

加速带电粒子的机器

——加速器

徐建铭

加速器是用人工方法变革“基本”粒子的重要装置。加速器能量愈高，愈有利于探索微观世界物质结构的更深入的层次。所以，几十年来，随着人类对微观世界认识的不断深入，加速器的能量愈来愈高，而且不断采用新技术，探索新原理，近年的高能加速器，已成为一系列尖端科学技术的综合。

加速器技术是怎样发展起来的

十九世纪末，人们已开始对原子的内部结构进行研究。当时，人们是利用天然放射性物质放射出来的氦原子核(即 α 粒子)作为炮弹，去轰击氮原子核，使之转化为氧的原子核，这是1919年的事。之后，人们利用天然放射的氦原子核轰击多种原子核，来研究原子核的结构和变化规律。但是，天然放射性物质放射出来的粒子的种类有限，能量不高，数目也不够多，满足不了科学研究的要求。这就提出了建造用人工方法加速带电粒子的装置——加速器的要求。1920年，透视用的X光机已能把电子加速到20万电子伏。1932年，利用高(电)压加速器把质子加速到70万电子伏，并开始用人工加速的粒子进行科学实验。1939年左右，回旋加速器已能产生20兆电子伏的氘核。1942年利用感应加速器把电子加速到20兆电子伏。1946年，能把氘核加速到190兆电子伏的加速器建造成功，1952年利用同步加速器得到30亿电子伏的质子流。之后，加速器的能量逐步提高，大约每隔十年就提高十倍。到目前，利用加速器已能把质子加速到4000亿电子伏，能把电子加速到220亿电子伏。在更高能量的加速器建成的同时，加速器的其他性能，像粒子流强度，粒子能量均匀度等指标也都逐步提高。所加速的粒子种类也日益增多，开始只能加速电子、质子、氘核，目前已发展到能加速大部分元素的离子。现在被广泛应用的加速

器有二十多种，它们各有特色，各自满足某些特殊的需要。

加速器怎样加速带电粒子

人们早就发现摩擦起电的现象，两件东西例如玻璃棒和绸子，摩擦后就会带电，一个带正电，一个带负电。带电体在它的周围形成电场。在电场中，带电物体会受到作用力。加速器就是利用电场对电荷的作用力来加速带电粒子的。

在加速器中，带电粒子源当然是不可缺少的一部分，例如必须要有发射电子的电子枪，或产生离子(如质子、氘核)的离子源。另外还必须要产生加速电场的电源，以及保持真空的真空系统，使带电粒子在真空中被加速，免得碰撞气体的分子，损失能量。此外，还要有一些其他设备。目前已被采用的加速电场大致可分为三类。即：1. 利用高压电源来产生加速电场的高压加速器(像X光管、倍压加速器、静电加速器等)；2. 利用随时间变化的磁场所产生的感应电场来加速电子的电子感应加速器；3. 利用高频电场的谐振加速器(这类加速器的加速电场的频率要和粒子的运动保持谐振关系，才能够加速粒子。像直线加速器、回旋加速器、同步加速器等都属于这一类)。

高压加速器 图1是高压加速器的工作原理图。把高压电源的正极联在加速器的高压电极上，负极接地。高压电极到地连有加速管，里面保持真空。产生正离子的离子源放在高压电极里。正离子从离子源发射出来以后，受高压电极的排斥作用，沿加速管向地加速运动，能量逐渐增高。需要被轰击的东西叫靶，放在加速管末端。被加速的粒子的能量是由高压电源供给的。只要把电源的负极接到高压电极，高压电极里面放上电子枪或负离子源，就能加速电子或负离子。

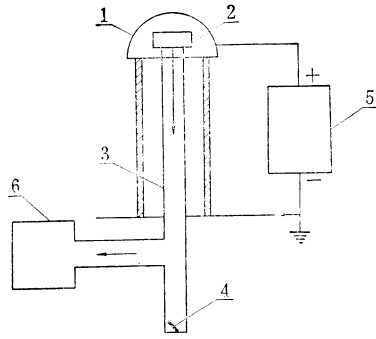


图1. 高压加速器工作原理图

- 1. 高压电极 2. 离子源 3. 加速管 4. 靶
- 5. 高压电源 6. 真空系统

高压加速器由于受高压电源电压的限制，所达到的能量不能太高，一般只有几十万到20兆电子伏左右。采用的高压电源有好多种，例如采用倍压整流电源的倍压加速器，采用静电起电机的静电加速器。此外，还有采用绝缘磁芯变压器、脉冲变压器等做电源的。这类加速器非常普遍，虽然能量比较低，但粒子流平均强度较高，常用做工农业生产辐照处理的射线源，也可用于低能核物理研究。

