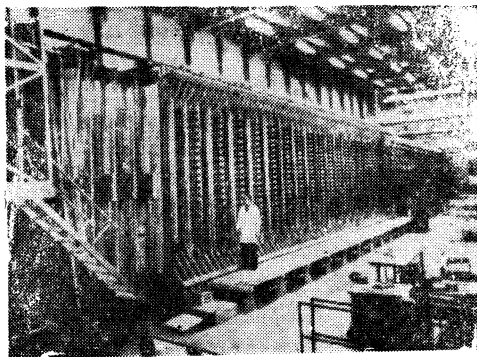


谈谈高能物理实验中的量能器

—— 陆昌国 ——



高能物理实验中的量能器与热学中的量热器在英文中是同一个词 Calorimeter, 它们都是用来测量能量的,只不过前者用来测量微观粒子的能量,而后者用来测量宏观物体的内能。

一、从一个例子谈起

假如我们面前有一粒温度很高的铁珠,为了测量这个铁珠所具有的热能,我们可以有两种方法.一种方法是用温度计测得它的温度,然后根据铁珠的大小计算出它的热容量,由此可算出它储有的热量.另一种方法则是将它浸入装有一定量已知温度水的绝热容器中,使它与水交换热量,最后达到热平衡,测得这时的水温,我们也就求得所需的量了.这两种方法的不同点是,前者不破坏铁珠的现有热状态,而后者将使铁珠的热状态完全改变了。

在高能物理实验中,探测带电粒子能量的方法同样基于上述的两种基本设想.非破坏性的探测方法,例如我们可以建立一个强磁场,待测带电粒子在磁场中运动的曲率半径是粒子动量的函数,我们可以用对带电粒子基本“透明”的探测器来测得其径迹(“透明”的意思是说粒子在穿过这些探测器时,基本上没有受到什么影响,只损失了极少的能量),再用其它手段辨认出这是什么粒子后,就可以完全清楚该粒子的能、动量了.正由于这种方法是非破坏性的,所以对待测粒子可以作多次测量.这种方法固然很理想,但是它的能力不是无限的.首先,它对光子、中微子这样一类中性粒子一筹莫展,因为它们毫不理会磁场的存在,在磁场中仍旧直来直往,同时它们在一般的电离型探测器中悄然而过,不留下任何信息,所以人们无法得知它们的踪迹.其次,即使对于带电粒子,磁场也不能随意地驾驭它们,如果这些粒子的动量很高,它们的径迹几乎成一直线,很难测准其曲率半径.为了减小径迹的曲率半径,我们必须增强磁场,于是要用更大的磁铁,更强的电流,甚至不得不采用超导磁铁.对于给定的相对动量分辨率 $\Delta p/p$ 来说,磁谱仪的尺寸将随 \sqrt{p} 而增加,由当前高能加速器的趋向来看,显然利用这种方法的困难是越来越大了.除此以外,我们应该看到,高能

物理界正在进入一个新一代高能对撞机的时代,在这些能量极高的对撞机上将揭示出超重粒子的新物理,物理学家们面临的是极为稀少又极为复杂的事例,在这样的事例中,传统的对少量带电粒子的动量分析将被对多重喷注中的动量和能量流的测量所取代.所有这一切都使量能器——一种破坏性的粒子探测方法越来越受到人们的重视。

二、量能基础——簇射

从原理上说,量能器是大块的物质,它用来拦截入射的高能粒子,由于它的体积和质量足够大,使得入射粒子在其中反复碰撞、作用,将自己的全部能量都损失在其中,最终大部份能量都转化为热能,就会像量热器中的水终于将高温的铁珠冷却下来,而使自己的温度升高了.但是需在量能器中测得入射粒子造成的温升是不可能的,入射粒子能量再高,也毕竟是微观的尺度,所以我们就不得不寻找其它实际可测量的与入射粒子能量有关的信号。

要找到合适的可测量信号,我们首先必须搞清高能粒子是如何在量能器物质中损耗其能量的.在量热器中,铁珠是通过热交换将其能量传递给周围的水,在粒子量能器中,不同种类的入射粒子则是通过电磁簇射或强子簇射这样复杂的物理过程,把自己的能量分摊给一大簇次级粒子的.以电磁簇射为例,当高能电子射入物质而受阻时,它就会产生韧致辐射而发出 γ 光子, γ 光子与物质相互作用,又会变为正负电子对,新产生的正负电子带有足够的能量,又会发射 γ 光子,……如此进行下去, γ 光子和正负电子的数目就会不断增殖,一直发展到极大值,此后由于次级粒子的能量低,被物质吸收的过程超过了增殖的过程,所以次级粒子的数目和能量将随物质的深度而呈指数衰减,直至衰减到“临界能量”以下,电子辐射 γ 光子的能力变得很弱,它们将通过在物质中的电离能损而逐步消耗掉自身的活力,最终,电磁簇射也就完全停止了.当然,所有这一切都是在极短的瞬间内完成的。

