

## $^{146}\text{Tb}$ 的能级结构研究\*

谢成营 周小红<sup>1)</sup> 郑勇 张玉虎 刘忠 潘强岩 甘再国

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

T. Hayakawa M. Oshima T. Toh T. Shizuma J. Katakura Y. Hatsukawa M. Matsuda

(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

H. Kusakari

(Chiba University, Inage-ku, Chiba 263-8512, Japan)

M. Sugawara

(Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan)

**摘要** 利用能量为 161—175 MeV 的  $^{32}\text{S}$  束流, 通过反应  $^{118}\text{Sn}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n})^{146}\text{Tb}$  研究了双奇核  $^{146}\text{Tb}$  的高自旋态能级结构. 实验进行了  $\gamma$  射线的激发函数、 $\gamma$  射线的各向异性度、X- $\gamma$  和  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量. 基于这些测量结果, 建立了激发能达 8390 keV 的  $^{146}\text{Tb}$  核的能级纲图, 其中包括新发现的 41 条  $\gamma$  射线和新建立的 27 个能级, 并指定了  $^{146}\text{Tb}$  新发现能级的自旋值. 用一个  $h_{11/2}$  价质子和一个  $h_{11/2}^{-1}$  价中子空穴耦合、 $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$  与  $^{146}\text{Gd}$  核实激发态的耦合对  $^{146}\text{Tb}$  的能级结构进行了定性地讨论.

**关键词** 在束  $\gamma$  谱学 高自旋态 能级纲图

### 1 引言

双奇核  $^{146}\text{Tb}$  与双满闭壳  $^{146}\text{Gd}$  核相比, 多一个质子和缺少一个中子. 它的能谱结构应呈现典型的单粒子激发特征, 其高自旋态应是价核子角动量耦合形成的.  $^{146}\text{Tb}$  的能级结构将为研究价质子和中子空穴的剩余相互作用提供重要的信息. 在本工作之前, R. Broda 等人用  $^{89}\text{Y}(^{60}\text{Ni}, 2\text{pn})^{146}\text{Tb}$  反应研究了  $^{146}\text{Tb}$  的低位能级结构, 发现了  $J^\pi = 10^+$  的同质异能态, 并测得其寿命  $T_{1/2} = 1.18\text{ms}^{[1]}$ . R. Collatz 等人用  $^{144}\text{Sm}(^6\text{Li}, 4\text{n})^{146}\text{Tb}$  和  $^{120}\text{Sn}(^{31}\text{S}, 5\text{n})^{146}\text{Tb}$  反应研究了  $^{146}\text{Tb}$  的较高位能级结构<sup>[2]</sup>. 本工作利用重离子诱发的熔合蒸发反应  $^{118}\text{Sn}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n})$  布居了  $^{146}\text{Tb}$  的非常高自旋的激发态, 建立了  $^{146}\text{Tb}$  复杂的高自旋态能级纲图, 并定性地讨论了其高自旋能级结构.

### 2 实验

实验是在日本原子力研究所(JAERI)串列加速器实验室完成的. 用串列加速器提供的  $^{32}\text{S}$  束流轰击  $^{118}\text{Sn}$  同位素靶, 产生处于高自旋激发态的  $^{146}\text{Tb}$  核.  $^{118}\text{Sn}$  靶质量厚度约为  $1.8\text{mg}/\text{cm}^2$ , 靶的后面蒸上了  $3.5\text{mg}/\text{cm}^2$  厚的铅衬. 实验首先进行了  $\gamma$  射线的激发函数测量, 然后在 165 MeV 束流能量下进行了长时间的  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  符合测量, 这里  $t$  是符合的两条  $\gamma$  射线到达探测器的相对时间差, 符合窗为 200 ns. 在 X- $\gamma$  和  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量时, 使用了 12 台 BGO(AC)HPGe 探测器, 它们分别放置于与束流方向成  $90^\circ, \pm 58^\circ, \pm 32^\circ$  的位置上. 各 HPGc 探测器对  $^{60}\text{Co}$  标准放射源 1332.5 keV 峰的能量分辨在 2.0—2.8 keV 之间.  $\gamma$ - $\gamma$  符合数据以事件方式记录到数据文件中, 共获取了约  $350 \times 10^6$  个符合事件. 在离线数据处理时, 对各

2003-01-07 收稿

\* 国家自然科学基金(10005012, 10025525)和国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077400)资助

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

个探测器进行增益匹配,然后将  $\gamma$ - $\gamma$  符合数据分类反演建成带有不同时间条件的符合矩阵. 在实验开始前和结束后,利用 <sup>152</sup>Eu 和 <sup>133</sup>Ba 标准放射源对各探测器做了能量和相对探测效率刻度.

