

高能加速器的现状与发展

魏开煜

目前,世界上高能加速器的发展重点是建造能量越来越高、规模越来越大的强聚焦环形加速器。加速器新原理的研究探索也在积极进行,但困难较多,进展缓慢。近期比较有希望的是研究发展若干新技术来进一步改进强聚焦环形加速器。此外,某些应用性高能加速器也将发展起来。下面,我们对几个比较重要的方面作一些简单的介绍。

一、质子同步加速器和质子对撞机

强聚焦环形加速器分为两大类,加速质子的叫高能质子加速器,加速电子的叫高能电子加速器。比较典型的现代高能质子同步加速器是由四台或更多台加速器构成的庞大而复杂的加速器组,包括高压倍加器,质子直线加速器,增强器和主加速器。高压倍加器又叫预注入器,是用来产生质子流的低能强流加速

器,目前一般设计能量是75万电子伏,流强200至400毫安。最近已有实际达到700毫安的。估计今后流强还会进一步提高。质子直线加速器的作用是把高压倍加器产生的质子流进一步加速到几千万至2亿电子伏的能量。目前较先进的质子直线加速器流强为脉冲150毫安。增强器是一个较小的强聚焦环形加速器。它的作用是把质子直线加速器出来的质子束再进一步加速到更高的能量然后注入到主加速器中去。增强器的能量设计范围很广,可以是一个几亿电子伏的中能加速器,也可以是一个几十亿电子伏的小型高能加速器。如日本KEK加速器的增强器能量只有5亿电子伏,而美国费米国家加速器实验室的质子同步加速器的增强器能量为80亿电子伏。目前最先进的是快速增强器,每秒钟可以加速10至20次,每次加速出来的质子数目可达

到 10^{12} (即1万亿)个。快速增强器发展的历史很短,人们在设计时没有经验,都采用了老式的组合型磁铁结构。结果在运行中发现不少毛病,对束流的监测和校正都很不方便。如上述日本和美国的增强器都有这种问题。人们目前普遍认为,下一代增强器应该改为和主加速器一样的分离型磁铁结构。主加速器是一个完成最后加速,把质子束加速到高能量的巨大的环形加速器。例如美国费米国家加速器实验室的主加速器直径达两公里。它的二极弯转磁铁每块长6米,重13吨。四极聚焦磁铁每块长2米,重4吨,两种磁铁加起来共有1000多块。这些磁铁按一定的周期规律排列成一个周长达6公里的大环,安放在地下6、7米深的隧道中。这个主加速器把质子束加速到5000亿电子伏,最新达到的流强指标是每脉冲 2.5×10^{13} 个质子,这是目前世界上最

