

对重丰中子核区合成新核素的思考*

赵之正

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 分析了 $A > 170$ 质量区丰中子核素的产生、分离和鉴别过程,总结了在这一质量区用较轻中能重离子炮弹打重靶产生新核素的优点,提出了在在线同位素分离器上使用带有优良元素选择性的激光离子源和多层靶加气体传输系统的改进措施.

关键词 新核素 核反应产额 在线同位素分离器 元素选择性

分类号 O571.31

1 引言

新核素合成是远离 β 稳定线核研究的起始和重要内容. 多年来在可能存在的核区中, 只有 $A > 170$ 的丰中子核质量区发现新核素的进展缓慢, 这是因为产生和分离方面遇到了困难. 在这个质量区能够产生一些重丰中子同位素的核反应并不多, 其中高能质子打重靶的散裂反应截面非常小, 重核碎裂反应产生的最重核的质量数低于 165. 只有快中子核反应和深部非弹转移反应才可能在这一区域产生新核素. 但是因产物十分复杂, 而其中许多是高温难熔元素, 使得过去采用的主要分离工具——在线同位素分离器, 在此区域遇到很大的困难. 80 年代末, 放射性束流装置由于不受被分离元素的化学性质影响, 分离速度极快和具有好的化学选择性, 因此在轻核区和裂变丰中子核区用它发现了大量新核素, 在电荷数数小于 20 的核区已经达到了质子滴线和在 Z 小于 9 的核区达到了中子滴线^[1]. 特别是以 ^{100}Sn ^[2] 和 ^{78}Ni ^[3] 双幻核为代表的奇异核的发现就表现出这一方法的强大生命力. 但是, 在 $A > 170$ 丰中子质量区它同样遇到困难, 如目前唯一能把重质量核加速到全剥离程度的加速器只有 GSI 的相对论重离子加速器 SIS, 因为束流强度低, 产额太小而产生重丰中子新核素相对困难. 近十年来, 使

用转移反应和在线同位素分离器对易挥发元素的分离只合成了 ^{205}Au ^[4], 使用快中子核反应和化学分离合成了 ^{202}Pt ^[5]、 ^{185}Hf ^[6] 和 ^{237}Th ^[7] 等新核素. 其余都是用中能较轻重离子炮弹打重靶和化学分离方法合成的. 本研究小组曾于 80 年代末提出过用中能较轻重离子打重靶产生、化学分离和探测 γ 谱的方法发现这个区新核素的建议. 使用这种方法目前已发现了 ^{208}Hg ^[8]、 ^{239}Pa ^[9] 等新核素. 为了进一步合成新核素, 本研究小组已经作了一系列的这个核区产生截面的研究, 其中文献^[10]有了新的发现. 这将给新核素的合成带来新的活力.

2 $A > 170$ 丰中子区新核素的合成、分离和指定

利用快中子的 $(n, 2pn)$ 、 $(n, 2p)$ 反应合成了 ^{202}Pt 、 ^{185}Hf 及 ^{237}Th 等新核素, 其产生截面大约是几十 μb ^[11]. 使用了很强的中子源 (4π 中子源强度为 $10^{11} \sim 10^{12}$ n/s); 中子的穿透力很强, 因此可采用很大数量的靶材料 (10 ~ 100 g), 以增加总产额; 产生的元素相对的少, 易于分离; 被分离核的半衰期较长 (几 min ~ 数十 h); 每一个靶子有足够的照射时间, 能产生足够多的目标核而易于分离和探测. 更进一步, 应当考虑 $(n, 3pn)$ 反应^[10], 但此时核反

* 国家自然科学基金资助课题和中国科学院八五重大课题, 课题编号 GJ970306.
1997 - 11 - 11 收稿.

应阈将进一步提高(约 20 MeV 以上),产生截面进一步减小(约几个 μb).此外,除了目标核的半衰期更短、无适当靶材料、 γ 射线的丰度低、衰变子体半衰期过长或过短及无适当的化学分离流程等因素外,一个能量高和束流强的中子源也是个重要问题.这时应当重视高能质子打 Be 的中子源和中能重离子碰撞中的前平衡发射产生的中子源.因为这两个中子源除了有足够高的中子能量外还有极端向前的角分布,因而中子束利用效率高.

