

^{139}Ce 的多准粒子激发态*

滑伟^{1,2} 周小红^{1,1)} 张玉虎¹ 郭应祥¹ 雷相国¹ 谢成营^{1,2} 宋立涛^{1,2} 王华磊^{1,2}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 利用能量为 50MeV 的 ^{12}C 束流, 通过反应 $^{130}\text{Te}(^{12}\text{C}, 3n)$ 布居了 ^{139}Ce 的高自旋态. 基于标准在束核谱学实验测量结果, 扩展并更新了 ^{139}Ce 的能级纲图. ^{139}Ce 的能级结构具有球形原子核的典型特征, 其高自旋态由单粒子激发形成. 利用经验壳模型计算了 ^{139}Ce 的多准粒子激发态能量, 研究了其高自旋激发态的多准粒子特性.

关键词 高自旋态 能级纲图 多准粒子态

1 引言

奇 A 核 ^{139}Ce 的中子数为 81, 接近幻数. 测量球形核 ^{139}Ce 的激发能谱可以研究处于高角动量轨道的价核子与核芯激发态的耦合特性和多准粒子激发态的形成机制^[1-5]. 本工作之前, 有人利用 $^{138}\text{Ba}(\alpha, 3n\gamma)$ 反应建立了 ^{139}Ce 比较简单的能级纲图^[1, 2], 并指出其 $3/2^+$, $1/2^+$ 和 $11/2^-$ 低位能级分别为 $2d_{3/2}$, $3s_{1/2}$ 和 $1h_{11/2}$ 单中子空穴态. 其中, $11/2^-$ 态是长寿命同核异能态. ^{139}Ce 的自旋 $I > 11/2$ 的晕态能级是由价中子空穴与核实集体振动态和多准粒子激发态耦合形成的^[1, 2], 理论计算再现了 $23/2^-$, $21/2^-$, $19/2^-$, $15/2^-$ 和 $13/2^-$ 激发态的能量. 鉴于 α 粒子诱导的反应不能布居高自旋态, 本工作利用重离子熔合蒸发反应 $^{130}\text{Te}(^{12}\text{C}, 3n)$ 着重研究了 ^{139}Ce 的高自旋态. 我们将 ^{139}Ce 的能级纲图扩展到 5765keV, 并修正了原有纲图中的错误.

2 实验

利用能量为 50MeV 的 ^{12}C 束流轰击厚为 $1.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{130}Te 靶产生了 ^{139}Ce 的高自旋激发态. 靶后蒸有 $9\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的 ^{197}Au 衬, 用于阻止反应产物、消除多普勒展宽. 束流由中国原子能科学研究所的 HI-13 串列加速器提供. 用 14 套 BGO(AC)HPGe

探测器进行了 X- γ -t, γ - γ -t 符合测量 (t 表示符合窗, 为 200ns). 共获取了 7.0×10^7 个符合事件. 为了在实验中提取 γ 跃迁的多极性, 将探测器置于 3 个角度区域. 各个角度位置 (及相应的探测器数目) 为: 大角度 90° (4)、中间角度 55° 和 125° (2)、小角度 45° 和 135° (8). 各探测器对 ^{60}Co 标准源 1332.5keV 射线的能量分辨率在 2.0—2.7keV 之间. 实验前后分别利用 ^{152}Eu 和 ^{133}Ba 标准放射源对所有探测器进行了相对效率刻度. 在离线数据处理时, 对各探测器进行精确增益匹配后, 将符合数据反演成一个对称矩阵, 用于分析 γ 射线之间符合关系; 将位于 90° 和 45° (135°) 位置探测器获取的符合数据反演成 DCO 矩阵, 以提取 γ 跃迁多极性信息.

