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

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

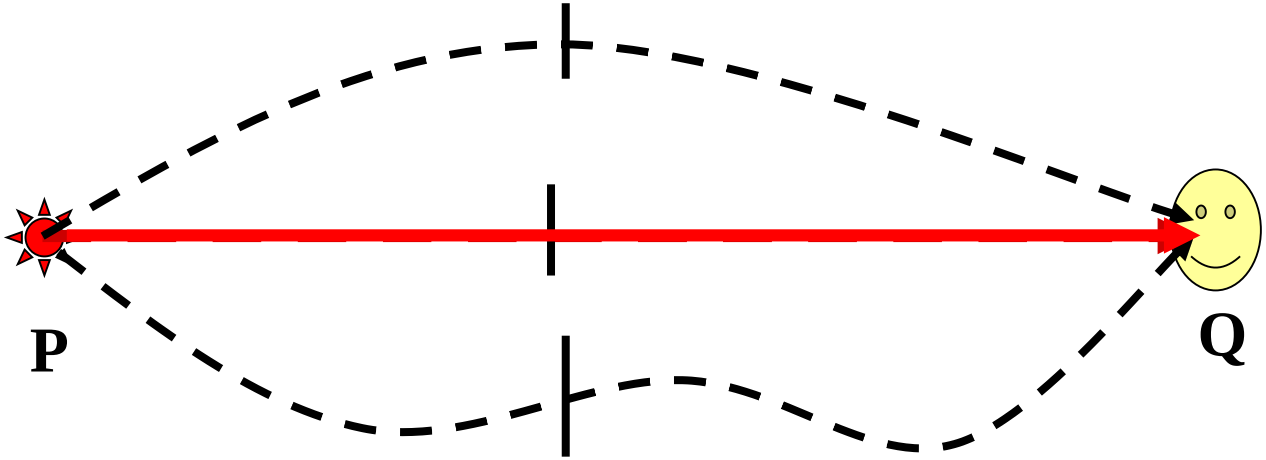
光线（Ray of light）：

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

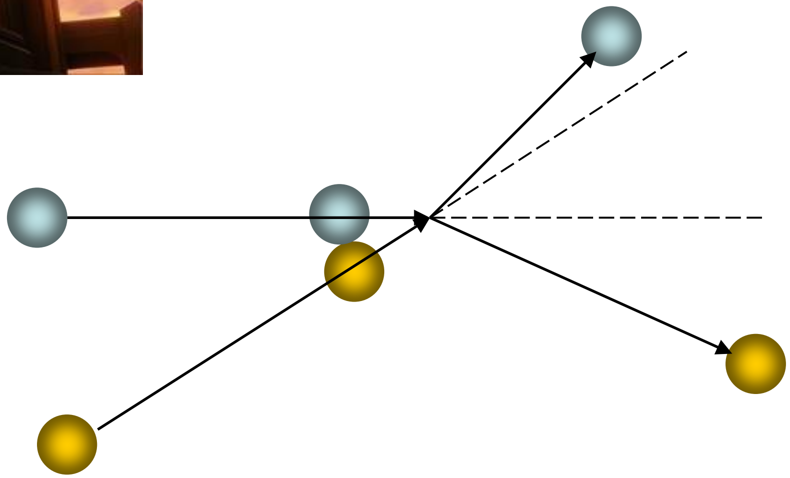
直线传播定律：



- 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**”。

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

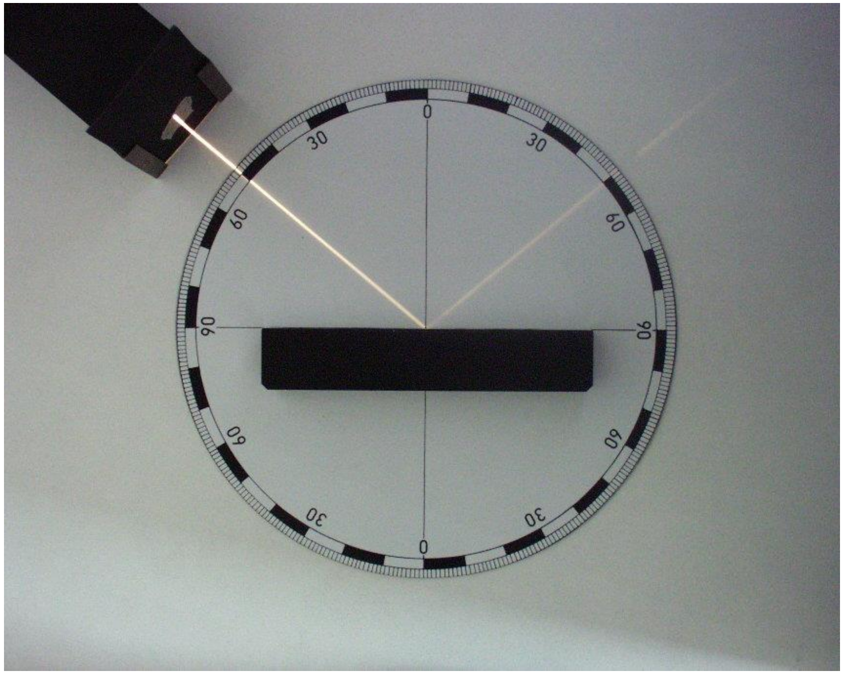
光的反射、折射定律

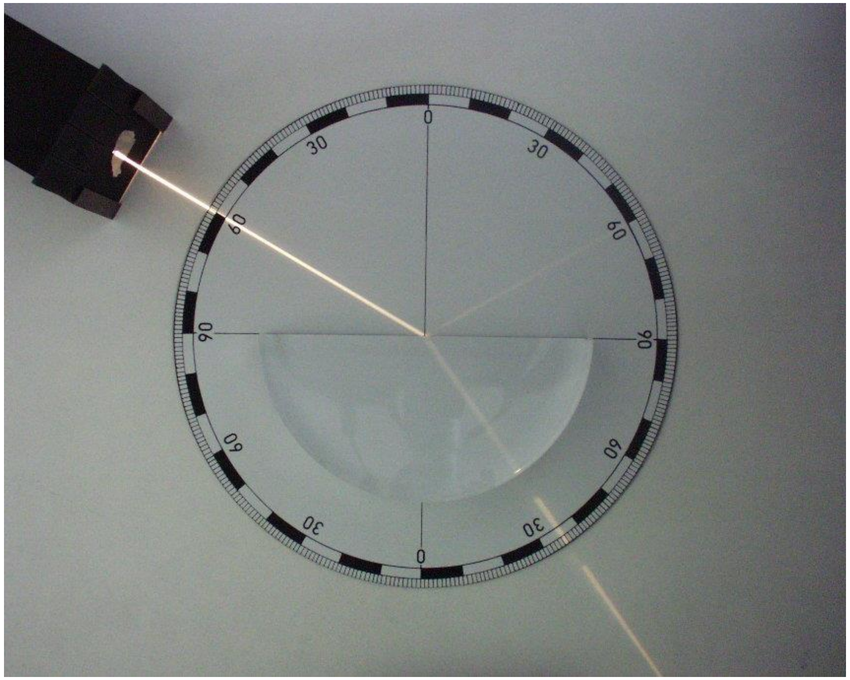
1）都在入射面(Incident plane)内

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

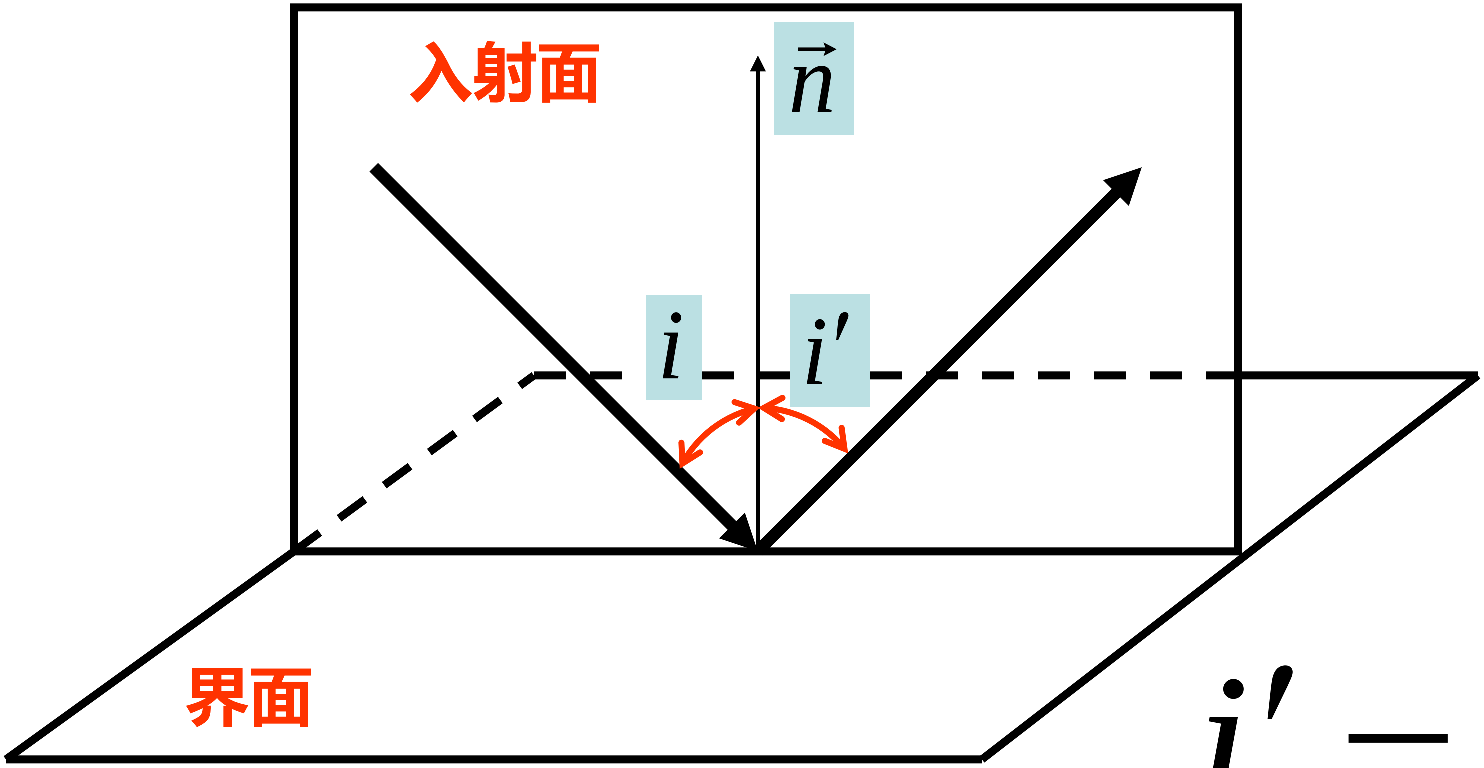
3）折射角、入射角正弦之比等于相对折射率





光的反射定律

1）反射光在入射面内
2）反射角等于入射角



$$i' = i$$

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：$n = 1$

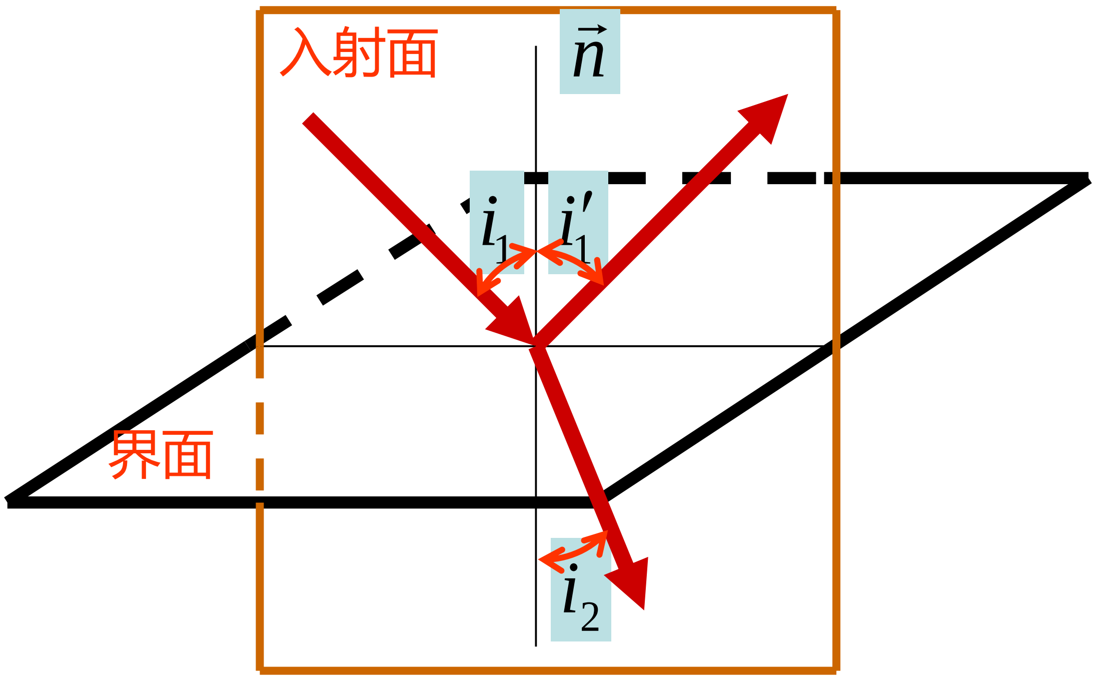
$$c/v = \sqrt{\varepsilon\mu} = n$$

ε: 介电常数
μ: 磁导率

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：$n_{12} = \dfrac{n_2}{n_1}$

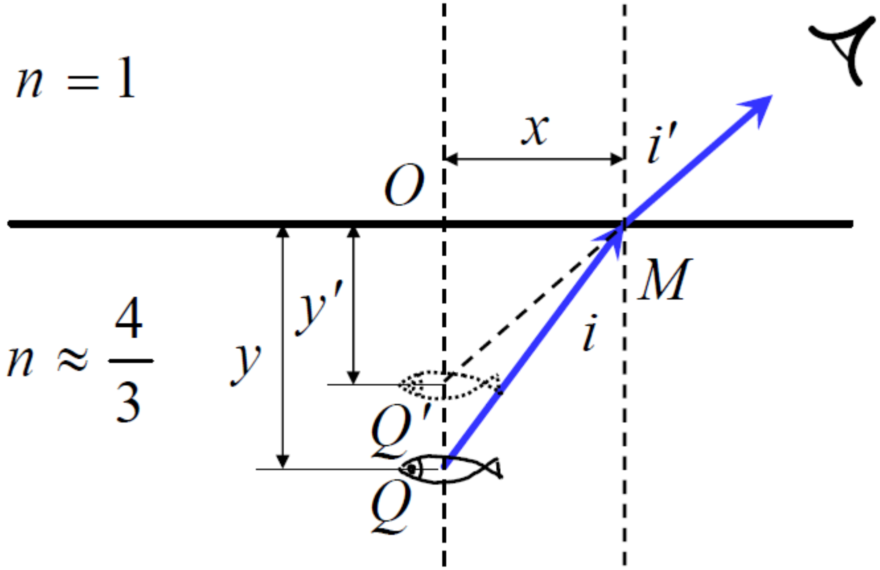


$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Snell定律

Snell-Descartes 定律

例1：水下的光点 (角度很小时)



