

振动和波动

- **1. 掌握**简谐运动的基本特征、旋转矢量法、简谐运动的能量、简谐运动的动力学方程、两个同频率同方向简谐运动的合成、拍。
- **2. 掌握**简谐波及其波函数、波的能量、能流密度、惠更斯原理、波的干涉、驻波、相位突变。
- **3. 理解**两个同频率相互垂直简谐运动的合成、声波、超声波和次声波、声强级。

第11章-I 几何光学

一 几何光学

1 掌握几何光学的基本定律，包括光的直线传播定律、反射定律、折射定律和全反射条件.

2 掌握光在平面上的反射和折射、光在球面上的反射和折射以及薄透镜的成像公式.

3 了解显微镜、望远镜和照相机的工作原理.

§ 1 几何光学的基本定律

一. 光源和光线

1. 光源

光源—任何发光物体：太阳、烛焰、钨丝白炽灯、日光灯、高压水银荧光灯等

点光源—可看成几何上的点，只有空间位置无体积的光源

2. 光线和光束

光线—光能传播方向的**几何线**

光束—有一定**几何关系**的一些光线的集合

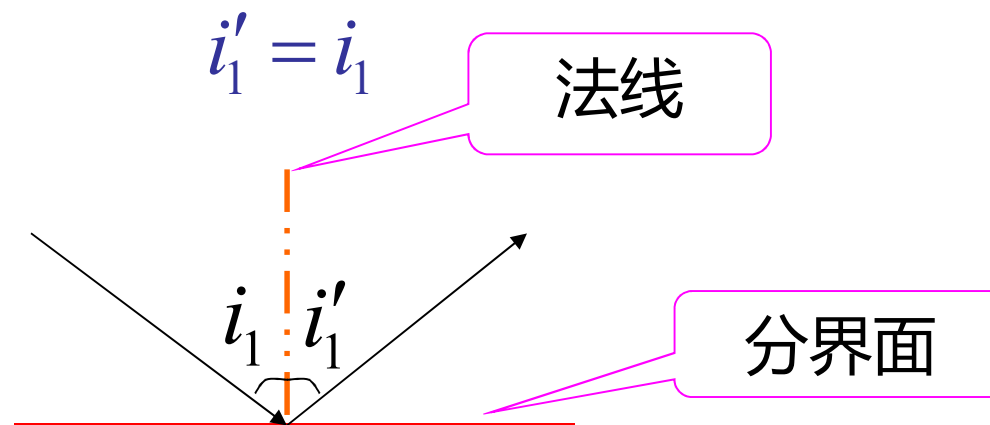
二.几何光学的三定律

1. 光的**直线传播定律**: 光在均匀介质中沿直线传播



2. 光的折射反射定律:

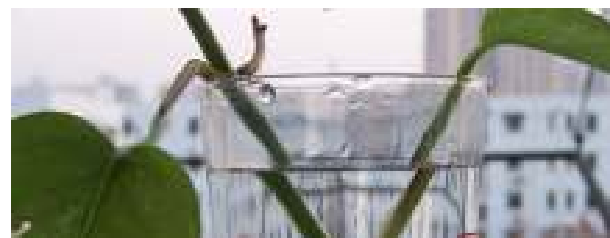
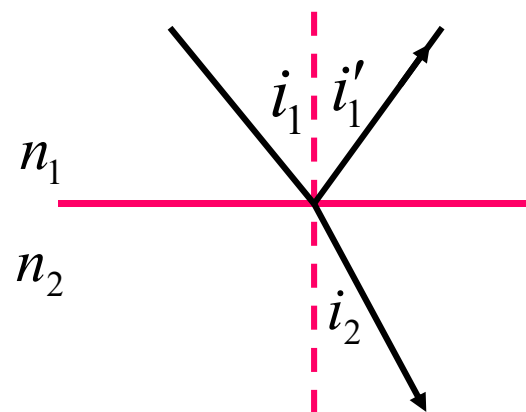
(1) 光的**反射定律**: 反射线位于入射面内, 反射线和入射线分居法线两侧, 反射角等于入射角, 即



(2) 光的**折射定律**：折射线位于入射面内,折射线与入射线分居法线两侧，入射角的正弦与折射角的正弦之比为—与入射角无关的常数，即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

或 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$



介绍

***漫射**：当界面粗糙时,各入射点处法线不平行,即使入射光是平行的,反射光和折射光也向各方向分散开——漫反射或漫折射。

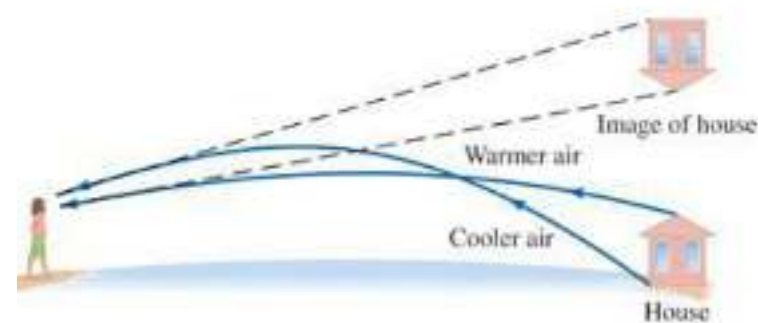
折射定律

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

例子：海市蜃楼

几种常用介质的折射率

媒质	折射率
空气	1.000 29
水	1.333
普通玻璃	1.468
冕牌玻璃	1.516
火石玻璃	1.603
重火石玻璃	1.755



热空气, n 小

冷空气, n 大

海面

3.光的**独立传播定律**和光路可逆性原理

光在传播过程中与其他光束相遇时，各光束都**各自独立**传播，不改变其传播方向。

光沿反方向传播时，必定沿原光路返回。即在几何光学中，任何光路都是**可逆**的。

三、几何光学定律成立的条件

(1) 必须是均匀介质，即同一介质的折射率处处相等，折射率不是位置的函数。

(2) 必须是各向同性介质，即光在介质中传播时各个方向的折射率相等，折射率不是方向的函数。

(3) 光强不能太强，否则巨大的光能量会使线性叠加原理不再成立而出现非线性情况。

(4) 光学元件的线度应比光的波长大得多，否则不能把光束简化为光线。

§2 费马原理

费马原理是一个描述光线传播行为的原理。

一.光程

在均匀介质中,光程为光在介质中通过的几何路程 l 与该介质的折射率 n 的乘积:

$$\Delta = nl$$

$$n = \frac{c}{u} \quad \therefore \frac{\Delta}{c} = \frac{l}{u} \quad \longrightarrow \quad l = ut = u \frac{\Delta}{c}$$

