

轻稀土区 Nd 和 Ce 核的超形变带

罗亦孝 钟纪泉

(中国科学院近代物理研究所,兰州)

A. Kirwan* D. J. G. Love** P. J. Nolan* R. Wadsworth†
P. J. Bishop* M. J. Godfrey* R. Hughes† A. N. James*
I. Jenkins* S. M. Mullins† J. Simpson** D. J. Thornley*
and K. L. Ying*

* (Oliver Lodge Lab. University of Liverpool, PO Box 147, Liverpool L69 3BX, U. K.)

** (SERC Daresbury Lab. Warrington WA4 4AD U. K.)

† (Department of Physics, University of York, Heslington, York YO1 5DD, U. K.)

摘 要

轻稀土区高自旋超形变的系统实验研究,首次发现了^{133,134,137}Nd 和¹³¹Ce 的超形变带,并证实和进一步研究了前已发现的^{135,136}Nd 和¹³²Ce 超形变带. 本文叙述超形变带的实验寻找、指定和测量,并对所发现的超形变带的馈入、退激、转动惯量、相对强度和结构的系统性进行了讨论.

一、前 言

¹⁵²Dy 高自旋超形变带的重要发现,开始了原子核高自旋超形变态谱学研究的新领域^[1-5]. 超形变带的布居机制、退激方式、转动惯量、相对强度,高角动量和激发能,以及超形变态的转动阻尼过程等,引起了人们极大的兴趣. 在极大形变(轴长比为 2:1 或 3:2 的长椭球形变)和高角动量下,静态对能显著减小,独立粒子运动更为突出. 从实验上寻找更多的高自旋超形变核,开展高自旋超形变谱学研究,已成为高自旋核结构研究的重要方向. 然而, $A \sim 150$ 区所进行的长期努力,仅发现了^{143,149}Gd 的超形变带^[6].

推转 Strutinsky 模型的位能面计算表明,在轻稀土区,由于高自旋下强壳隙的存在, $\epsilon_2 \sim 0.38$ 的超形变第二极小在 $20-60\hbar$ 的自旋值范围存在^[7-9]. 态寿命的 DSAM 测定证明,¹³²Ce 核中发现的具有很大动力学转动惯量的转动带,是形变为 $\beta \sim 0.5$ 的超形变带^[10]. 上述理论与实验表明, $A = 130-140$ 轻稀土区是寻找和研究高自旋超形变核很有希望的区域之一. 本工作在轻稀土区进行了系统的实验寻找,成功地确认了^{133,134,135,136,137}Nd 和^{131,132}Ce 核的高自旋超形变带,获得了首批实验数据. 与此同时,对这些数据进行

了一些分析和讨论。

二、实验和数据处理

1. 实验

实验是在英国 Daresbury 的 20MV 串列静电加速器上进行的。表 1 列出各次实验使用的反应和能量。各次实验分别使用 Poly-TESSA (与反冲分离器连用) 和 ESSA 30 探测系统^[11]。Poly-TESSA 由 20 个 BGO 康普顿抑制 N 型锗探测器组成, 同反冲分离器连用以进行 γ - γ 和 γ - γ -反冲核符合测量; 反冲分离器提供质量鉴别。ESSA 30 由 29 个 BGO 康普顿抑制 N 型锗探测器组成。BGO 康普顿抑制锗探测器单元的合理结构和电子学配置显著提高了康普顿抑制系数, 增大了峰总比, 大大提高了全能峰-全能峰符合效率^[12]。 γ - γ 和 γ - γ - γ 符合中, 峰总比分别比无抑制时增大了 10 倍和 30 倍。探测器前表面距离靶 18.2cm, 同时兼顾了探测立体角和 γ 谱线多普勒展宽两个因素, 以很高计数率获取高质量的 γ - γ 符合数据。

各次实验 γ - γ 符合事件数为 $\sim 100 \times 10^6$ 。为了将 γ 谱线的多普勒位移等考虑在内, 使同一能量的 γ 峰在各探测器中出现在同一道位置上, 对各探测器进行了增益匹配。获取的数据被整理为一个总的二维矩阵, 以供数据处理。

