

^{153}Dy 高自旋态的能级结构及缺中子 Dy 核的形状随中子数与自旋态的变化

朱胜江 马文超

(清华大学现代应用物理系, 北京)

M. A. QUADER** H. EMLING* T. L. KHOO* I. AHMAD* P. J. DALY** B. K. DICTER* M. DRIGERT*** U. GARG*** Z. W. GRABCWSKI** R. HOLZMANN* R. V. F. JANSSENS* M. PIIPARINEN** W. H. TRZASKA** T. -F. WANG*
 * (Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, U. S. A.) ** (Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, U. S. A.) *** (University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana 46556, U. S. A.)

摘 要

通过在束 γ 谱的实验研究, 建立了 ^{153}Dy 的非常高的自旋态的能级图, 最高自旋态为 $81/2$ 。所用核反应为 $^{122}\text{Sn} (^{36}\text{s}, 5\text{n})$, 束流能量 165MeV 。在同质异能态 ($I = 47/2$) 以上, 能级结构展示出极端复杂的单粒子跃迁特性。对缺中子 Dy 核的形状随中子数 N 及自旋态 I 变化的系统性进行了讨论。

一、前 言

对 $A = 150$ 核区的高自旋态的研究一直引起人们的关注, 特别是 ^{152}Dy 及 ^{151}Dy 超形变态的发现^[1,2], 引起核物理学界的很大兴趣。就正常的高自旋态的分立谱的研究来讲, 对 Dy 核素也已进行了大量的工作。缺中子 Dy 核素, 能级结构及形状变化丰富。 $N \leq 86$ 的 Dy 核在基态呈球形, 随着角动量的增加变成扁椭球形。而 $N \geq 90$ 的 Dy 核在基态呈长椭球形, 在高角动量下仍然保持长椭球形状^[3]。 $N = 87.88$ 的 Dy 核为过渡性的核, 在基态略呈长椭球形状, 随着角动量的增加, 逐步过渡到扁椭球形状。近来对 ^{154}Dy ($N = 88$) 的研究已获得非常高的自旋态的能级结构^[4], 表明了一些新的特性。而对 ^{153}Dy ($N = 87$), 人们也已进行了一些研究^[5-7], 不断完善较高自旋态的能级结构, 发现了 $I = 47/2^{(-)}$ 的同质异能态。但在高于此自旋态时, 由于能级结构非常复杂, 虽然发现了一些级联跃迁, 但能级图未能建立起来。

