
一. 几何光学基本原理

1. 概论-光学的发展

光学

几何光学

物理光学

量子光学

几何光学

几何是研究**空间结构及性质**的一门学科。

基于光的直线传播研究光的传播及**成像规律**及其**应用的科学**。

物理光学

以光是一种**波动为基础**的物理光学。

量子光学

以光是一种**粒子为基础**的物理光学。

量子光学一词是在有了激光后才提出来的。

1. 概论-光学发展历史

古代光学-萌芽时期（15世纪以前）

对简单光现象进行了记载并做了不系统的研究，**制造了简单的光学仪器（如平面镜、凸面镜、凹面镜）**。e.g. 凹面镜取火

《墨经》中记录了世界上最早的光学知识。包括影的定义和生成，光的直线传播性和针孔成像等。**（圭表、日晷）**

北宋著名学者沈括所著《梦溪笔谈》被认为是中国科技史的里程碑，里面不仅记录了多种光学现象，**包括平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和像的关系（阳燧-凹面铜镜）**。

欧几里德在其著作《光学》一书中提出触须学说：**(1)正确反映了光的直线传播规律；(2)错误：人眼能发出光线**

13世纪，意大利人阿玛蒂发明了眼镜。



墨子

墨子（公元前468～376年）



欧几里德（公元前330～275年）

1. 概论-光学发展历史

□ 光的运动有什么规律？

□ 光的本性是什么？

□ 微粒说、波动说、量子理论

1. 概论-光学发展历史

经典光学（16世纪-19世纪）

伽利略望远镜（1609年），开普勒望远镜（1611年）

光的微粒学说（牛顿），折射定律（1621年，斯涅尔），费马原理（1657年）

惠更斯（荷兰，1629~1695年）：光的波动理论的创始人，提出了“光是‘以太’中传播的波动”理论和次波假设（1678年惠更斯原理）

托马斯·杨（英，1773~1829年）：最先利用干涉原理解释了白光下的薄膜颜色，设计并完成了著名的杨氏双缝干涉实验，提出了光是横波的假设。

菲涅耳（法，1788~1827年）：利用杨氏干涉原理补充惠更斯原理而提出了惠更斯-菲涅耳原理，解释了光的直线传播定律和衍射现象。建立了菲涅耳公式。（泊松亮斑）

马吕斯（法，1775~1812年）：发现了光的偏振现象，建立了马吕斯定律。

麦克斯韦（英，1831~1879年），赫兹（德，1857~1894年）：光是电磁波。



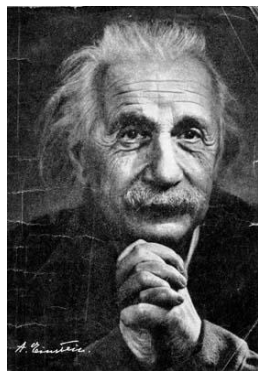
1. 概论-光学发展历史

量子光学

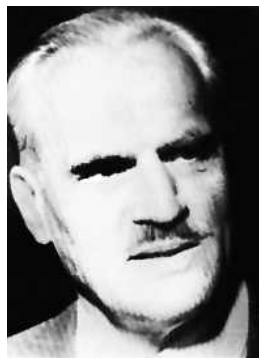
发现经典电磁理论存在缺陷（**以太说和黑体辐射**），进一步证实以太的不存在，建立了光的量子理论，解释了黑体辐射、光电效应和康普顿效应现象；提出了光的波粒二象性。



黑体辐射问题：**普朗克**
(德, 1858-1947)



光电效应：**爱因斯坦**
(美, 1879-1955)



X射线散射实验：**康普顿**
(美, 1892-1962)



物质波假说：**德布罗意**
(法, 1892-1989)

1. 概论-光学发展历史

电磁波

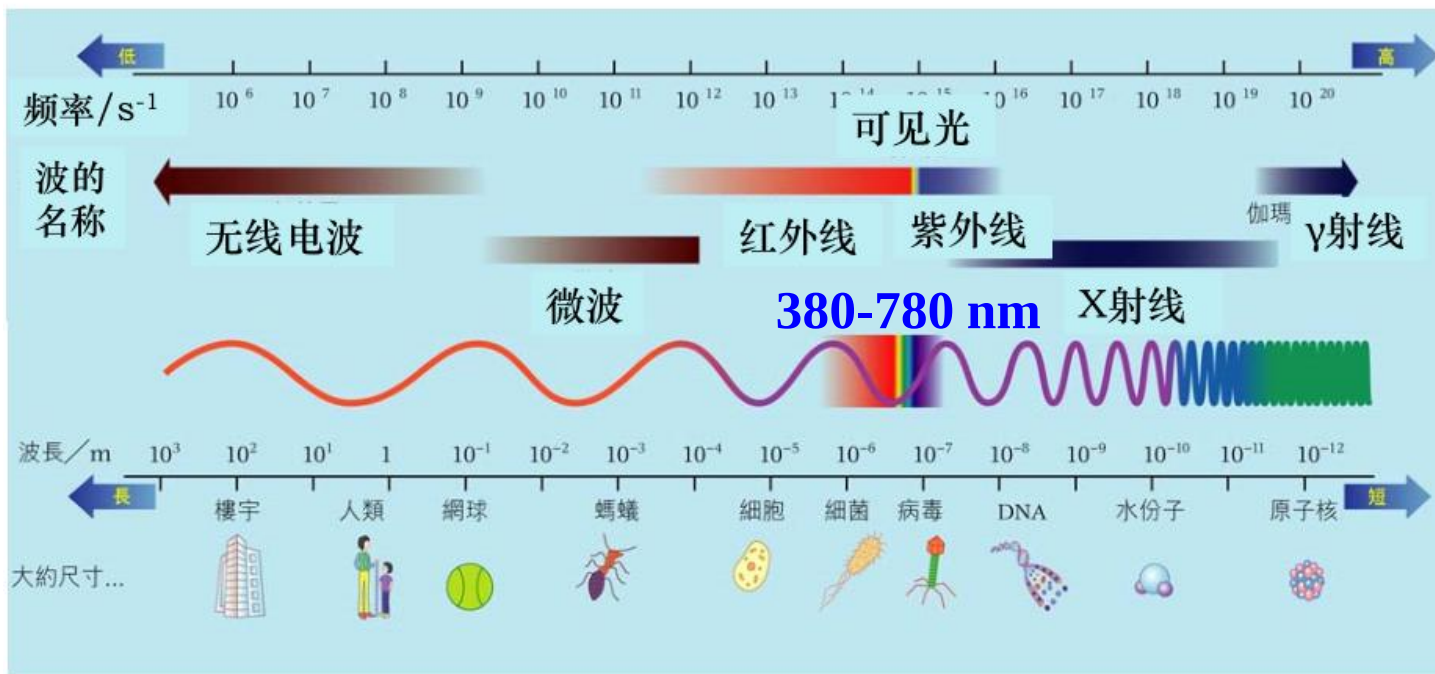
波速 u $u = \frac{c}{n}$

频率 ν

波长 λ $\lambda = \frac{u}{\nu}$

横波

能量

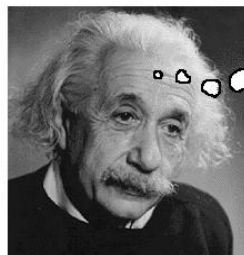


单色光

复色光

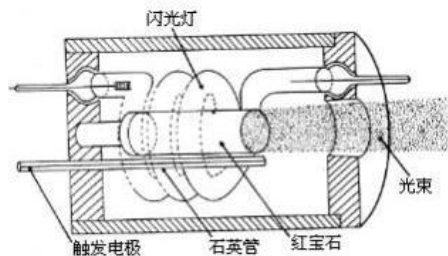
1. 概论-光学发展历史

现代光学



Albert Einstein ...
Theorized the concepts
of Light Physics in 1917

1917年爱因斯坦提出受激辐射的概念。



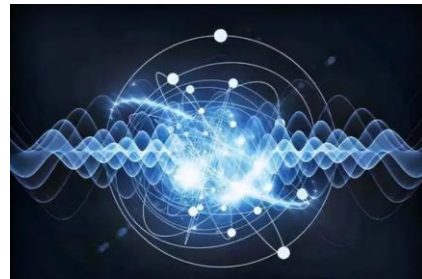
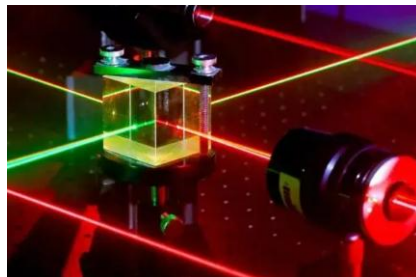
1960年，休斯顿航空公司的Theodore Malman 用人造红宝石制造了一个激光器（694 nm）



1961年Ali Javan成功制备第一台连续激光器，即He-Ne激光（632 nm）。



量子光学 量子通信 量子计算



1. 概论-光学发展历史

- 人类对光的研究，最初主要是试图回答“**人怎么能看见周围的物体？**”之类问题。
- 光学的发展历史表明，现代物理学中的两个最重要的基础理论——**量子力学和狭义相对论都是在关于光的研究中诞生和发展的。**
- 什么是光学？

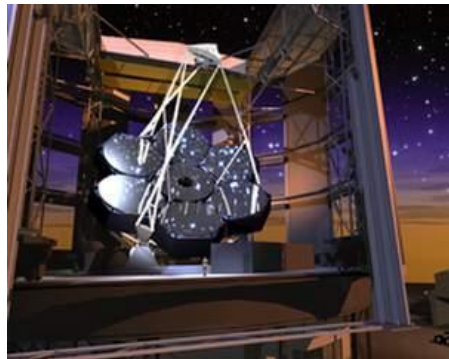
1. 概论-光学发展历史

- 狭义来说，**光学是关于光和视见的科学**。optics(光学)这个词，早期只用于跟眼睛和视见相联系的事物。
- 现在常说的光学是广义的，是研究从微波、红外线、可见光、紫外线直到X射线的宽广波段范围内的，关于**电磁辐射的发生、传播、接收和显示，以及跟物质相互作用的科学**。
- 光学是物理学的一个重要组成部分，也是与其他应用技术紧密相关的学科。

1. 概论-几何光学

几何光学是光学中发展最早的一部分。它所研究的中心问题是物体经光学系统成像的问题。它是以光线概念为基础，研究光的传播规律和成像规律。

适用条件：传播时遇到障碍物的尺寸远大于波长。



1. 概论-几何光学

几何光学

传播规律

成像规律

简单仪器

像差

像质评价

光学系统成像性质

直观、简便、可靠

局限性、近似性

像的信息

像的大小

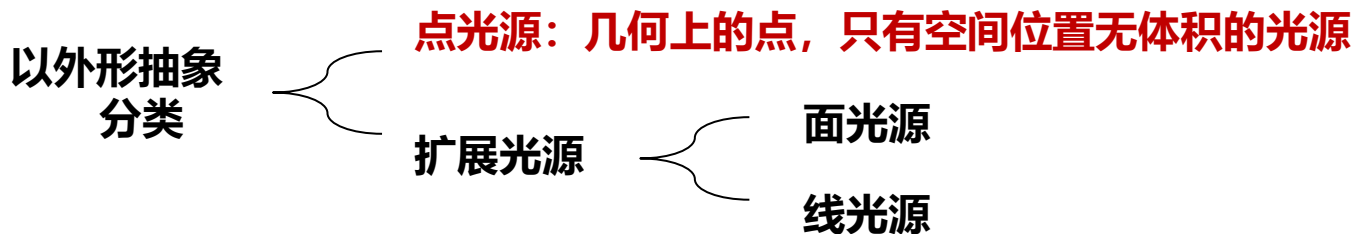
像的相似性

像的亮度

像的色彩还原性

1. 概论-几何光学基本概念

□ 光源：任何发光的物体（太阳，汞灯，日光灯等）



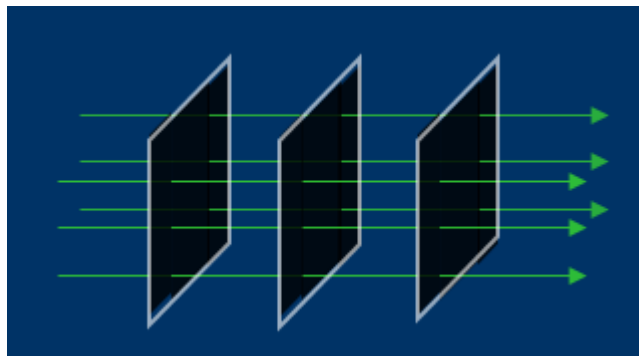
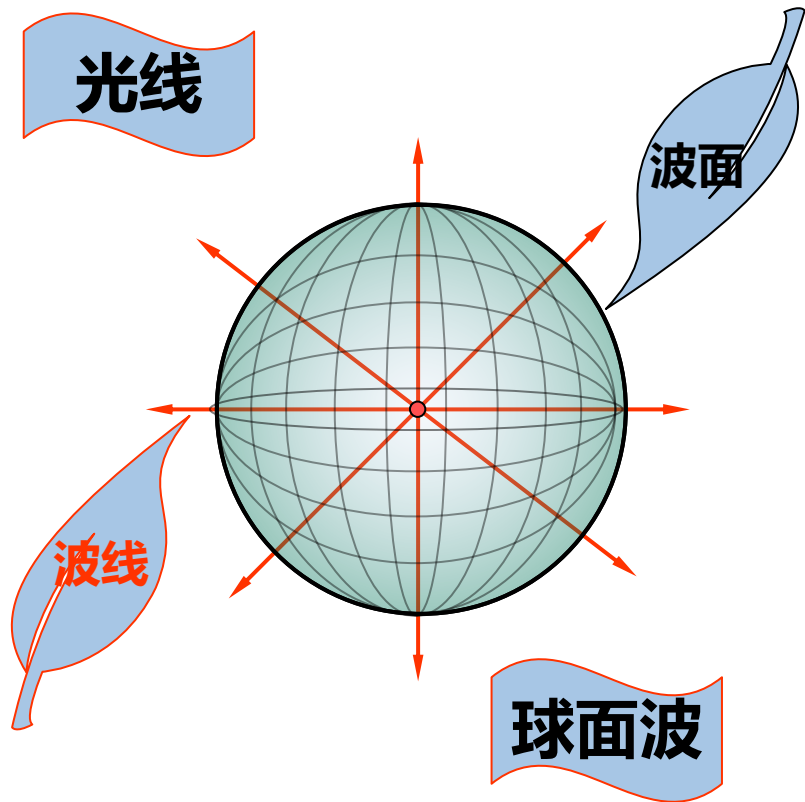
◆ 光线：表示光波能流传播方向的几何线

◆ 光束：有一定几何关系的一些光线的集合（平行、汇聚、发散）

波面：是电磁波位相相同点的集合

（在各向同性媒质中，能量传播方向垂直于波面，即光线是波面的法线方向。）

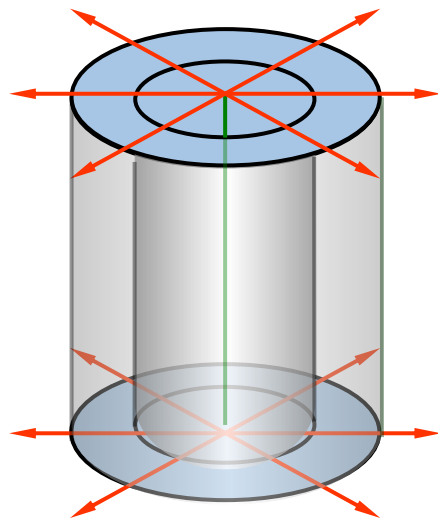
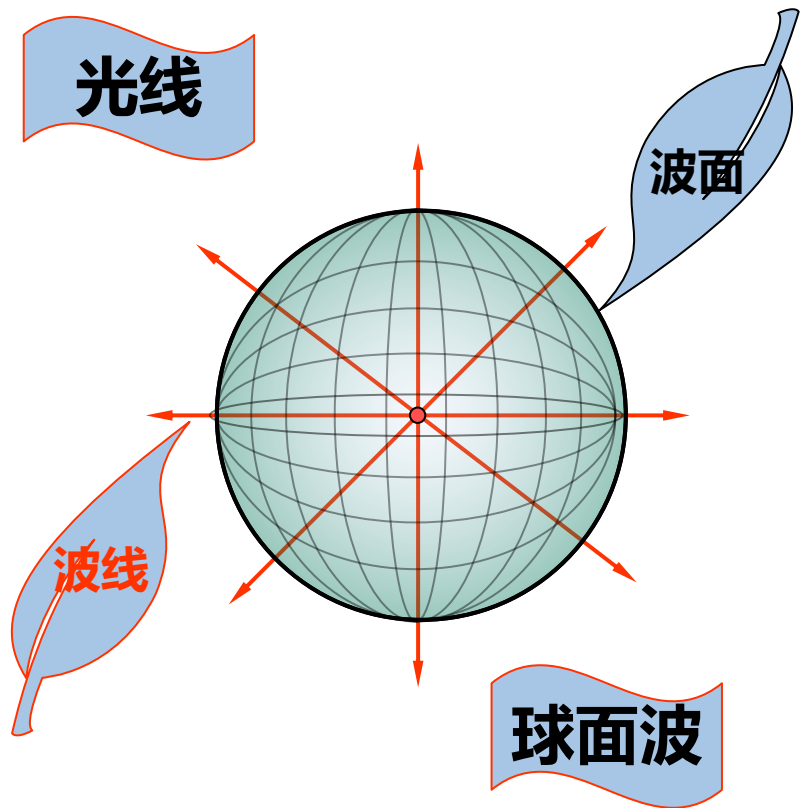
1. 概论-几何光学基本概念



