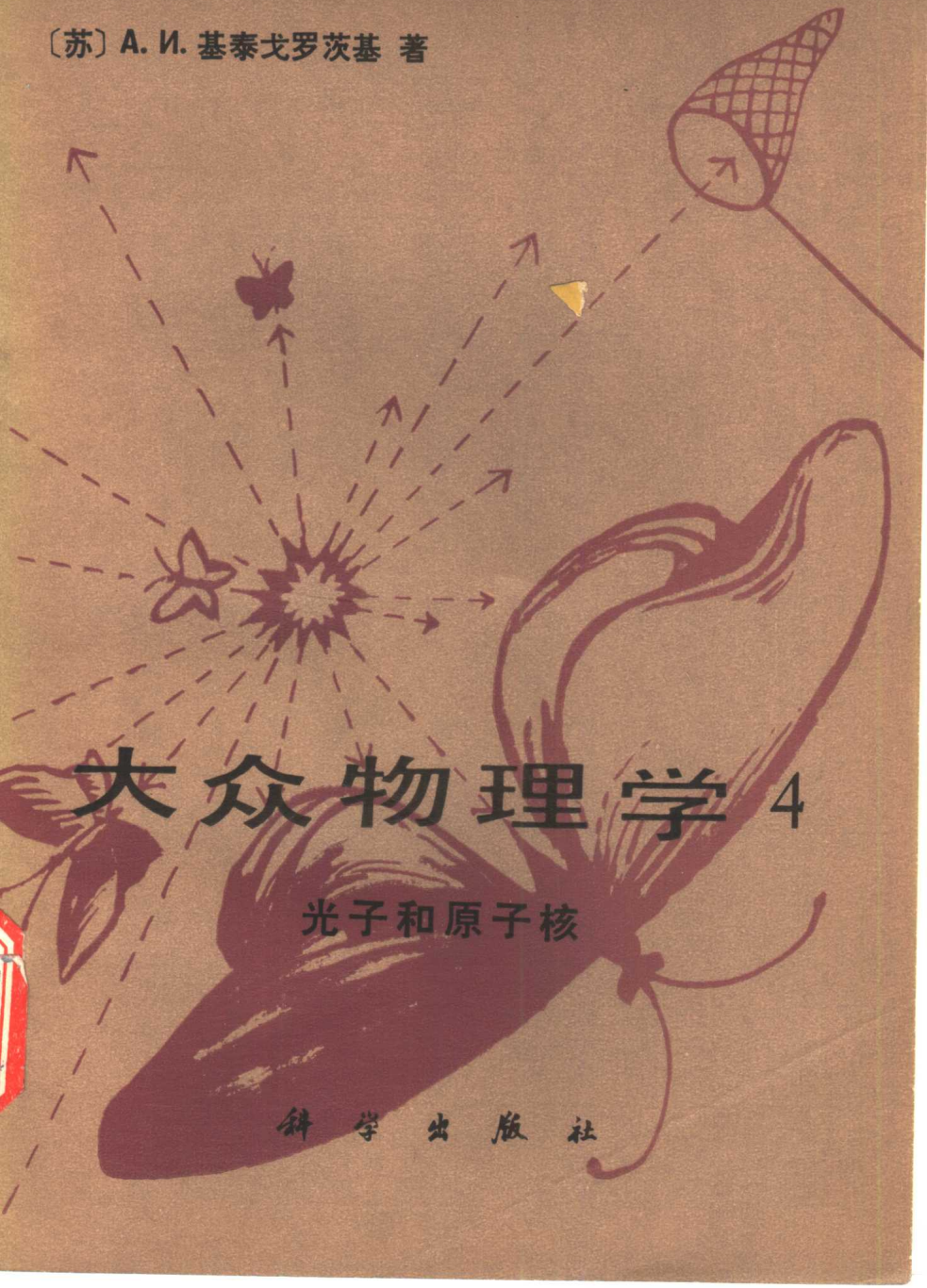
〔苏〕A. И. 基泰戈罗茨基 著



大众物理学 4

光子和原子核

科学出版社

大众物理学 4

光子和原子核

〔苏〕A.И.基泰戈罗茨基 著

尚惠春　李成福　杜远才 译

科学出版社

1984

内 容 简 介

《大众物理学》是由著名苏联物理学家、诺贝尔奖金获得者朗道和基泰戈罗茨基教授合作的科普著作。全书以通俗的形式向读者介绍了现代物理学的基本概念和最新成就。

《光子和原子核》是全书(共四册)的第四册。由于朗道早逝，它由基泰戈罗茨基写成。内容包括有：软电磁辐射、光学仪器、硬电磁辐射、力学的推广、原子核结构、我们周围的能量、宇宙物理学等等。

本书保持了前面三册书的特点，注重基础理论的介绍，内容丰富、语言生动、插图形象。既有科学性，又有趣味性，是一本难得的科普著作。原书出版之后，曾在国外多次再版，深受读者的欢迎。

另外三册：宏观物体、分子、电子已由我社出版。

本书可供具有中等文化程度的学生、干部、科技人员、中学教师阅读和参考。

А. И. Китайгородский

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ 4

Фотоны и Ядра

«Наука», Москва 1979

大 众 物 理 学 4

光子和原子核

〔苏〕А. И. 基泰戈罗茨基 著

尚惠春　李成福　杜远才 译

责任编辑　陈永锵　姚平录

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1984 年 5 月第 一 版　开本：787×1092　1/32

1984 年 5 月第一次印刷　印张：6 3/4

印数：0001—8,200　字数：130,000

统一书号：13031·2571

本社书号：3532·13—3

定价：0.85 元

序　　言

本书是《大众物理学》的第四册，它将结束对物理学基础的叙述。

怎样理解“基础”这一含义不确切的名词呢？

首先，所谓“基础”是指奠定整个物理学大厦根基的哪些主要规律。这些规律并不很多，甚至可以一一列举出来：经典力学的运动定律；热力学定律；包括在麦克斯韦方程组中的那些关于电荷、电流和电磁场的定律；量子物理学定律和相对论原理。

物理学定律象所有的自然知识一样是具有实验特性的。我们可以用观察和实验的方法来获得这些定律。诸如：物质由原子和分子所组成、原子结构模型、物质的波粒二象性等许多基本事实都是用实验证实的。尚未证实的一些问题，无论是基本规律，还是为描述基本规律所需要的基本事实，为数已不多了。

最近几十年来物理学的发展非常迅速，在物理学领域的工作者，当他们的交谈一超出他们所共同从事的那个学科领域、超出奠定物理学各个分支基础的定律和概念范畴时，他们彼此之间就无法互相了解了。物理学的各个独立分支都与技术、其它自然科学、医学甚至与人文科学紧密交织在一起，从而又形成许多新的独立的学科，这也是不足为奇的。

在描述应用物理学的各个分支时，应当先讨论基本定律和现象，这大概是无可争论的。但是，很清楚，不同的作者由于自己的个人爱好和狭窄的专业面的限制，在描述物理学基础时，每个人都会按照自己的意愿去筛选和综合所需要的材料。这里只提出描述物理学基础的各种可能方案的一种，供读者评判。

这套《大众物理学》的读者范围已在第一册的序言中作了介绍。这套书可供各行各业读者阅读，帮助他们重温物理学，了解物理学的现代概貌，估价物理学对科学技术发展过程的影响和对形成唯物主义世界观的意义。本书的很多篇幅会引起中学物理教师和爱好物理学的中学生们的兴趣。大概那些被繁琐的数学公式吓跑了的物理学读者也会从本书中寻找到某种乐趣。

不言而喻，这套书不是学习物理学的教科书，在这方面另有专门的课本。

根据作者的意图，《光子和原子核》这册书应当向读者指明，在描述各波段电磁波的性能时，电磁场和量子物理学的定律是如何起作用的。在谈到原子核之前，读者将先了解波动力学和狭义相对论的概念。在讲过关于原子核结构的基本现象之后，我们将谈到人们都很关心的地球上的能源问题。最后，在结束本书时，简短地介绍一下宇宙物理学。

由于本书篇幅所限，所以对许多传统题目不能加以描述，旧的总是要让位给新的。

A. И. 基泰戈罗茨基

目　　录

序言 …… v

第一章　软电磁辐射 …… 1

辐射能的交换 …… 1

灼热体的辐射 …… 3

热辐射理论 …… 8

光谱 …… 11

激光 …… 18

荧光 …… 27

第二章　光学仪器 …… 30

棱镜 …… 30

透镜 …… 34

照相机 …… 37

眼睛 …… 41

起偏器 …… 43

显微镜和望远镜 …… 46

干涉仪 …… 51

激光仪器 …… 60

光度学 …… 63

全息照相 …… 66

第三章　硬电磁辐射 …… 70

X射线的发现 …… 70

X射线结构分析 …… 76

X射线谱 …… 85
材料的X射线学 …… 89
第四章 力学的推广 …… 94
相对论力学 …… 94
接近光速运动的粒子 …… 106
波动力学 …… 112
海森堡原理 …… 116
第五章 原子核结构 …… 121
同位素 …… 121
放射性 …… 125
放射性衰变 …… 129
原子核反应和中子的发现 …… 132
原子核的性质 …… 135
玻色子和费米子 …… 137
原子核的质量和能量 …… 141
核反应的能量 …… 143
原子核的链式反应 …… 147
第六章 我们周围的能量 …… 152
能源 …… 152
燃料 …… 157
电站 …… 161
核反应堆 …… 167
热核能 …… 174
太阳光线 …… 178
风能 …… 181
第七章 宇宙物理学 …… 184
星体距离的测量 …… 184
膨胀着的宇宙 …… 189

广义相对论 …… 194
不同年龄的星体 …… 198
射电天文学 …… 203
宇宙射线 …… 206

第一章　软电磁辐射

辐射能的交换

我们把波长大约处于0.1—100微米波段内的电磁辐射称为软电磁辐射。此时还需要作一个补充规定，即所谓软辐射是指用非无线电技术方法所产生的那些电磁波。这个规定是必要的，因为用纯无线电技术的方法也可以获得软辐射波段的电磁波。

软辐射也常被叫做光波。在使用这个术语时，不要忘记可见光只是其中很窄的一个波段。对于一般人的眼睛来说，可见光的波段范围为380—780毫微米(0.38—0.78微米)。

如果下面我们要使用"光"这一术语，那也仅是就这一词的广义而言。因为对于可见光适用的定律对于软辐射的其它波段也适用。

我们还记得，比可见光波长更短的辐射称为紫外辐射，比可见光波长更长的辐射称为红外辐射。

现在我们可以书归正传，回到本节的题目上来啦。

我们知道，存在着三种热交换的方式：热传导、热对流和热辐射。为了研究由于热辐射而发生的能量交换，应当观察一下处于真空中(排除了热对流的可能性)相距一定距离(排

除了热传导的可能性)的两个(或若干个)物体的行为。

实验表明,如果两个或多个物体组成一个封闭系统(即该系统与外界物体之间没有能量交换),则这些物体的温度应趋于一致。系统中每一个物体既是辐射体,同时又是吸收体。物体中的原子和分子无数次地从高能级跃迁到低能级(此时放出相应的光子),或从低能级跃迁到高能级(这时吸收相应的光子)。各种能量的光子,或者换句话说,各种波长的电磁波都可以参加能量的交换。

当然,物体不会吸收投射到它上面的全部能量,有些物体可能更多地让投射过来的射线散射或通过。但是,热平衡迟早是要发生的,这一事实是不会改变的。

热平衡的条件要求吸收的能量与放出的能量比值对所有波长都是相同的。德国物理学家基尔霍夫(1824—1887)在1860年严格地证明了这一定理。对于不同的温度,这一比值可能发生变化;但是只要温度给定,对于各种能量的光子这个比值都是相同的。

这个定理已经相当清楚了,可以说不需要再作证明了。基尔霍夫定理的含义是:在热平衡时,被吸收的具有一定能量的某种光子的数量应等于被辐射的同种光子数。

由此可得到这样一个定则:如果某物体强烈地吸收某种射线,则它也强烈地辐射这种射线。

这个定则可以帮助我们预言热平衡发生的条件。为什么装在镀银瓶子里的水在日光照射下不太热,而装在黑色水壶中的水就很热呢?答案是很清楚的:黑色物体强烈地吸收日

光，被吸收的能量使水的温度升高，在热到一定程度后才出现热平衡。相反，镀银的表面是最好的反射体，物体吸收的能量少，加热只是慢慢地进行，在很低的温度下就出现热平衡。

现在，请您做一下相反的实验。把热水倒入上述两个水壶内，再把两个水壶放在冷却装置中。请问，在哪个壶中的水冷得快呢？回答是：加热快的那个壶中的水冷得也快。吸收能量多的，放出的能量也多。

用带色的陶瓷来做实验，效果会更好。拿一块绿色陶瓷片，就是说，这块陶瓷片能吸收除绿色光以外其余一切颜色的光。我们知道，眼睛所看见的颜色是物体反射或散射出来的光的颜色。现在我们把这块陶瓷片烧到赤热，试问能看到什么颜色呢？这个问题很容易回答：是紫色的，因为紫色和黄-绿色是互为补色(所谓互补色，就是这两种颜色的光混合后将形成白色光)。

“互补色”这一专门术语是牛顿引入光学领域的。当时他利用玻璃棱镜把白光分解成了彩色光带。

灼热体的辐射

大家都知道，把一块金属加热时，开始是发红，以后达到白热。但大量的化学物质在加热时就不是这样，它们或者熔化，或者分解。因此，下面的叙述基本上是对金属而言的。

最值得注意的是所有灼热物体的辐射光谱都大同小异。以下从能级的基本定律看这个问题是很清楚的：物体的辐射

光谱和吸收光谱应当是一致的。金属对整个软辐射光谱区都是不透明的。由此可以得出结论：金属应当辐射各种能量的光子。

也可以换一种说法：在多原子系统中，原子的能级相互交叠成能带，所以就产生了连续光谱。在这样的系统中可以发生任意的能量跃迁。也就是说，在具有任何能量差 E_m-E_n 的能级 m 与能级 n 之间都可以发生跃迁。这意味着可以有任意的辐射频率和吸收频率。图 1.1 示出在某些温度下灼热物体的光谱形状(图中给出的是所谓绝对黑体的理论曲线)。

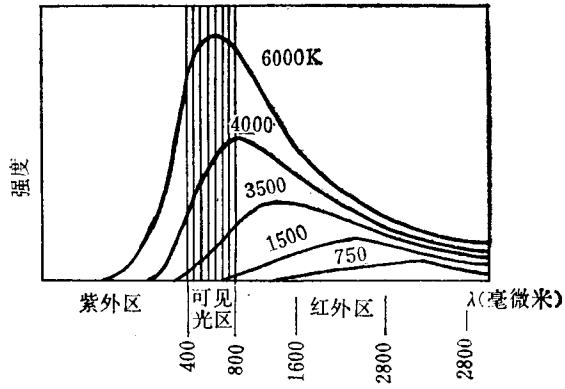


图 1.1

应当指出，这条曲线的形状是普朗克在 1900 年得出的。这是形成量子物理学的第一步。为了使理论与实验相符，普朗克不得不设想光的辐射和吸收是一份一份地发生的。普朗克没有下定决心迈出下一步，即确认光微粒——光子的说法，

这一步是爱因斯坦在 1905 年迈出的。

直到 1913 年玻尔才引入了关于能量量子化的概念。至于具有严密逻辑的热辐射理论，那是到 1926 年才形成的。



M.普朗克（1858—1947）——著名的德国物理学家，他奠定了量子理论基础。他在致力于寻找一种能描述绝对黑体辐射光谱分布的数学公式时指出，只要引入“作用量子”概念，就可以获得这样的公式。普朗克假设物体是一份一份地放射出能量的。这个能量在数值上等于一个常数与光频率的乘积，后来人们把这个常数称为普朗克常数。

我们先来讨论这些曲线形状，然后再谈理论问题。我们首先注意到，随着温度的升高，曲线下所包围的面积很快地增大。这曲线下所包围的面积有什么物理意义呢？画出与上述图形类似的曲线，并假设纵坐标轴表示一定波长的辐射强度。但是，这里的“一定波长”是指 453 毫微米还是指 453.2 毫微米呢？也可能是指 453.257859987654 毫微米呢？希望读者能

明白，这里所说的“一定波长”是指很小的一段波长范围。假设这段波长范围等于 0.01 毫微米。由此应当看到，不是纵坐标有什么物理意义，而是以 0.01 毫微米为底的矩形有物理意义。这个矩形面积等于以波的形式辐射的能量。譬如说，这些波的波长范围是从 453.25 到 453.26 毫微米。把曲线所包围的面积分成许多矩形，再把这些矩形面积相加之后，我们可以得到整个光谱的总强度。这里我所介绍的运算方法在数学中叫做积分。这样我们所画的曲线下面包围的面积便给出了辐射的总强度。原来，这个面积与温度的四次方成正比。

在我们所讨论的图上，可以清楚地看到，随着温度的增高，不仅曲线所包围的面积发生变化，而且曲线的最大值也向左即向紫外区移动。

下列公式给出了与最大强度的辐射（吸收）相对应的微米级波长与开氏温度的关系：

$$\lambda_{最大} = \frac{2886}{T}$$

在最低温度时，最大值处于红外区。因此，红外辐射有时又叫做热辐射。我们拥有对室温甚至低于室温的物体所发射的热辐射感觉非常灵敏的仪器，这是一种非常有利的情况。现代技术能使人们在完全黑暗之中看到物体，有一些动物也具有这种本领。这并没有什么值得奇怪的，因为红外线在原则上说与可见光有同样的性质。

尤其不应当忘记，任何动物都是一个热辐射源。人们常常说：在黑暗中可以“觉察”有人存在，这并不是神秘论。简单

说来，这个能“觉察”出有人存在于黑暗之中的人，便是对热辐射线具有敏锐知觉的人。

我不能不向读者讲述一个很有趣的故事。这个故事是说，在日常生活中那些没有加热的物体也是热辐射源，要重视它们放出的热线。几年前有些人建议我来解释一下一个自称是“魔术师”的人所做的那些实验。据说这个魔术师能够用自己的意志停止马达转动。我的任务是为这些实验做出合理的解释（二十世纪的魔术家喜欢赶时髦，假借科学术语，把这些实验叫做心灵制动术）。

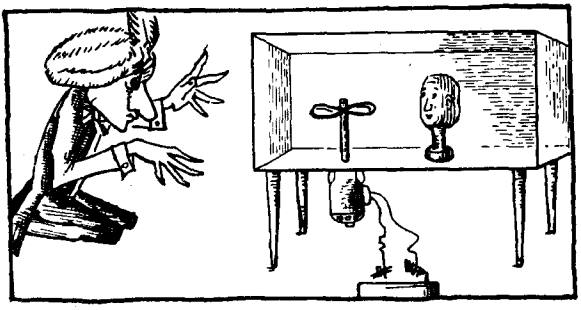


图 1.2

图 1.2 就是这种实验的示意图。一个小翼片系在小马达的轴上旋转。当魔术师坐到装有这个马达轴的机箱附近时，这个小翼片确实停下来了。我很快地对这个实验进行了解释：任何一个人坐在这个带马达的机箱附近时，对这个小翼片都会产生同样的影响。这个小翼片经过 10—15 分钟准会停止转动。正如魔术师所证实的，停下来的不是马达而是小翼片。因此，很清楚，有另外一种力量来阻止马达轴和小翼片间的联接

力，这种力量与靠近机箱的人有关。

我指出了，如果把电灯移近箱子壁时，翼片几乎可以刹那间停止下来。已经很清楚了，问题的实质在于人体所辐射的热。让一股香烟的烟雾通入盒中以后，在盒中便产生空气对流，这对流的方向正好阻碍翼片的旋转。精确的测量表明：箱内靠近人的一端的温度大约比离人较远的另一端的温度高一度。

每个人都可用手掌感觉到被加热到60—70度的物体所发出的红外线。当然，需要消除热对流的影响。被加热的空气向上升起，而你的掌心向上也随之举起时，在这种情况下可以确信，你所感觉到的正是热辐射线。

在结束热辐射这一节之前，我们必须阐明为什么由炭精丝加热的电灯过渡到现代的钨丝的电灯是一个很大的进步。整个问题的实质在于炭精丝可以达到的温度为2100K，而钨丝可达到的温度为2500K。为什么这400度之差这么重要呢？这是因为，加热钨丝的目的不是为了发热，而是为了发光。因此，必须使曲线的最大值正好在可见光区域。在图中可以清楚地看到，如果能有一种承受太阳表面温度6000K的灯丝，那是最理想的情况。然而，只是把温度从2100K提高到2500K就已经可以使进入可见区的能量从0.5%提高到1.6%了。

热辐射理论

如果辐射体和吸收体的系统是封闭的，那么“光子气体”

就应当与给予光子以寿命的原子相平衡，而利用“光子气体”物体可进行能量交换。能量为 $h\nu$ 的光子数目决定于处在能级 E_1 和能级 E_2 上的原子数目。在平衡状态时这个原子数目是不变的。

由于激发和辐射过程同时进行，所以这种平衡具有动力学特点。因为某种原因，或是由于同其它粒子发生了碰撞，或是由于吸收了外来的光子，使原子和原子系统跃迁到高能级上去。在这种激发态上停留一段不固定的时间（大约一秒钟以下），然后返回到低能级。这种过程叫做自发辐射。原子就像在形状复杂的梯子上的小球一样，被风微微吹动就能失去平衡，小球会从梯子的高处掉到低处。若大部分在梯子的低处，再想使小球跳上去，只有用力去打击才行。对于处于最低能级的原子，我们可以说：原子处于稳定状态。

但是，应当记住，除高处和低处的位置以外，当然还存在一种中间状态。也就是说小球可以处于不很低的位置，这时虽然需要用一定的力才可使小球从低处往上跳，但却不需要很大力量去冲击它。小球处的这种位置称为亚稳状态。因此除了激发状态和稳定状态外，还存在第三种能级状态——亚稳态。

这样，可以从两方面发生跃迁。一会儿这个原子，一会儿那个原子将跳到高能级上去。经过一瞬间这些原子又跳回低能级，同时放射出光来。而与此同时，另外的原子获得能量跳到高能级上。

能量守恒定律要求从高能级跃迁到低能级的原子数等于

从低能级跃迁到高能级上的原子数。用什么来确定跃迁到高能级上的原子数呢？用两种因素来确定：第一，用处于低能级上的原子数来确定；第二，用使原子升到高能级上的冲击次数来确定。那么又怎样来确定跃迁到低能级上去的原子数呢？这当然要用处于高能级上的原子数来确定，好像与其它因素没有多大关系。理论物理学家开始时正是这样来奠定理论基础的，但是结果是不能自圆其说的。跃迁到高能级的原子数与两个因素有关。随着温度升高向高能级跃迁的原子数比向低能级跃迁的原子数增加得快，这样说来跃迁的原子数只与一个因素有关，结果是所有的原子早晚都跳到高能级上去，原子体系将处于不稳定状态，辐射将要停止，原来好像很清楚的模型变成不合理的了。

在1926年爱因斯坦从自己前辈学者的讨论中探寻出这个不可能的结论。看来，还有一种情况对原子从高能级跳到低能级会产生影响的。所以只得假定，除了向低能级的自发跃迁外，还存在着受激跃迁。

受激辐射是什么意思呢？是这样的，系统处于高能级上，与低能级之间的能量差为 $E_2 - E_1 = h\nu$。如果有一个能量等于 $h\nu$ 的光子入射到系统上，则这个光子迫使系统跃迁到低能级上去。这时入射光子本身并没有被吸收，而和它所产生的新的完全相同的光子一起继续前进。

在这种讨论中不需探索逻辑是否合理，因为这是黎明的曙光，是科学上的猜测……其正确性要由实验来证实。利用受激辐射的假设可成功地推导出定量公式，该公式对加热体

的辐射给出了随波长变化的函数图解。理论与实验很好地吻合，这就证实了所做的假说是正确的。

很有趣的是，许多年之后，激光诞生了，这为受激辐射的存在做出了实验结论。

光　　谱

一般说来，任何物体都是软电磁辐射源。利用摄谱仪——主要组成部分是棱镜和衍射光栅——把光分解成光谱。光谱分连续光谱，带光谱和线光谱。被烧得炽热的固体的光谱彼此很相似。只有少量的物质才能加热到发光的程度。当然，液体加热到发光程度更是罕见的。气体光谱具有很大的信息量。从遥远星体上传来的光束的光谱就是这种具有大信息量的光谱。处于气体状态的星体物质以光束的形式传到地面上来，这对研究宇宙结构是最重要的资料。

在地球上不难产生原子光谱。原子受激发光是采用使电流通过气体的方法，或者用加热气体的方法。应当看到，用这样的方法只能研究原子光谱，而不能用来研究分子光谱。因为在气体开始发光之前，分子就分解成原子了。因此，如果研究工作者对液体或固体发生兴趣，那么就可以研究吸收光谱。归根结底，一张光谱图还是决定于能级系统。从高能级向低能级的跃迁，或从低能级向高能级的跃迁，都能获得相同的数据。

那些独立而清楚的线条所组成的光谱只能从气体或被稀

释的溶液那里去获得。在这套书第二册中谈到了被溶解的分子性能，这些性能在很多方面与气体相似。这个结论在光谱学上也是正确的。可惜的是溶剂对光谱特性能产生影响。对溶解于不同溶剂中的分子光谱形状进行比较，就可以看到这种影响。因此，在实验中"产生"了被溶解分子的"指纹术"。

获得了特征光谱还不意味着确立了分子的能级系统。然而，对于许多实用目的也不要求这一点。把某族化学物质光谱数据(即谱线及其强度表或强度与频率关系的特性曲线)收集在一个图册中。拍摄一种未知物质的光谱，并且把这个实验光谱与图册中的光谱进行比较，我们就完全像根据指纹来确定罪犯一样来确定这是什么样的物质了。

最近以来，光谱分析遇上了辐射波谱学这个对手。在灵敏度方面辐射波谱学方法暂时(很清楚，这个"暂时"是不会很久的)还不如光谱分析方法。但是在一次就能对大量物质中的杂质进行定性和定量分析方面超过了光谱分析的方法。

我们的任务不是介绍物质的具体光谱，而是向读者介绍氢原子的能级图和自由分子的能级原理图。

图 1.3 表示氢原子的能级系统。请读者注意，随着离零点距离的增加，能级特性曲线也越来越密集。

顺便说说，不应当认为图中所表示的零点是"真正的"零点。不言而喻，未激发的氢原子也具有一定的能量。但是，由于在光谱中显示出的是能级差，所以读数从低点算起更方便。由于得到一种"冲击力"原子可以从一层跳到任意一层上去，但原子在这种不平衡状态中不会保持很久，接着采用两种可

能的方法(自发辐射或受激辐射)中的任意一种方法使原子跃到低能级上。

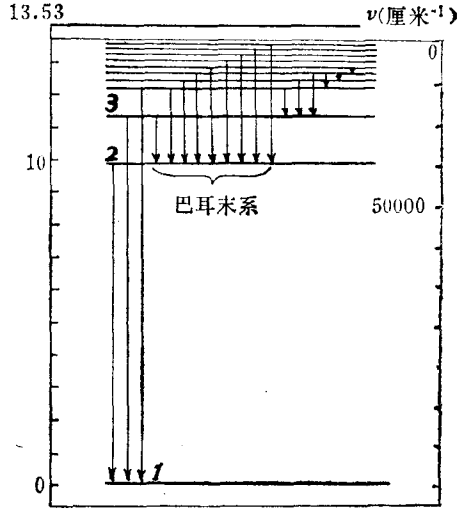


图 1.3

把所得到的光谱适当地分成许多光谱"系"。每个光谱系都隶属于自己的低能级。图中所看到的部分叫做巴耳末系。对这个光谱系的解释是玻尔的原子结构理论的第一次胜利。

不是所有的能级跃迁都具有相同的几率。跃迁的几率越高,对应的谱线越强。也有禁戒跃迁的情况。

在1926年薛定谔确定了著名的量子力学方程。理论物理学以此方程详尽地解释了氢原子的光谱。这是一个很大的创造。

外场对原子光谱可以产生很大影响。在电场作用下(斯

塔克效应)和磁场作用下(塞曼效应)光谱线被分成几部分。我们不来解释这些有趣的现象。我们仅谈一下，只有在高德斯密斯和乌伦贝克提出电子具有自旋的理论之后，对上述效应中的一些问题才解释清楚了。关于在实验中直接发现电子自旋问题已在本书第三册中叙述过了。



H. 玻尔 (1885—1962)——著名的丹麦物理学家。他建立了第一个原子的量子模型，并揭示了能量量子化规律。他积极地投身于创立量子力学原理的研究工作。指出了描述宏观物体行为的那些概念对微观世界原则上说是不适用的。玻尔对原子核结构的理论做出过很大贡献。

最后谈谈能级图问题。我们看到能级趋近的极限是用数字13.53表示。这个数字说明什么呢？它表示的是电离电压。如果把电子电荷乘以这个电压值(取瓦特为单位)，我们便得到使电子脱离原子核所需要做功的值。换句话说，也就是使氢原子破坏所需要花费的功。

由于电子跃迁的结果便产生了原子光谱。我们一从原子谈到分子，马上就需要考虑还有两个能量分量。分子能够旋转，分子的原子可以彼此相对地产生振动。所有这些能量形式也是量子化的。它们只能有一定的离散值。因此，分子能态可以用它的电子层态(电子能级)、振动态(振动能级)和旋转态(旋

转能级)来描述。我们可以把这三种形式的数据采用楼房号、楼层号和房间号来表示。

这里的楼层号和房间号起什么作用呢？什么样的能级被

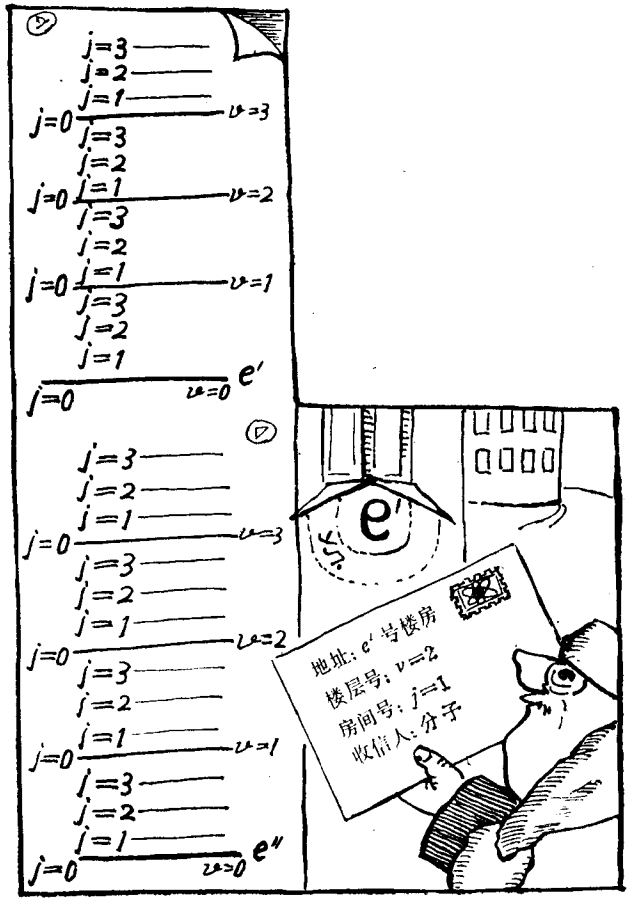


图 1.4

大的间隔分开，什么样的能级被小的间隔分开呢？在图1.4上回答了这些问题。图上表示两个电子能级 e' 和 e''（楼房号）。楼层表示振动能级，用字母 v 表示。房间号表示旋转能级，用字母 j 表示。当然，在房屋管理中是不采用这种号码的。我们知道，房间号采用的是连续号码，而我们用房间号码来描述分子光谱时，每层的楼层号和房间号都是从零开始的。从图中可以看到，旋转能级之间的间隔最小，而电子能级（e' 和 e''）之间的差最大。

假设，一个分子的电子能级处于100、200，300……能量单位；那么处于第二电子能级、第一振动能级和第三旋转能级的分子将具有的能量为213能量单位。

因此，分子的能量可以用下列形式表示：

$$W = W_{电子} + W_{振动} + W_{旋转}$$

被辐射的光或被吸收的光的频率总是与两个能级差（用 Δ 符号表示）相对应，即：

$$\nu = \frac{1}{h}(\Delta W_{电子} + \Delta W_{振动} + \Delta W_{旋转})$$

曾想把那些在跃迁时只有“一份”能量发生变化的跃迁分出来，但实际上只有对旋转跃迁这才是可能的，其原因是很容易理解的。

现在我们从最大波长，即一小份能量 $h\nu$ 开始来研究一组分子对电磁波的吸收。当能量量子值在两个最相近的能级之间的间隔内没有达到相等之前，分子不进行吸收。逐渐提高频率我们将获得使分子从一个旋转能级到另一个旋转能级的

量子。正如实验所指出的，这种情况发生在微波波段(无线电波段边缘)，或者，换句话说，发生在光谱的远红外区域。数量级为 0.1—1 毫米的波长将被分子所吸收。产生纯旋转光谱。

如果辐射具有能使分子从一个振动能级跃迁到另一个振动能级的能量量子，当它作用到物质上时，将产生一些新的现象。但是，任何时候我们也不能获得纯振动光谱(就是说，在这种跃迁中还保存着旋转能级)。恰恰相反，从一个振动能级向另一个振动能级的跃迁还将激发各种旋转能级。譬如说，从零振动能级(最低能级)向第一振动能级的跃迁，可能包括从第三旋转能级向第二旋转能级的跃迁，或者从第二旋转能级向第一旋转能级的跃迁等等。因此，便产生了振动-旋转光谱。在红外光(3—50 微米)中，我们将观察到这种光谱。从一个振动能级向另一个振动能级的所有跃迁在能量方面的区别都很小，并在光谱中给出一组相离很近的谱线。在分辨率很小时，这些线就汇集成一条谱带。每条谱带都对应着一定的振动跃迁。

现在我们进入一个新的光谱区——可见光谱区，此时量子能量对于分子从一个电子能级跃迁到另一个电子能级是足够用的了。当然，在这里无论是纯电子跃迁还是电子-振动跃迁都是不可能的。这时出现了一些很复杂的跃迁。在这些跃迁中，能量的跃迁引起了“楼房号”、“楼层号”和“房间号”的变化。由于振动-旋转跃迁乃是一条光谱带，因此可见光谱实际上是连续的。

原子和分子的特征光谱在确定物质的结构和化学成分

时，很多年来一直在起着、至今仍然在起着巨大的作用。仅仅在不久之前，光谱领域中才发生了革命性的变化。

激　　光

本世纪的前三十年理论物理学家做出了重大贡献。在这些年代里揭示了许多最重要的自然规律，如高速下的力学规律、原子核结构理论、量子力学定律。这以后的四十年在理论应用于实际方面获得了非凡的成就。在这些年代，人类从原子核中获得了能量；制成了晶体三极管，从而引起了无线电技术革命并研制出了电子计算机；掌握了激光技术。这三大应用技术实质上导致了科学技术的革命。

在本节中我们来谈谈激光。想要用传统的方法产生方向性很强的光束是不可能的。集中到很窄范围内的一束很强的光在不远的距离上就散射和损失了自己的能量。只有在 A. 托尔斯泰的科学幻想小说中，主人公想到一种“双曲面”，利用这种“双曲面”可以产生一束能烧毁物体、切开物体的光束。这束光可以把巨大能量传到远方。当然可以制造出这样的能产生平行光束的凹面镜。为达到这个目的需在反射镜的焦点上放一个点光源。但是点光源乃是数学上的抽象概念。假设放置的不是点光源，而是一个普通的不大的光源。这样，即使把这发光的小球加热到 6000 度（没有任何金属能承受比这再高的温度了），我们能获得到的光束强度仍然是微不足道的。当光源的尺寸一增加，平行光束马上就变成了扇形光，于是聚光

镜聚起的光束的强度随着距离增加就很快地减弱了。

因此，在建立强光束的征途中的第一个障碍是原子向各个方向辐射出光。这是第一个障碍，但不是最后的障碍。原子和分子进行辐射时各行其事，就是说，在辐射时它们互相之间是没有约定的。因此从不同原子辐射出的光，在向前传播的过程中是不协调的。通俗地说，它们各走各的路，谁也不等谁。这就导致不同原子的辐射位相不同，而有时不同原子的辐射常常互相抵消。我们还记得，一个波的波峰和另一个波的波谷相遇时就会产生上述现象。

激光出现之后，所有这些障碍都被克服了。“激光”，英文名称为“LASER”，它是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写，意思是利用受激辐射的光放大。

这种受激辐射的理论思想是由许多因素组成的。首先，我们记得除自发辐射外还有一种受激辐射。正如前面所述，当光子与被激发的原子相遇就产生这种辐射。如果被激发的原子能量精确地等于光子的能量，这时光子就迫使原子发光，原子跃迁到更低的能级并放出光子。受激辐射的显著特性是它所发出的光子和使之产生受激辐射的光子相同。不仅在能量方面相同，而且在前进的途中位相也相同，方向也相同。

产生这种理论思想的第二个因素是，如果把进行着辐射的原子系统封闭在一根管中，管的两底面互相有一定距离。使我们感兴趣的是这两个底面（两面反射镜）中的那些光子。这样，由于光子往返地运动，在这管中便逐渐积累起大量的光子。这些光子都是由相同的受激原子所产生的。

产生这种理论思想的第三个因素是，使许多原子在激发状态保持更长的时间。在这种“泵浦”之后，再迫使全部原子同时发光。这种思想（即增加一个光子而获得几十亿个性质相同的光子）的实现，可获得强度空前大的光束。因为这样的光束向四周杂散的量很微小，所以在这束光的横截面上集中了很大的能量。

怎样才能获得这样的光束呢？几十年一直没有人能解决这个问题。但早在三十年代法布里就曾对这个问题提出过重要见解。后来，诺贝尔奖金获得者，苏联学者布洛霍洛夫和巴索夫以及美国物理学家汤斯经过卓有成效的努力导致了激光的产生。

假设，一个系统具有两个能级。大多数原子或分子处于低能级。热冲击作用可以在很短时间内把分子迁移到高能级上去。但是在这样的位置上分子不会保持很久不辐射发光。在这时绝大多数的原子都自发地跃迁到低能级上去。当然，被激发的一些原子把某些被辐射的光子迁移到低能级上，并产生许多受激辐射光子。但是这种过程是很少见的，因为被激发的粒子很少（粒子基本上都处于低能级），而且自发跃迁的几率远大于受激辐射的几率。

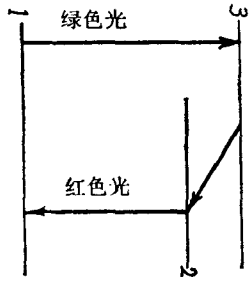


图 1.5

假设，我们找到了一种物质，这种物质的原子具有三个能级。在图1.5上用数字1、2、3来表示这三个能级。能级1—3的距离与

绿色光的频率相对应，能级1—2的距离与红色光的频率相对应。假设由能级3向能级2的跃迁几率比从能级2到能级1的跃迁几率大1000倍。我们用绿色光来辐照这物质。这时原子跳到第三能级，然后通过自发跃迁跳到第二能级并停留在这个能级上。这种跃迁叫做无辐射跃迁。分离出的能量迁移到原子的振动能级上。按着我们的想象继续下去，就可把大多数原子迁移到能级2上去。我们实现了粒子数反转，即"非正常的"粒子数分布。高能级2上的粒子数反而比低能级1上的粒子数密集了。当只有一种热运动在过程中发生作用时，这种现象是不可能出现的。

