

## 一个用于核化学研究的 $\gamma$ 能谱实验室

孙儒林 敬岚 赵莉莉 李文新

(中国科学院近代物理研究所)

**摘 要:** 随着兰州重离子研究装置 (HIRFL) 的正常运行, 一个用核化学技术研究重离子反应的离线  $\gamma$  能谱实验室已经建成。本文叙述了该实验室  $\gamma$  能谱的测量和获取设备及完整的  $\gamma$  能谱处理和分析程序。此外, 对核化学研究特点以及在 HIRFL 上开展的研究课题也作了简单介绍。

### 一、引 言

在核反应研究中, 化学家使用放射化学方法, 即通过放射化学分离和放射性测量, 来研究核反应产物。这个方法曾对核裂变的发现起了决定性作用, 并形成了“核化学”这门介于原子核物理和放射化学之间的交叉学科。高分辨  $\gamma$  射线能谱仪的出现和计算机技术的迅速发展给传统的核化学技术注入了极强的新的生命力。今天, 即使不采用放射化学分离, 使用  $\gamma$  能谱法就能从复杂的核反应中鉴别出上百个放射性核素。当配合反冲技术时, 还可以测量这些产物的空间分布和速度分布, 从而得到更多的核反应机制的资料。

在重离子反应研究中, 离线  $\gamma$  能谱法得到极为广泛的应用, 相当多的核化学家活跃在美国、德国和法国的著名重离子研究中心, 使得重离子核化学在核化学发展中继核裂变和超铀元素之后达到另一个研究高潮。因为这种方法与在线的核物理实验相比, 有一系列明显的优点: (1) 探测灵敏度高, 它可以使用加速器提供的最大束流和厚靶; (2) 不存在探测器的“切止阈”, 因此可以测量低速运动 (每核子几十个 keV) 的重碎片; (3) 不受弹性散射和束流影响, 可以测量包括  $0^\circ$  和  $180^\circ$  附近的角分布; (4) 最大优点是能确凿

鉴定产物, 特别是重反应产物, 唯一指定它们的原子序数  $Z$  和质量数  $A$ ; (5) 实验方法简单灵活, 实验数据直观可靠, 设备投资费用较低。当然, 这些优越性是付出了一些代价而取得的。放射化学方法最大不足是不能得到时间相关的反应资料, 此外, 它研究的是反应的最终产物而不是反应的初始碎片, 并且研究对象受核素衰变性质的限制。

近代物理研究所核化学组自七十年代中期开始进行重离子核反应的放射化学研究, 这是我国以基础研究为目的的核反应化学研究的开始。十多年来, 我们在重离子熔合裂变、14MeV 中子诱发裂变的质量和电荷分布、重离子引起的大质量转移和全熔合与非完全熔合研究中取得了不少研究成果。随着 HIRFL 投入运行, 一个用于核化学研究具有国际先进水平的  $\gamma$  能谱实验室已基本建成。为重离子反应, 特别是中能重离子反应研究创造了重要的物质条件。

### 二、实验室设备和仪器

$\gamma$  能谱实验室配有完整的  $\gamma$  能谱测量和获取装置, 它们包括:

#### 1. 探测器系统

探测系统为美国 ORTEC 公司生产的4个

高纯锗 (HPGe) 探头以及相应的前置放大器, M459、5kV 高压电源和 M673 谱放大器。探测器效率为 10%~40%, 分辨为 1.9~2.2keV (对<sup>60</sup>Co 的 1332keV  $\gamma$  线)。探头用 56cm 长的正方形铅室屏蔽, 铅室壁厚 7cm, 重 1.15t, 内衬 0.5cm 有机玻璃板。待测样品置于有机玻璃测量支架上, 测量距离以 1cm 的间隔, 在 1~30cm 内可调。探测器在铅室内的本底积分计数率为 10.6CPS (50keV 以上, 15% 的 HPGe 探头)。主要本底活性来自 <sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra、和 <sup>232</sup>Th 3 个长寿命放射性同位素以及 Pb 的 X 射线。屏蔽后本底比所在实验室本底水平约低 17 倍。

