壳模型研究 ^{10}Be 和 ^{12}Be 中的转动带结构

戴博, 李健国, 许甫荣*

北京大学物理学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: frxu@pku.edu.cn

2021-03-04 收稿, 2021-06-16 修回, 2021-06-17 接受, 2021-06-18 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404401)和国家自然科学基金(11835001, 12035001, 11921006)资助

摘要 基于WBP和YSOX两种核子-核子相互作用, 用壳模型计算研究了 ^{10}Be 和 ^{12}Be 的激发能谱. 为了解激发态的结构性质, 用轨道角动量分解方法对 ^{10}Be 和 ^{12}Be 的激发态波函数进行了分析, 预言了可能存在的转动带结构. 研究了中子数 $N=8$ 壳层下 ^{10}Be 和 ^{12}Be 中的跨壳效应与转动带之间的关系, 比较了WBP和YSOX两种相互作用计算结果的异同. 此外, 还研究了 ^{10}Be 和 ^{12}Be 核的转动特性. 研究结果可为今后相关实验提供有用信息.

关键词 壳模型, 转动带, 闯入态, L-S分解

原子核转动带一直是研究原子核结构信息的一个重要方向. 通过对转动带的研究, 可以了解原子核形变、电四极矩、组态混合等对认识原子核有重要意义的信息. 原子核转动带的研究主要集中在重核区, 反映原子核的形变性质. β 稳定线附近的满壳原子核都是球形的, 而满壳附近原子核的壳层外只有少数价核子, 不足以使原子核发生形变. 当原子核的质子数与中子数位于半满壳附近时, 原子核中会出现丰富的形变现象, 如稀土区($Z=57\sim 71$)的原子核中存在的轴对称形变^[1]. 在形变较大的原子核中, 集体转动能级与其自旋满足近似 $E_x \propto I(I+1)$, 其中 I 为该能级的自旋(角动量), E_x 为该能级对应的激发能量. 近年来对轻核区反转岛的大量研究表明, 在中子数 $N=8, 20, 28$ 附近的丰中子原子核中, 由于较高轨道闯入态的影响, 原子核的低激发态中出现丰富的形变结构, 存在形状共存等现象^[2~5].

理论上通常利用集体模型(如推转壳模型^[6]、粒子转子模型^[7]等)描述原子核转动带的性质. 这些集体模型通常选取形变的势场来描述原子核的形变信息, 并成功应用于中重原子核转动带结构的描述中. 但在物

理上, 用这些唯象集体模型去描述轻核的转动是不合理的. Be同位素链存在团簇结构^[8~11], 人们在实验上也观察到了 ^{12}Be 中 $N=8$ 壳层消失的现象以及可能存在转动带的证据^[12~15]. 在壳模型框架中, 形变概念是通过组态混合出现的. 比如, Tanihata^[16]提出, 轻核区中子费米面附近3条轨道 $0p_{1/2}$ 、 $1s_{1/2}$ 和 $0d_{5/2}$ 发生了组态混合, 带来了强的核结构影响. 实验发现, ^{11}Be 基态中出现了自旋对称性异常现象以及“晕核”结构, 表明基态中有相当成分的 $1s_{1/2}$ 轨道混合, 主要组态成分由 ^{10}Be 加上一个 $1s_{1/2}$ 轨道上的中子构成^[17~19]. 而对于 ^{12}Be 的基态, 早前实验认为, 其主要成分包括53% s^2 和15% d^2 ^[14,20,21], s 波的成分占比更大, 而最近两个实验在 s 和 d 波的占比中给出了相反的结论^[22~24]. 由于不同组态混合对轻核形变的影响不同, 研究 ^{12}Be 基态的形变以及转动带信息可以了解组态成分的差异.

