

缺中子核素 ^{129}Ce 的 (EC/β^+) 衰变*

谢元祥 徐树威 李占奎 张天梅 马瑞昌 郭应祥
葛元秀 王春芳 邢建萍

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用 $102\text{MeV}^{16}\text{O}^{6+}$ 束轰击同位素靶 ^{117}Sn , 通过熔合蒸发 $4n$ 反应产生核素 ^{129}Ce . 由氦喷嘴快速带传输系统将反应产物送到低本底区. 通过化学分离来制备待测的 Ce 样品, 与此同时用 ^{16}O 束轰击 ^{117}Sn 的两种相邻的同位素靶 ^{118}Sn 和 ^{116}Sn , 并比较上述3种反应中的产物来进一步区分元素 Ce 的不同的同位素. 结果一种半衰期为4.1min的活性被鉴定为 ^{129}Ce . 基于 $\text{X}-\gamma-t$ 和 $\gamma-\gamma-t$ 符合测量, 建议了包括51条射线在内的 ^{129}Ce 的 (EC/β^+) 衰变纲图. 其中, ^{129}Ce 基态直接馈送到 ^{129}La 基态的份额 $(26 \pm 7)\%$ 是用观测到的 ^{129}La 衰变的278.6keV的 γ 射线的生长和衰变曲线估计出来的. 另外还给出了用 $\text{La}-\text{K}_\alpha\text{-X}$ 射线和68.2keV γ 射线开门的 γ 谱以及典型的衰变 γ 射线的时间谱.

关键词 (EC/β^+) 衰变 氦喷嘴快速带传输系统 化学提纯 衰变纲图

1 引言

实验和理论都表明, 质量数 $A \approx 130$ 缺中子稀土区的原子核具有适中的形变, 相对于三轴形变是软的. 大量的在束 γ 谱学实验集中研究了高自旋态的转动能级结构. ^{129}Ce 的子核 ^{129}La 就是被广泛研究的对象之一, 在它的能级图中, 除了看到正宇称的转动带之外, 还观察到了不少负宇称带的结构^[1]. 但用 ^{129}Ce 的 EC/β^+ 衰变来研究 ^{129}La 低位态却很少报道.

在较早的研究中已报道了 ^{129}Ce 的寿命是 $(3.5 \pm 0.5)\text{min}$ ^[2]. G. D. Alkhazov^[3]用实验方法确定了 ^{129}Ce 的 Q_{EC} 值为 $(5600 \pm 200)\text{keV}$. 早在1969年, K. F. Alexander等^[4]还首次报道过 ^{129}Ce 存在一个同质异能态, 它的寿命为0.56s, 自旋与宇称为 $11/2^-$, 这个同质异能态通过发射级联 γ 射线104.5keV(E3)和67.5keV(M1)退激到基态. ^{129}Ce 和 ^{129}La 基态的自旋和宇称分别被建议为 $5/2^+$ 和 $3/2^{+ [5,6]}$.

本实验的目的在于观测 ^{129}Ce 的 EC/β^+ 衰变来获得有关 ^{129}La 低位态的信息. 其结果

2000-02-24 收稿

* 国家自然科学基金(19975057)和中国科学院重大项目以及国家重点基础研究发展规划(G200077402)资助

的简单报道见文献[7]. 本文将详细介绍实验方法和一些中间实验数据, 以及最终 ^{129}Ce 的 EC/ β^+ 衰变纲图. 它仅涉及到了子核 ^{129}La 的一些正宇称低位态.