## 2. 数据获取系统

数据获取由 ORTEC 的 ADCAM100 多道分析器系统完成。该系统的配置容量可带 4 台 ORTEC 的 M918 多道缓冲器 (MCB)。实验室现有配置如下:

(1) 2 台 M476—4 多路输入分路器;

(2) 2 台 M918 多道缓冲器 (MCB), 每个 MCB 包括一个高性能的模数转换器 (ADC), 8K 双口多道存储器以及一根经 IBM—ADCAM 接口电路连接到微机的扁平电缆。

上述配置可完成 4 路, 每路为 4096 道的  $\gamma$  能谱的获取。

系统软件配置 DOS 3.10 版支持的 ADCAM MCA100 仿真软件。该软件能显示系统的各种功能菜单, 通过人机对话方式完成按预置值 (实时间、活时间和峰计数) 获取数据、 $\gamma$  能谱各种显示、能量刻度、自动寻峰、谱峰处理、剥谱、比较和输入/输出等多种功能。

## 3. $\gamma$ 能谱的传送和 IBM 通讯程序

为了将 PC 机—ADCAM100 多道多路分析器系统测到的  $\gamma$  能谱传送到较大计算机上进行处理, 我们研制了 PC 机和主计算机 PDP11/44 或 VAX/8350 的 IBM 通讯接口, 并编制了 IBM 通讯程序 COMLAN。通讯程序 COMLAN 在 DOS 支持下运行, 它的主要功能

有:

(1) 仿真字符终端, 可将 PC 机作为主机的普通终端使用;

(2) 利用 F4 功能键随时交换主机和 PC 机的操作系统;

(3) 文本文件的双向传送以及主机和 PC 机的文件打印;

(4)  $\gamma$  能谱的传送, 一次最多可把 999 个 4096 道的  $\gamma$  谱数据文件传送到计算机系统, 进行记磁带式数据处理。

IBM 通讯程序使用灵活方便, 在程序进行的每一步, 屏幕上都向用户清楚地显示为完成各种功能所需的按键操作。

## 三、 $\gamma$ 能谱的计算机分析系统

$\gamma$  谱分析的任务是从长期跟踪测量获得的一系列  $\gamma$  能谱中鉴定核反应产物, 即确定放射性产物的 Z 和 A, 并计算它们的生成截面。鉴定的根据是  $\gamma$  射线的特征能量, 半衰期及  $\gamma$  射线强度的分支比。其主要过程分为: ① 分解  $\gamma$  能谱, 计算峰面积和对应的强度; ② 拟合衰变曲线, 鉴定产物并得到其初始强度; ③ 计算产物的生成截面。我们建立在 PDP—11/44 计算机上的分析系统, 已基本上能完成这些工作<sup>(2)</sup>。为了克服该分析系统存在的缺陷, 提高分析的效率和准确性, 我们对原来的系统作了重大改进和发展, 在 VAX—8350 计算机上建立了一套新的  $\gamma$  能谱分析的软件系统, 如图 1 所示。该软件系统包括 SAMPO、SAMDAT、SAMTAU CRDAT 和 CROSB 五个程序和一个分为 25 个文件的  $\gamma$  衰变数据库。这些程序之间用恰当的输入与输出格式相结合, 使得整个分析过程具有很好的连贯性。

### 1. $\gamma$ 谱的分析——SAMPO 程序

SAMPO 程序最早是由美国 California 大学 LBL 实验室的 J. T. Routti 和 S. G. Prussin 于 1969 年建立的<sup>(3)</sup>。经不断发展和改进, 目前

