

丰中子核 ^{141}Xe 、 ^{152}Ce 、 ^{153}Nd 及 ^{160}Sm 能级图的建立*

朱胜江 王牧歌 邓景康

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

J. H. Hamilton¹ A. V. Ramayya¹ B. R. S. Babu¹ W. C. Ma²

J. O. Rasmussen³ M. A. Stoyer³ I. Y. Lee^{2,4} J. D. Cole⁵

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

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

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

4 (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN-37831, USA)

5 (Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Fall, ID-83415, USA)

1996-01-04 收稿

摘 要

通过对 ^{252}Cf 自发裂变所产生的瞬发 γ 谱的实验研究, 首次建立了 ^{141}Xe 、 ^{152}Ce 、 ^{153}Nd 及 ^{160}Sm 4 个极端丰中子核的能级图, 最高自旋态可达 16^+ . 对这 4 个核的能级结构特性进行了讨论.

关键词 能级图, 集体带, 高自旋态, 八极形变.

^{141}Xe 、 ^{152}Ce 、 ^{153}Nd 、 ^{160}Sm 这 4 个核素不仅处于 $A=140-160$ 远离 β 稳定线丰中子边的振动-转动区, 而且也位于 $Z\approx 56$, $N\approx 88$ 的八极形变岛的边缘. 研究这些极端丰中子核的能级结构, 尤其是高自旋态的特性, 无疑对核结构的系统研究是非常有意义的. 但是迄今为止, 实验上对它们的激发态特性及能级结构尚无任何报道, 其原因是在目前实验条件下, 尚难于用通常的重离子熔合-蒸发反应产生这些丰中子核. 近年来, 随着大规模反康普顿谱仪的建立, 特别是 Gammasphere 与 Eurogam 的相继投入运行, 利用裂变瞬发 γ 谱进行丰中子核的能级结构、尤其是高激发态的实验研究已取得很大进展^[1]. 我们与国外有关实验组对由 ^{252}Cf 等重核裂变所产生的众多的丰中子核的能级结构进行了多年的合作研究, 最近首次建立了 ^{141}Xe 、 ^{152}Ce 、 ^{153}Nd 与 ^{160}Sm 的能级图. 这里, 仅对实验方法及主要结果作一简要报道.

实验是由众多合作组联合进行的. 第一次实验在美国橡树岭国家实验室(ORNL)的

* 国家自然科学基金与核工业科学基金资助.

Holifield 重离子研究设施 (HIRF) 上进行, 所用 ²⁵²Cf 的源强为每秒 6×10^4 次裂变. 具有 20 个反康普顿锗探测器阵列组成近 4π 立体角的探测装置 (简便晶体球), 用来测量由 ²⁵²Cf 自发裂变所产生的瞬发 γ 射线. 总计得到约 2×10^9 γ - γ 符合事件. 第二次实验在美国洛仑兹伯克利国家实验室 (LBNL) 完成, 所用 ²⁵²Cf 源与第一次类似, 利用 Gammasphere 的第一期装置, 由 36 个大体积反康普顿锗探测器组成的阵列获取数据, 记录三重以上的 γ 符合事件, 得到相当于分解成两重符合的 9.8×10^9 个事件数. 此外, 还在美国爱达荷国家工程实验室 (INEL) 用两个 Ge 与两个 Si 探测器, 进行 X- γ 射线的符合测量.

数据分析是由清华大学与范德比尔特大学合作进行的, 我们承担了主要的工作. 对在橡树岭与爱达荷获取的实验数据, 建立了两维 γ - γ 与 X- γ 符合矩阵; 而对在 Gammasphere 获取的数据, 建立了三维立体矩阵. 两维 γ - γ 符合矩阵采用通常的“单门”符合方法, 用于低激发态的分析; 而三维 γ - γ - γ 符合矩阵采用“双门”符合法, 用来扩充高自旋态及识别极弱的 γ 跃迁. 在进行“双门”符合分析时, 采用了功能很强的分析程序包. X- γ 符合则用以元素鉴别及识别低能 γ 跃迁. 由于涉及到上百种丰中子核极复杂的退激 γ 谱线, 数据分析工作极为复杂, 几种实验数据用来相互核对、补充.

