

# 远离稳定线丰中子核素的合成和研究\*

罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 远离稳定线丰中子核素的合成和其衰变性质及核结构研究在过去几年中得到了迅速的发展,已成为原子核物理最为活跃的前沿领域之一. 本文综述各质量区丰中子远离核的生成和鉴别,重点讨论丰中子远离核奇异衰变性质和核结构研究的重要进展,并简要介绍丰中子远离核研究在天体物理学中的重要应用.

**关键词** 远离稳定线, 丰中子核素, 合成和鉴别, 核衰变, 核结构.

## 1 前言

近年来,核物理学的研究沿着能量(激发能、温度、密度)同位旋和自旋三个维度迅速深化,硕果累累. 在同位旋自由度  $(N-Z)/A$  上,即沿核素图  $\beta$  稳定线向缺中子和丰中子两边拓展中,丰中子远离核的合成和鉴别,特别是其奇异衰变性质和核结构的深入研究已经并正在极大地推动核衰变和核结构及天文核物理理论模型的检验和发展<sup>[1,2,3,4]</sup>.

丰中子远离核  $\beta$  缓发 1~4 个中子、 $\beta$  缓发裂变(重核区)等奇异衰变方式的发现和研究,特别是轻丰中子滴线核中中子晕<sup>[2,3,5,6]</sup>和中子皮奇异结构的发现和深入研究是近年来核衰变和核结构研究最为引人注目的进展之一. 与此同时,丰中子远离核的研究在天体物理学中获得了重要应用<sup>[4]</sup>. 天体物理学质量( $A$ )丰度曲线在  $A=80, 130$  和  $195$  处观察到的特征峰已被归因于快中子俘获( $r$ )过程. 而  $r$  过程路径决定于中子俘获和  $\beta$  衰变,包括  $\beta$  衰变半衰期、 $Q_\beta$  值和缓发中子及缓发裂变(重核)机率. 由于丰中子远离核合成和研究在核衰变、核结构和天体物理研究中具有重要意义并正取得重大进展,该领域的研究已成为近年来原子核物理学最具吸引力和最为活跃的前沿之一.

由于库仑斥力的作用,质子滴线( $B_p=0$ )并不十分远离稳定线,轻质量区质子滴线仅

接近于  $N \approx Z$ . 尽管库仑位垒和离心位垒的存在使可观测的缺中子远离核能在一定范围越过质子滴线,留待人们合成和研究的缺中子核素所占比例已不大. 然而,由于中子物质的束缚性质,中子滴线( $B_n=0$ )位于极丰中子的非常远离稳定线的区域. 根据理论预言,<sup>176</sup>Sn 这样的极丰中子远离核(比已知的最丰中子核<sup>134</sup>Sn 多 42 个中子)仍然是可观测的! 核素图上未来可合成和研究的大多数远离核在丰中子一边.

最近几年,由于新的生成机制和先进的分离鉴别技术的发展,人们在各质量区相继合成和鉴别了一大批丰中子新核素,并在直到  $Z=10$  的轻质量区成功地达到了中子滴线. 在轻质量区,人们使用中高能炮弹碎裂和高能轻离子在重靶上的散裂,分别配合零度磁谱仪上的磁分离(加上飞行时间和能损测量)和在线同位素分离,成功地合成、分离和鉴别了数十种丰中子新核素,并测量了它们的生成截面、质量和半衰期<sup>[1]</sup>以及部分核素的缓发中子几率  $P_n$ . 特别值得强调的是,用中高能炮弹碎裂在<sup>11</sup>Li、<sup>11</sup>Be、<sup>14</sup>Be 和<sup>17</sup>B 等中子滴线核中发现的奇异的中子晕结构<sup>[2,3,5,6]</sup>和在<sup>6</sup>He、<sup>8</sup>He 中发现的中子皮结构,向传统的壳模型理论提出了严峻的挑战. 而跨过中子滴线的<sup>10</sup>He 共振态的成功观测把稳定性极限外的实验研究推向新的水平(Phy. Lett. B326 (1994)31).