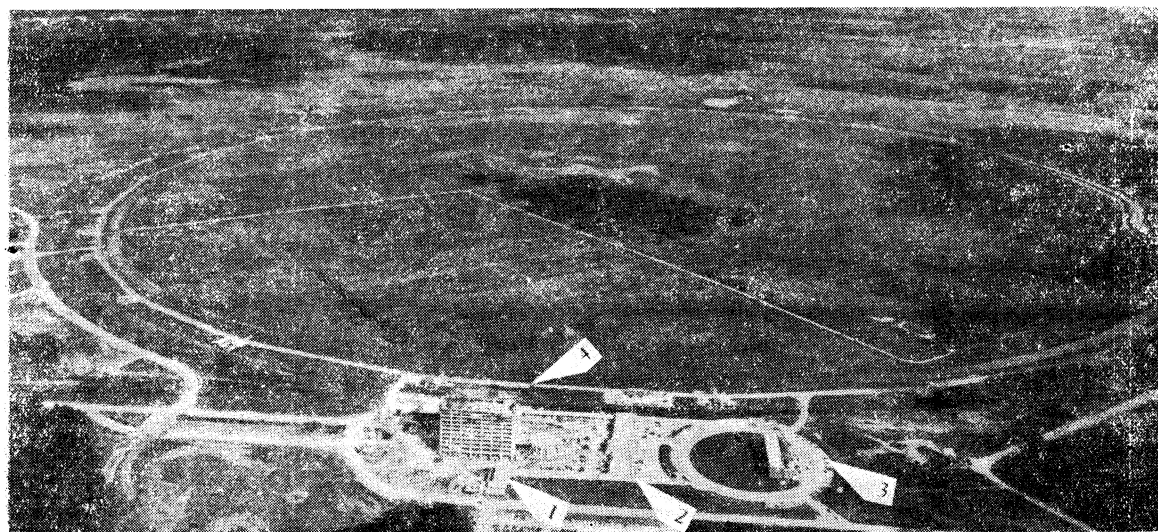


图1 美国费米国家加速器实验室的5000亿电子伏加速器布局
(1) 高压倍加器 (2) 质子直线加速器 (3) 增强器 (4) 主加速器

大的一台质子同步加速器。欧洲核子研究中心能量为 4000 亿电子伏的质子同步加速器居世界第二位。

质子同步加速器的进一步发展是采用超导磁体把能量向更高的领域推进。经过前几年的研究,磁场强度为 4 万至 5 万高斯的慢脉冲超导磁体目前已经达到实用阶段。美国费米国家加速器实验室正在上述 5000 亿电子伏主加速器的上面再造一个超导主加速器环,预计在 1979 年左右,可把该加速器的能量提高到 1 万亿电子伏,他们把这个超导环叫做“能量倍增器”。

质子同步加速器的优点是用它加速出来的高能质子流去打静止靶,可以产生出多种次级的高能粒子流,如反质子流, π 介子流, μ 子流……等等,并且可以把这些次级粒子流分别引向不同的实验室做多种高能物理实验。

其次,组成质子同步加速器的每一级加速器,除了供给下一级加速的质子流之外,都可以引出一部分束流供实验室使用。因此,一台质子同步加速器实际上是一个包括低能、中能和高能的综合性物理实验基地。

但是,打静止靶的质子同步加速器也有不足之处,那就是产生“基本”粒子反应的有效能量,即质心能量太低。例如美国费米国家加速器实验室能量为 5000 亿电子伏的质子束去打静止靶,质心能量只有三百多亿电子伏。人们为了提高质心能量而又不去重新建造规模更大的同步加速器,就提出了对撞机的思想。目前一般认为在建造出一个巨型质子同步加速器之后,接着建一个质子对撞机是比较合算的。就是在质子同步加速器附近再造两个和主加速器差不多的相互交叉的环,叫做贮存环。把主加速器加速出来的高能质子流沿相反方向交替地注入到两个贮存环里去,使它们一圈一圈地积累起来,积累到技术上允许的最大强度以后,使两股束流在环的交叉区发生对撞。这样相互作用的

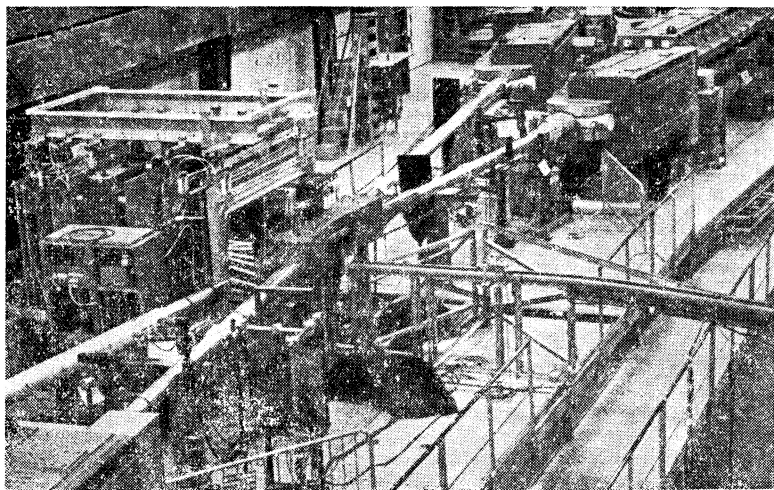


图 2 交叉对撞区概貌

质心能量大约等于质子束能量的两倍。例如当两个能量为 5000 亿电子伏的质子对撞时,它们的质心能量是 2×5000 亿电子伏 = 10000 亿电子伏。当然,贮存环与主加速器的构造并不完全一样,为了质子流的积累和对撞还需要增设一些特殊的磁铁结构、高频调制系统和束流偏转系统。

