

# 高能加速器的发展历史与现况 (续)

刘世耀

## 三、电子高能加速器的发展过程

电子加速器的发展过程是：从电子静电加速器到电子直线加速器再到电子同步加速器。

i) **电子静电加速器** 这种加速器与质子静电加速器原理基本一样。只不过用电子枪作为粒子源，而不用离子器。

ii) **电子直线加速器** 电子直线加速器与质子直线加速器的结构有很大的区别，因电子的质量比质子轻 1800 多倍，所以电子在不很高的能量时，速度就接近光速。例如在 5 兆电子伏时，电子速度是 99.5% 的光速。这个特点使电子直线加速器结构比质子直线加速器的要简单，通常加速管采用盘荷波导的慢波结构，加速腔直径仅十多个厘米，用一个波长为 10.5 厘米、频率约 2800 兆周左右的微波功率管（一般常用速调管）来激发。加速腔内经激发后形成一个相速度等于光速的向前传播的电磁波。电子从电子枪注入腔体后，很快就能达到光速。于是，电子就像骑马似的骑在电磁波的某个相位上，与电磁波共同前进，并在加速电场的作用下，不断增加其能量。骑在电磁波的时间越长，电子所得到的能量很高。因此越是能量高，所需的加速管也越长（图 10）。

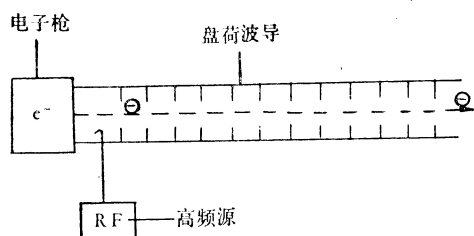


图 10 电子直线加速器原理

美国 SLAC 的三公里长的 250 京电子伏的电子直线加速器，是迄今能量最高的电子加速器。一共要用 240 个大功率速调管。每个管能输出 2 微秒持续的 25 兆瓦脉冲功率（图 11）。每秒重复次数为 60—360 次。微波大功率不但投资贵，并且日常维护也很费钱。因此从 SLAC 建成以来，世界各国还没有设想建造比 SLAC 更大的电子直线加速器，而是采用电子同步加速器的方法来获得较高能量的电子。

iii) **电子同步加速器** 电子同步加速器和质子同步加速器在磁场性能、高频性能，磁铁结构方面有许多

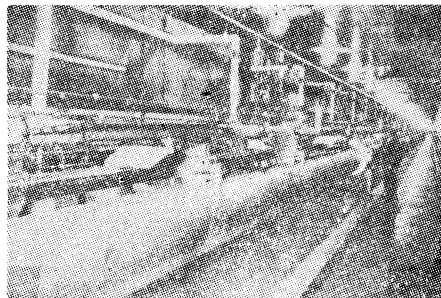


图 11 位于美国斯坦福电子直线加速器中心 (SLAC) 的二英里长电子直线加速器的加速管

相似之点，彼此的原理也是相同的。但也有不同之处：例如，电子能量为几个兆电子伏时其速度就很接近光速，所以当电子能量高于几个兆电子伏后，电子回旋一圈所用的时间实际就可以看作固定不变，高频频率也可用固定不变值，使高频系统更加简单。又例如，电子在磁场中沿曲线运动时，会产生一种同步辐射光线。加速、调整电子能量可以平滑地改变光波波长，从可见光，紫外线直到 X-射线。这种辐射对加速电子来说是不可避免的损失，但却又成为新的、单色性好，强度高，它的光源，它的辐射强度正比于电子能量的四次方，电子能量每增加一倍，辐射损失就要增加到 16 倍。因此当电子能量很高时，为补偿这部分辐射损失所需的高频功率就非常大，从而限制了电子能量的继续提高。但是，近年来随着电子正电子对撞存储环的建造和对于同步加速器辐射研究的深入，电子同步加速器在高能物理中仍占有相当重要的地位。

世界上最大的电子同步加速器是美国 Cornell 大学的 12 京电子伏加速器，现在正把它改建成 CESR 电子正电子对撞存储环。目前，除了用于光子工厂以及研究同步加速器辐射外，很少有人再设想建造单独的电子同步加速器。世界各高能物理实验室的趋向是集中力量来作电子正电子对撞存储环。如西德 DESY 除了早就建成的 5 京电子伏 DORIS 电子正电子对撞存储环外，现已建成 19 京电子伏的 PETRA 电子正电子对撞存储环。美国 SLAC 中心预计在 1980 年建成 18 京电子伏 PEP 电子正电子对撞存储环。

