



中学物理教师用书

# 几何光学

王天谔

北京教育出版社

# 几 何 光 学

王 天 谔

北 京 教 育 出 版 社

# 几何光学

jǐ hé guāng xué

王天濂

•

北京教育出版社出版

(北京北三环中路6号)

新华书店北京发行所发行

安平印刷厂印刷

•

787×1092毫米 32开本 7印张 152,000字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数 1—1,260

ISBN 7—5303—0000—8/O·1

定价: 2.45元

## 内 容 提 要

本书是《中学物理教师用书》中的一种，内容有以下几部分：引言；一、几何光学的基本定律；二、光路计算举例；三、物和像的概念；四、光在单球面上的折射；五、理想光学系统 厚透镜；六、薄透镜；七、反射成像；八、光度学的基本概念；九、像差和光阑；十、眼睛和助视光学仪器。全书全面、细致地阐述了几何光学中的概念，规律、现象以及它们之间的本质联系。

## 编 者 的 话

中学物理教学的不断发展和改革，对广大物理教师在业务上提出了新的要求。为了帮助教师深入理解物理学基础理论的主要内容，以便高屋建瓴地驾驭教材，我们编写了这套《中学物理教师用书》。

这套丛书按全日制重点中学教材系统选题，每个选题自成系统，分册出版(书目见后)。每一分册基本上与中学物理课本的一章相对应。这套书不是供教师直接用于讲课的教学参考资料。它是从普通物理的高度或运用理论物理的观点，对中学物理中重要概念、规律的来龙去脉以及与有关知识的联系，进行较系统的分析和阐述，把高等师范院校物理课与中学物理课的知识加以沟通。书中对中学物理教师在教学中遇到的学生难于理解、掌握的内容和常见的错误，进行了深入的分析。为了开阔教师思路，本套书也适当提供了一些与基本概念、规律、方法有关的物理学史资料；对中学物理课所涉及的物理学内容至今的发展状况以及近代物理知识，也做了一些介绍。

这套书是应广大中学物理教师的要求而写的。在确定选题、制定编写方针的过程中，北京师范大学的阎金铎同志、北京15中学的周誉蔼同志和北京师范大学的乔际平同志提了许多有益的建议、做了很多工作。本套书各册的提纲都是经王天谔、王杏村、申先甲、乔际平、周誉蔼、张维善、唐树

德、常利、钱玄、梁敬纯、阎金铎、缪秉成、魏凤文等同志集体讨论确定的。

我们希望这套书能够对中学物理教师进修提高和钻研教材都有用处。但由于我们的水平所限，很难如愿。盼望广大中学物理教师在使用中提出宝贵意见。

一九八五年十二月

# 目 录

引 言	1
一、几何光学的基本定律	6
(一)光线、光束和波面	6
(二)费马原理	6
(三)惠更斯原理和几何光学的基本定律	10
(四)折射率	13
二、光路计算举例	17
(一)平行透明板的光路	17
(二)三棱镜主截面内的光路	20
(三)虹和霓	32
(四)光学纤维	40
三、物和像的概念	46
(一)单心光束及其顶点	46
(二)物和像的概念	47
(三)物和像概念的扩大 实像和虚像 实物和虚物	48
(四)元光束的近似成像, 像散光束	52
(五)关于小孔成像的“像”	56
四、光在单球面上的折射	58
(一)符号规则	58
(二)单球面折射成像公式	62
(三)单球面折射成像的近似性 近轴条件	69

(四)垂轴放大率.....	72
五、理想光学系统 厚透镜.....	76
(一)理想共轴光学系统.....	76
(二)理想光学系统的研究方法.....	77
(三)理想光学系统的基点和基面.....	79
(四)基点基面成像法的几何作图和解析法.....	82
(五)厚透镜的基点和基面.....	105
六、薄透镜.....	95
(一)关于薄透镜的几个概念.....	95
(二)薄透镜成像的几何作图.....	100
(三)薄透镜成像的解析法.....	104
(四)薄透镜成像情况的讨论.....	119
(五)共轴薄透镜组.....	124
(六)透镜焦距的测量.....	129
七、反射成像.....	140
(一)平面镜成像.....	140
(二)球面镜.....	147
(三)抛物面镜及其焦点.....	152
(四)球面透镜的反射成像.....	159
八、光度学的基本概念.....	159
(一)辐射通量和光通量.....	159
(二)发光强度和面发光度.....	162
(三)照度和照度定律.....	165
(四)光度学的计量单位.....	167
九、像差和光阑.....	173
(一)实际光学系统的像差是不可避免的.....	173
(二)光阑.....	174