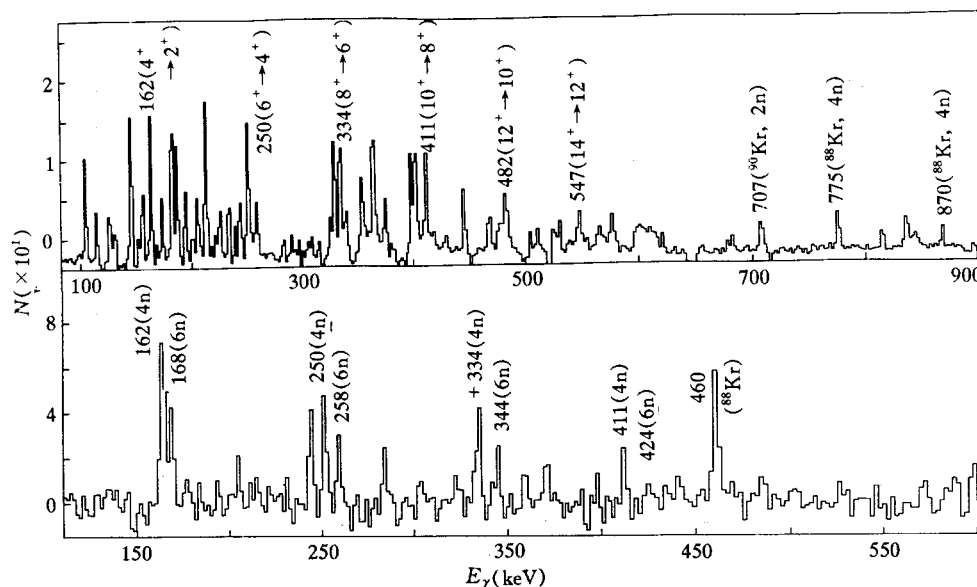


图1 ⁸⁸Kr 的 775 keV 与 870 keV “双门”符合 γ 谱 (下图) 与 ¹⁶⁰Sm 的 162、250、334、411 keV “双门加和”符合 γ 谱 (上图)

在裂变瞬发 γ 谱的研究中, 识别新核素能级的一个重要方法是利用互补核. 裂变发生后, 在伴随着中子发射后的某种特定丰中子核的退激 γ 符合谱中, 可以观测到对应不同中子发射道的互补丰中子核的 γ 峰. 例如, 在 ²⁵²Cf 的自发裂变中, ⁸⁸Kr 的互补核为 ¹⁶⁰Sm (4n)、¹⁵⁸Sm (6n) (括号中的数目代表中子发射数). 当我们用 ⁸⁸Kr 的 γ 跃迁开门

