

文章编号: 1007-4627(2016) 04-0375-10

基于 HI-13 串列加速器在束 γ 终端原子核激发态 寿命测量的核结构研究

郑云¹, 吴晓光¹, 李广生¹, 李聪博¹, 陈启明¹, 竺礼华^{2,3}, 贺创业¹, 郝昕^{1,3}, 王烈林¹,
姚顺和¹, 刘颖¹, 李立华¹, 汪金龙¹, 钟健¹, 周文奎¹, 邓利涛¹, 朱宝吉¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191;

3. 深圳大学, 深圳 5180603)

摘要: 利用在 HI-13 串列加速器的在束 γ 终端上建立的多普勒线移衰减法、反冲距离多普勒线移法和快时间延迟符合法等 3 种寿命测量方法, 开展了原子核手征对称性、磁转动等核结构热点课题的研究工作。实验结果表明, ^{130}Cs 的伙伴带具有很好的手征特性, 而 ^{106}Ag 的候选带并非手征双带。根据测量的能级寿命提取的 $B(M1)$ 值表明, ^{106}Ag 的正宇称晕带和 ^{107}Ag 的正、负宇称晕带都具有典型的磁转动特性。此外, 寿命测量数据还为解释和理解不同的同位素链中展现出的形状演化、形状共存、形状相变及临界点对称性等物理现象提供了有价值的实验证据。

关键词: 能级寿命; 核结构; 多普勒线移衰减法; 反冲距离多普勒线移法; 快时间延迟符合法

中图分类号: O571 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.375

1 引言

原子核的能级寿命是表征核状态的重要物理量, 它代表了能级间的跃迁几率。原子核能级的跃迁几率能准确反映核内禀属性, 因此是核结构研究最重要的内容之一。理论描述的跃迁几率与跃迁始末态的波函数有关, 因而受核结构模型假设的影响。所以, 测量能级寿命是对理论模型的最好检验^[1]。同时, 提取跃迁几率可以揭示这个激发态的集体性或单粒子性, 可以系统研究某一核素随着角动量的变化规律, 还可以开展同位素链(或同中子素链)中原子核形变的系统研究。

自从 20 世纪 70 年代初发现了回弯现象后, 高自旋态研究成为十分活跃的领域。随着电子学、计算机、加速器和探测技术的发展, 继之第二回弯、形状共存、超形变等核行为的揭示, 特别是近年来关于磁转动、手征性和形状相变临界点对称性 X(5) 和 E(5) 等核现象的发现, 进一步唤起人们对高自旋态研究的关注, 现已成为核结构研究的前沿阵地。无疑, 开展高自旋态的寿命测量也成为倍受重视的研究课题, 因为这对于澄清

这些新的核现象具有重要意义。例如, 根据能谱分析, ^{104}Mo 被认为是一个上佳的 X(5) 候选核。但是, 后来通过寿命测量发现, 该核的绝对跃迁几率与 X(5) 的理论值是不一致的, 从而对 ^{104}Mo 的 X(5) 临界点对称性产生了质疑^[2]。又如, 核的手征性也是当今的热点课题之一。 ^{134}Pr 曾被认为是典型的手征核, 但是根据寿命测量提取的电磁跃迁几率却给出了否定的结论^[3-4]。

原子核高自旋态的平均寿命一般是 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s 量级, 这正是多普勒移动衰减法(DSAM)和反冲距离多普勒线移法(RDDs)适合的时间测量范围。这两种方法都利用了运动中的反冲核发射的 γ 射线的多普勒效应。它们的区别在于, DSAM 是用反冲核在介质中的慢化时间作为参考时间, 常用于测量较高自旋区域 ~ 0.01 ps 至 ~ 1 ps 范围内的能级寿命; 而 RDDs 则是用反冲核在真空中的飞行时间作为参考时间, 常用于测量较低自旋区域 ~ 0.1 ps 至 ~ 1 ns 范围内的能级寿命, 两种方法在测量能级寿命的范围上互为很好的补充。另外, 还有可以测量大于几百个皮秒的激发态寿命的延迟符合技术^[5], 这种方法近些年因为 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器的发展而

收稿日期: 2016-06-07; 修改日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11305269, 11375267, 11475072, 11405274, 11205068, 11175259)

作者简介: 郑云(1981-), 男, 云南祥云人, 副研究员, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: Zhengyun@ciae.ac.cn

通信作者: 吴晓光, E-mail: wxg@ciae.ac.cn

焕发新生命^[6]。

下面简单介绍中国原子能科学研究院在束 γ 课题组已经建立的3种寿命测量方法, 以及通过测量激发态寿命所开展的原子核手征性、磁转动以及原子核形变、形状演化、形状共存、形状相变和临界点对称性等核结构热点课题的研究工作。

2 HI-13串列加速器在束 γ 终端上的寿命测量方法

经多年的努力, 本课题组相继建立了基于多普勒效应应的DSAM和RDDS法, 以及基于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 快时间性能的延迟符合法, 下面就这3种方法逐一简单介绍。

(1) 多普勒线移衰减法。多普勒线移衰减法(DSAM)^[1, 7-11]的原理如图1所示。核反应后逸出靶箔的反冲核通过固体或气体介质, 反冲核将在介质中逐渐慢化终致被阻止。反冲核在减速过程中衰变并发射 γ

光子, γ 光子能量 E_γ 将因多普勒效应而发生线移:

$$E_\gamma = E_{0\gamma} \left(1 + \frac{v_{\text{rec}}}{c} \cos \theta \right), \quad (1)$$

式中 $E_{0\gamma}$ 为核静止($v_{\text{rec}}=0$)时发射的 γ 光子能量。

发生多普勒线移之后, γ 能谱是在能量介于 $E_{0\gamma}$ 和 $E_{0\gamma}[1+(v_{\text{rec}}/c)\cos\theta]$ 之间呈宽分布的能谱, 其谱形与反冲核的衰变率和速度随时间的分布有关。换言之, 在确定的介质中, 衰变寿命将决定多普勒线移能谱的谱形。对不同的衰变寿命, 在理论上可以算出对应的多普勒线移能谱的形状。因此, 由谱形的分析就可以推算出衰变寿命。如图1所示, 根据式(1), $\theta=90^\circ$ 的探测器观测到的峰形为规则的高斯峰, 峰的半宽度较大但不发生线移; $0^\circ<\theta<90^\circ$ (前角)的探测器观测到的 γ 能谱将向高端发生线移; $90^\circ<\theta<180^\circ$ (后角)的探测器观测到的 γ 能谱向低端发生线移。图1右上角为实验上不同角度探测器测得的能谱。