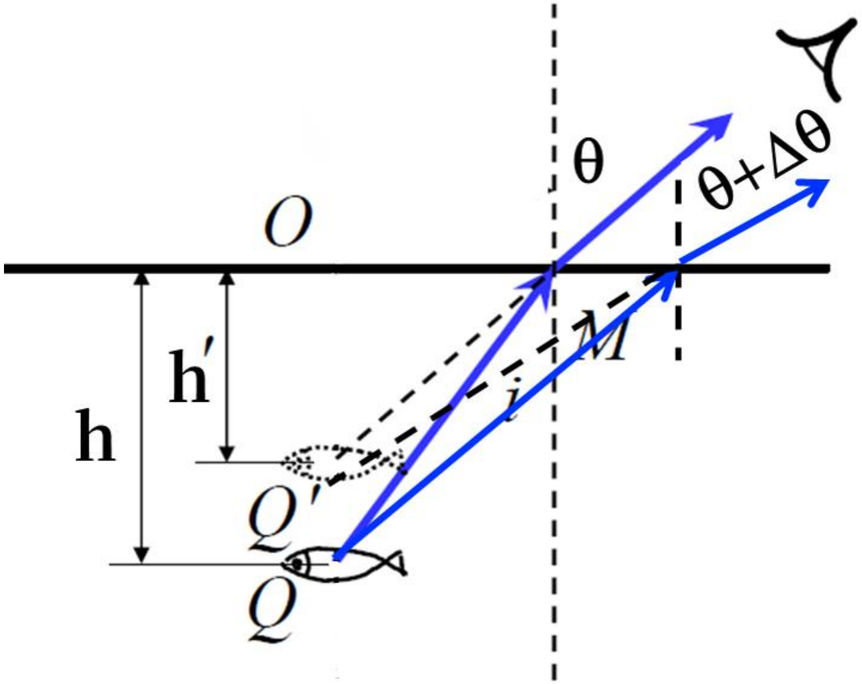
$$n \sin i = \sin i' \qquad y = \frac{x}{\tan i}$$

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

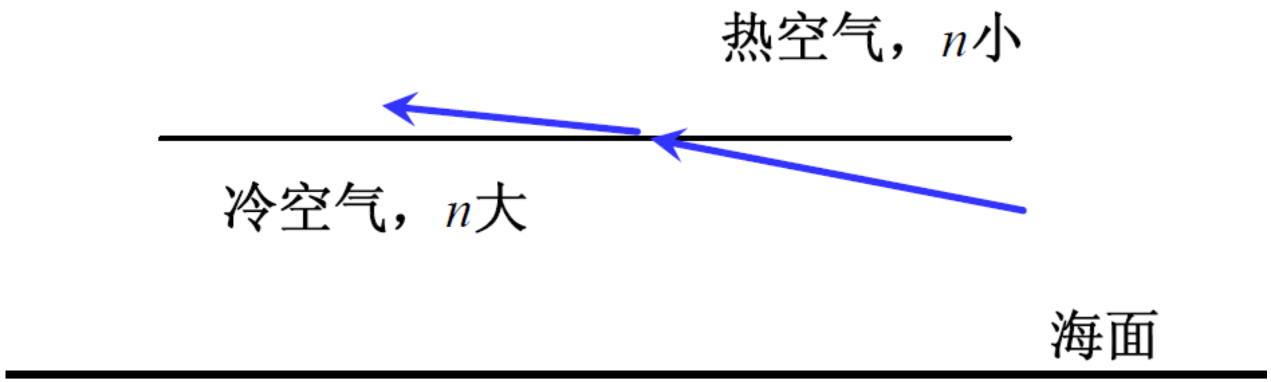
若 i 较小： $\frac{y'}{y} \approx \frac{1}{n} \approx \frac{3}{4}$

思考题：水下的光点 (角度很大时)

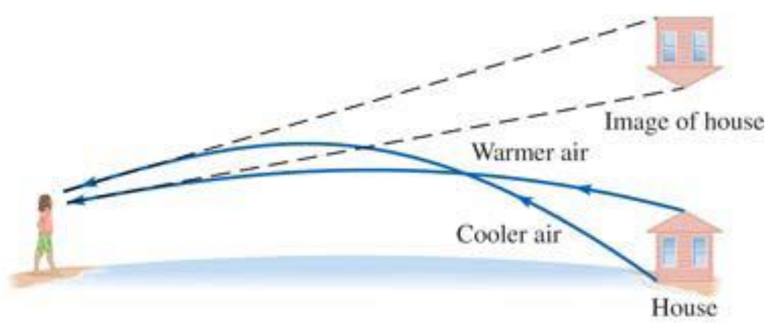
一个人在与水面法线夹角为 θ 的位置观察到一条鱼，请给出鱼的实际深度 h 与人观测到它的深度 h′ 的关系（水折射率 n）



例2：海市蜃楼

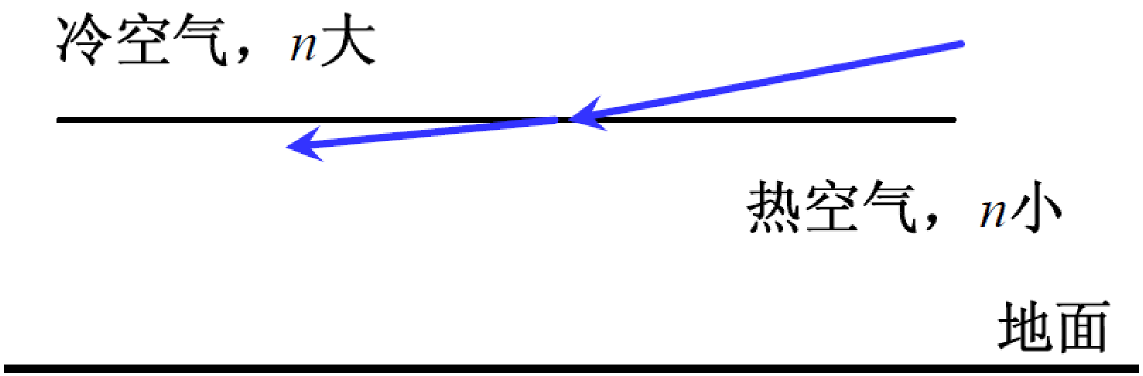


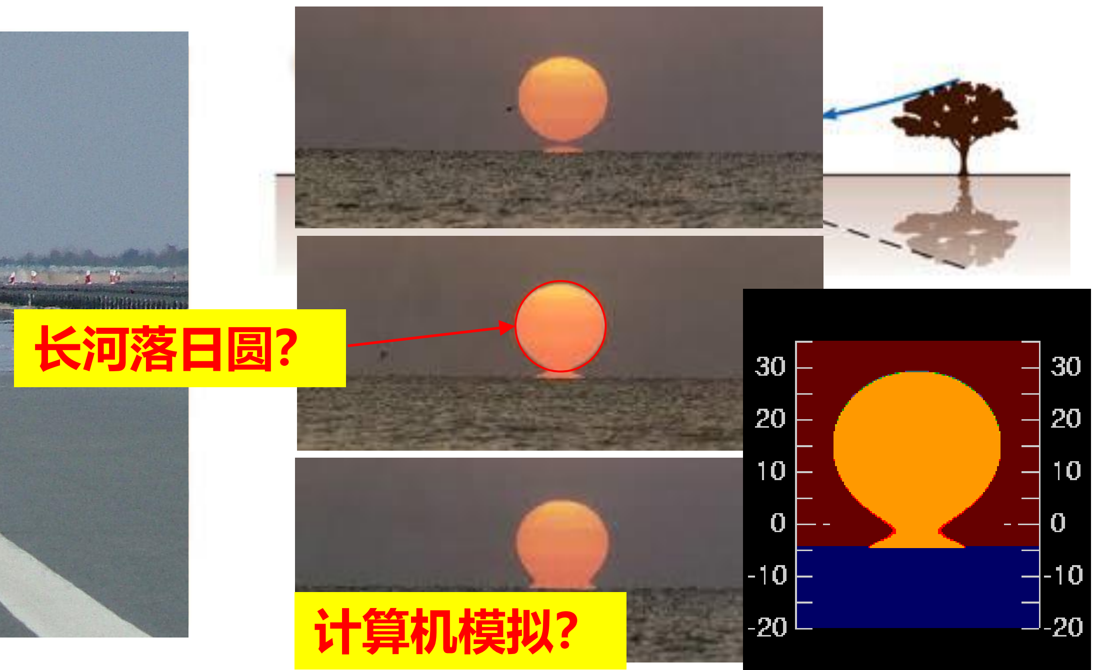
(a)



(b)

例3：沙漠神泉



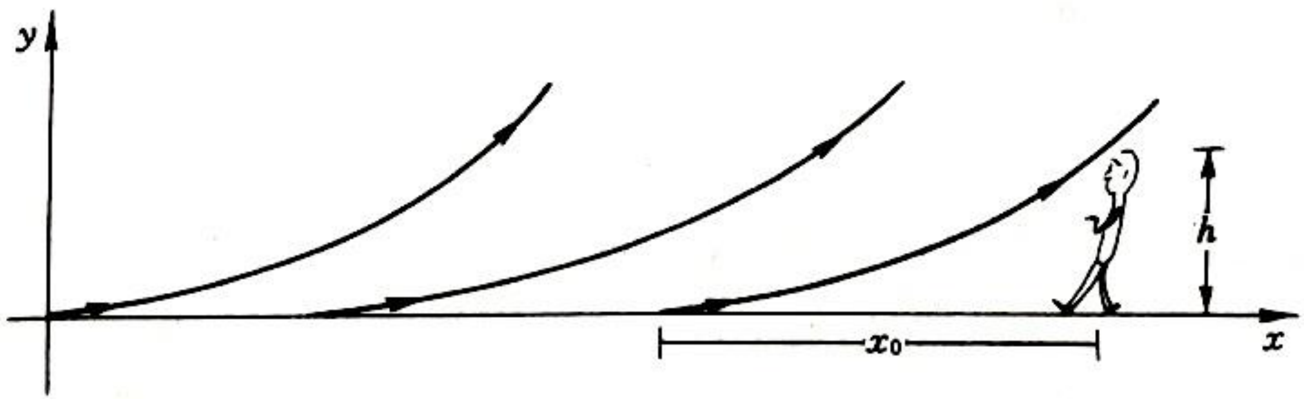


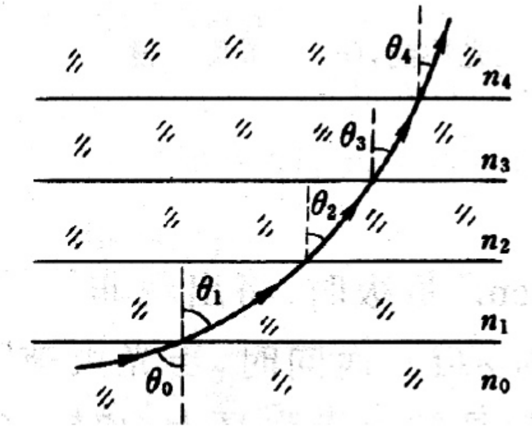
例4：机场跑道能看多远？

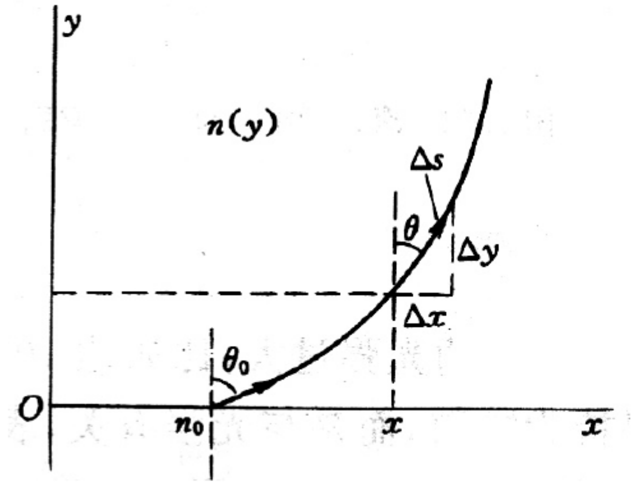
夏日机场跑道上方温度梯度较大，导致空气折射率发生变化：

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

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：

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

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

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

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

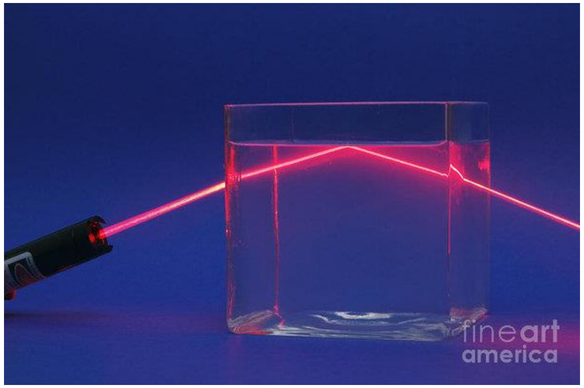
$$x_0 = \sqrt{\frac{2h}{\beta}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.75m}{1.5 \times 10^{-6} / m}} \approx 1.5 \times 10^3 m$$