为探索 ^{153}Dy 更高自旋态的能级结构, 以便在此区内对核的形状及结构特性作系统比较, 我们再一次进行了 ^{153}Dy 在束 γ 谱实验研究。

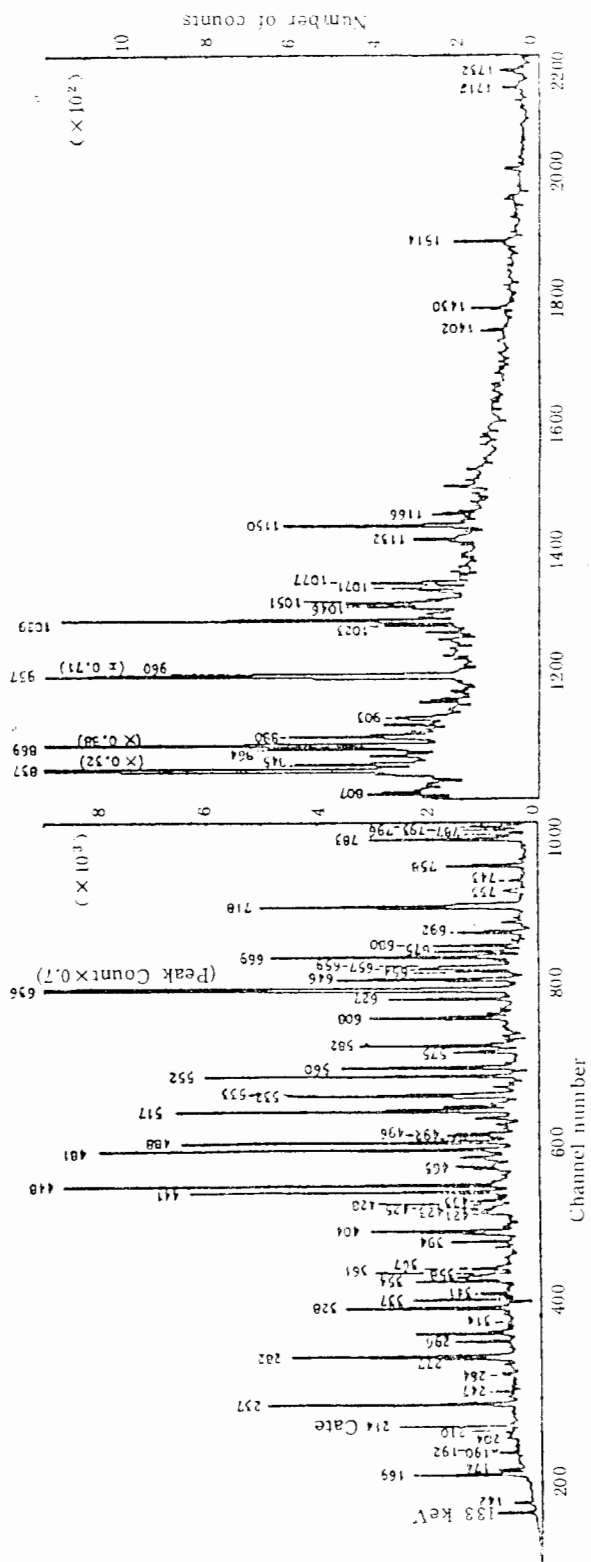


图1 ^{153}Dy 124keV γ 符合门谱(图中标出的为全部识别的谱)

二、实验和数据处理

实验装置与所用反应同 $^{154}\text{Dy}^{L43}$, 用 $^{123}\text{Sn} (^{36}\text{S}, 5n)$ 产生 ^{153}Dy , 束流能量为 165 MeV. 实验在美国 Argonne 国家实验室的 ATLAS 超导重离子加速器上进行, 靶厚约 1 mg/

