

带有磁分析器的半导体探测器 带电粒子谱仪*

杨金刚 李卫江 郭清江 朱光华 姜承烈

提 要

本文报导了一个新型的带电粒子谱仪。它将小型磁分析器分析粒子动量和半导体探测器有较高能量分辨率的特点结合起来,达到了分辨粒子和分析能谱的目的。本文叙述了谱仪的设计、结构和用于核反应研究的一些实验结果,讨论了该谱仪的应用范围和特点。这种谱仪简单灵活,且有较好的性能。

一、引 言

在出射粒子为带电粒子的核反应研究中,为了做到既分辨粒子又能分析能谱,除了测量粒子能量 E 外,还必须同时测量粒子的另一个动力学参数,例如: 能耗率 $\Delta E/\Delta x$ 、飞行时间 T 、射程 R 或磁刚度 p/Zc 等。我们把磁分析器分析粒子的磁刚度,和半导体探测器能量分辨率较高的特点结合起来,建立了一个新型谱仪。它先让带电粒子经过一个小型磁分析器偏转后再进入半导体探测器。这样对于一定大小的探测器来讲,磁分析器帮助选出了一个磁刚度范围,在这个范围内,各种粒子的能量是不同的。因此,在用多道脉冲幅度分析器所测得的能谱上,不同能区将分别属于不同种类的粒子。这种谱仪既能发挥半导体探测器能量分辨率较高和用多道脉冲幅度分析器摄取能谱快速、直观的优点,又能有效地分辨各种带电粒子。

通常使用的磁谱仪是用动量分析来实现能量分辨的,其后面的能量探测器只用于辅助分辨粒子和计数。在我们的谱仪里则反过来,能量分辨由半导体探测器承担,磁分析器只作粗的动量分析用以辅助分辨粒子,因此就只要求一个较小的磁分析器。虽然这种谱仪的能量分辨率由半导体探测器决定不及最好的磁谱仪高,但它具有设备简单、使用方便的优点。

下面给出谱仪的详细设计和结构,并给出将此谱仪联系于一个核反应转动靶室进行核反应研究的一些结果,最后讨论谱仪的应用和优缺点。

二、谱仪的工作原理

谱仪的工作概况如图1所示。从靶上来的核反应产物经过一个磁分析器偏转后再进

* 1973年2月9日收到。

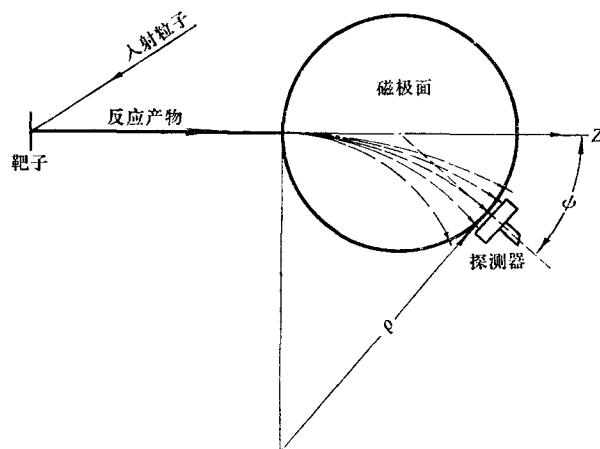


图1 谱仪工作原理示意图

入半导体探测器测量其能量。考虑到改变半导体探测器位置的方便,我们选了一个圆形小磁铁,探测器放在靠近磁分析器出口处一个适当的位置上。

1. 理想情况

设被分析的粒子是一束平行的无限窄的带电粒子,沿Z方向垂直于磁场进入分析器。对于较低能量的带电粒子,在垂直的均匀磁场中将作圆周运动,并服从下面公式:

$$B\rho = \sqrt{2mE}/Ze, \quad (1)$$

式中 E , m , Ze 分别为粒子的能量、质量和电荷; B 是磁场强度; ρ 是曲率半径。在忽略了边缘磁场效应的条件下,粒子运动的轨迹如图1所示。曲率半径 ρ 与粒子偏转角 ϕ 满足关系式

$$\rho = R \cot \frac{\phi}{2}, \quad (2)$$

式中 R 是磁极面半径。所以

$$E = \frac{B^2 Z^2 e^2 R^2}{2m} \cot^2 \frac{\phi}{2}. \quad (3)$$

公式(3)表明:在一个确定的磁场强度 B 时,每种粒子的偏转角 ϕ 与其能量一一对应(如图2曲线I)。而对某一个偏转角 ϕ ,不同种类粒子的能量不同, E 正比于粒子的 $Z^2 e^2/m$ 。若在磁分析器后面偏转角从 ϕ_1 到 ϕ_2 处放一个半导体探测器,那么,对于某种粒子就只有某个能量区间的粒子才能进入探测器。我们定义谱仪探测效率 η 为从靶上发出的具有不同能量的各种带电粒子进入谱仪所张的立体角内,经分析器分析后被半导体探测器探测到的份额。显然有

$$\begin{cases} \eta = 1 & \text{当 } E_1(\phi_1) \leq E \leq E_2(\phi_2); \\ \eta = 0 & \text{当 } E > E_2(\phi_2) \text{ 或 } E < E_1(\phi_1). \end{cases}$$

