

高能加速器的发展历史与现况

刘世耀

一、前言

几个世纪以来,科学家们都在探讨自然界中千变万化的各种物质是由那几种最基本、最简单的东西所组成,19世纪的人们曾经认为氧、氮、铁……等近百种化学元素的原子是最基本的.1897年汤姆生发现了电子,1911年卢瑟福发现了原子核,又在实验上证实了原子是由原子核与电子所组成.为了进一步研究原子核的结构,20世纪的物理学家们研究设计了一种专门轰击和变革原子核以及其他微观粒子的实验工具,它们能够产生高能量的质子或电子,这就是加速器,即加速粒子的机器.半个世纪来研制的加速器能量越来越高、规模越来越大,给实验物理工作者提供了越来越强有力的实验工具.不但研究了各种微观粒子的物理性能,还发现了各式各样的新粒子.至今已发现的粒子由 $P, \omega, \varphi, \Delta, \Sigma, \Xi, \Omega$ ……到 $J/\psi, \Upsilon$ ……达几百种.人们正在不断地向微观世界的更深层次进军.

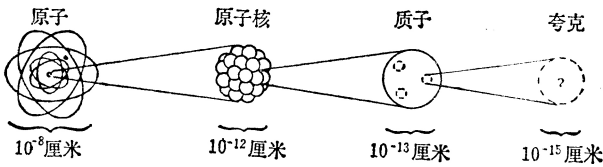


图 1

为什么高能加速器是研究基本粒子的一种手段呢?为解释这点,我们先来看看各种粒子的尺寸有多大;原子的尺寸约是 10^{-8} 厘米,原子核的尺寸约 10^{-12} 厘米左右,质子和中子等核子尺寸约 10^{-13} 厘米,而设想中的组成强子的夸克以及轻子估计小于 10^{-15} 厘米(图1).为了更形象说明原子有多小,可作下面譬喻:如我们把一个苹果的尺寸放大到一个地球那么大,那么一个原子的尺寸只相当于一个苹果那么大.呀!多么小的尺寸,当前用最大的电子显微镜也只能看到 10^{-6} 厘米,若要看原子核,则还要把放大倍数放大一百万倍才行.所以一般直接观察用的光学或电子型的显微镜,都已无法分辨如此小的原子核,于是人们才设计制造了粒子加速器.

为什么粒子加速器具有如此奇特的功能呢?我们知道,高能加速器的产品是高能粒子束,高能粒子束具有粒子和波动两重性.粒子的能量越高,粒子束所呈现的波长也越短.如一百兆电子伏的粒子,波长为 10^{-12} 厘米左右,1京(=1千兆)电子伏的粒子束波长约

10^{-13} 厘米,当今最大的500京电子伏加速器的粒子束,其波长为 10^{-15} 厘米左右.

在高能物理实验中,最小可分辨尺寸与高能束流的波长成正比,束流能量越高,波长越短,能分辨的尺寸就越小.因此,实验物理学家们为了揭开基本粒子之谜,为了更深入地研究基本粒子的结构,就要求提供波长越来越短的高能粒子束.设计制造高能加速器的科技工作者,也就不断地为建造更高能量的高能加速器而奋斗.

二、质子高能加速器的发展过程

直流加速器 30年代的加速器是直流加速器,即在两个电极中加上直流高压,当粒子通过此电极空间,就获得相应于该直流高压的能量.各种直流加速器又根据形成高压的不同方法来命名,至今仍采用的二种高压形成方法是:(i)柯克克罗特夫-沃尔顿(Cockcroft-Walton)发明的倍压方法,即以并联法充电,串联法电容器放电的方法.这种加速器称为柯克克罗特夫发生器,又称高压倍加器,至今仍广泛用作高能加速器的第一级加速器或叫预注入器,其能量一般为750千伏,流强可达几百毫安.(ii)范·德·格拉夫(Van de Graaff)发明的静电方法,利用绝缘传输带把电荷送到与地绝缘的金属球形罩上,使电荷在此金属球形罩上逐渐积累而形成很高的高压,常用能量为3—4兆电子伏,最高可达12兆电子伏.近年来采用把两个静电加速器串级使用,能使能量提高到21兆电子伏左右.这种静电加速器可加速电子、质子、重离子.虽然静电加速器现在已不能算是高能加速器,但它在低能物理实验、辐射化学等领域内仍有着广泛的应用.重离子静电加速器作为重离子加速器的注入器用.