新核素 ^{205}Au 是用重炮弹的转移反应、由在线同位素分离器分离和探测 γ 谱得到的.这种反应产生截面足够大,如产生 ^{205}Au 是用 $^{208}\text{Pb}(11.4\text{ MeV/u})$ 炮弹打 W 靶,在 (-3p) 反应道,截面约 $50\ \mu\text{b}$.产生无关的同位素相对较少,因炮弹能量不高(11.4 MeV/u),所以使用的靶厚小(几十 mg/cm^2). ^{208}Hg 和 ^{239}Pa 的合成是利用中能($20\sim 50\text{ MeV/u}$)较轻重离子炮弹(^{12}C 和 ^{18}O)的深部非弹转移反应的 $(-2\text{p}+2\text{n})$ 和 $(-\text{p}+2\text{n})$ 反应道和化学分离法实现的,产生截面大,约是 $10\sim 100\ \mu\text{b}$.由于炮弹轻,所以比重炮弹转移反应的截面小,但是因为炮弹的射程长,因而可使用更厚的靶($1\sim 2\ \text{g/cm}^2$),总产额仍然足够大.虽然炮弹能量的提高增加了产额,可是这种核反应开放了更多的反应道,而使产物变得十分复杂.这里应当指出的是:普通的溶液化学分离对新核素的合成是十分有效的,因为溶液化学分离不仅具有高效率而且能把未知核的衰变子体清除得比较干净,这就提高了按母子体关系指定未知核方法的灵敏度;在这一质量区未知核的寿命比较长,很适合手动化学分离,特别是许多元素是高温难熔元素,能够发挥化学分离的特长,补偿了在线同位素分离器的不足;未知核寿命长,以至于可使用屏蔽良好的铅室和大体积 Ge γ 探测器,很大程度上提高了探测灵敏度,所以这里没有使用大型设备而发现了一批新核素.

以上所述的在线同位素分离器分离和化学分离,都只有单一的质量分离或元素分离,

分离结果通常是只能得到一种质量数的同质异位素的混合物或一种元素的许多同位素的混合结果.因为分离得不完全而存在下述问题:(1)使分离方法不能成为进一步指定新核素的可靠方法,指定时必作出较完整的衰变曲线,根据母子体关系和已知子体的衰变特性确认未知母体的存在,这就需要得到很多计数才能实现.(2)使能谱中的本底较高和存在无关的 γ 射线峰,从而影响了探测灵敏度和可靠性的提高.此外,要在分离后的产物中选择出需要的同位素,则完全依赖于 Ge γ 探测器的能量分辨率.有时,由于核的 γ 射线的相对强度很低, γ 射线的探测效率也就很低($\sim 1\%$),所以探测灵敏度不高.(3)不能使用更高探测效率而无能量分辨率的探测器(如 β 探测器、中子探测器等).这都说明单一的质量或化学分离是造成可探测的最低截面较高的原因.所以单一的分方法的分离能力限制了这个质量区新核素的合成.为此,应寻找一种更有效的化学分离方法,它不仅要保持高效率分离的优点,而且能与在线同位素分离器结合使用,使在线同位素分离器既有质量分辨率又有电荷分辨率(即元素的选择性),可能的方法是激光多步共振电离和真空热色谱方法,而首选的方法是激光多步共振电离方法.

3 放射性束流装置的使用

放射性束流装置是以飞行时间确定核的质量 A ,以粒子穿过薄片探测器的能量损失确定核的电荷数 Z .此外偶极磁铁能按照离子的荷质比对粒子做粗分离.由于该装置对每一个核事件都作了 A 和 Z 的指定,又由于探测高能粒子的本底极低,所以能够实现单核事件测量;因探测灵敏度极高,往往只需要几个计数就可以指定未知新核素,如 ^{100}Sn 的发现只有 7 个有效计数^[2], ^{78}Ni ^[3]只有 4 个有效计数.另外,以反冲核作为分析对象,不需要反冲核停下来,所以分离速度快,又不受

