

一台用于重离子核反应研究的大面积位置灵敏电离室

沈文庆 诸永泰 陈巨声 郭忠言 尹淑芝
徐国俊 郭恩九 郭箕第 冯恩普 谢元祥

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

为了今后在中国科学院近代物理研究所建造的重离子研究装置(HIRFL)上开展重离子物理实验,制造了一个大面积位置灵敏电离室,本文简短地描述了它的工作机制,重点介绍了在1.5米重离子迴旋加速器上使用该电离室的实验装置,电子学系统和在线数据获取系统.同时描述了用上述加速器给出的69.5 MeV ^{12}C 束和93.5 MeV ^{14}N 束测试该电离室性能所得到的实验结果.

一、引 言

近年来,由于重离子加速器的发展,加速了更重的离子和达到了更高的能量.用这样的重离子轰击原子核时,使得反应产物的数目大大增多,反应出射道的数目也大大增加,但是对每个反应道来说(例如相应于某一确定的同位素产物)反应截面是很小的.另一方面,为了确定产物的质量,一般使用飞行时间技术,为了达到一定的质量分辨,飞行距离不能太短($> 60\text{cm}$),因此探测器离靶较远.在两体,尤其是两体以上的核反应中经常使用符合测量技术,此时,对在某一实验角下出射的产物往往对应于另一产物在不同的实验角下出射,因此要求探测的立体角不能太小(通常在 $n + \text{msr}$).这些都要求探测器有较大的灵敏面积及较好的电荷、质量和能量分辨本领.

大面积位置灵敏电离室有较大的接收角和较好的电荷分辨,对较轻的产物有一定的同位素鉴别能力,配合平行板雪崩探测器定时间可给出较好的质量分辨.而且它提供了在一定角度范围内测量每种产物连续分布的可能性.

西德重离子研究中心(GSI)首先设计制造了综合 $\Delta E-E$ 粒子鉴别技术和飞行时间技术的大面积位置灵敏电离室^[1].用这样的探测器系统在重离子物理实验中可进行:(1)单个反应产物碎片的测量,给出在质心系中对角度连续的角分布、能谱和电荷分布等;(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(γ 射线);

p 、 n 、 α 等轻粒子发射)的符合测量决定其能谱、角关联和多重性等,以及其他各种测量^[2]。

目前中国科学院近代物理研究所正在建造一台大型重离子研究装置(HIRFL),为了与之配合开展相应的重离子物理实验,作为配套的大型实验终端之一,根据 H. Sann 等的设计,在西德 GSI 加工了一个这种类型的大面积位置灵敏电离室。在 A. Gobbi, G. Augustinsky 等的协助下,在 GSI 完成了该电离室本体的组装。它的设计指标和参数选择均以开展较高能量重离子引起的核反应为依据,但在稍为降低能量和电荷分辨的情况下,也可用于较轻离子引起的核反应研究。因此,将使用该所 1.5 米迴旋加速器产生的轻重离子: ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 等,将来使用该所分离扇迴旋加速器产生的重离子束进行转移反应等准弹性过程和开放出射道比较多的深部非弹性过程等重离子核物理研究。

二、大面积位置灵敏电离室的一般描述和工作原理

为在中国科学院近代物理研究所重离子研究装置(HIRFL)上进行核物理实验而设计加工的大面积位置灵敏电离室见图 1,该电离室分为全同的上下两部分,公用的阴极板位于反应中心平面上,入射窗面积为 $400\text{mm} \times 60\text{mm} \times 2$,安装在距靶中心 1020mm 处,这样可保证呈放射形的电极和 θ 栅极的丝的方向与粒子出射方向重合,此时电离室所张立体角为 46msr ,总深度为 78cm ,探测器的灵敏体积被限制在阴极和屏蔽栅之间,屏蔽栅和反应中心平面的夹角为 4° ,保证由窗入射的粒子都进入灵敏体积中。电离室外壳由 3mm 厚的不锈钢板加固框架焊成,大大减轻了重量。

