

\* 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

(近代物理研究所 兰州 730000)

**提要** 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 $^{208}\text{Hg}$ 、 $^{185}\text{Hf}$ 和 $^{237}\text{Th}$ 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。

近两年对中国的核物理工作者来说是令人高兴的两年。1992年中国核物理学家在重质量丰中子区合成了三个新核素,它们是 $^{202}\text{Pt}$ (上海原子核所) $^{208}\text{Hg}$ 和 $^{185}\text{Hf}$ (近代物理所),1993年又合成了重丰中子新核素 $^{237}\text{Th}$ ,并发现了在天文核物理中处于关键地位的 $^{20}\text{Na}$ 核的一条新 $\beta$ 缓发低能 $\alpha$ 衰变道。本文以兰州近代物理所新核素合成和研究为例,对重质量丰中子区新核素合成及新核素研究的重要意义和实验结果作一些介绍。



## 一、 远离稳定线新原子核合成和研究的意义

远离 $\beta$ 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,特别是重离子核物理研究的重要前沿领域之一。在这个竞争十分激烈的重大基础性研究领域,世界上各有关实验室都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。除了质子数 $Z$ 和中子数 $N$ 而外,人们还常用质子数和中子数之和 $A=Z+N$ 作为描述核素的重要参数,称为质量数。在地球自然界中存在 300 多种稳定的和长寿命放射性核素。在 $Z-N$ 核素图上,稳定原子核集中在狭长区域,通过其中心区作一曲线,即为 $\beta$ 稳定线。核结构理论模型(如壳模型、液滴模型、集体模型等)大都是在对 $\beta$ 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(在核素图上,最后一个中子的结合能为零的一系列核的连线)上的核素以及那些接近和在质子滴线(在核素图上,最后一个质子的结合能为零的一系列核的连线)上的核素,具有一些非常特殊的性质,例如,核半径的突然增大,极大形变,反常的稳定性和奇异的衰变性质( $\beta$ 衰变后接着发射一个或者几个中子, $\beta$ 衰变后接着发一个或几个质子,直接发射质子或自发发射比碳重的复杂粒子)等。这些发现引起了核物理学家的极大兴趣,为了探索原有的核结构理论是否仍然适用于这些远离稳定线的核素,开展了广泛研究并取得了重要进展。人们已经认识到,合成更多的新核素,特别是那些远离稳定线的核素,并研究其衰变性质和核结构特征的变化规律,对检验和发展原有核理论具有重要意义。同时,新核素合成及其性质的研究对于推动与之有关的天体物理、原子物理的发展具有重要意义。新核素合成机制的研究对核物理本身以及核化学的发展也有很大的促进作用,并在能源、军事研究中具有潜在的效益。

人工合成新核素通常是通过核反应实现的,即用加速器将某种原子核加速到一定能量去轰击另一种原子核,通过适当选取的反应过程生成新核素。一般情况下,新核素的产额相当小,甚至只占核反应中生成的已知原子核总产额的百万分之一以下。要对极微量的新核素进行鉴别和研究,必须先将其从大量的已知原子核中分离出来。自1934年发现人工放射性以来,已人工合成和鉴别了2100种新核素。迄今为止,人工合成新核素所采用的主要方法有:

- 轻粒子(n,p,d, $\alpha$ )引起的反应;
- 重离子熔合蒸发反应(包括冷熔合);
- 重离子深度非弹性碰撞及大质量转移反应;
- 裂变反应;
- 中能重离子炮弹核的碎裂;
- 高能质子引起的散裂反应;

为了鉴别是否合成了新核素,大都利用化学方法分离、在线同位素分离器分离和其它的分离方法。这些方法中都离不开大型的仪器设备,例如:同位素分离器、离子速度选择器、反冲质量谱仪、弹碎片同位素分离器、液相色谱仪和汽相色谱仪等。

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,而且主要分布在丰中子一边。但是,随着未知新核素越来越远离稳定线,生成机率越来越小,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。

