

# $^{142}\text{Ce}$ 的新激发态及其经验壳模型研究\*

刘忠 张玉虎 郭应祥 周小红 雷相国 柳敏良  
罗万居 何建军 郑勇 潘强岩 甘再国 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

T. Hayakawa M. Oshima Y. Toh T. Shizima Y. Hatsukawa A. Osa T. Ishii  
(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

M. Sugawara

(Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan)

**摘要** 利用 420MeV  $^{82}\text{Se}$  轰击  $^{139}\text{La}$  引起的深部非弹反应和在束  $\gamma$  谱学方法研究了  $^{142}\text{Ce}$  的中高自旋激发态. 识别出了激发能为 2625, 2995 和 3834keV 的 3 个新能级, 自旋、宇称分别被指定为  $8^+$ ,  $9^{(-)}$  和  $11^{(-)}$ . 发现这些能级非常好地符合  $N = 84$  偶偶核转晕能级的系统性. 利用经验壳模型计算了  $^{142}\text{Ce}$  的中高自旋激发态的激发能, 计算结果比较好地重现了实验值. 对它们的结构进行了讨论, 表明在  $^{142}\text{Ce}$  的中高自旋激发态中以单粒子激发为主.

**关键词** 深部非弹反应 转晕激发态 经验壳模型

## 1 引言

近些年来, 在实验和理论上对中子数  $N = 84$ 、质子数在  $Z = 50-64$  满(亚满)壳之间的同中子素的转晕激发进行了大量研究.  $^{134}\text{Sn}$  ( $Z = 50$ ) 和  $^{148}\text{Gd}$  ( $Z = 64$ ) 及其周围同中子素表现为典型的满壳核, 可由壳模型单粒子激发很好地描述. 在这两个满(亚满)壳之间, 随着价质子数的增加, 集体性也逐渐出现, 并与单粒子激发模式相互竞争<sup>[1-3]</sup>.

最近, 利用重核的自发裂变识别出了比  $^{142}\text{Ce}$  轻的同中子素 ( $\text{Sn}-\text{Ba}$ ) 的转晕激发态<sup>[3,4]</sup>, 而通过重离子熔合蒸发反应对比  $^{142}\text{Ce}$  重的同中子素 ( $\text{Nd}-\text{Cd}$ ) 进行了深入的能级结构研究<sup>[5,6]</sup>. 不管在自发裂变中, 还是熔合蒸发反应中,  $^{142}\text{Ce}$  的产额都不够高, 因此关于该核的转晕激发态信息仍很有限. 近几年国外及我们自己的研究表明, 重离子之间的深部非弹反应能够布居较丰中子核的转晕激发态<sup>[7,8]</sup>, 为研究丰中子稳定同位素, 如  $^{142}\text{Ce}$  这样的核, 提供了一种有效方法. 为了研究  $Z \approx 58$ ,  $N \approx 82$  区核的中高自旋激发态, 我们利

2001-11-06 收稿

\* 国家自然科学基金(19705011), 国家重点基础研究发展规划(G2000077400)和中国科学院九五重大项目(KJ95T-03)资助

用 $^{82}\text{Se}$ 重离子束和 $^{139}\text{La}$ 之间的深部非弹反应进行了在束 $\gamma$ 谱学测量. 本文报道关于 $^{142}\text{Ce}$ 转晕激发态的研究结果.

## 2 实验和数据分析

实验是在日本原子力研究所(东海)加速器上进行的. $^{82}\text{Se}$ 束流由JAERI 20 MV 串列加速器和直线超导加速器提供(级联加速).束流能量为420MeV,超过 $^{139}\text{La} + ^{82}\text{Se}$ 系统的库仑位垒约90MeV.天然镧靶( $^{139}\text{La}$ 的丰度为99.9%)的厚度约100mg/cm<sup>2</sup>,能阻止所有产物和束流.由12台带BGO反康罩的高纯锗(HPGe)谱仪组成的GEMINI阵列<sup>[9]</sup>用来探测类靶余核、类弹余核发射的 $\gamma$ 射线.这些探测器的相对效率为40%—70%.按位置分为3组,每组4个,置于和束流成 $\pm 32^\circ$ ,  $\pm 58^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ 的方向.在实验之前、之后用 $^{133}\text{Ba}$ 和 $^{152}\text{Eu}$ 标准 $\gamma$ 源对探测器进行了能量和效率刻度.

