

新核素 ^{238}Th 的鉴别*

何建军 杨维凡 袁双贵 马桃桃 李宗伟
熊 兵 徐岩冰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用 60MeV/u 的 ^{18}O 离子束轰击天然铀靶, 通过多核子转移反应生成重丰中子新核素 ^{238}Th . 观测到了 ^{238}Th 的子体 ^{238}Pa γ 活性的生长、衰变行为, 鉴别了 ^{238}Th 的存在, 并测得它的半衰期为 $(9.4 \pm 2.0)\text{min}$. 同时, 发现了一条能量为 $(89.0 \pm 0.3)\text{keV}$ 、半衰期为 $(8.9 \pm 1.5)\text{min}$ 的新 γ 射线, 指定为 ^{238}Th 的衰变 γ 射线.

关键词 新核素 多核子转移反应 放射化学分离 生长和衰变曲线

1 引言

远离 β 稳定线新核素的合成和研究, 是国际上核物理学科竞争十分激烈的重大基础性前沿领域, 它不仅具有非常重要的学术价值, 而且存在非常广阔的应用前景. 在重质量丰中子区, 不仅包括一些对研究八极形变具有重要意义的 $A = 225$ 附近核^[1], 而且特别引人注目的是, 理论预言, 存在着与天体物理密切相关的一个 β 延迟裂变(β DF)岛^[2]和一个 β 延迟中子先驱核素岛^[3]. 因此, 该核区新核素的合成和研究, 必将不断揭示出新现象和新规律, 对进一步了解远离核的衰变及结构特性, 丰富和深化人们对原子核内部结构和运动规律的认识, 促进传统模型理论的发展, 并推动与之相关的天体物理、原子物理、核化学和放射化学等的进步发挥非常重要的作用.

在质量数为 $A \geq 170$ 的丰中子区, 由于缺少有效的生成机制和分离、鉴别手段, 因此, 该核区新核素的合成和研究进展比较缓慢. 近年来, 国内、外的研究^[4-6]表明: 利用中能丰中子炮弹轰击重丰中子靶, 通过多核子转移反应来生成尽可能丰的重丰中子余核, 这一奇异反应机制是产生这一核区新核素的最有效手段之一^[7-10]. 本文新核素 ^{238}Th 的合成和鉴别, 是利用中能 (60MeV/u) ^{18}O 离子束轰击铀靶 (^{238}U), 通过多核子转移, 也就是两个靶核质子与两个炮弹中子的交换, 即 $^{238}\text{U}-2\text{p} + 2\text{n}$ 而产生的.

1999-09-16收稿

* 国家自然科学基金资助项目19775055和中国科学院资助

2 实验

实验是在中国科学院近代物理研究所的兰州重离子研究装置(HIRFL)上完成的. 用能量为 60MeV/u、束流强度为 30—60enA 的¹⁸O 离子束轰击天然铀靶 [(NH₄)₂U₂O₇]. 由于¹⁸O 的穿透能力强, 允许使用厚靶 (1.5g/cm²), 这样有效地增加了目标核的产额, 充分弥补了束流强度小和反应截面低的不足. 每一个粉末靶被持续照射 25 分钟.

照射结束后, 用自动快速靶辐照传输装置将靶子传送到化学实验室, 使用如下改进过的分离钍的化学流程立即进行化学分离.

(1) 照过的铀靶溶于 15ml, 浓度为 1.2mol/l 的 HNO₃ 中, 用相同体积, 浓度为 0.05mol/l 的 PMBP-苯溶液手动萃取 1 分钟, 分相后弃去水相;

(2) 用 10ml, 浓度为 0.6mol/l 的 HCl 洗有机相一次, 弃去水相;

(3) 有机相用 15ml, 浓度为 4mol/l 的 HNO₃ (含 KI 和 NaNO₂) 反萃. 反萃水相转移到含 Te 和 Br 载体的离心试管中, 加 4mg Fe³⁺, 在搅拌下加冷氨水到碱性. 离心, 弃去离心液;

(4) 加入 10ml, 浓度为 0.6mol/l 的 HNO₃ 溶液, 快速搅拌. Fe(OH)₃ 沉淀溶解后, 将溶液转入分液漏斗中. 用浓度为 0.05mol/l 的 PMBP-苯溶液萃取, 弃去水相;

(5) 重复 2—3 步. 第 3 步的 Fe(OH)₃ 沉淀不离心, 而是用可拆卸漏斗过滤, 制成固体测量源, 用于 γ 计数.

