

符合模式下的 γ 射线各向异性度测量*

郑勇 周小红 柳敏良 刘忠 何建军 郭应祥
雷相国 张玉虎 罗万居

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了符合模式下 γ 射线的各向异性度测量方法以及由此来指定 γ 射线跃迁多极性的原理. 结合在具体物理实验中的探测器布局, 讨论了影响此方法准确性的因素. 通过提取已知跃迁多极性的 γ 射线的各向异性度系数, 说明了各向异性度方法是可靠的. 总结此方法与传统的角分布和 DCO 测量方法相比所具有的优越性.

关键词 各向异性度测量 γ 射线 γ 跃迁多极性

1 引言

在重离子诱发的熔合蒸发反应中, 蒸发余核激发态的角动量在与束流方向垂直的平面内高度取向, 这些具有空间取向核态的退激 γ 跃迁在空间中的强度分布具有各向异性. 在早期的在束 γ 谱学研究中就是通过测量 γ 射线的角分布来提取它们的跃迁多极性信息, 进而指定相关核态的角动量. 随着现代 γ 射线探测器系统大型化的发展, 采用的探测器数目不断增加, 探测器的相对位置也被固定下来, 因而传统的角分布测量方法的应用受到了限制. 人们进而发展了测量退激空间取向核态的 γ 射线之间角关联的方法, 即 DCO (Directional Correlation of γ rays Deexciting the Oriented States) 测量^[1]. 在考虑了探测器的空间布局情况后, DCO 测量可与 γ - γ 符合测量同时进行, 简化了实验, 节省了测量时间. 更为重要的是 DCO 测量是在符合模式下进行的, 它可以给出在单谱中受沾污的 γ 射线的跃迁多极性信息. 但其不足之处在于需要用已知跃迁多极性的 γ 射线开门, 因此不能应用于能级结构信息完全不知道的空白核, 另外对于退激高角动量核态的 γ 跃迁, 往往由于统计量不足而很难提取出可靠的 DCO 系数. 最近几年, 人们在高自旋核结构研究中发展了符合模式下的 γ 射线各向异性度 ADO (Angular Distribution of γ rays Deexciting the Oriented States) 测量方法. 并基于此方法成功地指定了 γ 跃迁的多极性^[2]. 本文将结合 ^{145}Tb 核的高自旋态研究实验^[3] 来较深入地介绍和探讨 ADO 测量方法.

2001-10-23 收稿

* 国家自然科学基金(1000512), 中国科学院百人计划经费和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

2 原理

此方法的测量原理就是由实验提取的 ADO 系数值判定相应 γ 射线的跃迁多极性. 在进行 γ - γ 符合测量时, 将所使用的探测器按它们与束流方向的夹角分为大角度 θ_L 、中间角度 θ_M 和小角度 θ_S 3 组. 在离线数据处理时把位于 θ_S 和 θ_L 角度位置处的两组探测器所记录到的 γ 射线的能量值分别放到两个矩阵的 y 轴上, 与之符合的其他 γ 射线, 不论被哪一组探测器所记录, 都把其能量值放到矩阵的 x 轴, 从而建立了两个不对称的符合矩阵. 通过选用较强的 γ 射线对这两个矩阵的 x 轴总投影谱开门并向 y 方向投影, 得到分别对应于 θ_S 和 θ_L 角度的两个投影谱. 对于级联跃迁 γ_1 和 γ_2 , 定义 γ_1 的 ADO 系数为 γ_1 在 γ_2 的上述两个投影谱中强度之比, 其比值要进行相对探测效率修正. 即 γ_1 的 ADO 系数 $R_{\text{ADO}}(\gamma_1)$ 为

$$R_{\text{ADO}}(\gamma_1) = \frac{I_{\gamma_2}^{\theta_S}(\gamma_1)/I_{\gamma_2}^{\theta_L}(\gamma_1)}{\varepsilon_{\theta_S}(\gamma_1)/\varepsilon_{\theta_L}(\gamma_1)}, \quad (1)$$