(三)单色像差的初步概念 .....	175
(四)色差 .....	183
十、眼睛和助视光学仪器 .....	185
(一)眼球的构造 .....	185
(二)示意眼和简化眼 .....	186
(三)眼睛看清物体的条件 .....	188
(四)眼睛屈光的缺陷及其矫正 .....	192
(五)视觉 .....	196
(六)眼睛对于物像的观察 .....	200
(七)助视光学仪器的放大本领 .....	204
(八)放大本领和分辨本领 .....	211

# 引 言

几何光学又叫光线光学，它以光的直线传播为基础，研究光在透明媒质中的传播问题。人类从大量的光学现象和光学实验中归纳出几条基本的实验定律，由此出发，运用演绎的方法，建立了光路的计算、光具组成像的理论，并进一步研究这些理论在科学技术中的应用。其中演绎的方法，通常是借助于几何学的方法，因而常把这部分光学的内容叫做几何光学。

几何光学是物理学中比较古老的一部分内容。它的建立和发展大致可以分为三个阶段。

## (1) 积累经验阶段

古代，人们在日常生活和生产中遇到了大量的光学现象，由此开始积累了许多光学知识。最早用文字比较系统地记录了光现象的是中国人，早在春秋战国时期，以墨翟（公元前468—392年）为代表的墨家学派所著的《墨经》中，关于光学的论述有八条，排在《经下》第十八条至第二十五条。其中论述了影的定义和生成；光和影的关系；光的直线传播，小孔成像；光的反射；光和光源的关系，如何确定影的大小；平面镜中物和像的关系；凹面镜中物和像的关系；凸面镜中物和像的关系等。在西方，最早记录光现象的文字是欧几里德（古希腊，公元前330—275年）著的《光学》。到15—16世纪，

凹面镜、凸面镜、凹透镜和凸透镜等光学器件相继出现，十六世纪末，荷兰的眼镜制造业已是十分健全的工业。约在1599年，荷兰人詹森发明了显微镜，1608年，荷兰人李普塞制造了第一架望远镜。发明显微镜和望远镜的消息迅速在西欧传开，伽利略把两个透镜固定在一个管筒的两端，一个是平凸透镜，一个是平凹透镜，制得伽利略望远镜，并用做天文观察。开普勒在《屈光学》中论述了显微镜和望远镜的光学原理，提出用两个凸透镜制造望远镜，叫做天文望远镜或称开普勒望远镜。望远镜和显微镜的使用促进了天文学和生物学的发展。

## (2) 建立几何光学理论的阶段

从公元前四世纪到公元十七世纪，经历了2000多年，人类积累了大量光学现象和实验事实，归纳总结出几何光学的基本定律，奠定了几何光学的理论基础。如同其它科学理论一样，几何光学理论的建立经历了一个漫长阶段。例如，关于折射定律，最早利用实验研究折射现象的是希腊人托勒密（公元70—147年）。如图1带有刻度的圆盘，一半浸在水中，

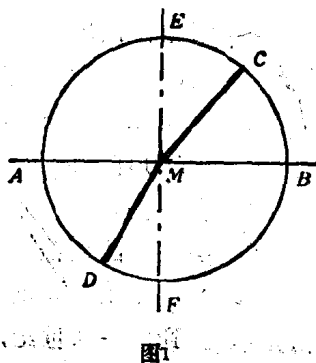


图1

$CM$  和  $DM$  为两细直杆，均固定于  $M$ ，且能绕  $M$  转动。将  $DM$  浸于水中，并转动  $DM$ ，直到从空气中看来  $DM$  与  $CM$  成一条直线，测出入射角  $i$  ( $\angle CME$ ) 和折射角  $r$  ( $\angle DMF$ ) (见表1)。他认为折射角和入射角成正比。以后，德国人开普勒在《屈光学》中记载了他对折射

表1

入射角 $i$	折射角 $r$	
	托勒密的值	现代值
$10^\circ$	$7^\circ 45'$	$7^\circ 29'$
$20^\circ$	$15^\circ 30'$	$14^\circ 52'$
$30^\circ$	$22^\circ 30'$	$22^\circ 01'$
$40^\circ$	$29^\circ$	$28^\circ 49'$
$50^\circ$	$35^\circ$	$35^\circ 04'$
$60^\circ$	$40^\circ 30'$	$40^\circ 30'$
$70^\circ$	$45^\circ 30'$	$44^\circ 48'$
$80^\circ$	$50^\circ$	$47^\circ 36'$

现象的研究。如图2所示，太阳光线  $L$ 、 $M$ 、 $N$  把一个竖直屏的直边  $CBD$  的影子投射到该装置的水平底座上，有些光线未折射，投下阴影  $HK$ ；另一些光线通过透明立方体的折射，投下阴影  $IG$ 。根据屏的高度  $BE$  和这两种情况下形成的两个阴影的长度  $EH$  和  $EG$ ，可以推出在立方体表面上光的

