

# 高能粒子鉴别方法

叶云秀

在高能物理实验中,粒子的能量一般都很高,用鉴别低能粒子的方法来鉴别高能粒子将难以实现,高能物理实验中有一些新的粒子鉴别法,也有在低能粒子鉴别法基础上改进的方法。一般有以下几种方法: 1. 飞行时间鉴别法。2. 契伦柯夫辐射鉴别法。3. 电离损失相对论上升法。4. 穿越辐射鉴别法。5. 量能法。6. 射程法。

## 一、鉴别方法

1. 飞行时间鉴别法 它的原理与低能粒子鉴别的原理完全一样,只不过这时粒子的速度高,它们会在很短的时间内飞越很长的距离。如果两探测器之间的距离不够大,则不用说探测两粒子之间的飞行时间差,即使单粒子本身的飞行时间也不易测得。但距离也不可能无限大,一般在3—5米,这是受实际实验条件限制的。实验上需用时间响应极快的探测器,比如为了鉴别1GeV/C的 $\pi$ 、K粒子,如飞行距离选择为3米,能让我们得到在时间上有一定间隔的两个信号,则要求探测器的响应时间约在300微微秒左右。目前,塑料闪烁体和特殊的火花室的探测响应时间能达到这样的要求。

2. 契伦柯夫辐射鉴别法 高能带电粒子穿过介质会产生契伦柯夫辐射,辐射角 $\theta$ 与介质折射率 $n$ 、粒子速度 $\beta$ 之间有以下关系

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

只有当 $\beta \geq \frac{1}{n}$ 时才有契伦柯夫辐射产生。相同动量、不同质量的粒子具有

不同的速度。利用阈契伦柯夫计数器或微分契伦柯夫计数器,即可达到对某种速度灵敏而对另外一些速度不灵敏而鉴别粒子。例如,

发现反质子 $\bar{P}$ 的实验,实验安排如图1。由磁铁M确定负粒子动量为1.2GeV/C,由物理上知道,其中混有的粒子可能是 $\pi^-$ 、 $\bar{P}$ 。由动量 $p = 1.2\text{GeV}/C$ 知道

$$\beta_{\pi} = 0.99$$

$$\beta_{\bar{P}} = 0.78$$

实验上要挑出 $\bar{P}$ ,抑制 $\pi^-$ 。选择阈契伦柯夫计数器 $C_1$ ,使它的阈值为 $\beta > 0.79$ 。这时 $\pi^-$ 在 $C_1$ 中有契伦柯夫辐射, $\bar{P}$ 穿过 $C_1$ 而无辐射。使 $C_1$ 中的辐射信号与闪烁计数器 $S_1, S_2$ 反符合,这样可初步鉴别 $\pi^-$ 、 $\bar{P}$ ,对 $\pi^-$ 的抑制率可达99.9%,但还觉不够,再加微分契伦柯夫计数器 $C_2$ ,阈选为 $0.78 > \beta > 0.75$ (这时的 $\bar{P}$ 因穿过一些探测器而到达 $C_2$ 时的速度已减低到 $\beta = 0.765$ )。这时 $\bar{P}$ 在 $C_2$ 中有辐射信号而 $\pi^-$ 无信号,且两者都到达 $S_2$ 。适当选择系统的逻辑即可鉴别粒子,如

