

2

专 论

KJ72/1802

正负电子对撞机

● 徐建铭

引言

本世纪30年代初由于研究微观物质世界的需要,在工业及有关学科发展的基础上,加速器开始发展起来。当时,利用直流高压加速带电粒子的高压型加速器已能把质子加速到兆电子伏量级。到40年代初,利用高频电场的回旋加速器和利用感应电场的感应加速器已能分别把质子或电子加速到20兆电子伏,加速器的最高能量提高了一个数量级。

40年代中发现了高频场加速带电粒子过程中的自动稳相现象,在此基础上,发明了多种谐振加速器,像直线加速器、稳相加速器、同步加速器等。从理论上解除了加速器的能量上限,开辟了建造高能加速器的通道。50年代初又发明了强聚焦原理,后来又发明了分离作用强聚焦结构,以及其他新技术的发展,如超导技术、自动控制、计算机技术等,都有效地降低了加速器造价,改善了它的性能,使加速器的最高能量从30年代初的兆电子伏量级提高到当前的千京电子伏(10^{12}eV)量级,50多年时间里,提高了6个数量级,即百万倍。

在最高能量迅速提高的同时,流强和加速粒子的种类及粒子束流的性能等方面也都有很大的提高和改进,以满足各方面(核物理、高能物理、化学、物理、生物、医学、能源、材料、国防等)及医疗、工农业生产的需要。

对撞机的发展^[1]

随着高能物理的发展,人们在愈来愈深的层次上进行研究。于是要求研究更高能量下粒子的运动变化规律。这样,就要求建造能量更高的加速器。当用高能粒子束轰击实验室中的静止靶进行实验时,有效作用能只占高能粒子能量的一小部分。打靶的粒子的能量愈高,有效作用能所占的比例愈小。在很高的能量下,有效作用能只与粒子动能的平方根成正比,即 $E_{\text{有效}} = \sqrt{2EE_0}$ 。

● 徐建铭 中国科学院高能物理研究所研究员

式中 E 是打靶粒子的能量, E_0 是粒子的静止能量。轰击静止靶进行物理实验时能量利用率太低, 使得建造满足高能物理发展需要的高能加速器在经济上和技术上都遇到很大困难。

当用两束相对运动的高能粒子进行碰撞时, 粒子能量的利用率要大得多。如果相同能量的两束同种粒子(如同为质子)或正、反粒子(如正、负电子或质子、反质子)相碰撞, 则有效作用能是两束粒子能量之和, 或者说相撞粒子的能量全部得到利用。因此, 高能粒子束进行对撞是有效的进行高能物理实验的手段。图1是粒子能量和有效作用能的关系曲线图。图中分别表示了质子(或电子)轰击静止质子(或电子), 及质子与质子和电子、电子对撞的情况。正、负电子对撞在能量关系上和电子、电子对撞相同。从图1可以看到, 1000京电子伏(1TeV)质子轰击静止质子靶, 有效作用能约40京电子伏, 即相当于20京电子伏的质子对撞。而100京电子伏的质子对撞, 相当于 2.2×10^4 京电子伏的质子轰击静止质子靶。至于电子对撞, 这一效应尤其显著, 例如20京电子伏电子对撞的有效作用能为40京电子伏, 相当于 1.5×10^4 京电子伏的电子轰击静止电子。能产生相对运动的高能粒子束并使它们对撞的加速器叫对撞机。按进行对撞的粒子分, 有质子-质子对撞机、质子-反质子对撞机、正、负电子对撞机、质子-电子对撞机以及重离子对撞机等。

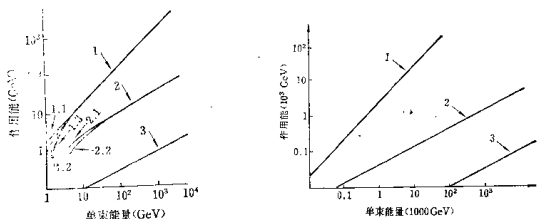


图1 有效作用能和粒子能量的关系

1. 相对碰撞, 2. 轰击静止质子, 3. 电子轰击静止电子,
1·1. 电子与正电子, 1·2. 质子与质子, 1·3. 电子与质子
2·1. 电子轰击静止质子, 2·2. 质子轰击静止质子

到目前为止, 绝大多数对撞机都是环形的, 两束粒子在环形磁场中以相反方向回旋运动, 进行对撞。粒子及其反粒子由于质量相同而电荷相反, 可以在同一个环形磁场中反方向回旋运动。所以这种对撞机(如正、负电子对撞机、质子-反质子对撞机)可以只有一个环形磁铁系统。当然也可以建造两个环形磁铁系统, 两种粒子分别在各自的磁铁及真空室里回旋运动, 回旋方向相反。两束粒子的轨道在几个地点交叉, 实现对撞。同种粒子或不同种粒子(如质子和电子)不能在单一环形磁场中反方向回旋运动, 所以这种对撞机必须有两个环形磁铁系统, 各容纳一束粒子。

用对撞方法进行高能物理实验的想法在40年代和50年代就有人提出来, 由于技术上的困难, 当时未能实现。随着加速器技术的发展, 60年代开始了对撞机的试制研究。由于环形电子加速器规模比较小, 较强的正、负电子流也较易产生, 所以初期发展的是正、负电子或电子-电子对撞机, 能量为数百兆电子伏。质子-质子对撞机则是70年代初才建成。至于质子-反质子对撞机直到80年代才建成, 这是由于强的反质子流的获得在技术上有很大困难。表1是主要对撞机建造年代表。

