

· 学科发展 ·

我国新核素合成和研究的新进展

魏宝文 罗亦孝 靳根明

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

[摘要] 本文概述了远离稳定线新核素合成和研究的重要意义, 并以近两年来我国科学家首次合成的远离稳定线重丰中子新核素 ^{208}Hg , ^{185}Hf 和 ^{237}Th 为例, 概述了我国远离稳定线重丰中子新核素合成和研究的物理思想及技术路线的突破性进展。本文还就本世纪末和下世纪初我国新核素合成和研究的发展方向及相关的重大设备建设提出了建议。

[关键词] 远离 β 稳定线, 新核素, 合成和鉴别, 衰变纲图

近几年, 我所承担的中科院“八五”重大项目“新核素的合成和研究”在中国科学院和国家自然科学基金会的大力支持下, 在 $A > 170$ 的重质量丰中子区先后合成了 ^{208}Hg , ^{185}Hf 和 ^{237}Th 三个新核素, 在核素图上填补了一个又一个空白, 使我国在新核素合成和研究这一前沿领域, 跨入了国际先进行列。本文对重质量丰中子区新核素合成及新核素的研究的重要意义和实验结果作一些介绍。

1 远离稳定线新原子核合成和研究的意义

远离 β 稳定线的新核素的合成及其衰变性质、核结构和生成机制的研究是原子核物理、核化学, 特别是重离子物理研究的重要前沿领域之一。世界上各有关实验室投入了大量的人力和物力, 建造了大量先进的仪器设备。我国投资 1.5 亿人民币在中科院近代物理研究所建造的大型重离子加速器以及配套的仪器设备, 为我国科研人员参加这个领域的竞争提供了必要的实验条件。

原子核是由质子 (Z) 和中子 (N) 组成的, 不同的原子核统称为核素。在地球上, 自然界中存在 300 多种稳定核素和天然放射性核素。在 $Z-N$ 核素图上, 对 β 衰变稳定的原子核集中在一狭长区域, 通过其中心区作一曲线, 即为 β 稳定线。原有核结构理论模型大都是在对 β 稳定线附近的原子核研究的基础上建立起来的。但是, 随着原子核物理的发展和加速器及核探测技术水平的提高, 人们通过原子核反应, 特别是中高能原子核碎裂和裂变, 合成了众多的新核素, 即在 $Z-N$ 核素图上, 沿质子数和中子数向两边得到了极大扩展。人们发现, 那些远离稳定线的丰中子或缺中子核素, 特别是接近和在中子滴线上的核素以及那些接近和在质子滴线上的核素, 具有一些非常特殊的性质, 如, 核半径的突然增大, 极大形变, 反常的稳定性、奇异的衰变性质、中子晕和中子皮等。这些发现引起了核物理学家的极大兴趣, 开展了广泛研究并取得了重要进展。这对检验和发展原有核结构理论具有重要意义。同时, 新核

本文于 1994 年 8 月 29 日收到。

素合成及其性质的研究对于推动与之有关的天体物理、原子物理的发展也具有重要意义。

理论预言,在重质量丰中子区(质量数 $A>170$),由于结构效应的影响,存在一些远离稳定线的核素,其半寿命要比邻近的已知核素的长得多。例如 ^{208}Hg ,理论预言的半寿命达2900—29000秒,这要比已知的 ^{206}Hg 的半寿命(490秒)长得多。我所科研人员预言,在质子数为82,中子数为126附近,存在着一个所谓的 β^- 延发中子衰变先驱核岛^[1],即存在着一批核,它们都是以 β^- 延发中子的形式进行衰变的。在该区域目前已经发现的唯一一个 β^- 延发中子衰变核是 ^{210}Tl ,若在该区逼近这一 β^- 延发中子衰变先驱核岛,并证实这一重要的理论预言,将具有十分重要的物理意义。

到目前为止,根据理论计算并考虑到可能的合成方法和分离鉴别手段,能够人工合成的核素还有600种左右,而且主要分布在核素图上丰中子一边。但是,随着未知新核素越来越远离稳定线,生成几率越来越小,寿命越来越短,新核素的生成、分离和鉴别面临越来越大的难度,要合成这600多种核素,必须寻找合适的反应机制和反应系统,建立起特殊的分离鉴别方法。因此,新核素的合成不仅有其重要的学术价值,而且也将大大促进技术上的进步。

