

# 兰州的重离子物理研究

邬思九

七十年代初,位于甘肃兰州的中国科学院近代物理研究所把原有的一台加速轻离子的经典回旋加速器改装成重离子加速器。1973年,在进行了一系列初步实验后,加速器投入正常运行。十年来在重离子物理的各个方面逐步开展了研究工作。本文将对此做个扼要的介绍。

1.5米重离子回旋加速器的能量常数  $K = 57$ 。常用的离子种类、能量和流强等见表一。实验中可用吸收片来改变入射离子的能量。

表一

加速离子	$\alpha$	DH <sup>+</sup>	C <sup>4+</sup>	N <sup>5+</sup>	O <sup>6+</sup>
离子能量 (MeV)	40	18	73	97	33
每核子能量 (MeV/A)			6.1	6.9	5.5
束流强度 ( $\mu$ A)	250 (内靶)	13.5	15	3	6

为了开展重离子物理研究,着重发展了半导体和气体探测技术。研制成了半导体  $\Delta E$  及  $E$  和气体电离室等各种性能不同、形式各异的探测器。应用这些探测器和各种实验技术建成了适用于不同重离子物理实验的终端设备。1.5米重离子回旋加速器的束流线及部分实验终端的布署见图。

## 核素的合成和性能研究

### 超铀元素的合成

在重离子物理研究的初期,世界各国的科学家都致力于合成新元素并研究其性质及

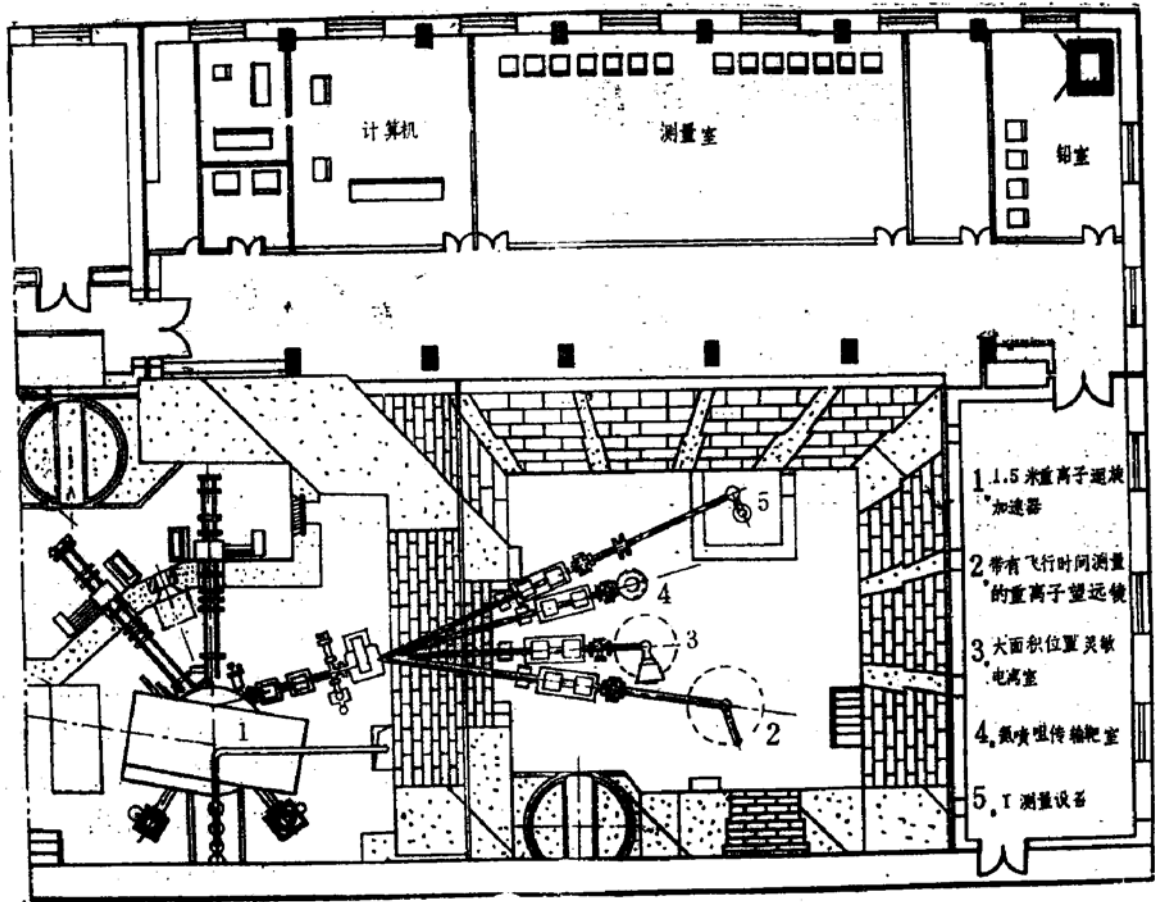
合成机制。在1.5米回旋加速器上,我们利用<sup>12</sup>C、<sup>14</sup>N、<sup>16</sup>O束轰击铀、钚靶,合成了98、99和100号三种元素的六种同位素。

