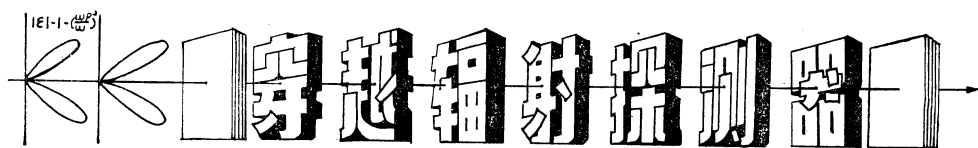


一种探测新原理的应用



唐孝威 张长春

(一) 什么是穿越辐射和穿越辐射探测器?

带电粒子在介质中运动时,产生各种可观察的电磁辐射,例如韧致辐射和契仑柯夫辐射。当带电粒子在穿越两种不同介质的界面时,同介质原子发生电磁相互作用,产生另一种新的电磁辐射,这就是穿越辐射。

高能带电粒子穿过不同介电常数的两种介质的交界面时,由于介质环境的突然改变,粒子携带的电磁场也将经受一个突然的变化,因而,在介质交界面附近的一个区域内,带电粒子辐射出一部分能量。离开了这个区域,带电粒子的行为就同在单种介质中运动一样。这种辐射是高能带电粒子穿越两种介质界面时才发生的,所以称为穿越辐射。在介质交界面附近带电粒子能够产生穿越辐射的区域,称为形成区。穿越辐射包括可见光和 X-射线,辐射的空间分布如图 1 所示。

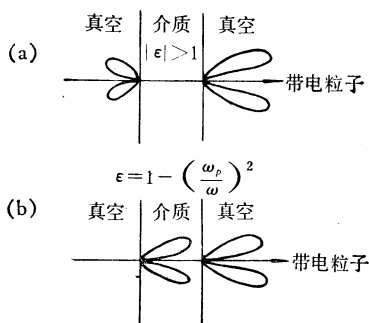


图 1 穿越辐射的出射角分布示意图
a) 可见光区, b) X-射线区

利用穿越辐射现象探测高能粒子的仪器,就叫穿越辐射探测器。它是由产生穿越辐射的辐射体(通常穿越辐射在辐射体和空气的界面上产生)、记录穿越辐射的计数器和必要的电子仪器所组成。新近研究的超导穿越辐射探测器,则把辐射体和辐射探测器合并成为了一体。

在高能物理实验中,要求高能粒子探测器能够分辨不同种类的高能粒子(如质子、 π 介子、 K 介子、电子等),而且要求能够分辨速度接近于光速的高能粒子。

用测量粒子在介质中所产生的电离来分辨速度接近光速的粒子时,遇到了困难。因为速度接近于光速的各种带电粒子,具有很相近的电离特性,因而对电离的测量难以辨认它们是由哪一种粒子所产生的。例如,契仑柯夫计数器可以分辨不同速度的带电粒子。但是,分辨速度非常接近光速的粒子也有困难。利用穿越辐射现象探测高能粒子就是在这方面的一种探索。

(二) 穿越辐射有哪些特性?

前面讲过,当高能带电粒子穿过两种介质的界面时,产生穿越辐射。穿越辐射具有连续分布的能谱,如图 2 所示。在图中, ω 是辐射光子的频率, N 是辐射光子的数目。 $\omega_p \gamma$ 是辐射光子能量的截断值。 ω_p 是辐射体的等离子体频率。对于铝来讲, $\omega_p \hbar = 32$ 电子伏。

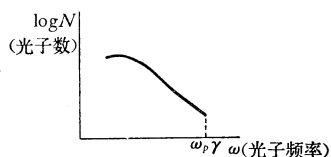


图 2 穿越辐射的能谱分布图

这儿 \hbar 是普朗克常数。 γ 是粒子的洛伦兹因子,即粒子总能量与静质量之比。如果一个带电粒子的 γ 值为 10^3 ,那么,在铝和空气交界面上,它产生的穿越辐射光子能量小于或等于 32 千电子伏特。辐射光子能量从 X-射线区连续分布到可见光区,但是大部分能量是以 X-射线形式发射的。在每一个界面上,产生穿越辐射光子的几率约为百分之一。

