

49°.

37 1 1 2
37 1 1 2
37 1 1 2

21 世纪科技与教育发展大观

(上 卷)

名誉主编 倪传荣
主 编 高丽松
曾绍阳



A0947364

中国人事出版社

第一编

物理学及其应用技术

一、神秘的物质世界

(一) 揭开物质结构之谜

浩瀚宇宙，苍茫大地，芸芸众生，万物世界千姿百态、五光十色，使人目不暇接。往大的方面延伸，地球、太阳系、银河系、星云乃至整个宇宙堪称无边无际、无穷无尽。而往小的方面探究，分子、原子、核子、电子……同样也是永无止境。那么物质世界究竟由什么组成？如何组成？自古以来，人们一直没有停止过对这一问题的探索。

远在上古时候，我们的祖先就在猜测物质世界具有最小的组成单元。据古书记载，相传在我国的殷周之际，人们就提出了“万物皆由金、木、水、火、土构成”的五行说。战国时代的墨子进一步提出“端”的概念，认为不断分割物质，最后就得到不能再分割下去的微小粒子——端。与墨子同时代的古希腊哲学家德谟克利特则把实物的最小单元称为“原子”，意指不可再分之物。

然而，真正以科学的方法对物质进行研究和解释，却是近三百年的事情。

16世纪60年代，英国的波义耳经过大量的实验，提出了元素的概念，认为元素是用化学方法不能再分解的最简单的物质；19世纪初期，人们形成了分子——原子论，认为在物质结构中存在着分子、原子这样的层次。分子由原子构成，原子是构成物质的不可再分割的最小粒子，这种观点一直保持到19世纪末。

1897年，汤姆逊通过实验发现了电子，并计算出电子的电荷 e 与质量 m 之比，即“荷质比”。电子的发现，使“原子不可分割”的观点瓦解，人们对物质的认识深入到原子的内部。原子是有结构的。

那么原子是怎样一种结构呢？1903年，汤姆逊提出了“汤姆逊模型”。1911年，卢瑟福提出了“卢瑟福原子模型”。他们提出的原子结构模型，都只能解释某种物理现象，本身也比较粗糙。

20世纪20年代，人们建立了量子力学，并应用于原子世界里替代牛顿力学，以波函数 ψ 来描述电子和原子的运动状态。波函数绝对值的平方 $|\psi|^2$ 反映了粒子在空间某一位置出现的几率，而且量子力学还认为：原子具有的能量是不连续的，呈能级分布。在每一种允许的能级状态下，电子都具有一定的分布方式，呈“云”状。量子力学这一有别于经典力学的全新的物理方法，为人们探索物质的微观世界，提供了极好的理论工具。

事实上，原子核也有结构。1920年前后，卢瑟福用天然放射现象中的 α 粒子来作为高速的“炮弹”轰击氮原子核，首先实现了原子核的人工破裂，并发现了原子核中的质子。接着他又根据实验的现象，推测原子核内应当存在着一种与质子的质量大体相等、但不带电的粒子。12年后，查德威克的实验证实了卢瑟福所预言的粒子，并把它命名为中子。之后，海森堡和伊凡宁科提出了原子核由质子和中子组成的假说，并且很快这一假说获得验证。原子由质

子、中子和电子构成的观点逐渐为人们接受。至此,不少科学家认为这已经是物质微观世界的终极了。然而,60年代科学家发现了物质结构还有更深层次——夸克。质子和中子都由夸克组成,如图1-1。科学的探索是无穷无尽的,尽管至今尚未发现组成夸克的更小结构,可是科学家相信,终有一天,还会找到夸克的结构。

探究物质微观世界的科学进展取决于实验手段,尤其是高能加速器的出现和发展。20世纪中叶,大型加速器的迅速发展,研究物质基本构成的科学——粒子物理学得到了极大的发展。科学家至今已经发现了400多种粒子,它们绝大多数在自然界中不存在,只能在高能实验室里才能产生,因而粒子物理学也叫高能物理学。

现代粒子物理学的理论告诉我们,物质世界存在着四种相互作用力:电磁力、弱力、强力和引力(见表1-1)。粒子就是通过通过这些力而形成物质世界的。

表 1-1

力的类型	电磁力	弱力	强力	引力
作用距离	延伸到非常大的距离	约小于 10^{-19} 米	约小于 10^{-15}	延伸到非常大的距离
力的相对强度	10^{-2}	10^{-13}	1	10^{-38}
传递力的粒子	光子	中间波色子 W^+, W^-, Z^0	胶子	未发现

依据参与相互作用的不同,粒子可以分为两类:一类是参与强相互作用的粒子,称为强子,包括质子、中子、 π 介子、奇异粒子和一系列的共振态粒子;另一类是不参与强相互作用而只参与电磁和弱相互作用的粒子,称为轻子,包括电子、 μ 子和中微子等。强子由三种夸克组成,这三种夸克分别称为上夸克u、下夸克d和奇异夸克s。例如,每一个质子含有两个上夸克和一个下夸克,而每一个中子含有两个下夸克和一个上夸克。1974年丁肇中和里克特发现了第四种夸克:粲夸克c,1977年美国费米实验室的莱德曼实验组证实了底夸克b的存在,1995年3月费米实验室宣布发现了顶夸克t。至今,人们共发现了6种夸克。此外已经发现的轻子数也达6种,包括:电子、电子型中微子、 μ 子、 μ 型中微子、 τ 轻子和 τ 型中微子(图1-2)。

夸克、轻子和传递基本力的各种规范波色子等“基本”粒子是组成物质的基石,它们通过四种相互作用力构成了自然界千变万化的实物世界。

(二) 探索无穷期

20世纪物理学在相对论和量子力学的推动下迅猛发展。人们对物质结构的认识越来越深入,研究物质微观结构及其运动规律的物理学分支——粒子物理学取得了辉煌的成就,成为现代自然科学的重要前沿。100多年前,汤姆逊发现了电子,从此影响了20世纪的物理