1.75m高的人最远只能看到1.5km。

1.2 全反射（total reflection）

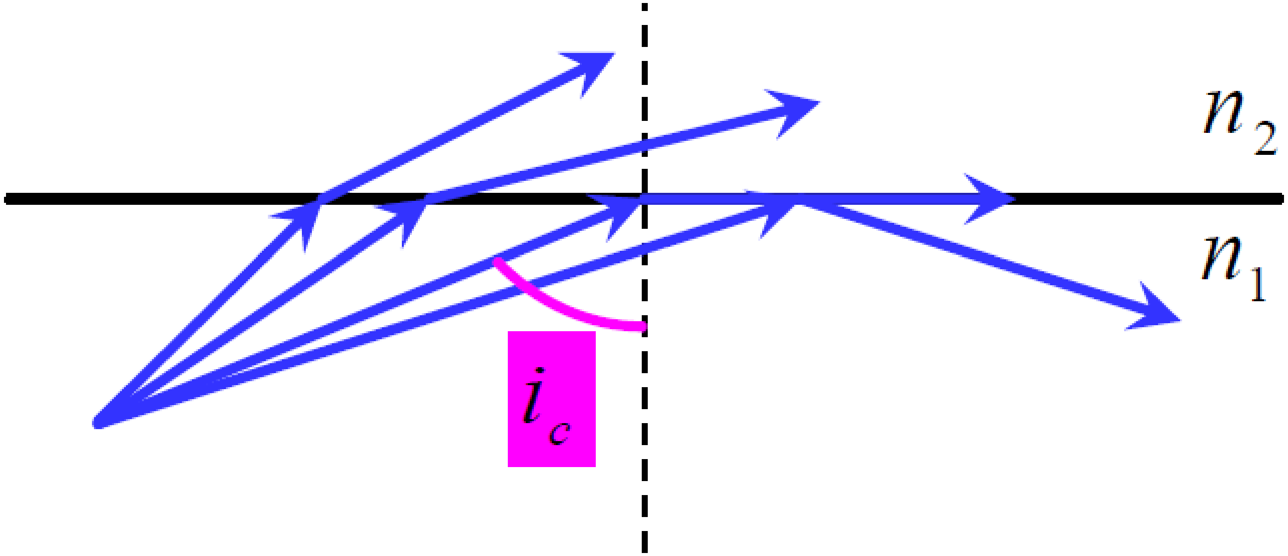
光密介质向光疏介质的折射：

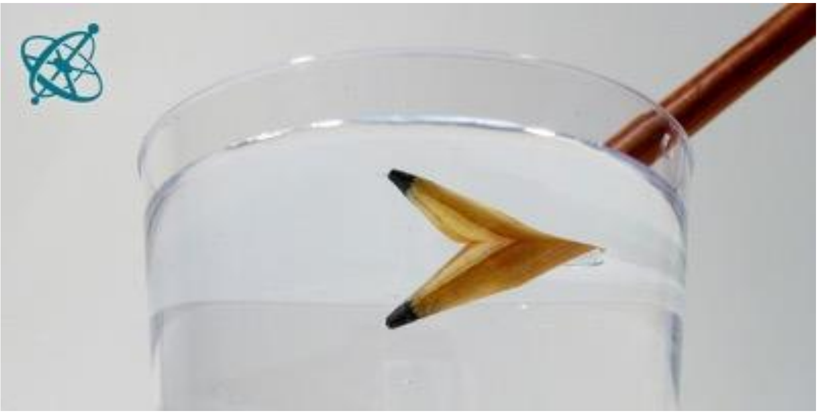
$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$



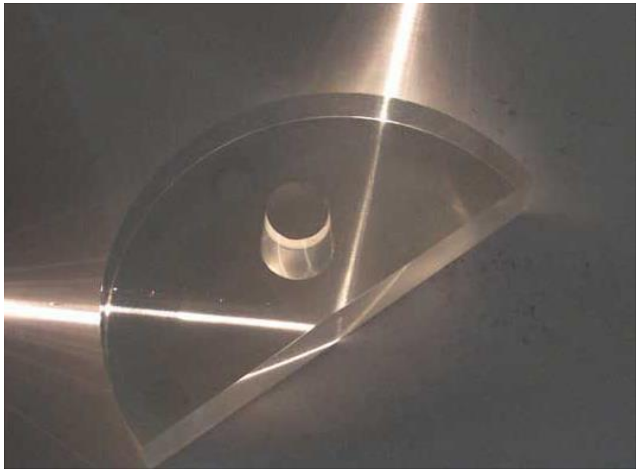
临界角（critical angle）：

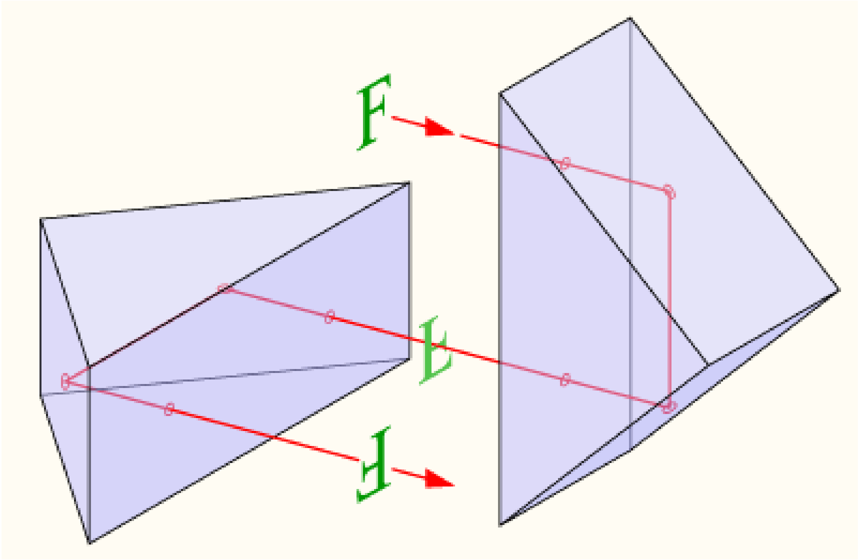
$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} = \arcsin \frac{n_{\text{small}}}{n_{\text{large}}}$$

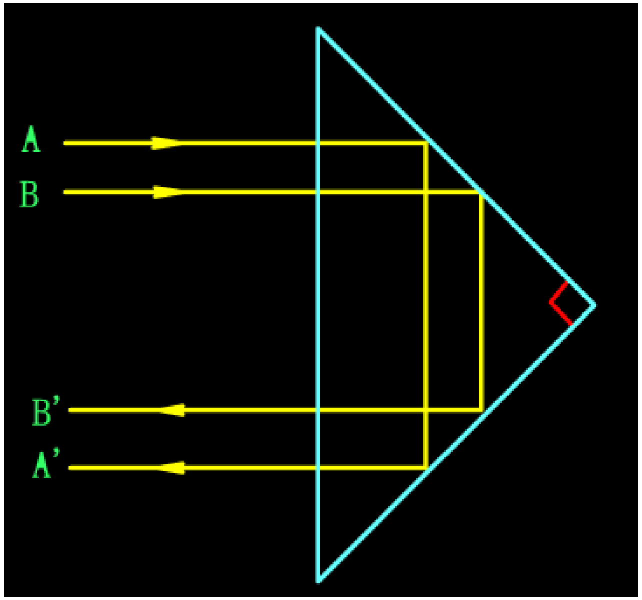


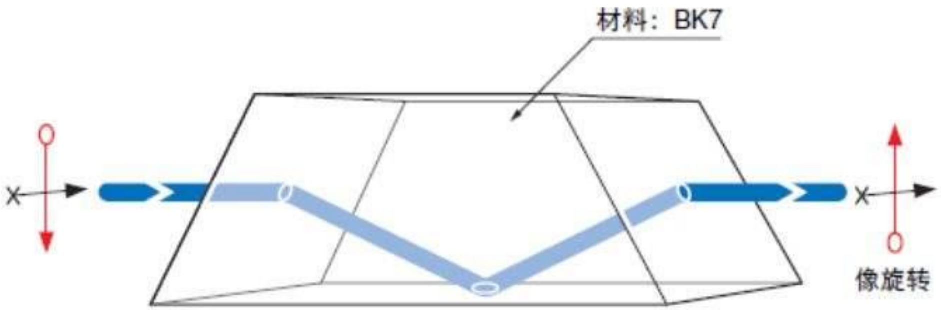


全反射棱镜

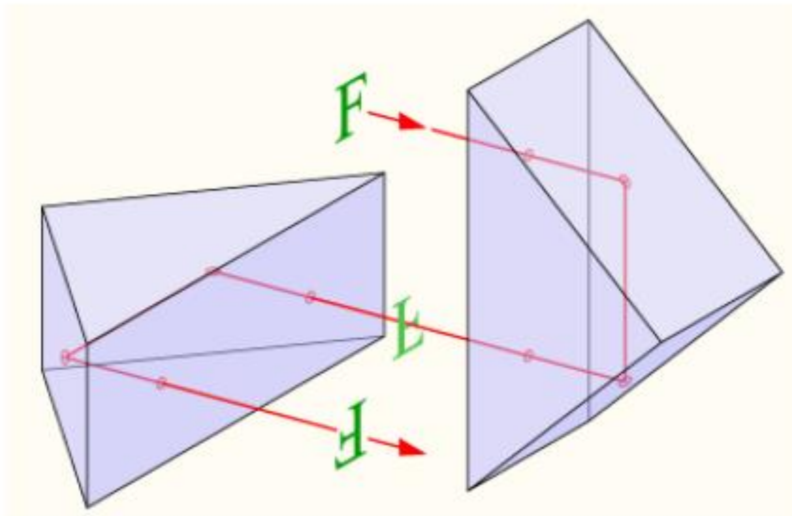




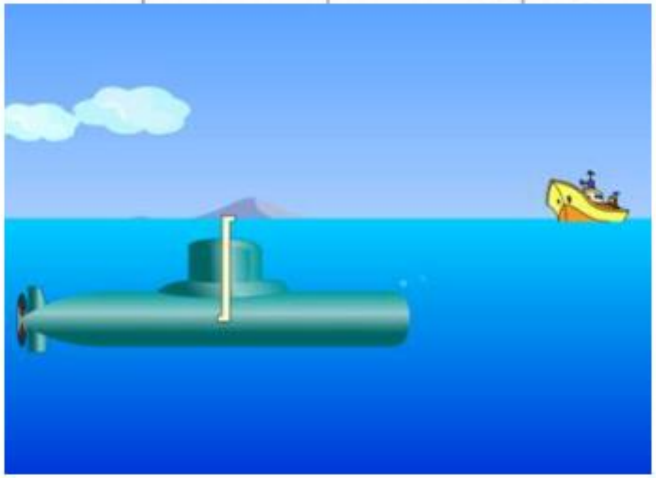




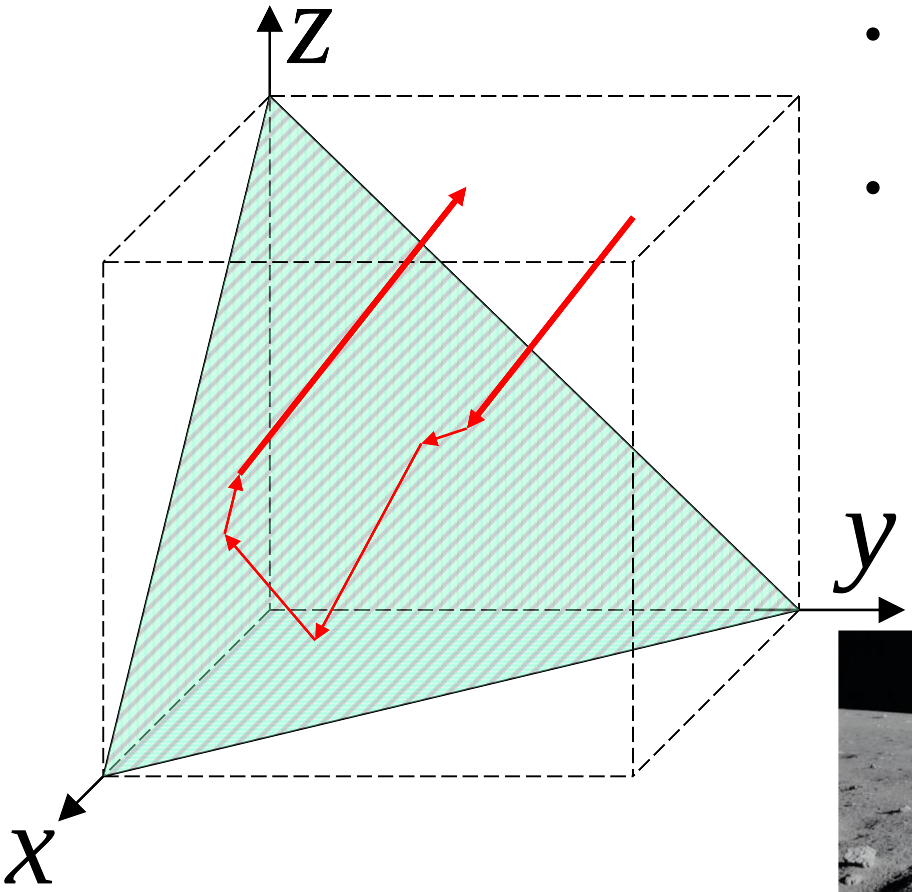
例：全反射棱镜


F

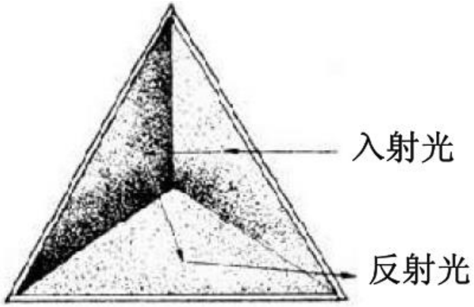

中心调焦旋钮
瞳距刻度盘
目镜铰链
上铰链
目镜
右目镜补偿刻度
接目眼罩
棱镜固定钢片
上端盖
正像棱镜
镜体
www.fengshop.com
下端盖
下铰链
物镜筒
棱镜垫片
轴下端盖

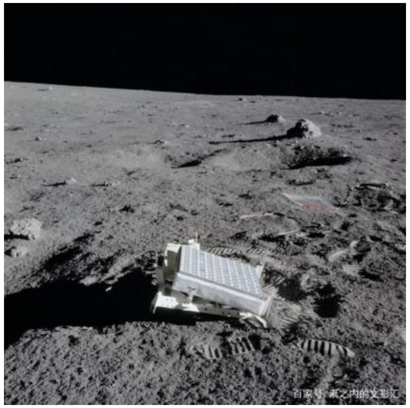


例：全反射棱镜—棱锥反射体

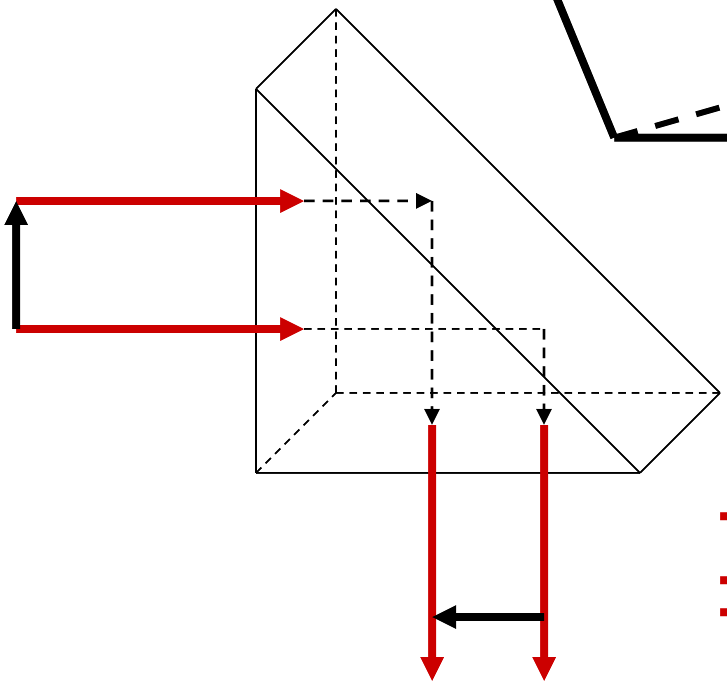


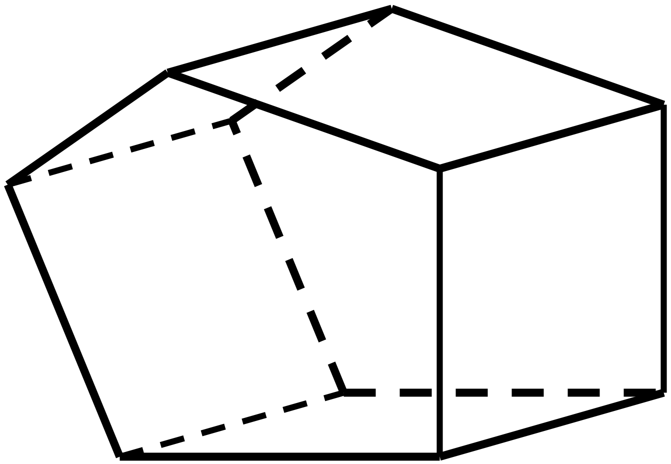
- 从斜面射入、再经三个直角面全反射、最后从斜面出射的光，沿原路返回
- 棱锥阵列反射器：阿波罗棱镜阵列、自行车尾灯、路牌、……