从能级2向更低的能级1的跃迁总是要发生的。相应的光子在迁移的途中将会遇到处于激发能级2上的其它原子。这样的相遇不会引起吸收，而会产生新的光子。受激辐射所产生的光子将和从能级2向能级1跃迁中最初偶然产生的同样的光子汇合在一起。

从能级2向能级1的跃迁中会产生光子流。所有这些光子十分精确的一致，并建立起巨大强度的光束。

研究工作者成功地实现了上述过程，他们的名字永垂青史。历史上第一台激光器是红宝石激光器，在图上所指出的能级图正是带有铬杂质的红宝石的能级图。

为了产生激光，必须有一个激发光源，这种光源就是激光器的"泵浦"。就是说，利用这样的泵浦可以把原子激发到高能级上去。

如果用固体做激光工作物质，就需要把这固体做成圆柱

形。这圆柱的两底面起着反射镜的作用。如果用液体或气体做激光工作物质，就要在装液体或气体的管的两端装上反射镜。调正反射镜的测微装置，并以此来确定圆柱管的长度。当圆柱管的长度可容纳下光子波长的整数倍时，这样的光子在管中才处于较好的条件，所有的波才能叠加起来。

能产生一束方向性很强的光这是激光的一个基本特点。实际上激光束可以有任意的横截面。在技术上实现这一点的方法是迫使一束激光沿着很细很长的玻璃毛细管传播。和毛细管成一定角度传播的光子，在前进过程中是不参加产生新光子的行为的。谐振腔只产生向一个方向行进的光子(但是，进行原子泵浦时，在激光器工作的这段时间内，反射镜所反射的光子，一会儿向这个方向，一会儿向另外一个方向)。在有些情况下，如果对 1 度左右的发散角不能满意时，就需要在光线向外发射的光程中再放一个辅助的透镜。

建立大功率激光装置这在工程技术上是相当复杂的。在圆柱形谐振腔中建立起最初级脉冲，然后可以把这个脉冲送到一系列放大器上去放大。这些放大器的工作原理与初级圆柱形谐振腔的工作原理相同，但是泵浦却与这初级谐振腔无关。我们这里不来讨论这些细节问题。使我们感兴趣的是激光的泵浦和产生的物理原理。激光的泵浦和产生可以用不同的方法来实现。正如 1.6—1.8 的激光作用原理图上所指出的，今天，可以用这些原理获得最大功率激光。

图 1.6 上表示的是钕激光器的原理图。钕激光器的叫法可能是错误的。因为激光工作物质不是金属钕，而是掺有钕

杂质的普通玻璃。钕原子的离子无规则地分布在硅原子和氧原子之间。泵浦是利用闪光灯进行的。闪光灯给出了波长范围为 0.5—0.9 微米的辐射，便产生了处于激发态的一条宽带。假设在图中用五条短线来表示这条宽带。原子完成无辐射跃迁而跳到高的激光能级上去（在本图和其它两个图中都是用数字 2 来表示这一能级的）。每次跃迁都给出不同的能量，这种能量又转变成整个原子"晶格"的振动能。

向空的低能级 1 跃迁时产生的激光的波长为 1.06 微米。

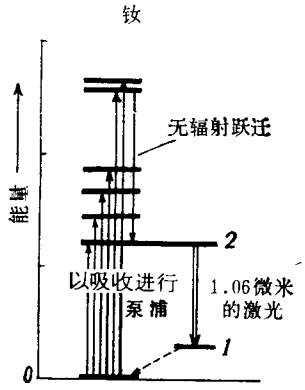


图 1.6

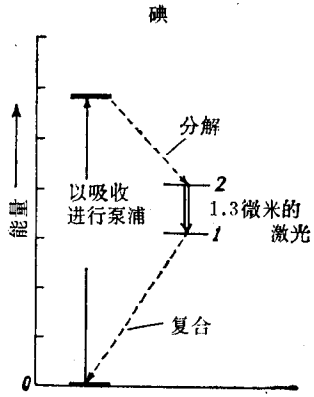


图 1.7

用虚线表示从能级 1 向"不工作的"能级的跃迁。这时以非相干辐射的形式释放出能量。

用钕激光器可以获得神奇般的大功率，其值等于 10^{12} 瓦特。它的能量是以脉冲形式发射出来的，脉冲宽度为 0.1 毫微秒。

利用激发态的碘原子的跃迁而产生的激光是激光领域中新的竞争者（图 1.7）。气体 C_3F_7I 是这种激光的的工作物质。这种激光器仍然使用闪光灯进行泵浦，但是物理过程和前者完全不同。可以利用波长为 0.25 微米的紫外光来进行泵浦。在这种紫外光作用下，分子发生分解。奇妙的是从分子中分离出来的碘原子处于激发状态。从图中您可以看得出来，这完全是另一种达到粒子数反转的方法。从能级 2 到能级 1 的工作跃迁，可以产生一束波长为 1.3 微米的激光，在此之后，碘原子和剩余的分子又重新结合起来。

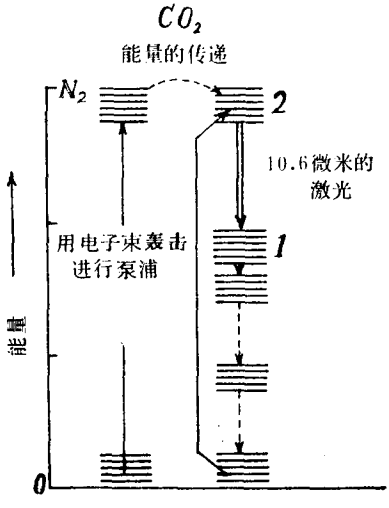


图 1.8

读者大概听说过，氮-氖激光器是较普通的激光器。利用这种激光器可以获得波长为 1.13 微米的相当强的红外光。但这种激光器在功率方面却不够理想。因此，我们在这里来研究一种利用氮和二氧化碳的混合物做工作物质的激光能级原理图（图 1.8）。

在对这个原理图进行描述之前，我们需要回答一个很自然地提出来的问题，为什么要使用气体混合物做工作物质呢？回答是这样的：一些原子和分子的激发比较简单，另外一些原子和分子比较容易发光。因此以混合物做工作物

质的激光器中，基本上是把一种粒子的能量泵浦上去，通过这些粒子的碰撞把能量传递给其它的原子或分子，这些获得能量的原子或分子便产生了激光。利用两种以上的气体作为工作物质的激光器目前很是流行。例如：在氮分子和二氧化碳起主要作用的激光器中，除了这两种物质之外，还适当地补充一些其它气体，包括补充一些氦气进去。

对二氧化碳激光器进行泵浦的方法与上述两种方法不同。把气体混合物通入气体放电管中，为了使系统达到等离子态，需把电压加到足够高的程度。高速运动的电子激励起氮分子的振动。在图 1.8 中表示出了这个分子向高能级上的跃迁。这与加到电极上的电压是有关系的。能量约为 2 电子伏对激发氮分子最适宜。

氮分子只起着一种媒介作用，它本身不进行辐射，而只是把从电子上获得的能量迁移给 CO_2 的分子，并使 CO_2 分子跃迁到高的激光能级上去。

CO_2 分子的第三层楼的一些“房间”就是高激光能级 2。在高激光能级上气体分子的寿命约为 0.001 秒。这个时间就不算短了，因为分子有很大的希望与具有适当能量的光子相遇，这个光子将迫使分子迁移到低能级上去。

应该注意，在“房间之间”的跃迁比“楼层之间”的跃迁要多得多。在旋转能级上的寿命用千万分之几秒来度量。这样就使我们可以认为每层楼上的各个房间中的粒子处于稳定状态。因此，利用以前谈过的技术装置，把两个反射镜调到适当距离，就可完成任意一种跃迁。例如：可以把粒子从第三层

的第六号房间迁移到第二层的第五号房间去。

激光器的设计师应当对各个能级上原子存在的寿命以及跃迁的几率具有全面的知识。这样就可以选择出某种气体混合物所发出的最适当的激光。二氧化碳激光器一般可以产生波长为 10.5915 微米的激光。为了使激光器很好地工作，就不能使分子留在低的激光能级上。可以这样讲，使分子在低能级上完成自己的使命，就离开低能级，而让位给其它分子。当气体压强为 1 毫米水银柱时，二氧化碳分子在一秒内就要受到 100 次互相碰撞。这种碰撞的结果使得能级解放出来。当有氮气和水存在时，这种碰撞次数就分别为 4000 和 100000，这种差别是非常大的。

向二氧化碳气体中加入适当的其它物质，对激光器的功率就可以产生极大的影响。专家们认为这种激光器应当获得金质奖章。

二氧化碳激光器在常态下可以聚焦的光斑面积为 0.001 厘米^2，其强度为 1000 千瓦/厘米^2。当在脉宽为 1 毫微秒的脉冲状态下，激光光斑上的光强可达到 10^6 千瓦/厘米^2。

寻找一种适合的材料用于激光器这也是一种艺术。需要有一个直观感觉好、想象丰富、记忆强的头脑，才能创造一种很好的激光器。消费者有可能定购各种波长的激光器。要求波段覆盖从几十微米到几百微米。

激光的光强特别强，相干性特别好的特点在许多技术领域中引起了革命。最近十年来激光器的生产已成了很重要的工业部门。激光器做为一种光振荡器应用，不仅能传递能量，

而且还能传递信息。应用激光产生热核反应的研究正在大大地加强。激光刀可用来进行非常精细的外科手术。激光也可用于分离同位素。在进一步叙述中我们还要谈到激光的一些应用。

荧　　光

热辐射是所有物体的普适性质。从绝对零度开始，在任意温度下物体都可进行热辐射。热辐射谱线是连续的，用曲线表示。这种曲线的特性我们已经讨论过了。当然，所画的曲线是表示黑体行为的，而黑体的行为与带色物体的行为基本相同。只有一点区别，那就是带色物体的曲线可以发生畸变。但是在温度增高时辐射的能量普遍增加，并且最大值向左发生位移(如果横坐标表示波长)。这些都是普遍的规律。

任意辐射都是由从较高的能级向较低的能级的跃迁时形成的。原子或分子的激发原因可能是各种各样的。在热辐射的情况下，它是物质的粒子由于热运动所获得到的冲击引起的。

但是，这并不是迫使物体发射光波的唯一原因。我们要描述的荧光现象具有另外的本性。这些现象与物体的温度升高有关，而主要靠分子的激发过程。粒子激发的原因可能是由于与光子束或电子束的碰撞、机械的冲击、摩擦等等所造成的。

实际上所有的物质都可发出荧光。但是只有荧光物质发

光最强并具有实际价值。

利用荧光粉可以作为电视和示波器屏幕的涂料。荧光粉涂料在电子束激励下就可以发光。在紫外线的作用下，物质可以强烈地发出荧光。在任何情况下，入射光子的能量都应当大于辐射出的光子的能量。因此，入射的能量量子可能处于光谱的不可见区，而被辐射的能量量子则处于光谱的可见区。

如果物质被紫外线辐照时，含有十亿分之几荧光杂质的物质就可发出荧光。因此，有时荧光分析可作为化学分析的一种手段。利用荧光分析可以发现无用杂质的痕迹。

日光灯管壁也是用荧光粉涂敷的。

荧光和磷光这两种发光形式是有区别的。荧光是原子或分子在激发态上不经过延迟就发出的光。相反地，磷光是原子或分子在激发态上经过很长的延迟时间才发出来的光。如果在激发时，系统跃迁到亚稳态上，而从亚稳态向低能态的跃迁几率很小，这就发生了磷光。一般说来，在分子开始吸收能量以后便进行辐射，并且跳到高能级上去，以后便进行发光，同时跃迁到低能级上，而在亚稳态上不停留。

下面谈谈电致发光。这是发生在某些半导体二极管的p-n结上的。这种有趣现象是很有实际意义的，因为可以利用这种现象来制造半导体激光器，半导体的电子和空穴可以与光子的辐射复合，这是制造半导体激光器的基础。

为了使这样的跃迁连续地发生，需要使电流经过半导体二极管。我们的任务就是要找到一种满足某些要求的适宜的

材料。假如能做到的话，那就首先让电流通过，以使电子“注入”到 P 型半导体中，即注入到包含很多空穴的半导体中。或者说把空穴泵浦到 n 型半导体晶体中。以上所说的是必须的条件。但其它的因素，例如从高能级向低能级的跃迁速度也可以起决定性作用。当遇到所有因素都有利于电子从高能级向低能级的跃迁时，便产生电致发光。

半导体砷化镓是产生电致发光的最好的材料。这种材料能形成大量的光子。这些光子是沿着 p-n 结分布的。二极管的两部分与 p-n 结互相垂直。这两部分是被抛光的，可以起谐振腔作用。在空穴和电子复合时形成的光子位相相同。当电流足够大时，光辐射将变成受激辐射，并因此得到在辐射锐度、方向性和偏振方面的相应后果。

从紫外波段到远红外波段的半导体激光器最广泛地应用于各个领域。

第二章　光学仪器

棱　　镜

在实验室和工业上所应用的大量仪器正在迅速地变化着。研究工作者因为某种原因停了二十年科学活动之后，又恢复了自己的工作，并且不得不学习新东西。但是无论在现在还是在遥远的将来，都会经常地遇到自己的老相识——棱镜和透镜。因此应当使读者注意到，光线与由透明材料制做的棱镜和透镜相遇时所遵守一定的简单规律，当然透明性这个概念也是相对的。对于一些电磁波来说树木和混凝土也可变成透明的。

在光的波动概念出现之前，光线与能反射和折射光的物体相遇时所遵守的规律是很简单的。这就是我们知道的反射定律(入射角等于反射角)和折射定律。

众所周知，投射到两个介质界面上的光线偏离开原来直线前进的方向。入射角 i 和折射角 γ 遵守下列关系式：

$$n = \frac{\sin i}{\sin \gamma}$$

这个定律是莱顿大学教授斯涅里乌斯(1591—1626)通过很细致的测量而确定的。当时在欧洲的一部分学者都很清楚

斯涅里乌斯所讲授的关于光线与透明介质相遇时所产生的现象。

大概由于上述原因，与笛卡尔同时代的人，便以一种嘲弄的态度来引用笛卡尔(1596—1650)的文章。笛卡尔曾在 1637 年发表过题为“关于寻找真理的理性方向方法之讨论”的著作。在这本著作中以使人们感到好像奇怪的讨论“证明了”折射定律。笛卡尔这篇题目十分模糊的著作绝对没有引起他的同事们的赞成。但是，笛卡尔却在自己的讨论中推导出一个正确的公式。而当时的学者们却简单地认为，在笛卡尔的讨论之前，人们早就知道这个结果了。因此，笛卡尔不得不忍受了抄袭的罪名。

大概可以把笛卡尔同时代的人的怀疑态度和这篇著作联系起来。笛卡尔描述了一个投射到一张很松的网子上的小球。这小球把网子冲破并使自己的速度损失一半。笛卡尔写到：当时小球的运动方向与预定的方向完全不同。理解这个道理是很困难的。可能笛卡尔想要用这句话说明小球运动的水平分速度是不变的。由于在垂直方向上网子阻碍小球的运动，所以小球运动的垂直分速度是变化的。

现在我们回过头来谈谈折射定律。

入射线和法线组成的入射角 i，折射线和法线组成的折射角 r 表示在图 2.1 上。数值 n 称为折射率，它与我们所讨论的介质有关。为了比较物体的光学性质，我们把光线从空气(或者从真空中)向介质入射时的折射率排成一个表。在这种情况下，折射角总是小于入射角。也就是折射率大于 1。

一般说来，折射率总是随着介质密度的增加而增大。例如：金刚石的折射率为 2.4，而冰的折射率为 1.3。

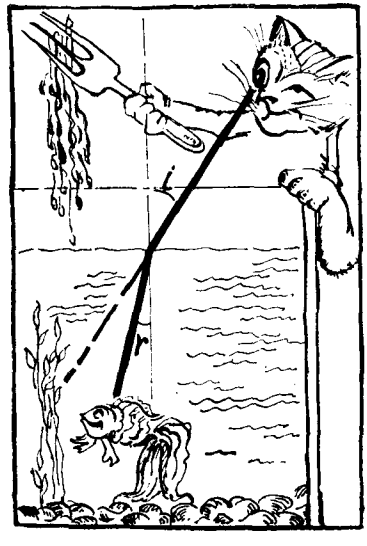


图 2.1

我不去过多地讨论折射率表。假如我必须这样做的话，那我就应当指出，只要引用光波波长的数据就够了，这是因为折射率取决于波长的缘故。这种重要现象叫做色散。色散现象是许多把电磁辐射分解成光谱的仪器的基础。

如果光线从光密物质入射到光疏物质，就可能产生全内反射。在这种情况下折射率小于 1。随着入射角的增加，折射角越来越接近90°。当满足下列条件：

$$\sin r = 1, \qquad \sin i = n$$

时，光线停止进入第二种介质，而从界面上全部反射回来。水的全内反射角等于 49°。

在使光线自身平行之后，为使光线“偏移”可以利用平面平板使光线发生折射，利用棱镜可以使光线改变方向。

如果读者要想回忆起推导光线偏转角 D 的公式，那就去参阅中学物理课本，便可以找到这个公式的推导方法。这个推导只要求有一般的几何知识，但推导起来是很费时间的。特

别是对于很厚的棱镜和光线与棱镜相遇的角度有任意值时，推导这个公式就更繁琐。如果是薄棱镜，光线在棱镜镜面的入射角对直进方向偏离不太大时，便可以得到如下的简单公式：

$$D = (n - 1)P$$

这里 P 是棱镜两镜面之间的夹角。

在十七世纪末，伟大的牛顿利用棱镜首次证实了白光不是单色光，而是由各种颜色光组成的。紫光偏折的最大，红光偏折的最小。正因为如此，所以紫外光又称“超紫光”，红外光又可称做“低红光”。

全世界的科学界在 1672 年都得知了牛顿的这个发现。牛顿对自己实验的描述是非常清楚和精确的，从这里可以看出牛顿的天才。人们在传说着牛顿的这一伟大成果。只有不停留于人们的恭维之中，才能百尺竿头更进一步。尽管牛顿想要尽力描述这些现象，但是牛顿的“九度高音般的假说”并没有建立起来，他的诺言没有完成。牛顿的很多观点和定义，如：“光线是光的极小的一部分”，这种罕见的说法，现代人听起来是感到很奇怪的。

目前在化学分析中应用的光谱仪，牛顿棱镜是其主要组成部分。制做棱镜的材料应当具有很好的色散特性。光谱仪上的棱镜是由石英、萤石、岩盐制做的。被研究的光线透过输入透镜主焦平面上的狭缝，因此入射到棱镜上的是平行光束。不同频率的光子在不同方向上传播。第二个输出透镜把相同的光子集中到焦平面的同一点上。如果需要用眼睛来观察光

谱，就要放一块毛玻璃。也可以进行光谱摄影。

现在，是利用自动记录器来记录光谱。能量接受器——光电元件或热电元件沿着光谱滑动，这种光电元件或热电元件给出电流，电流强度与光的强度成正比。这个电流迫使记录装置的可动部分偏转，其偏转的精度就像电流计的指针一样精确。偏转部分要装上一支笔尖，这个笔尖在一卷匀速展开的纸上描写出光谱来。

透　　镜

制造透镜的工业部门是很大的。由两个球面或一个球面和一个平面组成的透明物体可以有各种尺寸。在一些仪器中常使用十戈比硬币那样大小的透镜。在大的望远镜中透镜的直径可能等于几米。制造大透镜这是一项很复杂的工艺。一个很好的透镜应当是非常均匀的。

当然，每个读者手里都可以拿到一个透镜，并且了解其基本特性。透镜可以使物体放大，也可以使光线聚焦。在太阳光下利用透镜可以把一块纸烧着。透镜把光线“聚焦”成一点，这一点叫做透镜的焦点。

透镜可以把平行光线会聚成一点。相反地，如果把点光源放在透镜的焦点上，也可以利用透镜产生平行光线。用折射定律和普通的几何光学便可证明这一点。

如果点光源不是处在焦点上，而是在距透镜中心一定距离 a 处，则从点光源发射出来的光线被透镜聚焦在距透镜中

心一定距离 a' 处。这两个距离由下列著名的公式联系起来。即：

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{f}$$

这里的 f 是透镜的焦距。

不难证明，放在透镜两倍焦距外的物体上发出的光，在透镜另一侧的焦点和两倍焦距之间产生一个缩小 a'/a 倍的倒像。

如果把物体放在像所在的位置上，则像将产生在物体原来所在的位置上。这就是所谓的光程可逆原理。

当利用透镜做放大镜时，物体要放在透镜和它的焦点之间。在这种情况下不产生倒像，并且像和物体处于透镜的同侧。

在放大镜成像和前面所谈的透镜成像的两个例子之间是有区别的。放大镜成的像是虚像，而上述例子中透镜所成的像，我们可在屏幕上看到，或者也可以把这种像拍摄下来。这种像是倒立的实像。

放大镜的焦距越小，放大的倍数越大。放大镜放大的倍数是有限的，在放大镜下所能看到的虚像比不用放大镜直接观察物体时最多不过放大 20—30 倍。

假设透镜不是有很多不可避免的缺陷的话，很多光学仪器就可以非常简单了，而且可以由相同的透镜组成。我们想用透镜把白光的平行光线会聚成一点，但是色散现象会阻碍我们这样去做。要知道不同颜色的光子在透镜作用下向不同

的方向偏转，结果我们获得的不是一个点，而是沿透镜的轴延伸的彩色的光线，这就是色散像差。

另一个障碍是球面像差。近轴光线比远轴光线聚焦在更远的点上。

按大的角度和小的角度投射到透镜表面上的光表现是不同的，因此，得到的不是一个点，而是离开正常位置向一端偏移的光斑。光波尾部离开光斑向后拖长。这种效应叫做彗形像差。“彗形”一词是从希腊文翻译过来的。意思好像是“披头散发”的样子。



图 2.2

一个透镜所产生的畸变现象还远不止这些。在通过透镜观察正方形时，我们看到的是四个角顶被向内“压塌”进的弧线连接起来的四角形。这是因为从正方形的顶点和其各边中点发射出来的光线以不同方式折射的结果。

散像现象这一缺陷是光学仪器设计师最伤脑筋的事。如果一个点处于离透镜主光轴比较远的地方，则这个点的像分成两个互相垂直的带，并且向理想的像位的相反方向发生位移。

还有其它一些畸变。透镜生产方面的专家通常把所有的

畸变简化成七种基本形式。我们只提到其中的五种畸变形式。

在技术上常常遇到这样情况，为制做一个好的透镜，我们应当采取某种"折衷的"办法。完全清楚，随着透镜尺寸的增加，畸变也将增大。但是在另一方面，像的照度(即入射到单位面积上的可见光的光子数)与透镜的直径平方成正比(即与透镜的面积成正比)。然而，这还不是全部情况。假设在透镜中成像的物体离透镜比较远，这时像成在透镜的焦点上。焦距越短，像的尺寸越小。换句话说，从物体上发出的光束聚焦在一个很小的面积上。就是说，像的照度和透镜的焦距成反比。

根据以上两个原因，我们把透镜的直径与其焦距的比值的平方叫做透镜的光强。

曲率半径很小的厚透镜具有最小的焦距。也正是这样的一些透镜能产生最大的畸变。就是说，无论是由于透镜的尺寸，还是由于透镜的曲率半径使透镜的光强增加时，都将导致像质变坏。在技术上解决这个问题是不大容易的。

照　相　机

在暗箱的小窗上放上一个透镜就是一台最简单的照相机。透镜所成的像定影在对着窗口的照相底片上。

但是一个简单的透镜产生的像是畸变的。因此要换成复杂的透镜系统，在这种系统中应当消除各种光学缺陷。这种

系统称为摄影物镜。

怎样克服照相时的畸变呢?在很早以前,曾经利用透镜系统,在选配这种系统时,可使每个透镜的缺陷用其它透镜缺陷来补偿。利用两"负"相乘得正的原则,只使用三个透镜就可以消除全部七个缺陷。然而这只是个原则。为了产生最完善的像就需要利用更复杂的透镜组合的系统。图 2.3 上的就是其中的一种系统(远不是最复杂的系统)。这个凹透镜和凸透镜组成的系统,在放大倍数相差很大时,也能产生不畸变的像。当系统的第一部分和第三部分互相变动一下位置时,焦距可以连续变化三次。

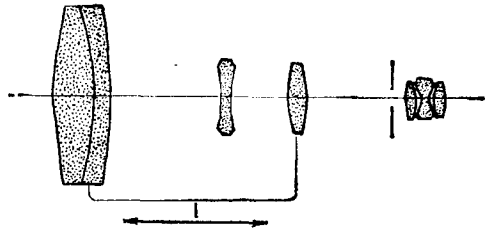


图 2.3

照相机需要有一个不太复杂的"能使相机聚焦"的装置。为此,需要使物镜中心和照相底片之间的距离是可调的。到现在为止,那种暗箱做成折叠式的可以压缩的照相机仍然在使用着。需要指出,这类照相机完全可以拍出比较好的照片来。

现代的照相机可以小到拿在手掌里,小巧玲珑,外形美观,可以利用螺旋运动调解物镜来实现聚焦。从对透镜光强

的讨论中我们清楚，如果尽力减小照相机的“瞳孔”，就可以使像质改善。使用可变光圈便可实现这一目的。

我们把照相机尺寸尽量缩小，但是通入的光要足够的强，就可以在一定曝光时间内生成一幅最好的像。

为什么看一张照相技术发展初期的照片使我们感到非常可笑呢？因为那时的照片上的人们使我们感到处于一种僵硬呆板的姿态之中。对这个现象的解释是很简单的：在那时拍一张照片要很长的曝光时间，因此摄影师在拍照时，不得不庄严神圣地下令：“不许动！照了”。为了在最短的曝光时间内得到一幅好的像有两种方法。第一种方法是完善物镜。这不能只依靠选择组成物镜的透镜的几何尺寸和形状。由几个透镜组成的物镜中几乎有一半的光被反射回来了。这就造成了：第一使像的照度受到损失；第二是造成一个能减小影像反差的光底。为克服这种现象需要采取一种叫做光学镀膜的方法，即在透镜的曲面上镀一层很薄的膜。由于光的干涉现象使反射回来的光显著地减少。具有光学镀膜的物镜是很容易看出来的：物镜的玻璃有淡蓝的色调。

改善照片质量的第二种方法是完善照相底片。

我们来谈谈成像的光化学过程。感光层乃是添加有少量碘化银杂质的溴化银晶体的明胶。晶粒的大小在千分之一到万分之一毫米范围内。在 1 厘米^2 底片上的晶粒数为 1 万到几十万左右。如果我们在显微镜下观察感光乳胶层，就可以看到晶粒的分布是非常紧密的。

入射到乳胶粒上的光子破坏银原子和卤素原子之间的

键。自由的银原子数与投射到胶片上的光子数严格地成正比。摄影师选择的曝光时间能使银和溴之间的大量原子键被破坏。但是曝光时间又不宜太长，过长的曝光时间将导致所有晶粒的银原子和溴原子之间的键完全被破坏。这样在显影之后，所有晶粒把其中所包含的银原子都分解出来，因此底片各处都一样黑。

对照相底片进行正常曝光时可以产生物体的潜像。在每个晶粒中被切断的原子键数与投射到这颗晶粒上的光子数成正比。显影过程就是使潜在的自由银原子又结合起来。这时，在底片显影之后，在底片上分解出来的银原子数将和光强成正比。

从以上情况可以清楚地看出，某物体在照片上所表现出来的精度，无论如何也不能超过溴化银晶粒的精度。

在底片显影之后，还需要对底片进行定影。定影过程是为了消除没有分解的溴化银。如果我们不消除这些没有分解的晶粒，那么在把底片露光后，便等于使底片"走光"，因为这时晶粒把其中所含的银原子完全分解出来了。

获得一张正像的物理原理是很容易弄清的，我们不需要在此对它进行详细的描述。

现代的彩色照相技术是很不简单的，这一技术已博得人们很好地赞扬。至于彩色照相过程的物理原理，则完全不是很复杂的。还在十八世纪的中叶就提出来的对颜色模型的认识至今仍是正确的。人的眼睛具有红、绿、蓝三种颜色的感受体。用这三种颜色的不同配比可以组合成各种颜色，可以构

成各种彩色。根据上述道理，为了获得一张彩色照片，需要具有一张三层的胶片。上层对蓝光灵敏，中层对绿光灵敏，下层对红光灵敏。这里我们不去详细地介绍化学家是怎样获得这种三层胶片的，但需说明仍要用三层照相纸，方可把彩色底片转变成彩色的正像。

眼　　睛

大自然为人类塑造的一双眼睛，是一台最好的物理仪器。用眼睛可以区分出几万种不同深浅程度的颜色；能看到遥远的物体，也能看清很近的物体；用一双眼睛可以对物体产生立体感；在很弱的光强下也可以看到物体。所有这些性质只有最高级的仪器才能完成。当然，人的眼睛所能看到的光谱区域是不大的。许多动物的眼睛在某种程度上消除了这种缺点。

眼睛的构造很像照相机。具有双凸透镜形状的水晶体起着物镜作用。水晶体是软的，并且能够在包围水晶体的肌肉作用下改变自己形状。眼睛通过调节过程可以同样很好地看到远处和近处的物体。随着年龄的增长，水晶体逐渐变硬了，肌肉也逐渐松弛了。现在人们为了“看远”和“读书”开始需要戴眼镜了。

物体的像成在眼睛后面的壁上，眼睛的神经把这种感觉传递给大脑。

年轻人的眼睛能够看到距离不小于 10 厘米的物体的细

小部分。随着年龄的增长，常常出现远视，这时距离增加到30厘米才能看清物体。

在水晶体前面有一瞳孔，它起着照相机的光圈的作用。人能够在1.8到10毫米范围内改变自己瞳孔的大小。

结构很复杂的眼球的网膜和成像的照相底片的作用是一样的。在网膜下有视上皮组织，它是由对光线敏感的网状细胞组成，这些网状细胞又分视杆细胞和视锥细胞。您可以把这些网状细胞和照相底片上的溴化银晶粒数进行比较，结果发现视网膜细胞数超过底片上溴化银的粒子数一亿倍。很清楚，正常人能够分清各种颜色，那是视网膜对不同的光谱区具有不同的灵敏度所致。如果我们假设，可以按视网膜对不同光谱区具有不同的敏感分成等级，我们就可以得出上述的结果。

如果视力是正常的，则眼睛的后焦点，在静态时处于视网膜上。如果眼睛的后焦点处于视网膜前，这个人就是近视眼。如果眼睛的后焦点处于视网膜后，这个人就是远视眼。引起这两种常见的缺陷的原因是水晶体的太厚或太薄所致。常常遇到一些眼睛有散光的人，这种人在正常状态下，他的被两个球面包围的水晶体的形状不规则。

所有这些缺陷都可以用眼镜来校正。这种眼镜和水晶体一起组成一种光学系统。这个光学系统可以使远处物体的像聚焦在视网膜上。

眼镜的透镜用屈光度来衡量，屈光度这是透镜的光焦度的单位，而光焦度与焦距成反比。以屈光度为单位的光焦度

等于 1 除以焦距（米）。近视眼的人所戴的眼镜是发散透镜，其焦距是负的。

眼睛的视角比我们想象的要大的多。与直视线成 90° 角的任意方向上所发生的事件我们都可以直接下意识地去判断。这种情况常常引起人们产生一个错觉：他们没有去看过路人，但却"感到"瞥见了过路人。

就是在很好的照明下，在小于 1 分弧度角下去看物体时，眼睛也是不能很好地对它判定的。

起　偏　器

光波也是电磁波。正如第三册中所述，可以用直观实验来演示电场矢量的方向与光线的方向垂直。如果用光的粒子说来解释这个现象，就应当说，光粒子——光子不是像小球而是像箭头。在理论物理学家的许多复杂的计算中所得到的结论是：光子具有自旋（等于 1）。因此，说光子像个箭头的概念是很自然的。

寻常光——这是一束光子流，其自旋的方向与光的传播方向垂直。但是沿着与光线垂直的四周围的分布是均匀的。这样的光线叫做非偏振光。然而在很多情况下，我们遇到的光子流，其自旋方向与光的传播方向一致，或者换句话说，我们所遇到的是这样一类电磁波，其电矢量完全具有一定的方向。这样的光线叫做偏振光。

获得偏振光的方法之一是迫使光线通过低对称的晶体。

这种晶体可对入射光适当地进行取向，它具有把自然光分解成两束方向互相垂直的偏振光的本领。

可惜，我不能给读者那怕是很少一点关于为什么发生这种现象的知识。这种现象与晶体的分子以不同方式"遇到"具有不同电矢量的波有关系。但是，我担心这句话并不容易使读者理解。我敢证实光线分解的理论是存在的，并且这是一个很好的理论。这个理论可以描述这个有趣现象的整个细节。特别是，当我们把晶体和光线成不同角度放置时，这个理论便可以预言光通过晶体后的状态是怎样变化的。

把非偏振光分解成两束偏振光之后，我们进一步就能很容易地使晶体处于使其中一束偏振光向某一方向偏移的位置。从此之后，便获得一种仪器，这种仪器叫做尼科耳棱镜，这是根据此仪器的创建者英国物理学家尼科耳(1768—1851)而取名的。早在1820年尼科耳就提出了这种仪器。颇为有趣的是，在当时用粒子说对光的偏振的全部解释都被认为是牛顿光粒子说的极好的证明。

不久便发现了干涉和衍射现象，可以很自然地用波动说对这些现象给予解释。光的粒子说的理论一时变得萧条起来。但是……一百年过后，这个理论又死灰复燃起来。当然，其面貌已大大地改观，成为电磁理论的两个观点之一了。

如果在光路中放一个起偏器，则光强应当像预料的那样降低两倍。但是当我们在光路上放上第二个同样的仪器时，一种最有趣的现象就发生了。这种现象也证实了偏振光的存在。尽管这种仪器与第一个尼科耳棱镜没有什么区别，但却

把它叫做检偏器。现在开始在光线周围来旋转尼科耳棱镜。结果发现，当两个尼科耳棱镜相互间处于某一位置时，通过两个尼科耳棱镜的光强和没有放置尼科耳棱镜时一样。我们说这种位置上的尼科耳棱镜是平行的。现在开始旋转检偏器，当我们把它旋转 90° 时，光线停止通过。我们说在这种位置上的尼科耳棱镜是十字交叉的。

当第二个尼科耳棱镜从平行位置旋转 α 角时，在这中间位置上，光强等于 $\frac{1}{2} I \cos^2 \alpha$。如果把电场矢量分解成两个分量，一个分量与检偏器的"缝"垂直，另一个分量与检偏器的"缝"平行，那么光强的公式就不必解释了。这样光强就与光波的振幅的平方成正比。即与电矢量的平方成正比。所以光强应当按余弦的平方定律进行变化。

偏振光分析具有许多实际用途。我们设想尼科耳棱镜是十字交叉的。在尼科耳棱镜之间放入能使光波的电矢量旋转的透明物体，这时便能发生被观察的光场的透光。处于电场作用下的物体就具有这样的能力。光矢量的旋转与电压值有关，与此同时在交叉的尼科耳棱镜的光场的透光也因电压值的不同而不同。我们可看到一些美丽的图案(而且是彩色的，因为各式各样颜色光的光子保持着不同的状态)，用这些图案可以去判断试样中的电压，或者去判断组成试样的分子是否具有取向性。这些资料是非常有价值的。因此，用一个很好的显微镜再附加上两个尼科耳棱镜就可以在偏振光下去观察物体成像的情况。根据这些图案可以得到更丰富的物质结构的

资料。

很多物质的溶液都可使光波的电矢量旋转，例如糖溶液就是这样的。这时的旋转角与溶液中的含糖量严格地成正比。因此可以利用偏振计来测糖的含量，这种仪器叫做旋光糖量计。几乎在任何化学实验室都可找到这种仪器。

偏振计的应用不只限于这两个例子，但是，我们举的这两个例子，大概是主要的。

显微镜和望远镜

显微镜的光学部分是由目镜和物镜组成的。接近眼睛的透镜是目镜，接近被观察的物体的透镜是物镜。把物体放在物镜焦距之外不太远处，便在物镜和目镜之间产生一个放大的倒像。需要使像成在目镜和目镜的焦点之间。目镜起着放大镜的作用。可以证明显微镜的放大倍数等于目镜和物镜单独放大倍数的乘积。

骤然看来，好像是利用显微镜可以观察物体的任意小的细节。可是为什么不把一张照片的尺寸先放大几千倍，然后放在显微镜底下去对这张照片进行仔细的研究，不是就可以获得放大百万倍的细节吗？以此类推。

这种想法是经受不住批驳的。首先我们要记得，照片的图相放大是受底片上晶粒的大小的限制的。要知道每个溴化银晶粒都是整体地发生作用的。读者无疑地看到过放得很大的照片，并且注意到了，一般来说放大并不能使照片更精确，

而只是把照片上的细节变得模糊。

但是，如果我们要简化照相程序，就可采用光学方法来放大。这种方法是完全可能的(谁也不能阻碍增加透镜的数目)。但很快地证实了，在这种情况下，很大的放大倍数并没有意义。根据电磁场的波动理论，任何仪器的有效放大倍数都有一定的极限值。不管我们用眼睛经过放大镜来观察物体，还是利用显微镜或望远镜来观察物体，在所有这些情况下从发光点发射的光波都要经过小孔才能入射到仪器中。这时便产生一种衍射现象，即光线要偏离开直进方向。从某种程度上讲光线要经过一定的角度才能入射到仪器中去。因此，一个点所成的像，任何时候都不会是一个点，而是一个光斑。并且无论经过怎样的努力，也都不可能使这光斑的尺寸小于光波的波长。

考虑一下在什么样的条件下，电磁波的前进方向才明显地偏移开直进的方向，这是极为重要的。

如果用 x 表示在距离光源为 f 处所观察到的离开直进方向的线性偏移，处于所研究的光程上的障碍物或小孔的尺寸等于 a，则有下列关系式：

$$x = \frac{\lambda f}{a}$$

这里的 λ 为波长。从这个方程式中可得出结论：从小的粒子和大的天体那里都可以观察到衍射现象。所有这些衍射都与光波波长和离光源的距离的大小有关。对小孔衍射也和上述一样。一般说来，为了观察衍射，不一定只使用极小的孔。有

时通过一个能飞过网球的孔，也能观察到衍射现象。当然，只有在几百米的距离上才能观察到这样的现象。

根据上面所引出的简单方程式就可以判断显微镜和望远镜的可能的使用范围。

一般的显微镜不能使我们分辨清微米以下的物体的细节，而毫米大小的物体我们可以直接用眼睛看到。由此可以清楚，利用光学显微镜放大一千倍以上是没有意义的。

但是，这种使用范围上的限制只是涉及到光学显微镜问题。假若能设计成一种不是使用可见光线，而是使用其它一些波长更短的辐射线的显微镜，则这样的显微镜的有效放大倍数将大大地提高。这种显微镜早已建成并已使用于许多科学实验室中。这就是电子显微镜。电子波的波长非常短，利用电子显微镜可以看见千万分之几毫米的物质结构的细节。

生物学家用电子显微镜看到了脱氧的核糖核酸分子，双亲就是通过这些最长的分子把遗传特性传给自己后代的。利用显微镜还可以看到蛋白质的分子；可以弄清细胞膜的结构；可以看清肌肉纤维结构的细节。我这里只提供放大三百多万倍的一张最大的照片(图 2.4)，照片上表示的是石笔石矿的晶格。从图上清楚地看到，晶体平面之间距离等于 4.45 埃。

