

## HIFRL 首次在束 $\gamma$ 实验\*

郭应祥 朱少飞 周小红 雷祥国  
刘 忠 金寒涓 张玉虎 赵庆中  
孙相富 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1996-11-10收稿

### 摘 要

在兰州重离子加速器(HIRFL)上调试完成了一套在束 $\gamma$ 核结构研究装置: SFC(ECR源)+直通管道(限束狭缝)+在束 $\gamma$ 终端,并进行了首次在束 $\gamma$ 实验,各项在束实验的指标,特别是中子、 $\gamma$ 本底达到了较为理想的水平.对 $^{16}\text{O}$ 轰击 $^{197}\text{Au}$ 反应进行了在束 $\gamma$ 测量,包括 $\gamma$ 单谱、 $\gamma$ 激发函数、 $\gamma$ 角分布和 $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ 符合,在一些测量中,采用了独特的技术.

**关键词** 在束 $\gamma$ ,  $\gamma$ 角分布,  $\gamma$ 激发函数.

### 1 引 言

自六十年代末开始首例在束 $\gamma$ 实验以来,它已经成为研究原子核高自旋结构最为有力的工具.目前核结构研究的前沿是向自旋  $I$ 、能量  $E$  和同位旋  $T$  的极端条件下拓广,其中对高自旋态的研究,在束 $\gamma$ 实验是无可替代的工具.与过去传统的实验相比,在束实验除需要数量较多的带反康抑制的高分辨 HPGe 探测器以及规模庞大的滤波器阵列外,对加速器和实验环境也有较高要求,即:尽可能多的重离子束流品种;适于核结构研究的高于库仑位垒的低能区;好的束流发散度;尽可能低的中子、 $\gamma$ 本底.最后一点往往是实验成败与质量高低的关键.八十年代中期,我国在北京原子能研究院 HI-13 串列加速器上,由原子能院核物理所和中科院近物所建成一套联合在束 $\gamma$ 装置<sup>[1]</sup>,成功地进行了一系列在束 $\gamma$ 核结构实验.今年,我们在兰州重离子加速器(HIRFL)上实现了在束 $\gamma$ 实验,这不仅增加了在束 $\gamma$ 实验的束流时间,而且可以使北京、兰州二地在束流品种和能区上很好地互补,

\* 国家自然科学基金资助.

为我国开展在中束 $\gamma$ 研究提供了又一强有力的实验手段。

## 2 HIRFL 在中束 $\gamma$ 实验环境

电子回旋共振 (ECR) 离子源的采用是 HIRFL 运行改造中重要的一步, 它使得可加速的离子种类和能区有了很大提高。其中注入加速器 SFC ( $K = 69$ ) 的能区尤其适合原子核结构研究, 但仍有两点不足: 一是 HIRFL 的 8 个实验终端不能直接使用 SFC 的束流, 这对核结构、原子物理、材料辐照研究十分不利; 二是 SFC 虽然束流较强, 通常可达  $\mu\text{A}$  量级, 但发散度较大, 聚焦后的靶点在  $1 \times 2\text{cm}^2$  左右。为此首先建成了一条直通管道运输线, 将