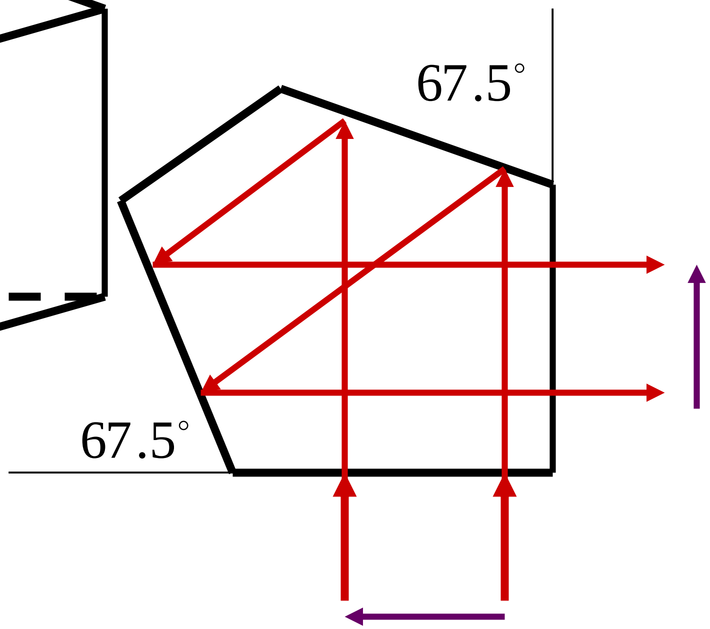


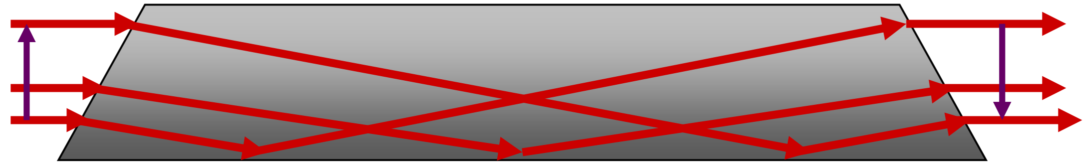
例：全反射棱镜





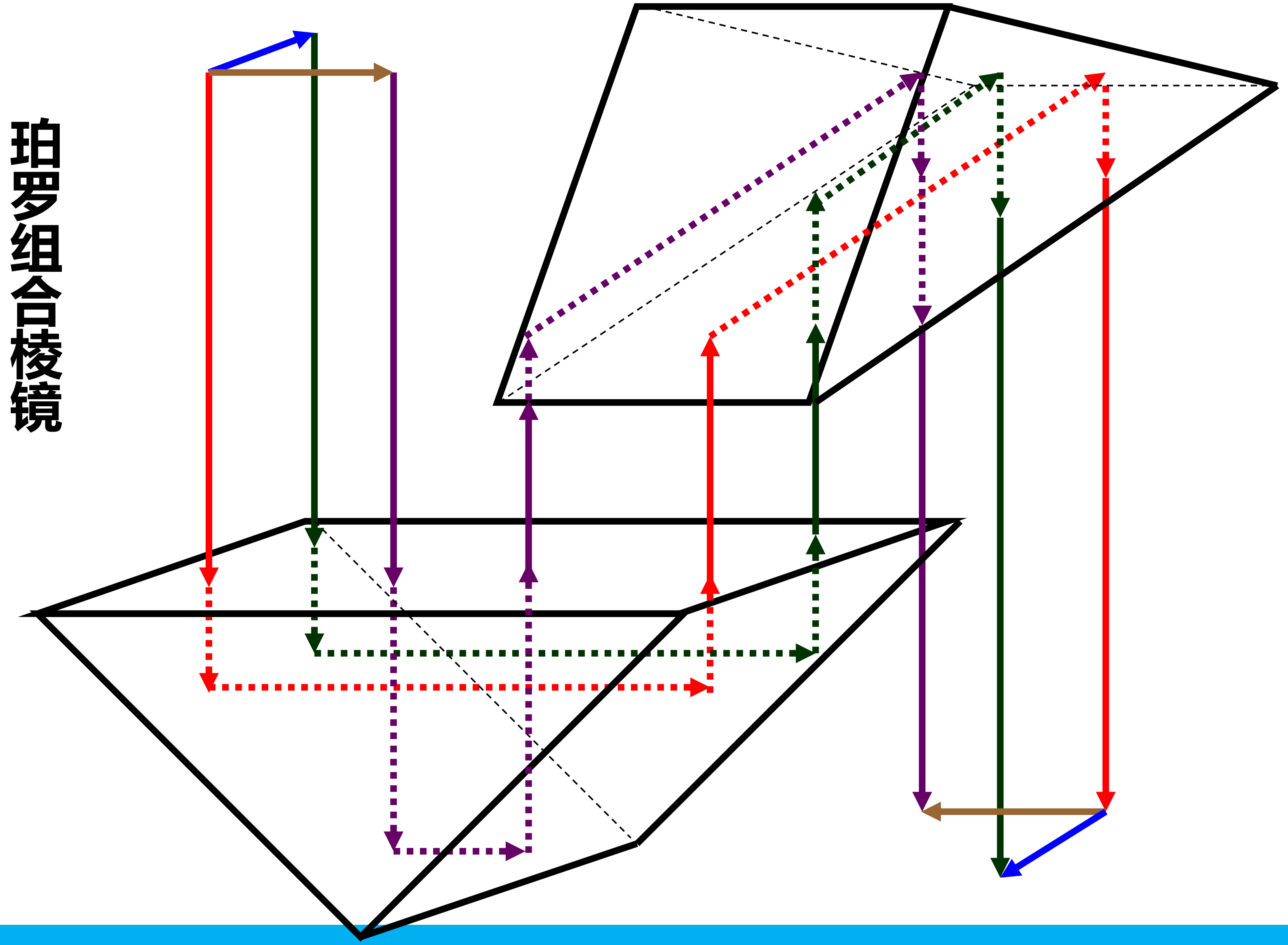
屋脊形五棱镜





倒转棱镜(阿米西棱镜)

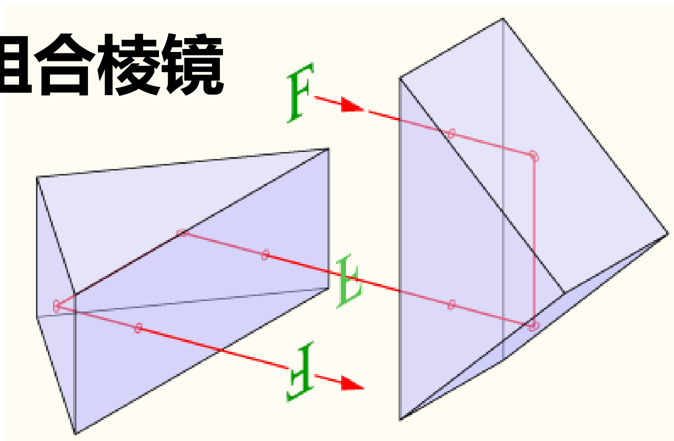
例：全反射棱镜



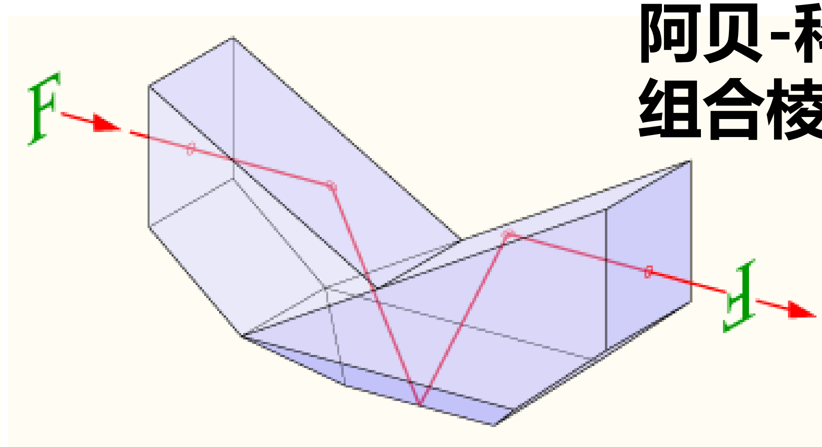
1.2 全反射

例：其他类型的组合全反射棱镜

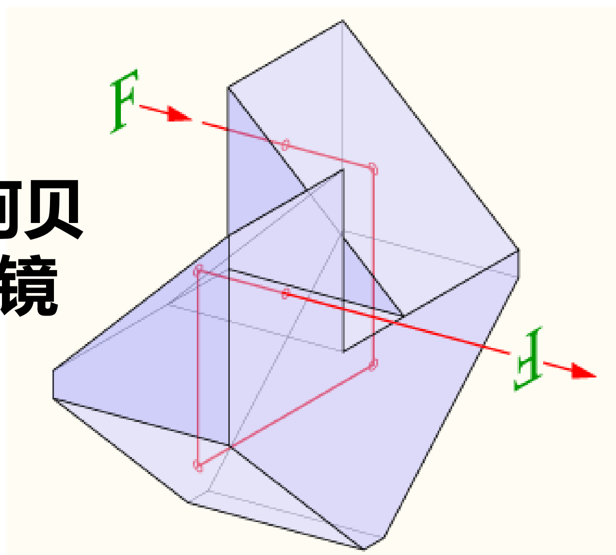
珀罗组合棱镜



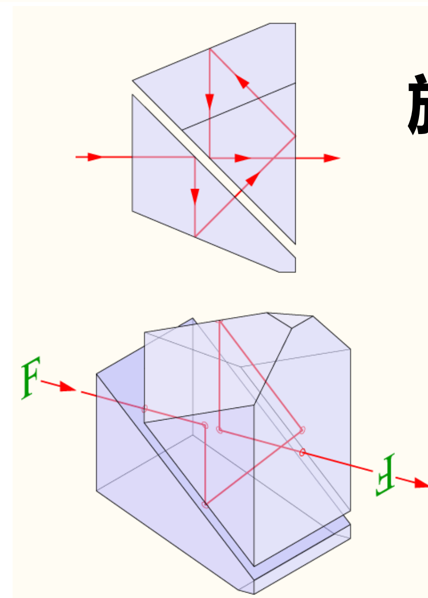
阿贝-科尼
组合棱镜



珀罗-阿贝
组合棱镜

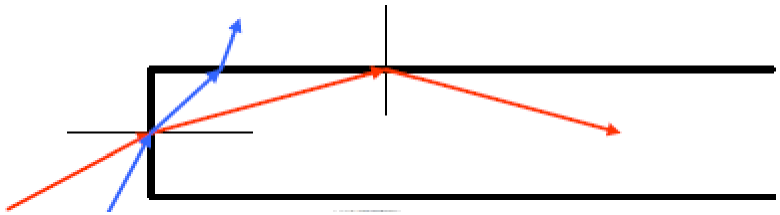


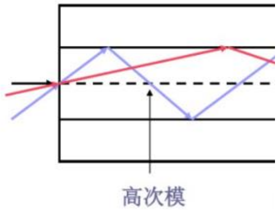
施密特-朴汉
组合棱镜



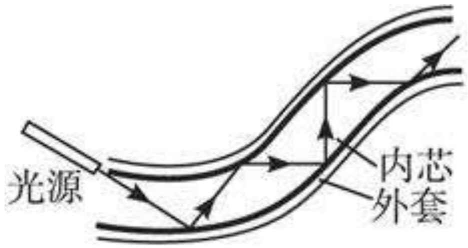
思考：为什么要求高的仪器多用棱镜而不是平面镜来改变光路?

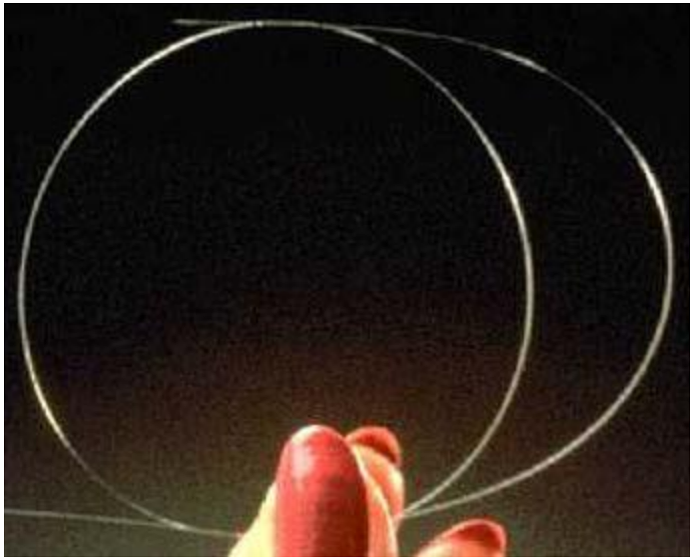
光纤(optical fiber)