表1 主要对撞机建造年代表

名 称	建造地点	建成时间	粒 子	能 量 (京电子伏)	有效作用能 (京电子伏)
AdA	意大利	1961	e^+e^-	0.25	0.50
Princeton-Stanford	美国	1962	e^+e^-	0.56	1.1
VEPP-2	苏联	1964	e^+e^-	0.70	1.4
AGO	法国	1965	e^+e^-	0.50	1.0
ADONE	意大利	1969	e^+e^-	1.5	3.0
ISR	日内瓦	1971	PP	31.0	62.0
CEA-Bypass	美国	1971	e^+e^-	2.5	5.0
SPEAR	美国	1972	e^+e^-	4.2	8.4
DORIS	联邦德国	1974	e^+e^-	4.5	9.0
VEPP-2M	苏联	1975	e^+e^-	1.3	2.6
DCI	法国	1975	e^+e^-	3.7	7.4
VEPP-3	苏联	1977	e^+e^-	3.0	6.0
VEPP-4	苏联	1978	e^+e^-	7.0	14.0
PETRA	联邦德国	1978	e^+e^-	19	38
CESR	美国	1978	e^+e^-	8	16
ISR PP	日内瓦	1981	PP	31	62
PEP	美国	1980	e^+e^-	18	36
SPS PP	日内瓦	1981	PP	270	540
TEVATRON	美国	1985	PP	1000	2000
TRISTAN	日本	1987	e^+e^-	30	60
BEPC	中国	1988	e^+e^-	2.8	5.6
HERA	联邦德国	1990	Pe	820×30	314
LEP	日内瓦	1989	e^+e^-	50	100
SLC*	美国	1988	e^+e^-	50	100

* 这是一台直线对撞机。

环形正负电子对撞机概况

在对撞机里相互碰撞的是2束相对运动的粒子束，它们的粒子密度远远小于静止靶。所以对撞机虽然有作用能高的优点，但也有事例稀少的缺点。另外它也不能改变相互作用的粒子的种类，它的工作能区也比较窄。

对撞机里2束粒子相互碰撞的几率叫对撞机的亮度，它不只和2个束流中粒子的总数成正比，还和束流中粒子的密度成正比。为了提高对撞机的亮度，一方面要尽量提高粒子束中粒子的数目，同时还要加强对撞点附近对粒子束的聚焦力，缩小束流截面，提高粒子密度。这一措施叫低 β 聚焦结构。

对撞机和其他环形加速器一样，正、负电子都要先在另一台加速器——注入器里加速到一定能量以后再注入到对撞机里。注入器多用电子直线加速器，也有用其他加速器如电子回旋加速器的。大多数能量较高的正、负电子对撞机粒子束在电子直线加速器加速之后，注入一台电子同步加速器进一步加速，才注入到对撞机里。这台中间的同步加速器又称为增强器。这是因为同步加速器单位能量的造价比电子直线加速器低，并且电子束在同步加速器里回旋加速过程中，由于同步辐射的阻尼作用，束流的横向聚焦性能及能散度都会得到改善，对注入对撞机有利。

正电子流是利用电子流打靶产生的。电子流轰击钨靶，由级联簇射产生正、负电子，经磁场或高频分离器，可以消除其中的负电子。正电子束的聚焦性能比较差，能散度也比较大，流强是打靶的电子流的数十甚至百分之一。一次注入的正电子数目有限，所以要多次注入，在对撞机里积累。这一过程叫注入积累过程。在此过程中，储存环的磁场维持不变。由于正电子流弱，需要的积累时间长。所以，先积累正电子，以后再积累负电子。整个注入积累过程延续数分钟甚至数十分钟。主要决定于注入的流强和注入能量。提高注入能量可有效地缩短积累时间。注入积累时间主要是正电子积累时间，为了缩短积累时间，不少正、负电子对撞机还建造正电子积累环。在对撞机进行对撞时，注入器把正电子注入并积累到正电子积累环里。当对撞机注入时，把已经积累起来的较强的正电子流从积累环里引出，注入到对撞机里，缩短对撞机的注入积累时间。图2是一个正负电子对撞机的总体布局图。

如果对撞机的注入能量已达到高能物理实验所需要的能量（这种情况称为全能量注入），则注入积累过程结束以后，即可开始对撞实验。大多数对撞机的注入能量低于物理实验要求的能量，在这种情况下，注入积累完了后，对撞机的磁场开始升高，开始了粒子的加速过程。粒子在高频加速站的作用下得到加速。被加速到需要的能量后，磁场维持不变，粒子束就在该能量下回旋运动，进行对撞。加速过程一般持续1~2分钟。图3是对撞机磁场强度随时间的变化曲线。

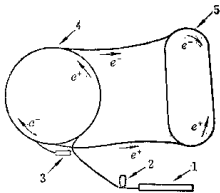


图2 正、负电子对撞机布局图
1. 正电子直线加速器，2. 正电子积累环，3. 电子直线加速器，4. 同步加速器，5. 对撞机

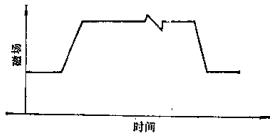


图3 对撞机磁场强度随时间变化曲线

注入积累和加速都是准备阶段，只有正、负电子对撞阶段，才能进行高能物理实验。为了延长正、负电子回旋运动、对撞的延续时间，提高束流利用效率，对撞机真空盒内的真空度要维持在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 托的超高真空，以减少真空盒内残余气体分子和正、负电子的碰撞作用，延长束流寿命。在对撞点附近，为了减少实验本底，真空度要维持在 10^{-12} 托。

电子和正电子在磁场中回旋运动，辐射出大量的电磁辐射，称为同步辐射。它的光谱分布及辐射强度和粒子的能量及轨道的曲率半径有关。电子或正电子每回旋一圈所辐射的能量为 $u=8.86 \times$

