基 础 物 理 学

第 二 部 分

（三大队试用教材）

成都电訊工程学院

一九七二年二月

目　录

毛主席语录

通过实践而发現眞理，又通过实践而証实眞理和发展眞理。

第三章　几何光学

目前在无线电器件的生产中使用着大量的光学仪器：显微鏡、照相机、投影仪……等。这些仪器我们在生产实践中经常用到，对它已经有了一定的感性认识。但是：“**感觉到了的东西，我們不能立刻理解它，只有理解了的东西才更深刻地感觉它。感觉只能解决現象問題，理論才解决本質問題。**”现在学习几何光学，就是要在我们已有的感性认识基础上，学习一些有关的光学基本知识，以便对光学仪器的本质问题有一初步的了解，从而更好的掌握这些仪器的工作原理，以便改进它、提高它。

当我们使用这些光学仪器时，很自然地会提出这样的问题：为什么显微鏡能把很小的物体放大，而照相机却能把大的图形缩小？要提高光刻和照象质量时在仪器方面受到那些限制，又如何去改进它？为了回答这些问题，就必须要学习一些有关光的基本知识——如光的直线传播定律、光的独立性定律、光的反射定律、光的折射定律。并应用这些定律来研究单透鏡成象的规律以及显微鏡的基本构造和性能。通过这些的学习，使我们“**到达于逐步了解客观事物的內部矛盾，了解它的規律性，了解这一过程和那一过程間的內部联系，卽到达于理論的認識。**”这就是学习几何光学的目的和任务。

第一节　几何光学的基本原理

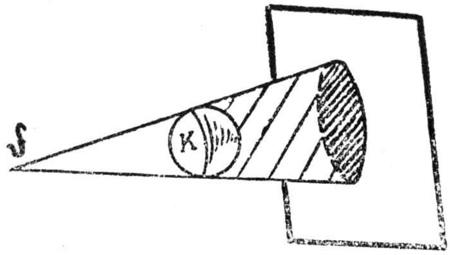
毛主席教导我们：“**馬克思主义的哲学辯証唯物論有两个最显著的特点：一个是它的阶級性，公然申明辯証唯物論是为无产阶級服务的；再一个是它的实践性，强調理論对于实践的依賴关系，理論的基础是实践，又轉过来为实践服务。**”几何光学是几千年来劳动人民实践经验的总结，它之所以正确，首先在于它的实践性，它是以实践为其基础的。因此，作为几何光学的基础——四个基本定律。在学习中，我们是直接引用它的结果而不去证明它，而它的正确性可以分析由它而导出结果的正确而被证实，这是我们在学习中必须注意的问题。

一、光的直綫传播定律：

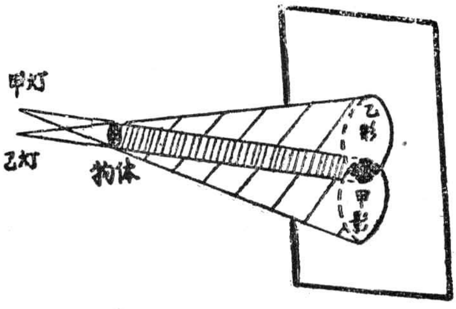
从光源发出的光在任一均匀媒质中是沿着直线传播的。

光在空气中沿直线传播这是大家所熟悉的，光在水中、玻璃中也是沿直线传播的。这样的例子在日常生活中是很多的，当太阳从窗戶中射入时，在屋內地面上出现了窗的轮廓。如图

（3—1）影的形成也是光直线传播的结果。设S是一个很小的光源，K是一个阻挡光线的物体，由于光的直线传播，结果在这个物体的背后形成一个锥形阴影；在锥形阴影內的每一点均不能得到光源的光，所以在垂直于这个锥形轴线的屏幕上，便得到了物体K的轮廓的影象。



图（3—1）



图（3—2）

二、光的独立传播定律；

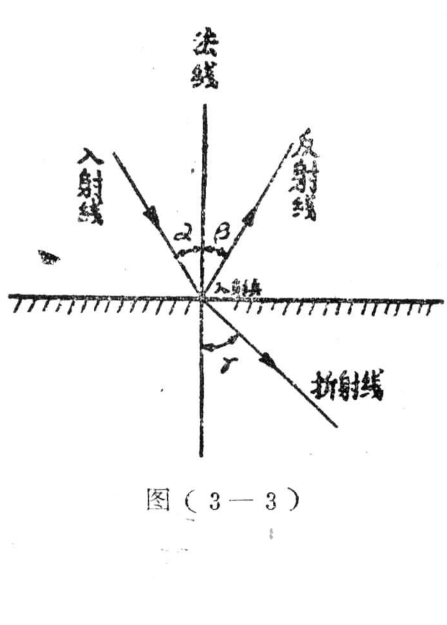
来自不同方向或不同光源所发出的光线相交，对每一光线的独立传播不发生影响，即与其它光线存在与否无关。

例如，一个房间同时开两盏灯，它们的光线互不影响，遇到不透明物体后，各自形成自己的影象如图（3—2）

三、光的反射定律

一、二定律说明了光在同一种均匀媒质中传播所遵循的规律，如果光从一种媒质（如空气），射入另一种媒质（如水）时，其传播情况又将如何呢？实验发现：光从一种媒质射到另一种媒质时，有一部分光在媒质分界面上改变了原来传播方向，回到原来的媒质里继续传播，这种现象叫做光的反射现象；另外一部分光在媒质分界面上也改变了原来传播方向，进入到另一种媒质里继续传播，这种现象叫做光的折射，见图（3—3）所示。