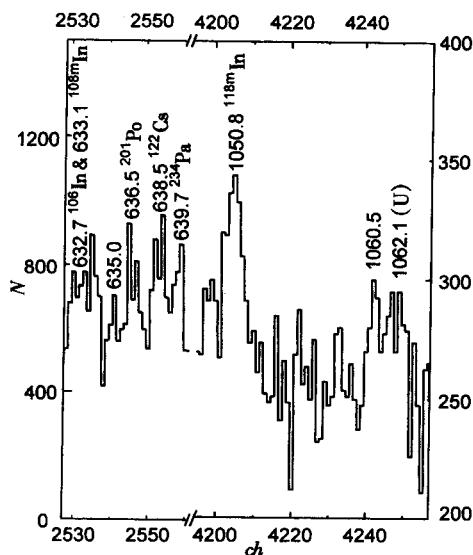
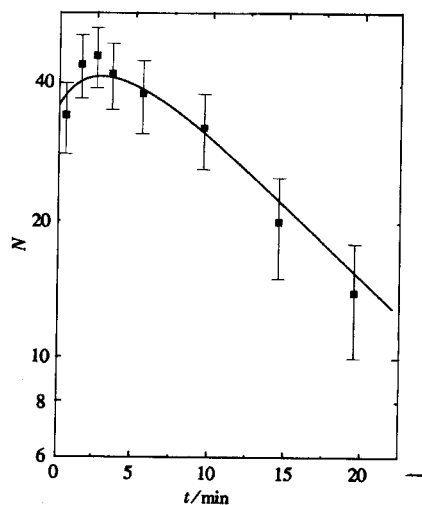
整个流程后, 钍的最终化学回收率大约为 70%.

紧跟化学分离, 在照射结束后约 10 分钟开始用两台探测器进行测量, 一台是小平面高纯锗 (HPGe) X 射线及低能 γ 射线探测器, 其有效直径为 32mm, 灵敏厚度为 10mm, 它对⁵⁷Co 122keV γ 射线的能量分辨为 580keV; 另一台是效率为 30%, 对⁶⁰Co 1332keV γ 射线的分辨为 2.0keV 的 HPGe 探测器. 这两台探测器面对面地置于测量源两侧并放在一铅室内. 每个样品持续测量了 25 分钟, 数据获取由 PC-CAMAC 多参数系统获取 γ, X 射线的时间序列谱及 γ(X)-γ-t 事件谱.

为了增加计数统计, 满足鉴别²³⁸Th 的需要, 上述过程重复进行了 67 次.

3 实验结果

在中能重离子反应中, 存在核子转移、碎裂和裂变等多种反应机制, 因此, 反应产物极为复杂, 包含从轻到重的一大批放射性核素, 其产生截面又很大, 不把它们去掉, 欲观测到反应截面 (μb 量级) 远小于产生杂质截面的目标核的活性是根本不可能的. 从观测的 γ(X) 谱可以看出, 化学分离是很成功的, 在靶量大和分离时间短的条件下, 经化学分离后, 样品中除 Th 及其子体 Pa 的同位素外, 只有少量的 Po、In 和 Cs 等杂质. 在测得的 γ(X) 谱中, 包括了来源于上述这些同位素中放射性同位素的活性, 不过钍的同位素及其 β 衰变子体占有绝对优势. 通过对能量为 635.0、1060.5keV 两条 γ 射线 (图 1) 的能量、相对强度和半衰期^[11]的分析, 指定了它们来自于²³⁸Pa 的衰变. 由于在 γ 谱的相对高能区具有

图1 分离钍样品的部分 γ 射线谱图2 1060.5keV γ 射线的生长、衰变曲线

较低的本底和较少数量的杂质峰,故对 1060.5keV 的 γ 射线进行了仔细跟踪(图 2),它们的生长和衰变行为表明 ^{238}Pa 的活性来源于新核素 ^{238}Th β^- 衰变. 利用递次衰变程序拟合图 2 中的实验数据,提取出 ^{238}Th 和 ^{238}Pa 的半衰期分别是 $(9.4 \pm 2.0)\text{min}$ 和 $(2.1 \pm 0.4)\text{min}$,后者同 ^{238}Pa 的文献值很好地一致^[11],前者同质子-中子准粒子随机相近似方法^[12](考虑了 Gamow-Teller 剩余相互作用,利用 Hilf 等人的质量公式和 Moller-Nix 的质量公式进行计算)的预言值符合得非常好. 但我们注意到,不同理论预言的半衰期存在很大差别. 下面给出本工作半衰期的实验值与预言值的比较. 从表 1 可以清楚地看出,我们的实验值与利用 QRPA^[12](利用 Hilf 等和 Moeller-Nix 的质量公式进行计算)的预言值符合得非常好,而与其他理论预言值却相差甚大. 本工作的测量值为检验这些理论提供了数据.

表1 半衰期的实验值与不同理论预言值的比较

核素	实验值 (min)	预言值 (min)				
		QRPA ^[12]		微观理论 ^[13]	粗糙理论 ^[14]	
^{238}Th	9.4 ± 2.0	9.5^{a}	26.5^{b}	9.3^{c}	2.6	0.8

注: a, b, c 分别是利用 Hilf 等、Groote 等和 Moeller 等的质量公式计算的半衰期.

另外,在用 Pa K_{α} X 射线开门的 γ 谱中,观测到了一条能量为 $(89.0 \pm 0.3)\text{keV}$ (图 3),半衰期为 $(8.9 \pm 1.5)\text{min}$ (图 4)的新 γ 射线.

