第一章 几何光学
1-01 几何光学的基本定律

1.1 几何光学三定律

折射定律的斯涅耳（W. Snell，1621）公式

1.2 全反射

1.3 棱镜与色散

1.4 光的可逆性原理

1.0 几何光学

定义：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。

适用范围：

1. 光学系统的尺度远大于光波的波长 （n的均匀范围远大波长）；
2. 介质是各向同性的 （n是各向同性的）；
3. 光强不是很大（n与光强无关）；

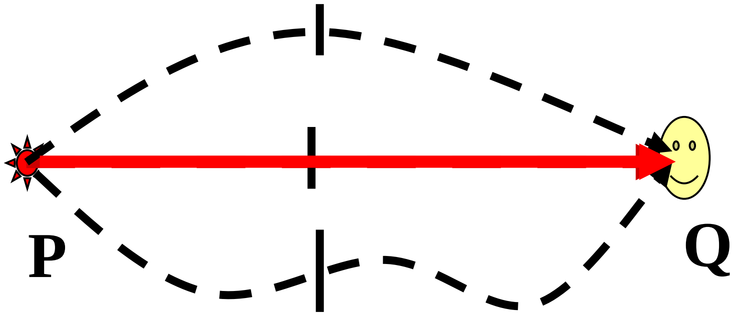
特点：原理简单、计算复杂，计算软件（追迹）的发展替代了复杂的计算

1.1 几何光学三定律

光线（ray of light）：用一条表示光传播方向的几何线来代表光，称这条几何线为光线

几何光学三定律

1. 直线传播定律：在均匀介质中光沿直线传播



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

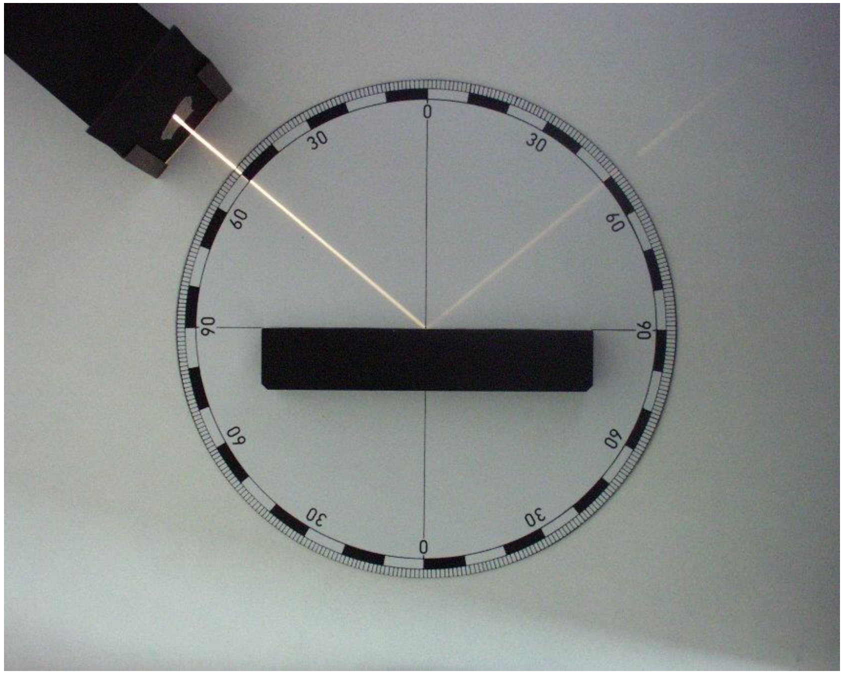
光的反射、折射定律

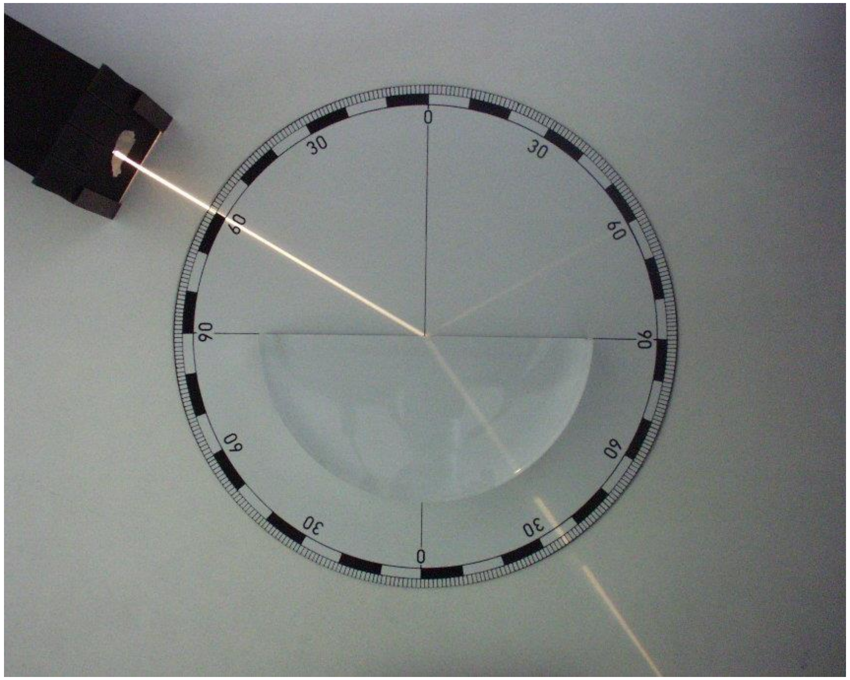
1）都在入射面(incident plane)内

入射面：入射光线和界面法线构成的平面

2）反射角等于入射角

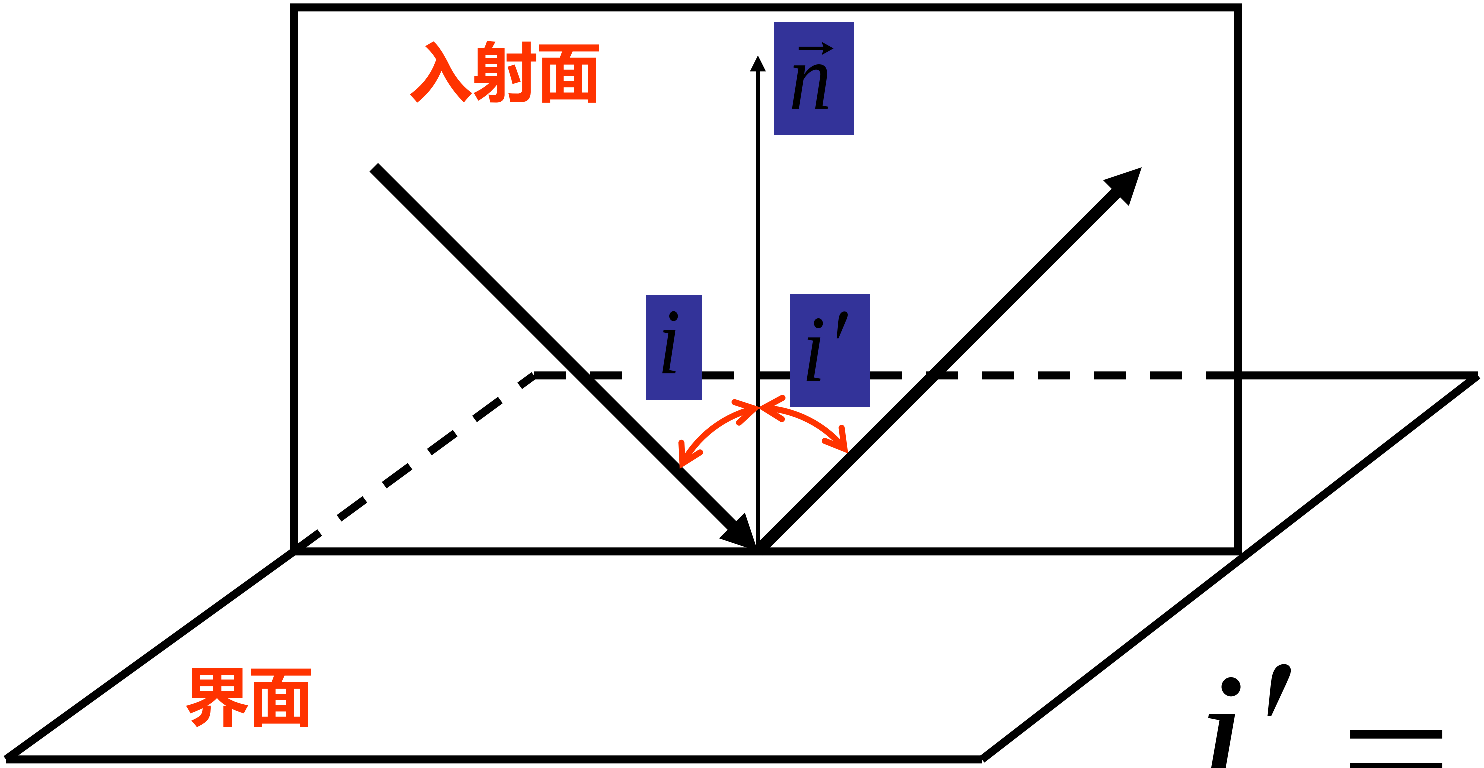
3）折射角、入射角正弦之比等于相对折射率