原子核壳模型可以很好地处理核子-核子关联, 能描述原子核的能谱、电四极矩、衰变等性质^[25,26]. 对于中子数 $N=8$ 附近的丰中子原子核, 通常利用跨壳相互作用描述原子核性质. 本文使用壳模型方法研究 ^{10}Be

引用格式: 戴博, 李健国, 许甫荣. 壳模型研究 ^{10}Be 和 ^{12}Be 中的转动带结构. 科学通报, 2021, 66: 3712~3718

Dai B, Li J G, Xu F R. The descriptions of rotational bands in ^{10}Be and ^{12}Be with shell-model calculations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3712~3718, doi: 10.1360/TB-2021-0239

和 ^{12}Be 低激发谱中的转动带信息, 使用Shimizu等人^[27,28]发展的KSHELL程序在psd全空间下进行计算. 在跨壳相互作用下, 分别在正宇称和负宇称下计算原子核的能谱, 并根据能量与 $B(E2)$ 信息找到相应可能的转动带. 本文使用 L - S 分解方法研究这些转动带的转动性质, 并进一步分析其与跨壳效应之间的关系.

1 模型

理想情况下, 刚性原子核的转动带通常满足转动公式(Alaga规则)^[29]中能量与角动量对应关系, 同时转动带各能级间应具有较强的 $B(E2)$ 强度. 转动带上各能级的能量与角动量满足

$$E(J) = E_0 + AJ(J+1), \quad (1)$$

其中, 转动常数 $A \equiv \hbar^2 / (2J)$ 依赖于转动惯量 J , 能量常数 $E_0 = E_J - AJ^2$ 依赖于转动带带头 J 的能量 E_J .

而实际中, 原子核的能谱往往与刚体转动带的规律有所偏差, 尤其是轻核区的原子核, 包含各种组态混合. 这就需要用到更加微观的计算, 比如壳模型. 为了从这些复杂的壳模型能谱中提取有意义的结构信息, 需要利用各种工具来分析各个能级所对应的波函数, 其中 L - S 分解方法常用于分析轻核区原子核的集体性质和组态信息. Johnson^[30]使用 L - S 分解方法来分解 j 耦合下的壳模型计算结果, 并使用唯象Cohen-Kurath相互作用壳模型^[31]和现实核力无核芯壳模型^[32]分别研究了 ^9Be 中的转动带信息. Caprio等人^[33]使用基于第一性原理的无核芯壳模型和 L - S 分解进一步研究了 $^{7,9,11}\text{Be}$ 中的转动带信息.

原子核壳模型理论广泛用于轻重核的研究中^[26,34]. 该方法在计算Be同位素中具有集团结构或大形变原子核时, 需要考虑跨壳激发的影响, 通常使用包含 $0p_{3/2}$ 、 $0p_{1/2}$ 、 $0d_{5/2}$ 、 $1s_{1/2}$ 和 $0d_{3/2}$ 轨道的p-sd模型空间有效相互作用, 如MK^[35]、WBP^[36]、WBT^[36]、YSOX^[37]等. 本文主要使用WBP^[36]和YSOX^[37]在p-sd跨壳模型空间内研究 ^{10}Be 和 ^{12}Be 的能谱以及可能存在的转动带信息. 考虑到跨壳激发下的质心修正, 在谐振子基矢下使用Gloeckner和Lawson^[38]提出的方法来消除质心运动带来的伪态, 其中倍增系数 $\beta=10$.

在原子核壳模型计算中, jj 耦合方法主要考虑核子单粒子轨道间的耦合, 而 ls 耦合方法可以体现原子核集体的轨道角动量 l 与自旋角动量 s 间的耦合, 从而更清晰地描述原子核集体结构的性质. 常用的壳模型方法通

常采用 jj 耦合的方式^[39], 因此我们将 jj 耦合方法计算出的波函数通过 L - S 分解得到 ls 耦合下的波函数信息, 从而分析原子核集体特征. 以 L 分解为例, 该方法以 L^2 算符构建一个厄米矩阵, 将波函数 ψ 作为初始向量 v_1 构建Lanczos算法^[40]:

$$\begin{aligned} L^2|v_1\rangle &= \alpha_1|v_1\rangle + \beta_1|v_2\rangle, \\ L^2|v_2\rangle &= \beta_1|v_1\rangle + \alpha_2|v_2\rangle + \beta_2|v_3\rangle, \\ L^2|v_3\rangle &= \beta_2|v_2\rangle + \alpha_3|v_3\rangle + \beta_3|v_4\rangle, \\ &\dots \end{aligned} \quad (2)$$

