

# 正负电子对撞机谱仪

章 乃 森

粒子物理实验需要高能加速器,但光有高能加速器还不能进行粒子物理实验.高能加速器只能提供高能粒子束流,用束流打击另一种作为靶的粒子就会产生粒子间的相互作用.相互作用的结果可能是发生散射,也可能产生一系列次级粒子.将这些次级粒子的种类、个数、飞行方向、动量、能量等都记录下来,并进行分析,从而探讨物质更深层次的微观结构,则是粒子物理实验要完成的任务.为了记录分析初级粒子和次级粒子,要用各种各样的粒子探测器以及相应的电子学线路、电子计算机.在物理实验中,这种成套的多功能的探测粒子的设备,称为谱仪.

## 一、对撞机实验的特点

1.事例率少 正负电子对撞过程属于电磁相互作用,其作用截面比强作用截面要小两、三个数量级.一种反应的事例率等于反应截面乘以对撞机亮度.如果  $2 \times 2.2 \text{ GeV}$  正负电子对撞机平均有效亮度为  $2 \times 10^{30} / \text{cm}^2 \cdot \text{秒}$ ,根据量子电动力学可以算出,产生  $\mu^+ \mu^-$  事例率大约为 100 秒一次.在这一能区产生任意强子的总截面比  $\mu^+ \mu^-$  的约大五倍,则约为 20 秒一次.对于某一种强子的事例率就更小了.如果研究某强子的某种衰变方式,就得再乘上它的分支比(小于 1).特别是对于某种被称为卡比玻禁戒的衰变过程,对撞机工作一整天,也许只能出现 1~2 次,可谓罕见的了.因此,必须十分珍惜在对撞机上产生的每一个有用事例,要尽可能将它们全部记录下来,以便研究分析.这就给谱仪提出了很高的要求.

在通常打静止靶的实验中,加速粒子能量越高,次级粒子就越集中在向前的一个小角度内,此时只要作一个朝前谱仪,就能把一定立体角内的次级粒子都记录下来.而对撞机实验所产生的次级粒子大体上是前后对称地飞向四面八方.这就需要在整个空间,即接近  $4\pi$  立体角内记录绝大部分次级粒子,才能较好地反映客观情况.为此,要求各种探测器将对撞区一层一层地紧密包围起来,这样在谱仪的设计、制造、检修等方面增加了很多困难.

2.次级粒子数目多 正负电子对撞产生湮没,实际上可以看作先形成一个能量高度集中的球,然后迅速衰变成轻子 ( $e^+$ 、 $e^-$ 、 $\mu^+$ 、 $\mu^-$ ...) 和强子 ( $\pi^+$ 、 $\pi^-$ 、 $\pi^0$ 、 $K^+$ 、 $K^-$ 、 $P$ 、 $\bar{P}$ 、 $A$ 、 $\bar{A}$ ...). 在  $2 \times 2.2 \text{ GeV}$  能区,碰撞后产生的带电粒子平均数目约为四个,另外还可能产生不带电粒子.这些粒子大多是不稳定的,会继续衰变或级联衰变,直到最后衰变成稳定粒子(如  $e^+$ 、 $e^-$ 、

$\rho$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $\nu$ 、 $\bar{\nu}$ ...). 因此,由  $e^+e^-$  湮没到各次级联衰变的整个过程是一幅十分复杂的图象.各种粒子衰变的平均寿命随产生衰变过程的具体相互作用类型而异,大多发生在  $10^{-23}$  秒— $10^{-6}$  秒.因此,各种粒子在探测器中,有的看不到径迹,有的径迹在微米量级,有的则可飞行千米以上.将这些径迹如实地记录下来,进行精确的测量和分析是对撞机谱仪的艰巨任务.