2. 超形变带的寻找和指定

超形变带强度很低 (大多数相对强度仅 1—5%); 而轻稀土区远离稳定线, 带电粒子蒸发道的竞争使在束 γ 谱相当复杂。在 γ - γ

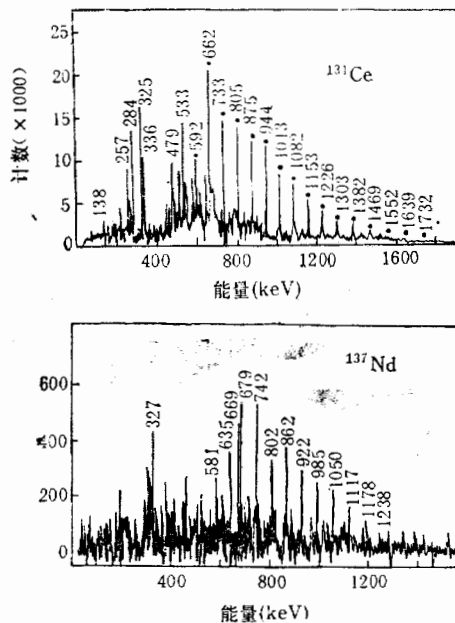


图 1 轻稀土区典型的 ^{131}Ce 和 ^{137}Nd 超形变带能谱

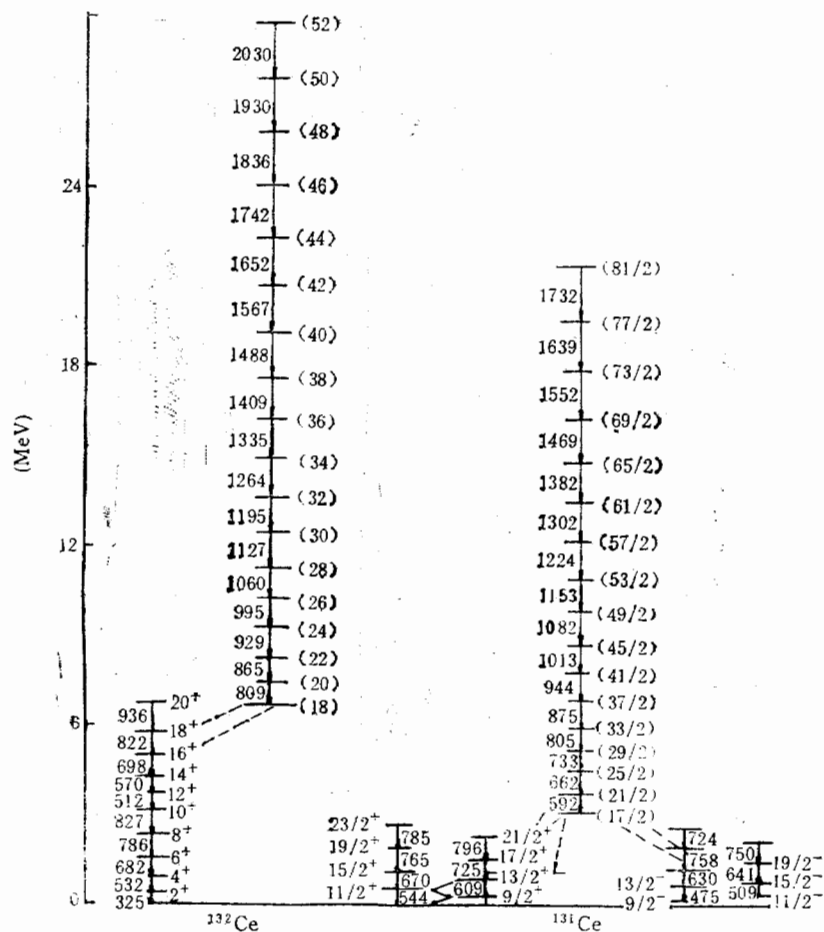
表 1 $A = 130 - 140$ 轻稀土区超形变核系统实验研究所使用的核反应及入射能量

