光　　学

关于光的本质的认识

17世纪开始，对光的本性的认识，有两种学说并立

以牛顿为代表的微粒说，认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒，可以解释光的直线传播、反射、折射。但无法解释干涉、衍射、偏振

惠更斯提出光的波动理论，认为光是在一种特殊介质中传播的机械波，解释了光的反射、折射、干涉、衍射。

托马斯.杨和菲涅尔（在19世纪初）透过实验和进一步的理论工作，验证了光的波动理论，成功地解释了光的干涉、衍射。

波动理论不足之处：把光看作是机械波，光在真空中传播需要媒质，于是臆想出“以太”，认为真空中充满了“以太”，但找不到。

19世纪60年代，麦克斯韦建立了电磁场理论，预言电磁波存在，1887年赫兹证实了电磁波的存在，且传播速度等于光速。

科学家们认为光的本质研究已完成---光是一种电磁波

20世纪初，发现了光电效应，康普顿效应，波动光学无法解释，1900年普朗克提出量子假说，1905年爱因斯坦提出光子学说，解释了光电效应。

目前关于光的本质：

光具有波粒二象性，既是粒子，也是波。

光学分支：

几何光学　：以直线传播为基础．折射、反射定律…

物理光学
- 波动光学：以麦克斯韦电磁理论为基础，光的干涉、衍射、偏振
- 量子光学：以量子力学为基础，光与物质作用

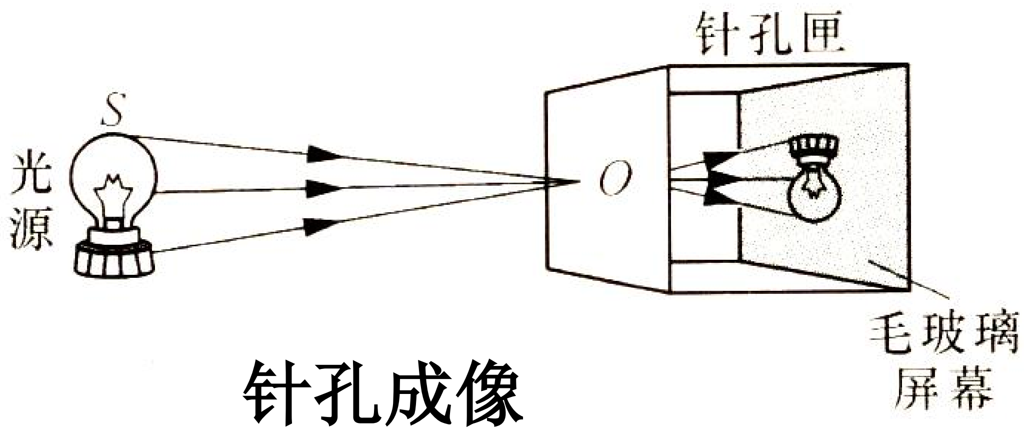
现代光学
- 非线性光学
- 信息光学
- 全息术
- 激光光谱学
- 光纤通讯
- 集成光学
- 统计光学
- ……….