$16 \frac{E^4}{\rho}$ (电子伏/圈)。式中, E 是粒子的能量, 以京电子伏为单位; ρ 是粒子轨道曲率半径, 以米为单位。同步辐射的特征波长(总辐射功率的一半在特征波长之上, 另一半在特征波长之下)和粒子能量三次方成反比, 并正比于轨道的曲率半径, 即 $\lambda_c = \frac{4\pi}{3} \rho \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-3}$, E_0 为粒子的静止能

量。由于有同步辐射损失, 在对撞过程中, 尽管不需要对正、负电子进行加速, 仍要有一定的高频加速功率, 来补充束流的辐射损失。所以, 正、负电子对撞机需要有连续工作的高频加速站。在高性能正、负电子对撞机里, 连续工作大功率高频加速站是主要技术困难之一, 是限制环形正、负电子对撞机最高能量的因素。为了减少同步辐射, 高性能正、负电子对撞都采用尽可能低的磁场强度, 以增大轨道曲率半径。例如正在建造中的最大的环形正、负电子对撞机, 一期目标为55京电子伏, 最高弯转磁场约594高斯, 轨道曲率半径达3096米, 加速器周长26.66公里, 最大加速电压达400兆伏, 连续高频加速功率16兆瓦。当达到该加速器最高能量125京电子伏(此时磁场强度为1350高斯), 即便使用超导加速腔, 高频功率也要96兆瓦, 最大加速电压将达4086兆伏。由于加速电压与加速器能量的四次方成正比, 加速功率随能量增长太多, 环形正、负电子对撞机进一步提高能量将会遇到很大困难。这就促使人们设法发展直线型正、负电子对撞机。

正、负电子对撞机是进行高能物理实验的设备, 为了进行高能物理实验, 在对撞点要安装探测器, 探测正、负电子对撞所产生的各种粒子的性能参数。和探测器相配的还有它的快电子学设备及大型电子计算机, 以记录并分析探测的数据, 从中获取有用的物理结果。探测器是按照高能物理实验的目的而设计制造的, 随着物理实验目的不同, 建造不同的探测器, 本文不一一叙述。

我国的北京正负电子对撞机^[2,3]

从50年代我国就计划建造自己的高能加速器, 以形成我国自己的高能物理实验基地。经过多年的准备、摸索, 根据我国当前经济力量及高能物理发展的情况, 1983年批准建造能量为2.2~2.8京电子伏的正负电子对撞机, 简称BEPC。它的造价比较低, 又可以进行有一定物理意义的实验工作。另外, 除在进行正、负电子对撞的同时能以寄生模式提供同步辐射外, 该对撞机还能以专用模式提供性能更为优越的专用同步辐射。而同步辐射由于强度大、亮度高、频谱范围广, 张角很小, 偏振性好等优点, 在物理、化学、生物以及表面物理、材料科学、医学、超大规模集成电路等方面都有广泛的应用。所以BEPC是一器两用, 基础研究和应用研究兼顾, 适合我国当前国情。

BEPC由注入器、储存环及束流输运线、北京谱仪、计算中心和同步辐射光束系统等5大部分组成。图4是它的总体布置图。

注入器是一台1.1~1.4京电子伏的电子直线加速器, 它能提供1.1~1.4京电子伏或更高能量的正、负电子流。注入器的起始部件是电子枪。电子流从电子枪发射出来, 通过预注入器把它调制成只占几度高频相位的短束团, 并加速到30兆电子伏。然后经过一段120兆电子伏的直线加速器, 加速到150兆电子伏。需要提供正电子流时, 把正电子产生靶——钨靶推到电子束流轴线上。电子轰击钨靶, 由级联簇射产生正、负电子。再通过脉冲压缩磁场, 收集并压缩正电子束。偏转磁场清除伴随的电子, 之后进入最后一段直线加速器。最后一段是能把正电子加速到1.1~1.4京

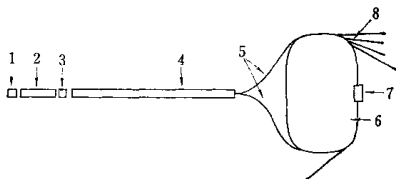


图4 BEPC总体布置图

1. 预注入器, 2. 120 MeV 直线加速器, 3. 正电子产生靶, 4. 1.1~1.4 GeV 直线加速器,
5. 束流输运线, 6. 储存环, 7. 北京谱仪, 8. 同步光束线

电子伏的电子直线加速器。需要提供电子流时, 则把钨靶拉出来, 使电子流直接进入最后一段直线加速器加速。还要调整加速能力, 使得正电子束和电子束有同样的最终能量, 以便注入储存环。

注入器总长约 200 米。电子枪采用三极电子枪, 当需要产生正电子时, 发射的脉冲电子流强约 3 安培; 产生电子时, 约 1 安培。发射电子流脉冲宽度 2.5 毫微秒。直线加速器的高频频率为 2856 兆赫, 采用等梯度盘荷波导作为加速结构, 每节加速管长 3.05 米。整个注入器共用 56 根加速管。微波源采用国产速调管, 输出最大冲脉功率 32 兆瓦, 脉冲宽度 2.5~3 微秒, 最大重复频率每秒 50 次。

由于正、负电子束脉冲很窄, 宽度只有 2.5 毫微秒, 为了减少速调管和调制器的数量, BEPC 的注入器采用了能量倍增器。利用它把速调管输出的约 3 微秒的脉冲能量, 压缩到约 0.83 微秒宽度内。提高了输入加速管的峰值功率, 也就提高了加速电场。比不用能量倍增器, 正、负电子能量约可提高 1.4 倍左右。因此, 原设计只要用 16 个约 20 兆瓦的速调管, 就能产生 1.1~1.4 京电子伏的正、负电子流。现在已改用 32 兆瓦的速调管, 能量还可进一步提高, 以改善整个 BEPC 的性能。