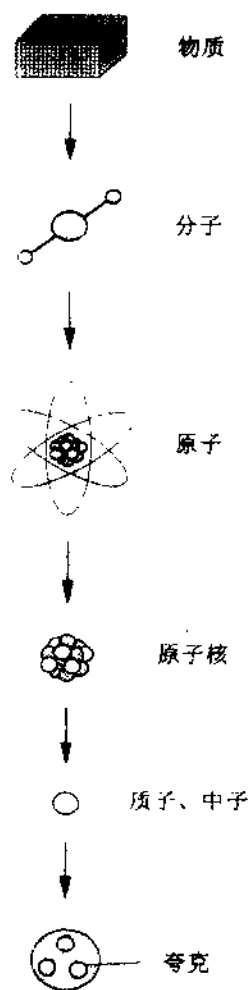


图 1-1 物质结构层次

思想：大的是由小的组成，小的由更小的组成，找到了最基本的粒子就知道最大的构造。时至今日，人类对物质微观结构的认识已经深入到夸克和轻子层次，对“基本粒子”和物质层次等概念的认识已经发生了深刻的变化。

1. “基本粒子”不基本

20世纪30年代中子的发现，开创了原子核物理。对物质世界的认识有了“基本粒子”这一概念，认为自然界万物是由质子、中子、电子和光子（ γ 粒子）这些基本粒子构成。所谓基本粒子意指组成物质不可再分割的最小“基元”。40年代起，加速器实验的迅速发展，使人们可以利用加速器手段在实验室里进行核物理实验，从而开创了高能物理学。50年代起的10年时间内，在一系列的高能实验中，人们先后发现了100多种基本粒子。这些新发现的基本粒子，也是组成物质的“基元”。这些基本粒子具有不同的物理特性，最初人们曾经按基本粒子的大小进行分类，后来发现了这样的分类方法的不足，因为质量只是表征了粒子一方面的特征，人们发现除了质量外，还有电荷、寿命、自旋等许多标识粒子的物理量。现在一般都是按它们参与相互作用的种类来进行分类，可以分为两类：一类是参与强相互作用的粒子，如质子、中子和一系列的共振态粒子，统称为强子；另一类是不参与强相互作用、只参与电磁相互作用和弱相互作用的粒子，如电子、中微子等，统称为轻子。这些基本粒子中，除了质子和反质子、电子和正电子、中微子和反中微子、光子外，其它都是处于不稳定状态（共振态）的粒子，寿命很短，有的粒子在产生之后，瞬间便转变成别种粒子。

高能物理的理论和实验又进一步指出，强子并不“基本”，它们是有内部结构的。1964年，美国物理学家盖尔曼和茨韦格分别提出了三夸克模型，认为强子都是由夸克组成的。他们认为强子由三种夸克（上夸克u、下夸克d、奇异夸克s）组成，夸克必须携带 $1/3$ 或 $2/3$ 个电子单位电荷。通过实验直接寻找单个夸克至今仍未实现，因为夸克有一个特别的性质：它们只能三三两两地存在于强子内部，不存在自由的夸克，这就是所谓的“夸克禁闭”。人们寻找夸克只能够通过间接的手段进行。实验证明夸克的尺寸小于 10^{-17}cm 。目前，已发现

第一代	 上夸克u	 电子
	 下夸克d	 电子型中微子
第二代	 粲夸克c	 μ 子
	 奇异夸克s	 μ 型中微子
第三代	 底夸克b	 τ 轻子
	 顶夸克t	 τ 型中微子

图1-2 三代夸克和轻子

的夸克一共有六种(除了上述的二种外,还有粲夸克 c 、底夸克 d 和顶夸克 t)(图1-2)。基本粒子的概念是一个相对的概念。目前科学界普遍接受的是,物质结构的基元是夸克和轻子。但是,随着科学研究的深入,发现更深层次的基本粒子也是很有可能的(图1-3)。

2. 对物质层次的新认识

自然界物质由分子组成,分子由原子组成,原子由原子核和电子组成。物质在分割过程

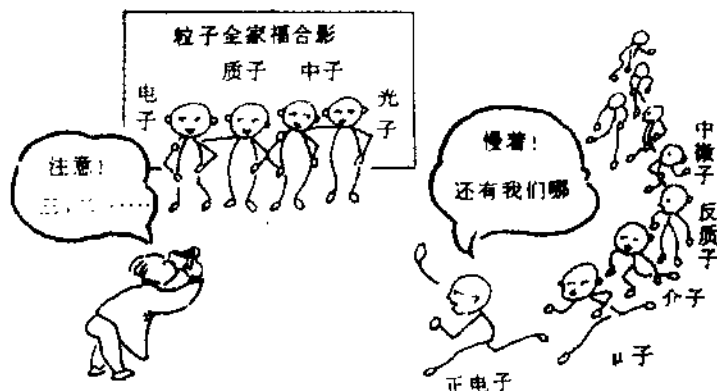


图1-3 基本粒子大家族

中,分割后的部分或组分总是小于整体,组分必定被包含在整体之中。这种传统的分割观念,对更深层次的基本粒子来说就得改变,因为不少的粒子现象无法用传统的分割观念来解释。比如说在加速器上用人工的方法产生的粒子,大多是由一种或两种粒子在碰撞过程中产生出来的。这些粒子不能说哪个是整体,哪个是部分;又如正反粒子对在结合(湮灭)时会变成光子(或介子),我们不能说光子(或介子)由某种正反粒子组成。

新的观点认为,基本粒子是“你中有我,我中有你”的复合体,而不存在更基本的粒子,并认为所有强子都可以视为其他任一组强子的复合体,哪一组都可以称为基本粒子。

事实上,在分割粒子时,往往不是越分越小。而且粒子分割之后,得到的可能是与分割前同一层次的粒子。更为离奇的是,强子在分割时,不同大小的能量分割出来的粒子种类和数目都不同。

因而,对于深层次的物质结构,只能用新的观念去解释,当然,这些新观念的形成和检验,靠的是科学技术的不断发展和人类对自然客观规律的不断深入认识。

3. 粒子物理学取得的成就和遇到的疑难

经历了几十年的艰苦探索,科学家在粒子物理学领域取得了辉煌的成果。

人们在研究中发现了几百种粒子的同时,又不断对这些粒子作深入的研究,提出了许多描述这些粒子性质和运动规律的理论,并且企图通过实验求得证实。如描述粒子的波粒两重性以及粒子的产生与湮灭过程的量子场论。各种粒子由相应的量子场来表示,量子场论和规范理论十分成功地描述了粒子及其相互作用。