3.本底相对大 在  $e^+e^-$  对撞机束流管道中,电子或正电子与残余气体或管壁碰撞会产生各种反应,天外来客宇宙线粒子也会在谱仪中产生各种作用,同步辐射也会对谱仪产生影响……这些都在谱仪中形成本底.此外在对撞点处,正负电子束团每秒钟要相遇约 100 万次,这将产生很多不需要的本底事例.因此要用电子学判断触发系统进行精选,要成百万倍地压低本底,……,才能找出所需要的事例.这一判断需要谱仪在微秒量级时间内完成.

## 二、对撞机谱仪的国际概况和基本结构

自 1960 年对撞机问世以来,世界各国相继已建成的高能正负电子对撞机近十台,工作的各类谱仪约有卅台,就对撞机结构和使用性能来看,可分成两类谱仪,一类是通用谱仪,一类是专用谱仪.

通用谱仪适用于多种实验,它所包括的探测器种类多,功能较全,灵活性大.但结构复杂,制造较难.目前国际上大部分对撞机谱仪是通用谱仪.

专用谱仪研究课题针对性强,结构较简单,课题选得合适也常可以作出有特色的成果.如美国 SLAC 实验室 SPEAR 对撞机上一台晶体球谱仪,对低能  $r$  粒子的探测效率高,能量分辨好,近年来它在分析( $c\bar{c}$ )系统能级结构上作出了出色的成果.

建造对撞机谱仪,在技术难度上和造价上往往超过建造对撞机本体.如西德 DESY 实验室建造  $2 \times 19 \text{ GeV}$  对撞机 PETRA 本身投资约一亿马克,而在其上工作的五台谱仪造价约两亿马克.

通用型谱仪的设计各不相同,但其基本结构大体上是:中心部分有一个径迹室记录粒子径迹,然后是一组飞行时间计数器,再后是簇射计数器测量光子或电子的能量,最后是  $\mu$  子鉴别器,见图 1.

有的谱仪为了加强对强子的分辨,增加了强子量能器或气凝胶计数器或气体契伦科夫计数器以测定更高能量 ( $> 1 \text{ GeV}$ ) 的强子或  $\mu$  子.

下面分别介绍一下各探测器的原理和构造:

1.径迹室 径迹室是记录带电粒子径迹和测量粒

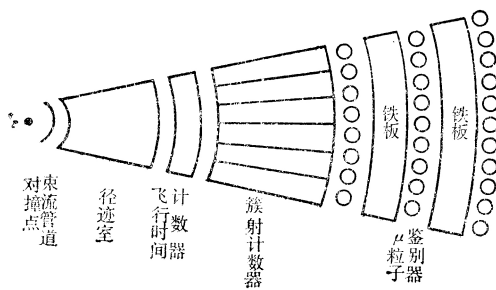


图 1 通用型对撞机谱仪的基本结构

子动量的，早期高能物理中曾主要用气泡室测量粒子径迹，用照相方法分析大量事例，费时费事。后改用电子学探测器，如丝火花室，多丝室等。目前主要采用漂移室测量粒子径迹。

漂移室是从多丝室派生出来的，我们先介绍一下多丝室。

多丝室是在一个室本体内拉很多根平行的金属丝（见图2）。阳极丝多用  $\phi 20\mu\text{m}$  的镀金钨丝，间距约 2mm，阴极丝可用不锈钢丝  $\phi \sim 100\mu\text{m}$ ，在阳极和阴极丝之间电位差约 4000 伏，室内充以氩气和二氧化碳或有机气体混合物。当带电粒子通过时，由于电磁相互作用使粒子径迹周围的气体电离，电离出来的电子和正离子受电场作用，分别向阳极和阴极漂移，当电子漂移到强电场区域，它可以获得足够的能量使室内气体分子电离而释放出新的电子，这种次级电离在阳极丝周围几百微米的强电场区内会发生好几代，因而产生大量电离电子-正离子对。这个现象称为电离雪崩。雪崩中产生的大量电子被阳极丝收集，就产生一个负脉冲，用电子学系统记录下来，就知道在这根丝附近通过了一个带电粒子。用多丝室确定粒子径迹的精确度，大致和二分之一丝距相当。这种径迹室的缺点是定位精度不够精确，丝数太多，相应的电子学系统庞大，对于大面积探测粒子很不经济。