其中 $I_{\gamma_2}^{\theta_S}(\gamma_1)$ 和 $I_{\gamma_2}^{\theta_L}(\gamma_1)$ 分别表示以 γ_2 开门的对应于 θ_S 和 θ_L 角度的投影谱中 γ_1 的强度, $\varepsilon_{\theta_S}(\gamma_1)$ 和 $\varepsilon_{\theta_L}(\gamma_1)$ 表示位于 θ_S 和 θ_L 角度位置处的探测器组对 γ_1 的探测效率. 假设 γ_1 和 γ_2 的总强度为 A_0 , 它们的归一化角分布函数分别为 $\omega_{\gamma_1}(\theta)$ 和 $\omega_{\gamma_2}(\theta)$, 则有

$$\begin{aligned} I_{\gamma_2}^{\theta_S}(\gamma_1)/I_{\gamma_2}^{\theta_L}(\gamma_1) = & \\ & \frac{A_0 \cdot \omega_{\gamma_1}(\theta_S) \cdot \varepsilon_{\theta_S}(\gamma_1) \cdot \left[\frac{N_{\theta_S} - 1}{N_{\theta_S}} \cdot \omega_{\gamma_2}(\theta_S) \cdot \varepsilon_{\theta_S}(\gamma_2) + \omega_{\gamma_2}(\theta_M) \cdot \varepsilon_{\theta_M}(\gamma_2) + \omega_{\gamma_2}(\theta_L) \cdot \varepsilon_{\theta_L}(\gamma_2) \right]}{A_0 \cdot \omega_{\gamma_1}(\theta_L) \cdot \varepsilon_{\theta_L}(\gamma_1) \cdot \left[\omega_{\gamma_2}(\theta_S) \cdot \varepsilon_{\theta_S}(\gamma_2) + \omega_{\gamma_2}(\theta_M) \cdot \varepsilon_{\theta_M}(\gamma_2) + \frac{N_{\theta_L} - 1}{N_{\theta_L}} \cdot \omega_{\gamma_2}(\theta_L) \cdot \varepsilon_{\theta_L}(\gamma_2) \right]}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 N_{θ_S} 和 N_{θ_L} 分别表示在 θ_S 和 θ_L 角度位置上的探测器数目, $\varepsilon_{\theta_M}(\gamma_2)$ 表示位于 θ_M 的探测器组对 γ_2 的探测效率. 如果位于同一角度处的探测器具有不同的探测效率, 上式近似成立. 将其代入(1)式可得

$$R_{\text{ADO}}(\gamma_1) = \frac{\omega_{\gamma_1}(\theta_S)}{\omega_{\gamma_1}(\theta_L)} \cdot f_{\text{ADO}}, \quad (3)$$

其中:

$$f_{\text{ADO}} = \frac{C - \frac{1}{N_{\theta_S}} \cdot \omega_{\gamma_2}(\theta_S) \cdot \varepsilon_{\theta_S}(\gamma_2)}{C - \frac{1}{N_{\theta_L}} \cdot \omega_{\gamma_2}(\theta_L) \cdot \varepsilon_{\theta_L}(\gamma_2)}, \quad (4)$$

$$C = [\omega_{\gamma_2}(\theta_S) \cdot \varepsilon_{\theta_S}(\gamma_2) + \omega_{\gamma_2}(\theta_M) \cdot \varepsilon_{\theta_M}(\gamma_2) + \omega_{\gamma_2}(\theta_L) \cdot \varepsilon_{\theta_L}(\gamma_2)], \quad (5)$$

定义 f_{ADO} 为 $R_{\text{ADO}}(\gamma_1)$ 的影响因子. 可见, 若 f_{ADO} 等于 1, 则 γ_1 的 ADO 系数等于它的各向异

性度. ADO 测量实质上就是符合模式下的角分布测量. 显然, 当位于大、小角度位置处的探测器数目足够多时, f_{ADO} 近似等于 1.