光的反射定律

1）反射光在入射面内
2）反射角等于入射角

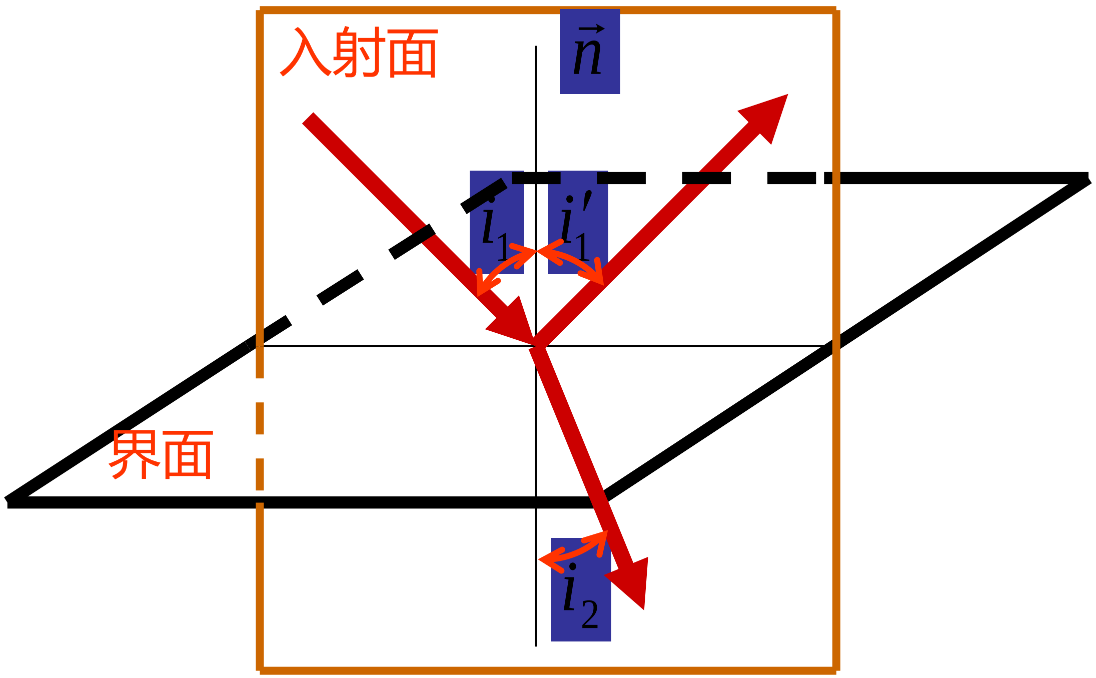


$$i' = i$$

光的折射定律

1）折射光在入射面内
2）折射角、入射角正弦之比等于相对折射率

相对折射率：$n_{12} = \dfrac{n_2}{n_1}$

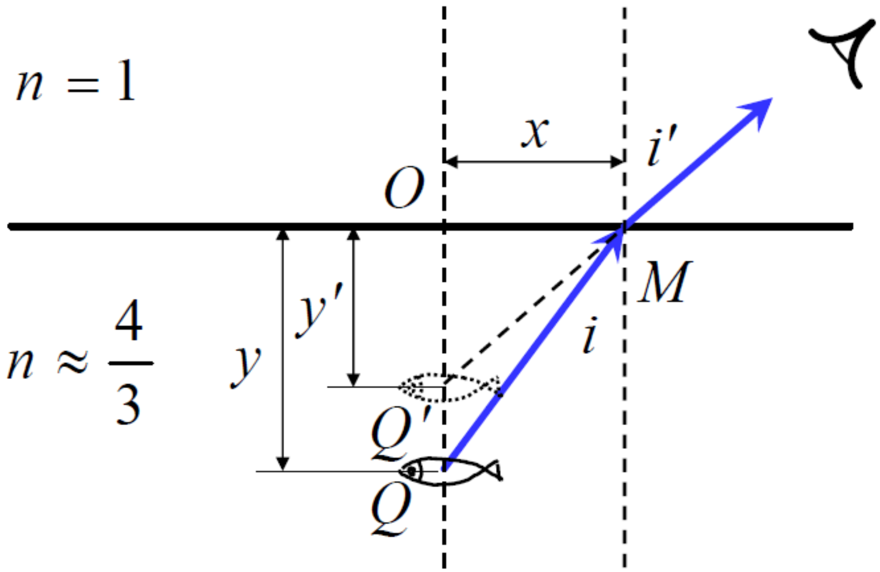


$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Snell定律

Snell-Descartes 定律

例1：水下的光点

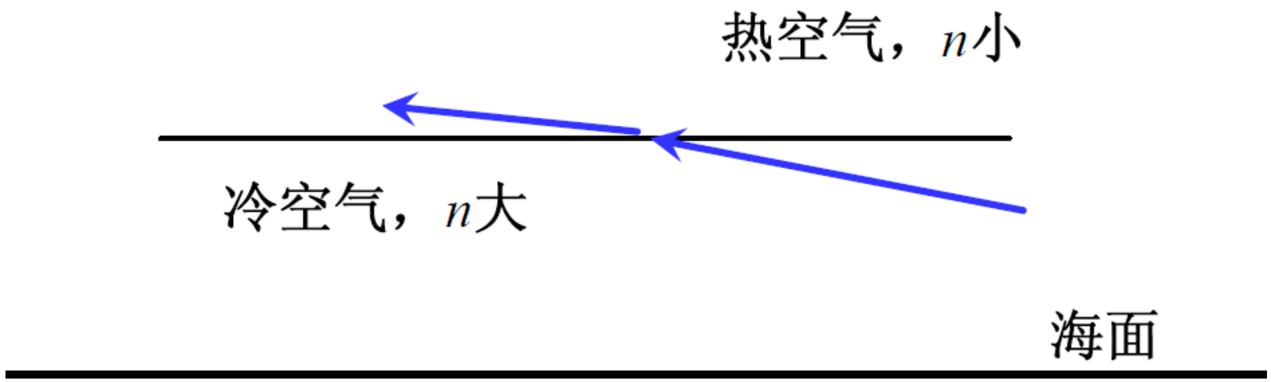


$$n\sin i = \sin i' \qquad y = \frac{x}{\tan i}$$

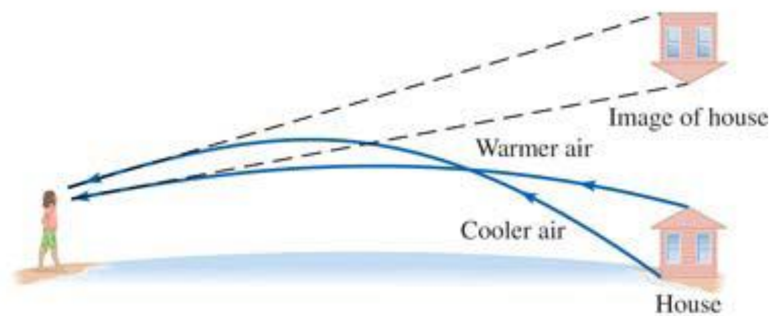
$$y' = \frac{x}{\tan i'} = y\frac{\tan i}{\tan i'} = y\frac{\sin i\cos i'}{\sin i'\cos i} = \frac{y\sqrt{1-n^2\sin^2 i}}{n\cos i}$$

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

例2：海市蜃楼

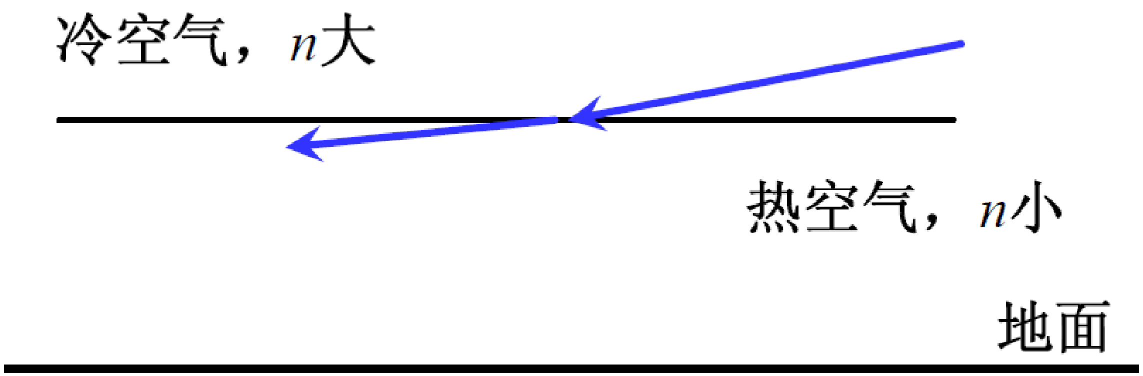


(a)



(b)