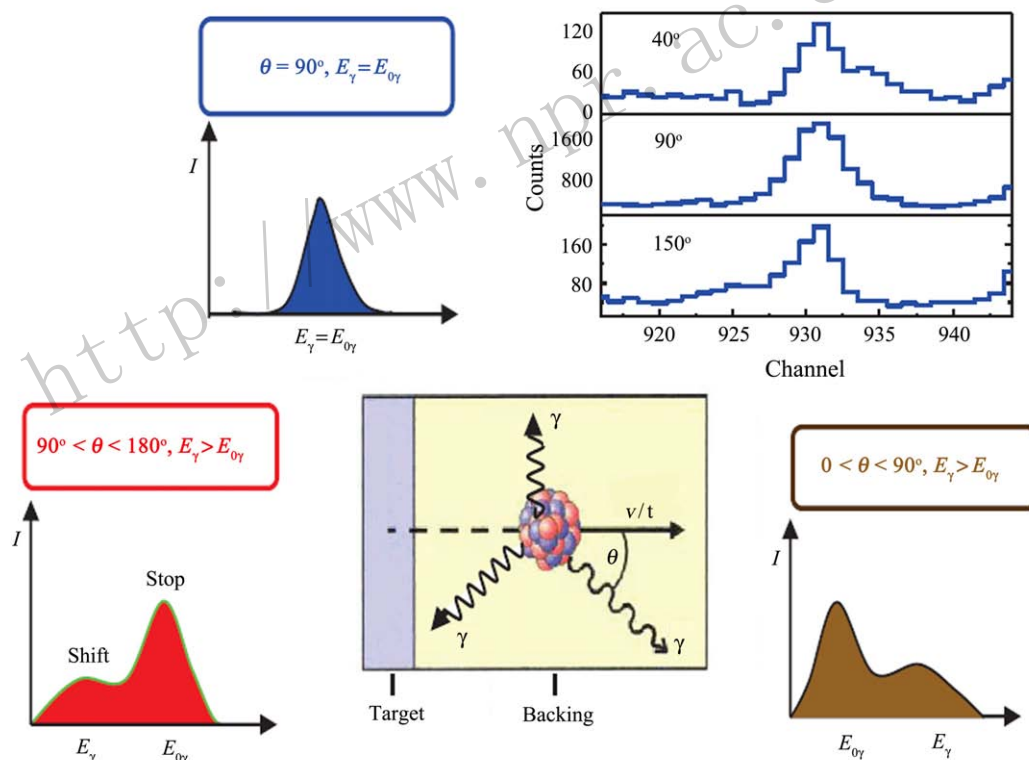


图1 (在线彩图) 多普勒线移衰减法原理示意图

前面提到采用该方法测量寿命时是通过谱形分析推算寿命, 具体来说是根据已知的实验条件用蒙特卡洛方法模拟出多普勒线移能谱的形状, 然后与实验提取的不同出射方向的跃迁的多普勒峰形比较, 从而得到能级的平均寿命。这种方法能够测量 $10^{-14} \sim 10^{-10}$ s的寿命, 由于缺乏电离原子在物质中的能量损失和散射过程的精

细知识, 致使该方法的精度降到 $\sim 10\%$ 。

(2) 反冲距离多普勒线移法。反冲距离多普勒线移法(RDDS)^[1, 12]的原理如图2所示。当入射离子束轰击靶箔时, 核反应生成的反冲核将脱离靶箔, 以速度 v_{rev} 在真空中飞行, 根据式(1), 如果反冲核退激以与运动方向成 θ 角发射 γ 光子, 则固定在 θ 角方向的探测器接

收到的 γ 光子能量 E_γ 将因多普勒效应而发生线移, 线移的大小决定于反冲速度 v_{rec} 和发射角 θ 。若在距离靶箔 d 的地方放置一阻停箔, 实验过程中移动阻停箔至不同的距离 $d+\Delta d$, 随着飞行距离 $d+\Delta d$ 增加, 探测器记录的同一能量 γ 光子飞行峰的面积逐渐增大, 而阻停峰的面积却逐渐减少。

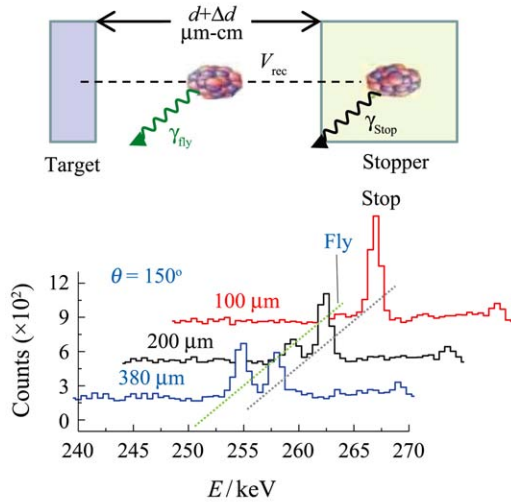


图2 (在线彩图) 反冲距离多普勒线移法原理示意图

采用反冲距离多普勒线移法测量能级寿命, 通常使用一台Plunger^[16-17]装置来实现靶箔和阻停箔之间 $\mu\text{m-cm}$ 范围内距离的精细调节。数据处理方面目前一般应用微分衰减曲线法^[18-19], 即用待测能级的直接馈入跃迁的飞行峰部分开窗, 从而馈入模式就可以大大简化, 边带的馈入强度、馈入时间、以及未知馈入的问题都可以不用考虑, 于是从开窗谱中就可以直接提取出待测能级的寿命。如果待测能级由跃迁B布居, 而由跃迁A退激, 那么用每一个靶箔和阻停箔之间的相对距离 Δd 都可以计算出一个能级寿命 $\tau(\Delta d)$:

$$\tau(x) = \frac{\{B_s, A_u\}(\Delta d)}{\frac{d}{dx}\{B_s, A_s\}(\Delta d)} \cdot \frac{1}{\langle v_{\text{rec}} \rangle}, \quad (2)$$

式中: $\langle v \rangle$ 为反冲核平均速度; $\{B_s, A_{s(u)}\}(\Delta d)$ 为在距离 Δd 处用B跃迁飞行峰开窗得到的A跃迁的飞行峰(阻停)峰强度。

采用这种方法提取寿命, 可以完全排除原子核的去极化效应^[20]。我们只需要知道与开窗射线飞行峰部分有符合关系的退激射线飞行峰和阻停峰的强度, 以及靶箔和阻停箔之间移动的相对距离 Δd , 而不需要绝对距离 $d+\Delta d$ 。因此, 我们可以得到一系列不依赖距离的寿命值, 然后作常数拟合就可得到最终的寿命值。该方法能够测量 $10^{-12} \sim 10^{-8}$ s的寿命, 因为RDDS不依赖于反冲核的 dE/dX 知识, 有可能给出较高的精度 $<5\%$ 。

图3为使用微分衰减曲线法提取 ^{106}Cd 中 2_1^+ 能级寿命的实例, 具体的讨论近期准备投稿发表。图中, (a)为各个 Δd 距离处提取的寿命值, 这些数据点经常数拟合后得到 2_1^+ s能级的寿命为 9.7 ± 1.2 ps; (b)给出的是不同距离 Δd 处飞行峰的强度, 实线为各强度值的二阶多项式分段拟合。