X 光能区的穿越辐射,总能量正比于入射粒子的 γ 值。所以,测量 X 光能区的穿越辐射总能量,就可以确定入射带电粒子的 γ 值。穿越辐射也可以产生可见光区域的辐射,但是,可见光的总能量比 X-射线能区小得多,所以不利用可见光辐射来测量高能粒子。另外,可见光区域的穿越辐射,总能量正比于 $\log \gamma$ 。因此,为了能更灵敏地分辨不同 γ 值的粒子,测量 X-射线比较有利。

穿越辐射发射 X-光子的角度很小,基本上是沿带

电粒子入射方向朝前发射的，发射角约为 $1/\gamma$ 。粒子的 γ 值越大，穿越辐射越是向前集中。辐射体必须具有一定的厚度，才能产生穿越辐射，这就是形成区的条件。具有不同等离子体频率的介质，这个形成区的大小是不一样的。形成区大小还依赖于入射粒子的 γ 因

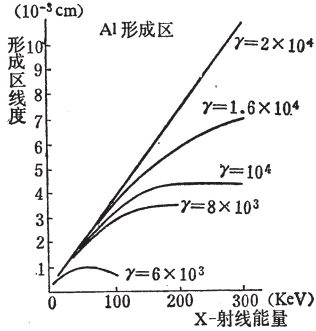


图3 铝的形成区对于洛伦兹因子 γ 和 X-射线能量的依赖(理论值)

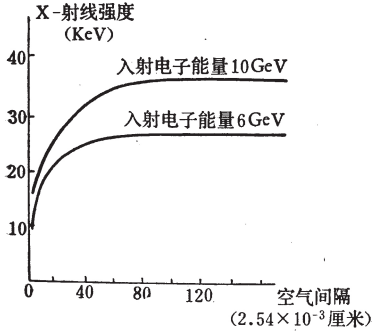


图4 X-射线强度对介质膜之间的空气间隔的依赖(实验值)

子,形成区的厚度约为 100 微米。

在用原子序数较大的介质作辐射体时，高能带电粒子产生的穿越辐射强度较大。但辐射体对穿越辐射有自吸收，用原子序数大的介质时，自吸收也多。所以，一般要用原子序数小的材料做辐射体，例如锂箔、镀铝的聚酯薄膜、铍片等，也有用泡沫塑料做辐射体的。当高速带电粒子穿过透明介质时，还有契伦柯夫辐射产生，为避免两种辐射的混杂，一般不用透明介质做穿越辐射的辐射体。

(三) 穿越辐射探测器的例子

因为单个带电粒子在每一个界面上产生的穿越辐射光子数目很少，所以，用穿越辐射现象探测单个高能带电粒子，需要用许多个薄片做辐射体，这些薄片彼此靠近安放，但又相隔一段距离，构成许多个界面。

通常，在带电粒子飞行路径上，放置多组穿越辐射的辐射体和 X-射线探测器，组成穿越辐射探测器，如图 5 所示。但又要求探测器记录 X-射线，探测器可以用闪烁计数器、半导体计数器等组成，目前常用多丝正

子和产生的穿越辐射 X-射线频率(见图 3)。实验测量表明，产生的 X-射线强度随着介质膜之间的空气间隔增大而增大，且趋于坪区。这证实了空气介质也具有一定的形成区。如图 4 所示，如果介质太薄，比形成区线度还小，那么带电粒子穿过介质界面时就可能不产生穿越辐射。以铝箔辐射体为例，对于很高能量的带电粒子

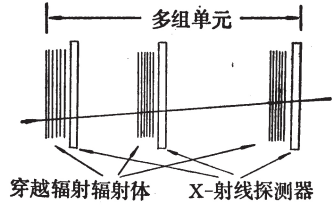


图5 穿越辐射探测器的例子

比室作为 X-射线探测器。

(四) 超导探测器应用于记录穿越辐射

不久前，袁家骝等试验将超导探测器应用于记录穿越辐射，做成了超导小颗粒的穿越辐射探测器。

这种探测器的主要原理是：当用许多超导小颗粒记录穿越辐射时，每一个超导小颗粒既是产生穿越辐射的辐射体（因为入射的高能粒子会在超导小颗粒和石蜡的界面上产生穿越辐射），又是记录穿越辐射的探测器（因为超导探测器可以记录穿越辐射的 X-射线）。

