



*A~80*核区在束谱学研究进展

王守宇 许文政 刘晨 李志泉

Progress on the Spectroscopy in the *A~80* Mass Region

WANG Shouyu, XU Wenzheng, LIU Chen, LI Zhiqian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020001>

引用格式:

王守宇, 许文政, 刘晨, 李志泉. *A~80*核区在束谱学研究进展[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(1):11–17. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020001

WANG Shouyu, XU Wenzheng, LIU Chen, LI Zhiqian. Progress on the Spectroscopy in the *A~80* Mass Region[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(1):11–17. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

原子核层次的手征对称性

Chiral Symmetry in Atomic Nucleus

原子核物理评论. 2017, 34(3): 310–317 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.310>

实验探索原子核中手征与空间反射对称性的联立自发破缺

Search for Chiral and Reflected Symmetry Breakings in Atomic Nucleus

原子核物理评论. 2017, 34(3): 357–360 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.357>

壳模型中中心力不确定度和跨壳激发效应的初步研究(英文)

Preliminary Study on Uncertainty of Central Force and Effect of Cross-Shell Excitation in Shell Model

原子核物理评论. 2018, 35(4): 537–542 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.537>

探索原子核结构的对称性主导无芯壳模型计算(英文)

Symmetry-adapted No-core Shell-model Calculations for Probing the Structure of Atomic Nuclei

原子核物理评论. 2018, 35(4): 350–355 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.350>

弱束缚原子核引起的熔合反应机制研究

Study of Fusion Reaction Mechanism Induced by Weakly Bound Nuclei

原子核物理评论. 2020, 37(2): 119–135 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019060>

能量密度泛函中不同对关联处理方式对原子核形变描述影响的探讨

Effect of Different Pairing Correlations on the Description of Nuclear Deformations within Energy Density Functional Framework

原子核物理评论. 2020, 37(1): 26–33 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020006>

文章编号: 1007-4627(2020)01-0011-07

A~80 核区在束 γ 谱学研究进展

王守宇, 许文政, 刘 晨, 李志泉

(山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 空间科学与物理学院, 空间科学研究院, 山东 威海 264209)

摘要: 为深入研究原子核手征对称性自发破缺等重要的科学问题, 山东大学(威海)核物理研究团队利用在束 γ 谱学实验技术, 系统研究了 A~80 核区一系列原子核的能级结构, 丰富了这个区域原子核的谱学信息, 并对这些原子核的对称性、形状和运动模式等问题进行了探讨。研究表明, 在 A~80 核区存在包括奇奇核和奇 A 核在内的多例候选手性原子核, 能级寿命测量支持 ^{80}Br 的手性解释。此外, 本文也讨论了随着中子数的增加, 手征几何和八极关联效应的演化情况以及这个核区近球形核的中子跨壳激发现象。

关键词: 原子核; 手征对称性; 寿命测量; 八极关联; 跨壳激发

中图分类号: O572.21⁺1

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020001

1 引言

原子核是一个复杂的量子多体系统, 其本身就是一个天然的实验室, 是研究微观体系对称性及基本相互作用的最佳场所。 γ 射线是人们认识原子核的“探针”, 是世界各大核物理实验室进行核物理研究的重要工具。不同于传统的离线 γ 谱学, 在束 γ 谱学测量是在大科学装置的加速器上进行的, 通常是利用各种核反应把原子核激发到更高激发能和角动量的状态, 布局多探头和多角度的探测器组成的探测器阵列测量原子核退激放出的各种射线。通过对射线的级联关系、角分布、线性极化和强度等实验数据进行分析, 获得原子核的能级纲图、能级寿命和跃迁几率等实验信息, 从而可以研究原子核的内

部结构、对称性和各种奇异运动模式, 如原子核的对称性自发破缺、磁与反磁转动、形状共存与演化等。

山东大学(威海)核物理研究团队从 2008 年开始, 在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器国家实验室的高纯锗探测阵列^[1]、南非 iThemba 国家实验室由 Clover 探测器组成的 AFRODITE 探测阵列^[2]、美国 Argonne 国家实验室的 γ 径迹追踪 GRETINA 探测阵列^[3]上, 进行了一系列在束 γ 谱学实验, 所用的辅助探测器还包括 DIAMANT^[4-5]和我们自行研制的 IRCNP-Bowl^[6]带电粒子探测器。通过这些在束 γ 谱学实验, 研究了近 30 个原子核的能级结构, 这些原子核主要集中在核素图中质量数约为 80 和 110 的核区, 如图 1 所

