

丰中子奇 A 核 $^{145,147}\text{Ce}$ 的集体带结构*

M. 萨哈伊 朱胜江 甘翠云 朱凌燕 杨利明
许瑞清 全明吉 姜卓 张征

J. H. Hamilton¹ A. V. Ramayya¹ B. R. S. Babu¹ J. K. Hwang¹ W. C. Ma²
J. Komicki¹ J. D. Cole³ R. Aryaeinejad³ M. W. Drigert³ J. O. Rasmussen⁴
M. A. Stoyer⁴ S. Y. Chu⁴ K. E. Gregorich⁴ M. F. Mohar⁴ S. G. Prussin⁴
I. Y. Lee⁴ Yu. Ts. Oganessian⁵ G. M. Ter-Akopian⁵ A. V. Daniel⁵

(清华大学物理系 北京 100084)

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

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

3(Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID 83415, USA)

4(Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

5(Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia)

摘要 通过对 ^{252}Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱的测量,对丰中子奇 A 核 $^{145,147}\text{Ce}$ 的高自旋态进行了研究. 首次识别了 ^{145}Ce 的集体带结构,扩展了 ^{147}Ce 的能级,并新识别了 3 个边带. 粒子-转子模型的计算指出, $^{145,147}\text{Ce}$ 的晕带可能来自于 $\nu i_{13/2}$ 轨道的耦合, ^{145}Ce 基态起源于 $(\nu h_{9/2} \otimes \nu f_{7/2})$ 组态混合,而 ^{147}Ce 基态则起源于 $\nu h_{9/2}$ 轨道. 在这两个核中未观测到明显的八极形变带,然而,在 ^{147}Ce 中观测到的一个边带,可能显露出八极关联的迹象.

关键词 核结构 集体带 自发裂变

丰中子奇 A 核 $^{145,147}\text{Ce}$ 位于 $Z=56, N=88$ 的八极形变区域内. 近年来在此区内高自旋态的研究,尤其是对于八极形变的研究已取得很大进展,相继报道出具有八极形变的核有: $^{139}\text{Xe}^{[1,2]}$, $^{140-144,146,148}\text{Ba}^{[1,3-7]}$, $^{145,147}\text{La}^{[8-10]}$, $^{144,146}\text{Ce}^{[11,12]}$ 等. 对于奇 A 核 $^{145,147}\text{Ce}$ 高自旋态的研究可以为系统研究此区内核结构的特性,诸如核的形状变化、单粒子耦合特性、八极形变等提供重要信息. 然而,对于此区内的核很难用通常的重离子熔合-蒸发反应研究其高自旋态,一种有效的方法是测量由重核裂变产生的瞬发 γ 谱来进行研究^[13,14],而上述众多核的八极形变特性正是通过这种方法的研究发现的. 对于 $^{145,147}\text{Ce}$ 的

1999-10-27 收稿

* 国家自然科学基金(19775026),核工业科学基金(Y7197AY509)以及美国能源部(DE-FC05-88ER40407 DE-FC03-87ER40323)资助

能级结构研究,早期的报道主要围绕 β 衰变谱的测量,研究其低激发态特性^[15,16]. 近年来从裂变瞬发 γ 谱的研究中,报道了 ^{147}Ce 的一个集体带结构^[17]. 而对于 ^{145}Ce 核,尚没有高自旋集体带结构的报道. 本工作通过对 ^{252}Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱的分析,将报道对于 $^{145,147}\text{Ce}$ 新的高自旋态的研究结果.

实验技术及数据处理方法参见文献[1,3,4,13,14],这里仅作简略叙述. 实验是由众多研究组联合在美国洛伦兹伯克利国家实验室(LBNL)的 Gammasphere 上进行的,用 72 个反康 Ge 探测器组成的阵列测量由 ^{252}Cf 自发裂变产生的瞬发 γ 谱,记录三重以上的符合事件. 所用 ^{252}Cf 源的裂变强度为 $6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$,得到约 9.8×10^9 个折合成两重符合的事件数. 对于所测实验数据,建立了三维 γ - γ - γ 符合矩阵.