标准模型的提出,更是粒子物理学发展的一个重要里程碑。标准模型是以夸克、轻子作为基本粒子,以弱-电统一理论以及量子色动力学理论为框架的粒子物理学理论体系。到目前为止,所有可靠的实验结果都和标准模型理论的预言相符。标准模型是近半个世纪以来探

索物质结构研究的结晶，是 20 世纪探索微观世界规律的极其重要的成果。但是标准模型所预言的一个重要粒子——黑格斯粒子（Higgs）至今仍未找到，因为标准模型理论中近 20 个参数中绝大多数来自黑格斯场，一切粒子的质量都与黑格斯场有关，或者说，粒子的质量是通过对称性破缺而获得的。因而寻找黑格斯粒子，是解决粒子物理学 20 世纪两大难题之一——“对称性破缺的本质”的一个关键。

粒子物理学 20 世纪另一难题是“夸克禁闭”。在夸克模型理论成功建立的同时，科学家们也为实验上寻找不到自由夸克而困惑。破解夸克禁闭之迷，可以找到真空本质的答案。尽管不断有一些解释，但都不尽人意（图 1-4）。

在成功地建立起弱-电统一理论后，有的物理学家又提出了“大统一”理论，试图把弱力、电磁力和强力统一起来，甚至提出“超对称统一”（超统一）理论，把引力也统一进来，建立所谓的“终极理论”（图 1-5）。

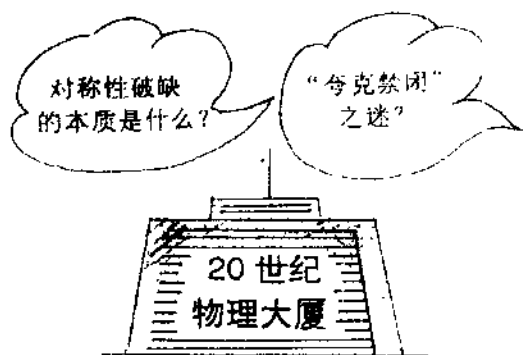


图 1-4 20 世纪末物理学的大疑难

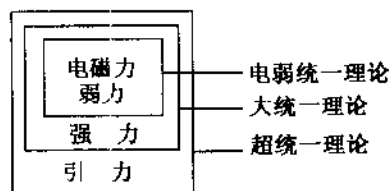


图 1-5 四种相互作用力的统一

现阶段“大统一”理论和“超对称统一”理论尚在探索之中。

虽然在粒子物理学领域中人们取得了辉煌的成就，但是对于微观世界的本质人们却知之甚少，面对更多的是疑团和难题。大多微观世界的客观规律仍在沉睡之中，要将其唤醒看来只有经过科学家长期不懈的探索才可实现。

（三）大小宇宙两极相通

人类在探究物质世界之迷的过程中既不断朝微观方面深入，又向宏观、宇观方面进军。物质科学所研究的对象是一个层次丰富、包罗万象，无处不及的大千世界：大至地球、太阳系、银河系、星系团以及总星系；小至分子、原子、原子核以及组成物质的基元——基本粒子。它们的空间尺度之大，横跨 42 个数量级（ $10^{-16} \sim 10^{26}$ 米），当代物质科学的前沿主要涉及微观世界和宇观世界的探索。物质尺度见示意图 1-6。当科学家从极大尺度的宇宙到极小尺度的微观粒子世界这两个极端尺度进行孜孜不倦的研究时，却发现它们之间存在着微妙而密切的联系。对宇宙起源及其演化的解释离不开物质的微观结构理论，而对微观物理的探索又常受宇宙学原则和天文观察数据的制约。天体物理学和粒子物理学两个学科的理论相互渗透，相互依存，共同发展。

宇宙的起源和演化的现代宇宙学图景，是粒子物理学家和宇宙学者联手勾画出来的。按照现代宇宙学的观点，宇宙的诞生在 150 亿年前的一次异乎寻常的大爆炸，当时宇宙始于高温高密度的原始物质，称为“宇宙蛋”，最初温度超过 1 亿亿亿度。爆炸的起初不仅没有任何天体，也没有粒子和辐射，只有一种单纯而又对称的真空状态。此时，我们所知的自然界中的四种相互作用力是统一不可区分的。随着宇宙的膨胀和降温，真空发生了一系列的相变：大爆炸瞬间开始计时， 10^{-44} 秒开始了普朗克时代，发生了超统一相变，引力首先分化出来，粒子开始产生，这时候，宇宙间充满了夸克和轻子，它们可以互相转化；到 10^{-36} 秒，开始了大统一时代，大统一相变发生，温度进一步降低，强作用与电、弱作用分离，对称性破缺开始出现，宇宙暴胀，夸克与轻子分离；到 10^{-32} 秒以后开始了夸克-轻子时代，电弱统一相变发生，弱作用与电磁作用分离，其中夸克开始构成强子；大约 3 分钟后强子合成原子核；此后经历了约 70 万年，宇宙的温度降到约 3000 度，电子与原子核结合成稳定的原子；

轻元素开始出现；大约 20 亿年后，星系开始出现；150 亿年后，宇宙开始形成如今我们所观察到的模样（图 1-7）。天文观察表明，宇宙还在不断地膨胀。与上述宇宙大爆炸过程相反，科学家企图用大统一理论和超统一理论让“时光”倒流，以高能实验的方法，实现强作用与电弱作用的统一乃至引力与其它作用全部统一起来。科学家预言：当高能加速器的能量达 10^{24} eV 时，可能直接观察到大统一理论的现象；当高能加速器的能量达 10^{28} eV 时，可能直接观察到超统一理论的现象。然而，实现如此高的能量，加速器的周长也非常大，如要达到上述两级的能量，其对撞机的周长分别达一万亿千米和一千光年（图 1-8）。