它的来源有: 1) 缺中子铀同位素的衰变; 2) 丰中子钍同位素的衰变. 由于铀在化学分离过程中都被分离掉了,因此,它只能来自于丰中子钍同位素的衰变. 按照它的能量和半衰期,它不可能是来自于已知钍的同位素衰变. 而其半衰期与上面测得的 ^{238}Th 的值一致,所以,指定它为 ^{238}Th 的衰变 γ 射线.

估计 ^{240}Pa 是一个很好的 β 延发裂变先驱核,而 ^{238}Th 及 ^{239}Pa ^[9]的合成和鉴别已经逼近了 β 延发裂变岛,这就为我们下一步开展 β 延发裂变几率测量创造了良好的条件.

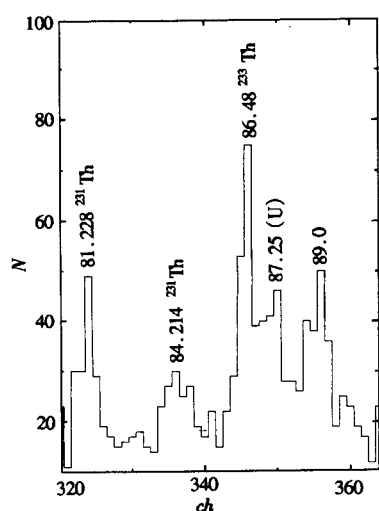
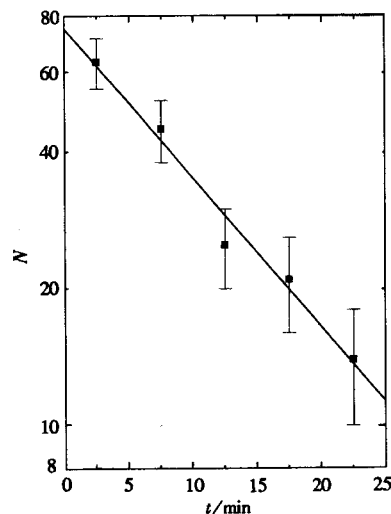
图3 用Pa K_α X射线开门的部分γ射线谱

图4 89.0keV γ射线的衰变曲线

感谢兰州重离子加速器全体工作人员在实验中的密切合作和大力支持。

参 考 文 献

- 1 Rohozinski S G. Rep. Prog. Phys., 1989, **51**:541
- 2 Berlovich E Y et al. Phys. Lett., 1969, **B29**:155
- 3 Yang Chengzhong. Chinese Jour Trends in Nucl. Phys., 1985, **1**:1
- 4 Loveland W et al. Nucl. Phys., 1987, **A471** (1,2):175c
- 5 Daniel Guerreau et al. Nucl. Phys., 1986, **A447**:37c
- 6 Mcgaughey P L et al. Phys. Rev., 1985, **C31**(3):896
- 7 Zhang Li et al. Phys. Rev., 1994, **C49**(2):592
- 8 Zhang Li et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1992, **16**:767—768
(张立等. 高能物理与核物理, 1992, **16**:767—768)
- 9 Yuan Shuangui et al. Z. Phys., 1995, **A352**(3):235
- 10 Yang Weifan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1995, **19**:479—480
(杨维凡等. 高能物理与核物理, 1995, **19**:479—480)
- 11 Yuan Shuangui et al. Phys. Rev., 1998, **C57**:1506—1507
- 12 He Jianjun et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, **21**:958—959
(杨维凡等. 高能物理与核物理, 1997, **21**:958—959)
- 13 Zhang Li et al. Eur. Phys. J., 1998, **A2**:5
- 14 Richard B Firestone. Table of Isotopes, 8th Edition, 1996, **2**:2780
- 15 Staudt A et al. At Data and Nucl. Data Tables, 1990, **44**:79
- 16 Klapdor H V et al. At. Data Nucl. Data Tables, 1984, **31**:81
- 17 Takayoshi Horiguchi et al. Chart of the Nuclides 1996

Identification of New Isotope ^{238}Th *

He Jianjun Yang Weifan Yuan Shuangui Ma Taotao
Li Zongwei Xiong Bing Xu Yanbing

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

Abstract Unreported heavy neutron-rich nuclide ^{238}Th has been produced via a multinucleon transfer reaction by $60\text{MeV/u } ^{18}\text{O}$ ions bombardment of natural uranium. Thorium was radiochemically separated from the mixture of uranium and reaction products. ^{238}Pa as a daughter nucleus of ^{238}Th has been identified according to the growth and decay of ^{238}Pa γ rays which has been observed. The half-life of ^{238}Th was determined to be (9.4 ± 2.0) min. At the same time, a new γ ray of (89.0 ± 0.3) keV with $T_{1/2} = (8.9 \pm 1.5)$ min was found in the γ spectrum gated with the K_{α_1} X ray of Pa and assigned to ^{238}Th decay based on the measurements of its transition energy and the half-life.

Key word new isotopes, multinucleon transfer reaction, radiochemical separation, growth and decay

Received 18 September 1998

* Project 19775055 supported by National Nature Science Foundation of China and supported by Chinese Academy of Sciences