

^{230}U 重离子衰变的观测*

潘强岩 袁双贵 杨维凡 李宗伟 马桃桃
郭俊盛 刘明义 刘洪业 徐树威 甘再国

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

孔登明 乔际民 罗紫华 张沐天 王书鸿

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 利用 35MeV 的质子束轰击 ThO_2 粉末靶, 通过 $^{232}\text{Th}(p, 3n)$ 反应产生 ^{230}Pa 核, 经用放射化学方法分离出 ^{230}Pa 核并制成 $^{230}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{230}\text{U}$ 测量源. 用聚乙烯对苯二酸酯固体核径迹探测器记录其发射的重离子径迹. 经 248 天的收集, 观测到了两个 $^{230}\text{U} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{22}\text{Ne}$ 衰变事件, 相对于 α 衰变的分支比 $B = \lambda_{\text{Ne}} / \lambda_{\alpha}$ 为 $(1.3 \pm 0.8) \times 10^{-14}$.

关键词 聚乙烯对苯二酸酯固体核径迹探测器 化学蚀刻 重离子衰变 相对分支比

1 引言

80 年代初, A. Sandulescu^[1]和卢希庭^[2]等预言某些重原子核可能存在重离子衰变. 原子核的重离子衰变是指原子核一分为二的两体过程中, 衰变体之一的质量数介于 α 粒子和重核自发裂变碎片之间. 很显然, 它架起了 α 衰变和重核自发裂变过程的桥梁, 对核结构理论模型的发展具有十分重要的意义. 因此, 自 80 年代以来, 重离子衰变的理论研究十分活跃, 指导实验研究获得成功并不断地取得进展.

首次观测到重离子衰变是由英国牛津大学 H.J. Rose 等^[3]于 1984 年完成的. 他们利用 $\Delta E-E$ 望远镜测量了处于平衡状态下的 ^{227}Ac 源. 经 383 天的观测得到了 19 个 ^{223}Ra 发射量为 29.9MeV 的 ^{14}C 重离子, 相对于 ^{223}Ra 的 α 衰变的分支比为 $(8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$. 这一重要发现很快由 S. Gales 等^[4]用磁谱仪去除强 α 本底干扰的方法所证实. 自此以后, 美、俄、英、法、意和西欧中心等诸多著名的实验室都很快投入寻找其它核素的重离子衰变研究工作中. 图 1 给出了迄今为止所发现的重核区 19 个重离子 (^{14}C 、 ^{20}O 、 ^{23}F 、 $^{24, 25, 26}\text{Ne}$ 、 $^{28, 30}\text{Mg}$ 和

1998-09-04 收稿

* 国家自然科学基金资助项目 19405006、中国科学院留学回国人员择优基金和中国科学院“九·五”重大项目资助

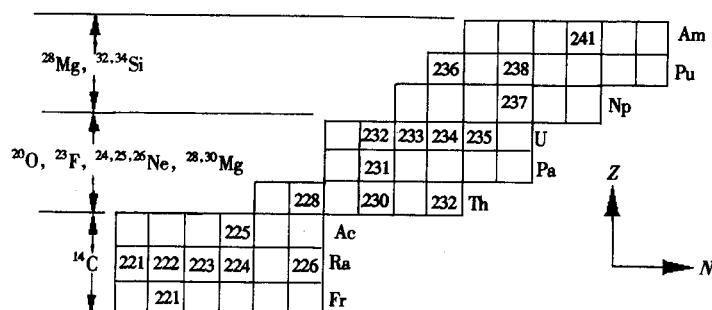


图1 观测到的19个重离子衰变体的分布
右边标明了所发射的重离子种类。

$^{32,34}\text{Si}$)的衰变体。其中 ^{223}Ra 的 ^{14}C 衰变精细谱学的发现^[5]是重离子衰变研究中又一新的里程碑,使人们确信重离子衰变是研究其形变发射体核结构的重要工具,它有助于人们对这些形变核基态组态结构的确认。在核素图上,另一个重离子衰变的发射体核岛有可能是位于 $Z=56-64$ 的缺中子区^[6]。俄国Dubna^[7]和德国GSI^[8]曾分别于1994和1995年报道了观测到 ^{114}Ba 的 ^{12}C 衰变,但此结果被德国GSI^[1]的新一轮实验所否定。

