

丰中子核素能级结构研究及 $A \sim 100$ 与 $A \sim 150$ 区丰中子核形状相变讨论*

朱 胜 江

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

I. Y. Lee

(Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN37831, U. S. A.)

摘 要

采用裂变产物- γ - γ 符合法,对 ^{252}Cf 裂变瞬发 γ 谱进行了研究,扩展了 $A \sim 100$ 及 150 区的30种丰中子偶-偶核素的能级结构,最高自旋可达 $10 \sim 14$ 。对某些同位素链的核结构及形状相变特性进行了讨论。

一、引 言

对由 ^{252}Cf 等重核的自发裂变产物退激产生的瞬发 γ 射线的测量是获得丰中子核素较高自旋态能级结构信息的重要手段之一^[1]。早期的研究^[2-4]由于实验技术的限制、大部分核的自旋态只观测到 $4 \sim 6\hbar$ 之间。随着在束 γ 谱实验技术的发展,这种实验重新引起人们的兴趣^[5,6]。由于裂变产物为丰富的丰中子核素的来源,一次测量可获得众多的核的能级结构信息,数据分析技术与现行的在束 γ 谱方法几乎完全一样,其结果可提供非常有价值的核结构实验数据。迄今为止、仅部分丰中子产物核素得到较认真的研究。

为进一步了解这些丰中子核素的能级结构特性,我们对 ^{252}Cf 的裂变产物进行了初步的瞬发 γ 谱的实验测量,较全面的研究了Sr、Zr、Mo、Ru、Pd、Cd、Te、Xe、Ba、Ce、Sm等三十种偶-偶核的能级结构,除证实了文献^[2,5,6]的大部分结果外,新发现了四十多条 γ 跃迁谱线,测量了各能级间的跃迁强度,推出自旋与宇称,并新建了 ^{136}Te 的能级图。最高自旋值可达 $14\hbar$ 。同时对 $A \sim 100$ 区与 $A \sim 150$ 区的一些同位素链的形状相变点随中子数 N 与自旋态 I 的系统性变化进行了讨论,给出了在低自旋态下的形状相变图。

二、室 验 与 结 果

实验是在美国橡树岭国家实验室的HHIRF设施上进行的,装置如图1所示。为了

本文1991年11月22日收到。

* 国家自然科学基金资助。

消除裂变产物的延迟衰变 γ 射线及其他杂散 γ 射线的干扰,采用裂变产物 γ - γ 符合技术。裂变源强为3,900裂变数/秒,约 $6.3\mu\text{g}$ 的 ^{252}Cf 源均匀地涂在充气电离室的内表面,

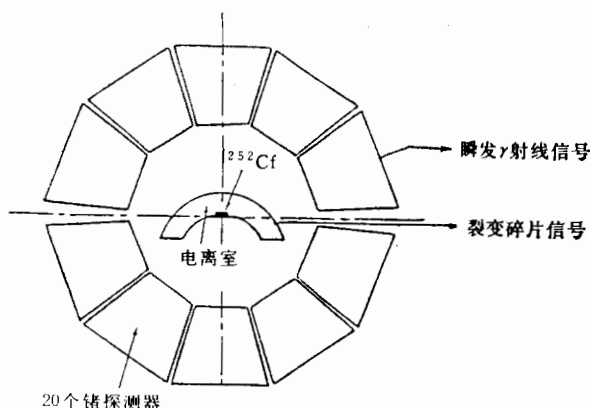


图1 实验装置示意图

产生的丰中子核素进入电离室后,产生的脉冲信号与瞬发退激 γ 信号符合。 γ 射线是由新建成的“轻便晶体球”装置来探测的,此装置具有20个康普顿屏蔽的锗探测器组成近 4π 立体角,大大提高了探测效率。相应地,自旋谱仪的数据获取系统用来获取、记录符合事件。总计约 1.5×10^7 个符合事件记录在磁带上。

在建立了 γ - γ 符合矩阵后,采用现今通用的“门”符合方法,对各丰中子核素的能级结构进行分析。虽然碎片的符合降低了干扰,但由于众多的丰中子核素退激谱线同时存在,使得数据分析工作相当复杂。基于以前的工作^[2],大部分偶-偶核的低激发态数据已知,通过分析不同 γ - γ 符合门谱,这些偶-偶核的级联 γ 跃迁谱线能清楚地显示出来。图2为一典型的符合门谱相加后的和谱。其中 ^{104}Mo 的643 keV ($8^+ \rightarrow 6^+$)与734 keV ($10^+ \rightarrow 8^+$)的跃迁是本实验新发现的。各跃迁谱线可以清楚地展现出来。这样,可将这些丰中子核素的能级推向较高的自旋态。实验结果列于表1,其中包括本次实验中确认的丰中子核素的 γ 跃迁能量(E_γ),跃迁的初、末态自旋与宇称($I_i^\pi \rightarrow I_f^\pi$)及各跃迁的相对强度(Int),并将以前的实验结果也列出,以作比较。在文献[2]的基础上,发现了五十多条新的 γ 谱线,其中,除Zr与Ba

