

丰中子核¹⁰⁷Ru 的集体转动带^{*}

朱胜江¹ 许瑞清¹ J. H. Hamilton² A. V. Ramayya²
J. K. Hwang² 张征¹ 姜卓¹ 甘翠云¹ X. Q. Zhang²
I. Y. Lee³ J. O. Rasmussen³ W. C. Ma⁴

1 (清华大学物理系 北京 100084)

2 (Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA)

3 (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

4 (Department of Physics, Mississippi State University, MS 39762, USA)

摘要 通过对²⁵²Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱的测量,对丰中子奇 A 核¹⁰⁷Ru 的高自旋态集体转动带重新进行了研究,建立了新的能级纲图. 将基带转动带的自旋态扩展到 $\left(\frac{27}{2}\hbar\right)$,证实并扩展了以前发表的基于中子 $h_{11/2}$ 激发产生的集体转动带,并新观测到一个基于 $(9/2^-)$ 能级的集体转动带. 研究结果澄清了早期发表的结果与近来别人发表的结果之间的矛盾,对新建立的¹⁰⁷Ru 能级结构的某些重要特征进行了讨论.

关键词 核结构 集体带 自发裂变

丰中子 Ru 核位于 $A = 100$ 区的基态大形变核 ($Z = 38, 40, N = 58, 60$) 以及 $Z = 50$ 的球形核 Sn 之间,其能级结构应表现出中等程度的集体性. 以往对于 Ru 偶-偶核的高自旋态研究表明,在中子数接近 64 时,预计应有三轴形变产生^[1]. 相比偶-偶核而言,对奇 A 核的高自旋态研究要复杂得多. 而对于此区内奇 A Ru 核结构的研究可以进一步提供关于核的形状、单粒子驱动效应、 $h_{11/2}$ 惟一宇称(闯入)带的系统特性等重要信息. 然而在目前实验条件下,研究这些丰中子核的高自旋态是很困难的,其原因是难于用通常的重离子融合-蒸发反应产生其高自旋态,一种有效的方法是测量由重核裂变产生的瞬发 γ 谱^[2].

本工作的目的是研究丰中子奇 A 核¹⁰⁷Ru 的集体转动带结构. 在以前的工作中^[3]对¹⁰⁷Tc β 衰变的研究已报道了¹⁰⁷Ru 的低激发态能级结构. 我们曾利用早期的 Gammasphere 装置测量的²⁵²Cf 裂变瞬发 γ 谱的数据,对¹⁰⁷Ru 进行了研究,第一次报道了¹⁰⁷Ru 的高自旋态结构^[4],其重要结果为发现了基带与 $\nu h_{11/2}$ 带的两条集体转动带. 然而在近来的工

2001-10-23 收稿

^{*}国家重点基础研究发展规划(G2000077400),国家自然科学基金(199775028)以及美国能源部(DF-FG05-88ER40407)资助

作中^[5],报道了用重离子熔合反应产生的复合核的瞬发裂变方法,对 $A \approx 100$ 丰中子核区的 Ru, Pd, Cd 几个奇 A 核激发态能级的研究结果,其中所报道的¹⁰⁷Ru 中的 $\nu h_{11/2}$ 的转动带与我们在文献[4]中所报道的完全不同. 为了澄清这两篇报道中对于¹⁰⁷Ru 能级结构研究的差异,近来,我们在 Gammasphere 上重新测量了²⁵²Cf 自发裂变发生的瞬发 γ 谱,得到了具有更高统计性的实验数据,对¹⁰⁷Ru 能级结构进行了重新分析,得到了新的结果. 新的结果表明:在文献[5]中所报道的¹⁰⁷Ru 的 $\nu h_{11/2}$ 转动带是不正确的,而我们在文献[4]中发表的结果基本上是正确的. 我们的新结果扩展了基带与 $\nu h_{11/2}$ 转动带结构,且对 $\nu h_{11/2}$ 转动带的带头能级进行了修正,由原来的 250keV 变为 301.8keV. 此外还观测到一个建立在 251.2keV 能级上的新的转动带.

