

Clover探测器的极化测量*

方永得^{1,2} 张玉虎^{1;1)} 周小红¹ 郭应祥¹ 雷祥国¹
郭松^{1,2} 滑伟^{1,2} 马龙¹ 郭文涛¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 介绍了利用 Clover 探测器测量 γ 射线的线性极化方法. 用 ^{60}Co 源对其进行测试, 有效地测量了 γ 射线的电磁属性, 从而确定了能级的宇称.

关键词 极化测量 Clover 探测器 灵敏度 康普顿谱仪

1 引言

γ 射线的角分布测量和极化测量对 γ 谱学的研究有着重要的意义, 它们是研究原子核核态属性的重要工具. 对 γ 射线的角分布测量可以确定 γ 射线的多极性^[1], 而确定 γ 射线的电磁性质, 则需借助于 γ 射线的线性极化测量, 并且通过测量其线性极化度可以精确地给出混合比系数 δ ^[2, 3]. 综合这些信息就能确定原子核从一个核态跃迁到另一个核态的自旋和宇称的变化以及 γ 射线的跃迁混合比, 这可为原子核结构研究提供重要的信息. 近年来由于新探测器的出现, 特别是 Clover^[4] 探测器的出现使得 γ 射线的极化测量变得相对容易. 本文介绍了 γ 射线极化测量的基本原理及实验上的实现, 利用 ^{60}Co 放射源的两条级联 γ 跃迁对中国科学院近代物理研究所的 16 路 EXOGAM-Segmented-Clover^[5] 探测器进行了极化测量的实验, 并对结果进行了详细的分析和讨论.

2 原理

2.1 γ 射线的极化

总体具有轴取向 (axially oriented) 的原子核发射出的 γ 射线是线性极化的, 其角分布由以下公式给

出^[2, 3, 6]:

$$W(\theta, \varepsilon) = \frac{d\Omega}{8\pi} \sum_{\lambda=\text{even}} B_{\lambda} U_{\lambda} [A_{\lambda} P_{\lambda}(\cos\theta) + 2A_{\lambda 2} P_{\lambda 2}^{(2)}(\cos\theta) \cos 2\varepsilon], \quad (1)$$

其中 B_{λ} 是取向核的方向张量, U_{λ} 是取向核的退极化系数 (deorientation coefficients), 它表明发射 γ 射线后的取向核的方向性效应; A_{λ} 是角分布相关项, 它依赖于给定的 γ 射线跃迁的多极性; $A_{\lambda 2}$ 是极化角分布相关项, 它依赖于发射出的 γ 射线跃迁的电磁属性; θ 为取向轴与放射的 γ 射线方向之间的夹角, ε 为放射出的 γ 射线的电矢量 \mathbf{E} 方向与反应平面 (取向轴和放射 γ 射线方向所组成的平面) 之间的夹角, 它们之间的关系如图 1 所示.

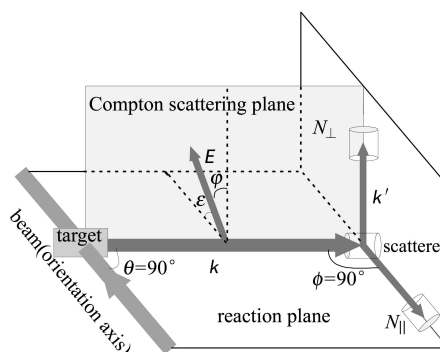


图 1 极化测量原理图

2006 - 12 - 26 收稿

* 国家自然科学基金 (10375077, 10221003), 国家重点基础研究发展规划项目基金 (G2000077400) 和中国科学院基金资助
1) E-mail: djer@impcas.ac.cn

γ 射线的线性极化度表示为^[6, 7]

$$P(\theta) = \frac{W(\theta, \varepsilon = 0) - W(\theta, \varepsilon = \pi/2)}{W(\theta, \varepsilon = 0) + W(\theta, \varepsilon = \pi/2)}, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式可得

$$P(\theta) = \frac{\sum_{\lambda=\text{even}} a_{\lambda}^{(2)} P_{\lambda 2}^{(2)}(\cos \theta)}{\sum_{\lambda=\text{even}} A_{\lambda \lambda} P_{\lambda}(\cos \theta)}, \quad (3)$$

其中 $a_{\lambda}^{(2)} = B_{\lambda} U_{\lambda} A_{\lambda 2}$ 为线性极化角分布系数, $A_{\lambda \lambda} = B_{\lambda} U_{\lambda} A_{\lambda}$ 为角分布系数. 定义混合系数^[8] $H_{\lambda}(LL') = 2a_{\lambda}^{(2)}/A_{\lambda \lambda}$, L 为 γ 射线的角动量. 当 $\theta = \pi/2$ (理论计算此处极化度最大), $\lambda_{\text{even}} \leq 4$, 代入(3)式可得

$$P_{\text{cal}}(\pi/2) = \pm \frac{3A_{22}H_2(LL') - 7.5A_{44}H_4(LL')}{2 - A_{22} + 0.75A_{44}}, \quad (4)$$

+ 对应电跃迁, - 对应磁跃迁. A_{22} , A_{44} 的值为实验角分布系数^[9], 混合系数 $H_{\lambda}(LL')$ 的值可由理论计算得到^[8, 10].