目前世界上已经建成的质子对撞机很少,能量也不高,最大的是欧洲核子研究中心的对撞机 (ISR),能量为 2×326 亿电子伏。但正在建造和计划建造一些大的质子对撞机。例如美国布鲁克海文国家实验室的 2×4000 亿电子伏质子对撞机,采用强度为 4 万至 5 万高斯的超导磁体,环的周长 3.8 公里,设计亮度为 10^{33} 厘米⁻²·秒⁻¹,计划 1984 年建成并投入使用。又例如欧洲核子研究中心正计划增建 2×4000 亿电子伏质子对撞机;美国费米国家加速器实验室也计划在完成 10000 亿电子伏“能量倍增器”之后,再增建一台 2×10000 亿电子伏质子对撞机,这样就可以得到 2 万亿电子伏的质心能量。根据理论的预言,当质心能量达到 1000 亿电子伏以上时,就可能发现传递弱相互作用的一类重粒子——中间玻色子。在近期,只有质子对撞机能够达到这种能量,其他加速器还有一大段

距离。然而,质子对撞机也有其缺点,就是在碰撞时产生大量的强子而且碰撞点不固定,很难分辨。因为有这个缺点,目前也有人对质子对撞机持否定观点,认为它将来即使打出了中间玻色子和层子,人们也无法把它们辨认出来,因而对建造质子对撞机的价值表示怀疑。

二、电子同步加速器 和电子对撞机

目前高能电子加速器的主流是发展电子同步加速器和电子对撞机。电子对撞机主要是搞正负电子对撞。

高能电子加速器也是由一系列加速器构成的加速器组,包括电子直线加速器,若干级电子同步加速器和电子贮存环。其中除了电子直线加速器在技术上同质子直线加速器差别较大外,电子同步加速器和电子贮存环在技术上同质子同步加速器和质子贮存环基本上类似。最大的差别是质子加速器要同时调磁和调频,而电子加速器只需调磁不需要调频,从这点来说,质子加速器更复杂一些。

目前世界上高能电子加速器的发展比质子加速器缓慢得多。其原因有二:第一,从物理实验上讲,电子加速器能够研究的范围要比质子窄。例如无论用高能电子束打静止

靶或碰撞都不能产生大量的次级粒子流,特别是强子流,因此不能研究强相互作用。它能够研究的范围,主要限于电磁相互作用。第二个原因也是最主要的原因,就是电子在磁场控制下转圈时产生同步辐射,一方面从高频加速场获得能量,另一方面又不断地把能量以光的形式辐射出去,就像狗熊掰棒子,一边掰一边丢。并且同步辐射随电子能量的四次方而增加。要使电子加速到高能,就必须使它获得能量的速度超过丢失能量的速度,这就要求高频功率随加速器能量的提高很快增大,这在技术上遇到了很大的困难。因此,目前世界上已运行的最大的电子同步加速器能量只有120亿电子伏,对撞机能量只有 2×30 亿电子伏左右。电子同步加速器和电子对撞机也有其突出的优点,就是束流的能量容易精确控制,在电子束打靶或碰撞时产生的杂散本底较低,反应产生的现象比质子加速器容易分辨,便于做精确测量。正因为有这种优点,它在今后仍然会同高能质子加速器一起向前发展。两者只能相互补充,不能相互代替。例如,目前正在建造的大型正负电子对撞机,有西德德赛的 2×190 亿电子伏对撞机和美国的PEP 2×230 亿电子伏对撞机。这两台机器将在1979或1980年建成。此外欧洲核子研究中心也在设计一台 2×700 亿电子伏的更大的电子对撞机。

