

国内外加速器发展概述

谢家麟

(中国科学院高能物理研究所)

带电粒子加速器自 1930 年左右作为探索物质微观结构的手段出现以来,在半世纪多的时间内,获得了十分巨大的发展.它的应用已远远超过早期的单纯的科学研究,而扩大到国民经济、国防建设、医疗卫生等方面.限于篇幅,此处难以全面介绍.下面只谈三个加速器发展的主要方面:即国际上高能加速器发展总貌;国内三大中、高能加速器工程和低能加速器应用概况;最后简单地介绍一下较有希望的新原理及其发展远景.

一、国际高能加速器发展总貌

图 1 给出加速器能量随年代发展的总的趋势,由图 1 可以看出:

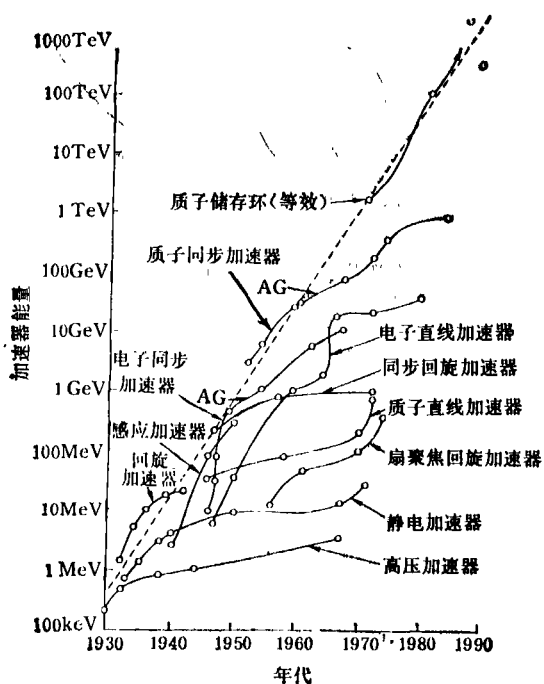


图 1 加速器能量随年代增长的势态

势,由图 1 可以看出:

(1) 在五十多年的期间,加速器能量提高了约 10 个数量级.同时,我们知道,每单位能量的造价则下降了约五个数量级.规模从桌上试验装置扩大到几十公里的长度;用途从基础研究推广到关系人类生活的广泛领域;数目从一两台发展到数千台.它在这不算太长的历史时期内的发展应该说是十分巨大的.

(2) 每一种类型的加速器出现以后,随着能量的提高,将受到技术或经济的限制,但历史证明,每当一种加速器能量达到限度时,就会有另一种根据新的加速原理建造的加速器问世,它具有向更高能区发展的潜力.人类不断地把加速器推向更高的能量是基于进一步认识物质世界的要求,这个努力是永远不会中断的.

(3) 目前正在建造的高能加速器,都属于对撞机类型,即使用两束高能粒子迎头相撞.这是因为对撞机能充分利用加速粒子的能量来产生高能反应.它的有效反应能量(E_{CM})为两个粒子束能量(E)之和 $E_{CM} = 2E$,而打静止靶的加速器的有效反应能量却与束流能量的平方根成比例, $E_{CM} \approx \sqrt{2E_0E}$, E_0 为粒子静止能量.因此,可以看出,前者的造价正比于质心能量,而后者则正比于质心能量的平方.这个道理说明向高能量推进,对撞机是必然的途径.

对撞机包括: e^+e^- , $p-p$, $p-\bar{p}$, $e^\pm-p$ 等几种.正、负电子对撞机产生高能反应的机制是正、负电子的能量转化为物质的新形式,不存在强相互作用,故反应产物比较简单.质子对撞机则因参与反应的粒子有内部结构,反应复杂,但它的优点则是容易获得高能量.因此,这两种类型将是互相补充的.

