



数理化自学丛书

物理

第四册

数理化自学丛书

# 物 理

(第四册——光学和原子物理学)

数理化自学丛书編委会  
物理編写小組編

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书介绍了光学和原子物理学的基础知識及实际应用。全书共分十二章。光学部分先叙述光的傳播、光学器件、光学仪器、光度学等,然后討論光的波动性和光的量子性。原子物理学部分依原子的結構、原子核的結構、原子核能、放射性同位素、宇宙射綫和基本粒子的次序分章叙述。书中列举許多例題、习題和总复习題,并且在每章末了附有“本章提要”,以供复习巩固之用。

本书可供具有初中三年級以上文化程度的自学青年閱讀。

数理化自学丛书

~~物 理~~

(第四册——光学和原子物理学)

数理化自学丛书編委会

物 理 編 写 小 組 編

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

---

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印張 9 16/32 插頁 2 排版字數 237,000

1965年4月第1版 1965年4月第1次印刷

印數 1—37,000

統一書号 T 13119·636 定价(科二) 0.90 元



## 編者的話

本書是數理化自學叢書物理部分的第四冊，包括光學和原子物理學兩部分。光學分為七章，原子物理學分為五章，全書共計十二章。考慮到自學的特點，我們把每一章的內容範圍都規定得比較小，便于學習和掌握。書中有关光的本性和原子結構等內容比較抽象，學習時還需要一定的力學、分子物理學、熱學和電學的基本知識，所以希望讀者能循序漸進，先讀完前面三冊，再閱讀本書。

由于本書的體例是把初、高中的內容綜合在一起編寫的，所以我們把光度學這一內容移到幾何光學之後，列為第五章，還因為這一章里的某些概念象光通量、照度等，在光學中一開始就講恐怕是不適宜的。关于原子結構這一內容，因為涉及到現代科學的新成就，我們適當地增加了一些有关探測器、能級、基本粒子和宇宙射綫等方面的基本知識。為了便于掌握，這裡大部分都只限于定性的討論。

物理學是建築在實驗的基礎上的，自學時應當重視有关實驗的描述，並且要搞清楚每一個實驗的儀器裝置、操作的过程和所得到的結論等等。有些簡單的實驗也可以自己動手來做，這樣，通過實際的觀察，所得到的知識將更為生動，同時還會使我們的思路活躍和開闊起來。

為了鞏固所學到的知識，練習也很重要，要經常勤加練習。書上的例題告訴我們怎樣着手、怎樣逐步分析、怎樣正確計算等。做習題時也應當這樣，不要急于套公式做出結果，應當仔細審題、明



确題意和要求，需要哪方面的知識来处理，然后再正确地选用公式、进行运算；当然，能够正确地选择单位，能够判断答案是否合理也是很重要的。每学好一部分內容，就要把这部分习题做好，书后所附的总复习題是供系統复习时用的，其中有些題目具有一定的綜合性。最后的习题答案用来帮助讀者复核习题的結果是否正确，希望在做出結果来以后再去查对，不要先凑答案再来解題。

每一章后面还附有“本章提要”，它能帮助大家在学习时理清綫索，抓住要領，把最基本的东西学到手。“本章提要”顾名思义只是一些概括性的結論，具体的內容还需要跟課本配合一起复习，不能认为只要把“本章提要”上的一些东西記住就够了，重要的还在于求得清楚的理解。

本书的第一到第七章、第十到第十二章是由吳孟明同志执笔的，第八章、第九章是由汪思謙同志执笔的。由于自学方面的讀者对象极为广泛，編写这一类讀物又是初次尝试，因此存在的問題和缺点肯定不少，希望讀者指正和提出宝贵的意見。

1964年12月

# 目 录

## 編者的話

### 第一章 光的傳播(一).....1

- § 1.1 光源.....1
- § 1.2 光的直綫傳播.....3
- § 1.3 象和影.....5
- § 1.4 月相 .....12
- § 1.5 光的傳播速度 .....15
- 本章提要 .....19
- 复习題一 .....20

### 第二章 光的傳播(二) .....21

- § 2.1 在两种媒质界面上的  
光現象 .....21
- § 2.2 光的反射和漫反射 .....22
- § 2.3 光的折射和全反射 .....28
- § 2.4 光的吸收和散射 .....41
- 本章提要 .....43
- 复习題二 .....45

### 第三章 光学器件 .....46

- § 3.1 平面鏡, 平面鏡成象 .....46
- § 3.2 球面鏡, 球面鏡成象 .....49
- § 3.3 球面鏡成象的作图 .....55
- § 3.4 球面鏡成象的公式 .....61
- § 3.5 平行透明板, 稜鏡 .....69
- § 3.6 透鏡 .....73
- § 3.7 透鏡成象 .....81
- § 3.8 透鏡成象的作图 .....84
- § 3.9 透鏡成象的公式 .....91
- § 3.10 透鏡成象的放大率 .....94
- 本章提要 .....99
- 复习題三.....102

### 第四章 光学仪器.....103

- § 4.1 照相机.....103
- § 4.2 幻灯机.....106
- § 4.3 电影机.....108
- § 4.4 眼睛.....109
- § 4.5 放大鏡.....115
- § 4.6 显微鏡.....117
- § 4.7 望远鏡.....121
- 本章提要.....126
- 复习題四.....127

### 第五章 光度学.....128

- § 5.1 发光强度.....128
- § 5.2 光通量.....129
- § 5.3 照度.....131
- § 5.4 照度定律.....134
- § 5.5 光度計.....140
- 本章提要.....142
- 复习題五.....143

### 第六章 光的波动性.....144

- § 6.1 干涉現象.....144
- § 6.2 衍射現象.....150
- § 6.3 光的色散.....153
- § 6.4 虹, 霓, 天空的顏色.....156
- § 6.5 物体的顏色.....159
- § 6.6 分光鏡和攝譜儀.....160
- § 6.7 可見光譜.....162
- § 6.8 光譜分析.....164
- § 6.9 紅外綫、紫外綫和倫琴  
射綫.....166
- § 6.10 光的电磁本性.....170
- 本章提要.....172

|                             |            |                                   |            |
|-----------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| 复习题六.....                   | 173        | § 9.3 放射性元素的蜕变规律.....             | 235        |
| <b>第七章 光的量子性.....</b>       | <b>174</b> | § 9.4 原子的人为嬗变.....                | 239        |
| § 7.1 光电效应.....             | 174        | § 9.5 中子.....                     | 242        |
| § 7.2 光子说.....              | 176        | § 9.6 原子核的组成.....                 | 246        |
| § 7.3 光电管和光导管.....          | 178        | 本章提要.....                         | 251        |
| § 7.4 光的量子性.....            | 182        | 复习题九.....                         | 252        |
| § 7.5 光的波粒二象性.....          | 184        | <b>第十章 原子核能.....</b>              | <b>253</b> |
| 本章提要.....                   | 186        | § 10.1 原子核的结合能.....               | 253        |
| 复习题七.....                   | 187        | § 10.2 裂变, 链式反应.....              | 256        |
| <b>第八章 原子的结构.....</b>       | <b>188</b> | § 10.3 原子反应堆.....                 | 260        |
| § 8.1 电子的发现——阴极<br>射线.....  | 189        | § 10.4 聚变, 热核反应.....              | 266        |
| § 8.2 天然放射现象.....           | 195        | 本章提要.....                         | 269        |
| § 8.3 $\alpha$ 粒子的散射实验..... | 198        | 复习题十.....                         | 270        |
| § 8.4 卢瑟福的原子核式结<br>构模型..... | 200        | <b>第十一章 放射性同位素.....</b>           | <b>271</b> |
| § 8.5 氢原子光谱的实验规律.....       | 204        | § 11.1 人工放射性同位素.....              | 271        |
| § 8.6 玻尔的氢原子模型.....         | 207        | § 11.2 放射性同位素的应用.....             | 273        |
| § 8.7 原子的能级.....            | 213        | 本章提要.....                         | 278        |
| § 8.8 其他原子的核外电子.....        | 218        | 复习题十一.....                        | 278        |
| § 8.9 化学反应和化学能.....         | 219        | <b>第十二章 宇宙射线和基本<br/>  粒子.....</b> | <b>279</b> |
| 本章提要.....                   | 221        | § 12.1 宇宙射线.....                  | 279        |
| 复习题八.....                   | 222        | § 12.2 基本粒子.....                  | 281        |
| <b>第九章 原子核的结构.....</b>      | <b>224</b> | 本章提要.....                         | 285        |
| § 9.1 放射性的探测方法和<br>探测器..... | 224        | <b>总复习题.....</b>                  | <b>287</b> |
| § 9.2 放射性射线的性质.....         | 230        | <b>习题答案.....</b>                  | <b>293</b> |



# 第一章 光的傳播(一)

我們生活在充滿着陽光的世界里，依靠光和其他儀器的幫助，我們既能夠觀察廣闊的星際宇宙，又能夠看清楚肉眼無法辨認的微小物體的結構；在日常生活中，我們也是依靠眼睛等感覺器官來認識周圍事物的。光和我們日常生活的關係是如此的密切，以致于在很久以前，人們就怀着很大的興趣來研究它了。到現在為止，人類在勞動實踐中已經積累了很豐富的關於光的知識，並且已經將它廣泛地應用在生產和日常生活中了。

光從物體發出來，經過傳播，再到達人的眼睛，這個過程很象我們在第三冊里已經討論過的電磁波的發送、傳播和接收一樣。例如，我們用眼睛直接對着發光的物體時，我們所能看到的將只是一片光亮，正象接收到一個沒有經過調制、不帶有信號的電磁波一樣；但是，當光經過物體表面反射以後，再傳到人的眼睛里，我們就會看見物體上很細微的區別，好象收到了關於物體情況的信號；有時候，我們會感到眼睛看見的物體太微小，不能仔細分辨，這時通過儀器同樣也可以把它加以放大，使眼睛能夠看得清楚。人的一雙眼睛，能夠看見近處或遠處的物體，就象是一副有調節能力的接收器一樣。

下面就來討論光從物體發出、在同一種均勻媒質里傳播的規律，和一些常見的光現象。

## §1.1 光 源

我們很熟悉，有許多物體，象太陽、電燈、火炬和螢火蟲，它們

都能自己发出光来，而月亮和許多星星，虽然看上去很亮，但它們都不是自己在发光。习惯上，我們把自己能够发光的物体叫做发光体，在物理学上，我們称它为**光源**。

就常見的光源来說，它們有的是固体，如白熾电灯；有的是气体，如霓虹灯；有时也有液体发光的，如火油和松节油在經過紫外綫照射以后，在暗室里会发出有顏色的光来。

光源发光，一般是把热轉变为光，太阳、弧光灯和火炬等都属于这一类发光的形式，我們称它为热发光；热光源是一种最便利的光源。但是也有很多光源发光，不是把热轉变为光，而是把其他形式的能直接轉变为光，象日光灯和萤火虫都是，这种发光的形式，我們称它为冷发光。研究的結果知道，冷光源是一种更經濟的光源<sup>①</sup>。

如果光源是一个很小的发光点，或者光源虽有一定大小的体积，但是比起它与被照射物体的距离来却是很小的，那么这种光源我們称它为**点光源**。从点光源发出的光，是均匀地向四周放射的。有时候，光源附以适当的装置以后，发出的光不是发散的而是平行的光束(象手电筒或探照灯等)，这种光源我們称它为**平行光源**。

有时我們又把光源分为天然光源和人造光源两类，象太阳和其他一些恒星都是天然光源，而白熾电灯和日光灯等都是人造光源。

由于人类掌握了使物体发光的知識，才能制造出各种光源，战胜了黑夜，在夜晚也能象白天一样地生活和工作。

---

① 从能量的轉換来說，在冷发光的情况下，一般能够把其他形式的能絕大部分轉变为光，如萤火虫能把用来发光的那一部分化学能的百分之九十几轉变为光。但是，热发光时，效率却没有这样高，如白熾电灯，它只能把所消耗电能的百分之几轉变为光，其余百分之九十几的能量都以輻射的形式跑掉了，所以从能量的利用率来說，冷光源是一种較為經濟的光源。

## §1.2 光的直綫傳播

从光源发出的光是怎样傳播的呢？我們先来討論光在同一种均匀媒质里傳播的情形，例如在密度相同的空气里光的傳播。

人們常常看見：从門或窗的狹縫里射进黑暗屋子里来的阳光，在有灰尘悬浮的情况下，清楚地显示出一条細而直的光帶(如图1.1所示)。所以人們习惯上总是称它做光綫(或者称它做一綫阳光)，这說明：光在空气里是沿着直綫方向射进屋子里来的。

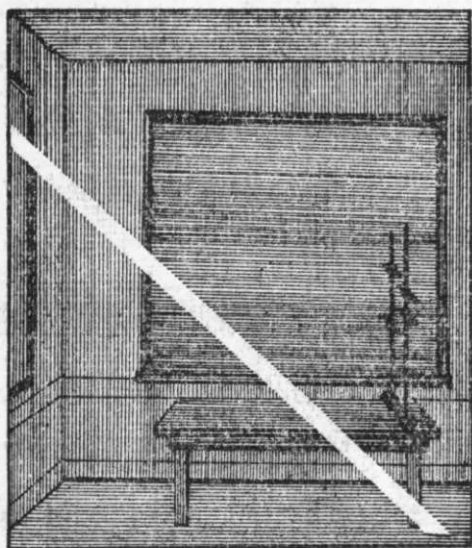


图1.1 光綫

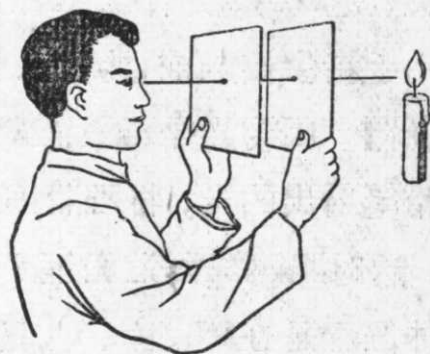


图 1.2

我們还可以做这样一个简单的实验：两只手分別拿着一块紙板，每块紙板上有一个小孔，让眼睛穿过小孔来观察光源，显然，只有当眼睛、两个小孔和光源恰好在一條直綫上的时候，眼睛才能够看見从光源发出的光(如图1.2所示)。同样，如果两只手各拿一支同样粗細的鉛笔，使两支鉛笔和人的一只眼睛恰好处在同一条直綫上，閉上另一只眼睛，这时我們能够看見的将只是离眼睛較近的一支鉛笔(如图1.3所示)。为什么眼睛看不見另一支鉛笔呢？这是因为从另一支鉛笔反射到我們眼里的光，被眼前这支鉛笔擋住了，所以眼睛不能看見它。以上这些例子都說明：光在同



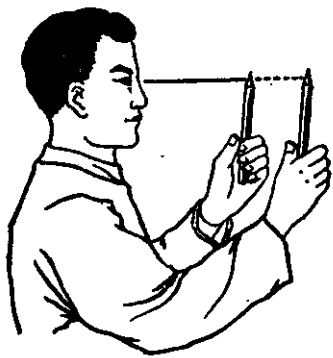


图 1.3

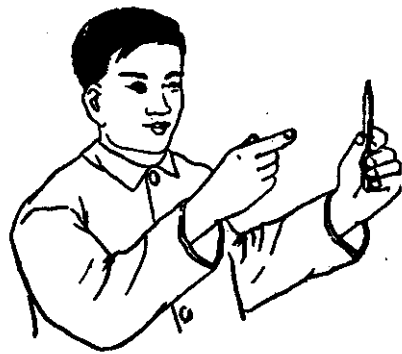


图 1.4

种均匀媒质里是沿着直线传播的。

例 1. 用左手拿着一支削尖的铅笔, 笔尖向上, 放在眼前一定距离处, 闭上一只眼睛, 这时用右手伸直的食指, 从侧面试图去接触笔尖(图 1.4), 为什么不容易击中它? 如果同时张开两只眼睛, 同样用手指去接触它, 为什么就容易击中呢?

【解】 因为光是沿着直线传播的, 当闭上一只眼睛的时候, 在  $P$  处铅笔射出的光, 将沿着图 1.5 中  $PO_1$  的方向射入睁开的那只眼中, 这时眼睛只知道铅笔是处在直线  $O_1P$  上, 但是不能确定它的具体位置是在  $P_1$ 、 $P$ 、 $P_2$  还是在更远一些的地方, 所以这时右手伸出的食指从侧面试图去接触它就不容易准确地击中笔尖. 如果你同时睁开两只眼睛来观察, 那么, 来自笔尖的光, 将同时射入你的两只眼睛(如图 1.5 中所示的  $PO_1$  和  $PO_2$  两条光线), 根据光的直线传播的道理, 从两条光线的交点, 就可以判断出铅笔的实际位置是在  $P$  点, 这样用手指就很容易击中它了. 这就是我们日常生活中, 凭两只眼睛的观察, 能够知道周围物体实际位置的缘故.

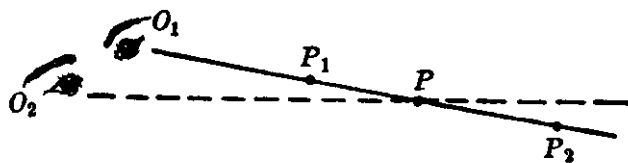


图 1.5

## 习 题 1.2

1. 用步枪射击靶子的时候,如果眼睛看过去,靶心和准尖恰好落在标尺的缺口上时,就算瞄准了,这是什么缘故?

2. 有一个人手上拿着一块石子,要使石子落下时恰好击中地上一个很小的目标,他只要用一只眼睛从石子上面往下看,当眼睛看到石子与目标重合时,石子落下来就会击中目标,这是什么缘故?

3. 在纸板上戳一个小洞,通过小洞向外看,为什么小洞离眼睛越近,眼睛看到外面的范围就越大?(做做看,再作图回答.)

## §1.3 象 和 影

日常生活中的许多光现象,都可以用光的直线传播来解释,例如小孔成象、本影、半影、日食和月食等,它们都是光在同一均匀媒质里直线传播所形成的光现象.

**1. 小孔成象** 在一块硬纸板上戳一个小针孔,把它对着光源(例如蜡烛火焰)置放着,在纸板的另一侧竖放一片毛玻璃,适当地调节它的位置,在毛玻璃上出现的就不是一片均匀的光亮或小孔的形象,而是光源清晰的倒象,这个现象,我们称它做**小孔成象**. 如果把有

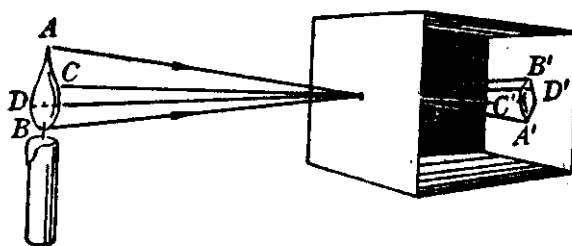


图 1.6 小孔成象

小孔的纸板和毛玻璃做成象图 1.6 所示那种暗箱的样子,它就成了一个最简单的照相机了(关于照相机的原理我们以后还要详细介绍).

光源发出的光,经过小孔以后,为什么会在毛玻璃上映出它的倒象来呢?

我们知道,光源射出的光,是向四周直线传播出去的,它的任何一个发光点只能在沿着与小孔成一直线方向的毛玻璃上形成一个光斑,其他的光线都被纸板挡住了,所以光源的每一个发光点,

都将对应地在毛玻璃上留下一个光斑，这许许多多小光斑集合起来，就形成了光源的象。很明显，这个象跟光源比较起来，是上下倒置和左右互换的，图 1.7 清楚地说明了这一点。

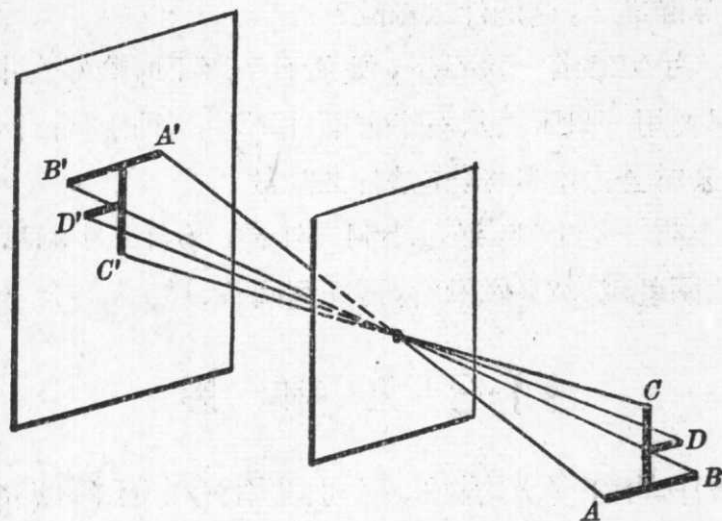


图 1.7

**2. 本影和半影** 如果有一个点光源，照在一个不透明的物体上，沿着直线传播的光线，就被物体遮挡住了，在物体的后面，受不到光的照射的地方，形成一个完全黑暗的阴影区，称做物体的**本影**。在图 1.8 中，一个火焰很小的蜡烛（近似地看成是一个点光源）照在竖立在桌面上的圆柱体上，在圆柱体后的桌面上，就出现它的本影。

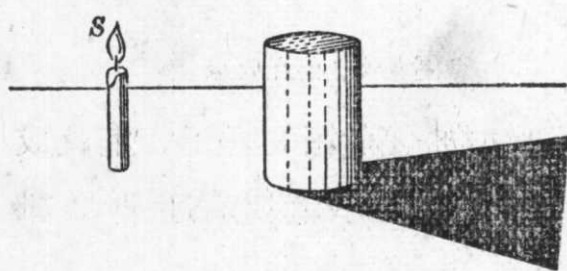


图 1.8

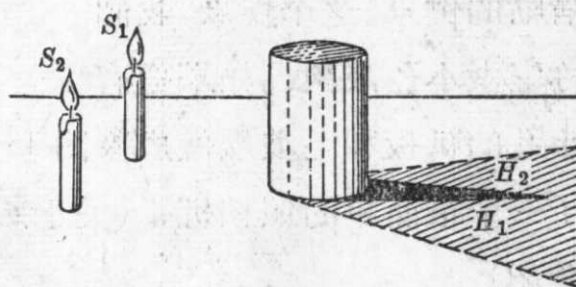


图 1.9

如果有两个点光源，分别从两个地方照在同一个物体上，这时在物体后面，不仅有完全不受光照的阴影区（物体的本影）存在，还会有半阴暗的阴影区存在，这个半阴暗的阴影区，叫做物体的**半影**。在图 1.9 中，有两个小蜡烛照在圆柱体上，在物体后面桌面上那



一个完全黑暗的锥形阴影就是它的本影,周围半阴暗的阴影,就是它的半影. 在本影里,无论光源的那一点所发出的光都不能到达,所以它是完全黑暗的;在半影里,它能够受到光源中某一点或某一部分的照射,但是不能受到光源上另一点或另一些部分的照射,所以它是半阴暗的. 在图 1.9 中,半影区中  $H_1$  部分能够受到光源  $S_2$  的照射,但是不能受到光源  $S_1$  的照射;半影区中  $H_2$  部分则能够受到光源  $S_1$  的照射,但不能受到光源  $S_2$  的照射;在  $H_1$  和  $H_2$  以外的地方,则既能受到光源  $S_1$  的照射,又能受到光源  $S_2$  的照射,所以是完全明亮的;这样,在桌面上就有了三个明暗不同的区域.

如果有两个以上的点光源同时照在物体上,这时半影区本身也有了阴暗程度的不同. 如图 1.10 所示,三支小蜡烛照在物体上,靠近本影的半影区比较阴暗一些,再外面一点的半影区就比较明亮一些;同样,半影以外的地方则

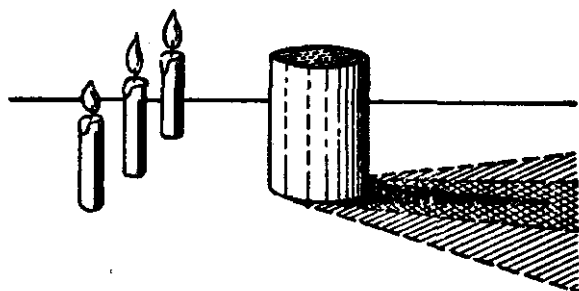


图 1.10

是完全明亮的,因为无论光源的哪一点所发出的光线,都能同时射到那儿去.

如果,光源不是几个孤立的发光点,而是一个体积很大的发光体,这时我们可以把它看成是许多小发光点的组合,物体半影区的阴暗程度也有了连续的变化,越靠近本影的地方越暗,从里到外逐渐变得明亮一些. 当然,在半影区外面的地方,则是完全明亮的. 本影和半影的形成,都是光的直线传播的结果.

从以上几种情况可以看出,当光源是一个点光源的时候,物体只存在本影,不存在半影,物体的影子也最清晰;当两个或两个以上点光源同时射在物体上时,物体后面就生成本影和半影. 光源分布的区域比物体小的时候,物体后面的本影是发散的(图 1.8);光源分布的区域如果比物体大,则物体后面的本影就是收敛的(图

1.9 和图 1.10)。在光源离开被照射物体距离相等的情况下,光源越大,本影就越小,所以太阳光照射在电线杆上,我们在地面上总是看不见电线的影子。在医院的外科手术室里,就用一个分布区域比较大的光源来照亮手术台,因为它的分布区域比较大,在动手术时,手下面不会产生阴影,所以这种灯叫做无影手术灯(图 1.11)。一般室内照明,也都喜欢应用面积较大或较分散的光源来照明,以减小室内物体所产生的阴影。

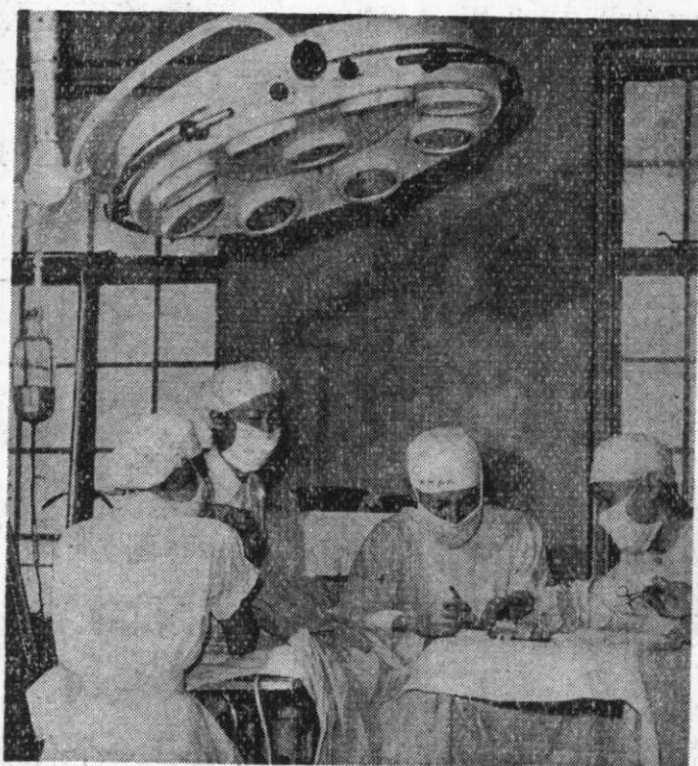


图 1.11

**3. 日食** 从光源发出的光,沿着直线向四周传播出去,投射在不透明的物体上,就会形成影;自然现象中日食和月食,也可以用成影的原理来解释。

太阳是一个庞大的天然光源,地球和月球本身又都不发光,太阳光照在月球表面,反射到人的眼里,我们就觉得月球很亮,如果没有太阳光射到月球表面上去,我们就不会看见月球。

月球是绕着地球运转的,地球又围绕太阳公转着,这样,月球就有机会跟太阳、地球处在同一条直线上。当月球运行到太阳

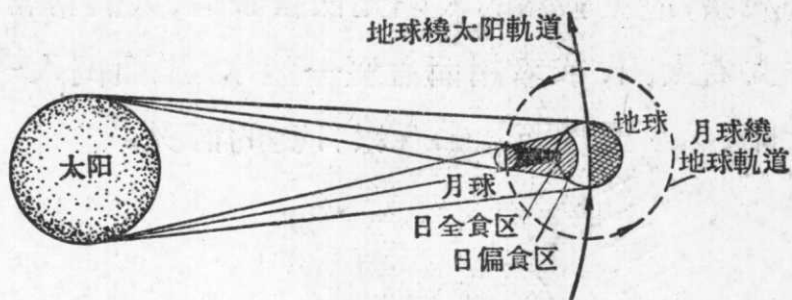


图 1·12 日食的成因

和地球之間时，它的影子可能投射到地球表面上来，于是发生了**日食**（图 1·12）。地球上处在月球本影区域里的人，这时完全看不到太阳（整个太阳都被月球遮住了），这叫做**日全食**（图 1·13）。日全食时，看上去天色很昏暗，好象是黄昏一样，天上的星星也能看得见。在月球的半影区域里的人们，这时看见太阳缺了一部分，这部分被月球遮住了，就叫做**日偏食**<sup>①</sup>（图 1·14）。从图 1·12 和图 1·14 可以知道，发生日食的时候，并不是地球上所有的地区都能看见日食，例如 1955 年 6 月 20 日所发生的一次日食，只有我国南沙群岛、菲律宾群岛等地的人能够看见。在观察日食的时候，不要用眼

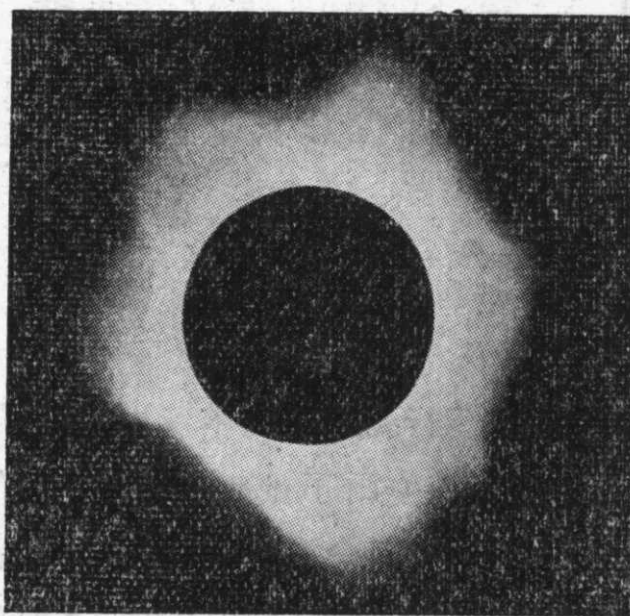


图 1·13 日全食

① 除了日全食和日偏食以外，还有所谓日环食。被月球本影的延长线笼罩着的地区，就会看到日环食，这时太阳当中阴暗，周围有很光亮的一圈，象一个光环，如图 1·15 所示。



睛直接去观察,避免强烈的太阳光伤害眼睛,人们常常隔着熏黑了的玻璃片去看太阳,或者用面盆盛一盆水,里面倒入一些墨汁,把它对着太阳,然后通过面盆去观察日食的情况。

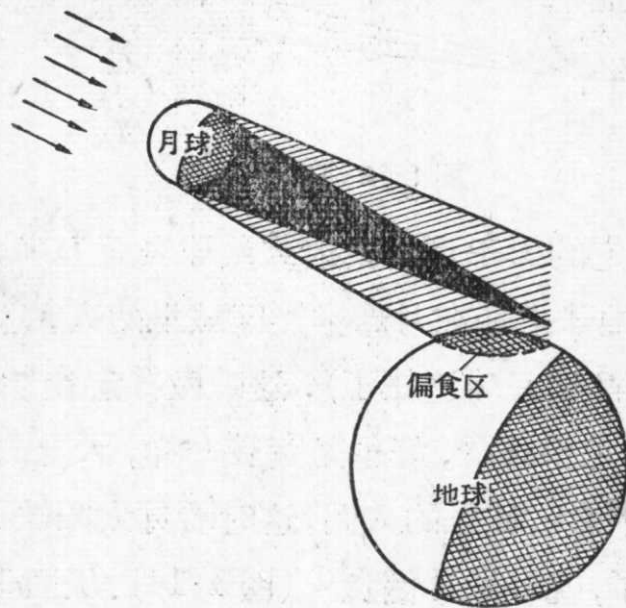


图 1·14 日 偏 食

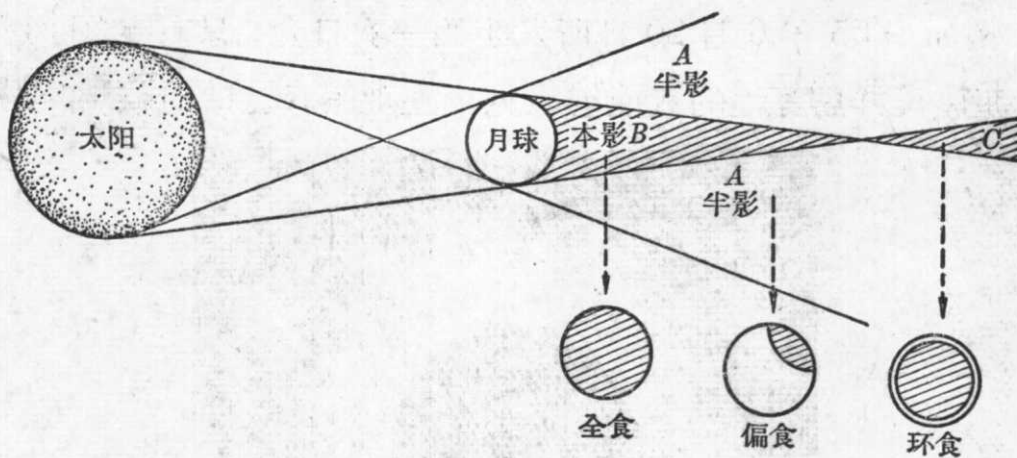


图 1·15

**4. 月食** 当月球运行到地球的本影里的时候,背着太阳半球上的人,看见原来的圆月变暗了,这叫做**月食**(图 1·16)。整个月球全部进入地球的本影里叫**月全食**;如果月球只有一部分被地球的本影掩蔽,这叫做**月偏食**。图 1·17 就是一次月偏食经过的过程。左上方的第一图是月球刚刚进入地球阴影里时的情况,之后就渐渐有更多的部分进入地球的阴影中,右下角的一张图是这次月偏食中月球被地球的阴影掩蔽得最多时的情形,在这以后,月球

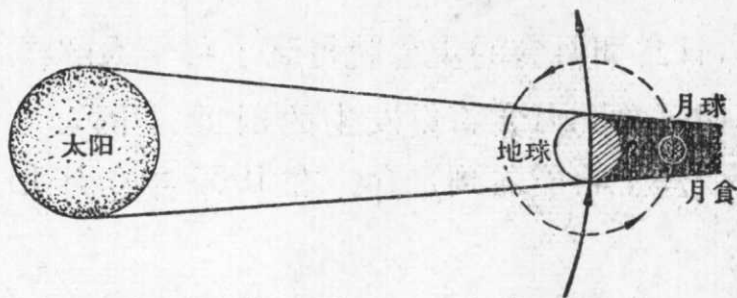


图 1·16 月食的成因

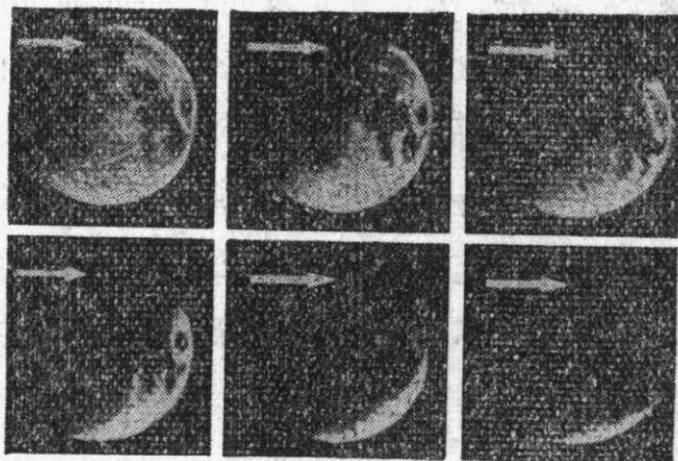


图 1·17

又逐渐离开地球的阴影区,直到整个月球都显露出来。

跟月食的情况不同,日食只能在地面上一个狭小的地区内可以看到,月球阴影投射不到的地方看不到日食,而发生月食的时候,除了地球向着太阳的那一面以外,地球上整个背着太阳的半球上的人,都能够同时看到。

由于月球绕地球运行的轨道跟地球公转的轨道不在同一平面上,它们互相倾斜成  $5^{\circ}9'$  的交角,所以月食和日食不可能每个月都发生(如图 1·18 所示)。观测和研究的结果知道,日食和月食的发生,

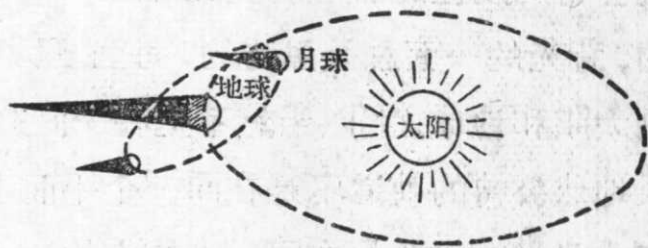


图 1·18

也是有一定的规律的;自从人们掌握了光的直线传播和天体运行

的知識以后，日食和月食的現象就得到了科学的解釋，并且还能够正确地預算出日食和月食将要發生的時間。例如：1965年5月31日，在太平洋上将能看到日食。在1965年6月14日将要發生一次月食。

在我国，从很古的时代起，就开始注意到天文的观察，尤其是注意到对日食的观察，同时也涌现了許多优秀的天文学家。在我国的古書記載中，最早一次日食是发生在公元前2137年10月22日，这是世界上最早的日食記錄。几千年来，勤劳的我国人民，通过历代的努力观测和研究，已經为我們积累了一些世界上最为詳尽可靠的日食研究資料。現代的科学家們还在不断地对日食和月食进行着观测和研究，以便进一步了解太阳的构造和天体运行的复杂規律，从而不断丰富和加深我們对于宇宙天体的認識。

## §1.4 月 相

有关月球的光現象，除了上面讲的月食以外，更常見的是月球圓缺的周期性变化。由于月球明亮部分的不同，而显示出月球不同的形状叫做**月相**。現在我們来討論，为什么月相会有这种周期性的变化呢？

地球、月球和太阳，它們之間的相对位置在不断地周期性地改变着，在地球上的人看起来，月球明亮部分的大小和形状也就会有周期性的盈亏的变化(图1.19)。月球受光的一面总是明亮的，背光的一面总是黑暗的，每当夏历月初的时候，月球恰好运行到太阳和地球之間(当然不是在一直綫上。由于月球运行的軌道跟地球公轉的軌道不是在同一个平面上，前面讲过，它們是不可能每个月都有机会处在同一直綫上的)，月球以黑暗的一面对着我们，我們就看不见它，这时的月相叫**新月**(图1.19(1))。月球漸漸地运转过去，它受光的一面开始露出一些来，地球上的人可以看見月

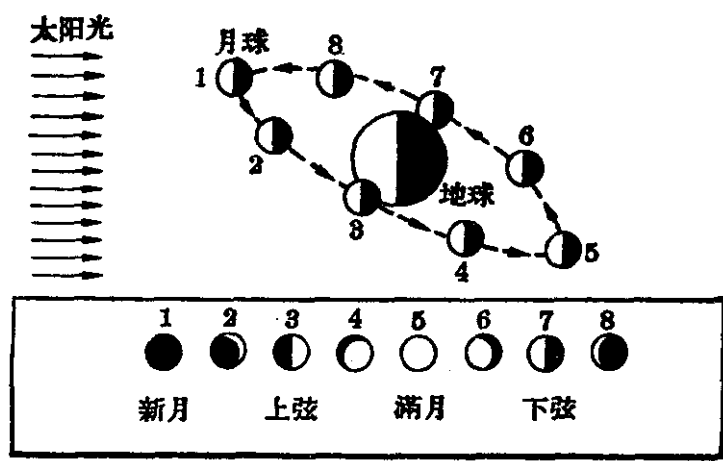


图 1·19 月 相

球上被照亮半球的一小部分，这时的月相叫娥眉月(图 1·19(2))。等到月球繞地球轉过去  $90^\circ$  时，我們能够看到它半个受光的侧面，月球就显示出半圆形来，这时的月相叫做上弦(图 1·19(3))。月球繼續沿着图 1·19 中箭头所指的方向运轉，能够看見的月球光亮部分也越来越多，当月球繞地球轉过去  $180^\circ$  的时候，它正好把整个受光面向着地球，这就是夏历月半时所看到的圓月，这时的月相叫做满月(图 1·19(5))。这以后，对着地球的月球明亮部分就越来越少，月球看上去又由圓变缺，当月球繞地球再轉过去  $90^\circ$  的时候，月球又一次呈半圆形，这时的月相叫下弦(图 1·19(7))。以后，月球又回复到新月。这样，月相的变化便完成了一个周期。

月相变化的周期，平均是 29.5 日，我国使用已久的夏历，就是根据月相的变化和季节的寒暑来制定的；把月相变化的周期叫做一个月，月大有 30 日，月小有 29 日；又把地球公轉的周期叫做一年，一年有 12 个月。由于地球公轉一周的时间是 365 日，而月相变化經歷 12 个周期的时间只有 354 日或 355 日，这个 10 日的差額就用閏年的方法来調剂。平年每年有 12 个月，閏年每年有 13 个月(共 384 日)，平均每 19 年內有七次閏年，这样既能照顾到月相的盈亏，又能兼顾到季节的变化。夏历的缺点是平年和閏年相差的日数比較多；为了計算方便，近几十年来我国已广泛地采用了跟世界各国一致的公历(或阳历)。

[§ 1·4]

例 2. 大厅里挂着一盏有白瓷灯罩的电灯, 灯罩的球半径为 20 厘米, 在电灯的正下方, 有一张半径为 50 厘米的圆桌, 桌子的高度为 80 厘米, 桌面离开电灯的距离为 3 米, 问桌面投射在地面上的本影有多大?

【解】 已知: 灯罩的半径  $OE = 20$  厘米,  
 圆桌的半径  $AB = 50$  厘米,  
 灯离桌的距离  $OA = 300$  厘米,  
 桌离地的距离  $AC = 80$  厘米.

根据题意作出图 1.20. 桌面在地面上的本影是以  $CD$  为半径的圆, 要求桌面投射在地面上的本影有多大, 只要根据图中三角形相似的原理先求出  $CD$  的长就可以了.

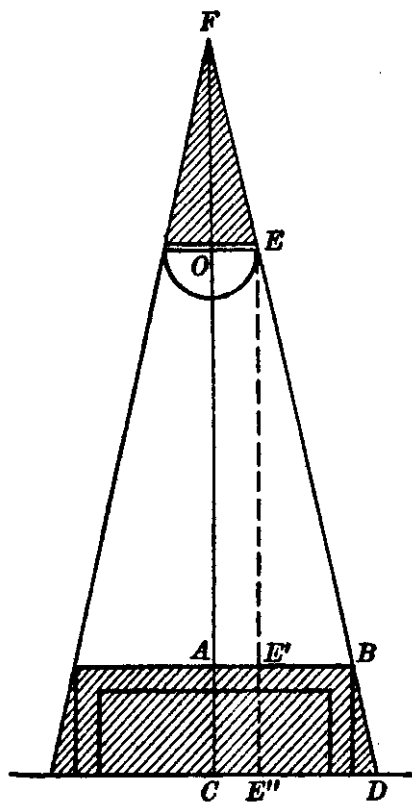


图 1.20

先从  $E$  点作  $AB$  和  $CD$  的垂线, 分别交于  $E'$  和  $E''$  点, 则有

$$\triangle E'BE \sim \triangle E''DE.$$

$$\therefore EE' : EE'' = E'B : E''D,$$

即

$$OA : OC = (AB - OE) : (CD - OE),$$

$$300 : 380 = (50 - 20) : (CD - 20),$$

$$300(CD - 20) = 380 \times 30,$$

得  $CD = 58$  厘米;

$\therefore$  圆桌投射在地面上的本影面积  $S = \pi(CD)^2$

$$= 3.14 \times 58^2 = 10,563 \text{ 厘米}^2.$$

### 习 题 1.4

1. 在茂密的树林里, 由于阳光的照射, 常常看见地上有许多圆形的小光斑, 这是什么缘故? 如果微风摇曳着树枝, 地面上的许多小光斑位置虽然在



变动,但是形状仍旧是圆的,这又是什么缘故?

2. 小孔暗箱的长是 12 厘米,在小孔前 8 厘米处,有一长 3 厘米的烛焰,問在暗箱毛玻璃上映成的倒象有多长?

3. 为什么日食总在新月的日子里发生,月食总在滿月的日子里发生?

4. 一电綫杆在阳光的斜射下,影长是 8 米,旁边有一根长 2 米的直立木杆,影长是 2.5 米,問这电綫杆实际上有多长?

## § 1.5 光的傳播速度

我們在前面已經討論了光在同一种均匀媒质里傳播的規律,現在要討論光的傳播速度有多大.

在很早以前,人們都以为光的傳播是不需要時間的,随着科学的发展,人們开始不满足于这种光速是无限大的看法,直到十七世紀末期,終于測出了光的有限速度的数值.

意大利物理学家伽利略(1564~1642)首先作了測定光速的尝试:他叫一个人帶着有开关的灯和計时的装置,站在一个山頂上,另一个合作者帶着一个同样的灯,站在另一山頂上,两山頂之間的距离是經過实际測定的(图 1.21). 实验开始时,这个人先开亮他的灯,同时記錄下开灯的时刻  $t_1$ ; 另一座山上的合作者看見他发来的灯光时,也馬上开亮自己的灯;当他再看到对方发还的灯光时,馬上記下这个时刻  $t_2$ , 这样他就知道了灯光来回經過两座山之間所

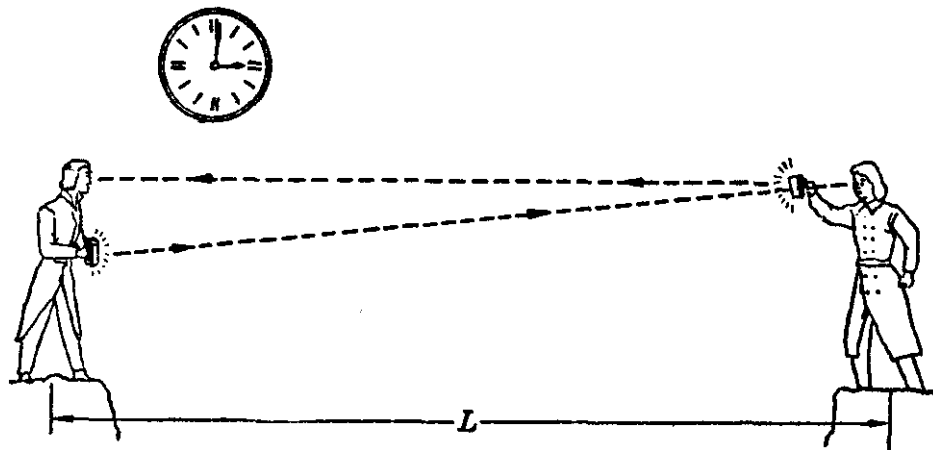


图 1.21

需要的时间  $t_2 - t_1$ 。根据已知的两座山之间的距离  $L$  和时间  $t_2 - t_1$ ，原则上就可以计算出光的速度  $v = \frac{2L}{t_2 - t_1}$ 。但是，他的测定实际上并没有获得成功，因为伽利略所选择的两座山之间的距离只有 1.5 公里左右，而光的速度是非常大的，它往返这两座山之间所经历的时间，现在知道只需要十万分之一秒左右，这样短暂的时间，不是一个钟或表所能测量得出的；即使有这样精确的钟表，由于开灯、看表这些动作不可避免地也要引起误差，这些误差本身会比光在这两座山中间传播的时间大几万倍，所以，实验的结果也是不准确的。

伽利略的实验给人们的启发是：光的速度是很大的，要测定它，一定需要更大的空间距离，或者用更精巧的实验装置。十七世纪中叶以后，科学家们沿着这两个方向继续探索测定光速的方法，果然获得了成功。

第一个用增大距离的方法来测定光速获得成功的是丹麦的天文学家勒麦 (1644~1710)，他是利用观测天体上的光现象和已知天体间的距离来测出光速的。

第一个用改进实验装置和技巧的方法来测定光速获得成功的是法国的物理学家斐索 (1819~1896)。和伽利略的方法相似，他也是利用光线在地面间来回传播来进行测定的，不过，他采用了以高速均匀转动的仪器装置来代替开灯、看表等动作，同时解决了计时上的困难，终于在地面上第一次测出了光的速度。

继他们之后，还有许多学者不断改进方法，进一步精确地测出了光的速度，其中最重要的是实验物理学家迈克耳逊 (1852~1931) 所进行的测定。迈克耳逊的实验装置如图 1.22 所示。

整个实验装置分别安装在两座距离已经精确测定好了的山顶上，在一座山顶上有：强光源  $S$ ，电动的旋转八面镜  $M$ ，望远镜筒  $T$  和直径是 60 厘米的大凹面镜  $M'$  等；在另一座山顶上安装一个平面镜。从强光源  $S$  发出的光，射到八面镜的一个镜面 (1) 上

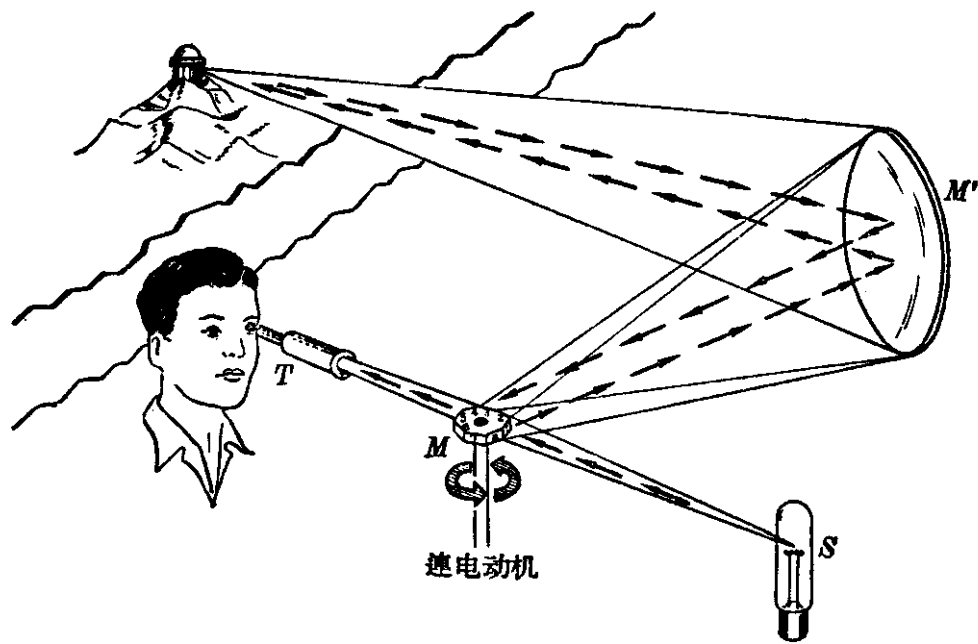


图 1-22 迈克耳逊的实验装置示意图

(这时八面鏡是靜止的), 反射以后到达凹面鏡  $M'$ , 經過凹面鏡反射就到达另一座山頂的平面鏡, 再反射回凹面鏡  $M'$ , 最后又射回到八面鏡的另一个鏡面 $\langle 4 \rangle$ 上, 調节望远鏡筒  $T$ , 使从鏡面 $\langle 4 \rangle$ 反射回来的光綫, 恰好能进入望远鏡筒被看見, 这样实验装置就算調节好了. 这时让带动八面鏡的电动机轉动起来, 原来从望远鏡筒中看得見的光綫便立刻消失了, 因为光綫从鏡面 $\langle 1 \rangle$ 、凹面鏡和平面鏡等反射回到八面鏡上来时, 鏡面 $\langle 4 \rangle$ 已經轉过去了一个角度, 原来能够通过鏡面 $\langle 4 \rangle$ 的反射而进入望远鏡筒的光綫, 現在不再能够准确地射入望远鏡筒  $T$  中; 繼續加快电动机的轉动速度, 使从鏡面 $\langle 1 \rangle$ 反射出去的光綫, 經過一系列鏡面的反射回到八面鏡上来时, 八面鏡恰好轉过去  $1/8$  周, 即鏡面 $\langle 3 \rangle$ 恰好轉到原来靜止时鏡面 $\langle 4 \rangle$ 的位置上, 这样, 經過鏡面 $\langle 3 \rangle$ 的反射, 光綫又能够进入望远鏡筒中, 于是在望远鏡中又能够看見从  $S$  发出的光, 記下这时候电动机每分钟的轉数, 就知道了轉动  $1/8$  周所需要的时间, 迈克耳逊根据这段时间和两山頂間的已知距离, 就計算出了光在空气中的速度, 进一步进行計算, 就得出光在真空中的傳播速

度：

$$c=299,796 \pm 4 \text{ 公里/秒} \textcircled{1}.$$

迈克耳逊以后又有許多科学家对测定方法作了改进，根据近来(1955年)比較准确的测定，在真空中光的傳播速度是：

$$c=299,792.8 \pm 0.4 \text{ 公里/秒}.$$

随着人类認識的发展和科学技术的进步，测定光速的方法还将不断地改进，测定的結果也将更加精确；光的速度  $c$  是自然界重要的常数之一，准确地测定出它的数值是很重要的。

在一般的情况，光在真空里的傳播速度，可以約取作 300,000 公里/秒。可以看出，光的速度是很大的，它在 1 秒钟内所能通过的距离，在数值上大約相当于地球赤道周长的七倍半。近代物理学指出，光速是一切物质运动速度的最大限度，任何物质要得到比真空中光速还大的速度是不可能的。

实验和計算指出：光在透明媒质里的傳播速度，比在真空里的小，法国物理学家傅科(1819~1868)曾經用很长的水管，測出了光在水里傳播的速度，測得的数值約等于光在真空中傳播速度的  $\frac{3}{4}$ ，即  $v_{\text{水}} = \frac{3}{4}c$ 。现在知道，光在空气里的傳播速度比在真空中小 67 公里/秒左右，这个数值比光速本身小許多，所以它們可以看成是近似相等的。光在水晶里的傳播速度大約是在真空中傳播速度的  $\frac{2}{3}$ ，光在金剛石里的傳播速度大約是真空里的  $\frac{2}{5}$ 。

### 习 題 1.5

1. 太阳离开地球的距离是  $1.5 \times 10^8$  公里，問太阳光射到地球上需要多少時間？
2. 織女星离开地球的距离約等于  $2.6 \times 10^{14}$  公里，当我们仰望天空，看

---

$\textcircled{1}$   $c=299,796 \pm 4$  公里/秒，表示所测定出的数值是个近似值，这个近似值誤差的絕對值，最大不超过 4 公里/秒。

見織女星所發出的光，實際上是多少年前發出的？

3. 天文學上常用 1 光年（就是光在一年內所經過的距離）來做長度的單位，試用厘米把光年表示出來。北極星離開我們約 44 光年，問它離我們有多少公里？

## 本章提要

1. 發光的物體叫光源，光源分為兩類：天然光源和人造光源。光源有的是固體，有的是氣體，也有液體發光的。

2. 光在同一種均勻媒質里是直線傳播的。小孔成象、影、日食和月食等都是由於光的直線傳播而產生的現象。

3. 小孔成象是光的直線傳播的結果，這個象跟光源（或物體）的關係是上下倒置、左右互換的。還應當注意的是，這個象是光源（或物體）的象而不是小孔的象。

4. 光源發出的光照射在物體上時，物體後面完全不受光照的黑暗的陰影區，叫做物體的本影。本影周圍半陰暗的陰影區，只能得到光源上一部分發光點發出的光線，這部分叫做半影。在光源與物體距離不變時，光源分布的區域越大，影子就越小。本影和半影的形成，也都是光的直線傳播的結果。

5. 當月球運行到太陽和地球之間，月球的影子投射到地球表面上的時候，就發生了日食；只有地面上被月球的影子籠罩着的地區才能見到日食，在本影區域里看見的是日全食，在半影區域里看見的是日偏食。日食總在新月的日子裡發生。

6. 當月球運行到地球的本影里的時候，就發生了月食，整個月球全部進入地球的本影里叫月全食，如果月球只有一部分被地球的本影掩蔽，叫做月偏食。月食總是在滿月的日子裡發生，月食發生的時候，整個背着太陽的半球上的人都能够看到。由於月球運行的軌道跟地球公轉的軌道，不是在同一平面上，所以不可能每個月都發生日食和月食。

7. 由於地球上的人觀看到月球明亮部分的多少和形狀不同而顯示出月球不同的形狀，叫做月相，月球明亮部分的盈虧有周期性的變化，月相變化的周期平均是 29.5 日。夏曆月初月球以黑暗的一面對着我們，這時的月相叫新月；夏曆月半時，它以整個受光面對着地球，這時的月相叫滿月。

8. 光在真空里的傳播速度是 300,000 公里/秒，在其他媒質里傳播的速度，都比在真空里的傳播速度小。



## 复习题一

1. 我国宋代学者沈括 (1030~1094), 在他写的《梦溪笔谈》一书中记载着这样的现象: 在纸窗上戳个小孔, 让窗外飞鸢的象成在屋内的纸屏上, 鸢向东飞, 屏上的象就向西移动; 鸢向西飞, 象就向东移动. 试说明这个现象的原因.

2. 在发生日食的时候, 地球上两个观察者, 一个站在月球的本影里, 另一个站在月球的半影里, 问他们所看到的日食有什么不同? 为什么?

3. 已知月球离开地球的距离约为 384,000 公里, 月球的直径对地球上观察者的眼睛所张的角是  $0.5^\circ$ , 问月球的直径有多大?

4. 已知太阳的直径是  $1.3 \times 10^6$  公里, 地球公转轨道的半径平均约为  $1.5 \times 10^8$  公里, 问地球圆锥形的影子有多长? (地球的半径是 6400 公里)

## 第二章 光的傳播(二)

在第一章里討論和証實了：在同一种均匀的媒质里，光是直綫傳播的。如果，光不是在同一种媒质里傳播(例如从空气射到水里)，或者，媒质是不均匀的、不純淨的(例如媒质本身的密度有着变化，或存在其他物质微粒)，这时候光的傳播的情况，就会比在同一种均匀的媒质里傳播复杂些。在这一章里，我們將分別討論这些情况下光的傳播和一些有关的光現象。

### § 2·1 在两种媒质界面上的光現象

光从一种媒质射入另一种媒质的時候，它的傳播方向是要改变的。例如光从空气射入水中時，就有一部分光在空气和水的分界面上改变了原来的方向，回到空气里，并繼續傳播。如水面上反光或耀光的現象，就是这个緣故；另外还有一部分光进入水里，也改变原来的方向，在水里傳播，如一支筷子半截斜插在水中(如图 2·1 所示)，从外面看上去，好象筷子在水面处被折断了，这就是光的傳播方向在空气和水的分界面处发生了偏折的緣故。光从一种媒质射到另一种媒质里時，有一部分光在媒质的分界面上改变了傳播的方向，回到原来的媒质里繼續傳播，这种現象，叫做**光的反射**；另外一部分光在媒质的分界面上也改变了原来傳播的方向，进入到另一种媒质里繼續傳播，这种現象，叫做

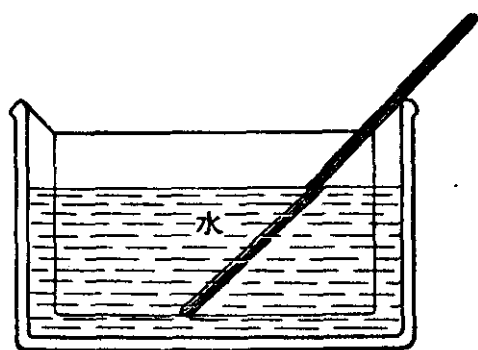


图 2·1

## 光的折射.

我們把射到界面上的光綫叫做**入射光綫** (見圖 2·2); 入射光

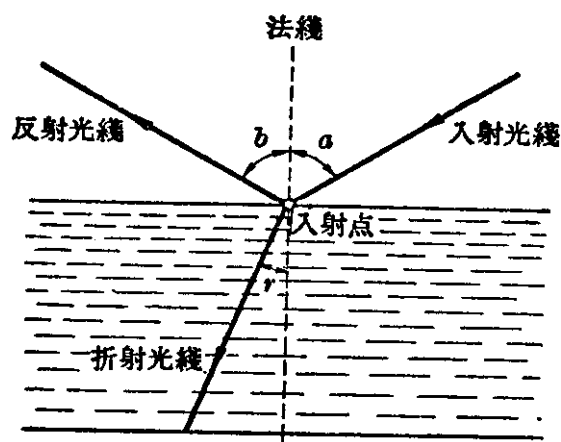


圖 2·2 在两种媒质界面上的光現象

綫跟媒质分界面的交点, 叫**入射点**; 过入射点与媒质分界面垂直的直綫称作法綫; 入射光綫跟法綫的夹角  $a$  叫**入射角**; 从界面上反射回到原来媒质的光綫, 叫**反射光綫**; 反射光綫跟法綫的夹角  $b$  叫**反射角**; 折射入另一种媒质里去的光綫叫**折**

**射光綫**; 折射光綫跟法綫的夹角  $r$  叫**折射角**.

入射光綫的强度(从而它的能量)<sup>①</sup>, 可以近似地看成是反射光綫强度和折射光綫强度的总和, 說它是近似的相等, 是因为还有一部分光的能量被媒质吸收了. 例如把一盆水曝晒在强烈的太阳光下面, 过一些时候, 水的温度就会升高一些, 这就是水吸收了太阳光的能量以后, 把太阳光的能量轉变成水的內能的緣故. 光的反射、折射和吸收等是光投射在两种媒质分界面上时发生的重要光現象, 下面将分別地加以討論.

## § 2·2 光的反射和漫反射

光射到两种媒质的分界面上, 如果界面是光滑的平面, 平行的入射光綫經過界面反射以后, 会沿着某一方向反射出去, 即反射光綫也是平行的, 这种反射称做光的**单向反射**, 也簡称为光的反射. 在暗室里, 让一束光綫斜射在小平面鏡上, 我

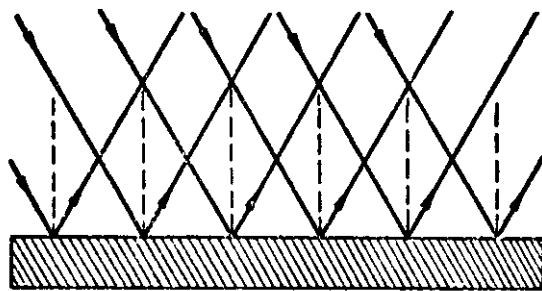


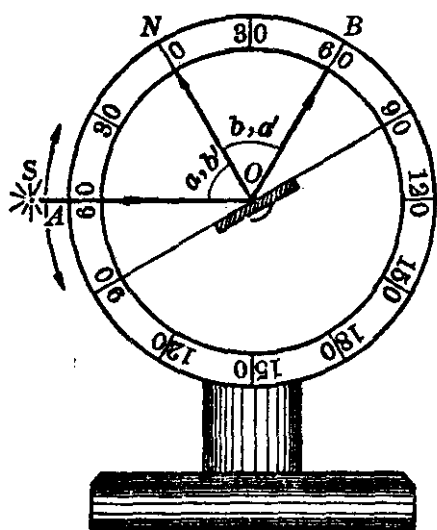
圖 2·3 光的单向反射

① 光的能量和它强度的平方成正比.

們只有沿着一定的方向看过去,才能看見从鏡面上反射出来的光,从其他方向看过去是看不見的,这說明原来投射在小平面鏡上的光綫,只是沿着某一个确定的方向反射出去的。

**1. 光的反射定律** 光在反射时,它的規律是怎样的呢? 下面我們通过实验来研究它。

图 2·4 是一个边缘上有刻度的豎直圓盘, 圓心处安放着一个



平面鏡, 鏡面跟圓盘平面是互相垂直的. 过鏡面  $O$  点所作的法綫, 恰好指在刻度盘的零点上, 刻度盘的边缘上附有一个光源  $S$ , 穿过狭縫可以把光束投射到平面鏡上来, 光源  $S$  跟圓盘是可以相对轉动的, 这样就可以任意改变投射到平面鏡上来的光綫的入射角, 入射角  $a$  和反射角  $b$  的大小都可以从刻度盘上讀出来. 改变光源的位

置, 使入射光綫沿着不同的方向射到平面鏡上, 得出光在反射时的規律是:

(1) 反射光綫总是在入射光綫和法綫所决定的平面里, 并且跟入射光綫分居在法綫的兩側.

(2) 反射角等于入射角.

这就是光的反射定律.

我們可以做一个很簡便的实验来驗証一下光的反射定律.

把一块小平面鏡側放在水平木板上, 使鏡面和板面垂直

(如图 2·5 所示), 沿着鏡面和板面交綫画一条直綫  $M_1M_2$ , 在綫上  $O$  点处釘上一枚大头針, 并且过  $O$  点作  $ON$  垂直于  $M_1M_2$ , 再在

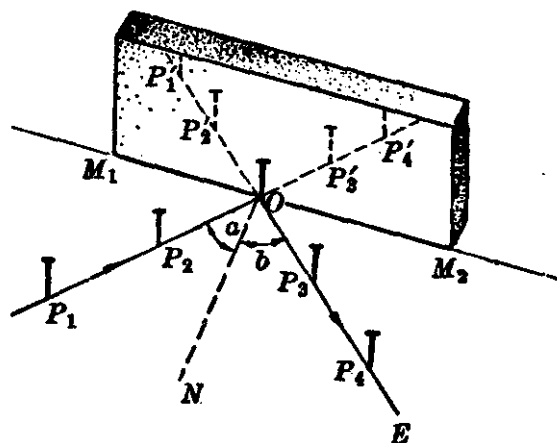


图 2·5

法綫  $ON$  的一側  $P_1$  和  $P_2$  处各釘一枚大头針，使  $P_1P_2O$  在一条直綫上，这时在平面鏡內就有这两枚大头針的象（各在  $P'_1$  和  $P'_2$  处）。用一只眼睛在  $E$  处去看平面鏡中这两枚針的象，使  $P'_1$ 、 $P'_2$  处的象恰好和釘在  $O$  点的針相重合，这时就在  $P'_1P'_2O$  这条綫的延長綫上再釘上两枚大头針（如图中  $P_3$  和  $P_4$  处），然后用鉛笔把  $P_1P_2O$  和  $P_4P_3O$  两条直綫連接起来。眼睛在  $E$  处看見平面鏡里的直綫  $P'_1P'_2O$ ，就是光綫沿着  $P_1P_2O$  方向射到鏡面上，反射以后射到  $E$  处的結果，因而  $OP_3P_4$  也就是入射光  $P_1P_2O$  的反射光，它們在同一平面上，并且用量角器量出入射角  $\angle P_1ON$  和反射角  $\angle NOP_4$ ，可以看出它們是相等的；改变  $P_1P_2$  的位置，重复上述实验的过程，得出的結果也是相同的。大家可以自己試試看。

**2. 反射时光路的可逆性** 如果在图 2·4 的实验装置里，将光源  $S$  移到法綫  $ON$  的右侧  $B$  处，使入射光綫沿着  $BO$  的方向射到平面鏡上，也就是使入射角  $a'$  等于原来的反射角  $b$ ，根据反射定律，这时反射光綫一定是沿着  $OA$  的方向射出去，（ $\because \angle b' = \angle a'$ ， $\angle b = \angle a$ ；而  $\angle a' = \angle b$ ， $\therefore \angle b' = \angle a$ 。）也就是说，这时的反射角等于原来的入射角，这就說明光在反射时，光路是可逆的。

**3. 漫反射** 并不是光綫投射在任何表面上都能引起单向反射。例如：在暗室里，让一束平行光綫投射在一張白紙上，情况就和前面所說的光綫射在平面鏡上的情况完全不同了。这时，从各个方向都能看見这張被照亮的白紙，說明投射到紙上的光綫

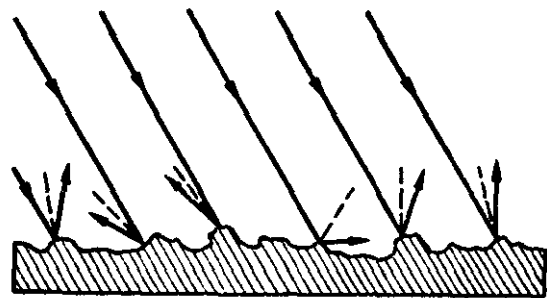


图 2·6 光的漫反射

是朝着各个方向反射出去的。平行光束沿着一定方向射在粗糙不平的表面上，反射以后的光綫就不再平行，而是射向各个不同的方向，这种光的反射叫漫反射。图 2·6 就是光綫在

粗糙表面上漫反射的示意图。图中表面不平的情况是放大的，



一束平行的入射光綫，它的每一條光綫投射的地方，可以看成是一個很微小的平面鏡，整個表面可以看成是許許多多方向不一致的微小平面鏡的組合，每一條光綫在它所投射的那個微小平面鏡上按光的反射定律反射，只是因為組成表面的小平面鏡的方向不一致，這束平行光綫經過反射以後，才散漫地射向各個不同的方向，形成漫反射。布、紙、牆壁和器皿的表面，粗略看來好像是平滑的，



但是仔細觀察一下，就知道它們表面上都有許多微小的凹凸，從光源發出的光，射到這種表面上，就會引起漫反射。我們能夠從各個不同的方向看見本身不發光的物體，就是由於物體表面發生漫反射的緣故；如果一個物體（例如一個瓶子）它的表面是非常光滑的，那麼，我們所能看見的就不是這個物體表面的真實面貌，而是物體表面由於單向反射而反映出的外界景象。象圖 2.7 那樣，我們所看見的就是瓶子所反映出窗戶的形象。

**例 1.** 一束光綫垂直地射在平面鏡上，把鏡面轉動一個  $\delta$  角，這時反射光綫跟入射光綫的夾角將是多大？如果要利用鏡面對光路進行控制，使反射光綫與入射光綫相垂直，那麼，這時鏡面應當怎樣置放？

**【解】** 這是在已知入射光方向的條件下，根據光的反射定律，從鏡面的位置來求反射光方向、和從反射光方向來求鏡面位置的問題。

根據題意，作出光路圖（圖 2.8）。入射光  $AO$  原來是垂直地射到鏡面  $M$  上，入射角是零度，由反射定律知道，反射角也是零度，這時反射光綫、入射光綫和法綫是重合在一起

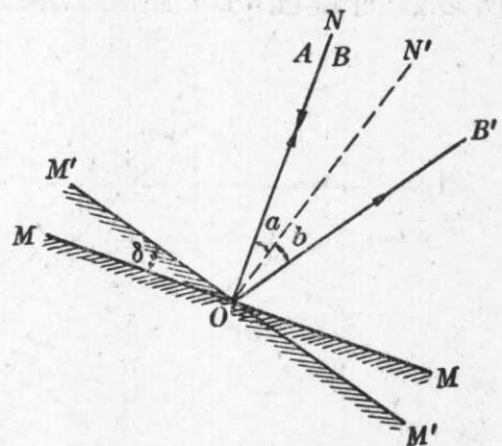


圖 2.8

的。在入射光綫方向不变的情况下,鏡面如果轉动一个  $\delta$  角,这时法綫  $ON'$  也随着轉动一个  $\delta$  角,入射光綫  $AO$  和反射光綫  $OB'$  不再与法綫  $ON'$  重合,而是分居在法綫的兩側。从图 2·8 中可以看出,当鏡面从  $M$  位置轉到  $M'$  位置(轉了一个  $\delta$  角)时,法綫就从  $ON$  轉到  $ON'$  (也轉了一个  $\delta$  角),使入射角从零度增大到  $\angle a$ ,显然,  $\angle a = \angle \delta$ 。这时反射光綫从  $OB$  轉到  $OB'$ ,反射角也从零增大到  $\angle b$ ,根据反射定律:

$$\angle b = \angle a,$$

即

$$\angle b = \angle a = \angle \delta,$$

所以,反射光綫  $OB'$  跟入射光綫  $AO$  之間的夹角  $\angle AOB'$  是鏡面轉动角度  $\delta$  的两倍,即

$$\angle AOB' = \angle a + \angle b = 2\angle \delta.$$

如果要利用鏡面的反射,使反射光綫跟入射光綫垂直(如图 2·9 所示),設这时入射光  $AO$  与鏡面的夹角是  $\theta$ ,已知

$$\angle a + \angle b = 90^\circ,$$

根据反射定律:

$$\angle b = \angle a,$$

$$\therefore \angle b = \angle a = 45^\circ;$$

又因为

$$\angle \theta + \angle a = 90^\circ,$$

$$\therefore \angle \theta = 90^\circ - \angle a = 45^\circ.$$

所以这时鏡面的位置应当放置在跟入射光綫成  $45^\circ$  角的方向上。

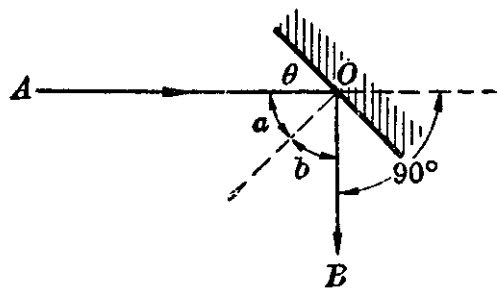


图 2·9

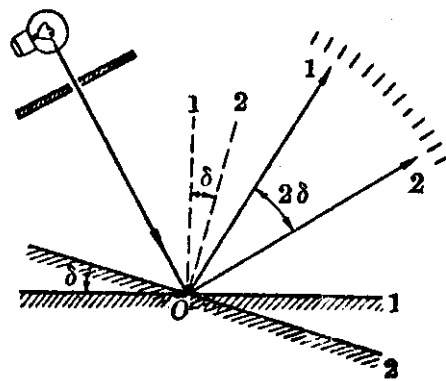
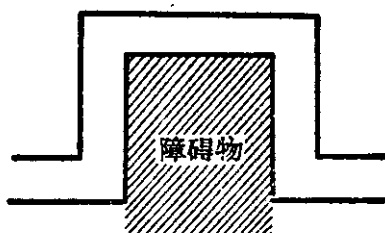


图 2·10

从上面的例题中可以知道,光线射在平面镜上,如果镜面转过一个微小的角度,由于镜面的转动反射光线所扫过的角度将是镜面所转过角度的两倍;利用这个结果,可以用平面镜的反射,来测定一个不容易测量出的微小的角度(如图2·10所示)。有一种灵敏电流计,在其中悬挂着的线圈上,附有一个小平面镜,当微小的电流通过线圈时,线圈就会转过一个很小的角度,这时让一束灯光射到小平面镜上,利用平面镜的反射,就可以比较明显的读出反射光线转过去的角度,从而量得这一微小电流的电流强度。此外,例如利用平面镜的反射来测定物体的微小形变等,也都是利用这一道理。

## 习 题 2·2

1. 太阳光沿着跟水平方向成  $24^\circ$  角的方向射来,为了使反射光线水平地射出去,问必须把平面镜放在跟水平方向成多大角度的方向上?(试画出图来。)
2. 如果甲从镜子里能够看见乙的全身,那么,这时乙能不能从镜子里同时看见甲?为什么?
3. 如附图所示,为了要在弯曲状的空心管子的一端能够看到另一端的情况,必须在管中加几个平面镜,问平面镜应如何置放才行?



(第3题)

4. 从光源发出的光,垂直地投射在镜面上,在正对着平面镜的地方有一个很大的光屏,光屏离开平面镜的距离是5米,如果平面镜转过  $1^\circ$  时,问镜面反射到光屏上去的光斑将移动多少距离?
5. 如果黑板“反光”,我们为什么就看不清楚这时黑板上所写的字?怎样做才能使黑板不致于“反光”呢?

6. 用白粉在一个洁净的平面镜上写字, 写好以后让太阳光射到镜面上, 再反射到白墙上去, 这时会看到什么现象? 做这个实验并加以解释。

## § 2.3 光的折射和全反射

光投射在两种媒质的界面上, 一般是有一部分光反射回原媒质继续传播, 还有另一部分光在两种媒质的分界面上, 改变了原来传播的方向, 进入另一种媒质里继续传播, 形成折射现象。只有在满足一定条件下, 光射在两种媒质的分界面上, 才只发生光的反射而没有光的折射现象, 关于这种情形, 下面还要仔细讨论。

**1. 光的折射定律** 光在折射的时候, 遵从什么规律呢? 我们用图 2.11 所示的实验装置来研究它。利用前面研究光的反射定律的实验装置图 2.4, 并把平面镜换成

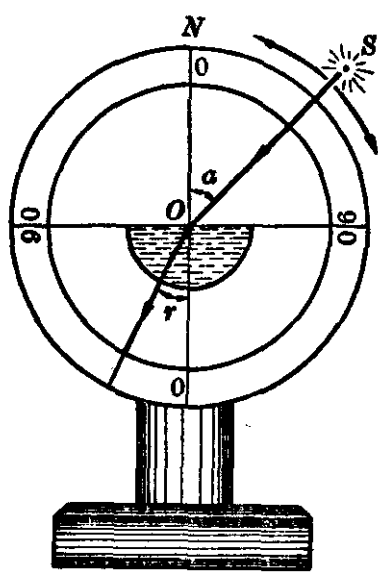


图 2.11

一个半圆形的透明玻璃水缸, 就可以来研究光在折射时所遵从的规律。在暗室里, 先使光源  $S$  发出的光垂直投射在水面上, 这时光线是正入射, 入射角等于零, 进入水中的光线是沿着原来的方向射进水中的。改变光源  $S$  的位置 (把光源  $S$  绕着圆盘转动一个角度), 使光线从空气斜射入水中, 这时候进入水中的那部分光线改变了原来的方向 (折射角不

等于入射角), 在水面处发生了偏折。继续改变光源  $S$  的位置 (从而改变入射角  $a$ ), 则折射光线的方向 (从而折射角  $r$  的大小) 也随着发生改变, 实验的结果表明: 无论入射角的大小怎样改变, 入射角的正弦和折射角的正弦的比总是一个不变的数值, 即

$$\frac{\sin a}{\sin r} = \text{常数}.$$

如果把图 2.11 中的水缸, 换成一个形状相同的玻璃砖, 并且

按上述的过程重复做这个实验，结果表明光线从空气斜射入玻璃中时，入射角的正弦，跟折射角正弦的比，也仍旧是一个常数，只是这个常数的数值，跟光线从空气斜射入水中时，所得出的常数不同就是了。人们经过长期的实验，总结出了光从一种媒质斜射入另一种媒质时的折射定律：

(1) 折射光线总是在入射光线和法线所决定的平面里，并且和入射光线分居在法线的两侧。

(2) 不管入射角怎样改变，入射角的正弦跟折射角的正弦的比，对于所给定的两种媒质来说，总是一个常数。（这个常数就叫做光线由第一种媒质射入第二种媒质时的折射率。）

我们也可以做一个很简单的实验来验证一下光的折射定律。

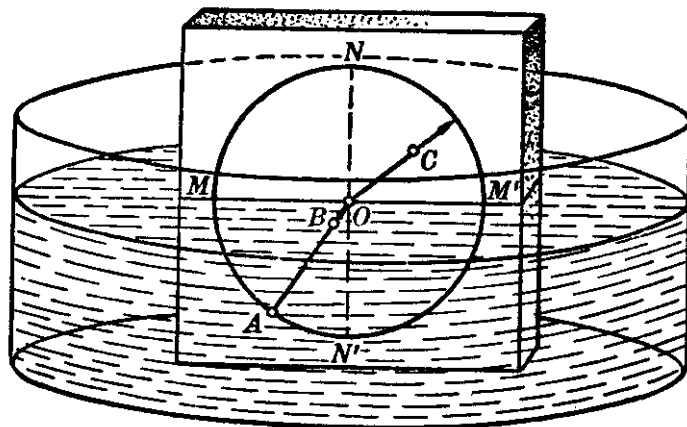


图 2·12

在一块木板上画一个圆，再画出互相垂直的两个直径  $MM'$  和  $NN'$ ，把圆分为四个象限，过圆心  $O$  在第三象限内引任意半径  $OA$ ，并在它上面  $A$ 、 $B$  两处分别插上一枚大头针，然后把木块浸入盛水的玻璃容器中，使水面恰好落在  $MM'$  线上（如图 2·12 所示）；这时在第一象限内用一只眼睛来观察浸没在水中的大头针，并且在第一象限内的  $C$  点处插上另一枚大头针，使眼睛看过去时  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三处的大头针在同一条直线上；之后再取出木板，用铅笔把  $OC$  联接起来，我们将发现： $OA$  和  $OC$  实际上并不在同一条直线



上。为什么当木板浸在水里的时候，从C点看过去，这几枚针好象是在同一条直线上呢？这是因为光线从AB两处的大头针上射到

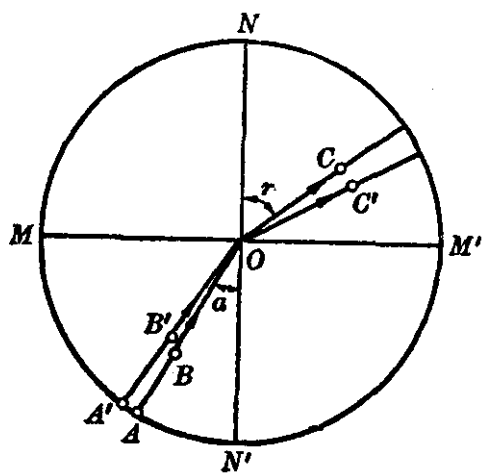


图 2-13

空气中来时，在水面处发生了折射，光线沿AB方向到达水面上的O点，折射以后就沿着OC的方向射入眼里，于是看上去好象它们是在同一条直线上。如图2-13所示，光从水射入空气，AO是入射光线，OC是折射光线， $\angle AON'$ 是入射角， $\angle CON$ 是折射角，于是我们可以量出入射角和折射角，并求出它们

的正弦值的比来。重复以上实验，又可以求得A'、B'和C'三点，记下这时的入射角 $\alpha$ 和相应的折射角 $r$ ，用三角函数表查出 $\sin \alpha$ 和 $\sin r$ 的数值，也可以求出它们的比来。多次重复上述实验，可以证实 $\sin \alpha / \sin r$ 总是一个常数。用这种方法也就测出了光线从水射到空气时的折射率。

**2. 折射率** 光线从第一种媒质斜射入第二种媒质发生折射时，入射角的正弦跟折射角的正弦的比值，对于所给定的媒质来说，是一个常数。用 $n_{21}$ 表示

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin r},$$

常数 $n_{21}$ 称做光线从第一种媒质射入第二种媒质时的折射率。它的数值取决于两种媒质的光学性质，与入射角的大小无关。

实验证明：光从第一种媒质射入第二种媒质时的折射率 $n_{21}$ ，与光在这两种媒质里的传播速度有关，折射率在数值上等于光在第一种媒质里的传播速度 $v_1$ 跟光在第二种媒质里的传播速度 $v_2$ 的比，即

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

如果光綫是从真空射到某种媒质里，它在真空里的傳播速度用  $c$  来表示，在媒质里的傳播速度用  $v$  来表示，根据上面的关系可以得出：

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin r} = \frac{c}{v}.$$

我們把光綫从真空射入媒质里的折射率  $n$ ，叫做这种媒质的**絕對折射率**，簡称为这种媒质的**折射率**。

实验表明：光綫在任何媒质里的傳播速度  $v$  都比在真空里的傳播速度  $c$  小，所以任何媒质的絕對折射率 ( $n = \frac{c}{v}$ ) 都大于 1。光在空气里的傳播速度比在真空里的傳播速度  $c$  略小一些 (相差得很少)，所以可以看成是近似相等的，即空气的折射率近似等于 1；所以我們常常把光綫从空气射入某种媒质的折射率，当做这一媒质的折射率。

下面是几种媒质的折射率。

| 固 体       | 折射率  | 液 体 | 折射率  | 气 体   | 折射率    |
|-----------|------|-----|------|-------|--------|
| 金 剛 石     | 2.42 | 甘 油 | 1.47 | 水 蒸 汽 | 1.026  |
| 重 火 石 玻 璃 | 1.74 | 酒 精 | 1.36 | 氫     | 1.015  |
| 二 硫 化 碳   | 1.62 | 乙 醚 | 1.35 | 空 气   | 1.0003 |
| 岩 盐       | 1.54 | 水   | 1.33 |       |        |
| 水 晶       | 1.54 |     |      |       |        |
| 輕 冕 牌 玻 璃 | 1.52 |     |      |       |        |
| 冰         | 1.31 |     |      |       |        |

光綫从一种媒质射入第二种媒质时的折射率，又称做第二种媒质对于第一种媒质的相对折射率。从媒质的絕對折射率  $n_1$  和  $n_2$  也可以得出相对折射率  $n_{21}$ 。

$$\therefore n_1 = \frac{c}{v_1},$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2},$$

則有

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2},$$

又因为

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2},$$

$$\therefore n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

即

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

根据公式  $n=c/v$  可以知道，媒质的折射率越大，光在这种媒质中的传播速度就越小。两种媒质比较起来，我们把折射率比较小（光在里面传播速度比较大）的媒质，叫做**光疏媒质**；折射率比较大（光在里面传播速度比较小）的媒质，叫做**光密媒质**。从关系式

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

可以看出，光线从光疏媒质  $n_1$  射入光密媒质  $n_2$  时 ( $n_1 < n_2, v_1 > v_2$ )，折射角比入射角小 ( $\sin \alpha > \sin r, \alpha > r$ )；如果光线是从光密媒质射入光疏媒质 ( $n_1 > n_2, v_1 < v_2$ )，则折射角将比入射角大 ( $\sin \alpha < \sin r, \alpha < r$ )。

前面已经说过，光从一种媒质射入另一种媒质发生折射时的

折射率，跟光在这两种媒质里的速度有关。我们可以这样来理解：设想有一束平行光，从一种媒质斜射入另一种媒质，光在第一种媒质里传播速度比较大，在第二种媒质里传播速度比较小 ( $v_1 > v_2, n_1 < n_2$ )；第一种媒质是光疏媒质，第二种媒质是光密媒质；当平行光射到  $AA'$  位置时（如图 2.14 所

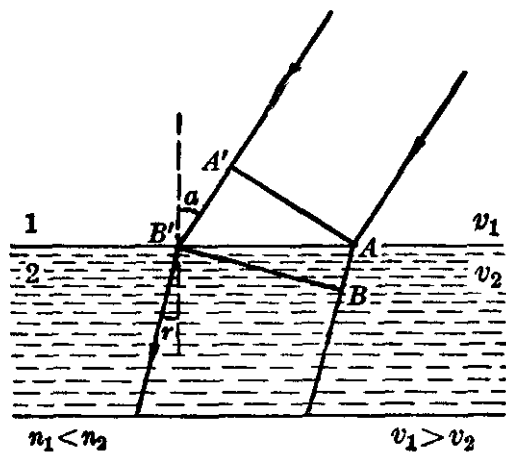


图 2.14

示),  $A$  处的光綫首先进入到光密媒质里, 速度开始减慢, 而  $A'$  处的光綫还繼續在原光疏媒质 (第一种媒质) 里以較大的速度  $v_1$  傳播, 由于速度的不同, 当  $A'$  处的光綫射到  $B'$  时,  $A$  处的光綫在第二种媒质里傳播到  $B$  处,  $A'B'$  将大于  $AB$ , 这以后平行光束又以同样的速度  $v_2$  在第二种媒质里繼續傳播, 这样便在两种媒质的界面上发生了折射現象, 折射角比入射角小. 如果光綫从光密媒质斜射入光疏媒质, 那么情况恰好相反, 折射角将大于入射角. 如果光綫是正入射 (入射角等于零, 入射光綫与界面垂直),  $AA'$  处的光綫将同时进入第二种媒质, 然后又同样以較小的速度在第二种媒质里傳播, 这时光綫在界面处将不发生任何偏折現象. 当然光綫进入媒质时, 受到媒质的影响和作用的情况是很复杂的, 在这里还不能作具体的討論.

应当注意: 光疏媒质和光密媒质是相对的, 它們只有在互相比較的时候才有意义, 不能孤立的問这种媒质是光疏媒质还是光密媒质, 这也不是由物质的密度大小来决定的. 另外还应当注意,  $n_{21}$  和  $n_{12}$  的脚碼也不能随意对調, 即

$$n_{21} \neq n_{12},$$

根据

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2},$$

$$n_{12} = \frac{v_2}{v_1},$$

可以得出

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}.$$

**3. 折射时光路的可逆性** 前面說过, 光在反射时的光路是可逆的, 那么光在折射时光路也是不是可逆的呢? 当光从第一种媒质斜射入第二种媒质时, 根据折射定律:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n_{21},$$

如果这时让光綫从第二种媒质沿着原来折射光的方向, 回过来射

到第一种媒质中去，即取第一次折射时的折射角  $r$  作为入射角  $a'$ ，根据折射定律有：

$$\frac{\sin a'}{\sin r'} = n_{12},$$

$$\therefore \angle a' = \angle r,$$

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}},$$

$$\therefore \frac{\sin a}{\sin r} = \frac{1}{\frac{\sin a'}{\sin r'}} = \frac{\sin r'}{\sin a'},$$

所以有

$$\sin r' = \sin a,$$

即

$$\angle r' = \angle a,$$

这说明折射光线又恰好与第一次折射时的入射光线相重合，即表明光在折射时，光路也是可逆的。

**例 2.** 在空碗里放着一个分币，当碗里盛满水时，为什么看上去碗底处的分币会显得比原来高起一些？

**【解】** 这是光线由水射入空气时发生折射的缘故。如图 2·15

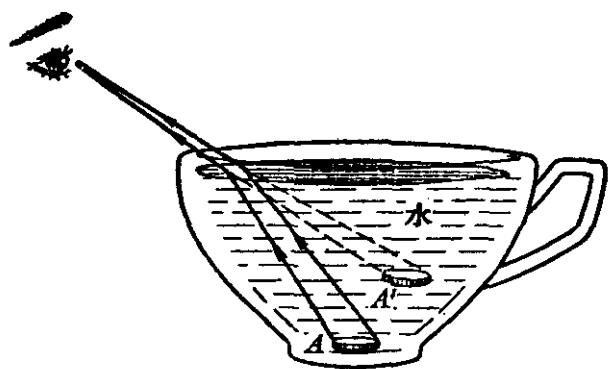


图 2·15

所示，从碗底分币上任意一点  $A$  射出的光线，经过水面射入空气的时候，发生了折射，这一光线射入眼里的时候，好象是从  $A'$  发出来的一样，这样分币上的  $A$  点看起来似乎是在  $A'$  处，其他各

点同样由于光的折射的缘故，看上去也相应地升高了，所以从碗外向水中倾斜地看过去，好象分币在盛水的碗中比原来的位置高起了一些。

**例 3.** 光线从空气斜射到水里，已知水的折射率是 1.33，要使得反射光线跟折射光线互相垂直，问入射角应该多大？

**【解】** 根据题意，光线从空气斜射到水中时同时发生了反射和折射；从反射定律和折射定律可知，反射光线和折射光线是跟入射光线分居在法线的两侧的，所以反射光线和折射光线必然在法线的同一侧，有可能成  $90^\circ$  的夹角。设反射光线这时与水面的夹角为  $\angle 1$ ，折射光线与水面的夹角为  $\angle 2$ （见图 2·16），根据题意

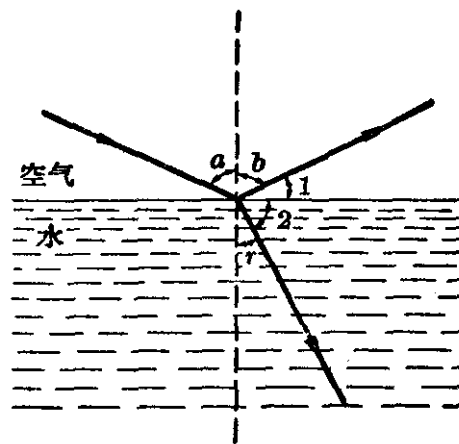


图 2·16

$$\angle 1 + \angle 2 = 90^\circ,$$

$$\angle b + \angle 1 + \angle 2 + \angle r = 180^\circ,$$

$$\therefore \angle b + \angle r = 90^\circ,$$

即

$$\angle r = 90^\circ - \angle b.$$

根据反射定律

$$\angle b = \angle a,$$

故

$$\angle r = 90^\circ - \angle a.$$

根据折射定律

$$\frac{\sin a}{\sin r} = n_{\text{水}},$$

即

$$\frac{\sin a}{\sin(90^\circ - a)} = 1.33,$$

$$\frac{\sin a}{\cos a} = \operatorname{tg} a = 1.33,$$

$$\therefore a = 53^\circ 6'.$$

就是说光线从空气射入水中时，要使得反射光线跟折射光线互相垂直，入射角应当是  $53^\circ 6'$ 。

**例 4.** 已知光线从空气射入甲媒质时，如果入射角是  $45^\circ$ ，则折射角是  $30^\circ$ ；而从空气射入乙媒质时，如果入射角是  $45^\circ$ ，则折射角是  $18^\circ$ 。试问当光线从甲媒质射入乙媒质时，如果入射角是



45°, 折射角是比入射角大呢还是比入射角小? 为什么? 是多少度?

