

近几年高能加速器的新发展*

徐 建 铭

(中国科学院高能物理所)

提 要

本文从四个方面介绍1966年以来高能加速器的新发展。即强聚焦同步加速器、中高能强流加速器、对撞机和新技术及新加速原理。

强聚焦同步加速器是当前高能加速器的主要类型。近年来采用了分离作用强聚焦系统、增强器等新技术，最高能量已提高到400千兆电子伏，设计平均流强达微安级，都比六十年代水平提高十倍多。每千兆电子伏投资约60万美元，为六十年代水平的60%左右。

质子强流发展较慢，目前仍依靠二十多年前建成的稳相加速器，平均流强为微安级，最高能量1000兆电子伏。有的正计划改建，把流强提高到十至数十微安。建造中的有两台等时性回旋加速器，设计平均流强100微安，能量约500兆电子伏。一台800兆电子伏的质子直线加速器正在总调中，设计流强1毫安。高能强流电子束主要依靠电子直线加速器产生，目前已达22千兆电子伏，平均流强48微安。

利用相对运动的两束粒子进行对撞的对撞机是近年来发展较快的加速器类型。由于对撞实验中粒子能量利用率高，是今后进行“超高能”实验的有效方法。目前已经建成的电子正电子对撞机单束能量约2.5千兆电子伏，质子对撞机为26.5千兆电子伏。

在加速器方面已广泛采用电子计算机和自动化技术。正在研究中的新技术主要为超导磁体和超导谐振腔，目前正进行部件试验或模型加速器调试。电子环加速器及其他新加速原理还在研究中。

目前已讨论建造利用超导磁体的1000、2000直到5000千兆电子伏的质子强聚焦同步加速器及200千兆电子伏的质子对撞机。还有15千兆电子伏的电子正电子对撞机。直线加速器方面正在考虑建造“返航”加速系统把电子直线加速器能量提高到50—60千兆电子伏。建造中的有2千兆电子伏电子超导直线加速器，及计划中的数千兆电子伏的超导质子直线加速器。还讨论建造数十到一百千兆电子伏的电子环加速器。

1966年我们写了“高能加速器的发展概况”^[1]，总结了当时高能加速器的发展情况。到现在，经过六年，高能加速器技术又有了不少发展。本文概括了1966年以来高能加速器方面的一些新发展，供有关方面参考。一些原有情况，和几种高能加速器的工作原理，请参看文献[1]，这里不再重复。

一、强聚焦同步加速器

强聚焦同步加速器仍是最主要的高能加速器类型。强聚焦同步加速器已经发展到它的第三代，经过最近六年的发展，质子同步加速器的最高能量从33千兆电子伏，提高到

* 1973年4月11日收到。

400—500 千兆电子伏,提高了十倍多。1966年时,这种加速器的最大束流强度约 10^{12} 质子/秒,目前设计指标为 10^{13} 质子/秒,也提高了约十倍。当时最大束流平均功率约为 5×10^3 瓦,现在设计最大平均束流功率约为 1×10^6 瓦,提高了约二百倍。1966年时,电子同步加速器最高能量为 6 千兆电子伏。近来发展不大,只新建了一台。原设计能量为 10 千兆电子伏^[2],现改善了加速系统,已达 12 千兆电子伏,平均流强约 1.8×10^{12} 电子/秒^[3]。

1966年时,讨论中的能量在 40 千兆电子伏以上的质子同步加速器方案共 9 个^[4],后来日本^[4]和西德^[5]都分别提出建造 40 千兆电子伏、英国提出 150 千兆电子伏的这种加速器的方案,总共六个国家(或单位)共提出十二个高能加速器方案。到目前,只完成两台,建造中的还有一台,大部分方案并未进行。主要原因是投资太大,建成以后物理上的意义也难估计。质子同步加速器台数(包括弱聚焦型)原为十二台,有两台已经关闭(美国普林斯顿和布鲁克海文的三千兆电子伏加速器),又新建成两台,总数仍为十二台。十二台中美国伯克莱和苏联联合核子研究所的加速器已用于加速重离子^[6]。此外,还有两台正在建造中。这些加速器的主要指标见表1^[7]。新建的强聚焦同步加速器的技术指标和经济指标比过去都有不少提高,原有的几台加速器也作了改进,提高了性能。电子同步加速器进展较小,改变不大,几台大型电子同步加速器指标见表2^[7]。下面分别介绍质子同步加速器主要的几项改进。

1. 新建成及建造中的本型加速器

新建成了两台质子同步加速器,一台在苏联谢尔普霍夫(IHEP)能量 76 千兆电子伏^[8],目前达到的束流强度为 2×10^{12} 质子/脉冲(约 2.5×10^{11} 质子/秒)。另一台在美国巴塔维亚(NAL),能量 200/500 千兆电子伏,1972年初开始总调,目前已达 400 千兆电子伏。设计流强为 5×10^{13} 质子/脉冲^[9](平均 10^{13} 质子/秒),据目前得到的报导,只达到 10^{12} 质子/脉冲^[10]。

正在建造中的有:西欧中心的 300/400 千兆电子伏的 SPS,第一期工程 1976 年完成,原计划达到 300 千兆电子伏,现在决定第一期即达到 400 千兆电子伏,设计束流强度为 10^{13} 质子/脉冲(或 2.3×10^{12} 质子/秒)。另一台为日本建造的 8 千兆电子伏的加速器,计划 1974 年建成,估计流强为 $(1-5) \times 10^{12}$ 质子/秒。它将是考虑建造的 80 千兆电子伏的同步加速器的人射器。另外还有几台能量较低的同步加速器,它们是用作大加速器的人射器用,即所谓“增强器”(Booster)。

美国和西欧中心的两台高能加速器(NAL及SPS)都有利用超导技术产生强磁场,把能量提高到 1000 千兆电子伏的计划。美国考虑在现有环形加速器(NAL)上加建一台同样直径的超导同步加速器,场强 45000 高斯。质子从 NAL 入射到超导加速器进一步加速到 1000 千兆电子伏^[11]。西欧中心的第一期工程只安装一半磁铁,考虑以后在磁铁空位上补装超导磁体,提高能量到 1000 千兆电子伏^[12]。西德原来考虑建造 40 千兆电子伏的加速器,后来考虑建造 60 千兆电子伏的同步加速器^[13]。究竟如何发展,大概要看物理及加速器发展情况来决定,未必按现在发表的这些计划进行。

1) 最近已提高到 4×10^{11} 质子/脉冲。见 CERN Courier, 13(1973), No. 6, 189.

表1 主要的质子同步加速器参数表

地 点	NAL 巴塔维亚	SPS 西 欧	BNL 布鲁克海文	CPS 西 欧	IHEP 苏	IHEP 苏	日 本	ZGS 阿 贡
开始建造时间	1969	1971	1953	1955	1956	1962	1971	1959
完成时间	1971	1976	1960	1959	1961	1967	1974	1963
最高能量(千兆电子伏)	200/500	300/400	33	28	7	76	8	12.7
束流强度(质子/脉冲)	$5 \times 10^{13*}$	10^{13*}	$3 \times 10^{12(4)}$	$2.1 \times 10^{12(4)}$	6×10^{11}	$2 \times 10^{12(4)}$	$2 \times 10^{12*}$	$3.3 \times 10^{12(4)}$
平均强度(质子/秒)	10^{13*}	$2.3 \times 10^{12*}$	1.5×10^{12}	$1 \times 10^{12(4)}$	1.5×10^{11}	—	$1 \times 10^{12*}$	$1.5 \times 10^{12(4)}$
投资	2.5 亿美元	11.5 亿瑞士 法郎	30.65×10^6 美元	2 亿瑞士 法郎	—	—	40 亿日元	50×10^6 美元
增强器能量(兆电子伏)	8000	10000 (cps)	—	800 ³⁾	—	1500 ³⁾	500	200
流强(质子/脉冲) ²⁾	$3.5 \times 10^{12*}$	10^{13*}	—	$4 \times 2.5 \times 10^{12*}$	—	$2 \times 10^{12*}$	$3 \times 10^{12*}$	10^{12*}
每秒脉冲数 ²⁾	15	0.5	—	1	—	25	20	30
入射器能量(兆电子伏)	200	50	200	50	24	100	20	50
入射器流强(毫安)	75	140	100	140	140	120	100	40
入射圈数 ¹⁾	4	3	≤ 150	4×15	10	1	9	300
轨道平均直径(米)	2000	2200	256.9	200	80	472	108	54.7
磁铁截面(米 ²)	0.64×0.33	1×0.5	0.84×0.99	1.16×0.94	—	—	0.85×0.7	1.4×2.6
有效孔径(厘米 ²)	12.5×5.0	10.7×3.81	13.33×6.35	14.6×7	11×8	17×11.5	14×5.0	13.3×81.3
聚焦系统	S.F.	S.F.	A.G.	A.G.	A.G.	A.G.	S.F.	Z.G.
磁铁块数	1014	588	240	100	112	120	96	8
聚焦系统安排	FOBBBB DOBBBB	—	FOFDOD	FOFDOD	FODO	FODO	—	—
入射磁场(高斯)	396	600	251	147	240	76	1500	482
最高磁场(万高斯)	0.9/2.2	1.8	1.31	1.4	1.3	1.3	1.3	2.15
磁场上升时间(秒)	1.6	2.0	0.45	0.7—1.0	1.5	2.5	0.75	0.85
平顶长度(秒)	1	0.7	1.0	0.5—0.7	0.4	2	0.5	1
铁重(吨)	9000	11000	4000	3000	3000	20000	600	4700
铜重(吨)	850	770	400	130	500	700(AI)	40	68
峰值励磁功率(兆伏安)	58(200Gev)	113	30	41	—	—	12	110
平均功率(兆瓦)	28(200Gev)	36	2.4	2.8	3.2	—	0.9	10
倍频系数	1113	4227	12	20	7	30	9	8
加速频率(兆周/秒)	53.05—53.1	—	2.52—4.46	2.9—9.55	—	2.6—6.1	6—7.9	4.4—14
加速腔数	16	3	12	14	11	53	3	—
每圈增加能量 (千电子伏)	2.5×10^3	3.4×10^3	192	80	4	180	12.6	10
峰值高频功率(千瓦)	1800	1500	1000	375	60	—	250	60
平均高频功率(千瓦)	800	—	—	—	30	—	100	30
每秒脉冲	1/4	0.23	0.5	0.5	0.25	—	0.5	0.5