元素化学性质的影响. 总之, 该装置克服了在线同位素分离器的主要缺点而获得很大的成功. 但是该装置并不是完美无缺的, 其局限性大体有三个方面. (1) 使用的炮弹能量必需很高, 高到足以使核反应产物达到全剥离, 例如 U 炮弹需要达到 1 GeV/u 的能量才能使产物核在放射性束流装置上使用, 而目前的加速器可以提供这一高能量时的束流强度只有 3×10^7 p/s (指 GSI 的相对论重离子加速器 SIS 在 1996 年的 U 束流强度). 为了达到粒子的全剥离和维持好的质量分辨, 使用的靶子不能太厚, 约 $1 \sim 2$ g/cm², 此时大约与 50 MeV/u ¹⁸O 全阻止的靶厚相同. 如果它的总效率约为 20%, 对产生 0.1 μ b 截面的同位素产额是每 1 000 s 一个原子. 这么低的产额难以作衰变特性的测量 (仅指在重核丰中子区核需要测量的 β 或 γ 放射性). (2) 在放射性束流装置的使用中, 更适于短寿命核的测量, 而对长寿命核的测量将使束流利用率不高. (3) 产物核的剩余激发能高, 对不稳核和易裂变核的产生不利. 这三个局限性使得放射性束流装置在产生 $A > 170$ 区丰中子新核素和测量新核素的衰变特性遇到一些困难. 这不仅在重丰中子区如此, 在缺中子区也一样, 如 GSI 的 UNILAC 加速器和在线同位素分离器结合得到分离后的 ¹⁰⁰Sn 核, 可以达到每天 1 200 个原子, 而在 SIS 和 FRS 上的产额是每天 1 个^[12]. 这说明目前的放射性束流装置在重核缺中子和丰中子区仍需要提高束流强度. 由上述原因, 人们不难理解为什么 GSI 的 SIS 和 FRS 目前没有开展重核丰中子区^[13]合成新核素研究的原故.

4 采用在线同位素分离器分离的建议

同位素分布的实验结果^[11]证明, 相对论能量的重炮弹碎片具有比中能较轻的重离子炮弹打重靶的靶碎片产生相同反应产物核的剩余激发能要高, 因此后者产生丰中子核的截面更大, 这样可以使束流强度很大的中能炮弹打重靶, 选择减少质子同时增加中子

的反应道产生丰中子新核素, 使用靶厚增大总产额. 这样靶碎片的方法在重核丰中子区仍然是一个应当使用的方法. 例如, 在中科院近物所的重离子加速器 (HIRFL) 上的 ¹⁸O 束流 (束流强度 $10^{10} \sim 10^{11}$ p/s) 打重靶产生的新核素的截面比 GSI 的 SIS 和适用于碎片分离器 FRS 的能量产生同一个重丰中子新核素的截面大^[11], 又因前者的束流比后者强 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 这样前者的产额也比后者大 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 如果在线同位素分离器的分离效率能达到 10%~20%, 与放射性束流装置差不多, 那么两者分离后的产额也将有这么大的差别. 这说明在当前放射性束流装置的强烈竞争下, 用中能炮弹打重靶和使用在线同位素分离器分离和化学分离的方法仍有一定优势, 即产额大.

虽然在 $A > 170$ 丰中子核区使用靶碎片在总产额方面有一些优势, 但是不改进原有缺点是很难发现新核素的. 这些缺点是: 不能分离高温难熔元素; 元素选择性不好, 因而分离得不纯; 对某些元素的分离效率低; 分离速度慢等. 在线同位素分离器的这些缺点, 显然都是来自靶离子源系统. 作为分离的第一步是核反应产物的原子脱离靶子, 但是直到目前, 在线同位素分离器主要使用热靶离子源系统, 用高温使核反应产物脱离靶, 显然不适用于高温难熔元素的分离. 由于转移反应的近靶产物的反冲能很低, 反冲核不可能从普通的厚靶中反冲出来, 高温难熔元素不可能经加热从厚靶中脱离. 多层靶和气体传输技术的使用能改善在线同位素分离器的分离速度和把高温难熔元素传出厚靶和靶室. 其次, 用激光离子源代替常用的电弧电离和表面电离源, 这样不仅可提高元素选择性和分离效率, 而且还能克服不能电离高温难熔元素的困难^[14,15]. 例如, 在 CERN 的在线同位素分离器原有的热靶离子源系统中, 以热毛细管方式的激光离子源代替原有的 FEBIAD 离子源, 虽然还不能分离高温难熔元素, 但是提高了观测的总效率和元素选择性. 对高能质子

