

## 丰中子核 $^{112}\text{Ru}$ 的集体带结构\*

车兴来<sup>1;1)</sup> 朱胜江<sup>1</sup> J. H. Hamilton<sup>2</sup> A. V. Ramayya<sup>2</sup> J. K. Hwang<sup>2</sup>  
J. O. Rasmussen<sup>3</sup> Y. X. Luo<sup>2,3</sup> 陈永静<sup>1</sup> 丁怀博<sup>1</sup> 李明亮<sup>1</sup>

1(清华大学物理系 北京 100084)

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

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

**摘要** 通过对重核 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变产生的瞬发 $\gamma$ 谱的测量,对丰中子核 $^{112}\text{Ru}$ 的能级结构进行了研究,确认和扩展了基带和单声子 $\gamma$ 振动带,同时识别了两个新的边带,认定它们分别为二准粒子带和二声子 $\gamma$ 振动带. TRS模型计算表明 $^{112}\text{Ru}$ 核具有三轴形变,其形变参数为 $\beta_2 \sim 0.27$ ,  $\gamma \sim -29^\circ$ . 推转壳模型的计算结果表明 $^{112}\text{Ru}$ 核基带回弯是由 $h_{11/2}$ 轨道的一对中子发生角动量的顺排所致. 对该核二准粒子带以及 $\gamma$ 振动带的特性也进行了讨论.

**关键词** 核结构 准粒子带  $\gamma$ 振动带 自发裂变

$^{112}\text{Ru}$ 丰中子核位于 $A=100$ 大形变区. 对该区高自旋态的研究可以提供有关核结构的丰富信息,比如核形状的系统性变化、单粒子运动与集体运动特性、新的准粒子带等<sup>[1-6]</sup>. 然而,用通常的重离子熔合-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 $^{252}\text{Cf}$ 或 $^{248}\text{Cm}$ )自发裂变产生的瞬发 $\gamma$ 谱进行研究<sup>[1]</sup>. 近期报道的丰中子核 $^{108,110,112}\text{Ru}$ 的一些集体带结构就是通过上述方法识别的<sup>[7-11]</sup>. 实验中,利用大型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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 射线,从而进行进一步的深入研究. 这里我们报道对 $^{112}\text{Ru}$ 核高自旋态研究的新结果.

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 $^{252}\text{Cf}$ 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 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变产生的瞬发 $\gamma$ 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 $5.7 \times 10^{11}$ 个折合成二维符合的有效事件数,此数据比以前的实验中测量的数据<sup>[2, 12]</sup>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<sup>[2, 12, 13]</sup>.

符合数据利用本实验组PC机上安装的Radware程序包进行分析<sup>[14]</sup>. 通过对符合关系和跃迁强度的仔细验证,得到了 $^{112}\text{Ru}$ 新的能级纲图,如图1所示. 各个集体带结构用加括号的数字标在纲图上方,对晕带(1)把自旋态识别到 $16\hbar$ ,验证了文献<sup>[8, 15]</sup>的结果. 带(2)为单声子 $\gamma$ 振动带<sup>[8]</sup>,在我们的工作中将带(2)进行了显著地扩展,使其自旋态达到 $15\hbar$ ,同时在带(2)中观测到4个新的 $\Delta I=1$ 跃迁. 带(3)和带(4),分别建立在 $1413.6\text{keV}$ 和 $2230.3\text{keV}$ ,是我们的工作中首次建立的. 另外,本次工作还识别了大量的带间馈入跃迁.

为了进一步理解晕带的特性,我们从实验提取了第一类转动惯量见图2. 从图2(a)可以看到, $^{108,110,112}\text{Ru}$ 都有集体回弯现象,其位置都在 $\hbar\omega \approx 0.4\text{MeV}$ 附近,只是在 $^{108}\text{Ru}$ ,  $^{110}\text{Ru}$ 中集体回弯较陡,而在 $^{112}\text{Ru}$ 中则较为缓慢. 同时进行了推转壳模型的计算<sup>[16, 17]</sup>,计算包括TRS(总罗斯量)与准粒子能级. TRS的计算表明, $^{112}\text{Ru}$ 具有平均形变参数 $\beta_2=0.27$ ,