沿直线加速器共装有 45 套四极磁铁, 以保证束流的横向聚焦。在预注入器和正电子产生靶后面的两极加速管, 则采用螺线管磁场聚焦。

注入器的加速管、速调管、调制器、微波波导、能量倍增器、各种磁铁及其励磁电源、真空泵等都是我国自行设计、自行制造。性能达到设计要求。目前这台 200 米长的直线加速器已能产生 1200 兆电子伏, 约 200 毫安的脉冲电子流。正电子产生也已通过试验。当电子枪脉冲电流 1 安培, 打靶电子流 785 毫安, 打靶能量 148 兆电子伏时, 收集的正电子流强为 2.5 毫安。这一正电子流曾加速到 100 兆电子伏。正电子产生率达到设计要求。正在进一步调整、改进、提高中。表 2 是这台注入器的主要参数。

束流输运线能把注入器加速出来的正、负电子束输运到储存环的注入点, 它的功能除给束流以良好的聚焦作用, 保证较高的输运效率外, 还有束流性能匹配作用, 提高储存环的注入效率。束流输运系统由 1 条干线和 2 条支线构成。干线长 30.6 米, 正、负电子束都先从干线通过。干线上共有 8 块四极磁铁, 对束流聚焦和匹配。干线的末端是 1 块偏转磁铁, 正、负电子流通过它以后, 分别向东、西方向偏转, 进入各自的支线。

每条支线长 88.9 米, 两条支线分别输运正、负电子束。每条支线由 2 个 60° 的水平偏转段和

表 2 注入器的主要参数

e ⁺ 的能量	1.1~1.4京电子伏 (20兆瓦速调管)	电子枪电流	3安(产生正电子用)
脉冲电子流	1~2安(产生正电子用) 0.2安(产生电子流用)	电子枪电压	0.5安(注入电子时)
脉冲宽度	2.5毫微秒	束团相宽	80千伏
最大脉冲重复率	每秒50脉冲	脉冲调制器电压	~5°
工作频率	2856兆赫	脉冲调制器电流	270千伏
速调管数目	16	脉冲宽度	224安
速调管脉冲功率	32兆瓦	脉冲不平度	3微秒
加速管根数	56	真空系统真空度	1%
每根加速管长度	3.05米	加速管温度	2×10^{-7} 托
预注入器能量	30兆电子伏	设备总容量	45±0.2℃
			1600千瓦

1个垂直偏转段组成。为了不妨碍同步辐射的引出,电子直线加速器和束流输运线的中心轴线比储存环轴线低。正、负电子束经过垂直偏转段以后,到达储存环的注入点,注入到储存环。整个束流输运线共有35块偏转磁铁、42块四极磁铁和一些导向磁铁、束流探测元件、真空室、磁铁的励磁电源等组成。这一输运线可以输运1.1~2.8京电子伏的正、负电子束。

储存环形状类似一个椭圆形跑道^[4],总周长240.4米。它由两个弧形部分和2个长度为27.4米的长直线节组成。长直线节中部是长5米的物理实验区,探测器北京谱仪就安装在南边的实验区里。另一个实验区暂时空闲着。实验区两边的直线节里对称安放两个静电分离器和高频加速站。分离器的作用是在注入积累及加速过程中,靠分离器的电场,把正、负电子束分开,使它们不对撞。加速过程終了再进行对撞。

两个弧形部分以分离型FODO聚焦结构为主要单元。每个正常单元包含两块1.6米长的弯转磁铁、两块0.4米长的四极磁铁和中、短直线节各两段,总长6.6米。中直线节里分别安放有束流探测元件、真空泵接口、校正磁铁等。每个弧形部分里还留有一些直线节安放注入元件、产生同步辐射的扭摆磁铁及控制对撞亮度的扭摆磁铁等。注入点在两个弧形部分的中点。超高真空盒从这些磁铁及注入元件中间穿过,是正、负电子束回旋运动的通道。储存环的主要参数见表3。

表 3 储存环的主要参数

最高能量	2.8京电子伏(单束)	每束粒子数	3.3×10^{11}
周长	240.4米	回旋频率	1.247兆赫
设计最高亮度	1.7×10^{21} 厘米 ⁻² 秒 ⁻¹	高频谐波倍数	160
最高弯转磁场	9.028千高斯	高频频率	199.53兆赫
轨道弯转半径	10.345米	峰值加速电压	1.35兆伏
对撞区数目	2	最大同步辐射功率	68千瓦
实验区空间长度	5米	同步辐射特征波长(寄生模式)	2.63埃
每个束流中束团数目	1	每圈同步辐射损失	521.5库电子伏
每束最大环流	65毫安	束流总寿命(2.8京电子伏)	6.5小时

水平自由振荡数	6.18	最大弯转磁场强度	9.028千高斯
垂直自由振荡数	7.12	弯转磁铁空腔高度	70毫米
均方根束团自然半长度	5.2厘米	好场区宽度	151毫米
均方根自然能散度	7.4×10^{-4}	四极磁铁有效长度	0.4米
对撞点垂直 β 函数	0.1米	内接圆半径	55毫米
对撞点水平 β 函数	1.3米	最大磁场梯度	1118高斯/厘米
弯转磁铁有效长度	1.6米		