例3：沙漠神泉

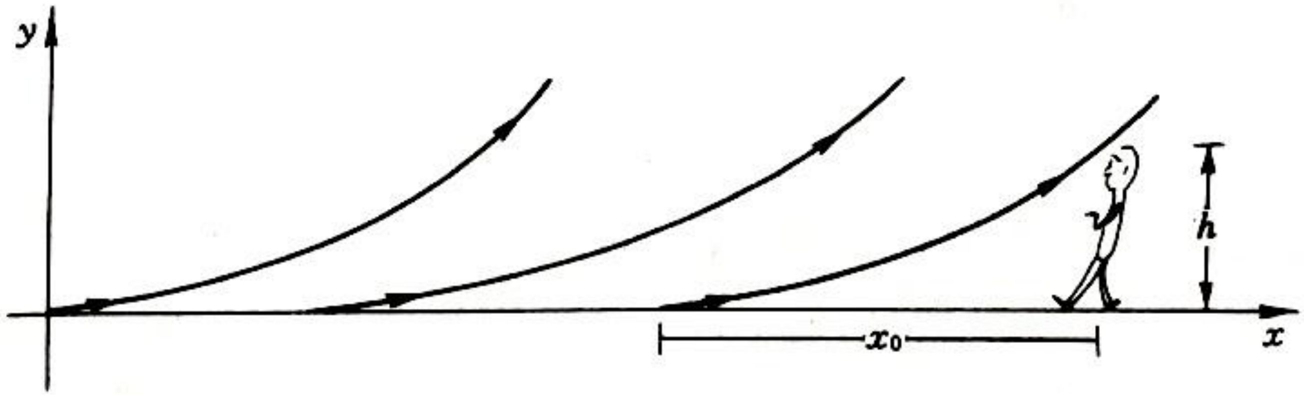


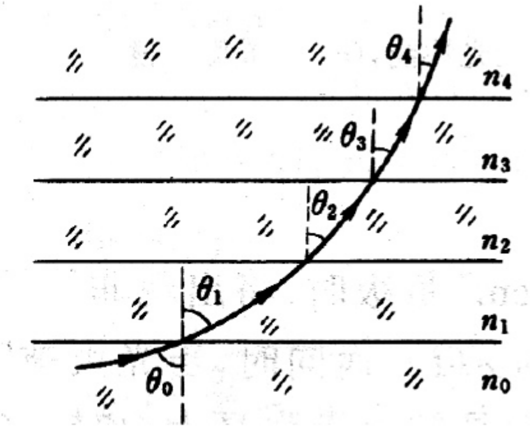
例4：机场跑道能看多远?

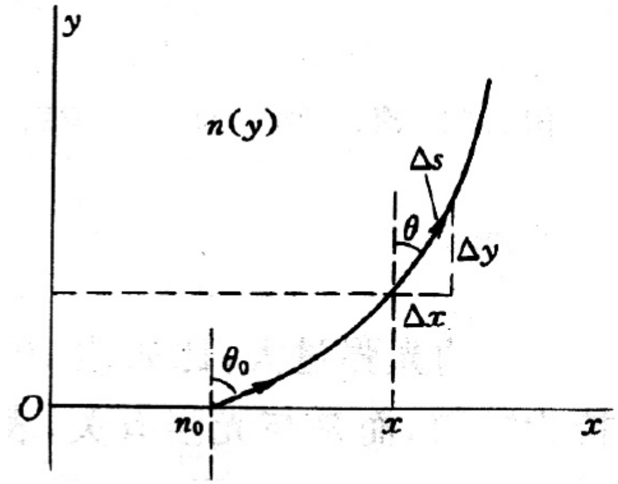
夏日机场跑道上方温度梯度较大，导致空气折射率发生变化：

$$n(y)=n_0(1+\beta y) \qquad \beta\approx1.5\times10^{-6}/m$$

人站在跑道的一端，最远能看多远?







光线方程：

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

$$n(y)\sin\theta(y) = n_0 \sin\theta_0$$

最远距离：$\begin{cases} n_0 = 1 \\ \theta_0 = 90^\circ \end{cases}$

几何关系：

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

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

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

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

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

1.75m高的人最远只能看到1.5km。

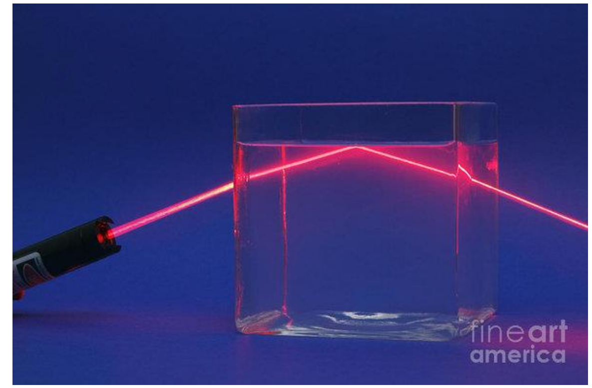
1.2 全反射（total reflection）

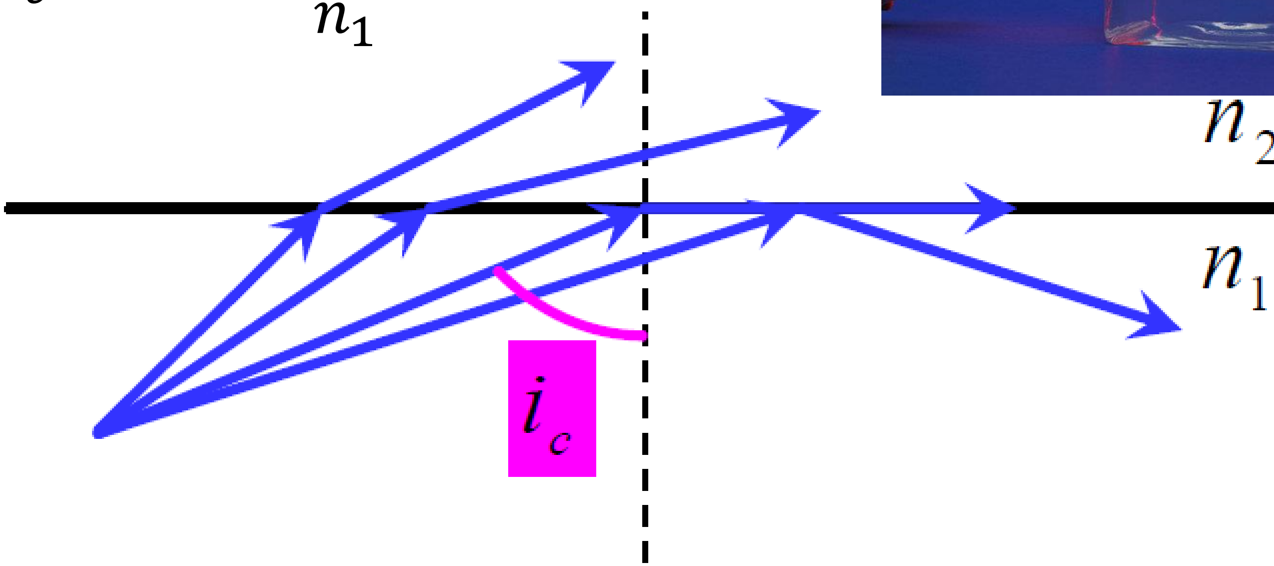
光密介质向光疏介质的折射：

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

临界角（critical angle）：

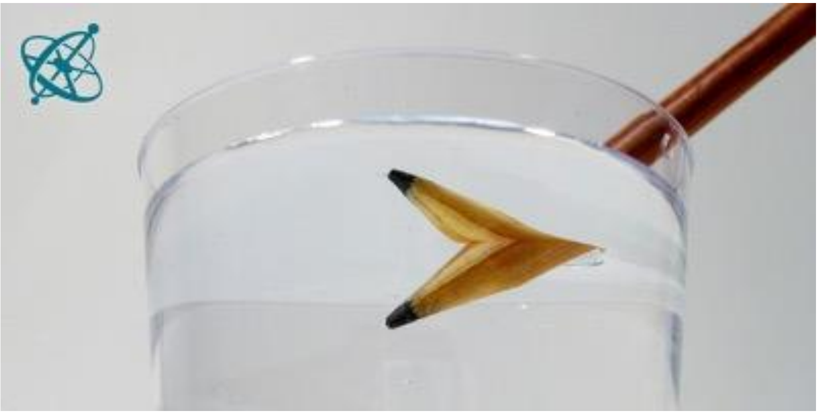
$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