决定电子显微镜使用范围的不是它的分辨能力，我们可以毫不困难地减小电子波的波长。一切都取决于像的对比度：被研究的分子需要放在底板上，而底板本身也是由分子组成的。在底板分子的背景上很难分清我们所感兴趣的那个分子。

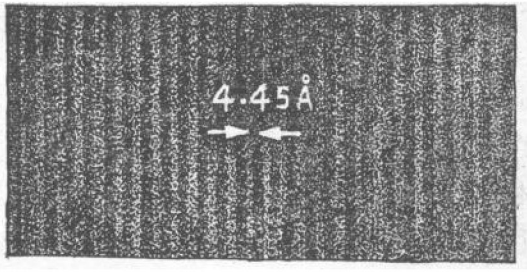


图 2.4

电子显微镜是很复杂和很贵重的仪器。一般电子显微镜的高度为 1.5 米。电子被高电压所加速。由于什么因素而产生放大作用呢？这种显微镜的放大原理和光学显微镜是一样的，都是用透镜进行放大的。但是，不言而喻，这些“透镜”完全不像普通显微镜的透镜。带有小孔的金属板电压的电场和线圈产生的磁场具有对电子聚焦的能力。

可以在很多不同的技术手段的帮助下产生像。利用切片机可以制备很薄的切片用于透光观察。在这种情况下，用金属蒸汽在切片上沉淀的方法可以仔细地分辨出底板上的分子。用同样的方法可以获得试样的“复制样”，即用透明材料做的薄膜先把试样覆盖住，然后再把这层薄膜腐蚀掉。

电子显微镜检验是物理上一个很大和很重要的分支，很值得我们用单独的篇章进行介绍，但因本书篇幅所限，我只能到此草草地收笔了。

利用凸透镜可以观察远处物体的想法，早在十六世纪就有人提出来了。但是，说望远镜（更正确地说是瞭望筒）的发明者是伽俐略，这是不会错的。伽俐略是在 1609 年 7 月发明

这种瞭望筒的。事隔一年之后伽俐略发表了第一批对天体观察的资料。

和显微镜一样，瞭望筒(望远镜)原则上也是由两个透镜组合成的，邻近物体的是物镜，邻近眼睛的是目镜。因为被观察的物体在无限远处，所以这个物体的像成在物镜的焦平面上。当目镜的焦平面与物镜的焦平面重合时，从目镜发出来的便是平行光束。

望远镜的使用范围随着物镜直径的增加而扩大。例如，利用直径为 10 厘米的望远镜能看清火星上大小为 5 公里方圆的物体。当望远镜的直径为 5 米时，用这种光学望远镜来研究火星的精度可达到 100 米。在天文馆里不但可以看到折射望远镜，而且还一定会看到反射望远镜。由于我们是研究远处的物体，并要求把光束聚在焦点上，为此可以使用球面反射镜，而不使用球面透镜。这样做可以避免色散像差，因此使用球面反射镜的优越性是很大的。缺点只是对反射式望远镜的反射镜镜面精度要求高，这是很难做到的。

当然，从光的波动观点来看，望远镜的有效放大倍数也是有一定限度的。遥远星体上的光束形成光环，使我们在望远镜中看到的星体之间的角距离受到一定限制。在这里可以看出，要想扩大望远镜的测量范围，就必须增加它的直径。望远镜的极限范围接近十分之一弧度秒。

最近几乎利用望远镜开辟了一个新的技术领域，例如，天文学家研究天体，拍摄从宇宙中传来的全部电磁波波谱都要使用望远镜。在第七章中将简单介绍一下群星深居之处的现

代物理学的应用。

干　涉　仪

我们已经不止一次地强调过，电磁场具有波动特性。粒子(电子、中子、质子)流也具有波动特性。声音是介质按着波动规律发生的机械位移的结果。辐射的波长、频率和传播速度的关系式 $c = \lambda\nu$ 对上述各种物理过程都是普遍适用的。最简单的辐射是单色的，即用一种波长来描述的。一般情况下，辐射都具有复杂的光谱，即由各种波长和强度的波合成。

在波的叠加和在光路中遇到物体被散射时，辐射的波动观点就体现出来了。波的散射的一种重要表现就是衍射。波的叠加叫做干涉。

这里所谈的是关于光的干涉。这种干涉现象是帮助我们精确测量距离和其它一些物理量的那些仪器的理论基础。利用光的干涉现象服务于实际应用目的的仪器叫做干涉仪。

测量距离的原理就是计算在被测量的长度上所叠加的波数。

骤然看来，这种测量好像是不复杂的。我们取两个光源，并把它们的光线集中到一点。这时在两列光波的“波峰与波峰”或“波峰与波谷”相遇的点可以观察到明暗相间的条纹。现在我们来谈谈测量距离问题，在这段距离上我们打算移动两个光源之一。在这种移动中，观察点上两列波的相位关系将发生变化。只需要计算一下光变暗的次数，然后考虑到光源

的几何形状和光波的波长，就可以毫无困难地计算出位移值。

以上所述，原则上是对的。但用这样的方法我们观察不到明暗相间的条纹，在屏幕上将是明亮的。因此，这种简单的实验是不成功的。

由不同光源发出的两束光被集中到一点以后，将总是互相加强，这个结论是毫无疑问的。因此，是否就是波动理论不正确了呢？

不！波动理论还是正确的。电磁辐射在本质上说具有波动特性。但是，我们希望我们这种不正确的假设能起作用。为了能观察到干涉现象，必须使叠加的波之间保持不变的相位差。要知道，从同种光源的两个原子发出的光波之间的相位关系也完全是偶然的。我们已经说过，发光的原子向外辐射光子的行为彼此之间是事先没有"协约"的。因此，两个不同光源的辐射是不匹配的，或者像大家所说的，是不相干辐射。

但是，是否发现这种匹配的辐射，即相干辐射有点像紫啸鸫（一种蓝色鸟）吗？没有发现！

要迫使同一原子的辐射自身互相叠加。这是多么新奇的想法，和许多新思想一样，用这种思想使问题解决的又漂亮又简单。为了达到这一目的就要求把每一光源发出的光束分解成两部分，迫使同一光束的这两个分开的部分经过不同光程，然后再集中到一点。因此，在这样条件下来观察干涉和改变被分开的两部分光的光程差，同时计算出明暗相间的条纹数，这样我们确实可以测量出我们要测量的位移和波长了。

上面我们描述了干涉计量的作用原理。早在1815年法

国物理学家菲涅耳(1788—1827)就揭示了这个原理。现在我们来描述干涉仪的作用方法，借助这种方法可以使光束分解开，又可使被分开的这两部分光束产生光程差。

现在我们对从透明薄膜或胶片的外表面和其内部的下表面反射的光束所形成的干涉进行详细的描述。因为在自然界中经常能观察到干涉现象，而且这种现象有很大的实际意义，所以干涉现象引起了人们的注意。除此之外，用这个道理很容易解释在描述可见光和其它电磁辐射时所利用的很多重要的概念。

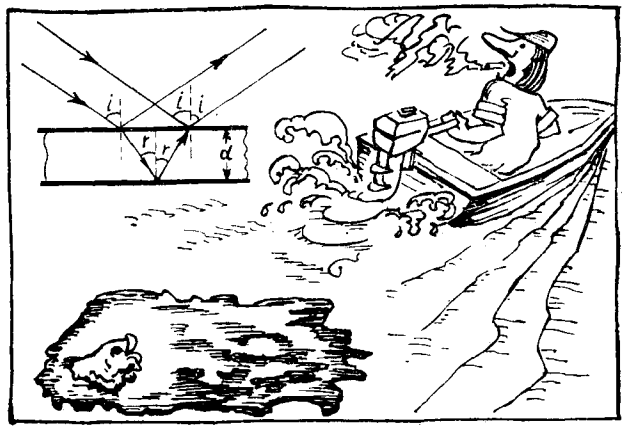


图 2.5

用图 2.5 可以计算两束光之间的相位移。相位差取决于光程差，即取决于两束光所走过的光程差。从图上清楚地看到，光程差 $x = 2d\cos r$。这里的相位差可以决定两束光是互相加强还是互相削弱。但是又怎样从光束的光程差转换为相

位差呢？

我们还想和不怕余弦定理复杂的读者谈谈。在空间任意一点光矢量的振动都可以写成下列形式：$A\cos 2\pi\nu t$。这里必须对自变量余弦角补加一个相位移角 φ。如果我们想比较被距离 x 分开的相同波上各点的相位，那么我们就要考虑这段距离上有多少个波长相加，然后把所得的数值乘以 2π，这个数值便是相位移。因此，$\varphi = 2\pi\frac{x}{\lambda}$。

现在我们来谈谈薄膜干涉。光程差的表达式在前面已写过了，现在只需要再把光程差 x 除以波长 λ。但是……需要停一下，还没有人告诉我们光在真空中和在透明的薄膜内部波长是否相同呢？恰恰相反，我们有充分理由预料，当光波从一种介质进入另一种介质中，光波是要发生某些变化的。要知道，由于存在着色散现象，所以各种频率的光子的行为也各不相同。光波的频率、波长和传播速度之间遵守等式：$c = \lambda\nu$。当光波进入到另一种介质中时，这关系式中的哪些量发生变化呢？实验回答了这个问题。可以直接测量光波在物体中的传播速度，并证实当光波斜射到两个介质的分界面时，使光波改变运动方向的折射率等于光在两个介质中传播速度的比值。如果其中一个介质是空气(准确点说是真空)时，则：

$$n = c/v$$

式中 c 表示在真空中的光速，v 表示光在介质中的传播速度。那么，进一步又如何做呢？当光波从空气进入到介质时，两个参数——频率和波长哪一个发生变化呢？为了解释干涉实验

结果，需要假设，光子的频率是不变的，而波长是变化的，这时折射率的公式可写成：

$$n = \lambda_0/\lambda$$

式中的 λ_0 表示在空气中的光波波长。

为了描述上述薄膜实验中的两束光的相位差，现在我们已经具有了所需要的一切。由于两束光中，一束在空气中传播，另一束在玻璃中传播，因此相位差等于：

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} nx = \frac{4\pi}{\lambda_0} nd\cos r$$

在研究薄膜干涉时什么数值是可以测量的呢？用上列公式可以回答这个问题。如果已知薄膜的厚度，则可以确定材料的折射率。如果已知折射率 n，便能以很大的精度(一个波长之内)求出薄膜的厚度。这样最后便可测量出各种“颜色”的光的波长。

如果薄膜的厚度是可量度的，其材料的组成也处处都是均匀的。向某一段薄膜投射的入射角相同，在所谓的等厚带的地方就会有干涉现象产生。在厚度不同的薄膜上，也可产生明暗相间的等厚条纹系统（因为各种颜色的光子将保持自己的行为状态，所以白光时会产生彩虹带）。常看见洒在水上的石油或油的薄膜呈彩色条纹，这也可以用上述道理解释。

在肥皂膜上很容易看到非常漂亮的等厚的彩色条纹。用金属丝做成一个圈，把它放入肥皂液中，取出后便可挂成一个肥皂膜。由于肥皂液的流动，所以肥皂膜的上部比下部薄些。在肥皂薄膜上呈现出水平的彩色条纹带。

干涉方法广泛应用于测量小的距离或小距离变化上。用这种方法可测量小于万分之几波长的厚度变化。用干涉方法测量晶体表面的粗糙程度可达到的精度为 10^{-7} 厘米。

干涉计量广泛应用于光学工业之中。比如说，如果需要检验玻璃表面的性质，就需要通过观察被检验的玻璃与标准的玻璃表面之间的空气楔所产生的等厚条纹带来实现。如果从一端来压紧两块玻璃板，就可形成空气楔。如果两个表面是平的，则等厚线将是平行的直线。

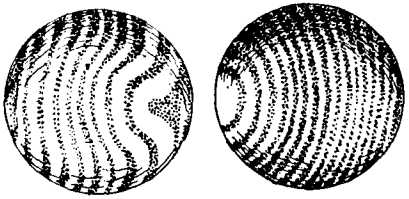


图 2.6

我们可设想，被检验的玻璃板面凸凹不平，等厚线将围绕缺陷处变成弯曲状态。当光波的入射角发生变化时，由于表面的凸凹的不同，而使干涉条纹向某一端移动。图 2.6 表示在上述情况时，在显微镜下所看到的图样。这两张图分别表示有缺陷的试样。第一张图上的缺陷分布在最右边，第二张图的缺陷在左边。

利用干涉式折射计可以精确测量物质的折射率。在这种仪器里可以观察到能互相独立的两束光的干涉。

假设，在一束光的光路上放一个折射率为 n，长为 l 的物体。如果介质的折射率为 n_0，则光程差的变化为 $\Delta = l(n - n_0)$。利用聚焦透镜可把两束光会聚到一点。在望远镜里可以看到什么样的干涉图呢？我们看到的是明暗相间的条纹带系

统。但是这和眼睛直接看到的等厚条纹不一样。在折射计中产生的条纹系统有另外的来源。要知道，原始的光束不是理想的平行光束，它很容易发散，就是说，入射到薄板上的光束，形成光锥，很容易具有各种角度。

入射角相同的光束所产生的干涉条纹也是相同的。这些干涉条纹都集中在望远镜焦平面的同一位置上。如果被分开的光束的两部分的光程差发生变化，则干涉条纹也将发生变动。当光程差的变化量为Δ时，则通过望远镜的目镜的条纹为Δ/λ。

因为发生 0.1 个条纹的位移也能很容易地被观察到，所以这种干涉测量精度是很高的。当发生上述位移值时，光程差的变化量为$\Delta = 0.1\lambda = 0.5 \times 10^{-5}$厘米，在长度$l = 10$厘米时，折射率的变化为$0.5 \times 10^{-6}$。

现在必须谈谈不利用折射现象的另一类型的干涉仪。这种干涉仪是美国物理学家迈克耳逊(1852—1891)发明的。怎样估价迈克耳逊干涉仪在物理学发展史上的作用也都不算过分（我想冒昧地谈谈迈克耳逊干涉仪在人类思想史上曾起的更大的作用)。利用这种干涉仪人类曾第一次发现一种极重要的现象：沿着地球轨道的方向和横着地球轨道的方向上光的速度都是相同的。

这表明光速与光源的运动无关！也表示光速和发光的灯速不能合成，而子弹的速度和发射子弹的枪速可以合成。这个重要事实的发现导致了相对论的建立，也使许多基本概念——长度、时间、质量、能量——要重新进行根本的修正。关

于这些内容我们以后再谈，而对于迈克耳逊干涉仪倒值得我们现在谈一谈。它不仅在物理学的发展史上有过重要的意义，而且直到今天作为这台仪器设计基础的几个基本原理也仍然用于测量长度和距离。

在这台仪器中，单色的平行光束入射到两面平行的玻璃平板 P_1 上(图 2.7)。这块玻璃平板带细线的一面被银的半透明膜覆盖着。这块平板和入射光成 45 °角放置。把入射光分成两部分，一部分与入射光平行(指向 M_1)，另一部分与入射光垂直(指向 M_2)。被分开的两束光以入射角为零投射到两个反射镜后，被反射回到发出这两束光的半透明板。从反射镜反射回来的每束光又在半透明板处再次分解，一部分光射向光源，而另一部分光射入到望远镜中。在图上清楚地看到，从望远镜对面的反射镜方向来的光，两次通过带半透明膜的玻璃板。因此，为了保证从反射镜 M_1 来的光束光程相等，放入与 P_1 相同，但没有半透明膜的补偿玻璃平板 P_2。

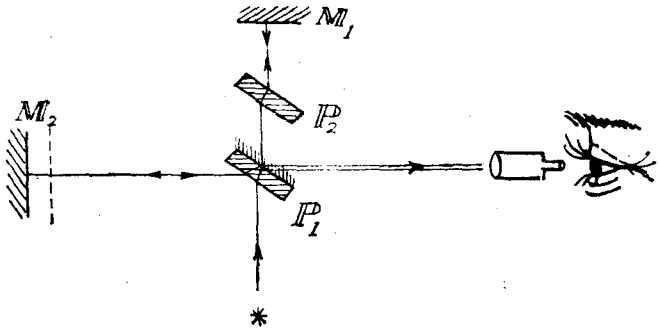


图 2.7

在望远镜的视场中，将看到形成光锥的原始光束在空气层中(空气层厚度等于从两个反射镜到光束分解处的距离差)相应的干涉光环。把一个反射镜(例如把反射镜 M_2 移到虚线所示的位置)移动四分之一个波长，望远镜中的图象便由最大值变到最小值，即图象整整移动了半个光环。这可能引起观察者的很大的注意，因此，在紫光中干涉仪的灵敏度大于1000埃。

激光出现以后引起了干涉计量技术的革命。

您是否考虑过这样的问题：为什么能从漂在水上的油或石油膜上观察到干涉彩虹，而在玻璃窗上就观察不到这种现象？本来这两种情况很相似，在两种情况下从薄层的外表面和内部的下表面都发生反射；两种反射光都发生叠加。可是只有当薄层很薄时才能观察到干涉现象。我不止一次地用这些问题考过学生们。

这些问题的答案如下所述。原子的辐射时间为 10^{-8}—10^{-9}秒。发射波列是这种辐射唯一的方式。尽管光的速度很大，但是由于辐射的时间很短，因此光波波列很短。当我们把一束光分成几部分，则能产生干涉现象的只是波列相同的那两部分。这意味着一段正弦曲线应当明显地与其它段正弦曲线相重叠。为此，当然必须使光束被分开的两部分间的光程差大大地小于波列长度。对于微米厚的薄片能满足这个条件，而对窗子上的玻璃不能满足这个条件。这就是大学生应当做出的回答。

能产生干涉的光束之间的最大光程差叫做相干长度。对

于可见光，这个长度不到1毫米。

但是，对于激光来说这种相干长度便发生特别明显的变化。连续式激光器所产生的受激辐射的光子在传播过程中相位相同。或者按波动观点说，从不同原子发出的波列彼此叠加后产生一个合成的波。相干长度实际上是没有限度的，在很多情况下以米和公里来度量(理想总是和实际有差别的，我不准备在这里来介绍影响相干长度的各种因素)。

把激光用于干涉仪可以解决以前认为不能解决的问题。譬如说，在寻常光源时，迈克耳逊干涉仪的反射镜只能在毫米左右范围内移动。如果利用激光做光源，入射到反射镜 M_1 上的光程等于几厘米，而从 M_2 反射回来的光程为几十米。

用来检验透镜球面的干涉仪可做成带有一个统一基准比较平面的结构。利用寻常光时，随着被检验透镜半径的变化，必须改变做比较用的标准具（因为不能在很大光程差下进行工作)。干涉图这时无比的清楚，所以用它来进行分析很方便也很精确，详情在这里不再赘述了。

可以制备无任何光程补偿的完全新型的干涉仪，使对拦河坝的位移、地质板块的漂移、地壳的振动的测量成为可能。使远处物体上反射回来的激光束与发出去的激光束产生干涉，便可以对上述物体的运动速度进行精确的测量了。

激光仪器

产生激光的装置，由于它也能用于分析、检验和观察，当

然把它也叫做仪器。但是，激光仪器和其它光学仪器是有区别的，激光仪器在工业中具有无与伦比的伟大意义。因为激光仪器应用非常广泛，因此我们不止一次地反复谈到它。在这一节中我们只着重介绍激光在材料加工方面的应用。如果不需要使用大功率，我们便可以用小巧玲珑的钕激光器。前面已经谈过，钕玻璃是这种激光器的工作物质。钕玻璃棒的长度为50毫米，直径为4毫米。以氙灯做泵浦。为了避免光能的损失，把氙灯和钕玻璃棒密封在圆柱形空腔中，并用水进行冷却。

下列性质对于这类激光器的各种应用是很重要的：可以把能量集中在一个非常小的面积上；也可以把能量精确地分成给定的份量；而且不用任何导体或接触就可以输出能量。

在钟表工业中激光有着特殊的应用。大家都知道做手表要用"钻石"。读者可能不知道，为什么在表里需要很小的红宝石。红宝石的数量能决定表的质量，这是每个读者都知道的。在红宝石垫圈上需要钻孔。在未应用激光前，每一块红宝石的钻孔工作要花费几分钟时间，而现在可以用激光完成这个工序，完全实现自动化，钻一个红宝石的孔不到一秒钟。我们每年在工业上需要数以百万计的红宝石，因此应用激光仪器的重要意义就显而易见了。

在金刚石工业上，激光也具有同样的意义。可以应用激光仪器对金刚石进行扩孔或打孔。利用激光仪器可以把金刚石加工成任意形状的断面和打成小到几微米的孔！

我方才中断了关于钟表生产的描述。现在接着再谈谈激

光在钟表业上还有一个很广的应用领域，就是应用激光把发条焊在钟表机件上。完全清楚，在需要点焊(现代技术上有极大的需求）的各个其它工业领域都可卓有成效地应用激光来进行焊接。这种很细的激光束的更可贵的价值是在焊接时对工件焊口附近不需要防护和冷却。利用激光刀可以把各种材料切割成任意形状这已不是新奇的事了。

我们再提一个意想不到的激光应用的领域，就是用激光可以恢复大理石雕刻的艺术品的本来面貌。二十世纪的大气，早就不是清洁的空气了。各种有害的气体，首先是二氧化硫，在大理石上形成一层黑色外皮，上面有很多细的小孔并像海绵一样吸收着水蒸汽和各种附加的有害的物质。用机械方法和化学方法来清除这一表层的污染，会造成艺术品的损害。如果采用脉冲式激光来清除污染，就不会损伤大理石本身。

利用二氧化碳激光可以实现无坩锅的晶体生长。这种工艺过程已不是什么新鲜事了。应用高频电流来进行这种无坩锅的晶体培养已很久了，但不是应用于导热性很小的电介质的晶体生长。现在已能利用激光来进行无坩锅的铌酸盐晶体及其它很需要的晶体生长了。因为即使百分之几的杂质也能起相反的作用，所以激光对微电子学需用的晶体的生长的意义非常重大。实际上想避免某些"有害的"原子从坩锅材料迁移到晶体中是不可能的。

我不准备来描述生长晶体的设备构造。在本书第二册中已谈过晶体生长问题。和应用高频电流时的情况一样，利用激光也可以产生一个不大的熔融区域，在这个区域里慢慢地

使物质进行晶体的生长。我认为，利用激光进行晶体生长的方法，可能要代替其它的方法。

光　度　学

每个光源都可以用它所辐射出的能量来描述。然而，在很多情况下使我们感兴趣的只是使我们产生视觉的那部分能量流。像以前我们说过的那样，波长大约处于 380—780 毫微米范围内的电磁波就具有这样的特性。

大脑所接受的光具有亮度和颜色两个特征。如果比较一下强度相同但波长不同的光所产生的视觉效果，就会发现，使眼睛感觉最强的是能发出波长为 555 毫微米的光源，这个波长所对应的是绿色光。

用可见度曲线可以表示光感(图 2.8)，这条曲线指出正常眼睛对各种波长光波的灵敏度（用相对单位表示)。技术上并不注意这条曲线，而是用眼睛去判断总的光强。使用这种方法，需要选择某一标准光源，然后把其它光源同标准光源来进行比较。光强的单位长久以来还保留烛光的名称，这是因为最初选择标

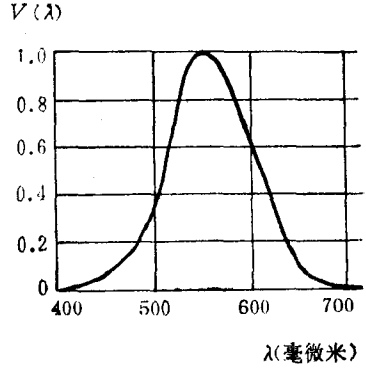


图 2.8

准的尝试所用的正好是一种标准的烛光，不用说，这是一件相当困难的事情。

今天所采用的国际标准是炽热的黑体，是用铂做成的。当铂加热到熔点，即加热到 1769℃ 时，“黑体”便经过小孔放射出光来。

光强单位取名叫烛光(“烛光”是拉丁文)国际定义尽量地避免涉及到发光的温度（这是为了不产生与温度测量有关的误差)。因此，烛光是这样确定的：如果取在标准大气压下处于凝固态的铂做光源，那么在 $1/6 \times 10^{-5}$ 米^2 的面积上与其表面垂直的方向所发出的光强等于 1 烛光。

光强的定义和单位这样的古老是令人惊讶的。专家们也认识到这一点。他们设想在不久的将来将以能量的测量和可见度的标准曲线做光强的定义和单位的基础。那时光强可以用这两个频谱分布的乘积来确定。把这两个函数相乘之后，再对这个乘积取积分，我们将得到光强的量度标准。请允许我对不知道积分计算的读者重新解释一下这句话。可以这样说：把各个频段的强度乘以它们的可见度，然后再把这些乘积相加起来。

在相当远的距离上的光源可被看成一个点。正是在这种情况下来测量光强才更方便。在点光源附近画一个球面，在这球面的表面上取一块面积 S。把面积 S 除以表面到中心的距离的平方，我们就可以得到所谓的立体角，立体角的单位是立体弧度。如果在半径为 1 米的球面上，割出 $S =$ 1 米^2 的面积，则这个立体角为 1 个立体弧度。

点光源的强度乘以某立体角叫做光通量。

当谈到平行光线时，光通量则趋近于零，您知道光通量定义以后对这一点就不会感到难理解了。但是，在类似上述的情况下光通量的概念是不用的。

光通量采取流明做单位。点光源以 1 烛光的光强通过 1 个立体弧度角时的光通量为 1 流明。点光源向四面八方辐射出的总光通量等于 4π 流明。

用光强表征点光源的性质与其表面积无关。但与此同时，完全清楚，由于光源向度(长、宽、高)的变化，情况便发生了变化，所以需要掌握光源亮度的概念才能更清楚地说明问题。亮度就是光源的单位表面积上所发出的光强。亮度用熙提来量度，一熙提等于一烛光除以平方厘米。

由于光源处的位置的不同，所以同一光源向打开的书的同一页传来的光能也不同。而对于读者来说更重要的是放书的写字台各部分的照度如何。像决定光强一样，照度也要除以到点光源距离的平方。为什么要除以平方呢？答案很清楚：光通量在已知立体角内部是不变的，不管我们离发光点有多远都是一样，球面积和已知立体角所隔开的那部分面积将与距离的平方成反比的增长。这个简单的原则叫做平方反比定律。把所读的书页到小灯泡的距离从 1 米变到 10 米时，那么书页上的照度则减少到原来照度的百分之一。

照度的单位——勒克斯。在一个平方米面积上的光通量等于一个流明时的照度为一个勒克斯。

在无月光照耀的黑夜里照度为 0.0003 勒克斯。因此，当

我们说："伸手不见五指"的时候，"漆黑"就表示这种情况下的照度。在月夜里的照度为 0.2 勒克斯。为了在阅读时，使眼睛不过度紧张，要求的照度为 30 勒克斯。在电影摄影时要使用聚光灯，在物体表面上的照度可达 10000 勒克斯。

关于测量光通量和照度的仪器我们还一点也没有谈到。现代进行这些测量早已不成问题了。实际上需要我们做的正是给烛光下个新的定义。我们测量入射到光电管上的能量，而在光电管上是用考虑到可见度曲线的勒克斯进行刻度的。

在十九世纪的光度计就是用比较两个相邻的被照亮的面积上的亮度的原理进行工作的。要想测量投射到其中一块面积上的光强，利用简单的装置使光通量的数值减小到已知数值，并最后正好使相邻的面积上照度相同。

全息照相

激光的出现象征着科学技术发展的新时代。很难找到一个受激辐射在其中不能开创新局面的知识领域。

在 1947 年哈玻尔建议利用激光以一种完全崭新的方法对物体进行照相，这种新技术叫做全息照相。全息照相与普通照相是有根本区别的。全息照相之所以成为可能，仅仅由于与普通光不同的受激辐射的特性所致。我们再一次强调指出，在激光辐射时，几乎全部光子在频率、相位、偏振和传播方向方面都是一致的。激光辐射的发散度很小，就是说在离光源很远的地方也可以得到一束特别细的光束。激光束具有很大

的相干长度。由于相干长度大（这一点对全息照相很重要），所以具有很大光程差的被分开的两束光可能产生干涉。

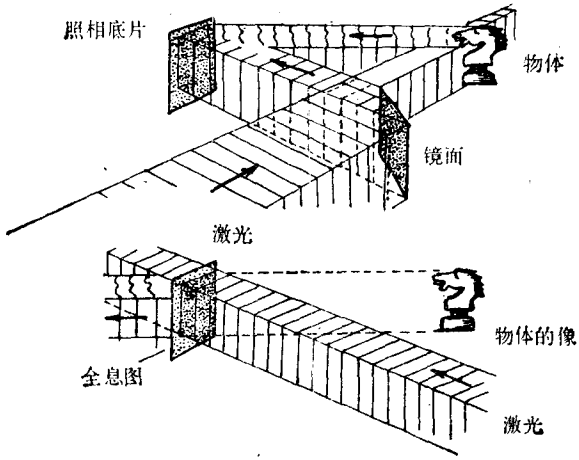


图 2.9

图 2.9 上部表示制取全息图的技术。被观察的物体被很宽但并不强的激光（为了不使物体受损害）照亮。同一束激光被物体和反射镜所散射，反射镜所建立的光波叫参考光。两个光波产生叠加，发生干涉，干涉图记录在照相底片上。

请您看一下图 2.10。上部表示的是物体，物体的下面表示的是物体的“像”。我们没有说错，这种明暗相间的环的复杂组合即所谓全息图，确实是物体的像，但仅仅是一种潜像。一张全息图包含着物体的全部信息。准确些说，是包含着被棋子所散射出的电磁波的全部信息。最好的一张普通照片也只是准确的传递被散射的光束的光强的全部信息。但是要知

道，物体上任意一点所散射出的光波不仅包含自己的光强（用振幅表示），而且还包含相位。全息图是一种干涉图，它的每一明暗条纹不仅记录了从物体传到照相底片的相应位置上的光束的光强，而且还记录了这束光的相位。

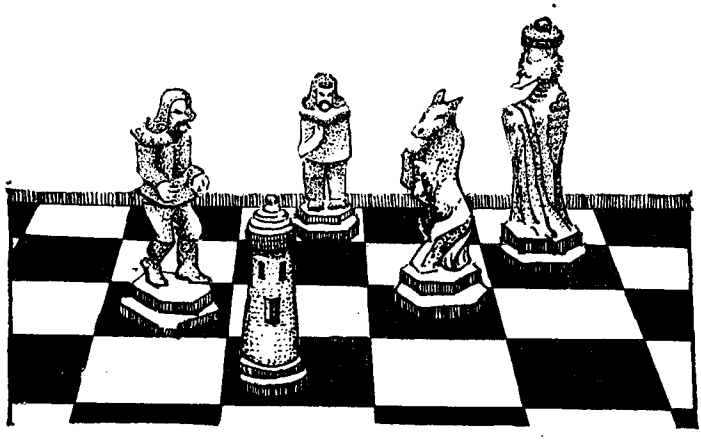


图 2.10

全息图的显影、定影和任何普通照相底片是一样的。并且保存的时间可以是任意长的。当我们想欣赏一下被照下来的物体时，就按图 2.9 下部所指出的那样：在恢复照像时的几何位置后，用同样的激光束来照射全息图。激光束要沿着反射镜所反射的光束方向去照射。这时，在原来放物体的地方便产生了物体的像，这张我们所看到的像和物体是完全相同的。

我们不能详细地涉及制取全息图的理论。简单的基本原理是，在用激光照射全息图时所产生的散射光波，具有在拍摄

这张全息图时的相同的振幅和相位。这些波叠加成一个波前，这个波前和建立全息图的波前完全相同。在和拍摄时的条件相同情况下来照射全息图就会出现这种特殊的再现。因此而产生物体的像。

全息照相的研究正在继续发展着。现在已有可能获得彩虹全息。尽量地进行改善之后，可以拍摄各种情况的全息图。最后(这大概也是最重要的)发现，可以不采用激光再现的方法，也能观察到全息图。

有很多详细描述全息照相的书籍。全息照相引起人们重视的一个原因，是因为它是物体的三维信息的大容量储存的一种方法。这方面的应用正方兴未艾。全息术在生活和技术领域的未来前程无可限量。

第三章　硬电磁辐射

X射线的发现

在电磁波谱中大约从几十毫微米到0.01毫微米的波段的电磁辐射叫X射线。比这更硬的一种射线，即波长更短的射线叫 γ 射线。

正像我们已经说过的那样，电磁波谱中各个波段所取的名称是有一定条件的。某种术语的使用，与其说是根据波长的数值而定，还不如说是根据光源的特性而定。“X射线”这一术语多半用于电子流与障碍物相遇时所产生的辐射。

伦琴（1845—1923）在1895年11月8日发现了X射线。在这些年代里世界各国的物理学家们都在研究被抽出空气的玻璃管中产生的电子流（这些管子中的一部分表示在本书第三册的图2.6上）。在管子里焊上两个电极，在电极上加以高压，能从这管的阴极发射出来某种射线的现象被人疑惑了很长时间。早在十九世纪初叶，不同的研究者都观察到了管内的闪光和玻璃管的发亮现象。希托尔夫(1844—1914)和克鲁克斯(1832—1919)用在光路中放置障碍物的实验完全清楚地证实了上述射线的存在。带十字接头的克鲁克斯管的照片出现在当时所有的教科书上，这是克鲁克斯于1879年在希托尔

夫之后十年所创建的。十字接头在玻璃管上投下了一个清楚的影子。这个光辉的实验证明了从阴极放出来某些射线，并且这些射线是直线传播的。当这束射线入射到玻璃管上，玻璃发亮，薄薄的金属层能吸收这种辐射。

汤姆逊于1897年证明了阴极射线乃是电子流。在本书第三册中叙述的那种方法，使汤姆逊成功地确定了电荷与电子质量的比值。又经过了10—15年就更清楚地知道了电子是带电的微粒。

不过，上面我们有些重复和离题了一点。现在我们感兴趣的是伦琴射线的发现，而作这种重复的目的是想强调：伦琴的发现是在人们了解阴极射线本性之前。大体来说，正是由于对阴极射线认识不清，伦琴才采用电极焊接位置不同和外形也不同的各种玻璃管子来进行实验。

1895年11月8日晚发生的事的详细情况已众所周知。伦琴在玻璃管子上盖上了一块黑色料子后，便熄灭了屋里的灯准备回家，但是忘掉了切断仪器上的开关。走到门口时又回过头来看了一下他做实验用的仪器。伦琴突然地发现在管子附近放的氰化亚钡荧光屏发亮了。伦琴又回来切断开关，亮光就不见了。再接通开关时，荧光屏又亮了起来。伦琴知道，在他使用的这种管子里阴极射线不可能穿透过盖在管子上的黑色外罩，况且还要经过很厚一层空气层更是不可能的。……这就是说发现了一种以前还不知道的辐射。

在同年年底伦琴第一次公布了他的发现。在这段时间里，伦琴详尽地研究了这种新射线的性质。实际上，直到伦琴射

线能被晶体衍射的现象发现之前(1912 年)，关于 X 射线的性质再没有什么新的发现了。关于晶体对伦琴射线的衍射以后再谈。“伦琴射线”的名称不是到处都是如此称呼。在法国、美国、英国都按发明者伦琴本人起的名称：把伦琴射线叫做 X 射线。

X 射线的最重要的性质，即伦琴首先研究和说明的性质是 X 射线能透过对光是不透明的物质(图 3.1 表示，在伦琴射线的发现第一次公布以后，过了 2—3 个月，大量出现了说明上述性质的滑稽画)。

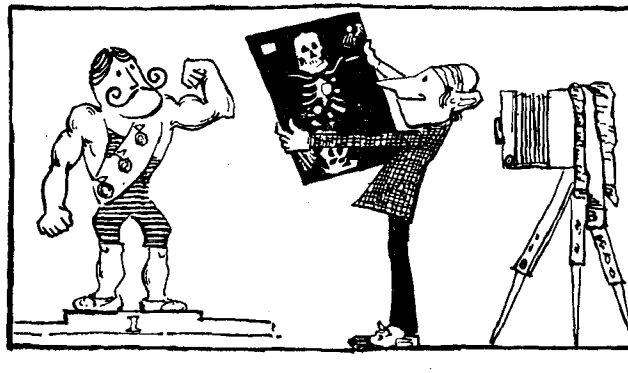


图 3.1

X 射线的穿透特性为医学做了不可估量的贡献，使工业上检验产品的缺陷成为可能。物质对 X 射线的吸收不同，物质的原子越轻，这些原子吸收射线越少。

很快地就确定了 X 射线对物体的穿透能力是随管子的电压的增加而增大。在进行 X 射线检验时所需要的电压范围从

几十千瓦到几百千瓦。

在研究X射线的性质以后，研究者确定了电子流遇到障碍物时的减速是产生X射线的主要原因。很有趣的是，X射线管很长时间是做成三个电极的。对着阴极焊上“对阴极”，电子就撞击到这个对阴极上。阴极安在侧面。过了几年才明白了这种复杂化是毫无意义的，所以，现在的X射线管里只焊两个电极。电子束被阳极减速，由于阳极表面通常做成偏斜的，在这种情况下X射线的方向指向偏斜面对着的方向。如果电子束成直角射向阳极表面，则从阳极反射回来的射线射向各个方面，但是射线的强度减弱了。

用X射线进行检验是现代工业特别是医学上的一场真正革命，现代的X射线探伤技术已发展得很完善。改变被研究物体对X射线管的相对位置，可以得到几个图形，利用这些图不仅可以确定缺陷在投影上的位置，而且还可以确定缺陷所在的深度。

根据所研究的材料或组织的不同，有时适当地采用硬辐射（穿透力更强的辐射），有时采用软辐射。我们的主要任务是使达到的对比度能够看清楚缺陷，甚至能看清楚与基本材料密度相差不大的缺陷。

对X射线的吸收定律和对任何辐射的吸收定律一样，是相当清楚的。我们更感兴趣的是通过厚度为 d 的薄板的射线强度的变化（此强度是在单位时间内投射到单位面积上的能量）。因为此书的对象是不了解积分计算的读者，所以在描述X射线通过很薄的薄板的定律所用的形式，我不得不受到一

定的限制。如果投射到薄板上的射线强度降低不明显，如1%，这时的薄板的厚度就认为是比较“薄”的。对于这个例子，定律比较简单：被吸收的辐射部分与薄板的厚度成正比。如果射线强度从 I_0 减少到 I，则这个简单定律可写成：

$$\frac{I-I_0}{I}=\mu d$$

比例系数 μ 叫做吸收系数。

有一个我多次列入考试题的简单问题：吸收系数用什么单位来量度呢？回答是不困难的。等式两端的测量单位应当是相同的。10 公斤和 5 米不能说那个大那个小。只能是公斤与公斤、安培与安培、尔格与尔格进行比较。就是说在任意等式的两端是无量纲的量。我们经常说，辐射的吸收为 $\frac{1}{30}$ 或 0.08。在强度除以强度时测量单位被“消掉”了。如果是这样的话，那么等式的右端也应是无量纲的量。因为厚度用厘米来测量(或用其它的长度单位)，则吸收系数用厘米的倒数，即厘米$^{-1}$ 来表示。

假设，射线通过厚 10 厘米的薄板强度只损失 1%，等式左部则等于 1/100。就是说，比例中的吸收系数等于 0.001 厘米$^{-1}$。如果是软射线通过的薄片厚度为 1 微米(0.0001 厘米)，能量的损失为百分之一，则吸收系数等于 100 厘米$^{-1}$。

确定吸收系数的公式，物理学家没有更好的理论。我仅仅提出，吸收系数大约和 X 射线的波长立方及射线所通过的物质的原子序数的立方成正比。

由于X射线的波长很短，所以电磁波的振动频率很大。这就是说，X射线的量子 $h\gamma$ 具有很大的能量。这个能量不仅对于使照相底片的乳剂发黑和使燐光屏发亮所进行的化学反应是足够用的(对可见光也使用这种方法)，而且这个能量用于破坏分子也绰绰有余。换句话说，X射线能使其所通过的空气和其它介质发生电离。

现在浅谈一下 γ 射线。当谈到放射性衰变所产生短波辐射时，就要用到 γ 射线这个术语。借此机会先说一下，γ 射线是天然的放射性物质发出的，在发出 γ 射线过程中产生出人工元素。在原子反应堆中，当然能产生 γ 射线。在原子弹爆炸时可以产生更强的和更硬的 γ 射线。

因为 γ 射线具有很短的波长，所以 γ 射线的吸收系数可能很小。例如，放射性钴在衰变时所产生的 γ 射线能够通过几十厘米厚的钢材。

短波电磁辐射能够破坏分子。一定剂量的辐射线对生物体是有危险的，因此对X射线和 γ 射线需要进行防护。为此目的常使用铅。X射线室壁也要抹上专门的含钡盐的灰泥。

γ 射线和X射线一样能够用于检验工作。通常使用的 γ 射线是放射性物质——核燃料的"灰"所发散出来的。γ 射线与X射线相比其优点是具有更大的穿透能力，但主要的是可以利用小的细玻璃管作为辐射源，这个细玻璃管可以安置在很小的地方。这是X射线管望尘莫及的。

X 射线结构分析

1912 年伦琴主持了慕尼黑大学的物理教研室。就是在这个实验室里学者们孜孜不倦地讨论了X射线的本性问题。应当说明，当伦琴还是实验物理学家的时候，他就特别重视理论。在慕尼黑大学的物理教研室里有很多天才的理论物理学家在工作，他们绞尽脑汁在研究X射线的本性。

研究X射线通过衍射光栅的情况，不言而喻，是试图对X射线的本性作出解释。利用衍射光栅曾证实了光只有波动的本性，并且很准确地确定了各种辐射的波长。

制备这种光栅的方法之一是在镀铝膜的玻璃板上用象牙做的软刻划工具借助专门的机器进行刻痕，要求严格地保持刻痕之间的距离彼此相同。好的光栅具有短周期和多划数。一块好的光栅划数可达几十万条，这样的光栅每毫米可划1000条以上。

利用透镜把很强的点光源发出的平行光束成直角投射到光栅上，从每一小孔向四面八方发出光线(换句话说，每一个小孔都是一个球面波的光源)。但是在选定的方向上从各个小孔发出的光波将是同相的。为了达到这一目的，必须使光程差等于波长的整数倍。强光线前进的方向将发生 α 角的偏折并满足下列条件：

$$a \sin \alpha = n\lambda$$

式中 n 为整数，a 为两狭缝间的距离。读者没有我们的帮助

也能很容易导出上述公式。

整数叫做光谱级。如果向光栅入射的是单色光，那么我们在目镜的焦平面上获得几条被暗区间分开的线。如果光线是由各种波长的光波组成的，则一个光栅产生几个光谱——一级、二级等等。每个后面的光谱比其前面的光谱更展宽了。

由于光波波长与狭缝间的距离有相同的数量级，所以衍射光栅把光(包括可见光、紫外光和红外光)分解成光谱。并借此可以进行精细的光谱分析。

但是对于X射线，衍射光栅就好像开着的大门。X射线通过衍射光栅不发生偏折。可以假设X射线是粒子流，也不妨把它设想成和光一样是波长 λ 更短的电磁波。当然，我们是假设波长 λ 很短。如果是这样的话，那么根据线性光栅的衍射方程 $a\sin\alpha = n\lambda$，全部的 n 束射线成偏折角 α 前进，实际上汇到一起，使衍射变得不明显了。但是要做成狭缝间距离 a 等于百万分之几微米的衍射光栅是不可能的。这怎么办呢?

