

# 沿 $Z=0.743N+11.6$ 质子滴线分布 的稀土区新核素的合成与研究\*

李占奎 徐树威 谢元祥 马瑞昌

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘 要** 利用与延发质子符合的子核中已知的第一个  $2^+ \rightarrow 0^+$  (基态) 的  $\gamma$  跃迁来鉴别其  $\beta$  延发质子先驱核的方法已在实验中得到证实, 并在兰州重离子加速器 SFC 上用氦喷嘴快速带传输系统成功地合成与研究了沿  $Z=0.743N+11.6$  质子滴线分布的稀土区新  $\beta$  延发质子先驱核  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$ . 该鉴别方法在缺中子稀土区新核素合成中将具有很大的应用前景.

**关键词**  $p$ - $\gamma$  符合 氦喷嘴快速带传输系统  $\beta$  延发质子先驱核

**分类号** O571.3

## 1 引言

合成与研究极限状态下的原子核是当代原子核物理基础研究的前沿领域之一, 故而在新核素合成与研究这一重大课题中, 中质比 ( $N/Z$ ) 处于极端值, 即极丰中子或极丰质子的滴线区核素及其奇异衰变性质的研究尤为引人注目. 在缺中子稀土区, 原子核形状经历极复杂的变化, 在其质子滴线附近可观测到直接质子发射、重离子集团发射和  $\beta$  延发质子衰变等奇异衰变模式, 研究这些模式可得到丰富多样的核结构信息, 可研究形变对奇异衰变的影响这一新的物理机制. 经过国外核实验室近 30 年的努力, 这个区域的研究进展很快, 已发现了几十个具有奇异衰变性质的新核素, 其研究前锋直逼质子滴线. Beraud 等人<sup>[1]</sup>认为: 在研究缺中子稀土区时确定质子滴线位置是最有兴趣的, 并指出 Hofmann<sup>[2]</sup>预言的  $Z=0.743N+11.6$  公式可以用来推测这个区域中质子放射性的最丰中子的候选核. 目前在核素图上就此预言的质子滴线距离缺中子稀土区已知核素的边缘线平均来说, 仅相差两个质量数单位 (如图 1 所

示), 有望取得突破性的进展. 所以率先进入  $Z=0.743N+11.6$  质子滴线区, 就成为众多研究者所关注的问题, 并且进行了一些有益的尝试<sup>[1~4]</sup>.

## 2 鉴别方法的改进

由于滴线区核素半衰期很短, 生成截面非常小, 而其奇异衰变道分截面更小, 所以为了合成和鉴别某些未知核素, 并能研究它们的弱分支比的奇异衰变性质, 就需要一套高灵敏度的实验方法. 这对于实验物理学家来说, 无疑是一种挑战.

前人鉴别缺中子稀土区的  $\beta$  延发质子先驱核所采用的基本工具是在线同位素分离器 (ISOL). 经 ISOL 分离后, 在同一质量数链中核反应产生的先驱核往往多于一个, 来自不同先驱核的质子连续能谱彼此重叠, 要识别这些先驱核或测量某一先驱核的缓发质子能谱就需要作进一步的区分, 比如采用特征 X 射线和  $\beta$  缓发质子 ( $X$ - $p$ ) 符合等方法. 由于 ISOL 的分离效率低, 缺中子稀土区核素特征 X 射线的发射几率也低, 研究生成截面小的目标核就会碰到困难<sup>[4]</sup>. 看来寻求新的分

\* 1998 - 01 - 14 收稿, 1998 - 04 - 03 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金 (项目号 19475055) 和中国科学院八五重大项目子课题资助.