对于Lanczos算法中 α_i 和 β_i 构建的对三角矩阵, 可以对角化解得具有好的 L 量子数的波函数, 从而利用这些波函数构建初始波函数 ψ :

$$|\psi\rangle = \sum_L c(L)|L\rangle, \quad (3)$$

其中, $|L\rangle$ 表示具有好的 L 量子数的波函数, $c(L)$ 表示初始波函数中的 L 分解系数. 本文只进行轨道角动量 L 分解, 简称 L 分解.

2 计算结果与讨论

分别用WBP和YSOX两种相互作用计算 ^{10}Be 和 ^{12}Be 核的激发能谱以及 $B(E2)$ 跃迁强度. 图1给出了分别使用WBP和YSOX计算 ^{10}Be 的正负宇称低激发能谱的结果与实验值的对比, 实验数据来自文献^[41]. 如图1(a)所示, 通过能级位置、角动量和 $B(E2)$ 的强度, 可以给出两条可能存在的分别以基态 0_1^+ 和激发态 0_2^+ 为带头的转动带结构. 图中箭头表示计算出的 $B(E2)$ 的方向, 上下方数据分别表示WBP和YSOX的 $B(E2)$ 计算结果(单位: $\text{e}^2 \text{fm}^4$), 质子和中子的有效电荷分别选用 $e_p=1.5e$ 和 $e_n=0.5e$. 由于这两种相互作用给出了具有相似性质的转动带能谱, 本文使用两种计算结果的平均值, 根据式(1)对转动带能谱进行拟合, 结果如图中直线所示, A 为拟合得到的转动常数. 图1(b)中给出了负宇称中以 1^- 为带头的转动带结构. 为了更进一步地研究以上3条转动带的性质, 使用 L 分解方法分析这3条转动带结构, 如图2所示. 为了比较YSOX和WBP相互作用给出的 L 分解结果, 对于以 J^π 为带头的转动带, 定义均方根偏差

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_L \Delta_{kL}^2}, \quad (4)$$

其中, $\Delta_{kL} = c_1(L)^2 - c_2(L)^2$ 表示YSOX(标记为1)和WBP(标

图1 (网络版彩色)使用WBP和YSOX计算得到的 ^{10}Be 正宇称(a)和负宇称(b)下的低激发谱,其中横线加粗部分为计算出可能具有转动带性质的能谱。箭头表示计算出的 $B(E2)$ 的方向,上下方数据分别表示WBP和YSOX的 $B(E2)$ 计算结果(单位: $\text{e}^2 \text{fm}^4$)。同时,还给出了根据式(1)对转动带能谱进行拟合的结果(其中 A 为相应的转动常数)。实验数据来自文献[41]

Figure 1 (Color online) The low-excitation spectrum with the positive parity (a) and negative parity (b) of ^{10}Be calculated by WBP and YSOX. The thickened part of the horizontal line is the calculated energy spectrum of the possible rotation band. The arrow indicates the direction of the calculated $B(E2)$, and the upper and lower data indicate the $B(E2)$ values calculated by WBP and YSOX, respectively (unit: $\text{e}^2 \text{fm}^4$). The results of fitting the energy spectrum of the rotation band according to Eq. (1) are also shown (indicated by the rotational energy constant A). The experimental data come from Ref. [41]

图2 (网络版彩色)对 ^{10}Be 中 $J^\pi=0_1^+$ (a)、 $J^\pi=0_2^+$ (b)和 $J^\pi=1_1^-$ (c)三条转动带的壳模型计算结果使用 L 分解,得到不同能级下整体的轨道量子数 L 的成分分布