北京正、负电子对撞机的储存环共有40块弯转磁铁、60块四极磁铁、8块插入四极磁铁、36块六极磁铁、30余块各种校正磁铁,还有这些磁铁的励磁电源、两个高频加速站、4个静电偏转板、6套冲击偏转板及它们的脉冲电源、240.4米长的超高真空盒及必要的真空计、泵,多种束测设备和自控系统。绝大部分都是国内自行设计、制造,性能满足设计要求。储存环全部设备已安装就位,并在现场进行分调。1987年底从注入器出来的1200京电子伏的电子束已顺利地通过束流输运线,注入储存环,并观察到电子束在储存环内回旋5圈的清晰信号。这一成功初步说明储存环各部件的性能及安装准确达到设计要求。

图5是储存环弯转磁铁的断面图,图6是弯转磁铁对称平面上磁场沿半径的分布图。40块弯转磁铁等效长度的标准偏差值,从注入场强到最高场强均优于 4×10^{-4} 。图7是储存环四极磁铁断面图,图中只划出1/4,图8是磁场梯度在孔径内的分布曲线。60块四极磁铁的有效长度标准偏差小于 8×10^{-4} ,各种磁铁性能和国际上同类产品相当。

主要磁铁(如弯转铁、四极磁铁)的励磁电源的电流稳定度优于 1×10^{-4} 。一些次校正磁铁的电源稳定度优于 3×10^{-4} 。所有电源都进行一个月以上连续运行的长期稳定性可靠性实验。

储存环的真空室采用铝的三通道真空室,由束流通道、分布泵通道及冷却水通道组成。真空室坯料由美国工厂挤压成形。国内工厂进行束流通道与分布泵通道隔层的打孔,管道弯曲及焊接,清洗。预抽可达 10^{-10} 托超高真空。当储存环工作时,分布离子泵在弯转磁铁边缘磁场的作用下,抽速可达110升/秒·米,是主要的真空泵。沿真空盒还装有100升/秒抽速的离子泵,在停机时可

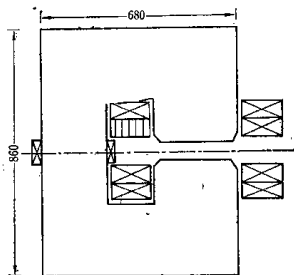


图5 弯转磁铁断面

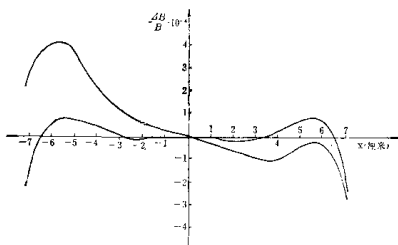


图 6 弯转磁铁磁场强度分布曲线

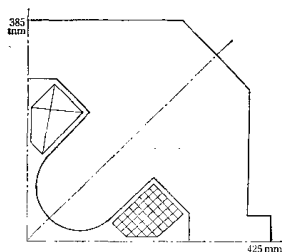


图 7 四极磁铁断面

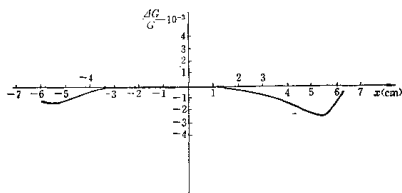


图 8 四极磁铁磁场梯度分布曲线

维持盒内真空。一些特殊部件如高频加速腔、冲击偏转板等则用500升/秒的离子泵来维持超高真空。图9是真空室断面图。

北京正负电子对撞机将安装的探测器是北京谱仪^[5]。它长约6米，宽、高各7米，重480吨，是国内第一个高能物理磁谱仪。它由中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器、磁场线圈及轭铁、 μ 子鉴别器、气体系统、亮度监测器、电子学系统、触发判选系统、计算机在线

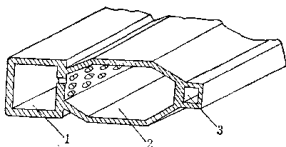


图9 铝真空室断面图

1. 分布式离子泵孔道, 2. 主真空室, 3. 冷却水通道

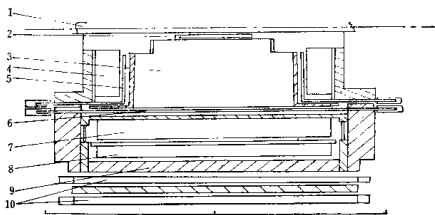


图10 北京谱仪下半部断面示意图

1. 束流管道, 2. 中心触发漂移室, 3. 漂移室, 4. 侧面簇射计数器, 5. 端面飞行时间计数器, 6. 飞行时间计数器, 7. 底射计数器, 8. 线圈, 9. 铁轭, 10. μ 计数器

数据获取、离线分析以及其他机械部件组成。图10是北京谱仪的结构示意图。该图只划出谱仪的下半部断面。整个谱仪以束流轴线为对称轴。各部件的功能分别是：提供触发信号，确定带电粒子的径迹，测量它们的动量和能量损失，测量飞行时间，鉴别强子，测量 γ 和正、负电子的能量，产生磁场偏转带电粒子，探测 μ 子并记录其位置、动量等。

北京谱仪的工作能区是3.0~5.6京电子伏，在这一能区将能研究一些重要的物理课题，如，胶子球和四夸克态的研究，粲粒子的研究，测量其衰变道，了解其性质，研究CP破坏特性等。 τ 轻子物理，粲重子的寻找和研究等。

