

丰中子核 ^{113}Ru 集体转动带的识别*

张征¹ 朱胜江^{1,1)} J. H. Hamilton² A. V. Ramayya² J. K. Hwang² 许瑞清¹
姜卓¹ 肖树冬¹ 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, TN37235, USA)

3(Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA94720, USA)

4(Department of Physics, Mississippi State University, MS39762, USA)

摘要 通过对重核 ^{252}Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱的测量,对非常丰中子核 ^{113}Ru 的能级结构进行了研究,建立了较高自旋态的能级纲图,识别了基于中子 $h_{11/2}$ 轨道激发产生的集体转动带,最高自旋态达 $31/2\hbar$. 还发现了另一个可能基于 $9/2^-$ 能级的集体转动带. 对新建立的 ^{113}Ru 的集体带的一些重要特性进行了讨论.

关键词 核结构 集体带 自发裂变

奇 A 核 $^{113}\text{Ru}_{69}$ 的中子数比质子数超出 25 个,属于非常丰中子的核. 而丰中子 Ru 核 ($Z = 44, N = 70$) 位于基态大形变核 Sr, Zr ($Z = 38, 40; N = 58, 60$) 以及球形核 Sn 之间,通过对此区域内的 Ru 奇 A 核能级结构的系统性研究,可以获得有关核结构、核形变、单粒子驱动效应以及 $h_{11/2}$ 唯一宇称带(闯入带)的系统学特性等重要信息. 然而,用通常的重离子熔合一蒸发反应很难得到丰中子核的高自旋态,一种有效的实验方法是通过测量重核(如 ^{252}Cf 或 ^{248}Cm)自发裂变产生的瞬发 γ 谱进行研究^[1]. 近期报道的丰中子奇 A 核 $^{107,109,111}\text{Ru}$ 的集体转动带结构就是通过这种方法识别的^[2-6]. 实验中,利用大型 $\text{Ge}\gamma$ 探测器阵列(例如美国的 Gammasphere 或欧洲的 Eurogam)可以获得三重和三重以上 γ 符合事件,对此数据进行分析可以识别出属于所研究核(目标核)的 γ 射线,从而进行进一步的深入研究.

对于 ^{113}Ru 的集体转动带结构,迄今为止尚无任何报道,惟一的能级结构信息就是基态的半衰期^[7] 以及通过对 ^{113}Tc 的 β 衰变的研究识别的一些低激发态能级^[8]. 这里报道通过对 ^{252}Cf 的自发裂变产生

的瞬发 γ 谱的实验研究建立的新的 ^{113}Ru 的能级纲图,并首次发现了两个集体转动带.

即便是在 ^{252}Cf 自发裂变中,丰中子核 ^{113}Ru 的产额也很低,要识别 ^{113}Ru 的高自旋态也是很困难的. 为了能够观测到较弱的 γ 跃迁,需要获得统计性更高的实验数据. 实验是与国外实验组合作在美国洛仑兹伯克利国家实验室的 Gammasphere 探测装置上完成的,所用的 ^{252}Cf 源强约 $62\mu\text{Ci}$,置于两块 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的铁箔之间. 整个源放置在一个由 102 个反康 Ge 探测器组成的 Gammasphere 探测器阵列的中心,测量由 ^{252}Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱,记录三重以上的符合事件. 经过离线处理,建立了三维符合矩阵(Cube),最后得到在投影谱中具有 5.7×10^{11} 个折合成二维符合的有效事件数,此数据比我们在以前的实验中测量的数据^[3] 的统计性高约 15 倍. 详细的实验技术介绍可以参照其他文献 [3, 9, 10]. 符合数据利用本实验组 PC 机上安装的 Radware 程序包进行分析^[11].

