

文章编号: 1007-4627(2010)03-0252-05

^{145}Er 的 β 延发质子衰变性质研究*

马飞^{1,2}, 周小红¹, 郑勇¹, 徐树威¹, 谢元祥¹, 陈亮^{1,2}, 张玉虎¹, 李占奎¹,
强赞华¹, 雷祥国¹, 郭应祥¹, 郭松¹, 丁兵^{1,2}, 王海霞^{1,2}, 李广顺^{1,2}, 周厚兵^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过 $^{92}\text{Mo}(^{58}\text{Ni}, 2p3n)$ 融合蒸发反应生成了非常缺中子核 ^{145}Er 。利用氦喷嘴带传输系统把研究目标核传输到低本底测量站, 进行了质子- γ 符合测量, 得到了不受同量异位素干扰的 ^{145}Er 的 β 延发质子谱。经过仔细分析与延发质子符合的 γ 谱, 发现了 ^{145}Er 的 $11/2^-$ 同核异能态具有 β 延发质子衰变性质。经拟合退激 ^{144}Dy 不同激发态 γ 跃迁的衰变曲线, 得出 ^{145}Er 的 $1/2^+$ 基态和 $11/2^-$ 同核异能态的半衰期分别为 (1.6 ± 0.6) 和 (0.6 ± 0.1) s。最后, 简单介绍了中重质量区缺中子新核素的合成及衰变研究计划。

关键词: 氦喷嘴带传输系统; 缺中子核素; β 延发质子衰变

中图分类号: O571.32

文献标识码: A

1 引言

在缺中子核区, 随着越来越远离稳定线, 原子核的 EC/β^+ 衰变能不断增大, 导致远离稳定线原子核的 EC/β^+ 衰变可以布居子核的高激发态。如果子核的高激发态是质子非束缚的, 就会有一定几率发射质子。这一过程就是 β 延发质子 (βp) 衰变。在中重核区, 发射质子的子核能级密度较大, β 延发质子的能谱是连续的, 一般具有钟罩形。在 $A < 70$ 的轻质量区, 由于原子核的能级密度小, 延发质子能量谱是分立的。 ^{145}Er 位于由球形核向形变核过渡的中重核区, 应该具有 βp 衰变特性。在美国 LBL, Wilmarth 等人利用在线同位素分离器首次观测到了 ^{145}Er 的 βp 衰变, 给出了 ^{145}Er 的衰变曲线并结合统计模型建议了 ^{145}Er 基态的自旋宇称^[1]。由于同量异位素 ^{145}Dy 的生成截面很大, 其 βp 衰变对 ^{145}Er 的鉴别形成了强烈的干扰, 从而实验上无法给出 ^{145}Er 确定的延发质子谱和衰变曲线^[1]。在统计模型中, 延发质子谱的形状和 βp 衰变到孙子核各能级的分支比对建议先驱核的自旋宇称是非常重要的。因此, 重新对 ^{145}Er 的 βp 衰变性质进行实

验研究是必要的。

在进行缺中子核 βp 衰变性质的研究中, 国际上普遍采用在线同位素分离器将研究目标核分离并传输到低本底测量区域, 利用质子-特征 X 射线符合鉴别先驱核^[1]。该方法的缺点是效率低, 特别对于产额较低的核素易受同量异位素的干扰。为了克服传统方法的缺陷, 本课题组在研究缺中子核的 βp 衰变性质时采用了不同的技术路线。利用氦喷嘴带传输系统传输研究目标核, 并通过质子- γ 符合方法鉴别先驱核^[2-4]。在一般情况下, 氦喷嘴带传输系统相对于同位素分离器具有更高的传输效率, 特别对处于高温难熔元素传输效率优势更加明显。图 1 给出了质子- γ 符合方法鉴别先驱核的原理。缺中子核 $^Z A$ 的 EC/β^+ 衰变通过 Gamow-Teller (GT) 跃迁有相当大的分支布居子核 $^{Z-1} A$ 的高激发态, 如果这些高激发态是质子非束缚的, 它们通过发射质子衰变到孙子核 $^{Z-2} A$ 的低激发态, 这些低激发态发射 γ 射线退激到基态。在此过程中, 由于中间核态的寿命很短, 可认为延发质子和 γ 射线是同时发射的。 $^{Z-2} A$ 核相对靠近稳定线, 通过在束和衰变实