实验技术与数据处理方法详见文献[2, 4, 6—8], 这里仅作简略叙述. 实验是在美国洛伦兹伯克利国家实验室(LBNL)的 Gammasphere 上进行的,用 102 个反康 Ge 探测器组成的阵列测量由²⁵²Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱. 所用²⁵²Cf 源强约 $60\mu\text{Ci}$, 放在两块 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的铝箔之间,记录三重以上的符合事件. 用此数据建成三维符合矩阵(Cube),得到具有 5.7×10^{11} 个折合成二维符合的有效符合事件. 此数据的统计性比我们以前测量的数据^[4, 6—8] 统计性高出 15 倍,用 Radware 程序包^[9] 分析数据.

图 1 为我们新建立的¹⁰⁷Ru 的能级纲图,包括 γ 跃迁的能量与相对强度. 4 个具有 $\Delta I = 2$ 级联 E2 跃迁的集体带结构用加括号的数字标在纲图的上方. 在我们以前的文章^[4] 中,已对带(1)与带(2)作了报道,这里得到了进一步的证实,并在带(2)的上部,新发现了 2558.1 与 3315.4keV 两个新能级,以 687.7 与 753.3keV 两条新 γ 跃迁相联接,而在带(1)与带(2)之间新发现一个 309.7keV 的带间跃迁. 在带(3)中,我们以前报道的 711→553→371keV 的 γ 跃迁序列^[4] 得到了证实,在此跃迁序列的上部,扩展了 2787.3, 3756.7keV 两个新的能级,以 850.1, 978.4keV 跃迁相联. 在带(3)的低自旋态部分,发现了 159.4keV 新的跃迁(从 301.8keV 能级跃迁到 142.4keV 能级),此跃迁在我们原来的文章^[4] 中未予报道. 另一个 50.6keV 的低能跃迁(从 301.8keV 能级跃迁到 251.2keV 能级),因其能量低于 Ge 探测器的阈值而观测不到,然而从符合关系分析,此跃迁必定存在. 这样,带(3)的带头能级由原来的 250.6keV^[4] 能级变为 301.8keV 能级. 带(4)为本工作中新发现的基于 251.2keV 能级上的转动带,由 855.0→726.6→571.6→381.3keV 级联跃迁组成,并且观测到了带(4)与带(3)间的边带跃迁,能量分别为 330.7, 531.4 和 704.9keV.

在我们原来与现在所发表的能级纲图中,低自旋态部分的能级与跃迁,如带(1)与带(2)下面的 199.9, 428.8keV 能级以及 199.9, 228.9, 428.8keV γ 跃迁,带(3)与带(4)下面的 103.1, 142.4, 251.2keV 能级以及 39.3, 103.1, 108.8, 142.4, 148.1keV 的 γ 跃迁,都在以前的 β 衰变纲图^[3] 中作了报道,然而该 β 衰变的工作在文献[5]报道的结果中并未体现出来. 图 2 给出对新数据分析中符合门谱的两个例子. 在对²⁵²Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱的分析中, Ru 核素链的互补核为 Xe, 在对¹⁰⁷Ru 跃迁 γ 谱线开门所得到的符合能谱中,除应看到 Ru 本身的一些级联跃迁谱线外,还应看到一些对应不同中子发射的互补核的 γ 谱线. 图 2(a)为对于带(3)中 108.8, 370.9, 553.1keV γ 跃迁两两双开门相加所得的三重符合谱. 在谱图中除可以看到属于¹⁰⁷Ru 的 γ 峰(103.1, 108.8, 142.4, 148.1, 159.4, 370.9, 553.1, 711.4 和 850.1keV)外,还可以清楚地观测到 Xe 同位素中的互补核的 γ 峰(属

于¹⁴²Xe(3n)的 287.1,403.5 和 490.2keV;属于¹⁴¹Xe(4n)的 370.1(与¹⁰⁷Ru 中 371keV 峰重叠),515.1 与 681.9keV;属于¹⁴⁰Xe(5n)的 376.7,457.4 和 582.5keV). 通过仔细考察各级级跃迁间的符合关系以及与互补核间的符合关系,可靠地建立了新的¹⁰⁷Ru 的能级纲图.