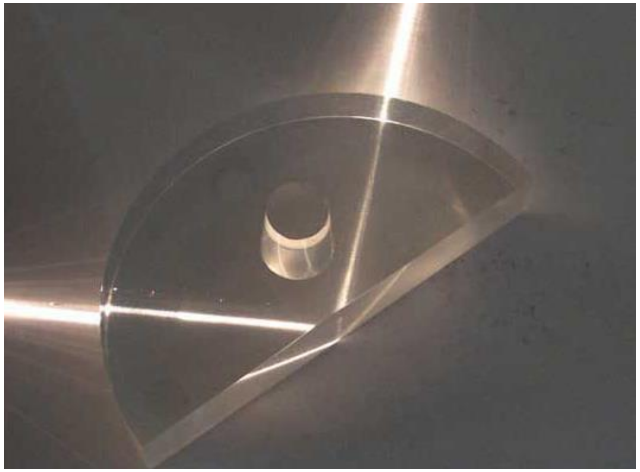


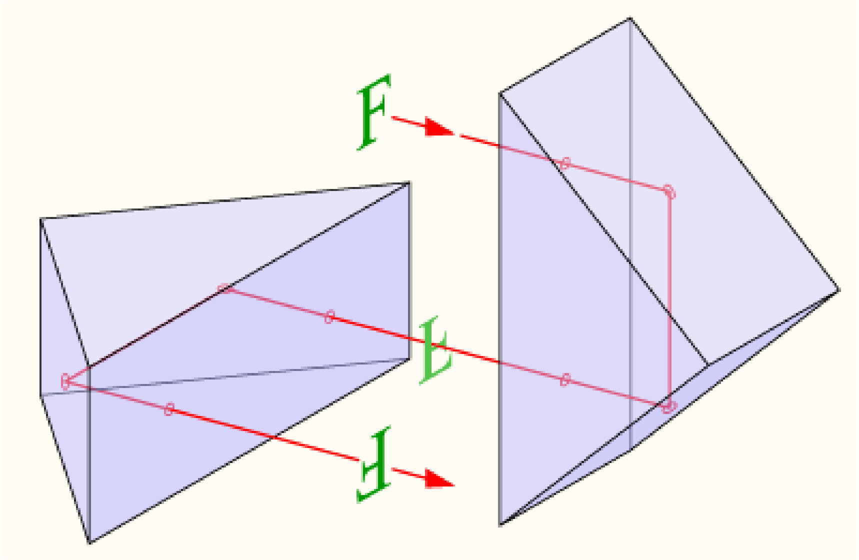
★ 调研报告： Goos–Hänchen effect

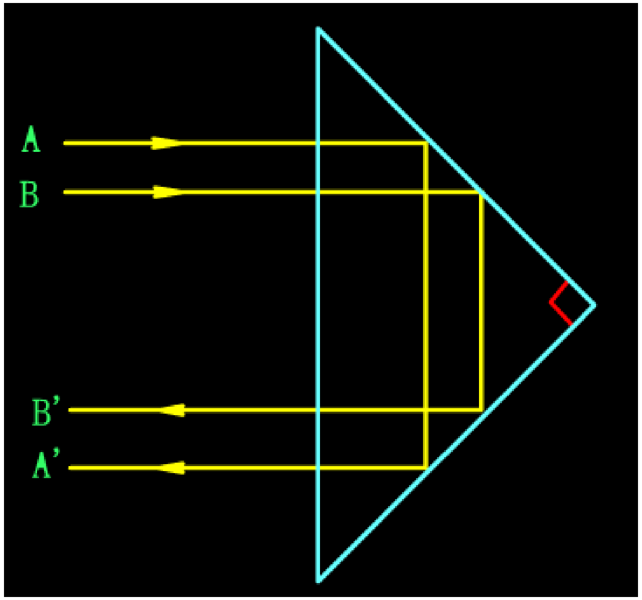


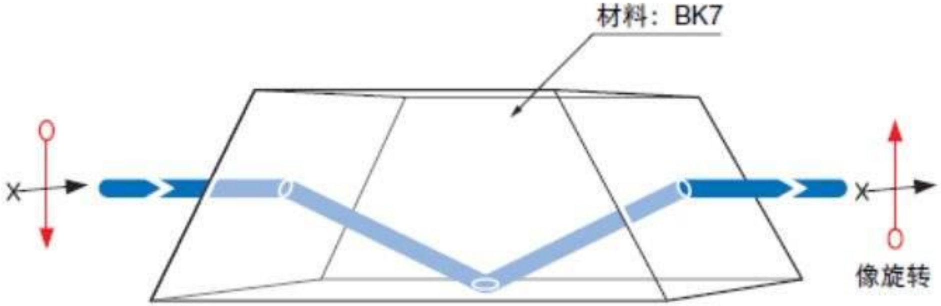



全反射棱镜

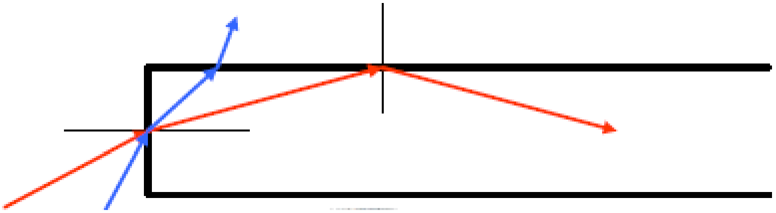


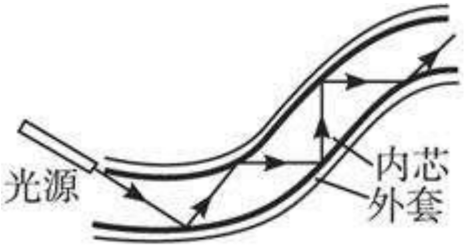


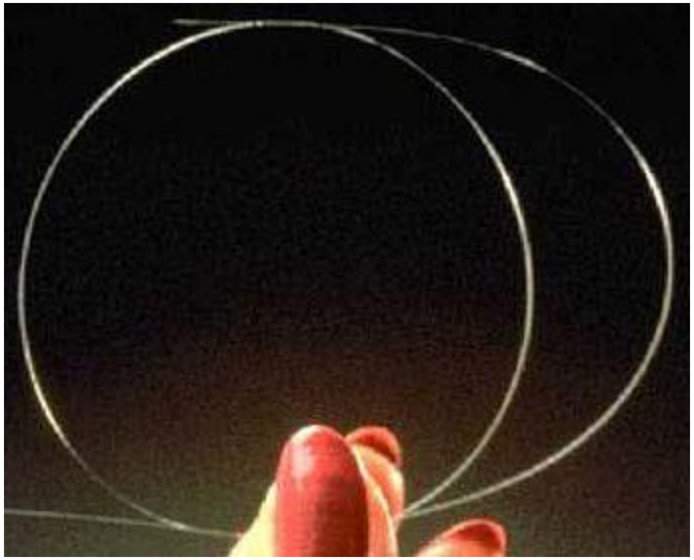




光纤(optical fiber)



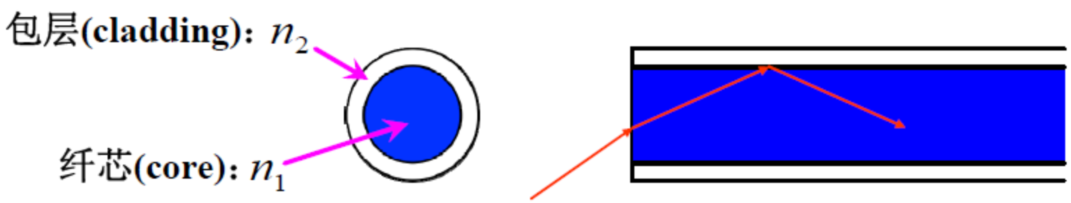




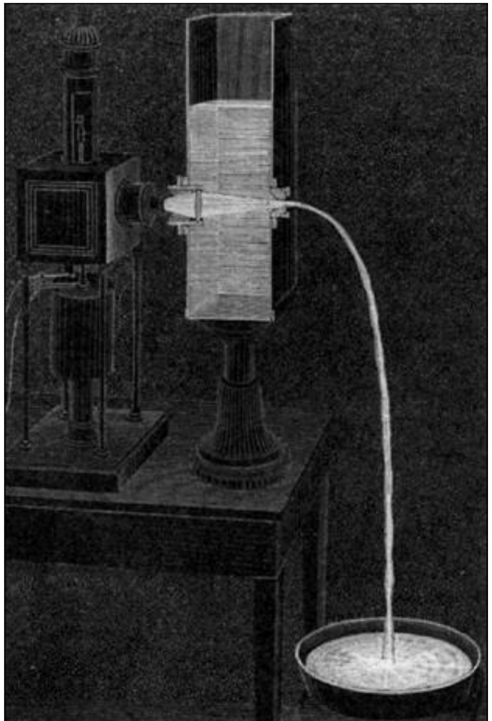
~1840，D Colladon 和J Babinet提出可以依靠光折射现象来引导光线的传播。

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。

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。



(step index fiber, SIF)


1854，J Tyndall

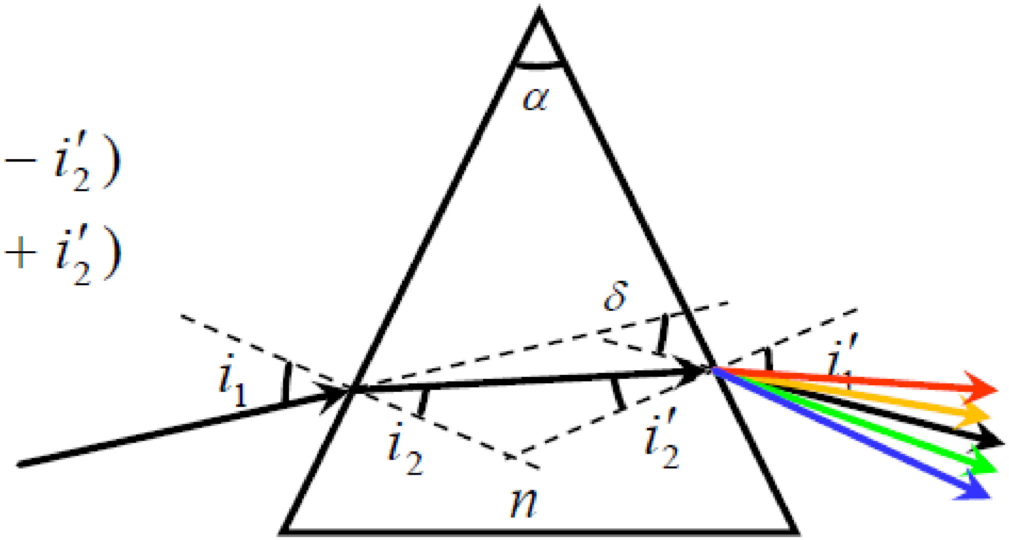
1966，英籍华人高锟(C Kao)指出：如果能够减少玻璃中的杂质含量，就可以制造出损耗低于20dB/km的光纤。