打铀的裂变产物作在线分离时,用高效率的中子探测器探测 β 延迟发射中子. 当时 Ag 元素在线测量的总效率为 $\sim 10\%$, 元素选择性为 10, 结果克服了 In 元素的干扰而发现了新的中子发射体暨新核素 $^{125\sim 128}\text{Ag}^{[16]}$, 这不仅比同时在放射性束流装置上进行的相对论能量的铀炮弹裂变产物探测到的 Ag 丰中子同位素还多 2 个^[17], 而且还得到了半衰期、衰变纲图和发射中子的分支比等多种核数据. 这个结果充分说明, 激光离子源好的元素选择性对在线同位素分离器的性能改进具有十分重要的作用. 在比利时的 LEUVEN, 给离子制导式在线同位素分离器加上激光多步共振电离后, 在室温下分离出熔合反应产物 $^{54,55}\text{Ni}$ 、 ^{54}Co 和 ^{238}U 的裂变产物 ^{113}Rh 同位素, 实现了高温难熔元素的电离^[18]. 同时还得到了在线实验的元素选择性为 300 的好结果. 这说明, 在目前的技术条件下, 把多层靶加气体传输技术和激光离子源结合在一起的在线同位素分离器将能实现并构成一种新的、适用于 $A > 170$ 丰中子核区的分离工具, 它将能克服在线同位素分离器的大部分缺点.

激光离子源的原理是由激光把分离的原子从基态共振地激发到第一激发态, 再由第二束激光共振激发到第二激发态, 最后由第三束激光共振激发到自电离态而产生电离. 由于共振激发与非共振激发的截面相差 $10^3 \sim 10^5$ 倍之多, 那么三步合计被激光共振电离的原子与非共振电离的原子之比有 $10^8 \sim 10^{15}$ 之大^[19], 如果不考虑其它因素, 那么元素选择性就是 $10^8 \sim 10^{15}$. 这就是为什么激光离子源具有好的元素选择性的根本原因. 本小组使用本所建立的以铜蒸汽激光器作泵浦激光器, 泵浦三个染料激光器, 得到了三束波长可调谐的激光, 用这样的激光对热毛细管式的激光离子源电离 Tm 原子的特性作了测试, 证明该离子源对电离电位大于 6 eV 和温度在 2 300 °C 以下具有挥发性的元素都具有好的元素选择性 ($50 \sim 10^4$)^[20]. 这种方式的激光离子源适用于部分稀土元素, Bi、Pb、Tl、Au

及部分铜系元素等重元素的电离.

对于 Hf、Ta、W、Re、Os、Ir 和 Pt 等高温难熔元素, 将依靠前述多层靶和气体传输技术把近靶产物带出厚靶, 沉积在收集板上, 再用一个强激光脉冲轰击收集板的沉积斑, 使带出的核反应产物呈单原子状态脱离沉积的底板, 在飞行中, 使用多步共振电离激光作选择性电离, 最终只有所选择的原子被电离, 把离子引入在线同位素分离器的磁铁, 可以实现对高温难熔元素的电离, 同时由于没有高温产生的热电离和热表面电离, 还可以考虑离子的中性化, 所以可能具有比热毛细管式激光离子源更好的元素选择性.

在实现了质量数 A 和元素 Z 的完全分离以后, 为提高探测灵敏度创造了良好条件. 首先是可以使用高效率而能量分辨率差或完全没有能量分辨率的探测器, 如 β 探测器和高效率中子探测器, 通过测量半衰期就可以确定新核素. 若元素选择性是大于 10, 就可以实现这个目的, 此时的探测效率大于单一分离时的 10 倍以上. 探测和指定新核素的最高灵敏度是实现单核事件探测的关键, 如在放射性束流装置对每个核事件都作了质量 A 和元素 Z 的标记, 同时本底极低, 只用几个计数就可指定新核素. 通常在线同位素分离器在无干扰时, 本底可能达到足够低. 从原理上看, 质量分辨率若达到 300 和元素选择性好于 100, 就能实现对质量数 250 以下的所有同位素的单核事件进行测量. 目前的激光离子源在线工作时的元素选择性为 $10 \sim 300$ ^[16,18], 已经初步具备实现单核事件探测的条件. 初步估计, 这一装置的可探测截面的下限为 10 nb.

5 结 论

使用中能较轻重离子打重靶产生 $A > 170$ 质量区丰中子新核素, 具有产额大的优点. 使用元素选择性好的激光离子源的在线同位素分离器, 将会推进这一质量区新核素研究的进程. 只有使用由多层薄靶组成的厚

靶加气体传输技术才能使高温难熔元素传出厚靶,并联合激光离子源就可实现对高温难熔元素的分离.好的元素选择性配合好的质量分辨率就能够实现单核事件的探测,使发现新核素的截面低于 10 nb.这些技术的实现将有力地推动 $A > 170$ 丰中子核区新核素的研究.