核 反 应	入射能量 (MeV)
$^{104}\text{Pd} (^{32}\text{S}, 2\text{p}, ^{133}\text{Nd})$	152
$^{104}\text{Ru} (^{34}\text{S}, 4\text{n}) ^{134}\text{Nd}$	155
$^{104}\text{Ru} (^{34}\text{S}, 3\text{n}) ^{135}\text{Nd}$	155
$^{104}\text{Ru} (^{36}\text{S}, 4\text{n}) ^{136}\text{Nd}$	150
$^{104}\text{Ru} (^{36}\text{S}, 3\text{n}) ^{137}\text{Nd}$	150
$^{98}\text{Mo} (^{36}\text{S}, 3\text{n}) ^{131}\text{Ce}$	155
$^{100}\text{Mo} (^{36}\text{S}, 5\text{n}) ^{131}\text{Ce}$	150
$^{100}\text{Mo} (^{36}\text{S}, 4\text{n}) ^{132}\text{Ce}$	150

符合数据处理中,充分利用该质量区域已知的在束 γ 谱学知识,正确地设门,合理地进行本底扣除,是寻找超形变带,并获得干净的、令人信服的超形变带能谱的关键。

经过仔细的、系统的数据分析,我们首次发现和指定了 ^{133}Nd , ^{134}Nd , ^{137}Nd 和 ^{131}Ce 核的超形变带,并进一步核实与研究了 ^{135}Nd , ^{136}Nd 和 ^{132}Ce 核的超形变带^[13-15]。它们分别由11—17条 γ 级联跃迁组成,带内相邻 γ 跃迁能量差 $\Delta E_\gamma \sim 65\text{keV}$ 。图1给出 ^{131}Ce 和 ^{137}Nd 的典型的超形变带能谱。各超形变带的指定,是根据它们各 γ 跃迁同该核特征yrast 低位跃迁和有关的其它正常形变带低位跃迁之间确切的符合关系,以及反冲分离器的质量鉴别而确定的。各超形变带能谱中,均只出现上述跃迁,说明对它们指定的可靠性。

各超形变带与早发现的 ^{132}Ce 超形变带十分相似($\Delta E_\gamma \sim 65\text{keV}$),后者的四极矩已由寿命测量给出^[16]。因此,这些超形变带的四极形变值约为 $\epsilon_2 \sim 0.38$,对应于轴长比为3:2的长椭球。



(a)