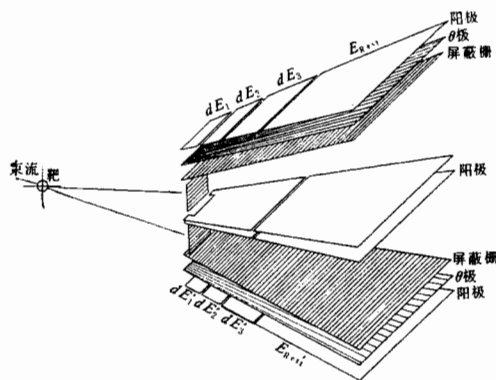


图 1 大面积位置灵敏电离室结构示意图

屏蔽栅丝垂直于粒子入射方向,是直径为 $50\mu\text{m}$ 的铜铍丝,间距 1mm ,屏蔽栅框架呈放射状的梯形,它由宽 50mm ,厚 2mm 的不锈钢板制成,具有足够的刚性。在屏蔽栅的后面相继为 θ 栅与阳极板,三个平面相互平行,间距为 15mm 。 θ 栅丝呈辐射状与探测粒子径迹相平行,也是 $50\mu\text{m}$ 的铜铍丝,在入口窗处相邻两丝间距 1mm ,末端为 1.8mm ,各丝在入口窗端互相绝缘,在末端与 LC 延迟读出单元的节点相联, $L = 2.7\mu\text{H}$, $C = 10\text{pf}$,每节延迟 4.4ns ,共 370 节,阻抗为 447Ω ,总张角为 $\pm 11^\circ$ 。 θ 栅框架和屏蔽栅框架类似。阳极板和阴极板都是呈梯形的,由 2mm 厚的不锈钢板制成。阳极板分成四段 (10cm , 6cm , 12cm , 50cm),以 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, \Delta E_R$ 分别表示测量粒子在相应路程上的能损,在

羊
1,
方
不
使
验
较

的
了

间
(1)
(2)
线;

粒子鉴别时,可用计算机程序组合成合适的 ΔE 及 E , 从而得到相应元素的最佳鉴别(因相同能量的轻、重粒子在相同路程上的能损相差较大).入射窗深入 ΔE_1 4cm, 故有效 ΔE_1 长为 6cm.

入射窗为 2μ 厚的有机薄膜 (Hostaphan), 用直径为 0.2mm, 间隔为 2.5mm 的平行钢丝作为膜的支撑, 通过电阻分压其电位分布与电离室中的电位分布一致, 以保持入口窗处的电场均匀性. 窗支撑的透射率大于 90%, 为了保持灵敏体积内电场的均匀性, 电离室两面都有等压环. 关于结构的进一步细节可参阅文献[3].

大面积位置灵敏电离室的工作原理可在文献[2,4]中找到, 这里简述如下: 被探测粒子在工作气体中穿过时形成电子和离子对柱, 在电场的作用下, 电子向屏蔽栅运动, 此时在阳极感应出一个正脉冲, 电子在穿过屏蔽栅时达到极大值. 正离子向阴极漂移会使该脉冲继续上升, 由于漂移速度小, 其上升时间要慢几千倍, 大大超过脉冲传输网络的微分时间, 因此感觉不出来. 电子柱穿过屏蔽栅后继续向阳极漂移, 此时开始在电子柱附近的 θ 栅丝上及各阳极板上感应出负脉冲. 在电子通过 θ 栅时, 在附近的 θ 栅上感应的脉冲达到最大值, 电子在继续向阳极运动时, 该脉冲幅度变小, 在这个过程中阳极脉冲幅度一直增加, 电子达到阳极时, 各阳极板脉冲幅度达最高值, 此值正比于所收集的电子数, 即正比于粒子在各极板区内所损失的能量, 若粒子全阻止在工作气体内, 各阳极板脉冲之和正比于入射粒子总能量. 由于电子漂移速度接近常数, 测量阴极脉冲和阳极脉冲的时间差可定出 y 方向位置. θ 栅丝上感应出的脉冲再经过与该 θ 位置成正比的延迟线输出, 用它和阳极脉冲的时间差可定出 θ 位置, 即 x 方向位置参数. 用测得的 x 、 y 方向位置参数在计算机上进行几何运算可得到该粒子真正的角度坐标 θ 和 ϕ .