2 实验

实验是在中科院近代物理研究所 SFC 加速器上完成的. 由加速器引出的 $102\text{MeV}^{16}\text{O}^{6+}$ 束流, 穿过 $1.94\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的 Havar 窗进入到充氦(气体压力为 100kPa) 反应室, 轰击到 $1.8\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚自支撑的同位素 ^{117}Sn (富集度为 92.8%) 靶上. 靶子熔点低, 在其周围安装了水冷装置. 在氦气中的添加剂为 NaCl , 加热 NaCl 的炉温为 620°C . 反应产物从靶子中冲出来后经过慢化, 最后阻止在反应室中, 并被粘附在 NaCl 上, 形成大分子集团, 随着毛细管中的氦气运送到屏蔽好的低本底区, 并喷射到收集带上. 带传输系统是自动控制的, 可以周期性的传送反应产物到测量区. 预定收集时间和测量时间均为 10min . 在做单谱测量时, 当反应产物被送过来后, 立即将粘在带子上的放射性产物淋洗到一个装有 $\text{Ce}(\text{III})$, $\text{La}(\text{III})$, $\text{Cs}(\text{I})$, $\text{Ba}(\text{II})$ 载体和 12M HNO_3 的烧杯中. 用 BrO_3^- 将 Ce 氧化成 $\text{Ce}(\text{IV})$ 后, 转入到一个装有 $6\text{ml}, 0.75\text{M}$ 的 HDEHP-正乙烷的分液漏斗中, 振摇萃取后, $\text{Ce}(\text{IV})$ 从有机相被反萃到 $0.54\text{ml}, 9\text{M HCl}$ 中, 洗涤后, 样品被送到铅室中进行 γ -t 单谱测量. 上述典型的分离时间约 3min .

两台同轴型高纯锗 GMX 探测器用于 γ 测量, 一台 $\phi 32 \times 10$ 的平面型高纯锗 GLP 探测器用于 X 测量, 对于 122keV 的 γ 射线, X 探测器的能量分辨是 600eV . 对于上述的探测器, 在能量范围 $30-1500\text{keV}$, 时间曲线(TAC)的 $FWHM$ 约 20ns . 用微机系统获取 γ -t 单谱, MOLDAS1 系统获取 X- γ -t, γ - γ -t 等符合数据, 事件谱被记录在磁带上, 实验后进行离线分析.

3 实验结果和讨论

由于本实验前有关 ^{130}Ce , ^{129}Ce , ^{128}Ce 衰变纲图尚未建立, 从文献中仅已知 ^{130}Ce 的一条 γ 射线(130keV), 和 ^{129}Ce 的两条 γ 射线($69.8, 170.5\text{keV}$)^[6]. 为了鉴别这些核素, 用 X- γ 符合方法, 鉴别出元素 Ce 的产物. 利用 ^{16}O 束还轰击了其他二种 Sn 靶 (^{118}Sn 和 ^{116}Sn), 以代替做激发函数来区分元素 Ce 的不同的同位素.

在样品中, 所观测到的主要活性是 $^{129}\text{Ce}(3.5\text{min}) \rightarrow ^{129}\text{La}(11.6\text{min})$, 还有 ^{128}Ce (约 $4.0\text{min}) \rightarrow ^{128}\text{La}(4.6\text{min})$ 和 $^{130}\text{Ce}(22.9\text{min}) \rightarrow ^{130}\text{La}(8.7\text{min})$. 对这些活性首先做了 X- γ 符合测量. 图 1 给出了用 La-K_α -X 开门得到的 γ 射线谱, 属于 ^{129}Ce 的共有 50 条 γ 射线(其中 1015.1keV γ 射线未在图中标出), 均用数字标记了 γ 射线能量. 并用其他的符号标记了干扰核素的 γ 射线. 在数字上并标有符号的 γ 射线中属于既有 ^{129}Ce 的成分, 也有干扰核素的贡献. 从图中可以看出强的 γ 射线有 $68.2, 171.5, 180.2, 371.7\text{keV}$ 等. 在所测量的单谱中, 对 $68.2, 171.5, 371.7\text{keV}$ 的 γ 射线做时间曲线(图 2), 可得到 ^{129}Ce 衰变的半衰期, 其加权平均值为 $(4.1 \pm 0.1)\text{min}$. 与以前的结果 $(3.5 \pm 0.5)\text{min}$ 基本符合^[2]. 以这些强 γ 射线开门, 从 γ - γ 符合关系中得到与这些 γ 射线符合的强度较弱的 γ 射线, 再

用这些弱的 γ 射线开门,可进一步证实这些符合关系的存在. 图 3 给出了 68.2keV 开门的 γ 射线谱,其中 29 条 γ 射线与它有符合关系,特别是 X- γ 符合谱中的强 γ 射线与它均有符合关系. 由单谱测量得到了大多数 γ 射线的强度,而一些较弱的 γ 射线的强度是由 γ - γ 符合的数据得到的. ^{129}Ce EC/ β^+ 衰变的 γ 射线的能量和强度以及它们的符合关系列在表 1 中.

