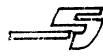
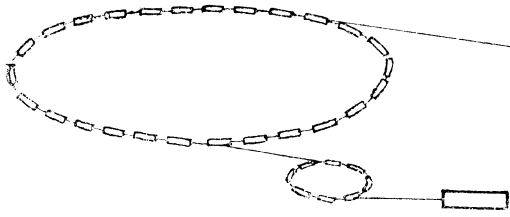


# 高能加速



# 现代科学技术



谢家麐

高能加速器是提供高能带电粒子，用以变革微观物质世界的实验装置。它是研究高能物理学不可缺少的工具。根据毛主席“一分为二”的哲学思想，物质结构应有无限层次。对物质结构的每深一层次的研究，都需要更高能量的加速器。加速器在性能上的每次重大改进，又都带来了“基本”粒子的新的发现和认识。目前高能加速器与空间技术等科学并列为“大科学”。大科学的出现，是现代科学技术成就的一个重要标志。高能加速器的研制，既是建筑在现代科学技术成就的基础之上，同时它的发展也促进了现代科学技术的前进步伐。

要探讨高能加速器与其它尖端科学技术的关系，有必要首先了解高能加速器本身的特征。我们都知道，首先它的规模是庞大的：加速器主环周长以公里计、造价以亿元计、使用的钢铁以万吨计、铜以千吨计、用电量达几十兆瓦等等。同时它的研制涉及到精密机械加工、高频、高压、真空、计算机、自控、低温、微波电子学、等离子体物理和许多新材料、新工艺等方面，综合性是很强的。另外，它的发展速度是极快的。加速器的能量增长率约为每十年提高一个数量级，从五十年代至今，能量已提高近千倍。但是，规模大、综合性强、发展快这些还都是表面现象，而内在的也是最主要的特征乃是它的技术要求的极端性。这是研制高能加速器遇到的最关键的问题。下面我们就从这个侧面来透视高能加速器与一些尖端科学技术的关系。

## (1) 强电场

高能加速器利用高频电场来加速带电粒子，电场愈强，加速本领愈大，这就提出了对高频强电场的要求。一般说来，这个场是在加速结构中的金属边界内产生的，当场强很高时，就会引起高频真空击穿和次级电子共振，这些现象决定于金属表面的物理、化学状态及真空环境等因素。在使用超导加速腔的情况，则除了有电场的限制之外，还有临界磁场的限制，即当腔表面的微波磁场超过一定限度时，超导性会突然消失。

这些对强场的限制因素，都是有待研究的课题。

目前的情况是：在使用金属腔的装置中，最高使用到1兆伏/厘米的平均场强。但是一般的使用值是远低于此的。为了摆脱金属边界引起的击穿限度，以提高可用的场强，有人进行了以等离子体为加速结构的研究。激光加速器每厘米长度可加速几十兆伏，这也是提高有效场强的一个可能的方向。

## (2) 高功率

为了在加速结构内产生强电场，需要有很大的高频功率来激励加速结构。这样，加速器就对高频大功率电子管提出了要求。在电子直线加速器上使用的大功率速调管，至今经过约卅年的研究改进，脉冲输出功率已达40兆瓦以上；再经过一个脉冲宽度与功率的转换装置，竟可产生140兆瓦的功率，对工作频率较低的质子直线加速器和同步加速器，也发展了一些栅控大功率管（三极管或四极管），有的脉冲功率也达10兆瓦之多。

在加速器中使用的电子管，不但要求功率高，寿命长，相位稳定度高，而且特别还要能经受极大的负载失配，这是因为它向高品质因数加速结构馈电的缘故。以上问题都是需要专门研究的。