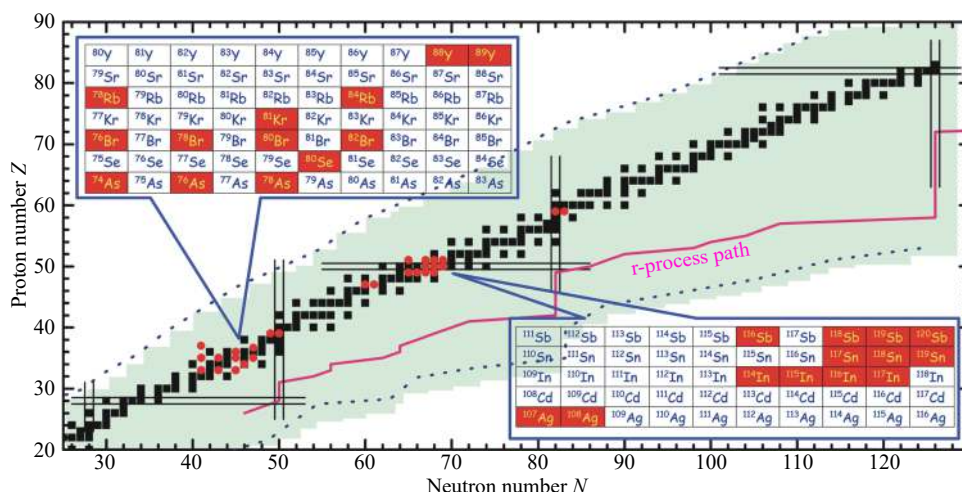


图 1 (在线彩图)80 和 110 核区在核素图的位置

其中标记为红色的原子核是本研究团队通过实验已经研究的核素。

收稿日期: 2020-01-03; 修改日期: 2020-02-24

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(JQ201701)

作者简介: 王守宇(1978-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事原子核结构研究; E-mail: sywang@sdu.edu.cn

示。A~110核区的原子核的质子数位于幻数 $Z = 50$ 附近,既有近球形的特征,激发之后也有好的形变特征,是研究原子核形状共存和演化的典型区域。我们系统研究了在这个核区部分原子核的形状共存和演化^[7-10],发现新的磁转动带^[9],发现并命名了原子核的订书机模式^[11],首次给出了类雨伞模式的反磁转动^[12]等。进行A~80核区原子核的在束 γ 谱学实验研究是源于原子核手征对称性这一物理问题的驱动,本文将综述山东大学(威海)核物理研究团队在A~80核区在束 γ 谱学的研究进展。

2 研究内容

2.1 Br同位素链中手性原子核的实验探索

手征对称性是自然界一个基本属性,已经在化学、分子生物学和粒子物理中得到了广泛的研究。1997年Frauendorf和孟杰首次预言了原子核层次的手征对称性,他们指出三轴形变奇奇核的转动可以体现手征对称性,而原子核手征对称性的自发破缺将会形成一对宇称相同能量近简并的 $\Delta I = 1$ 的双带结构,被称为手征双重带^[13]。2001年,由美国纽约州立大学石溪分校的科学家主导的一个研究组在A~130核区中子数为75的同中子素 ^{130}Cs , ^{132}La , ^{134}Pr 和 ^{136}Pm 中观测到了一系列近简并的正宇称双带^[14],并将这些转动带解释为基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征双重带。原子核手征对称性的理论预言与实验证实,在核物理学界引起了不小的轰动。原子核是否存在稳定的三轴形变争论了数十年,而手性原子核的发现提供了原子核存在三轴形变的直接证据。甚至,美国劳伦斯国家实验室的研究人员认为“研究原子核这个复杂系统的手性,可以帮助我们更好地理解其他领域的手性”^[15]。

正如上文所提到的,美国纽约州立大学石溪分校的科学家率先在A~130核区发现了手性原子核,随后该研究组报道了A~100核区第一例手性原子核 ^{104}Rh ^[16]。此后在A~100, 130和190核区又陆续报道了多例候选的手性原子核(见文献^[17-18]及文中的参考文献)。

寻找新的手征对称性核区,并探索手性原子核存在的质量极限,是人们非常关心的物理问题。经过系统的实验数据调研和相应的理论计算,我们选定A~80核区进行实验探索。选定这一核区进行实验探索主要基于两点原因:(1)这一区域的奇奇核,其价质子通常位于 $g_{9/2}$ 轨道的底部,表现为粒子性,价中子位于 $g_{9/2}$ 轨道的顶部,表现为空穴性,具有比较典型的粒子-空穴组态;(2)利用组态固定的相对论平均场程序^[19],我们系

统计算了这一区域奇奇核的位能面曲线,计算结果显示部分奇奇核中基于 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$ 组态的转动带有比较显著的三轴形变。以 ^{80}Br 为例,图2提供了组态固定的相对论平均场近似计算的位能面。从图2中可以看出, ^{80}Br 中 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$ 组态带的四极形变为 $\beta_2 = 0.35$, $\gamma = 24.6^\circ$,这个形变参数适于构建手征双重带。