**【解】** 这个问题的要求是从入射角和折射角的大小来计算媒质的折射率, 再根据媒质的折射率来判断哪一种媒质是光疏媒质, 哪一种媒质是光密媒质, 最后在给定入射角大小的条件下, 计算出光从甲媒质射入乙媒质时折射角的大小。

根据题意作图 2.17(a) 和 (b), 从图 (a) 中所给出的条件, 可以计算出甲媒质的折射率:

$$n_{\text{甲}} = \frac{\sin a}{\sin r} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{0.707}{0.5} = 1.41;$$

从图 (b) 中所给出的条件, 可以计算出乙媒质的折射率:

$$n_{\text{乙}} = \frac{\sin a}{\sin r} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 18^\circ} = \frac{0.707}{0.309} = 2.25.$$

比较甲乙两种媒质的折射率, 可以知道, 甲媒质的折射率比较小, 是光疏媒质, 乙媒质的折射率比较大, 是光密媒质。所以光从甲媒质射入乙媒质时, 折射角比入射角小, 即小于 45°。于是可作图 2.17(c)。

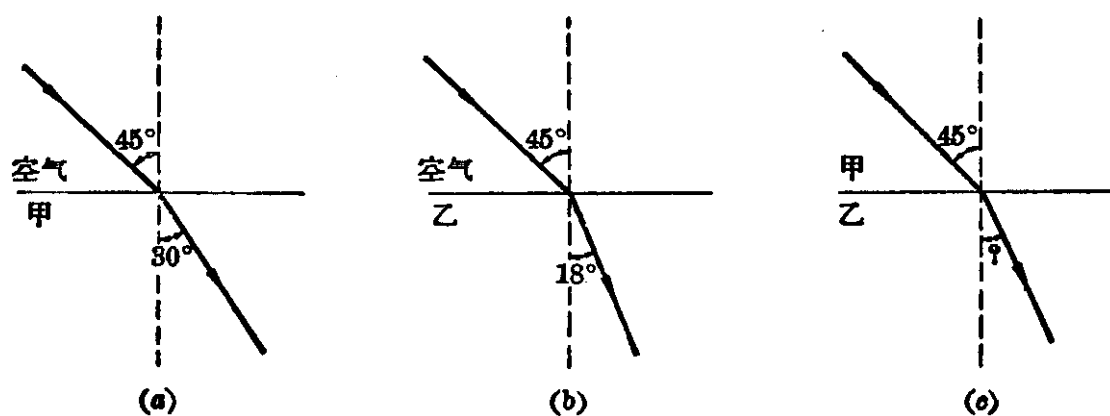


图 2.17

又根据计算式:

$$\frac{\sin a}{\sin r} = \frac{n_{\text{乙}}}{n_{\text{甲}}},$$

$$\frac{\sin 45^\circ}{\sin r} = \frac{2.25}{1.41},$$

$$\sin r = 0.707 \times 0.627 = 0.443,$$

得

$$r = 26^\circ 18',$$

这說明，光从甲媒质射入乙媒质时，入射角是  $45^\circ$ ，折射角是  $26^\circ 18'$ 。显然，与前面分析的结果一致：折射角比入射角小。

**例 5.** 已知玻璃的折射率是 1.52，水的折射率是 1.33，問(1) 光从水射入玻璃和从玻璃射入水中时的折射率各是多大？(2) 光在玻璃里和在水里的傳播速度又各是多大？(已知光在真空中的速度  $c = 3 \times 10^8$  米/秒)

**【解】** 已知： $n_{\text{玻璃}} = 1.52$ ， $n_{\text{水}} = 1.33$ ， $c = 3 \times 10^8$  米/秒，

(1) 光从玻璃射入水中时的折射率是

$$n_{\text{水, 玻璃}} = \frac{n_{\text{水}}}{n_{\text{玻璃}}} = \frac{1.33}{1.52} = 0.875,$$

光从水射入玻璃中时的折射率是

$$n_{\text{玻璃, 水}} = \frac{1}{n_{\text{水, 玻璃}}} = \frac{1}{0.875} = 1.14.$$

(2) 根据公式

$$n = \frac{c}{v},$$

則有

$$v_{\text{水}} = \frac{c}{n_{\text{水}}} = \frac{3 \times 10^8}{1.33} = 2.3 \times 10^8 \text{ 米/秒},$$

$$v_{\text{玻璃}} = \frac{c}{n_{\text{玻璃}}} = \frac{3 \times 10^8}{1.52} = 1.97 \times 10^8 \text{ 米/秒}.$$

$v_{\text{水}}$  和  $v_{\text{玻璃}}$  就是光在水里和在玻璃里的傳播速度。

**4. 全反射** 前面說过，光从一种媒质射入另一种媒质的時候，一般是同时发生反射現象和折射現象的，如果是从光疏媒质射入光密媒质，則折射角小于入射角；如果是从光密媒质射入光疏媒质，折射角将大于入射角。这样，当光从光密媒质射入光疏媒质时，就有可能在入射角还没有增大到  $90^\circ$  以前，折射角就已经达到  $90^\circ$ 。图 2·18 就表示这种情况，光源  $S$  置放在水面下，光綫从水里射到空气里，随着入射角的增大，折射光綫逐渐远离法綫，当入射

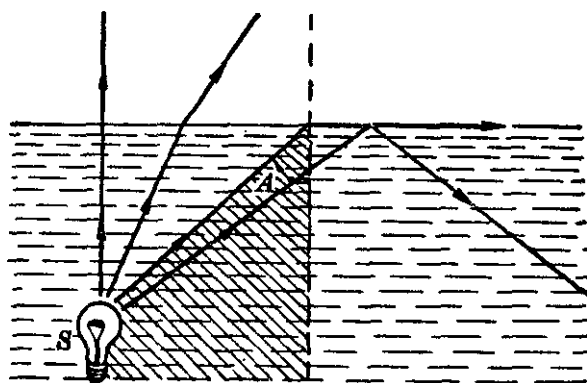


图 2·18 全 反 射

角增大到某一数值  $A$  时, 折射光恰好掠过界面; 跟界面平行(折射角  $\angle r = 90^\circ$ ), 再继续增大入射角, 光线就全部反射回到水中, 不再有折射光线进入空气, 形成**全反射现象**. 我们把使折射角等于  $90^\circ$  的入射角  $A$  叫做**临界角**. 那么, 发生全反射的条件就是:

- (1) 光线从光密媒质射入光疏媒质,
- (2) 入射角大于临界角. (入射角等于临界角时, 折射角等于  $90^\circ$ , 似乎还存在与媒质界面平行的折射光线, 但实际上, 这时折射光的强度等于零, 所以入射光是全部反射回到原来的媒质里的.)

设有一束光线从光密媒质(它的折射率是  $n_1$ ) 射到光疏媒质(它的折射率是  $n_2$ ) 里去, 根据折射定律:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1};$$

当折射角  $\angle r = 90^\circ$  时, 入射角  $\alpha$  即为临界角  $A$ ,

$$\frac{\sin A}{\sin 90^\circ} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

即

$$\sin A = n_{疏,密} = \frac{n_{疏}}{n_{密}}.$$

如果光线是从媒质射入真空或空气时发生全反射, 那么求临界角的公式应为:

$$\sin A = n_{空,媒} = \frac{1}{n_{媒}},$$

即

$$\sin A = \frac{1}{n}.$$

下面是几种媒质相对于真空或空气的临界角。

| 固 体     | 临界角     | 液 体 | 临界角   |
|---------|---------|-----|-------|
| 金 刚 石   | 24.4°   | 甘 油 | 43°   |
| 二 硫 化 碳 | 38°     | 酒 精 | 47°   |
| 各 种 玻 璃 | 30°~42° | 水   | 48.5° |

我們可以做一个简单的实验来观察全反射现象。

在一个烧瓶里装半瓶清水，在瓶塞当中穿一根直钢丝，使它的下端恰好落在烧瓶的球心  $O$  处并与水面相靠近(如图 2·19 所示)，把瓶的一个侧面从瓶底到水面分为 9 等分，即对于  $O$  点每隔  $10^\circ$  在瓶上贴一张有颜色的小纸条，并且在接近水面  $A$  处放一支点燃的小蜡烛，蜡烛发出的光，有一部分将平行于水面以接近  $90^\circ$  的入射角射入水中，这时眼睛从瓶底  $N$  点逐渐向  $B$  点( $\angle NOB \approx 50^\circ$ )移动，等到移近  $B$  点时，就能看见从小蜡烛发

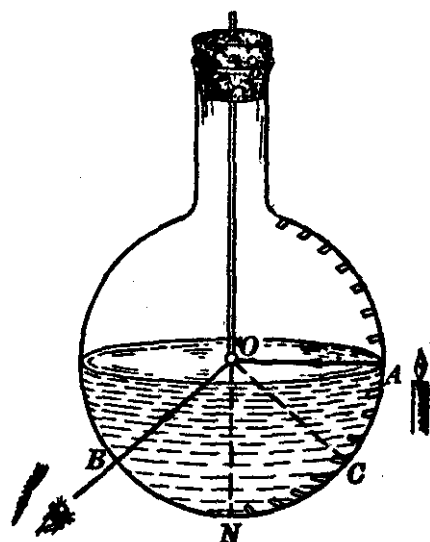


图 2·19

出的光。已知光从水射入空气时的临界角是  $48.5^\circ$ ，即当入射角(从水到空气)等于  $48.5^\circ$  时，折射角等于  $90^\circ$ ，现在情况恰好相反，根据折射时光路的可逆性，光从空气射入水中的入射角为  $90^\circ$  时，折射角等于  $48.5^\circ$ ，所以折射光会在  $B$  点附近射入眼中；当眼睛移到  $B$  点时，蜡烛的光亮却顿时就消失了，这时眼睛对着钢丝的下端  $O$  点时只能看到贴在  $C$  处的有颜色纸条，这就是从纸条射出的光线，在水面处引起全反射的结果，因为从  $C$  点射出的光线经水面  $O$  处反射到眼里，入射角  $\angle CON$  已经大于临界角  $48.5^\circ$  了( $\angle CON = \angle BON \approx 50^\circ$ )。

用这种方法也可以近似测定光从酒精或其他液体射到空气时的临界角。建議讀者試試看。

**例 6.** 已知水的折射率是 1.33, 水晶的折射率是 1.54, 要发生全反射, 光必須从哪一种媒质射入哪一种媒质? 入射角必須大于多少度? 如果光綫从水晶射入空气时, 临界角又是多大?

**【解】** 已知  $n_{\text{水}}=1.33$ ,  $n_{\text{水晶}}=1.54$ , 因为  $n_{\text{水}} < n_{\text{水晶}}$ , 所以水是光疏媒质, 水晶是光密媒质; 根据全反射发生的条件: 光綫必須从光密媒质射入光疏媒质, 入射角大于或等于临界角时才能发生全反射, 所以光必須从水晶射入水中才可能发生全反射。

根据公式

$$\sin A = \frac{n_{\text{疏}}}{n_{\text{密}}} = \frac{n_{\text{水}}}{n_{\text{水晶}}} = \frac{1.33}{1.54} = 0.8636,$$
$$\therefore A = 59^{\circ}44'.$$

就是說光綫从水晶射入水中的入射角大于或等于临界角  $59^{\circ}44'$  时才能发生全反射。

光从水晶射入空气中时, 临界角的大小可以根据下面的公式計算出来

$$\sin A = \frac{1}{n_{\text{水晶}}} = \frac{1}{1.54} = 0.6494,$$
$$\therefore A = 40^{\circ}30'.$$

在自然界里, 我們看見的露水或噴泉的水珠, 总是显得格外明亮耀眼, 这就是光在水珠內发生全反射的緣故. 大气光現象中, 霓、虹的形成, 也与全反射有关, 技术上利用全反射的例子, 我們留在后面再討論。

### 习 題 2·3

1. 水的折射率是 1.33, 光綫从空气射入水中, 入射角是  $30^{\circ}$ , 問折射角是多大? 如果光綫从正入射 ( $\angle a = 0^{\circ}$ ) 連續改变到掠入射 ( $\angle a = 90^{\circ}$ ), 問折射角相应有多大的改变?

2. 已知玻璃的折射率为1.52, 光线要用多大的入射角从空气投射到玻璃表面上, 才能使反射光跟折射光成 $180^\circ$ 和 $120^\circ$ 的夹角?

3. 光线从水射入玻璃时的折射率是多大? 已知光在水中的传播速度是 $\frac{3}{4}c$ , 求光线在玻璃中的传播速度是多大?

4. 水和玻璃相比哪一个为光疏媒质? 哪一个为光密媒质? 为什么? 要在水和玻璃的分界面上发生全反射现象, 光线必须从哪一种媒质射入哪一种媒质? 为什么? 这时的入射角应大于多少度?

5. 光从水射到某种玻璃时的折射率是1.18, 从水射到甘油的折射率是1.11, 问光线从这种玻璃射到甘油中的折射率是多大?

6. 在水面下1米深处, 放置一个点光源, 问它能照亮多大的水面? 被照亮的这块面积形状是怎样的? 水是透明体, 为什么这个放在水中的点光源不能把全部水面都照亮呢? [提示: 要从水面上看见某部分水面被照亮, 必须有光线从这部分水面射入空气里, 如果水面下的光射到某部分水面时发生全反射, 而没有光线射到空气里去, 那么眼睛就不会感觉到这部分水面是被照亮的.]

## § 2.4 光的吸收和散射

**1. 光的吸收** 光在两种媒质的分界面上, 一般除了发生反射现象和折射现象以外, 还有一部分光线在界面上要被媒质吸收. 这一部分光的能量, 主要是转变成媒质的内能使媒质的温度升高. 同一种光在不同媒质里、穿过不同的厚度时, 被吸收的多少也不同. 在其他条件相同的情况下, 光穿过不同的媒质, 是不是会被媒质强烈地吸收, 显然与媒质的性质有关. 与同种透明的媒质相比, 颜色深暗的媒质吸收光的本领较大. 例如: 光穿过无色阴暗的赛璐珞时, 被吸收的能量要比穿过无色透明的赛璐珞时多一倍左右. 有颜色的绸比白绸吸收光的本领大2~7倍, 所以我们在冬天总是穿颜色比较深的衣服, 夏天却穿颜色较淡的衣服. 有些光学仪器, 为了消除来自某些方向的光线, 常常把那部分表面涂黑; 为了防止封闭在筒里的照象胶片漏光, 总是用黑色的纸把胶片再包一层, 这是因为黑纸有较强的吸收光的本领.



一般地說，透光性能好而吸收光的本領差的物体是透明的；透光性能差而吸光本領較强的物体就是不透明的。由于光被吸收的多少与穿过媒质的厚度有关，所以有些不透明物体，当把它做成薄膜状态的时候（如金箔）也能让光透过；而透明体在很厚的时候，也会变得不透明了。例如：在深水（海底）里，即使在白昼也是黑暗的，所以潜水員要用潜水灯照明，才能在深水中工作。

**2. 光的散射** 光在媒质里傳播时，如果媒质里存在着其他物质微粒，或者媒质本身密度有着起伏的变化，这时，就会有一部分光綫偏离原来傳播的方向，而分散开来形成所謂**散射現象**。

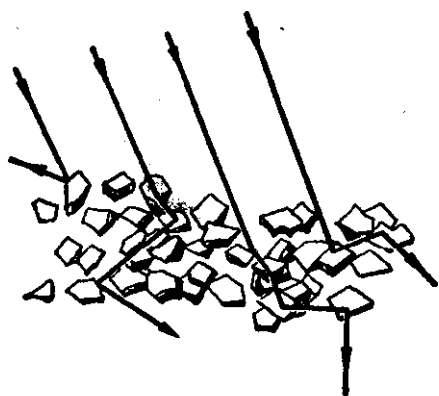


图 2·20 散射現象

如果媒质里存在悬浮的微粒，那么当光綫射在透明或不透明的微粒上时，有的在微粒表面发生反射，有的則进入微粒里发生折射（如图 2·20 所示），由于在媒质里，微粒的位置、形状等是不規則的，微粒的数目又很大，所以光綫穿过微粒层时，便会偏离原来的傳播方向而分散傳

播；如果媒质本身的密度，由于热运动等原因而有了起伏，这时媒质也就成了不均匀的媒质了，光綫就不可能象在同一均匀媒质里那样沿直綫傳播，結果也就发生散射現象。例如：太阳从云縫里泻下一綫阳光，或夜晚探照灯向着天空照射，光綫虽然沒有直接射入眼里，但是我們仍能看見它的光芒，这就是光綫穿过空气时被烟尘散射的結果。白昼，天空各部分都是光亮的，这也是由于大气密度的起伏和大气里存在水滴、烟尘等微粒，使太阳光发生散射的緣故。如果天空是十分純淨的，沒有大气和其他微粒，那么，我們除了能够看見天上有太阳、月亮和星星以外，整个天空的背景将会是完全黑暗的。

太阳和其他星星，时时刻刻都在把大量的光投射到地球上来，

它們都要穿过地球周圍的大气层才能到达地面，現在就来談談它們射到地面上来的过程：太阳或其他星球发出的光，开始进入大气层时，在大气层的頂面发生漫反射，使一部分光綫又返回到宇宙空間去，这种大气頂层的漫反射，将会使未来星际旅行的人，在遙远的太空里有可能看見地球这个光亮的球体；当光綫进入到大气层以后，由于大气密度由上而下逐漸增大，折射率也相应的有一定的变化，这就使进入大气层的光逐层发生折射（如图 2·21 所示），这种大气折射使我們所看到星星的位置，与它們实际位置有一定的偏离；射到大气层里的光綫除了发生折射以外，还有前面談过的散射現象，散射光綫使得整个天空看上去很明亮；还有一部分光被大气层吸收了。

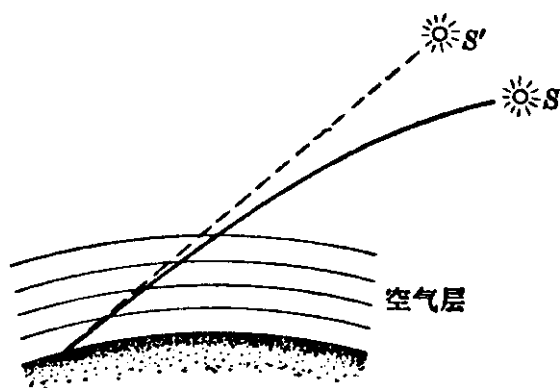


图 2·21 在大气层光的折射現象

以太阳光的輻射为例，射向地球来的太阳光只有 40% 左右能够到达地面。下面是射向地球来的太阳光被漫反射、散射和吸收等的百分比：

|                |       |
|----------------|-------|
| 大气层向宇宙空間漫反射出去的 | 占 18% |
| 云反射出去的         | 占 22% |
| 大气层吸收的         | 占 20% |
| 經過大气层散射到地面的    | 占 18% |
| 直接輻射到地面的       | 占 22% |

很明显，如果不是以上各种原因使得射向地球来的太阳光有很大的散失，那么地球表面的温度将会比現在高得多。

## 本章提要

1. 光在两种媒质的分界面上要发生反射、折射和吸收等現象；如果媒质里存在着其他物质微粒，或者媒质密度有起伏的变化，就会有一部分光綫偏离原来的方向而形成所謂散射現象。

2. 光在反射的时候,遵循反射定律:

(1) 反射光线总是在入射光线和法线所决定的平面里,并且跟入射光线分居在法线的两侧;

(2) 反射角等于入射角.

3. 光在折射的时候,遵循折射定律:

(1) 折射光线总是在入射光线和法线所决定的平面里,并且跟入射光线分居在法线的两侧;

(2) 不管入射角多大,入射角的正弦跟折射角的正弦的比,对于给定的两种媒质来说,是一个常数.(这个常数就叫做光线从第一种媒质射入第二种媒质时的折射率,又叫做第二种媒质对于第一种媒质的相对折射率.)

4. 光从第一种媒质射入第二种媒质时的折射率  $n_{21}$ , 等于光在第一种媒质里传播的速度  $v_1$  跟光在第二种媒质里传播的速度  $v_2$  的比,即

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

5. 光从真空或空气射入某种媒质时的折射率,叫做这种媒质的绝对折射率  $n$ (简称折射率),并有下列关系

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n = \frac{c}{v}.$$

6. 光从一种媒质射入另一种媒质时的折射率,与这两种媒质的绝对折射率的关系是:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

并有

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}.$$

7. 光在反射和折射时,光路都是可逆的.

8. 光发生全反射的条件是:(1)光从光密媒质射入光疏媒质;(2)入射角大于或等于临界角.

9. 光从光密媒质射入光疏媒质发生全反射时,计算临界角的公式是:

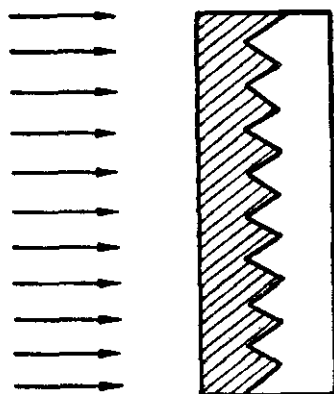
$$\sin A = n_{疏,密} = \frac{n_{疏}}{n_{密}};$$

光从媒质射入真空(或空气中)发生全反射时,计算临界角的公式是:

$$\sin A = \frac{1}{n}.$$

## 复习题二

1. 光的反射和漫反射、全反射有什么区别？漫反射和全反射是不是也遵循光的反射定律？
2. 光从光疏媒质射入光密媒质时，入射角大还是折射角大？为什么？光从光疏媒质射入光密媒质时的折射率比1大还是比1小？为什么？
3. 如果说“媒质的折射率越大，光从真空或空气射入这种媒质时，折射光线向法线偏折得也越多”，这种说法对不对？为什么？
4. 怎样证明：光在反射和折射时，光路都是可逆的？
5. 什么是临界角？光的全反射现象要在怎样的条件下才能产生？能不能说每一种媒质的临界角大小是一定的？为什么？如果说“水晶的临界角是 $48.5^\circ$ ”，这种说法对不对？为什么？
6. 为什么用步枪射击河里的游鱼，比射击天上的飞鸟更不容易击中呢？
7. 下雨后，树叶上的水珠为什么显得格外光亮？要使光线在水珠内作全反射，问水珠内的入射光线，跟通过入射点的直径之间夹角，不能小于多少度？
8. 公路上用来标明转弯处的路牌，是用红色玻璃薄片做成的，它的截面形状如附图所示，当夜间汽车的灯光投射到这种路牌上时，反射回来的光线可以引起司机们的注意，试解释这种玻璃片有什么作用。



(第8题)

9. 在冬天晴天雪还没有融化的时候，为什么室外格外明亮？为什么地上的脏雪比干净雪容易融化？
10. 什么叫光的散射？从门或窗的狭缝中射进室内来的一线阳光，为什么要在空气里有灰尘的时候才能看得见？

## 第三章 光学器件

前一章已經叙述过：光射在两种媒质的分界面上，一般要发生反射和折射现象，这时候光传播的路径（光路）在媒质的分界面上有明显的改变。人们就根据这些现象制成了各种**鏡**和**透鏡**。鏡是对光线具有规则反射性质的光滑平面或曲面（如平面鏡和球面鏡等）。透鏡是两面都磨成球面或一面是球面另一面是平面的透明体<sup>①</sup>（如凸透鏡和凹透鏡等），我們把这些用来改变光路的器件，叫做光学器件。

利用光学器件可以控制光路，而光路的控制又可以形成物体的象，这是一个很有趣也很有实际意义的问题。我們一張开眼睛，就能看见外面的物体，这就是因为在眼睛里形成了物体的象的缘故。各种鏡和透鏡究竟是怎样成象的呢？下面我們就来讨论它们的性质和成象的原理。

### § 3.1 平面鏡。平面鏡成象

反射面为平面的鏡叫做**平面鏡**。平常用的鏡子都是平面鏡。人們对着鏡子能够看见自己或其他物体的象。下面就用图来说明平面鏡是怎样成象的。

图 3.1 所示的是一个平面鏡，在鏡的前面放着一支点燃的蜡烛，从蜡烛火焰射到鏡面上的光线，经过反射以后，光路就发生了改变。例如，从  $S$  点发出的光线： $SO$  跟鏡是垂直的，反射光和入射

<sup>①</sup> 透鏡也有的是两面都磨成圆柱面，或一面是圆柱面另一面是平面，这种透鏡叫做柱面透鏡，在这里我們不讨论这种透鏡。

光相重合 (根据反射定律: 入射角等于反射角); 同样根据反射定律, 可以得出入射光  $SA$ 、 $SB$  的反射光  $AC$  和  $BD$ , 这一束光射入眼里, 看上去就好像它们是从镜里  $S'$  点发出来的一样, 我们就把  $S'$  叫做  $S$  的象. 从图中可以看出: 射到眼里来的这一束光线, 并不是真的从  $S'$  发出的, 它只是  $AC$  和  $BD$  等光线的延长线的交点, 镜子后面也并不存在这样一个实际的光点 (用一个光屏放在  $S'$  处也不会有象在屏上显现出来), 我们把具有这种性质的象叫做  $S$  的虚象. 同样, 我们也可以得出蜡烛其他各点在镜里相应地方所形成的虚象, 这些象点组合在一起, 就形成了跟蜡烛完全相同的虚象, 这就是我们平常能够在镜子里看见物体或自己的象的缘故.

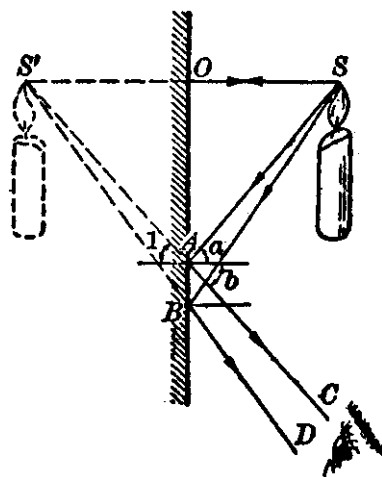


图 3·1 平面镜成像

平面镜里物体的虚象, 它的大小和位置又是怎样的呢?

从蜡烛射到平面镜上的光线, 反射时遵循反射定律. 现在我们来研究图 3·1 中的  $\triangle SOA$  和  $\triangle S'OA$ , 它们都是直角三角形, 因为  $\angle a = \angle b = \angle 1$ , 所以  $\angle SAO = \angle S'AO$ .  $OA$  是公用边, 则有  $\triangle SOA \cong \triangle S'OA$ ,  $\therefore S'O = SO$ . 同样可以证明, 蜡烛上其他各点跟它在镜里的象, 对镜面讲也是对称的. 这说明: 物体在平面镜里所成的虚象, 大小是和物体相等的, 并且和物体对称 (相对于镜面来说).

我们可以做一个实验来验证这个结论.

在铺在桌面的纸上画一个圆, 把一个小蜡烛竖直地立在圆周的某一点  $P_1$  的地方, 再把一块干净的平面玻璃竖直地放在圆的直径上 (如图 3.2 所示), 因为玻璃的表面是平滑的, 所以又能起平面镜的作用, 在玻璃中就能看见点燃的蜡烛的虚象. 如果在玻璃板的后面, 安放另一支没有点燃的、大小相同的蜡烛, 慢慢地移动它,



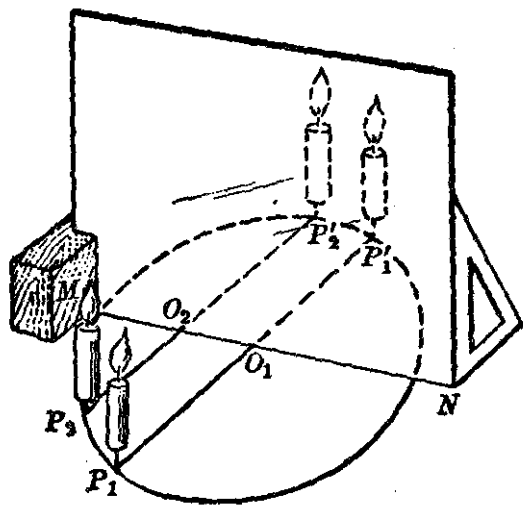


图 3·2

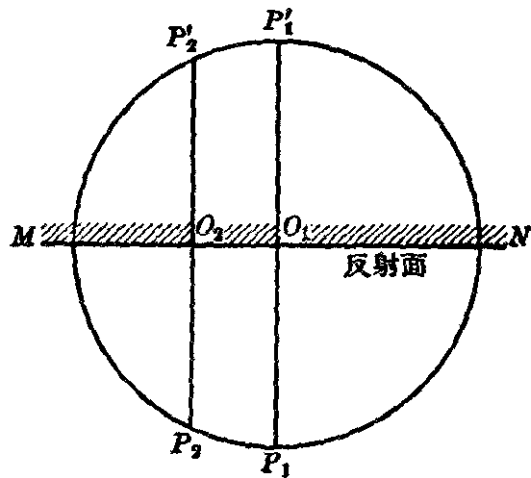


图 3·3

使得隔着玻璃看过去正好跟玻璃中蜡烛的虚象重合在一起，(要从不同的角度看过去，玻璃后面的蜡烛都跟点燃着的蜡烛的虚象相重合，好象它也是点燃着的一样，才算是相互重合的。)这时候，玻璃后面那支蜡烛的位置  $P_1'$ ，也就是玻璃板前面蜡烛的虚象的位置；移动点燃的蜡烛到圆周的另外一点  $P_2$  的地方，用同样的方法得出它的虚象的位置  $P_2'$ 。取去蜡烛和玻璃，会发现  $P_1'$  和  $P_2'$  也都在圆周上；连接  $P_1P_1'$  和  $P_2P_2'$ ，分别和直径  $MN$  交于  $O_1$  和  $O_2$ ；量度  $P_1O_1$ 、 $P_2O_2$ ， $P_1'O_1$  和  $P_2'O_2$ ，得  $P_1'O_1 = P_1O_1$ ， $P_2'O_2 = P_2O_2$  (见图 3·3)。上面的结果表明，蜡烛在玻璃中所形成的虚象是和蜡烛大小相等的；并且蜡烛的虚象和蜡烛本身对玻璃(镜面)来讲是互相对称的。

任何一个光滑的平面，由于它对光线具有规则反射的性质，所以都能起平面镜的作用；我们常常说“湖水平静得象一面镜子”，也常常看见岸上的高山树木倒映在水中相映成趣的景色，这些都是平静的水面引起平面镜成像的结果。

平面镜的应用是很普遍的，我们的祖先，在很古的时候，就已经知道用琢磨得很光滑精致的青铜来当做镜子使用了。现在，使

用鏡子的地方更多：在盥洗室里要用鏡子；在汽車駕駛員座位的前上方，也常常懸掛着一個小平面鏡，便于駕駛員觀察和掌握后面的情況；有些精密的電學儀表的表面上也常常附有一個平面鏡，只要看到指針和指針在鏡子里的象重合時，指針的示數就是正確的，如圖

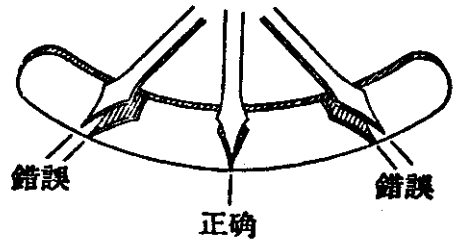


圖 3·4

3·4 所示。有時候，光滑的表面由于平面鏡成象的作用，也會引起一些對我們不利的結果，這時候，就需要加以防止。例如在夜間行駛的時候，車或船的駕駛室里不适宜點燈，不然駕駛台前後的玻璃就會把車內的景象反射出來，它和玻璃外面的景象混在一起會妨礙駕駛員作出正確的判斷。在有玻璃陳列櫥的展覽室里，也要注意避免由于玻璃起平面鏡作用而看不清楚櫥里面的東西。

### § 3·2 球面鏡。球面鏡成象

反射面是球面的鏡叫做**球面鏡**。利用球面的凹面作反射面的球面鏡叫做**凹面鏡**或**凹鏡**，利用球面的凸面作為反射面的球面鏡叫做**凸面鏡**或**凸鏡**。凹鏡和凸鏡都可以看成是由許多微小的平面鏡組合而成的。

球面鏡的球心  $C$  和鏡面上任何一點的連接綫，叫做球面鏡的**光軸**，連接球心和鏡面的頂點  $O$  (鏡面的中心點) 的直綫叫做球面鏡的**主光軸**，簡稱**主軸** (如圖 3·5)。

射到球面鏡上的光綫，如果跟主軸很靠近，我們稱它為**近軸光綫**。近軸光綫射到球面鏡 (或透鏡) 上所得到的結果我們以後要經常用到，所以很重要，今後我們所討論的也只是限于近軸光綫的情況。

平行于主軸的近軸光綫，在球面鏡上反射後，反射光 (或它的延長綫) 跟主軸相交于某一點，這一點恰好在半徑的中點上。這可

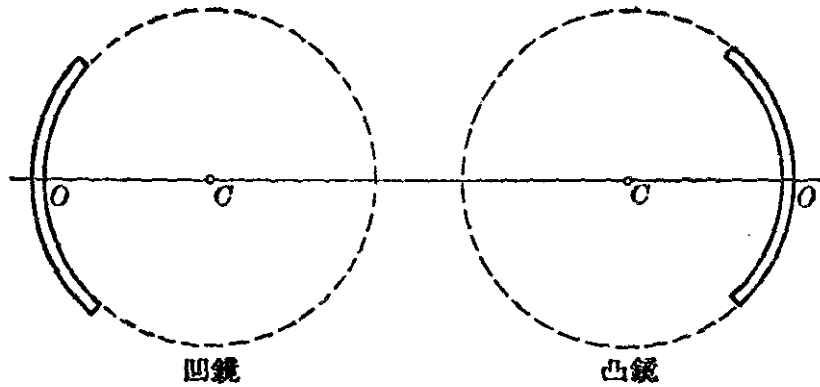


图 3.5

以从图 3.6 和图 3.7 中得到証明：

設  $SP$  为沿着平行于主軸方向射到球面鏡上的近軸光綫，入射角为  $a$ ，反射角为  $b$  ( $\angle b = \angle a$ )。因为  $SP \parallel OC$ ，所以  $\angle a = \angle 1$ ，对于凸鏡來說，又有  $\angle b = \angle 2$ ，所以  $\triangle FCP$  为等腰三角形，并且  $PF = FC$ 。又因为  $SP$  是近軸平行光綫， $P$  点和  $O$  点隔得很近，我們可以把  $\triangle POF$  近似的看成是一个等腰三角形，即有  $FO \approx FP = FC$ ，也就是說  $F$  点恰好在半徑  $OC$  的中点上。

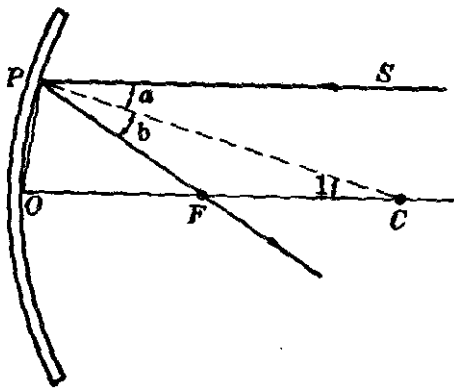


图 3.6

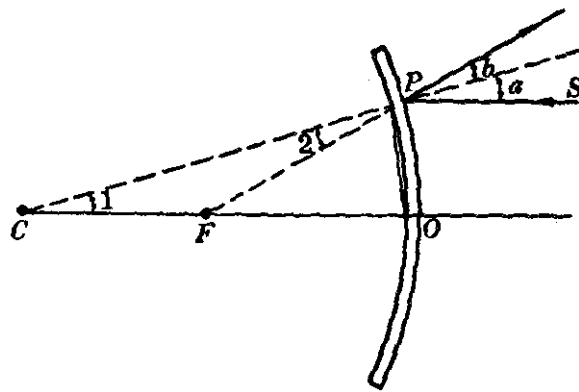


图 3.7

从这个結論可以知道，任何平行于主軸的近軸平行光綫，經過球面鏡反射以后，必定相交于同一点  $F$  上，这一点就称为球面鏡的焦点。习惯上用  $F$  来表示焦点的位置；从焦点  $F$  到頂点  $O$  的距离，叫做球面鏡的焦距，焦距的大小用  $f$  来表示，如果球面鏡的半徑是  $R$ ，則有

$$f = \frac{R}{2}.$$

平行于主軸的近軸光綫如果是射到凹鏡上，則反射以后的光綫是真正与主軸相交的，所以凹鏡的焦点又称为**实焦点**（如图3·8）。如果是射到凸鏡上，反射光綫就会向四周发散，迎着鏡面看

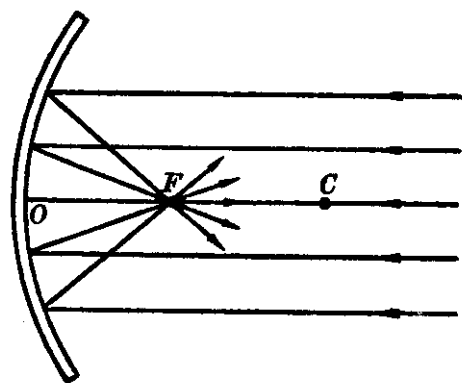


图 3·8 实焦点

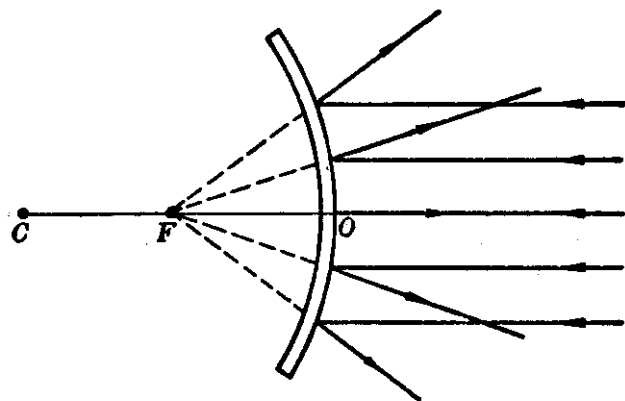


图 3·9 虚焦点

去，好象它們是从鏡面后的  $F$  点发出来的一样（图3·9）。也就是說，凸鏡的焦点是这些反射光的延長綫的交点，而不是光綫实际的聚合点，所以凸鏡的焦点又称为**虚焦点**。（应当注意：不要把焦点和一般光綫的交点混同起来，并不是任意光綫的交点都是焦点。）

平行光射到凹鏡上能够会聚起来，所以凹鏡有聚光的作用，是一种会聚鏡；平行光射到凸鏡上，光綫就向四周发散，所以凸鏡是一种发散鏡。

利用凹鏡的聚光作用，可以把太阳光的能量聚集起来加以利用：在凹面鏡焦点上放置一个壶或鍋，就能煮熟食物，这就是所謂太阳能炊事器（俗称太阳灶）；如果鏡面足够大，还可以在它的焦点处安装一个鍋炉，經凹鏡反射的太阳光就集中照射在鍋炉上，使鍋炉里的水变成高温高压的蒸汽，这些蒸汽就可以推动蒸汽輪机，带动发电机发电，从而成为一座太阳能发电站（图3·10，图3·11）。

如果在凹鏡的焦点处放置一个光源，那么根据反射时光路的可逆性，从光源发出的光經過凹鏡反射以后，就会形成一束平行光射出去。国防上用来搜索敌人飞机的探照灯，就是根据这个原

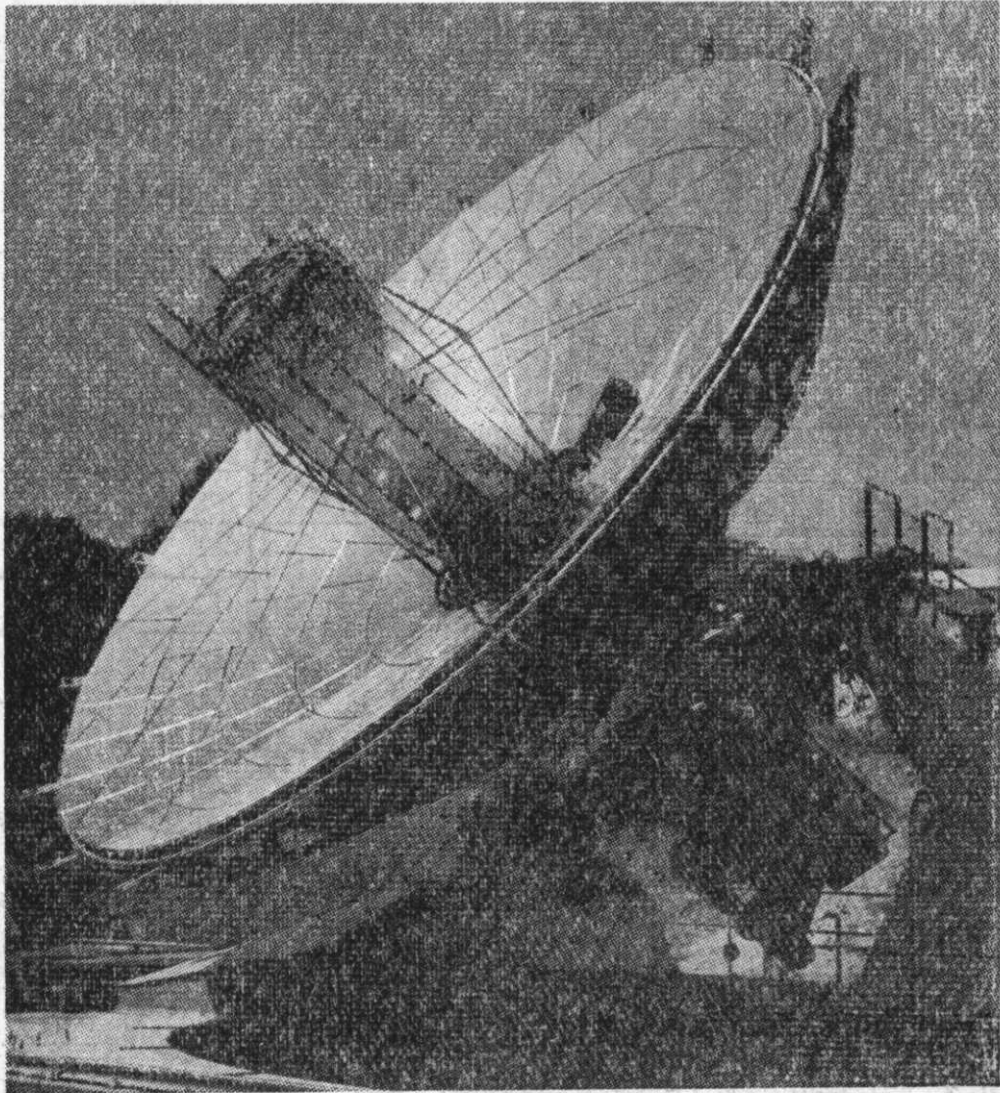


图 3·10 太阳能发电站

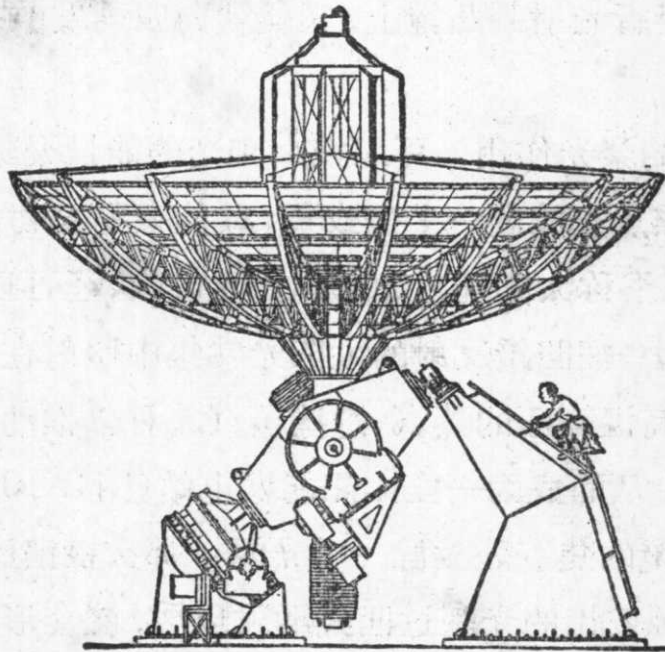


图 3·11

理制成的；其他如汽車的前灯，手电筒，照相机上的閃光灯，幻灯机，建筑工地、运动場或摄影棚里用的照明灯等都要应用凹鏡。它使光綫集中地向一个方向照射，增加照明的效果。

**1. 凹鏡成象** 跟平面鏡相似，物体放在球面鏡前也能成象，球面鏡成象有它自己的特点，如象的性质、大小、位置都不完全和平面鏡相同。下面先研究凹鏡成象的情况。

用一个焦距已知的凹鏡，（如果焦距不知道的話，可以把凹鏡向着太阳光近似地測出它的焦距来，如图 3·8 所示。）把一支点燃的蜡烛放在凹鏡焦点以外的地方，在同側，面对着凹鏡再豎放一个白紙做成的光屏，移动光屏到某一位置的时候，就会看見屏上有蜡烛的倒象出現（图 3·12

(a)，这个象既然在光屏上显现出来，則眼睛从各个方向都能清楚地看見它，这說明它和平面鏡所成的虚象不同，是蜡烛上各个发光点发出的光，經過凹鏡反射以后，在光屏上实际会聚而成的，我們把具有这种性质的象叫做**实象**。当蜡烛放在凹鏡的球心  $C$  以外（即 2 倍焦

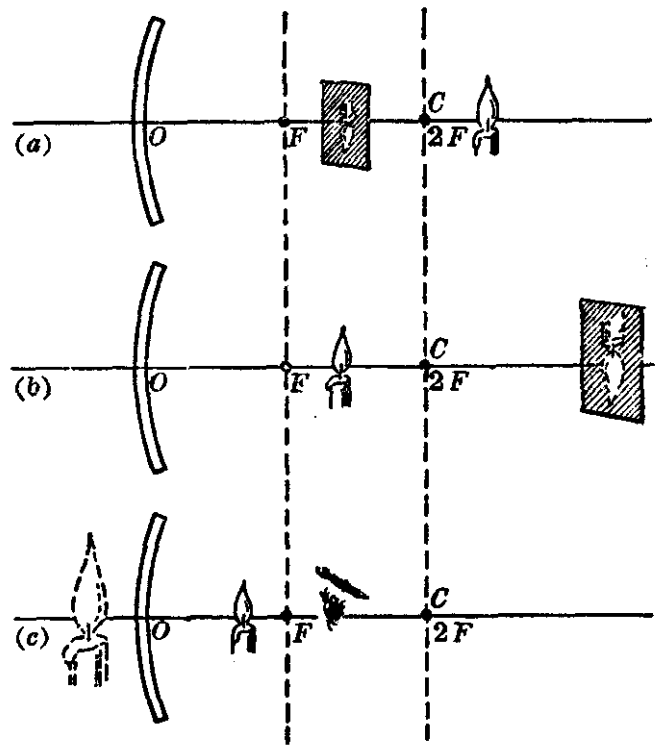


图 3·12 凹鏡成象

距以外)的地方，所成的实象就在焦点  $F$  以外球心  $C$  以内的地方（如图 3·12(a)所示）；如果把蜡烛向凹鏡移近，那么要使象成在光屏上，就必须把光屏向后移，使它远离凹鏡，这时候象离开凹鏡远了，也比原来大了，但仍旧是倒立的实象；当蜡烛移到球心上，蜡烛的倒象也恰好成在球心处，象和蜡烛大小也恰好相等；继续把蜡烛



移近到球心以內、焦点以外的地方，成的象就移远到球心以外，象也越来越大，这时光屏上得到的实象比蜡烛本身大(如图 3.12(b) 所示)；如果把蜡烛移到它的焦点以內，則無論把光屏放在什么地方也得不到蜡烛的实象，只能用眼睛对着凹鏡才可以看到鏡面里有一个正立、放大的蜡烛的象，这个象不能显現在光屏上，是一个虚象(如图 3.12(c) 所示)。根据以上的事实，我們可以把凹鏡成象的特点归結为以下几点：

(1) 物体放在凹鏡焦点以外的地方，成的象是倒立的实象，物体放在凹鏡的焦点以內的地方，成的象是正立的虚象。虚象总是成在鏡面的另一側，而实象則跟物体处在鏡面的同一側。

(2) 物体放在凹鏡的焦点以外、球心以內的时候，成的象是放大的实象，物体放在凹鏡的球心以外的时候，成的象是縮小的实象。

掌握各种鏡成象的特点是很重要的，上面所說的凹鏡成象的几种重要情况，除了可以直接从实验得出以外，还可以通过作图的方法来验证，我們將要在下一节里来介紹它。

**2. 凸鏡成象** 跟上面的方法一样，用一支点燃的蜡烛，放在凸鏡的前面，来观察凸鏡成象的情况，这时候無論把蜡烛放在什么地方，也無論把光屏移动到什么地方，屏上总不会得到蜡烛的实象，我們只能够在凸鏡里看見一个正立、縮小的虚象。(应当注意：它和凹鏡成虚象的情况不相同，凹鏡是当物体放在焦点以內时成虚象，且虚象比物体大。)于是我們也可以把凸鏡成象的特点归結如下：

凸鏡不能成实象，它只能在鏡的另一側成一个正立的、縮小的虚象。

跟平面鏡相比，凹鏡成的虚象比物体大，平面鏡成的虚象跟物体大小相等，凸鏡成的虚象比物体小。从凸鏡里能够看到的外界的范围，要比同样大小的平面鏡大(如图 3.13 所示， $\theta_2 > \theta_1$ )，

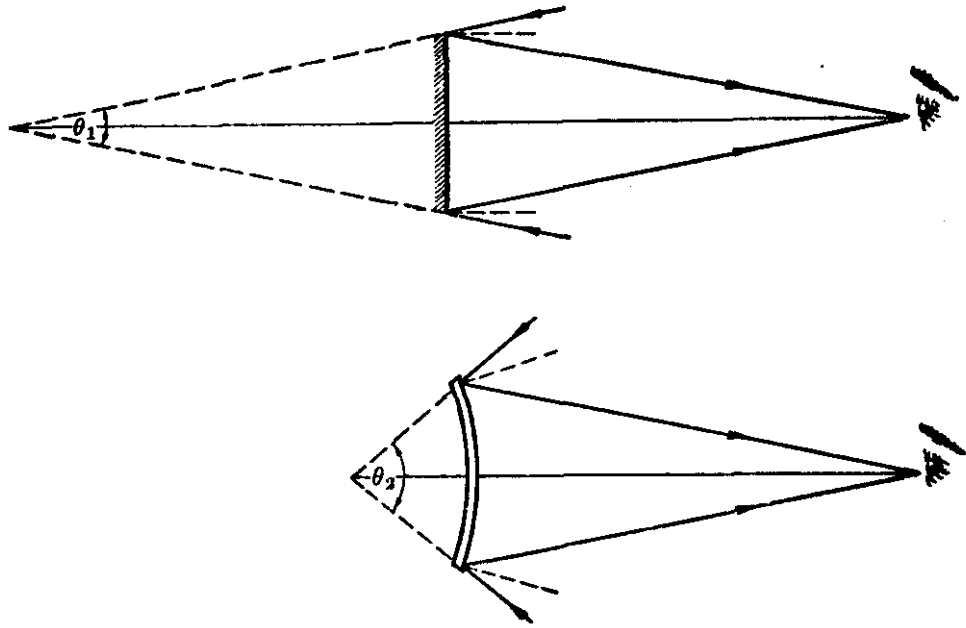


图 3-13

所以在汽車駕駛室的外側，常常豎立一个凸鏡，駕駛員通过它能够看到車外側或車后的情况；在有些大城市馬路的路口也常常装有凸鏡，用来让交通民警观察各个方向車輛行駛的情况，便于更好地指揮交通；有时候也在路口安装一面很大的凸鏡，使車輛駕駛人員在較远的地方就能看到前面橫馬路上行駛的車輛，这样就更便于行車的安全。

### § 3.3 球面鏡成象的作图

球面鏡成象的各种情况，还可以用作图的方法表示出来。球面鏡成象的光路图，是根据光的反射定律和球面鏡的性质作出来的。下面用作图法分別討論各种球面鏡成象的情况。

**1. 凹鏡成象的作图** 假使在凹鏡前面放一个发光点  $A$ ，我們用作图法来求它的象。先从  $A$  点任意引三条入射光綫  $AP$ 、 $AQ$  和  $AT$  (如图 3-14 所示)， $P$ 、 $Q$  和  $T$  就是入射点，把它們和球心  $C$  联結起来，得半徑  $CP$ 、 $CQ$  和  $CT$ ，这些綫显然就是  $P$  点、 $Q$  点和  $T$  点处鏡面的法綫 (因为半徑总是和球面垂直的)，它們和入射光綫的夹角就是入射角，根据反射定律，反射角等于入射角，用量角

器作  $\angle 2 = \angle 1$ ,  $\angle 4 = \angle 3$ ,  $\angle 6 = \angle 5$ , 就得到反射光綫  $PA'$ 、 $QA'$

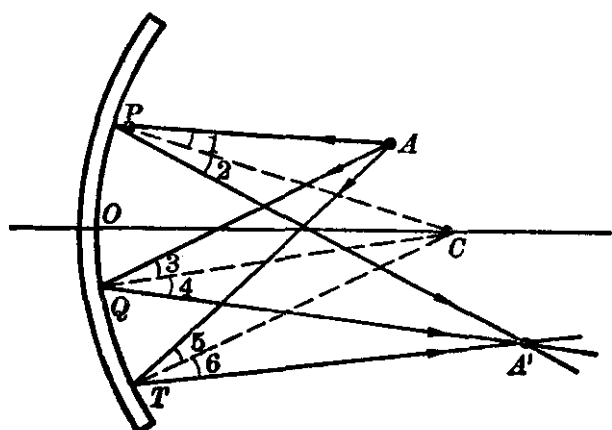


图 3-14

和  $TA'$ , 它們相交于  $A'$  点,  $A'$  点就是  $A$  点的实象; 在  $A'$  处如果放一个光屏, 就会有光綫会聚而成的亮点显现出来. 这里我們只用了三条光綫作图, 实际上从发光点  $A$  射到凹鏡上的光綫很多, 但实验証明它們总相交于一

点, 所以我們沒有必要把它們全都画出来.

如果放在凹鏡前面的不是一个光点, 而是一个具有一定大小的物体, 这时, 我們可以把物体看成是許多点的集合, 每一点可以按照上面作图的方法, 得出它的象点来, 这些象点組合起来, 就是物体的实象.

显然, 根据反射定律, 用量角器去求出物体上每一点的象是很麻煩的; 既然球面鏡成象的时候, 物体上每一点所成的象只有一点, 所以在作图的时候, 可以从物体上选几个有代表性的点, 由每一个这样的点上引两条光綫, 作出它們反射以后的交点, 則这些有代表性的点的象, 也就足以构成整个物体的象了.

既然作物体成象的光路图时用不着作出物体上每一点的象, 作物体上任一点的象时, 也用不着把从这一点发出的所有的光綫都画出来, 那么, 应当选择物体上哪些有代表性的点呢? 作任一点的象点时, 又应当选择哪些光綫比較方便呢?

因为物体的象是和物体相似的, 所以只要选择物体的几个端点就可以了, 得出这些端点的象, 就可以确定整个物体的象的位置和大小.

在作任一点成象的光路图时, 我們常常利用球面鏡反射的特点, 从下列三条特殊光綫中, 选择其中任意两条来作图, 这三条特

殊光綫是：

(1) 跟主軸平行的近軸入射光綫。它射到凹鏡上，反射以後經過焦點；射到凸鏡上，反射以後，反射光的延長綫經過凸鏡的虛焦點(根據焦點的定義)。

(2) 通過焦點的入射光綫(或它的延長綫)。它反射以後，反射光跟主軸是平行的(根據反射時光路的可逆性)。

(3) 通過球心的入射光綫(或它的延長綫)。它的反射光綫跟入射光綫重合(根據反射定律：這時反射角和入射角都等於零)。

圖 3·15 就是根據上面所說的方法作出的光路圖。蠟燭放在凹鏡的球心  $C$  以外的地方，選擇它的兩個端點 ( $A$  點和  $B$  點) 來作圖：從  $A$  點作一條光綫平行於主軸，反射以後，通過焦點  $F$ ；從  $A$  點作另一條光綫通過凹鏡的焦點  $F$ ，反射以後，跟主軸平行；

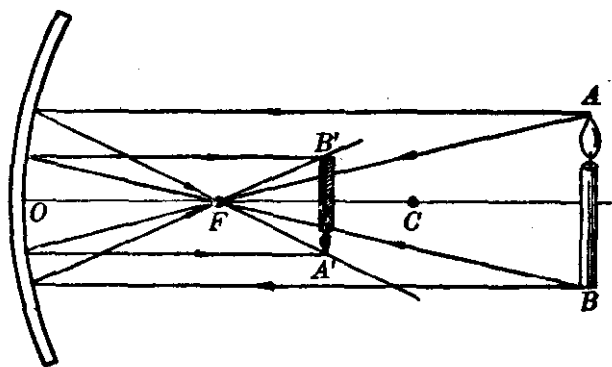


圖 3·15

這兩條反射光綫相交於  $A'$  點，這一點就是  $A$  點實象所在的位置。同樣從  $B$  點作平行於主軸和通過焦點  $F$  的入射光綫，它們經凹鏡反射以後，相交於  $B'$  點，這一點就是  $B$  點實象所在的位置。有了  $A'$  點和  $B'$  點就可以知道蠟燭所成象的位置、大小和性質。如從圖中可以看出， $A'$  點和  $B'$  點表明蠟燭所成的象是一個縮小的倒立的跟物體在鏡面同一側的實象。這個結果顯然跟前面“凹鏡成象”作圖法的一般探討中所得出的結論是一致的。

圖 3·16 和圖 3·17 是蠟燭立在凹鏡的主軸上成象的情況，這樣，作圖就更簡單一些，只要作出蠟燭頂端  $A$  點的象就夠了。根據凹鏡成實象的規律，物體直立在凹鏡的主軸上，成的象一定是倒立的主軸下面的，只要從蠟燭的頂端  $A$  引一條光綫平行於主軸，反射後通過焦點；引另一條光綫通過焦點，反射後跟主軸平行，這兩條

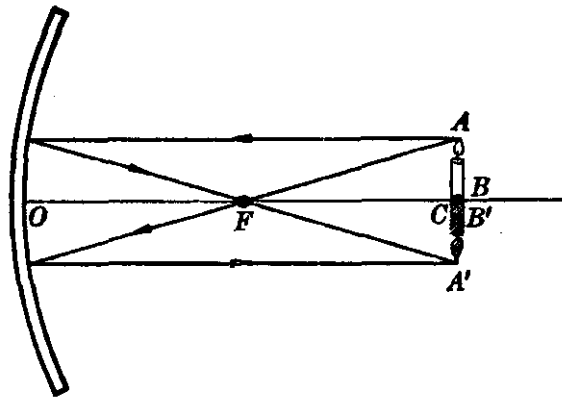


图 3-16

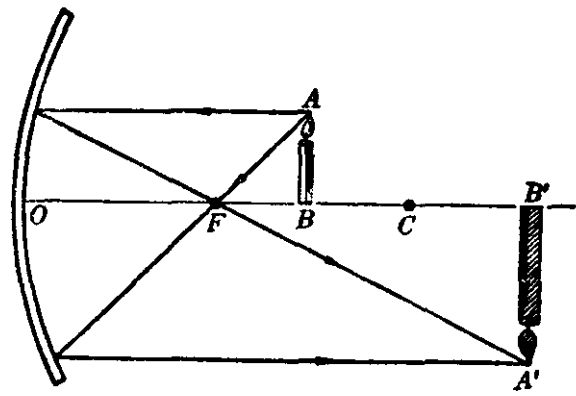


图 3-17

反射光线相交于  $A'$  点, 以  $A'$  为端点作蜡烛垂直于主轴的倒象  $A'B'$ , 这就是所求的蜡烛  $AB$  的倒立实象. 图 3-16 表示物体放在球心  $C$  上时, 成的倒立实象也在球心上, 象跟物体大小相同; 图 3-17 表示物体放在凹镜的球心  $C$  以内、焦点  $F$  以外的地方, 成的

倒立实象在球心外, 象比物体本身大.

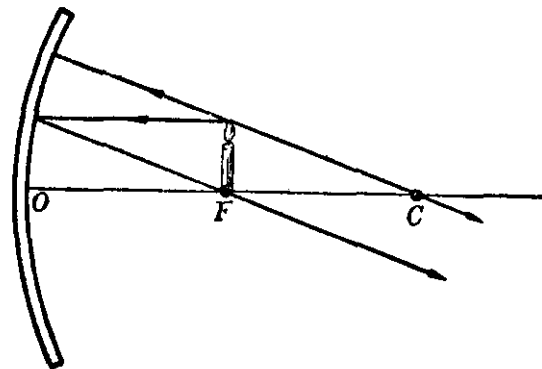


图 3-18

图 3-18 是蜡烛立在焦点上的情况, 从蜡烛的顶端作一条光线平行于主轴, 反射光通过焦点  $F$ , 作另一条沿着半径方向射到凹镜上的光线, 它的

反射光通过球心  $C$ , 跟入射光重合, 这两条反射光恰好互相平行, 永远不会相交, 所以物体的实象和虚象都不存在.

图 3-19 是蜡烛移到凹镜的焦点以内的情况, 从蜡烛的顶端  $A$  引一条平行于主轴的光线, 它反射以后通过焦点  $F$ , 从  $A$  点沿着半径方向引一条光线到镜面上, 反射以后和入射光线重合并通过  $C$  点. 从图中可以看出, 这两条反射光线是不相交的, 但是它们的延长线在镜面的另一侧相交于  $A'$  点, 这就是  $A$  点的虚象, 以  $A'$  为端点作蜡烛的直立在主轴上的象  $A'B'$ , 这就是蜡烛所成的正立的虚象.

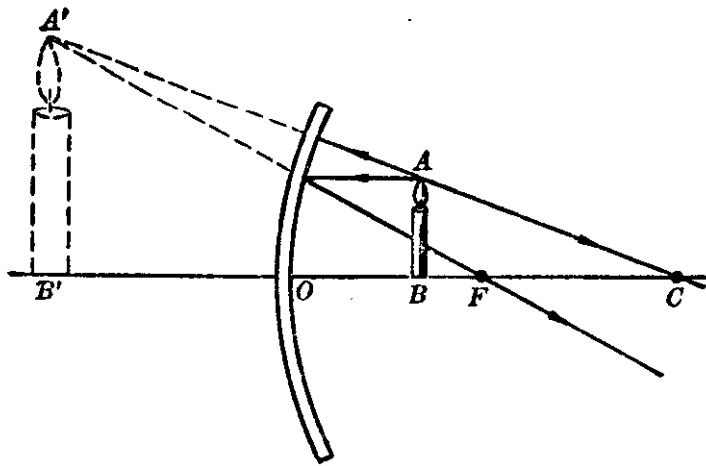


图 3-19

2. 凸鏡成象的作图 图 3-20 是蜡烛放在凸鏡前面成象的情况,

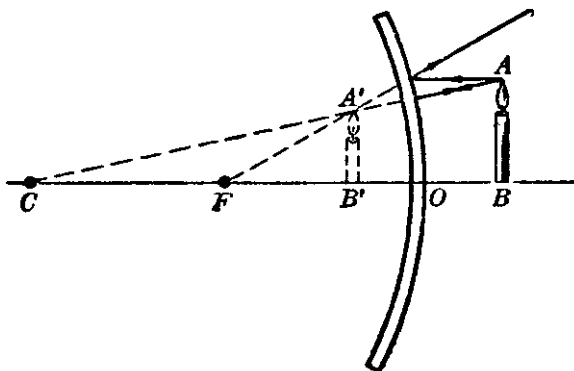


图 3-20

从蜡烛的頂端  $A$  引一条光綫平行于主軸, 反射以后, 它的延長綫通过凸鏡的焦点  $F$ , 从  $A$  点沿着半徑方向 (就是向着球心  $C$ ) 引另一条入射光綫, 反射光綫跟入射光綫重合, 这两条反射光綫

的延長綫在鏡面后相交于  $A'$  点, 則垂直于主軸的  $A'B'$  就是这时蜡烛所成的正立、縮小的虛象。

例 1. 有一发光点  $A$  (如图 3-21 所示), 已知  $A'$  是它由球面鏡所成的象, 試判断: 这个球面鏡是凹鏡还是凸鏡?  $A'$  是实象还是虛象? 鏡的位置应当在  $A$  和  $A'$  之間还是在  $A$  和  $A'$  同一側? 并通过作图求出球面鏡的頂点  $O$ 、球心  $C$  和焦点  $F$  的位置。



图 3-21

【解】 在这个問題中, 可以把发光点  $A$  看成是直立在主軸上的物体的端点, 那么,  $A'$  点就可以看成是这个物体的端点的象, 从

$A'$  点作主軸的垂綫也就是这个物体的象,显然,这个象是正立的,象比物体大. 从象是正立的这一点可判断象是虚象;从象比物体大这一点可以判断出这个球面鏡是凹鏡不是凸鏡.(只有凹鏡才能形成放大的虚象,凸鏡成的虚象总比物体小.) 根据凹鏡成象的特点可知,它形成的虚象总是跟物体分居在鏡面的兩側,所以鏡面的位置应当在  $A$  和  $A'$  之間.

在确定了象的性质、鏡的种类和鏡面大概的位置以后,我們用作图法来确定鏡面的頂点、球心和焦点的位置.

为了便于作图,可以先将凹鏡成虚象的光路图加以分析. 如图 3·22 所示,設凹鏡的

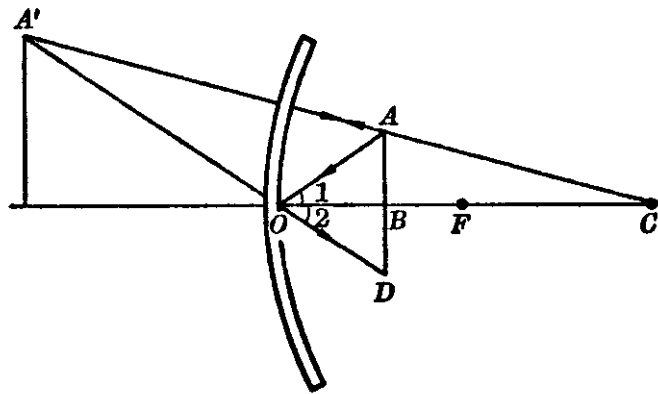


图 3·22

頂点在  $O$  点,介于  $A'$  和焦点  $F$  之間. 先从  $A$  点沿着凹鏡半徑的方向引一条入射光綫,它反射以后通过球心  $C$ ,即球心  $C$  为  $A'A$  的連綫与主軸相交的一点. 再从

$A$  点引另一条入射光綫  $AO$ ,它和主軸的夹角  $\angle 1$  就是入射角,过  $O$  点在主軸(法綫)的另一側作  $\angle 2 = \angle 1$ ,就得到  $AO$  的反射光綫,这两条反射光綫的延長綫就在鏡面后相交于  $A'$  点,它就是  $A$  点的虚象. 如果从  $A$  点作主軸的垂綫,与主軸相交于  $B$  点,并在延長綫上取  $BD = AB$ ,由于  $\triangle AOB \cong \triangle DOB$  可知  $OD$  就是  $AO$  的反射光綫,这样,  $A'$ 、 $O$  和  $D$  点也是在同一直綫上,即頂点  $O$  为  $A'D$  的連綫与主軸相交的一点. 分析后,就容易着手作图了. 作图的过程如下:

連接  $A'A$  跟主軸相交于一点,这一点就是凹鏡的球心  $C$ ; 自  $A$  点作主軸的垂綫,跟主軸相交于  $B$  点,延長  $AB$  到  $D$  使  $BD = AB$ ,連接  $A'D$ ,跟主軸相交于一点,这一点就是凹鏡的頂点  $O$ ; 取



$OC$  的中点  $F$ , 这一点就是凹鏡的焦点  $F$ . (因为  $f = \frac{R}{2}$ .)

### § 3.4 球面鏡成象的公式

除了用实验方法、作图方法来討論球面鏡成象的各种情况以外, 还可以通过数学公式来计算成象的性质、大小和位置等.

下面先推导出凹鏡和凸鏡的成象公式, 再討論它們的计算方法和具体的应用.

图 3.23 是物体  $AB$  在凹鏡前成实象的情况. 用  $u$  表示物体  $AB$  到顶点  $O$  的距离(简称物距), 用  $v$  表示物体的象  $A'B'$  到顶点  $O$  的距离(简称象距),

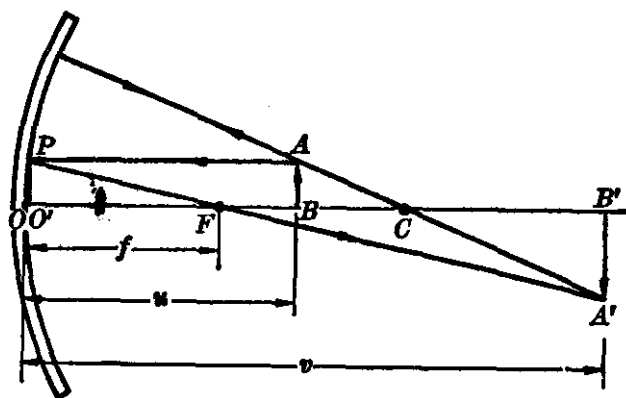


图 3.23

用  $f$  表示焦点  $F$  到顶点  $O$  的距离(简称焦距).

在图 3.23 中,  $\because \triangle ABC \sim \triangle A'B'C, \triangle PO'F \sim \triangle A'B'F$ ;

$$\therefore \frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C}, \quad \frac{PO'}{A'B'} = \frac{O'F}{B'F};$$

又  $\because AB = PO', \quad O'F \approx OF;$

$$\therefore \frac{BC}{B'C} = \frac{O'F}{B'F} \approx \frac{OF}{B'F}.$$

用符号  $u, v, f$  代入得

$$BC = 2f - u,$$

$$B'C = v - 2f,$$

$$OF = f,$$

$$B'F = v - f;$$

即得

$$\frac{2f - u}{v - 2f} = \frac{f}{v - f},$$

化簡后

$$vf + uf = uv,$$

用  $uvf$  除等式两边得到公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

如果是物体在凹鏡中成虚象,这时情况如图 3·24 所示.

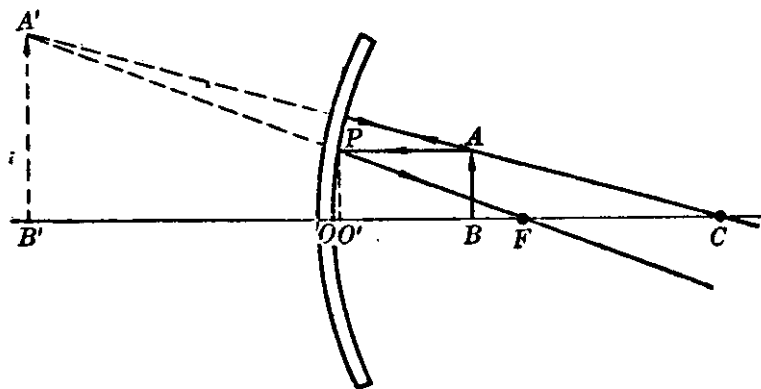


图 3·24

$$\because \triangle PO'F \sim \triangle A'B'F, \quad \triangle ABC \sim \triangle A'B'C;$$

$$\therefore \frac{PO'}{A'B'} = \frac{O'F}{B'F}, \quad \frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C};$$

又  $\because AB = PO', \quad O'F \approx OF,$

$$\therefore \frac{OF}{B'F} = \frac{BC}{B'C}.$$

用符号  $u$ 、 $v$ 、 $f$  代入得  $OF = f,$

$$B'F = v + f,$$

$$BC = 2f - u,$$

$$B'C = v + 2f;$$

即得  $\frac{f}{v+f} = \frac{2f-u}{v+2f},$

化簡后  $fv - fu = uv,$

用  $uvf$  除等式两边得

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (2)$$

如果是物体在凸鏡中成象(如图 3·25 所示),同样有

$$\triangle ABC \sim \triangle A'B'C \text{ 和 } \triangle PO'F \sim \triangle A'B'F;$$

$$\therefore \frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C}, \quad \frac{PO'}{A'B'} = \frac{O'F}{B'F};$$

$$\begin{aligned} \therefore AB &= PO', \\ O'F &\approx OF; \\ \therefore \frac{BC}{B'C} &= \frac{OF}{B'F}. \end{aligned}$$

同样用符号  $u$ 、 $v$ 、 $f$  代入上式得

$$\begin{aligned} BC &= u + 2f, \\ B'C &= 2f - v, \end{aligned}$$

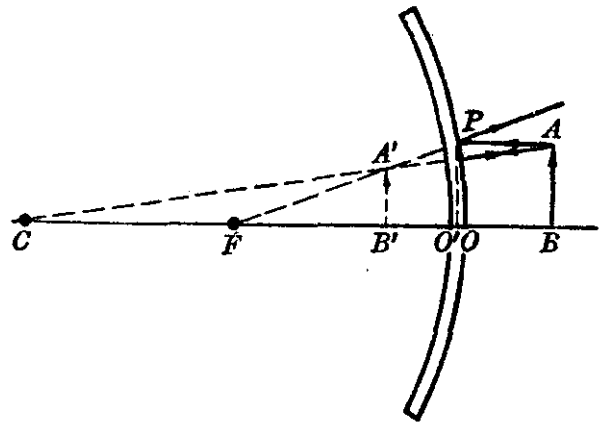


图 3-25

$$OF = f,$$

$$B'F = f - v;$$

即得

$$\frac{u + 2f}{2f - v} = \frac{f}{f - v},$$

化简后得

$$fv - fu = -uv,$$

用  $uvf$  除等式两边得

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = -\frac{1}{f}. \quad (3)$$

現在我們把物体在球面鏡中成象的这几种情况加以比較，以便得出一个統一的公式。如果統一地把成实象时的象距  $v$  看成正值，成虚象时的象距  $v$  看成是負值，那么，在凹鏡成虚象的公式(2)中以  $v$  代替  $-v$ ，得出的結果便与(1)式相同；在凸鏡成虚象的情况下，由于凸鏡的焦距是虚焦距，虚焦距也看成是負值，在(3)式中分別以  $f$  代替  $-f$ ， $v$  代替  $-v$ ，那么，所得出的結果也和(1)式相同。即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

所以我們把这个公式看成是球面鏡成象的普遍公式，对于凹鏡來說， $f$  是正值，对于凸鏡來說， $f$  是負值；成实象时， $v$  是正值，成虚象时， $v$  是負值，这里  $u$  都是正值。

根据这个成象公式，只要知道物距  $u$ 、焦距  $f$ ，就可以求出象距  $v$  来，从而知道象的位置和性质。（ $v$  是正值的时候，說明象是实

象； $v$  是負值的時候，說明象是虛象。）根據上面所得出的成象公式，物距  $u$ 、象距  $v$  和焦距  $f$  這三個量中，只要知道其中任意兩個量，就可以求出第三個量來。

**例 2.** 有一個凹鏡，半徑是 16 厘米，物體放在凹鏡前 20 厘米的地方，求所成象的性質和位置。

**【解】** 根據題意，已知半徑  $R$ ，也就間接知道了凹鏡的焦距  $f$ （因為焦距是半徑的一半），又知物距  $u$ ，於是可從成象公式中算出  $v$  來，從而知道象的性質和位置。

已知：  $u=20$  厘米， $R=16$  厘米，

則  $f = \frac{R}{2} = \frac{16}{2} = 8$  厘米；

代入公式  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ，

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{f} - \frac{1}{u} = \frac{1}{8} - \frac{1}{20} = \frac{3}{40}$$

$$v = 13.3 \text{ 厘米。}$$

從計算所得的結果知道：象的位置是在距離凹鏡頂點 13.3 厘米的地方；象距  $v$  是正值，說明象是實象，所以它一定是倒立的，和物體同在鏡面的一側。從已知條件  $u > R$  來看，這個結果也是合理的。

**例 3.** 有一個物體放在離開球面鏡的頂點  $R/4$  的地方， $R$  是球面鏡的半徑，這時在鏡面的另一側離開頂點 10 厘米的地方，成一正立、縮小的象，問這個球面鏡是凸鏡還是凹鏡？為什麼？這個球面鏡的焦距又是多大？

**【解】** 根據題意，已知物距  $u$  和象距  $v$ ，要求出  $f$  和判斷鏡是凸鏡還是凹鏡。由於題意沒有直接說明象是實象還是虛象，所以不能直接看出象距  $v$  是正值還是負值；由於不知道球面鏡是凸鏡還是凹鏡，所以也就不知道焦距  $f$  的正負。這樣，直接代入成象公式中去計算是有困難的，所以在具體計算以前，應該根據題意判斷

出象的性质和鏡的种类,然后再計算焦距.

因为物体离开頂点的距离是  $R/4$ , 而焦点离开球面鏡頂点的距离总是  $R/2$ , 所以知道物体是放在球面鏡的焦点以內的, 同时根据成的象是正立的, 可以判断出这个象是虚象; 又因为这个象是縮小的虚象, 可以断定这个球面鏡是凸鏡而不是凹鏡. (凹鏡所成的虚象总比原物大, 只有凸鏡所成的虚象才比原物小.)

$$\text{已知: } u = \frac{R}{4}, \quad v = -10 \text{ 厘米}, \quad f = -\frac{R}{2};$$

$$\text{代入成象公式} \quad \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f},$$

$$\text{即} \quad \frac{1}{\frac{R}{4}} + \frac{1}{-10} = \frac{1}{-\frac{R}{2}},$$

$$\frac{4}{R} - \frac{1}{10} = -\frac{2}{R},$$

$$\frac{6}{R} = \frac{1}{10},$$

$$R = 60;$$

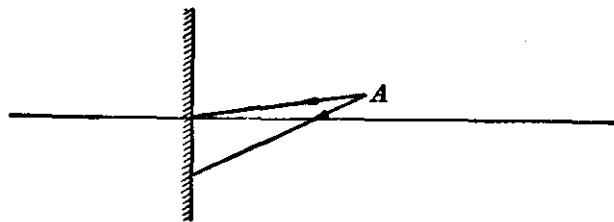
$$f = \frac{-R}{2} = \frac{-60}{2} = -30 \text{ 厘米}.$$

从計算的結果知道, 这个凸透鏡的焦距是 30 厘米.

### 习 題 3·4

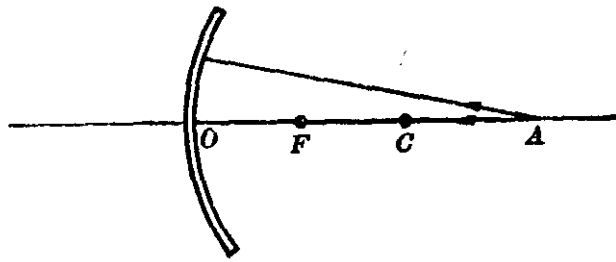
1. 用直尺和量角器, 完成下列各光路图:

(1) 求发光点  $A$  在平面鏡中所成的象(附图(a)).



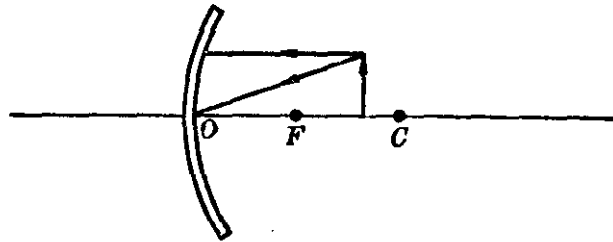
(a)

(2) 求凹鏡主軸上发光点  $A$  的象(附图(b)).



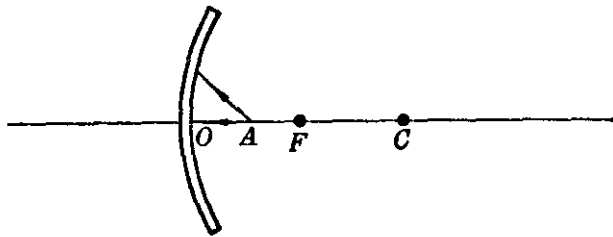
(b)

(3) 求凹鏡所成的物体的象(附图(c)).



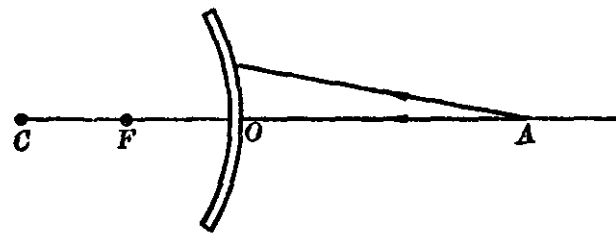
(c)

(4) 求凹鏡主軸上(焦点以內)发光点 A 的象(附图(d)).



(d)

(5) 求凸鏡主軸上发光点 A 的象(附图(e)).

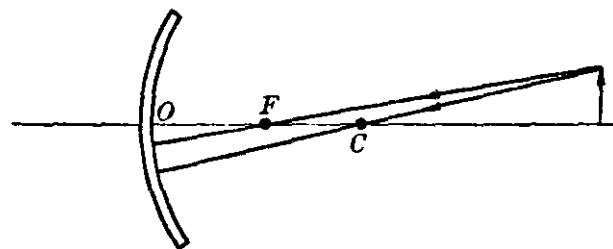


(e)

(第1題)

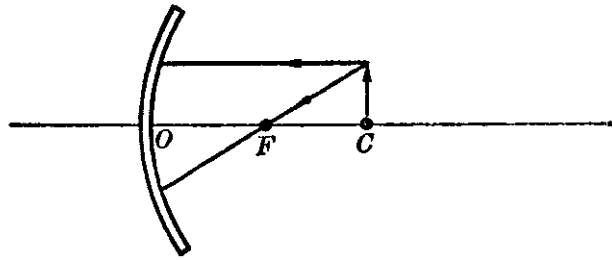
2. 試用直尺完成下列各光路图:

(1) 求凹鏡所成物体的象(附图(a)).



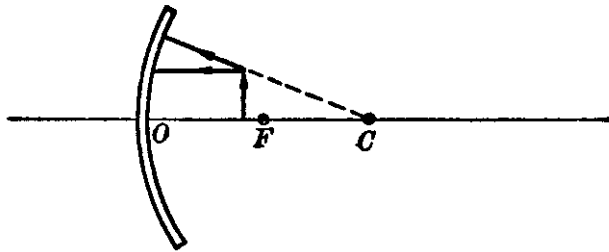
(a)

(2) 求凹鏡所成物体的象(附图(b)).



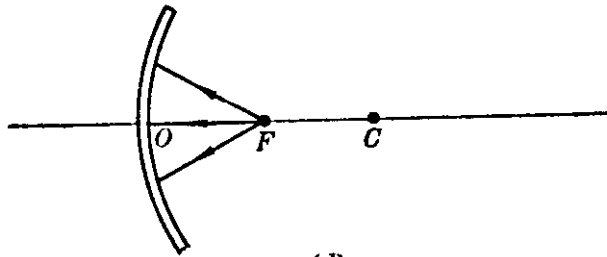
(b)

(3) 求凹鏡所成物体的象(附图(c)).



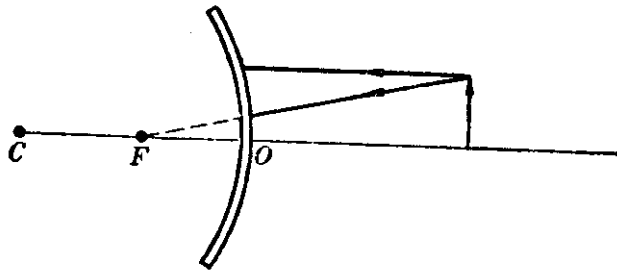
(c)

(4) 从焦点  $F$  发出的光束, 經凹鏡反射后的光路(附图(d)).



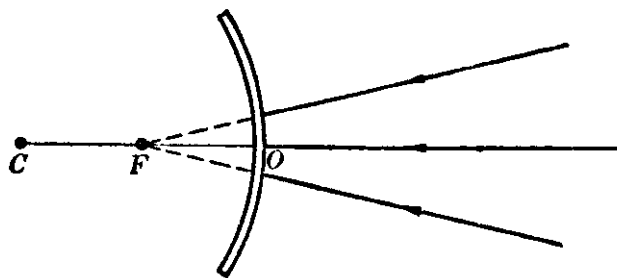
(d)

(5) 求凸鏡所成物体的象(附图(e)).



(e)

(6) 会聚于焦点  $F$  的会聚光束經凸鏡反射以后的光路(附图(f)).



(f)

(第2題)



3. 附图中  $A$  是一个发光点,  $A'$  是  $A$  經球面鏡反射以后所成的象, 横綫是这个球面鏡的主軸, 試判断这个球面鏡是凹鏡还是凸鏡? 为什么? 并通过作图求出鏡的頂点、球心和焦点的位置.

$A$

$A'$

(第3題)

4. 人站在平面鏡的前面, 如果人向着鏡面移近 1 米, 这时候人跟平面鏡中所成的象的距离将比原来近多少? 为什么?

5. 在牆上挂着一个 1 米高的平面鏡, 人站在离平面鏡 2 米远的地方, 如果人的头部位置保持不动, 那么, 他在鏡子里能够看見自己后面离鏡子 4 米远的牆壁上多高一段范围?

6. 有一个凹鏡半徑是 50 厘米, 平行光束沿着与主軸平行的方向射到这个凹鏡上来, 問这束光綫反射以后相交在距离鏡面多远的地方?

7. 有一个凹鏡半徑是 40 厘米, 物体放在距离鏡面 30 厘米的地方, 問象应当成在什么位置? 象是实象还是虚象? 是正立的象还是倒立的象?

8. 把物体分別放在凹鏡的  $2f$  和  $3f$  的地方, 象应当各成在什么位置?

9. 凸鏡的焦距也可以用下面的方法来測定: 以寬度为  $a$  的平行光束, 射到凸鏡上, 經反射以后变成为发散光束, 又投射到距离凸鏡为  $l$  的牆上, 这时光束的寬度为  $b$ , 試証明:

$$f = \frac{al}{b-a}.$$

10. 一个物体放在离开球面鏡 20 厘米远的地方, 这时在鏡面的另一側离开頂点 10 厘米的地方, 形成一个正立的、縮小的虚象, 試判断这个球面鏡是凸鏡还是凹鏡? 焦距是多大? 并作图驗証.

11. 一个物体放在球面鏡前面 20 厘米的地方, 所成的象跟物体在鏡面的同一側, 距离鏡面 40 厘米, 試判断这个球面鏡是凸鏡还是凹鏡? 焦距是多大? 并作图驗証. 如果所成的象是在鏡面的另一側, 距离鏡面也是 40 厘米, 那么这个球面鏡是凸鏡还是凹鏡? 焦距又是多大? 作图驗証并且和前面的光路图相比較.

