

重丰中子核 ^{237}Th 半衰期的测量*

袁双贵 杨维凡 徐岩冰 何建军

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 通过60MeV/u的 ^{18}O 离子束轰击天然铀靶,利用多核子转移反应并由放射化学分离方法准备了 ^{237}Th 源.鉴别了 ^{237}Th 的存在,测得它的半衰期为 $(4.69 \pm 0.60)\text{min}$.这个新的值不仅与我们较早获得的 $(5.0 \pm 0.9)\text{min}$ 值一致,而且提高了实验精度.

关键词 半衰期 精度 多核子转移反应 放射化学分离

重丰中子同位素的合成和研究,不仅可对远离 β 稳定线同位素核结构、核衰变性质,尤其是奇异性质的研究提供非常有用的数据,而且对天体物理具有重要价值^[1,2].另外,半衰期是核物理中最基本的数据之一,在基础研究、理论计算和许多应用中,这一数据是必须的,特别是在宇宙中重元素的合成和银河系年代的测定等起着举足轻重的作用^[3,4].

1992年,首次鉴别了新核素 ^{237}Th ,并测定其半衰期为 $(5.0 \pm 0.9)\text{min}$,在该实验中, ^{237}Th 是由14MeV中子轰击天然铀靶,通过 $^{238}\text{U}(n, 2p)^{237}\text{Th}$ 反应来生成的^[5].近年来一些研究工作表明,使用尽量丰中子的中能重离子束流轰击丰中子重靶核(厚靶),通过多核子转移反应,从类靶余核中生成重丰中子核素的新的奇异反应机制来产生目标核,是产生这一核区尽可能丰中子核素的最有效的手段之一^[6-10].为了验证上述 ^{237}Th 的鉴别是否正确,同时尽可能提高寿命测量的精确度,在本工作中,利用中能(60MeV/u) ^{18}O 离子束轰击天然铀靶(^{238}U),通过多核子转移反应,即 $^{238}\text{U} - 2p + 1n$ 而产生了 ^{237}Th .通过母子体衰变关系获得了 ^{237}Th 的半衰期.

利用我所重离子加速器(HIRFL)提供的60MeV/u的 ^{18}O 离子束流完成照射.为了增加靶中铀的含量,将市售硝酸铀酰转化为重铀酸铵,靶为厚 1.5g/cm^2 的 $(\text{NH})_2\text{U}_2\text{O}_7$ 粉末.每个靶持续照射15min,用法拉第筒监测束流的变化, ^{18}O 离子束流的强度为30—40.束流停止后,使用自动辐照传输系统(跑兔装置)将辐照过的铀靶传送到30m远的放化实验室,在那里进行钍的放射化学分离.将跑兔管中的重铀酸铵粉末倒入一个含5.0mL预热过的稀 HNO_3 的小烧杯中,并不断搅拌.待靶粉末溶解完毕后,立即将此溶液转入含等体积的0.05mol/L PMBP-苯的分液漏斗中,做钍的液-液萃取分离.PMBP-苯萃取分离钍的化学流程在别处已经描述过了^[11].最后制成钍固体样品源,用于 γ 射线测量.整个分离流程完

* 国家自然科学基金(19775055),国家重点基础研究发展规划(G2000077400)和中国科学院支持资助

成后,钍的最终化学回收率大约为 70%。

紧跟化学分离,在照射结束约 10min 后,用一台效率为 40% 的 HPGe 探测器对化学分离的钍样品源做 γ 射线单谱的时间序列谱测量. HPGe 探测器对 ^{60}Co 1332.5keV γ 射线的能量分辨为 2.1keV. 测量数据储存在微机磁盘中. 用微机解谱程序对测得的 γ 射线单谱数据进行分析. 根据 γ 射线的能量、强度以及半衰期,对核素进行指定. 对有母体来源的核素,利用递次衰变程序对它的 γ 活性的生长-衰变实验数据进行拟合分析,从而指定核素并确定它们的半衰期. 为了增加计数统计,满足测定 ^{237}Th 的半衰期的需要,上述过程重复进行了 120 次.

