

^{141}Nd 激发态的在束 γ 谱学研究*

柳敏良 张玉虎 刘忠 周小红 郭应祥
雷相国 何建军 郑勇 罗万居

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

竺礼华 温书贤

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 通过 $^{130}\text{Te}(^{16}\text{O}, 5n\gamma)^{141}\text{Nd}$ 反应布居了 ^{141}Nd 的高自旋态能级. 对反应产生的在束 γ 射线进行了 γ 射线单谱和 γ - γ 符合测量. 建立了激发能达7614.5keV的 ^{141}Nd 能级纲图, 新发现了12条 γ 射线和15个能级. 基于实验测量的 γ 跃迁各向异性, 建议了 ^{141}Nd 部分能级的自旋值. 用一个 $h_{11/2}$ 价中子空穴与 ^{142}Nd 核芯晕态的耦合可以定性地解释 ^{141}Nd 的能级结构.

关键词 高自旋态 γ - γ 符合测量 能级纲图 各向异性

1 引言

^{141}Nd 偏离双满闭壳 ^{146}Gd 核4个质子和一个中子, 是一个近球形的奇A核. 它的高自旋态应是价核子角动量顺排形成的, 其能谱呈现典型的单粒子激发特征. 在本工作之前, Ludziejewski 等人用 $(\alpha, xn\gamma)$ 反应研究了 $N = 81$ 的奇A核 ^{139}Ce , ^{141}Nd , ^{143}Sm 和 ^{145}Gd 的能级结构, 建立了这些核激发能达4.5MeV左右的能级纲图, 并用 $h_{11/2}$ 价中子空穴与相应核芯激发态的耦合计算, 讨论了这些奇A核的激发态能级结构^[1,2]. 本工作采用重离子引起的熔合蒸发反应 $^{130}\text{Te}(^{16}\text{O}, 5n)$ 布居了 ^{141}Nd 的高自旋态, 经过详细的数据处理和分析, 更新和扩展了 ^{141}Nd 的高自旋态能级纲图, 并对 ^{141}Nd 能级结构做了定性的讨论.

2 实验测量和结果

实验是在中国原子能科学研究院 HI-13 串行加速器上完成的. 用85MeV ^{16}O 束流轰击丰度为97%

的同位素 ^{130}Te 靶布居了 ^{141}Nd 的高自旋态. 靶子的厚度为2mg/cm², 并附有4mg/cm²的Au衬. 用9台带BGO反康抑制的高纯锗(HPGe)探测器进行了 γ - γ - t 符合测量, 这里 t 是参与符合的两个 γ 射线到达探测器的相对时间差, 符合时间窗为250ns. 为了从 γ - γ 符合数据中提取 γ 射线的方向角关联系数, 将9台探测器平均分为3组, 分别放置于与束流成35°, 45°和90°的方向上. 实验中共获取了 110×10^6 γ - γ 符合事件. 用 ^{60}Co , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 标准放射源进行了能量和效率刻度, 对 ^{60}Co 的1.33MeV γ 射线, 探测器的能量分辨在2.0—2.5keV之间. 在离线数据处理时, 对每个HPGe探测器做了能量增益归一, 建立了一个4096×4096对称化矩阵, 用于分析 γ - γ 符合关系. 基于与 ^{141}Nd 已知 γ 射线的符合关系, 指定了来源于 ^{141}Nd 的新 γ 射线. 为了得到 γ 跃迁多极性信息, 建立了两个4096×4096非对称化的ADO(γ -Ray Angular Distribution from Oriented States)矩阵: 位于35°和90°位置处探测器记录到的 γ 射线的能量值分别被放到了两个矩阵的 y 轴上, 与之符合的其他

2002-06-10 收稿

* 国家杰出青年科学基金(10025525), 国家自然科学基金(19705011, 1000512, 10075062), 中国科学院百人计划和国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077400)资助

γ 射线能量值(不论被哪个角度的探测器所记录)都被放到了相应的矩阵的 x 轴上. 分别在两个矩阵 x 轴拉门后(与 DCO 方法不同, ADO 方法中不用区分拉门 γ 射线的多极性), 给出某一 γ 射线在 35° 和 90° 的强度比(ADO 系数). 比较已知极性和未知极性 γ

射线的 ADO 系数, 获得新观测到的 γ 跃迁多极性, 从而建议了相关能级的自旋值. 表 1 给出了本实验测量到的¹⁴¹Nd γ 射线的能量、相对强度、ADO 系数以及我们建议的 γ 跃迁多极性、能级位置和自旋. 从表中可以看出四极跃迁 γ 射线的 ADO 系数大约

