

“认识来源于实践”。人们通过感觉器官了解各种自然现象,认识其规律性。但是,人的感官能够直接感知的范围是很有限的。因此,常常需要借助于各种仪器,扩大人们的感官的能力。人们借助于望远镜或者显微镜,可以观察到肉眼直接看不到的遥远空间或者微观世界的现象。高能物理实验工作者用粒子探测器观测基本粒子相互作用中产生的各种现象,从而了解基本粒子的性质及其相互作用的规律性。

## 一、一个比方

在高能物理实验中使用的粒子探测器有很多种类。如果按照探测器记录和测量粒子的方式来分类,探测器大致上可以分为径迹室和计数器两大类。

径迹室探测器能够把粒子飞行的轨迹记录下来。流光室是属于径迹室这一类。但它也具有计数器的某些特点。为了便于说明流光室的工作原理,先作一个比方。

大家知道,一个有经验的猎手,能在茫茫的草原上或者茂密的森林中猎取动物,常常是根据动物的足迹,跟踪追击。从动物的足迹,不仅可以知道动物的走向,而且还可以判断动物的种类、大小和重量。这就是说,动物的足迹给猎手留下了许多有用的资料。从表面上来看,利用径迹室研究基本粒子的性质以及基本粒子相互作用的规律的方法与猎人利用动物的足迹来判断动物的特征和猎取动物的方法是很相似的。

## 二、粒子的“足迹”

以一定速度运动的带正电荷或负电荷的粒子,只要它不是在真空中,而是在有某种物质存在的空间中飞行,在通过的路径上会与许多原子或者分子相碰。当它与这些原子或者分子碰撞时,有时会把其中电子撞出来,留下带正电荷的离子。这样,在带电粒子通过的路径上就会出现许多撞出来的电子-正离子对,这就是原来那个带电粒子的“足迹”。不过,在通常的情况下,这些“足迹”很快就会消失。这是由于电子和正离子能重新复合,或通过其他反应,恢复到原始状态。在“足迹”自行消失之前,加上某些特定条件,我们可以使粒子的“足迹”显现出来。在这瞬时用照像方法把粒子的“足迹”拍摄下来,就得到粒子飞行的轨迹。这粒子的径迹就代表粒子飞行的路径。流光室就是一个能够使带电粒子的“足迹”显示出来的特殊装置,并随即用照像方法把粒子的径迹拍摄在胶片上。

# 流光室

张家铨

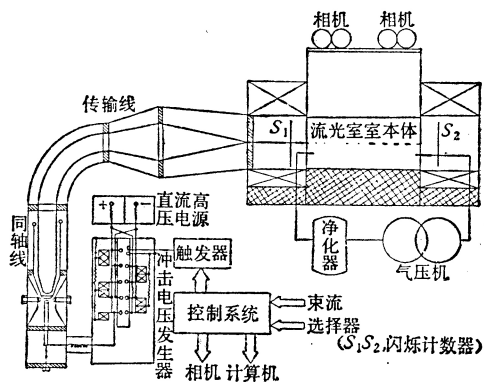


图1 流光室工作原理示意图

## 三、流光室如何显示粒子的“足迹”

流光室是怎样使粒子的“足迹”显示出来的呢?先介绍一下流光室的结构和它的各组成部分的作用。

流光室由室本体、工作气体净化和监测装置、毫微秒脉冲高压装置、照像光学系统、触发计数器和自动控制系统等六部分组成(见图1)。

室本体主要包括充有工作气体的容器及平面状电极。容器放置在两平面电极之间,为了照像,容器用透明而且电绝缘性好的材料制作。平面电极是由一排细金属丝组成,容器里一般充以一个大气压的氩-氟混合气体,加入约千万分之一的六氟化硫气体。工作气体净化系统和监测装置使工作气体持一定的混合比和纯度。

毫微秒脉冲高压装置由直流高压电源、冲击电压发生器、同轴线和传输线组成。这样就能够适当的瞬间把脉冲高压加到室本体的电极上。如果两电极之间的距离为30厘米,脉冲高压幅值约为600千伏特。脉冲的宽度一般约为10毫微秒,脉冲的上升时间大约为3毫微秒。

用三个照像机同步拍摄构成立体照像光学系统。

触发计数器一般用大面积闪烁计数器。它的作用是选择感兴趣的作用事例。如果在流光室的室本体中发生了所要研究的事件,触发计数器就给出一个信号,送到自动控制系统。

自动控制系统包括许多电子学仪器和有关的逻辑线路。它是流光室的司令部,指挥各组成部分协调动作。当带电粒子穿过室本体容器和触发计数器时,不仅在它通过的路径上留下了“足迹”,而且在触发计数器中产生一个信号,传送到自动控制系统。然后自



