

双束加速器

姚乃国

(南京大学物理系)

摘要: 本文介绍了在 TeV 能量区域电子-正电子直线对撞机的进展和双束加速器研究的概况。着重介绍以自由电子激光作微波功率源和用激励加速器作微波功率源的两种双束加速器。

一、引言

从 1930 年起, 粒子加速器成为实验核物理的越来越重要的工具之一。半个世纪以来, 加速器的研究和建造有着巨大的进展。按照 Livingston 图, 每十年加速器能量几乎增加一个半数量级(图 1)。仔细研究一下这张图就可以发现, 每一种新的加速器类型其能量很快达到饱和, 而不断提出的新思想又为急速的新发展提供了坚实的基础。其中两个最

为引人注目的例子就是五十年代初期发明的交变梯度聚焦和六十年代的对撞束, 估计今后的发展中超导将起着重要的作用。为了满足高能物理实验对加速器能量的越来越高的要求, 原来的固定靶机器根本不可能达到这一要求, 因此作为未来高能物理用的加速器将只能是对撞机。

对撞机的对撞束可以是强子, 也可以是轻子。现在已有的强子对撞机如 SERN 的 SPS, 它是 P 和 \bar{P} 对撞, 束能量为 $2 \times 300 \text{ GeV}$, 它于 1982 年开始工作。再如美国 Fermilab

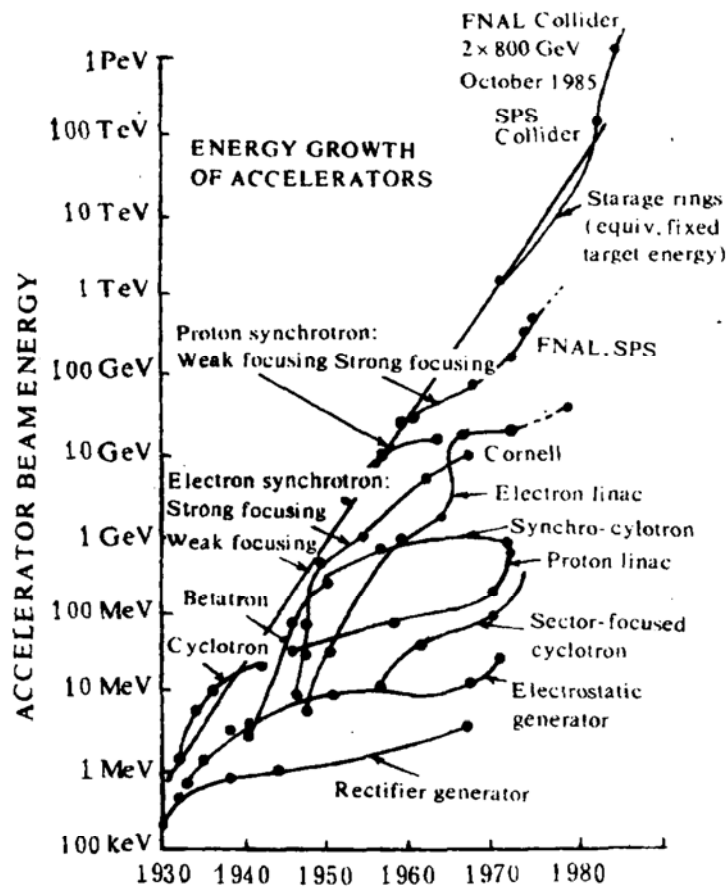


图 1. Livingston 图, 表明各种不同加速器最大能量和时间的关系

的Tevatron,它也是P和 \bar{P} 的对撞机,能量为 2×10^4 TeV,该机已于1985年开始工作。正在计划中的有CERN的LHC,束能量为 2×8 TeV和美国的SSC,能量为 2×20 TeV。轻子对撞机代表性的有CERN的LEP,它是 e^+ 和 e^- 对撞,束能为 2×50 GeV,再有SLAC的SLC,也是 e^+ 和 e^- 对撞,能量亦为 2×50 GeV。另外也有强子和轻子对撞的对撞机,如在西德DESY的HERA,P束能量为820GeV,e束能量为30GeV。

