

近三年来国际高能加速器 发展概况

方 守 贤

第十一届国际高能加速器会议已于今年7月初在瑞士日内瓦西欧核子研究中心召开。这次大会对近三年内加速器的新成就进行了回顾,介绍了今后五到十年内将要建造或设计的大加速器方案,并对下一代新加速器进行了展望。下面将根据这次会议的情况,对近三年来国际高能加速器发展概况作简单的介绍。总的说来,在这短短的三年中;高能加速器发展的速度仍然是十分惊人的,有三台机器已投入运转,九台加速器正在研制,其中五台已被各有关国家的政府批准。加速器新技术及原理方面也取得了不少进展。

一、近三年内投入运转的机器

在这三年中有三台加速器相继投入运行,均属正负电子对撞机。它们是西德的 PETRA,美国的 PEP 及 CESR。

(一) PETRA 正负电子对撞机:该机器的设计最高能量为 2×19 京电子伏,机器的平均半径为 366 米。为补偿电子同步辐射引起的损失所需的最大高频功率为 4.4 兆瓦。机器利用西德汉堡 (DESY) 的同步加速器以及新建的一台正电子积累环 (PIA) 作为注入器,注入能量为 7 京电子伏,整个注入时间为 3 分钟,每秒注入约 5×10^9 个电子或正电子。入射后再经过 3 分钟束流能量就上升到 18.3 京电子伏。束流的寿命约 3—8 小时。为加强这台机器的竞争能力,整个加速器从开始建造到出束仅化了两年半的时间,即 1976 年 1 月开始建造,1978 年 7 月即得到第一个储存束。同年秋即开始用来作物理实验。这也是世界上少有的高速度,从而也大大提高了西德高能科学家的威信。这台机器在克服了一系列的束流不稳定性后,目前的亮度可达 5×10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹。

(二) PEP 正负电子对撞机:该机器的设计最高能量为 2×18 京电子伏。机器平均半径为 350 米。最大高频功率为 6 兆瓦。PEP 有一个强有力的注入器,即美国斯坦福直线加速器中心原有的一台 3 公里长的电子直线加速器,入射能量可调,从 4 京电子伏一直到 18 京电子伏,从而在 PEP 不再加速。整个积累时间约 5 分钟,机器设计的最高亮度为 5×10^{31} 厘米⁻²秒⁻¹。这台机器在 1977 年 6 月开始动工,原订 1980 年 4 月

完成,一度曾宣布可提前半年出束,但后来发现运气不佳,所以仍然在今年 4 月 16 日才获得第一个束流。当时由于入射系统内快脉冲冲击磁铁的毛病,能量仅为 8 京电子伏。经过改进后,目前的最高能量达 11 京电子伏。相应亮度为 1.5×10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹。大会期间正在试调 15 京电子伏的储存束。据称除头尾不稳定性外,没有观察到其他不稳定性。

(三) CESR 正负电子对撞机:CESR 储存环本身的平均半径为 120 米。该机器建于美国康奈尔大学,利用原有的康奈尔 12 京电子同步加速器作为注入器。注入能量为 8 京电子伏。注入时间需 1 小时,设计的最大储存环流为 100 毫安,相应亮度为 $\sim 10^{32}$ 厘米⁻²秒⁻¹。但目前只达到 3×10^{10} 厘米⁻²秒⁻¹。机器于 1978 年 11 月开始建造,不到一年在 1979 年 6 月就开始储存并进行对撞,由于能区选得恰当,利用该机器在 5.5 京电子伏附近,已作出了颇为重要的物理实验成果。

二、正在建造的加速器

已经获得各有关国家的政府正式批准而正在建造的加速器共有五台,全是质子型的。它们是苏联的 UNK,美国的 ISABELL 及能量倍增计划,西欧的 PP 复合机以及我国的 BPS。

