

三轴形变核  $^{131}\text{Ba}$  中的奇异集体激发模式\*

韦锐<sup>1)</sup> 周厚兵<sup>1)2)†</sup> 王思成<sup>3)4)‡</sup> 丁兵<sup>3)4)</sup> 强赞华<sup>3)4)</sup> 贾晨旭<sup>3)4)</sup>  
 陈红星<sup>3)4)</sup> 郭松<sup>3)4)</sup> C.M. Petrache<sup>5)</sup> D. Mengoni<sup>6)7)</sup> A. Astier<sup>5)</sup>  
 E. Dupont<sup>5)</sup> 吕冰锋<sup>5)</sup> D. Bazzacco<sup>6)7)</sup> A. Boso<sup>6)7)</sup> A. Goasduff<sup>6)7)</sup>  
 F. Recchia<sup>6)7)</sup> D. Testov<sup>6)7)</sup> F. Galtarossa<sup>8)9)</sup> G. Jaworski<sup>8)</sup>  
 D.R. Napoli<sup>8)</sup> S. Riccetto<sup>8)</sup> M. Siciliano<sup>8)</sup> J.J. Valiente-Dobon<sup>8)</sup>  
 C. Andreoiu<sup>10)</sup> F.H. Garcia<sup>10)</sup> K. Ortner<sup>10)</sup> K. Whitmore<sup>10)</sup>  
 A. Ataç-Nyberg<sup>11)</sup> T. Bäck<sup>11)</sup> B. Cederwall<sup>11)</sup> E.A. Lawrie<sup>12)13)</sup>  
 I. Kuti<sup>14)</sup> D. Sohler<sup>14)</sup> T. Marchlewski<sup>15)</sup> J. Srebrny<sup>15)</sup> A. Tucholski<sup>15)</sup>

1) (广西师范大学物理科学与技术学院, 桂林 541004)

2) (广西核物理与核技术重点实验室, 桂林 541004)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

4) (中国科学院大学, 北京 100049)

5) (巴黎萨克雷大学, CNRS/IN2P3, IJCLab, 奥赛 91405)

6) (帕多瓦大学物理和天文学系, 帕多瓦 I-35131)

7) (意大利国家核物理研究所帕多瓦分部, 帕多瓦 I-35131)

8) (意大利国家核物理研究所莱尼亚罗国家实验室, 莱尼亚罗 (帕多瓦) I-35020)

9) (费拉拉大学理学与自然科学院, 费拉拉)

10) (西蒙菲莎大学化学系, 本拿比 BC V5A 1S6)

11) (皇家理工学院物理系, 斯德哥摩尔 S-10691)

12) (国家研究基金会 iThemba 加速器科学实验室, 西萨默塞特 7123)

13) (西开普大学物理与天文系, 贝尔维尔 ZA-7535)

14) (HUN-REN 原子核研究所, 德布勒森 4001)

15) (华沙巴斯德拉大学重离子实验室, 华沙 02-093)

(2024年2月1日收到; 2024年3月15日收到修改稿)

利用意大利 Legnaro 实验室串联静电加速器提供的 65 MeV  $^{13}\text{C}$  束流与  $^{122}\text{Sn}$  靶的熔合蒸发反应布居了  $^{131}\text{Ba}$  的高自旋态, 并搭建了新的能级纲图. 新的能级纲图由 15 条转动带组成, 包括三对手征双重带, 其中两对正宇称手征带为赝自旋-手征四重带. 正负宇称手征带通过一系列增强的 E1 跃迁连接, 表明它们之间存在八极关联. 在低自旋区域搭建了一条新的转动带, 通过一系列  $\gamma$  跃迁向  $\nu h_{11/2}$  晕带退激. 这种能级结构与摇摆带相似, 但基于现有的实验证据还难以将它确认为摇摆带, 不能排除其他集体激发机制, 如  $\gamma$  振动的影响.

**关键词:** 高自旋态, 手征带, 赝自旋, 八极关联, 摇摆运动

**PACS:** 23.20.Lv, 21.10.Re, 23.20.En

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240212

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12365016) 和广西自然科学基金 (批准号: 2023GXNSFAA026016) 资助的课题.

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

‡ 通信作者. E-mail: wangsicheng@impcas.ac.cn

## 1 引言

作为量子多体体系,原子核可能处于不同的本征态,其中能量最低的称为基态,其他统称激发态.对于部分激发态,考虑少数价核子就可以很好地描述它们;而对于另外一些激发态,则需要考虑多数核子的参与.为此,在一些模型中引入了集体运动和集体自由度,从而可以用精简的方式准确地描述这些激发态.集体运动通常和原子核的形状以及密度分布相关联,比如原子核的集体转动对球形原子核是没有意义的,对于常见的轴对称形变原子核来说,转动轴则被约束在与对称轴垂直的方向上.而在三轴形变原子核中,轴对称被打破,集体转动角动量可以沿任意方向,这使得三轴形变原子核的集体运动更为复杂,容易观测到奇异的激发模式.

人们很早之前就认识到原子核存在三轴形变,并发现其与许多物理现象有关,比如 $\gamma$ 振动带<sup>[1]</sup>、旋称劈裂等<sup>[2]</sup>.20世纪末,实验上相继发现了可能的手征双重带<sup>[3]</sup>与摇摆带<sup>[4]</sup>结构,一般认为这是原子核存在稳定三轴形变的证据.对于这两种现象,质量数 $A \approx 130$ 的核素是重要的研究对象.该质量区,原子核的价中子和价质子都有可能处于 $h_{11/2}$ 轨道<sup>[5]</sup>.该轨道可容纳12个核子,每一对自旋方向相反的核子填充在一个子轨道上.在球形核中,6个子轨道的激发能是简并的,但对于形变核,这6个子轨道的能级就出现了劈裂.随着质子或中子数的增加,相应的费米面提升,核子从激发能最低的底部逐渐填充到激发能最高的顶部,在费米面附近容易出现不配对的核子,即价核子.在质子数处于50—64之间,中子数处于64—82之间的130质量区,价质子位于 $h_{11/2}$ 轨道的底部,价中子位于 $h_{11/2}$ 轨道的中上部.这些轨道上的质子和中子分别倾向于绕原子核的短轴和长轴转动<sup>[6]</sup>,如果这些质子轨道和中子轨道同时被占据,原子核的三轴形变更稳定.手征对称性引入核物理之初,就把 $^{134}\text{Pr}$ <sup>[3]</sup>中的一对转动带当作最可能的手征双重带候选者.其后虽然关于该带产生一些争议,但至今为止 $A \approx 130$ 质量区仍然报道了最多的手征双重带候选带<sup>[7]</sup>.2006年,孟杰等<sup>[8]</sup>提出原子核中可能存在手征多重带之后,实验上首先在 $^{133}\text{Ce}$ 中发现了包含两对手征双重带的结构<sup>[9]</sup>.

摇摆运动是稳定三轴形变的另一个标志.三轴

形变原子核三个主轴的转动惯量各不相同,原子核有可能绕着转动惯量最大的主轴进动.20世纪70年代,Bohr和Mottelson<sup>[10]</sup>指出对于高自旋态,可以用转动和简谐振动的叠加近似地表示三轴形变原子核的进动.实验上在 $^{163}\text{Lu}$ 的高自旋态中发现第一例摇摆带<sup>[4]</sup>.随后在 $A \approx 130$ 核区,例如 $^{135}\text{Pr}$ <sup>[11]</sup>, $^{133}\text{La}$ <sup>[12]</sup>, $^{136}\text{Nd}$ <sup>[13]</sup>和 $^{133}\text{Ba}$ <sup>[14]</sup>等核中也报道了一系列低自旋摇摆带.围绕这些摇摆带,在理论和实验方面都引起了一系列争议.此外,在 $^{130}\text{Ba}$ <sup>[15]</sup>和 $^{136}\text{Nd}$ <sup>[13]</sup>中,还报道了建立在二准粒子组态上的摇摆带结构.最近,郭睿巨等<sup>[16]</sup>在奇奇核 $^{74}\text{Br}$ 中首次观测到手征摇摆带结构.

原子核中还可能偏离椭球形变,产生八极形变,使宇称发生破缺.宇称相反,主量子数差1,轨道角动量和总角动量相差 $3\hbar$ 的两条轨道之间存在八极相互作用,如果费米面附近这两条轨道接近,就容易驱使原子核出现八极形变<sup>[17]</sup>.当质子数或中子数接近34,56,88和134时,八极关联的效应较强,实验上发现 $Z \approx 88$ , $N \approx 134$ 的 $A \approx 220$ 质量区<sup>[18,19]</sup>,及 $Z \approx 56$ , $N \approx 88$ 的 $A \approx 140$ 质量区<sup>[20,21]</sup>存在较稳定的八极形变.在 $Z \approx 56$ ,中子数小于82的Ba同位素中没有发现八极形变,但观测到一系列正负宇称带间存在增强的E1跃迁<sup>[22-24]</sup>,并将其解释为八极关联的影响.

三轴形变和八极形变可能存在于同一个原子核中<sup>[25,26]</sup>,2016年刘晨等<sup>[25]</sup>在 $^{78}\text{Br}$ 中发现两对存在八极关联的手征双重带,发现较软的八极形变核芯仍能保持手征系统的稳定性. $A \approx 130$ 的核区能够处于手征双重带所需的三轴形变,而其中的Ba同位素质子数为56,带来较强的八极关联效应,所以 $A \approx 130$ 核区的Ba同位素是寻找相似结构的理想研究目标核素.

