

对撞束物理实验中的漂移室

马 基 茂

漂移室是七十年代初期出现的一种新型粒子探测器。它具有定位精度高、时间分辨好等优点,在高能物理实验中得到极其广泛的应用。

最早的漂移室为平面漂移室,它有几种类型:均匀电场型、多丝型、可调场型等。其中多丝型因结构简单

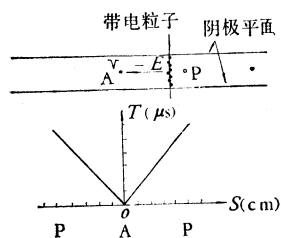


图1 多丝型平面漂移室工作原理图

应用最多。图1表明了多丝平面室的结构。我们以此为例说明一下漂移室的工作原理。在两个金属阴极平面之间,平行放置一个细阳极丝平面,阳极丝A直径约20—50微米。在阳极丝之间加入较粗的电位丝P,间距为几厘米。电位丝相对阳极丝有几千伏的负电压,在电位丝同阳极丝间形成电场。阳极丝到二相邻电位丝之间的空间,称为一个单元。室内充以工作气体,通常为氩气和有机气体的混合物。

当一个高速带电粒子通过单元时,沿其轨道在气体中产生电离。每厘米路程上释放出约30个电子-离子对。电离径迹的宽度约为10—20微米。在电场作用下,电离电子以一定速度向阳极丝漂移。当电子到达阳极丝附近几个丝半径距离时,在极高的电场中发生“雪崩”,得到约 10^4 — 10^5 倍的气体放大。电子向着阳极丝、正离子离开阳极丝移动,在阳极丝上感应出电信号,由电子学电路引出。如果选择具有不变饱和和漂移速度 V_{Ds} 的气体,从粒子通过室到阳极丝出现信号的时间间隔 T 和粒子轨道同阳极丝的距离 s 之间,就成简单的线性关系: $s = V_{Ds} \cdot T$ 。那么,通过测量漂移时间 T ,可以准确地确定粒子的位置。

在电子漂移过程中同时发生扩散,扩散量约为100微米/ \sqrt{x} (Cm), x 为漂移距离。扩散过程是决定漂移室定位精度的主要因素。此外,在气体放大不过高的情况下,输出信号幅度正比于带电粒子的能量损失,幅度谱测量可以提供粒子鉴别的信息。

近年来,由于可以比静止靶实验获得高得多的质心反应能量,对撞束实验已经成为提供高能物理前沿研究成果的主要来源。对撞束实验的发展对漂移室技术提出了新的要求,促进了一类新型漂移室——大型精密圆柱漂移室的发展。

对撞束实验中漂移室的特点

除去用于特定选题的专用谱仪外,大多数实验需要一个由各种探测器组成的通用谱仪,来测量高能反应的各种产物。在通用谱仪中,虽然漂移室也用在亮度监测、气体取样量能器、 μ 子探测器等方面,但它的主要用途是作为中心径迹探测器,测量带电粒子的径迹,动量以及能量损失。这种用途对于漂移室性能的要求最高。这里着重说明漂移室作为中心径迹探测器的特点。

1. 4π 立体角覆盖 在对撞束实验中粒子大致对称地飞向各方。整个实验室 4π 立体角都是重要的。

2. 高空间分辨 高能粒子在有限磁场体积内偏转很小,漂移室必须以高定位精度沿径迹多次取样测量,才能得到准确的动量。一些短寿命粒子的产生和级联衰变将提供多重顶点。重建这些次级顶点也需要大大改进空间分辨以及双径迹分辨。专门研究寿命问题,往往需要在对撞点附近放置一个具有极高空间分辨的漂移室作为顶点探测器。

3. 高双径迹分辨 高能对撞束反应将产生很窄的“喷注”,许多次级粒子集中在同一方向,需要把靠在一起的径迹分辨开来。

4. 高能量分辨 从大量外观相近的其它事例中,区别出感兴趣的稀有事例,必须把次级粒子仔细鉴别。漂移室应把不同种类带电粒子的能量损失的差别测出,这种差别往往是很小的。

其它特点还有高计数率能力,高本底排除率等。漂移室的要求同对撞束的类型有关。强子碎裂的普遍性使各种束流提出近似的要求。质子束实验中的计数率的考虑更为重要,次级粒子能量高在粒子鉴别方面也提出了更严的要求。

