

加速器粒子流的『冷却』技术

徐建铭

在一束粒子流里面，包含有很多个粒子。这些粒子并不是都在同一条轨道上，以同一个速度运动。大多数粒子相对于设计的轨道有一定偏离，还有一定散角，通常就说这束粒子流有一定的横向发散度，或简称发散度。另外，各个粒子的能量也不完全一样，相对于平均能量有一定分散，通常叫做这束粒子流的能散度。粒子流有一定的发散度和能散度，就意味着各个粒子相对于它们的平均速度还作不规则的运动。一束粒子流的发散度和能散度越大，这种不规则运动的动能越大。我们常借用热学中温度的概念，说这束粒子的“温度”比较高。反之如果我们设法减小粒子流发散度和能散度，也就是减少

各粒子相对于它们的平均速度的不规则运动，就可以说我们把粒子流的温度降低，也就是“冷却”。

由于粒子流有一定发散度，它就有一定大小的截面。粒子流如在磁场里运动，粒子流的能散度还会使它的截面进一步加大。这是由于不同能量的粒子在磁场里运动的轨道半径也不同的缘故。一定强度的粒子流，如果发散度和能散度大，束流截面就大，粒子密度就稀。加速器能接收进来并进行加速的粒子流的截面是一定的。进来的粒子流越稀，加速器加速出来的粒子流就越弱。对撞机是使两束相对运动的粒子流进行对撞的装置。在对撞机里，两束粒子流的密度越大，粒子发生碰撞的机会（通常称为对撞机的亮度）也越大，得到的物理实验结果就越多。所以，降低粒子流的“温度”，提高粒子流密度，就有可能提高加速器的束流强度和对撞机的亮度。

加速器技术开始发展以来，人们就不断地改善离子源的性能，使它能发射出密度大的粒子流。同时，还改善加速和传输粒子的设备，使得在加速及传输过程中不要引起粒子流密度的减弱。几十年来，在这些方面已取得很大进展。但是，人们并不满足于已有的成

绩,希望探索其他提高粒子流密度的方法。特别是近年来,随着高能物理和加速器技术的发展,开始研究建造“次级”粒子(如反质子)的加速储存设备。“次级”粒子是利用加速器加速出来的高能粒子(如质子)和物质相互作用产生的。目前条件下,“次级”粒子流的发散度和能散度很大,粒子流密度很稀,如不加以“冷却”,很难加速出足够强的高能“次级”粒子流。十年以前,就开始提出“冷却”粒子流的设想,经过多年的实验研究,最近才获得初步实验结果。目前正在研究的“冷却”方法有两种,即电子“冷却”和随机“冷却”。

电子“冷却”是利用电子流来“冷却”质子、反质子或其他重离子流。电子流的平均速度和被“冷却”的粒子流的平均速度相同。电子流的能散度和发散度要很低,或者说它的温度很低。温度低的电子流射入温度高的被“冷却”粒子流(如质子流)以后,通过粒子与电子间的碰撞作用,把粒子相对于它们的平均速度的不规则运动的那部分动能,逐步传递给电子,降低了粒子流的温度。也就是减少了粒子流的发散度和能散度,使粒子流密度得以提高。在粒子流被“冷却”的同时,电子流的温度则提高了,它的发散度和能散度都变大一些。这和一股冷气吹入一股热气,热气体被冷却,而冷气体被加温的情况很相似。这一技术已于1976年在一个质子储存环上取得初步实验结果。