对于强子对撞机而言,其能量和亮度的进一步提高没有明显的技术上的限制,仅受到财力上的限制,如SSC的预算费用就达三十亿美元。与强子对撞机相比,电子-正电子对撞机有几个显著的优点。首先是 e^+e^- 对撞出来的产物本底比强子对撞机要小得多,其次估计可达到更高的亮度,更重要的是对高能物理实验来说它所需要的能量比强子对撞机要低一个数量级,即一个质心能量为2TeV的 e^+e^- 对撞机大致相当于质心能量为20TeV的强子对撞机。

然而 e^+e^- 对撞机的最重大缺点是辐射问题。因为在贮存环中电子作圆周运动,因而不断辐射和损失能量,因为电子质量很小,而辐射的能量和 (E/m) 的四次方成比例,因此这一辐射能量是相当大的,这样就给制造

很高能量的 e^+e^- 对撞机带来很大的困难。因此现在CERN的周长为27km的LEP大概是最大的圆形 e^+e^- 对撞机了。为了减小圆形 e^+e^- 对撞机中的辐射问题,只有增加对撞机的周长,而增加周长的最终极限是使圆周半径增加到无穷大,即考虑从直线加速器出来的对撞束。第一个考虑从直线加速器出来的束进行对撞的是SLAC建造的SLC,其束能量为50GeV,亮度为 $6 \times 10^{20} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。与圆形对撞机不同之处是束仅使用一次,因此为了达到一定的亮度,对束的参数要求很严格,要求束的截面和发散度非常小,使在对撞中充分利用加速器出来的粒子束。

目前在CERN正在考虑建造能量在TeV范围亮度为 $10^{23} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右的直线对撞机(CLIC),即能量比SLC高二个数量级,亮度高三个数量级。为了达到这一要求,不是简单的利用目前的加速器技术就能达到的,为了使整个直线加速器的长度和消耗的功率保持在合理的范围内,必须要求这个直线加速器有非常高的加速场梯度和高的效率。

目前应用的电子直线加速器技术(如SLAC的电子直线加速器)而言,工作频率为3GHz,平均加速梯度为1MV/m,因此如果要用这种类型的机器达到10TeV的能量,加速器长度将达几十公里,需要大量的速调

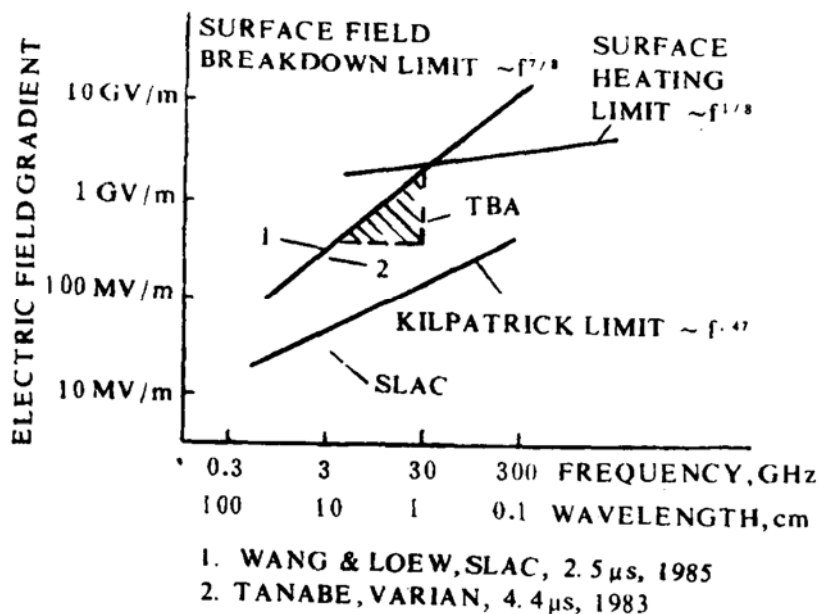


图2. 加速器最大表面电场梯度

管及调制器。现在SLAC速调管的输出功率为6MW。如果我们希望缩短加速器长度,要求加速器的场梯度为100MV/m,那末为达到1TeV的能量,需要20000个速调管,造价和可靠性都是问题,因此是不现实的。

