

粒子鉴别

叶云秀

不论是在核物理实验中,还是在高能粒子物理实验中,粒子的鉴别都是很重要的。

在核反应实验中,反应产物往往相当复杂,例如,用铀核轰击某些靶核,可以同时形成产生质子、氦核、中子等粒子的反应。这些不同反应对应剩余核的不同能态。处于激发态的剩余核又可能衰变、放出带电粒子。通常用能谱仪来测量核反应带电粒子产物的能谱时,所测得的能谱是几种不同粒子的能谱迭加而成的总能谱。我们不能从总能谱来研究特定的反应道或得知所有可能的反应物。

一束高能粒子射到靶上,往往产生大量的各种各样粒子,人们所希望研究的事例往往只是其中极少的一部分,需要从比它高几个数量级的本底中鉴别出来。

我们分别介绍核物理实验中的粒子鉴别法和高能物理实验中的粒子鉴别法。

在核物理实验中,鉴别粒子的方法通常有 $\Delta E \cdot E$ 望远镜法、飞行时间法、磁刚度法和脉冲形状甄别法等。

$\Delta E \cdot E$ 望远镜鉴别法

如果我们现在要鉴别由核反应产生的产物质子(p)、氘(d)、氚(t)、氦-3(^3He)和氦-4(^4He)等粒子,我们首先会想到,这些粒子的质量不同,而且相对质量差较大;有些粒子电荷数也不同。是否可以用电离能量损失率来鉴别它们呢?因为粒子在通过物质时的电离能量损失率是与入射粒子的质量、电荷数有关的。当粒子能量较低时,能量损失率有以下关系:

$$-\frac{\Delta E}{\Delta x} \propto \frac{MZ^2}{E} \quad \text{即} \quad \Delta E \cdot E \propto MZ^2 \Delta x$$

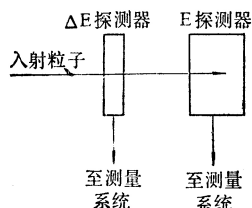


图1 $\Delta E \cdot E$ 望远镜鉴别系统

这里 M 、 Z 和 E 分别为入射粒子的质量、电荷数和能量, ΔE 为粒子穿过探测器物质厚度 Δx 时所损失的能量。在实验上用探测器测出各种粒子的总能量 E 和在薄探测器(厚为 Δx) 中

损失的能量 ΔE 时, MZ^2 就可确知。当然,要分辨出粒子,还应该分别知道 M 和 Z 。但在这里是不难知道的,因为 Z 总是整数是已知数,并且 $Z_p = Z_d = Z_t = 1$, $Z_{^3\text{He}} = Z_{^4\text{He}} = 2$ 。假定对于 p 粒子, $MZ^2 \Delta x = 1$, 即 $\Delta E \cdot E$ 乘积讯号为 1, 对于 d 、 t 、 ^3He 和 ^4He 的信号则分别为 2、3、

12 和 16。由于有这样较大的信号差别,就不难把它们分辨出来。

在实验安排上,就是把测量 ΔE 和 E 的探测器对准粒子束流排列起来,如图 1 所示,把测得的 ΔE 和 E 能量信号送到乘法器中相乘。这就是 $\Delta E \cdot E$ 望远镜鉴别法名称的由来。

细心的读者会提出问题,在以上的公式中,是否有不同的粒子而有相同的 MZ^2 值呢?如果是这样,那么在 $\Delta E \cdot E$ 探测器中得到的乘积信号也将是相同的,这时就无法鉴别它们了。这种情况确实是有,如 ^9B 和 ^{12}C , 它们的 MZ^2 值几乎相同,分别为 325 和 324,这在 $\Delta E \cdot E$ 探测器上是无论如何分辨不开的。这时需要辅以其它方法来分别确定 M 、 Z 值。如飞行时间法。

飞行时间法(TOF)

在非相对论情况,粒子的能量和速度有如下关系 $E = Mv^2/2$ 这里 v 为粒子速度。对于相同能量的一群粒子,只要分辨出它们各自的速度即可定出相应粒子的质量。在能量不同时,则要同时测出粒子的能量和速度才可确定质量 M 。粒子速度的测量是由在一定的距离 d 上测量飞行时间来实现的。测量示意图如图 2。

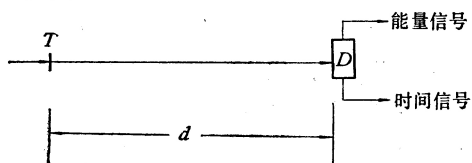


图2 飞行时间法示意图

粒子入射到靶 T 上,产生核反应,反应产物同时飞出,经距离 d ,入射到探测器 D 。探测器输出两路信号,一路经快电路作为时间信号,一路经线性电路作为能量信号。由此测定了这些粒子的能量和飞行时间,从而实现粒子的鉴别。