$$\bar{P} = S_1 \cdot S_2 \cdot \bar{C}_1 \cdot S_3 \cdot C_2$$

则表示在 $S_1, S_2, S_3$ 及 $C_2$ 中有信号在 $C_1$ 中无信号为 $\bar{P}$ 。同样可知

$$\pi^- = S_1 \cdot S_2 \cdot C_1 \cdot S_3 \cdot \bar{C}_2$$

即在 $S_1, S_2, C_1$ 和 $S_3$ 中有信号,在 $C_2$ 中无信号为 $\pi^-$ 。

用以鉴别粒子的契伦柯夫计数器有一般的阈式、微分式契伦柯夫计数器,有特殊的光学自校正式、光环式等契伦柯夫计数器。

3. 电离损失的相对论上升多点取样法 带电粒子穿过介质,通过与原子的电子碰撞损失能量,导致原子的电离与激发,在能量较低时,电离能量损失

$$dE/dx \propto \frac{1}{\beta^2},$$

这时鉴别粒子是相对容易的。当能量

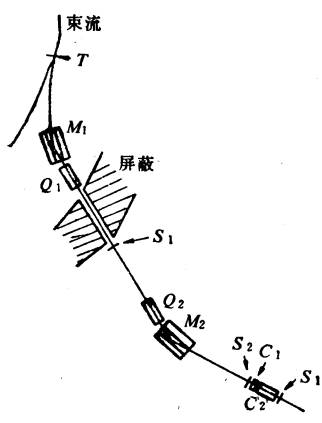


图1 发现 $\bar{P}$ 的实验

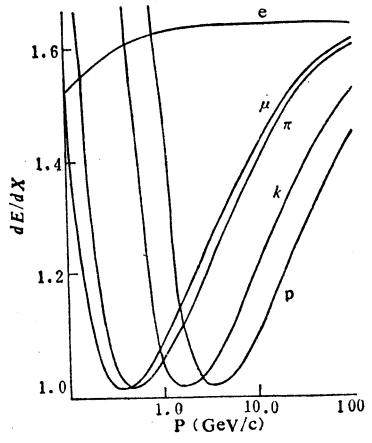


图2 几种不同粒子的电离曲线

较高,  $\beta > \frac{1}{n}$  时, ( $n$  为介质的折射率), 契仑柯夫辐射开始有所贡献, 同时, 在  $p/mc > 4$  时, 电离损失开始出现随动量增加而上升的现象, 称为电离损失能量的相对论上升. 电离损失能量随粒子动量的变化曲线如图 2 所示. 一般在气体探测器中有较明显的上升率.

电离率相对论上升的存在, 且在同样动量下不同粒子之间的电离损失有差别, 这就提供了通过测量电离率鉴别相对论粒子的可能性. 但是实验表明, 电离损失的相对论上升是很小的, 最大上升量不超过最小电离值的 50%. 不同粒子之间能量损失率的差别更小. 要鉴别粒子, 能量测量的分辨率必须远小于 10%. 事实上, 用通常的测量单信号的方法是不可能达到这样的分辨率的, 在薄层气体探测器中, 能量分辨率很坏, 如 3 GeV/C 的  $\pi$  介子在 1.5 厘米厚的氩 + 7% 甲烷的气体探测器中, 达 80%, 用厚气体探测器, 如 50 厘米厚, 能量分辨仍然在 50%; 即使用了很厚的气体室, 分辨率最好也不过 20%. 探测高能粒子时能量分辨率差的原因是在气体探测器中电离能量损失有大的涨落 (朗道涨落). 为了解决这个问题, 一个行之有效的方法是在一个厚的气体探测器中对电离信号  $dE/dx$  采取多点取样. 设取  $N$  点, 则得到的能量分辨率将是单点测量时分辨的  $1/\sqrt{N}$ . 只要把  $N$  取得足够大, 即可把能量测量的分辨率大大改善. 目前, 有的能做到能量分辨率好于 3%, 这就可将两种不同粒子的电离信号区分开, 达到鉴别粒子的目的.

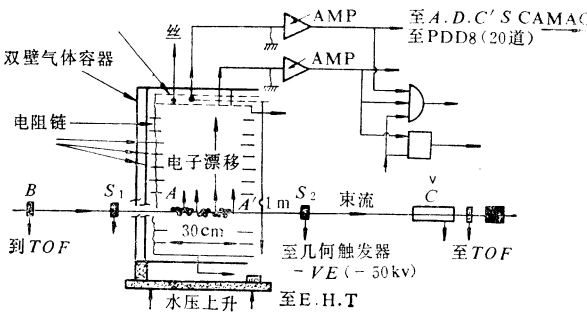


图 3 多点电离取样室

所采用的气体探测器, 有平面式多点电离取样的, 有圆柱形式的, 还有时间投影谱仪. 它们的取样丝多达几百根. 图 3 是一种图象漂移式平面型多点取样测量示意图.