\* 本文亦是作者在第五次国际核核碰撞会议上的邀请报告. 限于篇幅,本期刊登该报告的第 1 和第 2 节.

在重核裂变碎片复盖的质量区,丰中子远离核的合成和研究获得了新的发展.高能 $^{238}\text{U}$  炮弹裂变的新机制与碎片反冲分离器相结合,成功地鉴别出 50 种新丰中子核素(GSI-Nachrichten 04-94). 质子数  $Z=28$  闭壳附近质量数  $A$  为  $65\sim 80$  的丰中子区位于裂变碎片质量分布曲线最左端,传统诱发非对称裂变与反冲分离技术相结合,在过去几年中将丰中子新核素的合成推向更轻元素和更丰中子区,检验和发展了核衰变理论模型和天文物理在该区域关于  $r$  过程的计算<sup>[7]</sup>. 在高温难熔元素  $40\leq Z\leq 46(\text{Zr}\sim\text{Pd})$  的质量数在  $105\sim 120$  中重丰中子区,离子制导在线同位素分离技术的发展(使用传统对称裂变机制)在该区域实现了重要突破,合成和鉴别了一批高温难熔元素的丰中子核素,为检验理论模型和  $r$  过程计算发挥了重要作用(参见文献[8]).

此外,  $A>170$  的重质量丰中子区是具有重要物理意义而又有极大难度、至今进展缓慢的核区. 该核区理论预言的缓发中子先驱核岛<sup>[10]</sup>和缓发裂变岛<sup>[11]</sup>的研究在核衰变、核结构研究和天文物理有关重质量区  $r$  过程的计算中具有重要意义. 重离子多核子转移反应等机制和相关分离测量技术的发展推动该核区丰中子远离核的合成和研究取得了引人注目的进展.

本文综述近几年来丰中子远离核合成和研究这一前沿领域的主要进展. 第 2 节介绍丰中子远离核的生成、分离和鉴别;第 3 节归纳轻丰中子核,特别是中子晕和中子皮的实验研究;第 4 节概述  $Z=28$  闭壳附近  $A$  为  $65\sim 80$  质量区丰中子远离核的衰变性质、核结构研究和在天文物理中的应用;第 5 节简介  $40\leq Z\leq 46$  高温难熔  $A$  为  $105\sim 120$  中重丰中子区新核素的衰变性质和核结构研究及在天文物理中的应用;第 6 节讨论  $A>170$  重质量丰中子区新核素的研究,包括  $\beta$ 、 $\gamma$  谱学,缓发裂变和缓发中子的寻找及在天文物理学,包括  $r$  过程和宇宙年龄研究中的重要应用.

## 2 丰中子新核素的生成和鉴别

众所周知,过去几十年来重核的瞬发和诱发裂变在  $65\leq A\leq 170$  质量区丰中子核素的生成中发挥了主要作用. 近年来,传统的裂变(重靶的对称和非对称裂变)和先进的分离鉴别技术相结合,将该质量区丰中子核的合成推向更丰中子区. 特别值得指出的是,GSI 利用高能入射重离子( $^{238}\text{U}750\text{MeV/u}$ )的炮弹裂变这一新方法,在反冲碎片分离器 FRS 上成功地生成和鉴别了 50 种丰中子新核素,其裂变产物质量分布宽度比传统的诱发重靶裂变的更宽(GSI-Nachrichten 04-94).

在其它质量区丰中子核素合成中已经和正在使用的有效的核反应包括:重离子深度非弹性碰撞(DIC),中高能重离子炮弹碎裂(PF),重离子多核子转移(MNTR),高能轻离子诱发重靶散裂反应,快中子引起的( $n$ ,  $2p$ )和( $n$ ,  $2pn$ )反应等. 主要的分离鉴别技术包括:(1)零度磁谱仪与飞行时间和  $\Delta E$ - $E$  测量相结合;(2)在线同位素分离器与  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $X$  和转换电子谱学测量相结合;(3)放射化学分离与  $\beta$ 、 $\gamma$  和  $X$  谱学相结合.