时, 应观测到 ^{160}Sm 与 ^{158}Sm 的 γ 峰; 反之, 在 ^{160}Sm 的符合谱中, 也应看到 Kr 核素链的有关 γ 跃迁峰. 图 1 下部为 ^{88}Kr 的 775 keV 与 870 keV 双门 (Double Gate) 符合谱, 可以看到, 除了属于 ^{88}Kr 本身的 460 keV 的跃迁外, 属于新的核 ^{160}Sm (4n) 的 162、250、334、411 keV 以及属于 ^{158}Sm (6n) 的 168、258、344、424 keV 等 γ 跃迁峰展现出来 (由于奇中子核 ^{159}Sm (5n) 的能级图较相邻偶-偶核 ^{158}Sm (4n) 与 ^{160}Sm (6n) 复杂, 其分立 γ 谱线要弱得多, 加之 Sm 丰中子链的裂变产物相对强度很弱, 迄今为止尚未识别出来, 故本实验中尚不能确定 ^{159}Sm (5n) 的 γ 谱线). 图 1 上部为对 ^{160}Sm 的 162、250、334、411 keV 的“双门加和”符合 γ 谱. 同样可以看出, 除了属于 ^{160}Sm 的 162、250、334、411 keV 的级联 γ 跃迁谱线外, 可以看到 ^{88}Kr (4n) 的 775 keV 与 870 keV 及 ^{90}Kr (2n) 的 707 keV γ 峰. 该图中的其它峰来自于别的核的干扰. 图 2 为新识别的 ^{152}Ce 的“双门加和”符合 γ 谱. 除了 ^{152}Ce 本身级联 γ 峰外, 可以清楚地看到 ^{98}Zr (2n)、 ^{97}Zr (3n)、 ^{96}Zr (4n) 的互补峰. 为节省篇幅, ^{141}Xe 与 ^{153}Nd 的谱图不再给出. 这样, 再对新识别的 γ 谱线进行“单门”与“双门”符合分析, 反复比较, 可将新能级图建立起来. 图 3 为新建立的 ^{141}Xe 、 ^{152}Ce 、 ^{153}Nd 及 ^{160}Sm 的能级图. 在 γ - γ 与 γ - γ - γ 符合中, 对低能 γ 跃迁探测效率较低, ^{152}Ce 与 ^{160}Sm 中的 81.7、70.6 keV γ 跃迁很难观测到, 它们在能级纲图中的

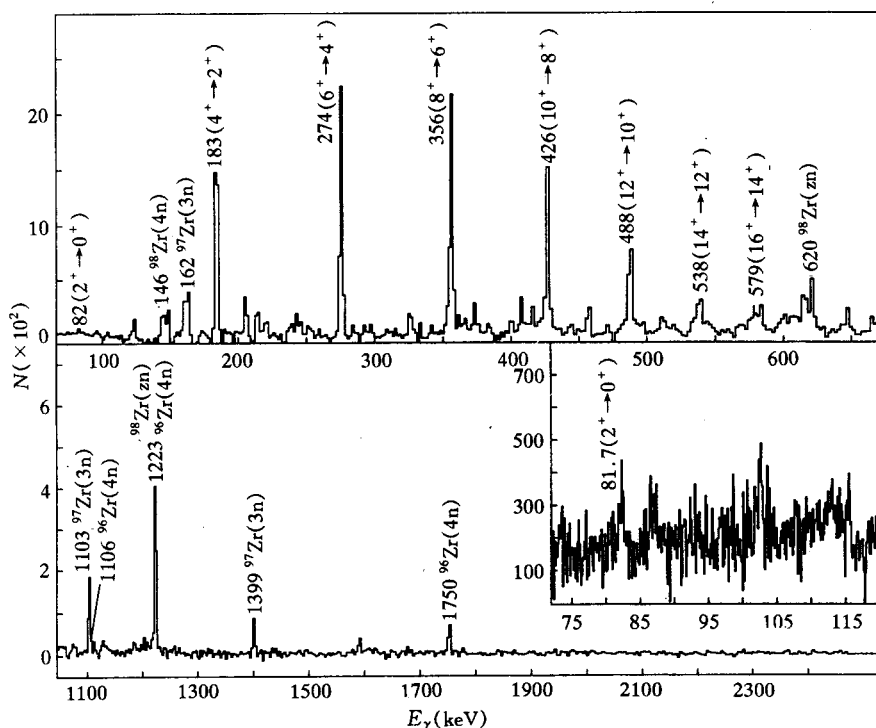


图 2 ^{152}Ce 的 183、274、356、426、488 keV “双门加和”符合 γ 谱

下图右上方插图为 183 keV “单门”X- γ 符合谱.

位置是由 X-γ 符合得到的. 图 2 下部右上方插图即为在 ¹⁵²Ce 中用 183 keV γ 射线开门所观测到的 81.7 keV γ 峰的例子.