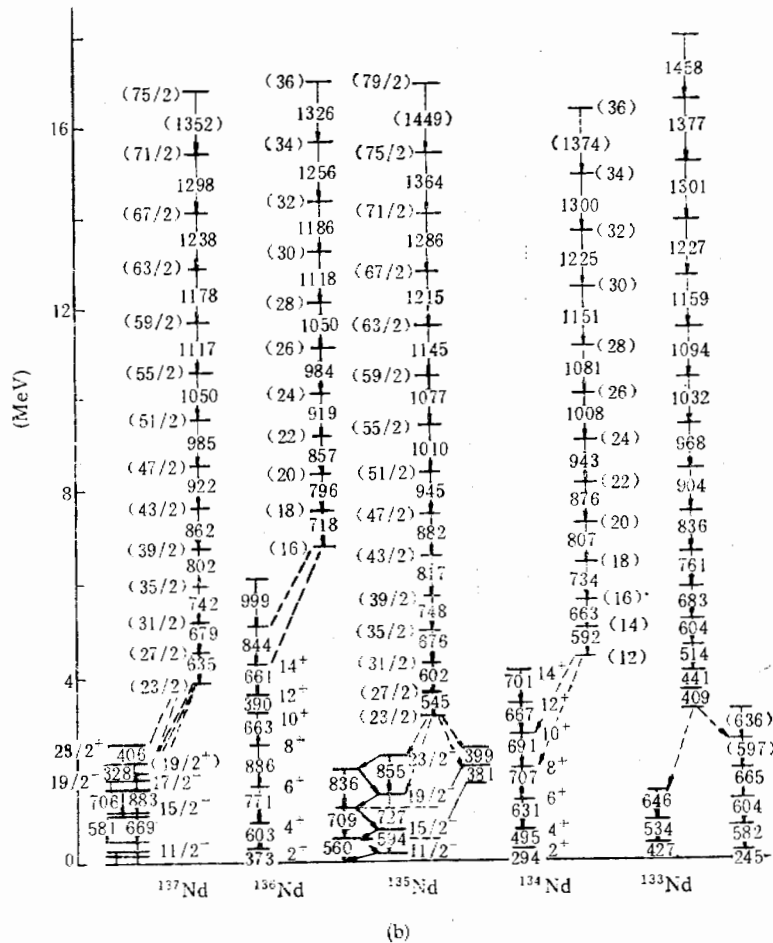
图2 超形变带能级图。

核由和征器靠已为

3. 各超形变带的退激和自旋指定

同 ^{152}Dy 情况一样^[2], 高统计、高质量的数据仍未肯定地鉴别出各超形变带退激馈入 yrast 带和其它正常形变带的退激 γ 跃迁 (linking transition). ^{137}Nd 和 ^{131}Ce 核超形变带退激馈入 yrast 和其它正常形变带各能级的相对馈送强度在表 2 中给出. 从表 2 可以看出, ^{137}Nd 和 ^{131}Ce 的超形变带具有相当多的退激路径. 这种退激方式的有关理论尚有分歧, 其形成原因是人们感兴趣的问题之一.

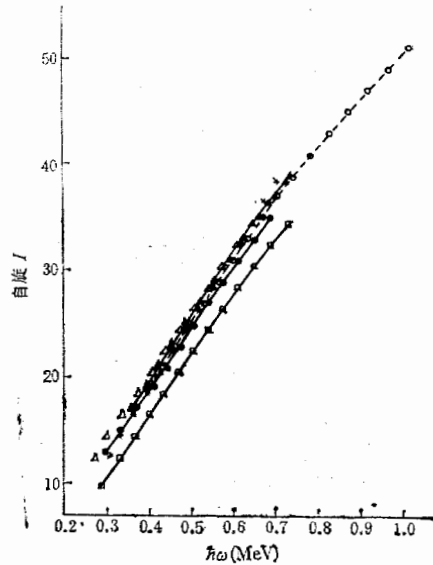
现有的高统计数据, 仍不足以进行超形变带角关联测量. 但根据个别跃迁的测量和超形变带明显的转动带特征, 可合理地假定带内跃迁均具有 Stretched $E2$ 性质. 同时, 根据 γ - γ 符合数据确定超形变带主要退激路径所联系的 yrast 和其它正常形变带的最高能级, 并假定沿该路径的退激 γ 跃迁携带的角动量为 $2\hbar$, 从而给出各超形变带自旋指定 (图 2), 不确定性 $< 2 \sim 4\hbar$. 从图 2 可以看出, 角动量一直延伸到 $\sim 40\hbar$ (^{132}Ce 为



(a) Ce 核, (b) Nd 核

表2 ^{137}Nd 和 ^{131}Ce 超形变带退激级入 yrast 和有关正常形变带各能级相对馈送强度

^{137}Nd		^{131}Ce	
能级 (J^*)	馈送强度(%)	能级 (J^*)	馈送强度(%)
23/2+	43±8	21/2+	5±2
19/2+	12±3	17/2+	29±6
19/2-	21±5	13/2+	8±3
17/2-	24±6	15/2+	20±6
		19/2-	3±2
		15/2-	31±7
		13/2-	4±2

图3 超形变带 $I \sim \hbar\omega$ 图

● ^{134}Nd ▲ ^{135}Nd △ ^{136}Nd * ^{137}Nd ○ ^{132}Ce □ ^{131}Ce

52ħ).