2009 Nobel Laureate, Charles Kao, Father of Fiber Optics

★ 调研报告：Optical waveguide and fiber

1.3 棱镜(prism)与色散(dispersion)

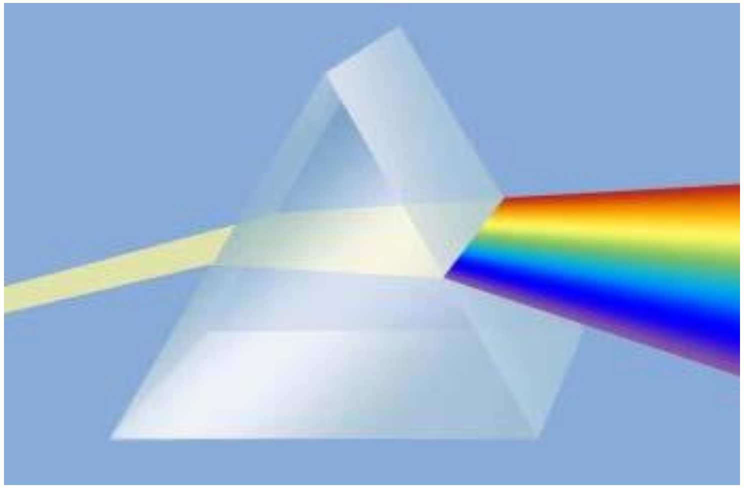
$$\delta = (i_1 - i_2) + (i_1' - i_2')$$
$$= (i_1 + i_1') - (i_2 + i_2')$$
$$\alpha = i_2 + i_2'$$
$$\delta = (i_1 + i_1') - \alpha$$

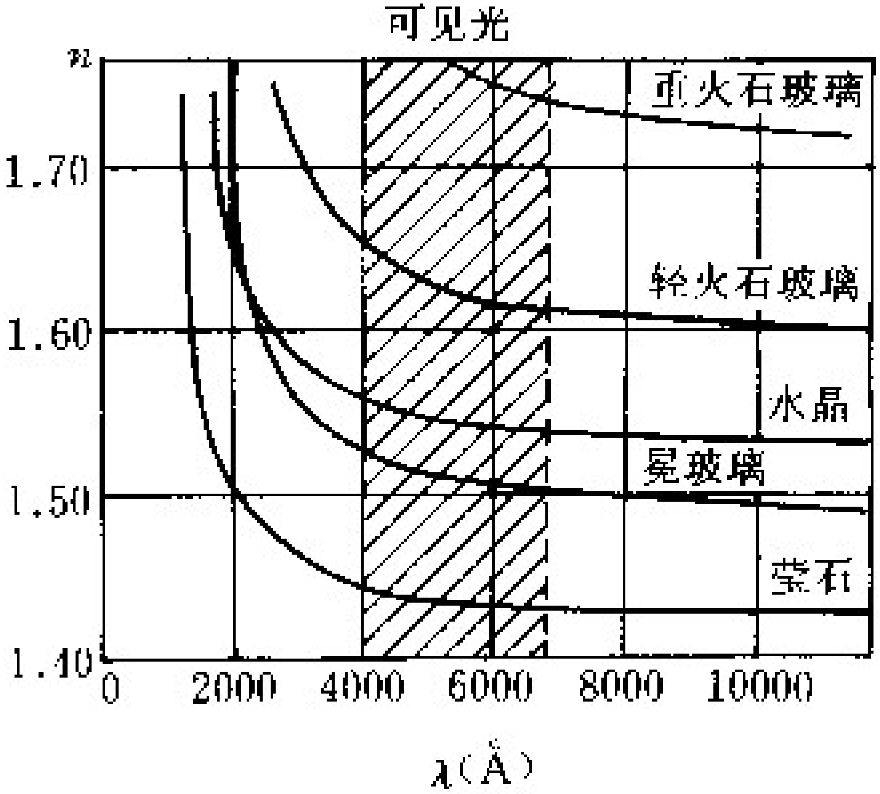


最小偏向角：

$$n = \frac{\sin\frac{\alpha + \delta_m}{2}}{\sin\frac{\alpha}{2}}$$

此时：
$$i_1 = i_1'$$
$$i_2 = i_2'$$

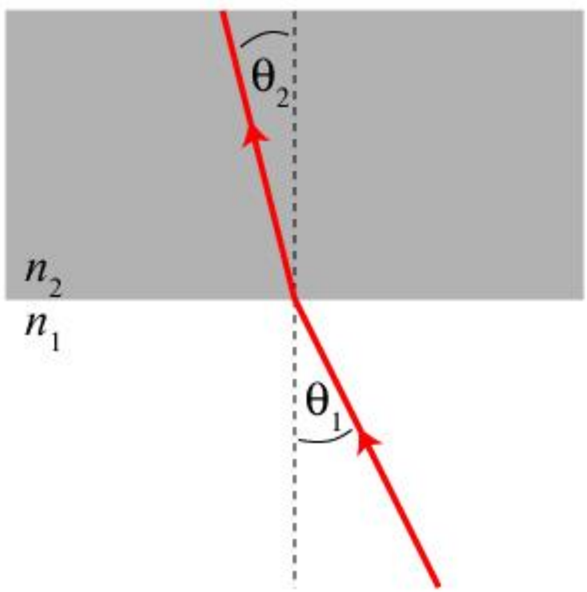


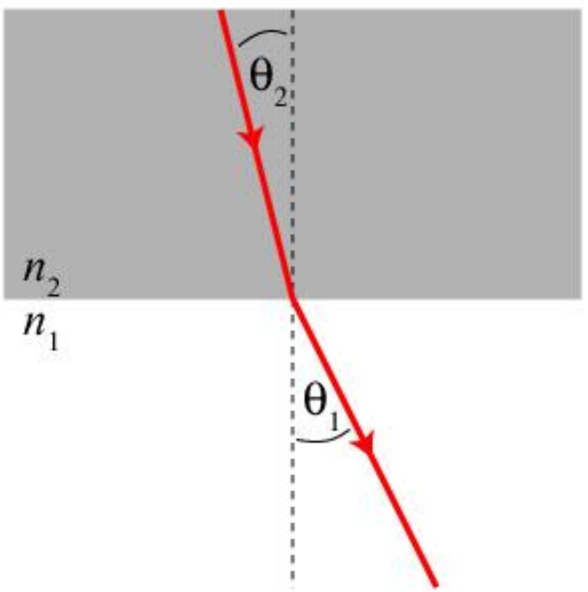

可见光
n
重火石玻璃
轻火石玻璃
水晶
冕玻璃
萤石
1.70
1.60
1.50
1.40
0
2000
4000
6000
8000
10000
λ(Å)

虹(rainbow)和霓(secondary rainbow)