理论预言,在重质量丰中子区(质量数 $A>170$ ),由于核结构效应,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 $^{208}\text{Hg}$ ,理论预言的半寿命达2900—29000秒,这要比已知的 $^{206}\text{Hg}$ 的半寿命(490秒)长得多。理论预言 $^{202}\text{Pt}$ 的半寿命长达几十小时,也比已知的 $^{200}\text{Pt}$ 的半寿命(12.5小时)长许多。如果能够合成这些核素,对核结构理论的检验和发展将会有重大的意义。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 $\beta^-$ 延发中子衰变先驱核岛,即存在着一批核,它们都是以 $\beta^-$ 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 $\beta^-$ 延发中子衰变核是 $^{210}\text{TI}$ 。在该重质量丰中子区逼近这一 $\beta^-$ 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。

然而,多年来该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。前面所说的几种合成机制对合成重质量区的丰中子核素都几乎是无效的。寻找一种新的反应机制来合成重质量区的丰中子核素是当前新核素合成中的一个人们非常感兴趣的研究课题。另外,重元素的分离也是一个需要深入研究的重大课题。虽然,在线同位素分离器可以对所有质量的核进行分离,其它电磁分离方法可对反应产物进行“飞行”中的分离,但是,由于种种原因,例如重质量核素的反冲动能极小,无法实现反冲飞行;而高熔点元素无法从靶离子源中热扩散,从而限制了上述分离技术的应用,这就要求我们发展新的分离鉴别手段以适应该质量区的丰中子核素的合成和鉴别的需要。

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。为在该项高难度的科研领域中从物理思想和技术路线两个方面实现突破,形成自己的特色,我们将该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。

## 二、新核素 $^{208}\text{Hg}$ 的合成和鉴别

这项工作是新核素合成和研究项目组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 $^{208}\text{Pb}$ 上奇异的多个核子转移反应来合成 $^{208}\text{Hg}$ 。这种反应的几率很小,特别是利用象 $^{12}\text{C}$ 这样具有“结团结构”的重离子轰击靶核,这种反应的几率就更小。为此,我们采取了两个特殊措施以提高反应中 $^{208}\text{Hg}$ 的产额:一是提高入射束流的能量,使其在 $^{208}\text{Pb}$ 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 360 兆电子伏的 $^{12}\text{C}$ 轰击 980mg/cm<sup>2</sup> 的铅靶。

为了释放、分离和鉴别生成的 $^{208}\text{Hg}$ ,我们建立了一套特殊的实验装置。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,利用纯净的氮气把挥发出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,按照熔点的高低沉积在管子的不同部位。在管子冷端得到的是熔点相对最低的元素。根据这个原理加上特殊的汞吸收体,这个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。在合成 $^{208}\text{Hg}$ 时,我们就是利用这套装置从用束流照射过的铅靶中收集反应过程中生成的汞元素的。由于该装置极高的化学选择性,收集的汞样品中不含有铋及铊元素。

由于 $^{208}\text{Hg}$ 是 $\beta^-$ 放射性的,其衰变子体是 $^{208}\text{Tl}$ 。如果能证明在我们收集到的汞样品中有 $^{208}\text{Tl}$ 产生,就说明在反应中生成了 $^{208}\text{Hg}$ 。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,并用置于低本底测量室中的 $\gamma$ 射线探测器测量其发射的 $\gamma$ 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 $^{208}\text{Tl}$ 最强 2614.6keV 特征 $\gamma$ 射线相同的 $\gamma$ 射线,显然,这条 $\gamma$ 射线是来自 $^{208}\text{Tl}$ 的衰变,从而确定在上述反应中生成了 $^{208}\text{Hg}$ 。又根据不同时间从汞样品中提取的铊中 $^{208}\text{Tl}$ 的强度的变化,计算出 $^{208}\text{Hg}$ 的半衰期为 42 分,并从得到的 $^{208}\text{Hg}$ 的强度估计出其在 60—360 兆电子伏入射能量范围内的平均生成截面为 10 微巴。