Figure 2 (Color online) L decomposition of the shell model calculation of $J^\pi=0_1^+$ (a), $J^\pi=0_2^+$ (b), and $J^\pi=1_1^-$ (c) in ^{10}Be . The composition distribution of the orbital quantum number L at different energy levels is obtained

记为2)相互作用对转动带中第 k 个能级计算出的 L 成分占比的差值。 ^{10}Be 中3条转动带在不同相互作用下的均方根偏差分别为 $\text{rms}=0.19(J^\pi=0_1^+)$, $0.08(J^\pi=0_2^+)$, $0.26(J^\pi=1_1^-)$ 。由于YSOX和WBP相互作用给出 L 分解的结果相似,图2中仅给出YSOX的计算结果。

^{10}Be 的实验研究中发现了两条以 0^+ 为带头的转动带,带头分别为基态 0_1^+ 和激发态 0_2^+ ,其中激发态 0_2^+ 的能量为6.2 MeV^[42-44]。如图1(a)所示,我们的计算结果能够很好地描述这两条转动带结构。图2(a)中 L 分解显示,对于以基态 0_1^+ 为带头的转动带, 0_1^+ 和 2_1^+ 均有较好的 L 量子

数,分别是 $L=0$ 和 $L=2$,而 4_1^+ 中则混入了 $L=3$ 的成分。这也意味着在此转动带中 0_1^+ 和 2_1^+ 满足 $J=L$ 结构,而在 4_1^+ 中可能包含 $J=L$, $J=L+1$ 结构的混合,且 $J=L+1$ 占比很大。原因主要在于,一方面,高激发态存在着各种组态的混合,使得其不再是一个好的转动结构;另一方面,有限空间壳模型没有很好地包含更高的角动量组态,实际计算需要更高轨道的耦合。而对于以激发态 0_2^+ 为带头的转动带, L 分解的结果给出, 0_2^+ , 2_4^+ , 4_2^+ , 6_1^+ 均有较好的 L 量子数,分别是 $L=0, 2, 4, 6$ 。我们的计算结果显示, ^{10}Be 中 $J^\pi=0_2^+$ 的转动带表现出较好的转动带性质,很好地满足

$J=L$ 的结构. 具体分析两个不同转动带带头波函数的性质, 在YSOX计算结果中, 基态 0_1^+ 中有94%的无跨壳激发成分, 仅有6%的两核子跨壳激发成分, 而激发态 0_2^+ 中有95%的两核子跨壳激发成分, 我们的计算结果与第一性原理无核芯壳模型结果一致^[45]. 图2(c)分析了 ^{10}Be 负宇称能级中以 $J^\pi=1_1^-$ 为带头的转动带结构, 计算结果显示, 在 1_1^- 处主要成分为 $J=L$ 的结构, 而 3_1^- 和 5_1^- 态对应的 L 分解的结果混入了 $J=L+1$ 的成分, 其中在 5_1^- 处 $J=L+1$ 的占比已经反超.

实验研究表明, ^{12}Be 的基态表现出形变特性, 具有较强的集体性质. 其中 ^{12}Be 基态 0_1^+ 的组态成分一直是人们研究的关注点, 不同实验和理论给出的结果存在显著差异^[12,14,20-24]. 我们分别利用WBP和YSOX相互作用对 ^{12}Be 进行计算, 发现WBP给出的基态 0_1^+ 中有80%的无跨壳激发成分, 仅有20%的两核子跨壳激发成分, 而激发态 0_2^+ 中有87%的两核子跨壳激发成分. YSOX计算结果有所不同, 基态 0_1^+ 有76%的两核子跨壳激发成分, 激发态 0_2^+ 仅有45%的两核子跨壳激发成分, 表明虽然不同的有效相互作用都给出了相近的能谱, 但所得的结构信息可能不相同. 因此, 为了更加细致地了解原子核的微观结构, 需要对其物理量进行研究. 为了研究 ^{12}Be 的集体性质, 本文计算了 ^{12}Be 的激发谱, 并利用 $B(E2)$ 的性质构建可能的带结构, 如图3所示, 其中实验数据来源于文献^[46]. 在 ^{12}Be 正宇称态中, WBP和YSOX计算出的转动带存在差异, 我们根据式(1)分别对这两个相互作用的计算结果进行拟合, 给出了相应的转动常

数. 此外, 还利用 L 分解方法对可能的带结构进行了分析, 如图4所示.