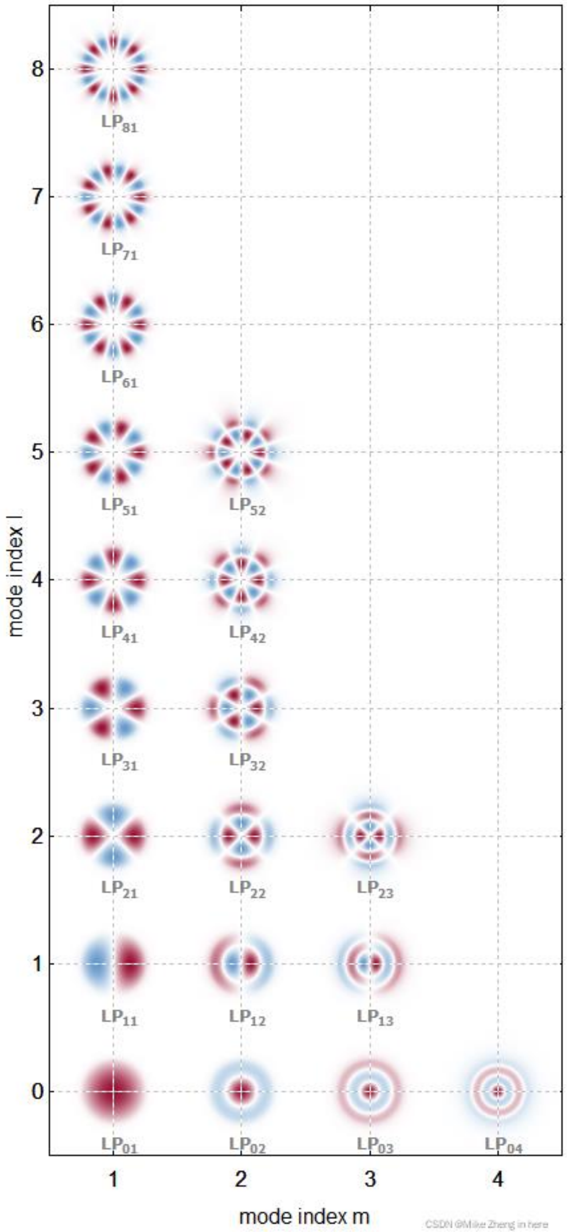




在光纤的受光角内
能在光纤纤芯-包层
就可以称为一个光的

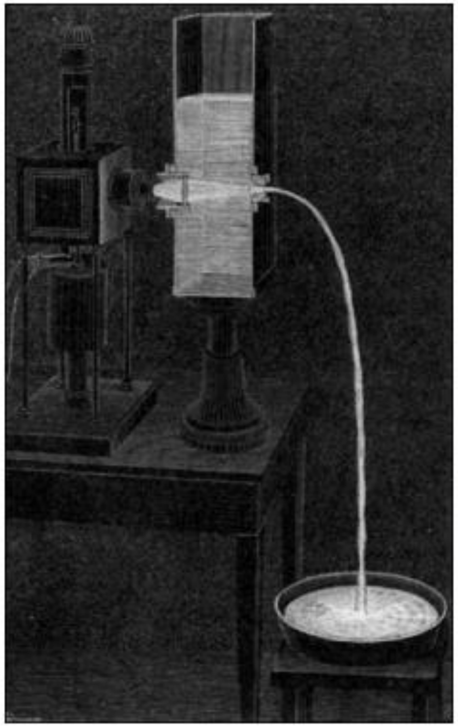


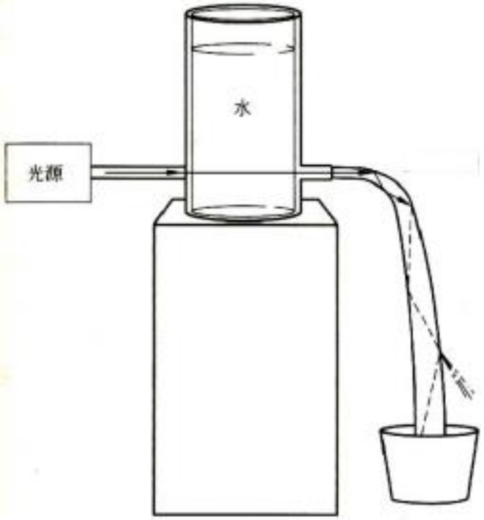




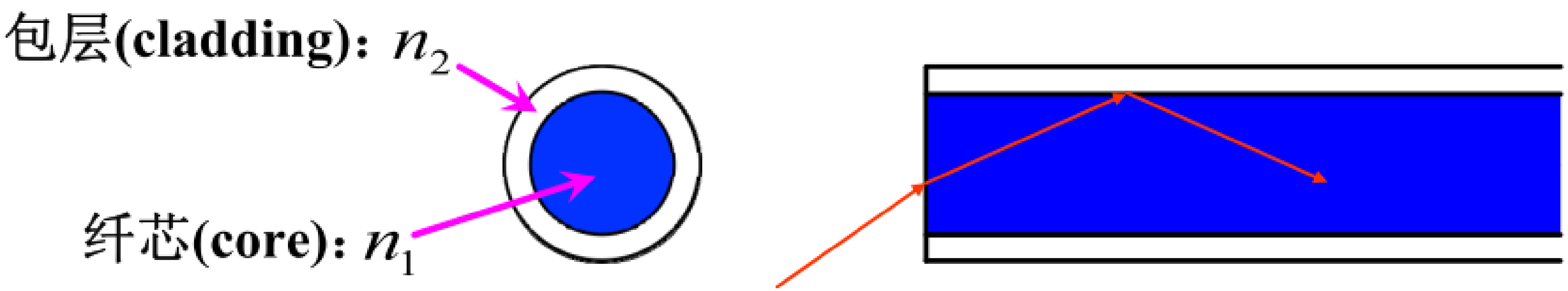
光纤发展历史

- ~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。

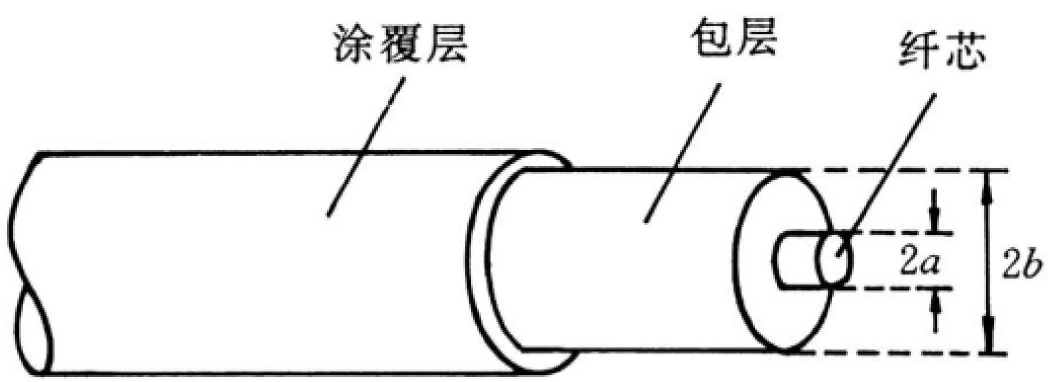




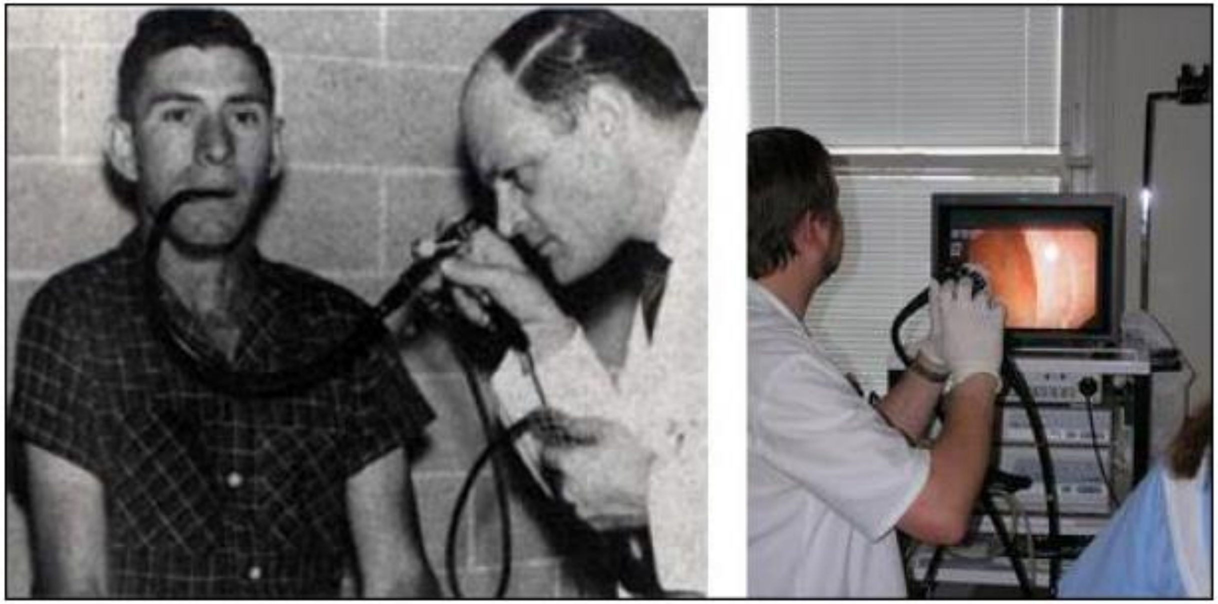
✧ 1953，Vanger把一种折射率为1.47的塑料涂在玻璃纤维上，形成比玻璃纤维芯折射率低的套层，得到了光学绝缘的单根纤维。



(step index fiber, SIF)



- 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)。

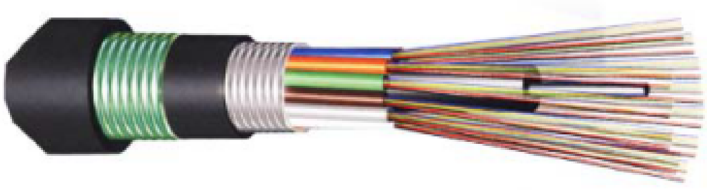
1966，英籍华人高锟(C Kao)指出：如果能够减少玻璃中的杂质含量，就可以制造出损耗低于20dB/km的光纤。

2009 Nobel Laureate, Charles Kao, Father of Fiber Optics

$$dB = -10\lg\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

- 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。

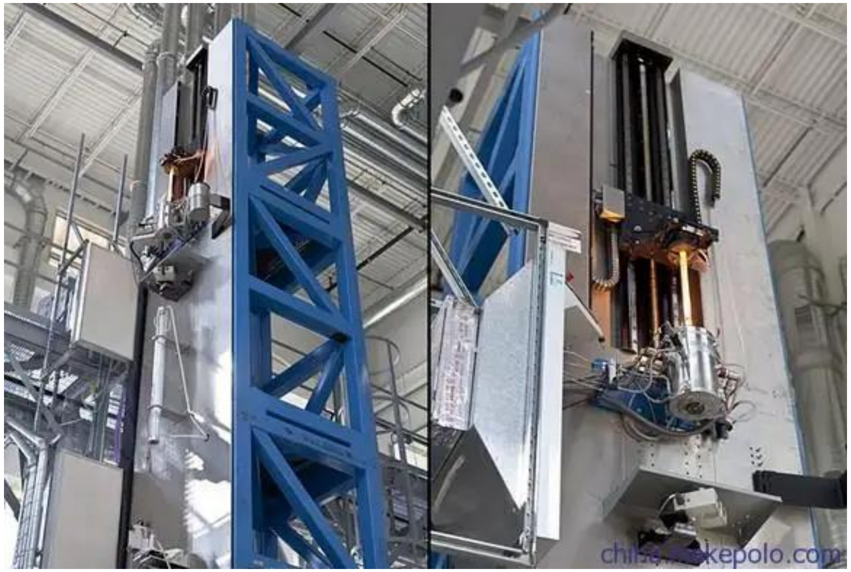
- 1990，单模光纤通信系统进入商用（565Mb/s），并陆续制定了数字同步体系（SDH）的技术标准。
- 1995，2.5Gb/s的SDH产品进入商用。
- 1996，10Gb/s的SDH产品进入商用。
- 1997，采用零色散移位光纤和波分复用技术（WDM）的20Gb/s和40Gb/s SDH产品试验取得重大突破。此外，在光弧子通信、超长波长通信和相干光通信方面也正在取得巨大进展。