<sup>245</sup>Cf、<sup>246</sup>Cf、<sup>246</sup>Es和<sup>250</sup>Fm合成所依据的反应是,<sup>238</sup>U(<sup>12</sup>C, xn)<sup>250-x</sup>Cf: x = 4, 5, <sup>238</sup>U(<sup>14</sup>N, 6n)<sup>246</sup>Es和<sup>238</sup>U(<sup>16</sup>O, 4n)<sup>250</sup>Fm。缺中子同位素<sup>243</sup>Cf和<sup>247</sup>Fm是利用<sup>235</sup>U(<sup>12</sup>C, 4n)<sup>243</sup>Cf和<sup>239</sup>Pu(<sup>12</sup>C, 4n)<sup>247</sup>Fm反应合成的。生成核的鉴别主要采用<1>测量特征 $\alpha$ 粒子的能量和半衰期;<2>化学淋洗分离,以确定元素的原子序数;<3>杂质反应鉴别,以确定生成核的 $\alpha$ 峰不是由于某种杂质起反应后产生的;<4>子代鉴别,依靠对子体的探测来证明核的存在;<5>激发函数测量,以确定复合核蒸发中子的数目,从而定出同位素的质量数,上述各种方法,多数同时使用,彼此吻合,以取得核素的可靠鉴别。

### 远离 $\beta$ 稳定线核素研究

一般说来,远离 $\beta$ 稳定线核素的寿命是很短的。为了测定在重离子反应中生成的这些核素,我们研制了一套快速传输和移动收集系统——氦喷咀传输系统。应用C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>+He做为传输气体,在30米的距离外,成功地测到了半衰期为1秒的短寿命放射性产物。利用这一技术,用70MeV<sup>12</sup>C轰击天然银及同位素<sup>109</sup>Ag靶,通过(HI, xn)反应合成了碘的一些缺中子同位素<sup>110</sup>I、<sup>117</sup>I、<sup>118</sup>I、<sup>118m</sup>和<sup>119</sup>I等。

近年来,在远离 $\beta$ 稳定线核素研究中, $\beta$ 延迟粒子发射做为一类重要的核衰变现象,日益得到了人们的重视。由于其截面低、寿命短,需要采用在线测量。我们建立了一套



适合于研究带电粒子衰变寿命为毫秒至秒级的快速脉冲束实验装置。用  $65\text{MeV}^{12}\text{C}$  轰击  $^{24}\text{Mg}$  和  $^{40}\text{Ca}$ ，通过  $(^{12}\text{C}, 3n)$  反应，成功地测得了延迟质子先驱核  $^{33}\text{Ar}$  及  $^{39}\text{Fe}$ 。测量了它们的  $\beta$  延迟质子谱、产生截面和半衰期。为今后进一步发展延迟粒子谱学研究创造了条件。

### 在束 $\gamma$ 测量

在束  $\gamma$  谱学是重离子核物理研究中最活跃和最富有成果的分枝领域之一，它为核结构研究提供了极其丰富的信息。在最近几年中，我们努力降低实验区的中子和  $\gamma$  本底，目前已基本具备开展在束  $\gamma$  测量的条件。应用  $^{120}\text{Sn} (^{12}\text{C}, 4n) ^{128}\text{Ba}$  反应，测量了  $^{128}\text{Ba}$  的高自旋态，实验中已观察到  $12^+$  态。有关的实验技术，如多探头  $\gamma$ - $\gamma$  符合、角关联分析、多重性滤波器及寿命测量等正在进一步完善和建立中。