### 2.1 $Z<28$ 轻丰中子核素的生成和鉴别

该质量区的大批轻丰中子核素是在 Berkeley<sup>[12~14]</sup>、GANIL<sup>[15~19]</sup>、RIKEN<sup>[20]</sup>、MSU<sup>[21]</sup> 和 GSI<sup>[22,23]</sup> 使用中高能  $^{11}\text{B}$ 、 $^{18}\text{O}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{86}\text{Kr}$  和  $^{48}\text{Ca}$  炮弹碎裂得到的(用该方法也同时得到一批丰质子核素).

对于中高能炮弹碎裂中丰中子核素的生成截面已进行过大量研究. 已发现,丰中子靶有利于接近弹核的丰中子同位素的生成,而重靶(如 Ta)对远离弹核的轻核的生成有利(参见图 1)<sup>[24]</sup>.  $44\text{MeV/u}$   $^{48}\text{Ca}$  轰击很丰中子的  $^{64}\text{Ni}$  靶,生成和鉴别了很丰中子的同位素  $^{42}\text{Si}$ 、 $^{45,46}\text{P}$ 、 $^{18}\text{S}$  和  $^{51}\text{Cl}$ <sup>[24]</sup>.

上述轻丰中子核素的分离鉴别是在零度磁谱仪上进行的,例如 GANIL 的 LISE, GSI 的 FRS, RIKEN 的 RIPS 和 MSU 的 A1200.

高能轻粒子引起的重靶散裂反应也被用

来生成轻丰中子核素. 最近, 在 CERN 的在线同位素分离器 ISOLDE 上, 用 910MeV  $^3\text{He}$  轰击  $\text{ThC}(55\text{g}/\text{cm}^2)$ , 生成和鉴别了丰中子核素  $^{26\sim 29}\text{Ne}^{[26]}$ .

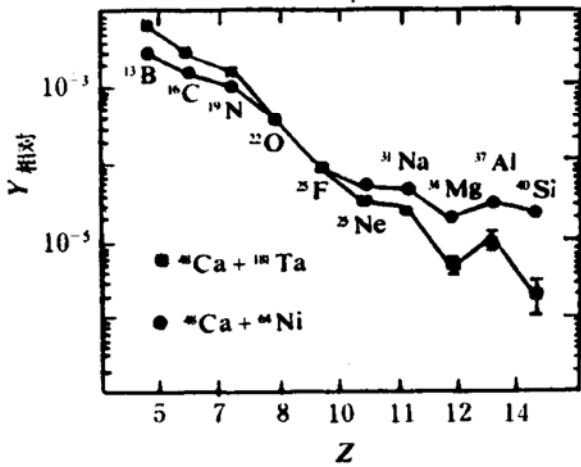


图 1  $^{48}\text{Ca} + ^{181}\text{Ta}$ ,  $^{61}\text{Ni}$  炮弹碎裂反应中中子数为  $N=2Z-2$  的丰中子同位素的相对产额

### 2.2 Z=28 附近 (Fe~Cu) 质量数约 65~80 丰中子核素的合成和鉴别

该区域丰中子核素位于非对称裂变产物质量分布的最轻质量边缘. 热中子诱发  $^{235}\text{U}$  裂变 $^{[7,27,28]}$ 、 $^{239}\text{Pu}$  裂变 $^{[7,29]}$  和高能质子 (和轻重离子) 引起的  $^{238}\text{U}$  裂变 $^{[30]}$  仍然是生成该区域丰中子核素的有效方法.

最近几年, 在上述非对称裂变反应中使用高通量中子已成功地合成丰中子核素  $^{68}\text{Fe}^{[29]}$ 、 $^{68,69}\text{Co}^{[29]}$ 、 $^{71,72,73,74}\text{Ni}^{[7]}$ 、 $^{74,75}\text{Cu}^{[7]}$ 、 $^{76,78}\text{Cu}^{[27,28]}$  和  $^{79}\text{Cu}^{[30]}$ . 大多数实验是在 Grenoble 的 ILL 高通堆上进行的, 使用反冲分离器 Lohengrin 和  $\Delta E+E$  技术对产物进行分离和鉴别.