我们把入射到界面上的光线叫做入射线；入射线与界面的交点叫做入射点；过入射点与界面所作的垂线叫做法线；入射线与法线的夹角α叫做入射角；从界面反射回原媒质的光线叫做反射线；反射线与法线的夹角β叫做反射角；折射入另一种媒质的光线叫做折射线；折射线与法线的夹角γ叫折射角。见图（3—3）



图（3—3）

在一般情况下，光入射到两个媒质界面上时，反射和折射现象都是同时发生的，到底那种现象是主要矛盾呢？这应取决于两种媒质的性质，例如：光射到平面镜上时，我们要研究平面镜的成象情况，这时就应着重考虑反射现

象。当入射光射到一薄透鏡上时，为了研究薄透鏡的成象情况，这时就应着重考查折射现象，反射现象则下降为次要矛盾而被忽略。

大量的实验事实发现，光的反射是按下述的反射定律进行的：

1. 反射线在入射线和法线所决定的面里，反射线和入射线分居法线两側。

2. 反射角等于入射角，即$\angle\beta=\angle\alpha$。

从这个定律可以知道，在反射现象里光路是可逆的，即：如果光线逆着原来的反射线方向射到界面上，那么，它就要逆着原来的入射线的方向而反射。

应用反射定律，可以解释平面鏡成象的道理。

在图（3—4）中，设MN为一平面鏡，S为鏡前一发光点，光线从该点沿SA、SB，SC等方向传播，在鏡面上按反射定律反射，反射线沿着AD、BE、CF等方向前进，成为一发散光束，如果这种发散光束射入眼里，眼睛就会感到，这些光线好象是从鏡里S'点发出来似的，我们就把S'叫做S的象，从图可知，射到眼里来的这束光线，并不是眞正从S'发出的，它只是AD、BE、CF等光线反向延长线的交点，鏡子里并不存在这样一个实际光点，我们把具有这种性质的相叫做S的虚象。

平面鏡里虚象的位置又是怎样呢？

由图（3—4）中可以看出，在$\triangle S'AB$和$\triangle SAB$中

由于$\angle SBA=\angle S'BA$　　$\angle SAB=\angle S'AB$　　AB公用

$\therefore$　$\triangle SAB\cong\triangle S'AB$　　（两角夹一边相等，两三角形全等）

得　$SA=S'A$　　（全等三角形，其对应边相等）

再看：$\triangle SOA$和$S'OA$中

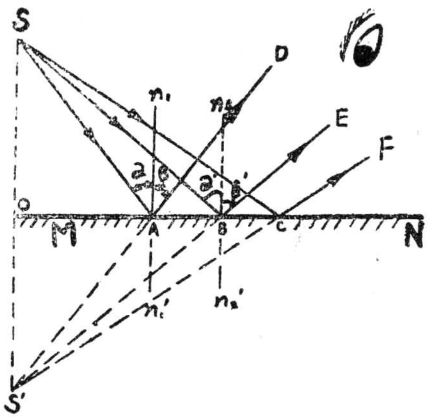
由于$\angle\alpha=\angle\beta=\angle 1$　　$\therefore\angle SAO=\angle S'AO$

又　$SA=S'A$，OA公用

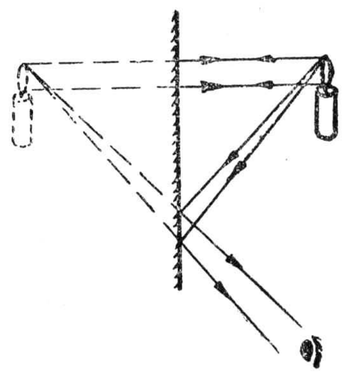
$\therefore$　$\triangle SAO\cong\triangle S'AO$　　（两边夹一角相等，两三角形全等）

得　$SO=S'O$　　且$SS'\perp MN$

这就说明了，光点在平面鏡里所成的虚象，与光点对称（相对于鏡面来说。）



图（3—4）



图（3—5）

知道了一个发光点的象是怎样形成的，那么，要找一个物体（如一支蜡烛）的象就容易了。如图（3—5）所示，只须把一个物体分为若干个点，按上述方法作出各点的象，再把

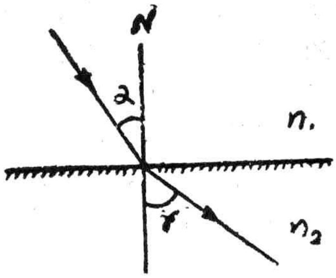
各象点联接起来，就作出了一个物体的象。一个物体在平面鏡中的象也是虛象，大小和物体相等，并且和物体以鏡面为对称。

四、光的折射定律

人们经过长期实验发现，折射光是按照下述折射定律进行的；

1. 折射线在入射线和法线所决定的平面里，并且和入射线分居法线两侧。

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。见图（3－6）



图（3－6）

这个常数叫做第二种媒质对于第一种媒质的相对折射率，用 n_{21} 表示，用公式表示出

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=n_{21}$$

实验还发现；在折射现象里，光路也是可逆的，即是说，如果光线逆着原来的折射线方向射到界面上，那么，新的折射线一定逆着原来的入射线方向进行。

如果用 n_{12} 代表第一种媒质对第二种媒质的相对折射率，由光路的可逆性可以得到：

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

实验证明：第二种媒质对于第一种媒质的相对折射率 n_{21} 与光在这两种媒质里传播速度有关，相对折射率 n_{21} 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 之比，即：

$$n_{21}=\frac{v_1}{v_2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（1）$$