Horen等<sup>[27]</sup>最早研究了 $^{131}\text{Ba}$ 的同核异能态,之后Ehrenstein等<sup>[28]</sup>用(d,p)反应研究了 $^{131}\text{Ba}$ 的低自旋态. $^{131}\text{Ba}$ 高自旋态的研究始于20世纪70年代,Gizon等<sup>[29]</sup>基于熔合蒸发反应 $^{122}\text{Sn}(^{12}\text{C},3n)$ 搭建了 $9/2^-$ 态上的转动带.Ma等<sup>[30]</sup>利用 $^{122}\text{Sn}(^{13}\text{C},4n)$ 反应布居了 $^{131}\text{Ba}$ 的高自旋态,探究处于 $h_{11/2}$ 轨道的质子和中子拆对时不同的形状驱动效应.Kaur等<sup>[31]</sup>完善了部分能级自旋和宇称的指认. $^{131}\text{Ba}$ 高自旋态最新的研究可参考文献<sup>[2,32]</sup>.在这些工作的基础上,本工作建立了迄今为止最完善的 $^{131}\text{Ba}$ 能级纲图,包含两个新的转动带结构.

基于这些实验信息, 深入讨论了  $^{131}\text{Ba}$  的各种奇异集体激发现象.

## 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 65 MeV 的  $^{13}\text{C}$  束流轰击两片叠放的厚度分别为  $0.5\text{ mg/cm}^2$  的  $^{122}\text{Sn}$  靶, 通过融合蒸发反应布居  $^{131}\text{Ba}$  的高激发态. 蒸发剩余核放出的  $\gamma$  射线由 GALILEO<sup>[33]</sup> 探测阵列记录, 该阵列由 25 个配备了反康单元的高纯锗探测器组成, 探测器分别放置在与入射束流方向成  $90^\circ$ ,  $119^\circ$ ,  $129^\circ$  和  $152^\circ$  的四个环上. EUCLIDES 硅球<sup>[33]</sup> 和中子墙<sup>[34]</sup> 分别用于探测反应过程中放出的带电粒子和中子, 用以区分不同的反应道. 实验共收集到了  $1.2 \times 10^9$  个三重及三重以上的  $\gamma$  符合事件. 利用 RADware 和 GASPware 程序包分析了  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  三重符合矩阵和蒸发核子挑选后的  $\gamma$ - $\gamma$  两重符合矩阵. 通过仔细分析  $\gamma$  间的符合关系, 大幅拓展了  $^{131}\text{Ba}$  高自旋态的能级纲图. 借助  $\gamma$  射线的角分布, 指出了大部分  $\gamma$  射线的跃迁极性, 从而建议了相关能级的自旋宇称值.

新搭建能级纲图如图 1 所示, 为了讨论方便, 将转动带分别标记为带 1—15. 此前已报道的能级与  $\gamma$  跃迁以黑色表示, 本工作确认了这些已知的能级结构, 而将新观测到的结构标记为红色. 带 1—8 在前人<sup>[32]</sup> 工作的基础上, 新鉴别了几条带间跃迁. 带 9 是新鉴别到的, 由能量为 377, 397 和 414 keV 的 3 条  $\Delta I = 1$  的跃迁组成, 并通过 303 keV 跃迁退激到带 8, 其典型开门谱如图 2(a) 所示. 在前人工作中<sup>[30,31]</sup> 看到了带 10 的大部分能级, 但把其中部分能级看作更高自旋态向带 2 退激的中间态, 而不是转动带的成员. 在本工作中, 新观测到 364 keV 的跃迁; 结合已知的 331, 474 和 276 keV 跃迁, 将它的两个旋称分支普遍联系起来. 此外, 相似的退激路径和随自旋变化的激发能表明将它是一条包含两个旋称分支的转动带. 图 2(b) 展示了 643 和 419 keV 跃迁的双开门谱, 从图中可以清楚看到 364 keV 等带内跃迁的  $\gamma$  射线. 带 13 是本工作建立的新转动带, 其典型开门谱如图 2(c) 和图 2(d) 所示. 在 865 和 1013 keV 的双开门谱中可以清楚看到 862 和 1155 keV 两条带内跃迁, 以及带 12 与带 13 带间的连接跃迁 1091 keV. 新发现

901, 1055 和 1173 keV 跃迁组成的  $\Delta I = 2$  序列与带 13 的  $\alpha = -1/2$  分支间有许多  $\Delta I = 1$  的连接跃迁, 可认为新发现的序列是带 13 的  $\alpha = 1/2$  分支. 通过  $\gamma$  射线的角分布信息, 建议了带 9 和带 13 新建立能级的自旋宇称. 带 15 最早是 Ma 等<sup>[30]</sup> 发现的, 并建议了能级的自旋值, 但没有指认其宇称. 本工作基于相关的角分布信息, 支持之前的自旋指认, 并建议其宇称为正.

## 3 讨论

纲图显示的 15 个带结构中, 低自旋区域的带 2 和高自旋区的带 3 布居最强, 它们代表本次实验观测的晕线位置. 为了进一步研究其他带的性质, 我们首先比较了  $^{131}\text{Ba}$  中带 1—15 的能级激发能, 如图 3 所示. 一般认为形变核的高自旋态激发能主要由集体转动部分和单粒子激发部分贡献, 高自旋实验上观测到的激发态, 一般分布在由每个自旋值对应的最低能量激发态(即晕态)组成的晕线附近, 通常比晕态的能量高 1 MeV 以内. 如果直接画出自旋和激发能的关系图, 所有观察到的转动带会挤在晕线附近, 不利于展示不同转动带之间的区别. 按照惯例, 这里将所有激发态能量减去一个相当于刚性转子的能量, 即  $E(I) - 0.012I(I+1)$ , 以凸显它们的差异. 值得注意的是, 该刚性转子的转动惯量是从展示效果的角度选取的, 不代表真实的核芯转动惯量. 由图 3 可以看出, 在  $6\hbar$  后准粒子拆对出现了多条转动带, 转动带的布居强度大致随它们离晕线的距离增加而减弱.

### 3.1 赝自旋-手征四重带

如图 1 所示, 带 1 是建立在基态  $1/2^+$  上的单准粒子态, 前人将其组态指认为  $\nu(s_{1/2}, d_{3/2})$ <sup>[30]</sup>; 带 2 组态为  $\nu h_{11/2}^-$ <sup>[29]</sup>, 它的带头为  $9/2^-$  态, 是建立在半衰期为  $(14.6 \pm 0.2)\text{ min}$  的同核异能态<sup>[27]</sup>. 基于同一套实验数据, 丁兵等<sup>[2]</sup> 建立了带 11, 并将其组态指认为  $\nu g_{7/2}$ . 这个带比带 1 更远离晕线, 布居强度也更弱. 带 3, 带 5, 带 6, 带 7 是 Ma 等<sup>[30]</sup> 首先建立的, 最近郭松等<sup>[32]</sup> 扩展了  $^{131}\text{Ba}$  的能级结构, 其中新搭建了带 4 和带 8. 从图 1 可以看到, 带 3—6 中自旋相同的能级具有近简并的能量, 带间存在许多跃迁连接, 还具有相似的顺排角动量, 因而它们很可能建立在相似的内禀组态上. 在文献<sup>[32]</sup>



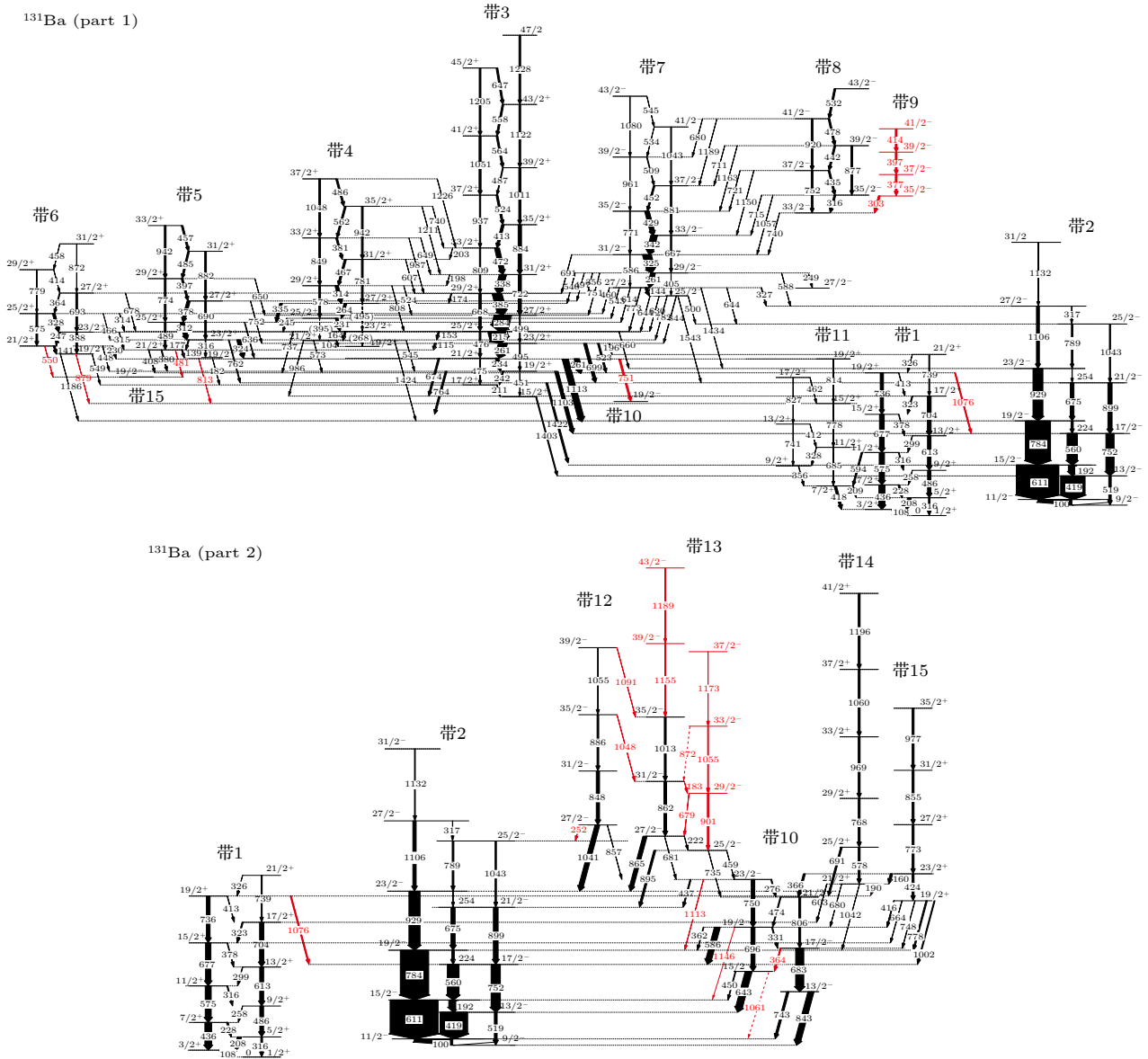


图 1  $^{131}\text{Ba}$  中的部分能级纲图, 箭头宽度表示  $\gamma$  跃迁强度, 跃迁能量单位为 keV, 本工作新发现的  $\gamma$  跃迁用红色表示

Fig. 1. Partial level schemes of  $^{131}\text{Ba}$  deduced from the present work. Transition energies are given in keV and their measured relative intensities are proportional to the widths of the arrows. Newly observed transitions are marked in red.

