

中、重质量区新核素的合成*[†]

杨维凡 袁双贵

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 论述了远离稳定线核素合成的科学意义,总结了有关新核素合成研究的国内外概况以及中、重质量区远离稳定线核素的主要产生机制.给出了我国合成的一些新核素的半衰期,并与理论预言值进行了比较.简略地叙述了核反应产物的传输、分离以及新核素的鉴别方法.

关键词 新核素 合成和鉴别 产生机制 半衰期 传输和分离

分类号 O571.3

1 科学意义

远离 β 稳定线核素的合成及衰变性质的研究是原子核物理和核化学研究十分重要的领域.因为它是研究新衰变模式、发展核结构理论的出发点.近年来已成为竞争十分激烈、引人入胜的科学前沿领域,也是衡量一个国家科技水平的重要标志之一.

现有的核结构模型理论(如壳模型、液滴模型和集体模型等)大部分是在 β 稳定线附近的原子核研究的基础上建立的,对这些原子核的研究主要是通过 α 、 β 衰变和裂变来进行的.更多远离核特别是滴线附近核的合成及其奇异衰变性质的研究无疑会拓广原子核研究对象,丰富和深化人们对原子核内部结构的认识,对检验和发展现有核结构理论,推动天体物理学、核化学和放射化学的发展等都具有非常重要的意义.

2 国内外研究概况

迄今为止,在自然界中已发现了约 **280** 种稳定原子核和约 **60** 种天然放射性原子核.自 **1934** 年以来 F Joliot 和 I Curit 首次发现人工放射性同位素的 **60** 余年间,人工合成并鉴别了二千多种原子核.按现有理论预计,核素图上被中子、质子滴线以及自发裂变半

衰期限制边界所包围的核素($T_{1/2} > 10^{-6}$ s)约 **6 000** 种.考虑到可能的合成方法和鉴别手段,未来可能合成和鉴别的新核素估计有约 **600** 种,其中包括 $Z=114$ 、 $N=184$ 附近的超重核稳定岛上的核素(见图 1).

由于远离核的生成截面越来越小,其寿命也越来越短,现在合成一个新核素对世界上每一个实验室都将是一个严峻的挑战.国外很多实验室不惜花费巨资,正在投入很大力量向 β 稳定线两侧尚可占领的区域扩展.中能重离子加速器和先进的分离、鉴别装置投入使用、新的生成机制的发现和与之相配套的分离、鉴别手段的产生导致了新核素研究的重大突破.现已合成了双幻数核 ^{78}Ni ^[1] 和 ^{100}Sn ^[2].中能多核子转移反应的应用在丰中子特别是裂变区外丰中子核的合成中发挥了重要作用.利用冷熔合反应已经合成了 $Z=107\sim 112$ 的许多超重新核素,逼近了超重岛中心 $Z=114$, $N=184$.

我国的核物理和核化学工作者们也一直致力于远离核的研究.中科院近代物理研究所、中科院上海原子核研究所和北京原子能研究院的核物理和核化学工作者们近几年在国内先后合成了 ^{90}Ru 、 ^{121}Ce 、 ^{135}Gd 、 ^{175}Er 、 $^{185,186}\text{Hf}$ 、 ^{202}Pt 、 $^{208,209}\text{Hg}$ 、 ^{235}Am 、 ^{237}Th 和 ^{239}Pa 等十多种新核素.从而使我国在该领域,特

■ 收稿日期: 1998 - 08 - 05.

* 国家自然科学基金(项目号 19775055)和中国科学院支持资助.