离鉴别手段是必要和有益的。

本小组采用一种别具特色的核素鉴别方法——“p- $\gamma$ ”符合方法，成功地合成了稀土区沿  $Z=0.743N+11.6$  质子滴线分布的新核素  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$  [6] (图 1 中以  $\star$  表示的核素)。一般来说，质子滴线区核(先驱核)有很大的  $\text{EC}/\beta^+$  衰变能 ( $Q_{\text{EC}}$ )，其衰变子核的质子分离能 ( $S_p$ ) 又很小(略大于零)，故衰变后处于激发态的子核很容易发射质子而成为质子发射体。分析前人有关  $\beta$  延发质子衰变的实验数据 [5] 则不难发现：当偶  $Z$ -奇  $N$  的延发质子先驱核发生  $\text{EC}/\beta^+$  衰变后，其奇  $(Z-1)$ -偶  $(N+1)$  质子发射体以一定的分支几率发

射质子而成为偶  $(Z-2)$ -偶  $(N+1)$  子核。根据  $\beta$  衰变选择定则和角动量耦合的相加规则，布局到偶-偶子核激发态的几率将相当大，并最终经其低位能级的第一个  $2^+$  态退激到基态 ( $0^+$ )。因此，与延发质子符合的子核中已知的第一个  $2^+ \rightarrow 0^+$  (基态) 的  $\gamma$  跃迁既用来识别其延发质子先驱核，又可给出其先驱核衰变的诸多物理信息，如半衰期、延发质子谱、 $\beta$  延发质子分支比等。利用这种“p- $\gamma$ ”符合方法直接鉴别核素时，延发质子测量的灵敏度相对 ISOL 分离方法将提高 1~2 个数量级，使有效计数大于本底水平，从而能够进行可靠的鉴别。