表 1 本实验测量到的¹⁴¹Nd 的 γ 射线的能量、相对强度、ADO 系数以及我们建议的 γ 跃迁多极性、能级位置和自旋

E_γ^a /keV	I^b	ADO 系数	角分布 系数 $A_2^{c,d}$	多极性 ^{d)}	E_i^e /keV	$J_i^e \rightarrow J_f^e$
64.5			-0.11	(M1 + E2)	(2953.7)	(19/2 ⁻) \rightarrow (17/2 ⁻)
81.2	3.7				2889.2	(17/2 ⁻) \rightarrow (13/2)
115.8	5.1	1.06(18)		(M1 + E2)	4561.8	(25/2 ⁺ , 27/2 ⁺) \rightarrow (25/2 ⁺ , 27/2 ⁺) ^{f)}
131.6	20.7	0.92(11)		(M1 + E2)	3085.3	(21/2 ⁻) \rightarrow (19/2 ⁻)
143.3	22.7	0.76(10)		(M1 + F2)	5861.5	(29/2) \rightarrow (27/2) 或(31/2) \rightarrow (29/2)
153.2	17.6	0.73(11)	-0.3	(M1 + E2)	3238.5	(23/2 ⁻) \rightarrow (21/2 ⁻)
169.8	13.6	0.64(14)		(M1 + E2)	6031.3	(31/2) \rightarrow (29/2) 或(33/2) \rightarrow (31/2)
188.9	4.3				7176.1	
249.1	58.7	0.89(7)	-0.11	(M1 + F2)	4561.8	(25/2 ⁺) \rightarrow (23/2 ⁺) 或(27/2 ⁺) \rightarrow (25/2 ⁺)
336.9	27.6	0.79(13)	-0.14	(E1)	4445.7	(25/2 ⁺) \rightarrow (25/2 ⁻) 或(27/2 ⁺) \rightarrow (25/2 ⁻)
346.9	20.7				6378.2	
348.9	80.8	0.73(9)	-0.3	(M1 + E2)	2889.2	(17/2 ⁻) \rightarrow (15/2 ⁻)
408	7.2				6065.5	
438.4	7.4				7614.5	
488	15.2	0.80(12)	-0.07	(M1 + E2)	2540.3	(15/2 ⁻) \rightarrow (13/2 ⁻)
457.8	5.7				6836.0	
595.7	12.9	0.93(19)		(F2)	2808.3	(13/2) \rightarrow (9/2)
780.7	17.5	0.75(14)	-0.49	(M1 + F2)	2832.2	(15/2) \rightarrow (13/2 ⁻)
837.3	19.8	1.34(35)	0.33	(E2)	2889.2	(17/2 ⁻) \rightarrow (13/2 ⁻)
869.5	21.3	1.06(11)		(M1 + E2)	4108.8	(25/2 ⁻) \rightarrow (23/2 ⁻)
1024.2	23.2	1.23(16)	0.25	(F2)	4108.8	(25/2 ⁻) \rightarrow (19/2 ⁻)
1125.7	8				6987.2	
1144.8	4.4				7176.1	
1156.4	65.7	0.81(8)		(M1 + F2)	5718.2	(27/2) \rightarrow (25/2 ⁺) 或(29/2) \rightarrow (27/2 ⁺)
1211.8	9.6				5657.5	
1294.8	57	0.59(9)	-0.71	(M1 + E2)	2052.1	(13/2 ⁻) \rightarrow 11/2 ⁻
1359.3	77.9	1.12(7)			4313.0	(25/2 ⁻) \rightarrow (19/2 ⁻) 或(27/2 ⁺) \rightarrow (19/2 ⁻)
1455.3	12.5		-0.3	(M1 + F2)	2212.6	(9/2) \rightarrow 11/2 ⁻
1783.1	100	1.21(5)	0.15	(E2)	2540.3	(15/2 ⁻) \rightarrow 11/2 ⁻

a) 能量不确定度为 0.2—0.8keV; b) 强度不确定度为 5%—30%; c) 取自于文献[1]中($\alpha, 5n$)反应, 正的 A_2 对应四极跃迁, 负的 A_2 对应偶极跃迁; d) 根据 ADO 系数、文献[1]所给的角度分布系数和能级结构建议了跃迁的电磁多极性, 具体讨论见后文; e) 能量不确定度为 0.2—0.8keV; f) 表示有 4 种可能的组合.

为 1.25, 偶极跃迁 γ 射线的 ADO 系数大约为 0.75.

