

顶点探测器及其在实验中的应用

王 运 永

一、顶点探测器

能够用来探测或重建相互作用顶点或粒子衰变顶点的探测器,称为顶点探测器。严格说来,我们把入射粒子与靶粒子相互作用的位置或两个束流对撞的位置,称为事例的初级顶点,而把产物中不稳定粒子的衰变位置,称为事例的次级顶点。在高能物理实验中,不稳定粒子占绝大多数,它们的寿命是非常短的。例如:强作用衰变的 ρ 粒子寿命约为 10^{-23} 秒,电磁作用衰变的 π^0 寿命为 0.84×10^{-16} 秒,即使弱作用衰变的 D^0 介子寿命也只有 10^{-13} 秒数量级。因此我们在探测器中能够观测到的,大都是它们最终的衰变产物。为了揭开“基本粒子”内部结构的秘密,研究它们的物理性质以及寻找新的粒子,探测、重建事例的顶点是非常重要的。

二、顶点探测器的特点和类型

高能物理实验中使用的探测器系统是十分复杂而庞大的。它们的结构因实验目的不同而有差异。但是,作为顶点探测器,一般具有如下一些特点:

1. 空间分辨率好,顶点定位精度高,能够精确地区分或拟合径迹。
2. 时间分辨率好,允许高的计数率,有多径迹处理能力。
3. 空间覆盖面积大,探测效率高,尽可能把事例中的粒子都记录下来。
4. 好的动量分辨,能有效地鉴别粒子。

顶点探测器基本上可分为径迹室及计数器谱仪两大类。

(一) 径迹室: 径迹室能把粒子经过的路径记录下来,提供直观的物理图象。它们在高能物理实验的发展过程中,曾起过重要作用。主要有以下几种:

A. 云室: 第一个云室是1912年由威尔逊建立起来的。它是一个密闭的容器,里面充有气体及少量的水与酒精混合物。在常温下,室内的液体蒸气达到饱和状态。当带电粒子穿过云室时,它会使室内气体电离而形成一条由电离粒子组成的看不见的“径迹”。这时云室突然进行绝热膨胀并适当控制体积的膨胀比。就会以电离粒子为中心形成一颗颗小水珠,用照相机把这些小水珠组成的径迹拍照下来,就可以进行分析、测量。

B. 气泡室: 气泡室是1952年由格莱塞发明的。

它是一个密闭的容器,里面装着有一定温度和压力的液体(如液氢、液氖、丙烷等),实验时使容器突然膨胀降压,液体就处于过热状态。带电粒子穿过时,使液体原子电离,过热液体以这些离子为中心发生沸腾形成一个个小气泡,当它们长到适当大小时,拍照下来,就得到我们需要的粒子径迹的照片。

C. 核乳胶: 原子核乳胶是由卤化银微粒与明胶混合制成的。它是在普通照相底片的基础上发展起来的。只不过厚度大,卤化银颗粒细、含量多。当带电粒子穿过乳胶时,会使路径上的一部分卤化银颗粒形成显影中心,经过显影、定影等一系列处理之后,粒子穿过的路径上就显示出一条由黑色银颗粒组成的径迹。

径迹室是一种很好的顶点探测器,它们有很高的空间分辨本领。如: 乳胶的空间分辨率为1微米左右,气泡室的空间分辨率为十几微米到几十微米。可以直观地显示出作用顶点的空间位置,把事例中的大量径迹区分开来,亦可显示出某些粒子的飞行距离及衰变顶点。用以寻找新的粒子,进行寿命测量及其他物理性能的研究。由于把粒子的径迹都拍照下来,因此便于对整个事例进行综合分析。但是这种方法不能对事例进行选择,需要分析扫描大量的照片,工作量十分大。对于反应截面很小的过程来说,统计性往往很差。

(二) 电子学计数器谱仪: 把多丝正比室、漂移室、时间投影室等位置灵敏计数器以及闪烁计数器、契伦科计数器、簇射计数器、磁铁等按照一定的物理设计组合起来,并配以快电子学、计算机等数据获取处理系统,就组成高能物理实验中使用的大型谱仪。只要空间分辨率足够高,就可以重建事例的初级顶点和次级顶点。这类顶点探测器种类很多,结构各异。