在 ^{252}Cf 自发裂变中,产生围绕 $A = 100-150$ 区域内的上百个丰中子核,释放出成千上万种不同能

2002-11-19 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400),国家自然科学基金(19975028),美国能源部(DE-FG05-88ER40407)资助

1) E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn

量的 γ 射线. 在自发裂变产生的瞬发 γ 谱中, 由于许多属于不同核的 γ 跃迁谱线重叠在一起, 使得数据分析工作非常复杂. 在实验中采用 γ - γ - γ 三重符合技术, 可以去除大部分本底及干扰峰. 同时, 用“互补核”的跃迁可以识别属于目标核的新的 γ 谱线. 由 ^{252}Cf 裂变生成的两个质子数相加为 98 的产物碎块称为一对互补核. 两个互补核质量数相加往往比 252 少几个 (对应于发射不同数量的中子), 因此一个目标核对应的互补核可以有很多个. 由于裂变后发射中子的退激时间很短, 可以认为目标核及其互补核的 γ 跃迁是同时发生的, 具有符合关系. 因此, 用目标核的任意两条跃迁 γ 峰开门, 得到的符合门谱里除了包括目标核的一些级联 γ 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. 同样, 在对互补核的已知 γ 跃迁谱线开门得到的符合门谱中, 也应观察到目标核的一些强的 γ 跃迁谱线. 例如, 在本工作中, ^{113}Ru 的主要的互补核为: $^{137}\text{Xe}(2n)$, $^{136}\text{Xe}(3n)$ 和 $^{135}\text{Xe}(4n)$ (括号中的数字代表裂变后发射的中子数). 在研究过程中, 在对互补核 $^{137}\text{Xe}(2n)$, $^{136}\text{Xe}(3n)$ 和 $^{135}\text{Xe}(4n)$ 的已知 γ 跃迁谱线开门得到的门谱中, 除了包括 Xe 的其他 γ 跃迁峰外, 同时也应观察到目标核 ^{113}Ru 的 γ 跃迁

谱线.

为了能够建立 ^{113}Ru 的新能级图, 首先, 通过对其互补核 ^{136}Xe 和 ^{137}Xe 的已知 γ 跃迁峰开双门得到的门谱进行仔细的分析、比较, 从而初步识别出 3 个新的 γ 跃迁, 其能量分别为 113.4、147.7 和 416.2 keV. 这几个新 γ 跃迁很可能属于 ^{113}Ru . 然后, 通过对这几个新 γ 跃迁与其互补核 Xe 的 γ 跃迁开双门得到的门谱的分析, 可以确定这些跃迁就是属于 ^{113}Ru . 作为一个例子, 图 1 给出了数据分析中的两个符合门谱. 其中图 1(a) 为对新发现的 ^{113}Ru 的能量为 113.2 keV γ 跃迁与已知互补核 $^{136}\text{Xe}(3n)$ 的能量为 1312.7 keV γ 跃迁开双门得到的符合门谱. 从图中可以观察到属于 $^{136}\text{Xe}(3n)$ 的能量为 197.1、370.3 和 381.3 keV γ 峰. 图 1(b) 为对 ^{113}Ru 的能量为 113.2 keV 的 γ 跃迁与已知互补核 $^{137}\text{Xe}(2n)$ 的能量为 1219.1 keV 的 γ 跃迁开双门所得符合门谱. 在图中可观察到属于 $^{137}\text{Xe}(2n)$ 的能量为 311.3、314.1 和 400.0 keV 的 γ 峰. 同时, 在两个门谱中都观测到了能量为 147.1、154.0、262.1、409.2、416.1、562.3 和 696.8 keV 的几个新的 γ 峰, 应该是属于 ^{113}Ru 的 γ 跃迁. 而对于新识别的属于 ^{113}Ru 的 γ 跃迁谱线开门, 除可以观测到属于 ^{113}Ru 的 γ 峰外, 还可以清楚

