

文章编号: 1007-4627(2017)03-0357-04

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

王守宇

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

摘要: 原子核的手征对称性和空间反射对称性研究是近来原子核结构研究的前沿热点问题, 吸引了大量的实验和理论研究。通过在束伽玛谱学的实验方法, 在原子核 ^{78}Br 中发现了两对宇称相反的手征双重带, 以及它们之间表征八极关联的电偶极跃迁。这是首次在原子核中发现了八极关联的多重手征带, 给出了原子核存在手征对称性和空间反射对称性联立自发破缺的实验证据。

关键词: 原子核; 手征对称性; 空间反射对称性

中图分类号: O571.21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.357

1 引言

对称性以及对称性的自发破缺是基本的科学问题。原子核本身就是一个天然的实验室, 蕴含着多种基本相互作用与对称性, 例如本文要重点讨论的原子核手征对称性和空间反射对称性。原子核手征对称性由 Frauendorf 和孟杰提出^[1], 他们指出具有某些特定组态的三轴变形的奇奇核, 其价质子、价中子与核芯的角动量方向是接近相互垂直的, 从而可以形成左手坐标体系或右手坐标体系。原子核手征对称性自发破缺的实验信号是在实验上观察到一对近简并的, 具有相同宇称的双带结构, 这种双带被称之为“手征双重带”。2001 年以纽约州立大学石溪分校为首的研究组率先在质量数约为 130 的核区的原子核中观测到了手征双重带^[2], 证实了原子核手征对称性的理论预言。随后, 实验工作者陆续在质量数约为 100, 190 和 80 核区发现了具有手征对称性的原子核^[3-20]。

与手征对称性自发破缺而形成的“手征双重带”相类似, 还有一种重要的核物理现象被称为“宇称双重带”^[21], 这种双带结构也是近简并的, 但双带相同自旋能级的宇称是相反的。“宇称双重带”的形成源于原子核反射对称性的自发破缺。原子核反射对称性的自发破缺发生在具有稳定八极变形的原子核中, 如梨形、心脏形和正四面体形等^[22]。这样的研究关联着基本的 CP 对称破缺问题, 有助于研究超出标准模型的新物理^[23]。目前实验上已经在不同的原子核中发现了 30 多例手征双重带和 10 多例宇称双重带^[22]。这些确凿的实验证据

表明了原子核中既可以发生手征对称性的自发破缺, 也可以发生反射对称性的自发破缺。那么人们很自然地要问, 原子核中是否可以发生手征对称性和反射对称性的联立自发破缺呢?

2 实验

在南非 iThemba 国家实验室的伽玛终端上, 利用重离子融合蒸发反应 $^{70}\text{Zn}(^{12}\text{C}, p3n)$ 布居原子核 ^{78}Br 的高自旋态。退激的伽玛射线由 8 个 Clover 探测器组成的 AFRODITE^[24] 探测阵列收集。为了提高目标核 ^{78}Br 在生成核中所占的比例, 我们采用了反应道标记技术, 用由 CsI 晶体组成的 DIAMANT^[25] 探测阵列来实现, 共收集了约 1.5×10^9 $\gamma-\gamma$ 和 1.6×10^8 $p-\gamma-\gamma$ 符合事件。图 1 给出了 $\gamma-\gamma$ 符合矩阵和 $p-\gamma-\gamma$ 符合

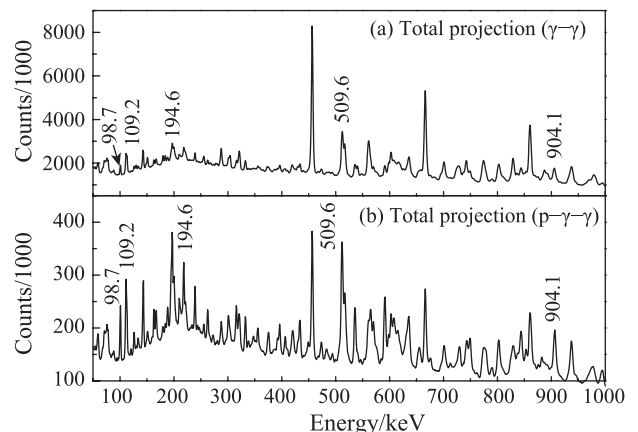


图 1 $\gamma-\gamma$ 符合矩阵 (a) $p-\gamma-\gamma$ 符合矩阵 (b) 的总投影谱

收稿日期: 2016-12-07; 修改日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11461141001, 11545011, U1432119)