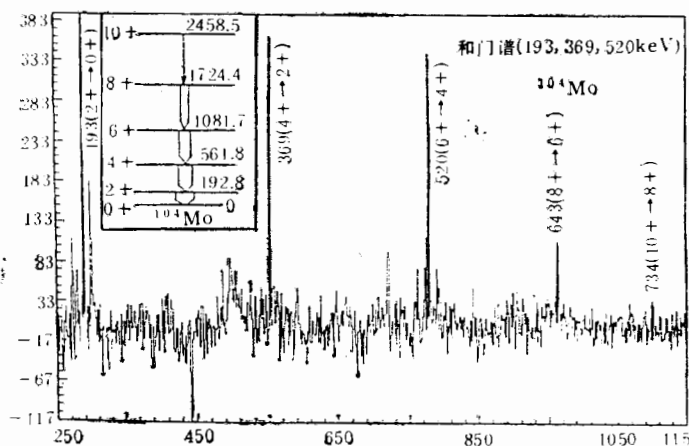


图2 用193,369与520keV门谱相加而得的 ^{104}Mo 和谱图(横坐标表示道数,纵坐标为每道计数)。左上方画出相应的能级图

表 1 由 ^{252}Cf 裂变产生的 $A \sim (100-150)$ 区的偶-偶核丰中子核素瞬发退激 γ 射线的能量与相对强度

| 核素 | $I_i^{\pi} \rightarrow I_f^{\pi}$ | $E_{\gamma}(\text{keV})$ | Int (%) | $E_{\gamma}(\text{keV})$ (Ref.*) | 核素 | $I_i^{\pi} \rightarrow I_f^{\pi}$ | $E_{\gamma}(\text{keV})$ | Int (%) | $E_{\gamma}(\text{keV})$ (Ref.*) | |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------|-------------------------------------|--------|
| ^{96}Sr | 2+ 0+ | 815.5 | 100 | 815.5 | | 8+ 6+ | 715.9 | (26) | | |
| | (4+) 2+ | 977.8 | (55) | (800) | | (10+) 8+ | 643.8 | 19 | | |
| ^{100}Zr | 2+ 0+ | 213.3 | 100 | 212.7 | ^{116}Pd | 2+ 0+ | 341.0 | 100 | 340.6 | |
| | 4+ 2+ | 352.3 | (70) | 352.1 | | 4+ 2+ | 538.2 | 48 | 538.7 | |
| | 6+ 4+ | 498.0 | 43 | 497.9 | | 6+ 4+ | 682.3 | 37 | | |
| | 8+ 6+ | 626.2 | 11 | 625.4 | | 8+ 6+ | 785.3 | 17 | | |
| ^{102}Zr | 2+ 0+ | 152.3 | 100 | 151.9 | ^{118}Cd | 2+ 0+ | 488.3 | 100 | 488.0 | |
| | 4+ 2+ | 326.9 | 46 | 326.9 | | 4+ 2+ | 677.9 | 44 | 677.3 | |
| | 6+ 4+ | 486.6 | 15 | 486.0 | | 6+ 4+ | 771.4 | 31 | (771) | |
| | 8+ 6+ | 630.6 | 6.9 | 630.9 | | ^{120}Cd | 2+ 0+ | 506.3 | 100 | 505 |
| ^{102}Mo | 2+ 0+ | 296.9 | 100 | 296.0 | | 4+ 2+ | 697.0 | 90 | (698) | |
| | 4+ 2+ | 447.7 | 6.7 | 447.0 | | 6+ 4+ | 830.4 | 68 | | |
| ^{104}Mo | 2+ 0+ | 192.8 | 100 | 192.3 | | 8+ 6+ | 925.6 | 46 | | |
| | 4+ 2+ | 369.0 | 85 | 368.7 | | ^{132}Te | 2+ 0+ | 975.1 | | 974 |
| | 6+ 4+ | 519.7 | 73 | 520.0 | | | 4+ 2+ | 697.6 | | 697 |
| | 8+ 6+ | 642.7 | 41 | | | | ^{134}Te | 2+ 0+ | 1280.1 | 100 |
| 10+ 8+ | 734.1 | 4.5 | | 4+ 2+ | 297.6 | | | 46 | 297 | |
| ^{106}Mo | 2+ 0+ | 172.1 | 100 | 171.0 | | (6+) 4+ | | 116.0 | (5) | 115 |
