



^{130}Ba 中的集体运动

郭松 周厚兵 Petrache C.M 强赟华

Collective Motion in ^{130}Ba

GUO Song, ZHOU Houbing, Petrache C.M, QIANG Yunhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC43>

引用格式:

郭松, 周厚兵, Petrache C.M, 强赟华. ^{130}Ba 中的集体运动[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(3):530–535. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC43

GUO Song, ZHOU Houbing, Petrache C.M, QIANG Yunhua. Collective Motion in ^{130}Ba [J]. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3):530–535. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC43

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中重核中单粒子与集体运动的竞争效应(英文)

Competition Between the Single-particle Seniority Regime and Collective Motion in Intermediate-mass Nuclei
原子核物理评论. 2018, 35(4): 420–428 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.420>

关于 ^{93}Mo 中 $21/2^+$ 晕阱的来源(英文)

On the Origin of $21/2^+$ Yrast Trap in ^{93}Mo
原子核物理评论. 2017, 34(4): 699–704 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.699>

重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector
原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

缺中子核素 ^{101}In 低位同核异能态的首次观测

First Observation of the Low-lying Isomer State of ^{101}In
原子核物理评论. 2018, 35(4): 439–444 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.439>

超越平均场模型对Ba同位素链八极形状演化研究

Beyond-mean-field Study of Octupole Shape Evolution in Neutron-deficient Ba Isotopes
原子核物理评论. 2019, 36(2): 144–150 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.144>

SD配对壳模型对质量数A~130区原子核的形状跨越研究(英文)

Nuclear Shape Phase Crossover in A~130 Mass Region in the SD-pair Shell Model
原子核物理评论. 2018, 35(4): 511–517 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.511>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0530-06

^{130}Ba 中的集体运动

郭松^{1,2}, 周厚兵^{3,4,†}, Petrache C.M.⁵, 强赞华^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;

4. 广西核物理与核技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

5. 巴黎-萨克雷大学原子核与材料科学中心, 法国 奥赛 91405)

摘要: 为探索原子核中的集体运动, 一项在意大利 Legnaro 实验室 XTU 串行加速器上开展的在束 γ 谱学实验研究大幅拓展了 ^{130}Ba 的能级结构。实验以能量为 65 MeV 的 ^{13}C 束流轰击 ^{120}Sn 薄靶, 布居 ^{130}Ba 的激发态。从激发态退激的 γ 射线由 GALILEO 阵列探测, 而与之关联的蒸发粒子由带电粒子阵列 EUCLIDES 和中子墙 NWALL 探测。分析符合数据鉴别了一系列新的转动带, 其中一部分布居 9.4 ms 同核异能态。结合已知的电四极矩和磁矩信息, 提取了该同核异能态的 g 因子。分析多条转动带, 发现 ^{130}Ba 可能处于长椭圆形变, 也可能处于扁椭圆形变, 而其集体转动方向可能沿主轴, 也可能沿主轴以外的倾斜方向。这是首次在 130 核区发现沿倾斜方向的集体转动。理论分析建议将部分新发现的结构解释为基于二准粒子组态的摇摆运动, 这是实验上在偶偶核中观测到的首例基于两准粒子组态的摇摆带结构。

关键词: 集体运动; 顺排; 摇摆运动; 同核异能态

中图分类号: O571.5

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC43

1 引言

$A \sim 130$ 质量区的原子核位于近球形核到形变核的过渡区域, 原子核的势能面对于 β 和 γ 形变非常软, 处于不同轨道的准粒子的极化效应使得原子核形状呈现出强烈的组态和价核子数相关性。通常情况下, 在低自旋态时核芯表现出软 γ 的三轴形变特性, 而随着角动量的增加, 原子核从三轴形变逐渐演化成接近轴对称的长椭或者扁椭圆形变, 从而形成高- K 的同核异能态^[1-2]。在偶偶核中, 10^+ 态以上的能级将出现核子的拆对顺排, 由于价质子的费米面位于 $h_{11/2}$ 子壳的底部, 在科里奥利力的作用下发生顺排时将把原子核驱向长椭圆形变; 而当中子发生拆对顺排时, 由于其费米面位于 $h_{11/2}$ 子壳的中上部, 将把原子核驱向扁椭圆形变。特别是在三轴形变的位能面变化比较平缓的原子核中, 还有可能出现多种不同顺排之间的竞争, 展现出丰富的核结构特性, 例如形状共存^[3]、手征带^[4]、八极形变^[5]等。