中, 这四个被指认为建立在组态  $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2}) \otimes \nu h_{11/2}$  之上的赝自旋-手征四重带. 王一平等<sup>[35]</sup> 基于反射不对称的粒子转子模型 (RAT-PRM), 计算了四个转动带的能级能量、旋称劈裂、约化跃迁分支比, 均与实验值基本相符, 因而支持该结构的指认. 他们还计算了集体转动角动量的方位角图 (azimuthal plots), 从中发现了手征几何演化的清晰证据.

在邻近的奇中子偶质子核  $^{133}\text{Ce}$ <sup>[9]</sup> 和  $^{135}\text{Nd}$ <sup>[36]</sup> 中都观测到了类似带 5、带 6 的手征双重带结构, 也观测到类似带 3 的转动带, 但没有观测到相应

的手征伙伴带带 4. 提取邻近偶偶核  $^{130}\text{Ba}$ <sup>[37]</sup> 中  $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2})$  转动带 N1 的顺排角动量, 如图 4(a) 所示. 带 3—6 的顺排角动量约为  $7\hbar$ — $9\hbar$ , 约等于  $i_x[\nu h_{11/2}] (\sim 2\hbar - 3\hbar) + i_x[\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2})] (\sim 5\hbar - 7\hbar)$  加和得到的顺排角动量, 进一步支持之前组态的指认. 带 7 和带 8 是一对负宇称手征双重带, 具有相似的准粒子顺排, 组态为  $\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}$ , 源于一对准质子拆对. 邻近偶偶核  $^{130}\text{Ba}$ <sup>[37]</sup> 中  $\pi h_{11/2}^2$  组态转动带 S1 的顺排角动量约为  $8\hbar$ , 从图 4(b) 可看出, 带 7 和带 8 的顺排角动量约为  $10\hbar$ — $12\hbar$ , 约等于  $i_x[\nu h_{11/2}] (\sim 2\hbar - 3\hbar) + i_x[\pi h_{11/2}^2] (\sim 8\hbar)$ .

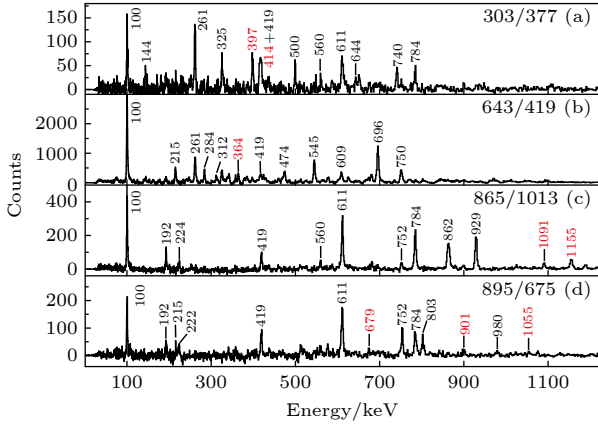


图 2 典型的二重符合开门谱, 本工作新鉴别的 $\gamma$ 跃迁用红色表示

Fig. 2. Typical double-gated coincidence spectra for the new structures in  $^{131}\text{Ba}$ . Newly observed levels are marked in red.

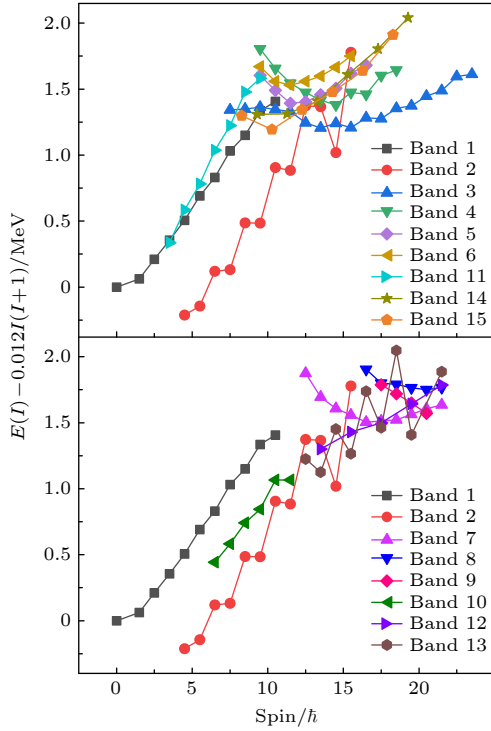


图 3 带 1—15 的转动能级相对于刚性转子的激发能

Fig. 3. The excitation energies of Band 1–15 of  $^{131}\text{Ba}$  are shown relative to a rotating rigid rotor reference.

### 3.2 正负宇称带间的八极关联

带 7 大部分通过一系列 E1 跃迁向带 3—6 退激, 退激后一个处于  $\pi h_{11/2}$  轨道的准粒子将占据  $\pi(g_{7/2}, d_{5/2})$  轨道.  $\pi h_{11/2}$  与  $\pi d_{5/2}$  轨道间的八极关联可能导致这些 E1 跃迁增强. 文献 [32] 指出带 3—6 与带 7 之间存在八极关联, 但并没有提供详细分析. 本文提取了  $^{131}\text{Ba}$  中负宇称带带 7 与正宇称带带 3 间的能量移动  $\delta E$  (图 5(a)) 和约化

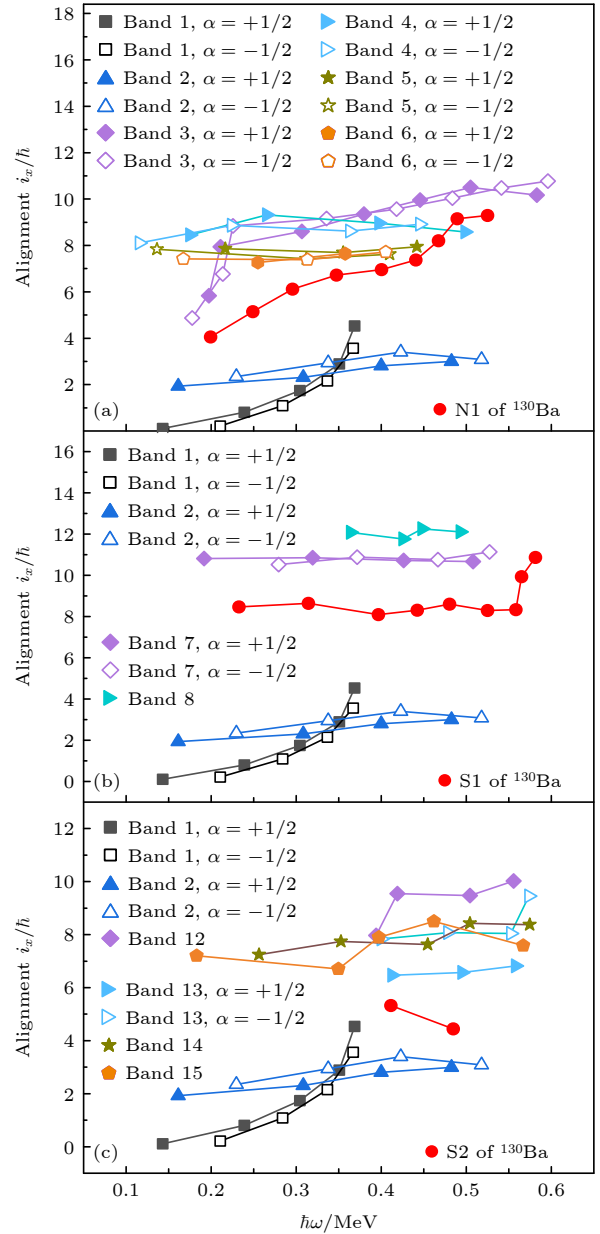


图 4  $^{131}\text{Ba}$  与  $^{130}\text{Ba}$  中转动带准粒子顺排, 对于  $^{131}\text{Ba}$ , Harris 参数取  $\mathcal{J}_0 = 11.9\hbar^2 \text{ MeV}^{-1}$ ,  $\mathcal{J}_1 = 21.1\hbar^4 \text{ MeV}^{-3}$ . 对于  $^{130}\text{Ba}$ , Harris 参数取  $\mathcal{J}_0 = 10\hbar^2 \text{ MeV}^{-1}$ ,  $\mathcal{J}_1 = 55\hbar^4 \text{ MeV}^{-3}$ .