电子感应加速器 它的原理和变压器相仿。变压器初级线圈里通过交流电，铁芯里就产生交变磁通。交变磁通在它的周围产生感应电场，感应电场就在次级线圈里产生交变电压。在电子感应加速器中，则是用这个感应电场来加速电子。

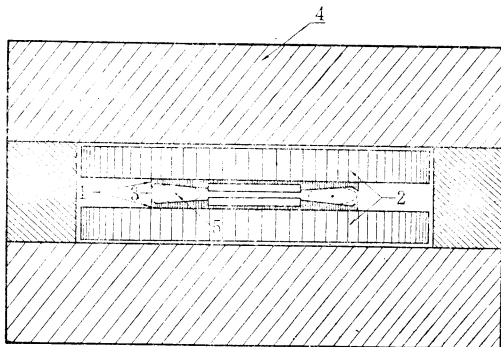


图2. 电子感应加速器原理图

- 1. 磁铁芯 2. 线圈 3. 真空室 4. 磁铁轭 5. 粒子轨道

图2是电子感应加速器的原理图。线圈里通以交流电，磁铁芯里就有交变磁通产生。交变磁通穿过环形真空室，在真空室里有感应电场产生，方向大致沿圆周方向。电子枪放在真空室边缘。电子枪发射的电子就被感应电场所加速。磁铁芯还使环形真空室里也分布有磁场，电子在磁场的作用下作圆周运动。受感应电场的加速作用，能量不断增大。磁铁芯产生的磁场也不

断增强，使得电子在加速过程中轨道半径不变。电子加速到最高能量，即可加以利用。图3是感应加速器真空室示意图。这种加速器不需要高压电源来产生加速电场，电子能量由产生感应电场的励磁电源供给。

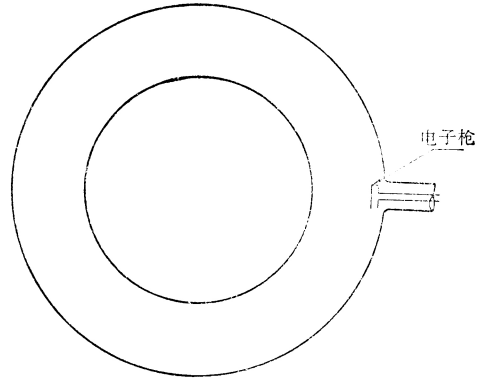


图3. 感应加速器真空室示意图

电子感应加速器适于把电子加速到较低能量，一般在数十兆电子伏以下。这种加速器结构简单，比较便宜，在治癌和工业探伤方面应用较广。

谐振加速器 要把粒子加速到更高能量，就要靠高频电场加速的谐振加速器。高频电场的强度和方向随时间迅速变化，如果不采取措施，带电粒子会忽而向前，忽而向后加速，不能很好地加速下去。必须使粒子的运动和电场变化情况保持一定关系，使得粒子只在一个方向上受加速作用，才能达到加速粒子的目的。这个关系就叫谐振关系。就好象荡秋千时，每当秋千向前荡时，轻轻地向前推它一下，秋千就会愈来愈高。这是因为推秋千的力和秋千的摆动发生谐振。谐振加速器按粒子在加速器中运动轨道的形状，又可分为两类：即直线加速器和圆形加速器。下面分别介绍这两类加速器。

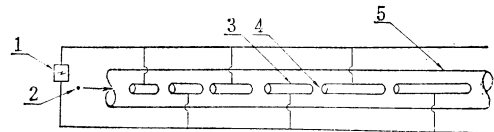


图4. 直线加速器工作原理图

- 1. 高频电源 2. 带电粒子 3. 漂移管 4. 加速间隙
- 5. 真空室

图4是直线加速器的工作原理图。在柱形真空室里装有金属圆筒，名叫漂移管。漂移管之间的间隙叫加速间隙，加速作用发生在这些间隙里。奇数漂移管和偶数漂移管分别接在高频电源的两个输出端。要加速的粒子从左端射进去。如正离子走出第一个漂移管时，恰好奇数漂移管为正电压，偶数漂移管为负电压，