数据分析是在清华大学进行的,采用功能很强的数据处理软件包. 尽管在自发裂变中围绕 $A=100-150$ 区域产生大量的丰中子核,这些核的高自旋及低自旋态退激 γ 谱线混杂在一起,使得数据分析工作极其复杂,然而,采用三维 γ - γ - γ 符合(双开门)方法能消除绝大部分干扰谱线,使特定核的极弱跃迁的识别成为可能. 另一种识别新跃迁的方法是利用互补核. 当对某个特定核的 γ 谱线开门时,除了能够观测到其本身的级联 γ 跃迁外,其互补核的 γ 谱线也能观测到. 图 1 为对两个 γ 跃迁谱线进行双开门得到的符合能谱. 图 1(a)谱图为对已知 ^{104}Zr 的 140.3 与 312.5keV γ 跃迁进行双开门所得符合能谱. 从图中可以看到,除了出现属于 ^{104}Zr 的 473 与 624keV 的 γ 跃迁峰外,还可以清楚地看到对应于不同中子发射道的 γ 跃迁峰: 属于 $^{147}\text{Ce}(1n)$ 的 118, 251, 283keV γ 峰,属于 ^{146}Ce

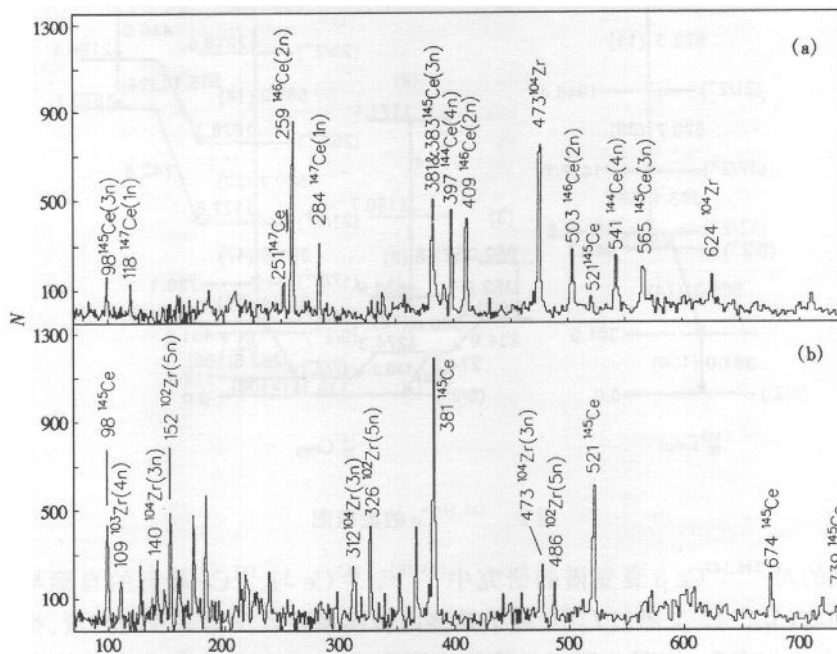


图 1 (a)对 ^{104}Zr 的 140.3 与 312.5keV γ 峰;(b)对 ^{145}Ce 的 381.3 与 565.3keV γ 峰双开门所得的符合谱