基于 γ - γ 符合关系、 γ 射线的相对强度、强度平衡和交叉跃迁的信息, 图 1 给出了本工作建立的 ^{141}Nd 的能级纲图. 因为探测器对低能 γ 射线的探测效率较低以及实验中只探测了 0—2MeV 的 γ 射线, 文献[1]给出的两条能量为 56.7 和 2074.0keV 的 γ 射线在本实验中没有观察到. 纲图中 56.7, 64.5 和 2074.0keV γ 射线的相对强度引用了文献[1]给出的结果.

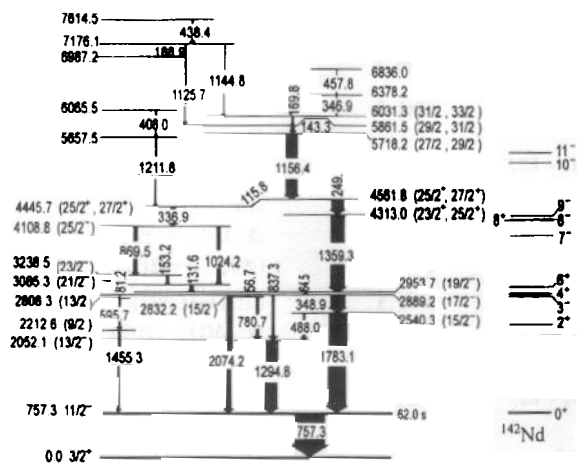


图 1 本工作建立的 ^{141}Nd 的能级纲图

激发能低于 4.5MeV 以下, 除了 7 个能级 (0.0, 757.3, 2212.6, 2540.3, 2832.2, 2889.2 和 2953.7keV) 与文献[1]给出的结果一致外, 本工作建立的能级纲图与以前的结果有较大的不同. 文献[1]给出的纲图中 1294.8keV γ 射线与 1359.3keV γ 射线没有符合关系. 图 2(a) 给出了用 1294.8keV γ 射线开窗的符合谱, 从中可以看出 1294.8keV γ 射线与 1359.3 和 348.9keV 的 γ 射线有很强的符合关系, 但与 1783.1keV γ 射线不符合. 通过仔细分析符合关系和 γ 射线相对强度, 我们认为 1294.8keV γ 射线应当是激发能为 2052.1keV 的一条新能级的退激跃迁. 本实验还观察到从已知能级 (2540.3, 2832.2 和 2889.2 keV) 向这个新能级跃迁的 γ 射线 (γ 射线的能量为 488.0, 780.7, 837.3keV), 为这个新能级的存在提供了有力的实验证据. ADO 系数测量表明 1294.8keV γ 射线为偶极跃迁, 与文献[1]的结果一致, 因此建议 2052.1keV 能级的 J^π 值为 $(13/2^-)$.

另外, 文献[1]中 1024.2, 131.6 和 336.9keV γ 射线与 1359.3 和 1294.8keV γ 射线符合, 但作者没有给出实验证据. 我们的实验数据清楚地表明 115.8, 131.6, 153.2, 336.9, 869.5 和 1024.2keV γ 射线与能量为 1359.3 和 249.1keV 的 γ 射线没有符合

关系. 图 2(b) 给出了 336.9keV γ 射线的开窗谱, 可以看到 336.9keV 的 γ 射线与 1359.3 和 249.1keV 的 γ 射线没有符合关系 (在 336.9keV γ 射线的拉门谱中出现的是 248.6keV γ 射线而不是 249.1keV γ 射线). 根据这 5 条 γ 射线的相对强度、符合关系, 我们建立了激发能分别为 3085.3, 3238.5, 4108.8 和 4445.7keV 的能级. 需要特别指出, 文献[1]的作者认为 1359.3keV γ 射线直接跃迁到了 2889.2keV 能级, 我们认为这是不合理的. 与 1359.3, 249.1keV 平行的 γ 射线之间的符合关系和能量加关系强烈支持本工作把 1359.3keV γ 射线放在了如图 1 所示的位置. 根据实验测量的 ADO 系数, 建议能量为 3085.3, 3238.5, 4108.8, 4445.7, 4561.8 和 4313.1keV 能级的自旋和宇称分别为 $(21/2^-)$, $(23/2^-)$, $(25/2^-)$, $(25/2^+, 27/2^+)$, $(25/2^+, 27/2^+)$ 和 $(23/2^+, 25/2^+)$. 对上述能级宇称的指认我们将在下面的讨论中给以说明.