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

矩阵的总投影谱，图中标记的 98.7, 109.2, 194.6, 209.6 和 904.1 keV 的跃迁为 ^{78}Br 中相对强度较大的特征伽玛跃迁。从图 1 中可以看出，经过带电粒子探测器进行的质子符合选择之后，目标核 ^{78}Br 中的特征伽玛跃迁的峰位变的更加突出，所占比例有了显著提高，从而更有利于目标核 ^{78}Br 能级纲图的搭建。

3 结果与讨论

通过对伽玛射线符合关系、强度、角分布和线性极化测量数据的仔细分析，建立了如图 2 所示的奇奇核 ^{78}Br 的能级纲图。从图 2 中可以看到：带 1 和带 2 是正宇称的转动带，它们之间的连接跃迁为磁偶极跃迁，组成了一对正宇称的双带结构；与之相类似，带 3 和带 4 也由磁偶极跃迁连接，但它们基于相同的负宇称，组成了一对负宇称的双带结构；同时正负宇称双带之间存在着多条强的电偶极连接跃迁，从而组成了一个交织在一起的四重带结构。

基于转动带的能谱、顺排角动量和电磁跃迁比率等实验信息，以及三轴粒子转子模型和多维约束的密度泛函理论计算^[27]，带 1 和带 2，带 3 和带 4 都是由于手征对称性自发破缺而形成的手征双重带，其中带 1 和带 2 基于 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}$ 组态，带 3 和带 4 基于 $\pi f_{5/2} \otimes \nu g_{9/2}$ 组态；正宇称带 1 和负宇称带 3 通过多条强的电偶极跃

迁连接在一起，这样的结构是八极关联效应导致的，而不是由于稳定的八极形变而形成的八极带。如果一个原子核具有稳定的三轴和八极形变，发生手征对称性和空间反射对称性的联立自发破缺，将有可能形成四条基于相同组态的近简并的转动带，文献[26]将其命名为“手征宇称四重带(chirality-parity quartet bands)”。如果这个原子核仅仅三轴形变是稳定，而八极形变是非常软的，发生手征对称性和空间反射对称性的联立自发破缺，将形成基于不同组态的两对手征带，并且两对手征带之间存在八极关联效应，可以被称为“八极关联的多重手征带(multiple chiral doublet bands with octupole correlations)”。因此，在 ^{78}Br 中发现的四重带结构应该是八极关联的多重手征带，这是首次在核系统中观测到这种核现象，表明原子核中发生了手性对称性和空间反射对称性的联立自发破缺。当前工作的实验发现也表明原子核的手征对称几何可以形成于具有八极形变软的原子核中，并进一步预示着原子核可以发生稳定的三轴形变和八极形变的共存，从而形成手征宇称四重带结构。

值得一提的是，近来在原子核 ^{103}Rh 中也观测到了一个四重带结构，文献[27]将其解释为基于相同组态的手征四重带结构。图 3 提供了 ^{78}Br 中四重带与 ^{103}Rh 中四重带能谱的比较。如图 3 所示， ^{103}Rh 的四个转动带分布更均匀，表现出了更好的简并性；另一方面，它