表 1 给出了国际上正在建造(或刚刚建成)

表 1 世界上正在建造和计划建造的高能加速器

器 名	能量 (GeV)	亮度 $10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	完成日期	特 色
(美) TEVATRON	2000 p-p	0.1	1986	当前最高能量 p-p 对撞机
(日) TRISTAN	70 e±	3-8	1986	顶夸克工作
(美) SLC	100-140	1.6	1987	微米束, 线型, 探测近顶点纵向极化
(中) BEPC	2.8	1.7	1988	J/ψ, F, D 介子工作
(欧) LEP	60-200	1	1989	最高能量 e± 对撞机
(西德) HERA	314 (820 p, 30 e±)	2.5-10	1990	唯一 e±-p 对撞机
(苏) UNK	2190 (p-p) 2200 (p-p̄)		1993	常温环 600 GeV, 超导环 3 TeV.
(美) SSC	40,000 p-p	100	1996	世界上能量最高的对撞机
(欧) LHC	5000-10,000		1995?	利用已有注入器和隧道
(意) ELONISATRON	200,000 pp p-p̄		??	

和计划建造的高能加速器。它可以给我们一个总体的概念。在此基础上,我们将择要地对某些发展加以评述。

由表 1 可见,今后几年将有好几台对撞机陆续建成,这是一个高能物理的兴旺时代,其中 TEVATRON 现已达到 1800 GeV 对撞,它将主要研究 W 带电粒子; TRISTAN 也得到 50 GeV 质心能量,并且一开始调机就获得了可喜的 $10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 量级的亮度。TRISTAN 的物理目标是研究顶夸克,但遗憾的是能量选择偏低,很可能低于阈值而无法达到目的。LEP [巨型正、负电子对撞机]与 SLC (斯坦福线型对撞机)两者都是为了对 Z^0 及其衰变模式进行研究的。因此,无形中构成竞争的局面。前者规模最大,周长 27 km,有四个对撞点,使用的是常规的经过考验的技术,风险较小,造价颇高。后者是一个实验机器,只有一个对撞点,使用了一系列未经考验的新技术,如线型对撞以减小辐射损失,束流半径为微米量级以提高亮度等等,是冒了一定的风险的。不过,它的造价只大约是 LEP 的(约 20 亿瑞朗)四分之一。建成之后,可为正、负电子对撞机向更高能量发展提供经验。图 2, 图 3 分别给出这两台对撞机的示意图。可以看出,一个实验室建造新的加速器,常常以已有的加速器作为注入器,以压缩工作量和投资。HERA 是目前唯一的 e^\pm -p 对撞机。它建在汉堡市居民区地下,最深处是在地面以下

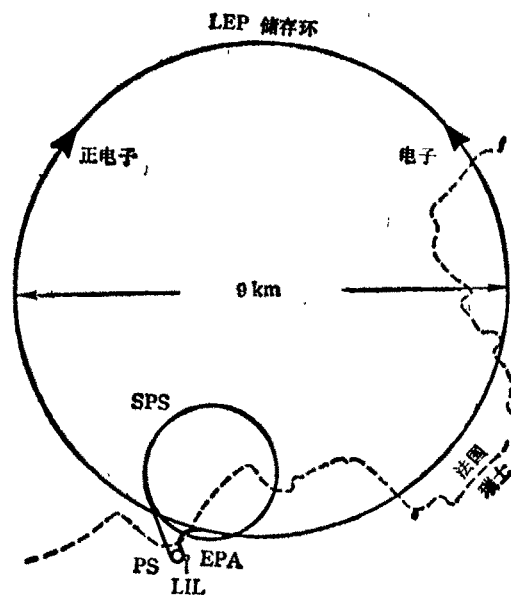


图 2 西欧中心世界上当今能量最高的正、负电子对撞机 (LEP) 示意图

PS——质子同步加速器; LIL——LEP 的直线注入器; EPA——正、负电子累积环; SPS——大型质子同步加速器

23m, 地下水以下 12m; 现正在紧张施工中,挖掘、浇筑、安装同时进行,动用德、法、瑞士、意大利等国工业力量制造部件。苏联 UNK 将以苏普克夫 76 GeV 质子同步加速器为注入器,全长 21 km, 初期工程已于 1981 年开始,但方案变动很多,进展较慢。

