

第一章 几何光学

第一节 几何光学的基本定律

第一节 几何光学的基本定律

1.1 几何光学三定律

1.2 全反射

1.3 棱镜与色散

1.4 光的可逆性原理

1.1 几何光学三定律

几何光学的定义：

关于物体所发出的“光线” 经过光学系统后成像的理论。

光的物理模型：

表示光传播方向的几何学上的线，即“光线”(ray of light)。

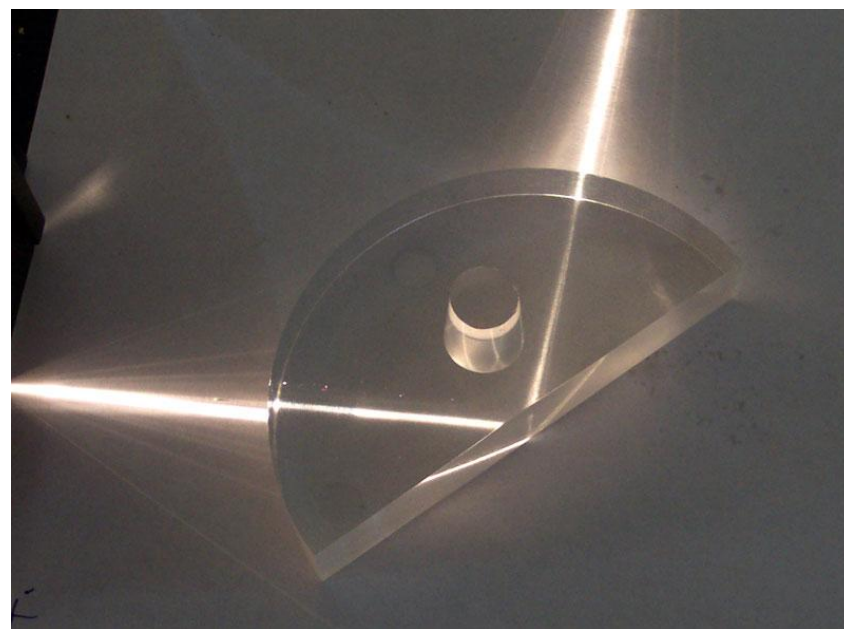
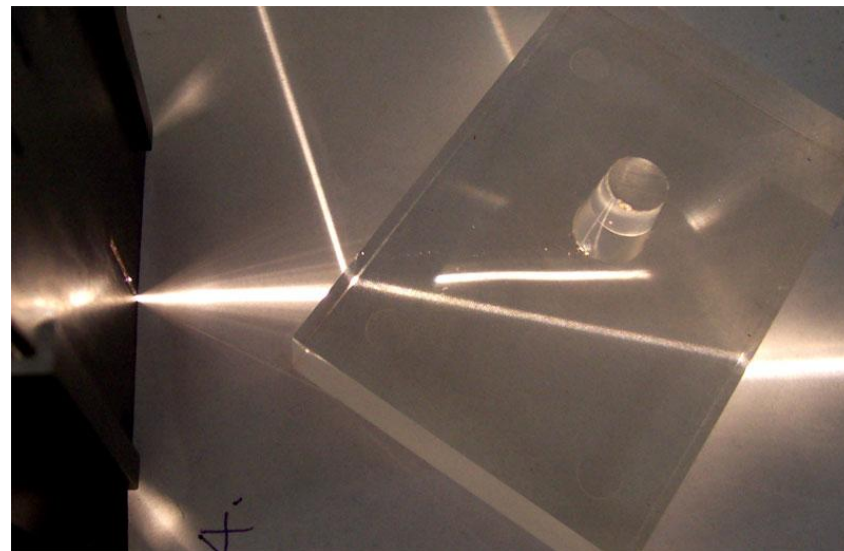
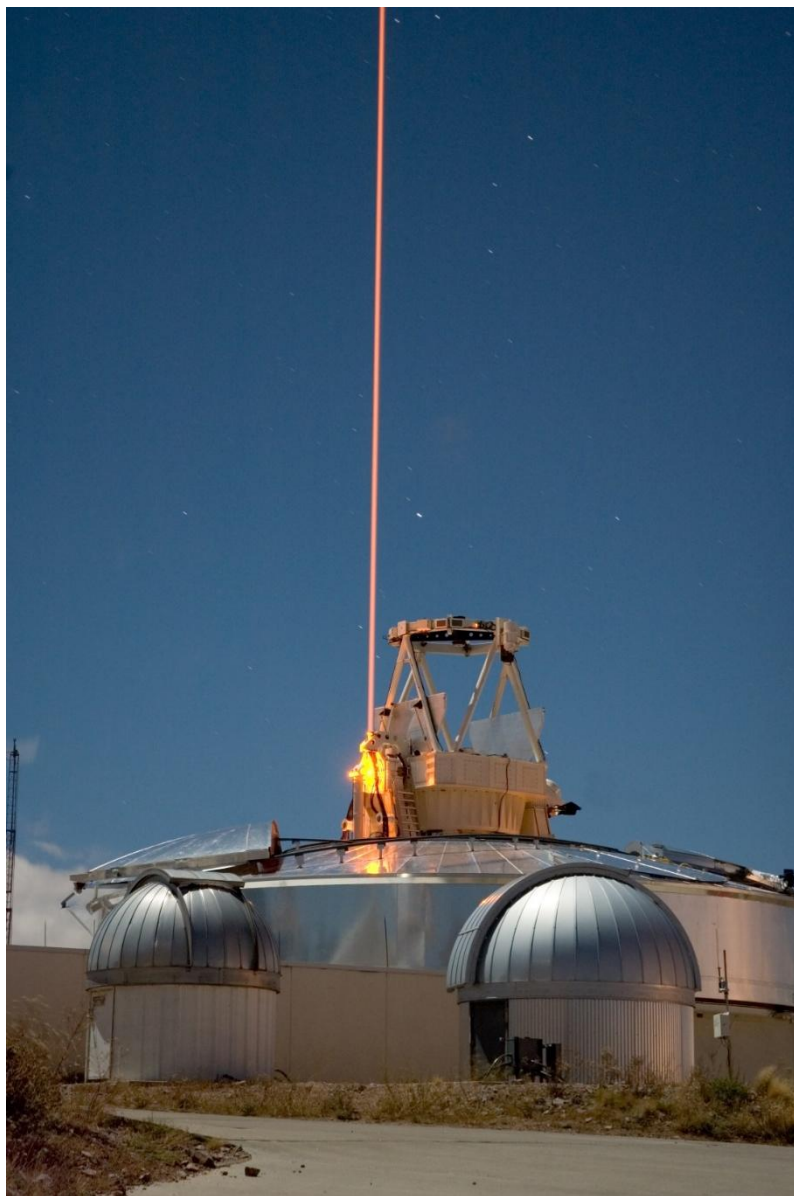
适用范围：

尺度远大于波长，是应用光学的基础。

特点：

- 撇开光的波动本性，仅以光的直线传播、反射折射定律为基础，研究光在透明介质中的传播问题。
- 建立在实验基础之上，原理简单、计算复杂，计算机软件（追迹）的发展替代了复杂的计算。

1.1 几何光学三定律



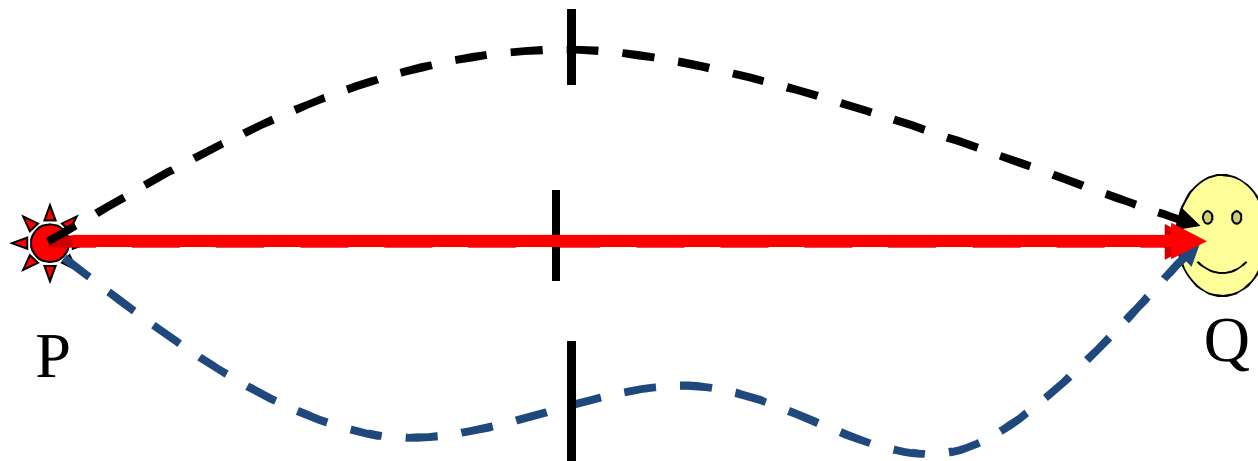
1.1 几何光学三定律

几何光学三定律：

1. 直线传播定律：在均匀媒质中，光沿直线传播。
2. 独立传播定律：不同方向的光线相交，不影响每一光线的传播。
3. 反射（ reflection ）、折射（ refraction ）定律：在两种媒质的界面发生反射、折射。

1.1 几何光学三定律

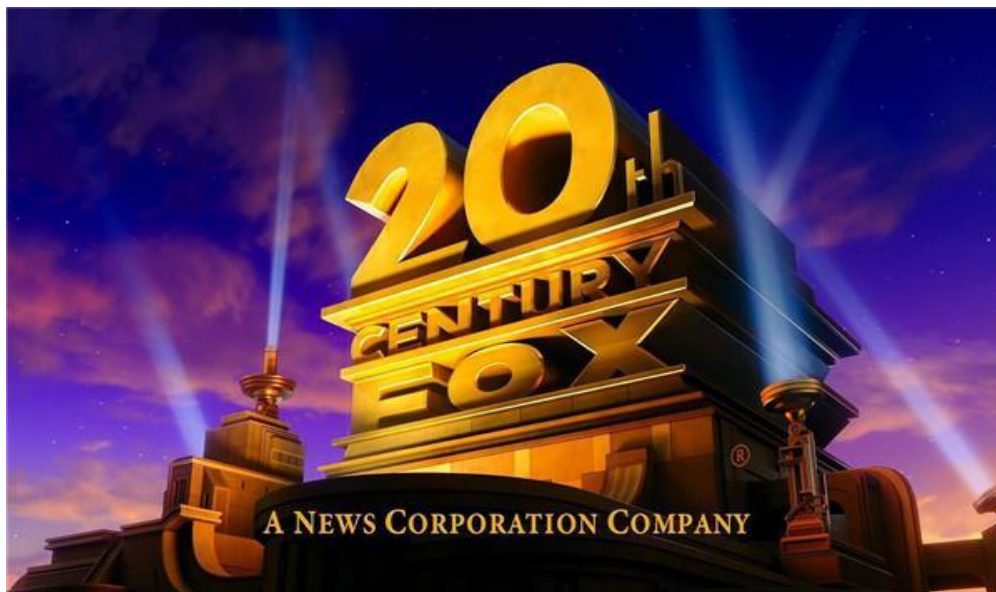
直线传播定律：



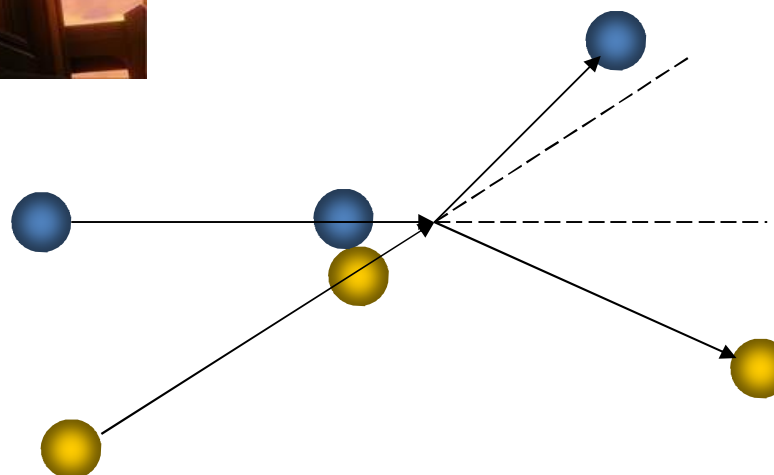
- 在均匀媒质中，光沿直线传播
- 如果介质是非均匀的，则光的传播将会发生偏折，即不再沿着一条直线传播。
- 但是，总可以设法发现光传播的路径，这条路径是折线或曲线。
- 根据这一事实，也可以得出这样的结论，既然在媒质中，光总是沿直线、折线、或曲线传播，那么就可以用一条几何上的线来描述和研究光的传播，这就是“**光线**”。

