

## 实验室系和质心系

**实验室系：**在 高能物理实验中，如果高能粒子打静止靶，靶和观测者相对于实验室是静止的（事实上观测者走动的速度相对于高能粒子速度来说是极小的，

入射粒子  $\xrightarrow{\text{高速度}}$  静止  
• 靶粒子



可以忽略不计)，那末，这个观测者测量粒子速度、动量和能量所用的坐标系就叫做实验室系，他测出来的各个粒子的速度、动量和能量叫实验室系的速度、动量和能量。

**质心系：**如果靶粒子对于观测者不是静止，而且对于这个观测者来说，入射粒子由西而东，靶粒子由东而西，它们的动量大小相等，方向相反，正好能够互相抵消，那末，这个观测者测量粒子速度、动量和能量（指入射粒子、靶粒子和它们反应后产生的各个粒子的速度、动量和能量）所用的坐标系叫做质心系，他测出来的各个粒子的速度、动量和能量叫质心系的、动量和能量。

在对撞机中，如果两束对撞的粒子的动量正好大小相等，方向相反，那末，这时相对于实验室为静止的观测者在测量对撞机中各个粒子的速度、动量和能量时所用的坐标系，恰好就是质心系。

入射粒子  $\xrightarrow{\text{高速度}}$  对撞  $\xleftarrow{\text{高速度}}$  靶粒子



**实验室系和质心系之间的关系：**两个有相对速度的观测者，同时观测两个相互碰撞的粒子，他们所测量出来的速度、动量、能量是不一样的。假定观测者 A 同其中的一个粒子相对静止，这个粒子对 A 来说就是靶粒子（对 A 来说是静止的）；另一个粒子则高速飞行，这个粒子对 A 来说是入射粒子，假定它的飞行方向由西而东。还有一个观测者 B，他相对于观测者 A 也有一个由西而东的速度。在 B 看来，靶粒子就不是静止的了，而是有一个由东而西的速度，与此相伴，靶粒子还有一个由东而西的动量。B 看到的 A 也不是静止的，而是和靶粒子一起自东而西地飞行。另外，假设 B 相对于 A 的速度比较小，所以 B 看到的人射粒子仍是由

西而东飞行。设想 B 相对于 A 的速度逐渐增加，那末，B 看到的靶粒子由东而西的速度和动量也会逐渐增加；同时，B 看到的人射粒子的由西而东的速度和动量则逐渐减小。当 B 相对于 A 的速度增大到一定程度，他测得的靶粒子（由东而西）的动量和入射粒子（由西而东）的动量就会大小相等，方向相反（如果入射粒子和靶粒子是相同的粒子，那末测出来的速度也大小相等，方向相反）。按照刚才所说，A 测出来的动量、能量就是实验室系的动量、能量；B 测出来的动量、能量就是质心系的动量、能量。这里应该注意一点：两个粒子碰撞是一个客观存在的事实，实验室系和质心系则是对这同一个客观事实的不同方式的描述。

按照狭义相对论，高能情况下实验室系能量和质心系能量之间有如下的近似关系（ $\approx$ 表示近似相等）：

$$\text{实验室系入射粒子能量} \approx \frac{\text{质心系各粒子能量之和}}{2 \times \text{实验室系靶粒子质量} \times (\text{光速})^2}$$

假定说，B 看到两个质子相撞，它们的动量大小相等，方向相反，恰好抵消；而且每个质子的能量为 100 亿电子伏，两个质子能量相加是 200 亿电子伏。刚才说过，B 测得的是质心系动量、能量，所以（质心系各粒子能量之和） $^2 = (200 \text{ 亿电子伏})^2$ 。同时，A 测得的是实验室系的动量、能量。在实验室系，靶粒子现在是质子，质子静止质量  $\times (\text{光速})^2 \approx 10 \text{ 亿电子伏}$ 。于是代入上面的公式得到 A 测得的人射质子的能量（就是实验室系入射粒子能量）应是：

$$\begin{aligned} \text{实验室系入射质子能量} &\approx \frac{(200 \text{ 亿电子伏})^2}{2 \times 10 \text{ 亿电子伏}} \\ &= 2000 \text{ 亿电子伏} \end{aligned}$$

但是，A 看到的过程和 B 看到的过程是同一个客观的物理过程，所以两个 100 亿电子伏的质子对撞，和一个 2000 亿电子伏的高能质子打静止靶中的质子是等价的。也就是说，对撞机中 100 亿电子伏的质子与 100 亿电子伏的质子相撞，其效果等价于用 2000 亿电子伏的高能加速器加速出来的质子去打静止靶中的质子。请读者用上面的公式检验一下。

**静止质量与运动质量：**按照狭义相对论，粒子运动时的质量大于粒子静止时的质量，两者之间有如下的关系：

$$\text{粒子运动时的质量} = \frac{\text{粒子静止时的质量}}{\sqrt{1 - \frac{(\text{粒子运动速度})^2}{(\text{光速})^2}}}$$

它说明粒子静止时的质量最小，粒子速度越是接近光速，其质量也越大。