利用上述一些加速器,物理学家将可对量子色动力学和弱电理论进行深入的研究。为了从实验中得到更多的启示以便对自然作更完整

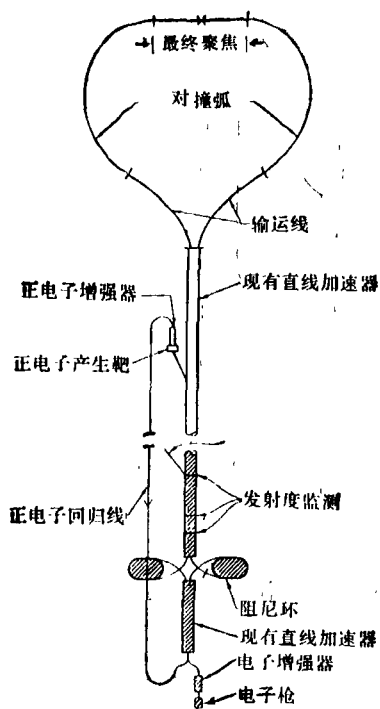


图3 美国史坦福线型正、负电子对撞机 (SLC) 示意图

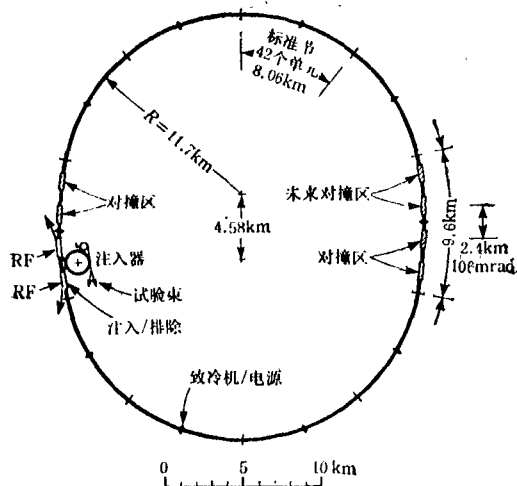


图4 美国即将兴建的超导超级对撞机 (SSC)

的描述, 计划中更高能量的加速器便提上日程。在计划建造的加速器中, 美国 SSC 是最有可能实现的(图4)。它是 $2 \times 20\text{TeV}$ 的 p-p 对撞机, 以 1TeV 质子同步加速器为注入器, 周长 84km , 使用 $10,000$ 块超导磁体, 以 1988 年美国计算总经费为 44 亿美元。现由 56 个主要大物理

学承包研究与发展工作。此工程最近已经总统批准, 下一步是国会通过, 然后进行选址。

在建造 SSC 之前, 是否要在西欧中心 LEP 已有隧道中建一个能量稍低的强子对撞机 LHC, 国际物理学界对此有不同的意见, 据说今年可以确定。意大利最近提议的欧洲长插入节对撞机 ELONISATRON 是较 SSC 能量更高(每束 100TeV) 的由二个超导环组成的 p-p 和 p- \bar{p} 对撞机, 周长约 200km , 这个方案还只是在讨论阶段, 在解决了大量的技术与非技术的问题后方能落实。

二、我国加速器发展概况

我国加速器研制、建造近年也呈现蓬勃发展的局面。三个国内制造的中、高能加速器工程 1988 年后即将陆续完工; 以国民经济应用为主的低能加速器, 也在一些主要领域开始发挥作用。下面就这两方面情况作一简要的介绍。

1. 2.2 GeV 北京正、负电子对撞机 (BEPC)

图 5 是 BEPC 工程的示意图, 它包括五个主要组成部分: (1) 正、负电子直线加速器。它产生并加速正、负电子, 是储存环的注入器。(2) 储存环。正、负电子在其中得到进一步加速并进行对撞。(3) 北京谱仪探测器。它鉴别反应粒子种类, 给出径迹、动量和能量损失。(4) 同步辐射实验区。利用回旋电子束产生的同步辐射光进行多种学科的实验。(5) 计算中心。离线分析高能物理实验由探测器取得的数据。