为了解决这一问题,许多人提出了利用工作在较短波长的加速结构作为电子直线加速器的加速波导。工作在较短波长的加速结构有两个主要的优点。首先,对于给定的加速梯度所需要的贮能是与波长的平方成正比的:

$$\overline{P}_{RF} \propto \lambda^2 \quad (1)$$

因而在短波长时贮能大为减少,这样可大大节约功率。其次击穿电场大致和波长成反比,更正确一些说,为

$$E_{BR} \propto \lambda^{-7/8} \quad (2)$$

因此在较短波长时击穿场强大大提高,允许我们增加加速梯度,从而缩短加速器长度。

图2给出理论上的最大电场梯度和工作频率的关系(对于铜的射频加速结构)。通常的阑片负载波导的平均加速梯度大约是最大电场梯度的一半,因此为要达到几百兆伏/米的梯度,加速器工作频率至少要30GHz或更高。

从上所述,我们可知要建造非常高能量的直线对撞机就要求建造高梯度的电子直线加速器,而建造高梯度电子直线加速器的关键是用较高的频率。现在的电子直线加速器工作在3GHz,要做高梯度加速器需工作在30GHz,因而牵涉到一个微波功率源的问题。

目前正在研制的一种微波回旋管(gyrotroous),其工作频率可比普通的速调管高些,估计可能达到的水平是工作在15GHz频率时输出功率为100MW。但就是利用这种管子,要建造1TeV的直线加速器仍需要大量的管子,因此是很困难的。

从上述情况可知,为建造能量为TeV的电子对撞机,必须研制出一种工作在比现有(3GHz)频率更高的有非常大输出功率的微波管,以满足建造高梯度加速器的要求。但这可能是一个很长时间才能解决的难题。因此人们提出另一种解决办法,即所谓双束加速器(TBA)来建造TeV能量的对撞机。目前美国和西欧等许多国家都在进行建造这种加速器的可行性研究。

二、双束加速器(TBA)

双束加速器的基本概念可从图3和图5看出。从图上我们可知,TBA是由一个高能低束流的主加速器和一个低能高束流的微波功率产生装置并列运行组成的。低能高束流的功率产生装置可以是自由电子激光(FEL)也可以是一个减速结构,利用束腔相互作用产生所需的微波功率。不论那种情况,由于产生微波功率,因而电子束损失能量,因此必须不断加以补充。可以通过感应加速器或超导腔等来补充损失的能量。而主加速器是一个工作在很高频率(30GHz)的高梯度电子直线加速器,这样二者结合起来,可以在合理的