如果光是从眞空射到某种媒质里，光在眞空里的速度用 c 表示，在媒质里的速度用 v 表示根据上面的关系，得

$$n=\frac{c}{v}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（2）$$

我们把光线从眞空射入某媒质里的相对折射率，叫做这种媒质的绝对折射率，简称为这种媒质的折射率，

下面列出几种媒质的折射率

金刚石：2.42	重火石玻璃：1.74	水晶：1.54
冰：1.31	水：1.33	空气：1.0003

可见，光在空气里的速度与在眞空中速度相近，故在处理具体问题中，常以 c 表示空气中的光速。

现在求相对折射率和绝对折射率的关系：

如果已知 n_1、n_2 分别为第一种、第二种媒质的折射率。由（2）式有

$$n_1=\frac{c}{v_1}\qquad n_2=\frac{c}{v_2}$$ 两式两除得

$$\frac{n_2}{n_1}=\frac{v_1}{v_2}\qquad\cdots\cdots（3）$$ 比较（1）式和（3）式得

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

讨论：1． 由公式 $n=c/v$ 可知，媒质的折射率越大，光在这种媒质中传播的速度就越小。两种媒质比较起来，我们称折射率比较小的为光疏媒质，而折射率比较大的为光密媒质。应当注意光疏和光密是两种媒质相比较而言，沒有孤立的意义。

2． 由 $\sin\alpha/\sin\gamma=n_2/n_1$ 可以看出：光从光疏媒质 n_1 射入光密媒质 n_2 时，折射角比入射角小。反之，光从光密媒质射入光疏媒质时，则折射角比入射角大。

上面列出了光的折射定律，这对我们说来虽然是间接知识，但对前人说来则是实践经验的总结，是直接知识，是正确的。因此，这里我们不去直接证明这个定律，而就直接用这一定律去讨论几种光的折射现象：

1． 光通过透明的平行平板

两个表面都是平行平面的透明体叫做平行透明板，如平面玻璃、玻璃砖等都是。见图（3－7）若光从平行透明板的一侧面射进来，发生一次折射，入射角为 α_1，折射角为 γ_1，设透明体的折射率为 n，则有

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\gamma_1}=n \qquad \cdots\cdots(4)$$

从透明板射出的时候，又发生一次折射，入射角为 α_2 折射角为 γ_2，并有

$$\frac{\sin\alpha_2}{\sin\gamma_2}=\frac{1}{n} \qquad \cdots\cdots(5)$$

因为 $A_1B_1 /\!/ A_2B_2$ 有 $O_2N_2 /\!/ O_1N_1$

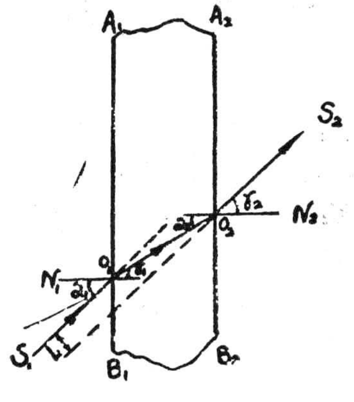
∴ $\angle\gamma_1=\angle\alpha_2$（两平行线的内错角等）

比较（4）（5）两式

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\gamma_1}=\frac{\sin\gamma_2}{\sin\alpha_2}=\frac{\sin\gamma_2}{\sin\gamma_1}$$

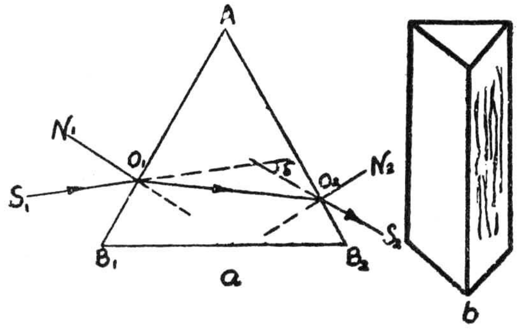
∴ $\angle\gamma_2=\angle\alpha_1$

即 $S_2O_2 /\!/ S_1O_1$



图（3－7）

这说明光穿过平行透明板时方向保持不变，只是向侧面平移了一段距离 J，透明板越薄，平移的距离也越小，平时我们隔着玻璃窗看外面物体并不感到物体有显著的位移，就是这个缘故。



图（3－8）

2． 光通过透明的三稜鏡

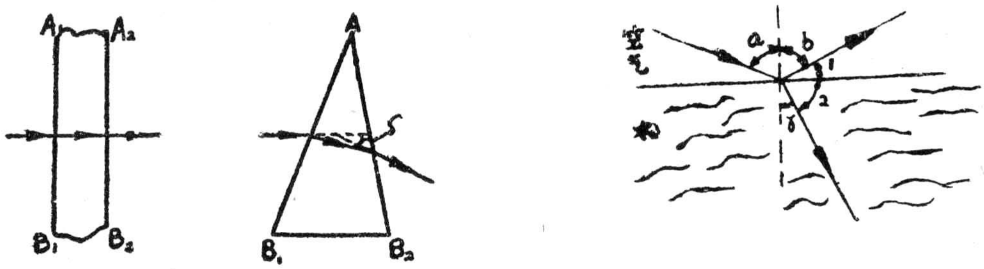
如果透明体的两个折射面互不平行，那么，光通过时方向会不会改变呢？下面就看光通过玻璃稜鏡时的情况，图（3－8）b 和 a 就是这种稜鏡的实体图和截面图。

光线从稜鏡的一个侧面 AB_1 射入

玻璃，发生一次折射，再从另一个侧面 AB_2 射出，又发生一次折射。稜鏡发生两次折射的面如 AB_1、AB_2 叫做稜鏡的折射面，两折射面的夹角如$\angle A$叫顶角，顶角所对的面叫稜鏡的底面。

如图（3—8）a 所示，光线 S_1O_1 从一个侧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，折射光线向法线 O_1N_1 靠拢，即光线向底面偏折；当这一光线通过折射面 AB_2 时，与上相反，这时折射角大于入射角，折射光 O_2S_2 将远离法线，从而再一次向底面偏折。由于以上两次向底面偏折的结果，方向发生了明显的改变，入射线 S_1O_1 与出射线 O_2S_2 所成的夹角 δ 叫做偏向角，偏向角越大，说明光线通过稜鏡时方向改变得越大。