(2n) 的 259, 409, 503keV γ 峰, 属于 $^{144}\text{Ce}(4n)$ 的 397, 541keV γ 峰. 此外, 还观测到 98, 381, 383, 521, 565keV 等几个新的 γ 峰. 通过对 ^{101}Zr , ^{103}Zr (属于 Ce 互补核) γ 峰开门的反复比较、核对, 证实以上新的跃迁属于 ^{145}Ce 的 γ 谱线. 图 1(b) 谱图为对 383.1 与 565.3keV γ 跃迁双开门所得符合能谱. 从图中可以清楚地看到属于 ^{145}Ce 的 98, 381, 521, 673 与 733keV 的 γ 峰. 此外, 还观测到 ^{145}Ce 的互补核 $^{104}\text{Zr}(3n)$, $^{103}\text{Zr}(4n)$, $^{102}\text{Zr}(5n)$ 的跃迁谱线. 经过反复开门比较其符合关系以及跃迁的强度关系, 建立起新的 ^{145}Ce 的能级图.

图 2 给出新建的 $^{145,147}\text{Ce}$ 的能级图, 包括部分 γ 跃迁的相对强度. 为讨论方便, 在 ^{145}Ce 中的具有 E2 跃迁的集体带结构标在能级图的上方. 对 ^{145}Ce , 所有的能级与跃迁为新识别的, 且未发现任何跃迁连接到已知的 β 衰变所测到的低激发态能级^[15]上. 对于 ^{147}Ce , 在文献[17]中报道的能级与跃迁(带(1))都得到了证实. 此外, 观测到了 274.3keV 能级, 此能级经由 156.2keV 与 274.3keV 的 γ 跃迁分别馈入到 118.1keV 与基态能级. 274.3keV 能级在早期的 β 衰变研究中^[16]曾报道过, 然而在文献[17]中并未作报道. 在本工作中还新识别了建立在 274.3keV 能级之上的集体带(2)以及另外两个边带(3)与(4)连同某些边带跃迁.

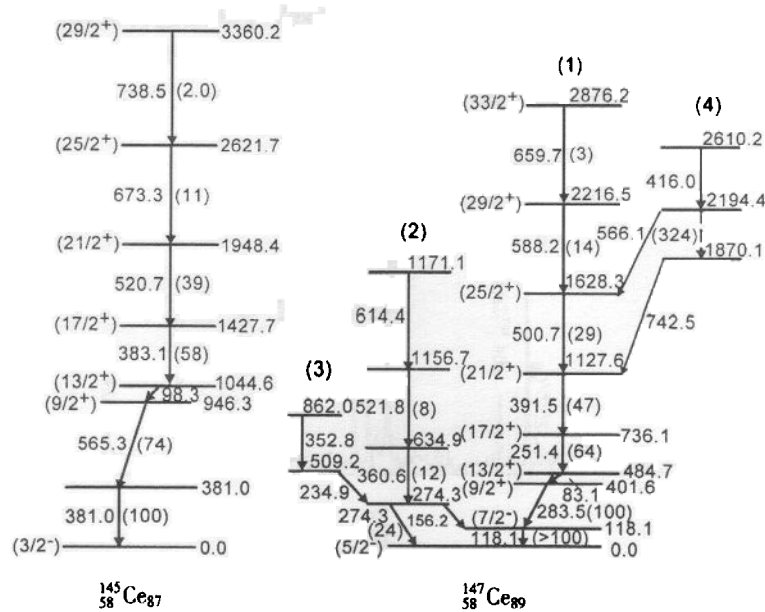


图 2 $^{145,147}\text{Ce}$ 的能级图

在早期的对 $^{145,147}\text{Ce}$ β 衰变谱的研究中^[15,16], ^{145}Ce 与 ^{147}Ce 基态的自旋与宇称被暂定为 $(3/2^-)$ 与 $(5/2^-)$. 文献[17]中, 基于某些内转换系数以及角关联的测量, 指定了 ^{147}Ce 中带(1)的自旋与宇称, 如图 2 所示. 基于这两个丰中子奇 A 核集体带结构的系统学比较, 我们指定 ^{145}Ce 中 946.3keV 与 1044.6keV 能级的自旋与宇称分别为 $(9/2^+)$ 与 $(13/2^+)$. 这样, 在 ^{145}Ce 中, 在 $(13/2^+)$ 能级以上, 4 个有规则的 γ 跃迁, 383.1, 520.7, 673.3, 738.5keV, 形成一个集体转动带. 带中的级联跃迁为 $\Delta I = 2$ 的 E2 跃迁, 依此推得

这个集体带每个能级的自旋与宇称.