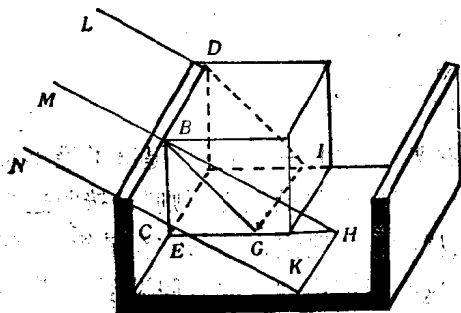


图2

的入射角和折射角之比。经过多次测量，开普勒断定入射角较大时，托勒密的结论不成立，只有当入射角小于  $30^\circ$  时，托勒密关于折射角和入射角成正比的结论才成

立。

一般认为，确定折射定律的有两个人。一位是荷兰数学家斯涅耳(1591—1626年)，他用跟开普勒类似的方法做实验：光从空气射入水中，落在容器的垂直器壁上的光线  $ODF$  中  $DF$  的长度，同该光线如未偏折而直接射到容器的垂直器壁上的光线  $ODC$  中  $DC$  的长度之比是常数，如图 3 所示。

$$\frac{DC}{DF} = \frac{AD \cdot \csc i}{AD \cdot \csc r}$$

$$= \frac{\csc i}{\csc r}$$

$$= \text{常数。}$$

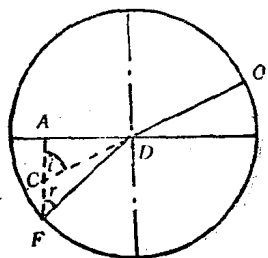
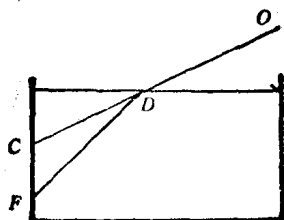


图3

另一位是法国数学家笛卡儿(1596—1650年)，他从光的微粒观念出发，认为①光在较密的媒质中光速较大(现在知道，这是错误的)；②在相同的媒质里这些速度对各种入射角都有相同的比率；③折射时，平行于折射界面的速度分量保持不变(现在知道，这也是错误的)；导出了折射定律的现在的形式，即

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{常数。}$$

1657年，法国科学家费马(1601—1665年)提出了最小时间原理，“自然界的行爲永远以路程最短为原则”，按照这个原则，“光永远是选择这样的一条路走，以便它在最短时间内抵达目的地”。费马由这个原理出发，并且假设不同媒质中“阻力”不同，推得折射定律。以折射定律为标志，可以认

为在十七世纪，几何光学的基本定律就基本确定下来了。

### (3) 几何光学理论的发展

确定了几何光学的基本理论以后，可以进一步研究光路的计算和光具组成像的理论。1704年，牛顿在《光学》一书中，提出了成像的牛顿公式，即  $x \cdot x' = f \cdot f'$ 。1841年，高斯建立了理想光具组的一般理论，为应用光学奠定了基础，推动了光学仪器的发展。光学仪器的发展又促进了光学理论的深化，以光具组成像为中心的应用光学得到迅速发展。

随着光学知识的丰富，关于光的本性的研究也进入了新阶段。波动光学、电磁理论、量子光学等理论相继出现，它们都从光的本性出发，研究光的传播规律，进一步给出了几何光学实验定律的理论基础，并且指出了几何光学的局限性和近似性。

# 一、几何光学的基本定律

## (一) 光线 光束和波面

在各向同性的媒质中，光沿着直线传播，因此，可以用一条带有箭头的直线代表光的传播，箭头的方向代表了光的传播方向，称之为光线。

光线是几何光学中的一个抽象模型，引入它为研究几何光学提供了方便。它代表了光的传播方向，或者是光能量的传播方向。光是一种波动，光的传播遵循着波的传播规律。波在空间传播时所有同相点的集合叫做波面，光波波面的法线方向就是光波的传播方向，即几何光学中的光线。因此，光线总和光波的波面正交，同一波面上各点的法线对应着过这些点的光线，这些有一定关系的光线的集合叫做光束。

光线不是光，也不是非常细窄的光束。实际上，从光源发出的光中借助于小孔或狭缝分离出一束非常细窄的光束是不可能的。孔径或狭缝足够小时，由于衍射作用，通过小孔或狭缝的光束就不再沿着直线传播了，光线的概念也就没有意义了。从这种意义上讲，光线是忽略了光的衍射的极限条件下的抽象模型。