最近发现使用一种加速器提供的强流相对论性电子束来产生微波，已能得到几千兆瓦的功率。虽然得到的脉冲宽度较短，但经过改进提高，有可能在加速器技术上起重要的作用。

## (3) 强磁场

高能加速器需要偏转及聚焦磁场来使带电粒子沿固定的环形轨道运动。磁场愈强，加速器尺寸愈小。这就提出了对具有严格的空间及时间变化规律的强磁场的要求。在时间变化较慢（即慢脉冲工作情况下）希望使用饱和值高的铁磁材料；而在时间变化较快（快脉冲）的情况，则希望选择涡流损耗低的材料。超导磁体磁场强度目前已可使用到5万高斯，它的采用一方面可使加速器尺寸变小；另一方面，也可能是更为重要的方面，就是大大节约了电力的消耗。因此，应用超导磁

体是高能加速器今后发展的必然趋势。超导磁体工作时需要在液氮的温度移转热量,这又对高效率、大容量的致冷机提出了要求。

纯铝在低温( $<12^{\circ}\text{K}$ )时的电阻比常温时减少约近万倍,用来绕制磁体,可以很容易地达到脉冲超导磁体的磁场强度,同时可以在快脉冲加速器上使用,而这对超导磁体是很难做到的,因此低温纯铝磁体在一定情况下可做超导磁体的补充。

此外,使用大电流通过空心线圈,或是在等离子体的环形收缩的表面,都可产生几十万高斯的磁场;近年利用内爆压缩磁通量的方法甚至产生了千万高斯量级的脉冲磁场。这些强磁场的获得都带来了在加速器上应用的可能性。

#### (4) 高真空

高能加速器真空系统的特点是要在体积大,通导低的真空盒内产生高真空度,而同时还要考虑高频场引起的真空击穿,粒子轰击或同步辐射引起的发热、出气等问题。

在欧洲核子研究中心的质子对撞机(ISR)中,为了减少束流与剩余气体分子碰撞而引起的损失和克服由于剩余气体电离而产生的有害影响,在大约2公里长的真空盒内,平均真空度达到 $10^{-11}$ 托,局部真空度达到 $10^{-12}$ 托,迴旋的束流可有几十小时的寿命。由于对撞机的发展,大体积容器的真空度从六十年代中期以后,已经从 $10^{-9}$ 托提高了三个数量级。这是真空技术上很大的成就。

#### (5) 高速电子学

在加速器中电子学或计算机控制的主要对象是以接近光速运动的带电粒子团。这与化工、冶金等工程中控制对象运动缓慢的情形相比,要求显然是很不同的。计算机目前已普遍使用于高能加速器的开、关机,参数测量,事故诊断,数据记录,状态显示和局部的运行控制。但因加速器是一个多参数,快速运转的体系,全面的动态最佳化运行控制,至今还有待实现。这对计算机的存储量和速度,同时提出了极为严峻的要求。

在某些需要对束团进行直接控制的情况,对电子学速度要求是很高的。因为束团运动速度接近光速,而控制信号的传播速度也只能是光速,而且不能避免的是回路中储能元件的时间常数。这样,就产生了控制信号与控制对象竞走如何取胜的问题。一个办法是让束流在能量较低(即速度小于光速)时触发控制信号,以便可以赶到前面进行控制,这叫做“前馈”。另外,也可使信号比束流走更短的途径以赢得时间。但不论哪种情况,电子学线路各个环节的高速响应,在加速器许多方面都是不可缺少的要求。

#### (6) 高度可靠性

一个质子高能加速器一般是由能量从小到大的几个加速器组成的,包括:高压加速器,直线加速器,中

间同步加速器(增强器)和末级同步加速器。这些加速器分布在相当大的地域而由电缆和电子学网络像神经系统一样控制着,以保证在任一瞬间全体都在指定的状态下工作。任何一个局部的小的环节工作不正常,整体即不能工作。这个特点就对电子学元件的可靠性提出极高的要求。以美国费米国家加速器实验室的500 GeV加速器为例,这些控制网络分布在十几公里的范围,包括上万个元件。如果每个元件只有99%的可靠性,则整个系统同时工作的几率只有0.0001%。而如果要求加速器能连续好多小时地工作,则元件的平均可靠性必须在99.9999%以上。这就对元件的设计,制造,筛选等方面有了严格的要求。