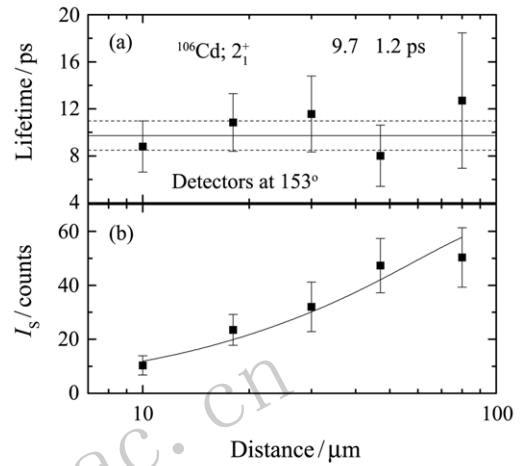


图3 微分衰减曲线法提取寿命实例

(3) 快时间延迟符合法。快时间的延迟符合技术是一种利用新型闪烁体探测器 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 测量核能级寿命的实验方法^[1, 5, 13-15]。这种方法是基于能量分辨很好的HPGe探测器与时间和能量分辨都较好的 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器相结合的寿命测量技术。

通过记录HPGe和 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 之间的 $\gamma\gamma\gamma(t)$ 符合事件, 利用能量分辨好的HPGe探测器探测到的 γ_3 开窗, 挑选出与之有符合关系的由 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器探测到的 γ_1 和 γ_2 , γ_1 和 γ_2 之间的能级即为待测寿命能级, 然后用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器开门, γ_1 和 γ_2 的时间信号分别作为“start”和“stop”即可提取出时间谱, 如图4所示。延迟符合法能够测量 $10^{-11} \sim 10^{-5}$ s的寿命, 测

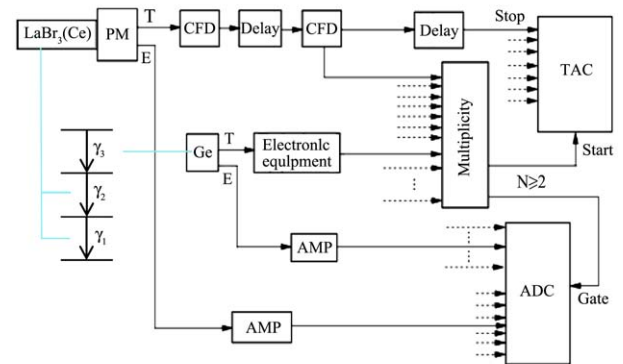


图4 利用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器的延迟符合技术原理及电子学线路图

量寿命大于 10^{-8} s 的寿命, 一般只需要用符合分辨时间小于 10^{-8} s 的慢符合谱仪。但是测量寿命小于 10^{-8} s 的能级, 则一定要用时间分辨为 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ s 的快慢符合谱仪。

实验数据处理方面, 对于寿命远大于符合分辨本领的事件, 只需要提取延迟谱中半对数坐标的直线斜率即可; 而对于寿命与符合时间分辨相当和小于时间分辨的情况, 则需同时测量瞬时符合曲线和延迟符合曲线。对此, 数据处理方法目前常用的有 3 种, 分别是矩心位移法、斜率法和去卷积法。其中矩心位移法在实际测量中由于很难满足所需条件, 一般拓展为“镜像对称矩心位移法”, 就是互换测量延迟谱时的“start”和“stop”, 得到的两曲线的矩心距离即为 2τ 。当延迟时间谱的面积远远大于瞬时时间谱的面积时, 一般采用斜率法, 只需提取延迟符合曲线在半对数坐标上的斜率, 便可得到寿命值, 一般当预期的寿命比仪器时间分辨大 30% 时就可以用斜率法测量寿命。在没有本底污染、电子学漂移等理想条件下, 延迟时间谱可以看成高斯瞬时谱(瞬时符合曲线 $P(y)$) 与指数衰变的非对称卷积谱^[5]:

$$N(t_d) = \frac{A}{\tau} \int_{-\infty}^t P(y) e^{-\frac{(t_d-y)}{\tau}} dy, \quad (3)$$

式中: A 为归一化因子; τ 为寿命值。实验上只需测到瞬时时间谱和延迟时间谱, 然后用上式拟合即可得到寿命值, 这就是去卷积拟合方法。我们用延迟符合法测量寿命时, 数据处理采用的就是这种方法。图 5 中给出了我们近期利用去卷积拟合法提取寿命的一个实例, 这是利用 ^{189}Hg 正宇称晕带的 197.2 keV 和 479.7 keV γ 跃迁时间差提取的 $\frac{33}{2}^+$ 能级时间谱。

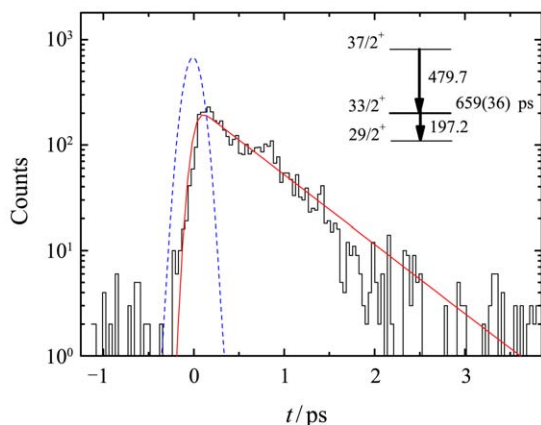


图 5 (在线彩图) 利用 ^{189}Hg 正宇称晕带的 197.2 keV 和 479.7 keV γ 跃迁时间差提取的 $\frac{33}{2}^+$ 能级时间谱

3 HI-13 串列加速器在束 γ 终端上开展的寿命测量及相关研究工作

(1) 原子核手征性研究。Frauendorf 等^[21]于 1997 年首次预言了三轴形变原子核中可能存在手征转动结构, 此后的这十多年间人们在 $A \sim 130$ 、 $A \sim 100$ 、 $A \sim 190$ 和 $A \sim 80$ 质量区, 开展了广泛的原子核手征性研究工作。根据大量的实验结果和理论计算, 手征双重带应该具有以下特性^[22-24]: 具有相同宇称、能级近简并的 $\Delta I = 1$ 的转动带; 双带的能级劈裂 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 几乎恒定; 较强的带内 M1 跃迁, 高自旋处较弱的带间 E2 跃迁; $B(M1)/B(E2)$ 值的奇偶自旋摇摆效应; 双带具有近似的带内 $B(M1)$ 、 $B(E2)$ 值。其中, 电磁跃迁几率被认为是检验候选手征双重带的一个严格标准。两手征伙伴带应该通过相似的电磁跃迁退激。在理想手征双带中, 其约化电磁跃迁几率 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 应该表现出相似的特性, 并且 $B(M1)$ 值会随奇偶自旋振荡。因此, 电磁跃迁几率测量是研究核手征性的重要探针。