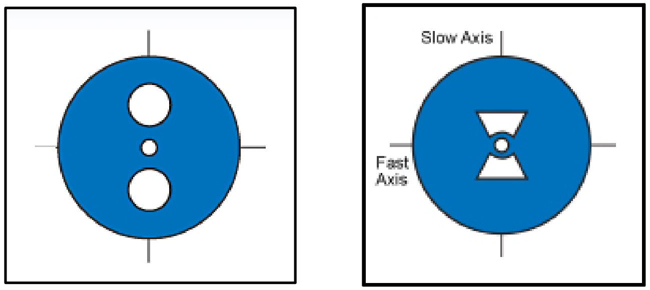


光缆

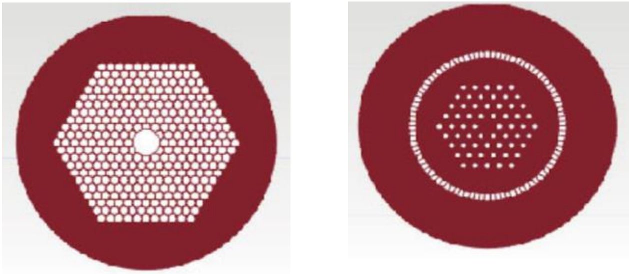
光纤及接头

Optics

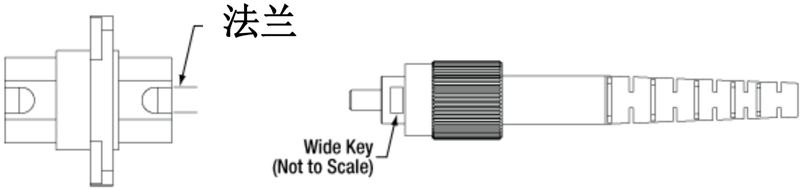




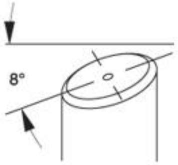
保偏光纤

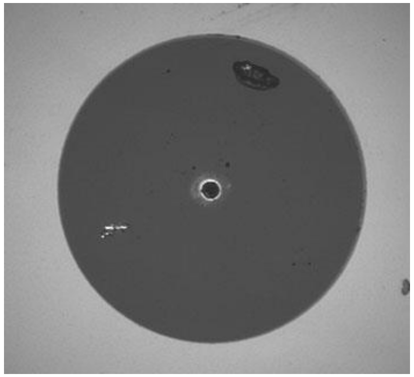


光子晶体光纤

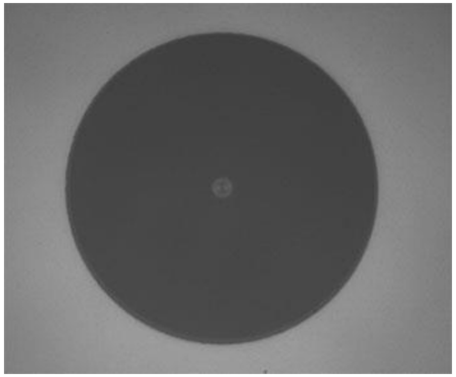


FC/PC
FC/APC



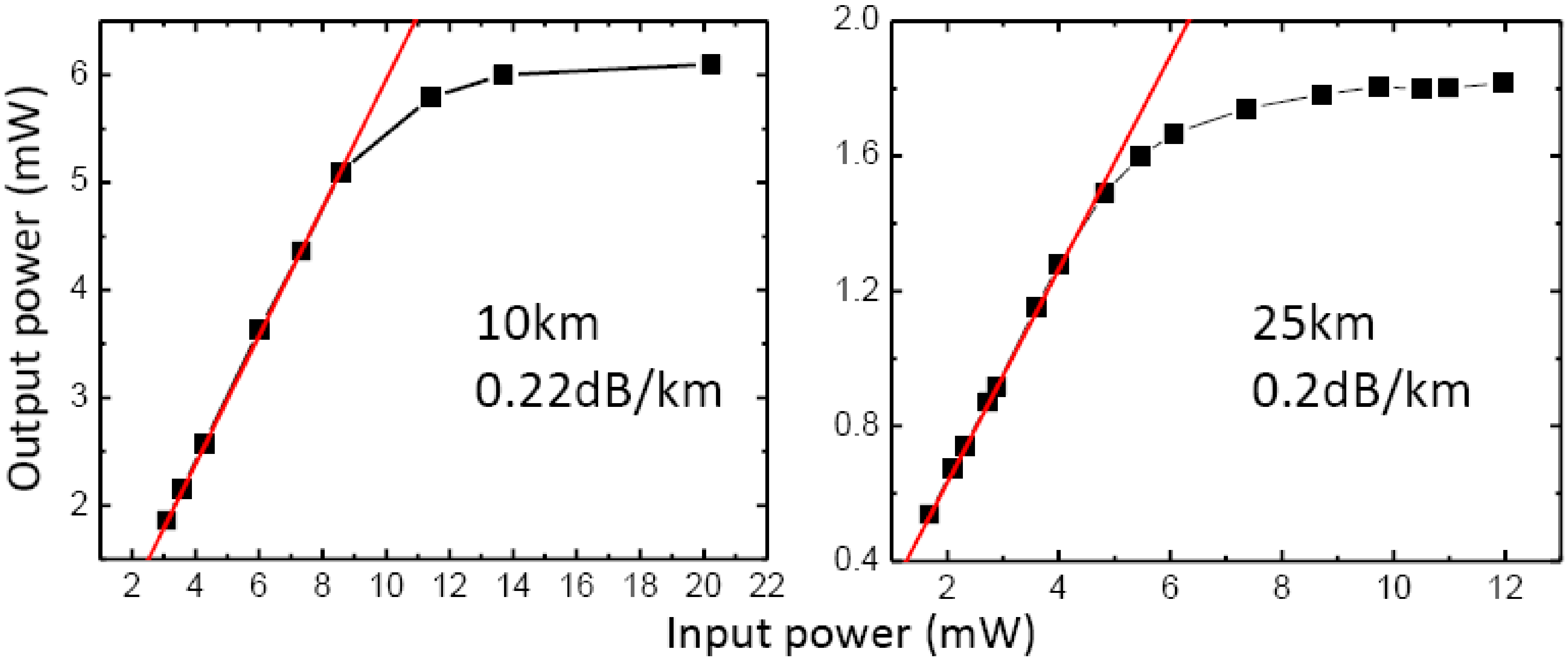


损伤的光纤端面

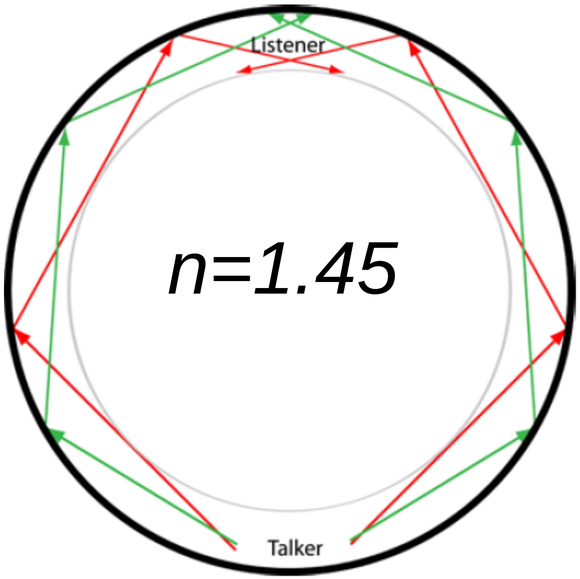


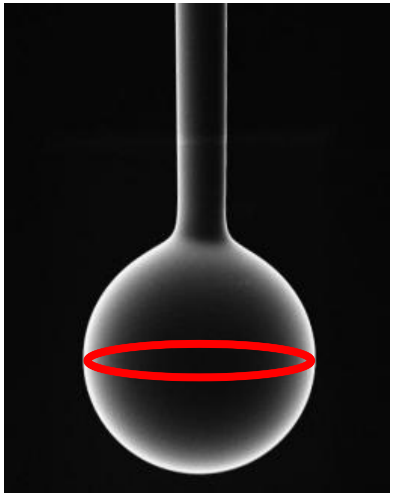
未损伤的光纤端面

光纤内的损耗

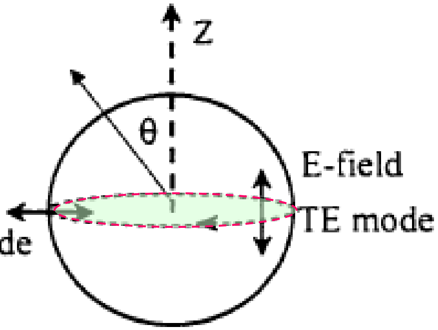

Output power (mW)
6
5
4
3
2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22
10km
0.22dB/km
2.0
1.6
1.2
0.8
0.4
2 4 6 8 10 12
25km
0.2dB/km
Input power (mW)

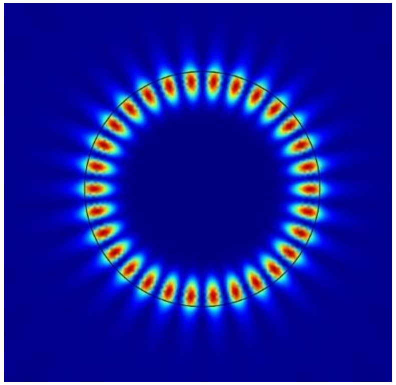
Our research





直径~30μm

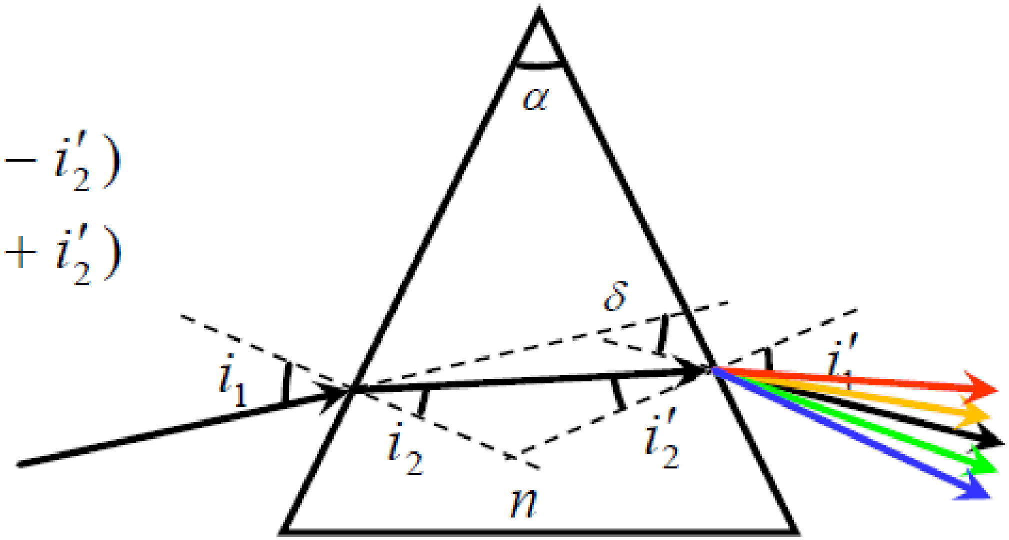




l=18

1.3 棱镜(prism)与色散(dispersion)

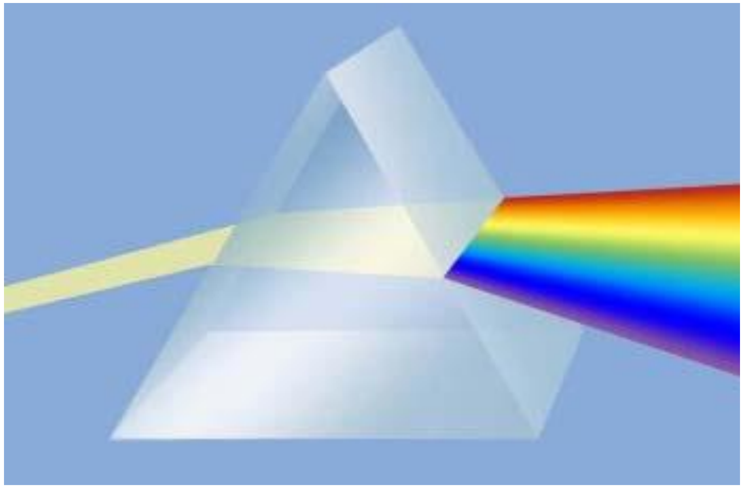
$$\delta = (i_1 - i_2) + (i_1' - i_2')$$
$$= (i_1 + i_1') - (i_2 + i_2')$$
$$\alpha = i_2 + i_2'$$
$$\delta = (i_1 + i_1') - \alpha$$

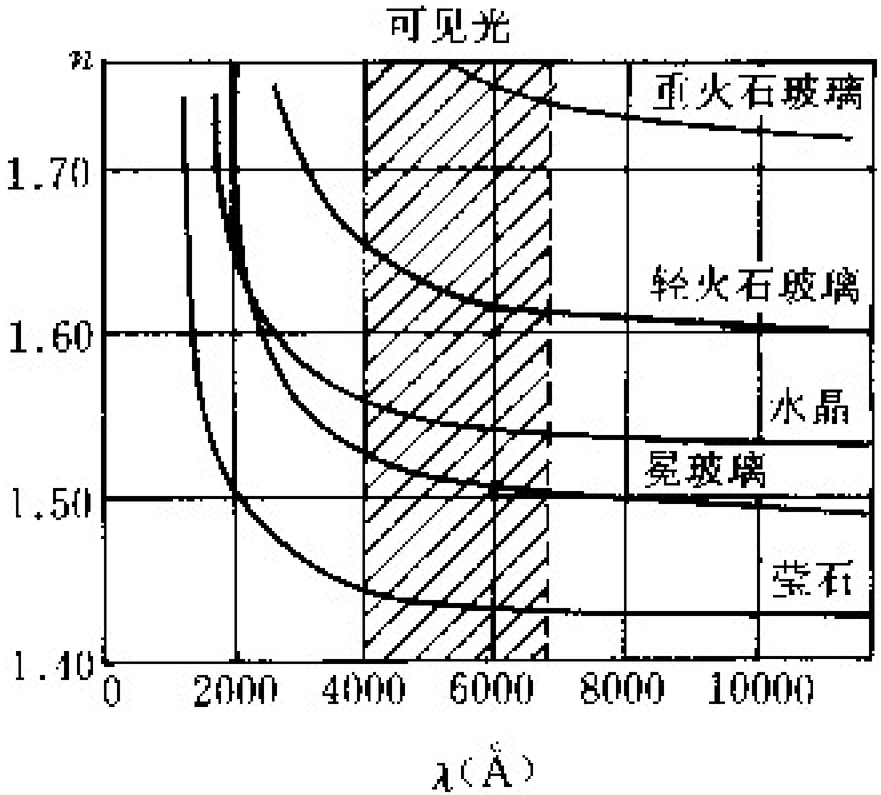


最小偏向角：

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

此时：
$$i_1 = i_1'$$
$$i_2 = i_2'$$





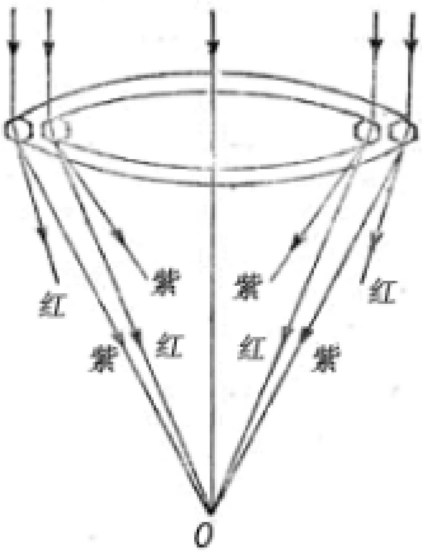
折射率n与光的波长有关，这一现象叫做色散。

虹(Rainbow)和霓(Secondary Rainbow)

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



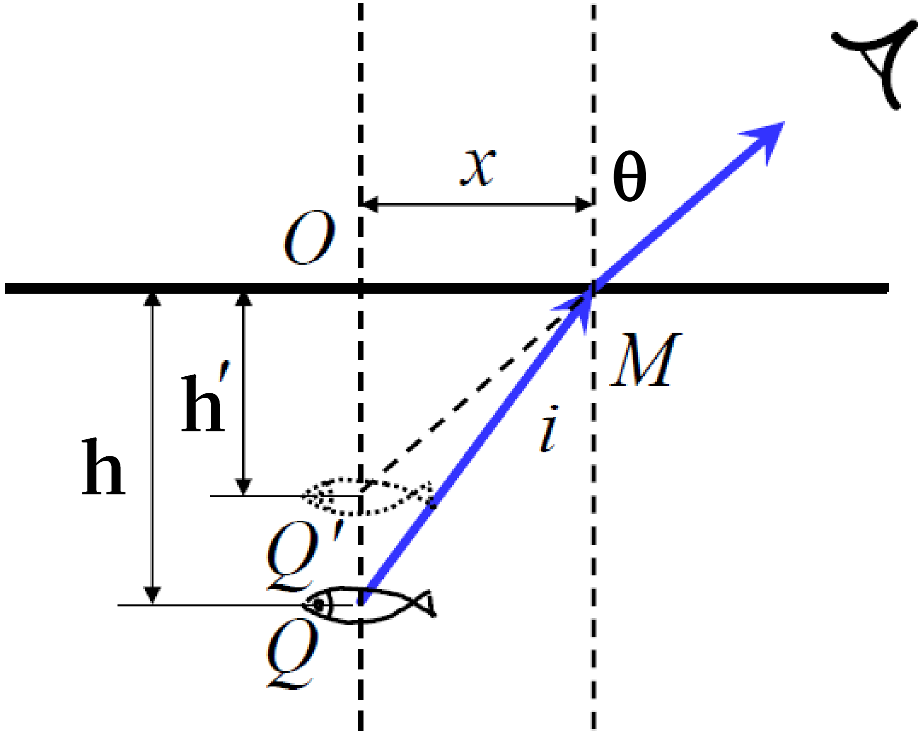
晕(halo)

