

光学

经典光学

几何光学：反射、折射、成像
波动光学：干涉、衍射、偏振

量子光学 —— 光的发射、吸收、相互作用

现代光学

激光光学：激光物理、技术、应用
全息光学：光学全息与信息处理等
傅立叶光学：光学傅立叶分析等
激光光谱学：物质微观结构分析等
非线性光学：强光与光学介质的相互作用、
受激散射、非线性频率变换等

几何光学： Ch1. 基本原理

Ch2. 共轴球面系统的物像关系

Ch4. 平面镜、棱镜系统（转像系统）

Ch5. 光学系统中成像光束的限制

光能的传播： Ch6. 辐射度学和光度学基础

光学系统成像质量的评价， Ch8.

典型光学系统： Ch3. 眼睛和目视光学系统

Ch9. 望远镜、显微镜、照相机、投影仪



◆ 课时安排：

- 学科基础课，学分2.5，总学时40；

◆ 考试方式：闭卷考试

◆ 成绩构成：

- 期末考试 70%
- 平时成绩 30%
 - ✓ 作业6次（30分）
 - ✓ 课堂小测或考勤共6次（30分）
 - ✓ 课程设计（30分）
 - ✓ 其它（讨论课？）（10分）



◆教材：

《应用光学》第四版，李林，北京理工大学出版社

◆参考书：

- 工程光学，郁道银，机械工业出版社
- 应用光学，张以谟，电子工业出版社
- 光学教程，叶玉堂，清华大学出版社
- Optics, Ajoy Ghatak, 清华大学影印版
- Optics, Eugene Hecht
- 应用光学相关的习题集



!!! 学习方法 !!!

- 1) 带着问题去学效果最好，——**预习**
- 2) 掌握原理，多做练习
- 3) 相互交流，**主动**学习，事半功倍



第一章 几何光学基本原理

◆ 基础概念

➤ 光

➤ 光线

➤ 光源

➤ 光学介质

➤ 波前

➤ 波阵面（波面）

➤ 光线与波面的关系

➤ 光束

1.1 光波与光线

◆ 光是什么？

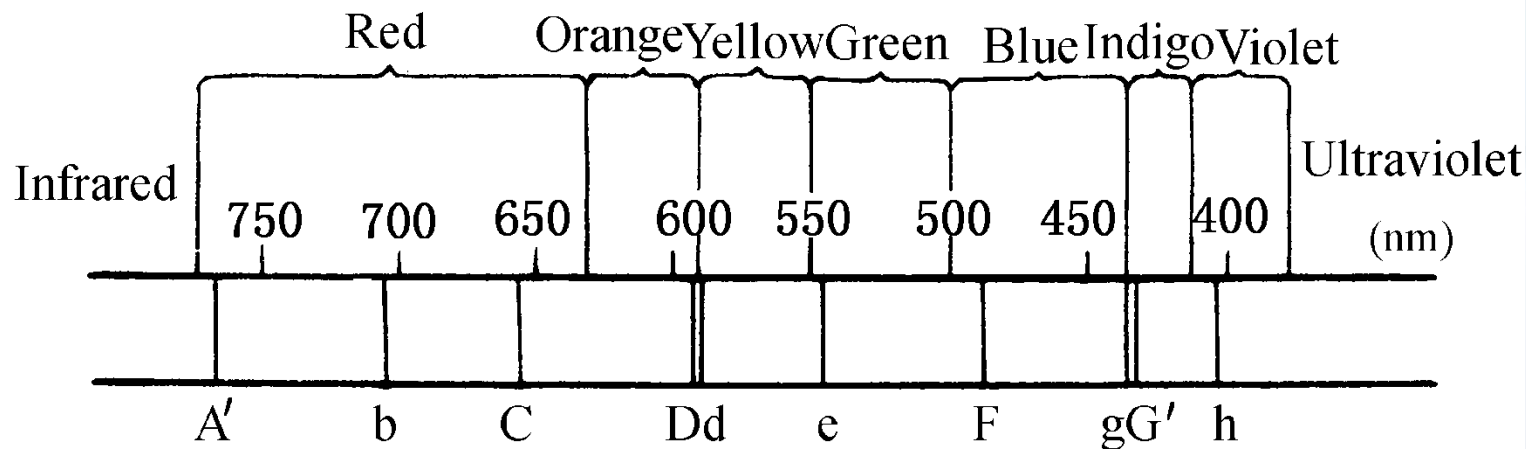
➤ 一定频率范围内的**电磁波**，它是以波的形式传播。

Name	Wavelength		Important spectral lines	
	10^{-12} (cm)	(nm)		
Cosmic ray	10^{-11}			
γ -ray	10^{-10}			
	10^{-9}	300		
	10^{-8}			
X-ray	10^{-7}			
	10^{-6}	400		h 404.66
	10^{-5}			G' 434.05
				g 435.83
Ultraviolet		500		F 486.13
Visible light				e 546.07
	10^{-3}	600		d 587.57
Infrared	10^{-2}			D 589.29
	10^{-1}	700		C 656.28
Ultrashort wave	10^0			b 706.52
	10^1	800		A' 768.20
	10^2	900		
	10^3	1000		
Radio wave	10^4			

1.1 光波与光线



◆ 可见光：380nm-760nm



◆ 紫外光：5-400nm

◆ 红外光：780nm-40 μ m

➤ 近红外：780nm-3 μ m

➤ 中红外：3 μ m—6 μ m

➤ 远红外：6 μ m—40 μ m

1.1 光波与光线



- ◆ **光线**：几何光学中把光看成是“具有方向的几何线”，称作“光线”，
 - 光与**大尺度**物体相互作用时，可把光视为光线，研究光的折射、反射、成像
 - 当物体的尺度与其波长相近时，光的模型是**电磁波**，解释光的干涉、衍射、偏振——**波动光学**
 - 目前使用的光学仪器，绝大多数是应用几何光学原理设计出来的（把光看作“光线”）



◆ **光源**：任何能辐射光能的物体

➤ **点光源（发光点）**：无任何尺寸，在空间只有几个位置的光源

➤ 任何被成像的物体，是由**无数个发光点**组成。

➤ 当光源的大小与其作用距离相比可忽略不计，可视为点光源。

➤ **注意**：**发光点和光线**只是一种假设。

1.1 光波与光线



◆ **光学介质**：可以传播光的媒介或材料。空气、水、玻璃

{ **各向同性介质**：光学性质不随方向改变（玻璃、水）
{ **各向异性介质**：如，单晶体（方解石双折射现象）

{ **均匀介质**：光学介质的不同部分的光学性质相同
{ **非均匀介质**：如密度不均匀的空气、

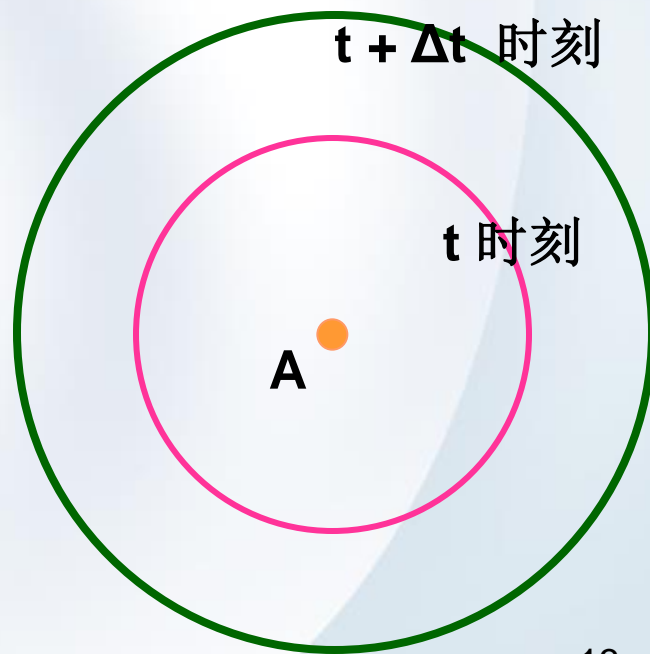
➤ **几何光学的基本定律针对均匀各向同性介质**

? 真空是不是介质 ? 光的传播是否一定需要媒介

1.1 光波与光线



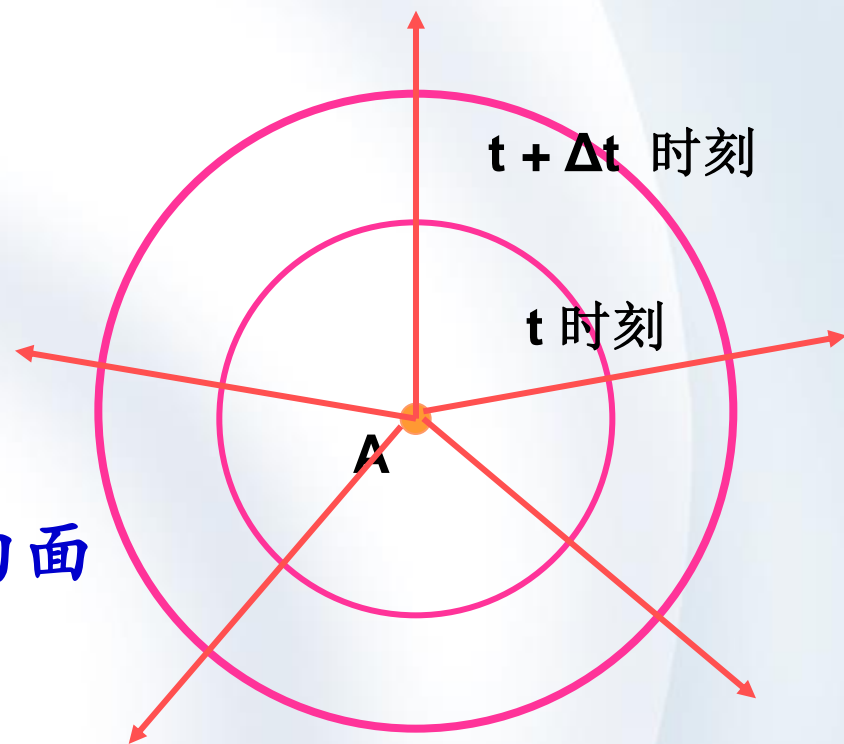
- ◆ **波前**：某一时刻，波动所到达的位置构成的曲面
- ◆ **波阵面（波面）**：传播过程中某一时刻、振动相位相同的各点所连结成的曲面，即等相位面。
 - 只有一个确定的波前，
波前是传播距离最远的波面
 - 波面的数目是任意多的



1.1 光波与光线

◆ 光线与波面之间的关系：

- 光线是波面的法线
- 波面是所有光线的垂直曲面



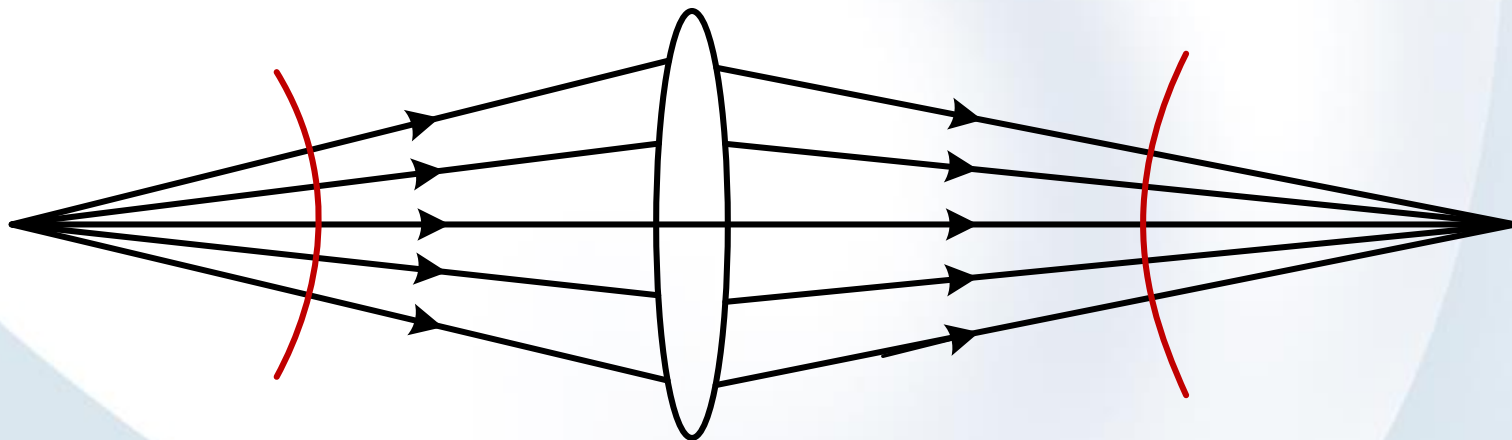
◆ 光束：具有一定关系的光线的集合

1.1 光波与光线



◆ 光束与波面的对应关系：

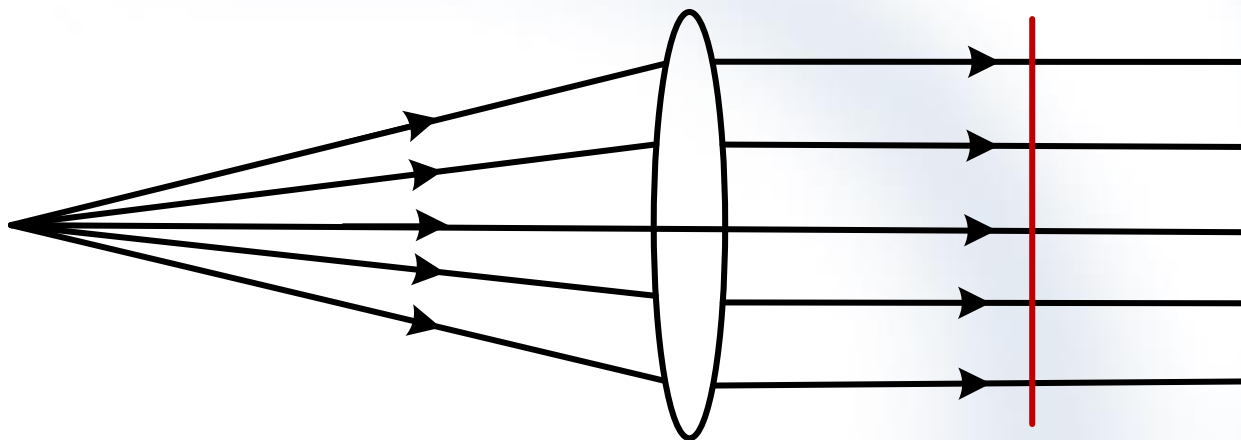
- **同心光束**：由一点发出或交于一点的光束（会聚或发散）；
- 同心光束对应的波面为**球面波**





