

平板定域火花计数器

——一种有希望的飞行时间测量仪器

董宝中 郑志鹏

一、“老兵新传”

提起平板火花计数器(或平板火花室),也许大家并不陌生。它早在1948年就出现了,以后在高能实验物理中获得了较广泛的应用。其基本原理是在两块平行的金属板电极上加上脉冲高压,电极间充以适当气体(通常是惰性气体和其它气体的混合物)。当带电粒子通过时,在电极间隙产生火花放电,火花放电又在电极上感应一脉冲信号,这样就得到位置或时间的信息。

随着被探测粒子能量速度的提高,对于探测器时间分辨率要求越来越高(例如达几十微微秒),这样,闪烁计数器就望尘莫及了。人们只好寻找新的探测器,在寻找过程中发现,改进后的平板火花计数器是十分有希望的飞行时间计数器。主要从两个方面改进,一是使时间分辨率大大提高(目前可达50微微秒);二是提高允许计数率(10^6 个/秒)。后者是通过采用特殊的结构,将放电局限在一个很小的范围内,以不影响发生在邻近的下一次放电。这种改进型的计数器通常称为平板定域火花计数器,所谓定域就是指限制放电范围的意思。

由于结构上的不断革新,各项指标不断提高,使得平板火花计数器这个高能沙场上的“老兵”获得了新的生命,现在正在为粒子探测谱写新的历史。

二、五十微微秒有多快?

平板定域火花计数器的时间分辨率为50微微秒,也就是说用它作时间测量可以准到50微微秒即200亿分之一秒,这是很快的一瞬间,以每秒三十万公里行进的光子在这短短的瞬间里只能走一个半厘米的距离;这段时间比人眨一下眼睛还快十亿倍。的确是够快的!那么这种快速测量有何用处呢?它可以测量短寿命的粒子;还可以测量接近光速运动的粒子飞越一定距离所需的时间(即所谓飞行时间法),从而求出其运动速度。在高能物理实验中,常常利用飞行时间法测粒子飞行时间(或速度),再加上用其它方法测粒子的动量,这样就可求出粒子的质量,从而达到粒子鉴别的目的。而粒子鉴别在高能实验中是十分重要的。

我们先举一个经典的例子。我们设法区分两个大小、颜色完全相同仅质量不同的运动着的小球。首先测量出它们经过某固定距离 L 所需的时间分别为 t_1 , t_2 , 那么其相应的速度 $v_1 = \frac{L}{t_1}$, $v_2 = \frac{L}{t_2}$ 可以计算出

来。如果我们再利用其它方法测出它们的动量分别为 p_1 , p_2 , 这样我们就可以知道小球的质量分别为

$$m_1 = \frac{p_1}{v_1}, \quad m_2 = \frac{p_2}{v_2},$$

也就是说我们鉴别出了这两个质量不同的小球。对高速运动的微观粒子,方法相似,但需要用相对论公式:

$$m = \frac{p}{v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$

在这里 m 是粒子静止质量, p 是动量, v 是速度, c 是光速。

一旦 v 、 p 测出, m 也就确定了。 m 的精度是由 v 和 p 的测量精度决定的。

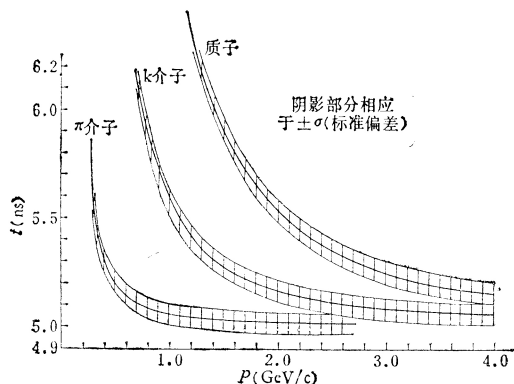


图1 飞行时间-动量关系曲线

图1绘出了 π 介子、 k 介子和质子在飞行距离 $L=1.5$ 米时,飞行时间 t 与动量 p 的关系曲线。阴影部分表示测量时间的两个标准偏差 σ_t 的范围。图中取 $\sigma_t=50$ 微微秒,可以看出在这个时间分辨率下,可以分辨直到 $2.5 \text{ GeV}/c$ 的 π 、 k 粒子;可以分辨动量直到 $4 \text{ GeV}/c$ 的 π 、 k 和质子。如果 $\sigma_t=200$ 微微秒,则对于 π 、 k 只能分辨动量到 $1.2 \text{ GeV}/c$,对于 π 、 k 和质子分辨的动量仅到 $2.0 \text{ GeV}/c$ 。

50微微秒的时间分辨率把被测粒子的动量范围大大向前推进了一步。那么这么好的时间分辨是如何得到的呢?采用了什么样的结构?