其中 $E_1 = \frac{B^2 Z^2 e^2 R^2}{2m} \cot^2 \frac{\phi_1}{2}$; $E_2 = \frac{B^2 Z^2 e^2 R^2}{2m} \cot^2 \frac{\phi_2}{2}$ 。所以,只要选择适当的 ϕ_1 , ϕ_2 , 使某种粒子的 E_2/E_1 小于这种粒子与另一种粒子的 $Z^2 e^2/m$ 之比,就可以从能谱上将这两种粒

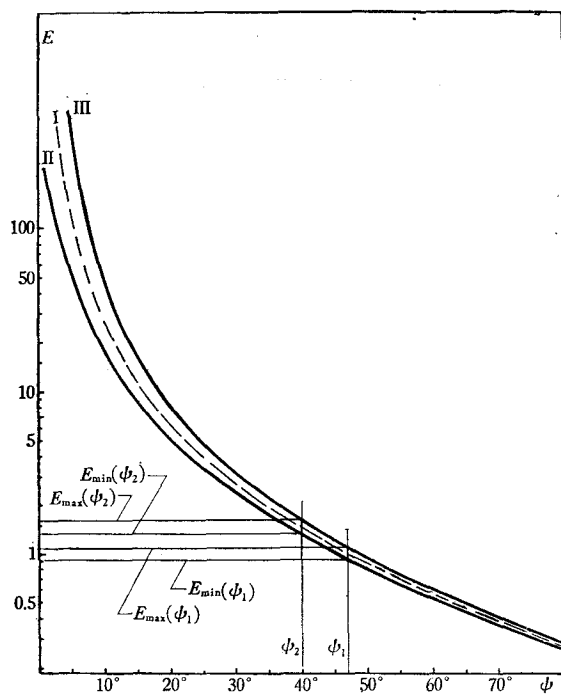


图2 谱仪的特性曲线

曲线 I, II 和 III 分别表示函数:

$$E = \frac{B^2 Z^2 e^2 R^2}{2m} \cot^2 \frac{\phi}{2};$$

$$E_{\min} = \frac{B^2 e^2 Z^2 R^2}{2m} \cos^2 \frac{1}{2} (\phi - \Delta\omega) / \sin^2 \frac{1}{2} (\phi + \Delta\omega + \Delta\phi);$$

$$E_{\max} = \frac{B^2 e^2 Z^2 R^2}{2m} \cos^2 \frac{1}{2} (\phi + \Delta\omega) / \sin^2 \frac{1}{2} (\phi - \Delta\omega - \Delta\phi)$$

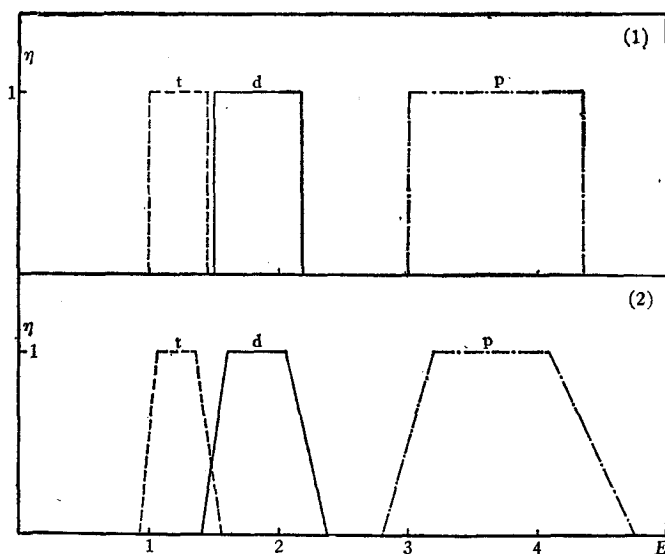


图3 探测效率 η -能量 E 曲线
(1) 理想情况; (2) 实际情况

子分开. 图 3 (1) 是当 $E_2/E_1 = 1.4$ 时, 谱仪对 p, d, t 三种粒子的探测效率与它们的能量关系. 可见, 当 $E_2/E_1 < 1.5$ 时, 用这种谱仪可以分辨 p, d, t 三类粒子. 当 $E_2/E_1 < 2$ 时可以分辨 p 与 d 这两类粒子.