三、在 1.5 米迴旋加速器上为使用大面积位置灵敏电离室配套的设备

大面积位置灵敏电离室主体建成后, 为了尽快在 1.5 米迴旋加速器上进行性能测试和核物理实验, 我们为它配套了一些设备, 包括充抽气系统, 喇叭形接长管, 光栏室及栅状光栏, 偏转电子的静电和磁偏转系统, 靶室真空系统, 电子学设备和在线数据获取系统. 图 2 是实验装置示意图. 图 3 是实验装置的实物照片. 整个系统从靶心到电离室入口窗的距离为 1020mm, 破坏真空来变换角度区, 盖板上下不同安装可覆盖角度为 -15° — 155° , 光栏室内可同时安装 x 方向和 y 方向两个栅状光栏, 用来对测量的 x 位置和 y 位置进行绝对刻度校准.

图 4 是电子学系统方框图. 由于现有电子学插件数目及 Fluximat-N 在线数据获取系统的限制, 只使用了该电离室的一半, 这样仅损失了一半的立体角, 并不带来其他影响.

在上述条件下, 曾用 Thc-c' α 源及 CH₄ 气体调试电离室, Thc-c' 的两个 α 峰 (8.785 MeV 和 6.051 MeV) 可在能量路 ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 中很好分开, 6.051 MeV 的 α 已阻止在前三段中, 因此 E_R 仅存在一个峰, 尽管源的 α 能量很低, 从 ΔE_1 及 θ 取出的时间讯号太小, θ 分辨不够好, 但用张角 1° (约 9.5 mm)、间隔 1° 的栅状光栏也可粗略分开穿过不同栅

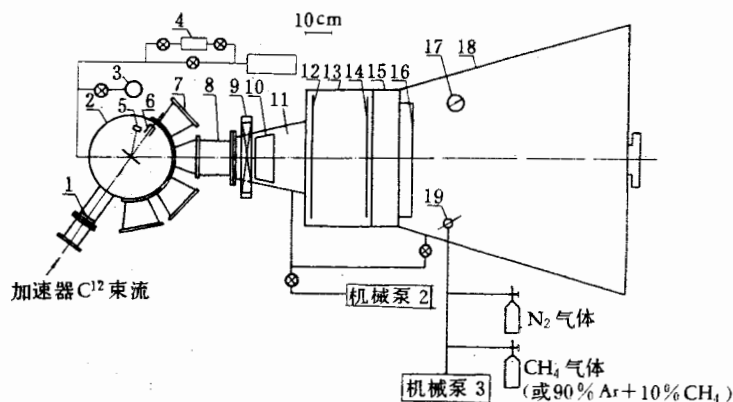


图 2 实验装置方框图

1. 隔油 Ni 箔, 2. 靶室, 3. 钛泵, 4. 分子泵, 5. 检验器, 6. 法拉第筒, 7. 连接盖板, 8. 软管, 9. 线圈磁铁, 10. 偏转板, 11. 喇叭接长管, 12. θ 光栅, 13. 光栅室, 14. γ 光栅, 15. 平行板室, 16. 窗, 17. 气压表, 18. 电离室, 19. 针阀。

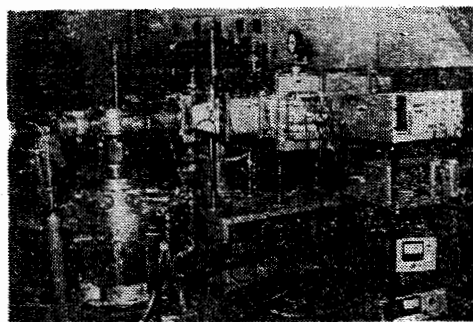


图 3 实验装置的实物照片

孔来的 α 粒子, 对 γ 讯号情况也类似。

经过 NIM 电子学后得到 ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 , E_R , θ 和 γ 讯号用作六参数测量。这些讯号要在数据获取系统的分辨时间范围内, 在时间上调到一致, 这是通过调节各路模数变换器 (ADC) 前的延迟放大器的延迟时间来达到的, ΔE_1 路和 ΔE_2 路各引出一讯号, 经成形后通过符合线路给出符合讯号作为 Plurimat-N 系统的控制讯号 (CE 讯号), 这个讯号比各路的 ADC 讯号超前几个 μs ($\sim 3\mu\text{s}$) ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_3 , E_R , θ 和 γ 讯号经 ADC, 通过四块 M1660 板 (接口) 耦合到 Multi-20 计算机, 作六参数关联数据获取, 数据以逐个事件方式记录, 有人磁带以备今后的进一步离线处理, 同时可在计算机内存中构成六个单参数谱和两个直接谱, 或构成六参数中任意两参数组成的二维谱。作为实验进行时的在线监督, 无论是实验前对电离室调试还是实验中作为监督之用, 都是极为重要的。它能及时发现问题以便实验人员及时解决, 保证调试和实验的正常进行。使用的控制程序是厂家提供的多参数获取程序 Plurimat N20-02, 该程序的主要缺点是不能对参数进行简单的运算, 例如求 $E_{\Sigma} = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + E_R$, 而这是实验进行时极为必需的, 对上述程序的这类改进工作正在进行中。