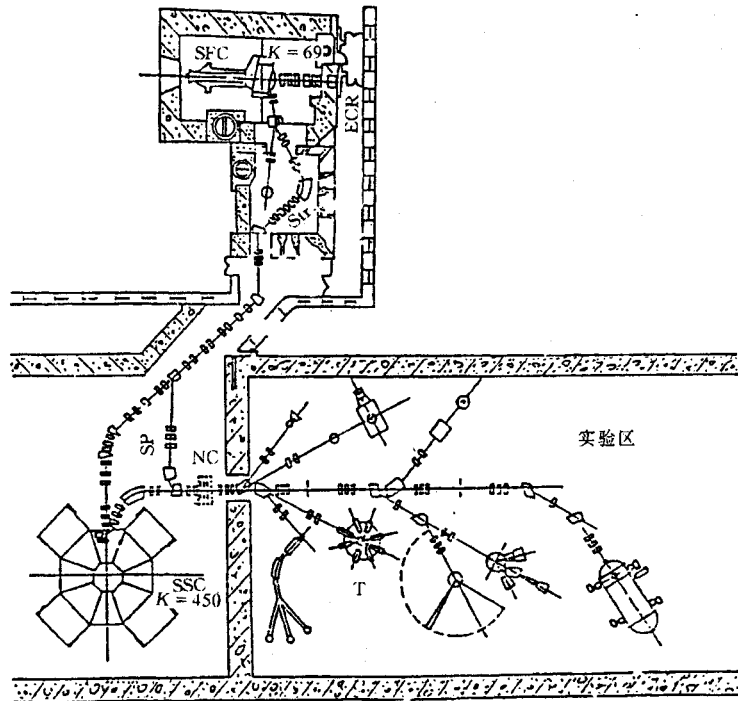


图1 HIRFL在中束 $\gamma$ 实验布局: SFC+直通管道(限束狭缝NC)+在中束 $\gamma$ 实验终端

Str.: 剥离膜及降能片; NC: 三组狭缝; SP: 直通管道; T: 在中束 $\gamma$ 实验终端。

SFC的束流不经过SSC加速器直接传输到实验大厅(图1), 实现了实验大厅的8个实验终端直接利用SFC束流进行实验; 紧接着, 考虑到在中束 $\gamma$ 核结构实验的特点, 即要求优良的束流品质, 尽可能低的中子、 $\gamma$ 本底, 但流强仅为10nA量级即可, 于是在进入实验大厅前的后输运线上设置了3组可调的限束狭缝(图1中NC), 将90%以上的发散度大的束流阻挡在加速器大厅, 由其轰击限束狭缝产生的大量中子、 $\gamma$ 本底不能进入实验大厅, 穿过狭缝进入实验大厅的束流则具有良好的发散性能, 从而可以100%的传输效率聚焦于实验靶上, 流强对在中束 $\gamma$ 实验而言不存在问题。在中束 $\gamma$ 核结构研究装置SFC(ECR源)+直通管道(限束狭缝)+在中束 $\gamma$ 实验终端在今年调试完成并成功地进行了首次在中束 $\gamma$ 实验。

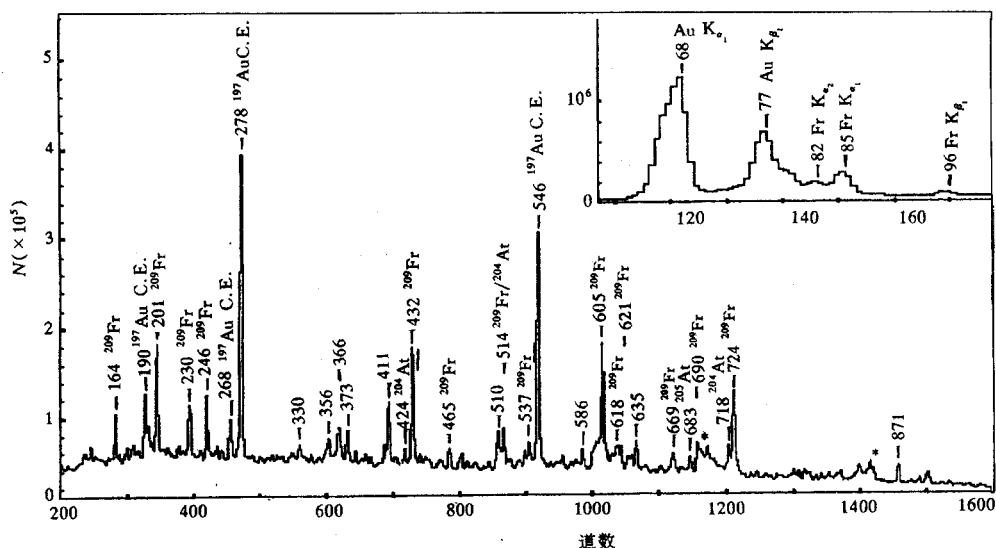


图2  $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应所得的在束 $\gamma$ 单谱

\* 中子本底峰; C. E. 库仑激发.