别是在重质量丰中子区新核素合成的国际竞争中占据了一席之地，也形成了我们自己的

特色。在这些新核素中，有八种是 $A > 170$ 重质量丰中子新核素。

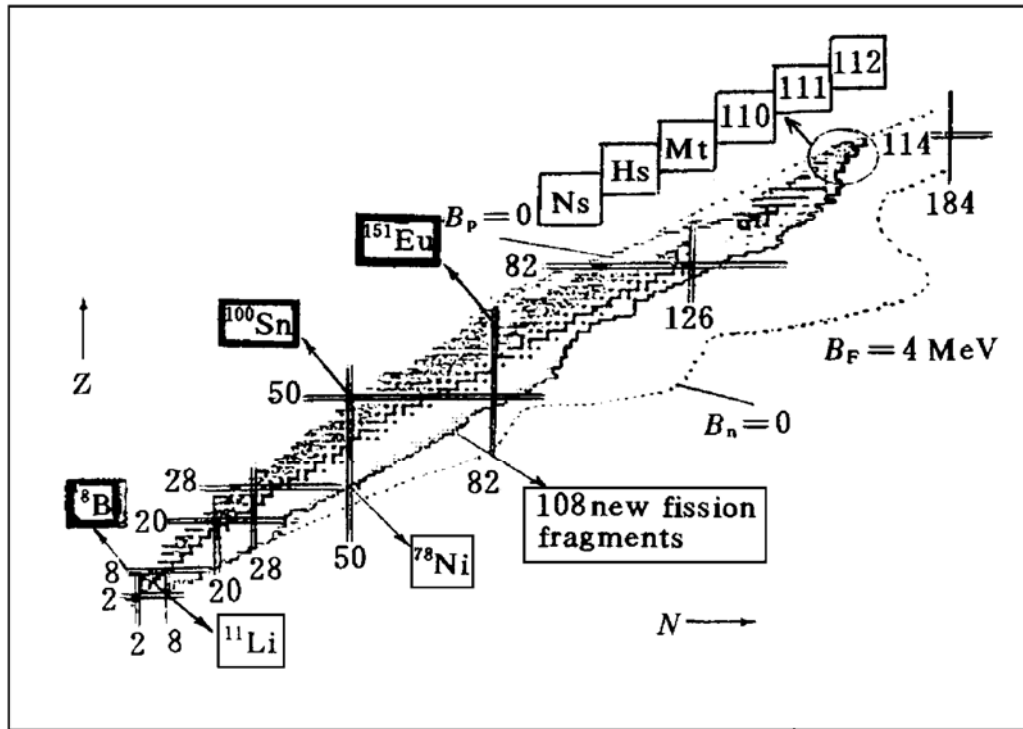


图 1 核素图

$B_p=0$ 的折线为质子滴线， $B_n=0$ 的虚线为中子滴线， $B_F=4$ MeV 的虚线表示自发裂变边界，黑方块组成的线为 β 稳定线， $Z=114$ 、 $N=184$ 是预言的超重核稳定岛的中心。

3 新核素的合成和鉴别

3.1 远离核的主要生成机制

(1) 轻粒子(p、 α 和n等)引起的反应
这一早期曾使用，现仍在使用的的方法对新核素合成由 β 稳定线附近向两侧拓广发挥了重要的作用。利用这种生成机制，中科院近代物理所先后合成了 ^{185}Hf [3]、 ^{237}Th [4]、 ^{175}Er [5] 和 ^{235}Am [6]。

(2) 裂变 通过热中子、快中子、质子和重离子等引起的裂变以及重核(^{252}Cf 等)的自发裂变，已经合成了大量丰中子核素(美、法、前苏联等国)。美国 Idaho 国家工程实验室用 ^{252}Cf 强源的自发裂变合成了 $150 < A < 165$ 范围的许多丰中子稀土新核素 [7]。

(3) 重离子熔合-蒸发反应 使用这种反应，在广阔的质量范围内合成了大量缺中子新核素。例如，Lazarev 等 [8] 用 ^{22}Ne 轰击

^{248}Cm 的热熔合-蒸发反应合成了 ^{265}Sg 和 ^{266}Sg 。德国 GSI 使用冷熔合反应已经合成了 $Z=112$ 新元素 [9]，最近有消息说俄罗斯 Dubna 和美国 Berkeley 合作合成了 114 号元素。近物所使用低能重离子熔合-蒸发反应，在稀土区合成了缺中子新核素 ^{121}Ce [10] 和 ^{135}Gd [11]。

(4) 重离子深部非弹和大质量转移反应在轻和重质量区已经合成了部分丰中子核素。美国 Berkeley 实验室使用 ^{22}Ne 、 ^{48}Ca 束流轰击 ^{248}Cm 、 ^{252}Cf ，获得了一系列超铀新核素。