Fig. 4. The alignments of rotational bands in  $^{131}\text{Ba}$  and  $^{130}\text{Ba}$ . The Harris parameters used to obtain the alignments are  $\mathcal{J}_0 = 11.9\hbar^2 \text{ MeV}^{-1}$  and  $\mathcal{J}_1 = 21.1\hbar^4 \text{ MeV}^{-3}$  for bands in  $^{131}\text{Ba}$ , and  $\mathcal{J}_0 = 10\hbar^2 \text{ MeV}^{-1}$  and  $\mathcal{J}_1 = 55\hbar^4 \text{ MeV}^{-3}$  in  $^{130}\text{Ba}$ .

跃迁分支比  $B(E1)/B(E2)$  (图 5(b)), 提取公式分别为 [25]

$$\delta E(I) = E(I) - \frac{[(I+1)E(I-1) + IE(I+1)]}{2I+1}, \quad (1)$$

$$\frac{B(E1)}{B(E2)} = 0.77 \times \frac{E_\gamma^5(I \rightarrow I-2)I_\gamma(I \rightarrow I-1)}{E_\gamma^3(I \rightarrow I-1)I_\gamma(I \rightarrow I-2)}. \quad (2)$$

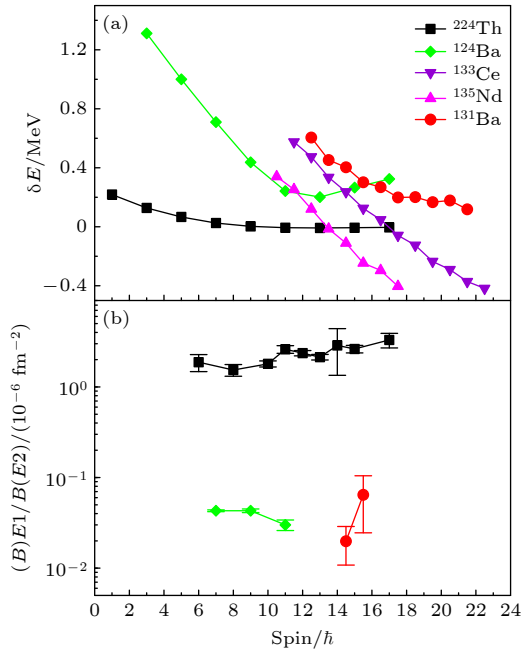


图 5  $^{131}\text{Ba}$ ,  $^{124}\text{Ba}$ [24],  $^{224}\text{Th}$ [38],  $^{133}\text{Ce}$ [39] 和  $^{135}\text{Nd}$ [36] 中 (a) 能量移动  $\delta E$  和 (b) 正负宇称带间的约化跃迁分支比  $B(E1)/B(E2)$  随自旋变化

Fig. 5. (a) The experimental energy displacement  $\delta E$  and (b)  $B(E1)/B(E2)$  ratios between the positive- and negative-parity bands as a function of spin in  $^{131}\text{Ba}$ , together with those in  $^{124}\text{Ba}$ [24],  $^{224}\text{Th}$ [38],  $^{133}\text{Ce}$ [39] and  $^{135}\text{Nd}$ [36].

将  $^{131}\text{Ba}$ ,  $^{124}\text{Ba}$ [24],  $^{224}\text{Th}$ [38],  $^{133}\text{Ce}$ [39] 和  $^{135}\text{Nd}$ [36] 中的能量移动  $\delta E$  进行对比. 对于存在强八极关联且具有稳定八极形变的  $^{224}\text{Th}$ , 正负宇称带间的能量移动  $\delta E$  很小, 且随着自旋增加逐渐接近 0[40,41], 这个核中的 E1 跃迁很强,  $B(E1)/B(E2)$  值超过 1.  $^{124}\text{Ba}$  中的  $\delta E$  更大, 但随着自旋增加迅速减少. 在这个核中观测到了基于不同组态的正负宇称转动带之间的 E1 连接跃迁, 但  $B(E1)/B(E2)$  值小于 0.1. Mason 等 [24] 将该现象解释为八极关联效应.  $^{131}\text{Ba}$  中正负宇称带之间的能量移动与  $^{124}\text{Ba}$  接近,  $B(E1)/B(E2)$  值也与  $^{124}\text{Ba}$  在同一量级, 但都与  $^{224}\text{Th}$  有明显偏移. 这表明,  $^{131}\text{Ba}$  中存在着八极关联效应, 但没有形成稳定的八极形变. 而  $^{133}\text{Ce}$ ,  $^{135}\text{Nd}$  中的能量移动随自旋线性变化, 穿过零点, 几乎找不到两个结构之间的 E1 跃迁, 说明在这两个核中八极关联效应很弱. 因此, 在  $A \approx 130$  核区, 存在八极关联的手征多重带结构可能只能存在于  $Z \approx 55$  的 Ba, Cs 等核中.

### 3.3 摇摆带

21 世纪初, 在  $A \approx 160$  核区 [4] 首先发现了一系

列摇摆带, 不过所有摇摆带的摇摆频率, 即摇摆声子的能量都随自旋增加而降低, 这种趋势与理论预期相反. 2015 年, 在  $A \approx 160$  核区以外的  $^{135}\text{Pr}$ [11] 中报道了第一例摇摆带, 处在低自旋区域. 同时, Frauendorf 和 Dönau[42] 提出横向/纵向摇摆的图像, 描述奇  $A$  核中的摇摆运动. 该图像假定准粒子的角动量方向固定在一个主轴上, 当这个主轴与转动方向大致相同, 会出现纵向摇摆; 如果与转动方向垂直, 则出现横向摇摆. 基于这种图像, 横向摇摆的摇摆频率随自旋增加而降低, 而纵向摇摆的摇摆频率随自旋增加而增加. 由此,  $A \approx 160$  核区所有的已知摇摆带和  $^{135}\text{Pr}$  中报道的摇摆带都被解释为横向摇摆. 随后, 在  $A \approx 130$  核区的  $^{133}\text{La}$ [12],  $^{127}\text{Xe}$ [43],  $^{133}\text{Ba}$ [14] 中, 又报道了一系列摇摆带, 其中  $^{133}\text{La}$ [12] 和  $^{127}\text{Xe}$ [43] 中报道的是纵向摇摆带,  $^{133}\text{Ba}$  中报道的是建立在中子  $\nu h_{11/2}$  组态上的横向摇摆带. 图 6 展示了这些摇摆带的摇摆频率.

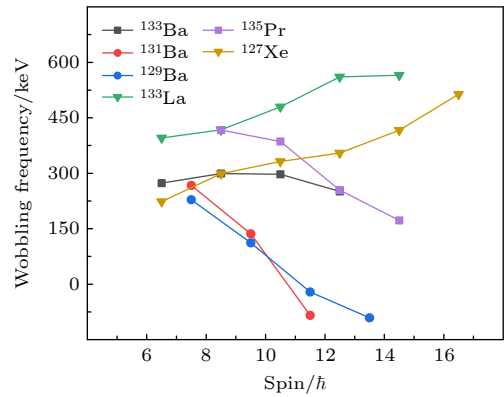


图 6  $^{131}\text{Ba}$ ,  $^{129}\text{Ba}$ [44],  $^{135}\text{Pr}$ [11],  $^{133}\text{La}$ [12],  $^{127}\text{Xe}$ [43] 和  $^{133}\text{Ba}$ [14] 中摇摆带的摇摆频率随自旋变化

Fig. 6. Experimental wobbling frequency as a function of spin in  $^{131}\text{Ba}$ , together with those in  $^{129}\text{Ba}$ [44],  $^{135}\text{Pr}$ [11],  $^{133}\text{La}$ [12],  $^{127}\text{Xe}$ [43] and  $^{133}\text{Ba}$ [14].

目前, 这些低自旋区域的摇摆带, 在理论和实验方面都还有一些争议. 理论上, Bohr 和 Mottelson 提出的摇摆图像仅在高自旋区域可以当作三轴原子核进动的良好近似, 不适用于低自旋区域. 为此, Lawrie 等 [45] 从三轴转动出发, 开发了三轴进动模型, 并应用于  $^{135}\text{Nd}$  中  $\nu h_{11/2}$  带的解释. 而陈启博和 Frauendorf[46] 开发了非简谐的摇摆运动模型, 用以处理低自旋进动问题. 实验上, 郭松等 [47] 指出: 报道低自旋摇摆带的实验工作对关键判据——电磁跃迁混合比的提取过程普遍不够严谨. 吕冰锋等 [48] 通过一次独立实验, 重新提取了  $^{135}\text{Pr}$  中摇摆

带相关跃迁的混合比,发现这些跃迁与之前报道的电四极跃迁主导相反,是由磁偶极跃迁主导的.因此,新的实验结果表明 $^{135}\text{Pr}$ 中非晕带的集体运动成分不及摇摆带的预期,不支持摇摆带的解释.

带 10 是本工作中新建立的低自旋区域转动带,通过一系列 $\gamma$ 射线向带 2 退激.由于带头的激发能很低,带 10 的组态应该主要是单准粒子态.带 10 和带 2 之间的紧密联系则表明该组态与 $\nu h_{11/2}$ 轨道密切相关.另外我们注意到在 $^{129}\text{Ba}$ 中也存在类似的结构<sup>[44]</sup>,由于它们与这个核区报道的低自旋摇摆带相似,我们将其暂且当作摇摆带提取了摇摆频率(见图 6). $^{129,131}\text{Ba}$ 中的摇摆频率随自旋增大而减小,这种变化趋势与横向摇摆相符.但 $^{129}\text{Ba}$ 的中子数 $N = 73$ ,费米面处于 $\nu h_{11/2}$ 壳层的中部,应当表现出与同中子素 $^{127}\text{Xe}$ <sup>[43]</sup>相似的纵向摇摆.另外, $^{129,131}\text{Ba}$ 中的摇摆频率出现了负值,也就是摇摆声子贡献的能量为负,这也不符合摇摆的图像,因此我们建议用摇摆运动以外的物理机制解释这两个转动带.事实上,除了摇摆,三轴形变原子核还有其他可能的集体运动模式,如 $\gamma$ 振动和 $\beta$ 振动.在 $A \approx 130$ 核区的偶偶核中<sup>[37,49]</sup>,普遍观测到低自旋区的 $\gamma$ 振动带.带 10 与晕带自旋小 $2\hbar$ 的激发能差都在 1000 keV 左右,这与 $A \approx 130$ 核区的偶偶核中 $\gamma$ 振动带相似.因此带 10 也可能是一个 $\gamma$ 振动带.由于 $\gamma$ 振动也是集体运动,相关的 $\Delta I = 1$ 跃迁中也会出现增强的 E2 成分,仅测量混合比可能不足以区分摇摆运动和 $\gamma$ 振动,需要进一步的实验和理论方面的工作来辨识.