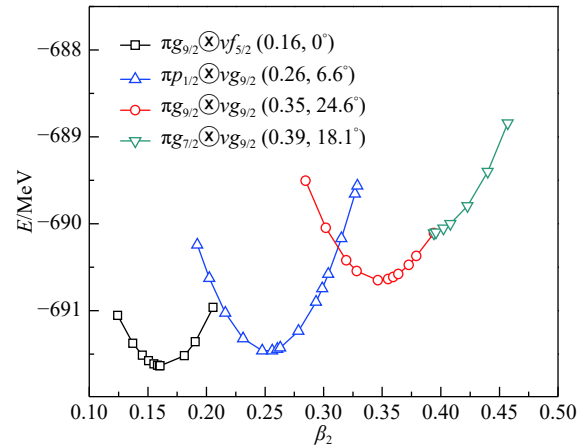


图2 (在线彩图)组态固定的相对论平均场近似计算的 ^{80}Br 位能面

我们首先选定奇奇核 ^{80}Br 为目标核,进行了在束 γ 谱学的实验测量。通过对实验数据的深入分析,发现了一条新的 $\Delta I = 1$ 的转动带。新发现的转动带与之前已知的晕带宇称相同,并且两个带的能级近简并,电磁跃迁等实验信息也符合手征带的实验判据,因此被指定为是一对手征双重带^[20]。 ^{80}Br 中手征双重带的发现,给出了一个新的手征对称组态 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$,在核素图上也扩展了新的核区来研究原子核的手征对称性,同时也预示着A~80核区可能存在一个手性原子核岛。接下来,在 ^{80}Br 邻近的 ^{78}Br ^[21]和 ^{82}Br ^[22]中也发现了基于 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}$ 组态的手征双重带。图3给出了 ^{78}Br , ^{80}Br 和 ^{82}Br 手征双重带的能级能量的系统性比较,其中手征带主带的 8^+ 态被取为参考态。如图3所示,无论是手征带主带还是边带的能级激发能都很好地满足系统性规律,随着中子数的增加能级能量呈现出近似单调上升的趋势。

在Br同位素链中发现三个手性原子核,提供了一个独特的机会研究Br同位素手征几何随中子数增加的演化情况。图4给出了 ^{78}Br , ^{80}Br 和 ^{82}Br 手征带的能谱 $E(I)$,双带能量差 $\Delta E = E_{\text{side}} - E_{\text{yrast}}$,能级奇偶自旋摇摆参数 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 和电磁约化跃迁几率比值 $B(M1)/B(E2)$ 的系统性比较。从图4中可以

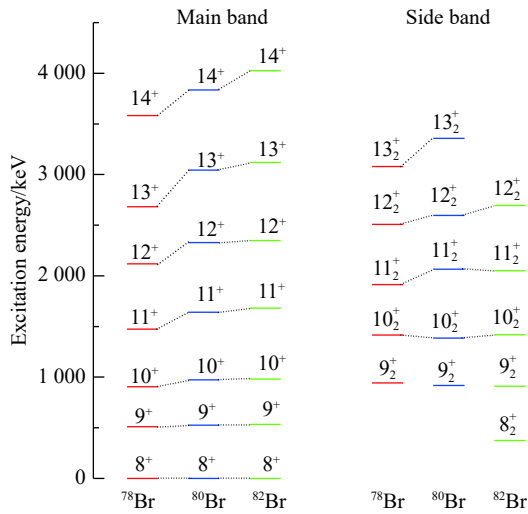


图 3 (在线彩图) ^{78}Br , ^{80}Br 和 ^{82}Br 中手征双重带能级能量的系统性比较

看出, 随着中子数增加, 从 $^{78}\text{Br}(N=43)$ 到 $^{82}\text{Br}(N=47)$, 双带间的能量差逐渐变小, $S(I)$ 呈现出变得更加光滑的趋势。这些实验信息预示着, 从 ^{78}Br 到 ^{82}Br 手征几何逐渐变好, 越来越接近理想的手征对称模式。出现这种现象很可能是源于手征带组态的细微变化。Br 同位素的质子数是 35, 价质子位于 $g_{9/2}$ 轨道的底部, 表现为粒子性; ^{78}Br 的中子数为 43, 价中子位于 $g_{9/2}$ 轨道的中上部, 随着中子数增加, 位于 $g_{9/2}$ 的中子越来越接近壳层的顶部, 到 $N = 47$ 的 ^{82}Br , 其价中子已经具备了良好的空穴性。此时粒子性的价质子、空穴性的价中子以及核芯的角动量倾向于分别沿着原子核的短轴、长轴和中间轴排列, 从而构成了一个相对比较理想的手征几何。