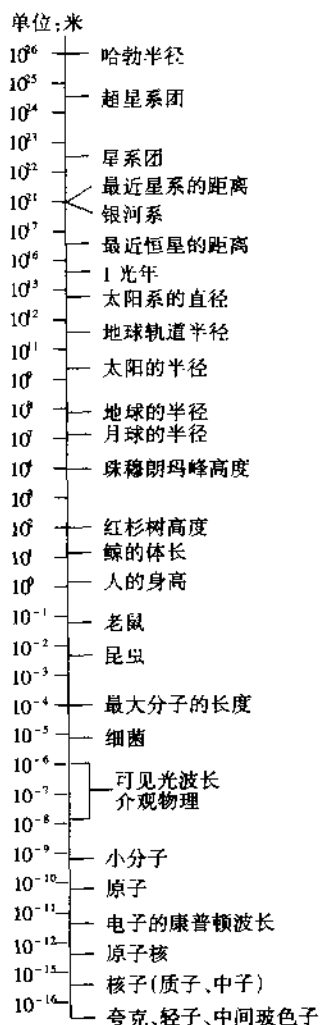


图 1-6 物质的尺度

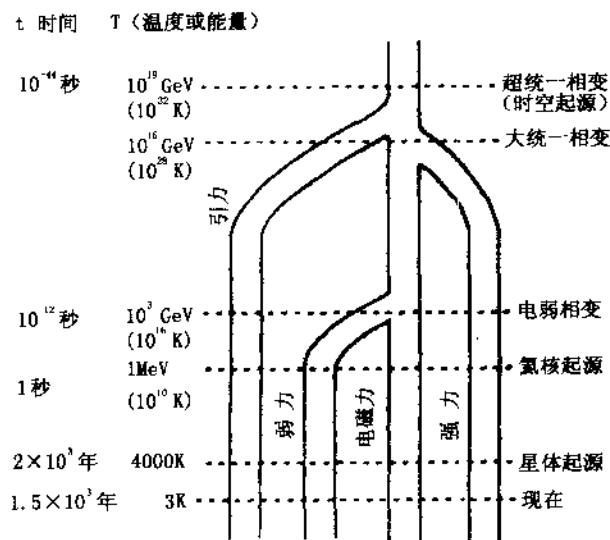


图 1-7 宇宙和基本力的起源

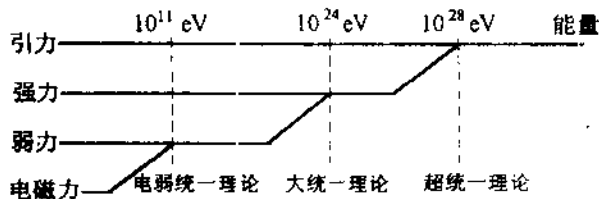


图 1-8 “大统一”与能量

科学家正在尝试在实验室内通过相对论重离子碰撞实验来营造小规模“宇宙大爆炸”景观，重现大爆炸最初三分钟甚至更早时间时的宇宙图像。所谓相对论重离子碰撞是指多核离子在接近光速时能量异常高，对撞时许多高能粒子同时参与撞击，能在较大的区域上形成高温炽热状态。在对撞区可能重现类似宇宙大爆炸时的情景。目前美国布鲁克海文实验室建造的相对论重离子对撞机，可以加速重离子；欧洲核子中心也正着手建造质子-质子和相对论重离子交替运行的对撞机，可望从 2005 年起运行。

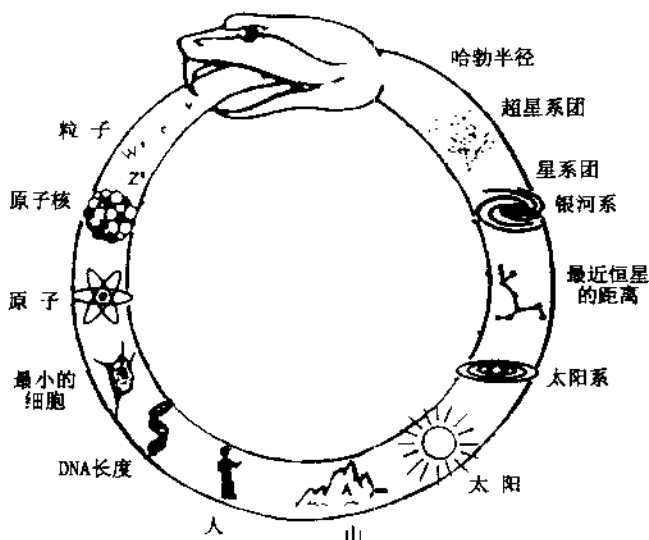


图 1-9 大小宇宙、两极相通

宇宙的宇观演化与物质的微观演化互为条件、协同进行，物质演

化的起点是宇宙的创生，宇宙总星系和物质最“基本”的粒子和相互作用力具有共同的起源，这两个“相通”领域的研究，将会有力地促进科技的发展，如图 1-9。因而正如诺贝尔奖金获得者李政道博士指出的“微观和宏观必须要结合起来，这个结合对应用科技可能会有极大的影响。”

（四）破解物质结构之谜的利器——高能加速器

“工欲善其事，必先利其器”，人们在探索微观世界的过程中，既有艰深抽象的理论思维演算，也有精尖卓绝的实验探索，粒子物理学的成就离不开实验，离不开高能加速器。可以断言，21 世纪人们在破解粒子物理疑难时，高能加速器是一把不可缺少的魔力强大的利器。

早期的核物理实验研究，都是利用天然放射性元素或宇宙射线放出的 α 粒子直接进行的。但是这种方式的实验受到许多制约，例如由于天然放射性元素的种类、射线中粒子的能量和粒子流的强度等方面因素的限制，使实验存在着许多困难。显然，要开展大量的、有预

期目标的实验研究，必须使用加速器来产生的高能粒子。加速器是一种复杂而又昂贵的人工粒子源，它所负担的任务是把带电粒子用物理方法加速到一定的能量，提供各种不同的实验使用。