这一核区的一个重要现象是原子核的摇摆运动, 它最早由 Bohr 等^[6] 作为稳定三轴形变的推论而提出。对

于具有稳定三轴形变的原子核, 其总角动量沿转动惯量最大的主轴作进动时, 就称为摇摆运动。经典理论预言典型的摇摆带可以建立在具有稳定三轴形变的偶偶核基态上, 比基态带多出一部分摇摆能。摇摆能正比于摇摆频率, 随自旋增加而增加。但至今实验上并未发现这种类型的摇摆带。实验上在 ^{163}Lu 中发现了第一例摇摆带^[7], 其后在其附近的奇质子核中发现了一系列建立在 $\pi i_{13/2}$ 组态上的摇摆带。近几年在 130 核区和 110 核区又发现了两例分别建立在质子和中子 $h_{11/2}$ 组态上的摇摆带^[8-10]。所有已报道的摇摆带都表现出随自旋降低的摇摆频率, 与理论预言相反。为此, Frauendorf 等^[11] 提出了横向摇摆, 将摇摆子看成一个三轴形变的核心与一个高 j 核子的耦合。这个高 j 核子的角动量方向固定于核芯的长轴或短轴, 与核芯转动所绕的中间轴垂直, 二者的叠加导致总角动量绕中间轴进动。这种图像可以简洁地解释摇摆频率的变化趋势, 但这种运动模式本身能否稳定存在仍备受质疑^[12]。

本工作之前, Brinckmann 等^[13] 首次报道了 ^{130}Ba 核的 8^- 同核异能态, Perkowski 等^[14] 用内转换电子和 γ

收稿日期: 2020-01-09; 修改日期: 2020-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11965003, 11505035, 11675266); 广西自然科学基金资助项目 (2017GXNSFAA198160, 2017GXNS-FGA198001); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划资助

作者简介: 郭松 (1984-), 男, 山东东平人, 副研究员, 博士, 从事原子核结构专业研究; E-mail: gs@impcas.ac.cn

† 通信作者: 周厚兵, E-mail: zhb@mailbox.gxnu.edu.cn.

谱学方法研究了它的衰变, 而 Moore 等^[15] 测量了该同核异能态的磁偶极矩与静态电四极矩。Kirch 等^[16] 利用 ^{130}La 的基态和同核异能态 β 衰变给出了 ^{130}Ba 低自旋态的信息, 而中国科学院近代物理研究所孙相富等^[17-18] 建立了 ^{130}Ba 高自旋态的能级结构, 该结构最近被 Kaur 等^[19] 确认并做了小部分补充。

2 实验介绍与结果

实验在意大利 Legnaro 国家实验室开展, 利用串列静电加速器提供的入射能量为 65 MeV 的 ^{13}C 束流轰击两片厚度为 0.5 mg/cm^2 的 ^{122}Sn 薄靶, 通过重离子熔合蒸发反应 $^{122}\text{Sn}(^{13}\text{C}, 5n)$ 布居了目标核 ^{130}Ba 的高激发态。 ^{130}Ba 核退激过程中放出的 γ 射线通过 GALILEO^[20] 探测阵列进行探测, 该阵列由 25 个带反康的高纯锗探测器组成, 放置在与入射束流的方向成 $90^\circ, 119^\circ, 129^\circ$ 和 152° 的 4 个环上。为鉴别不同反应道, 反应过程中放出的带电粒子和中子分别由 EUCLIDES 硅球^[20] 和中子墙探测^[21], 其中 EUCLIDES 阵列共有 45 组硅探测器望远镜, 中子墙包含 40 台液态闪烁体探测器。关于实验装置及数据分析的详细信息可参阅文献^[1, 3]。

基于 γ - γ - γ 符合、粒子- γ - γ 符合的测量方法, 大幅度拓展了 ^{130}Ba 的高自旋态能级纲图。如图 1 所示, 其中红色部分表示本次实验新发现的结构。在前人工作的基础上^[17-19], 我们将 γ 带的奇偶自旋分支分别拓展到 11^+ 和 14^+ 态, 并新鉴别了几条它们与基态带之间的连接跃迁。S1 和 S2 带的偶自旋分支分别拓展到 28^+ 和