由公式 (3) 可知, 改变半导体探测器位置 ψ 或磁场强度 B , 可以改变所测粒子的能区, 从而可以将各种粒子的能谱连接完整.

以上讨论的只是在理想情况下谱仪分辨粒子的性能. 实际上靶点和磁分析器入口都有一定大小, 因此进入磁场的粒子并非无限窄的平行束.

2. 实际情况

设在与磁极面平行的方向上靶点的有效宽度为 b , 磁分析器入口光阑宽度为 b_T , 两者相距为 L . 从图 4 可以看到: 入射粒子束不完全沿 Z 方向进入磁分析器而有一个 $\Delta\phi$ 的散开. 因此磁刚度相同的粒子经过磁场偏转后将分布在 $\psi - \phi + \Delta\phi$ 范围内. 同样, 在磁分析器出口处某一位置 ψ 所能探测到的粒子的磁刚度也不是单一的. 由图 4 可以看

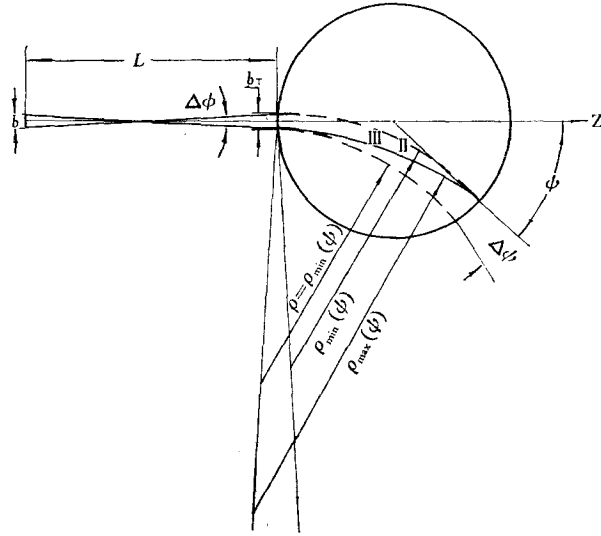


图 4 实际情况下谱仪分析示意图

$\Delta\phi$ 是 $\rho = \rho_{\min}(\psi)$ 的单能粒子经磁分析器偏转后的散开角;

$\rho_{\min}(\psi)$ 和 $\rho_{\max}(\psi)$ 是可能到达 ψ 处的那些粒子运动轨迹曲率半径的极限

出, 对某一位置 ψ 来讲, 在路径 II 和路径 III 之间运动的一束粒子都能到达这一位置, 这些粒子运动的轨迹曲率半径以路径 II 和路径 III 的曲率半径为极限. 这些个曲率半径满足如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\min} = \rho_{II} &= R \cos \frac{1}{2} (\psi - \Delta\omega) / \sin \frac{1}{2} (\psi + \Delta\omega + \Delta\phi); \\ \rho_{\max} = \rho_{III} &= R \cos \frac{1}{2} (\psi + \Delta\omega) / \sin \frac{1}{2} (\psi - \Delta\omega - \Delta\phi). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $\Delta\phi = (b + b_T)/L$; $\Delta\omega = b/2R$.

由公式 (1) 和 (4) 可求得在位置 ψ 处所能探测到的粒子的能量范围为 $E_{\min} - E_{\max}$,

且有

$$\left. \begin{aligned} E_{\min} &= \frac{B^2 Z^2 e^2 R^2}{2m} \cos^2 \frac{1}{2} (\phi - \Delta\omega) / \sin^2 \frac{1}{2} (\phi + \Delta\omega + \Delta\phi); \\ E_{\max} &= \frac{B^2 Z^2 e^2 R^2}{2m} \cos^2 \frac{1}{2} (\phi + \Delta\omega) / \sin^2 \frac{1}{2} (\phi - \Delta\omega - \Delta\phi). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(5) 式的函数图象如图 2 中曲线 II、III 所示。若在位置 ϕ_1 — ϕ_2 之间放一半导体探测器, 那么谱仪对各种能量的粒子的探测效率可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \eta &= 1 && \text{当 } E_{\max}(\phi_1) \leq E \leq E_{\min}(\phi_2); \\ 0 < \eta < 1 && \text{当 } E_{\min}(\phi_2) < E < E_{\max}(\phi_2) \text{ 及 } E_{\min}(\phi_1) < E < E_{\max}(\phi_1); \\ \eta &= 0 && \text{当 } E \geq E_{\max}(\phi_2) \text{ 及 } E \leq E_{\min}(\phi_1). \end{aligned} \right.$$

