

重丰中子核的一种特性

The Characteristic of Heavy Neutron-rich Nuclides

袁双贵/YUAN Shuang-gui,徐岩冰/XU Yan-bing,丁华杰/DING Hua-Jie,杨维凡/YANG Wei-fan

中国科学院近代物理研究所,兰州 730030

Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030, China

[摘要] 重丰中子核具有一种特殊的衰变性质,即 β -延发裂变。简单介绍这一衰变模式的基本过程,指出了它的研究意义和研究现状,扼要叙述我们的进展情况。

[关键词] 重丰中子核,特性, β -延发裂变

[中图分类号] O571.21

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)02-0005-02

Abstract: Heavy neutron-rich nuclides possess the characteristic, namely β -delayed fission. The basic process is simply introduced. The significance and actuality on its study is indicated. Our work on this field is essentialized.

Key Words: heavy neutron-rich nuclides, characteristic, β -delayed fission, study significance, progress status

CLC Number: O571.21

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)02-0005-02

极端条件下核的性质研究是核物理研究领域中的一个主要方向,同位旋自由度是核物理前沿最活跃的三个自由度之一,远离稳定线(新)核素的合成及其衰变性质尤其是奇异衰变性质的研究是核物理沿同位旋自由度的重要前沿领域,它不仅具有重要的学术价值,而且存在非常广阔的应用前景,世界上各主要实验室都对此极为重视,竞争非常激烈。

远离 β -稳定线的核总是表现出丰富多彩的奇异性质,在重质量丰中子区, β -延发裂变(β DF)现象就是其中之一。早在1969年,前苏联 Berlovich 和 Novikov 就预言,在远离 β -稳定线的重质量丰中子核区存在一个 β DF 岛^[1]。 β DF 是一个核衰变过程,一个这样的先驱核经 β -衰变,在它的子核中产生一个或几个激发态,这些态处于子核的裂变位垒之上,因而发生瞬发裂变。 β DF 过程可以表示为

$$(Z, N) \xrightarrow{\beta} (Z+1, N+1)^* \xrightarrow{\theta} \sum_i (Z_i, N_i)$$

这里, (Z, N) 是具有质子数 Z 和中子数 N 的裂变先驱核, (Z_i, N_i) 代表具有质子数 Z_i 和中子数 N_i 的核裂变产物,而星号表明中间核 $(Z+1, N+1)$ 处于激发态。该岛的范围由下面两个不等式(1)和不等式(2)来确定

$$T_{1/2}(\beta) \leq T_{1/2}(SF) \quad (1)$$

这里, $T_{1/2}(\beta)$ 和 $T_{1/2}(SF)$ 分别为裂变先驱核 -

衰变和自发裂变半衰期。

$$Q_{\beta}(Z, N \rightarrow Z+1, N-1) \geq B_f(Z+1, N-1) \quad (2)$$

这里, $Q_{\beta}(Z, N \rightarrow Z+1, N-1)$ 代表裂变先驱核的 β -衰变能, $B_f(Z+1, N-1)$ 代表其子核的裂变位垒高度。

β DF 提供一种用常规途径不可能实现的研究远离 β -稳定线核的可能性。比如, β DF 允许研究重丰中子核从激发态的裂变,这可以用来作为预言重丰中子核裂变性质的基础^[2,3]。 β DF 几率的测量提供一个裂变位垒结构的灵敏探针,因为裂变能级的几率(从而半衰期)指数地依赖于裂变位垒的大小^[3]。

β DF 在 r -过程中显得特别重要。由相继的中子捕获和衰变而形成的重元素的产生是一个重大的天体问题^[1,3-8]。在超新星爆炸中出现的 r -过程中,重元素的建立实际上被 β DF 所终止,因而,在自然界中不可能产生超重元素^[9]。所以, β DF 过程对解释观测到的重元素的同位素丰度以及在自然界中找不到超重元素能起到不可取代的作用^[5-7]。另外,利用通过重计时对 $(^{233}\text{Th}/^{238}\text{U}, ^{235}\text{U}/^{238}\text{U})$ 和 $(^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U})$ 的核宇宙年代学来进行的宇宙年龄的估计严重地依赖于 β DF 几率^[2,5-7]。