为了确定  $\gamma$  射线的跃迁多极性,进而指定相关能级的自旋值,本工作测量了在符合模式下的  $\gamma$  射线的各向异性度,即 ADO 系数<sup>[3]</sup>. 具体做法是:在数据处理时,把位于  $\pm 32^\circ$  和  $90^\circ$  位置处探测器记录到的  $\gamma$  射线的能量值分别放到两个矩阵的  $y$  轴上,与之符合的其它  $\gamma$  射线,不论被哪个角度的探测器所记录,都把相应的能量值放到相应矩阵的  $x$  轴,从而建立了两个不对称矩阵. 用较强的  $\gamma$  射线对这两个矩阵进行  $y$  方向投影,定义 ADO 系数为  $\pm 32^\circ$  和  $90^\circ$  方向上投影谱中  $\gamma$  射线的强度比:即  $R_{ADO} = I_{\gamma(\pm 32^\circ)} / I_{\gamma 90^\circ}$ . 在提取  $\gamma$  射线强度时,对这两个  $y$  方向的投影谱进行了相对探测效率修正. 根据偶极和四极跃迁的角分布特性,对应于这两种跃迁极性的  $\gamma$  射线,它们的 ADO 系数应明显不同.

### 3 结果与讨论

本工作中,对所观察到的每一条  $\gamma$  射线均做了拉门谱,基于与 <sup>146</sup>Tb 的已知  $\gamma$  射线的符合关系,发现了 41 条新  $\gamma$  跃迁. 仔细地比较和分析每条  $\gamma$  射线的拉门谱,结合  $\gamma$  跃迁的强度平衡和交叉跃迁等信息,建议了如图 1 所示的 <sup>146</sup>Tb 高自旋态能级纲图,其中包括 27 个新能级. 纲图中标明了各个能级和相应各条  $\gamma$  跃迁的能量值, $\gamma$  跃迁线的粗细代表了其相对强度的大小. 780keV 能级以下 5 个  $\gamma$  跃迁的相对强度取自文献[4]. 值得注意的是 R. Collatz 等人利用 <sup>144</sup>Sm(<sup>6</sup>Li, 4n)<sup>146</sup>Tb 反应,根据与已知  $7^- \rightarrow 6^- 343.1\text{keV}$   $\gamma$  射线符合关系发现的  $442.7\text{keV}$  E1 跃迁<sup>[2]</sup> 在本工作中没有观察到.

图 2 给出了 800.5 和 949.5keV  $\gamma$  射线的拉门谱. 与 800.5keV  $\gamma$  射线符合的所有  $\gamma$  射线(除 590.7keV  $\gamma$  射线外)均是本工作新发现的. 这些新  $\gamma$  射线都与 76.7, 777.3 和 854.0keV 跃迁符合. 777.3, 800.5, 818.2 和 854.0keV 跃迁之间没有符合关系. 777.3keV 跃迁与能量为 76.7keV 的低能  $\gamma$  射线有符合关系,它们的能量之和正好是 854.0keV. 因此,我们假定在 2225 和 2171keV 能级间有一实验上没有观察到的 53.5keV 跃迁. 此低能跃迁可能主要通过内转换方式跃迁.

