

# 近几年高能加速器的发展概况及展望

徐 建 铭

随着基本粒子的研究不断深入,加速器的研制工作也得到了迅速发展.七十年代末电子对撞机发展很快,如西德的 PETRA、美国的 PEP 和 CESR. 到八十年代,则主要是质子加速器.如美国费米实验室的 TEVATRON 和西欧中心的 SPS 这两台加速器的建成标志着加速器技术的重大突破,下面我们分别介绍一下.

## 一、已建成或改建成功的加速器.

1. 千京电子伏加速器 TEVATRON. 它是世界上第一台采用超导磁体的高能质子同步加速器安放在费米实验室原有的 500 京电子伏同步加速器的隧道里. 它的超导磁体环放在原有那台同步加速器的常规磁铁环下面,环的半径约一公里. 这台超导磁体加速器共有二极磁体 774 块、四极磁体 216 块、校正磁体 216 块. 超导材料采用铌钛丝,直径 8 微米,工作温度 4.6 °K. 设计最高能量可达 1 千京电子伏. 今年 8 月中旬已成功地吧质子加速到 750 京电子伏. 最近测得 500 京电子伏的质子流寿命约 5 小时,以后进一步改善真空及轨道品质,寿命还能进一步提高. 这台加速器还正在调试,目前束流强度还比较弱,每个脉冲约  $10^{12}$  个质子. 它的设计指标是:最高能量 1 千京电子伏,流强大于每脉冲  $2 \times 10^{13}$  质子,注入能量 150 京电子伏,重复频率每分钟 1—2 次,慢引出时间为 1—10 秒,快引出为 1 毫秒.

这台加速器的建成,为采用超导磁体以建造更高能量的质子同步加速器,反质子-质子对撞机奠定了技术基础. 它的建成不仅是由于采用超导磁体和大规模的制冷技术,同时也依赖于同步加速器注入引出及控制调整技术的掌握.

2. 西欧中心把 SPS 改建成质子-反质子对撞机,并取得发现了  $W^+$  和  $Z^0$  三种中间玻色子的重大物理成果.

这台对撞机利用已有的质子同步加速器 PS(28 京电子伏)所产生的 26 京电子伏的质子流轰击钨靶,产生反质子. 收集 3.5 京电子伏的反质子,入射到反质子积累环中,在积累环里对反质子束进行随机冷却,并进行积累. 积累到需要的强度时被注入到 PS 加速到 26 京电子伏. 再注入到 SPS,和已经储存的反方向回旋的质子束一起进一步加速到 270 京电子伏,进行对撞. 目前对撞亮度约  $1.8 \times 10^{29}$ /厘米<sup>2</sup>·秒. 位于 PS 附近的低能反质子环 LEAR 已投入运行,开始实验工作. 反质子积累环中的反质子束,经 PS 减速以后,再

注入到低能反质子环. 按照实验工作的需要,再进行加速或减速,引出的反质子束能量可在 0.1—2 京电子伏间调变. 采用随机引出,引出时间可长达 1000 秒,引出流强约  $2 \times 10^8$ /1000 秒反质子. 另外,在已有的质子对撞机 ISR 里也进行质子反质子对撞,峰值亮度约  $2.5 \times 10^{28}$ /厘米<sup>2</sup>·秒.

这台质子反质子对撞机正在采取措施,进一步改善性能. 正在增建一台反质子收集预冷环(AC),并准备把 PS 的增强器能量从 0.8 提高到 1 京电子伏,以提高 PS 的流强. 还预备加强对撞点的聚焦力,以缩小对撞点束流截面. 预计采取这些措施以后,亮度可提高到  $5 \times 10^{29}$ /厘米<sup>2</sup>·秒. 还着手改善 SPS 磁铁的冷却及电源系统,希望把它的对撞能量,从目前的  $2 \times 270$  京电子伏,提高到  $2 \times 310$  京电子伏.