## 重离子核反应机制研究

### 大质量转移

在重离子核反应研究过程中，一些特殊反应机制的发现还是近年来的事。大块质量的转移就是其中之一。我们采用多种实验技术和方法，仔细测量了  $61-73\text{MeV}$  的  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  反应各种出射道的数据，包括弹性散射角分布、转移反应产物的能谱和角分布、反应余核（或子体）的角分布和激发函数、裂变碎片的角分布、质能关联以及电荷、质量分布等。发现并证实在  $73\text{MeV}$  入射能量以下， $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  反应存在较大几率发生  $^8\text{Be}$  转移的反应机制，即一个  $^8\text{Be}$  集团从入射粒子转移至靶核。对一个核反应的各种出射道进行如此全面的测量，对这样大的核子结团的转移得出这样明确的结论，当时在国际上也

是先进的。此后又对72MeV  $^{12}\text{C}$ 轰击其他重核和中重核 ( $^{89}\text{Y}$ 、 $^{93}\text{Nb}$ 、 $^{103}\text{Rh}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $^{159}\text{Tb}$ ) 进行了一系列发射 $\alpha$ 粒子的测量, 实验表明 $^8\text{Be}$ 转移可能是一个比较普遍的现象。同时还发现随着靶核的变轻(或入射能量对库仑位垒比值增大),  $\alpha$ 粒子角分布除了擦边角成峰部分和各向同性部分外, 在前方角度上截面逐渐增加。有迹象表明存在另一种反应机制所产生的 $\alpha$ 粒子贡献于角分布的前角部分。为了进一步探索重离子反应中 $\alpha$ 粒子发射的规律, 我们用不同入射能量(46—70MeV)的 $^{12}\text{C}$ 轰击 $^{63}\text{Cu}$ 靶, 测量分析了该反应中发射的 $\alpha$ 粒子和 $^8\text{Be}$ 的能谱和角分布。发现低入射能时的结果是 $^8\text{Be}$ 转移的产物, 而随着入射能量增加,  $^8\text{Be}$ 转移(或 $^8\text{Be}$ 发射)明显增加。同时还存在另一种机制, 使 $\alpha$ 发射角分布中小角度的截面急剧增加而前角呈峰。对相同入射能量的 $^{12}\text{C} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{12}\text{C} + ^{124}\text{Sn}$ 反应, 观察到出射 $\alpha$ 的截面有显著差别, 可能反映了靶核内的中子数对反应产物的影响。这些都是值得进一步研究的问题。

### 深部非弹性碰撞

深部非弹性碰撞(DIC)是在研究重离子引起的核反应过程中发现的一种新的反应机制。在国际上也是70年代中才开展的, 但多半研究重核系统。我们在近几年的实验工作中, 观察到 $^{12}\text{C}$ 轰击轻核时的深部非弹性散射的某些现象。例如, 从准弹散逐步发展到深部非弹散的过程中, 能谱在准弹性区出现了几个峰。经过几次改进后的实验技术的核对, 证明这些峰确实存在。这些峰的能量可能对应于反应产物某些激发态, 而对重系统没有观测到。在我们这样低的能区及轻系统上, 国外已发表的工作甚少。因此近年来, 我们用 $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$ 等三种离子, 改变入射能量, 轰击一系列靶核( $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $^{59}\text{Co}$ 、 $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $^{51}\text{V}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{59}\text{Co}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ ), 对轻系统DIC的特征进行了系统的测量研究。同时还进行了碎片和 $\alpha$ 粒子的符合测量, 分别观测到了类弹及类靶碎片的

$\alpha$ 发射。实验分析表明: <1>对所研究的反应, 在较高入射能量时都有DIC的贡献; <2>在全阻尼的情况下, 出射道动能高于终态库仑能, 必须考虑离心能的贡献和形变的影响; <3>轻系统DIC产物的能量弛豫过程可用输运理论来解释; <4>轻系统DIC产物的元素分布不能用输运理论得到满意解释, 结构效应的影响很大。