在纲图右上部分,4868keV 能级和激发能大于

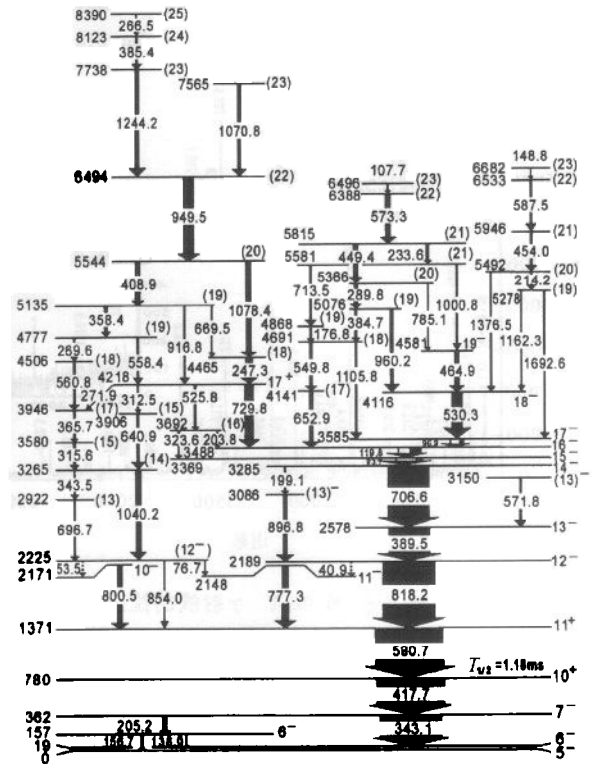


图 1 <sup>146</sup>Tb 的高自旋态能级纲图

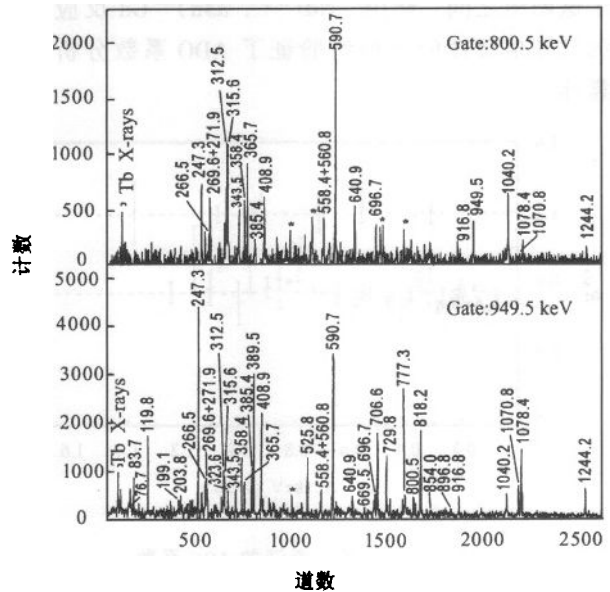


图 2 800.5 和 949.5keV  $\gamma$  射线的拉门谱

图中 \* 表示沾污的  $\gamma$  射线.

5076keV 的能级是我们新建立的. 图 3 给出了 818.2 和 96.9keV  $\gamma$  射线的拉门谱. 文献[2]建议了 177.6keV 跃迁退激能量为 3462keV 的能级. 而在本工作中,仔细分析 176.8keV  $\gamma$  射线的符合关系,建议了此跃迁应该退激 4868keV 能级.

基于 <sup>146</sup>Tb 的  $\gamma$  跃迁的 ADO 系数,尝试性地指定

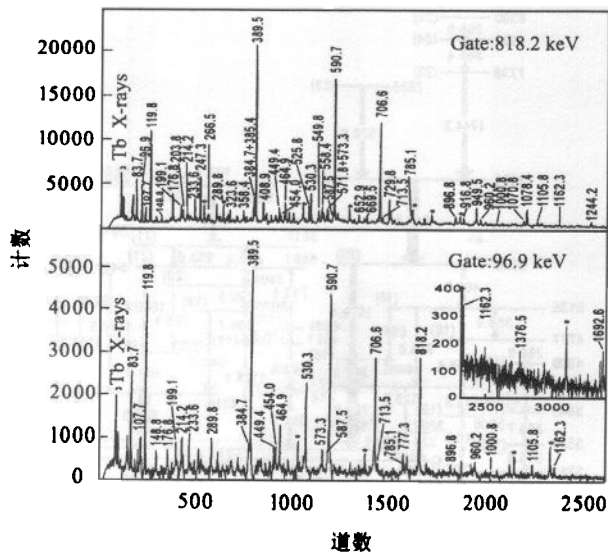


图 3 818.2 和 96.9keV  $\gamma$  射线的拉门谱  
图中 \* 表示沾污的  $\gamma$  射线.

