

# 用中能重离子反应

## 合成新核素的一种可能机制

黄业成 吴鍾立

(中国科学院近代物理研究所)

合成远离 $\beta$ 稳定线核素,进而研究它的性质,发现原子核结构的新规律,是核物理研究的重要课题之一。迄今为止,重离子核反应已成为合成新核素的重要手段。人们利用低能(库仑位垒附近)重离子核反应合成新核素,主要通过熔合蒸发、若干个核子的转移和深部非弹性碰撞等反应过程。经过多年的努力,已得到许多的研究成果。

中能(20-100MeV/A)重离子加速器的建成和中能区重离子核反应的研究,给核素合成工作带来新的发展和希望。随着中能加速器逐步投入运转,今后的十年,将是人们利用中能重离子核反应合成新核素的蓬勃发展时期。

### 一、国外概况

以法国GANIL国家实验室的加速器为主,利用新发现的中能重离子引起的炮弹碎裂反应机制,在Lise终端上合成了一批 $A < 70$ 的新核素,在 $Z < 8$ 及 $Z = 23, 25, 27$ 和 $29$ 区域,已分别到达中子滴线和质子滴线,为新核素合成作出了重要的贡献。

纯炮弹碎裂的特点是:1. 碎裂产物的 $N/Z$ 值与炮弹的 $N/Z$ 值有关,炮弹越丰中子,产物也越丰中子,反之亦然。因此,人们有意识的选择炮弹,就能够合成很丰中子或缺中子的核素。2. 炮弹碎裂产物的角分布,主要集中在 $0^\circ$ 附近。3. 产物的速度与炮弹的速度近似相等。4. 碎裂产物的质量比较小。在Lise终端合成的核素都位于质量很低的区域。

现在我们来思考这样一个问题,若将较轻的炮弹诸如 $^{20}\text{Ne}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 等外推到使用较重的炮弹 $^{84}\text{Kr}$ 或 $^{136}\text{Xe}$ ,能否得到较重的炮弹碎裂产物?法国GANIL实验室用35MeV/A的 $^{84}\text{Kr}$ 轰击 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{103}\text{Rh}$ 和 $^{197}\text{Au}$ 靶,实验结果表明:碎裂产物的产额比以 $^{40}\text{Ar}$ 作炮弹时的产额低得多;产物几乎集中在稳定谷附近,与用碎裂模型算出的理论值偏离很大<sup>[1]</sup>(图1)。这强烈地表明,当用质量比较大的炮弹时,由于相当高的激发能,使碎片随即粒子衰变,这个蒸发过程强烈地使 $N/Z$ 值移向稳定谷,炮弹碎裂反应机制已不再占优势。由于产物的角分布不再在 $0^\circ$ 附近,而是向较大的角度移去<sup>[2]</sup>(图2),其速度也不与炮弹速度相等,而是有一个连续分布。对于这些非炮弹碎裂产物,法国GANIL实验室的Lise装置已很难进行接收和分离了。

Lise装置原设计用于原子物理研究,后来因发现中能重离子碎裂反应机制才借用来合成新核素。这台装置的性能和特点是只能接收 $0^\circ$ (或 $\pm 1^\circ$ )的且具有同样速度(动量分散 $\Delta p/p < 5\%$ )的粒子束。同时由于Lise的分辨本领很低,只能分辨 $A < 70$ 的粒子。如果说,对接收和研究炮弹碎裂产物,Lise能充分发挥其优点的话,那么,对于其它反应机制产生的不在 $0^\circ$ 附近出射,且具有一定速度分布的质量较重的核素来说,Lise固有的特点就成为它的致命弱点了。为了能研究用Kr、Xe这样重的炮弹引起的非炮弹碎裂产物,他们提出两种解决办法。一是改进加速

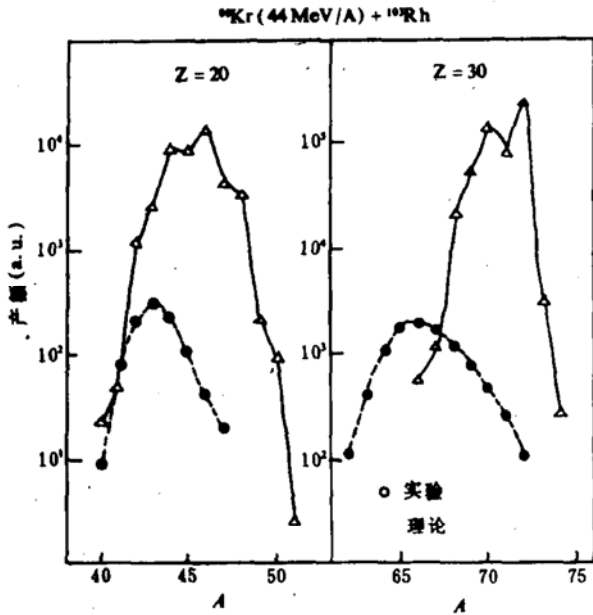


图 1

器,提高轰击能量(如 400MeV/A),以确保当使用较重的离子作炮弹时,仍能产生截面足够大的纯碎裂反应。目前他们已在 Saclay 的土星加速器上进行 200MeV/A 的此类反应研究。第二种途径是建造新的分离装置。

