

^{239}Pa 的鉴别及其特性

袁双贵, 丁华杰, 徐岩冰, 杨维凡

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 利用 60 MeV/u ^{18}O 离子束轰击天然铀靶, 经多核子转移反应生成重丰中子核素 ^{239}Pa 。用放射化学方法从被照射的靶中分离出镤。借助于 ^{239}Pa 和它的子体 ^{239}U 的 γ 射线观测和分析, 鉴别了 ^{239}Pa , 测得 ^{239}Pa 的半衰期为 (106 ± 30) min。长寿同位素, 如 ^{232}Th 和 ^{238}U , 可给出一个测定核合成持续时间的可能性, 而中等寿命同位素, 如 ^{235}U , 则可给出有关产生函数时间历史的信息。总地说来, 通过 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 或 $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ 的比率, 用公式 $N_A(\Delta)/N_B(\Delta) = (P_A/P_B)f(\lambda_A, \lambda_B, S_0, \lambda_R, \Delta)$ 便可推导出宇宙年龄。由 ^{239}Pa 的衰变途径, 可简单叙述 ^{239}Pa 的异常长的半衰期对于宇宙年龄估计的影响。

关键词: 鉴别; ^{239}Pa ; 宇宙年龄

中图分类号: O571.324

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0001-03

Identification and Characteristic of ^{239}Pa

YUAN Shuang-gui, DING Hua-jie, XU Yan-bing, YANG Wei-fan

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

Abstract: A nuclide ^{239}Pa was produced via a multinucleon transfer reaction by 60 MeV/u ^{18}O ions bombardment of natural uranium. Protactinium was radiochemically separated from the irradiated targets. ^{239}Pa has been identified by using observation and analysis of γ -rays of ^{239}Pa and ^{239}U as a daughter nucleus of ^{239}Pa . The half-life of ^{239}Pa was determined to be (106 ± 30) min. Long lived isotopes like ^{232}Th and ^{238}U give a possibility of determining the duration of nucleosynthesis whereas intermediate lived nuclei like ^{235}U can give information about the time history of the production function. Generally the universe age is deduced through the ratios of the $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$, $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ or $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ with formular $N_A(\Delta)/N_B(\Delta) = (P_A/P_B)f(\lambda_A, \lambda_B, S_0, \lambda_R, \Delta)$. The influence of the novel long half-life of ^{239}Pa on the universe age estimate is simply mentioned by ^{239}Pa decay path.

Key words: identify; ^{239}Pa ; universe age

新核素的合成和研究不仅具有重要学术价值, 而且具有广阔的应用前景, 是国际原子核物

理的前沿领域。新核素是指人工合成而先前未知的核素。据核理论计算, 核素达 6 000~8 000

种。自 1934 年约里奥 (F. Joliot) 和居里 (I. Curie) 发现人工放射性以来, 世界上已人工合成和鉴别了 2 000 多种不稳定核素, 并发现大量新现象。

产生极端条件下的原子核并研究它们的奇异衰变和核结构性质是当今核物理科学发展的前沿领域之一, 而研究中子数和质子数之比具有极端值的原子核, 已成为国际核物理学界关注的热点课题, 其中, 重质量丰中子区是具有挑战性的核区。因此, 该核区远离 β 稳定线核素的合成和研究, 必将不断揭示出新的现象和规律, 对进一步了解远离 β 稳定线核 (简称远离核) 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, 并推动与之有关的天体物理、原子物理、核化学和放射化学等学科的进步发挥非常重要的作用。

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, 特别是它在宇宙中重元素的合成和银河系年代的测定等中起着举足轻重的作用。因此, 半衰期的测定一直是人们非常关心的课题。

