

对撞机的亮度与束流寿命

冯 宝 树

对撞机是使两股带电粒子束流对撞的机器。对正负电子对撞机而言，这两股束流就是正电子束与负电子束。对撞机有四个基本参数，它们是粒子能量、束流强度、亮度和束流寿命，前二者较易理解。下面介绍亮度和束流寿命。

对撞机的亮度

当两束束流对撞时，束流中的粒子可能产生对撞，从而产生基本粒子的反应事例，通过对这些反应事例的观测、分析，可以了解到基本粒子的性质及其运动规律。设每秒内产生 N 个反应事例，粒子的反应截面为 σ 厘米 2 ，则对撞机的亮度 \mathcal{L} 为

$$\mathcal{L} = \frac{N}{\sigma} \frac{1}{\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}}$$

亮度越大，每秒钟内产生的反应事例越多，所以亮度的大小是衡量一台对撞机好坏的重要参数之一。通常每秒内产生的反应事例数 N 为几个、十几个，顶多是几十个， σ 大约为 10^{-30} 厘米 2 ，所以亮度 \mathcal{L} 大约为 $10^{31}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ 。

在对撞机中，要使粒子发生对撞是十分困难的。例如，若在一个束团中有一千亿个粒子，每秒内束团与束团对撞一百万次，产生十个事例，那么每次束团对撞中，每个粒子产生对撞的几率为一亿亿分之一，这个几率实在太小了。为了提高对撞机的亮度，人们想出了各式各样的方法，采用低 β 节或小 β 节就是最有效的方法之一。

对每一台对撞机而言，只有在某一个特定能量下其亮度最大，偏离这个特定能量时，亮度将大大地降低。因此每一台对撞机所覆盖的能量范围是十分有限的。这就意味着高能量的对撞机的存在并不妨碍低能量对撞机的建造。

低 β 节与小 β 节

采用低 β 节或小 β 节是提高对撞机亮度的有效方法。什么是低 β 节？这还要从什么是 β 函数说起。

粒子在加速器中运动时，在水平与垂直两个方向上，粒子在理想轨道附近振动。描述横向振动振幅大小的函数叫 β 函数， β 函数小一些时，粒子的横向振动振幅也小一些，束团的横向尺寸也小一些，通常 β 值为几米、十几米、几十米或者更大的值。低 β 节就利用特制的、高精度、大孔径的四极磁铁，使得在对撞点处的 β 函数值变得较小，这就是所谓的低 β (low β) 节技术。更进一步，如果在对撞点附近再加上四极磁铁，这就可以使对撞点处的 β 值变得更小，小到水平方向的 β 值

仅 1—2 米，垂直方向的 β 值为几个厘米或十几个厘米，这就是所谓的小 β (mini β) 节技术。这样一来，在对撞点处束团的横截面的尺寸就可以变得十分小，从而加大粒子对撞的几率，也就提高了亮度。目前又有人提出微 β (micro β) 技术，即进一步减小对撞点的 β 函数值，提高对撞机亮度，但迄今尚未实现。

束流寿命

在对撞机中，束团不断地循环运动，对撞。由于种种原因，束团中的粒子数不断地减小，束流流强也就不断地减小，当束团中粒子数少到一定程度，再让束团在对撞机中循环、对撞，其意义已不大，这时就要重新注入粒子，使束团中粒子数再恢复到原来的情况，从而束团达到“复壮”，得到“新生”。这里就有一个按什么标准估算束流的寿命问题，通常采用如下方法来定义束流的寿命

$$(\text{束流寿命}) = \frac{(\text{束团中粒子总数})}{(\text{单位时间内粒子损失数})}.$$

按粒子损失的原因不同，可以定义出不同的束流寿命。由于种种困难，严格地算出束流的寿命十分难，通常按经验采取一些措施，以保证束流寿命足够长。但也不宜于要求束流寿命过长，否则将导致对撞机的造价大大地提高。通常只要求束流寿命达 5—20 小时即可。那么通常有那几种影响束流寿命的因素呢？通常要考虑的因素有 5 个，即

(1) 束流残余气体寿命 由于在真空室内有残余气体，当束流中的粒子与残余气体分子或与残余气体离解后离子、电子相互作用时，可能导致束流中粒子的损失。真空室内真空度越高，这种损失就越小，因此束流寿命也就长一些。通常要求真空室内的气压在有束流时达到 10^{-9} 托以下，束流的残余气体寿命就可长达几十个小时以上。

(2) 束流的横向运动量子寿命 由于同步辐射的激发作用，使束团中粒子的分布律近似于正态分布律，即束团中心部分粒子多一些，离束团中心越远的地方粒子密度也越小，这样真空室孔径做得大一些，粒子损失也就小一些。根据经验，选取

$$(\text{真空室半孔径}) = 10 \times (\text{束团的半横向尺寸})$$

+ (由于磁场、安装等误差带来的影响)

就可以使束流的横向运动量子寿命达到几十个小时。

(3) 束流的纵向运动量子寿命 束团中粒子的能量分布律也是近似于正态分布律。为了减小粒子损失，通常采取适当地提高高频电压的峰值这一方法，通常选取高频电压峰值满足

$$\frac{(\text{粒子的电量}) \times (\text{高频电压峰值})}{(\text{粒子在对撞机内走一圈辐射的能量})} \geq 2.5.$$

这是一个经验结果。当然高频电压峰值高一些时，粒子的损失率也小一些，但对撞机的造价也高一些。因此高频电压的峰值只能适当的高。

(4) 束流的托奇克寿命 在同一束团中不同的粒子彼此相互作用，使某些粒子能量偏差加大，从而导致部分粒子损失，这一物理机制首先由托奇克提出，因此由于这种损失而导出的寿命叫托奇克寿命。在粒子能量在 10 亿电子伏左右时，托奇克寿命是短的，当粒子能量高于 10 亿电子伏时，托奇克寿命常常是较长的。

(5) 束流的轫致辐射寿命 当两个束团相碰时，

一个束团中的粒子受到另一个束团中的电磁场作用而发生偏转，从而这个粒子的能量有所损失，能量偏差加大，因此导致部分粒子损失，由这种损失而导出的寿命叫轫致辐射寿命。

实际上，上述五种作用同时存在，因此总寿命由下式求出：

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\text{总寿命})} &= \frac{1}{(\text{残余气体寿命})} + \frac{1}{(\text{托奇克寿命})} \\ &+ \frac{1}{(\text{横向运动量子寿命})} + \frac{1}{(\text{纵向运动量子寿命})} \\ &+ \frac{1}{(\text{轫致辐射寿命})}. \end{aligned}$$