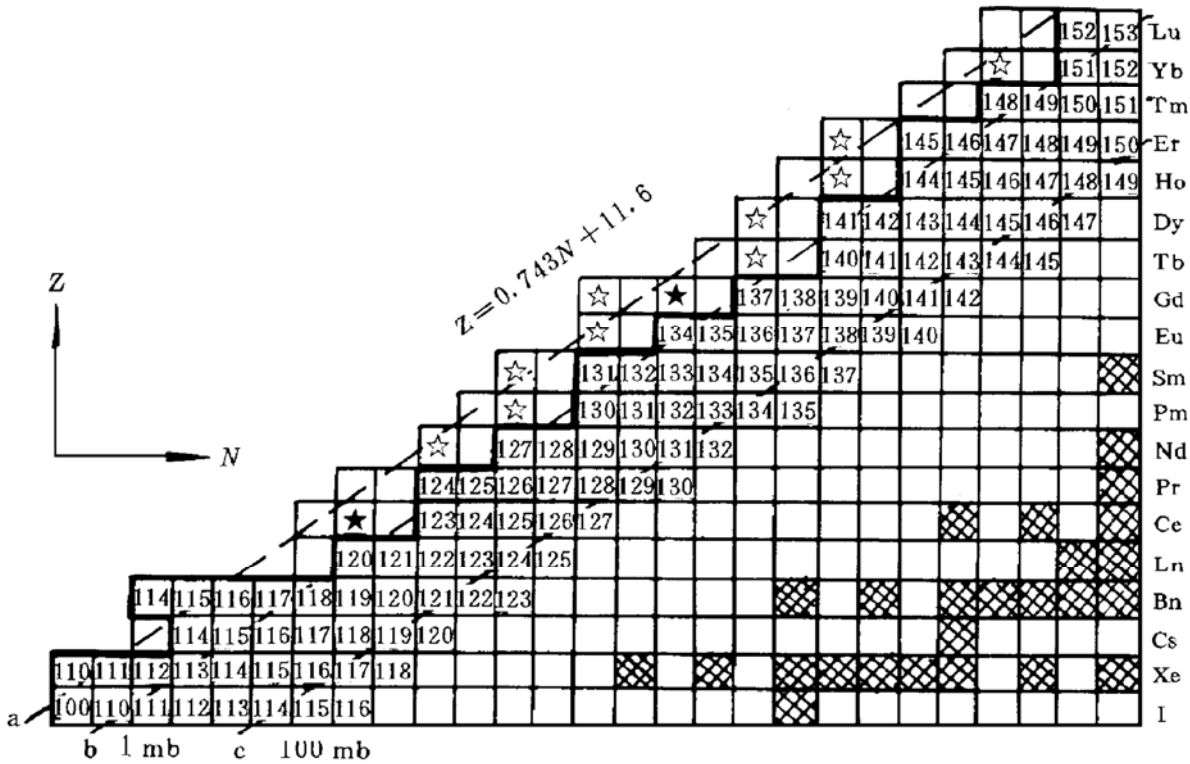


图 1 稀土区核素图

粗实线代表已知核素的边缘，虚线 a 为 Hofmann 预言的  $Z=0.743N+11.6$  质子滴线，虚线 b 和 c 代表用最佳融合蒸发反应产生截面分别为 100 mb 和 1 mb 的区域， $\star$  为已合成的延发质子先驱核  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$ ， $\star$  表示有望合成的延发质子先驱核。

我们提出的利用氦喷嘴带传输系统、跟踪与延发质子符合的子核中已知的第一个  $2^+ \rightarrow 0^+$  的  $\gamma$  跃迁来分离和鉴别延发质子先驱核的方法，原则上适合于鉴别偶  $Z$ -奇  $N$  的  $\beta$  延发质子先驱核。有些奇  $Z$ -奇  $N$  的先驱核亦有

类似的衰变规律。采用类似的实验方法与鉴别手段，如利用兰州 SFC 加速器提供的低能重离子束  $^{32}\text{S}$ 、 $^{36}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{Ca}$  轰击缺中子同位素靶  $^{92}\text{Mo}$ 、 $^{96}\text{Ru}$ 、 $^{106}\text{Cd}$  等，可望通过类似的  $3n$ 、 $p3n$  或  $\alpha 3n$ 、 $\alpha p3n$  等粒子的蒸发反应，产生

沿  $Z=0.743N+11.6$  直线分布的滴线区目标核(见图 1 中以☆号标记的核素). 理论预言的这些核素的半衰期在  $0.5\sim 2.0$  s 之间, 而计算的产生截面在  $20\sim 100\ \mu\text{b}$  之内, 所以这套快速氦喷嘴带传输装置和测量方法完全有能力有效地鉴别此类核素.

### 3 数据分析

实验是在兰州重离子加速器国家实验室 SFC 加速器上完成的. 通过  $^{106}\text{Cd}(^{32}\text{S}, 3n)^{135}\text{Gd}$  和  $^{92}\text{Mo}(^{32}\text{S}, 3n)^{121}\text{Ce}$  等融合蒸发反应, 产生了目标核素, 再利用氦喷嘴快速带传输系统把反应产物迅速地传输到屏蔽好的低本底区进行测量. 利用一台同轴型 GMX 高纯锗探测器测量  $\gamma(X)$ , 一台平面型 GLP 高纯锗探测器测量 X 射线及低能  $\gamma$ ; 在 GMX 探测器前放置了一块全耗尽型金硅面垒半导体探测器以测量质子(具体实验装置可参见文献[6]). 磁带上记录了所有 p- $\gamma(X)$  符合事件和时间信息(时间分辨设定为 0.2 s), 后进行

离线分析, 同时实验中也可进行在线监测. 稀土区其它一些滴线区新核素可用同样的实验装置、数据获取系统和测量方法进行合成与鉴别.

通过数据分析处理, 得到如下物理结果.