图2 在流光室中粒子的径迹 (SLAC)  $K_L \rightarrow \mu^+ \pi^- \nu_\mu$

动控制系统按照一定的逻辑程序指挥各组成部分的动作。首先,自动控制系统指令毫微秒脉冲高压装置输出脉冲高压,加到室本体的电极上。然后,按照一定的时间顺序要求指挥照像光学系统和其他部分的运转。

当脉冲高压加到电极上时,在室本体空间产生电场强度约为20千伏特/厘米的脉冲电场;这是显示粒子“足迹”的一个重要条件。

电子-正离子对在高电场作用下,通过碰撞过程,其数目指数地增加,形成由电子和正离子构成的小团。给这样的一个小团取个名字,叫做一个“雪崩”。当一个雪崩中的电子数目达到  $10^8$  个时,电子和正离子的重新复合会放射出光子。但由于一个雪崩发射的光十分微弱,一般胶片拍不出来。为了达到用最灵敏的胶片能够记录的光强,就要外加持续时间为10—20毫微秒的高压脉冲,使每个初级雪崩在沿电场方向发展成几个雪崩。人们把这个阶段发射出来的光叫做流光。它是由雪崩串发射出来的,比由一个雪崩发射的光通量强的多。

显示粒子“足迹”的另一个重要条件是:脉冲高压必须在粒子的“足迹”消失之前加到电极上。因此,动作过程必须很快的,从粒子穿过室本体到脉冲高压加到电极上所需的时间间隔一般应小于1微秒。

在上述条件下,粒子的“足迹”就转变成发光的小柱。发光的小柱的直径一般为0.3—1毫米,长约为几毫米。沿发光柱的轴向照像,就得到由小光点组成的轨迹,这就是粒子的径迹。图2是用流光室获得的粒子径迹的照片。

#### 四、径迹能告诉我们什么信息

现在我们已经知道的“基本”粒子有几百种。这些“基本”粒子之间有许多共同的性质,也有各自的个性。人们正是利用粒子的个性来区别它们,并寻找还未发现的新粒子。表征粒子性质的参量有很多,例如,质量、寿命、电荷、自旋、宇称和同位旋等等。其中最重要的是质量和寿命。许多粒子的第一次发现就是通过测量粒子的质量和寿命得到的。例如,在1974年丁肇中教授首先发现J粒子,就是在他的实验中观测到了质量为质子质量的3.3倍的粒子,而且它的寿命比较长,约为  $10^{-20}$  秒,这样的粒子过去从未观测到。

粒子的动量可以由粒子的径迹给出。把流光室的

室本体放在很大磁铁(约400吨)的两磁极之间,带电粒子在磁场的作用下,运动方向发生偏转。在沿磁场方向上拍摄粒子的径迹。这样拍摄出的粒子径迹不是直线,而近似为一段圆弧。粒子的动量越大,粒子径迹的弯曲半径也越大。测量径迹的弯曲半径就可以确定粒子的动量。

径迹弯曲的方向由粒子所带电荷的符号决定。因此,根据径迹弯曲的方向很容易确定粒子带的是正电荷还是负电荷。

根据许多径迹的分析,还可以给出表征粒子的其他一些参量的资料。综合分析这些资料,有可能鉴别粒子的种类、性质,认识相互作用的规律。所以,流光室在高能物理研究中是一个很有用的工具。

#### 五、流光室的特性

在高能物理实验中流光室具有它自己的特点,简要的归纳如下:

**1.能选择实验者有兴趣的事例** 在基本粒子相互作用过程中会发生各种各样的事件。实验者可能只对其中的某些事件感兴趣。流光室可以挑选这些事件。这样,目标明确,提高了工作效率、节省了费用。

**2.有明确直观的作用过程图象** 俗话说:“眼见为实”。由于流光室能记录相互作用过程中产生的粒子的径迹,给人们一个十分清楚的直观的图象,一目了然。

**3.能接受相互作用过程中产生的全部带电粒子** 有些短寿命的中性粒子的衰变也能被记录下来。

**4.能承受比较强的人射初级粒子束流** 这个特性对于研究一些稀有过程是很重要的。因为稀有过程的作用截面很小,为了获得足够大的事例产生率,只有求助于强的人射初级粒子束流。如果流光室的记忆时间是1微秒,在记忆时间内有10个人射初级粒子,这相当于束流强度为  $10^7$  个粒子/秒。流光室承受这样的束流强度是没有困难的。

**5.能比较精确的测量粒子的动量** 由于工作介质是气体,带电粒子的多次散射效应很小。对于动量大于0.7京电子伏/c\*的粒子,多次散射对动量测量精确度的影响可以忽略不计。在流光室中,动量测量的精确度主要决定于流光室的大小和照片测量仪器的误差,很容易做到使动量测量的相对误差小于百分之一。