3 实验结果和讨论

下面, 将结合 ^{145}Tb 核的高自旋态研究实验进一步分析 f_{ADO} 对 ADO 系数的影响程度. 在 ^{145}Tb 核的实验过程中, 探测器布局情况如下: 12 套 (BGO)HPGe 探测器被分成 3 组, 每组 4 套, 分别置于与束流方向成夹角为小 ($\pm 32^\circ$)、中 ($\pm 58^\circ$)、大 (90°) 角度的位置上. 实验中利用 ^{152}Eu 和 ^{133}Ba 标准源对这些探测器进行了相对探测效率刻度. 因为所用 HPGe 探测器是具有相同结构的标准探测器, 且它们与靶的距离大致相等, 因此它们对 γ 射线的探测效率曲线应近似相同. 位于不同角度的探测器组的总探测效率为组内各探测器的探测效率之和.

由(3)式可知, 除了探测器的布局及组各探测器对 γ_2 的探测效率外, 影响因子 f_{ADO} 还与 γ_2 的角分布函数有关. 若 γ_2 能量已知, 基于实验得到的各组探测器的探测效率曲线和给定的 γ_2 的角分布函数, 就能通过(2)式算出 f_{ADO} 的大小. 为了直观地说明 f_{ADO} 对 $R_{\text{ADO}}(\gamma_1)$ 的影响程度, 我们选取 γ_2 的能量从 100 到 1500keV, 步长为 50keV, 计算在此能量范围内 f_{ADO} 的值偏离 1 的百分量 Δf_{ADO} (即 $\Delta f_{\text{ADO}} = (f_{\text{ADO}} - 1) \times 100$). 图 1(a)和(b)给出了 γ_2 分别为偶极和四极跃迁时 Δf_{ADO} 值随 γ_2 能量的变化情况.

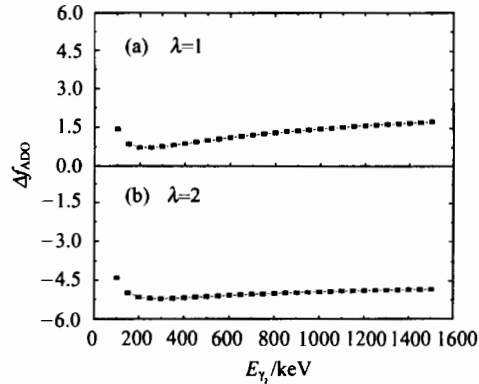


图 1 当 γ_2 为偶极跃迁(a)和四极跃迁(b)时 Δf_{ADO} 随 E_{γ_2} 的变化曲线

由图 1 可见, 当 γ_2 为四极跃迁时 $|\Delta f_{\text{ADO}}|$ 的最大值约为 5.2%; 当 γ_2 为偶极跃迁时 $|\Delta f_{\text{ADO}}|$ 的最大值约为 3.2%. 因此, 无论 γ_2 的跃迁多极性如何, f_{ADO} 对 γ_1 的各向异性度的影响均比较小. 一般情况下, 在用重离子熔合蒸发反应产生原子核的高自旋态时, 纯偶极跃迁的各向异性度在 0.7 左右, 而纯四极跃迁的各向异性度在 1.3 左右. 当 $|\Delta f_{\text{ADO}}|$ 的最大值在 5% 以内时, 纯偶极跃迁和四极跃迁的 ADO 系数应明显地分为两组. 综上所述, ADO 系数对于 γ 射线多极性的指定具有较强的可靠性, 特别在一些大型 γ 探测装置上, 由于位于各角度的探测器数目很多, 通过 ADO 系数测量应能可靠地指定 γ 射线的多极性.

在 ^{145}Tb 的高自旋核结构研究中, 所获取的实验数据包括了其邻近核 ^{144}Gd , ^{143}Gd , ^{142}Gd , ^{143}Eu , ^{146}Tb 等已知 γ 射线的信息. 我们提取了这些已知跃迁多极性的 γ 射线的 ADO 系数, 这些 ADO 系数的指定结果都和基于角分布测量和 DCO 测量的结果相符. 由此从实验上验证了采用 ADO 测量进行 γ 跃迁多极性指定的可靠性. 图 2 给出了 ^{145}Tb 和其邻近核的 γ 跃迁的 ADO 系数, 可见这些 ADO 系数比较明显地分成两组. 由邻近核中已知跃迁