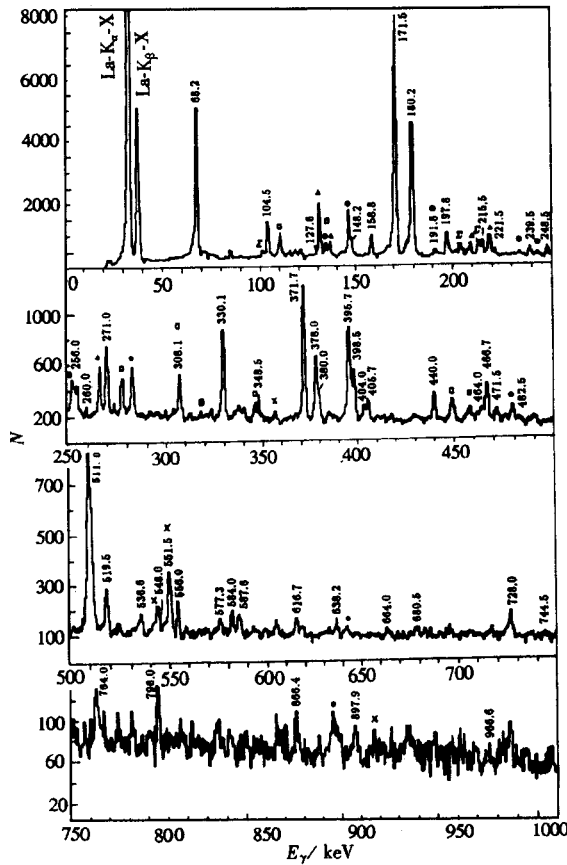


图 1 用 La- K_{α} -X 射线开窗所观测到的 γ 射线

^{129}Ce 的 γ 射线标记了能量 (keV), 其他 γ 射线属于 ^{128}Ce (●), ^{130}Ce (▲), ^{128}La (○), ^{129}La (□), ^{130}La (×) 的衰变或者为和峰 (Σ).

依据表 1, γ 射线的能量和强度以及它们的符合关系,某些时候用到能量和的关系,首次建立了 ^{129}Ce EC/ β^+ 的衰变纲图 (图 4).

^{129}Ce 的基态自旋宇称是 $5/2^+$, ^{129}La 的基态自旋宇称为 $3/2^+$, 因而 β 衰变可由 ^{129}Ce 基态直接馈送到 ^{129}La 基态. 我们用观测到的 ^{129}La 衰变的 278.6keV 的 γ 射线的生长和衰变曲线来估计这种直接馈送的份额^[8]. 具体的想法和做法如下:核反应停止后,在 10min 之内产生的 ^{129}Ba 的总数 N_t 应由两部分组成: (1) 核反应 $^{16}\text{O} + ^{117}\text{Sn}$ 直接产生的 ^{129}La 衰变成 ^{129}Ba 的数目 N_r ; (2) ^{129}Ce 衰变成 ^{129}La 而后衰变成的 ^{129}Ba 的数目 N_d , 即