4. 各超形变带转动惯量

根据超形变带各 γ 跃迁能量 E_γ 的测定和自旋指定, 可得出各超形变带自旋-转动频率 ($I \sim \omega$) 关系 (图3), 并可得到各超形变带第一类(运动学)转动惯量 $\mathcal{I}^{(1)}/\hbar^2 = I/\frac{dE_I}{dI} = 2I/E_\gamma$ 和第二类(动力学)转动惯量 $\mathcal{I}^{(2)}/\hbar^2 = 1/\frac{d^2E_I}{dI^2} = 4/\Delta E_\gamma$. 图4给出各超形变带 $\mathcal{I}^{(2)} \sim \hbar\omega$ 曲线, 按 $A^{5/3}$ 标度, 并归一化到 ^{132}Ce .

5. 各超形变带相对强度

同时使用总投影谱和 γ - γ 符合数据以测定超形变带各跃迁相对强度. 在低位 yrast 跃迁和超形变带底部最强的超形变跃迁上设门的符合谱给出带内各跃迁的强度比值. 将

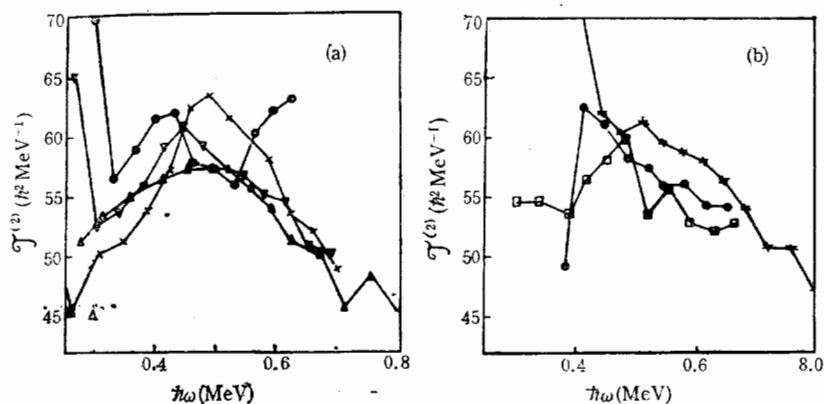


图 4 超形变带第二类转动惯量 $\mathcal{J}^{(2)} \sim \hbar\omega$ 图

(a) 奇中子核 ∇ ^{135}Nd \circ ^{137}Nd \times ^{139}Nd , (b) 偶-偶核 $*$ ^{132}Ce \circ ^{136}Nd \square ^{134}Nd

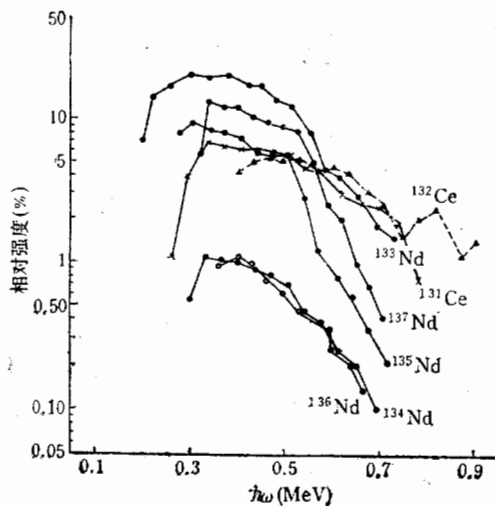


图 5 超形变带的相对强度。以相对于各核基态馈送强度的百分比表示

其归一化到“干净”地出现在总投影谱中的超形变跃迁的强度值和该核基态馈送强度值，即得超形变带各跃迁相对于该核基态馈送强度的比值。各超形变带相对强度 $\sim \hbar\omega$ 曲线在图 5 中给出。

三、讨 论

1. 轻稀土区核超形变带物理图象、结构和布居

推转模型(使用 Nilsson 或 Woods-Saxon 势)给出的单粒子能级图在 $Z = 58-62$ 粒子数, 显示出很大的壳隙^[9,16,17]。推转 Strutinsky 计算(考虑液滴能、壳修正能, 集体转动和核子排列能)和 Ce 与 Nd 核超形变带的系统发现表明, 该壳隙是该区域原子核位能面