11-1 几何光学

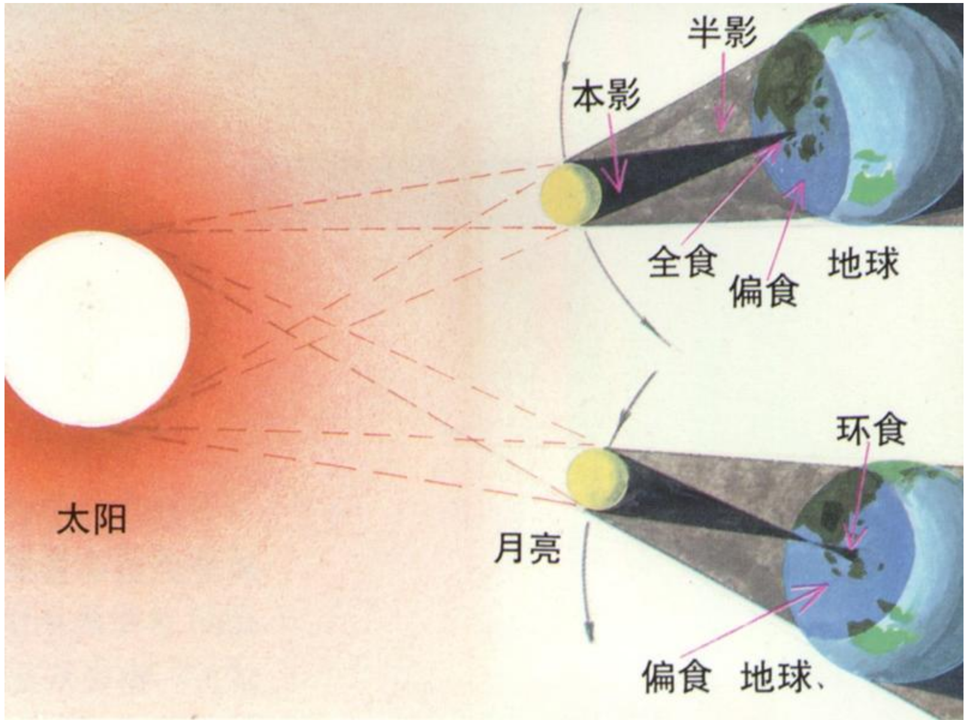
一、几何光学的基本规律

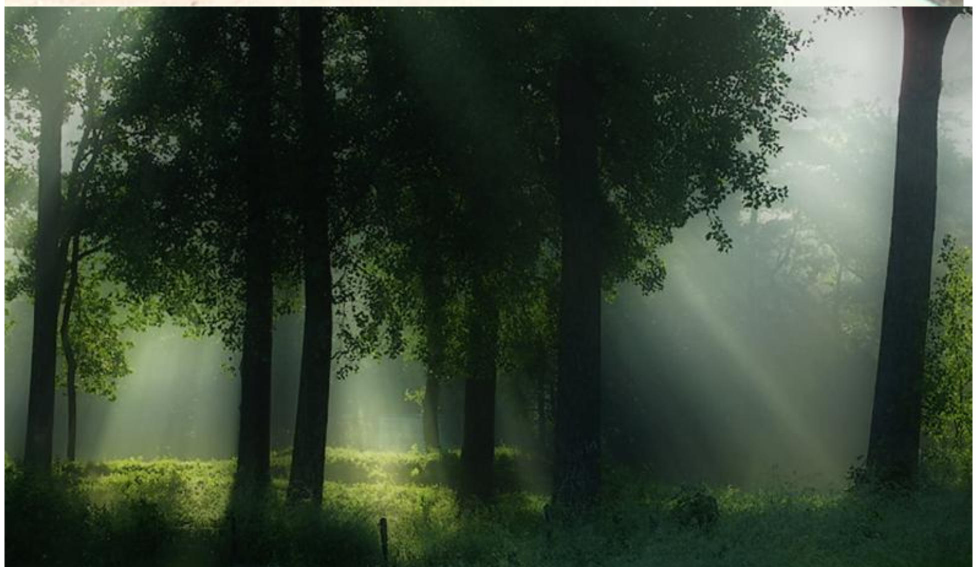
1、光的直线传播定律

光在均匀介质中沿直线传播



针孔成像

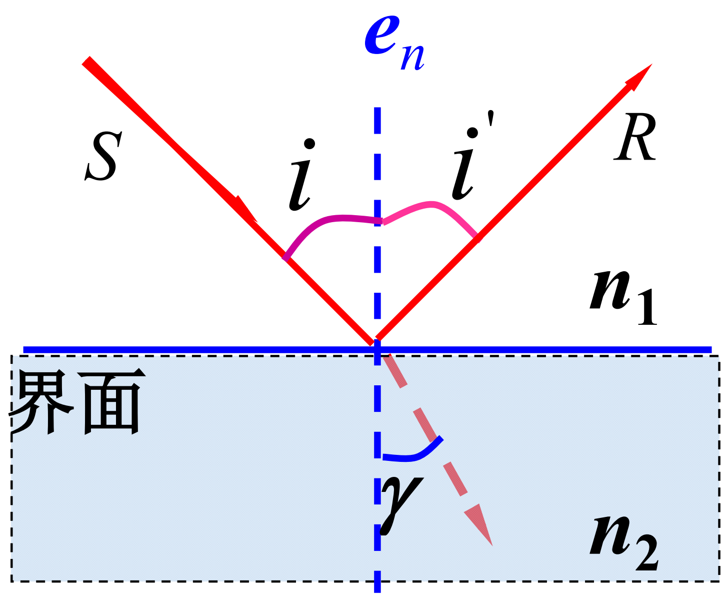




2、光的独立传播定律

3、 光的反射(Reflection)和折射(Refraction)定律

反射光线和折射光线都在入射面内，与入射光分居法线两侧。



- $i = i'$
- $n_1 \sin i = n_2 \sin\gamma$

$$\frac{\sin i}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

n_{21}称为介质 2 对介质1 的相对折射率。

—— 若介质 1 为真空，$n_{21} = n$ 称为介质2的(绝对) 折射率。

—— 相对而言，n 大----光密介质；n 小---- 光疏介质。

光路可逆性原理：光线方向逆向传播时，路径不变。

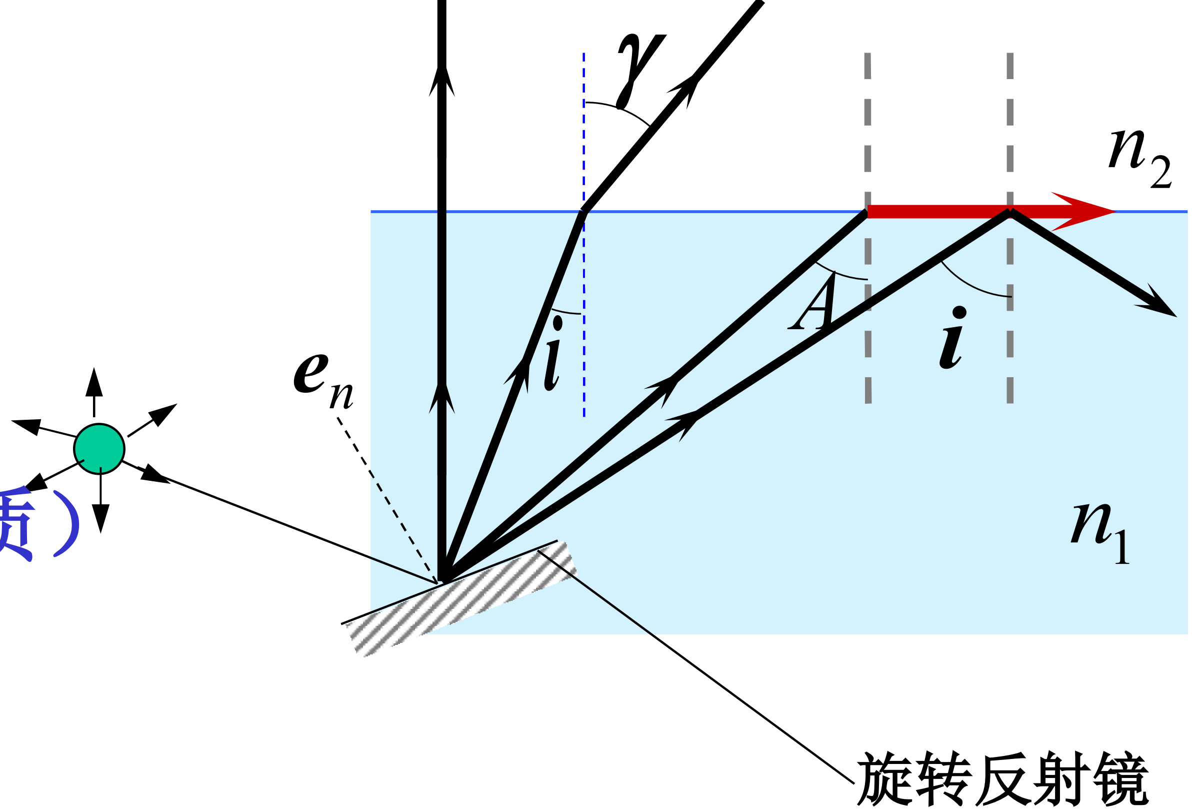
➢全反射

$$n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma$$

当 $\boldsymbol{n_1} > \boldsymbol{n_2}$

（光密进入光疏介质）

有 $\gamma > i$



临界角 A：

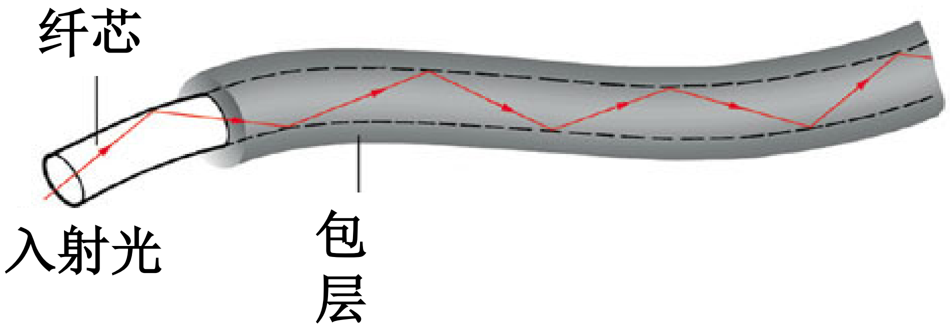
相应于折射角为90° 的入射角。

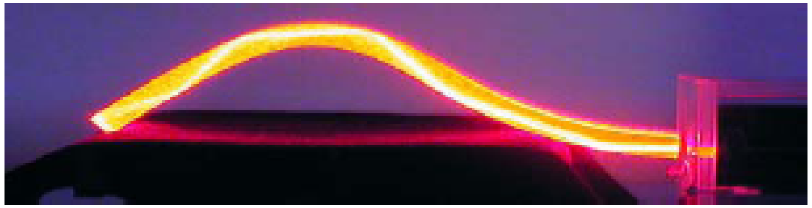
$$\sin A = \frac{n_2}{n_1}$$