在实验技术上, 为了鉴别产物的电荷 $Z$ 和质量 $A$ , 发展了气体电离室 $\Delta E$ 和半导体E探测器组成的 $\Delta E-E$ 望远镜系统, 其 $Z$ 分辨好于1/30, 能量分辨约1%。为了进一步鉴别质量数 $A$ , 研制了短距离重离子飞行时间谱仪, 实验中整套系统的时间分辨为270ps, 质量分辨可达1/50。但无论是气体电离室还是飞行时间谱仪, 都是在小立体角下实现的, 在数据处理中很难得到产物在质心系中的连续分布, 也造成了符合测量的困难。因此又制造了一台综合 $\Delta E-E$ 粒子鉴别技术和飞行时间技术于一体的大面积位置灵敏电离室, 它能在 $\pm 10^\circ$ 内鉴别产物的 $Z$ 、 $A$ 和测量能量。用它可进行: <1>单个反应产物碎片的测量, 给出质心系中对角度连续的角分布、能谱和电荷、质量分布等; <2>两体反应的符合测量(用两个相似的电离室); <3>反应产物碎片及退激发产物( $\gamma$ 射线、 $n$ 、 $p$ 、 $\alpha$ 等轻粒子发射)的符合测量, 决定其能谱、角关联和多重性等; 以及其他测量。

### 重离子引起的熔合、裂变反应

在重离子反应研究中, 全熔合截面的测量和裂变反应研究一直是人们重视的一个课题。实验上测量全熔合截面有时是困难的, 因为它包括熔合蒸发 $\sigma_{ev}$ 和熔合裂变 $\sigma_f$ 两种截面的绝对测量。对于比较轻的复合系统 $\sigma_{ev} \gg \sigma_f$ , 对于比较重的复合系统 $\sigma_f \gg \sigma_{ev}$ , 这两种情形通常测量其中之一就代表全熔合截面。但对于两者都不可忽略的情形, 还没有比较好的探测方法测量其全熔合截面。我们采用国产天然白云母做径迹探测器, 分别探测复合核的蒸发余核和裂变碎片, 测量了 $^{12}\text{C}(45$

表二

核素	T <sub>1/2</sub>	辐射特征	生产用核反应	靶	用 途
<sup>7</sup> Be	53.3d	E.C., γ0.48	<sup>6</sup> Li(d, n) <sup>7</sup> Be	Li	示踪剂
<sup>22</sup> Na	2.6y	β <sup>+</sup> , γ1.27	<sup>24</sup> Mg(d, α) <sup>22</sup> Na	Mg	正电子源、土壤盐分研究
<sup>54</sup> Mn	312.5d	E.C., γ0.834	<sup>56</sup> Fe(d, α) <sup>54</sup> Mn	Fe	γ源、示踪剂
<sup>55</sup> Fe	2.7y	E.C.	<sup>55</sup> Mn(d, 2n) <sup>55</sup> Fe	Mn	x荧光分析
<sup>56</sup> Co	78.5d	E.C.β <sup>+</sup> , γ0.84	<sup>56</sup> Fe(d, 2n) <sup>56</sup> Co	Fe	示踪剂
<sup>57</sup> Co	271d	E.C., γ0.122	<sup>58</sup> Fe(d, n) <sup>57</sup> Co	Fe	Mössbauer 源、x荧光源
<sup>68</sup> Ge	287d	E.C.	<sup>68</sup> Zn(α, 2n) <sup>68</sup> Ge	Zn	<sup>68</sup> Ge- <sup>68</sup> Ga发生器, <sup>68</sup> Ga肿瘤扫描
<sup>85</sup> Sr	65.2d	E.C. γ0.514	<sup>85</sup> Rb(d, 2n) <sup>85</sup> Sr	RbCl	骨骼扫描剂
<sup>109</sup> Cd	453d	E.C. γ0.88	<sup>109</sup> Ag(d, 2n) <sup>109</sup> Cd	Ag	<sup>109</sup> Cd x荧光源
<sup>167</sup> Tm	9.25d	E.C. γ0.208	<sup>165</sup> Ho(α, 2n) <sup>167</sup> Tm	Ho	骨骼和肿瘤扫描剂