当然跟其他的探测器一样,流光室也有它自己的缺点。主要缺点是,相对于计数器实验来说,获取数据的速度慢,照片的扫描和测量花的时间长。在用自动化的仪器扫描和测量照片的情况下,一般来讲,一个实验从拍摄照片到得出实验结果需要半年的时间。

\* 京电子伏/c 是表示粒子动量的单位,其中京电子伏是表示粒子能量的单位,1京电子伏= $10^9$  电子伏, c 是光速,  $c=3 \times 10^{10}$  厘米/秒。

## 六、流光室在高能物理实验中的应用——流光室谱仪

虽然“基本”粒子十分微小,但是研究“基本”粒子用的工具却是非常庞大、复杂。在高能物理实验中用的实验装置,常由好几种探测器组合而成。它的总重量由几十吨到一千多吨。

在高能物理实验中,流光室也不能单独使用,还必须有多钟别的探测器配合。通常以流光室为主体,再加上闪烁计数器,契伦柯夫计数器和漂移室等构成一个满足一定实验条件要求的复杂装置。这样的装置叫做流光室谱仪。流光室谱仪兼备了径迹室探测器和计数器谱仪的某些特点,具有多粒子谱仪的性能。当然,这样复杂的装置还必须要配有专用的计算机。

图3是美国斯坦福电子直线加速器中心的一个流光室谱仪的示意说明。它的主体部分是一个2米流光室。室本体的有效体积为2米×0.8米×0.6米。室本体放在磁极直径为2米的常规磁铁中。两磁极之间的间隙为1米,最大磁场强度为1万6千高斯,需要6兆瓦的直流电功率。

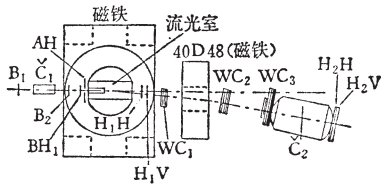


图3 流光室谱仪 (SLAC)

束流望远镜:  $B_1, \check{C}_1, B_2, BH_1, AH$ ;  $B_1, B_2$ ——闪烁计数器,符合;  $BH_1$ ——闪烁描述仪;  $\check{C}_1$ ——契伦柯夫计数器;  $AH$ ——反符合闪烁描述仪;  
触发选择系统:  $H_1H, H_1V, H_2H, H_2V, WC_1-WC_3, \check{C}_2$ ;  $H_1H, H_1V, H_2H, H_2V$ ——闪烁描述仪;  $WC_1-WC_3$ ——多丝正比室;  $\check{C}_2$ ——契伦柯夫计数器

在流光室的后面,有一个几十吨重的偏转磁铁,许多闪烁计数器,三个多丝正比室单元和两个契伦柯夫计数器。配有一台PDP-9计算机作专用机。

从这个例子,我们可以看到流光室谱仪的规模和技术上的复杂性。但在高能物理实验中,这还算是比

较简单的实验装置。现在有些实验室里正在用流光室作很重要的实验。

## 七、流光室的发展动向

流光室已经获得了广泛的应用,但是流光室技术还在不断地改进和发展,主要有以下几方面:

**1. 氢流光室技术** 所谓氢流光室就是在工作容器中不充现在常用的氦-氖混合气体,而是用氢气。氢流光室的特点在于,氢原子核是最简单的原子核,只由一个质子组成。在高能物理实验中氢是最理想的实验靶子。在氢流光室中,氢气既作为实验靶,又同时作为探测器的工作气体,相互作用点明显易见。用它可作许多有兴趣的高能物理实验。近几年来,在氢流光室的研究方面已经取得了很好的进展。

**2. 无底片记录系统** 目前有几个小组正在致力于流光室无底片记录系统的研究。所谓无底片记录系统就是用径迹数字化信息记录代替照像方法。无底片记录系统的优点是显而易见的。径迹用数字化信息记录,避免了繁重而复杂的底片测量和分析过程。径迹的数字化信息可以用计算机在线分析或者直接记录在磁带上进行离线处理。这样利用了在线实验的优点,提高了获取数据的速率,可以很快的得出实验结果。

目前正在研究中的径迹数字化信息记录系统有两种。一种是利用类似于电视摄像的装置,把流光室中的径迹图像变换成电信号,然后数字化,输送到记录和处理系统。另一种叫电荷耦合装置。电荷耦合装置的接收部分就是由许多微小的光敏感单元排列组成的一块平板。流光室中的径迹通过透镜成像于这平板上,产生电信号,由电荷耦合装置的输出信号电子学系统得到径迹的数字化信息,然后输送到记录和处理系统。这两种方法都已经取得了很好的结果,看来,无底片记录系统的应用已经是指日可待了。

最后应该指出,由于在气体介质中粒子游离的相对论上升比较显著,在游离的相对论上升区流光室有可能鉴别粒子。一些实验已经得出了令人信服的结果。但流光室技术还在继续发展,前面还有很多工作要作。相信不久还有新的捷报传来。