全反射： 当$\boldsymbol{i} > \boldsymbol{A}$时，将不会出现折射光，

入射光的能量全部反射回原来介质。

全反射的应用----光纤



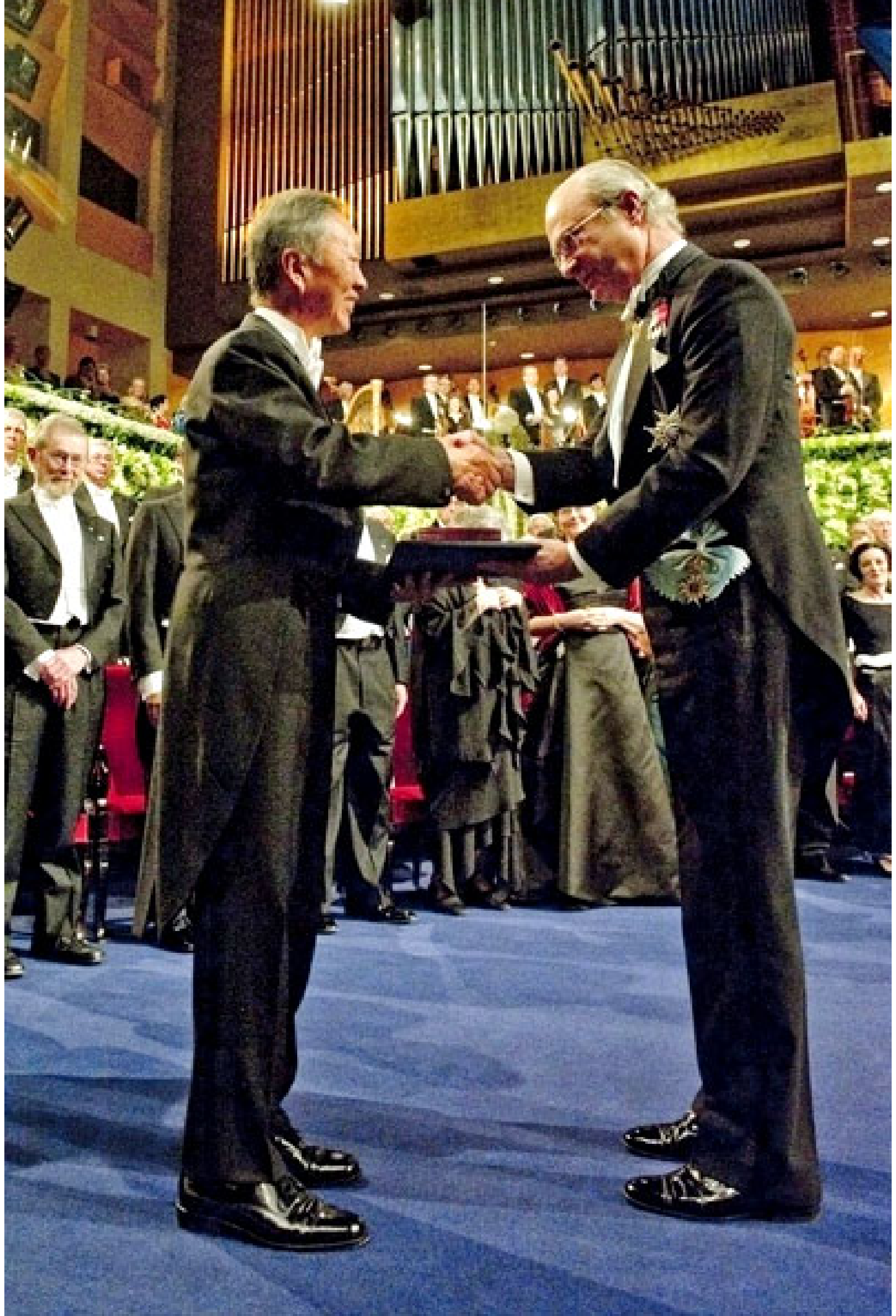


- 光纤通常用直径

纤芯---直径d＝5～60μm的透明丝，为光密介质；

包层----为光疏介质。

只要满足光线在其中全反射，则可实现无损传输。



瑞典国王与2009年度
诺贝尔物理奖得主高锟

高锟在
“有关光在纤维中的传输
以用于光学通信方面，
取得了突破性成就”

二、费马原理 (Fermat's Principle)

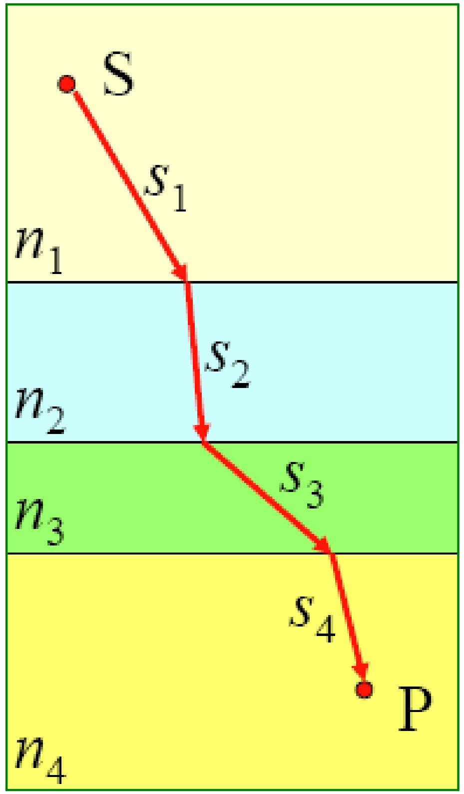
1. 光程的概念

光从S到P所用时间——

$$t = \frac{s_1}{\upsilon_1} + \frac{s_2}{\upsilon_2} + \frac{s_3}{\upsilon_3} + \mathrm{K}$$

$$= \frac{n_1 s_1}{c} + \frac{n_2 s_2}{c} + \frac{n_3 s_3}{c} + \mathrm{K}$$

$$t = \frac{1}{c}\sum_{i=1}^{n} n_i s_i = \frac{L}{c}$$



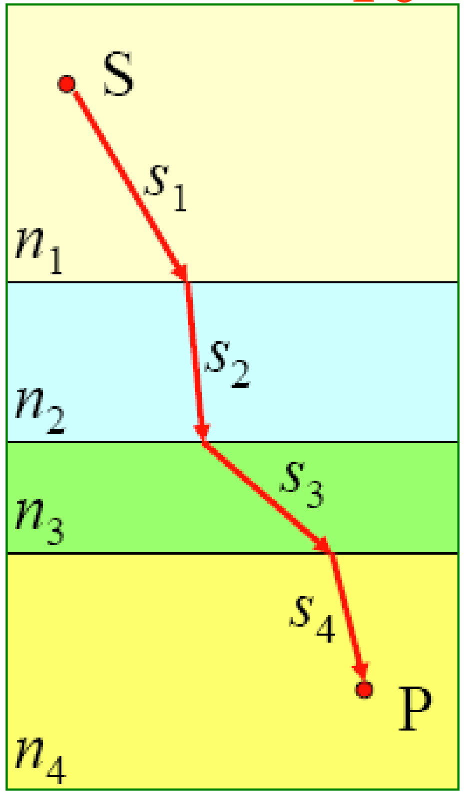
定义光程： $\boxed{L_i = n_i s_i}$

$$L = \sum_{i=1}^{n} n_i s_i$$

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

介质的折射率

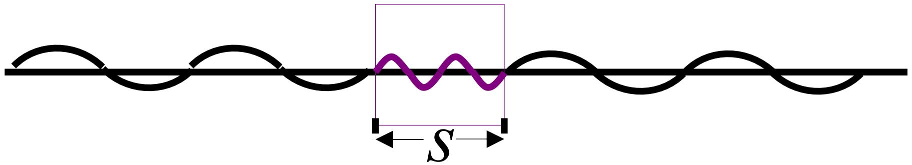
$$t=\frac{1}{c}\sum_{i=1}^{n} n_i s_i=\frac{L}{c}$$