我们测得 $^{208}\text{Hg}$ 的半衰期长达 42 分,虽然只与理论预言值的下限接近,但仍比 $^{206}\text{Hg}$ 的半

衰期(8.15分)要长得多。这一实验结果证实了关于寿命值的理论预言,并说明核结构对其衰变性质具有明显的作用。

### 三、新丰中子核素 $^{185}\text{Hf}$ 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代物理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。但是,现在还能否再利用这一途径合成新核素呢?经过认真分析和仔细计算,我们认为目前这仍是一条可行的途径,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, $^{185}\text{Hf}$ 就是其中的一个。新丰中子核素 $^{185}\text{Hf}$ 是利用高压倍加器强中子源提供的14兆电子伏的强流中子轰击大量的天然钨合成的。使用的反应是 $n + ^{186}\text{W} \rightarrow ^{185}\text{Hf} + 2p$ (两个质子)。当然,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 $1 \times 10^{12}$ 个/s左右,有时甚至更高。利用专门的化学流程快速地把反应中生成的铪元素从照射过的钨靶材料中分离出来。随后对分离出的铪样品进行 $\gamma$ 射线测量。

通过探测放射性衰变来鉴别放射性核素一般可以用两种方法进行:一是对已知核素直接测量该放射性核素衰变时放出的射线,并根据其能量、强度和半衰期确定是哪个核素。二是对未知核素测量该放射性核素的子核衰变时放出的射线,首先确定子核,再根据子核确定其母核。对于新的放射性核素而言,由于其放出的射线的能量、强度、半衰期都是未知的,显然不能利用第一种方法来确定它。我们就是通过确定其子体 $^{185}\text{Ta}$ 而确定 $^{185}\text{Hf}$ 的。

在对铪样品进行 $\gamma$ 射线测量时,得到了177.56keV和107.80keV两条 $\gamma$ 射线。根据这两条 $\gamma$ 射线的能量、相对强度和半衰期,可知这两条 $\gamma$ 射线是来自 $^{185}\text{Ta}$ 的衰变。由于177.56keV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。根据这一点可以确定反应中生成了 $^{185}\text{Hf}$ ,测得的 $^{185}\text{Ta}$ 就是从它衰变来的。通过对其强度变化的理论符合,得到 $^{185}\text{Hf}$ 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 $\gamma$ 谱中,还发现一条新 $\gamma$ 射线(164.5keV),根据其能量和半衰期,可以确认这条 $\gamma$ 射线是新丰中子核素 $^{185}\text{Hf}$ 的一条衰变 $\gamma$ 射线。 $^{185}\text{Ta}$ 的生长衰减规律和164.5keV的新 $\gamma$ 射线,足以证明在该反应中生成了新的丰中子核素 $^{185}\text{Hf}$ 。其生成截面约20微巴。

### 四、新核素 $^{237}\text{Th}$ 的合成和鉴别

如上所述,原子核质量数 $A > 170$ 的重质量丰中子区新核素的合成和研究具有重要学术意义,同时也具有很大的难度,合成 $^{237}\text{Th}$ 这样重的丰中子核尤其困难。难点之一是生成 $^{237}\text{Th}$ 的核反应中,产物原子核极易发生裂变,成为中等质量的核,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,分离技术面临极高的要求。

近代物理研究所新核素合成和研究项目组的科研人员再次利用该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 $^{237}\text{Th}$ 。为了提高新核素的生成产额,我们



进行了六十余轮实验,使用的靶量高达 1500 克。为设计快速化学分离流程,科研人员进行了长期不懈的努力,付出了极为艰苦的劳动。经过一年多的反复实验,终于从大量复杂的反应产物中快速而有效地分离出元素钷,并成功地排除了裂变产物特别是 Sb 和 I 的同位素对 $^{237}\text{Th}$ 的主要特征  $\gamma$  射线(853.5keV 和 865.5keV)干扰。大量实验数据不仅明确地证实了新核素 $^{237}\text{Th}$  的生成,而且给出其半寿命为 5 分钟。