—72MeV)、<sup>14</sup>N(75—96MeV) 离子轰击一系列中、重元素 (<sup>27</sup>Al、<sup>163</sup>Tm、<sup>175</sup>Lu、<sup>181</sup>Ta、<sup>187</sup>Au、Pb、<sup>209</sup>Bi、<sup>232</sup>Th、<sup>238</sup>U) 的蒸发余核及裂变碎片角分布, 得到全熔合激发函数, 从而分析研究裂变鞍点的核形状和形成全熔合反应的临界角动量。在有些实验中, 我们通过对碎片角分布数据的理论分析, 直接确定形成全熔合的临界角动量, 按锐截止模型计算全熔合截面。这种从碎片角分布确定全熔合截面的方法避免了进行σ<sub>er</sub>、σ<sub>i</sub>两个截面的绝对测量, 与直接测定σ<sub>er</sub>、σ<sub>i</sub>的实验对比, 证明是可靠的、适用的。并从实验上支持了关于全熔合截面计算的锐截止模型。

我们还利用Si (Li) X-射线谱仪测量蒸发余核由于电子俘获而发射的X射线方法测量了<sup>12</sup>C + <sup>159</sup>Tb、<sup>165</sup>Ho的全熔合激发函数。

对于轻系统, 一般说, 上述这些方法已不适用。我们利用电离室ΔE和半导体E探测器组成的ΔE—E望远镜系统, 测定了30—72 MeV <sup>12</sup>C + <sup>12</sup>C和<sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si反应的全熔合截面。所得激发函数呈现振荡结构, 表明了核结构效应的影响。

此外还进行了重离子引起重核的裂变碎片角关联和能量关联测量, 它们与裂变理论模型比较, 加深了我们对裂变过程有关规律性的认识。

## 核化学研究及同位素制备

### 核素的合成、快速化学分离和鉴定

用重离子反应合成一些核素时, 经常遇到反应产物是短寿命的复杂混合物。除了前面已谈到的分离Cf、Es、Fm的方法以外, 为鉴定这些短寿命核素, 我们把快速化学分离与氦喷嘴传输技术成功地结合起来, 用于短寿命核素的研究。从<sup>12</sup>C + Ag产物中实现了碘的分离, 用溶剂萃取法在反冲产物中有效地将碘与“杂质”碲、铈等分开。分离速度为25—10秒, 去污因子为50—100。用气相吸附法从<sup>12</sup>C + In反应中分离测定了<sup>123</sup>Xe, 分离速度为12秒, 相对化学收率约80%, 对Cs、Ga、Ge的去污因子均在1 × 10<sup>3</sup>以上。从<sup>12</sup>C + Ni、Co中分离了<sup>64</sup>Ge、<sup>67</sup>Ge, 收率66%, 对As、Ga的去污因子为150—800。用<sup>12</sup>C + <sup>163</sup>Dy、<sup>165</sup>Ho合成并气相热色谱分离出<sup>170-171</sup>Hf和<sup>172-174</sup>Ta。还用<sup>12</sup>C + <sup>115</sup>In反应研究了转移反应中I、Sb等余核的测定。

### 裂变碎片的质量分布和电荷分布

和中子或质子引起的核裂变相比, 重离子引起核裂变的放射化学研究报导的不多。在<sup>12</sup>C离子引起的<sup>197</sup>Au、<sup>209</sup>Bi和<sup>238</sup>U的裂变中, 我们用放射化学方法分别测量了11、15

和17个裂变产物的产额。根据这些数据,用三种电荷分布假设计算了裂变碎片的质量分布。结果表明,等电荷位移假设得到的结果一般和裂变碎片高斯质量分布曲线拟合得好。比较这三个反应的质量分布曲线,发现分布宽度随 $Z^2/A$ 的增加而增大。

### 中、短寿命同位素制备

1.5米重离子回旋加速器在加速C、N、O的同时,可以加速 $DH^+$ 离子和 $\alpha$ 粒子。利用它们轰击适合的靶子可以制备中、短寿命同位素。所制备的部分常用放射性同位素的详情参见表二。