2.2 线性极化的康普顿散射测量

在实验测量 γ 射线极化度的众多方法中, 因康普顿散射对 γ 射线的极化方向极其敏感, 且适用 γ 射线的能量范围非常宽, 所以一般都选择康普顿散射作为线性极化的测量方法. 散射截面由 Klein-Nishina 方程给出^[11]:

$$\frac{d\sigma_{\varphi}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{k'}{k} \right)^2 \left[\frac{k}{k'} + \frac{k'}{k} - 2\sin^2 \phi \cos^2 \varphi \right], \quad (5)$$

其中 $k' = k/(1 + k/m_0c^2(1 - \cos \phi))$, r_0 为经典电子半径, k, k' 分别为入射和散射光子的能量, ϕ 为散射角, φ 为入射的 γ 光子的极化方向 \mathbf{E} 和散射平面 $(\mathbf{k}, \mathbf{k}')$ 之间的夹角, 角度关系如图 1 所示. 根据散射截面公式, 在与极化面 (入射光子方向和它的极化方向组成的平面) 垂直的方向 ($\varphi = \pi/2$) 散射截面最大, 而在与之平行的方向 ($\varphi = 0$) 截面最小, 因而利用截面与 γ 光子的极化方向 \mathbf{E} 的这种相关性, 就可以用康普顿散射来测量 γ 光子的线性极化度. 在实验上, 通过测量与反应平面平行和垂直的康普顿事件来确定入射光子的极化度. 为了实现测量, 一般采用一个探测器作为散射体, 用另外两个互相垂直的探测器来测量散射出的康普顿事件 (对应垂直和平行事件). 定义 N_{\perp} 和 N_{\parallel} 分别对应实验上所测的与反应平面垂直和平行的康普顿散射 γ 光子的计数 (见图 1), 对于理想的散射体, 其理论值可由

以下两式给出:

$$N_{\parallel} = W(\theta, \varepsilon = 90^\circ) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 90^\circ) + W(\theta, \varepsilon = 0^\circ) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 0^\circ), \quad (6)$$

$$N_{\perp} = W(\theta, \varepsilon = 0^\circ) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 90^\circ) + W(\theta, \varepsilon = 90^\circ) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 0^\circ), \quad (7)$$

结合公式(2)和公式(5)得到极化度的表达式:

$$P(\theta) = \frac{a(E_{\gamma})N_{\perp} - N_{\parallel}}{a(E_{\gamma})N_{\perp} + N_{\parallel}} \times \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 90^\circ) + \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 0^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 90^\circ) - \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 0^\circ)} = \frac{A(\theta)}{Q(\phi, E_{\gamma})}, \quad (8)$$

其中

$$A(\theta) = \frac{a(E_{\gamma})N_{\perp} - N_{\parallel}}{a(E_{\gamma})N_{\perp} + N_{\parallel}},$$

$$Q(\phi, E_{\gamma}) = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 90^\circ) + \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 0^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 90^\circ) - \frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi, \varphi = 0^\circ)},$$

$A(\theta)$ 称为非对称度, 是实验上可测量的量; $a(E_{\gamma})$ 为垂直和平行的两个探测器的效率刻度系数, 其值可用非极化的 γ 光子刻度求出; Q 称为极化灵敏度, 它主要和两个参数有关, 一个是入射 γ 光子的能量, 另一个为实验测量装置的几何布居. 对于给定的实验装置, Q 值是 γ 光子能量的函数, 可以由理论模拟得出, 也可在实验上利用已知极性的 γ 射线拟合得出^[12]. 从(8)式可以得出 $A(\theta)$ 和 $p(\theta)$ 的正负值一致, 测量 $A(\theta)$ 的值就能给出 γ 射线的电磁属性, 而 $p(\theta)$ 的值则能给出 γ 射线混合比系数 δ 的相关信息.