利用电离损失的相对论上升及电离信号的多点取样法鉴别粒子的范围在动量 2 GeV/C 至 100 GeV/C 之间.

4. 穿越辐射鉴别法 在高能物理实验中, 契仑柯夫探测器在鉴别粒子方面有很大的作用, 可惜在能量很高时, 粒子之间的速度差值很小, 如 1 GeV 的电子、100 GeV 的强子, ( $\pi$  介子、 $k$  介子、质子等) 它们的  $\beta$  值

都趋向于 1, 这时用契仑柯夫计数器就很难鉴别粒子. 多点电离取样探测器的发展, 为相对论上升区鉴别粒子提供了有力的工具, 但是, 当能量继续升高, 达到  $r \geq 100$  时, 电离的相对论上升过渡到饱和状态, 达到了费米坪区, 多点电离取样鉴别就失效. 为解决超相对论区域的粒子鉴别, 发展了穿越辐射探测器.

当  $r \left( r = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) > 1000$  的高能带电粒子穿

越两种不同物质的交界面时, 产生穿越辐射, 辐射的总能量  $W$  与  $r$  值成正比. 只要测得两粒子的穿越辐射能  $W_1$ 、 $W_2$ , 则可知相应粒子的  $r_1$ 、 $r_2$ , 而  $r$  值与质量之间有关系  $r_1/r_2 = m_2/m_1$  (当  $\beta \approx 1$  时). 即可鉴别粒子.

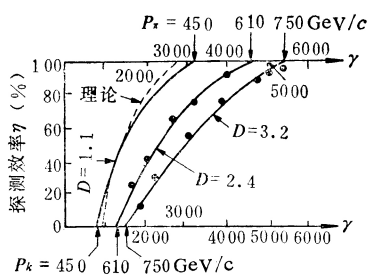


图 4 不同的甄别阈  $D$ 、 $\pi$  对应的探测效率

穿越辐射的能量是以软 X 射线的形式出现的. 原则上, 分别测出两种不同粒子产生的 X 射线能量, 可以鉴别粒子. 实际上, 与契仑柯夫计数器不需测辐射角而鉴别粒子一样, 只需做成阈式探测器, 即可鉴别粒子. 举例说明, 图 4 表示 450、610 和 750 GeV/C 动量的  $\pi$  和  $k$  粒子各自所对应的  $r$  值和 X 射线阈值. 如果我们把探测 X 射线的甄别阈置在  $D = 1.1$  keV, 则得到  $\pi$  和  $K$  的探测效率分别为 100% 和零, 这就把 450 GeV/C 时的  $\pi$  和  $K$  区分开. 因为 450 GeV/C 的  $\pi$  和  $K$  分别对应的  $r$  值为 3200 和 900, 它们穿越辐射的 X 射线能量分别为几十 keV 和小于 1 keV, 只要甄别阈调在 1.1 keV,  $K$  粒子就被排除,  $\pi$  就百分之百被探测到. 如果动量上升到 610 GeV/C 而不变化甄别阈, 则  $\pi$  的探测效率还是百分之百, 而  $K$  也有较多的部分被探测到, 这样就不利于分辨粒子. 必须把甄别阈上升到  $D = 2.4$  keV, 对 610 GeV/C 的  $\pi$  还是百分之百探测到, 而  $K$  却被排除了. 同样, 当动量又上升到 750 GeV/C 时, 必须把  $D$  上升到 3.2 keV, 才能把 750 GeV/C 的  $K$ 、 $\pi$  分开.