#### 3.1 半衰期

$\beta$  延发质子先驱核 EC/ $\beta^+$  衰变后中间“发射体”的寿命非常短( $\sim 10^{-15}$  s 量级), 故其子核中低位能级间  $\gamma$  跃迁与先驱核衰变可认为是同时发生的. 通过跟踪与延发质子符合的子核中第一个  $2^+$  态到  $0^+$  基态的  $\gamma$  跃迁, 可定出其偶 Z-奇 N 的  $\beta$  延发质子先驱核的半衰期. 图 2 给出了  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$  实验质子开门的  $\gamma(X)$  谱, 其中图(a)和图(b)中强峰 163 keV 和 185.8 keV 分别为  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$  的子核  $^{134}\text{Sm}$  与  $^{120}\text{Ba}$  的第一个  $2^+$  态到  $0^+$  基态的  $\gamma$  跃迁<sup>[7,8]</sup>. 利用最小二乘法拟合这两条  $\gamma$  射线的时间序列谱, 所提取出  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$  衰变的半衰期分别为  $1.1\pm 0.2$  s 和  $1.1\pm 0.1$  s, 这与理论预言的半衰期<sup>[9]</sup>符合很好.

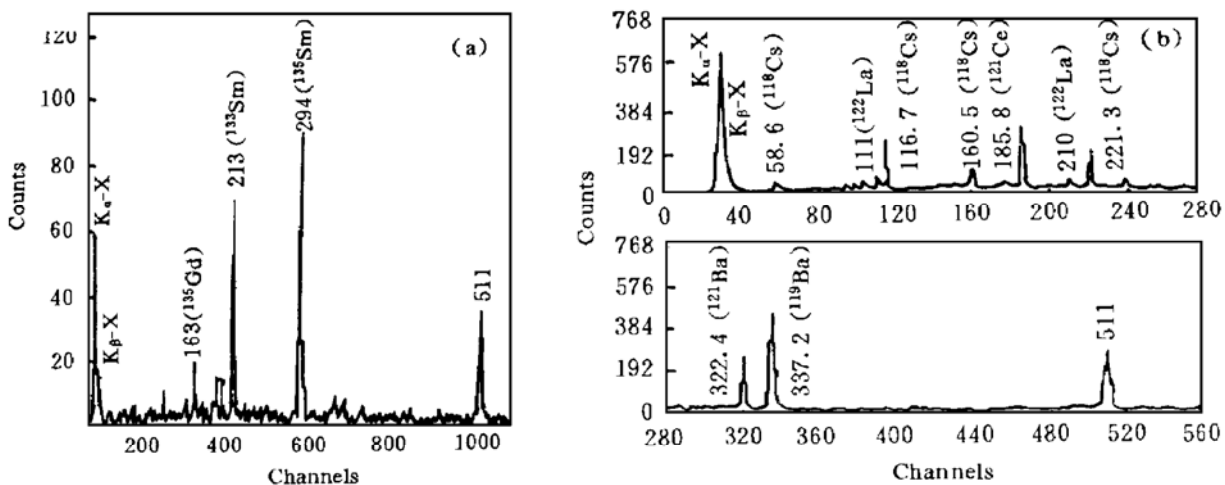


图 2 不同反应中质子开门的  $\gamma(X)$  谱(强峰的能量为 keV)  
 (a)  $^{32}\text{S}+^{106}\text{Cd}$ , 质子能量 3.0~5.0 MeV,  
 (b)  $^{32}\text{S}+^{92}\text{Mo}$ , 质子能量 2.5~6.0 MeV.

#### 3.2 延发质子能谱

由于条件限制, 不能在实验中测到先驱核延发质子衰变的质子单谱. 但通过对子核中第一个  $2^+\rightarrow 0^+$  (基态) 跃迁的  $\gamma$  射线开窗, 则可测到先驱核经 (EC+ $\beta^+$ ) 衰变后发射的延

发质子的能谱, 但它是布居到子核低位激发态(主要是  $2^+$  态)上的所有质子的能谱. 它的平均质子能量及能谱形状在一定程度上反映了核结构的信息. 图 3 给出了  $^{32}\text{S}+^{92}\text{Mo}$  实验中与 185.8 keV 的  $\gamma$  射线符合的  $^{121}\text{Ce}$  延发质