则它受第一个漂移管的排斥和第二个漂移管的吸引，向右方加速。漂移管里面没有电场，粒子进入漂移管以后，不再受加速或减速作用。假如漂移管长度选择合适，粒子走出第二漂移管时，高频电压已变换了极性。奇数为负电压，偶数为正电压。则粒子在第二和第三漂移管间又受到加速。只要粒子走过相邻加速间隙所花的时间恰好等于高频电压的半周期，就能保证粒子每次通过加速间隙都受到加速。尽管每个加速间隙的加速电压不高，但经过很多个加速间隙，积少成多，就能把粒子加速到较高的能量。

直线加速器既能加速质子，也能加速电子及其他离子。最大的电子直线加速器已把电子加速到 220 亿电子伏。几个到十几个兆电子伏的低能电子直线加速器在治癌和工业探伤方面应用很广，也用作工农业辐照处理的射线源。质子直线加速器的能量为数十到数百兆电子伏。

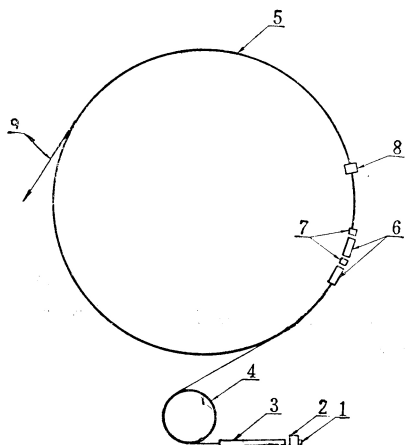


图 5. 质子同步加速器工作原理图

1. 离子源 2. 予注入器 3. 直线加速器 4. 增强器
5. 同步加速器 6. 弯转磁铁 7. 聚焦透镜 8. 高频加速站 9. 引出的高能粒子束

圆形加速器的工作原理和直线加速器相似，主要区别是利用磁场对带电粒子的作用力，使粒子在加速器里的运动轨道大致为圆形的。试以同步加速器为例来加以说明。图 5 就是同步加速器的工作原理图。沿着加速器的圆形轨道，按一定规律交替安放有弯转磁铁和聚焦透镜，图 5 中只画出一部分磁铁和透镜。环形真空室在磁铁和透镜的磁极间穿过，粒子在真空室里回旋加速。图 6 和图 7 分别为磁铁和透镜截面示意图。沿粒子轨道装有一个或几个高频加速站，用来加速粒子。粒子要先加速到一定能量以后，才能进入同步加速器进一步加速。图 5 所示的同步加速器中，质子的加速过程是：质子从离子源发射出来，进入予注入器初步加速到数十万电子伏。进入质子直线加速器，

图 6. 弯转磁铁截面示意图

1. 磁极
2. 线圈
3. 真空室

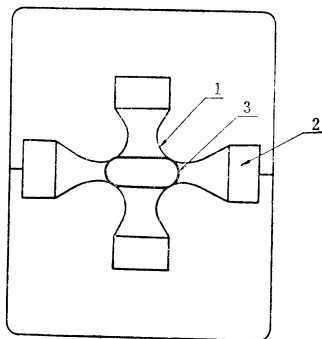
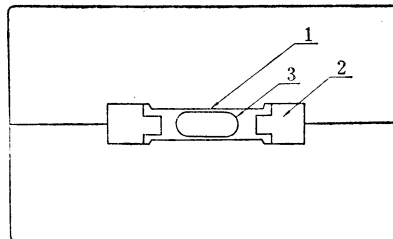


图 7. 聚焦透镜截面示意图

1. 磁极
2. 线圈
3. 真空室

再加速到数十或数百兆电子伏。从直线加速器出来，又进入增强器进一步加速到几亿或几十亿电子伏。最后才入射到主加速器加速到所需要的能量。（从这里也可以看出，现代高能加速器是一系列加速器的适当的组合。）

怎样保证粒子能够在大环中转很多很多圈而不碰壁呢？这是在设计加速器时必须考虑的问题。粒子进入同步加速器时，能量比较低，这时加速器的磁场也比较低。在加速过程中，粒子能量逐渐增高，磁场也必须相应地逐渐变强，使得在整个加速过程中，粒子能够沿大致为圆形的轨道运动。高频加速电场的频率也要随着粒子回旋频率的改变而调变，使得粒子能被谐振加速。