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 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 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 853.7 和 865.0keV 两条 γ 射线(图 1)的能量、相对强度和半衰期^[12]的分析,指定了它们来自于 ^{237}Pa 的衰变. 仔细跟踪了 853.7keV 的 γ 射线(图 2),它们的生长和衰变行为表明, ^{237}Pa 的活性来源于 ^{237}Th 的 β 衰变.

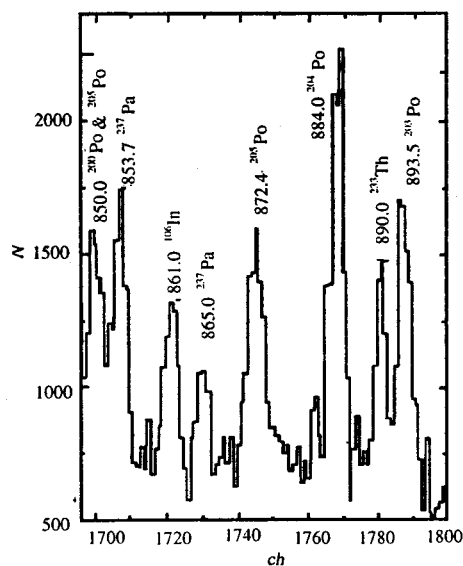


图 1 测得的部分 γ 射线谱

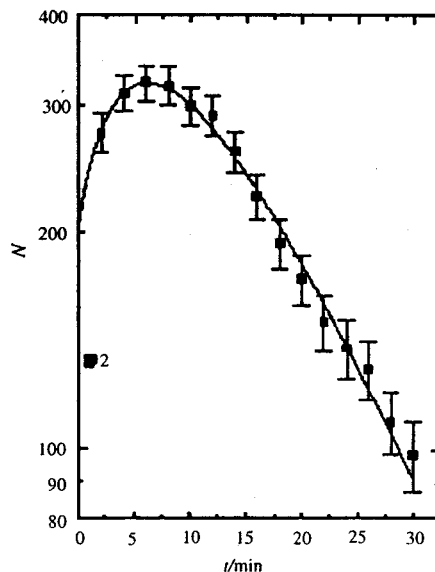


图 2 853.7 keV γ 射线的生长、衰变曲线

利用递次衰变程序拟合图 2 中的实验数据,提取出 ^{237}Th 和 ^{237}Pa 的半衰期分别是 $(4.69 \pm 0.60)\text{min}$ 和 $(8.60 \pm 0.70)\text{min}$,后者同 ^{237}Pa 的文献值很好地一致^[12],前者同我们先前在首次鉴别 ^{237}Th 时所测得的 $(5.0 \pm 0.9)\text{min}$ 的半衰期符合得很好^[5],而且同质子-中子

准粒子随机相近似方法(QRPA)(考虑了 Gamow-Teller 剩余相互作用,利用 Moeller-Nix 的质量公式进行计算)的预言值符合得也非常好^[13].

半衰期的测量可对检验各种预言核寿命的理论提供了有价值的实验数据,为了进行实验值和理论值的比较,把我们近年来完成的一些远离 β 稳定线重丰中子同位素的半衰期实验值以及 3 种不同的理论计算值列于表 1 中.

表 1 实验值与不同理论预言值的比较

| 同位素 | 实验值(min) | 预言值(min) | | | | |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|--------|---------|---------------------|------------------------------|
| | | QRPA ^[13] | | | TDA ^[16] | Gross Theory ^[17] |
| | | Hilf | Groote | Moeller | | |
| ¹⁸⁵ Hf | 3.5 ± 0.6 ^[14] | 9.7 | 12.8 | 3.4 | 1.2 | 4.0 |
| ¹⁸⁶ Hf | 2.6 ± 1.2 ^[8] | 7.3 | 9.4 | 2.3 | 0.5 | 10 |
| ²³⁷ Th | 5.0 ± 0.9 ^[5] | 3.7 | 6.5 | 5.2 | 1.1 | 3 |
| | 4.69 ± 0.60 (本工作) | | | | 1.1 | 3 |
| ²³⁸ Th | 9.4 ± 2.0 ^[10] | 9.5 | 26.5 | 9.3 | 2.6 | 15 |
| ²³⁹ Pa | 106 ± 30 ^[7] | 3.1 | 370.0 | 6.8 | 4.6 | 5 |
| ¹⁷⁵ Er | 1.2 ± 0.3 ^[15] | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 1.0 |

表中 Hilf, Groote, 和 Moeller 分别代表利用 Hilf 等, Groote 等, 和 Moeller 等的质量公式计算的半衰期.