子谱，它是钟型的连续谱，其平均能量 3.7 MeV 与相邻先驱核  $^{125}\text{Ce}$  和  $^{123}\text{Ce}$  的平均能量系统性地吻合<sup>[10]</sup>。

### 3.3 延发质子分支比

不能从本实验中直接测量出先驱核衰变的延发质子分支比，但由于实验中会产生多个具有  $\beta$  延发质子衰变性质的先驱核，其中某些核素的  $\beta$  延发质子分支比等信息已经实验给出。这样，通过比较已知核素与目标核，并以理论估算的生成截面为基础，就可间接推出目标核  $\beta$  延发质子衰变的延发质子分支比。如在  $^{121}\text{Ce}$  实验中，以  $^{118}\text{Cs}$  延发质子衰变到子核  $^{117}\text{I}$  中已知的三个  $\gamma$  峰 116.7、160.5 和 221.3 keV (见图 2b) 为标准<sup>[11]</sup>，并假定  $^{121}\text{Ce}$  衰变中有 80% 的延发质子与 185.8 keV  $\gamma$  射线符合 (参考  $^{123}\text{Ce}$  延发质子衰变到子核

激发态的分支比<sup>[10]</sup>)，由此可估算出  $^{121}\text{Ce}$  衰变的  $\beta$  延发质子分支比为  $(1 \pm 0.5)\%$ 。同样类推推出  $^{135}\text{Gd}$  衰变的  $\beta$  延发质子分支比约为 2%。

### 3.4 延发质子先驱核基态的自旋与宇称

对于中重质量区的延发质子先驱核，用统计模型<sup>[5]</sup>可很好地模拟实验结果并给出核结构的信息。通过拟合延发质子能谱，可选定延发质子先驱核基态可能的自旋和宇称，并给出其  $\beta$  衰变强度函数的有关信息，为进一步研究核的形变参数奠定基础。有关  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$  的统计理论拟合工作现正在进行。