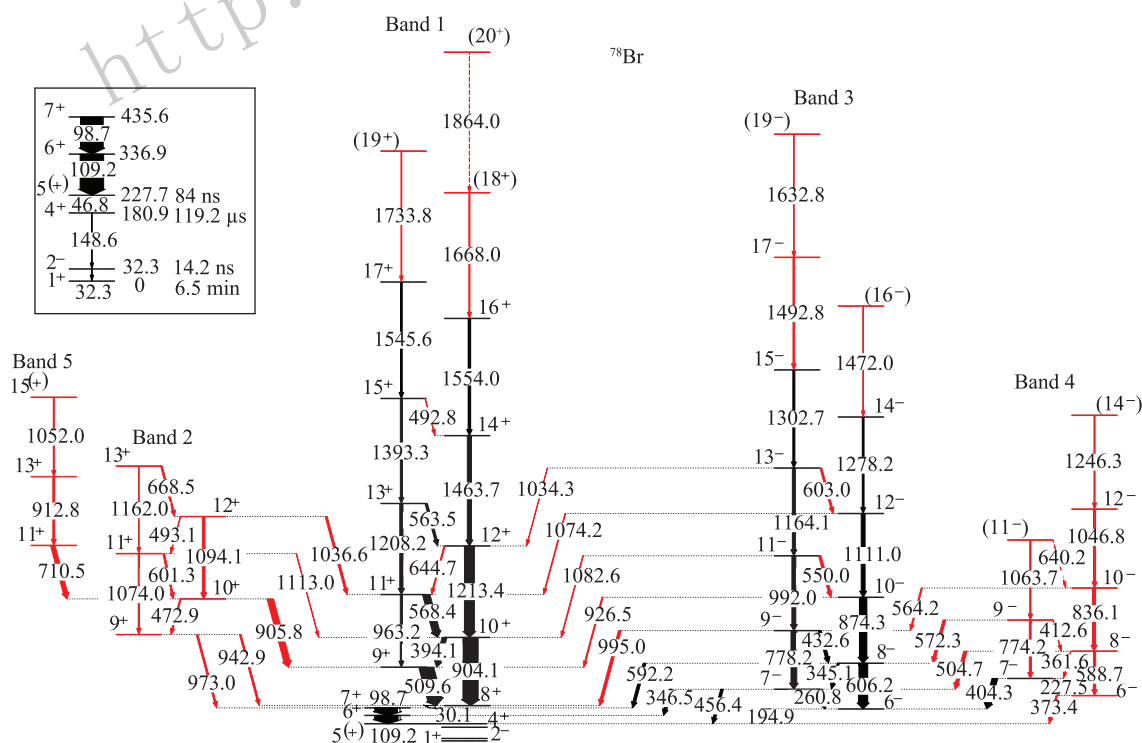


图 2 (在线彩图) 原子核 ^{78}Br 的能级纲图，取自文献 [26]

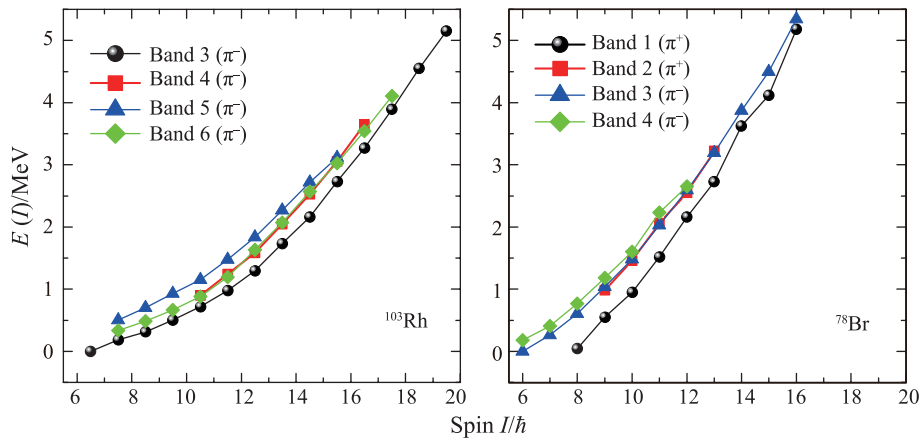


图 3 (在线彩图) 原子核 ^{103}Rh 中四重带能谱与原子核 ^{78}Br 中四重带能谱的比较, 实验数据取自文献 [26, 27]

