

文章编号: 1007-4627(2017)03-0465-04

^{192}Tl 高自旋态能级结构研究

贺创业, 郑云, 李聪博, 吴晓光, 李广生, 钟健,
陈启明, 朱保吉, 邓立涛, 周文奎, 樊启文
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 通过熔合蒸发反应 $^{181}\text{Ta}(^{16}\text{O}, 5n)^{192}\text{Tl}$, 在入射束流为 97 MeV 能量下, 布居 ^{192}Tl 的高自旋态, 更新了 ^{192}Tl 的能级纲图。共增加 8 条新能级, 尝试性地指定了能级自旋, 将负宇称晕带的能级推高到 $23\hbar$ 。讨论了 ^{192}Tl 与相邻同位素奇奇核 $^{194,196,198}\text{Tl}$ 负宇称晕带的旋称劈裂与反转现象, 发现随着中子数增加, $^{196,198}\text{Tl}$ 在高自旋处出现了旋称反转, 其原因可能是由于中子质子相互作用与科里奥利力相互竞争所致。

关键词: 熔合蒸发反应; 能级纲图; 回弯; 旋称反转

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.465

1 引言

旋称反转是高自旋态研究中的热门课题之一。它是指转动带中非优惠旋称分支能量低于优惠分支能量的反常劈裂模式, 然而, 在正常情况下, 优惠旋称态能量要低于非优惠态。这一现象最早是 20 世纪 80 年代, 在 ^{159}Tm ^[1], ^{157}Ho ^[2,3] 等奇质子核的高自旋态能谱中发现的。后来, 在奇奇核的低自旋区也相继发现了反常的旋称劈裂现象, 引起了核物理学家的极大兴趣, 理论家提出了多种模型来解释旋称反转现象, 但至今仍无定论。重核区原子核基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的转动带在低自旋也普遍存在反常的旋称劈裂^[4-7]。在 Tl 同位素奇奇核 $^{194,196,198}\text{Tl}$ ^[8-10] 中, 它们的负宇称转晕带低自旋都表现为反常的劈裂模式, 但当自旋高于 $18\hbar$ 后, $^{196,198}\text{Tl}$ 演化为正常的劈裂模式, 在 ^{194}Tl ^[10] 中这一现象并没有发生。为了深入理解这一核区的旋称反转现象, 很有必要从实验上进一步扩展 ^{192}Tl ^[11] 的高自旋态。

此外, $A \sim 190$ 区也是原子核手征对称性研究的热点区域, 这一核区手征带的组态都基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 。实验上在 Tl 同位素奇奇核 $^{194,198}\text{Tl}$ ^[9,10] 中已经发现了两例手征带, 尤其是 ^{194}Tl , 无论是在能级能量、顺排角动量, 还是在 $B(\text{M}1)/B(\text{E}2)$ 上, 都表现出了比其它核区更好的手征性。与其它核区不同的是, ^{194}Tl 不仅在低自旋区表现出了较好的手征性, 而且在回弯后, 手

征性还得到了较好的延续, 而在其他区域, 手征对称性都得到一定程度的破坏。迄今为止, ^{194}Tl 是发现的第一例存在四准例子手征对称性的手征候选核。 ^{192}Tl 的能级结构与 ^{194}Tl 极为相似, 能否在 ^{192}Tl 中找到手征对称性, 是实验上极为值得研究的课题。

本实验之前, Kreiner 等^[11], 利用 ^{18}O 和 ^{16}O 分别在 120 和 100 MeV 能量下轰击 ^{181}Ta 生成 ^{192}Tl , 使用两台 Ge(Li) 探测器进行了符合测量, 由于探测设备的限制, 能级信息相对匮乏, 晕带自旋也只推高到 $14\hbar$ 。后来, Liang 等^[12] 利用 ^{37}Cl 束流分别在 178 和 181 MeV 能量下轰击 ^{160}Gd 对 ^{192}Tl 作了进一步研究, 在较高自旋处找到了 6 条超形变带, 但仅给了能谱图, 没有能级纲图。本文报道了本次实验对 ^{192}Tl 最新的初步结果。