处理重离子衰变的理论模型可分为两大类型:集团模型和统一模型。前者是基于量子力学的位垒穿透理论,认为重离子衰变类似于 α 衰变。像 α 粒子一样,重离子集团具有一定的形成几率存在于发射体中。在保持体系的体积不变的前提下,集团具有一定的特征频率穿透核势阱和库仑位垒并产生衰变。后者将 α 衰变、重离子衰变和自发裂变三种模式认为是相类似的过程。母核将通过自发形变并克服库仑位垒和核势而分裂成二块碎片。在分裂过程中,由于两体质量的不对称程度而导致了 α 衰变、重离子衰变和自发裂变这三种不同的模式。目前,这两种模型均在不同程度上(但不能精确、完整地)解析所得到的有关 α 衰变、重离子衰变和自发裂变的实验结果。因此获得更多的有关重离子衰变的实验数据是十分必要的。本文报道了 ^{230}U 的 ^{22}Ne 衰变的测量结果。

2 实验过程

2.1 $^{230}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{230}\text{U}$ 测量源的制备及其强度(原子核数目)的测量

辐照过程是在中国科学院高能物理研究所完成的。利用流强约为 $3.5\mu\text{A}$ 和能量为 35MeV 的质子束轰击厚度为 $2\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ThO_2 粉末靶,通过 $^{232}\text{Th}(p, 3n)$ 反应产生目标核 ^{230}Pa 。辐照过程共进行了4次,累计有效辐照时间为100小时。

为了减少辐照剂量,停束后约6小时卸下靶进行化学分离以去除靶物质和裂变产物。靶子首先放在 $0.05\text{mol}/\text{l}$ 的 HF 和浓 HNO_3 的混合液中加热溶解进行放化分离和纯化并做成 $^{230}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{230}\text{U}$ 测量源。将聚乙烯对苯二酸酯固体核径迹探测器(简称lavsan探测器)紧贴在测量源上记录目标核所发射的重离子集团。

1) Guglielmetti A et al. GSI-Preprint-97-58, October 1997

实验共进行了 4 次辐照, 做成 6 个 $^{230}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{230}\text{U}$ 测量源. 由于源的强度相当强, 在源距探测器为 1.5m 的几何条件下, γ 探测器被高计数率所阻塞. 因此样品要经过 6 个月的冷却后, 再对它们的相对强度和绝对强度进行测量. 本实验选取了能量为 898.7、918.5、1009.6 和 1026.1keV 4 条清晰(无重叠和无沾污)的 ^{230}Pa γ 射线来刻度样品源的相对强度. 图 2 是测得的其中一个样品的 γ 能谱. 根据 γ 射线的能量及其相对强度指定了这些 γ 射线的发射体. 从图中可清楚地看出, 在反应过程中除了存在少数由裂变所产生的核素(如 ^{131}I 、 ^{132}Te 、 ^{141}Ce 等)和弱的个别近靶产物(^{233}Pa)以外, 目标核 ^{230}Pa 是样品源中最强的. 在进行绝对强度的测量时, 我们用已知强度的 γ 标准源刻度的 HPGc 探测器的相对效率. 这样, 样品源的绝对强度就可以根据 γ 标准源的强度和 HPGc 探测器的相对效率曲线得到, ^{230}Pa 的原子核数目共有 $(3.0 \pm 0.1) \times 10^{15}$ 个.