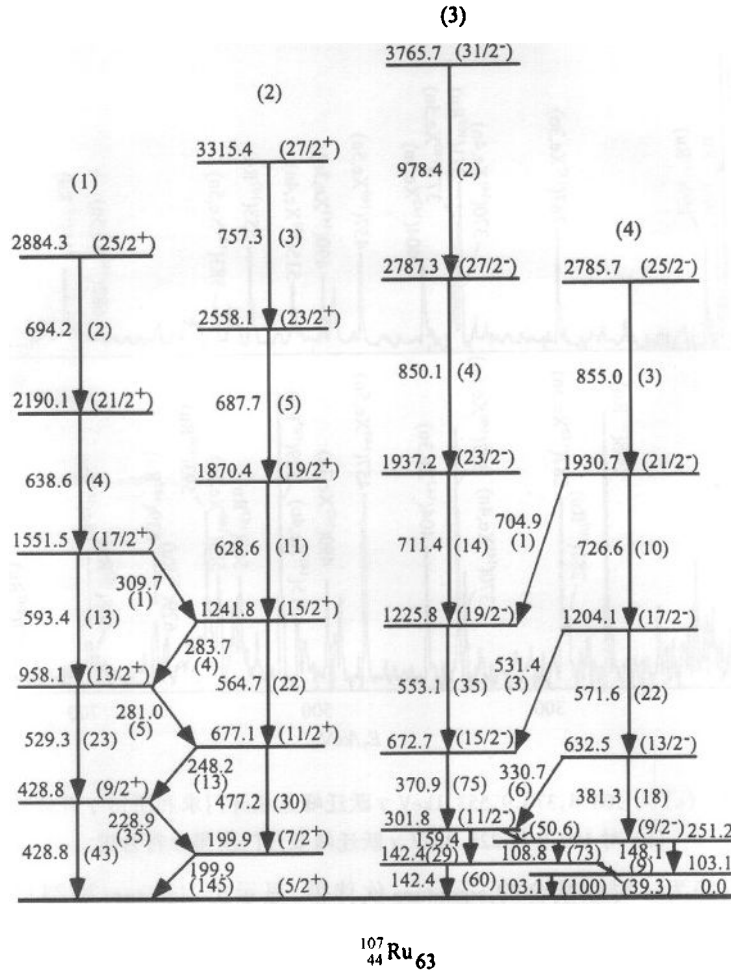


图 1 ¹⁰⁷Ru 能级图

在文献[3]中,¹⁰⁷Ru 基态自旋与宇称被暂定为(5/2⁺). 基于规则的跃迁与强度,在带(1)与带(2)内的级联跃迁具有 $\Delta I = 2$ 的 E2 跃迁特性,两带之间由 $\Delta I = 1$ 的 M1/E2 跃迁交叉相联,这是我们指定带(1)与带(2)能级自旋与宇称的基础. 带(1)与带(2)形成以基态为带头的典型的强耦合转动带结构,这种结构与在相邻同位素核¹⁰³Ru^[10]和¹⁰⁹Ru^[4,11]中所观测到的基态带结构类似. 通过与相邻同位素¹⁰⁹Ru^[4]和¹¹¹Ru^[12]的系统性比较,指定¹⁰⁷Ru 的带(3)为负宇称带,其带头能级为 301.8keV(11/2⁻),此带头能级与文献[4]中报道的不同,但新的结果仍然证实了文献[4]中报道的 711→553→371keV 级联跃迁是正确的,而没有任何证据表明存在文献[5]报道的 906.7→824.1→721.9→583.1→371.9keV 的 $\nu h_{11/2}$ 带结构. 图 1 中带(4)为新发现的转动带,其带头能级为 251.2keV. 基于与相邻同位素¹⁰⁹Ru

和¹¹¹Ru^[11]的系统性比较,我们暂定 251.2keV 能级自旋宇称为(9/2⁻),这样带(4)中其余能级的自旋宇称也就能推断出来.而在带(3)和带(4)以下几个能级的自旋与宇称目前尚不能确定.

