



高能质子加速器

魏开煜

高能加速器是利用电磁场的作用力，把带电粒子加速到极高能量的机器，是进行高能物理研究必不可少的重型实验设备。可以说，近年来高能物理方面的每一重大发现，几乎都是与高能加速器的进一步发展分不开的。

高能加速器所加速的粒子目前主要有质子和电子两种；从加速器的外形来看，有直线型和环型两种；从聚焦方式来看，有强聚焦和弱聚焦两种；从轰击粒子的方式来分，也有两种：打静止靶和对撞。这里只介绍打静止靶的强聚焦高能质子加速器。

高能质子加速器一般是由四台加速器组合成的庞大而复杂的机器。这四台加速器是：高压倍加器、质子直线加速器、增强器和主加速器。也有不用增强器，由直线加速器直接注入到主加速器的。这种组合，直线加速器的能量要增高。各加速器之间由输运系统输送质子流（图1）。

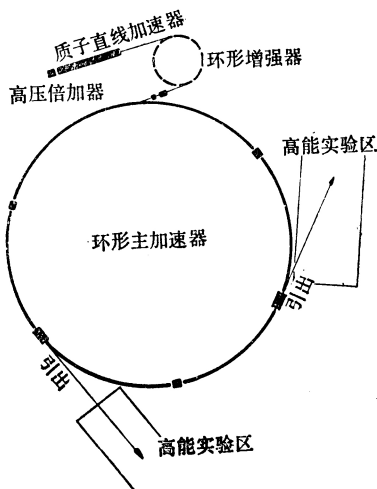


图1. 高能质子加速器总体布局示意图

高能质子加速器是怎样工作的，怎样产生出强大的高能质子流的呢？

在高压倍加器大厅里

在高压倍加器大厅里，高高的绝缘支架上平躺着

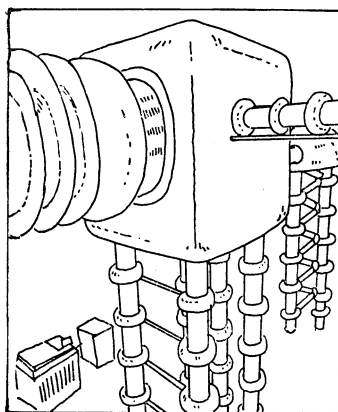


图2. 高压倍加器一角

一个光亮的高压电极，里面装着一个强流离子源。紧接在离子源的后面平放着一个圆柱形的加速管（图2）。沿着圆柱的轴线是一条细细的孔道，与离子源出口相通。真空泵把孔道中的残余气体不断地抽出去，好让质子流在孔道中畅行无阻。引人注目的是高压电极的另一侧，几根高达数米的擎天柱戴着一顶闪光耀眼的大铝帽，这是高压发生器的高压塔。高压发生器通过变频、调制、整流和多级倍压，把普通的交流电压变成直流高电压，再把塔上的高电压接在加速管上，这样就在加速管的孔道中建立起高梯度的直流电场。

高压倍加器开始工作时，氢气进入离子源的放电室，放电室开始放电，随着电弧的闪光，氢原子中的电子被剥掉，剩下的氢原子核就是质子。通过引出电极，把质子从离子源中拉出来。假如说，高压倍加器所产生的质子流的脉冲强度可达到200至300毫安，每个工作脉冲质子流的持续时间为100微秒，那么每个脉冲中质子的数目就有一百二十万亿至一百八十万亿个。这些质子形成一股连续的强大的质子流，浩浩荡荡地通过加速管的孔道，受到强大的电场作用，不断地增加能量，速度也越跑越快，在加速管的出口处，每个质子的能量达到几十万电子伏，前进的速度相当每秒飞行一万多公里。

质子流出了高压倍加器后，经过由一系列四极磁

透镜和若干个聚束器构成的低能输运系统。在这里，大约有三分之一不沿轴向飞行的质子丢掉。剩下的质子流经过压缩、切成许多个小段，最后在直线加速器入口处聚成一个一个的质子团。每个脉冲的质子流大约可以聚成2万个这样的质子团，每个质子团中大约有40亿至60亿个质子。各个质子团之间保持着相等的距离，一个接一个地飞入质子直线加速器的孔道。

质子在直线加速器中继续加速

质子直线加速器象一条钢铁巨龙，它的主体是由一些高频加速腔连接而成的。从高频发射机、磁铁电源和控制系统引来的纵横交错的电缆；还有循环冷却水管，都在主体的上侧连接到加速腔上。主体的下侧是一排高抽气速率的真空泵，保持加速腔内的真空度（要求 10^{-7} — 10^{-8} 毫米汞柱高）。