除了上面谈的几个方面以外,我们可以想到:由于加速器运转时有大量信息需要处理,如部件模拟信号,状态指示信号,控制信号,计算机之间的联结、显示信号等成千上万;而部件又是分布在高功率的功频、脉冲和高频的干扰源附近,噪音本底很大,因而要有抗干扰的现代化的通讯系统;为了在周长公里级的环形隧道中将一块块磁铁安装定位到点几毫米的精度,对大地测量提出了要求;加速器磁铁的电源对于电网是大功率的脉冲负载,这又需要专门研究它对所在地电网的稳定性的影响。这类问题还是很多的,在此就不一一举例了。

最后,必须指出:早期加速器虽然是实验室的产物,但发展到现在的规模,它的研制必须依靠机械、电子、冶金等多方面工业的力量。因为除了上面谈的加速器部件在质量上要求十分严格外,在数量上也常常是很大的。例如:美国费米国家加速器实验室能量为500 GeV的环形加速器,偏转磁铁每块约长7米,重11吨,要用到774块,另外还有180块聚焦磁铁;美国斯坦福直线加速器中心能量为22 GeV的直线加速器要用245个大功率速调管;欧洲核子研究中心的对撞机(ISR)使用了近400台各式真空泵。这些显然都不是实验室可以提供的,因此又产生了把性能指标要求很高的部件在工业上批量生产的问题。这就又必须开展多方面新材料、新工艺的研究。由此可见,高能加速器本身是基础研究的工具,但它的建造又是包括了应用研究、研制和工业生产的各个方面。

高能加速器的发展依靠许多尖端的科学技术和工业部门。但另一方面,高能加速器的发展也反过来促进其他科学技术和工艺技术的发展。例如建造对撞机促进了真空技术;使用超导磁体促进了致冷技术,这种例子还是很多的。但是这个很重要的问题常常没能得到应有的注意。

远在加速器发展的初期,研制高压加速器并用以进行核物理实验的研究工作者就创造了双稳态计数线路,事实上奠定了电子数字计算机存储和逻辑电路的

基础;也是在同一时期,为了使加速管能承受更高的电压,提出等压环的概念,后来这个措施普遍用于高压输电系统;1950年加速器工作者发现的强聚焦原理,现在已使用于电子显微镜;在加速器离子源和运输系统的基础上发展了离子掺杂机,成为制造半导体器件的重要工艺;超导加速腔因为品质因数极高而可应用于频标工作,它的相对稳定度高达 $10^{-13}$ ,超过了原子频标的水平;加速器中发展的一种特殊类型电子管——大功率速调管,也被考虑在空间太阳能站采用,以将能量由空间输送到地球;甚至为了减少高能加速器磁铁在运输过程受到的震动而研制的一种车辆,后来也发现在造船工业中有很大的用途。

除了加速器的部件、技术常常对其他科学技术的发展起到了推进的作用以外,高能加速器产生的“基本”粒子,也同样有着广泛的应用。正像一个工厂能提供大量的产品一样,流强很大的加速器也能提供大量的“基本”粒子,因此被称为“光子工厂”、“介子工厂”等,下面我们就把这方面的情况略加介绍。

