

什么叫对撞机?

方 守 贤

我们已知道加速器是一种能把带电粒子加速到高能量的机器。那么,什么叫对撞机呢?顾名思义对撞机是一种能使高能带电粒子在其中发生相对撞的机器。但是,近几年发展起来的对撞机,除了能使两束高能量的带电粒子发生对撞而引起相互作用外,还兼有积累脉冲粒子束团以增大流强和加速粒子的作用。它是在高能加速器的基础上发展起来的一种更为复杂更为先进的机器。下面作一简单介绍。

一、为什么要对撞

在对撞机建成之前,人们进行高能物理实验,是利用加速器加速出来的粒子去轰击实验室中的静止靶。在这种情况下,高能粒子的能量里只有一小部分对于发生相互作用是有效的,人们把这部分对相互作用有效的能量叫做有效作用能。高速运动粒子的能量越高,打静止靶的有效作用能所占的比例就越小,效率也越低。而使两个高速反方向运动的粒子发生相互碰撞时,其有效作用能则高得多。例如:两个能量为 300 亿电子伏的质子相互碰撞,它所产生的某些效果约与一个 18000 亿电子伏的质子与静止质子相互作用相同。尤其是电子的静止质量要比质子小得多,效果更显著。例如:两个 200 亿电子伏的电子相互碰撞就能得到 16,000,000 亿电子伏的高能电子与静止电子相互作用的相同效果!根据目前加速器技术所达到的水平及投资可能来看,建造一台 16,000,000 亿电子伏的加速器简直是不可思议的事。但是如果目前要建造能量为 200 亿电子伏的对撞机则技术上是完全可行的。因此,目前许多高能加速器还不能进行的超高能实验,可以用对撞机来进行。这便是最近十年来对撞机得到普遍重视的主要原因。

二、对撞机有三大机能

大体上说,对撞机和环形同步加速器是极为相似的,它也有庞大的磁铁系统,高频加速系统,真空系统以及探测及校正系统等。此外,它还有两个或两个以上专供对撞用的特殊的长直线节。如果要使电荷相反、静止质量相同的两束粒子相撞,就比较简单,只要建立一个环就行了(图一)。如果是电荷相同的同种粒子相碰,如:质子对质子、电子对电子等,就必须建两个环。两个环的外加磁场方向相反。这两个环可以建在同一平面中,使其在几个交叉的地方进行对撞(图二);

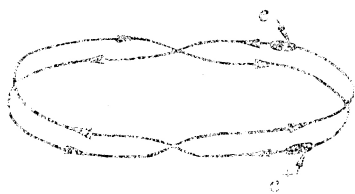


图 一

也可以建立在上下两个不同平面中,采用特殊的电磁场形态,使其在直线节内相撞。由此可见,对撞机的电磁场形态要比同步加速器复杂得多。此外,高能量的对撞机还需要用一台高能加速器(一般都是用同步加速器)作为注入器。先把粒子加速到预定的能量,再注入到对撞机主体中去进一步加速、对撞。所以说,对撞机不但在技术上是同步加速器的发展,而且它还必须要用同步加速器作为它的注入器。因此它是离不开同步加速器的。

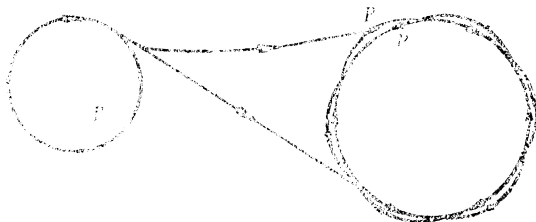


图 二

对撞机有三个主要的机能,即:积累脉冲粒子束团以增强束流,加速粒子和储存对撞。现分述如下:

(一) 积累作用

大家知道,用一束高能粒子轰击静止靶,靶所含的核子密度是很高的(每立方厘米约为 10^{23} — 10^{24} 个),所以,即使轰击靶的高能粒子束强度较低,高能粒子与靶中的静止核子发生相互作用的几率仍然是很大的。但是用两束高能粒子对撞就不一样了。如果两束粒子的流强与目前高能加速器的水平差不多,那么,粒子之间发生相互作用的几率就太小了,小到使物理仪器不能进行测量。由此可见要想用对撞机作高能实验,对撞的两束粒子流都必须足够强才行。以求保证对撞区域的粒子密度足够大,所引起的物理反应次数足够多,例如每秒每立方厘米至少有一个以上的事例发生,使物理仪器能够进行最低限度的测量。不仅如此,还必须保证束流与束流相撞的作用几率大大超过束流与残余气体相碰的作用几率。目前高能加速器的单束流强是远不能满足这些要求的。这就需要把高能加速器不同时间加速出来的脉冲粒子束团积累在对撞机的环形真空室中,一般需要积累几十个或上百个束团,才能达到上面所要求的强度,实现对撞。

为了便于进行积累,对撞机必需有一个能量相当高的加速器作为它的注入器。

（二）加速作用

随着加速器技术的进展，近期设计的对撞机均兼有加速的作用。也就是说，对撞机还可以将注入的高能粒子进一步加速到更高的能量。对撞机的这一作用与普通的同步加速器完全一样：粒子的能量是由安置在直线节内的高频加速腔供给的；在整个加速过程中，对撞机的磁场逐渐上升；高频腔的频率也被严格地控制得与被加速粒子的绕圈频率一样。这样，使粒子不断地加速到更高能量。

（三）储存对撞作用

当粒子被加速到一定能量之后，对撞机的磁场就被维持在相应的恒定值上，粒子束就在环形真空室中不断地迴旋，并在对撞区域内两束发生对撞。这时布置在对撞区周围的物理实验仪器，就可对碰撞时发生的事例不断地进行探测。显然，这两股对头碰的束流并不是只碰一次就完了，剩下的没有起反应的粒子将继续留在环里作迴旋运动，也就是说被储存在环里，等到下一圈到达对撞区时再度发生碰撞，一直到束流的强度降低到不能再作物理实验为止，这时两股束流的寿命也就中止了。一般说来，束流的寿命可达几小时或几十小时之久！所以作为注入器的高能加速器只有在积累过程中才把粒子束流提供给对撞机，而在对撞的几十小时过程中，还可以随时把高能加速器的束流引出来作轰击静止靶的物理实验。

增加双束的流强当然可以增加对撞的几率，但是在一定的流强下是否还有其他方法来增加对撞的几率呢？比较有效的办法就是设法改善对撞区域粒子的聚焦系统，使粒子发生对撞时被聚集在一个很小的截面中，这样由于粒子束的密度的增加，对撞的几率也就相应增加了。

三、几种典型对撞机的介绍

（一）质子——质子对撞机

这类对撞机除了需要一台能量较高的（例如大于50亿电子伏）质子同步加速器作为注入器外，还需要建立两个较大的环，分别储存两束相反方向迴旋的质子束以进行对撞，所以它的规模相当庞大，技术也复杂，投资高昂。目前世界上已建成的这类对撞机只有一台，两束能量各为280亿电子伏的质子对撞。这台在瑞士日内瓦欧洲原子核研究中心。

质子对撞机在很长的储存对撞过程中，磁场是维持在最大值上恒定不变的。磁铁通常需要消耗的电能是很大的。所以目前新设计中的质子——质子对撞机均采用超导磁体，以便节省电能。

（二）电子——正电子对撞机

由于电子、正电子电荷相反，所以这种对撞机只要建立一个环就可以了。另外，由于电子和正电子迴旋时有一种辐射的特性，便于积累。所以，这种对撞机不

要求能量太高的注入器，它的规模比质子——质子对撞机小得多，造价也较便宜，目前世界上已建成的对撞机大部分是属于这一类的。

但是，由于电子迴旋时产生辐射特性，就是电子在作迴旋运动时会将它的一部分能量沿切线方向辐射出去，给电子能量的进一步提高带来一定的困难。为了减少这种辐射损失，一般高能电子对撞机均采用大半径（即采用只有几千高斯的低磁场来控制电子的迴旋运动）。即使如此，目前电子对撞机的最高能量仍受到很大的限制。例如，100亿电子伏的电子在曲率半径为100米的对撞机中运动时，每圈的辐射损失约为10兆电子伏。如果对撞机中的迴旋电流为1安培，要补偿这束电子流的辐射损失就需要平均功率为10兆瓦的高频功率。假如正电子流也为1安培，则总的平均功率为20兆瓦。目前正在设计的最大的电子——正电子对撞机的能量约为200亿电子伏+200亿电子伏。