实验中记录了约 $350 \times 10^6$ 个 $\gamma$ - $\gamma$ 符合事件.将所有事件反演得到总的 $\gamma$ - $\gamma$ 符合矩阵.通过分析该矩阵的开门谱,提取 $\gamma$ 射线间的符合关系及相对强度.在深部非弹的两体反应中,类靶余核与类弹余核同时产生,因此 $\gamma$ 射线除与来自同一核的 $\gamma$ 射线符合,还可能与来自伴随产物的 $\gamma$ 射线发生交叉符合,虽然这种符合的强度较弱.伴随产物可对应于蒸发零个、一个、两个或更多中子.为了对新 $\gamma$ 射线进行核素指定,需要仔细分析符合、交叉符合关系和符合强度模式<sup>[7,8]</sup>.为了提取 $\gamma$ 射线的多极性,对 $\gamma$ 射线进行了角分布<sup>[7]</sup>和方向关联分析.具体做法是,事件中若有 $\pm 32^\circ$ ( $\pm 90^\circ$ )探测器点火,将 $\pm 32^\circ$ ( $\pm 90^\circ$ )数据放在矩阵的一个轴上,将其他所有数据放在另外一个轴上,这样反演得到 $\pm 32^\circ$ ( $\pm 90^\circ$ ),对其他所有数据的符合矩阵.这两个矩阵分别经 $\pm 32^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ 探测器效率修正后,在其他所有数据的轴上开门,得到 $\gamma$ 射线在符合方式下的各向异性,即角分布.另外,也可以用 $\pm 32^\circ$ 探测器对 $\pm 90^\circ$ 探测器反演得到一个DCO(Directioanl Correlations of  $\gamma$  rays emitted from Oriented excited states)<sup>[10]</sup>矩阵,提取 $\gamma$ 射线的DCO因子.这两种方法已由对融合蒸发产物的瞬发 $\gamma$ 射线的分析证明是可靠的.在本实验中,靶子表面的少量 $^{16}\text{O}$ 与 $^{82}\text{Se}$ 发生融合蒸发反应,所发射的偶极 $\gamma$ 跃迁的各向异性因子 $W(30^\circ)/W(90^\circ)$ 和DCO因子分别约为0.8和0.6,而四极 $\gamma$ 跃迁的分别约为1.6和1.0.

## 3 实验结果

在此之前,利用 $\beta^+$ 衰变、(t,p)反应、库仑激发、中子非弹散射和电子非弹散射对 $^{142}\text{Ce}$ 激发态进行了研究<sup>[11]</sup>.观测到的最高转晕激发态是1743keV  $6^+$ .在本实验中,退激已知转晕态( $2^+$ ,  $4^+$ ,  $6^+$ )的524→578→641keV级联 $\gamma$ 跃迁被观测到.3条新的跃迁882,370和839keV与它们具有清晰的符合关系,并与 $^{142}\text{Ce}$ 的伴随产物As同位素( $^{79,77}\text{As}$ )的低位跃迁有较弱的符合,因此被指定给 $^{142}\text{Ce}$ .通过分析这3条新跃迁与524,578,641keV的符合强度,确定它们应在1743keV  $6^+$ 态之上.这3条新跃迁也相互符合(524,839keV跃迁的开门谱见图1).根据它们的相对强度,确定它们自下而上的顺序为882,370和839keV,从而建立了2625,2995,3834keV 3个能级.在表1中列出了所观测到的 $\gamma$ 跃迁的性质. $\gamma$ 射线的

相对强度是从 641keV 的开门谱中提取的,而 641keV 的强度是从 As 同位素的低位  $\gamma$  跃迁开门谱中提取的.

表 1 <sup>142</sup>Ce 中  $\gamma$  跃迁能量、相对强度、各向异性因子和 DCO 因子

$E_\gamma/\text{keV}$	$I_\gamma^a$	$W(30)/W(90)$	DCO 因子
641.3	108(6)	1.16(8)	1.02(5)
578.0	100(5)	1.08(8)	1.03(6)
523.5	90(5)	1.18(9)	1.18(6)
881.9	50(3)	1.14(9)	1.25(9)
369.9	41(2)	0.83(7)	0.82(7)
839.3	30(2)	1.04(11)	1.00(9)
542 <sup>b</sup> (M1)		0.78(10)	0.66(9)
156 <sup>b</sup> (M1)		0.79(8)	0.60(11)
385 <sup>b</sup> (E2)		1.61(14)	0.95(6)
1498 <sup>b</sup> (E2)		1.52(14)	0.95(10)

a 相对强度提取方法见正文说明;b 来自熔合蒸发反应余核<sup>93</sup>Nb 的瞬发  $\gamma$  射线<sup>[12]</sup>.