由于 Plurimat-N 和 Multi-20 系统是一个较小的系统, 主要用于数据的获取。数据

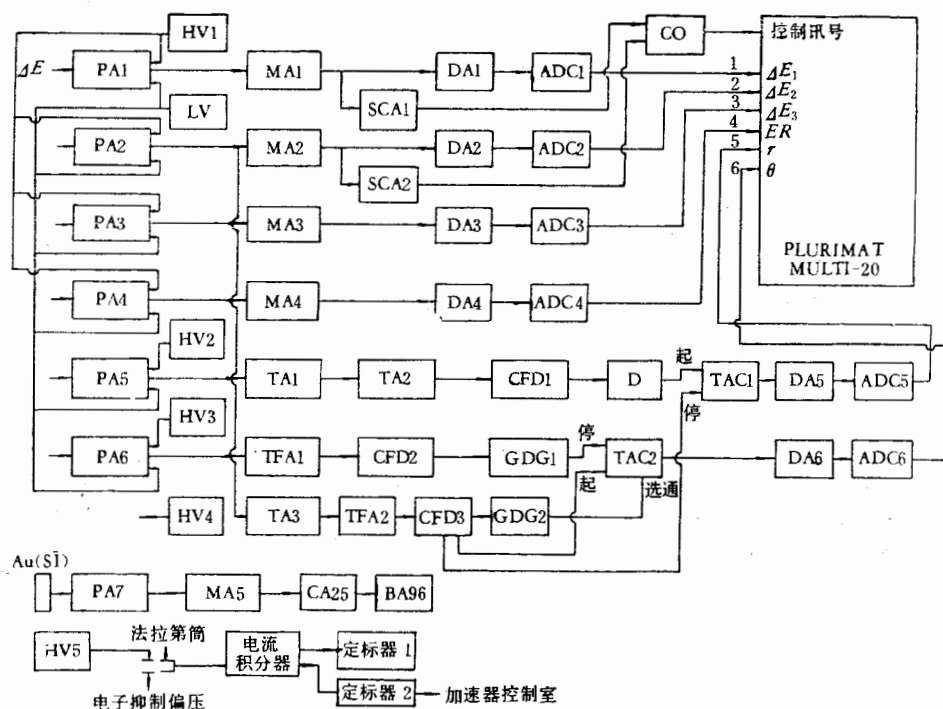


图4 电子学方框图

PA: 前放, MA: 主放, DA: 延迟放大, ADC: 模数变换, HV: 高压, LV: 低压, TA: 时间放大器, TFA: 时间滤波放大器, CFD: 恒分甄别, D: 延迟, TAC: 时幅变换, SCA: 单道, CO: 符合, GDG: 门和延迟发生器.

的离线处理分析是在甘肃省计算中心的 WCS/80 计算机上进行的,在该计算机上的大面积位置灵敏电离室的离线分析程序包括各参数的校准,计算 E_0 , 确定真正的 θ 和 γ 坐标, 线性化求得 Z 和 M , 在窗的薄膜和靶中能量损失修正, 从实验室系到质心系的转换等内容. 它将在以后的文章中详细加以讨论.

四、大面积位置灵敏电离室在 1.5 米迴旋加速器上的性能测试

在实验中使用大面积位置灵敏电离室时,为了得到较好的结果,选择合适的电离室工作条件是很重要的. 这些条件包括工作电压的选择、工作气体的选择,气压的选择等. 我们使用的工作气体有两类: 1) 纯 CH_4 气体; 2) 混合气体 (90% Ar + 10% CH_4). CH_4 气体的优点是可获得较大的电子漂移速度,从而可以改善 γ 和 θ 分辨,但是阻止粒子的本领差,需要在高压下工作,而且气体从窗的薄膜渗透较为严重,前级要用较大抽速的真空泵系统来维持. 用混合气体可得到的电子漂移速度比 CH_4 的小,但阻止粒子的本领强一些,且气体从窗的薄膜渗透不像 CH_4 气体那样严重. 气体气压的选择和具体的实验内容有关,但是根据 L. C. Northcliffe 和 R. F. Schilling 的能程表^[5]可以算出各种不同出射粒子恰好被阻止在 ΔE_1 中的能量随气压的变化曲线(可测能量下阈)及各种粒子恰好穿过整个电离室深度的能量随气压的变化曲线(可测能量的上阈),这两个能量阈决定了