年青的物理学家劳厄(1879—1959)相信X射线也是电磁辐射。他认识一位结晶学家，他们经常在一起讨论。这位结晶学家深信晶体具有三维的原子晶格。在他们讨论的大量的科学题目中，劳厄想到了一个题目，就是把他关于X射线的本性的思想和晶格的概念进行对比。劳厄想："万一晶体的原子间距离与X射线的波长具有相同的数量级呢?"

三维晶格是否能代替线性光栅呢?对这个问题的答案是不清楚的。劳厄决定进行实验，第一个实验是很简单的。调

正X射线束的光圈。在X射线的光路上放置一个比较大的晶体，在晶体附近放置照相底片。由于晶体毕竟不是线性光栅，把底片放到哪里合适，当然是不大清楚的。由于底片的位置没有选择好，所以在一段时间内实验没有获得成功。很有趣的是，在一个偶然机会，错把底片放到了正确的位置而取得成功。

当然，这个偶然性在发现过程中并没有起到特殊的作用。问题在于，劳厄实验中在发现现象的同时又深入地研究了这种现象的理论。劳厄很快地把线性衍射光栅的理论推广到三维的情况。从理论上应得出，只有晶体对于入射光线有一定的取向性时，才能产生衍射光线。从理论上也可以得出，最强的射线应当是偏折角不大的那些射线。由此可以得出结论：照相底片应当放置在晶体的后面，并与入射光线垂直。

最先注意到这个现象的是英国的布喇格父子，两个人起了一个名字，叫乌伊利亚姆。他们很快地重复了劳厄的实验，并对劳厄的理论给予了很简单，很通俗的解释。同时用大量易懂的例子指出了劳厄的发现可能成为研究物质的原子结构的一种方法。

我们向读者介绍X射线结构分析基本理论和一种确定晶格结构的方法。就是：以百分之一埃的精度测量原子间的距离；给出原子在分子中的空间分布图象；晶格结点对X射线的散射与从波节面系反射回来的经特殊选择的反射（只在某些离散值的角度下进行反射）等效。一个晶格可以分成许多这样的波节面。

X射线是一定波长的电磁波，让X射线按一定角度入射到晶体上。对于不同的波节面系这个入射角度各不相同。我们可以假设，任意原子面都按入射角等于反射角的定律来反射X射线波。但是和可见光波的反射有本质上的区别。和可见光的区别是：X射线能穿透到晶体的深处。这就是说，不仅外表面对X射线发生反射，而且所有的原子面也能对X射线发生反射。

我们来分析一个面间距离为 d 的波节面系统。每个波节面按相同的角度 θ 反射入射光线。这些被反射的射线应当是彼此相干的。如果从整个波节面系反射回来的射线只在同一相位中传播，便可能产生很强的X射线。换句话说射线之间的光程差应当等于波长的整数倍。

从图 3.2 的几何图形中可以看到，相邻两束反射线之间的光程差等于 $2d\sin\theta$，因此，衍射条件将有下列形式：

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

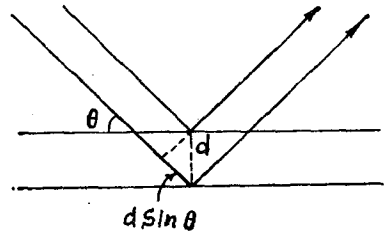


图 3.2

俄国结晶学家乌利夫与布喇格父子同时导出上述公式，所以把这个公式叫做布喇格-乌利夫方程式（确切地说应叫做布喇格父子-乌利夫方程）。

有许多方法可以把一个晶体分成若干波节面系。只有波节面系的面距离和对于入射光线的取向性能满足布喇格-乌

利夫方程式的波节面系，对反射才是有效的。

很清楚，如果射线是单色光(即电磁波有一定的波长)，则晶体对于射线处于任何位置时，都可能不发生反射。但是旋转一下晶体，我们可以依次把不同的波节面系旋转到反射位置。这种方法是最有实际意义的。

上面所涉及到的劳厄实验的成功决定于入射到晶体上的X射线的"白色光谱"，即X射线的波长在某个波段范围内是连续分布的。所以，尽管在劳厄实验中晶体是不动的，但是不同的波节面系对于不同的波长可成为"反射的"位置。

在现代，X射线结构分析已经实现了完全自动化。把一小块晶体(0.1—1毫米)固定在一个特制的卡头上，这个卡头可按指定的要求转动晶体，使其波节面系一个接一个地进入反射位置。每个反射面(为了不总是重复波节面系一词，故这样简称)有如下特征：

1. 有自己的面间距离；

2. 每个反射面与晶体晶胞的晶带轴都组成一定的角度(晶胞的棱长和这些棱之间所形成的角度是自动测量的)；

3. 其反射线的强度具有一定的数值。

组成一个分子的原子数目越多，则单位晶胞的尺寸自然就越大，信息容量也因此而增加。因为晶胞尺寸越大，反射面的数量就越多，以致需要测量的反射面数目往往有几十个到几千个。

我们已许诺介绍X射线结构分析的基本理论。介绍之前，先让我们把问题颠倒过来，即假设某物体的晶体结构已经完

全知道了。这就是说，我们知道原子分布图，即单位晶胞中所有原子的坐标(本书第二卷中介绍了关于晶体结构的知识，请读者复习一下)。现在我们来研究某一个反射面系。下述情况是很清楚的：如果晶体的大多数原子分布在通过晶胞各个节点的平面上，那么，所有的原子都将使X射线在相同相位中发生散射，于是便产生了强反射线。现在让我们设想另外一种情况，有一半原子在波节面上，而另外一半原子正好位于反射面间的正中间，在这种情况下，只有一半原子使入射的X射线在相同相位中发生散射；另外一半原子使入射的X射线在相反的相位中发生散射，因此，反射不能发生。

以上是两种极端情况，在其余的所有情况之下，我们将得到不同强度的反射线。用于这类测量的仪器叫做自动衍射仪，它可以测量彼此相差10000倍的反射线强度。

射线的强度单一地取决于波节面之间原子的位置。表示这种关系的公式过于复杂，看来无须把它列出。上述的两种极端情况，足以使读者相信这样公式的存在。在这样的公式中，射线的强度是所有原子坐标的函数，而且原子的种类也在公式中被考虑到了，因为原子中的电子数目越多，那么这个原子散射X射线的能力就越强。

表示原子结构和反射线强度关系的公式中，当然也包括了反射面的取向性和单位晶胞尺寸等因素。我们能测量出多少个反射线，就能够列出多少个这样的方程式。

假设物质的晶体结构是已知的，则所有的反射线强度便可能被计算出来，并且可以和实验结果进行对比。但这并不

是我们所要解决的问题，要解决的正好是与此相反的课题，即根据几十、几百甚至几千个反射线的强度，确定出晶胞中所有原子的坐标(位置)。乍看起来，解决这个相反的课题，在现代电子计算机的帮助下，似乎是轻而易举，没有什么特殊困难的。不是有很多方程式吗？这没有什么关系，可以利用电子计算机求出它们的解。

然而，实际上问题远非如此简单。已知的试验数据是射线的强度，而射线强度和射线振辐的平方成正比。上面所谈到的关系式，实质上是个表示射线干涉的公式。被晶体所有原子散射的波彼此之间互相干涉。于是所有原子散射波的振辐便发生叠加，叠加后的振辐可以计算出来。那么射线强度则可通过振辐的平方求得。解这样的问题自然毫不费力，但怎样解决与此相反的问题呢？为了求出振辐而把强度进行开方吗？是的。但开方之后，却有正负两个值。我想，读者已注意到问题的复杂性了。求原子坐标的方程式比需要的数目多。但是，方程式右边要有准确的符号。

看来，事情没有指望了。是的，起初物理学家并未试图以计算解决这个相反的问题，他们应用了"取样和修正"的方法，根据相似晶体结构的资料来研究未知的晶体结构。例如，计算出十几个射线强度，去和试验结果进行比较。如果毫无相似之处，我们可以再取另外的晶体结构模型。

上述方法虽然麻烦，但对简单的结构却可得出正确的结果。但是，当"结构学家"(从事这一专业的学者的行话称呼)事实上研究了所有的简单晶体结构之后，不得不对解决相反

问题的可能性进行认真的考虑了。

在30年代中期，物理学家们推测，如果只限于研究由许多轻原子和一个重原子组成的那些分子，甚至是复杂的结构也能够被“确定出来”(我再次使用行话)。重原子中的电子数目很多，对X射线的散射能力比轻原子强得多。所以，首先可以粗略地把晶体设想为仅仅由重原子构成的。假设在一个晶胞中只有一个原子，那么运用“取样和修正”的方法确定原子的坐标不会遇到什么困难。坐标确定后，并假设这个原子在晶胞中“主宰一切”。于是我们便可以认为，仅由重原子构成的假想的晶胞结构所确定的振辐的正负号，也同样适用于实际的晶体结构中。

20年以来最重要的发现是，关于不同的反射面系的反射波振辐之间具有一定联系的定理得到了证实。例如，假设三个反射波相对晶胞节点按相位分别移动的角度为α、β和$(\alpha+\beta)$，那么三个反射波振辐的符号就有以下关系：如果$\cos\alpha\cdot\cos\beta\cdot\cos(\alpha+\beta)$之积的绝对值大于1/8，那么这个乘积一定带正号。读者们，请你们不妨试一试。

这一理论的发展导致了所谓结构分析直读方法的出现。甚至对于很复杂的情况，也可以把实验仪器和电子计算机联合使用。这样，电子计算机可给出晶体的结构来(或者用矿工的行话说“把情况送上地面”)。

反射波振辐的符号确定之后，确定原子坐标的工作，就是解包括很多未知数的大量方程式，这在前面已论述过了。这时，重要的是方程式的数目至少超过需要确定的原子坐标数

的十倍，而甚至最好是百倍。

关于解这些方程式的技术问题，这里不做阐述。我们将用迂回的办法解决问题，这种办法就是电子密度的傅立叶级数理论。很遗憾，只有对受过良好教育的读者，才能把这一理论阐述清楚，并把它运用于确定晶体结构，但我觉得这并不需要。我已讲清楚了这种方法的实质，尽了自己的职责。

物理学家（指X射线结构分析专家们）用什么方式向化学家们提供其需要的物质结构知识呢？图3.3说明了物质结构

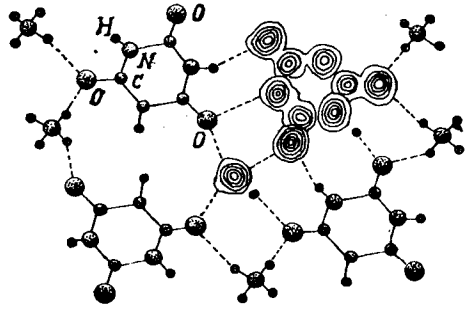


图 3.3

的概念。这是一个很简单的物质结构图，该物质就是巴比土酸铵。今天，确定类似的结构已经不费吹灰之力，不需要任何研究人员参加，就可用自动装置确定出来。电子计算机能够以数字形式（原子的坐标值）报出结果，也能够用物质结构的形式（象图3.3那样）表示出来。不同化学元素的原子以不同直径的圆环表示。如果研究人员需要，电子计算机也可以提出电子密度分布图。每个原子都可以象地理学家用等高线去

描绘山峰那样来表示。只是在我们的文章中，封闭线并不代表高度，而表示某个位置上的电子密度曲线，“山峰”的顶点则代表原子的中心。

以上的这类图象，仅仅是我们所描述的方法在科学上的贡献的小小一部分。这种方法的全部贡献要大得多。在现代，它已能确定出15000种以上的晶体结构，其中包括几十种蛋白质的结构，这些蛋白质的分子是由几千个原子所组成的。

复杂的有机物分子的确定，奠定了生物化学和生物物理学的基础。这些科学现在仍在蓬勃发展之中，人们正期待着这些科学将揭开生命、疾病和死亡的秘密。X射线结构分析方法，虽然已有六十五年的历史，却仍然处于科学发展的前沿。

X 射 线 谱

在前一节里我们曾提到，可能会遇到“白色光谱”和“单色光”。怎样解释硬电磁辐射光谱的这种特征？什么时候它是“白色”的？什么时候它又是“单色”的呢？

如果改变辐射源发出的X射线或γ射线的光圈（即在光程上设置两个带小孔的挡板），并使辐射线入射在晶体上，于是在最普遍的情况下，将在满足布喇格-乌利夫方程要求的波节面上产生几束反射线。如果这样放置晶体，使它的某个波节面（能给出强反射的）与X射线摄谱仪的转动轴线相重合，然后转动晶体，使这个波节面与入射线始终构成θ角，那么晶

体在任何位置时，都将有一定波长的分光谱被反射出来。我们可以用电离计量仪接收到这个反射波，或把它记录在摄影底片上。采用这种方法，首先，可以成功地产生辐射光谱中包含任意波长的单色光线；其次，可以建立研究任何辐射光谱的方法。

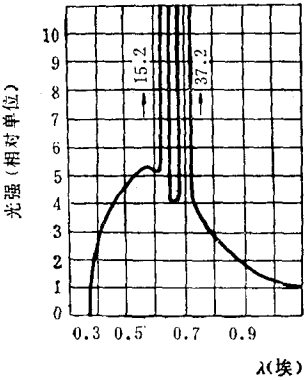


图 3.4

钼阳极X射线管典型光谱示于图3.4中(电压35千伏)从图中可以立即得出结论，有两种原因导致X射线谱的建立。实际上我们看到，被观察的光谱是许多尖峰在连续曲线上的叠加。当然，这些尖峰的产生与连续曲线的产生是有区别的。

X射线衍射现象发现之后不久，立即开始了X射线谱的科研工作。并确定出，连续X射线谱的特征不决定于X射线管的阳极材料，而是取决于射线管的电压。连续X射线谱的特点是，当波长为某些最小值时，射线谱急剧地中断，在长波的一端，通过最大值后，曲线平稳地向下，并且看不到谱线的“终点”。

研究人员曾指出，增强X射线管中的电压，连续射线谱的强度将增加，并且其界限向短波的方向偏移。X射线的最小波长与射线管中的电压存在着以下简单关系：

$$\lambda_{最小} = 12.34/V$$

用量子学说解释这个公式是不困难的。数值 eV——这是电子从阴极飞向阳极的过程中所获得的能量。当然，电子所释放的能量也不能大于此值。假若电子把自己的全部能量转变成X射线的量子($eV = h\nu$)，那么在代入常数后，我们将得到上面的等式。(λ 的单位是 Å，V 的单位是 KV。)

由于产生连续光谱，便可得知，电子不一定把自己的全部能量用于生成X射线。实验证明，电子束的很大一部分能量变成了热。所以X射线管的有效系数很低，而阳极却被加热得很厉害，以致不得不从阳极内部用水进行人工冷却。

有没有解释产生连续X射线谱的理论呢？是的，有。计算(很遗憾，我们不能进行这种计算)表明，从电磁场的一般定律(麦克斯韦方程)出发(第三卷中论述过这些定律)，可以严格地得出这样的结论：如果电子的飞行受到阻碍，这将导致连续X射线谱的产生。电子和固体的碰撞不是产生连续X射线谱的主要因素。即使没有阳极的物质作用，而用相反的电磁场，也可以获得连续X射线谱。

此外，还存在一种产生连续X射线谱的可能性。我们回忆一下，白炽状态的固体也能发射出连续电磁波谱。但在地球上，我们遇不着这样产生的X射线谱，因为白炽物体在最高温度时(6000度，高于此温度任何固体都经受不住)热辐射的波长接近半微米。

请不要忘记等离子区的存在。在地球上的人工等离子区中和其它星球上，有获得几百万度高温的可能性。在那样的条件下，热辐射的电磁波谱中也包括有X射线。因此可以设

想，从宇宙空间射来的X射线将帮助人类去解决天体物理学中那些引人入胜的课题。

现在让我们把话题转向连续X射线谱曲线上的“尖峰”吧。

对于这些射线，正好是一些相反的规则才适用，即与连续X射线谱的规律相反。“尖峰”的位置（实际上就是它的波长）单一地取决于阳极材料，所以这种辐射叫做标识X射线。

这种射线的发生可以用原子的量子模型给以正确的解释。X射线管中的电子束能穿透阳极材料的原子内部，并从原子中驱逐出处于最低能量级的电子。低能级刚一空出来，离原子中心较远的电子便跃迁到这个能级上来。在每次跃迁中，都按量子的基本定律 $E_m - E_n = h\nu$ 发生能量辐射。不同原子的能级分布各不相同，因此，所产生的光谱自然是标识的。

由于标识谱线是最强的谱线，所以可把它们用于X射线结构分析。至于连续X射线谱，则在射线入射到被研究的晶体之前，最好先进行“筛选”，也就是把它经过晶体单色计反射出来。

由于各种元素的光谱都是标识的，所以把射线分解成光谱便可以用于元素的化学分析。这种分析方法叫做X射线谱分析法。在一系列领域中，例如稀土元素的研究工作方面，X射线谱分析法几乎独占鳌头，无法取代。X射线的标识谱线的强度能够非常准确地确定出元素在化合物中的百分比。

现在我们浅谈一下 γ 射线谱。我们在地球上遇到的 γ 射线，往往是放射性元素在衰变过程中产生的，这一点以后还要

述及。但应指出，在放射性元素的衰变过程中，也有不产生 γ 射线的情况，但不管是哪一种放射性衰变，γ 射线谱都具有标识性质。

如果说，当原子从高能级“降到”低能级便产生标识X射线，那么，由于原子核类似的跃迁，便会产生 γ 射线。

放射性衰变过程中产生的 γ 射线谱已被很好地掌握了。任何放射性同位素，其衰变时所产的 γ 射线的波长的精确数据，都可以从表册中查找到。

材料的X射线学

我不得不多次重复，科学术语的使用情况还不是非常令人满意的。现代科学发展如此之快，以致一代人就能亲眼看到任何一个科学词汇所包含内容的变化。同时，术语的变化关系到习惯的骤然改变，而停止旧书的流传是不可能的。因此，除去严格地规定科学术语的含义外，别无办法。

现在，当谈到X射线结构分析时，指的是研究晶体的原子结构，研究的对象是物质的单晶体。

但是，用X射线研究物质结构的好处却远不局限于解决这一项任务。如果不仅仅是拍摄单一的晶体图像，而是拍摄任意的材料的图像，并把它们的X射线图像进行照相，那么就可以获得特有的和丰富信息的图像。在这种情况之下，一般采用“X射线学”这一术语。

如果在单色的X射线的光程上设置一小块金属箔，那么

在平面照相胶片上将产生一系列同心的圆环。这种X射线图像叫做德拜图。它是怎样形成的呢?

大多数固体材料是由取向不规则的小晶粒组成。当某种熔融合金开始凝固时，结晶过程便从合金的许多点上同时开始，每个晶粒都可以"任意地"生长，并且不断地继续长大，直到这些晶粒彼此接连时为止。

在每个晶粒中原子面系都是相同的，因为按照自己的结构来说，它们是全等的。我们先集中讨论某一个原子面系，设其面间距离为 d。一般来说，固体晶粒的线性尺寸大约为百万分之一厘米，因此物体中晶粒数量是非常巨大的。其中必然会有这样的晶粒，其原子面与入射光线形成的角度 θ 能满足布喇格-乌利夫方程式的要求。每一个这样的晶粒都在照相胶片上形成一个小光斑。所有形成反射的晶粒，其原子面的法线将组成一个圆锥形(图 3.5)。因此反射线也必然形成圆锥形，这个圆锥形若和照相胶片相交，在胶片上便生成圆环。测量这些圆环的半径和晶体至胶片的距离后，我们就可以立即算出布喇格角 θ，并据此计算出物体的所有反射面的面间距离。

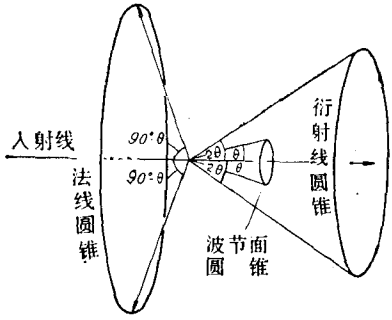


图 3.5

利用这样的衍射图像，我们可以立即区分出晶体物质和

非晶体物质。非晶体没有反射面，所以在它的X射线图像上看不到清晰的衍射环系。一般来说，原子不可能互相"堆集"在一起，所以物质的分子排列都具有某种规则。正象计算结果表明的那样，这一点导致了在非晶体的X射线图像上产生一个，偶尔也有两个漫射环。

在X射线图像上所观察到的这些圆环，为我们提供了关于金属、聚合物和天然化合物等物质结构方面的一系列有价值的信息。假若物质由粗大的晶粒组成，生成的衍射环将不是连续的，而是由分散的小光斑组成；如果这些晶粒的排列不是不规则的，而是对某个轴线或平面具有取向性，象在金属丝或金属板、聚合纤维和植物纤维中那样，衍射环会把这些特征表示出来。不难理解，当这些晶粒具有一些主要取向性时，这些原子面上的反射线将不能连续地充满整个光锥，所以在X射线相上，我们看到的是一些圆弧，而不是整个圆环；如果取向性是高度完善的，这些圆弧就可能变成不大的光斑。

当然，根据X射线图像的形状对物质结构的特征进行详细地描述并不是简单的事情。为解决这个问题，"取样和修正"的方法能起着极重要的作用。为此研究工作者想出了一个物质结构的模型，这种模型应当给出研究人员要计算的X射线的反射图。把计算和试验进行对比，选择出正确的物质结构图像。

在材料的X射线学中，有条件地把散射划分为大角度散射和小角度散射。从前面推导出的布喇格-乌利夫公式中可以清楚地看出，如果物质的结构中在不大的距离上（例如3—

10 Å)显示出周期性，在这种情况下，将产生大角度散射；而如果被反射的(或叫做被散射的)X射线给出的衍射图集中在入射的X射线附近，那就是说，物质结构在很大距离上具有周期性。

在金相学中，我们涉及的问题主要是处在大角下的衍射环。这些衍射环是由于金属晶粒而形成的。晶粒的原子组成了许多规则的晶胞，其尺寸一般以Å为单位。

当研究的对象是大分子构成的物质时，如纤维素或脱氧核糖核酸等自然物质以及聚乙烯、尼龙、卡玻隆和其它合成物质等，这些物质对于没有一点化学知识的读者也是非常熟悉的。在这种情况下，也会遇上一些非常有趣的现象。有时在X射线图像上出现的仅仅是一些大直径的环，换句话说，就是遇上了象金属散射时一样的大角散射；也有时不出现大直径的环，看到的是与入射线方向偏折不大的衍射线；最后，也可能出现这样的情况：某些物质显示出的X射线的散射，既有大角的，也有小角的。

当散射角由几分到3—4度的范围时，通常叫做小角散射(我再次重复，小角散射与大角散射的划分是有条件的)。自然，衍射角越小，造成这种衍射的结构单元的重复性周期就越大。

大角散射是由晶体内部原子排列的方式所决定的；至于小角散射，则是由于所谓超分子化合物的分子规则排列所造成。但有时也会遇到这种情况，在这些由几百、几千个原子组成的超分子化合物分子内部，原子排列没有任何规则。如果

这些巨大的体系组成了一维，二维，三维光栅，则X射线的小角散射会将这种情况反映出来。为使读者对这一点有直观的形象概念，我建议想象一个装满土豆的麻袋，土豆在麻袋中整齐地排列着。这种比喻中包含着深刻的道理和趣味。因为在很多生物系中有类似"装满土豆的麻袋"式的结构。例如，组成肌肉的长长的分子，就象一束束圆铅笔似的，整整齐齐地排列着。X射线的小角散射表明，在细胞膜中、在病毒等蛋白质分子系中，我们也遇到了这种类型的高度整齐排列的分子。

在衍射理论中有一个很有趣味的定理，只是我还没有去论证它。但我想对读者来说，这个定理是自然而然的事。如果在能使X射线发生衍射的物体中，把小孔和不透明的地方互相调换位置，结果是衍射图的形状严格地保持原样。有时这个定理颇使研究人员为难一时，当研究人员既能用物质内部的微孔、也能用异物杂质同样成功地解释X射线的散射时，就是上述情况的表现。研究微孔、研究它的尺寸、形状和单位体积中的数量，是一项具有重大实用价值的工作。怎样给合成纤维染色在很大程度上取决于其结构中的微孔特点。同时我们也不难猜出，微孔分布的不均匀性会造成染色的不均匀，使衣料在染色后不够美观。

上述种种充分表明，材料的X射线学不仅是研究材料的一种方法，而且也是各种生产过程中进行技术检验的手段之一。

第四章　力学的推广

相对论力学

我们在第一册中阐述过的牛顿力学，是显示人类独创才能的一项最伟大成就。应用牛顿力学可以计算天体的运行、火箭飞行的轨道以及机械运动等。但是，二十世纪的物理学证明了，牛顿力学定律有两点局限性：对于质量很小的粒子运动，牛顿定律就变得不能适用；而当物体运动的速度接近光速时，这些定律也不能忠诚地为我们服务。在前一种情况下，牛顿力学被所谓波动力学所取代；在后一种情况下被相对论力学所取代。

当我们遇到非常巨大的引力时，便不得不使经典力学复杂化。因为，控制着超致密星体活动的、难以想象的巨大引力场，不受经典力学那些简单公式的约束。这些公式在第一册中已向读者介绍过了。我们暂且不谈这些变化，而要详细叙述一下，当涉及微观粒子运动和速度接近光速的运动时，我们必须做出的两项最重要的结论。

让我们从相对论力学开始吧！通向物理学这重要一章的道路是非常不平坦的。这条道路不仅是曲折的，而且完全是从另外一些方面开拓的。这段历史是从“以太”开始的。一般来

说，在十九世纪末物理学家是安逸消闲的。普朗克的老师没有奉劝普朗克献身于物理学，因为“这门科学的发展实际上已经结束”。为了物理学大厦的峻工，只欠“两件小事”没有完成：首先是对黑体的辐射现象的解释搞得不顺利（搞清楚这件“小事”之后，物理学家发现了量子）；其次是迈克耳逊的实验证明了光的速度与地球运动的速度不能进行合成。在地球上光的速度在各个方向上都是一样的。这个实验迫使物理学家考虑以太的性质问题，从而破坏了他们安宁的心情。

很少有人怀疑过这种微妙的物质（以太）的存在和这种物质的振动就是电磁波的理论。100 年过去了，令人惊讶的是，尽管“以太假说”导致了大量奇谈怪论的出现。但是，仅仅是为了挽救“光就是某种看不见的物质的运动”这一概念。绝大多数科学家，其中包括一些天才的、杰出的物理学家却都走过各种迂回曲折的道路，提出过无数的补充建议。

是谁想象出来的，以太象平静的海洋、许多行星在其中通过。又是谁想象出来的，以太象空气一样可被运动物体所带动。奇怪的是，原来谁也没有提出过明确的见解，认为电、磁矢量的振动发生在一个点上，因而不能用机械位移来解释电磁现象。

为了自圆其说，创造了一套理论，其中得出了一些形式上是正确的公式（这些公式中也提到了所谓的平方根 $\sqrt{1-(v/c)^2}$，根号内 v 是物体运动的速度，c 是光速）。但是，公式被解释得不正确。在 1881 年迈克耳逊首次完成的实验使一些理论家极为伤心。迈克耳逊用干涉仪（其构造在第二

册中被描述过)所做的实验表明，相对地球运行轨道的纵向和横向，光的速度实际上是相同的。

这样一个对以太假说是致命打击的事实，并没有迫使主要的物理学家放弃对以太的信念（以太被认为是能够穿透一切物体的物质)。但是他们已经意识到，迈克耳逊的实验可能迫使人们和以太诀别。那么，请便吧！如果认为以太是不运动的，并承认牛顿的绝对空间，而天体又相对这个绝对空间完成自己的运行，世界岂不是更加美好。

为了解释迈克耳逊的实验，许多物理学巨匠，如拉莫尔(1857—1942 年)和洛仑兹(1853—1928 年)运用了当“刚体”通过以太时，会沿着运动方向发生收缩的假说。但是，在涉及电动力学的很多现象时，在逻辑上的矛盾和解释上的勉强，遗留了不能令人满意的感觉。

解决上述所有矛盾的重任落到了本世纪最伟大的物理学家爱因斯坦(1879—1955年)的肩上了。

爱因斯坦进行推理的出发点是相对性原理。在伽利略之后，很少有人怀疑，对于机械运动来说所有的惯性系都是等效的(让我们复习一下第一册中这方面的论述)。不知怎么搞的，得到的结果令人奇怪和不圆满：对于机械运动来说具有等效性，而对于电磁振动却没有等效性。那么，我们认定相对性原理对所有的现象都是正确的吗？不行，那我们会走向荒谬绝伦的处境。所以我们假设，某个光源发射出光，并在空间传播。在观察光波的时候，我们可以不考虑光源是运动的或静止的。如果是这样，那么，从不同的、以任意大的速度 v 做相对

运动的惯性系上的观察者的观点看，电磁波的速度（299792公里/秒）应当是一样的。

一节火车以不变的速度 v 沿着一段直线的铁路运动，和铁路平行方向有一条公路。一个摩托车运动员沿着公路与火车同一方向向前运动。铁路附近有一个自动检测站的检查员，他吹哨警告破坏规定者（摩托运动员）——他以速度 u 从检查站附近飞奔而过，速度超过去那个方向的许可值。检查人员装备的雷达指示出来的速度是 85 公里/小时，火车司机不时看看很快追上来的，并将超过火车的摩托运动员，观察者——火车司机测量了摩托车的速度，它是 u'，$u' = 35$ 公里/小时，无需证明，火车的速度是 50 公里/小时，在这种情况下，速度合成定律是正确的。

$$u = v + u'$$

但是，这个非常明显的规则，对于光线却不能适用。光子的运动速度对属于不同惯性系的两位观察者来说是一样的。

爱因斯坦的天才在于，他希望找到一个既适合电磁现象，又适合机械运动等所有物理现象的统一方法。因而他鼓足勇气，不仅放弃了对于光来说是明显的结论，而且也放弃了用于所有物体的速度合成定律。

从上面叙述的观点看待迈克耳逊的实验，自然就没有什么解释的了。既然光速不取决于光源运动的速度，就等于说，无论是沿着地球运动轨道，还是垂直地球围绕太阳转动的轨道，总之，在所有的方向上，光速都是相同的。

根据上述原理可立刻得出这样的结论：光的速度是最大

的速度*。的确，如果光的速度不能和光源的速度合成，也就等于说，超过光速的速度是不可能存在的。爱因斯坦在自己的回忆录中写道，早在1896年，他就产生了一个问题："如果我们以光速来追赶光波的话，那么，在我们的前面岂不是该有一个不依赖于时间的光波场吗？这样的场其实是不可能的"。这样，便没有一个物体，没有一个粒子能够以大于光速的速度进行运动。

请读者们仔细地思考一下这样一种论点，由于它表面上很离奇，我们再把它重述一遍：如果在地球上或者在其它星球上，电磁波从一个地方发射到另一个地方，那么在地球表面上的观察者或在地球上空乘坐高速飞行火箭上的观察者所测量到的这同一个电磁波的传播速度将是相同的。对于所有以电磁波的速度运动的粒子，这一论点都是正确的。爱因斯坦的理论也适用于光。

当运动物体的速度小于光速时，情况怎样呢？显然，即使在这种情况下，我们一直深信不疑地应用的速度合成的简单原理也是不正确的。但是，通常的速度合成规则所产生的偏差，只有在物体运动的速度非常非常大时才开始察觉得出来。

相对论力学，这是高速运动物体的力学，它的速度合成规

---

* 一般来说，相对论力学与大于光速运动的粒子的存在是不矛盾的．理论家甚至已给这些粒子取名为超光速粒子．但如果存在这种粒子，那么对于它们来说，光速也仍然是其运动速度的极限值，但不是最大值，相反是最小值．本书作者认为，超光速粒子的理论仅仅是个文雅的数学游戏．如果真的存在超光速粒子世界，那么原则上说，这种粒子对于地球上的事情也不会发生影响，就象传说中的上帝一样．

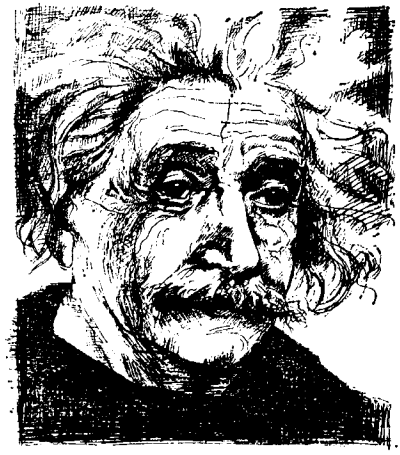
则可写成下面的形式：

$$V = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}}$$

为了给普通的速度合成规则以必要的修正值，需要大略地计算一下，应当具有什么样的 v 和 v' 值。

例如，当进行宇宙飞行时，运动速度为每秒几十公里，速度合成的普通规则是否还能适用呢？

众所周知，从宇宙飞船(运载火箭)上发射第二级火箭是具有重大意义的事情，正是采用这种方法将可能发射到太阳系边缘的火箭。我们用 v 表示宇宙飞船相对地球的速度，用 v' 表示从宇宙飞船上发射的火箭相对飞船的速度。假设 v 和 v' 均为 10 公里/秒，现在我们按速度合成的标准公式进行计算，火箭相对地球的速度将是多少？那时，在分母的单位上需要补



A. 爱因斯坦（1879—1955 年）——天才的学者，使物理学发生革命性变化的相对论的创始人. 在 1905 年爱因斯坦发表了相对论的专题论文，1907 年，他推导出一个表示物体质量与能量之间关系的公式，1915 年，发表广义相对论，根据这个理论，推导出新的引力定律和关于空间曲率的结论。

爱因斯坦对物理学的贡献并不局限于相对论. 从普朗克的著作中他得出了存在光子的结论，并指出了，怎样用这些观点解释一系列具有重大价值的现象，其中包括光电现象。

充分数 $10^2/9 \cdot 10^{10} = 10^{-9}$，计算后得到的修正值是个很小的数值，这就等于说，速度合成的经典公式在实际上是可以应用的。

那么相对论力学还有什么实际意义呢？我们一定会得到这个问题的答案的。而暂时，我们先从已经描述过的假说所得出的概念开始。由于不得不放弃速度合成的普通规则，所以，我们已准备好对力学中的其它公式也进行本质上的修正。

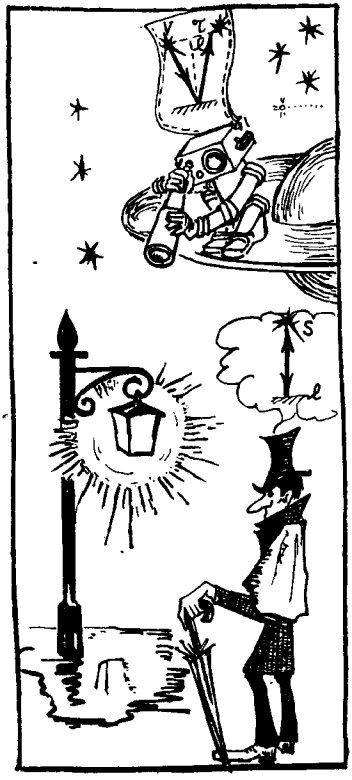


图 4.1

前面已经强调指出过，在相对论的形成过程中，迈克耳逊的实验起了决定性作用。这个实验证明了，在相对太阳的轨道上，无论在地球运动的纵向还是横向光的速度都是一样的。

我们不去研究迈克耳逊实验的干涉仪的光程，而局限于讨论更简单的事情。在地球的某个地方我们建立起一个平平常常的小装置（图 4.1），在它的柱子上离地表面高 L 的地方有一个激光器。激

