

正、负电子对撞机的发展前景

梁岫如

方守贤

目前,世界上运行的正、负电子贮存环对撞机有十多台,它们的能量低的不到1京电子伏,最高能量接近20京电子伏。欧洲核子研究中心计划建造大型电子-正电子对撞环LEP,它们最高设计能量是130京电子伏。此外,在未来的规划中,几乎都是质子型加速器。加速器专家们从LEP的设计方案中断定:LEP是世界上最后一台正、负电子贮存环对撞机。因为 e^+e^- 贮存环向更高能量发展中遇到了

难以克服的困难

电子贮存环的一个特点是存在着同步辐射现象——电子在磁场中做曲线运动时,沿轨道的切线方向发射出具有一定特性和能量的光子。值得注意的是,由此损失的能量随电子能量的四次方而上升。因此能量补偿问题在电子能量越高时就越重要。LEP对撞机用做能量补偿的常温高频腔系统长1.7公里,相当于一个巨型直线加速器,腔的直径比一般直线加速器大得多。其他部分如磁铁系统、控制系统及冷却系统也都十分庞大。人们总结出一条规律:机器的总投资正比于束流能量的平方,即束流能量提高一个数量级的话,投资将增加100倍。所以,如果要造一台比LEP能量还高的贮存环,这对任何一个国家来说,在经济上都是不能接受的。

然而,高能物理的研究需要把来源能量不断提高,这迫使加速器专家们为 e^+e^- 对撞机的发展寻找新的方向,出路在于避免同步辐射损失,因此,应运而出了

直线对撞机

用两台对头放置的电子直线加速器进行对撞,电子只做直线运动,就可以避免同步辐射损失。最突出的是它的总投资正比于束流能量的一次方,而不是平方!这就使它具有在高能区有可能取代贮存环对撞机的最优越条件。当然,它还存在着一些技术困难,但科学家们认为,这是探索中必然出现的问题,是可以通过努力来解决的。

直线对撞机的工作原理是在同一直线的两端,对头放置两台直线加速器,它们之间有一段较长的空间,是两束粒子的对撞区。正、负电子束分别被两台直线加速器加速到最终能量之后,引向对撞区的中点发生相互作用。这种看来颇为简单的对撞机,在理论上、技术上与贮存环对撞机相比,究竟有多大的竞争能力呢?这是人们所关心的问题。最重要的是要做

亮度比较

标志对撞机性能的两个主要指标是束流能量和亮度。当粒子的能量确定之后,亮度就是最主要的键。对撞机亮度的定义是:两束高速粒子流相撞,每秒钟内发生某种物理过程的反应率等于反应截面和亮度的乘积。

假定有两个横截面积为 A ,长度为 l 的柱状束团发生正面碰撞,且设粒子在柱体内是均匀分布的,每个束团中所含粒子的数目分别为 N_1 、 N_2 。(见图1)

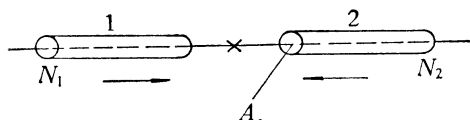


图1 两个束团正面碰撞

当两个束团相遇时,束团1中的一个粒子进入束团2中,它与束团2的粒子发生反应的几率是 $\sigma \frac{N_2}{A}$, σ 是反应截面。束团1中有 N_1 个粒子,若在每秒钟内碰撞 f 次,则每秒反应率就是 $\sigma f \frac{N_1 N_2}{A}$ 。设 $\mathcal{L} = f \frac{N_1 N_2}{A}$, \mathcal{L} 就称为对撞机的亮度。由此可见,反应率正比于反应截面 σ ,也正比于对撞机的亮度。亮度值越高,发生某种物理过程的反应率也越高,对撞机的性能就越好。目前正、负电子对撞机的亮度一般在 $10^{30} - 10^{31}$ 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$ 左右。

亮度 $\mathcal{L} = f \frac{N_1 N_2}{A}$ 。由此可见,提高对撞机的亮度有三条途径,即提高粒子数目、增加每秒内碰撞次数和压缩束流在对撞点上的横截面。

下面,我们对贮存环和直线对撞机分别介绍一下提高亮度的措施:

(1) 提高正、负电子贮存环亮度的措施

a. 增加束团中的粒子数目:但是对于高能量的贮存环来说,增加粒子数目意味着必须大大增加补偿由于同步辐射而损失的功率,当能量大于10京电子伏时,在功率一定的情况下,粒子数目也是有限制的,不可能超过某一极大值 N_{\max} 。

b. 压缩束团碰撞时的横截面:但几乎所有的正、负电子贮存环对撞机的实验都发现,当粒子数目达到一定程度或横截面小到一定程度时,整个束团的性能

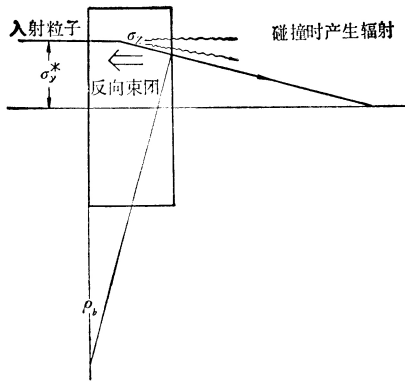


图2 反向束团对碰撞粒子的作用

碰撞时,束团1中的一个粒子进入束团2中,受到束团中集团作用所产生的宏观电磁场的扰动,使入射粒子的轨道发生偏转,当扰动量达到某一定值时,将会改变环中粒子振荡频率,即发生频移。由图3的简单模型可以推导出频移量的大小,它的一般表达式是:

$$\Delta\nu \propto \frac{N}{A}$$

频移量正比于单位横截面内的粒子数目。在一定的粒子数 N_{\max} 下,如果压缩 A ,会使频移增加。在贮存环中,粒子自由振荡频率是一个非常重要而又十分敏感的量,在设计中,必须十分仔细地选择工作频率,使它避开各种线性和非线性的共振线。如果由于某种原因使得振荡频率变化了,当它接近某个共振线时,整个束团的横向振荡就会急剧增长,导致束团性能的变坏和粒子的丢失。束-束相互作用造成的频移,就会导致上述共振。经验表明,对于任何正、负贮存环对撞机,为了使束团有良好的性能,频移 $\Delta\nu$ 必须小于 0.06。由上式可知, $\Delta\nu \propto N_{\max}/A$, 当 N_{\max} 一定时,设法压缩横截面 A ,使 $\Delta\nu$ 尽可能地接近 0.06,这时所得到的亮度是最大值。如何才能使横截面 A 达到最佳值? 这是设计贮存环时必然要解决的问题之一。我们假定,束团横截面是圆形,则 A 就等于束团横向发射度 ϵ_0 与对撞点上的包络函数 β^* 的乘积,即 $A = \epsilon_0 \beta^*$ 。所谓横向发射度是描写束团性能的一个物理量,它主要是指束团内的粒子在水平及垂直两个方向上的振幅偏离和角散。在贮存环中,由于同步辐射的存在,横向发射度的大小与注入时束流的性能无关,这主要是由于电子沿圆轨道运动时光子的辐射在能量及时间上均是随机的,这种随机性(称做量子起伏)会使横向发射度不断增长,而同步辐射所产生的阻尼作用又会使发射度不断减少,在一定程度时,两种作用的结果,会使发射度达到某一平衡值,它与粒子自由振荡频率 $\Delta\nu$ 的三次方成反比,与束流能量的平方成正比。因此,对于一定能量的贮存环,当参数选定之

将变得很坏,亮度反而下降。这是由于两个束团碰撞时发生一种束-束相互作用的效应相关联的。用图2的示意图来解释:

当两个束团相互碰撞时,

就很难再改变这一平衡值。由此看来,只有依靠减少包络函数 β^* 来缩小 A 值。为此目的,必须在对撞点附近的局部地区采用特强的聚焦结构。七十年代后期设计的贮存环,都采用了这种方法,实践表明,这种办法非常有效。当然, β^* 值的降低也受到了一定的限制,因为在对撞点上 β^* 降低的同时,必然会导致对撞区两端 β 值的增加,从而使束团增大,这也是不允许的。总的来说,采用了这种办法可以将亮度提高一个数量级。

以上说的在能量贮存环中提高粒子数和减少对撞点束流截面的限制,都是在实验中得到的现象,理论计算也基本符合。

c. 增加每秒对撞次数 f : 这里也假设一种最简单的情况,即贮存环中只有一对正、负电子团(一个正电子团和一个电子团反方向运动),而且在整个环中仅有一个对撞点。此时,粒子回旋运动的频率就是碰撞频率 f ,它等于光速除以贮存环的周长,一旦机器造好之后, f 是不改变的。若将正负电子束团增加至 m 对,在对撞点上的碰撞频率也会增加 m 倍。但实验表明,这将会引起束团与束团之间的不稳定性,反而是亮度得不到提高。因此目前大部分贮存环仍然只有一对束团,至多也不过三对。所以说,依靠增加碰撞次数 f 来提高亮度并不是有效的办法。