2 实验及结果

在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上, 通过重离子熔合蒸发反应 $^{181}\text{Ta}(^{16}\text{O}, 5n)^{192}\text{Tl}$ 布居 ^{192}Tl 的高自旋态。实验靶 ^{181}Ta 的厚度为 1.97 mg/cm^2 , 并带有 1.28 mg/cm^2 的 Pb 衬。用 10 台带 BGO 反康的 HPGe 探测器测量反应产物退激的 γ 射线, 探测器分别放在相对于束流 90° , $\pm 37^\circ$, $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 的方向上。这些探测器的相对探测效率 (^{60}Co 的 1332 keV) 在 20%~40% 之间, 能量分辨率

收稿日期: 2016-11-25; 修改日期: 2017-07-25

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

作者简介: 贺创业(1978-), 男, 河北邯郸人, 研究员, 博士, 从事原子核物理研究; E-mail: hechuangye@126.com。

为 1.9~2.2 keV, 实验前用 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 标准源对探测器进行了能量和效率刻度。

根据统计模型程序 CASCADE^[13] 计算, 并结合加速器所能提供的稳定运行能量, 选取 ^{16}O 束流能量为 97 MeV 进行 γ - γ 符合测量, 一共记录了约 100×10^6 个两重以上的 γ - γ 符合事件。将 γ - γ 符合事件反演生成对称化的 E_γ - E_γ 两维能量矩阵和非对称化的 DCO (directional correlation of oriented state) 矩阵, 分别用于确定 γ 射线之间符合关系和指定 γ 射线跃迁多极性, 进而得到相关能级自旋。

采用基于 PC-Linux 的 RADWARE^[14] 分析软件, 对 ^{192}Tl 已知跃迁 γ 射线开窗, 除清晰地观测到所有已知 γ 射线和前人不确定的 359, 767 和 221 keV 等 γ 射线外, 还辨认出 9 条全新 γ 射线。图 1 给出了已知 γ 射线 276 keV 以及新发现 γ 射线 300 和 773 keV 的示例

开窗谱, 能谱中不仅显示出大部分已知的 γ 射线, 还看到了 773, 381, 615, 341, 315, 300, 81, 260, 221, 354, 342 以及 412 keV 等新 γ 射线。根据 γ - γ 级联关系以及 γ 射线能量和强度平衡原则, 最后基于 7^+ 态建立了 ^{192}Tl 新的能级纲图, 如图 2 所示, 其中 7^+ 态是一条半衰期长达 11 分钟的激发态^[11]。前人通过系统学比较^[11], 建议 8^- 与 9^- 之间存在一条内转换系数很高且能量小于 40 keV 的 γ 射线。根据已知 γ 射线开窗, 在前人工作^[11] 基础上, 本实验将负宇称转晕带推高了 $8\hbar$ 。在本工作之前, $8\hbar$ 能级以上的自旋都是未知的, 本文将 ^{192}Tl 的能级结构与相邻奇奇核 $^{190,194}\text{Tl}$ ^[8, 15] 的能级结构进行了系统学比较, 发现 $^{190,194}\text{Tl}$ 晕带的第一条四极跃迁 336.1 keV 和 374.2 keV 馈入的能级自旋都是 9^- , 因此, 尝试性建议 ^{192}Tl 中能量为 359 keV 的 γ 射线所馈入的能级自旋也为 9^- 。