纲图中 4.5MeV 以上的能级完全是本工作新建立的. γ 射线在纲图中的相对位置由其相对强度和符合关系确定. 纲图中一条很强的能量为 1156.4 keV 的 γ 射线是文献[1]未曾报道的. 1156.4, 143.3 和 169.8keV γ 射线与能级纲图中大部分 γ 射线都有符合关系, 根据其相对强度和偶极特征, 我们建议了激发能和自旋分别为 5718.2 (27/2, 29/2), 5861.5 (29/2, 31/2) 和 6031.3 (31/2, 33/2) keV 的新能级. 另外, 169.8 和 1144.8keV γ 射线的能量之和等于 188.9 和 1125.7keV γ 射线的能量之和, 这支持我们新建立的 6987.2 和 7176.1keV 能级.

3 讨论

^{141}Nd 晕态能级结构可以简单地认为是由中子空穴与 ^{142}Nd 偶偶核芯的耦合而成^[3,4]. ^{141}Nd 的基态是一个 $d_{3/2}$ 中子空穴态. 寿命为 62.0s 的同质异能态由中子空穴处于 $h_{11/2}$ 的单粒子轨道形成^[1,5]. ^{141}Nd 中 62.0s 同质异能态以上的晕态应该是 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ^{142}Nd 核芯激发态耦合而构成的. 为了比较两个核的能级结构, 在图 1 的右边给出了 ^{142}Nd 的晕态能级^[3].

从图中可见, 13/2 和 15/2 两个晕态相对于 11/2⁻ 的激发能与 ^{142}Nd 的 2⁺ 态的激发能很相近, 这两个能级很可能是由 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ^{142}Nd 的 2⁺ 态的耦合构成的, 宇称为负. 在相邻的同中子素 ^{139}Ce

中也观察到由 $h_{11/2}$ 中子空穴与相应核芯 2^+ 态耦合构成的 $13/2(11/2)$ 和 $15/2$ 晕态, 它们的激发能、能级

间隔和退激模式与 ¹⁴¹Nd 中自旋为 $13/2$ 和 $15/2$ 的晕态非常类似^[1]. 文献[1]中理论计算的结果也支持

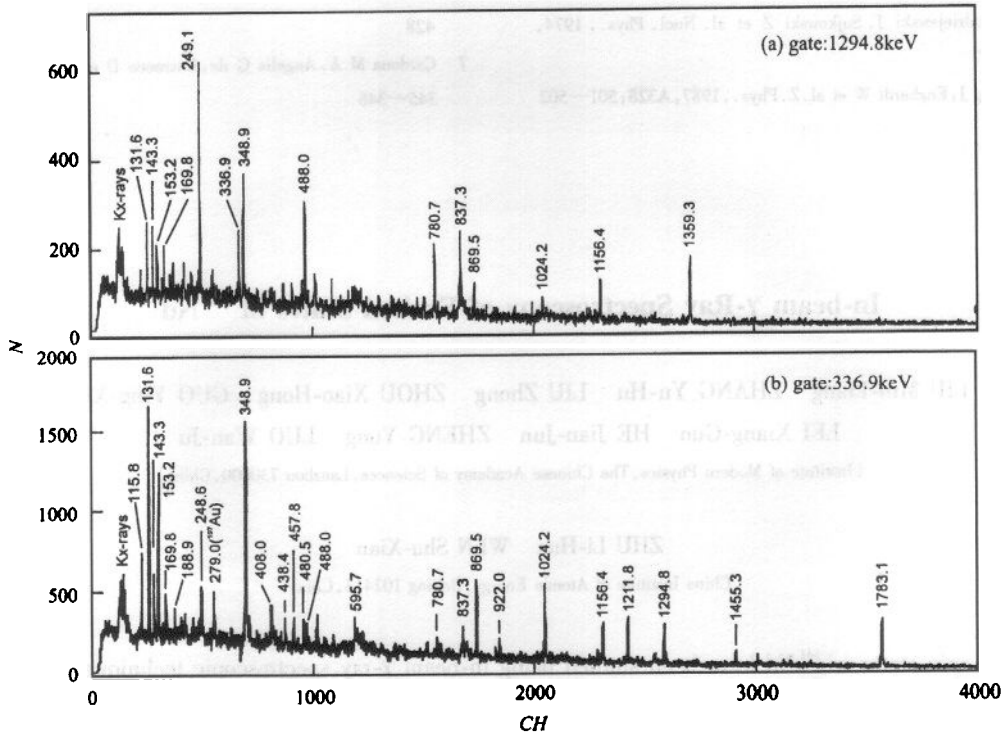


图 2 用 1294.8 和 336.9keV γ 射线开窗的符合谱

我们对上述两个能级组态的指定.