SPS 是世界上第一台质子-反质子对撞机,它的成功为获得密度较大的反质子流,从而进行有效的质子-反质子对撞奠定了技术基础,也为改善其他反粒子束、重粒子束的密度,改善束流品质,提高储存寿命,提供了宝贵的经验.

## 二、正在建造及改建的加速器

1. 我国的北京电子对撞机 BEPC. 这是一台 2.2/2.8 京电子伏的电子-正电子对撞机,除用于进行高能物理实验外,还能产生较强的同步辐射,供各种科学研究用. 图 1 是这台加速器的布局图,它由下列三个主要部分组成:

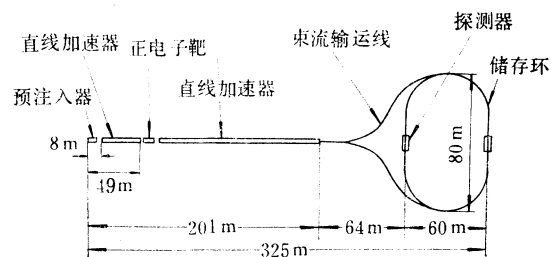


图 1 BEPC 布局图

① 注入器 它是一台长约 200 米的电子直线加速器. 利用 30 兆电子伏的预注入器来产生电子束,电子经 340 兆电子伏直线加速器加速打靶产生正电子. 正电子束经过主直线加速器加速到 1.1 京电子伏,达到需要的注入能量. 电子束从预注入器产生,直接由主加速器加速,得到需要的注入电子束.

② 束流输运线及储存环 正负电子束分别经束

流输运线到储存环,在环内反方向迴旋进行对撞.储存环轨道为跑道形,周长约 238 米,有两个对撞点.注入能量 1.1 京电子伏,电子注入储存,达到需要流强后,经过加速达到需要的能量.储存环最高能量为 2.8 京电子伏,计算最大亮度为  $1.7 \times 10^{31}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ .

③ 探测器 在对撞区安放大型探测器,以探测电子、正电子对撞后产生的各种粒子,采集数据,并进行分析.

2. 西欧中心的大型电子-正电子对撞机 LEP (详见本期《科学家的雄心壮志——西欧中心的 LEP 计划简介》一文)

3. 斯坦福实验室的直线对撞机 SLC. 这是利用该实验室已有的二英里长的直线加速器产生正负电子束,再用磁铁系统使正负电子束分别弯转聚焦并使之对撞.直线对撞机的正负电子束只对撞一次.图 2 是整个装置的布局图.在 SLC 设计里,对撞点束流截面仅 1—2 微米,单束最高能量为 50 京电子伏,每秒 180 次束流脉冲,设计亮度为  $6 \times 10^{30}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ ,每个束流脉冲中含有  $5 \times 10^{10}$  个粒子.

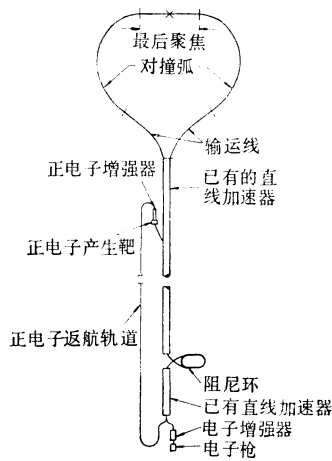


图 2 SLC 布局图

为了把现有的电子直线加速器的能量提高到 50 京电子伏,将采用更大功率的速调管来替换现有的速调管.正在研制的有 50 兆瓦长脉冲及 150 兆瓦短脉冲两种速调管.整个工程计划在 86 年 10 月以前完成,这项工程的主要目的,一是进行中间玻色子的实验研

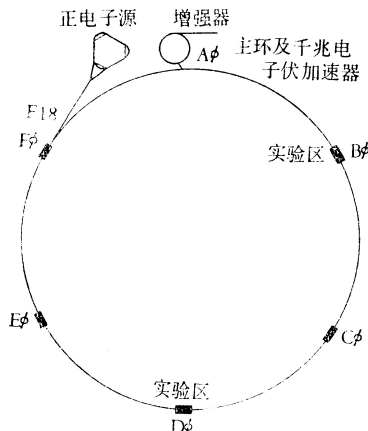


图 3 反质子源和千兆电子伏加速器总布局图

究,二是验证直线对撞的可能性,即验证把两股束流聚焦到微米直径,并准确对撞的可能性.