从上面两种情况的讨论，发现光在折射时有这样一个规律性：光线穿通平行透明板时，方向保持不变；光线通过稜鏡时，总是向底边偏折。见图（3—9）



图（3—9）

例：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：光线从空气斜射在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，反射线和折射线是跟入射线分居在法线的两侧，所以反射光线和折射光线必然在法线的同一侧，可能成90°夹角。设反射线这时与水面的夹角为$\angle 1$，折射线与水面的夹角为$\angle 2$，根据题意

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

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

∴ $\angle b+\angle r=90^\circ$

即 $\angle r=90^\circ-\angle b$

据根反射定律

$$\angle b=\angle a$$

故 $\angle r=90^\circ-\angle a$

根据折射定律

$$\frac{\sin a}{\sin r}=n_{水}$$

即

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

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

$\therefore \qquad \alpha=53°6'$

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°6′

例：已知玻璃的折射率是1.52，水的折射率是1.33 问（1）光从水射入玻璃和从玻璃射入水中时的折射率各是多少？（2）光在玻璃里和在水里的传播速度又各是多少？（已知光在真空中的速度$C=3\times10^8$米/秒）

解： 已知 $n_{玻璃}=1.52$ $n_{水}=1.33$ $C=3\times10^8$米/秒

（1）光从玻璃射入水中时的折射率是

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

光从水射入玻璃中时的折射率是

$$n_{玻璃\cdot水}=\frac{1}{n_{水\cdot玻璃}}=\frac{1}{0.875}=1.14$$

（2）根据公式

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

则有

$$v_{水}=\frac{c}{n_{水}}=\frac{3\times10^8}{1.33}=2.3\times10^8\text{米/秒}$$

$$v_{玻璃}=\frac{c}{n_{玻璃}}=\frac{3\times10^8}{1.52}=1.97\times10^8\text{米/秒}$$

$v_{水}$和$v_{玻璃}$就是光在水里和玻璃里的传播速度

第二节　薄透镜成象的基本原理

“馬克思主义的哲学认为十分重要的問題，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能夠解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的認識去能动地改造世界。”我们研究和寻找光的传播规律，不只是为了能够解释一些自然现象，更主要的，作为人的认识之能动作用，在于拿了这种规律性的认识去改造世界。例如，按我们的需要，改变光的传播方向，使它能更好的为生产服务，为社会主义建设服务。既然发现光通过具有不同表面形状的透明体时，光路改变的规律，那么，就有可能制造出不同表面形状的透明体来控制光路。例如，使平行光束通过后，就会聚一点，（如凸透鏡），或使平行光束通过它后，向外发散，（如凹透鏡）这就是透鏡的基本原理。

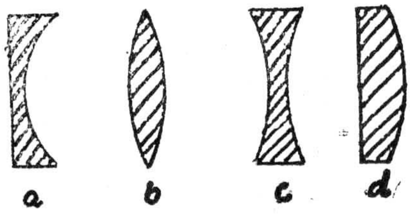
在半导体生产上，离开不了显微鏡、照相机，等光学仪器，这些仪器乍看去似乎不可理解，有的为什么可以把物体放大而有的又把物体缩小呢？但是只要把这些仪器解剖开，其核心部分，也不过是一些不同形状、不同规格的透鏡组成。如果我们掌握了薄透鏡成象规律，要了解光学仪器的结构和原理也就迎刃而解了，抓着了透鏡，就抓住了光学仪器的本质，就抓住了主要矛盾，因此本节是这章学习的重点。

一、薄透鏡的分类及其光学性质

1. 透鏡的分类

折射面是球面，或者一面是球面，另一面是平面的透明体，叫做透鏡，中央比边缘厚的

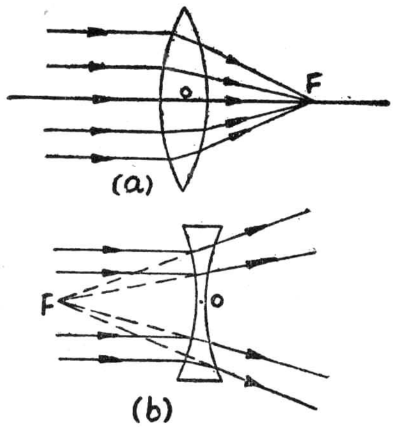
叫做凸透鏡，如图（3—10）b、d；中央比边缘薄的叫做凹透鏡，如图（3—10）a、c。



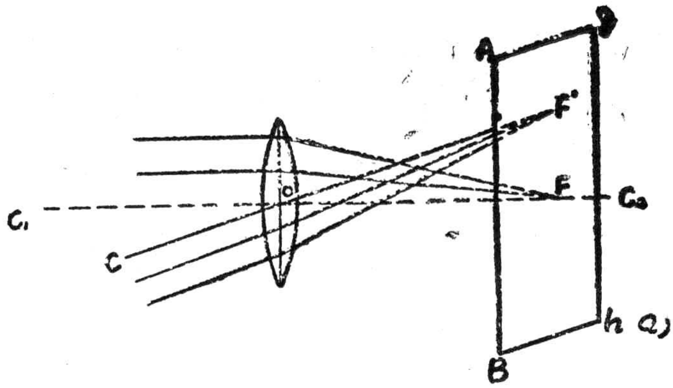
（图3—10）

实验表明；平行光束经过凸透鏡，折射后光线就会会聚于一处，故凸透鏡又叫会聚透鏡。见图（3—11）a。而平行光束经凹透鏡折射后，光线就向外发散见图（3—11）b，故凹透鏡又叫发散透鏡。