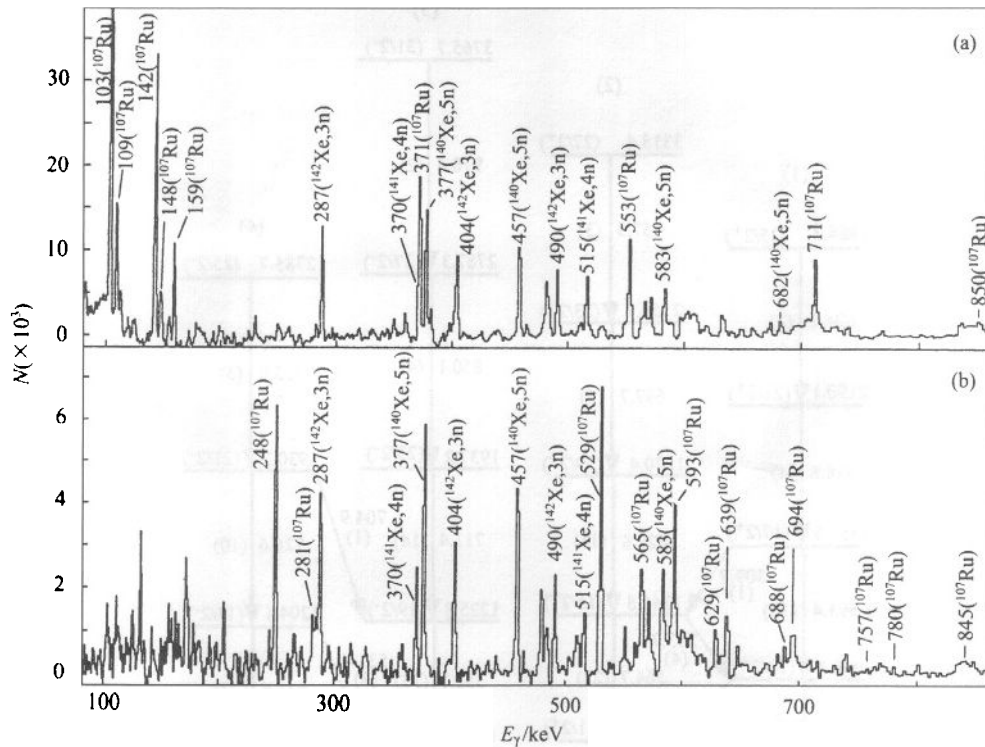


图 2 (a) 对 108.8, 370.9, 553.1keV γ 跃迁峰互相开门求和所得 γ 符合谱;
(b) 对 199.9 与 228.9keV γ 跃迁峰双开门所得 γ 符合谱