1) 有增强器者,指向增强器入射圈数. 2) S.F. 分离作用强聚焦, A.G. 指普通强聚焦, Z.G. 指零梯度聚焦.
 3) 计划建造. 4) 未用增强器的结果. 5) 增强器的指标.
 6) 目前已提高到 9×10^{12} 质子/脉冲. * 指设计指标.

表2 主要电子同步加速器参数

地 点	Desy 西 德	波 恩	NINA 英	CEA* 美	卡 纳 尔 美	伊 利 万 苏
开始建造时间	1959	1965	1963	1957	1965	1961
建成时间	1964	1967	1966	1962	1967	1966
最高能量(千兆电子伏)	7.5	2.5	5.2	6.2	10/12	6
束流强度(电子/脉冲)	2.2×10^{11}	4×10^{10}	2.4×10^{11}	1.5×10^{11}	3×10^{10}	10^{11}
平均束流(电子/秒)	1.1×10^{13}	2×10^{12}	1.2×10^{13}	9×10^{12}	1.8×10^{12}	5×10^{12}
投 资	1.1亿西德马克	12.3×10^6 马克	4.5×10^6 英镑	25×10^6 美元	11.5×10^6 美元	—
入射器能量(兆电子伏)	40	25	40	240	150	50
入射流强(毫安)	180	250	500	50	100	—
入射圈数	1	5	1	1	1	—
轨道平均直径(米)	50.4	22.15	70	72	250	70
磁铁截面(米 ²)	0.69×0.77	0.74×0.7	—	0.7×0.7	0.29×0.2	—
有效孔径(厘米 ²)	10×7 12×3.8	9×4	15×4.4 11.2×6.1	14×3	5.5×2.5	—
聚焦安排	FODO	OFDO	—	FODO	FDDF	FOFDOD
n 值	+69.26 -70.26	+23.26 -22.26	+47.17 -46.16	91	432	115
磁铁块数	48	12	40	48	192	48
入射磁场(高斯)	42	100	64	250	50	66
最高磁场(万高斯)	0.79	1.1	0.745	0.758	0.33	0.79
铁重(吨)	570	133	360	300	100	400
铜重(吨)	77	10	40	36.6	25	25
峰值励磁功率(兆瓦)	—	0.8	—	—	—	1.6
平均励磁功率(兆瓦)	1.7	—	0.95	1	0.77	—
倍频系数	520	116	300	360	1800	96
加速频率(兆周/秒)	499.666	499.67	407.88	479.7—479.8	714	132.8
加速腔数目	16	—	5	16	5	24
每圈增加能量(千电子伏)	1250	330	470	6000	10^4	727
每圈辐射损失(最大) (千电子伏)	8830	325	2700	4500	10^4	4400
峰值加速功率(千瓦)	1000	80	480	220	500	—
平均加速功率(千瓦)	360	40	150	220	120	—
每秒脉冲	50	50	53	60	60	50

* 现在已关闭。

2. 分离作用强聚焦系统^[14]的采用

过去建造的强聚焦同步加速器的磁铁要起弯转和聚焦两种作用,采用的是双曲线极面的C形磁铁。由于主磁铁要兼起聚焦作用,磁场沿半径的分布有一定梯度(一般约每厘

米变化5%—10%)。为了使磁场强的区域不致因铁的饱和磁场分布发生过多的畸变,中心轨道的磁场不能用得太高,一般 ≤ 14000 高斯。因而,一定能量的加速器的磁铁长度较长。另外,磁铁不得不选用C形截面。对一定的有效孔径(磁极之间,磁场分布满足要求的那部分区域),C形磁铁截面比较大。因此,单位长度磁铁重量也比较大。

在分离作用强聚焦系统中,弯转和聚焦作用分别由两类磁铁承担。磁场均匀分布的零梯度磁铁(主磁铁)起弯转作用,使粒子沿环形轨道廻旋运动。聚焦作用则主要由磁四极透镜承担。由于主磁铁的磁场是均匀分布的,中心轨道上的最高磁场可达18000到20000高斯,如NAL可工作在22500高斯。另外,可以选用方框形截面的磁铁结构,对一定有效孔径,磁铁截面又比较小。这样,对一定能量的加速器,既缩短了主磁铁长度,又减轻了单位长度磁铁的重量,使分离作用强聚焦系统的主磁铁重量减轻很多。尽管增加了一些四极透镜,总的说来,在一定条件下是比较经济的磁铁系统。所以新建的几台加速器及几台增强器多采用这种聚焦系统。从表4中可以看出美国新建的NAL和原有的BNL相比,单位能量的铁重降到原来的20%以下;西欧中心新建的SPS和原有的CPS相比,单位能量铁重也下降到原来的34%,变化是很显著的。

同时,也必须指出,分离作用强聚焦系统中,有聚焦作用的四极透镜只占整个粒子轨道的一小部分,例如在NAL中约占7%,(普通强聚焦系统中,有聚焦作用的磁场占整个轨道长度的80%左右)因而粒子流的聚焦性能要差一些。在小型加速器里,由于一些结构原因,需要的直线节长度不能随能量比例减小。如采用分离作用强聚焦系统,为了保证粒子束受到一定的聚焦作用,可能需用的四极透镜相对来说比较多。因此,要进行具体分析,比较那种聚焦系统较为有利。

3. 总体布局

目前高能同步加速器已是由多个加速器组成的加速器组合。试以西欧中心建造中的加速器为例,质子从离子源出来,经过倍压加速器加速,进入质子直线加速器又一次加速。

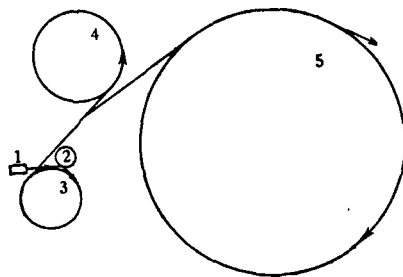


图1 一台高能质子同步加速器总布局示意图

- | | |
|--------|-------------|
| 1——离子源 | 3——CPS |
| 2——增强器 | 4——ISR(对撞机) |
| | 5——SPS |

然后,进入计划建造的小型同步加速器进一步加速到800兆电子伏,入射到同步加速器CPS,加速到10千兆电子伏。最后再入射到300—400千兆电子伏的加速器SPS,加速到300千兆电子伏。图1是这个加速器组合的布局示意图。它是一个由5台加速器串联组成的一个加速器组合。合适地选择这个组合,关系到加速器性能和经济指标。对这样一个多种加速器联合工作的复杂设备的总体设计过去实践经验不多,研究得不够。因此,几乎大部分大型同步加速器建成以后,又需要在总的联合工作线上增加一些欠缺的环节,如增加“增强器”。现在在这方面已积累了一些经验,有条件

也有必要对已有几台大型同步加速器的调整运行情况进行分析,找出规律,指导总体布局的选定。

最近的趋势是采用一台中间的小同步加速器来提高入射脉冲流强和入射能量,这台小同步加速器叫作增强器(Booster)。例如,早在1963年建成的零梯度同步加速器(ZGS)新建了200兆电子伏的增强器。西欧中心的CPS也在建造800兆电子伏的增强器^[15]。建成以后,希望能把CPS的束流强度提高到 10^{13} 质子/脉冲,从而保证建造中的SPS的流强达到 10^{13} 质子/脉冲。苏联的76千兆电子伏加速器计划建造1.5千兆电子伏的增强器,希望采用它以后,能把加速器流强从目前的 2×10^{12} 质子/脉冲,提高到 5×10^{13} 质子/脉冲^[16]。美国新建的NAL则采用一台8千兆电子伏的增强器,建造中的日本的质子同步加速器,能量虽低,也采用了一台500兆电子伏的增强器。

增强器的作用,除了提高主加速器入射能量,改善入射束流性能(由于加速过程中的绝热阻尼作用,束流聚焦情况和能散度都有所改善)外,更主要的是提高主加速器入射脉冲流强。直线加速器的束流通过增强器的积累作用(多圈入射)及粒子在增强器中速度的提高(束流在增强器中回旋周期缩短,相当于把脉冲电流强度提高),使得从增强器入射到主加速器的脉冲流强很高,有的设计值可达安培数量级。质子不从直线加速器直接入射到主加速器,而是通过中间的增强器以后,再入射到主加速器里面去,有它有利的方面。一方面可提高入射脉冲流强,另一方面,在主加速器同样入射能量的条件下,建造增强器比建造同能量的质子直线加速器可能会便宜一些。但是,到目前为止,增强器方面的实践经验不多,是否能达到预期的效果,还有待实践检验。