这样, 得到实际情况下的效率曲线如图 3 (2) 所示。由此可见, 只要选择适当的 ϕ_1 , ϕ_2 和适当的磁场强度 B , 同样可以达到从能谱上分辨粒子的目的。与理想情况下所不同的只是其探测效率 $\eta = 1$ 的区间变小了一些, 并出现了 $0 < \eta < 1$ 的区域。

在使用中我们希望 $0 < \eta < 1$ 的区域相对于 $\eta = 1$ 的区域越小越好。为了讨论方便, 定义

$$\left. \begin{aligned} \text{平 区 } P &= E_{\min}(\phi_2) / E_{\max}(\phi_1); \\ \text{上斜区 } \delta_1 &= E_{\max}(\phi_1) / E_{\min}(\phi_1); \\ \text{下斜区 } \delta_2 &= E_{\max}(\phi_2) / E_{\min}(\phi_2). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

显然, 谱仪性能的好坏表现于 P 的数值是否大和 δ_1 , δ_2 是否近于 1。由于 $\Delta\phi$, $\Delta\omega$ 数值很小, (6) 式可以近似表示为

$$P = \left[\cot \frac{\phi_1}{2} / \cot \frac{\phi_2}{2} \right]^2 (1 - 2\Delta_1 - 2\Delta_2),$$

$$\delta_1 = 1 + 4\Delta_1,$$

$$\delta_2 = 1 + 4\Delta_2,$$

其中 $\Delta_1 = \frac{1}{2} (\Delta\omega + \Delta\phi) \cot \frac{\phi_1}{2}$; $\Delta_2 = \frac{1}{2} (\Delta\omega + \Delta\phi) \cot \frac{\phi_2}{2}$ 。这些公式表明, 影响谱仪性能的主要因素是 $\Delta\phi$, $\Delta\omega$ 以及位置 ϕ 。此外, 在被分析粒子的能量一定时, 其偏转角 ϕ 受到磁场强度极大值的限制; 性能较好的半导体探测器的面积一般不很大, 这样磁铁半径也不能太大; 减小 $\Delta\phi$, $\Delta\omega$ 的结果又必然牺牲谱仪的探测立体角, 因此, 在谱仪设计时必须对这些因素综合考虑, 以求选择一个较合适的条件。

三、磁分析器和转动靶室系统

为了分析一定能量范围的 p , d , t 等带电粒子, 同时考虑到现有的半导体探测器有效面积的大小和对谱仪探测立体角要求等因素, 我们确定圆形磁铁的半径 $R = 70 \text{ mm}$, 磁极面间的距离为 20 mm 。被分析粒子沿磁极面半径方向入射, 经磁场偏转后基本上也沿半径方向出射。半导体探测器固定在靠近磁极面并可沿圆弧移动的导轨上, 它由一个齿轮带动, 可以在不破坏真空的情况下改变半导体探测器的位置。另外还平行地安装了一个导轨, 其上固定了一个可安装三种不同厚度吸收片的支架, 必要时可以在实验中改变加

在半导体探测器前面的吸收片厚度,用以辅助分辨粒子。

为了方便地测量核反应产物的角分布,设计了一个转动靶室。靶室的上半部与束流引出管道以 7.5° 的夹角相连接,并固定在一个刚性支架上。靶室的下半部固定在一个转盘上,靶室的上下两部分用真空橡皮圈和滚珠相联,因此,可以在维持真空的情况下使靶室下半部在 360° 范围任意转动。磁分析器与靶室下半部以 17.5° 的夹角相连接,因此可以使测量角度在实验室系从 $10-155^\circ$ 间任意选择。谱仪和靶室的结构见图 5。

从靶点到磁分析器入口之间的距离 $L = 150 \text{ mm}$, 谱仪的探测立体角

$$\Delta\Omega = \frac{b_T}{L} \frac{h}{L + l(\phi)}$$

其中 b_T 是磁分析器入口宽度; h 是方形半导体探测器在平行磁场方向的宽度; $l(\phi)$ 是粒子在磁场中运动轨迹长度。当 $\phi = 0$, $b_T = 2 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$ 时, $\Delta\Omega \approx 1 \times 10^{-3} \text{ sr}$ 。