平面波

平行光

1. 概论-几何光学基本概念



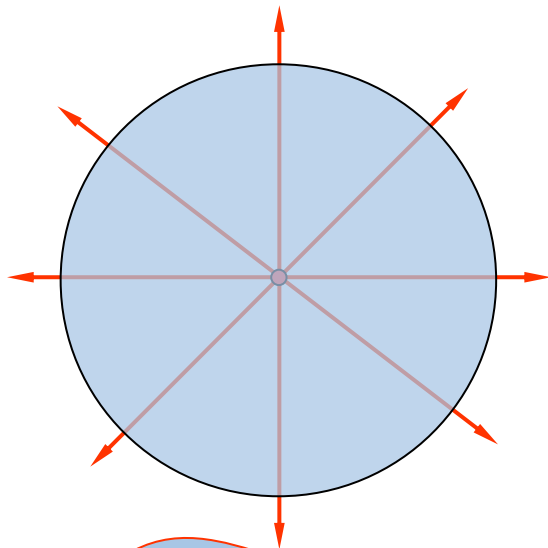
平面波

柱面波

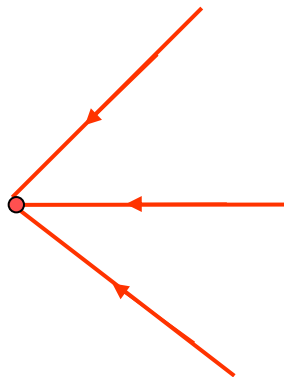
1. 概论-几何光学基本概念

光束

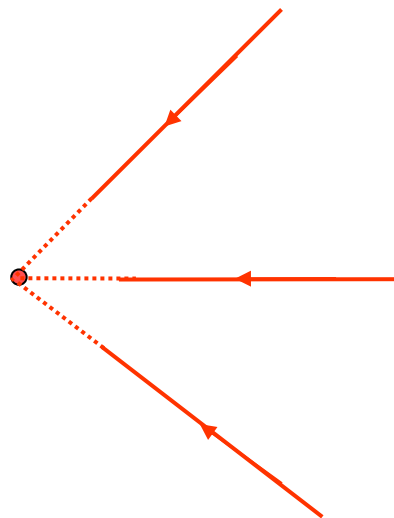
空间具有一定关系的光线的集合。



同心光束



会聚光束

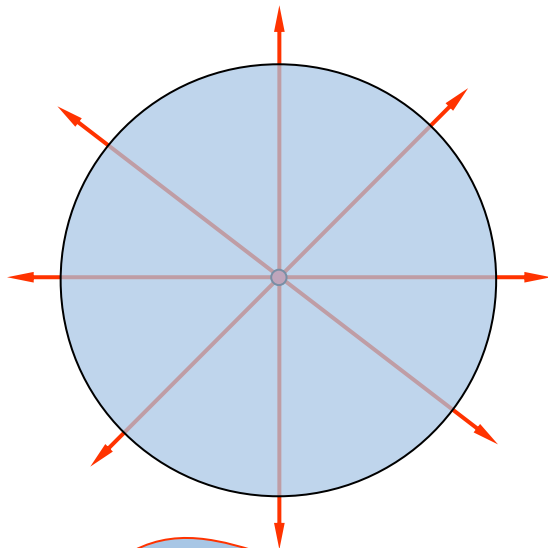


沿着光的传播方向,光束的截面积不断减小

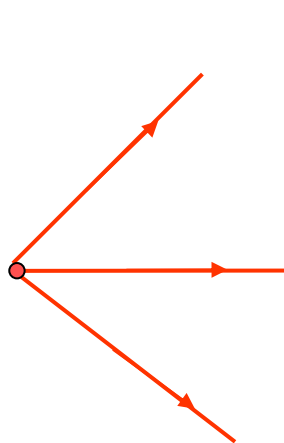
1. 概论-几何光学基本概念

光束

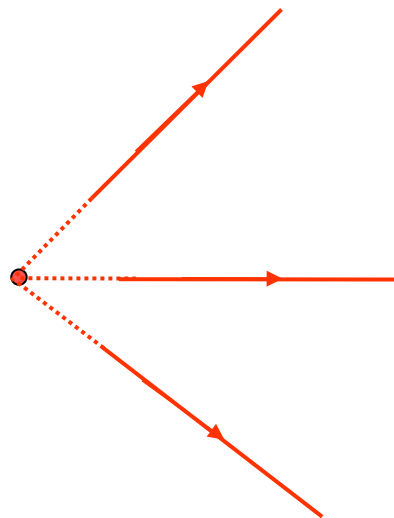
空间具有一定关系的光线的集合。



同心光束



发散光束

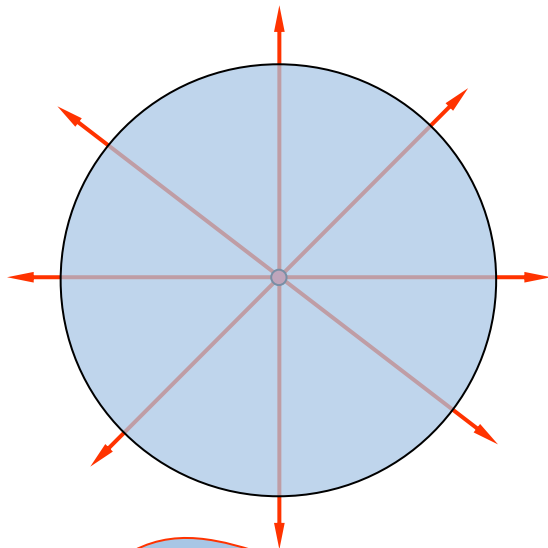


沿着光的传播方向,光束的截面积不断增大

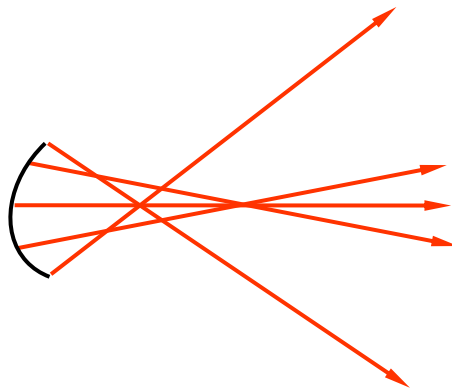
1. 概论-几何光学基本概念

光束

空间具有一定关系的光线的集合。



同心光束



非同心光束

像散光束

各光线或光线的延长线
不能相交于一点，但具有
一定关系

2. 几何光学的基本定律

光的直线传播定律

- 光在**各向同性**、**均匀**介质中沿直线传播。
(影子, 小孔成像)
- 反之, 非均匀介质中, 光以曲线传播, 向折射率增大方向弯曲。



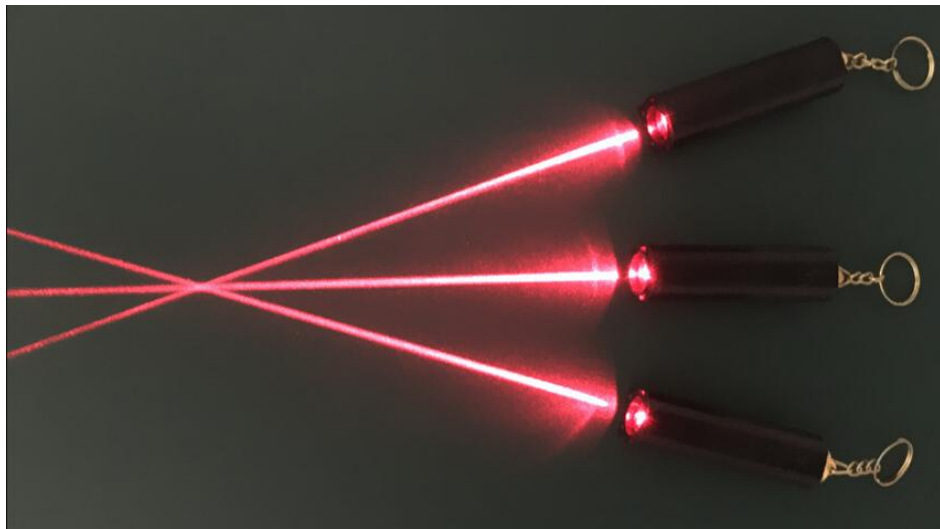
2. 几何光学的基本定律

光的直线传播定律

光在**各向同性**、**均匀**介质中沿直线传播。

光的独立传播定律

当多束非相干光线通过空间某点时，各光线的传播保持自己的特性不变，不受其他光线的影响。



2. 几何光学的基本定律

光的直线传播定律

光在**各向同性**、**均匀**、**透明**媒质内沿直线传播。

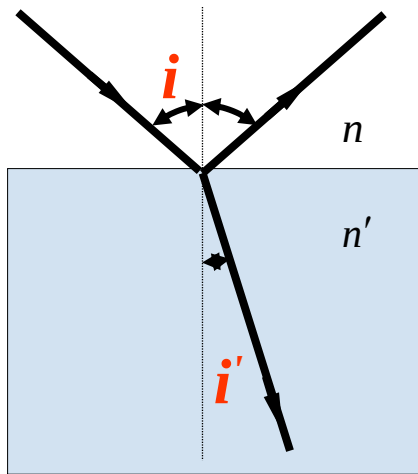
光的独立传播定律

当多束非相干光线通过空间某点时，各光线的传播保持自己的特性不变，不受其他光线的影响。

折射定律、反射定律

$$n \sin i = n' \sin i'$$

$$n' = -n \quad i' = -i$$



2. 几何光学的基本定律

光的直线传播定律

光在**各向同性**、**均匀**、**透明**媒质内沿直线传播。

光的独立传播定律

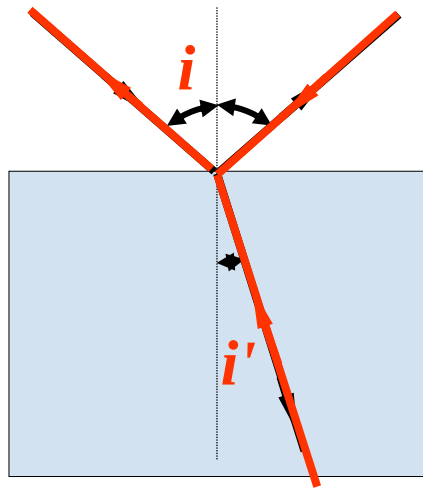
当多束非相干光线通过空间某点时，各光线的传播保持自己的特性不变，不受其他光线的影响。

折射定律、反射定律

$$n \sin i = n' \sin i'$$
$$n' = -n \quad i' = -i$$

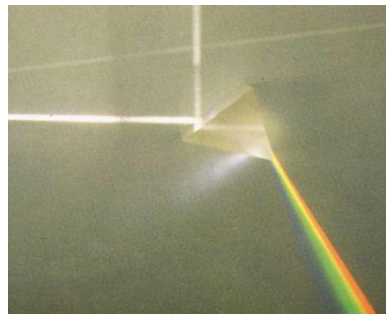
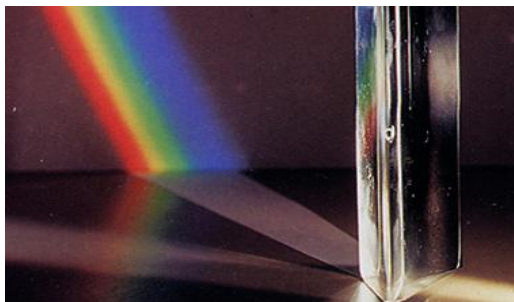
光路可逆性原理

光线在介质中沿某一路径传播，当光线反向时必沿同一路径逆向传播。



2. 几何光学的基本定律

- 在折射中，**频率不变**，波速和波长都会发生改变。
- **同一透明介质对于不同波长的单色光具有不同的折射率。**
因此，白光经过棱镜后将被分解为各种不同颜色的光，在棱镜后将会看到各种颜色，这种现象称为色散。

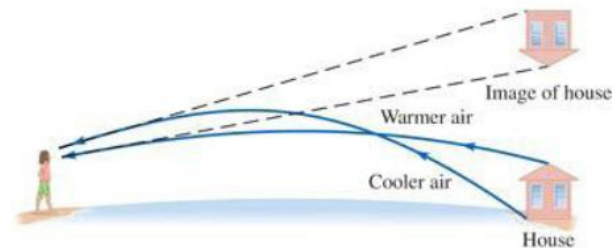


2. 几何光学的基本定律

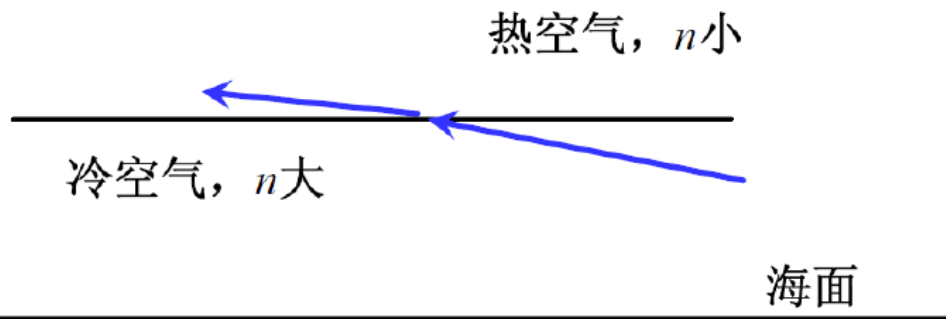
海市蜃楼



(a)



(b)



2. 几何光学的基本定律

□ 几何光学的基本定律成立条件

均匀介质： 折射率处处相等，不是位置的函数；

各项同性： 折射率各向相等，不是方向的函数；

光强不强： 满足线性叠加规律；

线度波长： 线度大于所研究光的波长；

2. 几何光学的基本定律

光线由一种介质1射向另一种介质2，若这两种介质的折射率不同，则

- A** 一定能进入介质2中传播
- B** 若进入介质2中，传播方向一定改变
- C** 若进入介质2中，传播速度一定改变
- D** 折射角一定大于入射角

2. 几何光学的基本定律

费马原理

费马原理是一个描述光线传播行为的原理

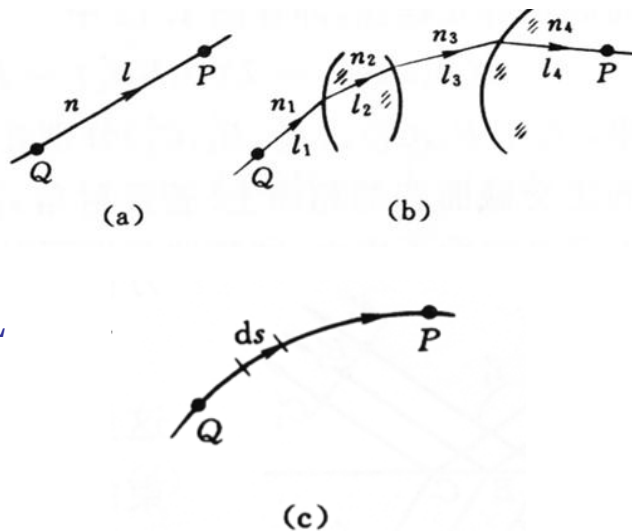
光程定义：光线路径的几何长度与所经过的介质折射率的乘积。

真空中： 光程 = l

均匀介质： 光程 (QP) = $n l$ 沿 L

分段均匀： $L(QP) = n_1 \Delta l_1 + n_2 \Delta l_2 + n_3 \Delta l_3$ 沿 L

对于非均匀介质： $L(QP) = \int_Q^P n(r) ds$ 沿 L



2. 几何光学的基本定律

费马原理

Fermat于1679年提出的，从光程的观点描述光传播的规律：
光传播的实际路径是使光程取**极值** (极小值、极大值或稳定值)。

“光学极短时间原理”

$$\delta L = \delta \int_A^B n dl = 0$$

- ▲ 费马原理规定了光线传播的**唯一可行**的路径。
- ▲ 光的直线传播定律，反射定律，折射定律，光路可逆性原理等都可由费马原理证明。

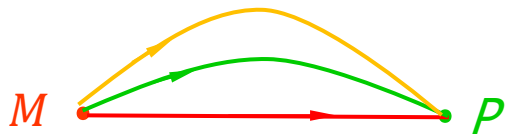
2. 几何光学的基本定律

在相同的时间内，一束波长为 λ 的单色光在空气中和在玻璃中

- (A) 传播的路程相等，走过的光程相等.
- (B) 传播的路程相等，走过的光程不相等.
- (C) 传播的路程不相等，走过的光程相等.
- (D) 传播的路程不相等，走过的光程不相等.