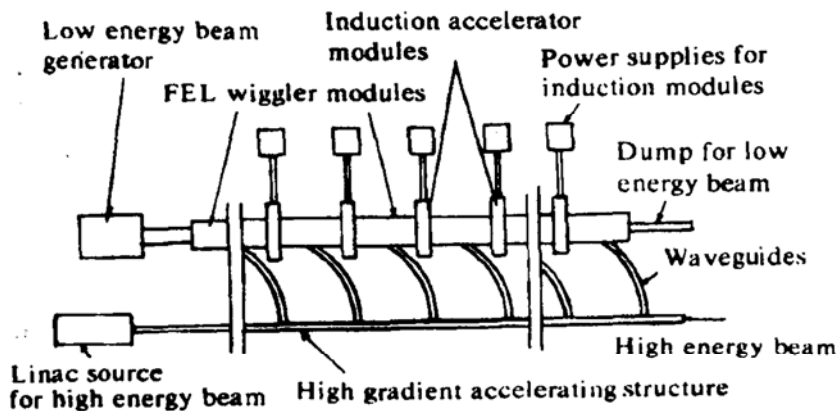


图3. 双束加速器示意图

范围内达到 TeV 的能量。

1. 从自由电子激光产生微波功率的 TBA

这样的 TBA 如图 3 所示。从图上可以看出,这种加速器是一个高梯度的电子直线加速器, FEL 产生的微波功率不断馈送到主加速器中。美国 Berkeley 的 LBL 和 Livermore 的 LLNL 对这种 TBA 进行了一些模型试验。在 LLNL 有一个微波自由电子激光装置,它由一个实验测试加速器 (ETA) 和 3 米脉冲 Wiggler 电磁铁组成。ETA 是一个感应电子直线加速器,它能产生 3—4 MeV、10 kA、20 ns 的电子束,重复频率为 1 Mz。电子束转换效率已达 7%,现在已产生 1.8 GW 的自由电子辐射。此外还建造了一个高梯度加速结构测试段 (HGS),它由 7 个腔组成,腔工作在 $2\pi/3$ 模式,所有腔及输入输出耦合器的尺寸都是根据频率比为 $34.6/2.856=12.11$ 的比例根据 SLAC 的尺寸折算得到的。输入输出耦合器腔中心之间的距离为 0.6828m ,总长度为 1.6766m 。(图 4)。每个腔的尺寸都相同,根据 SLAC 加速器 84 号腔按比例缩小得到的。经过与自由电子激光产生装置配合进行试验,目前输入腔的峰值场强已达 380MV/m ,相当于平均加速梯度为 190MV/m ,因此这一结果是非常令人鼓舞的。

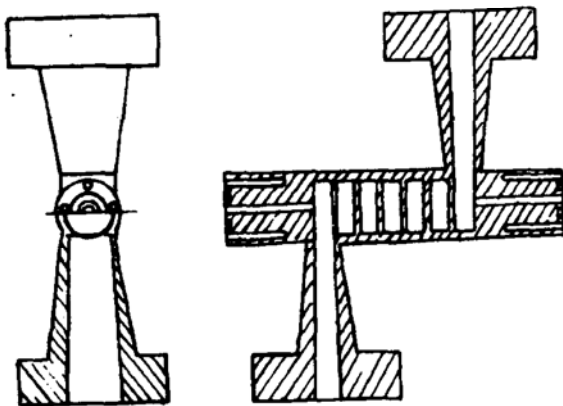


图 4 高梯度加速器测试结构(HGS)

当然这方面工作还只是开始,有大量工作需要去做,例如产生 FEL 的低能束的长距离输运问题、射频位相控制、电带不稳定性的

抑制、从 FEL 到高梯度加速器之间的微波功率耦合等等许多问题。有人作了一些 TBA 设计,表 1 列举一个 TeV 双束加速器的设计参数。

表 1. $1\text{TeV} \times 1\text{TeV}$ 双束加速器对撞机参数

低能束	
平均束能(mc^2 为单位)	40
束流	2.15 kA
Wiggler 波长	27cm
平均峰值 Wiggler 磁场	2.4 kG
束功率	43 GW
束能量	0.8 kJ
产生功率	2.2 GW/m
FEL 注入器数	2×2
所需电功率	160 MW
高梯度结构	
波长	1 cm
梯度	500 MeV/m
贮能	40 J/m
建场时间	18 ns
高能束	
注入能量	2 GeV
重复频率	0.5 kHz
最终能量	1 TeV
长度	2×2 km
亮度	$4 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{m}^{-2}$
束高(σ_y)	0.14 μ
束宽(σ_x)	1.4 μ
单束功率	8.0 MW
粒子数	10^{11}
Disruption (D)	1.3
Beamstrahlung (δ)	0.2
总效率(输入电功率到高能束)	10%