实验选择的核反应是95MeV的 $^{16}\text{O}$ 束轰击 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 的Au靶,经过CASCADE熔合蒸发统计模型程序计算,入射能量为95MeV时最有利于4n蒸发. $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 的Au靶既作为靶子,又作为反冲余核的阻止膜,有效地消除了 $\gamma$ 峰的多普勒展宽,束流穿过Au靶后能量已降到 $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 的库仑位垒以下,并被内衬有铅的法拉第筒收集,束流打在其它材料上的中子和 $\gamma$ 也被减到最低限度.加速器达到的指标如下:3组限束狭缝均调为3mm时,聚焦在靶上的斑点为 $\phi 4\text{mm}$ ,最后一组四极透镜距靶约5m,因此束流发散度比较理想,从狭缝后到靶室法拉第筒的传输效率约100%,流强为10—50nA.图2给出了实验得到的在束 $\gamma$ 谱,谱中所有较明显的 $\gamma$ 峰均可指定为Au、Fr的X射线,Au的库仑激发以及我们所感兴趣的Fr的退激 $\gamma$ 和Fr的 $\alpha$ 衰变子体At的衰变 $\gamma$ ,没有观测到由于束流轰击到靶以外材料上的 $\gamma$ 射线,整个谱的本底也比较低.由CASCADE程序计算本反应中裂变截面与熔合蒸发截面之比已相当可观(裂变产物的十分复杂性是将谱的本底加高),对本实验未采用 $\gamma$ 多重滤波而言,整个实验环境的 $\gamma$ 本底相当理想.图2中,位于690、835keV处的两个凸起(见\*号),通常是衡量在束 $\gamma$ 实验中中子本底大小的指标,它们是通过中子打在HPGe探测器中的Ge晶体上发生(n,  $\gamma$ )反应产生的.与以往在性能优良的串列加速器上的类似反应道的在束 $\gamma$ 实验相比,本次实验的中子本底也是相当低的.这样一套完整的在束 $\gamma$ 实验装置,已经完全可以进行在束 $\gamma$ 实验研究,并不比性能优良的串列静电加速器上中子、 $\gamma$ 本底的条件差.

### 3 在束 $\gamma$ 实验

在实验选择 $^{197}\text{Au}(^{16}\text{O}, 4n)^{209}\text{Fr}$ 反应,首先是因为 $^{209}\text{Fr}$ 是一个近球形的过渡区核,它可以考虑为一个 $^{208}\text{Pb}$ 的双闭壳核实及满壳外5个价质子和4个中子空穴组成的多体系统,

是一个很好的单粒子壳模型向铀系区八极形变过渡的验证对象. 它周围的核已有一些较为深入的研究结果<sup>[2,3]</sup>, 而它本身目前在核谱学上尚为空白; 其次, 对<sup>209</sup>Fr的衰变谱学, 近物所已有最新的研究结果<sup>[4]</sup>. 因此, 将<sup>209</sup>Fr作为这个核区一系列系统性研究的首选对象. 实验中共采用了4套带BGO反康抑制的HPGe探测器, 进行了完整的在束 $\gamma$ 测量即:  $\gamma$ 单谱、 $\gamma$ 激发函数、 $\gamma$ 角分布和 $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ 符合, 这中间采用了一些特殊的实验技术.

### 3.1 $\gamma$ 激发函数测量

在束 $\gamma$ 谱学中, 对一个谱学上完全未知核的研究, 首先就是目标核的电荷数 $Z$ 和质量数 $A$ 的指定. 本实验用该核激发态退激时内转换产生的特征X射线拉门指定 $Z$ , 这是重核区研究中通常采用的有效方法. 而对于 $A$ 指定, 激发函数测量则是比较有效的方法, 无论是在束 $\gamma$ 还是衰变 $\gamma$ 激发函数的形状, 都能使我们很容易断定该融合反应复合核所蒸发粒子的数目从而可靠地指定 $A$ 值, 同时激发函数对于判定核谱中能级的上下次序也有一定的作用. 对于HIRFL的SFC加速器来说, 改变一次能量需要较长的时间, 要求加速器在实验中改变能量来测量激发函数是不现实的, 因此采用了一个简便易行的方法, 即在靶面向束流一侧, 紧贴一层降能片(铝箔). 当然, 这个方法比较粗糙, 而且随着降能片的加厚, 将会带来很高的 $\gamma$ 本底和很多干扰 $\gamma$ 峰以及束流能散. 如果目标核的 $\gamma$ 峰足够强, 能够识别并求出强度, 此方法还是可以采用的. 由于铝箔紧贴靶膜, 所以束流强度归一仍然可行, 同时实验中也采用Au的特征X射线归一 $\gamma$ 峰强度, 如此还避免了加速器输运线参数的调整, 节约了束流时间. 本实验中, 加速器调整了一次能量, 分别对两个能量各使用一层降能片, 共得90、95、100、105MeV4个能量点, 通过对<sup>209</sup>Fr在束和其 $\alpha$ 衰变子体<sup>205</sup>At以及<sup>204</sup>At的主要衰变 $\gamma$ 射线的激发函数测量, 尽管比较粗糙, 但已足可成功地指定<sup>209</sup>Fr质量数(图3).