• 直接用真空中的光速来计算光在不同介质中通过一定几何路程所需要的时间。

$$t = \frac{\Delta}{c} = \frac{nl}{c} \Rightarrow \Delta = ct$$

• 光程表示光在介质中通过真实路程所需时间内,在真空中所能传播的路程。

分区均匀介质:

$$\Delta = \sum_{i=1}^k n_i l_i, \quad t = \frac{\Delta}{c} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^k n_i l_i$$

连续介质:

$$\Delta = \int_{(l)} n dl$$

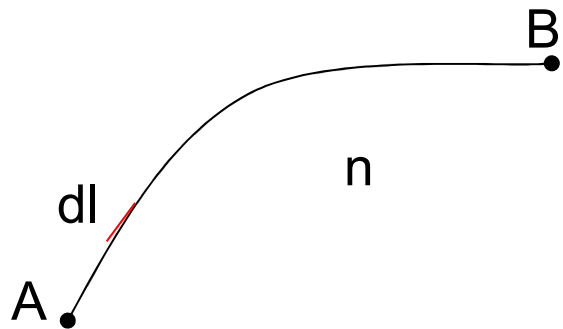
二、费马原理

1.表述：光在空间两定点间传播时，实际光程为一特定的极值。

2.表达式：

$$\int_A^B n \cdot dl = \text{极值}$$

或：
$$\delta \int_A^B n \cdot dl = 0$$



3.说明：

意义：费马原理是几何光学的基本原理，用以描述光在空间两定点间的传播规律。

极值的含义：极小值，极大值，恒定值。一般情况下，实际光程大多取极小值。

三. 由费马原理导出几何光学定律

1. 直线传播定律:

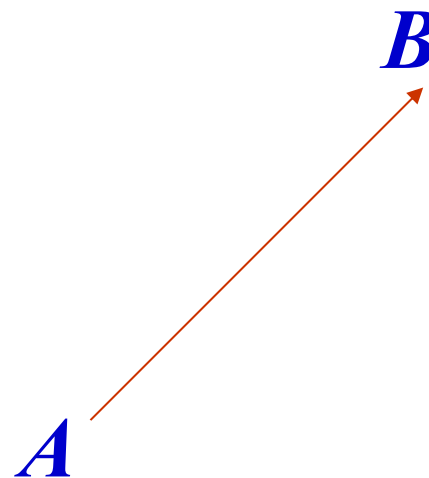
在均匀介质中折射率为常数

$$\therefore \int_A^B n \, dl = n \int_A^B dl$$

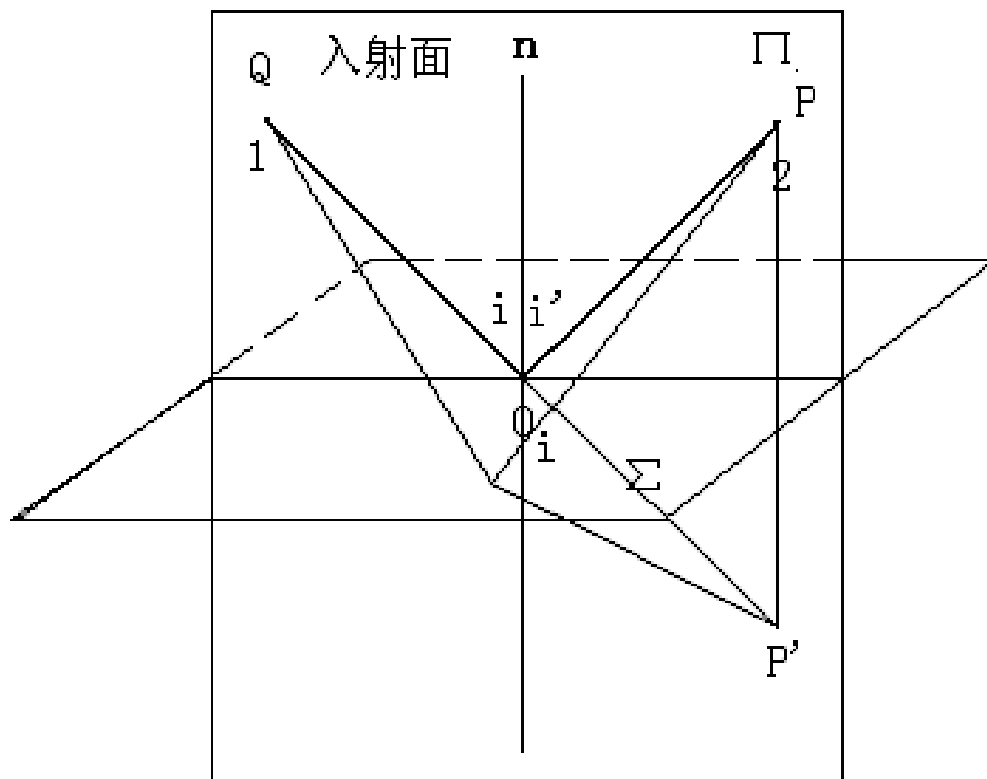
而由公理：两点间直线距离最短

$$\therefore \int_A^B dl \text{ 的极小值为直线 } AB$$

所以光在均匀介质中沿直线传播



2.光的反射定律



$$\Delta = n(QO + OP)$$

则易知当 $i'=i$ 时, $QO + OP$ 为光程最短的路径。

Q点发出的光经
反射面 Σ 到达P点

P'是P点关于 Σ
面的对称点。

P, Q, O三点
确定平面 Π 。

直线QP'与反射
面 Σ 交于O点。

3.光的折射定律:

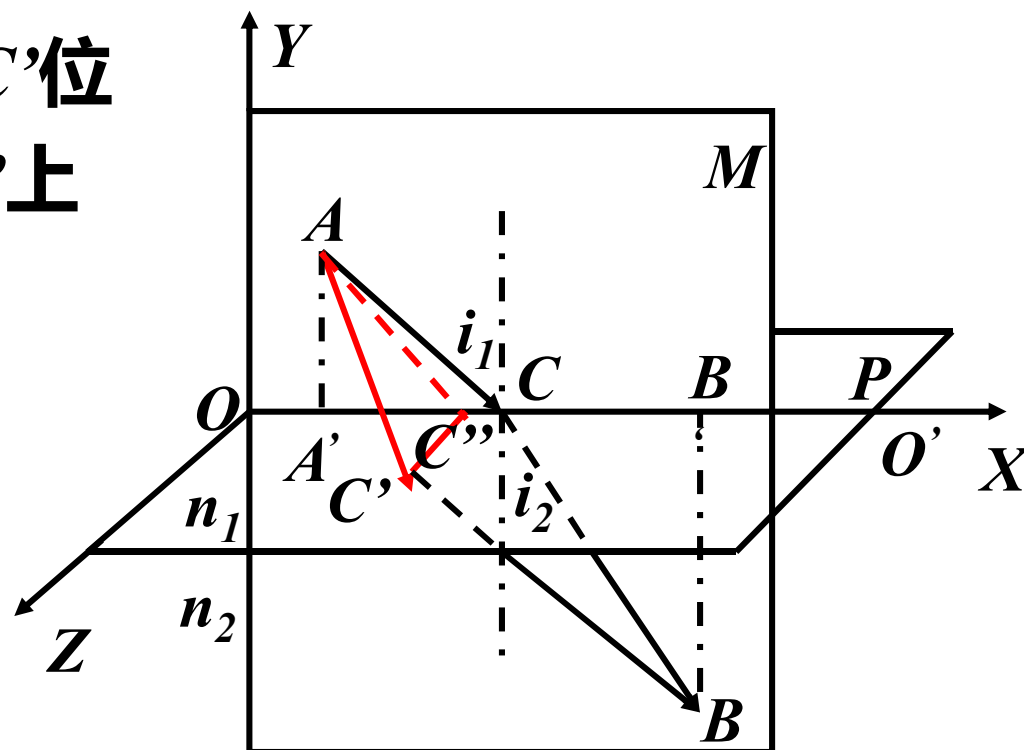
A点发出的光线入射到两种介质的平面分界面上，
折射后到达B点。

① 折射线在入射线和法线决定的平面内

如图：只需证明折射点C点在交线 OO' 上即可。

反证法：设有另一点 C' 位于 OO' 线外，则在 OO' 上必可找到其垂足 C'' ，

$$\therefore \text{有 } AC' > AC'', \\ C'B > C''B$$



即光程 $\Delta_{AC'B} > \Delta_{AC''B}$ 这与费马原理矛盾!

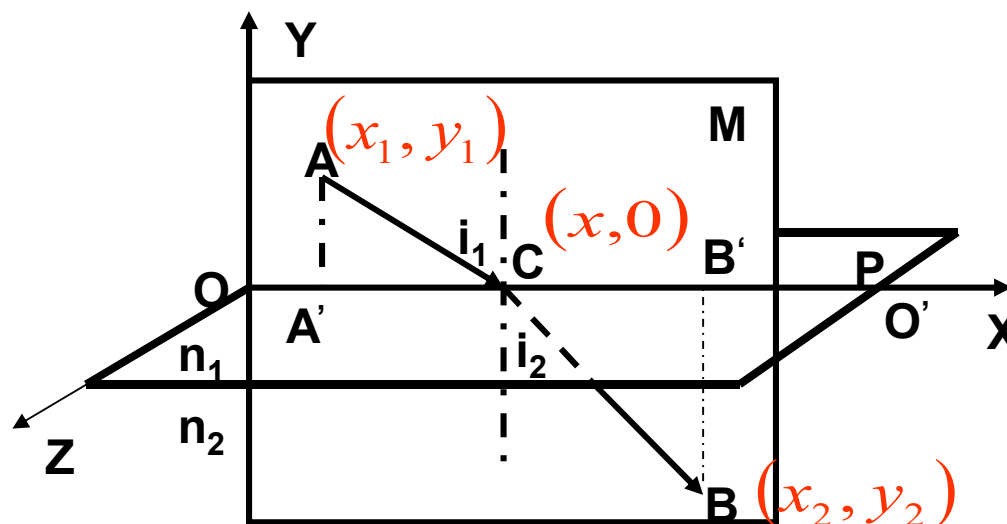
所以折射点在交线上, 折射线在入射线和法线所决定的平面内

②折射线、入射线分居法线两侧

A 、 B 、 C 点坐标如图, 沿此方向入射必有 $x > x_1$

ACB 光程为:

$$\begin{aligned}\Delta &= n_1 \cdot AC + n_2 \cdot CB \\ &= n_1 \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2} \\ &\quad + n_2 \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}\end{aligned}$$



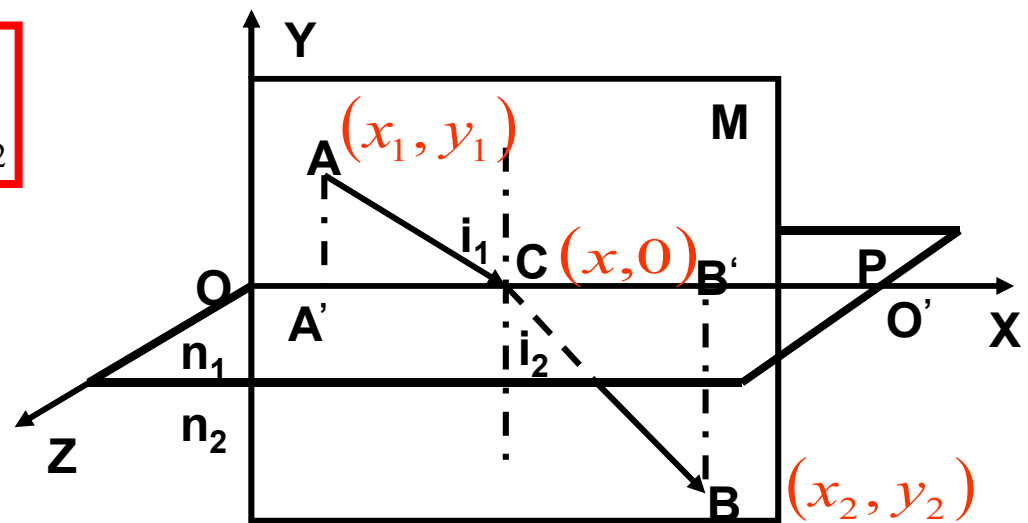
光程取极值，光程对 x 求一阶导数，令其为0

$$\frac{d\Delta_{ACB}}{dx} = \frac{n_1(x-x_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + y_1^2}} - \frac{n_2(x_2-x)}{\sqrt{(x_2-x)^2 + y_2^2}} = 0$$