事物总是一分为二的。辐射特性虽然给电子能量的提高带来了一定的困难。但是同时也有很大的好处，这是因为电子或正电子注入对撞机后，由于电子束迴旋时的辐射损失，使电子束的截面受到强烈的压缩，大部分电子都集中到一个较小的区域中去，这样，就可以不断地在环中进行积累，所以它不要求太高的人射能量，一般采用几百兆电子伏的直线加速器作注入器就可以了。

那么，正电子束是怎样得到的呢？是由能量为几十兆电子伏以上的电子束打靶后产生的。不过它的能量较低，必需把所得的正电子束再度注入到电子直线加速器中，与电子一起加速达到必要的能量。一般说来，正电子束的强度只及电子束的千分之一到万分之一，所以需要很长的时间才能积累到足够的强度。

（三）质子——反质子对撞机

质子与反质子的质量相同，电荷相反，也只需要造一个环就能进行对撞。这种对撞机发展得较晚，主要原因在于由高能质子束打靶产生的反质子束强度既弱，性能又差，角散度、能散度都很大。绝大部分反质子注入到环形真空室中去后，将会因为横向振荡振幅太大而在真空室壁上损失掉，留下的只是极少极少的一小部分，以致无法积累到足够的强度与质子对碰。直到去年，由于一种新的电子“冷却”技术的成功，这种对撞机才被开始认真考虑。（详见本刊1977年第2期《加速器粒子流的“冷却”技术》一文）

（四）电子——质子对撞机

这种对撞机的主要困难在于电子束的横截面很小，约为几分之一毫米，而质子束的横截面较大，约为一个厘米左右，前者比较密集，后者比较疏松，两者相碰时，犹如一根针与一团棉花一样，相碰的部分太少，作用几率也极小。也许今后“冷却”技术被采用后，质子束进一步被压缩，这种对撞机将成为现实。

另外,电子与质子的电荷虽然相反,但质量相差甚大,电子又有强烈的辐射,所以也必须建造两个环,一个采用常规磁铁,磁场值仅几千高斯,以储存电子;另一个则采用磁场值为四万高斯的超导磁体,以储存质子,两个环的半径相同,被安置在同一隧道中。

显然,储存电子的环还可以用来进行电子——正电子对撞,所以有时候又称这类对撞机为正电子——电子——质子对撞机。

四、对撞机能不能代替超高能加速器

从上面的简单介绍中可以看出对撞机是目前达到更高能量的一种比较经济而有效的装置,但是,是不是因此就不需要再建更高能量的高能同步加速器了呢?回答是否定的。这是因为:第一,对撞机只能在某些实验(例如稳定粒子之间的碰撞)上与一个很高能量的高能加速器加速出来的束流轰击静止靶的效果相同,而在另一些实验上就不行了。例如,如要用高能粒子产生的次级粒子来作实验,那么对撞机就无能为力了。第二,对撞机的种类也比较单调,只限于上面介绍过的

几种,也使物理实验受到一定的限制。第三,实验又被限制在对撞区附近狭小的空间内进行,实验仪器安排不开。所以,对撞机适于做一些探索性工作,而大量的定量的工作还有待于建立更高能量的加速器。打个比方来说,用对撞机做对撞实验好比是探矿,而用高能加速器打静止靶则好比是采矿。总之,对撞机只是高能加速器的补充而不是代替。

对撞机虽然比达到相同有效作用能的超高能加速器便宜得多,但从其绝对值来说,造价仍然不低,而且技术又比加速器来得复杂,所以对撞机的发展受到了一定限制。这也说明,要想达到更高的能量,不能光指望对撞机,还必需在加速器的原理上来一个根本性的改革。最近几十年来,已经有了不少新的设想,虽然要实现这些原理,无论在理论上或在技术上都还要作极大的努力,但我们深信,人类加速粒子的能力是无限的。随着人们不断地实践,不断地总结经验,在超高能加速器的领域里,也必然会不断地有所发现,有所发明,有所创造,有所前进,把粒子的能量加速到更高的阶梯,为进一步探索物质构造的秘密提供更加有力的“炮弹”。