已成为  $\gamma$  能谱分解比较流行的程序。SAMPO 程序具有丰富的功能,在分解  $\gamma$  谱时,它首先利用标准源的  $\gamma$  能谱进行峰形拟合,得到峰形刻度参数,然后利用这些参数进行自动找峰,自动拟合峰面积,同时根据能量刻度和效率刻度得到  $\gamma$  能谱每个峰所对应的能量、峰面积、强度和它们的误差。它同时还可计算该  $\gamma$  能谱测量时样品的冷却时间,为衰变曲线的拟合提供了方便。SAMPO 程序计算速度快,适用于系列  $\gamma$  能谱的全面分析,根据需要,它也可以对单个小峰或某一区间存在的多重峰做精细的分析。

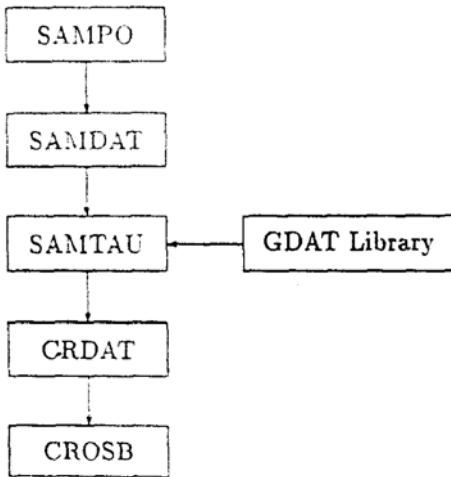


图1  $\gamma$  能谱分析系统流程图

## 2. 衰变曲线的形成——SAMDAT 程序

SAMDAT 程序是我们自己建立的,其功能是将同一样品多次测量所得的时间序列  $\gamma$  能谱的分析结果,按  $\gamma$  能量进行挑选和整理,得到每一个相同能量在不同测量时间的强度,从而构成衰变曲线,相同能量是按能量窗口:

$$\frac{1}{2} \Delta = \log(\bar{E}) - 1.5$$

寻找,其中  $\bar{E}$  为实验点的平均能量。

## 3. 衰变曲线分解——SAMTAU 程序

SAMTAU 程序的功能是根据  $\gamma$  衰变数据

库提供的核素数据表,用线性最小二乘法对衰变曲线进行分析,从而鉴定该能量代表的反应产物并计算该产物初始的放射性强度。SAMTAU 程序的核心取自美国劳伦兹伯克利实验室(LBL)的TAU2程序<sup>(4)</sup>。由于TAU2使用LBL的CDC-6000系列计算机支持的绘图程序,因此在移植该程序时删去了原有的绘图语句,代之可在VAX-8350上运行的PLOT10绘图软件。使该程序能够在图示终端Tektronix-4111上显示拟合执行情况,从而保留了原程序人机对话方式的操作功能。用SAMTAU拟合衰变曲线时,根据曲线的形状挑选不同的拟合方式。该程序可供选择的拟合方式共有八种,即除原程序所有的一组份,一组份+本底、二组份、三组份、母子体和母子体+另一组份外,在移植过程中增加了三组份递次衰变和三组份分支衰变两种方式的分解。SAMTAU程序运行的结果得到能量、初始强度与误差、核素、半衰期和分支比等,作为计算截面的原始数据。

## 4. $\gamma$ 衰变的数据库

作为该系统一个不可缺少的部分是核衰变数据库,该数据库取自德国重离子研究中心(GSI)。原数据库是按元素分类建立的<sup>(5)</sup>,包括104个元素,1600多个 $\gamma$ 放射性核素的35000多条 $\gamma$ 射线。根据程序的要求,我们将其改变成按能量顺序排列,分段建立的直接存取形式的数据文件,这样可以大大缩短索取核素的速度。在运行SAMTAU程序时,根据实验点的平均能量,在屏幕上展现一个具有接近该能量 $\gamma$ 射线的20个放射性核素衰变性质的核数据表。这些衰变性质包括核素的质量数、 $\gamma$ 射线的能量、衰变半衰期、强度的分支比和母体等。该核素表可以上下移动。为反应产物的鉴定提供了极大的方便。