除了单纯的质子和电子对撞机外,还有电子-质子碰撞,如德赛的PEP除了正负电子碰撞外,也准备兼搞质子和电子碰撞。

值得注意的还有在1977年召开的第10次国际高能加速器会议上,提出了发展高能重离子加速器的新方向。

三、新技术和新原理的研究

I. 关于新技术:最有前途的新技术是负离子注入和超导磁体,经过前几年的努力,负离子注入已开始正式使用;磁场强度为4万至

5万高斯的慢脉冲低温超导磁体也已进入实用阶段。今后的任务是(1)进一步发展强流H⁻离子源;(2)发展可运行在更高场强例如十万或几十万高斯的超导磁体;(3)发展快脉冲超导磁体;(4)寻找常温超导材料。

其次,电子冷却技术的研究也很重要,这些新技术的突破,可以把环形加速器的能量和流强推向更高的阶段。

II. 关于新原理:目前已经提出并经过一定试验的新原理有很多种,大体可归并成两大类。一类是集团加速,例如用电磁波的纵向压力加速等离子凝固,用电子圈带动质子一同加速(即“烟圈”加速器)等属于这一类。另一类是单粒子加速,例如用强电子流激发的电磁波直接加速质子,用激光的强电场加速电子或质子等属于这一类。集团加速碰到的困难是不稳定性,粒子集团在远未完成加速之前就散掉了。后一类新原理的困难在于很难造出一种可使粒子持续加速的场结构。这些新原理在近期突破的可能性都不大。但从技术基础来分析,激光加速器是一个发展前途较大的方向,因为(1)它的加速原理同现实的直线加速器类似,是比较可靠的;(2)大功率巨脉冲激光技术的高速度发展为它奠定了强大的物质基础。因此,这方面一旦有新突破,一代全新的超高能加速器就会出现。

四、值得重视的应用性高能加速器

最近国际上正在发展一种同步辐射加速器。前面我们说过,电子束在同步加速器中以光的形式不断地辐射能量,这对于提高电子能量来说是一件坏事,但是对于研究气体力学、固体物理、光化学、生物物理等许多部门,是一个非常有力的强大光源。因此,国际上目前除了将一些过时的电子同步加速器和电子对撞机用来做强光源使用外,正在完全按照应用的要求设计和建造专门产生强大同步辐射的高能电

子加速器。这种加速器的结构同高能物理研究用的加速器很不相同,所以称它为应用性高能加速器。

此外,用来生产核燃料的强流高能质子直线加速器,也有可能重整旗鼓一举突破。如果能够建造一台连续流强为100毫安、能量为10亿电子伏的高能质子直线加速器去轰击钍²³⁸靶物质,每秒钟大约可以产生 6×10^{19} 个中子,这些中子被安放在靶周围的铀²³⁸或钍²³²所吸收,每年可生产300至400公斤核燃料钚²³⁹或铀²³³。这是一个非常吸引人的方案。从原理上讲,是切实可行的,主要困难是没有连续输出功率为几兆瓦、频率在几百兆周的高效率大功率管,因而这个方案在一段相当长的时期中被搁置起来了。最近,据说因为苏修宣布制成了这种管子,于是对上述方案的讨论,目前在国际上又重新热闹起来了。

五、国际上在发展高能加速器问题上的两种观点

国际上在发展高能加速器问题上始终存在着两种不同的观点,一种是质子派,另一种是电子派。但是,历史事实证明,质子加速器和电子加速器都做出了很多有重要价值的高能物理实验。远的不说,就拿1974年以来一系列新粒子的发现为例,J粒子首先是在330亿电子伏的质子同步加速器上发现,并在电子对撞机上核实的。由于J粒子发现的启示,接着又在电子对撞机上找到了一系列新粒子。这充分体现了质子加速器和电子加速器的相互配合和相互补充的作用。正因为这两种加速器具有这种不依人们的主观意志为转移的客观特性。它们才能够在世界上不因两派观点的好恶而同时向前发展着。

自然界是不断发展的,人类的认识也是在不断发展的,永远不会停止在一个水平上。无论是质子加速器和电子加速器,都将在人们的实践过程中不断地得到改进和提高。发展前途都是光明的。