在某一气压下电离室可测到各种出射粒子的能量范围。电压的选取对获得较好的位置分辨是极为灵敏的,所加电压应在电离室坪曲线的坪区,我们用 250 托的 CH_4 气体,用 $\text{Thc-c}'\alpha$ 源测得阳极和 θ 栅极的坪曲线见图 5, 屏栅极是接地的, θ 栅极电压的选取原则是要得到最大的 θ 位置脉冲讯号,而又不影响阳极脉冲讯号的幅度,对本电离室的几何条件 θ 栅电压选择为阳极电压的 $\frac{1}{3}$ 左右,阳极电压和阴极电压的数值相等,极性相反(阴极加负电压,阳极加正电压)比较合适,阴极电压对获得良好的 γ 和 θ 分辨极为关键。电子在电场的作用下向阳极漂移的速度 v 为约化电场强度 ϵ 的函数,

$$\epsilon = \frac{U}{L} \cdot \frac{1}{P} \quad (\text{伏/厘米} \cdot \text{托})$$

式中 U 是极间电位差, L 为极间距离, P 是气压,为了获得最快的电子漂移速度,对 CH_4 气体取 $\epsilon > 1$ 伏/厘米·托,此时电子漂移速度约 10 厘米/微秒。对混合气体 (90% Ar + 10% CH_4) 最佳值 $\epsilon = 0.3$ 伏/厘米·托,此时电子漂移速度约 6 厘米/微秒^[6]。我们在 1.5 米迴旋加速器上用束流调试电离室时,得到的 θ , γ 分辨和阳极电压,气体的关系基本上符合 Bortner 等^[6]给出的电子漂移速度和 E 的关系曲线。

我们用 1.5 米重离子迴旋加速器给出的 69.5 MeV 的 ^{12}C 和 93.5 MeV 的 ^{14}N 束流对电

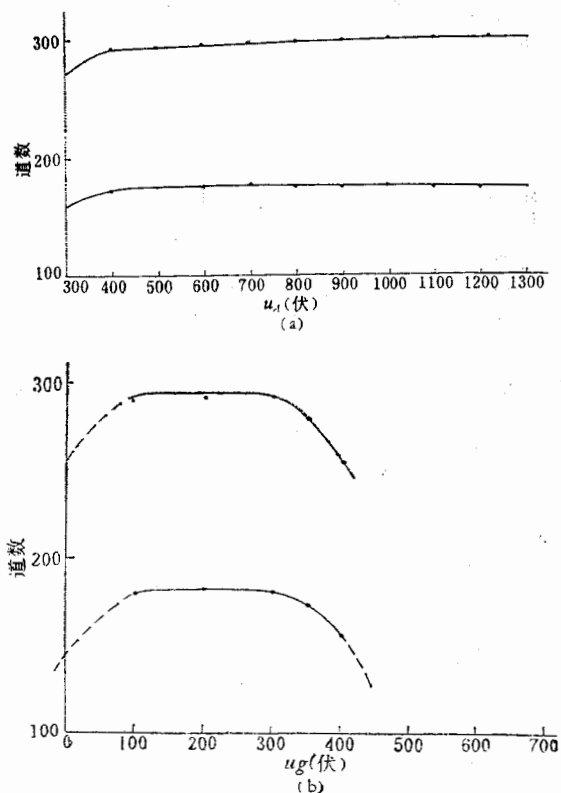


图 5 用 $\text{Thc-c}'\alpha$ 源测得的电离室坪曲线。用 CH_4 气体,气压为 250 托,

$$U_A = -U_K, U_\theta = \frac{1}{3} U_A, U_A = -U_K = 800 \text{ 伏}$$

a 电离室的阳极坪曲线 b 电离室的 θ 栅极坪曲线

目
内

工
我
气
本
真
强
金
内
司
出
合
好
定
了

离室进行了性能测试,测得的主要指标如下: γ 分辨是 3.5mm, 相当于角分辨 0.2° ; θ 分辨为 7mm, 相当于角度分辨 0.37° ; 对弹散的 ^{12}C ΔE_1 分辨为 6.8%, ΔE_2 为 5.6%, ΔE_3 为 3.7%, E_R 为 5.8%; 用计算机离线相加后得到总的能量分辨约为 2%—3%; 电荷分辨能力为 $Z/\Delta Z = 27$.