加速器按能量划分可分为几类：低于 100MeV（兆电子伏特）的称低能加速器；介乎 100 MeV 至 3GeV（京电子伏特）之间的为称中能加速器；3 GeV 至 1000GeV 为高能加速器；1000GeV 以上则称为超高能加速器如图 1-10 所示。

近代粒子物理实验所用的加速器能量要求越来越高。为什么需要高能量的加速器呢？有两个主要原因：一是科学家已经发现或者预言的粒子质量很大。例如，标准模型预言的黑格斯粒子估计质量在 52~680GeV 之间，按照爱因斯坦的质能关系，如果没有足够的能量，则不足以产生较大质量的粒子；另一个原因是粒子束流的能量越高，其波长则越短，就越容易深入到物质的内部，从而获得更多更细的信息。好比能量越高，“刀刃”越锋利。

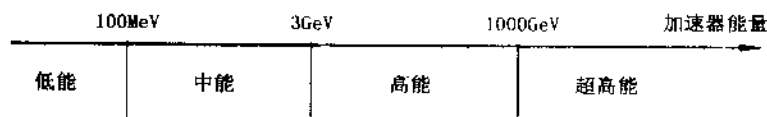


图 1-10 加速器的能量分级

1932 年，卢瑟福的两个学生科克劳夫和华尔顿建造了第一台实用的高压加速器，可以把质子加速到具有 7×10^5 eV 的能量，并在历史上首次用人工加速的粒子实现核反应。次年，范德格拉夫把高压加速器的记录提高到 1.2MeV。高压加速器的原理很简单，在真空的加速管的两端加上直流高压，带电粒子在电场的作用下加速，其增加的能量相当于加速器两端电位差乘以粒子的电荷。这种加速器的缺点是受高压绝缘的限制，一次加速能量无法再增大。直线型加速器可以让带电粒子在真空箱内连续作多次加速，因而粒子的能量可以加速到较高的能量。实用的直线加速器由史路安首建于 1931 年。目前，直线加速器仍有其用途（图 1-11）。在美国斯坦福大学里，有一个大型的直线加速器，它长 2 英里，埋在地下 25 英尺深的混凝土隧道中的铜管里，电子可以被加速到 40GeV。

几乎与上述两种加速器的出现同时，美国的劳伦斯发明了回旋加速器。回旋加速器也可以对带电粒子多次加速，与直线加速器不同的是，粒子的路线是螺旋形的，这是因为带电粒子垂直于均匀磁场运动时，轨道是圆形的，每走半周，粒子便通过电场区被加速一次，而每加速一次，粒子轨道的半径增加一些，当粒子加速运动到加速器边缘时，粒子能量最高，以切线方向将粒子引出加速器供实验应用（图 1-12）。回旋加速器一般用来加速质子。

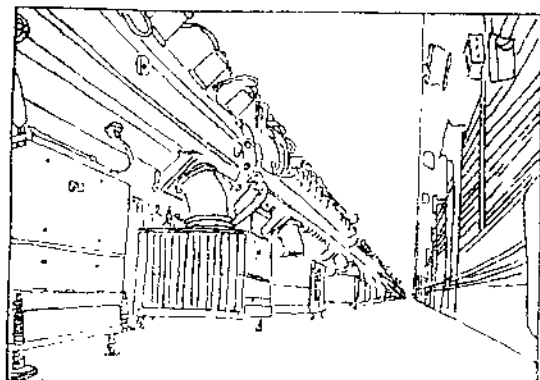


图 1-11 直线加速器

理论上回旋加速器只要回旋区足够大，磁场足够强，带电粒子便可以得到相当高的能量。但是，事实上由于粒子（质子）被加速到具有 19MeV 时，它的速度将达到光速的 $1/5$ ，这时相对论效应则较为明显，加速器无法继续对粒子进行有效的加速而达到速度的“极限”。回旋加速器的“相对论效应”问题限制了其能量水平的继续提高（最高约为 20 MeV），因而它只能算是低能加速器。

近几十年来，粒子加速器无论从类型或者能量规模方面都发展很快，比较引人注目的有大型同步加速器和粒子对撞机。

同步加速器是一种发展很快的加速器，这种加速器的原理与回旋加速器的原

理差不多，两者的主要区别是同步加速器省掉了巨大的磁极，代之而来的是体积小得多的磁环。粒子加速时的轨道不是螺旋线而是圆形。同步加速器的特征是粒子加速时能确保自始至终被约束在环状的加速管道内，在粒子速度加快时，磁场也要按照同样的步伐增强，因此称为同步加速器（图 1-13）。同步加速器分为电子同步加速器和质子同步加速器两种，目前在美國的費米國家加速器實驗室中有世界上最大的同步加速器。它的圓形路徑長達 4 英里，如使用超導電磁鐵，可以使能量達 1000 GeV 數量級。

粒子對撞機的設計思路不同於前面介紹的幾種加速器。通常的實驗是高速粒子撞擊靜止的粒子（靶），其能量的利用率較低。而粒子對撞機的原理是讓兩束高能粒子相向對撞，它的能效極高

（圖 1-14）。如計算表明：兩個動能各為 30 GeV 的質子對撞時產生的能量為 60 GeV，但卻等效於一個動能約為 2000 GeV 的質子轰擊一個靜止的質子。正是粒子對撞機的這一高能優勢，使得它成為尋找新粒子、驗證新理論的希望所在。對撞機實際上是一個多種能級加速器的組合大系統，它的結構複雜，所需的投入也是相當昂貴的。如 1989 年美國上馬的 SSC（超級超導對撞機，中途夭折）計劃投資 110 億美元。目前世界上已經運行的能量最高的強子對撞機是美國費米實驗室的質子-反質子對撞機，能量高達 2000 GeV，1995 年就是在这台對撞