近年来,由于加速器的进步,新核素的合成和研究在轻质量区得到了迅速发展。然而,在重质量区新核素合成进展缓慢。其重要原因是生成机制和分离鉴别方法的困难。

重质量丰中子区新核素的合成、分离和鉴别对世界核物理学界是一个严峻的挑战,也为我们提供了机会。为在这项高难度的科研领域中从物理思想和技术路线两个方面有所突破,形成自己的特色,我们将重质量丰中子区新核素的合成和研究作为我们的主要目标,力争在激烈的国际竞争中占据应有的地位。

2 新核素 ^{208}Hg 的合成和鉴别

这项工作获1989年和1992年国家自然科学基金资助,是由张立等人在兰州重离子加速器上完成的。我们选择炮弹在靶原子核 ^{208}Pb 上产生的奇异多核子转移反应来合成 ^{208}Hg ^[2,3]。这种反应的几率很小,特别是利用具有“ α 结团结构”的 ^{12}C 重离子轰击靶核,反应的几率就更小。为此,我们采取了两个特殊措施以提高反应中 ^{208}Hg 的产额:一是提高入射束流的能量,使其在 ^{208}Pb 靶中有更长的射程;其次,我们利用了很厚的靶物质,以便使入射束流都被阻止在靶物质中。具体的反应是利用360MeV的 ^{12}C 轰击980 mg/cm²的铅靶。

为了释放、分离和鉴别核反应生成的 ^{208}Hg ,我们建立了一套特殊的实验装置^[4]。该装置由一个靶熔化炉及一个与之相连接的热色谱管组成。利用这套装置可以把铅靶熔化,使其中的特低熔点元素挥发出来,由纯净的氮气把挥发出来的元素带到热色谱管的冷端。当挥发的元素经过热色谱管时,按照其熔点的高低沉积在管子的不同部位。在管子冷端得到的熔点相对最低的元素。加上特殊的汞吸收体,使该装置对汞元素具有极高的选择性和收集效率。实验结果表明,与汞相邻的元素,例如铅、铋、铊等都不能传到热色谱管的冷端,而对汞的收集效率则达到90%以上。我们就是利用这套装置从束流照射过的铅靶中收集反应过程生成的汞元素的。由于 ^{208}Hg 是 β^- 放射性,其衰变子体是 ^{208}Tl 。如果能证明在收集到的汞样品中有 ^{208}Tl 产生,就说明在反应中生成了 ^{208}Hg 。我们把收集到的汞样品再次纯化后,利用特殊的化学分离方法(母牛法)定时从中提取铊,并测量其发射的 γ 射线的能量和半衰期。实验观测到了一条能量和半衰期均与 ^{208}Tl 最强的2614.6 keV特征 γ 射线相同的 γ 射线。显然,这条 γ 射线是来

自 ^{208}Tl 的衰变,从而确定在反应中生成了 ^{208}Hg 。又根据不同时间从汞样品中提取的铊中 ^{208}Tl 的强度的变化,计算出 ^{208}Hg 的半衰期为42分,并从得到的 ^{208}Hg 的强度,估计出在入射能量60—360 MeV范围内 ^{208}Hg 的平均生成截面为 $10\ \mu\text{b}$ 。

实验所测得 ^{208}Hg 的半衰期长达42分,这比 ^{206}Hg 的半衰期(8.15分)要长得多,从而证实了关于寿命值的理论预言。结合我们对 ^{208}Hg 结构的理论计算和分析结果,还说明核结构对其衰变性质具有明显的影响。