5. 簇射能量法 高能电子和  $r$  量子的能量超过一定的临界值后, 在介质中除了有电离损失和韧致辐射外, 还有电子对产生的过程. 入射  $r$  量子在介质中产生正负电子对, 正负电子对又引起韧致辐射, 韧致辐射  $r$  量子又产生正负电子对, 这样随着穿入物质层的深度的增加, 次级电子和光子的数目将指数式地增加, 这种增加过程由于电子和光子的能量变低而停止. 入射粒子为电子时, 也发生类似的过程.

强子簇射是由非弹性强相互作用所传播的. 强相互作用中将产生许多次级粒子, 并激发原子核, 核衰变

又产生粒子发射,最后能量耗尽而停止。

电磁簇射和强子级联,具有不同的特征.在不同的物质中,电磁辐射长度与强子的核吸收长度相差都是很大的.如粒子进入铅中,电磁相互作用的辐射长度只有0.5厘米左右,而强子却要在18厘米左右(吸收长度)才发生一次典型的核事例而损失能量.选择适当厚度的辐射材料,用量能的办法探测到电子(或 $\gamma$ )在介质中具有一定高度的信号脉冲;强子作用的结果,输出比电子或 $\gamma$ 小的脉冲,或无明显信号脉冲.根据有无信号输出或信号大小即可鉴别出电子(或 $\gamma$ )和强子.这种方法对带电粒子和中性粒子都一样适用。

6. 射程法 强子在物质中经历强相互作用引起强子级联,电子或 $\gamma$ 量子通过电磁相互作用而发生簇射,它们的能量很快被消耗在物质内.高能 $\mu$ 子不参加强相互作用,它通过物质时只以电离的方式损失能量,它在物质中的射程远大于以上粒子的射程,因此利用射程的不同可以把 $\mu$ 子与强子电子及 $\gamma$ 量子区分开.例如,实验上可以这样安排:簇射量能器鉴别出电子(或 $\gamma$ )与其它粒子,然后安排相当厚度的物质,把强子级联过程的次级粒子都包含在内,而 $\mu$ 子能顺利通过,而最后的探测器中无信号时可鉴别它们为强子,相反,有信号时则为 $\mu$ 子.它们的实验安排我们将在粒子鉴别系统图中看到。

射程法比较简单、直观,但吸收强子的吸收体一般需要很厚,且随能量的增加而增加.为克服这个缺点,有改进了的射程法.如在用泡室作中微子实验时,由于泡室的灵敏体积有限,中微子反应产生的 $\mu$ 子和 $\pi$ 介子的能量都较高,因而它们的径迹有可能都没有终止在泡室内.由于它们质量相近,根据泡室内的电离径迹无法判别它们.按传统的方法,在泡室外加大量的吸收体吸收掉 $\pi$ 强子及其级联, $\mu$ 子在最后的探测器中探测.这种吸收体的量需要很多.如果加一定量的吸收体,则或有部分强子被吸收掉,或部分被散射出接收区,或部分到达接收区产生强子级联.如为前两者,即在接收区(称为外鉴别器)无信号,从而可以鉴别它们,如为后者,则在接收区内有多分叉粒子径迹而可以鉴别它们. $\mu$ 子既在泡室内无多分叉径迹,在外鉴别器内也为单径迹事例而可以鉴别它们。

## 二、粒子鉴别综述和典型测量系统

1. 粒子鉴别综述  $\pi/K$ 分开的动量范围可用表1综述表示。

2. 几个典型的探测系统 (1) 对撞机上的实验系统 图5是一种在对撞机上进行实验的谱仪系统.中心是对撞束流管,紧挨着的部分是对各种荷电粒子进行测量的探测器,如多丝正比室、漂移室、或多点电离取样的图象漂移室等,它们用来测量带电粒子的能量、动量.同时允许电子、 $\gamma$ 量子、强子和 $\mu$ 子等顺利通过;