(5) 高能质子引起的靶散裂 美国 Los Alamos 和欧洲 CERN 利用这类反应可生成新丰中子和新丰质子核素。

(6) 中能重离子引起的多核子转移反应这是近年来采用的一种新生成机制，它已开始于裂变区外 ($70 \leq A \leq 170$) 丰中子新核素的合成中发挥作用。德国 GSI 利用这一反应机

制合成了裂变区外 $A \geq 170$ 的 Lu 等丰中子新核素. 中科院近代物理所使用中能 ^{12}C 和 ^{18}O 离子轰击重元素靶, 通过多核子转移反应先后合成了 $^{208,209}\text{Hg}$ [12]、 ^{239}Pa [13] 和 ^{186}Hf [14] 等.

3.2 远离核的生成截面和半衰期

总的来说, 随着新核素越来越远离 β 稳定线, 其生成截面将越来越小, 已从 μb 降到 pb . 不过, 鉴别方法不同对目标核生成量的

要求也各异. 例如, 在 $Z=112$ 元素的合成、鉴别中, 20 多天的照射时间里只观测到了两个相关的 α 衰变事件 [9], 给出该反应的截面值仅为 1.0 pb . 随着从 β 稳定线向两侧扩展, 远离核的寿命将越来越短, 不同理论的计算值与实验值之间有时存在较大差异. 表 1 给出了我国合成的一些新核素的半衰期, 并同理论预言值做了比较.

表 1 我国合成的一些新同位素的半衰期同理论预言值的比较

核素	实验值	半衰期					
		微观理论(1)[15]	理论值 (s)			核素图	
			Hilf	Groote	Moeller	1992[17]	1996[18]
^{185}Hf	$3.5 \pm 0.6 \text{ min}$	73	584	766	204	*	*
^{186}Hf	$2.6 \pm 1.2 \text{ min}$	28	436	566	136	27.4	66
^{208}Hg	$42 \pm 13 \text{ min}$	28 900	145	239	76.7	*	*
^{237}Th	$5.0 \pm 0.9 \text{ min}$	66	221	389	311	*	1 500
^{239}Pa	$106 \pm 3.0 \text{ min}$	277	186	22 200	409	*	188
^{175}Er	$1.2 \pm 0.3 \text{ min}$	32	21	26.1	17.6	*	122
^{202}Pt	$43.6 \pm 15.0 \text{ h}$	158 000			15 600	*	*
^{235}Am	$15.5 \pm 5.0 \text{ min}$					*	1 194

注: 表中的 * 表示新核素已经被列入该核素图.

3.3 反应产物的传输和分离

3.3.1 反应产物的传输

(1) He-jet 反冲-传输系统 它是传输

核反应产物的重要装置之一. 通过毛细管将反应产物从照射位置输送到低本底实验区, 有时也直接传输到快化分离装置的液体收集器中. 图 2 显示在 ^{235}Am 合成实验中使用的 He-jet 传输系统 [6].

(2) 跑兔装置 在中科院近代物理所的中能重离子加速器快化终端上安装的跑兔装置用于传送中子、质子、低能与中能重离子等引起的反应产物, 可在几秒内完成. 在合成新核素 ^{175}Er [5] 和 ^{186}Hf [14] 的实验中使用了该装置.

3.3.2 反应产物的分离

(1) 电磁分离 60 年代初研制了同反应堆和加速器联用的在线同位素分离器, 用它发现了大量的新同位素. 现已研制成了 He-

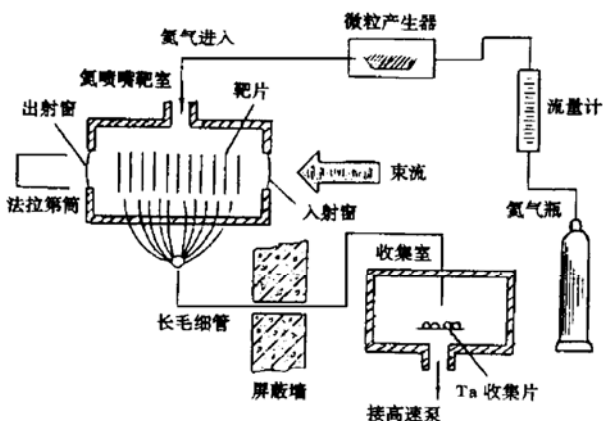


图 2 ^{235}Am 的合成和鉴别实验中使用的氦喷嘴反冲-传输系统

jet 在线同位素分离器. 70 年代建造了能分离很短寿命核的反冲质量谱仪和速度选择器, 后来又出现了用于分离中、高能弹碎裂产物的碎片分离器 RFS^[19]. 它们在超重核和滴线附近核的合成、鉴别中发挥了重要作用.