三、量能器的基本类型

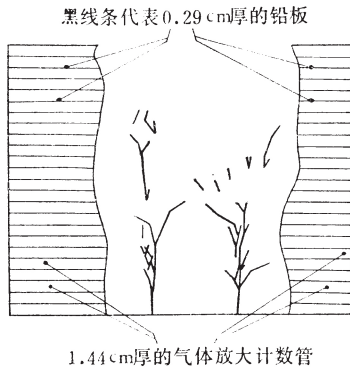
由上述可知,在一个电磁簇射中包含的是一簇正

负电子,光子最后也会变为正负电子,对于带电粒子,我们可以有各种方法来探测到它们.比如说可以用塑料闪烁体,但是它们很轻,在拦截入射电子或光子方面,它们的能力很低下,要用很厚很厚的闪烁体才能挡住高能光子或电子,这当然是不切合实际的.实际上人们常采用铅玻璃、NaI 晶体或锗酸铋晶体(BGO)等材料,它们的密度高,电磁簇射在这些材料中发展得很紧凑,相对来说,只需要较薄的材料,就可以把入射粒子的能量全部吸收掉,而且,簇射的次级带电粒子会在铅玻璃中产生契伦柯夫光,在闪烁体中产生闪烁光,被光敏器件探测到.所以这一类材料可以身兼两职,既当能量吸收体,又当信号发生体,是理想的量能器材料,特别是锗酸铋晶体,作为一种新型的闪烁材料,在许多方面优于传统的 NaI 晶体,研究和应用它的势头正方兴未艾.

主要利用 732 块 NaI 晶体组成的晶体球探测器就是这类量能器的典型,它围绕着 SLAC 实验室的 SPEAR 正负电子对撞机的一个对撞点,包住 34π 立体角的 98%,由于 NaI 晶体优越的能量分辨率以及晶体球的细致的分块结构,使它特别适合于研究黎偶素家族的辐射跃迁.

这类量能器尽管性能优越,但价格昂贵,所以如果将之应用于新一代高能对撞机的大立体角谱仪,其耗资之巨大,常常使人望而兴叹,爱却释手.

我们知道铅吸收光子、电子的能力很强,同时价格又便宜,所以是理想的吸收材料.但是电磁簇射在铅中的发展,并不能给出任何实际可测量的信号,于是人们想出了取样量能器的方法,它将粒子能量的吸收层与产生可测信号的灵敏层分开,例如将多层铅板、塑料闪烁体(或气体计数管)相间地迭合在一起,利用铅板来拦截光子和电子,当簇射的次级正负电子穿越计数器时,则可被后者探测到,见图在铅-气体计数管组成的取样量能器中,用蒙特卡罗模拟计算得到的电磁簇射图象,图中径迹代表次级带电粒子.入射的二个 γ 光子能量为 1GeV.我们自然要问这样一个问题:入射粒子的大部分能量都损耗在吸收体中,并没有给出任何可测量的信号,只有一小部分能量损耗在像闪烁体那样的灵敏层中,这时,测量得到的信号与入射粒子的能量是否还有关系呢?回答是肯定的.根据一般的电磁簇射理论,在一个簇射中总的径迹长



度(定义为所有次级带电粒子的径迹长度之和)与入射能量成正比,在取样量能器中,相当于每隔一定的长度对次级粒子径迹作一次拦截,用专门术语来说,即测得了一个穿越粒子,显见,总的穿越粒子数将正比于入射粒子的能量.由于这些次级正负电子的能量仍旧足够高,它们在灵敏层的物质中所造成的电离能损随它们的能量变化极缓慢,基本上都在最小电离能损附近,所以在灵敏层中测得的总的信号的大小近似地就与穿越粒子数成正比了.

各种类型的带电粒子探测器几乎都可以用来制作灵敏层,我们可以根据实验对量能器性能的要求,经费情况,几何形状,技术的难易等等选择.目前采用的有液氙电离室,闪烁计数器,气体放大计数管,塑料闪光室,漂移室及平板雪崩室等等.