BEPC 的能量是 $2.2/2.8\text{GeV}$, 远远低于前述的世界上能量最高的对撞机, 但是它在该能区的设计亮度却是世界上正、负电子对撞机中最高的。因此, 它有明确的物理目标, 即进行精细的物理研究, 另外, BEPC 产生的高光子能量的同步辐射, 也将用于多种学科的基础与应用研究。

BEPC 工程于 1982 年开始设计、预研, 1983 年底批准为国家重点工程, 预计 1988 年

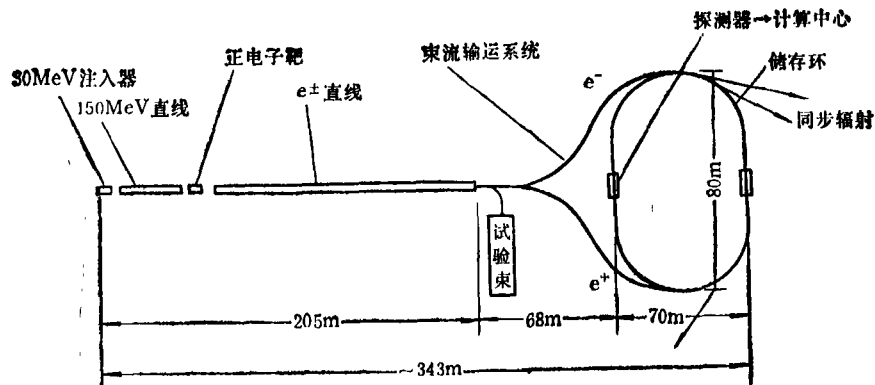


图5 北京正、负电子对撞机 (BEPC) 示意图

底实现对撞。目前已经完成工程设计、部件预研、样机制造、非标设备批量生产几个阶段。加速器的土建工程也已基本竣工,并于1986年中开始部分安装工作。目前直线加速器的正电子产生部分正在调试;由中国科学院高能物理研究所、中国科学院合肥等离子体研究所和上海先锋厂承制的储存环的二百余块磁铁均已完成,磁测达到设计指标,电源、真空泵都已到货,八台25kW发射机已全部安装就位,正在调试,运输线磁铁已大致就位,环的安装即将开始。在探测器方面,漂移室、簇射探测器、飞行时间探测器和磁体机械加工都已结束,正在进行三万多根丝的拉丝工作,估计1987年年底可进行总体安装、调试。

2. 兰州重离子研究装置 (HIRFL)

图6是兰州重离子研究装置的示意图,它由注入器(SFC)、主加速器(SSC)和八个实验终端与前、后束流运输线组成。注入器是一台改建的扇聚焦回旋加速器,主加速器是一台新建的大型分离扇回旋加速器。这台加速器有:四块 52° 的扇形磁铁,每块重约五百吨;两个可产生100—250kV加速电压的高频加速腔;一个容积约为 100m^3 ,束流平面真空度优于 10^{-7}Torr 的大型整体真空室。

HIRFL是我国第一个大型重离子加速装置。在同类型的加速装置中,它可与法国、日本鼎足而立。它的建成将为我国开展低、中能重离子碰撞研究和重离子束应用创造了条件。尽管世界上已有几台加速器开拓了这个能区的工

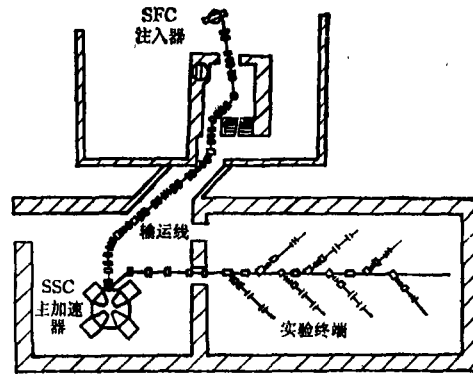


图6 兰州重离子研究装置 (HIRFL) 示意图

作,但由于重离子核反应远比轻核反应为复杂。因此我们还有很多深入细致的研究工作要做。

HIRFL作为大型科研工程项目于1976年11月由国家计委批准开始研制和建造,故又名7611工程,同步加速器大楼已于1984年底竣工。注入器已组装、调试、出束。主机设备已基本到齐,质量良好,现正进行主体安装和分系统调试。高频腔已经过高频锻炼,在8.5MHz时电压超过100kV;真空室试抽一次成功。真空度达到 $6 \times 10^{-8}\text{Torr}$ 。四扇磁铁的测磁工作正在进行。整个工程可望于1988年建成出束。