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。

一个人在与水面法线夹角为 θ 的位置观察到一条鱼，请给出鱼的实际深度 h 与人观测到它的深度 h′ 的关系（水折射率 n）



作业

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

重排版 P16-17：3, 4, 6, 7, 9, 11, 12

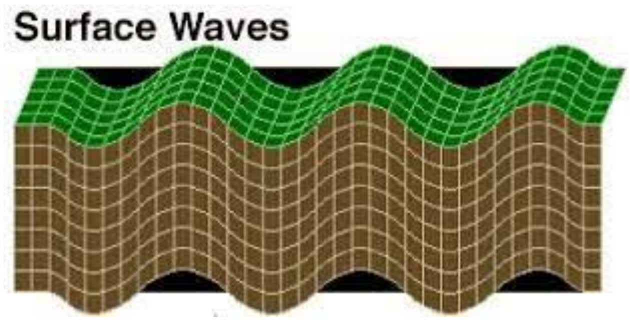
1-02 惠更斯原理

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

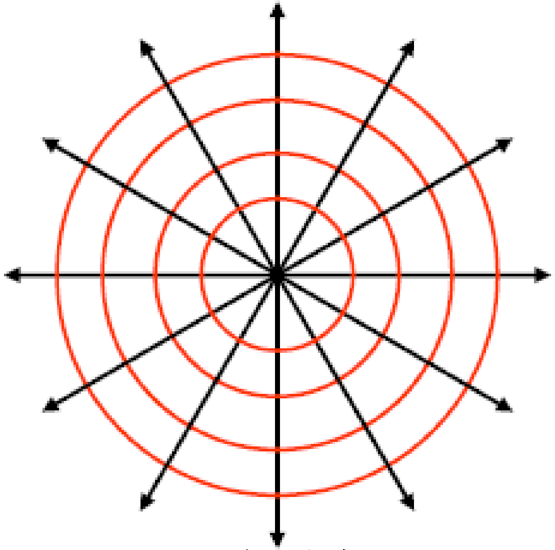
2.1 波的几何描述

波面(**Wave surface**)：同一振源的波场中，具有相同位相的点组成的曲面。（等相位面）

波线(**Wave ray**)：与波面垂直、且指向波的传播方向的线称为波线（或能量传播的方向）。

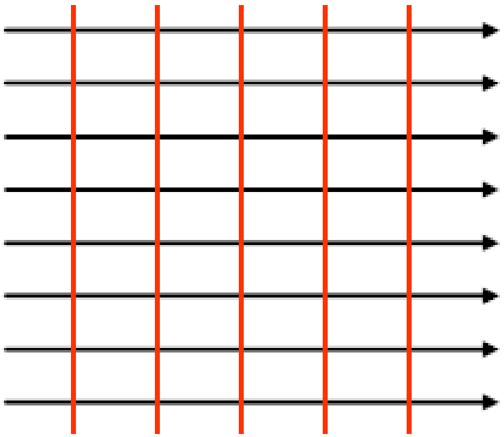


波线



球面波

波面

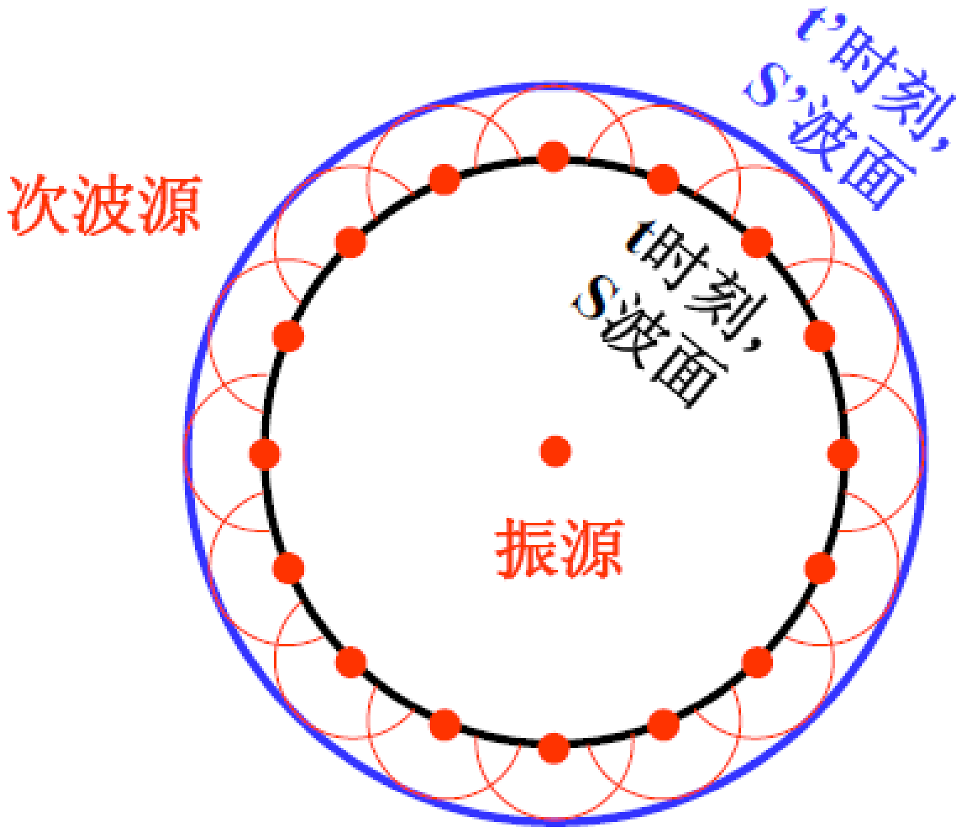


平面波

2.2 惠更斯（C. Huggens，1678）原理

-是关于波面传播的理论

次波源波面的包络就是下一时刻的波面

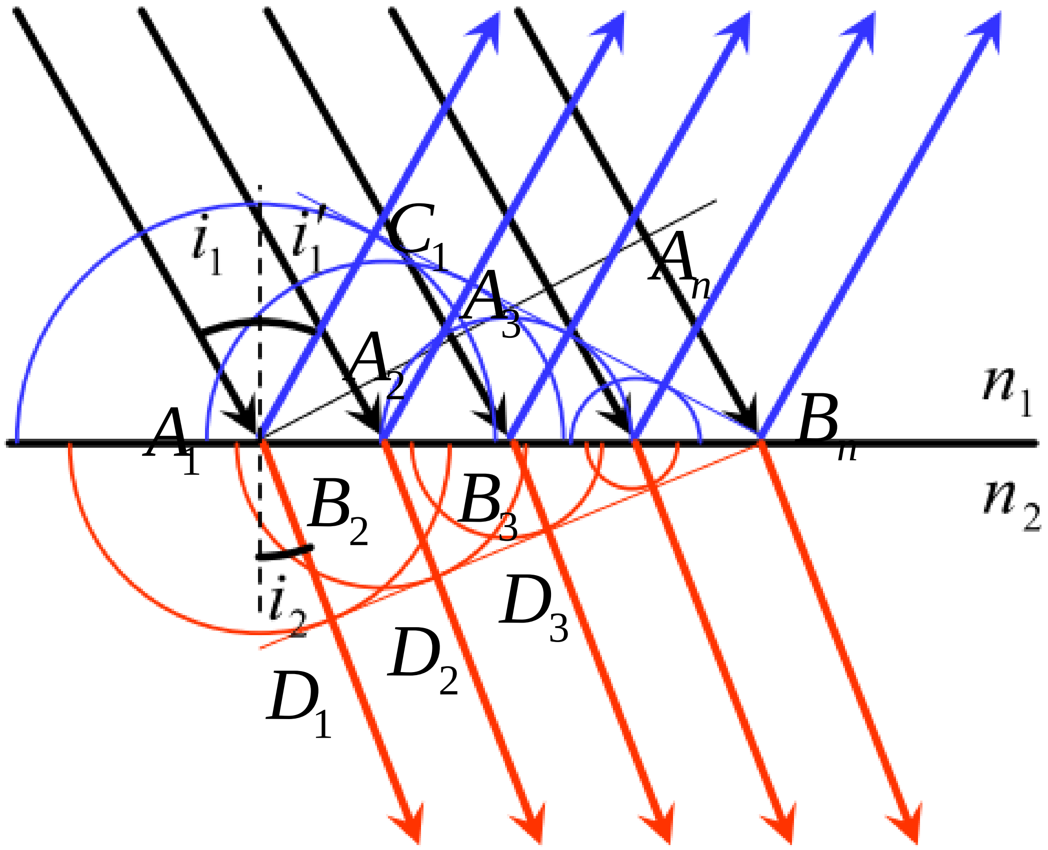


2.3 对反射定律和折射定律的解释

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

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

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



折射率的物理意义：光在两种媒介中的速度之比
在光密媒介中光的速度较小

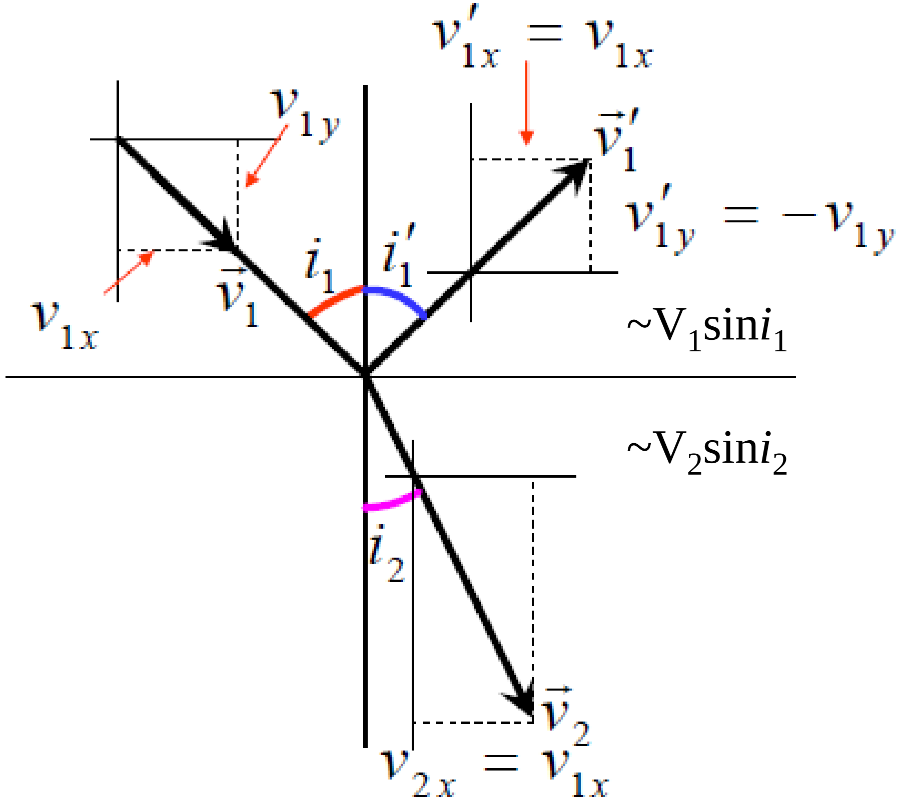
微粒说对折射的解释

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：

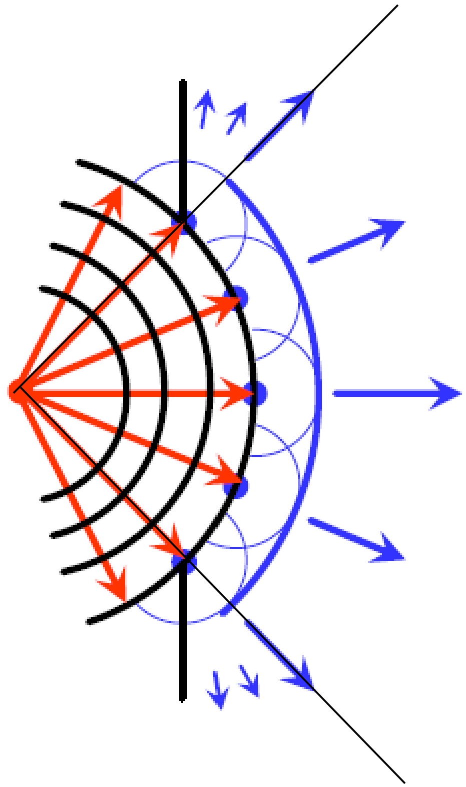
切向速度相等

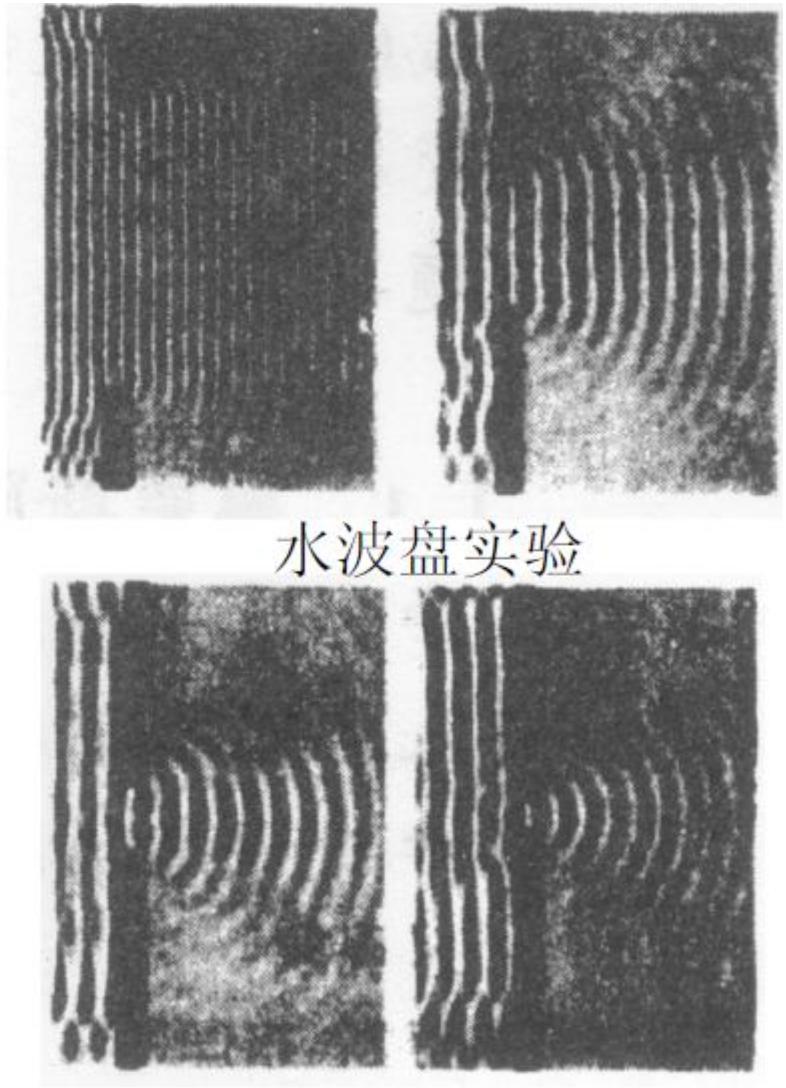
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{v_2}{v_1}$$