* 收稿日期: 2009-12-30; 修改日期: 2010-01-04

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10825522, 10735010, 10575120); 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB815001)

作者简介: 马飞(1981-), 男(汉族), 内蒙古巴彦淖尔人, 博士研究生, 从事原子核实验研究; E-mail: puabumf@impcas.ac.cn

通讯联系人: 周小红, E-mail: zzh@impcas.ac.cn

验, 已充分研究了它的低位能级结构。退激 $Z-2A$ 核低位能级的 γ 射线是该核的特征跃迁。因此, 利用质子- γ 符合方法可以明确地指认先驱核 $Z A$ 。

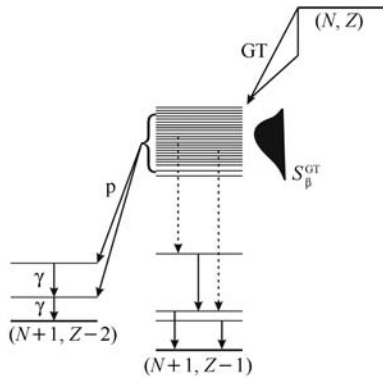


图 1 “质子- γ ”符合测量指认 β p 衰变先驱核原理图

2 实验

实验是在兰州重离子加速器国家实验室完成的。由 SFC 加速器提供的能量为 383 MeV 的 $^{58}\text{Ni}^{18+}$ 束轰击自支撑同位素靶 ^{92}Mo , 产生了目标核 ^{145}Er 。靶的丰度为 95%, 厚度为 2.0 mg/cm^2 。靶室与加速器管道相连处装有厚度为 2.18 mg/cm^2 的 Havar 窗, 靶室内充有一个大气压的氦气。束流到达靶芯部位的能量为 300 MeV, 强度为 $0.5\text{ e}\mu\text{A}$ 。反应产物在靶室中受到氦气慢化并附着在添加剂 PbCl_2 的大分子团上, 经氦喷嘴系统传输到收集室中, 喷射并附着到收集室中的传送带上, 制备成放射源。根据预期的 ^{145}Er 的半衰期, 设置收集时间为 2.0 s 。带传输系统把产物周期性地送到低本底区进行测量。在低本底探测区, 一块厚度为 $350\text{ }\mu\text{m}$ 的全耗尽金硅面垒探测器放置于传送带正对面 2 mm 的位置, 用于质子探测。在硅探测器背面及正对面各放有一台 HPGe 探测器测量 γ 射线, 质子- γ 符合时间窗为 300 ns 。实验中还利用了一台精密脉冲产生器来进行死时间修正。脉冲产生器产生的周期性脉冲同时被三路探测器接收, 形成符合信号并被获取系统记录, 通过分析不同时间段接收的脉冲计数, 可以判断该时间段内死时间的相对大小。

3 结果与讨论

图 2 给出了能量为 $2.2\text{--}6.5\text{ MeV}$ 的延发质子开门得到的 γ 谱。除 511 keV γ 峰外, 其余所有的

强 γ 峰都应该源于延发质子衰变。经过仔细分析, 找到了图 2 中所有 γ 射线的归属, 并指出这些 γ 射线所对应的先驱核^[5-9]。其中, 493 和 673 keV 两条 γ 射线均来自先驱核 ^{145}Er 的 β p 衰变^[8], 它们分别对应于 ^{144}Dy 中 $2^+ \rightarrow 0^+$ 和 $4^+ \rightarrow 2^+$ 的跃迁。经过效率修正, 得到子核 ^{145}Ho 质子衰变到 ^{144}Dy 2^+ 和 4^+ 态的相对分支比约为 1.0 。