^{134}Pr 曾被认为是 $A \sim 130$ 质量区最典型的手征核。可是后来对其手征双带的能级寿命测量结果显示^[3-4], 在能谱对称性最好的自旋区段, 晕带 $B(E2)$ 值明显大于伴带的 $B(E2)$ 值, 且 $B(M1)$ 也没有展现出摇摆特性, 这和预言的理想手征双带的特性不符, 给实验上是否能观测到手征双重带提出挑战。在此之后, 为了检验手征性, ^{128}Cs ^[25]、 $^{135,136}\text{Nd}$ ^[26-27] 和 $^{103,104}\text{Rh}$ ^[28] 等核的候选手征双带寿命测量结果先后见刊, 其中 ^{128}Cs 手征双重带的电磁跃迁几率较好地符合手征双重带特性, 被认为是目前已知的揭示手征对称性破缺现象的最好例子^[25]。我们利用多普勒线移衰减法测量了手征候选核 ^{130}Cs ^[29-31] 和 ^{106}Ag ^[32] 双带的能级寿命, 提取了跃迁几率 $B(M1)$ 和 $B(E2)$, 对这两个核中双带的手征性进行了研究。提取出寿命值 τ 后, 根据如下公式可以计算出跃迁几率 $B(M1)$ 和 $B(E2)$:

$$B(M1) = 5.68 \times 10^{-14} \cdot E_{\gamma}^{-3} \cdot \lambda(M1) \quad (4)$$

$$B(E2) = 8.156 \times 10^{-14} \cdot E_{\gamma}^{-5} \cdot \lambda(E2) \quad (5)$$

式中, $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 的单位分别为 μN^2 和 e^2b^2 , γ 射线能量 E_{γ} 单位为 MeV, $\lambda(\lambda = 1/\tau)$ 单位为 s^{-1} 。

图 6 给出了 ^{130}Cs 伙伴带实验提取的 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 值, 并与基于一粒子-一空穴耦合三轴形变核芯的粒子转子模型 (PRM)^[33-37] 理论计算的电磁跃迁几率进行了比较。从图 6 中可以看出晕带和伴带电磁跃迁几率 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 值基本上一致, 在自旋 14^+

以上的区域的 $B(M1)$ 值表现出奇偶自旋振荡, 奇自旋的值高于偶自旋的值。对于边带到晕带的带间跃迁, 虽然只给出了3条能级的 $B(M1)$ 值, 但是从大致的趋势可以看出偶自旋的 $B(M1)$ 值高于旁边的两个奇自旋能级的 $B(M1)$ 值, 即 $B(M1)$ 值存在奇偶自旋摇摆效应。对该双带电磁跃迁几率的理论计算值很好地再现了实验现象。结果清楚表明, ^{130}Cs 伙伴带在自旋区间 $14^+ < I < 17^+$ 存在手征对称性^[29-31]。

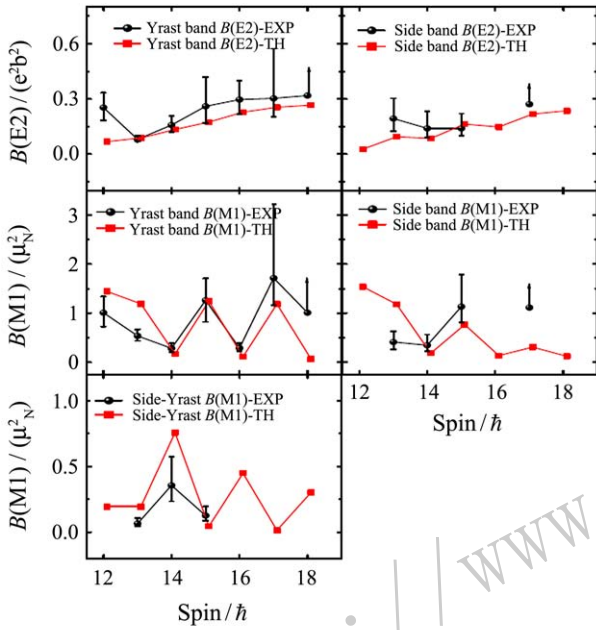


图6 (在线彩图) ^{130}Cs 伙伴带实验和PRM理论计算的电磁跃迁几率 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 比较^[29-31]

图7给出了 ^{106}Ag 候选手征双带的绝对电磁跃迁几率(a) $B(M1)$ 和(b) $B(E2)$ 以及它们的比值(c) $B(M1)/B(E2)$ 。从图7中可以看出, 在误差范围内双带的 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 值都不相同。边带的 $B(M1)$ 值比晕带的 $B(M1)$ 值大4倍以上, 虽然两条带的 $B(M1)$ 值都存在奇偶振荡, 且随着自旋的增加它们的值有逐渐靠拢的趋势, 但是两者的差别还是显而易见的。两条带的 $B(E2)$ 值也存在明显的差别, 边带的 $B(E2)$ 值大于晕带的值, 晕带的 $B(E2)$ 值有随自旋增加逐渐变小的趋势。晕带和边带的 $B(M1)/B(E2)$ 没有表现出理想手征的奇偶自旋摇摆效应, 及奇自旋高偶自旋低的特性。实验结果表明, ^{106}Ag 伙伴带不存在期望的手征对称性^[32]。

(2) 原子核磁转动带研究。原子核的磁转动结构最先于20世纪90年代初在近球形的Pb同位素中观测到^[38-40], 随后在 $A \sim 200, 140, 100, 80$ 和60核区分别发现了多例磁转动现象。磁转动结构的实验证据及其

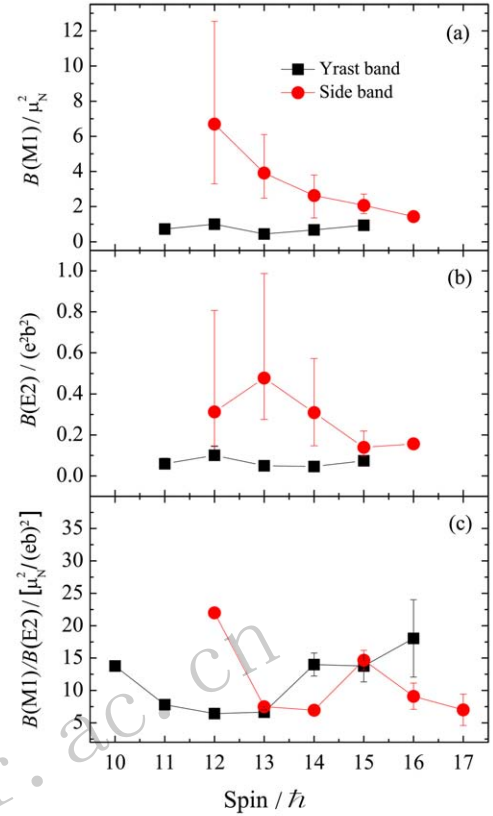


图7 (在线彩图) ^{106}Ag 候选手征双带的绝对电磁跃迁几率(a) $B(M1)$ 和(b) $B(E2)$ 以及它们的比值(c) $B(M1)/B(E2)$ ^[32]