由三角形几何关系可得

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

此即折射定律



4. 物像之间的等光程性

可以证明：在物点 Q 与像点 Q' 之间，不管光线经何路径，凡是由 Q 通过同样的光学系统到达 Q' 的光线，都是等光程的。



§3.单心光束 实像和虚像

一.单心光束、实像、虚像

1. **发光点**：只有几何位置而没有大小的发射光束的光源。

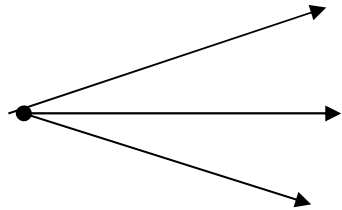
若光线实际发自于某点，则称该点为实发光点；



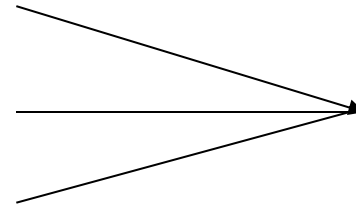
若某点为诸光线反向延长线的交点，则该点称为虚发光点。

2. **单心光束**：只有一个交点的光束，称单心光束。此交点也称为光束的顶点。

发散单心光束



会聚单心光束



3.实像、虚像

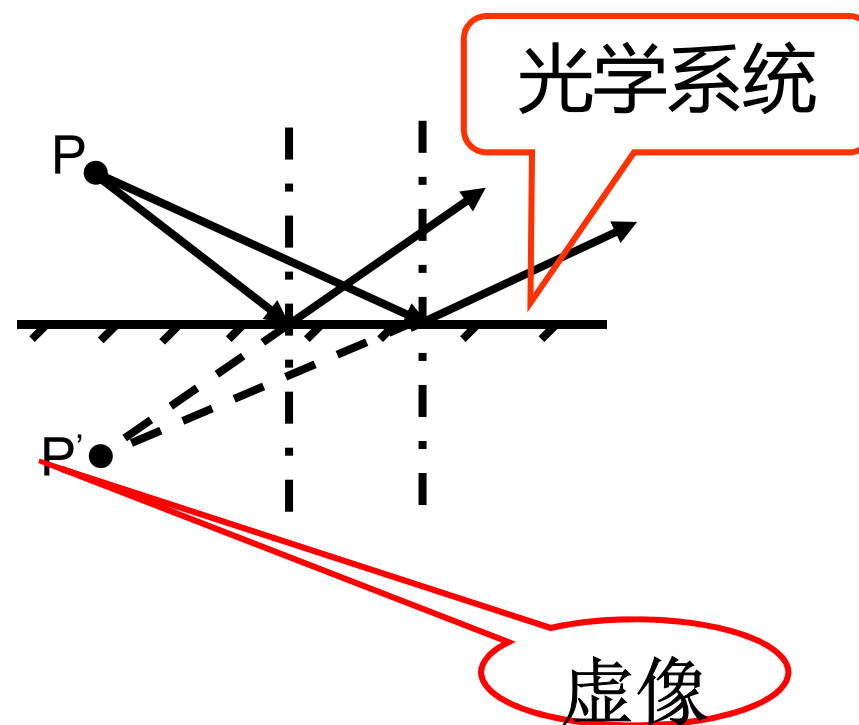
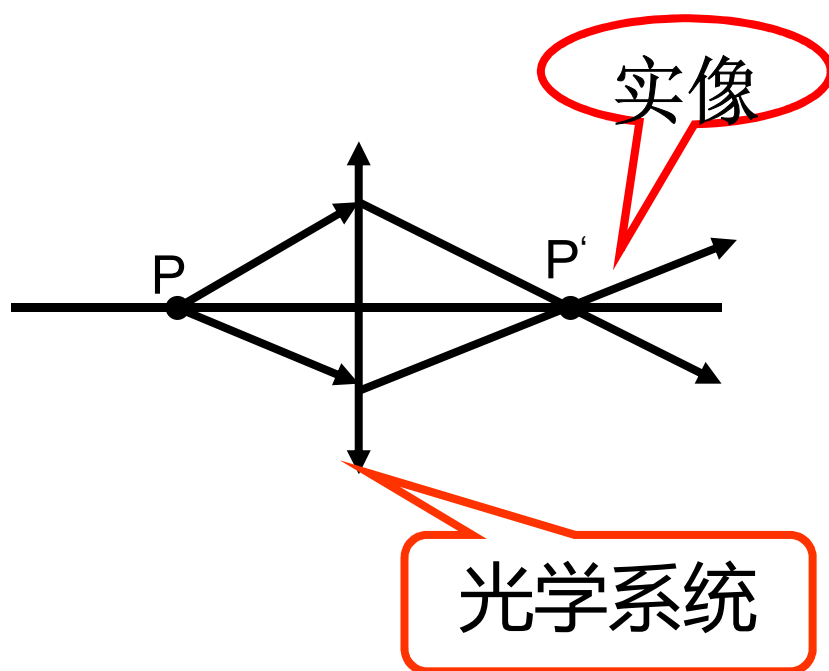
当顶点为光束的发出点时，该顶点称为光源、物点。