24^+ 态 (S2 回弯后的结构以 S2'' 带表示), 并首次鉴别到这两个带的奇自旋分支 S1' 和 S2o'。图 2(a) 展示了用 865-和 997- keV γ 线开门得到的二重符合开门谱, 其中可以清晰地看到 S1 带高自旋部分以及 S1 与 S1' 之间连接的几条新鉴别的 γ 射线。而 S2、S2o' 和 S2'' 带的部分 γ 射线展示在用 730-和 794- keV γ 线开门得到的二重符合开门谱中 [见图 2(b)]。此外, 在基态带以上还鉴别到了一条较短的能级系列 S2p。

D1 带和 t 带是本次实验建立的两个新转动带, 这两个新能带典型的二重符合开门谱分别如图 2(c) 和 (d) 所示。其中 D1 带为建立在 12^+ 态上的全新转动带, 自旋最高测到了 $20\hbar$ 。该转动带主要由 $\Delta I=1$ 的跃迁退激, 在 349-和 357- keV γ 线开门的二重符合开门谱中清晰看到了 277-、319-、389- keV 等几条带内跃迁的 γ 射线, 但 $\Delta I=2$ 的电四极带内跃迁很弱, 只鉴别到一条 (920 keV)。D1 带的退激路径比较复杂, 可通过 453-、977- keV γ 跃迁向 S 带退激, 通过 761 keV γ 跃迁或经由中间态 14^+ 和 12^+ 向 t 带退激, 还可通过 1649 keV γ 射线从带头直接退激到基态带。在新建立的 t 带中, 11^+ 和 12^+ 态在前人的工作中已经发现^[19], $8^+, 9^+, 10^+$ 以及 13^+ 为新发现的激发态。t 带可通过 182-、587-、508-、802- keV γ 线退激到基态带、 γ 带和 8^- 同核异能态。

^{130}Ba 中寿命为 9.4 ms 的 8^- 同核异能态最早由 Brinckmann 等^[13] 报道, 但建立在其上的高自旋态信息长期未被发现。如图 1 所示, 本实验中我们首次观测到了建立在 8^- 态上的能级结构 (N1 与 N2 带), 这些新发现