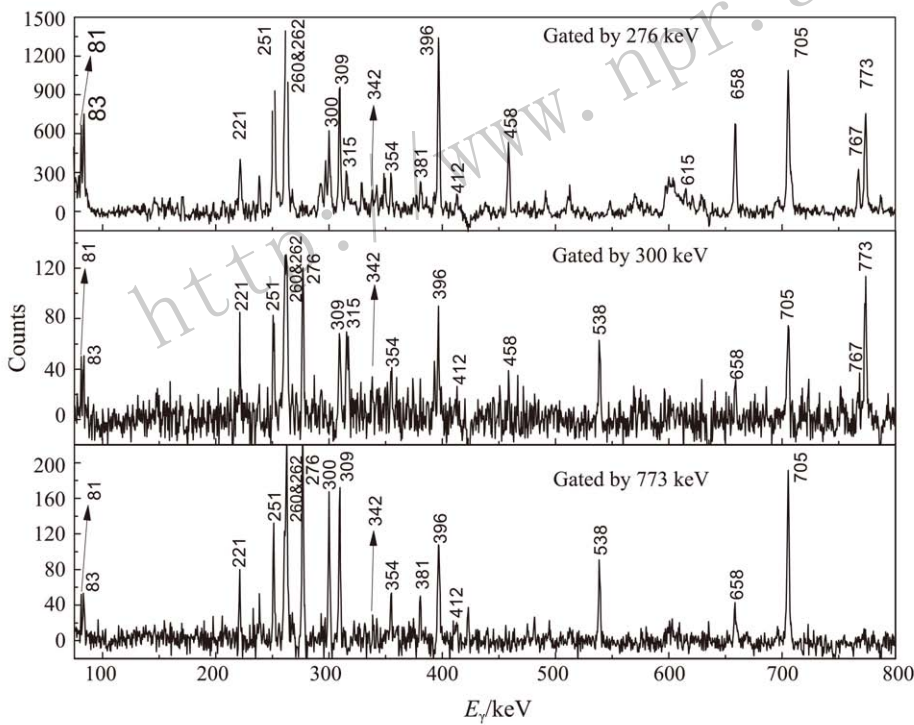


图 1 ^{192}Tl 特征峰示例开窗谱

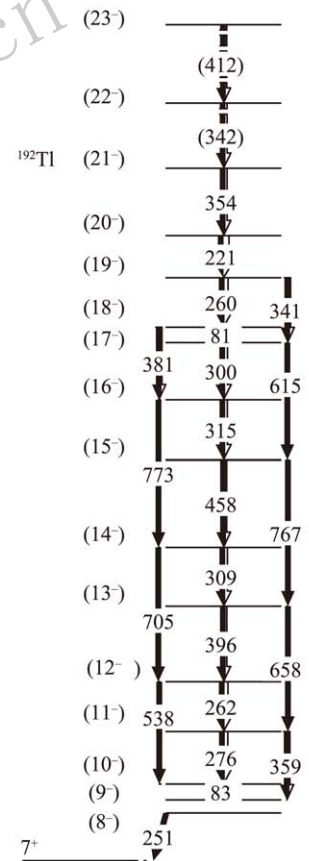


图 2 本工作建议的 ^{192}Tl 新能级纲图

3 物理讨论

旋称 (α) 是描写原子核 180° 转动对称性的一个量子数。对于奇奇核, 优惠的旋称分支定义为 $\alpha_f = [(-1)^{j_p-1/2} + (-1)^{j_n-1/2}] \times 1/2$, 其中 j_p, j_n 分别对

应价质子和价中子的角动量。自旋 I 对应 ($I-j_p-j_n$ =偶数) 的旋称分支对应优惠态, 而自旋对应 ($I-j_p-j_n$ =奇数) 为非优惠态。两旋称分支之间的劈裂程度通常用 $S(I) = [E(I) - E(I-1)]/2I$ 来表示。

^{192}Tl ^[11] 晕带的组态已经被指定为 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$,

根据组态填充, $\alpha = 1$ 的旋称分支为优惠旋称分支, 因此奇自旋分支各能态都为优惠态, 相对偶自旋分支应该能量较低。然而在图 3 给出的 ^{192}Tl 晕带 $S(I) = [E(I) - E(I - 1)]/2I$ 与 I 关系图中看到结果与此相反, 偶自旋分支相对奇自旋分支却在整个过程中一直保持较低的能量。晕带从低自旋开始, 存在一定的旋称劈裂, 随着自旋增加到 $16 \sim 17\hbar$ 附近, 劈裂程度有些许减小, 但并没有改变低自旋反常劈裂的模式。低自旋反常旋称劈裂现象在别的核区也大量存在, 一种合理的解释为中子质子相互作用与科里奥利力的竞争, 在低自旋区中子质子相互作用更占优势。 ^{192}Tl 的质子数为 81, 中子数为 111, 根据它们在 Nilsson 轨道填充, 中子与质子之间为排斥的相互作用。文献 [15,16] 指出, 质子中子全顺排 $11\hbar$ 由于受到很强相互作用的排斥, 使得原子核在 10^- 态以上能量增加更倾向于来自集体的转动, 这样就导致偶自旋分支为优惠的旋称分支, 表现为