们能谱的斜率完全相同, 表明它们的转动惯量是相同的, 并基于相同的内禀组态。与之相反, ^{78}Br 中带 1 和带 3 能谱的斜率是明显不同的, 表明它们的形变和内禀组态是不同的, 从而进一步支持我们给出的带 1 和带 3 基于不同内禀组态的物理解释。

本工作除了发现了八极关联的多重手征带之外, 还观测到了一条新的转动带, 此新转动带在图 2 被标记为带 5。带 5 具有正宇称, 并通过一条 710.5 keV 的 M1 跃迁退激到带 2。为指定带 5 的内禀组态, 我们系统比较了邻近核类似结构的激发能, 比较结果显示在图 4 中。如图 4 所示, 在初始位置, 带 5 与晕带(图 2 中标记为带 1) 相同自旋下的激发能差为 700 keV 左右, 随着自旋的增加, 激发能差逐渐减少。这种趋势极其类似于邻近偶偶核 ^{74}Se , ^{76}Se 和 ^{78}Se 中伽玛振动带和晕带的激发能差值的变化情况, 因此带 5 可以被尝试性指定为基于晕带之上的伽玛振动带。

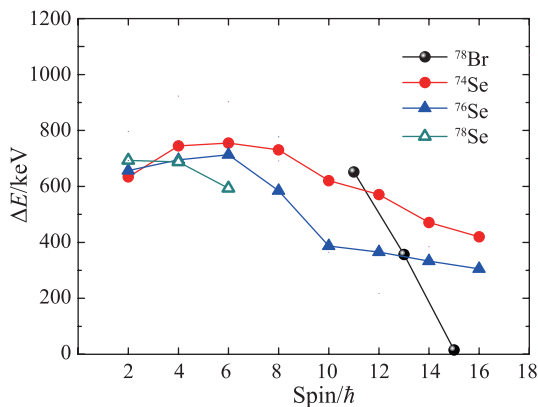


图 4 (在线彩图) ^{78}Br 中带 5 和带 1 激发能差与邻近偶偶核 ^{74}Se , ^{76}Se 和 ^{78}Se 中伽玛振动带和晕带激发能差的比较, 实验数据取自文献 [26, 28, 29, 30]

4 总结与展望

原子核的手征对称性与空间反射对称性研究是当前核物理研究的前沿热点问题, 目前已经有确切的实验证据表明原子核中既可以发生手征对称性的自发破缺, 也可以发生空间反射对称性的自发破缺。如果原子核中发生手征对称性和反射对称性的联立自发破缺, 将有可能形成八极关联的多重手征带或手征宇称四重带。通过在束伽玛谱学的实验方法, 已经在原子核 ^{78}Br 发现了八极关联的多重手征带, 这是首次在核系统中发现了手征对称性与空间反射对称性的联立自发破缺, 同时这样的研究也预示着原子核能够发生稳定的三轴形变和八极形变的共存, 从而形成手征宇称四重带。这样的实验探索正在进行之中。

参考文献:

- [1] FRAUENDORF S, MENG J. Nucl Phys A, 1997, **617**(2): 131.
- [2] STAROSTA K, KOIKE T, CHIARA C J, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**(6): 971.
- [3] ZHU S, GARG U, NAYAK B K, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **91**(13): 132501.
- [4] VAMAN C, FOSSAN D B, KOIKE T, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **92**(3): 032501.
- [5] WANG S Y, QI B, LIU L, *et al.* Phys Lett B, 2011, **703**(1): 40.
- [6] JOSHI P, JENKINS D G, RADDON P M, *et al.* Phys Lett B, 2004, **595**(1): 135.
- [7] TIMÁR J, JOSHI P, STAROSTA K, *et al.* Phys Lett B, 2004, **598**(3): 178.
- [8] ZHU S J, HAMILTON J H, RAMAYYA A V, *et al.* The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei, 2005, **25**(1): 459.
- [9] TONEV D, YAVAHCHOVA M S, GOUTEV N, *et al.* Phys