3 结果

根据与已知 γ 射线的符合关系^[1, 2], 指定了源于 ^{139}Ce 新的 γ 射线. 通过仔细分析 ^{139}Ce 的 γ 射线之间的符合关系, 建立了如图 1 所示的 ^{139}Ce 的能级纲图. 图 2 给出了典型的符合谱, 着重显示退激高自旋态 γ 跃迁之间的符合关系. 纲图中增加了 19 条新 γ 跃迁, 发现了位于 3182.7keV 能级以上的 10 个新能级. 能级自旋和宇称的指定主要依据 DCO 系数. 由于 2629.7keV 能级为同核异能态, 此能级以下的 γ 射线多极性信息

2006 - 06 - 01 收稿

* 国家自然科学基金(10475097, 10221003), 中国科学院百人计划项目和中国科学院基金资助

1) E-mail: zzh@impcas.ac.cn

取自文献[1]. 表 1 给出了实验观测到的 γ 射线的能量、相对强度、DCO系数、在能级纲图中的位置及相关能级的自旋值. 早期的研究工作指出^[1], 366.4keV 跃迁是纯的 M1 跃迁, 186.6keV 跃迁以 M1 成分为主. 表 1 给出的 DCO 系数主要是用 366.4 和 186.6keV γ 射线开门得到的. 因此, 纯的四极和偶极跃迁的 DCO 系数则介于这两组值之间.

本工作没有发现与 1605.6keV 跃迁平行的 333.2 和 1274.4keV 级联跃迁^[1], 取而代之的是能量为 295.8 和 1309.7keV 的两条射线. 我们未观测到位于 3182.7keV 能级之上的 296.5keV γ 射线^[1]. 由于存在较多的跨越跃迁, 利用符合关系和跃迁能量加和原则比较确定地建立了 ¹³⁹Ce 的高自旋纲图. 能量为 912.2 和 1057.6keV γ 射线的 DCO 系数约为 1.0, 它们应该是纯的偶极跃迁. 我们建议这两条 γ 射线退激的 4094.9 和 3873.9keV 能级的自旋值分别为 23/2 和 25/2. 由于存在较强的 1279.3keV 四极跃迁, 且该跃迁连接 4094.9 和 2816.3keV 能级 ($J^\pi=21/2^-$), 4094.9keV 能级的自旋宇称应该为 25/2⁻. 同理, 建议 4399.4keV 能级的自旋宇称为 27/2⁻. 基于相关跃迁的 DCO 系数, 我们指定了其他新能级的自旋值. 位于纲

图最顶端 γ 射线的强度太弱, 未能提取可靠的 DCO 系数, 从而未能指定这些高激发态的自旋值.

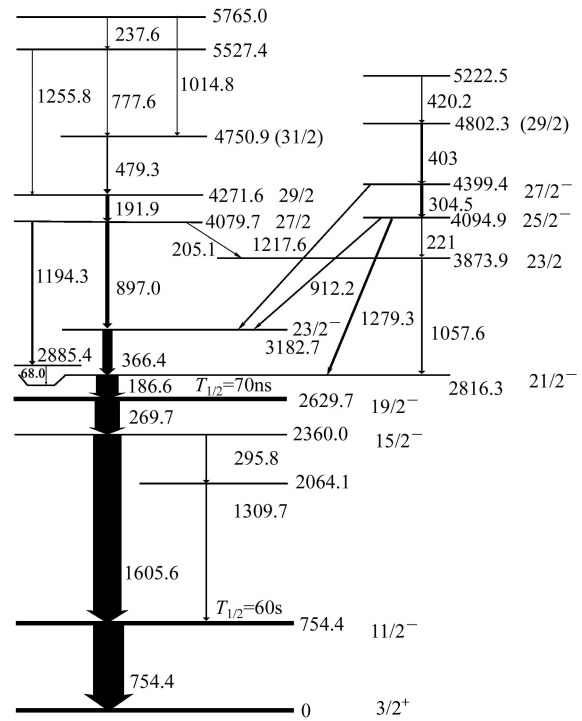


图 1 ¹³⁹Ce 的能级纲图

表 1 实验观测到的 ¹³⁹Ce 的 γ 射线的能量 (E_γ), 跃迁初末态的能量和自旋宇称 (E_i, J_i^π), (E_f, J_f^π), 相对强度 (I_γ) 和 DCO 系数 R_{DCO}