除了采用增强器,也有采用能量较高的质子直线加速器直接注入到质子同步加速器的。例如,美国的BNL就采用了这一方案,原有人射器为50兆电子伏的直线加速器,现已改用200兆电子伏的直线加速器。流强从原来的 4×10^{11} 质子/脉冲,提高到 3×10^{12} 质子/脉冲。但西欧中心的CPS,只靠提高原有50兆电子伏入射器的流强,并未提高入射器能量也把束流提高到 2.1×10^{12} 质子/脉冲。目前则增建了800兆电子伏的增强器。BNL和CPS这两台主加速器很相似,一台采用提高直线加速器能量,另一台增设增强器,使用情况如何,很有参考价值。此外,苏联也考虑了利用千兆电子伏的质子直线加速器作“超高能”质子同步加速器入射器的可能性。

增强器的周长比主加速器短得多,增强器的一次输出入射到主加速器中,只能填充主加速器环形轨道周长的一小部分。要把增强器的十余次到二十余次(由主加速器周长与增强器周长的比值决定)输出入射到主加速器里,依次填充主加速器的环形轨道,才能使轨道上充满粒子。为了缩短主加速器入射过程所花费的时间,使主加速器保持一定的脉冲重复率(如每分钟15—30次),以保证有足够的平均输出流强,或者采用快脉冲增强器,或者采用多环增强器。建成及建造中的增强器共有五台,其中四台为快脉冲的,一台为多环增强器。这些增强器的主要指标见表3。

快脉冲增强器就是快脉冲质子同步加速器,每秒15—30次输出。这样,主加速器的入射过程只需要 $1/2$ —1秒。在这个过程中,主加速器的磁场维持在入射水平不变。入射过程完毕后,磁场才开始上升,进行加速。增强器的设计流强多在 10^{12} 质子/脉冲以上,实际能否达到,尚难预料。过去只建成过一台快脉冲质子同步加速器(PPA),原希望获得强的平均流强,并没有达到希望的结果,每脉冲只有 10^{11} 质子。另外还有几台大型电子同步加速器,和快脉冲质子同步加速器工作情况相似,每脉冲也只有 10^{10} — 10^{11} 个粒子。所

表 3 一些增强器的主要指标

建造地点	CPS 西 欧	ZGS 美	日 本	NAL 美	IHEP 苏
轨道直径(米)	50	12	12	150.9	32
磁铁截面(米 ²)	1.52×0.71	0.4×0.55	0.7×0.8	0.46×0.33	—
有效孔径(cm ²)	13.2×6.1 13.5×12.1	2.8×6.4	5.6×14.0	6×2.25 6.5×1.65(磁极间隙)	—
能量(兆电子伏)	800	200	500	8000	1500
入射器	直线	直线	直线	直线	直线
入射能量(兆电子伏)	50	50	20	200	100
入射流强(毫安)	140	5	100	75	—
入射时间 ^(微秒) ^(圈数)	100/4×15	200/300	5.5/9	11.1/4	—
铁重(吨)	580	60	88.1	240	—
铜重(吨)	34.6	2.7	6.57	—	—
聚焦系统	分离作用	强聚焦	强聚焦	强聚焦	—
每秒脉冲	~1	30	20	15	25
束流强度 ¹⁾ (质子/脉冲)	4×2.5×10 ¹²	10 ¹²	3×10 ¹²	3.5×10 ¹²	~2×10 ¹²
(质子/秒) ¹⁾	4×2.5×10 ¹³	3×10 ¹³	6×10 ¹³	5×10 ¹³	~5×10 ¹³

1) 所有流强指标都是设计值。

以,看来要克服一定的困难,才有可能建成每脉冲有 10^{12} 个质子的强流快脉冲增强器。

西欧中心的 CPS 增建的多环增强器即将调整,它的磁铁有四个空气隙,每个气隙里面都安装一个真空室,从上到下依次安放,相当于把四个同步加速器迭起来。每秒一次输出,要求每个环有 2.5×10^{12} 质子/脉冲的输出。四个环的输出都注入到主加速器的真空室内。是否能达到要求的脉冲强度,也有待实验结果证实。

无论采用快脉冲或多环增强器,从增强器引出粒子并注入到主加速器都有一些困难的技术问题,如入射和引出都要求快速脉冲磁场,磁场的上升、降落时间控制精度要求在十一数十毫微秒;增强器加速电场与主加速器加速电场的频率、相位要准确控制等。从 NAL 调试报导来估计,这些问题在一定程度上已得到解决,最大困难在于增强器的输出流强达不到要求。

一方面要选择总体布置方案,即(选择能量较高的直线加速器直接入射到主加速器、或能量较低的直线加速器再经过快脉冲增强器、或能量较低的直线加速器经过多环增强器注入到同步加速器。或者增强器之后再经过一台同步加速器才入射到主加速器等各种可能的方案)。还要选定各台加速器各自负责的能区,及彼此交接的方案(入射积累的方法)。此外,还要从使用角度照顾到对这样一个复杂的加速器组合综合利用的可能。因为在这样一个加速器组合中,能量较低的加速器都是后面一台加速器的入射器,除进行入射外,其余时间可用于低能量的实验研究。也要考虑到加速器组合建造发展过程中,兼顾近期需要与长期需要的可能。

总之,六十年代中以前,人们主要进行单个加速器本身技术的研究。目前,加速器总

体布局的研究已提到日程上来。经过已有及新建几台大型加速器的调整运行,也积累了一定的实践经验,具备了进行初步分析研究,寻找内在规律的条件。

4. 经济指标的改进

表 4 列出几台主要的质子强聚焦同步加速器的几种主要经济指标。这些指标是单位能量耗铁量、单位能量的励磁功率(峰值)、单位能量投资及其他一些参数。数据表明,同一国家(或单位)新建的加速器比原有的加速器经济指标大都有所改善。单位能量耗铁量有的降低到原值的 15%,单位能量投资约降到原值的 50—60%。为了比较,还列出几台弱聚焦加速器的数据。

表 4 质子同步加速器主要经济指标

聚 焦 方 式	弱 聚 焦			强 聚 焦		分 离 作 用 强 聚 焦		
	Bevatron	联合所	ZGS	CPS	BNL	NAL	SPS	日本
加 速 器								
能 量 (千兆电子伏)	6.2	10	12.7	28	33	400/500	300/400*	8*
平 均 流 强 (质子/秒)	1.5×10^{12}	1.5×10^{10}	1.5×10^{12}	10^{12}	1.5×10^{12}	10^{13} *	2×10^{12} *	5×10^{12} *
耗 铁 (吨/千兆电子伏)	1560	3600	370	107	121	22.5/18	36.6	75
励 磁 功 率 (兆伏安/千兆电子伏)	19.5	14	8.65	1.46	0.91	~0.29	0.37	1.5
投 资 / 千 兆 电 子 伏	4.85×10^6 美元	—	3.94×10^6 美元	7.15×10^6 瑞士法郎	0.93×10^6 美元	0.625/0.5 $\times 10^6$ 美元	3.84×10^6 瑞士法郎	5×10^8 日元
真 空 室 截 面 (厘米 ²)	30×122	40×200	14.6×82	7.4×15	7.9×17.4	5.2×12.7	4.3×11.7	5×14
磁 铁 截 面 (米 ²)	2.75×6.0	5.3×7.5	1.4×2.6	1.16×0.94	0.84×0.99	0.33×0.64	0.5×1.0	0.7×0.85

* 表示为设计指标。

必须指出,这些数据是不准确的,各加速器的投资额所包括的范围不同,除加速器本身,还包括部分物理实验装备。没有更准确的资料,表 4 的数据仅供参考。有些加速器的数据是按设计值计算的,用*号标明。

另外,表 5 中列出美国的两台强聚焦质子同步加速器及电子直线加速器和质子直线加速器各一台的经济指标,以便比较不同类型加速器的性能。

表 5 美国的高能直线加速器与质子同步加速器经济指标比较

加 速 器	BNL	NAL	SLAC	LAMPF
单位能量投资(10^6 美元/千兆电子伏)	0.93	0.625(0.5)	5.16	70
单位束流功率投资(10^6 美元/千兆束流功率)	3.72	0.31*(0.25)	0.1	0.07*

* 表示设计指标。

二、中能和高能强流加速器

同步加速器平均流强一般只达到 0.1 微安数量级, 大约有三台电子同步加速器平均流强达到微安数量级, 它们是 Desy, Nina 和 CEA. 设计中的质子同步加速器的流强指标也为微安数量级. 更强的束流要靠其他类型加速器产生. 1966 年以来, 谈论中的强流中能及高能加速器有十多个, 实现的很少. 只是在电子方面建成了 22 千兆电子伏的 SLAC 电子直线加速器, 进行了不少物理实验工作. 质子强流方面仍依靠稳相加速器进行实验工作, 这些加速器大多是四十年代末五十年代初期建造的. 1972 年中初步建造了一台 800 兆电子伏的质子直线加速器 (LAMPF), 得到的束流很弱, 作为强流加速器来说, 还不能认为已经完成. 下面分别介绍圆形强流加速器、质子直线和电子直线加速器.