(一) 苏联的 UNK 计划:UNK 机器的最高能量为 3000 京电子伏*,机器平均半径为 3 公里。位于苏联雪尔普霍夫高能物理所。利用原有的 76 京电子伏质子同步加速器作为注入器。为此,首先在 76 京电子伏加速器前再添一台快速增强器,能量为 1.5 京电子伏,从而使 76 京电子伏加速器的输出流强提高到每脉冲 5×10^{13} 个质子。由于 UNK 机器的半径为 76 京电子伏加速器的 13 倍,12 个脉冲将填满 UNK 周长的 12/13,其中 1/13 周长空出来为注入及引出用。这样 UNK 的最终流强为每脉冲 6×10^{14} 个质子。

为达到 3000 京电子伏,UNK 又分两阶段完成。第一阶段是先做一能量为 200 京电子伏的常规磁铁环,它的半径也是 3 公里,最高磁场为 3343 高斯。第二阶段才是 3000 京电子伏本体,采用超导磁体,最高

* 即 $3 \text{ TeV} = 3000$ 京电子伏。

场强 5 万高斯。两者放在同一隧道中。这样 76 京电子伏的质子束,首先被注入到常规磁铁的环中,在 3.5 秒内被加速到 200 京电子伏,然后被引出并注入到超导环。计划 20 秒加速,38 秒平顶引出,20 秒磁场下降到注入值,一个循环共 78 秒,因此 UNK 的平均流强为 7.7×10^{12} 质子/秒。预计在 1990 年建成。

UNK 完工后又可兼作对撞机,即将常规磁铁环中的质子与超导磁体环中的质子对撞,相应的质心能量可达 1500 京电子伏。同样也可以利用常规磁铁环来储存电子,能量为 10 京电子伏—25 京电子伏。有趣的是所需的电子不一定需要另造电子加速器,它可以用 3000 京电子伏的质子直接打靶产生。预计每分钟可产生 3×10^{12} 个电子。用一小小的积累器可积累 10^{14} 个电子。这样似乎质子加速器尚可兼顾电子呢!

(二) 美国费米实验室的能量倍增计划: 费米实验室早就宣称计划在原 500 京电子伏大加速器的隧道中再建一超导环,把质子的能量提高到 1000 京电子伏,即为原能量的 2 倍,故称能量倍增器。实际上这一计划包括三部份。

第一部份。超导环只被用来作为一种节约能耗的手段,并不增加质子的能量。故名节能器。这是因为,有了超导环后,原大加速器就被用来作为它的注入器。根据超导磁体目前达到的性能,入射能量只要 100 京电子伏即可。原大加速器降低能量运行后,就可省不少电功率。据估计,如果超导环也工作在每分钟一次的脉冲状态,那么为得到能量为 500 京电子伏的质子,每年运行所需的电费比原大加速器可节省五百万美元。此计划预定在 1981 年年底完成。但如果超导磁体的脉冲工作状态有困难的话,那么会先完成第二部份的计划。

第二部份。众所周知,超导体是最适合工作在直流状态。此外由于费米超导环有足够大的孔径,并处于超高真空,用来作为储存环是最为合适的。因此计划在此环内实行能量为 1000 京电子伏的质子-反质子对撞。反质子的产生如下(图 1): 质子先在原大加速器被加速到 80 京电子伏,引出后被聚焦并打到一靶上

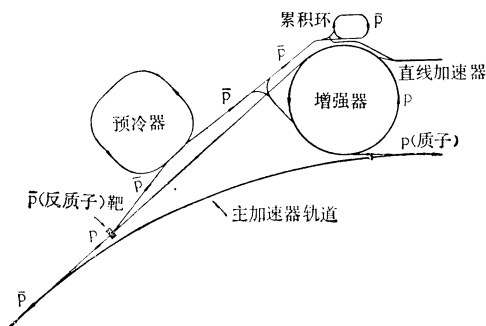


图 1 费米实验室对撞系统

产生能量约为 5 京电子伏的反质子束,此反质子束被注入到一预冷器中进行统计冷却并减速到 200 兆电子伏,随后,此低能反质子束又被转移到一电子冷却环中进一步进行高频积累及电子冷却。被冷却了的反质子再度被转移到预冷器中进行加速,当能量达到 80 亿电子伏时被注入到原大加速器中,由大加速器将其能量提高到 100 京电子伏,再注入到超导环内。与此同时,能量为 100 京电子伏的质子束也已被储存在超导环内,这样相反方向旋转的质子及反质子束被同时加速到 1000 京电子伏,然后进行对撞。据估计束流的寿命大于五小时。而为积累 10^{11} 个反质子也需五小时之久。预计该机器的亮度约为 10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹。计划在 1984 年完成。