12. 物体放在距离凹鏡 10 厘米远的地方, 已知球心在物体以外 40 厘米

远的地方，試用作图法求出象的位置，并用計算的結果来驗証。

### § 3.5 平行透明板. 棱鏡

前面討論了光在各种鏡面上反射成象的种种情况，接下来我們再来研究光穿过透明体折射的情况。光从空气射入一种透明体，或者从透明体里射出来，一般都要发生折射，随着透明体表面形状的不同，光穿过透明体的时候，光路改变的情况也不同，掌握这方面的知識和規律，就能够利用各种表面形状不同的透明体（例如：平行透明板、棱鏡和透鏡等）来控制光路。

**1. 平行透明板** 两个表面是平行平面的透明体叫做平行透明板，如平面玻璃、玻璃磚等都是。光从平行透明板的一个側面斜射进来时，发生一次折射（见图

3.26），入射角为  $a_1$ ，折射角为  $r_1$ ，

設透明体的折射率为  $n$ ，則有  $\frac{\sin a_1}{\sin r_1}$

$=n$ ；从透明板射出来的时候，又发生一次折射，入射角为  $a_2$ ，折射角为

$r_2$ ，并且有  $\frac{\sin a_2}{\sin r_2} = \frac{1}{n}$ 。因为折射面

$A_1B_1$  和  $A_2B_2$  是平行的，所以通过

入射点  $O_1$  和  $O_2$  的法綫  $O_1N_1$  和  $O_2N_2$  也是互相平行的，所以  $\angle r_1 = \angle a_2$ 。

又

$$\therefore \frac{\sin a_1}{\sin r_1} = n,$$

$$\frac{\sin a_2}{\sin r_2} = \frac{1}{n} = \frac{\sin r_1}{\sin a_1},$$

$$\therefore \angle r_2 = \angle a_1,$$

即

$$S_2O_2 \parallel S_1O_1.$$

这說明光綫穿过平行透明板的时候，方向是保持不变的，只是向側面平移了一段距离  $l$ ，透明板越薄，平移的距离也越小，平时我們隔

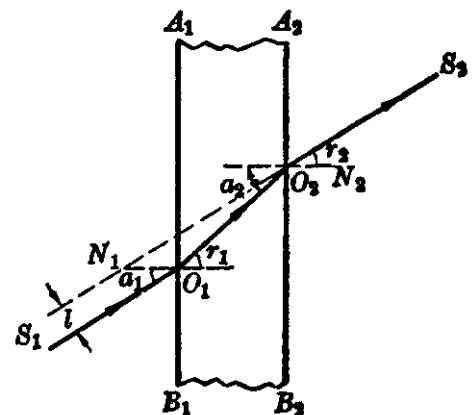


图 3.26 平行透明板

着玻璃窗看外面的物体,并不感到物体的位置有显著的移动,就是这个緣故。如果隔着一块厚玻璃看书上的字,就会发现书上的字不是处在真实的位置上,和玻璃板外面的字比較,压在玻璃板下面的那些字有明显的側向移动。

**2. 棱鏡** 如果透明体的两个折射面互不平行,那么,光綫通过它时方向会不会改变呢?接下去我們就要討論另一种透明体——玻璃棱鏡了。它是玻璃做成的正三棱柱体。图 3·27 就是光綫通过棱鏡时的情形。

光綫从棱鏡的一个側面射入玻璃,发生一次折射,再从另一个側面射出来,又发生一次折射。棱鏡发生折射的两个側面(如图

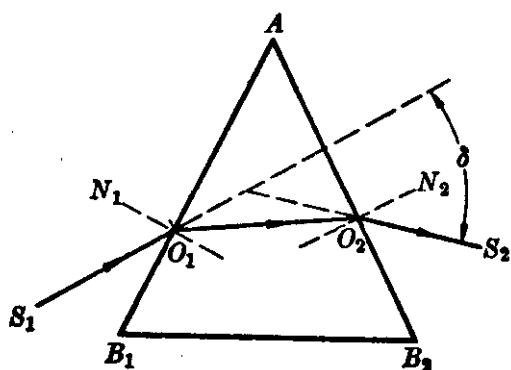


图 3·27

3·27 中  $AB_1$  和  $AB_2$ ) 称做棱鏡的折射面。两折射面的夹角(如图中的  $\angle A$ ) 称做頂角,或称折射頂角。頂角所对的面,叫做棱鏡的底面。棱鏡的三个側面,在不同的情况下,可以利用其中任意两个側面作为折射面,所以棱鏡的

頂角和底面也不是固定不变的,要看具体使用时的情况决定。

如图 3·27 所示,光綫  $S_1O_1$  从一个側面由空气射入玻璃时,由于是从光疏媒质(空气)射入光密媒质(玻璃),故折射角比入射角小,折射光綫向法綫  $ON_1$  靠攏(也就是偏向底面);当这一光綫( $O_1O_2$ )通过折射面  $AB_2$  时,从玻璃射出到空气里来,这时折射角就比入射角大,折射光綫  $O_2S_2$  将离开法綫  $O_2N_2$  (从而再一次向底面偏折);光綫通过棱鏡的时候,由于两次向底面偏折的結果,方向便发生了明显的改变。从图中可以看出:光綫  $O_2S_2$  从棱鏡里射出来的方向,已經不是原来入射光綫  $S_1O_1$  的方向了,它們之間形成了一个夹角  $\delta$ , 这个角称做偏向角。偏向角越大,說明光綫通过棱鏡时方向改变得越大。

图 3·28 所示的是,当光线射入平行透明板 and 不同顶角的棱镜时光路改变的情况: 光线穿过平行透明板的时候, 方向是保持不变的; 光线穿过棱镜的时候, 总是向底边偏折, 并依入射角和顶角大小的不同, 偏向角的大小也不相同。

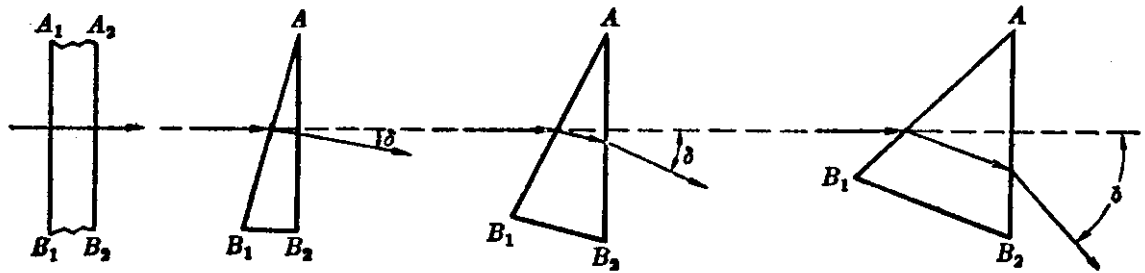


图 3·28

**3. 棱镜成象** 光线通过棱镜的时候, 要发生折射现象, 从物体射出的光线, 通过棱镜也会成象; 图 3·29 是隔着棱镜观看物体的情况, 从物体(蜡烛)的一点 A 射出的光线, 经过棱镜发生的两次折射都偏向底面, 这些光线进入眼睛里, 好象是从它们延长线的交点 A' 发出来的一样, A' 点就是 A 点虚象所在的位置, 用同样

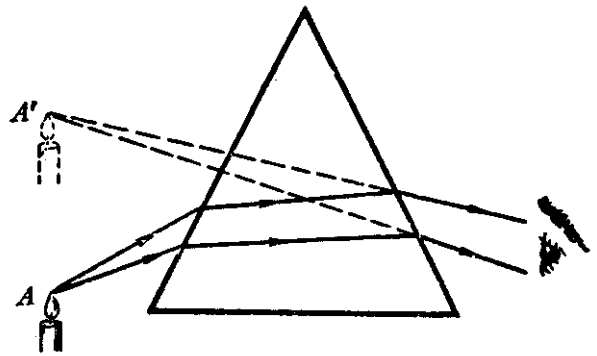


图 3·29

方法可以得出整个蜡烛的象. 从图中还可以看出, 物体通过棱镜所

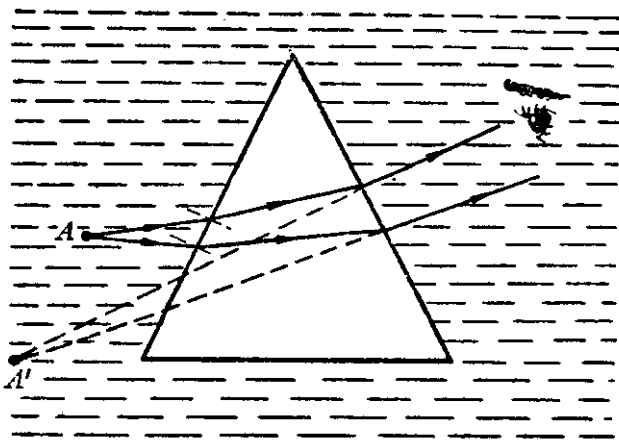


图 3·30

成的虚象是向着顶角偏移的, 这是由于光线通过棱镜的时候向底面偏折的结果。

以上是讨论光线从空气(光疏媒质)射入玻璃棱镜(光密媒质)的情况, 如果光线是从光密媒质射入光疏媒质制成的棱镜里, 情况就恰好相

反。例如：将一个空心的薄玻璃制成的棱镜（里面是空气）放在水里，这时候光线从水射入空心棱镜（空气），将会向顶角偏折，隔着空心棱镜（在水里）看物体，物体的虚象偏向棱镜的底面（如图 3·30 所示）。

平行透明板和棱镜的应用也很普遍，象门窗上用平面玻璃、仪器仪表上的保护玻璃等都是平行透明板应用的例子；棱镜可用来

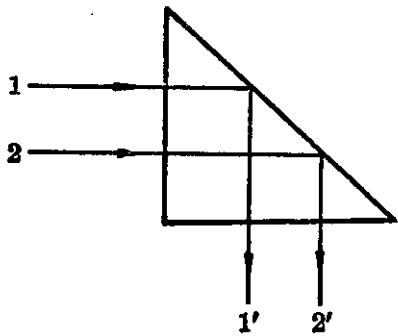


图 3·31

改变光路，图 3·31 所示的是一种全反射棱镜，光线从棱镜的一个折射面正入射（入射角是零度），当光线投射到斜表面上的时候，入射角正好是  $45^\circ$ ，大于玻璃的临界角（约  $42^\circ$ ），所以就发生全反射，最后从另一个折射面垂直地射出去，使光路转过了  $90^\circ$ ，这种棱镜又称回轉棱镜。利用两个这样的回轉棱镜，可以组成一个潜望镜（如图 3·32 所示）。有了潜望镜，潜水艇可以在水下观察和了望水面上的情况，就用不

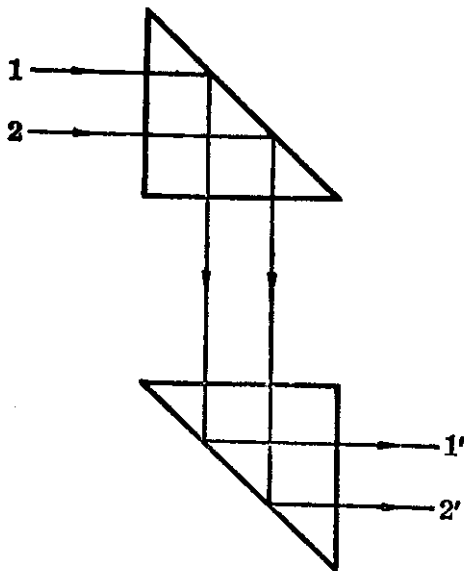


图 3·32

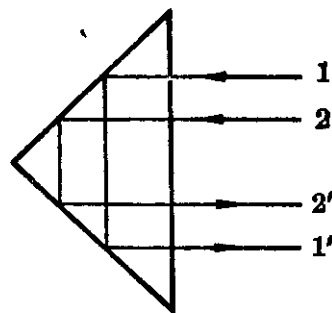


图 3·33

着把潜水艇升到水面上来。图 3·33 是另一种全反射棱镜，利用这种棱镜的全反射，可以把物体的象倒转过来，所以这种棱镜又叫做倒轉棱镜。利用棱镜还可以组成分光镜，这在后面要仔细讲到的。

## § 3.6 透 鏡

前面討論了光綫通过平行透明板和棱鏡这两种透明体的情况,这两种透明体的折射面都是平面,如果,透明体的折射面不是平面而是球面,或者一面是球面另一面是平面,那么,光綫經過它的时候,情况又会怎样呢?下面就分几种情况来加以討論.

**1. 透鏡** 折射面是球面,或者一面是球面,另一面是平面的透明体,称做**透鏡**. 中央比边缘厚的透鏡,称做**凸透鏡**. 中央比边缘薄的透鏡,称做**凹透鏡**.

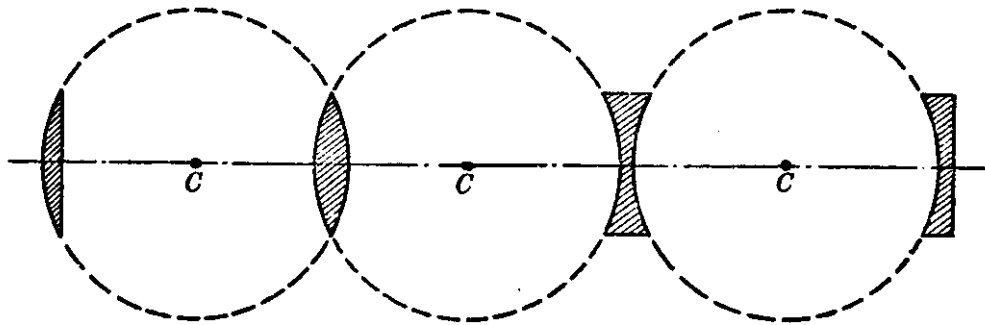


图 3.34

凸透鏡或凹透鏡的两个球面的半径,可以相同,也可以不相同. 图 3.34 和图 3.35 所示的就是几种不同形状的凸透鏡和凹透鏡.

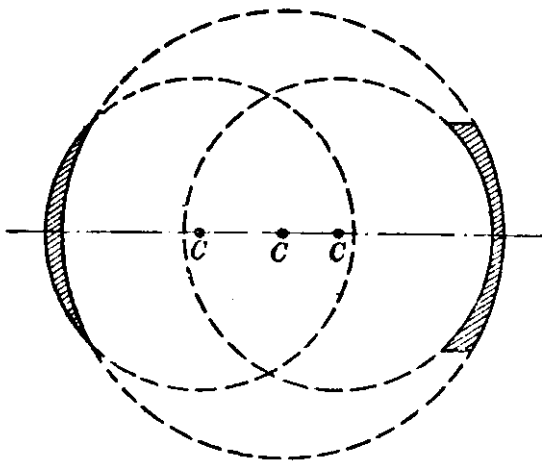


图 3.35

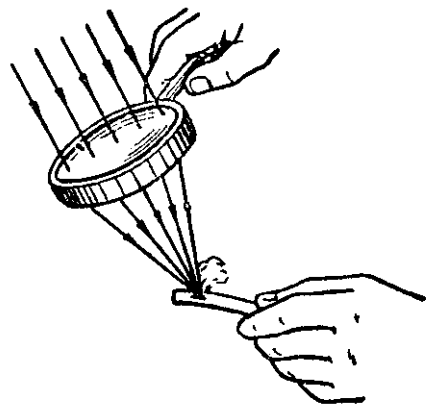


图 3.36

实验的结果表明：平行光投射在凸透镜上，经过折射以后，光线就会聚在一点上。如图 3·36 所示，让一个凸透镜迎着太阳光，光线就会会聚起来，在光线会聚的地方放一个小纸条，过一些时候，纸条就会被烧焦，如果太阳光很强，或经历的时间足够长，纸条甚至会烧起来。

平行光经过凹透镜折射以后，光线就会向外发散，成为发散光束；所以，我们又常常把凸透镜称做**会聚透镜**，而把凹透镜称做**发散透镜**。

如图 3·37 所示，凸透镜很象两个底对着底的棱镜的组合，平行光通过这一对棱镜的时候，对于每一个棱来说，都要使折射光线向它的底面偏折，所以最后把平行光会聚起来；凹透镜很象两个顶对着顶的棱镜的组合，平行光通过这样一对棱镜的时候，同样也要向棱镜的底面偏折，由于它们是顶对着顶组合起来的，所以折射以后，平行光束就向外散开，成为发散光束了。

一个凸透镜能够把平行光束会聚于一点(或一个很小的区域)，而一对底对着底的棱镜，却只能把光会聚起来，而不能使会聚在一点上；同样，一个凹透镜能够把平行光束发散开来，好象光线是从

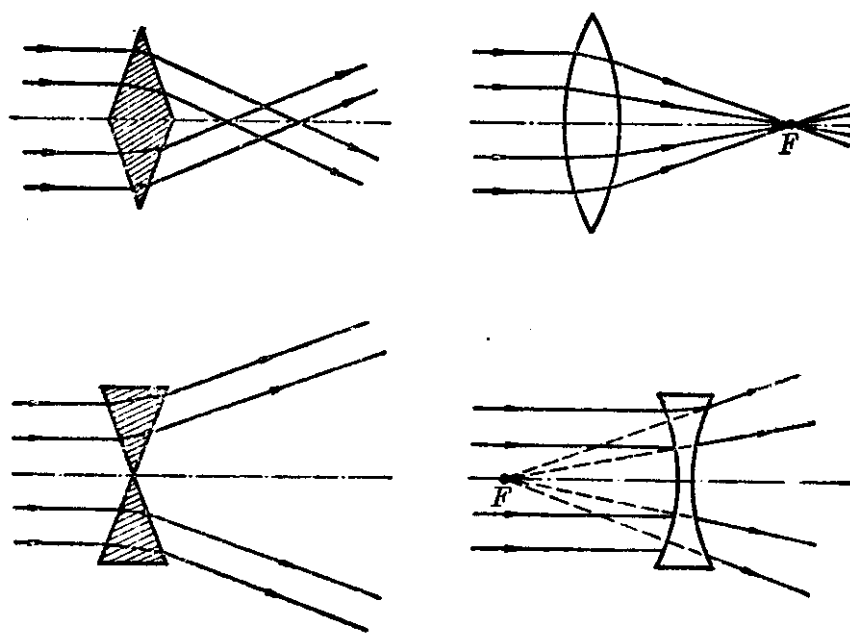


图 3·37



某一点发射出来的一样,而一对頂对着頂的稜鏡,却不能做到这一点. 由于凸透鏡和凹透鏡有着良好的改变光路的性能,从物体射出的光綫,經過透鏡的折射以后,在不同的情况下,可以形成不同性质、位置、大小的象,所以它們是光学仪器中較重要的器件.

仔細分析起来,可以认为一个透鏡是頂角大小不同的許多被截去了頂的稜鏡的組合. 如图 3·38 所示,組成凸透鏡的許多稜鏡是底面朝着透鏡的中央排列的,組成凹透鏡的許多稜鏡是底面朝着透鏡的边緣排列的. 它們共同的特点是:越靠近透鏡的中央,組成透鏡之稜鏡的頂角也越小,因而光綫穿过它的时候,偏向角  $\delta$  也越小;透鏡正中央那一部分,頂角等于零,可以看成是一小块平行玻璃板,光綫通过它时,方向不会改变,只会发生側移;如果透鏡是很薄的話,那么,这种側移也是很小的. 平行光束射到凸透鏡上,折射以后,就会使光束会聚于一点或一个很小的区域里;平行光束射到凹透鏡上,折射以后,就会发散开来,好象是从某一点发出来的一样.

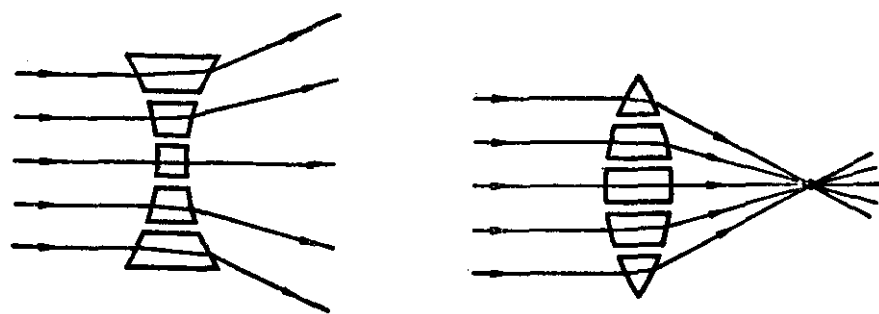


图 3·38

一个透鏡中央部分的厚度(就是透鏡两球面上中心点之間的距离,如图 3·39 中的  $O_1$  和  $O_2$ .) 如果比两个球面半徑小很多,这样的透鏡就叫做薄透鏡. 我們以后所討論的都是薄透鏡. 薄透鏡两球面的中心点离得很近,故可以近似地看成是重合成为一点  $O$ , 凡是通过  $O$  点的光綫,都相当于通过平行透明板一样,不改变原来的方向,且所发生的側向位移也可以忽略不計,这一点  $O$  称做透鏡的**光心**,如图 3·39 所示. 任何通过光心的直綫,称做透鏡的**光軸**.

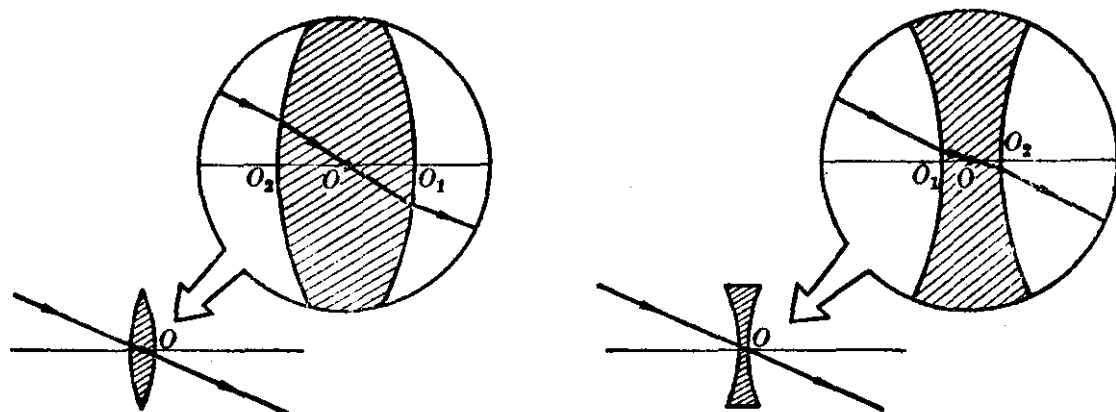


图 3-39

通过球心  $C_1C_2$  的光轴,称做透镜的**主光轴**(简称**主轴**),其他的光轴都称做为**副光轴**(简称**副轴**)。

严格地说,光心的位置是由透镜两个折射面的曲率半径来决定的,而非总跟透镜的中心相重合。一般

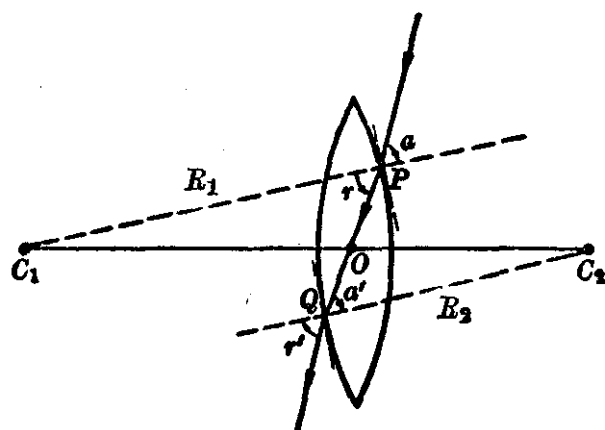


图 3-40

求单个透镜光心的方法是这样的: 设透镜两个折射面的球半径各为  $R_1$  和  $R_2$ ,  $C_1$  和  $C_2$  是这两个球面的球心, 从球心  $C_1$  引任意半径  $C_1P$ , 再从  $C_2$  引另一半径  $C_2Q$ , 使  $C_2Q \parallel C_1P$ , 连接  $P$ 、 $Q$  和  $C_1$ 、 $C_2$ , 它们相交于一点, 这一点就是透镜的光心  $O$  (见图

3-40)。可以证明,光线通过这一  $O$  点时,方向总是保持不变的。设有一条入射光线,射到  $P$  点上,它入射的方向恰好满足:  $\frac{\sin a}{\sin r} = n$ 。其中  $n$  为透镜的折射率,  $\angle r$  就是  $\angle C_1PO$ ,  $C_1P$  就是过入射点  $P$  的法线,由于  $C_2Q \parallel C_1P$ , 所以有:  $\angle a' = \angle r$ ,  $\angle a'$  是光线从  $Q$  点射出玻璃进入空气时的入射角,根据折射定律和光路的可逆性,得  $\frac{\sin a'}{\sin r'} = \frac{1}{n} = \frac{\sin r}{\sin a}$ 。  $\therefore \angle a' = \angle r, \therefore \angle r' = \angle a$ , 即光线从透镜射出去的方向,跟入射光的方向平行,也就是保持方向不变。

从图中可以看出: 由于  $\triangle C_1PO \sim \triangle C_2QO$  ( $\because C_1P \parallel C_2Q, \angle r = \angle a', \angle PC_1O = \angle QC_2O$ ), 所以有  $OC_1:OC_2 = R_1:R_2$ 。它的意义是: 透镜光心的位置离开透镜两折射面的球心距离之比,等于两折射面的半径之比。如果  $R_1 = R_2$ ,

則有  $OC_1 = OC_2$ ，也就是說，只有當透鏡兩折射面的曲率半徑相等時，透鏡的光心才跟透鏡的中心相重合。

**2. 透鏡的焦點、焦距和焦平面** 一束平行於主軸的近軸光綫射到凸透鏡上，經過折射以後，就會聚在主軸的某一點  $F$  上，這一點稱做凸透鏡的焦點。從焦點到光心的距離，稱做透鏡的焦距，表示焦距的符號是  $f$ 。如果有一束平行於主軸的近軸光綫射到凹透鏡上，經過凹透鏡折射以後，就向外發散，好像它是從主軸上的某一點發散出來的一樣，這一點稱做凹透鏡的焦點。它離開光心的距離，也就是凹透鏡的焦距。凹透鏡的焦點是發散光束延長綫的交點，不是光綫實際會聚而成的，所以是虛焦點；凸透鏡的焦點，是平行光束經過凸透鏡折射以後，實際會聚而成的，所以是實焦點。習慣上把實焦點離開光心的距離（焦距）算作是正值；虛焦點離開光心的距離（虛焦距）算作是負值。

透鏡的焦距，對於透鏡所在媒質（例如空氣）來說，是一個定值，它是由組成透鏡的材料（例如玻璃）對於透鏡所在媒質的相對折射率和透鏡兩個折射面的曲率半徑所共同決定的<sup>①</sup>。

任何一個透鏡，它的兩側都各有一個焦點，只要透鏡兩側面所在的媒質相同，（一般的情況下都是相同的，例如透鏡的兩側面都是空氣。）不管透鏡兩個折射面的曲率半徑是否相等，兩個焦點離開光心的距離（焦距）總是相等的。

主軸上的焦點，稱做透鏡的**主焦點**。一束平行光如果沿着凸透鏡的副軸方向射來，折射以後，就會會聚在副軸的某一點上；如

① 透鏡的焦距可以用下述公式來計算：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

式中  $n$  是光從媒質射入透鏡的折射率，如果透鏡是在空氣中， $n$  也就是透鏡的絕對折射率。 $R_1$  和  $R_2$  是透鏡兩個折射面的曲率半徑。如果是凸面， $R$  就取正值；如果是凹面， $R$  就取負值。應當注意，對於透鏡來說， $f \neq \frac{R}{2}$ ，即焦點並不在半徑的中點上，這一點跟球面鏡的情況是不相同的，不要混淆起來。

果是射到凹透鏡上，折射以后，它們延長綫也相交于副軸的某一點

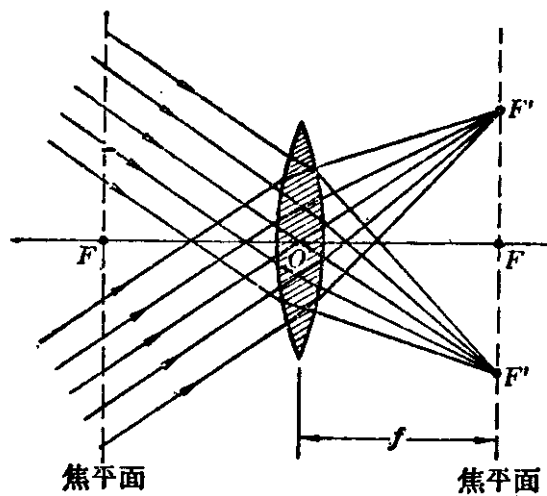


图 3·41

上，這一點就稱做透鏡的副焦點。透鏡的副軸可以有任意多根，所以透鏡的副焦點也有無數多個，在主焦點周圍不太大的範圍內，這些副焦點和主焦點恰好在同一個垂直于主軸的平面中，這個平面稱做透鏡的焦平面。图 3·41 表明：一個凸透鏡在它的兩側各存在着一

個焦平面。同樣，在凹透鏡的兩側，也各有一個主焦點，和通過主焦點并垂直于主軸的焦平面。

**3. 透鏡的焦距** 凸透鏡（會聚透鏡）有使光綫會聚的作用，凹透鏡（發散透鏡）有使光綫發散的作用。在图 3·42 上比較了光綫通過兩組焦距不同的凸透鏡時發生偏折的情況。上面一組透鏡焦距比較長，下面一組透鏡焦距比較短；同樣的光束，經過焦距比較短的凸透鏡時，發生偏折和會聚的程度比較顯著。图 3·43 是兩組焦距不同的凹透鏡，下面一組凹透鏡的焦距比上面一組透鏡的焦

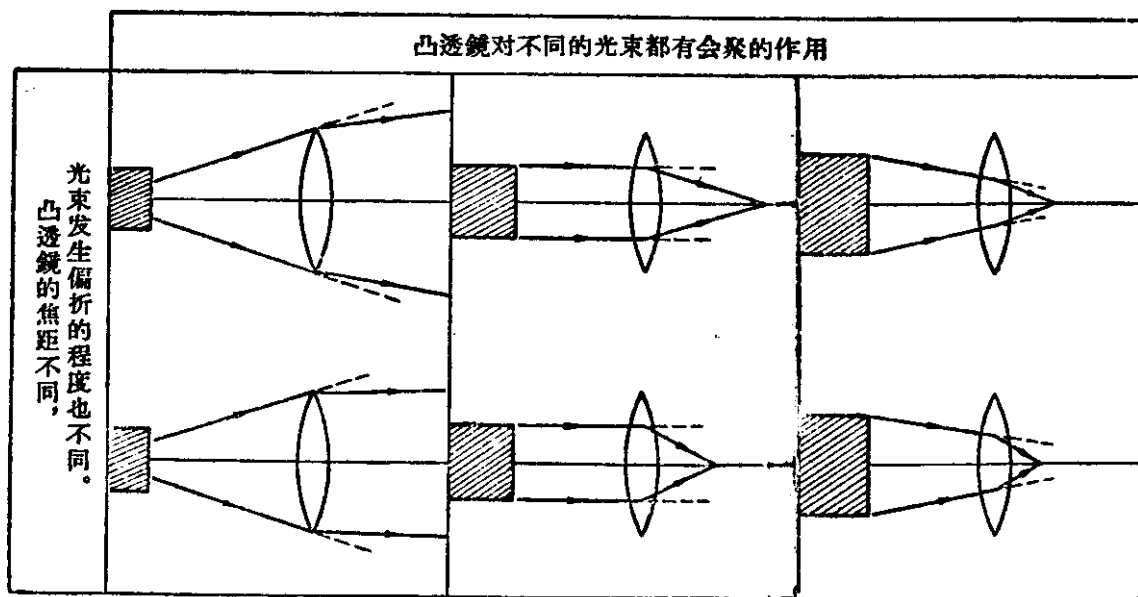


图 3·42

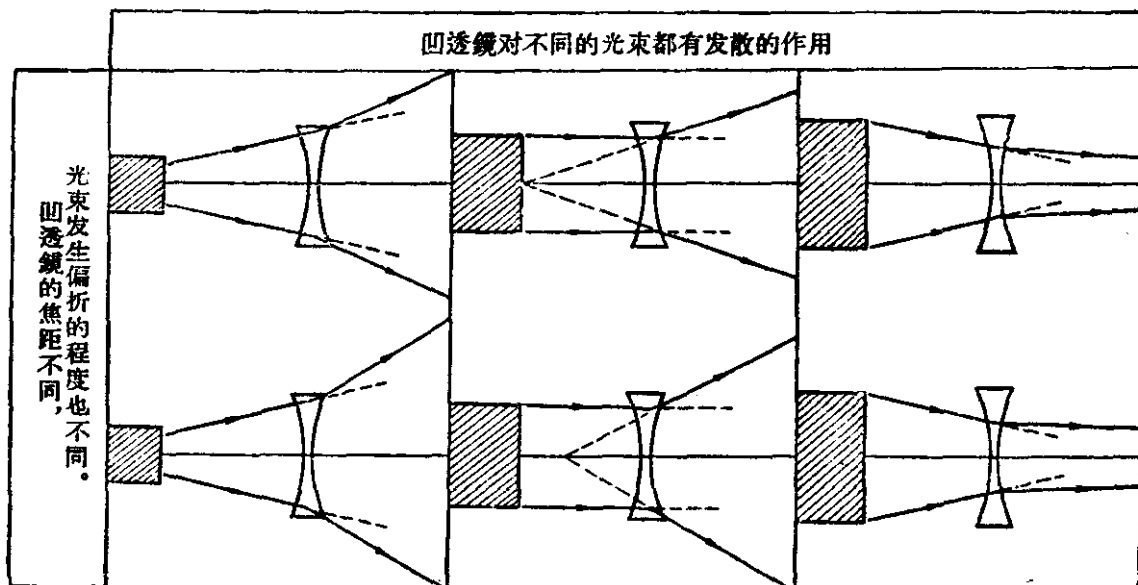


图 3·43

距短；同樣的光束，經過焦距比較短的凹透鏡時，發生偏折和發散的程度也比較顯著一些。總的說來，透鏡的焦距越短，透鏡使光綫發生偏折的本領就越強，同時，焦距的倒數  $1/f$  數值也越大，所以，我們就用焦距的倒數來表示透鏡折光本領的大小，這個物理量就叫做透鏡的焦度，用符號  $D$  來表示它

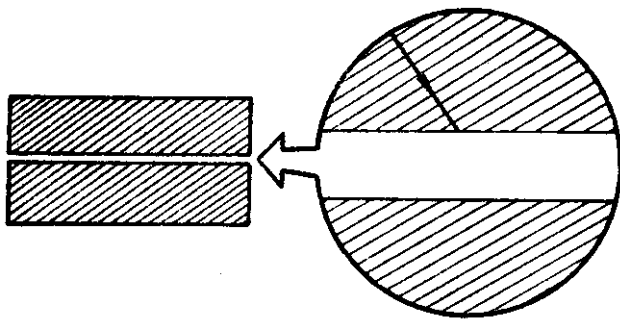
$$\frac{1}{f} = D.$$

焦度的單位是**屈光度**，規定焦距為 1 米的透鏡，它的焦度叫 1 屈光度。凸透鏡的焦距  $f$  是正值，它的焦度  $D$  也是正值；凹透鏡的焦距  $f$  是負值，它的焦度也是負值。

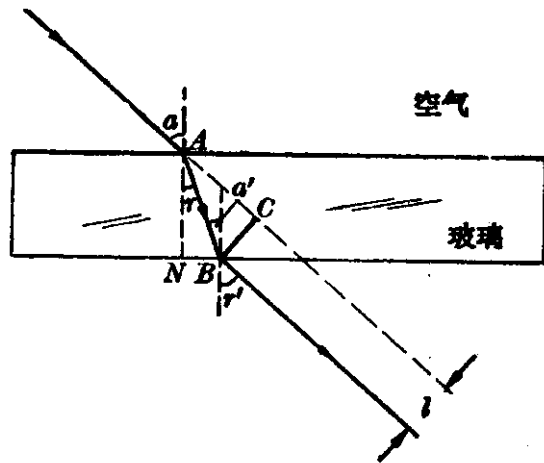
應該區別透鏡的屈光度和眼鏡的度数，眼鏡上的 1 度等於 1 屈光度的百分之一。

### 习 題 3·6

1. 有兩塊比較厚的平行透明玻璃磚，中間夾着一層空氣層（如附圖所示），當光綫從一塊玻璃磚穿過空氣層進入另一塊玻璃磚的時候，試畫出它的光路圖。並且跟光綫穿過空氣中一塊薄平行透明玻璃板的光路圖相比較，看看有什麼不同？



(第1題)

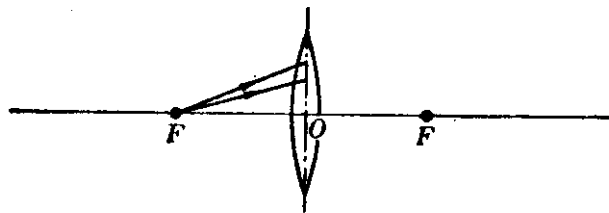


(第2題)

2. 有一块厚是1厘米的平行透明玻璃磚，已知玻璃的折射率是1.55，光从空气射入玻璃磚的入射角是 $45^\circ$ ，如附图所示。試計算：光綫穿过这块玻璃磚的时候，发生的側位移 $l$ 有多大？[提示：先从 $\triangle ABN$ 中計算 $AB$ 的长，再从 $\triangle ABC$ 中計算出 $BC$ 的长.]

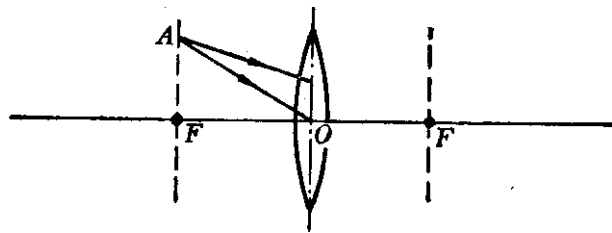
3. 完成下列各光路图：

(1) 从焦点 $F$ 发出的光束，經凸透鏡折射以后的光路(附图(a)).



(a)

(2) 从焦平面上一点 $A$ 发出的光束，經凸透鏡折射以后的光路(附图(b)).

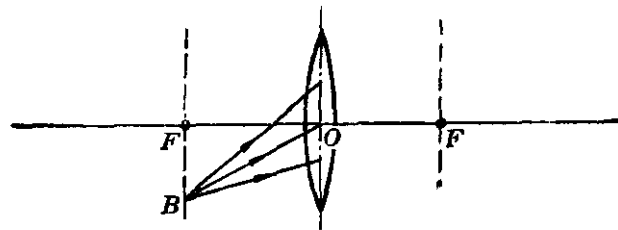


(b)

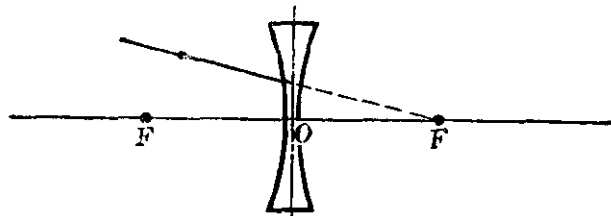
(3) 从焦平面上一点 $B$ 发出的光束，經凸透鏡折射以后的光路(附图(c)).

(4) 向着焦点 $F$ 射来的光綫，經凹透鏡折射以后的光路(附图(d)).

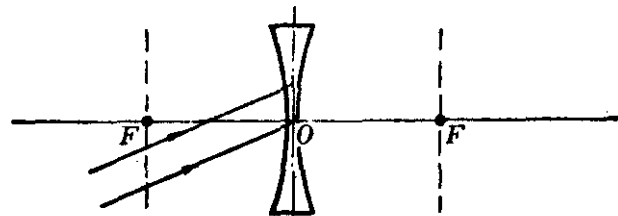
(5) 沿副軸方向射来的近軸平行光，經凹透鏡折射以后的光路(附图(e)).



(c)



(d)



(e)

(第3題)

4. 有两个凸透鏡, 要使一束平行光綫通过它們以后仍旧保持平行, 問这两个凸透鏡应当怎样放置? 为什么? 試画出光路图来.

5. 有一束平行光, 先通过一个凸透鏡, 再通过一个凹透鏡, 光綫射出以后, 仍旧保持平行, 問这两个透鏡是怎样放置的? 为什么? 試画出光路图来.

6. 有一个凸透鏡, 焦距是 20 厘米, 問它的焦度是多大?

7. 有两个透鏡, 它們的焦度分别是  $-5$  屈光度和  $4$  屈光度, 試求出它們的焦距, 并判断哪一个透鏡是凸透鏡, 哪一个透鏡是凹透鏡.

### § 3.7 透 鏡 成 象

一个发光体(或一个被照明的物体), 从它射出的光綫, 經過透鏡折射以后, 可以得到物体的象. 实验証实: 随着物体离开透鏡的位置和透鏡性质的不同, 成的象也各不相同. 下面就分別討論凸透鏡和凹透鏡成象的各种情况.

**1. 凸透鏡成象** 先用凸透鏡迎着太阳光, 找出它焦点的位置, 測出它的焦距  $f$ ; 然后象图 3.44 那样, 在凸透鏡的主軸上放置



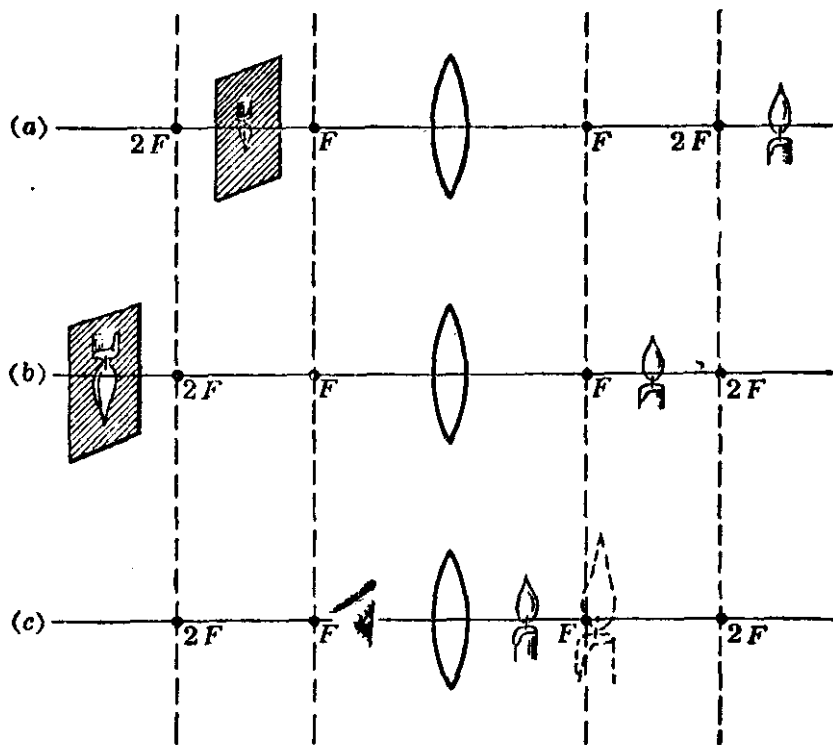


图 3·44 凸透镜成象

一支点燃的蜡烛，透镜的另一侧竖放一张白纸屏。这时候开始观察成象的情况：先把蜡烛放得离开透镜远一些，使它们之间的距离（物距）大于透镜焦距的两倍，也就是  $u > 2f$ ；然后把纸屏前后移动，到某一个位置的时候，屏上就得到一个烛焰倒立、缩小的象，这个象是从物体（烛焰）射出的光线，经过凸透镜折射以后，在纸屏上实际会聚而成的。从各个方向向光屏看去，都能看见这个象的存在，这是物体（烛焰）的实象。这时候象的位置落在透镜的焦点以外、两倍焦距以内的地方。这说明，凸透镜成象的时候，当物体放在两倍焦距以外的地方（ $u > 2f$ ），象的位置总是落在透镜的焦点以外、两倍焦距以内的地方（ $2f > v > f$ ），象是倒立、缩小的实象，如图 3·44(a) 所示。

把蜡烛渐渐靠近凸透镜，这时候要把纸屏向后移动（离开透镜）才能够在屏上显出烛焰的实象来，蜡烛离开透镜越近（物距  $u$  越小），成的象离开透镜就越远（象距  $v$  越大），屏上显出的实象也越大、越暗。当物距缩小到等于透镜焦距的两倍时（ $u = 2f$ ），象的

位置也恰好落在透鏡另一側兩倍焦距的地方( $v=2f$ ),象仍然是倒立的實象,大小恰好跟物體(燭焰)相等。

繼續把蠟燭移近到兩倍焦距以內、焦點以外的地方( $2f>u>f$ ),要在屏上得到燭焰的象,就要把紙屏移到離開透鏡更遠一些的地方——透鏡的兩倍焦距以外( $v>2f$ ),這時候,屏上的象比燭焰大了,且更暗了,但仍舊是倒立的,如圖 3·44(b)所示。

當燭焰移近到透鏡的焦點上( $u=f$ ),這時候無論把紙屏移動到什麼地方,都不能得到物體的象,而只能在屏上看到一片亮光,這時候,折射光綫是平行地射出去的。

如果把燭焰繼續移近到凸透鏡的焦點以內( $u<f$ ),則無論怎樣移動紙屏,我們總得不到燭焰的實象,但是,如果在放置紙屏的那一側,用眼睛對着透鏡觀察,可以看見一個正立的、放大的、跟物體在同一側的燭焰的象。這個象不是光綫實際會聚而成的,因此不能映在屏上,只能用眼睛對着透鏡才能看見它,它是燭焰的虛象,如圖 3·44(c)所示。

**2. 凹透鏡成象** 研究凹透鏡成象的情況,也可以用跟上面相似的實驗方法。

先來測定凹透鏡的焦距:在紙片上剪一個比凹透鏡略小的圓孔,用紙片遮住凹透鏡的邊緣,使孔的圓心正對着透鏡的光心,然後把凹透鏡正對着太陽光,如圖 3·45 所示。平行光(太陽光)經過凹透鏡折射以後,就成為發散光束,让它投射在一個白紙屏上,記下紙屏被光束照亮的圓面積的直徑  $D$ 、紙片上圓孔的直徑  $d$  和紙片離開紙屏的距離  $L$ ,從圖 3·46 三角形相似的關係中,可以得出比例關係

$$f:(f+L) = \frac{d}{2}:\frac{D}{2},$$

即

$$Df = df + dL,$$

$$\therefore f = \frac{dL}{D-d}.$$

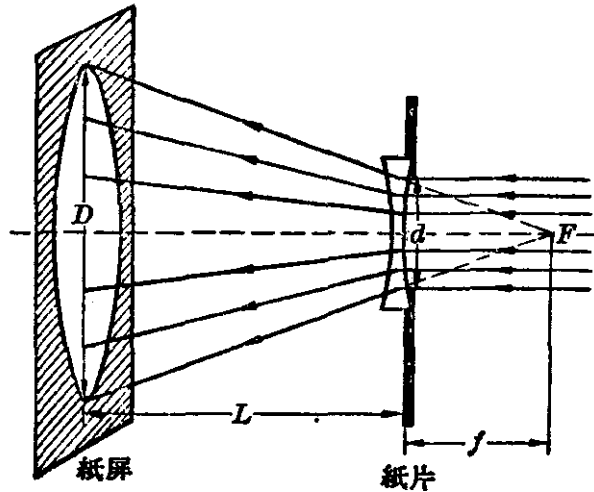


图 3.45

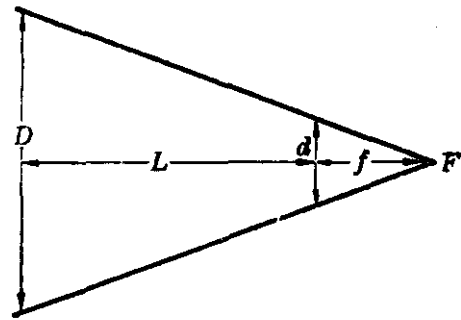


图 3.46

根据这个结果就可以计算出凹透镜的焦距  $f$ 。然后再把点燃的蜡烛放在凹透镜的焦点以内或焦点以外的地方，同样用一个纸屏在透镜的另一侧前后移动，这时候将会发现，无论把纸屏移到什么地方，屏上总不会得出烛焰的实象；但是，如果用眼睛对着凹透镜观察，则会通过透镜看到，在物体的同一侧有一个正立缩小的虚象。

### § 3.8 透镜成象的作图

跟球面镜相似，透镜成象的各种情况，也可以通过作图的方法求出来。根据上面实验的结果知道，当物体离开透镜的距离一定时，从物体射出的光线，经过透镜折射以后，只能形成一个象。（除了物体放在透镜的焦点上，既不成实象也不成虚象的情况以外。）也就是说，这时候从物体上每一点发出的光线，经过透镜的折射以后，也只相交于一点（或延长线相交于一点）。只要从物体上的一点引出任意两条光线，通过透镜以后，找出它们的交点，就可以确定这一点的象的位置了。当然，从物体上这一点射出的光线还很多，但是可以相信：它们经过透镜的折射以后，也一定相交于这一点，不然的话，物体上某一点所成的象同时有两点或好几点，那么一个物体所成的象也就同时有两个或两个以上相同性质的象了，这是和实际情况不相符合的。所以，在透镜成象的时候，我们也只要

在物体上选几个有代表性的点(如它的两个端点等),从这些点各引两条光线,经过透镜折射以后,得出它们相应的象点,这样把象点组合起来,就可以得出整个物体的象的大小和位置了.在作透镜成像的光路图时,要怎样才能确定折射光线的方向呢?如果要在光线通过透镜发生两次折射的时候,都用量角器去量入射角和折射角,根据折射定律来决定折射光线的方向,那就太麻烦了,而且也不容易作得精确.所以在实际作图的时候,为了简便起见,我们常常从下列三条光线中任意选择两条来作图,这三条光线是从前面学过的透镜性质得出来的,它们是:

(1) 跟主轴平行的入射光线. 它通过凸透镜后,折射光线通过焦点;通过凹透镜后,折射光线的延长线通过焦点.

(2) 通过焦点的(或延长线通过焦点的)入射光线. 它经过透镜折射以后,折射光线跟主轴平行.

(3) 通过透镜光心的入射光线. 它经过两次折射以后方向保持不变.

我们先来讨论一个**发光点**经过透镜成像的光路图.

图 3.47 是一个发光点  $A$  经过凸透镜成像光路图的作法:从  $A$  点引一条光线平行于主轴,折射以后,通过焦点  $F$ ,再从  $A$  点引一条光线通过焦点,折射以后,跟主轴平行,这两条折射光线相交于  $A'$  点, $A'$  就是  $A$  点的实象.在图 3.47(a) 中,画出了光线两次通过透镜的折射面时所发生的偏折,但是对确定象的位置讲这并不是必要的,所以也可以简化如图 3.47(b) 和(c) 的画法.一般用通

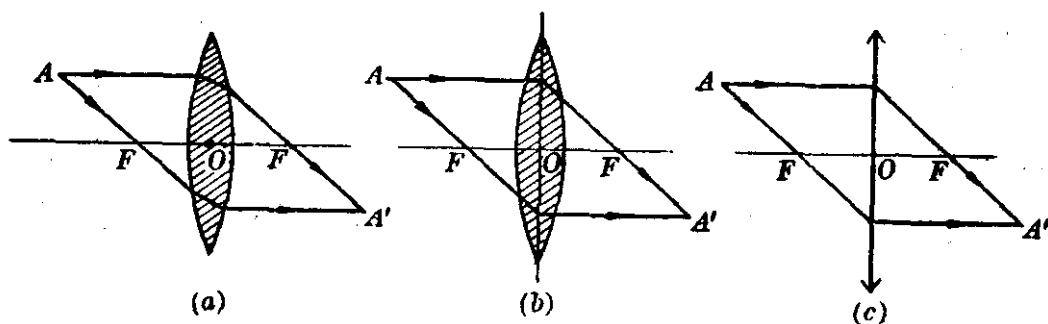


图 3.47

过光心并垂直于主軸的直綫来表示薄透鏡，显得更为簡便。凸透鏡

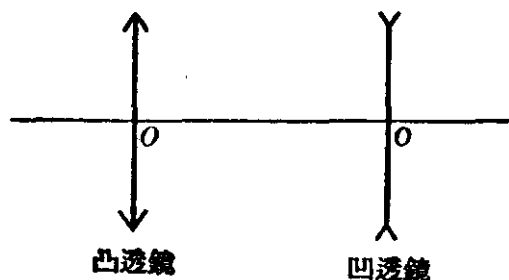


图 3·48

鏡和凹透鏡的表示法分別如图 3·48 所示，这种表示透鏡的符号，形象地表示了透鏡边缘的特征，所以也是比較容易識別的。

如果发光点在透鏡的主軸上，則成象时光路图的作法就有些特殊，因为这时候从主軸上的发光点所作的平行于主軸的光綫、通过焦点的光綫和通过光心的光綫是重合在一起的，即主軸本身，单是这一条綫显然得不出象点的位置，于是就要利用焦平面来輔助。

图 3·49 所示的是凸透鏡主軸上的发光点  $A$  成象的作图法：从  $A$  点引任意一条入射光綫  $AB$ ，再过光心  $O$  作副軸  $CO$  平行于  $AB$ ，并延长  $CO$  跟焦平面相交

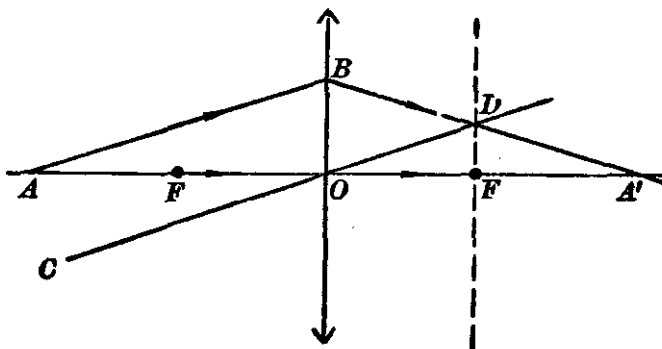


图 3·49

于  $D$  点，連結  $BD$ ，使它的延长綫跟主軸相交，則交点  $A'$  就是  $A$  点的实象。因为  $AB$  是平行于副軸的入射光綫，折射以后，应当跟副軸相交于焦平面上，所以折射光綫通过交点  $D$ ；从  $A$  点引的另一条入射光綫就是  $AO$ ，它沿着主軸方向，所以折射以后方向不变，这两条折射光綫相交于  $A'$  点，所以  $A'$  点就是  $A$  点的实象。

如果发光点  $A$  在凸透鏡的焦点以內，作图的步驟仍和上面一样，只是这时两条折射光綫并不相交，它們的延长綫相交于  $A'$  点， $A'$  点和  $A$  点在凸透鏡的同一側，是  $A$  点的虚象(如图 3·50)。

如果发光点  $A$  是在凹透鏡的主軸上，如图 3·51 所示。先从  $A$  点引任意光綫  $AB$ ，过光心  $O$  作副軸  $CO$  跟  $AB$  平行， $CO$  跟焦平面相交于  $D$  点，連結  $BD$  跟主軸相交于  $A'$  点， $A'$  点就是  $A$  点的

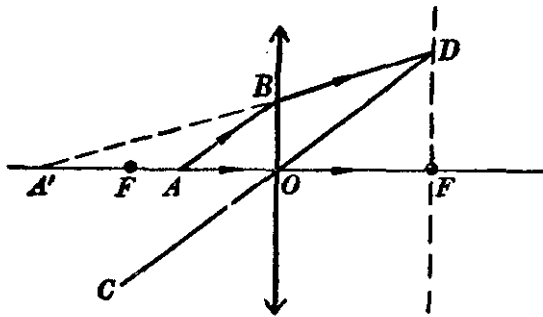


图 3-50

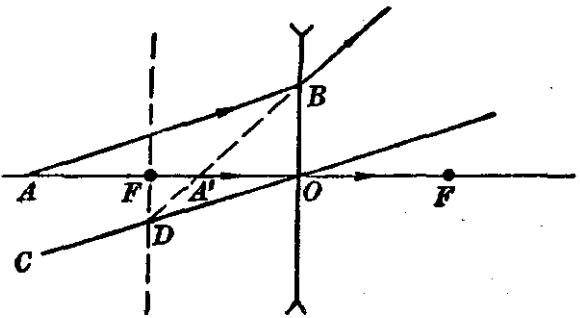


图 3-51

虚象。因为  $AB$  是平行于副轴  $CO$  的入射光线，经过凹透镜折射以后，它的延长线应当跟副轴相交在焦平面上，所以折射光线的延长线将通过交点  $D$ ；从  $A$  点引的另一条入射光线就是  $AO$ ，沿着主轴方向射到凹透镜上，折射以后方向不改变，这两条折射光线在透镜的另一侧不相交，但它们的延长线相交于同侧的  $A'$  点，所以  $A'$  点是  $A$  点的虚象。

接下来，我们来讨论一个物体通过透镜成象的光路图。

一个物体可以看成是许多点的组合，每一点射出的光线，经过透镜的折射以后，按照上面所述的作图法，可得出这一点象的位置。这些象点一一组合起来，就构成了整个物体的象；跟球面镜成象作图的情况一样，为简便起见，我们只要选取物体上的两个端点，作出它们成象的光路图来，就能够确定物体的象的性质、位置和大小。下面是物体放在不同的位置上时成象的光路图。

(1) 物体  $AB$  放在凸透镜的两倍焦距以外(图 3-52)。

从端点  $A$  引两条入射光线，一条平行于主轴，折射以后通过焦点  $F$ ；另一条通过光心，折射以后方向不变，它们在透镜的另一侧相交于  $A'$  点，这一点就是  $A$  点的实象。同样，从

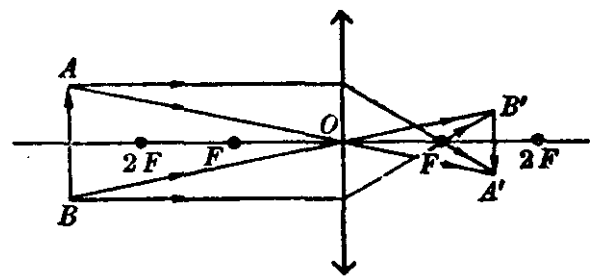


图 3-52

另一端点  $B$  也引两条入射光线，一条平行于主轴，另一条通过光

心，它們經過凸透鏡折射以後，相交于  $B'$  點， $B'$  點就是  $B$  點的實象。可以理解：在  $AB$  之間的其他各點的象，也都相應地落在象點  $A'$  和  $B'$  之間，所以連接  $A'B'$  也就是  $AB$  的實象。從圖 3·52 中可以看出：物體在凸透鏡的兩倍焦距以外，成的象在透鏡的另一側，落在焦點以外、兩倍焦距以內的地方，象是倒立、縮小的實象。也就是： $u > 2f$ ,  $f < v < 2f$ 。

(2) 物體  $AB$  放在凸透鏡的兩倍焦距的地方(圖 3·53)。

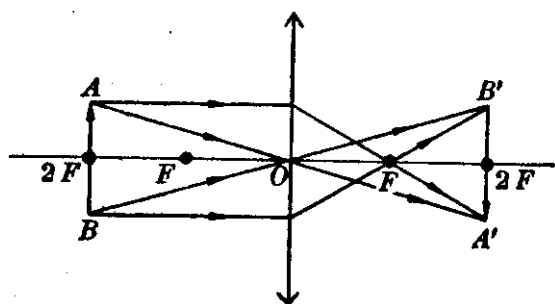


圖 3·53

從物體的端點  $A$  點和  $B$  點，各引兩條入射光綫，一條平行於主軸，另一條通過透鏡的光心，折射以後，它們在透鏡的另一側分別相交於  $A'$  點和  $B'$  點，這就是  $A$  點和  $B$  點的象，

$A'B'$  就是物體  $AB$  的象，從圖中可以看出：當物體放在凸透鏡的兩倍焦距上的時候，象成在透鏡另一側兩倍焦距的地方；並且是跟物體大小相等的倒立的實象。也就是： $u = 2f$ ,  $v = 2f$ 。

(3) 物體  $AB$  放在凸透鏡的焦點以外、兩倍焦距以內的地方(圖 3·54)。

作圖的方法同上。可以看出，當物體放在凸透鏡的焦點以外、兩倍焦距以內的時候，成的象在透鏡的另一側兩倍焦距以外；象是倒立的放大的實象。也就是： $f < u < 2f$ ,  $v > 2f$ 。

(4) 物體  $AB$  放在凸透鏡的焦點上(圖 3·55)。

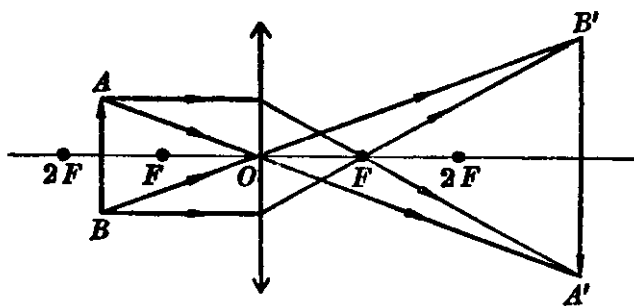


圖 3·54

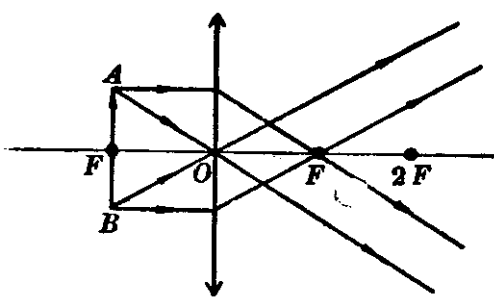


圖 3·55

从物体的  $A$  点和  $B$  点分别引两条光线，经过透镜的折射以后，互相平行，所以这时候，既不形成实象，也不形成虚象。

(5) 物体  $AB$  放在凸透镜的焦点以内(图 3·56)。

从物体的端点  $A$  引一条入射光线平行于主轴，折射以后通过透镜的焦点  $F$ ，另一条入射光线通过光心  $O$ ，折射以后方向不变，这两条折射光线在透镜的另一侧不相交，而它们的反向延长线相交于  $A'$  点，这一点就是  $A$  点的虚象；同样的方法可以作出  $B$  点的虚象  $B'$ ， $A'B'$  就是物体  $AB$  的虚象。从图 3·56 中可以看出：当物体放在凸透镜的焦点以内的时候，成的象跟物体在透镜的同一侧，象是正立、放大的虚象。

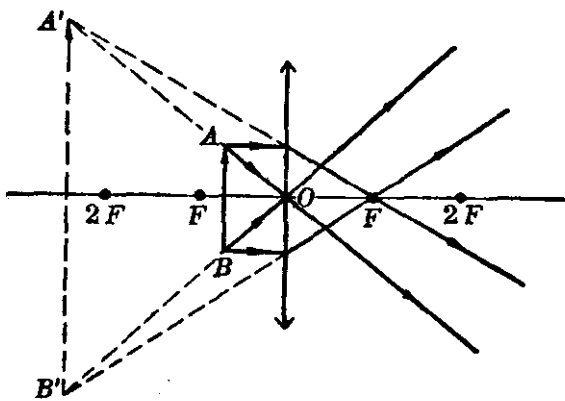


图 3·56

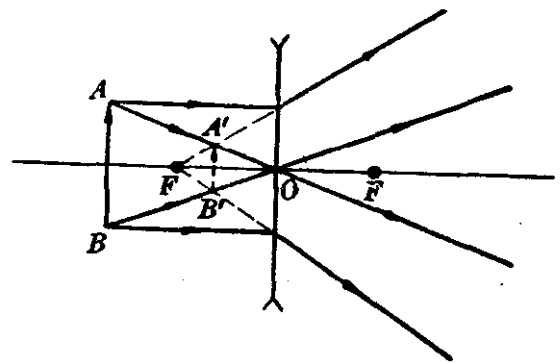


图 3·57

(6) 物体  $AB$  放在凹透镜前任意地方(图 3·57)。

从  $A$  点引一条入射光线平行于主轴，折射以后，它的反向延长线经过凹透镜的焦点  $F$ ，从  $A$  点引另一条入射光线通过光心  $O$ ，折射以后方向不改变，这两条折射光线在透镜的另一侧不相交，它们的反向延长线相交于  $A'$  点，这一点就是  $A$  点的虚象；同样， $B'$  点就是  $B$  点的虚象，连接  $A'B'$  就是物体  $AB$  的虚象。从图 3·57 中可以看出：物体经凹透镜所成的象跟物体在透镜的同一侧，象是正立、缩小的虚象。

上面几种不同情况的光路图表明：从物体射出的光线，经过透镜的折射以后，实际相交而成的象是实象，实象跟物体分



居在透鏡的兩側，凸透鏡能夠形成實象。從物體射出的光綫，經過透鏡的折射以後，它們的反向延長綫相交而成的象是虛象，虛象跟物體在透鏡的同一側，凸透鏡和凹透鏡都能形成虛象。

這裡所得出的結果，跟 § 3.7 透鏡成象的實驗中所得到的結果是符合的。

例 4. 如圖 3.58 所示， $A$  是一個發光點， $A'$  是由透鏡所形成的  $A$  點的象，橫綫是透鏡的主軸。試判斷這個透鏡是凸透鏡還是凹透鏡？並且用作圖法求出透鏡的光心和焦點的位置。

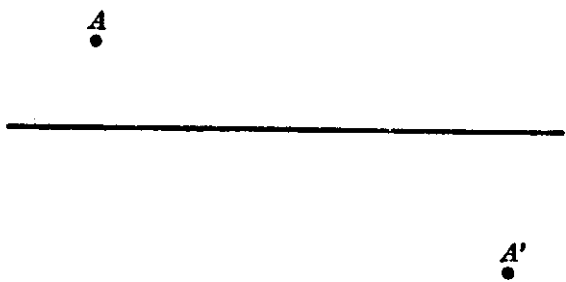


圖 3.58

【解】 可以把  $A$  點看成是直立於主軸上的某一物體的端點，那麼， $A'$  點也就是這一物體的象的端點，從  $A$  和  $A'$  分別作主軸的垂綫，就可以看出：象是倒立的和放大的，根據透鏡成象的性質可以判斷這個象是實象，這個透鏡是凸透鏡。（實象是倒立的，虛象總是正立的，只有凸透鏡能形成實象，凹透鏡只能形成虛象。）

根據凸透鏡成象的性質，從物體射出的光綫，通過光心的時候，方向不變，所以連接  $A$  點和  $A'$  點的直綫跟主軸的交點，就是凸透鏡的光心  $O$ ；通過  $O$  點作主軸的垂綫，也就是凸透鏡的位置，因為平行於主軸的光綫，經過凸透鏡的折射以後，一定通過焦點  $F$ ，所以可以這樣來求出焦點的位置：過  $A$  點作  $AD$  平行於主軸，再連接  $DA'$ ，它跟主軸相交於  $F$  點，這一點就是凸透鏡的焦點（如圖 3.59 所示）。

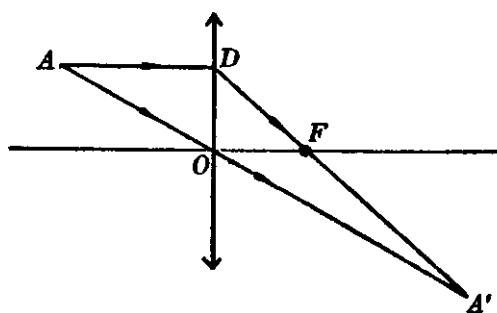


圖 3.59

## 习 题 3·8

1. 有一个凸透镜焦距是 20 厘米，一束平行光线沿着跟主轴成  $30^\circ$  角的方向射到凸透镜上，用作图法作出光路图，并计算平行光束经过折射以后的会聚点离开光心的距离，以及离开主轴上焦点的距离。

2. 凸透镜的焦距是 20 厘米，有一个物体放在离开透镜 15 厘米远的地方，试作它成像的光路图。如果把凸透镜换成一个凹透镜，焦距相同，物体离开透镜的距离也不变，再作出这时候成像的光路图，并比较这两种镜所成的象有什么不同。

3. 凸透镜的焦距是 10 厘米，有一个物体放在离开透镜 20 厘米的地方，作出成像的光路图。如果把凸透镜换成一个焦距相同的凹面镜，物距  $u$  保持不变，再作出这时候成像的光路图。试比较这两种镜所成的象有什么不同。

4. 附图中  $A$  是一个发光点， $A'$  是由透镜所成的  $A$  点的象，横线是透镜的主轴。试判断这个透镜是凸透镜还是凹透镜？并通过作图求出透镜的光心和焦点的位置。



(第 4 题)

## § 3·9 透镜成像的公式

透镜成像的各种情况，包括凸透镜成像、凹透镜成像，成像的性质（虚象、实象）、位置、大小等还可以通过公式的计算得出来。这里先来推导透镜成像的公式。

图 3·60 是凸透镜成实象时候的光路图。图 3·61 是物体放在

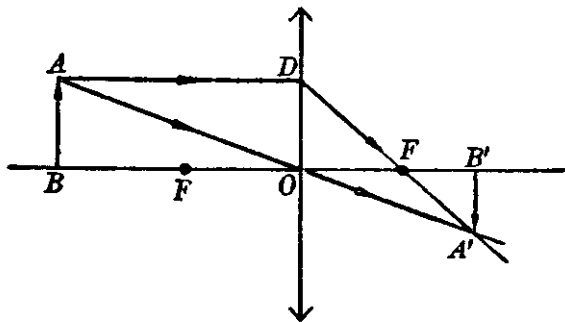


图 3·60

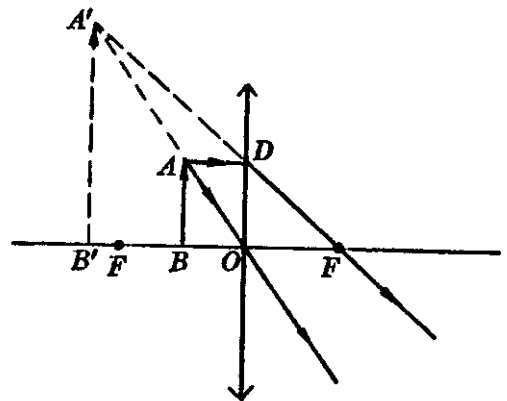


图 3·61

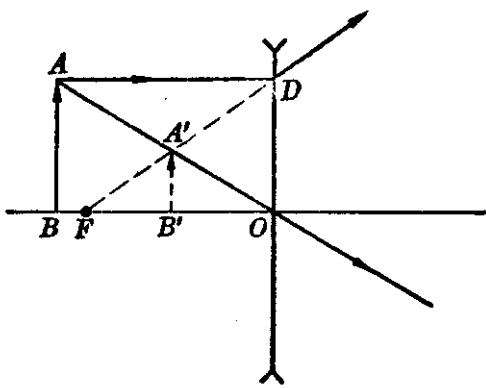


图 3.62

凸透镜的焦点  $F$  以内成虚象时候的光路图。图 3.62 是凹透镜成虚象时候的光路图。以上图中  $AB$  表示放在透镜前的物体， $A'B'$  是  $AB$  由透镜所成的象。从这些透镜成象的光路图中，可以看出： $\triangle ABO$  和  $\triangle A'B'O$  是相似的直角三角形， $\triangle DOF$  和

$\triangle A'B'F$  也是相似的直角三角形，所以有  $\frac{AB}{A'B'} = \frac{BO}{OB'}$ ； $\frac{DO}{A'B'} = \frac{OF}{FB'}$ ；因为  $DO = AB$ ，所以得出的结果是：

$$\frac{BO}{OB'} = \frac{OF}{FB'}. \quad (1)$$

对于凸透镜成实象的情况（图 3.60），可用  $BO = u$ ， $OB' = v$ ， $OF = f$ ， $FB' = v - f$  代入 (1) 式得

$$\frac{u}{v} = \frac{f}{v - f},$$

化简后得到

$$fv + fu = uv,$$

用  $uvf$  除等式两边得

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (2)$$

对于凸透镜成虚象的情况（图 3.61），这时  $FB' = v + f$ ，代入 (1) 式得

$$\frac{u}{v} = \frac{f}{v + f},$$

化简后得到

$$fv - fu = uv,$$

用  $uvf$  除等式两边得

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

这个结果和 (2) 式比较，只是相差一个符号，如果把虚象的象

距  $v$  算作負值代入(2)式,那么显然可以看出,公式(2)也是适用于凸透鏡成虛象的情况的.

对于凹透鏡成象的情况(图 3·62),这时  $FB' = f - v$ , 代入(1)式得

$$\frac{u}{v} = \frac{f}{f-v},$$

化簡后得到  $fv - fu = -uv$ ,

用  $uvf$  除等式两边得

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = -\frac{1}{f}.$$

这个結果和(2)式比較,有两項符号不同,如果把凹透鏡的焦距  $f$  和所成虛象的象距  $v$  都用負值代入(1)式,那么公式(2)也能适用于凹透鏡成象的情况.

所以,公式  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$  对于透鏡成象的各种情况都是适合的. 利用这个公式,只要知道物体离开透鏡的距离  $u$  和透鏡的焦距  $f$ , (凸透鏡的焦距算作正值,凹透鏡的焦距算作負值.) 就可以計算出象的性质和位置. ( $v$  的数值表示象离开透鏡的距离,  $v$  的正負表示象的虛实.) 一般地說,只要知道  $u$ 、 $v$ 、 $f$  当中的任意二个量,第三个量总可以从公式中計算出来.

**例 5.** 有一物体放在距透鏡 20 厘米远的地方,問在下列几种情况下,所用的透鏡是凸透鏡还是凹透鏡? (a) 象成在透鏡的另一側距光心 40 厘米的地方; (b) 象和物体在透鏡的同一側距光心 40 厘米的地方; (c) 象和物体在透鏡的同一側距光心 10 厘米的地方.

**【解】** (a) 已知:  $u = 20$  厘米,象在透鏡的另一側,象是实象,  $v = 40$  厘米,根据公式  $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$  可以算出:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{20} + \frac{1}{40} = \frac{3}{40},$$

$$f = 13.3 \text{ 厘米.}$$

$f$  是正值, 所以这个透鏡是凸透鏡, 焦距是 13.3 厘米.

(b) 已知:  $u=20$  厘米, 象和物体在透鏡的同一側, 象是虛象,  
 $v=-40$  厘米.

根据公式  $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$  可以算出:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{20} - \frac{1}{40} = \frac{1}{40},$$

$$f = 40 \text{ 厘米.}$$

所以知道这个透鏡仍是凸透鏡, 焦距是 40 厘米. 由于物距  $u=20$  厘米, 小于焦距  $f=40$  厘米, 所以形成虛象.

(c) 已知:  $u=20$  厘米, 象和物体在透鏡的同一側, 象是虛象,  
 $v=-10$  厘米.

根据公式  $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$  可以算出:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{20} - \frac{1}{10} = \frac{-1}{20},$$

$$f = -20 \text{ 厘米.}$$

焦距是負值, 所以知道这个透鏡是凹透鏡, 焦距为 20 厘米.

### § 3·10 透鏡成象的放大率

物距不同, 由透鏡成象的大小也不相同, 可能是放大的象, 可能是縮小的象, 也可能是和物体大小相同的象. 为了說明象放大的情况, 我們把象的长度和物体的长度的比叫做象的长度放大率, 簡称为象的**放大率**, 通常用  $K$  来代表

$$K = \frac{A'B'}{AB} \left( \text{放大率} = \frac{\text{象长}}{\text{物长}} \right).$$

从图 3·60 中可以知道  $\frac{A'B'}{AB} = \frac{v}{u}$ , 所以

$$K = \frac{v}{u}.$$

根据公式  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ , 用  $v = \frac{fu}{u-f}$  代入, 則又可得出

$$K = \frac{f}{u-f}.$$

从这个結果可以知道, 一个透鏡所成的象, 它的放大率是随着物距  $u$  而改变的. 对于一定的透鏡来說, 焦距是不变的, 物距越大时, 象的放大率就越小.

$K$  的意义是长度放大率, 如果要考虑到象的面积放大时可以按象的纵向放大率和横向放大率都是  $K$  来計算, 也就是說, 象的面积放大率是  $K^2$  倍.

关于球面鏡成象的放大率, 情况也和上面所說的相同.

**例 6.** 有一个凸透鏡, 它的焦距是 18 厘米, 有一个物体长 3 厘米, 問物体应当放在距透鏡多远的地方才能得到长 9 厘米的倒象? 如果要得到长 9 厘米的正象, 物体又应当放在什么地方?

**【解】** 已知象长是物长的三倍, 即  $K = \frac{9 \text{ 厘米}}{3 \text{ 厘米}} = 3$ , 又知  $f = 18$  厘米; 象是倒象. 所以知道象是实象,  $v$  是正值.

因为 
$$K = \frac{v}{u} = 3,$$

所以 
$$v = 3u,$$

代入成象公式得 
$$\frac{1}{u} + \frac{1}{3u} = \frac{1}{18},$$

$$\frac{4}{3u} = \frac{1}{18},$$

$$\therefore u = 24 \text{ 厘米}.$$

这时物体应当放在距透鏡 24 厘米的地方.

如果成的是长 9 厘米正立的象, 則就是虛象,  $v$  是負值, 应当以  $v = -3u$  代入透鏡成象的公式中:

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{3u} = \frac{1}{18},$$

$$\frac{2}{3u} = \frac{1}{18},$$

$$\therefore u = 12 \text{ 厘米.}$$

这时物体应当放在距透镜 12 厘米的地方。

**討論** 关于透镜成象的几种主要的情况, 可以通过透镜成象的公式来加以討論. 从公式  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$  可以得出

$$v = \frac{fu}{u-f} = \frac{f}{1-\frac{f}{u}}, \quad (3)$$

$$K = \frac{v}{u} = \frac{f}{u-f}. \quad (4)$$

当透镜一定时, 焦距  $f$  就是定值, 随着物距  $u$  的不同, 从(3)式和(4)式可以看出, 透镜所成的象的位置、性质和大小也就不同。

### 1. 凸透镜成象的情况 ( $f$ 是正值)

(1) 当  $u < f$  的时候,  $\frac{f}{u} > 1$ ,  $(1 - \frac{f}{u}) < 0$ , 所以

$$v = \frac{f}{1 - \frac{f}{u}} < 0, \text{ 象是虚象.}$$

又因为  $0 < u < f$ , 所以  $|u-f| < f$ , 根据(4)式知道:  $|K| = \left| \frac{f}{u-f} \right| > 1$ , 所以象是放大的。

**結論:** 当物体放在凸透镜的焦点以内时, 成的象是放大、正立的虚象, 象和物体在透镜的同一侧。

(2) 当  $u = f$  的时候, 代入公式(3)和公式(4), 得到的结果都是没有意义的。

**結論:** 当物体放在凸透镜的焦点上时, 既不形成实象, 也不形成虚象, 从物体射到透镜上的光束, 经折射以后是平行的。

(3) 当  $f < u < 2f$  的时候,  $1 > \frac{f}{u} > \frac{1}{2}$ ,  $0 < (1 - \frac{f}{u}) < \frac{1}{2}$ , 所以

$$v = \frac{f}{1 - \frac{f}{u}} > \frac{f}{\frac{1}{2}},$$

即  $v > 2f$ , 象是实象, 位于两倍焦距以外。

又因为  $v > 2f$ ,  $u < 2f$ , 所以  $K > 1$ , 象比物体大。

**結論:** 当物体放在凸透镜焦点以外、两倍焦距以内时, 所成的象是放大、

倒立的实象,象和物体分居在透镜的两侧.

$$(4) \text{ 当 } u=2f \text{ 的时候, } \frac{f}{u}=\frac{1}{2}, \left(1-\frac{f}{u}\right)=\frac{1}{2}, \text{ 所以 } v=\frac{f}{1-\frac{f}{u}}=2f, \text{ 象}$$

是实象,位于  $2f$  上.

$$\text{又因为 } (u-f)=f, \text{ 所以 } K=\frac{f}{u-f}=1, \text{ 象和物体大小相等.}$$

結論: 当物体放在透镜的  $2f$  上时, 成的象是倒立的实象, 大小和物体相等, 象和物体分居在透镜的两侧.

$$(5) \text{ 当 } u>2f \text{ 的时候, } \frac{f}{u}<\frac{1}{2}, \left(1-\frac{f}{u}\right)>\frac{1}{2}, \text{ 所以 } v=\frac{f}{1-\frac{f}{u}}<\frac{f}{\frac{1}{2}},$$

即  $v<2f$ .

$$\text{又因为 } \frac{f}{u}>0, \left(1-\frac{f}{u}\right)<1, \text{ 所以 } v=\frac{f}{1-\frac{f}{u}}>f. \text{ 即 } f<v<2f. \text{ 象是}$$

实象, 位于焦点以外、两倍焦距以內的地方.

$$\text{因为 } u>2f, v<2f, \text{ 所以 } K=\frac{v}{u}<1, \text{ 象比物体小.}$$

結論: 当物体放置在透镜的两倍焦距以外的地方, 所成的象是縮小、倒立的实象, 象和物体分居在透镜的两侧.

## 2. 凹透镜成象的情况 ( $f$ 是負值)

当物体放在距凹透镜任何距离处,  $u$  总是正值,  $f<0$ , 所以  $\frac{f}{u}<0$ ,  $\left(1-\frac{f}{u}\right)>0$ ,  $v=\frac{f}{1-\frac{f}{u}}<0$ , 象总是虚象.

$$\text{又因为 } f<0, |u-f|>|f|, \text{ 所以 } |K|=\left|\frac{f}{u-f}\right|<1, \text{ 象比物体小.}$$

結論: 物体由凹透镜成的象总是縮小的正立的虚象, 象和物体在透镜的同一側.

**例 7.** 烛焰和紙屏間的距离是  $L$ , 在它們之間放一个焦距为  $f$  的凸透镜. 这个透镜放在两个不同的位置上时, 紙屏上都清楚地显出烛焰的倒象. 試証明: 这时烛焰和紙屏間的距离必須大于凸透镜焦距的 4 倍, 即  $L>4f$ .

**【解】** 設成象时, 烛焰离透镜距离为  $u$ , 則象 (光屏) 离开透镜的距离为  $(L-u)$ , 代入透镜成象的公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{L-u} = \frac{1}{f},$$

化簡后得出

$$f(L-u) + fu = u(L-u),$$



$$fL = Lu - u^2,$$

整理后得出

$$u^2 - Lu + fL = 0, \quad (5)$$

从(5)式解出  $u = \frac{L \pm \sqrt{L^2 - 4fL}}{2}.$

这一结果表明,要求透镜放在两个不同的地方时,在屏上都能成象,即要求上式中  $u$  有两个实数根,就必须有  $L^2 - 4fL > 0$ , 即  $L(L - 4f) > 0$ . 因为  $L$  总是大于零的,所以应有  $(L - 4f) > 0$ , 即  $L > 4f$ .

从这个结果还可以看出: 如果  $L^2 - 4fL = 0$  (即  $L = 4f$ ), 则  $u$  只能得出一个实根, 也就是  $u = 2f, v = 2f, K = 1$  的情况. 如果  $L^2 - 4fL < 0$  (即  $L < 4f$ ), 则解出的  $u$  为虚数, 表明这时不能在屏上显出烛焰的象来.

例 8. 上题中如果凸透镜的焦距  $f$  是待测的, 凸透镜放置的两个位置间的距离是  $d$ , 试证明这个透镜的焦距  $f = \frac{L^2 - d^2}{4L}$ .

【解】 根据例 7 解出的结果有  $u = \frac{L \pm \sqrt{L^2 - 4fL}}{2}$ , 而两次成象时物距的差, 也就是透镜两次位置间的距离  $d$ , 所以

$$\frac{L + \sqrt{L^2 - 4fL}}{2} - \frac{L - \sqrt{L^2 - 4fL}}{2} = d,$$

化简后得出  $\sqrt{L^2 - 4fL} = d.$

等式两边平方后得出  $L^2 - 4fL = d^2,$

即  $L^2 - d^2 = 4fL,$

所以  $f = \frac{L^2 - d^2}{4L}.$

或者按这样的方法来解:

第一次成象时  $\frac{1}{u} + \frac{1}{L - u} = \frac{1}{f},$

第二次成象时  $\frac{1}{u + d} + \frac{1}{L - (u + d)} = \frac{1}{f},$

解联立方程式得出  $u = \frac{L - d}{2},$

代入第一次成象时的计算式中, 化简后即得出

$$f = \frac{L^2 - d^2}{4L}.$$

这里的具体运算过程, 大家可以自己做做看.

## 习 题 3·10

1. 一个物体离开透镜 12 厘米远, 成的象离开透镜的距离是 60 厘米, 象成在纸屏上, 问这个透镜的焦距是多大? 是凸透镜还是凹透镜? 透镜的焦距是多少屈光度?

2. 上题中如果物体长是 2 厘米, 那么象长是几厘米? 试作出成象的光路图来检验你的答案是否正确.

3. 物体长 4 厘米, 凸透镜的焦距是 30 厘米, 物体离开透镜的距离是 45 厘米, 问象成在离透镜多远的地方? 是实象还是虚象? 象长是几厘米?

4. 上题中如果物体放在离开凸透镜 15 厘米的地方? 那么成的象将离透镜多远? 象是实象还是虚象? 象长又是几厘米? 试作出光路图来检查你的答案是否正确.

5. 凸透镜的焦距是 18 厘米, 一个长 2 厘米的烛焰要放在离透镜多远的地方, 才能在纸屏上得到一个长 6 厘米的象?

6. 一个凹透镜的焦距是 12 厘米, 要得到缩小 3 倍的象, 物体应当放在距离凹透镜多远的地方? 试作出成象的光路图来检查你的答案.

## 本章提要

1. 平面镜能够成象, 成象的原理是根据光的反射定律, 成的象是虚象. 象的大小跟物体的大小相等, 并且对称于镜面.

2. 凹镜和凸镜统称为球面镜. 凹镜能够把沿着主轴射到镜面上来的近轴平行光线会聚在焦点上, 也能够把从焦点射出的光线反射成平行光线; 凸镜能够把沿着主轴射到镜面上来的近轴平行光线反射成发散光线, 好象它们是从镜面里的一点(虚焦点)射出来的一样.

3. 凹镜和凸镜都能成象. 凸镜只能成正立的缩小的虚象, 象跟物体分居在凸镜的两侧. 凹镜所成的象的虚实、倒正、大小决定于物体的位置. 图 3·63 与图 3·64 分别是物体在不同的位置时, 凹镜和凸镜成象的光路图.

4. 光线通过棱镜的时候, 折射以后向底面偏折; 棱镜也能够成象, 成的象是虚象.

5. 透镜有凸透镜和凹透镜两种. 凸透镜对光线有会聚的作用, 所以又称做会聚透镜; 凹透镜对光线有发散的作用, 所以又称做发散透镜.

6. 凸透镜和凹透镜都能够成象. 凹透镜只能成正立的缩小的虚象(这

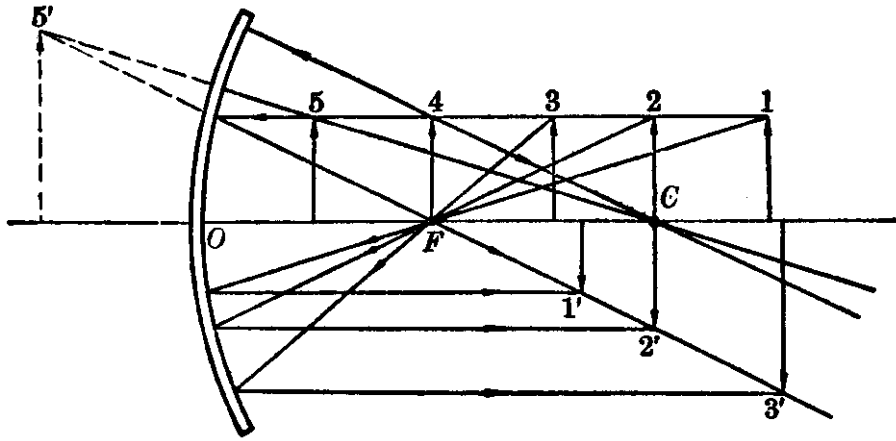


图 3-63 凹鏡成象的各种情况

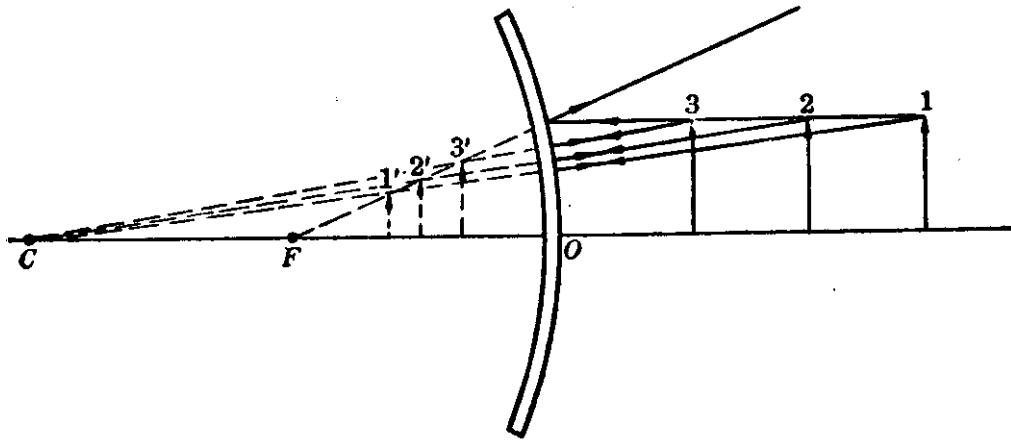


图 3-64 凸鏡成象的各种情况

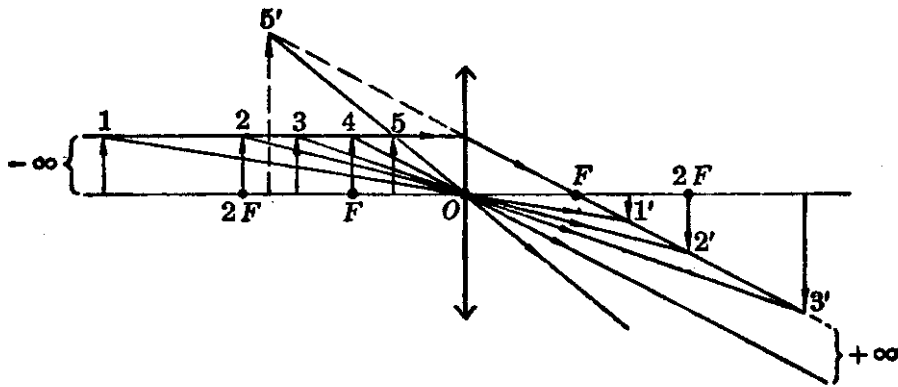


图 3-65 凸透鏡成象的各种情况

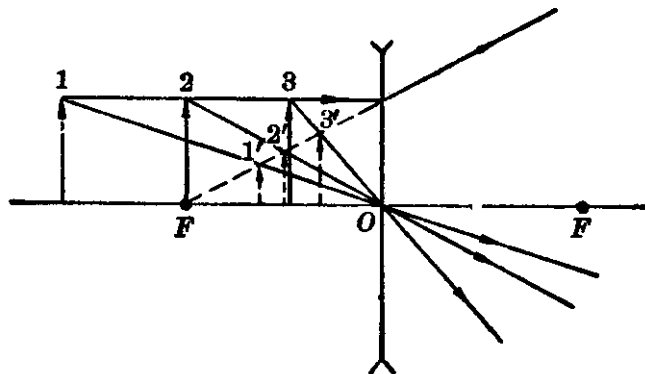


图 3-66 凹透鏡成象的各种情况

一点跟凸鏡成象的情况相同), 虚象跟物体在透鏡的同一側(这一点跟凸鏡成象的情况不同). 凸透鏡所成的象的虚实、倒正、大小决定于物体的位置. 图 3.65 与图 3.66 分别是物体在不同的位置时, 凸透鏡和凹透鏡成象的光路图.

### 7. 球面鏡成象跟透鏡成象的几点比較

#### 球面鏡成象

(1) 成象公式:  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ .

$u$  是正值;

$v > 0$  表示成实象 (象跟物体在鏡面的同一側);

$v < 0$  表示成虚象 (象跟物体分居在鏡面的兩側);

$f > 0$  表示凹鏡的焦距;

$f < 0$  表示凸鏡的焦距.

(2) 象的放大率:

$$K = \frac{A'B'(\text{象长})}{AB(\text{物长})},$$

$$K = \frac{v(\text{象距})}{u(\text{物距})},$$

#### 凹面鏡

物体在球心以外 ( $u > 2f$ ),

$K < 1$  (縮小、倒立的实象);

物体在球心上 ( $u = 2f$ ),

$K = 1$  (跟物体大小相等的倒立实象);

物体在球心以內、焦点以外 ( $R > u > f$ ),

$K > 1$  (放大、倒立的实象);

物体在焦点以內 ( $u < f$ ),

$K > 1$  (放大、正立的虚象).

#### 凸面鏡

物体在任何地方,

$K < 1$  (縮小、正立的虚象).

#### 透鏡成象

(1) 成象公式:  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ .

$u$  是正值;

$v > 0$  表示成实象 (象跟物体分居在透鏡的兩側);

$v < 0$  表示成虚象 (象跟物体在透鏡的同一側);

$f > 0$  表示凸透鏡的焦距;

$f < 0$  表示凹透鏡的焦距.

(2) 象的放大率:

$$K = \frac{A'B'(\text{象长})}{AB(\text{物长})},$$

$$K = \frac{v(\text{象距})}{u(\text{物距})},$$

#### 凸透鏡

物体在  $2f$  以外 ( $u > 2f$ ),

$K < 1$  (縮小、倒立的实象);

物体在  $2f$  上 ( $u = 2f$ ),

$K = 1$  (跟物体大小相等的倒立实象);

物体在  $2f$  以內、焦点以外 ( $2f > u > f$ ),

$K > 1$  (放大、倒立的实象);

物体在焦点以內 ( $u < f$ ),

$K > 1$  (放大、正立的虚象).

#### 凹透鏡

物体在任何地方,

$K < 1$  (縮小、正立的虚象).

### 复习题三

1. 用凹鏡将一个烛焰的象成在离烛焰 16 厘米的屏上, 使象长为烛焰长的 3 倍, 問这个凹鏡应放在什么地方? 它的焦距是多大?

2. 凹鏡中所成的象是物体长的  $\frac{1}{4}$ , 把物体向凹鏡移动 5 厘米, 象长就变为物长的  $\frac{1}{2}$ , 求凹鏡的焦距.

3. 透鏡的焦距是  $f$ , 为了得到放大率是  $g$  的象, 求物体跟透鏡間的距离.

4. 用透鏡得到灯絲在光屏上的象, 屏和灯絲相距 90 厘米. 如果灯絲象的长度是灯絲长度的 3.5 倍, 問灯絲离开透鏡有多远?

5. 蜡烛到光屏間的距离是 100 厘米, 要在光屏上得到放大 4 倍的象, 問应当用哪一种透鏡? 透鏡焦距是多大? 应将透鏡放在什么地方?

6. 用凸透鏡在屏上得到一个正方形发光体的象, 正方形发光体离透鏡的距离是 30 厘米, 象的面积是发光体面积的 4 倍, 求象的位置和透鏡的焦距.

7. 用焦距为  $f$  的凸鏡所得的象, 长度为物体的  $\frac{1}{n}$  倍, 試証明物距  $u = (n-1)f$ .

8. 在发光体与屏間放一个凸透鏡, 調节发光体的位置使在屏上成的象比物体大 1 倍, 然后把透鏡向屏移动 36 厘米, 則这时象长只有物长的  $\frac{1}{2}$ , 求透鏡的焦距.

## 第四章 光学仪器

利用球面鏡、透鏡成象的不同情况,可以制成各种类型的光学仪器,用来帮助眼睛观察或测量. 不同性质和类型的光学仪器,在一定的程度上把人的眼睛“武装”起来,大大的增强了人們的观察能力. 所以光学仪器不仅在日常生活中很常見,在生产建設、国防和科学研究中也应用得极其广泛. 在这一章里,我們將要討論几种常見的光学仪器的构造、原理和应用.

### § 4.1 照 相 机

照相机是研究物理現象时一項很重要的工具,例如在研究天文現象、光現象、原子核的变化的时候,就常常要用到它. 一張照片往往是事实最好的見証,它能够把一些瞬息即逝、肉眼一下子很难看得仔細的現象摄取下来并长期保存着,供人們从容反复地研究.

照相机是利用凸透鏡成縮小实象的原理制成的. 它属于  $u > 2f$ ,  $f < v < 2f$ ,  $K < 1$  的情况. 照相机一般是由鏡頭、光圈、快門、暗箱等几个主要部分組成的. 图 4.1 是一种照相机的外形图.

(1) 鏡頭: 最簡單的鏡頭就是一个凸透鏡,一般照相机的鏡頭是由一組透鏡組合而成的(图 4.2). 它的作用相当于一个凸透鏡,它的第一片透鏡的位置是能够調节的,从而可以改变整个透鏡組的焦距  $f$ ,使得在不同的距离下摄影,景物的实象都能清晰地成在底片上.

