

# 防护 浅谈

邵 贝 贝

高能质子加速器运行及高能物理实验中遇到的辐射防护问题，首先是中子、 $\beta$  粒子、 $\gamma$  及 X 射线的防护问题。这类粒子流或射线，在低能物理领域中人们就都遇到过，而  $\mu$  子的防护却是高能物理领域中防护上遇到的新问题。当质子加速器能量超过 10 京电子伏以后， $\mu$  子的防护问题就变得越来越重要。高能  $\mu$  子有很强的穿透力，若以混凝土作屏蔽材料，防护中子、 $\gamma$  射线的屏蔽几米厚就足够了，但用以防护  $\mu$  子，或许几十米厚还不够。 $\mu$  子的防护并非人们所熟知。了解一下  $\mu$  子的性质和防护办法是件很有意思的事。

## 为什么要防护 $\mu$ 子

$\mu$  子有两种，一种带正电，一种带负电。除所带电荷不同，其他性质基本相同，我们统称二者为  $\mu$  子。

因为  $\mu$  子带电，它穿过人体时能与人体组织作用产生电离。电离会引起肌体细胞的损伤，所以对  $\mu$  子要防护。 $\mu$  子与物质作用产生电离的现象和我们在低能物理中遇到的  $\beta$  粒子（即高速运动的电子）与物质作用产生电离的现象十分相似。就对人体的危害程度而言，在数值上  $\mu$  子也和  $\beta$  粒子差不多，假使一个人在通量为 8 个  $\mu$  子/厘米<sup>2</sup>·秒的辐射场中停留一小时，累积剂量约为 1 毫雷姆。对于工作人员的人身安全说来，把  $\mu$  子减弱到这种程度就可以了。但对一些高能物理实验，则至少还须把  $\mu$  子再减弱两个数量级，以排除  $\mu$  子对所观测的物理现象的干扰。因此，或出于人身安全的考虑，或因物理实验的需要，尽管目的不同，要求也不一样，却都需认真对待  $\mu$  子的防护问题。

## $\mu$ 子的特点

$\mu$  子的静止质量是 105.6 兆电子伏，比质子（938 兆电子伏）轻些，比电子（0.51 兆电子伏）则重得多。 $\mu$  子不同于强子，它与物质只有电磁相互作用和弱相互作用，几乎不发生强相互作用，即  $\mu$  子几乎不与原子的原子核作用。故  $\mu$  子比强子的穿透能力强得多。

$\mu$  子穿过物质介质时，主要以产生电离的方式损失能量。能量为数十京电子伏的  $\mu$  子穿过质量厚度

为 1 克/厘米<sup>2</sup>的介质时，仅损失约 2 兆电子伏能量。由此不难估算出，要挡住 20 京电子伏的  $\mu$  子质量厚度需 10<sup>4</sup> 克/厘米<sup>2</sup>，这相当于一堵 50 米厚的土墙（密度 2 克/厘米<sup>3</sup>）！

$\mu$  子在自身坐标系中的寿命是  $2.2 \times 10^{-6}$  秒，它衰变成电子和中微子。虽然  $\mu$  子寿命不算长，但我们却不能指望用留出一定距离的空间，让  $\mu$  子衰变掉的方法防护  $\mu$  子。不难算出，很低能量的  $\mu$  子衰变需漂移 600 米，而 10 京电子伏的  $\mu$  子衰变平均要穿行 60 公里！

$\mu$  子虽然穿透力强，不易防护，但另一方面，需要考虑  $\mu$  子防护问题的场合并不多。 $\mu$  子不象中子、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线那样，在加速器周围几乎处处皆有，朝各方向射出的都有。高能  $\mu$  子仅出现在质子束流轰击的靶的正后方，束流前进方向上很小的圆锥角内。这使得  $\mu$  子防护问题的处理容易多了。至于  $\mu$  子为什么只有窄窄的一束，还得说说  $\mu$  子是怎样产生的。

## $\mu$ 子是怎样产生的

90% 以上的  $\mu$  子是由带电的  $\pi$  介子衰变产生的。少量  $\mu$  子来源于  $\kappa$  介子衰变。 $\pi$  介子又是怎么来的呢？原来，高能质子打靶时引起簇射而产生一系列次级粒子，其中有相当一部份是带电的  $\pi$  介子。例如，对于 50 京电子伏的质子束流，一个作用质子产生的一簇次级粒子中平均就有一个是带电的  $\pi$  介子。 $\pi$  介子出现在靶后面束流前进方向上很小的圆锥角内，这个角只有几十毫弧度，且束流能量越高，这个角越小。带电的  $\pi$  介子衰变成  $\mu$  子和中微子，衰变产生的  $\mu$  子差不多仍保持原来的  $\pi$  介子运动的方向。 $\pi$  介子在自身坐标系中的寿命是  $2.6 \times 10^{-8}$  秒，很低能量的  $\pi$  介子衰变前平均漂移 8 米，1 京电子伏的  $\pi$  介子衰变成  $\mu$  子平均漂移 55 米。 $\pi$  介子能量越高，衰变前平均漂移的距离也越长，经过一段相当的距离之后，绝大部分  $\pi$  介子就衰变成  $\mu$  子了。