$$N_t = N_r + N_d, \quad (1)$$

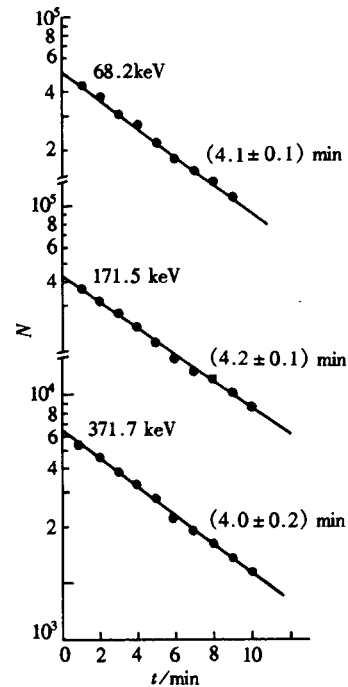


图 2 ^{129}Ce EC/ β^+ 衰变所发射的强 γ 射线的衰变曲线

表1 ¹²⁹Ce EC/ β^+ 衰变的 γ 射线的能量 E_γ ,相对强度 I_γ 以及它们的符合关系

E_γ/keV	I_γ	γ 射线符合关系(keV)	E_γ/keV	I_γ	γ 射线符合关系(keV)
68.2(2)	100*	104.5,148.2,158.8	348.5(3)	1.1 \pm 0.2	271.0
		171.5,180.2,191.8	371.7(2)	9.1 \pm 0.2	68.2,180.2
		197.8,215.5,308.1	378.0(2)	3.8 \pm 0.4	68.2
		330.1,371.7,378.0	380.0(2)	1.9 \pm 0.4	68.2,171.5
		380.0,395.7,404.0	395.7(2)	6.2 \pm 0.2	68.2
		405.7,466.7,519.5	398.5(2)	3.6 \pm 0.2	
		536.6,551.5,577.3	404.0(2)	0.8 \pm 0.1	68.2
		584.0,616.7,638.4	405.7(2)	1.0 \pm 0.1	68.2,171.5
		680.5,728.0,764.0	440.0(2)	4.4 \pm 0.1	
		866.6,897.9	464.0(2)	1.3 \pm 0.2	
104.5(2)		68.2	466.7(2)	4.3 \pm 0.2	68.2,171.5
127.6(3)	0.3 \pm 0.1	271.0	472.2(2)	1.0 \pm 0.1	
148.2(3)	1.3 \pm 0.1	68.2,256.0	482.5(2)	0.6 \pm 0.1	68.2,197.8
158.8(2)	2.2 \pm 0.1	68.2,171.5,221.5	519.5(2)	2.4 \pm 0.1	68.2
		239.5,308.1,536.6	536.6(3)	1.7 \pm 0.5	68.2,158.8,171.5
		616.7			330.1
171.5(2)	30.3 \pm 0.2	68.2,158.8,380.0	548.0(2)	0.3 \pm 0.1	180.2
		405.7,466.7,536.6	551.5(2)	3.2 \pm 0.6	68.2
		616.7	556.0(2)	2.0 \pm 0.1	
180.2(2)	13.9 \pm 0.2	68.2,191.8,197.8	577.3(2)	1.8 \pm 0.2	68.2
		215.5,371.7,548.0	584.0(2)	1.6 \pm 0.1	68.2,180.2
		584.0,680.5	587.6(2)	2.2 \pm 0.2	
191.8(3)	0.2 \pm 0.1	68.2,180.2	616.7(2)	1.3 \pm 0.3	68.2,158.8,171.5
197.8(2)	2.6 \pm 0.1	68.2,180.2,248.5			330.1
		260.0,482.5	638.4(2)	0.6 \pm 0.1	68.2
215.5(3)	1.5 \pm 0.4	68.2,180.2	664.0(3)	0.4 \pm 0.1	271.0
221.5(3)	0.2 \pm 0.1	158.8,330.1	680.5(3)	0.8 \pm 0.4	68.2,180.2
239.5(2)	2.1 \pm 0.1	158.8	728.0(2)	1.7 \pm 0.2	68.2
248.5(2)	2.5 \pm 0.1	191.8,197.8,215.5	744.5(2)	0.7 \pm 0.1	271.0
256.0(3)	1.3 \pm 0.2	148.2	764.0(2)	1.0 \pm 0.3	68.2
260.0(2)	0.3 \pm 0.1	68.2,197.8	796.0(2)	1.8 \pm 0.2	
271.0(2)	4.3 \pm 0.1	127.6,348.5,664.0	866.6(3)	0.4 \pm 0.2	68.2
		744.5	897.9(2)	0.9 \pm 0.2	68.2
308.1(3)	1.6 \pm 0.5	68.2,158.8,330.1	966.6(2)	0.9 \pm 0.1	
330.1(2)	4.3 \pm 0.2	68.2,221.5,308.1	1015.1(3)	0.2 \pm 0.1	
		536.6,616.7			

* 包括内转换电子的修正.