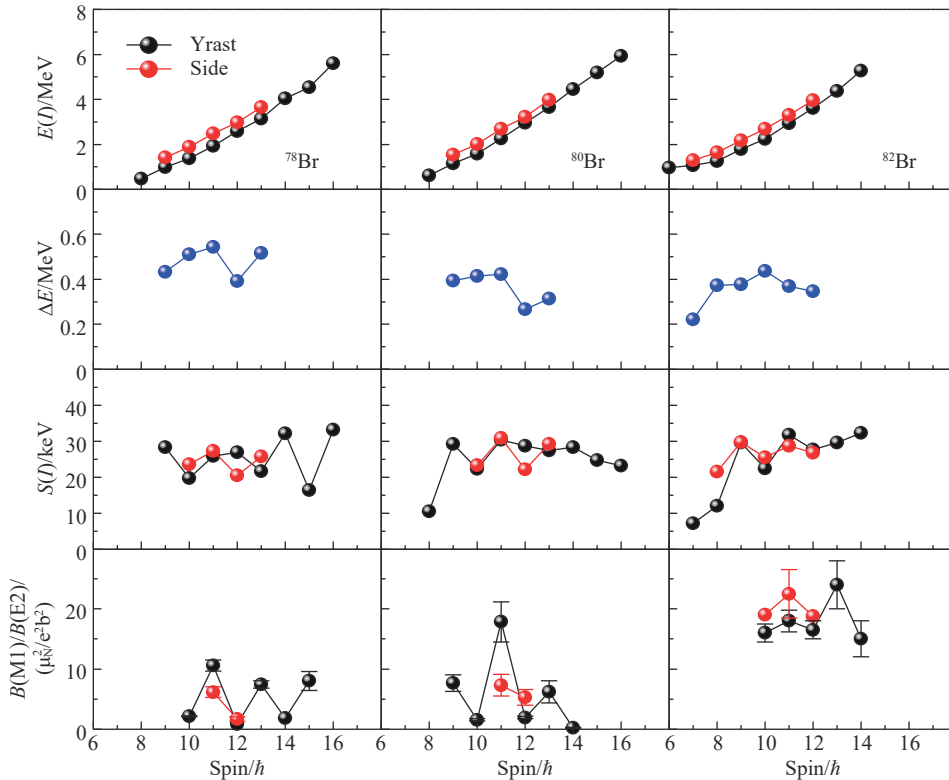


图 4 (在线彩图) ^{78}Br , ^{80}Br 和 ^{82}Br 中手征双重带的 $E(I)$, ΔE , $S(I)$ 和 $B(M1)/B(E2)$ 值的比较

2.2 A~80 核区手性原子核岛

在 Br 同位素序列中系统地发现手性原子核, 也激发我们持续在 A~80 核区进行原子核手征对称性的实验研究, 并探索 80 核区手性原子核岛的边界。实验研究的目标核主要集中在 As, Br, Kr, Rb 和 Y 同位素链上的核素。初步的研究结果显示: 除了 $^{78,80,82}\text{Br}$, 在 ^{74}As , ^{74}Br , ^{76}Br , ^{81}Kr , ^{78}Rb 和 ^{84}Rb 中也存在手征双重带的

候选, 这预示着 A~80 核区手性原子核岛至少存在于质子数从 33 到 37、中子数从 39 到 47 的范围内。这些核素在核素图上的分布见图 1 中左上角的插图。

值得一提的是, 作为一个一般性质, 原子核的手征对称性不仅存在于奇奇核, 也应该可以存在于奇 A 核或偶偶核。其它发现手性原子核的质量区都有发现奇 A 手性原子核的实验报道 [23~25]。在 A~80 核区, 奇 A

核 ^{81}Kr 与该核区第一例候选手性原子核 ^{80}Br 拥有相同的转动核芯，并且价核子有很大的几率占据高 j 侵入轨道，具备形成手征双重带的必备条件。为了在奇 A 核 ^{81}Kr 中寻找手征带，采用熔合蒸发反应 $^{82}\text{Se}(\alpha, 5n)^{81}\text{Kr}$ ，通过在束 γ 谱学测量，扩展了原来已知的能级结构 [26]，观测到了两对近简并的双带结构，分别基于 $\pi(g_{9/2})^2 \otimes \nu(g_{9/2})^{-1}$ 和 $\pi g_{9/2}(f_{5/2}/p_{3/2}) \otimes \nu(g_{9/2})^{-1}$ 的三准粒子组态。这两对近简并双带的能量差保持在 400~500 keV 之间，符合该核区手征带的普遍特征。手征带实验判据的论证和理论模型的计算还在进行之中，结果将另文发表 [27]。如果这两对近简并的双带是手征双重带，将是首次在 $A=80$ 核区奇 A 核中观测到多重手征带现象。

2.3 A-80 核区手性原子核的寿命测量

手征双重带除了要求宇称相同的近简并双带之外，还要求双带的电磁跃迁几率非常类似。电磁跃迁几率与原子核的形变和组态密切相关，是检验原子核手征对称性的敏感探针。在原子核手征对称性研究初期，能级简并度最好的 ^{134}Pr 中的双带结构一度被认为是最佳的手征双重带事例。但之后的能级寿命测量发现 ^{134}Pr 双带的带内 $B(E2)$ 值相差 2~3 倍，这表明双带的形变有明显差异，并不符合静态手性的实验期待 [28]。与此同时，Grodner 等 [29] 测量了具有恒定 200 keV 能量差的 ^{128}Cs 候选手征双重带的能级寿命，发现双带有非常接近的带内 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 值，建议 ^{128}Cs 是目前已知的最佳手性原子核。