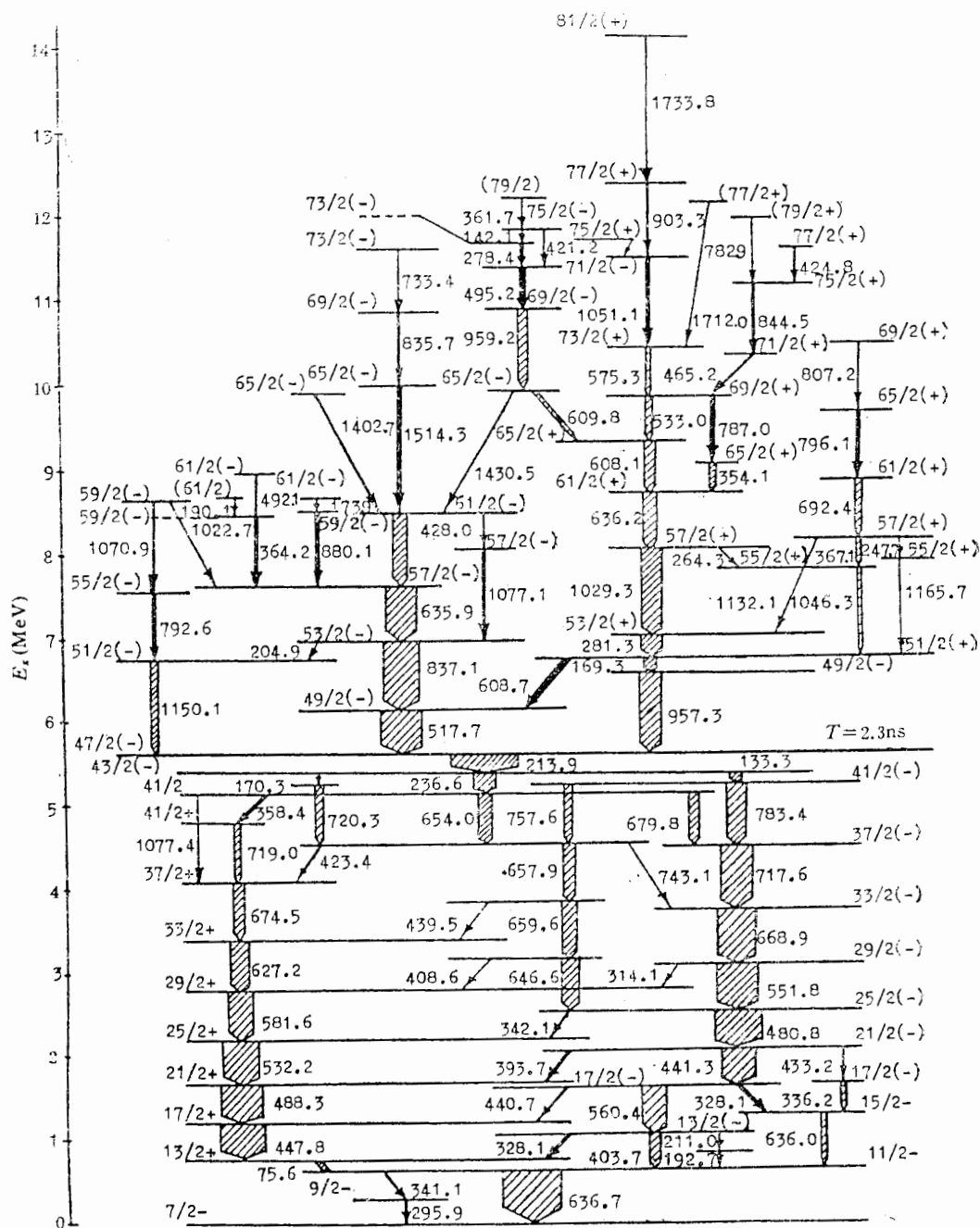


图 2 ^{153}Dy 高自旋态能级图

cm², 8台 BGO 反康普顿高纯锗探测器, 放在不同角度, 三台相对于束流方向成 34.5° 角, 二台成 90° 角, 三台成 145.5° 角. 此外, 14 个围绕靶的 BGO 六棱柱所构成的多重过滤器, 用以选出较高激发能的级联 γ 跃迁事件, 以备 γ - γ 符合及方向关联用.

数据分析是在清华大学进行的, 利用 γ - γ 符合与 γ 射线的强度关系, 识别了多条非常弱的 γ 跃迁谱线. 图 1 为通过 214keV 符合门所得的 γ 射线能谱, 标出峰位值的为已识别的 γ 射线峰. 图 2 为 ¹⁵³Dy 新的能级结构图, 最高自旋态为 81/2. 除了识别[6]中所有 γ 跃迁外, 发现了 50 多条新的 γ 跃迁谱线. 其中, 有几条是在 47/2⁽⁻⁾ 能级以下的较弱的跃迁, 其余新谱线都布居在 47/2⁽⁻⁾ 以上. γ 射线的投影谱极为复杂, 除了 ¹⁵¹⁻¹⁵³Dy, ¹⁵⁴⁻¹⁵⁵Dy 等竞争反应产生的 γ 线外, ¹⁵³Dy 本身存在着几条非常复杂的重叠峰, 而这几条重峰的识别对布居高自旋态的能级图起着关键性的作用. 其中有四重峰 636keV, 三重峰 609keV, 二重峰 533、958keV 等等. 采用不同门谱下的符合关系相对强度比值及系统性原理定出它们在能级图中的位置. 能级自旋的确定采用方向关联法^[8], 即 90° 探测器对其余的探测器组成的符合关系, 观测其方向关联强度比率定出 γ 跃迁的 ΔI , 根据系统性原理定出能级的自旋. 能级宇称的安排是推测性的. 早期的实验由于 328keV 的重叠峰, 不能明确定出 17/2 能级的宇称, 只能根据 ¹⁵⁴Dy 类似的带结构推得带头 17/2 的宇称为负, 导致一直到 47/2 能级的宇称都是推测而来^[7]. 所以在 47/2⁽⁻⁾ 以上能级的宇称也是根据系统性原理推得的. 在确定 51/2 (6719keV) 能级宇称时, 因为从 53/2 → 51/2 → 49/2⁽⁻⁾ 为两个强的偶极跃迁, 能级间距较小, 实验中未观测到从 53/2 → 49/2⁽⁻⁾ ($\Delta I = 2$) 的四极跃迁, 暂定 51/2 能级的宇称为正. 这样, 在 51/2⁽⁺⁾ 以上, 右边级联跃迁的各能级的宇称都暂定为正. 这些能级的宇称尚有待于进一步的角分布测量验证.