与波动学说相反



2.4 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

衍射（Diffraction）

1-03 费马原理

3.1 光程

3.2 费马（P. de Fermat，1679）原理

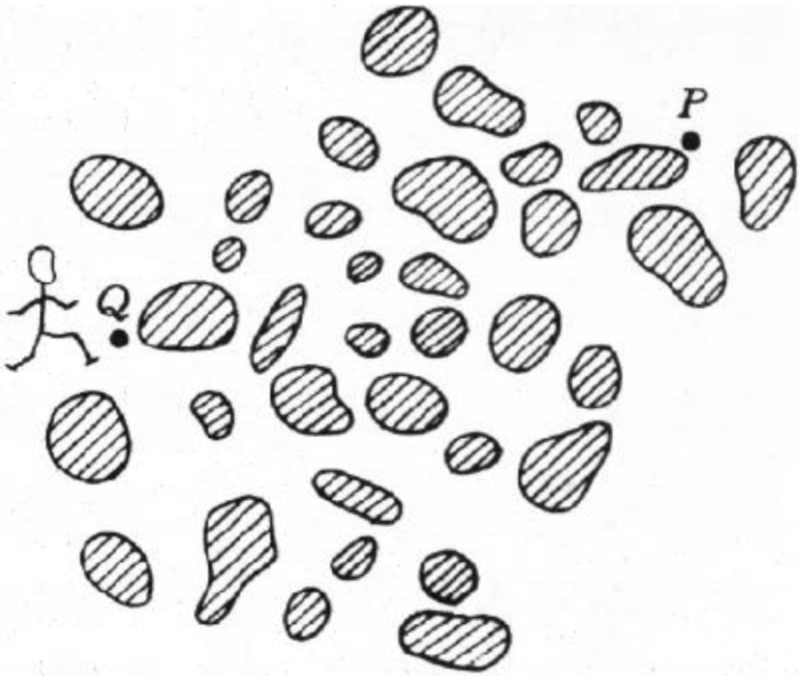
3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

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**

$$(QP)_L = \int_Q^P nds$$ *L*为传播路径

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



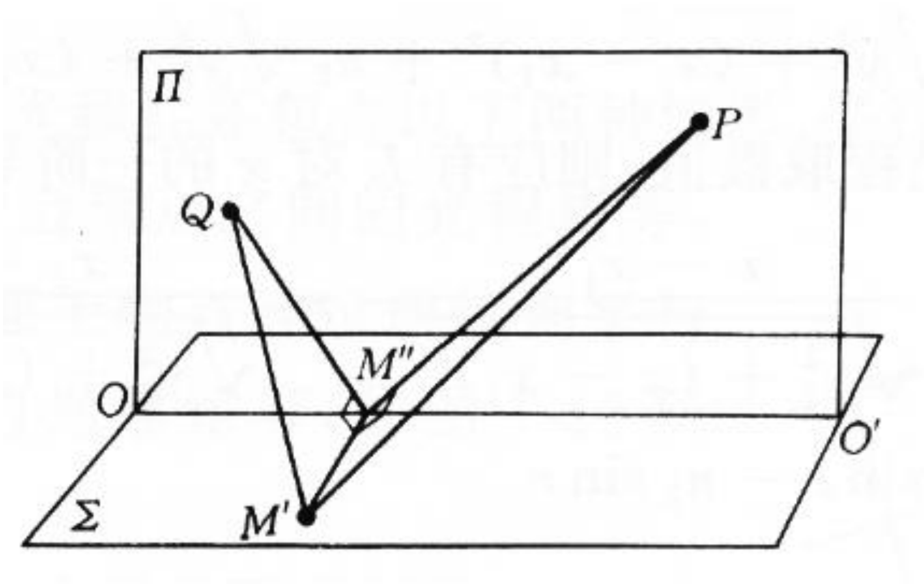
3.2 费马原理 (Fermat's principle（P. de Fermat,1679)

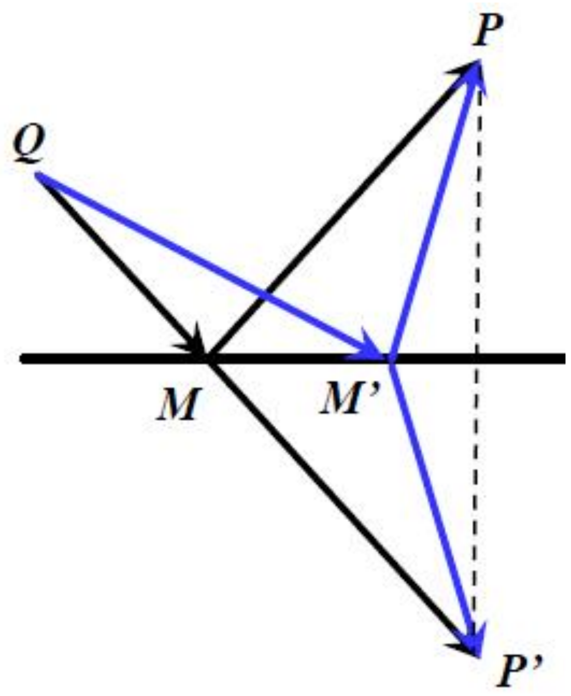
费马原理：两点间光的实际路径，是光程平稳（取极值）的路径。

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

3.3 费马原理与几何光学光线传播的基本定律

反射

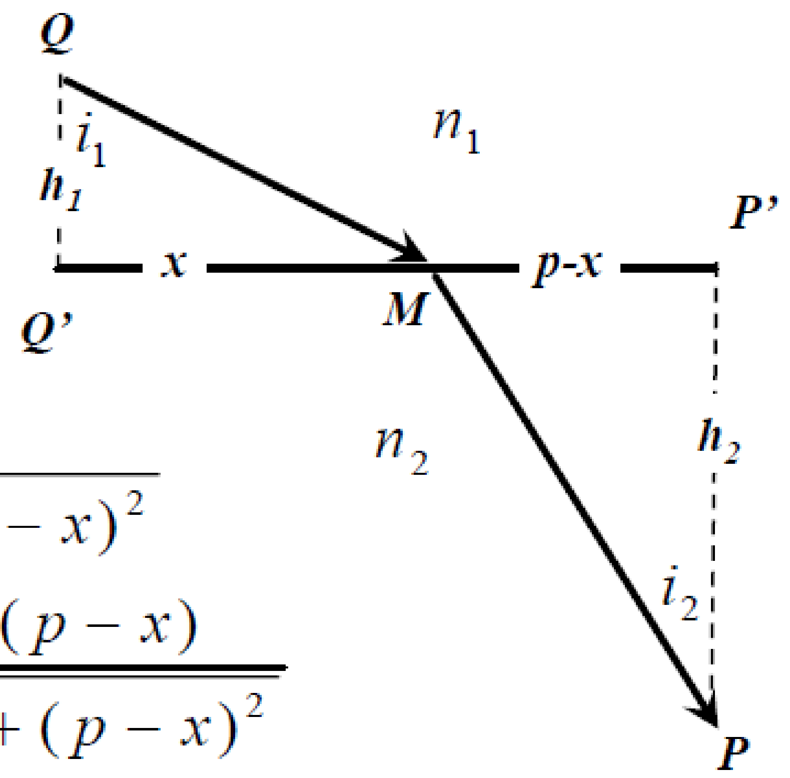




面内光程最短。

QMP光程最短。

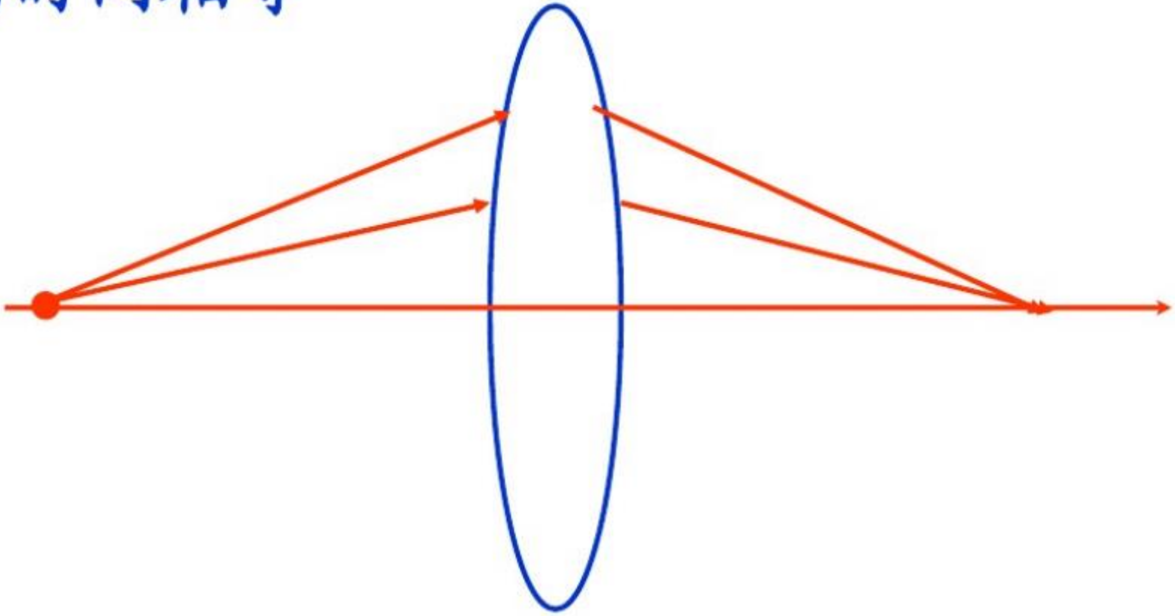
折射



$$(QMP) = n_1 QM + n_2 MP$$
$$= n_1\sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}$$
$$\frac{d}{dx}(QMP) = \frac{n_1 x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{n_2(p-x)}{\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}}$$
$$= n_1 \sin i_1 - n_2 \sin i_2$$

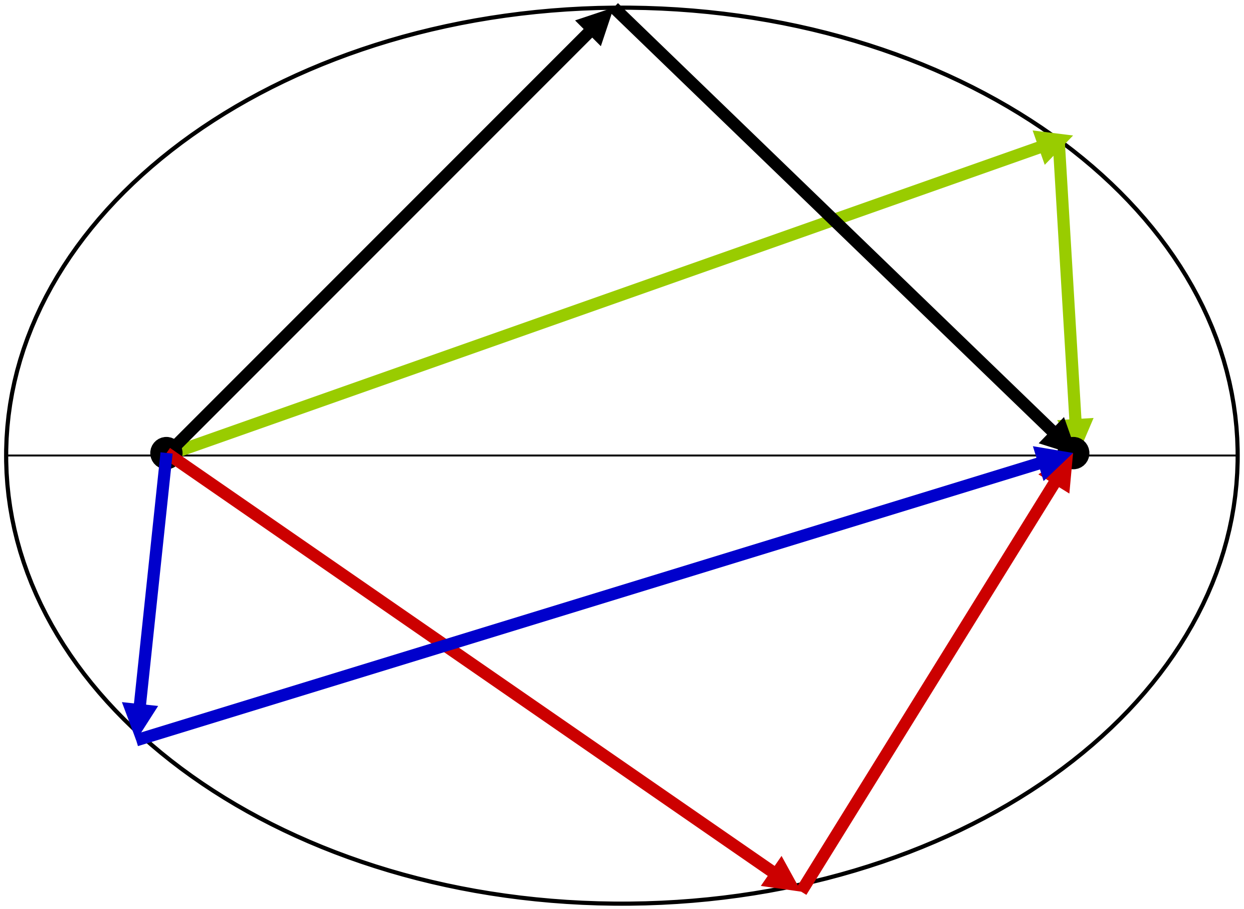
会聚透镜

- 为了汇聚电光源发出的光，而设计得光学器件。使所有沿不同路径传播的光线到达A'的时间相等



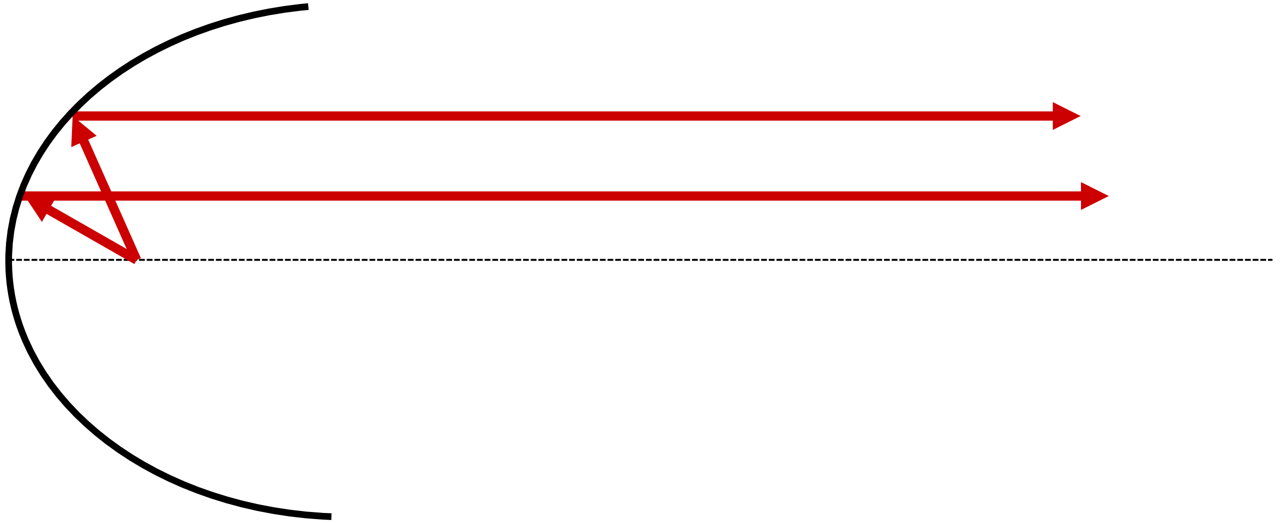
光程取常数的例子

椭球面内两焦点间光的路径，光程为恒定值



光程取极大值的例子

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。



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

p.32-33: 1, 4, 5
p.39-2

重排版 P23-24：1，4，5
P 27：2