了新发现的能级的自旋值. 图 4 给出了<sup>146</sup>Tb 的  $\gamma$  跃迁的 ADO 系数, 可见 ADO 系数比较明显地分成两组. 对于已知纯的四极和偶极  $\gamma$  射线, 它们的 ADO 系数分别是 1.20 和 0.75, M1 和 E2 的混合跃迁则介于这两组之间. 利用<sup>150</sup>Nd(<sup>13</sup>C,  $\alpha$ 3n)<sup>156</sup>Gd 反应产生的已知多极性的  $\gamma$  射线验证了 ADO 系数分析的可靠性<sup>5</sup>.

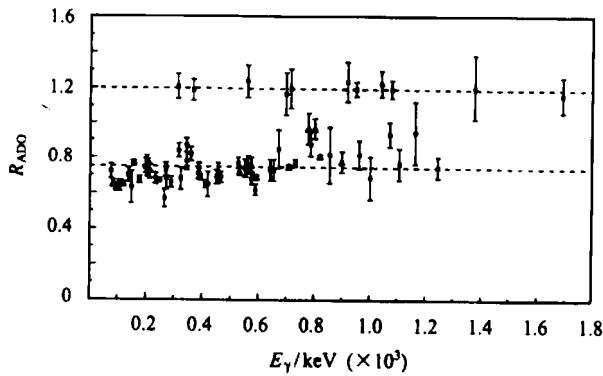


图 4 <sup>146</sup>Tb 的  $\gamma$  跃迁的 ADO 系数  
▲<sup>146</sup>Tb 已知跃迁多极性的  $\gamma$  射线的 ADO 系数.

本工作所建议的<sup>146</sup>Tb 能级纲图中不规则的能级间隔以及众多的平行跃迁清楚地说明了<sup>146</sup>Tb 核具有典型的单粒子结构特性. 事实上, 可以认为<sup>146</sup>Tb 核是由一个价质子和一个价中子空穴与<sup>146</sup>Gd 核芯耦合形成的. <sup>146</sup>Tb 核低位 5<sup>-</sup>, 6<sup>-</sup> 和 7<sup>-</sup> 激发态是由一个  $h_{11/2}$  价质子与一个  $d_{3/2}^{-1}$  或  $s_{1/2}^{-1}$  价中子空穴耦合形成的<sup>[4]</sup>. 通过比较邻近奇奇核<sup>142</sup>Eu, <sup>144</sup>Eu, <sup>144</sup>Tb, <sup>148</sup>Tb, <sup>148</sup>Tm, <sup>150</sup>Ho 的能级结构<sup>[6-10]</sup>, <sup>146</sup>Tb 的  $J^\pi = 10^+$  和  $11^+$  的晕态应是由一个  $h_{11/2}$  价质子和一个  $h_{11/2}^{-1}$  价中子空穴耦合形成的. 590.7keV  $\gamma$  射线是本工作中观测到的<sup>146</sup>Tb 的最强的  $\gamma$  射线, 该偶极跃迁退激的 1371keV 能级应该是  $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}$  多重态角动量最大的分态. 激发能大于 1371keV 的能级应涉及到<sup>146</sup>Gd 核实的激发. <sup>146</sup>Gd 的第一激发态是位于 1.58MeV 的八极振动态  $3^{-} [111]$ , 预期  $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$  与核芯的  $3^{-}$  态耦合应形成能量为 2.50MeV 左右的负宇称态. 因此, 本工作建议激发能在 2.1 和 2.6MeV 之间的能级可能的组态是  $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^{-}$  (<sup>146</sup>Gd). 对于双幻核<sup>146</sup>Gd,  $N = 82$  的中子闭壳应比  $Z = 64$  的质子亚闭壳稳定, 质子更容易被激发. 因此, <sup>146</sup>Tb 能量更高的激发态的组态应该是  $\pi h_{11/2}^2 d_{3/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$  和  $\pi h_{11/2}^2 g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$ . 以上四准粒子态能够提供的最大角动量为  $19\hbar$ . <sup>146</sup>Tb 的高位激发能级应该是 6 准粒子态.