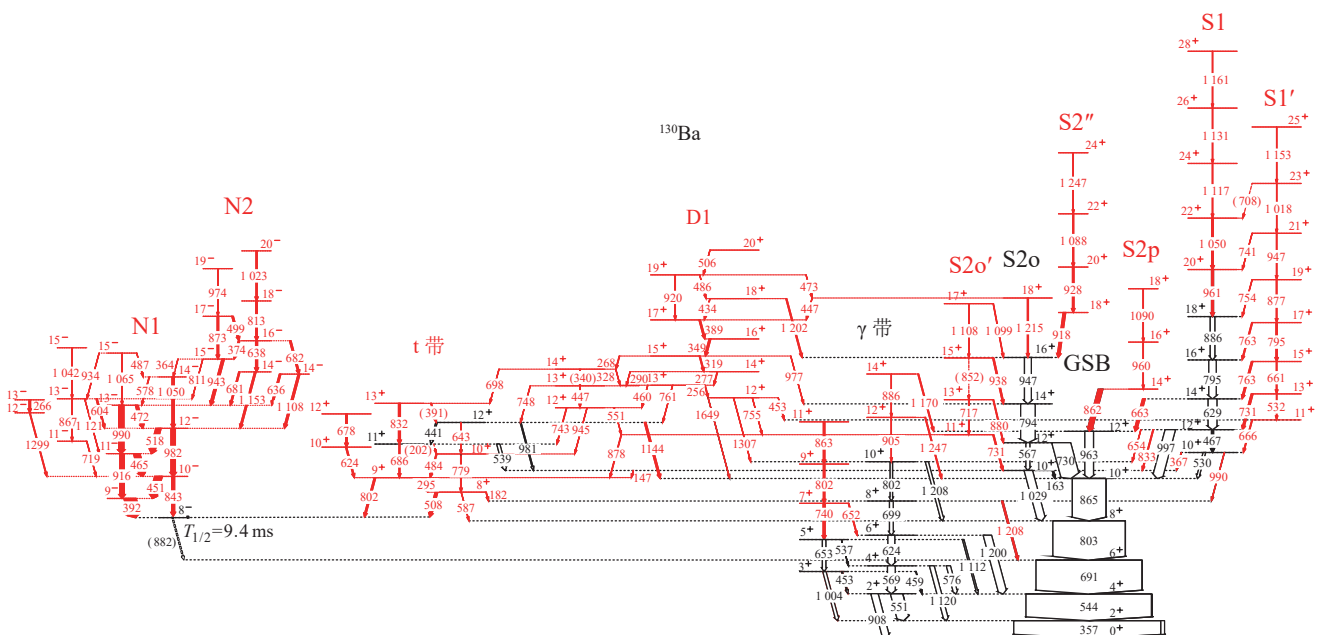


图 1 (在线彩图) ^{130}Ba 中的部分能级纲图, 箭头宽度表示 γ 跃迁强度, 跃迁能量单位为 keV, 本工作新建立的部分用红色表示

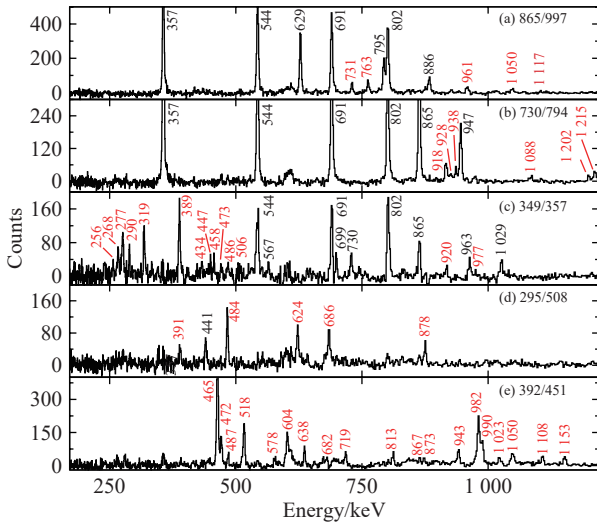


图 2 (在线彩图) 典型二重符合开门谱, 本工作新鉴别的 γ 射线用红色表示

的 γ 射线清晰地展示在 392-和 451- keV 线开门的二重符合开门谱中 [见图 2(e)]。由于同核异能态的寿命远大于 γ 探测阵列的符合时间, 所以通过常规的 γ 符合探测手段无法建立其上下两部分能级结构之间的关联。因此, 该结构的归属是通过粒子- γ 符合确认的, 具体的方法可查阅我们最近发表的文章 [1]。

3 讨论

本工作对 ^{130}Ba 的能级结构作了大幅拓展, 为讨论各转动带的性质, 我们首先比较了他们的激发能, 如图 3 所示。为清晰展示转动带间能量差异, 图中展示的是激发能减去一个刚性转子能量后的部分。由于准粒子拆对, $8h$ 以后出现了转动惯量更大的二准粒子带, 使晕线的斜率减小, 表现出明显的分段特征。准质子和准中子都可能发生拆对, 而拆对后的准粒子可以占据多个轨道, 因此存在丰富的耦合模式, 在图 3 中可以看到拆对之后出现多条转动带。转动带的布居强度大致随它们离晕线的距离增加而减弱, 靠近晕线的 N1、S2o、S1 是拆对后布居最强的几条转动带。

在前人的工作中, 已通过对顺排角动量的分析将 S1、S2o 的组态分别建议为 $\pi h_{11/2}^2$ 与 $\nu h_{11/2}^2$, 但由于理论值和实验值之间的差异, 对 S1 的指认是试探性的。在附近的 ^{134}Ce 中, 通过 g 因子的测量确定了两条类似转动带都基于 $\nu h_{11/2}^2$ [22], 后续的研究表明这两条转动带内禀结构的区别主要在于形变 [23-24]。这种现象也可能出现在 ^{130}Ba 中, 使指认 ^{130}Ba 中观察到转动带的组态变得更加困难, 需要充分考虑不同形变带来的影响。为此, 本工作结合总势能面 (TRS)、倾斜轴推转 (TAC)、