1.1 几何光学三定律

独立传播定律：



光波在空间相遇，各自独立传播，互不干扰



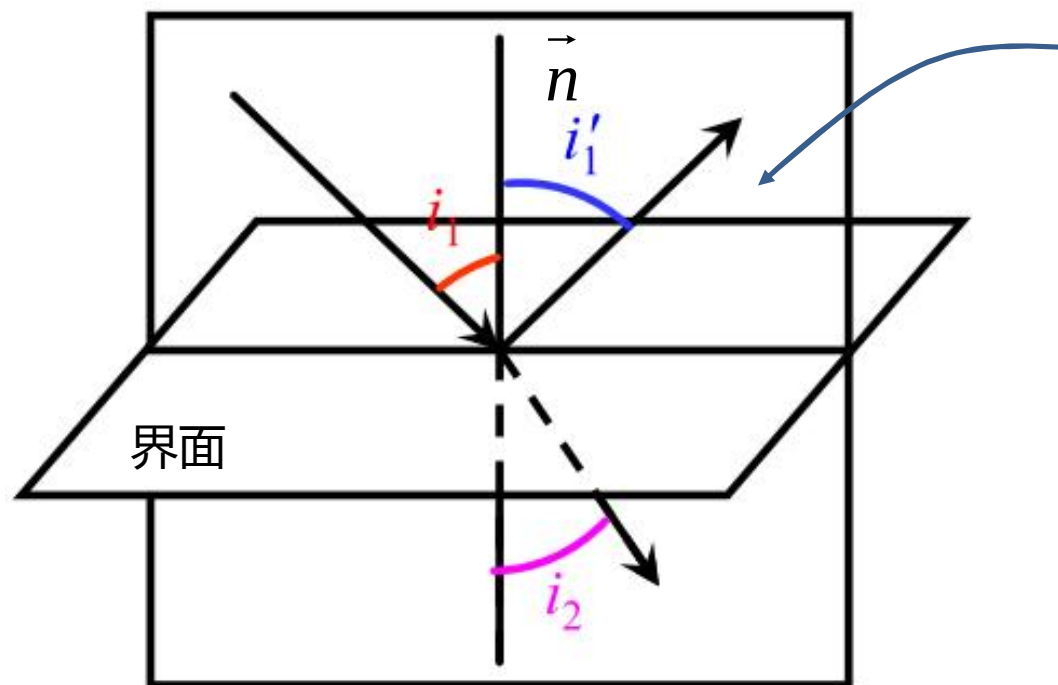
若是粒子相遇，则将发生碰撞，各自的状态都将改变

1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：

反射光、折射光满足：

- 都在入射面(incident plane)内
- 反射角等于入射角
- 折射角、入射角正弦之比等于**相对折射率**



入射面：入射光线和界面法线构成的平面

1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：

折射率(refractive index, index of refraction)：

绝对折射率：媒质对真空的相对折射率 $n = c / v$

相对折射率：两种介质之间的折射率之比。 $n_{12} = n_2 / n_1$

光密媒质(optically denser medium)：折射率大，光速小

光疏媒质(optically thinner medium)：折射率小，光速大

真空： $n = 1$

$$c / v = \sqrt{\epsilon \mu} = n$$

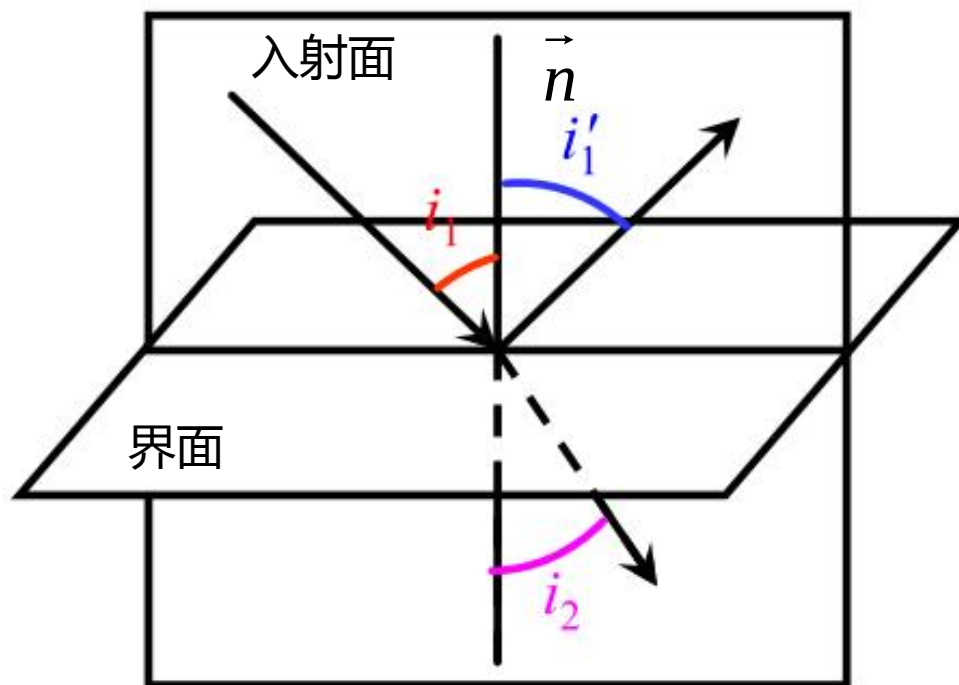
ϵ : 介电常数
 μ : 磁导率

1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：

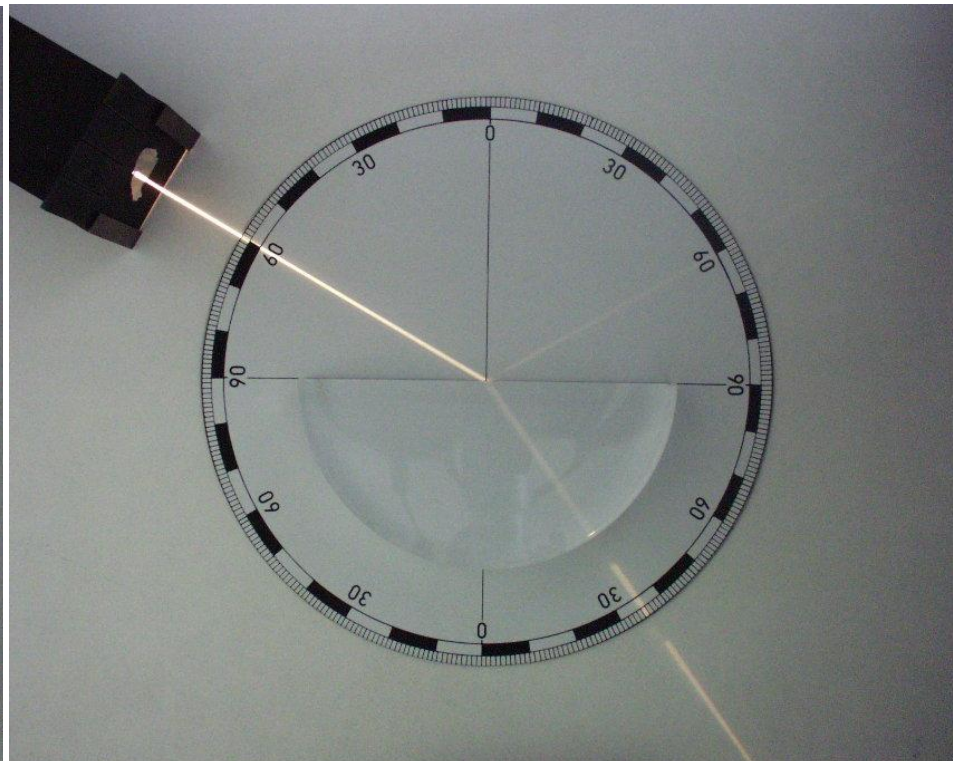
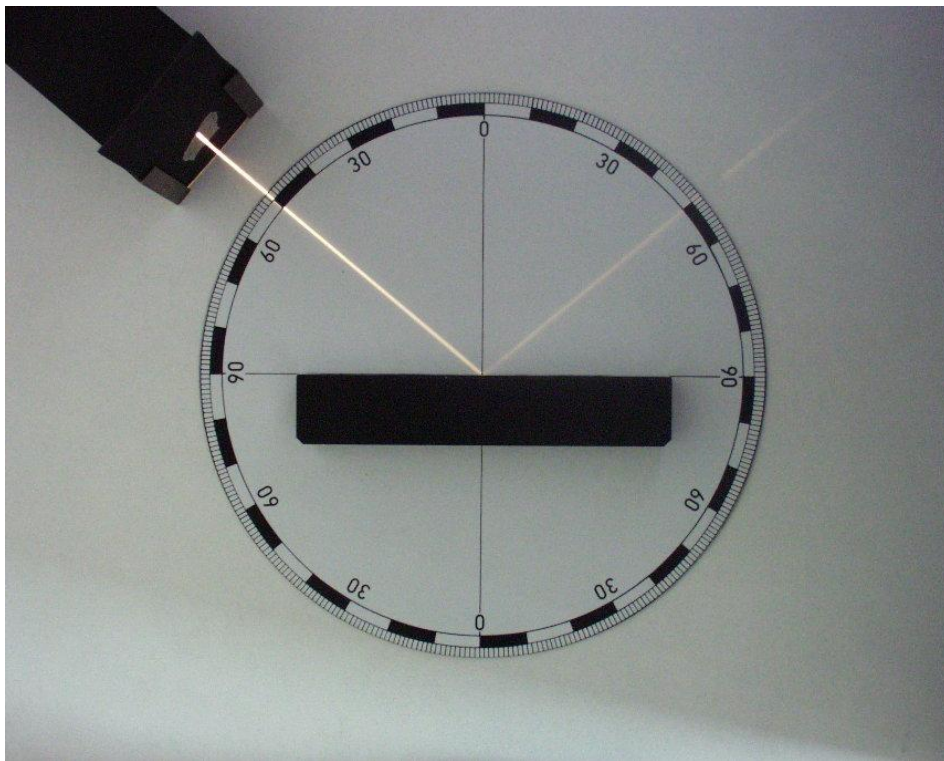
折射定律的斯涅耳 (Willebrord Snell , 1621) 公式

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad \text{或} \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12}$$



1.1 几何光学三定律

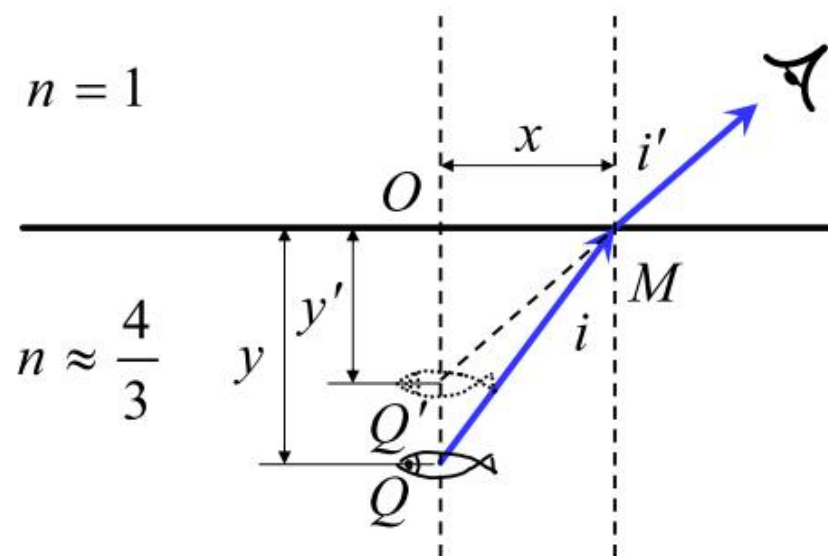
折射、反射定律实验：



1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：

例：水下光点



$$n \sin i = \sin i' \quad y = \frac{x}{\tan i}$$

$$y' = \frac{x}{\tan i'} = y \frac{\tan i}{\tan i'} = y \frac{\sin i \cos i'}{\sin i' \cos i} = \frac{y \sqrt{1 - n^2 \sin^2 i}}{n \cos i}$$

$$\text{若 } i \text{ 较小: } \frac{y'}{y} \approx \frac{1}{n} \approx \frac{3}{4}$$