图 6 中显示的是 γ 方向位置信号谱, 出射粒子在 γ 方向上应该是均匀分布的, 所测得的坪就反映了这个事实. 而在两边边缘区的斜率可作为 γ 方向位置分辨的量度, γ 分辨为 3.5mm 就是用这个方法从上述测量的结果中取得的. γ 分辨能力主要取决于从 ΔE_1 和阴极取出时间信号的时间分辨, 这次实验中阴极上接的是 GSI 型电荷灵敏前放, 将来改用

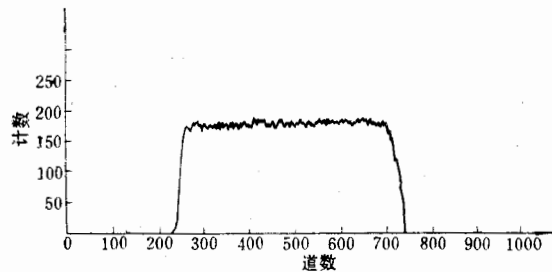


图 6 γ 方向位置信号谱. 实验条件为 69.5MeV 的 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, 角度在 $27^\circ - 48^\circ$, CH_4 气体的气压为 250 托, γ 位置分辨为 3.5mm, 相当于 0.2° .

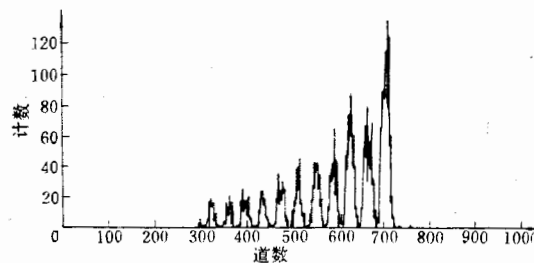


图 7 θ 方向位置信号谱. 实验条件同图 6. 位置分辨为 7mm, 相当于 0.37° .

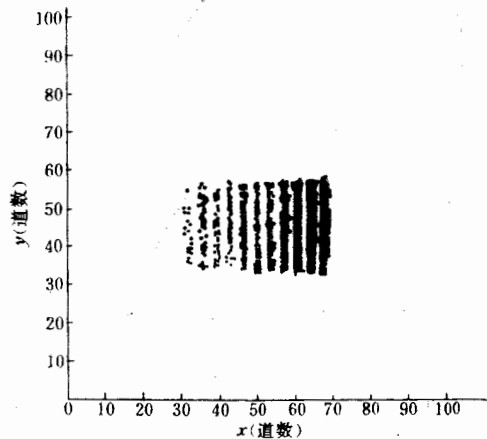


图 8 γ 和 θ 方向位置的关联二维分布图. 实验条件同图 6.

较好的电流灵敏前放将会改善 γ 的位置分辨能力。图 7 显示的是 θ 方向位置信号谱。在入口窗的光栏室内放了一个条状光栏，光栏的孔和间距是相等的，折合到薄膜窗处为 16mm 相当于 0.9° 。从图上可以看出能很好地分辨出穿过不同光栅孔的粒子，同样从位置谱各峰两边的边缘斜率可得出 θ 位置分辨。由于入射粒子能量较低，给出的信号较小，信号噪声比较小，造成 θ 分辨变差，较高入射粒子能量，良好的前放和精心调试的电压将可大大改善 θ 分辨（预期可达到 2mm）。图 8 是有栅状光栏时 γ 方向和 θ 方向位置信