参 考 文 献

- Anne R, Artukh A G, Bazin D et al. Production and Identification of New Isotopes at the Proton and the Neutron Drip-line. Nucl Phys, GANIL, 1989,19~21: 1983~1988
- Schneider R, Friese J, Reinhold J et al. Production and Identification of ^{100}Sn . Z Phys, 1994,A348:241~243
- Engelmann C, Ameil F, Armbruster P et al. Production and Identification of Heavy Ni Isotopes: Evidence for the Doubly Magic Nucleus, ^{78}Ni . Z Phys, 1995, A352:352~355
- Wennemann Ch, Schmidt-ott W D, Hild T et al. Investigation of New Neutron-rich Gold Isotopes ^{203}Au and ^{205}Au . Z Phys,1994,A347:185~189
- Shi S, Huang W D, Li Y et al. Identification of a New Neutron-rich Isotope ^{202}Pt . Phys, 1992, A342: 369 ~ 370
- Yuan Shuanggui, Zhang Tianmei, Pan Qiangyan et al. The New Isotope of ^{185}Hf . Z Phys, 1993,A344:355~356
- 袁双贵,张天梅,徐树威等. 新重丰中子核 ^{237}Th 的合成和鉴别. 高能物理与核物理,1993,17:959~960
- Zhang Li ,Jin Genming, Zhao Jinhua et al. Observation of the New Neutron-rich Isotope ^{208}Hg . Phys Rev, 1994, C49:R592~R596
- Yuan S, Yang W, Mon W et al. A New Isotope of Protactinium: ^{239}Pa . Z Phys, 1995, A352:235~236
- 赵之正,胡志强,杨维凡等. 中能 $^{12}\text{C}+^{197}\text{Au}$ 反应产物中 Ir 同位素产额的观测. 高能物理与核物理, 1997,21: 402~408
- Hill J C, Shrik D G, Petry R F et al. Search for New Neutron-rich Nuclei Produced by Fast Neutrons at LAMPF, Pro 3rd Inter Conf Nucl far from Stability, CERN 1976,76~13:532~535
- Burkard K, Collatz R, Hellsrtrom M et al. Recent Developments at the GSI on-line Mass Separator. GSI-pre. 1996,63:1~8
- Wollnik H, Beckert K, Beha T et al. Direct Mass Measurements of Proton-rich Nuclei in the Region from Tellurium to Polonium. Nucl Phys, 1997, A616: 346c ~ 351c
- Qamhieh Z N, Vandeweert E, Silverans R E et al. Resonance Ionization in a Gas Cell: a Feasibility Study for a Laser Ion Source. Nucl Instr and Meth, 1992,B70:131~136
- Lee J K P, Cvawford J E, Raut V et al. Resonant Ionization Using Synchronized Laser Pulses. Nucl Instr and Meth, 1992,B70:444~447
- Fedoseyev V N, Jading Y, Jonsson O C et al. Study of Short-lived Silver Isotopes with a Laser Ion Source. Z Phys, 1995,A353:9~11
- Bernas M, Armbruster A, Lzajkowski S et al. Identification of More than a 100 New Isotopes from ^{238}U Projectile Fission and Beam of Neutron-rich Nuclei at BRENDA. Nucl Phys, 1997, A616:352c~362c
- Kudryavtsev Y, Andrzejewski J, Bijmens N et al. Beams of Short Lived Nuclei Produced by Selective Laser Ionization in a Gas Cell. Nucl Instr and Meth B, 1997,114:350~365
- Letokhov V S. Laser Photoionization Spectroscopy. London:Academic Press, 1987
- Zhao Zhizheng, Yang Yongfeng, Cai Xicheng et al. Chemical Selectivity of Laser Ion Source for on-line Mass Separator. Chinese Journal of Nucl Phys, 1997, 19:48~52

New Idea about Synthesis of New Heavy Neutron-rich Nuclei

ZHAO Zhizheng

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

Abstract The production, and process of separation and identification of new neutron-rich nuclei with mass number $A > 170$ were analyzed. The advantages of producing new isotopes in this mass region by lighter heavy particles on heavy targets were (下接第 42 页)

(上接第 14 页)

summarized. It is put forward an improvement method that a laser ion source and multilayer target combining with gas jet transport method can be used on on-line isotope separator.

Key Words new isotope yield of nuclear reaction on-line isotope separator element selection