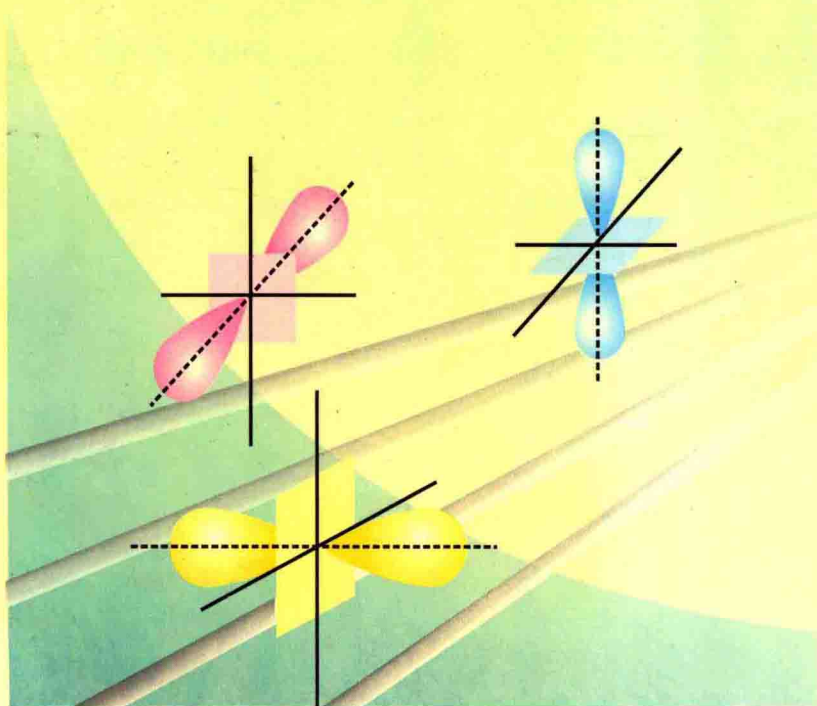


下 册

物理学教程

主编 宋太平 梁建均 邱敏



四川大学出版社



物理学教程

(下册)

主 编 宋太平 梁建均 邱 敏

副主编 杨兴强 闫荣义 苏本庆

吴寿煜 曾云飞 尹中文

编 委 滕 敏 姚 恺 曹富涵

王清林 崔甲武 黄金书

四川大学出版社

责任编辑:孙康江

责任校对:贾朝辉

封面设计:罗 光

责任印制:曹 琳

图书在版编目(CIP)数据

物理学教程/宋太平主编. —成都:四川大学出版社, 2000. 8

ISBN 7-5614-1967-8

I. 物... II. 宋... III. 物理学—高等学校—教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 40533 号

书名 物理学教程

作 者 宋太平等 主编

出 版 四川大学出版社

地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)

印 刷 南阳市第四印刷厂

发 行 四川大学出版社

开 本 850mm×1 168mm 1/32

印 张 22.625

字 数 567.6 千字

版 次 2000 年 8 月第 1 版

印 次 2000 年 8 月第 1 次印刷

印 数 0 001~2 000 册

定 价 (上、中、下三册共)27.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电 话:5412526/5414115/
5412212 邮 编:610064

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回印刷厂调换。

版权所有◆侵权必究

前 言

为适应当前师范院校非物理专业的教学需要，配合教学改革和三年制教学方案的实施，我们七所院校长期从事普通物理教学的教师合作编写了这本《物理学教程》，本书可作为四年制本科院校、三年制专科学校和教育学院非物理专业的普通物理教材，也可供有关大专院校的师生参考。