3. 800MeV 合肥同步辐射装置 (HESYRL)

图7给出合肥同步辐射装置的示意图。它包括四个组成部分,即电子直线加速器、运输线、储存环及实验区。电子直线加速器的能量是200MeV,它提供的束流一方面可注入到储存环,另一方面可运输到电子实验厅供核物理

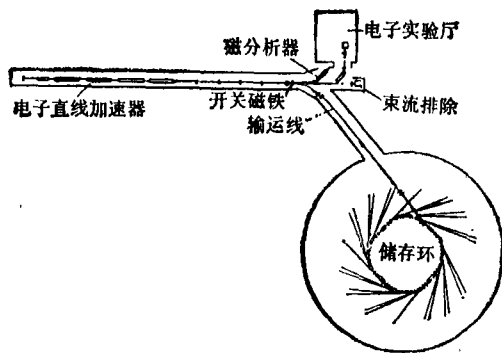


图7 合肥同步辐射装置 (HESYRL) 示意图

厅进行实验以及其它应用。储存环的能量是800MeV, 在其中作回旋运动的电子产生的同步辐射最多可由27个窗口引出, 在实验区进行工作。初期将先建一条光束线和一个光电子能谱实验站, 然后再逐步发展光刻-软X光显微学、时间分辨谱学和光化学等方面的研究。

HESYRL 是我国第一台专用的同步辐射装置, 建成后将为许多学科的研究与应用提供条件。它的由偏能磁铁产生的同步辐射光谱最强处(临界波长 λ_c 附近)为 24 \AA , 同时它的设计允许在直线节中放置各种插入原件, 如超导扭摆磁体、永磁波荡器等, 以缩短临界波长, 提高辐射强度。储存环的聚焦结构有几种工作模式, 以适应不同实验的要求。

HESYRL 工程于1977年提出, 1983年4月由国家计委批准, 1984年11月开始施工, 预计于1989年完成。目前进展情况是, 直线加速器的所有设备均已加工完毕, 基建完成, 正在进行安装。储存环的磁铁、真空盒、高频腔等样机均已完成, 批量生产正在进行, 预计1987年底开始总装。

4. 我国低能加速器应用的发展

我国的低能加速器除少数用于基础研究,

表2 我国低能加速器应用情况

加速器类型	总台数	国产台数	引进台数		治疗肿瘤	医用消毒	同位素生产	工业探伤	辐照加工		分析技术	离子注入	基础研究	计量标准	其他
			早年	近年					应用研究	试验性生产					
经典回旋加速器	4	2	2										4		
等时性加速器	1			1			1							2	
电子回旋加速器	2	2													
质子静电加速器	8	6	1	1									8		2
电子静电加速器	14	14							11	1					
高压倍压型加速器	18	17	1								6	9	1		
绝缘芯变压器型	6	6							2	1+1*					2 停工
高、中频倍压型	4	1+1*		2						1					
串列式静电	15	1+2*		12							13		2		
电子帘式加速器	2			2											
电子感应加速器	20	14	4	2	8			12							
电子直线加速器	59	16+1*		42	41	1		10	2				1		
高功率束电子加速器	8	8													
电回旋波导后增能器	1	1													
中子发生器	8	5		3											
离子注入机	168	138		22+8*											
质子直线加速器	1	1													
分离盘后加速器	1*														
边、环耦合电子直线															
分离扇重离子加速器	1*														
同步辐射贮存环	1*														
正、负电子对撞机	1*														