E_γ/keV	E_i/keV	E_f/keV	$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$	I_γ^*	R_{DCO}
186.6	2816.3	2629.7	$21/2^- \rightarrow 19/2^-$	169.0 ± 0.2	0.85 ± 0.02
191.9	4271.6	4079.7	$29/2 \rightarrow 27/2$	33.9 ± 0.3	0.87 ± 0.03
205.1	4079.7	3873.9			
221.0	4094.9	3873.9	$25/2^- \rightarrow 23/2$	8.1 ± 0.2	1.05 ± 0.04
237.6	5765.0	5527.4			
269.7	2629.7	2360.0	$19/2^- \rightarrow 15/2^-$		
295.8	2360.0	2064.1	$15/2^- \rightarrow$		
304.5	4399.4	4094.9	$27/2^- \rightarrow 25/2^-$	23.3 ± 0.2	0.91 ± 0.04
366.4	3182.7	2816.3	$23/2^- \rightarrow 21/2^-$	100 ± 0.4	1.03 ± 0.02
403.0	4802.3	4399.4	$(31/2) \rightarrow 27/2^-$	28.6 ± 0.3	1.11 ± 0.06
420.2	5222.5	4802.3			
479.3	4750.9	4271.6	$33/2 \rightarrow 29/2$	17.5 ± 0.2	1.17 ± 0.07
754.4	754.4	0.0	$11/2^- \rightarrow 3/2^+$		
777.6	5524.7	4750.9			
897.0	4079.7	3182.7	$27/2 \rightarrow 23/2^-$	42.8 ± 0.4	1.44 ± 0.04
912.2	4094.9	3182.7	$25/2^- \rightarrow 23/2^-$	13.9 ± 0.3	0.98 ± 0.06
1014.8	5765.0	4750.9			
1057.6	3873.9	2816.3	$23/2 \rightarrow 21/2^-$	21.6 ± 0.3	0.96 ± 0.06
1194.3	4079.7	2885.4			
1217.6	4399.4	3182.7	$27/2^- \rightarrow 23/2^-$	18.6 ± 0.3	1.33 ± 0.07
1255.8	5527.4	4271.6			
1279.3	4094.9	2816.3	$25/2^- \rightarrow 21/2^-$	27.5 ± 0.4	1.35 ± 0.06
1309.7	2064.1	754.4	$\rightarrow 11/2^-$		
1605.6	2360.0	754.4	$15/2^- \rightarrow 11/2^-$		

* γ 射线强度是以 366.4keV 的强度为 100 的相对值.

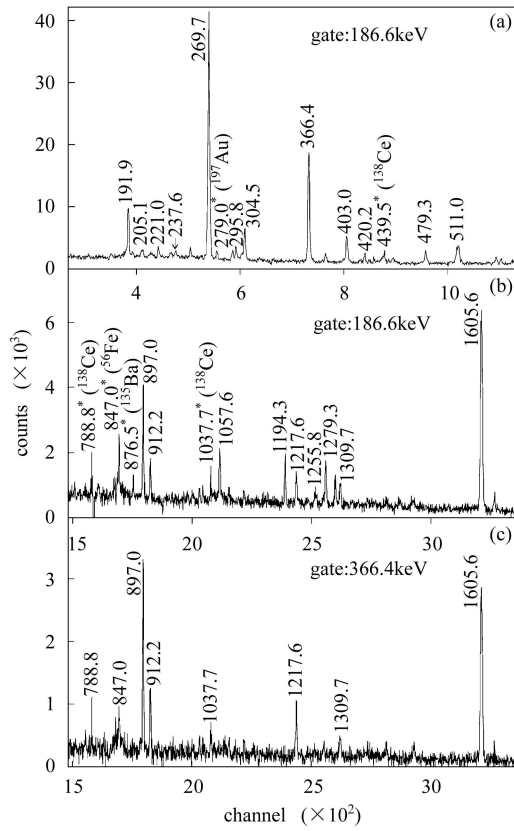


图2 186.6keV跃迁的符合谱

(a) 低能段; (b) 高能段; (c) 366.4keV跃迁的符合谱. 沾污线以实点标注.