当单心光束经光学系统折射或反射后，仍能找到一个顶点，称光束保持了其单心性。该顶点称为象点。

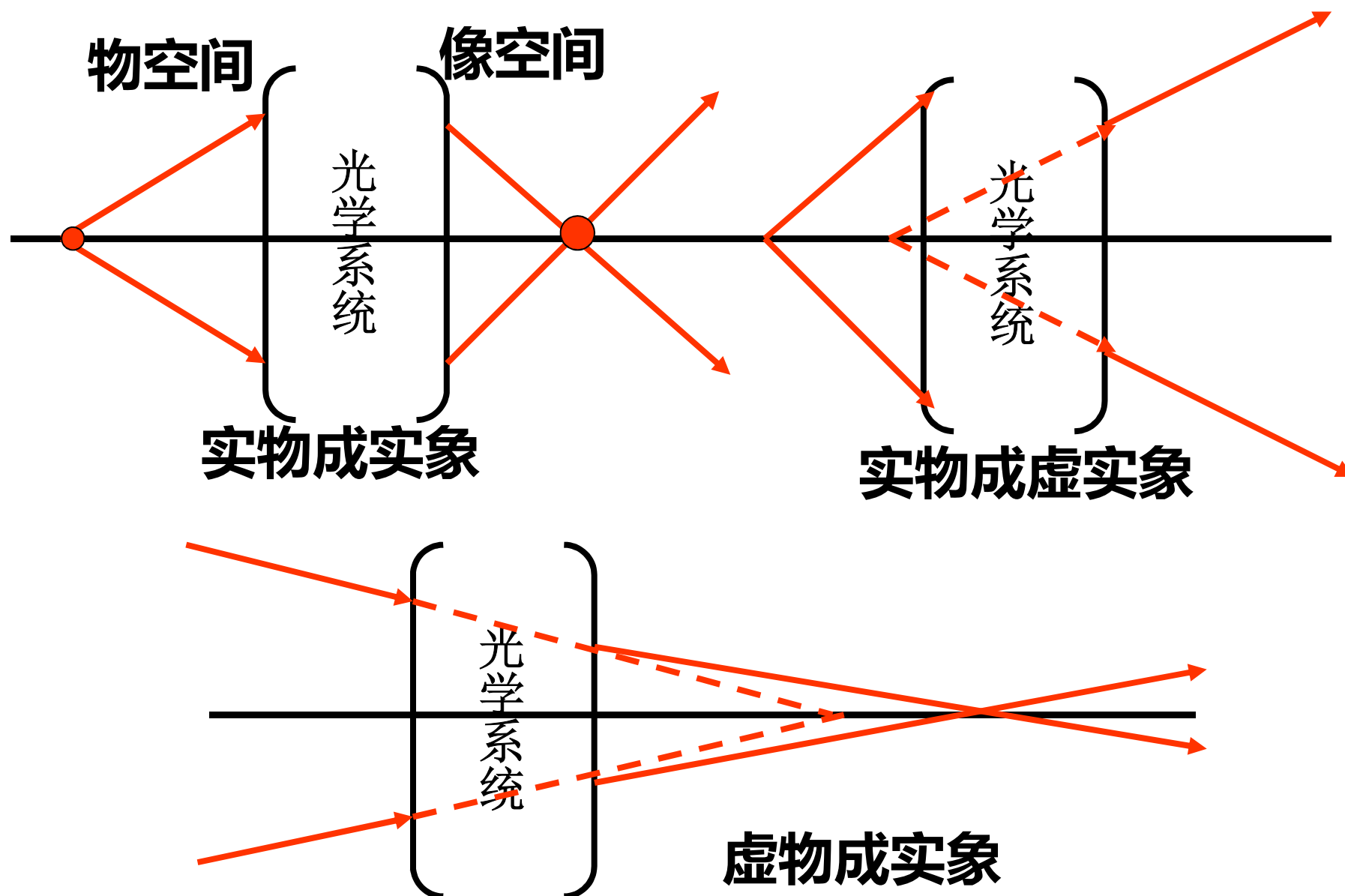
实象：有实际光线会聚的象点。

虚象：无实际光线会聚的象点。

(光束反向延长线的交点)。



二、物空间与像空间



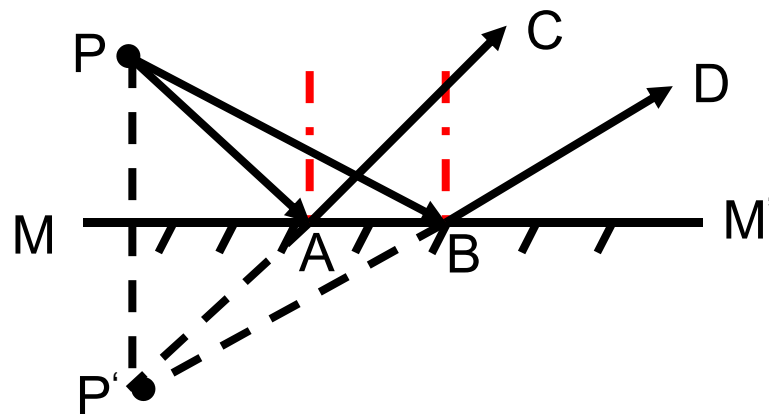
§4 光在平面介面上的反射和折射

一般情况下，光在介面上反射和折射后，其单心性不再保持。但只要满足适当的条件，可以近似地得到保持。接下来的两节，主要研究在不同介面反射、折射时，光束单心性的保持情况。