4. 日本 KEK 的三环计划 TRISTAN, 这一计划是在一个周长约三公里的隧道里安装三个环,一个常规磁铁环和两个超导磁体环.建成以后,可以进行电子-正电子、电子-质子、质子-质子以及质子-反质子对撞实验.正在进行的是已被批准的一期工程,只建造采用常规磁铁的电子-正电子储存环.1981 年开始建设,计划 1986 年建成.对撞的设计亮度为  $2 \times 10^{31}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ ,主环的设计亮度为  $8 \times 10^{31}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ .

5. 美国费米实验室建造的反质子源.费米实验室建造千京电子伏加速器的主要目的之一就是进行质子-反质子对撞.所以,在建造 TEVATRON 的同时,即着手进行反质子源的设计预制工作,这一工程于 1983 年 8 月开工,计划 1984 年底建成.1985 年初开始调试,1985 年中将反质子束注入到主加速器,1986 年开始质子-反质子对撞实验.图 3 为反质子源和千兆电子伏加速器 TEVATRON 的总布局图.

6. 苏联的 UNK 计划.这一计划是利用莫斯科附近谢尔普霍夫已有的 76 京电子伏质子同步加速器作注入器,在半径约三公里的隧道里建造三个环.一个常规磁铁环,二个超导磁体环.一期工程完成常规磁铁环,场强 10000 高斯,质子能量可达 600 京电子伏.二期工程建造一个超导磁体环,最高工作磁场为 50000 高斯,质子可加速到三千京电子伏.完成之后,可进行 3000 和 600 京电子伏质子-质子对撞实验.最后一期工程,再完成一个超导磁体环,以进行 3000 和 3000 京电子伏质子-质子对撞实验.共有四个对撞区,设计亮度为  $10^{32}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ .预计 88 年可完成一期工程,得到 600 京电子伏的质子束.为准备二期工程,正在进行超导磁体的预制研究工作.

7. 西德的质子电子对撞机 HERA.这也是几年前已进行讨论的方案,现已经原则上被批准,正式工程尚未开始.它的内容是在一个 6.3 公里周长的隧道里安放两个环,一个采用超导磁体,另外一个为常规磁铁环.前者可把质子加速到 820 京电子伏,并储存质子流.常规磁铁环则能把纵向极化了的电子束加速到 30 京电子伏,并储存电子束,以进行电子-质子对撞实验.注入器将利用 DESY 现有的几台加速器加以改建,另外再新建质子直线加速器,并考虑在 DESY 电子同步加速器隧道里建造一台性能较好的 DESYII,来代替现有的同步加速器.而将原有的 DESYI 改建成质子同步加速器,提供 HERA 所需要的质子流.计划 1989 年获得高能质子束,1990 年进行电子质子对撞,目前已开始超导磁体的模型研究工作.

### 三、今后展望

从当前各国高能加速器发展计划来看,1990 年左

右, 在高能物理前沿工作的主要加速器将是费米的 FEVATRON 和西欧的 LEP 和斯坦福的 SLC. 九十年代以后的更新的一代高能加速器仍然不外于质子和电子加速器两种类型. 质子加速器将是采用超导磁体的环形加速器, 即能加速质子(或反质子), 又能储存并进行对撞. 电子加速器, 由于电子在环形加速器里回旋运动时辐射损失随能量提高而增加很快, 能量在数百京电子伏以上时已难以利用现在的储存环, 势必将依靠直线加速器对撞, 有关技术问题正有待于探索.