频
I/
超

ast
将

上出现第二极小 ($\varepsilon_2 \sim 0.4$), 并在一定自旋以上成为 yrast 的重要因素. 建立在这个位能面第二极小上的高自转动带就称之为超形变带. 然而, 实验已经表明, 壳隙的存在并不足以解释原子核的超形变现象. 使用 Woods-Saxon 势的推转模型计算表明, Ce 和 Nd 核超形变的出现是同一个或两个中子激发到 $i_{13/2}$ 侵入轨道有关的^[9]. 在低转动频率和正常形变下, $i_{13/2}$ 能级远高于费米面而未被占据. 随着形变和转动频率增大, $i_{13/2}$ 能级迅速下斜. 对于 $\varepsilon_2 \sim 0.4$ 和 $N > 72$ 的稀土核, $i_{13/2}$ 能级在低的转动频率下已位于费米面附近, $i_{13/2}$ 中子在 $\sim 0.4\text{MeV}$ 转动频率下已发生排列. 准粒子能级图给出, 一对 $h_{11/2}$ 质子, 一对 $i_{13/2}$ 中子和一对 $h_{9/2}$ 中子分别在 $\hbar\omega \simeq 0.3, 0.4$ 和 0.5MeV 发生排列; 在更高转动频率下排列的还有 $h_{11/2}$ 中子等. 计算还表明, $h_{11/2}$ 或 $h_{9/2}$ 粒子的排列并不引起形变值的显著增加. 对于 ^{151}Ce 核, 超形变带是同一个 $i_{13/2}$ 中子激发 ($\pi = +, \alpha = +1/2$) 相联系的, 在实验观察到的转动频率范围内, 还出现了 $h_{11/2}$ 质子和 $h_{9/2}$ 中子的排列.

实验表明, Nd 核超形变带的布居同 Ce 核相比存在系统性的差别. Nd 奇中子核超形变带相对强度比偶中子核高一个量级(图 5), 但这种明显的奇偶效应却未能在 Ce 核中观察到, ^{152}Ce 和 ^{151}Ce 超形变带相对强度十分相近. 这也是目前实验和理论感兴趣的问题之一.

此外, ^{150}Ce 一直被认为是最有可能的超形变核之一^[18], 但本实验高统计的数据仍未确认其超形变带, 仅给出其相对强度上限 $< 1\%$. 先前 $E_\gamma - E_\gamma$ 关联谱中具有大 $\mathcal{F}^{(2)}$ 的脊结构可能主要来自 ^{151}Ce , 而不是 ^{150}Ce , 虽然 ^{150}Ce 在该核反应中有高得多的生成截面. 因此, 实验的核实与 ^{150}Ce 超形变带的进一步寻找是有意义的.

2. 轻稀土区核超形变带的馈入和退激方式

同 ^{152}Dy 情况类似, 轻稀土区核超形变带达到比正常形变带高得多的自旋值, 实验观察到的正常形变带最高自旋是 $30-32\hbar$, 而超形变带是 $40-52\hbar$. 一方面, 这可能由于建立在轴长比为 3:2 的轻稀土区超形变核上的巨偶极共振低位分量显著增强了超形变带的 E1 馈入^[19]; 另一方面, 在同样的激发能下, 超形变态比正常形变态有低得多的能级密度(由于强壳隙的存在), 有不同的转动阻尼过程, 激发态的退激过程中, 超形变 γ 跃迁不像正常形变 γ 跃迁那样将其强度分散到几个跃迁上^[19], 从而, 具有可观测强度的超形变带一直延伸至极高自旋区.

超形变带符合谱上仅观察到很低自旋区的正常形变带跃迁(图 1). 这说明, 一旦馈入超形变带, 将一直在带内级联退激到带底部. 由图 5 还可看出, 在超形变带底部, 超形变带迅速退激馈入正常形变带, 强度在底部一、二个跃迁上急剧下降; 各带迅速退激与第二类转动惯量 $\mathcal{F}^{(2)}$ 在低 $\hbar\omega$ 端出现突变的转动频率基本一致(图 4, 5), 与高 i 轨道的排列相应, 很可能与特定的低自旋值下对能的突然恢复有关.