1.1 几何光学三定律

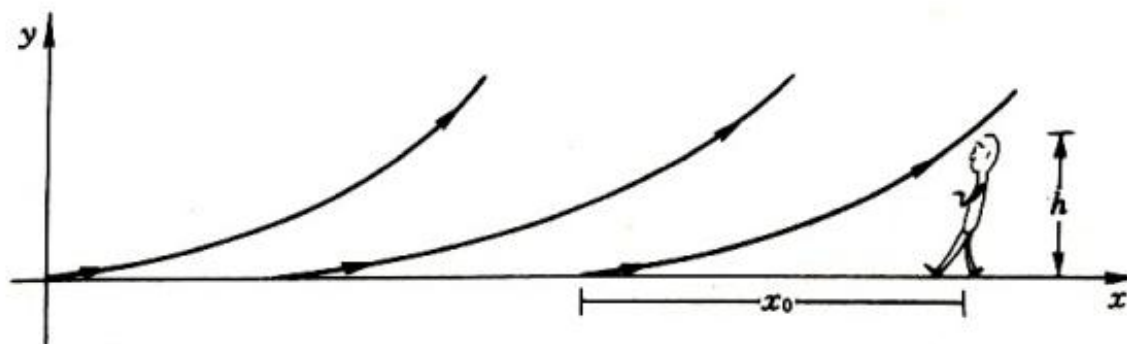
折射、反射定律：

例：机场跑道能看多远？

夏日机场跑道上方温度梯度较大，导致空气折射率发生变化：

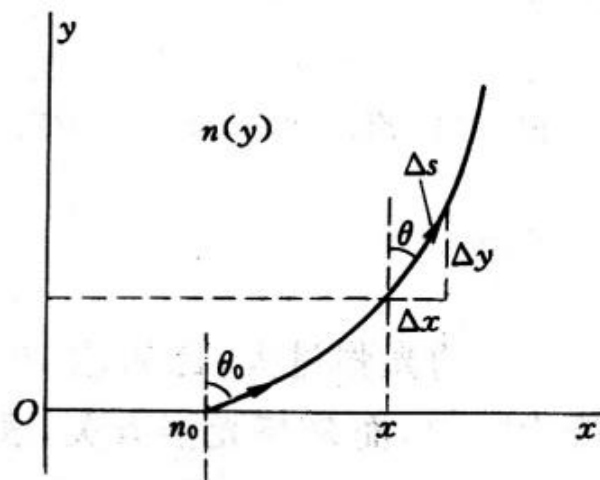
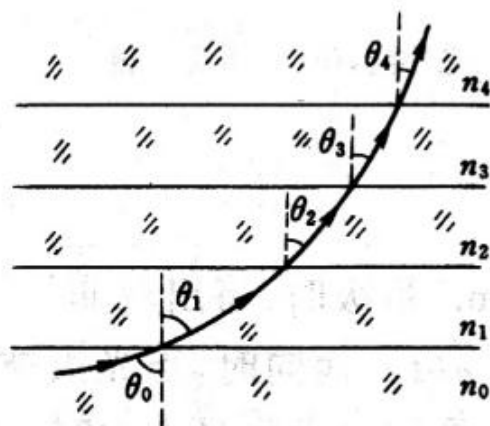
$$n(y) = n_0(1 + \beta y) \quad \beta \approx 1.5 \times 10^{-6} / m$$

人站在跑道的一端，最远能看多远？



1.1 几何光学三定律

折射、反射定律—机场跑道举例（续）



光线方程:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = \dots = n_m \sin \theta_m$$

$$n(y) \sin \theta(y) = n_0 \sin \theta_0 \quad \text{最远距离: } \begin{cases} n_0 = 1 \\ \theta_0 = 90^\circ \end{cases}$$

几何关系:

$$\sin \theta(y) = \frac{dx}{ds} \quad (ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{ctg} \theta = \sqrt{\frac{n^2(y)}{n_0^2 \sin^2 \theta_0} - 1}$$

1.1 几何光学三定律

折射、反射定律—机场跑道举例（续）

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{(1 + \beta y)^2 - 1} \approx \sqrt{2\beta y}$$

$$y = \frac{\beta}{2} x^2$$

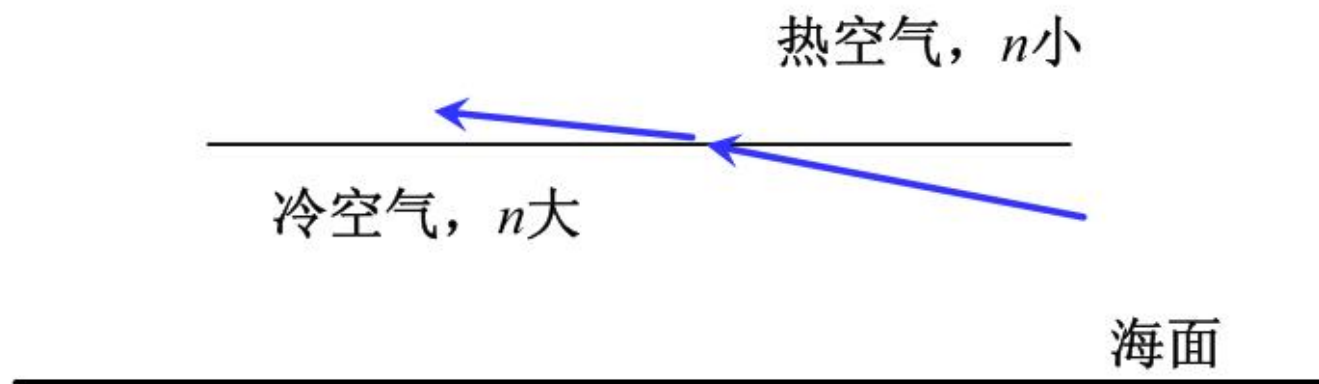
$$x_0 = \sqrt{\frac{2h}{\beta}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.75m}{1.5 \times 10^{-6} / m}} \approx 1.5 \times 10^3 m$$

1.75m高的人最远只能看到1.5km。

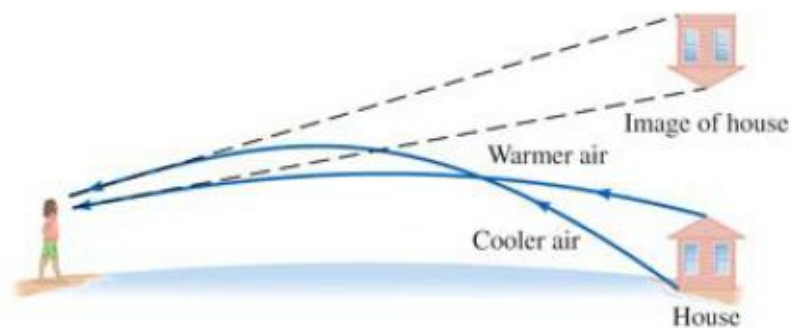
1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：

例：海市蜃楼



(a)

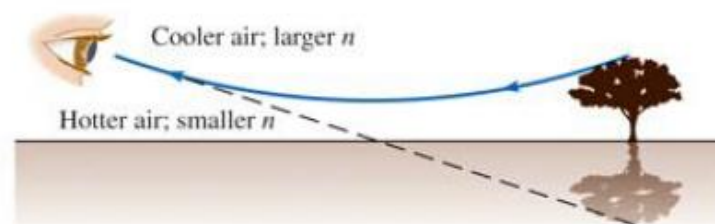
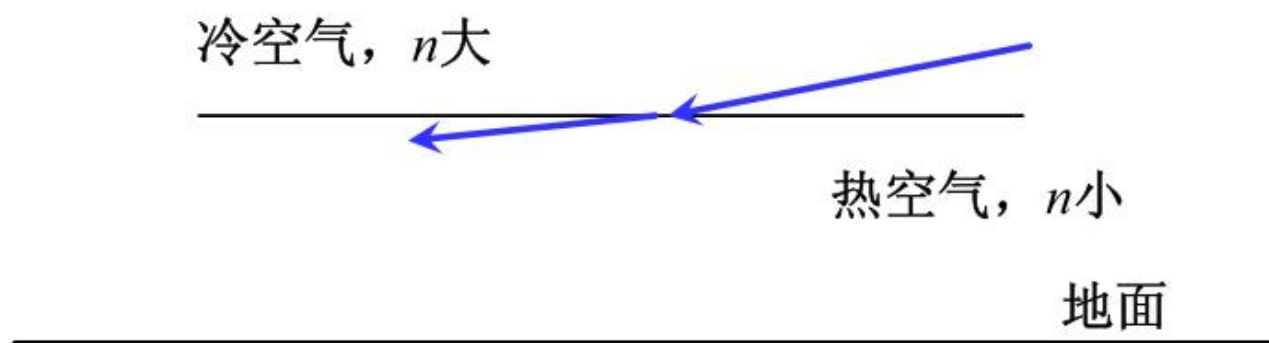


(b)

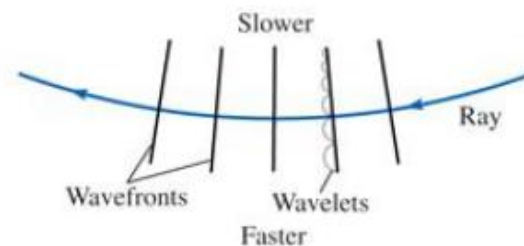
1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：

例：沙洲神泉



(b)



1.1 几何光学三定律

折射、反射定律：



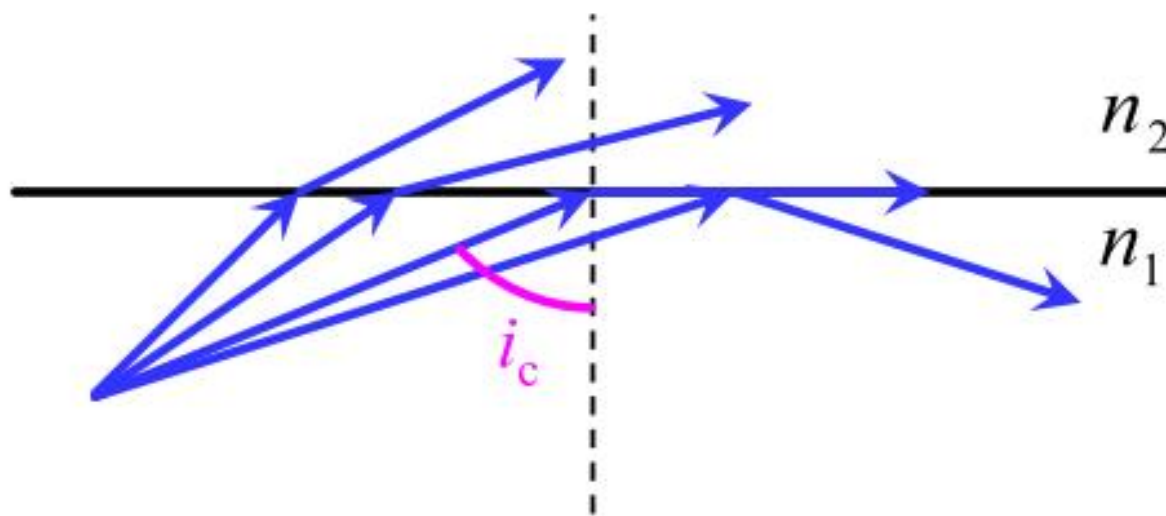
公路上出现的“水洼”其实是类似“沙洲神泉”的光线折射结果

思考：在小汽车上还是在大巴车上更容易看到“水洼”？

1.2 全反射

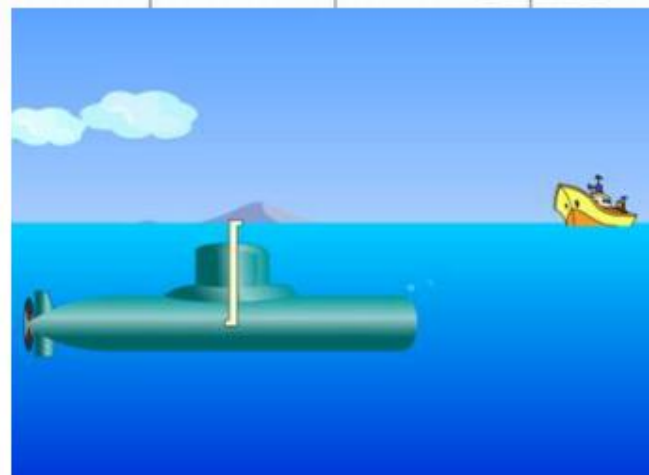
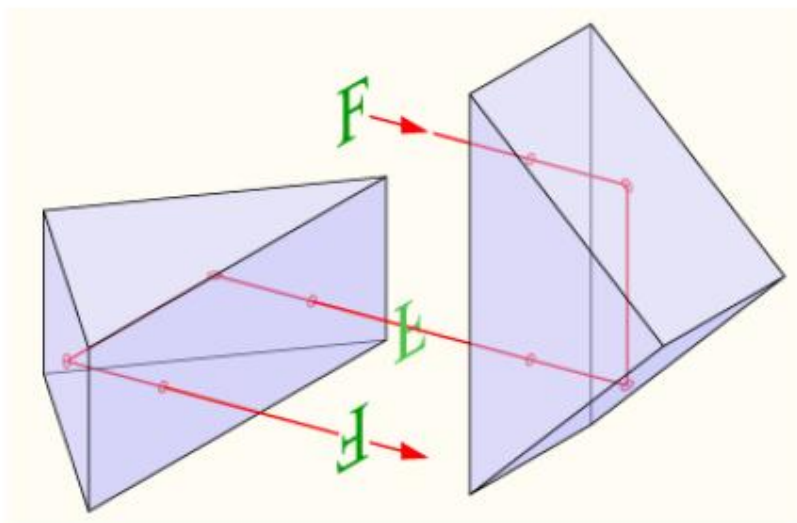
$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$