由于两种相互作用计算的低激发态中 0^+ 组态不同, YSOX给出了 $J^\pi=0_1^+$ 的转动带, 而WBP则给出 $J^\pi=0_2^+$ 的转动带. 对 ^{12}Be 低激发能谱的转动带研究有助于研究基态 0_1^+ 以及激发态 0_2^+ 的组态成分. 图4(a)表示YSOX计算的 $J^\pi=0_1^+$ 转动带 L 分解结果, 图4(b)表示WBP计算的 $J^\pi=0_2^+$ 转动带 L 分解结果, 可以看到, 两条转动带在 L 分解的结果上具有高度的相似性. 因此, 对于 ^{12}Be 激发态的进一步实验研究, 将有利于我们更加清晰地认识 ^{12}Be 的结构. 在10 MeV以上的较高激发区域, Yang等人^[47]发现了一条 ^{12}Be 中可能存在的转动带, 并解释为 $^4\text{He}+^8\text{He}$ 的集团结构. 为了研究实验上所观测到的激发态是否是真实的转动带及其内部的结构信息, 我们也对这一能量区域进行了研究. 尽管在这一能量区域壳模型的计算已经有较大误差, WBP仍然给出了一条与实验结果接近的以激发态 0_6^+ 为带头的转动带. 图4(c)给出了WBP计算的 $J^\pi=0_6^+$ 转动带 L 分解结果, 可以看出, 该转动带轨道量子数变化关系是 $L=1, 1, 3, 5$. $J^\pi=0_6^+$ 转动带从 0_6^+ 到 2_{10}^+ , 结构由 $J=L-1$ 转为 $J=L+1$, 而从 2_{10}^+ 到 4_{10}^+ , 主要结构均为 $J=L+1$, 表明带中已混入其他 L 成分, 并非纯转动带. ^{12}Be 负宇称中可能存在的转动带结构如图3(b)所示, WBP和YSOX均给出了两条以 1^- 为带头的转动带, 分别为 $J^\pi=1_1^-, 1_7^-$ 和 $J^\pi=1_1^-, 1_4^-$. 不同相互作用下, 这两条转动带 L 分解的均方根偏差分别为 $\text{rms}=0.15(J^\pi=1_1^-)$ 和0.16

图3 (网络版彩色)与图1类似, 但对于 ^{12}Be 正宇称(a)和负宇称(b)下的低激发谱而言. 实验数据来自文献^[46]

Figure 3 (Color online) Similar to Figure 1, but for the low-excitation spectrum under the positive parity (a) and negative parity (b) of ^{12}Be . The experimental data come from Ref. [46]

图4 (网络版彩色)与图2类似,对 ^{12}Be 中 $J^\pi=0_1^+$ (a)、 $J^\pi=0_2^+$ (b)、 $J^\pi=0_6^+$ (c)、 $J^\pi=1_1^-$ (d)、 $J^\pi=1_4^-$ (e)转动带的 L 分解

Figure 4 (Color online) Similar to Figure 2, but for L decomposition of $J^\pi=0_1^+$ (a), $J^\pi=0_2^+$ (b), $J^\pi=0_6^+$ (c), $J^\pi=1_1^-$ (d) and $J^\pi=1_4^-$ (e) in ^{12}Be

($J^\pi=1_1^-$ (WBP)/ 1_4^- (YSOX)). 由于这两种相互作用给出的 L 分解结果相近,因此在图4(d)和(e)中仅给出了利用YSOX相互作用的计算结果. 计算的 $J^\pi=1_1^-$ 转动带和 $J^\pi=1_4^-$ 转动带的 L 分解结果表明,转动带主要成分均为 $J=L$ 结构,不同之处在于 $J^\pi=1_1^-$ 转动带在 5_1^- 处混入了较强的 $J=L+1$ 结构,而 $J^\pi=1_4^-$ 转动带在 5_4^- 处混入了较弱的 $J=L+1$ 结构. 从组态混合的角度对这两条转动带的带头 1_1^- 和 1_4^- 进行分析,YSOX给出的负宇称基态 1_1^- 有94%的单核子跨壳激发成分,而激发态 1_4^- 中则仅有34%的单核子跨壳激发成分,三核子跨壳激发成分占65%.