根据邻近奇 A 核 ¹⁴¹Sm, ¹⁴³Gd 和 ¹³⁹Ce 能级结构的系统性^[1,6,7] 和文献[1]理论计算的结果, 我们认为 2889.2 和 2953.7keV 的能级是由 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ¹⁴²Nd 的 4^+ 态耦合构成的, 宇称为负. 更高自旋的晕态应该涉及到 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ¹⁴²Nd 的 $6^+, 8^+, 7^-, 8^-, 9^-, 10^-$ 和 11^- 态的耦合^[3]. ¹⁴²Nd 的 7^- 和 8^- 态 (组态同为 $\pi g_{7/2}^8 d_{5/2} h_{11/2}$) 的激发能明显高于 6^+ 态的激发能^[1]. 所以, 4313.0 和 4561.8keV 的能级很可能是由 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ¹⁴²Nd 的 7^- 和 8^- 态耦合构成的, 宇称为正, 而 3085.3 和 3238.5keV 的能级很可能是由 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ¹⁴²Nd 的 6^+ 态耦合构成的, 宇称为负. 实际上, 4^+ 和 6^+ 组态的主要成份分别为 $\pi g_{7/2}^8 d_{5/2}^2$ 和 $\pi g_{7/2}^7 \otimes (d_{5/2}^3)_{5/2}$ ^[1]. 从 4313.0keV 能级向 2953.7keV 能级的跃迁主要涉及到单粒子轨道 $h_{11/2} \rightarrow d_{5/2}$ 的变化, 而从负宇称态向 2953.7keV 能级

的跃迁主要涉及到单粒子轨道 $d_{5/2} \rightarrow g_{7/2}$ 的变化. 4108.8keV 的能级很可能是由 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ¹⁴²Nd 的 8^+ 态的耦合构成的, 宇称为负, 它的退激发涉及到了核芯 $8^+ \rightarrow 6^+$ 的变化. 根据能级 4561.8keV 处的强度平衡、115.8keV γ 射线的内转换效应和 ADO 系数, 我们认为 115.8keV γ 射线应当是一个 M1/E2 混合跃迁, 因此建议 4445.7keV 能级的宇称为正.

从图 1 可见, 4.5MeV 以上的能级相对于 $11/2^-$ 能级的激发能与 ¹⁴²Nd 的 10^- 和 11^- 态的激发能很相近, 这些能级很可能是由 $h_{11/2}$ 中子空穴与 ¹⁴²Nd 的 10^- 和 11^- 态耦合构成的. 当然这些能级组态的具体指定还有待理论计算.

感谢北京串列加速器全体工作人员在实验中提供的方便和帮助.

参考文献 (References)

- 1 Ludziejewski J, Arnold H. *Z. Phys.*, 1977, **A281**: 287—308
- 2 Kownacki J, Ludziejewski J, Sujkowski Z et al. *Nucl. Phys.*, 1974, **A236**: 125—157
- 3 Prade H, Döring J, Enghardt W et al. *Z. Phys.*, 1987, **A328**: 501—502
- 4 Wirowski R, Yan J, Dewald A et al. *Z. Phys.*, 1988, **A329**: 509—510
- 5 Heyde K, Brussaard P J. *Z. Phys.*, 1973, **A259**: 15—36
- 6 Lach M, Kleinheinz P, Blomqvist J et al. *Z. Phys.*, 1992, **A345**: 427—428
- 7 Cardona M A, Angelis G de, Bazzacco D et al. *Z. Phys.*, 1991, **A340**: 345—346

In-beam γ -Ray Spectroscopy of Excited States in ^{141}Nd *

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

ZHU Li-Hua WEN Shu-Xian
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract High-spin states in ^{141}Nd have been studied using in-beam γ -ray spectroscopic techniques with the heavy-ion induced $^{130}\text{Te}(^{16}\text{O}, 5n\gamma)^{141}\text{Nd}$ reaction at 85 MeV beam energy. Nine anti-Compton HPGe detectors were employed for the measurements of γ -ray singles and γ - γ coincidences. The previously reported ^{141}Nd level scheme is significantly revised and extended up to much higher excitation energy. Spins for many excited states in ^{141}Nd are tentatively assigned according to the measured γ -ray anisotropies. The level structure of ^{141}Nd is interpreted by coupling a $h_{11/2}$ neutron-hole with the respective excited states in the ^{142}Nd core.

Key word high-spin state, γ - γ coincidence, level scheme, γ -ray anisotropism

Received 10 June 2002

* Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholar (10025525), NSFC (19705011, 1000512, 10075062), One Hundred Talents project of CAS and Major State Basic Research Development Program (TG2000077400)