BEPC除可用来进行粒子物理研究，还可利用它的储存环所产生的同步辐射进行多种学科的基础研究和应用研究。它的贮存环的40块弯转磁铁中有30块能提供水平张角最大达28毫弧度的同步辐射。另外还有4个较长的直线节供安装产生同步辐射用的扭摆磁铁。电子在磁场中运动所产生的同步辐射的特征波长 λ_c 及特征能量 E_c 分别是：

$$E_c(\text{keV}) = \frac{2.218 E^3(\text{GeV})}{\rho(\text{m})}$$

$$\lambda_c(\text{\AA}) = \frac{5.59 \rho(\text{m})}{E^3(\text{GeV})}$$

式中 E 为电子能量， ρ 为电子轨道的曲率半径。在进行高能物理对撞实验时，以寄生模式产生的同步辐射的性能见下表：

表 4 BEPC 同步辐射性能

电 子 能 量	1.6~2.8京电子伏
电 子 束 流	37~65毫安
特 征 波 长	14.1~2.63埃
同 步 辐 射 功 率	2~34千瓦
中 心 亮 度	$10^{21} \sim 10^{24}$ 光子/(s·mm ² ·mrad ² ·1%谱宽)

在专用模式下运行所产生的同步辐射性能为：

表 5 BEPC 专用模式同步辐射性能

电 子 能 量	1.1~2.8京电子伏
电 子 束 流	150毫安
特 征 波 长	43.7~2.63埃
同 步 辐 射 功 率	1.9~78千瓦
水 平 方 向 发 射 度	0.03~0.192mm·mrad
中 心 亮 度	$(4.1 \sim 4.9) \times 10^{22}$ 光子/(s·mm ² ·mrad ² ·1%谱宽)

第一期工程计划安装 1 台 18000 高斯的扭摆磁铁，在 2.8GeV 能量下，所放出的同步辐射的特征波长将为 1.32 Å。第一期工程将建造 5 条光束线，2 束从扭摆磁铁引出，其余 3 条从弯转磁铁引出。共建造 7 个实验站，它们是形貌学、EXAFS 及漫散射实验、衍射和小角度散射、真空紫外与软 X 光、光刻实验站。

国外新建成和建造中的大型环形正负电子对撞机

TRISTAN 是日本高能物理研究所建造的正、负电子对撞机，1986 年未建成，开始对撞。单束能量达到 25 京电子伏，亮度为 10^{20} /厘米²·秒。主环周长 3018 米，设计能量 25~30 京电子伏。它的注入器是一个 6~8 京电子伏的积累环，积累环除了积累正、负电子，用以注入主环外，它本身也可进行正、负电子对撞实验。而积累环又用该所已有的 2.5 京电子伏的直线加速器作注入器。TRISTAN 主环和积累环的主要参数见表 6。

建造这台对撞机的目的是寻找并研究顶夸克，目前正在调整改进中。这台对撞机是日本的三

表 6 TRISTAN 主环和积累环参数

	主 环	积 累 环
能量(京电子伏)	25~30	6~8
注入能量(京电子伏)	6~8	2.5~3
周长(米)	3018	377
轨道曲率半径(米)	246.5	23.2
长直线节长度(米)	194.4(×4)	19.5(×2)+19.1(×2)
加速站总长(米)	509.4	38.1

(续表6)

	主 环	积 累 环
加速腔总长(米)	318	29.6
加速频率(兆赫)	508.6	508.6
粒子回旋频率(千赫)	99.3	795
最大环流(毫安)	22	35
每圈辐射损失(兆电子伏)	290(30京电子伏)	4.6(6京电子伏)
峰值加速电压(兆伏)	400	10
实验区长度(米)	6(×4)	5(×2)
设计最大亮度	8×10^{31}	2×10^{31}
对撞点 β 值((β_x^*/β_y^*))	1.12/0.07(30京电子伏)	2.0/0.1(6京电子伏)
对撞点束流截面(σ_x^*/σ_y^*)(毫米)	0.434/0.027(30京电子伏)	0.71/0.036(6京电子伏)

环计划的第一步, 原设想还要建造质子储存环以实现质子对撞及质子与电子对撞。由于其他质子对撞机及质子-电子对撞机正在建造或已开始工作, 三环计划未必继续进行。

LEP是当前建造中的最大的正、负电子对撞机, 建造在日内瓦欧洲原子核研究中心。一期工程55京电子伏, 计划1989年建成。以后增加高频加速站, 并用超导加速腔, 可以把能量逐步提高, 最后有可能提高到125京电子伏。

它的注入器是电子直线加速器, 包括1个200兆电子伏每秒100脉冲的电子直线加速器, 之后是正电子产生靶, 再后面是一段600兆电子伏的直线加速器, 以获得600兆电子伏的正、负电子束。正、负电子束注入正、负电子积累环(EPA)进行积累, 之后注入增强器系统进一步加速。

LEP的增强器系统利用已有的2台质子同步加速器改装用来加速正、负电子。先利用PS(28京电子伏质子同步加速器)可加速到3.5京电子伏, 引出后注入SPS(450京电子伏的质子同步加速器), 把正、负电子束加速到20京电子伏, 再注入LEP。

LEP的主要参数见表7。

表7 LEP的主要参数

周长	26.658883 公里	高频频率	352.20904兆赫
平均半径	4.242893 公里	回旋周期	88.92446微秒
轨道曲率半径	3.096175 公里	倍频数	31320
每绕周期相移	60°或90°	总高频功率(第一期)	16兆瓦
水平振荡数	70.35或94.35	加速腔总长	272.377米
垂直振荡数	78.20或98.20	加速电压梯度	1.474兆伏/米
动量弥散因子	3.866×10^{-4}	总加速电压	400兆伏
每束内束团数目	4	注入能量	20京电子伏
对撞点数目	4+4	最大能量(零亮度)	~60京电子伏
第一期装备实验设备数	4	最大亮度	1.6×10^{31} 厘米 ⁻² 秒 ⁻¹
对撞点处水平 β 值与垂直 β 值之比	25	最大亮度下的能量	55京电子伏