1 实验

对于重质量丰中子区的核, 尤其是远离核, 由于产生截面很低, 所以, 选择一种以足够高产生率生成目标核的有效反应对于产生远离核至关重要。早在 1969 年, A. G. Artukh 等^[1]首次报道了通过多核子转移反应 (MNTR) 产生丰中子同位素的可能性。以后的一些实验结果表明, 在 MNTR 中, 使用较丰中子的弹和靶核以及适当高的入射能量有助于重丰中子核的产生^[2-6]。另外, 在中能重离子碰撞中, 重靶的耗散碎裂也可产生重丰中子核。此外, 该区域远离核的分离和鉴别同样存在着巨大的技术上的困难, 必须建立相应的特殊分离鉴别装置。利

用如图 1 所示的实验方案完成了对²³⁹Pa 的观测。在兰州重离子加速器 (HIRFL) 上用 60 MeV/u ¹⁸O 离子照射天然铀靶, 通过²³⁸U 和¹⁸O 之间的多核子转移反应 (²³⁸U - 1p + 2n 反应) 及²³⁸U 的耗散碎裂生成了先前未知的同位素²³⁹Pa。每照射靶 4 h 后, 在放射化学实验室, 用化学分离方法从铀和反应产物的混合物中分出活性 Pa, 并制成 γ 测量源, 借助于 HPGe 探测器, 对源进行 γ 单谱及符合谱测量 4 h。为增加计数统计, 上述过程重复进行多次。

2 实验结果

由对²³⁹Pa 及其子体²³⁹U 衰变 γ 线的观测和分析表明, 生成和鉴别了²³⁹Pa, 并测定其半衰期为 (106 ± 30) min。同时, 还观察到²³⁹Pa 的能量分别为 (522.0 ± 0.5)、(562.0 ± 0.5)、(638.5 ± 0.5)、和 (681.5 ± 0.5) keV 的 4 条衰变 γ 射线。一般而言, 同一种元素的放射性同位素的寿命随远离 β 稳定线而减小。对于丰中子边, 核的寿命随质量数的增加而减小。但测得的²³⁹Pa 的半衰期却是异常的, 即它比²³⁹Pa 前面的几个核的半衰期^[7] (²³⁵Pa, 24.5 min; ²³⁶Pa, 9.1 min; ²³⁷Pa, 8.7 min; ²³⁸Pa, 2.3 min) 都长得多, 这个异常长的半衰期可能会影响到利用核宇宙年代学来进行的宇宙年龄的确定。

3 ²³⁹Pa 的半衰期对于宇宙年龄估计的影响

在天体 r 过程中, 产生一些寿命特别长的核素, 如²³²Th ($T_{1/2} = 1.405 \times 10^{10}$ a) 和²³⁸U ($T_{1/2} = 4.46 \times 10^9$ a), 可与宇宙年龄相比拟, 因而, 可给出一个测定核合成持续时间的可能性, 用来作为宇宙时钟。而中等寿命同位素, 如²³⁵U ($T_{1/2} = 7.038 \times 10^8$ a), 则可给出有关产生函数时间历史的信息^[8-10]。借助于宇宙演化模型, 由 $N_A(\Delta)/N_B(\Delta) = (P_A/P_B)f(\lambda_A, \lambda_B, S_0,$

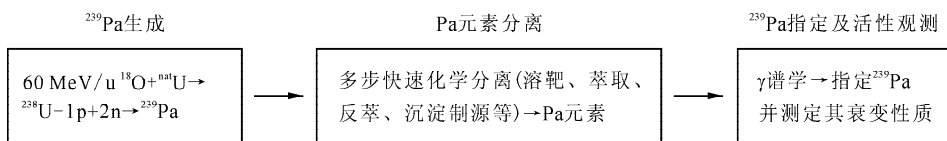


图 1 ²³⁹Pa 的生成方法、分离技术和鉴别手段

Fig. 1 Means of production, separation, and identification on ²³⁹Pa

λ_R, Δ) 能够计算宇宙年龄。式中: P_A/P_B 为 A 和 B 两种核素的合成比; N_A/N_B 为陨石形成时它们之间的丰度比; Δ 为核素合成所持续的时间; S_0 为初始时刻的丰度; λ_A, λ_B 为 A、B 核的生成几率, λ_R 为几率常数, 取 $\lambda_R = 0$, 即假定了一个恒定的有效核素合成率。可见, P_A/P_B 计算的准确性直接影响宇宙年龄测定的准确度。

