

^{146}Tb 的多粒子激发特性研究*

谢成营^{1,2;1)} 周小红¹ 郑勇¹ 张玉虎¹ 郭应祥¹ 雷祥国¹ 柳敏良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 利用在束 γ 谱学技术、通过反应 $^{118}\text{Sn}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n})$ 研究了 ^{146}Tb 的高自旋态能级结构. 基于实验测量结果, 建立了激发能达 8.39MeV 的 ^{146}Tb 核的能级纲图. 双奇核 ^{146}Tb 相对于双满闭壳 ^{146}Gd 核, 多一个质子和缺少一个中子, 它的低位激发态是二准粒子态, 更高的激发态是四准粒子态, 或二准粒子态与其偶核芯低位激发态的耦合. 利用经验壳模型对部分全顺排组态的激发能进行了理论计算.

关键词 在束 γ 谱学 高自旋态 能级纲图 经验壳模型

1 引言

对于 $Z = 65$ 的球形核 ^{146}Tb , 它的激发态应该是价核子激发形成的. 早期的在束研究^[1,2] 和 ^{146}Dy 的 β 衰变研究^[3] 对 ^{146}Tb 的低位激发态进行了研究, 这些研究提供了相关价质子和中子空穴之间剩余相互作用的重要信息. ^{146}Tb 的高位能级应该是由一个价质子和一个价中子空穴耦合到 ^{146}Gd 核实激发态形成的. 在本工作之前, R. Collatz 等人用 $^{144}\text{Sm}(^6\text{Li}, 4\text{n})$ ^{146}Tb 和 $^{120}\text{Sn}(^{31}\text{S}, 5\text{n})$ ^{146}Tb 反应建立了 ^{146}Tb 的能级纲图, 并用壳模型计算解释了其高自旋态能级结构^[2]. 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}Tb 的非常高自旋的激发态, 极大地更新了 ^{146}Tb 的能级纲图, 并利用经验壳模型对部分能级的能量进行了理论计算.

2 实验和结果

实验是在日本原子力研究所(JAERI)串行加速器实验室完成的. 实验进行了 γ 射线的激发函数, γ 射线的各向异性度, X- γ 和 γ - γ - t 符合测量. γ - γ 符合数据以事件方式记录到数据文件中, 共获取了约 350×10^6 个符合事件. 基于与 ^{146}Tb 的已知 γ 射线^[2] 的符合关系, 把新发现的 41 条 γ 射线指认给了 ^{146}Tb . 通过仔细地比较和分析每条 γ 射线的拉门谱, 结合 γ

跃迁的强度平衡和交叉跃迁等信息, 建立了如图 1 所示的 ^{146}Tb 高自旋态能级纲图. 基于本工作在符合模式下测量的 γ 射线各向异性度和早期测量的内转换系数^[2], 建议了纲图中能级自旋值. 本工作所有指认给 ^{146}Tb 的 γ 射线都与 590.7keV γ 跃迁符合. 因此, 本

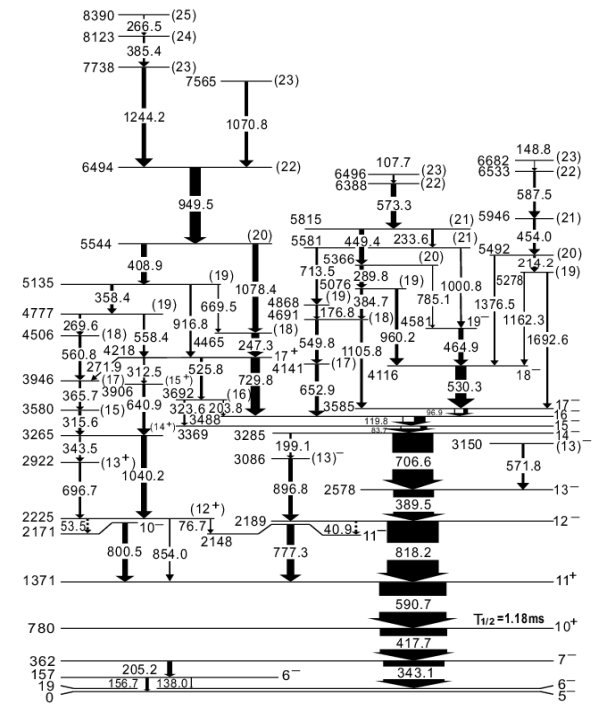


图 1 ^{146}Tb 的高自旋态能级纲图

* 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: xiecy@impcas.ac.cn

工作建议的 ^{146}Tb 能级纲图是建立在 $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1} 10^+$ 同质异能态($T_{1/2} = 1.18 \text{ ms}$)^[1]之上的. 详细的实验和数据分析细节可参考文献[4].