从表 1 可以看出,全部实验半衰期都支持 QRPA 理论.进而发现,在整个重质量丰中子区,绝大部分核的半衰期实验值与 QRPA 理论预言值的符合都好于其他两种理论.这是完全合理的,在 QRPA 理论的计算当中,利用了从具有 Gamow-Teller 剩余相互作用的质子-中子准粒子无规相近似得到的 β 强度函数这一比较逼真的微观描述.加之,考虑了经 BCS 模型处理的对关联、自旋-同位旋基态关联.

感谢兰州重离子加速器全体工作人员在实验中的有效合作和全力支持.

参考文献(References)

- 1 Rohozinski S G. Rep. Prog. Phys. , 1989, 51:541
- 2 Cowan J J, Thielemann F K, Truran J W et al. Phys. Rep. , 208:267
- 3 Thielemann F K, Metzinger J, Klapdor H V. Z. Phys. , 1983, A309:301
- 4 Klapdor H V. Fortschr Phys. , 1985, 33:1
- 5 YUAN Shuang-Gui, ZHANG Tian-Mei, XU Shu-Wei et al. Z. Phys. , 1993, A346: 178
- 6 ZHANG Li, JIN Gen-Ming, ZHAO Jin-Hua et al. Phys. Rev. , 1994, C49: R592
- 7 YUAN Shuang-Gui, YANG Wei-Fan, MOU Wan-Tong et al. Z. Phys. , 1995, A352 : 235
- 8 YUAN Shuang-Gui, YANG Wei-Fan, LI Zhong-Wei et al. Phys. Rev. , 1998, C57:1506
- 9 ZHANG Li, ZHAO Jin-Hua, ZHENG Ji-Wen et al. Eur. Phys. J. , 1998, A2:5
- 10 HE Jian-Jun, YANG Wei-Fan, YUAN Shuang-Gui et al. Phys. Rev. , 1999, C59:5
- 11 XIONG Bing, YANG Wei-Fan, YUAN Shuang-Gui et al. Isotope, 1999, 12:1 (in Chinese)
(熊兵, 杨维凡, 袁双贵等. 同位素, 1999, 12:1)
- 12 Browne B. Nuclear Data Sheets, 1989, 49:181
- 13 Staudt A, Bender E, Muto K et al. At Data and Nucl Data Tables, 1990, 44: 79
- 14 YUAN Shuang-Gui, ZHANG Tian-Mei, PAN Qiang-Yan et al. Z. Phys. , 1993, A346:187
- 15 ZHANG Xue-Qian, YUAN Shuang-Gui, YANG Wei-Fan et al. Z. Phys. , 1995, A353:353
- 16 Klapdor H V, Metzinger J, Oda T. At. Data Nucl. Data Tables, 1984, 31:81
- 17 Takahashi K, Yamada M, Kondah T. Data Nucl. Data Tables, 1973, 12:101

Half-Life Measurement of Heavy Neutron-Rich Nuclide $^{237}\text{Th}^*$

YUAN Shuang-Gui YANG Wei-Fan XU Yan-Bing He Jian-Jun

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

Abstract Sources of ^{237}Th has been prepared via a multinucleon transfer reaction by $60\text{MeV}/\text{u}^{18}\text{O}$ ions bombardment of natural uranium followed by radiochemical separation. The isotope ^{237}Th has been identified. The half-life of ^{237}Th was determined to be (4.69 ± 0.60) min. Not only the new value is in agreement with the earlier one of (5.0 ± 0.9) min obtained in our previous work, but also its experimental precision was improved.

Key words half-life, precision, multinucleon transfer reaction, radiochemical separation

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775055), Major State Basic Research Development Program(G2000077400) and The Chinese Academy of Sciences