能量较低。

图 3 给出了 $^{192,194,196,198}\text{Tl}$ 等 4 个核素负宇称晕带的旋称劈裂随自旋增加的演化关系图。图中看出, 4 个核素在低自旋处, 旋称劈裂的模式相同, 都是偶自旋分支表现为能量较低, 并且它们劈裂的程度都很相似。随着自旋的增加, $^{196,198}\text{Tl}$ 在 $18\hbar$ 处出现反转, 奇自旋分支变为能量较低的分支; 然而, $^{192,194}\text{Tl}$ 在自旋 $18\hbar$ 处并没有出现反转, 偶自旋分支在高自旋处继续保持优惠, 出现这样的现象值得深究。文献 [17] 指出, 中子与质子的相互作用大小随着 $N-Z$ (中子数减质子数) 的增加而减小。 $^{192,194,196,198}\text{Tl}$ 等 4 个核素中, $^{196,198}\text{Tl}$ 中的中子质子相互作用相比 $^{192,194}\text{Tl}$ 较弱, 因此, 这就可能导致在中子质子相互作用与科里奥利力竞争过程中, 在 Tl 中子数较大的同位素中出现了旋称反转现象, 而在轻的同位素中没有出现。

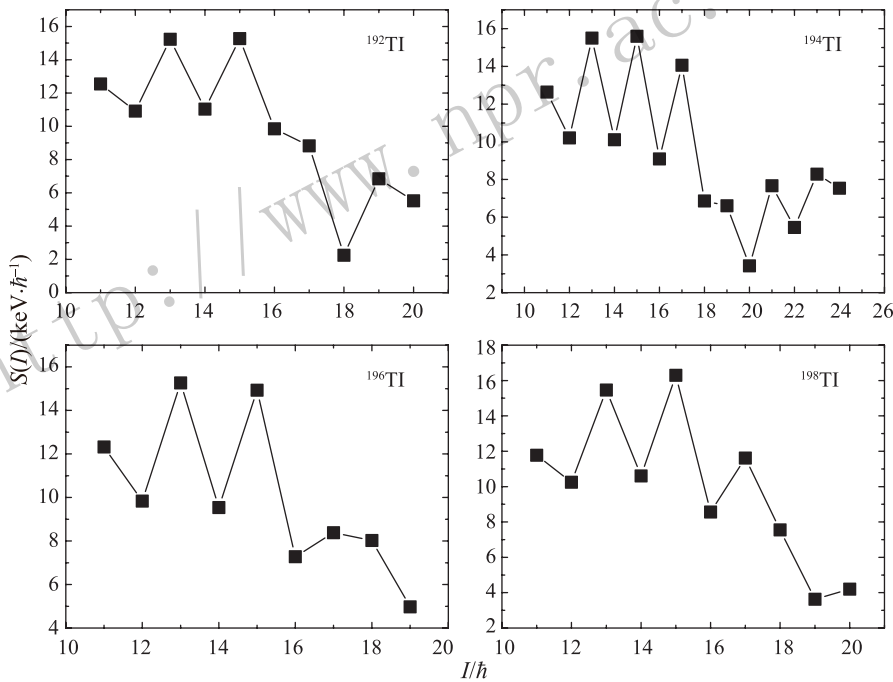


图 3 $^{192,194,196,198}\text{Tl}$ 旋称劈裂系统学比较图

4 总结

通过 $^{181}\text{Ta}(^{16}\text{O}, 5n)^{192}\text{Tl}$ 反应布居 ^{192}Tl 的高自旋态, 建立新能级纲图。新纲图共增加 8 条新能级和 9 条新 γ 射线。将 ^{192}Tl 的负宇称晕带能级往上推高了 $8\hbar$ 。目前没有建立晕带的手征伴带, 后续的数据处理还在进行之中。在与同位素奇奇核旋称劈裂系统学比较中发现, $^{192,194,196,198}\text{Tl}$ 4 个核素在低自旋均