实验装置的主体近似于四方形,四个角上各有一块偏转磁铁。这磁铁能把质子偏转 90° ,质子在磁铁里沿着3米半径的圆弧轨道运动。两偏转磁铁之间是7.1米的直线段,构成四方形的四个边。在一个直线段上,把电子流入射进去,电子流和在这个储存环里回旋的质子流一同前进,进行电子冷却。电子和质子的速度相同,质子能量是65兆电子伏,电子能量是35千电子伏。这样选择质子和电子的能量,是为了使得它们的速度相同。实验表明,两种粒子的速度差应小于千分之一,才能发生“冷却”作用。由于电子和质子的动量相差很多,电子只能在那个直线段里和质子一同前进,不能在整个储存环里共同回旋。需要在那个直线段不断地入射电子流,以“冷却”质子流。电子流由特制的电子枪产生,以获得发散度和能散度很小,能量稳定的电子流。实验用的电子流密度是每平方厘米0.25安培。“冷却”之前,质子流直径约一厘米,流强为100微安。在这个装置里,通过电子“冷却”,在83毫秒以后,质子流截面直径减小到毫米以下。为了完成电子的入射、引出并约束电子运动,在进行电子“冷却”的直线段上,用螺旋状线圈产生一定强度的轴向磁场。由于质子动量远大于电子动量,这部分轴向磁场,对质子运动影响很小。电子“冷却”技术对低速度的粒子流“冷却”效果较好,适于“冷却”低能量的粒子流。粒子流在“冷却”环里经过“冷却”,减小粒子流截面以后,再入射到主加速器里去进行加速。这可以减小主加速器的截面尺

寸,从而降低造价,提高流强或对撞机的亮度。

随机“冷却”则适用于对撞机内储存的高能粒子流。“冷却”过程是,随时测量粒子流一个截面上的密度分布。根据测量结果,计算这个截面上的粒子流的重心。计算结果用来控制校正(或冷却)装置。校正装置就设在测量点后面不远,校正装置的电场给粒子流以推力。推力的大小和方向是使重心恢复到理想轨道上面去。粒子相对于它们的平均速度的运动是不规则的,电场的推力,对有些粒子的作用是减弱其不规则运动。而对另外一些粒子作用则相反,会加剧其不规则运动。由于我们是根据该截面粒子流重心的位置来决定校正电场的大小和方向,所以运动情况得到改善的粒子会多一些。这样,长时间进行下去,会使整个粒子流截面逐渐减小,受到“冷却”。在西欧原子核研究中心的质子对撞机上,进行了随机“冷却”的实验。对强度低的质子流(回旋电流5毫安)，“冷却”速率约每小时10%。“冷却”速率反比于粒子流强度,所以对强粒子流,“冷却”速率还要低。这种“冷却”方法的“冷却”速率远远低于电子“冷却”,但适用于高能粒子流。可用来“冷却”对撞机里储存的高能粒子流,以保持粒子流已达到的密度,不致稀释,维持对撞机的亮度,延长粒子流储存的时间。

还应指出的是,“冷却”粒子流以缩小粒子流截面,和采用强聚焦系统缩小粒子流截面,二者并不相同。强聚焦系统并不能减少粒子流已有的发散度和能散度,只是靠较强的聚焦力,约束粒子的运动,使它们不致偏离太远。而“冷却”方法则是减小粒子流的发散度和能散度,改善粒子流的品质,两种方法有本质区别。“冷却”技术只用于质子、反质子以及其他更重的粒子,因为电子和正电子这些比较轻的粒子,当能量大于数百兆电子伏以后,在环形加速器或储存环里,做圆周运动所辐射的能量,对它们本身已能起到足够的“冷却”作用,无须再用其他方法进行“冷却”。

这两种“冷却”粒子流的方法,目前只获得初步实验结果,还有进行研究改进的广阔前景。今后,“冷却”技术在质子、反质子或其他更重粒子的加速器、对撞机的建造中,必将起重要的作用。但是,对一定强度的粒子流,也不是能通过“冷却”技术,把它的截面无限限制缩小下去。因为,一方面受到“冷却”技术本身的限制。另外,加速器和对撞机在一定条件下,也只能接收一定密度的粒子流。过强过密的粒子流,由于粒子之间的电磁作用,以及强粒子流与加速器部件(如真空室,加速腔)间的相互作用,会使粒子的运动不稳定,导致粒子流截面扩大,增大粒子流的损失。但是,粒子流“冷却”是加速器技术的一种新发展,前景是颇有希望的。