| | 4+ 2+ | 351.1 | 75 | 350.8 | ^{136}Te | 2+ 0+ | | 1134.5 | 100 | (1134) |
| | 6+ 4+ | 511.6 | 45 | (511.8) | | 4+ 2+ | 288.8 | 90 | | |
| | 4+ 2+ | 626.1 | 20 | | | 6+ 4+ | 573.6 | 44 | | |
| 8+ 6+ | 655.1 | 16 | | (8+) 6+ | | 1697.0 | 24 | | | |
| ^{108}Ru | 10+ 8+ | 785.1 | 14 | | ^{136}Xe | 2+ 0+ | 1314.7 | | 1314.7 | |
| | 2+ 0+ | 242.3 | 100 | 242.3 | | 4+ 2+ | 381.8 | | 380.1 | |
| | 4+ 2+ | 423.3 | 52 | 423 | | ^{138}Xe | 2+ 0+ | 589.5 | 100 | 589.5 |
| | 6+ 4+ | 576.1 | 25 | | | | 4+ 2+ | 483.4 | (71) | 483.4 |
| 8+ 6+ | 702.6 | 4.1 | | 6+ 4+ | 730.4 | | 46 | | | |
| 10+ 8+ | 815.8 | 2.1 | | 8+ 6+ | 688.6 | | 28 | | | |
| ^{110}Ru | 2+ 0+ | 241.8 | 100 | 240.8 | | 10+ 8+ | 599.8 | 23 | | |
| | 4+ 2+ | 423.2 | 54 | 423 | (12+) 10+ | 483.4 | | | | |
| | 2+ 0+ | 619.7 | (19) | | 10+ | 248.8 | (4.3) | | | |
| | 6+ 4+ | 576.2 | 32 | 576 | ^{140}Xe | 2+ 0+ | 377.0 | 100 | 376.8 | |
| 8+ 6+ | 706.0 | 20 | | 4+ 2+ | | 458.2 | 80 | 457.9 | | |
| ^{112}Ru | 2+ 0+ | 237.5 | 100 | 236.8 | | 6+ 4+ | 583.1 | 45 | | |
| | 4+ 2+ | 409.2 | 43 | 408.9 | | 8+ 6+ | 567.3 | 37 | | |
| | 6+ 4+ | 545.4 | 36 | | 10+ 8+ | 608.1 | 18 | | | |
| | 8+ 6+ | 651.1 | 22 | | ^{140}Ba | 2+ 0+ | 603.2 | 100 | 602.2 | |
| 10+ 8+ | 722.9 | 11 | | 4+ 2+ | | 529.0 | 50 | 528.2 | | |
| ^{112}Pd | 2+ 0+ | 349.0 | 100 | 348.9 | | (6+) 4+ | (809.1) | 39 | | |
| | 4+ 2+ | 534.6 | 58 | 535.9 | | ^{142}Ba | 2+ 0+ | 360.1 | 100 | 359.6 |
| | 6+ 4+ | 667.9 | 44 | | 4+ 2+ | | 475.7 | 54 | 475.1 | |
| | 8+ 6+ | 733.0 | 23 | | 6+ 4+ | | 631.9 | 32 | 631.3 | |
| 2+ 0+ | 333.3 | 100 | 332.9 | (8+) 6+ | 694.2 | | 5.9 | 693.5 | | |
| ^{114}Pd | 4+ 2+ | 520.2 | 59 | 520.7 | ^{144}Ba | 2+ 0+ | 199.9 | 100 | 199.3 | |
| | 6+ 4+ | 649.1 | 37 | 649.3 | | 4+ 2+ | 331.4 | 72 | 330.7 | |