2. 几何光学的基本定律

费马原理(极小值)

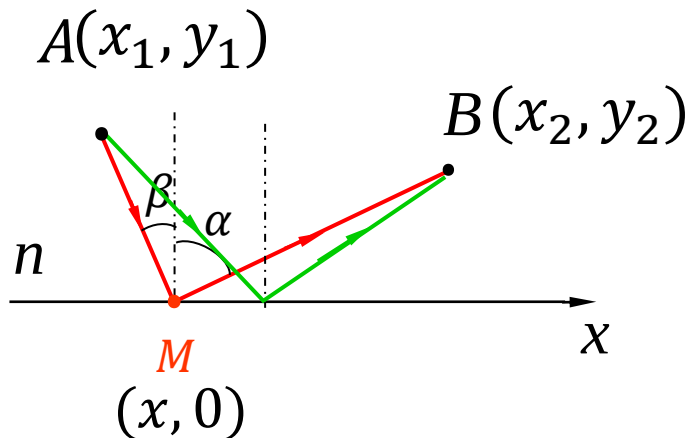


$$\int_A^B n dl = n \int_A^B dl$$

光的直线传播定律

2. 几何光学的基本定律

费马原理(反射定律)



$$\delta_{AB} = AM + MB$$

$$AM = \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}$$

$$MB = \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}$$

$$\sin\beta = \sin\alpha$$

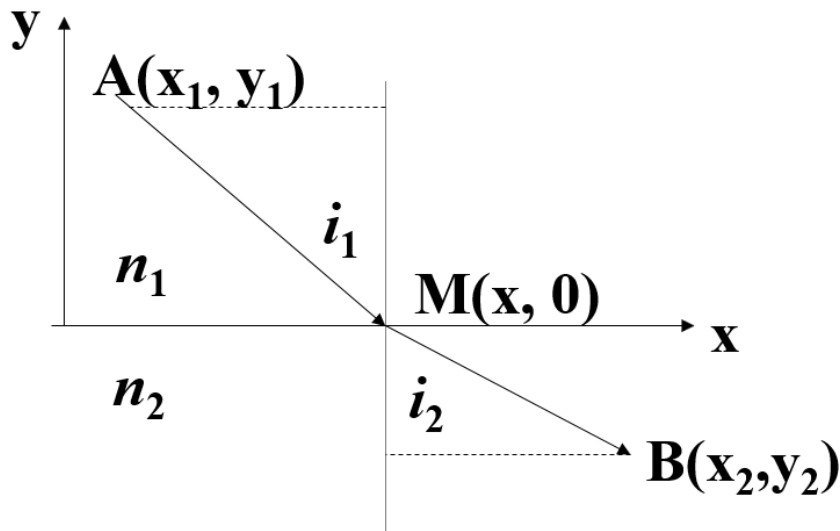
$$\delta_{AB} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2(x - x_1)}{\sin\beta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{-2(x_2 - x)}{\sin\alpha} = 0$$

2. 几何光学的基本定律

费马原理 (折射定律)

(1) 折射光线在入射面内，方法和反射定律推导一样。

(2) 入射角和折射角的关系；

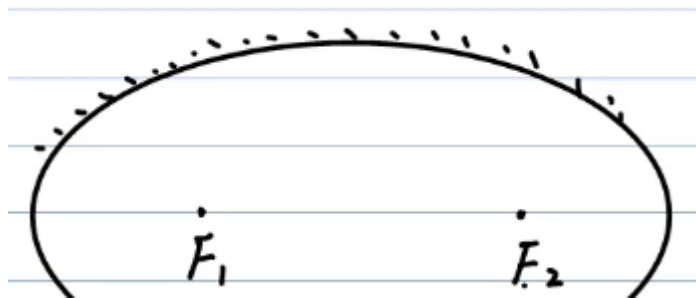


A→M→B的光程：

$$AM + MB = n_1 \sqrt{y_1^2 + (x - x_1)^2} + n_2 \sqrt{y_2^2 + (x_2 - x)^2} \longrightarrow n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

2. 几何光学的基本定律

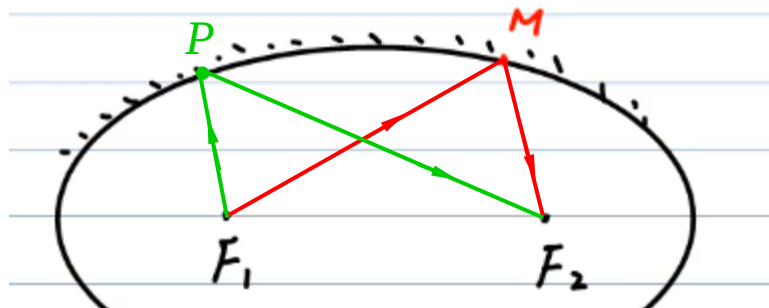
费马原理(稳定值)



椭圆反射镜

$$F_1M + MF_2 = 2a \quad F_1F_2 = 2c$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad a^2 - c^2 = b^2$$

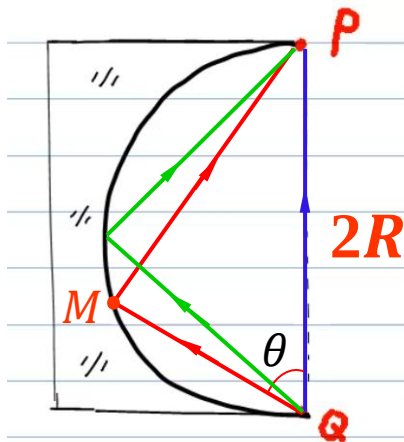


$$F_1M + MF_2 = C$$

$$F_1P + PF_2 = C$$

2. 几何光学的基本定律

费马原理(极大值)



半球面反射镜

$$\delta = QM + MP$$

$$QM = 2R\cos\theta$$

$$MP = 2R\sin\theta$$

$$\begin{aligned}\delta &= 2R\cos\theta + 2R\sin\theta \\ &= 2R(\cos\theta + \sin\theta)\end{aligned}$$

$$\theta = 45^\circ$$

2. 几何光学的基本定律

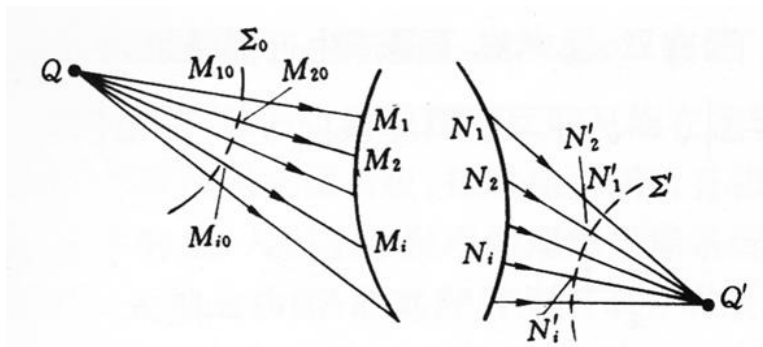
费马原理与成像

严格等光程 $\Leftrightarrow$ 严格成像,

近似等光程 $\Leftrightarrow$ 近似成像,

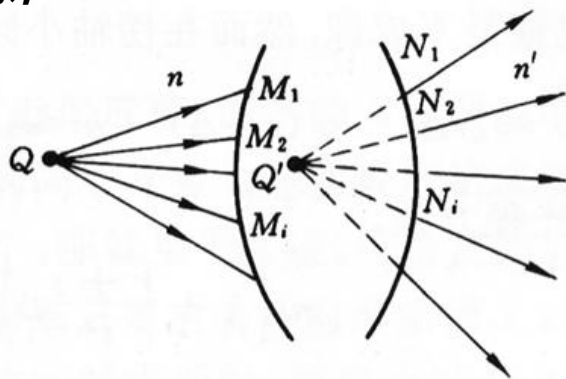
非等光程 $\Leftrightarrow$ 不成像,

实像



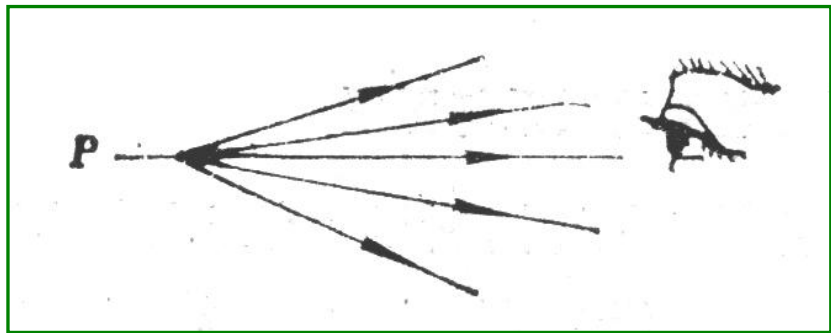
$$L(QM_1N_1Q') = L(QM_2N_2Q') = \dots = L(QM_iN_iQ')$$

虚像

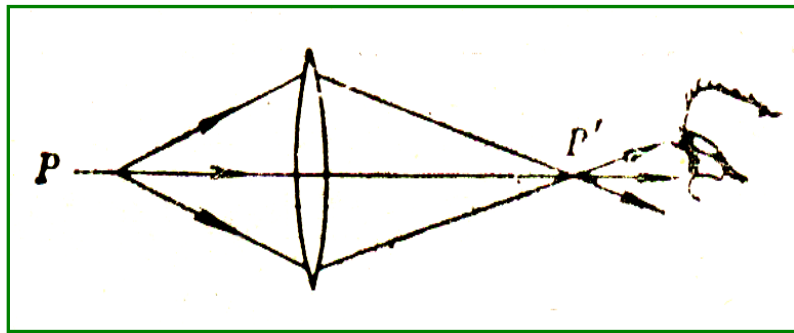


$$\begin{aligned} L(QM_1N_1) - L(N_1Q') &= L(QM_2N_2) - L(N_2Q') = \dots \\ &= L(QM_iN_i) - L(N_iQ') = \dots \end{aligned}$$

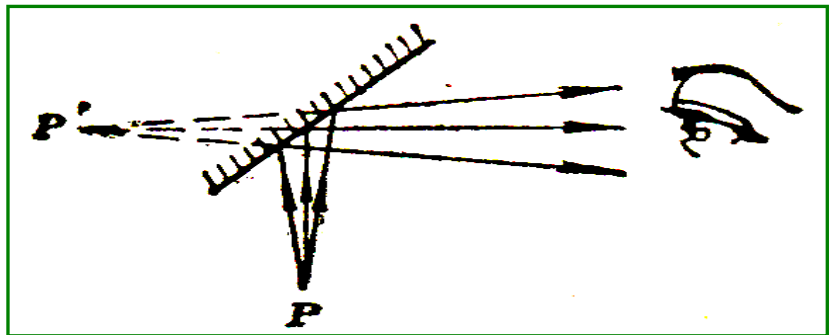
3. 物像虚实



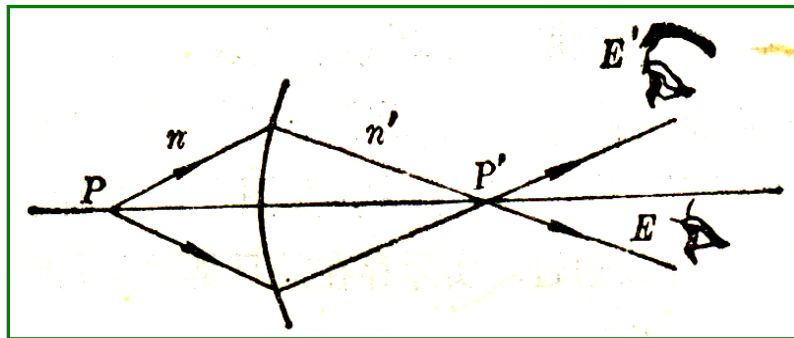
实物光线进入人眼



实像光线进入人眼



虚像光线进入人眼



人眼在像点发光范围内可见它

3. 物像虚实

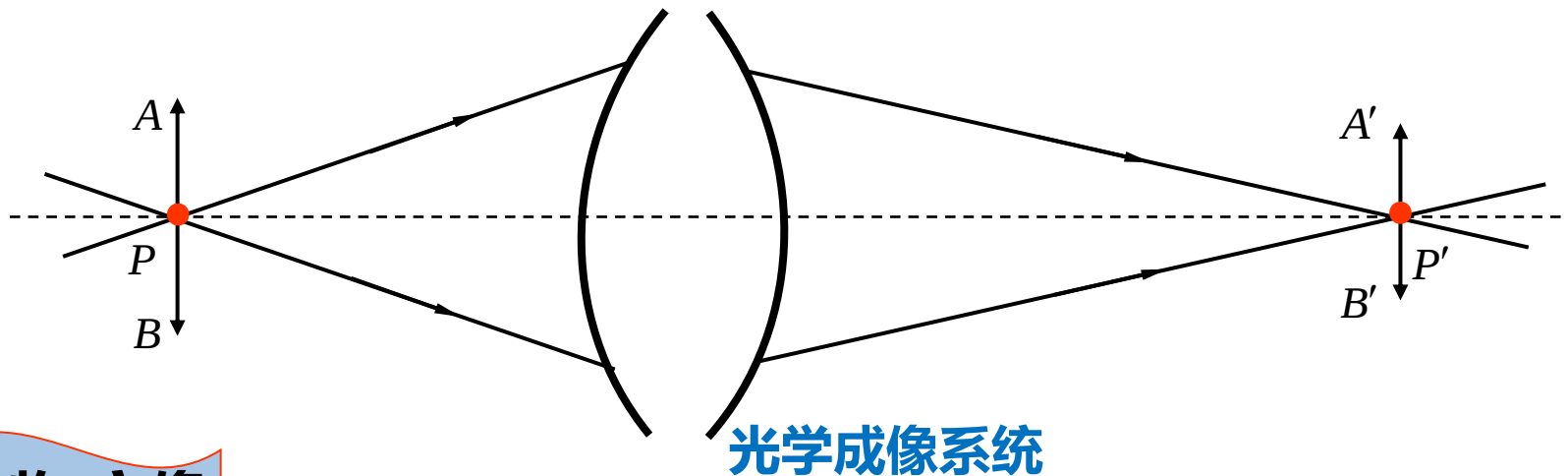
虚物点的形成

- Ⓐ 入射光线的交点
- Ⓑ 入射光线延长线的交点
- Ⓒ 光线的交点
- Ⓓ 出射光线延长线的交点

3. 物像虚实

物 像

发出入射光线的是物，由出射光线形成的就是像。



实物 实像

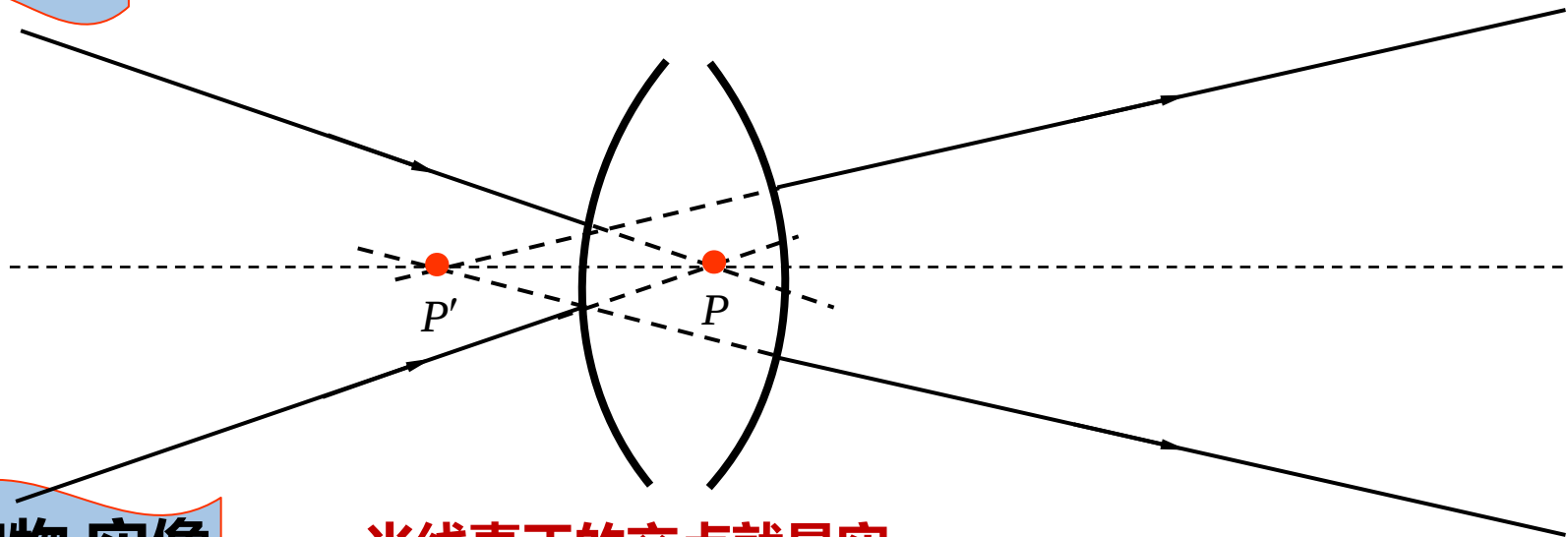
虚物 虚像

有光线真正的交点就是实。

3. 物像虚实

物 像

发出入射光波的是物，由出射光形成的就是像。



实物 实像

光线真正的交点就是实。

虚物 虚像

光线延长线的交点就是虚。

3. 物像虚实

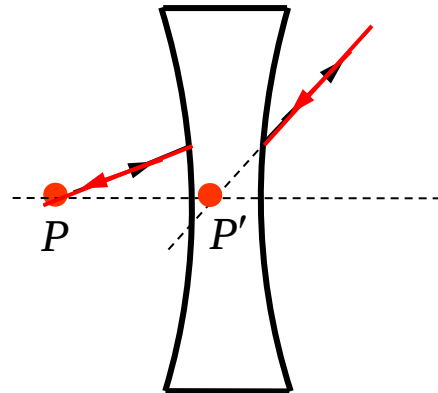
- ▲ 虚物不能人为设定，只能由系统元件产生。
- ▲ 通常在光学设计中，**系统至少要有有一个实像**，否则会抑制系统的功能。