美国到一九八六年能完成现有的高能计划, 现在美国高能物理界正在酝酿建造一台约二十千京电子伏(20 TeV)的质子-质子对撞机. 那台加速器轨道半径比较大, 可能有十几公里到三十公里, 有建在沙漠地带的可能, 故取名为沙漠加速器, 也有人称之为超级超导对撞机. 简称为 SSC. 估计对撞亮度可达  $10^{33}$ /厘米<sup>2</sup>·秒. 主要进行质子-质子对撞实验, 同时也可作静止靶实验, 利用次级束的实验以及电子-质子对撞实验等. 这样一台加速器的入射能量要求千京电子伏, 总投资可能要 20—30 亿美元.

西欧中心在 LEP 建成以后, 也设想建造质子-质子对撞机, 设想在 LEP 的隧道里安装超导磁体环, 用来加速并储存质子. 按 LEP 隧道长度, 如果超导磁体的工作场强为五万高斯, 质子最高能量可达 5000 京电子伏, 估计进行质子-反质子对撞时亮度约为  $10^{31}$ /厘米<sup>2</sup>·秒. 如果采用新的超导材料, 最高工作磁场为十万高斯, 则能量可提高到 10,000 京电子伏. 如果再建第二个超导磁体环, 则可进行质子-质子对撞, 估计亮度可大于或等于  $10^{32}$ /厘米<sup>2</sup>·秒. 另外, 建成超导磁体环加速并储存质子束以后, 便能进行质子-电子对撞.

另一个发展方向, 是利用直线对撞机进行数百以至千京电子伏以上的电子正电子对撞. 即利用两台直线加速器分别加速电子束及正电子束, 两束反方向相对运动, 进行对撞. 可以免去电子或正电子在储存环里回旋运动的辐射损失问题. 为了提高直线对撞机的亮度, 一方面要提高直线加速器的脉冲次数, 以增加对撞次数, 另一方面则要加强碰撞区的聚焦力, 压缩碰撞点的束流截面. 提高脉冲次数的有效途径是采用超导电子直线加速器, 但近年来进步缓慢, 技术上不够成熟. 用常温直线加速器, 每秒脉冲不过几百次, 和储存环里每秒对撞数万至数十万次相比差距很大. 有效的办法是压缩碰撞点的束流截面到微米数量级. SLC 的目的之一就是验证这一技术的可能性. 如果技术上得以成功, 直线对撞机将得到发展. 当然, 只有对撞能量大于 100—200 京电子伏, 直线对撞机才比储存环在经济上有优越性. 斯坦福实验室和苏联新西伯利亚实验室都对此方案进行过一些考虑, 据估计, 为进行一千京电子伏的电子正电子对撞, 将须建造二台各 50 公里长

的电子直线加速器, 投资将达 20—30 亿美元.

正如近廿年来人们一直提到的, 加速器的能量日益增高, 用目前通用的加速原理, 尽管采用一些新技术如超导技术, 加速器的尺寸规模及造价愈来愈大. 如果仍以每 6—10 年能量提高 10 倍的速度发展下去, 2010 年可能要求 1000 千京电子伏的加速器. 这种能量的环形加速器的半径将达 300—1000 公里, 相应的磁场强度约 10 万到 3 万高斯. 而这么高能量的直线加速器, 假定加速梯度每米 100 兆电子伏, 总长将达一万里. 在技术上, 特别是经济上都有一定困难. 廿多年以来, 人们一直在寻求新的更有效的加速方法, 即所谓新加速原理. 例如, 激光加速, 相干加速, 以及尾场加速, 反自由电子激光加速等设想. 但是在实现这些设想上遇到很大的困难, 近期难以用来建造高能加速器. 但是可以深信, 随着人类科学技术的发展, 更有效的加速方法, 及更有效的研究微观世界的方法必然会出现. 人类对微观世界的认识, 会继续不断地深入发展.