3 结论

通过壳模型方法,本文利用WBP和YSOX两种相互作用探究了 ^{10}Be 和 ^{12}Be 中可能存在的转动带,并使用 L 分解对这些转动带的集体性质进行了详细的分析. 通过研究转动带结构中带头的组态混合成分,给出了原子核集体性质与壳模型中跨壳激发成分的联系. 对于占据成分尚不清晰的 ^{12}Be 基态及低激发谱,两种相互作用也给出了不同的结果. 通过对转动带结构的分析,我们的计算为进一步理解 ^{12}Be 的结构性质和波函数之间的关联,为实验上进一步研究 ^{12}Be 的奇特性质提供了有用的信息.

参考文献

- Walker P, Dracoulis G. Energy traps in atomic nuclei. *Nature*, 1999, 399: 35–40
- Kanungo R. A new view of nuclear shells. *Phys Scr*, 2013, T152: 014002
- Gade A, Liddick S N. Shape coexistence in neutron-rich nuclei. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2016, 43: 024001
- Rotaru F, Negoita F, Grévy S, et al. Unveiling the intruder deformed 0_2^+ state in ^{34}Si . *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 092503
- Schwerdtfeger W, Thierolf P G, Wimmer K, et al. Shape coexistence near neutron number $N=20$: First identification of the $E0$ decay from the deformed first excited $J^\pi=0^+$ state in ^{30}Mg . *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 012501
- Xu F R, Satuła W, Wyss R. Quadrupole pairing interaction and signature inversion. *Nucl Phys A*, 2000, 669: 119–134
- Ring P, Schuck P. The Nuclear Many Body Problem. 3rd ed. Berlin: Springer, 2004
- Itagaki N, Okabe S. Molecular orbital structures in ^{10}Be . *Phys Rev C*, 2000, 61: 044306
- Ito M, Itagaki N, Sakurai H, et al. Coexistence of covalent superdeformation and molecular resonances in an unbound region of ^{12}Be . *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 182502