迄今， $A=100, 130$ 和 190 核区的手性原子核已经进行过能级寿命测量的检验 [28, 30-31]，但 $A=80$ 核区这方面的实验信息还是空白。为检验 $A=80$ 核区手征带的电磁跃迁几率是否符合手征带所期待的实验特征， ^{80}Br 候选手征带的能级寿命被提取。采用多普勒移动衰减法 (DSAM) 提取的能级寿命显示， ^{80}Br 中手征双重带有相近的 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 值，并且 $B(M1)$ 值有明显的奇偶自旋振荡行为，符合手征双重带的实验判据 [32-34]。因此，能级寿命的测量结果支持 $A=80$ 核区手性原子核的解释。

2.4 原子核手性与其他运动模式的相互影响

除三轴形变外，对于给定的质子和中子的组合，理论上也期待原子核的形状可以具有八极形变 (如：梨形、心脏形、正四面体形等)，对应着反射不对称。当费米面附近的核子占据到宇称相反并且轨道角动量和总角动量相差 $3\hbar$ 的两条轨道时，会使原子核出现八极关联；而强的八极关联会导致原子核具有稳定的八极形变 [35]。

八极形变原子核的研究对完善核结构理论非常重要，甚至关联着 CP 对称性破缺的基本科学问题。当三轴形变与八极形变共存于同一个原子核中时会产生什么样的物理现象，是人们非常关心的物理问题。

目前 $A=80$ 核区手征双重带的实验发现表明 Br 同位素存在着稳定的三轴形变。此外，Br 同位素质子数为 35，质子费米面附近存在 $g_{9/2}$ 、 $f_{5/2}$ 和 $p_{3/2}$ 轨道。在这些轨道中， $g_{9/2}$ 和 $p_{3/2}$ 轨道具有相反的宇称，它们之间的总角动量差值 (Δj) 和轨道角动量差值 (Δl) 都是 $3\hbar$ ，满足这种条件的两条轨道之间会发生八极相互作用，驱动原子核出现八极关联，强的八极关联会导致原子核具有稳定的八极形变。因此，Br 同位素可能也是研究手征对称性与空间反射对称性联立自发破缺的理想研究对象。

前面提到的发现 ^{78}Br [21] 手征带的工作，也观测到了正负宇称手征带之间多条强的 E1 连接跃迁。E1 连接跃迁的大量发现证实 ^{78}Br 中存在着八极关联效应，这是实验上首次在一个原子核中观测到具有八极关联的多手征带，表明原子核发生了手征对称性与空间反射对称性的联立自发破缺，详细的论述参见文献 [21, 36]。同样的八极关联效应也在奇奇核 ^{76}Br 和 ^{80}Br 中得到了观测，这就允许我们对奇奇核 Br 同位素的八极关联效应进行系统性的研究。为研究这三个原子核中八极关联效应随中子数的变化规律，我们首先提取了电偶极跃迁与电四极跃迁的比值 $B(E1)/B(E2)$ ，然后通过粒子转子模型计算出带内跃迁的 $B(E2)$ ，计算中所需的形变参数取自文献 [37]，从而我们能够得到 $B(E1)$ 值随自旋的变化情况，结果给在图 5 中。如图 5 所示，随着中子数的增加， $B(E1)$ 也逐渐变大，表明八极关联效应在变强。前面的研究已经表明，在 Br 同位素序列，随着中子数

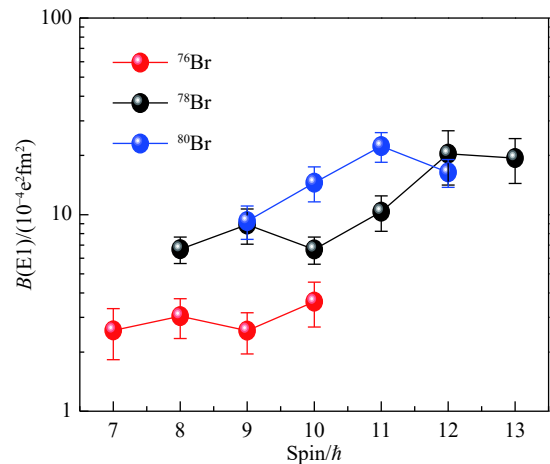


图 5 (在线彩图) ^{76}Br 、 ^{78}Br 和 ^{80}Br 中 $B(E1)$ 值的系统性比较

的增加, 手征几何逐渐变好, 越来越接近理想手征对称模式。综上, 在 Br 同位素链上, 手征对称和八极关联都随着中子数的增加而变强, 这可能预示着原子核内手征效应和八极关联效应并不是竞争关系, 而是相对独立的, 甚或是可以相互促进的。接下来的工作中, 我们将提取这三个核素的能级寿命信息, 进一步深入理解原子核中多重对称性相互作用的物理机制。