我国科研人员在原子核质量数大于 170 的重质量丰中子区新核素合成和研究中取得的这些新进展填补了核素图上的一个又一个空白,充分显示了我国科研人员的聪明才智,展现了我国重大基础性研究的活力和水平,形成了自己的一条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研究中占有了一席之地。

## 五、 $^{20}\text{Na}$ $\beta$ 缓发低能 $\alpha$ 衰变的发现和研究

$^{20}\text{Na}$  位于热 CNO 链到 Na, Mg, Al 链过渡的主要路径上,是宇宙元素形成中的关键核,在核天体物理研究中具有重要意义。理论预言,在其衰变中应存在较强的  $\beta$  缓发低能  $\alpha$  衰变,但是,原有的实验中仅估计有很弱的  $\beta$  缓发低能  $\alpha$  衰变分支,并以此推算出宇宙中元素形成过程中从热的 CON 链进入 Na, Mg, Al 链的几率。近代物理所的科研人员利用高能物理研究所直线质子加速器提供的 35MeV 质子束轰击 Ne 气体生成 $^{20}\text{Na}$ 。利用自行设计的氦喷射气体传输装置将反应产物 $^{20}\text{Na}$  传送到由  $(\Delta E(7\mu) + E)$  和转盘组成的测量系统中,对生成的 $^{20}\text{Na}$  的  $\beta$  延发  $\alpha$  衰变中发射的粒子进行测量。经过对测得的带电粒子能谱的仔细分析,他们发现  $\beta$  延发 0.70MeV  $\alpha$  粒子衰变的分支比是 3.7%,远大于原来估计的  $<0.5\%$ ,从而修改了 $^{20}\text{Na}$  的衰变纲图。这对于全面深入研究 $^{20}\text{Na}$  的性质有重要意义。

$^{20}\text{Na}$  这一新的  $\alpha$  衰变分支的发现,同时也改变了其激发态的衰变情况。原来认为在 $^{20}\text{Na}$  的  $\beta$  延发  $\alpha$  衰变谱中,0.70MeV 谱线全是来自 $^{20}\text{Na}$  的 3.046MeV 激发态衰变质子的贡献,并由此推算出天体核反应率。我们的发现改变了 $^{20}\text{Mg}$  衰变到 $^{20}\text{Na}$  的 3.046MeV 激发态的分支比,给天文物理的(r,p)过程的研究提供了重要基础数据。

## 六、 远离稳定线新核素合成和研究的发展

根据新核素合成和研究的现状及动向,我们可以预计在本世纪及 21 世纪初该领域研究的重点将是在发展放射性次级束装置和在线分离器的基础上,开展:

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  $\beta$  缓发中子先驱核岛的逼近的研究;天文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; $^{100}\text{Sn}$  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  $\beta$  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  $\beta$  衰变和双  $\beta$  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。

多年来,远离稳定线核都是用稳定核产生的核反应来生成的。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,就成了世界上各主要实验室的重要目标。第一代次级束从中高能炮弹碎裂产物中获得放射性次级束,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,将提供高流强的放射性束流。

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,提出关于我国重离子加速器的下一步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慎重提出了将上述放射性核加速和冷却贮存环结合起来的兰州重离子加速器冷却贮存环计划(HIRFL-CSR)。建议的贮存环周长为 141 米,它是一个既能冷却,又能加速和贮存累积重离子(包括放射性重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 兆电子伏到 1200 兆电子伏;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前所未有的条件,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。同时也必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。

魏宝文 1935 年 11 月生于河南禹县,1957 年毕业于北京大学物理系。现任中科院兰州分院院长兼中科院近代物理研究所所长、研究员,兰州重离子加速器国家实验室主任,中国粒子加速器学会理事,甘肃省物理学会理事长。是国家级有突出贡献的中青年优秀专家。1980—1989 年领导并亲自参加了兰州重离子加速器的建设工作,现指导着院“八五”重大基础科研项目“新核素合成和研究”。