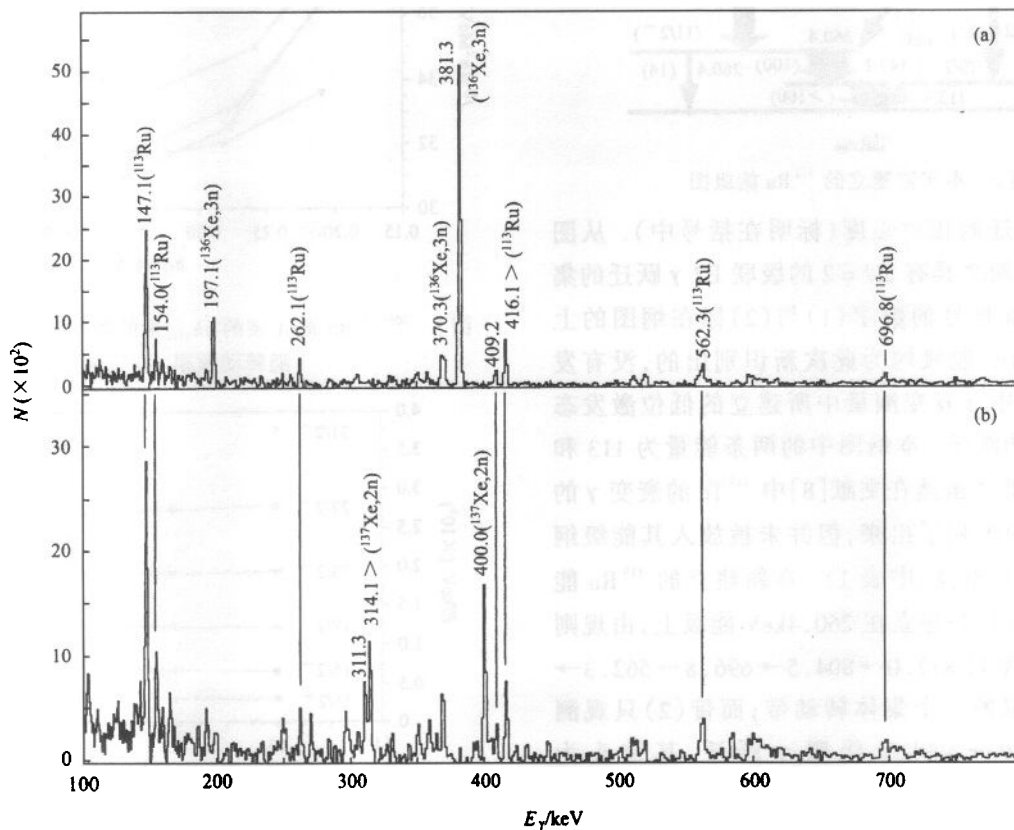


图 1 对 ^{113}Ru 的 113.2 keV 与 $^{136}\text{Xe}(3n)$ 的 1312.7 keV (a) 和 $^{137}\text{Xe}(2n)$ 的 1219.1 keV (b) γ 跃迁开双门得到的符合门谱

地观测到 ^{113}Ru 的互补核 Xe 的跃迁. 通过仔细的考察各级联跃迁间的符合关系以及与互补核间的符合关系, 建立了 ^{113}Ru 的能级纲图.