1. 圆形强流加速器

1966 年时认为最有希望的圆形强流加速器是恒定磁场强聚焦加速器和等时性回旋加速器. 恒定磁场强聚焦加速器 (FFAG) 曾被认为是很有希望的高能 (十千兆电子伏左右) 强流加速器类型, 从五十年代初到六十年代中期大约有十多个实验室对这种加速器进行了大量的研究工作, 经过理论、模型及部件研究, 认为这种加速器技术复杂, 造价很高, 已被放弃. 由于超导磁体技术的发展, 近来有的实验室开始研究建造超导恒定磁场强聚焦加速器的可能^[17].

低能的等时性回旋加速器在核物理及应用方面起很大作用, 发展很快. 中能等时性回旋加速器进展较慢, 建造中的 500 兆电子伏的这种加速器有两台, 计划平均流强为 100 微安^[18].

近年来中能实验物理还是依靠五十年代初期已经建成的一些稳相加速器进行. 这些稳相加速器经过不断改进, 一台约 160 兆电子伏的稳相加速器已得到 10 微安质子流^[19], 有些稳相加速器计划进一步改进, 把平均流强提高到数十微安^[20]. 如果能够实现, 在中能物理领域里, 可能这批稳相加速器还会继续发挥作用.

2. 质子直线加速器

低能质子直线加速器主体是圆筒状金属腔, 轴线上按一定规律安排有名叫漂移管的圆筒形加速电极. 把大功率超高频发生器的高频功率输送到圆筒里, 激励起高频电磁场. 加速电极之间的加速间隙内便有轴向高频电场发生, 用来加速质子. 这种加速结构是阿瓦瑞兹首先采用的, 通称为阿瓦瑞兹结构. 通常采用的频率是 200 兆周/秒, 尺寸比较大, 直径约 1 米. 用来加速低能量 (100 兆电子伏以下) 的质子, 效率比较高. 质子能量增高, 漂移管要作得很长, 这种结构的加速效率变低, 加速结构本身发热消耗太大. 通过研究, 找到一种适于把质子加速到高能量的加速装置, 叫边偶合腔. 这种加速装置主体由一段段短的高频谐振腔组成, 它们沿着直线轴线串联焊接起来, 起加速作用. 这些腔叫作主腔. 经过在电子计算机上反复计算比较, 并通过模型试验, 选定了效率高的主腔的形状^[21]. 相邻主腔之间通过另外一个谐振腔把它们偶合起来, 这些起偶合作用的腔, 安放在加速器

主体的外边,所以称为边腔。图2是这种加速器的结构示意图。通过理论与试验分析,证明采用了这些不起加速作用的偶合腔以后,整个加速结构稳定性提高了^[22],公差要求也降低了。或者说单个腔的尺寸形状的误差及强粒子流的通过对加速器中加速电场分布情况的影响较小,因而对加速器性能影响较小。这种加速结构,可以在较高频率下工作,目前采用的是800兆周/秒,主控直径约20余厘米。目前这种边偶合腔结构已在工业及医疗用的小型电子直线加速器上采用,证明它的确是高效率的加速结构。

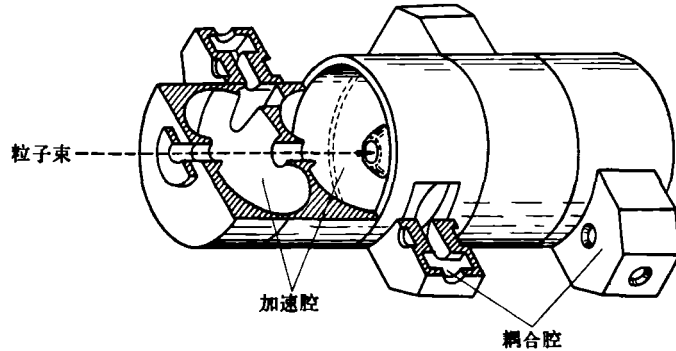


图2 边偶合腔示意图

相邻主控(加速腔)通过边腔偶合起来,主控和边腔有同样的谐振频率,这种偶合情况叫谐振偶合(Resonance Coupling)。采用谐振偶合提高直线加速器稳定性的想法也推广到阿瓦瑞兹结构。在那种结构里不能采用边腔,而是采用“多杆”^[23]或“偶合杆”^[24]。所谓“多杆结构”,就是加多漂移管的支撑杆,选择支撑杆的数目(一般4根)和直径,使它兼起谐振偶合的作用。“偶合杆”结构中不加多支撑杆,而是在垂直于支撑杆的方位上,对着漂移管轴线,从外筒伸进一个金属杆。调节它与漂移管的距离,适当地选择杆的直径,也能使它起谐振偶合的作用。“多杆”的损耗较大,调节也不及偶合杆方便。建造较早的BNL的200兆电子伏质子直线加速器采用多杆结构。NAL的200兆电子伏加速器和洛斯阿拉莫斯的LAMPF,100兆电子伏以前都采用偶合杆结构(100兆电子伏到800兆电子伏则采用边偶合腔)。

已建成的质子直线加速器主要用作同步加速器的入射器,能量较高的有IHEP的100兆电子伏,BNL和NAL的200兆电子伏各一台,还有800兆电子伏的LAMPF。最后一台是中能强流加速器,作为介子工厂,用于中能核物理、介子物理、放射化学、放射生物学以及其他应用基础研究。设计平均流强为1毫安,已得到的报导,这台加速器已达到800兆电子伏,但目前平均流强只有0.1微安(脉冲流强可达4毫安),主要困难是解决加速过程损失的粒子产生的放射性问题^[25]。这台加速器正在调整改进中,计划在今年底把平均流强提高到10—100微安^[26],最后性能如何,对建造中能强流质子直线加速器有参考价值。已建成的几台质子直线加速器的主要参数见表6。

此外,苏联考虑建造能量约千兆电子伏的常温质子直线加速器,西德曾考虑建造7千兆电子伏,平均流强100微安的超导质子直线加速器。

此外,苏联考虑建造能量约千兆电子伏的常温质子直线加速器,西德曾考虑建造7千兆电子伏,平均流强100微安的超导质子直线加速器。

3. 高能电子直线加速器

斯坦福的22千兆电子伏电子直线加速器于1966年建成,工作稳定,性能较好。这台加速器长3公里,采用了245个速调管作微波电源,每个速调管脉冲功率21兆瓦,总微波功率(峰值)4000兆瓦^[27]。平均电子流强度48微安。计划把能量进一步提高到50—60

表6 几台质子直线加速器的主要参数

地 点	CERN	日 本	ITEP	IHEP	BNL	NAL	LAMPF	
能量(兆电子伏)	49.7	20	24.6	100	206	200.3	800	
长度(米)	28.7	15.5	18.4	90	145	144.8	794	
腔链数目	3	1	2	3	9	9	4	44 ¹⁾
频率(兆周/秒)	202.56	201	148.5	148.5	201	201	201.25	805
离子源电流(毫安)	1000	300	1000	450	400	—	48	
倍压加速器电压(千电子伏)	540	750	700	700	780	750	750	
倍压加速器电流(毫安)	1000	250	400	240	400	300	48	
脉冲流强(毫安)	140	100*	200	120	100	110	5×10 ¹³ */脉冲	
平均流强(毫安)	—	—	—	—	—	—	1*	
发散度(mm-mrad)	20 π	10 π	12	20 π	10 π	5 π	5	
峰值高频功率(兆瓦)	—	2.7	6.0	15	45	37	12	55
平均高频功率(兆瓦)	—	10(千瓦)	1.8(千瓦)	4.5(千瓦)	0.18	0.11	1.03	4

1) 高频电源数目。

* 设计指标。

千兆电子伏^[28]。提高能量的方法是在电子加速一次以后,把电子引入到一个储存环里储存起来。下一次微波脉冲时,把电子注入到直线加速器里再加速一次。此外,还预备用功率较大的速调管(30或60兆瓦)来更换现有的速调管。更换以后,可以提高加速电场,从而把电子能量(经过两次加速)提高到50—60千兆电子伏。

电子流较强时,也发现束流不稳定现象,称为束流崩溃现象。发生崩溃现象的电流强度和加速器参数有关。改变加速器某些参量,压制一些有害模式的激发,改善横向聚焦等方法能改善这种情况。

表7列出几台高能电子直线加速器的主要参数。

4. 直线加速器返航加速

粒子通过直线加速器加速一次以后,可以利用恒定磁场把粒子偏转回来,再进入直线加速器,又进行一次加速。这种加速方法称为返航加速。从原理上讲,可以反复多次“返航加速”,利用一段能量不太高的直线加速器,把粒子加速到较高的能量。这一加速原理和微波加速器(Microtron)相同,只不过把微波加速器中的单个加速腔换成直线加速器的腔链而已。所以有人把直线返航加速装置也称为微波加速器;而用以加速质子的,则称为质子微波加速器(Proton Microtron)。

偏转磁场是恒定的,因此这种加速器原理上可以连续工作,易于获得较大的平均流强。这种加速方法在五十年代就已被提出,如文献[29,30]。直到最近才开始有人进行建造^[31]。设计能量为600兆电子伏,用一段30兆电子伏的超导电子直线加速器作加速装置,反复加速20次,以达到600兆电子伏。