在这种探测器中，由超导小颗粒吸收、记录穿越辐射，所以前面提到的穿越辐射探测器通常遇到的一个困难，即辐射体的自吸收问题，就不存在了。

此外，因为超导小颗粒的原子序数大，所以高能粒子在小颗粒与石蜡的界面上产生穿越辐射的产额高，而且用它们记录 X-射线的效率也高。

袁家骝等曾在高能电子加速器上进行试验。据称，用改进了的电子学置装，探测灵敏度可以提高一千倍，因此超导探测器被认为是一种有希望的新探测器。

(五) 穿越辐射探测器的应用

穿越辐射探测器可以用于高能物理实验中（包括高能加速器上的高能物理实验，以及利用宇宙线的高能物理实验），用来探测记录单个高能粒子。一方面，它可以分辨不同种类的高能粒子（因为动量相同而静质量不同的高能粒子，其 γ 值是不同的）。另一方面，它还可以测量高能粒子的 γ 值；如果高能粒子的静质量为已知，则可以由 γ 值确定粒子的能量。

在高能加速器上做的高能物理实验中，有人把穿越辐射探测器同谱仪合用，探测和分辨高能粒子。例如图 6 所示的实验装置。在图中，入射粒子包括电子和 π 介子，它们的动量是 90 到 100 亿电子伏特/c(c 是

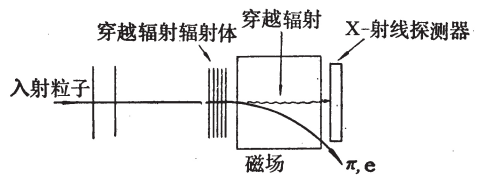


图6 穿越辐射探测器和谱仪合用

光速).在辐射体的界面上,电子可以产生穿越辐射,而 π 介子则不产生(因为这种动量的电子 γ 值很大,而 π 介子的 γ 值则不够大). 磁场使带电粒子偏转,穿越辐射则穿过磁场,由放在磁场后面的 X-射线探测器(这里用充氙气的探测器)记录. 电子穿过辐射体时,损失的能量很小,可以忽略. 这样,利用穿越辐射,可以把电子与 π 介子分辨开,分辨率达到 99% 以上.

(六) 一个正式使用穿越辐射探测器的高能物理实验

1977 年,在西欧中心交叉储存环的质子-质子对撞实验中,Cobb 等人正式使用了穿越辐射探测器. 他们通过测量末态为正负电子对的作用事例,研究 J/ψ 和 γ 粒子的产生截面. 入射强子的质心系总能量是 630 亿电子伏特. 他们的探测器由以下四部份组成(见图 7): (1) 圆柱型多丝正比室,紧贴着加速器束流管道安装,用于排除光子在探测设备上产生的正负电子对事例. (2) 塑料闪烁计数器组成的描述仪. (3) Li 膜穿越辐射体和探测 X-射线的充 Xe-CO₂ 多丝正比室,用于分辨电子和强子,电子在 Li 膜中产生 X-射线区穿越辐射,充 Xe-CO₂ 多丝正比室探测 X-射线. (4) 液氙量能器,用于测量出射电子的能量.

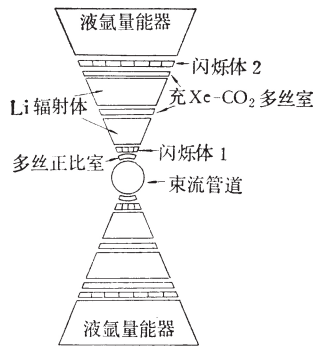


图 7 在西欧中心交叉储存环上使用的实验装置图

这个穿越辐射探测器可用于探测 γ 值大于和等于 10^3 的入射粒子. 因为动量低于 1000 亿电子伏特/c 的 π 介子,它们的 γ 值小于 715,实际上可认为它们不产生 X-射线区的穿越辐射. 但是电子却不然,电子动量大于 5 亿电子伏特/c (γ 值大于 10^3),就能产生可探测到的 X-射线区穿越辐射,因此,在一个很宽的动量范围内,仅通过测量所辐射的 X-射线能量,而不必分析粒子的动量和速度,就可以把电子同强子分辨开来.

穿越辐射探测器是目前正在发展中的一种新探测器. 无论是穿越辐射探测器本身,还是它们在高能物理实验中的应用,都值得进行更多的研究.