此靶室还配置有束流准直器、电荷收集器、靶框及其支撑,冷阱,监督器窗,观察窗,真

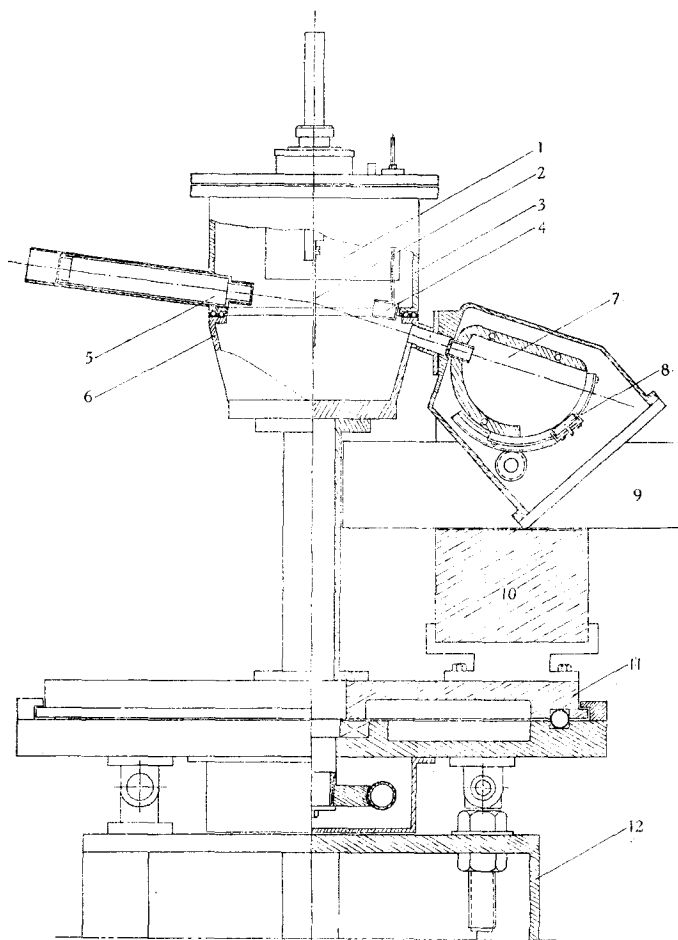


图 5 谱仪结构图

- 1——冷阱; 2——靶框; 3——靶室上半部; 4——束流收集器; 5——束流准直器; 6——靶室下半部; 7——磁极面; 8——半导体探测器; 9——线圈; 10——轭铁; 11——转动底盘; 12——支架(下部略)

空蒸靶设备等进行核反应实验所必须的设备。束流准直孔是长方形的,其宽度通常与分析器入口的宽度是一样的。

磁铁是用普通低碳钢加工的。磁铁线圈是用 $\phi 6 \times \phi 4$ 的紫铜管外缠两层绝缘绸布绕成的,管内通水冷却。磁铁电流由 7.5kW 的直流发电机供给,由一个负反馈稳流系统控制。电流的稳定度好于 0.1%。

这台谱仪安置在 2.5MeV 静电加速器的一个实验厅内用来进行核反应研究。

四、谱仪特性的测量

为了用本谱仪分辨各种带电粒子,我们对谱仪的基本特性进行了测量。

1. 单能粒子经磁场偏转后在 ψ 方向上的散开情况

我们用 $\text{Au}(p, p)$ 弹性散射在 $\theta_L = 30^\circ$ 处获得近似单能的质子束,用适当的磁场将这束质子偏转到所需要的偏转角 ψ ,以安装在靶室监督器窗口上的半导体探测器的计数作为监督,用具有 0.5mm 窄缝的半导体探测器测量了此单能质子对偏转角的分布。结果如图 6 所示。其中顶部和 ψ 数值大的一端出现的斜坡是由于弹性散射粒子有一个低能“尾巴”所造成的。真正单能质子的分布应如虚线所示。实验中所用靶点宽度约为 2mm,在 $\psi = 30^\circ$ 附近,单能质子的散开约 4° ,这与计算结果是相符的。

2. 对不同粒子的探测效率-能量曲线

在一定的磁场强度和一定的半导体探测器位置下,通过改变入射粒子能量的方法测量了谱仪对质子和氘核的探测效率-能量曲线。其结果如图 7 所示。单能入射粒子由 $\text{Au}(p, p)$ 和 $\text{Au}(d, d)$ 弹性散射来获得。曲线