一个透鏡中央部分的厚度如果比两个球面半径小很多，这样的透鏡叫做薄透鏡。薄透鏡两球面的中心点离得很近，故可近似地看成是重合为一点O，凡是通过O点的光线，都相当于通过平行透明板一样不改变方向，所发生的测向位移也不考虑，这一点O叫做透鏡的光心，如图（3—11）中O点。



图（3—11）



图(3—12)

2． 薄透鏡的主要光学性质

见图（3—12），通过薄透鏡球面的两个球心的直线叫做透鏡的主光轴如C_1C_2，光心O则在主光轴上，通过光心的任意其它直线叫做付光轴如CF'。实验表明；所有与主光轴平行的近轴光线，经凸透鏡折射后，一定会聚在主轴上的一点F，该点叫凸焦鏡的焦点，从光心到焦点的距离OF叫透鏡的焦距。如果这束光经过凹透鏡，折射后就向外发散，图（3—11）b，它好象也是从主轴上的某一点F发散出来的一样，这一点称为凹透鏡的焦点。它是发散光束延长线的交点而不是实际光线会聚而成，所以是虚焦点，而凸透鏡则是实焦点。任何一个透鏡，它的两侧都各有一个焦点，只要透鏡两侧面所在的媒质相同，不管透鏡两个折射面的曲率半径是否相等如图(3—10)c，或图(3—10)a，两个焦距总是相等的。主轴上的焦点，叫做主焦点如F，过F作一平面垂直于主轴，该平面叫做透鏡的焦平面，

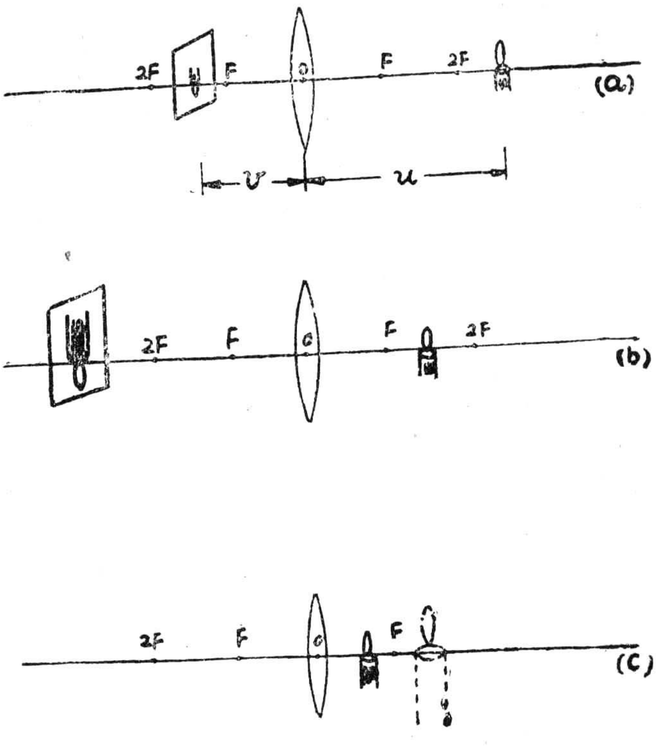
如 $ABgh$，所有平行于付光轴的近轴平行光束通过透鏡后都与付光轴在焦平面上相交如 F' 点，该点叫做透鏡的付焦点。

二、透鏡成象的实験規律。

一个发光体（或一个被照明的物体），从它发出的光线，经过透鏡折射后，象平面鏡反射一样，也可以得到物体的象，那么，所成象的大小、位置、虛实跟那些因素有关呢？是否有什么规律性的东西可寻呢？**“辯証物唯論的認識論把实践提到第一的地位，認为人的認識一点也不能离开实践。”**因此，我们还是首先让实验来回答吧！

用一个凸透鏡，已知其焦距为 f，然后如图（3—13)那样，在透鏡的主轴上放置一支点燃的蜡烛，而在透鏡的另一侧放一白纸屏，这时来观察成象的情况。

1） 当物距（以后用 u 表示）大于透鏡两倍焦距时，如图 a，即 $u>2f$，在 f 和 $2f$ 之间得到一倒立的，缩小的象（以后用 v 表示象距）。这个象是从物体射出的光线，经过凸透鏡折射后，在纸屏上实际会聚而成的，从各个方向向屏看去，都能看见这个象的存在，这是物体



图（3—13）

的实象。这说明，凸透鏡成象时，当 $u>2f$ 时，象的位置总是落在透鏡的焦点以外，两倍焦距以內的地方，即 $2f>v>f$，象是倒立缩小的实象。

2） 当把蜡烛向透鏡靠近时发现：蜡烛距透鏡越近，成的象离开透鏡就越远，且实象越大，当 $u=2f$ 时，则 $v=2f$，象仍是倒立实象，且大小恰好与物体相等。

3） 当 $2f>u>f$ 时，见图 b，则在两倍焦距之外得到一个放大了的，倒立的实象。

4） 当 $u=f$ 时，这时无论纸屏怎样移动，都得不到物体的象，而只能在屏上看见一片光亮，因为这时，折射光是平行地射出。

5） 当 $u<f$ 时，则无论怎样，我们总看不见蜡烛的实象。但是，如果在放纸屏的那一侧，用眼睛对着观察，可以看见一个正立的、放大的、跟物体在同一侧的虚象，见图 c 所示。

三、透鏡成象的作图法。

从以上实验的观察，给了我们这样一个印象：物距、象距、焦距之间不是孤立的，而是有着一定的相互联系，这只是认识的第一阶段——感性阶段。为什么这样的物距会必然有那样的象距呢？这是实验所不能回答的。**"感觉只解决現象問題，理論才解决本质問題。"**因此，必须把感性认识上升为理性认识——这就是认识论的辩证法。