(2) 直线对撞机可能达到的亮度值

设想一台直线对撞机的最终能量为 E_{\max} 和每束团中包含最大粒子数 N_{\max} 均与贮存环相同,在此条件下,讨论增加直线对撞机碰撞机率的可能性。在贮存环中,电子每圈因同步辐射损失的能量为 Δu ,与此相应,每秒内高频补偿功率为 $N_{\max} f \Delta u$ 。在电子直线加速器中无此损失,高频功率完全用来增加束团的能量,如果直线加速器每秒输出 f_e 个束团,所需要的高频功率为 $N_{\max} f_e c E_{\max}$ 。令 $N_{\max} f \Delta u = N_{\max} f_e c E_{\max}$ 。可得 $f_e = \frac{\Delta u}{c E_{\max}} f$,显然,由于 $\Delta u \ll c E_{\max}$,所以直线对撞机的

碰撞率比贮存环低得很多,几乎是好几个数量级,这是直线对撞机的致命弱点。为了使直线对撞机在亮度方面能与贮存环相匹敌,只能求助于大大压缩对撞点的横截面 A 。

幸运的是由于在直线加速器中没有贮存环中的许多共振线,可以预期,与此相应的频移限制也就不复存在了。但是进一步的研究表明,也存在着一种较宽的限制。前面已经介绍过,碰撞时,束团中的电磁场会使另一束团中的粒子发生偏转,而且对于不同粒子这种偏转是不同的,当这种偏转大到一定程度时,会使碰撞后的束团迅速散开,束团好象被“瓦解”了,与贮存环中的频移相对应引入“瓦解”因子来描述束团在碰撞中散开的效应。“瓦解”因子也正比于 N/A ,在直线对撞机中,“瓦解”因子可以取较大的值,也即是对 N/A 的限制

要比贮存环中对频移的限制宽很多,也就是说,在相同的 N 时,直线对撞机中的 A 值可允许比贮存环中小得多,一般可到几千倍之多,这就抵偿了上述 f_0 的不足,从而使直线对撞机有可能获得新的生命力。

现在的问题是怎样才能使得直线对撞机中的 A 值得极小,如前所述, A 取决于两个因素,即横向发射度 ϵ_0 和对撞点上束流包络函数 β^* 。如果与贮存环采用同样的强聚焦系统,使 β^* 达到极小值,在这里, ϵ_0 也是一个可以调节的因素。由于在直线对撞机中没有量子起伏和同步辐射也就不存在发射度的平衡值,束团的性能主要取决于起始条件,为了缩小注入束团的横向发射度,在直线对撞机的方案中,几乎都在低能段设计了一种特殊的阻尼环,将一定能量的正、负电子束注入到阻尼环中,可使束流的横向发射度大大减少,然后再注入到直线加速器中进一步加速。科学家们预计,采取这一措施以后,直线对撞机可达到与贮存环相同的亮度甚至更高。下表中给出西欧中心 LEP 贮存环和美国斯坦福直线加速器中心正在设计的单通道对撞方案 SLC 的两个数据:

	LEP	SLC
碰撞频率 f (赫)	10^5	180
A (微米) ²	$300 \times 20^*$	2×2
f/A (赫/微米 ²)	17	90

至此,可以得出结论: e^+/e^- 直线对撞机与 e^+/e^- 贮存环比较,以少得多的功率可得到相同的能量且具有相同的亮度值。因此,直线对撞机的问世,将是一件很有意义的事情。

未来直线对撞机方案之一

直线对撞机做为高能领域中的新型机器最早出现在国际舞台上是在 1979 年“国际未来加速器会议”(ICFA)上,科学家们提出了几种质心能量为 700×100 京电子伏以上的直线对撞方案。图 3 是其中的一例,在这个方案中,采用了超导直线加速器,具有回收相撞之后的粒子的能力。

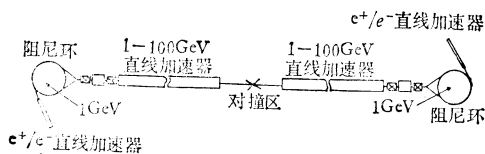


图 3 直线对撞机设计方案之一

我们来想像一下这个过程:碰撞之后的束团各自沿它们原来的方向继续前进,进入到反向加速器中。在那里,它们遇到了相位完全相反的电磁场,粒子不但得不到加速,反而被减速,它们必须把所携带的能量交回给高频电磁场,待到离开直线加速器尾部时,几乎是“精疲力尽”了,最后进入它们的住所——废物堆中,在