本书以四年制本科院校和三年制专科学校的非物理专业教学大纲为依据，参阅了国内、外的许多普通物理教材，力图吸收众家之长，针对非物理专业学生的特点，注重基本概念、基本规律的科学性和系统性的叙述，注重理论联系实际，侧重对学生能力的培养。该书的特点是：叙述严谨，体系完整、新颖，语言简练，例题典型。每章都附有一定数量精选的习题，大部分章节还附有思考题，有利于学生加深对理论知识的理解，提高分析问题和解决问题的能力。在内容的编排上，部分章节带有“*”，为选学内容，以适应不同专业、不同层次的学生使用该教材。教师可根据具体情况选讲，不影响整个体系的学习。

本书包括力学基础、分子运动论和热力学、电磁学、光学和近代物理学基础等五篇，共十九章内容，由宋太平、梁建均和邱敏主持编写。具体分工为：杨兴强（南阳师范学院）编写第一章；吴寿煜（开封师专）编写第二章；滕敏（新乡教育学院）编写第三章、第六章的第八节至第十节；邱敏（黑河师专）编写第四章的第一节至第八节；苏本庆（新乡师专）编写第五章和第九章；姚恺（新乡师专）编写第六章的第一至第七节、思考题和习题；曾云飞（南阳电大）编写第十一章、第四章的第九节至习

题；梁建均（安阳师范学院）编写第七章和第八章；宋太平（南阳师范学院）编写第十章和第十六章；曹富涵（开封师专）编写第十二章的第一至第六节；尹中文（南阳师范学院）编写第十三章；黄金书（南阳师范学院）编写第十四章的第一至第三节；崔甲武（南阳师范学院）编写第十五章、第十二章的第七节至习题；王清林（开封师专）编写第十七章和第十九章；闫荣义（南阳师范学院）编写第十八章、第十四章的第四节及习题。

在本书的编写过程中，各参编院校的物理系领导给予了大力支持，并提出了许多建设性的建议，在此表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，加之时间仓促，本书的错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2000年7月

第四篇 光 学

光学是物理学的一个重要组成部分。它是研究光的本性，光的发射、传播和接收，以及光与物质的相互作用，及其在生产、生活中的应用的基础学科。按照光学发展的历史和研究方法的不同，通常将光学分为几何光学、波动光学、量子光学和近代光学四部分。本篇讨论前三个部分。

第十三章 几何光学

撇开光的本性，以光的直线传播性质为基础，借助光线的概念，用几何学的方法研究光在透明介质中的传播规律的光学分支称为几何光学。虽然几何光学没有体现光的电磁波本性，是波动光学的近似理论，但在讨论光在透明介质中的传播规律时，方法简便、直观，其结果令人满意。因此，几何光学是研究光的传播和光学仪器的设计、制造的重要工具，只有在光的衍射效应不可忽略时，才根据波动理论作必要的修正和补充。

本章首先介绍几何光学的几个基本实验定律，在此基础上研究棱镜的折射与色散，光在单球面上的折射与反射。最后讨论薄透镜的近轴成像。

13.1 几何光学的基本定律和原理

光的传播所遵循的三条实验定律是研究几何光学的基础，这些定律的表述，需要借助光线的概念，光线是几何光学中最基本概念，所谓光线，就是表示光传播方向的几何线。光的传播伴随着能量的传播。因此，光线也表示光能量的传播方向。

13.1.1 光的直线传播定律

光在同一种均匀介质中沿直线传播。即在均匀介质中，光线为一有向直线。光的直线传播是日常生活中到处可见的现象，小孔成像，影的形成，日食和月食等等都是明显的实例。

应当指出的是，光在非均匀介质中传播时，光线将因折射而弯曲，“海市蜃楼”、“沙漠幻景”就是光沿曲线传播的例子。

13.1.2 光的独立传播定律

向不同方向传播的光在空间相遇时，互不发生影响，各自仍按原来的方向继续传播的规律称为光的独立传播定律。例如节日广场上的探照灯光，在空间相交后，仍按各自原来的状态继续传播，互不影响。