粒子转子模型 (PRM) 和投影壳模型 (PSM) 等理论模型的计算结果 [3], 指认了各个能带的组态, 如表 1 所列。

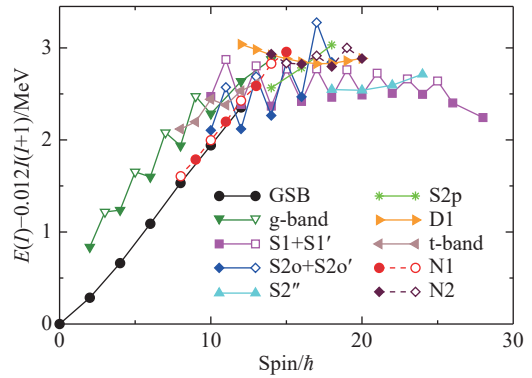


图 3 (在线彩图) 相对于一个刚性转子的激发能, 以不同转动带分组表示

表 1 各能带的组态和形状信息

带	组态	形状	转轴
GSB	-	长椭	主轴
γ -band	-	三轴振动	主轴
S1	$\pi h_{11/2}^2$	长椭	主轴
S1'	$\pi h_{11/2}^2$	三轴	沿主轴进动
S2o	$\nu h_{11/2}^2$	扁椭	主轴
S2o'	$\nu h_{11/2}^2$	扁椭	主轴
S2''	$\nu h_{11/2}^4$	扁椭	主轴
S2p	$\nu h_{11/2}^2$	长椭	主轴
D1	$\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}^2$	长椭	倾斜轴
t-band	$\nu h_{11/2}^2$	长椭	倾斜轴
N1	$\nu h_{11/2} g_{7/2}$	长椭	主轴
N2	$\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2} g_{7/2}$	长椭	主轴

其中, S1、S2o 的准粒子组态得到证实, 值得注意的是 S2o 被指认为扁椭圆形变带, 这一指认也可以被顺排角动量验证。从图 4 中可以看到, 当采用与其它转动带一致的 Harris 参数时, S2o、S2o' 和 S2'' 的顺排角动量表现出合理的下降趋势, 为了得到正常的趋势只有采用更小一些的 Harris 参数。这说明这几个带的动力学转动惯量显著小于其他转动带, 而这正是这个核区扁椭圆转动带表现出来的性质 [25]。扁椭圆形变下 ^{130}Ba 的准中子占据 $h_{11/2}$ 的低 Ω 轨道, 与长椭圆形变下的准质子相似, 因此 S1 和 S2o 的顺排角动量相近, 都在 $8h$ 左右。而在长椭圆形变下准中子占据 $h_{11/2}$ 的中高 Ω 轨道, 这导致 S2p 带的顺排角动量略低一些 ($\sim 6h$)。根据投影壳模型的计算, S2o' 被指认为 S2o 的旋称非优先分支, 而 S2'' 则被指认为又一对准中子拆对后得到的 $\nu h_{11/2}^4$ 组态 [3]。

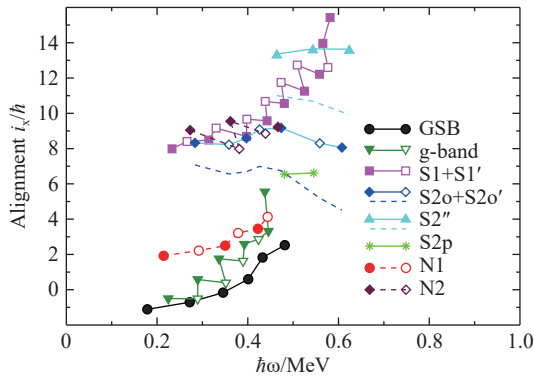


图 4 (在线彩图) ^{130}Ba 核中各转动的准粒子顺排角动量, 对于扁椭带 ($S2o$ 、 $S2o'$ 和 $S2''$) 以外的转动带, Harris 参数取 $J_0=14\text{MeV}^{-1}h^2$, $J_1=20\text{MeV}^{-3}h^4$ 。对于扁椭带, 无标记的虚线采用和其他转动带一致的 Harris 参数, 有标记的实线采用另一组 Harris 参数 $J_0=10\text{MeV}^{-1}h^2$, $J_1=15\text{MeV}^{-3}h^4$