一、光在平面上的反射

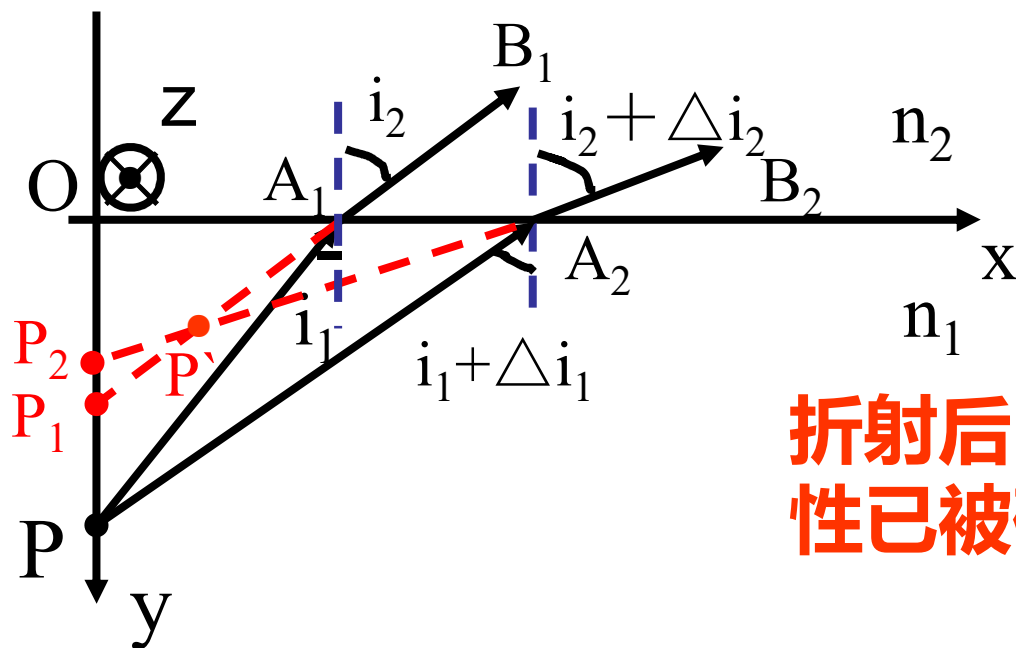
点光源P发出单心光束，经平面镜反射后，形成一束发散光束，其反向延长线交于一点P'，且与P点对称。

平面镜是一个不破坏光束单心性、理想成像的完善的光学系统。并且也是唯一的一个。



二、光在平面介质面上的折射

光束单心性的破坏



折射后，光束的单心性已被破坏！

介质 n_1 中的发光点 P 发出单心光束经介面 XOZ 折射后进入介质 n_2 ，现取其中一微元光束，在 XOY 平面内，其折射光束的反向延长线交于 P' 点，并与 OY 轴交于 P_1 、 P_2 两点。

三.全反射 光学纤维

全反射:

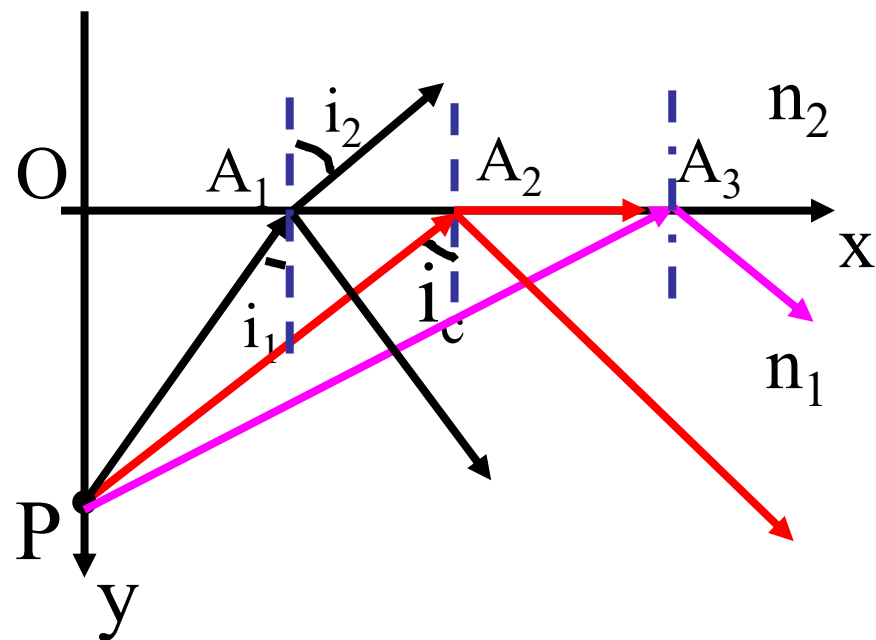
只有反射而无折射的现象称为**全反射**。

全反射的条件:

$$(1) n_1 > n_2$$

$$(2) i_1 \geq i_c$$

$$\text{其中: } i_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ \right) = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$



应用: 光学纤维



1. 光从玻璃进入金刚石的相对折射率是1.60，玻璃的折射率是1.50。这金刚石的绝对折射率为（ ）

A. 1.55 B. 1.70 C. 2.40 D. 3.10

2. 光线从折射率为1.4的稠密液体射向该液体和空气的分界面，入射角的正弦为0.8，则有

A. 出射线的折射角的正弦将小于0.8；

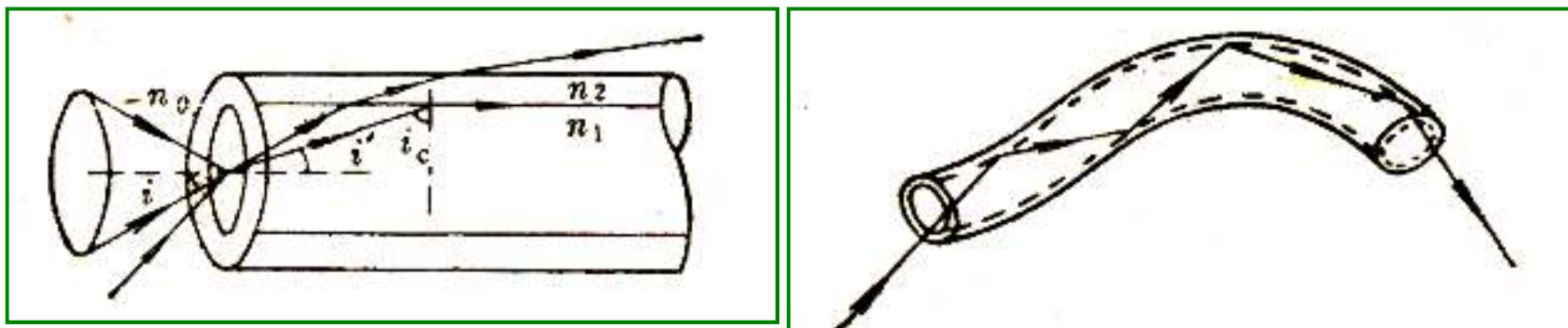
B. 出射线的折射角的正弦将大于0.8；

C. 光线将内反射；

D. 光线将全部吸收。

四、光学纤维(了解)