◆ 光束与波面的对应关系：

➤ 平行光束



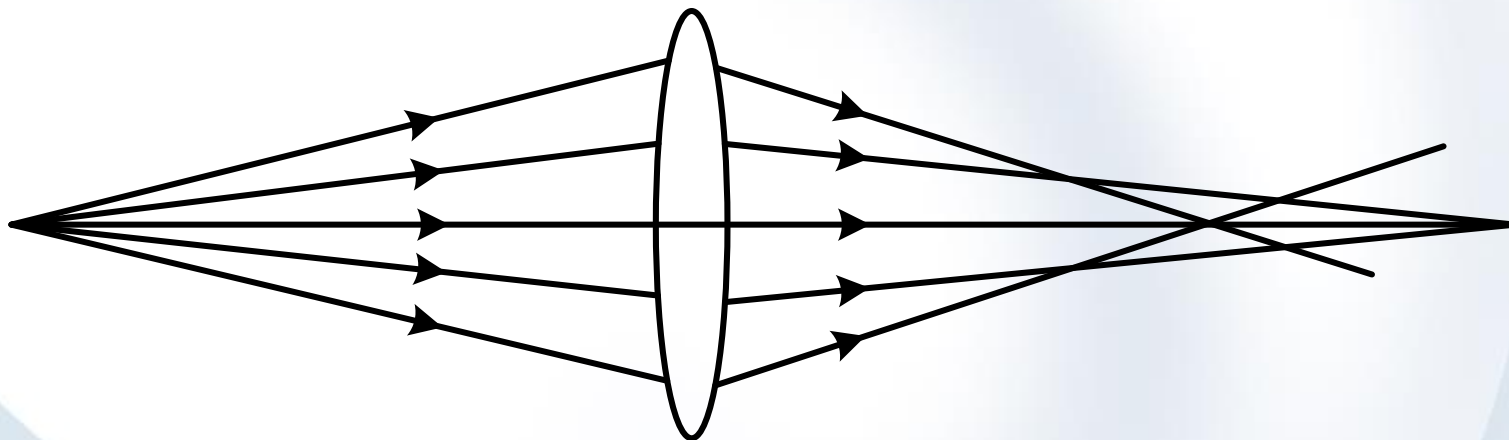
平行光束对应的波面为平面

1.1 光波与光线



◆ 光束与波面的对应关系：

➤ **像散光束：** 既不相交于一点，又不平行，但有一定关系的光线的集合；与非球面的高次曲面光波相对应



➤ 光线是波面的_____；相交于同一点或者由同一点发出的光线称为_____光束，其对应的波面为_____面；不交于一点的光线称为像散光束，其对应的波面为_____面。

➤ 光线是波面的法线；相交于同一点或者由同一点发出的光线称为同心光束，其对应的波面为球面；不交于一点的光线称为像散光束，其对应的波面为非球面。

1.2 几何光线基本定律



1) 光的直线传播定律

➤ 在各向同性的均匀介质中，光线直线传播

➤ 例子：

1) 影子、日食、月食

2) 小孔成像

二千四五百年前战国时期的墨翟的《墨经》：
“光之煦（照）人若射。下者之人也高，高者之人也下。”

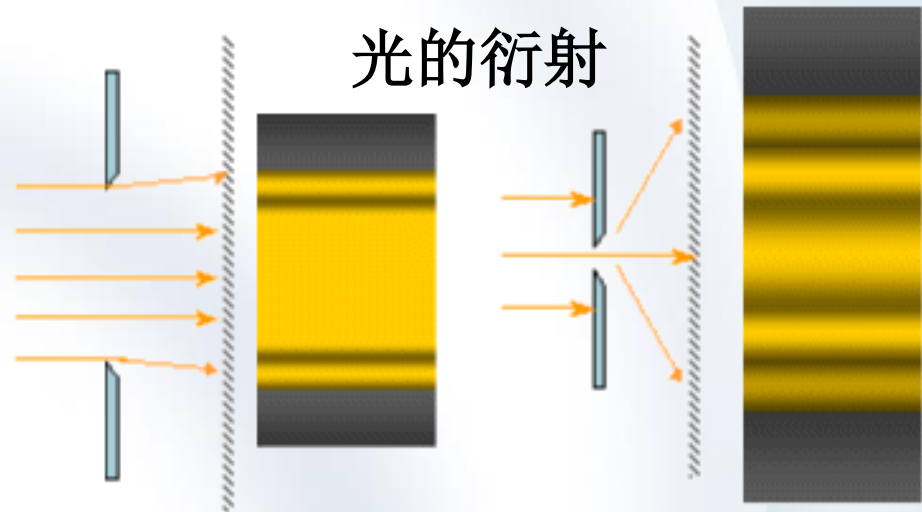
1.2 几何光线基本定律



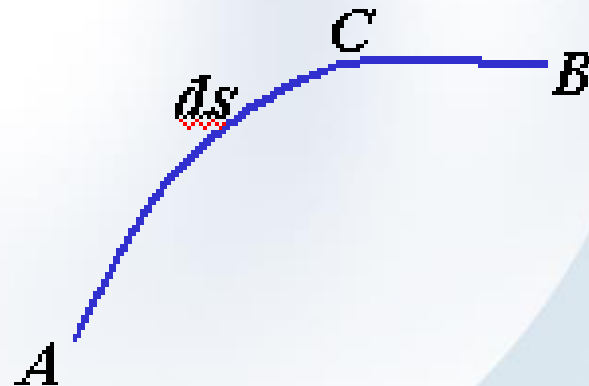
1) 光的直线传播定律

➤ 局限性

- ✓ 当光经过尺寸与光波长接近或更小的小孔或狭缝时，光的传播将偏离直线——“光的衍射”



- ✓ 在非均匀介质中，光是沿曲线传播的



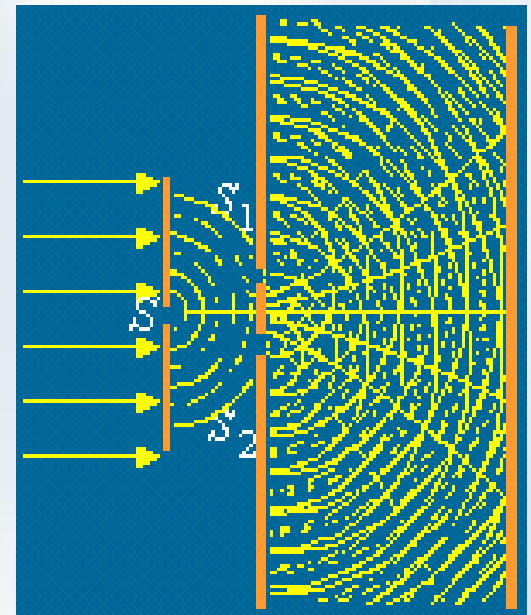
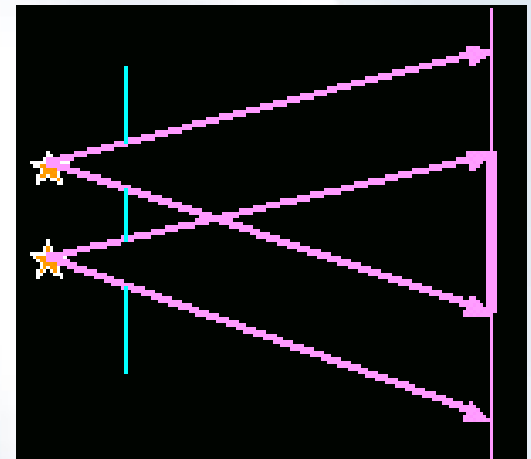
1.2 几何光线基本定律



2) 光的独立传播定律

➤ 从不同光源发出的光线，在空间某点相遇时，彼此互不影响，而在各路光相遇处，其光强度是简单地相加，总是增强的

➤ 未考虑光的波动性，忽略干涉现象

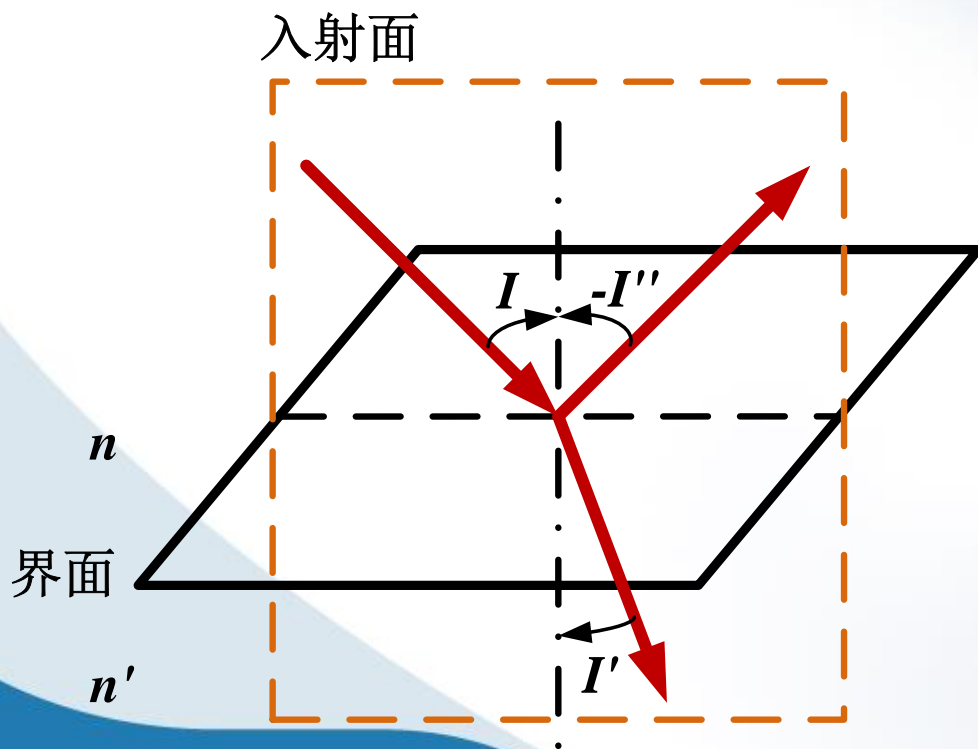


1.2 几何光线基本定律



3) 光的反射和折射定律

- 光传播到两种介质的分界面上,
- 一部分光线返回原介质, 称为**光的反射**;
- 一部分光线进入另一介质, 成为**光的折射**。



入射面

入射角: I

反射角: I''

折射角: I'