在 GSI 的 FRS 上使用炮弹碎裂反应  $500\text{MeV}/u \text{ } ^{86}\text{Kr} + \text{Be}(2\text{g}/\text{cm}^2)$  成功地生成和鉴别了更丰中子的  $^{69}\text{Fe}$  和  $^{71}\text{Co}^{[22]}$ .

### 2.3 $40 \leq Z \leq 46$ (Zr~Pd) 高温难熔元素丰中子同位素的生成和鉴别

常规在线同位素分离器热离子源不能有效地扩散高温难熔元素, 这是分离鉴别该类丰中子核素的主要技术困难. 过去几年中, 在

Jyvaskyla 建成并投入使用的离子制导在线同位素分离器 (IGISOL) 摒弃了常规热离子源, 在高温难熔元素同位素的分离鉴别中实现了重要突破, 在 IGISOL 上的在线同位素分离与其后的  $\beta\text{-}\gamma$ 、 $\beta\text{-X}$ 、 $\gamma\text{-}\gamma$  和转换电子测量相结合, 在 20MeV 质子引起的  $^{238}\text{U}$  对称裂变产物中成功地分离鉴别出 Zr~Pd 区二十多种中重丰中子新核素 (约 105~120) $^{[32,33]}$ , 其中包括有  $^{105}\text{Zr}$ 、 $^{107}\text{Nb}$ 、 $^{109}\text{Mo}$ 、 $^{110}\text{Mo}$ 、 $^{113}\text{Tc}$  和  $^{115}\text{Ru}^{[33]}$ .

值得指出的是, 中高能炮弹碎裂和高能轻离子引起的重靶散裂是生成该区域的中重丰中子核素的另外两种有效的核反应. Friese 等人在 GSI 的 FRS 上研究了炮弹碎裂反应  $760\text{MeV}/u \text{ } ^{136}\text{Xe} + ^{27}\text{Al}(804\text{mg}/\text{cm}^2)$  中, 质量范围  $116 \leq A \leq 134$  内很丰中子核素的生成截面 $^{[23]}$ . EPAX $^{[25]}$  理论计算的生成截面在总体上和实验符合得较好, 但对于类弹产物, 理论计算过高估计了生成截面, 而且过低估计了同位素产额分布的陡度 (参见图 2). 由图 2 还可看出, 统计擦碎模型 $^{[34]}$ 很好地描述了类弹产物的生成截面, 却大大高估了较轻产物的生成截面.

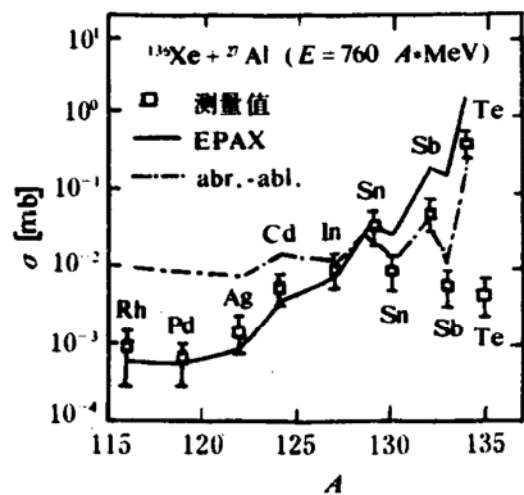


图 2  $^{136}\text{Xe} + ^{27}\text{Al}$  炮弹碎裂反应中质量数为  $116 \leq A \leq 134$  的丰中子产物生成截面与 EPAX 模型 (实线) 和擦碎模型 (点划线) 计算值的对比

### 2.4 A>170 重丰中子核素的生成和鉴别

该重质量区位于裂变产物质量分布之外;此外,中高能重离子炮弹碎裂和零度磁谱仪相结合也尚不适用于很重质量区丰中子核素的合成. A>170 丰中子区是核素图上留有大块空缺的质量区.