### 3.4 磁转动带

磁转动带的发现可以追溯到 20 世纪 90 年代,在较轻的 Pb 同位素中报道的几例规则的类转动的 $\gamma$ 跃迁序列<sup>[50-52]</sup>.起初,这些带被误解为超形变带,后续测量表明这些带内的 $\gamma$ 跃迁是很强的 M1 跃迁,这与超形变带中强的 E2 跃迁不符.进一步的测量结果显示这些带具有很小的四级形变, $\beta$ 通常小于 0.15,且是扁椭圆形变<sup>[53,54]</sup>.因此,这些带结构应该源自原子核内部一种新的激发模式.为了区分形变核中已经建立起来的电转动带,这些带被称为磁转动带<sup>[55]</sup>.带内增强的 M1 跃迁由磁偶极矩大的横向分量绕着总角动量转动所致.粒子-空穴轨道相互垂直的耦合方式最容易形成大的横向分量.实验上也在不同的核区发现了多例磁转动带<sup>[56-58]</sup>.

$A \approx 130$ 核区,具有价质子粒子和价中子空穴特性,也是寻找该类带的一个理想区域.

本次实验观测的带 9 由 3 条强的 M1 跃迁组成,没有观测到 E2 跃迁,表明该带或许是个磁转动带.实际上,与 $^{131}\text{Ba}$ 相邻的 $^{130}\text{Ba}$ <sup>[37]</sup>和 $^{132}\text{Ba}$ <sup>[49]</sup>都发现了磁转动带,组态是 $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2}) \otimes \nu h_{11/2}^2$ .图 7 展示了这些带的能级间隔系统性,能量归一后,相应能级的激发能大致相当.该系统性支持 $^{131}\text{Ba}$ 中带 9 磁转动带的指认,同时表明相对于偶偶核芯 $^{130}\text{Ba}$ 和 $^{132}\text{Ba}$ , $^{131}\text{Ba}$ 中的奇中子扮演了一个旁观者的角色,它可能来自低 $j$ 的 $d_{3/2}$ 轨道. $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2}) \otimes \nu(h_{11/2}^2, d_{3/2})$ 组态能提供的最大角动量是 $41/2$ ,刚好对应带 9 的最大角动量,也支持将该组态指认给带 9.此外,图 7 所示的 $^{133}\text{Ba}$ 中的相应带组态,前人没有从磁转动的角度来理解该转动带<sup>[59]</sup>.图中的系统性表明该带可能也是一个磁转动带.不过,该猜测还需要进一步的实验和理论工作加以验证.

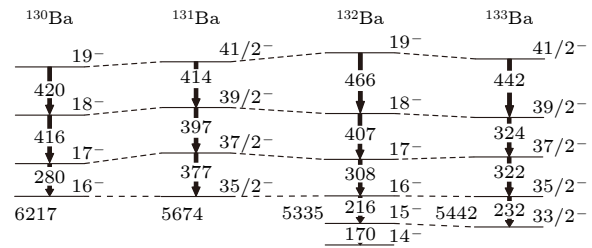


图 7  $^{130}\text{Ba}$ <sup>[37]</sup>,  $^{131}\text{Ba}$ ,  $^{132}\text{Ba}$ <sup>[49]</sup>和 $^{133}\text{Ba}$ <sup>[59]</sup>中 $\Delta I = 1$ 跃迁序列的能级间隔系统性

Fig. 7. The systematic level spacings of  $\Delta I = 1$  transition sequences in  $^{130}\text{Ba}$ <sup>[37]</sup>,  $^{131}\text{Ba}$ ,  $^{132}\text{Ba}$ <sup>[49]</sup> and  $^{133}\text{Ba}$ <sup>[59]</sup>.

### 3.5 带 12—15

带 12、带 13 是主要由电四极跃迁构成的转动带,宇称为负,并且主要向带 2 和带 10 退激.在文献<sup>[30]</sup>中二者被指认为建立在三准粒子组态 $\nu h_{11/2}^3$ 上,分别对应 $\gamma \approx 40^\circ$ 和 $\gamma \approx 80^\circ$ 的扁椭圆形变带.从图 4(c)可看出,带 12、带 13 的准粒子顺排角动量不同,这可能是由形变不同导致.在邻近的 $^{130}\text{Ba}$ <sup>[60]</sup>中就存在组态相同( $\nu h_{11/2}^2$ ),形状不同而产生的不同转动带.

带 14、带 15 的宇称为正,向带 1、带 2 和带 10 退激.它们的组态被认为是 $\nu h_{11/2}^2$ 与 $\nu(s_{1/2}, d_{3/2})$ 的耦合<sup>[30]</sup>.从图 4(c)可看出带 14、带 15 的顺排角动量约等于 $6\hbar-8\hbar$ ,约等于邻近偶偶核 $^{130}\text{Ba}$ <sup>[37]</sup>中 $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2})$ 转动带的顺排角动量( $4\hbar-6\hbar$ )



与核  $^{131}\text{Ba}$  中  $\nu h_{11/2}$  转动带的顺排角动量 ( $2\hbar-3\hbar$ ) 之和.

## 4 结 论

通过重离子熔合蒸发反应研究了  $^{131}\text{Ba}$  的高自旋态, 新搭建的能级纲图大幅度扩展了原有的能级纲图. 在新纲图中我们指认了建立在  $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2}) \otimes \nu h_{11/2}$  组态上赝自旋-手征四重带. 组态为  $\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}$  的负宇称手征双重带, 通过一系列 E1 跃迁向赝自旋-手征四重带退激, 表明在了  $^{131}\text{Ba}$  中存在八极关联. 在低自旋区搭建了一条新的转动带, 基于摇摆图像的分析排除了将这个带解释为摇摆运动的可能, 需要考虑  $\gamma$  振动等其他集体激发机制的影响. 通过能级系统性的分析, 将新搭建的由 M1 跃迁组成的转动带初步指认为磁转动带. 为了进一步确定这两个转动带的集体激发机制, 基于粒子-转子模型、投影壳模型开展理论计算是至关重要的. 希望相关领域的理论同行能在已知数据基础上, 对此展开理论分析. 不过, 由于高自旋转动带的结构复杂, 有可能存在多样的解释, 且都能比较好地解释观测到的激发能. 目前, 普遍认为不同激发机制会导致差异显著的跃迁几率值, 因此通过寿命测量提取跃迁几率实验值, 将为指认这两个转动带的激发机制提供决定性的实验依据. 我们希望接下来能够基于兰州重离子加速器装置或中国原子能科学研究院串列加速器装置, 利用  $\gamma$  射线的多普勒效应开展寿命测量工作.

## 参考文献

[1] Li H J, Xiao Z G, Zhu S J, Yeoh E Y, Liu Y X, Sun Y, Zhang Z, Wang R S, Yi H, Yan W H, Xu Q, Wu X G, He C Y, Zheng Y, Li G S, Li C B, Li H W, Liu J J, Hu S P, Wang J L, Yao S H 2013 *Phys. Rev. C* **87** 057303

[2] Ding B, Petrache C M, Guo S, Lawrie E A, Wakudyanaye I, Zhang Z H, Wang H L, Meng H Y, Mengoni D, Qiang Y H, Wang J G, Andreoiu C, Astier A, Avaa A, Bäck T, Bark R A, Bazzacco D, Boso A, Bucher T D, Cederwall B, Chisapi M V, Fan H L, Galtarossa F, Garcia F H, Goasduff A, Jaworski G, Jones P, Kuti I, Lawrie J J, Li G S, Li R, Liu M L, Liu Z, Lomborg B, Lv B F, Marchlewski T, Mdletshe L, Msebi L, Mthembu S H, Napoli D R, Netshiyi A, Nkalanga M F, Orce J N, Ortner K, Recchia F, Riccetto S, Rohilla A, Seakamela T W, Siciliano M, Sithole M A, Sohler D, Srebny J, Testov D, Tucholski A, Valiente-Dobón J J, Wentzel F, Whitmore K, Zhang Y H, Zheng K K, Zhou X H, Zikhali B R 2021 *Phys. Rev. C* **104** 064304

[3] Starosta K, Koike T, Chiara C J, Fossan D B, LaFosse D R,

Hecht A A, Beausang C W, Caprio M A, Cooper J R, Krücken R, Novak J R, Zamfir N V, Zyromski K E, Hartley D J, Balabanski D L, Zhang J Y, Frauendorf S, Dimitrov V I 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 971

[4] Jensen D R, Hagemann G B, Hamamoto I, Odegård S W, Herskind B, Sletten G, Wilson J N, Spohr K, Hübel H, Bringel P, Neußer A, Schönwaßer G, Singh A K, Ma W C, Amro H, Bracco A, Leoni S, Benzoni G, Maj A, Petrache C M, Bianco G L, Bednarczyk P, Curien D 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 142503

[5] Wyss R, Grandérath A, Bengtsson R, Von Brentano P, Dewald A, Gelberg A, Gizon A, Gizon J, Harissopulos S, Johnson A, Lieberz W, Nazarewicz W, Nyberg J, Schiffer K 1989 *Nucl. Phys. A* **505** 337