半经验描述可以参看文献[41-42]。我们知道, 在一个近球形原子核中, 其对称性被少数激发的高- j 粒子和空穴打破时, 就会发生磁转动。如今, 对磁转动的形成机制有了基本的认识, 发展了诸如倾斜轴推转(TAC)模型^[21]、三轴投影壳模型(TPSM)^[43]等理论, 对观测到的磁转动现象进行了成功的解释, 认为上述200, 140, 100和80等4个核区出现磁转动的原子核内秉组态主要是由处于高 j 轨道上的价质子(粒子或空穴)与价中子(粒子或空穴)在空间取向向上的耦合, 即分别为 $\pi(h_{11/2}/i_{13/2}) \otimes \nu i_{13/2}$, $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$, $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 及 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}$ ^[44]。

处于磁转动模式下的原子核, 具有如下主要特征: 带内跃迁是由强的 $M1$ 磁偶极跃迁组成, 电四极 $E2$ 跃迁很弱或观测不到; $B(M1)$ 值很大(约 $2 \sim 10 \mu_N^2$), $B(E2)$ 值很小(通常 $< 0.1 \text{ (eb)}^2$), 因此 $B(M1)/B(E2)$ 比值很大(约 $10 \sim 100 \mu_N^2/(\text{eb})^2$) 且随角动量增加缓慢减弱。根据上述磁转动特征, 实验上只要测量磁转动带的能级寿命, 然后提取出相应的 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 值, 就可以对磁转动机制和理论模型进行检验。我们已经利用多普勒线移衰减法测量了 $^{106,107}\text{Ag}$ ^[45-46] 磁转动带

的能级寿命, 提取了跃迁几率 $B(M1)$ 和 $B(E2)$, 并对这两个核中磁转动以及电转动-磁转动突变机制进行了研究。

作为例子, 我们只简单介绍 ^{106}Ag 磁转动及其电转动-磁转动突变的情况, 关于 ^{107}Ag 的实验结果及理论计算等请参阅文献[45]。图 8 给出了 ^{106}Ag 磁转动带的 (a) 电磁跃迁几率比 $B(M1)/B(E2)$ 以及由能级寿命值提取的 (b) 跃迁几率 $B(M1)$ 和 (c) $B(E2)$ 。从图中 8 可以看出, 在带交叉 (12^+13^+) 之前, $B(M1)/B(E2)$ 平均值很小且随着奇偶自旋振荡。这种特性表明, 正宇称基态带与经典的主轴转动和电转动的特征相符。自旋再增加 $1h$, 即在 13^+ 能态之上, $B(M1)/B(E2)$ 值变得很大, 且随着自旋的增加平滑地减小, 特别奇偶自旋振荡效应几乎消失。带交叉之后所表现出来的特性, 是磁转动的主要特征。 $B(M1)$ 值的奇偶振荡变小, 随着自旋的增加 $B(M1)$ 比值逐渐减小。这也是倾斜轴的一个主要特征。TPSM 理论计算很好地再现了实验数据, 详细内容请参阅文献[46]。

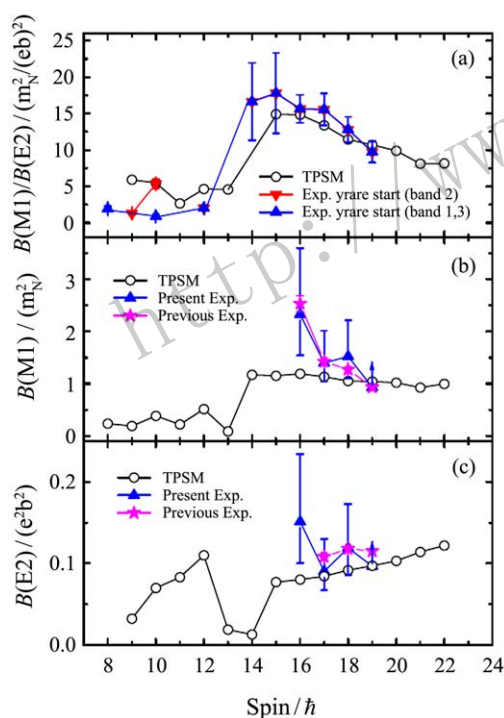


图 8 (在线彩图) ^{106}Ag 磁转动带的绝对电磁跃迁几率比 (a) $B(M1)/B(E2)$ 以及跃迁几率 (b) $B(M1)$ 和 (c) $B(E2)$ [46]

(3) 原子核形变、形状演化、形状共存、形状相变及临界点对称性研究。近年来核结构研究的热点问题如三轴超形变、磁转动、手征转动和摇摆带等都涉及到原子核三轴形变。对于三轴形变, 一般都

是通过位能面计算给出, 没有直接的实验证据。我们用 DSAM 测定了 ^{129}Ce [49–50] 的能级寿命, 提取约化跃迁几率和跃迁四极矩, 并从实验的 Routhian 提取能量旋称劈裂, 进而得到核形状的三轴性信息。研究结果表明: ^{129}Ce 核的负宇称带, 随着自旋值的增加, 回弯后 γ 形变由负值变为趋于零度。而在正宇称带中, γ 形变一直是正值, 没有发生变化。在负宇称带中, 回弯后电四极矩 Q_t 的平均值为 4.13 eb, 对应的转动惯量 $J^{(1)}$ 的平均值为 $50.7 \text{ MeV}^{-1}h^2$ 。求解 Q_t 和 $J^{(1)}$ 联立方程 [48–49] 得到 $\gamma = 4.30^\circ \pm 2.80^\circ$, $\beta_2 = 0.27 \pm 0.02$; 在正宇称带中, 回弯后电四极矩 Q_t 的平均值为 3.94 eb 对应的转动惯量 $J^{(1)}$ 的平均值为 $51.8 \text{ MeV}^{-1}h^2$ 。求解得到 $\gamma = 11.80^\circ \pm 2.60^\circ$, $\beta_2 = 0.28 \pm 0.02$ 。另外, 从实验中提取的负宇称带的 $B(M1)/B(E2)$ 值在自旋值 $15/2^-$ 至 $25/2^-$ 之间呈现出摇摆特性, 与能量旋称劈裂相一致。为确认负宇称带在低自旋时存在三轴形变提供了实验证据 [49–50]。