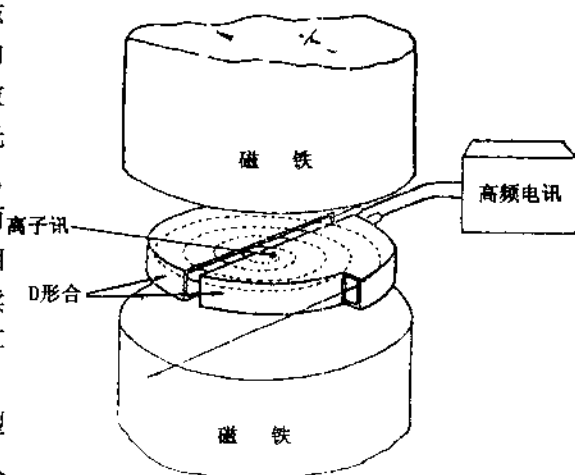


图 1-12 回旋加速器

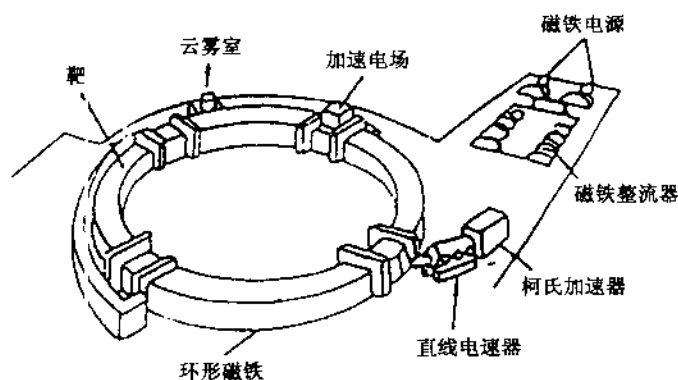


图 1-13 同步加速器

机上证实发现了顶夸克。正在建造的最大的强子对撞机 (LHC) 位于日内瓦附近的欧洲粒子物理实验室 (CERN), 投资达数十亿美元, 它建在一条长 27 千米的巨大圆形隧道中, 能量将达到 16000 GeV。科学家们祈望在这台设备上能找到黑格斯粒子, 从而回答对称性破缺的本质这一疑难。

加速器的原理实际上并不复杂, 但要成为实用的粒子实验设备, 尤其是大型粒子对撞机, 却要解决许多技术上的困难, 如强磁场、高真空、强功率、电子技术、巨型机械的设计制造等高技术难题, 而且要花费庞大的经费。高能加速器的发展需要依靠许多尖端的科学技术和工业部门, 同时高能加速器的发展又反过来促进了其它科学技术和工艺技术的发展。为了探索物质结构的奥秘, 尽管为此要花费昂贵的投入, 动员无数科学家参与, 前赴后继, 这正是人类的科学精神所在。

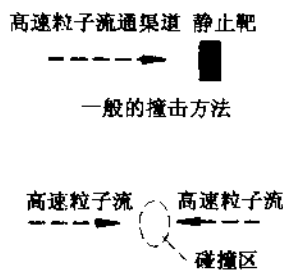


图 1-14 对撞原理

(五) 等离子体与受控热核聚变

物理学指出, 地球上的物质通常呈气态、液态和固态三种状态。在特定的条件下, 物质还可以呈现为第四种状态——等离子态。什么是等离子态? 它有什么特性? 研究等离子态有何意义?

在极高温以及电磁场等条件下, 气体物质中的原子会被电离, 即原子中的电子将会大量地跑出, 形成了由带正电的正离子和带负电的负离子 (电子) 组成的物质状态。在一定的范围内带正离子和负离子的数目相等, 因此这样的物质状态称为等离子态。这种被高度电离的气体物质称为等离子体。从宏观上看, 等离子体呈电中性。由于等离子态有别于其它物质状态, 因而常被称为物质的第四态。

等离子态一般不存在于常温常压之下, 地球上出现等离子体的情况也不多见。比如闪电、极光、地球电离层等都是自然存在的等离子体。用人工的方法如通过电弧放电、日光灯、核爆炸等也可以产生等离子体。然而在宇宙广袤的空间, 等离子体却是物质存在的主要状态, 在全部宇宙物质中, 90% 以上都是等离子体。

太阳是一个高温高压的气体恒星, 在它的内部每时每刻都在进行着无数次的热核反应, 并源源不断地向外辐射出光和热。太阳这个燃烧着的巨大气体球就是一个等离子体球。太阳最外层大气——日冕气体的温度高达一百万摄氏度。由于高温极高, 日冕气体完全电离, 并剧烈向外膨胀, 致使大量离子不断辐射到星际空间, 从而形成“太阳风”, 其影响范围之广, 直达百倍于太阳与地球之间的距离, 地球更是首当其冲。

科学家对等离子体的实验研究始于 19 世纪 30 年代。在这之后的 120 年时间里, 英国的法拉第、汤姆逊、克鲁克斯和美国的朗缪尔等众多的科学家通过对真空中气体放电、阴极射线等物理现象的研究, 逐步建立起等离子体的概念, 开创了等离子体物理学的早期研究工作, 并建立了等离子体物理学的基本理论框架和描述方法。20 世纪 50 年代之后, 受控热核聚变研究和空间技术的重大突破, 驱使等离子体研究在理论和应用两个方面都取得了丰硕成果。现今等离子体物理的研究的前沿领域有: 受控热核聚变、空间等离子体、天体等离子体以及等离子体技术的应用, 下面我们看看等离子体技术如何应用于受控热核聚变之中的。

当今科学技术发展迅速，然而人类却面临着严峻的能源危机问题，尤其是不可再生的能源，如石油、煤、天然气等。据专家预测，在世界常规能源中，除了煤炭因储量较多尚可维持较长时间外，目前已探明的石油储量将于 2020 年左右基本开采完，发展中国家在 2060 年也将发生天然气短缺。因此，寻找高效、干净、持久的新能源是世界各国共同努力的方向，其中热核聚变能是一种取之不竭、用之不尽的干净能源。一旦热核聚变可以受控，人类将不再为能源短缺问题而大伤脑筋。

热核聚变能是一种核能，但不同于现有应用的重原子核裂变所产生的能量。热核聚变的“原料”是海水里的氢元素的同位素氘或氚，通过特殊的方法，将氢原子核聚合成高温高密度的等离子体，生成新的元素，同时放出比核裂变还要大得多的能量（图 1-15）。人类已经实现了热核聚变，热核爆炸（氢弹）就是热核聚变，可是瞬间释放如此巨大的能量，无法作和平应用。只有受控的热核聚变产生的能量，才是人们所期待的新能源。可是要实现受控热核聚变在技术上十分困难。