自20世纪80年代开始, Thielemann 和 Klapdor 等对该岛区域内核素的 β DF 几率的理论预言进行了探讨,并指出了它对

在 r -过程中重元素的产生和重同位素的丰度的建立所起的作用以及它对宇宙计时对产生的影响^[4-6]。

由于 β DF 研究的强大吸引力,也引起了实验核物理学家的浓厚兴趣。 β DF 理论是否正确,尤其是对于基态核是否成立给核物理学家提出了一个重要课题。多年来实验核物理学家一直在不懈探索,为从实验上证实 β DF 的理论预言而努力。世界上各有关实验室像美国的 LBL, 前苏联的 Dubna 和 Leningrad 核物理研究所以及德国的 GSI 和 Mainz 大学等都进行了这方面的工作。例如,前苏联 Leningrad 核物理研究所 Mezilev 等^[8]在 IRIS 质量分离器上,对 ^{228}Fr , ^{230}Fr , ^{232}Fr 和 ^{232}Ac 的 β DF 事件进行了搜索,没有观测到 β DF 碎片,只给出了它们的 β DF 几率上限分别为 2×10^{-7} , 3×10^{-6} , 2×10^{-6} 和 1×10^{-6} 。前苏联 Dubna 核研究所 Gangrskii 等^[2]报告了 ^{238}Pa 和 ^{236}Pa β DF 几率测定的实验结果分别为 6×10^{-7} 和 3×10^{-10} ,但之后被德国 Mainz 大学 Bass-May 等^[7]的实验否定。美国 Berkeley 实验室 Hall 等^[9]对 $^{256}\text{Es}^m$ 的 β DF 几率进行了观测,他们利用低能 (t,p) 转移反应产生了目标核,并通过化学分离和 β - γ , γ - γ 和 β -fission 关联技术对其进行了观测,得到它的 β DF 几率为 2×10^{-5} 。

β DF 这一研究方向引起了我们的高度关注,本小组也开展了这方面的工作^[9]。设

收稿日期: 2005-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(10575118)

作者简介: 袁双贵,男,甘肃省兰州市南昌路509号中国科学院近代物理研究所,研究员,主要研究方向为实验核物理;

E-mail: yuansg@impcas.ac.cn

法满足目标核的产额是一个十分严峻的问题。因为所预言的 β -延发裂变岛非常远离 β -稳定线,而现今的设备条件最多只能生成该岛左边界附近的核,其 β -延发裂变几率特别小,加之生成这个质量区的核的截面又格外低。我们之所以选择核 ^{230}Ac ,是从导致目标核总产额的产生和分离两大步骤来考虑的。就分离而言,放射化学分离方法是效率最高的一种分离技术,其化学产额可以达到 70% 以上,但它严重地受到时间的限制,不能适用于短寿命同位素,虽然 ^{230}Ac 的半衰期只有 122 s,不过我们直接产生的是 ^{230}Ra ,通过 $^{230}\text{Ra} \xrightarrow{\beta-} ^{230}\text{Ac}$ 得到 ^{230}Ac ,而 ^{230}Ra 的半衰期为 93 min,足够满足化学分离所需要的时间。就生成而言,选择一种能以足够高产生率生成目标核的有效反应是至关重要的。我们选择了奇异的中能重离子多核子转移反应和重靶的耗散碎裂这一奇异的反应机制,通过 $^{232}\text{Th}-2\text{p}$ 反应产生 ^{230}Ra ,再由 $^{230}\text{Ra} \xrightarrow{\beta-} ^{230}\text{Ac}$ 得到目标核 ^{230}Ac 。为检验这一想法,我们进行了模拟实验,即用 60 MeV/u ^{18}O 轰击天然铀靶,通过 $^{238}\text{U}-2\text{p}$ 产生了 ^{236}Th ,测量其生成截面为约 1 mb。用 $^{232}\text{Th}+^{18}\text{O}$ (60 MeV/u),通过 $^{232}\text{Th}-2\text{p}$ 反应

生成 ^{230}Ra 。用放射化学分离,从反应产物和钍的混合物中提取出 Ra 元素,再制成薄的 $^{230}\text{Ra} \xrightarrow{\beta-} ^{230}\text{Ac}$ 源,使用云母和 HPGe 探测器,分别对裂变碎片径迹和 γ 射线进行探测,找到了两个裂变事件。借助于 γ 谱的观测,经 β -延发裂变特性、衰变关系和 β -衰变系统学的分析表明,这两个裂变事件可以指定为 ^{230}Ac 的 β -延发裂变,并得到了它的 β -延发裂变几率为 $(1.19 \pm 0.85) \times 10^{-8}$,从实验上证实了基态 β -延发裂变的理论预言。

参考文献 (References)

- [1] BERLOVICH E YE, NOVIKOV YU N. Delayed nuclear fission [J]. Phys. Lett, 1969, B29: 155-156.
- [2] GANGRSKII YU P, MARINESCU G M., MILLER M B, et al. Delayed fission of neutron-rich protactinium isotopes[J]. Sov. J. Nucl. Phys, 1978, 27: 475-478.
- [3] HALL H L, GREGORICH K E, HENDERSON R A, et al. β -delayed fission from ^{256}Esm and the level scheme of ^{256}Fm [J]. Phys. Rev, 1989, C39: 1 866-1 875.
- [4] KLAPDOR H V, ODA T, METZINGER J. The beta strength function and the

astrophysical side of the r-process [J]. Z. Phys, 1981, A299: 213-229.