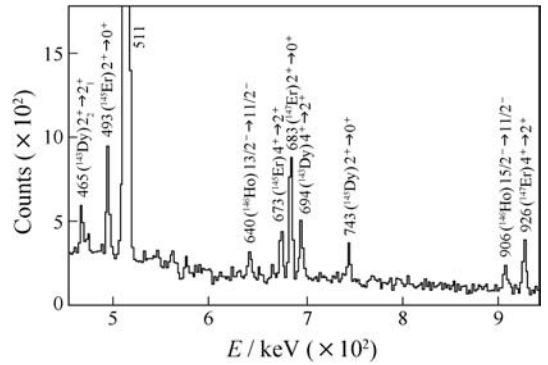


图 2 能量为 $2.2\text{--}6.5\text{ MeV}$ 质子开门的 γ 谱

每条 γ 线上所标记的内容分别表示跃迁的能量、相应的先驱核以及对应孙子核能级之间的跃迁。

^{145}Er 为偶 Z 奇 N 的近球形核, 基态自旋由最后一个价中子所处的轨道决定。从 Nilsson 能级可知, ^{145}Er 的价中子可以处于 $2d_{3/2}$ 或 $1h_{11/2}$ 轨道。通过分析 $N=77$ 和 $A=140$ 附近偶 Z 奇 N 核低激发态能级结构的系统性, 可以推测出 ^{145}Er 基态的自旋和宇称可能为 $1/2^+$, 并应该存在一个 $11/2^-$ 的同核异能态^[10, 11]。Tantawy 等人通过观测 ^{146}Tm 的直接质子放射性间接地发现了这两个态^[10, 11], 并给出 ^{145}Er 同核异能态的半衰期为 0.7 s ^[11]。在 ^{145}Er 的 EC/β^+ 中, 主要是通过 GT 跃迁布居到子核 ^{145}Ho 的高激发态^[12, 13]。因此, ^{145}Er 的 $11/2^-$ 同核异能态应该主要衰变到 ^{144}Dy 6^+ 和 4^+ 态; $1/2^+$ 基态主要衰变到 ^{144}Dy 0^+ 和 2^+ 态。如图 2 所示, 本实验观测到了 $493(2^+ \rightarrow 0^+)$ keV 和 $673(4^+ \rightarrow 2^+)$ keV 两条较强 γ 线。但未发现 ^{144}Dy 中 $6^+ \rightarrow 4^+$ 的 γ 跃迁, 这可能是由于 ^{145}Er 同核异能态经 β p 衰变到 ^{144}Dy 6^+ 态的几率较低导致的。

图 3(a) 显示了 493 keV γ 峰开门的延发质子能谱, 延发质子的平均能量约为 4.5 MeV 。图 3(b) 拟合了 ^{144}Dy 核中 $2^+ \rightarrow 0^+$ 493 keV 跃迁的衰变曲线, 所得到的半衰期为 $(0.9 \pm 0.2)\text{ s}$, 这与文献^[1]中所给出 ^{145}Er 的半衰期是一致的。但是, 从图 4

^{145}Er 的 βp 衰变纲图中可知, ^{144}Dy 的 2^+ 态可以由延发质子衰变直接产生, 也可通过 4^+ 态退激产生。由于直接布居 ^{144}Dy 2^+ 态的延发质子只能由 ^{145}Er 的基态衰变产生, 而 ^{144}Dy 的 4^+ 态只能通过 ^{145}Er 的同核异能态衰变产生。因此, 如图 5(b) 中所示, 从 493 keV γ 射线衰变曲线的计数中扣除由 $4^+ \rightarrow 2^+$

γ 跃迁的贡献后, 得到的 (1.6 ± 0.6) s 才是 ^{145}Er 基态半衰期。通过拟合 673($4^+ \rightarrow 2^+$) keV γ 射线的衰变曲线, 如图 5(a) 所示, 得到 ^{145}Er $11/2^-$ 同核异能态的半衰期为 (0.6 ± 0.1) s。这与文献[11]中所给出的结果一致。而文献[1]中所给出的半衰期包含了 ^{145}Er 基态和同核异能态衰变信息的综合结果。