定义光程： $\boxed{L_i=n_i s_i}$ $\quad L=\sum_{i=1}^{n} n_i s_i$

意义----介质中的光程等于在相同时间内光在真空中的路程。

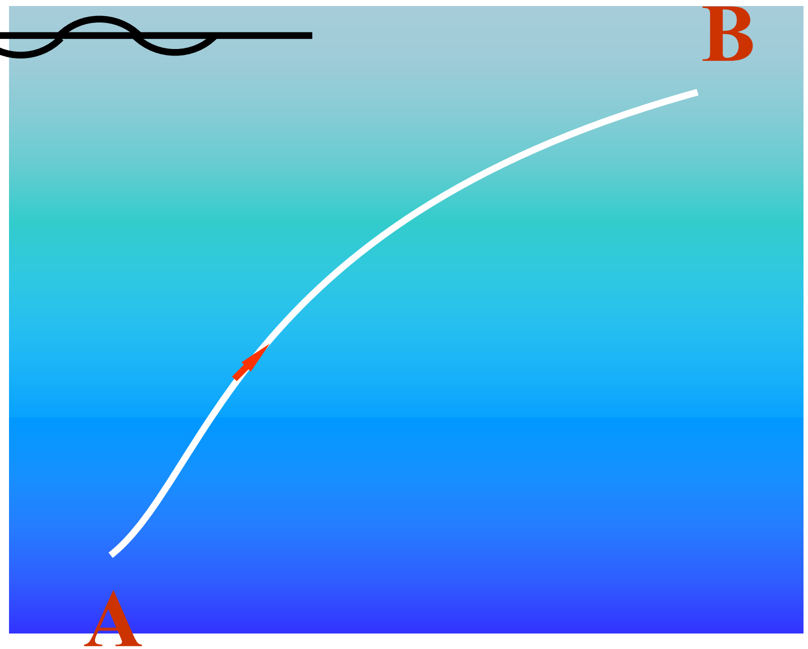
介质中：



折合到真空中：

对连续介质 $\quad L=\int_A^B n\,ds$

所用时间为 $\quad t=\frac{1}{c}\int_A^B n\,ds$



2、 费马原理（*Fermat's Principle*）

1658年法国数学家费马（P. Fermat 1601-1665) 概括了光线传播的三定律，发表了"光学极短时间原理"

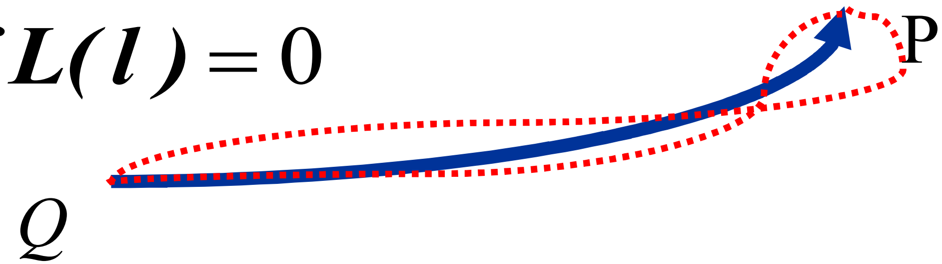
经后人修正，称为费马原理。

两种表述：

（1）光在给定两点之间沿着**时间为极值**的路径传播

（2）光在给定两点之间沿**光程为极值**的路径传播。

$$\delta \int_{Q\,(l)}^{P} n\,ds = 0, \quad \text{或} \quad \delta L(l) = 0$$



3、费马原理的应用

例1 证明反射定律 $i = i'$

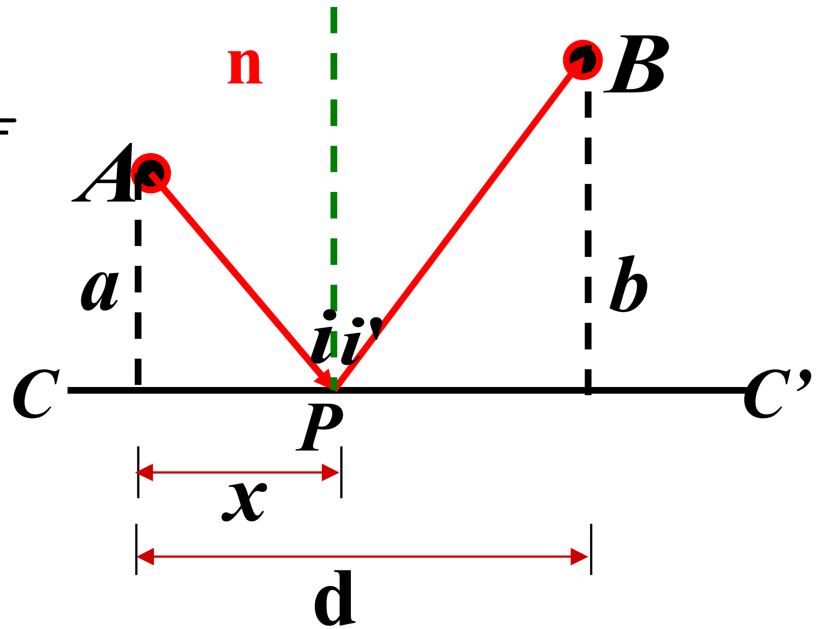
光线APB，其光程为：

$$L(APB) = n\sqrt{a^2 + x^2} + n\sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

根据费马原理有，

$$\frac{dL}{dx} = n\frac{1}{2}(a^2 + x^2)^{-\frac{1}{2}}(2x) + n\frac{1}{2}[b^2 + (d-x)^2]^{-\frac{1}{2}}2(d-x)(-1) = 0$$

整理得：$\dfrac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \dfrac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$



由图可知：$\sin i = \sin i'$

即：$i = i'$

这就是反射定律。

例2 证明折射定律

$$L(PMQ) = n_1 PM + n_2 MQ$$

$$= \boldsymbol{n_1\sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2\sqrt{h_2^2 + (l - x)^2}}$$

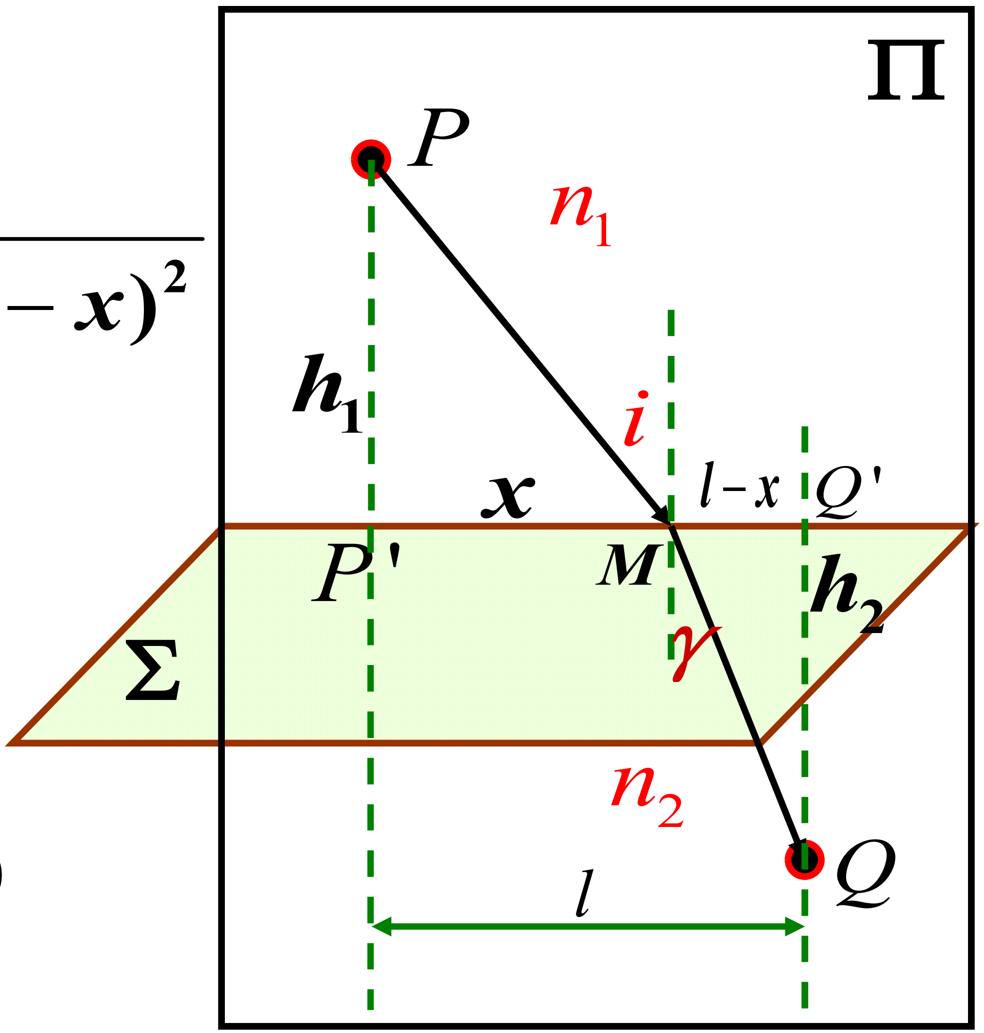
根据**费马原理**

$$\frac{d}{dx} L(PMQ) = 0$$

$$\frac{\boldsymbol{n_1 x}}{\sqrt{\boldsymbol{h_1^2 + x^2}}} - \frac{\boldsymbol{n_2(l - x)}}{\sqrt{\boldsymbol{h_2^2 + (l - x)^2}}} = \mathbf{0}$$