带(1)与带(2)为一对强耦合的 signature 伙伴带,显示出 signature 劈裂与反转. 图 3 为观测到的几个转动带的第一类转动惯量($J^{(1)}$)随转动频率 $\hbar\omega$ 变化图. 从图中可以看出,带(1)与带(2)的 $J^{(1)}$ 值随转动频率的变化表现出类似的特性:随 $\hbar\omega$ 的增加而增加,然而两条曲线的斜率却不一样,在 $\hbar\omega \approx 0.29\text{MeV}$ 处发生交叉,这是由于 signature 劈裂所引起的. 图 4 给出了带(1)与带(2)中能量差 $E(I) - E(I-1)$ 随自旋变化的曲线,由图我们不仅可以看到以上提到的 signature 劈裂,而且还看到了在 $I \approx 9.5\hbar$ 的地方发生 signature 反转. Signature 反转的原因尚不清楚,可能暗示着在 $I \approx 9.5\hbar$ 的地方结构发生了变化,值得理论上进一步探讨. 在¹⁰⁷Ru 中,基态带的 signature 劈裂可能与三轴形变有关. 在以前报道对偶-偶核^{108,110,112}Ru 的能级结构研究中,认为此 3 个核为 $\gamma \approx 20^\circ - 25^\circ$ 的三轴形变核^[1],所以我们有理由假定¹⁰⁷Ru 也为三轴形变核. 事实上,在我们对¹⁰⁷Ru 早期报道的文章^[4]中,曾利用三轴转子加准粒子模型计算了^{107,109}Ru 的转动带能级,所用形变能量为 $\beta_2 \approx 0.20, \gamma \approx 24^\circ$,得到了满意的计算结果. 计算指出,¹⁰⁷Ru 基态可能起源于 $\nu d_{5/2}$ 与 $\nu g_{7/2}$ 准粒子的组态混合,而带(3)可能起源于 $\nu h_{11/2}$ 中子轨道与相邻偶-偶核的耦合,即带(3)为惟一宇称带或闯入带.

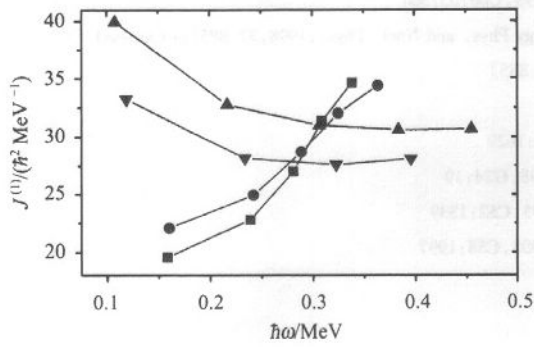


图 3 ¹⁰⁷Ru 中 4 个转动带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化
 —■—带(1), —●—带(2), —▲—带(3), —▼—带(4).

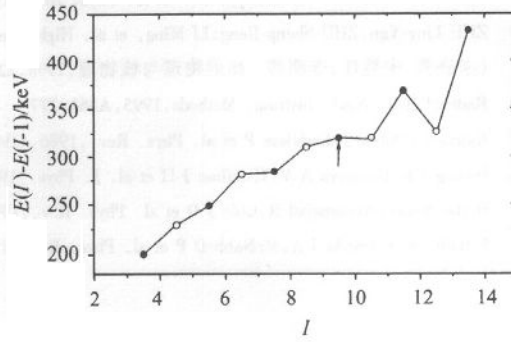


图 4 带(1)与带(2)激发能差 $E(I) - E(I-1)$ 随自旋 I 变化
 ○带(1), ●带(2).

从图 3 可以看出,在¹⁰⁷Ru 中 $\nu h_{11/2}$ 闯入带的转动惯量与基态带完全不同,它随转动频率 $\hbar\omega$ 的增加而减少. 如以上讨论所说,在许多相邻 Ru 奇 A 核中都观测到了 $\nu h_{11/2}$ 闯入带,包括^{109,111}Ru^[4,11,12] 及其他 $N \leq 63$ 的 Ru 同位素^[13]. 图 5 是已知的这些 Ru 奇 A 核中所观测到的 $\nu h_{11/2}$ 闯入带能级能量的系统性比较. 随着中子数的增加,带头能量减少,到 $N = 61$ 时达到最低值,过了 $N = 61$ 以后,带头能量增加缓慢. 可以看到,基本上是中子数在接近满壳层中部时,集体性逐渐增加,而¹⁰⁷Ru $h_{11/2}$ 中子态的激发能位于¹⁰⁵Ru (209keV) 与¹⁰⁹Ru (304keV) 之间. 这种能级的系统性光滑变化也支持了我们对于¹⁰⁷Ru 中 $h_{11/2}$ 转动带的指定. 对新发现的转动带(4),其起源尚不太清楚,其转动惯量 $J^{(1)}$ 要比 $\nu h_{11/2}$ 带低,但随转动频率变化的特性基本上与 $\nu h_{11/2}$ 带(3)相似,因此,带(4)也可能起源于 $\nu h_{11/2}$ 单粒子轨道,属于另一条惟一宇称(闯入)带.