## 二、用中能重离子耗散反应合成新核素

从核反应机制的角度来看,在中能区,全熔合、纯转移反应和深部非弹性碰撞的截面随能量增高而迅速下降,甚至消失。至于纯炮弹碎裂反应,正如前面所述,当炮弹质量增加到如<sup>86</sup>Kr 这样的核素时,在中能情况下,炮弹碎裂已不再占优势了,而下面两类反应对新核素合成则是很有潜力的。

### 1. 以弹核为主的耗散反应(Dissipative)

这类反应目前尚未统一命名,诸如深部非弹性转移、非纯碎裂反应、Calefaction phenomenon、类转移过程等。其特点是:弹-靶各削出一块热的结合体与较冷的弹核剩余部分形成临时的组合,然后各自分开。热的结合体由于具有高的激发能,必须通过粒子蒸发退激。而冷的弹核剩余部分由于失

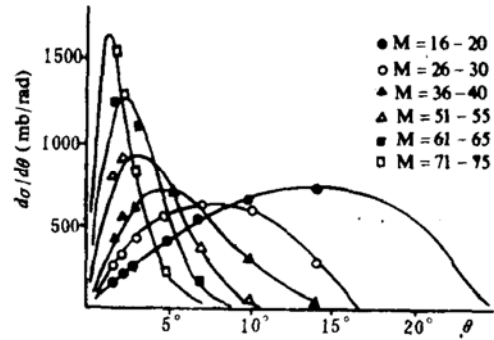


图 2

去了一些核子而使它有可能变得更丰中子,这对合成新核素是很有利的(图3)<sup>[3]</sup>。由于有耗散存在,产物角分布不再向前峰起,而是有较大的角分布,且有一个连续的动量分布,这就解释了正如上面谈到的为什么 Lise 不可能探测到这些产物的原因。利用这个反应机制,在 Z = 20 - 30, A = 50 - 75 区域内,有可能合成丰中子新核素。

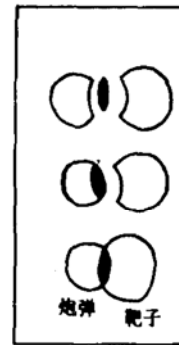


图 3

### 2. 以靶核为主的耗散反应

以靶核为主的耗散反应,人们仍习惯地称之为类熔合或非完全熔合等。以不同能量的 Ar 轰击一系列中重靶的实验结果表明<sup>[4]</sup>,同位素产额峰值的位置离稳定线约 10 个核子的距离,脊线大体上与稳定线平行。重剩余核的 Z<sub>重</sub> 值与靶核的 Z<sub>靶</sub> 值相比,  $\Delta Z = Z_{重} - Z_{靶} = 1$

时,相应的中子数要减少 $\Delta N = N_{重} - N_{靶} = 4 \sim 5$ 。若 $\Delta Z = 3$ 时,有 $\Delta N = 12 \sim 15$ (图4)。选择缺中子核素(例如 $^{64}\text{Zn}$ 、 $^{103}\text{Rh}$ 、

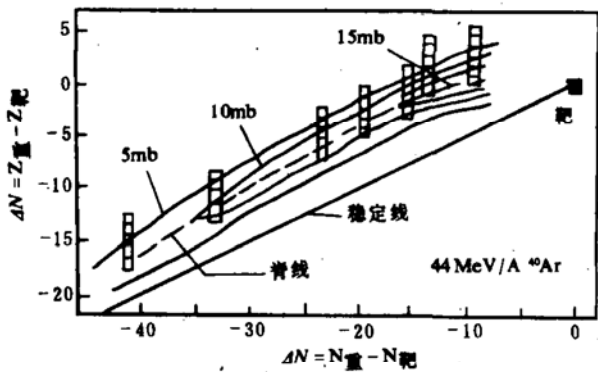


图4

$^{107}\text{Ag}$ 等)作靶,就有可能得到非常缺中子的核素了,况且这些重剩余核仍有足够长的半寿命和相当大的截面可供探测。

### 三、科学意义

以耗散反应为主包括炮弹碎裂在内的核素合成研究,其科学意义在于:

1. 能产生接近中子滴线和质子滴线的核素,对研究在极限情况下的原子核性质具有重要的意义。例如 $^{11}\text{Li}$ ,是Li同位素的最后一个丰中子核素,人们发现它的核半径比预期的大得多,这是核结构中的一种奇异现象。

2. 所产生的核素,相当一部分在 $N/Z = 1.587$ 中子先驱核线附近,对研究延迟中子、多中子衰变提供有利的条件。

3. 能产生分布于新形变区的核素,如 $^{31}\text{Na}$ 、 $^{31}\text{Mg}$ ,虽然 $N = 20$ 是中子幻数,但 $^{31}\text{Na}$ 和 $^{31}\text{Mg}$ 却是形变核,对检验经典壳模型理论是有意义的。