\* 国家自然科学基金(10375032, 10575057)和教育部博士点基金(20030003090)资助

1) E-mail: chexl02@mails.tsinghua.edu.cn

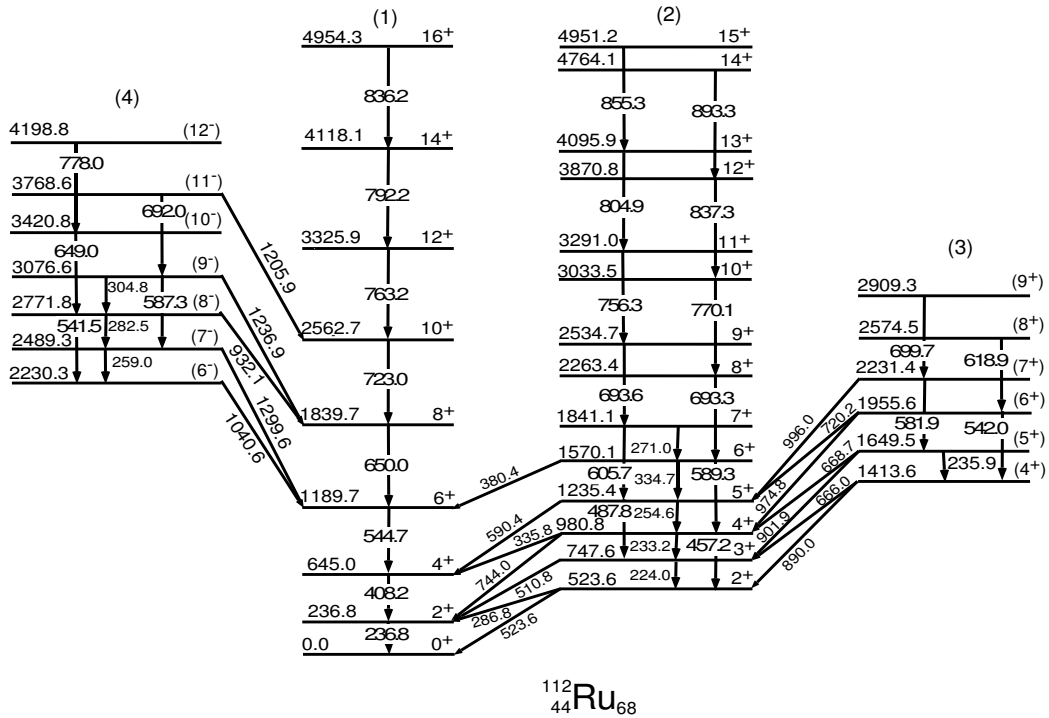


图 1  $^{112}\text{Ru}$  能级纲图

图可见，一对  $h_{11/2}$  中子顺排引起的带交叉刚好出现在  $\hbar\omega=0.4\text{MeV}$  附近，这一结果和实验符合得很好，而从质子的计算结果中直到  $\hbar\omega=0.6\text{MeV}$  还看不到有带交叉产生。因此， $^{112}\text{Ru}$  核晕带的集体回弯是由一对  $h_{11/2}$  中子顺排引起的。

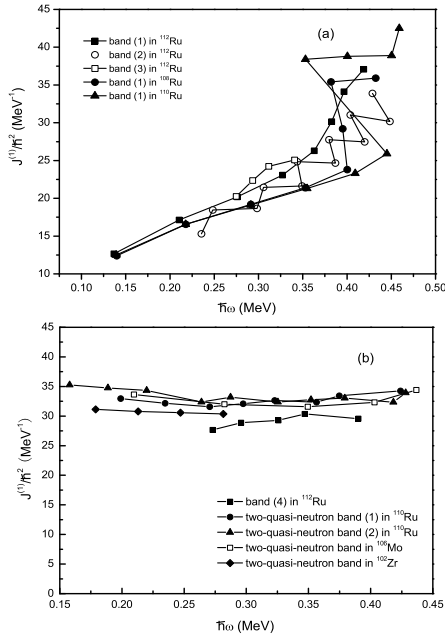


图 2 (a)  $^{112}\text{Ru}$  中带 (1), (2), (3) 及  $^{108,112}\text{Ru}$  中晕带第一类转动惯量  $J^{(1)}$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化图; (b)  $^{112}\text{Ru}$  中带 (4) 及  $^{106}\text{Mo}$ ,  $^{102}\text{Zr}$  和  $^{110}\text{Ru}$  中准粒子带一类转动惯量  $J^{(1)}$  随转动频率  $\hbar\omega$  的变化图

$\gamma = -29^\circ$ ，说明  $^{112}\text{Ru}$  具有三轴形变。推转壳模型算得的  $^{112}\text{Ru}$  核的中子和质子准粒子能级如图 3 所示。由

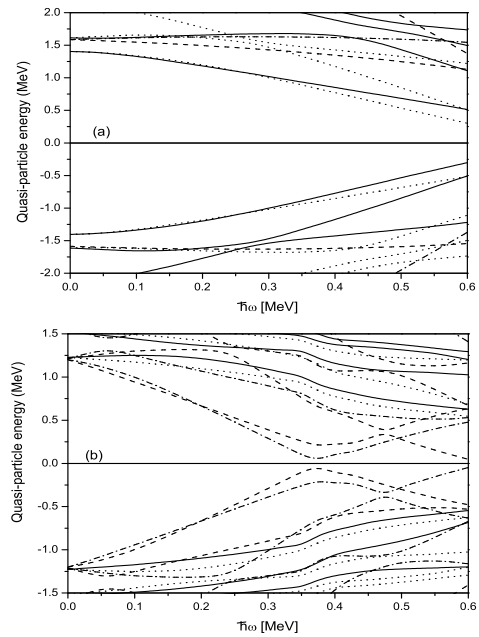


图 3  $^{112}\text{Ru}$  准粒子能级图 (a) 准质子 (b) 准中子  
 实线:  $(\pi, \alpha) = (+, +1/2)$ , 点线:  $(\pi, \alpha) = (+, -1/2)$ ,  
 点划线:  $(\pi, \alpha) = (-, +1/2)$ , 虚线:  $(\pi, \alpha) = (-, -1/2)$ 。