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。





作业

p.22-24: 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12

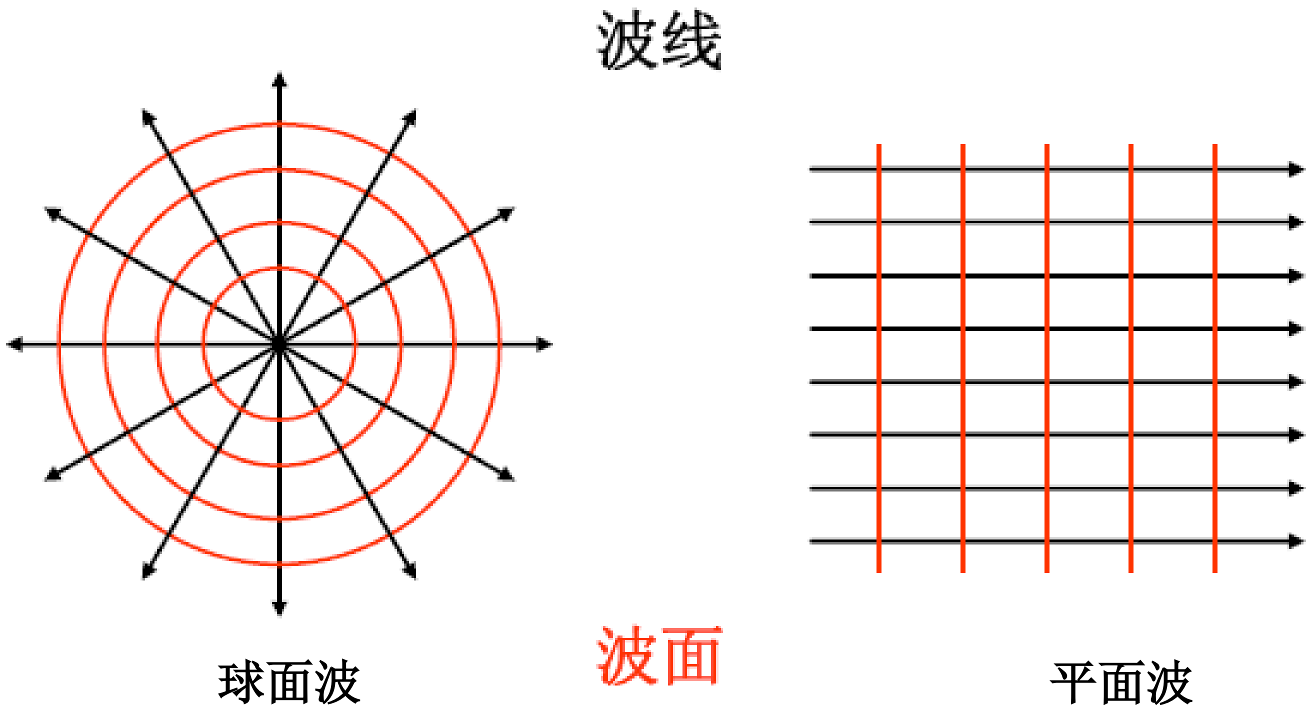
重排版：P16-18
3, 4, 6, 7, 9, 11, 12

1-02 惠更斯原理

2.1 波的几何描述
2.2 惠更斯（C. Huggens，1678）原理
2.3 对反射定律和折射定律的解释
2.4 对直线传播定律的解释

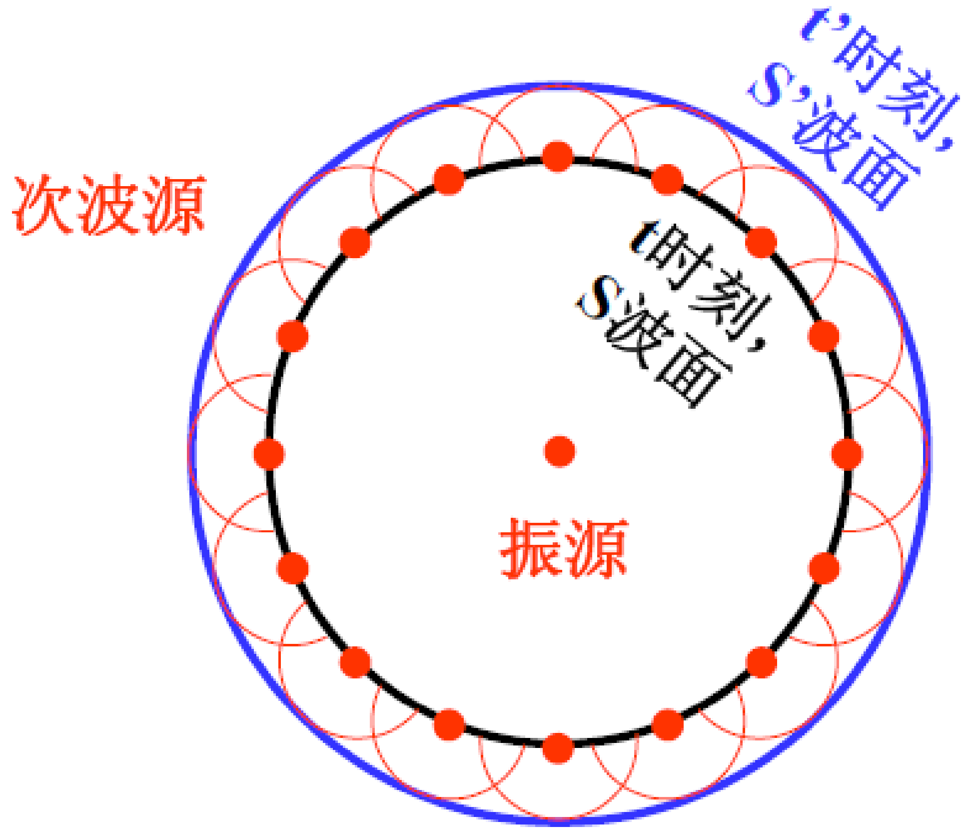
2.1 波的几何描述

波面(**wave surface**)：等相位面
波线(**wave ray**)：能量传播的方向



2.2 惠更斯（C. Huggens，1678）原理

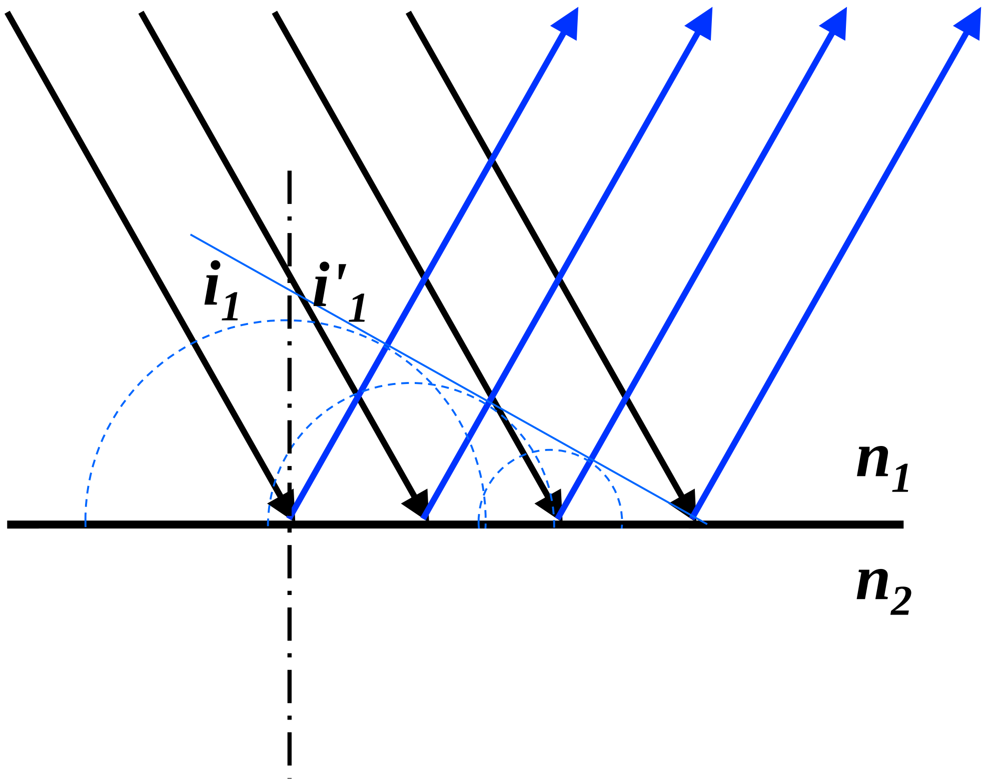
次波源波面的包络就是下一时刻的波面



2.3 对反射定律和折射定律的解释

反射定律

$i'_1 = i_1$

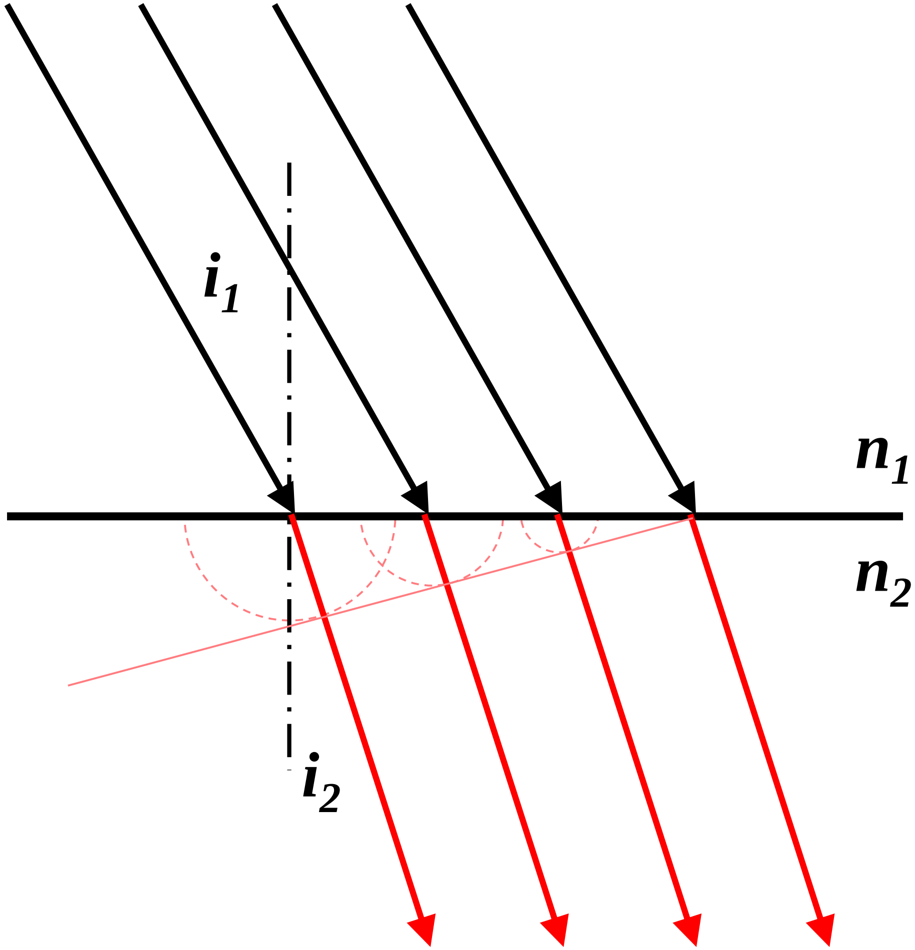


折射定律

$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