现在就在已有感性认识的基础上应用光的基本定律，来找出物距、象距、焦距它们之间的、必然的內在联系，了解它的规律性。这个问题的解决可以用作图法、也可用公式计算。下面就介绍透鏡成象的作图法。

从上面的实验知道：从一个物体射出的光线，经过透鏡后，只能对应地形成一个象（$u=f$ 情况除外），这时候物体上每一点发出的光线，经折射后也相交于一点。要确定一点的象，只须从物体上的某点引出任意两条线，通过透鏡按折射定律找出它们的交点，该点的象就确定了，当然从这点发出的光线很多，但经折射后也必然交于这点，假如物体上的一点所成的象点有几个的话，那末，物体所成的象也就有好几个了，这与实际情况不相符合。

在实际作图中，如果每作一条光射都按折射定律作图，当然可以，但是太麻烦，一般都从三条特殊光线中选两条来作，这三条光线是：

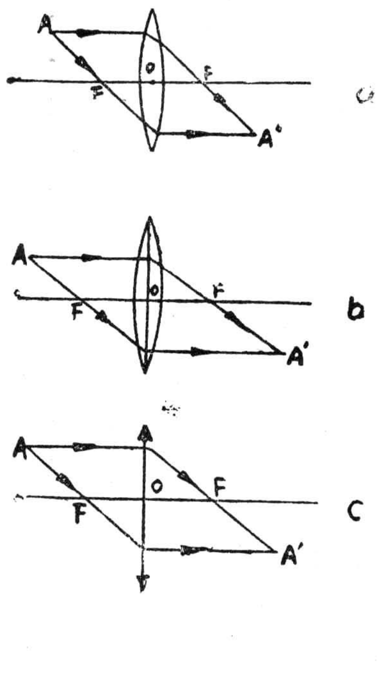
a） 跟主轴平行的入射光线，通过凸透鏡后，折射光通过焦点、通过凹透鏡后，折射光的延长线通过焦点。

b） 通过焦点的（或延长线通过焦点）入射线，折射光跟主轴平行。

c） 通过光心的入射线，折射后方向不变。

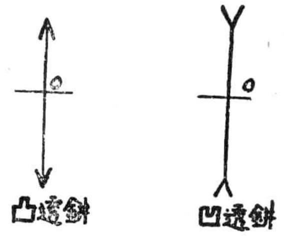
先来作一个光点经过透鏡成象的光路图，见图（3—14）。

从 A 点引一条光线与主轴平行，两次折射后通过焦点 F。再从 A 点引一条光线通过焦点 F，折射后与主轴平行，这两条光线相交于 A' 点，这点就是光点 A 的实象。见图 a。在作图中画出两次光通过折射面时所发生的偏折，如果确定象的位置要求，不十分精确，可以简化如图 b，和 c 的画法，一般用通过光心并与主轴垂直的线来表示薄透鏡，这样更简便些，凸透

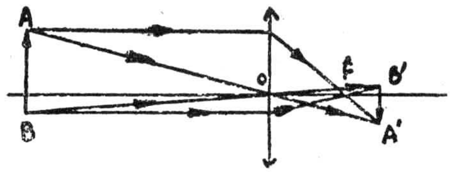


图（3—14）

鏡和凹透鏡分别表示如图（3—15）



图（3—15）



图（3—16）

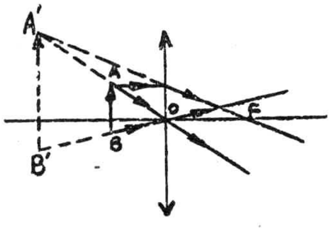
讨论了一个光点成象的作图法，一物体所成的象也就迎刃而解了。按照主席：化整为零、合零为整的战略思想，任何一复杂物体所成的象都可以作出来。但是在具体作图中，常常只选两个（或几个）物体的特殊的、具有代表性的点——抓住主要矛盾，作出它们成象的光路图来，就能够确定物体象的性质、位置和大小。

下面就以投影仪、照相机和放大鏡为例，分析它们的光路，用作图法说明它们的工作原理。

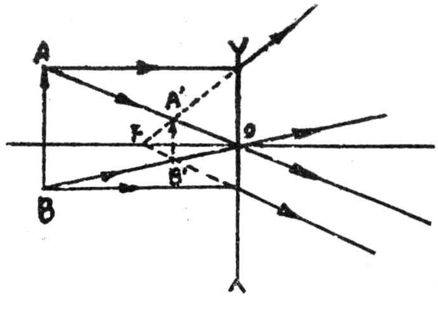
1） 若把物体 AB 放在两倍焦距以外的地方，图（3—16），我们用作图法只作两端点的象，得出物象 $A'B'$。由此可以看出：物体在凸透鏡两倍焦距以外，则成的象在透鏡的另一侧，落在焦点以外，两倍焦点以內的地方，是缩小、倒立的实象。与图（3—13）a 的实验结果相吻合。这就是照象机把物象缩小的原理。

2） 若把 AB 放在两倍焦距之內、焦点之外，情况又该如何呢？同学可以按作图法自己练习，并与图（2—13）b 的实验结果相比较。

3） 若把 AB 放在透鏡焦点之內，见图（3—17），通过作图，发现：折射线在透鏡的另一侧不相交，而它们的反向延长线，在透鏡的同一侧相交，构成 AB 的正立，放大的虚象 $A'B'$，这与图（3—13)实验结果一致，这就是放大鏡的工作原理。



