

一、高能物理实验和高能探测器

毛主席教导我们说：“你要有知识，你就得参加变革现实的实践。你要知道梨子的滋味，你就得变革梨子，亲口吃一吃。你要知道原子的组织同性质，你就得实行物理学和化学的实验，变革原子的情况。你要知道革命的理论和方法，你就得参加革命。”高能物理实验就是变革“基本”粒子的实践。通过这种实践，才能知道“基本”粒子的组织同性质。

怎样做高能物理实验呢？要用高能加速器产生各种高能量的粒子，去轰击另一些粒子，变革它们的情况。变革粒子时粒子发生的变化，用高能探测器记录测量下来。实验得到这些感性认识材料，就是高能物理实验的数据。在对大量实验数据加以整理和加工以后，上升到理性认识。这样，我们就能逐步地了解“基本”粒子结构、运动、变化的规律性。

高能探测器是记录和测量高能粒子的工具。因为微观粒子不能由人的感官直接感觉到，要用专门的高能探测器，所以高能探测器是人的器官的延长，用以感觉高能粒子和高能现象。用它们分辨粒子的种类和特性，用它们记录高能粒子的数目，用它们测量粒子的飞出角度、路径、能量、动量、速度等。

高能探测器是什么样的东西呢？它们都是些装着探测介质的仪器，在特定的条件下面工作。例如：泡室是装着液氢（或者其他一些液体）的仪器，使液氢压力发生变化，液氢处于过热状态，带电粒子通过就能沿着径迹产生气泡，而被照象记录下来。又如多丝正比室是装着气体的、有许多根金属丝做电极的仪器，在电极间加了高电压，带电粒子通过就能沿着径迹放电而被记录下来，等等。

高能探测器为什么能够记录高能粒子呢？各种具体的探测器的工作原理是各不相同的。一般说来，当高能粒子穿过探测器的时候，会使探测介质中的原子发生激发（就是使原子处于较高的能量状态）、电离（就是把原子中的电子打出来）等等物理过程。高能探测器是通过这些物理过程来记录和测量高能粒子的。

同记录低能粒子的低能探测器相比较，高能探测

器的体积大、结构复杂。这是因为高能粒子碰撞或衰变时产生的现象比较复杂，高能粒子在探测介质中所走的路程也很长。目前许多高能探测器的尺寸是以公尺计量的，在结构上有不少特殊的要求。有些高能探测器的建造工作，已经是一个相当规模的工程了。

在一个高能物理实验中，往往不止用一个高能探测器，而是用许多个高能探测器同时进行测量。除高能探测器外，在实验中还使用各种选择、聚焦和分离出干净粒子束的设备、特殊的靶子（注1）、吸收体和屏蔽体、各种分析磁铁、磁谱仪、各种脉冲电路、电子学仪器、自动控制设备以及数据处理设备如快速的电子计算机等。所以高能物理实验的规模是相当大的。

对于不同的高能物理实验，要专门设计、制造、设置不同的高能探测器去进行实验。当然，有些组件（例如标准电路、多丝正比室的单元等）和一些设备（如大的泡室，大型快速电子计算机等）是可以通用的。但大多数的实验则需要专用的探测器的。即使在利用通用的探测器时，它们的安排也要根据不同的物理实验来设计，并不是一成不变的。

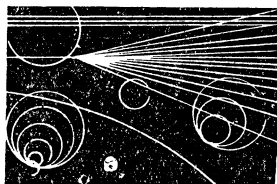
高能物理实验对高能探测器有那些要求呢？

有一些高能探测器是记录高能粒子的径迹的，也就是要把高能粒子在探测器中所通过的路径细致地记录下来。记录粒子的径迹要求细。径迹是一种立体的图象，要求记录的图象畸变很小。如果有两根靠得很近的径迹，记录径迹细就可以把它们分辨开来。这叫做仪器的空间分辨率好，或者说仪器对粒子定位的精确度高。

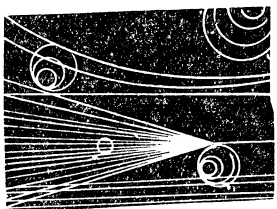
有一些高能探测器是记录高能粒子发生事例的时间的，要求记录时间快，要把两个在时间很靠近的事例分辨开来，这叫做仪器的时间分辨率好。或者说仪器对粒子定时的精确度高。另外，还要求探测器在记录一次事例