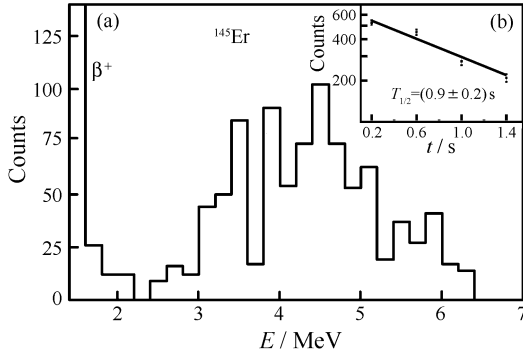


图 3 493 keV 特征 γ 射线对应的 (a) 延发质子能谱和 (b) 时间衰变曲线

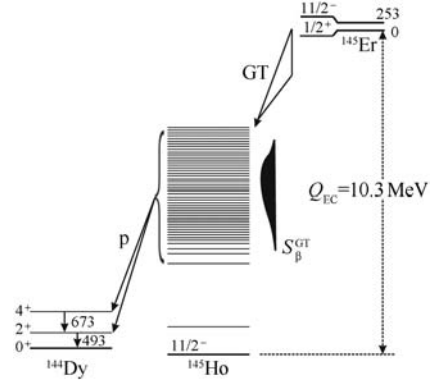


图 4 ^{145}Er βp 衰变纲图

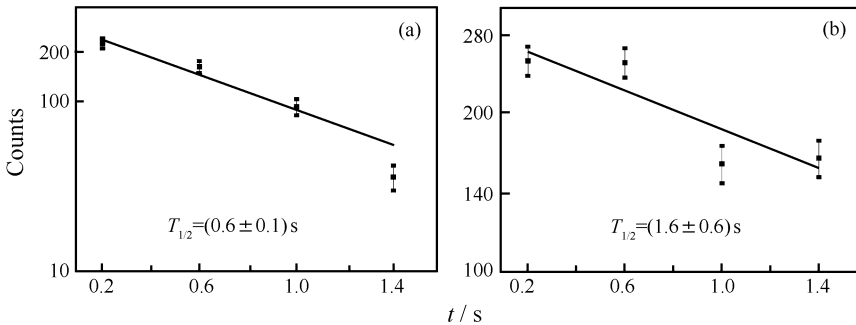


图 5 ^{145}Er 的 (a) 同核异能态半衰期和 (b) 基态半衰期

4 未来工作介绍

合成滴线附近新核素并观测它们的奇异衰变一直是核物理的前沿研究领域之一。处于质子滴线附近的丰质子核具有 β 延发质子、基态直接质子发射以及基态双质子发射等奇异衰变模式。进行极端丰质子核的奇异衰变研究, 能得到在极端中子数与质子数不平衡条件下核内单粒子轨道和质子滴线位置的信息, 将使各种核模型受到非常严格的检验。自 20 世纪 70 年代以来, 一些国外著名实验室, 如美国 LBL、德国 GSI、法国 Grenoble、日本 JAERI、英国 Daresbury 和俄国的 Dubna 等, 就开始着手这方面的研究^[14, 15]。迄今, 通过测量直接质子放射性, 人们已基本确定了奇 Z 核的质子滴线位置^[14, 15]。但是, 对于偶 Z 同位素, 研究进展十分缓

慢, 主要原因是目标核产额极低, 分离鉴别技术难度太大。在滴线附近, 对关联的作用相对明显增加。理论计算预言, 相对奇 Z 核的质子滴线的位置, 偶 Z 核的质子滴线平均来说要向缺中子方向移动约 4 个中子数。在 $Z > 30$ 的核区, 人们还从未发现过任何偶 Z 的质子滴线核。率先发现偶 Z 的质子滴线核显然是一个非常有趣的和富有挑战性的物理目标。