以锐角度量, 光线转向法线顺时针为正

1.2 几何光线基本定律



3) 光的反射和折射定律

◆光的反射定律

➤ 反射光线位于入射面内
法线的两侧，且

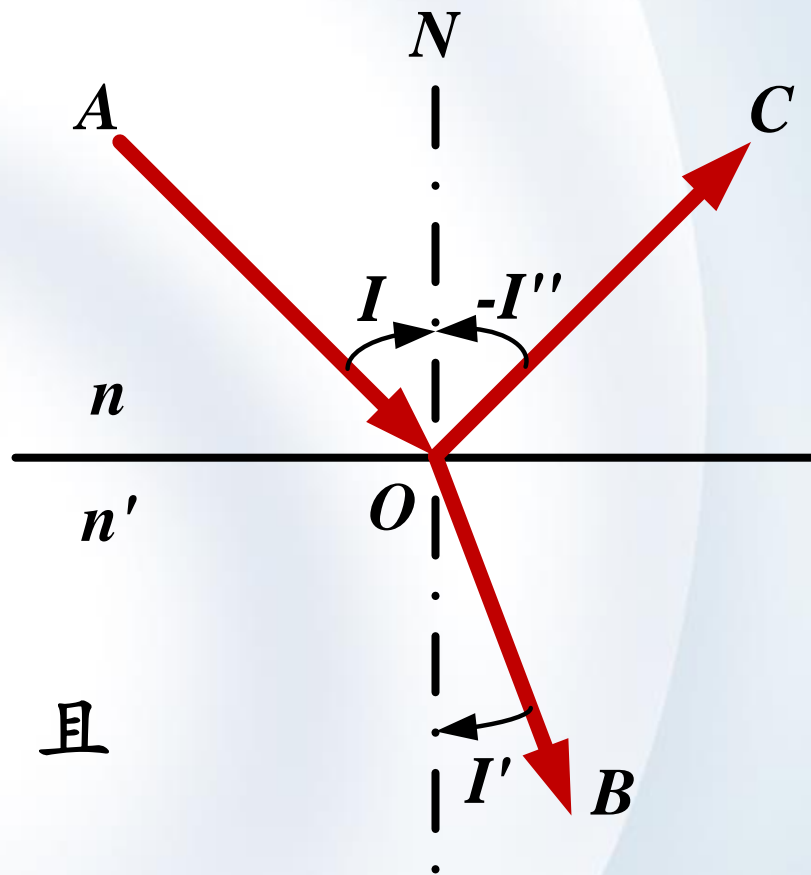
$$I'' = -I$$

◆折射定律

➤ 折射光线位于入射面内，且

$$n \sin I = n' \sin I'$$

n 为折射率



1.3 折射率和光速



◆ 折射率 n :

表征透明介质光学性质的重要参数之一。

描述介质中的光速 v 相对于真空中的光速 c_0 减慢程度的物理量

$$n = \frac{c_0}{v} \quad \text{绝对折射率}$$

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{相对折射率}$$

1.3 折射率和光速

介质	折射率
真空	1
空气 (STP, 标准状况, 温度为0°C (273.15开), 压强为101.325千帕 (1标准大气压, 760毫米汞柱))	n=1.00029 略大于1, 实际应用中大都假设为≈1
水 (20° C)	n ≈1.333
玻璃	n ≈1.45 –1.75
冰	1.309
乙醇, Ethyl alcohol	1.36
熔融石英Fuzed quartz	1.46
氯化钠Sodium Chloride	1.54
蓝宝石Sapphire	1.77
锆石Zircon	1.923
光折射晶体, 如铌酸锂	n ≈2.2 –2.3
钻石Diamond	2.417
超冷却钠原子	18000000

*1999年2月
Nature: 脉冲激光在超冷却钠原子气体中的传播速度为
17m/s

1.3 折射率和光速



◆ 用折射定律公式描述反射

$$\left. \begin{array}{l} n \sin I = n' \sin I' \\ \text{令 } n' = -n \end{array} \right\} \Rightarrow I'' = -I$$

1.3 折射率和光速

◆ 介质中的光的传播速度和传播介质及波长有关。

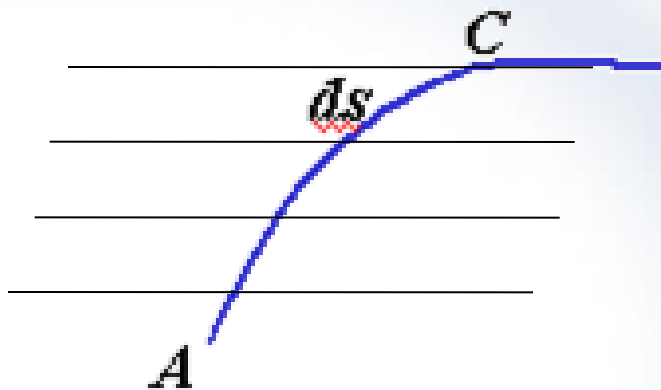
$$n = \frac{c_0}{v}, \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

如，光从光疏介质（折射率小）入射到光密介质时

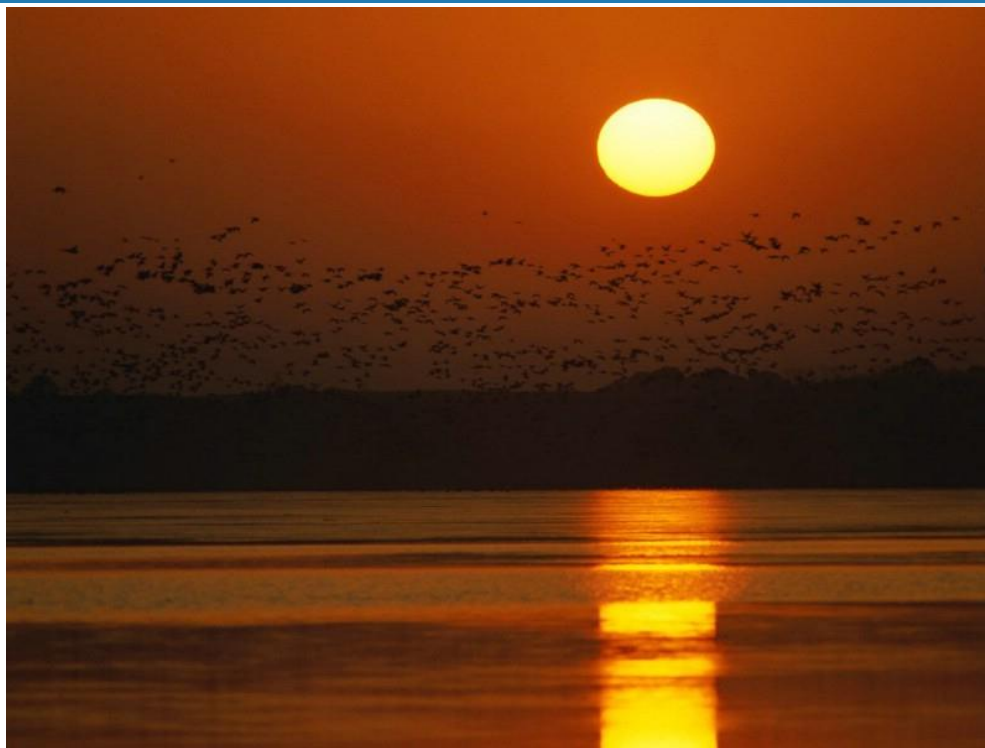
- ✓ 光的传播速度变慢
- ✓ 通常光的频率不变（不考虑非线性和荧光）
- ✓ 光的波长变短
- ✓ 对人眼引起的颜色感觉不变（由光频率决定）

1.3 折射率和光速

不均匀介质，可看作由无限多的均匀介质薄片组成，
光线的传播，可看作是一个连续的折射



Q: 若光线从A入射，由A→C的路径上，折射率是怎样变化的？

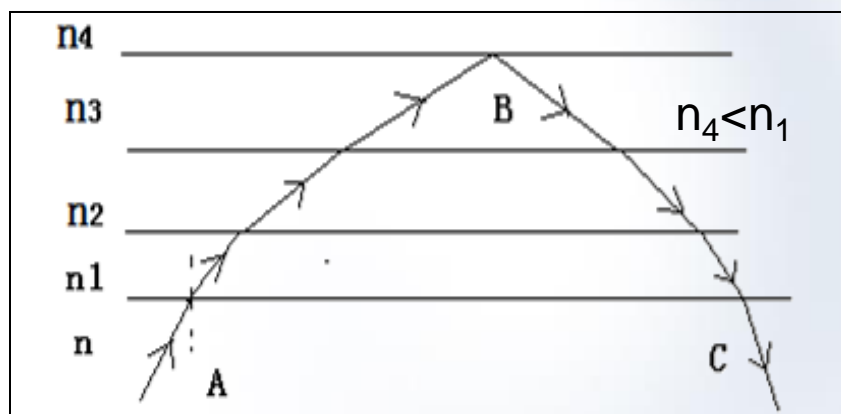
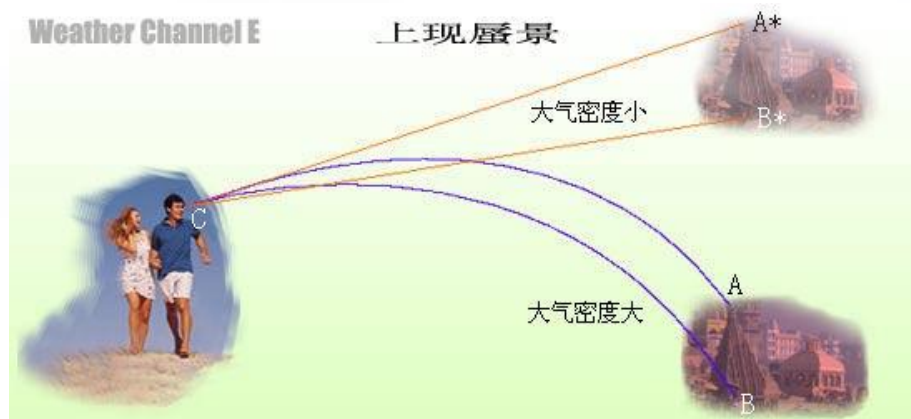


◆（作业题）：

怎样解释朝阳或晚霞在竖直方向被压扁？
请结合折射定律，考虑大气密度随高度的变化规律。



◆ “海市蜃楼”



上现蜃景与光线在密度分布不均匀的空气中的折射有关

1.4 光程的概念及相关定律

◆ 光程：

光在介质中经过的几何路径 l 和该介质的折射率 n 的乘积，用 L 表示

$$\left. \begin{array}{l} L = nl \\ n = c / v \\ l = vt \end{array} \right\} \Rightarrow L = ct$$

(t 为光在介质中传播的时间)

1.4 光程的概念及相关定律



$$L = ct$$

➤ 光在某种介质中的**光程**，等于相同时间内光在真空中的传播距离。

- ✓ 只要光经过不同介质中的传播时间相同，光程也相同
- ✓ 在任意两个波面之间的所有光线，光程也相同，（波面是相同时间到达点的曲面）

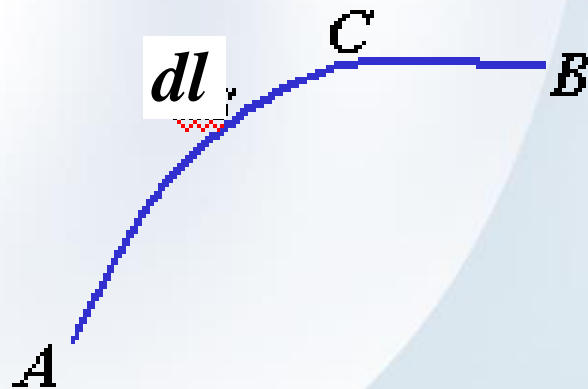
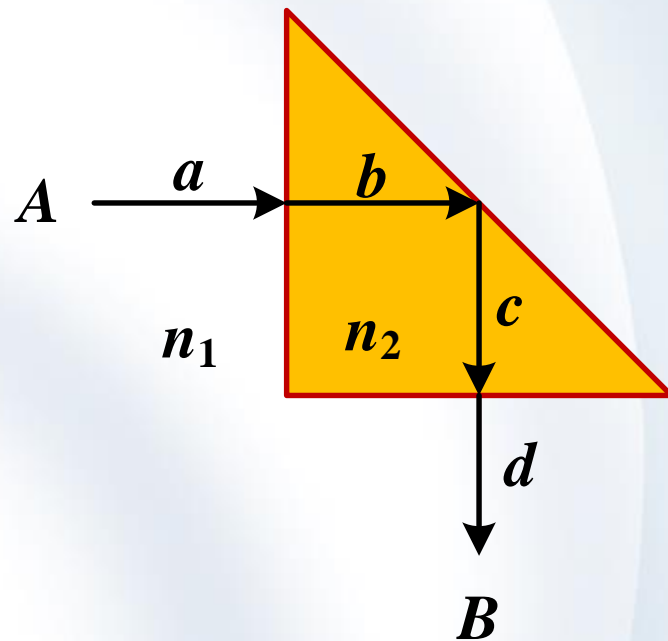
1.4 光程的概念及相关定律