漂移室的阳极丝数目少，丝距几厘米甚至几十厘米。在带电粒子穿过室体，电离出的电子以一定的漂移速度向附近的阳极丝漂移。电子到达阳极丝的漂移时间和粒子穿过室体的位置有关。准确地测定漂移时间，就可以定出粒子径迹的位置。漂移室的空间分辨率可以达到  $100 \sim 200\mu\text{m}$ 。

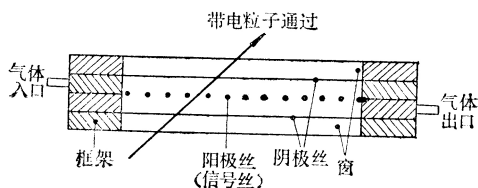


图 2 多丝室结构原理图

漂移室丝数少，相应的电子学设备也少，比多丝室经济。但对电子学设备的定时精确度要求很高，常要求有毫微秒级定时精度的电子学设备。

对撞机谱仪上所用的漂移室多是圆柱形的（图4），空间分辨率最好可达  $30 \sim 50\mu\text{m}$ 。专门用以测定次级粒子衰变顶点的称为顶点探测器。

漂移室一般安装在谱仪的大空间均匀磁场中，测量带电粒子的动量。磁场强度高，漂移室空间位置分辨率好，就可以准确地测出粒子径迹的弯曲情况，由此可以测定粒子的动量  $P$ 。

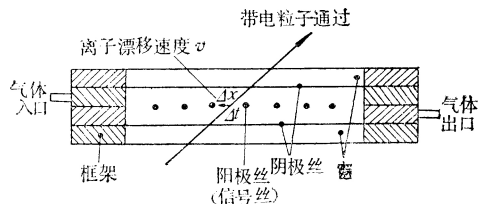


图 3 平面漂移室原理图

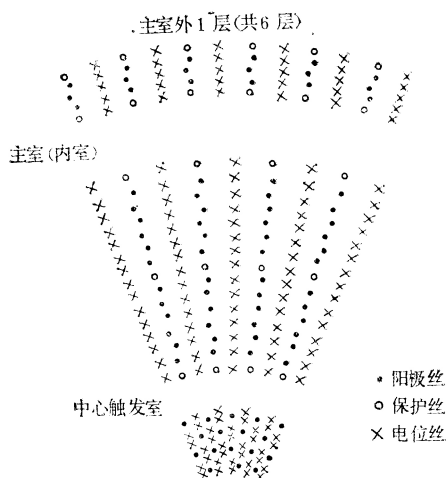


图 4 漂移室单元结构

2. 飞行时间计数器 飞行时间计数器是测量  $e^+e^-$  碰撞产生的次级粒子，由产生到穿过飞行时间计数器的时间差，来计算粒子速度（图5）。飞行时间计数器常用大面积塑料闪烁体，放置在离碰撞点一定距离处（1~5 米），用时间精度非常好的电子学设备，测量飞行时间，定时精度可达 200 微微秒以下。

3. 簇射计数器 我们先介绍一下什么是簇射。高能电子进入重物质（即原子序数大的物质），和物质发生电磁作用，通过韧致辐射产生一些高能光子。高能光子又和物质发生电磁作用产生正负电子对，正负电子和物质作用又产生光子，如此循环，产生越来越多的次级光子和正负电子对。直到粒子能量降低到不能再产生光子或正负电子为止。在物质中沿入射方向分布的光子和正负电子数目由少到多发展到峰值之后，再由多到少，整个过程叫簇射过程。