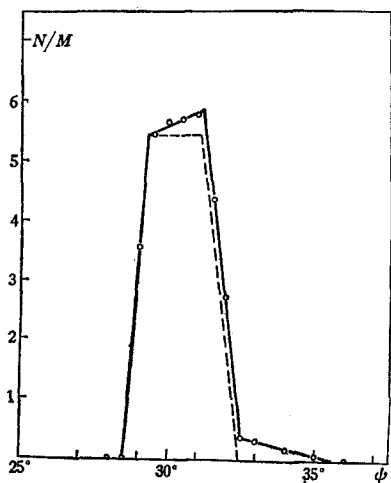


图 6 单能粒子的散开情况

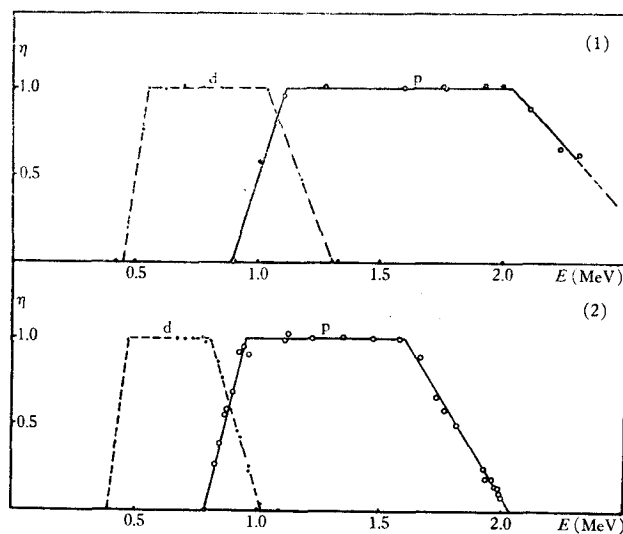


图 7 探测效率-能量曲线

- (1) 探测器位置 $\psi = 22.5^\circ - 37.5^\circ$,
磁场强度 $B = 6500\text{Gs}$;
(2) 探测器位置 $\psi = 20^\circ - 30^\circ$,
磁场强度 $B = 5100\text{Gs}$

的某些部分由于受加速器最高和最低能量的限制没有做全, 是用 $E_p = 2E_d$ 关系式来补足的. 而这个关系式亦被本实验中的另一些实验点所验证. 图 7 说明在探测效率-能量曲线上, 存在一个 $\eta = 1$ 的区域, 可以用选择半导体探测器位置 ϕ 和 $\Delta\phi$ 的大小来分辨某些粒子. 例如, 曲线 2 说明, 当 $\phi = 20^\circ - 30^\circ$ 时, 谱仪可以用来分辨 d 和 p. 同样, 只要 $\Delta\phi$ 适当, 也可以用来分辨 t 和 d. 这些探测效率-能量曲线和第二节中给出的理论计算结果是一致的.

3. 用改变磁场强度的方法获得探测效率-能量曲线

用改变粒子能量的办法来测量探测效率-能量曲线比较麻烦. 可以在固定探测器位置和入射粒子能量的情况下, 用改变磁场强度的办法来间接获得探测效率-能量曲线.

图 8 是当 $E_p = 2.0\text{MeV}$, $\phi = 20^\circ - 30^\circ$ 时, 用改变磁场强度 B 的办法测得的探测效率-磁场强度曲线. 由公式 (1) 可知: 在其他条件完全相同的情况下, 固定能量 E_0 粒子的 $\eta-B$ 曲线与固定磁场强度 B_0 的 $\eta-E$ 曲线的换算关系式如下:

$$B_0^2/B_i^2 = E_i/E_0 \quad (i = 1, 2, 3, 4),$$

式中 B_i 是 $\eta-B$ 曲线上四个特征点所对应的磁场强度, E_i 是 $\eta-E$ 曲线上与之对应的四个特征点的能量. 实验结果说明这个公式是正确的, 这两种曲线是等效的.

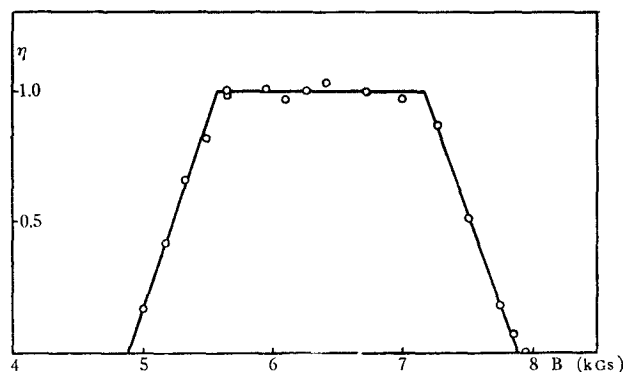


图 8 探测效率-磁场强度曲线
探测器位置: $\phi = 20^\circ - 30^\circ$; $E_p = 2.0\text{MeV}$

五、谱仪的应用

1. 去掉弹性散射粒子

在低能带电粒子核反应实验中, 库仑弹性散射截面常常比所要研究的核反应截面大很多倍, 尤其在前角区这种差异更大. 单独使用半导体探测器测量反应产物时, 这种弹性散射粒子往往成为非常严重的干扰. 因为大量弹性散射粒子脉冲在测量系统中会造成严重堆积, 使得要测量的粒子群的能谱发生严重畸变. 若用降低总计数率的办法来减少堆积效应, 就要大大降低实验效率. 在厚衬底靶的情况下, 只能在用吸收片挡掉弹性散射粒子时才能单独使用半导体探测器, 这样就会使很多测量无法进行. 使用本谱仪可以将弹