第三部份。由于在引出技术上的困难,故在对撞机之后才考虑将 1000 京电子伏的质子束从超导环中引出,以进行固定靶的物理实验。计划在 1986 年完成。完成上述三部份总投资约八千万美元。

超导环共需超导二极磁体 774 块,四极聚焦磁体 240 块,从目前已经完成 100 多块二极磁体来看,性能基本上是满意的,但也存在一些问题,即磁中心平面有时会发生微小的旋转。而四极磁体的结果是十分满意的。

(三) 美国布鲁克海汶实验室的 ISABELLE(图 2): ISABELLE 即能量为 2×400 京电子伏的对撞机。该机

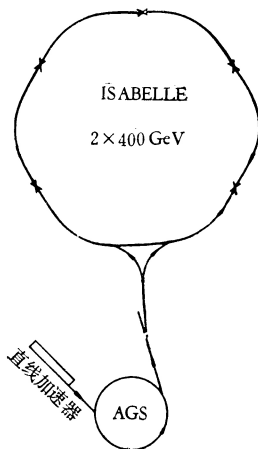


图 2 美国布鲁克海汶实验室 ISABELLE P-P 对撞机示意图

器早在 1970 年已开始研究,化了六年时间,作了六个设计报告,在 1977 年才获批准。1979 年开始建造,计划在 1986 年 4 月完成。总投资为二亿七千万美元。

机器平均半径为 610 米,为实行质子-反质子对撞,在同一隧道中需安装两个超导环,共需超导二极磁体 732 块,四极磁体 352 块。该机器利用原 33 京电子伏质子同步加速器 AGS 作为注入器。为提

供性能良好的质子束。AGS 的流强从每脉冲 10^{13} 个质子降低到每脉冲 2.7×10^{12} 个质子。12 个 AGS 循环提供的束流才能将超导环填满,然后经过加速并储存在某一轨道上,这种过程需重复 62 次才能使得单环的环流达到 8 安培。整个积累过程需 10 分钟左右。这台机器的特点是由于采用了质子-质子对撞,它的亮度极高,预计可达 2×10^{32} 厘米⁻²秒⁻¹— 10^{33} 厘米⁻²秒⁻¹。

目前隧道已经开挖了周长的 1/6 左右,整个基建

将在 1983 年 4 月完工。在超导二极磁体的制造方面遇到了很大的困难。按照设计指标, 超导二极磁体的最高场强为 50000 高斯。该实验室研制的超导磁铁模型 Mk-V 结果良好。经过几次失超后就可以达到最高场强。但工业大规模生产的结果十分不理想。第一次失超后可达 37000 高斯。约 100 次失超后才能到达 48500 高斯。另外超导磁体的静态场在 3 厘米的好场区内可满足要求, 但动态场不行, 如按原计划八分钟完成加速, 此时超导带中涡流已使场的性质畸变到不可容忍的地步。所以加速过程需延长到 1 小时左右。甚至有个别二极磁铁在失超时导致线圈的损坏, 因此, 该实验室的科学家正在全力以赴地设法解决这一困难。

(四) 西欧联合核子研究中心的质子-反质子复合器(图 3):