光器发射出的极细的光线沿着地球半径的方向前进，射向地表面上的镜子之后向相反的方向反射回来，以后便被光电管接受。一位工程师这样巧妙地安放着光电管，以致光源和光电管位于一个点上，在图 4.1 上这个点以字母 S 表示。运用超级秒表可以准确地记录下两个瞬时：光线发射的瞬时和光线到达光电管的瞬时。

两位观察者对这些现象进行监视，其中一位坐在我们装置的附近；另一位观察者则在遥远的星球上。两位观察者都对光线从 S 点出发到光线返回 S 点的时间间隔 τ 进行测量，第一位观察所绘制光线路程图最简单，他认为光的往返路程完全重合，因此确信运用等式 $\tau = 2L/c$ 的推理是正确的。

星球上的那位观察者监视光线发射时的闪光和光线到达光电管的瞬时，被他测量到的时间间隔以 τ 表示。为检验测量结果是否完全正确，观察者绘制了光程图。但对他来说，开动秒表的瞬时和他发现光电管反应的瞬时，S 点的位置是不重合的。所以，他所绘制的光的路程和第一位观察者的不相同。星球上的观察者知道地球相对自己的速度，他绘制的光程图为等边三角形，等边三角形的底为 $v\tau$，它的高为 L，利用毕达哥拉斯定理，星球观察者确定出，光线走过的路程等于 $2\sqrt{L^2+\left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}$。因为对两位观察者来说，光速是相同的，所以这段路程等于 $c\tau$。既然如此，则两个瞬时之间的时间间隔将有以下值：

$$\tau = \frac{2L}{c\sqrt{c - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这是意想不到的结果！因为按地球观察者的观点，上述的同一时间间隔应当等于 $2L/c$。

我们求助于逻辑学，也一定能得出这样必然的结论：静止的观察者所测量出的时间和运动的观察者所测量出的时间是不一样的。

静止的观察者测得的时间叫做本征时间，以 τ_0 表示；以速度 v 运动的观察者测得的时间以 τ 表示，我们发现，这两者之间有如下关系：

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \text{式中} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

这就是说，处于运动状态的时钟比静止状态的时钟走得慢了。如果你接受上述理论的基本假设，那你就必看得出这个结论。乍看起来，这个结论导致了不可理解的推论，如必须放弃同时性概念。

但是，这是否会导致以下情况的出现呢？一位观察者看到，张三放了一枪，而后李四中弹倒下，另一位观察者看到的是，李四首先倒下了，然后张三才打了一枪？请读者确信，相对论力学不会导致任何毫无道理的事情发生，因果关系的原则任何时候也不会被破坏，这一点是可以非常通俗地解释清楚的。但很遗憾，限于本书的篇幅，我们不能这样做。

这里还需要对“双生子的奇谈”讲几句话。至今还有人把

这个“奇谈”引为相对论站不住脚的证据。据说瓦尼亚和别佳是一对双生子，别佳告别了瓦尼亚，以接近光的速度飞向宇宙去旅行，不久他返回了，但别佳的手表走得慢了，当他回到地球时，脸上没有皱纹，头上没有白发，但看到自己的兄弟瓦尼亚时，他已变成一个年老体衰的老头啦！

但是，很遗憾（也许很幸运，因人而异），在保持我们讨论的公式是正确的条件的同时，组织一次双生子的相会是不可能的，因为要做到这一点，别佳必须改变自己返回飞行的速度。所以有关惯性系的结论与上述这种情况毫无关系。

时间的相对性并不是新理论的唯一推论。无论对于观察者走得最快的“本征手表”，还是对您手中杆子的长度最大值 L_0，相对论都是正确的。任何一个以速度 v 沿直线运动的观察者看到的杆子，它的长度都等于 $L_0\sqrt{1-\beta^2}$。

表示质量的公式也同样具有以上的平方根关系。以 m_0 表示观察者“拿在手中的物体”的质量，称之为静止质量，它具有最小值。对于运动的观察者来说，它的质量为：

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

从以上的公式可以看出，随着运动速度的增加质量也在增加。实际上，既然速度有个极限值，那么越是接近这个极限值，使粒子加速运动就越加困难，所以，这也就意味着粒子的质量在增加。

非常大的运动速度会迫使我们注意到平方根关系式；但长时间以来，在距离与时间的关系式中未曾遇见过非常大的

速度值。所以，对时间相对性公式正确性的判断，仅仅是不久之前的事情。

至于质量与速度的关系，则是在电子流的问题上被发现的，是爱因斯坦的论文出现之前的事情。从整体意义上说，质量的公式是个技术性公式。在下一节将谈到，若没有这个公式，将无法计算和设计现代的粒子加速器，在这种非常贵重的设备中，粒子被非常猛烈地加速，以致平方根趋向于零甚于趋向于"1"。

质量与速度关系的公式的首次提出是在爱因斯坦之前，但在相对论力学形成之前，这个公式的解释是不正确的。

但表示质量与能量关系的著名公式 $E = mc^2$ 则是爱因斯坦提出的。这个公式，也象表示 L、τ 和 m 与速度的关系式一样，是严格地从理论推理得出来的。

把物体的质量乘以光速的平方，对于运动物体将是 mc^2；对于静止状态的同一物体则为 m_0c^2。列出上面乘积之差：

$$mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$$

利用近似计算可得：

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1 + \frac{1}{2}\beta^2$$

近似计算的正确性，读者可以不费吹灰之力进行验证。

通过计算后的两项乘积差有下列形式：

$$mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0v^2}{2}$$

从上式可以看出，两项乘积之差等于物体的动能。

对这个等式深思熟虑之后，爱因斯坦得出以下有重大价值的结论：运动物体的能量可以用下列形式表示：

$$E = mc^2$$

这个能量由物体的静态能量 m_0c^2 和动态能量组成。不考虑物体的组成结构，也不知道物体粒子互相作用的特征，便可以确信它的内能为：

$$v = m_0c^2$$

质量一公斤的物体，其内能为 10^{17} 焦耳。燃烧 300 万吨煤炭才能释放出这样多的热能。下面我们将要谈到，释放这个能量中的很小的一部分的方法已被物理学家掌握了。这就是分裂原子核或迫使它们合并。

我们强调指出，爱因斯坦方程式 $E = mc^2$ 不仅适用于内能，而且是通用的。这里和宇宙航行员的手表的情况完全相同。表示质量与能量关系的公式，大概是不能验证的。事实上，如果使一吨金属钼升温 1000 度，则其质量仅增加百万分之三克。只有原子核内部的巨大力量才能判定出公式 $E = mc^2$ 的正确性。

把以下情况介绍给读者，看来可能是有益的：对于这个著名的公式，目前很广泛地流行着模糊的表达方式。例如，说什么质量转变成能量；更糊涂的说法是物质转变成能量，等等。实际上，公式 $E = mc^2$ 说明的是，在一个惯性系中，不管发生了什么不同形式的物质互相转化，能量和质量之间都发生当量的相应变化。能量和质量是物质的单一互相联系的两

个特征。

接近光速运动的粒子

人类找到构成世界最小单位的愿望由来已久。但几百年以来，这个研究课题却仅仅属于哲人贤者们的讨论范畴。只是在分裂分子、原子和原子核的可能性出现之后，物理学家们才以巨大的热情和坚定性投入这项工作。目前，这门科学仍在蓬勃发展之中。

为了回答"世界是由什么东西构成的"这个问题，显然需要不断地"击碎"粒子，而为此就需要"炮弹"。这些"炮弹"的能量越大，揭开这个自然之谜的把握就越大。这种"炮弹"就是高速运动的粒子。

制造高速运动粒子的历史始于 1932 年，当时，卢瑟福的合作者们建成了获得高速质子的装置，使质子加速到具有 50 万电子伏特的能量。随后回旋加速器问世了，可使质子具有数以百万电子伏特计的能量；在进一步的发展中又出现了同步加速器，可把质子加速到具有十亿电子伏特的能量。从此开始了十亿级电子伏特的时代。现在，已设计出一万亿电子伏特的加速器。应当特别提到的是，出席 1975 年国际会议（此会在谢尔普霍夫*举行，那里装备着这类的最大的加速器之一）的物理学家断定，需要建造直径为 16 公里的环型加速

---

* 谢尔普霍夫是苏联地名。

器。

但是，读者会问，加速器为什么要设计成环型？其工作原理是什么？有什么用途？

实质上说，只要在真空仪器的线端上输入高电压，则任何这样的仪器都是一台加速器。在某种意义上说，X射线管和电视显象管也可以叫做加速器。高速运动粒子的动能等于（读者一定会记得，我们不是第一次引用这个公式）：

$$\frac{mv^2}{2} = eV$$

但是，应用上述仪器加速粒子的原理，不能使粒子获得非常大的速度，所以，只有谈到能把粒子加速到接近光速的设备时，才能使用“加速器”这一术语。而为把粒子加速到接近光速，需要强迫粒子连续地通过很多“场”。所以不难理解，线性的加速器使用起来会很不方便。因为要使运动粒子具有微不足道的几万电子伏特的能量，就要通过几厘米的路程；而要达一百亿电子伏特的能量，就要通过大约十公里的路程。

不行，这样解决问题是不适当的！于是在1936年劳伦斯（1901—1960年）着手建造现代化的圆环型加速器，并称之为回旋加速器。在这样的设备中，可以利用电场使粒子加速，并利用磁场使粒子重复地返回原位。

劳伦斯的加速器，类似一个沿直径分为两半的罐头盒。向罐头盒的两个半块输入快速变化的交流电压。当带电粒子走完加速器的一半路程的瞬时，这些粒子便获得加速，在“罐头盒”上加以磁场，使其磁力线垂直罐头盒底，以迫使粒子沿着

圆周运动。众所周知，这时带电粒子运动圆周的半径为：

$$R = mv/eH$$

转动一圈所用的时间为：

$$T = 2\pi m/eH$$

为了使电场在加速器的两半之间"抓住"粒子，必须使交流电压变换方向的瞬时正好和粒子到达加速器两半之间的瞬时相重合。

在加速器中心形成电荷后（比如说，氢的离子化生成质子）。第一个圆周的半径是不大的，根据上面的公式，圆周半径和粒子运动的速度成正比，所以粒子继续运动时，其圆周半径越来越大。

乍看起来，似乎随着回旋加速器尺寸的加大，即随着粒子运动圆周半径的增大，我们便可以使粒子具有任意大的能量。为了达到需要的能量级，我们只要用偏折板向外发射粒子束就可以了。如果不存在质量决定于速度的关系式，那么事情倒是很理想的。在某个时期，看来象是没有任何实际意义的爱因斯坦关于质量的公式，便成了计算环型加速器的基本公式了。

因为随着运动速度的增加，粒子的质量也变大，所以，粒子转动的周期也就不是不变、而是也在变大数值。周期的变大使粒子开始"迟到"。于是粒子便不是在电压相位变化 180 度的瞬时到达被加速的位置，而是稍晚一些。随着运动速度的增加，我们将会遇到这种情况：电场不但不加速粒子运动，甚至会使粒子减速。

回旋加速器可以加速质子到具有大约20兆电子伏特的能量。看来情况还不错。但我已说过，物理学家为了开展工作，需要功率日益加大的加速器。显然，为得到更大的能量，需要探索新的道路。

粒子转动周期公式能帮助我们选择需要的道路。随着运动速度的增加，质量也在增加，这就是说，为了保持周期，需要"合拍地"增加磁场强度。乍看起来，这种解决办法似乎简单，但不应忘记，粒子每转动一周，其圆周半径就增大一些。因此，对于沿着半径不断加大的圆周进行运动的粒子，就要求其质量和磁场同步地增长。仔细研究明白上述几个数值的相互关系后，我们将会明白，一定存在这样一些"成功的"的粒子。在磁场强度的增长速度达到某些特定数值时，这些粒子能满足上述条件。实际上，主要的是发生一种独特的相位自动调节。当粒子具有的能量大于其转动半径的需要时，那它将由于质量的"过度"增加而减速；相反，当能量不足时则导致加速度。

读者可以独立地运用粒子转动半径和周期的公式，以最简单的计算证实，情况的确如此（给出磁场强度增长的速度，据此算出粒子运动的轨道、绘出图像，你会感到相位自动调节的原理确实存在）。可以相信，原则上说这种方法可以无限地增加粒子运动速度，只是不得不利用脉冲方式进行加速。当磁场增强时，加速器便工作，相反的过程是空转。但我们不能停顿在这一种方法上，它也是发展过程中的一个阶段。因为按照这种原理去建造现代化的加速器，为制造它的磁铁就要

用几百万吨铁。

现代化的环型加速器叫做同步稳相加速器，这种加速器实现了在一个轨道上对粒子进行加速。所以磁体的整个中心部分好象是被割掉了。在这类设备上，加速粒子的方式同样是脉冲式的。无论是磁场的强度，还是电场的周期都是谐调地进行变化。"成功"的粒子严格地按照圆形轨道被加足速度；不很"成功"的粒子将靠近比较"好"的轨道附近运动，也得到一定的加速。

原则上说，加速可以达到很大的数值，可以使质子运动的速度和光速相差甚微。

现在我们只好回答，这种设备有什么用途的问题了。建造加速器是为了认清楚物理学中的基本粒子。作为轰击靶子的"炮弹"，带电粒子具有的能量越大，找到基本粒子互相转变规律的可能性就越大。

一般来说，物质世界仅由三种粒子组成：电子、质子和中子。目前还没有根据可以认为电子是复合型粒子。至于质子和中子，则它们可能会被分裂成更小的组成部分。在各种撞击过程所产生的"残片"中，可能会出现新的粒子。现在，这类粒子有近250种，而且随着加速器功率的增加，这个数字还会扩大。象已经成功地把近百种元素及其几百种同位素，综合、分为几类电子、质子和中子的组合体一样；对于基本粒子也找出类似门捷列夫周期律的规律，并把它们综合成几类"原始粒子"（如果可以这样称呼的话）。粒子物理学专家们对于这种做法的成功，是寄予希望的。

读者因此会好奇地提问，刚才提出的物质世界由“三种粒子组成”这句话，其含义是什么呢？问题在于，只有质子和电子是完全稳定的；如果“稳定”按日常生活的含义去理解的话，中子虽然不是完全稳定的，但其生命还是很久的，约为10^3秒；至于理论家非常关心的为数众多的其它基本粒子，其生命甚至小于10^{-6}秒。这两个数字是无法比拟的。

但是，人们仍然希望把这些短命的物质“残骸”综合成一个体系。据认为，基本粒子中存在许多这类体系。只要在科研舞台上出现更强大的加速器，便可以利用它们去发现不属于通常范畴的许多新现象。

在写这篇文章时，专家们是乐观的，似乎可以成功地把整个基本粒子体系综合成几种“原始粒子”，这些“原始粒子”又叫“夸克”。难题在于，“夸克”与电子、质子不同，它们尚未被观察到，而且原则上说，似乎也不可能观察到。为了建立基本粒子的“门捷列夫系”，我们不得不认为“夸克”具有电荷，电荷的数值为电子的1/3或2/3；而且要附加给“夸克”两个参数，这两个难于形容的附加参数叫做“奇异数”和“粲值”*。

本书作者不想再用更多的笔墨去论述基本粒子的问题了，这并不是由于通俗地讲清现存基本粒子问题难于做到，而是由于，确信“粲值”和“色”等参数的存在，现在还为时过早。当然，不能排除出现基本粒子崭新理论的可能性，也不能排除

---

* 在此书手稿完成后的一年内，发生了一些新的事件：已经研究清楚一个新参数的必然性，这个参数叫做“色”（Краска）。

出现研究宇宙中这个极小范围（以 10^{-15} 厘米为单位计量的）的崭新原理的可能性。

波 动 力 学

1923 年，法国物理学家德布罗意在其极富于创新精神的著作中写道："几百年来在光学领域中，过分重视其波动性质的研究，过于忽视其微粒性质的研究了；但在微粒的理论方面，恰恰是犯了相反的错误"。在同一部著作里，德布罗意指出了可以把光的波动概念和微粒概念结合起来的方法。

德布罗意提出的这项工作，由德国杰出的物理学家薛定谔继续和完成了。不久，在 1926—1927 年已变得明确了，实质上波动力学和量子力学是同等含义的术语。这门新兴的力学是物理学一个很重要的分支。无论是微粒观点还是波动观点都解释不清的现象，波动力学却可以指导我们怎样去看待微粒的行为。

我们应当提醒读者，不要仅仅从字面上去理解"电磁波"一词。无论是无线电波，光波，还是 X 射线，都可以从波动观点和微粒观点（这两种观点）去看待。虽然粒子流和电磁辐射有明显的区别（主要是指电子、原子核、中子和离子能以任意速度进行运动，而光子只能以 30 万公里/秒的速度运动），但波粒二象性观点对于粒子流也完全适用。物质存在的这种形式（粒子流）在不同的实验中，有时表现出波的性质；有时表现出微粒的性质。

德布罗意借助于几个推理（现在我们将要以某些简化的形式加以叙述这些推理），证明了（确切地说，是他猜出来了）与粒子流相伴随的波动的波长是多少。

我们来研究把电磁辐射的微粒观点和波动观点联系起来的基本关系式。光子所携带的那份电磁辐射的能量，以公式表示为 $E = h\gamma$。光子的能量，也和任何其它物质粒子的能量一样，服从爱因斯坦公式，因此，光子的能量也可以用 $E=mc^2$ 的公式表示，由此可得出，光子的质量 $m = \frac{h\gamma}{c^2}$。等式两边均乘以光速 c，便可得出光子的动量值*：

$$P = \frac{h\gamma}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

但是，我们感兴趣的是粒子波的波长。粒子的静止质量自然不能等于零。

怎样“猜出”波长等于什么呢？如果以上的推理是正确的，就可以认为动量和波长的关系式是通用的，只需把上式改写成以下形式即可得到波长：

$$\lambda = \frac{h}{mv}。$$

这就是著名的德布罗意公式。它表明，当粒子的质量和运动速度都不是很大时，粒子流应当表现出特别明显的波动

---

* 光子的质量：这当然是运动粒子的质量，至于光子的静止质量，实际上则几乎等于零。研究人员可以证明，这个静止质量小于 0.6×10^{-20} 兆电子伏特。应当指出，用测量光压的办法可以直接验证光子动量的关系式。

性质，这一点也被实验所证实。因为对于电子流和运动速度不大的中子流，很容易观察到粒子的衍射现象。

上述的推理，当时曾经被认为是概念的游戏。可以说，验证这种推理的正确性完全是应用直观方式进行的。就是要从同一物质上摄制X射线像、电子射线像和中子射线像。为此我们用这样的方法加速粒子运动，使其波长在所有的情况下都是相同的。这样我们应当得到全等的(对圆环半径而言)德拜图。结果也正是如此。

在1927年，德布罗意公式的首次验证完全是偶然性的。英国物理学家戴维森和革末做金属表面的电子散射试验，在仪器的工作过程中，被研究物体灼热了，这个物体原是多晶体，加热后发生了重结晶，所以发生了单晶体的射线散射，所得到射线像和相应的X射线像非常相似，以致对电子流具有与X射线一样的衍射能力，无法产生任何怀疑。

很快，观察电子衍射现象的方法，转变成研究物质结构的方法。在很多情况下，这种方法表现出比X射线结构分析更为适用。电子射线学的主要应用领域是在研究薄片结构方面。它的工作原理和我们在第三章里的论述是一样的。不同之点仅仅是，电子射线是由电子和原子核形成的散射；而X射线仅仅由电子所形成。

因为粒子波的波长与其质量成反比，所以，分子的衍射显然难于被观察到。到目前为止还没有观察到分子衍射。质子的衍射可以观察得出来，但质子衍射没有任何实际意义，因为质子的穿透能力很小，所以对研究物质的立体结构方面的工

作不适用。而为了研究物质的表面，最好还是运用电子衍射，电子衍射可以给出物质结构方面非常丰富的信息。

中子的研究工作是另外一种情形。中子衍射的研究已经成为成千上万的科学家从事研究的课题。这个科学领域已被称为中子照相术。

从技术上说，得到中子射线像比得到X射线像困难得多。首先，足够强的、具有需要波长的中子束(波长用中子运动的速度来调节)，只有通过原子反应堆的专门管路将粒子引出才能形成；其次，困难在于中子的散射程度不大，中子能够不和物质的原子核相撞而顺利地通过物质，所以为了获得中子射线像，就需要有尺寸约为一厘米左右的大晶粒，而这种大晶粒是不易得到的；最后，第三个困难是中子在摄影胶片上不留痕迹，而在离子化的仪器中，中子也仅仅能间接地表示自己的存在。

应当怎样看待中子呢？我们将在下面浅谈一下。

科学家们为什么仍然在从事中子射线的研究呢？问题在于，与X射线的区别是，中子并不由于电子而发生散射，但是在和原子核相撞时却发生偏离自己行程的现象。可以举出很多物质做例证。这些物质的原子按其电子数目相差不大；而按原子核的性质却相差甚远。在这种情况下，X射线不能区分这些原子的差别，而中子射线在分辨其差别方面则能取得成功。但最主要的情况可能是，中子能被氢原子核非常强烈地散射；而X射线就难于确定氢原子的位置，因为氢原子只有一个电子。确定氢原子的位置是非常重要的工作。在大量的有

机物和生物系中，氢原子把一个分子的各部分或把相邻的分子彼此之间联系起来，这种特殊的键合叫做“氢键”。中子射线有可能用于分辨具有不同磁性的原子核，这将是无与伦比的成就。上述种种，使我们可以认为，中子射线学是研究物质结构的重要方法之一。

海森堡原理

由于光和粒子同时具有波的性质和微粒的性质，致使许多物理学家长时间地争论不休。他们感觉到，在这种波粒二象性中似乎有某些和认识论相矛盾的事情。这些学者觉得海森堡原理是尤其不能被接受的。

海森堡原理是微观世界物理学的一项最重要的原理，它确定了在涉及与物质粒子运动有关的任何现象时，应用微粒观点的有效范围，海森堡原理可以写成以下形式：

$$\Delta x \cdot \Delta v > \frac{h}{m}$$

上式中 Δx 和 Δv——当我们用微粒观点观察物质粒子时，对于运动粒子的坐标和同一坐标轴方向的速度，我们在测量上所产生的偏差。简单地说，Δx 和 Δv 就是测量运动粒子的坐标和速度的不确定性。

但是必须强调出，这里谈的绝不是测量技术上的困难。上列的关系式中的不确定性，即使在最理想的实验中，也是不能排除的。过去用于“绝对准确”地测量粒子运动轨道和速度而

提出的各种呆板的方式，今天仅仅是一页有趣的历史了。仔细推敲这些方式，就一定能发现其原则上的缺陷。

现在简单地介绍一下，为什么任何实验都不能给出比海森堡原理所允许的更大的准确性。假设我们谈的是确定粒子在空间的位置问题，为了知道粒子在什么地方，就要使它在光照下成为可见的，而测量的准确程度，象前面已经谈过的一样，则决定于使用射线的波长；波长越小显象就越好。但是，在波长减小的同时，光波的频率变大了，也就是光子的能量增加了。这时，被确定的粒子所受到的冲撞，使我们无法对该粒子和光子相遇时，它所具有的速度作出判断。

再举一个经典的例子。我们在电子射程中设置一个狭缝，电子飞过狭缝后射在荧光屏上，发生了闪光。在电子通过狭缝的瞬时，确定了它的位置，测量的准确性决定于狭缝宽度。为提高测量准确性，就需要减小狭缝宽度。但同时，电子的波动性质会表现得很突出，电子可以偏离直线射程越来越远，而这就意味着，我们将在更大的程度上，无法确定在狭缝平面的方向上电子运动速度的组成情况。

这类的例子可以列举很多。对这些例子可以进行定量地研究(在三十年代的文献中也能找到)，每一次我们都得出符合前面列举公式的结果。

利用海森堡的不等式，可以对不同质量粒子的 Δx 和 Δv 进行评定。下面就来讨论这个问题。

如果谈到属于某原子所具有的电子时，是否可以安排一项试验，以确定电子在某个已知瞬时在什么位置上呢？由于

原子的尺寸约为 10^{-8} 厘米左右，这就是说，希望得到的测量精确度，譬如说为 10^{-9} 厘米。原则上说（也仅仅是在原则上说），这项试验是可以实现的。但是我们利用海森堡不等式去评定这个电子的信息损失。对于电子来说 h/m 大约等于 7 厘米²/秒，所以对于这个电子，海森堡原理可以写成：$\Delta x \cdot \Delta v > 7$，计算可得 $\Delta v > 7 \cdot 10^{9}$ 厘米/秒，这就完全没有任何意义了。就是说，关于电子的运动速度，什么也不能说明。

现在，假设我们想把原子的电子运动速度测得更准确一些，为此可以设想出原则上能实现的试验。但那时将完全不可能测出电子在什么位置上。

把海森堡不等式应用于原子里的电子的结果表明，在这种情况下，微粒观点是不适用的。在原子中电子运动轨道的概念也失去了意义；关于电子从一个能级跃迁到另一个能级的方式，同样也没有什么可说的了。

但当我们谈到电离箱中的电子运动时，情况就大不相同了。电子经过的道路是察觉得出来的，就是说它有运动轨迹吗？是的，有。但怎样把这种情况和前面的计算联系起来呢？不，不需要联系起来。现在所有的推理都要重新进行。电子轨迹的宽度约为 10^{-2} 厘米，因此，甚至对于以大约 1000 米/秒慢速飞行通过电离箱的电子来说，速度的测量不准确值为 7 米/秒是完全可以接受的。

这些例子表明，随着我们探讨的深入，随着对物质组成部分认识的深入，微粒观点也表现出自己的局限性。

通常，质子和中子被认为是微粒。但是，如果谈到它们在

尺寸只有 10^{-13} 厘米的原子核内部的行为时，那么，微粒观点就没有显示出自己的作用。

这里还要补充一点，我们可以有把握地说，分子量为一百万左右的巨大的分子的行为颇象一个“小颗粒”。这种分子的活动行为象是一个“守本分”的粒子，甚至可以绘出它的毫无规则的热活动轨迹。

波动-微粒二象性被认为是尚待进一步探索的某种奇怪现象的时期，已经过去很久了。当年，一批有威望的学者，象爱因斯坦和玻尔等人，曾经激烈地争论过，应当怎样解释电子和其它粒子这样“奇特的行为”。在现代，在描述电子，原子核和光子参予的各种物理现象时运用“二象性”观点，绝大多数自然科学家都视之为正常之事了。

十年前，一批科学界的带头人在一大批物理学家（近10000人）中进行了调查性询问，另一些人则提出这样的问题：“二象性”问题是否引起了被询问者的兴趣？“二象性”问题不能彻底弄清楚吗？只有20个人的答案认为，海森堡的不等式和与此相连带的问题，在“终审法院”上将被认为不是真理。

理解自然界的这一条重要规律是困难的，困难性看来是由于逻辑上的错误所致；而逻辑错误的根源可以从一份异议书中找到。异议书中写道：“我不能同意组成物质的小颗粒的行为是不可预测的说法”。这句话的毛病在于，把物理学中的物质粒子和日常生活中的物质颗粒混为一谈了。实际上，在谈到光、微波、电子或原子核等物质粒子时，则它们与物质的“小颗粒”是完全不相同的，这是任何人都同意的。

我们不能想象出物质粒子的形象。众所周知，颜色、硬度、温度等概念不能用于电子或质子。这类性质只为宏观物体所具有。如果不能想象出物质粒子的形象，那就更无法想象它们的运动了。而物质粒子的运动本身中又综合了两种观点：波动观点和微粒观点，所以，不能预测的只是其两种观点之一的行为。

量子力学(我再次重复，它是波动力学的同义语)为我们总结了精确的规则，运用这些规则就能够预言物质粒子的行为。应用量子力学的方法论述物质粒子能全面地反映微观世界的规律性。应用量子力学我们可以准确无误地预言一些事件，使之为实际服务。

当然，这并不是说，将来不会再发现更加概括性的自然规律，而现代的量子力学则仅是这些规律的局部成果，就象牛顿力学所经历的情况一样。这些概括性的总规律应当适用于描述质量小、运动速度大的粒子行为。人们早已期待建立一种把所有的"力学"联合成一个整体的理论。应当承认已经等了很久，以致有点不耐烦了。因此，唉！甚至已经为这个尚未问世的理论取了名字——相对论量子力学。

看来，颇有点奇怪，二十世纪的第一个四分之一里的连续不断的发现意外地停顿了。读者对此可能感到奇怪，但事实毕竟是事实。尽管实用科学有了飞快的进步，尽管本世纪的随后两个四分之一的时间过去了，科学技术革命高速地前进了，尽管……，但是在量子力学问世之后，还没有新的自然规律被发现。看来，还不得不再等待一段时间。

第五章　原子核结构

同　位　素

我们在第三册书中已经叙述过怎样利用电场和磁场把不同荷质比的粒子束分开。然而，如果粒子的电荷相同，则可以按照它们的质量把粒子分开。称为质谱仪的仪器就是为这种目的服务的。它广泛地应用于化学分析。

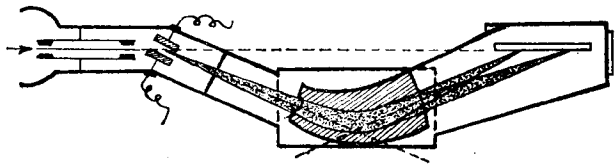


图 5.1

图 5.1 是这种仪器的示意图。它的工作原理如下。当具有不同速度的粒子入射到电容器的电场时，我们可以想象地分出具有相同的 $\frac{e}{m}$ 值的一组粒子。这些粒子的束流进入电场中并散开：在电场中快的粒子偏转小，慢的粒子偏转大。这些扇状分布的粒子再进入到垂直于图面的磁场中。磁场是这样接通的，它使粒子往相反的方向偏转。同样，在这里也是快

的粒子偏转小而慢的粒子偏转大。因此，在位于磁场之外的某一点，被我们想像地分出的相同 $\frac{e}{m}$ 的粒子的束流又重新会聚在一点——聚焦。

具有其他 $\frac{e}{m}$ 值的粒子也会聚到一点，不过是另外的一点。计算表明，对于所有的 $\frac{e}{m}$，焦点都落在非常接近于某条直线的地带。如果沿着这条直线放置照相底片，那么每一种类型的粒子都以单独的线条标明自己。

同位素是用质谱仪发现的。它的发现应归功于 G. 汤姆逊。1912 年，在研究氖离子在电场和磁场中的偏转时，这位研究者观察到粒子束分裂成两部分。氖原子的重量已经知道得相当精确——它等于 20.200。后来已经观察到，事实上氖原子有三种。它们的原子重量为 20、21 和 22。请读者原谅：我(承认，故意地)滥用了一次老的术语；现在我们称这些数字为相对的原子质量。

因为氖的化学性质与质量无关，所以物理学家很快就相信，这种质量差别只是和原子核有关。核的电荷和电子的数目都相同——表示不同的氖原子应该在门捷列夫周期表中占有同一位置。同位素的名称就是这样得来的，即占有相同位置的元素。

在 20 年代，出现了近代的质谱仪，并开始研究所有元素的同位素的成分。毫无例外，元素都是同位素的混合。它们当中有象氢和氧那样的基本上由一种同位素组成（质量为 1 的氢——99.986%，质量为 16 的氧——99.76%）。但是也遇

到含有数量大致相同的几种同位素的元素。例如氯（质量为35的同位素占75%，质量为37的同位素占25%）就属于这类。在自然界中存在着有许多同位素的元素。我们已经举了稳定同位素的例子。后面我们将谈及同一种元素的放射性（不稳定的，会衰变的）的同位素。

由于仪器的质量迅速提高，很快就弄清楚了：同位素的质量用整数来表示，只是准确到小数点之后的第二一第四位数字。我们在下面将谈及这种差异的原因。

原子质量的整数称为质量数。

因为核的质量不影响化学性质，所以显然存在许多化合物，它们的区别只是同位素的成分。人们说有两种水——普通水和重水。在普通水中含有质量数为1的氢的同位素，而在重水中则含有质量数为2的氢的同位素，即所谓氘。但是在自然界中有质量数为16、17和18的三种氧的同位素，这意味着水是六种不同类型的分子的混合物。如果物质的分子由许多原子组成，那么它的同位素的组合可以有几十甚至几百种。

分离同位素是重要工业部门的工作。在一系列与获得原子能有关的过程中，同位素分离具有特别重要的意义。例如要把重水和轻水分开，把不同类型的核燃料铀和钍的原子分别送到不同的接收器，工业部门提出的类似的任务还有很多。

问题的复杂性在于，同位素原子的电子结构的差别是极其不显著的，因而其化学性质的差别也甚微。对于轻原子，采用多级化学萃取的方法，花很大的力气才能做到这种分离；对

于重原子，由于原子核质量的差别很小，只有采用物理方法才有可能。

气体扩散的方法目前用得最广泛。含有不同质量的同位素的分子通过多孔的薄膜的速度稍有不同。轻的分子比重的较快钻过障碍物。

当然，也可以采用刚刚描述过的质谱仪原理来分离同位素。但是，这两种方法都要很多时间和花很多钱。

仅仅 2—3 年之前才证明，同位素分离可以用一种原则上是新的方法（利用激光器）来进行。激光器可以产生极其高度单色的光线，所以适用于同位素分离。对于同一种元素的两种同位素，它们的由电子占据的能级之间的距离的差别，当然是不显著的。这种差别只是由于核的质量差引起。因为这两种同位素的核电荷是相同的，而电荷基本上决定电子能级的配置。激光束如此严格的单色，它只把一种同位素激发而保留其他种同位素的原子处于非激发状态。

图 5.2 描述两种利用激光分离同位素的过程。原子或分子气体从炉子的孔出来，激光束激发一种同位素的原子。一般来说，被激发了的原子具有电或磁矩。因此不均匀的磁场或电场把它偏离到一边（上图）。

第二种方法用于被激发了的原子会迅速发光的情况。在这种情况下，当通过被激光束照射的空间时，同一个原子多次地被激发，也就是说，受到光子的几次非弹性碰撞。每吸收一次光子，原子都会在朝向激光束作用的方向上获得动量。能够被激发的原子就被推向上，而那些不吸收光子的同位素的

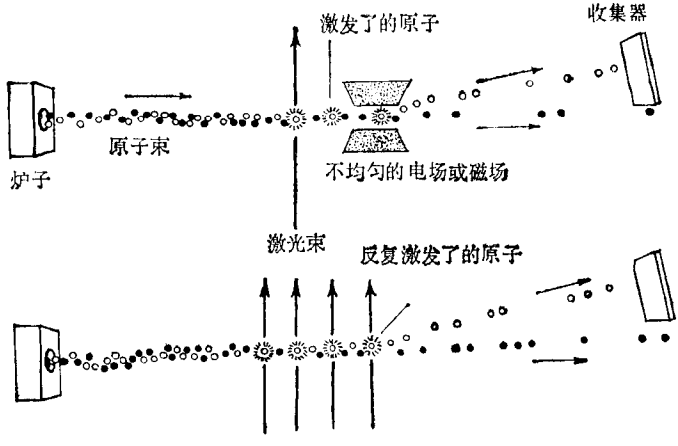


图 5.2

原子则无偏离地前进。

这种类型的第一个成功的实验是由用波长 0.55535 微米的激光照射钡原子束完成的。在纵向速度为每秒 50000 厘米的情况下，钡原子每吸收一个光子，一秒钟内横向移动了 0.8 厘米。

放　射　性

在第三册书中曾经简短地谈到，卢瑟福怎样确定了原子由很小的核和绕着原子核运动的电子组成。现在我们应该在读者面前翻开物理学最重要的篇章之一——它描述原子核由质子和中子构成的事实。说也奇怪，这个发现的历史竟开始于卢瑟福用 α 粒子在薄片上散射的实验证明原子的核模型之

前的十五年。

1896 年春天，法国物理学家 A. 贝克勒耳(1852—1908)发现了铀辐射出类似于伦琴射线的射线。象几个月前发现的伦琴(X)射线一样，铀射线能通过不透明的物体和使照相底片漏光。它们的吸收正比于放在铀和照相底片之间的物体的密度。如果物体对这种射线是不透明的话，那么在底片上形成清晰的物体的轮廓。也象伦琴射线那样，铀射线能够使空气电离；根据空气的电离情况，可以很好地估计它们的强度。

在贝克勒耳和伦琴的发现中有相似的东西——偶然因素。但只是一个事例，永远也不会是重要的科学发现的来源。象在伦琴的发现之后知道有人在他之前几年就已经"看见了"X射线那样，在贝克勒耳的发现之后查明：至少有三个人曾经观察到了放在铀盐附近的照相底片变黑。但是"看见"还不够，需要注意和需要查明现象的真正原因。做到了这点的是伦琴和贝克勒耳，而不是他们的先驱者。因此他们应该得到尊敬与荣誉。

贝克勒耳发现放射性的道路经过了如下的阶段。象我们已经讲述过的那样，在最初的管子中，伦琴射线与玻璃有关。在阴极射线的作用下玻璃发荧光。因此自然地想到，穿透射线是荧光的伴侣。贝克勒耳首先也是用在阳光作用下能发荧光的物质开始进行实验的。他很快就观察到，穿透射线从各种含铀的矿物中发出。虽然这种现象已经发现了，但贝克勒耳不急于告诉科学界。他认为还要重复几次实验。而这时，象故意作难一样，太阳好几天总是不露面。照相底片和被研

究的矿物一起放在实验室的桌子的抽屉里等待太阳。1896年3月1日，晴天终于出现了，可以进行实验了。但是贝克勒耳决定在开始工作之前检查一下底片的质量。他前往暗室，显影了一个底片，在底片上看见了矿物的清晰的像。可是未曾有过任何荧光。这表示，问题不在于荧光。

贝克勒耳重复"黑暗"实验并确信他的矿物是穿透辐射的来源。不需要外面的光的帮助，它"自己"产生辐射。

通过对许多样品的仔细观察，使贝克勒耳想到铀是射线源。如果在矿物中没有铀，那么也没有穿透辐射。为了使证明是完备的，需要研究纯铀。而这种元素是非常稀有的。贝克勒耳在自己的朋友(化学家穆亚山)那里弄到了铀。在法国科学院的同一次会议上穆亚山讲述了获得纯铀的方法，而贝克勒耳宣布了铀辐射出射线。这些报告宣读于1896年11月23日。这个发现和扔在广岛的原子弹之间只相隔50年。

一年之后，1897年秋，两位年轻的物理学家——居里夫妇开始了自己的实验。年轻的热心人工作在冰冷的棚子里。玛丽·居里(1867—1934)选择了贝克勒耳穿透辐射样品的化学特性的研究，作为自己的学位论文题目。

紧张的劳动带来了一个接一个的发现。首先观察到，除了铀之外，钍也有穿透辐射。射线的强度用电离电流的大小来测量。居里证明了贝克勒耳的猜测，即穿透辐射的强度与铀和钍的化合物的种类无关，而是严格地与它们的原子数目成正比。