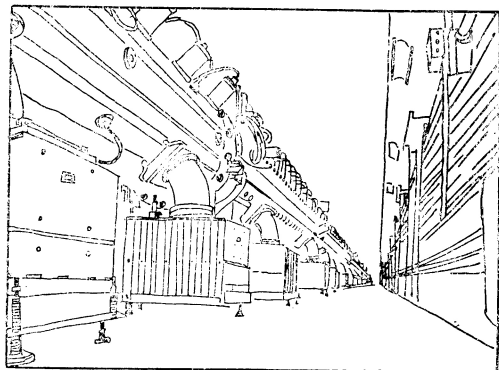


图3. 质子直线加速器

质子直线加速器的高频加速腔外壳是一个大圆筒，内壁附有无氧铜，内表面必须抛光到四划十以上的光洁度，象镜子一样光亮。在加速腔内由一系列支撑杆吊着一排小圆筒形的加速电极，这就叫漂移管。为了对质子聚焦，每个漂移管内还安装着一个四极磁透镜（图4）。相邻两个漂移管之间的缝隙叫做加速间隙。

直线加速器是怎样进行加速的呢？高频发射机把强大的高频功率输送到加速腔内，腔中就建立起强大的高频电场，主要都集中在加速间隙中，它的大小和方向随着高频频率很快地变化着，一会儿顺着质子团飞行的方向，一会儿又逆着质子团飞行的方向，一秒钟变化上亿次。漂移管就好象一个个防空洞，它里面没有电场，设计师们把漂移管和加速间隙的长度设计得非常巧妙，当电场顺着质子团飞行的方向时，一个个质子团正好都在加速间隙中，受到电场的加速作用；而当电场逆着质子团飞行的方向时，一个个质子团都躲进了漂移管，不会受到减速作用。这样，质子团每经过一个加速间隙就受到一次加速，经过上百个间隙，飞行速度就从每秒钟一万多公里加速到每秒十几万公里。

质子在漫长的加速旅途中飞行，并不是一帆风顺

的，很多因素都会使它们偏出孔道，撞到漂移管壁上损失掉。为了保护质子的安全飞行，四极磁透镜立下了功劳。每当质子偏离加速器的轴线时，四极磁透镜就以强大的交变聚焦力，把它们拉回来。然而，事情并不完全理想，每个质子团中仍然大约百分之三十的质子在途中不幸遇难。到了直线加速器出口时，每个质子团中只剩下大约30亿至40亿个质子。同时，由于质子通过加速间隙时有先有后，高频电场的大小也在很快变化着，各个质子每次获得的能量就不完全相同。因此，质子团在从直线加速器进入低中能输运系统的孔道后，除了由四极磁透镜继续保持横向聚焦外，由一个同聚束器作用相反的散束器把质子团中质子能量的差别削去。然后经过一个注入系统把它们注入到增强器去继续加速。

增强器快速运转

增强器是一个小环形加速器。它的主体是由一对对C形电磁铁构成的。每块电磁铁重好几吨，是由含碳量极低的硅钢片叠成的。它们的上、下两个双曲形磁极面相对于中心平面成一个倾斜角（如图5）。每对磁铁有一块的极面向环内倾斜，一块向环外倾斜，以分别产生一个向外和向内的磁场梯度，对飞行中的质子在横方向施加一个强大的交变聚焦力，保证它们在漫长的加速旅程中的安全。一个截面呈椭圆形的环形真空室从各C形磁铁的极面之间穿过。沿C形磁铁排列着真空泵，各对电磁铁之间距离相等，只在几个特定的地方留有较长的空隙，叫做“长直线节”。在长直线节中设有供加速质子用的高频加速腔。沿腔壁附有铁氧体环，使加速腔的谐振频率可以灵活地随着质子在增强器中转圈的频率跟踪调谐。高频发射机也是跟踪调谐的。另有两个遥遥相对的“长直线节”，一个装着注入偏转和凸轨磁铁，直线加速器送来的质子流，就从这里注入；另一个装着引出偏转磁铁，准备把加速到预定能量后的质子流引出增强器，送到中高能输运系统中去。