这一系列研究, 除了发现具有八极关联的多手征带, 也发现了手征双重带与赝自旋双带和摇摆 (wobbling) 带共存的实验迹象。这些实验证据都表明原子核可以发生多重对称性的联立自发破缺, 从而也提出了一个亟需进一步进行深入研究的新课题。

2.5 近球形核的跨壳激发

我们在 $A \sim 80$ 核区进行手性原子核研究的同时, 也发现一些原子核呈现出近球形的实验特征, 这主要是由于该核区部分原子核邻近 $Z = 28$ 和 $N = 50$ 的满壳, 以及 $Z = 38$ 和 40 的亚满壳。这些原子核的低激发态主要表现为单粒子运动, 即价核子从费米面轨道激发到能量更高的轨道。随着激发能的增加, 将会有更多的核子参与, 呈现出多粒子激发的特征, 这些粒子的激发一般都是满壳之外价核子的激发。随着激发能的进一步提高, 原子核中的满壳则有可能发生破裂, 发生跨壳激发这一物理现象。

我们利用 ^{11}B 轰击 ^{82}Se 的熔合蒸发反应研究了 ^{88}Y 和 ^{89}Y 的高自旋态。研究表明: ^{88}Y 的低激发态主要来自一个质子粒子和中子空穴与 ^{88}Sr ($Z = 38$, $N = 50$) 核芯的耦合作用。对于自旋大于等于 $12\hbar$ 的激发态, 主要来自 2 个或者 4 个质子被激发, 跨越 $Z = 38$ 亚满壳形成四准或者六准粒子组态。但没有在 ^{88}Y 中发现中子跨越 $N = 50$ 满壳激发的实验迹象 [38]。 ^{89}Y 的能级结构更为复杂, 借助于大规模壳模型计算程序 OXBASH [39], 两种计算方式被进行, 其中一种纯质子激发, 另一种考虑中子跨壳激发。通过两种壳模型计算结果与实验数据的对比发现, 对于低激发态能级, 两种计算都可以较好地符合实验数据, 但是在高自旋区域的能级, 两种计算呈现出明显的不同, 且只有考虑中子跨越 $N = 50$ 满壳激发的计算才能够较好地符合实验结果 [40]。

在 $N = 50$ 同中子素中, 原子核 ^{85}Br 的能级纲图有多个版本, 是否存在中子跨壳激发现象也存在争议 [41-43]。为研究 ^{85}Br 能级结构的来源并弄清跨壳激发在其中扮演的角色, 我们使用大规模壳模型 NUSHELLX [44] 计算了 ^{85}Br 的能级结构。理论计算表明, ^{85}Br 已知的正负宇称能级中都有来自于 $1g_{9/2}$ 中子跨越 $N = 50$ 满

壳至 $2d_{5/2}$ 轨道的能级 [45]。 ^{85}Br 中子跨壳激发能级的指认, 允许我们研究 $N = 50$ 同中子素中跨壳激发现象的系统学规律。图 6 提供了 $Z = 50$ 同中子素发生跨壳激发能级激发能的系统性比较。如图 6 所示, 在 $Z = 32$ 到 40 的偶偶核中, 发生中子跨壳激发现象的能级激发能随着质子数的增加而增加。这一现象可以通过 $\pi f_{5/2} - \nu g_{9/2}$ 和 $\pi p_{1/2} - \nu g_{9/2}$ 相互作用中的张量项来解释 [46-47]。对于奇 A 核, 发生跨壳激发现象时的能量同样随着质子数的增加而增加, 但是其增加速度要快于偶偶核, 这可以归因于额外的价质子在其中发挥的作用, 但具体的作用机制还需要进一步的实验和理论方面的研究。

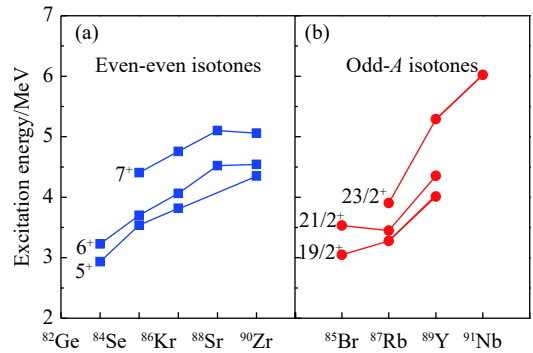


图 6 (在线彩图) $N = 50$ 同中子素发生跨壳激发现象时的激发能随质子数的变化, 其中偶偶核和奇 A 核分别取 0^+ 和 $9/2^+$ 态为激发能的参考态