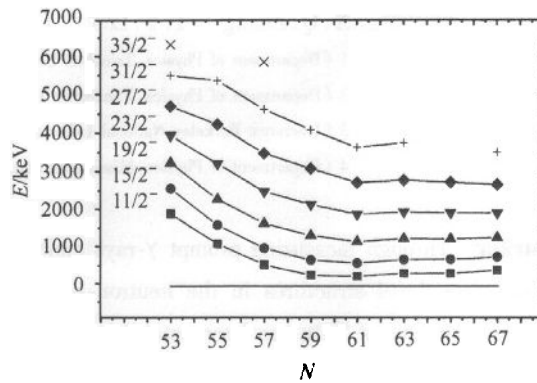


图 5 奇 A Ru 同位素的 $\nu h_{11/2}$ 带的能级能量 E 随中子数 N 系统性变化
 数据来自:对 $N \leq 61$ (文献[11]);对 $N = 63$ (现在的工作);
 $N = 65$ 与 67 (文献[4, 11, 12]).

参考文献 (References)

- 1 LU Q H, Butler-Moore K, ZHU S J et al. Phys. Rev., 1995, C52:1348
- 2 Hamilton J H, Ramayya A V, ZHU S J et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, 35:635
- 3 Satachel J, Kaffrell N, Stender E et al. Radiochimica Acta, 1979, 26:127
- 4 ZHU S J, GAN C Y, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1998, 15:793
- 5 Fotiades N, Cizewski J A, Krücken R et al. Phys. Rev., 2000, C61:064326
- 6 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 1999, C59:1316

- 7 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 1999, C60:051304
- 8 ZHU Ling-Yan, ZHU Sheng-Jiang, LI Ming, et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22: 885 (in Chinese)
(朱凌燕, 朱胜江, 李明等. 高能物理与核物理, 1998, 22: 885)
- 9 Radford D C. Nucl. Instrum. Methods, 1995, A361: 297
- 10 Kajrys G, Dubuc J, Lariviere P et al. Phys. Rev., 1986, C34: 1629
- 11 Hwang J K, Ramayya A V, Hamilton J H et al. J. Phys., 1998, G24: 19
- 12 Butler-Moore, Aryaenejad R, Cole J D et al. Phys. Rev., 1995, C52: 1339
- 13 Fotiades N, Cizewski J A, McNabb D P et al. Phys. Rev., 1998, C58: 1997

Collective Bands in Neutron-Rich ^{107}Ru Nucleus*

ZHU Sheng-Jiang¹ XU Rui-Qing¹ J. H. Hamilton² A. V. Ramayya²

J. K. Hwang² ZHANG Zheng¹ JIANG Zhuo¹ GAN Cui-Yun¹

X. Q. Zhang² I. Y. Lee³ J. O. Rasmussen³ W. C. Ma⁴

1 (Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA)

3 (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

4 (Department of Physics, Mississippi State University, MS 39762, USA)

Abstract Through measuring prompt γ -rays emitted in the spontaneous fission of ^{252}Cf with higher statistic data, level structures in the neutron-rich, odd-A ^{107}Ru nucleus have been re-investigated. New level scheme of ^{107}Ru has been established. The ground state band was extended with spin up to $\frac{27}{2}\hbar$. The $\nu h_{11/2}$ band structure observed in our previous publication has been confirmed and extended. These results clear up the inconsistency between our earlier work and results from another experiment published recently. A collective band built on $(9/2^-)$ level has been observed for the first time. Some important features of the level scheme have been discussed.

Key words nuclear structure, collective band, spontaneous fission

Received 23 October 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400), National Natural Science Foundation of China (19975028) and U. S. Department of Energy (DE-FG05-88ER40407)