- 光经过若干种介质时，光程为各介质折射率与几何路径乘积之和

$$L = \sum_{i=1}^m n_i l_i$$

- 若介质为非均匀，折射率连续变化，则

$$L = \int_A^B n(l) dl$$

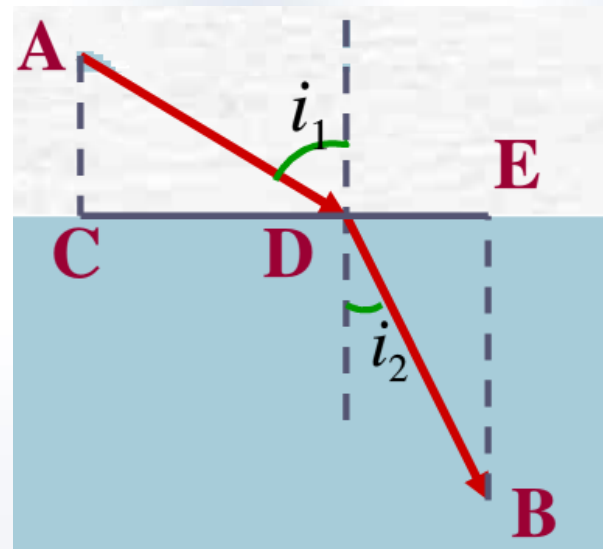
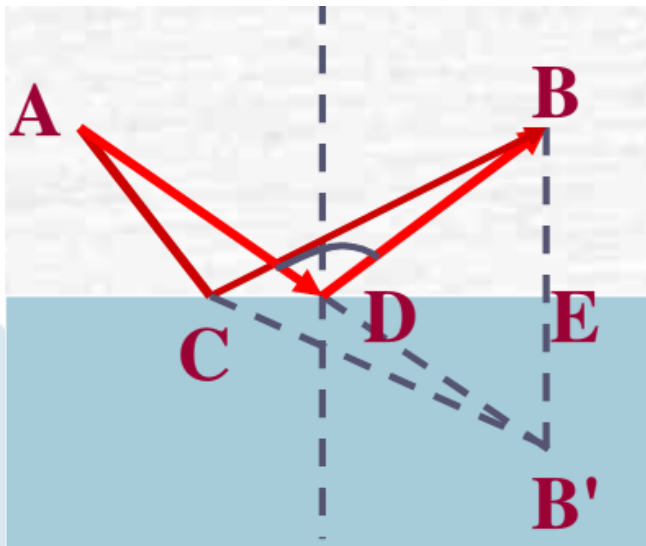


1.4 光程的概念及相关定律

◆ 费马原理：

光是沿着光程为极值（极小、极大或常量）的路径传播的。

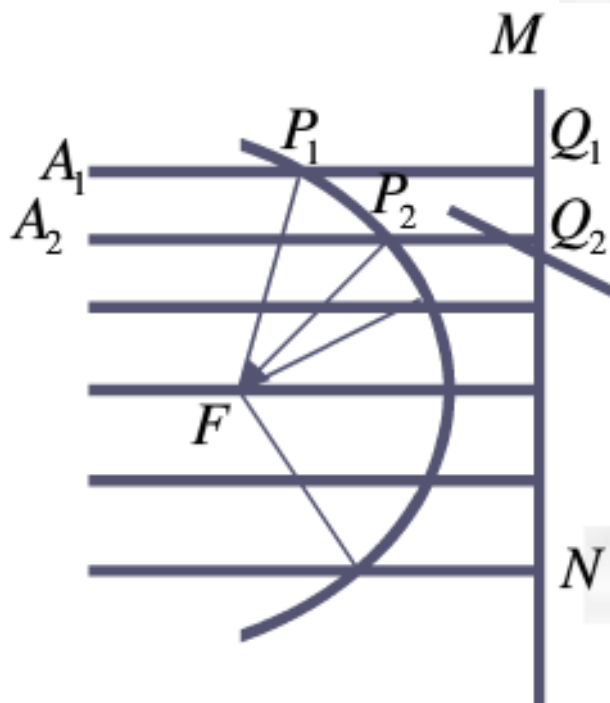
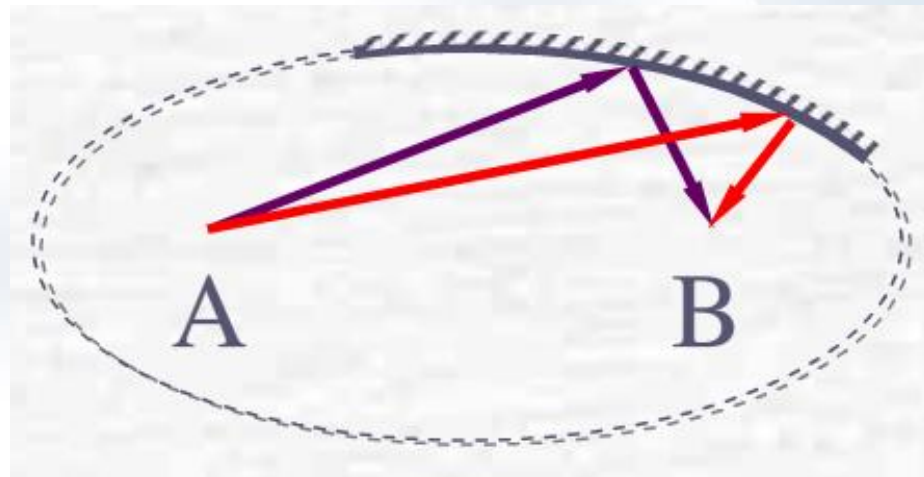
1) 光程为极小值的情况



1.4 光程的概念及相关定律

◆ 费马原理:

2) 光程恒定的情况

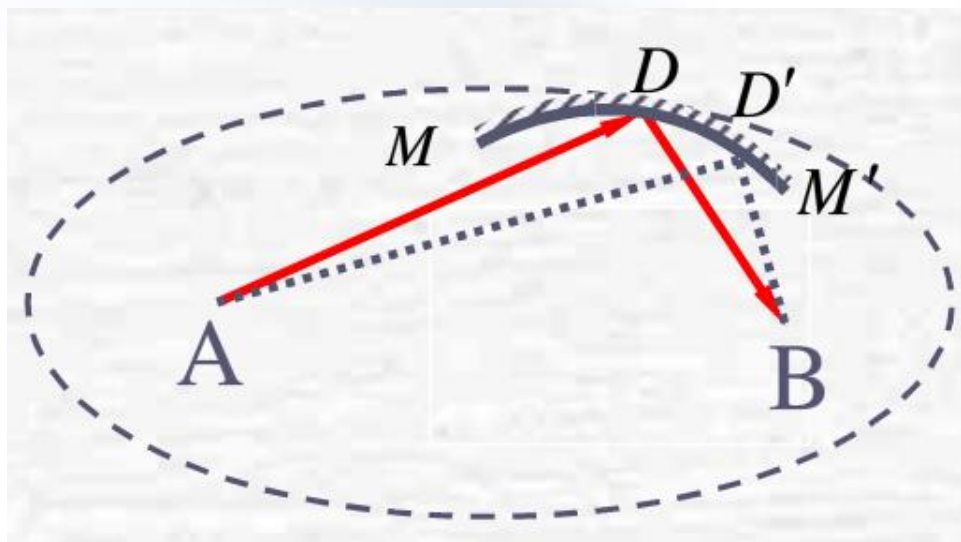


1.4 光程的概念及相关定律



◆ 费马原理

3) 光程为极大值

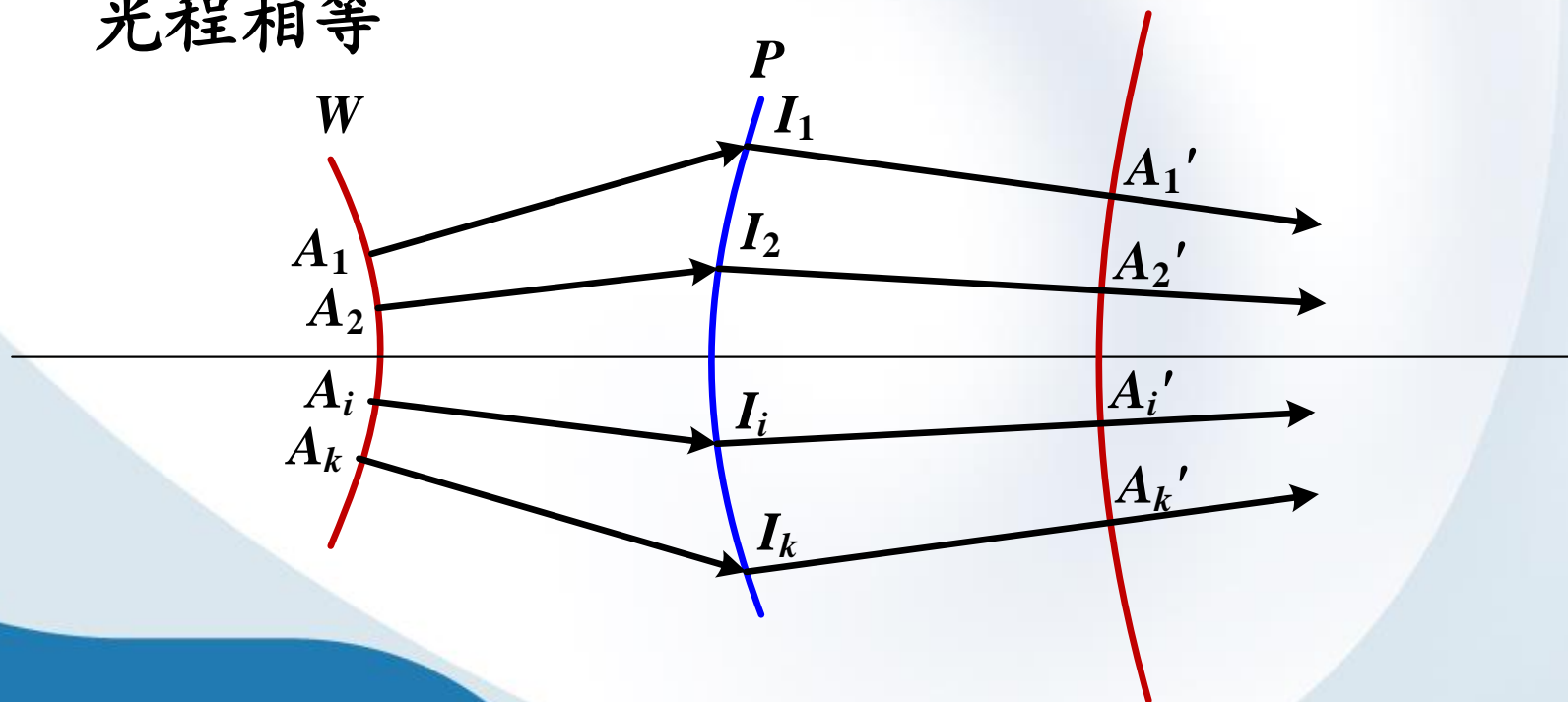


反射镜 MM' 与旋转椭球内切于 D 点
外切呢？

1.4 光程的概念及相关定律

◆ 马吕斯定律

✧ 均匀的各项同性介质中，垂直于波面的光线束，经过任意多次反射和折射后，出射波面仍和出射光束垂直，且入射波面和出射波面对应点之间的光程相等



1.4 光程的概念及相关定律

折反射定律、费马原理和马吕斯定律三者中的任意一个均可视为几何光学的基本定律，而把另外两个作为基本定律的推论

- ◆ 光在某种介质中的光程，与相同时间内，光在真空中的传播距离的关系如何？

- ◆ 以下关于费马原理和马吕斯定律描述正确的是：
 - A. 光是沿着光程最短路径传播的
 - B. 光线在A点与B点之间传播，其传播的路径是唯一的
 - C. A、B为位置固定的两点，光线从由A到B的传播路径与由B到A的传播的传播路径是不同的
 - D. 垂直于波面的光线束，经过任意多次反射和折射后，出射波面仍和出射光束垂直，且入射波面和出射波面对应点之间的光程一定是相等的
 - E. 以上都不对



- ◆ 光在某种介质中的光程，与相同时间内，光在真空中的传播距离的关系如何？

答：相等

- ◆ 以下关于费马原理和马吕斯定律描述正确的是：

- A. 光是沿着光程最短路径传播的
- B. 光线在A点与B点之间传播，其传播的路径是唯一的
- C. A、B为位置固定的两点，光线从由A到B的传播路径与由B到A的传播的传播路径是不同的
- D. 垂直于波面的光线束，经过任意多次反射和折射后，出射波面仍和出射光束垂直，且入射波面和出射波面对应点之间的光程一定是相等的
- E. 以上都不对