临界角(critical angle): $i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$



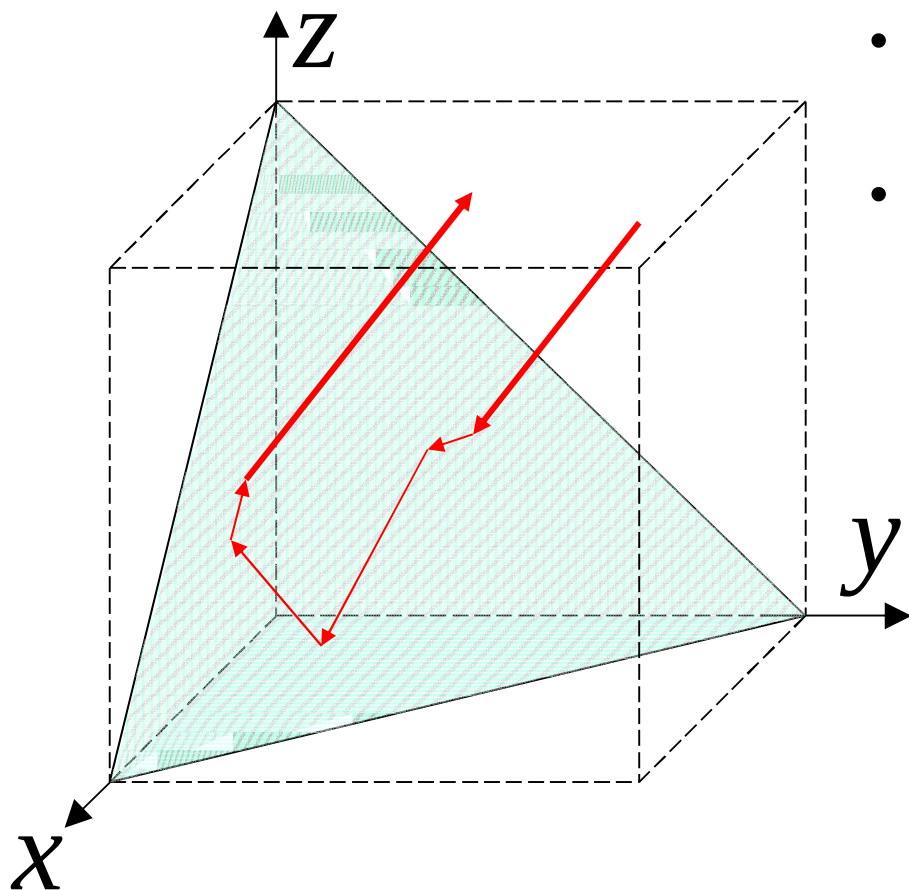
1.2 全反射

例：全反射棱镜

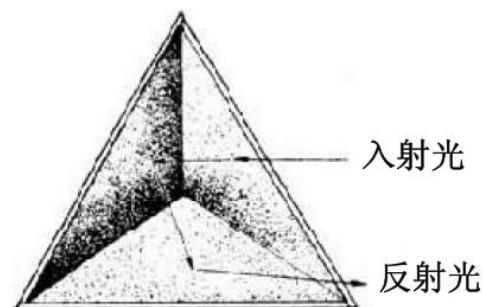


1.2 全反射

例：全反射棱镜—棱锥反射体

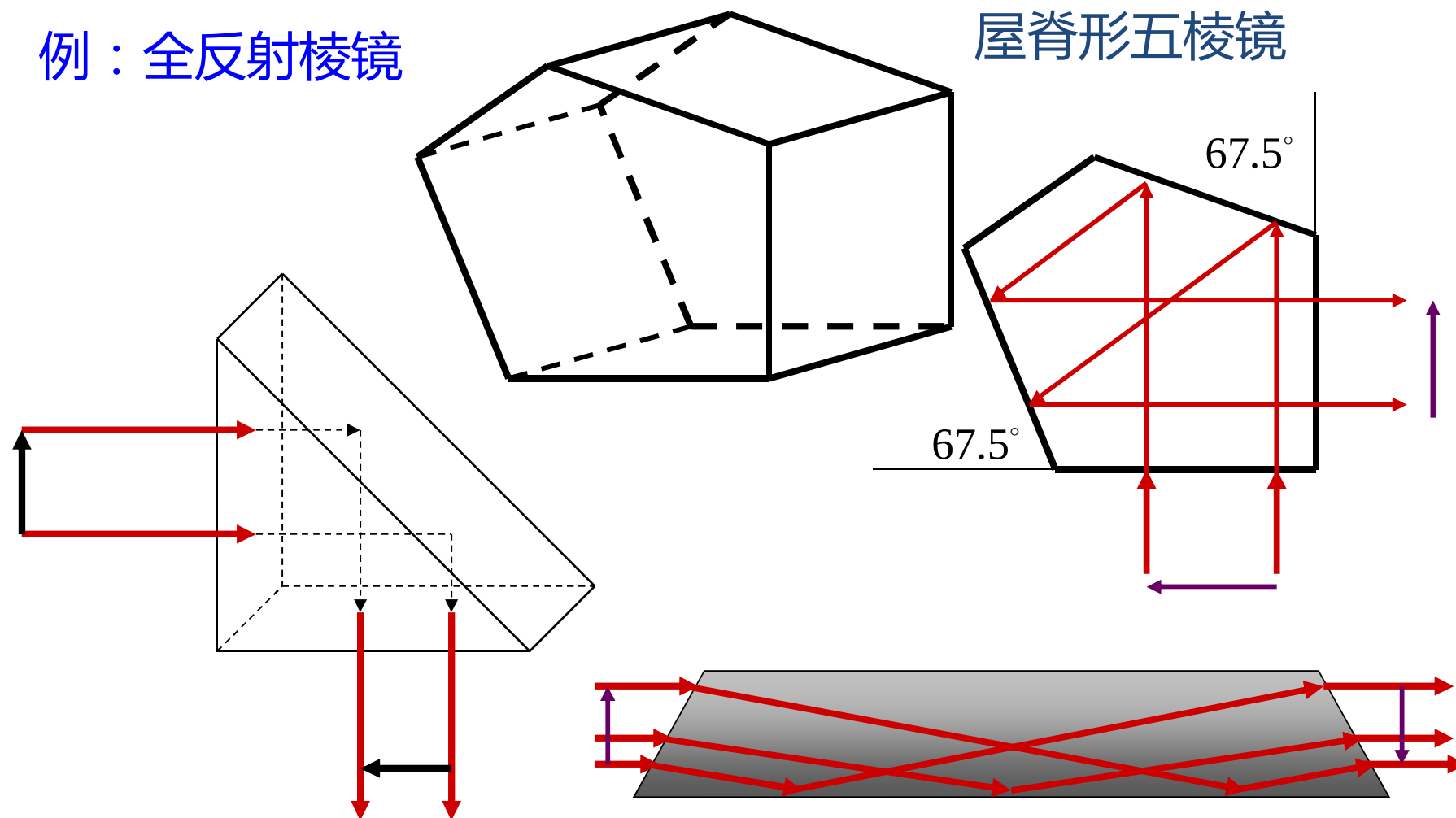


- 从斜面射入、再经三个直角面全反射、最后从斜面出射的光，沿原路返回
- 棱锥阵列反射器：阿波罗棱镜阵列、自行车尾灯、路牌、……



1.2 全反射

例：全反射棱镜

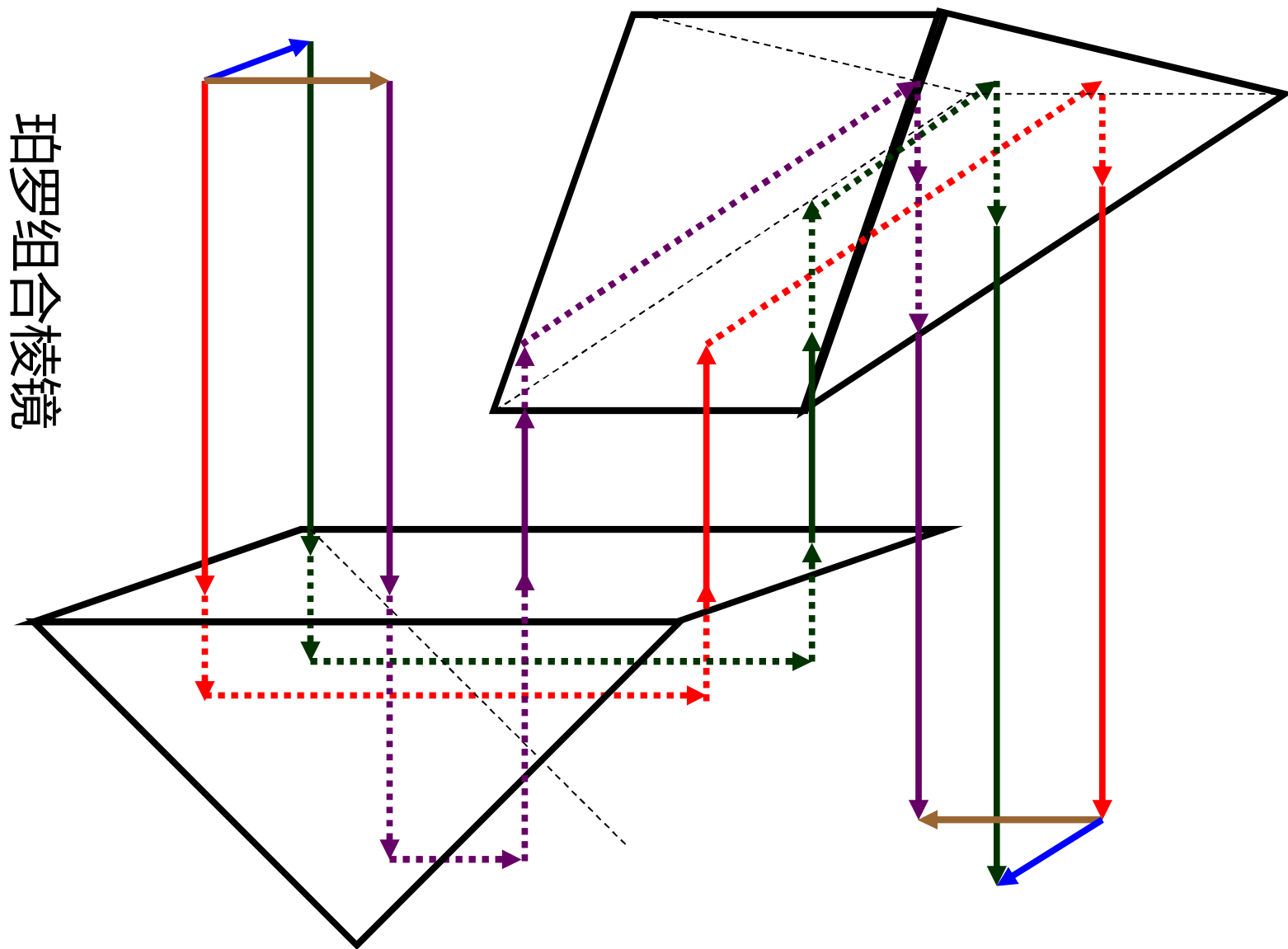


作图分析方法判断像的“正倒”

倒转棱镜(阿米西棱镜)