原子核的形状一直是核结构研究的热点问题。当一个原子核处在不同形状之间的能量相差不大时, 会存在一个与基态形状不同的低激发态, 原子核同时呈现出两个不同的形状, 这种现象就叫做形状共存 [47]。原子核的稳定形状随着同位旋或角动量等发生变化称为形状演化。原子核的形状会随着其质子数和中子数的变化而发生相变。原子核的形状相变 [55–57] 不同于常见的热力学相变, 而是基态和低激发态的平衡形状和结构的量子相变。这产生了研究处于相变点原子核结构的临界点对称性这一新的研究领域 [51–52]。

我们通过测量感兴趣原子核的能级寿命, 对原子核的形状演化、形状共存、形状相变及临界点对称性等物理热点问题进行了一些研究。其中, 采用多普勒线移衰减法测量了 $^{176,178}\text{Os}$ [53–54] 两核高自旋态能级寿命, 提取了约化跃迁四极矩 Q_t , 并与 IBM 理论计算结果进行了比较。对于 ^{176}Os , 在 10^+ 态以下, X(5) 理论预言与实验值符合得很好, 但随着自旋增加, 在 10^+ 态以上, 跃迁电四极矩达到最大并趋于常数, 这与 10^+ 态以上 SU(3) 的计算结果相一致, 展现出轴对称转子的特征 [53]。对于 ^{178}Os , 核形状在 14^+ 以下一直维持 X(5) 对称性, 其形状演化的情况和 ^{176}Os 类似 [54]。

此外, 我们利用延迟符合法测量了 ^{174}Os [58] 和 ^{178}Pt [59] 第一个 2^+ 态寿命, 开展了同位素链 (或同中子素链) 中原子核基态的形状相变及形状共存的研究。如图 9 和图 10 所示, ^{174}Os 的 2^+ 态 $B(E2)$ 值在 Os 同位素 $B(E2)$ 值随着中子的变化趋势中最大, W 和 Os 同位素展现出相同的趋势, 但在更轻的 Yb 和 Hf 同位素

中却表现出不一样的变化趋势。W与Os同位素的这种 $B(E2)$ 值随着中子演化的异常可能是由 $N=98$ 的中子壳隙和大变形的质子 $h_{9/2}$ 闯入轨道共同的影响造成的^[58]。对于 ^{178}Pt ,如图11所示,生成坐标法的理论计算很好地再现了Pt同位素实验结果,并且认为轻Pt同位素中低自旋态存在组态混合,为更好地理解轻Pt同位素中的形状共存现象提供了重要的信息^[59]。

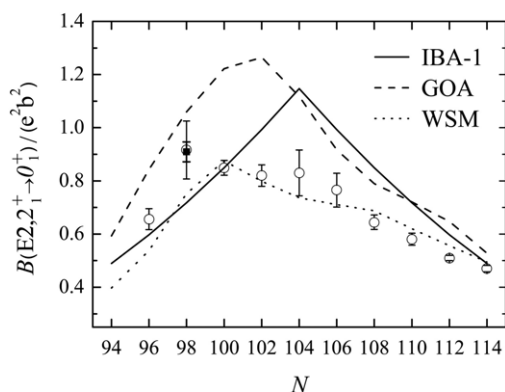


图9 Os同位素的 $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 值随着中子数变化图

文献[58]测量的实验结果用实心方块覆盖在原来的实验结果上面,图中同时给出了不同几个模型的理论预测结果^[58]。图中的实验数据来自文献[58]及其参考文献。

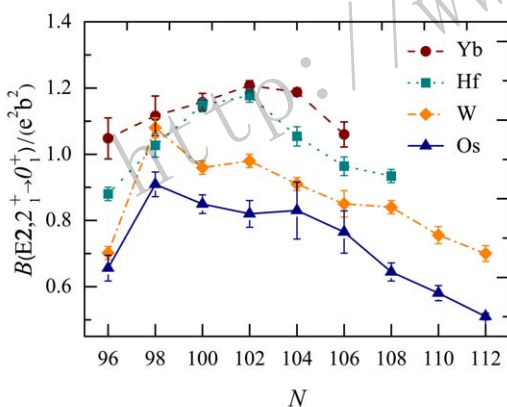


图10 (在线彩图)Os, W, Hf, Yb同位素的 $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 值随着中子数变化图^[58]

图中的实验数据来自文献[58]及其参考文献

对于 ^{174}Os 和 ^{178}Pt 两个核,都只用延迟符合法测量了低自旋的 2^+ 态寿命,在此基础上我们还尝试将该方法用于测量 ^{189}Hg 中 $33/2^+$ (图5)和 $25/2^-$ 能级的寿命,该工作详细的讨论近期将开展。

最近,我们还利用Plunger装置测量了 ^{180}Pt ^[60] 4^+ 到 8^+ 态的寿命,实验和理论计算结果及其系统学比较如图12所示。如图12(b)所示,实验提取的 ^{180}Pt $B(E2)$ 值随自旋增加而变大,表现出了与 ^{178}Pt 相似的

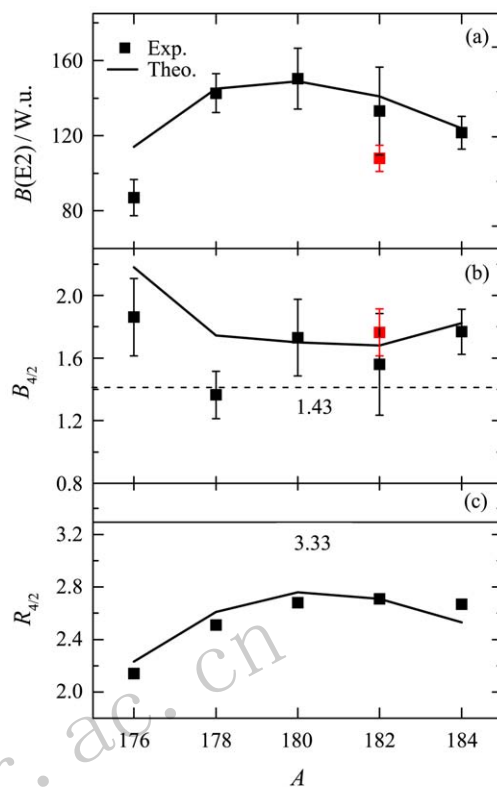


图11 (在线彩图)中子数在 $98 \leq N \leq 106$ 的Pt同位素中(a) $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 、(b)基带的第一个 4^+ 态和第一个 2^+ 态的跃迁几率比值 $B_{4/2}$ 和(c)基带的第一个 4^+ 态和第一个 2^+ 态的能量比值 $R_{4/2}$ 系统学比较其中 $N=100$ 为文献[59]实验值,其余实验数据来自核数据表,实线为生成坐标法理论计算结果^[59]