1.5 光路可逆和全反射



1) 光路可逆

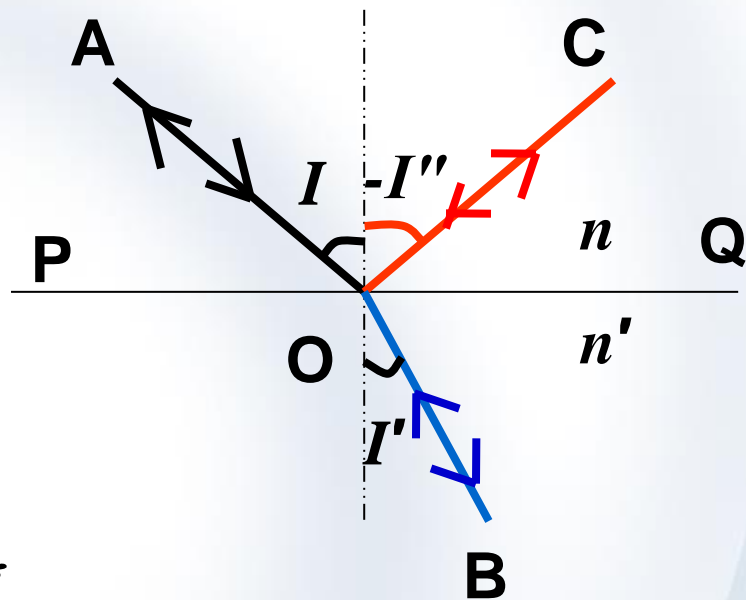
◆现象

◆证明

◆应用：

➤ 求焦点

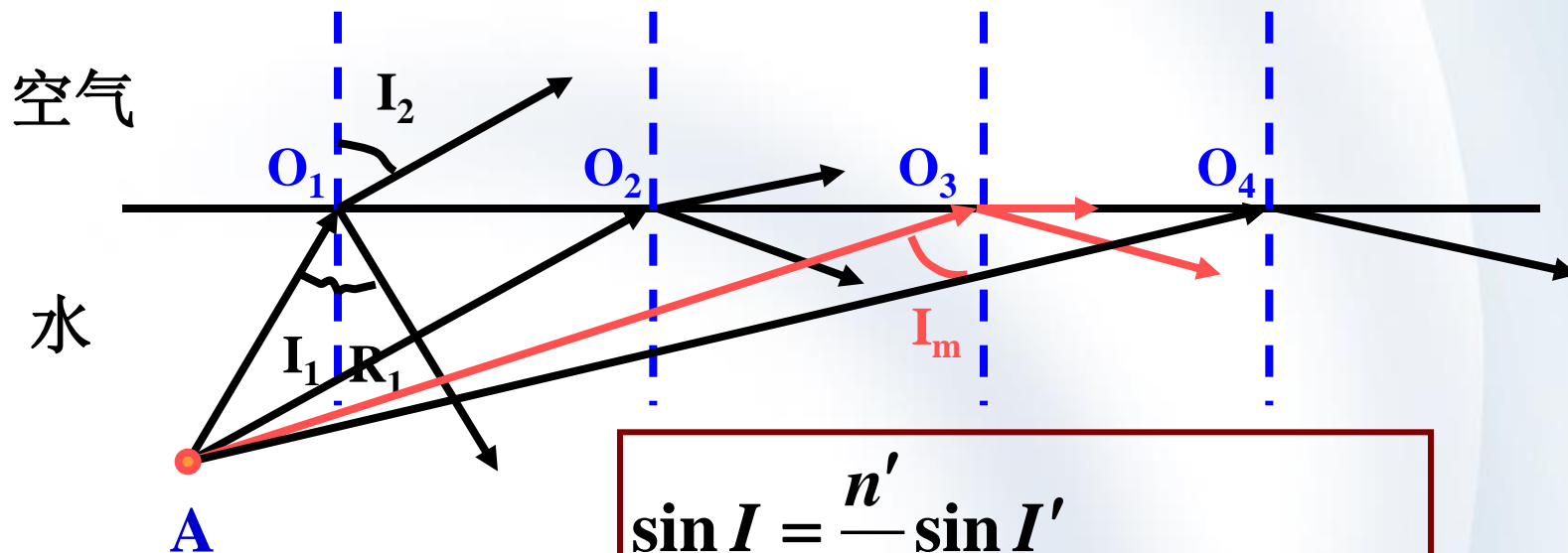
➤ 光学设计中，逆向计算



1.5 光路可逆和全反射



2) 全反射



◆ 临界入射角： I_m

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

$$\begin{aligned} I' &= 90^\circ \\ \Rightarrow \sin I_m &= \frac{n' \sin 90^\circ}{n} = \frac{n'}{n} \end{aligned}$$

◆ 全反射：在一定的条件下，界面可将入射光线全部反射回去，而无折射现象。

1.5 光路可逆和全反射



2) 全反射

$$\sin I = \frac{n'}{n} \sin I' \Rightarrow I = I_m \text{ 时, } \sin I' = \sin 90^\circ = 1$$