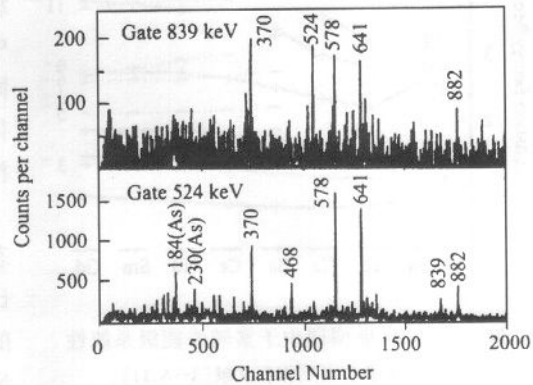


图 1 用<sup>142</sup>Ce 的 524,839keV 跃迁开门的符合谱

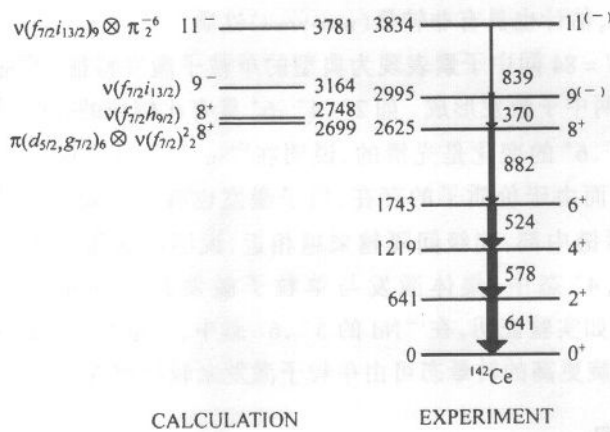


图 2 本实验建议的<sup>142</sup>Ce 能级纲图(右侧)和经验壳模型计算得到的 8<sup>+</sup>,9<sup>(-)</sup>,11<sup>(-)</sup> 能量和组态(左侧)

能级的自旋、宇称分别为 8<sup>+</sup>,9<sup>(-)</sup>,11<sup>(-)</sup>. 图 2 给出了<sup>142</sup>Ce 的新能级纲图. 可以看出,<sup>142</sup>Ce 的激发模式与较重同中子素(Nd—Gd)的相似.

## 讨论

### N = 84 同中子素的能级系统性

本工作之前,除<sup>142</sup>Ce 外,从<sup>134</sup>Sn 到<sup>148</sup>Gd 的 N = 84 同中子素的激发态中至少观测到了 8<sup>+</sup>. 利用本实验识别出的<sup>142</sup>Ce 新能级,研究该同中子素链能级变化的系统性是很有意义的. 这些核的正、负宇称转晕态激发能如图 3 所示. 在较轻的 Sn—Xe 同中子素中,只识别

与熔合蒸发反应相比,在深部非弹反应中,产物的自旋取向程度显著降低. 虽然如此,由实验中观测到的  $\gamma$  跃迁的各向异性和方向关联仍然足以提取多极性性质. 882,839keV 的各向异性和 DCO 因子与已知转晕 E2 跃迁的一致,说明它们也是 E2 跃迁(瞬发 M2 跃迁非常罕见). 370keV 的各向异性和 DCO 因子明显比 E2 跃迁的小,说明它是一条偶极( $\Delta I = 1$ )跃迁,根据后面关于 N = 84 同中子素能级系统性,将其尝试性地指定为 E1 跃迁. 这样,新建的 3 个转晕

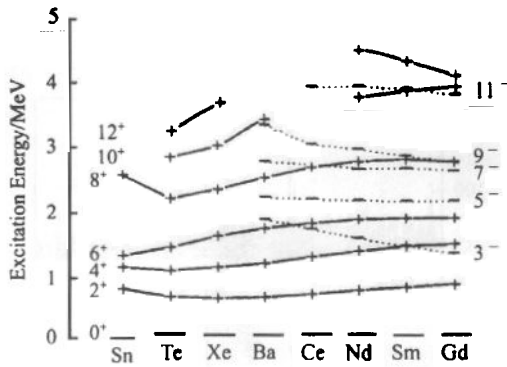


图 3  $N=84$  偶偶同中子素转晕能级系统性  
实验数据取自本工作和文献[3—6, 11].  
正宇称态由实线连接, 负宇称态由虚线连接.