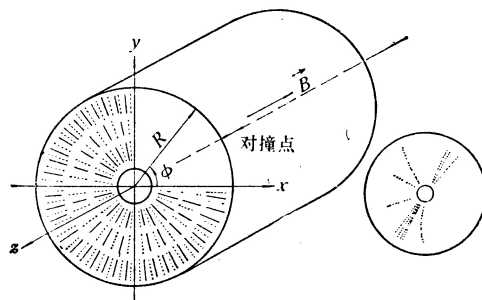


图2 轴向丝圆柱漂移室结构及一次事例示意图

漂移室的各种类型

作为中心径迹探测器，在现有国外对撞机上工作的漂移室类型有：

1. 平面漂移室 根据需要，可以把平面漂移室围绕对撞点组合成一定的形式。一般配合环形磁铁工作。平面室的优点是利用已有技术，容易制造，组装较灵活。但平面室组合使粒子通过的物质多，影响空间分辨和动量分辨。连接处有死角，室的性能不连续均匀。除专测 μ 子以及早期实验外，较少采用平面漂移室(但在 μ 子探测器、小角度探测器等方面应用很多)。

2. 轴向丝圆柱漂移室 这类漂移室专为对撞束实验而设计。它的结构示意图见图2。在一个长圆柱体内，围绕轴线按一定格式平行分布阳极丝、电位丝和阴极丝(条)。它们沿径向形成一层层的漂移单元。整个结构相对圆柱轴和中心前后方向都是对称的。圆柱室工作在螺线管磁铁内。丝平行磁场，漂移电场垂直磁场，电子漂移发生在粒子偏转平面内。室的典型尺寸为：长1.5—3.5米，外径1—3米，一般有几千根丝。磁场强度约为4—16千高斯。记录三维径迹的方法是：漂移时间测量给出方位角 ϕ ，轴向坐标 Z 通过两

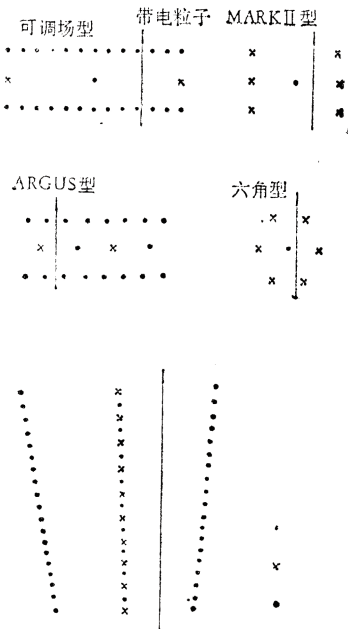


图3 轴向丝圆柱漂移室的两类单元结构示意图

(a) 小单元各种形式 (b) 大单元，
● 阳极丝； × 电位丝； ○ 阴极丝

维读出得到径向坐标 R 由丝的径向位置提供。这类室的优点是，粒子通过的物质少，定位精度高，性能连续且在大部分空间均匀，数据分析方便。因此成为最广泛采用的漂移室类型。按照单元的特点，它们又可以分为两类：(图3)

(1) 小单元室：每个单元只有一根阳极丝，宽度约1—4厘米。小单元室的特点是总丝数多，电子学路数多，而每路的设计简单，只处理一次事例接受一个粒子即单次击中情况。由于漂移路程短，即使单元内电场分布不均匀，仍能得到较好的空间分辨。

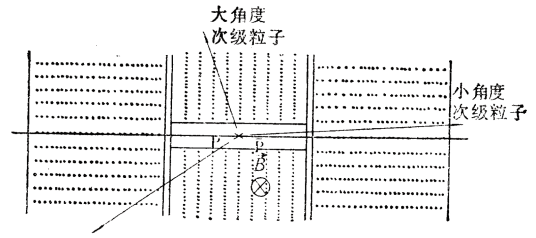


图4 UA1 漂移室结构示意图

宽度可达十几厘米。每个单元包括几根到十几根阳极丝。大单元室的特点是总丝数少，电子学路数少，而每路的设计复杂，一般要处理多次击中情况。它的电场分布在大部分漂移路程上是均匀的，使简单的线性 $S-T$ 关系非常精确，因此可以达到更好的空间分辨。单元设计得细心考虑，例如把阳极丝相对中心丝平面依次做小的左右位移(几百微米)，不仅可在单元内提供左右分辨，而且可有效地去除某些本底和干扰。我国北京探测器主漂移室采用了这种结构。

3. 一些特殊形式的圆柱漂移室 (1) 时间投影室(以后另文介绍)