[6] Sensharma N, Garg U, Chen Q B, Frauendorf S, Burdette D P, Cozzi J L, Howard K B, Zhu S, Carpenter M P, Copp P, Kondev F G, Lauritsen T, Li J, Seweryniak D, Wu J, Ayangeakaa A D, Hartley D J, Janssens R V F, Forney A M, Walters W B, Ghugre S S, Palit R 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 052501

[7] Xiong B, Wang Y 2019 *At. Data Nucl. Data Tables* **125** 193

[8] Meng J, Peng J, Zhang S Q, Zhou S G 2006 *Phys. Rev. C* **73** 037303

[9] Ayangeakaa A D, Garg U, Anthony M D, Frauendorf S, Matta J T, Nayak B K, Patel D, Chen Q B, Zhang S Q, Zhao P W, Qi B, Meng J, Janssens R V F, Carpenter M P, Chiara C J, Kondev F G, Lauritsen T, Seweryniak D, Zhu S, Ghugre S S, Palit R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 172504

[10] Bohr A, Mottelson B R 1975 *Nuclear Structure* (Vol. II) (New York: Benjamin)

[11] Matta J T, Garg U, Li W, Frauendorf S, Ayangeakaa A D, Patel D, Schlax K W, Palit R, Saha S, Sethi J, Trivedi T, Ghugre S S, Raut R, Sinha A K, Janssens R V F, Zhu S, Carpenter M P, Lauritsen T, Seweryniak D, Chiara C J, Kondev F G, Hartley D J, Petrache C M, Mukhopadhyay S, Lakshmi D V, Raju M K, Madhusudhana Rao P V, Tandel K K, Ray S, Dönau F 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 082501

[12] Biswas S, Palit R, Frauendorf S, Garg U, Li W, Bhat G H, Sheikh J A, Sethi J, Saha S, Singh P, Choudhury D, Matta J T, Ayangeakaa A D, Dar W A, Singh V, Sihotra S 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 159

[13] Lv B F, Petrache C M, Budaca R, Astier A, Zheng K K, Greenlees P, Badran H, Calverley T, Cox D M, Grahn T, Hilton J, Julin R, Juutinen S, Konki J, Pakarinen J, Papadakis P, Partanen J, Rahkila P, Ruotsalainen P, Sandzelius M, Saren J, Scholey C, Sorri J, Stolze S, Uusitalo J, Cederwall B, Ertoprak A, Liu H, Guo S, Wang J G, Ong H J, Zhou X H, Sun Z Y, Kuti I, Timár J, Tucholski A, Srebny J, Andreoiu C 2022 *Phys. Rev. C* **105** 034302

[14] Rojeeta Devi K, Kumar S, Kumar N, Neelam, Babra F S, Laskar MdSR, Biswas S, Saha S, Singh P, Samanta S, Das S, Chakraborty S, Singh R P, Muralithar S, Kumar A 2021 *Phys. Lett. B* **823** 136756

[15] Chen Q B, Frauendorf S, Petrache C M 2019 *Phys. Rev. C* **100** 061301

[16] Guo R J, Wang S Y, Liu C, Bark R A, Meng J, Zhang S Q, Qi B, Rohilla A, Li Z H, Hua H, Chen Q B, Jia H, Lu X, Wang S, Sun D P, Han X C, Xu W Z, Wang E H, Bai H F, Li M, Jones P, Sharpey-Schafer J F, Wiedeking M, Shirinda O, Brits C P, Malatji K L, Dinoko T, Ndayishimye J, Mthembu S, Jongile S, Sowazi K, Kutlwano S, Bucher T D, Roux D G, Netshiyi A A, Mdletshe L, Noncolela S, Mtshali W 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 092501



- [17] Butler P A, Nazarewicz W 1996 *Rev. Mod. Phys.* **68** 349
- [18] Butler P A, Gaffney L P, Spagnoletti P, Abrahams K, Bowry M, Cederkäll J, De Angelis G, De Witte H, Garrett P E, Goldkuhle A, Henrich C, Illana A, Johnston K, Joss D T, Keatings J M, Kelly N A, Komorowska M, Konki J, Kröll T, Lozano M, Nara Singh B S, O'Donnell D, Ojala J, Page R D, Pedersen L G, Raison C, Reiter P, Rodriguez J A, Rosiak D, Rothe S, Scheck M, Seidlitz M, Shneidman T M, Siebeck B, Sinclair J, Smith J F, Stryczyk M, Van Duppen P, Vinals S, Virtanen V, Warr N, Wrzosek-Lipska K, Zielńska M 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 042503
- [19] Hensley T C, Cottle P D, Tripathi V, Abromeit B, Anastasiou M, Baby L T, Baron J S, Caussyn D, Dungan R, Kemper K W, Lubna R S, Miller S L, Rijal N, Riley M A, Tabor S L, Tai P L, Villafana K 2017 *Phys. Rev. C* **96** 034325
- [20] Bucher B, Zhu S, Wu C Y, Janssens R V F, Cline D, Hayes A B, Albers M, Ayangeakaa A D, Butler P A, Campbell C M, Carpenter M P, Chiara C J, Clark J A, Crawford H L, Cromaz M, David H M, Dickerson C, Gregor E T, Harker J, Hoffman C R, Kay B P, Kondev F G, Korichi A, Lauritsen T, Macchiavelli A O, Pardo R C, Richard A, Riley M A, Savard G, Scheck M, Seweryniak D, Smith M K, Vondrasek R, Wiens A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 112503
- [21] Bucher B, Zhu S, Wu C Y, Janssens R V F, Bernard R N, Robledo L M, Rodríguez T R, Cline D, Hayes A B, Ayangeakaa A D, Buckner M Q, Campbell C M, Carpenter M P, Clark J A, Crawford H L, David H M, Dickerson C, Harker J, Hoffman C R, Kay B P, Kondev F G, Lauritsen T, Macchiavelli A O, Pardo R C, Savard G, Seweryniak D, Vondrasek R 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 152504
- [22] Zhu S J, Sakhae M, Yang L M, Gan C Y, Zhu L Y, Xu R Q, Jiang Z, Zhang Z, Long G L, Wen S X, Wu X G 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1027
- [23] Chen X C, Zhao J, Xu C, Hua H, Shneidman T M, Zhou S G, Wu X G, Li X Q, Zhang S Q, Li Z H, Liang W Y, Meng J, Xu F R, Qi B, Ye Y L, Jiang D X, Cheng Y Y, He C, Sun J J, Han R, Niu C Y, Li C G, Li P J, Wang C G, Wu H Y, Li Z H, Zhou H, Hu S P, Zhang H Q, Li G S, He C Y, Zheng Y, Li C B, Li H W, Wu Y H, Luo P W, Zhong J 2016 *Phys. Rev. C* **94** 021301
- [24] Mason P, Benzoni G, Bracco A, Camera F, Million B, Wieland O, Leoni S, Singh A K, Al-Khatib A, Hübel H, Bringel P, Bürger A, Neusser A, Schönwasser G, Nyakó B M, Timár J, Algora A, Dombrádi Zs, Gál J, Kalinka G, Molnár J, Sohler D, Zolnai L, Juhász K, Hagemann G B, Hansen C R, Herskind B, Sletten G, Kmiecik M, Maj A, Styczen J, Zuber K, Azaiez F, Hauschild K, Korichi A, Lopez-Martens A, Roccaz J, Siem S, Hannachi F, Scheurer J N, Bednarczyk P, Byrski Th, Curien D, Dorvaux O, Duchêne G, Gall B, Khalfallah F, Piqueras I, Robin J, Patel S B, Evans O A, Rainovski G, Petrache C M, Petrache D, Rana G L, Moro R, Angelis G D, Falon P, Lee I Y, Lisle J C, Cederwall B, Lagergen K, Lieder R M, Podsvirova E, Gast W, Jäger H, Redon N, Gørgen A 2005 *Phys. Rev. C* **72** 064315
- [25] Liu C, Wang S Y, Bark R A, Zhang S Q, Meng J, Qi B, Jones P, Wyngaardt S M, Zhao J, Xu C, Zhou S G, Wang S, Sun D P, Liu L, Li Z Q, Zhang N B, Jia H, Li X Q, Hua H, Chen Q B, Xiao Z G, Li H J, Zhu L H, Bucher T D, Dinoko T, Easton J, Juhász K, Kamblawe A, Khaleel E, Khumalo N, Lawrie E A, Lawrie J J, Majola S N T, Mullins S M, Murray S, Ndayishimye J, Negi D, Noncolela S P, Ntshangase S S, Nyakó B M, Orce J N, Papka P, Sharpey-Schafer J F, Shirinda O, Sithole P, Stankiewicz M A, Wiedeking M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 112501
- [26] Xiao X, Wang S Y, Liu C, Bark R A, Meng J, Zhang S Q, Qi B, Hua H, Jones P, Wyngaardt S M, Wang S, Sun D P, Li Z Q, Zhang N B, Jia H, Guo R J, Han X C, Mu L, Lu X, Xu W Z, Niu C Y, Wang C G, Lawrie E A, Lawrie J J, Sharpey-Schafer J F, Wiedeking M, Majola S N T, Bucher T D, Dinoko T, Maqabuka B, Makhathini L, Mdletshe L, Khumalo N A, Shirinda O, Sowazi K 2022 *Phys. Rev. C* **106** 064302
- [27] Horen D J, Kelly W H, Yaffe L 1963 *Phys. Rev.* **129** 1712
- [28] von Ehrenstein D, Morrison G C, Nolen J A, Williams N 1970 *Phys. Rev. C* **1** 2066
- [29] Gizon J, Gizon A, Horen D J 1975 *Nucl. Phys.* **252** 509
- [30] Ma R, Liang Y, Paul E S, Xu N, Fossan D B, Hildingsson L, Wyss R A 1990 *Phys. Rev. C* **41** 717
- [31] Kaur N, Kumar A, Mukherjee G, Singh A, Kumar S, Kaur R, Singh V, Behera B R, Singh K P, Singh G, Sharma H P, Kumar S, Kumar Raju M, Madhusudhan Rao P V, Muralithar S, Singh R P, Kumar R, Madhvan N, Bhowmik R K 2014 *Eur. Phys. J. A* **50** 5
- [32] Guo S, Petrache C M, Mengoni D, Qiang Y H, Wang Y P, Wang Y Y, Meng J, Wang Y K, Zhang S Q, Zhao P W, Astier A, Wang J G, Fan H L, Dupont E, Lv B F, Bazzacco D, Boso A, Goasduff A, Recchia F, Testov D, Galtarossa F, Jaworski G, Napoli D R, Ricchetto S, Siciliano M, Valiente-Dobon J J, Liu M L, Li G S, Zhou X H, Zhang Y H, Andreoiu C, Garcia F H, Ortner K, Whitmore K, Ata-Nyberg A, Bäck T, Cederwall B, Lawrie E A, Kuti I, Sohler D, Marchlewski T, Srebrny J, Tucholski A 2020 *Phys. Lett. B* **807** 135572
- [33] Testov D, Mengoni D, Goasduff A, Gadea A, Isocrate R, John P R, De Angelis G, Bazzacco D, Boiano C, Boso A, Cocconi P, Dueñas J A, Egea Canet F J, Grassi L, Hadyńska-Klek K, Jaworski G, Lunardi S, Menegazzo R, Napoli D R, Recchia F, Siciliano M, Valiente-Dobón J J 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 47
- [34] Ljungvall J, Palacz M, Nyberg J 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **528** 741
- [35] Wang Y P, Wang Y Y, Meng J 2020 *Phys. Rev. C* **102** 024313
- [36] Lv B F, Petrache C M, Chen Q B, Meng J, Astier A, Dupont E, Greenlees P, Badran H, Calverley T, Cox D M, Grahn T, Hilton J, Julin R, Juutinen S, Konki J, Pakarinen J, Papadakis P, Partanen J, Rahkila P, Ruotsalainen P, Sandzelius M, Saren J, Scholey C, Sorri J, Stolze S, Usitalo J, Cederwall B, Ertoprak A, Liu H, Guo S, Liu M L, Wang J G, Zhou X H, Kuti I, Timár J, Tucholski A, Srebrny J, Andreoiu C 2019 *Phys. Rev. C* **100** 024314
- [37] Guo S, Petrache C M, Mengoni D, Liu Y X, Chen Q B, Qiang Y H, Astier A, Dupont E, Zheng K K, Wang J G, Ding B, Lv B F, Liu M L, Fang Y D, Zhou X H, Bazzacco D, Boso A, Goasduff A, Recchia F, Testov D, Galtarossa F, Jaworski G, Napoli D R, Ricchetto S, Siciliano M, Valiente-Dobon J J, Andreoiu C, Garcia F H, Ortner K, Whitmore K, Cederwall B, Lawrie E A, Kuti I, Sohler D, Marchlewski T, Srebrny J, Tucholski A 2020 *Phys. Rev. C* **102** 044320
- [38] Ackermann B, Baltzer H, Ensel C, Freitag K, Grafen V, Günther C, Herzog P, Mams J, Marten-Tölle M, Müller U, Prinz J, Romanski I, Tölle R, deBoer J, Gollwitzer N, Maier H 1993 *Nucl. Phys.* **559** 61
- [39] Ayangeakaa A D, Garg U, Petrache C M, Guo S, Zhao P W, Matta J T, Nayak B K, Patel D, Janssens R V F, Carpenter M P, Chiara C J, Kondev F G, Lauritsen T, Seweryniak D, Zhu S, Ghugre S S, Palit R 2016 *Phys. Rev. C* **93** 054317