表7 高能电子直线加速器主要参数

建造地点	美	法	美	苏
开始建造时间	1949	1956	1962	—
完成时间	1953(1964)	1959	1966	—
能量(千兆电子伏)	1.2	2.1	22.1	2.0
平均电流(微安)	5	7.5	48	1.2
投资	3.5×10^6 美元	10^8 法郎	114×10^6 美元	—
入射电流(毫安)	300	600	100	—
工作频率(兆周/秒)	2856	2999	2856	2797
模式	$2\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	—
节数	31	1+37	960	—
每节长度(米)	3	6	3	—
总长度(米)	100	228	3050	220
品质因数Q	13500	11800	13000	—
峰值微波功率(兆瓦)	600	840	4000	—
平均微波功率(兆瓦)	0.1	0.28	4	—
每秒脉冲	120—0.1	50	360	50
脉冲长度(微秒)	0.8—1.3	1.7	1.67	2

三、对撞机

1. 概况

近几年对撞机获得较大的发展,特别是电子正电子对撞机发展很大。1966年时,超过1千兆电子伏的电子正电子对撞机只有意大利的Adone一台(1.5千兆电子伏)。现在,已建成及建造中的超过1千兆电子伏的电子正电子对撞机已有五台,最大设计能量(单机能量)为4.5千兆电子伏。西欧中心的质子质子对撞机已建造成功,进行实验工作。它的最高能量目前达到26.5千兆电子伏,回旋电流6.9安培。

经过几年的实践,在粒子流的积累,超高真空的建立,对撞机的设计、调整、自动控制和利用对撞机进行物理实验等方面都积累了一定经验。对强束流运动的各种不稳定性问题也进行了初步的理论和实验研究。

对撞机建成之前,高能物理实验是用高速运动(对实验室而言)的粒子轰击实验室中静止的靶。这种情况下,高能粒子能量中只有一小部分是有效的。计算表明,用对实验室系统动能为 T 的粒子,去轰击在实验室中静止的粒子,如果这两个粒子静止质量相同,则有效作用能 T_0 约为:

$$T_0 \cong (2E_0 T)^{1/2}$$

E_0 为静止能量。即有效作用能与高能粒子的动能的平方根成正比,能量愈高,有效作用

能所占的比例 T_e/T 愈小。另外,对同样能量的高能粒子来说,静止质量愈轻,有效作用愈小。所以,用高能电子轰击静止电子,以研究电子与电子的相互作用是最不利的,高能电子的能量中只有很少一部分转化为有效作用能。例如 3900 千兆电子伏的电子与静止电子相互作用,有效作用能不过 2 千兆电子伏,效率很低。

如果不用高能粒子轰击静止靶,而是用两束相对运动的粒子互相对撞,则作用能会大得多。如果能量相同的两个同种粒子对撞,则有效作用能等于两个粒子能量之和。例如,两个 1 千兆电子伏的电子对撞,其有效作用能就相当于 3900 千兆电子伏的电子与静止电子的作用能。利用两个高能粒子对撞来进行高能物理实验的想法在 1956 年^[32] 提出以后才受到重视。

因为用高能电子轰击静止电子进行实验时能量利用率很低,所以过去高能电子加速器不用来研究电子电子碰撞问题。而是用以研究电子与质子的作用。高能电子电子相互作用问题,主要是在对撞机建成以后,利用对撞机进行的。图 3 是粒子单束能量与作用能的关系曲线。

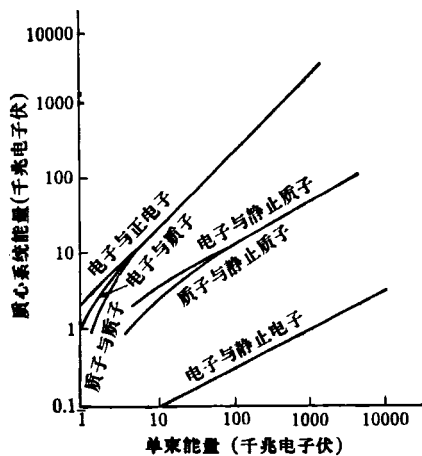


图 3 粒子(单束)能量与作用能的关系曲线

能够进行反向运动使高能粒子对撞的设备叫对撞机。对撞机和同步加速器很相似,电荷相反,静止质量相同的粒子,象电子正电子,质子和反质子可以使之在同一个环形加速器中反向回旋进行对撞。电荷相同的粒子为了实现对撞,就须要建造两个环形加速器,每个环里各有一束粒子回旋,两个环相切或在几个地方交叉,在相切或交叉的地方粒子进行对撞。相对运动的两束粒子碰撞的几率很低,要向环里入射尽可能多的粒子(即粒子的积累),同时改善聚焦情况,以增加粒子发生对撞的可能。新建的对撞机都很好设计聚焦系统,使粒子对撞处截面很小,这种系统称为“低 β 系统”。为了充分利用那两束粒子,要使它们长时间回旋,不断发生碰撞。因此,这种环形装置也称为储存环。真空室里的残余气体分子也会和粒子束发生碰撞,引起粒子的损失;还会发生不需要的反应,干扰物理实验的进行。所以,对撞机要求较高的真空度,一般在 10^{-9} — 10^{-10} 毫米汞柱,对撞区域要求更高, 10^{-10} — 10^{-11} 毫米汞柱。

目前,普通同步加速器把粒子加速到最高能量,也使磁场维持恒定,粒子就在真空室内回旋(不再加速)。这种情况,和储存环完全一样。不过普通同步加速器是利用加速的粒子与静止靶作用的,粒子流不需要长时间储存在加速器里,只要维持一秒左右的时间。在这一秒左右时间内逐步把粒子流引到静止靶,进行物理实验。储存环(或对撞机)长时间维持磁场恒定,并保持超高真空,使粒子流能长时间回旋。一般可储存数小时到十余小时。

2. 电子正电子对撞机

已建成和建造中的 500 兆电子伏以上的电子正电子对撞机共九台,主要参数见表 8。

电子与正电子电荷相反,质量相同,可以使它们在同一个环形磁场中反向廻旋。大多数电子正电子对撞机都只有一个环形磁铁和真空室。磁铁系统和电子同步加速器相似,可以采用弱聚焦、强聚焦或分离作用强聚焦系统,有的对撞机就是利用原有的电子同步加速器改建的。

表8 主要的电子正电子对撞机(500兆电子伏以上)参数

地 点	ACO 法	Adone 意	CEA ¹⁾ by-pass 美	Spear 美	VEPP-2 苏	VEPP-3 苏	Doris 西德	ACO II 法
开始建造时间	1962	1964	1967	1970	—	1966	1969	—
完成时间	1965	1969 ¹	1972	1972	—	1971?	1974	—
投资	15×10 ⁶ 法郎	9×10 ⁶ 美元	—	5×10 ⁶ 美元	—	—	10 ⁸ 马克	—
最高能量(千兆电子伏)	0.54	1.5	1—3.5*	2.5—4.5	0.7	3.5	3	1.8
入射器	直线	直线	直线	直线	同步	同步	直线+同步	直线
入射能量(兆电子伏)	240	320	240	1500	—	500	2200	—
入射流强(毫安)	2×10 ⁹ e ⁺ / 脉冲	100e ⁻ 6e ⁺	30e ⁻ 0.1e ⁺	—	—	—	60e ⁻ 50e ⁺	—
聚焦形式	S.F.	S.F.	A.G.	S.F.	弱	S.F.	S.F.(双环)	S.F.(双环)
铁重(吨)	90	350	340	220	—	50	800	—
铜重(吨)	12	30	40	10(AL)	—	4	70	—
高频频率(兆周/秒)	27.236	8.568	475.79	51.2	—	75	499.67	25.35
加速电压(千伏)	17.5	160	2×10 ³	500	—	—	3.2×10 ³	350
峰值高频功率(千瓦)	10	190	220(2Gev)	160	—	1000	2×750	—
平均高频功率(千瓦)	—	20	40	110	—	400	2×580	—
真空度(托)	10 ⁻⁹	5×10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	3×10 ⁻⁹	—	5×10 ⁻⁹	2×10 ⁻⁸	—
积累电流(毫安)	25	60(1.2Gev)	—	220	40e ⁻ 5e ⁺	—	900	—
束流寿命(小时)	12	15	—	2	—	—	6	—
亮度 ¹⁾ (cm ⁻² Sec ⁻¹)	6×10 ¹⁸	3×10 ¹⁹	10 ²¹ *	10 ²¹ *	10 ²¹	10 ²¹ *	10 ²² *	10 ²² *

1) 亮度乘以反应截面(用 cm² 作单位),即得每秒内反应次数。

2) 这台已关闭,最后三台,还没有总调的报导。 * 表示设计指标。

电子和正电子在同一个真空室里反向廻旋,在需要进行对撞实验的直线节里,电子束和正电子束的中心轨道重合,进行对撞。借助于轴向电场或径向磁场,使得在其他地方电子束和正电子束中心轨道畸变(相对于真空室轴线),在轴向上下分开,不使它们发生不必要的对撞。个别对撞机(如 Doris, ACO II)采用两个环,以减少正负电子束之间的作用对束流稳定性的影响。

