

## 成果与应用

**编者按** 近代物理研究所的科研人员以创新性的物理思想和独特的技术路线,经过近十年的探索,在世界上首次合成和研究了汞-208 等 16 种新核素,占国际上同期同一核区合成和研究总数的一半以上,不但实现了我国在新核素合成领域零的突破,而且在这一前沿领域占有优势地位。以下对他们的工作做一简单介绍。

# 新核素合成和研究的丰硕成果\*

袁双贵 徐树威 张立 罗亦孝 靳根明

(近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 叙述了远离  $\beta$  稳定线新核素合成和研究的重要意义,介绍了新核素合成和鉴别技术路线及实验方法,报告了近代物理研究所在重质量丰中子区和稀土质子滴线区新核素合成和研究的情况。

**关键词** 新核素,合成,鉴别,优势地位

## 1 学术价值及应用前景

新核素的合成和研究不仅具有重要的学术价值,而且具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>,是国际原子核物理的前沿领域。能否合成新核素是衡量一个国家核物理研究水平的重要标志之一。

新核素是指人工合成的先前未知的核素。据核理论计算,核素总数可达 6 000—8 000 种。自 1934 年约里奥(Joliot F.)和居里(Curie I.)发现人工放射性以来,世界上已人工合成和鉴别了两千多种不稳定核素,并发现大量新现象。

核体系是集强、弱、电磁三种相互作用于一体的微观客体。目前人们对原子核的认识大部分来自  $\beta$  稳定线附近的几百个核素,主要通过  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射

线和裂变的研究而获得,并建立了一套核结构模型理论,如壳模型、液滴模型和集体模型等。而远离  $\beta$  稳定线的很多核,特别是接近中子滴线和质子滴线(核素图上核素最后一个中子或质子的结合能为零的一系列核的连线)的核素寿命很短,已经出现如  $\beta$  缓发粒子、 $\beta$  缓发裂变、直接质子发射及重离子衰变等奇异衰变方式和非常特殊的结构特征(如核半径突然增大、形状共存及反常的稳定性等),但人们对其性质还不甚了解。因此,通过原子核反应合成远离  $\beta$  稳定线的新核素,并研究其衰变性质,尤其是奇异衰变性质,研究其基态、激发态能级结构和核结构及其它谱学信息,探讨在远离核不平衡的核子环境中,壳模型幻数、核的形状、核的大小、电磁矩的变化、核内集体运动和单粒子运动的关系及中子

\* 收稿日期:2001 年 2 月 22 日

-质子相互作用等,对于拓广原子核研究对象,检验和发展现有核结构理论具有重要作用。

产生极端条件下的原子核并研究其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,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,重质量丰中子区和轻稀土质子滴线区是具有挑战性的核区。该核区新核素的合成和研究,必将不断揭示出新的现象和规律,为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,并推动与之有关的天体物理、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。

## 2 技术路线及实验方法

核素越远离 $\beta$ 稳定线,生成概率越小,寿命越短,其合成、分离和鉴别的难度也越大。必须寻找合适的反应机制和反应系统,建立相应的特殊分离鉴别装置。就合成方法而言,新核素除少数可由自发裂变生成外,大部分是用加速器将某种特定原子核(炮弹)加速到选定能量去轰击另一种原子核(靶),通过某种反应过程而产生的。迄今,采用的方法可归纳为7种:低能轻粒子(中子、质子、氘等)引起的反应;低能重离子引起的熔合蒸发反应(包括冷熔合);高能质子引起的靶散裂反应;重离子深部非弹性碰撞及大质量转移反应;裂变(诱发和自发裂变)反应;中能重离子炮弹碎裂;中能重离子引起的非全熔合反应。

一种新核素合成后,还必须把它鉴别出来才算真正发现它。鉴别的关键在于分离。目前采用的分离方法可分为物理和化学两大类。物理分离大多使用电磁分离方法,如在线同位素分离器、反冲弹碎片分离器、反冲质量谱仪和速度选择器等。化学分离包括常规离线化学分离和快速在线液、汽相色谱化学分离,用以进行 $Z$ (元素)选择。此外,还有物理与化学相结合的分方法。

随着加速器、分离及探测技术的进步,新核素

不断发现,在核素图 $Z-N$ 平面上,已知核素逐渐远离 $\beta$ 稳定线,向两边延伸,把新核素研究的工作阵地扩展到非常困难的区域。

由于生成机制和分离鉴别技术路线的困难,严重妨碍了人们对这些具有重要意义的重质量丰中子区和稀土质子滴线区新核素的合成和研究。因此,填充该区的每一个空白对于世界上任何一个实验室都是严峻的挑战。

我国这方面的研究起步较晚,90年代初正式开展工作,世界上已是强手林立,有不少各具特色的远离核研究中心。面对国际上的先进设备和优越条件对该区新核素合成和研究也不甚有效的事实,我们独辟蹊径,为攻克该核区新核素合成和研究这一难关提出了独具特色的物理思想和技术路线,设计并实施了创新的技术方案。在重质量丰中子区,使用了中能重离子和快中子反应生成重丰中子新核素的奇异反应机制来产生目标核,巧妙地使用了与上述产生新核素的方法相配套的经济熔融合靶热色谱技术和多步快速化学分离以及 $\gamma(X)$ 谱学方法,不但克服了分离鉴别这一重大困难,而且不必使用国际上通常采用的昂贵的电磁设备<sup>[2,3]</sup>;在稀土质子滴线区,面对生成产额很低和寿命很短等难题,放弃了国际上流行的用“在线同位素分离器”+“X-质子”符合的分离鉴别方法,提出了“氦喷嘴带传输”+“质子- $\gamma$ ”符合的巧妙方法,使测量灵敏度相对提高了50倍,为高效率地测量、鉴别短寿命核创造了决定性条件<sup>[4]</sup>。