使光的独立传播定律成立的介质称为线性介质。讨论光在非线性介质中传播规律的光学称为非线性光学，它是近代光学的重要部分。

13.1.3 光的反射和折射定律

当光射到两种各向同性，均匀透明介质的分界面时，通常情况下，一部分反射后在原来介质中传播，即光的反射现象，另一部分进入第二种介质中并改变传播方向，即光的折射现象。

如图 13-1 所示， MM' 表示两种介质的分界面， AO 是入射光线， OB 是反射光线， OC 是折射光线， NN' 是过入射点 O 的界面法线（简称为法线）。入射线与法线构成的平面叫做入射面，入射线与法线的夹角 i_1 叫做入射角，反射线与法线的夹角 i_1' 叫做反射角，折射线与法线的夹角 i_2 叫做折射角。

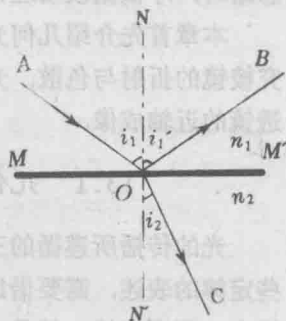


图 13-1

实验证明，反射光线和折射光线随入射光线方向的改变而改变，并且遵守下述规律：

(1) 反射定律：反射光线在入射面内而且和入射光线分居法线的两侧，反射角等于入射角（绝对值），即

$$i_1 = i_1' \quad (13-1)$$

(2) 折射定律：折射光线在入射面内并和入射光线分居法线的两侧，入射角的正弦和折射角的正弦之比，与入射角和折射角都无关，而是一个由两种介质光学性质和光的波长决定的常数。这个定律可以写成。

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad (13-2)$$

常数 n_{21} 称为第二种介质相对于第一种介质的折射率，也叫做相对折射率。而 n_2 和 n_1 分别叫做第二种介质和第一种介质的绝对折射率。简称折射率，它表示该种介质相对于真空的折射率。按照光的电磁理论，介质的折射率 n 等于真空中的光速 c 与该种介质中的光速 v 之比，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (13-3)$$

折射率是介质的重要光学常数，它随光的波长改变而改变，手册中一般给出了对于钠黄光 ($\lambda = 589.3\text{nm}$) 的介质折射率。几种常见介质的折射取值为：

空气： $n = 1.00028 \approx 1$

玻璃： $n = 1.5$

水： $n = 1.333 \approx \frac{4}{3}$

两种介质相比较，折射率较大者称为光密介质，折射率较小者称为光疏介质。例如水相对于空气是光密介质，而相对玻璃为光疏介质。

13.1.4 全反射

由 (13-2) 式, 若 $n_2 < n_1$, 则 $i_2 > i_1$, 即光由光密介质入射光疏介质界面时, 折射光线远离法线. 当折射角 $i_2 = 90^\circ$ 时的入射角叫做临界角, 用 i_c 表示. 当入射角 $i_1 > i_c$ 时, 入射光的能量将全部反射回光密介质中传播, 这种现象叫做全反射. 如图 13-2 所示. 由 (13-2) 式可得:

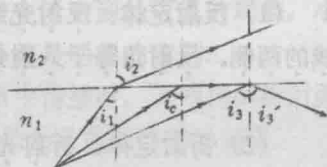


图 13-2

$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (13-4)$$

全反射时没有能量的透射损失, 因而应用甚广, 全反射棱镜和通讯光缆中的光学纤维, 都是利用全反射原理制成的.

13.1.5 光的可逆性原理

光的传播是可逆的, 当光线的方向反转时, 光将沿同一路径逆向传播, 这一规律称为光的可逆性原理. 在图 13-1 中, 若光沿 BO 方向入射, 则沿 OA 方向反射, 若光沿 CO 方向入射, 则沿 OA 方向折射.

13.2 棱镜的折射与色散

棱镜是由两个以上平面界面所围成的透明介质元件. 光线从一个面射入棱镜, 从另一个面射出, 从而发生两次折射, 这两个面叫做棱镜的折射面. 两折射面的交线叫做棱镜的“棱”, 两折射面的夹角叫做顶角, 顶角所对的平面叫做底面. 与棱垂直的平面叫做主截面. 主截面是三角形的叫做三棱镜. 棱镜是重要的光学元件, 其主要作用有两个, 一是对单色光发生偏折, 二是对复色光产生色散.