## 重离子束应用

### 重离子活化分析

重离子活化分析是轻离子活化分析的延续和补充,也是近年来才开展起来的。国外多用于轻元素的痕量分析。作为分析重元素的尝试,我们采用测量重离子核反应产物的 $\alpha$ 活性的方法,测定了某地区环境空气中以气溶胶形态存在的痕量元素铅的平均浓度及某工厂工作车间空气中的铅浓度。测量结果表明,这种方法可靠性高,本底低,对铅的极限灵敏度可达 $10^{-9}$ 克。

### 用阻塞效应测量复合核的寿命

阻塞效应是研究核反应的时间过程的新技术,它可测量的正是复合核反应的时间范围,这个范围是目前用其它方法难以测量的。我们在云母底晶上用银—金复膜真空蒸发法成功地制备了厚约 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 的金单晶膜靶。以 $72.5\text{MeV } ^{12}\text{C}$ 轰击Au靶,用云母做固体径迹探测器,记录了 $^{197}\text{Au}(^{12}\text{C}, f)$ 反应裂变碎片沿金单晶不同晶轴(面)的阻塞花纹。从测量 $\langle 123 \rangle$ 及 $\langle 213 \rangle$ 两轴阻塞坑的极小的产额之差,得出复合核 $^{209}\text{At}$ 的寿命

$$\tau = (8.4^{+2.7}) \times 10^{-18} \text{秒}。$$

### 重离子对金属的辐照损伤

金属材料的中子辐照损伤研究是由于核反应堆工程的需要而发展起来的。由于重离

子比中子能更有效的产生原子位移,因此用高能重离子模拟快中子在材料中造成缺陷是研究辐照损伤的有效工具。国际上发展很快,开辟了材料研究方面的一个新领域。我们用 $72.5\text{MeV}$ 碳离子进行了在镍和不锈钢中引起辐照损伤的初步研究。用透射式电子显微镜、热激活形变分析和正电子湮没技术等来观察分析,发现经过小剂量的碳离子辐照的镍样品中,出现了大量六角形空洞,它与文献报导的镍被自身离子辐照所产生的空洞相似。它们是辐照样中产生的大量空位在高温下扩散聚焦而成的。不锈钢样品在辐照前后未见明显变化。辐射损伤的缺陷与温度的关系等进一步的实验尚在进行中。

### 重离子打孔

用重离子束照射云母或者任何塑料材料的薄膜,经过化学蚀刻,可以制成一种特殊的超细筛——核孔滤膜。这种核孔滤膜的孔径范围可达 $0.01-10\mu\text{m}$ ,大小均匀,孔道垂直,而且可以根据需要做成单孔过滤器。国外已用于环境科学、医学诊断、生物学、海洋科学、半导体工业和食品工业等方面,并具有广泛的应用前景。我们利用 $40\text{MeV}$ 的氧离子轰击 $20\mu\text{m}$ 厚的聚碳酸酯薄膜,经过化学蚀刻,得到了孔径为 $0.8-6\mu\text{m}$ 的核过滤膜。面密度达 $10^5-10^7$ 孔/厘米<sup>2</sup>,单孔率为88%,双孔率为9%,三孔率为3%。正在探索其应用的途径。

\* \* \*

经国家批准,目前我所正在建造一台大型分离扇重离子加速器系统(HIRFL),它由一台注入器(SFC)和一台主器(SSC)组成。SFC将由现正在运行的1.5米回旋加速器改建而成。按照建造的进程,1984年初,1.5米回旋加速器就要停止运行了。重离子物理研究也将适时地从1.5米回旋过渡到SFC(1986)及SFC+SSC(1987)上去。

回顾过去,在1.5米回旋加速器上重离子物理研究逐步开展的十年,是打基础的十

(下转10页)

（上接 5 页）

年，创业的十年。它为今后的发展培养了人才，积累了经验，探索了领域，打开了局面。展望未来，在第二个十年里，我国第一台

大型重离子加速器系统将建成并投入运行。一个与之配套的、先进的重离子物理实验室的建设也将按计划实现。重离子物理研究必将走向一个新的阶段，开创出新的局面。