物空间

物所在的空间。

像空间

像所在的空间。



- ▲ 物像空间是按照光线所在的空间来判断。
- ▲ 物像空间是可以无限延伸的。

▲ 共轭：互成物像关系。

4. 符号法则

在开始画图计算之前还需要一些定义：

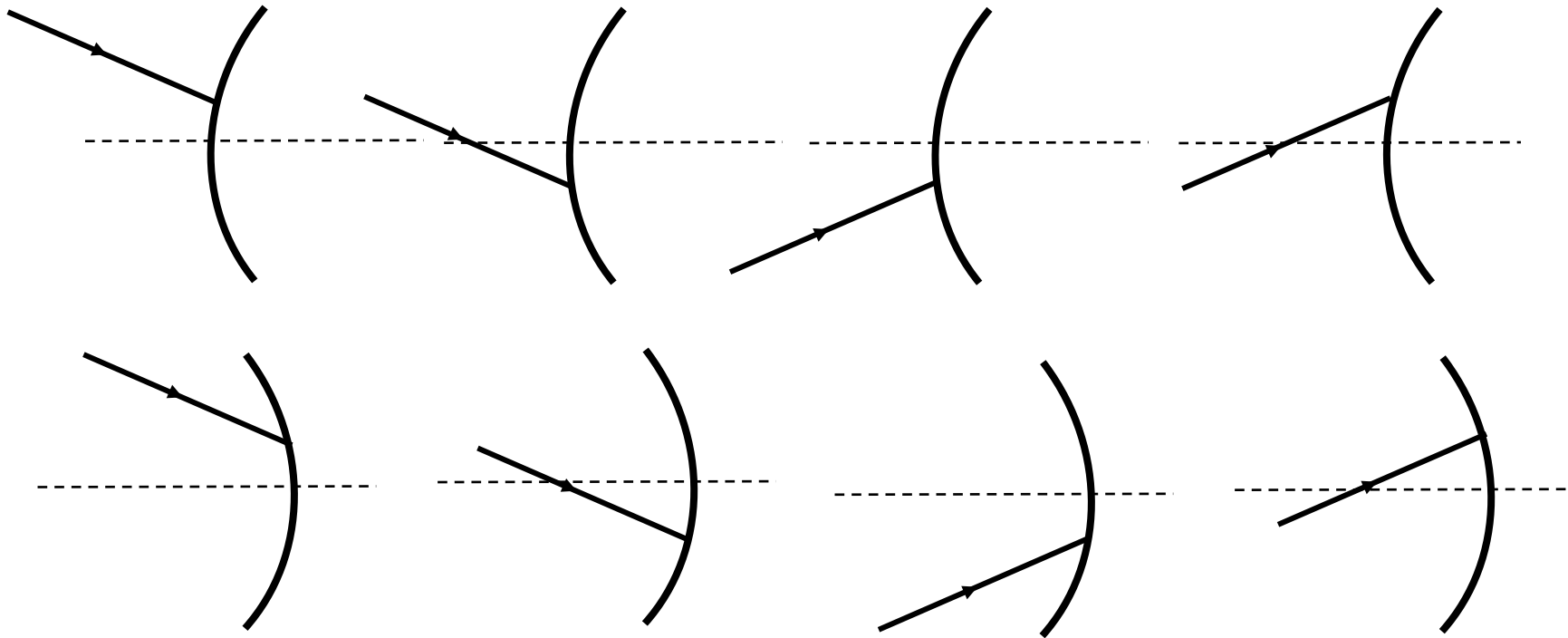
画：半径为5cm的球面？

画：入射角为30度一条光线？

4. 符号法则

意义

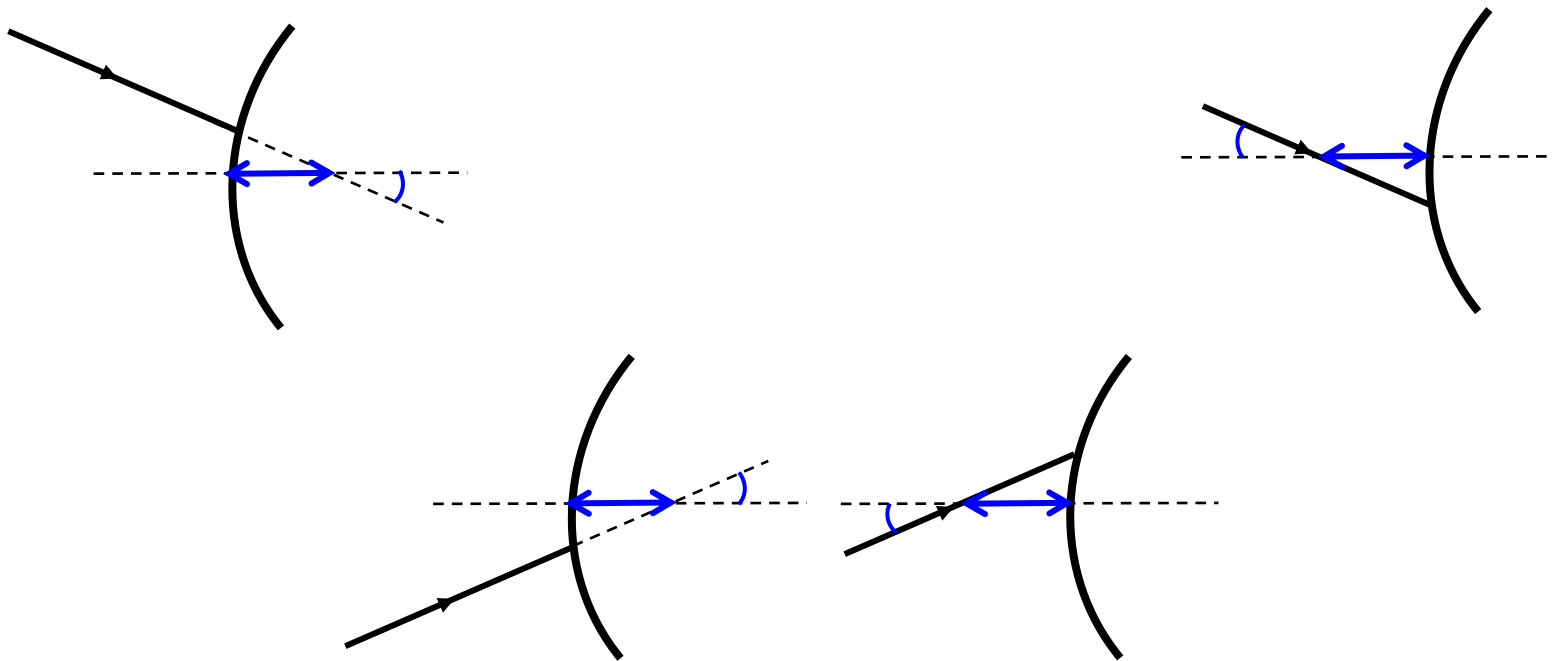
唯一地确定光学系统的结构、光线的位置、物像的信息。



4. 符号法则

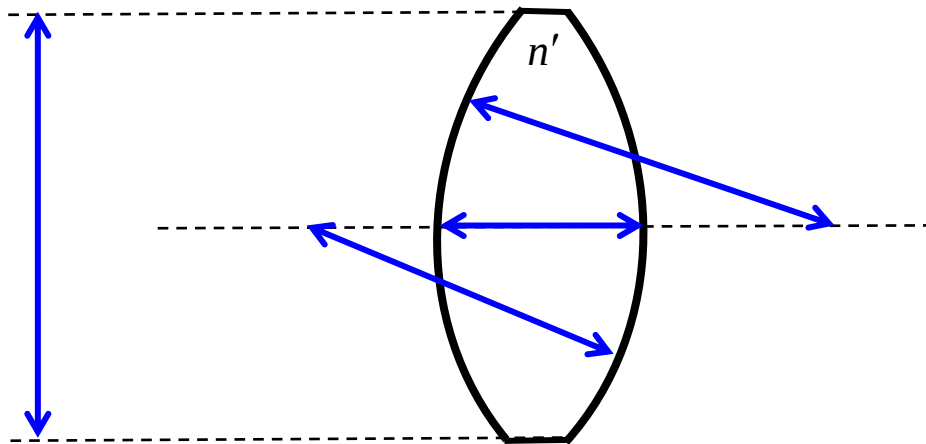
光线参数

唯一地确定一条光线位置所需要的参数。

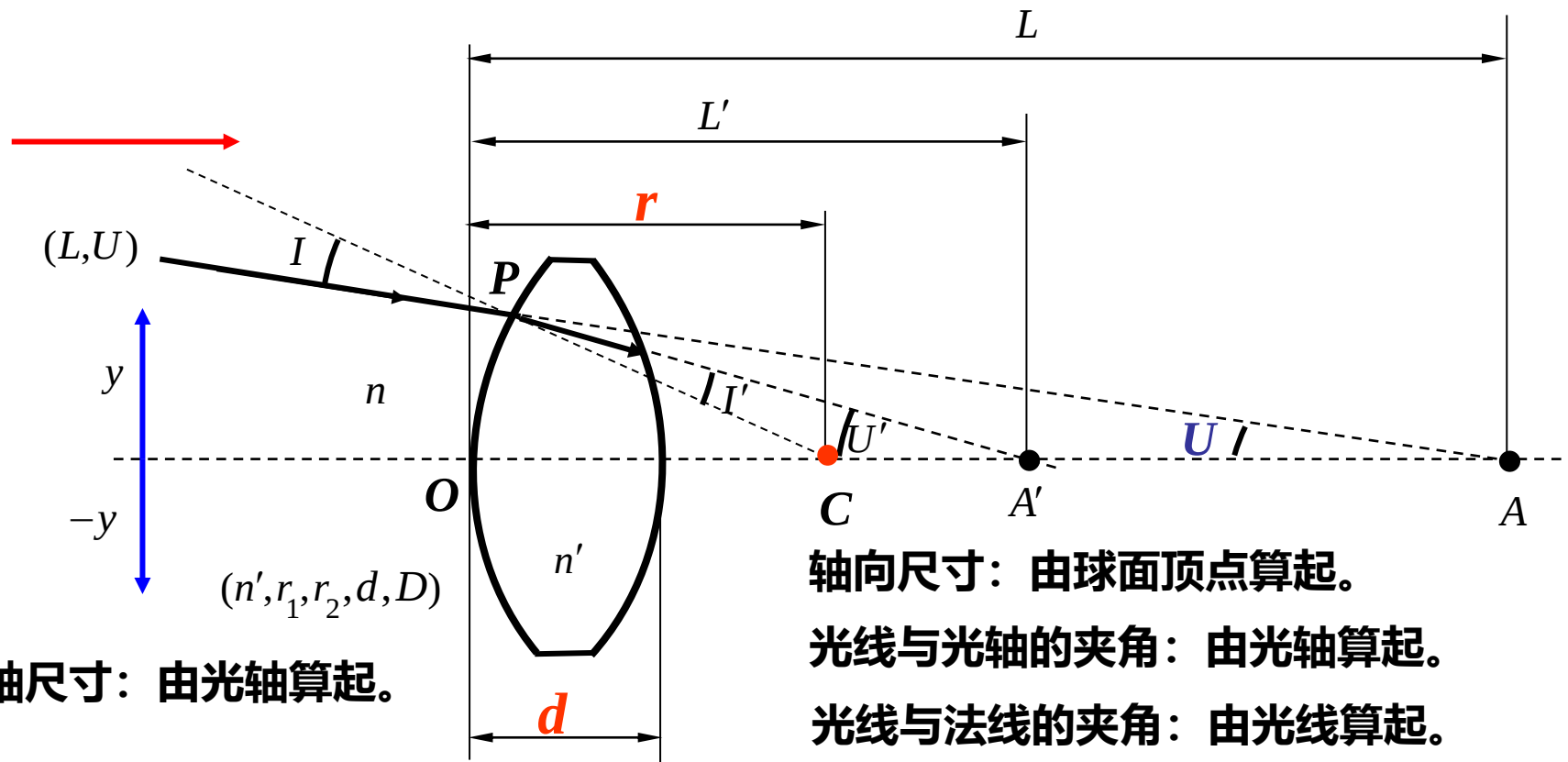


4. 符号法则

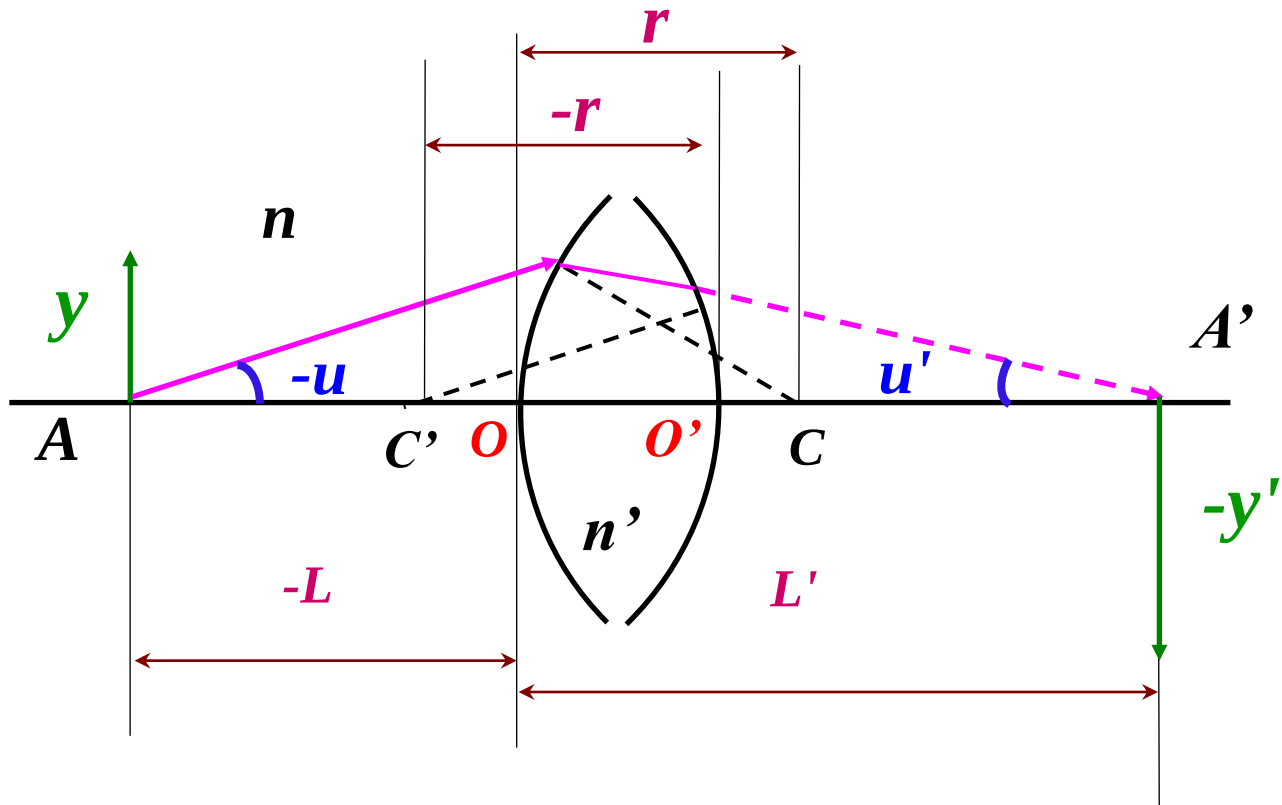
透镜参数



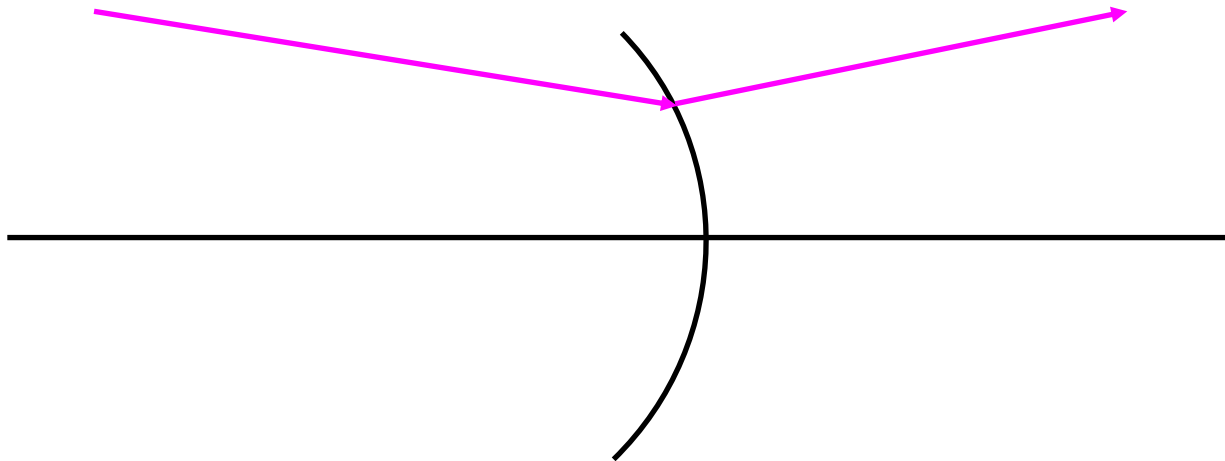
4. 符号法则



4. 符号法则



4. 符号法则

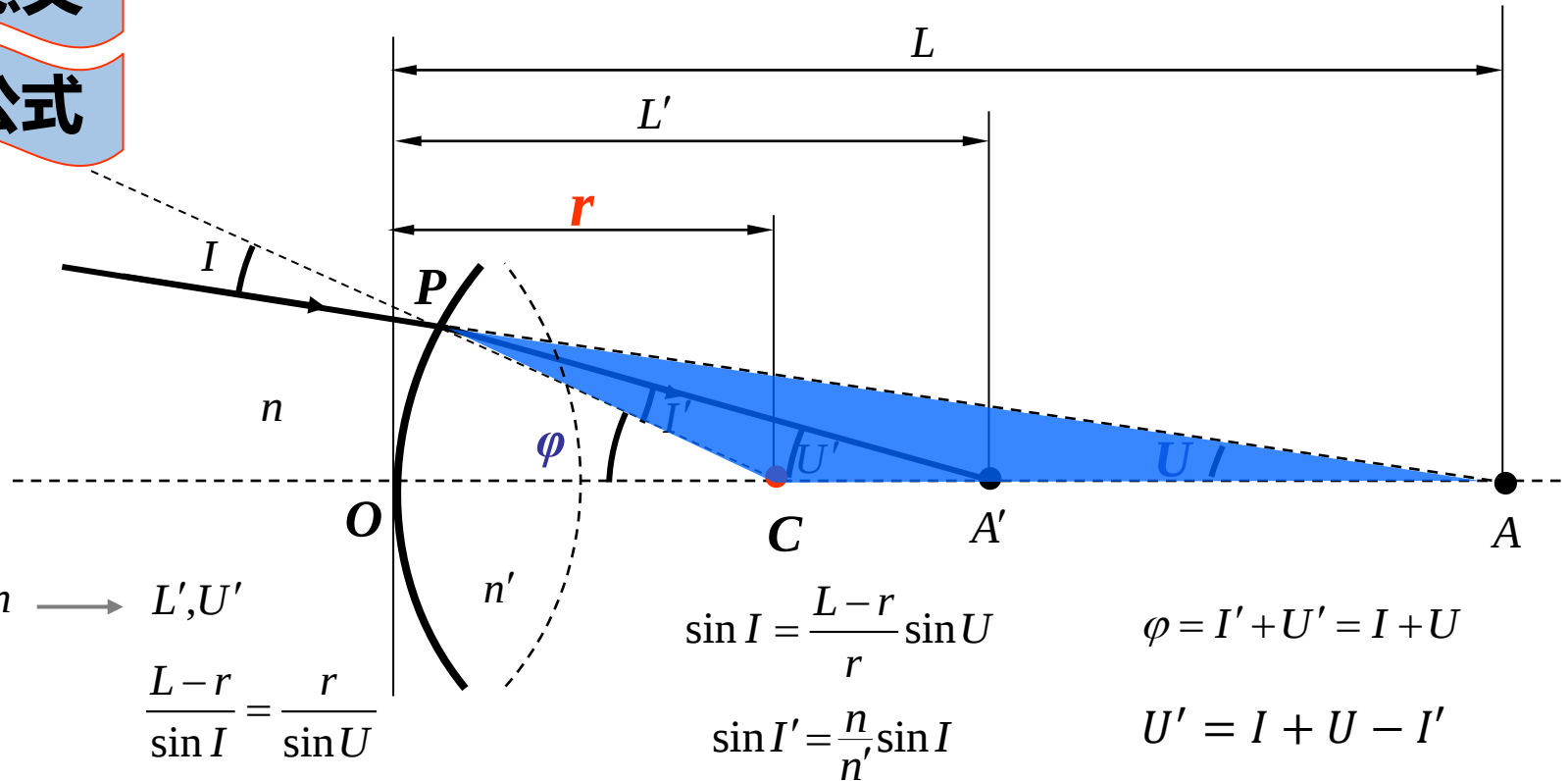


5.单个球面折射公式

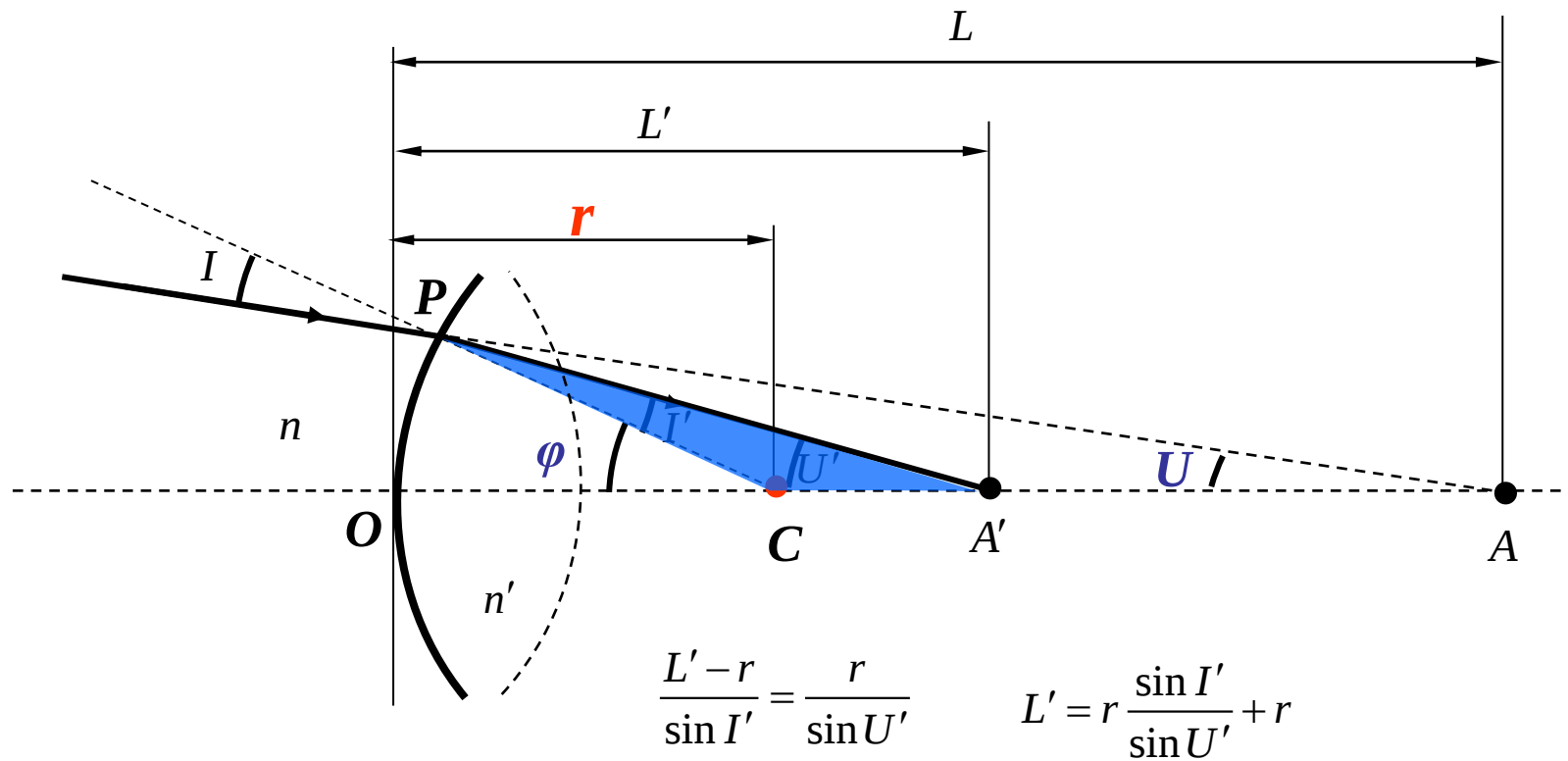
意义

公式

最基本的成像元素，其成像规律也是最简单、最基本的。



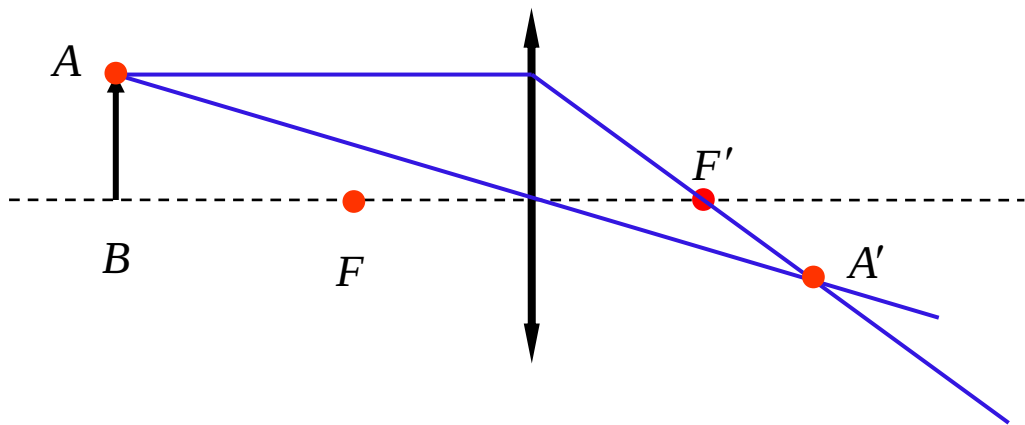
5. 单个球面折射公式



5.单个球面折射公式

上述几个公式能找出
像的位置么？

什么情况下，一个物点可以成一个像点？



$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U$$