3 新丰中子核素 ^{185}Hf 的鉴别

这项工作是新核素合成和研究项目组袁双贵等人先后在兰州大学和近物所的强流中子源上合成的。利用中子诱发的各种反应合成新核素是几十年前就采用的方法。经过认真的分析和仔细的计算,我们认为目前通过这一方法还可在重质量丰中子区合成有限的几个新核素, ^{185}Hf 就是其中的一个。新丰中子核素 ^{185}Hf 是利用高压倍加器强中子源提供的14兆电子伏的中子轰击天然钨合成的^[5,6]。使用的反应是 $n+^{186}\text{W}\rightarrow^{185}\text{Hf}+2p$ (两个质子)。这种反应的几率是很小的。为了提高新核素的产额,每次照射的靶子的量都在20克左右,中子源的强度都在 10^{12} 个/s左右。利用专门的化学流程快速地把反应生成的铪元素从照射过的钨靶材料中分离出来。在对分离出的铪样品进行 γ 射线测量时,得到了177.56 keV和107.80 keV两条 γ 射线。根据这两条 γ 射线的能量、相对强度和半衰期,可知这两条 γ 射线是来自 ^{185}Ta 的衰变。由于177.56 keV的强度较大,我们对其强度随时间的变化进行了观测,发现它的强度变化有明显的生长和衰减阶段。这种规律是母体衰变的特有现象,据此,可以确定反应中生成了 ^{185}Hf ,测得的 ^{185}Ta 就是从它衰变来的。通过对其强度变化的拟合,得到 ^{185}Hf 的半衰期为3.5分,这与理论预言的半衰期值非常相近。另外,在测得的 γ 谱中,还发现一条新 γ 射线(164.5 keV),根据其能量和半衰期,可以确认这条 γ 射线是新丰中子核素 ^{185}Hf 的一条衰变 γ 射线。以上足以证明在该反应中生成了新的丰中子核素 ^{185}Hf ,其生成截面约 $20\ \mu\text{b}$ 。

4 新核素 ^{237}Th 的合成和鉴别

如上所述,原子核质量数大于170的重质量丰中子区新核素的合成和研究不仅具有重要学术意义,而且难度很大,合成 ^{237}Th 这样重的丰中子核尤其困难。难点之一是核反应生成的 ^{237}Th 核极易裂变为中等质量的核,而生成重的新核素可能性很小,其比值仅约为百万分之一;难点之二是生成的新核素寿命非常短,要在很短的时间内将微量的钍元素从大量的裂变产物中有效地分离出来并进行鉴别,要求分离技术极高。

袁双贵课题组的科研人员利用本研究所的高压倍加器强中子源提供的14兆电子伏快中子轰击三硝酸铀酰来生成 ^{237}Th ^[7,8]。为了提高新核素的生成产额,我们进行了60余轮实验,使用的靶量高达1500克。为设计快速化学分离流程,经一年多的反复实验,终于从大量复杂的反应产物中快速而有效地分离出元素钍,并成功地排除了裂变产物特别是Sb和I的同位素对 ^{237}Th 的主要特征 γ 射线(853.5 keV和865.5 keV)干扰。大量实验数据不仅明确地证实了核新素 ^{237}Th 的生成,而且给出其半寿命为5分钟。由于该课题取得突出成果,1993年获得国家自然科学基金资助,使研究工作得以深入开展。

5 建立了缺中子核素 ^{153}Er , ^{157}Yb 的电子俘获和电子 (E_c/β^+) 衰变纲图

最近, 我所“新核素合成和研究”项目组徐树威领导的实验小组, 对美国橡树岭国家实验室和前苏联联合核子研究所测量 ^{153}Er 衰变未获成功的原因进行分析后指出, 由反应同时生成的与目标核质量数相同的其他干扰核都是强而复杂的 γ 发射体, 用国际上通常使用的在线同位素分离器按质量数分离反应产物, 无法除掉这些干扰核所引起的强而复杂的 γ 本底, 致使测量目标核发射的 γ 十分困难, 这就是症结所在。徐树威等提出并建立了氦喷射带传输 X- γ 符合探测系统, 把反应的产物按不同元素进行分离, 与目标核属于同一元素的其他核只发射单一的 γ 射线, 使本底大为降低。该小组借助兰州重离子加速器提供的 138 MeV 的 ^{16}O 离子束轰击 ^{142}Nd 和 ^{147}Sm 靶核, 产生了 ^{153}Er 和 ^{157}Yb 。利用自己建立的氦喷嘴快速带传输系统及 X- γ 和 γ - γ 符合测量手段, 首先将反应产物按不同元素分离后再测量其衰变性质, 在世界上第一次建立起这两个核的完整的 E_c/β^+ 衰变纲图, 并从中发现了一个新的三粒子态和两个新单粒子及新的同质异能态。

我国科研人员在重质量丰中子区这一领域取得的这些新进展, 填补了核素图上的一个又一个空白, 充分展现了我国重大基础性研究的活力和水平, 形成了自己的独具特色的物理思想和技术路线, 在国际竞争十分激烈的前沿领域的研究中占有了一席之地。