3 理论计算和讨论

本工作所建议的 ^{146}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表明了 ^{146}Tb 核具有典型的单粒子结构特性. ^{146}Tb 的基态是 5^- , 其组态是 $\pi h_{11/2} \nu d_{3/2}^{-1}$ 和 $\pi h_{11/2} \nu s_{1/2}^{-1}$ 的混合^[5]. 6^- 和 7^- 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^[5]. ^{146}Tb 的 $J^\pi = 10^+$ 和 11^+ 的晕态是由一个 $h_{11/2}$ 价质子和一个 $h_{11/2}^{-1}$ 价中子空穴耦合形成的二准粒子态^[2]. 590.7 keV γ 射线是本工作中观测到的 ^{146}Tb 的最强的 γ 射线, 该偶极跃迁退激的 1371 keV 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. 很明显, 位于 1371 keV 11^+ 能级上面的激发态应涉及到 ^{146}Gd 核实的激发. ^{146}Gd 的第一激发态是位于 1.58 MeV 的八极振动态 3^- , 其组态的主要成分是 $\pi(h_{11/2} d_{5/2}^{-1})$, 同时也混进了 $\nu(f_{7/2} s_{1/2}^{-1})$ 和 $\nu(h_{9/2} d_{3/2}^{-1})$ 组态^[6,7]. 10^- , 11^- , 12^- 和 13^- 能级为 $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-$ 七重态角动量不同的分态^[2], 如图2所示. 八极振动态 3^- 的主要成分是 $\pi(h_{11/2} d_{5/2}^{-1})$, 根据Pauli-blocking原理, 它与 $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 耦合能提供的最大自旋值应是13. 当 $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 与核芯 3^- 态耦合时, 主要成分 $\pi(h_{11/2} d_{5/2}^{-1})$ 在 14^- 分态中应该被Pauli原理有效禁戒, 导致 14^- 态的能量被相应抬高. 下面采用文献[8,9]所描述的方法来计算 $(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-)_{14^-}$ 全顺排分态的激发能:

$$E_{(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-)_{14^-}} = E_{(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11^+}} + E_{3^-}^{146\text{Gd}} + \Delta_{(\pi h_{11/2} \otimes 3^-)_{17/2^+}}^{147\text{Tb}} + \Delta_{(\nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-)_{17/2^+}}^{145\text{Gd}} + S =$$

$$E_{(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11^+}}^{146\text{Tb}} + E_{3^-}^{146\text{Gd}} + (E_{(\pi h_{11/2} \otimes 3^-)_{17/2^+}}^{147\text{Tb}} - E_{\pi h_{11/2}}^{147\text{Tb}} - E_{3^-}^{146\text{Gd}}) +$$

$$(E_{(\nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-)_{17/2^+}}^{145\text{Gd}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}}^{145\text{Gd}} - E_{3^-}^{146\text{Gd}}) + S = 1371 + 15794 + 4586 + 104 = 3513 \text{ keV}.$$