### (1) 光子工厂

在电子同步加速器中,人们很早就发现沿电子运动轨道的切线方向可以看到光点的现象。这是由于做圆周运动的电子会以放出光子的形式来辐射能量。这种光辐射叫做同步辐射,它导致很大的能量损失,限制了环形电子加速器向更高能量发展,因而一直被认为是一件坏事。但是,“坏事也可以转变成为好事”。这种辐射强度极大、方向性极强、光谱可从 $0.1 \text{ \AA}$ 直到几千 $\text{\AA}$ 、分布完全可以从理论上推算,而且发的是偏振光。近年发现它对分子生物学、表面物理、表面化学、天体物理、非线性光学、半导体器件工艺等方面的研究有着广泛的应用,特别是对一些瞬态现象的研究。因此美、苏、英、日、西德、法、意等国都在积极开展实验工作,并且建造了以专门产生这种光辐射为目的的强流电子储存环——光子工厂。它的能量一般为几百到几千兆电子伏。顺便指出,最近试验成功的具有频率连续可调的特点的自由电子激光,也正好需要使用储存环中的强流电子束,这可能发展为光子工厂的另一方面的应用。

### (2) 介子工厂

能量为几百兆电子伏以上的质子或电子打靶都可产生 $\pi$ 介子。介子工厂就是指在这个能区工作,但流强很大的加速器,它以提供大量 $\pi$ 介子为目的。这种 $\pi$ 介子对核结构和“基本”粒子物理研究都有用处,近年世界上已建成三座这样的工厂。

介子工厂不但是科研的工具,同时带负电的 $\pi$ 介子( $\pi^-$ )还可用于癌症的治疗。这是因为 $\pi^-$ 有一个特

性,就是它在射程的末端被原子核吸收后,原子核会放出一些电离作用很强的质子、中子、 $\alpha$ 粒子、重离子等,对射程末端附近的原子核起很大的破坏作用。这样,用于癌症的放射治疗,就会有許多独特的优点,譬如:可用控制 $\pi^-$ 束的能量来使破坏作用集中于不同深度的病灶,可用控制 $\pi^-$ 束的能散度来调节破坏作用的范围等。最近经过实验证明 $\pi^-$ 确有很好的疗效。据美国统计,该国每年新发现癌症的病人约为一百万,其中50%需要放射治疗。可见癌症是严重威胁人类生命的多发病,而积极开展 $\pi^-$ 介子和其他放射疗法具有重大的意义。

很有趣的是在研制一个质子直线加速器介子工厂时,发明了一种双周期的高频加速结构。使用这种结构制造治癌的电子直线加速器,可使加速器尺寸小巧,造价低廉,因而得到广泛的使用,这就从另一方向对癌症的治疗做出了贡献。

### (3) 高能重离子加速器研究可控聚变反应

研究可控聚变反应过去主要是采用磁场约束等离子体的办法,近年已从多方面展开惯性约束的研究。这种方法是使用光子(激光)、电子或重离子轰击内含氘氟的小球,使之发生内爆,由而产生高温高压以达聚变的要求。在使用带电粒子时,让它们都聚焦到小球上是很困难的,因为电流愈大,束流截面愈小,空间电荷散焦力也就愈强。使用高能低电荷态的重离子的意义在于它的质量很大,电流不必很强就可以给出足够的束流功率了。目前计划中的方案之一是使用一个高能加速器将重离子加速后送到一个储存环内,然后用许多冲击磁铁将一段段的束流提出,沿一些在半径方向的束流运输系统,同时向位于环中心的靶球轰击。这种方法的关键问题是要使储存环内的重离子在几个毫微秒时间之内全都打在靶球上。尽管技术上存在着困难,但原则上还是可以实现的,有的国家对这个方案已经拨款进行研究。

## 结 语

高能加速器是研究高能物理的实验装置。由于它的规模庞大、技术复杂,要求精尖而成为现代科学技术水平的一个标志。许多尖端科学技术的成就使高能加速器的发展成为可能,同时,高能加速器的发展也反过来对其他科学技术起推进的作用。我国为了在本世纪末实现四个现代化,赶超世界先进水平,有必要从实验和理论两个方面占领高能物理这个基础研究的阵地,这就必需要研制高能加速器,尽管这是十分光荣而又艰巨的任务,但在毛泽东思想的指导下,在以华主席为首的党中央的领导下,我们的目的一定能够达到,我们的目的一定能够达到。