6 远离稳定线新核素合成和研究的发展

多年来, 人们都是利用稳定核炮弹轰击靶核引起的核反应来生成远离 β 稳定线的核。然而为了合成和研究重质量区质子滴线和中子滴线附近的核素, 就必须进一步使用放射性核作为炮弹轰击丰质子靶核或丰中子靶核。因此, 放射性次级束装置的研制及远离稳定线放射性次级束的使用, 就成为世界上各主要实验室的重要目标。目前放射性次级束的研制已从第一代发展至第二代。第一代次级束是从中高能炮弹碎裂产物中获得的放射性次级束, 而第二代次级束则从中能束厚靶离子源中产生放射性核, 经在线分离后再行加速, 以提供高流强的放射性束流。我所于 1993 年底利用原有的束流输运线, 建成了我国第一条中能重离子次级放射性束流线, 利用 25 MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{27}\text{Al}$ 和 $^{18}\text{O}+^{29}\text{Be}$ 反应, 成功地调试出了 ^6He , ^9Li , $\dots\dots$, ^{30}Mg 等 30 多种放射性次级束, 其电荷分辨达 1/100, 质量分辨达 1/200, ^{17}N 放射性核束的强度达 $10^6/\text{s}$, 可以利用作为放射性核束的核的寿命下限为 $1\ \mu\text{s}$ 。这条次级放射性核束流线的建成为新核素的合成和研究的深入和发展提供了一个基本条件, 也为我国利用放射性束流开展核物理及核天体物理学研究打下了基础。

根据新核素合成和研究的现状及发展动向, 我们可以预计在本世纪末至 21 世纪初, 该领域研究的重点将在发展放射性次级束装置和在线分离器的基础上, 开展以下几方面工作:

(1) 新核素合成和研究, 包括重质量丰中子区新核素合成及我们从理论上预言的 $Z=82$, $N=126$ 附近 β 缓发中子先驱核岛的逼近的研究; 天体物理中十分重要的轻质量奇异核特别是滴线核的合成和研究; 超铀区缺中子新核素的合成和研究; ^{100}Sn (最近报道该核已被合成) 等 $N=Z$ 双幻核的合成和研究。

(2) 远离稳定线原子核的奇异衰变性质、核结构和核质量研究, 包括 β 缓发双质子和理论预言而至今尚未发现的直接双质子发射的寻找和研究, 束缚态 β 衰变和双 β 衰变研究及轻丰

中子滴线核的中子晕、中子皮现象的寻找和研究及纯中子物质的研究。

(3) 合成超重元素的探索。为了达到上述有关新核素合成和研究的目标，并适应世界重离子物理研究迅速发展的需要，我们认为进一步改善我国重离子物理研究的基本设施——兰州重离子加速器，做好下一步的发展计划已刻不容缓。统观世界各国重离子物理实验室的发展动向，重离子加速器除向高能甚至相对论能区发展外，其热点有二：一是放射性核的产生、加速和积累。多年来，都是使用加速器加速稳定核作为炮弹，以开展核物理实验研究。放射性核的产生和使用正在开辟原子核物理的新纪元；二是建造能提供高品质束流（高的能量分辨和位置分辨）的重离子冷却贮存环。所谓冷却是指将环中被加速的离子的温度降低，以得到相互间能量和位置偏离极小的离子束流，从而显著提高实验测量精度。而“贮存”是指在一闭合环上，将高品质束流循环积累和多次使用，以大大提高实验研究的灵敏度。目前，国际上许多实验室都计划建造或正在建造放射性核加速器或高品质束流的重离子冷却贮存环。经过认真调研和反复论证，中国科学院近代物理研究所最近提出了重离子加速器冷却贮存环计划（HIRFL-CSR）。建议的贮存环周长 141 米，它是一个既能冷却，又能加速和贮存累积重离子（包括放射性离子和全部剥去核外电子的全裸重离子）的多功能环。利用 HIRFL 现有的两台加速器分别作它的注入器，用同步加速器的方法把重离子加速到每个核子 600 MeV 至 1200 MeV；采用多圈注入与射频堆积相结合的方法在环内积累束流；利用电子冷却和随机冷却的先进技术使环内离子的速度和位置分辨率提高。

建造这样一台重离子冷却贮存环不仅可以提供放射性束流以代替传统使用的稳定核束流，并循环多次使用，为新核素合成和研究，特别是超重元素合成的探索创造条件，而且将使我国重离子物理研究，例如高电荷态重离子和高温高压核物质性质研究及其相关学科，以及生命科学中最新发展起来的重离子束治癌等取得一批重大科研成果。同时也将大大推动我国超高真空技术，射频堆积技术及电子冷却等先进技术的迅速发展。