13.2.1 单色光经三棱镜的折射

如图 13-3 所示, $\triangle ABC$ 为三棱镜的一个主截面, 顶角用 α

表示. 我们只讨论光线在主截面内的传播情况. 光线经两个折射面 AB , AC 两次折射后射出棱镜, 出射光线与入射光线的夹角称为偏向角 δ . 由图可知

$$\delta = (i_1 - i_2) + (i_1' - i_2')$$

$$= (i_1 + i_1') - (i_2 + i_2')$$

$$\alpha = i_2 + i_2'$$

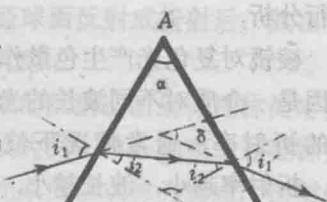


图 13-3

所以有 $\delta = i_1 + i_1' - \alpha$

对于给定顶角 α 的三棱镜, 偏向角 δ 随入射角 i_1 改变而改变. 可以证明, 当 $i_1 = i_1'$ 时, 偏向角为最小值, 用 $\delta_{\min}$ 表示

$$\delta_{\min} = 2i_1 - \alpha$$

又当 $i_1 = i_1' = \frac{\delta_{\min} + \alpha}{2}$ 时, $i_2 = i_2' = \frac{\alpha}{2}$

利用折射定律

$$\sin i_1 = n \sin i_2$$

$$\text{可得: } n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{\delta_{\min} + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (13-5)$$

由 (13-5) 式, 测出棱镜顶角 α 和对钠光 ($\lambda_D = 589.3\text{nm}$) 的最小偏向角 $\delta_{\min}$, 就可求出棱镜材料的折射率 (介质折射率一般都是相对 λ_D 而言的), 这是测量折射率的常用方法之一.

13.2.2 三棱镜对复色光的色散

如图 13-4 所示, 让一束白光通过三棱镜后, 在棱镜后的光屏上将形成一个按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色顺序排列的彩色光带, 这种复色光因折射分解为各种色光的现象叫色散. 色散后形成的按波长顺序排列的彩色光带叫光谱. 棱镜摄谱仪就是利用棱镜的色散作用拍摄光谱, 从而对入射光的波长成份

进行分析。

棱镜对复色光产生色散作用的原因是，介质对不同波长的光有不同的折射率，通常情况下波长越大，折射率越小，波长越小，折射率越大（存在非线性关系）。白光中红光波长最大，折射率最小；紫光波长最小，折射率最大。因而白光经棱镜折射后，红光偏折最小，紫光偏折最大。其它色光介于其间，就形成了上述彩色光谱。

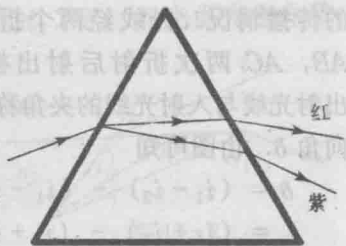


图 13-4

另外，全反射棱镜和倒像棱镜也有重要应用，不再讨论。

13.3 光在单球面上的折射和反射

凡对光束具有反射或折射作用的介质界面及其组合均可称为光学系统。单球面是最基本的光学系统之一，也是构成光学仪器的基本组元。本节讨论光线经单球面折射或反射后传播的规律，其方法是借助成像的概念，给出物点，利用公式法或作图法求出像点，即得出了光经过光学系统后的传播规律。因为过物点的任一入射光线，经理想光学系统后，出射光线必过像点，为此，我们先引入几个基本概念。