4 讨论

本工作所建议的能级纲图中不规则的能级间隔清楚地说明了 ^{139}Ce 核的能谱具有典型的球形核特征, 其高自旋态是由价核子耦合 ^{140}Ce 核芯激发态形成的. $3/2^+$ 基态和 $11/2^-$ 同核异能态分别是 $2d_{3/2}$ 和 $1h_{11/2}$ 单中子空穴态^[1, 2]. 激发能为2360.0keV的 $15/2^-$ 态是由 $h_{11/2}$ 价中子空穴与核芯 ^{140}Ce 的 2^+ 振动态耦合形成的^[1]. 位于 $15/2$ 能级以上的激发态是多准粒子态. 由于 $h_{11/2}$ 轨道的高角动量特性, ^{139}Ce 的多准粒子近晕态应该是 $h_{11/2}$ 中子空穴与核芯 ^{140}Ce 的二准粒子和四准粒子激发态^[6, 7]耦合的结果. ^{140}Ce 高自旋的正宇称态是由质子拆对分布在 $1g_{7/2}$ 和 $2d_{5/2}$ 轨道形成的; 负宇称态是一个质子被激发到 $1h_{11/2}$ 轨道, 其他价质子占居 $1g_{7/2}$ 和 $2d_{5/2}$ 轨道形成的. 经验壳模型可利用邻近核中已知的一些简单组态的能量来计算一个复杂的多准粒子组态的能量. 为了研究 ^{139}Ce 高自旋态的多准粒子激发特性, 我们用经验壳模型计算了 $\pi d_{5/2}^2 \nu h_{11/2}^{-1}$, $\pi d_{5/2} g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$, $\pi g_{7/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1}$, $\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 和 $\pi d_{5/2} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 等组态高自旋分

态的激发能, 结果见表2.

表2 $h_{11/2}$ 中子空穴与核芯 ^{140}Ce 激发态耦合的计算结果

组态	J^π	$E_{\text{cal}}/\text{keV}$
$\pi d_{5/2}^2 \nu h_{11/2}^{-1}$	$19/2^-$	2592.9
$\pi d_{5/2} g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$	$19/2^-$	3021.9
$\pi d_{5/2} g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$	$21/2^-$	3104.7
$\pi d_{5/2} g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$	$23/2^-$	3192.7
$\pi g_{7/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1}$	$23/2^-$	3531.9
$\pi d_{5/2} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$	$25/2^+$	4208.7
$\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$	$25/2^+$	4564.2
$\pi d_{5/2} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$	$27/2^+$	4384.6
$\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$	$27/2^+$	4725.6
$\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$	$29/2^+$	4907.0

以全顺排($\pi d_{5/2}^2 \nu h_{11/2}^{-1}$) $19/2^-$ 态为例, 在经验壳模型理论框架下其激发能量为:

$$E_{\pi d_{5/2}^2 \nu h_{11/2}^{-1}, 19/2^-}^{139}\text{Ce} = E_{\pi d_{5/2}^2, 6^+}^{140}\text{Ce} + E_{\nu h_{11/2}^{-1}, 11/2^-}^{137}\text{Ba} + 2 \sum_{I=7,8} 9(2I+1)W^2 \left(\frac{5}{2} \frac{5}{2} \frac{19}{2} \frac{11}{2}; 4I^- \right) \times$$

$$\Delta E(^{142}\text{Pm}, \pi d_{5/2} \nu h_{11/2}^{-1}; I^-) + S = 2592.9 \text{keV},$$