(2) UA1 漂移室：工作在西欧中心质子反质子对撞机上。为适应540GeV质心能量反应产生很多小角度粒子和事例复杂的特点，采取一些特殊安排(图4)。圆柱体在束流方向做得很长(6米)，由六个半圆柱组成。最大特点是采用偶极磁铁。磁场方向垂直束流。丝平面同磁场平行，但安排中心和两端部分的丝平面相互垂直。这样做是为了达到小角度粒子同大角度粒子一样，以高精度和高密度(平均100点)记录径迹，克服了轴向丝圆柱室在小角度分辨变坏的缺点。该探测器由于最近发现 W^\pm 和 Z^0 事例而受到注意。应该指出，偶极磁铁的使用使对撞束受到偏转，必须在某处附加磁铁进行补偿，这带来了麻烦。此外，磁场同束流垂直还会产生同步辐射，增加本底。因此很少采用偶极磁铁。

如何得到好的室性能

1. 空间分辨。单丝空间分辨主要由电离密度的统计涨落，电子的扩散和电子学测量精度三个因素决定。漂移速度和磁偏转角的校正也会带来误差。几个因素中，电子扩散是最重要的。减小扩散效应的影响，可以通过选择小扩散系数的气体，提高气压和改进电子学测量方法达到。在1大气压下，对于2—3厘米的漂移，一般达到的空间分辨为150—200微米。

2. 二维读出沿丝方向的定位有电子学方法和斜丝方法。电子学方法又有电荷分配法和延迟线法，分别通过测量丝两端的电荷量和时间差别定出粒子通过的位置。这种方法给出时间相关的三维空间点。电荷分配法定位精度为0.3—1%丝全长，延迟线为它的1/3

—1/4, 但不易放置在室内. 斜丝法不用电子学, 利用部分层的丝相对轴向作一小角度倾斜, 通过立体关系的计算决定轴向位置. 这种方法的精度更高, 但大大增加了计算机分析的工作量. 一般大单元多采用电子学方法, 小单元多采用斜丝法.

3. 双径迹分辨 由室的几何条件和电子学能力决定. 小单元结构粗略地决定于单元大小, 一般为 1 厘米. 大单元结构决定于一条径迹产生电子的漂移时间差和输出脉冲宽度, 一般可达到几毫米.

4. 动量分辨 如果忽略多次散射, 测量的点子数够大, 动量分辨为: $\Delta P/P^2 \sim \sigma_x/BR^2\sqrt{N}$. 动量分辨的改进可以通过增大磁场强度 B , 室半径 R , 取样数 N 或减小空间分辨 σ_x 达到. 但对低能区来说(例如北京 e^+e^- 对撞机, $2 \times 2.8\text{GeV}$), 次级粒子的平均能量低, 多次散射成为决定动量分辨的主要因素. 应尽量减小小粒子通过的物质, 包括减小束流管、触发计数器以及室内壁的厚度, 并选用轻材料和轻的工作气体.

5. 能量分辨 在 1 大气压下, 1 厘米取样的能量分辨约为 50—100%, 因气体而异. 能量损失分布为兰道分布, 有一个很长的尾巴. 为改进能量分辨, 一方面, 可以通过选择电离损失大的气体, 增加气压提高单次取样的能量分辨. 另一方面, 可以通过多次取样, 按 $N^{-0.42}$ 关系 (N 为取样次数) 改进总的能量分辨. 一般 N 取十几到几十次.

展 望

各种漂移室, 都是根据具体物理目标和条件建成的. 它们各有特点, 在实验中都取得了有意义的物理结果. 笼统地讲孰优孰劣是困难的. 随着新对撞机的建造, 要求性能更好的漂移室. 从新对撞机的实验计划看, 现有的轴向丝圆柱室和时间投影室, 在至少 5—10 年内仍保持它们的生命力. 以 Z^0 衰变研究为例: 在其强子衰变方式中, 分开典型的最靠近的径迹需要 10 毫弧度的双径迹分辨, 对于 1 米距离相当 1 厘米. 这是目前已经达到的指标. 在 $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 衰变方式中, 如果要求以质量分辨 $\Delta M/M=1\%$ 来测量动量高达 $50\text{GeV}/c$ 的 μ 子, 一个长 6 米、直径 5 米、磁场 15 千高斯、取样 160 次、单丝分辨 150 微米的轴向丝圆柱室可以达到这个目的. 但同时要看到, 高磁场、高精度、极大尺寸的要求正把现有漂移室技术推到它的极限. 同加速器情况类似, 进一步提高能量时, 漂移室技术也需要探索新的道路. 这方面时间扩展室 (TEC) 向前迈出探索性的一步. 它直接测量单个初级电离的位置, 通过初级电离空间分布重心的确定, 将可能把室的空间分辨提高到约 30 微米. 另一点值得注意的是多电极硅圆柱体探测器甚至可能具有更好的分辨作为顶点探测器, 它是漂移室一个有力的竞争对手. 上述两项技术的应用, 都已列入新对撞机实验计划中.