表 8 列出高频加速功率和LEP能量的关系。

表 8 LEP加速功率与粒子能量关系

加速腔型式 Cu 铜腔 Sc超导腔	Cu			Cu + Sc			Sc
长直线节中高频腔所占比例	1/3	1/2	1	1/3 + 1/6	1/3 + 2/3		1
加速腔长(米)	272.4	408.6	817.2	408.6	817.2		817.2
铜腔中加速电压梯度(兆伏/米)	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47		
超导腔中梯度(兆伏/米)	—	—	—	3	5	3	5
总加速电压(兆伏)	400	600	1200	810	1080	2034	4086
最大能量(京电子伏)(零亮度)	60	65	75	70	75	90	105

LEP 建造目的是对 Z⁰ 进行细致的研究。它的物理目的和后面将要介绍的直线正、负电子对撞机 SLC 相同。

正负电子直线对撞机

在环形对撞机里，电子和正电子的同步辐射损失随着对撞机能量提高而迅速增加，致使这种对撞机的能量提高遇到很大困难。因此，在不少实验室正在进行直线正、负电子对撞机的研究。在直线加速器里，电子不作回旋运动，不会由于同步辐射损失而引起困难。美国斯坦福实验室正在建造的 SLC 就是一台直线正、负电子对撞机。当然，SLC 是利用已有的 2 英里长的电子直线加速器改建的，和研究中的直线对撞机有所不同，但是它的建成将为直线对撞机提供宝贵的经验。

图 11 是 SLC 的布局图。电子束从电子枪发射出来，经过一段强流直线加速器—电子增强器初步加速后，注入已有的直线加速器。被加速到 1.21 京电子伏后，引出来注入衰减环。衰减环实际上是一个储存环，电子在它里面储存并回旋运动放出同步辐射。由于放射同步辐射光子的反冲作用，电子束的聚焦性能得到改善。之后，从衰减环引出，注入已有的直线加速器继续加速。电子枪每次发射出两个电子束团，在电子衰减环里同时有 2 束电子团回旋运动。这两个电子束团重新进入已有直线加速器后，一团一直加速到直线加速器末端，达到 50 京电子伏，进入束流运输线，经过对撞机弧弯转，进入对撞区。到达对撞点前经过一系列聚焦元件进行最终聚焦，把束流直径聚焦到 1 微米，和对面的正电子束团在对撞点进行对撞。另一个电子束团，加速到 33 京电子伏就引出直线加速器，与重金属正电子产生靶作用，产生正电子束。正电子束经正电子增强器初步加速以后，通过正电子返航线，输送到已有直线加速器的入口端，进入直线加速器，加速到 1.21 京电子伏，引出来注入正电子衰减环。在衰减环受到足够的衰减作用以后，和电子衰减环中的一个电子束团同时从各自的衰减环引出，注

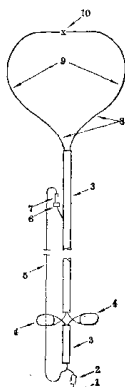


图 11. SLC 布局图

1. 电子枪
2. 电子增强器
3. 已有的 2 英里长直线加速器
4. 衰减环
5. 正电子返航线
6. 正电子产生靶
7. 正电子增强器
8. 束流运输线
9. 对撞机弧
10. 对撞点

入原有的直线加速器，一直加速到该直线加速器的末端，达到50京电子伏。之后，经过束流输运线，对撞 π 弧，到达对撞点，正、负电子束进行对撞。在直线对撞机里，正、负电子束只能进行1次对撞，和环形对撞机里2束粒子长时间储存，回旋运动，反复利用。限于直线加速器微波功率，每秒只能产生数百次电子束，也就只能进行数百次对撞。比环形对撞机里对撞次数少得多（环形对撞机一般每秒进行百万次到数万次）。为了达到一定的亮度，要把束流截面尺寸聚焦到微米或更小，提高粒子密度。SLC设计亮度是 $10^{30}/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ 。目前正在调试中。

直线对撞机正在研究过程中，还没有成熟的经验。显然，它是实现更高能量（例如100京电子伏以上）正、负电子对撞的一个可能的途径，有些国家，像美、苏、意等都在进行研究，提出一些可能的方案，并寻求更经济的直线加速器加速结构，如更高频率较小尺寸的波导，超导加速系统等。随着科学技术的发展，更高能量性能更优越的正、负电子对撞机将会建成，把人类对微观世界的认识向前推进。

[1] Waldemar Scharf, *Particle Accelerators and their Uses*, Harwood Academic Publishers, (1985), 521

[2] 中国科学院高能物理研究所,《北京正负电子对撞机初步设计提要》,中国科学院高能物理研究所(1982).

[3] 冯家麟,《自然科学年鉴》,(1983),1.1

[4] 高能物理研究所储存环室,《2.2京电子伏储存环初步设计提要(修订版)》,高能物理研究所储存环室,(1984),3

[5] 高能物理研究所物理一室,《北京谱仪探测器预研究资料汇编》,高能物理研究所物理一室,(1987),1

“神光”装置——高功率 激光技术的新成就

● 范滇元 邓锡铭

“神光”装置是建立在中国科学院上海光学精密机械研究所的一台大型高功率激光实验装置。它的输出功率高达 10^{13} 瓦量级，并配有物理实验用靶室及全套诊断测量设备，是世界上为数不多、国内规模最大的激光系统。

装置的研制始于1980年。经过二年的技术论证和预研，三年半的工程建造和调试，二年多的运行考核和打靶实验，于1987年6月通过国家级鉴定，并被正式命名为“神光”装置。