1.2 全反射

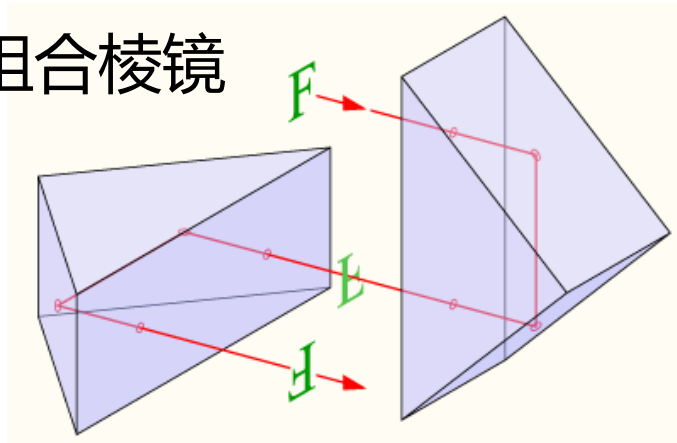
例：全反射棱镜



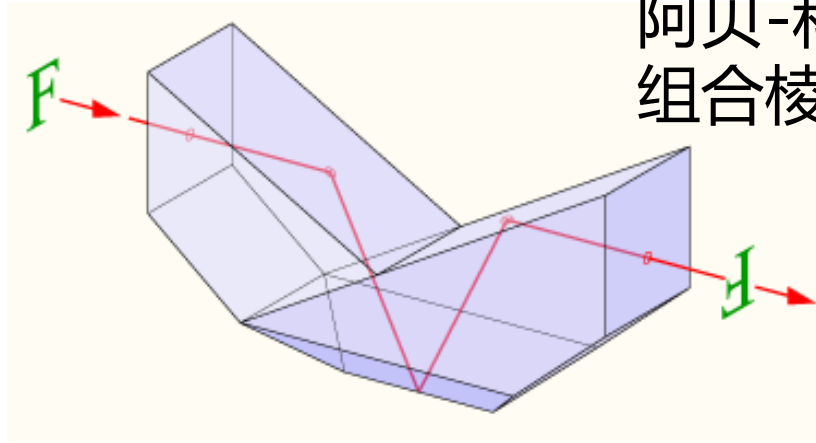
1.2 全反射

例：其他类型的组合全反射棱镜

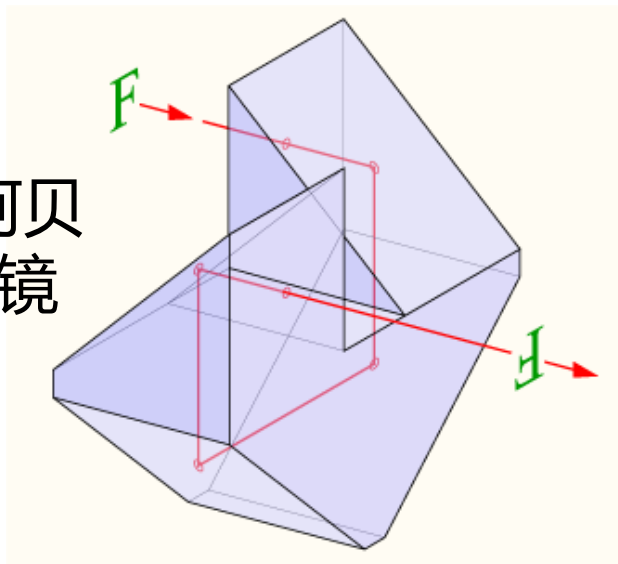
珀罗组合棱镜



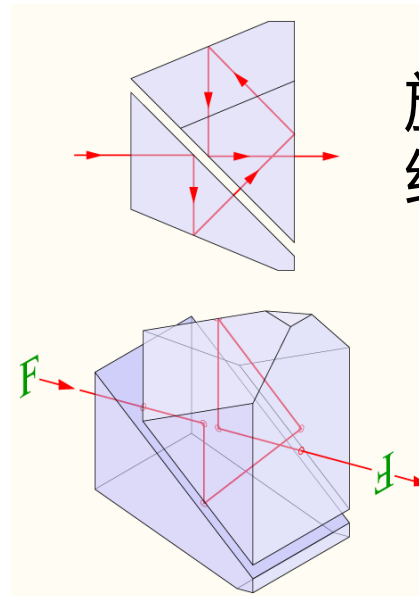
阿贝-科尼
组合棱镜



珀罗-阿贝
组合棱镜



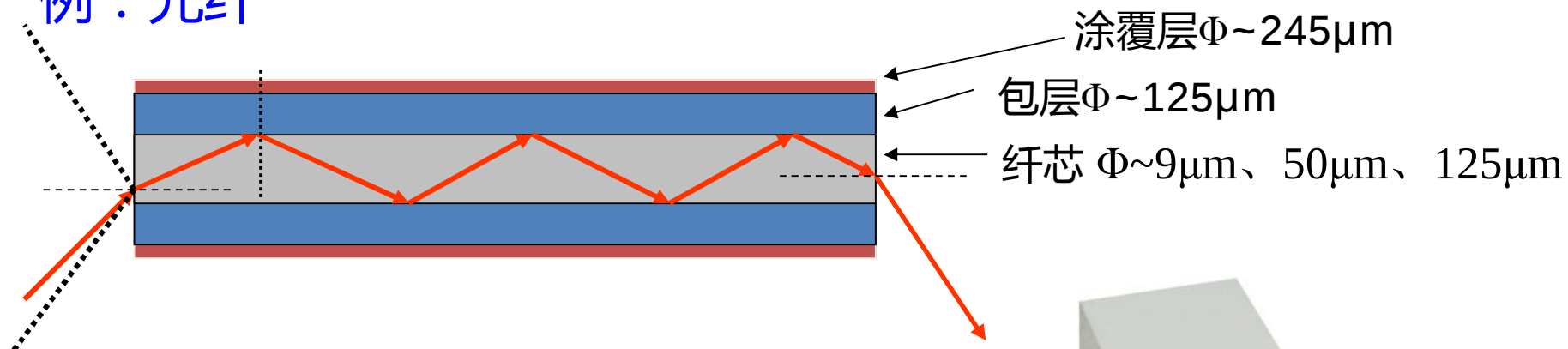
施密特-朴汉
组合棱镜



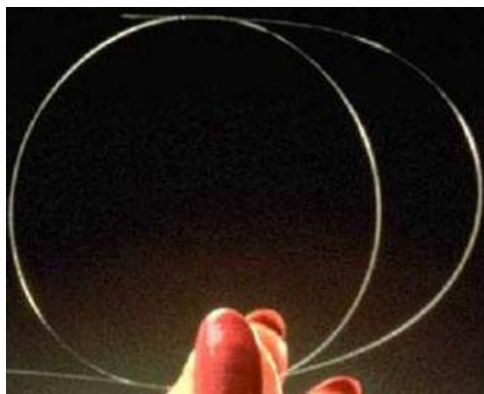
思考：为什么要求高的仪器多用棱镜而不是平面镜来改变光路？

1.2 全反射

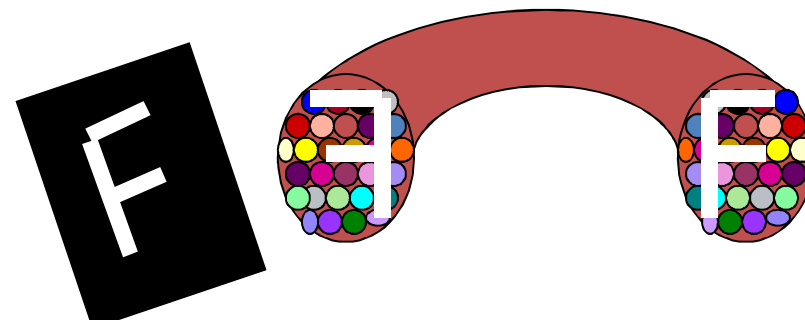
例：光纤



通过内壁上的多次全内反射,从纤维的一端传向另一端。损耗极低！



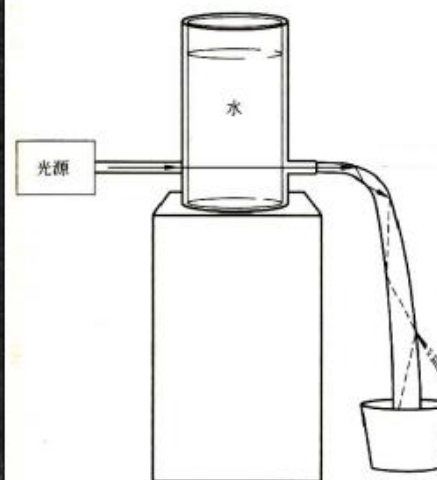
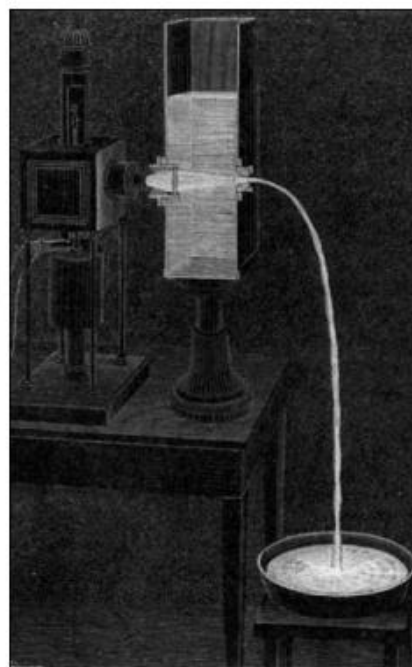
单根光纤不能传输图像，依靠集束光纤传输图像



1.2 全反射

光纤发展历史

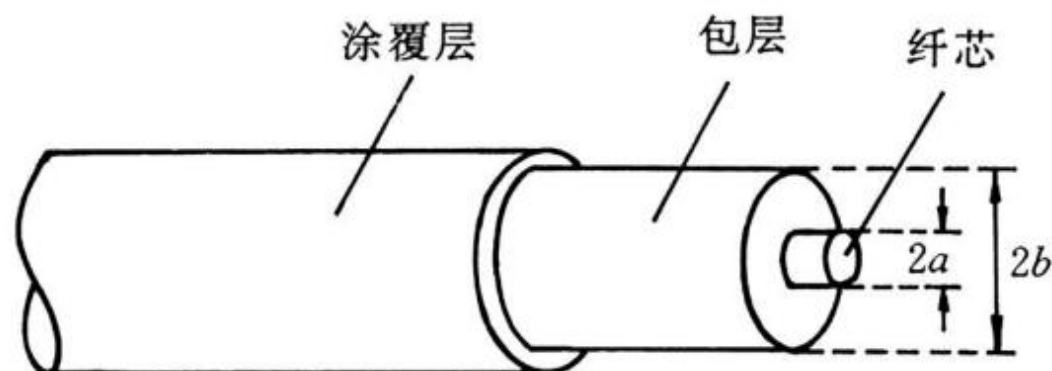
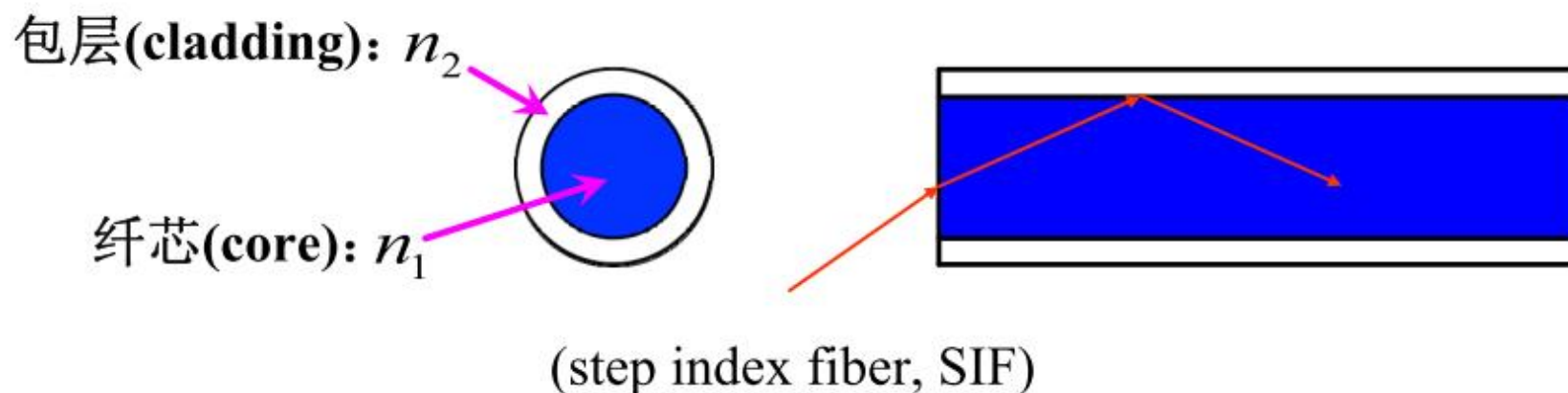
- ✧ ~1840, D Colladon 和J Babinet提出可以依靠光折射现象来引导光线的传播。
- ✧ 1854, J Tyndall在英国皇家学会的一次演讲中用实验证实：光线能够沿盛水的弯曲管道传输。
- ✧ 1927, JL Baird利用光纤阵列传输图像。