用了前一能级, 它与整个同中子素链的  $5^-$  态系统性符合得很好. 后一能级就在  $6^+$  态的下方, 严重偏离系统性, 因此该能级的可靠性值得怀疑. 至今  $^{142}\text{Ce}$  的  $7^{(-)}$  仍是未知的. 系统性显示, 该态的激发能和  $8^+$  非常相近, 估计也具有非转晕 (non-yrast) 性质.

在双闭壳核  $^{132}\text{Sn}$  和  $^{146}\text{Gd}$  附近的  $N=84$  同中子素表现为典型的单粒子激发特征.  $^{134}\text{Sn}$  和  $^{148}\text{Gd}$  只有两个价中子, 低激发态由两中子激发形成. 如  $2^+$ ,  $4^+$ ,  $6^+$  具有比较纯的  $\nu(f_{7/2})^2$  组态. 图 3 中  $N=84$  同中子素  $2^+$ ,  $4^+$ ,  $6^+$  的变化是光滑的, 说明在  $^{134}\text{Sn}$  和  $^{148}\text{Gd}$  之间的同中子素中, 也有一定  $\nu(f_{7/2})^2$  成分. 然而由于价质子的存在, 质子激发也有一定贡献. 另外, 随着价核子数增加, 在该同中子素链中部, 能级间隔越来越相近, 说明已表现出集体性. 研究表明确如此, 特别是  $2^+$ ,  $4^+$  态中, 集体激发与单粒子激发共存并相互竞争<sup>[1-3]</sup>. 但随自旋增加, 集体性降低. 如实验证明, 在  $^{144}\text{Nd}$  的  $5^-$ ,  $6^+$  态中, 二准粒子 (2qp) 成分已占优<sup>[2, 13, 14]</sup>. 因此, 可以预期自旋更高的转晕态可由单粒子激发来较好解释.

#### 4.2 $^{142}\text{Ce}$ 新激发态的经验壳模型研究

如上所述, 预期  $^{142}\text{Ce}$  中新观察到的  $8^+$ ,  $9^{(-)}$ ,  $11^{(-)}$  态以单粒子激发为主. 为了了解它们的能级结构, 进行了经验壳模型计算<sup>[15]</sup>. 长期以来, 该方法被用来研究讨论双幻核附近多核子激发态. 具体做法是, 将某个核的多核子组态分解为核子数较少的组态的组合. 这些核子数较少的组态与相邻核的具体激发态相对应, 它们自动包含了粒子之间的相互作用、单粒子能量等实验信息.  $^{142}\text{Ce}$  位于双幻核  $^{132}\text{Sn}$  和  $^{146}\text{Gd}$  的中间, 原则上二者中的任意一个可选作参照核.  $^{146}\text{Gd}$  周围核的核谱学信息比较完整, 而  $^{132}\text{Sn}$  区域的激发态数据还很有有限, 因此, 这里以  $^{146}\text{Gd}$  为参照核.

$^{142}\text{Ce}$  在  $Z=50$  主壳外有 8 个质子, 它的  $8^+$  态能用来检验  $g_{7/2}$ ,  $d_{5/2}$  子壳的间隙大小, 即  $g_{7/2}$  子壳是否具有闭壳性质<sup>[3]</sup>. 对  $8^+$  态, 激发能较低的组态为  $\nu(f_{7/2} h_{9/2})$  或  $\pi(g_{7/2}^1 d_{5/2})_6 \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2$ . 前一组态与  $^{134}\text{Sn}$  和  $^{148}\text{Gd}$  中的  $8^+$  一样, 为纯两中子激发  $\nu(f_{7/2} h_{9/2})$ , 可这样分解:  $E^{142}\text{Ce}[8^+, \nu(f_{7/2} h_{9/2})] = S + E^{141}\text{Ce}(9/2^-, \nu h_{9/2}) + E^{148}\text{Gd}(8^+, \nu f_{7/2} h_{9/2}) -$

出了正宇称态; 在较重的 Ba—Gd 同中子素中还观测到了由  $3^{(-)}$ ,  $5^{(-)}$ ,  $7^{(-)}$ ,  $9^{(-)}$ ,  $11^{(-)}$  组成的负宇称能级序列. 我们看到, 在  $^{142}\text{Ce}$  中新观察到的  $8^+$ ,  $9^{(-)}$ ,  $11^{(-)}$  能级与  $N=84$  同中子素的相应能级系统性变化趋势吻合得非常好, 有力地支持了前面自旋宇称的指定.