首先，实现受控热核聚变必须有很高的温度，让氢核有足够的能量克服强大的核斥力而实现核聚变。如要实现氘+氚核反应，温度需要数千万度；实现氘+氘核反应更要求氘气温度达 1 亿度以上，实现这么高的温度，要解决许多技术难题。其次，在极高的温度下，参与核反应的气体早就离解为原子核和电子，成为高温等离子体。把高温的等离子体用某种形式限制在一定的体积内，使之稳定地产生核聚变反应，称为约束。对几千万度上亿度高温的等离子体约束非常困难，即使使用金属中熔点最高的钨，其熔点才是 3387℃，因此无法用常规的方式约束。

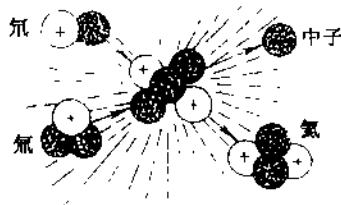


图 1-15 核聚变示意图

50 多年以来，科学家设计了许多办法仍未有效地解决这一问题。迄今为止，实现受控热核聚变的根本困难在于解决高温等离子体的约束问题。二是能量的增殖问题。产生高温等离子体，必须投入一定的能量，而且形成等离子体后，能让它维持足够的时间完成核聚变反应，并放出相当的能量，这些能量除了补偿投入的能量，维持核反应外，还应当有盈余向外输出，这样才能算得上是一个有用的能源装置。

那么如何解决高温等离子体约束这个根本问题呢？科学家设计了许多方案，而且都处于实验研究阶段，其中磁约束和惯性约束最为引人注目。

(1) 磁约束。磁约束热核聚变的原理是这样的：先把核聚变原料——氘或氚加热升温，让它们成为高温等离子体，同时利用外磁场将这一团等离子体约束在一定的空间内不让它们四处飞散或者与容器壁相碰。然后在加热直至最终达到核聚变反应的条件。只要有足够的核发生聚变反应，释放的能量就能保证核聚变的持续进行，这时候只需适时的添加核原料即可。磁约束热核聚变的关键是对核原料的加热与约束。

磁约束的方式有两种最基本的形式。一种是直线型的约束系统，也称磁镜约束（图 1-16）；另一种形式是环形约束系统，这种形式最为成功的是前苏联学者提出的“托卡马克”装置（图 1-17），在我国译名叫环流器。

(2) 惯性约束。惯性约束热核聚变实质上相当于微型的核爆炸。它的原理是利用大功率激光从四面八方照射一个小靶丸的外壳，靶丸外壳因急剧吸收辐射能量而迅速消融、气化，

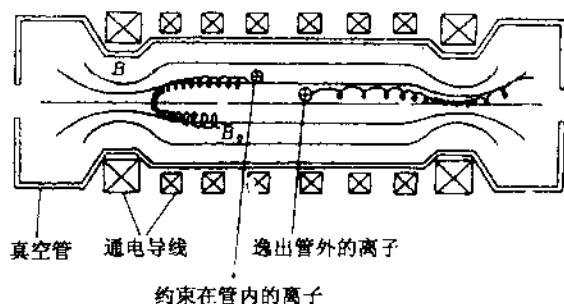


图 1-16 磁镜约束

并向外喷射。

这些向外飞散的气体好比是火箭的排气口中喷出的气体，从而产生强大的反作用力将靶丸内核——氘或氚向核心爆聚，在极短的时间内达到核聚变的条件，发生聚变反应，放出能量。惯性约束可以说是不约束，它让等离子体自由飞散，由于等离子体的惯性，在还没有散开之前，便实现“点火”引爆。

惯性约束热核聚变的关键技术是大功率的激光器，要使靶丸在瞬间加热到几千万度的温度，其激光器的能量达到几十万焦耳的水平，而且要求激光的能量均匀地照射到靶丸的表面，这些都是高难度的激光技术。

各种形式约束的受控热核聚变仍在研究之中，无论在理论上或者技术上还有许多难题尚未解决。从环流器的研究进展来看，等离子体物理学的兴起推动了环流器的研制；反过来一个接一个环流器装置的兴建又促进了等离子体物理研究的深入。目前，磁约束热核聚变已经实现输入能量与输出能量的相当，即实现了零增殖，尽管如此，这已经是来之不易的研究进展了。人们预期，再过二三十年，受控热核聚变能量发电将会实现，而且，人们已经设想把核聚变反应装置小型化，作为新一代汽车、火车的驱动装置。可以想象，在不远的将来，随着热核聚变这一新能源的实现，人们的生活将发生翻天覆地的变化。

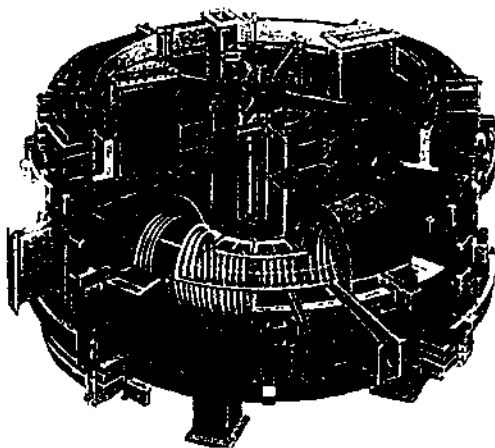


图 1-17 托卡马克装置

二、展望明日交通工具

(一) 绿色交通工具——新型自行车

每天早上，也许你会骑着自行车去上学或上班，你会感到自行车是一种轻便、灵巧的交通工具。它的原理你可能觉得很简单——用脚蹬踏板，通过链条带动后轮推动前轮一齐运动，可如此简单的发明也经历了曲折的过程。最早的自行车只有两个木制的车轮和车架，没有车把，没有车闸，也没有链条和充气轮胎。它是法国人希布拉克在1790年发明的，那时他是用双脚交替蹬地来作为前进的动力，当时，街上的人们看到希布拉克骑着他发明的自行车前进时惊得目瞪口呆！以后人们逐渐改进，才有了车把、车闸和脚蹬。1880年，法国的基尔梅在自行车上使用了链条，才使人真正地坐在了车上，解决了动力的传递问题；1888年，英国人邓禄普发明了充气轮胎，既增强了自行车在路面上行驶的缓冲，也减轻了车轮与地面接触时的阻力，此后自行车才逐渐定型下来。

