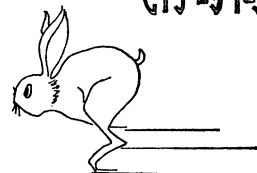
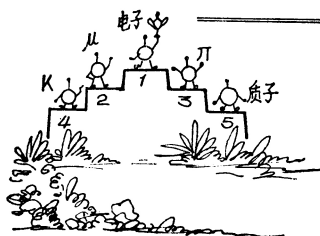


向亚毫秒进军

飞行时间计数器简介



郑志鹏 祝玉灿



一、从“鸡兔分笼”到粒子鉴别

“鸡兔同笼”问题是小学四则运算中遇到的一个有趣问题。那么“鸡兔分笼”又是怎么回事呢？有人提出这样一个问题：若干鸡和兔装在一个笼子里，现欲将鸡和兔分开，分别装进各自的笼子，什么办法最好？有一个聪明人做了回答：将鸡、兔同时轰出笼口，让它们跑过一定距离的通道，先到者为兔，后到者为鸡。从原则上讲，这个方法是对的，其实是利用鸡、兔速度不同来达到区分它们的目的。

在核物理和粒子物理中也有类似的问题——粒子分辨的问题，其中一种解决方法就是利用粒子速度不同来区分它们。例如让具有同样动量的电子、 μ 子、 π 介子、 K 介子和质子“赛跑”，那么冠军一定是电子，亚军是 μ 子，而质子是倒数第一名。这是因为电子最轻，因而飞得最快；质子最重，飞得最慢。这种利用测量速度来鉴别粒子的方法称为飞行时间测量方法，其相应的探测器称为飞行时间计数器。飞行时间法除了鉴别粒子外，还可以测量飞行粒子的能谱（当粒子种类已知时）。因为知道了粒子速度和质量，能量也就能求出来了。用这种方法测量飞行中子能谱是一种行之有效的办法。

大家知道，在百米赛跑的时候，裁判员听见枪响，开始按一下秒表，表针开始走动。当运动员到达终点时再按一下，表针停止。飞行时间测量也需要给出两个信号——起始和停止信号。因此通常需要两块飞行时间计数器，分别给出起始、停止信号。在对撞机谱仪中，起始信号由加速器对撞束给出，只需要飞行时间计数器提供停止信号。

二、计数器的时间分辨率

测量百米赛跑需要一个“走得很准”的秒表对飞行时间测量，人们也期望得到测时精度高（或误差小）的计数器。就用“时间分辨率”来衡量其标准。当我们用飞行时间计数器测量一个确定的时间时，由于统计涨

落，得到的总是一个统计分布（与能量分布相似）。过去常用时间谱的半高宽（即峰值一半处相应的宽度）来表示“时间分辨率”，目前更常用时间谱（近似高斯分布）的标准偏差 σ （ $\sigma = \frac{\text{半高宽}}{2.35}$ ）来表示。飞行时间计数器测到的时间谱越“苗条”， σ 值越小，时间分辨率越好，说明该计数器的测时精度越高（见图1）。好的时间分辨率相应于高的能量分辨和质量分辨。

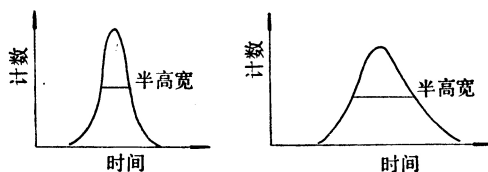


图1 用时间谱的半高宽来表示时间分辨率。左边的谱“苗条”，比右边的时间分辨要好。

在五十年代，用 NaI(Tl) 晶体配合慢光电倍增管，得到微秒数量级的时间分辨率。到了六十年代，由于使用塑料闪烁体配合快光电倍增管以及快电子学线路，得到毫微秒的时间分辨率。于是，塑料闪烁体在核物理及高能物理实验中获得广泛的使用。毫微秒即十亿分之一秒，看来是很快，但对高能物理来说还是嫌慢。高能粒子已接近光速，飞行一米距离，只需三毫微秒的时间，因此一毫微秒的时间分辨率相应于33%的相对精度，当然是不够的，于是人们开始向亚毫微秒进军！

近些年来，由于获得了快发光塑料闪烁体（光衰减时间小于一毫微秒）及快光电倍增管，制成的小面积（几平方厘米）闪烁计数器可达到几十微秒（ μs ）的时间分辨率，但是几平方厘米的面积，对高能探测器来说是太小了。通常高能谱仪中的飞行时间计数器需要数平方米的面积，面积大了，光子在传播中会损失一部分；传播距离远了，造成的时间涨落相应地要变大。尽管对塑料闪烁体的光学透明性（光衰减长度）进行改进，但大面积闪烁计数器仍很难做到时间分辨率 σ 小于 200ps 。

三、时间分辨与质量分辨

一旦粒子的飞行时间、动量确定以后,它的静止质量也就确定,粒子的种类也就知道了。

时间分辨与质量分辨的关系由以下公式确定:

$$\Delta m^2 = 2p \cdot \sqrt{\frac{m^2}{p^2} + 1} \cdot \frac{\sigma t \cdot c}{\mathcal{L}}$$

式中 σt 为计数器时间分辨率, c 为光速, \mathcal{L} 为飞行距离, m 为粒子质量, p 为动量, Δm^2 为质量平方偏差。可见,为了获得好的质量分辨(Δm^2 小),需要有好的时间分辨率(σt 小)。在 Δm^2 一定的情况下, σt 越小,可测动量范围越大。例如在飞行距离 \mathcal{L} 为 1.2 米时,计数器时间分辨率为 400 ps, 动量小于 0.7 GeV/C 时, π 介子和 K 介子可以分开;若时间分辨率提高到 200 ps, 动量延伸到 1 GeV/C 的 π 介子和 κ 介子也能分开。因此,人们千方百计地为提高大面积计数器的时间分辨率而努力。前些年,大面积塑料闪烁计数器时间分辨率一直在二百多微微秒到三百微微秒范围内游移,人们期望打破二百 ps 的“纪录”。

四、“纪录”是如何创造的?

计数器的时间分辨率与哪些因素有关?

1. 光产生和传输时间的统计涨落。带电粒子打在闪烁体上,使其激发、在退激过程中并非同时产生光子,要经历一个过程;光子在闪烁体、光导中传输也有先、后、快慢之分;在光电倍增管中光电子的产生、倍增也有一个过程——这些都是统计过程。时间分布谱的宽、窄则决定了该计数器的时间分辨率。在闪烁体中产生的光子数越多,闪烁体发光衰减时间越快,光电倍增管传输时间涨落越小,则得到的时间分布谱越“苗条”。为了获得“苗条”的谱,必须在闪烁体和光电倍增管的选取上,在闪烁体和光导的表面抛光上,在光导设计上等方面下功夫。

2. 在电子学记录、分析过程中,总要首先经过一甄别器进行甄别、成形,“甄别”就像脉冲过一个“门坎”,大于某一幅度(甄别阈)才能进来,否则就被拒之门外,这样就把噪音信号卡掉了。与此同时也产生了一个问题:大、小脉冲过“门坎”的时间就不一样,大脉冲冲得快,小脉冲冲得慢,这就是通常称之为“时间晃动”的影响,它将加宽时间谱。为了减少这一影响,甄别器不断地改进,经历了从前沿甄别、过零甄别到恒比定时甄别的发展阶段,目前可以做到的恒比定时甄别,其时间分辨率为一百多 ps。近些年来还采用了时间-幅度修正方法,原理是将幅度对时间的关系输入到计算机中,进行修正,可以把幅度对时间的影响减得更小。

3. 电子学线路的漂移也将使时间谱变“胖”,因此要获得长期稳定的电子学线路是十分重要的。

综合考虑以上三个因素之后,在美国 SLAC MARK-III 的谱仪上,大面积飞行时间计数器(3.2 米 \times 15 厘米 \times 5 厘米)获得了好于二百 ps 的“记录”。他们使用了一种 Pilot-F 厚闪烁体及 XP2020 快光电倍增管,配合稳定的快电子学线路,用计算机进行时间-幅度修正,得到了目前最好的结果。

五、北京谱仪中的飞行时间计数器

北京谱仪是我国计划中的正负电子对撞机上工作的第一个探测装置。它的任务是研究正负电子对撞后产生的粒子相互作用的规律,当然首先是要识别产生的是什么粒子,这就是飞行时间计数器(配合漂移室)的任务。飞行时间计数器准备分为两大部分,一部分是“圆桶”计数器,它是由 48 块分别长 3.2 米,宽 15 厘米,厚 5 厘米的闪烁计数器组成。圆桶部分可以接受和分析大部分对撞后产生的带电粒子,为了不致于使两端的粒子“漏掉”,还要加 48 个端盖计数器,围成一环形,见图 2。

对端盖模型的光导形状、输出脉冲形状、幅度分布、探测效率、时间分辨率、光的有效传播速度等参数进行了测试研究,其中带扭曲光导的一种,其时间分辨小于 200 ps, 探测效率接近百分之百,其余各项物理指标和机械结构皆满足要求。

对圆桶模型也进行了电子学测试,其时间分辨为 200 ps 左右,若今后采用计算机进行时间-幅度修正,其时间分辨率可望小于 200 ps。

在没有适当的加速器束流,而放射源能量不足以穿透厚度为 2.5 厘米到 5 厘米的闪烁体时,一种切实可行的办法就是利用宇宙线的测试方法,由此得到了接近计数器的本征时间分辨率的结果。

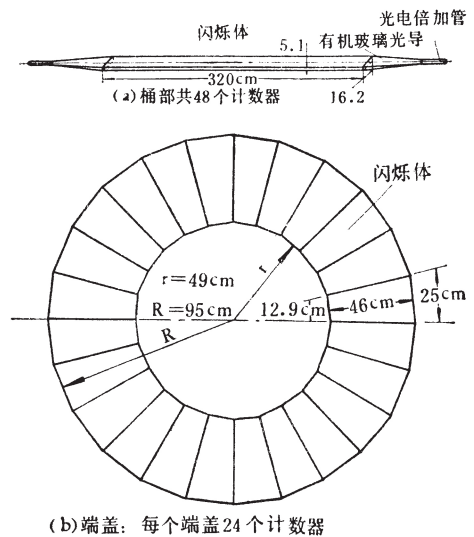


图 2 圆桶(上)及端盖(下)飞行时间计数器

在飞行时间计数器的研制中，一方面吸收了国际上现有计数器(特别是 Mark-III 探测器)的经验,另一方面又加进我们自己的改进。在 Mark-III 探测器中没有端盖飞行时间计数器,圆桶计数器的光导形状又不对称,我们在预制研究中通过不同模型比较取得了经验,最后得到了较理想的结果。在整个预制研究中,对光电倍增管分压器的设计与调节(用氩闪光灯);对扭曲光导的设计(使用蒙特卡罗模拟程序)与制造(自制);对闪烁体、光导的粘接技术;对电子学线路的调节;对宇宙线测试方法等方面都进行了摸索、改进。

虽然预制研究模型已接近目前世界先进水平,但为今后谱仪中每一个计数器都达到先进指标还要作很大努力,况且世界上新的“纪录”不断被打破,新的时间测量技术不断出现。新型闪烁体及微通道极型光电倍增管的出现,定域放电的平面火花室时间分辨率不断提高(30 ps 左右),给飞行时间测量技术带来了新的前景和希望。