- [5] THIELEMAN 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: 301-317.
- [6] KLAPDOR H V. Beta decay far from stability and its role in nuclear physics and astrophysics [J]. Fortschr Phys, 1985, 33: 1-55.
- [7] BASS-MAY A, KRATZ J V, TRAUTMANN N. Absence of delayed fission in the β -decay of 2.3 min ^{238}Pa [J]. Z. Phys. 1985, A322: 457-462.
- [8] MEZILEV K A, NOVIKOV YU N, POPOV A V, et al. Search for delayed fission in neutron-rich nuclei [J]. Z. Phys, 1990, A337: 109.
- [9] YUAN SHUANGGUI, YANG WEIFAN, XU YANBING, et al. Search for β -delayed fission of the heavy neutron-rich isotope ^{230}Ac [J]. Eur. Phys. J, 2001, A10: 1-3.

(责任编辑 胡春华)

·封面文字说明·

美国宇航局成功向冥王星发射探测器

美国东部时间 2006 年 1 月 19 日下午 (北京时间 1 月 20 日凌晨),美国宇航局的“新地平线”(New Horizons)号探测器搭乘“宇宙神 5 号”火箭从卡纳维拉尔角空军基地成功发射升空。“新地平线”号从此开始其探索冥王星的漫漫旅程。

“新地平线”号是美国宇航局首架探测冥王星的探测器,在它之前,人类还从未向冥王星发射过探测器。冥王星是传统上的“九大行星”中唯一尚未被人类探测器造访过的行星。

自 1930 年天文学家汤博首先发现冥王星至今的 70 多年时间里,深藏在外太阳系黑暗地带之中的冥王星始终严守着它的秘密,人类对它的所有了解只需要一张便笺就能写完。汤博于 1997 年 1 月 17 日逝世,9 年之后的 1 月 17 日正是“新地平线”号计划中发射升空的日子,它携带了汤博的骨灰一同前往那遥远的地带。但由于天气原因“新地平线”号发射被迫推迟了 2 天。

“新地平线”号将花费 9 年的时间飞抵遥远的冥王星,对冥王星、它的卫星卡戎以及 2005 年新发现的 2 颗冥王星的卫星(S/2005 P1 和 S/2005 P2)展开科学考察。途中它将于 2007 年 2 月飞经木星,借助木星的引力进行加速;在抵达冥王星之前 5 个月,开始对冥王星系统进行观测,观测至少持续到它飞掠冥王星之后 9 个月。

“新地平线”号携带的 7 部探测仪器将对冥王星和卡戎的表面化学组成、地貌,冥王星可能存在的大气等进行考察。探测器获得的数据需要以光速传播 4.5 h 才能从冥王星传回地球,相比之下,距离我们 1.5 亿 km 的太阳发出的光芒只需要 8 分多钟就可达到地球。

在太阳系的大行星中,冥王星是一颗与众不同的成员。水星、金星、火星等大行星是拥有固体表面的类地行星;木星、土星、天

王星、海王星则是气态行星。科学家猜测,冥王星很可能既不是类地行星也不是气态行星,而是一颗“冰矮星”,因为它的表面虽为固态,但主要成分不是岩石,而是各种成分的冰。是否真的如此,有待“新地平线”号为我们解开悬念。

冥王星还因为历史原因保留着双重身份——既是一颗大行星,又是一颗柯伊伯带天体。由于汤博发现冥王星的时候,天文学家还不知道柯伊伯带的存在,才将这样一颗比月球还要小的天体归入了大行星的行列。现在,天文学家已经发现了超过 1 000 颗柯伊伯带天体,其中某些较大的成员也对冥王星的大行星地位提出了挑战(参见本刊 2005 年第 9 期《天文学家声称发现第十大行星》)。“新地平线”号此行也将会帮助人们更多地了解柯伊伯带的秘密。

在 2005 年,天文学家们在对冥王星的研究中做出了一些让人感到意外的发现,比如发现了两颗新卫星,发现了冥王星的表面温度比卡戎的还要低。9 年之后,“新地平线”号所打开的新视野无疑会给人们带来更多的意外。本期封面图片为“新地平线”号对柯伊伯带进行探测的艺术表现图,远处发出淡黄色光芒的天体是我们的太阳,近处有无数大小不一的冰冷的柯伊伯带天体。图片取自约翰·霍普金斯大学应用物理实验室网站。

(本刊记者 黄永明)