$$\Rightarrow I > I_m \text{ 时, } \sin I' > 1 \quad ? \quad ?$$

➤ 显然这是不可能的。这表明，折射光消失，能量全部被反射

发生全反射的条件：

(1) 光线由光密向光疏介质入射

(2) 入射角 $>$ 临界角 I_m

1.5 光路可逆和全反射

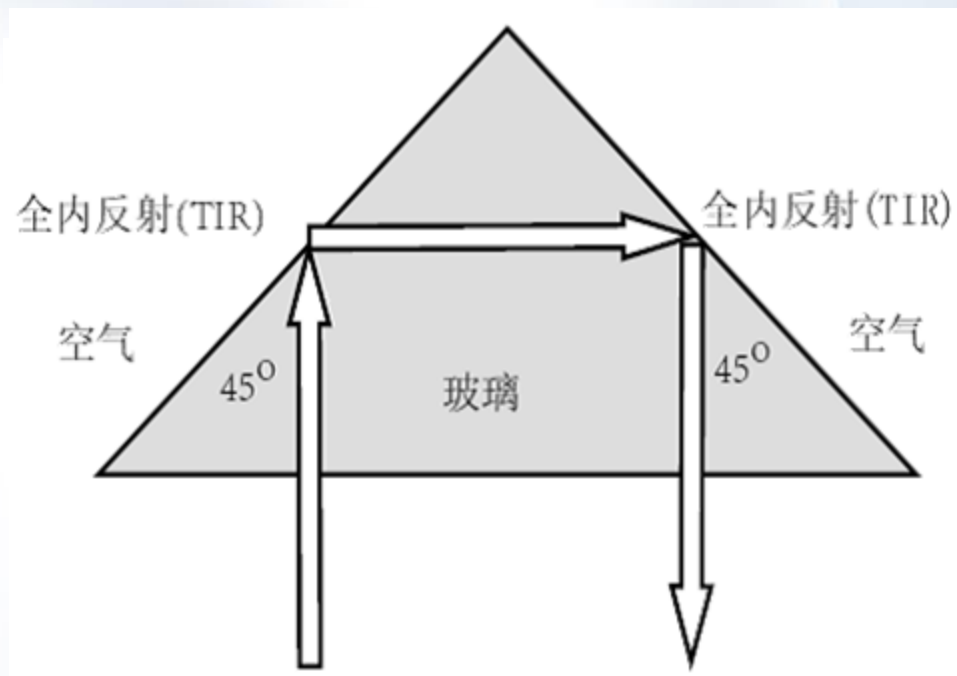


◆ **例：** 玻璃 $n=1.5$ ，空气 $n'=1$ ，判断垂直于等腰直角棱镜斜面入射的光能否发生全反射

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} = \frac{1}{1.5}$$

$$\Rightarrow I_m \approx 41.8^\circ$$

$I = 45^\circ > I_m$ ，
可发生全反射



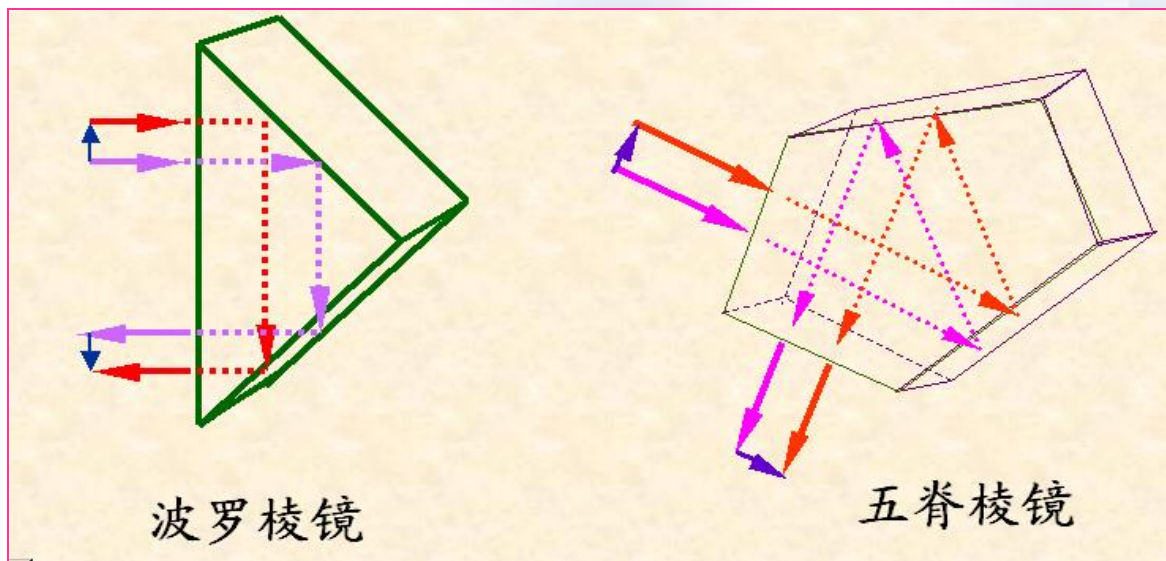
等腰直角棱镜

1.4 光路可逆和全反射

2) 全反射

◆应用：

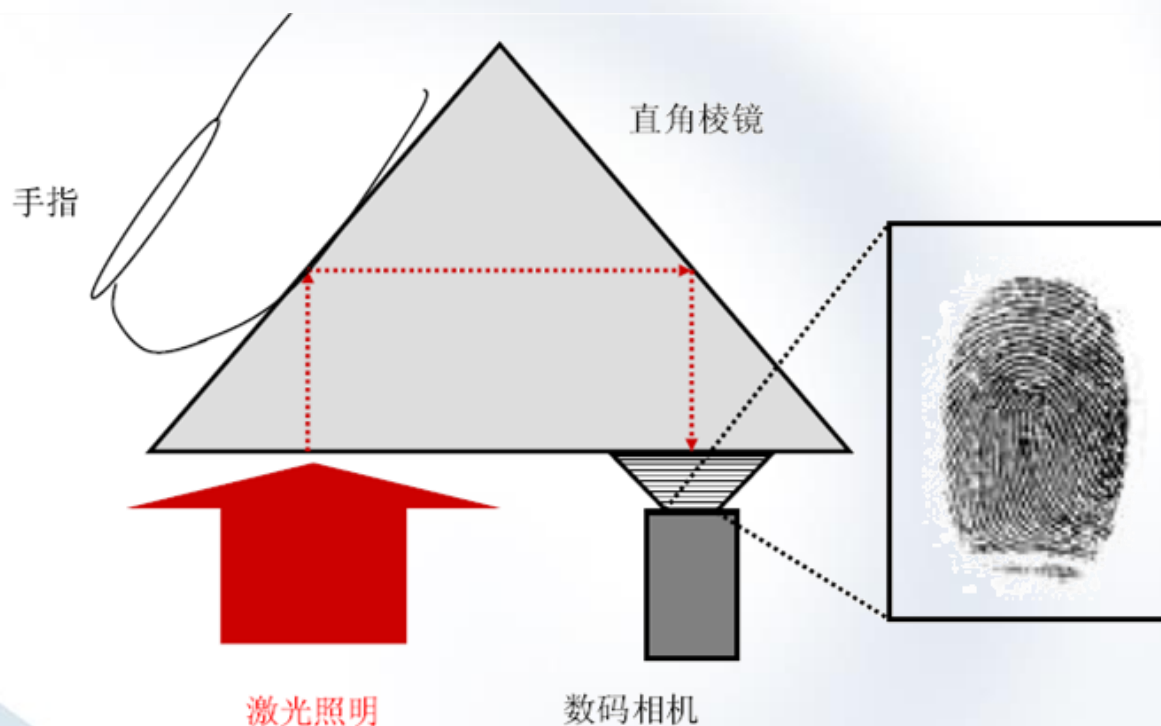
➤ 用棱镜代替反射镜，减少光能损失



全反射棱镜

1.4 光路可逆和全反射

➤ 光学指纹传感器（指纹开门、考勤、高考）



1.4 光路可逆和全反射

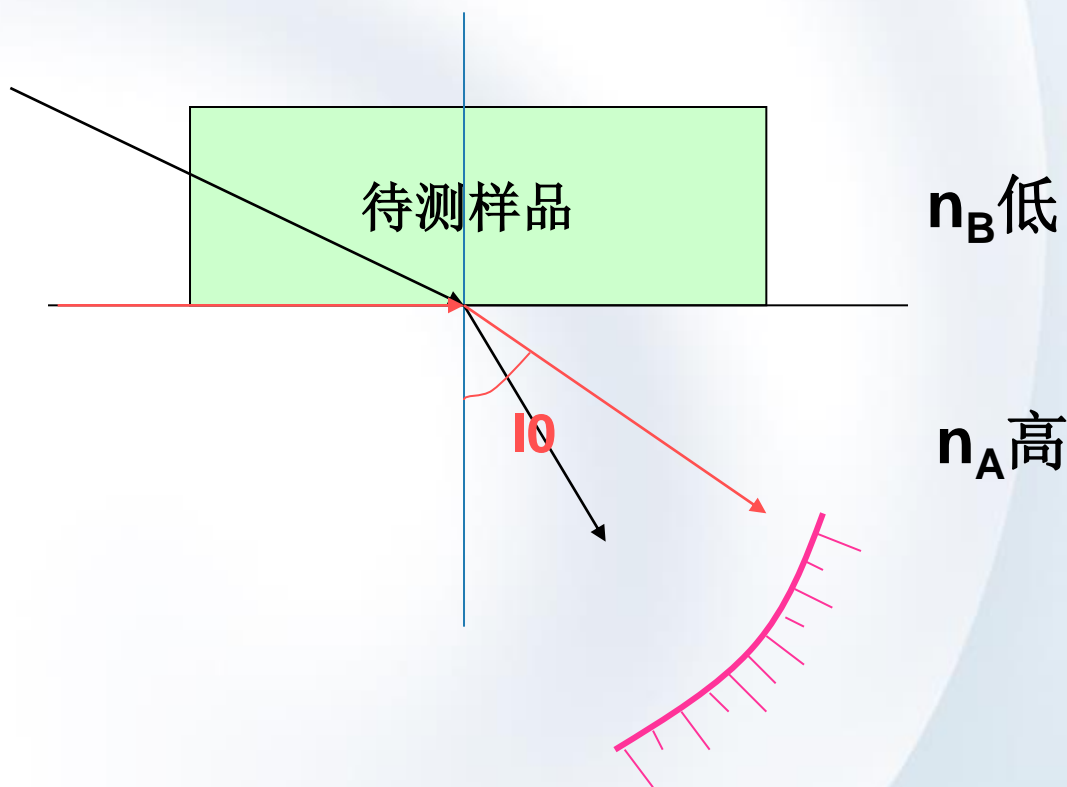
2) 全反射

◆应用：

➤测量折射率

$$\sin I_0 = \frac{n_B}{n_A}$$

$$n_B = n_A \sin I_0$$



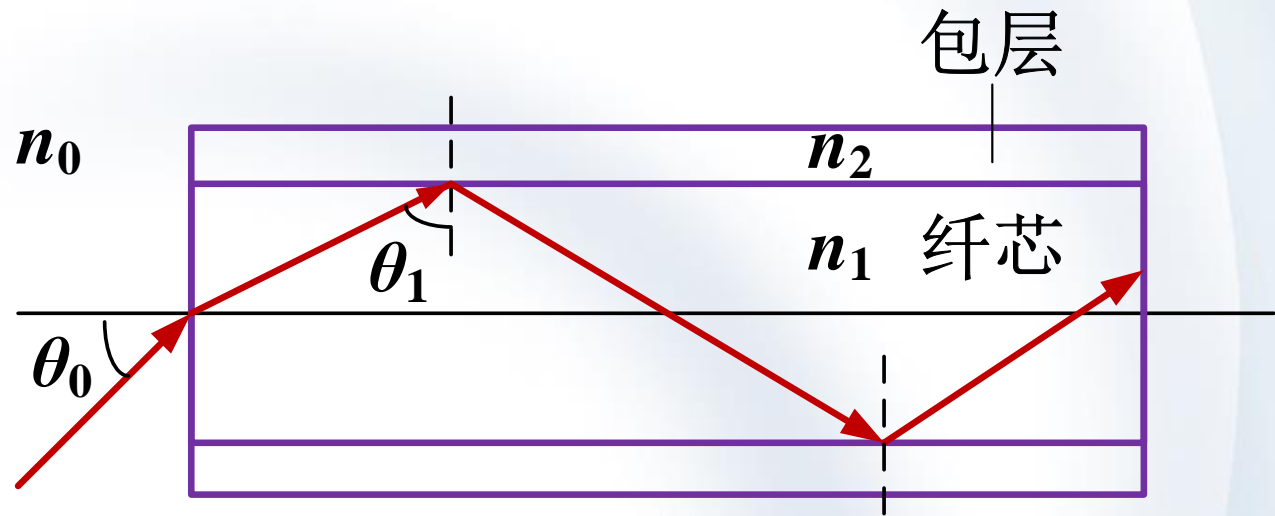
1.5 光路可逆和全反射



2) 全反射

◆ 应用：

➤ 光纤



✓ 数值孔径 $N.A. = n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

1.4 光路可逆和全反射

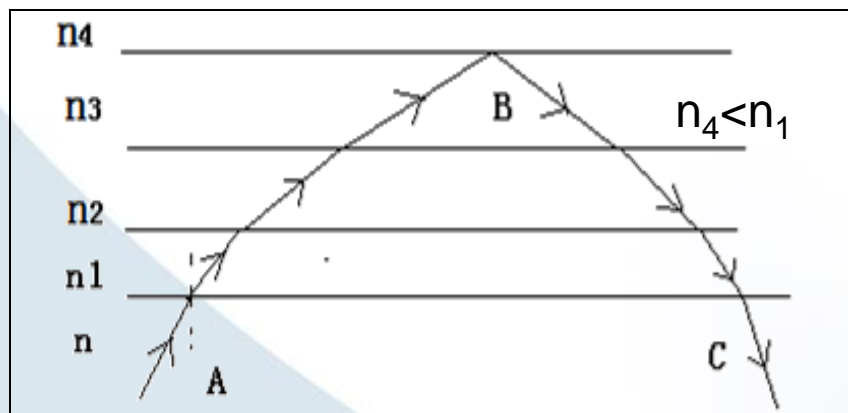
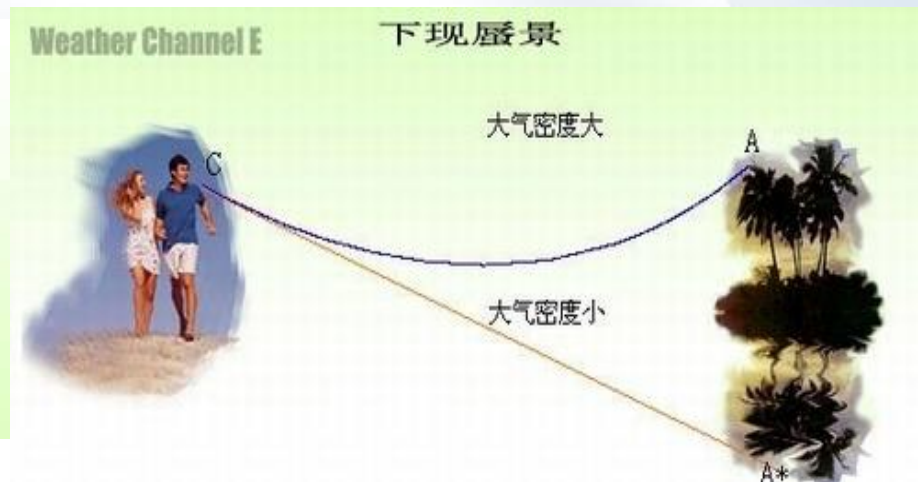
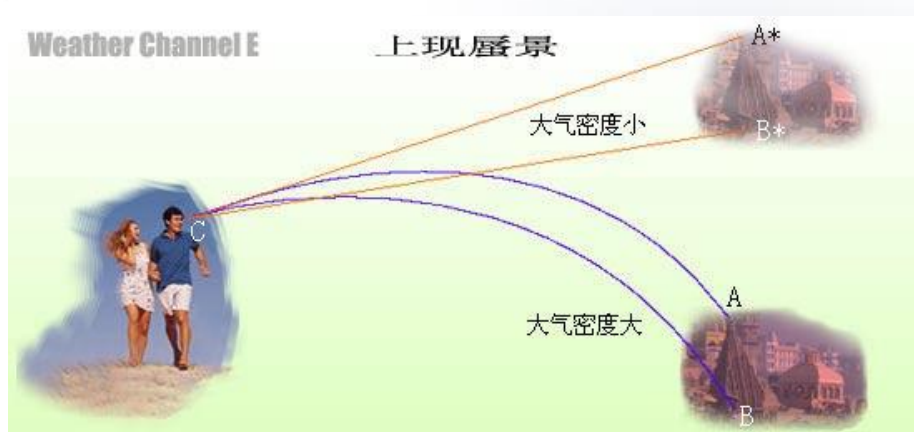
- 光纤还可用于传感，可实现位移、温度、应力、应变、压力、浓度、振动等70多个物理、化学量的检测。运用光纤既可以传光，又可以传像



激光内窥镜（左）和激光手术刀（右）



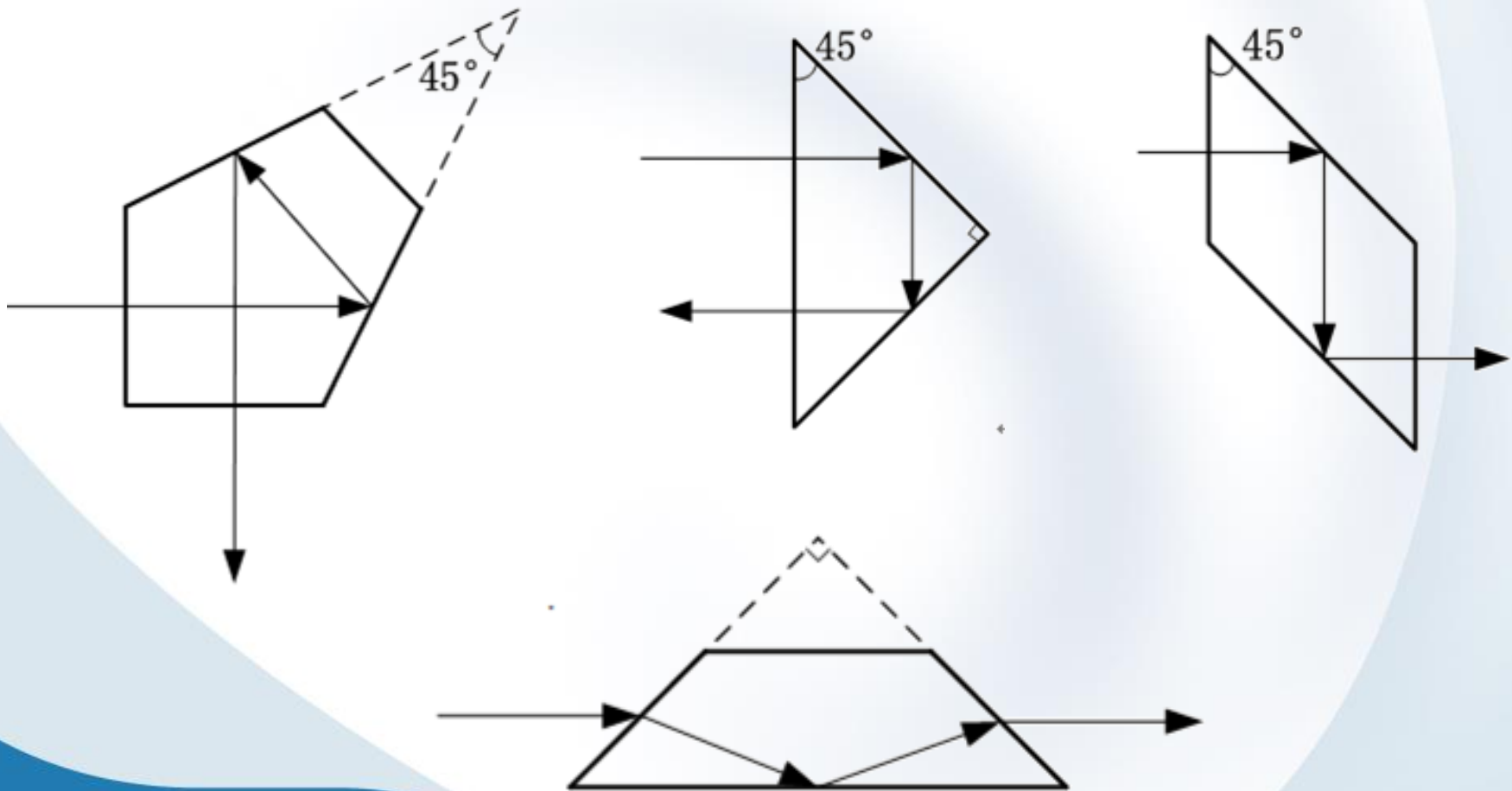
◆ “海市蜃楼”和“沙漠幻影”