鉴定委员会的专家们一致确认：“神光”装置是我国激光技术发展的重大成就；达到了国际同类装置的先进水平，并有若干独创性成果；是我国跟踪世界高技术领域的一个范例。它的建成为进行世界前沿领域的激光物理实验提供了有力的手段，也对国防尖端科研和国民经济有重要意义。

“神光”装置概貌

装置的目的与用途决定了它的指标、规模和技术路线，同时也决定了所能得到的投资强度与重视程度。“神光”装置既有长远的战略目标又有近期的阶段性应用，两者互相依存、互相促进。

研制“神光”装置的长远目的是用来进行“惯性约束聚变”研究。从根本上说，人类的能源来自核聚变反应，这就是发生在太阳上的“重力约束聚变”。近四十年前，在地球上实现了不可控的热核反应，这就是氢弹的爆炸。为了获得几乎是取之不尽的新能源，必须使这一反应在可控的条件下持续地进行。为实现这一理想，三十多年来，科学家用托卡马克装置进行了“磁约束聚变”的研究。近十多年来，又提出了另一条新的技术路线。它的基本原理是把强大的激光束聚焦到热核材料制成的微型靶丸上，在一瞬间产生数千万度的高温和上千万个大气压的压力，被高压压缩的稠密等离子体，在因惯性而扩散之前，即完成全部核聚变反应。这就是“惯性约束聚变”。许多国家的实验室已经在 10^{13} 瓦量级的激光装置上作了大量研究工作；美国、日本则已走过这一阶段，进而建立了 10^{13} 瓦及 10^{14} 瓦的装置，并着手建造更大规模的激光器，期望在不远的将来实现激光

● 范滇元 中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员
邓锡铭 中国科学院上海光学精密机械研究所所长、中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室主任

热核“点火”。激光聚变的最后成功并投入工业应用还要走漫长的道路，但是，许多阶段性的应用对科学研究和国防尖端有直接的实用价值，相干X光激光的产生就是其中的一个典型例子。为了及时地跟踪这一高技术的发展，“神光”装置的研制是十分必要的。

下面从四个方面具体叙述。

(一)对激光器的要求

惯性约束聚变对激光器的输出光束有十分苛刻的要求，主要有：

(1)激光的波长 已有的理论分析和实验结果表明：波长过长，大部分光能量从靶面反射，不能有效地用于靶的加热，而且会产生有害的“过热”电子；波长过短，激光会穿透靶面逃逸，同样不利于靶的加热。十几年来的大量实验表明，0.2~0.5微米的波长是适宜的。用最合适的波长，靶对激光的吸收率可高达80%以上。“神光”装置采用掺钕玻璃作激光器的工作物质，发射波长为1.054微米，较为偏长。需要利用非线性晶体(如KDP)把红外光转换为短波长激光，以满足今后打靶实验的需要。

(2)激光脉冲宽度 从惯性约束的基本原理容易理解激光脉冲的持续时间不能太长，否则等离子体早已膨胀飞散，激光能量不能充分利用。但脉宽也不能太小，不仅有技术上的困难，而且会在靶面集中过高的激光功率，由此衍生出许多有害的非线性光学效应。因此适宜的激光脉冲宽度与靶的尺寸有关，一般在 10^{-10} ~ 10^{-9} 秒范围。根据近期物理实验的需要，“神光”装置的激光脉宽确定为0.1、1和3毫微秒，今后还将增加20~30微微秒量级的脉宽。

(3)激光脉冲的信噪比 这里借用了电子技术的术语，指的是：激光脉冲的峰值功率(信号)与主脉冲到达靶面以前的背景杂光功率(噪音)之比。这是一个很重要的参数，如果信噪比不高，背景杂光过大，就会在主脉冲到达之前先把靶烧蚀了，整个靶加热过程就会失控甚至完全失败。高的信噪比是对激光器极其苛刻的要求。因为任何激光在产生过程中不可避免地存在着背景光，即使在极限情况下，也还有量子噪音；而且激光放大器对低功率杂光的增益大于主激光，同时还要叠加放大产生的背景光。“神光”装置对信噪比的要求是大于 10^6 ~ 10^7 。要采取很多技术措施才能达到这一指标。

(4)激光束的光学质量(发散度) 光束的质量决定了被会聚透镜聚焦后在靶面上光能量的集中程度。即使是一个理想的激光束，由于光的波动本性也不可能会聚成几何点，而是总有一定的发散度。这个最小的极限发散度称为“衍射极限”，可用来作为度量实际光束质量的基本单位。对“神光”装置这样的大型激光系统，要获得高质量的光束是极其困难的。根据应用的要求，光束发散度的指标确定为0.13毫弧度，相当于10倍衍射极限。为此，付出了高昂的代价。主要的技术措施有以下三方面：首先是要求装置中的光学材料有极高的均匀性，允许的折射率跌落(Δn)必须小于 $2\sim 4\times 10^{-6}$ ，数百个大口径光学元件的表面平度必须加工到十分之一波长以内；其次，放大器氙灯照射掺玻璃所引起的热形变必须足够小；最后，要严格地控制强光通过光学元件所造成的非线性波象差。在研制“神光”装置过程中，我们还采用了一项先进的技术——自适应光学技术去补偿材料和元件不完善，大幅度地改善了光束的质量。

(5)激光脉冲的能量 能量的高低决定了所能进行的物理实验的等级，同时也决定了装置的规模和造价。它们是相互制约的。根据现阶段的实际需要与可能，“神光”装置的最大输出能量是1000焦耳(每束激光，共两束)。为此需要近60台套各种激光器件，数百个光学元件，300多支氙灯，20多台充电机，2500台电容器和8公里大容量高压电缆等。

(二)对靶室的要求