表 1

方 法	动 量 范 围		要 求
	固定靶实验 ( $L=30$ 米)	贮存环实验 ( $L=3$ 米)	
飞行时间法	$P < 4 \text{ GeV}/c$	$P < 1 \text{ GeV}$	$\sigma_t \leq 300 \text{ ps}$ 用大的闪烁系统可得 $\sigma_t = 100-300 \text{ ps}$ 用特殊火花室可得 $\sigma_t \leq 100 \text{ ps}$
阈契仑柯夫计数器	$P < 80 \text{ GeV}/c$	$P < 25 \text{ GeV}/c$	灵敏于10个光电子的探测器
DISC (光学自校正微分契仑柯夫计数器)	$P < 200 \text{ GeV}/c$		消色散气体计数器
光环契仑柯夫计数器		$P < 65 \text{ GeV}/c$	对紫外光灵敏的探测器
多点电离取样法	$1.2 < P < 100 \text{ GeV}/c$	$1.5 < P < 45 \text{ GeV}$	$\sigma(dE/dx) \sim 2-3\%$
穿越辐射探测器	$r > 1000$	$r > 1000$	软X射线探测器

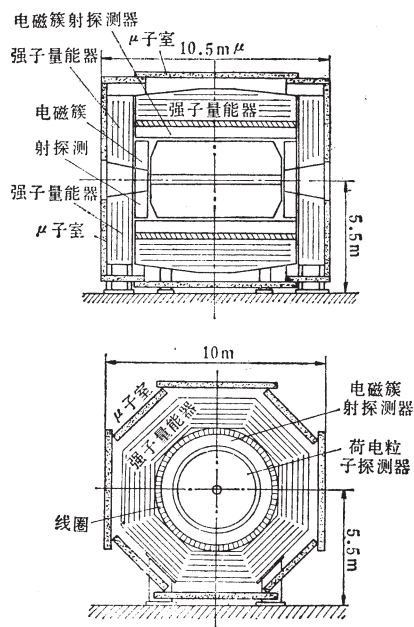


图5 对撞机上的实验系统之一  
时间法的探测器等组成强子臂。

对撞机上束流碰撞后的产物是朝各个方向飞行的,所以探测器需要围绕对撞点包起来,探测系统有近于 $4\pi$ 的立体角。

(2) 固定靶的实验系统 固定靶的实验目的和实验种类多种多样,难以用一、二个典型探测系统概括出来.它的特点是:反应产物不是分布在 $4\pi$ 立体角内,

第二层是用来测量和鉴别电子、 $\gamma$ 量子的电磁簇射探测器,强子和 $\mu$ 子仍能通过;强子在外面的强子量能器中被探测、鉴别;唯有 $\mu$ 子穿过了强子量能器,到达 $\mu$ 子室而被探测、鉴别。

有的系统还由契仑柯夫计数器、飞行时

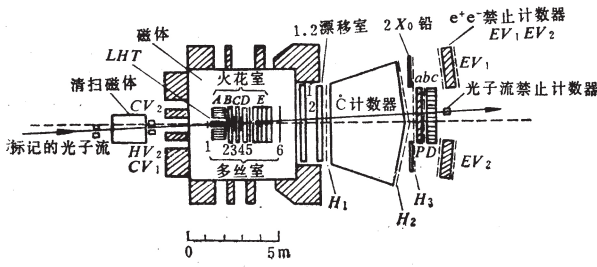


图6 光产生实验安排,图中 A:(1-8); B:(9); C:(10)  
D:(11); E:(12-15)

而主要是在前向,因而探测系统可安置在前向的小立体角内。图6是光产生实验的一套装置,可测光子能量到70 GeV。标记光子从左入射,穿过对带电粒子不灵敏的计数器的间隙,入射到液氦靶,发生相互作用,光产生的荷电粒子,由火花室、多丝室加以探测、鉴别,铅玻璃块和大型闪烁描述仪探测快的 $\pi^0$ 介子,气体契仑柯夫计数器用以鉴别 $K^\pm$ 和 $P^\pm$ 。