2.3 EXOGAM Segmented Clover 探测器

EXOGAM Segmented Clover (简称 Clover) 探测器^[5] 是中国科学院近代物理研究所利用中国科学院特殊装置项目购买的 16 路位置灵敏的高纯锗探测器. 其结构如图 2 所示, 它由 4 块独立的晶体 (A, B, C, D) 封装而成, 晶体的直径为 60mm, 长度为 90mm, 每个晶体又电分割成 4 小块. 每个晶体可作为一个独立的探测器, 每个小块也可作为一个独立的探测器, 所以共有 20 路信号输出. 本次实验只用到 4 个晶体的信号输出. 如图 2 所示, 实验时把 Clover 探测器放在与束流 (或核取向轴) 垂直的方向上 (此方向 $P(\theta)$ 有最大值). γ 射线入射到任意一个晶体上 (如 D), 与之相邻的两

个晶体 (B, C) 探测到的康谱顿散射光子被认为对应于垂直和平行的康谱顿事件. 所以 A 和 B (C 和 D) 之间的散射并且散射能量加和等于入射 γ 射线总能量时是平行的事件, 记为 N_{\parallel}^{AB} (N_{\parallel}^{CD}), 同理垂直的散射事件记为 N_{\perp}^{AC} (N_{\perp}^{BD}), 则实验的 $A(\theta)$ 非对称度可以表示为

$$A(\theta) = \frac{a(E_{\gamma})(N_{\perp}^{AC} + N_{\perp}^{BD}) - (N_{\parallel}^{AB} + N_{\parallel}^{CD})}{a(E_{\gamma})(N_{\perp}^{AC} + N_{\perp}^{BD}) + (N_{\parallel}^{AB} + N_{\parallel}^{CD})}, \quad (9)$$

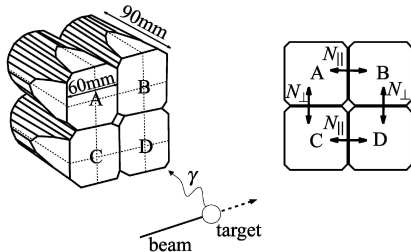


图2 Clover探测器垂直和平行散射事件的定义

3 实验结果和讨论

实验前先对 Clover 进行效率刻度, 求出 $a(E_{\gamma})$ 的值. 利用各向同性的 ^{60}Co 放射源, 通过测量其 1332keV 的 γ 跃迁在 Clover 探测器上发生的平行和垂直的康谱顿散射事件比, 就能确定 $a(E_{\gamma})$ 的值. 刻度时把 ^{60}Co 源放在离 Clover 探测器中心 50cm 处, 获取两重符合事件, 符合时间窗为 80ns. 离线数据处理时, 得到平行和垂直的散射事件分别为

$$N_{\parallel}(1332\text{keV}) = 2873225 \pm 1729,$$

$$N_{\perp}(1332\text{keV}) = 2798319 \pm 1695,$$

由此得到 $a(1332\text{keV}) = N_{\parallel}/N_{\perp} = 1.026768$.

本次实验是对 ^{60}Co 放射源的 1332keV 的 γ 跃迁的电磁属性进行测试. 由于实际中的 ^{60}Co 源的原子核自旋方向是各向同性的, 它放出的 γ 射线既没有角分布效应又没有极化效应, 所以在实验中利用角关联效应进行测量. 实验布局如图3所示, 常规探测器和 Clover 探测器放在相互垂直的方向上并保证它们的中心位于同一个平面, 和源的距离均为 50cm. 当常规探测器探测到 ^{60}Co 的 1173keV 的 γ 跃迁时, 则在符合时间窗里被 Clover 探测器探测到的级联 1332keV 的跃迁具有角分布和极化效应.

具体实验是利用三重符合方法, 即常规探测器和 Clover 探测器中的两路被同时点火时, 我们才认为它是一个符合事件, 符合时间窗设为 80ns. 我们进行了一周的符合测量, 共获取了约 6×10^6 个符合事件. 离线数据处理时, 分别提取平行和垂直的康谱顿符合事件, 做成两个单谱. 图4(a)给出的是 90° 方向垂直和平

行单谱相减后的结果. 分析单谱得到 1332keV γ 射线的平行和垂直的康谱顿散射计数分别为

$$N_{\parallel}(1332\text{keV}) = 60570 \pm 253,$$

$$N_{\perp}(1332\text{keV}) = 61890 \pm 285,$$

所以非对称度

$$A(\theta) = \frac{a(1332)N_{\perp} - N_{\parallel}}{a(1332)N_{\perp} + N_{\parallel}} = \frac{1.026768 \times 61890 - 60570}{1.026768 \times 61890 + 60570} = 0.02396,$$

$A(\theta)$ 为正值表明它是电跃迁. 理论计算得到 ^{60}Co 源的级联 1332keV 的 γ 射线的极化度 $P = 0.1667$, 由此可以得到 Clover 探测器的灵敏度为

$$Q(1332\text{keV}) = \frac{A}{P} = 0.1438,$$

灵敏度是表征极化谱仪优劣的一个量, 对比文献[13]给出小 Clover 探测器在能量 1368keV 时的灵敏度为 0.121, 16 路 Clover 极化谱仪有优越性.