性散射粒子偏出探测器,而只让要测量的反应产物进入探测器,从而很好地解决了堆积问题。这样不仅可以提高实验效率和使能谱得到改善,而且在厚衬底靶的情况下也能进行实验。图9(2)就是用1.368MeV质子轰击薄 Al^{27} 靶时,在 $\theta_L = 30^\circ$ 用本谱仪偏掉弹性散射粒子的情况下测到的 $\text{Al}^{27}(\text{p}, \alpha_0)\text{Mg}^{24}$ 反应的 α_0 谱。实验中所用入射粒子束流强度为 $8\mu\text{A}$,入射粒子总电量 $Q = 1515\mu\text{C}$ 。在单独使用半导体探测器时, α_0 粒子群将完全被弹

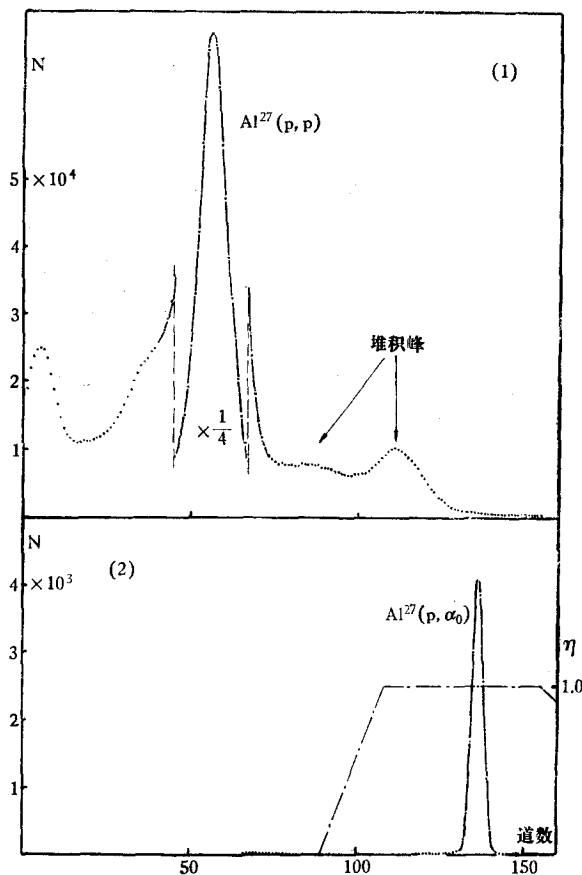


图9 谱仪应用于去掉弹性散射粒子的情况

- (1) 单独用半导体探测器测得的 $\text{Al}^{27} + \text{p}$ 反应能谱(入射粒子束流强度 $I = 0.05\mu\text{A}$, 电量 $Q = 2.65\mu\text{C}$);
(2) 经过磁分析器去掉弹性散射粒子后的 $\text{Al}^{27}(\text{p}, \alpha_0)$ 能谱($I = 8\mu\text{A}$, $Q = 1500\mu\text{C}$)

“— · — · —”表示谱仪对 α 粒子的探测效率 η - E 曲线

性散射粒子的堆积峰所淹没。例如图9(1)就是当入射粒子束流强度为 $0.05\mu\text{A}$ 时单独使用半导体探测器测得的结果,入射粒子总电量 $Q = 2.65\mu\text{C}$ 。从能谱上根本无法分辨出 α_0 粒子群。假如继续降低束流强度,那就会因反应产物太少而使实验难以进行。

2. 分辨粒子

从图7可以看出,本谱仪可以将能量相近的不同粒子分辨开。图10是用能量为2.0 MeV的氘核轰击 C^{12} 薄膜,在 $\theta_L = 30^\circ$ 用谱仪测得的反应能谱。其中图10(1)是不加磁

场 ($B = 0, \phi = 0^\circ$) 时测得的 $d + C^{12}$ 反应能谱, 图中没有给出高能端的一些粒子群如 $C^{12}(d, p_0)$ 等. 从图上可以看到 $C^{12}(d, p_1)C^{13}_{ist}$ 反应的质子群与 $C^{12}(d, d)$ 弹性散射 d 粒子混在一起了. 图 10(2) 是经过磁场分析后进入半导体探测器的粒子群能谱, 图中虚线是对应于 d 和 p 的探测效率曲线. 可以看到分辨出了 $C^{12}(d, p_1)C^{13}_{ist}$ 群. $C^{12}(d, p_1)C^{13}_{ist}$ 群与 $H(d, p)$ 分得不够好是因为实验中所用的束流准直光阑太厚, 使入射氘核能量不很单一, 致使反应产物也有一个低能“尾巴”的原因.