### 4 总结

本工作利用<sup>118</sup>Sn (<sup>32</sup>S, 1p3n) 反应建立了激发能达 8390keV 的<sup>146</sup>Tb 高自旋态能级纲图, 其中包括新发现的 41 条  $\gamma$  射线和新建议的 27 个能级. 基于<sup>146</sup>Tb 的  $\gamma$  跃迁的 ADO 系数, 对新建立的能级进行了自旋值指定. 用一个  $\pi h_{11/2}$  价质子和一个  $\nu h_{11/2}^{-1}$  价中子空穴耦合、 $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$  与<sup>146</sup>Gd 核实激发态的耦合对<sup>146</sup>Tb 的能级结构进行了定性的讨论. 下一步将要利用弱耦合模型和壳模型的计算对<sup>146</sup>Tb 的能级结构进行更完善的解释.

## 参考文献 (References)

- 1 Broda R, Chung Y H, Daly P J et al. *Z. Phys.*, 1984, **A316**:125
- 2 Collatz R, Amzal N, Mélliani Z et al. *Z. Phys.*, 1997, **A359**:113
- 3 ZHENG Yong, ZHOU Xiao-Hong, LIU Min-Liang et al. *HEP & NP*, 2002, **26**(4):354(in Chinese)  
(郑勇,周小红,柳敏良等. *高能物理与核物理*,2002,**26**(4):354)
- 4 Broda R, Daly P J, McNeill J H et al. *Z. Phys.*, 1989, **A334**:11
- 5 Sugawara M, Mitarai S, Kusakari H et al. *Nucl. Phys.*, 2001, **A686**:29
- 6 Piiparinen M, Atac A, Blomqvist J et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **A605**:191
- 7 Sferrazza M, Cardona M A, Bazzacco D et al. *Z. Phys.*, 1996, **A354**:157
- 8 Schumacher C, Brentano P von, Dewald A et al. *Z. Phys.*, 1995, **A352**:161
- 9 Nolte E, Gui S Z, Colombo G et al. *Z. Phys.*, 1982, **A306**:223
- 10 McNeill J, Broda R, Chung Y H et al. *Z. Phys.*, 1986, **A325**:27
- 11 Kleinheinz P, Lunardi S, Ogawa M et al. *Z. Phys.*, 1978, **A284**:351

Study of Level Structure in <sup>146</sup>Tb \*XIE Cheng-Ying ZHOU Xiao-Hong<sup>1)</sup> ZHENG Yong ZHANG Yu-Hu

LIU Zhong PAN Qiang-Yan GAN Zai-Guo

(Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

T. Hayakawa M. Oshima T. Toh T. Shizuma J. Katakura Y. Hatsukawa M. Matsuda

(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319 - 1195, Japan)

H. Kusakari

(Chiba University, Inage-ku, Chiba 263 - 8512, Japan)

M. Sugawara

(Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275 - 0023, Japan)

**Abstract** The level structure of high-spin states of doubly odd nucleus <sup>146</sup>Tb has been studied via the <sup>118</sup>Sn (<sup>32</sup>S, 1p3n) <sup>146</sup>Tb reaction using techniques of in-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy. Measurements of  $\gamma$ -ray excitation functions,  $\gamma$ -ray anisotropies, X- $\gamma$  and  $\gamma$ - $\gamma$ -t coincidences were performed with 12 BGO(AC)HPGe detectors. Based on the gated spectra,  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence relationships, intensity balances and cross-over transitions, the level scheme in <sup>146</sup>Tb has been extended up to an excitation energy of 8390 keV, and 41 new  $\gamma$ -rays are added into the level scheme. The spins for the new established levels have been assigned according to the results of the measured  $\gamma$ -ray anisotropies. The levels in <sup>146</sup>Tb are interpreted qualitatively by coupling a  $h_{11/2}$  proton to a  $h_{11/2}$  neutron hole and  $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$  to the excited states in <sup>146</sup>Gd core.

**Key words** in-beam  $\gamma$ -spectroscopy, high-spin state, level scheme

Received 7 January 2003

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10005012, 10025525) and Major State Basic Research Development Program (TG2000077400)

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