

高能物理研究与高能实验基地

徐绍旺

随着科学研究向深度和广度进展,实验研究的规模越来越大,技术越来越复杂。

1920年以前,人们研究原子、原子核物理时,用放射源射线中的粒子作为炮弹,去轰击原子或原子核,用简单的云室或计数管甚至更简陋的仪器,作为探测器,一个或几个人进行实验研究。

1930年以后,相继发明了几种人工加速带电粒子的加速器,和相应地发展了探测器,实验研究规模也逐步增大,需要若干人共同配合才能研究。

现代高能物理的实验研究,利用人工产生高能带电粒子的高能加速器为工具,是当今几项大型科学实验研究之一,这就需要一个高能物理实验基地。这是一个规模很大、技术复杂、多工种综合的基地,涉及很广泛的技术和学科,如机械、电工、无线电、冶金、快速计算机、自动控制、超高真空、超导、低温、精密测量等等。而且这些技术要求大都高于一般工业的需要,有些甚至是极端的要求。因此建设高能物理实验基地是一项复杂的科学研究工程,要组织有关工业部门和研究机构大力协同,联合作战。

为什么研究高能物理需要如此规模的实验基地呢?这是由高能物理实验研究特点所决定的,如:要求粒子的能量高,工作精细,工作可靠,综合性强等等。

一、能量高,要求规模大

高能物理研究的是比原子核更深的物质结构层次,组成这一层次的粒子,统称为“基本”粒子。高能物理实验研究是通过变革“基本”粒子,来认识其相互作用及其转化的规律。

要进行变革“基本”粒子的实验,就需要有高能“基本”粒子。用太空中来的宇宙射线中的“基本”粒子进行研究,也是高能物理实验研究的一个方面,因为宇宙空间是一个最大的天然高能粒子的来源,它能产生很高能量的粒子(估计能量可以达到 10^{21} 电子伏),而目前用人工产生的最高能量的质子为 5×10^{14} 电子伏(五千亿电子伏)。但是人们还不能支配宇宙线中粒子的种类、数量和能量,实验研究有一定局限性。不过偶然飞来的很高能量“基本”粒子产生的相互作用,可能给人们以新的启示,起到探索的作用。

要进行大量的、有预期目标的实验研究,就必须依靠人工产生的高能“基本”粒子。产生高能粒子的设备

就是高能加速器。用以观察粒子的变革及其作用行为的设备,叫做探测器。这就是高能实验基地的两部份主要设备。

为什么研究物质结构更深层次必须用高能粒子呢?

人们已经认识的物质结构的层次是:原子、原子核、基本粒子。要了解每一层次的结构,就要用一种“炮弹”,打到相应的层次里去。“炮弹”必须有足够的能量才能深入到相应的层次,实现变革。变革原子把原子外层的电子从原子中打出来,平均约需十个电子伏的能量。变革原子核,把一个核子从原子核中打出来,约需八兆电子伏(Mev),比变革原子高80万倍。用质子作为“炮弹”打靶并产生 π 介子、K介子等粒子,质子的能量要几百至几千兆电子伏。而要打出目前预言组成强子的层次,从现在实验情况估计,可能又要比这个能量高一万至十万倍。总之,随着研究层次的深入,要求有更高能量的加速器和相应的探测器。目前世界上最大能量的加速器在美国费米国立加速器实验室(FNAL),为5000亿电子伏(500Gev)。

高能加速器由若干个不同种类的加速器组成,能量逐级提高。最后一级为环形加速器,即同步加速器,它把粒子束加速到设计的能量,并达到要求的束流强度(即每秒钟的粒子数)。

环形加速器的主要部分之一,是环形的磁铁系统。它由环形排列的一块块几米长的聚焦磁铁和弯转磁铁所组成,每块磁铁的工作间隙,产生一定形态的磁场,使加速的粒子束始终约束在截面约为 150×70 毫米的真空室内,迴转几万圈而基本不丢失。目前磁铁由铁磁材料制成,最大工作磁场两万高斯,因而如果要约束能量为1000亿电子伏的质子,使其转圈,磁铁系统直径约为500米,需二、三百块磁铁。这样一个加速器的磁铁供电系统,最大脉冲功率100兆瓦,平均功率损耗约为20兆瓦,相当于一个中小城市的用电量。