上面两种应用只是反应出谱仪特点的例子. 本谱仪还可以用于其他工作, 例如用于符合实验, 选出欲研究的能区, 可以大大减少偶然符合计数率. 也可以用于强 β 本底下重带电粒子能谱的测量, 或者偏去重带电粒子而只测量电子等.

从上面的讨论可以看到: 为了分辨粒子, 本谱仪一次能选出一个一定的磁刚度范围, 即一次只能测量一定能量范围的粒子, 否则几种粒子的能谱就会混杂. 我们准备用近年来发展起来的位置灵敏半导体探测器代替现用的普通半导体探测器, 这样在 ϕ, E 两维谱上各种粒子将按其磁刚度 p/Zc 和能量 E 的大小分布在各自的“岛”上, 就可使用更大的半导体探测器, 使一次测量能区得到扩展. 也可进一步改善谱仪的分辨粒子性能.

本谱仪在调试过程中, 看到 R. Bigler 等人^[1]发表了一个类似的工作, 他们的基本思想和我们差不多, 但在具体设计方面与本谱仪有较大的差异.

六、结 论

我们将小型磁分析器分析粒子动量和半导体探测器有较好的能量分辨率的特点结合起来, 建立了一个新型的带电粒子谱仪. 本谱仪可以用于分辨粒子, 对于去掉弹性散射粒子干扰方面尤其有利, 可以充分发挥半导体探测器有较高能量分辨率和用多道脉冲幅度分析器摄取能谱的优点.

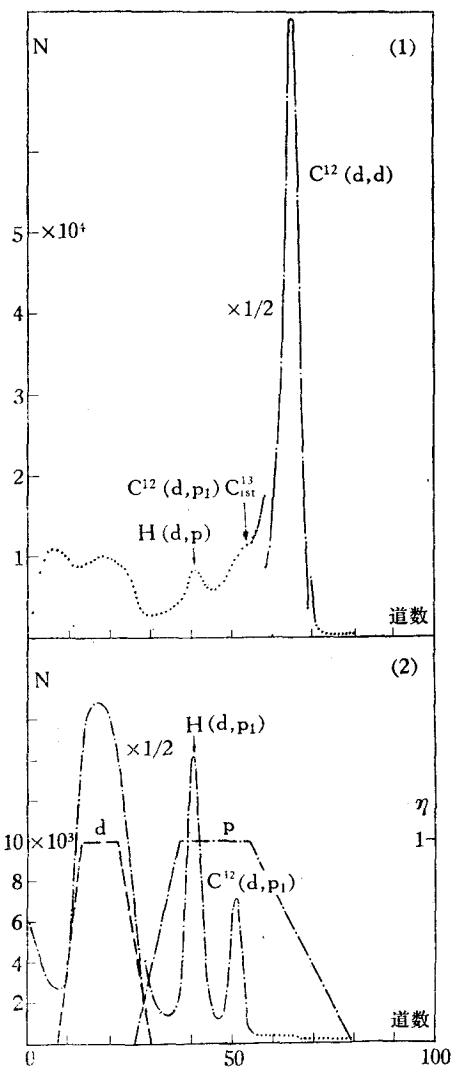


图 10 谱仪应用于分辨粒子的情况
(1) 单独用半导体探测器测得的 $C^{12} + d$ 反应能谱(高能部分略);
(2) 通过磁场分析分辨出质子群的谱:
“— · — · —” 表示谱仪对质子探测效率- E 曲线,
“-----” 表示谱仪对 d 的探测效率- E 曲线

吴润同志对本谱仪靶室系统的机械设计提出很多宝贵意见、并审核修改了整个设计图纸,在此深致谢意。

参 考 文 献

- [1] R. Bigler, J. L. Horton and S. A. A. Zaidi, *Nucl. Instr. and Meth.*, **98** (1972), 125.

A CHARGED PARTICLE SPECTROGRAPH OF SEMICONDUCTOR DETECTOR WITH A SMALL MAGNETIC ANALYZER

YANG CHIN-KANG LI WEI-CHIANG KUO CHING-CHIANG
CHU KUANG-HUA CHIANG CHEN-LIEH

ABSTRACT

A new-type charged particle spectrograph has been proposed and built up. It combines the property of the small magnet which can analyse the particle momentum with that of the semiconductor detector which has a higher energy resolution. As a result, the particle identification and the analysis of energy spectrum can be obtained simultaneously. In this paper, the design and structure of this spectrograph are described, some experimental results of using it in nuclear reaction studies are given, and its applications and characteristics are discussed. This kind of spectrograph is more simple and facile but possesses rather better performances.