$$n_1 \sin i - n_2 \sin \gamma = 0$$

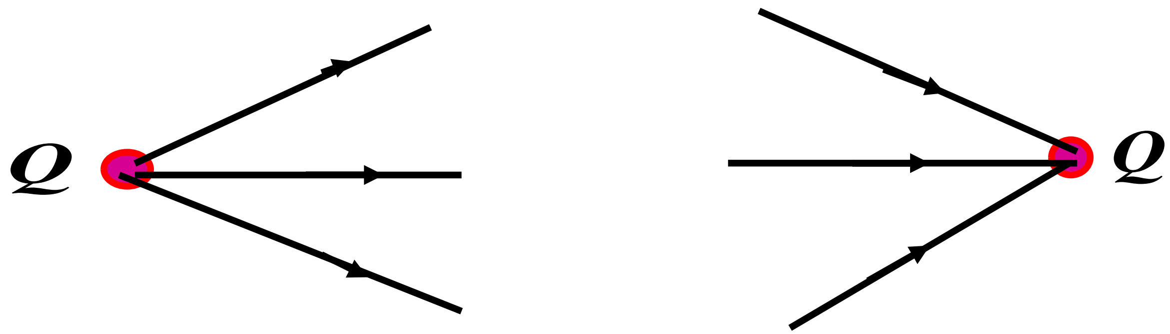
即 $\boldsymbol{n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma}$