本课题组提出了一种直接跟踪母子体衰变来分离鉴别核素的方法, 因而在轻稀土区质子滴线附近合成了 10 余种新核素^[2, 4, 16-20]。为了探索中重质量区偶 Z 核的质子滴线位置, 必须用更快速和更灵敏的测量手段来代替现有的氦喷嘴带传输系统。为此, 我们在实验手段上将进行以下 3 方面的改进: (1) 用速度选择器或充气谱仪代替氦喷嘴系统, 缩

短传输时间; (2) 利用硅微条探测器 DSSD 代替单片硅, 改进带电粒子谱; (3) 采用反康的高效率 HPGe 探头, 提高“质子- γ ”符合测量稀有事件的灵敏度。表 1 给出了今后的具体研究目标核。

表 1 研究的目标核及其预计的半衰期与生成的反应道和截面

核素	半衰期预言值 /ms	反应道	βp 道截面估计值 /mb
^{113}Ba	101	$^{58}\text{Ni}(^{58}\text{Ni}, 3\text{n})$	20—100
^{117}Ce	103	$^{58}\text{Ni}(^{64}\text{Zn}, 5\text{n})$	2—10
^{119}Ce	315	$^{58}\text{Ni}(^{64}\text{Zn}, 3\text{n})$	20—100
^{123}Nd	237	$^{36}\text{Ar}(^{92}\text{Mo}, 5\text{n})$	2—10
^{127}Sm	234	$^{40}\text{Ca}(^{92}\text{Mo}, 5\text{n})$	2—10
^{131}Gd	185	$^{40}\text{Ca}(^{96}\text{Ru}, 5\text{n})$	2—10
^{133}Gd	425	$^{40}\text{Ca}(^{96}\text{Ru}, 3\text{n})$	20—100
^{137}Dy	352	$^{40}\text{Ca}(^{102}\text{Pd}, 5\text{n})$	2—10
^{141}Er	283	$^{40}\text{Ca}(^{106}\text{Pd}, 5\text{n})$	2—10
^{143}Er	555	$^{40}\text{Ca}(^{106}\text{Cd}, 3\text{n})$	2—10
^{147}Yb	333	$^{58}\text{Ni}(^{92}\text{Mo}, 3\text{n})$	20—100
^{155}W	194	$^{58}\text{Ni}(^{102}\text{Pd}, 5\text{n})$	2—10
^{157}W	1.4×10^3	$^{58}\text{Ni}(^{102}\text{Pd}, 3\text{n})$	20—100

5 总结

本工作利用重离子熔合蒸发反应产生了缺中子核 ^{145}Er 。基于快速带传输系统并结合质子- γ 符合测量, 研究了 ^{145}Er 的 β 延发质子衰变性质。实验观测到了与延发质子符合的 ^{144}Dy 低位激发态退激的 γ 跃迁。 ^{144}Dy 核的 $4^+ \rightarrow 2^+ \gamma$ 跃迁与延发质子的符合表明, ^{145}Er 的 $\nu h_{11/2}$ 同核异能态具有 β 延发质子衰变。通过分析 ^{144}Dy 低位激发态退激 γ 跃迁的衰变曲线, 提取了 ^{145}Er 基态和 $\nu h_{11/2}$ 同核异能态的半衰期分别为 (1.6 ± 0.6) 和 (0.6 ± 0.1) s。为了探索 $Z > 30$ 偶 Z 核的质子滴线位置, 简要讨论了实验技术的改进方案并给出了具体的研究目标核。

参考文献 (References):