13.3.1 成像的几个概念

(1) 发光点 只有几何位置而无大小的点，也称为点光源。实际光源因距离较远而本身线度可以忽略不计时，就可看作点光源，线度不可忽略时，则可作为点光源的集合。

(2) 光束 有一定关系的光线的集合叫做光束。光束中各光线具有共同交点的光束叫做单心光束，这一点称为光束的心或顶点。由一个发光点发出的光束为单心光束，发光点的距离为无限

远时，变为平行光束。单心光束经球面反射或折射后，其出射光线一般不再交于一点，称为像散光束。

(3) 物与像 光学系统对光束的反射或折射作用称为对光束的变换。单心光束经光学系统变换为另一单心光束的过程称为成像。对一个光学系统而言，入射光束的顶点称为物点，出射光束的顶点称为像点。物和像都有虚实之分，对同一个光学系统而言，发散的人射光束的顶点称为实物点，会聚的人射光束的顶点

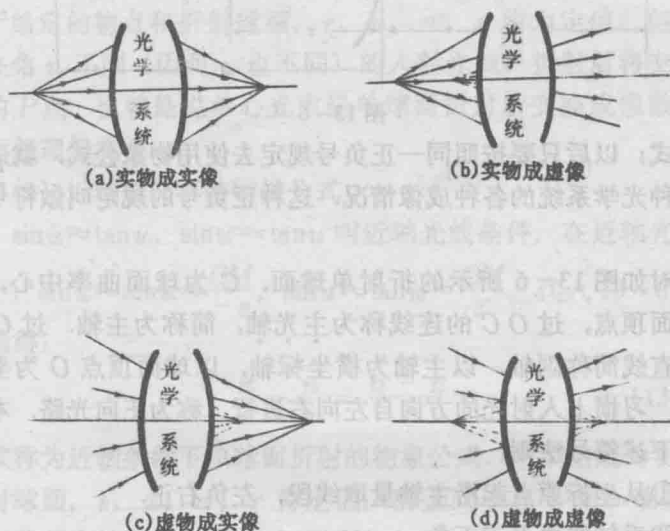


图 13-5

称为虚物点；会聚的出射光束的顶点为实像点，发散的出射光束的顶点为虚像点。对于一个光学系统，实物可以成实像，也可能成虚像；虚物可以成实像，也可能成虚像。图 13-5 给出了几种点物成点像的情况。

13.3.2 符号法则

如前所述，物和像都有虚实之分，既与物点位置有关，也与

光学系统性质有关。就球面光学系统而言，球面又有凸凹之分。为了使我们对某一光学系统的一种成像情况进行分析，得出的结果对该种光学系统的各种成像情况都普遍适用，有必要对球面半径、物、像位置，高度等参量采用统一的正负号规定，总结出物

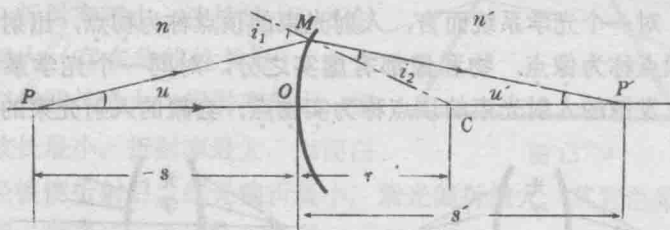


图 13-6

像公式；以后只要按照同一正负号规定去使用物象公式，就适用于该种光学系统的各种成像情况。这种正负号的规定叫做符号法则。

对如图 13-6 所示的折射单球面， C 为球面曲率中心， O 为球面顶点，过 OC 的连线称为主光轴，简称为主轴。过 C 的其它直线简称副轴。以主轴为横坐标轴，以球面顶点 O 为坐标原点。习惯上入射光的方向自左向右进行，称为正向光路。本书采用下述符号法则：

①从坐标原点起沿主轴量取线段，左负右正。

②垂轴线段上正下负。

③图上标记绝对值，称全正图形。

图中 O 点到轴上物点的距离称为物距 s ，因 $s < 0$ ，图中标记 $-s$ 。若 P 点发出的各光线，经球面折射后都交于 P' 点， P' 点就为 P 点的像点， OP' 称为像距 s' ，图中 $s' > 0$ 。 OC 为球面半径 r ，凸球面 $r > 0$ ，凹球面 $r < 0$ 。