综合以上 4 点内容，我们可建立先驱核  $^{121}\text{Ce}$  衰变的部分衰变纲图，如图 3 中右上角插图所示。

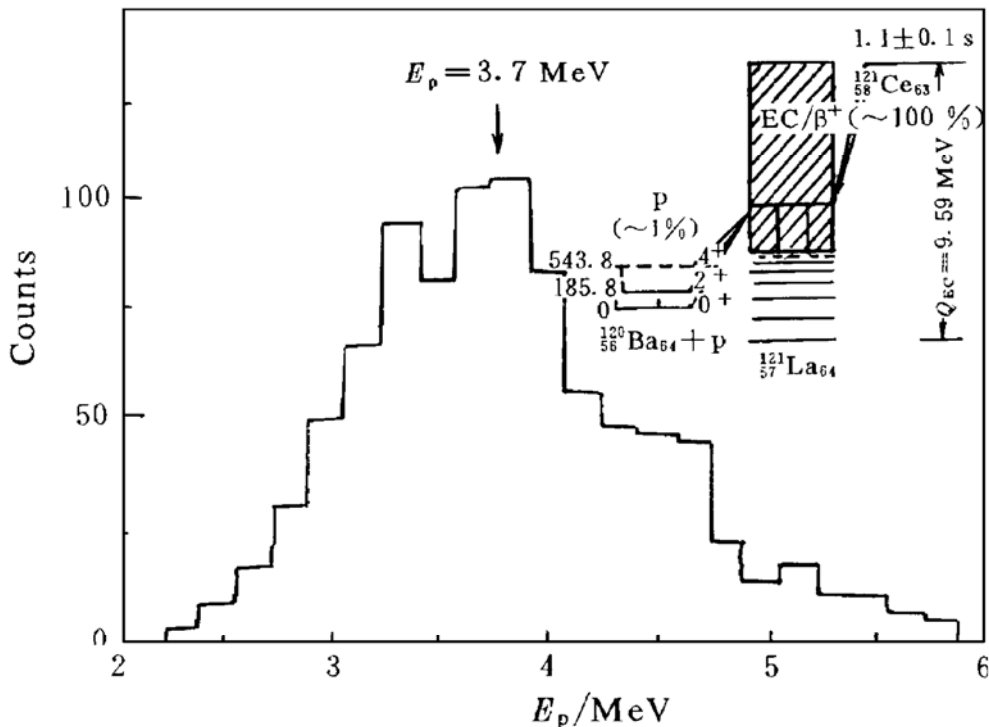


图 3  $^{32}\text{S}+^{92}\text{Mo}$  实验中 185.8 keV  $\gamma$  射线开门的  $^{121}\text{Ce}$  延发质子谱，右上角插图为本实验推出的  $^{121}\text{Ce}$  衰变的部分衰变纲图

### 3.5 其它物理信息

在稀土区已合成和鉴别的  $\beta$  延发质子先驱核中，多数核素是在在线同位素分离器上完成的，其衰变的延发质子分支比等已经实

验给出，但先驱核衰变的延发质子与其子核的退激  $\gamma$  射线间的符合关系却知之甚少。在本实验中，由于延发质子测量灵敏度的大大提高，故通过对比子核中已知的  $\gamma$  射线及三

重符合事例中 X 射线峰位的分析, 可指认延发质子先驱核衰变所对应的  $\gamma$  射线, 进而可估算出该先驱核经延发质子衰变后落到子核不同激发态的分支几率. 例如, 在  $^{121}\text{Ce}$  实验中, 337.2、322.4、111 和 210 keV 等四条  $\gamma$  射线(见图 2b)与其相应先驱核  $^{119}\text{Ba}$ 、 $^{121}\text{Ba}$  和  $^{122}\text{La}$  的  $\beta$  延发质子的符合是首次观测到的; 而与先驱核  $^{118}\text{Cs}$  衰变的延发质子符合的  $\gamma$  射线, 除了文献[11]报道的 117、160 和 221 keV 三条  $\gamma$  射线外, 还应补充一条较弱的  $\gamma$  射线 58.6 keV.

## 4 结 论

国外一直在尝试合成滴线区具有质子放射性或延发质子放射性的新核素, 由于分离鉴别方法的限制, 从 1983 年到 1994 年 GSI (德国)、Daresbury (英国)、Grenoble (法国) 和 Dubna (俄罗斯) 等著名实验室连续发表了搜索  $Z=0.743N+11.6$  滴线区质子放射性不成功的实验结果, 或虽提出了进一步的研究设想, 但至今仍未见有成果报道. 新核素  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$  的首次合成与研究, 无疑是朝这个方向迈进的重要一步. 通过类似反应继续合成与研究沿  $Z=0.743N+11.6$  直线分布的滴线区新核素(见图 1 中以  $\star$  号标记的核素), 定能加深人们对稀土区质子滴线的理解, 为系统性地研究该区的核结构参数打下基础.

感谢德国 GSI 制靶实验室为本实验无偿提供了  $^{92}\text{Mo}$  同位素浓缩靶. 对兰州重离子加速器国家实验室全体运行与维修人员和近物所数据获取室的帮助与合作, 在此表示谢意.