三、结构的奥秘所在

近十多年来,苏联、美国和德国等国的实验物理学家对平板火花计数器的结构不断进行革新,采取了一系列措施以提高时间分辨。例如:缩小电极间的间

隙,提高电场强度,使用适当的混合、高气压(6—10个大气压)气体……。另一方面利用高电阻的物质作阳极板,这样既可以使产生的火花范围缩小,又可以使一个火花与另一个火花隔离开来,因此可以同时记录若干个带电粒子,于是提高了允许计数率。平板定域火花室之“定域”就是指的这个意思。

图2是由苏联西伯利亚分院核物理所的一个研究小组制作的一种典型的平板定域火花计数器。

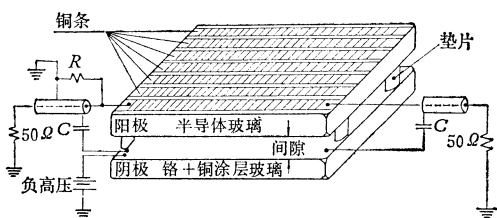


图2 平板火花计数器的结构

这计数器是由两个相互间隔只有0.1毫米的平面电极板组成。阳极平面用电阻率为 10^9 欧姆·厘米的半导体玻璃制成,厚度为几个毫米。表面要求加工平整和抛光,所有的稜、角都要倒圆和抛光,以保证加高压时不致发生放电。在半导体玻璃向外的一面蒸镀上宽一厘米,相互间隔为一毫米的铜条,这样就可以收集到不同区域产生火花的感应讯号。

阴极用一般的光学玻璃,厚0.1厘米。和阳极一样,要求有很高的表面光洁度。在阴极的内表面蒸镀上一层铜作导电电极。阴极加四千至七千伏的负高压,阳极接地。安装时要求阳极和阴极间有很好的平行度。

两电极间充以氩气和10%—30%的有机气体(如丁二烯、乙烯、异丁烷、丙烷等)的混合气体。气体压力一般为6—10个大气压。气体要进行快速的循环,以防止由于火花引起的化学反应产物沉积到电极表面,影响导电。

四、高指标是怎样得到的?

当带电粒子穿过计数器时,在间隙中将产生 N_0 个初级离子对。 N_0 正比于气体的压力和间隙的大小,与气体的电离性质有关。通常 N_0 在4—8个左右。

初级电离形成的电子在电场下加速,不断获得能量,在与其它气体分子或原子碰撞时又可产生新的离子对,而其中的电子又加速、碰撞再产生离子对……。在时间 t 的时刻,形成离子对数 N 与 N_0 有如下关系:

$$N(t) = N_0 e^{\alpha v_- t} \dots \dots (2)$$

其中 α 表示电子通过单位长度产生的离子对数; v_- 表示电子的迁移速度。显然 α 、 v_- 值越大, N 上升得越快,时间分辨就越好。要提高 α ,就要使电子获得更高的能量,因此需要增加电场 E ;提高 v_- ,也需增加电场 E ,以更快地加速电子,使其获得较大的迁移速

度。增加电场强度意味着增加极间电压,减小极间间隙,这就是为什么要在极间加4—7千伏的高压,将间隙缩小至0.1毫米的原因。增加电场强度相应地需增加气体的压力,才能保证在无粒子入射时,极间可以加上高电压而不至于放电。增加气体压力的另一个好处是可以得到更多的初级离子对数 N_0 ,使离子收集的统计涨落减小,从而改善了时间分辨。

我们再看一下放电区域是如何被限制的。当电子发展到 10^8 左右个的时候就会形成流光,流光很快地传播到两个电极表面,在间隙形成一个电离柱。接着,由流光发展成的火花“耗尽”了电极上的表面电荷,这使得在火花区域内的电场几乎降到零。但是由于电极之一是用高电阻的材料做成的,使得这种电场的破坏只是局限在一个小范围内。同时电极间隙中的有机气体对火花放电产生的紫外光子有吸收作用,使它不至传播太远,就不会在其它区域引起新的放电。于是半导体玻璃和有机气体保证了火花放电只限制在一个小区域内,而电极的其它区域仍然是灵敏的。

放电区的阳极表面电荷被放电中和后,电流就停止了。逐渐地,表面电荷在阳极上又重新建立。这个恢复时间应比正离子通过间隙所需时间要长一些,否则会引起第二次火花放电。但此时间又不能太长,否则会影响计数率。恢复时间的长短与半导体玻璃的电阻率有关。为了得到适当的恢复时间(一般为几个到十几个毫秒),大都采用电阻率为 10^9 — 10^{10} 欧姆·厘米的高阻材料作电极。不灵敏放电区为0.5厘米²左右。

火花放电在阳极上会感应一信号,如图2,每个铜条的两端分别接到同轴电缆蕊上,电缆的外壳经过一高压隔直电容与阴极相联。信号可通过电缆引出。火花沿阳极上铜条方向位置是由铜条两端引出信号的时间差来测定。垂直铜条的位置则由输出信号指明放电在哪一个铜条而确定。定位误差由铜条的宽度决定。这样平板定域火花计数器可以同时进行两维读出。

五、道路坎坷,前途光明

目前,苏联、美国、西德的几个实验小组近些年来在平板定域火花计数器制作方面作了很多工作。最好的时间分辨率已达到30微微秒,是十分令人鼓舞的。但从计数器的尺寸看,还太小,离高能物理实验的要求:还有一段距离。

大面积的主要困难在技术方面:间距小,而要求大面积均匀,平整,高平行度。此处需要加流动高气压,给使用带来了极大的不方便。再者,放电沉积物会使电极“中毒”,影响使用寿命……这些困难都急待克服,前进的道路是坎坷的。但正因为它有许多引入的优点,使得实验物理学家们想方设法去改进它,完善它。相信有一天平板定域火花计数器将以一种理想的飞行时间探测器在高能物理实验中使用。它的前途是十分光明的。