13.3.3 单球面折射成像公式

(1) 单球面折射对光束单心性的破坏

在图 13-6 中, 对 $\triangle PMC$ 和 $\triangle PMC$ 使用正弦定理

$$\frac{r-s}{\sin i_1} = \frac{r}{\sin u}$$

$$\frac{s'-r}{\sin i_2} = \frac{r}{\sin u'}$$

将两式相除并利用折射定律 $n \sin i_1 = n' \sin i_2$ 得

$$s' = r + \frac{n \sin u}{n' \sin u'} (r - s) \quad (13-6)$$

对于给定的物点和折射球面, r, n, n', s 均为定值, 但与主轴夹角 u 不同 (因而 u' 也不同) 的入射光线, 折射后将交于不同的 P 点. 也就是说单心光束经单球面折射后变换成像散光束而不能理想成像.

(2) 近轴条件下的物像公式

$\sin u \approx \tan u, \sin u' \approx \tan u'$ 叫近轴光线条件, 在近轴光线条件下, $\sin u \approx \tan u \approx \frac{OM}{-s}, \sin u' \approx \tan u' = \frac{OM}{s'}$, 代入 13-6 式后化简得:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (13-7)$$

上式称为近轴条件下单球面折射的物象公式. 对于给定的物点和折射球面, s, n, n', r 为定值, 由上式求出 s' 为一确定值, 这意味着由轴上物点 P 发出的近轴 ($u \leq 5^\circ$) 的单心光束, 经球面折射后能交于同一点 P' , 即出射光束仍是单心的. 也就是说, 在近轴光线条件下, 折射单球面能够理想成像. 在正向光路和折射成像情况下, 求出 $s' > 0$ 成实像, $s' < 0$ 成虚像.

(3) 焦点、焦距、焦平面

平行主轴的入射光束经光学系统变换后, 出射单心光束的顶点叫做系统的像方焦点, 用 F' 表示. 从坐标原点 O 到 F' 的距离 OF' 叫做系统的像方焦距 f' . 过 F' 的垂轴平面叫做像方焦平面.

平行副轴的人射光束，出射光束交像方焦平面上一点，此点即副轴与像方焦平面的交点。

平行主轴的出射光束对应的轴上物点叫做系统的物方焦点 F ， OF 叫做物方焦距 f ，相应的过 F 的垂轴平面叫做物方焦平面。物方焦平面上一点发出的光束，出射光线平行于过该点的副