后，紧接着就能记录第二次事例。这叫做仪器的恢复时间短，有利于进行快速的计数。探测器每秒钟可以记录的最大计数数目，称为仪器的最高计数率。

还有一些高能探测器专门用来测量高能粒子的能量、动量或速度，也要求测量的精确度高。例如：如果有几组不同能量的粒子，测量能量的精确度高就可以



什么是高能探测器 ——记录 and 分辨粒子的工具



唐孝威

把它们分辨开来。这叫做仪器的能量分辨率好。

高能探测器可以同时记录到几种不同的高能粒子(例如电子和各种介子),要求能够把几种粒子确定地分辨开来,这叫做仪器对不同粒子的辨认本领好。

以上讲到了高能加速器上的物理实验。高能宇宙线的物理实验也是类似的,只不过实验中是利用了宇宙线的高能粒子,所以实验所用高能探测器的结构和安排,和加速器实验有些不同罢了。另外,高能宇宙线的强度很低,所以实验中对高能探测器的时间特性要求不高。

二、目前高能物理实验常用的高能探测器

高能物理实验中所用的高能探测器是多种多样的。例如:探测器中所用的探测介质是多种多样的,有固体、液体、气体;探测器的工作条件是多种多样的,有的改变压力,有的加直流高电压,有的加脉冲高电压等等;探测器的工作原理是多种多样的,有的是液体沸腾,有的是气体放电等等;探测器的样式、结构和尺寸又是多种多样的。

如果按高能探测器记录和测量高能粒子的方式来分类,高能探测器大致可以分成径迹探测器和计数器两大类。

径迹探测器是可以记录高能粒子的径迹(包括碰撞或衰变的图象)的探测器。记录方式大多是先把径迹拍下照片来,再对照片进行自动分析和处理。泡室和乳胶等都属于径迹探测器。

计数器是记录高能粒子产生的电脉冲(就是脉冲式电信号)的探测器。因此,它必须和各种脉冲电路及电子学仪器配套。在实验过程中,计数器往往同电子计算机连成一线,联合运行,并即时对实验数据进行分析处理,这种技术叫做电子计算机的在线应用。闪烁计数器和契伦柯夫计数器等都属于计数器一类。

下面重点介绍几种常用的高能探测器。

(一) 泡室。泡室是装着液氢(或者其他一些液体、如液氖、液氦、丙烷等)的仪器。进行实验时,使它突然膨胀,压力减低,液氢就处于过热状态。(图1)

高能带电粒子穿过液氢,使得沿路上的原子发生

电离。过热的液氢以离子为中心发生沸腾而形成气泡。所以,在粒子穿过的路径上就会产生一连串气泡。用照相设备把由气泡组成的粒子径迹拍下照片,再用自动测量设备自动进行扫描和测量。泡室常常放在强磁场中工作,测量带电粒子在磁场中径迹的曲率,可定出粒子的动量,由弯曲的方向定出正负电荷。

目前泡室的空间分辨率可以达到百分之一毫米,时间分辨率约为千分之一秒。一般讲,每秒钟可以膨胀一次到十次。

(二) 乳胶。乳胶是特制的厚层细颗粒照相底板。

高能带电粒子穿过乳胶,使得它穿过路径上的原子发生电离。电离在照相底板中形成潜象中心。经过显影以后,粒子穿过的路径上就显出一根径迹。可在显微镜下进行测量。(图2)

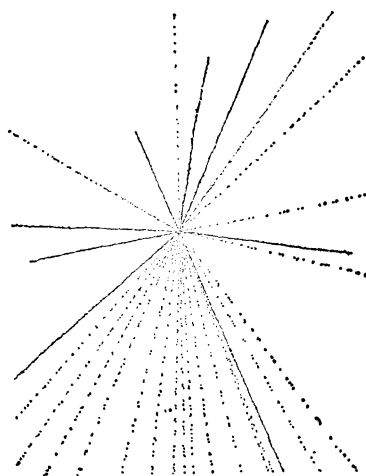


图2 乳胶中核作用示意图

目前乳胶的空间分辨率约为一微米(千分之一毫米)。从时间上说,乳胶是可以累积记录不同时间来的带电粒子的。

最近在宇宙线高能实验中,还使用高灵敏度的X光底片,记录能量较高的 γ 射线产生的簇射。

(三) 火花室。火花室是装着气体的(例如氖气),有许多金属平板或许多金属丝做电极的仪器。前一种火花室叫多板火花室,后一种火花室叫丝火花室。(图3)