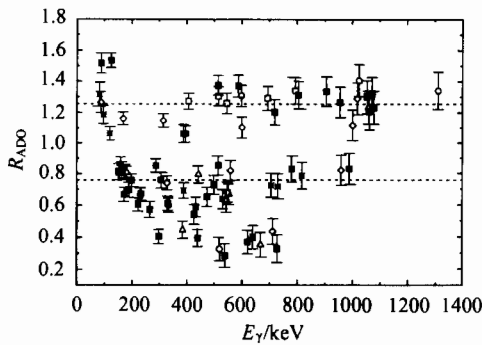


图 2 ^{145}Tb (■)的 γ 跃迁的 ADO 系数

图中同时给出了 ^{143}Gd (○), ^{142}Gd (□), ^{143}Eu (△),
 ^{146}Tb (*)和 ^{144}Gd (◇)已知跃迁多极性的 γ 射线
的 ADO 系数.

性,采用 ADO 系数法要明显优于 DCO 系数法. 另外,由 ADO 系数测量的原理可知,ADO 符合矩阵是通过处于大(小)角度位置的探测器记录到的 γ 射线与所有参加测量的探测器记录的 γ 射线发生符合从而建立起来的,对于文中所述的探测器布局,可提供给 ADO 矩阵的探测器组合数达 38,而对于 DCO 矩阵,所能提供的组合数仅为 16,前者是后者的 2 倍多. 因而 ADO 系数法所具有的统计量要比 DCO 系数法高得多. 综上所述,ADO 系数测量作为一种指定 γ 跃迁多极性的测量方法,其可靠性在具体的应用中得到了证明. 该方法具有 DCO 测量方法的简化实验、节省束流时间等优点,以及可提取在单谱中受沾污的 γ 射线的跃迁多极性信息的能力,特别重要的是它所具有的高的统计量和处理空白核的能力是 DCO 测量无法比拟的.

多极性的 γ 射线的 ADO 系数得到纯四极跃迁的 ADO 系数取值为 1.25 左右,而纯偶极跃迁的 ADO 系数取值为 0.75 左右, M1 和 E2 的混合跃迁的 ADO 系数则介于这两组之间. 由此定出了 ^{145}Tb 的 γ 跃迁的多极性. 由于篇幅所限,我们将在另外的文章中对 ^{145}Tb 高自旋态能级的建立进行具体描述.

4 总结

由前面的讨论可知,开门 γ 射线的跃迁多极性不会对 ADO 测量的指定结果造成明显影响. 因此,对于指定空白核 γ 射线的跃迁多极

参考文献 (References)

- 1 Krämer-Flecken A, Morek T, Lieder R M et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, **A275**:333
- 2 ZHANG C T, Bhattacharyya P, Daly P J et al. Nucl. Phys., 1998, **A628**:386
- 3 ZHOU X H, ZHENG Y, ZHANG Y H et al. Eur. Phys. J., 2001, **A12**:253—255

γ -Ray Anisotropy Measurement in Coincidence Mode *

ZHENG Yong ZHOU Xiao-Hong LIU Min-Liang LIU Zhong HE Jian-Jun

GUO Ying-Xiang LEI Xiang-Guo ZHANG Yu-Hu LUO Wan-Ju

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

Abstract In order to assign γ -ray multipolarity, a method of ADO ratios deduced from coincidence data has been described. The factors affecting the reliability of the ADO ratios have been discussed using an experimental detector configuration. The multipolarities for known γ rays deduced by the ADO method are consistent with the previous results obtained from γ -ray angular distribution and DCO ratio measurements. This consistence proves that the ADO method is reliable. The advantages of the ADO method over the traditional DCO ratio measurement have been discussed.

Key words ADO ratio, γ -ray, γ -ray multipolarity

Received 23 October 2001

* Supported by National Natural Sciences Foundation of China (1000512), 100 Talents Programme of Chinese Academy of Sciences, and Major State Basic Research Development Program (G2000077400)