沙漠和柏油路上，
下现蜃景：在下层
空气发生全反射

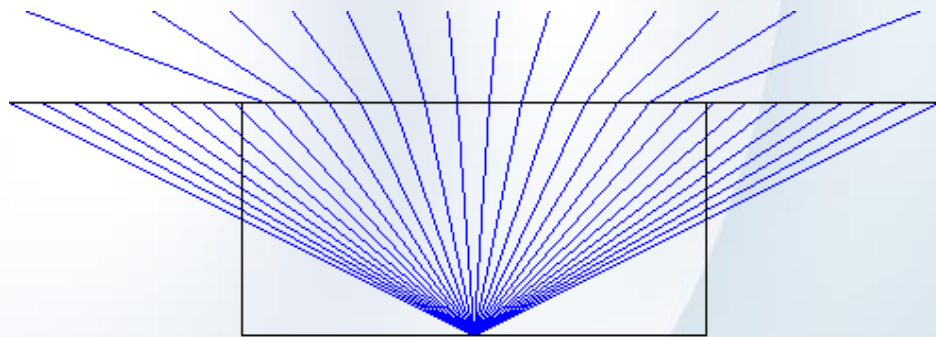
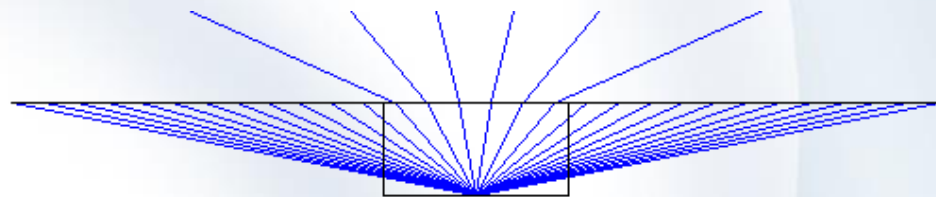
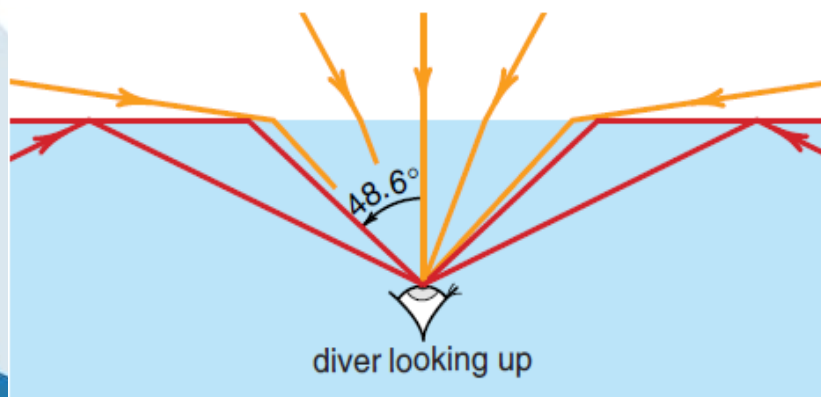
难点、练习

- ◆ 设棱镜的折射率为1.5，以下棱镜中，哪一个需要镀反射膜：





- ◆ 游泳者在水中向上仰望，能否感觉到整个水面都是亮的？为什么？水面可见范围随深度怎样变化？



- ◆ 请从几何光学的角度分析光纤弯曲后光损耗增大的基本原理。（4分）
 - 答：不满足全反射条件
- ◆ 请从几何光学的角度分析通信用光纤导光的基本原理
- ◆ 一块折射率为1.5的等腰直角棱镜浸没在折射率为1.33的水中，光从直角棱面垂直入射，能否在斜面上发生全反射？

1.8 光学系统类别和成像的概念



一、光学系统

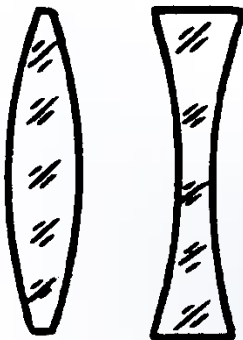
➤ **光学系统**：由一系列反射、折射表面（光学零件）按一定方式组合而成，满足一定使用要求的组合，如望远镜系统、显微镜系统

➤ **光学零件**：反射镜、透镜和棱镜

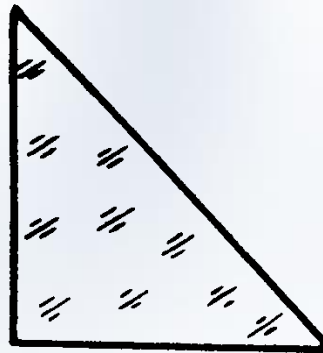
反射镜



透镜



棱镜



1.8 光学系统类别和成像的概念



一、光学系统

◆分类:

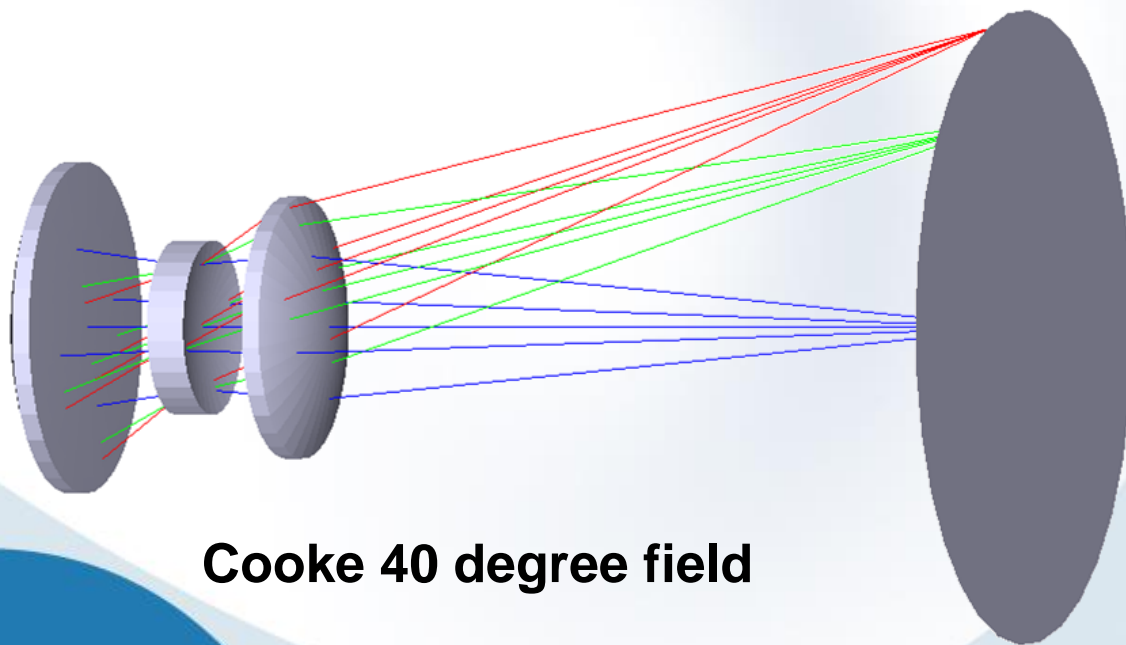
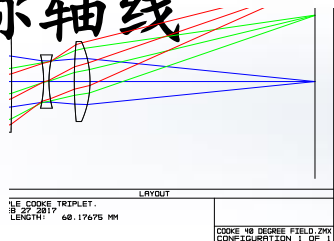
有无对称轴 { 共轴系统: 系统有一条对称轴 (光轴)
非共轴系统: 没有对称轴线

界面形状 { 球面系统: 系统中光学零件均由球面构成
非球面系统: 系统中包含非球面

1.8 光学系统类别和成像的概念



- ◆ **共轴球面系统：** 系统光学零件由球面构成，并且具有一条对称轴线

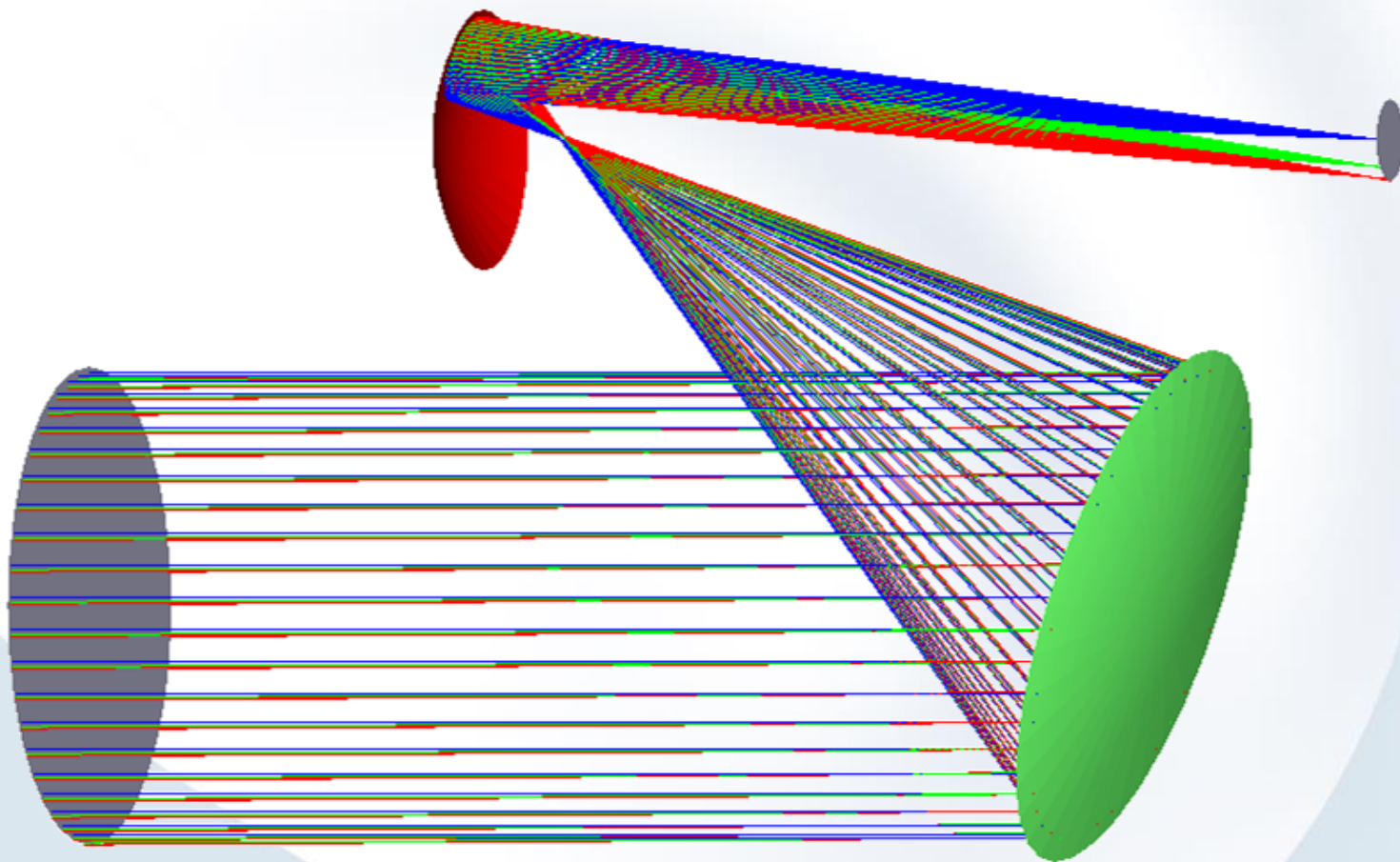


Cooke 40 degree field

1.8 光学系统类别和成像的概念



◆ 非共轴系统



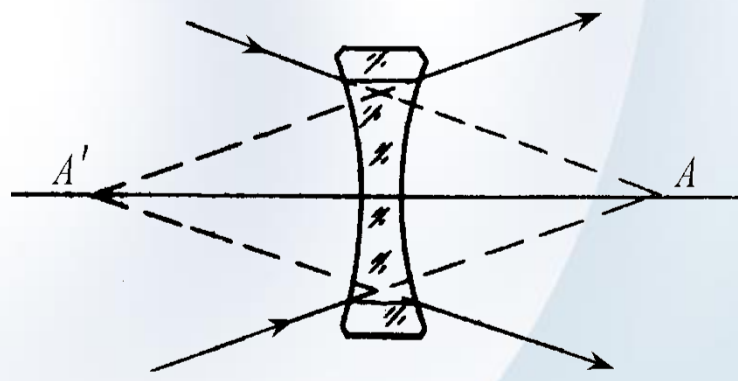
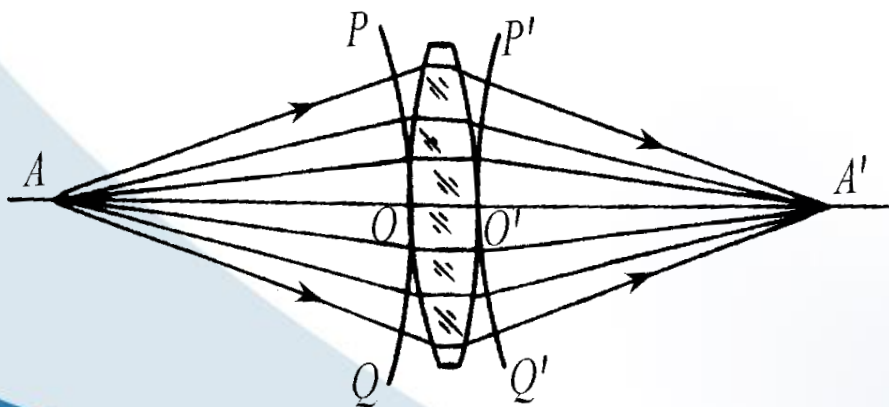
Unobstructed Gregorian