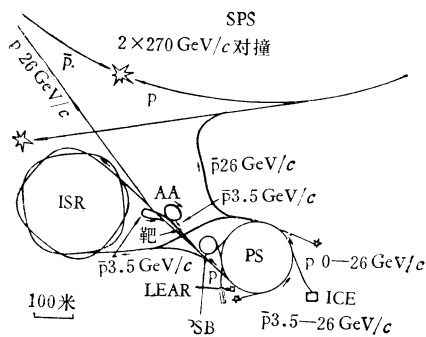


图 3 西欧核子研究中心质子 P 反质子 $\bar{P}$ 对撞系统示意图

由于该实验室原有的能量为 400 京电子伏的大加速器 SPS 磁铁的质量较高, 且真空室内的真空度已达 0.6×10^{-8} 托。这样就有可能把 SPS 改为对撞机。由于电功率的限制, 对撞的最高能量为 2×270 京电子伏。为进一步证明上述方案的现实性, 曾用 SPS 作了实验, 发现质子束的寿命可达 18 小时之久! 这充分说明一个机器质量的好坏对今后的发展起决定性作用。

反质子束是这样产生的, 由 28 京电子伏质子同步加速器 CPS 提供的质子束被引向一直径为几毫米长 11 厘米的钨靶上, 就可产生动量为 3.5 京电子伏的反质子束, 随即反质子束被注入到一反质子积累环中, 在那里进行反复储存及冷却, 到一定强度后, 再被注入到 CPS 中去, 依靠 CPS 把反质子束加速到 28 京电子伏后, 再注入到 SPS 中, 由 SPS 同时将质子及反质子束加速到 270 京电子伏以进行对撞。这里关键在于能否积累足够强度的性能良好的反质子束。也就是积累环 AA 的成败起着决定性作用。

AA 的平均半径为 CPS 的 1/4, 外圈为预冷轨道, 内圈为积累轨道。性能较差的反质子束首先被注入到预冷轨道上, 依靠随机冷却在 2.2 秒内即可将反质子

束的动量散度由 1.5% 压缩到 0.17%。预冷完毕后, 束流受高频腔减速而被存放到积累轨道的外侧, 通过随机冷却, 束流在动量及横向空间均进一步受到冷却, 与此同时, 束流被慢慢地推向积累轨道的内侧。在此束流的密度将比外侧高四倍。然后, 另一束反质子又被注入到预冷轨道, 重复上述过程, 被储存在积累轨道内侧。据计算, 经过一天的积累及冷却, 在积累轨道的内侧将可得到 6×10^{11} 的反质子, 然后再将其中密度最高的一部份反质子转移到 CPS 中去进一步加速。由此可见 AA 必须有足够大的径向孔径才能完成上述任务。所以个别地区的孔径竟达 70 厘米! 聚焦铁及弯转铁均需经过特殊的垫补, 才能有这样宽广的孔径内产生性能足够好的静磁场。

经过西欧中心科学家的努力, 在大会期间 AA 取得了初步成绩, 预冷试验已获成功。从而受到大会全体科学家的重视及热烈祝贺。公认他们在迈向质子-反质子对撞机的新实验中已走出了决定性的一步。

计划在 1981 年 3 月先在西欧中心的交叉储存环中进行能量为 62 京电子伏的质子反质子对撞, 取得经验后, 在同年年底, 再在 SPS 上作质子-反质子对撞的调试。

值得提一下的是作为质子-反质子复合器中的另一项内容, 即西欧中心还准备在 CPS 附近造一台低能反质子环 LEAR, 它将提供动能为 5 兆电子伏到 2×1.7 京电子伏的反质子。LEAR 的平均半径为 CPS 的 1/8, 经 AA 冷却的反质子束中的极小一部分, 约 10^9 个, 每隔 15 分钟就被转移到 CPS 中去, 由 CPS 将其能量减速到 170 兆电子伏, 随后再注入到 LEAR 中进行加速或减速, 使反质子达到上述能域中的任一值。为配合物理实验, LEAR 采用统计超慢引出, 引出过程共 900 秒, 每秒提供 10^6 个反质子。LEAR 虽小, 但它却包含了各种新技术, 如积累, 电子冷却及统计冷却等等。

(五) 我国的 50 京电子伏北京质子同步加速器 (BPS): BPS 的设计能量为 50 京电子伏, 流强为每脉冲 1×10^{13} 个质子, 脉冲循环周期约为 5 秒, 它由下面几个主要部分组成(图 4)。