环形加速器的另外一个系统,即为加速粒子提供能量的高频加速系统。随着能量增加,高频加速系统的功率也随之增加。例如一个能量为100Gev的质子加速器,质子流的平均强度0.5微安,即每秒 3×10^{14} 质子,则质子流的功率为50千瓦。假定高频系统功率转换成质子流功率的效率为10%,则需总功率为500千瓦,要有五台功率100千瓦,频率为几个至几十

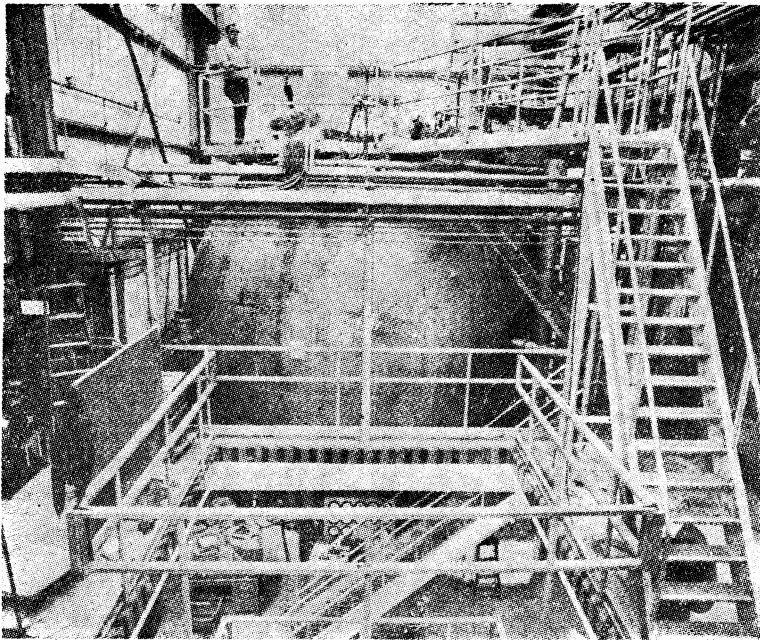


图 1 15 英尺的液氢泡室

兆周的扫频发射机，每台发射机相当于一个中等以上的广播台发射机。

环形加速器的其他系统也随着能量增高相应增大。

从加速器引出的质子或电子，打靶以后产生不同能量，不同种类的粒子，要用电场和磁场把它们分开。粒子能量增高以后，为了使不同种类和能量的粒子分开一定间距，就要求电场磁场也相应增加，或者增加加速器与实验设备之间束流运输系统的长度。在束流运输路程上安装有一系列偏转和聚焦磁铁，随着加速器能量增高，由于束流运输距离的增大，也要相应增加偏转、聚焦磁铁的数量和规模。五十年代初美国一台能量为 450 Mev、磁铁极面直径 4.3 米的中能加速器，现在已拆往 FNAL，只充当束流运输线上几百块磁铁中的一块。在一个几百亿电子伏能量的加速器上，整个高能实验区里约有几百块大小不等的偏转和聚焦磁铁。

为了产生足够的预期的相互作用事例和便于测量粒子的行为，随着粒子能量增加，探测器有效作用长度应该增加。无论是铁磁体或超导磁体只能产生一定强度的磁场，在一定磁场下，能量越高的粒子，越不容易偏转。探测器要有足够的作用长度，才可以测量出粒子的偏转来，否则探测器里就几乎测不出粒子的偏转，测不出偏转就确定不了粒子动量，不能确定粒子的动量，就很难判定是什么粒子了。

目前世界上最大液氢泡室有效直径一个是 3.7 米和一个是 15 英尺，前者在欧洲核子研究中心 (CERN)，供能量加速到 400Gev 的质子进行实验用。图 1 为美国

FNAL 的泡室。这类泡室液氢容量为几十立方米，采用超导磁场。当粒子束进入泡室时，液氢容器一侧的活塞由液压作用而膨胀，液氢接近沸腾状态，围绕入射和相互作用产生的粒子飞行路径，产生一连串气泡，这气泡串描出粒子的踪迹，用照相机拍摄图像。建立这类泡室本身是一项很大的工程，涉及超低温、超导、液压、光学等技术。