#### 2.4.1 重丰中子核素合成中使用的多核子转移反应

在多核子转移反应中,  $l_{cr} < l < l_c$ , 没有足够的时间达到反应系统质量分布的平衡, 而有相当多的核子可以在碰撞核之间转移, 这是介于准弹和深部非弹之间的反应. 核子交换具有统计性质, 反应系统的渐进方向由双核系统的势能决定. 由于库仑斥力和离心力超过了核引力, 反应系统在达到平衡之前分开, 其寿命决定于角动量. 多核子转移的上述性质被成功地用于宽广质量区中远离核、特别是重质量丰中子核素的合成, 多核子转移的类弹产物和类靶产物均可加以利用.

Meissner 等人测量了 11.4MeV/u  $^{209}\text{Bi} + ^{208}\text{Pb}$  多核子转移反应中类弹产物重丰中子核素的产额, 并把该反应系统中几个多核子转移道的生成截面同其它反应系统<sup>[9]</sup>比较, 发现对于不同反应系统中相同的转移道, 生成截面是相近的.

杨维凡等在兰州重离子加速器上对中能轻重离子在重靶上引起的多核子转移的类靶产物的生成截面进行了系统研究<sup>[37]</sup>. 用放射化学分离和  $\gamma$  谱学方法测量了 47MeV/u  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 、 $^{197}\text{Au}$  多核子转移反应中类靶产物的生成截面. 由 Hg、Au 和 Pt 的同位素质量产额高斯分布发现,  $\Delta A/\Delta Z \approx 4$  (见图 3), 这里  $\Delta A = A_i - A_{mp}$ ,  $A_i$  是靶核质量数,  $A_{mp}$  为类靶产物同位素质量分布的最可几值;  $\Delta Z = Z_i - Z$ ,  $Z_i$  和  $Z$  分别是靶和类靶产物的原子序数. 将分布曲线外推, 可以看出  $-3p + 2n$  这样的转移道有希望以  $\sim 10^0 \sim 1 \mu\text{b}$  的生成截面产生新的重丰中子核素.

GSI、LBL 和 IMP 采用多核子转移反应,

已在类弹和类靶产物中合成了一批重质量丰中子新核素.

在重镧系区, 在在线同位素分离器上使用多核子转移反应, 重质量丰中子核素的合成及衰变性质和核结构研究已取得了引人注目的进展, 包括  $^{181,182}\text{Lu}$ <sup>[38]</sup>、 $^{183}\text{Lu}$ <sup>[39]</sup>、 $^{184}\text{Lu}$ <sup>[9]</sup>、 $^{180}\text{Yb}$ <sup>[40]</sup>、 $^{179}\text{Yb}$ <sup>[41]</sup>、 $^{177}\text{Tm}$ <sup>[9]</sup>、 $^{174}\text{Er}$ <sup>[42,43]</sup>、 $^{168}\text{Ho}$ <sup>[44]</sup>、 $^{168m}\text{Ho}$ <sup>[44]</sup>、 $^{171}\text{Ho}$ <sup>[45]</sup>、 $^{172}\text{Ho}$ <sup>[42]</sup>、 $^{168}\text{Dy}$ <sup>[44]</sup> 和  $^{169}\text{Dy}$ <sup>[45]</sup>.

重丰中子新核素  $^{203,205}\text{Au}$  在 GSI 在线同位素分离器上分离鉴别获得成功, 在 11.4 MeV/u  $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$  多核子转移反应中, 类弹产物生成了  $^{203,205}\text{Au}$ <sup>[46]</sup>.