图（3—17）

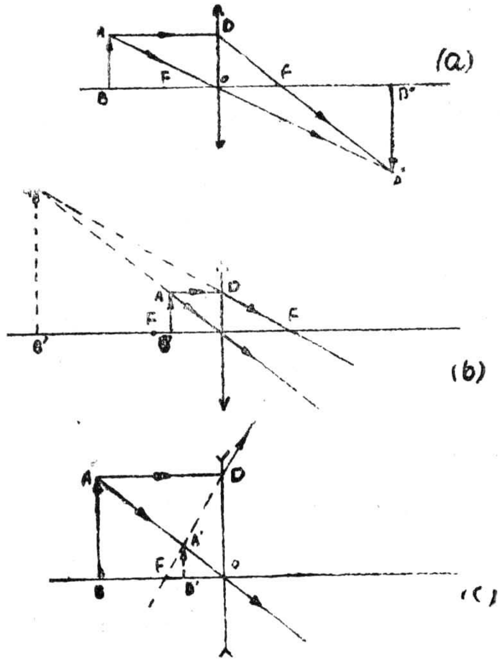


图（3—18）

4） 若把 AB 放在凹透鏡前的任意地方如图（3—18），通过作图发现：折射线在透鏡的另一侧也不相交，而其反向延长线在透鏡的同一侧相交而形成物体的虚象。由此可知：无论把物体放在什么地方，物体经过凹透鏡所成的象，跟物体在同一侧，是正立、缩小的虚象。

从上面的光路图表明：从物体射出的光线，经透鏡折射后，实际相交而成的是实象，与实物分居透鏡两侧。它们的反向延长线相交而成的象是虚象，这些结果与上述实验结果一致，说明了这理论是经得起实践检验的、是正确的。

四、透鏡成象公式和放大率



图（3—19）

我们学习自然科学就是为了“从自然里得到自由。”从实验和作图知道：对于一个透鏡，随着物距的不同可以得到一个放大或缩小的物象，我们就可利用这一规律来为生产服务，但是，实验和作图有很大的局限性，例如，在制版工艺中，需要把图案缩小 50 倍，应该把图案放在什么地方，而象又成在什么地方呢？固然用实验和作图也可能实现，但太麻烦，甚至是不现实的。因此，我们得找出它们之间的数量关系，下面就介绍透鏡成象公式，通过这个公式的计算可以确定成象的位置、大小和性质。

图(3—19) a 是凸透鏡成实象的光路图，b 是物体放在焦距之內成虚象的光路图，c 是凹透鏡成象的光路图。

从光路图中可以看出：

∵ $\triangle ABO \backsim \triangle A'B'O$

有 $$\frac{AB}{A'B'}=\frac{BO}{B'O} \cdots\cdots (1)$$

∵ $\triangle DOF \backsim \triangle A'B'F$

有 $\dfrac{DO}{A'B'}=\dfrac{OF}{FB'}$　　因为 $DO=AB$

$$\frac{AB}{A'B'}=\frac{OF}{FB'} \cdots\cdots (2)$$

比较(1)和(2)式得

$$\frac{BO}{B'O}=\frac{OF}{FB'} \cdots\cdots (3)$$

对于 a 种情况

用 $BO=u$　$OB'=v$　$OF=f$　$FB'=v-f$　代入(3)式

得 $$\frac{u}{v}=\frac{f}{u-f}$$

化简后得　$fv+fu=uv$　　等式两端同以 uvf 相除得

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f} \cdots\cdots (4)$$

对于 b 种情况

这时 $FB'=v+f$ 代入(3)式化简得

$fv-fu=uv$　同理有

$$\frac{1}{u}-\frac{1}{v}=\frac{1}{f} \cdots\cdots(5)$$

比较(4)、(5)两式只是相差一个符号，如果把虚象的象距 v 算作负值，代入，则(4)式就和(5)式一样了。可见(4)式也适用于凸透镜成虚象情况。

对于 c 种情况同理可得

$$\frac{1}{u}-\frac{1}{v}=-\frac{1}{f} \cdots\cdots(6)$$

比较(4)、(6)两式，如果把凹透镜的焦距 f 和所成虚象的象距 v 用负值代入(4)式，那么(4)式也适用于凹透镜成象情况。

综上所述：公式 $\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$ 对于薄透镜成象的各种情况都适合。利用这个公式，只要知道物距 u 和焦距 f 就可以计算出象的性质和位置——v 的数值表示象离开透镜的距离，v 的正负表示象的虚实。

物距不同，由透镜成象的大小也不相同，可能放大，也可能缩小，为了说明象的放大情况，我们把象的长度和物的长度之比叫做象的长度放大率，简称放大率，用 K 表示。

$$K=\frac{A'B'}{AB} \quad \text{由(1)式} \frac{AB}{A'B'}=\frac{BO}{B'O}=\frac{u}{v}$$

$$=\frac{v}{u} \quad \text{用} \frac{1}{u}+\frac{1}{u}=\frac{1}{f} \text{ 得 } v=\frac{fu}{u-f} \text{ 代入}$$

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

由此可知：一个透镜所成的象，它的放大率是随着物距 u 的增加而变小，这和实验结果一致的。

例：有一物体放在距透镜20厘米远的地方，问在下列几种情况下，所用的透镜是凸透镜还是凹透镜？(a)象成在透镜的另一侧距光心40厘米远的地方；(b)象和物体在透镜的同一侧距光心40厘米的地方；(c)象和物体在透镜的同一侧距光心10厘米的地方。

解：(a)已知：$u=20$厘米，象在透镜的另一侧，象是实象，$v=40$厘米。根据公式

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u}+\frac{1}{v} \quad \text{可以算出}$$