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I$$

$$U' = I + U - I'$$

$$L' = r \frac{\sin I'}{\sin U'} + r$$

5.单个球面折射公式

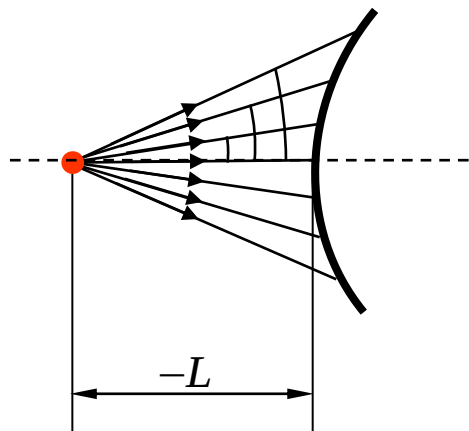
▲ 讨论

$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \longrightarrow I(L, U)$$

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \longrightarrow I'(L, U)$$

$$U' = I + U - I' \longrightarrow U'(L, U)$$

$$L' = r \frac{\sin I'}{\sin U'} + r \longrightarrow L'(L, U)$$

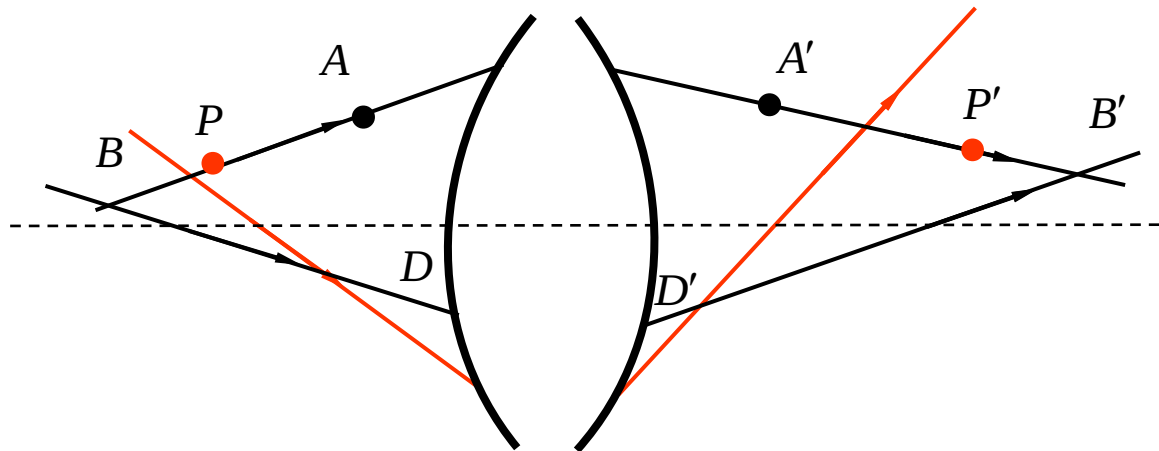


- ▲ 当折射球面确定时，出射光线 L', U' 与入射光线的位置、入射角有关。
- ▲ 一个物点经过单个折射球面成像后，不会汇聚于一点。
- ▲ 点物不能成点像，或者一般是不完善像（球面像差）

5.单个球面折射公式

完善像

像与物只有大小的变化，而没有形状的改变。



完善成像的条件

物、像空间符合:点对应点

直线对应直线

平面对应平面



回到之前的问题，怎么才能形成完善像呢？

近轴光线

靠近光轴的光线，入射孔径角 $< 5^\circ$ 的光线。

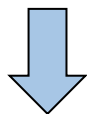
完善像

$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \longrightarrow i = \frac{l-r}{r} u$$