高能粒子穿过火花室气体,使路程上的气体原子产生电离。当高能粒子穿过火花室后,立即在电极间加上高电压脉冲。在这个高电场的作用下,气体中有电离的地点就产生火花放电,用拍照或者其他方法记录火花放电的位置,就可以测出粒子的径迹。

目前火花室的空间分辨率约为0.3毫米至2毫米,时间分辨率约为1微秒,最高计数率约为每秒钟10次到300次。

(四) 流光室。火花室的进一步发展形式是流光室。流光室内充氖气或氦气。通常用两块平板做电极,

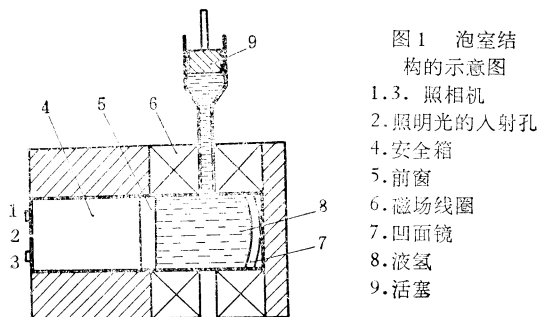


图1 泡室结构的示意图

- 1.3. 照相机
2. 照明光的人射孔
4. 安全箱
5. 前窗
6. 磁场线圈
7. 凹面镜
8. 液氢
9. 活塞

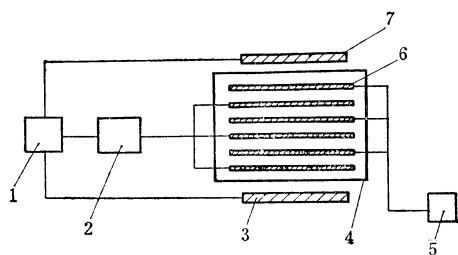


图3 多板火花室的示意图

1. 符合电路 2. 高压脉冲产生器 3. 控制用的闪烁计数器 4. 多板火花室容器 5. 直流清扫电场电源 6. 金属板电极

其中至少有一块是透明的,以便沿电场方向上拍照。流光室也像火花室那样,是脉冲供电工作的。它的特点是所加的高电压脉冲在时间上非常窄。(例如10毫微秒,1毫微秒是十亿分之一秒)。带电粒子穿过气体发生电离的地方,放电只发展到火花放电前期的流光放电阶段,高压脉冲就已结束了。这种放电形成很小的流光光点,所以记录的径迹可以较细致,而且方向均匀性较好。

目前流光室的空间分辨率约为0.5毫米,时间分辨率约为1微秒,摄取照片速率可达每秒5次以上。

(五) 多丝正比室。多丝正比室装的是气体(例如氙和酒精蒸汽的混合物,或其它气体),用两块平行的金属网做负电极,在网的中心平面上,平行于网排列许多根平行的金属细丝作为正电极,在电极间加上直流的高电压。(图4)

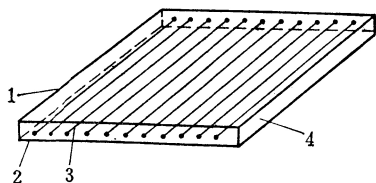


图4 多丝正比室的示意图(一个多丝正比室的单元)

1. 金属网(负电极) 2. 金属网(负电极) 3. 金属丝(正电极) 4. 多丝正比室本体

高能带电粒子穿过多丝正比室中的气体时,使路径上的气体原子发生电离,电离产生的电子在附近的某一根金属丝的电场中形成气体放电。因为这种气体放电产生的总的电荷量正比于初始电离中电子的数目,所以称为正比放电。测量那一根丝上有正比放电形成的负脉冲,可以确定粒子穿过的位置。用许多个这样的单元可以定出粒子的径迹。