$\sin i_1 / \sin i_2$
$= v_1 / v_2$
$= n_{12}$
$= n_2 / n_1$

$n = v/c$

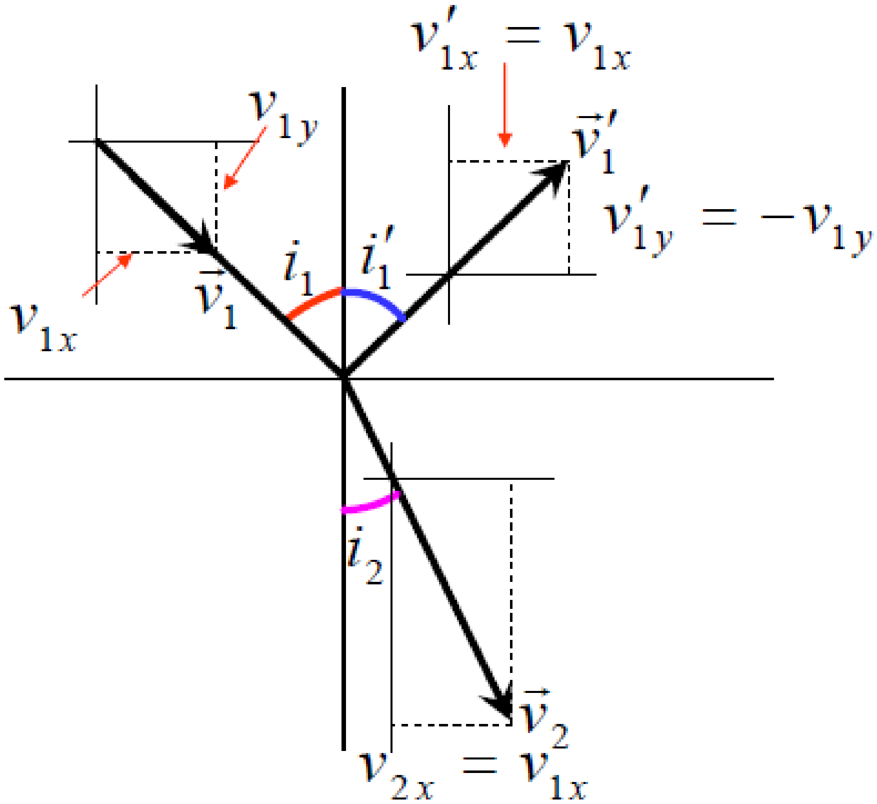


微粒说对折射的解释

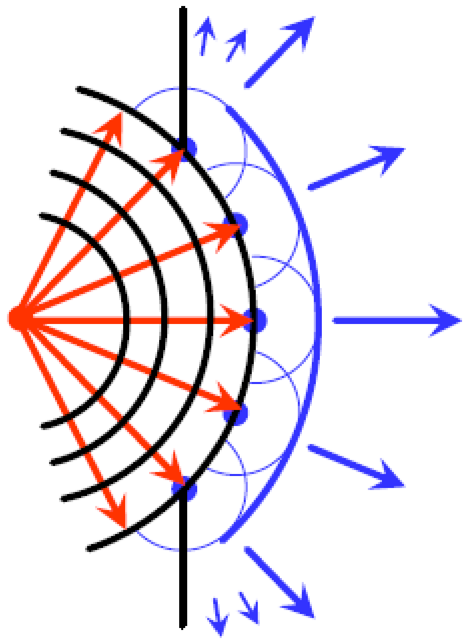
1）光微粒在均匀透明介质中依惯性定理匀速飞行
2）光微粒遇到界面时，切线速度不变
3）反射时，微粒的法向速度象小球反弹一样翻转
4）折射时，界面存在着一种力，光微粒通过界面时，法向速度发射突变，依折射定律有：

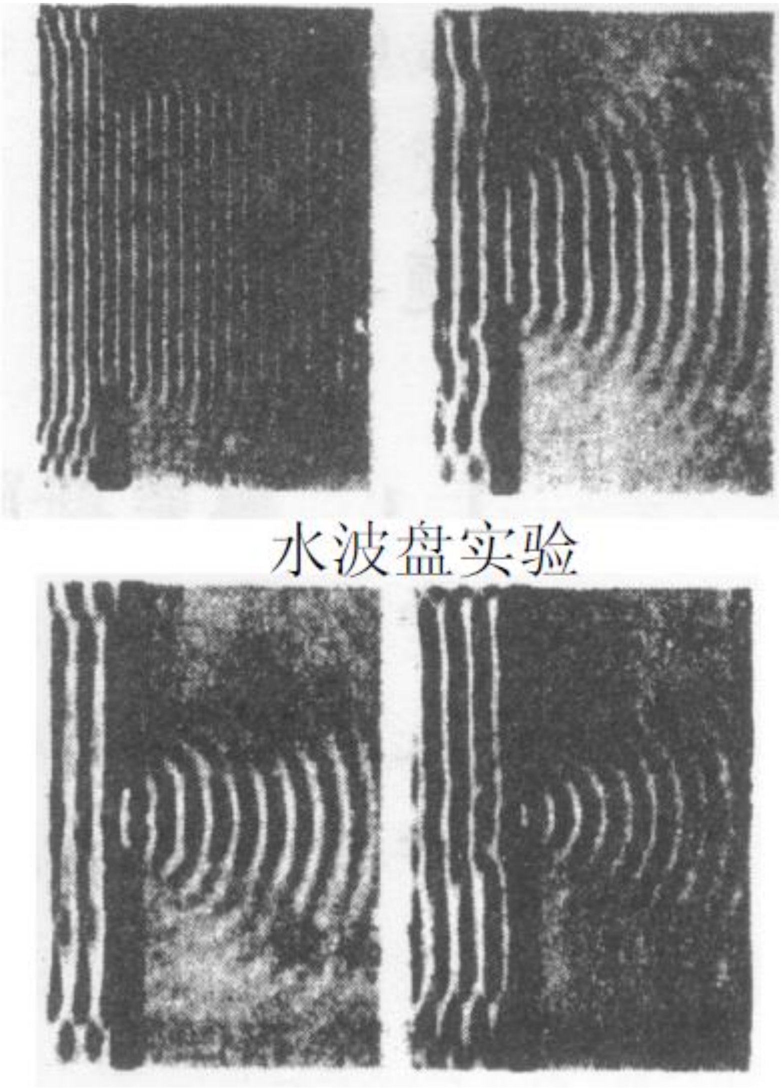
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

与波动说相反！



2.4 对直线传播定律的解释





水波盘实验

定性而不能定量

当系统尺寸降低，衍射现象明显

作业

p.32-33: 1, 4, 5

重排版：P23-24
1,4,5

1-03 费马原理

3.1 光程

3.2 费马（P. de Fermat，1679）原理

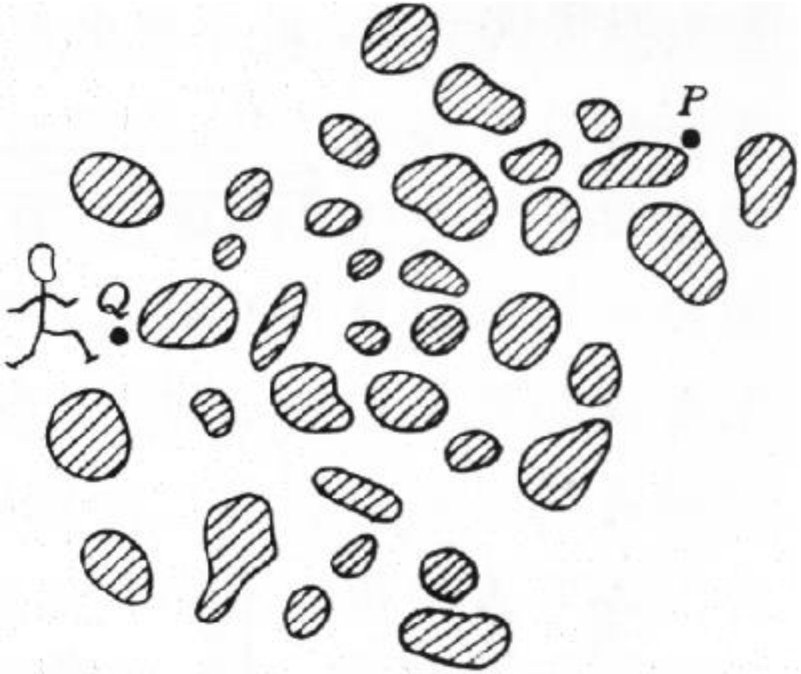
3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