四、量能器性能的主要指标

衡量一个量能器性能的好坏,主要有两个指标:能量分辨率和空间分辨率.因为簇射的发生与发展本身是一个统计过程,所以探测到的信号必然包含了这种涨落因素.在取样量能器中,我们又是对簇射次级粒子进行取样拦截,这又会带来取样涨落.拦截到的次级粒子在灵敏层中产生的信号又服从一定统计涨落的规律.由此可见最后得到的信号将综合许多统计涨落过程,限制了能量分辨率.下表是几种常用的量能器达到的能量分辨率.

量能器种类	能量分辨率 $\sigma(E_{\text{GeV}})$
NaI	$\sim 0.015/\sqrt{E} (< 1\text{GeV})$, $\sim 0.015/E^{1/4} (> 1\text{GeV})$
铅玻璃	$\sim 0.02/\sqrt{E}$
铅-液氙电离室	$\sim 0.07/\sqrt{E}$
铅-闪烁体	$\sim 0.10/\sqrt{E}$
铅-正比多丝室	$\sim 0.17/\sqrt{E}$

空间分辨率是指量能器确定簇射位置的能力.这显然受到量能器单元分块大小的影响,但因为簇射不仅沿纵向发展,在横向也有发展,所以往往相邻几个单元都会产生信号,这时我们就可以用重心法定出簇射的中心位置,使得量能器的空间分辨率将于每个单元的几何尺寸,例如用 5cm 见方的铅玻璃作为基本单元,则该量能器的空间分辨率可达到毫米数量级.

以上我们介绍的都是电磁簇射的情况,对于强子量能器,则是探测强子簇射,它与电磁簇射有着本质的区别,但是其表现的形式也是粒子的级联增殖过程,只不过这种级联过程是由强子的非弹性反应造成的,次级粒子中主要是强子,也有部分是 π^0 衰变的 γ 光子,然后由 γ 光子进一步发展成的电磁簇射.由于强子簇射要比电磁簇射发展得更深更广,强子量能器的规模

要比同样能量的电磁量能器大得多,用像 NaI、铅玻璃这样的材料是不切实际的,所以它们都采用取样量能器的方式.

为了使读者对目前高能物理实验中量能器的规模及其作用有初步的印象,我们挑选一些典型的装置列于下表.

名称	主要的物理目的	规模(吨)	技术	读出电子学道数	σ_E (对1GeV强子 电磁)
CDHS (见图 2)	中微子物理	~1400	铁板作吸收体,以闪烁体和漂移室	3600个光电管,4000根漂移丝	50% 23%
IMB	质子衰变	~7000	用水作介质的切伦科夫探测器	1350个8英寸直径的光电管	$\sigma \approx 20\%$ (对 $p \rightarrow e + \pi^0$)
MAC	e^+e^- 湮没	~400	铅与正比管夹层用于电磁簇射,铁与正比管用于强子簇射	10 ³ 根丝组合成6000道信号	75% 17%
UA1	质心系能量为540 GeV时的强子产生	~1000	铅与闪烁体夹层用于电磁簇射,铁与闪烁体夹层用于强子簇射	2200个光电管	75% 15%

这里特别值得一提的是安装在西欧中心 SPS 对撞机上的 UA1 和 UA2 谱仪,在1982年年底和1983年4月的两次运行中,成功地发现了87个 W^\pm 事例和14个 Z^0 事例,从而证实了温伯格-萨拉姆弱电统一理论的正确,这是五十多年来几代物理学家辛勤劳动成果的无上光荣.由于在这些事例中, W 和 Z 衰变出的正、负电子能量非常高,所以在粒子辨认、确定能量、排斥本底中,量能器的信息无疑起着关键性的作用.

面对下一代新的加速器,如 CERN 的 LEP(50GeV \times 50GeV e^+e^- 对撞),然后提高到 130GeV \times 130 GeV e^+e^- 对撞),美国 SLAC 的 SLC (50GeV \times 50GeV e^+e^- 直线对撞),布鲁克海文实验室的 CBA(400 GeV \times 400GeV $p-p$ 对撞),费米实验室的 Tevatron(1000GeV \times 1000 GeV $p-\bar{p}$ 对撞),或者更为雄心勃勃的计划,加速器能量越来越高,次级粒子将在探测器中沉积高至数百 GeV 的能量,这时量能器的能量分辨率将变得很好(因为它与 \sqrt{E} 成反比),为任何其它方法所望尘莫及.可以预见,量能器将在下一代高能物理实验中发挥越来越重要的,甚至是主要的作用,它是当前高能物理学家所热切注视着的一环,任何在这方面具有突破性的新思想,无疑会对未来的探测器起重要的影响.