三、球面成像

1、共轴理想光学系统成像的基本概念

➢同心光束：一束光线本身或其延长线相交于一点，称其为~。



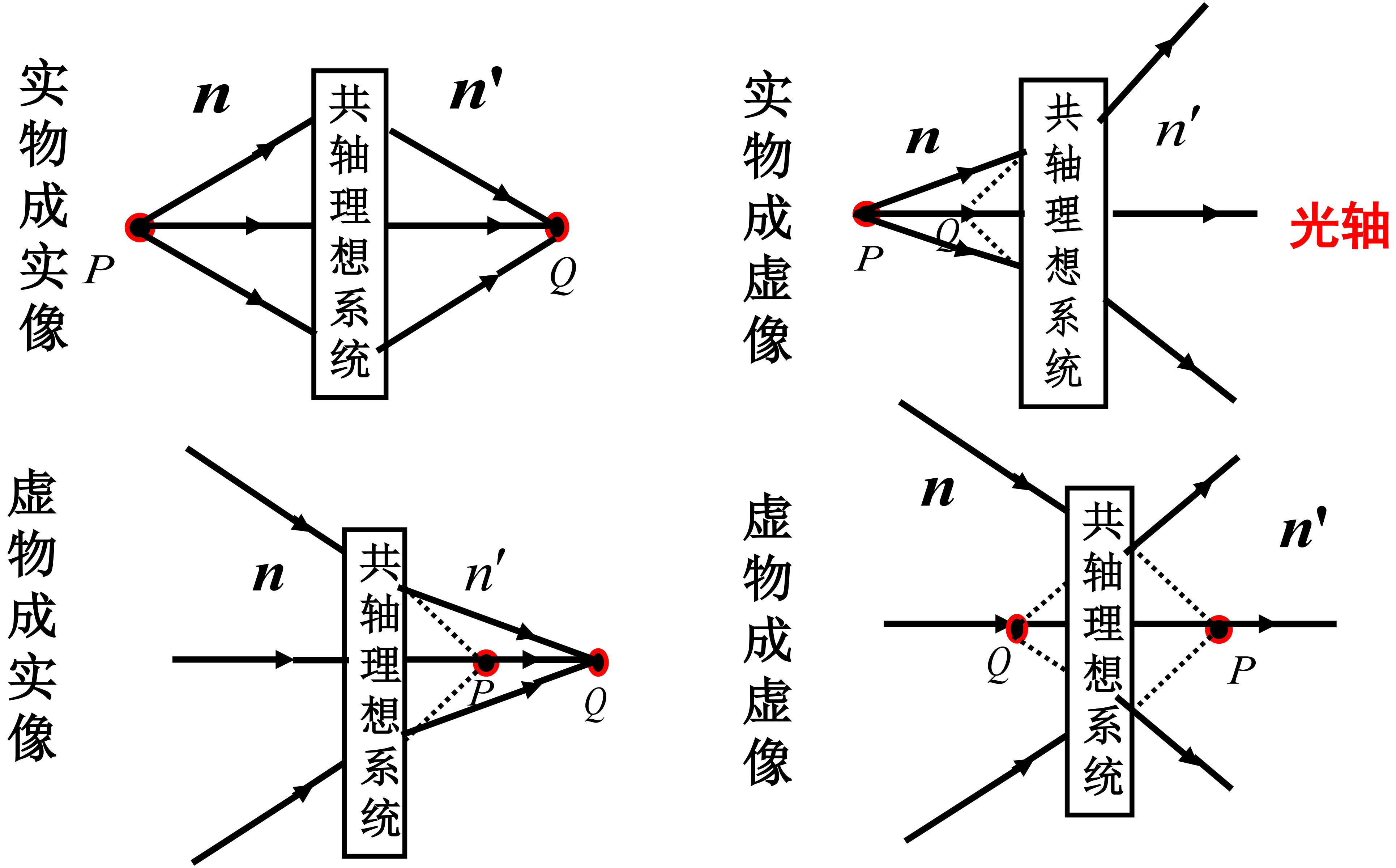
发散同心光束　　　　会聚同心光束

➢共轴理想光学系统：能保持光束同心性的光学系统。

➢光轴：是指光束的中心线，或光学系统的对称轴。

➢成像：入射同心光束通过共轴理想系统后变成出射同心光束的过程。

➢ 物点和像点都有虚实之分——



在理想光学系统中，从物点到像点之间的各条光线的光程都相等

----物像等光程性

2、球面反射和折射成像（光在单球面上的反射和折射）

球面：

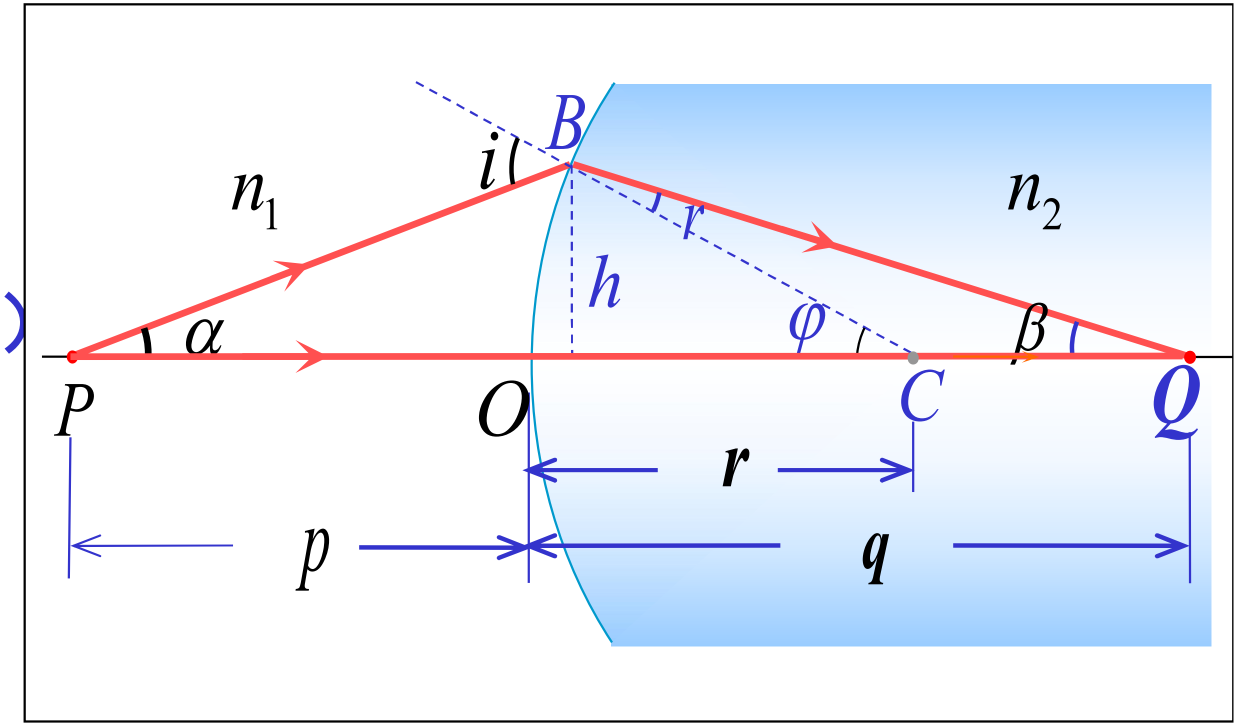
C ：球心(曲率中心)

O：顶点（球面的对称中心）

n_1 ：物方折射率

n_2：像方折射率

P：物点　　Q：像点



主光轴： 球面顶点 O 和曲率中心 C 的连线 。

副光轴： 通过曲率中心 C 的任何直线（主光轴除外）。

傍（近）轴光线： 成像光线和主光轴很接近时，称为~

物距----p　　　像距----q

（1） 推导傍轴光线下球面反射成像公式

设 n=1，

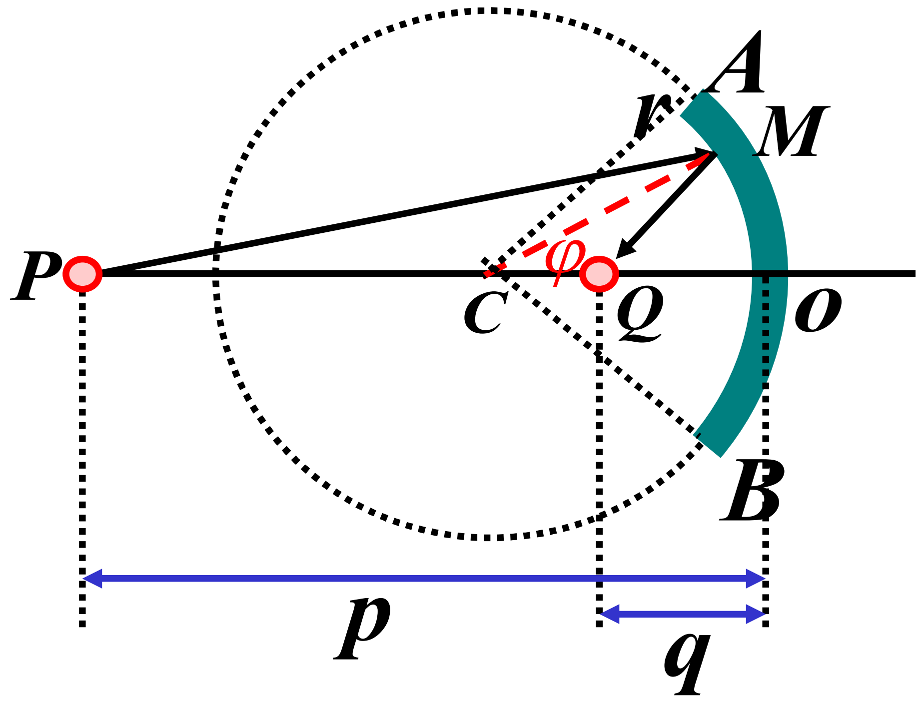
$$L(PMQ)=\overline{PM}+\overline{MQ}$$

$$=\sqrt{r^2+(p-r)^2-2r(p-r)\cos(\pi-\varphi)}$$

$$+\sqrt{r^2+(r-q)^2-2r(r-q)\cos\varphi}$$

$$=\sqrt{p^2+4r(r-p)\sin^2\frac{\varphi}{2}}$$

$$+\sqrt{q^2+4r(r-q)\sin^2\frac{\varphi}{2}}$$



凹球面镜傍轴反射成像

令 $\dfrac{\mathrm{d}L(PMQ)}{\mathrm{d}\varphi}=0$

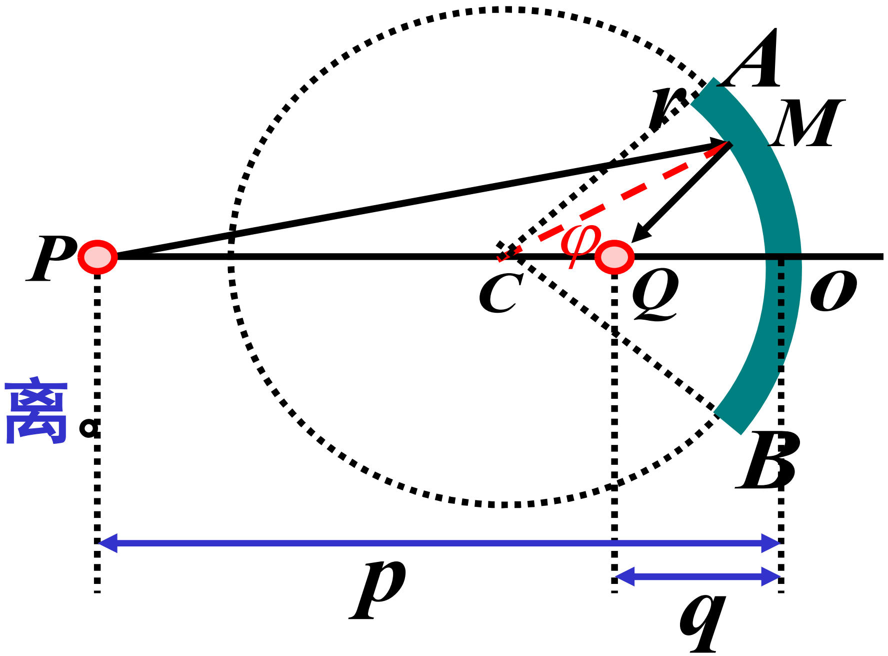
$$\frac{r-p}{\sqrt{p^2+4r(r-p)\sin^2\frac{\varphi}{2}}}=\frac{q-r}{\sqrt{q^2+4r(r-q)\sin^2\frac{\varphi}{2}}}$$

$$\frac{r-p}{\sqrt{p^2+4r(r-p)\sin^2\frac{\varphi}{2}}}=\frac{q-r}{\sqrt{q^2+4r(r-q)\sin^2\frac{\varphi}{2}}}$$