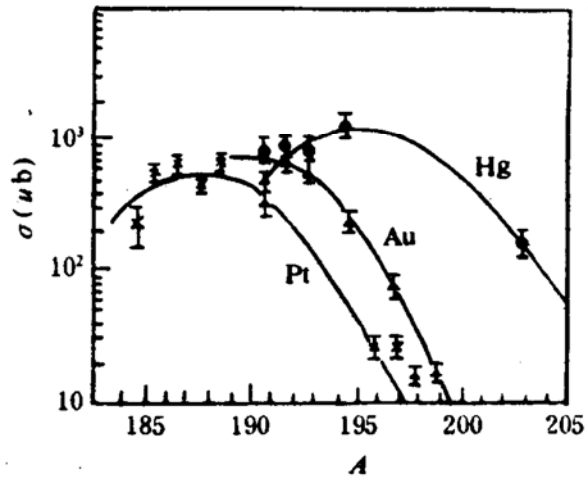


图 3 47MeV/u  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  多核子转移反应中类靶产物的同位素分布

在兰州重离子加速器上, 在 30MeV/u  $^{12}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$  多核子转移类靶产物中合成了新丰中子核素  $^{208}\text{Hg}$ , 其质子数接近  $Z=82$  幻数, 中子数正好处于  $N=126$  满壳<sup>[47]</sup>. 这是一个人们期望已久的核素. 生成  $^{208}\text{Hg}$  的靶转移道  $-2p + 2n$  的截面低至  $\sim 1 \mu\text{b}$ , 考虑到反应 Q 值低达 -39.4MeV, 该截面值仍比预期的要高.

原子能院赵葵等人在英国 Daresbury 实验室借助于奇异的多核子转移反应  $^{198}\text{Pt} (^{18}\text{O}, ^{17}\text{F})$  合成了重质量区丰中子新核素  $^{199}\text{Ir}$ , 并通过测量多核子转移反应 Q 值的方法精确测量了它的质量 (Kui Zhao et al., Chinese Phys. Lett., 10(1993)265).

## 2.4.2 快中子(n, 2p)和(n, 2pn)反应合成重丰中子核素

除了多核子转移反应外, 14MeV 快中子在重靶上引起的(n, 2p)和(n, 2pn)反应能有效地生成某些重丰中子新核素. 石双惠等人在反应 $^{204}\text{Hg}(n, 2pn)^{202}\text{Pt}$ 中合成了丰中子新核素 $^{202}\text{Pt}$ <sup>[48]</sup>. 袁双贵等人分别使用反应 $^{186}\text{W}(n, 2p)^{185}\text{Hf}$ 和 $^{238}\text{U}(n, 2p)^{237}\text{Th}$ 合成了重丰中子新核素 $^{185}\text{Hf}$ <sup>[49]</sup>和 $^{237}\text{Th}$ <sup>[50]</sup>, 生成截面 $\sim 20\mu\text{b}$ . 在上述反应中, 使用高的中子通量( $10^{11}\sim 10^{13}/\text{s}$ )和大的靶量成功地提高了产额.

## 2.4.3 高能质子重靶散裂生成锕系区丰中子核素

Mezilev 等人在丰中子锕系核中寻找缓发裂变, 用 1GeV 质子轰击铀靶, 合成了新核素 $^{232}\text{Fr}$ 和 $^{233, 234}\text{Ra}$ <sup>[51]</sup>.

为了研究  $A=225$  附近稳定八极形变岛的边界, 使用 600MeV 质子在 $^{232}\text{Th}$ 靶上的散裂反应, 合成了新丰中子核素 $^{220\sim 223}\text{At}$ <sup>[52]</sup>.

## 2.4.4 重丰中子核素的分离和鉴别

1) 多核子转移反应中重丰中子核素的在线质量分离

靶置于在线同位素分离器热离子源中. 多核子转移产物阻滞在离子源内, 经扩散、电离并进行质量分离. 质量分离后的产物经离子光学系统传输至屏蔽的测量区, 由快速带传输系统收集, 移送至探测站进行 $\beta$ 和 $\gamma$ 谱学测量.

2) 重丰中子核素元素的化学分离

高温难熔元素不能从在线同位素分离器热离子源中扩散释放, 化学分离方法却无此限制, 且分离效率可高达 90%.