(2) 光圈: 光圈是在鏡頭后面(或者是在鏡頭的透鏡之間)的

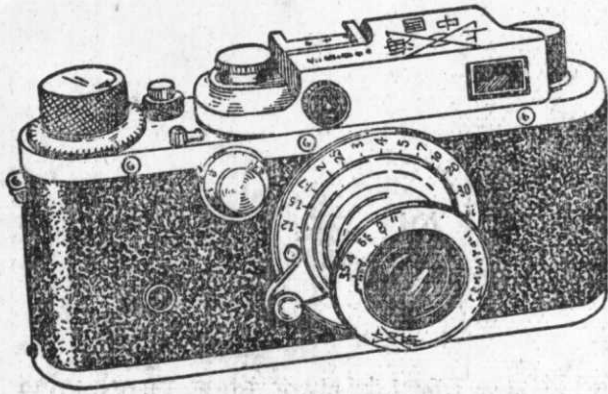


图 4·1 照相机

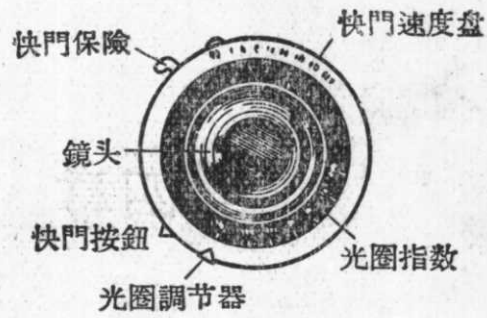


图 4·2 镜头

一个孔，它是由十多片弧形的金属薄片制成的。孔的大小可以放大和缩小，用来调节进入镜头的光线的多少。图 4·3 表示几种不同大小的光圈， $f11$ ， $f8$  等是表示光圈大小的数字。

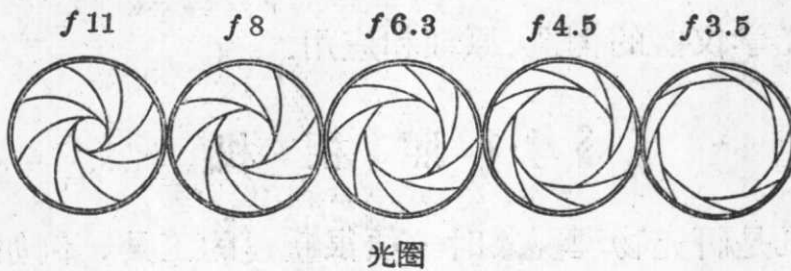


图 4·3

(3) 快门：快门是控制光线进入镜头时间长短的机械装置。图 4·4 是一种合页式的快门，快门从开启到合拢的过程如图中所示，在这一段时间内，光线就进入了镜头。它和光圈一起来控制进入镜头的光线的多少，在摄影的时候，快门开启的时间和光圈的大小要很好地配合起来。



图 4·4 快门开启过程

(4) 暗箱：暗箱就是照相机的机身部分。有的暗箱长度（从镜头到感光片之间的距离）是可以调节的，有的暗箱长度是固定的。图 4·1 所示的小型照相机暗箱的长度就是固定的。在暗箱里



展开的感光片对着镜头置放着,在快门没有开启以前,感光片上受不到光的照射。

摄影的时候,先把镜头对着要拍摄的景物,调节暗箱长度,(如果暗箱是固定的,就调节镜头第一片透镜的位置。)使得景物的象能够清晰地成在感光片的位置上,这个过程叫做**对光**,如图4·5所示。有的照相机暗箱后面有一块毛玻璃,放在相当于感光片的位置上,如果景物的象能够清晰地成在毛玻璃上,也就一定能够清晰地成在感光片上,有的照相机利用反光镜把毛玻璃改装到镜箱的上方,调节镜头和感光片的距离,当使毛玻璃上出现清晰的象的时候,就算对光对好了;对光以后,就可以掀动快门,使感光片**曝光**(或称**露光**),物体的象就成在感光片上了。感光片上涂有感光药剂,受到光的作用以后就起了化学变化,物体的象就留在感光片上。一般说来,物体各部分对于光的反射的情况是不相同的,所以从物体各部分射来的光线的强弱也各不相同,感光片上各部分起的化学变化程度也不相同;感光片上感光的程度必须适宜,拍出来的照片才会清楚,效果才好。控制感光的程度一般是采用这样两种方法:(1)改变光圈的大小;(2)改变曝光的时间。光强的时候,可缩小光圈,或缩短曝光时间,这样,进入镜头的光线就不会太多;光弱的时候,可放大光圈,或延长曝光时间。实际上,光圈的大小和曝光时间的长短是可以相互调剂的,只有把光圈的大小和曝光时

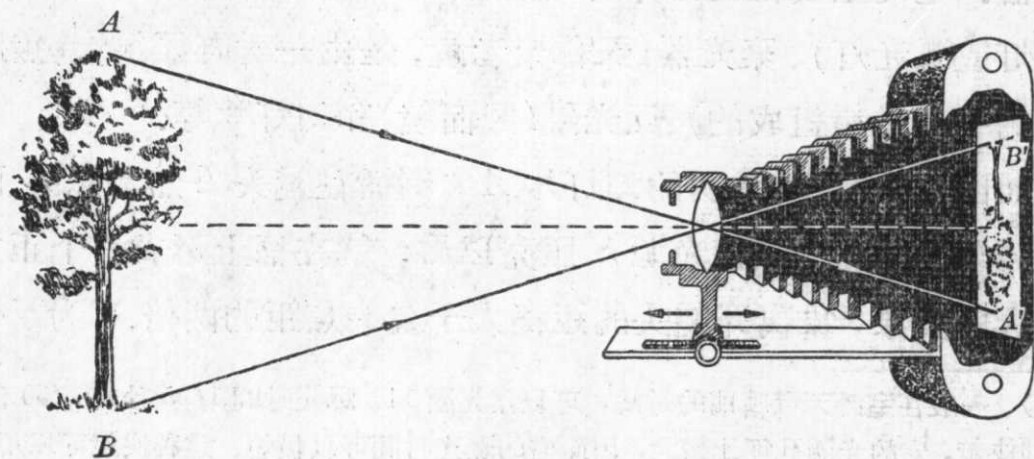


图 4·5



間配合好,才能使底片上的感光程度适宜<sup>①</sup>。

拍摄完毕以后,要在暗室里把已經曝光的感光片取出来,依次在显影液和定影液里浸过,这时候感光片上就显示出跟所拍摄的物体明暗相反的图象来,这就是**底片**。再把底片复盖在涂有感光剂的照相紙上,使它曝光,随后把已經感光的照相紙依次放在显影液和定影液里浸一定的时间,就得到明暗程度跟底片相反、而跟实物相同的正片,这就是**相片**(如图 4·6 所示)。



底片



相片

图 4·6

## § 4·2 幻 灯 机

幻灯机是利用凸透鏡成放大实象的现象制成的,属于  $f < u < 2f, v > 2f, K > 1$  的情况。幻灯机一般用来放映图片,有时也称做映画器。它的主要組成部分有: 镜头(凸透鏡)、光源(功率較大的白熾灯或弧光灯)、聚光器(又称聚光鏡,是由一对直徑很大、焦距較短和平凸透鏡組成的)、反光鏡(凹面鏡)和幻灯片等。

如图 4·7 所示,透明的幻灯片  $AB$ ,倒插在镜头  $L$  焦点以外、两倍焦距以內的地方,經光源  $S$  照亮以后,就在幕上形成一个正立的放大的实象,象离开镜头的距离大于镜头焦距的两倍。为了使

<sup>①</sup> 一般在室外天气晴朗的时候,可以用光圈 11、曝光时间 1/25 秒或 1/50 秒。有一种快鏡,它的光圈孔徑比較大,因而它的曝光时间可以极短。这种快鏡可以用来拍摄正在运动着的物体的形象。

这个放大的实象不致于太暗，就必须增强照明，所以，除了要用很强的光源  $S$  以外，还要利用聚光镜  $L'$  和反光镜  $M_1$ ，使光源发出的光比较集中地投射到幻灯片上去。聚光镜  $L'$  的直径比较大，焦距比较短，光源放在它的焦点以外的地方，光线经过聚光镜的折射以后就比较集中的投射到幻灯片上。反光镜  $M_1$  安装在光源的另一侧，光源恰好放置在凹镜的球心上，利用凹镜的反射，也可增强射到幻灯片上的光线。图 4·7 所示的幻灯机只能放映透明的图片，称做透射式幻灯机；还有一种反射式幻灯机，它能够放映不透明的图片。

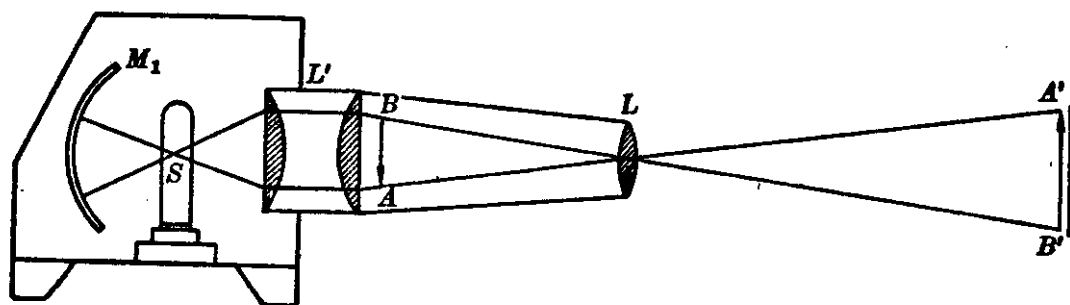


图 4·7 幻灯机

图 4·8 就是反射式的幻灯机。把要放映的图片放在平板  $P$  上，从光源  $S$  发出的光，射到图片上经过反射以后就射到平面镜  $M_2$  上，再经过  $M_2$  的反射和镜头  $L$  的折射，就在幕上成一个放大的实象。由于经过图片本身和平面镜  $M_2$  的两次反射，有很大一部分光线被吸收了，所以映在幕上的象要比透射式幻灯机映出的象暗一些。

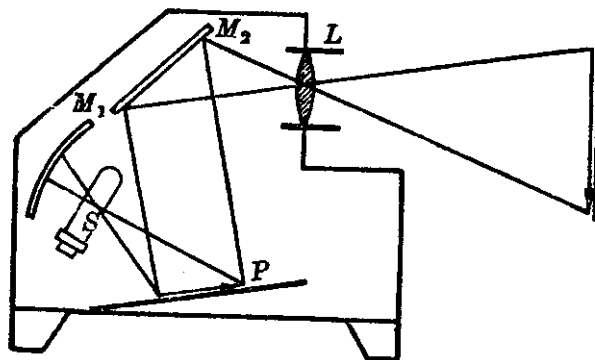


图 4·8 反射式幻灯机

有許多幻灯机是两用的,即既能放映透明的幻灯片,又能放映不透明的图片,称为透射、反射两用幻灯机。因为幻灯机中所用的光源比較强,放映机里的温度就很高,为了不致损坏图片和其他器件,幻灯机里常常还装有一个小电扇,用来降低幻灯机里的温度。

放映幻灯的时候,先装上幻灯片(倒插在幻灯片匣内)或不透明的图片,再調节镜头的位置,使得象恰好清楚地成在預先装好的幕上,然后把固定镜头的螺絲旋紧。放映最好在暗室里进行,因为这样效果比較好。沒有散热电扇的幻灯机,放映的时间不要过长。

### § 4.3 电 影 机

电影放映机是用来放映电影的。它的基本原理大致和幻灯机相似。电影机放映影片就相当于—部幻灯机在很快的自动更換着幻灯片,每秒钟內經過放映机镜头的影片画面有 24 个。影片把每一个动作都分成了好几个部位不同的照片,它是电影摄影机对着活动的景物每隔  $1/24$  秒摄影一次依次拍摄出来的,影片上每一个画片經過镜头的时候,在銀幕上就映出它放大的实象。例如:

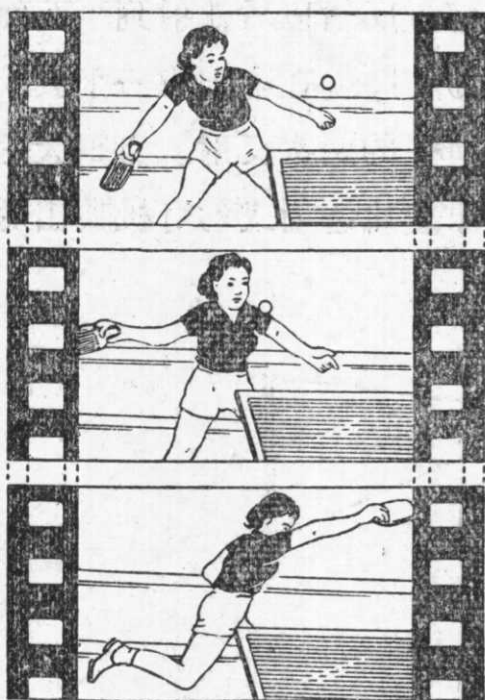


图 4.9

乒乓运动员某一次抽击的动作是在 1 秒钟內完成的,电影摄影机对着它在一秒钟內就連續拍摄出 24 张照片(每隔  $1/24$  秒拍摄一張),这个动作就在影片里被均匀地分成了 24 个过程,图 4.9 是在这一系列过程中选出来的三个画面。放映的时候,电影机让影片以同样的速度通过镜头,一秒钟內銀幕上就有 24 張放大的象出現,使这个抽击的动作又重現出来。

影片上的画面是一个又一个地

連接着的，放映電影的時候用電動機帶動影片依次一張一張地通過鏡頭，每當鏡頭上更換畫面的時候，電影機裏的一個開閉器就把鏡頭遮住，不讓畫面接頭的地方在銀幕上映現出來，當下一個畫面正對着鏡頭的時候，開閉器又打開，於是畫面又現在銀幕上。每個畫面在銀幕上大約停留 0.04 秒的時間，更換畫面時銀幕上黑暗的時間大約是 0.01 秒。但是在我們看電影的時候，覺得銀幕上的動作是持續的，並沒有間歇的閃動，這是什麼緣故呢？因為，當眼睛看見任何物體的時候，眼睛里就有了這個物體的象（這一點下面還要仔細討論），物體移去以後，視神經對它的印象還不會立即消失，而要延續 0.1 秒的時間，這種性質叫做眼睛的**視覺暫留**。我們可以做一个很簡單的實驗來証實眼睛有視覺暫留的特性：取一把小團扇，在它的一面畫一個執拍的乒乓球運動員，在另一面畫一張乒乓球台（如圖 4·10 所示）。用手將扇柄迅速

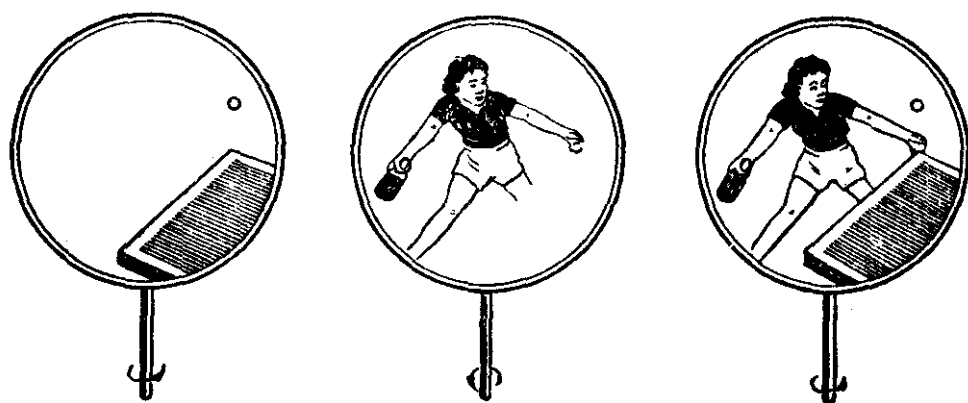


圖 4·10

地轉動起來，看起來就會覺得乒乓球運動員好像是在乒乓球台上打球一樣，這就是眼睛的視覺暫留的緣故。同樣道理，銀幕上映出的是一張一張雖然相差很少却是不連續的象，但看上去會感到動作是持續的。

#### § 4·4 眼 睛

人的眼睛，就它的構造來說，跟照相機很相似，也可以看成是



一种“光学仪器”。图 4·11 就是人的眼睛的简图，人眼睛的半径平均约为 2.5 厘米，形状很象一个球体，所以称它做眼球。眼球里的

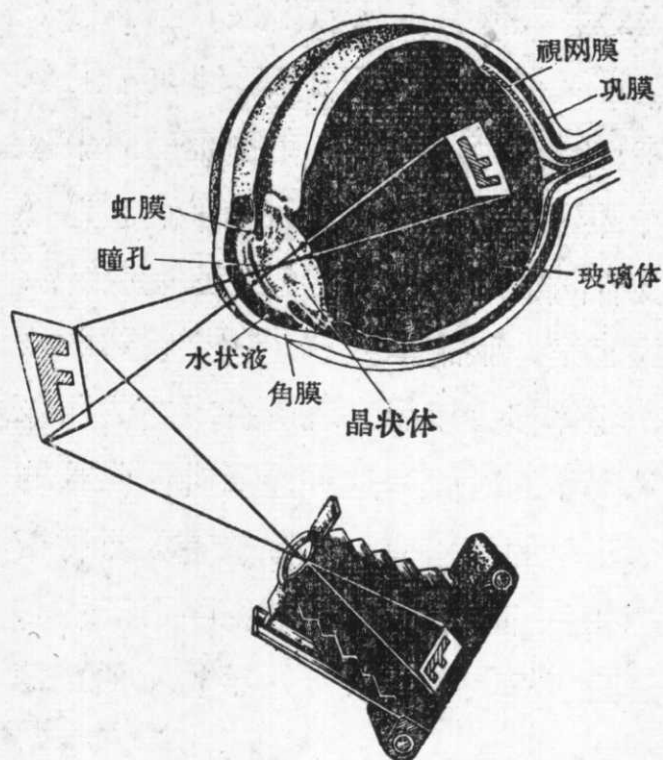


图 4·11

晶状体很象一个双凸透镜（透镜两侧球面都是凸面的凸透镜），其边缘支承在特殊的肌肉和韧带上。晶状体和透明的角膜之间充满着无色透明的水状液，晶状体和视网膜之间充满着另一种无色透明的液体——玻璃体。从物体射出的光线，穿过角膜进入眼球的时候，经过水状液、晶状体和玻璃体的折射，形成一个倒立缩小的实象，

如果这个实象恰好成在视网膜上，刺激分布在视网膜上的感光细胞，视神经就会把印象传给大脑，这时候我们就看见这个物体了。

我们可以做一个简单而有趣的实验，来证实物体在视网膜上所成的象是倒立的：在一张硬纸片上戳一个很小的针孔，用手拿在离眼睛 8~10 厘米处；另一只手拿着一枚大头针，竖直地放在贴近眼睛的地方，使纸片上的孔、大头针和眼睛恰好在同一直线上。用一只眼睛对窗或窗外观看（如图 4·12 所示），这时候眼睛不仅能够通过小孔看见窗和窗外的景物，还能看见大头针清晰的倒影。

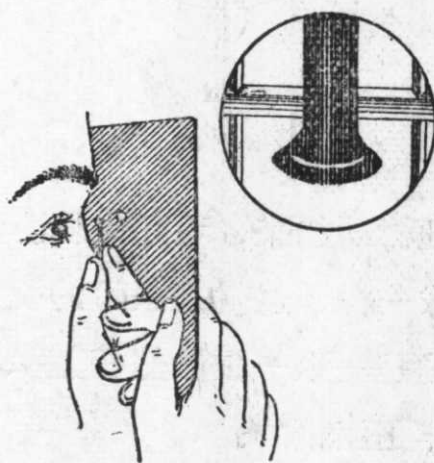


图 4·12

当我们看见物体的时候，如果还要求看清楚这个物体，也就是要能够清晰地分辨物体的这一部分和那一部分，那么，就不仅需要

物体的象成在视网膜上,同时还要求成在视网膜上的象足够明亮,以及物体两端对眼睛的光心所張的角——**視角**至少不小于1分。当物体对眼睛所張的視角小于1分的时候,在视网膜上所成的象,就会落在同一个感光細胞上,整个物体看上去就縮成了一点,无从分辨。这时候眼睛甚至連哑鈴和鉛球也分辨不清。要使得物体的这一部分和那一部分能够被我們眼睛区分开来(例如我們要看清楚一个哑鈴),就必须使物体的这两部分分別落在两个不同的感光細胞上,只有当物体的两部分对眼睛的光心所張的視角大于1分的时候,这两部分的象才会落在两个不同的感光細胞上,如图4·13所示。所以看得清楚物体的条件之一是物体对眼睛所張的視角要大于1分。

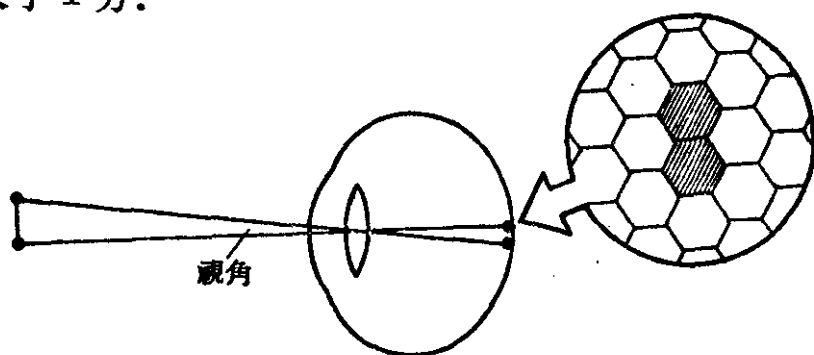


图 4·13

在一定的程度上,人的眼睛能够在远近不同、光綫强弱不同的情况下,看清楚外面的物体。这是什么道理呢?

首先是,眼睛晶状体边缘的肌肉有一种收缩和弛張的机能,通过它可以改变晶状体的曲率(从而改变它的焦距),使得离开眼睛远近不同的物体,經過調节以后,象都能够成在视网膜上(眼睛要看清楚一个物体,首先要这个物体的象成在视网膜上),眼球里晶状体到视网膜之間的距离(就是象距  $v$ )是固定不变的,物体离开眼睛的距离(就是物距  $u$ )有时远有时近,依靠晶状体曲率的調节可以改变焦距  $f$ ,从而使得晶状体的焦距  $f$  恰好滿足公式:  

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$
 那么,象就能够成在视网膜上了。

其次,眼睛还有另一种适应能力,就是能够控制进入眼球的光线的多少,眼睛要看清楚一个物体,除了象要成在视网膜上以外,还需要成在视网膜上的象足够的明亮. 每当我们刚从外面进入正在开映的电影院里时,周围什么也看不清楚,这就是因为周围物体成在视网膜上的象太暗的缘故,等我们在电影院里坐了一些时间以后,又能够看清楚邻近的人了,这是什么缘故呢? 因为眼睛晶状体前面有一层虹膜(见图 4·11),虹膜当中有一个孔,叫做瞳孔,瞳孔的大小是可以改变的,改变它就可以控制进入眼球的光线的多少,它的作用象照相机中的光圈一样. 白天我们在室外,瞳孔收缩得比较小,防止有过多的光线进入眼睛产生过强的刺激;当我们进入电影院或其他黑暗的地方时,瞳孔就会慢慢地放大,让较多的光线进入眼睛. 正是这个原因,人们进入电影院后,过了一会,就又能看清楚邻近的人了. 人的瞳孔在强烈的光线下直径可以收缩到 2 毫米,在光线很微弱的情况下,可以放大到 8 毫米左右.

再其次,眼睛要看清楚一个物体,还要满足第三个条件,就是物体的两端对眼睛光心所张的视角要大于 1 分. 物体离开眼睛越远,张的视角也越小,在视网膜上成的象也就越小(如图 4·14). 当

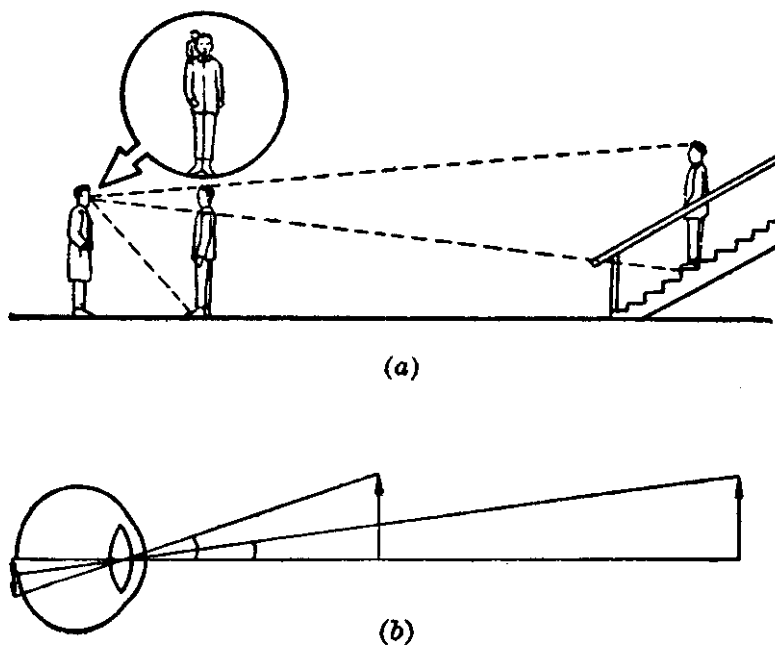


图 4·14

物距  $u$  一定的时候, 视角和象的大小也是一定的, 眼睛自身没有调节所成象大小的能力, 每当视角太小的时候, 我们只能把物体移近一些, 或者使眼睛靠近物体去观察, 这样就可以看得清楚一些, 因为这时候的视角相对的增大了. 但是, 这也有一个限度, 那就是如果物体离开眼睛的距离移近到某一个一定的数值以后, 即使晶状体的曲率调节到最大也不能使物体的象成在视网膜上, 这时候物体仍旧不能被看清楚. 眼睛经过调节所能够看得清楚的最短距离叫做**近点**. 年青人的正常眼睛, 近点约在 10 厘米左右.

眼睛的晶状体在曲率最小的时候, 能够看得见多远的物体呢? 正常的眼睛在曲率最小的时候, 能够把平行光束聚在视网膜上, 也就是能够看得清楚无限远的物体 (因为从无限远物体射来的光线是平行的). 在天气晴朗的夜晚, 我们能够看清楚月亮清晰的轮廓, 说明正常的眼睛在晶状体曲率最小的时候能够看清楚无限远处的物体. 眼睛能够看得清楚的最远距离, 叫做**远点**. 正常的眼睛远点是无限远.

人的眼睛虽然有一定的调节能力, 但是长时间在高度调节的情况下作很近距离的观察, 眼睛很快就会感到疲劳. 人们的眼睛比较习惯于在适当的距离 (对正常眼睛讲, 这个距离约为 25 厘米.) 下看东西, 这时眼睛不容易感到疲劳, 所以我们又把 25 厘米叫做眼睛的**明视距离**.

人的眼睛也有不正常的, 象近视眼和远视眼等. 下面就来讨论这两种眼睛的缺陷和矫正的方法.

(1) **近视眼** 这种眼睛的晶状体的折光本领比正常的眼睛大些, 或是角膜到视网膜的距离比正常的眼睛长些, 晶状体在曲率最小的时候, 也不能把平行光束会聚在视网膜上 (而是聚在视网膜前), 这种眼睛远点不是无限远, 只适于看较近的物体, 近点也比 10 厘米小. 要使这种眼睛能够看清楚无限远的物体, 必须把物体所成的象从视网膜前向后移到视网膜上. 矫正近视眼的方法是戴



一副用凹透鏡作的眼鏡（俗称近視眼鏡），利用这种透鏡对于光束的发散作用，可以使得物体所成的象远一些，根据眼睛近視程度的不同，只要選擇适当焦度的凹透鏡，就能使无限远物体的象剛好成到眼睛的視网膜上（見图 4·15）。

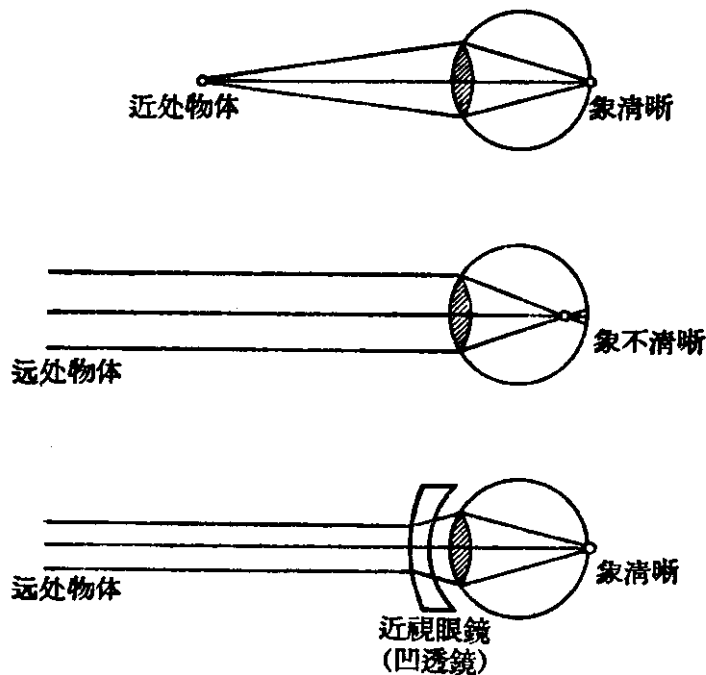


图 4·15 近 視 眼

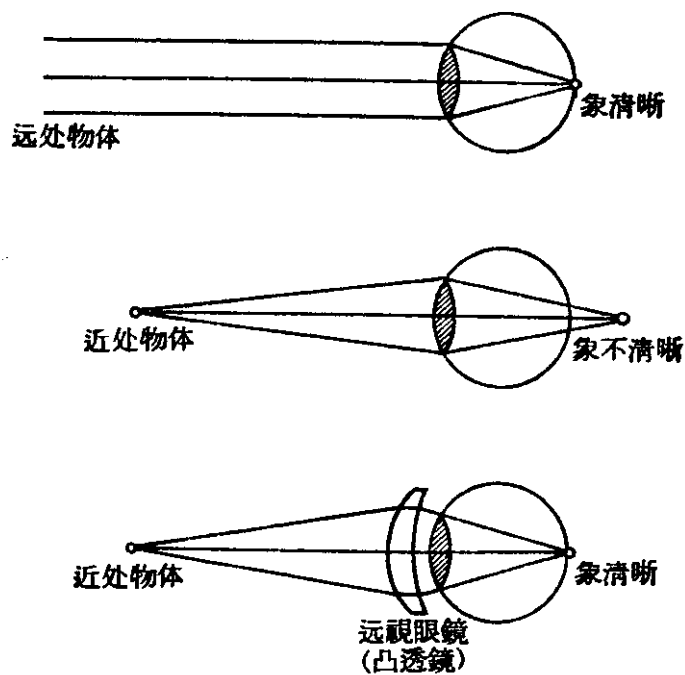


图 4·16 远 視 眼

(2) 远視眼 这种眼睛的晶状体的折射本领比正常的眼睛小些,或是角膜到视网膜的距离比正常的眼睛短些,晶状体在曲率最小的时候,无限远处物体的象,成在视网膜的后面,要经过调节才能看清楚无限远处的物体;较近处物体的象,成在视网膜的更后面一些,这时候要看清楚物体,晶状体就需要作更大的调节,这种眼睛(远視眼)的近点比 25 厘米还要远,(物体离开眼睛接近 25 厘米时,虽经调节,眼睛仍不能看清楚这个物体。)矫正远視眼的方法是戴一副凸透镜做的眼镜(俗称远視眼镜)。利用这种眼镜对于光束的会聚作用,使得物体所成的象可以移近一些,根据眼睛远視程度的不同,只要选择适当焦度的凸透镜就可以使近处物体原来成在视网膜后的象,刚好成在视网膜上(见图 4·16)。

正常的眼睛,或是有缺陷的眼睛经过矫正以后,虽然都能使远处或近处物体的象成在视网膜上,但是,如果物体对眼睛的光心所张的视角小于 1 分的时候,还是看不清楚,这时候就需要设法增大视角,使视网膜上的象增大。增大视角的途径有两方面:(1)把物体移近。平时我们为了辨别物体的细小部分,总是走到物体的近前去看,或者把物体拿到眼的近旁来仔细观察。(2)利用光学仪器的帮助。当物体很小,移到眼的近点时视角还不到 1 分,或者物体很远,而它们离眼睛的距离又是不能缩短的时候,(例如观察天体;作战时观察敌情;坐在很远的座位上看戏等。)就需要使用各种光学仪器来增大视角。下面就介绍几种常见的用来增大视角的光学仪器。

## § 4·5 放 大 鏡

放大鏡是一种最常见的用来观察细小物体的光学仪器。它是一个焦距很短的凸透镜,当物体放在它的焦距以内时,我们就可以看见物体被放大的虚象。一般放大鏡的焦距在 1~10 厘米之間,视角放大的倍数在 2.5~25 倍左右。

从图 4·17 可以看出放大鏡的作用：图中①表示一般情况下，物体  $AB$  放在明視距离  $d$  处，这样，进行长时间观察眼睛也不致于感到疲劳；但是，如果物体所張的視角  $a$  太小，这时眼睛还是看不清楚。图中②表示物体移近到  $A_1B_1$  处，这时視角  $b$  比原来的增大了，但是，由于物体离开眼睛太近，眼睛要經過高度的調节才能看清楚，因此很快就会感到疲劳；有时，甚至移到近点以内眼睛經過調节也还是看不清楚。图中③表示在眼睛的近旁放一个放大鏡，让物体的位置  $A_1B_1$  落在放大鏡的焦距  $f$  以内，适当調节放大鏡的位置，可以使物体的虛象  $A'B'$  刚好也位于明視距离上，这样，虛象  $A'B'$  所張的視角还是  $b$ ，但是眼睛观察起来就会感到清楚和舒适，这就是放大鏡的作用。

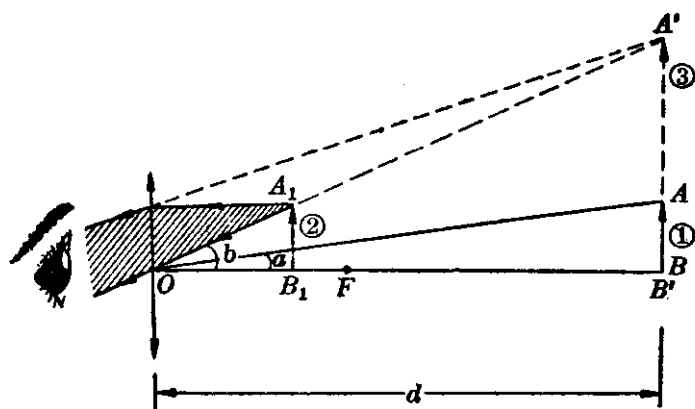


图 4·17 放大鏡

根据图 4·17 我們来研究放大鏡的視角放大倍数。不用放大鏡时，物体  $AB$  在明視距离处对眼睛所張的視角为

$$a \approx \tan a = \frac{AB}{d};$$

使用放大鏡后的視角为

$$b \approx \tan b = \frac{A'B'}{d} \approx \frac{A_1B_1}{f} = \frac{AB}{f}.$$

(在視角  $a$  和  $b$  不太大的情况下，可以认为  $\tan a \approx a$ ,  $\tan b \approx b$ , 又因为放大鏡离开眼睛总是比較近的，所以在上面两种情况下，我們都用物体对凸透鏡的光心所張的角作为視角了。) 不用放大鏡时

物体的視角为  $a$ ，用放大鏡时象的視角为  $b$ ，所以放大鏡增大視角的倍数  $m$  应为

$$m = \frac{b}{a} = \frac{AB}{f} / \frac{AB}{d} = \frac{d}{f}.$$

已知明視距离  $d$  为 25 厘米，放大鏡的焦距  $f$  約在 1~10 厘米之間，所以放大鏡視角增大倍数在 2.5~25 倍左右。从上面的公式中可以看出，要进一步增大視角倍数，就要把凸透鏡的焦距做得更短，这样，透鏡的球面曲率就要做得更大，用这种放大鏡看起物体来，能够看得清楚的范围就会很小，只有一小块看得很清楚，旁边的都很模糊，同时这种曲率大、焦距短的透鏡也不容易磨得很准确，所以一般的放大鏡焦距都在 1~10 厘米之間。

放大鏡所增大的視角倍数，就是放大鏡的放大率。放大鏡、显微鏡和望远鏡等光学仪器，它們主要的作用是增大視角，仪器的放大率就是指它們視角增大的倍数，所以仪器的放大率定义为

$$m = \frac{b}{a},$$

$a$  是不用光学仪器时物体所張的視角， $b$  是用光学仪器后虚象所張的視角， $m$  就是仪器的放大率。可以看出，仪器的放大率  $m$  和前面学过的象的放大率  $K$  在意义上是不相同的，仪器的放大率  $m = \frac{b}{a}$  是角放大率，象的放大率  $K = \frac{v}{u}$  是长度放大率。

## § 4.6 显 微 鏡

观察非常細微的物体或物体的細微部分时，我們需要用放大率更高的光学仪器，显微鏡（图 4.18）就是这种光学仪器，它的放大率要比放大鏡高得多。

显微鏡是由两組透鏡組成的，对着物体的一組透鏡叫做物鏡，对着观察者眼睛的一組透鏡叫做目鏡。物体（标本）第一次經過物鏡成的象是放大的实象，这一实象落在目鏡的焦距以內，于是又进

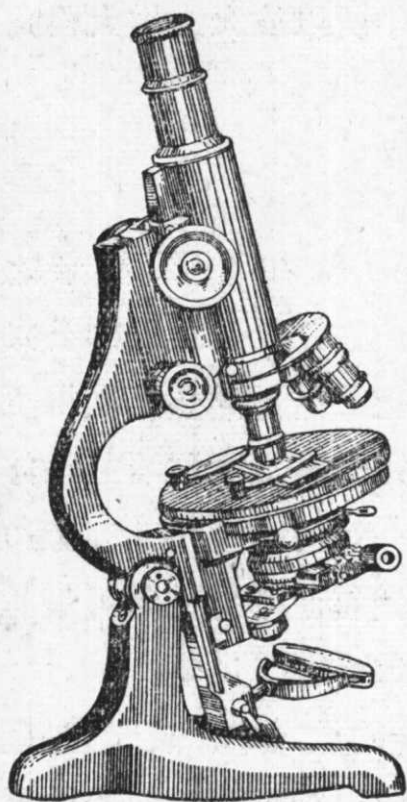


图 4·18 显微镜

一步被目鏡放大成虛象，从目鏡中看到的物体的虛象是經過两次放大的，所以視角增大的倍数比放大鏡高。

显微镜的物鏡焦距  $f_1$  比較短<sup>①</sup>，目鏡的焦距  $f_2$  比較长，物体  $AB$  放在物鏡下，虽然离开物鏡很近，但是仍在焦距以外 ( $f_1 < u < 2f_1$ )，使它通过凸透鏡后形成一个放大的实象  $A_1B_1$  (图 4·19(a))。这个实象又位于目鏡的焦距  $f_2$  以內(这时候把实象  $A_1B_1$  看成是一个物体)，根据凸透鏡成象的性质， $A_1B_1$  的光綫經過目鏡  $O_2$  折射后，要形成一个放大的虛象  $A_2B_2$  (图 4·19(b))。图 4·19(c) 就是显微镜成象的光路图，虛象  $A_2B_2$  跟物体

$AB$  是上下倒置、左右互换的，象恰好成在明視距离  $d$  的地方。

設物鏡  $O_1$  和目鏡  $O_2$  的距离(也就是显微镜筒的长)是  $L$ ，物体如果不經過显微镜放大，直接放在明視距离处， $AB$  所張的視角是

$$a = \frac{AB}{d};$$

物体經過显微镜放大以后，虛象  $A_2B_2$  所張的視角是

$$b = \frac{A_2B_2}{d} \approx \frac{A_1B_1}{f_2}.$$

① 显微镜的物鏡  $O_1$  的焦距为什么要很短而目鏡  $O_2$  的焦距又很长呢？因为从物体  $AB$  (标本) 射出的光綫，經過物鏡  $O_1$  折射以后要求形成一个实象(不然的話就不能够利用目鏡使象再一次放大)，而又要求物体离物鏡尽可能的近一些，(不然的話，由于物体离物鏡較远，从物体上射入鏡筒里的光就会太少，这样成的象就会不够明亮。) 要同时满足上面說的两个条件，物鏡的焦距  $f_1$  就需要設計得短一些。又由于物鏡第一次所成物体的实象  $A_1B_1$ ，应当成在目鏡的焦距以內(使得它通过目鏡再形成放大的虛象)，为了保証第一次成的实象  $A_1B_1$  总是落在目鏡  $O_2$  的焦距以內，目鏡的焦距  $f_2$  又总是設計得长一些。

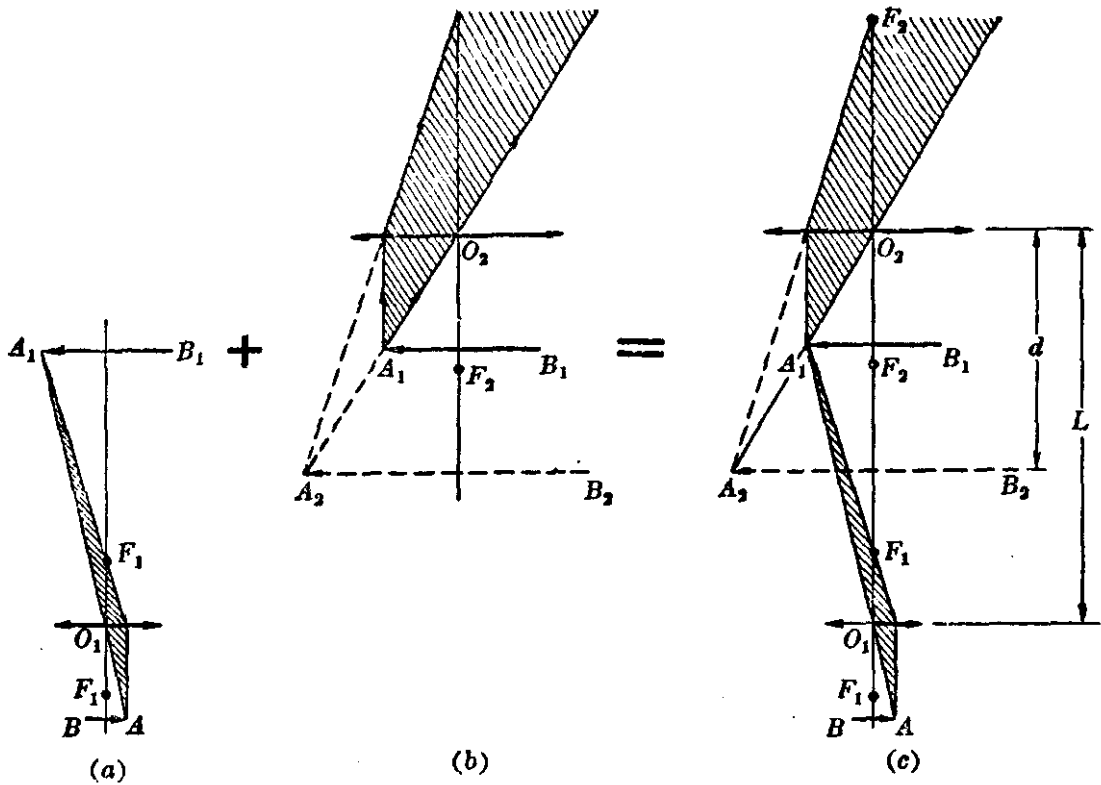


图 4-19

所以显微镜的放大率

$$m = \frac{b}{a} \approx \frac{A_1B_1}{f_2} / \frac{AB}{d} = \frac{d}{f_2} \times \frac{A_1B_1}{AB}$$

从图 4-19 (c) 中  $AB$  经物镜成放大实象的情况看出:  $\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{v}{u} \approx \frac{L}{f_1}$ , 代入上式后, 得出显微镜放大率的公式:

$$m = \frac{dL}{f_1 f_2}$$

**例 1.** 已知显微镜筒的长度  $L$  一般约为 16 厘米, 有一显微镜物镜的焦距为 1 厘米, 目镜的焦距为 2.5 厘米, 求显微镜的放大率.

**【解】** 已知显微镜筒长  $L=16$  厘米, 明视距离  $d=25$  厘米, 物镜的焦距  $f_1=1$  厘米, 目镜焦距  $f_2=2.5$  厘米, 代入显微镜放大率公式  $m = \frac{dL}{f_1 f_2}$ ,

$$m = \frac{25 \times 16}{1 \times 2.5} = 160 \text{ 倍.}$$



在显微镜放大率公式推导的过程中,有下列关系存在:

$$m = \frac{d}{f_2} \times \frac{A_1 B_1}{AB},$$

$\frac{A_1 B_1}{AB}$  就是物镜成实象时的放大率,  $\frac{d}{f_2}$  就是目镜(放大镜)的放大率, 所以显微镜的放大率也就等于物镜的放大倍数和目镜放大倍数的乘积. 例如, 显微镜物镜的放大倍数是 8, 目镜的放大倍数是 10, 显微镜的放大率就是 80.

一般光学显微镜的放大率最高可以达到 3000 倍, 甚至能够把物体上相距  $2 \times 10^{-5}$  厘米的两点清晰地分辨开来. 如果还需要进一步提高放大率, 或者需要把相距比  $2 \times 10^{-5}$  厘米更近的两点分辨开来, 那就不能够利用光学显微镜, 而要利用另一种根据电磁原理制成的**电子显微镜**来放大, (这种显微镜的原理不属于光学研究的范围, 这里就不仔细讲了.) 电子显微镜的放大率可以高达几十



图 4·20 电子显微镜

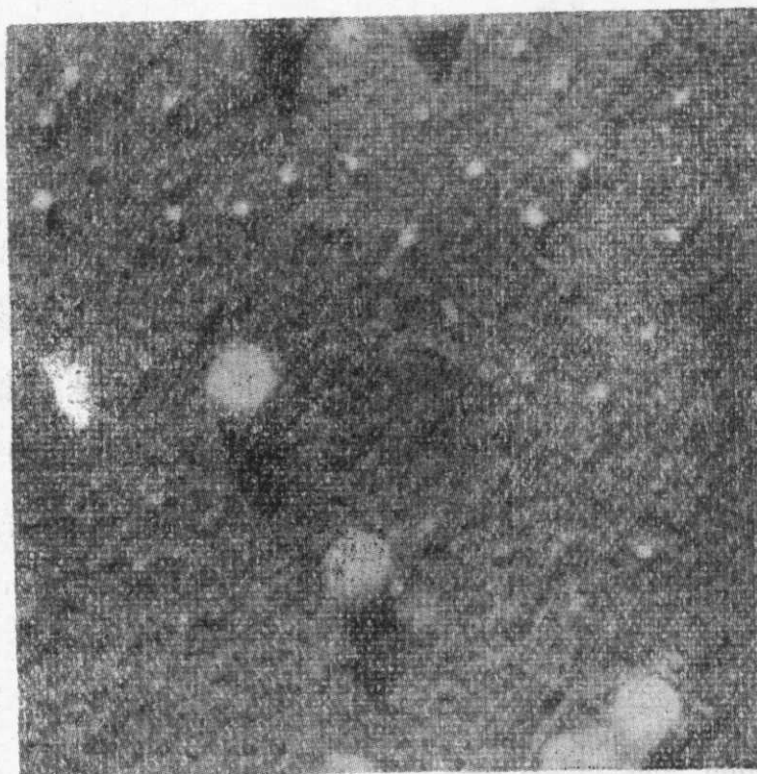


图 4·21 电子显微镜下的病毒

万倍，能够把相距比  $10^{-5}$  厘米更近的两点清晰地分辨开来。图 4·20 就是我国自制的电子显微镜。图 4·21 是用电子显微镜拍摄下来的肝炎病毒的照片。病毒的直径只有  $1.2\sim 1.8\times 10^{-6}$  厘米左右，但从电子显微镜拍摄出的照片里却能够看得很清楚。

## § 4·7 望 远 镜

观察远处的物体，要用望远镜来增大视角。望远镜和显微镜相似，也是由物镜和目镜两个透镜组构成的，它的物镜焦距比较长，目镜焦距比较短，这是和显微镜不同的地方。望远镜的物镜一般总是凸透镜，而目镜却可以是凸透镜，也可以是凹透镜。物镜和目镜同是凸透镜的望远镜叫做开普勒望远镜；物镜是凸透镜，目镜是凹透镜的望远镜叫做伽利略望远镜。

**1. 开普勒望远镜** 开普勒望远镜又称做天文望远镜，或称做倒象望远镜，是天文学家开普勒在 1611 年发明的。它的构造是：物镜和目镜都是凸透镜，物镜跟目镜的距离（望远镜筒的长），



等于这两个透镜焦距的和，也就是物镜的后焦点跟目镜的前焦点重合(如图 4·22 所示)。望远镜对着天体或远方的物体，这时物体对物镜  $O_1$  所張的视角为  $a$ ，自它一端射来一束光线，(因为相距很远，作图时可以近似看成是平行光束。) 经过物镜折射以后，在它的后焦平面上形成一个倒立的实象，这个象既是成在物镜的焦平面上，也是在目镜的焦平面上(因为这两个焦平面是重合的)，所以它再经过目镜折射以后，从目镜射出的光线又是近似的平行光束，但是这时候视角  $b$ ，比没有经过望远镜以前的视角  $a$ ，有了显著的增大。这就是开普勒望远镜增大视角的原理。

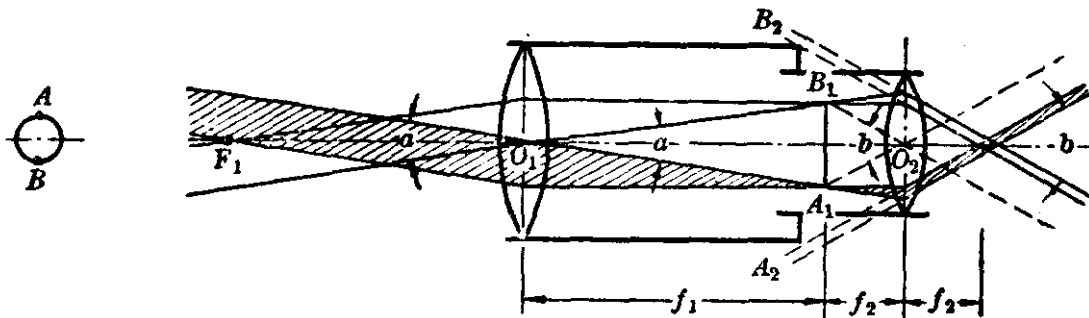


图 4·22 开普勒望远镜

实际上，天体离开望远镜并不是无限远，从天体射来的光束也不是严格的平行光束，从而经过物镜成的倒立实象也不在焦平面上，而是在焦平面外面一些，是属于  $u > 2f$ ,  $2f > v > f$  的情况。第一次成的实象既然在物镜的焦平面以外，也就是在目镜的焦平面以内，所以它再经过目镜折射以后，成的象一定是放大的、对实象来说是正立的(从而对天体来说是倒立的)虚象。可以知道，这时从目镜射出的光束严格说来也不是平行的而是发散的光束。这些发散光束的延长线的会聚点就集成远方天体或物体的虚象。

如图 4·22 所示，天体原来对人眼的视角为  $a$  ( $a \approx \tan a = \frac{A_1 B_1}{f_1}$ )，经过望远镜折射以后的视角为  $b$  ( $b \approx \tan b = \frac{A_1 B_1}{f_2}$ )；所以开普勒望远镜的放大率为

$$m = \frac{b}{a} = \frac{A_1 B_1}{f_2} \bigg/ \frac{A_1 B_1}{f_1} = \frac{f_1}{f_2}.$$

可以看出，物鏡的焦距  $f_1$  越大，目鏡的焦距  $f_2$  越短，望遠鏡的放大率也就越大。天文望遠鏡可以使視角增大幾十倍甚至幾百倍。

**例 2.** 有一天文望遠鏡，物鏡的焦距為 2 米，目鏡的放大率為 10 倍，求望遠鏡的放大率。

**【解】** 已知望遠鏡物鏡的焦距  $f_1 = 200$  厘米，目鏡的放大率  $m_{目} = 10$  倍。

因為天文望遠鏡的目鏡是一個放大鏡，根據放大鏡的放大率公式  $m = \frac{d}{f}$ ,

則 
$$10 = \frac{25}{f_2}, \quad f_2 = \frac{25}{10} = 2.5 \text{ 厘米}.$$

望遠鏡的放大率 
$$m = \frac{f_1}{f_2} = \frac{200}{2.5} = 80 \text{ 倍}.$$

因為天文望遠鏡成的象是倒象，用它來觀察地面上的物體是很不方便的；但是天文望遠鏡有一個很大的優點，就是物體通過物鏡後在鏡筒中成一實象，於是我們可以在鏡筒中成實象的地方裝一個透明的刻度尺，作定量的觀測，或者在成實象的地方安裝攝影

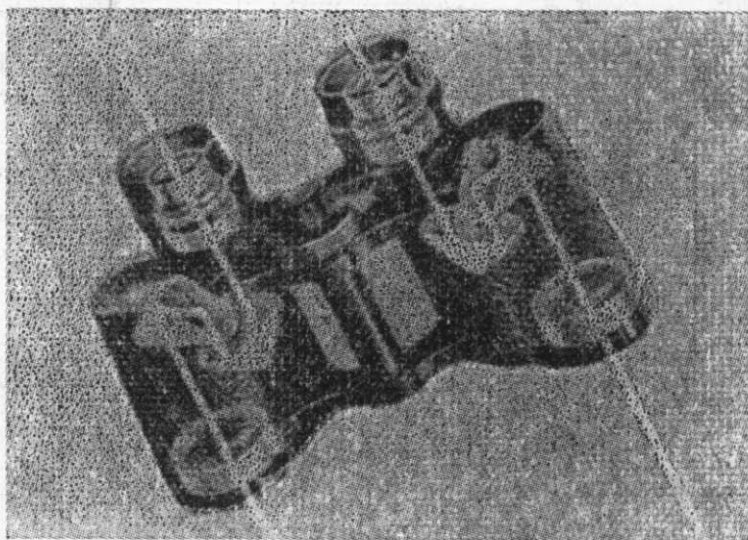


圖 4.23 雙筒稜鏡望遠鏡

装置，把远方的物体或天体的照片拍摄下来。如果在开普勒望远镜的镜筒上，装上一组回轉棱鏡，那么就可以形成物体正立的虚象，用来了望地面的情况。这种望远镜称做棱鏡望远镜，图 4·23 就是一个双筒棱鏡望远镜。

**2. 伽利略望远镜** 这种望远镜是物理学家伽利略在 1609 年发明的。它的构造是：物鏡是凸透鏡，目鏡是凹透鏡，物鏡跟目鏡的距离（望远镜筒的长），等于这两个透鏡焦距的差，也就是物鏡的后焦点跟目鏡的后焦点是重合的，如图 4·24 所示。望远镜对着远方的物体  $AB$ ，这时物体对物鏡  $O_1$  所張的視角为  $a$ ，从物体的一端射来的光束，（因为物体相距很远，所以光束是近似平行的。）經過物鏡折射以后，本来应当会聚在它的后焦平面附近，形成物体倒立的实象；但是在光束沒有会聚成象以前，就已經遇到目鏡，目鏡是个凹透鏡，本来会聚的光束，經過它折射以后又变成发散光束，这些发散光束的延长綫的会聚点就集成物体正立的虚象，这个虚象对眼睛所張的視角为  $b$ ，与沒有經過望远镜时的視角  $a$  相比，显然是增大了。当然，这个視角被增大了的虚象，只有当眼睛对着目鏡观察的时候才能看見。

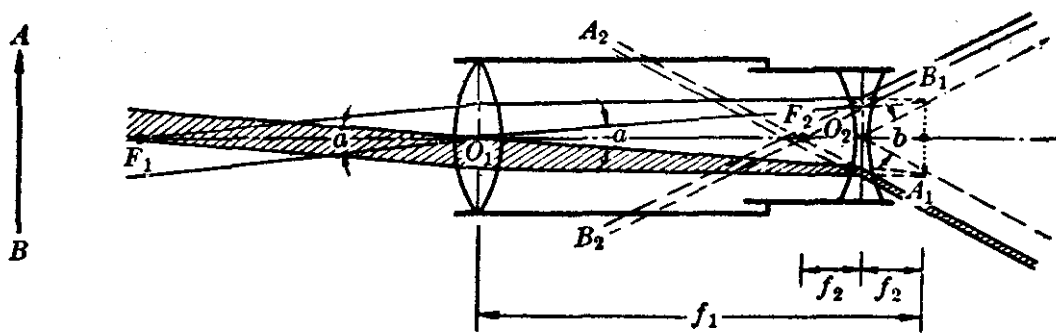


图 4·24 伽利略望远镜

从图 4·24 中也可以得出伽利略望远镜放大率的公式

$$m = \frac{b}{a} = \frac{\frac{A_1 B_1}{f_2}}{\frac{A_1 B_1}{f_1}} = \frac{f_1}{f_2}$$

$$m = \frac{f_1}{f_2}$$

伽利略望远镜最后形成的虚象,对于物体来说是正立的,所以适用于地面了望,常用的双筒望远镜,就是由两个伽利略望远镜组成的。

**反射望远镜** 还有一种目镜是凸透镜、物镜是凹面镜的望远镜,叫做反

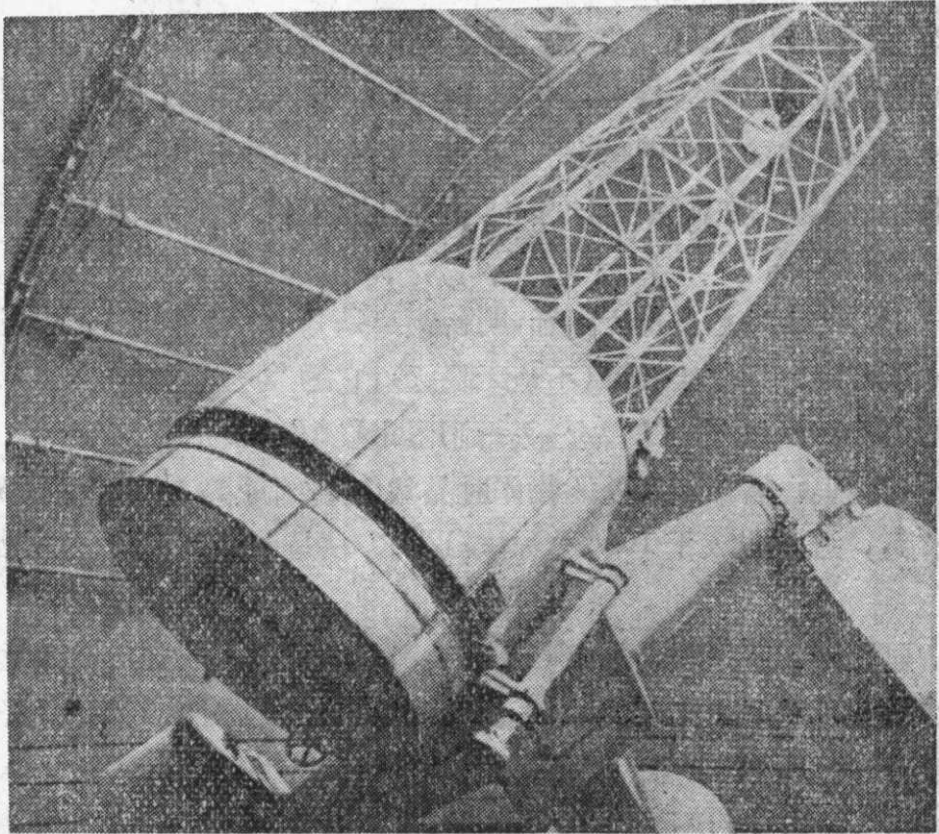


图 4·25 反射望远镜

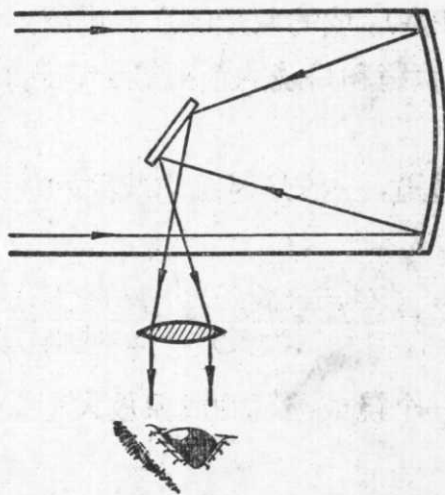


图 4·26 反射望远镜光路图



射望遠鏡，這種望遠鏡常用于天體研究方面，它的物鏡凹面直徑可以做得很大，圖 4·25 是我國自制的反射望遠鏡，其凹鏡直徑長達 60 厘米。圖 4·26 是反射望遠鏡的光路圖。

## 本章提要

1. 這一章所討論的光學儀器，可以分為兩種類型：

(1) 成實象的光學儀器：照相機、幻灯機、電影機、眼睛。

(2) 成虛象的光學儀器：放大鏡、顯微鏡、望遠鏡。

2. 眼睛也可以看成是一種有調節能力的光學儀器。眼睛能看見物體的條件是：物體的象成在視網膜上。眼睛看清楚物體的條件是：(1) 物體的象成在視網膜上；(2) 成在視網膜上的象要足夠明亮；(3) 物體對眼睛的光心所張的視角要大於 1 分。

3. 正常的眼：遠點是無限遠，明視距離是 25 厘米，近點是 10 厘米。

近視眼：遠點比較近（不是無限遠），它的“明視距離”小於 25 厘米，近點比 10 厘米小；矯正的方法是戴一副用凹透鏡做成的眼鏡。

遠視眼：看無限遠處的物體時晶狀體需要調節，它的“明視距離”比 25 厘米遠，近點也大於 10 厘米；矯正的方法是戴一副用凸透鏡做成的眼鏡。

4. 顯微鏡和望遠鏡都是由一個物鏡和一個目鏡組成的，顯微鏡的物鏡焦距比較短，目鏡焦距比較長，用來觀察近處細小難於分辨的物體；望遠鏡的物鏡焦距比較長，目鏡焦距比較短，用來觀察遙遠的物體。它們都能使物體的視角放大，使原來看不清楚的物體能夠被看清楚。

5. 開普勒望遠鏡的目鏡和物鏡都是凸透鏡，物鏡和目鏡之間的距離等於它們的焦距之和 ( $f_1 + f_2$ )，成的象是倒立的虛象。伽利略望遠鏡的物鏡是凸透鏡，目鏡是凹透鏡，物鏡和目鏡的距離等於它們的焦距之差 ( $f_1 - f_2$ )，成的象是正立的虛象。

6. 對於單個鏡或透鏡，一般是討論它成象的放大率  $K$ ，成象放大率的意義是：

$$K = \frac{A_1B_1(\text{象長})}{AB(\text{物長})} = \frac{v(\text{象距})}{u(\text{物距})}$$

隨着物距  $u$  的不同，同一個鏡或透鏡的成象放大率數值也不相同， $K$  是象的長度放大率。

對於光學儀器來說，一般是討論它的儀器放大率  $m$ ，儀器放大率的意義

是：

$$m = \frac{b \text{ (光学仪器中物体的虚象所張的視角)}}{a \text{ (不用光学仪器时, 物体直接所張的視角)}}$$

$m$  是角放大率, 对于同一光学仪器來說, 放大率  $m$  是个定值. 下面是几种簡單光学仪器角放大率  $m$  的計算公式:

$$\text{放大鏡的放大率: } m = \frac{d}{f};$$

$$\text{显微鏡的放大率: } m = \frac{Ld}{f_1 f_2};$$

$$\text{望远鏡的放大率: } m = \frac{f_1}{f_2}.$$

### 复 习 題 四

1. 飞机在 3000 米的高空拍摄地面的照片, 如果要求照片与所攝地面面积的比是  $1:2.5 \times 10^7$ , 問照相机的焦距必須是多长?

2. 照相机的鏡頭已經对准了近处的物体, 如果这时要攝取远景, 問暗箱的长度应当怎样調节? 为什么?

3. 幻灯机中的幻灯片和物鏡相距 40 厘米, 所得的象离物鏡 9 米远, 現在要使象呈现在距物鏡 12 米远的屏幕上, 問应当怎样調节鏡頭?

4. 近視眼、远視眼跟正常眼有什么不同? 为什么矯正近視眼要戴一副凹透鏡, 矯正远視眼要戴一副凸透鏡?

5. 有一个放大鏡, 它的放大率是 10 倍, 問它的焦距和焦度各是多大?

6. 为什么显微鏡物鏡的焦距要比較短, 目鏡的焦距要比較长? 为什么望远鏡物鏡的焦距要比較长而目鏡焦距要比較短?

7. 今有两个凸透鏡,  $f_1=2.5$  厘米,  $f_2=20$  厘米, 問要怎样才能装成一个显微鏡? 这个显微鏡的放大率是多大? 怎样才能装成一个望远鏡? 这个望远鏡的放大率又是多大?

8. 一架显微鏡的放大率  $m=160$  倍, 它的目鏡放大率  $m_{目}=8$  倍, 如果換用一个焦距  $f=1$  厘米的目鏡, 这时显微鏡的放大率将是多大?

## 第五章 光 度 学

前面已經学过了光的傳播速度、光的傳播規律和光路的控制等等,現在再从能量方面来研究光的发射、傳播和照射等問題。在工厂或其他生产的場所、城市建筑的設計和日常生活中,照明和采光的研究都具有重要的实际意义。下面我們將依次从光能的发射、傳播、照射和有关的应用等方面分別加以討論。

### § 5.1 发 光 强 度

在第一章里已經对各种不同的光源进行过討論,并知道不同的光源发光强弱程度是不同的,即使是同一个光源,沿着不同的方向,它的发光强弱程度也可能是不相同的。**发光强度**就是表示光源发光强弱程度的物理量。

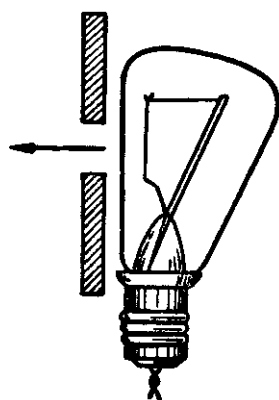


图 5.1

光源发光强度的单位是**烛光**,多大的发光强度才是1烛光呢?最初是用一支特制的蜡烛,沿着水平方向的发光强度規定为1烛光;后来因为蜡烛燃燒的时候,烛焰发出的光不够稳定,于是国际照明委员会就把一盞特殊构造的电灯在規定的电压下沿着一定方向的发光强度規定为1烛光<sup>①</sup>。如图5.1

所示,豎直的細灯絲在規定的电压下,沿着箭头所指方向的发光强

<sup>①</sup> 在1954年国际度量衡會議上,又重新規定:面积等于1/60平方厘米的絕對“黑体”(即能够吸收全部外来光綫而毫无反射的理想物体)在純铂(Pt)凝固温度2042.1°K时,沿垂直方向的发光强度叫1烛光。

度就是 1 烛光。

## § 5.2 光 通 量

光源发光时,总要消耗其他形式的能,象电灯发光时要消耗电能,煤油灯发光时要消耗化学能等等。而照射在物体上的光能,也可以转变为其他形式的能,例如:日光照在物体上,可以使物体发热,增加了物体的内能;晒太阳会使皮肤发黑,这是有一部分光能转变为化学能了。光能就是光所具有的能量,所以,光源也就是一种把其他形式的能转变为光能的装置。光源发光时,不断地向四周空间辐射出光能,设光源在  $t$  秒内总共辐射出的光能是  $A$ ,我们就把辐射出的光能跟辐射所经历的时间之比叫做光源的**光通量**。如果在  $t$  秒内通过物体某一面积的光能是  $A$ ,我们就把通过这一面积的光能跟照射时间的比叫做通过这一面积的光通量。光通量一般用  $F$  来表示,也就是

$$F = \frac{A}{t},$$

光通量的单位是流明。

多大的光通量是 1 流明呢? 为了说明光通量的单位——流明是怎样规定的,我们先介绍立体角这个概念。

以空间任一点  $O$  为球心,以  $r$  为半径作一球体,再以球心  $O$  为顶,以球面的一部分  $S$  为底,截下一个圆锥体来(如图 5.2 所示),这个圆锥体内的空间,就叫做**立体角**  $\omega$ 。如果所截取的球面积  $S$  刚好是球半径  $r$  的平方倍,则这部分球面所对的立体角就规定为一个**单位立体角**。因为球面积等于  $4\pi r^2$ ,所以整个球面所包的立体角,总等于  $4\pi$  个单位立体角。

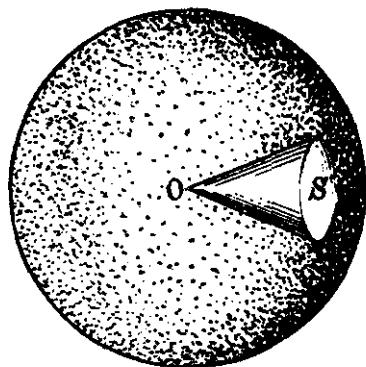


图 5.2



1 烛光的点光源，在单位立体角内所发射的光通量，就叫做 1 流明。发光强度是 1 烛光的点光源，它所发出的总光通量就是  $4\pi$  流明。如果光源的发光强度是  $I$  烛光，那么，这个光源所发出的总光通量就是

$$F = 4\pi I \text{ 流明.}$$

例 1. 有一个点光源，发光强度是 10 烛光，如果以这个点光源为球心，以 1 米长为半径作一球面，问在球面上多大的面积范围内所通过的光通量刚好是 1 流明？整个球面所通过的光通量又是多少流明？如是球半径增大为 2 米和 3 米，结果又会怎样呢？

【解】 根据流明的定义，1 烛光的点光源，在每一个单位立体角内射出的光通量就叫做 1 流明。现在球面的半径是 1 米，在球面上取一面积  $S = r^2 = 1 \text{ 米}^2$ ，则这个球面上每  $1 \text{ 米}^2$  的面积所对的立体角就是一个单位立体角，光源的发光强度是 10 烛光，它在一个单位立体角内射出的光通量应该是 1 流明的 10 倍，即 10 流明，也就是每  $1 \text{ 米}^2$  的球面上通过的光通量是 10 流明，所以，球面上每  $0.1 \text{ 米}^2$  通过的光通量是 1 流明。

由于点光源是置放在球心上的，通过整个球面的总光通量就是光源所射出的总光通量，所以

$$\begin{aligned} F &= 4\pi I \\ &= 4 \times 3.14 \times 10 = 125.6 \text{ (流明)}. \end{aligned}$$

如果球半径增大为 2 米，则球面上每  $r^2 = 4 \text{ 米}^2$  的面积所对的立体角为 1 单位立体角，即每  $4 \text{ 米}^2$  的面积上所通过的光通量为 10 流明，所以这时球面上每  $0.4 \text{ 米}^2$  面积上所通过的光通量为 1 流明。如果球半径增大为 3 米，则每  $9 \text{ 米}^2$  的球面上通过 10 流明的光通量，即球面上每  $0.9 \text{ 米}^2$  的面积上所通过的光通量是 1 流明。从计算的结果可以看出，半径是 1 米时，每  $0.1 \text{ 米}^2$  的球面上通过 1 流明的光通量；当半径增大到 2 米时，则每  $0.4 \text{ 米}^2$  的球面上通过相同的光通量；当半径增大到 3 米时，则每  $0.9 \text{ 米}^2$  的球面上通

过 1 流明的光通量，即相同的立体角（从而光源射出相同的光通量）所对的球面，是随着球半径  $r$  增大成平方地增大的。图 5.3 可以说明这一点。

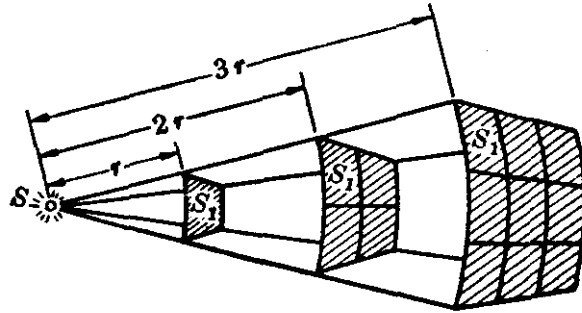


图 5.3

至于半径增大为 2 米、3 米以后，整个球面上所通过的总光通量，仍旧应当等于光源所射出的总光通量，即 125.6 流明。

### § 5.3 照 度

在工作和日常生活中，我们能不能看清楚一个物体，或能不能辨别物体上极其细微的部分，这都与物体表面被照明的程度有关系。在上一章里讲过，眼睛要看清楚一个物体，条件之一是：物体在视网膜上成的象要足够明亮，而这一点又是由物体表面被照明的程度等来决定的。为了表明物体被照明的程度，我们引进一个叫做照度的物理量。

物体被照明的程度，显然与照射到物体表面上来的光通量有关，如果物体的表面积大小一定，照射在表面上的光通量不同，这个物体被照明的程度就不一样；同样，如果相同的光通量照射在两个表面积大小不同的物体上，那么这两个物体被照明的程度也会不一样。我们把物体表面上所得到的光通量跟这个被照射的面积之比，叫做这个表面的照度。

如果用  $F$  表示物体表面所得到的光通量， $S$  表示被照射的面积， $E$  表示这个表面的照度，那么，

$$E = \frac{F}{S}$$

这个定义反映了实际的情况,当物体表面积一定时,表面得到的光通量越多,表面的照度就越大;如果表面所得到的光通量是一定的,在均匀照射的情况下,被照射的面积越大,则照度越小。

照度的单位是勒克司。被均匀照射的物体,1平方米面积上所得到的光通量是1流明时,它的照度就是1勒克司。

在工作和学习的时候,保持合适的照度,对提高我们的工作效率和学习效率都有很大的好处;经常在不稳定光源的照射下,或在过于强烈或过于阴暗的光线照射下工作,对眼睛都是不利的,应当注意防止。下表中所列的是几种不同工作情况下的标准照度和在某些情况下的实际照度。

| 工 作 性 质 或 场 所             | 照度(勒克司)            |
|---------------------------|--------------------|
| 夏季中午在太阳光直接照射下             | 100,000            |
| 摄影场在拍摄电影时                 | 10,000             |
| 没有太阳的室外                   | 10,000~1000        |
| 明朗夏天的室内                   | 500~100            |
| 细小精致的工作(修理钟表、雕刻制板、制图等)    | 100                |
| 使用有危险性的小的带刃工具(削刀、钻、旋刀)的工作 | 100                |
| 在工作台上作细小精确的工作,用缝纫机缝纫,书写工作 | 75                 |
| 阅读,观看各种仪器所示的读数,纺织         | 50                 |
| 电影院银幕上                    | 80~20              |
| 走廊                        | 10                 |
| 楼梯                        | 8                  |
| 在满月底下                     | 0.2                |
| 夜间没有月亮时的天空下               | $3 \times 10^{-4}$ |
| 一等星光下                     | $8 \times 10^{-7}$ |
| 六等星光下                     | $8 \times 10^{-9}$ |

有时候为了充分利用光源,我们常常在光源上附加一个反射装置,使得某些方向能够得到比较多的光通量,以增加这一方向被照面上的照度。例如探照灯、手电筒和汽车前灯都装有反射镜,马

路上的路灯、机床工作台上的台灯，为了增加路面和工作处的照度，灯上也都装有一个灯罩。

在第四章里討論显微镜时曾經提到，它的物鏡的焦距总是設計得比較短，其原因之一就是让标本能够靠近物鏡，使得从标本射入鏡筒的光綫尽可能地多，从而增加象的照度，看起来象就可以更清楚一些。在所討論的几种望远鏡中，也有这样一个作用：从远方物体某一局部射来的近似平行光束經過物鏡和目鏡两次折射以后，从目鏡射出来时，这一平行光束比原来的狹細了，同样多的光通量<sup>①</sup>被容納在更狹細的範圍里，所成象的照度当然就增大了。一般望远鏡总是物鏡的直徑比較大，目鏡的直徑比較小<sup>②</sup>，用望远鏡观察物体的时候，物体的象与不用望远鏡直接观察时相比，不仅視角增大了，而且照度也要大一些。用双筒望远鏡看舞台上表演时，我們会感到这时舞台上的演員和道具都变得更明亮了也就是这个緣故。

**例 2.** 有一个点光源，放在半徑是 2 米的球心上，已知这个球面上每  $4 \text{ 米}^2$  的面积所得到的光通量是 8 流明，試求光源的发光强度  $I$ 、光源射出的总光通量  $F$  和球面上的照度  $E$ 。

**【解】** 根据单位立体角的规定（在球面上取面积  $S$ ，恰好是球半徑  $r$  的平方，这个球面所对的就是一个单位立体角。）可以知道，半徑是 2 米的球面上， $4 \text{ 米}^2$  的球面所对的立体角就是 1 个单位立体角。所以题目中所給的条件也就是已知点光源在每单位立体角中发出的光通量是 8 流明；又知道 1 烛光的点光源在每一单位立体角中发出的光通量是 1 流明，而題意中已知点光源在每单位立体角中发出的光通量是 8 流明，所以光源的发光强度应当是 1 烛光的 8 倍，也就是 8 烛光。

① 因为透鏡对光的吸收作用較少，所以可不予考虑。

② 由于望远鏡观察的对象与显微镜不同，所以望远鏡物鏡的直徑做得比較大，目的还在于使观察的範圍能够更广闊一些。

从光源的发光强度求光源发出的总光通量,可以根据公式:

$$F = 4\pi I = 4 \times 3.14 \times 8 = 100.5 \text{ 流明.}$$

球面上的照度可以根据照度的定义式  $E = \frac{F}{S}$  来计算.光源发出的总光通量是 100.5 流明,投射在整个球面上,球面积  $S = 4\pi r^2$ ,所以

$$E = \frac{F}{S} = \frac{100.5 \text{ 流明}}{4 \times 3.14 \times 2^2 \text{ 米}^2} = 2 \text{ 勒克司.}$$

或者根据题意,每 4 米<sup>2</sup>的球面上通过的光通量是 8 流明,也可以算出:

$$E = \frac{F}{S} = \frac{8 \text{ 流明}}{4 \text{ 米}^2} = 2 \text{ 勒克司.}$$

## § 5.4 照 度 定 律

物体表面被照明的程度跟哪些因素有关呢?成怎样的关系?由于光源有的是点光源,有的是平行光源;照射的情况有的是垂直照射,有的是斜照射,为了便于研究起见,这里分几种情况来加以讨论.

**1. 点光源垂直照射在物体表面上的情况** 从实际经验知道,如果光源跟被照射面之间的距离保持不变,则光源越强,被照射的面上照度也越大(显得越亮).如果点光源保持不变,改变光源跟被照射面之间的距离,照度也随着改变,距离越近,被照射面上得到的光通量越多,因而照度越大;如果距离越远,被照射面上的照度也就越小.根据照度的定义,可以推导出照度跟光源发光强度以及距离之间的关系.设点光源的发光强度是  $I$ ,被照射的面是以点光源为球心的球面,光源和被照射面之间的距离是  $r$ ,那么,这个球面上的照度  $E$  就是

$$E = \frac{F}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi r^2},$$

$$\therefore E = \frac{I}{r^2}.$$

結果表明：在點光源垂直照射的情況下，被照面上的照度，是跟光源的發光強度成正比，跟光源到被照面之間的距離平方成反比。

這個結論叫做照度第一定律。

從圖 5.3 中也可以看出，如果  $S$  處是一個點光源，在同一立體角內，光源發出的光通量  $F$  是相同的；但是相同的立體角所對的球面積  $S$  是隨着球半徑的平方而增大的，所以球面上的照度  $E \left( = \frac{F}{S} \right)$ ，也就隨着距離  $r$  的平方而減小。

實際上，由於所用的光源（如蠟燭、電燈等）都不是點光源，所以這時候根據照度第一定律計算得出的結果也只是近似正確的。光源越小，或被照面距離光源越遠（從而光源的大小可忽略不計），計算的結果也就越接近實際情況。

**2. 平行光源斜照射在物體表面上的情況** 設有一束平行光，光通量是  $F$ ，斜射在一矩形表面  $S_{AC}$  上（如圖 5.4 所示），表面  $S_{AC}$  是跟紙面垂直的，所以只畫出它的一邊  $AC$ ，它的另一邊設為  $L$ ， $S_{AC} = L \times AC$ ， $\theta$  角就是這時光線的入射角。如果將矩形表面轉一個  $\theta$  角，使光束垂直地照射在表面上來，則同樣的光通量  $F$ ，將投射在較小的面積  $S_{AB}$  上（見圖 5.4， $S_{AB} = L \times AB$ ）。斜照射時  $S_{AC}$  上的照度是

$$E = \frac{F}{S_{AC}} = \frac{F}{L \times AC};$$

垂直照射時， $S_{AB}$  上的照度  $E_0$  是

$$E_0 = \frac{F}{S_{AB}} = \frac{F}{L \times AB}.$$

這兩種情況下矩形表面上照度的比是

$$\frac{E}{E_0} = \frac{F/L \times AC}{F/L \times AB} = \frac{AB}{AC} = \cos \theta,$$

所以

$$E = E_0 \cos \theta.$$

結果表明：在平行光綫斜照射的情況下，被照面上的照度跟光綫的入射角的余弦成正比。

这个結論叫做照度第二定律。

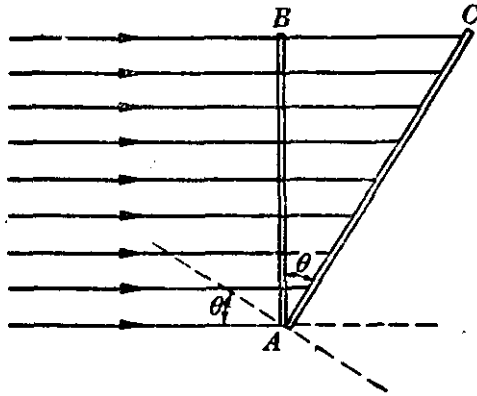


图 5.4

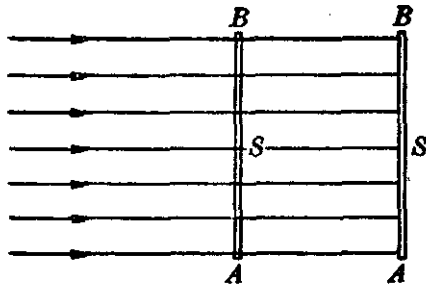


图 5.5

太阳光投射在地球表面上，使地面有一定的照度，随着地区、季节和时间的不同，(即地球和太阳相对位置不同，从而入射角也不同。)地面上的照度也有所不同。在春分或秋分的正午，太阳光正好垂直地照射在赤道地区上，这时候，太阳光并不是垂直地照射在其他地区上，所以这时赤道上的照度比任何其他緯度地区的照度都要大。

**3. 平行光垂直照射在物体表面上的情况** 这种情况可以看成上面这种情形的一种特例，即  $\theta = 0$ ， $E = E_0$ ，这时候物体表面上的照度比任何其他斜照射时的照度都要大。在平行光垂直照射的时候，物体表面的照度是随着平行光源的发光强度增大而增大的，同时，如果不考虑媒质对于光的吸收，那么被照面上的照度跟它离开光源的距离是没有关系的，图 5.5 很清楚地说明了这一点。

**4. 点光源斜照射在物体表面上的情况** 这时，被照物体表面的照度是不均匀的。例如桌面上吊着一盏小电灯(如图 5.6 所示)，桌面上 A 处和 B 处由于离开光源的距离不同，入射角也不同，所以照度也是不同的。(其他各点的照度当然也各不相同。)

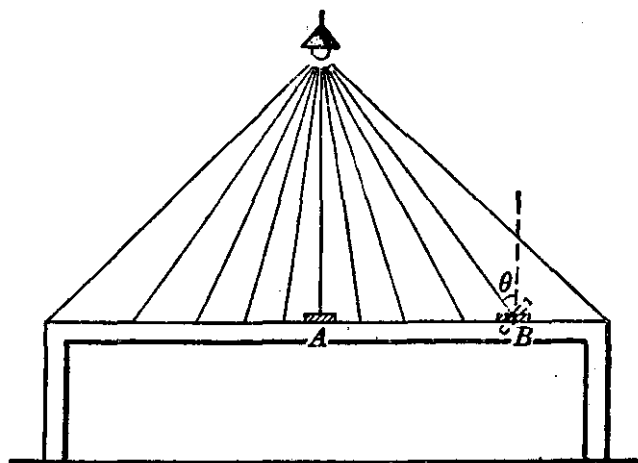


图 5.6

如果要求这时候被照面上任何一点的照度，例如在桌面  $B$  处放着一本小书，求书面上的照度，可以先把书面转动一个角度，使书面跟光线垂直，求出这时书面上的照度

$$E = \frac{I}{r_B^2};$$

然后再把书放平，由于书面较小，投射在书面上的一小束光可以近似看成是平行光，于是，根据照射第二定律可以知道，放平以后书面上的照度  $E_B$  是放平以前垂直照射时照度  $E$  的  $\cos \theta$  倍，即

$$E_B = \left( \frac{I}{r_B^2} \right) \cos \theta.$$

这说明在点光源斜照射的情况下，被照面上任何一点的照度，可以把照度第一定律的公式和照度第二定律的公式结合起来使用，即

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \theta.$$

**例 3.** 以 4 烛光的点光源为球心，分别以 1 米和 3 米为半径作两个球面，问球面上的照度各是多大？如果要使大球面上的照度跟小球面上的照度相等，那么，这时候在大球的球心上应当置放发光强度是多少烛光的点光源？

**【解】** 根据题意，球心上有点光源，它的光线总是垂直照射球面的，所以求球面上的照度应当用照度第一定律。已知球心上光



源的发光强度  $I=4$  烛光，光源到小球面的距离  $r=1$  米，光源到大球面的距离  $R=3$  米，根据照度第一定律公式可以分别求出两个球面上的照度

$$E_{\text{小}} = \frac{I}{r^2} = \frac{4 \text{ 烛光}}{(1 \text{ 米})^2} = 4 \text{ 勒克司};$$

$$E_{\text{大}} = \frac{I}{R^2} = \frac{4 \text{ 烛光}}{(3 \text{ 米})^2} = 0.44 \text{ 勒克司}.$$

如果要使大球面上的照度跟小球面相等，同样是 4 勒克司，这时候在大球心上的点光源的发光强度应当是

$$I = E_{\text{小}} R^2 = 4 \text{ 勒克司} \times (3 \text{ 米})^2 = 36 \text{ 烛光}.$$

**例 4.** 有一盏电灯，挂在离桌面 0.5 米高的地方，已知灯的正下方桌面上的照度是 80 勒克司，问离开电灯 1 米远处的桌面上照度是多大（见图 5.7）？ $B$  点的照度是不是  $A$  点照度的  $\cos \theta$  倍？

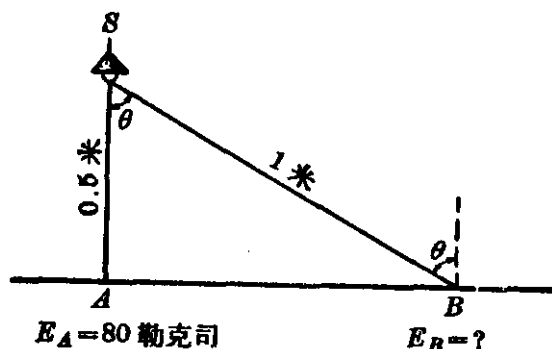


图 5.7

**【解】** 根据题意和图 5.7 知道， $A$  点是属于点光源垂直照射的情况。从已知的照度和距离，根据照度第一定律可以求出电灯的发光强度来； $B$  点是处在点光源斜照射的情况下，从  $\triangle SAB$  可以求出  $B$  点的入射角  $\theta$ ，再根据电灯的发光强度  $I$ ，距离  $r_{SB}$ ，利用照度第一定律和照度第二定律相结合的公式  $E = \frac{I}{r^2} \cos \theta$  就可以求出  $B$  点的照度。

已知： $E_A = 80$  勒克司， $r_{SA} = 0.5$  米， $r_{SB} = 1$  米。

求： $E_B = ?$

先根据照度第一定律算出光源的发光强度  $I$ 。

$$\therefore E_A = \frac{I}{r_{SA}^2},$$

$$\therefore I = E_A r_{SA}^2 = 80 \text{ 勒克司} \times (0.5 \text{ 米})^2 = 20 \text{ 烛光}.$$

再由  $\triangle SAB$  求出  $B$  点入射角的余弦

$$\cos \theta = \frac{SA}{SB} = \frac{0.5}{1} = 0.5.$$

最后根据照度第一定律跟照度第二定律相结合的公式求  $B$  点的照度

$$E_B = \frac{I}{r_{SB}^2} \cos \theta = \frac{20 \text{ 烛光}}{(1 \text{ 米})^2} \times 0.5 = 10 \text{ 勒克司}.$$

从题意和图 5.7 可以知道,  $B$  点的照度比  $A$  点的照度小, 有两种原因: 一是  $A$  点离光源较近,  $B$  点离光源较远; 二是射到  $A$  点的光线是垂直入射, 射到  $B$  点的光线是斜入射, 入射角  $\theta \neq 0$ 。既然  $B$  点的照度比较小不仅是由于入射角  $\theta$  不同的缘故, 所以,  $B$  点的照度不应当是  $A$  点照度的  $\cos \theta$  倍, 上面实际计算的结果也证实了这一点。

**例 5.** 印照片的时候, 如果在 40 烛光的电灯下 1 米远的地方曝光, 需要的时间是 2 秒, 如果在 30 烛光的电灯下 1.5 米远的地方曝光, 问需要多长的时间?

**【解】** 印照片的时候, 要使照相纸上感光剂的感光程度相同, 那就需要使单位面积照片上所受到的光能相等。根据照度的定义  $E = \frac{F}{S}$ , 照片曝光时的照度就是单位面积照片上所通过的光通量; 而光通量的定义  $F = \frac{A}{t}$  是指单位时间里通过这一面积上光能的多少, 所以照度跟曝光时间的乘积  $E t$ , 就是单位面积照片上所通过的光能。照度不同, 曝光时间也一定不相同, 只有当  $E$  和  $t$  的乘积相同时, 才能使单位面积照片上得到的光能相同, 即

$$E_1 t_1 = E_2 t_2.$$

灯下曝光可以算是点光源垂直照射，所以它的照度可以根据照度第一定律来计算。

$$\left(\frac{I_1}{r_1^2}\right) \times t_1 = \left(\frac{I_2}{r_2^2}\right) \times t_2,$$

$$t_2 = \frac{I_1 r_2^2 t_1}{r_1^2 I_2} = \frac{40 \times 1.5^2 \times 2}{30 \times 1^2} = 6 \text{ 秒}.$$

## §5.5 光度计

利用照度第一定律我们可以比较和测定光源的发光强度。如图 5.8 所示，让两个光源  $S_1$  和  $S_2$  分别垂直照射在一个纸片的两个侧面上，调节纸片的位置，使纸片两面的照度相等 ( $E_1 = E_2$ )，设  $S_1$  和  $S_2$  的发光强度分别是  $I_1$  和  $I_2$ ，这时候它们离开纸片的距离分别是  $r_1$  和  $r_2$ ，根据照度第一定律

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}, \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2};$$

又有

$$E_1 = E_2,$$

$$\therefore \frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2},$$

或

$$I_2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_1.$$

$r_1$  和  $r_2$  是可以测量的，如果  $I_1$  是已知的标准光源的发光强度，那么，待测光源的发光强度  $I_2$  就可以从上面的公式中求出来。如果  $I_1$  不是标准光源，通过这样的方法，也可以比较出发光强度  $I_2$  是  $I_1$  的几倍。

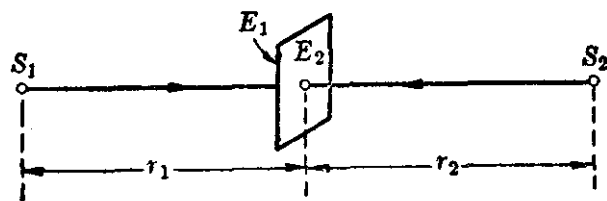


图 5.8

但是，要凭眼睛的观察来比较纸片两面的照度是不容易做到很准确的，所以，一般是用一种比较光源发光强度的仪器——**光度计**来进行比较。光度计的类型很多，这里介绍一种简单的光度计——**焦利光度计**，它的构造如图 5.9 所示。它是由两块长方体的石蜡块迭合而成的，中间夹着一层锡箔，使从侧面射来的光线不能从一块石蜡穿到另一块石蜡中去，这样，光度计的两块石蜡块就各只能被一侧的光源所照明。调节石蜡块的位置，直到看上去两块石蜡被照明的程度相等，好象是一整块石蜡一样，这时候再量出两个光源分别到锡箔间的距离  $r_1$  和  $r_2$ ，就可以按照前面所说的方法来计算出待测光源的发光强度了。

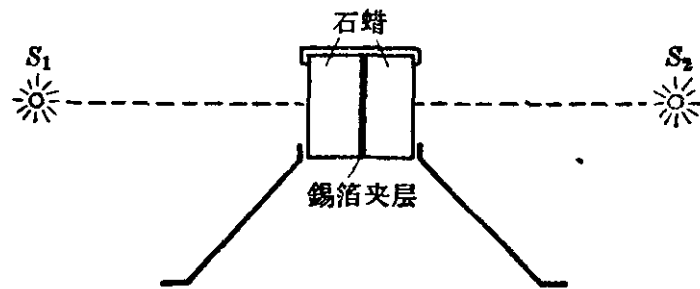


图 5.9 焦利光度计

上面这种光度计还是通过视觉的比较来测定光源的发光强度的。还有一种可以客观地测定出照度大小的光度计，称做**勒克司计**，从这种勒克司计中能够直接读出被测地方照度的大小。为了保护青年学生的视力，学校里可用勒克司计来检查教室的采光和照明是不是合乎需要。摄影的时候所用的**曝光计**（又称做**曝光表**）也是一种勒克司计，用它来测定被摄对象的照度，从而便于正确地确定摄影的曝光时间。

### 习题 5.1~5.5

1. 什么是光源的发光强度？什么是光通量和照度？它们的符号、单位各是什么？光通量和照度的单位又各是怎样规定的？
2. 照度第一定律和第二定律的内容是什么？它们各在怎样的条件下才适用？

3. 一个 100 烛光的电灯, 挂在离开桌面 1.5 米高的地方, 这时候如果在灯下面的桌面上阅读, 是不是合乎标准照度的要求?