表1续

| 核素 | $I_i^* \rightarrow I_f^*$ | $E_\gamma(\text{keV})$ | Int (%) | $E_\gamma(\text{keV})$ (Ref.*) | 核素 | $I_i^* \rightarrow I_f^*$ | $E_\gamma(\text{KeV})$ | Int (%) | $E_\gamma(\text{keV})$ (Ref.*) |
|-------------------|---------------------------|------------------------|---------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|---------|-----------------------------------|
| ^{146}Ba | 6+ 4+ | 431.9 | 70 | 431.4 | ^{152}Nd | 6+ 4+ | 300.9 | 72 | 300.7 |
| | 8+ 6+ | 510.1 | 33 | 509.3 | | 8+ 6+ | 376.7 | 60 | 376.4 |
| | 10+ 8+ | 574.0 | 12 | 573.6 | | 10+ 8+ | 440.6 | 38 | |
| | 12+ 10+ | 622.6 | 8.6 | 622.6 | | 12+ 10+ | 496.8 | 36 | |
| | 2+ 0+ | 181.9 | 100 | 181.0 | | 14+ 12+ | 545.5 | (10) | |
| | 4+ 2+ | 333.4 | 68 | 332.7 | | 2+ 0+ | 75.2 | | 75.9 |
| ^{146}Ce | 6+ 4+ | 445.8 | 65 | 445.1 | 4+ 2+ | 164.7 | 100 | 164.7 | |
| | 8+ 6+ | 524.9 | 22 | 524.3 | 6+ 4+ | 248.1 | 69 | 247.3 | |
| | 2+ 0+ | 259.0 | 100 | 258.6 | 8+ 6+ | 322.3 | 48 | 322.1 | |
| | 4+ 2+ | 410.6 | 78 | 410.1 | 6+ 6+ | 374.6 | 28 | | |
| ^{148}Ce | 6+ 4+ | 503.6 | 55 | 502.3 | ^{156}Sm | 10+ 8+ | 390.6 | 11 | |
| | 8+ 6+ | 565.6 | 10 | | 2+ 0+ | 76.0 | | 76.0 | |
| | 2+ 0+ | 159.7 | 100 | 158.7 | 4+ 2+ | 172.1 | | 174.2 | |
| | 4+ 2+ | 295.7 | 79 | 295.7 | (6+) 4+ | (268) | | 267.8 | |
| ^{150}Ce | 6+ 4+ | 386.8 | 64 | 386.5 | ^{158}Sm | 2+ 0+ | 72.8 | | 72.8 |
| | 8+ 6+ | 451.7 | 35 | | 4+ 2+ | 168.1 | | 167.5 | |
| | 10+ 8+ | 501.0 | 22 | | (6+ 4+ | 258.2) | | 258.2 | |
| | 12+ 10+ | 537.6 | 3.3 | | 8+ 6+ | 346.5 | | 346.0 | |
| | 2+ 0+ | 97.3 | 100 | 97.1 | 10+ 8+ | 454.8 | | | |
| | 4+ 2+ | 209.1 | 85 | 209.0 | | | | | |

* 参考[1,4,5]

同位素链与文献[5,6]结果相同外,其余都是本实验新发现的。对 ^{136}Te 核,文献[2]中只给出两个可能的 $2^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁能量: 688与1134keV。实验上发现688keV属于 ^{138}Xe 的跃迁,而与1134keV有关的级联跃迁可清楚地观察出来,从而可得 ^{136}Te 的能级图。

三、形状相变讨论

实验所涉及到的丰中子核素大体分为两组: $A \sim 100$ 的形变区与 $A \sim 150$ 形变区的边缘,中间跨过 $z = 50(\text{Sn})$ 的主壳层附近。对 $A \sim 100$ 与150区的核结构特性,一直是人们非常关注的问题。我们仅从系统性原理出发,利用现有实验数据讨论这两区的形状相变问题,即对各同位素链相变点随中子数 N 与自旋 I 的变化特性。

为讨论方便,将核形状按通常惯例分为四组: (a)球形核——单粒子组态混合(Single Particle Configurations)区。(b)振动核——振子(Vibrators)(一般为 $2 \leq R_4 \leq 2.4$)区。(c)过渡性核——软形变转子(Soft Deformed Rotors)(一般为 $2.4 \leq R_4 < 3.0$)区。(d)轴对称形变——形变转子(Well Deformed Rotors)(一般为 $3.0 \leq R_4 \leq 10/3$)区。其中 $R_4 = E_4/E_2$ 。

用如下方法进行综合比较:

1. 系统比较每一同位素链的实验壳能随中子数 N 与自旋 I 的变化^[7(a)]。与别的方法相比,此法的优点是形状相变点看得清楚。如果核的形状变化很平缓,实验壳能

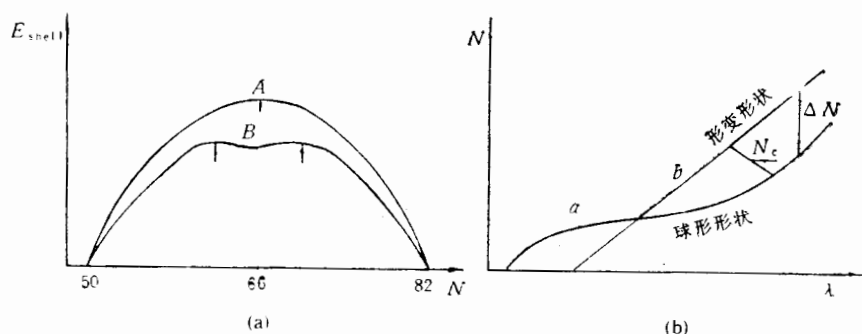


图 3(a) 实验壳能 E_{shell} 随中子数 N 变化图. (b) 球形核与形变核的中子数随费米能 λ 的变化图.

E_{shell} 将在两个幻数中间呈最大值,如图 3(a) 中曲线 A 所示;如果核发生了形状相变, E_{shell} 就会因形变壳效应而减少,会出现两个极大值点,如图 3(a) 中曲线 B 所示,两个极大值点相应于形状相变点,形变区位于其间.