上述直流加速器很难提到比20兆电子伏更高的能量,因为一旦超过一定电压限值时,就要产生危险的放电击穿现象.因此要得到高于20兆电子伏的粒子,必须寻找其他的加速方法.

周期结构型加速器 人们开始设法采用高频交流方法来加速粒子.这时粒子不是像在直流高压时那样只经过一次加速,而是采用了多次连续不断加速的方法.这种周期加速的机器,都有一个大功率高频源,只是不同类型具有不同频率:如质子直线加速器,频率用200兆周左右.电子直线加速器,频率用2800兆周左右.环形同步加速器,所用高频频率一般可由几个兆周到几百兆周.高频源的功能是产生一个周期变换

的加速电场,给粒子一个加速力,从而增加其能量.另外,所有周期结构加速器中都要用磁场,以对加速粒子进行引导、聚焦与散焦.

1. 质子直线加速器 最原始的直线加速原理是三十年代由 Wideroe 提出.采用图 2 中所示的漂移管极

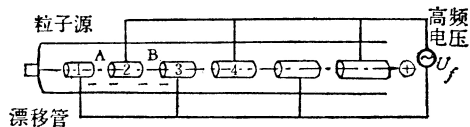


图 2 粒子直线加速原理

性连接方法,在相邻的二个漂移管上加高频电压 U_f ,使

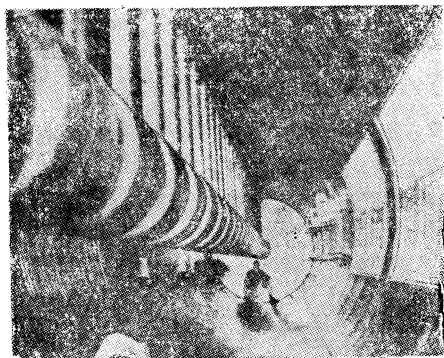


图 3 在美国劳伦茨贝克莱实验室的 HILAC 质子直线加速器. 图中表示 Alvarez 型的圆柱型加速腔, 中间部分即漂移管

粒子经过隙 A 时, A 间隙中的高频电场刚好是正电场,使粒子得到加速.当高频电压改变方向时,粒子已进入漂移管 2 中,因此不受此反相高频电场的影响.当粒子经过漂移管 2 进入间隙 B 时,高频电场又改变方向.在间隙 B 中又形成一个正电场,使粒子又能得到加速,这样不断反复,使粒子获得更高能量.

为了得到很高的高频电场,提高每单位长度的加速能量值,目前实用的质子直线加速器大都采用 Alvarez 型的加速腔(直径为一米多的铜筒),利用高频共振的方法,使整个腔体成为共振腔,其中各个漂移管间隙中都激发起较高的高频场,这时所有的加速间隙都激发出相同方向的电场,不必再用交替连接漂移管的方法,高频激发频率约 200 兆周左右.

当前世界上最大的质子直线加速器是美国洛杉矶阿拉莫斯实验室的八百兆电子伏介子物理用加速器(LAMPF).由于高能质子直线加速器需用很大的高频功率,投资昂贵,维护费用又高,可靠性也较差,因此当前质子直线加速器一般只做到二百兆电子伏,仅作为高能加速器的注入器用,而更高能量的加速器就要靠环型同步加速器来完成.

2. 圆型加速器 1930年以来,圆型加速器是从回旋加速器到同步回旋加速器再到同步加速器逐步发展起来的.所有这类圆型加速器的粒子束都是用高频电

场加速,用磁场偏转与聚焦.