4. 要在标准照度下的工作台上书写, 问应该把一盏 48 烛光的电灯吊在工作台上方多高的地方?

5. 在桌面中心的正上方 80 厘米处挂一盏 25 烛光的电灯, 求桌面中心的照度和桌面上离电灯 100 厘米远处的照度.

6. 已知甲乙两光源相距 70 厘米, 甲光源的发光强度是 16 烛光, 当光度计移到离甲光源 40 厘米的时候, 光度计的两块蜡块具有同样的亮度. 问乙光源的发光强度是多少烛光?

## 本章提要

1. 发光强度  $I$  是表示光源发光强弱程度的物理量, 它的单位是**烛光**.

**光通量**  $F$  就是通过某一面积的光能跟照射时间的比 ( $F = \frac{A}{t}$ ). 它的单位是**流明**. 1 烛光的点光源在单位立体角内所发射的光通量, 就是 1 流明.

**照度**  $E$  就是通过物体表面的光通量跟被照射面积的比 ( $E = \frac{F}{S}$ ). 它的单位是**勒克司**. 被均匀照射的物体, 1 平方米面积上所通过的光通量如果是 1 流明, 这个物体表面上的照度就是 1 勒克司.

2. 发光强度是 1 烛光的光源, 发出的总光通量是  $4\pi$  流明, 发光强度是  $I$  烛光的光源, 它发出的总光通量是

$$F = 4\pi I \text{ 流明.}$$

3. 点光源垂直照射在物体表面上的时候, 物体表面上的照度跟光源的发光强度成正比, 跟表面离光源的距离的平方成反比(**照度第一定律**)

$$E = \frac{I}{r^2}.$$

4. 平行光源斜照射在物体表面上的时候, 物体表面上的照度跟光线的入射角的余弦成正比(**照度第二定律**)

$$E = E_0 \cos \theta.$$

5. 点光源斜照射在物体表面上的时候, 物体表面上任何一点的照度, 可以根据照度第一定律跟照度第二定律相结合的公式来计算

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \theta.$$

6. 測定光源的发光强度可用光度計，計算被测光源发光强度的公式是

$$I_2 = \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 I_1.$$

### 复 习 題 五

1. 一个点光源放在半径是 500 厘米的球面的球心上，已知球面上的照度是 20 勒克司，問球面上的总光通量应当是多少流明？ $1/4$  球面上的照度又是多少？这个点光源的发光强度是多少？

2. 45 烛光的电灯挂在走廊的中間离地面 3 米的地方，走廊的长是 8 米，求灯下方地面的照度和走廊两端的照度各是多少？

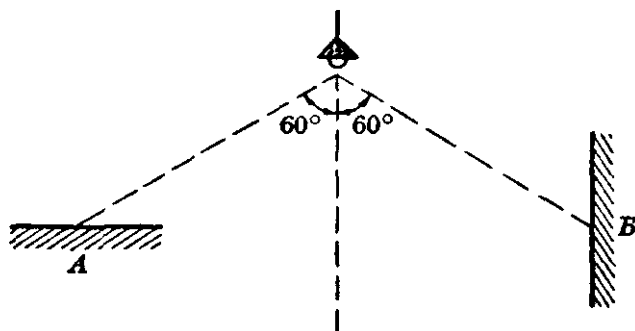
3. 有 16 烛光和 25 烛光的电灯各一盞，它們相距 135 厘米远，在它們之間放一个光度計，要使光度計两边石蜡的照度相等，問光度計应当放在什么地方？

4. 房間里挂着两盞 25 烛光的电灯，它們相距 3 米并且离开桌面的垂直高度都是 2 米，在两灯連結綫的中点下面有一張桌子，求这張桌面正当中的照度。

5. 印照片的时候，在 16 烛光的电灯下 2 米远的地方曝光，需要 1.5 秒的时间，如果改用一盞 45 烛光的电灯，并且在离灯 3 米远的地方曝光，要晒印的效果相同，曝光的时间应当是几秒？

6. 两根电綫杆的高度都是 10 米，直立在地面上，上面分別挂着 200 烛光的电灯各一盞，如果想使在地面上两电綫杆連結綫的中点处的照度是 0.5 勒克司，問两电綫杆的距离应当是多少？

7. 如附图所示，电灯离开桌面一点  $A$  和离开墙上的一点  $B$  的距离是相等的，求  $A$  点和  $B$  点的照度的比。



(第 7 題)

## 第六章 光的波动性

在第一至第五章里我們討論了光的傳播規律，在第六至第七章里我們將要討論光的本性問題。光的本性也是光學的中心問題之一。光究竟是什麼呢？為了很好的理解各種光現象發生的過程，從而能夠進一步掌握它和利用它，長期以來，人們不斷地進行探索，才認識到光具有波動性和量子性；要証實光具有波動性，還應當先學習一下波所特有的一些現象——波的干涉和波的衍射等。下面就分別來討論它。

### § 6.1 干涉現象

**1. 波的迭加** 在平靜的池塘里，同時在兩處分別投下一塊石子，就會看見兩列水波在水面上展開來，它們相遇後，交錯在一起，形成一種複雜的波紋，於是這部分水面上，每一個質點的振動都是

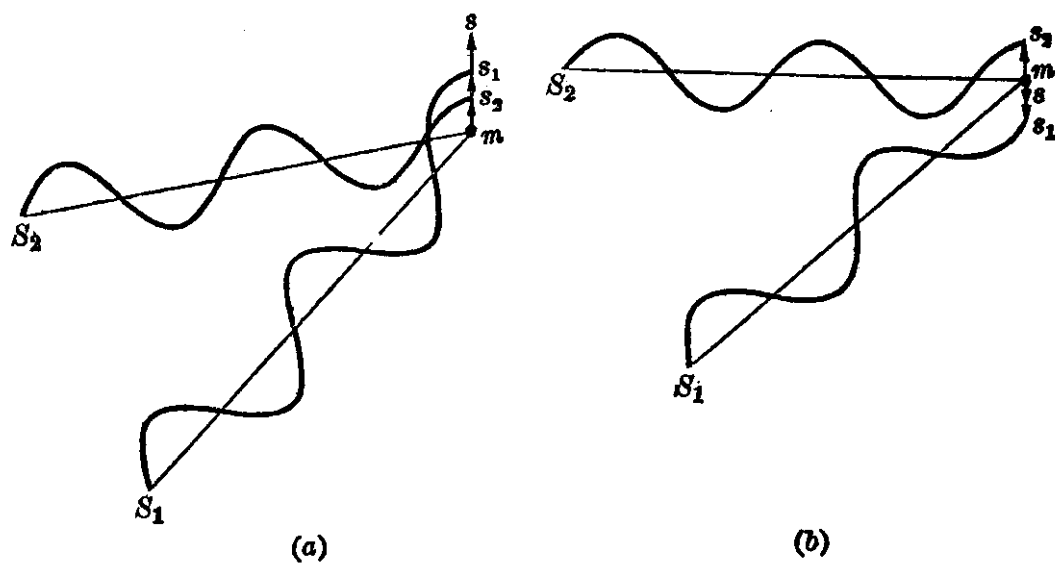


图 6.1

由这两列波共同决定的。我們可以用图 6·1 来証明这一点。設  $m$  是两列波相交区域里的某一质点，由于波源  $S_1$  的振动的傳遞， $m$  点得到的位移是  $s_1$ ；由于另一波源  $S_2$  的振动的傳遞， $m$  点得到的位移是  $s_2$ ，而  $m$  点的实际振动的合位移是两个位移的和，按矢量合成法則，合位移

$$s = s_1 + s_2,$$

如果两列波的頻率 and 波长并不相同，那么  $m$  点的振幅将不是固定不变的，其他各点情况也一样。对于任何一点來說都經歷着这样的过程：有时合振幅比单独一个波所产生的振幅大，有时又比单独一个波所产生的振幅小，每一点的合位移总是每一列波所单独产生位移的总和，这就是**波的迭加**。

**2. 波的干涉** 在同一种媒质里傳播的两列波，如果它們的頻率、波长相同，那么在两列波相交的区域里，由于迭加的结果，每一点的合振幅都是一定的，并且出現振动最强和振动最弱互相間隔开来的現象，这就是**波的干涉**。

設想有两列波长相同的波在同一媒质中傳播，并互相迭加起来，如图 6·2 所示。 $m$  是两列波相交区域里的某一点，它离开波源

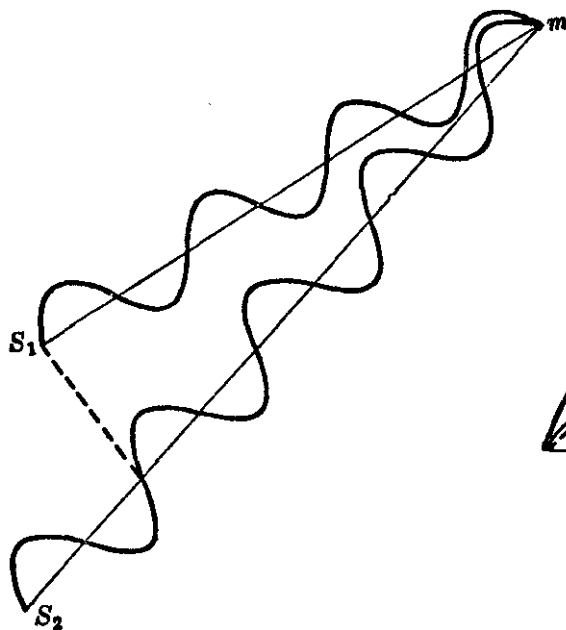


图 6·2

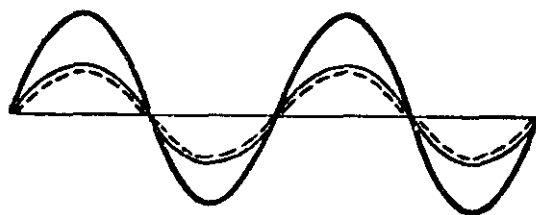


图 6·3  $m$  点的振动图綫



$S_1$  和  $S_2$  的路程差  $\Delta r = r_2 - r_1$  恰好等于波长  $\lambda$  (或波长的整数倍  $n\lambda$ )，由于两列波在这一点互相加强使这一点的合振幅达到最大值。图 6·3 是  $m$  点的振动图线，它表示  $m$  点的振幅是两个振幅的和，它的振幅最大值并保持稳定不变，这点就是振动最强的地方。我们再选另一点  $m'$  (如图 6·4 所示)，它离开波源  $S_1$  和  $S_2$  的路程差  $\Delta r = r_2 - r_1$  恰好等于波长的一半  $\lambda/2$  (或半波长的奇数倍  $(n+1/2)\lambda$ )，迭加的结果是使这一点的振幅达到最小值。图 6·5 就是  $m'$  点的振动图线，它表明  $m'$  点的振动由于互相削弱的结果，振

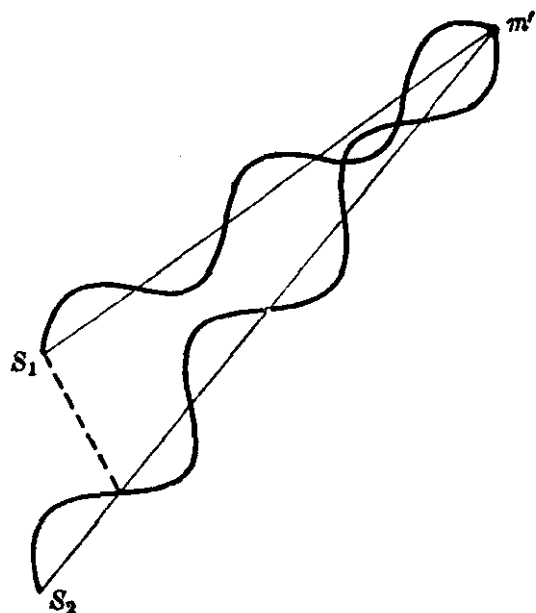


图 6·4



图 6·5  $m'$  点的振动图线

幅最小并稳定不变，这点就是振动最弱的地方。所有满足路程差  $\Delta r = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$  ( $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ) 的点，它的振动都是最弱的；满足路程差  $\Delta r = n\lambda$  ( $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ) 的点，它的振动都是最强的；离开波源由近及远的各点必然会相间地出现振幅最大和振幅最小的地方，以上就是波的干涉的成因。应当知道，如果不是两列波长相同的波迭加，就不会形成这种每点振幅保持恒定，并间隔出现振动最强和振动最弱的现象。

我们可以在玻璃水槽中，观察水波干涉的现象。把一支频率

較小的音叉輕輕敲一下后浸入水中，音叉的两个分叉就分別在水面上激起一系列水波。由于两个分叉的振动頻率是相同的，因此它們在同一水面上激起水波的波长也一定相同，这恰好符合产生波的干涉的条件，于是我們很容易看到水面上有干涉条紋出現，如图 6·6 所示。图中实綫表示波峰，虛綫表示波谷。波峰与波峰相遇，波谷与波谷相遇，都互相加强；波峰与波谷相遇就互相削弱。所以干涉的結果使得有些地方振动非常强，如图中的  $aa$  綫，有的地方振动非常弱，如图中的  $bb$  綫。

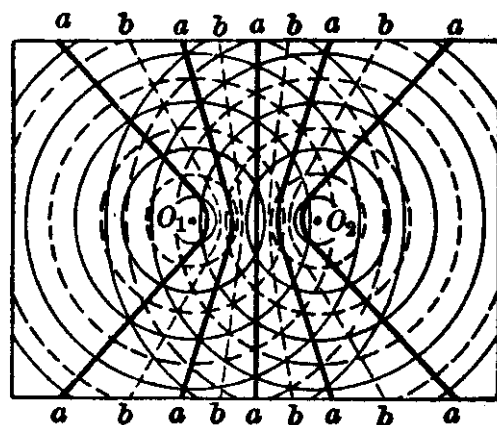


图 6·6 水波的干涉

声音在空气中傳播，有时也会发生干涉現象。例如把音叉敲击一下，让它发声，由于音叉的股发出的两列声波波长相同，故它們在空中迭加时就发生了干涉，这时有的地方听到的声音就比較强，有的地方就比較弱。为了容易听出这种空气振动强弱互相間隔开来的現象，可以在敲击音叉之后，把音叉放在耳朵旁边并轉动它，就能够觉察出由于干涉而产生的声音强弱的变化来。

**3. 光的干涉** 光是不是也能够发生干涉現象呢？法国物理学家菲涅耳(1788~1827)曾經做过一个双鏡实验，結果果然观察到了光的干涉現象。如图 6·7 所示， $S$  是点光源， $M_1OM_2$  是双鏡，鏡面  $OM_1$  和  $OM_2$  的夹角略小于  $180^\circ$ ，从光源发出的光束  $SM_1$ 、 $SO$  和  $SM_2$  經過鏡面反射以后成为  $M_1A_1$ 、 $OA_1'$  和  $OA_2'$ 、 $M_2A_2$ ，它們的延长綫分別相交于  $S_1$  和  $S_2$ ，好象它們是从这两个虚光源发出来的一样，因为它們的波长是相同的，这两束光綫在  $A_1'$ 、 $A_2'$  之間相互迭加，在波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇的地方，光就相互加强；在波峰与波谷相遇的地方，光就相互减弱。于是，在光屏  $P_1P_2$  上就可以清楚地看到明暗相間的干涉条紋。这

就是光的干涉现象。

我們还可以做一个簡易的实驗来观察光的干涉现象。用金属

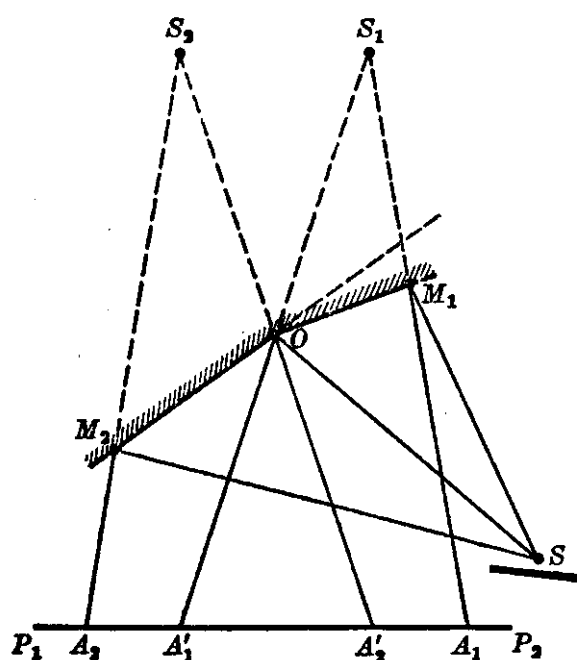


图 6·7 菲涅耳双鏡实验的示意图

絲做一个框框,浸在肥皂液中,取出后,金属框上就有一层肥皂液的薄膜,把它竖放在洒有鈉盐的酒精灯头近旁,这时就能看見肥皂薄膜上的干涉条纹(图 6·8(a))。

竖立的肥皂薄膜,由于重力的作用,使上面的膜較薄、下面的膜較厚,形成楔子形状,如图 6·8(b) 所示。从酒精灯火焰发出的单色黄光照在膜上,一部分从薄膜表面  $A_1B_1$  上反射回来,另一部分光线进入皂液再从另一表面  $A_2B_2$  反射回来,它們在空气中相遇,由于它們是从同一光源发出的,波长相同,所以相遇以后就发生干涉现象,形成干涉条纹。在薄膜的某些地方,前后两表面反射出来的光恰好是波峰与波峰相迭加或波谷与波谷相迭加,使光波的振动加强,形成黄色的明亮条纹;在薄膜上的另一

一部分从薄膜表面  $A_1B_1$  上反射回来,另一部分光线进入皂液再从另一表面  $A_2B_2$  反射回来,它們在空气中相遇,由于它們是从同一光源发出的,波长相同,所以相遇以后就发生干涉现象,形成干涉条纹。在薄膜的某些地方,前后两表面反射出来的光恰好是波峰与波峰相迭加或波谷与波谷相迭加,使光波的振动加强,形成黄色的明亮条纹;在薄膜上的另一

一部分从薄膜表面  $A_1B_1$  上反射回来,另一部分光线进入皂液再从另一表面  $A_2B_2$  反射回来,它們在空气中相遇,由于它們是从同一光源发出的,波长相同,所以相遇以后就发生干涉现象,形成干涉条纹。在薄膜的某些地方,前后两表面反射出来的光恰好是波峰与波峰相迭加或波谷与波谷相迭加,使光波的振动加强,形成黄色的明亮条纹;在薄膜上的另一

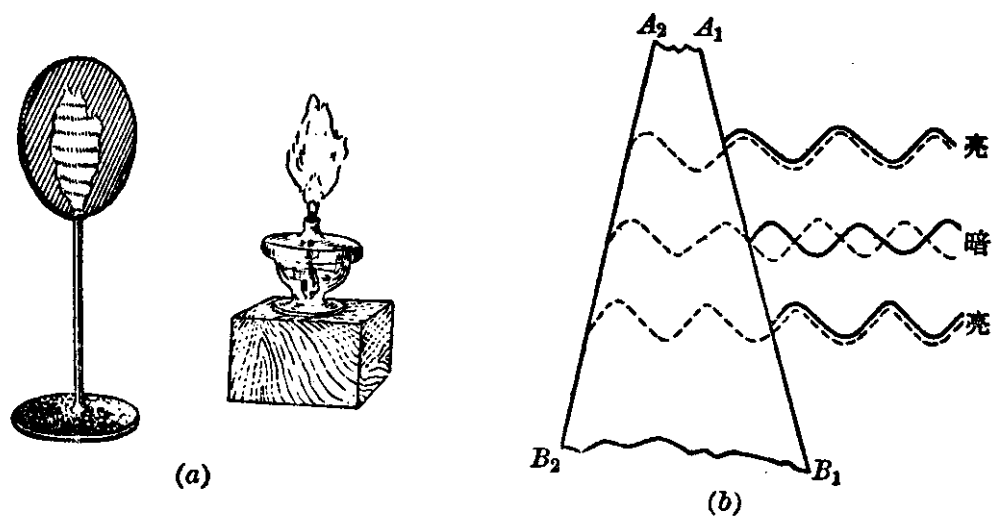


图 6·8

些地方,两列反射光恰好是波峰与波谷相迭加,結果使光波的振动相互削弱,形成黑暗的条紋.

如果照在肥皂膜上的是白光而不是单色光,那么薄膜上就有彩色的干涉条紋出現,因为白光是由許多顏色不同的光組成的,每一种顏色的光頻率一定,这些頻率不同的单色光投射到皂膜上,如果在某一厚度的地方恰好有某一种頻率的色光振幅得到加强,那么在同一地方,其他頻率的色光就不会同时得到加强,于是这里就显示出这种色光的顏色来. 由于厚度不同,其他地方就有其他頻率的色光在那里得到加强,从而显示出另外的顏色. 这样,在整个皂膜上就有了彩色的干涉条紋. 用小竹管蘸肥皂水吹肥皂泡,肥皂泡在空中飞舞时,会显出五光十彩的顏色来,也就是这个道理;肥皂泡上的色彩不断地变化着,这是因为肥皂泡在空中轉动,同时由于重力的作用,它的厚度也在不断地变化,所以同一个地方的顏色也随时在变化. 下雨以后,路面是湿的,如果有油滴在上面,油就会展开成很薄的油膜,这时就会看見油膜有各种顏色. 这也是薄膜干涉的緣故.

光的干涉表明光有明显的波动性.

在科学研究和工业生产上,光的干涉都有重要的应用. 下面就来介紹一下,如何利用光的干涉来檢驗光学玻璃表面或其他表面的质量.

在檢驗时,先用一块透明的标准板(称做光学平面驗規,或称平晶)把它的标准表面和要檢驗的样品的表面迭合在一起,于是在

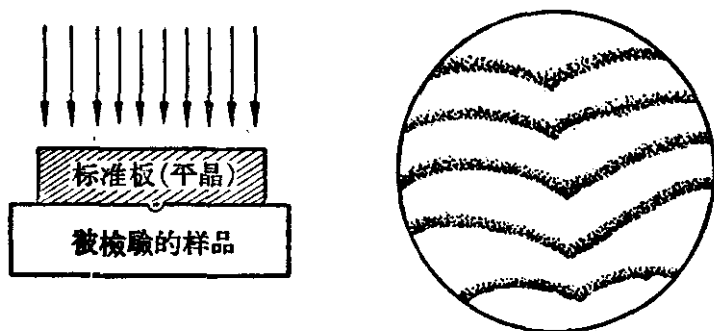


图 6·9

它們之間就一定存在一层楔形的空气薄膜,用单色光照射,就和前面所讲的皂膜的情况相似,会发生干涉现象,如果被检验的表面也是非常光洁和平滑的,那么出现的干涉条纹就是一组平行直线;如果表面上有高低不平的缺陷,那么在有缺陷的地方干涉条纹就会弯曲,根据干涉条纹的形状,就能确定样品表面缺陷的所在和不规则的程度. 图 6.9 就是利用光的干涉来检验平面质量的示意图.

## §6.2 衍射现象

**1. 波的衍射** 跟干涉现象一样,衍射现象也是波动特性的重要表征之一. 什么是波的衍射呢? 波在同一均匀媒质里传播是沿直线方向进行的,如果在它传播的方向上遇到迎面挡住的孔或障碍物时,只要孔或障碍物不比它的波长小很多,这时波就会明显地绕到障碍物后面或孔的外面去(传播路径发生了弯曲),这种现象叫做波的衍射.

我们先用实验来观察水波的衍射现象. 在两个水盘里分别放一个较大的障碍物(图 6.10)和一个开孔的屏(图 6.11),把振动音叉的一个股接触水面,使水面上产生一系列水波,由于障碍物和孔都比水波的波长小很多,这时只能看见波的直线传播,在障碍物后面和孔的外面水波都不能到达,形成明显的几何“阴影”. 再缩小障碍物和孔的尺度(使它们和波长相差得不太多),这时候水波就能够绕到孔的外面和障碍物的后面去,形成水波的衍射,如图 6.12 和图 6.13 所示.

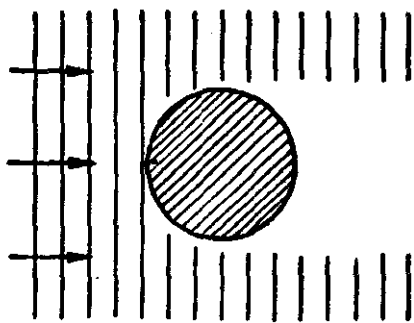


图 6.10

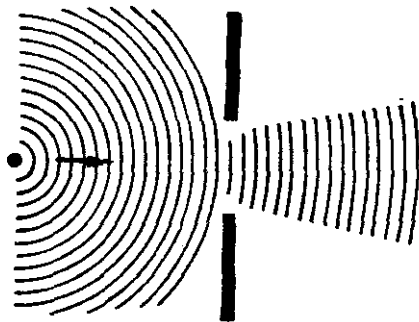


图 6.11

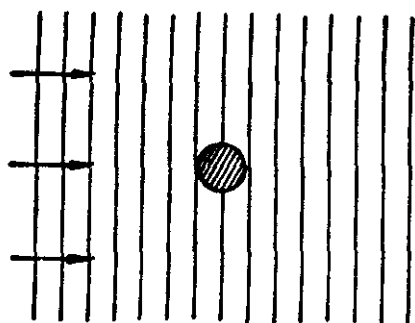


图 6.12

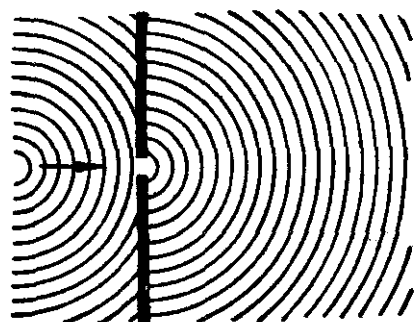


图 6.13

如果把水盘中的孔换成双孔(双狭缝), 这时候每一孔都发生衍射, 从两个孔衍射出去的水波又遇在一起, 互相迭加发生水波的干涉, 形成清楚的干涉花样(图 6.14).

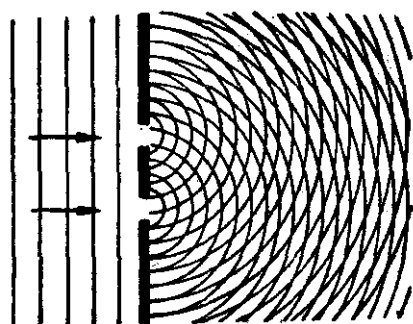


图 6.14

声波也有衍射现象. 一般人的声音波长约以米计, 当障碍物的大小比声波的波长长很多的时候, 例如人在城墙的一面喊话, 在城墙的另一面的人即使在夜深人静的时候, 也不能听见; 如果是隔着一层很厚但不太高的围墙, 那么在墙的一侧喊话, 另一侧的人就能听见, 这就是声波绕过不太大的障碍物的衍射现象. 同样, 当门窗开着的时候, 房间里的人喊话, 房门外的人也能够听见, 这也是由于声波通过门或窗(它们的宽度跟声波的波长相差不多)时发生衍射的缘故.

**2. 光的衍射** 光既然具有波动性, 那么在一定的条件下, 是不是也能够发生衍射现象呢?

实验结果作了肯定的回答.

让点光源  $S$  照射在一个大小可以伸缩的圆孔上(图 6.15(a)), 开始时, 孔的直径比光的波长<sup>①</sup>大得多, 在孔后面的屏上得到的是一个明亮的光斑, 这说明光是沿着直线传播的, 如图 6.15(b) 所示. 逐渐缩小孔的直径, 直到孔的直径比光的波长大得不多的时

<sup>①</sup> 光的波长很短, 可见光的波长范围约在 4000~7700 埃左右. 埃是长度的单位, 1 埃 =  $10^{-8}$  厘米.

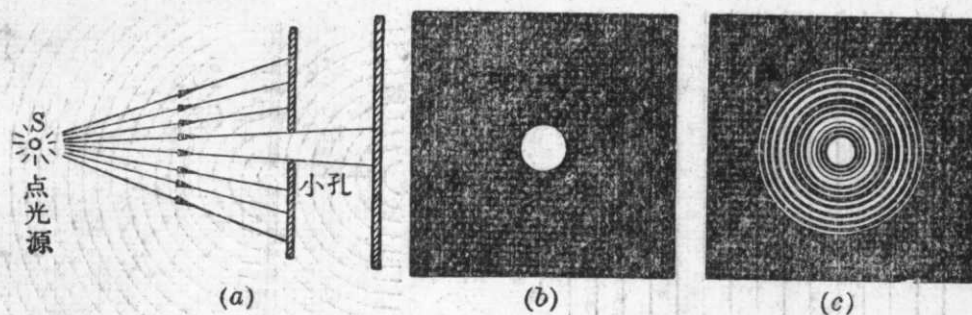


图 6·15 小孔衍射

候,光就开始绕到孔的外面,在屏上形成衍射花样,整个衍射花样的面积比原来的光斑大很多,它说明这时光已经不沿直线传播了(如图 6·15(c)所示)。

如果让一个有直线灯丝的光源照在一个狭缝上,当缝的宽度比较大时,狭缝后的光屏上有一条轮廓分明的光带,如图 6·16(b)所示。逐渐收缩狭缝的宽度,光屏上就会出现现象图 6·16(c)所示的衍射花样,当中一条光带最亮,旁边的光带就比较暗。

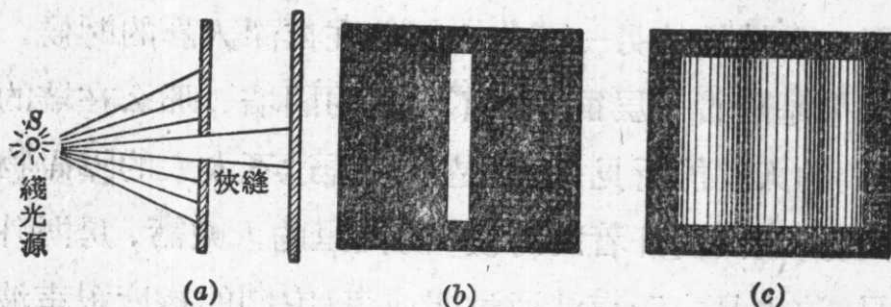


图 6·16 狭缝衍射

平时我们要看见光的衍射现象也并不困难,只要把两支圆杆铅笔并拢来,形成一条狭缝,然后通过狭缝来看细长的光源,(简单的办法是在纸片上切一条长孔,把它对着电灯,被电灯照亮的长孔就成了一个狭细的光源。)就能看到衍射的花样。隔着篾子或细麻纱手帕来看光源,也可以看见光的衍射现象。

光通过大小跟光的波长相差不太多的细小物体时,也要发生衍射现象,这就限制了显微镜成象的清晰性,从而也限制了显微镜的放大倍数。显微镜成象首先要用光把标本照亮,然后从物体各部分反射出来的光通过透镜成象。如果物体太小,光照上去会引

起衍射現象，从而产生衍射花样，那么就不可能通过透鏡形成它清晰的象来，这时候即使增加放大倍数也无济于事。从这一意义上說，光学显微鏡的放大倍数，和把相邻两点清晰地分辨开来的本领都受到了限制。我們在第五章光学仪器中介绍显微鏡的放大率时，曾經說明光学显微鏡的放大率最大只能到达 3000 倍，而不能再进一步提高，主要也就是这个道理。

光的衍射現象，再一次証明光具有波动性。

### § 6.3 光的色散

在日常生活中我們早就知道，在白光里“包含”着各种顏色的光。在前面讲光的干涉时，也曾經通过薄膜干涉現象把白光里的顏色显示出来；然而白光究竟是由哪些顏色的光組成的呢？讓我們通过实验来进一步研究它。

如图 6.17 所示，让一束白光穿过狭縫，射到一个玻璃棱鏡上，光綫經過棱鏡折射以后，就在另一側面的白紙屏上形成一条彩色的光带，它的顏色总是这样排列的：靠近棱鏡頂角的一端是紅色，靠近底边的一端是紫色，中間依次是：橙、黄、綠、藍、靛。这样的光带叫做光譜。图 6.17 的实验表明：白光經過棱鏡折射以后会分解成各种不同的色光来。

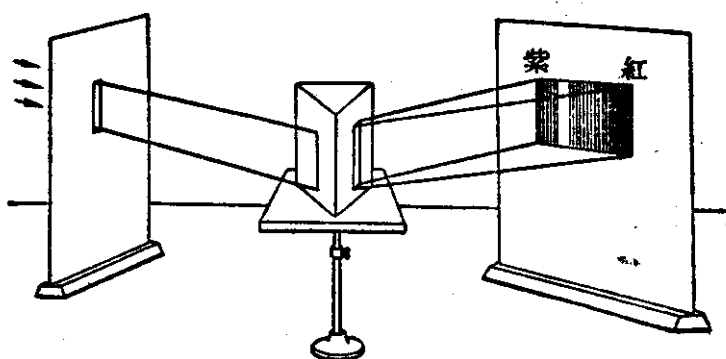


图 6.17 白光的色散

如果在屏上有顏色光带的地方开一条狭縫，让任何一种顏色的色光通过狭縫，射到狭縫后面另一个棱鏡上，将会发现，这种色



光經過棱鏡的折射以后，只会发生偏折，不能再从中分解出其他色光来，这表明：每一种顏色的光只含有一种成分，不能再分解开来。光譜中的每一种色光，我們称它做**单色光**。

如果在图 6·17 中棱鏡和白屏之間再放一个凸透鏡(会聚透鏡)，如图 6·18 所示，那么原来被棱鏡分解开来的彩色光带，經過凸透鏡的折射以后又会聚攏来，在屏上形成一条狭长的白色光带。从图 6·17 白光分解的實驗和图 6·18 各种被分解成的色光又复合成白光的實驗表明：白光是由各种单色光混合而成的。

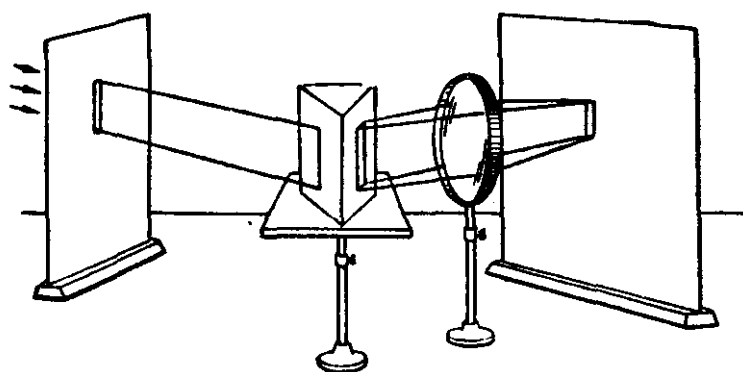


图 6·18

由单色光混合而成的光叫做**复色光**，自然界中的太阳光，白熾电灯和日光灯发出的光等都是复色光(白光)，把复色光分解成单色光的現象叫做**光的色散**。

应当怎样根据光的波动性来解釋光的色散現象呢？

原来，光波都有它一定的頻率；在一定的媒质中傳播时，又有一定的波长和傳播速度。光的顏色是由光波的頻率决定的。一种单色光的顏色不同于另一种，也就是这种光波的頻率跟另一种光波的頻率不同而已。复色光(白光)就是由各种頻率不同的单色光混合而成的，紅、橙、黄、綠、藍、靛、紫就是組成它的几种主要的色光。根据實驗的測定知道：紅光的頻率最小，紫光的頻率最大，各色光的頻率大小的次序如下表所列。

为什么光譜中各种色光位置排列的次序和下表中各种色光按頻率大小排列的次序是一致的呢？

| 光 譜 的 区 域 | 頻 率 (赫茲)                                     | 波 长 (在真空中) (埃) |
|-----------|--|----------------|
| 紅         | $3.9 \times 10^{14} \sim 4.7 \times 10^{14}$ | 7700~6400      |
| 橙、黃       | $4.7 \times 10^{14} \sim 5.3 \times 10^{14}$ | 6400~5800      |
| 綠         | $5.2 \times 10^{14} \sim 6.1 \times 10^{14}$ | 5800~4950      |
| 藍、靛       | $6.1 \times 10^{14} \sim 6.7 \times 10^{14}$ | 4950~4400      |
| 紫         | $6.7 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$ | 4400~4000      |

白光在真空中傳播的速度是一定的，它的數值  $c$  已經從實驗中測定出來了（見第一章）。既然白光是各種頻率的單色光混合而成的，那就是說各種頻率的光在真空中傳播的速度也都彼此相同，都等於  $c$ （在空氣中近似等於  $c$ ）。但是不同頻率的單色光在媒質中傳播時，由於受到媒質的作用，傳播速度都比在真空中的速度小，並且速度的大小互不相同。白光從真空（或空氣）進入稜鏡後，因為速度的改變而發生折射，折射率  $n = \frac{c}{v}$ ， $v$  就是光在媒質中的傳播速度，由於不同頻率的色光在媒質中的  $v$  不同，因而折射率  $n$  也隨着頻率  $f$  的不同而不同。實驗指出：同一種媒質，對於頻率較小的色光（例如紅光）折射率也比較小；對於頻率較大的色光，折射率也較大。根據公式

$$\frac{\sin \alpha}{\sin r} = n,$$

當白光射入稜鏡時，無論對於哪一種頻率的色光來說，入射角  $\alpha$  是相同的，但是折射率  $n$  是互不相同的，因而折射角  $r$  以及發生兩次折射以後的偏向角  $\delta$ ，也就隨着頻率的不同的不同了，這樣白光通過稜鏡時就形成色散現象。

根據圖 6.19 和公式

$$\sin \alpha = n \sin r,$$

在入射角  $\alpha$  相同的情況下，紅光的折射率  $n_1$  最小，所以折射角  $r_1$  最大，從而偏向角  $\delta_1$  最小，因而紅光發生的偏折也就最少，這樣它

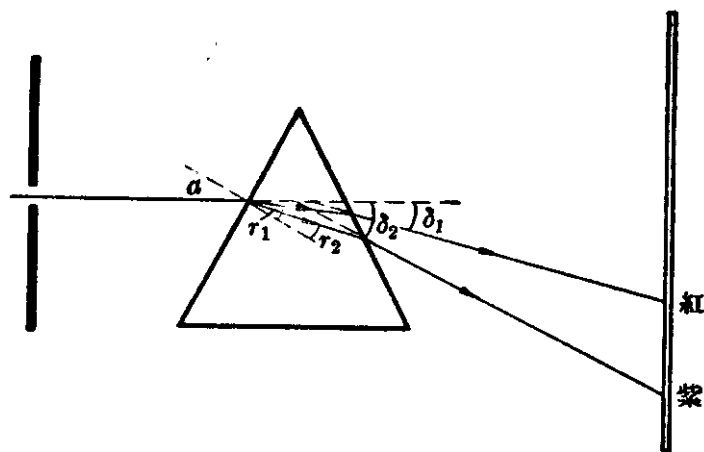


图 6-19

在光譜中处在靠近頂角的一端；随着頻率的逐漸增大，橙、黃、綠、藍、靛、紫等色光的偏向角也依次增大，因而在光譜中也就按紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫的次序排列起来；紫光的折射率最大，折射角最小，从而偏向角  $\delta_2$  最大，在光譜中也就排列在最靠近棱鏡底边的一端。

## § 6.4 虹. 霓. 天空的顏色

通过光的色散原理，初步揭示了顏色的由来，所謂顏色就是一定頻率的光波射入人的眼睛所引起的一种視覺。我們周圍的物体呈現着綺麗繽紛的彩色；許多自然現象也常常伴随着悅目的色調出現。人們不禁要問：雨后天上为什么会有美丽的长虹出現？晴朗的天空为什么总是藍色的？清晨和黄昏的时候看見的太阳又为什么分外嫣紅？等等。

**1. 虹和霓** 夏天雨后在朝着太阳那一边的天空上，常常会出现彩色的圓弧，这就是虹。下雨以后，天上悬浮着很多极小的水滴，太阳光沿着一定角度射入这些小水滴里，会引起两次折射和一次反射，然后又从水滴里射出来。太阳光（白光）射入水滴的时候，太阳光里所有的单色光都有着相同的入射角，但是在折射的时候，各种单色光的折射率各不相同，于是就发生了色散現象，朝着这些小水滴看过去就会看見彩色的虹，如图 6.20 所示。虹的顏色总是

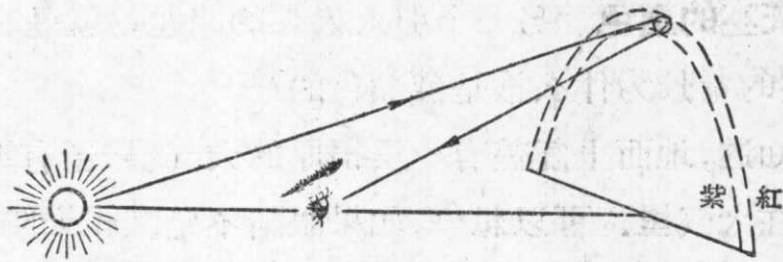


图 6·20 虹

紅色在外、紫色在內依次排列的。

当出現虹的时候,有时旁边还可看見另一道彩色的圓弧,它的顏色的排列和虹相反,恰好是內紅外紫,顏色也比虹淡一些,这就是**霓**,又称为**副虹**,它是太阳光射到小水滴里,經两次折射和两次反射以后而形成的(图 6·21)。由于光綫在水珠里多經過了一次反射,所以顏色的排列跟虹相反,而多一次反射,又使光的能量也散失一些,因此霓的光带不如虹的色彩鮮明。

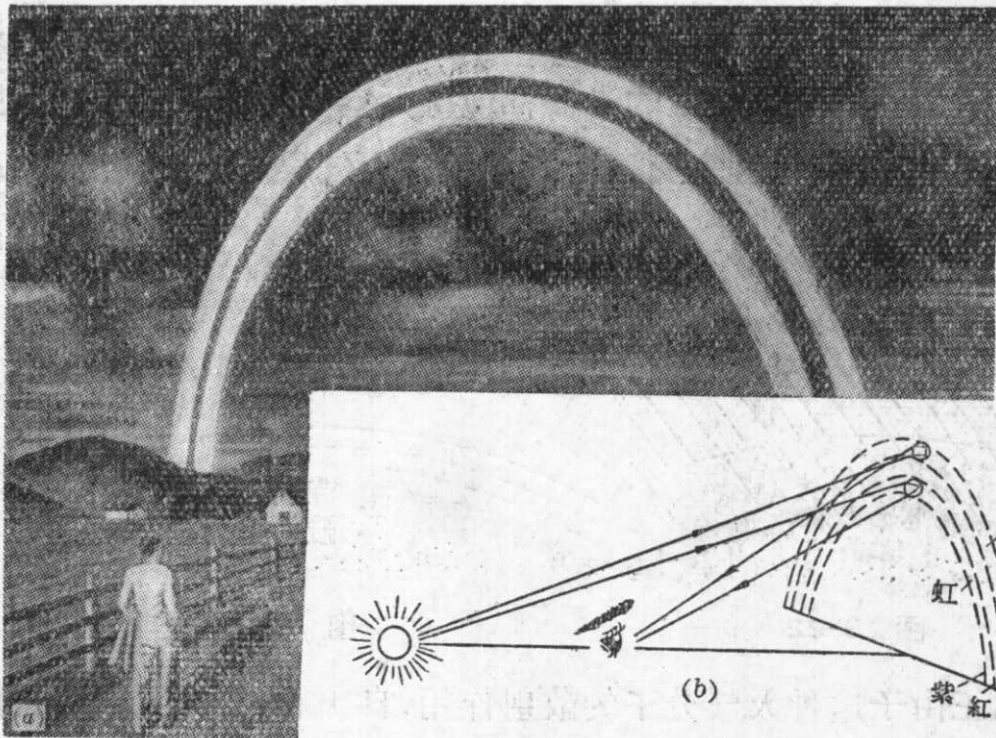


图 6·21 霓 和 虹

在城市公园的噴水池旁,由于空中充滿着細小而均匀的水滴,故当人們背着太阳沿着一定角度看去,也能看到小小的人造虹。当夏天洒水車剛剛走过的时候,也有这种情况出現。

**2. 天空的颜色** 另一个引人入胜的问题，就是在晴朗的日子里，天空的背景为什么总是蓝色的？

我们知道，地面上复盖有一层很厚的大气层，还有烟尘之类的微粒悬浮在大气里。可以想象，如果眼睛不是直视太阳，由于天空中大气和微粒的漫射，地面应当得到各种频率的色光，从而天空应当是白颜色的，但为什么它会显示出蓝色来呢？

原来，太阳光通过大气层的时候，由于大气中分子无规则的运动，和许多其他因素的影响，使得大气层的分子密度总在不断地变化着，由于这种密度的起伏，使折射率也发生起伏的变化，于是太阳光穿过大气的时候就不能沿着直线传播（光线只有在密度均匀的媒质中才是沿直线传播的），因而发生了散射现象。科学研究指出，这种分子散射，散射光的强度与波长等因素有一定的关系：波长越短的光，被散射得也越多。如波长较短的蓝光和紫光所受到的散射，要比红光和橙光强十倍以上，所以天空中便存在着大量的这种被散射出来的波长较短的光线，使得天空呈现出浅蓝或纯蓝的颜色。图 6·22 简单地表明了太阳光通过大气层发生散射的情况。

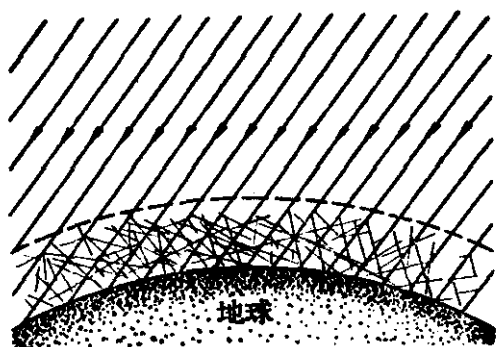


图 6·22

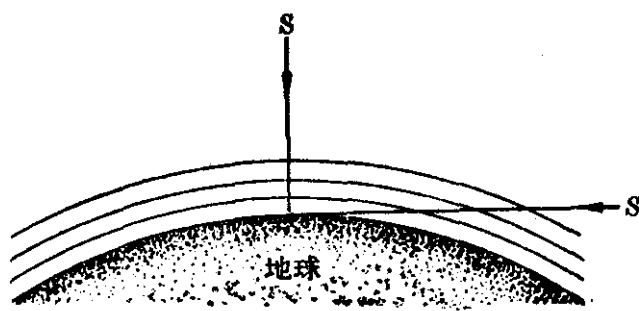


图 6·23

也正由于这种大气分子的散射作用，日出和日落的时候，太阳看上去显得分外嫣红。如图 6·23 所示，日出或日落时射到地面上来的太阳光经过大气层的路程要比中午时长一些，因而太阳光中波长较短的成分也被散射得多一些，波长较长的红光散射得最少，直射而来的红光也就最多，所以这时候太阳呈现红色。朝霞或晚

霞显示出瑰丽的紅色也是同样的緣故。

## § 6·5 物体的顏色

各种物体的顏色又是怎样决定的呢？我們先討論透明体的顏色，再討論不透明体和顏料的顏色。

为了研究透明体的顏色，我們可以把一片紅色玻璃，放在一个白熾电灯和白紙屏之間，让白光穿过玻璃片投射到屏上来，这时候白紙屏上就只現出紅顏色；如果換一片綠色玻璃，屏上就現出綠顏色；換什么顏色的玻璃片，屏上就現出什么顏色来；移去有色玻璃，屏上就呈現出白顏色。这說明：当白光射到某种顏色的透明体上时，所能透过的主要是跟透明体同一种顏色的色光，其他色光都几乎被透明体所吸收，所以透明体的顏色是由能透过它的色光来决定的。如果透明体允許各种色光都同样地透过它，那么这种透明体就是无色透明体，象玻璃、空气、清水、很薄的透明胶等。

不透明体表面的顏色是怎样决定的呢？我們可以让白光色散以后的光譜帶投射在一張紅紙上，紙上就只有光譜中紅色所处的部位是光亮的，其他部位都是阴暗的，这表明白光中除了紅光以外，其他各种色光都被紅色紙面吸收了；如果換一張綠紙，則紙上只有光譜中綠光所处的部位是光亮的，其他部位都是阴暗的，这也表明，除了綠光以外，其他各种色光都被綠色紙面所吸收；如果換一張黑紙，光譜投射上去，紙面上几乎全都是阴暗的。这說明：某种顏色的不透明体，当白光投射到它的表面上时，所能反射的主要是跟物体表面同一种顏色的色光，其他頻率的色光几乎都被物体的表面所吸收，所以不透明体的顏色是由它所能反射出的色光来决定的。物体的表面如果能够把白光中所有的色光几乎全部地吸收掉，这就是黑色的不透明体；如果能够把各种色光几乎全部地反射出来，这就是白色的不透明体。同一方花布，它的花朵上和枝叶上所反射出来的色光是不一样的，这是被局部表面反光的性质所

决定的。其他有图案和各种花样的物体表面，情况也是一样的。

白纸上涂上颜料以后，为什么就显示出这种颜料的颜色来呢？这是因为，原来白纸面能够反射各种频率的色光，所以是白色的；涂上颜料以后，改变了表面的性质，使它主要反射出跟颜料颜色相同的色光，其他频率的色光大部分都被吸收了。也许大家对于把两种颜料的颜色涂在一起会得到另一种颜料的颜色感到奇怪，其实这也是光的反射的缘故。每一种颜料除了反射跟它本身颜色相同的色光以外，还反射一些跟这种颜色相近的色光。例如：黄颜料除了主要反射黄光以外，还反射一些邻近的橙光和绿光；蓝颜料除了主要反射蓝光以外，还反射一些邻近的绿光和紫光。如果把蓝颜料和黄颜料同时涂在一处，橙光、黄光被蓝颜料吸收了；蓝光和紫光被黄颜料吸收了，唯一能够被反射出来的就只有绿光，所以黄蓝这两种颜料混合在一起就成了绿颜料。这就是调色的简单的道理。

## § 6·6 分光镜和摄谱仪

在光的色散一节里已经讲了怎样通过棱镜的折射来获得光谱。有关光谱的结构和它在科学研究、生产实践上的应用，现在已经累积了很为丰富的知识，并且构成了一门很重要的学科——光谱学。为了观察和研究光谱的结构，人们就要用到比较精细的仪器，下面所讲的分光镜和摄谱仪就是常用的两种。

**1. 分光镜** 图 6·24 是分光镜的外形图。在图 6·25 上，管  $A$  叫做平行光管，在靠近棱镜  $P$  的那一端，有一个凸透镜  $L_1$ 。管的另一端附有一个宽度可以调节的狭缝  $S$ ，它的位置刚好落在透镜  $L_1$  的焦平面上。光源发出的光经过狭缝射到透镜  $L_1$  上，经过折射以后就成为平行光束。这束平行光经过棱镜的折射以后发生色散，红光偏折最少，在最外侧；紫光偏折最大，在最内侧。各种色光依次形成一系列的平行光束，射到管  $B$  里去。管  $B$  叫做望

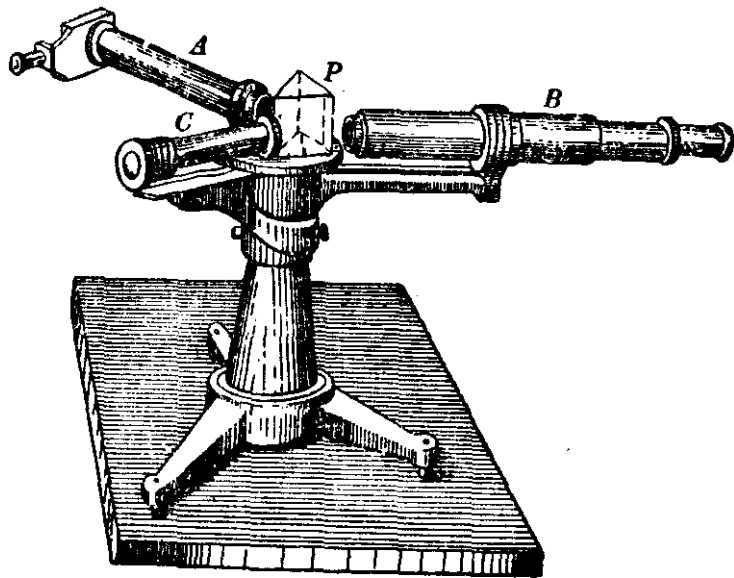


图 6·24

远镜,靠近棱镜的凸透镜  $L_2$  是物镜,另一端的凸透镜是目镜.从棱镜射来各种颜色的平行光束,经过物镜  $L_2$  的折射以后,就分别会聚在它的焦平面  $MN$  上,形成光谱.由于光谱的位置是在目镜的焦平面以内的(可以复习一下第四章光学仪器里所讲的开普勒望远镜的构造原理),经过目镜的放大以后,光谱带就拉得更宽,从目镜中看起来就格外清楚.

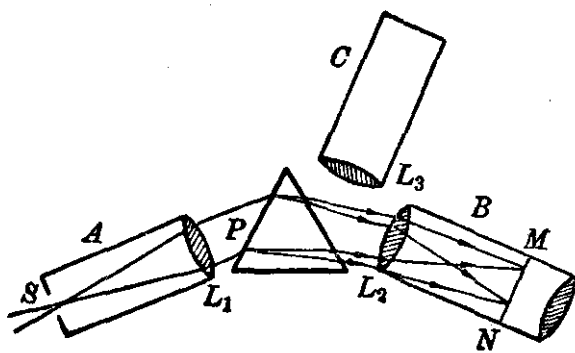


图 6·25

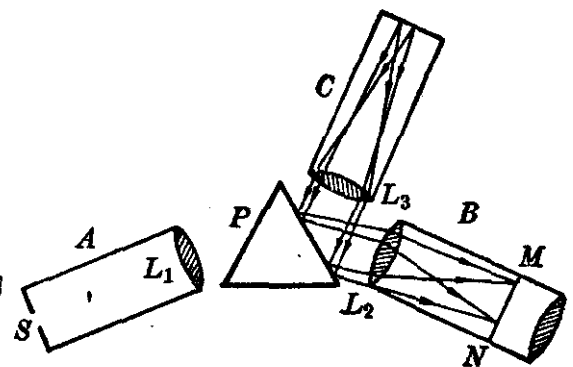


图 6·26

在分光镜的另一侧,还有一个  $C$  管,叫做标度管.它靠近棱镜的一端有一个凸透镜  $L_3$ ,在管内  $L_3$  的焦平面处有一个玻璃刻度尺,管口的另一端用一个小灯泡照亮这个刻度尺,于是刻度上的每一条标线经过  $L_3$  的折射以后,就成为一束平行光线,再经过棱镜的一个折射面的反射,进入到望远镜筒  $B$  里(如图 6·26 所示),通



过物鏡  $L_2$  的折射，又在焦平面  $MN$  处构成刻度尺的象。从望遠鏡的目鏡中看去，光譜就落在刻度尺的背景上，可以很方便地确定光譜的位置。

**2. 攝譜儀** 如果在分光鏡望遠鏡筒中的  $MN$  处，置放照相用的干片，就能把光譜的照片拍摄下来，供反复仔細地比較和研究。能够得到光譜并且能够拍摄光譜照片的仪器就叫做**攝譜儀**。

## § 6.7 可見光譜

光譜按产生的方法可以分为发射光譜和吸收光譜两大类。

**1. 发射光譜** 由发光体所发出的光直接生成的光譜叫做**发射光譜**。由于产生的情况不同，它又分为連續光譜和明綫光譜两种。

(1) 連續光譜：包含由紅到紫各种色光在內的連續彩色光帶，这种光譜叫做連續光譜(見书末插图 1(a))。

連續光譜是固体或液体在高温下所发出的光生成的。弧光灯的炭粒发光，温度高达  $4000^{\circ}\text{C}$ ；白熾电灯发光，灯絲的温度达  $2000^{\circ}\text{C}$  左右，它們都是熾热的固体发光的例子。熔融的鋼水发光，温度也在  $2000^{\circ}\text{C}$  左右，这是熾热的液体发光的例子。它們发出的光都能生成連續光譜。

(2) 明綫光譜：在黑暗的背景上只有一些不相連續的明綫，这种光譜叫做明綫光譜。

明綫光譜是气体或蒸汽在高温下所发出的光生成的。例如把盐类的粉末放在煤气灯或酒精灯的火焰中，盐类就在高温下分解，金属蒸发以后就得到它的熾热蒸汽，把这种火焰发出的光射到分光鏡上，除了火焰本身生成微弱的連續光譜以外，还有熾热的金属蒸汽生成的明綫光譜；通过封閉在管內的稀薄气体放电的方法也能得到这种气体的明綫光譜。图 6.27 就是利用稀薄气体放电发光来观察明綫光譜的實驗装置。

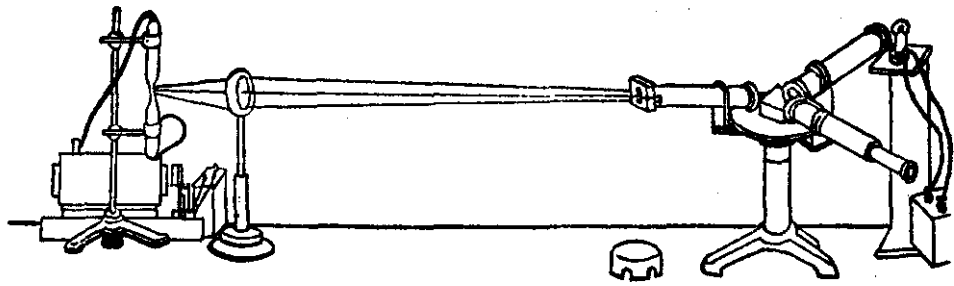


图 6-27

明綫光譜里的明綫叫做**光譜綫**。每种元素的高温蒸汽各有它自己特有的明綫光譜,光譜中譜綫的条数、位置都各不相同,通过这些譜綫就可以識別它是那种元素发出来的,所以我們把一种元素发出的光譜綫,称做这种元素的**标識譜綫**(見书末附图 1(c) 和 (e))。現在已經发现一百多种元素的标識譜綫,它們的条数、位置各不相同,甚至沒有一条是彼此重合的,这也表明每种元素的熾热蒸汽所发出的光,各有它自己特有的一些頻率。

**2. 吸收光譜** 在連續光譜的背景上,分布着許多暗綫,这种光譜就叫做**吸收光譜**。

吸收光譜是温度很高的光源发出来的白光,通过温度較低的蒸汽或气体后生成的。

例如,让高温光源发出的白光,通过温度較低的鈉(Na)的蒸汽,經過棱鏡后就能生成鈉的吸收光譜,这个光譜背景是明亮的連續光譜,而在鈉汽的黄色光譜綫(鈉的标識譜綫)的位置上出現了暗綫(見书末插图 1(d))。如果白光是通过鉄的低温蒸汽,那么在連續光譜背景中鉄的标識譜綫的位置上就会出现相应的暗綫。

通过对元素明綫光譜和吸收光譜大量的观察和比較,德国物理学家基尔霍夫(1824~1887)于 1859 年总結出这样一条定律:每一种元素的吸收光譜里暗綫的位置,跟它的明綫光譜里明綫的位置是互相重合的;也就是每种元素所发射的光的頻率跟它所吸收的光的頻率是相同的。

太阳光譜也是一种吸收光譜,在它的連續光譜的背景上,分布

着許多条暗綫,这些暗綫称为**夫琅和費綫**。因为在太阳光譜中,有許多暗綫是夫琅和費首先在1817年发现的,书末插图1(b)就是太阳光譜中的夫琅和費綫。

太阳光譜本来应当是連續的,为什么会有暗綫存在呢?原因是:太阳发出的白光,要穿过温度比太阳本身低得多的太阳大气层,而在这大气层里存在着从太阳里蒸发出来的許多元素的气体,太阳光穿过它們的时候,跟这些元素标識譜綫相同的光,都被这些气体吸收掉了,所以太阳光到达地球上就形成了吸收光譜。

## § 6.8 光 譜 分 析

既然每一种元素都有它特有的标識譜綫,那么,把某物质所生成的明綫光譜和已知元素的标識譜綫进行比较,就可以知道这种物质是由哪些元素組成的。根据物质的光譜来判定它的化学成分,这种方法就叫做**光譜分析**。光譜分析中,如果只分析物质的化学成分,而并不測定它的含量百分比,这叫做光譜的定性分析;如果在分析物质化学成分的时候,同时还根据标識譜綫的强度来确定元素含量的多少,这样的分析叫做光譜的定量分析。

**1. 光譜的定性分析** 把待分析的物质放在高温下不易蒸发的鉑环上,用温度很高的火焰对它加热,这种物质就逐渐变为熾热的汽体,并且发出光来。通过摄譜仪,拍摄出它的光譜的照片,再把它的光譜和各种已知元素的标識譜綫相比較,如果光譜中有某种元素的譜綫存在,就可以断定它含有这种元素;如果在待分析物质的光譜中,发现了某些譜綫,这些譜綫在所有已知元素的标識譜綫中都找不到,这就表示在待分析的物质里含有前所未知的新元素。在十九世紀中叶,就曾經用这种方法发现了铯(Cs)、鉀(Rb)、鉍(Tl)、錫(In)、氦(He)等元素。

**2. 光譜的定量分析** 光譜的定量分析是通过比較譜綫的强度来决定的,譜綫越强,这种元素的含量也越多。实验的結果表

明：如果物质中含有的微量元素不超过5%，这种元素的谱线强度和它的含量是成正比的。

作光谱定量分析的时候，先要把经过适当选择、含量已知的某种元素(称为**内标元素**)加到待测的物质中去，然后把待测物质的谱线强度跟内标元素的标线强度进行比较，根据它们之间的相对强度来确定它的含量。

进行光谱分析时，可以用明线光谱，也可以用吸收光谱。有些元素的标线谱线条数很多，例如铁(Fe)的谱线就有几千条，既然各种元素的谱线没有一条互相重合，那么在分析的时候就不必逐条加以比较，只要比较其中强度最大的几条谱线，有时甚至只要比较一条谱线也就够了。

**3. 光谱分析的特点** 光谱分析的主要优点是(1)灵敏度高。物质中杂质含量在一亿分之一克左右，也能够准确地分析出来，这样高的灵敏度是有很大的实用价值的。例如在地质勘探中，利用光谱分析就可以检验矿石里是不是含有微量的重金属、稀有元素或放射性元素等。(2)分析迅速。用化学分析的方法要几天才能完成的工作，用光谱分析只要几十分钟就能完成了，这就大大的提高了工作效率。

**4. 光谱分析的应用** 光谱分析除了用来分析矿石中是否含有稀有金属以外，还可以用来检验合金的成分。在炼钢时，为了及时掌握熔炉内各种成分的变化，或在冶炼特殊的合金钢时，为了严格控制需要渗入的钨、钒或镍等元素的含量，都要用到光谱分析的方法。

天文学家也经常用光谱分析来研究天体的化学成分。因为现在还不能从天体上取出样品来作化学分析，那就只能用摄谱仪拍出天体的光谱来进行光谱分析。通过太阳光谱的分析，知道太阳大气层里至少含有氢、氧、钠、钾、钙、铁、铜、镍、钴等66种元素。我国南京紫金山天文台就有太阳光摄谱仪，专门用来研究太阳光谱。

其他恒星表面大气层的成分、恒星的温度以及运动速度也都可以用光谱分析来测定<sup>①</sup>，这就大大开扩了人类对宇宙的认识。

光谱分析的用途很广泛，它还能用来研究同位素、原子和分子的构造、原子中的电子分布以及用来精密地校定长度的标准原器等。

## § 6.9 红外线、紫外线和伦琴射线

在光谱分析的研究中，人们不仅了解了可见光的部分（从红光到紫光，波长范围是 7700~4000 埃），同时还发现了我们眼睛看不见的光——红外线、紫外线和伦琴射线等。

**1. 红外线** 1800 年英国的物理学家赫谢耳 (1738~1822)，用灵敏的温度计在可见光谱红端以外的地方，发现有显著的热作用存在，他认为这里有一种看不见的光线，它的位置表明它的频率应当比红光更低，波长比红光更长；后来用特殊的感光底片拍摄光谱，证实在红光区域外侧的确有谱线存在，并且还证实这种看不见

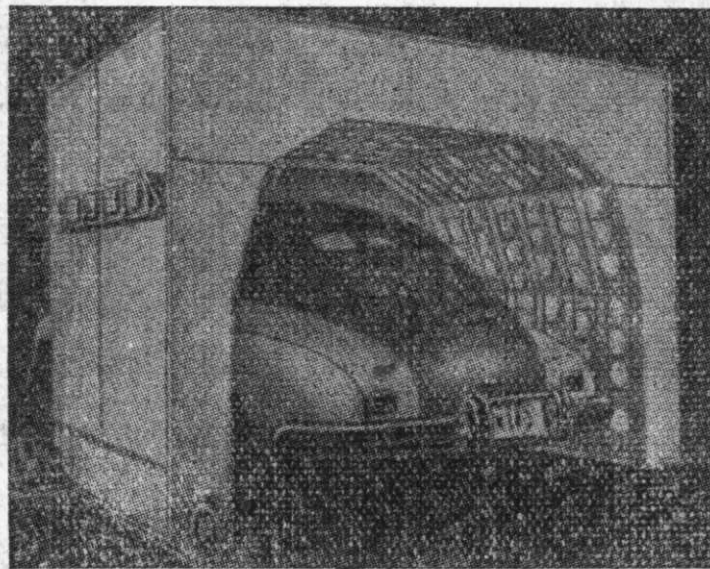


图 6.28

<sup>①</sup> 温度较低的天体呈红色，它的光谱中最亮的部分也应当是红色；温度较高的天体呈黄色，它的光谱中最亮的部分是黄色和红色；温度更高的天体呈白色，它的光谱经会聚以后也应当是白色；温度最高的天体呈蓝色，它的光谱中蓝色的部分也最亮。这样我们就可以判断天体的温度了。

的光綫也同样遵循可見光所遵循的定律，由于它的位置是在紅光区域以外，所以称为**紅外光**，或称为**紅外綫**。

紅外綫的特性之一是它的热作用非常强，工业上經常用它来烘干物体。用紅外綫烘漆，不仅速度快，而且使相当厚度的漆层中受热均匀，可以避免皺紋、裂痕、汽泡等缺点。現在烘干汽車外壳的油漆都用紅外綫(如图 6·28 所示)，一部汽車利用热空气要几十小时才能烘干，用紅外綫只要几十分钟就可以了。

紅外綫的另一个特性是：它能够穿过很厚的气层或云雾而不致发生散射現象，这种性质可以在軍事上用来通訊、定位、跟踪<sup>①</sup>和黑夜摄影<sup>②</sup>等。

紅外綫在农业上的应用是用来烘干谷物和种子。种子經過紅外綫处理以后，发芽率高、生长快、产量高。

紅外綫在医疗上可以用来对病人的內脏加热，治疗效果很好。

**2. 紫外綫** 1802年，德国物理学家里特(1766~1810)又发现，在可見光譜的紫端以外的地方，有使含有氯化銀的照相底片感光的作用，并且能使涂有鉑氰化銀的物质发出綠色的荧光<sup>③</sup>。他认为这里也有一种看不見的光綫存在，由于它存在于可見光譜紫光区域的外側，所以称为**紫外光**，或称为**紫外綫**。紫外光的頻率比紫光更高，波长比紫光更短。

紫外綫最显著的性质是荧光作用强，象煤油、曙紅溶液、含有氧化鈾的玻璃等受到紫外綫的照射时会发荧光，甚至人的皮肤、指甲、牙齿在紫外綫的照射下也会发出很微弱的荧光来。日光灯就

① 远处的軍艦、高空的飞机、導彈，由于发动机使机体发热，会輻射出紅外綫来，利用紅外綫接收器，可以确定机体的方位，如果附以自动跟踪設備，还可以使接收器的方位始終跟踪着目标。

② 在灯火管制的情況下，可以利用对紅外綫敏感的特制照相底片进行摄影，甚至夜晚在高空也能拍摄隱蔽的軍艦、機車和工厂等目标。因为这些温度較高的物体，即使在鍋炉停止工作的情况下也会輻射出大量紅外綫来。

③ 物质在紫外綫照射下发出的可見光叫做荧光，能够发荧光的物质叫做荧光物质。

是利用紫外綫的这种性质設計制成的，在日光灯的内管壁上涂有一种荧光物质，使用的时候，先使日光灯管内的水銀蒸汽产生大量的紫外綫，在紫外綫的照射下，管壁就能发出白色或其他顏色的荧光，日光灯的效率很高，是一种很經濟的冷光源。

紫外綫的另一种性质是生理作用。紫外綫能够杀菌，能够使皮肤发黑。在太阳光里含有一定量的紫外綫，所以衣服、被褥等用具經常晒晒太阳可以消毒也正是这个道理。医院里常常用紫外綫医疗皮肤病、軟骨病等。矿井里的工作人员，如果下班以后能够在发射紫外綫的太阳灯下，进行人工日光浴，那就可以保护身体健康<sup>①</sup>。

**3. 倫琴射綫** 除了紅外綫、紫外綫以外，不可見的光綫，还有所謂倫琴射綫(X射綫)。

1895年，德国物理学家倫琴(1845~1923)首先发现这种射綫的存在。他用高速度的电子束冲击玻璃或金属的表面，就产生一种看不見的射綫。这种射綫可以穿过木板，使荧光物质发光，还能穿过包在胶卷外面的黑紙筒使照相底片感光。由于当时还不很了解它，认为这种射綫还是个“未知数”，所以就把它叫做“X”射綫，后来人們为了紀念他，就把这种射綫称为**倫琴射綫**。

图6·29就是产生倫琴射綫的电子管(又称倫琴射綫管)，管内抽成高真空，气压約在 $10^{-6}$ 毫米高水銀柱，里面封閉着两个极：*K*是阴极，由鎢制的灯絲組成，*A*是对阴极(阳极)，是由鎢、鉬或鉑做成的傾斜靶面，通过变压器供給灯絲的电压約在8~12伏左右，它使絲极发热，射出热电子，而供給两极的电压約在50~2000千伏左右，使絲极射出的热电子在板极高压的作用下，以很大的速度冲击对阴极的金属靶面，这时金属表面就会射出倫琴射綫来。

跟紅外綫、紫外綫一样，倫琴射綫也会发生反射、折射、干涉

<sup>①</sup> 太强的紫外綫对人的身体是不利的。例如：会引起皮肤发紅、眼球充血等。电焊工在工作时要戴防护眼鏡，也就是为了防止电焊发出强烈的紫外綫伤害人的眼睛。



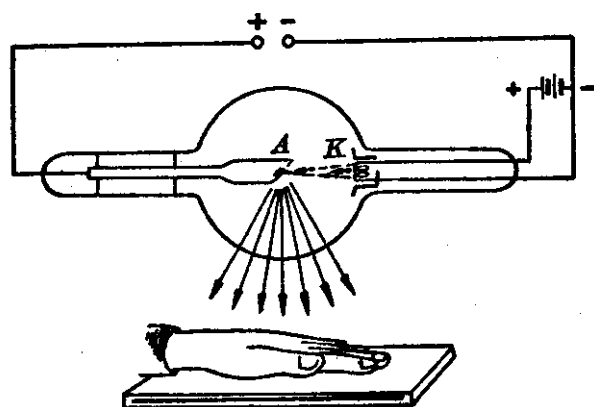


图 6·29

和衍射现象。进一步研究知道伦琴射线的频率比紫外线更高，波长比紫外线更短。一般用刀片切成的任何细小的狭缝，对于伦琴射线衍射都嫌太宽了；只有晶体薄片中的结晶格子（结晶点阵），才是伦琴射线衍射实验中最恰当的衍射狭缝。1912年，德国物理学家劳厄首先用这种方法观察伦琴射线的衍射并获得成功，图 6·30 就是伦琴射线通过食盐结晶以后生成的衍射花样。用这种方法可以来研究各种晶体的结构。伦琴射线的衍射现象表明它是一种不可见的光线。

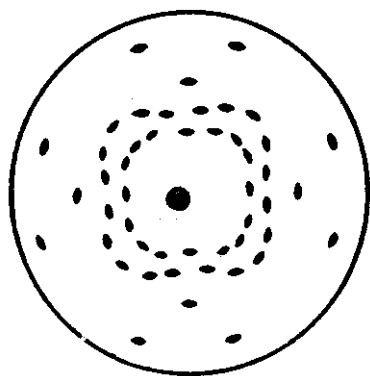


图 6·30

跟红外线、紫外线比较起来，伦琴射线具有更强的贯穿本领，波长越短（也就是越“硬”的伦琴射线），贯穿本领就越大，它能够穿过不透明的厚纸、肌肉、木头和 5~15 厘米厚的铅板等物体；物质的密度越大，它能够贯穿的厚度就越小；并且射线进入物体越深，



射綫减弱得也越厉害<sup>①</sup>。在医疗上可以利用倫琴射綫来檢查人体組織內有无病变(例如肺病、骨折、結石、彈片射入肌肉等),在工业上可以用它来檢查金属工件內有无汽泡、裂痕等缺陷。

跟紫外綫一样,倫琴射綫也有杀菌作用,并且能影响动物的細胞組織,所以也能用硬倫琴射綫来治疗恶性肿瘤。它也有激发荧光物体发荧光,使照相底片感光和使气体电离等作用。

## § 6.10 光的电磁本性

通过光的干涉、衍射和对复色光的色散所进行的初步討論,使我們知道光具有明显的波动性。然而,光是象水波、声波那样的波嗎?为什么它在沒有媒质存在的真空中也能傳播?究竟光是怎样一种波呢?

麦克斯韦的理論研究,赫茲和列別捷夫的实验回答了这个问题。

1864年麦克斯韦通过理論研究指出:(1)电場跟磁場的改变,不是局限在它周圍的空間,而是以电磁波的形式向外輻射出去,它跟光一样,也能在真空中傳播;(2)电磁波的傳播速度跟光的傳播速度相同;(3)电磁波跟光一样也能发生反射、折射、干涉和衍射等现象。因而他提出了光的电磁学說:光現象实质上是一种电磁現象。

① 下表列出各种物质使射入的倫琴射綫强度减弱一半的厚度(毫米)

| 波 长<br>(埃) | 使倫琴射綫强度减弱一半的厚度(毫米) |       |       |       |        |
|------------|--------------------|-------|-------|-------|--------|
|            | 标准状态下的空气           | 水     | 鋁     | 銅     | 鉛      |
| 0.1        | —                  | 43    | 16    | 2.3   | 0.18   |
| 0.7        | 4100               | 4.6   | 0.5   | 0.016 | 0.0044 |
| 2.5        | 140                | 0.14  | 0.013 | 0.004 |        |
| 10.0       | 3.1                | 0.003 | 0.005 |       |        |

从表中可以看出,波长越长的倫琴射綫越容易被物质吸收,波长为几十埃的倫琴射綫,几乎能够全部被很薄的稀薄空气层吸收。技术上和医疗上应用的倫琴射綫波长多为1埃左右,或者更短一些,并且用鉛板来防止它的穿透。

象，光波就是一种频率很高的电磁波。

1888年德国物理学家赫兹(1857~1894)首先用人工的方法获得了电磁波，并且通过电谐振接收到它，这就证实了电磁波的实际存在。后来又通过实验发现，电磁波在金属表面上要反射，在金属凹面镜上反射后会聚焦，通过靛青棱镜的时候要发生折射等现象。从而证实了光波在本质上跟电磁波是一样的。

1891~1893年，科学家们分别用实验的方法测出了电磁波的传播速度，它和光的传播速度近似相等。后来麦斯尔又进一步作了较为精确的测定，得出的结果是299,780公里/秒，和迈克耳逊测定的光速( $c=299,796 \pm 4$ 公里/秒)十分符合。

1900年俄国的物理学家列别捷夫(1866~1912)从实验知道光对固体的表面有压力作用，他的实验证明，光本身就是一种物质。因此它在真空中传播就自然不需要依靠其他媒质了。

根据光的电磁理论，光波是一种频率很高的电磁波。可见光的频率范围大致是  $3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$  赫兹，紫外线频率比可见光大，伦琴射线的频率比紫外线更大，而从放射性元素射出的  $\gamma$  射线的频率比伦琴射线的频率还要大，它是目前阶段所知道的电磁波中频率最高的一种；比可见光频率小的是红外线，现代无线电技术中广泛应用的电磁波是比红外线频率更小的电磁波，它的频率范围大约是  $10^5 \sim 3 \times 10^{12}$  赫兹。

随着各种电磁波的频率大小不同，它的性质也有明显的改变。下面是各种电磁波按频率由小到大排列成的电磁波谱。

| 电磁波种类       | 频率(赫兹)                                       | 在真空里的波长(厘米)                                |
|-------------|--|--|
| 无线电波        | $10^5 \sim 3 \times 10^{12}$                 | $3 \times 10^5 \sim 10^{-2}$               |
| 红外线         | $10^{12} \sim 3.9 \times 10^{14}$            | $3 \times 10^{-2} \sim 7.7 \times 10^{-5}$ |
| 可见光线        | $3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$ | $7.7 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ |
| 紫外线         | $7.5 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{16}$   | $4 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-7}$   |
| 伦琴射线        | $3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{20}$     | $10^{-6} \sim 10^{-10}$                    |
| $\gamma$ 射线 | $3 \times 10^{19}$ 以上                        | $10^{-9}$ 以下                               |

## 本章提要

1. 波的干涉就是两列波迭加在一起时,出现振动最强和振动最弱互相间隔开来的现象。产生干涉现象的条件是:两列波波长相同,并且在同一均匀媒质中传播。干涉现象是波动性质的主要表征,光具有干涉现象,表明光具有明显的波动特性。

2. 波的衍射就是波在传播的途径中遇到迎面挡住的孔或障碍物时,绕到孔的外面或障碍物的后面继续传播的现象。产生衍射现象的条件是:孔或障碍物的大小不比波长长很多。能够发生衍射现象也是波的重要属性之一;光的衍射再一次证明光具有波动特性。

3. 把复色光(白光)分解成单色光的现象,叫做光的色散。白光的色散现象表明复色光是由许多频率不同的单色光组合而成的。单色光的颜色是由它的频率决定的,不同频率的色光在真空(或空气)中传播的速度是相同的;在媒质中的传播速度比真空中的传播速度小,并且光的频率不同,传播速度也不同,根据公式  $n = \frac{c}{v}$  可知,各种频率的单色光折射率就不同。这就是复色光通过棱镜能够发生色散的缘故。

4. 透明体的颜色是由它所能透过的色光来决定的。不透明体的颜色是由它所能反射的色光来决定的。混合颜料的颜色是由组成它的颜料共同反射的色光来决定的。

5. 复色光经过色散以后,按波长(或频率)依次排列而成的光带叫做光谱,光谱按产生的方法可以分为发射光谱和吸收光谱两大类。

发射光谱是由发光体发出的光直接生成的光谱;吸收光谱是由温度很高的光源发出来的白光,通过温度较低的蒸汽或气体以后生成的光谱。

发射光谱由于产生的情况不同又可以分为连续光谱和明线光谱等。由炽热的固体或液体发出来的光生成连续光谱;由炽热的蒸汽或气体发出来的光生成明线光谱。

每一种元素的吸收光谱里暗线的位置,跟它的明线光谱里明线的位置,总是互相一致的。

6. 红外线是波长较可见光长、频率较小的不可见光,它的特性是:热辐射作用强,能穿透大气层和云雾,可使特制的底片感光等。

7. 紫外线是波长较可见光短、频率较大的不可见光,它的特性是:荧光作用强,有生理作用,能使照相底片感光等。

8. 倫琴射綫是波長比紫外光更短、頻率更大的不可見光，它是由高速電子束沖擊在金屬的表面上產生的，這種射綫有很強的貫穿本領，有殺菌作用，能影響動物的細胞組織，能激發熒光物質發熒光，使照相底片感光，並且具有使氣體電離的本領。

9. 麥克斯韋電磁學說指出：光現象實質上是一種電磁現象，光波是一種頻率很大的電磁波。

## 復習題六

1. 什麼是波的干涉現象？產生干涉現象的條件是什麼？什麼是波的衍射現象？產生衍射現象的條件又是什麼？

2. 用手將兩片干淨的玻璃片捏在一起，它們中間夾著一層空氣薄膜，將玻璃片的表面迎着灑有食鹽的燭焰，這時在玻璃表面上就會看見明暗相間的條紋，試做這個實驗，並說明理由。

3. 用針尖在硬紙片上戳一個小而光滑的針孔，通過這個小孔來觀察一個體積很小的光源，例如手電筒中小電珠的燈絲，這時會看見什麼現象？試做這個實驗。

4. 白光通過稜鏡時為什麼會發生色散現象？

5. 什麼是連續光譜、明綫光譜和吸收光譜？它們各是在怎樣的情況下生成的？

6. 什麼是標識譜綫？對於同一種元素來說，它的明綫光譜中的光譜綫和吸收光譜中的光譜綫相互間有什麼關係？

7. 根據物質的連續光譜能不能確定它的化學成分？為什麼？

8. 紅外線、紫外綫和倫琴射綫各有些什麼重要的特性？

9. 光的電磁學說的內容是什麼？試將各種電磁波按波長由短到長排列成電磁波譜來。

## 第七章 光的量子性

第六章討論了光的波动性质，在这一章里我們还要討論光的另一种重要性质：量子性。

### § 7.1 光电效应

1887年赫兹首先发现，让紫外线照射在电压很高的极板上，就能使极板间发生火花放电的现象。1888年俄国物理学家斯托列托夫(1839~1896)重复赫兹的实验，进一步发现，在不大的电压下，用紫外线照在带负电的极板上，也能够使极板失去负电荷。

我们把金属物体受到射线照射时失去负电荷的现象叫做**光电效应**。

如图7.1所示，让一块表面光洁、绝缘的锌板带负电，并把它与静电计(或验电器)相连接，用紫外线照在锌板上，这时原来静电计上指针偏转的角度，立即减小为零。这表明：锌板带的负电荷，由于受到射线的照射立即消失了。

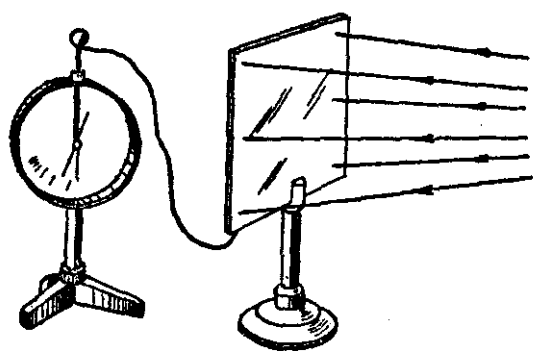


图 7.1

如果用丝绸摩擦过的玻璃棒与锌板接触，使锌板带正电，这时候尽管也用紫外线照射它，静电计指针偏转的角度仍旧保持不变。这表明：紫外线使锌板失去负电荷，并不是由于射线使周围气体电离所产生的正离子与锌板负电荷中和的结果，

而是其他原因。不然的话，紫外线照射在带正电的锌板上时，为什



放出来。

怎样用光的波动性质来解释光电效应的这些特性呢？按照光的波动学说，从金属表面释放出的电子速度和动能，应当跟入射光的强度（振幅）有关系，入射光越强，振幅越大，光的能量也就越强，这些能量被金属表面的电子所吸收，则电子脱出金属表面以后就应该具有较大的动能才对，然而事实却与光的波动性质相抵触，显然，光电效应不能用光的波动性质来解释。

## § 7.2 光 子 说

基于以上这些难于解释的实验结果，1905年物理学家爱因斯坦（1879~1955）提出了光的量子理论（光子说）。他认为：

物质的原子和分子所发射和吸收的光，并不是连续的波，而是由特殊物质组成的一个个的微粒，这种物质微粒，称做光子（或者称做光量子）。

这种特殊的物质微粒——光子，跟一般的物质微粒一样，也具有一定的能量，它是光的最小单元，它的能量  $\epsilon$  跟它的频率  $\nu$  成正比，即

$$\epsilon = h\nu,$$

式中  $h$  是一个普适恒量，称做普朗克恒量，它的数值是： $6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒。

爱因斯坦根据光子理论成功地解释了光电效应：电子要从金属表面脱离出来，就必须克服引力做一定数量的功（称做脱出功  $p$ ），对不同的金属讲，电子脱出它的表面时，所做的功也不同。具有能量  $h\nu$  的光子，射到金属表面上时，就把它的能量传递给了金属中的电子，一部分能量用来作为脱离金属表面时所需要的脱出功，另一部分能量就转变成脱离金属表面的电子的动能，也就是

$$h\nu = p + \frac{1}{2}mv^2.$$

根据爱因斯坦的这个公式，可以看出：对于同一种金属， $p$  的数值是一定的，照射光的频率如果小于它的最低频率  $\nu_0$ ，即  $h\nu \leq p$ ，那就不会发生光电效应。不同的金属， $p$  的数值不同，要发生光电效应，照射光光子的能量  $h\nu$  必需大于这一金属的脱出功  $p$ ，因而频率必须大于某一数值  $\nu_0$  才行。碱金属的脱出功  $p$  比其他金属的脱出功小，所以，只要用频率较低的可见光照射，就能使它发生光电效应；而一般金属发生光电效应，则需要用频率较高的（即能量较大的）紫外线照射才行。

从爱因斯坦公式中还可以看出：如果照射光的频率越大，光子的能量  $h\nu$  也越大，从金属中释放出来的电子的速度和动能也就越大（根据  $\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - p$ ），而跟光的强度无关。光的强度大，只表示光子的数量多，所以照射的光线越强，吸收光子并从金属表面释放出来的电子也就越多，光电流也就越强（见图 7.2）。

光电效应表明：光又具有另一种重要的性质——量子性。

例 1. 试求出波长是 5000 埃的可见光和波长是 1 埃的伦琴射线光子的能量。

【解】 根据题意要从射线的波长来求光子的能量，就必须先从射线的波长求出它的频率，再根据公式  $\varepsilon = h\nu$  求出光子的能量。

根据公式  $\lambda\nu = c$  ( $c = 3 \times 10^{10}$  厘米/秒)，波长是 5000 埃的可见光的频率是

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒}}{5000 \times 10^{-8} \text{ 厘米}} = 6 \times 10^{14} \text{ 秒}^{-1} \text{ (赫兹)};$$

波长是 1 埃的伦琴射线的频率是

$$\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒}}{1 \times 10^{-8} \text{ 厘米}} = 3 \times 10^{18} \text{ 秒}^{-1} \text{ (赫兹)}.$$

再根据公式  $\varepsilon = h\nu$  ( $h = 6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒)，算出光子的能量分别是



$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= h\nu_1 = 6.62 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒} \times 6 \times 10^{14} \text{ 秒}^{-1} \\ &= 4 \times 10^{-12} \text{ 尔格} \quad (\text{波长是 } 5000 \text{ 埃的可見光光子的能量}); \\ \varepsilon_2 &= h\nu_2 = 6.62 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒} \times 3 \times 10^{18} \text{ 秒}^{-1} \\ &= 2 \times 10^{-8} \text{ 尔格} \quad (\text{波长是 } 1 \text{ 埃的倫琴射綫光子的能量}).\end{aligned}$$

例 2. 已知金属鎢的脫出功是  $7.2 \times 10^{-12}$  尔格, 現在分別用頻率是  $7 \times 10^{14}$  赫茲的紫光 and 頻率是  $5 \times 10^{15}$  赫茲的紫外光照射金属鎢的表面上, 問能不能发生光电效应?

【解】 根据光子理論和爱因斯坦公式  $h\nu = p + \frac{1}{2}mv^2$  知道, 要发生光电效应, 应当滿足下列关系:  $h\nu > p$ , 即照射光光子的能量要大于这一金属的脫出功, 所以应当先算出所給的紫光和紫外光光子的能量.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{紫}} &= h\nu_{\text{紫}} = 6.62 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒} \times 7 \times 10^{14} \text{ 秒}^{-1} \\ &= 4.63 \times 10^{-12} \text{ 尔格}; \\ \varepsilon_{\text{紫外}} &= h\nu_{\text{紫外}} = 6.62 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒} \times 5 \times 10^{15} \text{ 秒}^{-1} \\ &= 3.31 \times 10^{-11} \text{ 尔格}.\end{aligned}$$

从計算的結果知道: 对于頻率是  $7 \times 10^{14}$  赫茲的紫光, 其光子的能量是  $4.63 \times 10^{-12}$  尔格, 比鎢的脫出功 ( $7.2 \times 10^{-12}$  尔格) 小, 即  $h\nu_{\text{紫}} < p$ , 所以这种紫光照射在鎢的表面上, 不会发生光电效应; 对于頻率是  $5 \times 10^{15}$  赫茲的紫外光, 其光子的能量是  $3.31 \times 10^{-11}$  尔格, 比鎢的脫出功大, 所以这种紫外綫照射在鎢表面上时, 能够发生光电效应.