- 10 Ito M, Itagaki N, Ikeda K. Cluster correlations for low-lying intruder states of ^{12}Be . *Phys Rev C*, 2012, 85: 014302
- 11 Ito M. Formations of loose clusters in an unbound region of ^{12}Be . *Phys Rev C*, 2012, 85: 044308
- 12 Navin A, Anthony D W, Aumann T, et al. Direct evidence for the breakdown of the $N=8$ shell closure in ^{12}Be . *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 266–269
- 13 Pain S D, Catford W N, Orr N A, et al. Structure of ^{12}Be : Intruder d-wave strength at $N=8$. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 032502
- 14 Fortune H T, Liu G B, Alburger D E. $(sd)^2$ states in ^{12}Be . *Phys Rev C*, 1994, 50: 1355–1359
- 15 Iwasaki H, Motobayashi T, Akiyoshi H, et al. Low-lying intruder 1^- state in ^{12}Be and the melting of the $N=8$ shell closure. *Phys Lett B*, 2000, 491: 8–14
- 16 Tanihata I. Neutron halo nuclei. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 1996, 22: 157–198
- 17 Schmitt K T, Jones K L, Bey A, et al. Halo nucleus ^{11}Be : A spectroscopic study via neutron transfer. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 192701
- 18 Aumann T, Navin A, Balamuth D P, et al. One-neutron knockout from individual single-particle states of ^{11}Be . *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 35–38
- 19 Tanihata I, Savajols H, Kanungo R. Recent experimental progress in nuclear halo structure studies. *Prog Part Nucl Phys*, 2013, 68: 215–313
- 20 Alburger D E, Balamuth D P, Lind J M, et al. Core excited $T=2$ levels in $A=12$ from studies of ^{12}Be . *Phys Rev C*, 1978, 17: 1525–1530
- 21 Sherr R, Fortune H T. Structure of ^{12}Be and ^{12}O ground states. *Phys Rev C*, 1999, 60: 064323
- 22 Chung L X, Bertulani C A, Egelhof P, et al. The dominance of the $\nu(0d_{5/2})^2$ configuration in the $N=8$ shell in ^{12}Be from the breakup reaction on a proton target at intermediate energy. *Phys Lett B*, 2017, 774: 559–563
- 23 Chen J, Lou J L, Ye Y L, et al. Low-lying states in ^{12}Be using one-neutron transfer reaction. *Phys Rev C*, 2018, 98: 014616
- 24 Chen J, Lou J L, Ye Y L, et al. A new measurement of the intruder configuration in ^{12}Be . *Phys Lett B*, 2018, 781: 412–416
- 25 Otsuka T, Gade A, Sorlin O, et al. Evolution of shell structure in exotic nuclei. *Rev Mod Phys*, 2020, 92: 015002
- 26 Caurier E, Martínez-Pinedo G, Nowacki F, et al. The shell model as a unified view of nuclear structure. *Rev Mod Phys*, 2005, 77: 427–488
- 27 Shimizu N, Mizusaki T, Utsuno Y, et al. Thick-restart block Lanczos method for large-scale shell-model calculations. *Comput Phys Commun*, 2019, 244: 372–384
- 28 Shimizu N. Nuclear shell-model code for massive parallel computation, “KSHELL”. 2013, arXiv: [1310.5431](https://arxiv.org/abs/1310.5431)
- 29 Alaga G, Alder K, Bohr A, et al. Intensity rules for beta and gamma transitions to nuclear rotational states. *Mat Fys Medd Dan Vid Selsk*, 1955, 29: 9
- 30 Johnson C W. Spin-orbit decomposition of *ab initio* nuclear wave functions. *Phys Rev C*, 2015, 91: 034313
- 31 Cohen S, Kurath D. Effective interactions for the $1p$ shell. *Nucl Phys*, 1965, 73: 1–24
- 32 Navrátil P, Vary J P, Barrett B R. Large-basis *ab initio* no-core shell model and its application to ^{12}C . *Phys Rev C*, 2000, 62: 054311
- 33 Caprio M A, Fasano P J, Maris P, et al. Probing *ab initio* emergence of nuclear rotation. *Eur Phys J A*, 2020, 56: 120
- 34 Brown B A. The nuclear shell model towards the drip lines. *Prog Part Nucl Phys*, 2001, 47: 517–599
- 35 Millener D J, Kurath D. The particle-hole interaction and the beta decay of ^{14}B . *Nucl Phys A*, 1975, 255: 315–338
- 36 Warburton E K, Brown B A. Effective interactions for the $0p1s0d$ nuclear shell-model space. *Phys Rev C*, 1992, 46: 923–944
- 37 Yuan C, Suzuki T, Otsuka T, et al. Shell-model study of boron, carbon, nitrogen, and oxygen isotopes with a monopole-based universal interaction. *Phys Rev C*, 2012, 85: 064324
- 38 Gloeckner D H, Lawson R D. Spurious center-of-mass motion. *Phys Lett B*, 1974, 53: 313–318
- 39 Inglis D R. The energy levels and the structure of light nuclei. *Rev Mod Phys*, 1953, 25: 390–450
- 40 Whitehead R R, Watt A, Cole B J, et al. Computational methods for shell-model calculations. *Adv Nucl Phys*, 1977, 9: 123–176
- 41 Tilley D R, Kelley J H, Godwin J L, et al. Energy levels of light nuclei. *Nucl Phys A*, 2004, 745: 155–362
- 42 Freer M, Casarejos E, Achouri L, et al. α : $2n$: α molecular band in ^{10}Be . *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 042501
- 43 Bohlen H G, Dorsch T, Kokalova T, et al. Structure of ^{10}Be from the $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{Be}$ reaction. *Phys Rev C*, 2007, 75: 054604
- 44 Suzuki D, Shore A, Mittig W, et al. Resonant α scattering of ^6He : Limits of clustering in ^{10}Be . *Phys Rev C*, 2013, 87: 054301
- 45 Caprio M A, Fasano P J, McCoy A E, et al. *Ab initio* rotation in ^{10}Be . 2019, arXiv: [1912.06082](https://arxiv.org/abs/1912.06082)
- 46 Kelley J H, Purcell J E, Sheu C G. Energy levels of light nuclei $A=12$. *Nucl Phys A*, 2017, 968: 71–253
- 47 Yang Z H, Ye Y L, Li Z H, et al. Observation of enhanced monopole strength and clustering in ^{12}Be . *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 162501