利用辐射损失对电子振荡的阻尼作用便能进行电子或正电子的积累。电子(或正电子)入射到对撞机以后,在环形磁场区内廻旋运动,发生辐射损失。由于辐射阻尼作用,粒子振荡振幅衰减,大部分粒子轨道会离开入射设备的影响区(如偏转磁场或电场)。再入射第二束电子时,原有的电子流受到入射系统的扰动很小,不会使原有电子束有较大的损失,这时又俘获了一束新入射的电子,真空室内廻旋的电子数目有所增加。这样,一次次

注入进去,便能积累到较多的电子。入射器一般采用数百兆电子伏的直线加速器。有的对撞机,为了加速入射积累过程,入射进去一束电子后,主磁场上升,进行加速,以增强辐射阻尼作用。磁场升到较高值,电子被加速到1—2千兆电子伏以后,磁场下降,电子又被减速到入射能量。电子束通过这样一次加速减速过程,受到的辐射阻尼作用较大,磁场恢复到入射磁场值时,就可以再入射一束电子,以后再重复一次加速减速过程^[33]。在这段过程里,对撞机的工作情况和电子同步加速器相似,只是电子加速到最高能量时,不把它引出利用,而是储存在真空室里,再把它减速到入射能量。由于增强了辐射阻尼作用,一秒钟可以入射50—60次。而当不采用这种加速减速过程时,每秒只能入射几次。采用加速减速过程的对撞机的磁铁,要能在50—60周交变磁场下工作。

入射器多采用数百兆电子伏的直线加速器或同步加速器。正电子由电子束与靶作用产生,可被用来入射的正电子束强度约为电子束强度的 10^{-4} — 10^{-2} 。由于入射的正电子束较弱,需要的积累时间较长,一般先积累正电子,然后再积累电子。

电子和正电子积累到饱和值以后,把它们加速到需要的能量,磁场强度保持在对应粒子能量的数值上,电子正电子就在对撞机内回旋对撞。电子对撞机的最高能量主要受高频功率的限制。高能电子及正电子回旋运动时辐射损失比较大,例如10千兆电子伏的电子在大半径低磁场(3300高斯)的对撞机里,每圈辐射损失也约10兆电子伏。如果对撞机的回旋电流为1安,则为了补偿这束电子流的辐射损失需要的平均高频功率为10兆瓦。假如正电子流也为1安,则总平均高频功率为20兆瓦(不包括腔本身损耗的功率)。目前讨论中的电子正电子对撞机最大的约15千兆电子伏。

3. 质子对撞机

已建成的质子对撞机只有西欧中心的一台,目前最高工作能量是26.5千兆电子伏(单束的能量),用原有的CPS作入射器。CPS在26.5千兆电子伏时粒子束的能散度和发散度都很小(估计能散度约0.05%,发散度约 1π 毫米—毫弧度)。因此,可以把比较多的质子同步加速器的输出脉冲累积到对撞机的两个环里。两个环有八点相互交叉,粒子就在那里对撞。图4是它的布局示意图。(实际上ISR有八点交叉,示意图上只有六点。)

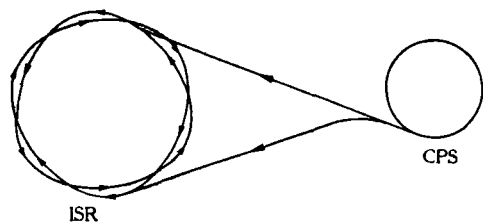


图4 西欧中心质子对撞机布局示意图

在那里对撞。图4是它的布局示意图。(实际上ISR有八点交叉,示意图上只有六点。)

质子在数十千兆电子伏时,辐射损失仍很小,所以质子对撞机不能采用电子对撞机相类似的累积方法,也不能在很低能量下入射积累。只能用高能质子同步加速器输出的能散度和发散度都很小的质子束,多圈入射,

累积较多的质子。西欧中心是在纵向振荡相空间中积累质子的。能散度很小的质子束从环形真空室内侧壁附近入射进去。入射后用高频加速系统把质子俘获(磁场维持恒定)。调节加速系统频率,便把这一束质子推到真空室外侧壁附近。然后,去掉加速电压,那束质子就留在外侧壁附近回旋。把高频系统参数调回到入射时所需数值,再入射一束质子,又由加速系统把这束粒子推移到原有粒子束的附近。这样周而复始,直到质子束强度达到最大值。像西欧中心那台对撞机,每个环约入射400—500次。另外,也可采用普通多

圈入射方法,在横向振荡相空间里累积质子。

西欧中心的对撞机只起积累对撞作用,采用恒定磁场。质子对撞机也可以在积累了足够的质子以后,磁场上升,把质子加速到更高能量。然后再使磁场维持在对应值上,进行对撞实验。同时,也可以引出粒子,进行与静止靶作用的实验工作。以后建造的质子对撞机大致都会采取这种工作程序:积累、加速、储存对撞,同时也可引出粒子进行其他实验。这种对撞机,和超高能质子同步加速器差别很小。

已知的,正在讨论中的质子对撞机有,美国讨论用原有的BNL作入射器,建造200千兆电子伏对撞机^[34],考虑采用超导磁体,45000高斯。工作程序为积累、加速、储存对撞或引出。还可能另加一个十千兆电子伏的电子正电子储存环,以进行质子—电子对撞实验。另外,还有可能储存反质子束,氘核束等,以进行质子反质子,氘核质子以及氘氘对撞实验。此外,还讨论建造70千兆电子伏质子储存环与15千兆电子伏电子正电子储存环^[35],以进行质子电子对撞(65千兆电子伏)及电子正电子(30千兆电子伏)对撞实验。苏联在建造约21千兆电子伏的质子反质子对撞机(VAPP—NAP)^[36]除进行质子反质子对撞实验外,这台对撞机旁边还建造电子正电子储存环,以进行电子质子对撞实验。高能质子与金属靶作用可产生反质子,所得到的反质子流聚焦性能很坏,计划用一束电子来改善反质子束的聚焦性能,这一过程叫“电子冷却”^[36]。讨论中的能量为二百千兆电子伏对撞机采用33千兆电子伏同步加速器入射,估计改善后的数十千兆电子伏的同步加速器束流比较强,可能每脉冲 10^{13} 个质子。因此,只要把这么强的质子流入射到对撞机内,已能使对撞机积累够多的质子,无须入射数百次^[37]。这样,即将建造的数百千兆电子伏对撞机和质子同步加速器基本上是一样的。只是对撞机需要两个环形磁铁,同时粒子加速到最高能量以后,粒子储存时间较长,磁场要长期维持在最高值,因而励磁及冷却系统功率较大,同时真空室真空度较高。

四、新技术的采用和新加速原理的研究

1. 计算技术和自动化技术

电子计算机和自动化技术在高能加速器的设计、调整和运行工作中日益广泛采用。如部件设计,像高频腔设计、磁铁设计;加速器物理设计,如粒子动力学问题、加速器参数总设计;部件实验研究数据的自动分析处理;加速器调整运行过程中,轨道畸变的自动补偿,入射、引出加速系统中各种参量的自动调节等,普遍采用电子计算机技术和自动控制技术。使得在过去无法精确计算的繁难问题获得解决,大量在过去依靠多次模型测量、逐步近似的设计工作得以简化。

2. 超导磁体技术

利用超导材料绕制的绕组来产生磁场,通称超导磁体。超导绕组消耗功率少,并可产生很强的磁场。恒定超导磁体已经在物理仪器如泡室及热核反应装置中被采用,高能加速器需要的脉冲超导磁体,也在进行模型研究,取得初步结果。

目前采用最多的是用铌钛丝绕制成的绕组,铌钛丝直径约5—10微米,用这种丝制成

多股绞线。若干根多股导线按一定规律换位编制成绕组。导线在空间按一定规律分布,以产生所需要的磁场形式,如二极矩磁场,四极矩磁场等。模型磁体已达到的性能为,在4.2°K下,最高磁场约4—4.5万高斯,电流密度约20000—30000安/厘米²,磁场上升时间(上升到最高磁场所需时间)一般为数秒以上,最短约半秒—1秒。磁体孔径10厘米,上升时间1秒,长40厘米的超导磁体发热率约9瓦^[36]。

对超导同步加速器的成本估计,还缺乏可靠材料。有人估计超导同步加速器造价可能为常温加速器的30—50%。有人估计超导同步加速器的磁体系统造价可能为10万美元/千兆电子伏,连同十年运行费在内,超导磁体系统可能为常温磁铁费用的1/3—1/4。

目前存在的问题,一方面是进一步研究加工工艺,改善工作稳定性。另外提高可能达到的磁场强度及电流密度,降低造价。例如研究Nb₃Sn, V₃Ga或用其他高临界温度、高临界磁场的超导材料制造合用的长丝的加工工艺,使用超纯金属制造绕组来产生磁场的经济性等。

估计用超导磁体来建造积累、加速、储存对撞的对撞机比较容易实现,因为这种对撞机允许加速过程比较长,如长达数分钟甚至半小时。磁场上升时间数分钟或半小时的超导磁体较易建造。并且对撞机要在高磁场(恒定磁场)下长时间工作,进行对撞实验,更能发挥超导磁体的优越性。如果建造同步加速器,为了得到一定的平均束流,磁场重复周期(即加速周期)需要在数秒—十秒,不能太长。这种超导磁体还要进行研究,提高工作稳定性和经济性。