带(2)是单声子 $\gamma$ 振动带<sup>[8]</sup>,本次工作把该带自旋态从原来的 $9\hbar$ 扩展到 $15\hbar$ .新识别的 $\Delta I=1$ 的跃迁给出了带(2)作为单声子 $\gamma$ 振动带的强有力证据.图2(a)给出带(2)的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化.由图可见,该曲线有明显的旋称劈裂,这可能由于 $^{112}\text{Ru}$ 具有三轴形变引起.带(3)是本次工作中新观察到的带.由于邻近核 $^{104,106}\text{Mo}$ <sup>[5]</sup>和 $^{108}\text{Ru}$ <sup>[11]</sup>中的二声子 $\gamma$ 振动带的带结构和带(3)的带结构很相似,从系统学比较出发,我们认为带(3)也是一个二声子 $\gamma$ 振动带.图2(a)同时给出实验提取的带(3)的第一类转动惯量随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化.从图中可以看到,带(1)、

带(2)、带(3)具有相似的转动惯量,这也是支持带(3)为二声子 $\gamma$ 振动带的一个证据.

对于新建立的带(4),我们认为其带结构与邻近核 $^{102}\text{Zr}$ <sup>[4]</sup>, $^{106}\text{Mo}$ <sup>[6]</sup>和 $^{108,110}\text{Ru}$ <sup>[10,11]</sup>中发现的二准粒子带相似,由系统学原理,建议该带为二准粒子带.根据系统学比较和跃迁选择定则,我们建议带(4)的带头的自旋宇称为 $6^-$ .图2(b)给出 $^{112}\text{Ru}$ 的带(4)与 $^{102}\text{Zr}$ , $^{106}\text{Mo}$ 及 $^{110}\text{Ru}$ 的二准粒子带的 $J^{(1)}$ 随 $\hbar\omega$ 的变化曲线.由图可见,这些带的转动惯量非常相似.根据尼尔逊能级图,我们建议带(4)的带头组态为 $\{\nu[402]5/2^+ \otimes \nu[523]7/2^-\}6^-$ .

### 参考文献(References)

- 1 Hamilton J H et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, **35**: 635
- 2 ZHU S J et al. Chin. Phys. Lett., 1998, **15**: 793
- 3 Durell J L et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: R2306
- 4 YANG L M et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**: 24
- 5 XU R Q et al. Chin. Phys. Lett., 2002, **19**: 180
- 6 ZHANG Z et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064307
- 7 ZHU S J et al. Rev. Mex. Fis., 1992, **38**: 53
- 8 LU Q H et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 1348
- 9 Deloncle I et al. Eur. Phys. J., 2000, **A8**: 177—185
- 10 JIANG Z et al. Chin. Phys. Lett., 2003, **20**: 350
- 11 CHE X L et al. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**: 1904
- 12 ZHU S J et al. Phys. Rev., 1999, **59**: 1316
- 13 ZHU S J et al. Phys. Lett., 1995, **B357**: 273
- 14 Radford D C et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A361**: 297
- 15 HUA H et al. Phys. Lett., 2003, **B562**: 210
- 16 Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1972, **A237**: 139
- 17 Frauendorf S et al. Phys. Lett., 1983, **B125**: 219

## High Spin Band Structure in $^{112}\text{Ru}$ \*

CHE Xing-Lai<sup>1,1)</sup> ZHU Sheng-Jiang<sup>1</sup> J. H. Hamilton<sup>2</sup> A. V. Ramayya<sup>2</sup> J. K. Hwang<sup>2</sup>  
J. O. Rasmussen<sup>3</sup> Y. X. Luo<sup>2,3</sup> CHEN Yong-Jing<sup>1</sup> LI Ming-Liang<sup>1</sup> DING Huai-Bo<sup>1</sup>

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

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

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

**Abstract** Through measuring high-fold prompt  $\gamma$ -ray coincidence events following the spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$  with the Gammasphere detector array, new level scheme in the very neutron-rich  $^{112}\text{Ru}$  nucleus has been established. The ground-state band and the one-phonon  $\gamma$ -vibrational band have been confirmed and extended with spin up to  $16\hbar$  and  $15\hbar$ , respectively. The other two side bands, one proposed as two-phonon  $\gamma$ -vibrational band and another proposed as two-quasiparticle band, have been identified for the first time. From cranked shell model calculations,  $^{112}\text{Ru}$  nucleus may have triaxial deformation with parameters  $\beta_2 \sim 0.27$ ,  $\gamma \sim -29^\circ$  and the band crossing in the yrast band is due to the alignment of two  $h_{11/2}$  neutrons. The characteristics for the quasiparticle band and  $\gamma$ -vibrational bands have also been discussed.

**Key words** nuclear structure, quasiparticle band,  $\gamma$ -vibrational band, spontaneous fission

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375032, 10575057) and Special Program of Higher Education Science Foundation(20030003090)

1) E-mail: chexl02@mails.tsinghua.edu.cn