上面的过程中,控制相位是很关键的技术问题,在最理想的情况下,只要在回收能量上再补充很少的能量就可以进行下一次的加速过程,能量主要损耗在冷却系统和超导腔上。从节省能源的角度来看,这个方案是可取的,就技术困难而论,却不可轻心。由于要回收粒子,就要求碰撞后束团的性质不能太坏,即瓦解因子不能太大,相应的 A 不能选得太小,若减小瓦解因子,势必降低亮度。进入反相加速器中的束团必须落在相振荡稳定区内,否则不能实现有效的减速作用。另外,还要求在直线加速器中同时存在正、负电子束团的情况下,不能有额外的碰撞点,这就限制了每秒钟内的脉冲数目不能高。在低能端安置了具有特殊磁场形态的阻尼环来减小正、负电子束团的横向发射度。另一个技术关键是超导腔,它的特点是具有很高的品质因素。正、负电子束团做为载荷体,在通过超导腔时,会在腔内激励起高次模电磁场,要把这种场及时引出腔体,否则将会影响加速频率。这种技术连同其他一些问题,都有待于在进一步发展中去解决。

即将问世的单通道对撞机

正当世界各国的科学家们在“国际未来加速器会议”上讨论直线对撞机方案的时候,美国斯坦福直线中心的加速器专家们已经动手工作了。他们打算利用现有的三公里长的直线加速器,按照对撞机的要求做一番改造,用以实现只有一个直线加速器的对撞。他们称自己是“疯子”,竟有如此大胆的想法,又有如此巧妙的设计方案,只需要追加不多的投资就可以取得这一新领域中的领先地位。图 4 是该单通道对撞机的示意图,叫做 SLC 工程。

SLAC 原有的直线加速器能量为 22 京电子伏,经过改造,把能量提高到 50 京电子伏,在此基础上新增加的部分是:两个阻尼环、两个脉冲压缩器,正电子产生靶和正电子输运系统、两条弧形输运通道及碰撞区的强聚焦系统等。它的工作过程是这样的:假定在直线加速器中已经有了电子束团,在它三分之二的地方引出一个电子束团,去打靶产生正电子束,然后经传输系统引向加速器低能段,注入并加速。当正、负电子束团被加速到 1.2 京电子伏时,分别进入各自的阻尼环中,在每个环中有两个束团同时存在,每个束团的粒子数目是 5×10^{10} 。很好地控制阻尼环的引出时间,先引出一个正电子束团,再引出两个负电子束团,按先后注入到直线加速器中去。正电子阻尼环中还贮存有一个束团,留待下一次使用。此时,在直线加速器中有 e^+ , e^- , e^- 三个束团顺序前进,它们之间保持 15 米的距离。高频场对不同极性的粒子都要求是加速的。在 36 京电子伏时,把最后一个 e^- 束团引出去执行打靶产

* LEP 中束流横截面是椭圆。

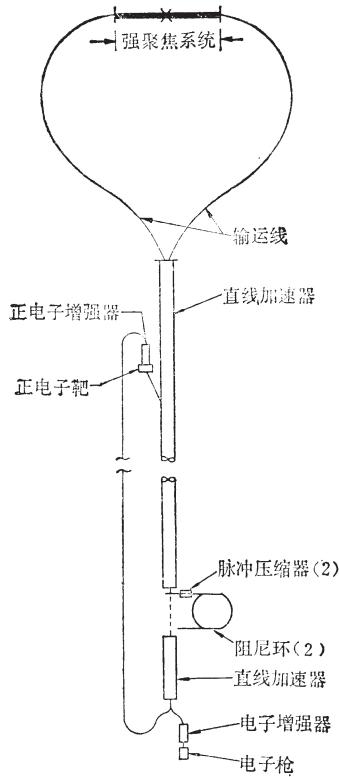


图4 SLAC 直线对撞机示意图

面半径为 30 微米,再经过对撞点附近强聚焦系统的作用,使对撞点上的束团截面半径仅是 2 微米. 由于束团尺寸极小,真空空截面只需 1 平方厘米,这样,运输线上的所有元件都可以做得小巧玲珑,偏转磁铁和磁透镜都如同玩具一样. 这就使 SLC 工程的前景十分乐观,预算投资为 6 千 3 百万美元,建造周期为三年,可达到的亮度值为 10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹. 虽然亮度并不太高,但这个方案是确定可行而又十分有意义. SLC 工程的实现将会向加速器专家们提供许多关于发展新技术方面的经验和展示对撞机向更高能发展的前景.

生正电子的任务,前二个正、负束团继续被加速到 50 京电子伏时离开加速器,之后,他们就各自沿着自己的弧形传输系,进入相互作用区,在被指定的地点相遇产生碰撞. 由于阻尼环的作用,在加速器中束团性能已经很好,束团横截面为 160 微米,在弧形传输系统中,束团截