(i) **回旋加速器** 第一个回旋加速器是 1931年由 E. O. Lawrence 在美国贝克莱(Berkeley)实验室建造的,用一个圆型截面的磁柱面提供一个使粒子偏转回旋的固定磁场,磁场中的真空室内安放二个 D 型盒电极(见图 4).两个 D 型盒间加上一个固定频率的高频

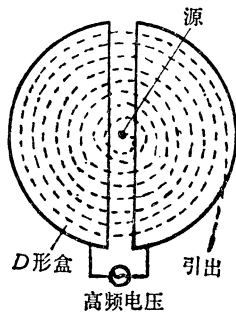


图 4 回旋加速器原理

电压.粒子束每旋转一圈通过两个 D 型盒的间隙两次,每次都受到高频电场的加速从而增加能量.在回旋加速器中,粒子的运动轨道呈螺旋形,外圈的粒子能量高、速度快,但路程长.内圈的粒子能量低、速度低,但路程短.所以可以做到每个粒子转一圈所需的时间是一个常数.

当质子能量大于 25 兆电子伏时,由于爱因斯坦提出的质能关系,动能的增加使质子的质量越来越大.如 10 兆电子伏的质子质量比其静止质量约大 11%.高能质子变得越来越重,动作就显得迟钝,以致质子回旋一圈到达 D 形盒间隙所需时间要拉长,从而粒子回旋周期与高频周期的相互同步遭到破坏(有关同步问题以后再详细介绍),不能继续进行加速.

(ii) **同步回旋加速器** 为了克服这个同步问题,人们就设法让高频频率随加速的过程而不断降低,以继续维持高能时粒子回旋周期与高频周期之间的同步,同时,磁场仍采用固定磁场.这种回旋加速器的改进型称为同步回旋加速器.当前世界上最大的同步回旋加速器是 1949 年在美国劳伦茨贝克莱实验室的 184 英寸直径磁铁的机器,能量可达 740 兆电子伏,其磁铁总重为 4000 吨(图 5).从原理上来说,同步回旋加速器还可以

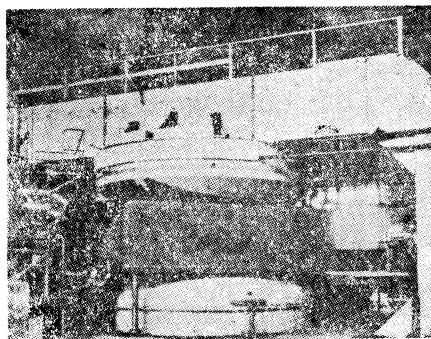


图 5 在劳伦茨贝克莱实验室的 184 英寸同步回旋加速器

还可以达到更高的能量.但实际上能量再高,磁铁的直径就要更大,以致由于磁铁太重而难以实现.例如

我们设想把能量加大到 1500 兆电子伏,则需把磁铁直径加大到 368 英寸,重量则达 32000 吨,又费铁,又费钱,太不经济.因此,要造大于 1 京电子伏的高能加速器,

必须采用新的办法，就是现在一般高能加速器采用的同步加速原理。

(iii) 同步加速器 同步加速器的基本设想首先是把粒子轨道

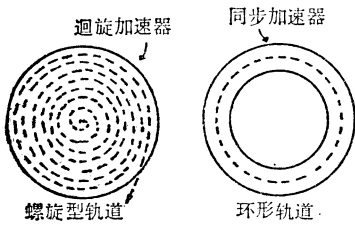


图 6

限制在一个等半径的环形内，这样就可以把迴旋加速器的圆形截面磁铁变为环形截面磁铁，实心磁铁改成空心磁铁，就可以大大节省用铁量(图 6)。但也由此带来同步加速器的几个特点：首先，磁场必须随粒子能量的增加而上升，才能使不断增加能量的粒子的迴旋轨道半径不变；其次，要保持同步高频频率必须随能量增加而增加，因为当粒子能量提高，速度变快时，每迴旋一圈所需的时间也变短了。另外，必须有一个注入器从外部把加速到一定能量的粒子注入环内，不能再像迴旋加速器那样把粒子源安放在磁铁中心，从很低能量开始加速。目前一般注入器是采用 20—200 兆电子