## 参 考 文 献

- 1 Beraud R, Emsallem A, Arje J et al. Nuclear Spectroscopy of Exotic Nuclei with the SARA/IGISOL Facility. In: Third IN2P3-RIKEN Symposium on Heavy Ion Collisions. Singapore: World Scientific, 1994, 102~130
- 2 Hofmann S. Proton Radioactivity. In: Proc Int Conf on the Future of Nuclear Spectroscopy, Crete, Greece. Berlin: Springer, 1993: 255~286
- 3 Larsson P O, Batsch T, Kirchner R et al. Direct Proton Decay of 0.56 s  $^{147}\text{Tm}$  and Search for This Decay Mode among very Neutron-deficient Isotopes with  $53 \leq Z \leq 67$ . Z Phys, 1983, A314(1): 9~16; Livingston K, Woods P J, Davis N J et al. Search for Proton Radioactivity in Odd Z drip-line Nuclei from  $Z=61$  to 67. Phys Rev, 1993, C 48(6): 3113~3114
- 4 Vierinen K S, Nitschke J M, Wilmarth P A et al. Decay of Neutron-deficient Eu, Sm and Pm Isotopes near the Proton Drip Line. Nucl Phys, 1989, A499: 1~28
- 5 Nitschke J M, Wilmarth P A, Lemmert P K et al. Beta-delayed Proton Emission Observed in New Lanthanide Isotopes. Z Phys, 1984, A316(2): 249~250; Hornshøj P, Wilsky K, Hansen P G et al.  $\beta$ -Delayed Proton Emission from Heavy Nuclei (II). Nucl Phys, 1972, A187(3): 609~623
- 6 Xu Shuwei, Xie Yuanxiang, Li Zhankui et al. New  $\beta$ -Delayed Proton Precursor  $^{135}\text{Gd}$ . Z Phys, 1996, A356(1): 227~229; Li Zhankui, Xu Shuwei, Xie Yuanxiang et al. New  $\beta$ -Delayed Proton Precursor  $^{121}\text{Ce}$ . Phys Rev, 1997, C56(2): 1157~1159; 徐树威, 谢元祥, 李占奎等. 合成和研究滴线区新核素— $\beta$  延发质子先驱核  $^{135}\text{Gd}$ . 中国科学, 1997, A 27(5): 434~438; 谢元祥, 徐树威, 李占奎等. 合成和研究滴线区新核素  $\beta$  延发质子先驱核  $^{121}\text{Ce}$ . 高能物理与核物理, 1997, 21(7): 668~671
- 7 Sergeenkov Yu V. Nuclear Data Sheets Update for  $A=134$ . Nucl Data Sheets, 1994, 71: 557~658
- 8 Cederwall B, Johnson A, Wyss R et al. High Spin States of  $^{120}\text{Ba}$ . Z Phys, 1991, A338(4): 461~462
- 9 Hirsch M, Staudt A, Muto K et al. Microscopic Predictions of  $\beta^+/\text{EC}$  Decay Half-lives. At Data and Nucl Data Tables, 1993, 53(2): 165~193
- 10 Nitschke J M, Wilmarth P H, Gilat J et al. Beta-delayed Proton Decay in the Lanthanide Region. in: Proc Nuclei far from Stability, 5th International Conference, Rousseau, Ontario, Canada. New York: American Institute of Physics, 1987: 697~707
- 11 D'Auria J M, Grüter J W, Hagberg E et al. Properties of the Lightest Known Cesium Isotopes  $^{114}\sim^{118}\text{Cs}$ . Nucl Phys, 1978, A301(3): 397~410

# Synthesis and Study of New Nuclei along the Proton-drip Line $Z=0.743N+11.6$ in Rare-earth Region

Li Zhankui Xu Shuwei Xie Yuanxiang Ma Ruichang

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

**Abstract** It's more and more difficult to synthesis and study new nuclei along the proton drip-line by using on-line isotope separator because of its low efficiency. A specific method of “p- $\gamma$ ” coincidence measurement, using the known low-lying “ $2^+ \rightarrow 0^+$  (ground state)”  $\gamma$  transition of the “daughter” nucleus in coincidence with its  $\beta$ -delayed proton, could increase the detection sensitivity effectively and was used to identify and study the precursors, new nuclei  $^{135}\text{Gd}$  and  $^{121}\text{Ce}$  with a He-jet recoil fast tape transport system at HIRFL in China. It's prospected to synthesis and study more nuclei along the proton drip-line of  $Z=0.743N+11.6$  in the rare-earth region by this technique.

**Key Words** p- $\gamma$  coincidence He-jet recoil fast tape transport system  $\beta$ -delayed proton precursor