1. 预注入器, 产生负氢离子束, 并把它们加速到 750 千电子伏。

2. 能量为 90 兆电子伏的质子直线加速器。

3. 能量为 2 京电子伏的快速增强器。增强器平均半径为 22.3 米, 每秒提供 12.5 个脉冲, 每脉冲含 1×10^{12} 个质子。

4. 主加速器, 将质子从 2 京电子伏加速到 50 京电子伏。它的平均半径为 223 米。其主要参数可见表 1 (见插页)。

BPS 的能量及规模均比上述加速器小得多。但这是极其重要的一步, 为今后的进一步发展打下了基础。

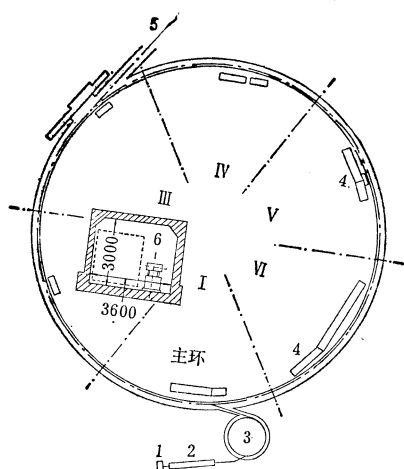


图 4 我国 BPS 示意图

- 1.预注入器, 2.直线加速器, 3.增强器,
4.服务楼, 5.引出通道, 6.主环隧道

标志着我国决心进入高能物理的领域。BPS 建成后除提供高能物理实验外尚可提供某些应用研究。根据目前加速器技术发展的水平,可以断言,不论是向超高能还是向中低能、不论是向质子或电子发展,BPS 均存在着广阔的路子。

三、正在研制的加速器

正在研制而未获相应政府批准的未来加速器共四台。它们是西欧中心的 LEP, 日本 KEK 的 TRISTAN, 西德 DESY 的 HERA, 以及美国 SLAC 的 SPCP。

(一) 西欧中心的大型正负电子对撞机 (LEP): 大型正负电子对撞机的最高能量为 2×130 京电子伏。但由于高频功率的限制, 该计划分两阶段进行。第一阶段, 采用常温腔, 总高频功率 96 兆瓦, 可以使能量达到 86 京电子伏。第二阶段, 改用超导腔, 同样的总功率可以使束流能量达 130 京电子伏。第一阶段还分两步走, 第一步先安置 $1/6$ 的高频腔, 即功率仅 16 兆瓦, 使能量先达 50 京电子伏。

机器周长为 30.6 公里, 其中高频加速腔总长达 1.7 公里。整个机器共有 4000 多块二极磁铁 800 多块四极磁铁, 500 多块六极磁铁。二极磁铁的最高场强仅 1230 高斯, 所以可以采用特殊的简便工艺, 磁铁每块长 5.8 米, 是由厚为 1.5 毫米的铁片、片间间隔 5 毫米、并以水泥为填充剂组成。目前 1:1 的模型磁铁已组成, 磁性及刚性均能满足要求。二极磁铁的激励也十分简单, 用水冷的铝制母线, 将整个环内的二极磁铁串联, 形成一个两圈的回路即可。为了节省高频功率消耗, 除了努力设法提高束调管的转换效率外, 还采用调制法, 提高加速腔的有效分路阻抗。其方法如下: 即把加速腔与一个低损耗的储存谐振腔相耦合, 这样只有当束团通过加速腔时, 在加速腔中才有电场, 而在

两个束团间隙之间, 加速腔无电场, 其电能被转移到储存谐振腔中去, 由于后者是低耗的, 所以可以节省功率, 从而使相同的 96 兆瓦功率所加速的能量从 80 京电子伏提高到 86 京电子伏, 初步试验已证实了这一设计的现实性。至于超导加速腔, 目前正在研究中。

关于 LEP 的入射器, 原计划准备在交叉储存环的下面造一 1.7 公里周长的电子同步加速器, 后发现可以改用西欧中心原有的 28 京电子伏质子同步加速器 (CPS) 及 400 京电子伏质子同步加速器 (SPS) 来加速电子, 这样可以节省投资 1 亿瑞郎左右。这方案中正负电子被电子直线加速器加速到 400 兆电子伏后, 即被注入到 CPS, 加速到 2.7 京电子伏, 然后又被注入到 SPS, 加速到 22 京电子伏后就可注入到 LEP 中进一步加速及对撞。