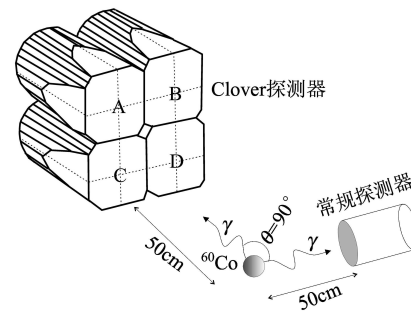


图3 实验探测器布局

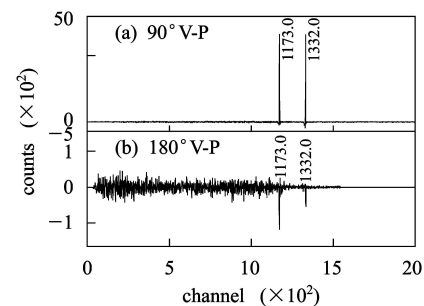


图4 90° 和 180° 垂直减平行单谱的比较

按照极化角分布理论, 当常规探测器和 Clover 探测器的夹角为 180° 时, 极化效应消失 (垂直和平行的计数应该相等). 为了更进一步验证结果, 我们在 180° 的方向作了 24h 符合测量, 图4(b)给出了 180° 方向垂直计数的单谱减去平行计数单谱所得到的谱. 从图中可以看出, 在 90° 方向和 180° 方向明显不一样, 90° 方向垂直计数比平行计数多 (电跃迁), 而 180° 方向垂直计数比平行计数少 (由 $a(E_{\gamma})$ 引起, 效率刻度后相等), 结果和理论符合得很好.

4 结论

本文介绍了重离子核反应中的 γ 射线极化测量方

法, 讨论了 EXOGAM Segmented Clover 探测器作为极化谱议装置的实现, 并用 ^{60}Co 放射源对装置进行了测试, 理论和实验符合得很好, 可以作为极化测量一个可靠的装置.

参考文献(References)

- 1 Rose H J, Brink D M. Rev. Mod. Phys., 1967, **39**: 306
- 2 Falkoff D L. Phys. Rev., 1948, **73**: 518
- 3 Hamilton D R. Phys. Rev., 1948, **74**: 782
- 4 Duchêne G, Beck F A, Twin P J et al. Nucl. Instrum. Methods, 1999, **A432**: 90
- 5 Azaiez F. Nucl. Phys., 1999, **A249**: 1003c
- 6 Hamilton W D. The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy. New York: North-Holland, 1975. 505
- 7 Fagg L W, Hanna S S. Rev. Mod. Phys., 1959, **31**: 711
- 8 Aoki T, Furuno K, Tagishi Y et al. At. Data Nucl. Data Tables., 1979, **23**: 349
- 9 DENG J K, MA W C, Hamilton J H et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **A317**: 242
- 10 Aoki T, Furuno K, Tagishi Y et al. Nucl. Instrum. Methods, 1982, **196**: 421
- 11 Klein O, Nishina Y, Zeits F. Physik., 1929, **52**: 853
- 12 Kim J S, Lee Y K, Hardy K A et al. Phys. Rev., 1975, **C12**: 499
- 13 Jones P M, Wei L, Beck F A et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A362**: 556

Test Experiments of Gamma-Ray Linear Polarization Using a Clover Detector^{*}

FANG Yong-De^{1,2} ZHANG Yu-Hu^{1,1)} ZHOU Xiao-Hong¹ GUO Ying-Xiang¹ LEI Xiang-Guo¹
GUO Song^{1,2} HUA Wei^{1,2} MA Long¹ GUO Wen-Tao¹

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

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract We have investigated the performance of a EXOGAM-Segmented-Clover with 16 segments as a Compton polarimeter to measure the linear polarization of gamma rays. The polarization sensitivity of the Clover detector has been measured at the energy of 1332keV through the coincidence measurements of cascade gamma-rays from ^{60}Co . Experimental values were in good accord with our expectation.

Key words linear polarization, Clover detector, polarization sensitivity, Compton polarimeter

Received 26 December 2006

* Supported by National Natural Sciences Foundation (10375077, 10221003), Major State Basic Research Development Program of China (G2000077400) and Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: djer@impcas.ac.cn