在丰中子 $^{208}\text{Hg}$ 分离鉴别中<sup>[47]</sup>, 使用气相热色谱装置和熔融靶系统, 实现了多核子转移类靶 Hg 产物的高效释放、分离、传输和收集(见图 4).

在高温难熔 Hf 元素丰中子同位素 $^{185}\text{Hf}$ 的分离鉴别中, 20g 靶量的钨粉经 14MeV 中子照射后用化学分离方法进行处理, 高效率

地将 Hf 元素从其它元素中分离出来<sup>[49]</sup>. 在丰中子 $^{237}\text{Th}$ 的合成中, 化学分离流程的巧妙设计是克服复杂裂变产物干扰的关键技术<sup>[50]</sup>.

3) 多核子转移重丰中子核素鉴别和测量  
产物经质量和元素分离后由包括 $\beta$ 、 $\gamma$ 和 X 探测器的探测器阵列进行放射性衰变的 $\gamma$ 单谱和 $\beta$ - $\gamma$ 、 $\gamma$ - $\gamma$ 、 $\gamma$ -X 和 $\beta$ -X 符合测量.

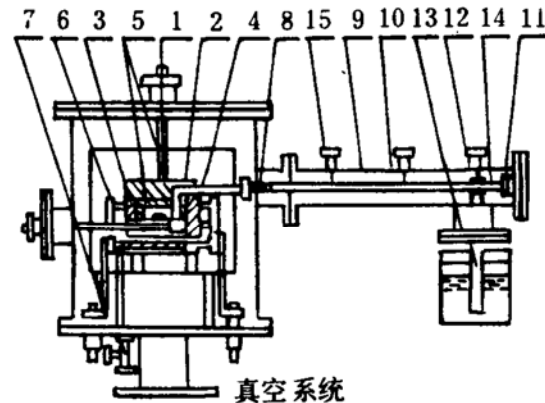


图 4 在 $^{208}\text{Hg}$ 首次合成中使用的熔融铅靶—热色谱装置(详见参考文献[47])

新丰中子核素的鉴别指定是根据质量或元素分离和 $\beta$ 、 $\gamma$ 衰变谱学测量. 核素半衰期是由时间多定标 $\beta$ 、 $\gamma$ 谱和子核 KX 射线谱确定的. 新重丰中子核素衰变 $\gamma$ 射线的指定是根据它们的半衰期和它们同子核 KX 射线的符合关系. 最后, 根据上述符合测量数据建立核素衰变纲图, 进行核衰变和核结构的研究.

此外, 前已述及, 测量多核子转移反应的反应 Q 值, 可精确测量生成核的质量, 并确认相应新核素的存在. (待续)

## 参 考 文 献

- 1 Detraz C, Vieira, D J. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1989, 39: 407; Proceed. of 6th Inter. Conf. on Nucl. Far From Stability, Bernkastel-Kues, Germany, July 1992
- 2 Hansen P G, Jonson, B. Europhys. Lett., 1987, 4: 409
- 3 Tanihata I, et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 55: 2676
- 4 Cowan J J, et al. Phys. Rev., 1991, 208: 267
- 5 Kobayashi T, et al. Phys. Lett., 1989, B232: 51