Summary for “壳模型研究 ^{10}Be 和 ^{12}Be 中的转动带结构”

The descriptions of rotational bands in ^{10}Be and ^{12}Be with shell-model calculations

Bo Dai, Jianguo Li & Furong Xu*

School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

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

The rotation band is an important issue in the studies of nuclear structures, which offers a good laboratory for understanding of nuclear deformation, shell evolution, and other properties. Studies of nuclear collective rotations have mainly focused on open-shell nuclei in heavy-mass regions. Traditional collective models, such as the total Routhian surface and particle-rotor models, have been widely used. In principle, the phenomenological collective models are not suitable for the descriptions of rotations of light nuclei. The shell model with configuration interactions can describe any mass-region nuclei, as long as one chooses an appropriate model space. There have been recent studies of rotational bands of light nuclei within the shell model framework. The shell model calculation has shown a powerful model for the descriptions of low-lying states and shell evolutions. On the other hand, the shell model is a useful and popular method to analyze configurations of states. Recently, the L - S decomposition has been suggested for analyzing the collective properties of nuclei with shell-model calculation.

In these light nuclei around the dripline, the intruder higher single-particle orbitals often occur in the ground states and mix with the normal single-particle orbitals. And a lot of work has been done to learn the exotic properties of the neutron-rich nuclei near ^{12}Be . In the case of ^{12}Be and its neighboring nuclei, it is believed that the strong configuration mixing of the intruder states and normal states leads to large deformations. And the rotational bands can build on the band-head states with large deformations. Therefore, an interesting question is whether rotational bands can exist in such light systems, and what the corresponding configurations are in the shell-model framework.

In the present paper, using the WBP and YSOX interactions, we perform shell model calculations for the low-lying states of ^{10}Be and ^{12}Be , focusing on their excitation spectra. The rotational bands are constructed using the calculated $B(E2)$ values and excitation energies. We give the rotational energy constants of these rotational bands. To further learn the properties of the states within the rotational band, we perform the L - S decomposition. The results show that the L - S decomposition can well describe the collective properties of the rotational band in ^{10}Be and ^{12}Be . In the calculations for ^{10}Be , the WBP and YSOX interactions give similar results for L decomposition in $J^\pi=0_2^+$ rotational band. But for ^{12}Be , the WBP and YSOX interactions give different rotational intrinsic states, which show $J^\pi=0_2^+$ for WBP and $J^\pi=0_1^+$ for YSOX. Further discussions on shell model configurations for rotational bands are made as well. The results show that the above two rotational bands have strong intruders from the upper sd shell orbitals in the rotational states. For the ground state of ^{12}Be , the WBP and YSOX interactions give different dominant configurations, which indicate that the intruder configuration from the sd shell in YSOX calculations is stronger. We discuss the possible origins of the difference, and future experimental studies for the rotational structure in ^{12}Be should be expected.

shell model, rotational band, intruder configuration, L - S decompositiondoi: [10.1360/TB-2021-0239](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0239)