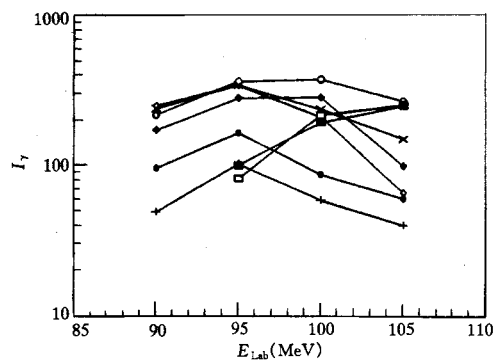


图3  $^{16}\text{O}+^{197}\text{Au}$ 反应中主要 $\gamma$ 射线的激发函数

■ <sup>204</sup>At 425keV; □ <sup>204</sup>At 683keV; + <sup>205</sup>At 719keV;  
◆ <sup>209</sup>Fr 723keV; ○ <sup>209</sup>Fr 432keV; ● <sup>209</sup>Fr 204keV;  
◇ <sup>209</sup>Fr 605keV; × <sup>209</sup>Fr 201keV.

### 3.2 $\gamma$ 角分布测量

由于融合反应中复合核高度取向, 它发出的瞬时 $\gamma$ 在空间呈各向异性, 因此从在束 $\gamma$ 角分布测量可以得到 $\gamma$ 跃迁的多极性, 结合其它类型的测量和分析可以得到能级的 $J^\pi$ 值. 通常将一台HPGe探测器围绕靶中心旋转不同的角度测量角分布, 用另一台探测器在固定角度测量, 进行归一. 这样做有两个缺点, 一是需要较多的束流时间, 二是误差较大, 而角分布的各向异性一般仅约10%左右. 我们采用的办法是将多个探测器放在不同的角度一次测量完成角分布实验. 这个方法的关键在于一次完成在束角分布测量后, 加速器停束, 在同样条件下进行一次衰变 $\gamma$ 的测量. 我们知道, 衰变 $\gamma$ 射线没有角分布效应呈各向同性,

对照计算两次测量的结果,显然可得角分布测量结果.这个方法可把靶点形状和各个探测器的立体角、效率等影响统统消去,将误差仅仅归结为 $\gamma$ 峰的统计和积分误差,大大简化测量提高精度.这里有两点必须注意修正:一是探测器效率随能量变化的修正,二是死时间修正.第一点是由于采用的多个探测器的效率随能量变化各不相同,衰变 $\gamma$ 的能量与在束 $\gamma$ 的能量也不相同,因此需要足够多的衰变 $\gamma$ 峰,使其能量范围包含所测角分布的在束 $\gamma$ 峰,用衰变 $\gamma$ 刻度每个探测器在不同能量处的相对探测效率,以修正不同能量在束 $\gamma$ 的相对强度.第二点是由于在束测量时计数率相当高,死时间影响大,不同探测器的死时间就大不相同,而衰变测量时计数率很低,死时间影响很小,各探测器死时间几乎没有差别,因此,需要将束谱中的某一强衰变 $\gamma$ 峰的强度,与衰变谱中的此衰变 $\gamma$ 峰的强度相比,以修正各个探测器的死时间.如果在束谱中衰变 $\gamma$ 峰相当明显、干净,可直接用于各向同性的归一,那么死时间修正就不必要了.很显然这种角分布测量方法较为简单,精度较高,而且有相当的普适性.