数据来源于参考文献 [40-43, 48-60]。

3 总结与展望

本文综述了山东大学 (威海) 核物理研究团队在 $A \sim 80$ 核区原子核精细谱学的研究进展。首先, 介绍了手性原子核 ^{78}Br , ^{80}Br 和 ^{82}Br 的发现历程, 并系统分析了这三个原子核手征带的实验数据, 发现随着中子数增加, 手征几何逐渐趋近于理想情况。其次, 研究也表明, $A \sim 80$ 核区手性原子核岛至少存在于质子数从 33 到 37、中子数 39 到 47 的范围内; 在该核区奇 A 核中也可以存在手征带, 甚至多手征带。再次, 通过能级寿命测量, 发现 ^{80}Br 候选手征带的电磁跃迁几率数据符合手性原子核的实验特征; 并且手征带可以与八极关联现象共存, 并且都随着中子数的增加而变得显著。最后, 简述了该核区近球形核的研究进展和跨壳激发现象的系统性规律。

本文综述的研究结果仅是阶段性的, 仍有大量的数据尚待分析挖掘。就 $A \sim 80$ 核区在束 γ 谱学而言, 尚有大量的工作需要开展。如继续实验探索手性原子核岛的边界, 系统地开展多普勒移动衰减法和反冲距离法的

能级寿命测量, 以及开拓微分扰动角分布法的磁矩测量等。对于继续往丰质子(或丰中子)一侧进行手性原子核的实验探索, 由于目标核的生成截面较低, 通常的熔合蒸发反应很难满足实验需求, 这就对实验装置提出了更高的要求。如需要加入更加灵敏和高效的带电粒子辅助探测器或者质量选择的探测设备, 甚至可能需要使用放射性束流装置。此外, 在 ^{78}Br 中发现的手征对称性和空间反射对称性的联立自发破缺, 只是揭开了原子核多重对称性联立自发破缺这一新课题神秘面纱的一角, 仍有很多物理问题不清楚, 亟需进行进一步的深入探索和研究。

致谢 感谢中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器国家实验室、南非 iThemba 国家实验室和美国 Argonne 国家实验室提供的良好研究条件, 以及这三家单位科研人员在实验期间的协助。本文综述的研究工作也得到了来自北京大学、清华大学、北京航空航天大学和中国科学院理论物理研究所等单位科研人员的密切合作, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] ZHU L H. HEP & NP, 2006, 30(Supplement II): 127. (in Chinese)
- [2] BARK R A, LIPOGLAVŠEK M, MALIAGE S M, et al. *J Phys G*, 2005, 31: S1747.
- [3] PASCHALIS S, LEE I Y, MACCHIAVELLI A O, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2013, 709: 44.
- [4] SCHEURER J N, AICHE M, ALEONARD M M, et al. *Nucl Instr Meth A*, 1997, 385: 501.
- [5] GÁL J, HEGYESI G, MOLNÁR J, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2004, 516: 502.
- [6] HAN X C, WANG S, WANG S Y, et al. *Nucl Instr Meth A*, to be submitted.
- [7] WANG S Y, SUN D P, DUAN B T, et al. *Phys Rev C*, 2010, 81: 017301.
- [8] WANG S Y, QI B, SUN D P, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 057303.
- [9] WANG S Y, SUN D P, QI B, et al. *Phys Rev C*, 2012, 86: 064302.
- [10] LIU L, WANG S Y, CHEN Z Q, et al. *Phys Rev C*, 2014, 90: 014313.
- [11] CHEN Z Q, WANG S Y, LIU L, et al. *Phys Rev C*, 2015, 91: 044303.
- [12] JIA H, QI B, LIU C, et al. *Phys Rev C*, 2018, 97: 024335.
- [13] FRAUENDORF S, MENG J. *Nuclear Physics A*, 1997, 617(2): 131.
- [14] STAROSTA K, KOIKE T, CHIARA C J, et al. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 971.
- [15] VOSS D. *Science*, 2001, 291: 962.
- [16] VAMAN C, FOSSAN D B, KOIKE T, et al. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(3): 032501.
- [17] MENG J, WANG Y Y, LI Z Q. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34: 310.
- [18] XIONG B W, WANG Y Y. *At Data Nucl Data Tables*, 2019, 125: 193.
- [19] MENG J, PENG J, ZHANG S Q, et al. *Phys Rev C*, 2006, 73: 037303.
- [20] WANG S Y, QI B, LIU L, et al. *Phys Lett B*, 2011, 703: 40.
- [21] LIU C, WANG S Y, BARK R A, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 112501.
- [22] LIU C, WANG S Y, QI B, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100: 054309.
- [23] ZHU S, GARG U, NAYAK B K, et al. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(13): 132501.
- [24] TIMÁR J, VAMAN C, STAROSTA K, et al. *Phys Rev C*, 2006, 73: 011301.
- [25] TIMÁR J, JOSHI P, STAROSTA K, et al. *Phys Lett B*, 2004, 598: 178.
- [26] FUNKE L, DÖRING J, KEMNITZ P, et al. *Nucl Phys A*, 1986, 455: 206.
- [27] MU L, et al. in preparation.
- [28] TONEV D, ANGELIS G, PETKOV P, et al. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 052501.
- [29] GRODNER E, SREBRNY J, PASTERNAK A A, et al. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 172501.
- [30] TONEV D, YAVAHCHOVA M S, GOUTEV N, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 052501.
- [31] MASITENG P L, PASTERNAK A A, LAWRIE E A, et al. *Eur Phys J A*, 2016, 52: 28.
- [32] WANG S Y, ZHANG S Q, QI B, et al. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 664.
- [33] KOITE T, STATOSTA K, VAMAN C. In *Frontiers of Nuclear Structure[C]*//FALLON P, CLARK R. AIP Conf Proc, 2003, 656: 160.
- [34] KOITE T, STATOSTA K, HAMAMOTO I. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(17): 172502.
- [35] BUTLER P A, NAZAREWICZ W. *Rev Mod Phys*, 1996, 68: 349.
- [36] WANG S Y. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34: 357.
- [37] QI B, JIA H, LIU C, et al. *Sci Chin Phys, Mech & Astr*, 2019, 62: 012012.
- [38] XU C J, WANG S Y, NIU C Y, et al. *Phys Rev C*, 2012, 86: 027302.
- [39] BROWN B A. OXBASH for Windows, MSUNSCL Report No 1289, 2004 (unpublished).
- [40] LIZ Q, WANG S Y, NIU C Y, et al. *Phys Rev C*, 2016, 94: 014315.
- [41] ZHANG Y H, PODOLYÁK Z, DE ANGELIS G, et al. *Phys Rev C*, 2004, 70: 024301.
- [42] FOTIADES N, CIZEWSKI J A, KRÜCKEN R, et al. *Phys Rev C*, 2005, 71: 064312.
- [43] ASTIER A, PORQUET M G, VENKOVA T, et al. *Eur Phys J A*, 2006, 30: 541.
- [44] BROWN B A. Nuclear Structure Resources (NuShellX@MSU), <http://www.nshellx.msu.edu/>.
- [45] GUO R J, LI Z Q, LIU C, et al. *Chin Phys C*, 2017, 41: 084105.
- [46] SORLIN O, PORQUET M G. *Prog Part Nucl Phys*, 2008, 61: 602.
- [47] OTSUKA T, SUZUKI T, FUJIMOTOR, et al. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 232502.
- [48] HWANG J K, HAMILTON J H, RAMAYYA A V. *Int Jou*