我国是一个自行车王国，各种品牌、各种款式的自行车数以亿计。对以前生活并不富裕的中国人来说，自行车是人们进行超短距离交通的主要工具。和机动车相比，虽然自行车的速度较慢，但是自行车轻便、灵巧，它不需要任何能源，也不会造成交通阻塞，并且还可锻炼骑车人的身体，更重要的是，它不会像机动车那样排出废气污染环境。在环境保护日益得到重视的今天，自行车再一次引起了人们的注意。

不过，人们要解决的主要问题就是如何提高传统自行车的速度和骑车的舒适性。目前，科研人员采用了一系列的新技术和新材料，使新型自行车和传统的自行车有了很大的区别，速度大大上了一个台阶，甚至可以达到当今汽车的速度。

那么，科研人员采取了哪些有效措施来提高自行车的速度和骑车的舒适程度呢？

我们知道，阻力是影响速度提高的主要障碍。在中学物理中讨论物体的运动时一般情况下忽略了阻力，事实上，空气阻力在大气中却无时不有，无处不在。而经验表明，物体在空气中运动时受到的阻力和物体本身的形状、空气的密度、物体的速率有关。所以，科研人员首先在自行车的整体结构上做文章，将它进行大幅度的改造，使之与传统自行车的结构迥然不同。在新型自行车的车身周围设计了一个外罩，该外罩由轻质的弹性泡沫塑料组成，将车身的全部或者部分包起来，使之具有流线形的整体外形，按照空气阻力公式：

$$f = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 S$$

C_d 为阻力系数

ρ 为空气密度

V 为速度

S 为迎风面积

其中, 流线型物体的阻力系数 C_d 大约在 $0.06 \sim 0.1$ 之间, 而平板物体的阻力系数 C_d 大约为 2。据试验, 仅此设计, 至少可以提高车速 $1 \sim 2$ 倍。在第十一届亚运会中, 代表我国参加自行车计时赛的运动员所使用的赛车, 只将原来自行车车轮上的幅射状钢丝换成圆盘式车轮, 就使得车轮的空气阻力至少减少了 $1/10$ 。

其次, 科研人员采用了众多的新材料, 使得新型自行车的本身既有很强的韧性和强度, 又非常轻巧和灵活。例如, 他们采用了内部蜂窝状结构的碳纤维做整体车架, 使车身的强度增大了 5 倍, 而重量只有原来的 $1/4$, 骑起来会更加省力、舒适; 也有科学家采用了钛铝合金车架, 新型塑料冲压而成的车身。美国一位宇航科学家曾同他人合作, 设计出一系列叫做“威多克”的新型自行车, 两人乘坐时最高时速可以超过 100 千米。该车的轮胎内填充着弹性良好的发泡材料, 整个外形呈流线型且非常光滑, 甚至雨点都不能停留在防风罩上。

在保证提高新型自行车速度的同时, 骑车的舒适性也是科研人员重点改进的地方。传统自行车的车座在脚蹬的上方, 骑车人坐在车座上用力蹬踏时, 所施加的力一般不能超过骑车人自身的重量, 并且时间一长就容易疲劳, 新型自行车将脚蹬置于车座的前下方, 车座上设计了一个往后倾斜成的、角度可调的半躺形式的座位, 让人像半躺着一样踩脚蹬, 这样, 骑车人可以方便地利用自身的一部分重力蹬踏, 长时间内都不会感到疲劳。

不过, 由于速度较快, 加上侧向风对流线型外罩的影响, 使得新型自行车很容易受侧向风的影响而导致翻车。为了克服这种稳定性差的问题, 解决的办法就是另外加上两个防侧翻的小轮子, 速度较慢时两个小轮子可以收起来。基本原理就像儿童脚踏车那样子, 当速度快时, 行驶中以两个大车轮为主, 旁边再加上两个小车轮, 使得它的支撑面加大, 稳定性加强。现在, 许多科研人员 and 自行车爱好者都在对传统自行车进行改进。也许, 明天你要出门, 摩托车、小车不再风光, 新型自行车会由于它的轻便、灵巧和快捷而大显英雄本色。

(二) 喝汽油的马

看到这个题目, 你可能会感到奇怪, 马是吃草或者是吃饲料的, 怎么会有喝汽油的马呢?

别着急, 告诉你, 的确有喝汽油的“马”, 它就是人们对早期汽车的称呼。

在汽车没有发明之前, 人们靠马来载人拉货。可是, 马要吃草, 还要生病, 力气也不大, 而且, 马不懂得讲清洁卫生的重要性, 要随地拉屎撒尿, 在城市中根本不可能让它拉车。

瓦特发明蒸汽机后, 有不少人打上了蒸汽机的主意。他们试图把蒸汽机装上轮子, 制造能行驶的蒸汽机, 代替马来拉车。可别说, 1769 年, 法国炮兵军官居纽真的制造出了世界上第一台蒸汽机车, 每小时可以行驶 3.6 千米, 它的力量很大, 可以拉上好几吨重物。然而遗憾的是, 这辆车为了积聚蒸汽必须每隔 15 分钟停一会儿, 而且控制系统不灵, 行驶起来也不听指挥, 在街上行驶的时候不是碰人, 就是撞墙, 或者干脆熄火, 所以后来只好闲置不用。

以后不少人少对居纽的蒸汽汽车进行过改良。但改来改去, 人们总是觉得蒸汽汽车的自身重力大, 所占空间多, 对路面状况要求也很严, 而且乘坐这种车又热又脏, 在实际的公路运输中用处不大, 要想制造轻便灵巧的“汽车”看来靠蒸汽机是不行的, 必须需要自身重量轻、体