然而, 如果将 $S1'$ 带指认为 $S1$ 带的旋称非优先分支, 投影壳模型计算出的旋称劈裂要大于实验值, 尤其在较高自旋部分。这意味着 $S1'$ 带可能源于激发能低于 $S1$ 带的旋称非优先分支的另一种机制。在具有三轴形变的原子核中, 如果只有一个准粒子占据高 j 低 Ω 轨道, 可能会呈现摇摆运动。在 ^{135}Pr 和 ^{105}Pd 中, 摇摆带与旋称非优先分支的激发能相近, 而在更重的 Lu 和 Ta 同位素中, 未观测到旋称非优先分支, 因此其激发能应显著高于摇摆带。 ^{130}Ba 核中观察到的 $S1$ 与 $S1'$ 带与后者相似, 而其组态包含两个占据高 j 低 Ω 轨道的准质子, 因此有可能也源于摇摆运动。实验上提取了从 $S1'$ 向 $S1$ 退激的 $M1/E2$ 跃迁的混合比, 发现它们普遍具有较大的负值, 这表明 $E2$ 成分得到的明显的增强, 通常这被当作摇摆带的一个关键判据。随后通过约束的三轴密度泛函理论和量子粒子转子模型 [26] 计算了摇摆带的激发能和跃迁几率, 与实验值很好地符合, 进一步支持了摇摆带的解释。 $S1'$ 带可能是实验观测到的第一例建立在二准粒子组态上的摇摆带结构。将 $S1'$ 带的摇摆频率与自旋的变化关系与 ^{135}Pr [9]、 ^{163}Lu [7] 中已报道的摇摆带进行比较, 如图 5 所示, 3 个原子核的摇摆频率均随着自旋的增加而降低, 这种变化趋势与最初的预言相反, 但在最近被解释为横向摇摆 [11]。在这种图像下, 准粒子的角动量固定在与核芯角动量垂直的方向上进动, 而摇摆频率随自旋降低, 下降的斜率与沿三个主轴的转动惯量之比相关。图 5 中可以看到三个摇摆带的摇摆频率下降趋势有明显差异, ^{135}Pr 中摇摆频率的斜率远大于 ^{163}Lu , 这主要是由四极形变的差异引起的, ^{163}Lu 中摇摆带的四极形变是 ^{135}Pr 中的 2 倍以上。 ^{130}Ba 中摇摆频率的变化趋势介于两者之间, 这是由于两个高 j 低 Ω 轨道的准质子

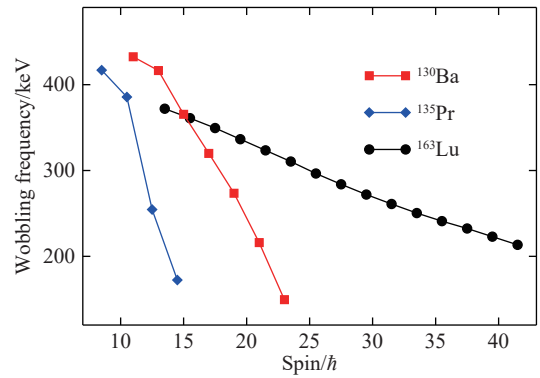


图 5 (在线彩图) ^{135}Pr [9]、 ^{163}Lu [7] 和 ^{130}Ba 中摇摆带的摇摆频率

驱动使 ^{130}Ba 四极形变略大于 ^{135}Pr 。

^{130}Ba 中半衰期为 9.4ms 的 8 同核异能态是建立在 $\nu h_{11/2}g_{7/2}$ 组态上的高 K 同核异能态, 该同核异能态系统性地存在于这一核区的 $N=74$ 同中子素中。通过理论分析发现 $N1$ 带的各观测性质与该内禀组态相符, 这进一步确认了 $N1$ 带布居在这个同核异能态上。结合已知的电四极矩和磁矩信息, 重新提取了该同核异能态的 g 因子 [1], 其中 $g_K = -0.040(5)$ 与从临近奇 A 核中提取的单粒子 g 因子的耦合值相符。 $g_R = 0.278(15)$ 小于理论值, 这与近来在 180 质量区多中子组态观察到的现象是一致的。 $N2$ 带由 $N1$ 带经过又一对准粒子顺排产生, $N1$ 带的内禀组态已包含了中子 $h_{11/2}$ 轨道, 会带来阻塞效应延迟可能的中子拆对, 故 $N2$ 应该来自于准质子拆对, 其组态为 $\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}g_{7/2}$ 。回弯后顺排角动量增加了 $6 \sim 7\hbar$ (见图 4), 略小于 $S1$ 带中 $\pi h_{11/2}^2$ 带来的 $8\hbar$, 这可能是源于形状改变的影响。根据组态约束的三轴协变密度泛函理论计算的结果, $N1$ 接近长椭形变, 而 $N2$ 具有典型的三轴形变 [3]。