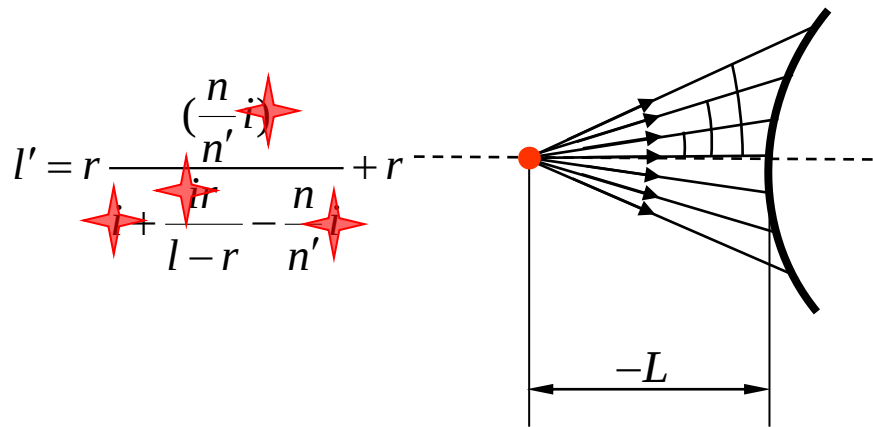
$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \longrightarrow i' = \frac{n}{n'} i$$

$$U' = I + U - I' \longrightarrow u' = i + u - i'$$

$$L' = r \frac{\sin I'}{\sin U'} + r \longrightarrow l' - r = r \frac{i'}{u'}$$



$$L'(L, U) \longrightarrow L'(L)$$



▲ 物体以近轴光成像时，所成的像为完善像。

思考：仅与物距有关，所以...？

一个光学系统成完善像，则成像过程符合

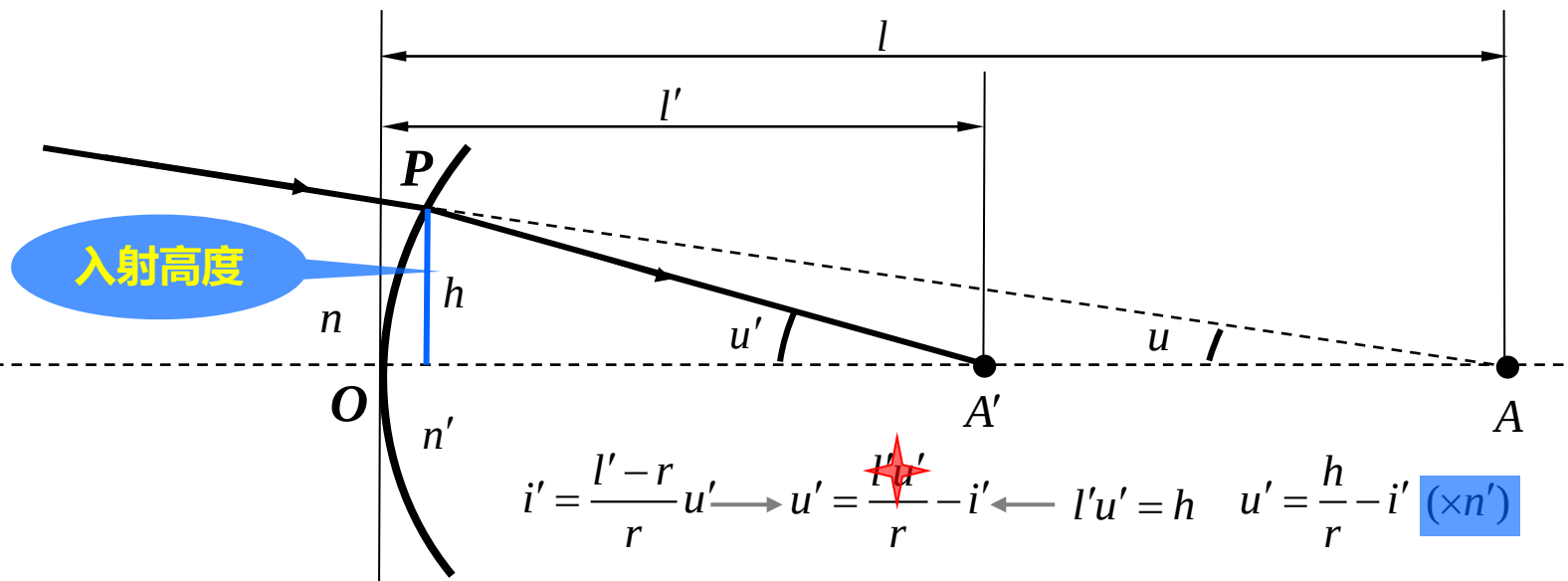
- A 一个物点对应唯一的像点
- B 直线成像为直线
- C 平面成像为平面
- D 与物完全一样

6. 单个球面物像关系

条件

入射光为近轴光。 ▲ 物像位置关系 $n', r, n, l \rightarrow l'$

$$i = \frac{l-r}{r}u \rightarrow u = \frac{h}{r} - i \leftarrow lu = h \quad u = \frac{h}{r} - i \quad (\times n)$$

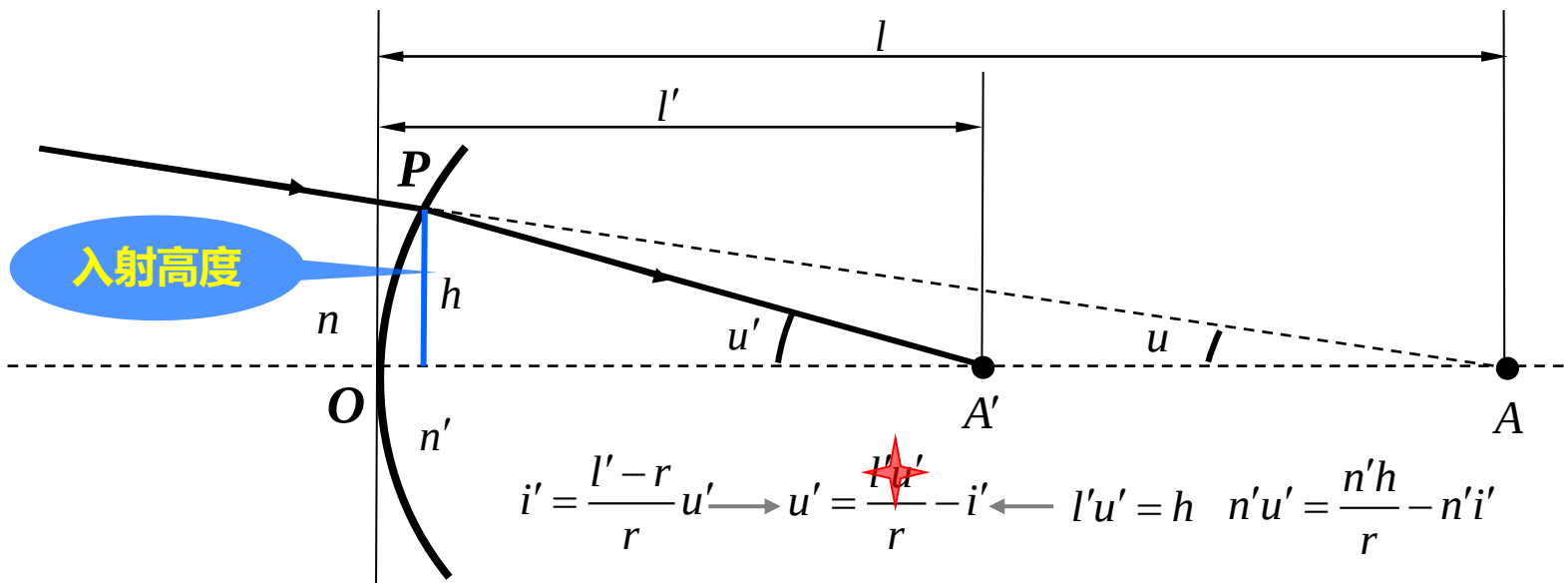


6. 单个球面物像关系

条件

入射光为近轴光。▲ 物像位置关系 $n', r, n, l \rightarrow l'$

$$i = \frac{l-r}{r}u \rightarrow u = \frac{r}{l-r}i \leftarrow lu = h \quad nu = \frac{nh}{r} - ni \quad n'u' - nu = \frac{h}{r}(n' - n) - (n'i' - ni)$$



6. 单个球面物像关系

条件

入射光为近轴光。▲ 物像位置关系 $n', r, n, l \rightarrow l'$

$$n'u' - nu = \frac{h}{r}(n' - n)$$

$$n' \frac{u'}{h} - n \frac{u}{h} = \frac{1}{r}(n' - n)$$

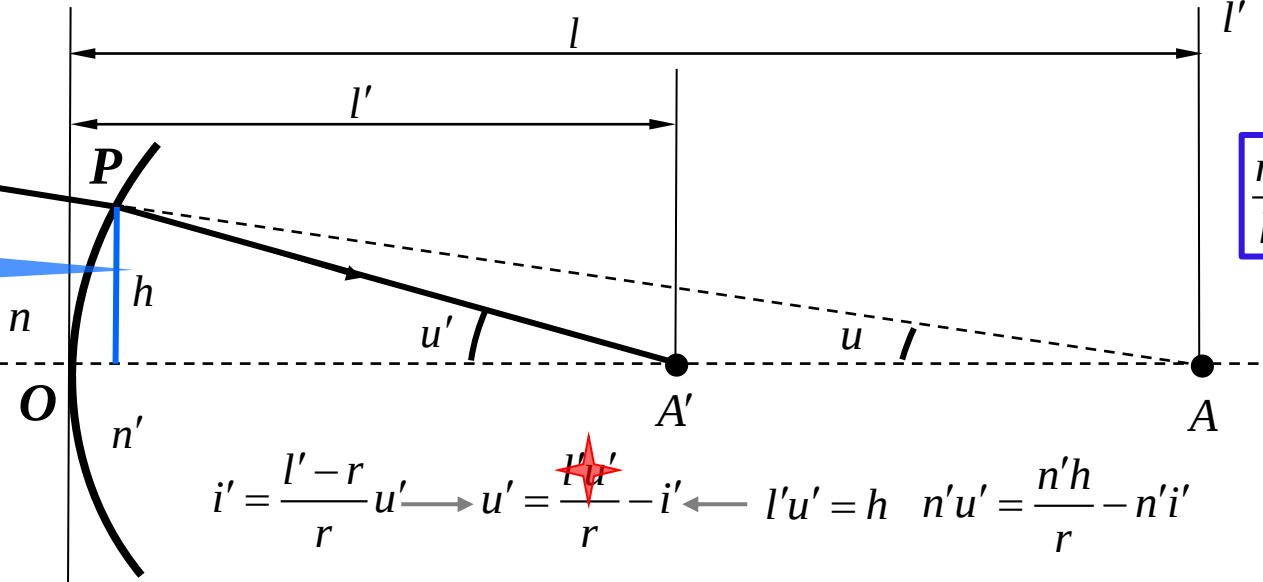
$$n' \frac{1}{l'} - n \frac{1}{l} = \frac{1}{r}(n' - n)$$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

$$i = \frac{l-r}{r}u \rightarrow u = \frac{h}{r} - i \leftarrow lu = h \quad nu = \frac{nh}{r} - ni$$

$$i' = \frac{l'-r}{r}u' \rightarrow u' = \frac{h}{r} - i' \leftarrow l'u' = h \quad n'u' = \frac{n'h}{r} - n'i'$$

入射高度



6. 单个球面物像关系

例：如图所示，有一折射率为1.5的玻璃棒，一端为 $r=30\text{cm}$ 的光滑凸球面，另一端为磨砂平面，试问该棒多长时，正好使无限远处物体经球面后清晰的成像在磨砂平面上？

根据单球面折射公式：

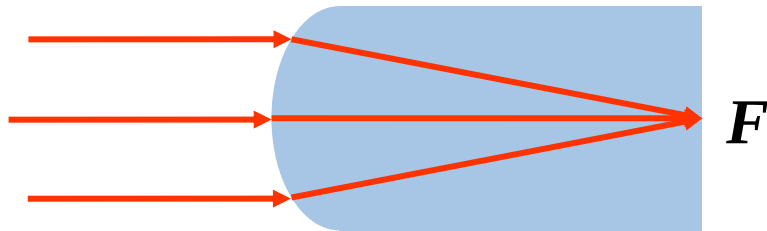
$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

代入数据：

$$\frac{1.5}{l'} - \frac{1}{\infty} = \frac{1.5 - 1}{30}$$

解得：

$$l' = 90 \text{ cm}$$



6. 单个球面物像关系

阿贝不变量

$$Q = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \longleftarrow n' \frac{1}{l'} - n \frac{1}{l} = \frac{1}{r} (n' - n)$$

一个折射球面，物空间和像空间的 Q 值是相同的，其数值随共轭点的位置而异。

$$\frac{1}{r} (n' - n) = \phi$$

光焦度



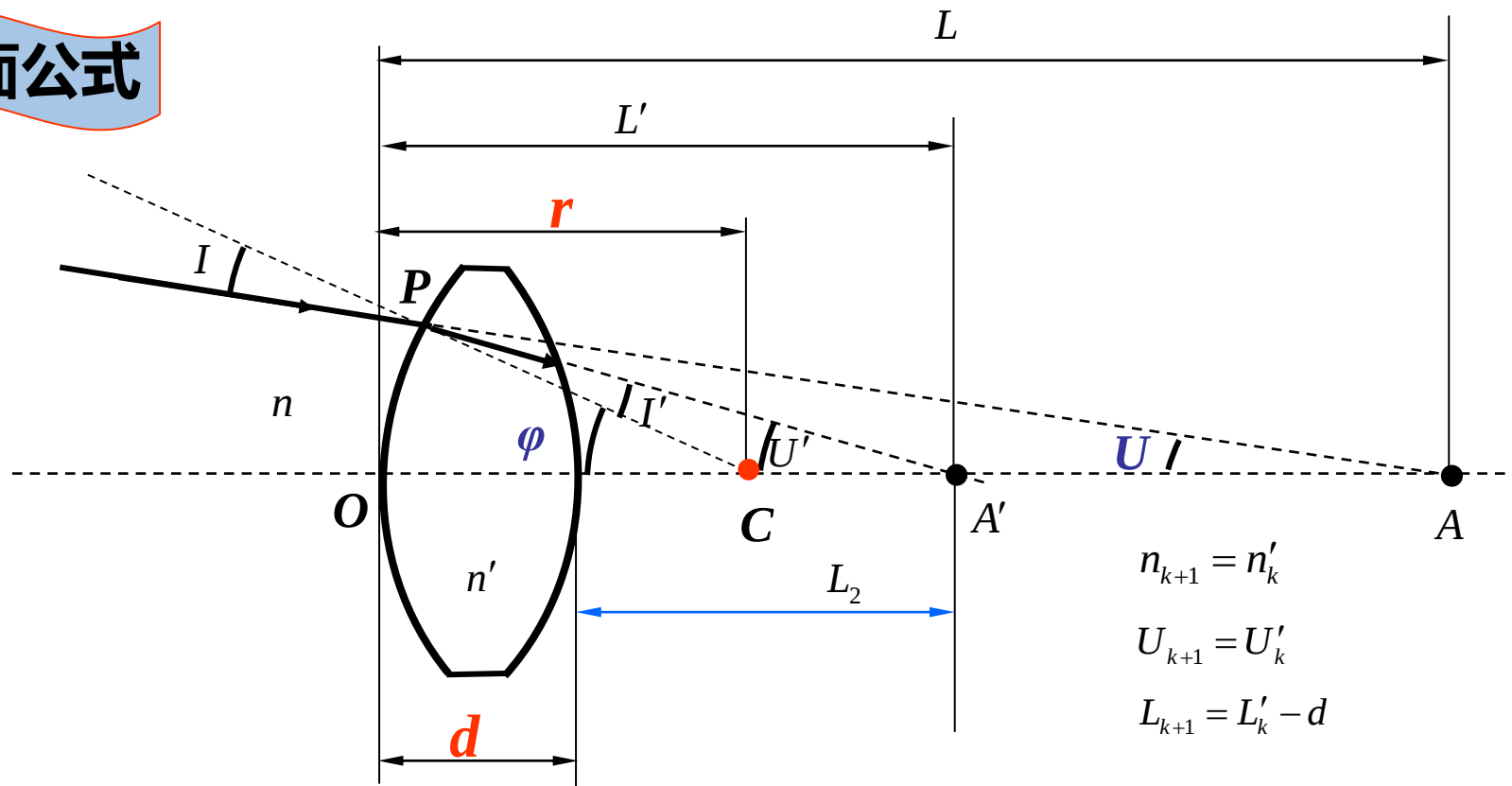
表征折射表面曲折光线的本领的物理量，单位为 m^{-1} 。

$\phi > 0$ 会聚作用； $\phi < 0$ 发散作用

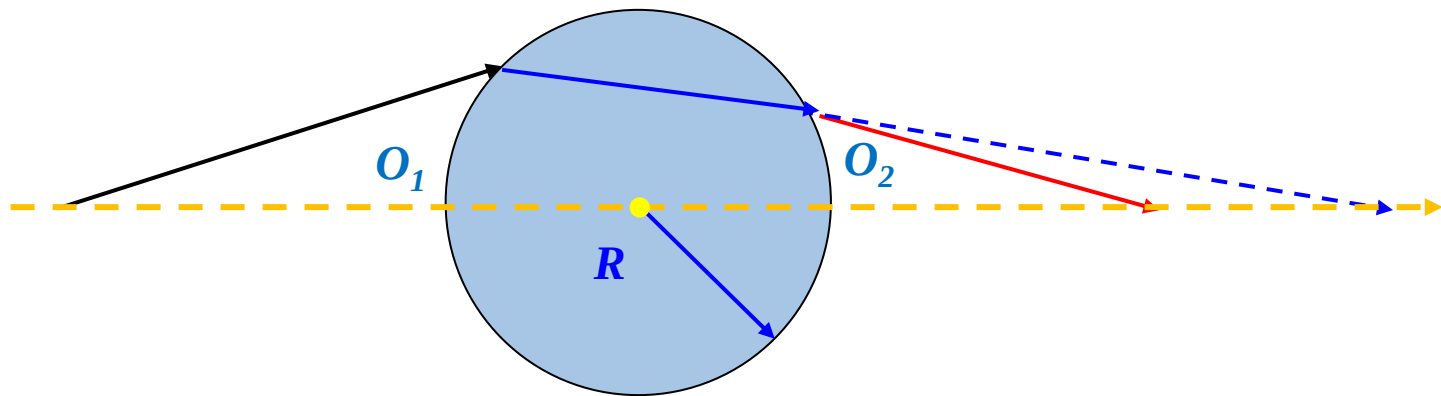
思考，若 l 或者 $l' = \pm\infty$?