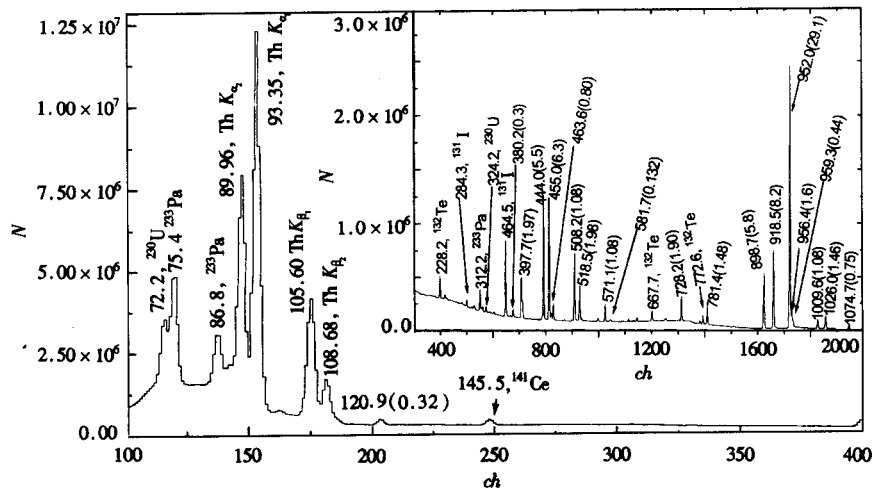


图2 测得样品源的 γ 能谱(能量单位为 keV)

未标明核素的 γ 射线均为 ^{230}Pa 的衰变 γ , 括号中的数据为分支比, 插图为能谱的高能部分.

2.2 固体径迹探测器的蚀刻和重离子径迹的观测与分析

经过 248 天, 即约 ^{230}Pa 的 14.2 个半衰期后, 取下 lavsan 探测器. 将探测器用蒸馏水冲洗干净后浸泡在浓度为 6.25mol/l 和 70℃ 的恒温 NaOH 蚀刻溶液中进行化学蚀刻, 每隔 10 分钟搅拌一次. 经 2 小时的化学蚀刻后取出 lavsan 探测器, 并用蒸馏水冲洗数次置于干燥器中. 详细的化学蚀刻条件和过程见参考文献 [9].

用一台德国产的 600 倍光学显微镜观测固体核径迹探测器所记录的重离子径迹. 经过仔细地观测和辨认, 共确认了两个由 ^{230}U 所发射的重离子集团的径迹, 其中径迹的照片如图 3(a, b) 所示. 本实验首先根据所观测到径迹的立体几何形状及其大小的明显差异来区分重离子集团径迹和本底(如探测器的缺陷、 α 和宇宙射线); 其次, 在 ^{230}Pa 的原子核数目为 $(3.0 \pm 0.1) \times 10^{15}$ 个的强度下, 其衰变系的 17 个核中, 可观测到的重离子径迹唯有 ^{222}Ra 和 ^{230}U , 它们分别发射 $^{14}\text{C}^{(10)}$ 和 ^{22}Ne 重离子. 其中 ^{222}Ra 发射 ^{14}C 的几率要比 ^{230}U 发射 ^{22}Ne 大 5 个数量级, 但它们的径迹口径的大小是完全不同的. 图 3 中所看到的密度较高的本底就