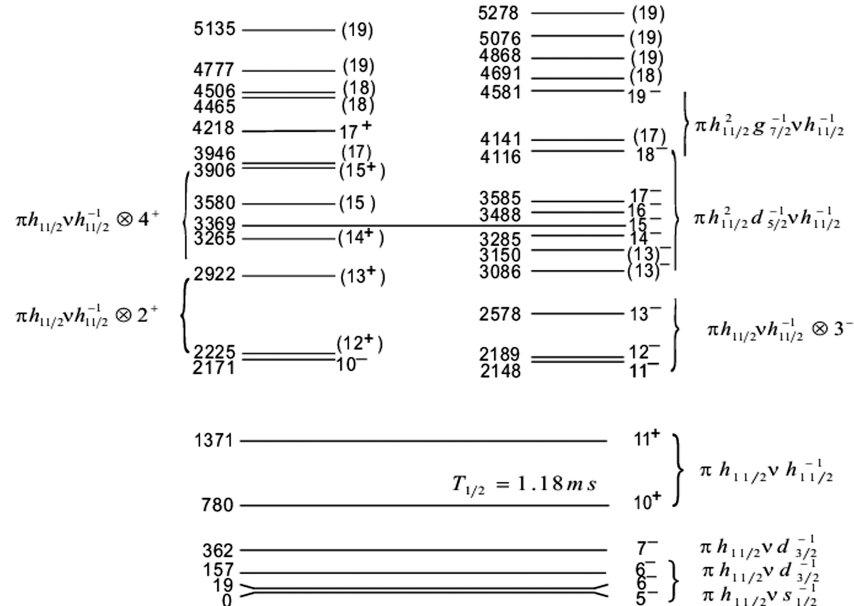


图 2 ^{146}Tb 的部分能级及建议的组态

这里结合能项 $S = B_{147\text{Tb}} + B_{145\text{Gd}} B_{146\text{Tb}} - B_{147\text{Tb}} - B_{145\text{Gd}} + B_{146\text{Gd}} - B_{146\text{Tb}} - B_{146\text{Gd}} = 0$, E 表示相关核 ^{146}Gd ^[6,7], ^{147}Tb ^[10,11], ^{145}Gd ^[12] 和 ^{146}Tb 的激发能, Δ 表示 p-n 剩余相互作用. 计算值比实验上观

测到的 14^- 能级的能量 (3285 keV) 要高些, 14^- 能级应该存在着组态混合. ^{146}Gd 的第一 2^+ 和 4^+ 激发态是质子-中子-空穴激发态, 其主要组态已分别指认为 $\pi(s_{1/2} d_{5/2}^{-1})$ 和 $\pi(d_{3/2} d_{5/2}^{-1})$ ^[7,13]. 图1中左边那

些激发态很有可能对应的是 $(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 2^+)_{13+}$ 和 $(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 4^+)_{15+}$ 组态, 具体如图2所示.

由于 $N=82$ 的中子闭壳比 $Z=64$ 的质子亚闭壳稳定, 质子更容易被激发. 多粒子激发, 如位于 $h_{11/2}$, $d_{5/2}$, $g_{7/2}$ 轨道的质子或质子空穴与一个 $h_{11/2}$ 中子空穴耦合, 在 ^{146}Tb 的高自旋态中占有重要作用. $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-$ 多重态能提供的最大自旋值是13. 因此, 位于 13^- (2578keV) 以上的高自旋态(如图1所示的中间右边的负宇称态)很可能

是 $\pi h_{11/2}^2 d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$ 和 $\pi h_{11/2}^2 g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$ 四准粒子激发态. 下面用经验壳模型^[14]来估算 $(\pi h_{11/2}^2 d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{18^-}$ 和 $(\pi h_{11/2}^2 g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{19^-}$ 全顺排态组态的激发能. 分别把 $(\pi h_{11/2}^2 d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{18^-}$ 和 $(\pi h_{11/2}^2 g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{19^-}$ 组态结构分解成 $[(\pi h_{11/2}^2 d_{5/2}^{-1})_{25/2+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}]_{18^-}$ 和 $[(\pi h_{11/2}^2 g_{7/2}^{-1})_{27/2+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}]_{19^-}$, 就可以用下面的表达式计算他们的激发能:

$$E_{[(\pi h_{11/2}^2 d_{5/2}^{-1})_{25/2+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}]_{18^-}} = E_{(\pi h_{11/2}^2 d_{5/2}^{-1})_{25/2+}} + E_{\nu h_{11/2}^{-1}} + S + \Delta_{(\pi d_{5/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} + 2 \sum_{I=10,11} \left(\sqrt{2I(2I+1)} W \left(\frac{11}{2} \frac{11}{2} \frac{31}{2} \frac{11}{2}; 10I \right) \right)^2 \cdot \Delta_{(\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_I} = 4184.7 \text{ keV},$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_{(\pi d_{5/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} &= E_{(\pi g_{5/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}} - E_{\pi d_{5/2}^{-1}} + B_{145\text{Gd}} + B_{145\text{Eu}} - B_{144\text{Eu}} - B_{146\text{Gd}} = -430.6 \text{ keV}, \\ \Delta_{(\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{11+}} &= E_{(\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{11+}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}} - E_{\pi h_{11/2}} + B_{145\text{Gd}} + B_{147\text{Tb}} - B_{146\text{Tb}} - B_{146\text{Gd}} = 399.8 \text{ keV}, \\ \Delta_{(\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{10+}} &= E_{(\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{10+}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}} - E_{\pi h_{11/2}} + B_{145\text{Gd}} + B_{147\text{Tb}} - B_{146\text{Tb}} - B_{146\text{Gd}} = -191.2 \text{ keV}, \end{aligned}$$

同理 $E_{[(\pi h_{11/2}^2 g_{7/2}^{-1})_{27/2+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}]_{19^-}} = 4346.3 \text{ keV}$, 这