5. 单个球面折射公式

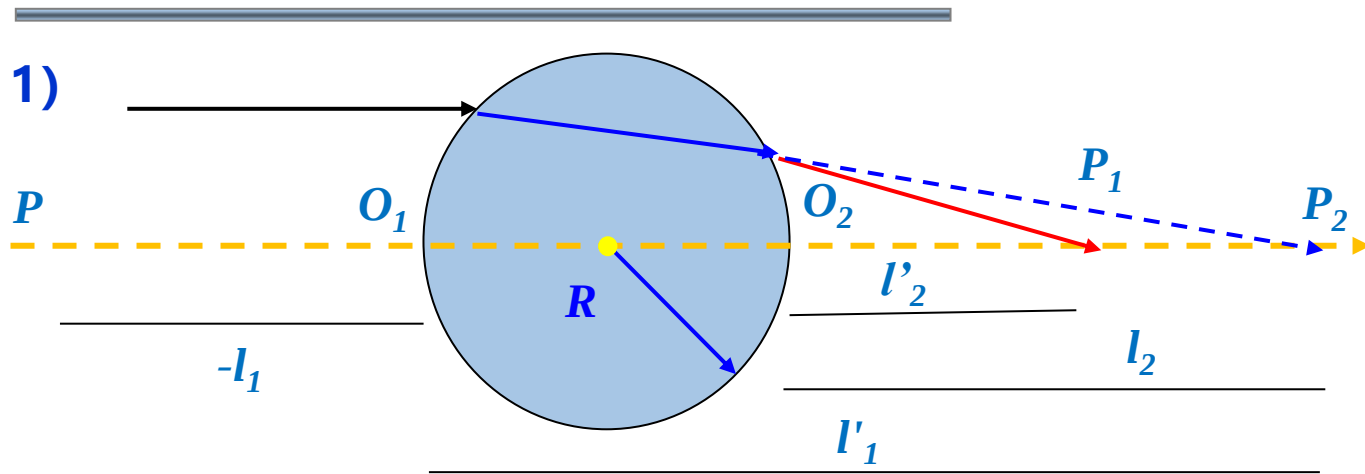
转面公式



例：如图所示，玻璃球 ($n=1.5$) 半径为 R ，置于空气中，问：
1) 无穷远处的物成像在何处； 2) 物在球前 $2R$ 处，成像在何处？



6. 单个球面物像关系



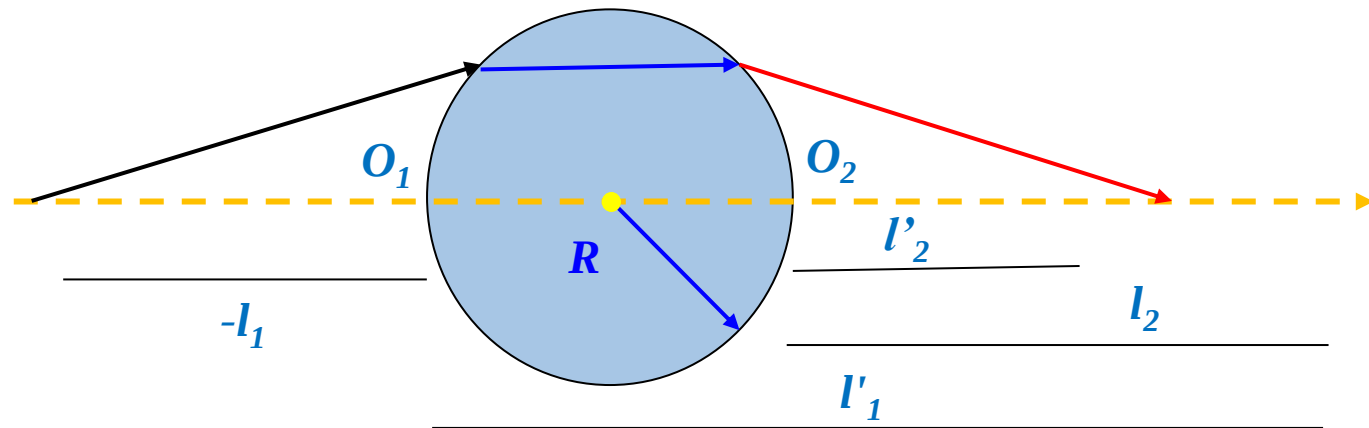
$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

第一次成像: $l_1 = \infty$ $r_1 = R$ $n_1 = 1$ $n'_1 = 1.5$ $\Rightarrow$ $l'_1 = 3R$

第二次成像: $l_2 = R$ $r_2 = -R$ $n_2 = 1.5$ $n'_2 = 1$ $\Rightarrow$ $l'_2 = R/2$

6. 单个球面物像关系

2)

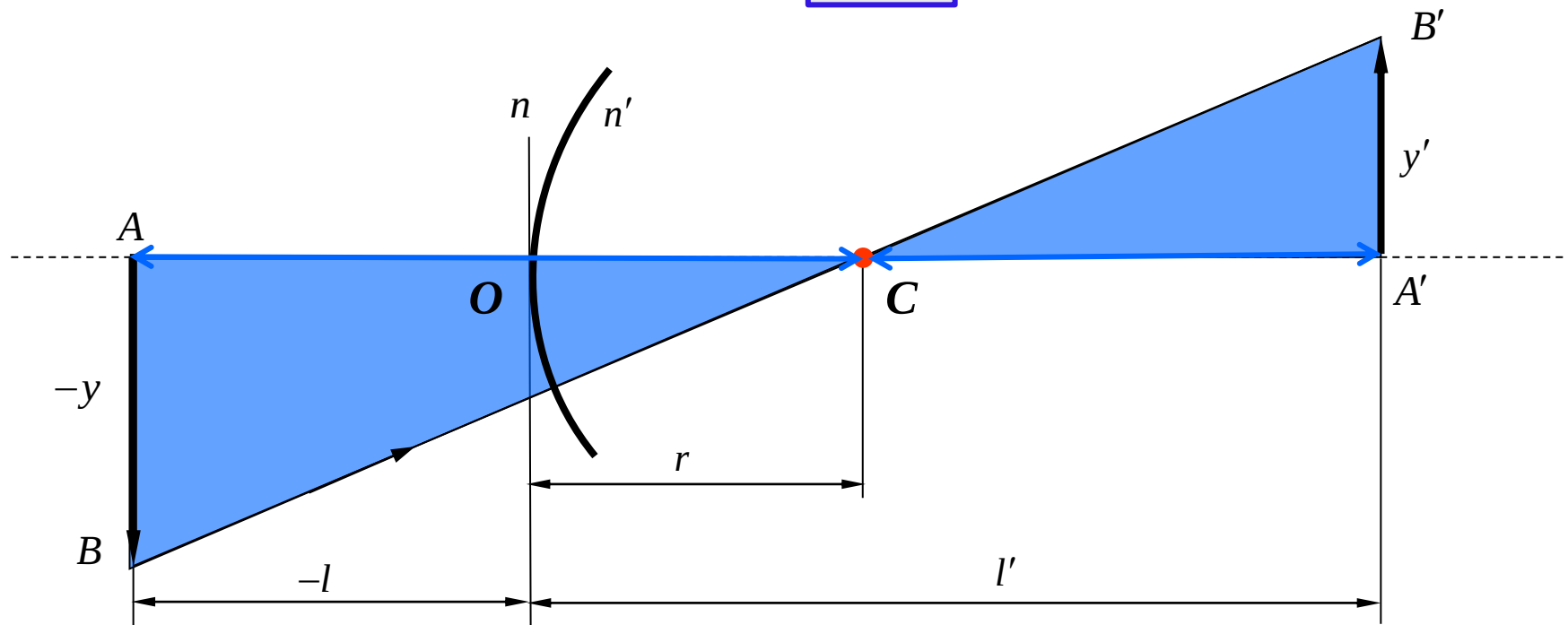


6. 单个球面物像关系

▲ 垂轴放大倍率 $\beta = \frac{y'}{y}$ $\frac{y'}{y} = \frac{l' - r}{l - r}$

$$\beta = \frac{nl'}{n'l}$$

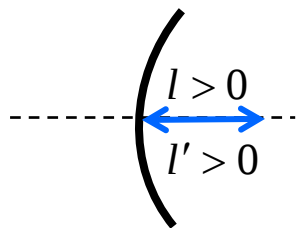
思考：符号的意义？



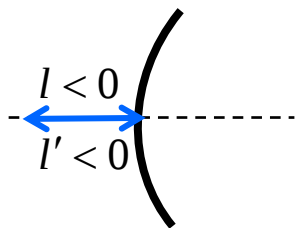
6. 单个球面物像关系

(1) $\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n l'}{n l} > 0$ 正像；物像虚实相反；

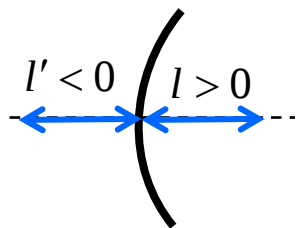
$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n l'}{n l} < 0$ 倒像；物像虚实一致；



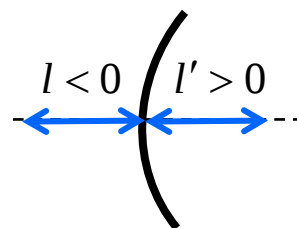
虚物实像



实物虚像



虚物虚像



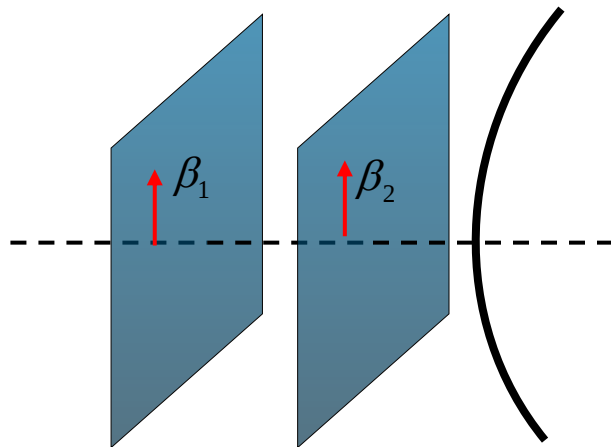
实物实像

6. 单个球面物像关系

(2) $|\beta| > 1$ 放大; $|\beta| < 1$ 缩小;

(3) $\beta = \frac{nl'}{n'l}$ 垂轴放大倍率随共轭面改变;

一对垂轴共轭面内的垂轴放大倍率相同。



6. 单个球面物像关系

例题：已知一个光学系统的结构参数， $r = 36.480 \text{ mm}$ ， $n=1$ ， $n'=1.5163$

已知一物体 $y = 20 \text{ mm}$ ， $l = -240 \text{ mm}$ ， $l' = 151.838 \text{ mm}$ ，

现求 β 和 y' (横向放大率与像的大小)

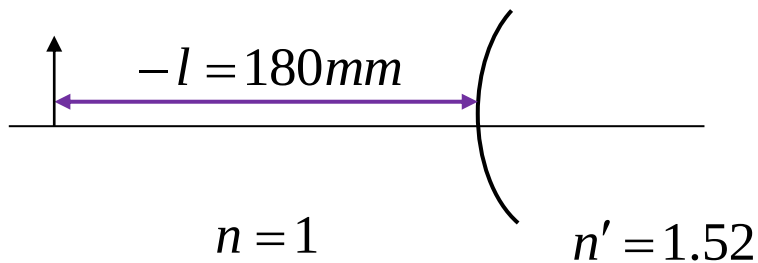
解：

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} = \frac{1 \times 151.838}{1.5163 \times (-240)} \approx -0.42$$

$$y' = \beta \cdot y = -0.42 \times 20 = -8.4 \text{ mm}$$

6. 单个球面物像关系

一个 18mm 高的物体位于折射球面前 180mm 处，球面半径 $r = 30\text{mm}$ ， $n = 1$ ， $n' = 1.52$ ，求像的位置、大小、正倒及虚实情况。



6. 单个球面物像关系

已知: $y = 18\text{mm}$ $l = -180\text{mm}$ $r = 30\text{mm}$ $n = 1$ $n' = 1.52$

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \qquad \frac{1.52}{l'} - \frac{1}{-180} = \frac{1.52 - 1}{30}$$

$$l' = 129.06\text{mm}$$

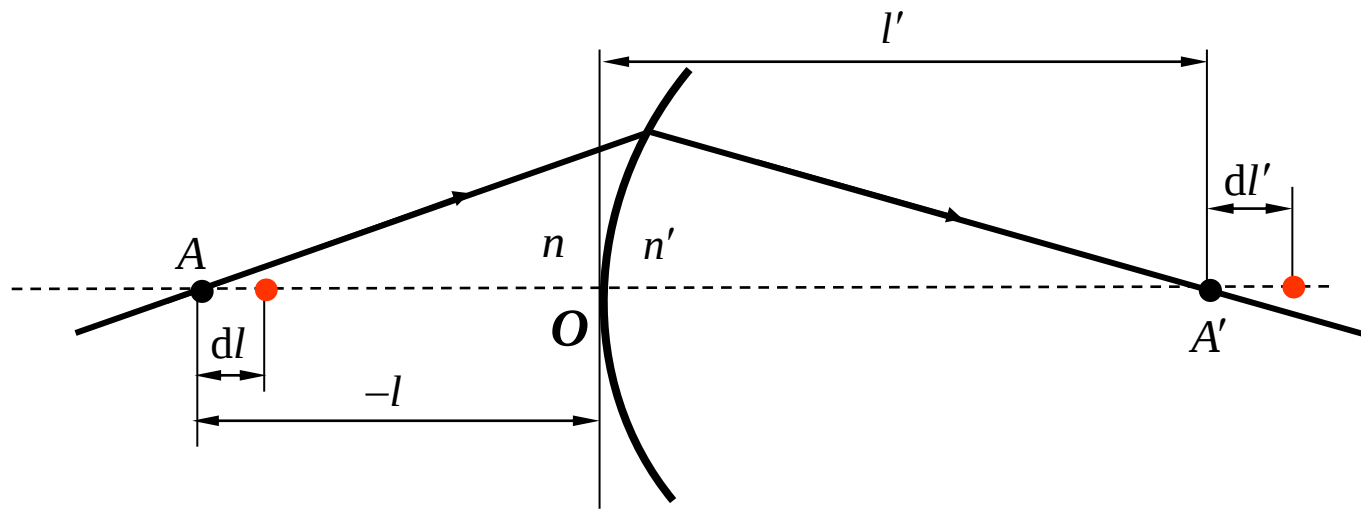
$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \frac{l'}{l} = \frac{1}{1.52} \times \frac{129.06}{-180} = -0.47$$

$$y' = -0.47y = -0.47 \times 18 = -8.49\text{mm} \qquad \text{缩小、倒立、实像}$$

6. 单个球面物像关系

▲ 轴向放大倍率 光轴上一对共轭点沿轴向移动量之间比例关系

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} \quad \alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad -n' \frac{dl'}{l'^2} + n \frac{dl}{l^2} = 0 \quad \leftarrow \quad \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

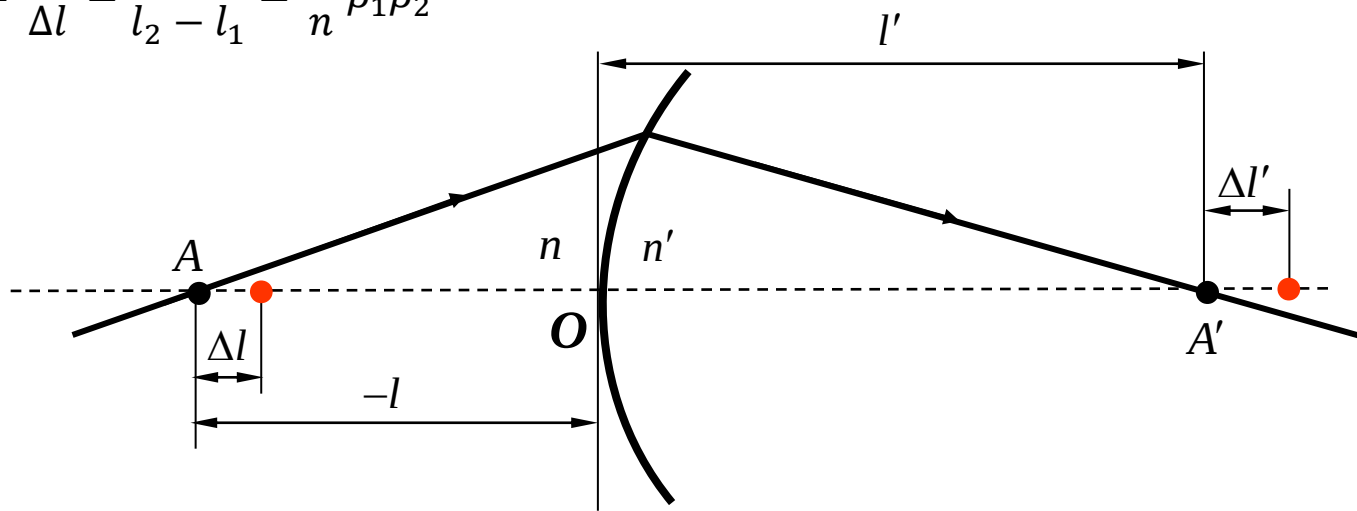


6. 单个球面物像关系

▲ 轴向放大倍率 光轴上一对共轭点沿轴向移动量之间比例关系

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} \quad \alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad -n' \frac{dl'}{l'^2} + n \frac{dl}{l^2} = 0 \quad \leftarrow \quad \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l'}{\Delta l} = \frac{l'_2 - l'_1}{l_2 - l_1} = \frac{n'}{n} \beta_1 \beta_2$$