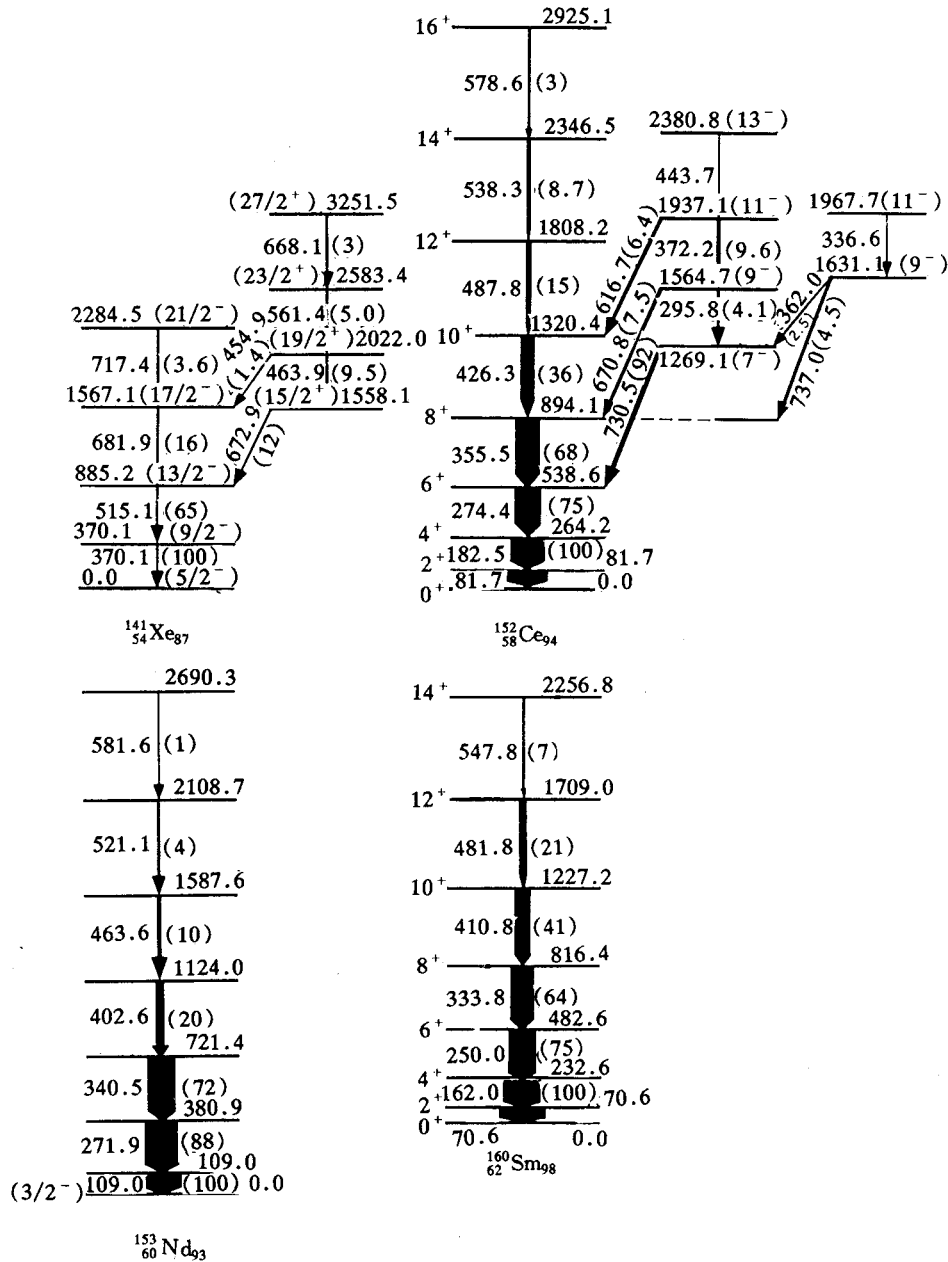


图3 ¹⁴¹Xe、¹⁵²Ce、¹⁵³Nd及¹⁶⁰Sm的能级图

对于¹⁴¹Xe, 早期对基态自旋宇称 (J^π) 的测量最可能值为 $(5/2^-)^{[2]}$. 此种指定可能与 $N=87$ 的同中异位素¹⁴³Ba类似, 起源于主要分量为 $[530, 1/2]$ 与 $[532, 3/2]$ 的组态混合^[3]. 基态带各能级间有规则的跃迁间隔及强度, 以及与¹⁴³Ba结构的类似性^[4], 很

可能组成 $\Delta I=2$ 的负宇称带, 其激发态的能级 J^π 分别为 $(9/2^-)$ 、 $(13/2^-)$ 、 $(17/2^-)$ 及 $(21/2^-)$. 而右边的由 464、561、668 keV 所构成的集体带结构, 分别以 673 keV 与 455 keV 跃迁馈入基带, 组成 $\Delta I=2$ 的正宇称带, 各能级的 J^π 分别为 $(15/2^+)$ 、 $(19/2^+)$ 、 $(23/2^+)$ 及 $(27/2^+)$. 这两个具有相反宇称的集体带结构, 很可能组成一个八极形变带, 与此区的相邻核 $^{143}\text{Ba}^{[4]}$ 与 $^{139}\text{Xe}^{[5]}$ 类似. 理论上预言, ^{141}Xe 可能存在八极关联^[6,7], 而我们所测到的实验结果是与理论预言相符合的. 