光学纤维：直径几微米的单根或多根玻璃或塑料纤维组成



光从内层射到外层，入射角大于临界角的光线由于全反射而在界面上多次反射传到另一端。

设光从 $n_0 \rightarrow n_1$ ，入射角 i ，折射角 i'

$$n_0 \sin i = n_1 \sin i'$$

设光从 $n_1 \rightarrow n_2$ ，若入射角 $i_1 = \pi/2 - i' = i_c$ ，则折射角 $i_2 = \pi/2$

$$\sin i_c = \frac{n_2}{n_1}$$

1966, 英籍华人高锟(C Kao)指出: 如果能够减少玻璃中的杂质含量, 就可以制造出损耗低于 20dB/km 的光纤。



2009 Nobel Laureate, Charles Kao, Father of Fiber Optics

四.棱镜(了解)

棱镜是一种由多个平面界面组合而成的光学元件。光通过棱镜时，产生两个或两个以上界面的连续折射，传播方向发生偏折。最常用的棱镜是三棱镜。

三棱镜两折射面的夹角称三棱镜顶角 A 。

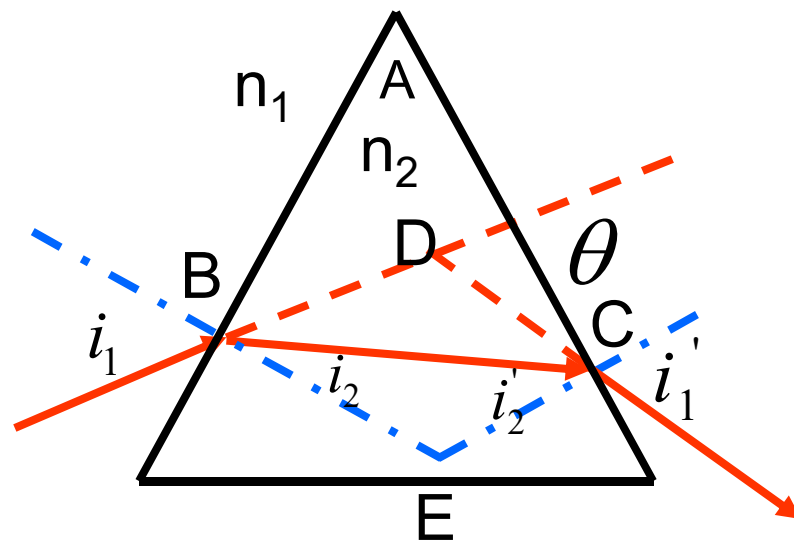
出射光与入射光之间的夹角称棱镜的偏向角 θ 。

1.偏向角、最小偏向角：

偏向角：

$$\theta = (i_1 - i_2) + (i'_1 - i'_2)$$

$$\because i_2 + i'_2 = A \quad \therefore \theta = i_1 + i'_1 - A$$

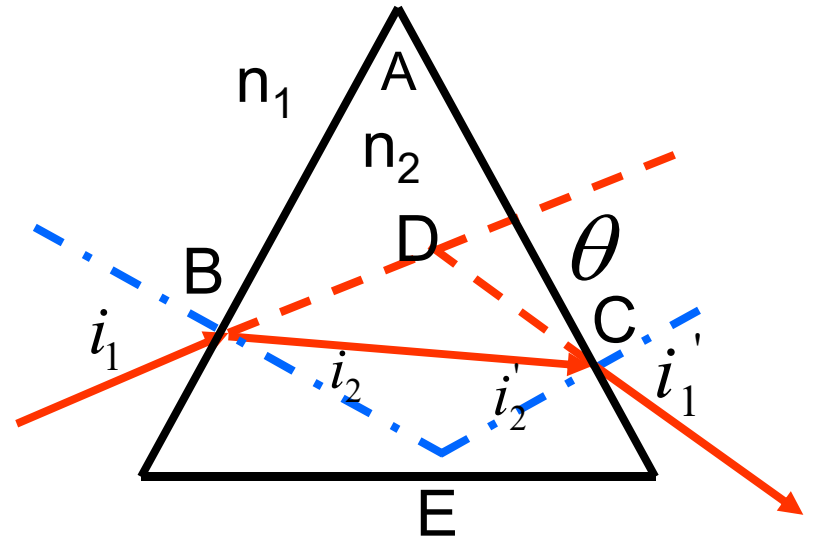


可以证明：当光路对称

即： $i = i'$ θ 达最小值 θ_0

最小偏向角： $\theta_0 = 2i_1 - A$

此时，入射角 $i_1 = \frac{\theta_0 + A}{2}$



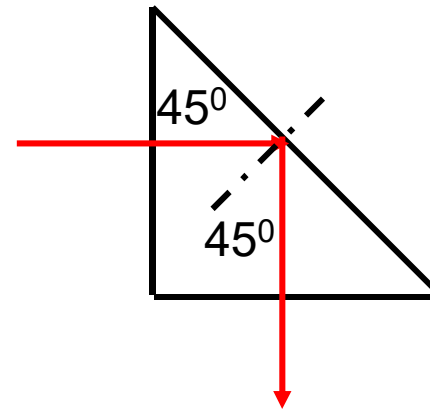
若此时三棱镜处于空气中

即 $n_1 = 1$, 则由折射定律有:
$$n_2 = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{\theta_0 + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