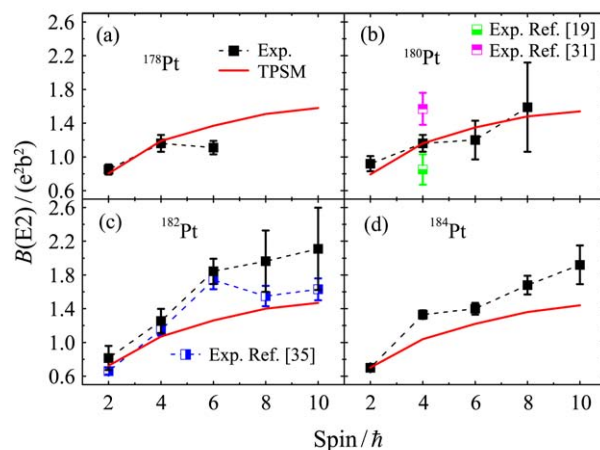


图12 (在线彩图)三轴投影壳模型计算的 $^{178,180,182,184}\text{Pt}$ 晕带 $B(E2)$ 值(实线)与实验数据比较图片取自文献[60]中的图8

转子特性,但是 $B(E2)$ 值在低自旋区域增加并不是很快,没有展现出与 $^{182,184}\text{Pt}$ 相似的典型形状共存的特征。利用三轴投影壳模型计算了 $^{178,180,182,184}\text{Pt}$ 的晕态,能级能量和跃迁几率等理论计算结果与实验相符

合。计算结果还显示, 考虑 γ 自由度之后才能很好地描述 ^{180}Pt 的晕态。另外, 我们还测量了 $^{176}\text{W}^{[61]}$ 低激发态的寿命, 主要研究 W 同位素链的形状演化; 测量了 $^{134}\text{Ce}^{[62]}$ 4 个能态的寿命, 澄清了 $B_{4/2}$ 实验值与传统集体模型的分歧。

4 结语

简要介绍了测量原子核能级寿命的意义。介绍了在中国原子能科学研究院在束 γ 终端上建立的几种寿命测量方法和开展的相关研究工作, 包括原子核手征转动、磁转动以及原子核形状演化、形状共存、形状相变及临界点对称性研究等^[29-32, 45-46, 50, 53-54, 58-61]。除了前文所述研究工作, 本课题组前些年还基于能级寿命测量开展过很多核结构研究工作, 比如原子核扁椭圆形变、八级关联、形状相变等^[63-67]。

未来一段时间之内, 课题组将致力于提升终端的探测能力、继续发展和完善核能级寿命测量的方法。我们正在积极申请相关项目, 准备在中国科学院近代物理研究所的放射性束流线上建造一个用于寿命测量的 Plunger 装置, 为合作组开展相关研究工作创造条件, 并为将来在北京 ISOL、广东惠州 HIAF、广东东莞散裂中子源等大科学装置上开展寿命测量相关的核结构研究工作提供技术储备。我们希望通过测量原子核能级寿命这一非常重要的物理量, 将其应用于上述研究工作之外的其它一些核结构的热点研究中, 比如: 反磁转动和丰中子核的寿命测量。

致谢 感谢 HI-13 加速器工作人员在历次实验中提供高品质的束流, 感谢樊启文为历次实验准备实验用靶。同时, 向参与历次实验的每个人表示感谢。

参考文献:

- [1] WU Zhihua, ZHAO Guoqing, LU Fuquan, *et al.* Experimental Method of Nuclear Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1994: 421. (in Chinese)
(吴志华, 赵国庆, 陆福全, 等. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1994: 421.)
- [2] HUTTER C, KRÜCKEN R, APRAHAMIAN A, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**: 054315.
- [3] TONEV D, ANGELIS G de, PETKOV P, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **96**: 052501.
- [4] TONEV D, ANGELIS G de, BRANT S, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 044313.
- [5] MACH H, GILL R L, MOSZYŃSKI M. Nucl Instr Meth A, 1989, **280**: 49.
- [6] RÉGIS J M. Fast Timing with LaBr₃(Ce) Scintillators and the Mirror Symmetric Centroid Difference Method. Cologne: Univ of Cologne, 2011.
- [7] GASCON J, YU C H, HAGEMANN G B, *et al.* Nucl Phys A, 1990, **513**: 344.
- [8] BRANDOLINI F, RIBAS R V. Nucl Instr Meth A, 1998, **417**: 150.
- [9] PETKOV P, TONEV D, GABLESKE J, DEWALD A, BRENTANO P von. Nucl Instr Meth A, 1999, **437**: 274.
- [10] PETKOV P, TONEV D, DEWALD A, BRENTANO P von. Nucl Instr Meth A, 2002, **488**: 555.
- [11] PETKOV P, DEWALD A, BRENTANO P von. Nucl Instr Meth A, 2006, **560**: 564.
- [12] DEWALD A, MÖLLER O, PETKOV P. Prog Part Nucl Phys, 2012, **67**: 786.
- [13] MOSZYŃSKI M, MACH H. Nucl Instr Meth A, 1989, **277**: 407.
- [14] MACH H, WOHN F K, MOLNÁR, *et al.* Nucl Phys A, 1991, **523**: 197.
- [15] LOEF E V D VAN, DORENBOS P, EIJK C W E van, KRÄMER K W, GÜDEL H U. Nucl Instr Meth A, 2002, **486**: 254.
- [16] DEWALD A, SALA P, WRZAL R, *et al.* Nucl Phys A, 1992, **545**: 822.
- [17] KRÜCKEN R, J Res Natl Inst Stand Technol, 2000, **105**: 53.
- [18] DEWALD A, HARISSOPULOS S, BRENTANO P von. Z Phys A, 1989, **334**: 163.
- [19] BÖHM G, DEWALD A, PETKOV P, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1993, **329**: 248.
- [20] PETKOV P. Nucl Instr Meth A, 1994, **349**: 289.
- [21] FRAUENDORF S, MENG Jie. Nucl Phys A, 1997, **617**: 131.
- [22] KOIKE T, STAROSTA K, HAMAMOTO I. Phys Rev Lett, 2004, **93**: 172502.
- [23] JOSHI P, FINNIGAN S, FOSSAN D B, *et al.* J Phys G, 2005, **31**: S1895.
- [24] WANG Shouyu, ZHANG Shuangquan, QI Bin, *et al.* Chin Phys Lett, 2007, **24**: 644.
- [25] GRODNER E, SREBRNY J, PASTERNAK A A, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **97**: 172501.
- [26] MUKHOPADHYAY S, ALMEHED D, GARG U, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, **99**: 172501.
- [27] MUKHOPADHYAY S, ALMEHED D, GARG U, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**: 034311.
- [28] SUZUKI T, RAINOVSKI G, KOIKE T, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**: 031302(R).
- [29] WANG Lielin, WU Xiaoguang, ZHU Lihua, *et al.* Chin Phys C, 2009, **33(S1)**: 173.
- [30] WU Xiaoguang, WANG Lielin, ZHU Lihua, *et al.* Plasma Sci Technol, 2012, **14**: 526.
- [31] WANG Lielin. Investigation of chiral bands in ^{130}Cs [D]. Jilin: Jilin University, 2010. (in Chinese)
(王烈林. ^{130}Cs 手征双重带研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2010.)
- [32] ZHENG Yun, ZHU Lihua, WU Xiaoguang, *et al.* Chin Phys Lett, 2014, **31**: 062101.
- [33] LARSSON S E, LEANDER G, RAGNARSSON I. Nucl Phys