文献[17]中提出,在 ^{147}Ce 中建立在 485keV 能级上的带(1)应具有 $\nu i_{13/2}$ 组态. 而我们在 ^{145}Ce 中所观测到的新的基于 1044.6keV 能级上的集体带也应有 $\nu i_{13/2}$ 组态. 为了寻找在这两个核中建立在 $13/2^+$ 能级上的晕带的起源,我们进行了具有可变转动惯量(VMI)的粒子转子模型(PRM)的计算,计算的方法与文献[18,19]类似. 所用参量:对于 ^{145}Ce , $\epsilon_2 = 0.14, \epsilon_4 = 0, \gamma = 0^\circ$; 对于 ^{147}Ce , $\epsilon_2 = 0.16, \epsilon_4 = 0, \gamma = 0^\circ$. 计算时对每个核的正负宇称态分开进行,其中另一个可调参量为科里奥利力衰减因子 ξ , 对 ^{145}Ce 的正负宇称态, ξ 的取值分别为 0.650 与 0.200; 对 ^{147}Ce 分别为 0.820 与 0.750, 其它参量取标准值. 算得的能级与实验比较见图 3, 总体上符合较好. 结果表明,在 ^{145}Ce 与 ^{147}Ce 中建立在 $13/2^+$ 能级上的晕带确实起源于 $\nu i_{13/2}$ 中子(连同非常弱的 $\nu g_{9/2}$ 分量)的单粒子激发与 $^{144}\text{Ce}, ^{146}\text{Ce}$ 偶-偶核芯的耦合, 这个结果支持了对于 ^{145}Ce 的 $13/2$ 带自旋与宇称的指定. 另一方面,在 ^{145}Ce 的集体带中的能级间距与核芯 ^{144}Ce 的晕带^[12] 非常接近,表现出完全的退耦特性,正如在文献[17]中对于 ^{147}Ce 的晕带特性所讨论的那样. 计算还表明, ^{145}Ce 的基态($3/2^-$)可能起源于 $(\nu h_{9/2} \otimes \nu f_{7/2})$ 组态混合,而 ^{145}Ce 的基态($5/2^-$)可能起源于 $\nu h_{9/2}$ 单粒子轨道分别与其偶-偶核芯的耦合形成的. 另一方面,从图 3 可以看出,在 ^{145}Ce 中的 381.0keV 能级的自旋与宇称可能为 $(7/2^-)$, 因为它的能量接近于计算得到的 $7/2^-$ 能级的能量(375keV). 对于在 ^{147}Ce 中的两个弱的边带(2)与(3)的自旋与宇称,在我们的实验中尚不能确定,带(3)可能与此区内其它核类似^[20], 属于 $h_{9/2}$ 带.

$29/2^+ 3360$	$29/2^+ 3393$		
		$33/2^+ 2876$	$33/2^+ 2911$
$25/2^+ 2621$	$25/2^+ 2656$		
		$29/2^+ 2216$	$29/2^+ 2266$
$21/2^+ 1948$	$21/2^+ 1998$		
		$25/2^+ 1628$	$25/2^+ 1679$
$17/2^+ 1427$	$17/2^+ 1446$		
$13/2^+ 1044$	$13/2^+ 1063$	$21/2^+ 1126$	$21/2^+ 1164$
	$\nu i_{13/2}$ 耦合	$17/2^+ 736$	$17/2^+ 745$
		$13/2^+ 484$	$13/2^+ 481$
381	$7/2^- 375$		$\nu i_{13/2}$ 耦合
$3/2^- 0.0$	$3/2^- 0.0$	$5/2^- 0.0$	$5/2^- 0.0$
实验值	$(\nu h_{9/2} \otimes \nu f_{7/2})$ 耦合 计算值	实验值	$(\nu h_{9/2})$ 耦合 计算值
^{145}Ce		^{147}Ce	