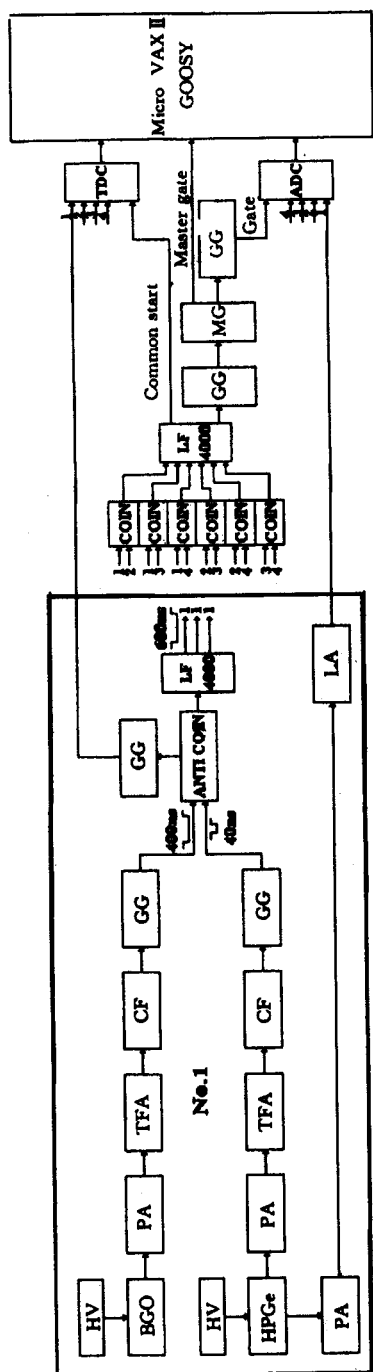


图4 实验采用的电子学方框图

### 3.3 $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ 符合测量

本次在束 $\gamma$ 测量的仪器框图见图4,与以往<sup>[1]</sup>最主要的不同之处是时间测量部分.本次实验采用TDC记录事件的时间,这样可只记录每路HPGe探测器所测得的彼此间相对时间差在符合时间窗600ns内的事件,每路HPGe探测器彼此间的瞬时符合时间分辨为10ns.根据事件-事件间的相对时间差,一方面可将数据整理为3个不同的 $\gamma$ - $\gamma$ 符合矩阵:瞬时矩阵、延迟矩阵、超前矩阵,由它们之间各 $\gamma$ 射线拉门谱的异同断定是否存在同质异能态及各 $\gamma$ 射线间的时间先后关系;另一方面可得各 $\gamma$ 射线间的延迟或瞬时符合时间谱,求得同质异能态的寿命,所得寿命的上限由符合时间窗大小决定,下限由瞬时符合时间分辨决定.对于<sup>209</sup>Fr核区,由于存在较多的同质异能态,利用时

间谱也可以在建立纲图的同时,进一步确认能级顺序.目前数据处理已接近完成,理论分析已经开始,结果将另文发表.

对加速器运行组尹全民、姜厚德以及数据获取组焦敦庞、王彦瑜、邢建萍等同志在本次实验中给予的大力帮助表示深切的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 郭应祥等, 高能物理与核物理, 14(1990)635.
- [2] A. P. Byrne *et al.*, *Nucl. Phys.*, A448 (1986)137.
- [3] W. J. Triggs *et al.*, *Nucl. Phys.*, A395 (1983)274.
- [4] Xu Shuwei *et al.*, *Z. Phys.*, A354(1996)343.

## First In-beam $\gamma$ Spectroscopic Experiment at HIRFL

Guo Yingxiang   Zhu Shaofei   Zhou Xiaohong   Lei Xiangguo  
Liu Zhong   Jin Hanjuan   Zhang Yuhu   Zhao Qingzhong  
Sun Xiangfu   Luo Yixiao

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

Received 10 November 1996

### Abstract

The in-beam  $\gamma$  experimental setup of HIRFL, which includes SFC(ECR ion source), direct-link-pipe(limit jaws) and in-beam  $\gamma$  measurement system, was adjusted and tested with its first in-beam  $\gamma$  experiment. All performances, such as neutron and  $\gamma$  backgrounds of the setup have reached to an ideal level. With some special  $\gamma$ -ray spectroscopic techniques, the in-beam  $\gamma$  experiment, including  $\gamma$  single spectrum,  $\gamma$  excitation function,  $\gamma$  angular distribution and  $\gamma$ - $\gamma$ - $t$  coincidence measurements, was performed using reaction  $^{16}\text{O} (^{197}\text{Au}, xn)$ .

**Key words** in-beam  $\gamma$ ,  $\gamma$  angular distribution,  $\gamma$  excitation function.