在本实验中,  $^{142}\text{Ce}$  原先已知的  $3^-$ ,  $5^-$  态未被观察到, 可能是由于它们的激发能比  $4^+$ ,  $6^+$  高的原因.  $^{142}\text{Ce}$  有两个能量较低的反应中都观测到了; 另一个是 1742keV, 仅在电子非弹散射中<sup>[11]</sup> 被指定. 在图 3 中采

$$E^{147}\text{Gd}(9/2^-, \nu h_{9/2}) = 2748(\text{keV}), \quad (1)$$

其中  $S$  称为能量窗(mass window):

$$S = M(^{146}\text{Gd}) + M(^{148}\text{Gd}) + 2M(^{141}\text{Ce}) - M(^{140}\text{Ce}) - \\ M(^{142}\text{Ce}) - 2M(^{147}\text{Gd}) = 97(\text{keV}), \quad (2)$$

式中核的质量取自文献[16]. 组态  $\pi(g_{7/2}^{-1} d_{5/2})_6 \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2$  涉及到中子激发和质子激发的耦合, 分解如下:

$$E^{142}\text{Ce}[8^+, \pi(g_{7/2}^{-1} d_{5/2})_6 \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2] = \\ S' + E^{140}\text{Ce}(6^+, \pi(g_{7/2}^{-1} d_{5/2})_6) + E^{143}\text{Pr}(9/2^+, \pi d_{5/2} \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2) + E^{147}\text{Eu}(11/2^+, \pi g_{7/2}^{-1} \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2) - \\ E^{148}\text{Gd}[2^+, \nu(f_{7/2}^2)_2] - E^{141}\text{Pr}(5/2^+, \pi d_{5/2}) - E^{145}\text{Eu}(7/2^+, \pi g_{7/2}^{-1}) = 2699(\text{keV}), \quad (3)$$

$$S' = M(^{146}\text{Gd}) + M(^{147}\text{Eu}) + M(^{143}\text{Pr}) + M(^{140}\text{Ce}) - M(^{148}\text{Gd}) - \\ M(^{145}\text{Eu}) - M(^{141}\text{Pr}) - M(^{142}\text{Ce}) = 32(\text{keV}). \quad (4)$$

实验上  $^{143}\text{Pr}$  的  $\pi d_{5/2} \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2 9/2^+$  还是未知的. 根据在相邻奇  $A$  核(如  $^{145}\text{Pm}$ )中观察到的能级弱耦合特征<sup>[17]</sup>, 估计得到  $^{143}\text{Pr}$  的  $9/2^+$  约 640keV, 用于上面的计算. 可以看出, 这两个组态的计算值都能较好地重现  $8^+$  态的实验值,  $^{142}\text{Ce}$   $8^+$  可能主要是它们的混合. 特别是后者涉及  $g_{7/2}$  子壳激发的组态与实验符合得更好, 说明在  $^{142}\text{Ce}$  中  $g_{7/2}$  子闭壳并不重要.

在靠近  $^{146}\text{Gd}$  的  $N = 84$  偶质量同中子素中,  $9^-$  转晕态由一个中子从  $f_{7/2}$  轨道激发到  $i_{13/2}$  轨道形成. 我们也计算了  $^{142}\text{Ce}$  中该组态的激发能,

$$E^{142}\text{Ce}[9^-, \nu(f_{7/2} i_{13/2})] = S + E^{141}\text{Ce}(13/2^+, \nu i_{13/2}) + E^{144}\text{Gd}(9^-, \nu(f_{7/2} i_{13/2})) - \\ E^{147}\text{Gd}(13/2^-, \nu i_{13/2}) = 3164(\text{keV}). \quad (5)$$

类似地, 对  $11^-$  几种可能组态进行了估计, 得到的  $\nu(f_{7/2} i_{13/2})_9 \otimes (\pi^{-6})_2$  激发能是 3781keV, 两中子组态  $\nu(h_{9/2} i_{13/2})$  是 4128keV,  $\pi(g_{7/2}^{-1} h_{11/2})_9 \otimes \nu(f_{7/2}^2)_2$  是 4352keV. 其中第一个组态与实验值符合最好(相差约 50keV), 因此,  $\nu(f_{7/2} i_{13/2})_9 \otimes (\pi^{-6})_2$  是  $^{142}\text{Ce}$  的  $11^-$  转晕态的最佳候选组态. 在  $^{144}\text{Nd}$  中, 相同组态也指定给了能量最低的  $11^-$ .