新建的 ^{113}Ru 能级纲图如图 2 所示, 包括 γ 跃迁

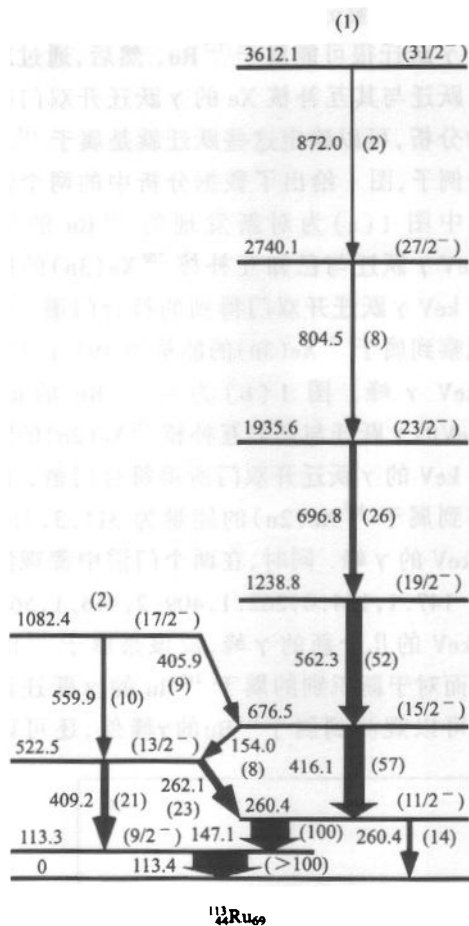


图 2 本实验建立的 ^{113}Ru 能级图

的能量、各跃迁的相对强度(标明在括号中). 从图中可以看出, 两个具有 $\Delta I = 2$ 的级联 E2 γ 跃迁的集体带结构用加括号的数字(1)与(2)标在纲图的上方. 纲图中所有能级均为此次新识别出的, 没有发现与文献[8]中 β 衰变测量中所建立的低位激发态能级相关联的跃迁. 本纲图中的两条能量为 113 和 147keV 的 γ 跃迁虽然在文献[8]中 ^{113}Tc 的衰变 γ 的符合关系表中被列了出来, 但并未被放入其能级纲图中(见参考文献[8]中表 1). 在新建立的 ^{113}Ru 能级纲图中, 带(1)为建立在 260.4keV 能级上, 由规则的强 γ 跃迁序列 872.0 \rightarrow 804.5 \rightarrow 696.8 \rightarrow 562.3 \rightarrow 416.1keV 组成的一个集体转动带; 而带(2)只观测到弱的 559.9 \rightarrow 409keV 级联 γ 跃迁, 其带头为 113.3keV 能级. 在带(1)与带(2)之间观测到 3 个弱的交叉跃迁, 能量为 262.1, 154.0 和 405.9keV. 在低自旋态部分, 观测到能量为 113.4 和 147.1keV 的两个

强的跃迁与能量为 260.3keV 的一个弱的跃迁. 两个集体转动带(1)与(2)由于布居的强度相差太大, 不像是共同构成一个强耦合带. 带(1)为转晕(yrast)带, 而带(2)为非转晕带. 在以往的报道中, 未对 ^{113}Ru 的任何能级(包括基态)的自旋宇称作出指定. 通过将 ^{113}Ru 与其相邻奇 A 核 $^{107-111}\text{Ru}$ 的集体带结构作系统学比较, 将带(1)指定为负宇称带, 带头为 260.4keV 能级, 其自旋宇称暂定为 $(11/2^-)$. 带(1)中的级联跃迁为 $\Delta I = 2$ 的 E2 跃迁, 这样, 依次确定这个集体转动带的能级的自旋宇称值直到 $(31/2^-)$. 对于带(2), 也是基于系统学比较, 在邻近的 $^{107, 109, 111}\text{Ru}$ 核中也发现相似的集体带结构^[3-6], 它们都建立在 $9/2^-$ 能级上, 将它的带头 113.1keV 能级的自旋宇称暂定为 $(9/2^-)$, 带内的其他两条能级依次定为 $(13/2^-)$ 和 $(17/2^-)$.

负宇称带(1)可能起源于 $h_{11/2}$ 中子轨道与相邻偶-偶核三轴形变芯耦合的结果, 即带(1)为惟一宇称带或者称闯入带. 在 Ru 奇 A 核的其他相邻同位素 ^{107}Ru ^[3,5], ^{109}Ru ^[2,4] 和 ^{111}Ru ^[2,4] 中都观察到这种闯入带. 图 3 给出了 $^{107-113}\text{Ru}$ 奇 A 核的 $\nu h_{11/2}$ 带的第一

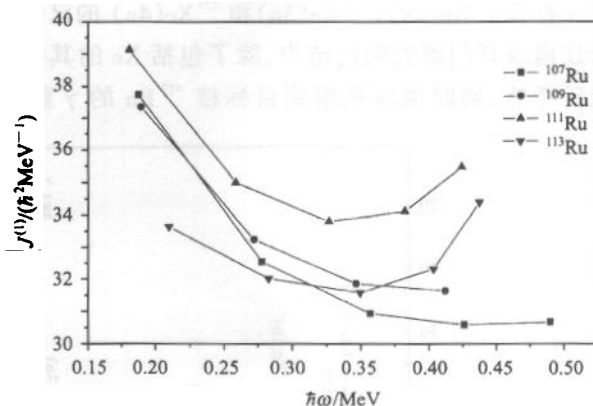


图 3 $^{107-113}\text{Ru}$ 奇 A 核的 $\nu h_{11/2}$ 带的第一类转动惯量 (J_1) 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化