思考：当从侧面看到闪亮的水柱时，水是良好的导光材料吗？

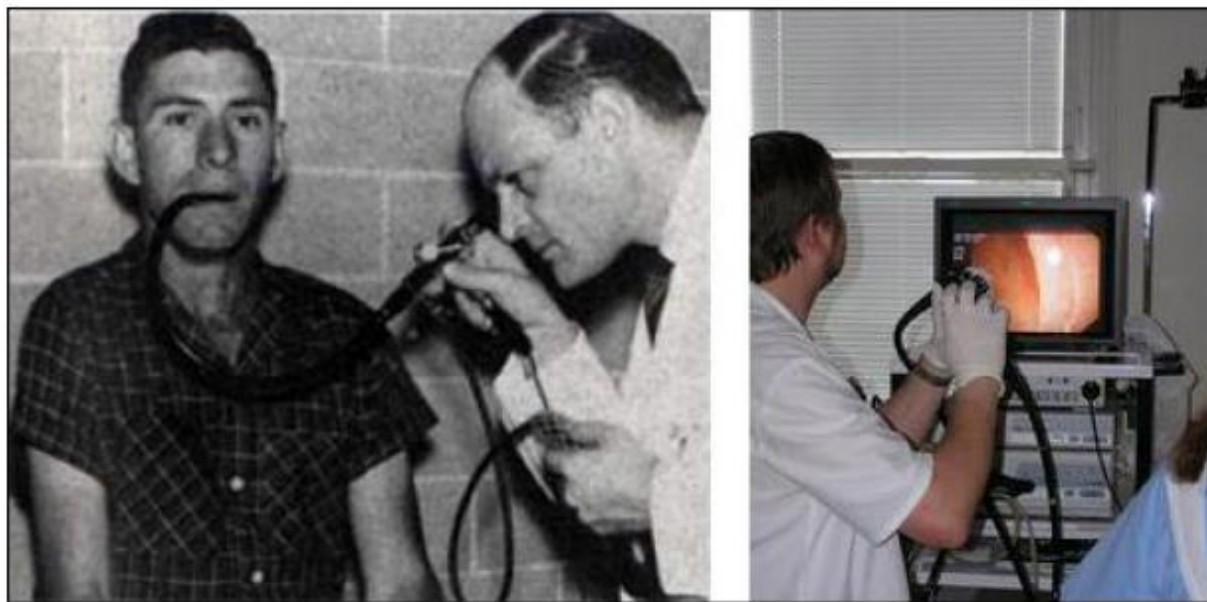
1.2 全反射

✧ 1953, Vanger把一种折射率为1.47的塑料涂在玻璃纤维上，形成比玻璃纤维芯折射率低的套层，得到了光学绝缘的单根纤维。



1.2 全反射

- ✧ 1957, Hirschowitz在美国胃镜学会上展示了研制的光导纤维内窥镜。

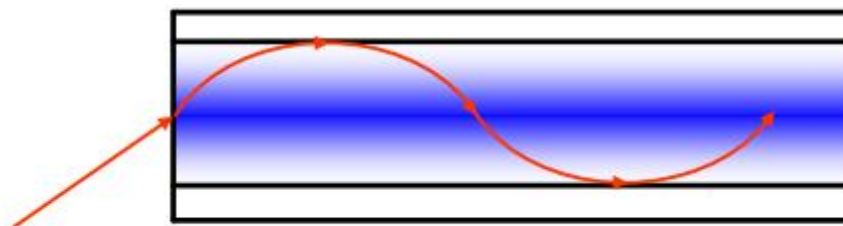
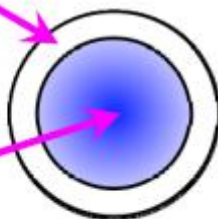


- ✧ 1961, E Snitzer完成了单模光纤的理论工作。
- ✧ 1963, 西泽润一提出了使用光纤进行通信的概念。
- ✧ 1964, 西泽润一发明了渐变折射率光学纤维(graded index fiber, GIF)。

1.2 全反射

包层(cladding): n_2

纤芯(core): 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**

1.2 全反射

- ✧ 1970, 美国康宁玻璃(Corning Glass)根据高锟的设想, 制造出当时世界上第一根超低损耗光纤, 得到30米光纤样品, 首次迈过了“20dB/km”的门槛。
- ✧ 1972, 4dB/km。
- ✧ 1974, 1.1dB/km。
- ✧ 1979, 0.2dB/km (1.5微米)。
- ✧ 1990, 0.14dB/km, 已经接近石英光纤损耗的理论极限值0.1dB/km。
- ✧ 1976, 美国贝尔实验室在亚特兰大到华盛顿间建立了世界上第一条实用化的光纤通信线路, 速率为45Mb/s, 采用的是多模光纤, 光源用的是发光管LED, 波长是0.85微米, 中继距离为10公里。
- ✧ 1980, 多模光纤通信系统商用化 (140Mb/s), 并着手单模光纤通信系统的现场试验工作。

1.2 全反射

- ✧ 1990，单模光纤通信系统进入商用（565Mb/s），并陆续制定了数字同步体系（SDH）的技术标准。
- ✧ 1995，2.5Gb/s的SDH产品进入商用。
- ✧ 1996，10Gb/s的SDH产品进入商用。
- ✧ 1997，采用零色散移位光纤和波分复用技术（WDM）的20Gb/s和40Gb/s SDH产品试验取得重大突破。此外，在光孤子通信、超长波长通信和相干光通信方面也正在取得巨大进展。



光缆



光纤及接头

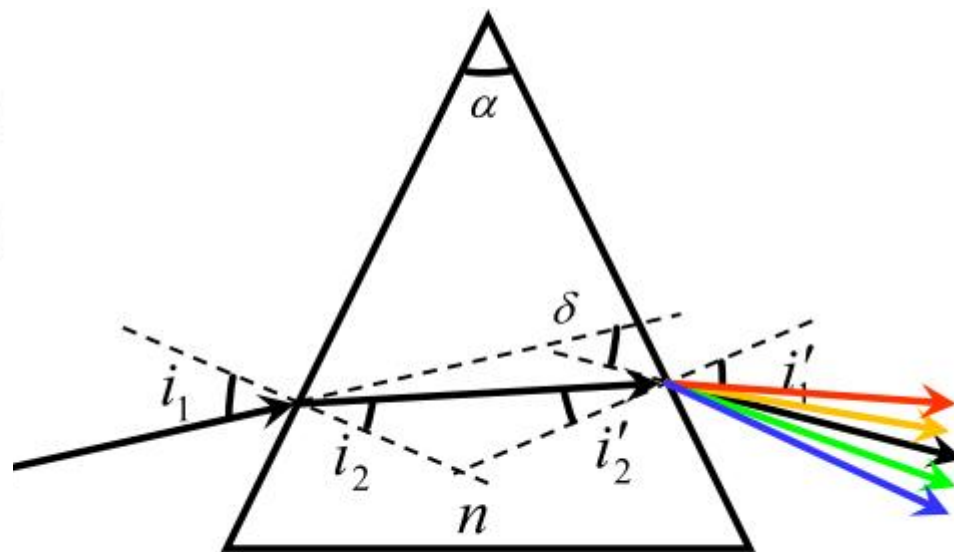
1.3 棱镜 (prism) 与色散 (dispersion)

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

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

$$\alpha = i_2 + i'_2$$

$$\delta = (i_1 + i'_1) - \alpha$$

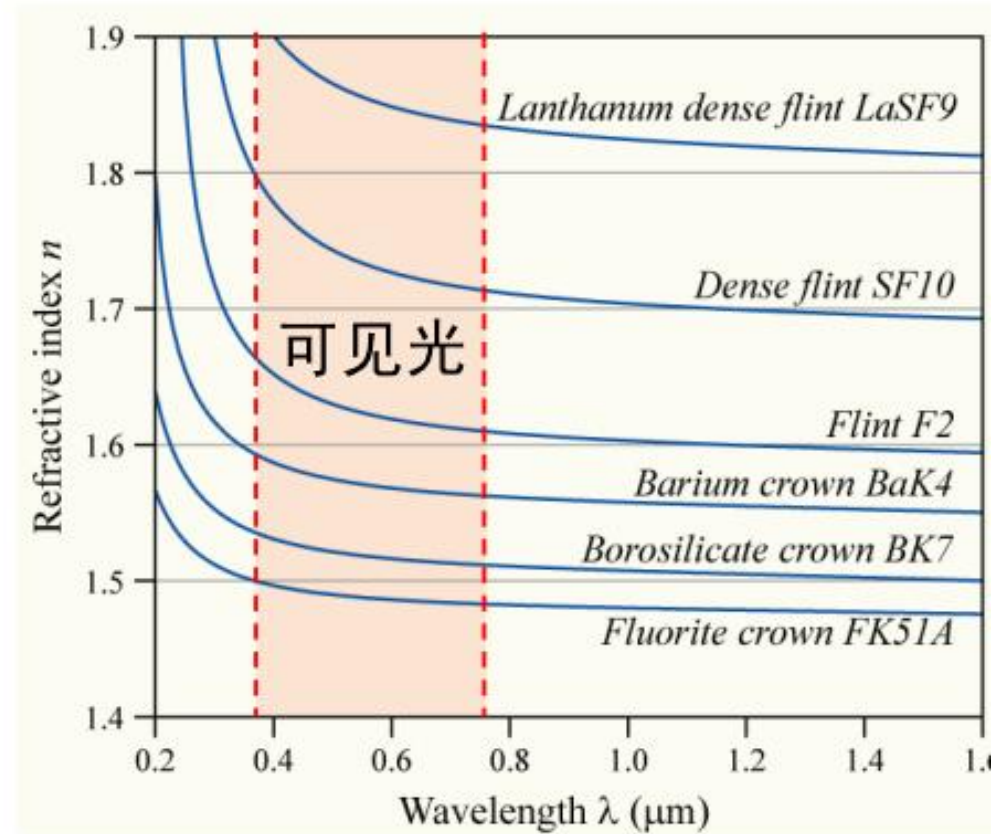
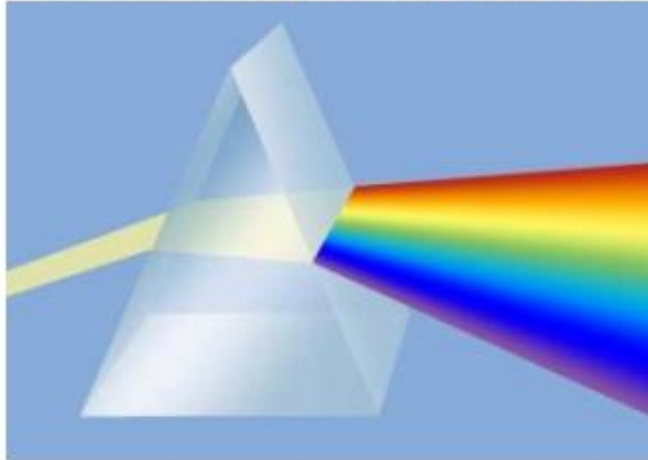


最小偏向角：对于给定的 α ，在某一 i_1 值条件下，偏向角有最小值 δ_m 。

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_m}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad \text{此时:} \quad \begin{aligned} i_1 &= i'_1 \\ i_2 &= i'_2 \end{aligned}$$

棱角已知时，通过测量最小偏向角，可以得到折射率。

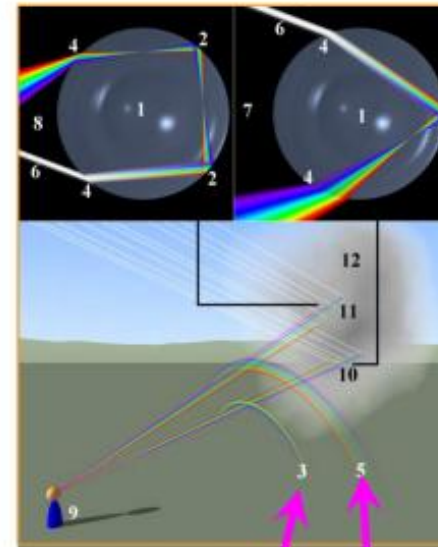
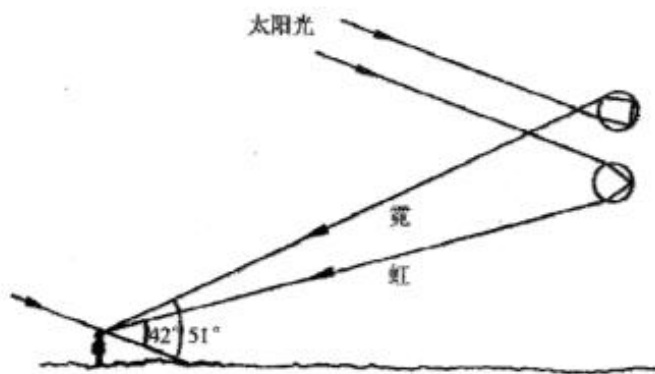
1.3 棱镜 (prism) 与色散 (dispersion)