利用公式:

$$E_{\text{shell}}(I=0) = E_{\text{exp}}(I=0) - E_{\text{ld}}^{\text{sp}}(I=0), \quad (1)$$

其中 E_{shell} 为基态实验壳能, $E_{\text{exp}}(I=0)$ 为基态总能量, $E_{\text{ld}}^{\text{sp}}(I=0)$ 为基态球形液滴能. 对不同自旋 I 的各激发态:

$$E'_{\text{shell}}(I) = E_{\text{shell}}(I=0) + E_i(I), \quad (2)$$

$E_i(I)$ 为实验所测各激发态相应于基态的能量. $E_{\text{ld}}^{\text{sp}}(I=0)$ 、 $E_{\text{exp}}(I=0)$ 及 $E_{\text{shell}}(I=0)$ 取自文献[9、10]. 对每一种同位素链,可得到 $E'_{\text{shell}}(I)$ — N 曲线,以作比较.

2. 利用规范空间中的回弯现象确定相变点^[7(a),8]. 在此空间中,粒子数 N 与费米能 λ 的关系相当于普通空间中角动量 I 与转动频率 ω 的关系. N - λ 的关系图可将形状相变点放大,如图 3(b) 所示. 在图 3(b) 中,曲线 a 相应于球形核,经过回弯后,跃变到曲线 b 的形变转子,回弯区即为过渡区, N_c 为形状相变点, ΔN_c 为过渡区的范围. 引入自旋 I , λ 可表示为:

$$\lambda_N(Z, N, I) = \frac{E(Z, N+1, I) - E(Z, N-1, I)}{2}, \quad (3)$$

其中, $E(Z, N, I) = -E_B(Z, N) + E_i(Z, N, I)$. (4)

$E_B(Z, N)$ 为核的结合能,取自文献[10], $E_i(Z, N, I)$ 即为(2)式中的 $E_i(I)$.

对球形液滴能:

$$\lambda_{\text{ld}} = \frac{E_{\text{ld}}^{\text{sp}}(Z, N+1) - E_{\text{ld}}^{\text{sp}}(Z, N-1)}{2}. \quad (5)$$

用上述两种方法对 Sr, Zr, Mo, Ba, Ce, Nd, Sm 核链进行了系统的研究. 对 Ru, Pd, Cd, Te, Xe 等核链,处于振动或软形变区,本文不作重点讨论. 图 4 画出 4 种同位素链 Sr, Zr, Mo 与 Ba 的系统性比较图,限于篇幅,其他核素链未予画出. 从 a_1 — a_4 的实验壳能图上可看出,在满壳层 ($N=50, 82$) 时, E'_{exp} 最小,此时为球形核. 随着中子