里 E 表示相关核的激发能^[6,7,9-12,15], W 是Racah系数^[16]. 结合能项 $S = B_{146\text{Tb}} + B_{146\text{Gd}} - B_{147\text{Tb}} - B_{145\text{Gd}} = 222.4 \text{ keV}$ ^[17]. Δ 表示p-n剩余相互作用. 理论计算的激发能值与我们实验上观测值符合得较好. 与R. Collatz等人利用壳模型计算的结果^[2]是一致的. 在 ^{146}Gd 中, $\pi h_{11/2} d_{5/2}^{-1}$ 组态和 $\pi h_{11/2} g_{7/2}^{-1}$ 组态有混合^[18], 同样我们也建议在 ^{146}Tb 中的四准粒子态也存在一定的混合. 激发能更高时, 可能由于核实再激发一对质子而形成6准粒子态, 也可能 $N=82$ 的中子闭壳层遭到破坏, 激发模式会变得更加复杂. 所以讨论更

高位能级的组态较为困难.

4 结论

本工作利用 $^{118}\text{Sn} (^{32}\text{S}, 1p3n)$ 反应建立了激发能达8390keV的 ^{146}Tb 高自旋态能级纲图, 其中包括新发现的41条 γ 射线和新建议的27个能级. 双奇核 ^{146}Tb 相对于双满闭壳 ^{146}Gd 核, 多一个质子和缺少一个中子, 它的低位激发态是二准粒子态, 高位激发态是四准粒子态, 或二准粒子态与其偶偶核芯低位激发态的耦合. 基于经验壳模型对部分全顺排组态激发能的理论计算, 对 ^{146}Tb 能级结构进行了讨论.

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 Zuber K, LIANG C F, Paris P et al. Z. Phys., 1987, **A327**: 357
- 4 XIE Cheng-Ying et al. HEP & NP, 2003, **27**(10): 884 (in Chinese)
(谢成营等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(10):884)
- 5 Broda R, Daly P J, McNeill J H et al. Z. Phys., 1989, **A334**: 11
- 6 Kleinheinz P, Ogawa M, Broad R et al. Z. Phys., 1978, **A286**: 27
- 7 Yates S W, Julin R, Kleinheinz P et al. Z. Phys., 1986, **A324**: 417
- 8 Ercan A, Broda R, Kleinheinz P et al. Z. Phys., 1988, **A329**: 63
- 9 Piiparinen M, Atac A, Blomqvist J et al. Nucl. Phys., 1996, **A605**: 191
- 10 Broda R, Behar M, Kleinheinz P et al. Z. Phys., 1979, **A293**: 135
- 11 Collatz R, Kleinheinz P, ZHANG C T et al. Z. Phys., 1995, **A351**: 245

- 12 Pakkanen A, Muhonen J, Piiparinen M et al. Nucl. Phys., 1982, **A373**: 237
- 13 Ogawa M, Broda R, Zell K et al. Phys. Rev., 1978, lett. **41**: 289
- 14 Jongman J R, Bacelar J C S, Balanda A et al. Nucl. Phys., 1995, **A581**: 165
- 15 Rakel D A, Kaczarowski R, Funk E G et al. Phys. Rev., 1980, **C21**: 595
- 16 Lawson R D, Theory of the Nuclear Shell Model(Oxford University, Oxford,1980)
- 17 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 409
- 18 Kleinheinz P, Broda R, Daly P J et al. Z. Phys., 1979, **A290**: 279

Study of Multi-particle Excitation in ^{146}Tb *

XIE Cheng-Ying^{1,2;1)} ZHOU Xiao-Hong¹ ZHENG Yong¹ ZHANG Yu-Hu¹
 GUO Ying-Xiang¹ LEI Xiang-Guo¹ LIU Min-Liang¹

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

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

Abstract High-spin Level structure of ^{146}Tb has been studied via the $^{118}\text{Sn}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n})^{146}\text{Tb}$ reaction using techniques of in-beam γ -ray spectroscopy. Based on the experimental measured results, the level scheme of ^{146}Tb has been revised significantly and extended up to an excitation energy of 8.39 MeV. The doubly odd nucleus ^{146}Tb has one proton-particle and one neutron-hole with respect to the doubly closed nucleus ^{146}Gd , and its low-lying states should be 2-qp states, and the high-lying states should be 4-qp states or the coupling of 2-qp state to the low-lying excited states in ^{146}Gd core. The excitation of the fully-aligned 4-qp configurations can also be well reproduced using the empirical shell-model approaches.

Key words in-beam γ -spectroscopy, high-spin state, level scheme, empirical shell model

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

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