同 ^{152}Dy 相比, 轻稀土区核超形变带的馈入还表现出许多不同特点. ^{152}Dy 超形变带馈入非常快, 在最上部三个能级馈入该带^[2]. 而 Ce 和 Nd 核超形变带的馈入出现在更多的能级(图 5). 特别是 Nd 奇中子核, 各超形变带相对强度十分相似, 均在 $\hbar\omega \simeq 0.7\text{MeV}$ 到 0.5MeV 范围内急剧上升; 以后随 ω 减小, 馈入已大大减弱但并未完全停止. 此外, 同 Nd 核相比, Ce 核强度曲线随转动频率增加而平缓下降, 观察到的分立超形变 γ 跃迁延伸

这个存在 e 和频率能级费米 $1/2$ 质高转变值关系

核超核中问题

乃未²⁾的成截

验观于建带的密度不像带一

且馈超形与第道的

变带更多 MeV, 同延伸

到更高的自旋值。

如前所述,各超形变带具有相当多的退激路径,表明这些超形变带底部在能量上已的确显著高于各正常形变带。文献[2]预言,这种退激跃迁是统计性的,而文献[13]报道了¹³⁵Nd的退激跃迁。本实验未确定任何超形变带的退激跃迁,但提供了表2所示数据。因此,首先必须用高统计的 γ - γ - γ 三重符合测量,待完全确认退激方式后,再进行物理上的探讨。

3. 轻稀土区核超形变带转动惯量

图3所示 $I \sim \hbar\omega$ 曲线都很平滑、相似,表现出很好的转动性质和极高的转动惯量。然而,曲线斜率均随 ω 而变,并不表示为严格的直线,这显示出该质量区超形变带 $\mathcal{I}^{(1)}$ 与 $\mathcal{I}^{(2)}$ 的差异。

第二类转动惯量 $\mathcal{I}^{(2)}$ 独立于自旋指定,具有重要的物理意义。该质量区的 $\mathcal{I}^{(2)}$ ($= \frac{4}{\Delta E_{\gamma}} \hbar^2 \text{MeV}^{-1}$),在 $\hbar\omega \sim 0.5 \text{MeV}$ 附近高达 $62-68 \hbar^2 \text{MeV}^{-1}$,相当于该区域球形刚体转动惯量值的1.4倍左右。从图4可以看出,轻稀土区核超形变带的 $\mathcal{I}^{(2)}$ 在高自旋区随 ω 增加而减小,而¹⁵²Dy超形变带的 $\mathcal{I}^{(2)}$ 的这种变化要缓慢、轻微得多^[2]。显然,轻稀土区超形变核的转动并不是刚性的,高*i*轨道的逐渐排列,使其对集体转动的贡献逐渐减小。^{148,149}Gd超形变带的 $\mathcal{I}^{(2)}$ 有类似的特征^[6]。

值得注意的是,¹³⁷Nd的 $\mathcal{I}^{(2)}$ 在 $\hbar\omega = 0.57 \text{MeV}$ 又开始显著上升,这是在高自旋区观察到 $\mathcal{I}^{(2)}$ 重新上升的第一个超形变核,很可能是理论计算给出的 $h_{9/2}$ 质子排列发生的交叉所引起,但尚有待于DSAM寿命测量与进一步的实验证实。

从图4还可看出,奇中子核的 $\mathcal{I}^{(2)}$ 在低转动频率范围随 ω 减小而减小, $\mathcal{I}^{(2)}$ 曲线呈现明显的钟罩形,需要进行寿命测量以判别 $\mathcal{I}^{(2)}$ 的减小是否来源于集体性的减小。然而,偶-偶核在低频范围却明显不同。高*i*轨道的排列可以解释这种差异。偶-偶核 $i_{13/2}$ 中子在 $\hbar\omega \simeq 0.4 \text{MeV}$ 发生排列, $\mathcal{I}^{(2)}$ 出现突变;奇中子核由于 $i_{13/2}$ 中子的阻塞作用, $\mathcal{I}^{(2)}$ 在 $\hbar\omega \simeq 0.4 \text{MeV}$ 不出现突变,而在 $\hbar\omega \simeq 0.3 \text{MeV}$ 附近 $\mathcal{I}^{(2)}$ 的突变对应于 $h_{11/2}$ 质子排列^[9]。