3. 超导谐振腔

直线加速器从原理上讲是一种可以连续工作的加速器类型,它的参数如加速频率都是恒定的并不随时间调变。现在建造的绝大部分直线加速器却都是脉冲工作的,负载因子一般都比较小如0.1%—10%左右。这样就限制了直线加速器平均流强的提高。主要原因是谐振腔或波导中微波损耗太大。六十年代以来,不少实验室计划用超导谐振腔或波导来建造直线加速器。

现在对超导腔的加工工艺,如纯铌的加工,抛光,高温(1800℃以上)高真空(10⁻⁸托)下热处理工艺等方面都摸索到一些经验。实验室制造的小腔(3厘米波段)的最大表面场强可达70兆伏/米,品质因数在10¹⁰以上。但超导加速器上可能采用的大腔(10厘米波段)的表面最大场强,目前只达到20兆伏/米左右,品质因数仍可达10⁹—10¹⁰,只是有效加速场强较低。所以,制造超导直线加速器的主要问题是进一步改善超导腔工艺,提高超导腔的最大电场强度,以缩短加速器长度,减低造价。另外,还要改善腔的稳定性,解决或减轻长期运行中腔的老化,暴露大气中毒,以及辐射的影响。用目前超导腔达到的水平来建造电子直线加速器,长度不能缩短,但腔耗减少(约为常温的10⁻³),使微波源功率和运行费用减少。斯坦福高能实验室已经建造一段超导电子直线加速器^[39],得到50微安,6.6兆电子伏的电子流。由于腔的工艺还有待改善,这段加速器的平均加速场强不高,只有3.8兆伏/米,低于常温电子加速器的加速场强(6—10兆伏/米)。正如所估计的那样,电子束的能散度比较好,约10⁻³。估计,超导直线加速器一方面可连续运行,使负载因子达到100%,(对某些物理实验有利)。另外,加速器处于连续工作状态,主要参数稳定度好,高

能超导直线加速器的束流能散度可能达到 10^{-4} 的水平。

质子直线加速器的超导腔的加工问题更为困难。不过常温质子直线加速器的平均加速场较低,只有 1—2 兆伏/米,因此,即使超导腔的最大电场比较低,也可采用。目前,超导质子直线加速器的低能段已开始进行模型试验,采用了超导螺旋线结构,平均加速场强 1.5 兆伏/米,质子从 0.75 兆电子伏的倍压加速器入射到一段超导螺旋线,使质子能量增加了 400 千电子伏^[40]。轴上平均加速电场达 3 兆伏/米的超导螺旋线也建造成功^[41],螺旋线和它的外筒都是用纯铌制成,工作频率 80 兆周/秒,工作温度 1.8°K,品质因数约可达 10^9 ,加速的粒子的 $\beta = 0.06$ 。适于加速中能或高能质子(数十到数百兆电子伏)的超导谐振腔也正在研究中。

为了建造高能超导直线加速器,除须解决高加速场强、稳定性好、有一定品质因数(10^9 以上)的超导腔的制造问题外,还有其他一些技术问题,需要着重解决。如高品质因数的腔的激励问题,自动控制问题。需要研究解决加速过程中损失的粒子对超导腔的影响,低温稳定自控问题等。超导腔品质因数很高,估计束流崩溃现象也较为严重,设计时应注意解决。西德曾考虑建造 7 千兆电子伏的超导质子直线加速器,设计平均流强 100 微安,估计造价约 5000 万美元(按 1 马克 = 0.27 美元折合)。(目前已考虑把能量改为 1 千兆电子伏)。美国斯坦福高能实验室正建造 2 千兆电子伏的超导电子直线加速器,估计平均流强 250 微安,能散度 10^{-4} ,连续工作,加速器总长 140 米。现在调试的一段电子超导加速器就是这台加速器开始的一段。

在新加速原理方面,像恒定磁场强聚焦加速器,用强电子流产生强磁场来约束质子的所谓 Будкер 加速器,相干加速原理^[42],以及用激光加速电子等建议,都没有取得进展的报导。1968 年苏联发表电子环加速器的建议^[43]。它的工作原理是,把强电子流垂直入射到磁场区内,磁场有一定的空间分布形式,并随时间增强,在磁场的约束,和动磁场感应加速作用下,形成密集的电子环,(环以磁场方向为轴线)这一过程和感应加速器相似。电子电离作用形成的离子被俘获在密集的电子环所形成的电场势垒里。采用适当的加速装置,(例如产生轴向加速电场的腔),使环沿着轴向被加速,被电子环俘获的离子也就有可能和环一起被加速。电子环连同被它俘获的离子作为一个整的集团来被加速,这种加速方法也被称为集团加速。一个带电粒子集团(或粒子)在一定强度的外电场中受加速作用时,集团的单位质量所得到的能量增长,正比于这个集团(或粒子)的荷质比。在电子环加速器里,被加速的集团是大量较轻的电子与离子组成的,集团的荷质比大于其中离子的荷质比。因此用同样的外电场来加速电子环,则电子环中的离子实际得到的加速作用大于用同样外电场加速离子的作用。比值约为 $\frac{1}{Z \left(\frac{M_e}{M_i} + \frac{N_i}{N_e} \right)}$ 式中 Z 为被加速的离子的电荷

数, M_i 为离子质量, N_i 为电子环中俘获的离子个数; N_e 为电子环中电子数目, M_e 为它的垂直质量(考虑到它回旋运动的质量),假定 $N_e \gg N_i Z$ 。由于 $\frac{M_e}{M_i}$ 及 $\frac{N_i}{N_e}$ 都 $\ll 1$,所以这个比值很大。即采用集团加速方法后,同样的加速电场下,电子环中的重离子受到了较大的实际加速作用,提高了加速效率,缩短加速器长度。可是,离子是靠电子环的电场把它俘获才能和电子环一起被加速的,如果外加速电场太强,电子环产生的电场不够强,离

子就会脱离电子环,不能进行集团加速。所以离子受到的有效加速电场不可能大于电子环所产生的约束电场。而这个电场决定于电子环内电子的密度。所以,高密度的稳定的电子环的获得是实现集团加速原理的关键问题。

经过几年科学实验,发现实现集团加速还要克服不少困难。主要问题是强流高密度电子环的稳定问题,此外还要研究合适的加速电子环的设备。美国、西德、苏联等国不少实验室都进行电子环加速器的研究,到目前为止,只有苏联报导了用这种加速器加速了 α 粒子的结果。得到30兆电子伏的 α 粒子,电子环内约 10^{12} 个电子,俘获的 α 粒子有 10^9 个。采用的加速方法是使约束电子环的轴向磁场逐渐减弱,使电子环扩大。把电子的廻旋运动能转化为轴向运动能,得到了加速。这种加速方法所能得到的能量是有限的,还要研究其他合适的加速结构。

除了要解决电子环稳定性,加速结构等技术问题外,这种加速器的经济性还没有可靠的估计。这种加速器可能首先用来加速重离子,用电子环加速器来加速重离子,有不少优点。例如,可以省去重离子源,能俘获不同电离度的重离子,并把它们加速到同一能量。同时重离子加速器要求的能量不高,容易实现。而建造“超高能”量的电子环加速器,为期尚早。

近年来,强脉冲电子流发生器有新的发展。利用这些强电子流,又开始进行相对论性强电子流的研究。利用数万至数十万安培的强脉冲电子流获得了一些被加速的离子^[44],例如,用1.7兆电子伏,3万安培脉冲电子流,获得一些6兆电子伏的质子,7兆电子伏的氦核,以及氩核、氮核等。这些强电子流实验中加速效率不高。采用相干原理的建议,有可能较有效地利用强脉冲电子流所产生的加速电场。例如,用来加速电子环。不过这时要求电子环有更高的电子密度,以产生很强(如数千兆伏/厘米)的约束电场。但电子环稳定时间的要求可以降低。

上述两方面都是从提高有效加速电场入手,提高约束磁场也能缩小加速器尺寸,同样有可能建造能量高,尺寸小的高能加速器。利用超导材料能产生较强的磁场,目前虽然采用超导材料建立的磁场强度只有4—5万高斯,有些材料理论上临界磁场强度在20万高斯以上(如 Nb_3Sn 的临界磁场约24.5万高斯, V_3Ga 约21万高斯),随着超导技术的前进,产生20万高斯左右的交变磁场是有可能的。利用超导材料,已能在小体积中产生短脉冲的数十万高斯强度的磁场,例如用 $NbZrTi$ 线产生50万高斯0.25毫秒的脉冲强磁场^[45]。已有人设想利用百万高斯以上的强磁场建造加速器的可能^[46]。

新技术和新加速原理的研究一方面要解决技术上的可能性,另外还要考虑它的经济性或性能上有重要的特色。如果性能上既没有特色,又不够经济,即使技术上是可行的,也不会被采用,得不到发展。估计新加速原理还要进行相当多的探索研究,才可能决定它的可能性及是否值得采用。

五、小结与展望

总结近年来的发展,质子超高能方面发展比较快,仍以约每六—十年能量提高一个数量级的速度发展。强聚焦同步加速器技术更为成熟,经济指标也有显著的改进。估计今

后一段时期内“超高能”实验主要依靠利用超导磁体的质子超导强聚焦加速储存对撞机。从技术上讲,今后十年内建造数千千兆电子伏的这种对撞机是可能的。按目前超导磁体达到的水平 4.5 万高斯计算,5000 千兆电子伏的储存环平均轨道直径约 10 公里,还是可能实现的。例如,美国讨论中的有 600—2000 千兆电子伏,及 5000 千兆电子伏的超导质子同步加速器。随着超导技术的发展,数千直到数万千兆电子伏的质子超导同步加速器(数秒一次脉冲)及对撞机在技术上也有实现的可能性。近年来强聚焦同步加速器随着最高能量的提高,最大平均流强也不断提高,近六年来也提高了一个数量级。平均流强提高的趋势是否能继续下去,决定于适当的总体布局的研究和快脉冲超导磁体的发展。