- Mod Phys E, 2012, 21: 1250020.
- [49] PRÉVOST A, PORQUET M G, ASTIER A, et al. *Eur Phys J A*, 2004, 22: 391.
- [50] WINTER G, SCHWENGER R, REIF J, et al. *Phys Rev C*, 1993, 48: 1010.
- [51] STEFANOVA E A, KUTSAROVA T, DELONCLE I, et al. *Nucl Phys A*, 2000, 669: 14.
- [52] GOVOR L I, DEMIDOV A M, KURKIN V A, et al. *Phys At Nucl*, 2008, 71: 1339.
- [53] GARRETT P E, YOUNES W, BECKER J A, et al. *Phys Rev C*, 2003, 68: 024312.
- [54] LUO P W, WU X G, SUN H B, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 034318.
- [55] SAHIN E, DE ANGELIS G, DUCHENE G, et al. *Nucl Phys A*, 2012, 893: 1.
- [56] PORQUET M G, ASTIER A, VERNEY D, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 054305.
- [57] WARBURTON E K, OLNESS J W, LISTER C J, et al. *Phys Rev C*, 1985, 31: 1184.
- [58] LI P C, DAEHNICK W W. *Nucl Phys A*, 1987, 462: 26.
- [59] FANN H, SCHIFFER J P, STROHBUSCH U. *Phys Lett B*, 1973, 44: 19.
- [60] PATTABIRAMAN N S, CHINTALAPUDI S N, GHUGRE S S, et al. *Phys Rev C*, 2002, 65: 044324.

Progress on the γ Spectroscopy in the $A\sim 80$ Mass Region

WANG Shouyu¹⁾, XU Wenzheng, LIU Chen, LI Zhiquan

(Shandong Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, School of Space Science and Physics, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: In order to further explore important scientific issues such as spontaneous breaking of chiral symmetry in the $A\sim 80$ mass region, the nuclear physics group of Shandong University at Weihai has studied excited states of nuclei in this region by in-beam gamma spectroscopy techniques. The level schemes of these nuclei were expanded. The symmetry, shape, and motion mode of these nuclei were systematically studied with respect to experiments and theories. According to experimental results, several chiral candidates including odd-odd and odd- A nuclei were found in the $A\sim 80$ mass region, and chirality in the ^{80}Br nuclei was confirmed by the lifetime measurements. In addition, the present work also discussed the evolution of chiral geometry and octupole correlations with increasing neutrons, and the systematic features of neutron-core excitations in near-spherical nuclei in the $A\sim 80$ mass region.

Key words: nucleus; chiral symmetry; lifetime measurements; octupole correlations; cross-shell excitation

Received date: 03 Jan. 2020; **Revised date:** 24 Feb. 2020

Foundation item: Shandong Provincial Natural Science Foundation (JQ201701)

1) E-mail: sywang@sdu.edu.cn.