### § 7.3 光电管和光导管

实验的結果告訴我們, 光电效应分为两种: 一种是光射在金属导体的表面上, 使金属中的自由电子激发出来, 这种光电效应称做**外光电效应**; 另一种是光射在半导体或絕緣体的表面上, 使束縛电子受到激发以后, 从原子的內层跳到外层来, 甚至成为自由电子,

以增加它的导电性,这种光电效应,称做**内光电效应**。

**1. 光导管** 光导管是利用半导体的内光电效应制成的器件。在含有直流电源、光导管、继电器的电路里,由于这时光导管的电阻比较大,通电电流很微弱,不足以推动继电器工作;当光照射在光导管上时,由于光导管中发生内光电效应,光导管的电阻就突然变小,电路中的电流也随即增强,以致于可以推动继电器工作,(例如控制一个电铃:当光导管受光时,电铃就发出声响讯号。)这样就可以把一个光讯号转变成为电讯号。这种半导体也称做光敏电阻,象:硫化镉、硫化铅、硫化铈、硫化铟等半导体都是光敏电阻。这类半导体元件体积小、牢固耐用,主要应用于自动控制、远距离探测等设备中。

**2. 光电管** 光电管是一种利用碱金属的外光电效应制成的二极电子管。图 7·3 就是一种光电管的外形,管里的空气已被抽去,有时候在管里充入少量的惰性气体(例如:氩、氛、氖等)<sup>①</sup>;管内的阳极 A 接在电源的正极上;管内的阴极 K 与电源的负极相连接(如图 7·4 所示),其内壁涂有碱金属(例如:钾、钠、铯,或者它的氧化物);电源的电压约为 80~100 伏。光线照射在光电管阴极的内壁上时,就引起外光电效应,激发出光电子,在电源电压的作用下,

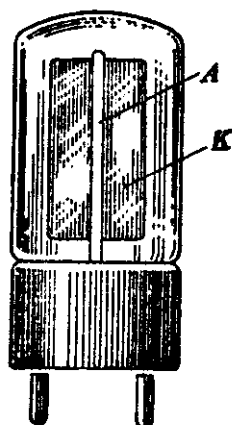


图 7·3 光电管

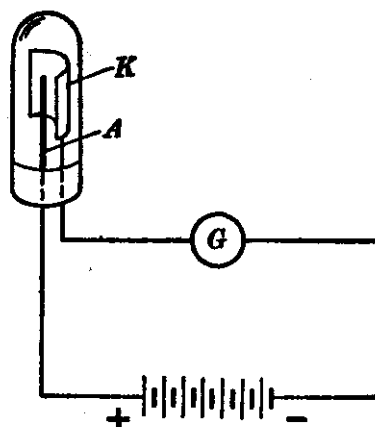


图 7·4

<sup>①</sup> 充入光电管的惰性气体压强约为 1 毫米水银柱高,从碱金属表面激发出来的电子,碰击惰性气体的原子以后,使气体发生电离现象,这样电流就可以大大增强。

电子就飞向阳极  $A$ ，形成光电流。照射光线越强，激发出来的电子数目也越多，电流计  $G$  中显示出的电流强度也越大。

光电管在自动控制、无线电传真、有声电影和其他技术设备中有着广泛的应用。下面就来介绍几种比较常见的应用。

(1) 自动计数装置 图 7.5(a) 表示用光电管控制的自动计数装置，用来记录传送带上所输送产品的数量。在传送带的一侧是由光电管等组成的光控继电器  $P$  和计数器  $C$ ；传送带的另一侧是光源  $S$ ，从  $S$  发出的一束狭细的光束，正好能射到对面的光电管里。

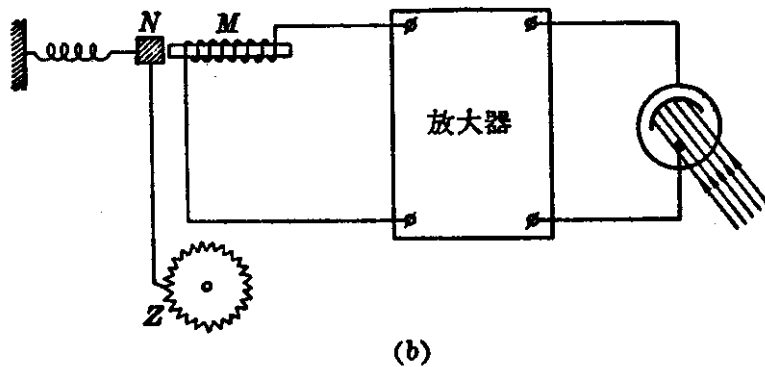
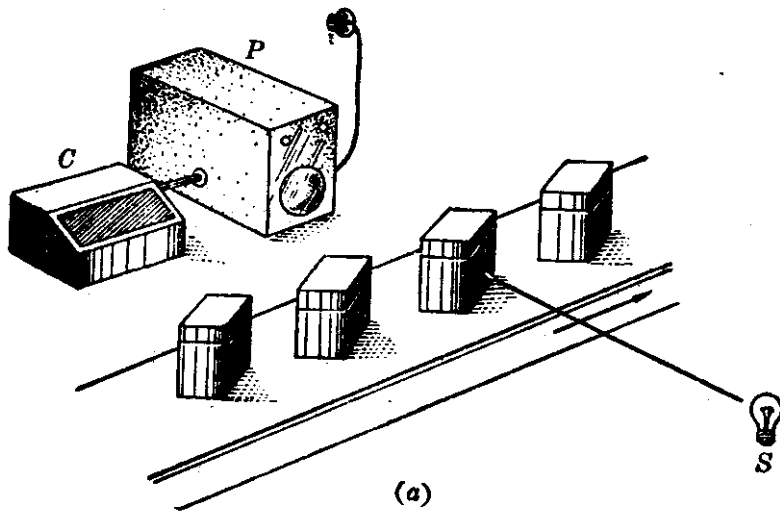


图 7.5

图 7.5(b) 是光控继电器  $P$  和跟它相连的计数器  $C$  的装置简图。从  $S$  发出的光束射到光电管里，使电路中产生微弱的光电流，经过放大器放大后，再通入计数器里的电磁铁  $M$  线圈中，于是电

磁铁就能把衔铁  $N$  吸住,从而使齿輪  $Z$  被卡住而不能轉动。只有当傳送带上輸送过去的产品把光綫擋住的时候,电路中的电流才会消失,这时电磁鉄  $M$  也就放开衔鉄,使齿輪不再被卡住而能轉过去一格,于是計数器上就添加一个数。用这种方法就能把产品的数目自动地記錄下来。这种計数装置既迅速又准确,适合于自动化生产的需要。

(2) 有声电影的发音 有声电影能够发出声音,是由光电管組成的发音机构来实现的。要了解它是怎样发出声音的,首先要簡單說明一下有声影片声迹的記錄方法。

图 7.6 是有声影片录音原理的示意图。先把要記錄下来的声音送入发話器,使它的金属薄片发生振动;金属薄片在磁場中振动时,由于切割磁力綫便发生电磁感应現象,使电路中产生跟声音变

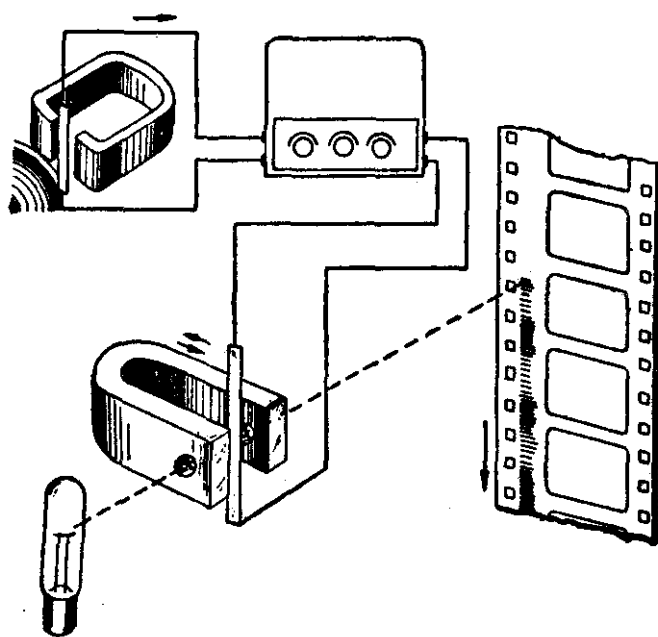


图 7.6 有声影片录音原理示意图

化相同的声音电流;声音电流經過放大器放大以后又流入录音机中的金属薄片中,由于磁場对电流有作用,所以这个金属薄片又随着声音电流的变化而振动着;在录音机中的两个磁极上开有圓孔,从光源发出狭細的光束,能够通过圓孔射到胶片上。当金属薄片靜止的时候,薄片正好把这束光綫的一半擋住;当金属薄片随声音

电流变化而振动的时候，射到胶片上来的光束宽度也就随着声音的变化而变化着。光束宽度不同，在感光胶片上留下的痕迹宽度也不同，匀速移动胶片，这时在它的边缘上就录下了如图所示的声迹。

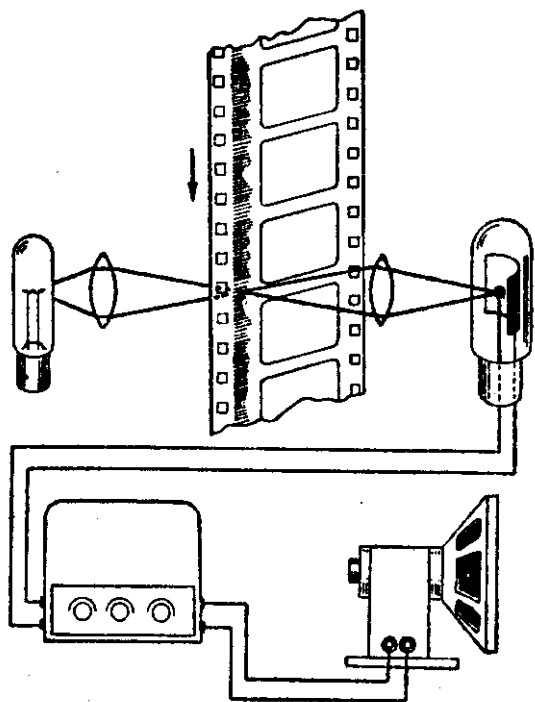


图 7·7 有声影片声音的重发过程示意图

被记录在胶片上的声迹，在放映影片时，是怎样重放出来的呢？图 7·7 简要地表示出这一重放的过程。光源、胶片的声迹和光电管的位置被安排在同一条直线上，光源发出的光，照射在胶片的声迹上，透过胶片进入光电管里，由于声迹起伏的变化，进入光电管的光线强弱也发生相应的变化，再经过扩音器的放大以后，就能把变化着的电流又变成跟原来相同的声音，在银幕后面重发出来。

## § 7·4 光的量子性

爱因斯坦的光子说成功地解释了光电效应，它表明，光还具有明显的粒子性质。近代物理学指出，这种由特殊物质组成的光量子是不连续的，或者说它是一份一份地在空中以巨大的速度传播

着，它的“顆粒”是这样的小，速度是这样的快，以致我們凭眼睛的直觉簡直难于看出它的不連續性来。

下面的实验結果也可以直接显示出光的量子性。如图 7·8 所示：让倫琴射綫射到薄膜  $A$  上，使薄膜发出一种波长极短的荧光，而在  $A$  的两侧对称地放着两个計数器  $C_1$  和  $C_2$ ，射进計数器的光子，能够在小于 0.001 秒的时间內引起反应，例如使跟它连接的靜电計的悬絲发生振动，然后把这两个靜电計的振动記錄在同一条帶子上。如果从  $A$  向四周发出的荧光是波的話，两个計数器中所

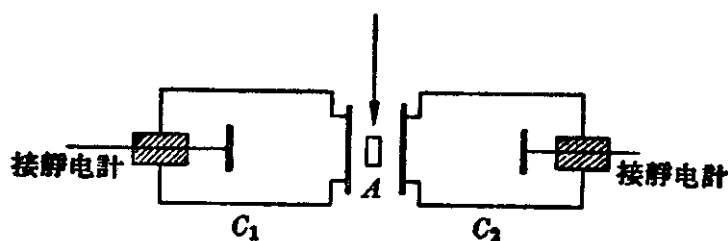


图 7·8

得到的記錄就应当是一致的；如果从  $A$  向四周发出的是光量子，那么，这种量子的发射就会时而向这边发射，时而向那边发射，不可能象波的发射那样均匀而对称，从而两个計数器中所得到的記錄就会是无規則的、互相不一致的。实验的結果表明，記錄帶上的两条踪迹是无規則的，这就証明，从  $A$  发出的是光量子而不是連續对称的波。

証实光的量子性的另一个有趣的实验 (图 7·9)，是物理学家瓦維洛夫 (1891~1951) 首先完成的。由于光源发出的光量子不是均匀而有規律的，而是无秩序地飞出来，有时候飞出来的数目多

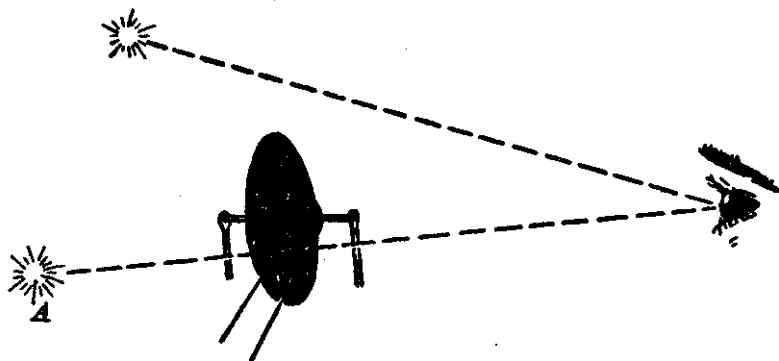


图 7·9

一些，有时候飞出来的数目少一些。如果光源足够的微弱，则发出光量子流的起伏就有可能被眼睛觉察出来。为了防止眼球本身的活动而引起视觉的变化，瓦維洛夫用一个红色的点光源放在发光点 A 的近旁，当眼睛同时注意红色光点和发光点 A 的时候，眼球就不致于那么活动，从而能相对的固定下来；又由于眼睛有视觉暂留作用，它会使光量子的起伏现象不能被觉察出来，所以瓦維洛夫又利用一个有小孔的圆盘，使发光点 A、小孔和眼睛处在一条直线上，圆盘每秒钟转一圈，眼睛在 1 秒钟内就能看见 1 次闪光。把光源调节得很微弱，使得发射出来的起伏的光量子流，在数目少的时候不能被眼睛所看见，只有在数目多的时候才能被眼睛所看见。这样，在圆盘转起来后，就不一定每秒钟都能看见一次闪光，而是间歇性的，有时能看见闪光，有时看不见闪光。瓦維洛夫第一次用眼睛直接看见了光量子的不连续性，从而有力地证明了光的量子性质。

## § 7.5 光的波粒二象性

光的干涉、衍射和色散等现象，可以用光的波动说来解释，它们说明光具有波动性；而光电效应和它的规律等，又要用光子说才能解释，这说明光又具有微粒性，而不是连续不断的波，光的这两种性质是不是互相矛盾的呢？

从前面所讨论的许多光现象中可以看出，光的性质是比较复杂的，甚至有些地方很难用与我们日常生活经验相符合的图象来描述它。在不同的具体条件下，它显示出不同的特性，在一些情况下，它向我们显示出波动性，在另一些情况下，它又向我们显示出粒子(量子)性。好象一个物体，有时候它让这一面面向着我们，有时候又让另一面面向着我们。这原也没有什么不可理解的地方，问题在于，它所表现出来的这两重性质，按习惯的看法，似乎是互相矛盾的。根据近代物理学的研究知道：凡是比分子小的物质微粒(象

电子、中子等微观粒子),都具有明显的粒子性和波动性(称做波粒二象性),这种二重性质并不是光子所独有的,而是物质的共同属性.在爱因斯坦用光子来解释光电效应的时候,已经初步引用了这种统一的概念.公式  $\varepsilon = h\nu$  表明光量子的能量是光频率的函数,而“频率”是描写波动过程的概念,乍看起来,不也是矛盾的吗?但是这一理论却能很好的解释包括光电效应在内的一些光现象.

表明波动性和粒子性是物质共同属性的一个有力的佐证是:一般被看成是物质微粒的电子,实验证明它也能够发生衍射现象,表现出波动性质.下面就简单地介绍一下电子衍射的实验.图 7·10 中  $K$  是连接在电源上的灯丝; $A_1$ 、 $A_2$  是开有小孔的金属板; $A_1$  和电池的正极相连,以保持  $A_1$  和  $K$  之间有一定的电势差; $P$  是照相底片.从灯丝飞出的热电子,在电场的作用下,向着  $A_1$  作加速运动,形成电子的定向流动,但由于受到金属板  $A_1$ 、 $A_2$  上小孔的限制,射到铜膜上的电子射束就很狭,当电子穿过铜膜的晶格(结晶点阵)的时候,果然就发生了衍射现象,在照相底片上形成了如图 7·11 所示的衍射花样.这个实验结果说明:电子这种微粒,也具有波动的性质.

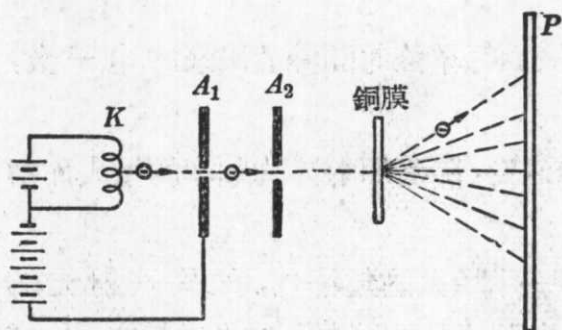


图 7·10 观察电子衍射的装置

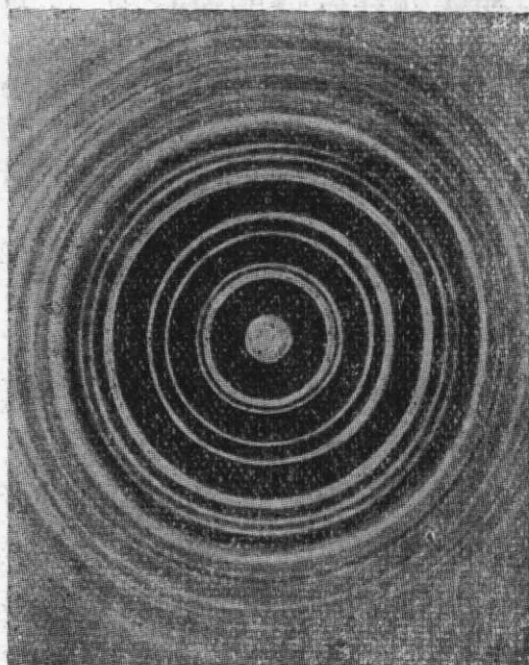


图 7·11 电子衍射花样

根据近代物理学的研究知道:波粒二象性是物质共同的属性,物质的波长可以用下列公式来表示



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$m$ 是物质的质量， $v$ 是它的速度， $h$ 是普朗克常数( $h=6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒)。对于静止( $v=0$ )的物体来说，讨论它的波长是没有意义的，( $mv=0$ 时，上式没有意义。)即这时它不表现出波动性；对于作机械运动的物体，我们可以计算出它的波长。

设物体的质量  $m=1$  毫克，速度  $v=1$  厘米/秒，它的波长是

$$\lambda = \frac{6.62 \times 10^{-27} \text{ 尔格·秒}}{10^{-3} \text{ 克} \times 1 \text{ 厘米/秒}} = 6.62 \times 10^{-24} \text{ 厘米。}$$

我们知道，一个原子核的直径约在  $10^{-13} \sim 10^{-12}$  厘米左右。而这个小物体的波长，就是跟原子核相比，也是小得几乎近于零的，那么对于更大一些的物体来讲( $mv$ 也越大)，它的波长就更小得没有意义了。

至于微观粒子的情况就完全不同了。例如一个电子，它的质量只有  $9.1 \times 10^{-28}$  克，当速度不太大的时候，它的波长跟伦琴射线的波长相近，约在几个埃左右，这时就能明显地显示出它的波动性来，例如电子的衍射现象就是。

这样，我们从一切微观粒子都有波粒二象性的观点出发，初步地把光的这两重互相矛盾的性质统一起来。关于光的本性的学说，现在还处在发展的过程中，更为完善的、能够解释一切光现象的统一学说，还有待于进一步的研究和建立。

## 本章提要

1. 光照射在金属的表面上，使它失去负电的现象，叫做光电效应。光电效应的规律是：

(1) 光照射在金属表面上，从金属表面每单位时间释放出来的电子数，跟照射光的强度成正比。

(2) 从金属表面释放出来的电子的速度，随着照射光的频率的增大而增加，跟照射光的强度没有关系。

(3) 每一种金属都各自存在着这样一个最低的频率  $\nu_0$ ，如果入射光的频率小于这一金属的最低频率  $\nu_0$ ，那么，即使尽量增大入射光的强度，也不能使这种金属发生光电效应。

2. 光子说的内容是：物质的原子和分子所发射的光，并不是连续不断的波，而是由特殊物质组成的一个个的微粒，这种物质微粒，叫做光子或光量

子。

3. 光子說对于光电效应的解釋是:对每一种金属来讲,要使电子从它的表面釋放出来,必須要作一定数量的功  $p$  (脫出功). 根据公式  $h\nu = p + \frac{1}{2}mv^2$  可知,只有当入射光光子的能量大于它的脫出功 ( $h\nu > p$ ) 的时候,才能发生光电效应. 入射光的頻率  $\nu$  越大,光子的能量  $h\nu$  也越大,从金属表面釋放出来的电子的速度和动能也就越大. 照射光的强度大,就是光子的数目多,它只能使釋放出的电子数目增多,而不会影响电子的速度和动能.

4. 光的电磁說反映了光的电磁本性(波动性),光子說反映了光的量子性(粒子性),这两种学說都只反映出光的本性的一个方面,都是不完备的. 近代物理学指出,一切微觀粒子都具有波粒二象性,光也一样,它既具有波动性,又具有粒子性.

## 复 习 题 七

1. 什么是光电效应? 改变投射到金属表面上光的强度或頻率,从金属表面釋放出来的电子情况有什么变化?

2. 光子說的内容是什么? 怎样用光子說来解釋光电效应?

3. “高速度的电子流轰击金属表面,釋放出  $\gamma$  光子”跟“用  $\gamma$  光子照射金属表面,釋放出电子”各属于哪一种現象?

4. 在图 7.1 中,如果开始时鋅板带有正电,用紫外綫照射鋅板,問这时靜电計的指針偏角会不会减小? 为什么?

5. 如果把图 7.4 中电池組的正負极接反了,这时光綫照射到光电管的內壁上,电流計的指針是否偏轉? 为什么?

6. 試求橙光 ( $\lambda = 6000$  埃) 和紫外光 ( $\lambda = 2537$  埃) 的每一个光子的能量.

7. 已知鈉的脫出功是  $3.5 \times 10^{-12}$  尔格,如果要使鈉发生光电效应,照射光的頻率必須大于多少赫茲?

8. 已知鎢的脫出功是  $7.2 \times 10^{-12}$  尔格,問用頻率是  $5.1 \times 10^{14}$  赫茲的黃光来照射金属鎢的表面,能不能发生光电效应?

9. 已知使鉍引起光电效应的最长波长是 6600 埃,如果用波长是 4000 埃的光照射到鉍表面上,問从鉍表面釋放出的电子速度将是多大?

## 第八章 原子的結構

早在古代的希腊和羅馬就已經有了原子論的萌芽。古希臘的著名思想家德莫吉利特，在公元前 420 年左右曾經說過：“自然界中无穷多的事物，只是由很少几組相同的原子构成的，它們占据着空間不同的位置和作着各种不同的运动。”但是由于缺乏实验証据，还不能正式成为一种系統的学說，所以后来，这种古代原子論者的思想就长期地被人們遺忘了。

直到十九世紀初，英国学者道尔頓根据物质在化学变化中所表現出来的性质，正式提出了原子-分子学說。他认为一切元素都是由一些极为微小的粒子——原子<sup>①</sup>构成的，原子是物质存在的最小单元，是不可分割的。每一种元素都有一种和它相对应的原子。同种元素的原子具有相同的性质，例如它們的形状、大小和质量等都是相同的；不同元素原子的性质各不相同。由这些原子的互相結合可以构成无穷多种分子，其中每一个分子都是由一种或几种原子在一定的比例下彼此結合而成的。

到了十九世紀末叶和二十世紀初期，由于电气工业的发展，促进了对电現象的研究，科学家們先后发现了电子、X 射綫和放射性元素。这不仅証实了原子的存在，而且还表明，原子的結構十分复杂，它并不是不可分割的。

原子物理学就是研究各种原子复杂結構的一門学科。由于原子是构成物质的基本单元，物质的一切特性都是和原子的結構分不开的，因此要想彻底了解物质的特性，首先必須对原子結構有所

<sup>①</sup> 原子 atoms 在希腊文中是不可分割的意思。

了解。此外，我們還知道，在這些渺小的原子中却蘊藏着極大的能量，它是現今所知道的最大的能源，要想利用它，也必須先了解原子的結構。

下面我們就來看看，原子的複雜結構是怎樣被發現的。

## § 8.1 電子的發現——陰極射綫

在沒有討論陰極射綫以前，先介紹一下稀薄氣體中的放電現象。

我們知道，在一般情況下，氣體是不導電的，即是很好的絕緣體。但是如果外來的作用使氣體分子本身電離，那麼氣體就導電了。例如用點燃的火柴靠近帶電的驗電器，驗電器上的金箔就會下垂，表示驗電器上的電荷通過空氣跑掉了；又如在紫外綫或倫琴射綫的照射下，氣體也能因電離而導電。象這種只有當使氣體電離的作用存在時才發生氣體放電的現象叫做**被激放電**。

此外，實驗表明，在相當強的電場作用下，即使沒有任何外來的使氣體電離的作用，氣體也會發生放電現象。例如電閃就是在雲間或雲和地間存在着很強的電場時大氣中所發生的火花放電現象。象這種單靠電場的作用而發生的氣體放電現象叫做**自激放電**。實驗還表明，氣體自激放電需要多大的電場強度是跟氣體本身的性質以及氣體的壓強有關的。一般說來，在稀薄氣體中發生自激放電現象所需要的電場強度較小。

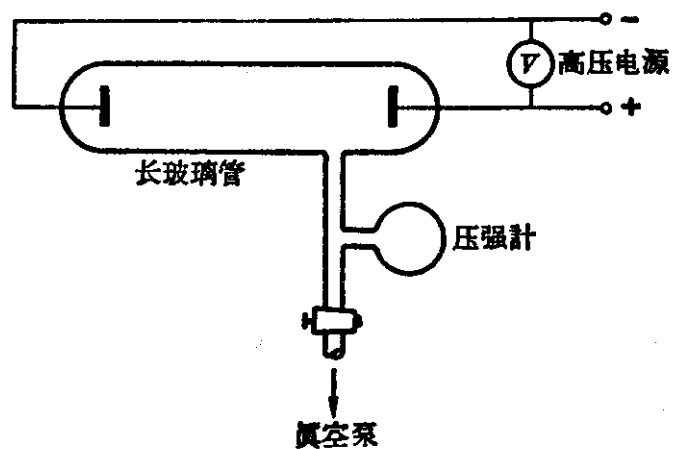


图 8.1 研究氣體自激放電的裝置

图 8.1 所示的就是一个专门用来研究氣體自激放電的裝置。其主要部分就是一根兩

端封閉的长玻璃管；管的下端与真空泵相通，这主要是为了控制管内气体的压强；管旁还有一个压强計，我們可以随时讀出管内气体的压强。由于两电极間的距离是固定不变的，因此可以根据伏特計讀数測出管内的电場强度。

实验前，先把两电极跟高压电源連接起来，（跟起电机的放电球連起来，或者跟感应綫圈副綫圈的两端連起来。）假設管内空气的压强等于1个大气压，那么只有当两极間的电場强度增大到30,000伏特/厘米时，管内才会产生猛烈的火花放电。如果切断电源，用真空泵抽去管内的部分空气，再重复上述实验，就会发现，当电极間的距离不变时，空气自激放电所需要的电压将随着管内气压的降低而减小，这也就是说，管内空气越稀薄，越容易产生自激放电现象。但是当空气的压强降低到2毫米高水銀柱以下时，自激放电所需要的电压反而随压强的降低而增大，并且放电的性质也有所改变。这一关系可以用图8·2上的曲綫表示。

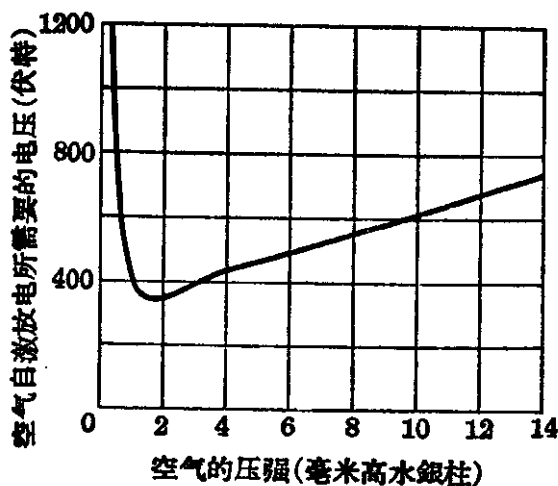


图 8·2

为什么在相当强的电場作用下气体会产生自激放电现象呢？这可以用电离学說来解释。我們知道，在气体中总有一些带电的离子存在，随着电場强度的增强，气体离子运动的速度也逐漸增大，因而它的动能也就增大了。当电极間的电場强度超过一定大小时，某些离子

就可以获得足够大的动能，在中性分子碰撞时使气体分子电离。继续增大电場强度，能使中性分子电离的离子数也跟着增加，这样一来，由于一个离子的运动就可以产生很多的离子，而且产生得非常迅速，终于使全部气体电离而发生放电现象。由此可见，在电极間存在的强电場本身就具备了使气体放电的必要条件。

又为什么管内气体越稀薄,就越容易产生自激放电现象呢?原来离子的动能不仅随电场强度的增加而增加,而且随离子的自由路程<sup>①</sup>的增大而增大.因为离子在电场力作用下运动的加速度是一定的,自由路程越长,到达终点时的速度就越大,它所获得的动能也就越大.这样即使管内的电场强度较小,离子所受到的电场力较小,只要自由路程足够长,离子也可以获得足以撞开中性分子使它电离的动能.管内气体越稀薄,离子运动的自由路程就越长,因此产生自激放电现象所需要的电场强度也就越小,也就是说越容易产生自激放电现象.

但是上述规律是具有一定限度的.如果我们把管内的气压降低到2毫米高水银柱以下,则放电的性质改变了,这时增大两极间的电压,管内就会出现一条跨越两极的光带;它随着管内气压下降而变粗,继而充满全管,使整个放电管发出美丽的紫色光辉.霓虹灯<sup>②</sup>就是利用这一现象设置而成的.

继续降低管内气压到0.1毫米高水银柱以下,管内气体发光的现象就完全消失;如果把管内气压降低到 $10^{-3}$ 毫米高水银柱以下(这种玻璃管叫做克鲁克斯管),那么在对着阴极的玻璃管壁有绿色的荧光出现.

为了研究玻璃管壁所发出的绿色荧光是从哪里来的,我们可以把克鲁克斯管内的阳极制成五角星形,在通电后,对着阴极的玻璃管壁并不全部发光,而出现了和阳极形状相同的较大的阴影(图8.3).这就表明管壁发光是由于受到从阴极发出的一种射线照射

---

① 分子或离子在连续两次跟其他分子碰撞间所通过的直线距离叫做分子或离子的自由路程.

② 霓虹灯原来是指在高电压低气压的情况下会发出红光的装有氖气的放电管,后来把凡是能发出彩色光的放电管都叫做霓虹灯.其实放电管发出光辉的颜色主要决定于管内气体的性质,例如管内充以空气就发紫光,充以氩气就发黄光,充以水银蒸汽就发蓝光.此外它还跟玻璃管本身的颜色有关,如在用黄色玻璃制成的放电管内装上水银蒸汽就发绿光.

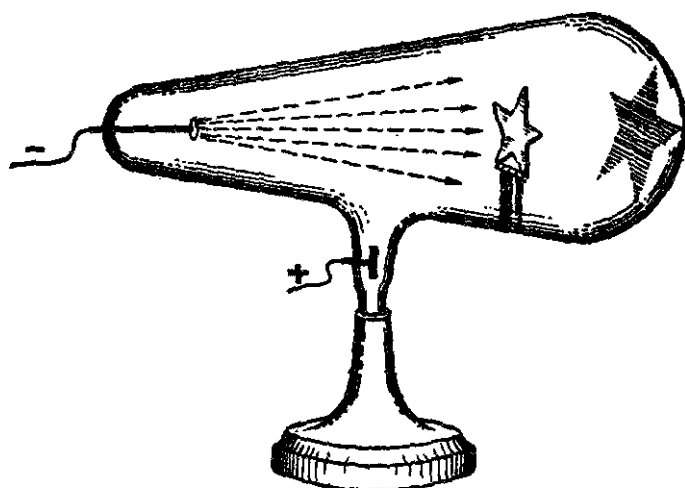


图 8·3 阴极射线

的结果,我们把这种射线叫做阴极射线;这种放电管叫做阴极射线管。

阴极射线是属于哪一种性质的射线呢?如果在阴极射线管内装上一个象风车似的小叶轮,就会发现,小叶轮在阴极射线的推动下旋转起来(图 8·4),它表明阴极射线是一股微粒流。进一步的实验还发现,阴极射线在电场和磁场里都会发生偏转,如果在阴极射线管内沿着射线的方向装上一块荧光屏<sup>①</sup>,射线的偏转情况就能看得十分清楚。图 8·5 所示的是阴极射线在磁场里发生偏转的情况;图 8·6 是阴极射线在电场中发生偏转的情况。根据阴极射线在磁场和电场中的偏转情况,可以肯定阴极射线是带负电荷的微粒流,这种带电微粒就叫做电子。

英国物理学家汤姆逊在对阴极射线作了仔细研究后,于 1897 年指出,用不同物质作阴极都能产生阴极射线;一切阴极射线都具

<sup>①</sup> 荧光屏是涂有发光物质的屏,在阴极射线、X 射线或紫外光的照射下会发出荧光。通常用的发光物质是含有微量锰杂质的硫化锌,它在上述射线的照射下会发出绿色的荧光,此外钨化钙也是常用的发光物质,它在阴极射线的照射下会发出蓝色的荧光。严格说来,荧光是指在射线停止照射后只能维持相当短的时间(约  $10^{-1}$  秒)的发光现象,如果它能保持相当长的时间(几秒甚至几小时),那就叫做磷光。影响发光性质的因素很多,其中最重要的是杂质的影响,有些发光物质在很纯净的时候不发光,只有在加入微量的杂质后才能发光;而发光的颜色也跟杂质的性质有关,例如在硫化锌中加入微量的银杂质时发蓝光,加入铜时发绿光,加入锰时发橙色光。

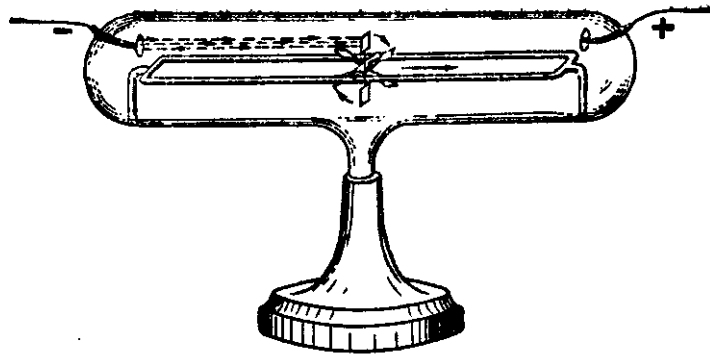


图 8·4 阴极射线是一股微粒流

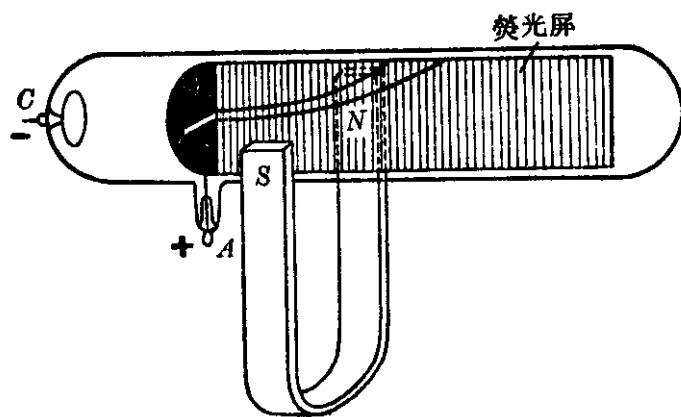


图 8·5 阴极射线在磁场中偏转

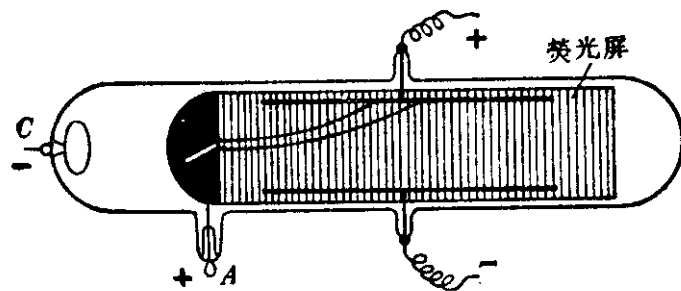


图 8·6 阴极射线在电场中偏转

有相同的性质。他还根据阴极射线在电场和磁场中的偏转程度，测出电子的荷质比<sup>①</sup>以及它的速度，并且指出电子的荷质比是个常数，而电子的速度跟加在阴极射线管两极上的电压有关：所加的电压越高，电子的速度就越大。

① 带电微粒的电荷跟它的质量之比  $q/m$  叫做这种带电微粒的荷质比。



进一步的实验还表明,阴极射线在通过气体时,可以使气体电离,并使气体发出微光;阴极射线射到照象底片上可以引起化学作用;此外,它还可以引起一种特殊的射线,即伦琴射线(X射线)。

既然用任何物质作阴极都能产生阴极射线,这就表明任何元素的原子中都有电子存在,即原子并不是组成物质的最小单元,并且原子并不是不可分割的。

例 1. 已知汤姆逊所测得的电子的荷质比  $e/m = 1.759 \times 10^{11}$  库侖/公斤<sup>①</sup>;后来经过实验又直接测出电子所带的电量  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  库侖。试根据这些数据计算电子的质量,并且跟氢原子的质量进行比较。

【解】  $\because$  电子所带的电荷  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  库侖,而电子的荷质比  $e/m = 1.759 \times 10^{11}$  库侖/公斤,

$$\begin{aligned}\therefore \text{电子的质量 } m &= \frac{1.602 \times 10^{-19}}{1.759 \times 10^{11}} \text{ 公斤} \\ &= \frac{16.02}{1.759} \times 10^{-31} \text{ 公斤} \\ &= 9.107 \times 10^{-31} \text{ 公斤} \\ &= 9.107 \times 10^{-28} \text{ 克}.\end{aligned}$$

在第二册中,我们曾经学过用原子量和阿伏加德罗常数计算原子质量的方法。根据氢的原子量为 1.008 可知

1 克原子氢的质量为 1.008 克,

$$\begin{aligned}\therefore \text{氢原子的质量 } M &= \frac{1.008}{6.023 \times 10^{23}} \text{ 克} \\ &= 1.673 \times 10^{-24} \text{ 克}.\end{aligned}$$

---

① 汤姆逊测得的电子的荷质比很大,比当时(1897年)认为最大的氢离子的荷质比还要大 2000 倍左右。由于当时人们以为原子是组成物质存在的最小单元,因此很多科学家都认为电子具有跟最轻的原子——氢原子一样的质量,而所带的电荷却相当于氢离子所带的电荷(基本电荷)的 2000 倍。但是汤姆逊指出电子所带的电荷不可能有这么大,电子的荷质比大是因为它的质量只有氢原子的 1/2000 的缘故。这一论断不久就被其他实验所证实。

比較氫原子和电子的质量可知

$$\frac{M}{m} = \frac{1.673 \times 10^{-24}}{9.107 \times 10^{-28}} \doteq 1837,$$

即电子的质量大約是最輕的原子——氫原子质量的  $\frac{1}{1837}$ 。

## § 8.2 天然放射現象

1896年，也就是发现倫琴射綫的后一年，法国科学家貝克勒耳在进行倫琴射綫实验时注意到，在发出倫琴射綫的玻璃管壁上同时有黄綠色的熒光，他就联想到，这种熒光会不会是发生倫琴射綫的原因呢？或許有熒光时就一定会有倫琴射綫产生？目前看来，这种想法显然是錯誤的，然而在倫琴射綫的性质还没有弄清楚的当时，这种推測也是十分自然的。于是貝克勒耳就对各种熒光物质进行了研究，想用熒光物质来发生倫琴射綫，虽然他对这个问题的研究并没有得出結果，但却在无意中发现了—种含鈾的熒光物质(硫酸鉀鈾)能不断自发地射出某种看不見的穿透能力相当强的射綫来。这一重大发现的意义不仅在于获得了一种新的射綫，而在于第一次发现了物质能不經照射不断自发地发出射綫的現象，这种現象叫做**天然放射現象**。物质的这种性质就叫做**天然放射性**。

进一步的实验发现，所有的鈾化合物，不論它是不是熒光物质，都具有天然放射性，而它們的放射性强度跟各自的含鈾量成正比，这就表明天然放射性是来自鈾元素(U)的。

不久，物理学家瑪丽·居里夫人发现釷元素(Th)也具有天然放射性；同时她还发现—种瀝青鈾矿的放射性十分强烈，要比按照它的鈾含量計算所得到的放射性强度大4倍，因此她认为在这种鈾矿中一定存在着放射性比鈾强得多的物质。居里夫妇經過耐心細致的分离工作，終於在这种矿石的杂质中发现了两种放射性更强的元素——釷(Po)和鐳(Ra)。釷的放射性强度是鈾的 $10^{10}$ 倍；

鐳的放射性强度是鈾的  $2 \times 10^6$  倍。这两种元素都是当时化学元素表里所沒有的新元素。后来經過科学家們繼續研究，发现位于門捷列夫周期表中原子序数<sup>①</sup>从 84 起的所有元素都具有天然放射性，原子序数比 84 小的某些元素也有天然放射性。我們把这些具有天然放射性的元素叫做**放射性元素**。

象研究阴极射綫一样，把放射性元素发出来的射綫放在电場和磁場中加以研究，就会发现不同的放射性元素所发出的射綫并不是完全一样的。

有些放射性元素，例如氡(Rn)所发出的射綫，在电場和磁場里偏轉的方向和阴极射綫相反，这表明它是由帶正电的粒子組成的，我們把它叫做 $\alpha$ 射綫，組成 $\alpha$ 射綫的粒子叫做 $\alpha$ 粒子。进一步的研究指出， $\alpha$ 粒子就是失去了两个电子的氦原子，它所帶的电量是  $3.204 \times 10^{-19}$  庫侖，相当于基本电荷的 2 倍；它的质量是  $6.64 \times 10^{-24}$  克，相当于氦原子质量的 4 倍。

有些放射性元素，例如錒(Ac)所发出的射綫，在电場和磁場里偏轉的方向和阴极射綫相同，这表明它是由帶負电的微粒組成的，我們把它叫做 $\beta$ 射綫，組成 $\beta$ 射綫的微粒叫做 $\beta$ 粒子。进一步的研究指出， $\beta$ 粒子就是速度很高的电子。不同的放射性元素在不同的情况下，发出 $\beta$ 射綫中的电子速度也各不相同，例如在鐳和它的化合物所发出的 $\beta$ 射綫中，电子的速度范围相当于光速的 30~99%，而在阴极射綫中，电子的速度只有光速的百分之几。

此外，有許多放射性元素，在发出 $\alpha$ 射綫或者 $\beta$ 射綫的同时，还发出另一种穿透能力非常强的射綫，这种射綫在电場和磁場里都不会发生偏轉，这表明它是由不带电的微粒組成的，我們把它叫做 $\gamma$ 射綫。进一步的研究指出， $\gamma$ 射綫是由波长很短的光子組成

<sup>①</sup> 俄国科学家門捷列夫根据他所发现的化学元素的周期律，把所有的元素加以自然的分类，制成了元素周期表(見第 218~219 頁附表)。所謂原子序数就是元素周期表上按原子量从小到大的順序排列而得的元素編号。

的,我們把这种光子叫做 $\gamma$ 光子,它們的波长比倫琴射綫的波长还要短,約在 $10^{-10}$ 厘米以下。

虽然絕大多数純淨的放射性物质都只发出两种射綫( $\gamma$ 射綫和 $\alpha$ 射綫或者 $\gamma$ 射綫和 $\beta$ 射綫),但是一般的放射性物质都不可能是純淨的,因此在放射性物质所发出的射綫中, $\alpha$ 射綫、 $\beta$ 射綫和 $\gamma$ 射綫总是同时存在的。图

8.7 就是用来探測放射性物质所发出的三种射綫在磁場中偏轉情况的装置的示意图。在一个玻璃容器內放一个鉛盒,盒內穿一小孔,在孔的底下放入少量的放射性物质;并在容器周圍安排一个强有力的磁場,它的磁力綫方向跟紙面垂直,并离讀者而去。实验时可以先利用真

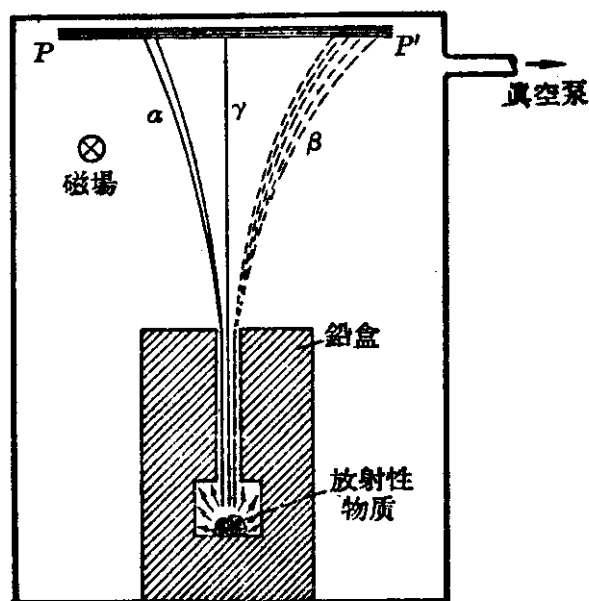


图 8.7

空泵将容器內空气抽去,以增强实验效果。如果在 $PP'$ 处放有照相底片,那么这三股射綫就会在底片上留下三个黑点,根据黑点的位置可以推測 $\alpha$ 射綫和 $\beta$ 射綫的偏轉情况。关于这三种射綫的其他性质,我們将在下一章里再具体进行研究。

放射性元素在发出射綫以后,它本身将会发生什么变化呢?实验表明它将变成具有不同性质的新元素。例如把氯化镭( $\text{RaCl}_2$ )放在一个封閉的容器中,它可以产生两种气体,利用光谱分析可知其中一种是氦气,另一种是氢气。这就是說镭原子在放出一个 $\alpha$ 粒子以后就变成了氦原子。我們把放射性元素由于发出射綫而变成另一种新元素的变化叫做放射性元素的**蜕变**。由放射性元素蜕变而成的新元素,如果也具有放射性,那它将繼續蜕变,直到最后变成不具有放射性的元素为止。

既然各种放射性元素在发出射线后能蜕变成各种不同的元素,这就说明原子并不是物质存在的最小单元,并且原子并不是不可改变的。由此可知,原子的结构也并不简单,而是十分复杂的。

### § 8.3 $\alpha$ 粒子的散射实验

发现电子后,科学家们逐渐了解了电子的各种基本特性,并且认识到电子是各种元素原子的共同组成部分,但是另一方面又知道,原子是相当稳定的中性体。既然一切原子都具有带负电的电子,那么原子中就必然有带正电的物质存在。原子中的正负电荷究竟是怎样分布的呢?

1903年,汤姆逊提出了一种原子模型。按照汤姆逊的原子模型,原子中的正电荷是以均匀的密度分布在一个大小等于整个原子的球体内,而带负电的点电荷(即电子)则分布在球体内的不同位置上,并且分别以各种频率在各自的平衡位置附近振动。这个原子模型,由于缺乏实验基础,同时又和 $\alpha$ 粒子散射实验的结果相矛盾,因此很快就被科学家们抛弃了。

所谓 $\alpha$ 粒子的散射实验,就是利用 $\alpha$ 粒子来冲击原子,从而根据 $\alpha$ 粒子的散射情况来探测原子内部结构的实验。图8.8就是有关这个实验的装置示意图。图中

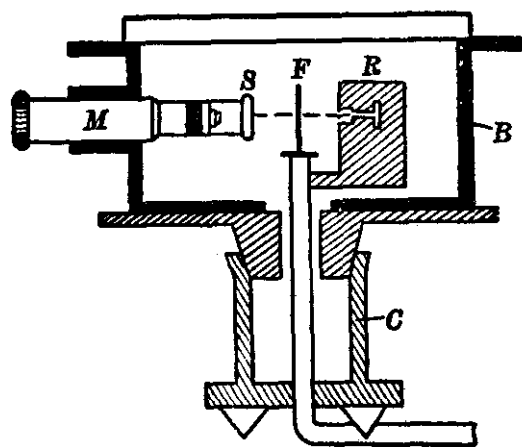


图 8.8  $\alpha$  粒子的散射实验装置示意图

中  $B$  是一个插在套筒  $C$  上的可以转动的圆柱形金属匣; 在套筒中心安装一个杆子, 杆上装置一片金质的散射薄片  $F$ <sup>①</sup>, 它还跟一个安置放射性物质的铅制小管  $R$  相连, 但跟  $B$  匣是不相关的。  $M$  是显微镜, 在它前面装有荧光屏  $S$ , 它们与  $B$

① 这里所以用金质的薄片是因为金的展延性强, 能压得非常薄而不会裂开。

匣連在一起的，在轉動  $B$  匣時，就可以調節顯微鏡  $M$  和熒光屏  $S$  的位置，使它們對準所要觀察的方向。而散射薄片  $F$  和放射性物質  $R$  都是固定不動的。

實驗時，先從下方把  $B$  匣內的空氣抽掉，以避免使  $\alpha$  粒子由於空氣分子的影響而發生附加的散射。如果在  $F$  處不安裝散射薄片，那就只有在把顯微鏡  $M$  和熒光屏  $S$  調節到對準放射性物質（氦）的位置時，才能觀察到  $\alpha$  粒子在熒光屏上所激發的閃光（圖 8.9(a)）。由於每一次閃光就相當於一顆  $\alpha$  粒子打在熒光屏上，因此在這一位置上連續不斷地看到閃光，而在其他位置上看不到閃光就表明  $\alpha$  粒子是直線進行的。如果在  $F$  處裝上散射薄片（金箔），那麼轉動  $B$  匣，不論使顯微鏡和熒光屏處在什麼位置上，都能觀察到閃光（圖 8.9(b)），這表明由放射性物質發出的  $\alpha$  粒子通過金箔後向不同的方向發生了散射。記下在每單位時間內射到不同散射角  $\theta$ <sup>①</sup> 方向上單位面積內的  $\alpha$  粒子數，就得出  $\alpha$  粒子通過金箔後的散射情況。

應該怎樣來解釋  $\alpha$  粒子通過金箔所發生的散射現象呢？這顯

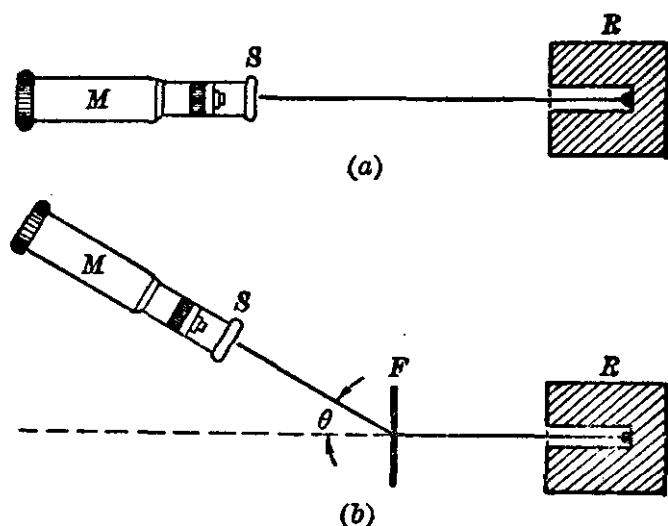


圖 8.9

① 熒光屏與散射薄片的聯綫和散射薄片的法綫之間所成的角度是  $\alpha$  粒子的散射角。

然不是由于金原子内电子的作用所引起的。因为 $\alpha$ 粒子的质量比电子的质量大得多，約是电子质量的7300倍<sup>①</sup>，所以电子对它的引力不可能使 $\alpha$ 粒子发生显著的偏轉。可見 $\alpha$ 粒子的散射現象主要是受到金原子内正电荷的推斥作用。根据湯姆逊的原子模型，正电荷是均匀地分布在整個原子中的，这样，金原子和 $\alpha$ 粒子間的相互作用就不会很强。因而 $\alpha$ 粒子的散射角就不可能很大。但是根据盖革和馬斯敦在1909年按上述方法实验的結果，发现大多数的 $\alpha$ 粒子經過金箔后散射的角度是不大的，有的甚至仍然保持直綫軌迹，就好象沒有金箔一样；但有少数的 $\alpha$ 粒子散射的角度却很大，約有1/8000的 $\alpha$ 粒子的散射角在 $90^\circ$ 以上，有的几乎达到 $180^\circ$ ，說明它們在冲击金箔后从原路上被頂了回来，就象碰到比它硬得多的东西一样。这一实验結果如果采用湯姆逊的原子模型是无法解釋的，这就意味着，在原子中带正电荷的物质并不均匀地分布着。

#### § 8.4 卢瑟福的原子核式結構模型

1912年，英国物理学家卢瑟福在研究了 $\alpha$ 粒子的散射实验的基础上提出了另一种原子模型，所謂原子的核式結構模型。

卢瑟福仔細分析了 $\alpha$ 粒子散射实验的結果，认为在通过金箔后，大多数 $\alpha$ 粒子仍然保持直綫軌迹，几乎沒有发生偏轉，这表明在原子内部存在着很大的空隙；而少数 $\alpha$ 粒子的散射角很大，甚至超过 $90^\circ$ 而接近 $180^\circ$ ，那就只能假設原子内的正电荷并非均匀分布，而是全部集中在一个很小的体积(即所謂原子核)内，这样由原子核对 $\alpha$ 粒子所起的推斥作用才能使它具有較大的散射角。

根据卢瑟福的假設，如果金原子核所带的电量为 $+Ze$ ，式中

---

<sup>①</sup> 电子的质量約为氢原子的1/1837， $\alpha$ 粒子是失去2个电子的氦原子，已知氦原子量为4.003，約是氢原子的4倍，因此 $\alpha$ 粒子的质量約是电子质量的 $4 \times 1837$ 倍，即7300倍左右。

$Z$  为正整数,  $e$  相当于电子所带的基本电荷;而  $\alpha$  粒子所带的电量为  $+2e$ , 那么它们之间的库仑排斥力

$$F = \frac{2Ze^2}{r^2}.$$

由于金原子的质量要比  $\alpha$  粒子的大得多<sup>①</sup>, 因此我们可以假设金原子核固定不动, 而  $\alpha$  粒子在金原子核附近穿过. 如果金原子核的位置恰好在  $\alpha$  粒子的运动方向上, 那么当  $\alpha$  粒子靠近它时, 在排斥力  $F$  的作用下  $\alpha$  粒子速度逐渐减小, 然后停下来又往原路退回, 这就是  $\alpha$  粒子的散射角  $\theta = 180^\circ$  时的情况, 显然, 这种情况是很少的. 如果  $\alpha$  粒子在穿过金箔时跟各个原子核的距离都相当远, 那么排斥力  $F$  对它的影响很小, 可以略去不计, 于是  $\alpha$  粒子就不会发生偏转, 仍然沿直线前进, 这就是当  $\alpha$  粒子的散射角  $\theta = 0^\circ$  时的情况. 如果  $\alpha$  粒子在穿过金箔时跟原子核的距离较近, 那么  $\alpha$  粒子在排斥力  $F$  的作用下就会发生偏转, 而形成一定的散射角  $\theta$  (图 8.10). 进一步的理论推导表明, 在这种情况下  $\alpha$  粒子的散射角的大小将决定于  $\alpha$  粒子的初速度、金箔原子核所带的电量以及  $\alpha$  粒子穿过原子时跟原子核的最短距离. 在  $\alpha$  粒子的散射实验中,  $\alpha$  粒子的初速度和金箔原子核所带的电量是固定不变的, 而  $\alpha$  粒子在穿过原子时跟原子核间的最短距离不仅无法测定, 而且也难以控制. 不过由于在实验中穿过金箔的  $\alpha$  粒子数相当大, 同时,

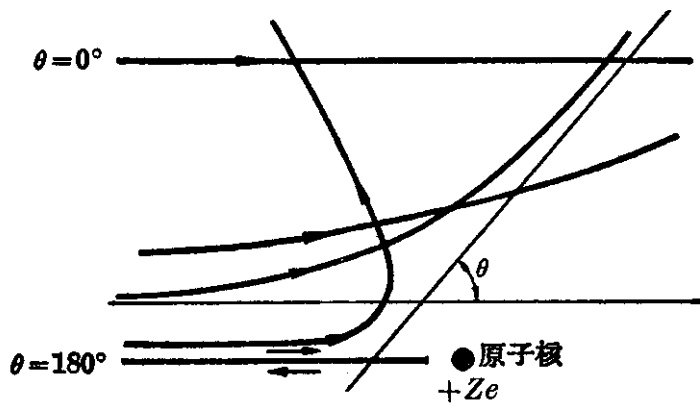


图 8.10 散 射 角

<sup>①</sup> 金原子量为 197.028, 而氢原子量为 4.003.



尽管金箔很薄，但每个  $\alpha$  粒子实际上却穿过了成千上万个原子。根据这种情况，卢瑟福就利用统计规律算出了在穿过一定厚度的金箔后，沿不同角度散射的  $\alpha$  粒子数与  $\alpha$  粒子总数之间的关系。

1913年，盖革和马斯敦在卢瑟福的指导下又利用金箔和银箔做了许多精确的实验，结果都证实了卢瑟福关于  $\alpha$  粒子散射理论的正确性。

运用卢瑟福关于  $\alpha$  粒子的散射理论，还可以推测原子核所带的电量。盖革和马斯敦曾用不同物质的金属箔进行实验来测定  $Ze$ ，结果指出，对于不很重的金属元素来说，它的原子核所带的电量  $Ze$  中的未知数  $Z$  约等于它的原子量的一半；后来恰德维克又用铜、银、铂等金属箔分别进行实验，发现任何元素的原子核所带的电荷  $+Ze$  中的  $Z$  就等于该元素在门捷列夫元素周期表中的原子序数。通常我们把  $Z$  叫做原子核的**电荷数**。

知道了原子核的电荷数  $Z$  后，也就知道了原子中的电子数；再从电子的质量及原子的质量就可以推知原子核的质量。计算结果表明，原子的质量几乎全部集中在原子核上。

那么原子核究竟有多大呢？利用卢瑟福关于  $\alpha$  粒子的散射理论，算出  $\alpha$  粒子可能达到离原子核中心最短的距离，就可对原子核的大小作出估计。下面我们就利用能量守恒定律简单地把这一关系推导一下：

假设  $M$  和  $v_0$  分别为  $\alpha$  粒子的质量和初速度， $d$  为  $\alpha$  粒子可能达到的离原子核中心的最短距离。如果有一个  $\alpha$  粒子，它在通过原子时的散射角  $\theta = 180^\circ$ ，（显然只有在这种情况下， $\alpha$  粒子离原子核中心的距离才可能是最短的。）可以设想它在趋近原子核的过程中，速度逐渐减小，它的动能逐渐转换为电势能。直到  $\alpha$  粒子到达某一点  $P$  时，它的速度已经减小到 0（图 8·11）。这时  $\alpha$  粒子的全部动能都已转换为电势能，而  $P$  点到原子核中心的距离就是

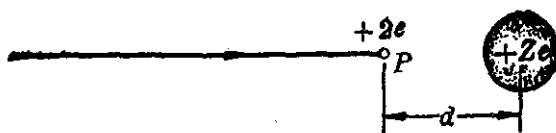


图 8·11  $\alpha$  粒子可能到达的离原子核中心的最短距离

要找的最短距离  $d$ 。設  $\alpha$  粒子原有的动能为  $\frac{1}{2} M v_0^2$ ，原子核的电場在  $P$  点处的电势为  $\frac{Ze}{d}$ ， $\alpha$  粒子在  $P$  点处和原子核所构成的系統所具有的电势能为  $\frac{Ze}{d} \cdot 2e$ ，

$$\therefore \frac{1}{2} M v_0^2 = \frac{2Ze^2}{d},$$

即

$$d = \frac{4Ze^2}{M v_0^2}.$$

知道了  $v_0$  及  $Z$ ，就可以算出  $d$ ，这就是初速度为  $v_0$  的  $\alpha$  粒子所能到达的离原子核最短的距离。这一計算建立在  $\alpha$  粒子与原子核間的推斥作用力服从庫侖定律的基础上。如果  $\alpha$  粒子的初速度愈大，它可以达到离原子核最近的距离也就愈小。因此，卢瑟福就进一步用快速  $\alpha$  粒子来进行实验，以研究庫侖定律所能适用的范围。結果发现对銀讲达到  $2 \times 10^{-12}$  厘米，对銅讲达到  $1.2 \times 10^{-12}$  厘米，对金讲达到  $3.2 \times 10^{-12}$  厘米时，庫侖定律都还能适用，这就表明原子核直径大小的数量級应在  $10^{-12}$  厘米以下。后来，由其他实验結果也指出，原子核直径大小的数量級是  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  厘米，这跟原子直径大小的数量級  $10^{-8}$  厘米相比較，原子核确实是很小的，它只占整个原子体积的亿万分之一。

卢瑟福假設可以归納为下列几点：

(1) 一切原子都是由一个原子核和核外电子組成的。原子核直径大小的数量級在  $10^{-12}$  厘米以下，其体积只占整个原子体积的亿万分之一。在原子核里集中了原子所帶的全部正电荷和几乎全部原子的质量。

(2) 原子序数为  $Z$  的元素,其原子核所带的电荷为  $+Ze$ , 它的核外电子数也等于  $Z$ .

(3) 由于原子核和核外电子間存在着吸引力, 因此它們不能构成靜止平衡, 即如果电子不运动的話, 它势必落到原子核上去, 只能假設电子在繞着原子核运动, 就象行星繞着太阳运行一样, 才能构成一种动平衡. 这就是卢瑟福的原子核式結構模型.

因为卢瑟福的原子模型能成功地解釋  $\alpha$  粒子的散射实验, 所以不久就被大家接受了. 但是这个原子模型还比較簡單, 并且也沒有說明核外电子的分布情况和运动規律, 因而还需要进一步进行理論和实验的研究.

### 习 題 8·1~8·4

1. 根据在图 8·5 中所表示的阴极射綫在磁場中的偏轉方向, 为什么可以确定它是帶負电荷的微粒流?

2. 什么叫做天然放射現象? 放射性元素在发出射綫以后, 它本身将会发生什么变化?

3. “原子是物质存在的最小单元”的想法是怎样被动搖的?

4. 比較  $\alpha$  粒子和电子的质量、带电量以及它們的荷质比.

5.  $\alpha$  粒子在穿过金箔时会发生怎样的散射現象? 卢瑟福是怎样解釋这种散射現象的? 簡單叙述卢瑟福关于原子的核式結構模型.

## § 8·5 氫原子光譜的实验規律

我們知道, 任何元素都有它自己独特的明綫光譜. 在这些光譜中出現一系列頻率不同的明綫是由于它們放出具有一定能量光子的結果. 早在十九世紀后半期人們就了解到这些光譜綫是从原子內部发射出来的, 因而明綫光譜又可以称为**原子光譜**. 仔細观察原子光譜就可发现, 这些譜綫并不是杂乱无章的, 而是按照一定規律排列着的. 后来才发现这些譜綫的規律性跟原子內部电子的分布情况和运动規律有着密切的联系, 于是研究原子光譜也就成

为进一步探索原子内部结构的方法之一。

氢原子光谱是原子光谱中最简单的一种，它的规律性也比较明显，图 8·12 就是氢原子在可见光和近紫外光区域中的光谱图。

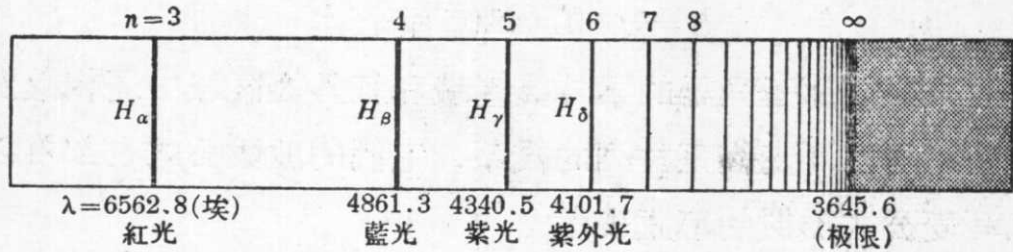


图 8·12 氢原子光谱中的巴耳麦线系

1885 年，一位瑞士的中学数学教师巴耳麦，对当时已知的四条氢光谱线之间是否存在数量关系的问题发生了兴趣。经过多方面的研究，终于发现了它的规律。巴耳麦所提出的公式是

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4},$$

式中  $B$  是一常数，等于 3645.6 埃 (1 埃 =  $10^{-8}$  厘米)，当  $n=3, 4, 5, 6$  时，上式就分别给出氢光谱中可见部分四条谱线的波长。这四条谱线通常用  $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$  等符号来标志。进一步地观察和实验表明，氢光谱中还有  $n=6$  以上的谱线存在于可见部分以外，目前已经发现了 33 条。由于巴耳麦公式的计算值和实验观测值符合得非常好，所以我们就把氢光谱中这一系列谱线称为巴耳麦线系。

其后不久，瑞典物理学家黎德堡提出了不用波长而以波长的倒数——波数<sup>①</sup>来表征光谱线的方法，这样就使巴耳麦公式的形式更为简单，即

① 波数是光谱学中常用的名词，它表示在单位长度 (通常以厘米为单位) 的波列中波的数目。它的单位是厘米<sup>-1</sup>。在光谱学中之所以用波数 ( $1/\lambda$ ) 而不用频率 ( $c/\lambda$ ) 来表征光谱线是由于波数比频率更能保留波长的精确值。但是光谱线的波数并不是绝对常数，因为光谱线的波长跟媒质的折射率有关。巴耳麦公式中给出的波长是光谱线在空气中的波长  $\lambda_{\text{空气}}$ 。在可见部分中  $\lambda_{\text{真空}}$  约比  $\lambda_{\text{空气}}$  大 0.025%。

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

式中  $\bar{\nu}$  表示波数,  $R=4/B$ , 称为黎德堡常数, 它的数值由实验测定为

$$R = 1.097 \times 10^5 \text{ 厘米}^{-1}.$$

后来在氢原子光谱的紫外线区域和红外线区域中还相继发现了好几列与巴耳麦线系并列的线系, 它们的波数公式也都可以用与巴耳麦公式类似的形式表示

$$\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

其中只有  $m$  的数值跟巴耳麦线系不同.

| $m$ 值 | 线系名称 | $n$ 值      | 性质  |
|-------|------|------------|---|
| 1     | 赖曼   | 2, 3, 4... | 远紫外线  |
| 2     | 巴耳麦  | 3, 4, 5... | 除 $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$ 为可见光外, 其余都是近紫外线 |
| 3     | 帕邢   | 4, 5, 6... | 近红外线  |
| 4     | 布喇开  | 5, 6, 7... | 远红外线  |

由此可见, 氢原子光谱中谱线的波数都可以看作是由两项的差构成的

$$\bar{\nu} = \frac{R}{m^2} - \frac{R}{n^2},$$

其中前一项的值是确定的, 后一项值可以改变, 并随着  $n$  的增大, 相邻谱线间的波数差也愈来愈小, 谱线的分布也愈来愈密, 当  $n \rightarrow \infty$  时, 波数就趋于一个极限值  $\frac{R}{m^2}$ . 对于巴耳麦线系说来, 它的波数的极限值就等于  $\frac{R}{4}$ , 即  $2.74 \times 10^4 \text{ 厘米}^{-1}$ .

上述规律不仅适用于氢原子光谱中的各列线系, 就是对其他原子光谱也有参考价值, 因此, 这个原则是光谱分析的重要工具,

也是探索原子內部結構的很好的綫索。

## § 8.6 玻尔的氫原子模型

卢瑟福的原子核式結構模型虽然能够成功地解釋  $\alpha$  粒子的散射实验，但是这个模型本身却很难用当时的电磁理論来解釋。因为繞核旋轉的电子具有加速度，根据麦克斯韦的电磁理論可知，繞核旋轉的电子必然会向周圍空間不断輻射出电磁波，那么电子的能量就要不断地减少，于是它繞核旋轉的半徑也将不断地减小，最后电子必然趋近于核而落在核上。这样說来，原子就應該是一个不稳定的系統，同时由于电子本身能量不断减少，它发出的电磁波的頻率也就應該不断地变化，那么我們所观察到的原子光譜也就應該是連續光譜。但事实上原子是十分稳定的，而且原子所发射的光譜是明綫光譜而不是連續光譜。怎样来解决这个矛盾呢？1913年，丹麦物理学家玻尔在卢瑟福所提出的核式結構模型的基础上，首先把普朗克的量子理論推广到原子系統里来。他引用了普朗克的量子概念，提出了一种跟牛頓力学和麦克斯韦电磁理論根本相矛盾的假設，成功地解釋了氫原子光譜。

玻尔在卢瑟福的核式結構模型的基础上提出：氫原子是由一个帶正电的核和一个繞核旋轉的帶負电的电子所組成的。为了研究方便，他假設电子繞核旋轉的軌道是半徑为  $r$  的圓，如果庫侖定律和牛頓运动定律在原子区域内仍旧适用，假設  $Ze$  和  $e$  分別为氫原子核和电子所帶的电量，那么它們之間的靜电力

$$F = \frac{Ze \cdot e}{r^2} = \frac{e^2}{r^2} \quad (\text{对于氫原子核說来 } Z=1),$$

根据牛頓运动定律，还可以把这个靜电力看作是使电子繞核旋轉作圓周运动的向心力，即

$$F = \frac{Ze^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r},$$

式中  $m$  是电子的质量,  $v$  是电子繞核旋轉的綫速度. 于是就可以得出电子繞核旋轉的綫速度和軌道半徑之間的关系式

$$v^2 = \frac{Ze^2}{mr},$$

但是玻尔认为, 电子繞核旋轉的軌道并不是任意的, 它只能在核外一定的軌道上旋轉, 这些可能軌道的周长和电子动量的乘积必須等于普朗克常数的整数倍. 这就是說, 电子运动的軌道半徑  $r$  和电子的綫速度  $v$  之間除了具有上述关系外还必须遵循另一个关系

$$2\pi r \cdot mv = nh \quad (n=1, 2, 3\cdots),$$

式中  $h$  是普朗克常数, 数值等于  $6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒;  $n$  是正整数. 利用消去法把上述两关系式中的  $v$  消去后就可以得出氫原子中核外电子运动軌道半徑的公式

$$r = \frac{n^2 h^2}{4Z\pi^2 m e^2} \quad (n=1, 2, 3\cdots).$$

**例 2.** 試計算氫原子中核外电子运动的最小軌道半徑和其他可能的軌道半徑值.

**【解】**  $\therefore r = \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2} \cdot \frac{n^2}{Z};$

已知 电子质量  $m = 9.1 \times 10^{-28}$  克,  
 电子电量  $e = 4.8 \times 10^{-10}$  靜电系单位电量,  
 普朗克常数  $h = 6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒,  
 圓周率  $\pi = 3.14;$

$$\begin{aligned} \therefore r &= \frac{(6.62 \times 10^{-27})^2}{4(3.14)^2 (9.1 \times 10^{-28}) (4.8 \times 10^{-10})^2} \cdot \frac{n^2}{Z} \\ &= 0.53 \times 10^{-8} \cdot \frac{n^2}{Z} \text{ 厘米} \\ &= 0.53 \cdot \frac{n^2}{Z} \text{ 埃.} \end{aligned}$$

对于氫原子說来,  $Z=1$ ; 令  $n=1$ , 就得出氫原子中核外电子运动的最小軌道半徑

$$r_1 = 0.53 \text{ 埃.}$$

这个数值跟由气体分子运动論推出的結果相一致。其他可能的軌道半徑

|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| 当 $n=2$ | $r_2 = 0.53(2)^2 = 2.22 \text{ 埃,}$ |
| $n=3$   | $r_3 = 0.53(3)^2 = 4.77 \text{ 埃,}$ |
| $n=4$   | $r_4 = 0.53(4)^2 = 8.48 \text{ 埃,}$ |
| .....   | .....                               |

即 
$$r_n = 0.53 n^2.$$

可見核外电子只能沿一些不連續的圓周軌道运动。

另外，玻尔还假設电子在这些可能的軌道上运动时，各具有一定的势能和动能，而并不向四周輻射能量，只有当电子以跳跃的方式从一个軌道跳到另一个軌道上时，才会和外界发生能量的交换。

假設  $E_{n_2}$  和  $E_{n_1}$  是电子在軌道  $n_2$  和  $n_1$  上运动时所具有的能量，那么当电子从軌道  $n_2$  跳跃到軌道  $n_1$  上时，能量的改变为

$$\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1}.$$

我們知道，能量是个相对的量。在正电荷的电場中，通常規定靜止在无限远处的正电荷所具有的能量为 0，离正电荷愈近，能量就愈大。对于处在原子核电場中的电子說来：由于它帶負电，所以情况正相反，电子的电势能总是負的，而且离核愈近，电势能負得愈多，即能量愈小。

由此可知，当电子从离核較远的軌道  $n_2$  跳跃到离核較近的軌道  $n_1$  上时，就要放出能量。

即当  $\Delta E = E_{n_2} - E_{n_1} > 0$  时，将有一部分能量以光子的形式发射出来而形成原子的发射光譜(图 8·13)；而当电子从离核較近的軌道  $n_1$  由于外界的原因跳跃到离核較远

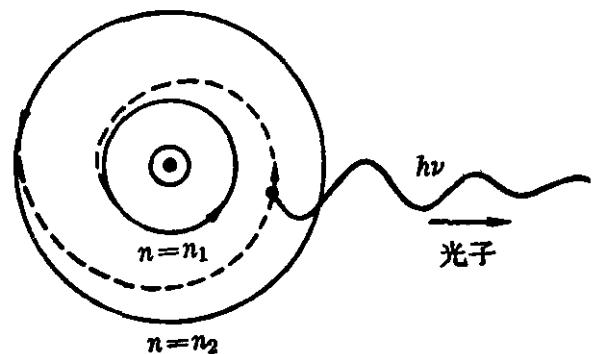


图 8·13 电子发射光子的示意图



的軌道  $n_2$  上时就要吸收能量, 即当  $\Delta E = E_{n_1} - E_{n_2} < 0$  时, 将有一部分能量以光子的形式被电子所吸收而形成原子的吸收光譜. 至于电子所发射或吸收的光子的頻率并不决定于电子的能量, 而决定于电子在跳跃前后所具有的能量差, 即

$$h\nu = |\Delta E| = |E_{n_2} - E_{n_1}|,$$

式中  $h$  是普朗克常数,  $\nu$  是光子的頻率. 由于电子的运动軌道半徑是不連續的, 因此电子所具有的能量以及它在跳跃前后能量的差也不可能是連續的. 这就可以說明, 为什么原子光譜是明綫光譜而不是連續光譜.

对于氫原子說来, 原子核所带的电量是  $+Ze$  ( $Z=1$ ). 电子在半徑是  $r$  的軌道上运动时所具有的电势能<sup>①</sup>和动能分别是

$$E_{\text{电}} = \frac{Ze}{r} \cdot (-e) = -\frac{Ze^2}{r},$$

$$E_{\text{动}} = \frac{1}{2}mv^2,$$

結果, 电子所具有的总能量<sup>②</sup>

$$E = E_{\text{电}} + E_{\text{动}} = -\frac{Ze^2}{r} + \frac{1}{2}mv^2.$$

又因  $v^2 = \frac{Ze^2}{mr}$ , 代入上式可得

$$E = -\frac{Ze^2}{r} + \frac{Ze^2}{2r} = -\frac{Ze^2}{2r},$$

再以  $r = \frac{h^2n^2}{4Z\pi^2me^2}$  代入上式可得

$$E = -\frac{2\pi^2me^4Z^2}{h^2n^2} \quad (n=1, 2, 3\dots).$$

以  $n=1, 2, 3\dots$  代入上式就可以依次得出电子在各个可能軌道上

① 在原子核  $+Ze$  的电場中, 距核为  $r$  处的电势是  $+\frac{Ze}{r}$ .

② 严格說来, 总能量  $E$  并不为电子单独所有, 而是属于整个原子系統的. 現在这样提是为了叙述上的方便.

运动时所具有的能量  $E_1, E_2, E_3 \dots$ . 随着  $n$  的增大,  $E$  的值逐渐增大, 表示电子运动的可能轨道距核愈远, 电子所具有的能量也愈大.

当电子从第  $n_2$  个轨道上跳跃到第  $n_1$  个轨道上时 ( $n_2 > n_1$ ), 根据玻尔的假设, 这时电子所发射的光子的能量

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1} = \frac{2\pi^2 m e^4 Z^2}{h^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

那么光子的频率

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{2\pi^2 m e^4 Z^2}{h^3} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

所发射谱线的波数

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 m e^4 Z^2}{ch^3} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

式中  $c$  是光在真空中的传播速度. 把这个玻尔理论的公式和由实验归纳出来的巴耳麦公式

$$\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

比较一下, 可见它们具有类似的形式. 计算表明, 在玻尔的理论公式中取  $Z=1$ , 那么公式中括号前的因子就是黎德堡常数, 即

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3} = 1.097 \times 10^5 \text{ 厘米}^{-1}.$$

这与从最精确的光谱实验里得出来的黎德堡常数  $R = 1.097 \times 10^5$  厘米<sup>-1</sup> 符合得相当好, 它说明玻尔理论在处理氢原子的問題上是十分成功的.

根据玻尔理论, 氢原子光谱的规律性可以这样来解释. 当氢原子处在正常状态时, 电子是在离核最近的  $n=1$  的可能轨道上运动, 这时它的能量最少, 也比较稳定. 当原子受到光的照射或高能粒子的“碰撞”<sup>①</sup> 等外界因素的激发时, 电子就吸收一定的能量而

<sup>①</sup> 这里所谓“碰撞”并不一定是指高能粒子对电子的直接接触. 也可以指对它的影响.

跃入其他能量較高的( $n=2, 3, 4\cdots$ 等)可能軌道上去,并处于激发状态,这时电子很不稳定,它能自发地跳跃到其他能量較低的可能軌道上来,同时发出一个光子,这个光子的能量就等于电子在跳跃前后所具有的能量差. 从不同的能量較高的可能軌道上,跳跃到同一个能量較低的可能軌道上来时所发出的譜綫都属于同一綫系. 例如,电子从 $n=2, 3, 4, 5\cdots$ 等可能軌道上跳跃到 $n=1$ 的可能軌道上来时所发出的譜綫都属于賴曼綫系,它們的波数

$$\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=2, 3, 4, 5\cdots).$$

电子从 $n=3, 4, 5, 6\cdots$ 等可能軌道上跳跃到 $n=2$ 的可能軌道上时所发出的譜綫都属于巴耳麦綫系,它們的波数

$$\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=3, 4, 5, 6\cdots).$$

电子从 $n=4, 5, 6, 7\cdots$ 等可能軌道上跳跃到 $n=3$ 的可能軌道上时所发出的譜綫都属于帕邢綫系,它們的波数

$$\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=4, 5, 6, 7\cdots).$$

图 8·14 就是有关氢原子光譜产生的示意图.

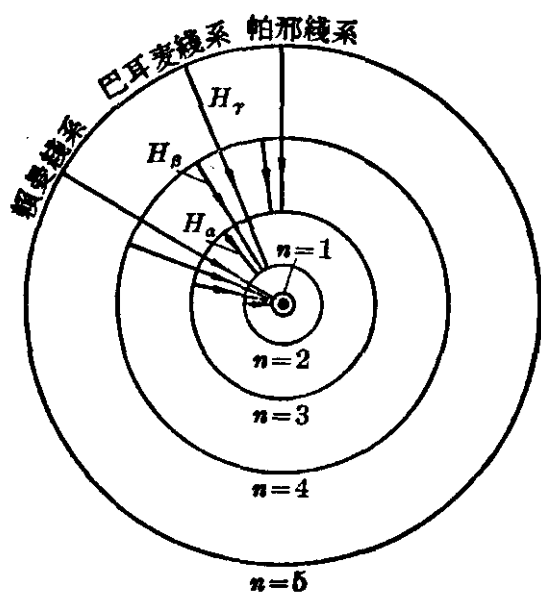


图 8·14 氢原子光譜的产生

一般說来,一个处于激发状态的氢原子在某一时刻只能发出一条譜綫,为什么我們在氢原子光譜上总可以看到各种不同的譜綫呢?这是因为在大量的氢原子中,处于激发状态的氢原子也有許許多多,它們各自处于不同的激发状态,因而发出的譜綫也各不相同,所以我們总可以同时观察到它們所放射的全部譜綫.

## § 8.7 原子的能級

根据玻尔的假設,电子繞核旋轉的軌道是不連續的,在每一个可能軌道上的电子也都具有一定的能量,因此电子在各个可能軌道上所具有的能量也是不連續的.于是我們把这些不連續的能量数值叫做**原子的能級**.

原子的能級通常是以电子伏特来表示的.我們已經知道电子在各个可能軌道上运动时所具有的能量为

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{h^2 n^2} \quad (n=1, 2, 3\cdots).$$

它的单位是尔格.如果要把它的单位化为电子伏特就必须除以  $1.60 \times 10^{-12}$ , 即

$$E(\text{电子伏特}) = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{e_c h^2 n^2} \quad (n=1, 2, 3\cdots).$$

把各个已知的常数代入上式,并且取  $Z=1$ , 就可以得出氢原子能級的公式

$$E(\text{电子伏特}) = -\frac{13.60}{n^2} \quad (n=1, 2, 3\cdots),$$

|         |                      |
|---------|----------------------|
| 当 $n=1$ | $E_1 = -13.60$ 电子伏特, |
| $n=2$   | $E_2 = -3.40$ 电子伏特,  |
| $n=3$   | $E_3 = -1.51$ 电子伏特,  |
| $n=4$   | $E_4 = -0.850$ 电子伏特, |
| $n=5$   | $E_5 = -0.544$ 电子伏特, |
| .....   | .....                |

原子的能級还可以形象地用图来表示.图 8.15 就是氢原子的能級图.图中最下面的水平綫是表示电子在正常状态下所处的能級,上面几条水平綫依次表示电子在不同的激发状态下所处的能級,它們和最下面的水平綫之間的距离是根据一定的比例来画的.因此在能級图上,各个能級之間的距离就直接表示着电子跳

跃时所发出谱线频率的高低。我们从图 8·15 上就可以看出,为什么赖曼线系在紫外线区域里而帕邢线系是在红外线区域里。

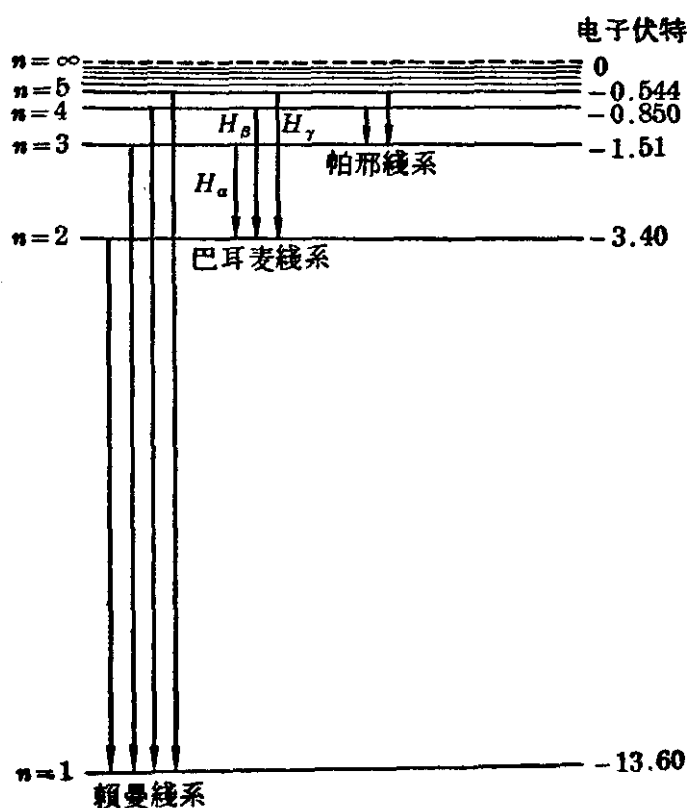


图 8·15 氢原子的能级图

如果氢原子内的电子原来是处于正常状态下的, 由于外界的因素获得了能量, 例如获得了 20 电子伏特的能量, 这就足以使它从  $n=1$  的可能轨道跳跃到  $n=\infty$  的能级, 即从而脱离氢原子, 并且在离开时还具备 6.4 电子伏特的动能; 如果电子获得的能量正好是 13.6 电子伏特, 那就正好使它脱离氢原子核, 在这两种情况下, 氢原子都成了正离子。如果外来的能量少于 13.6 电子伏特, 那么电子就不一定能够吸收它, 只有当能量的大小正好等于任一较高能级与最低能级的差时, 它才能被电子所吸收, 从而使电子跳跃到这一离核较远的可能轨道上去。在这种情况下, 氢原子只是受到激发, 并没有成为正离子。

处在激发状态下的电子是不稳定的。如果电子被激发在  $n=4$  的可能轨道上, 那它可能一下子跳回  $n=1$  的可能轨道, 同时发出

一条紫外綫；它也可能先跳到  $n=2$  的可能軌道，同时发出一条藍光 ( $H_{\beta}$  綫)，然后再跳回  $n=1$  的可能軌道，并发出一条紫外綫；它还可能先跳到  $n=3$  的可能軌道，发出一条紅外綫，然后再跳到  $n=2$  的可能軌道，发出一条紅光 ( $H_{\alpha}$  綫)，最后再跳回  $n=1$  的可能軌道，发出一条紫外綫。

原子能級的存在是可以驗証的，图 8·16 就是一个用来驗証原子能級存在的实验装置示意图。在一个三极电子管里充入少量低压的氩气；然后让灯絲  $F$  的一端接地，把栅极  $G$  和板极  $P$  連在一起并跟一组蓄电池  $B$  相通构成板极电路；同时在这电路上并联一个可变电阻。

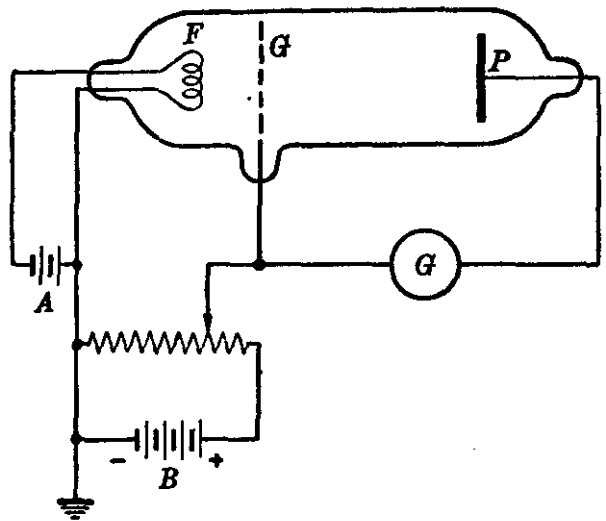


图 8·16 驗証原子能級存在的装置示意图

实验时，先利用蓄电池组  $A$  对灯絲加热。于是在灯絲上就有一股热电子束飞出，电子在  $FG$  間的电場作用下加大了速度。假設  $FG$  間的电势差是  $V$ ，那么电子在穿过栅极  $G$  时所具有的动能

$$E_{\text{动}} = eV = \frac{1}{2} mv^2.$$

如果电子在  $GP$  之間碰撞氩原子时沒有能量的損失，那么它将飞到  $P$  极。我們从灵敏电流計上指針的偏轉程度可以測出达到  $P$  极的电子数目。

然后調节可变电阻，那就可以发现，随着  $FG$  間电势差  $V$  的增大，电子所获得的动能也增大，經過  $P$  极的电流也就增大了。但是等到电子所获得的动能正好等于氩原子某一激发态与正常状态之間的能量差时，經過  $P$  极的电流就突然显著地下降，这表明

有很多电子在碰撞氢原子时，它的全部动能被氢原子所吸收而不能达到  $P$  极。例如当  $FG$  间的电势差  $V$  增大到 10.20 伏特时，穿过栅极  $G$  的电子所获得的动能就等于 10.20 电子伏特，这一数值恰等于正常状态下氢原子内的电子跳跃到  $n=2$  可能轨道上所需要的能量，于是它在碰撞中就被氢原子吸收了。

如果再调节可变电阻，来增大  $FG$  间的电势差  $V$ ，使穿过栅极  $G$  的电子所获得的动能足以使氢原子发生电离，这时我们就会发现灵敏电流计上的读数突然上升，这时达到  $P$  极的不仅有来自灯丝的热电子，还有由于氢原子发生电离而脱离原子核的电子。我们把这时  $FG$  间的电势差叫做氢原子的**电离电压**（又叫做击穿电压）。由实验得出的氢原子的电离电压  $V=13.54$  伏特，这一数值跟由玻尔理论推知的计算值 13.60 伏特十分相近，因而证实了原子能级的存在。

**例 3.** (1) 根据玻尔有关氢原子模型的假设来计算氢原子光谱中巴耳麦系的第三条谱线  $H_\gamma$  的波长；(2) 用巴耳麦公式来计算  $H_\gamma$  的波长，并比较这两个结果。

**【解】** (1) 根据玻尔的假设， $H_\gamma$  线是氢原子内的电子从  $n=5$  的可能轨道跳回到  $n=2$  的可能轨道时所发出来的。设  $E_5$ 、 $E_2$  分别是电子在  $n=5$  和  $n=2$  的可能轨道上运动时的能级； $\lambda$ 、 $\nu$  分别是  $H_\gamma$  线的波长和频率，那么

$$h\nu = E_5 - E_2.$$

从氢原子的能级公式可知  $E_5 = -0.544$  电子伏特， $E_2 = -3.40$  电子伏特，而 1 电子伏特  $= 1.6 \times 10^{-12}$  尔格， $h = 6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒，

$$\begin{aligned} \therefore \nu &= \frac{E_5 - E_2}{h} \\ &= \frac{[(-0.544) - (-3.40)] \cdot 1.6 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} \\ &= \frac{2.856 \times 1.6 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} = 6.9 \times 10^{14} \text{ 秒}^{-1}, \end{aligned}$$

即  $H_\gamma$  綫的波長

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2.997 \times 10^{18}}{6.9 \times 10^{14}} = 4340 \text{ 埃.}$$

(2) 根据巴耳麦公式

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (n=3, 4, 5 \dots),$$

对于光譜綫  $H_\gamma$  說来,  $n=5$

$$\therefore \lambda = 3645.6 \times \frac{25}{25-4} = 4340 \text{ 埃.}$$

比較两次結果, 可以發現它們符合得相当好, 而事实上这一数据跟实际的观测值也相当接近. 这表明玻尔理論在解釋氫原子光譜方面是相当成功的.

### 习題 8.5~8.7

1. 已知氫原子光譜中巴耳麦綫系的第一条譜綫  $H_\alpha$  的波長为 6563 埃, 試推算黎德堡常数  $R$  值.

2. 利用氫原子光譜中賴曼綫系的波數公式計算它的头三条譜綫的波長, 并說明賴曼綫系是在紫外綫区域里的.

3. 用玻尔关于氫原子模型的假設說明为什么氫原子光譜不是連續光譜.

4. 根据玻尔的假設計算氫原子核外电子的第四条可能軌道的半徑, 并算出电子沿着这条軌道运动时的綫速度.

5. 在氫原子內当电子从第 5 条軌道上跳跃到第 3 条軌道上时所发出的譜綫属于哪一綫系? 求出它的頻率和波長来.

6. 什么叫做原子的能級? 怎样驗證氫原子能級的存在?

7. 在氫原子核外第三条可能軌道上运动的电子至少要吸收具有多少能量的光子才能脫离氫原子而成为自由电子?

8. 在一充有少量氫气的电子管內(图 8.16), 若电子的最大动能为 13.0 电子伏特, 問管內氫气能发出氫原子光譜中的哪几条譜綫? 为什么?

[提示: 首先考虑电子在碰撞氫原子的过程中, 氫原子內原来处于稳定状态的核外电子受激后至多能跳跃到哪一条可能軌道上去.]