傍轴近似条件下 $\varphi \to 0$

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{2}{r}}$$

球面反射成像公式



当 $p \to \infty$时 $q=\dfrac{r}{2}$

该像点称为球面镜的焦点。

焦距（f）：球面镜顶点到焦点的距离。

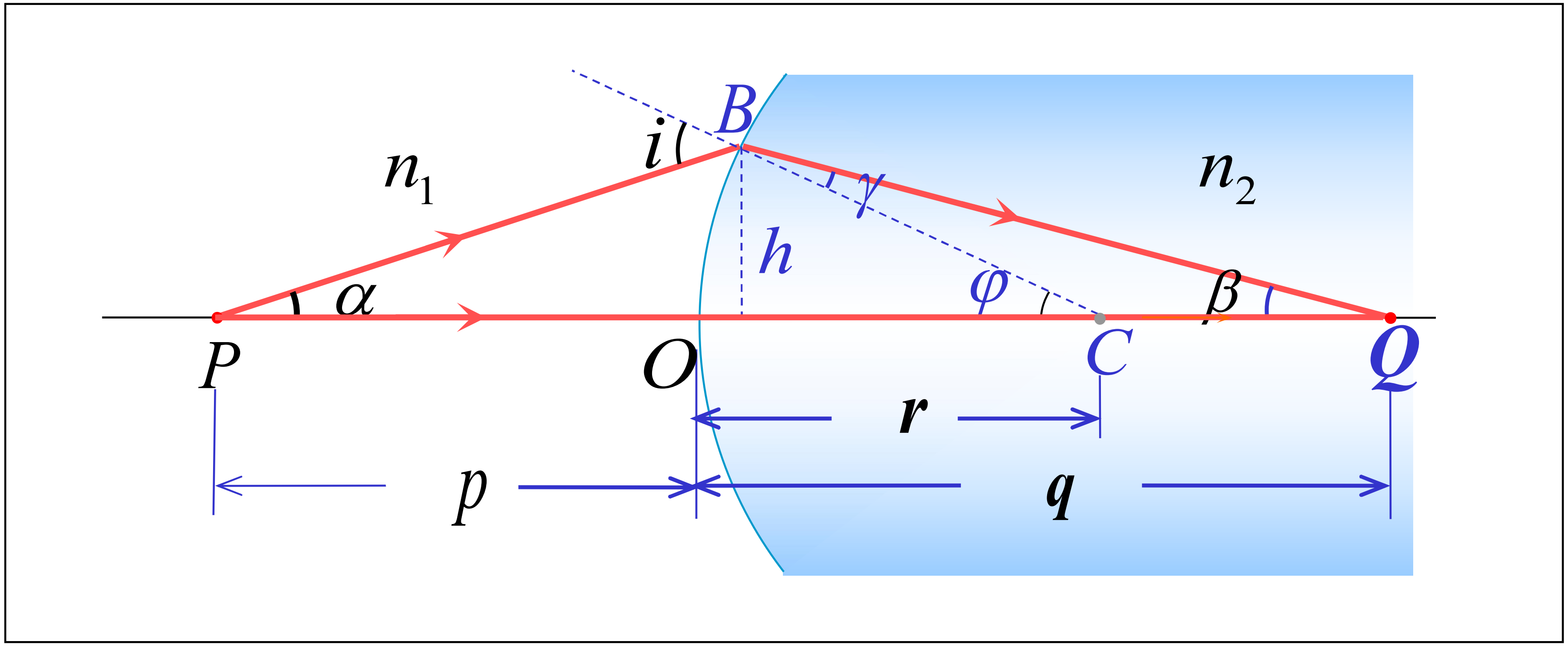
球面镜焦距：$f=\dfrac{r}{2}$

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}}$$

—— 傍轴光线下

球面反射成像公式

（2） 傍轴光线下单球面折射成像公式



公式推证（略）：

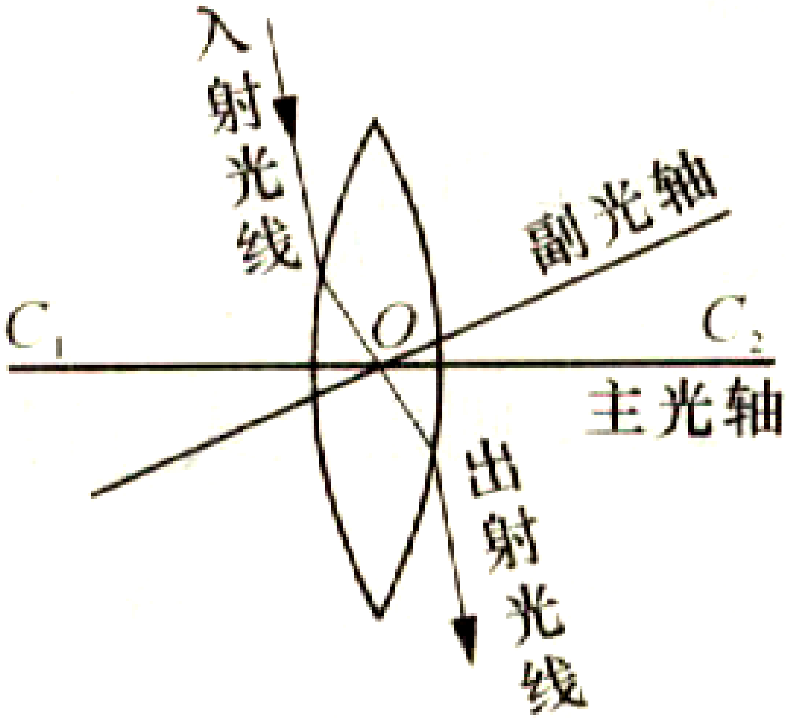
$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{q}=\frac{n_2-n_1}{r}$$