(2) 激光分离 通过激光束使核反应产物蒸发、电离, 达到与靶物质和其它核反应产物元素分离的目的. 这个方法具有很高的选择性. 近物所正在进行激光离子源的研制, 准备与同位素分离器联用, 用于远离核的合成研究

(3) 化学分离 这是使目标核同靶物质和其它反应产物元素分离的经典方法. 有时很简单的化学分离便可使复杂的问题大大简化. 在新核素的研究中, 已由传统的手工操作逐渐发展到用微机控制的快化分离, 某些元素的分离可在几秒内完成. Bruchertseifer 等^[20]用离子交换技术快速分离出 Hf, 并得到了新同位素 ^{161}Hf ($T_{1/2} = 20 \text{ s}$) 的衰变性质. Hulet 等^[21]通过计算机控制的自动快化分离装置, 研究了 65 s 的 α 放射性同位素 $^{201}104$ 的化学性质.

3.4 目标核的鉴别

3.4.1 直接法

随着分离和探测设备的不断改进和完善, 已经出现了灵敏度非常高的核探测设备. 例如, 法国 Ganil 的 LISE 和德国 GSI 的 FRS^[19], 它们能对每一个核事件做出同位素的判断, 后者一次实验就发现了 50 多种新核素^[22].

每个核都有表示其特征的 α 或衰变 γ 能谱, 根据这些射线的能量、半衰期或强度可确定一种同位素. 在有效化学分离的基础上, 通过 β 衰变曲线分解的方法也可确定产物的半衰期, 进而指定核素, 也是经常使用的一种方法. β - γ , γ - γ , X- γ 等符合测量也常用于新核素的鉴别. 有时还利用重核的自裂变径迹鉴别新核素, 前苏联科学家在 $Z = 103$ 和 104 的鉴别中曾经使用过这种方法.

3.4.2 间接法

对 α 衰变的核素, 借助于 α 衰变链通过观察各代子体核的存在进而证实母体(目标核)的生成, 也是经常使用的一种方法. 用这种方法实现了 $Z = 108 \sim 112$ 元素的鉴别.

用放射化学法将目标核(母体)从靶物质和反应产物中分离出来, 只要母核寿命大于子核, 定时将子体从母体中分出, 通过观测子核的增长或衰变, 可确定母体的存在, 进而证实目标核(母体)的生成. 在放射化学中经常使用这种“母牛法”. 在 ^{208}Hg (图 3) 的鉴别中使用了这种方法^[23].