2. 二级 Linac 组成的 TBA

也可以不是用自由电子激光产生 30GHz 的微波功率,而用类似通常速调管那样由束腔相互作用来产生微波功率。和自由电子激光相比,这种方法的优点是相互作用比较简

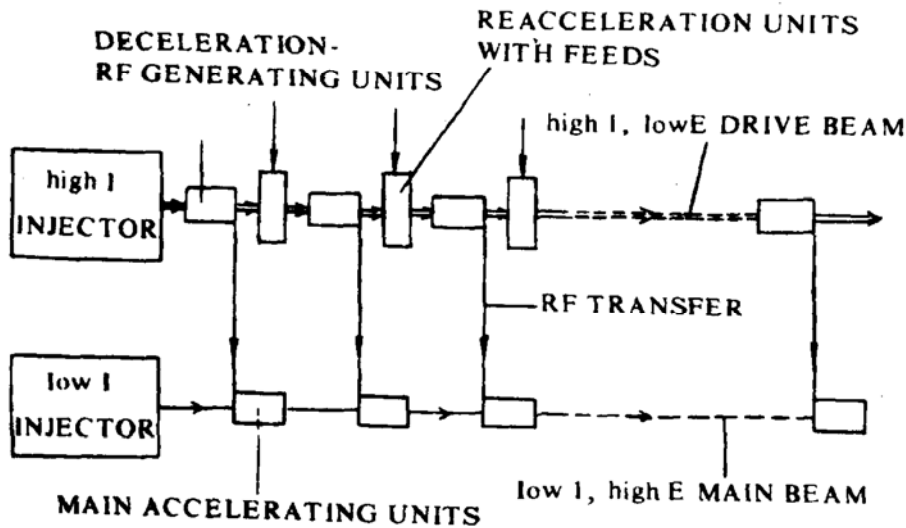


图5 双束加速器示意图

单且为人们所了解,射频频的位相控制等估计均不成问题。

在CERN有人建议采用二级直线加速器结构来建造TBA(图5)。其中激励直线加速器(drive Linac)采用高强度(每脉冲 1.6×10^{13} 电子)中能(3—5GeV)电子束,脉冲重复频率为5.8kHz,这个频率主要受到注入器的限制。这一电子束通过周期性安置的减速结构和再加速腔。在减速结构中产生微波功率,减速结构是长度为 l_0 工作在30GHz的行波结构。在时间 $t_0 = l_0/c$ 的时间内,束充满减速结构,然后在时间 $t_D = l_0/v_{gD}$ ($v_{gD} \approx 0.3c$ 是行波结构的群速)产生微波辐射。由于产生微波辐射而损失了能量的电子束在再加速腔中可以获得能量的补充。CLIC希望采用350MHz的驻波超导管作为再加速装置,这种腔已经在LEP中有所应用,每个腔用效率达70%的高效率速调管提供功率。为了使总的效率较高,超导再加速腔将工作在连续波模式。

主加速器采用非常高的频率(30GHz),而再加速系统采用较低的频率(350MHz),这是因为上面我们已经说过为了达到 Π eV能量,主加速器必须工作在30GHz,而对再加速系统宁愿选取较低的频率,以保证较高的效率。另一个原因是因为主加速器梯度和再加

速系统梯度之比与相应频率之比成正比。

对于主加速器,考虑到击穿场强和射频功率源等问题,希望工作在30GHz的频率,这个值是由高功率的产生及击穿能力、机械制造要求和冷却等一系列考虑决定的。与SLAC的3GHz频率相比,可减小射频平均功率约100倍,减小脉冲功率3倍,可选取梯度达300MV/m,取一个保险值如100MV/m,那末一个 Π eV的加速器长为10km,脉冲功率为100MW/m。

作为高梯度加速器的慢波结构可有各种不同的型式,研究表明对于工作在30GHz的高梯度结构而言,还是标准的阑片负载波导(DLG)最为合适。阑片孔径的选取要考虑到几个因素:希望群速尽可能大(建场时间较小)、较低的尾场(Wake field)和在尽可能低的射频功率下达到所需的场的梯度。CLIC准备选取的参数是

$$\text{群速} \quad v_g = 0.07c,$$

$$\text{建场时间} \quad t_r = 11.2\text{ns},$$

$$\text{结构长度} \quad l_0 \approx 25\text{cm} \text{ (约70个腔)}.$$

对于主加速器,由于工作在高的频率,给机械制造带来一定的困难,此外尾场(Wake field)也会对粒子加速产生很大的影响。这一场的纵向分量会引起粒子束的能量损失及束团中粒子能散度的增加,而其横向分量会