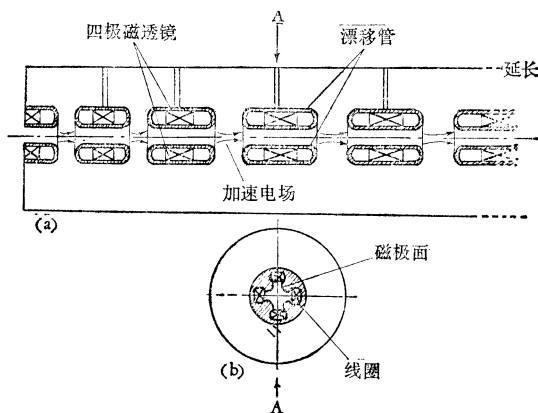


图4. 加速腔、漂移管、四极磁透镜位置示意图。
(a) 纵剖面，(b) 横剖面。

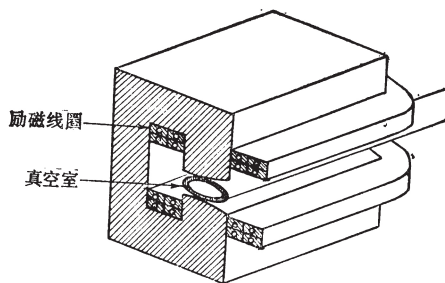


图5. C形二极磁铁轮廓图

增强器开始工作时,自动控制系统控制励磁电流,注入偏转和凸轨磁铁相互配合,把低中能输运系统送来的质子流一圈又一圈的连续地注进增强器,质子流在磁场的强制下,沿着真空室中间的环形轨道不停地飞行着,等到一个脉冲的质子流全部注入完,自控系统就命令高频发射机将强大的高频功率送进加速腔内,质子流就开始加速。这儿,一件非常不理想的事发生了:一大半质子流由于没有跟上高频加速相位而丢掉了,其余的质子流被高频电场分别聚集成几个新的质子团。这些质子团保持着相等距离在增强器的环形轨道上一圈又一圈地飞行,一次又一次地通过加速间隙不断提高能量,飞行速度越来越快,因而离心力也就越来越大。为了使质子团始终沿着原来的轨道转下去,自控系统在命令开动加速腔的同时,指挥励磁电流跟踪上升,使得轨道上平均磁场强度随着质子能量的增加而增强。同时,为使质子每次通过加速间隙时都在加速场的正半周,高频机和加速腔也进行频率跟踪调谐。这样,经过几十分之一秒的短时间的忙碌,质子团在增强器中大约转了几万圈,每个质子的能量就增加到上百亿电子伏,飞行速度已接近光速(每秒三十万公里)。这时,高频系统停止工作,磁场暂时保持在最高值。突然开动快速冲击磁铁,把质子团向外猛踢一脚,正好被引出偏转磁铁一把揪出增强器,推入中高能输运系统的孔道。就这样,增强器一批一批地加速质子流,一秒钟要加速几十批。

主加速器完成最后加速

主加速器是高能质子加速器的最后一级,也是最主要的一级。它是一个非常庞大的环形加速器。例如目前世界上最大的高能质子加速器(4000亿电子伏)的主环直径为两公里,周长达六公里之多。

主加速器的外形和增强器差不多,磁铁结构与增强器不同。它不是C形磁铁,而是把聚焦磁铁和强制质子团绕圈的弯转磁铁分开的“分离型”结构。弯转磁铁的截面为H形平面二极磁铁(见图6)。聚焦磁铁就是大的四极磁透镜。主加速器的磁铁系统主要是由这两种磁铁按一定规则交替排列而成的。磁铁总重量达上万吨。高频系统的结构和增强器的差不多,但采用

高倍数的倍频加速,一次可以同时加速更多的质子团。

主加速器开始工作时,自控系统也象增强器那样控制它的平均磁场,注入系统把中高能输运系统送来的质子团严格地按照预定时间一个一个地注入到主加速器的真空室。高频系统在一个恰当的时刻突然开动,把所有的质子团同时分别插入各自对应的相稳定区,并开始加速。这时磁场上升,高频系统也跟踪调频。这些质子团就在固定的环形轨道上一圈又一圈地进行加速。质子达到预定的能量后,高频系统停止工作,引出系统开始工作,冲击磁铁,把质子团一个一个的踢进引出偏转磁铁的孔道,经过高能输运系统,使它们向着饱含着“基本”粒子的靶轰去……

就这样,高能质子加速器一个加速循环接着一个加速循环,日以继夜地运转着,不断向高能实验室输送着强大的高能质子流。

目前,高能质子加速器在每一个加速循环中向高能实验室输送的高能质子数实际上已达到十万亿个左右,平均束流强度已超过0.3微安,它比同能量的宇宙线要强大亿亿倍以上。

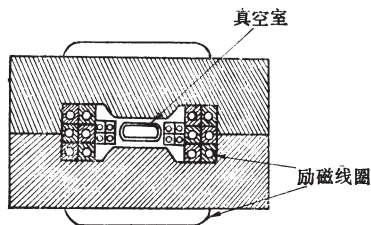


图6. H形二极磁铁横剖面