同步加速器是目前最通用的一种高能加速器类型，它的流强（每秒加速粒子数）不如直线加速器，但比较容易达到很高的能量，造价也比直线加速器要低。现在最大的同步加速器能把质子加速到 4000 亿电子伏。同步加速器也能用来加速电子或其他离子。

对撞机及新技术、新原理

六十年代以前，人们是用高能粒子轰击静止的粒子来进行高能物理研究的。但从日常生活经验中我们知道，两个相对运动物体对头碰撞的碰撞作用，比一个运动物体碰另一个静止物体的作用要大（假定运动速率相同）。在很高能量的情况下，上述现象尤为显著。例如，两束 300 亿电子伏的质子对头碰撞，其作用约相当于 20,000 亿电子伏的质子轰击静止质子。显然，从能量上来看，两束高能粒子对头碰比用一束高能粒子

轰击静止靶要有利得多。实现相对运动粒子对头碰的装置叫对撞机。目前,对撞机是进行“超高能”实验的主要装置。图 8 是一台对撞机的原理图。粒子先在同步加速器进行加速以后,入射到对撞机里。在对撞机里两束粒子以相反方向迴旋,在轨道交叉的地方相互碰撞。对撞机能进行质子与质子,质子与电子,电子与正电子,以及其他带电粒子之间的对撞。

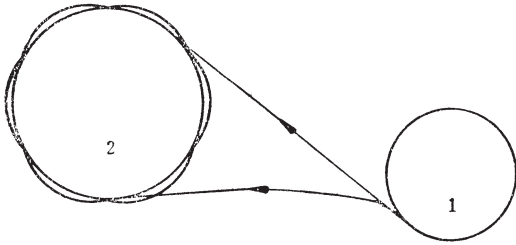


图 8. 一台对撞机的原理图
1.同步加速器 2.对撞机

近年来发展起来的计算机技术和自动化技术对加速器的改进起了很大作用。正在研究中的超导技术也将对加速器的发展起重大作用。超导技术在加速器上的应用主要有两个方面。用超导材料制造的线圈来产生加速器的磁场,即超导磁体;用超导材料制造产生高频加速电场的加速腔,即超导腔。采用超导技术,能以较低的功率消耗,获得较高的磁场和加速电场,缩小加速器尺寸,并且有可能减低费用,改善加速器的某些性能。

另外,也在研究利用其他形式的电场来加速带电粒子的新加速原理,像激光加速,集团加速,相干加速等。

加速器的用途

随着工农业和科学技术的发展,各种类型的加速器也发展起来。加速器不仅可用来研究原子、原子核、

“基本”粒子,作为可控制的、强度很强的辐射源,加速器在工业、农业、医疗卫生、国防及科学研究等方面应用也很广。例如:

在工业方面,可利用加速器产生的射线进行辐射合成、辐射聚合以生产性能好的产品。像聚乙烯经辐射处理以后,在 300℃ 高温仍能维持原有性能。未经处理的,135℃ 即已熔化。橡胶用辐射方法进行硫化,产品不易老化,抗磨性提高。在国防工业、重工业方面,加速器可用于对大型元件,厚金属原材料等进行透视探伤。

农业方面可用来进行辐射育种,提高产量。也可用来消灭粮仓里的害虫、虫卵。或用辐射处理来抑制某些农产品发芽,延长保存期。

在医疗卫生方面可用于透视诊断。加速器产生的某些粒子束可用来治疗癌症,等等。

加速器在其他科研领域里,像固体物理、化学、生物物理、爆炸物理等方面,以及原子堆工程、核武器等的研究设计等方面都是重要的研究设备之一。此外,由于研制加速器而发展的许多尖端技术,也逐步应用于其他生产领域。

解放以来,特别是无产阶级文化大革命和批林批孔运动以来,在毛主席无产阶级革命路线的指引下,我国加速器技术有了很大的发展。医用加速器、探伤和工业辐照以及科学研究需要的一些类型的加速器都迅速建成。我国加速器事业也和其他方面一样,“到处莺歌燕舞”,“旧貌变新颜”。我们相信,通过党的十一大,在无产阶级文化大革命中,在毛主席无产阶级革命路线的指引下,在党的基本路线的指引下,以阶级斗争为纲,坚持党的基本路线,开门办科研,实行工人、干部、技术人员三结合,大搞群众运动,我国的高能事业和加速器技术的发展,将会取得更大的胜利,为巩固无产阶级专政,为社会主义革命和社会主义建设做出新的贡献。