## 5. 生成截面的计算——CROSB 程序

首先运行CRDAT程序,将SAMTAU按能量运算的结果改换成按核素分类,成为计算截面的CROSB程序所要求的格式,加上照

射时随时间变化的束流强度的数据,即可用 CROSB 程序来计算反应截面。运算时 CROSB 程序对同一核素的多条  $\gamma$  射线按其强度计算得到的误差和  $\gamma$  射线分支比大小权重平均,并能自动删除偏离平均值过远的数据,这样在实际上根据各条  $\gamma$  射线计算数据的平行程度对产物核素作了进一步鉴定。

通过  $\gamma$  能谱分析最终鉴定了核反应中放射性产物并获得它们的生成截面。这是核化学研究中最为重要的一步,是一切研究工作的基础。取决于实验安排,使用这套分析程序可得到核反应中靶余核的平均反冲射程、微分射程分布和反冲角分布。根据测定的生成截面,使用本实验室配置的 MASSY 程序可计算靶余核的质量分布,所有这些结果为研究重离子反应机制提供了相当全面的数据和资料。

#### 四、应用和前景

用于核化学研究的离线  $\gamma$  能谱实验室在筹建过程中已完成了一系列研究工作,其中包括在 HIRFL 上进行的第一个中能重离子反应,  $47\text{MeV}/u^{12}\text{C}+\text{Cu}$ ,  $^{93}\text{Nb}$  和  $^{181}\text{Ta}$  反应中靶余核的研究<sup>[6]</sup>, 随着重离子国家实验室的成立,已基本建成的  $\gamma$  能谱实验室受到越来越多的科研工作者,不仅仅是核化学工作者还包括了相当多的核物理工作者的重视和兴趣。作为开放实验室的一部分,1991年初,原子能研究院核物理研究所的科研人员与近物所核化学组合作,在这里完成了  $18\sim 47\text{MeV}/u$  的  $^{12}\text{C}+\text{Cu}$  和  $^{93}\text{Nb}$  反应中线性动量

转移的实验,总共获取了800多个  $\gamma$  谱,得到了满意的结果。已确定该实验室在3~5年间要开展的研究课题有:

- (1) 中能重离子反应中靶碎裂研究;
- (2) 中能重离子碰撞中线性动量转移;
- (3) Ar 引起的裂变反应;
- (4) 远离核生成机制和新核素生成截面的估计。

利用离线  $\gamma$  能谱法研究中能重离子反应得到的结果也引起了国外同行的很大兴趣。美国 Oregon 州立大学的 W. Loveland, Lawrence Berkeley 实验室的 G. T. Seaborg, 瑞典 Studsvik 中子研究实验室的 K. Aleklett, 加拿大 McGill 大学的 J. Hogan 以及意大利 Milan 大学的 E. Gadioli 教授都表示了在兰州开展重离子反应核化学研究的兴趣。一个和美国与瑞典科学家合作的研究计划正在协商中。深信,不久将有为数不少的具有国际先进水平的科研成果将在离线  $\gamma$  能谱实验室内完成。与此同时,  $\gamma$  能谱实验室也将得到进一步的完善和发展。

#### 参 考 文 献

- [1] 敬岚,核探测器与核技术, 10, 340 (1990)
- [2] 李文新,孙彤玉,原子能科学技术, 24, 60 (1990)
- [3] T. Routti and S. G. Prussin, Nucl. Ins. & Methd. 72, 125 (1969)
- [4] D. J. Morrissey et al., Nucl. Ins. & Meth. 156, 499 (1978)
- [5] U. Reus et al., Atomic Data and Nucl. Data Table, 29, 1, (1983)
- [6] 李文新等,“ $47\text{MeV}/u^{12}\text{C}$  离子和  $\text{Cu}, ^{93}\text{Nb}, ^{181}\text{Ta}$  相互作用中靶余核研究”(已投稿给 Phys. Rev. C)