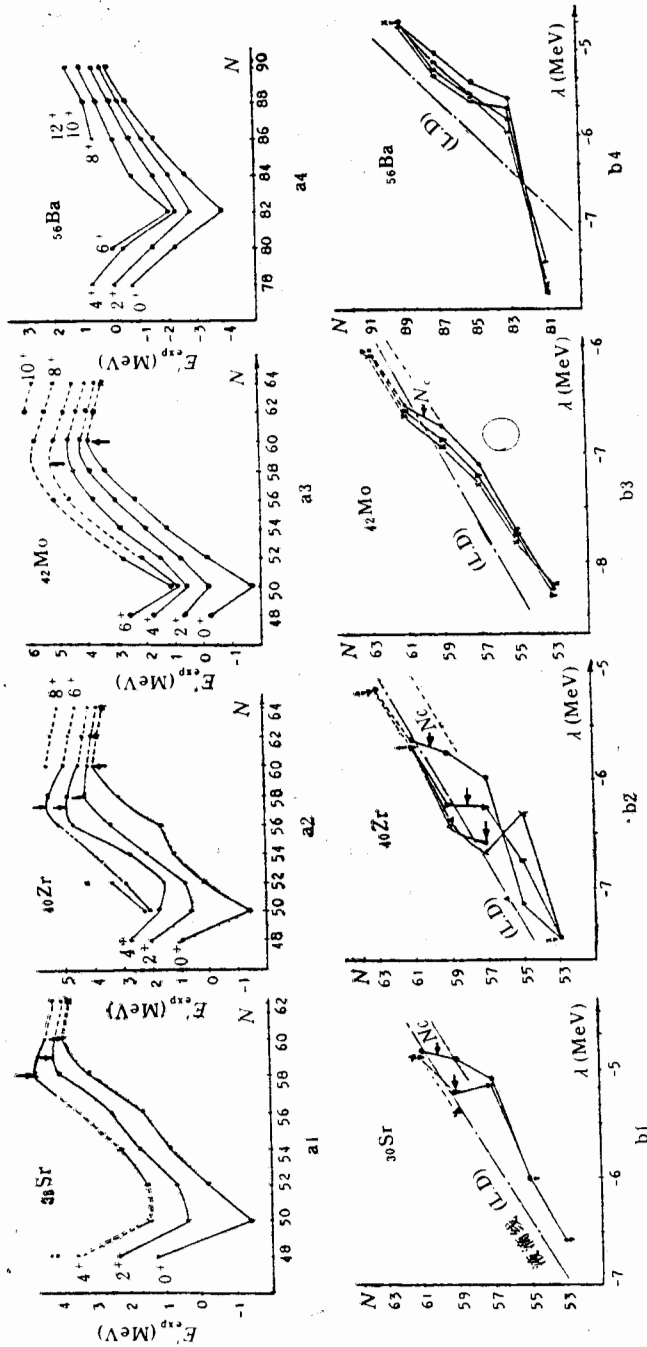


图4 4种丰中子同位素链的 $E_{x,p} \sim N(a_1 - a_2)$ 及 $N \sim \lambda(b_1 - b_2)$ 图
 实验激发能取自: 对 Sr, 文献 [22,7(c),7(d)] 及本工作; 对 Zr, 文献[22,6]及本工作; 对 Mo, 文献[22,17,18]及
 本工作; 对 Ba, 文献[22,5]及本工作

● 0^+ , ▼ 2^+ , × 4^+ , ▲ 6^+

数 N 远离主壳层, $E'_{x,p}$ 逐渐变大, 此为振动或软形变。到最大值点(图中用箭头标出)为相变点, 过了此点, $E'_{x,p}$ 开始降低, 此时核的形状已完全确立, 表现为对称转子。 $b_1 - b_4$ 为 $N - \lambda$ 图, 回弯区为形状相变过渡区, 同时还标出相变点 N_c 。图中还画出了球形液滴线, 形状相变点 N_c 一般发生在液滴线附近, 形变区位于液滴线上方。图中的星号“*”仅为计算值, 个别点根据液滴线为直线的原理进行了校正, 相应各能态之间用虚线连接。综合以上方法, 注意到本节开始所定义的 4 个区的 R_4 值, 得到了 7 个丰中子偶偶核素链在低激发态下的形状相变图, 如图 5 所示。