高能电子同步加速器受电子辐射损失太大的限制,在提高能量方面遇到困难,发展停顿。利用电子直线加速器已能产生 22 千兆电子伏的电子流,并计划用“返航”方法把能量提高到 60 千兆电子伏。可是,由于这种加速器单位能量造价太高,到目前为止,没有建造更高能量电子直线加速器的消息。而“返航”加速,也受电子辐射损失的限制,不能达到很高的能量。例如,即使利用 22 千兆电子伏的直线加速器来补偿电子辐射损失,也只能把电子加速到 100—150 千兆电子伏。“超高能”电子与静止核子作用的实验有可能利用将来建成的数百—数千千兆电子伏或更高能量的质子同步加速器的超高能质子与靶作用,以获得超高能电子流。

电子正电子碰撞实验由于对撞机的建立,已经获得较大的发展并将继续前进。讨论建造的为 15 千兆电子伏对撞机。在对撞机中,电子流长时间连续回旋,辐射损失问题比同步加速器尤为严重。所以建造数十千兆电子伏以上的连续工作的电子正电子对撞机,有很大困难。电子与核子的相互作用除利用超高能电子(超高能质子同步加速器的次级粒子)与静止靶作用外,也可以利用电子质子对撞机进行,例如用 15 千兆电子伏的电子与 5000 千兆电子伏质子对撞,有效能约 545 千兆电子伏。获得并储存这两种粒子流,在技术上还是可能的。

在强流方面,利用电子直线加速器已能产生数十微安平均流强的高能电子流(22 千兆电子伏)。在质子强流方面发展很慢,到目前为止,数百兆电子伏的质子流只能达到微安级。还是依靠四十年代末到五十年代初建成的稳相加速器。近二十年没有建成性能更好的中能强流质子加速器。中能等时性回旋加速器仍在建造中,中能直线加速器还在进行总调,实践经验不够,不能认为已有成熟的经验。至于数千兆电子伏以上的强流(如数十微安)质子加速器则丝毫没有实践经验。建议中的强流加速器类型有超导质子直线,分轨回旋、串级等时性回旋加速器、超导恒定磁场强聚焦加速器、质子微波加速器等。这些加速器或者在研究中或者仅仅是建议,从总体布局设计到具体技术问题都需要进行大量实验研究工作才能明确是否能达到希望的流强,以及在经济上和技术上实现的可能性如何。所以中能、高能(数百兆到十千兆或数十千兆电子伏以上)强流质子加速器是当前进展最慢,缺乏经验,困难较大的一个方面。图 5 是质子和电子高中能加速器发展情况图。

总之,利用已有的加速原理,采用最近可能实现的新技术,如自动化,计算技术,超导磁体、超导腔等,无论在“超高能”方面和中能高能强流方面都有进一步发展的可能。同时也有必要探索其他加速原理和其他新技术,把加速器能量和流强及经济指标方面进一步向前推进。例如,有些实验室讨论建造数十到一百千兆电子伏的电子环加速器。高能加速

器的发展方向一方面决定于本身及与之有关的科学技术的发展, 另一方面也取决于高能物理及其他方面对加速器的要求。

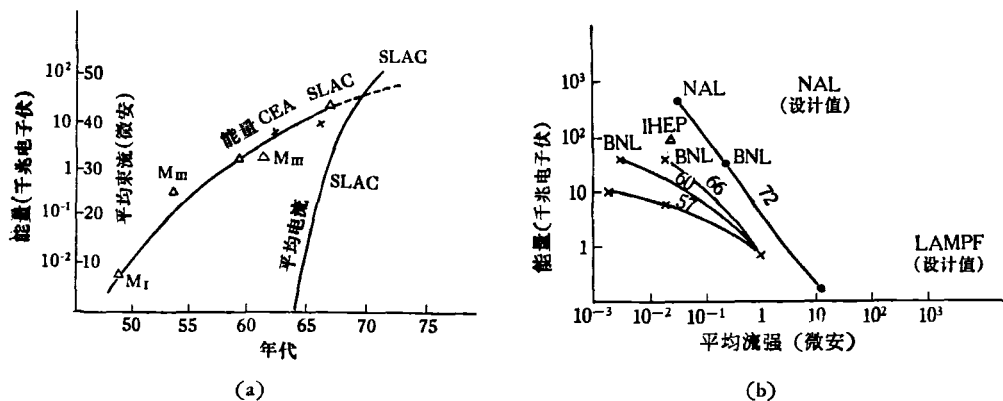


图 5 质子与电子高能加速器发展情况图

(a) 电子加速器发展情况; (b) 质子加速器发展情况

参 考 文 献

- [1] 徐建铭, 方守贤, 原子能, 1 (1966), 24.
- [2] *Proceedings of the 6th International Conference on High Energy Accelerators* (1967), 397.
- [3] *Phys. Today*, 25 (1972), No. 10, 20.
- [4] S. Suwa, *Proceedings of the 6th International Conference on High Energy Accelerators* (1967), 9.
- [5] W. Heinz, *ibid.*, 54.
- [6] *Phys. Today*, 24 (1971), No. 12, 19.
Science News, 100 (1971), No. 16, 266.
- [7] M. H. Blewett, Vogt-Nilson, *Catalogue of High Energy Accelerators* (1971).
- [8] Y. M. Ado et al., *Proceedings of the 8th International Conference on High Energy Accelerators* (1971), 14.
- [9] R. R. Wilson, *ibid.*, 3.
- [10] CERN Courier, 12 (1972), No. 12, 420.
- [11] *Phys. Today*, 24 (1971), No. 5, 19.
- [12] *Phys. Today*, 24 (1971), No. 3, 70.
- [13] F. Arendt et al., *IEEE Trans.*, NS-16 (1969), No. 3, 979.
- [14] G. T. Danby et al., *Proceedings of the 6th International Conference on High Energy Accelerators* (1967), 49.
- [15] C. Bovet, K. H. Reich, *Proceedings of the 6th International Conference on High Energy Accelerators* (1967), 315.
- [16] V. I. Balbekov et al., *Proceedings of the 8th International Conference on High Energy Accelerators* (1971), 22.
- [17] P. Gerald Kruger, J. N. Snyder, *IEEE Trans.*, NS-16 (1969), No. 3, 994.
- [18] J. B. Warren, *Fifth International Cyclotron Conference* (London, Butterworths) (1969), 573.
H. A. Willax, *ibid.*, 59.
- [19] J. P. Scanlon, *ibid.*, 673.
- [20] N. Vogt-Nilsen, M. Reiser, *ibid.*, 719.
- [21] Harry C. Hoyt et al., *R. S. I.*, 37 (1966), 755.
- [22] E. A. Knapp, *IEEE Trans.*, NS-12 (1965), No. 3, 118.
D. E. Nagle et al., *R. S. I.*, 38 (1966), 1583.
- [23] G. Dôme, I. White, *Proceedings of the 6th International Conference on High Energy Accelerators* (1967), A-19.
- [24] D. A. Swenson et al., *ibid.*, 167.

- [25] *Phys. Today*, **25** (1972), No. 8, 18.
- [26] *CERN Courier*, **13** (1973), No. 2, 41.
- [27] R. B. Neal, *IEEE Trans.*, **NS-14** (1967), No. 3, 705.
- [28] *Phys. Today*, **24** (1971), No. 10, 18.
Science News, **99** (1971), No. 25, 414.
- [29] Д. М. Зорин и др., *Атомная энергия*, **2** (1957), 552.
- [30] A. Roberts, *Annals of Phys.*, **4** (1958), No. 2, 115.
- [31] J. S. Allen et al., *Particle Accelerators*, **1** (1970), 239.
- [32] D. W. Kerst et al., *Phys. Rev.*, **102** (1956), 590.
- [33] Ю. М. Адо, *Атомная энергия*, **12** (1962), 54.
- [34] *Phys. Today*, **25** (1972), No. 2, 20.
- [35] C. Pellegrini et al., *Proceedings of the 8th International Conference on High Energy Accelerators* (1971), 151.
- [36] *VAPP-NAP Group*, *ibid.*, 72.
- [37] J. P. Blewett, *ibid.*, 501.
- [38] D. B. Thomas, *ibid.*, 190.
- [39] *CERN Courier*, **12** (1972), No. 4, 132.
- [40] *CERN Courier*, **12** (1972), No. 4, 133.
- [41] A. Citron, et al., *Proceedings of the 8th International Conference on High Energy Accelerators* (1971), 278.
- [42] В. И. Векслер, *Атомная энергия*, **2** (1957), 427.
- [43] В. И. Векслер, и др., *Атомная энергия*, **24** (1968), 317.
- [44] S. E. Graybill, *IEEE Trans.*, **NS-18** (1971), No. 3, 438.
- [45] В. Т. Контенко и др. *Ж. Т. Ф.*, **XLII** (1972), № 1 183.
- [46] В. С. Панасюк и др., *Атомная энергия*, **33** (1972), Вып. 5, 902.