- [40] Nazarewicz W, Olanders P 1985 *Nucl. Phys.* **441** 420
- [41] Cottle P D 1990 *Phys. Rev. C* **41** 517
- [42] Frauendorf S, Dönauf F 2014 *Phys. Rev. C* **89** 014322
- [43] Chakraborty S, Sharma H P, Tiwary S S, Majumder C, Gupta A K, Banerjee P, Ganguly S, Rai S, Pragati, Mayank, Kumar S, Kumar A, Palit R, Bhattacharjee S S, Singh R P, Muralithar S 2020 *Phys. Lett. B* **811** 135854
- [44] Byrne A P, Schiffer K, Dracoulis G D, Fabricius B, Kibédi T, Stuchbery A E, Lieb K P 1992 *Nucl. Phys.* **548** 131
- [45] Lawrie E A, Shirinda O, Petrache C M 2020 *Phys. Rev. C* **101** 034306
- [46] Chen Q B, Frauendorf S 2022 *Eur. Phys. J. A* **58** 75
- [47] Guo S, Zhou X H, Petrache C M, Lawrie E A, Mthembu S H, Fang Y D, Wu H Y, Wang H L, Meng H Y, Li G S, Qiang Y H, Wang J G, Liu M L, Zheng Y, Ding B, Zhang W Q, Rohilla A, Muhki K R, Yang Y Y, Ong H J, Ma J B, Xu S W, Bai Z, Fan H L, Huang J F, Li J H, Xu J H, Lv B F, Hua W, Gan Z G, Zhang Y H 2022 *Phys. Lett. B* **828** 137010
- [48] Lv B F, Petrache C M, Lawrie E A, Guo S, Astier A, Zheng K K, Ong H J, Wang J G, Zhou X H, Sun Z Y, Greenlees P T, Badran H, Calverley T, Cox D M, Grahn T, Hilton J, Julin R, Juutinen S, Konki J, Pakarinen J, Papadakis P, Partanen J, Rahkila P, Ruotsalainen P, Sandzelius M, Sarén J, Scholey C, Sorri J, Stolze S, Uusitalo J, Cederwall B, Ertoprak A, Liu H, Kuti I, Timár J, Tucholski A, Srebrny J, Andreoiu C 2022 *Phys. Lett. B* **824** 136840
- [49] Juutinen S, Törmänen S, Ahonen P, Carpenter M, Fahlander C, Gascon J, Julin R, Lampinen A, Lönnroth T, Nyberg J, Pakkanen A, Piiparinen M, Schiffer K, Šimeček P, Sletten G, Virtanen A 1995 *Phys. Rev. C* **52** 2946
- [50] Hübel H, Baldsiefen G, Mehta D, Thirumala Rao B V, Birkental U, Fröhlingsdorf G, Neffgen M, Nenoff N, Pancholi S C, Singh N, Schmitz W, Theine K, Willsau P, Grawe H, Heese J, Kluge H, Maier K H, Schramm M, Schubart R, Maier H J 1992 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **28** 427
- [51] Clark R M, Wadsworth R, Paul E S, Beausang C W, Ali I, Astier A, Cullen D M, Dagnall P J, Fallon P, Joyce M J, Meyer M, Redon N, Regan P H, Nazarewicz W, Wyss R 1992 *Phys. Lett. B* **275** 247
- [52] Baldsiefen G, Chmel S, Hübel H, Korten W, Neffgen M, Pohler W, Van Severen U J, Heese J, Kluge H, Maier K H, Spohr K 1995 *Nucl. Phys.* **587** 562
- [53] Singh A K, Nenoff N, Roßbach D, Görden A, Chmel S, Azaiez F, Astier A, Bazzacco D, Bellegruic M, Bouneau S, Bourgeois C, Buforn N, Cederwall B, Deloncle I, Domscheit J, Hannachi F, Hauschild K, Hübel H, Korichi A, Korten W, Kröll T, LeCoz Y, Lopez-Martens A, Lucas R, Lunardi S, Maier H J, Mergel E, Meyer M, Petrache C M, Redon N, Reiter P, Rossi-Alvarez C, Schönwaßer G, Stezowski O, Thirolf P G, Wilson A N 2002 *Nucl. Phys.* **707** 3
- [54] Görden A, Nenoff N, Hübel H, Baldsiefen G, Becker J A, Byrne A P, Chmel S, Clark R M, Deleplanque M A, Diamond R M, Fallon P, Hauschild K, Hibbert I M, Korten W, Krücken R, Lee I Y, Macchiavelli A O, Paul E S, Van Severen U J, Stephens F S, Vetter K, Wadsworth R, Wilson A N, Wilson J N 2001 *Nucl. Phys.* **683** 108
- [55] Frauendorf S 1993 *Nucl. Phys.* **2** 259
- [56] He C Y, Li X Q, Zhu L H, Wu X G, Qi B, Liu Y, Pan B, Li G S, Li L H, Wang Z M, Li Z Y, Wang S Y, Xu Q, Wang J G, Ding H B, Zhai J 2011 *Phys. Rev. C* **83** 024309
- [57] Li J, He C Y, Zheng Y, Li C B, Ma K Y, Lu J B 2013 *Phys. Rev. C* **88** 014317
- [58] Yao S H, Ma H L, Zhu L H, Wu X G, He C Y, Zheng Y, Zhang B, Li G S, Li C B, Hu S P, Cao X P, Yu B B, Xu C, Cheng Y Y 2014 *Phys. Rev. C* **89** 014327
- [59] Juutinen S, Šimeček P, Ahonen P, Carpenter M, Fahlander C, Gascon J, Julin R, Lampinen A, Lönnroth T, Nyberg J, Pakkanen A, Piiparinen M, Schiffer K, Sletten G, Törmänen S, Virtanen A 1995 *Phys. Rev. C* **51** 1699
- [60] Petrache C M, Walker P M, Guo S, Chen Q B, Frauendorf S, Liu Y X, Wyss R A, Mengoni D, Qiang Y H, Astier A, Dupont E, Li R, Lv B F, Zheng K K, Bazzacco D, Boso A, Goasduff A, Recchia F, Testov D, Galtarossa F, Jaworski G, Napoli D R, Riccetto S, Siciliano M, Valiente-Dobon J J, Liu M L, Zhou X H, Wang J G, Andreoiu C, Garcia F H, Ortner K, Whitmore K, Bäck T, Cederwall B, Lawrie E A, Kuti I, Sohler D, Timár J, Marchlewski T, Srebrny J, Tucholski A 2019 *Phys. Lett. B* **795** 241