三、讨 论

比较 ¹⁵³Dy 与 ¹⁵⁴Dy^[9] 的能级图, 在自旋态不太高时, 两者有些相似, 它们都有两个主要的退激带, 即正宇称带与负宇称带. ¹⁵³Dy 的正宇称带的带头为 $\nu_{i13/2}$, 显示出很强的集体性, 角动量 I_x 对 $\hbar\omega$ 的图是一直线^[7], 到 41/2⁽⁺⁾ 时即失去集体性, 这与 ¹⁵⁴Dy 的 S 带很相似. 用带终结理论计算 ¹⁵⁴Dy, 到 $I = 36^+$ 后转入单粒子跃迁^[9], 能级间距呈现不规则性. 相比之下, ¹⁵³Dy 带终结得较早, 到 41/2⁺ 就进入单粒子跃迁. 对负宇称带两者似乎有类似的情形. 随着角动量的增加, 在 5MeV 激发能附近, ¹⁵³Dy 的几个偶极跃迁与四极跃迁同时并存, 表明集体运动与单粒子跃迁的相互共存, 此或许是三轴形变区, 一直到 $T_{1/2} = 2.3\text{ns}$ (47/2⁽⁻⁾) 的同质异能态的建立.

图 3 (取自文献 [7, 11, 12]) (曲线 b 区) 表明了 Dy 同位素集体带所能达到的最高能量与自旋及中子数 N 的关系. 在 $N \leq 85$ 时, 无集体带出现, 在 $N = 86$ 时, 开始有弱的集体振动出现, 随着中子数的增加, 带终结的能量逐渐增高, 集体性增强, 到 $N = 89$ 时, 集体性完全确立.

轻质量数的 Dy 同位素的同质异能态的存在是一个很有趣的现象. 十多年前, Bohr 与 Mottelson 作了理论预言^[10], 在高角动量下, 可有转晕陷阱形成, 即同质异能态, 标志着单粒子性的完全确立, 也标志着核的扁椭球形状^[9]. 图 3 (曲线 a 区) 画出 Dy 同位素的同