6. 单个球面物像关系

▲ 轴向放大倍率 光轴上一对共轭点沿轴向移动量之间比例关系

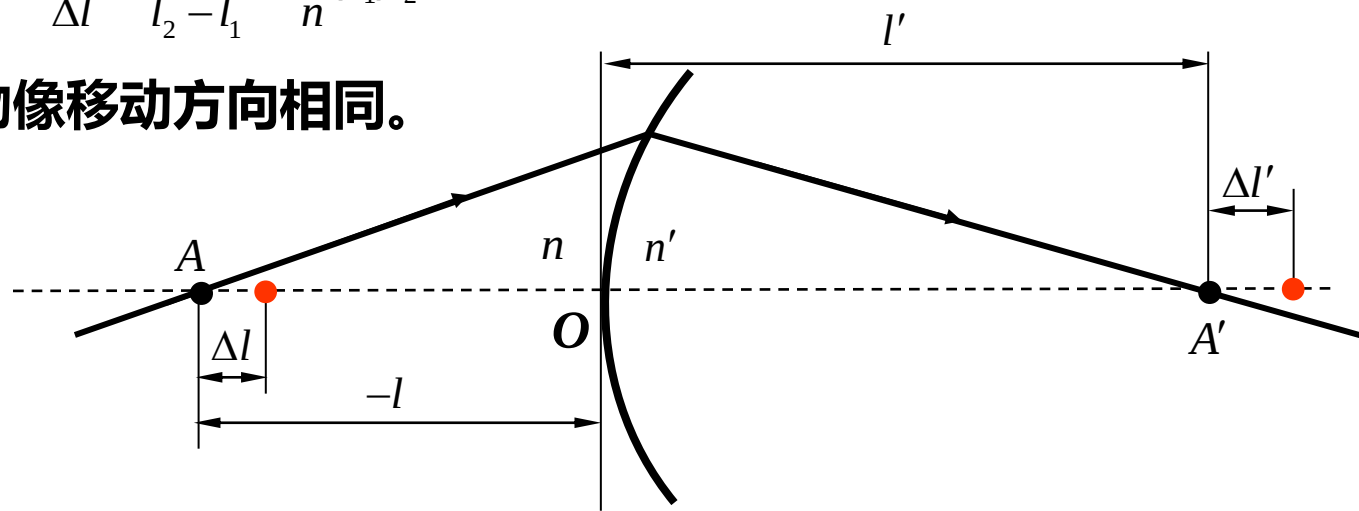
$$\beta = \frac{nl'}{n'l} \quad \alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad -n' \frac{dl'}{l'^2} + n \frac{dl}{l^2} = 0 \quad \leftarrow \quad \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l'}{\Delta l} = \frac{l'_2 - l'_1}{l_2 - l_1} = \frac{n'}{n} \beta_1 \beta_2$$

(1) $\alpha > 0$

物像移动方向相同。

(2) $\alpha \neq \beta$



6. 单个球面物像关系

▲ 轴向放大倍率 光轴上一对共轭点沿轴向移动量之间比例关系

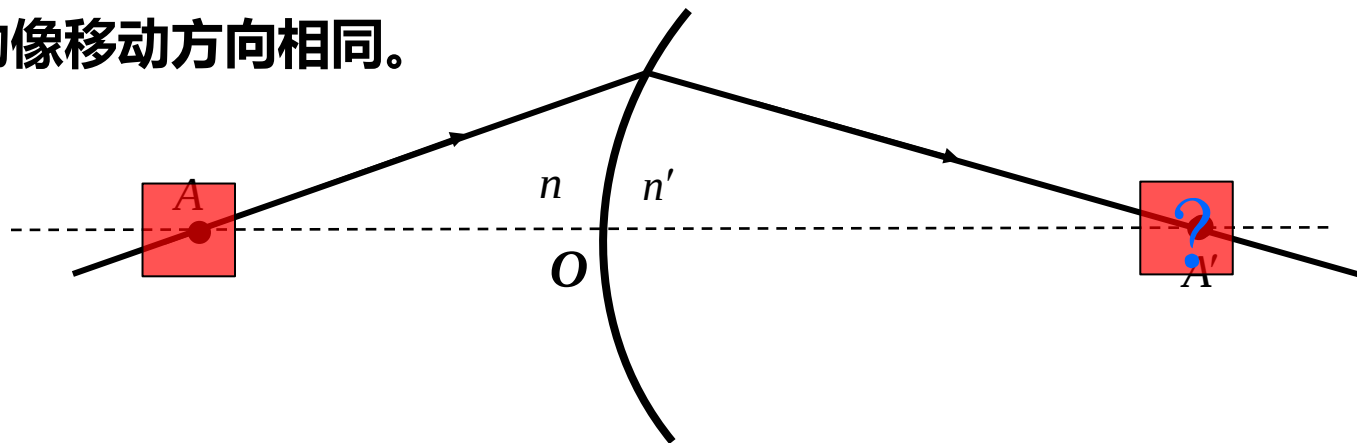
$$\beta = \frac{nl'}{n'l} \quad \alpha = \frac{dl'}{dl} = \frac{nl'^2}{n'l^2} = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad -n' \frac{dl'}{l'^2} + n \frac{dl}{l^2} = 0 \quad \leftarrow \quad \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l'}{\Delta l} = \frac{l'_2 - l'_1}{l_2 - l_1} = \frac{n'}{n} \beta_1 \beta_2$$

(1) $\alpha > 0$

物像移动方向相同。

(2) $\alpha \neq \beta$



6. 单个球面物像关系

▲ 角放大倍率 近轴区一对共轭光线像方孔径角与物方孔径角之比。

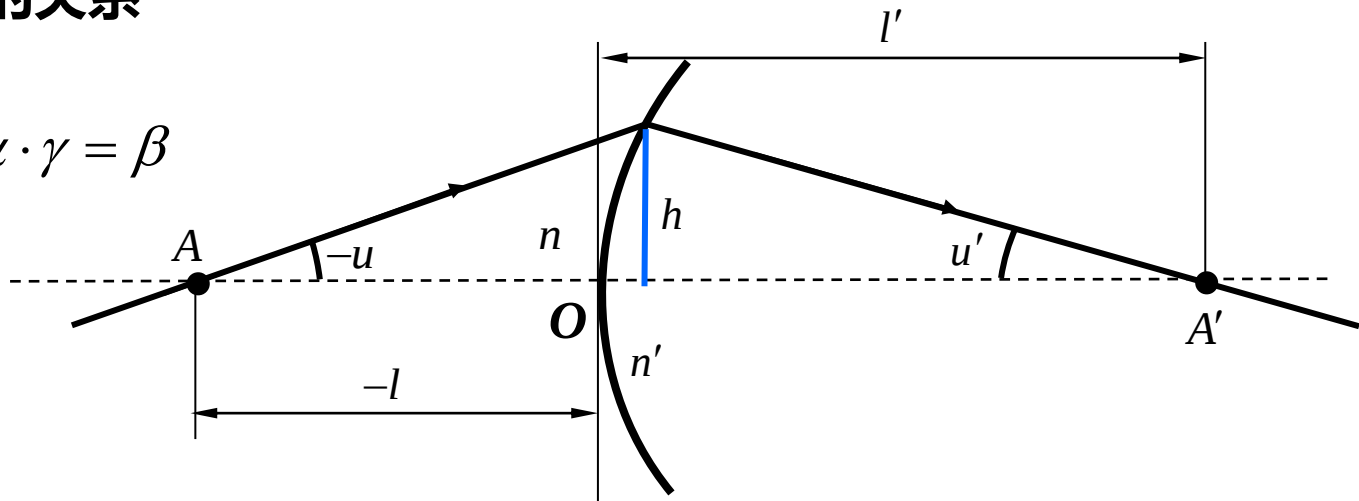
$$\beta = \frac{nl'}{n'l} \quad \gamma = \frac{u'}{u} = \frac{l}{l'} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\beta}$$

▲ 三种放大倍率的关系

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2$$

$$\alpha \cdot \gamma = \beta$$

$$\gamma = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\beta}$$

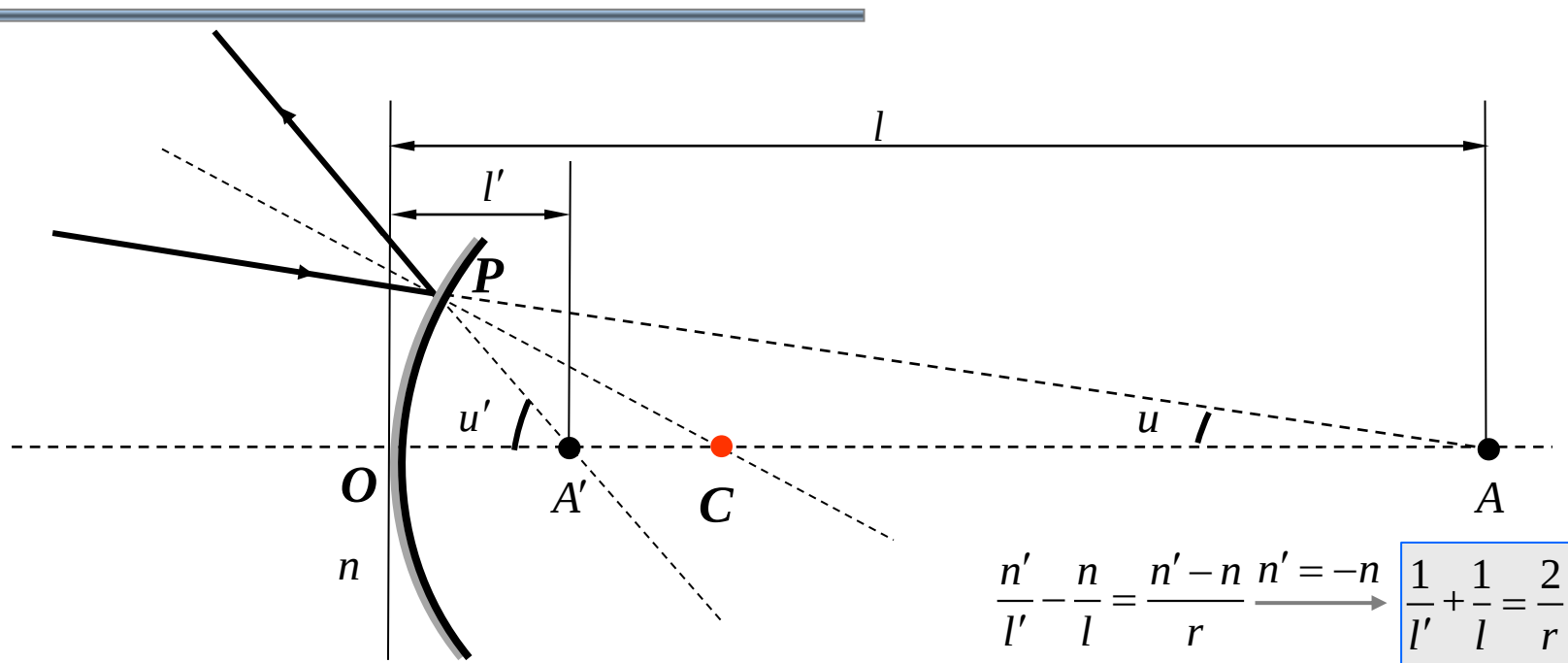


6. 单个球面物像关系

有一个置于空气中的理想光学系统,其垂轴放大率 $\beta > 0$, 则()

- A.物像位于系统的同侧。
- B.角放大率 $\gamma > 0$ 。
- C.像高大于物高。
- D.光学系统的焦距为正。

反射球面



$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \xrightarrow{n' = -n} \boxed{\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r}}$$

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l} \xrightarrow{n' = -n} \beta = \frac{y'}{y} = -\frac{l'}{l} \quad \alpha = \frac{dl'}{dl} = -\beta^2 \quad \gamma = \frac{u'}{u} = -\frac{1}{\beta}$$

反射球面

凸面镜半径为30 cm。现有一个物体高10 mm，置于镜前30 cm处，求所成像的位置、大小和虚实。

按题意， $l = -30\text{cm}$ ， $r = 30\text{cm}$ ， $y = 10\text{mm}$

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r}$$

由成像公式可得 $l' = 10\text{ cm}$

由横向放大率公式可得 $y' = \beta y = -\frac{l'}{l}y = 3.33\text{mm}$

所以成的是缩小正立的虚像，位于镜前右方10 cm处。

拉赫不变量

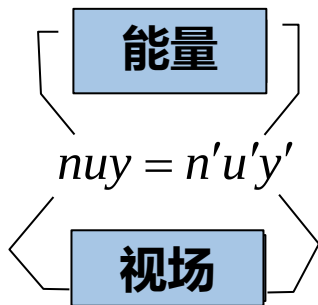
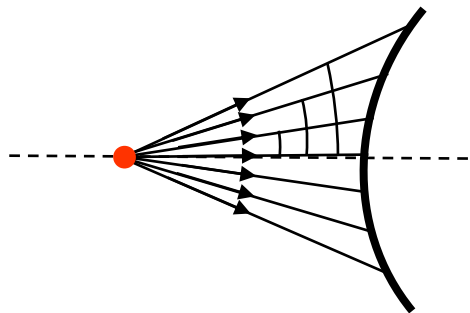
$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l}$$

$$\gamma = \frac{u'}{u} = \frac{l}{l'}$$

$$\longrightarrow \frac{y'}{y} = \frac{nu}{n'u'}$$

拉赫不变量

$nu y = n' u' y' = J$ **拉格朗日-赫姆霍兹恒等式**



▲ 像差与孔径(u)与视场(y)有关。
每个近轴球面的作用基本上是将这个光学(拉赫)不变量在**孔径角**和**物(像)高**之间重新分配。

▲ 拉赫不变量的重要性： 它数值的大小决定了光学系统设计的难易程度。

本章小结

基本概念

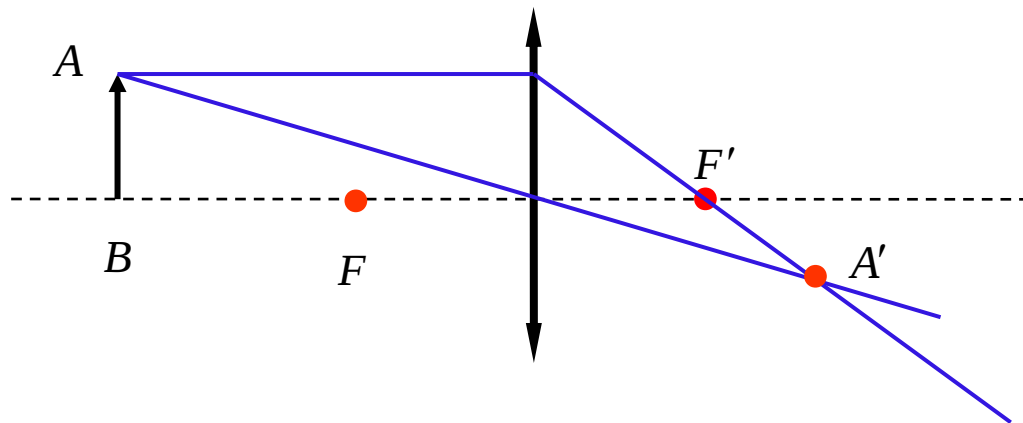
物、像 虚、实 物空间、像空间 共轭 完善像

垂轴放大倍率、轴向放大倍率、角放大倍率 拉赫不变量

基本方法

如何成完善像？

近轴



本章小结

共轴球面系统求解完善像的方法

▲ 对于单个球面系统，应用 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad \beta = \frac{nl'}{n'l} \longrightarrow l', y'$

▲ 对于共轴球面系统，依次应用 $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$

$$\beta = \frac{nl'}{n'l}$$

$$\longrightarrow l'_k, y'_k$$

及转面公式

$$n_{k+1} = n'_k$$

$$u_{k+1} = u'_k$$

$$l_{k+1} = l'_k - d$$

本章小结

推到薄透镜的焦距公式