* 号表示正在调试或安装

大多数应用于国民经济等领域。在基础研究方面,比较突出的设备是中国原子能科学研究院由美高压工程公司引进的端电压为 13MV 和中国科学院上海原子核研究所自行设计制造的端电压为 6MV 的两台串列加速器。这两台加速器投入使用,必将对我国核物理研究、快中子物理研究和分析应用等起重要的作用。在低能加速器应用方面,主要包括放射治疗、同位素生产、材料改性、医药用品消毒、食品保鲜、离子注入、无损探伤、农业育种、核分析、三废处理等等。据美国 1980 年统计,世界上技术应用性质的加速器多于 3000 台,有 25 家公司专业生产,1973 年产值为 20 亿美元。由此可见低能加速器应用在国民经济中的重要性了。

我国建国以来,已先后建成近九十台、十几种类型的低能加速器;拥有一支约二千人的科技队伍,有二十多个单位具有研制和生产能力;在开发性的研究工作也取得了许多成果(见表 2)。总之,目前状况仅相当于国际上七十年代初期的水平,急待解决发展中存在的一些问题,以满足国民经济建设的需要。

三、新加速原理及其进展

高能加速器受技术和投资的限制,一般认为计划中的 SSC 等,已达现有加速方法的极限。进一步提高能量,必须开拓新的途径。因此,探讨新的加速原理提上了日程,受到愈来愈多的注意。以美国为例,1982 和 1985 年分别举行了新加速原理讨论会。在第二次会议上,有约 120 名物理学家和工程师参加,比第一次增加 100%。同时,讨论如此热烈,会议不得不把原定五天延长到九天,由这个情况不难看到新加速原理已日趋接近于实际应用。

由于电子或质子在环形超高能加速器中做回旋运动时,不能避免由同步辐射导致的来流能量损失,因此为实现超高能加速的新原理,人们集中研制直线型加速装置。其中有两个关键性能要求:一是高场强,以便把加速器长度限制在合理的范围内;一是高亮度,以适应一些重要高能反应截面与能量平方成反比的关系。

激光场强可达 10^{12} V/cm,用它来加速带电粒子是十分吸引人的想法。不过,细想一下:激光的电场与传播方向垂直,而且传播速度是光速,不能与粒子同步;因此直接加速是不可能的。要利用激光的强电场实现加速,目前看来有两个途径可以遵循:一种办法是使用光栅或介质或周期性金属结构以降低光的相速并产生传播方向的电场分量,但粒子必须运动在这些“物质”的附近(波长量级),因此叫做近场加速;另一办法是根据康普顿效应的反自由电子激光,使用两个不同频率的波与粒子作用,一个波是扭摆磁铁的静磁场,一个波是激光场,在这种加速方法中,粒子除纵向运动外还有横向运动,它们可以远离“结构”,因此叫做远场加速。这两种方法,都已经过原理上的检验,场强可达 GV/m 的量级,但技术困难很多,距实际应用还有很远的距离。

另一个产生强电场的方法是利用等离子体中的空间电荷波,大家最感兴趣的是使用两个频差等于等离子体振荡频率的激光来激发等离子体波,叫做拍波加速。激光使等离子体电子密度发生变化从而产生纵向的电荷波。实验上已测得的加速场强是 ~ 1 GV/m,理论上可以做到 10 GeV/m。尽管如此,等离子体的不稳定性是突出的,建成实际的拍波加速器,还有大量问题有待解决。

由于激光加速和等离子体加速都还不够成熟,而自由电子激光的研究近一两年却取得了很大的进展,故较多人倾向于这样的方案:即使用经典的盘荷波导加速结构,而用自由电子激光提供高频电磁场以加速正、负电子,建造能量大致为 1 TeV 的正负电子对撞机,以便进行与 SSC 强子对撞机相互补充的物理研究。

这种加速器叫做双束加速器,如图 8 所示。图中下部装置是产生高频场的自由电子激光器,上部是尺寸缩小的盘荷波导。研究工作在美国里维摩实验室进行,已产生频率为 35 GHz、功率为几百兆瓦的电磁波,也做出了铅笔粗细的工作在 35 GHz 的加速管。加速管的并联阻

(下转第 556 页)