A) 漂移室与多丝正比室: 多丝正比室与漂移室是60年代末和70年代初发展起来的两种新型粒子探测器。它们的工作原理都是基于气体雪崩放电。多丝正比室以丝的位置标志粒子穿越的坐标。漂移室以电离粒子的漂移时间来确定入射粒子的空间位置。这两种探测器的主要优点是:

a. 直流供电,连续灵敏,可同时起到计数和定位的作用。

b. 空间分辨率高。漂移室为几十微米到几百微米。多丝正比室为 $\sigma = 1/3s$, s 是阳极丝丝距。使用雪崩重心法读出亦可达到100微米左右。

c. 时间分辨率高。多丝正比室一般为30毫微秒

左右,漂移室为 2—5 毫微秒。

d. 允许高的计数率。多丝正比室一般为 10^6 个/秒·丝,漂移室亦可达到 10^5 个/秒·丝。

c. 探测效率高,一般都大于 99% 而接近 100%。

f. 结构简单,制作方便,根据需要可制成不同的形状和大小。

B) 时间投影室: 时间投影室是 1975 年由 D. Nygreen 提出来的。其基本结构如图 1 所示: 它是一个

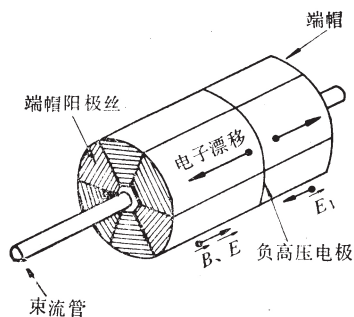


图 1 时间投影室结构示意图

密闭的圆筒,里面充有高压气体。沿筒的轴线方向有与之平行的强电场和强磁场,两个端帽各包括 6 个扇形的多丝正比室讯号丝的方向如图所示。在讯号丝的方向上,沿着丝的方向有一排分成小块的膜状阴极,用它取出感应讯号。当带电粒子穿过圆筒时,会把里面的气体电离,而形成一串电离粒子。电离电子在强电场下向端帽漂移,到达端帽阳极丝附近时产生雪崩讯号。电子的漂移时间确定了沿轴向 z 的坐标,沿端帽径向的坐标 y 由丝的位置确定,而沿阳极丝的坐标 x 由阴极块上的感应讯号确定。

时间投影室可以精确地确定入射粒子的三维空间坐标,具有很强的多径迹分辨能力,是一种很好的顶点探测器,欧洲原子核研究中心的 Ω 谱仪,就以时间投影室为顶点探测器,其空间分辨率为 180 微米。

C) 其他: 除以上所述,硅片探测器望远镜、宽间隙火花室、微道板等都可以做为顶点探测器,电子学计数器谱仪顶点探测器的优点是:

① 覆盖面积大,能够基本上包围住事例产生的整个空间,不丢失径迹。

② 沿粒子行进的空间可以摆多层不同的探测器,能够重建一段很长的径迹,便于外推重建事例的顶点。

③ 能够处理多重数很高的事例。

④ 利用触发判选,可以选择满足特定物理条件的事例,进行记录和分析,本底小。

⑤ 利用计算机快速处理大批数据,提高了统计性。

(三) 混合谱仪: 近几年来,单独的径迹室在高能物理实验中用得越来越少了。人们把它们与电子学计数器联合起来,组成了混合系统。在这种系统中,径迹室(如气泡室、乳胶)作为顶点探测器,发挥了空间分辨率高,物理图象直观等优点。电子学计数器用作触发,选择符合一定物理条件的事例。从而大大减小了扫描