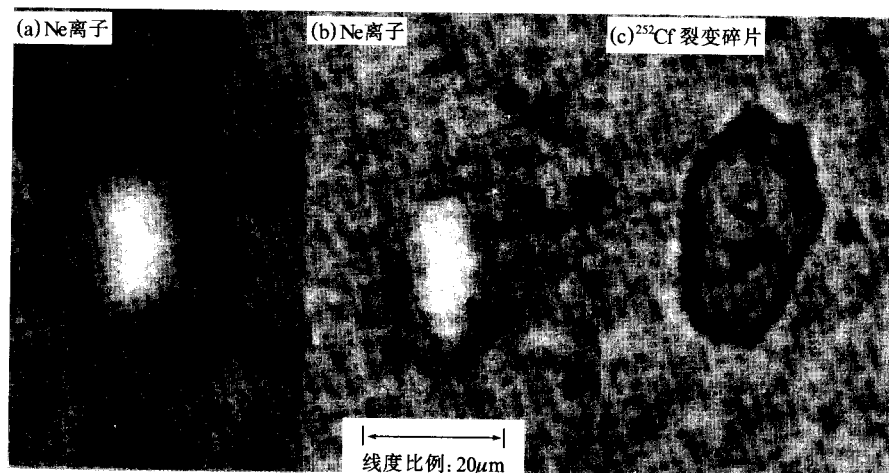


图3 观测到的两个Ne离子径迹(a)、(b)和²⁵²Cf的自发裂变碎片的径迹(c)
线度比例标在图中。

是由²²²Ra发射¹⁴C和高强度的 α 射线所产生的。实验选取了蚀刻Ne离子径迹的最佳条件,使¹⁴C和Ne离子的径迹大小有明显差异。尽管探测器中有约 10^5 个¹⁴C的径迹,与强 α 粒子一起造成了辨认Ne离子径迹的本底。这里应该指出的是lavsan固体核径迹探测器具有特殊的记录性能,对 $Z \leq 6$ 的离子记录不灵敏,这在我们的附加实验和条件实验中得到了验证。但是,在受到高强度($\geq 10^{14-15}$ 个/cm²)的 α 粒子的轰击时,lavsan探测器也能记录 α 粒子并造成本底。另外,本实验还用lavsan探测器收集了²⁵²Cf的裂变碎片,如图3(c)所示。这同样品中所观测到的两个径迹的大小、射程和形状都具有显著的区别。排除了其它一切可能外,所观测到的重离子唯有²³⁰U衰变的结果。从理论^[6]上可知,它应具有 $^{230}\text{U} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{22}\text{Ne}$ 的形式。

3 结论

通过 $^{232}\text{Th}(p, 3n) ^{230}\text{Pa}$ 反应和放射化学方法制备了 $^{230}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{230}\text{U}$ 测量源。利用聚乙烯对苯二酸酯固体核径迹探测器观测到了第20个重离子发射体,即 $^{230}\text{U} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{22}\text{Ne}$ 衰变事件。相对于 α 衰变的分支比为 $(1.3 \pm 0.8) \times 10^{-14}$,部分寿命为 $4.4 \times 10^{12}\text{A}$ 。

作者感谢中国科学院近代物理研究所刘昌龙博士为本实验提供的显微镜和刘利文先生在照片冲洗上给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Sandulescu A, et al. Sov. J. Part. Nucl., 1980, 11:528—532
- 2 Lu Xiting. Nucl. Phys. (in Chinese). Beijing Atomic Energy Press, 1981, 92
(卢希庭. 原子核物理. 北京: 原子能出版社, 1981, 92)
- 3 Rose H J, Jones G A. Nature (London), 1984, 307:245

- 4 Gales S et al. Phys. Rev. Lett., 1984, **53**:759—762
- 5 Hussonnois M, Ardisson G. Z. Phys., 1994, **A349**:311—314
- 6 Poenaru D N et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1991, **48**:231—327
- 7 Oganessian Yu Ts et al. Z. Phys., 1994, **A349**:341—342
- 8 Guglielmetti A et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:740—743
- 9 Li Zongwei, Liu Hongye, Pan Qiangyan et al. Nucl. Tech. (in Chinese), 1998, **21**(6):340—343
(李宗伟, 刘洪业, 潘强岩等. 核技术, 1998, **21**(6):340—343)
- 10 Price P B, Stevenson J D, Barwick S W. Phys. Rev. Lett., 1985, **54**(4):297—299

Observation of Heavy Cluster Emission From Radioactive ^{230}U Nuclei *

Pan Qiangyan Yuan Shuanggui Yang Weifan Li Zongwei Ma Taotao
Guo Junsheng Liu Mingyi Liu Hongye Xu Shuwei Gan Zaiguo

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

Kong Dengming Qiao Jimin Luo Zihua Zhang Mutian Wang Shuhong

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of sciences, Beijing 100039*)

Abstract ^{230}Pa was produced with the reaction $^{232}\text{Th}(p, 3n)^{230}\text{Pa}$ in the irradiation powder targets of ThO_2 with 35 MeV proton beam. Sources of $^{230}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^-} ^{230}\text{U}$ were prepared by radiochemical method. Using solid-state track registration detectors, two events of ^{230}U decay with heavy cluster emission have been observed. The preliminary branching ratio to α -decay comes out to be $B = \lambda_{\text{nc}}/\lambda_{\alpha} = (1.3 \pm 0.8) \times 10^{-14}$.

Key words polyethylene-terephthalate (lavsan) solid-state track registration detector, chemical etching, decay of heavy cluster, branching ratio

Received 4 September 1998

* Project 19405006 supported by National Science Foundation of China, the foundation of the Chinese Academy of Sciences for the researcher returned back from abroad, and the Chinese Academy of Sciences