四、结 论

$A \sim 130-140$ 轻稀土区高自旋超形变链的实验发现为超形变谱学的研究提供了首批实验数据。该区域超形变带表现出丰富的谱学现象,是进行超形变谱学研究的理想区域。

推转Strutinsky理论模型、有关的准粒子能级计算成功地预言和解释了轻稀土区高自旋超形变的出现,对各超形变带的布居、退激、结构和转动惯量等进行了初步研究。但丰富的实验现象还远未能得到系统的描述。对已发现的超形变带进行寿命测量以获取可靠的形变系统知识,并由 $B(E2)$ 值验证理论预言的带交叉;确认超形变带底部退激跃迁的性质、多极性和能量,从而对超形变带给出自旋和激发能指定等,对该区域超形变态的

研究具有重要意义。

此外,在超形变带的寻找中,关于入射道效应也有过讨论^[20],这也有待于实验作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] P. J. Twin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 1380.
B. M. Nyako et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 507.
- [2] P. J. Twin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 811.
- [3] R. Bengtsson et al., *Phys. Lett.*, **57B**(1975), 301.
K. Neergord et al., *Phys. Lett.*, **59B**(1975), 218.
- [4] I. Ragnarsson et al., *Nucl. Phys.*, **A347**(1980), 287.
- [5] T. Bengtsson et al., *Phys. Scr.*, **24**(1981), 200.
- [6] B. Haas et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 503.
M. A. Deleplanque et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 1626.
- [7] S. Aberg, *Phys. Scr.*, **25**(1982), 23.
- [8] D. J. G. Love, *J. Phys. G.*, (in press).
- [9] R. Wyss et al., Preprint Lund-Mph-87/16.
- [10] P. J. Nolan et al., *J. Phys. G.*, **11**(1985), L17.
A. J. Kirwan et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 467.
- [11] P. J. Nolan, *Proc. Int. Nucl. Phys. Conf. Harrogate*, V2, P155.
- [12] P. J. Nolan et al., *Nucl. Inst. Meth.* **A236**(1985), 95.
- [13] E. M. Beck et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 2182.
- [14] R. Wads worth et al., *J. Phys. G.*, **13**(1987), L207.
- [15] Y. X. Luo et al., *Z. Phys.*, **A329**(1988), 125.
- [16] T. Bengtsson, *Nordita Preprint*, 1987.
- [17] J. Dudek, Preprint CRN/PN 87/10.
- [18] D. J. G. Love, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 1361.
- [19] S. Aberg, Preprint Lund Mph 87/06.
- [20] A. O. Macchiavelli et al., *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 2177.

THE SUPERDEFORMED BANDS IN Nd AND Ce NUCLEI

LUO YIXIAO ZHONG JIQUAN

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou*)

A. KIRWAN* D. J. G. LOVE** P. J. NOLAN* R. WADSWORTH††† P. J. BISHOP*
M. J. GODFREY* R. HUGHES††† A. N. JAMES* I. JENKINS* S. M. MULLINS††† J.
SIMPSON** D. J. THORNLEY* K. L. YING*

*(*Oliver Lodge Lab. University of Liverpool, PO Box 147, Liverpool L69 3BX, U. K.*)

**(*SERC Daresbury Lab. Warrington WA4 4AD U. K.*)

***(*Department of Physics, University of York, Heslington, York YO1 5DD, U. K.*)

ABSTRACT

Superdeformed bands in $^{133,134,137}\text{Nd}$ and ^{131}Ce are found in a systematic study of the high spin, superdeformed light rare earth nuclei. Also the previously reported superdeformed bands in $^{135,136}\text{Nd}$ and ^{132}Ce are confirmed and further investigated. The experimental search procedure, identification and measurement of the superdeformed bands are described in detail. The systematics in feeding, decay, moment of inertia, relative intensity and structure of the bands are discussed.