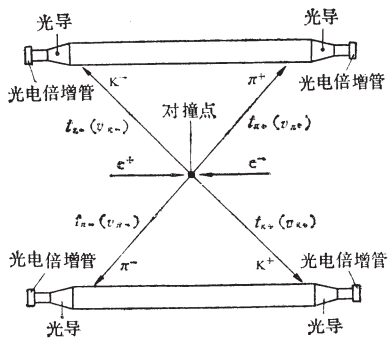


图 5 飞行时间计数器原理图

探测器称为簇射计数器。利用碘化钠晶体、铅玻璃等制成的能够测量入射电子全部能量的簇射计数器，称全吸收型簇射计数器；利用多层铅片，在每两层中夹以气体计数器或闪烁计数器，来测量入射粒子一部分能量的称作取样式簇射计数器。图 6 是塑料闪烁体——铅片夹层式簇射计数器结构示意图。这两种计数器主要记录电子或光子的电磁簇射。高能强子也有簇射现象，测量用的强子簇射器也称强子量能器，多是用多层铁片，每两层中夹以适当的计数器构成。

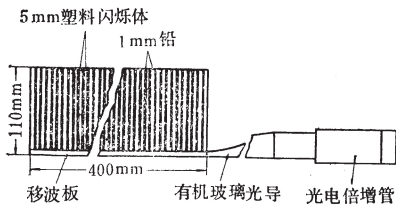


图 6 塑料闪烁体——铅片夹层或簇射计数器单元结构示意图

一层或多层厚铁板作为吸收体，将具有强作用的各种次级粒子吸收掉，把通过厚铁板的粒子用计数器记录下来，记录下来的粒子可能就是  $\mu$  子。这种设备叫做  $\mu$  子鉴别器。一般  $\mu$  子鉴别器都是放在谱仪的最外层。在所测得的  $\mu$  子中，是否还混有强子或强子衰变出来的其它粒子，这就需要通过进一步计算、分析加以辨认、校正。

谱仪除了具有上述各种探测器系统外，还配备相

应的快电子学读出、触发系统，在线计算机，自动控制、机械、电磁、供水、供电、供气等系统。整个谱仪的重量可达 4 吨以上，电子学线路有几万道。所以，一个谱仪的建成，往往需要上百名工程技术人员和物理学家多年的辛勤劳动。一个高能谱仪的水平，在一定程度上反映了一个国家的工业基础和科学技术水平。

利用探测器将所有次级电子、正电子的能量全部测量出来，或测量它们的一部分就可以确定原来入射电子（或光子）的总能量。这种

图 7 是美国斯坦福大学电子直线加速器实验室 (SLAC)，在七十年代初建造的第一台正负电子对撞机谱仪——MARK-I 的外形示意图。

图 8 是八十年代初建成的，目前还在调试中的第三代对撞机谱仪——MARK-III 的剖面图。它重约 400 吨。是当代最先进的高能谱仪之一。

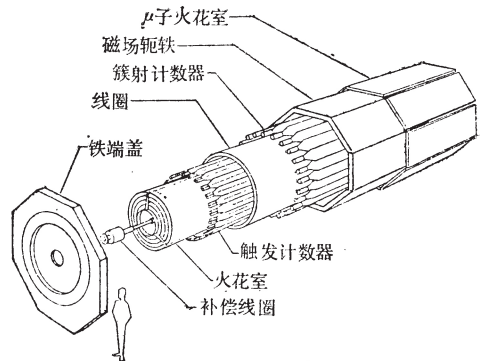


图 7 SLAC 的 MARK-I 的示意图

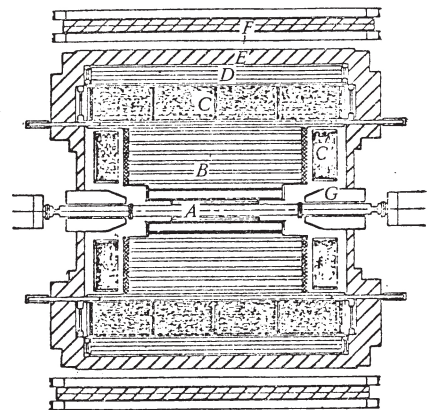


图 8 SLAC 的 MARK-III 剖面图

#### 4. $\mu$

子鉴别器

$\mu$  子可以穿透很厚的物质层而不发生作用，因此，要鉴别  $\mu$  子可以设法用