## (二) 费马原理

费马原理是从光程的角度描述光的传播规律的。

历史上，人们曾试图用光在两点之间走最短的路程来说

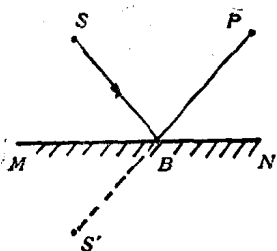


图1-1

明光的传播。如光反射时，光从某点  $S$  发出，经反射界面反射后到另一点  $P$ ，实际走的路径是所有可能的路径中，路程最短的一条。如图1-1所示，由  $S$  点发出的光，经界面  $MN$  反射后，到达  $P$  点。其中以  $SBP$  的光线所走的路程最短， $B$  点是  $S'P$

与界面  $MN$  的交点， $S'$  点是  $S$  点关于  $MN$  面的对称点。对于反射界面  $MN$  来说， $SB$  是入射光线， $BP$  是反射光线。这与反射定律给出的结果是一致的。但对于折射现象，上述光在两点间走最短的路程显然是不正确的。

例如，光由真空中的  $A$  点发出，进入媒质中，到达  $B$  点，如图1-2所示。显然，最短路程  $AO'B$  不符合光折射的实际情况。

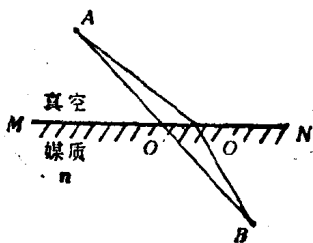


图1-2

1657年，法国科学家费马(1601—1665年)提出最小时间原理。指出，光由某一媒质中的  $A$  点到另一媒质中的  $B$  点，沿着所需时间为最短的路径传播。这是费马原理最初的形式。例如，图1-2中，光由真空中的  $A$  点，到达媒质中的  $B$  点。设真空中的光速为  $c$ ，媒质中的光速为  $v$ ，如果光沿着最短路程即  $AO'B$  传播，它所用的时间  $t$  为

$$\begin{aligned} t &= \frac{AO'}{c} + \frac{O'B}{v} \\ &= \frac{1}{c} \left( AO' + \frac{c}{v} \cdot O'B \right) \\ &= \frac{1}{c} \left( AO' + n \cdot O'B \right). \end{aligned}$$



可以证明，光由  $A$  沿着不同的可能路径到  $B$ ，所需的时间是不同的，这些时间之中， $t = \frac{1}{c}(AO' + n \cdot O'B)$  不是最短的。按照费马原理， $AO'B$  不是光的实际路径，也就是说，光由真空进入媒质时，要发生偏折，它的实际路径  $AOB$  应满足  $t = \frac{1}{c}(AO + n \cdot OB)$ ， $t$  是最短的时间。其中  $n = \frac{c}{v}$  叫媒质的折射率， $AO$  是光在真空中传播的路程， $OB$  是光在媒质中传播的路程， $n \cdot OB$  即媒质的折射率和媒质中光走的路程的乘积，叫做光在媒质中的光程。光程的意义是在相同的时间内光在媒质中所走的距离折合成光在真空中所走的距离。引入光程的概念， $AO + n \cdot OB$  就是由  $A$  到  $B$  的总光程，费马原理又可以称为最短光程原理。

在各向同性的均匀媒质中，光在该媒质与其它媒质的界面上被反射，光传播的最短光程和最短路程是一致的，都与光的反射定律相一致。光由一种媒质进入另一种媒质时，最短光程和最短路程就不一致了，光的传播是按照费马原理由最短光程来确定的，它与折射定律相一致。

利用费马原理可确定光由媒质 I 中的  $A$  点到达媒质 II 中的  $B$  点的光路。设两种媒质的交界面是一个平面  $P$ ，媒质 I 的

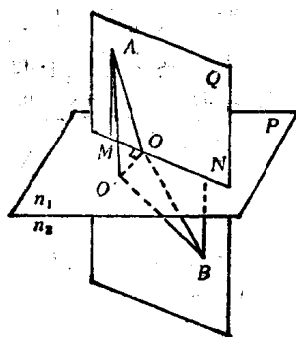


图 1-3

折射率为  $n_1$ ，媒质 II 的折射率是  $n_2$ 。首先，确定由  $A$  到  $B$  的入射光线和折射光线都在与界面  $P$  垂直的平面内。如图 1-3 所示，分别过  $A$ 、 $B$  两点做平面  $P$  的垂线  $AM$  和  $BN$ ，这两条垂线所决定的平面  $Q$  与平面  $P$  垂直，两个平面的交线为  $MN$ ，则入射光线和折射光线都应在平面  $Q$  内，入射