但是突然失败了，土状沥青铀矿给出的电离比应有的大

四倍。就在这个转折点的时刻，表现了研究者的天才。没有天才的人也许会认为是铀原子的罪过。但是玛丽·居里认为，这种现象可以作另外的解释。也许在沥青矿中含有少量的至今尚不知道的化学元素，它能给出强得多的穿透辐射。



M. C. 居里(1867—1934)

——杰出的女科学家。在1898年，当她研究铀和钍的辐射时(当时其性质还是未知的)，查明了在这些元素的矿石中，含有别的物质，它的辐射本领比铀的强得多。她分离出了钋和镭。玛丽·居里和她的丈夫 Л. 居里把"放射性"一词引入到日常生活当中。M. C. 居里的发现很快被卢瑟福所推广，并确定了原子的放射性衰变定律。

猜测被证明了是正确的。居里的巨大的(可以毫不夸大地说是英雄的)劳动使她最早分离出了钋(Po)(这个名称不是偶然的：娘家姓斯可罗多夫斯卡的玛丽·居里原籍波兰(Po-

land)，然后分离出了放射性的镭。并证明了镭的放射性比纯铀的几乎大一千倍。

下面我们将不管事件的历史连贯性，以较快的速度来叙述。

在镭的发现之后，又找到了其他的是穿透射线源的物质。它们都称为放射性物质。

究竟什么是放射性辐射呢？把放射性样品放进抽空了的盒子里，然后放上带狭缝的铅挡板，射线通过狭缝照射到照相底片上，并留下径迹。可是，只要盒子放在磁极之间，则在显影之后的底片上可以看到三条小线。放射性径迹分裂成为了三条。其中一条偏到带负电的粒子流所预期偏转的方向，第二条射线是正粒子流，第三条射线不偏转，显然它是伦琴射线那一类的。

用我们讨论过的方法，已经成功地证明，在一般情况下，放射性辐射由电子流（在弄清楚这是电子流之前，称为β射线），氦原子核流（α粒子）和硬的电磁辐射（γ射线）组成。

放射性衰变

放射源的原子会不会发生变化呢？会，而且这些变化是十分惊人的。在1902年，就是那个卢瑟福（不管事件的历史先后，我们早就谈过他在1911年发现原子结构）证明，放射性辐射的结果，产生从一种原子到另一种原子的转变。

卢瑟福预料到，虽然这是建立在严格的实验证据的基础

上的假定，但也将会遭到化学家们的攻击。要知道，我们证明原子转变的存在，实际上侵犯了最神圣的东西——原子的不可分性．我们在证实从铀可以得到铅的时候，实现了炼金术士(炼金术士的名声曾经一点也不比星相家的好)的幻想。

但是在证据的压力下，反对派很快就退却了。而且，过了一段时间之后，某些原子的自发衰变的现象，无可争辩地不仅用化学方法，而且也用物理方法得到了证明。那么，放射性转变的问题在什么地方呢？

首先，作为放射性辐射成分的电子射线是从原子核出来的。但是，如果是这样的话，那么核电荷增加一个单位，放射性原子则转变为门捷列夫周期表的顺序中的下一个原子。

α 粒子本身带有 2 个正电荷，而且其质量为氢原子的质量的 4 倍。如果原子核放出这些粒子，那么由于相应的同位素转变而应该发生原子"位移"。这种位移按照门捷列夫周期表的顺序向左进行。

不稳定原子遭受到放射性衰变的这种论点毫不稀奇。

我们不知道地球形成时这类的原子有多少种。但是，我们极好地知道，目前在自然界能找到什么样的不稳定的原子。原来，它们是三个家族的成员。质量数为 238 的铀原子，质量数为 235 的铀原子和质量数为 232 的钍原子是它们的始祖。

在图5.3上，我们介绍第一家族。^{238}U 到 ^{234}Th，由于放 α 粒子而发生的转变是第一次转变。在它之后发生两次 β 转变，把钍变成镤，而镤又变成了铀，但这已经是质量数为 234 的同位素了。接着是五次连续的 α 转变，到达质量数为 214 的铅

的不稳定同位素。再走两次“之字形路线”，衰变过程结束。带有质量数为 206 的铅同位素是稳定的。

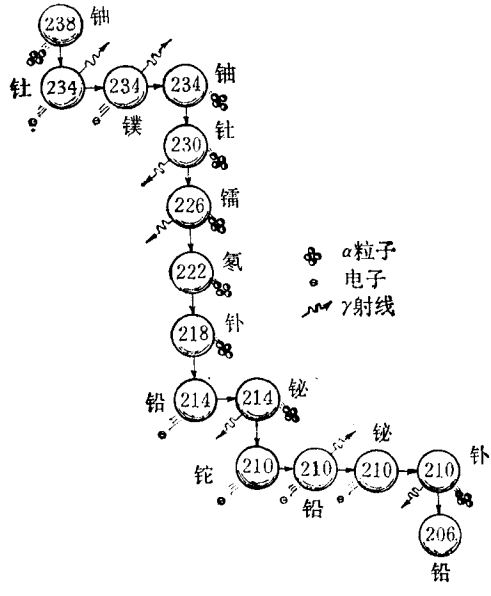


图 5.3

每个个别的原子的破坏是偶然的。既有长寿幸存的原子，也有短命的原子。

但是，无论如何都不能预测到某一个原子何时发生转变。虽然我们不能预言我们家里的猫的逝世日子，然而每一种动物都有自己的平均寿命。同样，每一种放射性原子都有非常严格的平均寿命。其实，原子的行为与动物的生命根本不同。不稳定原子的寿命与生物的平均寿命不同，它不依赖于任何外界的条件。什么东西也不能改变平均衰变时间。在任何单

位时间之内，原子衰变的百分数永远是相同的。

$$\frac{\Delta N}{N} = \lambda t$$

此公式只是在分数 $\Delta N/N$ 不大的情况下适用。

λ 的数值对于给定的放射性转变是常数。以“半衰期”来描述衰变过程的速度比利用这个常数要直观一些。“半衰期”是放射性物质的一半发生了转变所需的时间。这个时间对不同的放射性元素可以大幅度地变化。例如，我们讨论过的家族的始祖 ^{238}U 的“半衰期”为 45 亿年，而质量数为 214 的铅同位素的原子的半衰期只有 27 分钟*。

原子核反应和中子的发现

放射性转变完全类似于化学衰变反应。曾经是化学物质，后来由于受热的或光的作用衰变成了两部分。比如说，碳酸衰变为水和二氧化碳。我们刚才讨论了的原子核衰变的图象也正是如此。质量数为 230 的钍原子核衰变成镭核和氦核。

如果原子核衰变是可能的话，那么，大概也应该存在按照

$$A + B \rightarrow C + D$$

原则进行的核反应。为了进行类似的化学反应，需要物体的分子 A 和 B 进行碰撞。为了实现核反应，需要两种原子核碰撞。

---

* 原文误认为百万分之一秒，已改正。——译者

卢瑟福从1919年起开始进行这类的实验。在粒子加速器出现之前，只能用α粒子轰击某种物质的方法来实现。在能够获得强大的质子和其他原子核的束流之后，发现了新的核反应。原则上可以把任何的化学元素的同位素变成其他的元素同位素。这种可能性已经很明确了。甚至也可以从其他物质得到金子。炼金者的梦想变成了现实。



9. 卢瑟福(1871—1931)
——著名的英国物理学家，伟大的实验家。他以精密的创造性的实验指出了放射性衰变的问题所在。以自己的α粒子流在物质上的散射的经典实验，奠定了近代的原子结构理论的基础：原子由原子核和围绕着核运动的电子组成。在继续进行用原子核轰击不同的靶子的实验时，首次实现了元素的人工转变。

第一次观察到的$A+B\rightarrow C+D$类型的核反应是把氮和氦变成氧和氢。这种反应写成如下形式：

$$^{14}_{7}\mathrm{N}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{17}_{8}\mathrm{O}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

要注意上标数字的总和以及下标数字的总和反应前后保持不变。下标数字表示核电荷数，而上标数字表示准确到整数的质量数。这样，电荷守恒定律严格地起作用。质量守恒定律象我们下面将看到的那样，只是近似地实现。但是质量数象电荷一样严格守恒。

早在1920年，卢瑟福已经提出假设，应该存在一种质量与质子相近而没有电荷的粒子。否则难以解释，为什么带正电的α粒子能穿透带正电荷的原子核，须知相同电荷的粒子互相排斥。

被称为中子的没有电荷的粒子于1932年发现了。不难理解，为什么它的发现"推迟了"。要知道，我们之所以能看见带电粒子，是因为它们能把在自己走过的路线上碰到的分子电离，因而能在气体或照相乳胶上留下它们的痕迹。但是，中性的粒子不和电子相互作用，因此，在自己的路径上不留下痕迹。这样，关于中子的存在只能用次级效应来判断。

中子是在α粒子打铍时发现的。这个反应写成：

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\alpha \longrightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

记号n代表中子。但是，怎能相信不留下痕迹的粒子的存在呢？办法是根据它的作用。试想一下，在台球桌的绿色的呢绒上，有一个肉眼看不见的台球。如果可见台球在桌子上滚动时，突然"无缘无故"地偏离了原来的方向，那么物理学家就会用能量守恒和动量守恒定律做出结论：可见的球在不可见的球上发生了碰撞。而且，当弄清了可见球以什么样的角度偏离自己前进的路线以及怎样改变自己的速度时，他能够利用守恒定律来确定不可见的球的全部特征。

中子的数目用下述方法算出。在中子射线前进的路上放置含有硼原子的物质。当中子与硼原子核相遇时，中子消失，而产生如下的反应：

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{4}_{2}\alpha$$

中子消失了，但是出现了α粒子。当在不同类型的接收器中记录到留下可见径迹的这些带电粒子的时候，我们能够准确地测出中子射线的强度。

有很多其他的方法能够完全可靠地定出描述中子，而且从根本上说，描述任何电中性粒子的所有参数。综合完全一致的间接的证明，在使人信服方面有时候不亚于可见径迹的仔细观测。

原子核的性质

在中子发现之前，物理学家曾假定原子核由电子和质子组成。这个假设自身隐含着很多矛盾，而且建立核结构理论的尝试也未能成功。一当发现了在核碰撞中产生的中子，马上就产生了这样的念头，原子核由中子和质子组成。苏联物理学家 Д. Д. 伊凡宁科首先提出了这个假设。

从一开头就已经清楚，中子的质量即使不等于质子的质量，无论如何也接近于质子的质量。因此，同一种元素的不同的同位素由此也得到了明确的解释。

象我们将看到的那样，能够给每种同位素记上两个数字。其中的一个是门捷列夫周期表的顺序号 Z，它等于在原子核中的质子数。因此，顺序号决定核所束缚的电子数。既然如此，那么显然，顺序号也应当决定元素的化学行为(因为化学反应不触及原子核)。

至于质量数，它等于中子和质子的总数。于是，同一种元

素的各种同位素彼此的区别在于核内中子数不同。

组成原子核的两种粒子的特性用非常精密的实验定出。质子的质量是等于 1.6726×10^{-24} 克，即为电子的质量的 1836 倍。质子的自旋等于 1/2，磁矩为 1.41×10^{-23} 厘米克秒单位。中子的质量比质子的质量大得不多，即等于 1.6749×10^{-24} 克。中子的自旋等于 1/2。中子的磁矩和自旋反平行并等于 0.966×10^{-23} 厘米克秒单位。

研究原子核的自旋和磁矩的方法有多种：光谱学，辐射谱学，研究粒子束在不均匀磁场中的偏转等。在第三册书中以及在本册书的前面章节中，我们谈到了这些测量的一般原理。现在我们只限于叙述近几十年来大批物理学家所获得的主要事实。

首先我们强调，涉及动量矩的量子物理学定律对所有粒子来说都是正确的。因此对于原子核，动量矩可以用公式

$$\sqrt{s(s+1)}\cdot\frac{h}{2\pi}$$

表示。此处 h 为普朗克常数，在所有的量子物理公式中都有它。

通常不称这个式子为自旋而称参数 s 为自旋。理论严格证明，而且实验出色地证实，任何粒子的自旋只等于 0，1/2，1，3/2 等等。

当浏览不同原子核的自旋数值表（在不同的实验中得到的）的时候，我们看到一系列有趣的规律性。首先，在含有偶数的质子和偶数的中子的原子核中，核的自旋等于零（^{4}He，^{12}C，^{16}O）。当核子（即核的粒子）数是四的倍数时，看来总是

起很大的作用。在很多情况(但远不是所有情况)下，原子核的自旋能够用下面的方法获得：抛掉最接近于质量数 A 的用四除得尽的数，把剩下的差乘以 1/2。例如：在锂 6 中，自旋等于 $2 \times \frac{1}{2} = 1$，在锂 7 中，自旋等于 3/2；在硼 10 中，自旋等于 1，在硼 11 中，自旋等于 3/2。

相当明显的规则是：在具有偶数质量数 A 的原子核中，自旋为整数或等于零，在具有奇数质量数 A 的原子核中，自旋为 1/2 的奇数倍。

泡利原理适用于核中的质子和中子。两个全同粒子只有在反平行自旋的条件下才能处于同一能级。因为质子和中子是不同的粒子，所以在同一能级可以有两个质子和两个中子。在这个具有自旋等于零的紧密的组合中，我们认识了氦原子核(α 粒子)。

自旋的存在表明磁矩的存在。如我们所知，在角动量 L 和磁矩 M 之间存在着正比关系。在这种情况下，磁矩可以是和自旋或者平行或者反平行。

玻色子和费米子

我们曾经多次强调，一个能级只能有两个带有相反方向的自旋的粒子。现在应该指出，这个原理(泡利原理)只适用于称为费米子的那一类粒子。电子、质子和中子以及所有其他的由奇数费米子组成的粒子属于费米子。第二类粒子称为

玻色子。光子，某些短寿命的基本粒子(例如 π 介子)以及所有由偶数费米子组成的粒子(它们是最主要的)，属于玻色子。

处于同一能级的玻色子的数目不受限制。为了让你们更好地理解在玻色子和费米子之间的区别，我们引入了图 5.4。在这个图上，每个圆点代表带有相反自旋的粒子对。在非常

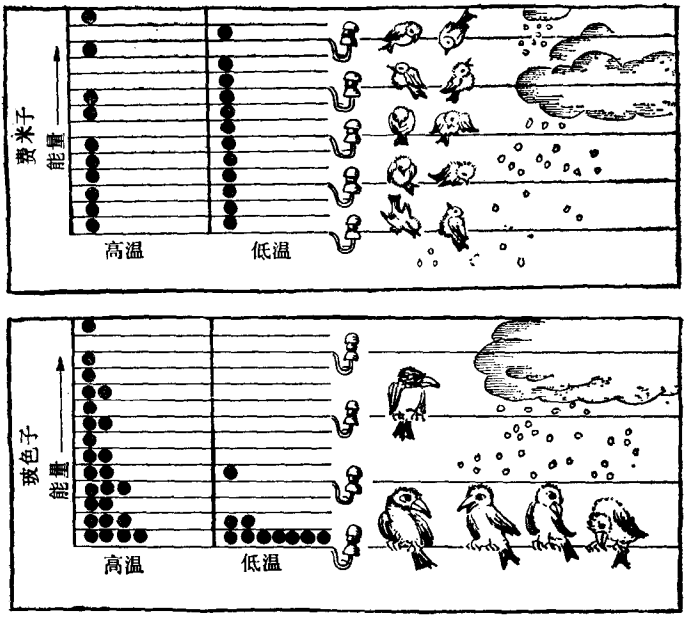


图 5.4

低的温度下，玻色子基本上集合在最低的能级。而在这个图上的费米子则分布成柱子形状。

显然，在低温时，费米子和玻色子的行为的差别能最清楚地表现出来。在最低的温度下，位于“地下室”的玻色子的数

目可以几乎等于玻色子的总数。

到目前为止，所谈到的东西不需要“理解”，只要记住就行了！因为所说的是不可辩驳的真理。但是，当我不得不向读者介绍某些原理而不证明（它们是能够证明的，但只有借助于远不是简单的数学方程式才行）时，总是企图简化。可以证明玻色子在某些情况下能够而在其他情况下不能够集合在大量的能级中的一个能级上。如果它们能够做到这一点，那么我们说，发生了玻色-爱因斯坦凝聚。

当大量的粒子处在一个能级时，那么在这种情况下，它们的运动变成完全一样。在没有热的扰乱时，粒子双生子完全相同地混在一起。

在第二册书中我们谈过一种奇异的液体，它在低温时具有超流动性。^4He 原子的集合就是这种液体。这种同位素的原子是玻色子。当温度在绝对零度之上 2.19 度时，粒子凝聚产生，这种凝聚赋予液体以惊人的超流动的性质。摩擦的消失可以粗略地解释为：如果只要有一个原子能通过极小的狭缝，那么所有其他的原子都会顺从地跟着它前进。

我们已经认识了不是一种而是两种没有阻力的大量粒子移动的现象。^4He 原子的超流移动，象在许多金属和合金中也是在低温时观察到的没有电阻的电流一样。

但是要知道电子是费米子，它们不能够集合到一起。摆脱困难的出路已在 1956 年找到了。当时三个美国学者提出理论，按照这个理论，当低于某个温度时，电子能够配对。象我们早就已经说过的那样，费米子对是玻色子。因此，当这些

玻色子凝聚到一个能级时就会出现超导。对这两种出色的现象——超导和超流的解释事实上是一样的。一个粒子开路，路变成“平坦易行”，于是所有其他的跟着它前进。

如果由于配对，费米子变成玻色子这一设想是对的话，那么就会产生理所当然的问题：具有质量数 3 的氦的同位素，它有自旋而且是费米子，难道不能也象 ^4He 一样是超流的吗？

从刚一开始就已经明白，如果这个现象也存在，那么无论如何要在比 ^4He 变成超流状态的温度低得多的温度下才能出现。原因很清楚：^3He 的原子核由两个质子和一个中子组成。这意味着它比 ^4He 轻 25%。因此，当然它的热运动要比较强烈，因而玻色子的整齐队伍的建立只有在比较低的温度下才有可能。那么在什么样的温度呢？遗憾的是，理论不能预言 ^3He 转变为超流状态的温度。由于顽强的科学幻想和巨大的困难的克服，^3He 的超流已经在 1974 年之前获得。

在什么样的温度下发生这种转变呢？回答是（它应该用黑体字印刷）：**在 0.0027 度开氏绝对温度**。可能读者会说：“有什么了不起，总共只比 ^4He 的类似的转变温度低两度”。噢，不！冷却这两度所花费的代价，比冷却普通的两度（比如说 20℃ 到 18℃）所花费的代价多得多。在这个平常事件中，温度下降 293/291 倍，而在我们所要谈的情况下，温度下降了 1000 倍。这是实验物理学家的巨大成就，也是预言 ^3He 原子配对成“玻色子”的理论物理学家的胜利。

直观形象有助于记忆。为此我在图 5.5 引入配对图象。两个原子的磁矩指向同一边。这样，^3He 在转变成玻色-爱因斯

坦凝聚状态时，应伴随有磁共振频率的跳跃式的改变。因为一对就象一个整体一样，就是这种现象也已被实验观察到了，这确实是物理学的光辉篇章。虽然没有可能说明在什么条件下，在怎样的根据的基础上发生费米子配对成玻色子，但不应该不把它介绍给读者。

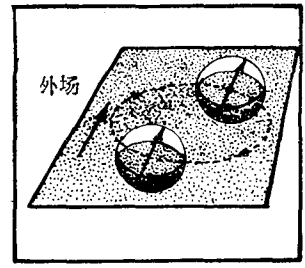


图 5.5

原子核的质量和能量

我们曾经简单地谈到，质量数是原子核的质量的精确数值中的整数。现在习惯上选取(我们在第一册书中谈过这点)^{12}C 的同位素的质量的 1/12 作为质量的原子单位。

所有原子的同位素的相对质量不等于整数。虽说与整数的差别不大，但这种差别确实存在，无论如何也不能把它归因于实验误差。^{1}H 的质量等于 1.00807，氘的质量决不是其两倍而是等于 2.01463。

当仔细地研究同位素的质量表时，可以得出重要的结论：原子核的质量小于组成原子核的基本粒子的质量的总和。例如，中子的质量为 1.00888，质子的质量为 1.00807；两个中子和两个质子的质量等于 4.0339。而由两个中子和两个质子组成的氦原子核的质量不等于这个数目，而是等于 4.0038。所以，氦原子核的质量比组成原子核的粒子的质量的总和少

0.031 原子单位，这超过了测量精确度的 1000 倍。

毫无疑问，这些小的差别具有深刻的意义，但有什么具体意义呢？

相对论回答了这个问题，而它在此时出现比在实验证明电子的质量与它的运动速度有关的时候更使人印象深刻。于是，原子核的质量小于组成它的质子和中子的质量的总和，这种现象称为质量亏损。（从英文翻译得不好，须知质量不是变坏而是变小了。）质量亏损现象用著名的公式 $E = mc^2$ 得到精确和清楚的解释。如果系统获得或者失去能量 ΔE，那么这个系统的质量相应地增加或者减少的数值为：

$$\Delta m = \Delta E / c^2$$

质量亏损（从这个原理的观点）得到自然的解释：它是核粒子束缚能的量度。

在物理学和化学中，人们理解束缚能就是为了完全破坏这个束缚所需要消耗的功。如果能够把原子核分裂成基本粒子，那么系统的质量可增加质量亏损 Δm 的数值。

原子核的破坏可导致巨大能量的释放。不难估算，质量改变千分之一相对单位，即 1.66×10^{-27} 克，大约相当于 1MeV。

当知道原子核的质量时，读者不难看出以下有趣的事实。如果把在核中束缚质子和中子的能量除粒子数，那么对所有的核（除了几个最轻的之外）都得到同样的数目，即 8MeV。从这里无疑地可以得出重要的结果：只有最接近的质子和中子发生相互作用，即核力只在短距离起作用。如果离开质子或中子的距离为这些粒子的大小的数量级（即离开 10^{-13} 厘米），

核力实际上等于零。

把 8MeV 与分子的化学束缚能相比较是有教益的。化学束缚能通常等于每原子几电子伏。这表示，把分子拆开为原子需要消耗的能量比拆开原子核需要消耗的小几百万倍。

从所举的例子中明显可以看出，核力达到巨大的数值。同样，核力是一种新的力，因为它们能够把带着相同电荷的粒子连结在一起，核力不能转化为电磁力。

这两种力所遵从的规律性是极其不同的。电磁力随距离的增加而衰减得很慢，因而仪器可以记录到离带电粒子很远的地方的电磁场。相反，核力则随距离的增加衰减极快。在原子核的边缘之外，核力实际上不起作用。

其他重要的差别还有，核力(大概也象化学价的力那样)具有饱和性。每个核子，即质子或中子，只和有限数目的接近的核子相互作用，而对于电磁力，则没有这种限制。

目前已知，存在着三种力：万有引力，弱电磁力和核力。物理学家已经把弱相互作用的力和电磁力合并到一起了，这种合并后的力称为弱电磁力。力的种类数是否还会变化？这个问题由物理学家的进一步研究来回答*。

核反应的能量

我们已经解释了两个重要的事实。第一个是，在原子核

* 这一小段由译者根据弱-电统一理论的成功改写而成。

之间能够按照非常类似于化学家所知的模式发生反应；第二个是，反应前的原子核和反应后产生的新的粒子在质量方面总是有差别的（因为是质量数的总和守恒而不是反应前后原子核的质量的总和守恒）。

除此之外，我们已经看到，非常微小的质量差也将伴随着释放或吸收巨大的能量。

在核转变中放出或吸收的能量决不能和化学反应热相比较。为了形象地对比，我们举如下例子，一克煤在燃烧时放出的热足以把半杯水加热到沸腾；而核转变放出的热量如下：如果能用 α 粒子把一克的铍的所有原子核打碎，那么放出的热量足以把一千吨的水烧开。

卢瑟福和他的同事们对所有这些知道得非常清楚。然而，卢瑟福认为把核反应用于实际的目的，是完全不能实现的（在当时，物理学家中谁也没有想到可以存在链式反应）。我们强调，卢瑟福在他的发现所带来的出乎他意料之外的革命中，成为象法拉第和赫兹那样的科学家。在第三册书中作为有趣的心理学之谜，我已经提到过此事。在讲述卢瑟福的简单的实验之前，需要用点篇幅给读者提示，在反应中能量的释放和吸收的机理。

首先，我想强调的不是化学反应和核反应之间的区别，而是它们的相似之处。

粒子 A 和 B 变成粒子 C 和 D 的反应中，是放出还是吸收热量，依赖于是从慢粒子产生快粒子呢，还是从快粒子产生慢粒子。在化学反应中情况是这样，在核反应中情况也恰好一

样。而且，如果从慢粒子产生快粒子，那么表示系统的动能增加了。但是，只有在系统的势能减少的情况下，能量守恒定律才允许这种反应。也就是说，在这种情况下，粒子 A 和 B 的内能的总和大于粒子 C 和 D 的内能的总和。在化学反应中的情况是这样，核的内能也表现如此。

按照爱因斯坦定律，内能的减少与质量的减少一一对应。内能的增加导致质量的增加。化学反应中的情况是这样，核反应中的情况也是如此。

但是，在化学中，质量守恒定律是起作用的。分子 A 和 B 的质量总和等于分子 C 和 D 的质量和。而在核反应中，这个等式不成立。这是否意味着化学反应与核反应的区别呢？是的，总是有区别的。但这种区别只是数量上的。在化学变化中，能量变化（这意味着质量也变化）是不明显的（从相对论的观点来看是不明显的）。所以，在实验中观察不到分子质量的改变。因此，化学反应和核反应的相似是百分之百的。

由于上述的重要性（人们经常认为，核能的释放是某种特殊的过程，不应该这样想），我类推到粒子 A 分解为粒子 B 和 C 的情况。如果粒子"自己"分裂成几部分，那么对粒子 A 来说，它是不稳定的。如果 A 是分子，那么对物质来说，它分解；如果 A 是原子核，那么物质是放射性的。在这两种情况下，都有热放出。粒子 B 和 C 将具有"前所没有的"动能。这种动能来自势能。形象地说，把粒子 B 和 C 连结成一个整体的弹簧，这个弹簧断了，而用科学的语言说，束缚能消失了。由于这个束缚能，我们得到了快速运动的粒子 B 和 C，也就是说我们以

热的形式释放出了能量。

在化学反应的情况下，由于能量很小，所以观察不到分子 A 的质量与由它产生的分子 B 和 C 的质量和的差别。但在核反应中，这种差别很容易在实验中观察到。原子核 B 和 C 将具有较大的质量和，它比原子核 A 的质量多出的部分在数值上等于质量亏损。

某种反应放出热量这一事实本身还不意味着它将具有实用的意义，系统的不稳定性的条件（初始物质的能级比反应产物的高的那种情况）象数学家说的那样，是必要的，但不是充分的。

我们在第二册书中已详细地讨论过化学燃料要满足什么条件，现在我们只需要继续在化学反应和核反应之间类比就行了。

于是，我们提醒读者，不仅要化学反应给出热量，还需要使这种热量“点燃”邻近的分子。

因此很清楚，在学会使原子核碰撞并释放出大量能量之前，物理学家绝不会又去生产核燃料。

不能用 α 粒子使铍或锂变成核燃料。它们只满足燃料的第一个条件，即给出能量。但是锂和铍象每一块都需要单独的火柴来点燃的煤块。

直到三十年代末，生产核燃料好象是完全没有把握的任务。

原子核的链式反应

从1934年开始，意大利物理学家恩里科·费米(1901—1954)和他的学生以及其他人的工作，证明了大部分元素的原子核能够吸收慢中子而变成有放射性的元素。

当时已经知道辐射出电子和辐射出α粒子的放射性转变(这些转变伴随有γ射线)。在1938年，许多研究者(有趣的是，在我们现在所谈的基本的发现中，并不是一个人的成果)曾经观察到，在按照费米方法用中子活化了的铀中存在类似于镧的元素。其解释只有一个，在中子的作用下，铀原子分裂成两个差不多相等的部分。这个发现的极端重要性，一下子就清楚了。问题在于，当时已经知道如下的规律性：原子序数越大，在原子核中的中子越多。在铀中，中子数与质子数之比约等于1.6。而对于象镧那类处于门捷列夫周期表中部的元素，这个比例在1.2和1.4之间。

于是，如果铀核分裂成大约相等的两半，那么裂变产物的原子核将不可避免地含有"多余的"中子。因此，它将放出中子。而中子又会起到火柴的作用。

链式反应的可能性清楚了。1939年，第一次对这个现象进行了计算，事件的戏剧性的进程——第一个核反应堆的启动，原子弹的制造和在广岛的爆炸，已经在数十本书中详细地叙述过了。我们没有篇幅来描述这些事件，我们将叙述问题的近况。

我们需要说明：第一，核的链式反应是什么；第二，怎样控制它；第三，在什么情况下引起爆炸。

这种类型的最重要的反应之一，可见图 5.6 的铀 235 原子核裂变的示意图。

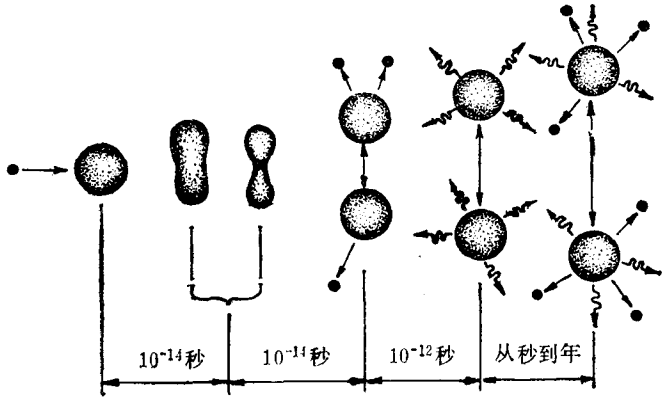


图 5.6

问题不在于第一个中子，它可以在大气中找到。但是，如果希望有比较有效的“火柴”，那么可以利用少量镭和铍的混合物。

铀 235 的原子核由 92 个质子和 143 个中子组成。这些质子和中子紧密地集中在半径大约 10^{-12} 厘米的球状空间。当中子射向铀 235 的原子核时，它穿入这个原子核而产生铀 236 同位素。入侵者使原子核变形，经过数量级为 10^{-14} 秒的时间，原子核的两半只剩下很小的小桥连结着。再经过同样短的时间，原子核变为两部分。与此同时，两个形成的裂片各自放出

两、三个(平均 2.56 个)中子，裂片以巨大的动能飞散。一克铀 235 放出的能量与 2.5 吨煤能放出的能量相当，换句话说，相当于 22000 千瓦小时。经过 10^{-12} 秒，裂变之后形成的原子核，在辐射出 8 个 γ 光子之后，或多或少平静下来。产生的原子核是放射性的。下一步的放出 γ 射线和放出电子的衰变过程可以持续从 1 秒到很多年，这决定于形成什么样的裂片。

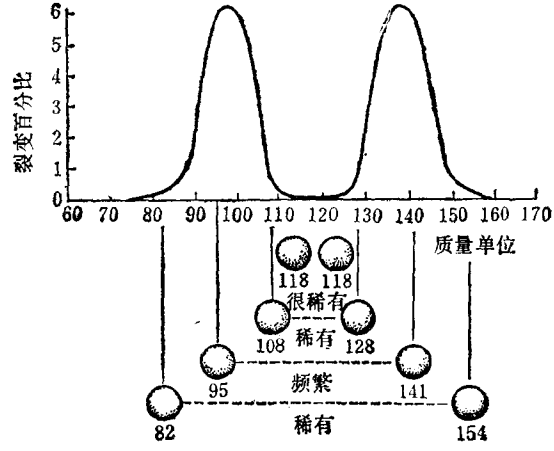


图 5.7

图 5.7 表示，铀 235 原子核多数裂变成两个不相等的裂片。象从曲线中看到的那样，大多数裂变产生质量数为 141 和 95 的原子核。

无论如何，产生的放射性裂片的种类是非常多的，能够满足人工放射性元素工业的各种需要。

如果在一个原子核的裂变中产生的中子能够使其他的铀

原子核分裂，那么链式反应就能实现。

因为物质相对于自己的原子核结构来说，是非常多孔的，所以在某个原子核裂变时产生的中子，从物质中跑出而没有引起其他原子核裂变的可能性是非常大的。此外，还应考虑，不是所有的中子和原子核的碰撞都能导致裂变。如果在每下一个时刻，在物质块内部的中子的数目等于或者大于上一个时刻的，那么链式反应就能发展下去。物理学家把这个条件表达如下：裂变产生的中子数，中子与原子核的碰撞几率，中子在碰撞中被原子核俘获的几率，这三者的乘积等于中子增殖系数，它不应小于 1。

因此纯的原子燃料具有临界质量。如果其质量小于临界质量，那么可以放心地(嗯，说准确些，多少可以放心)携带这块核燃料，只要把它装在口袋中就行了，也不重，因为临界质量不到 1 公斤。

当然，知道临界质量的数值是极其重要的。让.别兰的儿子，弗. 别兰在 1939 年第一次计算了这个数值。这次计算在现在看来只有历史意义，因为当时还不知道在天然铀中链式反应是不可能的，所以我们一点也没有用它。但是，经过了很短的时间就把情况弄清楚了，在天然铀中，链式反应不能进行，因为在铀 235 原子核裂变时得到的中子，由于被铀 238 原子共振俘获而被吸收并产生铀 239；铀 239 经过接连两次 β 衰变而成为镎和钚。只有铀 235 和钚具有临界质量。具有临界质量的物质才是核燃料，在四十年代初期，物理学家已经具有的知识就是这些。

如果建造这样的结构，能够用按钮使两块核燃料（每一块的质量少于临界质量，而合起来的质量则超过临界质量）联接起来，那么就会产生爆炸。原子弹就是按照这个简单的原理制成的。

如果我们想控制核反应的进程该怎么办呢？回答是很清楚的：需要建立一个系统，在它里面除了燃料原子之外，还有能吸收中子的，也就是说使中子失效的其他原子。镉棒是完全合用的，因为镉能强烈地吸收中子。建立由核燃料棒以及镉棒组成的系统之后，把这些棒推进核反应堆或核锅炉（这个系统曾被这样称呼）或者把它们拉出，使中子增殖系数稍大于1，就能开始核的链式反应。然后，当释放出的热量达到所希望的水平时，再把镉棒推进去，使增殖系数正好等于1，这样，核反应就得到控制。

第六章　我们周围的能量

能　　源

日常生活中我们能支配的所有能量归根到底来自太阳。太阳内部，温度百万度，原子核之间的反应可以产生，不受控制的热核聚变进行着。

人类在地球上能实现类似的伴随着难以置信的能量释放的反应，这就是氢弹。下面我们将要谈到正在进行的受控热核聚变的工作。

现在我们用这些引言来论证，在谈论原子核结构之后就把话题转到地球上的能源是自然的。

在地球上，我们能够通过三条途径获得能量。第一条途径是从燃料(化学燃料和核原料)获得。为此目的，要求造成链式反应。在链式反应进程中发生分子或原子核的聚合或瓦解。暂时还有实际意义的化学燃料有煤、石油、天然气等。核燃料有铀和钍（原子核拆散）以及轻元素——首先是氢(原子核的聚合)。

第二条途径是把动能转变为功。如建造水坝，使水从高处落下或者利用天然的瀑布［如尼阿格尔斯基（Ниагарский）瀑布］，使水流进行工作。水能("白色的煤")可成为非常重要

的能源。正是这条能量转变为功的途径使风车的叶片转动。

我们认为，需要十分认真地对待气流（蓝色的煤）。在新的技术水平上，风车复活并给能量库带来重要的贡献。海浪能量的利用也属于这类能源。

热力学定律还使我们想到解决能量问题的第三条途径。原则上总是可以建造利用温差的发动机。如我们所知，当热量从热的物体流向冷的物体时，可以部分地转变为机械功。在地壳，在全世界的海洋以及在大气中，我们都遇到温差。我们确信，当深入到地球内部时，在任何地方都可观察到温度的升高。

所有这三种可能性（我们再次重复），都起因于太阳的辐射来到我们的星球。地球只获得阳光带有的能量的很少一部分。但是，就是这非常少的部分在绝对数量上也是很大的，它不仅可以满足通常的需要，而且能满足实现最富有幻想的计划的要求。

但是，也能直接利用太阳能。要知道，我们已经学会了利用光电池把太阳能转变成电流，而获得电流是把能量用于实际目的的最重要方法。

当然，在很多情况下，物质的内能以及水流和气流的动能都能够直接利用，不必经过电流的阶段。但是，除了飞机和火箭之外，大概在所有的情况下，把初级能源变成电能再从发电站取出来是合适的。现在电站已经为我们的目的服务了。当我们学会制造轻便的、体积小而容量大的蓄电池来代替现在仍放在小汽车里的那种（重量大而容量小的）的时候，电能的

意义还会大得多。

在转到具体讨论各种能源之前，我们还请读者注意两种重要的能源分类。

首先，在燃料和太阳能，白色的以及蓝色的煤之间有一条重要的分界线。在利用燃料时我们一去不返地消耗地面财富的贮备。但是太阳、空气和水，却是免费的能源。免费是在这样的意义上说的，当利用它们的能量时，无论如何不会导致地球财富的减少。风车的功不会减少地球上的空气数量，水电站的功不会减少河流的流量，在太阳能机器作功时也不消耗地球的物质贮备。

还有一种分类法。必须关心环境保护，因为在地球上布满了动植物群。环境保护的重要性是不可低估的。燃料的燃烧不仅具有使地球资源减少的缺点，而且大量的有害的废弃物还污染地面、水和空气。水电站在这方面的情况也不是完全没有问题的。河流状况的改变会影响气候，也会危害地球上很大一部分渔业居民。

直接利用太阳辐射，毫无疑问是获得能量的最佳方法。

在这些一般性介绍之后，我们转到较详细地讨论在地球上利用能量的可能性以及给读者介绍关于在动力工程学手册中出现的数字的概念。

我们从太阳能的特性开始。进入到大气层边界每平方米上的光能平均功率接近 1.4 千瓦（1 年接近 1 千万千卡的能量），这相当于几百公斤的煤给出的热量。整个地球可从太阳那里获得多少热量呢？计算了地球的面积之后，考虑到阳光

照射地球表面的不均匀性，我们得到将近 10^{14} 千瓦。这为地球上所有工厂、电站、小汽车和飞机的马达从所有的能源获得的能量的十万倍。简单地说，为地球上所有居民需要的功率(数量级为十亿千瓦)的十万倍。

到目前为止，太阳能还利用得不多。我们曾这样推论：不错，我们的计算给出巨大的数字，但是要知道，这个能量落到地球表面的所有地方，包括上不去的山坡，占地球表面的大部分的海洋表面，以及没有人烟的沙漠。除此之外，落到不大的面积的能量确实不是这么多的。而且要知道，建立延伸到平方公里的能量接收器未必合适。最后，从事太阳能的利用，只有在日照多的地方才有意义。

能量的缺乏和生产半导体光电池方面的巨大成就，完全改变了动力工程师的心理状态。已经进行了大量的设计和建立了很多实验装备以便把太阳光聚焦到数千个，将来数百万和数十亿个光电池。阴天以及大气对阳光的吸收都吓不倒工程技术人员。毫无疑问，太阳能的直接利用是有很大前途的。

同样，我们对待"蓝色的煤"的态度也改变了。大约二十年之前有人说：在能源方面，我们不把很大希望寄托在风上。这种能源也具有与太阳能的同样的缺点：在单位面积上得到的能量不大；如果要得到工厂够用的能量，那么风轮机的叶片应该达到实际上不可实现的规模。风力的不稳定性也是相当严重的缺点。所以说风能(或者富有诗意地称为蓝色的煤)只有在小的发动机——"风轮机"中才值得利用。在有风时，风轮机把电给农业机器以及给房屋照明。如果风能有余，可以