以上对  $^{142}\text{Ce}$  的  $8^+$ ,  $9^{(-)}$ ,  $11^{(-)}$  态的计算结果也列在图 2 中(右侧). 总的来说, 计算与实验符合得相当不错, 最大相差不到 170keV.  $^{142}\text{Ce}$  相对于  $^{134}\text{Sn}$  和  $^{148}\text{Gd}$  分别有 10 个和 8 个价核子, 预期存在较显著的集体性. 但上面的计算表明, 在  $^{142}\text{Ce}$  的中高自旋激发态中, 仍以单粒子激发为主.

## 5 小结

在利用  $^{82}\text{Se}$  和  $^{139}\text{La}$  之间的深部非弹反应研究  $Z \approx 58, N \approx 82$  区的中高自旋激发态的实验中, 观测到了  $^{142}\text{Ce}$  的 3 条级联  $\gamma$  跃迁, 通过对  $\gamma$  射线强度、各向异性分析建立了  $8^+$ ,  $9^{(-)}$ ,  $11^{(-)}$  3 个转晕能级. 它们的激发能非常好地符合  $N = 84$  偶偶核的系统性. 利用经验壳模型计算较好地重现了这 3 个能级的激发能, 并讨论了它们的组态结构, 表明在  $^{142}\text{Ce}$  的中高自旋激发态中, 仍以单粒子激发为主.

## 参考文献 (References)

- 1 Copnell J et al. Phys. Rev., 1992, C46:1301
- 2 Holden J et al. Phys. Rev., 2001, C63:024315
- 3 Korgul A et al. Eur. Phys. Journal, 2000, A7:167
- 4 Urban W et al. Nucl. Phys., 1997, A613:107
- 5 Bargioni L et al. Phys. Rev., 1995, C51:R1057
- 6 Jewell J K et al. Phys. Rev., 1995, C52:1295
- 7 ZHANG C T et al. Nucl. Phys., 1998, A628:386
- 8 LIU Zhong et al. HEP & NP, 2001, 25:845 (in Chinese)  
(刘忠等. 高能物理与核物理, 2001, 25:845)
- 9 Furuno K et al. Nucl. Instr. and Meth., 1999, A421:211
- 10 Krane K S et al. Nucl. Data Tables, 1973, A11:351
- 11 Tuli J K. Nucl. Data Sheets, 2000, 89:671
- 12 Baglin C M. Nucl. Data Sheets, 1997, 80:1
- 13 Robinson S J et al. Phys. Rev., 2000, C62:044306
- 14 Cottle P D et al. Phys. Rev., 1989, C40:2028
- 15 Blomqvist J et al. Z. Phys., 1983, A312:27
- 16 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, A595:409
- 17 Glamacher T et al. Phys. Rev., 1992, C45:1619

### Observation and Empirical Shell-Model Study of New Yrast Excited States in the Nucleus $^{142}\text{Ce}$ \*

LIU Zhong ZHANG Yu-Hu GUO Ying-Xiang ZHOU Xiao-Hong  
LEI Xiang-Guo LIU Min-Liang LUO Wan-Ju HE Jian-Jun  
ZHENG Yong PAN Qiang-Yan GAN Zai-Guo LUO Yi-Xiao  
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

T. Hayakawa M. Oshima Y. Toh T. Shizima Y. Hatsukawa A. Osa T. Ishii  
(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

M. Sugawara

(Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan)

**Abstract** Excited states of  $^{142}\text{Ce}$ , populated in deep inelastic reactions of  $^{82}\text{Se}$  projectiles bombarding  $^{139}\text{La}$  target, have been studied to medium spins using in-beam gamma spectroscopy techniques. Three new levels have been identified at 2625, 2995 and 3834 keV, and assigned as  $8^+$ ,  $9^{(-)}$  and  $11^{(-)}$ , respectively, based on the analysis of the properties of gamma transitions. These new yrast states follow well the level systematics of  $N = 84$  isotones. Their structures have been discussed with the help of empirical shell-model calculations.

**Key words** deep inelastic reaction, yrast excited state, empirical shell model

Received 6 November 2001

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19705011), Major State Basic Research Development Program (G200077400) and Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)