目前多丝正比室的空间分辨率约为1至2毫米,时间分辨率约为30毫微秒,最高计数率达到每秒一百万次计数。

(六) 漂移室。漂移室是多丝正比室的发展。它

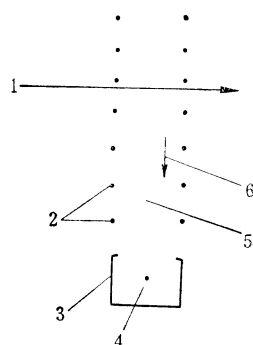
装着气体,内部有加着恒定电场的空间,作为供电子漂移的区域,并且有金属细丝作为接收信号丝。(图5)

高能带电粒子穿过漂移室中的气体,使得它路径上的气体原子发生电离。电离产生的电子在恒定电场作用下漂移到达接收信号丝,在信号丝的电场中形成气体放电而被记录下来。测量电离电子产生后漂移到达信号丝的漂移时间,可以比多丝正比室更精确地定出高能带电粒子穿过的位置。因为漂移室中接收信号丝的数目比多丝正比室少得多,所以附带的电路也比多丝正比室节省得多。

目前漂移室的空间分辨率好于0.1毫米,时间分辨率约为2毫微秒,最高计数率大约是每秒钟一万次计数。

图5 漂移室的示意图

1. 入射高能粒子 2. 形成均匀电场的丝电极 3. 接地的电极 4. 接收信号丝 5. 电子漂移区域 6. 电场方向及电子漂移方向



(七) 闪烁计数器。闪烁计数器是在暗盒中装有发光物体(闪烁体)和光电倍增管(注2)的仪器。(图6)

高能粒子穿过闪烁体,使得闪烁体中的原子发生激发,激发复原时会发出光来。用光电倍增管接收这些光,产生电脉冲输出,由脉冲电路记录。

目前,常用的闪烁计数器的空间分辨率决定于闪烁体的大小,例如几个毫米。时间分辨率约为1毫微秒,最高计数率约每秒一百万次到一千万次计数。

(八) 契伦柯夫计数器。契伦柯夫计数器是在暗盒中装有透明介质(辐射体)和光电倍增管的仪器。辐

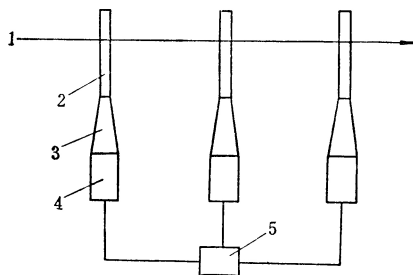


图6 一组闪烁计数器的示意图(每一台是一个闪烁计数器)

1. 入射高能粒子 2. 闪烁体 3. 光导(将闪烁体的光传导到光电倍增管) 4. 光电倍增管 5. 脉冲电路

射体有时用气体,也有用液体或固体的。

匀速运动高能带电粒子在介质中速度超过光在介质中的传播速度,就会发生辐射,这种辐射一般称为契仑柯夫辐射,其中包含可见光。一定速度的粒子产生的辐射具有一定的辐射角。由光电倍增管记录光而产生电脉冲。这种计数器也可称为介质中超光速粒子辐射计数器。(图7)

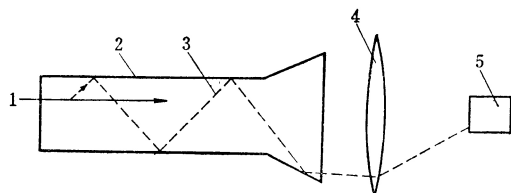


图7 一个固体的介质中超光速粒子辐射计数器的示意图

1. 入射高能粒子 2. 辐射体 (例如有机玻璃的辐射体) 3. 粒子产生的辐射 4. 透镜 5. 光电倍增管

利用这种辐射效应,可以做成只记录速度超过某一最低值(称为阈速度)的高能粒子的仪器,叫做阈式计数器。还可以做成选择记录速度超过阈速度而又在某一速度范围中的高能粒子的仪器,这叫做微分式计数器。还可以用铅玻璃等介质做成将高能光子或电子全部能量记录下来的仪器,这叫做全吸收探测器。