贮到蓄电池里，以便在暂时无风时使用。

当然不能依靠风轮机，它只能起到辅助发动机的作用。

现在，忙于和能源缺乏作斗争的工程师们的推论则完全是另一种。由上千个有规则地排列的有巨型叶片的风车组成的电站的设计快要实现。蓝色的煤的利用，也同样给人类需要的能量的收入账本，带来有份量的贡献。

流动的水（不断地冲向陆地的海浪和流向海洋的河水）是免费的能源。1969 年水电站生产的电能在苏联是 1152 亿千瓦小时，在美国为 2533 亿千瓦小时。但是水力资源的利用在苏联只有 10.5%，而在美国为 37%。

所列举的水电站生产的电能的数字是非常巨大的。但是，如果我们失去了煤、石油和其他的能源而仅仅依靠白色的煤（河流的能量）的话，那么即使在所有的河流上都建造所有技术上可能的水电站，也还是不得不减少地球上能量的需求。

那么海浪呢？虽然它的能量大约只有河流的九分之一，但那也是很大的。可惜这种能量暂时还利用得非常少。海潮的冲击特性给利用带来了困难。但是，苏联和法国的工程师们已经找到了实际上克服这种困难的途径。现在海潮电站充分供给在最高需求钟点的保险功率。在法国，在兰斯河上建有海潮电站，而苏联在穆尔曼斯克地区的基斯拉雅古坝（Кислая Губа）也建有海潮电站。后者将作为设计在白海海峡的大功率的（近 1 万兆瓦）海潮电站的实验模型。

在海洋深处的水的温度与表面层的相差 10—20°。这表示，可以建造热机。在中等纬度处，上层的水作为它的加热

剂，而深处的水作为它的冷却剂。这种机器的效率将是1—2%。但是，这当然也是很不浓缩的能源。

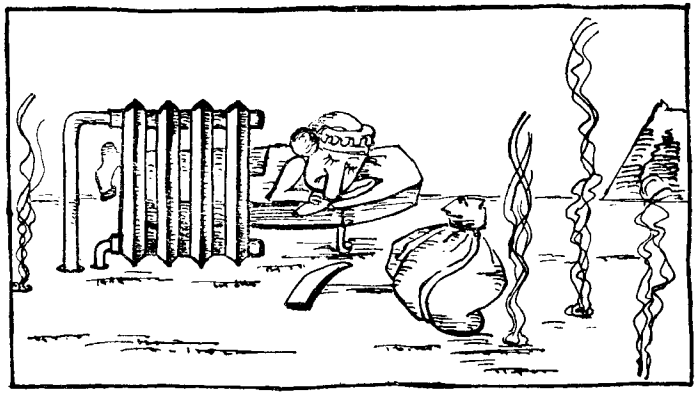


图 6.1

地热能也属于免费的能源。我们不谈论富有温泉的国家，这类国家很少。凡是有温泉的地方，温泉的热都可以用于工业。但是不应忘记，几乎在地球上的任何地方，当深入到地下2—3千米时，我们都会遇到大约150—200℃的温度。建立地热电站的原理是不言而喻的，这需要钻两条水道，从一条注入冷水而从另一条抽出热水。

燃　　料

到目前为止，所谈过的所有能源都比燃料优越得多。燃料会被烧光。煤、石油、木柴的能量的利用是地球财富一天天的毁灭。

地球上的燃料贮量如何？煤、石油和天然气属于普通燃料，即属于用火可以点燃的燃料，它们在地球上的贮量非常少，按照近年的石油消耗，已探明的贮量到下一千年初就要用完。天然气的贮量也是这种情况。煤的贮量稍多。地球上煤的贮量用数字表示为十万亿吨。1 公斤煤燃烧时放出 7000 千卡的热量（当然，燃料的质地是很不相同的。换算的数额好象是一种计量单位，据说是有某种条件的用来比较不同来源的能源的燃料单位）。因此，煤的总贮量为 10^{20} 千瓦的数量级。这大约为能量的年消费量的一千倍。

能量只有一千年的贮备应当认为是很少的。一千年——这只有和人的寿命相比才是很长的，而人的寿命和地球寿命以及文明世界存在的时间相比，却是非常短暂的。除此之外，按人口平均的能量消耗是不断地增长的。因此，如果燃料的贮备缩减到石油和煤，那么地球上的能量贮备的情况应该认为是极危险的。

难道化学燃料一定要局限于我们在自然界找到的那些物质吗？当然不是。在很多情况下，用合成的气体或液体燃料代替石油和天然气是有好处的。

近年来特别注意氢的工业生产。作为燃料，氢有许多优点。通过不同的途径可以获得数量无限的氢，它到处都有，所以没有运输问题。氢容易除去无用的杂质，在很多情况下直接利用氢燃烧的热量是比较有利的，因为可以免去变成电能的阶段。

现在，能获利的生产氢的方法有三种：电解法，热化学分

解法和用中子、紫外线等照射含氢化合物方法。在核反应堆中从煤和石油中获得氢也是经济上有利的。在这些情况下，能够预见到用管道把氢送到用户，就象现在送天然气那样。

我们对化学燃料的简单评论到此结束。我们问：核燃料的情况怎样？它在地球上的贮量如何？要知道，它的需要量是很小的。一公斤的核燃料放出的热量比同量的煤所放出的大二百五十万倍。

大略的计算表明，潜在的（从以后的情况中读者会明白，为什么我们利用这个形容词）核燃料的贮量可以用下面的数字表示：大约两百万吨铀和四百万吨钍。这就是我们今天会在原子反应堆中，用核裂变的方法从它们那里获得能量的物质。是否还有其他物质可以作为核燃料呢？好吧，不能排除这种可能性。给出能量的核反应的数目是很多的，问题只是在于怎样产生核的链式反应。

我们现在只谈今天会做的事情。象上一章所说的那样，在自然界中只存在唯一的一种核燃料物质，这就是铀235同位素。在矿场中获得的铀含有99.3%的铀238而总共只有0.7%的铀235。

骤然看来，似乎最本质的原理是：分离出我们所需要的同位素，建立由这种物质块或棒组成的反应堆。为了控制核反应，可把吸收中子的控制棒推进反应体积的内部。

首先应当指出，如果我们关心装置的功率，即希望从单位的核燃料质量中，每秒获得尽可能多的能量，那么，吸收中子（使之没有可能参加链式反应）是不利的。而把中子慢化到热

速度（把在核裂变中产生的“快”中子转变成“慢”中子），这就对提高锅炉的功效非常有利，因为铀 235 的原子核吸收慢中子的几率比吸收快中子的大得多。

如果不讨论实验室范围之内的实验性的结构，那么可以说，所有反应堆都可以用重水或普通水作为慢化剂。重水的好处在于它完全不吸收中子，但是它慢化中子的效果比普通水的差得多。

于是，似乎最本质的方法在于分离出同位素铀 235。我们已经说过，实现这种分离需要大量经费。要知道，化学方法不适用于分离化学性质相同的物质。

现在认为离心法是最有利的。在离心分离之前，需要获得某种气体的铀的化合物。六氟化铀是在普通温度下处于气态的唯一的这种化合物。含有同位素铀 238 和铀 235 的气体分子的质量差非常小，最好的离心机也只能浓缩较轻的分子到 12%。为了得到含有 3% 的同位素 235 的铀（这样的燃料已经可用于核反应堆了），离心分离过程需要重复 13 次。显然，获得纯的同位素 235 不能认为是正确解决工程问题的办法。

但是，有其他的、可能是更重要的想法。没有铀 235，我们就不能把铀的基本部分和钍变为核燃料。这就是为什么我们也称它们为潜在的核燃料的原因。至于同位素铀 235 本身，那么这种燃料只能把能源缺乏到来的时刻推迟几百年。所以，如果认为人类应该长期利用核燃料，那么需要走另外的道路。

能在反应堆中生产核燃料。在反应堆中，我们能够生产

的首先是钚239，它从铀238获得；其次是铀233，它从钍232获得。但是，如果没有铀235，无论如何也不可能生产核燃料。

生产能量也同时生产新的核燃料的反应堆称为增殖反应堆。能够做到，反应堆生产出的新的核燃料比它所消耗的多，或者说，使再生产系数大于1。

于是，我们已经知道了利用所有铀和钍的贮量的技术上可实现的途径。所以，我们会利用的燃料最少也够用几千年。

然而，把铀和钍合并到燃料中，也不能解决人类从能源缺乏中解放出来的根本问题，因为地球上矿物的贮量是有限的。

热核反应则是另外一回事。如果能够实现受控的轻原子核的聚变，能使反应自己持续进行，那么，到那时我们确实可以说，解决了能源问题。解决这个问题的现实性如何？最近，物理学家已经能获得处在温度大约六千万度的氢等离子体。热核反应在这个温度下发生。但是，我们还不知道怎样能使这个反应成为自持的，怎样实现热核反应堆。

在全世界的海洋里蕴藏着这么多热核能，它可以在超过太阳系的年龄的时间满足人类所有能量的需要。这实际上就是无限的能源。

关于燃料的讨论到此结束。现在转到讨论使燃料工作的装置。

电　　站

当然，可以举出许多与获得电流无关的直接利用能量的

例子：在您的厨房里烧煤气，由于燃料的燃烧产物的反冲而使火箭升空，以及老式的蒸汽发动机在某处使用等等。在许多情况下，直接利用象风那样的免费的能源给出的能量来作为动力是合适的。

但是在绝大多数情况下，我们需要电流。照明、电动机、电牵引、电焊、电炉、蓄电池等等都需要电。而且，无论如何今天我们想不出别的办法能象用电流那样把能量输送到远距离。因此，说电站仍然是技术主角大概不会夸大。

直至今天，有两种基本的工业方法能使发电机（生产电流的机器）的转动部分运动。如果由落下的水的能量完成这个工作，那么我们把这种装置称为水电站；如果用蒸汽给汽轮机的叶片的压力作为动力，那么我们称它为热电站。

从热电站的种类中特别分出原子能电站，虽然实质上它们与普通热电站的区别只是燃料不同。但是，在这两种情况中，我们都是先获得热量，然后用热量来获得蒸汽。

近代居民经常碰到热电厂或者废汽余热电站这样的名称。热电厂不仅给消费者提供电能而且首先是以水蒸汽或热水的方式提供热能。

人类自古以来就会利用落下的水的能量。木磨的水轮是近代水轮机的原型。当冲击轮子的叶片时，水流把自己的动能的一部分传给叶片，于是叶片运动起来，轮子开始转动。为了得到最高的效率，轮子的叶片的安排不是那样简单的。工程师们根据水的落差条件区别对待地解决这个工程问题。强大的水流冲击叶片的高度（高达 300 米）越高，涡轮机就工作得

越顺利。在高水平的近代工艺基础上完成的水轮机的设计功率超过 500000 千瓦。由于这些功率是在很低的转数(每分钟 100 次左右)下获得的，所以现在设计的水轮机的规模和重量都是惊人的。

按照在工作轮子内的水流方向，水轮机分为轴流式和径-轴流式。在苏联，工作轮子的直径为 7.5 米，功率为 508 兆瓦的径-轴流式水轮机工作得很顺利。

现在，在水电站能生产出最便宜的电能，但是水电站的造价比热电站的贵几倍，而且建造周期比较长。在水电站中装有由水轮机运转的水力发电机，水力发电机是很大的同步电机，它一般具有垂直的转轴。这种类型的电机的转子直径超过它的长度 7—10 倍，在最大的电机中超出 15 米，这是为了在使它运转的水轮机的速度变化时机器仍能稳定地工作。水力发电机的转子装有很多明显的磁极。例如，德聂伯水电站的发电机装有 72 个极。为了用直流给磁极线圈供电，使用专门的直流发电机——激励器。水力发电机的转动频率不大，为 80—250 转/分。

克拉斯诺雅尔斯克的水电站的水力发电机（功率为 500 兆瓦)具有转动频率 93.8 转/分，它的转子的直径为 16 米，重量 1640 吨。萨彦岭-舒申斯克水电站的发电机的设计功率为 650 兆瓦。

象我们已经说过的那样，水能的利用不消耗周围的介质。而且水电站比热电站优越，这是不容置疑的。首先，水电站不消耗贮量不多的燃料。而热电站有一个最大的缺点：在把燃

料的能量变成电能时，不可避免地白白浪费相当大的一部分能量。然而，将近五分之四的电能来自装有以蒸汽压作为动力的汽轮发电机的热电站。

为了使发电机的效率更高，必须尽可能地增加蒸汽的温度。显然，只有在同时增加压力的情况下才能达到这一点。在功率为200—300兆瓦的近代热电站中，通过涡轮机的蒸汽温度565℃和压力24兆牛顿/米^2。

但是为什么需要力求达到高的温度呢？原因如下，在汽轮机中，我们所利用的现象归根到底与茶壶中的水沸腾冲开盖得不紧的壶盖时的道理相同。换句话说，在汽轮机中，热能变成机械能，然后机械能变成电能。而在第一次转变中（这能够严格证明），能量的损失的份额不少于周围介质的温度与蒸汽的温度之比。

真可惜，在现代的获得能量的装置中，不得不经过"热的阶段"。这个转变永远是和巨大的能量损失联系在一起的，而将来的理想电站应能把任何来源的能量直接变成电能。但现在这个非常重要的问题还没解决。给我们剩下的只有一条路：力求使蒸汽、气体或者等离子体的温度达到最高。

不管这如何复杂，但热电站的效率还是达到了将近40%。汽轮发电机是有水平转轴的电机，转子和转轴的两端一起做成一个锻件，并由特殊的涡轮机转子钢制成，其原因是在转子里面的机械应力由于大的转动频率（3000转/分）而达到近代材料的最大允许数值。正是同样的原因，转子没有明显地表现出磁极来。在它的圆筒形表面部分有槽，励磁线圈装在槽

里。三相交流线圈放在定子的槽里。

由于机械应力大，转子的直径受到限制，因此为了得到足够大的功率，不得不把机器的长度增加。

在 1925 年，列宁格勒的工厂“电力”生产出了第一批国产的汽轮发电机，功率为 500 千瓦。而在 1964 年，“电力”生产出的汽轮发电机的功率为 500000 千瓦，超过它的第一批产品的功率的 1000 倍。

企图从一个机器获得更大的功率而不增加甚至减少已经很大的体积，这就使问题明显地复杂化了。于是，为了减少在定子的线圈内的损耗，线圈用通水的空心紫铜导线制成。励磁线圈用将近 4 个大气压的氢冷却。氢的密度为空气密度的十四分之一，用氢冷却可以使汽轮发电机的功率增加 15—20%。

在 1976—1980 年的发展国民经济计划中，摆在电机工业面前的任务是掌握热电站和原子能电站的功率为1000—1200 兆瓦的汽轮发电机的生产。

世界上最有兴趣的电站之一已在苏联建成。它称为Y-25。它输给电网约 7000 千瓦的电能。这是世界上最大的用磁流体动力学方法产生电能的装置。这样的装置人们口头上称为磁流体。磁流体发电机没有转动部分。

这个有趣的发电机的基本原理是非常简单的。具有很大动能的离子流(等离子体喷注)通过磁场而截断磁力线，洛伦兹力作用在离子上。如我们所知，感应电场强度正比于离子流的速度和磁感应强度，电动势的方向垂直于离子运动的方

向，电流也在这个方向上产生，它通过外部负载闭合。接收电流的电极与等离子体直接接触。

电能的产生是由于等离子体喷注的能量的减少。磁流体发电机能使电站的效率达到 60% 或更高。

从磁流体中获得便宜的能量的决定因素是在间隙中的磁场。这个磁场应该是很大的。常规的有铜线圈的电磁铁可以获得这样大的磁场，但是它体积太大，结构复杂而且造价很高；除此之外，它自己也消耗很多电能。因此，倾向于采用有超导线圈的磁体的新结构。这样的磁体耗能少，发热不多，可以产生所要求的强度的磁场。计算表明，为了得到超导磁体所要求的接近于绝对零度的温度所花的费用是值得的。

从上面几页走马观花的评述中，我们看出，增加能量生产的传统方法是讲不完的。但是未必就能认为，人类将长时间走这条路。

不用说燃料的贮量和利用水能的可能性快要终结，而且不能忘记建造新的电站给周围环境带来严重的影响。生态学家警告，要特别小心对待干预河流的生存，要动力工程师们注意在燃料燃烧时散到大气的大量的灰，一年就有一亿五千万吨灰和将近一亿吨硫进入大气。在大气中，二氧化碳的增加特别使人不安。每年大气中的二氧化碳含量增加两百亿吨。在最近 100 年来，大气中的二氧化碳的含量增加了14%。

这种增加有两个原因：地球上的植被被破坏，以及最重要的是燃烧普通燃料时产生的“气体灰尘”进入大气。这个不断的增长能引起极有害的后果，其中最重要的后果是增加大

气的温度(1.5—3 度)，它能够引起处于地球两极的冰山的不可逆的融化。气候学家认为，在大气中最大允许的二氧化碳含量的进一步增加，不应该超过百分之几十。

核 反 应 堆

象我们已经说过的那样，原子能电站属于热电站那一类。两者的区别在于产生冲向汽轮机的叶片的水蒸汽的方法不同。有理由用"核锅炉"一词来代替"核反应堆"这一术语，这样可以强调它们获得能量的方法是相似的。

核反应堆一般为圆形的建筑物。它的墙壁应该是很厚的而且由吸收中子和 γ 射线的材料做成。给出 1000 兆瓦左右电能的反应堆有各种不同的尺寸，这由所利用的燃料、慢化中子的方法、取热的性质等决定。但是无论如何，这些尺寸都是很大的。高度可达 5—10 层楼那么高，直径几十米。

第二次世界大战一结束，核能学就开始发展了。在苏联，著名学者和组织者伊戈利、瓦西里叶维奇、库尔恰托夫主持了这些重要的研究工作。

在国内外，曾经试验了很多不同的结构。首先解决关于所利用的铀或其他核燃料的同位素成分问题。然后工程师应该决定他所利用的核燃料的形态：铀盐溶液或者固体块。固体燃料单元可以有不同的形状：可以是长方条，但是较合适的是长棒。燃料单元的布置的几何形状起很重要的作用。工程计算帮助找出吸收中子的控制棒的最佳布置。它们的移动

（当然是自动化的）应该保证中子增殖系数的需要的数值。



И. В. 库尔恰托夫（1902—1960）——著名的苏联物理学家，苏联原子问题研究工作的卓越组织者和领导者。他在固体物理领域开始了自己的学术活动，创立了铁电学说。在三十年代初期，从事了原子核物理领域的研究。在他的领导下，在研究核的同质异能素、中子的共振吸收、人为放射性等领域开展了重要的工作。

由于慢中子（热中子）和快中子的行为不同，可以把反应堆分为两类，即有中子慢化剂的反应堆和增殖反应堆。

预先考虑了中子慢化的反应堆可以用天然铀工作，慢化剂的数量应该足以使铀238的原子核不能显著地吸收中子。要知道，铀238的原子核大约比铀235的多140倍。如果慢化剂较少，那么中子还来不及减速到热速度就被铀238吸收了，因而链式反应不能继续下去。用天然铀或者不大浓缩铀235的铀工作的反应堆还能生产新的核燃料——钚。但是这种堆所产生的钚比“燃烧的”原子核少得多。

在原子能电站中，暂时还利用热中子反应堆。最常用的反应堆有四种：由普通水既作为慢化剂也作为载热剂的水-水反应堆；用石墨作为慢化剂，普通水作为载热剂的石墨-水反应堆；用重水作为慢化剂，普通水作为载热剂的重水-水反

应堆和石墨-气反应堆。

原子能专家把自己的注意力集中于热中子反应堆的原因看来在于浓缩铀同位素 235 的工作比较困难。但是需要记住我们在上面提出的意见：只利用一种同位素铀 235 作为燃料，我们就失去了利用具有巨大贮备的潜在核燃料的可能性。

现在打算转到另一种类型的核反应堆，它用高浓缩的燃料而且不利用中子慢化剂。

假定在锅炉中有铀 235 和铀 238 各一半的混合物。在这种情况下，由于铀 238 的俘获，离开链式反应的中子数目，可以大于使铀 235 原子核裂变而继续链式反应的中子数目。这样的反应堆将是增殖的。由于活性的和潜在的核燃料棒或砖的布置的几何形状不同，在增殖反应堆中，这两种类型的燃料的比例及再生产系数可以相差很大。

为了使读者对核反应堆的参数有一个概念，我们举两个例子。

图 6.2 给出的是目前在美国核潜艇中使用的核反应堆装置的一般结构。冷却剂用普通水。因为普通水俘获中子的能力比重水的约大 600 倍，所以这种反应堆只能利用浓缩了铀 235 的铀 238 作为燃料。在这些反应堆的燃料中，铀 235 的含量为 1—4% 而不是在天然铀中的 0.72%。能够给出 1100 兆瓦的电能的反应堆直径约 5 米，高 15 米(五层的大楼)，壁厚约 30 厘米。如果在这种反应堆中装上 80 吨含有 3.2% 铀 235 的氧化铀，那么它将工作 10—12 个月(此后需要更换燃料棒)。在反应堆中的水热到 320° 并在将近 300 大气压下循

环。热水变成蒸汽并冲向汽轮机的叶片。

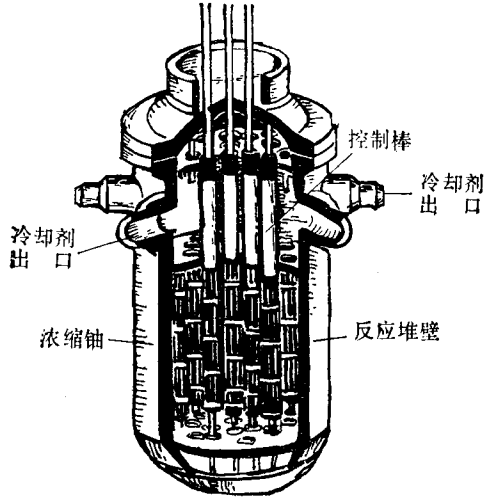


图 6.2

现在，我们简短地描述要在法国建造的大功率的增殖反应堆的设计。这个反应堆称为苏佩尔分涅克斯(超级凤凰)。

它计划用钚 239 和铀 238 的混合物作为燃料，不用慢化剂。这样，中子从核裂变产生时起到与燃料物质的其他原子核碰撞时为止速度不变。反应堆用快中子工作，就可以把它造得小巧玲珑，核心部分不超过 10 立方米。因此，得到的单位体积的热量很大，不能用水取热，因为水使中子慢化。这样只好用液态钠。在大气压力下，钠在 98℃ 溶化，在 882℃ 沸腾。由于技术上的原因，液态钠的温度不应该超过 550 度。因此不象利用水作为冷却剂那样需要提高冷却液体的压力。

苏佩尔分涅克斯的尺寸如下：内直径 64 米，高约 80 米，这是相当可观的 20 层大楼！反应堆的核心是由长 5.4 米的细棒集合成的(象一束铅笔)六角形棱柱体，燃料物质棒与控制棒混合在一起。

我们没有篇幅(而且在物理书中也没有必要)描述反应堆核心的冷却系统。只说它分成三级就够了。初级管道是钠管道，它从反应堆取热并把热传给锅炉。次级道管也是钠管道，它从锅炉取热并传给第三级管道。水-蒸汽的混合物在第三级管道中循环。以后是通向汽轮机的普通管路。

计算表明，这个装置应给出 3000 兆瓦的热功率和 1240 兆瓦的电功率。

我不得不再次强调，把核能变成电能要通过热的阶段，这很遗憾，但仍需要。反正一样，就象如果我们把带有相应的传动装置的小汽车的发动机装在普通运货的大车上一样。但是现在还没有办法免去这个给原子能电站的建造带来可能是基本的困难的阶段。除了具有所有热电站的公共缺点外，这里还需要中间管道。要知道，进入汽轮机的蒸汽是不能容许有放射性的，所以需要用中间管道来排除。

再列举这个设计的几个数据。每平方厘米每秒的最大中子流应该等于 6.2×10^{15}，再生产系数将等于 1.24，一年更换一次燃料棒，液态钠流的速度（技术上说是大量的消耗）是每秒 16.4 吨(在初级管道)。输出的过热蒸汽的压力为 180 巴，温度为 490℃。

我们说几句关于核燃料的“灰”的话。由于燃料原子核裂

变的结果，产生大量放射性同位素。这个过程是不受控制的。但是，当把某些物质放到反应堆里时，这些物质吸收中子而产生新的原子，因而我们有可能获得任何同位素。

当然也可以用加速器获得放射性同位素，其方法是用质子或其他元素的原子核轰击物质。

到目前为止，人造的元素的数目很多。它们把门捷列夫周期表上的"空"位填满了。由于原子序数 61，85 和 81 的元素没有长寿命的稳定同位素，因此在自然界中不存在。它们还把门捷列夫周期表延长到 105 号。原子序数大于 92 的元素称为超铀元素，每种超铀元素都获得了几种同位素。

除了新的化学元素之外，还生产了在地球上有稳定形式的化学元素的大量放射性同位素。

放射性同位素的一系列应用多年来已广为大家所知：用 γ 射线给产品杀菌、探伤，利用在衰变时产生的电子建造电能产生器……。这个单子还可以继续写下去。

可惜，放射性同位素的益处和它们给工程师们带来的麻烦（因为必须对人身进行放射性辐射的防护）相比是程度相同的。

在核燃料的灰中含有450种原子，其中有铀237和镎239，它们可以变为镎 237 和钚 239。

和煤或石油不同，核燃料烧不到底。在一系列情况下，核反应堆用含有铀 235 在 2.5% 和 3.5% 之间的浓缩燃料工作。反应堆在某个时刻停止给出能量，因为在衰变过程中产生大量的同位素，它们俘获中子因而妨碍裂变反应的继续。在反

应堆停工时，在核燃料中剩下大约 1% 的铀 235 和稍为少一点的钚 239。

不用说，扔掉含有这样大量的宝贵燃料的这种灰，是非常不合适的。因此，可以把一个大的化工厂和原子能电站联合起来。这个企业应该是全自动化的，因为要加工具有很强放射性的物质。必须采取认真的措施，强迫要求对工作人员进行 γ 射线的防护。

在这些工厂里被加工的燃料单元应该压碎和溶解，纯净的燃料应该分离出来(铀和钚)，并应回收以便制造新的燃料单元。

剩下的大量的无用的强放射性溶液应该掩埋在一定的地方。此时应当完全确信，在几百年内掩埋放射性废物的地方不会发生某种严重的事件。

专家们的情绪是乐观的。认为把装有放射性溶液的大桶，存放到大约 1 千米深的专门为此而选好的地方，是百分之百安全的。什么样的地方合适呢？地质学家应该解决这个问题。当然，没有地震可能性的地区是合适的。除此之外，还需要保证没有地下水流出。盐矿的地方也满足这些条件，但不能简单地把大桶扔到千米的深井。为了保证散开每个桶发出的热，需要把它们彼此隔开至少 10 米。

在美国，在新墨西哥州的东南部，找到了从地质学家的观点来看是合适的地方。

热　核　能

象已经说过的那样，化学反应和核反应是很相似的。因为放热不仅在分解反应中发生，而且往往也在两个分子结合成一个时发生，所以可以预期，原子核也有类似的行为。

什么样的核聚变反应能够放出热量？当知道原子核的质量时，要回答这个问题完全不难。

氘核的质量为 2.0146 质量单位。如果两个氘核聚合成一个，即形成 ^4He。其质量为 4.0038，而不是 $2 \times 2.0146 = 4.0292$，质量剩余 0.0254 等价于大约 25MeV 的能量，或 4×10^{-11} 焦耳。在一克氘中有 0.3×10^{24} 个原子。所以，如果这种反应进行的话，两克就能给出 10^{13} 焦耳的能量！已经证明氢的重同位素——氘和氚的聚变反应最有前途。而且普通氢作为热核燃料也是合适的。

我们使用的术语完全是带有条件的。在许多情况下谈的是核能。但是已经这样地复杂化了：原子核裂变的能量称为原子能，而聚变的能量称为热核能。在这些术语中没有多少逻辑，但是人们已经习惯了。

“热核”(行话)能够保证能量在地球上用几百万年，而在这种情况下，全世界的海洋的水位不会明显降低。因此可以认为热核能是免费的。

但是，从提出设想到实现这种设想的距离是很大的。要知道，所有的原子核都是带正电的，显然，要使它们彼此靠近，

需要巨大的能量。

从什么地方取得这样的能量呢？唯一的可能是使物质处于等离子体状态(就是说露出原子核)，然后提高等离子体的温度到能克服电的排斥而使核开始碰撞(即彼此接近到 10^{-13} 厘米的距离)的程度。

计算的结果使人非常伤心。建议你们自己按照公式 e^2/r 计算静电排斥能量的数值，然后估算需要达到多高的温度(为此需记住把任何粒子的动能和温度联系在一起的公式)，计算结果是需要几千万度。

于是，需要造成高温的等离子体。有两条道路，一条路物理学家已经走了二十多年了，而另一条，其年代少 15 年。

第一条路是把等离子体"赶到""磁的瓶子"里。

如果把其方向与电场方向相同的磁场加到气体放电管，那么在这样的管子中产生等离子线柱。象我们所知的那样，等离子体的带电粒子将走螺旋轨道。可以认为，粒子的运动形成一个圆形的表面电流。磁场越强，等离子线柱的半径越小。来自磁场的作用在带电粒子流上的力，是形成和气体放电管的壁不接触的线柱的原因。

这样，原则上能够造成"悬在空气中"的等离子体。

计算表明，在数量级为 0.1 毫米汞柱的氢的起始压力、线柱的半径为 10 厘米以及放电电流强度 500000 安培的情况下，等离子体的温度应该是足以开始热核聚变的了。

在实现受控热核反应的道路上有着很大的困难。问题在于等离子线柱由于一系列原因是非常不稳定的，而且会出现

刹那间的散开。如果能造出带有“反馈”(它要求偶然的使线柱散开的涨落能引起一种力。这种力反作用于散开)的磁瓶，就能解决这个问题。

1978 年中期，在普林斯顿大学工作的美国物理学家小组成功地把等离子体加热到了 6 千万度。这个成就曾经在苏联研制的称为“托卡马克”(来自三个字(环、室、磁体)的字头)的“磁瓶”(我们在第三册书中已经谈到了它们)中达到，所达到的温度足以进行氘和氚的原子核的聚变。

这是重大的成就，但是第二步还未做完，还不能使热的等离子体保持足够长的时间。实现这个任务的技术途径还不很清楚。建立受控热核聚变是非常花钱的任务，无论如何，这个领域的研究在继续着。

利用激光射线来造成受控热核聚变的工作正在进行。能够在持续时间 10^{-9}—10^{-10} 秒内以光脉冲的形式辐射出功率约 10^{12} 瓦的激光器现在已经实现。这种激光可以射到我们想使之变成等离子体的物质。当然，在这种非常强的光线射到固体时，物质刹那间就离子化而过渡到等离子体状态。要实现造成具有温度 10^{8} 度的氘-氚等离子体，以及使其温度能持续足够长的时间，使链式反应能够开始的任务，就要求造成密度尽可能大的等离子体以便增加核碰撞的数目。

以这些想法为基础的反应堆示意图如图 6.3 所示。由氢的同位素组成的固体（冷凝的）球投入到抽到高真空的容器中。当球通过容器的中心时，开动强大的激光器而把固体变成等离子体。为了使反应堆工作起来，需要达到这样的状态：

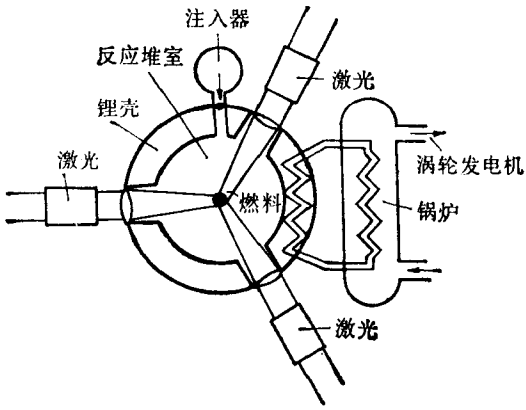


图 6.3

在反应开始到结束这段时间内所给出的能量，能够保持反应进行所必须的温度。计算表明，等离子体的密度应该超过固体的密度 10^3—10^4 倍，即在 1 立方厘米应当有大约 10^{26} 个粒子。激光器能够造成这个压缩。

原则上可以获得所需要的温度和所需要的密度。事情进一步如何发展？核聚变的能量传给反应中释放出来的中子，这些中子打到容器的锂壳上，锂通过热交换器把能量传给汽轮发电机。一部分中子和锂起反应而产生氚。氚是有用的燃料物质。

原理是简单的，但是到它的实现却很遥远。而且完全可能，在前进的道路上会遇到新的预想不到的困难。暂时还很难预言，需要对所描述过的要变为能源的装置提出什么样的要求，因为在小的物质体积内创造出这样大的功率，是一个未

知的过程。研究人员相信，在这个过程中将会发现新的现象。

太 阳 光 线

早就知道，利用光电池可以把太阳能变成电能。但是直到最近，谁也看不出把这种现象作为发电站的工作基础的可能性。骤然看来，这个建议好象是古怪的幻想。为了建立功率为1000兆瓦的电站，需要把太阳能元件（这样称呼专门用于把太阳能变为电能的光电池）铺砌到面积6×6平方公里。而且这要在象撒哈拉大沙漠那样的日照地区！但是，比如说，在中欧，在那里，有太阳的日子已经不那么多了，要铺的面积至少应该增加一倍。读者会提高声音地说，这纯粹是幻想，而且这样的电站要花多少钱！

这是正确的异议。但是，请把这种获得能量的方法的优点来衡量一下。我们不消耗任何地球上的财富，也没有废物污染环境。这两个理由是否有力到足以值得认真地研制尽可能便宜的太阳能元件以及研究布置元件和聚焦太阳光的最佳方法呢？很多研究者深信，不仅问题值得认真注意，而且希望将来的电站用这个原理工作。本书的作者也是这样认为的。不排除这样的可能性，若干年之后给这个课题起名为第一号问题。

这样乐观是不是为时过早呢？今天的情况怎样？首先需要看看，现在工业已经能提供什么样的太阳能元件。

我们用图6.4重温一下把太阳能变成电流的原理。元件

由夹在金属电极之间的半导体 p-n 层组成。太阳光造成自由电子和空穴，它们被接触电压发送到相反的方向而形成电流。

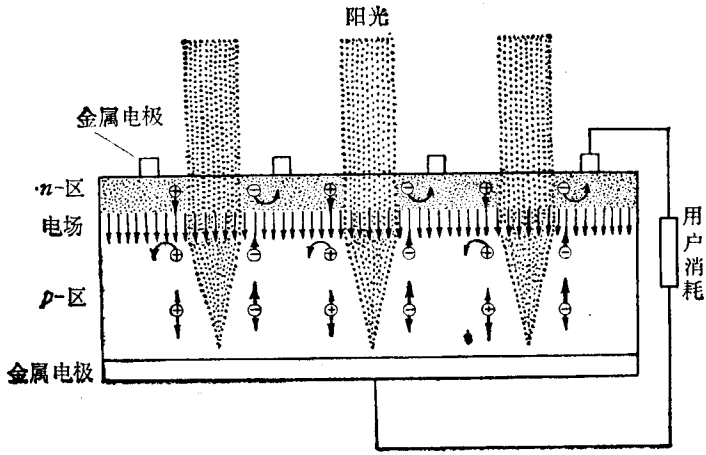


图 6.4

已经掌握了三种这样的元件：均匀接触型的元件的 p-n 瓷片由硅合金制成；用扩散方法产生薄的(0.3 微米) n 层和较厚的 (300 微米) p 层，不均匀接触型的元件由两种不同的半导体组成，厚度为 20—30 微米的硫化镉的 n 层被蒙在金属的衬垫上并用化学方法在它的表面上造成厚度为 0.5 微米的硫化铜的 p 层。第三种元件利用在被非常薄的 (20 埃) 电介质薄膜隔开的砷化镓和金属之间的接触电压。

为了最佳地利用全部太阳光谱的能量，可用具有电子束缚能约 1.5 电子伏的半导体。太阳能元件的效率原则上可以达到 28%。

硅均匀接触元件具有一系列技术上的优点，并且研究得最仔细。它的效率为11%到15%。生产硅太阳能元件已经二十多年了。用石英砂(硅的氧化物)作为原料，先从石英砂中得到纯硅，再把硅制成单晶并加工成厚度0.3毫米的圆垫片。近几年，研究出了单晶带，在硅片中形成 p 层的掺杂工艺已经掌握得很好。为了使太阳光线在硅片上的反射尽量减少，在硅片表面蒙上一层钛的氧化物薄膜。在光强100毫瓦/厘米^{2}时，硅片给出的电压为0.6伏，短路电流密度等于34毫安/厘米^2。可以用各种各样的方法把元件组成电池。直径为5—7.5厘米的单晶硅片，把它们固定在玻璃片之间并连接起来可以收集到足够强的电流。而且，生产面积大得多的元件的工艺加工也是可能的。

目前妨碍在工业上使用太阳能元件来获得能量的主要原因是太昂贵。因为需要得到高质量的单晶硅带，所以成本高。

很大的希望寄托在制造薄的多晶层太阳能元件上。这样的工序耗资不多，但是效率显著降低。寻找获得高效率而又便宜的太阳能元件的方法的工作正在紧张地进行着。与此同时，研究人员在寻找增加进入太阳能元件的能量的方法。

已经进行了这样的太阳能电站的设计，它由三万四千个反射镜组成。镜子把太阳光反射到处于高300米的塔顶的接收器。

如果利用集中的太阳能，那么需要注意在元件的温度升高时少影响效率。在这方面，由砷化镓造的元件有优点。

正在考虑把太阳能电站设在高山上，以便保证好的日照

条件。设在地球卫星上的太阳能电站的设计也正在详细地拟制。这类宇宙电站能够获得未经损失的太阳能，并把它以微波的形式发送到地球，然后再变为电能。骤然看来，这种想法好

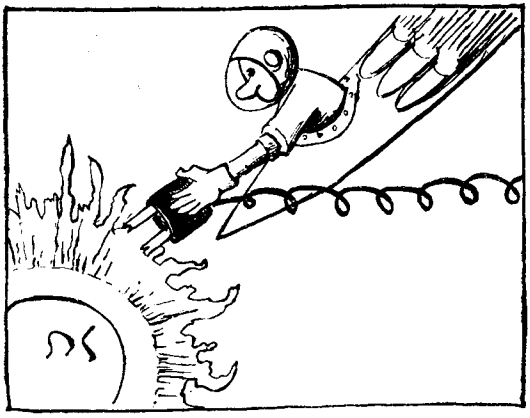


图 6.5

象是来自幻想小说。然而，工程师们却在认真地对待在卫星上的太阳能电站的设计。这个设计的尺寸为 25×5 平方公里。在这么大的面积上可以放置 140 亿个光电池，电站将重达十万吨。这样的电站能够给出几十个非常大的原子能电站能给出的能量。即数量级为几万兆瓦。