图 3 粒子-转子模型计算得到的 $i_{13/2}$ 带能级与实验的比较

计算还表明, ^{145}Ce 的基态($3/2^-$)可能起源于 $(\nu h_{9/2} \otimes \nu f_{7/2})$ 组态混合,而 ^{145}Ce 的基态($5/2^-$)可能起源于 $\nu h_{9/2}$ 单粒子轨道分别与其偶-偶核芯的耦合形成的. 另一方面,从图 3 可以看出,在 ^{145}Ce 中的 381.0keV 能级的自旋与宇称可能为 $(7/2^-)$, 因为它的能量接近于计算得到的 $7/2^-$ 能级的能量(375keV). 对于在 ^{147}Ce 中的两个弱的边带(2)与(3)的自旋与宇称,在我们的实验中尚不能确定,带(3)可能与此区内其它核类似^[20], 属于 $h_{9/2}$ 带.

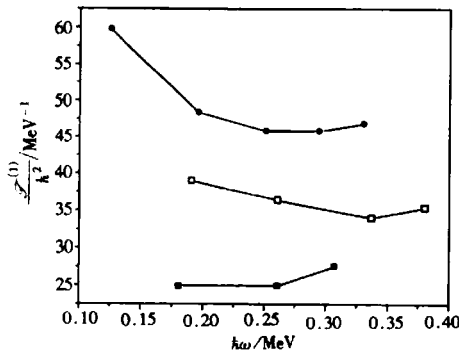


图 4 $^{145,147}\text{Ce}$ 的部分集体带转动惯量 $J^{(1)} / k^2$ 随转动频率 $h\omega$ 变化
—□— ^{145}Ce 带, —●— ^{147}Ce 带(1),
—■— ^{147}Ce 带(2).

进一步考察 ^{145}Ce 与 ^{147}Ce 中的 $\nu i_{13/2}$ 带,两者具有类似的特征. 图 4 绘出这两个核中的 $\nu i_{13/2}$ 带以及 ^{147}Ce 中的带(2)的转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $h\omega$ 的变化图. ^{147}Ce 的 $i_{13/2}$ 带的转动惯量较 ^{145}Ce 的要大,反映随中子数远离 $N = 82$ 的满壳层,其形变值加大. 然而两者随转动频率 $h\omega$ 的变化趋势是相同的,在低频情况下,随着转动频率的增加,转动惯量变小,转动频率较高时,转动惯量又变大,这与此区域内

其它核的 $i_{13/2}$ 带的特性很相似. 然而对 ^{147}Ce 中的带(2), 转动惯量转动频率的变化总体上来讲是增加的, 表明带(2)与晕带相比, 确实起源于不同的单粒子轨道.

在 $^{145,147}\text{Ce}$ 中没有观测到明显的八极形变带结构. 说明 $i_{13/2}$ 奇中子的耦合减弱了八极形变效应. 然而, 从与相邻偶-偶核的系统性比较可以看出, 在 ^{147}Ce 中观测到的弱的边带(4)可能属于负宇称带, 带(1)与带(4)可能存在弱的八极关联. 由于跃迁强度太弱, 本实验尚不能测出 $B(E1)/B(E2)$ 值, 需要进一步的实验证实.