LEP 的总投资约 9 亿瑞士法郎。LEP 本体的耗电量每年约 3000 亿瓦小时。因此只能将原交叉储存环等机器关闭, 才能使西欧中心每年的总耗电量维持在 10000 亿瓦小时的水平 [约占供给西欧中心的欧洲电站的 0.1%]。

LEP 期望在 1981 年底被批准, 1990 年完成。

(二) 日本高能研究所的电子-质子对撞机 (TRISTAN)。日本科学家决定将 TRISTAN 方案中的机器周长由原来的 2 公里扩大到 3 公里。也就是说, 最大可能地利用了该研究所的场地。这时相应对撞的能量为电子 25 京电子伏、质子 300 京电子伏。正负电子是这样产生的, 首先由该研究所在 1981 年即将完成的作为电子同步辐射注入器的电子直线加速器把正负电子加速到 2.5 京电子伏, 然后注入到一正负电子积累环把能量提高到 6 京电子伏, 再注入到 TRISTAN 的常规磁铁环中去进一步加速。至于 TRISTAN 超导体环中的质子是由原 12 京电子伏质子同步加速器供给的, 但对于超导磁体来说, 这样的能量尚嫌太低, 所以必须设法先将质子能量提高到 30 京电子伏。是否可以利用上述正负电子积累环来完成这一步骤, 尚在研究中。超导磁体、超导腔等相应的部件模型正在研制中。

(三) 西德 DESY 研究所的电子-质子对撞机 (HERA): HERA 是希腊神话中的女神名。现被用来命名该研究所未来的电子-质子对撞机。对撞最高能量为质子 820 京电子伏, 电子 30 京电子伏。机器的周长为 6.5 公里。计划安放在 DESY 研究所的地底下。同一隧道中安放两个环, 超导环加速及储存质子, 常规磁铁环加速及储存电子。前者的最高磁场为 47 千高斯, 后者却只有 1.8 千高斯。预期机器亮度为 $10^{31} - 10^{32}$ 厘米⁻²秒⁻¹。HERA 所需的正负电子束可由该实验室原有的电子加速器供给。即电子由原电子同步加速器 (DESY) 先加速到 70 亿电子伏, 再注入到现在正处全盛时期的正负电子对撞机 PETRA 中, 在 PETRA

内加速到 14 京电子伏后即被转移到 HERA 中去, 而正电子却只被 DESY 加速到 5 京电子伏, 然后在 PETRA 中进行积累, 等到有一定强度后 (约 5×10^{12} 个正电子) 才被加速到 14 京电子伏, 再注入到 HERA 中去。至于 HERA 所需的质子, 也仍想利用 DESY 及 PETRA 来加速 (图 5), 为此必须对这两台机器进行一些修改, 并再增添一台质子直线加速器, 能量为 50 兆电子伏, 由 DESY 加速到 7 京电子伏, 再由 PETRA 加速到 40 京电子伏, 再转移到 HERA 中去。