参 考 文 献

- [1] 张立. 高能物理与核物理, 1991, 15 (2): 187.
- [2] 张立, 靳根明. 高能物理与核物理, 1992, 16 (8): 767.
- [3] Zhang Li, Jin Genmin *et al.* Phys. Rev. C., 1994, 49 (1).
- [4] Zhao Jinhua *et al.* Chinese Journal of Nucl. Phys., 1992, 14 (3): 267.
- [5] 袁双贵, 张天梅等. 高能物理与核物理, 1992, 16 (8): 765.
- [6] Yuan Shuangui, Zhang Tianmei *et al.* Z. Phys., 1993, A344: 355.
- [7] 袁双贵, 张天梅等. 高能物理与核物理, 1993, 17 (10): 959.
- [8] Yuan Shangui, Zhang Tianmei *et al.* Z. Phys., 1993, A346: 187.

THE NEW PROGRESS IN SYNTHESIS AND STUDY OF NEW NUCLIDES IN CHINA

Wei Baowen Luo Yixiao Jin Gengming
(Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000)

Abstract This paper introduces the importance of synthesis and study of new nuclides far from stability line, and following the example of the new nuclides ^{208}Hg , ^{185}Hf and ^{237}Th , which were synthesized for the first time by Chinese scientists, the progress of physics and technology in this aspect is summarized. It also outlines a proposal about the further development of the synthesis and study of new nuclides and the construction of relevant key facilities in China at the end of this century and in the beginning of the next century.

Key words Far from β stability line, New nuclide, Synthesis and identification, Decay scheme

· 信息 ·

我国第一台超导托卡马克 HT-7 工程联调成功

中国科学院等离子体物理研究所成功地建造了我国第一台超导托卡马克装置 HT-7, 1995 年 3 月 9 日召开了 HT-7 工程联调成功庆祝会, 目前等离子体峰值电流已达 135 kA, 持续时间大于 200 ms。

HT-7 是由 T-7 改建的装置, T-7 是前苏联建造的世界第一台超导托卡马克。随着核聚变研究的进一步发展, 前苏联在 T-7 的基础上建造了更大的超导托卡马克 T-15。4 年前, 中国科学院等离子体物理研究所和前苏联库尔恰托夫研究所签订协议, 将 T-7 送给中国科学院等离子体物理研究所并改建成 HT-7。

HT-7 是目前世界上 4 个大型超导托卡马克装置之一, 它包括装置主机和六个独立的子系统, 即低温系统, 极向场电源系统, 纵场电源系统, 真空系统和控制、数据采集及技术诊断系统, 原价值近 2 亿人民币。中国科学院等离子体物理研究所参加 HT-7 工程建设的科技人员、工人和干部齐心协力, 精打细算, 只用 1/10 的原价, 在短短的 4 年中建成并联调成功。

当前, 世界核聚变研究正处于转折的关键时期。近几年来, 磁约束核聚变取得了突破性进展, 继 1991 年欧洲 JET 装置获得近 3 MW 功率后, 1994 年美国 TFTR 装置获得 10.7 MW 的功率。验证科学可行性转到验证工程可行性, 欧洲、美国、俄罗斯和日本正在计划联合建造 ITER 装置, 计划输出功率 1.5 GW, 拟投资 60—100 亿美元。中国科学院等离子体物理研究所及时抓住建造 HT-7 的机会, 抽调近百名科技人员, 组成 11 个课题组, 团结奋战, 无私奉献, 只用三年半时间, 就完成主机改造的全部任务, 对各系统精心设计、精心加工, 使联调一次成功。HT-7 的建设成功, 使我国的磁约束核聚变研究向前迈进了一大步。

在 HT-7 的建设过程中, 得到了俄罗斯库尔恰托夫研究所的大力支持, 他们不但将 T-7 装置用 40 列车皮运送给中国, 而且还派了近百名科技人员, 累计 200 多人月, 到中国帮助建设 HT-7。所以, HT-7 的建设成功也为大型科学工程开展国际合作提供了宝贵的经验。

HT-7 联调成功不仅为今后几年的物理工作提供了基本条件, 而且为下一步建造非圆超导托卡马克 HT-7U, 实现稳态运行打下了重要基础。

(数理科学部 陈思育 洪明苑供稿)