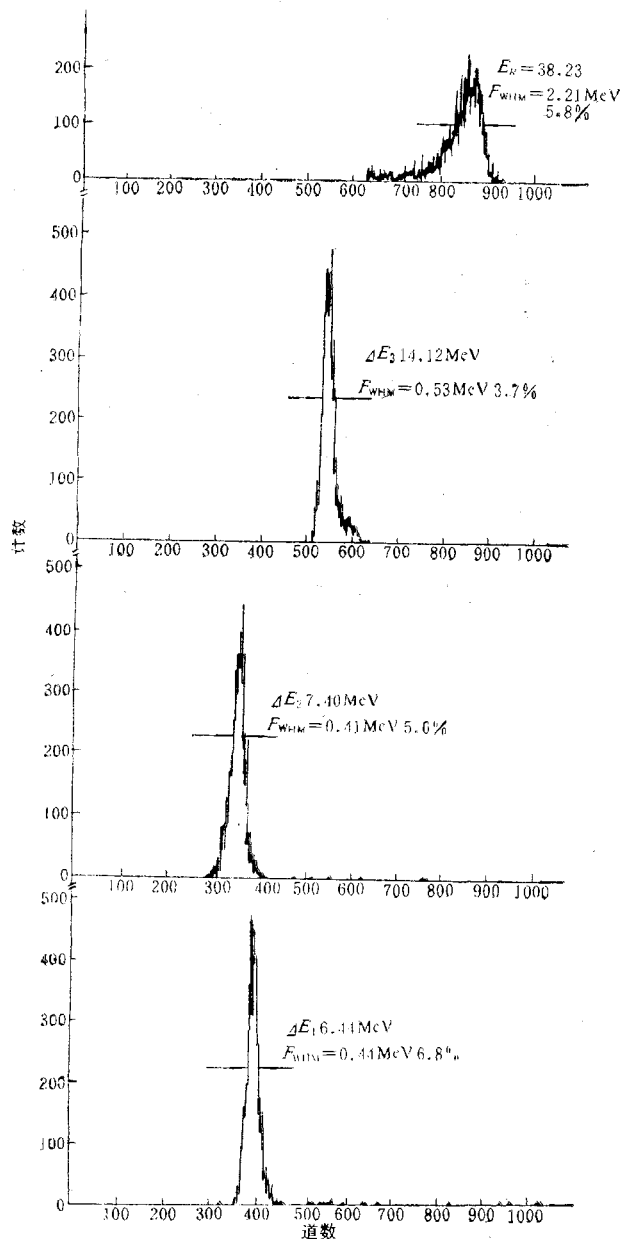


图 9 $69.5\text{MeV } ^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$, $\theta_L = 16^\circ \pm 0.5^\circ$ 的碳元素的 ΔE_3 , ΔE_2 , ΔE_1 , E_R 信号谱和能量分辨

号关联的两维分布图,它反映了入口窗及栅状光栏的几何形状,及弹性散射强度随角度增大而减小的情况.

图9是69.5 MeV $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$,在 $\theta_L = 16^\circ \pm 0.5^\circ$ 时取出的C元素的 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, E_R$ 讯号谱,用精密脉冲发生器对 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, E_R$ 各路测量线性并进行相对校准,给出各路的零点道和各路斜率的比,加上实验上测到的弹性散射峰位及运动学计算的能量可得到各路的绝对能量刻度.

图10是用69.5MeV的 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 测到的对角度 $27^\circ - 48^\circ$ 积分的 ΔE_3 对 E_R 的二维分布图. 可以看出 ^7Be 和 ^9Be 被很好地分开了. 在B和C带上也看到了一些同位素结构,但分得不够好. 高Z元素阻止在 $\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3$ 中,因此图上未显示出来. 图11是在93.5 MeV的 $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$ 中, ΔE_1 对 ΔE_2 二维图上用 ΔE_2 加小窗后取出的 ΔE_1 谱

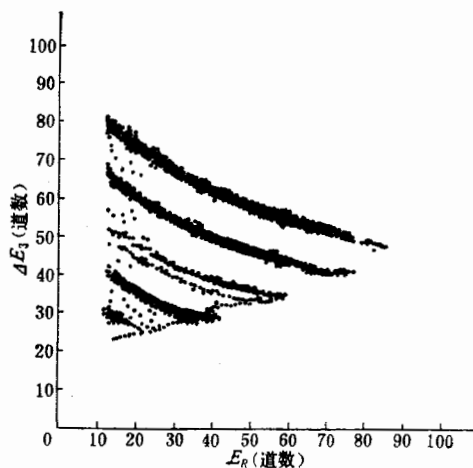


图10 69.5MeV $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$, ΔE_3 (y轴)和 E_R (x轴)的二维图. 右下角是 α, Be 带中 ^7Be 和 ^9Be 可以很好地分开.