## 四、对撞束流存储环

对撞束流存储环采用和强聚焦同步加速器相同的结构，只是真空度的要求更高。但在实验安排上，却有

很大的不同。例如，同步加速器能同时产生不同能量的许多种次级粒子如  $\pi$ ,  $\mu$ ,  $k$  粒子等，能同时提供不同实验区作不同的物理实验，打的是静止靶，产生“事件”(event) 的几率很大，而对撞存储环只能作一种实验，不是  $e^- \rightarrow e^- e^+$ ，就是  $p \rightarrow p p$  或  $p \rightarrow p \bar{p}$  (今后还可以有  $e^\pm \rightarrow e^\pm p$  实验)。并且只能在交叉碰撞点上做实验，不是引出来做。因此可能做的物理实验项目受到很大限制。在存储环对撞时，又没有一个高密度的靶，只是对撞双方都以对方束流做为靶，而束流的密度远比静止靶小得多，因而存储环实验产生有用事件的几率比加速器实验的小至少几千倍。

存储环对撞虽有这些重要缺点，但有一个很重要的优点，使它具有生命力：因为当加速器束流打击一个静止靶时，除去一部分能量参与反应外，有相当大一部分能量被人射粒子与新产生的粒子带走，并不参与反应，所以白白损失掉了。而且能量越高，这个问题就越严重。由下表可见(表中前向能量即反应后粒子带走的能量，有用能量是真正用于反应的能量)，号称 400 京电子伏的束流，真正用于物理实验粒子反应上的能量只占 7% (28 京电子伏)，效率实在太低了。

束流能量 (京电子伏)	前向能量 (京电子伏)	有用能量 (京电子伏)	束流能量的 (%)
6	3	3	50
32	24	8	25
76	65	11	15
400	372	28	7
1000	960	40	4

而存储环对撞实验就没有这个问题，两个方向相反的束流相碰撞，两个束流的能量可全部用于粒子反应。例如，西欧中心的交叉存储环 (ISR) 中，二个 30 京电子伏质子束相撞，其有用能量(或叫质心能量)是 60 京电子伏，将近一个 2000 京电子伏的质子加速器所能提供的有用能量(图 12)。正因为存储环对撞机有如此巨大的优点，才使它成为当前高能物理实验最有生命力的设备。

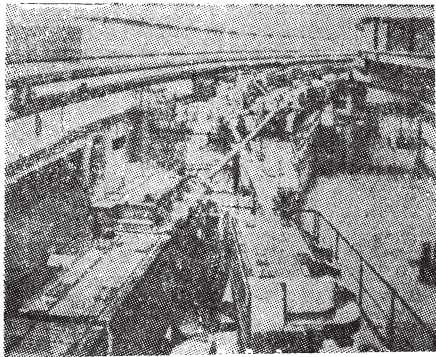


图 12 西欧中心的交叉存储环，八个交叉点之一

存储环在系统结构上有以下几个特点：存储环的工作周期分为二部分，前半部是填充时间，使外来的束流粒子填充到存储环内，一般几个小时。由于存储环时间如此长，因此存储环的真空度要求很高。存储环内存储的束流能量固定，所以只需用固定磁场来偏转引导。束流能量如果改变，也只需稍稍改变磁场，不需要像同步加速器那样快速变换磁场。同样道理，高频系统也可以用固定频率，以维持存储环或作必要的提高能量之用。

存储环还必须有一个外接加速器作为注入器，注入的粒子能量要足够高。如 4 京电子伏的 SLAC SPEAR 存储环，用 SLAC 电子直线加速器射出的 2.25 京电子伏的高能电子束注射进去，再加速提高到 4 京电子伏。西欧中心的 ISR 交叉存储环，把从 CPS 同步加速器出来的 11—26 京电子伏的质子束注入后，再提高到 31 京电子伏。

目前已建造的最大  $e^+ \rightarrow e^- e^-$  对撞存储环是西德 DESY 的 19 京电子伏 PETRA 对撞机。最大的  $p \rightarrow p p$  对撞存储环是西欧中心的 30 京 ISR 机器。目前正在建造的  $e^+ \rightarrow e^- e^-$  对撞存储环有美国的 SLAC-PEP，能量为 18 京电子伏。此外还有美国的 Cornell-CESR 等。正在建造的  $p \rightarrow p p$  对撞存储环有美国的 BNL 的 ISABELLE，能量为 400 京电子伏；正在设计中的还有日本 KEK 的 TRISTAN 计划，用三个存储环组成，质子最高能量为 200 京电子伏，电子 16 京电子伏，可作  $p \rightarrow p p$ ,  $e^+ \rightarrow e^- e^-$ ,  $e^\pm \rightarrow e^\pm p$  实验。(全文完)