二、工作精细，要求技术复杂

研究高能物理的设备如此庞大，造价又高，所以设计应力求精细，少留保险，并采用先进技术，这样的设计，又称为极限设计。否则就会造成浪费。

加速器和探测器里的带电粒子，在设定的复杂的电磁场中运动，加速器所有系统，既要保证粒子达到足够的能量，又要有足够的数量，而且粒子束又必须尽可能密集，从而使实验尽快得到足够的预想的相互作用事例。

但是加速器研究的对象实在太小了，半径只有 10^{-13} 厘米，电子更小，因此无论设计、制造设备，还是实验研究时都要求很精细。例如设计加速器时，对被加速粒子的运动情况的描述，要尽量地接近实际情形，稍稍的粗枝大叶就会使设备造价增加。假如运动束团的垂直高度多估了 10%，磁铁重量就将增加 10% 以上，而磁铁供电的功率将增加 20% 以上。因此，设计中要求有尽可能接近实际的物理模型和相应的计算方法。设计中要求严格的允许误差，这些误差对加速粒子起扰动作用，使束团截面增大，甚至离开预定轨道而丢失。采用先进技术的目的也就是减小误差，提高技术经济指标。那末，需要精细到什么程度呢？这里举一个例子：

为在加速器得到足够的粒子数，必须要求束流转几万圈仍保持一定截面而基本不丢失，为此应使磁场在几百块磁铁内均匀度不低于万分之几，这就要求磁铁制造精度、磁铁电源稳定度，相应的检测、传感的精度优于万分之几的水平；要求所有磁铁块安装在直径几百米的环上，位置均方根偏差 ± 0.3 毫米，相对精度达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。

在高能物理实验中，必须精确地测定微小的研究对象的各种特性，诸如粒子的寿命、能量、磁矩等等。近年来实验精度又有很大提高，如测量 K_L^0 介子寿命为 $(5.181 \pm 0.40) \times 10^{-8}$ 秒，测量 μ 子的静止质量为

$105,65948 \pm 0.00035 \text{ Mev}$, 其磁矩准确到 $\mu_{\mu}/\mu_p = 3.1833467 \pm 0.0000082$ 。得到这样精确的结果,需要一系列的仪器,进行大量测量,以减小统计误差。

此外为了提高精度,减小几个同时进行的实验之间的干扰和本底,要用相应的材料对杂散的粒子束加以屏蔽,常用的屏蔽材料是重混凝土、碳化硼、铁等。一个实验装置约需几万吨的混凝土,有时需要几十吨碳化硼或几千吨铁。有一些实验要采用特殊屏蔽材料,如屏蔽高能量的强子,采用铀²³⁸。

三、工作可靠,要求测量信息数据多

因为加速器和探测器各部份设备应有很高的可靠性和精确度,所以无论在建造还是建成后的运行中,都要进行很大数量的各种测量,包括机械、电和磁等量的测量,保证各部份设备的可靠性。

在建造质子直线加速器过程中,要知道电场沿轴向分布,在几十米甚至上百米的加速腔长度上,每隔一毫米测量一个点,因此要测量几万甚至十几个点。建造环形加速器时,对磁铁工作间隙,以及工作区域以外包括散磁区域,都要测量磁场,每一平方厘米上测量两个点,一块磁铁要测量几万个点近十万数据。一个实验用的大型谱仪磁铁,也需测量几万个点的磁场值,以便根据磁场值逐点修正测得的粒子的动量。

达到上述磁铁安装精度,要利用大地测量的技术,并研制一些特殊的测量仪器。欧洲核子研究中心安装 300 Gev 的加速器磁铁,其测量工作量相当于测绘整个法国地图所需要的三角测量网。为了消除积累误差,根据测得三角网的数值,用最小二乘方的方法求出所有磁铁位置,这一组方程中包括 1728 个方程,和 864 个未知数。

为提高加速器运行中可靠性和技术经济指标,增加加速器工作灵活性,要对加速器的运行进行实时控制和监视。控制和监视的信息数量成千上万,需要几台至十几台电子计算机。

物理实验中,产生预期相互作用事例,有一定几率,几率往往很小。例如液氢泡室上进行实验,一次照相出现的几率仅仅是十万或百万分之一。为获得高的可靠性和精确度,需要从大量的事例中测量。所以,气泡室实验,通常一个物理工作要处理十万至百万张照片。又例如,利用多丝室进行实验研究时,每片多丝室面积最大几十平方米,若干片组成一个组,一个多丝室每组几万条丝,每条丝上的信息通过放大器送到计算机。一个实验基地有几十个这样的多丝室。