## § 8·8 其他原子的核外电子

我們知道,对于其他元素的原子來說,随着原子序数的增加,核外电子数也增多了,因此它們的电子运动情况要比氫原子的电子复杂得多。

跟氫原子一样,其他原子的核外电子也是在一定的軌道上繞核旋轉的。这些軌道可以分成好几层,它們叫做电子的壳层。每一壳层中都含有一定数目的可能軌道,每个可能軌道上最多只能有一个电子。在正常状态下,核外电子都集中在內层軌道上,半徑最小的壳层叫做 *K* 层,最多只能容納 2 个电子;第二个壳层叫做 *L* 层,最多只能容納 8 个电子;第三个壳层叫做 *M* 层,最多可以容納 18 个电子。愈到外面,可以容納的电子数就愈多,但是在最外面一层上的电子数却有严格的限制,最多不能超过 8 个。例如氧元素的原子序数是 8,因此氧原子內有 8 个核外电子,在正常状态下,其中 2 个填滿了 *K* 层的軌道,6 个在 *L* 层的軌道上运动。图 8·17 就是氧原子的模型图。

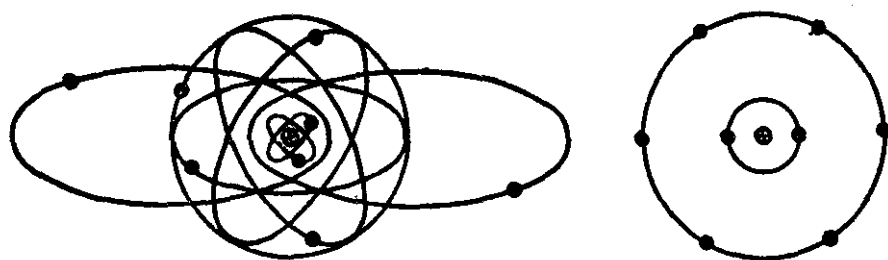


图 8·17 氧原子模型图

其他元素的原子,其核外电子在各个可能軌道上运动时也具有一定的能級。它們也可以在吸收一定的能量后跳跃到能級較高的外层可能的軌道上去,而处于激发状态。反过来,在激发状态下的核外电子在跳回內层可能的軌道时也要发出具有一定波数的譜綫。由于不同元素的原子具有不同的能級,因此每种元素的原子只能吸收或发出某些具有特定波数的譜綫,而不能吸收或发出其

他波数的譜綫，所以每种元素都有各自独特的原子光譜。

## § 8·9 化学反应和化学能

原子的結構和元素的化学性质有着密切的关系。早在1869年俄国科学家門捷列夫就发现元素的化学性质和原子量有关。他把元素按原子量由小而大的次序排列起来，指出元素的化学性质随着原子量的增加而有周期性的变化，从而創立了有名的元素周期律。图 8·18 就是門捷列夫元素周期表。現在我們已經知道，周期表上的元素实际上并不是按原子量而是按电荷数  $Z$  的順序排列的。例如在第二周期的元素中，鋰 ( $Z=3$ ) 的金属性很活潑，鈹 ( $Z=4$ ) 就比鋰差些，硼 ( $Z=5$ ) 的金属性就更差了，而碳 ( $Z=6$ ) 則有一种介于金属与非金属之間的过渡性质，氮 ( $Z=7$ ) 以后元素的非金属性又漸漸增强，直到氟 ( $Z=9$ ) 时就更强，但是氖 ( $Z=10$ ) 却突然成为一种最不活潑的所謂惰性气体。在第三周期里，这种情况又重复出現了。它們也是由金属性很活潑的鈉 ( $Z=11$ ) 起漸漸减低到金属性不活潑的硅 ( $Z=14$ )，然后又开始呈現非金属性，一直到非金属性最活潑的氯 ( $Z=17$ )，而最后也是一种最不活潑的元素——氫 ( $Z=18$ )。

各种元素的化学性质为什么具有周期性呢？根据玻尔的意見，元素化学性质的周期性可以用原子內的电子按一定壳层排列的观点来解釋。因为随着原子序数的增多，原子的核外电子也在增多，而每一壳层所能容納的电子数有一定的限制，所以某一壳层中的电子数增加到一定程度以后，就只好排到更外面一层上去，同样，最外面一层的电子数也是一个一个逐漸增加的。而实验表明，元素的化学性质和原子內壳层的电子沒有多大关系，它基本上决定于最外层的电子个数。而最外层电子数总是从 1 个逐漸增加到 8 个，所以出現了化学性质相似的元素。图 8·19 是門捷列夫元素周期表前三个周期中元素的原子結構示意图。从这张图上可以看

出鋰原子和鈉原子的最外层都只有一个电子，这个电子容易失去而使它們成为正离子，因此它們都具有很強的金属性；氟原子和氯原子的最外层都有7个电子，它們容易获得一个电子而成为負离子，因此它們都具有很強的非金属性。氖原子和氩原子的最外层都正好是8个电子，这就是它們的化学性质最不活潑的原因。由此可見，門捷列夫所发现的元素性质的周期性，正反映了原子中电子排列的周期性。

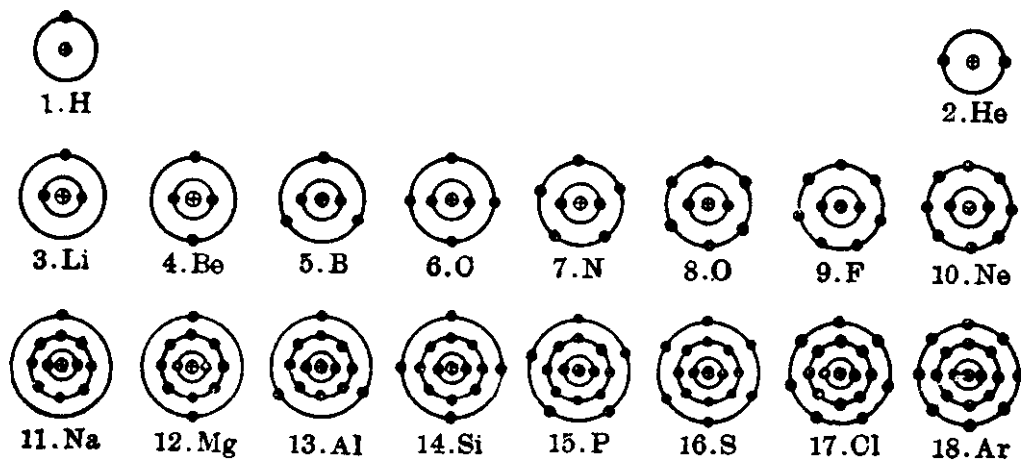


图 8·19 周期表中第 1、2、3 周期元素的原子结构示意图

从上面的分析可以推知：一切化学反应实质上就是原子最外层电子运动状态的改变。例如煤的燃燒就是一种化学反应，在这一化学反应中，煤里的碳和空气里的氧化合成二氧化碳。具体地说，在这一过程中碳原子和氧原子最外层电子的运动状态发生了改变，最后碳原子的两个外层电子和氧原子的两个外层电子聚积起来，便把一个碳原子和两个氧原子結合在一起，成为二氧化碳（图 8·20）。

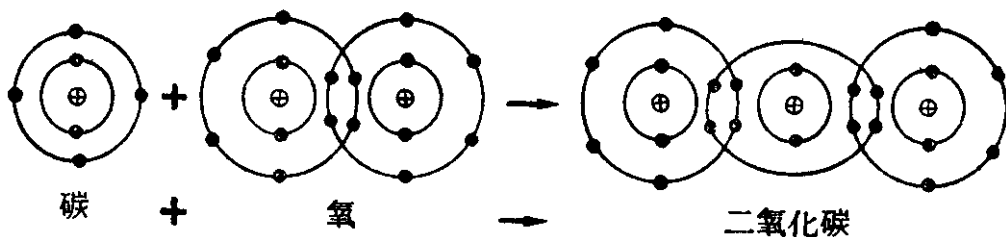


图 8·20 碳分子和氧分子的化合

大家都知道，当煤在燃烧时有能量释放出来，这是什么原因呢？原来不同元素的原子都具有一定的能级。原子最外层电子运动状态的改变就要引起原子能级的改变，因此在发生化学反应的过程中总是伴随有能量变化的过程。有的化学反应释放能量；有的化学反应吸收能量。例如每个碳分子和氧分子化合成二氧化碳时要放出能量 4.1 电子伏特；反过来，一个二氧化碳的分子必须消耗能量 4.1 电子伏特才能被分解成一个氧分子和一个碳分子。在化学·反·应·中·吸·收·或·者·释·放·的·能·量·就·叫·做·化·学·能·，化·学·能·的·来·源·是·在·化·学·反·应·中·由·于·原·子·最·外·层·电·子·运·动·状·态·的·改·变·和·原·子·能·级·发·生·变·化·的·结·果·。

## 本章提要

1. 在克鲁克斯管内从阴极发出的射线叫做阴极射线。阴极射线是一束带负电的粒子流，这种带电粒子就叫做电子。用任何物质作阴极都能产生阴极射线，这一事实表明任何元素的原子中都有电子存在，原子并不是物质存在的最小单元，原子也并不是不可分割的。

2. 物质不经照射不断自发地发出射线的现象叫做天然放射现象；物质的这种性质叫做天然放射性；具有天然放射性的元素叫做放射性元素。放射性元素在放出射线以后，它本身就变成具有另一种性质的新元素，这种变化叫做蜕变。各种放射性元素在发出射线后都能蜕变成各种不同的元素，这些事实说明原子并不是不可改变的，原子的结构也并不简单而是十分复杂的。

3. 所谓  $\alpha$  粒子的散射实验，就是利用  $\alpha$  粒子来冲击原子，从而根据  $\alpha$  粒子的散射情况来探测原子内部结构的实验。卢瑟福在研究  $\alpha$  粒子散射实验的基础上提出了原子的核式结构模型，他假设：

(1) 一切原子都是由一个原子核和核外电子所组成的，原子核直径大小的数量级在  $10^{-12}$  厘米以下，其体积只占整个原子体积的亿万分之一，在原子核里集中了原子所带的全部正电荷和几乎全部原子的质量；

(2) 原子序数为  $Z$  的元素，它的原子核所带的电荷为  $+Ze$ ，它的核外电子数也等于  $Z$ ；

(3) 电子绕着原子核运动，就象行星绕着太阳运行一样，构成一种动的平衡。

4. 任何元素都有它自己的独特的明綫光譜，在这些光譜中出現的一系列頻率不同的明綫是从原子內部发射出来的，它的規律性跟原子內部电子的分布情况和运动規律有着密切的联系，因而明綫光譜又可称为原子光譜。

氫原子光譜中，可見部分譜綫的波长可用巴耳麦公式表示如下

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (n = 3, 4, 5, 6 \dots),$$

式中  $B = 3645.6$  埃。若以波长的倒数——波数来表征光譜綫，巴耳麦公式可以写作

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5 \dots),$$

式中  $R = 4/B = 1.097 \times 10^5$  厘米<sup>-1</sup>。

5. 玻尔在卢瑟福的原子核式結構模型的基础上引用了普朗克的量子概念，提出了两点假設，成功地解釋了氫原子光譜：

(1) 电子繞核旋轉的軌道并不是任意的，电子只能在核外一定的軌道上旋轉，这些可能的軌道的周长和电子的动量的乘积必須等于普朗克常数的整数倍；

(2) 电子在这些可能的軌道上运动时，各具有一定的能量(势能和动能)，而并不向四周輻射能量，只有当电子以跳跃的方式从一个軌道跳到另一个軌道上时，才会輻射能量或吸收能量。

6. 根据玻尔理論可以推知当电子从离核較远的軌道跳跃到离核較近的軌道上时就要放出能量，即发射光子而形成原子的发射光譜；反过来当电子从离核較近的軌道由于外界的原因跳跃到离核較远的軌道上时就要吸收能量，即吸收光子而形成原子的吸收光譜。电子所发射的或吸收的光子并不决定于电子的能量，而决定于电子在跳跃前后所具有的能量的差。

7. 电子在各个可能軌道上所具有的能量是不連續的，这些不連續的能量数值叫做原子的能級。原子的能級通常是以电子伏特表示的。氫原子能級的計算公式是

$$E = -\frac{13.60}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3 \dots).$$

## 复 习 題 八

1. 为什么說，在  $\alpha$  粒子的散射实验中， $\alpha$  粒子的散射显然不是由于原子中电子的作用所引起的？

2. 求  $\alpha$  粒子在距离錳原子核 ( $Z = 25$ )  $10^{-12}$  厘米时所受的推斥力等于多

少达因?

3. 求  $\alpha$  粒子在距离錳原子核 ( $Z=25$ )  $10^{-12}$  厘米时所具有的电势能等于多少尔格?

4. 在  $\alpha$  粒子的散射实验中, 假设一射在铜箔上的  $\alpha$  粒子具有动能 7.68 电子伏特. 如果有一铜原子核 ( $Z=29$ ) 的位置恰好在  $\alpha$  粒子的前进方向上, 求  $\alpha$  粒子所能到达的离铜原子核中心的最短距离.

5. 怎样解释氢原子光谱的规律性?

6. 根据玻尔的假设计算氢原子核外电子的  $n=50$  可能轨道的半径.

7. 一个处于稳定状态的氢原子至少要获得多少电子伏特的能量才可能发出一条巴耳麦线系里的光谱线  $H_{\beta}$ ?

8. 核外电子被激发在  $n=4$  可能轨道上的氢原子在回到稳定状态的过程中可能发出哪些谱线? 有哪几种可能?

## 第九章 原子核的結構

我們已經初步研究了原子的外層結構，在這一章里，將進一步來討論原子核的結構。關於原子核的研究，應該說是從 1896 年發現了天然放射性時就開始的。雖然原子核的發現要比放射性元素的發現晚 15 年，但事實表明，物質的放射過程與原子核外電子重新分布的物理、化學條件的改變無關。有人曾經做過這樣的實驗，他把放射性物質加熱到幾千度的高溫，並且加上數百個大氣壓的高壓或者放在幾千奧斯特的強磁場中，結果並沒有發現它的放射過程有任何變化，這就是說，物質的放射過程是在原子的最內部——原子核里發生的。因此，對物質的放射性的研究，實質上就是對原子核蛻變過程的研究。

在第八章里，我們已經對天然放射現象作了初步的介紹，現在就在它的基礎上來研究各種放射性射綫的性質和放射性元素的蛻變規律。

### § 9.1 放射性的探測方法和探測器

要研究各種放射性射綫的性質，首先必須了解探測各種放射性粒子的方法，包括探測它們的存在，辨別並測量它們的各種物理性質等。用來探測各種射綫或粒子的儀器就叫做**探測器**。探測器的基本原理是利用這些射綫與其他物質作用時所產生的一些特殊現象，研究這些現象就可以探測到射綫或粒子的存在，辨別它們的性質。對於性質不同的探測工作，所用的探測器也不同；探測器的種類很多，這裡只簡單介紹幾種常用的探測方法和相應的探測器。

## 1. 观察射线或粒子在一定物质中的径迹，从而探测其物理性质的方法

(1) **乳胶片** 把放射性物质的截面紧贴在暗房里的乳胶片上使它“感光”，再经过显影等手续就可以得到这种射线或粒子径迹的“照片”。因为当带电粒子经过乳胶中的溴化银颗粒时，产生了电离作用，使溴化银颗粒“感光”，感光点在显影时变黑。于是我们可以观察到粒子在乳胶中的径迹，并根据径迹的长短、形状和其中颗粒的疏密程度来确定粒子的性质和种类。这种乳胶片和一般的照相底片的不同处在于溴化银的含量多，颗粒细，乳胶层也较厚，约为50~300微米。这种方法的优点是应用方便，即使对于快速的粒子也能得到全部径迹；此外，由于在乳胶上形成的象可以保持相当的时间，因此我们还可以利用这点来记录某一段时间内先后经过乳胶的粒子。

(2) **威耳逊云室** 当速度很大的放射性的带电粒子通过威耳逊云室时，就会使它所碰到的气体分子电离，从而在它的运动径迹上形成一连串的正离子，这时如果在空气中含有过饱和的蒸汽（水、酒精或者它们的混合物），蒸汽就会以这些离子为核心凝成一串雾滴。如果我们从侧面用很强的光来照射，就可以看到一条白色的粒子径迹，这个径迹可以用照相拍摄下来。

图9.1就是威耳逊云室的简图。其主要部分就是一个圆筒状的容器C，里面装着干净的气体（氩气、氮气或者空气）和少量的酒精、水；P是一个可以上下滑动的活塞。在使用前我们先把活塞

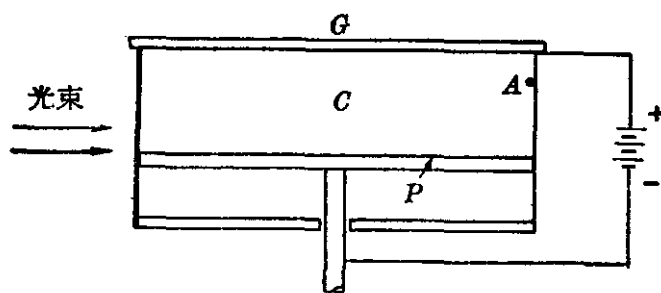


图9.1 威耳逊云室



$P$  向上压挤室内的气体，然后使活塞  $P$  迅速地向下运动，于是室内气体就进行绝热膨胀，使室内温度迅速下降到它的露点以下，这时室内气体中所含有的蒸汽就处于过饱和状态。如果这时在气体中含有离子，过饱和的蒸汽就会围绕这些离子凝成雾滴。为了便于我们从上面隔着玻璃板  $G$  进行观察或者拍摄照片，在容器  $C$  的侧面还装有小窗，可以让照明用的强光透入。如果把放射源放在云室内  $A$  点处，从  $A$  点发出的  $\alpha$  粒子或者  $\beta$  粒子就沿着它的径迹使气体分子电离而产生一些离子，这时若使云室内气体膨胀，雾滴就会形成在  $\alpha$  粒子或  $\beta$  粒子的径迹上。每次使用后，在活塞  $P$  和玻璃板  $G$  之间加上一个电场，使室内的离子迅速地被除掉，以保证下一次使用时的效果。

威耳逊云室是 1912 年英国科学家威耳逊首先设制而成的。近年来已经有了不少的改进。例如现在的云室都是自动控制的，即膨胀、摄影仅在粒子飞过云室时才发生，这种控制是借助于计数器和替续器来使云室工作的。

根据径迹的长短、浓淡、方向等可以分析出带电粒子的性质。例如把云室放在磁场中就可以根据粒子径迹的方向分辨出粒子所带电荷的正负。

(3) 汽泡室 汽泡室是一种比较新型的带电粒子探测器。它是由威耳逊云室发展而成的，因此它的原理跟威耳逊云室很相似。威耳逊云室对于高能的带电粒子的探测效果并不好，不能观察到它的全部径迹，而汽泡室就可以避免上述缺点。汽泡室是利用当带电粒子经过过热液体时粒子的径迹处会形成汽泡的原理设制而成的。它是一个装有液体（如丙烷，液态氩等）的玻璃容器，室内液体的温度略高于它的正常沸点，这时它之所以没有沸腾是因为室内压强较高，当室内压强突然下降时，液体就处于过热状态。如果这时有带电粒子通过液体，液体中带电粒子的径迹处就会形成一串小汽泡，通过这些小汽泡就可以了解到这种带电粒子的性质。

因为液体的密度比气体大，所以只有能量相当大的带电粒子才能通过汽泡室，例如宇宙射线中的带电粒子，或者经过加速器加速而得到的超高能粒子等。因此汽泡室特别适合于观察高能粒子。

## 2. 记录射线或粒子进入仪器的信号从而探测其物理性质的方法

(1) 闪烁镜 闪烁镜是根据射线或者粒子能使某些物质放出荧光的特性设计而成的。如图 9.2(a) 所示，它的构造是一个很轻的管子，在它的底部放着涂有硫化锌的荧光屏，在离屏不远的地方有一根固定在管壁上的小针，针尖上涂有要探测的放射性物质。放射性物质放出的射线打在屏上就使它发生闪光。观察者在完全黑暗的房间里，通过闪烁镜上面的放大镜就可以看到每一个粒子打在屏上所发出的闪光，记录闪光的次数就可以知道射在屏上的粒子数(如图 9.2(b) 所示)。闪烁镜不仅可以用来观察  $\alpha$  粒子，而且还可以用来观察快速的  $\beta$  粒子。

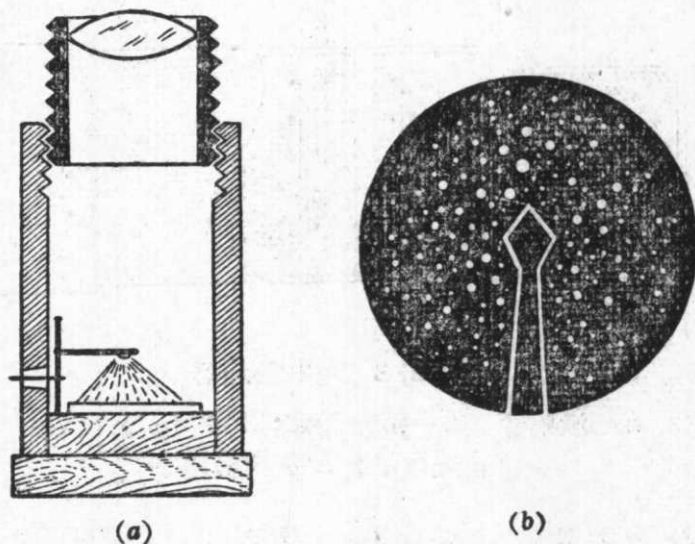


图 9.2 闪烁镜

(2) 闪烁计数器 利用人眼来记录闪光次数是很吃力的，同时如果一下子射在荧光屏上的粒子数很多，那就无法进行记录了。在有了光电倍加器以后，我们可以利用光电倍加器来代替人眼，再利用电子仪器设备来自动进行计数，这种由荧光晶体、光电倍加器

和电子计数设备所组成的整套计数系统就叫做闪烁计数器。

所谓光电倍增器是一种灵敏度非常高的光电管，图9·3就是一种光电倍增器的示意图。其主要部分是一组百叶窗状的电极，在各个电极上都加上适当的电压以形成电场，而且使每一个电极上的电压都比前一个电极上的电压高出100伏特左右。图中的 $P$ 就是光灵敏阴极，当光射到这个能够产生光电效应的阴极上时，就使阴极发出光电子，这些光电子受到电场的加速就打在最近的阳极1上，由于它们具有适当的能量，每个光电子就会在电极1上打出几个新的电子来，这些电子叫做次级电子。很明显，阳极1对于电极2来说是阴极，因此从电极发出的电子又在电场的作用下加速地打在阳极2上，又产生更多的电子。这样每通过一个电极，电子数就放大几倍，如果有10个电极，就可以使最后到达阳极的电子总数是原来光电子数的几十万倍，这样一来，光电流就得到了放大。以上所述的也就是光电倍增器具有很高灵敏度的原因。

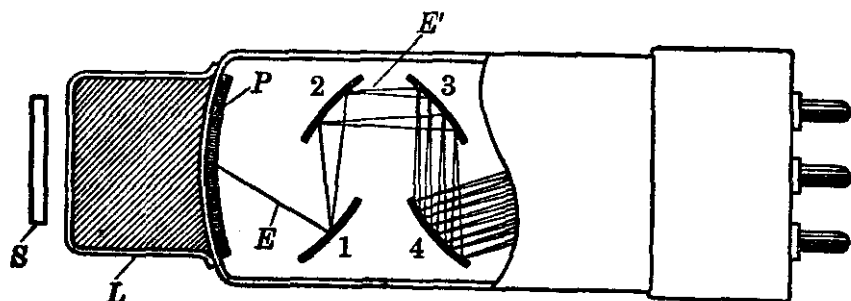


图9·3 光电倍增器

$S$ —放射源； $L$ —荧光晶体； $P$ —光灵敏阴极；

$E$ —光电子； $E'$ —次级电子

在闪烁计数器里，在光电倍增器的光灵敏阴极 $P$ 的附近装有荧光晶体。当粒子射到晶体上时，晶体就发出闪光，从而使 $P$ 发出光电子。于是在光电倍增器里就有了光电流。如果我们在光电倍增器的最后一个阳极上串联一个电阻 $R$ ，那么当有光电流通过时，电阻 $R$ 上就有电压降产生，因此当每一个粒子射在荧光晶体上而发出一次闪光时，电阻 $R$ 上就出现一次脉冲电压，把这脉冲

电压用放大器放大,并把它记录下来,就可以对进入閃爍計数器的粒子进行計数.

利用閃爍計数器不仅可以計数,而且还可以从脉冲电压的大小来推測閃光的强度,从而来确定入射粒子的能量.

(3) 盖革計数器 (盖-謬計数器) 盖革計数器是盖革計数管配上电子計数设备的計数系統. 这种計数器主要是根据射綫或粒子能使气体电离的特性設制而成的. 图 9·4(a) 就是一种盖革計数管的示意图. 其主要部分是一个两端用絕緣物质封閉着的金属圓筒  $C$  和一根与筒的中心軸重合的金属細絲  $W$ , 通常在圓筒外面还套有一个玻璃管  $G$ . 筒  $C$  內装有低压的惰性气体 (压强約为 5~12 厘米高水銀柱). 在金属絲  $W$  和筒  $C$  間加上一定的电压, 以筒  $C$  为阴极, 金属絲  $W$  为阳极, 这一电压必須稍低于筒內气体的电离电压, 从而使筒內在沒有射綫穿过时不发生气体放电現象. 当某种射綫或粒子进入筒內时, 它就使筒內气体电离; 这些离子在电场中被加速, 以后在跟中性的气体分子碰撞时又产生次級电子; 次級电子再使气体电离……. 因此当它們达到中心的金属絲  $W$  时, 一个电子就已經形成了几千个电子, 产生所謂电子“雪崩”現象. 所以当粒子进入計数管后, 就在电阻  $R$  上产生脉冲电压, 利用电子仪器設備就可以把它自动計录下来.

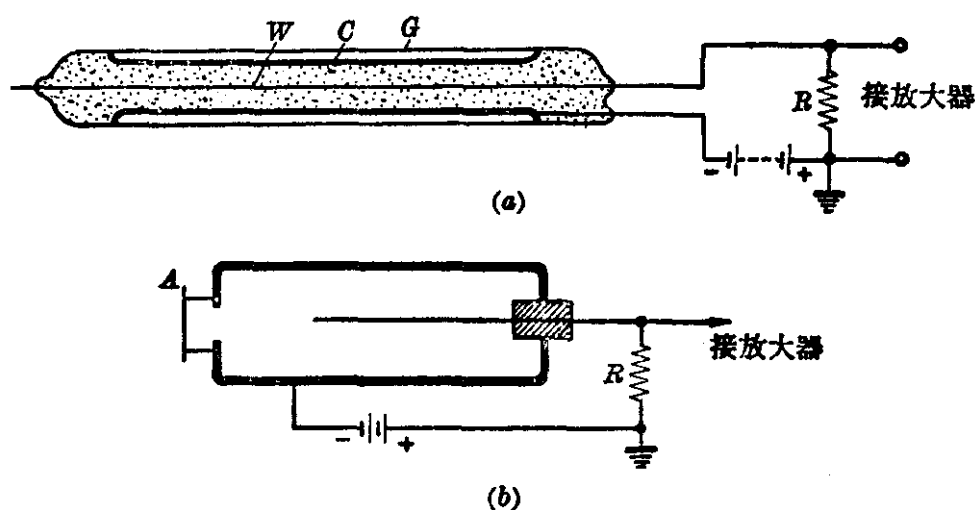


图 9·4 盖革計数管

盖革计数器由于放大倍数大，因此非常灵敏。但是它对于不同的射线都给出大小相同的脉冲，因而只能用来计数，而不能用来分辨不同的粒子，同时由于它有一段间隙时间不能计数，因此也不适于作极快的计数。

当利用盖革计数器对 $\alpha$ 射线进行计数时，因为 $\alpha$ 射线的贯穿能力较小，所以必须在计数管上装一个很薄的云母小窗(如图9.4(b)中的A)，或者把放射源放在计数管内。

## § 9.2 放射性射线的性质

我们已经知道，天然放射性射线是由 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 等三种性质不同的射线组成的。 $\alpha$ 射线是带正电的高速粒子流， $\beta$ 射线是带负电的高速粒子流，而 $\gamma$ 射线是一种光子流。现在我们进一步来研究它们的性质。

根据 $\alpha$ 射线在电场和磁场中的偏转情况，我们可以确定 $\alpha$ 粒子的荷质比约为电子荷质比的 $\frac{1}{3600}$ 。同时利用盖革计数器可以测出1克纯镭每秒钟放出 $3.71 \times 10^{10}$ 个 $\alpha$ 粒子，再测出这些 $\alpha$ 粒子所带的总电量后，就可以算出 $\alpha$ 粒子所带的电荷 $q = +2e$ ，它的质量 $M = 4$ 原子质量单位<sup>①</sup>。由此可知 $\alpha$ 粒子就是失去2个电子的氦原子，即氦原子核。为了验证这一点，卢瑟福早在1909年就做过一个实验，图9.5就是这个实验装置的示意图。图中A是一个薄玻璃管，它的厚度以 $\alpha$ 粒子可以穿透为准。A管安置在一个上端比较狭细的厚玻璃管B里，B管的上端还封有两个电极。实验时先把B管内的空气抽空，并封以水银；然后在A管里放入少许镭盐，作为 $\alpha$ 粒子源。几天以后，A管里的 $\alpha$ 粒子就穿过玻璃壁

<sup>①</sup> 在化学上，原子量是以氧单位(氧原子重量的1/16)作单位的。但实际上氧原子共有三种同位素，它们的原子序数、化学性质虽然相同，但是质量却各不相同，在物理学上为了更确切起见，就以自然界里含量最多的一种氧同位素( $O^{16}$ )的原子质量的1/16作为单位，称为原子质量单位，1个原子质量单位约等于 $1.6598 \times 10^{-24}$ 克。

而进入  $B$  管,这时我們提高  $B$  管内的水銀面以把其中含有  $\alpha$  粒子的稀薄气体压入  $B$  管狭細部分,同时在两极上加上高电压,則  $B$  管上端就会有放电现象产生,从而发生强烈的光芒. 经过光谱分析可知,其中有氦气存在. 这说明  $\alpha$  粒子在放电过程中获得了 2 个电子而变成了氦原子.

此外,在所有能放出  $\alpha$  粒子的放射性物质的矿穴中,总可以发现氦气存在;而在所有没有放射性物质的矿穴中又都没有氦气存在. 这些事实也充分说明  $\alpha$  粒子是氦原子核.

关于  $\alpha$  粒子的速度,实验表明:不同的放射性物质所放射的  $\alpha$  粒子的速度是各不相同的,但同一种放射性物质所放射的  $\alpha$  粒子速度几乎是一定的.  $\alpha$  粒子的速度最高可达  $2 \times 10^7$  米/秒,用这样的速度只要 2 秒钟就可以繞地球一周.

$\alpha$  射线很容易被其他物质所吸收,一片很薄的云母片,或者一片只有 0.05 毫米厚的铝片就可以把  $\alpha$  射线全部吸收掉. 这是因为  $\alpha$  粒子带有 2 个单位正电荷,对电子的电磁作用很大,所以当它经过物质时,很容易使物质电离,而在它的径迹上产生许多离子对<sup>①</sup>. 由于  $\alpha$  粒子每产生一对离子,都要消耗它本身一定的动能,因此它们在经过其他物质时,总是愈走愈慢,最后就和物质中的某 2 个电子结合成氦原子. 所以在物质中电离作用愈强的射线,就愈容易被物质吸收.

为了描述  $\alpha$  粒子或者其他带电粒子被物质吸收的情况,通常我们把带电粒子在物质中所走过路程的长短叫做**射程**. 带电粒子

<sup>①</sup> 失去了电子的原子(即离子)和它所失去的电子合称为离子对.

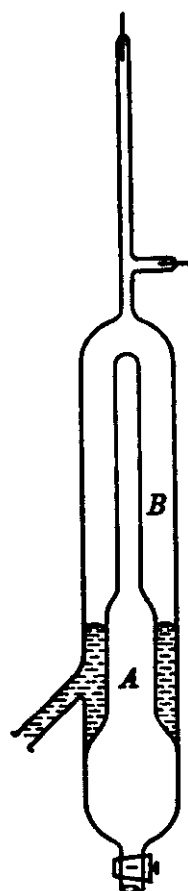


图 9·5 用来验证  $\alpha$  粒子是氦原子核的装置

的种类不同，能量不同，或者在不同的物质中，它的射程就不同。下表所列的就是具有不同能量的  $\alpha$  粒子在几种物质中的射程。

### $\alpha$ 粒子在物质中的射程

(单位: 厘米)

| 射程(厘米)<br>$\alpha$ 粒子经过的物质 | $\alpha$ 粒子的能量<br>(百万电子伏特) |         |        |        |        |
|----------------------------|----------------------------|---------|--------|--------|--------|
|                            |                            | 0.5     | 2.0    | 5.0    | 10.0   |
| 空 气                        |                            | 0.33    | 1.7    | 3.5    | 10.6   |
| 铝                          |                            | 0.00018 | 0.0006 | 0.0019 | 0.0055 |
| 铅                          |                            | 0.00011 | 0.0004 | 0.0012 | 0.0032 |

我們可以根据  $\alpha$  粒子在威耳逊云室里的径迹来确定它在一定物质中的射程, 从而来测量  $\alpha$  粒子的能量。

$\beta$  射线是一种贯穿能力较大的放射性射线, 大多数  $\beta$  粒子都能够穿过几毫米厚的铝片。根据  $\beta$  射线在磁场中的偏转情况, 可以测出它的能量和速度, 由于  $\beta$  粒子的荷质比远大于  $\alpha$  粒子的荷质比, 因此测量时不需要很强的磁场。  $\beta$  射线有很多性质跟阴极射线相似, 但是  $\beta$  粒子所具有的能量却比通常观测到的阴极射线能量高得多。后来才知道,  $\beta$  射线原来是一种高速电子流;  $\beta$  粒子就是电子。  $\beta$  粒子的速度很大, 例如由放射性镭放出的  $\beta$  粒子, 速度几乎接近光速。

$\beta$  粒子所带的电量  $q = -e$ , 只有  $\alpha$  粒子所带电量的一半; 它的质量  $M = 0.000549$  原子质量单位, 约为  $\alpha$  粒子质量的  $\frac{1}{7200}$ , 因此  $\beta$  粒子在经过物质时, 电离作用较弱, 不象  $\alpha$  粒子那样容易被物质所吸收; 而射程却要比  $\alpha$  粒子大得多。例如 3 百万电子伏特能量的  $\alpha$  粒子在 1 个大气压  $15^\circ\text{C}$  的空气中, 其射程约为 2.8 厘米, 在每毫米路程中约产生 4000 个离子对; 而能量相同的  $\beta$  粒子在同



样的空气中射程约为 1000 厘米, 在每毫米路程上只能产生 4 个离子对.  $\beta$  粒子在每毫米路程上产生的离子对数目随着它速度的减低而增加, 最后就成了物质中的自由电子, 或者与某个离子结合成中性原子. 下表所列的是不同能量的  $\beta$  粒子在几种物质中的射程.

### $\beta$ 粒子在物质中的射程

(单位: 厘米)

| 射程(厘米)<br>$\beta$ 粒子经过的物质 | $\beta$ 粒子的能量<br>(百万电子伏特) |       |      |       |
|---------------------------|---------------------------|-------|------|-------|
|                           | 0.05                      | 0.51  | 5.1  | 51    |
| 空气                        | 3.9                       | 155   | 2200 | 15000 |
| 铝                         | 0.0025                    | 0.085 | 1.15 | 7.8   |
| 铅                         | 0.001                     | 0.031 | 0.33 | 1.25  |

$\beta$  粒子与  $\alpha$  粒子的性质不同还可以从它们在威耳逊云室里的径迹中表现出来. 图 9.6 就是关于它们的径迹的照片.  $\alpha$  粒子由于电离作用强, 而又不宜散射, 因此它的径迹粗而浓, 并且很直;  $\beta$  粒子由于电离作用较弱, 而且容易散射, 因此它的径迹细而稀, 并且有弯弯曲曲的现象.

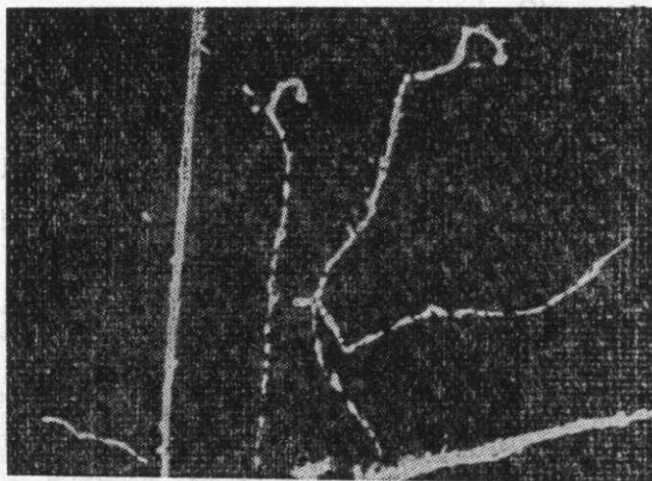


图 9.6  $\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子的径迹



$\gamma$  射綫常伴随着  $\alpha$  射綫或者  $\beta$  射綫产生。它的性质与一般的可見光、紫外綫、倫琴射綫很相似,也是由光子組成的。所不同的是  $\gamma$  射綫的能量很大,一个  $\gamma$  光子的能量約在几十万电子伏特以上,而一般可見光的光子只有几个电子伏特。

$\gamma$  射綫被物质吸收的情况和  $\alpha$ 、 $\beta$  等带电粒子被吸收的情况不同,因为光子的速度是固定不变的。 $\gamma$  光子在經過物质时,可能把全部能量傳給原子中的一个电子而使原子电离;也可能把一部分能量傳給原子中的一个电子或者傳給自由电子,从而本身变成能量較低的光子,同时改变了运动方向,离开了原来的光子流。所以  $\gamma$  射綫在經過物质时,速度并不减小,只是光子数目逐漸减少。因此对于  $\gamma$  射綫来說,研究它的射程意义并不大,通常我們总是用穿过多厚的物质后强度减弱多少来說明  $\gamma$  射綫被物质吸收的情况。实验表明: $\gamma$  射綫在空气中飞行了几百米以后,强度并没有显著的减弱。下表列出了使不同能量的  $\gamma$  射綫强度减弱一半所需要的物质的厚度。

使  $\gamma$  射綫强度减弱一半所需物质的厚度(单位:厘米)

| 强度减弱一半所需的<br>厚度(厘米) | $\gamma$ 射綫的能量<br>(百万电子<br>伏特) | 0.5              | 1.0  | 2.0   | 5.0  |
|---------------------|--------------------------------|------------------|------|-------|------|
|                     |                                | $\gamma$ 射綫經過的物质 |      |       |      |
| 空 气                 |                                | 6300             | 9200 | 14700 |      |
| 铝                   |                                | 3.0              | 4.5  | 5.7   | 9.9  |
| 铁                   |                                | 1.11             | 1.56 | 2.10  | 2.88 |
| 鉛                   |                                | 0.42             | 0.9  | 1.35  | 1.47 |

从原子核能够发射  $\gamma$  射綫的事实,可以知道原子核中也存在着能級,原子核中能量的分布也是一級級的,或者說原子核能够处在各种激发状态中。当原子核从能級較高的激发状态跃迁到能級

較低的状态时，就发出 $\gamma$ 射綫来。这个現象和原子中的电子从能級較高的激发状态跃迁到能級較低的状态时发射可見光或者倫琴射綫十分相似。由于原子核中能級間的能量差很大，一般說来，要比电子壳层間的能量差大得多，因此发射出来的 $\gamma$ 射綫的能量比可見光也大得多。

### § 9.3 放射性元素的蜕变規律

我們已經知道，放射性元素的原子核能够自发地放射出 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射綫，并且在放出射綫后，自己就变成了具有不同性质的新元素。这种变化叫做蜕变。放射 $\alpha$ 射綫的蜕变叫 $\alpha$ 蜕变，放射 $\beta$ 射綫的蜕变叫 $\beta$ 蜕变。

正因为放射性元素的蜕变是自发进行的，所以总帶有一定的偶然性，这就是說，并不是所有的原子核都在进行蜕变，因此任何一块放射性物质都不会一下子全部蜕变完。为了研究放射性元素的蜕变規律，我們可以作以下的实验。

取一块质量已知的放射性元素钋，把它放在閃爍鏡中，根据閃光的数目就可以計算打在熒光屏上的 $\alpha$ 粒子数。我們知道，钋原子核在放出1个 $\alpha$ 粒子后就蜕变成沒有放射性的鉛原子核，所以閃光的次数也表明在一定時間內发生蜕变的钋原子核数。这块放射性物质原来含有的原子核总数可以根据其质量和钋元素的原子量来推知。如果我們仔細观察一昼夜，就会发现每100,000个钋原子核中有495个发生了蜕变；如果繼續观察一昼夜，就会发现，在剩下的每100,000个钋原子核中仍然有495个发生了蜕变；繼續进行观察，結果仍旧一样。

由此可知，在有大量原子核的放射性物质中，在相同的時間內，发生蜕变的原子核数与原子核总数之比总是一定的。这个比值就叫做放射性元素的**蜕变常数**①。

① 放射性元素蜕变常数的倒数又叫做放射性元素的平均寿命。

各种放射性元素的蜕变常数各不相同，就表明各种原子核的不稳定性程度也各不相同。上面的实验结果表明，在以一昼夜(天)为时间单位的情况下，放射性元素钋的蜕变常数

$$\lambda_{\text{Po}} = \frac{495}{100,000} = 0.00495 \text{ 天}^{-1}.$$

根据放射性元素的蜕变规律，并利用数学分析的方法可以推算出，在一定量的放射性元素中有一半原子核发生蜕变所需要的时间，这个时间就叫做放射性元素的**半衰期**。计算表明，放射性元素的半衰期是跟它的蜕变常数成反比的，它们之间的关系式是

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}, \text{ 即 } T = \frac{0.693}{\lambda}.$$

对于放射性元素钋说来

$$T_{\text{Po}} = \frac{0.693}{\lambda_{\text{Po}}} = \frac{0.693}{0.00495} = 140 \text{ 天}.$$

也就是说，如果有 20 克钋，过了 140 天就只剩下 10 克，再过 140 天就只剩下 5 克，再过 140 天就只剩下 2.5 克了……。

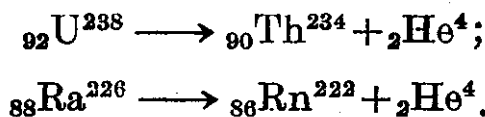
各种放射性元素的半衰期也是各不相同的。有的长达几百亿年( $T_{\text{U}} = 1.39 \times 10^{10}$  年)，而有的却只有几天( $T_{\text{Po}} = 5$  天)，还有的甚至短到几万分之一秒( $T_{\text{Po}'} = 3 \times 10^{-7}$  秒)。比较不同元素的半衰期可以了解它们放射性的强弱。在质量相同的情况下，半衰期愈短的元素，放射性就愈强烈。此外，我们还可以利用放射性元素半衰期的测量来鉴别不同的放射性同位素。

和任何其他过程一样，在原子核的蜕变过程中，也要遵守电荷守恒定律和质量守恒定律。由于任何个别原子核的质量可以近似地用它的质量数<sup>①</sup>来表示，因此我们可以近似地用质量数守恒定律来代替质量守恒定律。通常我们总是在元素符号的右上角标以质量数  $M$ ，而在它的左下角标以电荷数  $Z$  (即原子序数) 来表示各

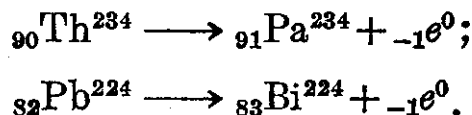
① 质量数是与该原子的原子量最接近的整数。例如铀的原子量是 4.003，其质量数就是 4。

种原子核或粒子。例如， ${}_8\text{O}^{16}$ 、 ${}_{92}\text{U}^{238}$  分别是氧原子核和铀原子核的符号；而  ${}_2\text{He}^4$ 、 ${}_{-1}e^0$  分别是  $\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子的符号。

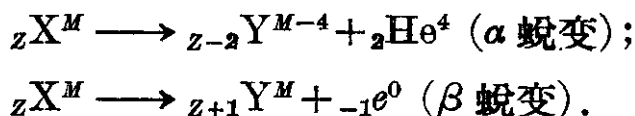
一个放射性原子核在进行  $\alpha$  蜕变后，电荷数（原子序数） $Z$  就减少 2，它在周期表内的位置就向左移 2 格，同时质量数  $M$  减少 4。例如



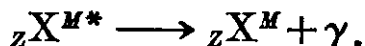
一个放射性原子核在进行  $\beta$  蜕变后，电荷数（原子序数） $Z$  将增加 1<sup>①</sup>，它在周期表内的位置向右移 1 格，但质量数  $M$  却保持不变。例如



这样的规律就叫做**位移规律**。若用  $X$ 、 $Y$  分别代表蜕变前后的元素，其中  $X$  是母元素， $Y$  是子元素，那么  $\alpha$  蜕变和  $\beta$  蜕变的位移规律就可以用一般公式表示：



由于  $\gamma$  光子不带电，所以当原子核放出  $\gamma$  射线时，它在周期表内的位置并不移动，只是从不稳定的激发状态转变到稳定状态。这一过程可以写作



科学研究结果表明，地球上所有现存的天然放射性元素归纳起来都是由三种原始的母元素蜕变而来的。每一种原始的母元素和它所产生的子子孙孙，直到最后蜕变成稳定的元素为止组成一个放射系。这三个天然放射系就是铀(U)系、钍(Th)系和锕(Ac)系。

图 9.7 表示这三个放射系的蜕变情况。图中的横坐标代表电

① 少了一个负电荷，也就相当于多了一个正电荷。

荷数(原子序数) $Z$ , 纵坐标代表质量数  $M$ . 在这三个图中,  $\alpha$  蜕变使元素原子核的位置向左向下移, 而  $\beta$  蜕变使元素原子核的位置沿水平线向右移动. 从图上还可以看到, 大多数的元素都能发生  $\alpha$  蜕变或  $\beta$  蜕变, 但是也有少数元素既能发生  $\alpha$  蜕变, 又能发生  $\beta$  蜕变. 例如在铀系中的元素镭  $C$  ( $RaC$ ) 和钍系中的钍  $C$  ( $ThC$ ). 这时, 对它每一个原子核说来, 仍然是发生  $\alpha$  蜕变或发生  $\beta$  蜕变, 可是就整块放射性物质说来, 则同时发出  $\alpha$  射线和  $\beta$  射线. 这三个放射系最后都是铅的各种稳定同位素. 所以放射性元素的产地总有铅同时存在.

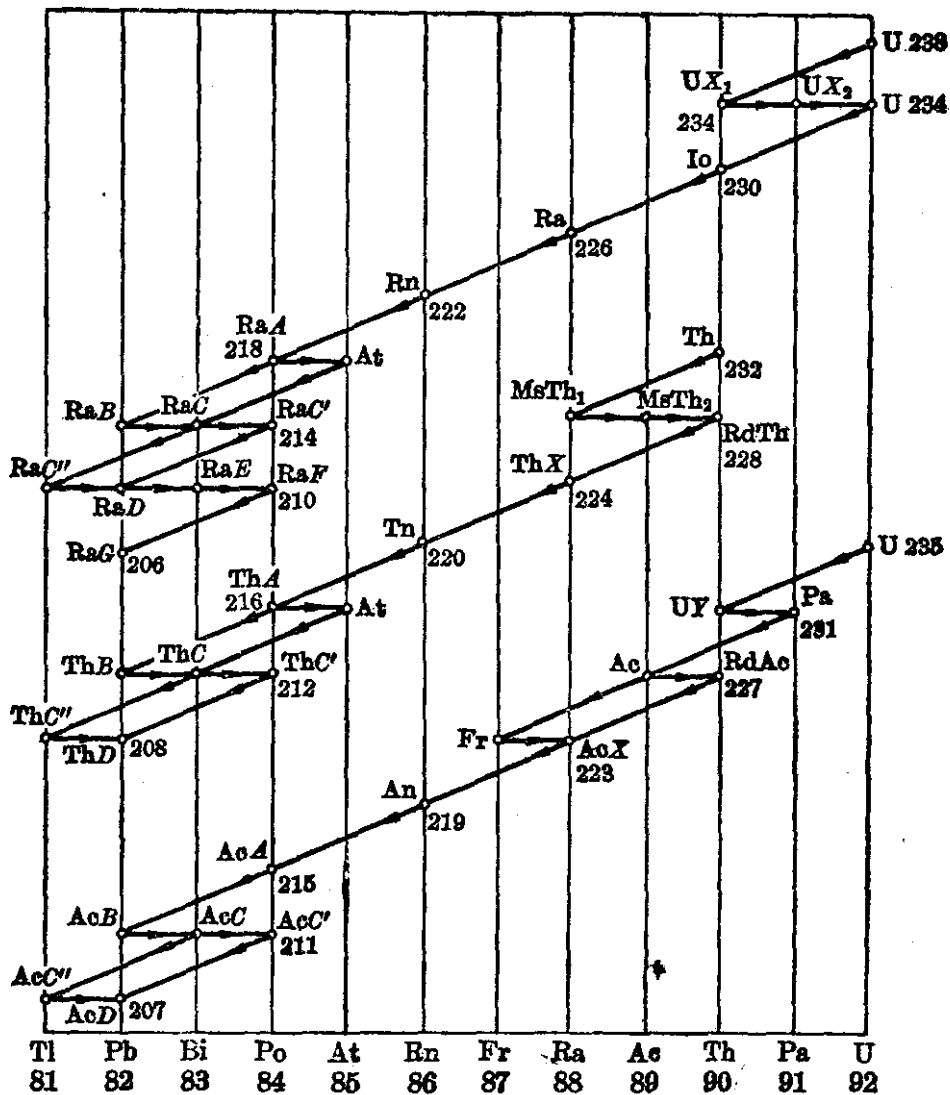


图 9.7 三个天然放射系的蜕变规律

## 习题 9.1~9.3

1. 为什么利用威尔逊云室可以探测到  $\alpha$ 、 $\beta$  等带电粒子在物质中的径迹?
2. 从哪些事实和实验可以说明  $\alpha$  粒子是氦原子核?
3. 什么叫做射程? 比较  $\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子在空气中的射程, 并说明为什么  $\beta$  粒子的射程较大.
4. 利用盖革计数器测得 1 克放射性镭每秒钟发射  $\alpha$  粒子  $3.71 \times 10^{10}$  个, 求镭的蜕变常数和半衰期.  
[提示: 1 克镭中含有镭原子的个数 =  $\frac{\text{阿佛加德罗数}}{\text{镭原子量}}$ .]
5. 已知放射性氡 (Rn) 的半衰期是 3.82 天, 设有 32 克纯氡, 问几天后将减少成 1 克?
6. 某种放射性物质的样品在 15 天后只余下原来的  $\frac{1}{8}$ , 求这种放射性物质的半衰期, 并鉴别它是哪一种放射性物质.
7. 写出下列各元素的原子核符号:  
硼 11, 钠 23, 磷 31, 钍 210, 铀 235.  
(元素后面的数字代表原子核的质量数.)
8. 试问  ${}_{92}\text{U}^{238}$  蜕变成  ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ , 要经过几次  $\alpha$  蜕变和几次  $\beta$  蜕变?  ${}_{92}\text{U}^{238}$  蜕变成  ${}_{82}\text{Pb}^{207}$  要经过几次  $\alpha$  蜕变和几次  $\beta$  蜕变?

## § 9.4 原子的人为嬗变

自从发现了天然放射性物质以后, 人们开始知道, 在自然界里有些元素的原子核能自发地进行嬗变. 所谓嬗变, 就是指一种原子变成了性质上不同的另一种原子的过程. 这些事实给科学家们一个启发: 有可能人为地将一种物质转变为另一种物质. 于是科学家们就开始研究如何通过人为的方法使一些稳定元素的原子发生嬗变. 他们曾在水银蒸气中进行高压放电, 或者用阴极射线去射击氮气, 但是都失败了. 因为原子核是一个相当坚固的组织, 要想使它内部结构发生变化就必须使用具有相当高能量的“炮弹”轰击它. 后来他们终于想到利用由放射性元素发射出来的  $\alpha$  粒子

作为“炮弹”。由于 $\alpha$ 粒子是带电的粒子，所以用它来轰击重元素的原子核必然会遭到散射，但用它来轰击轻元素的原子核，击中原子核的可能性就大了。

1919年，卢瑟福在用镭 $C'$  ( $Ra C'$ ) 原子所放出的具有 $2 \times 10^7$ 米/秒这样高速度的 $\alpha$ 粒子作为“炮弹”来轰击氮气的时候，发现了一种新的粒子。后来通过分析才知道这个实验第一次实现了用人为的方法使原子发生嬗变。

图9·8就是当时卢瑟福所用的实验装置示意图。其主要部分是一个密闭的容器 $C$ ，其中装有纯净的气体。同时在 $C$ 室内有一个可以滑动的座架，其上放着 $\alpha$ 粒子的放射源( $Ra C'$ ) $A$ ，在 $C$ 室的侧面上有一小窗，窗上贴着一层铝箔 $F$ ，它的厚度是以恰好能吸收由室内 $A$ 处射出的 $\alpha$ 粒子为准。（或者通过调整 $AF$ 间的距离来做到这一点。）窗外放一涂有硫化锌的荧光屏 $S$ ，显微镜 $M$ 是用来观察 $S$ 屏上的闪光的。

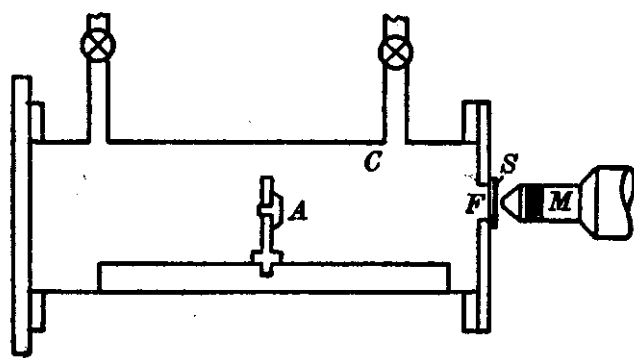


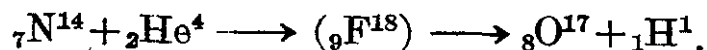
图9·8 卢瑟福的人为嬗变实验装置

当 $C$ 室内装着纯净的氧气或者碳酸气时， $S$ 屏上并没有闪光出现，这表示由 $A$ 处发出的 $\alpha$ 粒子已被 $F$ 箔所吸收。但是当 $C$ 室内装着纯净的氮气时，虽然 $\alpha$ 粒子仍然不能穿过 $F$ 箔，但在屏上却可以观察到闪光。卢瑟福认为，这些闪光是由于 $C$ 室内的氮原子核在 $\alpha$ 粒子的轰击下发射出来的一种贯穿本领很强的新粒子所引起的。进一步的探测证明，这些新粒子就是氢原子核 ${}^1_1H$ 。我们

把它叫做质子，它們在空气中的射程可以达到 40 厘米；而由鐳 C' 放出的  $\alpha$  粒子在空气中的射程只有 7 厘米。

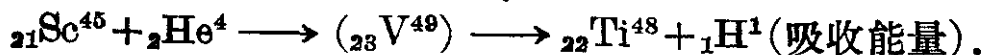
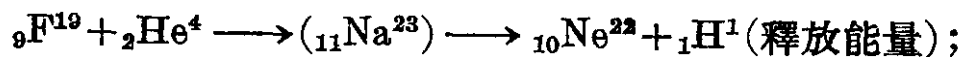
根据玻尔的解釋，氮原子核在  $\alpha$  粒子的轰击下发生嬗变的过程分为两个阶段：第一阶段是快速的  $\alpha$  粒子在击中靶核  ${}_{7}\text{N}^{14}$  后被靶核所俘获，形成了一个不稳定的复核  ${}_{9}\text{F}^{18}$  (氟的不稳定同位素)；第二阶段是这个不稳定的复核在极短的时间內<sup>①</sup> 放出一个质子而嬗变成反冲核  ${}_{8}\text{O}^{17}$  (氧的稳定同位素)。

原子核由于受到外来的原因而引起的嬗变叫做核反应。卢瑟福实验中的核反应过程可以用下列的核反应方程来表示



由于核反应过程也同样遵守电荷守恒定律和质量守恒定律，因此反应前后的电荷总数和质量总数保持不变。

几年以后，科学家们发现，除了氧和碳以外，原子序数在 21 以下的轻元素的原子核，在  $\alpha$  粒子的轰击下几乎都能产生类似的核反应。例如：



上述核反应方程还可以简写成  $\text{F}^{19}(\alpha, p)\text{Ne}^{22}$ ,  $\text{Al}^{27}(\alpha, p)\text{Si}^{30}$ ,  $\text{Sc}^{45}(\alpha, p)\text{Ti}^{48}$  等。括号中前一个字母  $\alpha$  表示入射的粒子是  $\alpha$  粒子，后一字母  $p$  表示反应后放出的粒子是质子，括号前面的  $\text{F}^{19}$ 、 $\text{Al}^{27}$  等表示受到轰击的靶核，括号后面的  $\text{Ne}^{22}$ 、 $\text{Si}^{30}$  等表示复核放出质子后嬗变成的反冲核。通常我们就把这种核反应叫做  $\alpha$ - $p$  型核反应。

$\alpha$ - $p$  型核反应在威耳逊云室里被探测到的机会是非常少的。有人曾经在充有 90% 氮气和 10% 氧气的威耳孙云室中，摄取了成千成万张  $\alpha$  粒子的径迹照片，结果只在很少的照片上发现  $\alpha$  粒

① 不稳定的复核存在的时间约  $10^{-16}$  秒。



子的徑迹中有了“分叉”。图 9·9 就是其中的一张照片。分析証明，

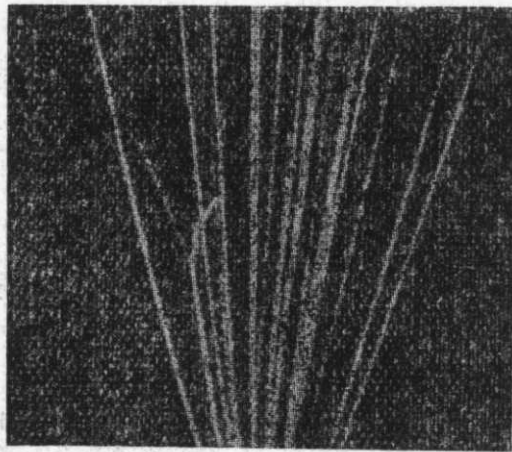


图 9·9  $\alpha$  粒子从氮原子核中打出质子来的徑迹照片

在发生“分叉”后形成的两条新的徑迹中，細而长的一条是质子的徑迹，粗而短的一条是新生成的反冲氧原子核的徑迹。“分叉”的起点就是发生  $\alpha$ - $p$  型核反应的地方。

## § 9·5 中 子

1930 年，德国物理学家玻特和白克尔在仔細研究  $\alpha$  粒子所引起的核反应时，发现一种輕元素铍 (Be) 在  $\alpha$  粒子的轰击下并不发射质子，而放出一种穿透能力非常强的射綫来；后来又发现輕元素硼 (B) 在  $\alpha$  粒子的轰击下也会产生同样的情况。当时他們錯誤地以为这种射綫是一种  $\gamma$  射綫。根据这种射綫在透过鉛板后强度减弱的情况，可以肯定它的能量在 10 百万电子伏特左右，即要比任何天然放射性物质所发出的  $\gamma$  射綫的能量来得大。

到了 1932 年，伊丽芙·居里和約里奥·居里又进一步发现，这种射綫在穿过石蜡或其他含氢物质时会使这些物质放出速度約为  $3 \times 10^7$  米/秒的质子来。如果认为这些质子的产生是由于原子核受到  $\gamma$  光子碰撞的結果，那么計算表明，这种  $\gamma$  光子的能量至少应该具有 50 百万电子伏特，否則就不可能給质子那么大的速度，然而这跟实际测得的数据 10 百万电子伏特有矛盾。后来恰德維克又对这种射綫在經過不同物质时的情况进行了系統的研究，他

指出,只有假定铍(Be)、硼(B)等轻元素的原子核在 $\alpha$ 粒子的轰击下,放出的不是 $\gamma$ 光子,而是一种质量跟质子差不多的中性粒子,才能解决上面的矛盾.恰德维克把这种中性粒子叫做**中子**.不久,这个假定就被其他许多实验证实了.

图9·10所示的是恰德维克用来表明中子穿过石蜡片时,能使石蜡放出质子来的实验装置.图中左边的容器I是用来产生中子的.其中有个金属盘P,上面涂着一层钋(Po)作为 $\alpha$ 粒子源;B是铍(Be)片,它在 $\alpha$ 粒子的轰击下就发出中子.图中右边的容器II是个带有铝箔窗W的电离室,即是一个简单的盖革计数器.放在电离室前面的是石蜡片D.

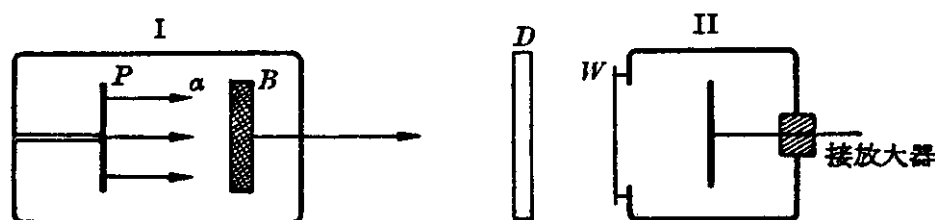
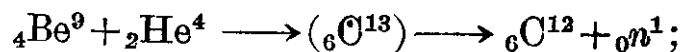


图9·10 探测中子性质的实验装置

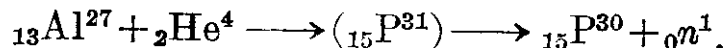
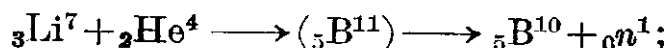
实验时,先不放石蜡片D,我们就会看到,在左右两容器相隔3厘米时,计数器上指出每分钟的粒子数是4.很明显,这并不等于说每分钟只有4个中子进入容器II.因为中子不带电,所以它在进入电离室后不能使其中的气体电离,而只有极少数的中子可以在撞击电离室器壁的过程中引起原子核的运动从而产生离子,因而计数器对进入容器II的中子计数是不精确的.如果在容器间放入一块铅片,计数器上的计数并不会减少,这表明中子的穿透能力是很强的.当我们在容器间放入一块石蜡片D时,计数器上的计数就大大地增多了,这说明含氢的石蜡片D在中子的轰击下放出了速度很高的质子,这些质子在容器II内产生了强烈的电离作用.如果取走石蜡片D,让中子直接进入容器II,则计数器上的计数就又回降到原来的数字.

因为中子是中性的粒子,它在磁场或电场中并不发生偏转,所以

我們不能利用它在磁場或電場中的徑迹來計算它的质量。但是当它穿过物质时，它将与物质中的原子核发生碰撞，从而把能量傳給原子核，使原子核运动。这种受到中子碰撞而发生反冲运动的原子核就叫做反冲核。根据这种碰撞情况利用动量、能量守恒定律就可以間接地把中子的质量推算出来。恰德維克就是利用这种方法得出中子质量接近于质子质量的結論。根据最新的数据，中子质量等于 1.008986 原子质量单位；而质子质量等于 1.007593 原子质量单位。因此我們可以把中子的符号写作为  ${}_0n^1$ ；于是前面提到的关于中子产生的核反应方程可以写作



此外，我們还发现，除了氧和碳以外，原子序数在 19 以下的輕元素，在  $\alpha$  粒子的轰击下大都能产生中子。例如



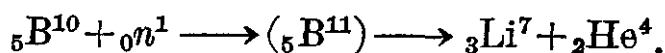
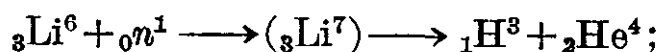
通常我們把这种核反应叫做  $\alpha$ - $n$  型核反应。由此可知，輕元素的原子核在  $\alpha$  粒子的轰击下不一定放出质子，也可能放出中子。

因为中子是中性子，很难使气体电离，所以中子不能使荧光物质发出閃光，也不能使乳胶片“感光”；同时我們也不能利用威耳逊云室来观察它的徑迹，或是利用盖革計数器来对它进行計数。因此我們只能用間接的方法来探测它的存在和它的能量值。例如当中子和原子核碰撞而产生反冲核时，这些反冲核在它們的徑迹上产生大量的离子，这些离子可以在威耳逊云室中被观察到，这样也就間接地探测到中子的存在。同时我們还可以根据反冲核的射程来确定中子的能量。又例如当中子在穿过乳胶片时，虽然中子本身并不能留下徑迹，但是它能使乳胶中輕元素的原子核发射质子，于是我們就可以根据这些质子在乳胶中的射程来推测质子的能量，从而間接地把中子的能量也推算出来。

因为中子是中性的粒子，它不象带电粒子那样容易和原子中的电子发生相互作用，所以当中子经过物质时，能量损失很少，这也就是中子具有很强的穿透能力的原因。中子可以穿透几十厘米厚的铅板。

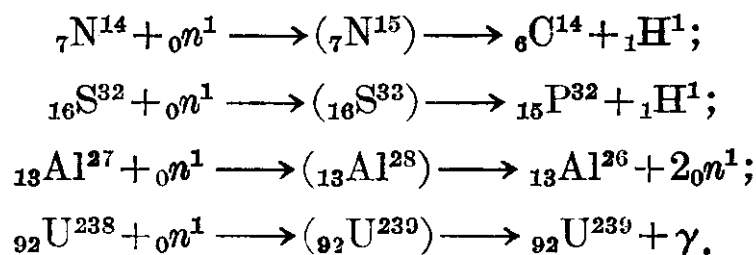
因为中子是中性的粒子，所以当它经过物质时，很容易接近原子核而使它发生嬗变。我们知道，用 $\alpha$ 粒子作为“炮弹”来轰击原子核时，命中的可能性是很小的，大约需要 $10^6$ 个 $\alpha$ 粒子“炮弹”才能使一个原子核发生嬗变。因为 $\alpha$ 粒子带正电，要受到原子核的排斥，故不易击中原子核，又因为绝大多数的 $\alpha$ 粒子在跟原子核发生碰撞以前，必须经过很多的原子，结果就把大部分的能量损失在使那些原子电离上，而剩下来的能量已经不足以侵入原子核，所以只有少数 $\alpha$ 粒子才能引起原子核的嬗变。中子的情况就不同，因为中子没有电荷，在经过原子时，不会跟核外电子相互作用而损失能量，所以中子可以自由地通过很多原子，这样命中原子核的机会就多了。因此，在核反应中，中子是一种很好的“炮弹”，中子几乎能使一切元素的原子核发生嬗变。例如卢瑟福曾经利用当时最快的 $\alpha$ 粒子作“炮弹”，也没有能引起氧原子核的嬗变；但是利用中子来轰击氧原子核，就能使它放出 $\alpha$ 粒子而嬗变成碳13了。

下面就来介绍几种由中子所引起的核反应。实验表明，不但高能的中子容易引起核反应，就是低能的中子也同样容易引起核反应，有时甚至比能量大的中子更为有效。例如有几种轻元素的原子核在低能的中子的轰击下会放出 $\alpha$ 粒子来。这种核反应通常称为 $n-\alpha$ 型核反应。如



一般用来检查中子是否存在的灵敏探测器就是利用上述核反应的原理制成的。它的构造很简单，就是在一个电离室的内壁上涂一层含硼的化合物，当中子进入室内时，由于碰撞内壁而产生的 $\alpha$ 粒

子可以使室内气体电离,这样就可以确定中子的存在.除  $n-\alpha$  型核反应外,还有  $n-p$  型、 $n-2n$  型的和  $n-\gamma$  型的核反应等.例如



核反应的种类很多,我们不仅可以用  $\alpha$  粒子和中子作“炮弹”,而且还可以用质子、氘核(重氢核  ${}_1\text{H}^2$ )、 $\gamma$  光子等粒子作为“炮弹”来轰击原子核,使它发生嬗变.实验表明,各种能量不同的粒子都有可能进入原子核,但是进入原子核的可能性的的大小却跟粒子所具有的能量有关,粒子所具有的能量越大,那么与原子核碰撞时,进入原子核的机会也就越多.因此为了提高“炮弹”的能量,就可以运用加速器<sup>①</sup>来获得能量高达几十个甚至几百个百万电子伏特的高速粒子.用加速的碳原子核、氮原子核、氧原子核等来做“炮弹”轰击原子核时,可以获得某些罕见的不稳定同位素和新元素.如最近用加速的碳原子核  ${}_6\text{C}^{13}$  来轰击镅 (Am) 时,发现了电荷数  $Z$  等于 102 的超铀元素.

## § 9.6 原子核的组成

早在十九世纪初,人们根据元素的原子量都接近于整数的事实就以为所有元素都是由氢原子组成的.到了 1919 年,卢瑟福用人为方法使原子发生嬗变的实验成功以后,看到许多种元素的原子核在  $\alpha$  粒子的轰击下都能发射质子,就更加相信一切原子核都是由氢原子核——质子组成的.另一方面由于人们看到许多天然放射性元素的原子核会放出电子,似乎电子也是原子核的组成部分

<sup>①</sup> 加速器是用人工方法来产生高速带电粒子的设备.加速器的种类很多,例如静电加速器是通过一个很高的电压来加速带电粒子的加速器,回旋加速器是通过一个不很高的电压来反复多次地加速带电粒子的加速器,电子加速器是专门用来加速电子的加速器等.

分之一，于是就有人設想任何原子核都是由  $M$  个质子和  $M-Z$  个电子所組成。因为这种假說可以用来解釋原子核的质量数和电荷数，所以直到 1932 年还被普遍地认为是正确的。

但是随着原子物理学的发展，一門专门描述“微观世界”現象的理論——波动力学逐渐形成了。所謂“微观世界”就是指有关分子、原子和原子核等微观粒子的世界。根据波动力学所論述的法則可以証明，在原子核里不可能有电子存在，如果原子核里确实存在着电子，那么它的能量就應該比实验中測得的数值大得多。

自从中子被发现以后，另一种关于原子核組成的观点出现了。苏联物理学家伊凡宁科认为原子核是由质子和中子所組成的；在原子核中，质子的数目等于它的电荷数  $Z$ ，中子的数目等于它的质量数和电荷数的差  $M-Z$ 。这个假說成功地解决了上述矛盾，不久就获得了普遍的承认。从此，质子和中子就統称为**核子**。

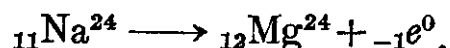
根据原子核的质子-中子假說，氮原子核  ${}_{7}\text{N}^{14}$  的质量数是 14，电荷数是 7，所以它是由 7 个质子和 7 个中子組成的； $\alpha$  粒子即氦原子核  ${}_{2}\text{He}^{4}$  是由 2 个质子和 2 个中子組成的。因为氢原子核  ${}_{1}\text{H}^{1}$  里只有 1 个质子而沒有中子，因此氢原子核就是质子。

根据这个假說还可以說明，各种元素的同位素存在是因为它們原子核中的质子数相同而中子数不同的緣故，所以它們各具有不同的特征。例如，在鈾的同位素中： ${}_{92}\text{U}^{234}$  是由 92 个质子和 142 个中子組成的； ${}_{92}\text{U}^{235}$  是由 92 个质子和 143 个中子組成的；而  ${}_{92}\text{U}^{238}$  是由 92 个质子和 146 个中子組成的。天然的鈾就是由 99.28% 的鈾 238、0.710% 的鈾 235 和 0.006% 的鈾 234 等組成的。

既然原子核中沒有电子，为什么很多元素的原子核会发生  $\beta$  蜕变而放出电子来呢？原来电子是在原子核发生嬗变时产生的，原子核发射电子的情形就好比原子发射光子一样。我們知道，原子內并不存在光子，但是当原子中处于激发状态的电子从一个能

級跳回到另一个較低的能級时就放出具有一定能量的光子；同样当原子核从一种状态轉变为另一种状态时，就有电子发射出来，虽然在原子核里并不存在电子。

原子核在放射电子的时候，它本身究竟发生什么变化呢？还是让我们举例来说明。例如，放射性鈉  ${}_{11}\text{Na}^{24}$  在发生  $\beta$  蜕变时，放出电子同时变成鎂 24。这一蜕变过程可以写作



${}_{11}\text{Na}^{24}$  与  ${}_{12}\text{Mg}^{24}$  有什么不同呢？这两种原子核的质量数是相同的，但电荷数却不同。这就是說，放射性鈉的原子核是由 11 个质子和 13 个中子組成的；而鎂原子核是由 12 个质子和 12 个中子組成的。由此可知，在  $\beta$  蜕变的过程中，放射性鈉的原子核里一个中子变成了质子，于是就形成了鎂 24 的原子核，同时在原子核的周圍产生了一个自由电子。

为什么中子会变成质子呢？科学研究表明，原子核里的质子和中子是可以互相变换的，或者說质子和中子不过是核子的两种状态，核子可以处于“质子”状态，也可以处于“中子”状态。在一定的条件下，原子核里的核子可以由一个状态过渡到另一个状态：当核子从“中子”状态过渡到“质子”状态时，原子核就放出电子；当核子从“质子”状态过渡到“中子”状态时，原子核就放出正电子<sup>①</sup>。

核子在原子核里集聚得非常紧密。例如鉛原子核  ${}_{82}\text{Pb}^{207}$  的体积約为  $4 \times 10^{-36}$  厘米<sup>3</sup>，其中却有 82 个质子和 125 个中子，可見原子核的密度是十分巨大的，它的数量級达  $10^{14}$  克/厘米<sup>3</sup>。可以設想，如果把原子核一个个地排起来装满一个火柴盒，那它的重量就相当于喜馬拉雅山的重量。

我們知道，质子都帶有单位正电，它們彼此間的距离又这样小，显然它們之間的电磁斥力一定很大，那又是什么作用力使它們

<sup>①</sup> 正电子是质量跟电子相等，所带正电量等于电子所带負电量的微观粒子。是在 1932 年被发现的。



这样紧密地集聚在一起呢？是万有引力嗎？不可能。因为质子間的万有引力要比靜电斥力小得多。由此可見，在原子核里，在各个核子之間一定存在着一种引力，而这种引力的总和一定要比质子間电磁斥力的总和大得多，只有这样才能使原子核保持稳定。我們就把核子間的这种引力称为**核子力**。实验指出，核子只有在集聚得非常紧密的情况下才呈现出强大的核子力，或者说只有当两个核子間的距离在 $3 \times 10^{-13}$  厘米<sup>①</sup> 以內时，它們之間的核子力才远远超过电磁斥力；当两个核子間的距离超出 $3 \times 10^{-13}$  厘米以外，它們之間的核子力就立刻显著地减小，以至于小到可以忽略的地步。也正是这个原因，原子核里的核子只与它周圍的几个核子发生作用。

核子在原子核里是怎样分布的呢？关于这个问题到目前为止还没有完全得到解决。科学家們曾經提出过好几种核模型，每一种核模型都只能用来解释某一些实验现象，而至今还没有一种核模型能够解释所有的实验事实。

1937年，玻尔曾經提出过一种所謂原子核的液滴模型。玻尔认为，可以把原子核比作液滴，原子核里的核子可以想象为液滴里的分子。在原子核里，核子只与它周圍的几个核子发生作用，这种情况跟液滴里的分子情况十分相似，而液滴里分子的不断运动也相似于原子核里核子在不断地运动。玻尔利用这个液滴模型成功地解释了原子核发生核反应的过程。他把原子核受到粒子轰击后形成不稳定复核的过程与液滴受热相比拟，而把粒子从复核里飞出的过程看作是液滴在蒸发。图9·11就是玻尔对核反应过程解释的示意图。其中图(a)表示在原子核“液滴”里插有一个具有两个刻度的温度计，左面的刻度是以百亿度为单位，右面的刻度是以百万电子伏特为单位；一颗中子正在向原子核“液滴”射来。图(b)表示中子侵入了原子核內，“液滴”温度升高到八百亿度，核內所有

① 这一距离要比原子核的半径小得多。



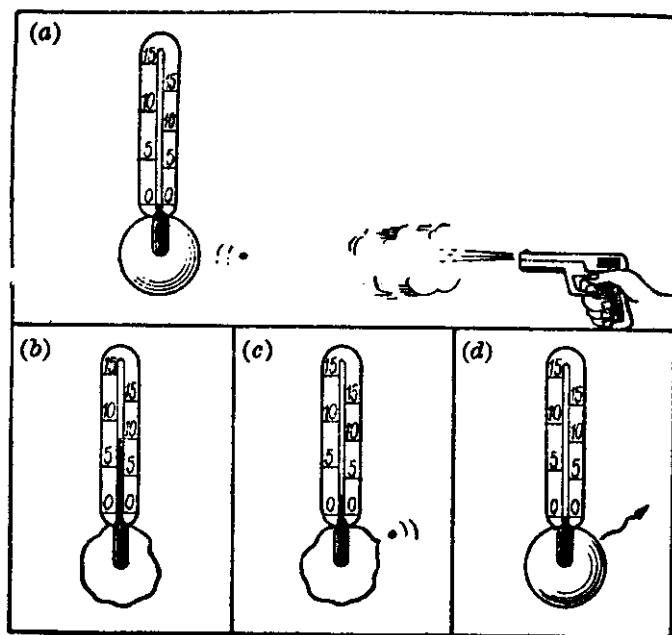


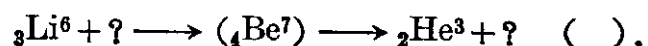
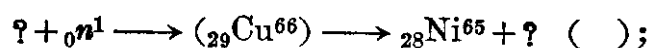
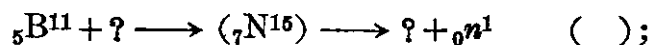
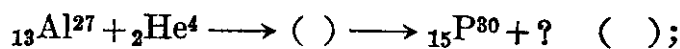
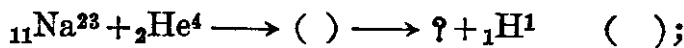
图 9.11 玻尔对核反应过程解释的示意图

的核子都被“激发”了，“液滴”处于振动的状态下。图(c)表示从原子核“液滴”里“蒸发”出一个粒子，于是温度降低。图(d)表示原子核放出了  $\gamma$  射线的光子后恢复正常状态。

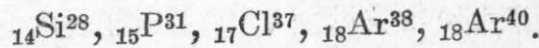
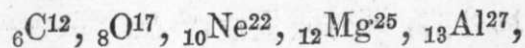
此外，还有一种所谓  $\alpha$  粒子模型，它认为在原子核里，两个质子跟两个中子常常更紧密地结合在一起形成一个  $\alpha$  粒子。这种模型可以用来解释某些放射性元素能放出  $\alpha$  粒子的现象。

### 习题 9.4~9.6

1. 卢瑟福通过什么实验第一次发现原子的人为嬗变现象？
2. 嬗变和蜕变有什么区别与联系？
3. 中子是怎样被发现的？它具有哪些特性？我们为什么不能利用威耳逊云室或者汽泡室来探测中子的径迹？
4. 什么叫做核反应？根据给出的条件，完成下列各核反应方程，并指出核反应的类型：

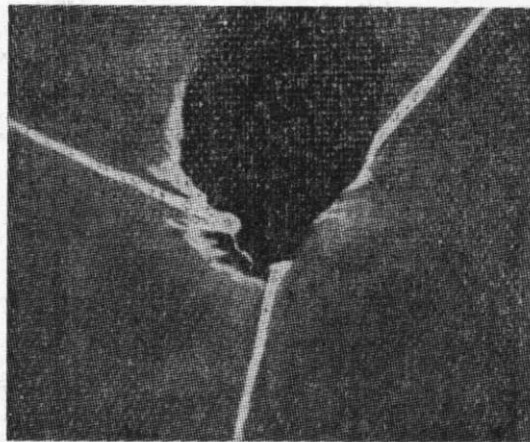


5. 写出下列各原子核中的质子数和中子数:



6. 既然原子核中并没有电子, 那为什么很多元素的原子核会发生  $\beta$  蜕变而放出电子来呢? 原子核在放射电子的时候, 它本身会发生什么变化?

7. 在威耳逊云室中用高速质子轰击硼核( ${}_5\text{B}^{11}$ )时, 可以观察到三条相同的几乎是从一点发出的径迹(见附图), 这说明硼核俘获了质子后嬗变成三个相同的粒子, 试问这些是什么粒子呢? 并写出核反应方程来.



(第7题)

## 本章提要

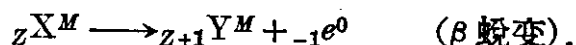
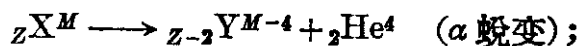
1. 用来探测各种射线或粒子的仪器就叫做探测器。乳胶片、威耳逊云室和汽泡室是观察射线或粒子在一定物质中径迹的探测器; 闪烁镜、闪烁计数器和盖革计数器是记录射线或粒子进入仪器的信号的探测器。

2. 天然放射性射线是由  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  等三种性质不同的射线组成的。  $\alpha$  射线是带正电的高速粒子流;  $\alpha$  粒子就是失去 2 个电子的氦原子, 即氦原子核。  $\beta$  射线是带负电的高速粒子流;  $\beta$  粒子就是高速的电子。  $\gamma$  射线是一种光子流。

3. 在有着大量原子核的放射性物质中, 在相同时间内发生蜕变的原子核数与原子核总数的比总是一定的, 这个比值叫做放射性元素的蜕变常数  $\lambda$ 。 在一定量的放射性元素中, 使一半原子核发生蜕变所需要的时间叫做放射性元素的半衰期  $T$ , 半衰期与蜕变常数之间的关系是

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}.$$

4. 一个放射性原子核在  $\alpha$  蜕变后, 电荷数(原子序数)  $Z$  减少 2, 它在周期表内的位置就向左移 2 格, 同时质量数  $M$  减少 4. 一个放射性原子核在  $\beta$  蜕变后, 电荷数(原子序数)  $Z$  将增加 1, 它在周期表内的位置就向右移 1 格, 但质量数  $M$  却保持不变. 这样的规律叫做位移规律. 即



5. 所谓嬗变是一种原子变成了性质上不同的另一种原子的现象. 原子核自发地进行嬗变叫做蜕变; 原子核由于受到外来的原因而引起的嬗变叫做核反应.

6. 原子核是由质子和中子所组成的, 在原子核中, 质子的数目等于它的电荷数  $Z$ , 中子的数目等于它的质量数和电荷数的差  $M - Z$ . 质子和中子统称为核子.

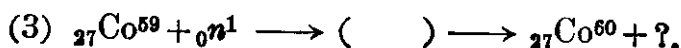
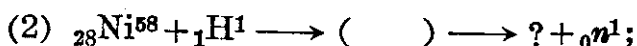
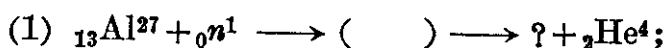
## 复 习 题 九

1. 有一块放射性物质, 其半衰期是 20 天, 问: (1) 几天后这块放射性物质减少为它原来的  $1/4$ ? (2) 几天后这块放射性物质的  $7/8$  被蜕变掉? (3) 这种放射性物质的蜕变常数有多大?

2. 质量数分别是 12、13、14、15、16、17 的氮核, 其中各含有多少个质子和中子? 分别列出它们的原子核符号来.

3. 镁核 ( ${}_{12}\text{Mg}^{25}$ ) 俘获氘核 ( ${}_1\text{H}^2$ ) 时, 硅核 ( ${}_{14}\text{Si}^{30}$ ) 俘获质子时都能放出中子并嬗变成另一种新原子核, 试列出它们的核反应方程.

4. 完成下列各核反应方程, 并指出其反应类型:



## 第十章 原子核能

### § 10·1 原子核的結合能

前面讲过,原子核是由质子和中子組成的,越重的元素(原子序数越大的元素),核內含有核子数越多,质量数也越大.原子核的体积是很小的,直徑一般在  $10^{-13} \sim 10^{-12}$  厘米左右.核內有帶正电的质子,它們要相互排斥,由于任何两个核子之間都存在着互相吸引的**核力**,才使得許多核子能够結合得很紧密,成为稳定的原子核.根据以前学过的知識,我們知道:任何两个相互作用着的物体之間都有势能存在,如果它們是相互吸引的,那么当它們彼此靠近的时候,就要放出能量.例如,水蒸汽分子互相靠近、凝聚成小水滴的时候,放出一定数量的內能;几个原子結合成为分子的时候,要放出化学能.同样,若干个核子結合成为原子核的时候也要放出一定的能量,这种能量叫做**結合能**.由于核力很强,許多核子結合成为原子核时,放出的結合能也很大,原子核釋放出的結合能跟組成这种原子核的核子总数的比值,也就是平均每个核子所釋放出的結合能,叫做**平均結合能**.核子結合成为不同元素的原子核时,釋放出的平均結合能是各不相同的,对于那些釋放出較多結合能的元素的原子核来讲,核子的平均結合能較大,原子核結合得較紧密,核也較稳定.所以原子核的平均結合能的大小,可以看作是原子核紧密程度的标志.当从平均結合能較小的核变成为平均結合能較大的新元素的原子核时,有一定数量的能量被釋放出来,这就是**原子核能**,簡称为**原子能**.

图 10.1 所示的曲线表明各种原子核的每一个核子平均结合能的大小,从图中可以看出:对核子总数少(原子量小)的轻核与核子总数较多(原子量较大)的重核来讲,核子的平均结合能较小;而对原子量中等的原子核来讲,核子的平均结合能一般都比较大,数值也很相近;核子总数在 125 左右的原子核,核子的平均结合能最大,约为 8.6 百万电子伏特,因而这种原子核也就最稳定。在曲线的左端,还有几处突起的地方,它们分别是  $\text{He}^4$  (氦)、 $\text{Be}^8$  (铍)、 $\text{O}^{12}$  (碳)、 $\text{O}^{16}$  (氧) 等所在的位置,这些元素的原子核也是结合得较紧密的。结合能曲线指出:把很轻的原子核聚合成为较重的原子核,或者把重核分裂成为中等质量的原子核,都能从原子核内释放出大量的能量。例如,铀 238 ( ${}_{92}\text{U}^{238}$ ) 是由 92 个质子和 146 个中子构成的,它每个核子的平均结合能是 7.5 百万电子伏特,这 238 个核子缔结成为  ${}_{92}\text{U}^{238}$  的原子核时,总共可以放出的结合能是  $7.5 \times 238 = 1785$  百万电子伏特;如果这 238 个核子不是构成铀 238 而是构成两个质量数中等的原子核,已知质量数中等的原子核的每一个核子平均结合能是较大的,假使以每一个核子的平均结合能为 8.6 百万电子伏特计算,那么这 238 个核子构成两个中等的原子

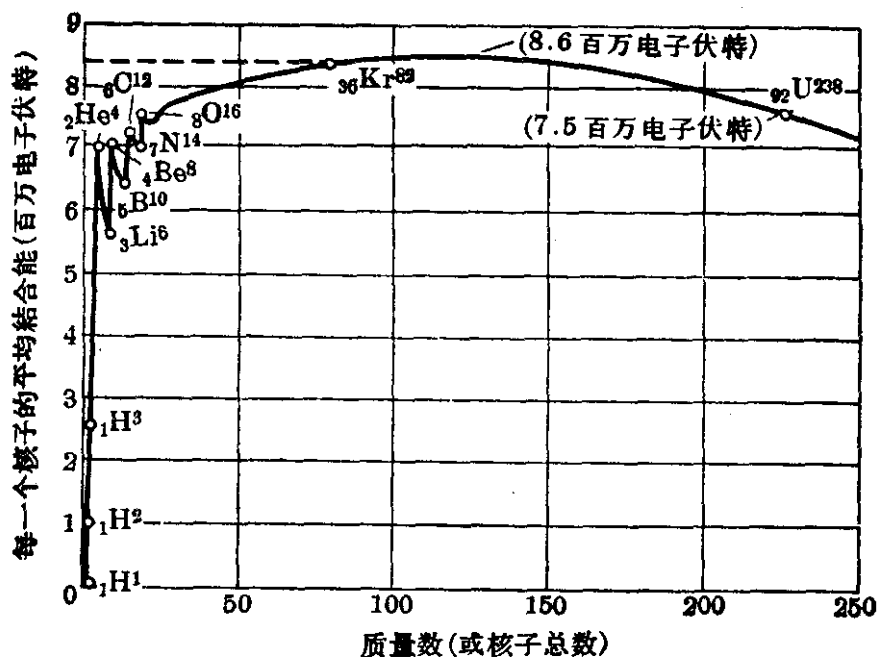
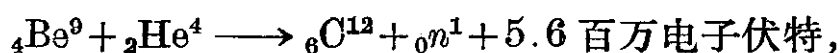


图 10.1 平均结合能曲线

核所放出的結合能将是  $8.6 \times 238 = 2047$  百万电子伏特。这表明：一个  ${}_{92}\text{U}^{238}$  的核分裂成为两个原子量中等的原子核时，可以釋放出： $2047 - 1785 = 262$  百万电子伏特的原子核能。又如，氦( ${}_{2}\text{He}^4$ )的原子核是由 2 个质子和 2 个中子組成的，它每一个核子的平均結合能是 7.03 百万电子伏特，这四个核子組成氦核时总共放出結合能  $7.03 \times 4 = 28.12$  百万电子伏特；如果这四个核子不是聚合成一个氦核，而是聚合成两个氘核( ${}_{1}\text{H}^2$ ) (每一个氘核是由一个质子和一个中子組成的)，氘核的每个核子平均結合能是 1.09 百万电子伏特，那么它們組成氘核时总共放出的結合能是  $1.09 \times 4 = 4.36$  百万电子伏特。从平均結合能的大小来看，氦核比氘核結合得更紧密、更稳固，如果能将两个氘核聚合成为一个氦核，那就能得到  $28.12 - 4.36 = 23.76$  百万电子伏特的結合能。以上是从理論上討論获取原子核能的可能性，实际上的情况又是怎样的呢？我們很早就知道，蜕变和許多人为嬗变都伴有原子能的釋放，(当然，并不是所有的嬗变都釋放能量，也有些核反应是吸收能量的。) 以鈾或鐳的蜕变为例：它們蜕变为新的元素时，质量数减小，結合能增大，这也就是要釋放出一定量的結合能。1 克鐳經過若干次蜕变以后，完全变成稳定的鉛，在这过程中，它总共放出 34 亿卡的热量，这个数目之大是惊人的，它相当于 1 克上等好煤燃燒时所放出热量的 42.5 万倍。1 克鈾( ${}_{92}\text{U}^{238}$ ) 全部完成一次  $\alpha$  蜕变所放出的热量也有 4 亿卡。虽然这些放射性物质在完成蜕变时能够放出大量的能量，但是，由于它們蜕变的半衰期很长，釋放原子能的过程也就非常緩慢，功率非常小，以致于实际上不能有效地加以利用。例如，鐳的半衰期是 1590 年，即 1 克鐳要过 1590 年才有半克鐳发生了蜕变；鈾的半衰期更长，鈾 238 的半衰期是 45 亿年，这就是說，一公斤鈾在一天的時間內，由于蜕变而放出的热量就只有 0.00017 卡，而放射性元素蜕变的速度又不是人力所能改变的，所以通过蜕变来获取原子能是沒有实际意义的。

我們再从原子核的人为嬗变来討論获得原子能的可能性，下面是两个人为嬗变的核反应方程式：



从結合能曲綫可以知道，这两个核反应式中的生成物（ ${}_6\text{C}^{12}$  和  ${}_2\text{He}^4$ ）都比靶核（ ${}_4\text{Be}^9$  和  ${}_3\text{Li}^7$ ）的平均結合能大，它表明这两种嬗变都伴有原子能的釋放。按 1 个质子击中鋰核嬗变时放出 17.3 百万电子伏特計算，一克质子完全击中鋰的原子核，可以得到  $3.9 \times 10^{11}$  卡热量，相当于 49 吨好煤完全燃燒时所发出的热量，这个数量也是很可观的。可是，問題在于用来轰击靶核的质子（或  $\alpha$  粒子）并不是很容易就能击中原子核的，在一百万个质子中，一般只有一个到两个质子能够击中靶核，为了要使 1 克质子完全击中鋰核，那就要用 1 百万克质子，源源不断地供給这样多的质子，不仅在技术上是相当困难的，而且成本也很高，所以用嬗变的方法来获取大量的原子能仍旧是得不偿失的。

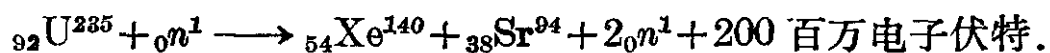
人們有效的获得大量的原子能，实际是在发现了原子核的裂变和鏈式反应以后开始的。

## §10·2 裂变．鏈式反应

1939 年科学家在用中子轰击鈾原子核时，发现鈾原子核在俘获了一个中子以后，分裂成为两个原子量中等、质量相近的原子核，这种現象叫做鈾核的**裂变**。鈾核在裂变的时候，要放出二个到三个中子，同时釋放出大量的結合能，正如前面在討論結合能曲綫时所得出的結果一样，每一个鈾核发生裂变时釋放出来的能量实际上都在 200 百万电子伏特左右，1 公斤鈾完全裂变釋放出来的能量可以达到  $2 \times 10^7$  千瓦小时，相当于二百万公斤（2000 吨）最好的煤完全燃燒时所釋放出来的化学能；并且鈾核在裂变时釋放出几个中子，从而有可能引起其他鈾核发生新的裂变，使裂变反应继

續不断地进行下去，这样就为人们获得大量原子能提供了实际的可能性。

鈾核分裂时产生的碎片(原子量中等的原子核)，有許多种可能的情況，下面的裂变反应式是其中的一种：



除此之外还可能生成： ${}_{56}\text{Ba}$  和  ${}_{36}\text{Kr}$ 、 ${}_{51}\text{Sb}$  和  ${}_{41}\text{Nb}$  等。

鈾核受到中子轰击也有裂为三块或四块碎片的可能(如书后插图 2 所示)，这是我国科学家錢三强、何澤慧在 1946 年首先发现的，鈾核的三分裂或四分裂的可能性实际上要比二分裂的可能性小得多。

实验指出，用中子轰击鈾核还会产生下面一些可能情况：有的鈾核俘获了一个中子以后，只发生嬗变，同时发出  $\gamma$  射线；也有的鈾核把中子弹了出去，既不吸收中子也不发生核变化。

一般地说，鈾核的裂变产物(碎片)可能有三、四十种之多，裂变时释放出来的结合能大部分是以碎片的动能形式表现出来，碎片以很大的速度向相反的方向飞开，然后经过碰撞把动能传递给周围的物质，以增加它们的内能。裂变时从原子核内释放出来的结合能，分配的情形大致如下：

|                |            |
|----------------|------------|
| 碎片的动能          | 162 百万电子伏特 |
| 第二代中子的动能       | 6 百万电子伏特   |
| 碎片发生蜕变释放的能量    | 21 百万电子伏特  |
| $\gamma$ 射线的能量 | 6 百万电子伏特   |
| 总 計            | 195 百万电子伏特 |

每一个鈾原子核发生裂变时释放出来的能量是很大的，同时它的下一代中子又可能引起其他鈾核发生裂变，释放出更多的能量，再产生更多的中子；这样裂变一經开始就有可能自动地持续下去(如图 10.2 所示)，我们把这种裂变自动持续下去的反应过程称做**鏈式反应**。



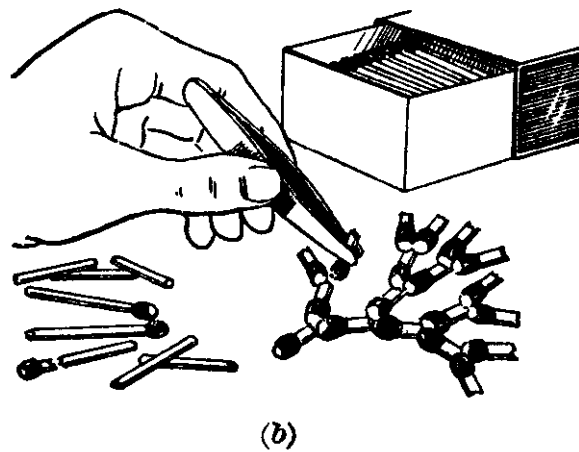
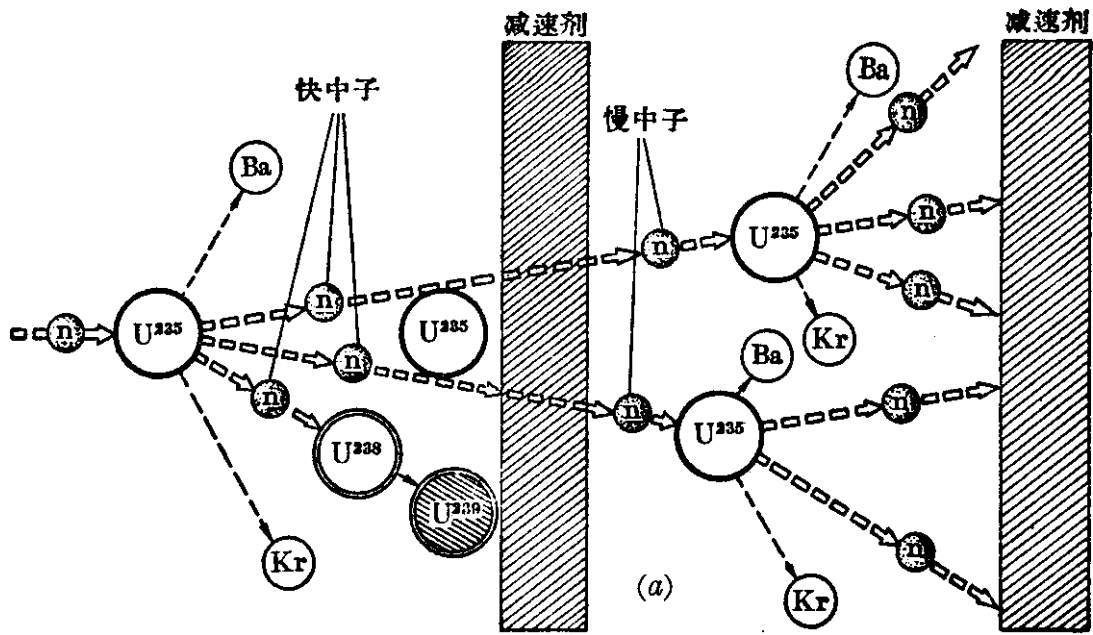


图 10·2 鏈式反应的示意图

鏈式反应不是在任何情况下都能进行的，要鏈式反应持續进行就必须每一个核分裂所放出的中子当中，至少平均要有一个中子能够再引起新的核分裂才行，如果我们把裂变所产生的第二代中子数跟产生它的上一代的中子数的比叫做中子的**再生率**，显然，产生鏈式反应的条件必须是中子的再生率大于1。

怎样才能使中子的再生率大于1呢？先让我们简单地讨论一下，中子在鈾块中可能发生的几种遭遇：

(1) 中子击中鈾 235 的核。只要中子击中鈾 235 的核，就有

很大的可能引起裂变,使中子数增多. 中子的速度越慢,被铀 235 吸收并且引起裂变的可能性就越大,如  $V \approx 2200$  米/秒、 $E \approx 0.025$  电子伏特的慢中子引起铀 235 裂变的可能性就比较大.