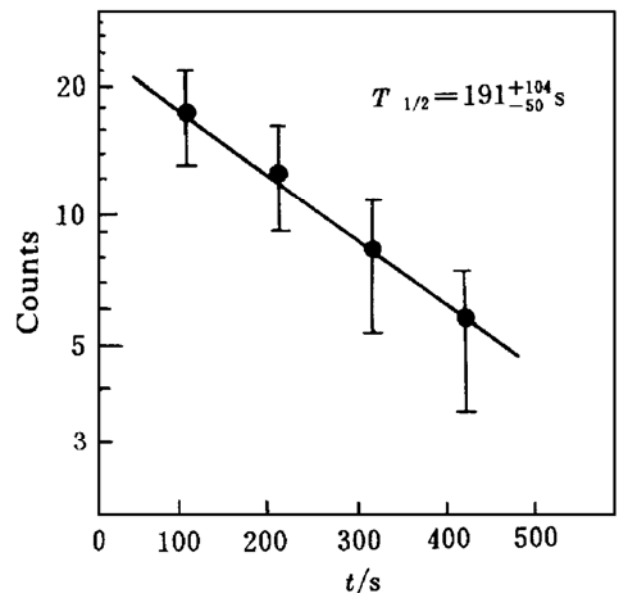


图 3 从 Hg 样品(来自铅靶)中分离出的 ^{208}Tl 的 2 614 keV γ 活性的衰变曲线

通过观测子体核特征 γ (X) 射线的增长、衰变, 并将测得的增长、衰变曲线进行分解, 可得到母、子体的半衰期, 从而证实目标核

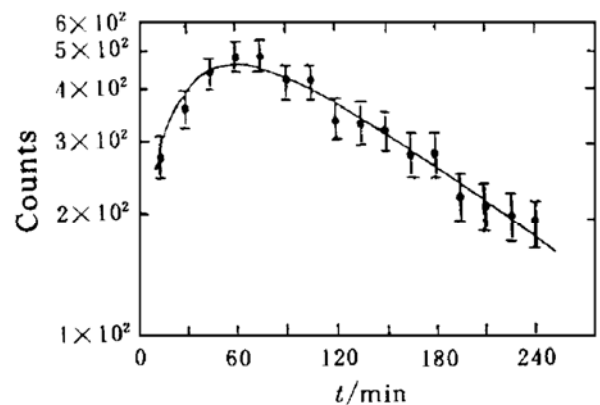


图 4 ^{239}U 衰变的 74.66 keV γ 射线的增长、衰变曲线^[13]

(母体)的存在. 用这种方法我们先后鉴别了^{185, 186}Hf^[3]、²³⁷Th^[4]、²³⁹Pa^[13]和²³⁵Am^[6] 5种新核素. 图 4 显示了²³⁹Pa 的子体²³⁹U 衰变的 74.66 keV γ 射线的增长和衰变曲线.

4 小结

几十年来各国科学家在新核素的合成研究中取得了巨大成果. 到目前为止, 在 $A < 50$ 的质量区, 已知核素中有的已经达到甚至超过质子、中子滴线, 可合成的新核素已所剩无几. 同位素分离器用于中子、质子引起重核裂变产物的分离对重稀土区丰中子新核素的合成仍在发挥作用. 由于技术等原因,

在 $A > 170$ 难熔重金属丰中子区, 尚有一大批未知核素等待人们去合成. 多层靶-气喷嘴系统加激光解析-电离技术与同位素分离器联用, 可能是合成、鉴别这个区新核素的有效途径. 在核素图的超铀缺中子区尚有一些空位, 选取合适的弹-靶组合及有效的化学分离技术, 这些空位将逐渐被填补. 在超重核的合成中, 尽管 Z 值已经达到了 112, 但它们都是超重缺中子同位素. 若要占领 $Z = 114$, $N = 184$ 的超重稳定岛核心, 则需要更丰的靶材料和更丰中子的次级束炮弹, 恐怕也要付出艰苦的努力才能获得成功.

