and 102 isotones using the configuration-constrained cranking Skyrme Hartree-Fock mean-field calculation with PNC pairing. The Skyrme force of SKM* is adopted. The pairing strength is determined using the odd-even mass difference and a three-point formula, which includes the mean-field and blocking effects. The calculations reproduce the experimental moments of inertia of both the ground state and sidebands well. Configurations are assigned to the observed high- K rotational bands. Further, we predict possible high- K rotational bands in ^{158}Nd , ^{162}Gd , ^{160}Nd , ^{162}Sm , ^{164}Gd , and ^{166}Dy . This study on high- K rotational bands can provide new insights into the structure of the states, and the predictions may provide useful information for future experiments.

configuration-constrained, particle-number-conserving, isotones, high- K rotational banddoi: [10.1360/TB-2019-0044](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0044)