棱镜的折射率随波长不同发生变化 (随波长增大而减小) , 因此可以用于分光和光谱测量 (光谱仪)

1.3 棱镜 (prism) 与色散 (dispersion)

虹(rainbow)和霓(secondary rainbow)



虹：内紫外红

霓（副虹）：内红外紫

1.3 棱镜 (prism) 与色散 (dispersion)

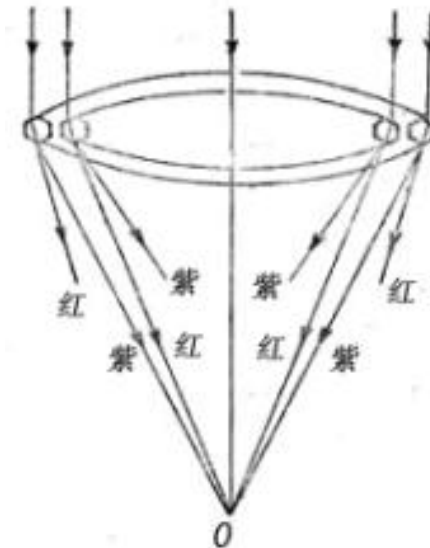
虹(rainbow)和霓(secondary rainbow)



1.3 棱镜 (prism) 与色散 (dispersion)

晕(halo)

22°晕：六角柱状冰晶横躺着缓慢下降，光在冰晶中的折射最小偏向角为22°左右，由于不同波长的光波折射率不同，引起色散，在太阳下方的观测者观测到内红外紫的22°晕。



日晕三更雨，月晕午时风
月光带枷，大雨落下
月亮生毛，大雨冲壕

1.3 棱镜 (prism) 与色散 (dispersion)

晕(halo)

46°晕：六角柱体状冰晶竖着缓慢下降，则阳光折射的最小偏向角为46°左右，形成46°晕。



1.4 光的可逆性 (reversibility) 原理

当光线的方向反转时，光将逆着同一路径传播。



第一章 几何光学

第二节 惠更斯原理

第二节 惠更斯原理

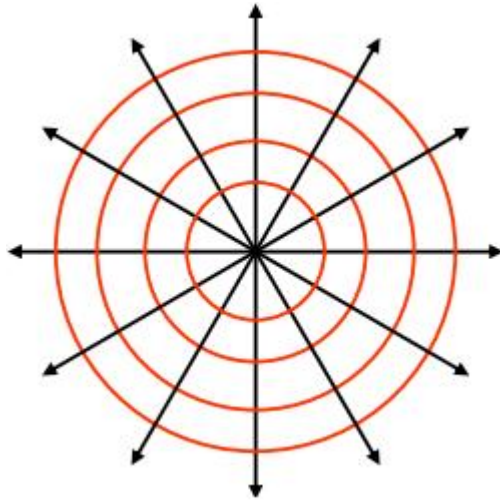
2.1 波的几何描述

2.2 惠更斯 (C. Huggens , 1678) 原理

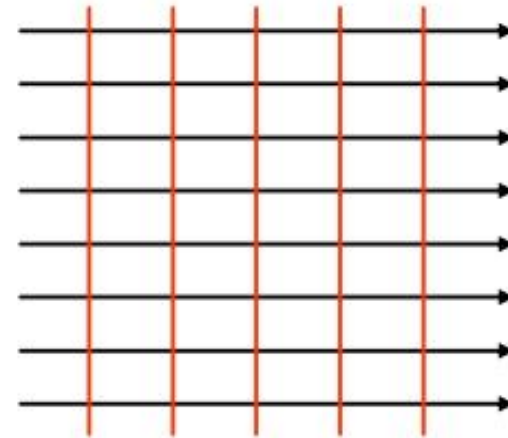
3.3 对反射定律和折射定律的解释

4.4 对直线传播定律的解释

2.1 波的几何描述



波线：波线上每点的切线方向代表该点波传播的方向（或能量传播的方向）。

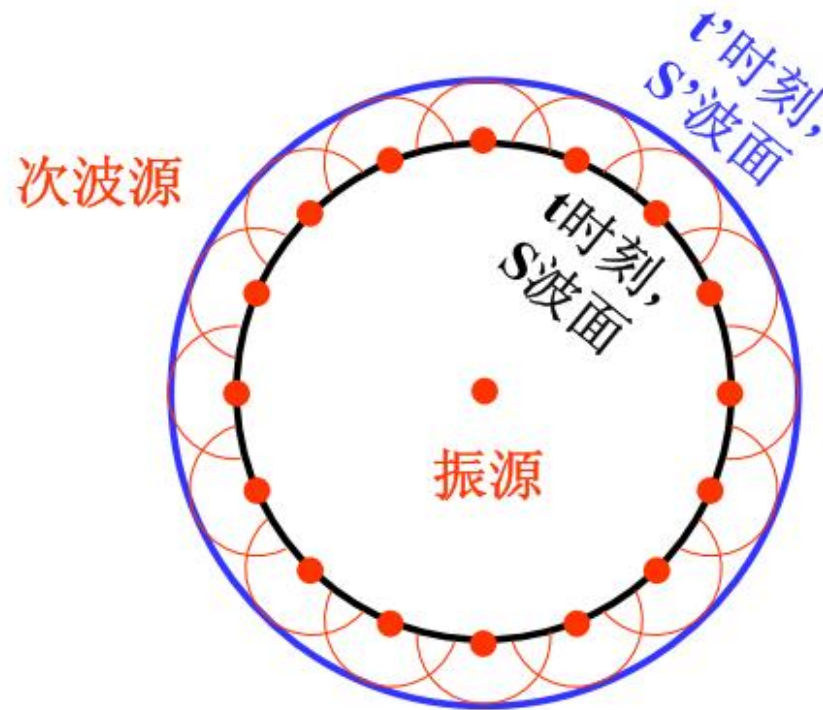


波面：同一振源的波场中，具有相同位相的点组成的曲面。（另一表述：从同一波源发出的波经过相同传播时间到达各点组成的面。）

2.2 惠更斯原理

次波源：振源发出的波在 t 时刻传播到波面 S ，其上的每一面元被认为是次波源。

惠更斯原理：次波源波面的包络就是 t' 时刻的波面 S' 。



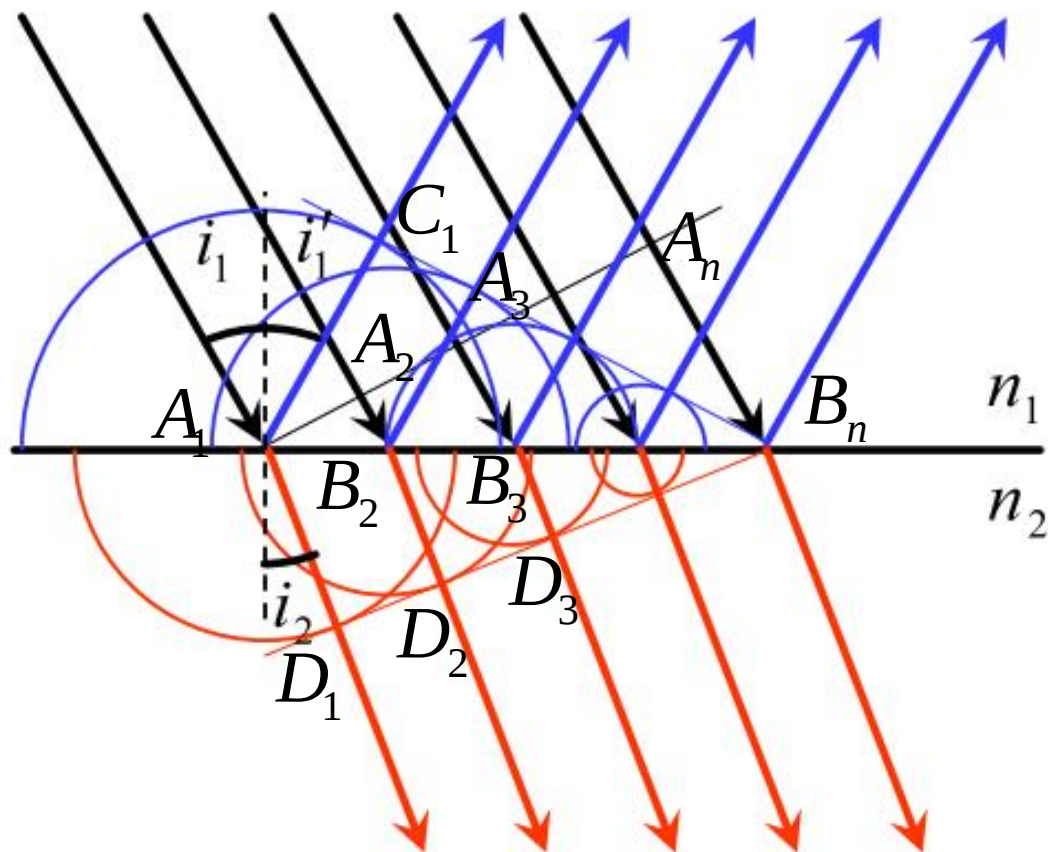
2.2 惠更斯原理

对反射和折射定律的解释

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

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



2.2 惠更斯原理

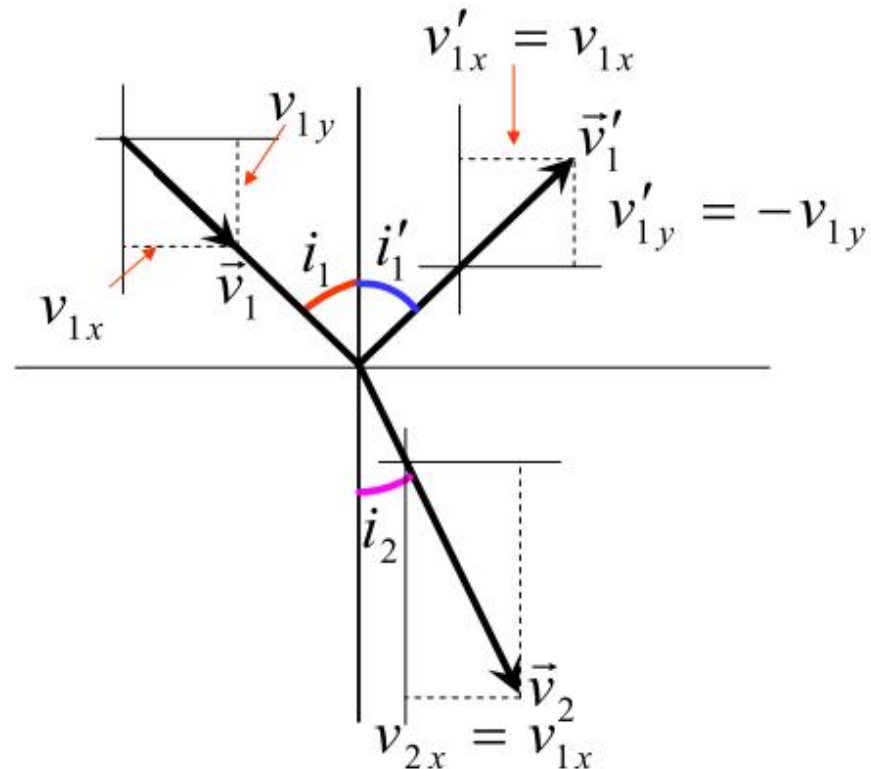
微粒说对折射定律的解释

- 1) 光微粒在均匀透明介质中依惯性定理匀速飞行；
- 2) 光微粒遇到界面时，切线速度不变；
- 3) 反射时，微粒的法向速度象小球反弹一样翻转；
- 4) 折射时，界面存在着一种力，光微粒通过界面时，法向速度发射突变，依折射定律有：