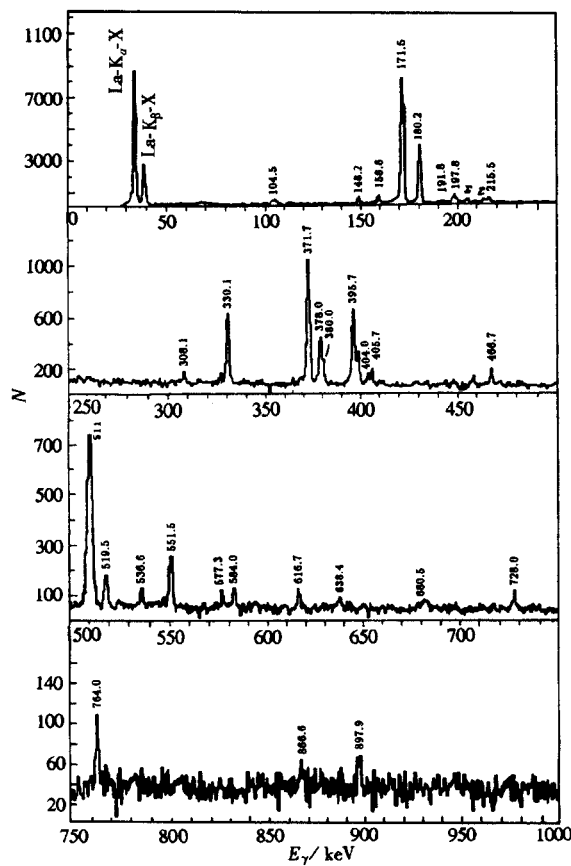


图 3 68.2keV 开门的 γ 射线谱

指定为 ^{129}Ce 的符合峰用 keV 标记,其他标记的 γ 射线属于和峰(Σ)。

曲线下的面积即为非反应产生的 ^{129}La 基态衰变到 ^{129}Ba 然后发射的 278.6keV γ 射线总计数。由于已知 278.6keV γ 射线的绝对强度是 0.247, 就可以换算出非反应产生的, 即衰变产生的 ^{129}La 基态衰变到 ^{129}Ba 总计数 N_d 。这样最终得到由 ^{129}Ce 基态直接衰变到 ^{129}La 基态的边馈的估计值: $1 - N_d(\text{间接})/N_d = (26 \pm 7)\%$ 。定出了此值之后, 就可以定出图 4 中其他各能级的 (EC/β^+) 衰变的边馈值。再利用 N. B. Gove 和 M. J. Martin^[9] 给出的表, 计算出了 $\log ft$ 值。这两项值已列在衰变纲图的右边。这里指出这两项值与文献[7]不同, 这是由于在该文中 68.2keV γ 射线的内转换修正被重复做了, 造成 68.2keV 跃迁的总强度增大, 引起边馈值和 $\log ft$ 值不正确。在衰变图上 172.7keV 能级被指定为 $11/2^-$ 同质异能态, 其寿命是 0.56s。由于仪器的分辨时间只有 20ns, 所以观察不到退激到此态的 γ 射线。图中仅以虚线表示。Leigh 等^[6] 建议 239.7keV 态的自旋和宇称是 $7/2^+$ 。另外, 包括 68.2, 248.4 和 446.3keV 的基态带的结构也看见了。He Y. 等^[1] 从在束 γ 谱学研究中, 首先观测到这个带, 并解释为建立在强耦合 $[422]3/2g_{7/2}$ 轨道上的单准质子带。