(2) 少数能量在 1.1 百万电子伏特以上的中子击中铀 238 的核时,有可能引起铀核的裂变,但是,铀核把中子弹出去而不裂变的可能性更大. 被铀核弹出去的中子能量逐渐降低到 1.1 百万电子伏特以下;能量在 1.1 百万电子伏特以下的中子,都不能引起核分裂,多数是被铀 238 所吸收,使铀 238 嬗变为钍,中子数减少.

(3) 中子被铀块中的杂质所吸收,不再释放出中子来,于是中子数减少.

(4) 中子在原子的空间里穿过,并没有击中原子核,最后飞出铀块的表面,中子数减少.

在这几种可能发生的情况下,只有(1)和(2)中引起裂变的遭遇对中子的增殖是有利的,也只有在这些有利的遭遇中所增加的中子数比其余几个遭遇中所减少的中子数来得大时,中子的再生率才能大于 1,链式反应才能持续地进行下去.

所以,在发生链式反应的实际装置中,总是尽量减少铀块中的杂质,用铀 235 含量较多的浓缩铀,或者用纯铀 235 来做裂变物质;同时裂变物质的总体积做得足够大<sup>①</sup>,使得中子不容易飞出它的表面,或者再在裂变物质外面包一层反射中子的物质,以减少中子的损失,增加它的再生率.

如果用纯净的铀 235 做裂变物质,当然链式反应是能够进行的;但由于中子的再生率过大,链式反应就会进行得非常快,功率也非常大,大量的原子能就会以爆发的形式释放出来,原子弹的爆炸就是这种形式的链式反应. 如果要利用原子能作为动力,就必须控制链式反应的进行,这时候,控制链式反应的功率,就是一个很重要的问题.

<sup>①</sup> 使得裂变物质能够维持链式反应的最小体积,通常称做临界体积.

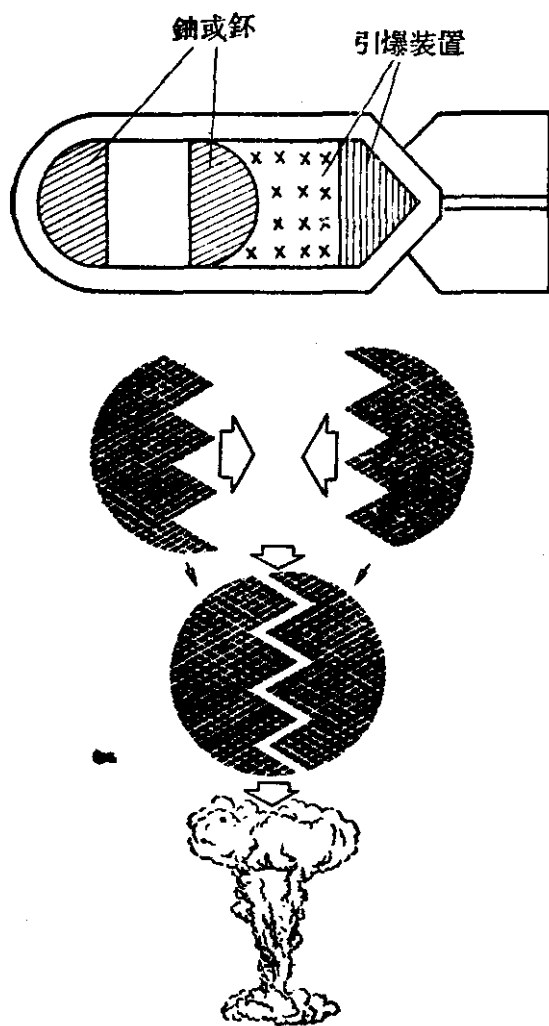


图 10·3

原子彈的構造如图 10·3 所示：在彈壳內裝着兩塊互相分開，各小於臨界體積的裂變物質（如鈾或鈾），外側有普通的引爆裝置，點燃引爆裝置就能使裂變物質合在一起，於是由於裂變物質的體積超過臨界體積而爆炸。

### §10·3 原子反應堆

使鏈式反應能夠有控制地進行的裝置叫做**原子反應堆**，簡稱**原子堆**或**反應堆**。

#### 1. 反應堆幾個主要的組成部分

(1) **核燃料** 反應堆中能夠發生裂變的物質叫做核燃料。一般不用純淨的鈾 235，而用濃縮鈾（或者鈾 239、鈾 233）作反應堆中的核燃料，雖然濃縮鈾中含有的鈾 235 比天然鈾中高得多，但是

仍然含有一定量的鈾 238. 鈾 238 很容易吸收中子, 尤其是能量为几十电子伏特的中子(但是能量低于几十电子伏特的中子被鈾 238 吸收的可能性又开始减小); 而鈾 235 吸收中子的机会总是随着中子能量的减小而增大的, 当中子能量减小到 0.025 电子伏特的时候, 被鈾 235 吸收、从而引起裂变的机会要比被鈾 238 吸收掉的机会大 190 倍. 所以, 要防止裂变时新生的中子全被鈾 238 吸收掉, 就必须很快地降低中子的速度, 使它在没有全被鈾 238 吸收以前, 有的中子的能量已经减小到 0.025 电子伏特左右, 这样就使得链式反应在用不纯净的鈾 235 作裂变物质的情况下也能够进行.

(2) **减速剂** 反应堆中用来降低中子速度的物质叫做减速剂. 使中子减速一般是用碰撞的方法, 中子每与原子核碰撞一次, 就会失去一定的能量. 中子的质量是很小的, 被碰撞的原子核质量越小, 它的速度就越容易被改变, 中子就越容易把能量传递给它, 这样, 中子本身的速度也就减小得越快. 例如, 要使得能量为 1.75 百万电子伏特的快中子, 减速为 0.025 电子伏特的慢中子, 用不同质量的元素做减速剂时, 所需要与中子碰撞的次数也就不同. 具体的次数可见下表:

| 减 速 剂   | ${}_1\text{H}^1$ | ${}_1\text{D}^2$ | ${}_2\text{He}^4$ | ${}_4\text{Be}^9$ | ${}_6\text{O}^{12}$ | ${}_8\text{O}^{16}$ | ${}_{92}\text{U}^{235}$ |
|---------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 碰 撞 次 数 | 18               | 24               | 41                | 50                | 110                 | 145                 | 2100                    |

减速剂质量要比较小, 吸收中子的本领要比较小, 并且密度要比较大, 因为密度大就可以增加与中子碰撞的机会, 所以一般都用液态或固态物质而不用气态物质做减速剂. 象水(含氢)、重水<sup>①</sup>(含氘)、液态金属钠等是液态的减速剂, 氧化铍(含铍)、石墨(含碳)就是固态的减速剂.

<sup>①</sup> 重水的分子是由两个氘( ${}_1\text{H}^2$ ) 原子和一个氧原子组成的, 因为重水吸收中子的本领比水小得多, 所以重水做减速剂比水好,

(3) **控制棒** 控制棒是用来控制鏈式反应速度和功率大小的装置。一般是用能够强烈吸收中子的物质(鎳或硼)来做的。由于鏈式反应进行得很快,大概在一秒钟內可以产生一千代中子,所以反应速度如果不加以控制,能量就会一下子釋放出来,容易引起爆炸。控制棒是和自动控制系统联系着的,当反应速度太快的时候,控制棒就会向反应堆里伸进去一些,吸收中子的数目随着增多,反应的速度就会减慢;当反应的速度太慢的时候,控制棒就被拉出来一些,所吸收的中子数就越少,反应的速度就会自动加快。通过控制棒对中子再生率的控制,反应堆的功率的大小也就可以得到自动的調节。下表所列的数据具体說明了每秒钟所发生裂变的核子数跟功率大小的关系

|                  |                  |                  |                  |                  |       |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|
| 一秒钟內裂变的核数<br>(个) | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>18</sup> | 10 <sup>19</sup> | ..... |
| 放出的功率(千瓦)        | 300              | 3000             | 30,000           | 300,000          | ..... |

(4) **載热剂** 載热剂是把反应堆里产生的巨大热量向外面輸送的傳热材料。鏈式反应釋放出来的大量原子能,如果不輸送出来就不能加以利用,同时反应堆也会由于温度过高而毀坏。載热剂在封閉的循环系統中流动着,通过热交换把热量輸送到动力装置中,同时又降低了反应堆的温度,所以載热剂又称做冷却剂。这种傳热用的材料要求导热的本领大,吸收中子的本领小,沸点比較高(液体載热剂)。如:水、重水、液态金属鈉等都是常用的載热剂(冷却剂)。

(5) **保护层** 在进行鏈式反应的过程中,反应堆要放射出大量的 $\gamma$ 射綫和中子,为了防止这些射綫对人的伤害,反应堆总是安放在很厚的水泥保护层里,这些射綫在穿过保护层的时候,极大部分都被吸收了。

根据所用的核燃料、减速剂和載热剂的不同,反应堆可以分成

各种不同的类型，如石墨型、重水型等等。图 10·4 就是石墨型反应堆的构造示意图，用天然铀或浓缩铀条做燃料，石墨做减速剂，镉棒和铀条都插在石墨堆中，中子穿过石墨时，与碳核碰撞而很快地减速为慢中子，上下移动镉棒就可以控制链式反应的速度。反应过程中所产生的巨大热量，由液态金属钠输送到外面来，再把热量传给水，然后传给动力装置。石墨型反应堆的成本比重水型反应堆低。世界上第一座原子反应堆(1942年12月建成)就是石墨型的。

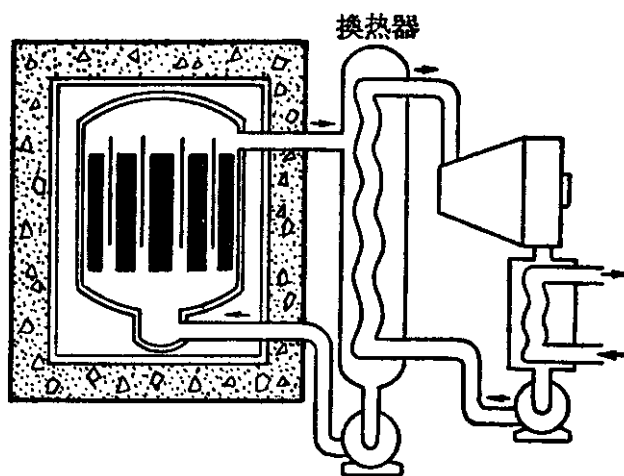


图 10·4 石墨型反应堆

图 10·5 是另一种类型——重水型反应堆的示意图。这种反应堆的结构基本上和石墨型相似，但是它的减速剂和载热剂都是用重水，这是和石墨型反应堆不同的地方。用重水作减速剂的效果比石墨好，所以要使中子的再生率大于1，反应堆的体积可以

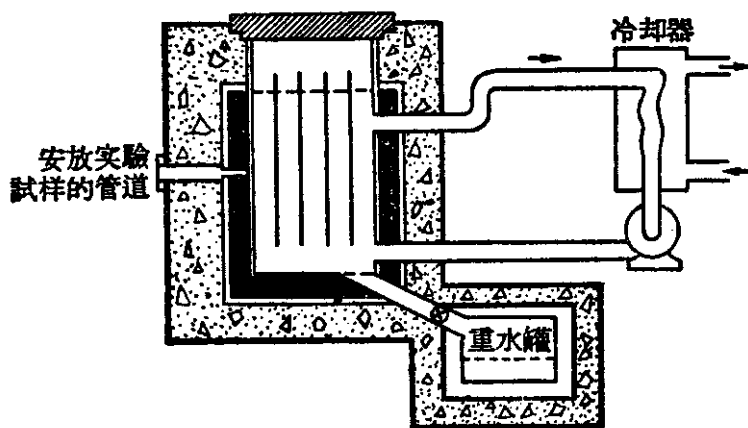


图 10·5 重水型反应堆

比石墨型反应堆小一些。1958年6月，我国建成的第一座反应堆就是重水型的，这座供实验用的原子反应堆功率为7000千瓦，最大功率可达10,000千瓦。

## 2. 原子核反应堆的用途一般有下列几方面

(1) 用来获取原子能 反应堆里所产生的大量的热可以使热交换器中的水变成蒸汽，蒸汽通入汽轮发电机后就能发电。图10.6是原子能发电站的示意图，一个十万千瓦的原子能发电站，每天只要消耗几百克铀，而同样功率的火力发电站每天却要消耗几百吨煤！利用原子能发电可以节省大量的燃料和昂贵的运输费用，对于缺水、缺煤、交通不便的地区，原子能发电站就显示出更大的优越性来。原子能发电站的投资费虽然比火力发电站略高一些，但是因为使用的燃料比较经济，生产出来的每度电的价格仍然要比火力发电站的低一些。随着科学技术的进步，原子能动力的价格是一定会越来越低的。

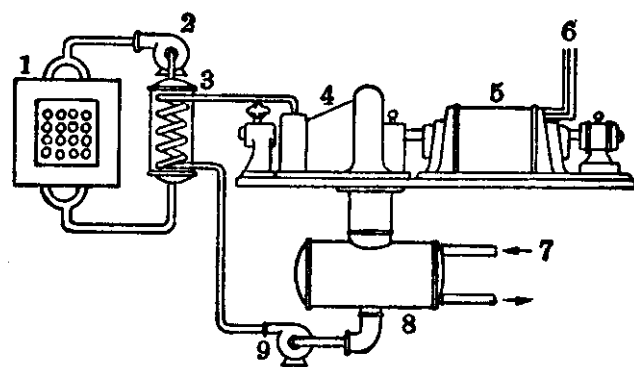


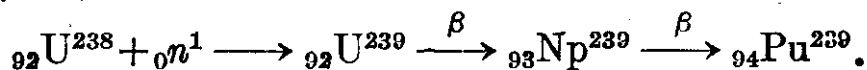
图 10.6 原子能发电站示意图

1—反应堆；2—气泵；3—换热器；4—汽轮机；5—发电机；  
6—接到用电处；7—进水泵；8—冷凝器；9—水泵

(2) 用来产生大量的中子 反应堆中所产生的大量中子，可以用来进行各种原子核物理的实验研究工作。

(3) 用来生产核燃料 反应堆中还可以生产一些象钚 239 和铀 233 之类的裂变物质。例如：天然铀或浓缩铀中的铀 238 受到中子的轰击以后，就可能生成铀 239，再经过一系列的蜕变，就成

为钚 239。反应式如下：



这些裂变物质可以做为核燃料，也可以用于原子爆炸。

(4) 用来生产放射性同位素 反应堆中大量的裂变产物(碎片),都是具有放射性的同位素(称做放射性同位素),反应堆中产生的大量中子,也可以用来制取放射性同位素,原子反应堆可以说是制造放射性同位素的工厂。放射性同位素的应用是很广泛的,下一章就要讨论这些问题。

例 1. 1 克铀 235 在裂变后所释放出来的结合能,相当于多少公斤煤完全燃烧后所释放出来的化学能?(煤的燃烧值是 8000 千卡/千克,每一个铀核裂变时释放出来的结合能约为 200 百万电子伏特.)

【解】 一个铀原子核裂变后所释放的结合能为：

$$\begin{aligned} 200 \times 10^6 \text{ 电子伏特} &= 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格} \\ &= 2 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-12} \times 10^{-7} \text{ 焦耳}; \end{aligned}$$

$$1 \text{ 克铀含有的铀原子个数} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \text{ 个},$$

1 克铀在裂变后所放出的能量(结合能)

$$= \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \times 2 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-12} \times 10^{-7} \text{ 焦耳}.$$

根据功热当量值, 1 克铀在裂变后所放出的能量换算成相当的热量：

$$Q = 0.24 \times \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \times 2 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-12} \times 10^{-7} \text{ 卡};$$

1 克煤完全燃烧后所放出的热量 = 8000 卡。

设  $m$  克煤完全燃烧后所放出的热量与 1 克铀裂变所放出的热量相当, 则有

$$8000 m = 0.24 \times \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \times 2 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-12} \times 10^{-7},$$

$$\therefore m \approx 2,460,000 \text{ 克} = 2460 \text{ 公斤}.$$

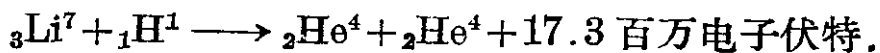
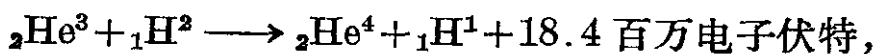
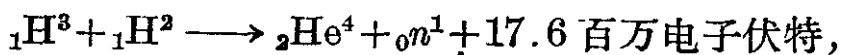
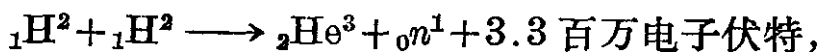
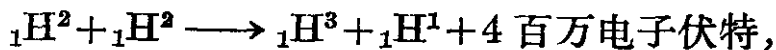


## § 10·4 聚变. 热核反应

从原子核的结合能曲线中可以看出,除了重核分裂时放出大量的原子能以外,轻的核结合成为原子量较大的原子核时(我们把这种核反应叫做**聚变**)也会释放出大量的原子能.图 10·1 所示曲线的左端表明在最轻的一些原子核中,结合能的变化都比较大,其中,氦 4 的结合能比邻近的原子核大得更多,具体的数值可以从下表中看出来.

| 原 子 核             | 平均结合能(百万电子伏特) |
|-------------------|---------------|
| ${}_1\text{H}^1$  | 0             |
| ${}_1\text{H}^2$  | 1.09          |
| ${}_1\text{H}^3$  | 2.78          |
| ${}_2\text{He}^3$ | 2.53          |
| ${}_2\text{He}^4$ | 7.03          |
| ${}_3\text{Li}^7$ | 5.07          |

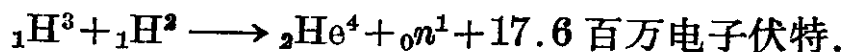
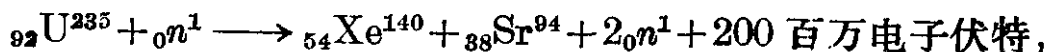
由于氦 4 的平均结合能特别大,所以当轻的原子核发生聚变反应时,如果生成物中有氦 4,这时放出的结合能也就更多,例如:



又由于轻的原子核所带的正电荷比重核少得多,所以轻的原子核发生反应时所要克服的库仑斥力就要比重核小得多,因而要使它们进行核反应就不需要给核太大的能量.例如:用氘( ${}_1\text{H}^2$ )去轰击氚( ${}_1\text{H}^3$ ),氘核的能量只要到达几万电子伏特就有相当大的可能引起核反应( ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^3 \longrightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_0n^1 + 17.6$  百万电子伏特);而如果用氘( ${}_1\text{H}^2$ )去轰击较重的镁( ${}_{12}\text{Mg}^{26}$ )(它所带的正电荷数只比氘核大 12 倍),这时氘核的能量就至少要有 1 百万电

子伏特才有可能引起核反应。

如果以一次聚变和一次裂变来比较，我们还看不出聚变反应中释放出来的原子能的巨大，例如：



从反应式看，似乎是聚变时释放出的原子能比裂变时的小，但是，如果从核子的平均结合能来比较，就可以明白：一个铀 235 原子核发生裂变释放出的结合能是 200 百万电子伏特，即平均每一个核子释放  $\frac{200}{235} \approx 0.85$  百万电子伏特的能量；而一个氘 2 ( ${}_1\text{H}^2$ ) 和一个氚 3 ( ${}_1\text{H}^3$ ) 聚变成一个氦 4 时，释放出来的结合能是 17.6 百万电子伏特，参加反应的核子数是  $2+3=5$  个，平均每一个核子释放  $\frac{17.6}{5} \approx 3.5$  百万电子伏特的能量，这要比铀核裂变时，平均每一个核子释放出来的能量大 4 倍左右。无论是裂变反应或者是聚变反应，从一个核发生反应来看，释放出来的能量总是微不足道的，例如在铀核裂变的情况中，只是当大量铀核发生链式反应时才释放出巨大的原子能，所以要通过聚变获得原子能，也必须要有大量的轻原子核同时发生核反应才能获得比链式反应时更多的能量。1 克铀完全裂变所产生的能量相当于 2 吨煤完全燃烧时所释放出的能量，而氘和氚通过聚变生成 1 克氦时，释放出来的能量却相当于 12 吨煤完全燃烧时所释放出来的化学能！

使大量轻原子核发生聚变的方法是把反应物质加热到极高的温度，使这些原子核在获得很大动能的情况下，发生剧烈的碰撞，这时就会发生聚变反应，因为这种核反应是在极高的温度下进行的，所以叫做**热核反应**。

产生热核反应所需要的温度是很高的，一般要在一百万度以上，甚至达到几千万度！温度越高，热核反应进行得也越快。以氘 2 和氚 3 聚合成氦 4 的聚变为例：在 100 万度高温下，每秒钟、每

克反应物质可以放出  $10^4$  卡的热量；在 150 万度时，可以放出  $10^7$  卡的热量；当温度上升到 200 万度时，放出的热量则达到  $10^{10}$  卡。这表明，反应的充分程度和速度，大致是跟温度成正比的。太阳在几十万万年間，能够不断地发出巨大的能量（平均每秒钟大約放出  $4 \times 10^{26}$  焦耳的能量），就是因为太阳上不断地进行着热核反应的緣故。太阳表面温度虽然只有 6000 度左右，但太阳中心的温度则高达 1400 万度，輕元素的原子核就在这样高的温度下，充分地进行着热核反应，把反应中釋放的大量原子能不断地向周圍空間輻射出去。这个巨大而熾热的天体，每一秒钟向外輻射出去的能量，大約相当于完全燃燒 1 亿亿吨煤所发出的能量，而輻射到地球表面上来的却只有它的 20 亿分之一。

要人为的获得这样高的反应温度是相当困难的，只有原子爆炸时，才可以获得几百万度以上的高温，这时让氘和氚发生反应，就会产生不可控制的热核反应，大量的能量也就以爆发的形式釋放出来，这就是氢彈的作用原理。另外，用实验的方法让很强的电流（几十万安培）导入稀薄的气体中，也会产生几百万度的高温，但問題是要使热核反应充分地和有控制地进行（叫做受控热核反应），就需要进一步把温度升高。用什么方法对这种稀薄气体进一步加热？用什么方法使热核反应中的高温不致于损坏它的“容器”？

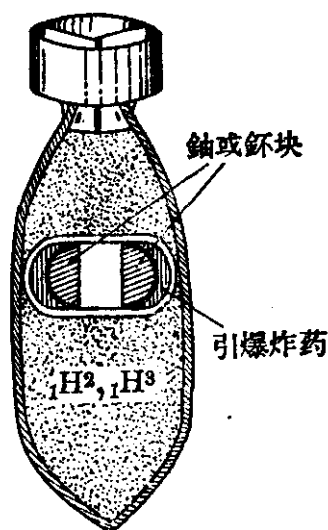


图 10·7 氢彈

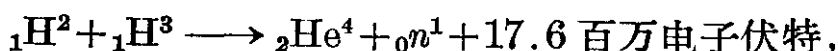
应当用什么方法来控制热核反应进行的速度，并把热量取出来加以利用？这些問題都是目前和平利用原子能研究中的重要課題，近年来，科学家們已經发现了在低温下使輕的原子核发生聚变的方法，这种方法虽然还在繼續研究中，并且也还有许多需要解决的問題，但是它却开辟了一个获得巨大原子能源的新途径。

如图 10·7 所示，氢彈的壳內充滿着氘和氚，

并且有一个普通的原子彈，呈两个半球状，每一个半球体积小于临界体积，半球处有引爆炸药，当引爆炸药燃燒时，就使原子彈的两个半球合在一起，这时由于超过了临界体积便发生了原子爆炸，产生超高的温度，氘和氚又在这样高的温度下发生热核反应，引起新的爆炸。

**例 2.** 氘和氚在发生聚变后变成氦的原子核，同时释放出一个中子和 17.6 百万电子伏特的結合能，試計算 2 克氘和 3 克氚在完成这个反应后所释放出的能量。

**【解】** 根据題意这个聚变的核反应式是：



即一个氘核和一个氚核經過核反应后释放出 17.6 百万电子伏特的結合能。

氘的克原子量是 2 克，氚的克原子量是 3 克，所以 2 克氘和 3 克氚含有的原子个数都是  $6.02 \times 10^{23}$  个，它們完全发生聚变反应后所放出的能量为  $6.02 \times 10^{23} \times 17.6$  百万电子伏特  $= 6.02 \times 10^{23} \times 17.6 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-12}$  尔格  $= 6.02 \times 10^{23} \times 17.6 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-12} \times 10^{-7}$  焦耳  $= 1.7 \times 10^{12}$  焦耳。

### 习 題 10.1~10.4

1. 235 克  $\text{U}^{235}$  的原子核，都发生裂变能放出多少原子能？
2. 1 公斤鈾 235 裂变以后释放出来的能量，相当于 1 公斤汽油燃燒时，所释放出来的能量的多少倍？（汽油的燃燒值是 11,000 千卡/公斤。）
3.  ${}_{92}\text{U}^{235}$  裂变时释放出的結合能是 200 百万电子伏特，两个氘核聚变时释放出的結合能是 23.76 百万电子伏特。試計算一公斤鈾 235 完全发生裂变和一公斤氘完全发生聚变各放出多少結合能？哪个放出的能量大？为什么？
4. 在下列核反应中：



設有一克质子完全击中了鋰的原子核，問将放出多少原子能？

### 本 章 提 要

1. 原子核內核子之間有很强的核力互相吸引着，当它們互相靠近組合

成为一个原子核的时候，便放出一定的能量，这种能量叫做结合能；核子组成不同的原子核，放出的结合能大小也不相同，释放出来的结合能跟组成这个原子核的核子数的比，叫做每个核子放出的平均结合能；核子的平均结合能越大，这种原子核结合得就越紧密、越牢固。原子核反应中，凡是从平均结合能小的原子核转变成平均结合能大的原子核，都要放出一定的结合能，这就是原子核能，简称为原子能。

2. 由结合能曲线知道：重的原子核分裂成为两个原子量中等的原子核时，轻的原子核结合成较重的原子核时都要释放大量的结合能。

3. 重的原子核俘获了一个中子以后分裂成两个原子量中等、质量相近的原子核的现象，叫做裂变。裂变自动持续下去的反应过程叫做链式反应过程，产生链式反应的条件是中子的再生率大于1。

4. 使链式反应能够有控制进行的装置叫做原子反应堆，简称原子堆或反应堆；反应堆一般包括下列几个基本组成部分：(1)核燃料(如铀235)；(2)减速剂(如石墨、重水)；(3)控制棒(如镉棒)；(4)载热剂(如液态金属钠、重水)；(5)保护层(如水泥保护层)等。

5. 轻的原子核结合成较重的原子核，叫做聚变；在几百万度以上的高温时，轻的原子核发生聚变的反应过程，叫做热核反应；链式反应和热核反应是获得原子能的两个重要途径。

## 复 习 题 十

1. 什么叫结合能？什么叫核子的平均结合能？

2. 什么叫裂变？为什么重的原子核发生裂变时会放出大量的原子能？

3. 什么叫链式反应？链式反应产生的条件是什么？

4. 什么叫原子反应堆？它是由哪几个部分组成的？

5. 什么叫聚变和热核反应？

6. 某原子反应堆，功率是10,000千瓦，用的核燃料是含 $U^{235}$ 5%的浓缩铀，已知每个铀核裂变时释放的原子能约为200百万电子伏特，问这个反应堆一昼夜要消耗多少克核燃料？

7. 4个氦的原子核在经过一些中间反应以后变成一个氦核，并释放出28百万电子伏特的原子能；一克氦完全燃烧时能够释放出的热量为34,000卡，试计算1公斤氦的原子核完全发生聚变反应所放出的原子能和1公斤氦原子完全燃烧时所释放的化学能各是多少。

## 第十一章 放射性同位素

在原子核变化的过程中,除了有能量释放出来以外,有时还有射线放出来,象原子核的蜕变等. 这种放射现象不仅可以帮助人们了解原子核的结构,并且还在各个科学技术部门中得到极为重要的应用.

1896年贝克勒耳首先发现铀元素具有放射性,但是真正开始应用放射性元素,是1898年皮埃尔·居里和玛丽·居里夫妇发现了放射性元素镭(Ra)和钋(Po),并且从铀矿中提炼出镭以后,自然界存在的各种元素中,原子序数在84以后的都有放射性,但是天然放射性元素实在太稀少,由于提炼不易,价值昂贵,所以大大限制了放射性元素的应用范围.

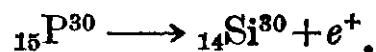
1934年居里夫妇的女儿——伊丽芙·居里和她的丈夫约里奥·居里,又首先用人工的方法制造出放射性元素,这无疑是一项重大的贡献,它使人们摆脱了天然放射性元素产量少的束缚,为广泛地应用放射性元素开辟了广阔的前途.

### § 11.1 人工放射性同位素

第一次获得人工放射性元素是用原子核嬗变的方法,让 $\alpha$ 粒子轰击铝(Al)的原子核

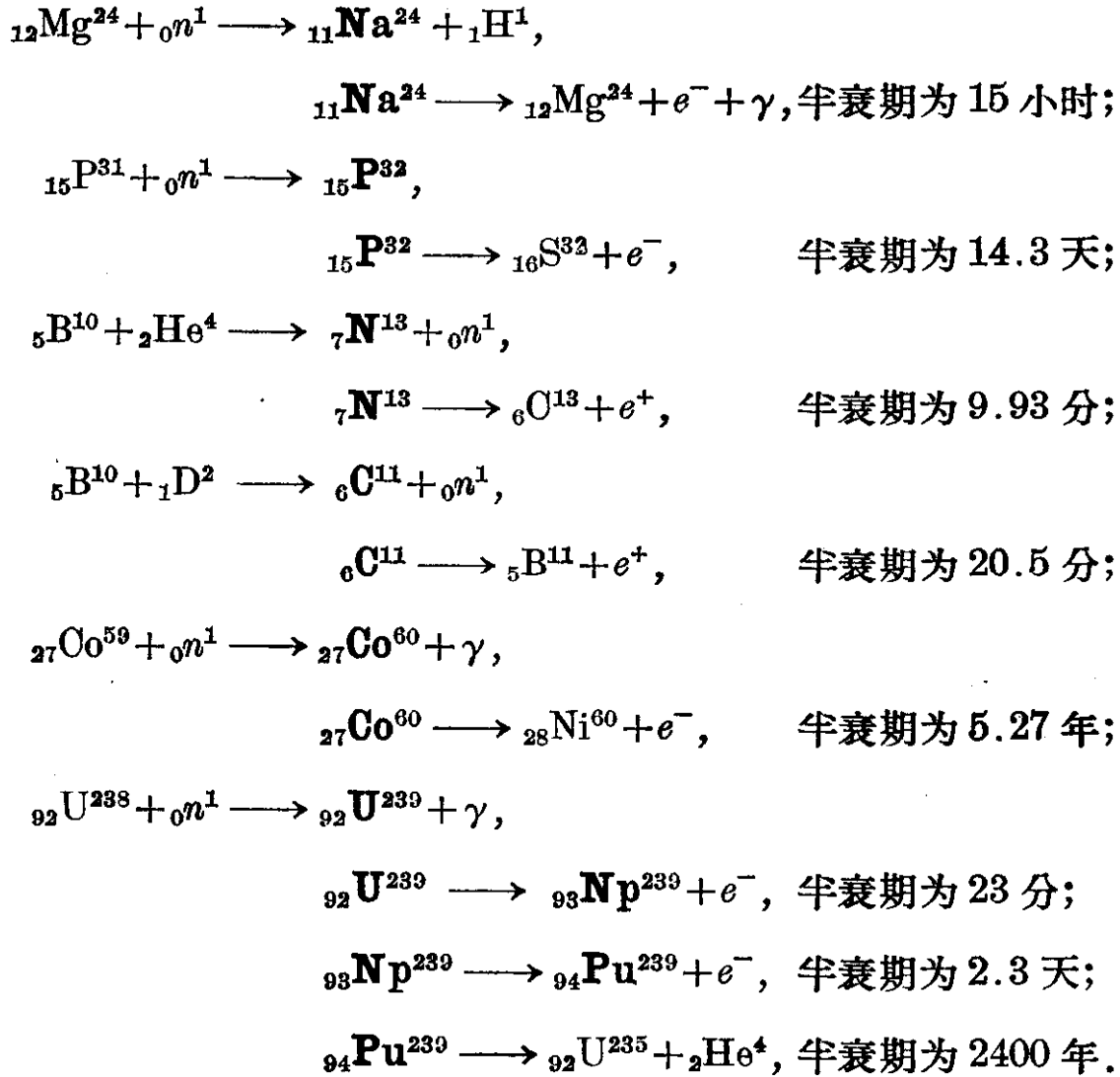


其中核反应的生成物磷30是有放射性的:



磷 30 发生的是  $\beta^+$  蜕变, 即放出带正电的电子, 蜕变以后变成硅的同位素  $_{14}\text{Si}^{30}$ .  $_{15}\text{P}^{30}$  的半衰期是 2.55 分钟, 由于  $_{15}\text{P}^{30}$  是磷的同位素, 所以又称做放射性同位素.

以后科学家们又相继制成了一系列的人工放射性同位素, 例如



除了用原子核人为嬗变的方法来制取放射性同位素以外, 重核裂变时生成的裂变产物, 也都是放射性同位素. 最近几十年来, 由于原子核物理的蓬勃发展, 反应堆的相继建立, 放射性同位素已经可以大量的生产(图 11.1). 目前几乎所有的元素都有放射性同位素, 甚至很轻的元素也可以有放射性同位素, 它的品种已达一千多种.

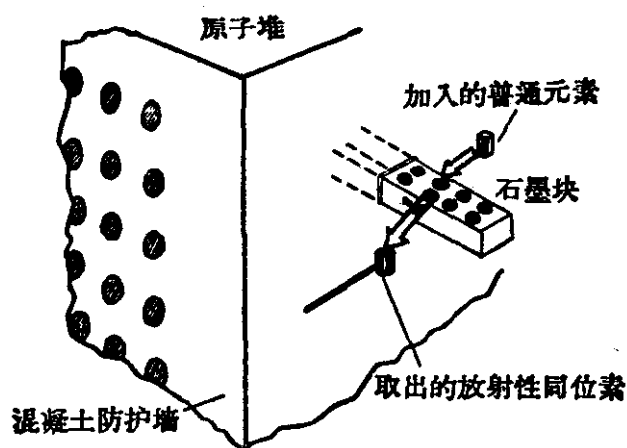


图 11·1

## § 11·2 放射性同位素的应用

放射性同位素在工农业生产、医疗卫生和科学研究等方面都有广泛的应用。根据放射性同位素的性质和特点，在应用上大致可以分为两类：1. 射线的利用；2. 示踪原子的利用。

**1. 射线的利用** 放射性同位素放出的射线 ( $\alpha$  射线、 $\beta$  射线或  $\gamma$  射线等) 都有穿透物质的本领，其中以  $\gamma$  射线的穿透本领为最大；这些射线能使物质分子电离，如  $\alpha$  和  $\beta$  射线的电离本领都比较大，它们能引起化学变化或生理变化。下面列举它在工农业生产、医疗和科学研究中应用的一些实例。

(1) **工业方面** 利用射线的穿透本领来检查金属材料的内部损伤和金属板的厚度。

金属制品内部有缺陷，会大大影响成品的强度。过去检查制品内部损伤，一般是用硬 X 射线透视的方法，但是 X 射线设备复杂、笨重，而且 X 射线的穿透的本领一般也比  $\gamma$  射线来得小。现在采用放射性钴 60 (这是放射性同位素中价格最便宜的一种)，它能够穿过 20 厘米厚的金属材料，使底片感光，从而可以检查出有没有缺陷存在和缺陷所在的部位。图 11·2 就是利用  $\gamma$  射线探伤的示意图。

检查金属材料的厚度，原理也大致相似。如图 11·3 所示，把



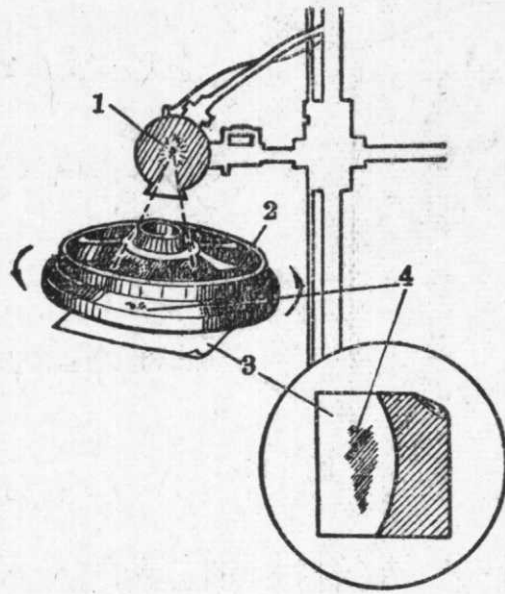


图 11·2

1—放射性同位素钴 60； 2—被检查的零件；  
3—照相胶片； 4—缺陷

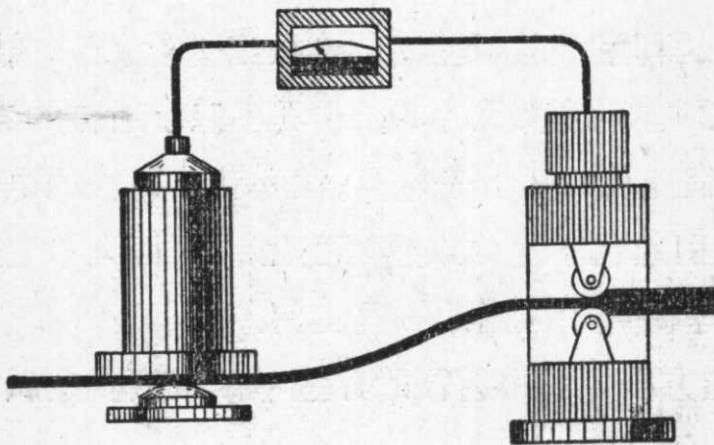


图 11·3

放射性同位素放在轧制的金属板下面，射线穿过金属板以后就被计数器记录下来。如果板的厚度不合要求，为计数器记录的射线强度也就有变化，如果把计数器发出的信号加以放大，通到自动操纵设备上，就能够很快的调节压延设备使得金属板厚度合乎标准。

在工业方面还能利用射线的电离本领来消除有害的静电积累。在工业生产的快速运转过程中，常常会由于摩擦而造成静电的积累，给生产造成困难或带来危险。例如印染机的滚筒由于静

电积累而产生的电火花，容易使易燃溶液燃烧起来。所以利用放射性同位素的电离作用，可以使空气电离，从而把积累的静电逐渐中和掉，以不致发生危害。（如图 11·4）

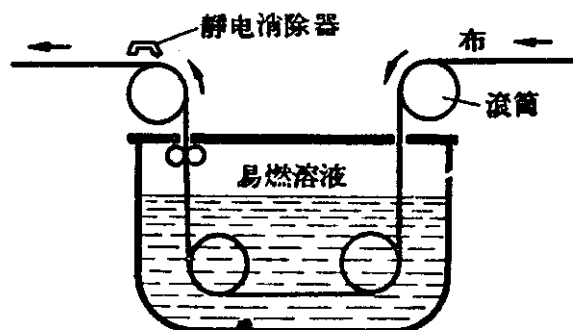


图 11·4

(2) 农业方面 用适度的放射性同位素射线照射种子，可以使作物早熟和增产；在放射性元素的适当的溶液中浸过的某些种子（例如豌豆），产量也可以提高。实验证明：经过较弱射线的照射，有些作物的品种可以得到改良。例如小麦和燕麦的种子经过中子射线照射以后，可以获得抗锈菌力很强的优良品种。

利用射线还可以防止虫害。在田间用不太强的射线照射，就可以使害虫的成虫失去生殖能力，使幼虫失去发育能力。由于射线的穿透本领比较强，对躲在树皮、土壤或作物里面的害虫也具有同样的杀害能力，因而比一般的农药效果好。在大的谷仓里，也可以用较强的射线来使粮食最主要的害虫——象鼻虫的幼虫受到严重的抑制甚至死亡，使粮食得到妥善的保藏。

(3) 医疗方面 放射性同位素的射线在医疗方面可以用来抑制或医治恶性肿瘤。由于放射性同位素的体积小，可以做成各种形状不同适合于各种部位使用的放射源，以及能够大量生产，这就使它在治疗癌肿方面有 X 射线所不能比拟的优点。有些癌肿部位不固定，很难用 X 射线照射，这就可以用内服一些含有放射性同位素的药剂来治疗。目前常用来作射线治疗的同位素有：钴 60、碘 131、磷 32 等，特别是放射性钴 60，能够制成很强的放射源，而

价格又比較低廉。

**2. 示踪原子的利用** 不具有放射性的同位素跟同一元素的放射性同位素，化学性质完全相同。如果在元素里渗入一些它的放射性同位素，那么無論这种元素到达什么地方，总有它的放射性同位素相伴随，它們經歷着相同的过程。要了解一般元素在物体里的分布或轉移过程是不容易的，但是由于放射性同位素总和它在一起，我們就可以通过計数器来探測它的位置。在这里，放射性同位素起了一种“指示踪迹”的作用，所以又称做“示踪原子”。示踪原子在科学技术中的应用也很普遍，下面簡單介紹它的具体应用。

(1) **农业方面** 利用示踪原子可以了解作物吸收肥料的情况。例如，在棉桃快要成熟的时候，如果向根部施带有放射性磷 32 的磷肥，可以发现，这时根部已不大能够吸收肥料；如果把磷肥施在叶子上，計数器就能很快地指示出，在棉株中有放射性磷的“踪迹”出現，并且迅速地移向棉花的子房。这就說明要使棉花增产，可以把磷肥施在叶子上。如果把鉀肥澆在果树的树干上，鉀肥就会透过树皮进入果树，并迅速地沿着枝条上升，积累在花芽中。这种追肥的方法也是利用示踪原子得出来的。

又如在天旱的时候，作物的根部特別需要水分，因为这时候沒有足够的水分来供应根，所以要根尖来追逐水源，如果能促使根尖很快的生成，就能使根深入到水分充足的水层里去，帮助作物抗旱。实验表明，把放射性的磷肥(含有磷 32)埋在离表面 17 厘米深的土层里作为目标，然后观察施肥的与不施肥的燕麦幼苗根尖的生长情况，可以看出，施肥的燕麦根比不施肥的燕麦根早四天伸展到既定目标的地方(如图 11.5 所示)。

(2) **工业方面** 在冶炼鋼时，必須注意磷的杂质含量不能过高，为了能在冶炼时及时作出鉴定，可以利用示踪原子的方法。在炼鋼炉里渗入少量的放射性磷，它很快就会和普通的磷混在一起，

再从鋼水中取出試样来，一方面用計数器測出試样中射綫的强度，一方面用化学分析的方法，測出这时候鋼水中的磷含量，然后找出射綫强度跟含磷量的对应关系。这样每隔一定時間測定一次射綫强度，只要射綫强度降低到一定程度，就表明这时候鋼水中的含磷量已經降低到合格的标准了。用这种方法来檢查磷含量要比用化学方法来檢驗快得多。

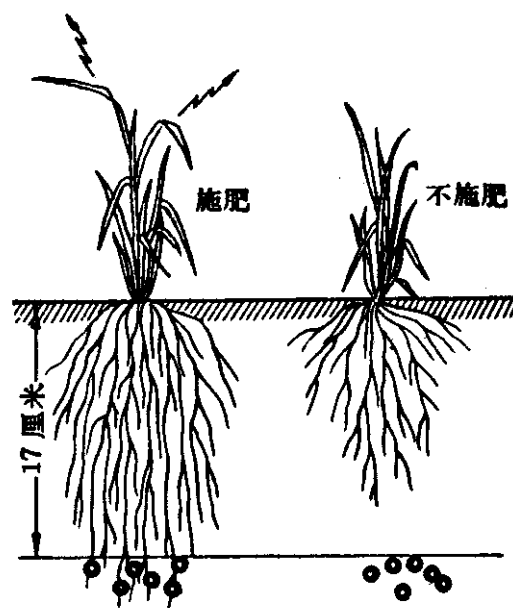


图 11·5

示踪原子也可以用来檢查水庫是否有漏水的情况。把少量的放射性同位素放入水庫中，由于扩散作用，示踪原子很快就会均匀地分布在水的分子中，通过計数器周密的探测，就会了解水庫有没有渗水或漏水的情况。

(3) 医学和生物学方面 医学上可以利用示踪原子来作診斷和研究。例如在皮下注入含有放射性鈉<sup>24</sup>的生理食盐水，就可以研究人体血液循环的情况，对正常的人讲，三小时以后放射性的鈉就可以遍布全身；而有些患有心脏病的人，血液循环時間却要增加到6~12小时。又例如，人体里的甲状腺含碘量比其他器官大一千倍，甲状腺有了病后，吸收碘的数量就会有很大的改变，服用少量放射性碘<sup>131</sup>作为示踪原子，就可以帮助診斷甲状腺的病情。

对动物注射放射性同位素作实验发现，大脑在兴奋的时候，磷的新陈代谢速度比抑制时快得多。利用示踪原子还可以对植物的光合作用、动物体内蛋白质的合成等許多問題进行研究。

应用示踪原子的优点是：

(1) 灵敏度高，能够測定极微量的放射性物质。最好的天平，感量可达 $10^{-6}$ 克；最灵敏的光譜定量分析，也只能測到 $10^{-9}$ 克；

但是用示踪原子的方法,通过灵敏的計数器則可以把含有  $10^{-14} \sim 10^{-18}$  克的微量放射性物质測出来。

(2) 容易辨識,操作方法和过程都很簡便。由于过强的放射性射綫照射对人体是有害的,所以在使用的時候應該注意安全防护問題。为了保护工作人員的健康,射綫照射人体的時間应当尽可能的短;人要离开射綫源远一些;并且用鉛、鉄、水泥或有机玻璃等适当的物质把射綫源屏蔽起来,以吸收或减弱射綫强度;最重要的是使人体每天所受到射綫照射的剂量不超过規定的限額。总之只要有必要的防护設備,严格遵守安全操作和防护規程,射綫对人体可能产生的伤害是完全能够避免的。

## 本章提要

1. 用原子人为嬗变的方法所产生的有放射性的元素,叫做人工放射性同位素。天然放射性元素的半衰期一般比較长,而人工放射性同位素的半衰期都比較短,稳定性比天然放射性元素差。天然放射性元素一般都要发生一連串連續的蜕变(可以到达一、二十次),最后才形成稳定的同位素。而人工放射性同位素,除了极少数(例如鈾 241)以外,大都是只蜕变一次就变成稳定的原子核。天然放射性元素都是重元素,而放射性同位素則每一种元素都有。

2. 根据放射性同位素的性质和特点,它的应用可以分为两大类:(1)射綫的利用(利用射綫的穿透本領和电离本領);(2)示踪原子的利用。(利用放射性同位素来測定含量。优点是:灵敏度高、容易辨认、手續簡便等。)

## 复习題十一

1. 什么叫人工放射性同位素?
2. 人工放射性同位素跟天然放射性元素比較起来,有些什么不同?
3. 放射性同位素主要的應用可以分为哪几方面?(每一方面試举一例。)
4. 試写出鈷 59 俘获中子以后嬗变为鈷 60 的核反应式,和鈷 60 放出  $\beta$  射綫的蜕变方程。

## 第十二章 宇宙射綫和基本粒子

### §12.1 宇宙射綫

放射性元素所放出来的射綫可以使气体电离。1901年人們发现整个大气层都处在微弱的电离状态下,尽管空气很干燥,带电的驗电器也会慢慢地放电(和大气中的离子中和)。起先,人們以为这是地壳中有放射性元素存在的緣故。为了研究这种現象,1910年科学家們用气球把驗电器带到高空去做实验,結果发现空气的电离程度在离开地面1公里以上是随着高度的增加而迅速增大的。如果空气的电离是由于地壳內放射性元素的射綫所引起的話,那么电离的程度就应当随着高度的增加而减小,因为高度越大,射綫穿过的空气层也就越厚,射綫的强度减弱得也就越厉害。可見,使大气处在微弱电离状态的原因,不是由于地壳內存在着放射性元素的緣故,而是由于来自宇宙空間的某些射綫进入大气层引起的結果。科学家們通过进一步研究已經完全証实了这一論断,我們就把这种来自宇宙空間的能量很高的射綫叫做宇宙射綫。

从宇宙空間射下来的这种宇宙射綫,不仅能够穿过很厚的大气层到达地面,甚至能够穿过1000米深的湖水,这表明它的穿透本領很大,能量很高。經過測定得知,它的能量一般达到 $10^9 \sim 10^{10}$ 电子伏特;剛剛进入大气层的初級宇宙射綫,能量甚至达到 $10^{15}$ 电子伏特;能量强大的宇宙射綫在穿过10厘米厚的鉛板后,射綫的强度仅仅减小30%,如果再穿过1米厚的鉛板,强度也只减少一半。这一部分射綫是宇宙射綫中的硬性部分,其余能量較低、穿透

本領較小的就是宇宙射綫中的軟性部分。

这种能量强大的宇宙射綫是由什么組成的呢？根据科学家們用威尔逊云室和計数器在高空探測的結果得知，初級宇宙射綫是由带正电的高能量的粒子組成的，其中約有 80% 是质子，20% 是  $\alpha$  粒子，此外，还有极少量的（約 1%）包含从鋰到鉄各种质量較大的原子核；初級宇宙射綫进入大气层以后，与大气中的原子核相互作用而产生了一系列的新的粒子，这些粒子的射綫束称做次級宇宙射綫，这样就构成了全部的宇宙射綫。

在次級宇宙射綫中又含有哪些粒子呢？从高空大气层探測的研究中曾发现有电子、 $\gamma$  光子等粒子存在，1932 年安德逊在宇宙射綫中还发现有带正电的电子——正电子，书后插图 3 所示的就是所拍摄到的正电子穿过云雾室中鉛板后在磁場中偏轉的徑迹，根据徑迹偏轉的方向和穿过鉛板时曲率的改变，就知道这种粒子所带的电荷与电子相反，而电量和质量都与电子相同，正电子就是这样第一次在宇宙射綫中被发现的。1937 年以后，科学家們通过对宇宙射綫的巨大穿透本領的研究和应用了照相乳胶探測带电粒子的技术，终于发现了宇宙射綫中还存在着另外一种新粒子，它的质量介于电子和质子之間，所以称做介子。介子可以分为  $\pi$  介子、 $\mu$  介子和  $K$  介子三大类，它們有的带正电，有的带負电，也有不带电的。介子从产生到轉变为別种粒子，所經歷的平均時間（又称做平均寿命）是非常短促的，只有  $10^{-8}$  秒，甚至更短。現在已經知道，宇宙射綫中的硬性部分就是由介子組成的（这种粒子的穿透本領很大），而宇宙射綫中的軟性部分則是由电子、正电子和  $\gamma$  光子組成。

近几年来，在宇宙射綫中还发现了质量超过质子 340 倍（超过电子质量二千多倍）的粒子——超子。超子的寿命更短，只有  $10^{-10}$  秒左右，它很快就轉变成为另一种粒子。关于次級宇宙射綫中的其他一些粒子这里就不一一詳述了。

宇宙射綫中粒子的能量是十分巨大的，穿透本領也很强，这种

射綫对人体有没有影响呢？宇宙射綫的能量能不能加以利用呢？根据所测量的数据統計：平均每一分钟射到每一平方厘米海平面上的宇宙射綫粒子只有1.5个，直到现在还没有发现过，宇宙射綫对有机生命有什么影响，甚至可以相信，在未来的宇宙航行中，只要有适当的防护装置，它对飞行員的健康也不会有什么严重的威胁。至于宇宙射綫粒子的能量，就每一个粒子来說是巨大的，但由于粒子的密度很小，显然不能象太阳能那样作为一种天然的能源来加以利用。可以作这样一个比較：在射到一平方厘米地球表面上来的太阳光中，每一分钟大約有 $3 \times 10^{19}$ 个光子，而在相同的情况下射来的宇宙射綫粒子却只有1.5个，如果把射到一百平方公里面积上的宇宙射綫的全部能量汇集起来加以利用，也只不过相当于1匹馬力的发电机而已！尽管如此，研究宇宙的意义却是十分重大的。通过对于宇宙射綫的研究，科学家們发现了不少新的粒子，并且获得了在高能粒子作用下的原子核的轉变和粒子互相轉化的新資料，这对搞清楚物质結構和粒子的特性都有很大的价值。所以現在科学家們正在应用巨大的加速器来使各种原子核达到相当于初級宇宙射綫所具有的能量，以便在实验室的条件下重新产生和研究宇宙射綫中所观察到的一切重要的現象。另外，宇宙射綫的研究对了解其他星球上物质的成分，星球所产生的磁場的特性和天文学上的一些基本問題，都有着很重要的意义。

## 习 題 12.1

1. 什么叫宇宙射綫？
2. 初級宇宙射綫是由什么組成的？
3. 什么是次級宇宙射綫？

## § 12.2 基本 粒 子

通过对宇宙射綫和高能粒子引起人为核变化的研究，我們认



識了許多比原子更簡單更“基本”的粒子，除了前面各章已經講到的光子、電子、質子和中子以外，我們又發現了質量比質子重的各種超子，質量介於質子和電子之間的各種介子，質量跟電子相同帶有正電荷的正電子，以及質量比電子小得多的中微子等，現在已發現的約有三十多種，這些粒子是人們到目前為止所知道的組成物質的最基本的單元，所以人們稱它們為基本粒子。

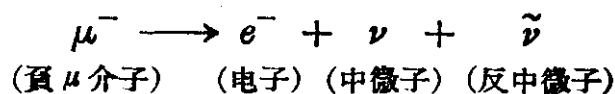
對基本粒子的研究，使人們了解了它的許多特征，例如：

它們有的是中性的，有的是帶正電的，有的是帶負電的，而帶電粒子所帶的電量總是等於基本電荷的電量（即  $4.8 \times 10^{-10}$  靜電系單位）。

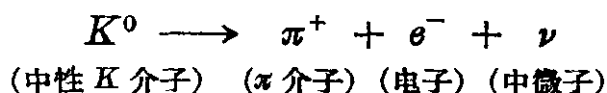
它們的質量也是各不相同的。質量大的超子，比電子質量大 2585 倍，質量小的中微子，還不到電子質量的  $\frac{1}{2000}$ 。

基本粒子可以相互轉化，並且它們一般都是不穩定的。在相互轉化中產生的單個基本粒子平均壽命都很短，很快又自動轉變為其他的粒子（稱做基本粒子的衰變），只有經過複雜細致的探測才能發現這些粒子的存在。

基本粒子在相互轉化時還釋放出巨大的能量來，其數值甚至比原子核裂變或聚變時所釋放出的能量還要大得多。例如，在負  $\mu$  介子的衰變



和中性  $K$  介子的衰變



中都有巨大的能量釋放出來。

理論推導和實驗結果還表明：每一種基本粒子都有它的反粒子，反粒子的質量和原來的粒子相同，所帶的電荷和磁性跟原來的粒子相反。例如電子  $e^-$  的反粒子就是正電子  $e^+$ ；質子  $p$  的反粒子

是反质子  $\bar{p}$  (1955 年被发现); 中子  $n$  的反粒子是反中子  $\bar{n}$  (1956 年被发现, 磁性与中子相反);  $\pi^+$  介子的反粒子是  $\pi^-$  介子;  $\mu^+$  介子的反粒子是  $\mu^-$  介子;  $K^+$  介子的反粒子是  $K^-$  介子; 中微子  $\nu$  的反粒子是反中微子  $\bar{\nu}$ ; 而光子  $\gamma$ , 中性  $\pi$  介子  $\pi^0$  的反粒子就是它自身. 并且每一对正反粒子相遇, 还会发生“湮灭”的现象, 也就是转化为其他粒子的现象. 例如电子和正电子相遇转化为两个光子

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma.$$

其他的正反粒子相遇, 也会发生“湮灭”, 转化为光子或介子. 根据正反粒子的对称, 有些科学家认为宇宙间可能存在一种反物质, 这种反物质的原子核是由反质子和反中子组成的, 核的外面有正电子围绕旋转, 也就是说, 组成这种物质的基本粒子都是反粒子.

基本粒子除了光子以外, 一般又分为轻子、介子和重子三大类, 下面列出的是一些重要的基本粒子的数据:

| 粒子类 | 粒子符号     | 反粒子符号       | 质量<br>(以电子质量为单位)   | 平均寿命<br>(秒)                              |                       |
|-----|----------|-------------|--------------------|--|-----------------------|
| 光子  | $\gamma$ | $\gamma$    | 0                  | 稳定                                       |                       |
| 轻子  | $\nu$    | $\bar{\nu}$ | 1                  | 稳定                                       |                       |
|     | $e^-$    | $e^+$       | 206.8              | 稳定                                       |                       |
|     | $\mu^-$  | $\mu^+$     | 206.8              | $2.2 \times 10^{-6}$                     |                       |
| 介子  | $\pi^0$  | $\pi^0$     | 264.3              | $< 4 \times 10^{-16}$                    |                       |
|     | $\pi^+$  | $\pi^-$     | 273.3              | $2.6 \times 10^{-8}$                     |                       |
|     | $K^+$    | $K^-$       | 966.7              | $1.2 \times 10^{-8}$                     |                       |
|     | $K^0$    | $\bar{K}^0$ | 976                | $5 \times 10^{-8} \sim 8 \times 10^{-8}$ |                       |
| 重子  | 核子       | $p$         | 1836.0             | 稳定                                       |                       |
|     |          | $n$         | 1838.6             | 稳定                                       |                       |
|     | 超子       | $\Lambda$   | $\bar{\Lambda}$    | 2182                                     | $2.5 \times 10^{-10}$ |
|     |          | $\Sigma^+$  | $\bar{\Sigma}^-$ ① | 2327                                     | $0.8 \times 10^{-10}$ |
|     |          | $\Sigma^-$  | $\bar{\Sigma}^+$   | 2341                                     | $1.6 \times 10^{-10}$ |
|     |          | $\Sigma^0$  | $\bar{\Sigma}^0$   | 2329                                     | $< 10^{-11}$          |
|     |          | $\Xi^0$     | $\bar{\Xi}^0$      | 2566                                     | $1.5 \times 10^{-10}$ |
|     |          | $\Xi^-$     | $\bar{\Xi}^+$      | 2585                                     | $2 \times 10^{-10}$   |

①  $\bar{\Sigma}^-$  超子(反西格马负超子)是 1960 年我国物理学家王淦昌所领导的工作组首先发现的.

| 質量<br>(电子单位) | 粒子(电荷)     |            |            | 反粒子(电荷)          |                  |                  |
|--------------|------------|------------|------------|------------------|------------------|------------------|
|              | 負          | 中性         | 正          | 負                | 中性               | 正                |
| 2586         | $\Xi^-$    | $\Xi^0$    |            |                  | $\bar{\Xi}^0$    | $\bar{\Xi}^+$    |
| 2335         | $\Sigma^-$ | $\Sigma^0$ | $\Sigma^+$ | $\bar{\Sigma}^-$ | $\bar{\Sigma}^0$ | $\bar{\Sigma}^+$ |
| 2185         |            | $\Lambda$  |            |                  | $\bar{\Lambda}$  |                  |
| 1837         |            | $n$        | $p$        | $\bar{p}$        | $\bar{n}$        |                  |
| 966          |            | $K^0$      | $K^+$      | $K^-$            | $\bar{K}^0$      |                  |
| 270          | $\pi^-$    |            |            | $\pi^0$          |                  | $\pi^+$          |
| 207          | $\mu^-$    |            |            |                  |                  | $\mu^+$          |
| 1            | $e^-$      |            |            |                  |                  | $e^+$            |
| 0            |            | $\nu$      |            |                  | $\bar{\nu}$      |                  |
| 0            |            |            |            | $\gamma$         |                  |                  |

图 12.1

基本粒子的互相轉化，种类繁多，表現也十分复杂，这是粒子之間的內在联系和互相作用的多样性的結果。基本粒子不仅可以轉化为另一种粒子，并且它的能量还能受到“激发”，从而增加它內在变化的能量，这些都表明我們已經不能把这些粒子当作“基本的”“不可分割”的粒子来看待了。随着人們对于基本粒子互相联系和轉化的規律的深入的研究，这些“基本粒子”也将漸漸失去它最初作为組成原子的最基本的微粒或单元的那种意义，而对于基本粒子的結構問題也已經提了出来，这也說明物质世界是不可穷尽的，人的認識能力也是无限的，随着生产力和科学技术的发展，我們对于基本粒子和物质結構的認識也将不断地深入下去。目前对于基本粒子的研究工作正在迅速的发展着，世界各国都很重視这方面的研究工作，基本粒子轉化时所釋放的能量是巨大的，如果也能使这种基本粒子的轉化連續和有控制地进行，那将使人們获得比原子核能更为巨大的能量。对于基本粒子日益深入的研究，正在逐步揭开物质构造的秘密，并为获得新的巨大的能源提供了可能。

## 习 題 12·2

1. 什么叫基本粒子？基本粒子可以分为哪几类？
2. 什么叫基本粒子的衰变？
3. 反粒子的特点是什么？
4. 电子、中子和质子的反粒子各是什么？并写出它們的符号。

## 本 章 提 要

1. 来自宇宙空間的能量很高的射綫(高能粒子流)叫做宇宙射綫。剛进入大气层的初級宇宙射綫是由质子、中子和极少量的从鋰到鉄各种质量較大的原子核組成的；初級宇宙射綫进入大气层后与大气中的原子核相作用又产生了一系列新的粒子(如电子、正电子、光子、介子、超子等)，这些粒子束称做次級宇宙射綫。

2. 在宇宙射綫中發現的新粒子有正电子、介子和超子等。正电子  $e^+$  帶的电量与电子帶的电量相等而符号相反。介子的质量介于电子和质子之間，有的帶正电，有的帶負电，有的是中性的；介子一般分为三类： $\pi$  介子、 $\mu$  介子和  $K$  介子；介子的穿透本領很大。超子的质量比电子的质量大二千多倍，有的帶电，有的不帶电；各种超子的平均寿命都特別短促。

3. 組成物质的基本单元叫做基本粒子，目前已經發現的基本粒子有三十多种。总共可以分为：光子、輕子、介子和重子。基本粒子有的帶电（帶正电或帶負电，所帶的电量都等于基本电荷的电量，即  $4.8 \times 10^{-10}$  靜电系单位），有的是中性的。它們可以相互轉化，有的同时还能放出巨大的能量。大多数的基本粒子都是不稳定的，平均寿命都很短促。

4. 基本粒子都有它的反粒子。反粒子的质量跟原来的粒子相同，帶的电荷和磁性跟原来的粒子相反。例如电子和正电子就是一对正反粒子。正反粒子相遇会发生“湮灭”，轉化为其他粒子（光子或介子等）。

## 总复习题

1. 有一街灯正对着一个面积为  $1 \text{ 米}^2$  的窗戶，它发出的光穿过窗戶照在窗对面的墙上，墙离窗 3 米，灯离窗的距离为 2 米，問墙被照亮的面积有多大？
2. 从地球上看来最亮的天狼星离地球  $8.4 \times 10^{13}$  公里远，問由它所发出的光到达地球需要多少时间？
3. 当光綫由空气以  $30^\circ$  的入射角投射在水面上时，发生了反射和折射现象。試計算折射綫与反射綫之間的夹角。
4. 当光綫由空气以  $70^\circ$  的入射角投射在某种液面上时，进入液体的折射光綫沿着跟液面成  $50^\circ$  的方向繼續在液体中傳播，試求这种液体的折射率。
5. 折射率为 1.65 的玻璃磚全部浸沒在水中，如果光綫以  $30^\circ$  的入射角投射在玻璃面上，問这时的折射角为多大？
6. 已知水的折射率是  $4/3$ ，玻璃的折射率是  $3/2$ ，求光在水里和在玻璃里傳播速度的比。
7. 当温度为  $20^\circ\text{C}$  时，二硫化碳对橙色光的折射率为 1.625。試計算橙色光在二硫化碳中的傳播速度，并求出橙色光从二硫化碳投射到真空或空气时的临界角。
8. 当光綫从折射率为  $n_1$  的媒质斜射入折射率为  $n_2$  的媒质时，若要发生全反射， $n_1$  和  $n_2$  应当具有怎样的关系？若要发生折射，又应当具有怎样的关系？
9. 某人向平面鏡走近，問他在鏡中的虚象大小有沒有变化？他在走近时，从鏡中所觀察到自己的象的大小有沒有变化？为什么？
10. 試根据球面鏡的成象規律把下表中空白的各項填写出来。

| 鏡的种类 | 焦 距<br>( $f$ ) | 物 距<br>( $u$ ) | 象 距<br>( $v$ ) | 放大率<br>( $K$ ) | 象的虚实 | 象的倒正 | 象的位置     |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|----------|
| 凹 鏡  | +              | 大于 $2f$        | +              | 小于 1           | 实    | 倒    | 与物在鏡的同側  |
| 凸 鏡  |                | +              |                |                |      |      | 与物分居在鏡兩側 |
|      |                | +              |                | 大于 1           |      | 正    |          |
|      | -              |                |                |                | 虚    |      |          |

11. 一凹鏡的曲率半徑等于 100 厘米, 今有三物体甲、乙、丙分別放在距鏡面 25、75 和 150 厘米处, 試求它們象的位置和性质. 如果物体的长度都是 2 厘米, 問它們的象长又分別是多少?

12. 高 3 厘米的发光物体, 放在曲率半徑为 24 厘米的凸鏡前 6 厘米处, 求象的位置、高度和性质.

13. 一凹鏡的半徑  $R=40$  厘米, 在下列各种情况下求物体离开鏡面顶点的距离:

- (1) 成一放大 5 倍的实象;
- (2) 成一放大 5 倍的虚象;
- (3) 能不能得到縮小为  $1/5$  的实象?
- (4) 能不能得到縮小为  $1/5$  的虚象?

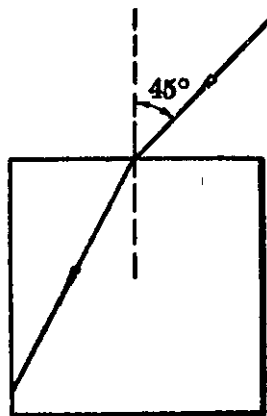
14. 在一曲率半徑为 30 厘米的球面鏡前有一根与主軸垂直的长为 4 厘米的直棒, 它所成的象长为 2 厘米, 問直棒离鏡多远?

15. 焦距是 35 厘米的凸鏡和一平面鏡相对而立, 相距 28 厘米, 如果在它們的中点处立一物体, 实长 7 厘米, 問为什么在平面鏡里可以看到两个虚象? 試用作图法和球面鏡公式来确定两个虚象的位置, 并算出其高度.

16. 光綫以入射角  $\alpha$  投射到平行透明板上, 假設平行透明板的厚度为  $d$ , 进入透明板时的折射角为  $r$ , 試証明光綫經两次折射后透过平行板的光綫对入射綫的側移

$$l = \frac{d \sin(\alpha - r)}{\cos r}.$$

17. 光綫从玻璃立方体的上表面射入, 入射角是  $45^\circ$  (如下图所示), 設玻璃的折射率是  $\sqrt{2}$ , 問这时光綫能不能在玻璃立方体的側面上发生全反射?



(第 17 題)

18. 試根据透鏡的成象規律把下表中空白的各項填写出来。

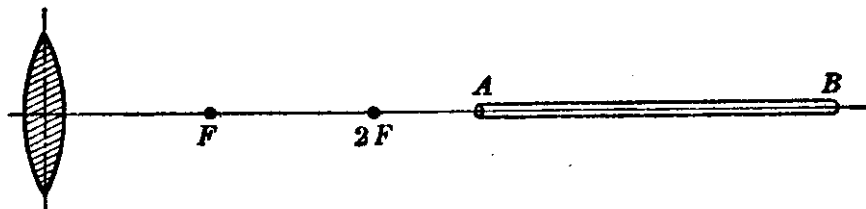
| 透鏡的種類 | 焦距 ( $f$ ) | 物距 ( $u$ ) | 象距 ( $v$ ) | 放大率 ( $K$ ) | 象的虛實 | 象的倒正 | 象的位置     |
|-------|------------|------------|------------|-------------|------|------|----------|
| 凸     | +          | $u < f$    | -          | $K > 1$     | 虛    | 正    | 与物在透鏡的同側 |
|       | -          | +          |            |             |      |      |          |
|       |            | $u > 2f$   |            |             |      | 倒    |          |
|       |            |            | $v = f$    |             | 實    |      |          |
|       |            |            |            | $K < 1$     |      |      | 与物在透鏡的同側 |
| 凹     |            | +          |            |             |      |      |          |
|       | +          | $u = f$    |            |             |      |      |          |

19. 已知一凸透鏡的焦距是 12 厘米，要想在离透鏡 18 厘米处得到物体的象，問物体应放在透鏡前多远的位置上：

- (1) 設象与物体分居透鏡的兩側；
- (2) 設象与物体在透鏡的同側。

20. 凸透鏡的焦距等于 4 屈光度，問必須把物体放在离透鏡多远的地方才能获得长度放大 4 倍的象？并求出象的位置。

21. 在凸透鏡兩倍焦距以外的地方，以主軸为中心綫平放着一根粗細均匀的直圓棒  $AB$  (見附图)。問所得的象  $A_1B_1$  比实物长些还是短些？象  $A_1B_1$  粗細是否均匀？如果不均匀，哪一头粗些，哪一头細些？为什么？試用作图法来驗證你的答案。



(第 21 題)

22. 把物体放在一透鏡前 50 厘米的地方，所生成的虛象的长度是实物长度的  $1/5$ ，問这是哪一种透鏡？它的焦距有多大？所生成的虛象位置在哪里？



23. 用一个凸透鏡來使物體的象成在光屏上，物體和光屏之間的距離是固定不變的。設透鏡第一次所成象的長度為  $a$ ，移動透鏡，第二次在屏上所成象的長度為  $b$ 。試證明物體的長度為  $\sqrt{ab}$ 。

24. 利用凸透鏡成象時，如果遮去透鏡的一半，問這時還能成象嗎？成的象有什麼變化？

25. 一凸透鏡的焦距為 90 厘米，一燭焰從距透鏡 100 厘米處沿主軸以 1 厘米/秒的速度向外移動 2 厘米。問在這個過程中，燭焰的象移動幾厘米？移動的速度有多大？

26. 一凸透鏡和一凹鏡放在同一軸上，彼此相距 58 厘米，它們的焦距分別為 6 厘米、8 厘米。今有一長 4 厘米的發光物體與主軸垂直地放在凸透鏡前 9 厘米處。求：

- (1) 由物體發出的光線經過凸透鏡後第一次所成象的位置、長度和性質；
- (2) 再經過凹鏡反射後所成象的位置、長度和性質；
- (3) 最後再經過凸透鏡所成象的位置、長度和性質。

27. 試用作圖法作出第 26 題中的光路圖。

28. 兩片焦距都等於 +2 厘米的凸透鏡  $L_1$  和  $L_2$ ，放在同一軸上，彼此相距 8 厘米。今有一物體放在透鏡  $L_1$  前 5 厘米處，高 1 厘米，試用作圖法作出物體最後所成象的位置、高度和性質。

29. 幻燈鏡頭的焦距等於 8 屈光度，為了得到 25 倍的放大率，問幻燈鏡頭跟幕之間的距離應當有多遠？

30. 有一個照相機，當底片距鏡頭 20 厘米時，恰好可以攝得遠處物體清晰的象。如果要用它來拍攝離開鏡頭 2 米處的景物，應當怎樣調節照相機的暗箱？

31. 有一架顯微鏡，物鏡焦距 3 毫米，目鏡焦距 2 厘米。如果其物鏡所成的象離物鏡 18 厘米，而最後所成的虛象離目鏡 25 厘米，求實際放大率。

32. 一顯微鏡的鏡筒長 16 厘米，放大率為 100 倍，已知目鏡的焦距長 2.5 厘米，求物鏡的焦距。

33. 有一架天文望遠鏡，目鏡焦距長 10 厘米，物鏡和目鏡相距 2.1 米，求這個望遠鏡的放大率。

34. 月球對人的眼睛所張的視角約為  $0.5^\circ$ ，如果用望遠鏡去觀察月球，已知望遠鏡的物鏡焦距為 17 米，求物鏡所成月球實象的直徑。

35. 在晴朗的中午，地球表面空曠的地方受太陽光照射的照度估計約為  $6 \times 10^4$  勒克司。如果太陽光不被地球周圍的大氣吸收掉一部分，地面上的照

度可能还要大些。今假设太阳光直接照射在地面上时，照度为  $10^5$  勒克司，试求太阳的发光强度和太阳发出的总光通量。（设地球与太阳之间的平均距离为  $1.495 \times 10^8$  公里。）

36. 某光源照射在 50 厘米外一点上的照度，相当于离该点 2 米外 16 烛光的电灯和 3 米外 36 支标准鲸油蜡烛同时照射下的照度，试求此光源的发光强度。

37. 试把下表中空白的各项填写出来。

| 点光源发光强度<br>( $I$ ) | 距 离<br>( $r$ ) | 球面上被照面积<br>( $S$ ) | 通过被照面光通量<br>( $F$ ) | 被照面照度<br>( $E$ ) |
|--------------------|----------------|--------------------|---------------------|------------------|
| 5 烛光               | 2 米            | 4 米 <sup>2</sup>   |                     |                  |
|                    | 3 米            | 9 米 <sup>2</sup>   |                     | 2 勒克司            |
|                    | 2 米            | 2 米 <sup>2</sup>   | 2 流明                |                  |

38. 一盏电灯离开桌面的高度是 0.5 米。已知电灯正下方桌面上的照度是 160 勒克司，桌面上一点 A 离开电灯的距离为 1 米，求 A 点的照度。

39. 某人在灯下看书，已知电灯距桌面 1.2 米，为了使电灯的正下方获得标准照度，电灯的发光强度应该多大？如果要使桌面上离电灯正下方 0.9 米处获得标准照度，电灯的发光强度又应该是多大？

40. 在 40 烛光的电灯下 50 厘米处晒印照片，需要曝光 2 秒，问在 60 烛光的电灯下 80 厘米处晒印照片，为了得到同样的效果，必须曝光几秒？

41. 紫光在空气中的波长为 4000 埃，红光在空气中的波长为 7000 埃，玻璃对紫光的折射率为 1.54，对红光的折射率为 1.50，求：

- (1) 紫光和红光的频率；
- (2) 紫光和红光在玻璃中的波长。

42. (1) 当太阳光投射在水面上，经过一次折射后在水中是否会发生色散现象？为什么？

(2) 一束白光以入射角  $\alpha = 60^\circ$  投射在水面上，对于红光和紫光来说，水的折射率分别为 1.330 和 1.344，试求在水中红光和紫光这两条光谱线之间的夹角。

43. 把挖有一个孔的硬纸板正对着一烛焰，在硬纸板的另一边的屏上可以看到一块比孔大的光斑。如果不断缩小硬纸板上孔的直径，屏上的光斑将

会发生什么变化? 当孔的直径减小到 0.01 毫米或更小时, 又会发生什么现象?

44. 已知使电子脱离某种金属所需的功是  $3.97 \times 10^{-12}$  尔格, 当它在波长为 4000 埃的紫光照射下, 问:

- (1) 能不能发生光电效应?
- (2) 金属放出的电子具有多大的动能?

45. 氢原子的核外电子由第五条可能轨道跃入第二条可能轨道运动时, 将放出多大频率的光子? 这条光谱线的波长又有多大?

46. 根据下列各已知条件, 写出核反应或核蜕变方程:

(1) 铝核 ( $_{13}\text{Al}^{27}$ ) 在俘获一个  $\alpha$  粒子后, 放出一个中子而成为另一种新核;

(2) 氮核 ( $_{7}\text{N}^{14}$ ) 在俘获一个中子后, 放出一个质子而成为另一种新核;

(3) 铀 238 俘获中子后变成放射性同位素钍; 又经过两次  $\beta$  蜕变而成为另一种稳定的新核;

(4) 锑核  $_{51}\text{Sb}^{121}$  在俘获一个快中子后放出两个中子而变成放射性同位素铊; 又经过一次  $\beta$  蜕变而成为另一种稳定的新核。

# 习題答案

## 第一章

习题1.4 2. 4.5厘米; 4. 6.4米.

习题1.5 1. 500秒; 2. 約27.5年前; 3.  $4.16 \times 10^{14}$ 公里.

## 复习題一

3. 約3340公里; 4. 約 $1.5 \times 10^6$ 公里.

## 第二章

习题2.2 1.  $12^\circ$  或  $78^\circ$ ; 4. 17.5厘米.

习题2.3 1.  $22^\circ 6'$ ,  $0^\circ < r < 48^\circ 46'$ ; 2.  $0^\circ$ ,  $36^\circ 35'$ ; 3. 1.14, 0.658c;  
4.  $61^\circ 3'$ ; 5. 0.94; 6.  $4.01 \text{米}^2$ .

## 第三章

习题3.4 6. 25厘米; 7.  $v=60$ 厘米, 倒立的实象; 8.  $v=2f$ ,  $v=\frac{3f}{2}$ ;  
10. 凸鏡,  $f=-20$ 厘米; 11. 凹鏡,  $f=13.3$ 厘米; 凹鏡,  $f=40$ 厘米; 12.  $v=-16.7$ 厘米.

习题3.6 2.  $l=0.35$ 厘米; 6. 5屈光度; 7.  $f=-0.2$ 米, 凹透鏡;  
 $f=0.25$ 米, 凸透鏡.

习题3.8 1. 23.1厘米, 11.5厘米.

习题3.10 1.  $f=10$ 厘米, 凸透鏡,  $D=10$ 屈光度; 2. 10厘米;  
3.  $v=90$ 厘米, 实象, 象长8厘米; 4.  $v=-30$ 厘米, 虚象, 象长8厘米;  
5.  $u=24$ 厘米; 6.  $u=24$ 厘米.

### 复习题三

1. 凹鏡离屏 24 厘米,  $f=6$  厘米; 2.  $f=2.5$  厘米; 3.  $u=\frac{g+1}{g} \cdot f$ ;  
4.  $u=20$  厘米; 5. 凸透鏡,  $f=16$  厘米,  $u=20$  厘米; 6.  $v=60$  厘米,  
 $f=20$  厘米; 8.  $f=24$  厘米.

### 第四章

#### 复习题四

1.  $f=60$  厘米; 3. 向后移动 0.4 厘米; 5.  $f=2.5$  厘米,  $D=40$  屈光度;  
7. 8 倍, 8 倍; 8. 500 倍.

### 第五章

- 习题 5.1~5.5 3. 44.4 勒克司 < 50 勒克司, 不合乎要求; 4. 0.8 米;  
5. 39 勒克司, 20 勒克司; 6. 9 烛光.

### 复习题五

1. 6280 流明, 20 勒克司, 500 烛光; 2. 5 勒克司, 1.08 勒克司; 3. 离开  
16 烛光的电灯 60 厘米远的地方; 4. 6.4 勒克司; 5. 1.2 秒; 6. 34.6  
米; 7. 1:1.73.

### 第七章

#### 复习题七

6.  $3.3 \times 10^{-12}$  尔格,  $7.8 \times 10^{-12}$  尔格; 7.  $5.3 \times 10^{14}$  赫兹; 8.  $3.38 \times 10^{-12}$   
尔格 <  $7.2 \times 10^{-12}$  尔格, 不能发生光电效应; 9.  $v=6.6 \times 10^7$  厘米/秒.

### 第八章

- 习题 8.5~8.7 1. 109,700 厘米<sup>-1</sup>; 2. 1215 埃, 1026 埃, 973 埃;  
4. 8.48 埃, 546 公里/秒; 5. 帕邢线系,  $2.33 \times 10^{14}$  秒<sup>-1</sup>, 12,800 埃;  
7. 1.51 电子伏特; 8. 赖曼线系中的第 1、2、3 条谱线; 巴耳麦线系中的第

1、2 条谱线；帕邢线系中的第 1 条谱线。

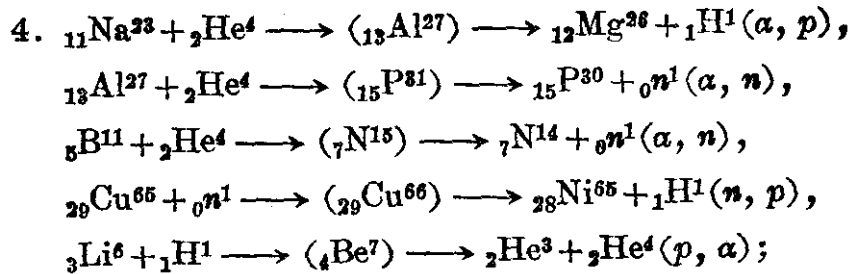
## 复习题八

2.  $1.15 \times 10^7$  达因； 3.  $1.15 \times 10^{-5}$  尔格； 4. 109 埃； 6. 1325 埃；  
7. 12.75 电子伏特。

## 第九章

习题 9.1~9.3 4.  $1.39 \times 10^{-11}$  秒<sup>-1</sup>, 约 1590 年, 5. 19.1 天; 6. 5 天,  
镭 E; 7.  ${}_5\text{B}^{11}$ 、 ${}_{11}\text{Na}^{23}$ 、 ${}_{15}\text{P}^{31}$ 、 ${}_{84}\text{Po}^{210}$ 、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ ; 8. 8 次  $\alpha$  蜕变和 6 次  $\beta$  蜕变,  
7 次  $\alpha$  蜕变和 4 次  $\beta$  蜕变。

### 习题 9.4~9.6



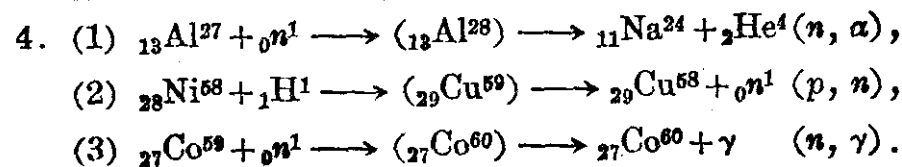
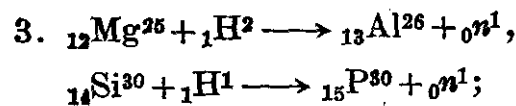
5. 6, 6; 8, 9; 10, 12; 12, 13; 13, 14; 14, 14; 15, 16; 17, 20; 18, 20;  
18, 22;

7.  $\alpha$  粒子;  ${}_5\text{B}^{11} + {}_1\text{H}^1 \longrightarrow ({}_{6}\text{C}^{12}) \longrightarrow 3{}_2\text{He}^4$ 。

## 复习题九

1. (1) 40 天, (2) 60 天, (3)  $0.0347$  天<sup>-1</sup>;

2.  ${}_7\text{N}^{12}$ 、 ${}_7\text{N}^{13}$ 、 ${}_7\text{N}^{14}$ 、 ${}_7\text{N}^{15}$ 、 ${}_7\text{N}^{16}$ 、 ${}_7\text{N}^{17}$ ;



## 第十章

习题 10.1~10.5 1.  $1.9 \times 10^{13}$  焦耳; 2.  $1.8 \times 10^6$  倍; 3.  $8.2 \times 10^{12}$

[习题答案]

焦耳,  $5.7 \times 10^{14}$  焦耳; 4.  $1.7 \times 10^{12}$  焦耳.

### 复习题十

6. 约 211 克; 7. 约  $6.7 \times 10^{14}$  焦耳,  $1.4 \times 10^8$  焦耳.

### 总复习题

1.  $6.25 \text{ 米}^2$ ; 2. 8.87 年; 3.  $128^\circ$ ; 4. 1.46; 5.  $23^\circ 46'$ ; 6. 9:8;

7.  $\frac{8}{13}c$ ,  $38^\circ$ ; 8.  $n_1 > n_2$ ,  $n_1 \neq n_2$ ;

10.

| 鏡的种类 | 焦 距<br>( $f$ ) | 物 距<br>( $u$ ) | 象 距<br>( $v$ ) | 放大率<br>( $K$ ) | 象的虛实 | 象的倒正 | 象的位置     |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|----------|
| 凹 鏡  | +              | 大于 $2f$        | +              | 小于 1           | 实    | 倒    | 与物在鏡的同側  |
| 凸 鏡  | -              | +              | -              | 小于 1           | 虛    | 正    | 与物分居在鏡兩側 |
| 凹 鏡  | +              | +              | -              | 大于 1           | 虛    | 正    | 与物分居在鏡兩側 |
| 凸 鏡  | -              | +              | -              | 小于 1           | 虛    | 正    | 与物分居在鏡兩側 |

11.  $v_1 = -50$  厘米, 是放大正立的虛象, 象长 4 厘米;  $v_2 = 150$  厘米, 是放大倒立的实象, 象长 4 厘米;  $v_3 = 75$  厘米, 是縮小倒立的实象, 象长 1 厘米;

12. 象在凸鏡后 4 厘米处, 高 2 厘米, 是縮小正立的虛象;

13. (1) 24 厘米, (2) 16 厘米, (3) 能, 120 厘米, (4) 不可能;

14. 設为凹鏡, 直棒离鏡 45 厘米时得到 2 厘米长的实象; 設为凸鏡, 直棒离鏡 15 厘米时得到 2 厘米长的虛象;

15. 距平面鏡面 14 厘米的虛象高 7 厘米, 距平面鏡面 38 厘米的虛象高 5 厘米;

17. 能发生全反射;

18.

| 透鏡的種類 | 焦距 ( $f$ ) | 物距 ( $u$ )             | 象距 ( $v$ ) | 放大率 ( $K$ )       | 象的虛實 | 象的倒正 | 象的位置     |
|-------|------------|------------------------|------------|-------------------|------|------|----------|
| 凸     | +          | $u < f$                | -          | $K > 1$           | 虛    | 正    | 與物在透鏡的同側 |
| 凹     | -          | +                      | -          | $K < 1$           | 虛    | 正    | 與物在透鏡的同側 |
| 凸     | +          | $u > 2f$               | +          | $K < 1$           | 實    | 倒    | 與物分居透鏡兩側 |
| 凸     | +          | $u \rightarrow \infty$ | $v = f$    | $K \rightarrow 0$ | 實    | 倒    | 與物分居透鏡兩側 |
| 凹     | -          | +                      | -          | $K < 1$           | 虛    | 正    | 與物在透鏡的同側 |
| 凹     | -          | +                      | -          | $K < 1$           | 虛    | 正    | 與物在透鏡的同側 |
| 凸     | +          | $u = f$                |            |                   | 不成象  |      |          |

19. (1) 36 厘米; (2) 7.2 厘米; 20.  $u_1 = 31.25$  厘米,  $v_1 = 125$  厘米, 實象;  $u_2 = 18.75$  厘米,  $v_2 = -75$  厘米, 虛象; 21.  $\overline{A_1 B_1} < \overline{AB}$ ,  $A_1$  這頭較粗; 22. 凹透鏡,  $f = -12.5$  厘米,  $v = -10$  厘米, 25. 135 厘米, 67.5 厘米/秒. 26. (1)  $v = 18$  厘米, 放大倒立的實象, 象長 8 厘米.  
 (2)  $v = 10$  厘米, 縮小正立的實象, 象長 2 厘米.  
 (3)  $v \approx 6.857$  厘米, 縮小倒立的實象, 象長 0.286 厘米.  
 28. 在  $L_2$  後 3.5 厘米處, 高 0.5 厘米正立的實象; 29. 325 厘米; 30. 暗箱拉長 2.2 厘米; 31. 796.5 倍; 32. 1.6 厘米; 33. 20 倍; 34. 14.8 厘米; 35.  $2.234 \times 10^{27}$  烛光;  $2.806 \times 10^{28}$  流明; 36. 2 烛光;  
 37.

| 點光源發光強度 ( $I$ ) | 距 離 ( $r$ ) | 球面上被照面積 ( $S$ )  | 通過被照面光通量 ( $F$ ) | 被照面照度 ( $E$ ) |
|-----------------|-------------|------------------|------------------|---------------|
| 5 烛光            | 2 米         | 4 米 <sup>2</sup> | 5 流明             | 1.25 勒克司      |
| 18 烛光           | 3 米         | 9 米 <sup>2</sup> | 18 流明            | 2 勒克司         |
| 4 烛光            | 2 米         | 2 米 <sup>2</sup> | 2 流明             | 1 勒克司         |

38. 20 勒克司; 39. 72 烛光, 140.6 烛光; 40. 3.4 秒; 41. (1)  $7.5 \times 10^{14}$  赫茲,  $4.3 \times 10^{14}$  赫茲; (2) 2600 埃, 4650 埃; 42. (2) 30'; 44. (1) 能; (2)  $10^{-12}$  尔格; 45.  $6.91 \times 10^{14}$  赫茲, 4340 埃.

[習題答案]



46. (1)  ${}_{13}\text{Al}^{27} + {}_2\text{He}^4 \longrightarrow ({}_{15}\text{P}^{31}) \longrightarrow {}_{15}\text{P}^{30} + {}_0^1\text{n}$ ,  
 (2)  ${}_{7}\text{N}^{14} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow ({}_{7}\text{N}^{15}) \longrightarrow {}_6\text{C}^{14} + {}_1\text{H}^1$ ,  
 (3)  ${}_{92}\text{U}^{238} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow ({}_{92}\text{U}^{239}) \longrightarrow {}_{94}\text{Pu}^{239} + 2 {}_{-1}^0\text{e}$ ,  
 (4)  ${}_{51}\text{Sb}^{120} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow ({}_{51}\text{Sb}^{121}) \longrightarrow {}_{52}\text{Te}^{120} + {}_0^1\text{n}$