切向速度相等

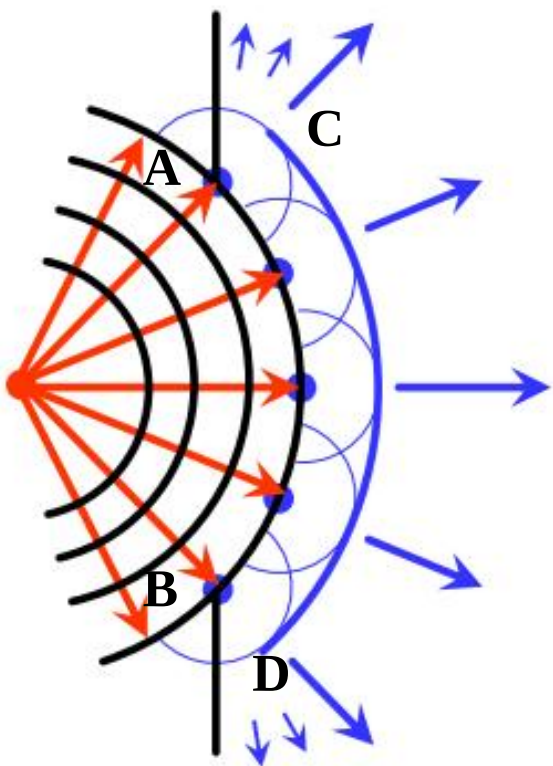
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

与波动学说相反

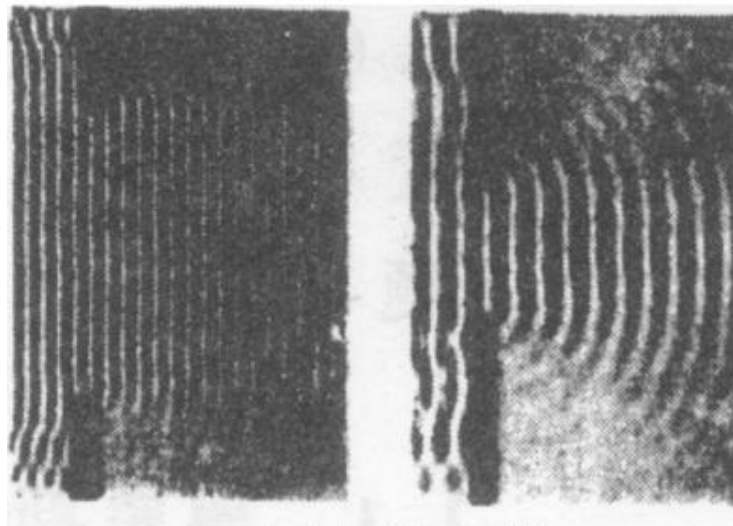


2.2 惠更斯原理

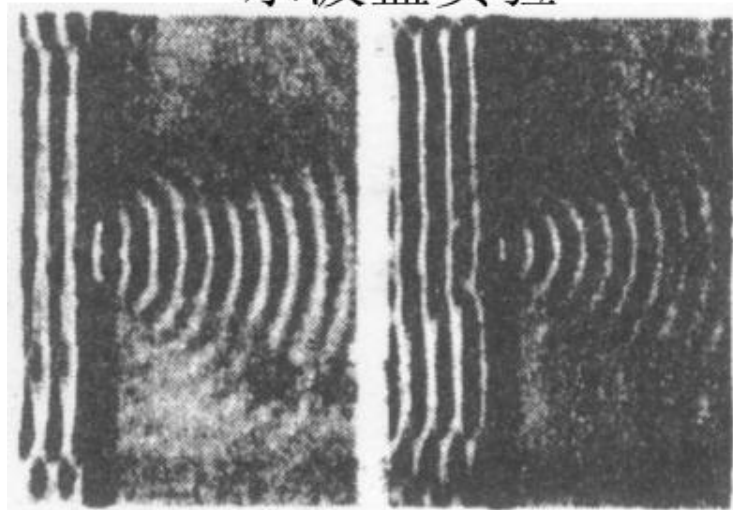
对直线传播的解释



定性而不能定量



水波盘实验



第一章 几何光学

第三节 费马原理

第三节 费马原理

3.1 光程

3.2 费马 (P. de Fermat , 1679) 原理

3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

3.1 光程 (optical path)

光程：相同时间内光线在真空中传播的距离。

是折射率 $\times$ 光所经过的路程

$$(QP) = \int_Q^P n dl \quad L \text{ 为传播路径}$$

$$\tau_{QP} = (QP) / c$$



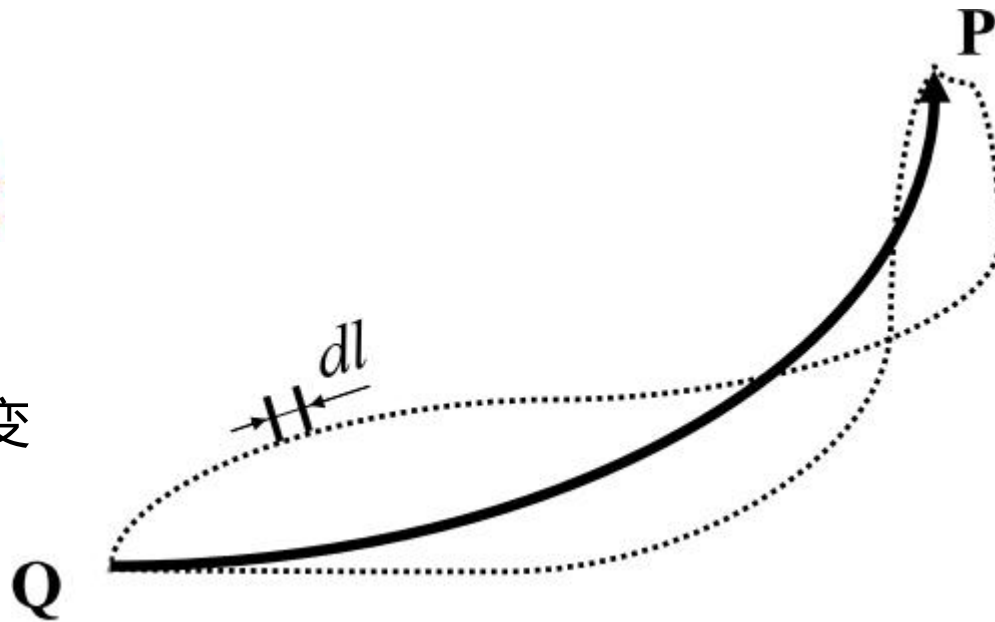
3.2 费马原理

费马原理：两点间光线传播的实际路径是光程（或所需时间）为平稳（取极值）的路径（平稳时间原理）。即：

$$\delta \int_Q^P n dl = 0 \quad \text{或} \quad \delta \tau_{QP} = 0$$

极大、极小、常数

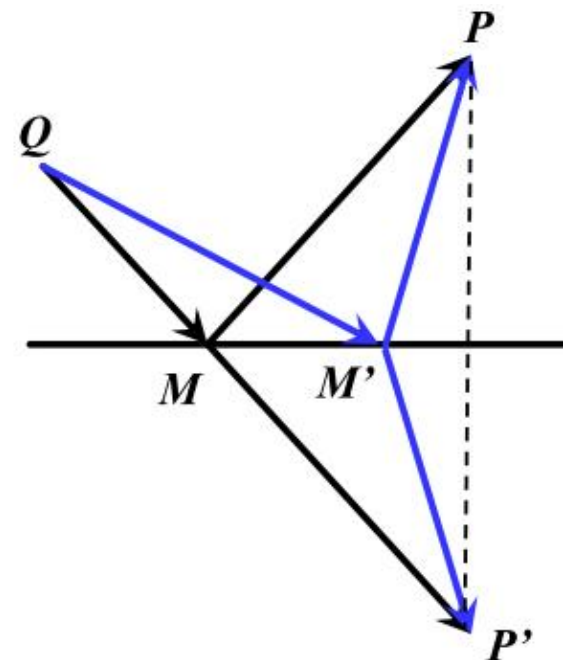
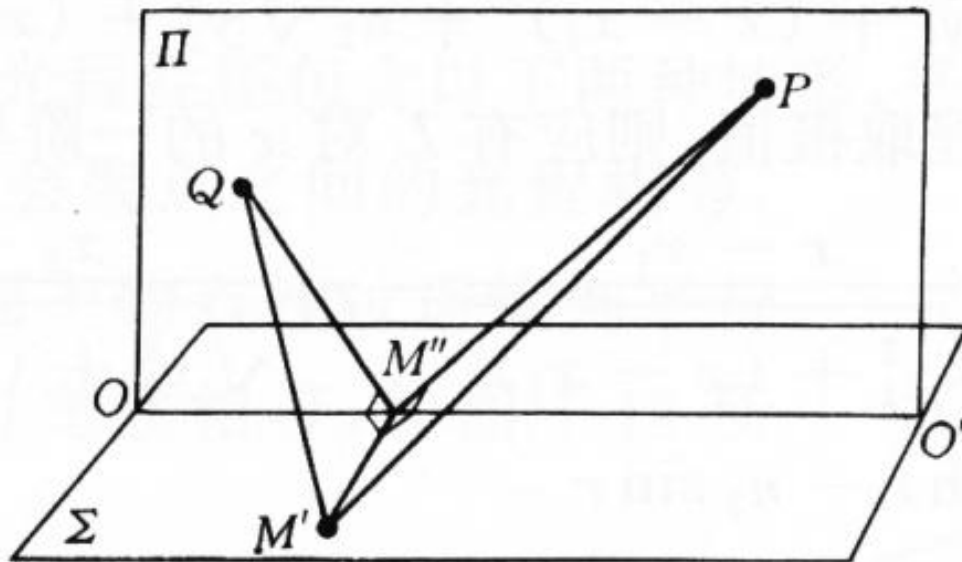
是针对路径的无穷小变化而言的。



3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

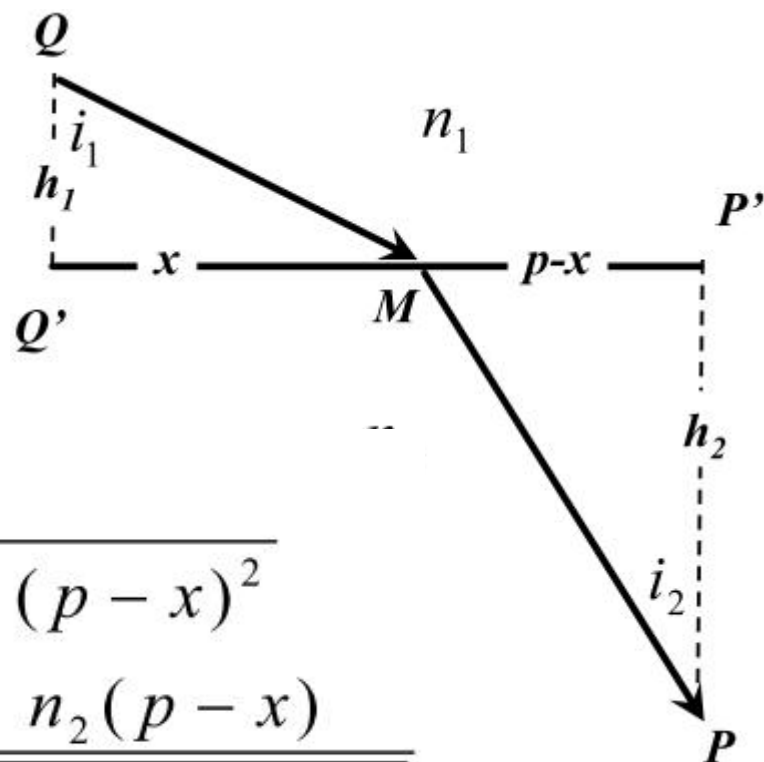
- 可以由Fermat原理导出几何光学的实验定律
- 所以可以说，Fermat原理是更基本的
- 一般来说，任何一门学科，都有着无法证明的（指从理论上无法证明）最基本的假设，这就是原理，是这一学科所建立的基础。

反射定律



3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

折射定律



$$(QMP) = n_1 QM + n_2 MP$$

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

$$\frac{d}{dx}(QMP) = \frac{n_1 x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{n_2 (p-x)}{\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}}$$

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

几何光学的局限性

- 几何光学是关于光的唯象理论,不涉及光的物理本质。
- 对于光线,是无法从物理上定义其速度的。
- 只有在波长很小时,三定律才近似成立。
- 在几何光学领域,也无法定义诸如波长、频率、能量等物理量。
- 也可以说:几何光学就是三大实验定律在几何学中的应用。

本节重点

1. 几何光学三定律
2. 惠更斯原理
3. 费马原理

作业

P23- 5, 7,14,16

P33-4

P39-2

重排版

P16-17 5, 7,14,16

P24-4

P27-2