泡室的照片在进行自动分析、测量后把数据送到计算机,多丝室信息直接送计算机分析、计算。一个实验基地一般需要一台或几台速度近千万次,容量几百万字的大型计算机,和几十台与探测器直接连接的在线计算机,组成计算中心(见图 2)。

四、综合性

高能物理实验研究基地除了研究高能物理为主外,还可以利用各级加速器的束流进行其他基础学科和应用的研究,成为一个多学科研究的综合实验基地。

利用电子在贮存环中转圈时辐射出来的光子,其波长为 $0.1 \text{ \AA} - 1000 \text{ \AA}$, 可以进行化学、生物、固体物理、光学研究以及超大型集成电路光刻。这种辐射叫同步辐射,它是这些学科向先进水平发展的重要手段。

快速质子同步加速器,即连接最后一环型加速器的增强器,可以达到几十微安的束流强度,用这样的

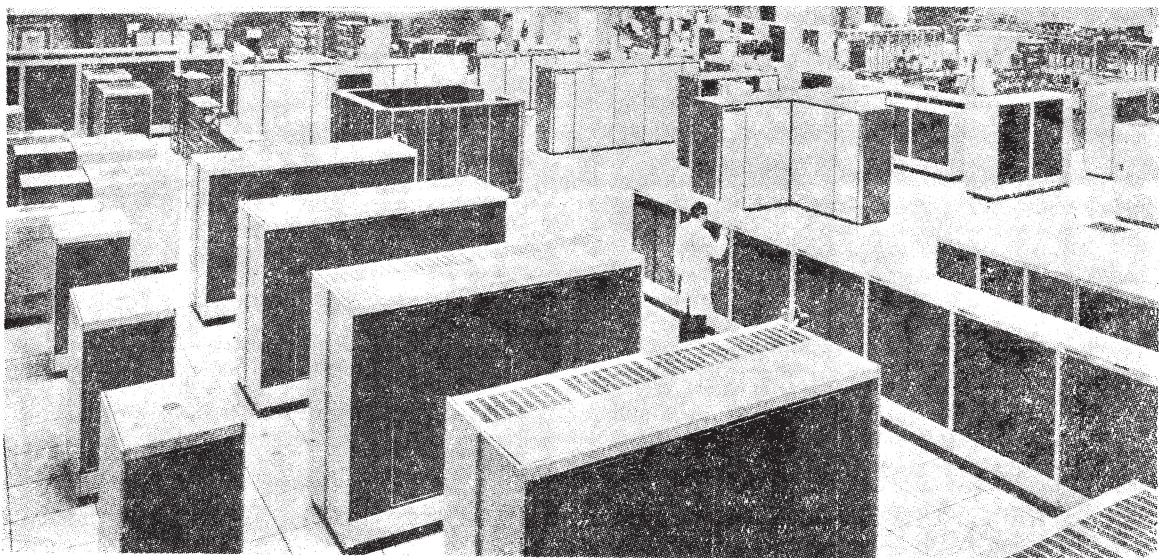


图 2 一个计算中心

束流打铀靶，可以产生很高的中子通量，作为强中子源，供有关能源研究的材料试验等。

增强器的质子束或打靶产生 π 介子束，质子直线加速器的质子束或者打靶产生快中子束，可以用于质子照相和 π 介子及快中子治癌研究。

改造早年建成的质子同步加速器，用来加速高能重离子，已经在美国、苏联实现，近两年来正在研究用高能量的重离子实现受控热核反应点火。

此外利用加速器可生产缺中子的同位素和某些短寿命的同位素以及进行辐照，为工业、农业、国防服务。

为了充分利用高能实验基地，有利友邻学科之间相互渗透，促进各学科发展，高能实验基地往往建设在大学和科学研究单位较集中的地区，形成科学研究中心，便于共同利用。

高能实验基地的建设依靠最新工艺技术、科学技术，同时它又对工艺技术、科学技术提出新的要求，促进工业、科学的革新创造。高能实验基地各方面研究的成果，从更长远的意义上看，将影响某些基础学科和技术的发展，因此建设高能物理实验基地，是实现四个现代化，赶超世界科学技术先进水平的重大部署。