$\pi$  介子与物质的作用是强相互作用，容易用屏蔽物阻挡住，几米厚的混凝土就足以将高能  $\pi$  介子连同它产生的次级强子吸收掉。在这样短的距离上，衰变

产生的 $\mu$ 子是很少的,因为大部份 $\pi$ 介子来不及衰变成 $\mu$ 子就被吸收掉了。由此可知, $\mu$ 子的强度,除与加速器能量、流强、 $\pi$ 介子产额等有关外,还与屏蔽物到靶的距离有很大关系。

### $\mu$ 子的防护

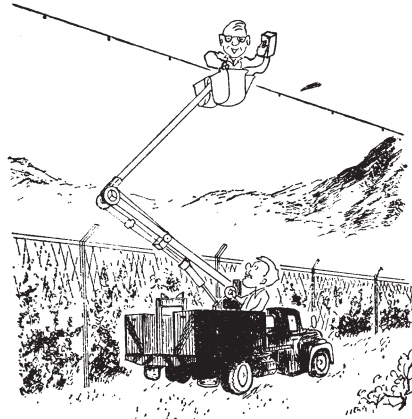
准确定出 $\mu$ 子屏蔽所需厚度,需做大量复杂的计算和实验,需从 $\pi$ 介子的产生和分布研究起,弄清 $\mu$ 子的能谱和分布情况。高能加速器产生的 $\mu$ 子从低能到高能都有,最大能量略小于加速器能量,防护上关心的是能量高的那部份 $\mu$ 子。10京电子伏以下的质子加速器,防护强子的屏蔽就足以挡住 $\mu$ 子,无需专门考虑 $\mu$ 子防护问题,而能量更高的质子加速器,则必须认真对待 $\mu$ 子的防护问题。

处理 $\mu$ 子防护问题的原则之一是,在 $\pi$ 介子一产生,还来不及衰变成 $\mu$ 子时,就尽早用屏蔽物将其吸收掉,就是说尽量把 $\mu$ 子“扼杀于襁褓中”。但我们又不能把 $\mu$ 子屏蔽紧贴着靶,因为我们要用靶上产生的次级粒子流做物理实验。靶的后方必须放置一些分离、输运次级束流的磁铁和实验探测设备。这就使得 $\pi$ 介子有机会在空间穿行一段距离而衰变成 $\mu$ 子。我们只能要求 $\mu$ 子屏蔽尽量靠近靶。安排物理实验的人,应当尽量将仪器设备安排得紧凑,并尽可能在设备周围加一些局部屏蔽,尽早将 $\pi$ 介子吸收掉,以减少 $\mu$ 子的产额。

防护 $\mu$ 子的另一原则是尽量利用地形。设计加速器束流线时,可以让束流方向指向一座天然小山,或巧妙利用地势坡度,让靶后方束流线的标高比地平面低

几米,让大地作我们的 $\mu$ 子屏蔽。

由于 $\pi$ 介子衰变成 $\mu$ 子和中微子时保持了良好的准直性,利用该束流的这一特点,可进行 $\mu$ 子的物理实验,也可用来做中微子实验。这就需要在束流打靶后,



欧洲核子研究中心(CERN)在有 $\mu$ 子射出的实验厅后面,沿CERN的边界,挂有监测 $\mu$ 子的探测器(挂在铁丝上的小薄片)。工作人员正在测量 $\mu$ 子的空间分布。

有意留下一段空间,让 $\pi$ 介子尽量衰变成 $\mu$ 子,以进行 $\mu$ 的实验。为了做中微子实验,就还需要在 $\mu$ 的束流线上做一 $\mu$ 子屏蔽,将 $\mu$ 吸收掉,“滤”出纯净的中微

子流用来做实验。事实上,国外一些大的高能中心就是这样做的。为了挡住数百京电子伏的 $\mu$ 子,需一座五、六米见方,几百米长的 $\mu$ 子屏蔽,这一巨大屏蔽以好几万吨钢铁堆成。这样才能保证实验不受 $\mu$ 子的干扰,当然也同时保证了实验者不受到 $\mu$ 子的伤害。