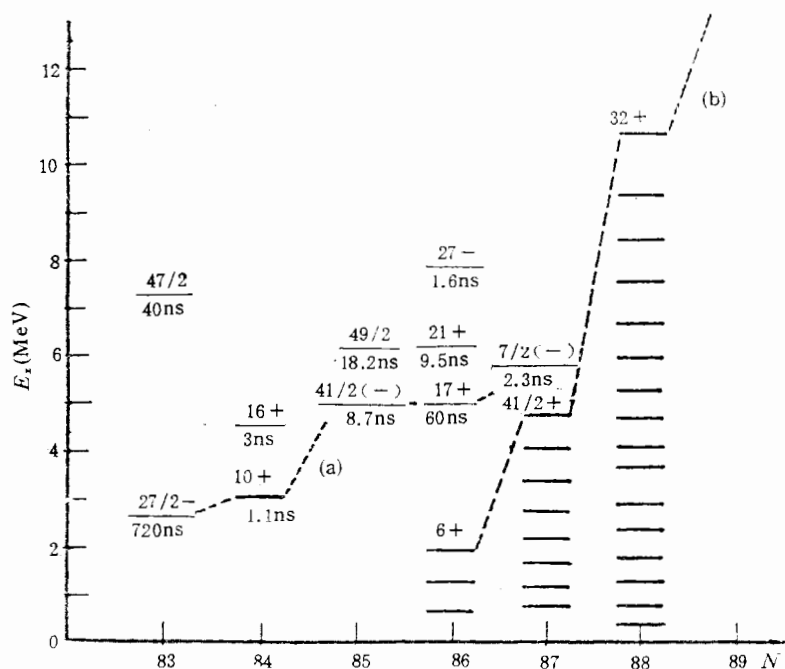


图 3 轻质量 Dy 同位素同质异能态(曲线 a 区)与集体带终结(曲线 b 区)的激发能与中子数 N 变化的关系

质异能态所出现的能量与中子数变化的关系,可以看出,随着中子数的增加,同质异能态的激发能逐渐抬高.在 $N \leq 86$ 时,一般有两个以上,而在 $N = 87$ 时,只测到一个,在 $N \geq 88$ 时,尚未观测到它的存在.这也正说明了在高自旋下, Dy 核随 N 的增加,单粒子性减弱,集体性增强,表现为由扁椭球向长椭球形状过渡.理论上已有人对这种同质异能态进行了计算^[11],只能定性与实验符合,但未涉及 ^{153}Dy 的同质异能态.似乎是 ^{153}Dy 的 $I = 47/2$ 的同质异能态为 ^{148}Gd 的核实加上两个顺排 $h_{11/2}$ 质子与五个处于三种不同轨道上的中子 ($f_{7/2}, h_{9/2}, i_{13/2}$) 的组态混合.

从图 2 中可以看出,在 $47/2^{(-)}$ 以上, ^{153}Dy 的能级结构非常复杂,能级间距很不规则.但可以看到两个较强的级联跃迁系列.在靠近 $47/2^{(-)}$ 以上的区域,有几个强的偶极跃迁,能级间隔为 518、957、169、281keV.左边的正宇称级联跃迁最高自旋能级为 $73/2^{(-)}$,表现为一系列的四极跃迁.而右边的正宇称级联跃迁,一系列的四极跃迁中夹着两个能级间距较大的偶极跃迁(1051keV, 903keV).此外还发现几个较弱的级联跃迁及众多的边馈.而所有这些级联与边馈,最后都汇入 $47/2^{(-)}$ 的同质异能

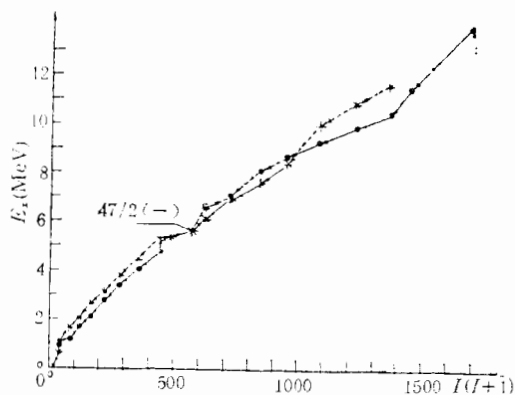


图 4 ^{153}Dy 的两个主要级联跃迁的激发能与 $I(I+1)$ 曲线图
 —●— Yrast; ● Positive Parity;
 - - * - - Noyrast; * Negative Parity

态.此外还发现几个较弱的级联跃迁及众多的边馈.而所有这些级联与边馈,最后都汇入 $47/2^{(-)}$ 的同质异能

态,经由 214keV 向下退激. 而在 $^{148-152}\text{Dy}$ 中,在非常高的自旋态下,并未发现如此多的达馈及复杂的弱级联跃迁^[12]. 这种 ^{153}Dy 的复杂的退激途径,是否意味着在非常高的自旋态下,扁椭球形状的牢固确立,或是发生了某种变化,有待于理论上进一步分析. 值得注意的是,在 ^{154}Dy 中^[4],集体带终结 ($I = 32^+$) 后,出现单粒子跃迁特性,但随着自旋的增加,在 $I = 42^+ \sim 48^+$ 之间,又呈现出集体性,这是新发现的现象. 而在 ^{153}Dy 中,在极高的自旋态下,尚未发现集体跃迁的证据.