参 考 文 献

- 1 Ameil I, Armbruster P, Bernas M *et al*. Production and Identification of Heavy Ni Isotope: First Observation of the Doubly Magic Nucleus ⁷⁸Ni. GSI Scientific Report 1995, GSI-1996-1, 1996, 1: 17
- 2 Schneider R, Faestermann T, Friese J *et al*. Production and Decay Measurement of ¹⁰⁰Sn. GSI Scientific Report 1994, GSI-94-1, 1995, 1: 27
- 3 Yuan S, Zhang T, Pan Q *et al*. New Neutron-rich Nuclide ¹⁸⁵Hf. Z Phys, 1992, A344: 355~356
- 4 Yuan Shuanggui, Zhang Tianwei, Pan Qiangyan *et al*. The Synthesis and Identification of New Heavy Neutron-rich Nuclide ²³⁷Th. Z Phys, 1993, A346: 187~188
- 5 Zhang Xueqian, Yuan Shuanggui, Yang Weifan *et al*. γ Decay of New Heavy Neutron Rich Nuclide ¹⁷⁵Er. Z Phys, 1996, A353: 353~354
- 6 甘再国, 郭俊盛, 刘洪业等. 超铀区缺中子同位素 ²³⁵Am 的合成与鉴别. 中国科学(A 辑), 1997, 26: 928~931
- 7 Greenwood R C, Anderl R A, Cole J D *et al*. Identification of New Neutron-rich Rare-earth Isotope Produced in ²⁵²Cf Fission. Phys Rev, 1987, C35: 1 965~1 968
- 8 Lazarev Yu A, Labanov Yu V, Oganessian Yu Ts *et al*. Discovery of Enhanced Nuclear Stability near the Deformed Shell $N = 162$ and $Z = 108$. Phys Rev Letters, 1994, 73: 624~627
- 9 Hofmann S, Ninov V, Beßberger F P *et al*. The New Element 112. GSI Scientific Report 1996, GSI-97-1, 1997, 1: 9
- 10 李占奎, 徐树威, 谢元祥等. 滴线区新核素¹²¹Ce 的合成及奇异衰变性质的研究. 第十次全国核物理大会论文集, 青岛, 1996, 270~271
- 11 Xu Shuwei, Xie Yuanxing, Li Zhankui *et al*. New β Delayed Proton Precursor ¹³⁵Gd. Z Phys, 1996, A356: 227~228
- 12 Zhang Li, Jin Genming, Zhao Jinhua *et al*. Observation of the New Neutron-rich Nuclide ²⁰⁸Hg. Phys Rev, 1994, C49: 592~596
- 13 Yuan Shuanggui, Yang Weifan, Zhang Xueqian *et al*. A New Isotope of Protactinium: ²³⁹Pa. Z Phys, 1995, A352: 235~236
- 14 Gaggeler H W, Jost D J, Turler A *et al*. Cold Fusion Reaction with ⁴⁸Ca. GSI Scientific Report 1989, GSI-90-1, 1990, 1: 22
- 15 Klapdor H V, Metzinger J, Oda T. Calculated beta-decay Half-lives, $Z = 114$. At Data Nucl Data Tables, 1984, 31: 95~111
- 16 Staudt A, Bender E, Muto K *et al*. Calculated beta-Decay Half-Lives, $6 \leq Z \leq 108$. At Data Nucl Data Tables, 1990, 44: 95~132
- 17 Takayoshi Horiguchi, Takahiro Tachiana, Tsutomu Tamura. Chart of the Nuclides. Japanese Nuclear Data Committee and Nuclear Data Center, 1992
- 18 Horiguchi T, Tachibana T, Katakura J I, Chart of The Nuclides. Japanese Nuclear Data Committee and Nuclear Data Center, 1992

- 19 Schmidt-Ott W D, Asahi K, Fujita Y *et al*. Observation of Spin Alignment of ^{43}Sc Produced in 500 MeV/u $^{46}\text{Ti} + \text{Be}$ Fragmentation. GSI Scientific Report 1993, GSI-94-1, 1994, 1: 13
- 20 Bruchertseifer H, Eichler B, Estevez J *et al*. Fast Continuous Radiochemical Isolation of the Short-lived Isotopes of Hf, Ta and W Produced by Heavy Ion Induced Reactions. *Radiochim Acta*, 1989, 47: 41~46
- 21 Hulet E K, Loughheed R W, Wildetab J F. Chloride Complexation of Element 104. *J Inorg Nucl Chem*, 1980, 42: 79~82
- 22 Czajkowski S, Ameit F, Armbruster P *et al*. First Identification of 50 Neutron-rich Isotopes in Fission of 750 MeV/u ^{238}U Projectiles on a Be Target. GSI Scientific Report 1995, GSI-96-1, 1996, 1: 16
- 23 杨维凡, 张立, 赵进华等. 从 30 MeV/u ^{12}C 离子辐照过的铅靶中分离汞和铊. *核技术*, 1996, 19: 513~516

Synthesis of New Nuclides in Intermediate and Heavy Mass Region

Yang Weifan Yuan Shuanggui

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

Abstract The importance of synthesis of new nuclei far from stability is concisely recounted. The progresses on synthesis of the new nuclides and the main methods used for producing new nuclei far from stability in the intermediate and heavy mass region is summarized. The half-lives of some new nuclides synthesized in china are compared with those calculated based on the gross theory and the microscopic theory. Some examples for transport and chemical separation of the nuclear reaction products as well as identification of the new nuclides are presented.

Key words new nuclide synthesis and identification half-life transport and separation

Classifying number O571.3