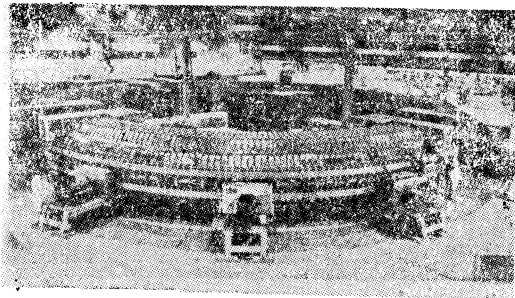


图 7 1952 年在美国布鲁克海汶实验室建成的最早期的质子同步加速器，称为 COSMOTRON 采用弱聚焦型，能量为 3 京电子伏

伏的质子直线加速器，或 500 兆—10 京电子伏的增强器，或另一台能量相当的同步加速器。由此可见，一台同步加速器实际上必须由若干台不同类型的加速器串联形成，整个系统的结构要比迴旋加速器复杂得多。

同步加速器根据磁聚焦力的大小又可分为强聚焦型与弱聚焦型二种。强聚焦型能使真空盒尺寸大大减小，减轻磁铁重量，具有很大的优点。如在美国布鲁克海汶 (Brookhaven) 实验室，1952 年造的弱聚焦型同步加速器，称为 COSMOTRON，质子能量为 3 京电子伏，真空盒尺寸为 6×26 英寸，磁铁截面为 8×8 英尺，总重 2000 吨(图 7)。到 1960 年造的强聚焦型同步加速器，称为交变梯度型 AGS，它的环型真空室的截面大小只不过是 3×7 英寸的椭圆。磁铁截面为 3×3 英

尺，磁铁总重 4000 吨(图 8)，能加速质子到 33 京电子伏。因此 AGS 比 COSMOTRON 能量大 11 倍，流强也大得多，但磁铁重量只不过是大一倍。近二十年来各国

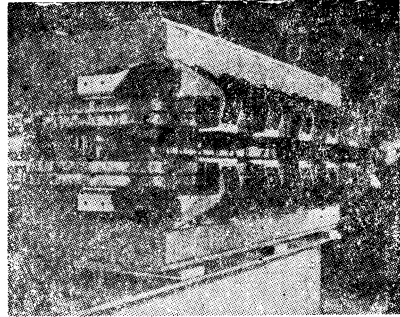


图 8 在美国布鲁克海汶实验室中 33 京电子伏的交变梯度质子同步加速器上所用的强聚焦磁铁

所建造的同步加速器，不论是日本的 12 京电子伏同步加速器 KEK；还是西欧中心的 400 京电子伏超级质子同步加速器 SPS；或美国费米中心的 500 京电子伏质子同步加速器，无例外地都采用了强聚焦型结构。这种强聚焦型同步加速器结构，不论在加速器领域，还是在当前发展最快的对撞存储环加速器中，目前仍保持其旺盛的生命力。

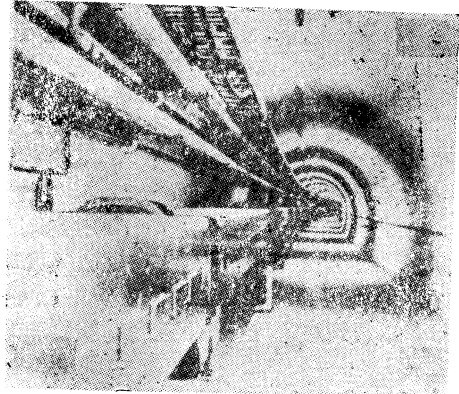


图 9 美国费米实验室的 500 京电子伏同步加速器中的环形磁铁隧道，磁铁的截面约 18×30 英寸，周长共 6 千多米，总共有 一千多块磁铁

它用了上千块磁铁，分布在直径为 2 公里的 6—7 千米的圆周上，规模很大(图 9)。从原理来看，要建立更高能量的同步加速器是完全可能的。问题是规模和投资过于巨大，将带来不少困难。加速器专家们正在探索新技术新原理来解决这问题。美国 NAL 的加速器上现拟加一个不用常规磁铁而用超导磁体造的加速器，把 500 京电子伏提高到 1000 京电子伏。各国从事高能加速器的科学家们还在筹建国际协作的更高能量同步加速器。但近几年来，各国主要建造的机器都是相对来说费钱较少的对撞存储环(又名对撞机，详见下文)。(待续)

当前世界上最大的强聚焦同步加速器是装在美国伊利诺斯州巴塔维亚的费米国家加速器实验室(NAL)的 500 京电子伏同步加速器。