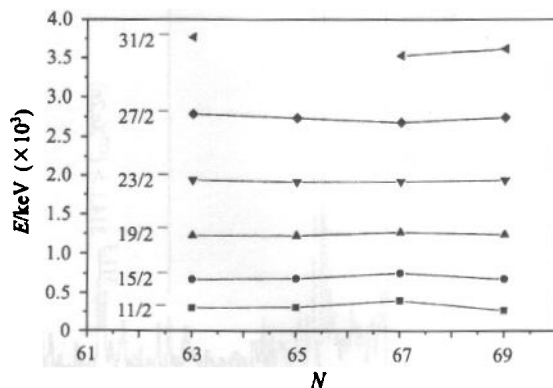


图 4 奇 A Ru 同位素的 $\nu h_{11/2}$ 带的能级能量 E 随中子数 N 的系统性变化

类转动惯量 (J_1) 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化曲线. 从图中可以看出, ^{107}Ru , ^{109}Ru 的 $\nu h_{11/2}$ 带转动惯量 J_1 随转动频率的变化表现出类似的特性. 然而还有区别: 当 $\hbar\omega < 0.3\text{MeV}$ 时, 这几个核的 J_1 随 $\hbar\omega$ 的增大而减小, 当 $\hbar\omega > 0.3\text{MeV}$ 以后, ^{107}Ru 和 ^{109}Ru 的 J_1 值继续随 $\hbar\omega$ 的增大而减少, 但 ^{111}Ru 和 ^{113}Ru 的 J_1 值则随 $\hbar\omega$ 的增大而增大. 这说明 ^{111}Ru 和 ^{113}Ru 的 $\nu h_{11/2}$ 闯入带结构更具有相似性. 图 4 为几个相邻的 Ru 奇 A 核的 $\nu h_{11/2}$ 闯入带的能级能量的系统性比

较. 从图中可以看出, 随着中子数的变化, 总体上能级能量变化曲线很平滑. 然而, 从中子数 $N = 63$ 变化到 $N = 67$, 其带头能级的能量在增加, 然而在 $N = 69$ 时又减小了. 由于 ^{113}Ru $\nu h_{11/2}$ 带的能级间隔比 ^{111}Ru 大, 说明了 ^{113}Ru ($N = 69$) 核的集体性比 ^{111}Ru ($N = 67$) 要小, 这与壳模型的预言是一致的. 对于新发现的带(2)的形成原因还不是很清楚, 但是在参考文献[5]中对这种带已有所讨论, 它可能也是由 $\nu h_{11/2}$ 单粒子轨道引起的, 也属于惟一宇称(闯入)带.

参考文献 (References)

- Hamilton J H, Ramayya A V, ZHU S J et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, 35: 635
- Butler-Moore K, Aryaenejad R, Cole J D et al. Phys. Rev., 1995, C52: 1339
- ZHU S J, GAN C Y, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1998, 15: 793
- Hwang J K, Ramayya A V, Hamilton J H et al. J. Phys., 1998, G24: L9
- ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 2001, 014307
- ZHU Sheng-Jiang, XU Rui-Qing, Hamilton J H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, 26: 791 (in Chinese) (朱胜江, 许瑞清, Hamilton J H 等, 高能物理与核物理, 2002, 26: 791)
- Penttila H, Taskinen P, Jaaho P et al. Phys. Rev., 1988, C38: 931
- Kurpeta J, Lhersonneau G, WANG J C et al. Eur. Phys. J., 1998, A2: 241
- ZHU S J, LU Q H, Hamilton J H et al. Phys. Lett., 1995, B357: 273
- ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 1999, C59: 1316
- Radford D C. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 1995, A361: 297

Identification of Collective Bands in Neutron-Rich ^{113}Ru Nucleus *

ZHANG Zheng¹ ZHU Sheng-Jiang^{1,1)} J. H. Hamilton² A. V. Ramayya² J. K. Hwang²
 XU Rui-Qing¹ JIANG Zhuo¹ XIAO Shu-Dong¹ 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, TN37235, USA)

3 (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA94720, USA)

4 (Department of Physics, Mississippi State University, MS39762, USA)

Abstract Through measuring high-fold prompt γ -ray coincidence events following the spontaneous fission of ^{252}Cf with the Gammasphere detector array, new level scheme in the very neutron-rich odd-A ^{113}Ru nucleus has been established. An intruder collective band based on $11/2^-$ level has been identified with spin up to $31/2^- \hbar$ and excitation energy 3.6 MeV. This band most probably originates from $\nu h_{11/2}$ intruder orbital. Another collective band probably built on $9/2^-$ level is also observed. Some important characteristics of the collective bands have been systematically discussed.

Key words nuclear structure, collective band, spontaneous fission

Received 19 November 2002

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

1) E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn