

# 正负电子对撞机的亮度及其监测

郁忠强

高能正电子束和负电子束对撞产生我们需要研究的新粒子,它的产生几率是很小的.譬如说,碰撞一千万次才产生一个新粒子.只有产生了新粒子,并用探测器能测量到,我们才能发现它.为了研究该反应的特征和新粒子的性质,必须获取足够多数量的反应事例和新粒子.产生新粒子的反应事例数和什么因素有关呢?首先决定于产生该新粒子的几率,称为该相互作用过程反应截面,以 $\sigma$ 表示.另外和对撞机的正电子束和负电子束的对撞性能有关,我们把这个参数称为对撞机的亮度,以 $L$ 表示.对撞机的亮度越大,产生新粒子越多,反之,产生的新粒子就少.单位时间内产生新粒子的事例数 $N$ 可以用下式表示:

$$N = \sigma \cdot L \quad (1)$$

一般说来,产生某新粒子的反应截面 $\sigma$ 是一定的,所以产生新粒子的事例数主要依赖于对撞机的亮度.

什么是对撞机的亮度呢?我们可以用马路上的汽车相撞作比方,当东面开来的汽车和西面开来的汽车在某一个地段相遇时,有可能相撞,发生事故.不难设想,汽车的流量越大,相撞的可能性越大.显然,这决不只决定于车的流量,还和马路的宽窄有关,马路越窄,汽车相撞的可能性越大.正电子束和负电子束在对撞点对撞时也有类似情况,正电子束和负电子束的流强越大,碰撞可能性越大,束的截面越小,碰撞的可能性越大,对撞机的亮度就是综合了这两方面的因素,可以由下式表示:

$$L \sim \frac{I^+ I^-}{S} \quad (2)$$

式中 $I^+$ 和 $I^-$ 分别表示正电子束和负电子束的流强, $S$ 表示它们的束流截面.

建造一台正负电子对撞机,能量是头等重要的,因为能量越高,能产生的新粒子的质量越大,能研究的物理问题越多.然而能量再高,没有一定的亮度也是做不了实验的.特别是研究一些稀少事例时,亮度更为重要.譬如说,我们要研究的一个过程在某能量下反应的截面是1微微巴,即 $\sigma = 10^{-30}$ 厘米<sup>2</sup>,设对撞机的平均亮度为 $\sim 10^{29}$ 厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup>.按式(1)计算,对撞机运行一年(运行时间 $\sim 10^7$ 秒),该过程仅发生一次,也就是说我们可以获得1个好事例.假如为了对该反应过程进行一些物理研究,对生成的新粒子进行定量的分析,得到一些有用的物理结果,需要获取1千个这样的事例,也就是说,对撞机必须连续运行1千年才能

获取足够的数,这显然是不现实的.最好的办法是提高对撞机的亮度,假如能将对撞机的平均亮度提高1千倍,那么在同样的条件下,加速器运行一年就可以获取1千个好事例,从中分析就可以获得所需要的物理结果.由此可见,能量和亮度是对撞机最主要的两个指标.

当然,增加对撞机的亮度不是一件轻而易举的事,要考虑尽可能地增大束流强度,减小束流损失,同时在对撞点附近采用聚焦系统,使束在对撞点处的截面减小.这一切都要求在设计对撞机时精心地选择各项参数,使对撞机的各项指标达到最佳.

在对撞机的实验中,经常要测量的是某一反应过程的截面,这是通过测量该过程的事例率实现的,如公式(1)所示.只要知道了对撞机的亮度,就可以计算出该反应过程的截面.可以看出,在实验上精确测量亮度是很重要的,它的测量精度直接影响到截面测量的精度.

目前对撞机亮度的测量有两种方法:一种是直接测量法,另一种是间接测量法.

由上面公式(2)看出,只要分别测量对撞束的流强 $I^+$ 和 $I^-$ ,以及对撞束的几何截面 $S$ ,就可以计算出对撞机的亮度,这种方法称为直接测量法.

测量对撞束流强的方法有以下几种:

(1) 电流变压器的方法.用磁芯组成一个变压器,当束流从磁芯的中心穿过时,在磁芯上绕制的线圈中就感应出一定的电流,测量线圈中的感应电荷量就可以推算出束流的强度.这种方法是加速器最常用的束流测量方法,方法简便,容易刻度.只要在变压器的中心用一根导线通以脉冲电流模拟成束团就可以进行调整和刻度.

(2) 静电拾取探头.它是由安置在束流上下和左右的两对电极组成,可以用它测量束流的位置,这是由相对两个探头的感应信号的差决定的,由上下和左右两对感应信号的差决定束流偏离中心轨道的位置,由它们的和决定流强的大小.刻度方法和电流变压器方法相似.

(3) 测量同步辐射光的方法.我们知道,带电粒子在磁场中偏转时要产生同步辐射,发射的功率和带电粒子的能量有关,和瞬时轨道的曲率半径有关,和束团的流强成正比.通常选用灵敏的光电二极管组成光度计,测量单个束团发射的同步辐射的功率就可以测

量到单个束团的流强。与电流变压器的方法相比,这种方法有很大的优点,电流变压器测量束流强度无法区分正电子束还是负电子束,而利用同步辐射光测量是分别进行的,能直接分别测出正电子束和负电子束的流强。

测量束流强度还有其它一些方法,如壁电流探头,电离室,法拉第圆筒等等。

测量对撞束截面的方法主要有: CsI 或  $Al_2O_3$  荧光屏型探头,单丝靶或多丝靶探头。同样也可采用测量同步辐射光的方法,用旋转镜的扫描方式或狭缝扫描方式对同步光进行扫描,可以得到同步光的截面分布数据,从而推算出正电子束和负电子束的截面。

上述束截面测量方法都有一个共同的缺点,它们给出的束截面都是被测量点处的截面,不是对撞点处的束截面。所以必须作某些修正或计算后,才能得到对撞点处的束截面,然后用它来计算亮度。由于这些修正和计算很不严格,会引入较大的偏差。所以测量得到的亮度精确度不高,误差高达 10—20%。更为严重的是有可能测量到的亮度完全是虚假的。采用这种直接测量法时我们假定了两束团是理想对撞的条件。我们设想一种极端的最坏的情况,两束团在对撞点处没有能对撞上,完全分开为一上一下或一左一右,这时按上述测量方法仍可计算出很大的亮度,而实际上根本没有意义。正像地下铁道上的车厢和地面上的公共汽车根本就不会撞车一样。所以在用直接测量法监测亮度时要十分小心,这种方法常常只限于对撞机的调整和监测。在物理实验中经常采用的是下面介绍的间接测量法。

从式(1)中看出,假如我们选择某一已知反应截面的过程,实验上测量出它的事例数,就可以计算出对撞机的亮度。然后用亮度再去计算未知过程的截面,这是目前正负电子对撞实验中通常采用的方法。

选作亮度测量的作用过程一般为小动量转移的电磁相互作用过程。我们知道量子电动力学理论是近代理论中最为完善的理论,目前已经证明在小到  $10^{-16}$  厘米的小范围内,量子电动力学仍然有效,对小动量转移的电磁相互作用过程,理论上可以十分精确地计算出它的反应截面。可用作正负电子对撞机亮度测量的小动量转移的电磁作用过程有单韧致辐射过程,双韧致辐射过程或小角度的巴巴散射。最常用的是小角度巴

巴散射,它相应于小的四动量转移。图 1 给出了常用的亮度监测器的示意图。在对撞点的两端小角度处安放了一套探测器装置,它由 8 个闪烁计数器(图 1 中  $P_1—P_4, C_1—C_4$ ) 和 4 个簇射计数器 ( $S_1—S_4$ ) 组成,它们分别组成了四组亮度测量单元。闪烁计数器  $P_1$  和簇射计数器  $S_1$  和对角的闪烁计数器  $C_3$  和簇射计数器  $S_3$  组成了第一组亮度测量单元,它们分别测量巴巴事件中散射的正电子和负电子。面积较小的  $P_1$  计数器决定了该组亮度测量的接收度,为了从大量的本底中鉴别出巴巴事件,要求对角的  $C_3$  探测器同时记录到和  $P_1$  背对背的散射电子,  $S_1$  和  $S_3$  分别测量散射电子的能量,以一定的阈值排除掉那些能量较低的本底事件。由于正负电子束团对撞时有一个区域,  $C$  和  $S$  计数器必须比  $P$  计数器大得多,使得接收度完全由  $P$  计数器决定。由  $P_1, S_1, C_3$  和  $S_3$  组成的亮度监测单元可以测量到该单元的巴巴散射事例率。类似地,  $P_2, S_2, C_4$  和  $S_4, P_3, S_3, C_1$  和  $S_1$ , 以及  $P_4, S_4, C_2$  和  $S_2$  分别给出第二组、第三组以及第四组亮度监测单元的巴巴散射事例率。由量子电动力学可以计算出巴巴散射的微分截面,根据探测器的具体尺寸和位置计算出它的总截面,然后根据所测量到的计数率就可以计算出对撞机的亮度。在计算中知道,在小角度时巴巴散射的微分截面近似地和散射角  $\theta$  的四次方成反比。也就是说,计算的亮度和探测器的尺寸以及安装位置的依赖十分灵敏,这就对探测器尺寸和安装位置的精度提出了严格的要求,它们很小的偏差就会给截面的计算带来较大的误差。我们希望监测器对亮度的响应对安装精度和对撞机的不同运行参数尽可能的不灵敏。上述四组亮度监测单元的安排就是为了这个目的。我们采用上述四组监测单元的平均计数率计算对撞机的亮度,而不是单独用一组监测单元的计数率。当安装精度稍差,或对撞机运行参数稍有变化时,对于某一组监测单元的计数率变化较大,而其它三组监测单元中的计数率将有所补偿,因而对上述四组监测单元的平均计数率的影响将不大,最后得到的亮度精度将较高。用这种方法测量的亮度误差可以低至 2—3%。更加精细的设计,再附加一些特殊的探测装置,亮度测量的误差可以改善到 0.6%。

一般说来,对撞机在运行之初,总有一个逐步调整和提高亮度的过程,亮度测量就成为很重要的监测手段。我们必须精心设计亮度监测器,以满足调试的要求,并为将来物理实验提供可靠的亮度数据,使北京正负电子对撞机在将来的物理实验方面作出应有的贡献。

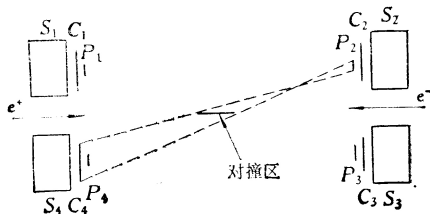


图 1 亮度监测器示意图