参考文献 (References)

- 1 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:L77
- 2 Bentaleb M, Schulz N, Lubkiewicz et al. *Z. Phys.*, 1994, **A348**:245
- 3 ZHU S J, WANG M G, Hamilton J H et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1997, **14**:569
- 4 ZHU S J, LU Q H, Hamilton J H et al. *Phys. Lett.*, 1995, **B357**:273
- 5 Phillips W R, Ahmad I, Emling H et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**:3257
- 6 Urban W, Jones M A, Durell J L et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A613**:107
- 7 Jones M A, Urban W, Durell J L et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **A605**:133
- 8 ZHU S J, WANG M G, Hamilton J H et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C59**:1316
- 9 Urban W, Phillips W R, Durell J L et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C54**:945
- 10 ZHU ShengJiang, WANG MuGe, ZHU LingYan et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 2000, **24** (5):418
(朱胜江, 王牧歌, 朱凌燕等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(5):418)
- 11 Phillips W R, Janssens R V F, Ahmad I et al. *Phys. Lett.*, 1988, **B212**:402
- 12 ZHU LingYan, ZHU ShengJiang, Li Ming et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1998, **22**:885
(朱凌燕, 朱胜江, 李明等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:885)
- 13 ZHU ShengJiang. *Trends in Nucl. Phys.* (in Chinese), 1992, **9**(2):8
(朱胜江. 核物理动态, 1992, **9**(2):8)
- 14 Hamilton J H, Ramayya A V, ZHU S J et al. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 1995, **35**:635
- 15 Peker L K. *Nucl. Data Sheets*, 1993, **68**:997
- 16 Mateosian E der, Peker L K. *Nucl. Data Sheets*, 1992, **66**:705
- 17 Hoellinger F, Schulz N, Durell J L et al. *Phys. Rev.*, 1995, **C56**:1296
- 18 XING Zheng, CHEN XingQu, XU ShuWei. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1996, **20**:85
(邢正, 陈星巢, 徐树威. 高能物理与核物理, 1996, **20**:85)
- 19 ZHU S J, GAN C Y, Hamilton J H et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**:793
- 20 Babu B R S, ZHU S J, Ramayya A V et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C54**:568

Collective Band Structures in Neutron-Rich Odd-A $^{145,147}\text{Ce}$ Nuclei*

M. Sakhaee ZHU ShengJiang GAN CuiYun ZHU LingYan YANG LiMing
 XU RuiQing JON MyonGil JIANG Zhuo ZHANG Zheng
 J. H. Hamilton¹ A. V. Ramayya¹ B. R. S. Babu¹ J. K. Hwang¹ W. C. Ma²
 J. Komicki¹ J. D. Cole³ R. Aryaeinejad³ M. W. Drigert³ J. O. Rasmussen⁴
 M. A. Stoyer⁴ S. Y. Chu⁴ K. E. Gregorich⁴ M. F. Mohar⁴ S. G. Prussin⁴
 I. Y. Lee⁴ Yu. Ts. Oganessian⁵ G. M. Ter-Akopian⁵ A. V. Daniel⁵

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

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

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

3(Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID 83415, USA)

4(Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

5(Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia)

Abstract Through study of the prompt γ -rays emitted in the spontaneous fission of ^{252}Cf , high spin states of neutron-rich odd-A $^{145,147}\text{Ce}$ nuclei have been investigated. The levels in ^{147}Ce have been extended. A collective band in ^{145}Ce have been identified for the first time. The results from the particle rotor model calculations indicate that the yrast bands in ^{145}Ce and ^{147}Ce originate from $\nu i_{13/2}$ orbital coupling and the ground states of ^{145}Ce and ^{147}Ce originate from $(\nu h_{9/2} \otimes \nu f_{7/2})$ and $\nu h_{9/2}$ configuration, respectively. No obvious octupole deformation was observed in these two isotopes, but a side band obtained in ^{147}Ce may show some octupole correlations.

Key words nuclear structure, collective band, spontaneous fission

Received 27 October 1999

* Supported by NSFC (19775026), Science Foundation of Chinese Nuclear Industry (Y7197AY509), and U. S. Department of Energy (DE-FG05-88ER40407 and DE-FG03-87ER40323)