- 6 Anne R, et al. Phys. Lett., 1990, B250 : 19
- 7 Bernas M, et al. Z. Phys., 1990, A336 : 41
- 8 Penttila H, et al. Phys. Rev., 1988, C38 : 931
- 9 Rykaczewski K, et al. Nucl. Phys., 1989, A499 : 529
- 10 Zhang Li. Chinese Jour. High Energ. Phys. and Nucl. Phys., 1991, 15 : 187
- 11 Berlovich E Ye, Novikov Yu N. Phys. Lett., 1969, B29 : 155
- 12 Guillemand-Muller D, et al. Phys. Rev., 1990, C41 : 937
- 13 Westfall G D, et al. Phys. Lett., 1979, 43 : 1859; Symons T J M, et al. Phys. Rev. Lett., 1979, 42 : 40
- 14 Tanihata I. Phys. Lett., 1985, B160 : 380; Phys. Lett., 1988, B206 : 592
- 15 Langevin M, et al. Phys. Lett., 1985, B150 : 71
- 16 Pongheon F, et al. Europhys. Lett., 1986, 2 : 505
- 17 Guillemand-Mueller D, et al. Z. Phys., 1985, A322 : 415
- 18 Guillemand-Mueller D, et al. Z. Phys., 1989, A332 : 189
- 19 Lewitowicz M, et al. Nucl. Phys., 1989, A496 : 477
- 20 Ishihara M, et al. in Proceed. of the 4th Inter. Conf. on Nucl.-Nucl. Collision, Kanazawa, Japan, June 10 ~14 1991
- 21 Mohar M F, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 66 : 1571
- 22 Weber M, et al. Z. Phys., 1992, A343 : 67
- 23 Friese J, et al. Nucl. Phys., 1993, A553 : 753C
- 24 Lewitowicz M, et al. Z. Phys., 1990, A335 : 117
- 25 Summerer K, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : 2546
- 26 Tengblad O, et al. Z. Phys., 1992, A342 : 303
- 27 Winger J A, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : 954
- 28 Lund E, et al. in Proceed. of the Fifth Inter. Conf. on Nucl. Far From Stability, edited by I. S. Towner (A. I. P. N. Y. 1988) 587
- 29 Bernas M, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 26 : 3661
- 30 Kratz K L, et al. Verh. Dtsch. Phys. Ges., E2. 5, 1991, 438
- 31 Schmidt-ott W D, et al. Nucl. Phys., 1991, A522 : 610
- 32 Penttila H, et al. Phys. Rev., 1991, C44 : R935; Z. Phys., 1991, A338 : 191
- 33 Aysto J, et al. Phys. Rev. Lett., 1992, 69 : 1167
- 34 Gaimard J J, et al. Nucl. Phys., 1991, A531 : 709
- 35 Meissner F, et al. GSI Sci. Rep., 1991, 19
- 36 Langevin M, et al. Nucl. Phys., 1984, A414 : 154
- 37 Yang Weifan, et al. To be published
- 38 Kirchner R, et al. Nucl. Phys., 1982, A378 : 549
- 39 Rykaczewski K, et al. Z. Phys., 1983, A309 : 273
- 40 Runte E, et al. Z. Phys., 1987, A328 : 119
- 41 Bosch-Wicke U, et al. GSI Sci. Rep., 1991, 85
- 42 Becker K, et al. Nucl. Phys., 1991, A522 : 557
- 43 Chasteler R M, et al. Z. Phys., 1989, A332 : 239
- 44 Chasteler R M, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : R1796
- 45 Chasteler R M, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : R1171
- 46 Wennemann Ch, et al. GSI Sci. Rep., 1992, 84
- 47 Zhang Li, et al. Phys. Rev., 1994, C49 : R592
- 48 Shi S, et al. Z. Phys., 1992, A342 : 369
- 49 Yuan Shuanggui, et al. Z. Phys., 1993, A344 : 355
- 50 Yuan Shuanggui, et al. Z. Phys., 1993, A346 : 187
- 51 Mezilev K A, et al. Z. Phys., 1990, A377 : 109
- 52 Burke D G, et al. Z. Phys., 1989, A333 : 131

## Synthesis and Study of Neutron-rich Nuclides

Luo Yixiao

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

**Abstract** During the past few years our understanding of the decay properties and nuclear structure has been extended in a systematic fashion for the neutron-rich nuclei. This review will first sketch the production and identification of the neutron-rich nuclei throughout the whole mass region, and will then discuss the impressive progress in the studies of the exotic decay properties and nuclear structure of neutron-rich nuclei. Their astrophysical implications will also be outlined.

**Key Words** nuclei far from  $\beta$  stability, neutron-rich nuclide, synthesis and identification, nuclear decay, nuclear structure.