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

$$\therefore \quad f=13.3\text{厘米}$$

f 是正值，所以这个透镜是凸透镜，焦距是13.3 厘米。

(b)　已知：$u=20$厘米，象和物在同一侧，象是虚象，$v=-40$厘米

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

$$\therefore \quad f=40\text{厘米}$$

所以这仍是个凸透镜，焦距是40厘米，由于物距 $u=20$厘米，小于焦距，所以形成虚象。

(c)　已知：$u=20$厘米，象和物在透镜同一侧，象是虚象 $v=-10$厘米

代入公式

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

$$\therefore \qquad f=-20\text{厘米}$$

焦距为负值，所以知道这是个凹透鏡，焦距为20厘米。

例　有一个凸透鏡，它的焦距是18厘米，有一个物体长3厘米，问物体应当放在距透鏡多远的地方才能得到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 为正值

因为

$$K=\frac{v}{u}=3$$

$$v=3u$$

代入成象公式得

$$\frac{1}{v}+\frac{1}{3u}=\frac{1}{18}$$

$$\therefore \quad u=24\text{厘米}$$

这时物体应当放在距透鏡24厘米的地方。

如果成的是长9厘米正立象，则就是虚象，v 是負值，应以　$v=-3u$ 代入成象公式中

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

$$\therefore \quad u=12\text{厘米}$$

这时物体应当放在距透鏡12厘米的地方。

*第三节　透镜成象的质量討論

毛主席教导我们：“**有比較才能鉴别。**”现取一个复合透鏡和一个单透鏡，作成象实验，用以比较它们的质量。我们发现，在单透鏡所成的象中有一些缺陷，如：边缘出现彩条、象不清晰或有形变等。为什么会出现这些缺陷呢？这就是本节要讨论的问题。

以上所討论的透鏡成象理论，不是在任意情况下都适合的，只有在滿足下列条件时，才是正确的。

1.假设入射光线是近光轴的一束光入射。

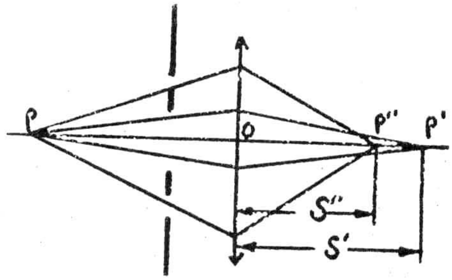
2.假设物的光束与主轴所成的角度很小。

3.媒质的折射率对所有的光线来说都是常数。

但是，在实际工作中，这三个条件都不可能很好的被滿足。因为它既限制了光强（要求细光束入射），又限制了视場范围（只限制轴附近的点）而在半导体生产中使用光学仪表工作时：①被成象的物体总有一定大小（例如光刻版有一定大小），②要有一定光强（不是近轴光束），③一般照明都不是单色光。因此，以上三条限制，不适合生产的需要。这样，在上述条件不滿足时，总会出现这样或那样的象差，从而影响着透鏡成象的质量。我们研究这些象差及造成这些象差的原因，就为我们想法消除象差，提高透鏡质量指出了方向。

一、寬闊光綫入射所引起的球面象差

当上述第一个条件不滿足时，即不是近轴光线而是寬闊的光线入射时，由于边缘光束在透鏡中折射比近轴光束在透鏡中折射得更厉害，从而出现球面象差，例如图(3—20)，光点 p 位于主轴上，从 p 点发出的近轴光线经透鏡后相交于 p' 点，p' 点距透鏡为 s'，而经过透鏡边缘的光线由于折射更厉害而相交于 p'' 点，该点到透鏡的距离为 s'' 而 $s''-s'=\triangle s$ 这个量就决定了这个透鏡的轴向球面象差。对于凸透鏡 $\triangle s<0$，对于凹透鏡 $\triangle s>0$ 由于这种象差的存在，从物点上发出的光线，并不完全会聚于一点，从而使成象不清。

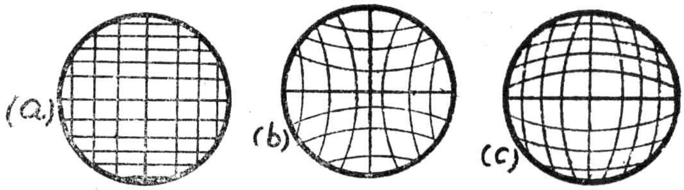


图（3—20）

为了消除和减小这种象差，可以用凸、凹透鏡适当的组合；适当的限制视場的大小和透鏡的通光口径。

二、軸外傾斜光束所引起象的畸变

当第二个条件不被滿足时，即物体向透鏡所发出的光线与透鏡的光轴构成大角度时，将产生物象的畸变，产生这类象差的原因在于：透鏡的放大率是随着光束与透鏡主轴所成角度不同而变，也即图形各不同部分放大倍数不同，而使象变了样，这类的象差叫做畸变，若物体是网状图形，如图(3—21) a，由于透鏡的畸变，象就要变形，如果放大倍数随离开光轴的距离而增加，则所成的象如图 b 所示，如果放大倍数随离开光轴的距离而減小，则所成的象如图 c 所示，由于畸变只改变象的几何形状而不影响象的清晰程度，故在一般观察用的仪器中其影响不大，但是当所成的象用来作精密測量时（如地形测量、航空攝影等）就必须設法消除这程象差。



图（3—21）

三、折射率随光的顏色而改变所引起的色散

在以上一系列的討论中，我们都认为透鏡的折射率是一个常数，这只有在单色光入射的情况下才是正确的，实际上一般所用的白光（如日光）就是由不同颜色的光混合的（如紅橙黄绿青兰紫），实验发现，同一透鏡对于不同顏色的光，即使是近轴光线，其折射率都不相同，一般紫光的折射率就比红光的折射率大。在图(3—22)中如果在 p 点放一个紫光和红光的混合光源，经透鏡折射后，由于折射的情况不同，紫色光在 p'' 相交而红光在 p' 相交，