除 S 带外, 本工作还发现了另一部分正宇称能级结构, 由 t 带、 $D1$ 带和它们之间的过渡能级构成 (如图 1)。 t 带建立在激发能为 2983 keV 的 8^+ 态上, 而 $D1$ 带的带头为激发能 4 911 keV 的 12^+ 态, 因此它们应分别对应二准粒子和四准粒子带。 t 带分别向 γ 带、基态带、 $S2o$ 带和 $K^\pi=8^-$ 的同核异能态退激, 考虑到这些带的形状和 K 值都存在显著差距, 多条退激途径的共存是一个很独特的现象。由于 $S2o$ 和 $K^\pi=8^-$ 的同核异能态都含有占据 $h_{11/2}$ 轨道的准中子, 可以向它们退激的 t 带也应包含至少一个在此轨道上的准中子。不考虑大四极形变下才能布居的闯入轨道 (会对应更低的带头自旋和更高的带头激发能), 则除 $h_{11/2}$ 外中子费米面附近都是正宇称中子轨道, 因此这个正宇称带只能基于与 $S2p$ 和 $S2o$ 相同的 $h_{11/2}^2$ 内禀轨道。然而 $S2p$ 和 $S2o$ 已经分别

对应了长椭、扁椭形变，t带和它们有何差别呢？我们注意到在180核区曾报道过一系列建立在 $\nu i_{13/2}^2$ 内禀组态上的倾斜轴转动带^[27]，可以同时向基态带和高K同核异能态退激，与t带情况相似。因此t带可以解释为建立在 $\nu h_{11/2}^2$ 内禀组态上的倾斜轴转动带。 $N=74$ 时，中子费米面位于 $h_{11/2}$ 轨道的中部，准中子的角动量方向不接近任意一个主轴，而在远离它们的倾斜轴上。对于集体转动的原子核，更适合用非旋流体去解释它的运动规律，而非旋流液体滴是可以沿倾斜轴转动的。当两个准中子的角动量方向接近，它们耦合得到的总角动量也会沿倾斜轴方向，在准中子驱动下，t带表现出沿倾斜轴的集体运动。从图1中可以发现，D1带主要通过S带和t带进行退激，因此，我们把该带的组态指认为 $\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}^2$ 。由于准中子和准质子分别绕三轴核芯的长轴和短轴转动，相互垂直的转动方向使这个带呈现磁转动带的特征，包括很小的旋称劈裂和M1跃迁主导的带内退激。

4 结论

通过重离子熔合蒸发反应 $^{122}\text{Sn}(^{13}\text{C}, 5n)$ 布居了 ^{130}Ba 的高自旋态，根据 γ - γ - γ 符合与粒子- γ - γ 符合的测量结果，大幅拓展了 ^{130}Ba 的能级纲图。首次观测到了带头为8⁻同核异能态以上的能级结构，并结合已知的电四极矩和磁矩信息，提取了8⁻同核异能态的g因子。根据各转动带的结构特征并结合理论分析，对各能带的组态进行了指认，首次在 ^{130}Ba 中发现了具有费米顺排结构的t带以及具有横向摇摆运动的S1'带。这些结果说明 ^{130}Ba 核既可能处于长椭形变，也可能处于扁椭形变，而其集体转动方向可能沿主轴，也可能沿主轴以外的倾斜方向。这些新的实验结果提供了一个该核区原子核具有多种集体运动共存的典型范例。