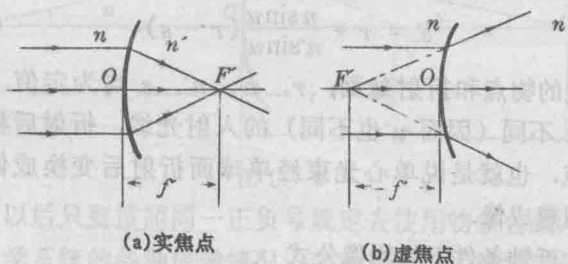


图 13-7

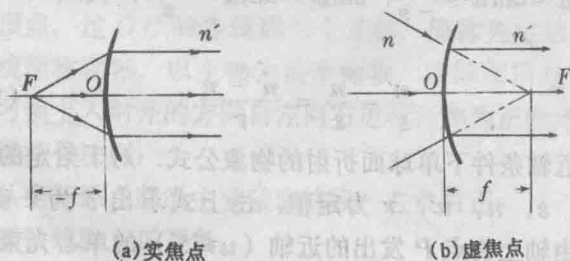


图 13-8

光轴。焦点也有虚实之分。焦点、焦距、焦平面的意义见图 13-7、图 13-8 和图 13-9 所示。

根据焦点和焦距的定义，由 (13-7) 式可求得折射单球面的物、像方焦距分别为：

$$f = \lim_{s \rightarrow \infty} s' = \frac{n'}{n' - n} r \quad (13-8)$$

$$f = \lim_{s \rightarrow \infty} s = -\frac{n}{n' - n}r \quad (13-9)$$

可见
$$\frac{f}{f} = -\frac{n'}{n} \quad (13-10)$$

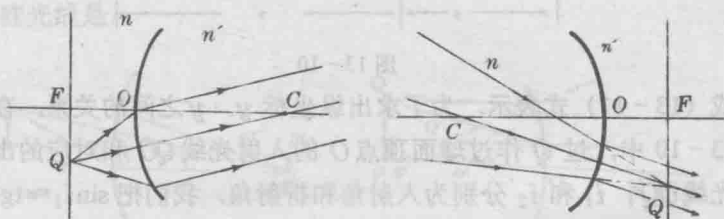
(4) 高斯公式

将焦距表达式 (13-8) 式、(13-9) 式代入 (13-7) 式, 可得单球面折射物像公式的另一形式

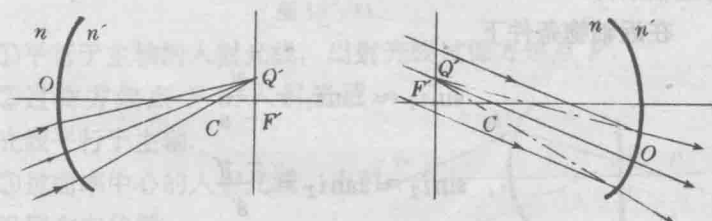
$$\frac{f}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad (13-11)$$

称为高斯公式, 高斯公式是几何光学中的普遍公式, 即对各种成像光学系统均成立, 但不同的光学系统的焦距不同。

(5) 轴外物点成像, 横向放大率



(a) 物方焦平面与副轴



(b) 像方焦平面与副轴

图 13-9

如图 13-10 所示, P, P' 是一对轴上物、像点, 将轴绕球心 C 转一个小角度 φ , P, P' 分别转到 Q_1 与 Q_1' , 当 φ 角足够小时, 弧线 $\widehat{PQ_1}$, $\widehat{P'Q_1'}$ 可看作垂轴线段 $PQ, P'Q'$. 我们把 PQ 叫做垂轴物, 物高为 y , $P'Q'$ 为 PQ 经球面折射后成的垂轴像, 像高为 y' . 或者说 Q 是轴外物点 Q 的轴外像点, s, y 和 s', y' 就分别为 Q, Q' 的横坐标与纵坐标. s, s' 的关系仍由 (13-7) 式

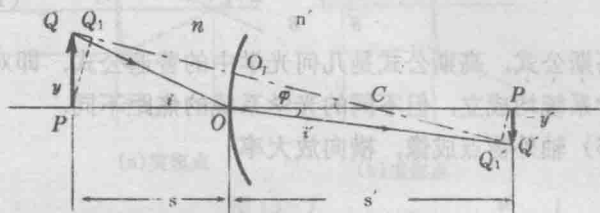


图 13-10

或 (13-11) 式表示. 为了求出纵坐标 y, y' 之间的关系, 在图 13-10 中, 过 Q 作过球面顶点 O 的入射光线 QO 和对应的出射光线 OQ' , i_1 和 i_2 分别为入射角和折射角. 我们把 $\sin i_1 \approx \tan i_1$, $\sin i_2 \approx \tan i_2$ 叫做近轴物条件. 近轴光线条件和近轴物条件合称为近轴条件.

在近轴物条件下

$$\sin i_1 \approx \tan i_1 = \frac{y}{-s}$$

$$\sin i_2 \approx \tan i_2 = \frac{-y'}{s'}$$

代入折射定律

$$n \sin i_1 = n' \sin i_2$$

得

$$\frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \frac{s'}{s}$$