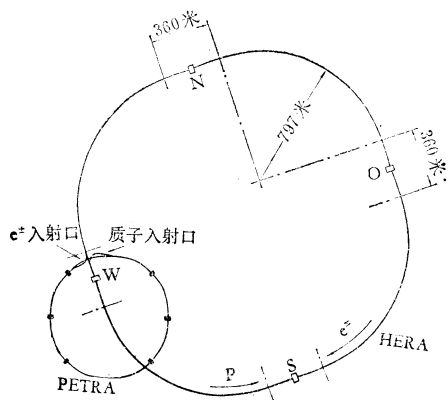


图 5 西德 HERA 电子-质子对撞机示意图

期望在 81 年得到批准, 87 年完成。

(四) 美国斯坦福直线中心的“单通道”对撞计划 (SPCP): 众所周知, 当电子作圆运动时, 会沿切线不断地辐射光子, 辐射功率将与能量的平方成正比。因此随着对撞机能量的上升, 为补偿电子辐射损失所需的高频功率也急剧上升, 这已成为能量大于上百京电子伏的电子环形对撞机发展的一大障碍。因此, 早在 1965 年已有人指出, 在较高能量时, 为实现电子对撞应采用直线型。也就是说, 应采用两台电子直线加速器 (图 6) 加速两股运动方向相反的电子束 (或正负电子束), 待达到预定能量后, 两股电子束被引出并在某点 A 上相对撞, 对撞一次后的电子束即被遗弃, 不再重复利用。显然这里也有两个问题需回答, 第一, 单位时间内被遗弃的电子束所带走的能量是否低于上面提及的辐射损失功率。第二, 由于电子直线加速器功率的限制, 每秒所能提供的电子束 (即脉冲数) 是有限的, 这样将使单位时间内发生的对撞次数比环形对撞机少得多。为了保证直线对撞与环形对撞机有相同的亮度, 必须要求

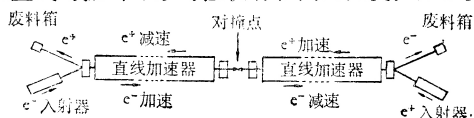


图 6 直线对撞机工作原理示意图

在对撞点的横截面进一步压缩, 约比环形对撞机的碰撞时横截面还要小几十倍到一百倍。这是否在技术上能做到? 是否存在着其他的限制? 十多年的研究对上述问题的回答是肯定的, 从而使这种对撞机也被真正提上日程。

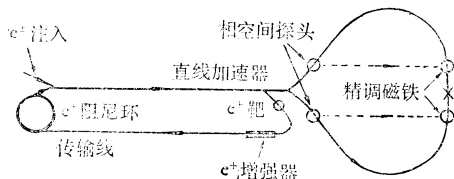


图 7 单通直线对撞机示意图

美国斯坦福实验中心的“单通”对撞机方案就是基于上面的想法而设计的, 不过他们所采用的只有一台电子直线加速器, 即原 3 公里长的电子直线加速器。图 7 简单地绘出了这一对撞机的示意图, 正负电子被该电子直线加速器加速到 50 京电子伏后, 即被注入到一圆环中去, 由于电荷的不同, 正负电子将分别沿着上下两个半环运动, 半圆后即在 A 点相撞。由于每束电子 (或正电子) 只一次通过圆环随即进行对撞, 对撞后即被遗弃, 故名“单通”对撞机计划 (Single Pass Collider Project)。为得到 $\sim 10^{30}$ 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$ 的亮度, 要求在对撞点正负电子束的横截面直径为 2 微米!! 相应的环的其他部份为 30 微米。直线加速器中也不得超过 100 微米。为达到这一点, 尚需建造两个阻尼环, 一定能量的正负电子束必须在阻尼环中依靠同步辐射把它的横截面压缩到 100 微米左右, 然后再注入到直线加速器中继续加速。此外, 为使如此细小的束团能在 A 点准确相碰, 束团测量系统及控制系统均需十分高的精度。顺便提一下, 由于电子束是如此之细小, 环形真空室的截面也只需 1 厘米 2 即可。相应的磁铁截面也只有 15×23 厘米 2 , 犹如玩具一样!

SPCP 预计只需 6 千 3 百万美金即可, 批准后三年即可完成。是十分有希望的一个计划。

四、总的情况

为了让读者对目前高能加速器的总的状况有一较全面的了解, 下面把现有的各类主要高能加速器, 如质子同步加速器, 电子同步加速器、电子直线加速器及各种对撞机的主要参数列在表 1—表 4 中 (表 1—3 见插图, 表 4 见文末), 供大家参考。

从这些表中可见, 尽管高能加速器的规模及投资均越来越大, 但随着加速技术的发展及高能物理实验的要求, 在近几年中高能加速器发展的速率非但没有下降, 反而有所增加。在这几年中, 正负电子对撞机及固定靶质子, 同步加速器得到了优先发展, 没有新建的电子同步加速器及电子直线加速器。自从丁肇中教授