参考文献：

- [1] QIANG Y H, PETRACHE C M, GUO S, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 014307.
- [2] KONDEV F G, DRACOULIS G D, KIBÉDI T. *At Data Nucl Data Tables*, 2015, 50: 103.
- [3] PETRACHE C M, WALKER P M, GUO S, et al. *Phys Lett B*, 2019, 795: 241.
- [4] XIONG B W, WANG Y Y. *At Data Nucl Data Tables*, 2019, 125: 93.
- [5] TIMAR J, SIMPSON J, PAUL E S, et al. *J Phys G*, 1995, 21: 783.
- [6] BOHR A, MOTTELSON B R. *Nuclear Structure*[M]. New York: Benjamin, 1975.
- [7] JENSEN D R, HAGEMANN G B, HAMAMOTO I, et al. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 142503.
- [8] MATTA J T, GARG U, LI W, et al. *Phys Rev Lett*, 2015, 89: 082501.
- [9] SENSARMA N, GARG U, ZHU S, et al. *Phys Lett B*, 2019, 792: 170.
- [10] TIMAR J, CHEN Q B, KRUSCICZ B, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 062501.
- [11] FRAUENDORF S, DONAU F. *Phys Rev C*, 2014, 89: 014322.
- [12] TANABE K, TANABE S T. *Phys Rev C*, 2017, 95: 064315.
- [13] BRINKMANN H F, HEISERA C, ALEXANDER K F, et al. *Nucl Phys A*, 1966, 81: 233.
- [14] PERKOVSKI J, ANDRZEJEWSKI J, ABRAHAM T, et al. *Acta Phys Pol B*, 2012, 43: 273.
- [15] MOORE R, BRUCE A M, DENDOOVEN P, et al. *Phys Lett B*, 2002, 547: 200.
- [16] KIRCH K, SIEMS G, ESCHENAUER M, et al. *Nucl Phys A*, 1995, 587: 211.
- [17] SUN X F, BAZZACCO D, GAST W, et al. *Phys Rev C*, 1983, 28: 1167.
- [18] SUN X F, BAZZACCO D, GAST W, et al. *Nucl Phys A*, 1985, 436: 506.
- [19] KAUR N, KUMAR A, MUKHERJEE G, et al. *Eur Phys J A*, 2014, 50: 5.
- [20] TESTOV D, MENGONI D, GOASDUFF A, et al. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 47.
- [21] LJUNGVALL J, PALACZ M, NYBERG J, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2004, 528: 741.
- [22] ZEMEL A, BROUDE C, DAFNI E, et al. *Nucl Phys A*, 1982, 383: 165.
- [23] SHEIKH J A, BHAT G H, PALIT R, et al. *Nucl Phys A*, 2009, 824: 58.
- [24] PETRACHE C M, GUO S, AYANGEAKAA A D, et al. *Phys Rev C*, 2016, 93: 064305.
- [25] PAUL E S, FOSSAN D B, LIANG Y, et al. *Phys Rev C*, 1990, 41: 1576.
- [26] CHEN Q B, FRAUENDORF S, PETRACHE C M. *Phys Rev C*, 2019, 100: 061301.
- [27] WALKER P M, YEUNG K C, DRACOULIS G D, et al. *Phys Lett B*, 1993, 309: 17.

Collective Motion in ^{130}Ba

GUO Song^{1,2}, ZHOU Houbing^{3,4,†}, Petrache C.M⁵, QIANG Yunhua^{1,2}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Department of Physics, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;*

4. *Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;*

5. *Centre de Sciences Nucléaires et Sciences de la Matière, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Bât. 104-108, 91405 Orsay, France)*

Abstract: An in-beam γ spectroscopic study, based on the XTU Tandem accelerator of the Laboratori Nazionali di Legnaro in Italy, has been performed to explore the collective motion in ^{130}Ba . A significantly extended level scheme of ^{130}Ba has been built in the present work. High-spin states of ^{130}Ba were populated via the $^{122}\text{Sn}(^{13}\text{C}, 5n)$ reaction at a beam energy of 65 MeV. The γ rays were detected by the GALILEO spectrometer, while the neutrons and charged particles were detected by the Neutron Wall array and the EUCLIDES silicon apparatus, respectively. A series of new rotational bands in ^{130}Ba have been identified, among which there is a new structure populating to the previously known 9.4 ms isomer. With the help of previously reported intrinsic quadrupole moment and magnetic moment, we extracted precise value of the g factors of this isomer. According to the band structure analysis, the coexistence of prolate and oblate shapes has been observed in ^{130}Ba , while the orientation of collective rotation can be either along or away from the principal axes. It is the first time to identify a tilted band in the $A = 130$ mass region. Theoretical analysis suggests that a new band can be interpreted as the wobbling motion built on two-quasiparticle configuration, which is the first wobbling band observed in an even-even nucleus.

Key words: collective motion; alignment; wobbling motion; isomer

Received date: 09 Jan. 2020; **Revised date:** 16 Apr. 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11965003, 11505035, 11675266); Natural Science Foundation of Guangxi(2017GXNSFAA198160, 2017GXNSFGA198001); Foundation of Guangxi Innovative Team and Distinguished Scholar in Institutions of Higher Education

† **Corresponding author:** ZHOU Houbing, E-mail: zhb@mailbox.gxnu.edu.cn.