## 3 工作进展及所获成果

在上述正确物理思想和技术路线的指导下,我们实施了有效可行的技术方案,成功地首次合成和鉴别了汞-208、汞-209、铅-185、铅-186、铪-237、铪-238、镨-239、铪-175等8种重丰中子新核素及铈-121、铈-125、铈-128、钐-129、钐-135、钐-137、镱-139和铪-139等8种稀土缺中子新核素,并测出其半衰期分别为42分、35秒、3.5分、2.6分、5分、9.4分、106分、1.2分、1.1秒、0.6秒、1.0秒、0.55秒、1.1

秒、2.2 秒、0.6 秒和 1.6 秒,同时获得了它们的一些衰变  $\gamma$  射线和奇异的延发质子衰变,初步确认了铈-125、钐-129、钆-137、镱-139 等 4 种新核素的基态自旋和宇称,进一步提供了这些核素具有大形变的间接实验证据,建立了铈-175 的部分衰变纲图,研究了其部分子体的低位态能级,并从理论上对它们特别是对汞-208 进行了研究<sup>[5]</sup>。上述这些重要结果,不仅可为研究远离  $\beta$  稳定线同位素核结构、核衰变性质、尤其是奇异性提供非常有用的数据,而且对天体物理(如宇宙中元素合成的计算和银河系年代的测定等)具有重要价值,并为半衰期的预言提供了灵敏的检验方法。

这些具有国际先进水平的成果,不但实现了我国在新核素合成领域零的突破,而且在重质量丰中子区和稀土质子滴线区形成了自己的物理和技术特色,使我们在这个国际重要基础前沿领域占有了一席之地。这些成果引起了强烈的反响,得到国内外核物理学界的关注和好评,分别入选 1992 年全国十大科技成就、十大科技新闻和 1999 年中国基础研究十大科技新闻,并荣获 1999 年国家自然科

学奖二等奖、1995 年吴有训物理奖、1994 年中国科学院自然科学奖一等奖及 1997 年、1998 年中国科学院自然科学奖二等奖。

## 参考文献

- 1 Klapdor H V.  $\beta$  Decay far from stability and its role in nuclear Physics and Astrophysics. *Fortschr. Phys.*, 1985, 33(1): 1 - 55.
- 2 Zhang L, Zhao J H, Zheng J W *et al.* Identification of  $^{209}\text{Hg}$ . *Eur. Phys. J. A*, 1998, 2(1): 5- 7.
- 3 He Jianjun, Yang Weifan, Yuan Shuanggui *et al.* Synthesis and identification of a new heavy neutron-rich isotope  $^{238}\text{Th}$ . *Phys. Rev. C*, 1999, 59(1): 520- 521.
- 4 Xie Yuanxiang, Xu Shuwei, Li Zhankui *et al.* New nuclides  $^{139}\text{Tb}$  and  $(\text{EC} + \beta^+)$  decay of  $^{138, 139}\text{Gd}$ . *Eur. Phys. J. A*, 1999, 6(2): 239- 241.
- 5 Luo Yixiao. Studies of nuclei far from stability in IMP. Jin G M, Luo Y X, and Zhang F S. *Proceedings of the international workshop on nuclear reaction and beyond*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1996, 505- 509.

## Great Success on the Syntheses and Study of the New Nuclides

Yuan Shuanggui Xu Shuwei Zhang Li Luo Yixiao Jin Genming

(Institute of Modern Physics, CAS, 730000 Lanzhou)

The significance of the syntheses and study on new nuclides far from  $\beta$  stability is described. The technical approaches and experimental methods of syntheses and identification for them are introduced. The situation on syntheses and study of new nuclides in heavy neutron-rich region and rare-earth region near the proton drip line at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences is reported.

**袁双贵** 男, 1966 年毕业于兰州大学核物理专业, 近代物理研究所研究员, 博士生导师, 1988—1989 年在加拿大巧克河原子核实验室(CRNL)进修远离核研究工作。在国际上首次合成、鉴定和研究了 $^{185}\text{Hf}$ ,  $^{186}\text{Hf}$ ,  $^{237}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{Th}$ ,  $^{239}\text{Pa}$  和  $^{175}\text{Er}$  6 种重丰子新核素, 占同期同质量区全世界合成总数的三分之一, 同时建立了 $^{175}\text{Er}$  和  $^{239}\text{Pa}$  的部分衰变纲图, 研究了其子体 $^{175}\text{Tm}$  和  $^{239}\text{Ac}$  的低位态能级。首次测得了 $^{230}\text{Ac}$  的基态  $\beta$ -延发裂变事例, 第一次从实验上证实了基态  $\beta$ -延发裂变的理论预言。在国内外发表论文 100 多篇, 主要论文被多次引用, 广获好评。有关成果 1992 年入选全国十大科技成就, 曾获 1999 年国家自然科学奖二等奖、1994 年中国科学院自然科学奖一等奖、1995 年第四届吴有训物理奖和 1997 年中国科学院自然科学奖二等奖。