- Rev Lett, 2014, **112**(5): 052501.
- [10] LIEDER E O, LIEDER R M, BARK R A, *et al.* Phys Rev Lett, 2014, **112**(20): 202502.
- [11] RATHER N, DATTA P, CHATTOPADHYAY S, *et al.* Phys Rev Lett, 2014, **112**(20): 202503.
- [12] KOIKE T, STAROSTA K, CHIARA C J, *et al.* Phys Rev C, 2001, **63**(6): 061304.
- [13] BARK R A, BAXTER A M, BYRNE A P, *et al.* Nucl Phys A, 2001, **691**(3): 577.
- [14] KOIKE T, STAROSTA K, CHIARA C J, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**(4): 044319.
- [15] RAINOVSKI G, PAUL E S, CHANTLER H J, *et al.* Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2003, **29**(12): 2763.
- [16] WANG S Y, LIU Y Z, KOMATSUBARA T, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**(1): 017302.
- [17] ZHAO Y X, KOMATSUBARA T, MA Y J, *et al.* Chin Phys Lett, 2009, **26**(8): 082301.
- [18] MA K Y, LU J B, YANG D, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**(3): 037301.
- [19] LAWRIE E A, VYMERS P A, LAWRIE J J, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**(2): 021305.
- [20] MASITENG P L, LAWRIE E A, RAMASHIDZHA T M, *et al.* Phys Rev B, 2013, **719**(1): 83.
- [21] CHASMAN R R. Phys Rev B, 1980, **96**(1): 7.
- [22] BUTLER P A, NAZAREWICZ W. Reviews of Modern Physics, 1996, **68**(2): 349.
- [23] GAFFNEY L P, BUTLER P A, SCHECK M, *et al.* Nature, 2013, **497**(2): 199.
- [24] BARK R A, LIPOGLAVSEK M, MALIAGE S M, *et al.* Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2005, **31**(10): S1747.
- [25] GAL J, HEGYESI G, MOLNAR J, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2004, **516**(2-3): 502.
- [26] LIU C, WANG S Y, BARK R A, *et al.* Phys Rev Lett, 2016, **116**(11): 112501.
- [27] KUTI I, CHEN Q B, TIMÁR J, *et al.* Phys Rev Lett, 2014, **113**(3): 032501.
- [28] DORING J, JOHNS G D, RILEY M A, *et al.* Phys Rev C, 1998, **57**(6): 2912.
- [29] XU C, LI X Q, MENG J, *et al.* Phys Rev C, 2015, **91**(6): 061303(R).
- [30] SCHWENGER R, WINTER G, DORING J, *et al.* Z Phys A, 1987, **326**: 287.

Search for Chiral and Reflected Symmetry Breakings in Atomic Nucleus

WANG Shouyu¹⁾

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

Abstract: Spontaneous symmetry breaking is a fundamental concept in nature. Chiral Symmetry Breaking and reflection-asymmetry in nuclei has been a subject of intensive experimental and theoretical investigation. Two pairs of positive- and negative-parity doublet bands together with eight strong electric dipole transitions linking their yrast positive- and negative-parity bands have been identified in ^{78}Br by means of in-beam gamma-ray spectroscopy techniques. These four rotational bands are suggested as multiple chiral doublet bands with octupole correlations. This observation indicates that nuclear chirality can be robust against the octupole correlations. It is of highly scientific interest to search for the chirality-parity quartet bands in nucleus with both stable triaxial and octupole deformations.

Key words: atomic nucleus; chiral symmetry breaking; reflected symmetry breaking

Received date: 7 Dec. 2016; Revised date: 20 Mar. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11545011, 11461141001, U1432119)

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