图 4 表明了 ^{153}Dy 激发能对 $I(I+1)$ 的变化曲线,只标出两个主要的级联退激路线. 在自旋态较低时,转晕线沿正宇称带走,在 $47/2^{(-)}$ 的同质异能态以上,转晕线先是沿负宇称级联走,到 $I = 61/2$ 以上,两个级联交叉,正宇称级联变成转晕线,这种情形在别的 Dy 同位素(例如 ^{148}Dy , ^{154}Dy) 中也可观测到,这可能是沿不同途径退激的单粒子路程发生交叉引起的,或是位能表面极小值发生了移动,有待于理论上进一步探讨.

四、结 论

缺中子 Dy 核素,随着中子数 N 的增加,单粒子性减弱,集体性增强. 而随着自旋的增加,单粒子性增强,集体性减弱. 这种单粒子与集体性的转换,表现在核的形状的变化上. ^{153}Dy 与 ^{154}Dy 正是处于这种变化的过渡区. 本实验确立了过渡性核 ^{153}Dy 在非常高的自旋态下的分立 γ 谱能级图. 此能级图表明在同质异能态(扁椭球形状)以上, ^{153}Dy 表现出的强的单粒子组态混合特性,展示了 ^{153}Dy 核随着角动量的增加,是如何从集体性(长椭球形状)经由三轴形变到扁椭球形状,然后仍维持其复杂的单粒子特性. 此复杂的能级结构,有待于理论上进一步分析. 这种过渡性的特性,对于确定 Dy 核的形状随中子数 N 与自旋 I 变化的相图^[13]是很重要的.

参 考 文 献

- [1] P. J. Twin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 811.
- [2] G. E. Rathke et al., *Phys. Lett.*, **209B** (1988), 177.
- [3] A. Pakkanen et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48** (1982), 1530.
- [4] W. C. Ma et al., *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988), 46.
- [5] P. Kleinheinz et al., *Nucl. Phys.*, **A283** (1977), 189.
- [6] J. F. W. Jansen et al., *Nucl. Phys.*, **A321** (1979), 365.
- [7] M. Kortelahti et al., *Phys. Lett.*, **131B** (1983), 305.
- [8] K. S. Krane et al., *Nucl. Data Tables*, **11** (1973), 351.
- [9] H. W. Grammer-Gordon et al., *Nucl. Phys.*, **A465** (1987), 506.
- [10] A. Bohr and B. R. Mottelson, *Nuclear Structure*. Vol. 2 (Benjamin, New York, 1975).
- [11] D. Horn et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50** (1983), 1447.
- [12] B. Haas et al., *Nucl. Phys.*, **A362** (1981), 254.
- [13] C. G. Anderson et al., *Phys. Scr.*, **24** (1981), 256.

LEVEL STRUCTURE OF ^{153}Dy IN HIGH SPIN STATES AND SHAPE CHANGES WITH N AND I IN Dy NUCLEI

ZHU SHENGJIANG MA WENCHAO

(Physics Department, Tsinghua University, Beijing)

M. A. QUADER** H. EMLING* T. L. KHOO* I. AHMAD* P. J. DALY** B. K.
DICHTER* M. DRIGERT*** U. GARG*** Z. W. GRABOWSKI** R. HOLZMANN*
R. V. F. JANSSENS* M. PIIPARINEN** W. H. TRZASKA** T. -F. WANG*

* (Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, U. S. A.) ** (Purdue University,
West Lafayette, Indiana 47907, U. S. A.) *** (University of Notre Dame, Notre Dame,
Indiana 46556, U. S. A.)

ABSTRACT

The ^{153}Dy level structure has been investigated through in-beam γ -ray spectroscopy experiment. The reaction $^{122}\text{Sn} (^{36}\text{S}, 5n)$ was studied at beam energy 165MeV. The highest spin was 81/2. Above $I = 47/2$ isomer, extremely complicated single-particle character was shown. Nuclear shape changes with N and I in the neutron-deficient Dy nuclei were discussed.