其中 N_d 又分为两部分: (1) ^{129}Ce 直接衰变到 ^{129}La 基态, 而后衰变成 ^{129}Ba , N_d (直接); (2) ^{129}Ce 衰变到 ^{129}La 的不同激发态, 然后发射 γ 射线 (一共 13 条) 退激到基态 (见图 4), 再衰变到 ^{129}Ba , N_d (间接) 即

$$N_d = N_d(\text{直接}) + N_d(\text{间接}), \quad (2)$$

我们测量了这 13 条 γ 射线的强度和它们在 10min 之内的时间谱。利用已知 ^{129}La 的半衰期 11.6min, 就得到了 10min 之内的 N_d (间接)。 ^{129}La 衰变到 ^{129}Ba 的最强的衰变 γ 射线是 278.6keV。在 10min 测量时间内, 将每一分钟得到的 278.6keV γ 射线的计数画成曲线并外推到零点。零点附近的贡献应完全来源于反应产生的 ^{129}La 。以此为起点按 ^{129}La 半衰期画衰变曲线。并把它们作为反应产生的 ^{129}La 对 278.6 γ 射线的贡献 (对应于 N_r), 从时间谱中扣除。这样就可以画出 ^{129}Ce 衰变到 ^{129}La 所得到的 278.6keV 时间谱, 看到了生长和衰变的现象。这条