# Exotic collective excitation patterns in triaxially deformed $^{131}\text{Ba}^*$

Wei Rui<sup>1)</sup> Zhou Hou-Bing<sup>1)2)†</sup> Wang Si-Cheng<sup>3)4)‡</sup> Ding Bing<sup>3)4)</sup>  
 Qiang Yun-Hua<sup>3)4)</sup> Jia Chen-Xu<sup>3)4)</sup> Chen Hong-Xing<sup>3)4)</sup> Guo Song<sup>3)4)</sup>  
 C.M. Petrache<sup>5)</sup> D. Mengoni<sup>6)7)</sup> A. Astier<sup>5)</sup> E. Dupont<sup>5)</sup> Lü Bing-Feng<sup>5)</sup>  
 D. Bazzacco<sup>6)7)</sup> A. Boso<sup>6)7)</sup> A. Goasduff<sup>6)7)</sup> F. Recchia<sup>6)7)</sup> D. Testov<sup>6)7)</sup>  
 F. Galtarossa<sup>8)9)</sup> G. Jaworski<sup>8)</sup> D.R. Napoli<sup>8)</sup> S. Riccetto<sup>8)</sup> M. Siciliano<sup>8)</sup>  
 J.J. Valiente-Dobon<sup>8)</sup> C. Andreoiu<sup>10)</sup> F.H. Garcia<sup>10)</sup> K. Ortner<sup>10)</sup>  
 K. Whitmore<sup>10)</sup> A. Ataç-Nyberg<sup>11)</sup> T. Bäck<sup>11)</sup> B. Cederwall<sup>11)</sup>  
 E.A. Lawrie<sup>12)13)</sup> I. Kuti<sup>14)</sup> D. Sohler<sup>14)</sup> T. Marchlewski<sup>15)</sup>  
 J. Srebrny<sup>15)</sup> A. Tucholski<sup>15)</sup>

1) (*College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China*)

2) (*Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Guilin 541004, China*)

3) (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

4) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

5) (*University Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLab, Orsay 91405, France*)

6) (*Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Padova, Padova I-35131, Italy*)

7) (*INFN, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy*)

8) (*INFN, Laboratori Nazionali di Legnaro, Legnaro (Padova) I-35020, Italy*)

9) (*Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università di Ferrara, Ferrara, Italy*)

10) (*Department of Chemistry, Simon Fraser University, Burnaby, BC V5A 1S6, Canada*)

11) (*KTH Department of Physics, Stockholm S-10691, Sweden*)

12) (*iThemba LABS, National Research Foundation, PO Box 722, Somerset West 7123, South Africa*)

13) (*Department of Physics & Astronomy, University of the Western Cape, P/B X17, Bellville ZA-7535, South Africa*)

14) (*HUN-REN Institute of Nuclear Research, ATOMKI, Debrecen 4001, Hungary*)

15) (*University of Warsaw, Heavy Ion Laboratory, Pasteura 5a, Warsaw 02-093, Poland*)

( Received 1 February 2024; revised manuscript received 15 March 2024 )

## Abstract

In the last two decades, several unique phenomena in triaxially deformed nuclei, such as chiral doublet bands and wobbling motion have been revealed. Up to now, there are still many open questions which require further experimental and theoretical studies. To explore the collective motion in  $^{131}\text{Ba}$ , an experiment was

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12365016) and the Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant No. 2023GXNSFAA026016).

† Corresponding author. E-mail: [zhh@mailbox.gxnu.edu.cn](mailto:zhh@mailbox.gxnu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [wangsicheng@impcas.ac.cn](mailto:wangsicheng@impcas.ac.cn)

performed using the XTU Tandem accelerator in the Legnaro laboratory, Italy. High-spin states of  $^{131}\text{Ba}$  have been populated via the heavy-ion fusion-evaporation  $^{122}\text{Sn}(^{13}\text{C}, 4n)$  reaction.  $\gamma$ -rays, charged particles and neutrons emitted from the residues were detected by the GALILEO array, EUCLIDES silicon ball, and the Neutron Wall, respectively. A total of  $1.2 \times 10^9$  triple- or higher-fold events were collected by the GALILEO data acquisition system. The  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  coincidence events were sorted into a three-dimensional histogram (cube) and the analysis was carried out with the RADWARE and GASPWARE software packages.

Through analysis of the coincidences between  $\gamma$ -rays, the most comprehensive level schemes of  $^{131}\text{Ba}$  to date was deduced from the present work. The extended level-scheme consists of 15 rotational bands, and newly observed transitions are marked in red. Three nearly degenerate pairs of doublet bands (Band 3–8) are identified in  $^{131}\text{Ba}$ . Two pairs of chiral doublets (Band 3–6) with configuration  $\pi h_{11/2}(g_{7/2}, d_{5/2}) \otimes \nu h_{11/2}$  are interpreted as a set of pseudospin-chiral quartet bands. The quartet bands are fed by another pair of chiral doublet bands (Band 7–8) built on a  $\pi h_{11/2}^2 \otimes \nu h_{11/2}$  configuration via a series of enhanced E1 transitions. We extracted the energy displacement  $\delta E$  and the  $B(E1)/B(E2)$  branching ratios between the positive-parity band 3 and the negative-parity band 7 in  $^{131}\text{Ba}$  and in comparison with those in  $^{124}\text{Ba}$ ,  $^{224}\text{Th}$ ,  $^{133}\text{Ce}$  and  $^{135}\text{Nd}$ . The energy displacement  $\delta E$  and the  $B(E1)/B(E2)$  branching ratios in  $^{131}\text{Ba}$  are comparable with those in  $^{124}\text{Ba}$  but deviate appreciably from those in  $^{224}\text{Th}$  which has been reported to have stable octupole deformation. The results indicate the existence of octupole correlations in  $^{131}\text{Ba}$  without stable octupole deformation. A new rotational band (Band 10) discovered in the low-spin region exhibits a level structure similar to a wobbling band. Assuming it as a wobbling band, the wobbling frequency was extracted and compared with other reported wobbling bands in the neighboring nuclei. The wobbling frequency of this band decreases with increasing angular momentum, and even exhibits negative value at the highest spin. Considering that the wobbling phonon should contribute a positive amount to the excitation energy, this band is unlikely to be explained by this mechanism. The band may originate from other collective excitation mechanisms such as  $\gamma$  vibration. The newly identified rotational band (Band 9) composed of M1 transitions is tentatively assigned as a magnetic rotational band through a systematic analysis of the level structure. Finally, the configurations of other 4 bands, Band 12–15, are also suggested based on previous researches and the extracted quasiparticle alignments.

**Keywords:** high-spin states, chirality, pseudospin, octupole correlation, wobbling motion

**PACS:** 23.20.Lv, 21.10.Re, 23.20.En

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240212](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240212)



## 三轴形变核 $^{131}\text{Ba}$ 中的奇异集体激发模式

韦锐 周厚兵 王思成 丁兵 强赟华 贾晨旭 陈红星 郭松 C.M.Petrache D.Mengoni A.Astier E.Dupont 吕冰锋 D.Bazzacco A.Boso A.Goasduff F.Recchia D.Testov F.Galtarossa G.Jaworski D.R.Napoli S.Ricetto M.Siciliano J.J.Valiente-Dobon C.Andreoiu F.H.Garcia K.Ortner K.Whitmore A.Ataç-Nyberg T.Bäck B.Cederwall E.A.Lawrie I.Kuti D.Sohler T.Marchlewski J.Srebrny A.Tucholski

## Exotic collective excitation patterns in triaxially deformed $^{131}\text{Ba}$

Wei Rui Zhou Hou-Bing Wang Si-Cheng Ding Bing Qiang Yun-Hua Jia Chen-Xu Chen Hong-Xing Guo Song C.M. Petrache D. Mengoni A. Astier E. Dupont Lü Bing-Feng D. Bazzacco A. Boso A. Goasduff F. Recchia D. Testov F. Galtarossa G. Jaworski D.R. Napoli S. Ricetto M. Siciliano J.J. Valiente-Dobon C. Andreoiu F.H. Garcia K. Ortner K. Whitmore A. Ataç-Nyberg T. Bäck B. Cederwall E.A. Lawrie I. Kuti D. Sohler T. Marchlewski J. Srebrny A. Tucholski

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 112301 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240212

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 二维介电光子晶体中的赝自旋态与拓扑相变

Pseudospin states and topological phase transitions in two-dimensional photonic crystals made of dielectric materials

物理学报. 2020, 69(9): 094206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191962>

#### 基于结构反转二维光子晶体的拓扑相变及拓扑边界态的构建

Topological phase transition based on structure reversal of two-dimensional photonic crystals and construction of topological edge states

物理学报. 2020, 69(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200415>

#### 二维电介质光子晶体中量子自旋与谷霍尔效应共存的研究

Coexistence of quantum spin and valley hall effect in two-dimensional dielectric photonic crystals

物理学报. 2023, 72(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221814>

#### 实验观测非厄米系统奇异点的手性翻转现象

Experimental observation of chiral inversion at exceptional points of non-Hermitian systems

物理学报. 2022, 71(13): 131101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220842>

#### 强相互作用物质中的自旋与运动关联

Quantum correlation between spin and motion in quantum chromodynamics matter

物理学报. 2023, 72(11): 111201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222458>

#### 偏振光声成像技术的研究与发展

Research and development of polarized photoacoustic imaging technology