照片的工作量。这些计数器还可以探测粒子的空间位置、角度、动量、速度等,提高了径迹分辨能力。

三、顶点探测器在高能物理实验中的应用

1. 径迹室的应用: 径迹室作为一种顶点探测器,在高能物理的发展史上曾经起过重要的作用。很多“基本粒子”都是在这种探测器中发现的。例如: 利用云室发现了正电子、 μ 介子、 K^0 介子、 Λ 超子及 Ξ^- 超子等。利用原子核乳胶发现了 K^+ 、 K^- 介子、 Σ^+ 超子、 $\bar{\Lambda}^0$ 反超子等。利用气泡室发现了 ω 介子、 $\bar{\Sigma}^-$ 反超子、 Ω^- 超子及 $Y^*(1385)$ 、 $Y^*(1520)$ 等大量“共振态”。至今仍然有人用它组成混合谱仪,进行 Λ 粒子及 B 粒子的研究。在径迹室中,典型的事例如图 2 所示: 这是一张

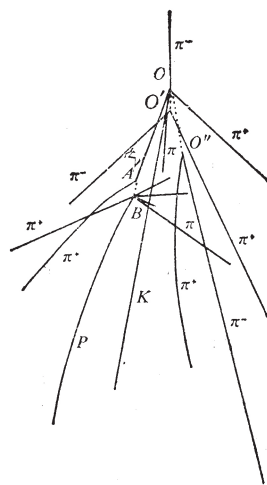


图 2 气泡室中事例的描线图

张气泡室径迹的描线图。是我国物理学家王淦昌等发现的 $\bar{\Sigma}^-$ 反超子事例。入射的 π^- 介子在 O 点发生相互作用,形成初级顶点,产生 4 个能量较大的带电粒子径迹。 O' 、 O'' 、 A 及 B 都是次级顶点。经过分析计算可知, O' 和 O'' 是两个 K^0 介子的衰变。 $\bar{\Sigma}^-$ 超子在 A 点衰变成 π^+ 介子及一个反中子 \bar{n} ,反中子 \bar{n} 在 B 点与碳核湮灭产生大量粒子。

2. 重轻子 τ 寿命的测量: τ 粒子是近几年来新发现的第三代轻子,它的寿命测量对验证标准的弱相互作用理论具有重要的意义。如果 τ 的衰变也象 μ 子一样,描述其衰变的带电弱流具有普适的费米耦合强度及 $V-A$ 结构,那么 τ 的寿命应为 $(2.81 \pm 0.20) \times 10^{-13}$ 秒。如果实验结果与此理论值不符,那就意味着打开一个新的物理领域。 τ 的寿命测量也可以给出 τ 中微子质量的上限,这种中微子至今未在实验上找到。

τ 的寿命测量在正负电子湮灭实验中是很方便的,因为这时 τ^+ 和 τ^- 是成对产生的,每个都有确定的能量。我们可以测量它们的平均衰变长度来确定它们的寿命。实验上,我们按照一定的条件选出 τ 轻子事例。利用顶点探测器确定它们的衰变顶点,测量衰变顶点对初级顶点的距离,做分布图,求平均值。MARK-II 组测得 τ 衰变长度的分布如图 3 所示,相应的寿命为 $\tau = (3.20 \pm 0.41 \pm 0.35) \times 10^{-13}$ 秒。

此外,顶点探测器还可用于如: B 强子的寿命测量、 D 介子寿命的测量、改善对中性粒子 K^0 、 A^0 等的探测、标识 Λ 粒子及 B 粒子事例等。

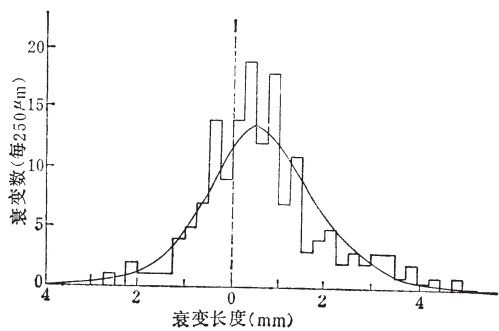


图 3 τ 衰变长度的分布

顶点探测器在高能物理实验中已经发挥了重要的作用,现在,很多运转多年的老谱仪都在考虑加进顶点探测器以改善其探测性能,开展新的物理工作。正在兴建中的新谱仪也大多数把顶点探测器作为一个重要组成部分。随着实验向更高的能区推进、顶点探测器必将发挥更大的作用。