这样的设计已在详细地拟制，而且它们的小模型正在开始试验。

风　　能

地球大气的空气团块不断地运动着。气流能量的出现是

多种多样的：低气压旋风，风暴，经常刮的贸易风和微风等等。古代就已经利用风的能量使帆船和风车运行。全部的、年平均的、全地球的空气流功率正好是1000亿千瓦。

气象学家很好地知道地球上不同地方以及在不同的海拔高度的风速。风是变化无常的，因此，在计算它的平均速度时要考虑各种情况。在海拔90米的高度，平均风速为4米/秒，这是对沿海一带的最低估计。

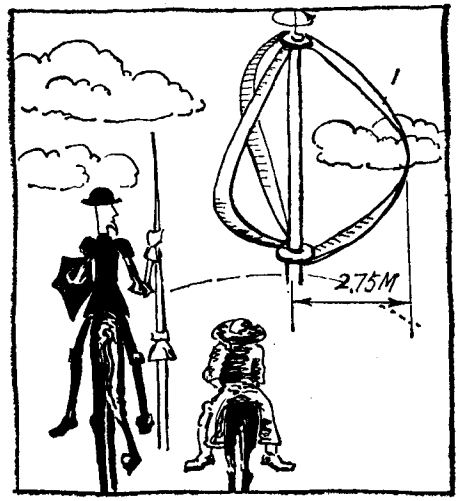


图 6.6

显然，座落在海和洋岸边的村庄是利用蓝色的能量的最有利的地方。英国(它是中欧国家中最多风的一个)指望在宁静的天气能得到的风能，比它全国现在所有电站能生产的大6倍。而在爱尔兰，风能超过这个国家的电能消耗的一百倍(不过，很可能那里没有那么多风，而是电站少)。

不到二十年前，对风作为能源曾不抱大的希望。但是，近代动力工程学的趋势在我们眼前改变着，筹划利用免费能源的委员会一个接一个地成立，对待地球内部的财富的态度不象以前了。人们开始认为，合理利用而不是滥用地球内部资源的时候来到了。因此，也认真研究风能了。冷静地估计到技术上的可能性，认为利用 1000 亿千瓦的百分之几是现实的，但这也是很多的能量。

已经设计了巨型“风车”：翼展大于 100 米，塔高也差不多 100 米，风车翼端的速度约每小时 500 公里。这个风车的功率在普通天气下到达 1—3 兆瓦。在常有强风的国家，几千个这样的风车能够保证电能的供应。1973 年在西欧曾用风车生产了 1261.6×10^{12} 瓦小时的电能。原则上说（如果不惜工本），这只是技术上可能的从风那里取得的能量的很小的一部分！巨型风车的建造已经开始。

计算表明，当转子把风的速度减少到三分之一时，风力发动机给出最大的能量。但是不要认为风力发动机一定应该模仿风车，采用具有垂直转轴的转子是可能的。图 6.6 所示的转子可以给出大约 20 千瓦的功率。这个转子的优点是不依赖于风向，其缺点是只有在风力大时合用。直径为 5.5 米的这种类型的转子正在制造。

很显然，用风力工作的发电机仍然应该安装在彼此隔开一段距离以便它们之间不起相互作用，虽然总共所占的面积不大。为了建造功率 1000 兆瓦的电站，面积大约需要 5—10 平方公里。

第七章　宇宙物理学

星体距离的测量

现在几乎不可能在天文学和物理学之间划一条界线。在天文学家(好象地理学家)还局限于描述星空的时候，天文学对象很少引起物理学家的注意。但是近几十年来，特别是在开始了从人造卫星和月球观察星空之后，情况发生了根本的变化。

如果大气不妨碍的话，那么能够接收到从宇宙的所有角度来到我们这里的全部讯号。这包括各种粒子流，和实际上所有波谱的电磁辐射——从γ射线到电磁波。用可见光来观察星空的可能性也极大地增加了。

粒子流和电磁波谱的研究无条件地属于物理学。如果还加上宇宙的研究使我们碰到许多暂时还不能给以唯一的解释的现象，如果考虑到我们能够而且应该准备着宇宙物理学能够带来新的自然规律的发现，那么为什么物理学家(按照所受的教育和思维方法)现在是星体世界的研究者就很明显了。

我们从经典的天文学问题开始我们的关于宇宙的讨论。怎样测量从地球到天体的距离？现在我们用雷达能很准确地测量出地球到太阳和行星的距离。地球到太阳的平均距离等

于 149573000 公里。你看，它精确到百万分之一。

但是天文学家会用称为三角测量术这种原理上并不精巧的方法而不用雷达测出行星系统内部的距离。

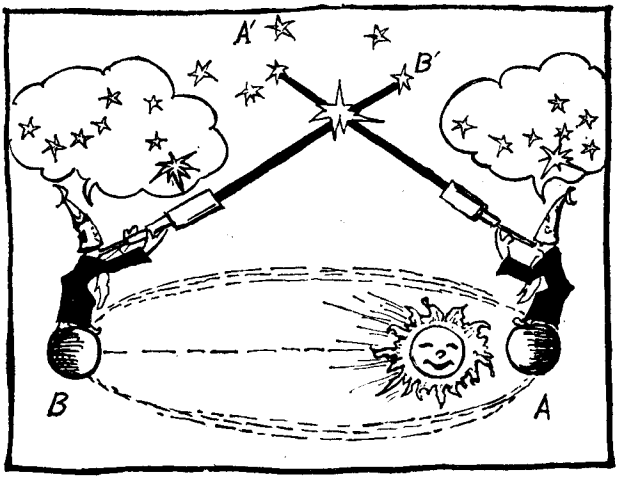


图 7.1

让我们从两个不同的地方来观察某一组星体。这两个地方应该选得彼此相隔尽量远，天文学家称这个距离为基线。天文学家起初用并不精巧的仪器，后来用极好的望远镜测量了到个别星体的方向之间的角度(图 7.1)，而且注意到了能找出作为一个整体在天上运动的星群。无论你从什么位置观察，只要基线相等，对于同一星体的方向之间的夹角都保持不变。但是在这些星体之中经常会找到某一个明显地相对于自己的邻居移动了的星体。当取这些“不动的”星体中的一个作为参照点时，能够测出相对于不变的星座改变了自己的位置的星

体的角移。这个从两个观察点到某一星体的方向之间的角度称为视差。

还在十七世纪，在伽利略发明了望远镜之后，天文学家在观测行星的对于“不动的”星体的移动时测量了行星的视差。那时算出了地球距太阳一亿四千万公里，精确度很不错！

对于肉眼，星体相互位置永远不变。而只要从不同的位置拍下星空的照片，就能够观察到星体视差的位移，这种测量的最大基线是地球轨道的直径。如果从同一个天文台相隔半年拍下某一部分星空的两张照片，那么基线将约等于三亿公里。

用雷达测量到遥远的星体的距离是不可能的。因此图 7.1 所示的测量示意图是完全现代化的。

这一类的照片首先使我们得出结论：有这样的星体，它们相对于其他的星体显著地移动着。也许最不合逻辑地假定，存在着运动的星体和不运动的星体。自然得出结论，那些相互距离保持不变的星体处于比漫游的星体远得多的地方。无论如何，有可能利用很好的仪器测量出很多星体的视差。

对于很多星体，测量视差的精确度达到百分之一弧秒。事实证明了，它们当中最近的处于大于一秒差距。

一秒差距是这样的距离，如果取地球轨道的直径作为基线，那么它给出一秒角位移。很容易算出，一秒差距等于 3×10^{13} 公里。

天文学家有时用光年来表示距离。一光年等于光在一年通过的路程。一秒差距等于 3.3 光年。光穿过整个太阳系需

要半天。观测得出重要而且惊人的结论：我们的行星系实际上是孤孤单单的。

视差方法可用到数量级为 100 光年的距离。但是怎样测量到更远的星球的距离呢？这已经是非常不简单的事情，而且在近似估计的正确性方面的可信度（大部分只能保证一位有效数字）又由不同的测量结果的比较得到。

无论如何，在亿万个星体中有许多是二重的，这种情况在测定到遥远的星体的距离时起着决定性的作用。二重星也称为变光星。这个名称的原因是很清楚的：由于星对的相互运动，星的亮度改变，改变的周期能精确测定。

假定对非常遥远的星团进行观测。在这种情况下，我们有权认为，它们的亮度的不同与距离的不同无关。当然，我们知道存在着“与距离平方成反比”的定律，即任何辐射的强度与距离的平方成反比；我们还注意到当光线通过星体的气体层时，亮度会减弱。但是，如果我们选出天空的很小的一部分而且星体离我们很远，那么它们就处于相同的条件之下。

对属于小马格兰诺夫星云的二重星的研究得出结论：在二重星的周期和它的亮度之间有一定的关系。就是说，如果星体处于离我们差不多一样远而且它们的亮度改变周期（通常是在 2 到 40 昼夜之间）一样长，那么这些星体对我们来说是一样亮的。

在确定了这个规律和对它进行了检验之后，我们就能够把这个规律用于属于不同的星团的星体。在比较闪烁周期相同的而亮度不同的星体时，我们确信它们离开我们的距离是

不同的。为了决定这些距离的差别有多大，我们利用与距离的平方成反比的定律进行估算。但是这个方法只能确定变光星到地球的相对距离。我们只有权把它用于非常遥远的星体，因此不能用来校对用测量视差位移的方法得到的星体一地球的绝对距离的知识。

测量很远的星体之间的距离的比例尺已用多普勒效应找到。

我们在第三册书第 161 页(中译本为 189 页)所讲的公式对任何振动都是正确的。因此，用在星体光谱中观察到的谱线频率能够决定它在离开或朝向地球的方向上运动的速度。因为在公式

$$\nu' = \nu\left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

中，c 是光速，即 300000 公里/秒。所以显然，星体的运动应该是相当快的。为了能观察到光谱线的移动，摄谱仪应当是非常高质量的。

请注意，自然科学家完全相信，在离我们远得不可想象的星体上的氢和我们在地球上与之打交道的氢是同一种东西。如果星体不动的话，那么星体上的氢光谱一定是看起来完全和我们从气体放电管中得到的氢光谱完全一样（物理学家对于世界的共同性方面的信念多么强！)。但是，事实上谱线却显著地移动了，因而得出星体的速度是每秒几百甚至几万公里。这样的解释没有可疑的地方，而且，怎能怀疑呢？要知道，氢光谱由很多线组成，而且我们看到的不是一条线的移动，而是

所有谱线都按多普勒公式移动。

现在我们回到星体距离的测量问题上。知道星体运动的速度能够给以我们什么帮助呢？如果我指出，星球在一年之内移动了(仍然相对于在该测量中能够认为是“不动的”其他星体)某个距离，那么这一切都很简单。如果星体的弧的移动 φ（垂直于来到我们这里的光线）已知，那么当知道切线方向的速度时，我可以按照公式

$$\frac{R\phi}{t} = V$$

找出到星体的距离 R。此时需要用在星体移动过程中所花的时间代入到 t 中。

但是读者会说：对不起，要知道，在公式中含有切线方向的速度，而星体的运动方向我们又不知道。这是完全正确的异议。因此必需作如下的处理，选出大量的具有相同闪烁周期的二重星，对所有这些星体测量视向速度。它将在从零(如果星体运动垂直于光线)到最大（如果星体沿光线运动）之间振动。假定平均切线方向的速度和视向的速度相同，就能够把我们所测得的速度的平均值代入到上面所描述的公式中去。

膨胀着的宇宙

根据测量距离的结果，我们可以把星的世界描述如下：能够看到的宇宙可以分成巨大数目的称为银河的星团。我们的

太阳系属于每人都在天空中看见的银河，这就是天河。天河呈圆盘形，其厚度约十万光年。在天河中约有 10^{11} 个不同类型的星体，太阳是这些星体中的一个，它位于天河的边缘。星体彼此相隔非常遥远，其距离平均超过星体的大小的一千万倍，因此永远不会相撞。为了在空气的空间得到类似的稀疏程度，需要把空气的密度减少 10^{18} 倍。

至于银河系的相互位置，那么则是另一个样子，在银河系之间的平均距离总共只比银河系本身的大小大几倍。

天体物理学家能够给出属于一个银河的星体的相互运动特征的许多详细的情况。我们不谈这些细节。但是，即使在叙述物理学入门的书中，我们也不能绕过一个非常重要的发现。根据对属于不同银河的星体的光谱中的多普勒效应的研究，已经可靠地确定，这些银河系全都“从我们这里”四散跑开。在这种情况下证明了：银河离开的速度正比于“从我们这里”到它的距离。物理学家能见得到的最远的银河的运动速度接近于光速的一半。

为什么我在“从我们这里”这一词上加上引号呢？这是由于某种没有道理的东西显然隐藏在这个论点里。这种立场只能使相信上帝创造了地球并在它的周围摆上了星星的人们满意，这种图象在古代被阿里士多德接受并且统治了中世纪。宇宙有界，界外为上帝王国——神仙世界。

近代的人们完全不能接受关于宇宙有界的说法。如果宇宙有界，那么马上就会问：界外是什么？所以需要绕过关于宇宙的边界的概念；从另一方面，怎样也不能相信地球或者太

阳是宇宙中的特殊物体。但这显然和天体物理学家所获得的知识相矛盾。要知道，银河系"从我们这里"四散跑开！要尽可能地把这个事实容纳到我们对宇宙模型的要求上：我们希望宇宙无界；它多少是均匀的；要求从任何星球上的居民的观点来看，宇宙都是一样的。

从这个模型的思想出发，必然使爱因斯坦得出下面的基本性的结论：我们在日常生活中成功地利用的欧几里德几何，在我们研究星体世界时所遇到的，大得不可想象的距离的条件下不正确。放弃欧几里德几何表示放弃宇宙的直观模型。这也没有什么，对我们来说，舍弃掉直观地想象我们周围的世界的可能性已经不是第一次了。

放弃了欧几里德几何之后，我们可以提出宇宙是封闭的、同时也没有边界和中心的宇宙模型。在这个模型中，所有的空间点将是平等的。

骤然看来，似乎爱因斯坦要求我们作很大的牺牲。我们是那么习惯于两条平行线永远不相交，直角三角形的斜边的平方等于两直角边的平方和……但是，对不起，请记住地理课，在描述地球的地球仪上，纬线是平行的。而在地图上呢？您有权问，在哪一种地图上，因为地图是用不同方法画成的。如果以两个半球的形式把地球画出，那么纬线不再平行；如果借助于所谓直角投影，在纬线之间的距离不再相等，这算什么欧几里德几何！

如果你愿意，那么可以相信毕达哥拉斯定理垮台了。在最重要的航空线地图上，我把莫斯科—开普敦—伦敦画成三

角形（图 7.2）。选出这三角形是因为在地图上它偶然地正好是直角形。就是说直角边的平方和应等于斜边的平方。事实上绝不是。请读距离：莫斯科—伦敦 2490 公里，莫斯科—开普敦 10130 公里，而伦敦—开普敦 9660 公里。勾股弦定理不对，我们的几何学不适用于地图。在描述地球的平面上的几何学定律和“普通的”不同。

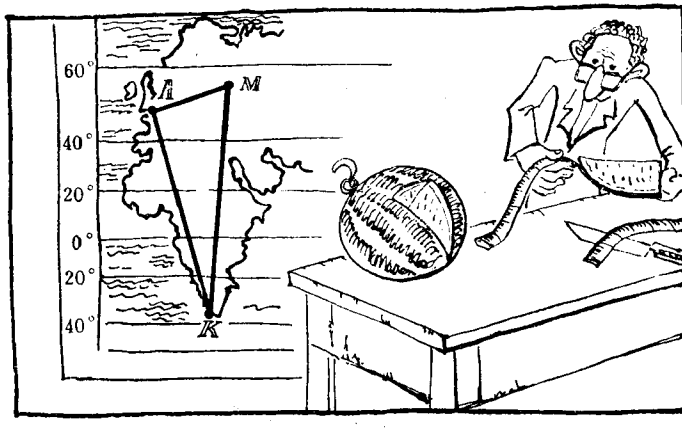


图 7.2

在研究半球的地图时，我们发现，地图有“边”。但是，要知道这是错觉。事实上，沿着地球表面移动时，我们永远也到不了不存在的“地球的边缘”。

有这样的笑话：爱因斯坦的小儿子问父亲：“爸爸，为什么你这样出名？”父亲回答说：“我走运，我第一个注意到在地球仪上爬行的甲虫能够沿着赤道绕回到原处。”当然，没有那样的发现。现在把这个想法搬到宇宙的三维空间；断言宇宙

是有限的而且是封闭的，类似于包围地球仪的两维表面，所以“普通的”几何学对它不适用；以此得出结论，宇宙所有的点完全平等就象地球仪表面上所有点是平等的一样。当然，在做这些假定时需要有特殊的智力上的勇气。

从这里得出这样的结论：如果我们（地球人）观察到所有银河从我们这里四散跑开，那么任何恒星的行星的居民将看见同样的图象。他得出的关于星体世界的运动特性的结论以及测量得的银河的速度都和地球上的居民所得的相同。

爱因斯坦在1917年提出的宇宙模型是他的所谓广义相对论（我们在第四章讲过的那部分理论称为狭义相对论）的自然结果。

但是爱因斯坦没有假定封闭的宇宙应该膨胀。在1922—1924年，苏联学者亚力山大、亚力山大罗维奇、弗里德曼（1888—1925）证明了，理论要求宇宙或者膨胀，或者膨胀与收缩互相更替，无论如何，它不是静止的。我们有权采取如下两种观点中的任何一种，即或者假定我们现在生活在宇宙膨胀的时代，或者假定宇宙在某个时间（可以认为几百亿年）之前曾经是“宇宙蛋”，它爆炸了并从那时起开始膨胀。

应该清楚地理解，起初爆炸的假设和创造世界的说法完全没有共同之处，在这种现有的理论的范围之内，企图前后看得太久以及看的距离太大可能是不合适的。

让我们按照现在看来是合理的逻辑来分析一下下面的简单例子。要测量从遥远的银河来到我们这里的辐射光谱线的红移，如果利用多普勒公式来估计星体的运动速度，星体离我

们越远，那么它们就运动得越快。望远镜能告诉我们越来越远的银河四散跑开的速度：每秒一万公里，十万公里……但是速度数值的这种增长应该达到极限。要知道，如果银河以光速从我们这里离开，那么我们原则上不能看见它；按照多普勒公式计算出的光的频率则为零，所以光不能从那条银河到达我们这里。

当我们拥有最好的仪器时，我们能够测量的最大距离是多少？当然，估计可能是非常粗略的，无论怎样埋怨我们不能看得很远。但是，怎样也测不到以十亿光年计算的距离！

至于更大的距离，那么谈论它简直失去意义。也可以这样说，在今天的概念范围之内，谈论大于十亿光年的距离是失去物理意义的，因为不能提出测量方法。

这里的情况完全类似于电子轨道所引起的情形：怎样也不能容易地测量它，因此关于它的概念没有意义。

广义相对论

狭义相对论导致对运动速度接近于光速的物体的力学定律进行修正的必然性，广义相对论则带来对大距离的空间的习惯概念的修正。就是这个缘故，我们把这个理论放到与宇宙物理有关的一章里。

广义相对论以下面的原理为基础：没有实验能够区分物体是在引力场的作用下运动还是在适当地选出的非惯性参照系统中运动。

让我们分析几个非常简单的例子。假定我们处于以加速度 a 落下的电梯中。让我们从手中放开一个球并猜想它将有什么样的落下的特性。一旦球被放开，从在惯性参照系统中的观察者的观点来看，球以加速度 g 的开始自由落下；因为电梯以加速度 a 落下，所以对于电梯的地板的加速度将是($g-a$)，处在电梯中的观察者能够用加速度 $g'=g-a$ 来描述落下的物体的运动。换句话说，在电梯中的观察者在"改变"了在自己的系统中的重力场的加速度之后可以不说电梯运动的加速度。

现在让我们比较两个电梯。其中一个不动地悬在地球上，而另一个则在行星际的真空中运动，并且有相对于星体的加速度 a。在地球上不动的电梯中的所有物体，都有以加速度 g 自由落下的特性。但是在行星际的电梯中的物体同样具有自由落下的特性。它们将以加速度 $-a$ "落下"到电梯的"底部"。在这种情况下，与加速度的方向相对的墙将起底部的作用。

因此，重力场的作用和运动加速度的出现是分不清的。

在加速运动的坐标系中的物体的表现和在等效的重力场存在时物体的表现完全一样。如果我们限于观察很小一部分空间时，这个等效可以是完全的。让我们设想"电梯"地板的长度为几千公里，如果它不动地悬在地球上，那么在它里面的现象将和相对于不动的星体有加速度 a 运动的电梯里面的现象不同。这从图 7.3 可以看得很清楚。在第一种情况，物体倾斜地落到电梯底部，而在第二种情况，物体垂直地落下。

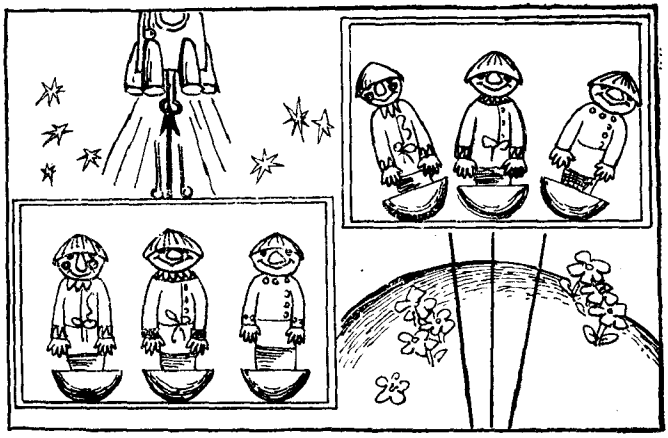


图 7.3

所以等效原理只是在引力场能够被认为是均匀的空间体积内才是正确的。

引力场和用所需要的方式选出的局部参照系等效导致重要的结论：引力场是和空间的弯曲以及时间进程的畸变相联系的。

两个观察者在从事距离和时间间隔的测量，他们对转动着的圆盘上发生的事件产生了兴趣。一个观察者在圆盘上，而另一个是不动的(相对于星体)。可是，只有那个可以说是圆盘上的居民的研究者工作，不动的观察者只是注视着自己同事的工作。

第一个实验是测量径向距离，即测量固定在圆盘的同一条半径上但离圆心的距离不同的两个物体之间的距离。测量方法是普通的，即：在研究者感兴趣的区间的两端之间放若

干次标准的尺子。这两个研究者的观点都认为，放在垂直于运动方向的尺子的长度是一样的。因此，在我们的两个研究者之间关于径向区间的长度没有分歧。

现在圆盘上的居民开始第二个实验。他想测量圆周的长度，必须沿着运动的方向放置尺子。当然，需要考虑圆周的弯曲，因此需要用较小的尺子，以便把切线的一段的长度认为等于弧长。两个观察者对在圆周上能放多少次尺子没有争议，但是他们对圆周的长度的意见有分歧。要知道，不动的观察者将认为尺子缩短了，因为在第二个实验中尺子放在沿着运动的方向。

于是，圆周的半径对于两个观察者来说是一样的，而圆周的长度却不同。不动的观察者得出结论，圆周长度的公式 $2\pi r$ 不对，他认为圆周长度大于 $2\pi r$。

这个例子告诉你们相对论怎样导致欧几里得几何垮台或者（换句话说也是一样）导致关于空间弯曲的概念。

时钟也发生类似的"岂有此理的事"。当时钟固定在离转轴不同距离时，它们走的速度也是不同的，它们都比不运动的时钟走得慢。在这种情况下，时钟离圆盘的中心越远，变慢就越厉害。不动的观察者说，如果你生活在圆盘上，你只能在离中心一定的距离上使用时钟和尺子，因为时间和空间都有地方性。

现在让我们回忆等效原理。既然时间和空间的地方性在转动的圆盘上出现，那么这些现象也应在引力场中发生。圆盘上的情况正如画在图 7.3 中的电梯的情况一样，加速运动

是和与加速反向的引力分不清楚的。

因此，空间和时间的局部弯曲等效于引力场的存在。

在上一节我们谈到的宇宙的封闭性无疑地可以认为是广义相对论的证明。

从广义相对论的巧妙的方程式中有可能用严格的数学推论得出一系列定量的结果。爱因斯坦指出：首先，光线从太阳附近通过时应该偏转，从紧靠太阳的最近处通过的光线应该偏转 1.75 角秒(测量的数值为 1.70 角秒)。其次，水星的行星轨道（准确地说是它的近日点）应该在自己的平面上迴转。计算表明，这个移动在一百年应等于 43 角秒，实验也正好给出这个数字。还有一个预言，它已经被实验证实：光子在克服引力时损失能量(这表示光的频率改变)。

广义相对论是人类思维的最伟大的成果之一。它的创立，在宇宙观的发展方面起了巨大的作用，并使物理学发生了革命。

不同年龄的星体

宇宙物理学处在蓬勃发展的阶段，无论如何也不能象(比如说)低速力学或热力学那样称它为完善的科学领域。因此，不能排除在研究星体时将发现新的自然定律的可能性。这种情况暂时还没有发生，但无论如何，时常被物理学家在科普文章中叙述的宇宙图象经常遭到改变。因此，我在本章所讲的经过十来年之后也可能要重新修改。

天文学家早已经明白，星体是各种各样的，用望远镜、摄谱仪和干涉仪能成功地确定了可以记入星体身份证的许多物理数值。

从与地面上的实验[请和第 12 页（中译本为第 11 页）相比较]的类比中，尽可能地假定，光谱强度的极大位置决定星体表面的温度。观察到的星体的颜色是一对一地与这个温度联系着的。如果温度为 3—4 千度，那么颜色是红的；如果是 6—7 千度，那么是略带黄色的。浅蓝色的星体的温度超过 10000—12000 度。进入到宇宙的广阔天地时，物理学家找到了这样的星体，它们的辐射极大值在 X 射线甚至 γ 射线区域。这表示，星体的温度也可以达到数百万度。

到达我们这里的光谱的总能量是星体的另一个重要的特征，这就是星体的亮度。在亮度方面的极大的差别可能和星体的大小，它与到我们这里的距离以及它的温度有关。

至于星体的化学成份，它们基本上是氢、氦等离子体。太阳是相当典型的星体，它的化学成份是由光谱的形式以及辐射能量的理论计算相当准确地确定了的：氢占 82%，氦占 18%，其他元素不到 0.1%。

在很多星体的大气中，发现了比地球磁场大一千倍的强磁场。还是光谱分析说明了这一点，因为光谱线在磁场中分裂。

星际间的介质被稀释到不能想象的程度，在宇宙的一立方厘米空间只有一个原子。请回忆一下，在 1 厘米^3 我们呼吸的空气中有 2.7×10^{19} 个（平均数）分子。在有些空间领域中，

星际间的气体的密度大大高于平均值。除了气体之外，我们还遇到灰尘，它们由直径为 10^{-4}—10^{-5} 厘米的粒子组成。

应该假定星体是由气体一尘的介质形成的。在引力的作用下，某块云开始被吸引到一个球上，经过几十万年，云层收缩，而星体的温度升高，因而使星体在天空中成为可见的。当然，这个形成的时间强烈地依赖于浓缩的云的大小和质量。

由于继续收缩，星体内部的温度增加并达到能开始热核反应的数值。四个氢原子核变成一个氦原子核。在这种情况下，四个氢原子的 4.0339 原子单位质量变成氦原子的 4.0038 单位质量。所以有 0.0301 单位的质量变成能量。

在星体中心进行的氢的燃烧能够持续不同的时间，这个时间决定于它的质量，对于太阳，它等于 100—200 亿年。星体的稳定状态的持续时间也是这么长。万有引力抵消着企图使星体胀开的内部的热核压力，因此，星体有点象装有压缩气体的气瓶，只不过是引力起着容器壁的作用。

当氢燃料的贮备接近用完时，内部的压力减弱，星体的核心开始收缩。

下一步如何发展？我们得向理论家请教。进行了相应的计算以后得出，星体的下一步的命运取决于它是否能把它的外壳甩掉。如果能甩掉，而且它的质量变成小于太阳的二倍，那么此时产生能够对抗引力的力；这时产生具有很高的表面温度的小星体，它称为白矮星。

那么，再下一步呢？星体的命运还是取决于它的质量。如果白矮星的质量小于一个半太阳的质量，那么它将慢慢地逐

渐灭亡而不发生任何戏剧性的事件。它的半径将减少，温度将下降，最终变成大小和地球差不多的冷星体。大部分星体都是这样灭亡的。

但是如果星体烧完了燃料并甩掉了自己的外壳之后形成的白矮星的质量大于一个半太阳的质量，那么在白矮星阶段收缩不停止，此时白矮星由于电子和质子溶合在一起而形成中子星，它的直径只有几十公里。按照计算，中子星的温度为几千万度的数量级，它的辐射的极大值位于X射线区域。

我们已经谈了如果星体甩掉自己的外壳后应该发生什么情况。但是数学方程式并不一定强求甩掉外壳，如果天体保持着十来个太阳的质量，那么万有引力就干脆消灭星体，在原来星体所在的地方变成黑洞。

在收缩的什么阶段应该产生星体的消灭以及为什么原来星体所在的地方称为黑洞？

让我们回忆起下面的作为火箭离开地球射向宇宙（参看第一册书）的基础的简单规律性。为了离开地球，速度需要11公里/秒。这个速度的数值由公式

$$V^2 = r\frac{M}{R}$$

决定。由公式显然看出，由于一定质量的星球的收缩，火箭离开这个星体射向宇宙所需要的速度一直在增大。但是要知道，极限的速度为300000公里/秒！如果给定质量的星球收缩到半径等于

$$R = r\frac{M}{(300000\text{公里/秒})^2}$$

那么火箭从这个星球飞出就成为不可能了。换句话说，任何东西，包括光线或其他的电磁辐射都能进入这个星体的地方，但是任何东西却都不能从这个星体中跑出来。请你们承认，“黑洞”这一名称是完全合适的。按照上面的公式，不难估算出，质量为 3 到 50 个太阳的质量的黑洞具有直径 60 到 1000 公里。

现在我将或多或少详细地谈谈黑洞的寻找。当然，读者会说，这是局部问题，在这本讲述所有物理学的小书中不应该在这上面分散精力。但是我觉得，这个寻找方法本身是有教益的。自然科学家的天才也表现在对不能直接证明的模型找出间接证明其正确性的方法。骤然看来，这个问题如果不是不能解决的话，也确实是不可思议地复杂的。在天空中直径为 1000 公里的黑斑只相当于百万分之一角秒，在望远镜中认出黑洞显然是不可能的。

苏联物理学家 Я. 耶尔铎维奇二十多年之前就建议开始寻找黑洞。他认为在天空中，黑洞的存在应影响到处在附近的可见星体的行为。他和自己的同事们一起开始了对星表的系统扫描，以便找出在黑洞附近转动的可见的星体。这样的星体应该看起来是单个的，但是它的转动导致光谱线周期地红移或蓝移。红移还是蓝移，这由星体的运动是离开我们还是走向我们来决定。

其他国家的研究人员也参加了这个工作，并找出了一定数量的好象是合适的星体。从多普勒移动的数值可以粗略地估计出可见的卫星在它周围回转的星体的质量。曾经选出了

不可见的候选者，它们的质量是太阳质量的三倍，因此不能说它们是白矮星也不能说它们是中子星。

可是这还不足以证明这种奇特的系统确实作为黑洞而存在。反对派也能够给周期性的多普勒移动找到许多其他的解释。

但是可以找到一根救命稻草。黑洞有从自己的卫星那里吸引气体的特性，在被吸向黑洞时，这些气体应该强烈地发热而辐射出X射线(不错，中子星和白矮星也能这样吸引气体)。正如上面已说过的那样，我们能够按照质量的数值把它们和黑洞分开。

就在不久前，已经找到了一种星体，它符合作为黑洞的卫星的所有要求。跟在这个发现之后，肯定会有新的实验以及预言从黑洞周围发出的X射线的光谱特性的详细的理论计算。最近的将来应当指出，在宇宙中有遇到这些惊人的"物体"的几率。有理由假定，可能存在大的黑洞和质量为10^{16}克数量级的黑小洞，规模比原子核小的那些黑洞可以出乎意料之外地在放出在它里面所含有的能量之后灭亡，这些放出的能量够地球上所有人用许多年，这对科学幻想小说的作者来说是多么富有诗意的题目！

射电天文学

在图7.4的照片上，描述了抛物线射电天线。它把入射到它上面的平行的无线电射束聚焦到放置专门的接收器的地

方，然后，讯号用无线电技术放大。在图中所示的抛物线天线安装在德意志联邦共和国(西德)的埃佛尔斯伯格山。很多国家，包括苏联在内的学者用这个百米直径的天线进行共同的研究。

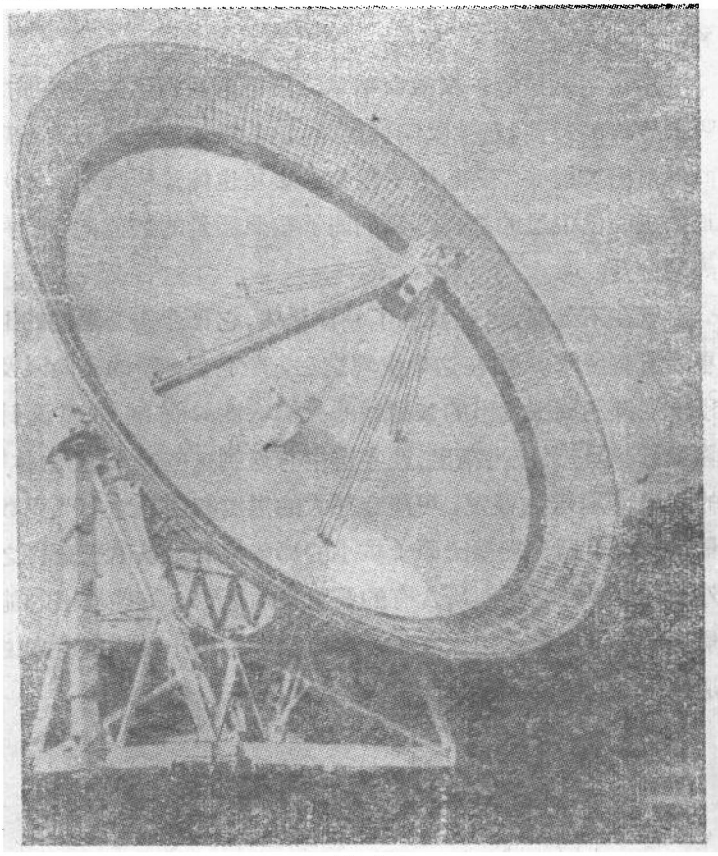


图 7.4

这类的天线具有惊人的灵敏度，当把它转动到镜轴指向

我们感兴趣的方向时，我们能够收到 10^{-28} 瓦·秒/米^{2}的数量级的能量流，真是够幻想的，对不对?!

射电天文学导致了在宇宙物理领域的基本发现。

在不远的将来，射电望远镜将装在月球和卫星上，到那时，大气对电磁波的吸收和反射将不再妨碍观察者了。在电磁谱学中暂时只有两个"窗口"。其中一个窗口可以通过可见光，而另一个可以通过波长从 2 厘米（15000 兆赫）到 30 米（10 兆赫）的无线电辐射。

天气不影响射电天文学的观测，射电天空"外表看起来"是完全另一个样子，不象我们在夜里所欣赏到的那样。在光谱的可见光区，很难发现强的射电星体[包括很多银河和所谓类星体（类似于星的客体）在内]。

宇宙的无线电辐射不是很强的，只是由于无线电技术的非凡的成就才有可能研究它。只要说太阳的无线电辐射的功率为其在可见光区的辐射的功率的百万分之一就够了。

尽管如此，如果没有辐射光谱学，我们也不能确定很多重要的事实。因此，"超新星"爆发的剩余辐射的测量，在了解宇宙中所发生的过程方面起着很大的作用。

中性的氢辐射出波长 21 厘米的强烈的电磁波，借助于这种无线电辐射的强度的测量可以画出星际间的气体在宇宙中的分布图和跟踪气体云的运动。

找到了大量的，处于离我们非常大的观测距离的射电银河和类星体。只说从这些辐射源来到我们这里的辐射的红移达到 3.5 的数值就够了。红移由辐射时的波长和接收时的波

长之差与辐射时的波长之比决定。因此，这个差值为辐射时波长的 3.5 倍。

用无线电方法可以看到宇宙的最边远的地区，用射电天文学的研究可以进一步分析从天空射向我们的宇宙射线的性质。

宇 宙 射 线

在广阔的空间进行的研究现在可以方便地证明，运动速度实际上等于光速的原子核粒子流连续不断地落到我们的地球。它们的能量在 10^8—10^{20} 电子伏之间。数量级为 10^{20} 电子伏的能量超过在最大的加速器中能够达到的能量的八个数量级！

初级宇宙射线基本上由质子组成(约 90％)。除了质子之外，还有较重的原子核。当然，当宇宙射线和其他分子、原子、原子核碰撞时会产生所有类型的基本粒子。但是天体物理学家对初级射线感兴趣。具有这种能量的粒子流是怎样产生的？这些粒子源在什么地方？

相当早之前就已经证明，宇宙射线的基本来源不是太阳。如果是这样，那么也不能认为其他的星体是宇宙射线的基本来源，因为原则上他们和太阳没有什么区别。究竟宇宙线源在什么地方呢？

在我们的银河中存在着蟹状星云，它是由于在 1054 年星体爆炸产生的。(不应忘记，学者们注视星空不止一千年了。)

实验表明，它是无线电波的来源，也是宇宙粒子的来源。这个结果给出了宇宙质子的巨大能量的谜底。象我们所知道的那样，当粒子在磁力线附近绕圈子时能够积集能量。只要假定由于星体爆炸所形成的电磁场起到同步加速器的作用，那么此时按照螺旋线围绕磁力线在几千光年的范围内徘徊的粒子所积集到巨大的能量，能够达到我们所列举的幻想式的数字。

计算表明，当粒子飞越过等于我们的银河的直径的距离之后，宇宙粒子不能积集到大于 10^{19} 电子伏的能量。显然，带有最大能量的粒子是从另外的银河来到我们这里的。

当然，没有任何的必然性假定，只有星体的爆炸才导致宇宙粒子的出现。任何的无线电波的来源都可能同时是宇宙射线的来源。

早在本世纪初就已经观察到宇宙射线的存在。把验电器放在气球上之后，研究人员发现，在高空时验电器放电的速度比如果把这种古老的、为物理学家效劳不少的仪器放在海平面时快得多。

原来，验电器的叶片总是进行性的落下，不是由于仪器的不完善，而是某种外界的因素的作用的结果。

在二十世纪，物理学家已经明确地知道，从验电器取下了电荷的空气的电离无疑是来源于地球之外。密立根首先坚信地提出了这个假设并给了这个现象以近代的名字：宇宙射线。

在 1927 年，苏联学者 Д. В. 斯科贝尔琴首先得到了在云雾室*的宇宙射线的径迹的照片。

* 原文误为电离室，已改正。——译者

用我们以前描述过的普通方法已经确定了宇宙粒子的能量，这种能量是非常大的。

在研究宇宙射线的性质时，物理学家做出了一系列著名的发现。特别是，正电子的存在就是用这种方法证明的。介子——质量介于质子和电子之间的粒子，也正是在宇宙射线中首先观测到的。

宇宙射线的研究仍然是物理学家的吸引人的课题之一。

在这本部头不大的书（这本书的目的是给读者介绍一些物理科学的基本事实和思想）的一章中叙述还很不完善的天体物理学是很困难的，这里只选出了几个我认为是最有兴趣的与宇宙有关的物理学问题中的一些问题。