的 J 粒子被发现, 建造正负电子对撞机的呼声空前高涨, 另一方面它所需的代价也较少. 因此表 4 中的 11 台对撞机中, 除西欧 ISR 及美国正在建造的 ISABELLE 外, 其余九台均为正负电子对撞机. 但由于同步辐射方面的困难, 估计今后正负电子对撞机的发展趋势将会减弱, 超过上述西欧 LEP 规模的正负电子对撞机恐怕是很难实现的. 下一步将让位于直线正负电子对撞机, 或质子-反质子, 质子-电子以及质子-质子对撞机. 特别是由于冷却技术的成功, 质子-反质子对撞将会优先得到考虑.

质子同步加速器仍然得到了较大的发展, 表 1 中列了 17 台. 其中有四台是正在建造中的. 新建的巨型质子同步加速器均采用超导磁体, 以节省励磁功率. 而且均可同时兼作质子-反质子对撞或其他种类的对撞. 可以预言, 今后再也不会建单一的固定靶的巨型质子同步加速器了, 依靠超导磁体兼作对撞是再理想不过的了. 由于质子不存在同步辐射的困难, 因此仍然有广阔的发展余地.

五、展 望

回顾加速器发展史, 从 1930 年到 1980 年的五十年中加速器的能量已经上升了大约七个数量级, 对撞机的质心能量(包括已经运行或正在计划中的)也将有四个数量级的上升. 但是, 看来还远远不能满足高能物理学的要求! 人们不禁要问, 到底多高的能量才是极限, 要想从物理学家那里得到肯定的答案是不可能的, 即使再提高十个数量级也是不算多的!! 因此我们只能从目前加速器的技术水平来作一下展望.

让我们来看一下, 如果采用现有的原理, 建造一台质子能量为 20000 京电子伏 (20 TeV) 的加速器*将是怎样的处境. 如果采用超导磁体, 最高磁场为 5 万高斯. 加速器的半径将接近 20 公里, 周长近 100 多公里. 该加速器的造价在 20 亿美元左右. 由于采用了超导磁体, 运行时所消耗的功率也大大节省, 可能在上百兆瓦左右, 随着科技的飞跃发展, 这样的规模、投资

及能耗看来并不是太可怕的. 但是也是相当可观的, 可能超过了一个大国可能给予的支持. 所以人们期望着国际合作, 即联合起来建造一台巨型加速器, 但这又谈何容易呢? 看来根本的途径是必须从原理上或技术上对加速器的制造进行根本性的改革. 近十多年来, 科学家们已在这方面化了不少力量, 从已经发现的几种新原理或新方法来看, 都是很吸引人的. 例如利用激光加速, 加速率可达每米 10^{15} 电子伏; 利用集体相干场加速则可达每米 10^{11} 电子伏; 利用晶体格子内部的场加速则可达每米 10^{12} 电子伏. 一旦这些方法成功, 岂不是大大可以缩小加速器的规模及投资. 当然, 目前这些方法均仍存在着很大的困难, 但是可以深信, 随着人类认识的不断深化, 新的效率更高的加速方法必然会出现于加速器史上. 加速器的进一步发展必然不会受到限制.

表 4 目前世界上主要的电子直线加速器
(能量 < 1 京电子伏)

地点代号	法 国 (ORSAY)	日 本* (KEK)	美 国 SLAC
开始建造—完成时间	1956—1959	1978—1981	1962—1966
投 资	1 亿法郎	70 亿日元	1 亿 1 千 4 百万美元
最高能量(京电子伏)	2.3	2.5	24
平均束流强度(微安)	1.5→22.5	0.25	48
加速器长度(米)	230	320	3050
加速器节数	1 + 38	160	960
加速频率(兆周)	3000	2856	2856
功 率 源	束调管	束调管	束调管
功率源数目	39	40	244
高频峰值功率(兆瓦)	860	1200	7300
高频平均功率(兆瓦)	0.13	0.18	7.0

* 作为 KEK 光子工厂注入器.

* 即比目前的最大加速器提高了约十倍.