表现为反常的旋称劈裂, 在高自旋处则出现了分水岭, $^{192,194}\text{Tl}$ 的反常劈裂模式在高自旋处继续得以保持, 而 $^{196,198}\text{Tl}$ 在高自旋处发生了反转。出现反转的原因可能是由于中子质子相互作用在中子数较大的同位素中减弱所致。

致谢 作者感谢中国原子能科学研究院串行加速器全体工作人员提供的稳定束流。

参考文献:

- [1] LARABEE J A, WADDINGTON C J. *Phys Rev C*, 1981, **24**: 2367.
- [2] HAGEMANN B G, GARRETT D J, HERSKIND B, *et al.* *Phys Rev C*, 1982, **25**: 3224.
- [3] HAGEMANN B G, HERSKIND B, GARRETT D J, *et al.* *Nucl Phys A*, 1984, **424**: 365.
- [4] ZHANG Y H, XU F R, HE J J, *et al.* *Science in China Series G*, 2003, **46**: 382.
- [5] BARK R A, ESPINO J M, REVIOL W, *et al.* *Phys Lett B*, 1997, **406**: 193.
- [6] ZHANG Y H, OSHIMA M, TOH Y. *et al.* *Eur Phys J A*, 2002, **13**: 429.
- [7] ZHANG Y H, HAYAKAWA T, OSHIMA M, *et al.* *Eur Phys J A*, 2000, **8**: 439.
- [8] KREINER A J, FENZL M, KUTSCHERA W, *et al.* *Nucl Phys A*, 1978, **308**: 147.
- [9] LAWRIE E A, VYMERS P A, VIEU C H, *et al.* *Eur Phys J A*, 2010, **45**: 39.
- [10] MASITENG P L, LAWRIE E A, RAMASHIDZHA T M, *et al.* *Eur Phys J A*, 2014, **50**: 119.
- [11] KREINER A J, FILEVICH A, GARCIA BERRNUDEZ G, *et al.* *Phys Rev C*, 1981, **21**: 933.
- [12] LIANG Y, CARPENTER M P, JANSSENS R V F, *et al.* *Phys Rev C*, 1992, **46**: R2136.
- [13] PUHLHOFER F. *Nucl Phys A*, 1977, **280**: 267.
- [14] RADFORD D C. *Nucl Instr and Meth A*, 1995, **361**: 297.
- [15] XIE C Y, ZHOU X H, ZHANG Y H, *et al.* *Phys Rev C*, 2005, **72**: 044302.
- [16] KREINER A J. *Phys. Rev. C*, 1980, **22**: 2570.
- [17] ZHENG R R, ZHU S Q, CHENG N P, *et al.* *Phys Rev C*, 2001, **64**: 014313.

High Spin Level Structure of ^{192}Tl

HE Chuangye¹⁾, ZHEN Yun, LI Congbo, WU Xiaoguang, LI Guangsheng, ZHONG Jian,
CHEN Qiming, ZHU Baoji, DENG Litao, ZHOU Wenkui, FAN Qiwen

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: High spin states of ^{192}Tl were populated by the $^{181}\text{Ta}(^{16}\text{O}, 5n)^{192}\text{Tl}$ heavy ion fusion evaporation reaction at 97 MeV beam energy. A new level scheme with 8 new levels was constructed and the level spins were tentatively assigned. The negative yrast band was extended up to $23^- \hbar$. Systematics of signature of inversion were also discussed for the negative yrast band of odd-odd Tl isotopes. Signature inversion has been found in $^{196,198}\text{Tl}$ with neutron number increasing in these four Tl isotopes, and it is explained by the competition between the strength of n-p interaction and Coriolis force.

Key words: fusion evaporation reaction; level scheme; backbending; signature inversion

Received date: 25 Nov. 2016; Revised date: 25 Jul. 2017

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

1) E-mail: hechuangye@126.com.