虽然未观测到从 $(21/2^-) \rightarrow (19/2^+)$ 及 $(23/2^+) \rightarrow (21/2^-)$ 的交叉跃迁, 可能是这些跃迁太弱, 本次实验未能观测到. 从所测 455 keV 与 464 keV 跃迁的分支比可推得 $B(E1)/B(E2)^{[4]}$ 值为 $0.26 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$. 此值介于 ^{143}Ba ($\sim 1.8 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$) 与 ^{146}Ba ($\sim 0.008 \times 10^{-6} \text{ fm}^{-2}$)^[4] 之间, 可以作为支持八极形变的证据. 这种奇中子核的八极形变带结构, 具有 Simplex 量子数 $S=-i$ ^[8] 的特征.

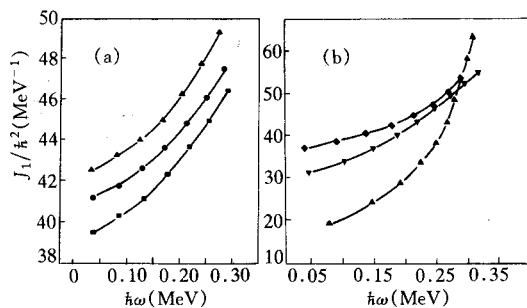


图4 $^{156, 158, 160}\text{Sm}$ 与 $^{148, 150, 152}\text{Ce}$ 的转动惯量

J_1/\hbar^2 随转动频率 $\hbar\omega$ 变化图

(a) \blacktriangle ^{160}Sm , \bullet ^{158}Sm , \blacksquare ^{156}Sm ;

(b) \blacklozenge ^{152}Ce , \blacktriangledown ^{150}Ce , \blacktriangle ^{148}Ce .