但是,单独使用飞行时间法鉴别粒子有个缺点,它只能实现粒子的质量鉴别,不能分辨如氘和氦-3 这样不同电荷而同质量的粒子。前面提到,单独用 $\Delta E \cdot E$ 鉴别器不能鉴别相同 MZ^2 值的粒子。如果这两种测量方法结合起来,由 $\Delta E \cdot E$ 鉴别器得到 MZ^2 值,飞行

时间法得到 M 值, 则对于粒子就提供了确定的鉴别。

磁刚度鉴别法

带电粒子在垂直于磁场 B 方向的平面中沿曲率半径为 ρ 的轨道运动, 有以下关系式:

$$P = Mv = ZeB\rho$$

这里 P 为粒子的动量, $B\rho$ 称为磁刚度。由此得到

$$(B\rho)^2/E = 2M/Z^2$$

测量磁刚度和能量, 决定了 M/Z^2 , 但要唯一地分别确定 M 和 Z , 还需与别的方法结合起来。可结合飞行时间法或望远镜法。与望远镜法结合起来, 符合 $M^2 \sim (B\rho)^2 \Delta E$ 和 $Z^4 \sim E^2 \Delta E / (B\rho)^2$ 分别测出 ΔE 、 E 和 $(B\rho)$, 则粒子的 M 和 Z 值可确定。测量系统如图 3 所示。

$B\rho$ 值的测定,

可以有两种方法。

一种是有固定的粒子运动轨道。对于一定的磁场强度, 只有一定动量的粒子才能通过狭缝而被探测到。需要不断地改变磁场强度 B , 才能测得具有不同磁刚度值的不同粒子。另一种是使

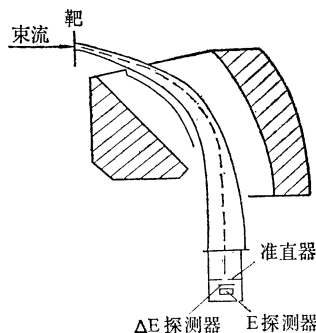


图 3

用固定的磁场, 让不同动量的粒子走不同曲率半径的轨道。由“源”出发的不同动量的粒子经入口狭缝后, 在均匀磁场中运动, 然后被聚焦到一个平面上, 不同动量的粒子到达平面上的不同位置, 由位置灵敏探测器记录。聚焦平面上不同位置对应不同的磁刚度 $B\rho$ 。

脉冲形状甄别法

不同类型的粒子入射到某些探测器中, 探测器输出的脉冲形状不同。在某些气体电离探测器中, 重带电粒子产生的脉冲上升时间快, 如质子引起的脉冲上升时间比电子引起的脉冲上升时间快。在若干闪烁计数器中, 闪烁衰退时间有快慢两种成分, 而快-慢成分

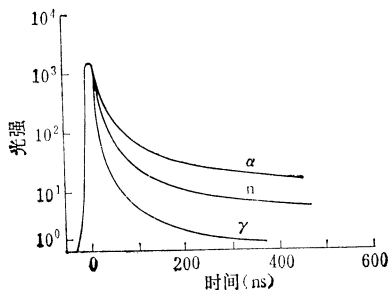


图 4

比随粒子种类而异, 如图 4 所示, 重粒子引起的快-慢成分比较小, 轻粒子的较大。在半导体探测器中, 不同类型粒子产生的脉冲上升时间有异, 可以适当选择耗尽层的厚度, 使不同粒子产生的脉冲形状不同。

鉴于以上特点, 可以利用电子学方法, 把脉冲形状上的差别转换成脉冲幅度上的差异, 从而达到鉴别粒子的目的。

脉冲形状甄别技术在鉴别中子和 γ 射线时是很有用的, 特别是在快中子物理实验中应用特别广泛, 已发展成为快中子能谱学的一个标准技术, 这是由于一方面在中子发射场中往往伴随着 γ 辐射, n 、 γ 分辨是必要的; 另一方面, 由于中子和 γ 射线都不带电, 某些对于带电粒子适用的方法对它们不适用, 如磁刚度法。而中子和 γ 射线或由它们分别产生的次级粒子如质子和电子, 在某些闪烁计数器中能造成不同的脉冲形状, 因而我们能够以此来鉴别它们。