4. 能产生具有亚壳特性的奇异核,如 $^{80}\text{Zr}_{40}$ 、 $^{66}\text{Ni}_{40}$ 都是双幻核,对拓广壳模型理论有重要的价值。

5. 在 $Z = 20 - 30$ ,  $A = 50 - 75$ 的区域和对重剩余核区域可能合成一些新核素。

## 四、兰州在线同位素分离器 ISOLAN<sup>[5,6]</sup>

兰州在线同位素分离器 ISOLAN 已于 1988 年底离线调试成功。1989 年与兰州重离子加速器(HIRFL)在线联接,同年 9 月以中能 $^{12}\text{C} + ^{181}\text{Ta}(W)$ 反应进行在线调试,合成了 Rb、Cs 及一些元素的缺中子核素和质量与靶子相近的重剩余核。

ISOLAN 有三个束流分支,当核反应产物被  $55^\circ$  偏转磁铁质量分析之后,由束流开关分别送至  $0^\circ, \pm 30^\circ$  的管道上去。第一分支配以带传输系统,由 Mylar 带接收放射性样品,迅速传送(速度为  $100 \text{ cm/s}$ )至探测站(由 GeLi 探测器和塑料  $\beta$  探测器等组成)。进行  $\gamma$  能谱、 $\beta$  能谱和半寿命测量,实现对核素的鉴别和对衰变性质的研究。第二分支将与激光谱仪相接,测量原子核的自旋、电四极矩、磁矩和电荷均方半径。第三分支可作较长寿命的同位素样品接收,供离线测量和研究或配以高分辨质谱仪进行原子核质量的直接测量。这几方面的工作,都能从不同的角度提供研究远离  $\beta$  稳定线核素的核结构数据和信息。

由在线分离器合成的核素,其半寿命的极限值很大程度决定于靶离子源的工作特性。由于核素被在离子源中的俘获膜阻止之后,在高温下重新释放,被测核素的半寿命极限值决定于核素在俘获膜的释放过程。它不仅依赖于该元素的物理和化学性质(如熔点)、靶离子源的工作温度,还依赖于俘获膜材料的晶格结构等。目前国际上用在线分离器分离的核素,最短半寿命为毫秒量级(例如 $^{34}\text{Na}$ ( $5 \text{ ms}$ ), $^{11}\text{Li}$ ( $8.7 \text{ ms}$ )),分离器的总效率最高为 20%。由于我们的工作才刚起步,各项技术都有个逐步提高和完善的过程。在最近的几年内,预期 ISOLAN 可合成半寿命为几十毫秒量级的核素,总效率可达 5% 左右。

在线分离器的靶离子源对产物的接收是全方位的,不受角分布的影响,对不同反应机

制适应性很强。离子源中的俘获膜将产物阻止后重新释放而被加速,进行质量分析时,不受产物原有的动量连续分布的影响。在线分离器的分辨很高,能很好地分离邻近质量的核素,最大分离质量可达  $A = 250$ , 满足各类反应机制可能产生最大质量核素的要求。

ISOLAN 对于研究由耗散反应产生的核素,无疑是很合适的。趁着 GANIL 实验室提出的两点解决办法(提高加速器的能量或建造新的分离装置)实施之前,应利用我们的设备,扬己之长,尽早开展工作,如争得了时间,就有可能给予我们领先的机遇。

就中能重离子核反应而言,炮弹碎裂产生的是低质量区( $A < 70$ )的缺中子和丰中子核素。对中等质量的产物,是裂变与散裂反应竞争的结果,裂变在整个过程中所占的份额,与靶核的裂变位垒有关。至于重核区,可能是重靶与炮弹的转移反应和耗散反应产生的重剩余核。由于目前对中能重离子核反应机制尚未研究得十分清楚,可能还有一些其

它的反应机制可用于合成新核素。但是,如果我们对在线分离器的靶离子源作相应的改进和提高,对被分离的核素作某种条件上的选择和限制,例如元素的熔点在  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,核素的半寿命在  $50\text{ms}$  以上,反应产额在  $10^2\text{ n/s}$  以上,合成和研究这些核素,对 ISOLAN 来说,是很乐观的。

#### 参考文献

- [1] D. Bazin 等, GANIL P 89-22 第 12 页
- [2] C. Détraz, GANIL P 89-18 第 10 页
- [3] M. Berlinger 等, Nuclear Physics at GANIL, P 58  
1989
- [4] F. Hubert 等, Nuclear Physics at GANIL, P 101
- [5] 黄业成、王同庆、谈锦封、郭斌、范红梅, 高能物理与核物理 1 (1990)
- [6] 黄业成、王同庆、谈锦封、郭斌、范红梅  
A Status Report of the ISOL Facility in Lanzhou,  
Nucl. Instr. and Meth. (即将发表)