- [1] Wilmarth P A. Beta-delayed Proton Emission in Neutron-deficient Lanthanide Isotopes. Berkeley: LBL-26101, 1988, 73—96.
- [2] Xu Shuwei, Li Zhankui, Xie Yuanxiang, *et al.* Phys Rev, 1999, **C60**: 061302(R).
- [3] Xu Shuwei, Xie Yuanxiang, Li Zhankui, *et al.* Z Phys, 1996, **A356**: 227.
- [4] Li Zhankui, Xu Shuwei, Xie Yuanxiang, *et al.* Phys Rev, 1997, **C56**: 1157.
- [5] Gui S Z, Colombo G, Nolto E. Z Phys, 1982, **A305**: 297.
- [6] Firestone R B, Gilat J, Nitschke J M, *et al.* Phys Rev, 1991, **C43**: 1066.
- [7] Redon N, Ollivier T, Beraud R, *et al.* Z Phys, 1986, **A325**: 127.
- [8] Goettig L, Gelletly W, Lister C J, *et al.* Nuc Phys, 1987, **A464**: 159.
- [9] Zheng Yong, Zhou Xiaohong, Zhang Yuhu, *et al.* J Phys (London), 2004, **G30**: 465.
- [10] Ginter T N, Batchelder J C, Bingham C R, *et al.* Phys Rev, 2003, **C68**: 034330.
- [11] Tantawy M N, Bingham C R, Rykaczewski K P, *et al.* Phys Rev, 2006, **C73**: 024316.
- [12] Nitschke J M, Wilmarth P A, Gilat J, *et al.* Phys Rev, 1988, **C37**: 2694.
- [13] Blank B, Borge M J G. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2008, **60**: 403.
- [14] Davids C N, Woods P J, Seweryniak D, *et al.* Phys Rev, 1998, **L80**: 1849.
- [15] Rykaczewski K P. Eur Phys J, 2002, **A15**: 81.
- [16] Xu Shuwei, Xie Yuanxiang, Li Zhankui, *et al.* Z Phys, 1996, **A356**: 227.
- [17] Xie Yuanxiang, Xu Shuwei, Li Zhankui, *et al.* Eur Phys J, 1999, **A6**: 239.
- [18] Xu Shuwei, Li Zhankui, Xie Yuanxiang, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 017301.
- [19] Xu Shuwei, Li Zhankui, Xie Yuanxiang, *et al.* Eur Phys J, 2001, **A12**: 1.
- [20] Xu Shuwei, Xie Yuanxiang, Xu Furong, *et al.* Eru Phys J, 2004, **A21**: 75.

Properties of β -delayed Proton Decay of ^{145}Er *

MA Fei^{1, 2}, ZHOU Xiao-hong^{1, #}, ZHENG Yong¹, XU Shu-wei¹, XIE Yuan-xiang¹, CHEN Liang^{1, 2}, ZHANG Yu-hu¹,
LI Zhan-kui¹, QIANG Yun-hua¹, LEI Xiang-guo¹, GUO Ying-xiang¹, GUO Song¹, DING Bing^{1, 2},
WANG Hai-xia^{1, 2}, LI Guang-shun^{1, 2}, ZHOU Hou-bing^{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: The neutron-deficient isotope ^{145}Er was produced via the fusion-evaporation reaction $^{92}\text{Mo}(^{58}\text{Ni}, 2p3n)$. The reaction products were transported to a low background counting area using a He-jet tape transport system, and proton- γ coincidence measurements were carried out. Based on the analysis of γ transitions in coincidence with β -delayed protons, the β -delayed proton decay of an $\nu h_{11/2}$ isomer in ^{145}Er was proposed. By fitting the decay curves of the γ transitions depopulating the low-lying states in ^{144}Dy , the half-lives of the ground-state and the $\nu h_{11/2}$ isomeric state in ^{145}Er were deduced to be (1.6 ± 0.6) and (0.6 ± 0.1) s, respectively. An experimental plan to synthesize new β -delayed proton precursors in the medium-heavy mass region has been presented.

Key words: He-jet tape transport system; neutron-deficient isotope; β -delayed proton decay

* **Received date:** 30 Dec. 2009; **Revised date:** 4 Jun. 2010

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10825522, 10735010, 10575120); Major State Basic Research Development Program of China (2007CB815001)

Corresponding author: Zhou Xiao-hong, E-mail: zhx@impcas.ac.cn