脉冲形状甄别方法很多, 有比较法(或抵消法)、空间电荷饱和法、上升时间法、双微分过零法等。以下我们就以 n 、 γ 分辨来说明这几种方法。

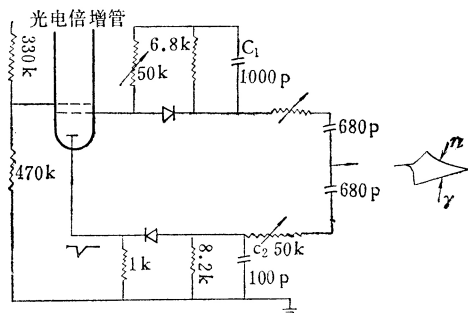


图 5 比较法脉冲形状甄别线路

比较法 在利用闪烁计数器作为探测器时, n 、 γ 信号可分别从光电倍增管的最后一个打拿极和阳极取得。图 5 为比较法简图。在相应的连接电路里采用不同大小的电容, 连接打拿极的电容取得较大, 快、慢成分都对电容充电, 因而得到 n 、 γ 总信号, 在阳极电路上连接小电容, 只有快成分充电, 获得的脉冲信号相应于光输出的快成分。两路信号在输出端进行比较。调节

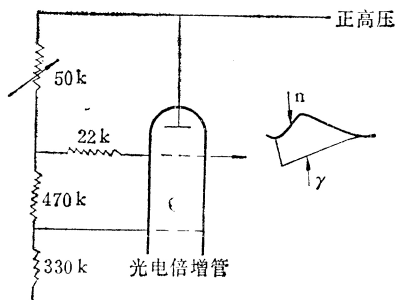


图 6 空间电荷饱和法

电路的可变电阻数值,使比较以后产生的输出信号对 n 来说为正,对 r 来说为负,这样就达到了 n 、 r 分辨的目的。

空间电荷饱和法 空间电荷饱和法原理如图 6 所示。在光电倍增管的最后一个打拿极与阳极之间的电压取法对快成分来说足够低,使闪烁脉冲电流的快成分通过时,空间电荷很容易达到饱和,因而使阳极电流具有最小可能的值,在这个短时间内,打拿极输出的是负脉冲;另一方面,电压值对慢成分来说又足够大,使闪烁脉冲的慢成分通过时不产生空间电荷饱和,因而所有打拿极对慢分量的放大是线性的。适当调整电路参数,使最后一个打拿极的信号输出对 n 为正,对 r 为负,因而分辨了 n 、 r 。

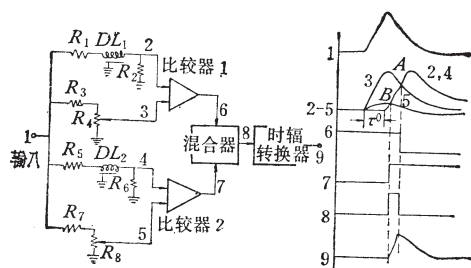


图7 上升时间-脉冲幅度转换。

上升时间法 利用 n 、 r 在某些探测器中产生的脉冲上升时间不同来鉴别它们。图 7 为其原理图。探测器信号从 1 输入到电路,在道 2、4 中延迟 τ_0 ,道 3、5 中衰减,但两路中衰减值不同。道 2、3 的脉冲到比较

器 1,道 4、5 的脉冲到比较器 2。只有当到达比较器的两个输入信号相等时,比较器才有脉冲输出,即在 A 和 B 点分别有信号输出。B 与 A 之间的一段时间间隔取决于脉冲 2 (或 4) 即脉冲 1 的上升时间,上升时间快,则间隔短,反之,则间隔时间长。把这时间间隔转换成脉冲幅度,脉冲的高度与输入脉冲 1 的上升时间成正比。在后面接上脉冲幅度分析器,进行脉冲高度分析,即对上升时间进行了分析,也就达到了 n 、 r 分析。

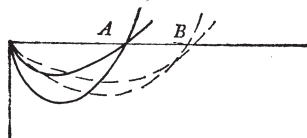


图8 双微分过零

双微分过零法 双微分过零法基于以下事实,即同样形状的脉冲被双微分后,它们相交于时间轴上的同一点,而不管它们的脉冲大小(即能量大小)如何,对于不同形状的脉冲(即不同粒子产生的)脉冲微分后在时间轴上的相交点将有位移,如图 8 所示,交于 A 点的是一种粒子的脉冲,交于 B 点的是另一种粒子脉冲,因此测量过零时间(即与时间轴的相交点)就能分辨 n 、 r 。过零时间的测量同样采用时间-幅度转换方法,分析脉冲幅度从而分析了时间。

以上粒子鉴别方法主要用于核物理研究工作中,高能物理中的粒子鉴别有其特殊性,以后我们再作介绍。