通常选取重计时对 ($^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 或 $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$) 的核宇宙年代学来进行宇宙年龄的估计, 这 3 个比值均与 ^{238}U 相关。所以, 正确估计经 r 过程生成 ^{238}U 的量具有重要意义。 ^{239}Pa 寿命的长短对 ^{238}U 合成的影响示于图 2。从 ^{239}Pa 可经过两条途径生成 ^{238}U , 一是由 β^- 衰变到 ^{239}U , 再经光致反应生成 ^{238}U ; 二是 ^{239}Pa 经 r 过程到 ^{240}Pa , 再由 β^- 衰变到 ^{240}U , 然后, 经两次光致反应, 最后生成 ^{238}U 。如此看来, 由 ^{239}Pa 生成 ^{238}U 的量与 r 过程紧密相关。显然, ^{239}Pa 的半衰期越长, r 过程所占的权重则越大, β^- 衰变所起的作用则越小。因此, 所测得的 ^{239}Pa 异常长的半衰期可能会影响利用重计时对的核宇宙年代学来进行的宇宙年龄的计算。

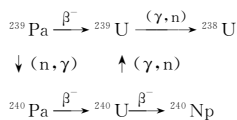


图 2 由 ^{239}Pa 生成 ^{238}U 的示意图

Fig. 2 Scheme of producing ^{238}U through ^{239}Pa

4 结语

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。在合成和鉴别远离核的实验中, 测定 ^{239}Pa 的半衰期为 (106 ± 30) min。注意到利用重计时对的核宇宙年代学来进行宇宙年龄估计的方法, 由 ^{239}Pa 的衰变途径的分析表明, ^{239}Pa 的异常长的半衰期对于宇宙年龄估计可能产生一定的影响。

参考文献:

- [1] ARTUKH A G, GRIDNEY G F, MIKHEEV V L, et al. New isotopes ^{22}O , ^{20}N and ^{18}C produced in transfer reactions with heavy ions[J]. Nucl Phys, 1969, A137(2): 348-352.
- [2] RYKACZEWSKI K, GIPPERT K L, KAFRELL N, et al. Investigation of neutron-rich rare-earth nuclei including the new isotopes ^{177}Tm and ^{184}Lu [J]. Nucl Phys, 1989, A499(3): 529-545.
- [3] RUNTE E, SCHMIDT W D, ESCHNER W, et al. The decay of the new isotope ^{180}Yb and the search for the r-process path to ^{180m}Ta [J]. Z Phys, 1987, A328(1): 119-122.
- [4] RYKACZEWSKI K, KIRCHNER R, KURCOWING W, et al. The new neutron-rich isotope ^{183}Lu [J]. Z Phys, 1983, A309(3): 273-274.
- [5] ZHANG Li, ZHAO Jinhua, ZHENG Jiwen, et al. Neutron-rich heavy residues and exotic multi-nucleon transfer[J]. Phys Rev, 1998, C58(1): 156-163.
- [6] HE Jianjun, YANG Weifan, YUAN Shuanggui, et al. Synthesis and identification of a new heavy neutron-rich isotope ^{238}Th [J]. Phys Rev, 1999, C59(1): 520-521.
- [7] REUS U, WESTMEIER W. Catalog of gamma rays from radioactive decay; Part II[J]. At Data Nucl Data Tables, 1983, 29(2): 193-406.
- [8] THIELEMANN F K, METZINGER J, KLAPDOR H V. Beta delayed fission and neutron emission: Consequences for the astrophysical r-process and the age of the galaxy[J]. Z Phys, 1983, A309(4): 301-317.
- [9] KLAPDOR H V. Beta decay far from stability and its role in nuclear physics and astrophysics[J]. Fortschr Phys, 1985, 33: 1-55.
- [10] KLAPDOR H V, ODA T, METZINGER J. The beta strength function and the astrophysical side of the r-process[J]. Z Phys, 1981, A299(3): 213-229.