3.1 光程（Optical path）

光程：折射率×光所经过的路程，即ns; 或相同时间内光线在真空中传播的距离

$$(QP)_L = \int_Q^P n ds$$ *L*为传播路径

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



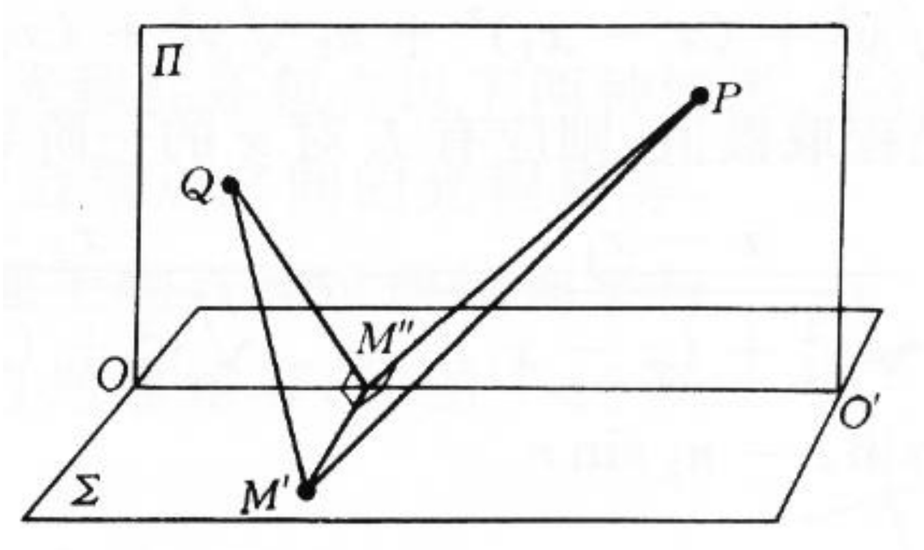
3.2 费马原理 (Fermat’s principle（P. de Fermat,1679)

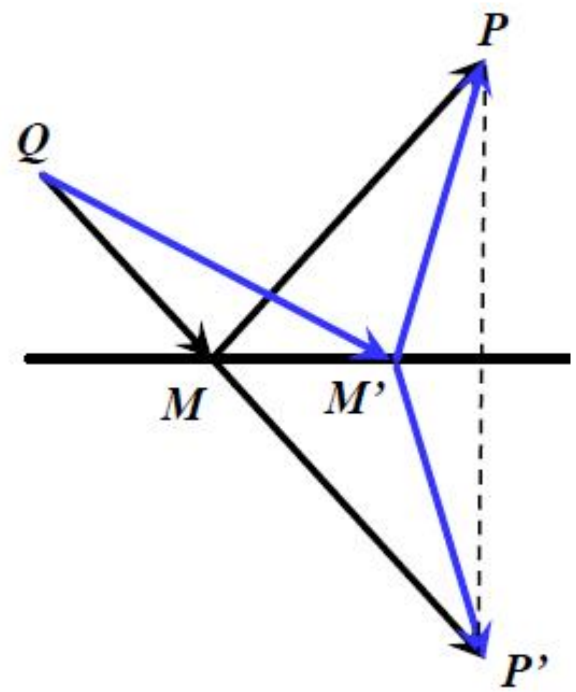
费马原理：两点间光的实际路径，是光程平稳（取极值）的路径。

$$\underbrace{\delta\int_{Q}^{P} n\,ds}_{\text{极大、极小、常数}} = 0 \quad \text{或} \quad \delta\tau_{QP} = 0$$

3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

反射

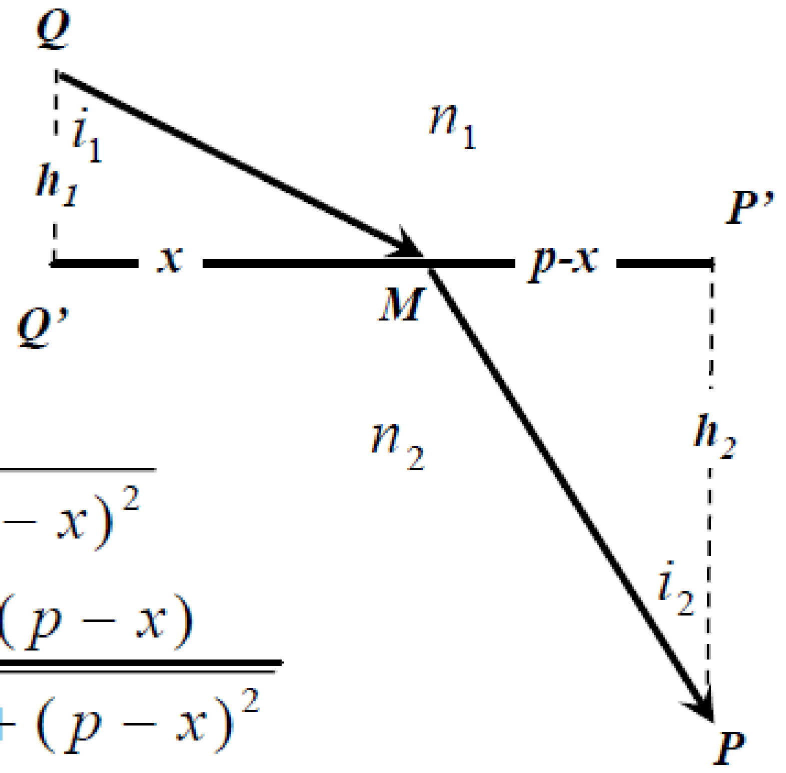




面内光程最短。

QMP光程最短。

折射



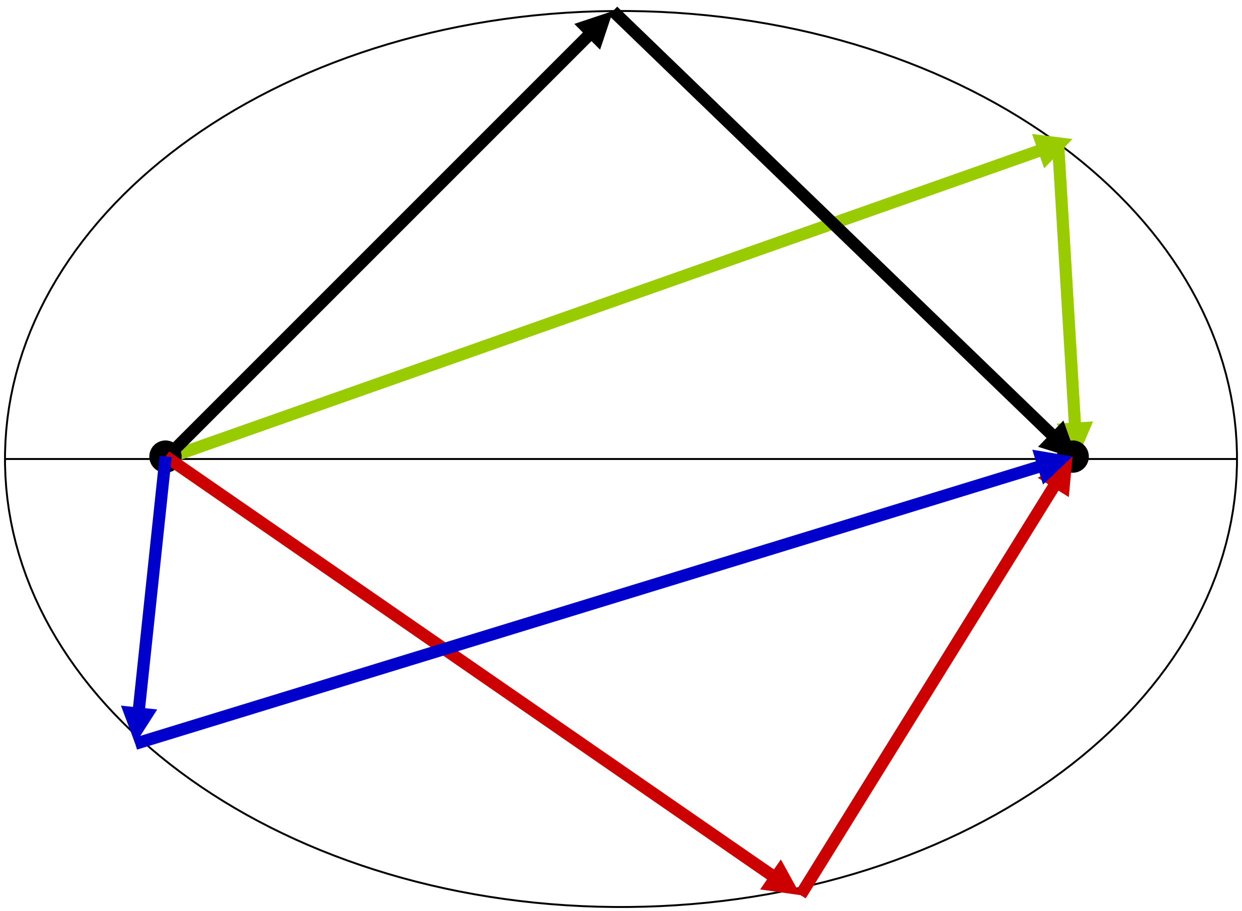
$$(QMP) = n_1 QM + n_2 MP$$

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

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

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

椭球面内两焦点间光的路径，光程为恒定值



抛物面焦点发出的光，反射后变为平行光，汇聚在无穷远处，光程为极大值。