若已知 A , 测出 θ_0 , 可计算出 n 。

2.应用

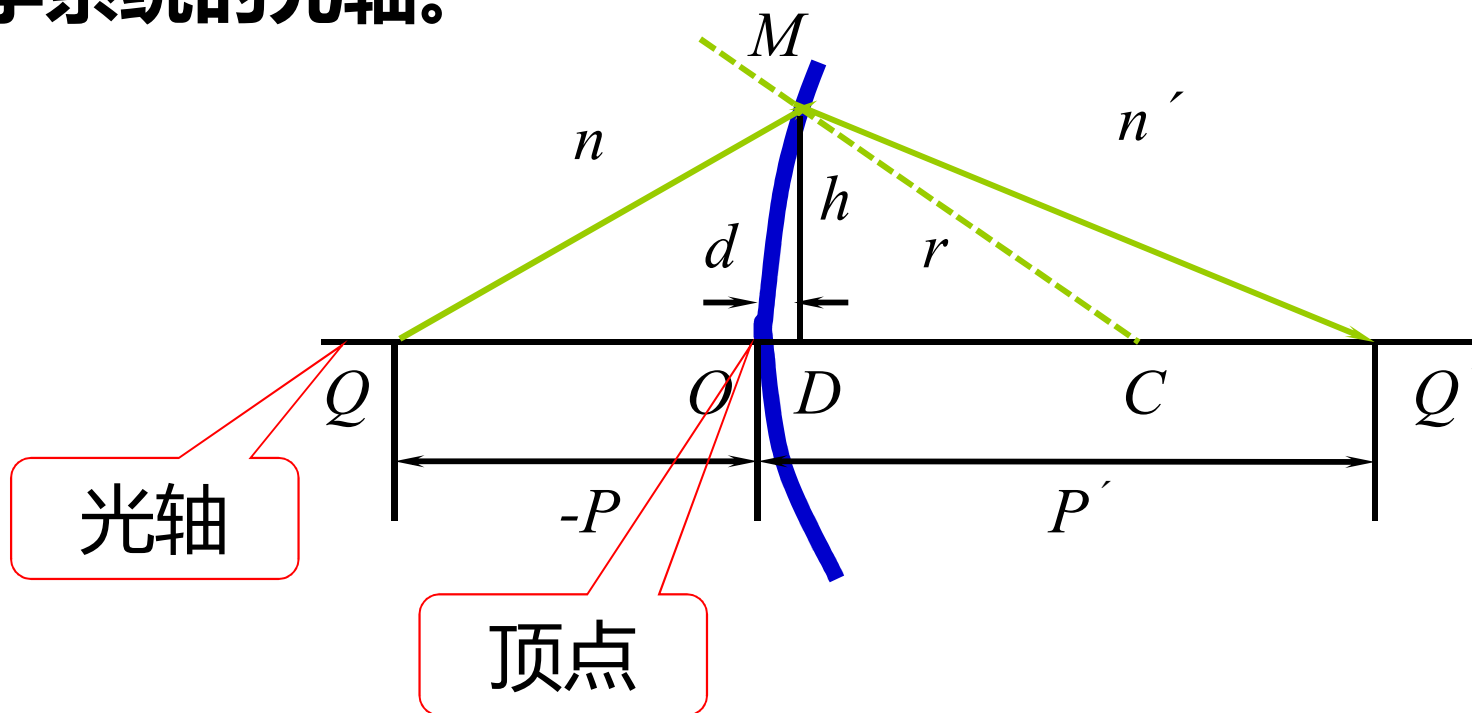
- 分光：当用白光入射时，由于折射率的不同，出射光将展开成彩带即光谱。
- 改变光路：如右图示

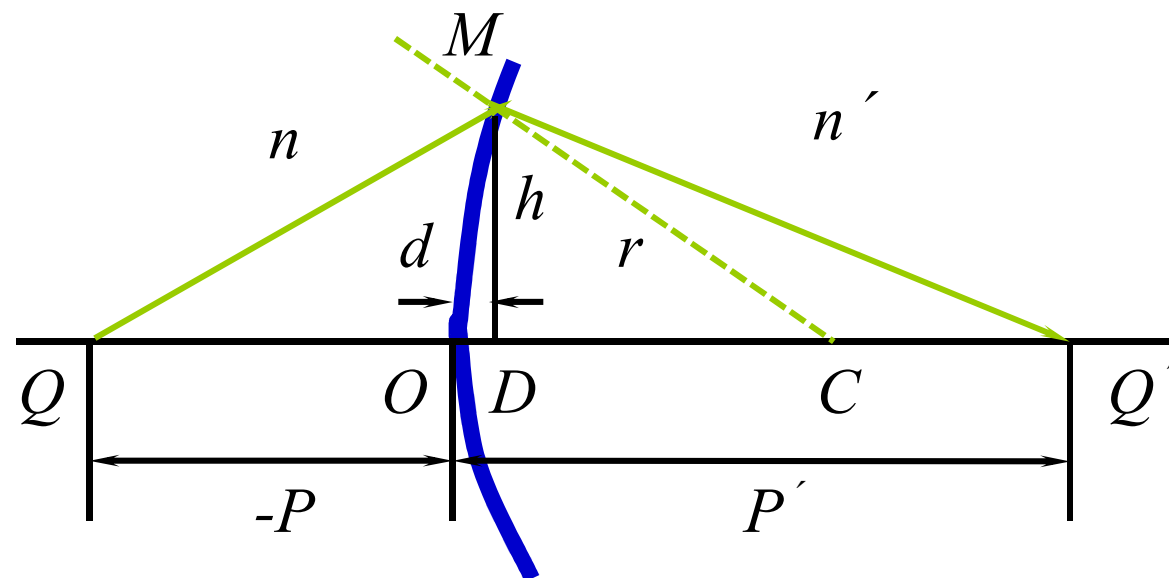


§ 5 光在单球面上的近轴成像

一. 基本概念和符号规则

光轴：若光学系统由球面组成，各球心的连线在一条直线上，则称为共轴球面系统，这条直线为该光学系统的光轴。





符号规则:

★ (1) 线段：光轴方向上，以顶点为起点，沿光线进行方向为正，反之为负；垂直方向上，主光轴上方为正，反之为负。

(2) 球面的曲率半径：球心在球面顶点的右方为正，反之为负。(自左向右为正方向)

(3) **物距**：自参考点（球面顶点、薄透镜的光心）到物点，沿光线方向为正，反之为负。

(4) **象距**：自参考点（球面顶点、薄透镜的光心）到象点，沿光线方向为正，反之为负。

(5) **物高和象高**：物高和象高垂直于光轴，向上为正，反之为负。

★ (6) **角度**：以光轴或界面法线为始边，旋转到该光线，旋转方向为顺时针，角度为正，反之为负。

★ 此外，还规定在图上**只标记角度和线段的绝对值**，若某一字母表示负的数值，则在其前面标以负号。