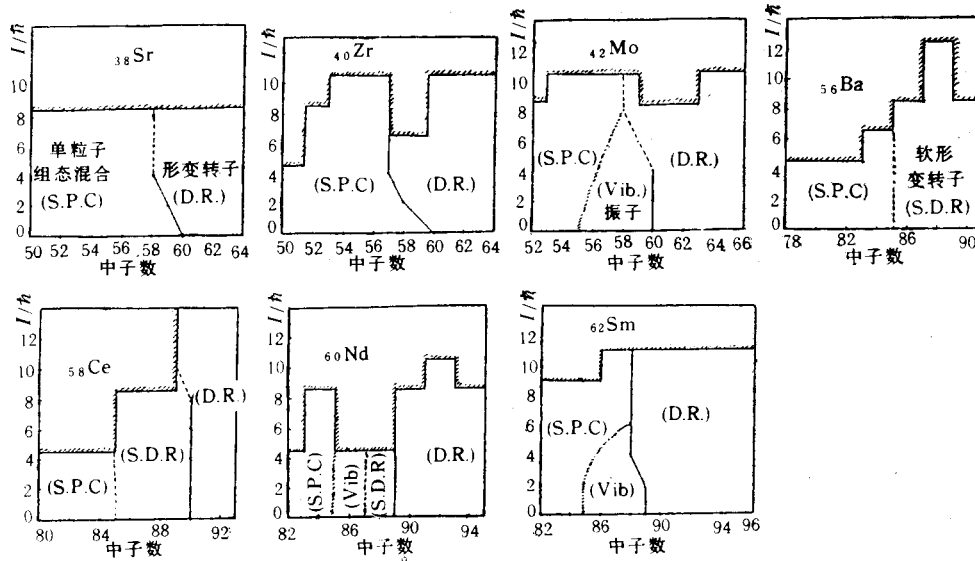


图 5 7 种丰中子同位素链在低激发态下的形状相变图

Sr 与 Zr 丰中子同位素链最引人注目, 其能级结构不仅体现形状共存, 而且存在 $(Z, N = 40, 56)$ 的亚球形壳层与 $(Z, N = 38, 60)$ 的大形变壳层^[11,12,6]及 $N = 58$ 的球形核到 $N = 60$ 的大形变核的突变。从图 4 可以看出, 在 $N = 56$ 时, Sr 与 Zr 的基态壳能处于极小值点, 此正是亚球壳效应。此效应影响到 $N = 58$ 的核, 使 ^{96}Sr , ^{98}Zr 在基态仍为球形。到 $N = 60$ 时, 基态壳能增到极大值点——形状相变点, 从 $N - \lambda$ 图上也可清楚看出。在 $N \geq 60$ 后, 具有 $\beta \sim 0.35 - 0.4$ 的大形变值。而随着自旋 I 的升高, 在 $I^\pi = 2^+$ 时, $N = 56$ 的壳激发能的极小值点对 Sr 已减弱, 对 Zr 则完全消失, 而极大值点则向 N 减小的方向移动, 说明即使在低自旋态下, 这种亚球壳效应已基本消失, 而向形变核方向转变。虽然 Zr 的基态亚球壳效应比 Sr 体现得更强烈, 但在 $I^\pi \geq 2^+$ 时, Zr 消失得更快。相应的形状相变点随自旋 I 的变化可从图 5 中看出。

对于 Zr 同位素链在 $N = 60$ 时突然发生基态形变, 目前有两种解释: 一种为球壳模型计算^[13,14]指出 $g_{9/2}$ 质子与 $g_{7/2}$ 中子在占据自旋轨道部分子态 (Spin-Orbit Partner States) 之间发生同位旋标量相互作用, 从而确立起稳定的形变; 另一种方法是用形变平均场计算^[15,16], 指出 $h_{11/2}$ 轨道的“侵入”接近于费米面, 对确定形变起关键性的作用。近来的实验结果的讨论^[6]倾向于后者, 最后的结论有待于进一步的工作。而对 Sr

同位素链,理论上解释尚不够充分。

Mo 丰中子链位于 Sr、Zr 与软核 Ru、Pd 之间。总之,激发能随中子数与自旋的变化较平缓, $N = 56$ 的基态亚球壳效应已完全消失。但激发能最大值点(图 4(a3)) 仍处于 $N = 60$ 处, $N-\lambda$ 图(图 4(b3)) 的回弯比较平缓,但仍能看到 $N = 60$ 时的形变转折点。 $N \geq 60$ 时,可以说形变已完全确立。因缺少 $N = 58$ 时的 4^+ 以上的实验值,或许在 6^+ 以上,形变转折点移到 $N = 58$ 的地方。从相变图(图 5)可看出,从单粒子组态混合区到形变区,中间为振动区,这与 Zr、Sr 直接从单粒子组态混合突变到形变区形成鲜明对比。对丰中子核素 $^{104}\text{Mo}^{[17]}$ 、 $^{106}\text{Mo}^{[18]}$ 的讨论指出,虽然 $N = 62, 64$ 时形变已确立,但仍存在一定软度。 ^{104}Mo 的 β_2 值为 0.32,比 ^{100}Sr 与 ^{102}Zr 要小。随着 Z 向 50 的主壳层靠近,集体性逐渐减弱。

与 Mo 类似, Ba 丰中子链位于振动核 Xe 链与 Ce、Nd、Sm 形变链之间,其形变特性一直引起人们很大兴趣。较早期对 $^{142,144,146}\text{Ba}$ 的低激发态研究^[19]声称这三种核素已确立了形变,其后的研究^[5,20,21]表明, ^{144}Ba 与 ^{146}Ba 为具有反射反对称性的八极形变特性的核,体现在八极形变带上,但是属于稳定的八极形变或是大幅度八极振动尚不清楚^[5]。从图 4 可以看出,实验壳能直到 $N = 90$ 仍是上升的,在 $N < 90$ 时, $N-\lambda$ 图上也没有回弯发生,在 $N = 84-90$ 之间,没有明显的形状相变,说明其四极形变仍是软的,很可能其八极形变也是软的。因缺少 $N = 92$ 的实验数据比较,尚不清楚 $N = 90$ 是否为相变点。

Ce, Nd, Sm 同位素链位于 N 大于 90 的 $A \sim 150$ 形变区的边缘,总的讲,其形状变化较平滑。在 $N < 90$ 时,某些核例如 ^{144}Ce , ^{146}Ce , ^{146}Nd , ^{158}Nd , ^{150}Sm 等也具有八极形变特性^[20,6]。在 $N \geq 90$ 时,一般都已建立起稳定的形变。但形状相变点(见图 5)有些差别。Ce 链发生在 $N = 90$ 处,此相变点直到 $I^\pi = 10^+$ 时都未发生变化,对 Nd 链 $I^\pi \leq 4^+$ 时,相变点在 $N = 89$ 处, $I^\pi > 4^+$ 时很可能移到 $N = 88$ 处。而对 Sm 同位素链,则相变点进一步向 N 减小方向移动。总之形变区随 Z 增大与 I 增加而扩大,与 $A \sim 100$ 区相似。