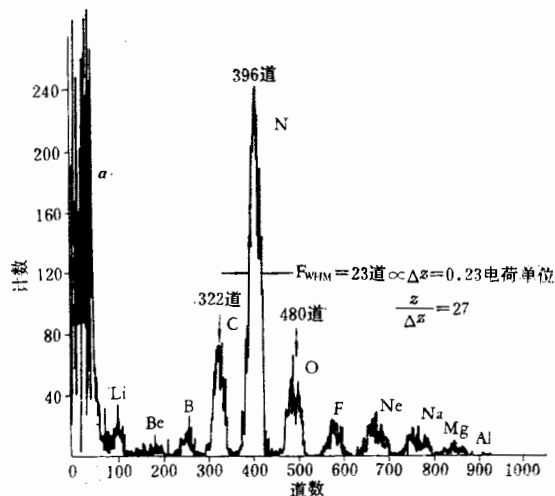


图11 93.5MeV $^{14}\text{N} + ^{27}\text{Al}$, ΔE_1 加小窗后取下的 ΔE_1 谱 (Z分布)

(Z 分布). 由于 ΔE_1 对 ΔE_2 双维图上等 Z 线是双曲线, 尽管 ΔE_2 上加了小窗, 还是影响了分辨, 细致的离线处理将改善 Z 的分辨. 由于 ΔE_2 窗加在低能区, 因此同位素分辨不好, 而在高能区 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^9\text{Be}$ 是区分得很好的. 所用的线性化程序还正在编制中, 得到 Z 分辨本领约为 27, 大大低于用该电离室可得到的 Z 分辨主要原因是入射粒子的能量太低及前放、主放系统的性能所造成的, 改进电子学系统后估计可稍微改善 Z 分辨, 在用能量更高的人射粒子时得到更好的 Z 分辨.

从 1.5 米迴旋加速器上用 69.5 MeV 的 ${}^{12}\text{C}$ 束和 93.5 MeV 的 ${}^{14}\text{N}$ 调试的结果可以看出该电离室达到了可用于实验的水平预期入射粒子的能量增加后电离室的各项性能将进一步改善, 并达到原设计指标.

作者感谢西德洪堡基金会和中国科学院对建造该电离室及其附属设备给予的财政支持, 感谢西德重离子研究协会 R. Bock 教授、A. Gobbi, H. Sann, K. D. Hildenbrand, G. Augustinsky 等对中国科学院近代物理研究所建造该电离室给予的大力支持和热诚的关心.

参 考 文 献

- [1] U. Lynen, M. Stelzer, A. Gobbi, H. Sann, A. dmi, *Nucl. Instr. and Meth.*, **133**(1976), 409.
- [2] A. Gobbi and N. Norenberg, Dissipative Collision, in heavy ion collisions Vol. 2, p. 134. R. Bock et al., North-Holland Publishing Company.
- [3] G. Augustinsky, The GSI Ionization Chamber GSI Preprint.
- [4] H. Sann, H. Damajantskitseh, D. Heberd, J. Junge, D. Pelte, B. Povh, D. Schwalm and D. B. Tranthoi, *Nucl. Insts. and Meth.*, **124**(1975), 509.
- [5] L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nucl. Data Tables*, **A7**(1970), 233.
- [6] T. E. Bortner, G. S. Hurst and N. G. Stone, *Rev. Sci. Instr.*, **28**(1957), 103.

A LARGE AREA POSITION SENSITIVE IONIZATION CHAMBER FOR HEAVY ION NUCLEAR REACTION RESEARCH

SHEN WEN-QING ZHU YONG-TAI CHEN JU-SHEN GUO ZHONG-YAN
YEN SHU-ZHI XU GUO-JING WU EN-CHIU GUO CHI-DI
FENG EN-PU XIE YUAN-XIANG

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The working mechanism of the large area position sensitive ionization chamber for heavy ion nuclear reaction research is briefly described. The main part that is introduced is the experimental setup, electronics and data acquisition of this chamber which are used on 1.5 meter heavy ion cyclotron of Institute of Modern Physics. The experimental results of the chamber property measurement are also described for the 69.5 MeV ${}^{12}\text{C}$ and 93.5 MeV ${}^{14}\text{N}$ beams.