- A, 1978, **307**: 189.
- [34] HAMAMOTO I, Mottelson B. Phys Lett B, 1983, **132**: 7.
- [35] FRAUENDORF S, MENG J. Z Phys A, 1996, **356**: 263.
- [36] ZHANG Shuangquan, QI Bin, WANG Shouyu, *et al.* Phys Rev C, 2007, **75**: 044307.
- [37] QI Bin, MENG Jie, ZHANG Shuangquan, *et al.* Phys Lett B, 2009, **675**: 175.
- [38] CLARK R M, WADSWORTH R, PAUL E S, *et al.* Phys Lett B, 1992, **275**: 247.
- [39] BALDSIEFEN G, HÜBEL H, MEHTA D, *et al.* Phys Lett B, 1992, **275**: 252.
- [40] KUHNERT A, STOYER M A, BECKER J A, *et al.* Phys Rev C, 1992, **46**: 133.
- [41] CLARK R M, MACCHIAVELLI A O. Ann Rev Nucl Part Sci, 2000, **50**: 1.
- [42] HÜBEL H. Prog Part Nucl Phys, 2005, **54**: 1.
- [43] GAO Zaochun, CHEN Yongshou, SUN Yang. Phys Lett B, 2006, **634**: 195.
- [44] AMITA, JAIN A K, SINGH B. At Data Nucl Data Tables, 2000, **74**: 283.
- [45] YAO Shunhe, MA Hailiang, ZHU Lihua, *et al.* Phys Rev C, 2014, **89**: 014327.
- [46] ZHENG Yun, ZHU Lihua, CHEN Yongshou, *et al.* Sci China-Phys Mech Astron, 2014, **57**: 1669.
- [47] IACHELLO F, ZAMFIR N V, CASTEN R F. Phys Rev Lett, 1998, **81**: 1191.
- [48] PRICE H G, LISTER C J, VARLEY B J, GELLETLY W, OLNESS J W. Phys Rev Lett, 1983, **51**: 1842.
- [49] LIU Ying. Signature splitting and triaxiality in $^{129}\text{Ce}[D]$. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2008. (in Chinese) (刘颖. ^{129}Ce 核旋称劈裂与三轴性研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2008.)
- [50] LIU Ying, WU Xiaoguang, ZHU Lihua, *et al.* Chin Phys C, 2009, **33(S1)**: 212.
- [51] IACHELLO F. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 3580.
- [52] IACHELLO F. Phys Rev Lett, 2001, **87**: 052502.
- [53] HAO Xin, ZHU Lihua, WU Xiaoguang, *et al.* J Phys G: Nucl Part Phys, 2011, **38**: 025102.
- [54] HAO Xin, ZHU Lihua, WU Xiaoguang, *et al.* Chin Phys Lett, 2011, **28**(11): 112101.
- [55] IACHELLO F, ARIMA A. The Interacting Boson Model. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [56] GILLMORE R. J Math Phys, 1979, **20**: 891.
- [57] FRANK A. Phys Rev C, 1989, **39**: 652.
- [58] LI Congbo, CHEN Fangqi, WU Xiaoguang, *et al.* Phys Rev C, 2012, **86**: 057303.
- [59] LI Congbo, WU Xiaoguang, LI Xianfeng, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 047302.
- [60] CHEN Qiming, WU Xiaoguang, CHEN Yongshou, *et al.* Phys Rev C, 2016, **93**: 044310.
- [61] LI Congbo, MA Hailiang, WU Xiaoguang, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**: 044307.
- [62] ZHU Baoji, LI Congbo, WU Xiaoguang, *et al.* Phys Rev C, Accepted.
- [63] LI Guangsheng, DAI Zhengyu, WEN Shuxian, *et al.* Z Phys A, 1996, **356**: 119.
- [64] LI Guangsheng, DAI Zhengyu, LIU Xiangnan, *et al.* Eur Phys J A, 1998, **1**: 379.
- [65] WU Xiaoguang, LI Guangsheng, PENG Zhaohua, *et al.* Chin Phys Lett, 2001, **18**: 505.
- [66] LI Guangsheng, MENG Rui, ZHU Lihua, *et al.* Chin Phys Lett, 2003, **20**: 475.
- [67] LI Guangsheng, MENG Rui, ZHU Lihua, *et al.* Chin Phys Lett, 2004, **21**: 461.

Nuclear Structure Studies Based on the Lifetime Measurements of Excited States in Nuclei at the in-beam γ Terminal of HI-13 Tandem Accelerator

ZHENG Yun¹, WU Xiaoguang¹, LI Guangsheng¹, LI Congbo¹, CHEN Qiming¹, ZHU Lihua^{2,3},
HE Chuangye¹, HAO Xin^{1,2}, WANG Lielin¹, YAO Shunhe¹, LIU Ying¹, LI Lihua¹,
WANG Jinlong¹, ZHONG Jian¹, ZHOU Wenkui¹, DEN Litao¹, ZHU Baoji¹

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The significance and principle of lifetime measurements of excited states in nuclei are briefly described. By using the recoil-distance Doppler-shift method, the Doppler-shift attenuation method, and the fast-timing technique established at the in-beam γ terminal of HI-13 tandem accelerator, nuclear structure studies on topical subjects including chiral symmetries and magnetic rotation have been performed. Our experimental results indicate that ^{130}Cs shows better chiral characteristics, however, the two candidate bands of ^{106}Ag could not be a pair of chiral doublet bands. For magnetic rotation, the deduced $B(\text{M}1)$ values deduced from the measured level lifetimes clearly demonstrate that the yrast positive-parity band in ^{106}Ag and both the yrast positive- and negative-parity bands in ^{107}Ag are magnetic rotation bands. In addition, our lifetime measurement data also provide valuable experimental evidences for the interpretation and understanding of the shape evolution, the shape coexistence, and the critical-point symmetries of shape phase transition in the different isotope chains.

Key words: level lifetime; nuclear structure; doppler-shift attenuation method; recoil distance doppler-shift; fast-timing delayed coincidence

Received date: 7 Jun. 2016; **Revised date:** 25 Jul. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11305269, 11375267, 11475072, 11405274, 11205068, 11175259)

Corresponding author: WU Xiaoguang, E-mail: wxg@ciae.ac.cn.