式中 ΔE 之前的系数项是角动量重耦合系数的平方, 由查克累布施-郭尔丹系数表^[8]可求; S 代表质量项,

$$S = M(^{137}\text{Ba}) - M(^{138}\text{Ba}) - M(^{139}\text{Ce}) +$$

$$M(^{140}\text{Ce}) = -590 \text{keV}.$$

用相似的计算可求得其他组态的能量. 比较计算结果与实验测量, 可以认为 ^{139}Ce 的负宇称 $19/2^-$ 态的主要组态为 $\pi d_{5/2}^2 \nu h_{11/2}^{-1}$; $21/2^-$ 和 $23/2^-$ 激发态应该具有比较纯的 $\pi d_{5/2} g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$ 组态. 由于在 ^{139}Ce 中组态类型为 $\pi^2 \nu$ 的三准粒子态能够提供的最大自旋值为 $23/2$, 更高自旋值的负宇称态应该是五准粒子态. 壳模型计算指出^[6], ^{140}Ce 自旋值大于6的正宇称态是由8个价质子分布在 $d_{5/2}$ 和 $g_{7/2}$ 轨道上的四准粒子态. 这些高自旋正宇称态的主要组态成分为 $\pi d_{5/2}^2 g_{7/2}^6$, $\pi d_{5/2}^3 g_{7/2}^5$ 和 $\pi d_{5/2}^4 g_{7/2}^4$. 根据理论计算和实验提取的DCO系数可知, 4094.9和4399.4keV能级的自旋宇称很可能分别是 $25/2^-$ 和 $27/2^-$. 我们认为位于纲图右上部(见图1)的一系列能级可能是由一个 $h_{11/2}$ 价中子空穴与这些正宇称核芯激发态耦合形成的.

在 ^{140}Ce 中, 存在主要组态成分为 $\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2}$ 和 $\pi d_{5/2} h_{11/2}$ 的 7^- , 8^- 和 9^- 态^[6, 7]. 一个 $h_{11/2}$ 价中子空

穴与这些核芯激发态的耦合能够形成高自旋正宇称态. 由于在实验上不能确切地指定高自旋激发态的宇称, 我们不能明确识别具有 $\pi d_{5/2} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 和 $\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 组态的能级. 在激发能为 3.5 MeV 附近, ^{140}Ce 的正宇称和负宇称能级明显地分为两组. 考虑到 ^{139}Ce 和 ^{140}Ce 结构的相似性, 我们认为图 1 左上部的一些能级可能具有 $\pi d_{5/2} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 和

$\pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 组态.

5 结论

本工作利用熔合蒸发反应 $^{130}\text{Te}(^{12}\text{C}, 3n)$ 扩展了 ^{139}Ce 高自旋态能级纲图. 利用经验壳模型揭示了球形核 ^{139}Ce 高自旋态的多准粒子激发特性.

参考文献(References)

- 1 Ludziejewski J, Arnold H. Z. Phys., 1977, **A281**: 287
- 2 Chaumeaux A, Bruge G, Faraggi H. Nucl. Phys., 1971, **A164**: 176
- 3 LIU M L, ZHANG Y H, ZHOU X H et al. Science in China, 2003, **G46**: 330
- 4 ZHENG Y, ZHOU X H, ZHANG Y H et al. Science in China, 2004, **G47**: 561
- 5 Kownacki J, Ludziejewski J, Sujkowski Z et al. Nucl. Phys., 1974, **A236**: 125
- 6 Enghardt W, Käubler L, Prade H et al. Nucl. Phys., 1986, **A449**: 417
- 7 Baer H W, Reidy J J, Wiedenbeck M L. Nucl. Phys., 1966, **86**: 332
- 8 China Institute of Atomic Energy. Clebsch-Gordan efficient table. Beijing: Science Press, 1964. 3—64 (in Chinese)
(中国科学院原子能研究所. 克累布施-郭尔丹系数表. 北京: 科学出版社, 1964. 3—64)

Study of Multi-Quasiparticle Excited States in ^{139}Ce *

HUA Wei^{1,2} ZHOU Xiao-Hong^{1,1)} ZHANG Yu-Hu¹ GUO Ying-Xiang¹ LEI Xiang-Guo¹
XIE Cheng-Ying^{1,2} SONG Li-Tao^{1,2} WANG Hua-Lei^{1,2}

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract High-spin states in ^{139}Ce have been populated using the $^{130}\text{Te}(^{12}\text{C}, 3n)$ reaction at beam energy of 50 MeV. The level scheme of ^{139}Ce has been revised and extended greatly up to $E=5765.0\text{keV}$. The level structure of ^{139}Ce shows typical characteristics of spherical nucleus, and the high-spin states were formed by the excitations of valence nucleons. Energies of the yrast and near yrast high-spin states in ^{139}Ce have been calculated by the empirical shell model, and the multi-quasiparticle nature of high-spin excited states has been discussed.

Key words high spin state, level scheme, multi-quasiparticle state

Received 1 June 2006

* Supported by National Natural Sciences Foundation of China (10475097, 10221003), and 100 Talents Program of the Chinese Academy of Sciences and Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: zhx@impcas.ac.cn