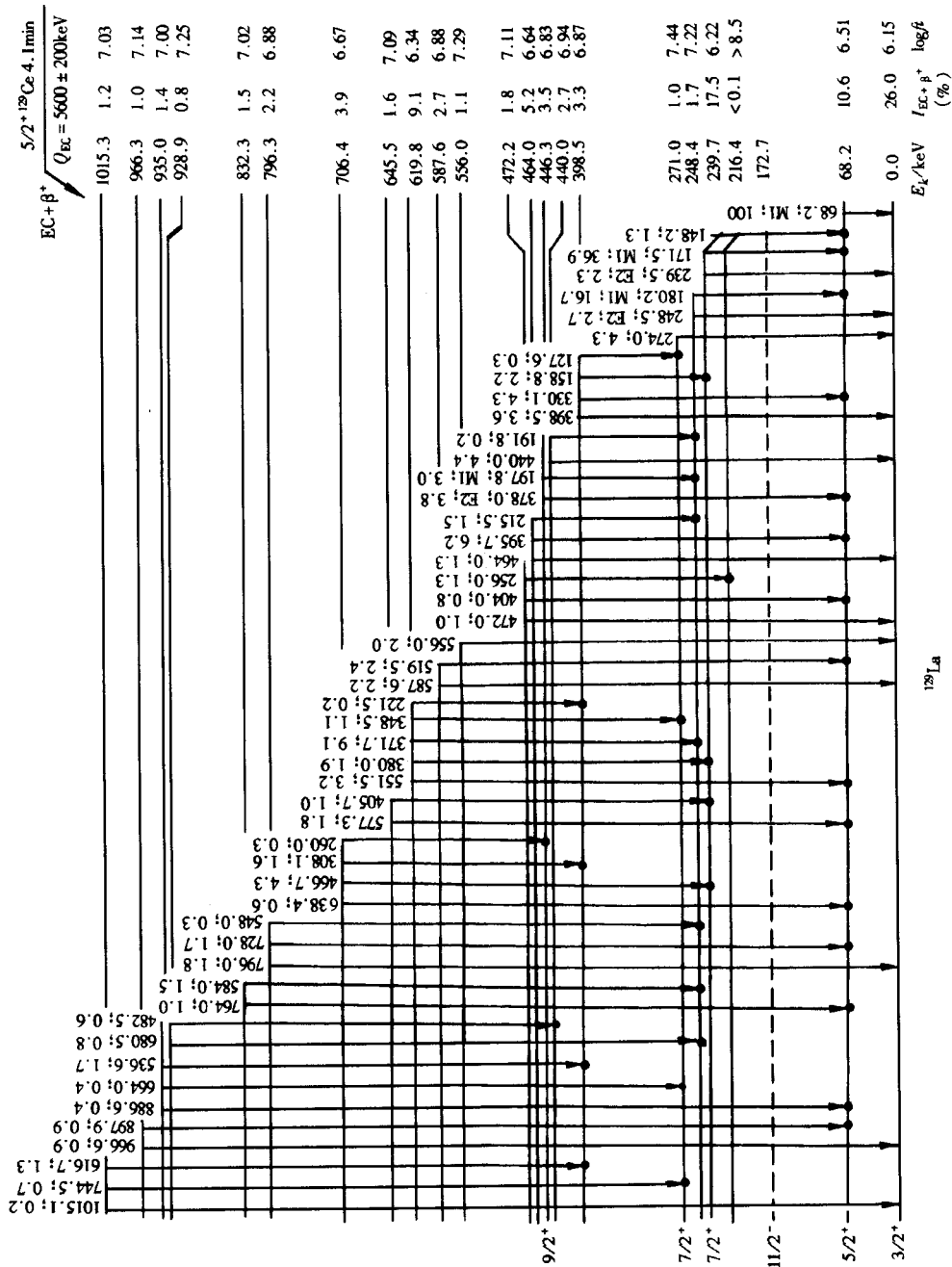


图 4 建议的 ^{129}Ce EC/β^+ 的衰变纲图

参考文献 (References)

- 1 HE Y, Godfrey M J, Jenkins I et al. *J. Phys.*, 1992, **G18**:99
- 2 Hashizume A, Tendow Y, Ohshima M. *Nucl. Data Sheets*, 1983, **39**:633
- 3 Alkhazov G D, Batist L H, Bykov A A et al. *Z. Phys.*, 1993, **A344**:425
- 4 Alexander K F, Neubert W, Rotter H et al. *Nucl. Phys.*, 1969, **A133**:77
- 5 Aryueinejad R, Love D J, Nelson A H et al. *J. Phys.*, 1984, **G10**:955
- 6 Leigh J R, Nakai K, Maier K H et al. *Nucl. Phys.*, 1973, **A213**:1
- 7 XIE Yuan-Xiang XU Shu-Wei, MA Rui-Chang et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1997, **14**:344
- 8 Brodeur P, Pathak B P, Mark S K et al. *Z. Phys.*, 1978, **A289**:289
- 9 Gove N B, Martin M J. *Nucl. Data Tables*, 1971, **10**:206

(EC + β^+) Decay of Neutron-Deficient Nuclide $^{129}\text{Ce}^*$

XIE Yuan-Xiang XU Shu-Wei LI Zhan-Kui ZHANG Tian-Mei MA Rui-Chang
GUO Ying-Xiang GE Yuan-Xiu WANG Chun-Fang XING Jian-Ping

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China*)

Abstract The nuclide ^{129}Ce was produced by a ($^{16}\text{O}, 4n$) reaction with an enriched ^{117}Sn target. With the aid of a helium-jet tape transport system, the reaction products were transported to a shielded location, where Ce samples were prepared after chemical separation. The neighboring isotopes of ^{117}Sn , ^{116}Sn and ^{118}Sn , were also bombarded with ^{16}O beam. Different isotopes of Ce were further separated by comparing the products in the above three reactions. An activity with a half-life of 4.1 min in the chemically purified cerium samples was identified as ^{129}Ce . Based on X- γ -t and γ - γ -t coincidence measurements, the EC/ β^+ decay scheme of ^{129}Ce , including 51 γ lines, was proposed. Using the observed growth-decay curve of an intense 278.6 keV γ line of ^{129}La decay, the β feeding branch from the ground state of ^{129}Ce directly to the ground state of ^{129}La was estimated to be $(26 \pm 7)\%$. In addition, the γ spectra gated by both La- K_{α} -X ray and intense 68.2 keV γ ray of ^{129}Ce decay as well as the time spectra of typical γ rays were also presented here.

Key words EC/ β^+ decay, He-jet tape transport system, chemical separation, decay scheme

Received 24 February 2000

* Supported by National Nature Science Foundation (19975057), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences and Major State Basic Research Development Program (G200077402)