四、薄透镜傍轴成像

1、透镜

透镜： 由玻璃、水晶等磨成两面为球面（或一面为平面）的透明物体。

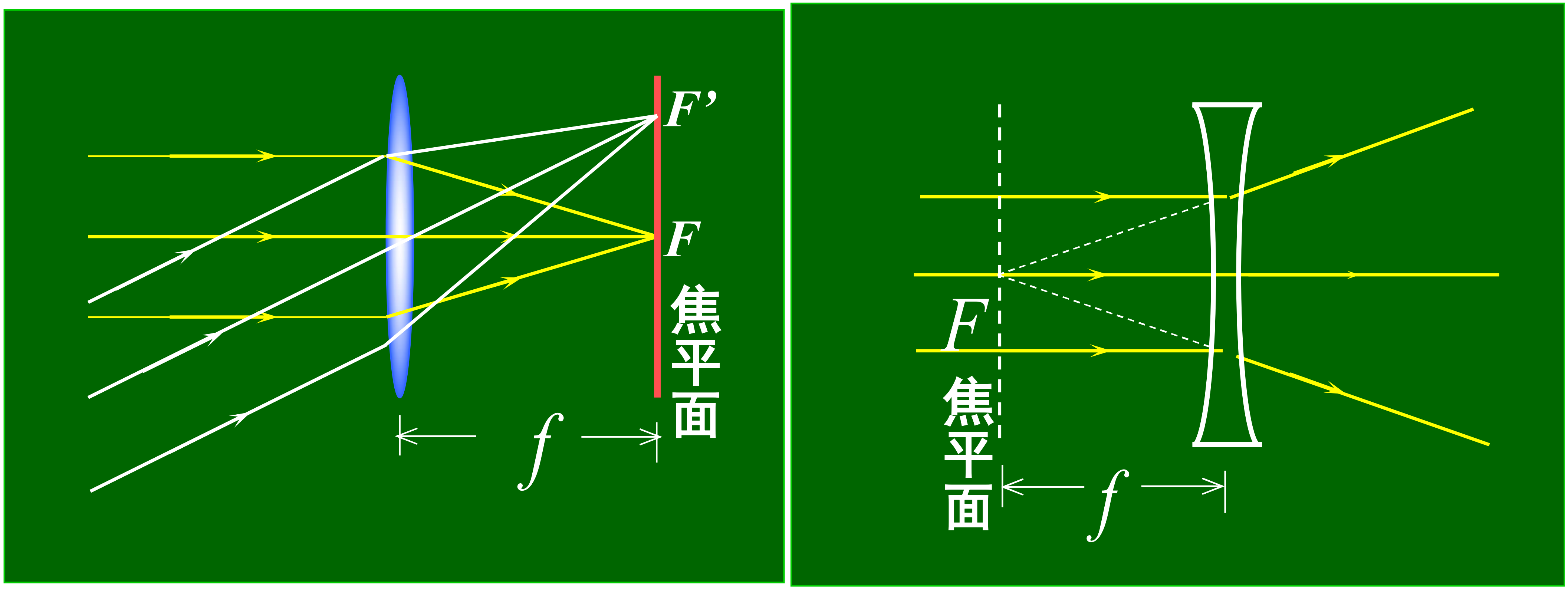
薄透镜： 两个侧面的中心靠得很近的透镜。



（主）焦点——平行主光轴的光线经透镜后所汇聚的点F

副焦点——平行副光轴的光线经透镜后所汇聚的点F'

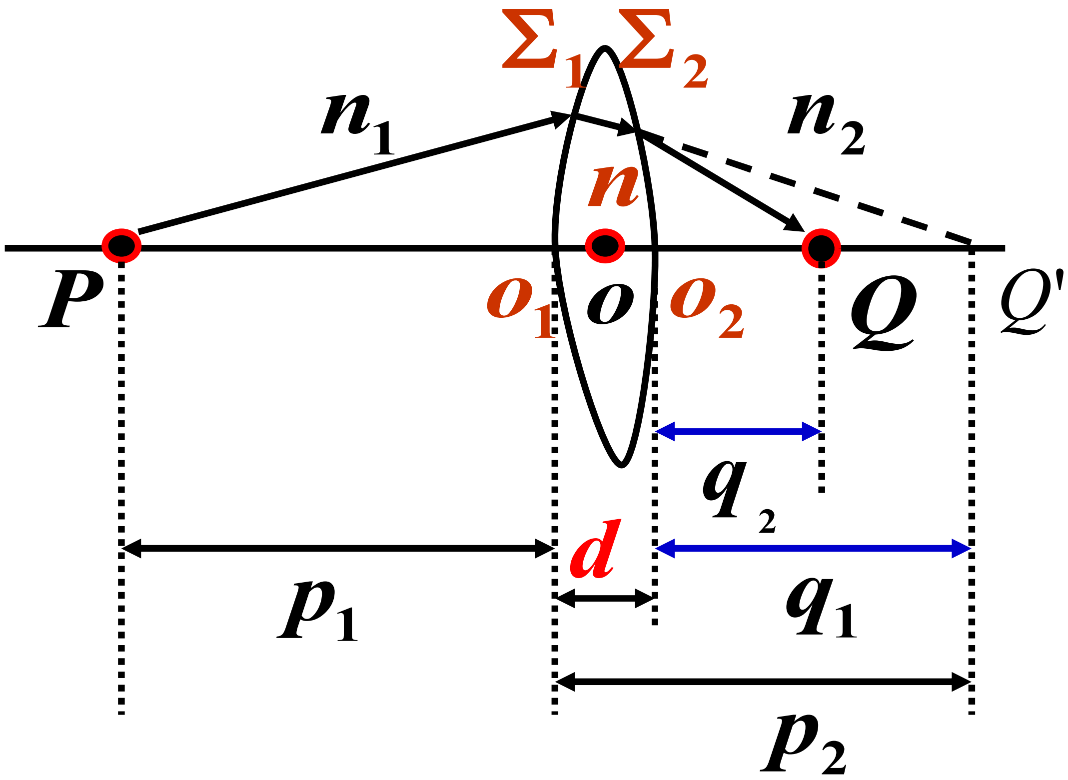
焦距——主焦点到光心的距离。



凸透镜的焦距f为 正（实焦点）

凹透镜的焦距f为负（虚焦点）

2、薄透镜傍轴成像

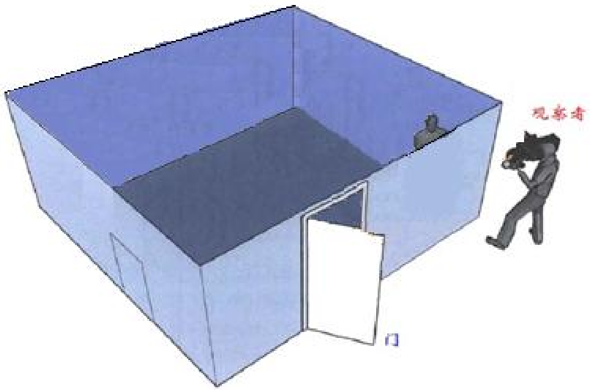


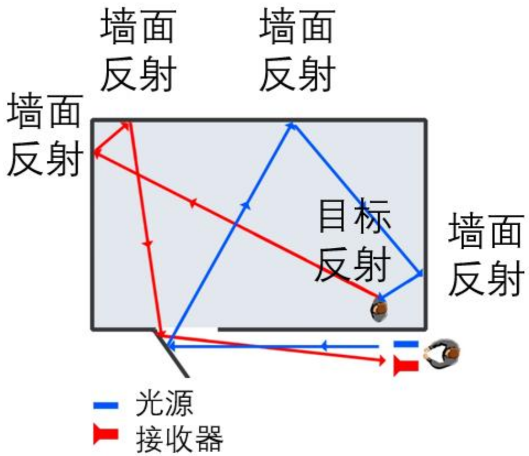
两次单球面镜折射成像

$$\boxed{\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}}$$ ----空气中薄透镜成像公式

3、典型案例

（1）多次反射

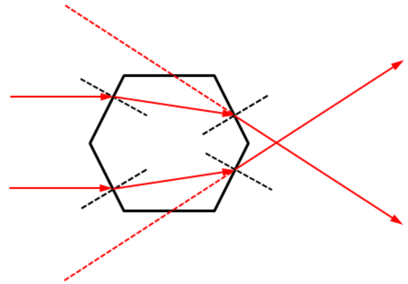




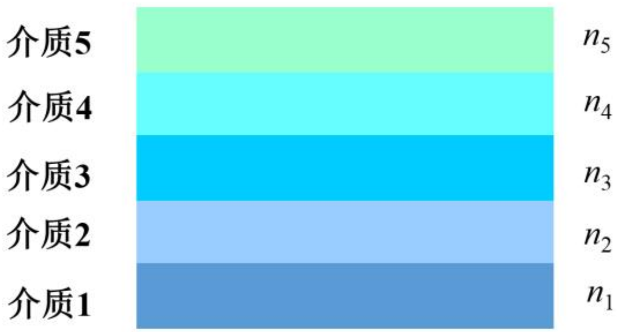
非视域成像

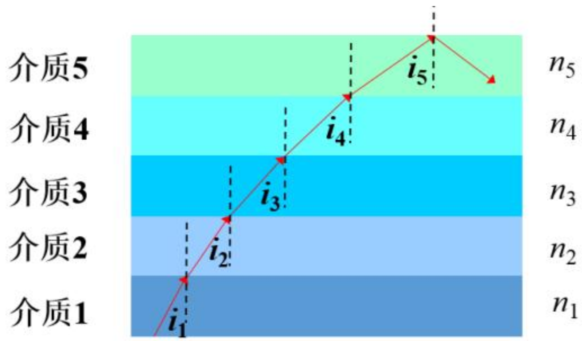
- 应用：反恐、救灾。

（2）多次折射



六角形薄片冰晶





折射率渐变的多层介质