率 $\hbar\omega$ 变化如图 4 所示. 图中, $^{148, 150}\text{Ce}$ 及 $^{156, 158}\text{Sm}$ 的实验数据取自我们最新的实验结果^[1]. 从图中可以看出, 在我们所观测的自旋态下, 尚没有明显的回弯现象发生. 然而在自旋态较低时, 从 ^{148}Ce ($N=90$) 到 ^{152}Ce ($N=94$), J_1 增加很快. 在 $\hbar\omega \approx 0.25 \text{ MeV}$ 以上, 它们逐渐逼近; 在 $\hbar\omega \approx 0.28 \text{ MeV}$ 处, 它们相互交叉; 在 $\hbar\omega \approx 0.30 \text{ MeV}$ 以上, 单粒子顺排可能发生, 至少对于 ^{148}Ce 是如此. 而对 Sm 同位素链, J_1 随中子数与自旋态的增加变化很平滑, 三条曲线形状相似, 互相之间几乎是等间距的. 在 ^{152}Ce 中还观测到带头为 1269、1631 keV 的两个边带, 其自旋与宇称尚不清楚. 在 ^{148}Ce 与 ^{150}Ce 中也观测到类似的带结构, 它们可能属于 $K=1^-$ 与 2^- 的八极振动-转动带^[10], 我们推测 1269 keV 的 J^π 为 (7^-) , 而 1631 keV 为 (9^-) , 相应的 $\Delta I=2$ 的跃迁组成两个八极形变带. 这种假设尚需进一步的实验与理论研究.

^{153}Nd 的基态带的 J^π 尚不清楚. 从 $N=93$ 的丰中子核的系统性比较, 它可能与 $^{155}\text{Sm}^{[9]}$ 相同, 为 $(3/2^-)$. 第一激发态能级间距较小, 可能为 $\Delta I=1$ 的跃迁. 而在 109 keV 能级以上, 各级联跃迁的能量比较有规则, 可能为 $\Delta I=2$ 的集体转动带. 此转动带不象强耦合带, 可能属于弱集体带, 形成的原因尚需进一步研究.

两个偶-偶核 ^{152}Ce 与 ^{160}Sm 的基带分别扩充到 16^+ 与 14^+ . $E4/E2$ 比率为 3.32 与 3.39, 表明这两个核强的四极形变. 基带的第一类转动惯量 J_1 随转动频率

参 考 文 献

- [1] J. H. Hamilton, A. V. Ramayya, S. J. Zhu *et al.*, *Prog. in Part. and Nucl. Phys.*, **35** (1995) 635.
 [2] W. Borchers *et al.*, *Phys. Lett.*, **216B** (1989) 7.
 [3] J. D. Robertson *et al.*, *Phys. Rev.*, **C40** (1989) 2804.
 [4] S. J. Zhu *et al.*, *Phys. Lett.*, **B357** (1995) 273.
 [5] M. Bentaleb *et al.*, *Z. Phys.*, **A348** (1994) 245.
 [6] W. Nazarewich, S. L. Tabor, *Phys. Rev.*, **C45** (1992) 2226.
 [7] V. Martin, L. M. Robledo, *Phys. Rev.*, **C48** (1993) 188.
 [8] W. Nazarewich *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A467** (1987) 437.
 [9] M. A. Lee, *Nucl. Data Sheets*, **50** (1987) 563.
 [10] L. Peker, 私人通信, 1995.

Level Schemes in Neutron – Rich ^{141}Xe , ^{152}Ce , ^{153}Nd and ^{160}Sm Nuclei

Zhu Shengjiang Wang Muge Deng Jingkang

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

J. H. Hamilton¹ A. V. Ramayya¹ B. R. S. Babu¹ W. C. Ma²

J. O. Rasmussen³ M. A. Stoyer³ I. Y. Lee^{2,4} J. D. Cole⁵

¹ (Department of physics, Vanderbilt University, Nashville, TN37235, USA)

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

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

⁴ (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN–37831, USA)

⁵ (Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Fall, ID–83415, USA)

Received 4 January 1996

Abstract

The level schemes of neutron–rich nuclei, ^{141}Xe , ^{152}Ce , ^{153}Nd and ^{160}Sm have been established for the first time through measuring the prompt γ –rays from spontaneous fission of ^{252}Cf . The highest spin state is up to 16^+ . The collective band structures in these neutron–rich nuclei are discussed.

Key words level structures, collective bands, high spin states, octupole deformation.