目前这种计数器的空间分辨率决定于辐射体的大小,时间分辨率约为1毫微秒,最高计数率约每秒钟一百万次到一千万次计数。

三、高能探测器是不断发展的

人们利用高能加速器和高能探测器研究“基本”粒子的历史是很短的。但是就在这很短的历史中,高能探测器也经历了巨大的变化。

高能物理实验的发展,对高能探测器不断提出新的要求。一些不满足实验要求的旧的探测器逐步被淘汰,一些新的探测器和实验技术出现了。高能探测器的发展对高能物理实验起了很大的作用。如果没有探测器的新发展,许多新粒子和新现象的发现是不可能的。

这些年来,发明了一些新的高能探测器,例如飘移室。发展了一些新的实验技术,例如电子计算机的在线应用。建造了一些体积很大的高能探测器,例如大型的带有超导磁场的氢泡室。高能探测器的这种发展过程一直在继续进行之中。

前面说过,有一些径迹探测器空间分辨率较好,但时间分辨率很差。而有一些计数器则时间分辨率较好,但空间分辨率很差。这些年来,人们开始注意把探测器的定位技术和定时技术结合起来,也就是要求同一个探测器又要空间分辨率好,又要时间分辨率好。

有一种做法是使径迹探测器受控工作,也就是使

探测器平时对入射粒子不灵敏,控制它只在指定的短时间内才对入射粒子灵敏。这样可以大大提高仪器选择记录粒子的本领,而且还能使探测器的恢复时间缩短。受控制的、加脉冲高压工作的火花室和流光室,都是朝这方面发展的例子。但是到目前为止,泡室和乳胶还没有做到能够受控工作,有待进一步研究。

还有一种做法是使计数器朝着精确定位方面发展。这就是说,要求计数器不但能够计数快,而且能够精确地定出粒子穿过的位置,从而确定粒子的径迹。计数器输出的电脉冲可以直接连接到快速电子计算机去处理,这样比拍下径迹照片,再分析照片要快得多。利用许多单元组成的多丝正比室和飘移室就是朝这方面发展的例子,但是到目前为止,闪烁计数器和契仑柯夫计数器的定位精确度还很差。这也有待进一步研究。

高能探测器虽然有了很大的发展,但是现在高能粒子的探测方面还存在着许多矛盾,需要我们去研究和解决。

例如:高能粒子的种类很多,但这些粒子在高能量时速度都接近真空中的光速,它们产生电离的特性也很接近,要辨认它们是那一种粒子就比较困难。在更高的能量区域(称为超高能区)中,高能粒子碰撞产生粒子的数目更多,辨认粒子的困难更大,这是一个矛盾。又如:记录高能粒子的探测器体积要很大。在更高的能量区域中,高能粒子碰撞产生粒子数目更多,能量更大,探测器的体积也就要更大,这也是一个矛盾。

总之,高能探测器新原理(注3)和新技术的研究,还有许多工作要我们去做。

在高能探测器的研究方面,我国高能物理实验工作者正在开展各种工作。我们在毛主席革命路线指引下,在党的领导下,奋发图强,自力更生,一定要在高能物理领域中,努力做到“有所发现,有所发明,有所创造,有所前进”,为人类作出较大的贡献。

注1:靶子就是受高能粒子轰击的物体,有时探测器本身也可以当靶子,例如氢泡室中的液氢。

注2:光电倍增管是一种真空器件。它的作用是使微弱的光在光阴极上打出光电子,电子再倍增而形成电脉冲输出。因为在管中许多个次级发射级发出的电子数目逐级增多,所以称为光电倍增管。

注3:举例说,最近在试验中的穿越辐射探测器就是高能探测器新原理的一种探索。当高能粒子很快地穿过两种介质的分界面时,粒子在介质中的电磁场来不及调整,一部分能量会以可见光的光子及X射线光子的形式辐射出来,这就是穿越辐射。这种辐射中X射线光子的能量正比于入射高能粒子总能量和它静止质量的比值,所以可以用它测量质量已知的高能粒子的总能量,也可以用它分辨动量相同而质量不同的高能粒子。