文献 [7(b)] 对 $A \sim 150$ 区的 $N = 84 \sim 90$ 的同中异位素 ($56 \leq Z \leq 64$) 的低激发能态进行了系统的比较,发现随着质子对的增加,在 $N \leq 88$ 时,能级间距逐渐增大呈上倾之势,说明质子数远离 $Z = 50$ 满壳层时集体性反而减弱,而在 $N = 90$ 时情形则相反,集体性增强,说明中子数 $N = 90$ 在 $A = 150$ 形变区的特殊性,对此需要进一步开展理论与实验工作。

四、结 论

通过对 ^{252}Gf 瞬发 γ 谱的初步研究,得到了 30 种丰中子偶-偶核能级结构的新的信息,大部分核能级图推向较高自旋态。对 $A \sim 100$ 与 $A \sim 150$ 丰中子核素区形状相变讨论表明,在低自旋态下, $A \sim 100$ 区的形状相变点在 $N = 60$ 附近。 $A = 150$ 区在 $N = 90$ 附近。随着自旋的升高与中子数 N (质子数 Z 也是如此)的变化,此相变点也发生改变,这是由于在较高自旋态及远离满壳层核的集体性发生变化引起的。在 $A \sim 100$

区的亚球壳效应很弱, 自旋在 2 以上, 此壳效应就不明显。对 Ba 同位素链, 直到 $N = 88$ 四极形变仍是软的, 相应的八极形变也很可能是软的

作者感谢 J. H. Hamilton 教授给予的帮助与指导, 同时对同张玫教授马文超博士进行的有启发性的讨论深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 朱胜江, “裂变产物丰中子核素的瞬发 r 谱的实验研究”, *核物理动态*, **9**(1992), 8.
- [2] E. Cheifetz et al., *Phys. Rev. Lett.*, **25**(1970), 38; *Phys. Rev.*, **C4**(1971), 1913.
- [3] J. B. Wilhelmy et al., *Phys. Rev. Lett.*, **25**(1970), 1122; *Phys. Rev.*, **C5**(1972), 2041.
- [4] F. F. Hopkins et al., *Phys. Rev.*, **C4**(1971), 1927.
- [5] W. R. Phillips et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 3257.
- [6] M. A. C. Hotchkis et al., *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 3123.
- [7] Proc. 4th Int. Conf. On nuclear far from stability, Vol. 2, Helsingor, Denmark, Jan., 1981. (a). B. Bengtsson et al., p509; (b). W. B. Walter et al., p557; (c). B. Pfeiffer et al., p423; (d). M. Mattsson et al., p431.
- [8] B. Bengtsson et al., *Phys. Lett.*, **105B**(1981), 5.
- [9] P. Moller and J. R. Nix, *Nucl. Phys.*, **A361**(1981) 117; *Atomic Data and Nucl. Data Tables*, **26**(1981), 165.
- [10] A. H. Wapstra and G. Audi, *Nucl. Phys.*, **A432**(1985), 14.
- [11] J. H. Hamilton, Proc. Int. School of Nuclear Physics, in “Progress in Particle and Nuclear Physics”, Vol. 15, A. Faessler, Ed., (Pergamon press, 1985), p107; in *Treaties on Heavy-Ion Science*, edited by D. A. Bromley (Plenum, New York, 1989), Vol. 8, p. 3.
- [12] H. Mach et al., *Phys. Lett.*, **B230**(1989), 21.
- [13] P. Federman and S. Pittel, *Phys. Lett.*, **69B**(1977), 385; *Phys. Rev.*, **C20**(1979), 820.
- [14] A. Etchegoyen et al., *Phys. Rev.*, **C39**(1989), 1130.
- [15] Faessler et al., *Nucl. Phys.*, **A230**(1974), 302.
- [16] A. Kumer and M. R. Gunye, *Phys. Rev.*, **C32**(1985), 2116.
- [17] B. D. Kern et al., *Z. Phys.*, **A306**(1982), 161.
- [18] K. Shizuma et al., *Z. Phys.*, **A311**(1983), 71.
- [19] S. M. Scott et al., *J. Phys.*, **C6**(1980), 1291.
- [20] W. Urban et al., *Phys. Lett.*, **B200**(1988), 424; *Phys. Lett.*, **B185**(1987), 331.
- [21] W. Nazarewicz et al., *Nucl. Phys.*, **A429**(1984), 269.
- [22] Table of Isotopes, C. M. Lederer and V. S. Shirley (eds.) 7th Edn. (John Wiley and Sons Inc., 1978).

Research on Level Structures of Neutron-Rich Nuclei and Shape Phase Transitions Around $A \sim 100$ and 150 Regions

ZHU SHENGJIANG

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

I. Y. LEE

(Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, U. S. A)

ABSTRACT

Level structures of neutron-rich even-even nuclei around $A \sim 100$ and 150 regions have been studied by observing the prompt gamma rays from the spontaneous fission of ^{252}Cf . The highest spin is up to 10~14. The character of nuclear structures and shape phase transitions of some isotope chains are discussed.