1.8 光学系统类别和成像的概念



二、成像基本概念

- **物：**入射光线的交点
 - ✓ **实物点：**实际入射光线的交点
 - ✓ **虚物点：**入射光线延长线的交点
- **像：**出射光线的交点
 - ✓ **实像点：**出射光线的实际交点
 - ✓ **虚像点：**出射光线延长线的交点



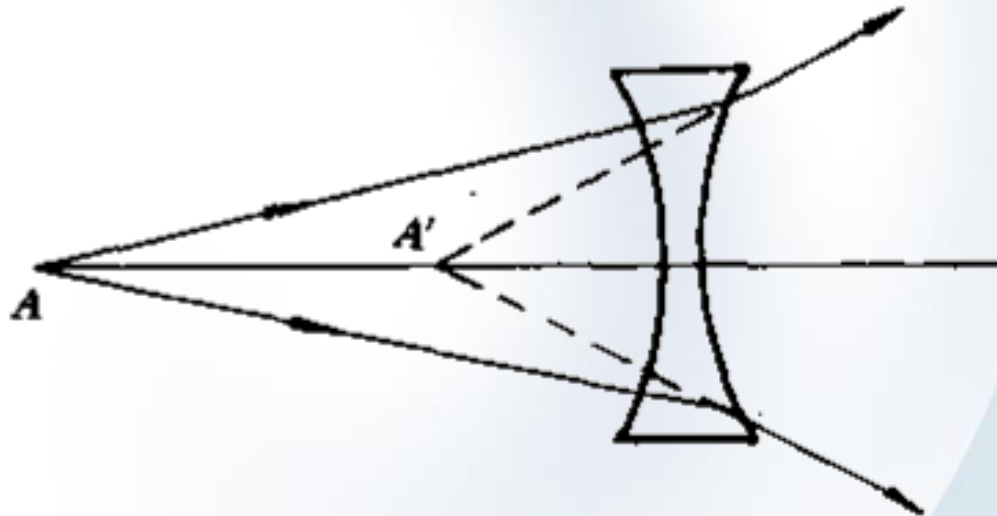
1.8 光学系统类别和成像的概念



二、成像基本概念

- **共轭：**物与像的对应关系
- **物空间：**物所在的空间（包括虚物）
- **像空间：**像所在的空间（包括虚像）

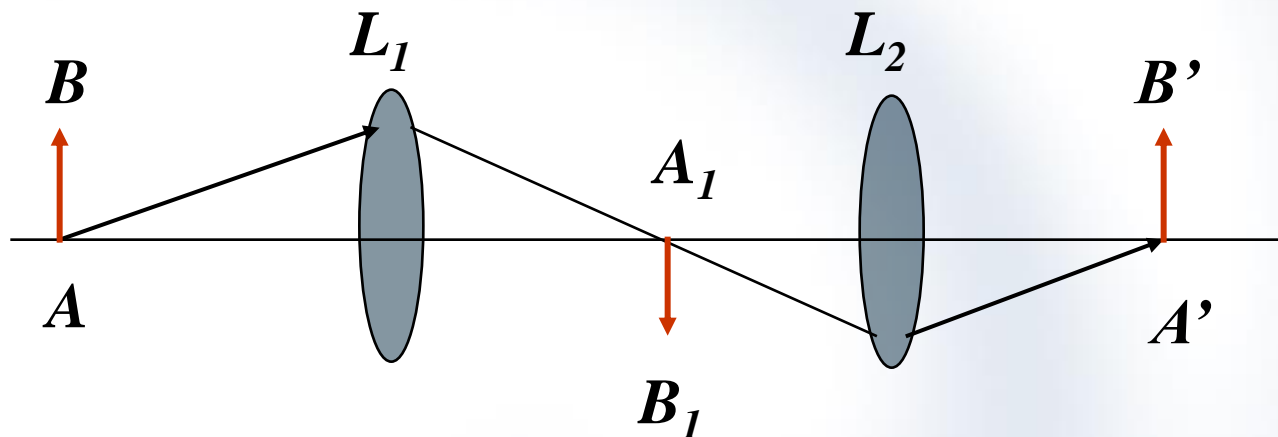
物空间与像空间可能重合



1.8 光学系统类别和成像的概念



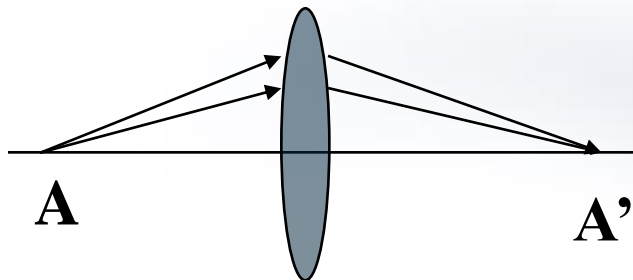
◆ **注意：**物、像的概念是相对于光组来说的



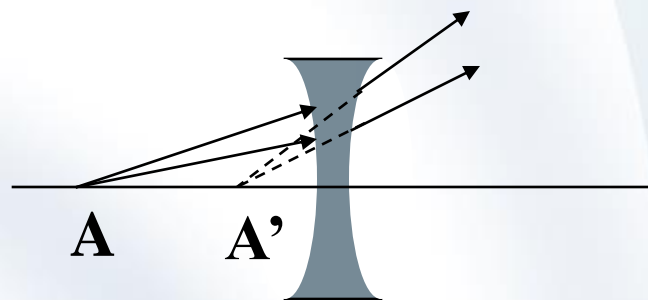
1.8 光学系统类别和成像的概念



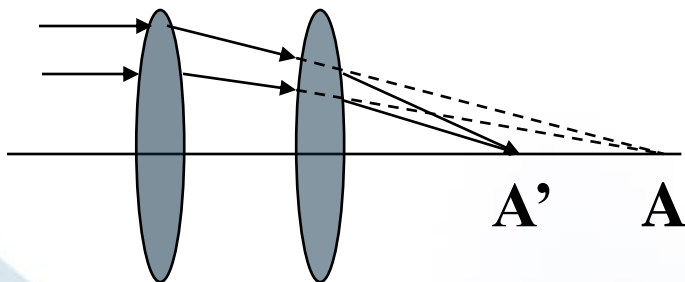
◆物、像的虚实



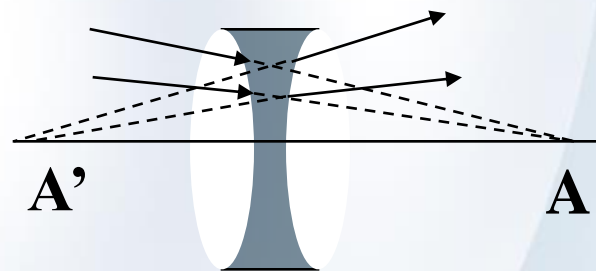
a. 实物成实像



b. 实物成虚像



c. 虚物成实像
(对于第二个透镜)



d. 虚物成虚像



- ◆ 解释什么是虚物？虚物是怎样形成的？

- ◆ 某物点发出的光经理想光学系统后对应的最后出射光束是会聚同心光束，该物点所成的是（ ）
 - A. 实像
 - B. 虚像
 - C. 有可能是实像，也有可能是虚像
 - D. 都不是



◆ 解释什么是虚物？虚物是怎样形成的？

答：虚物是入射光线延长线的交点；前方光学系统产生的会聚光束被后方光学系统截断时，对于后方光学系统而言，入射光线没有实交点，后方光学系统的物就是虚物

◆ 某物点发出的光经理想光学系统后对应的最后出射光束是会聚同心光束，该物点所成的是（ A ）

A. 实像

B. 虚像

C. 有可能是实像，也有可能是虚像

D. 都不是

1.9 理想像和理想光学系统

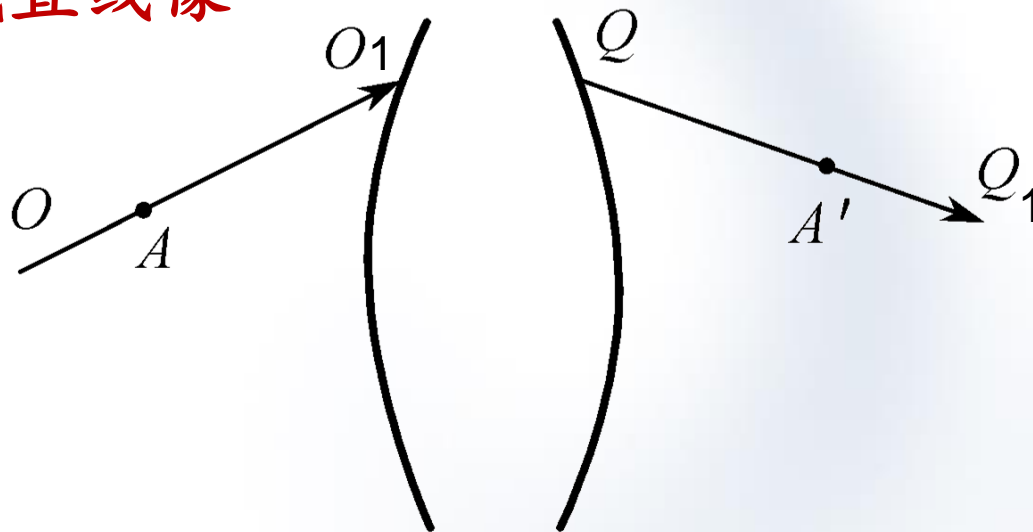


◆理想成像：

➤点物成点像

如果要成像清晰，必须一个物点成像为一个像点

➤直线成直线像

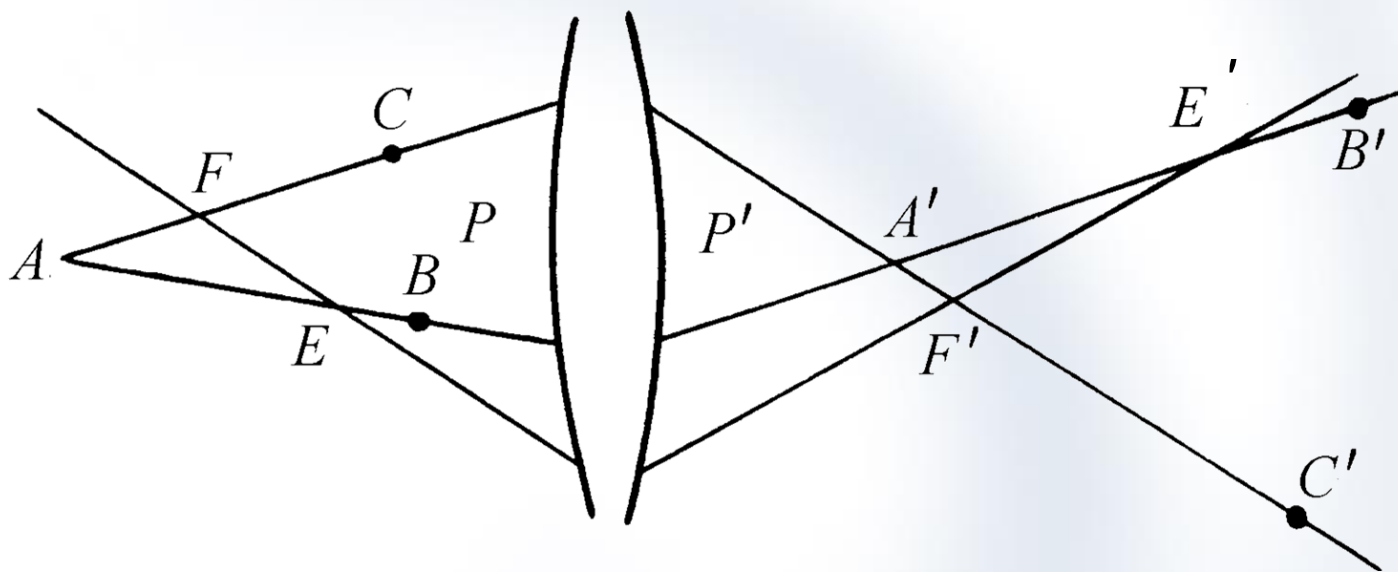


1.9 理想像和理想光学系统



◆理想成像：

➤平面成平面像



- 符合点对应点，直线对应直线，平面对应平面的像称为**理想像**
- 能够成理想像的光学系统称为**理想光学系统**

1.9 理想像和理想光学系统



◆ 共轴理想光学系统的成像性质

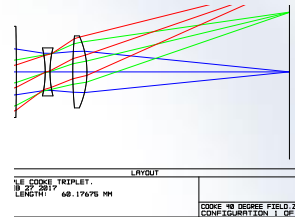
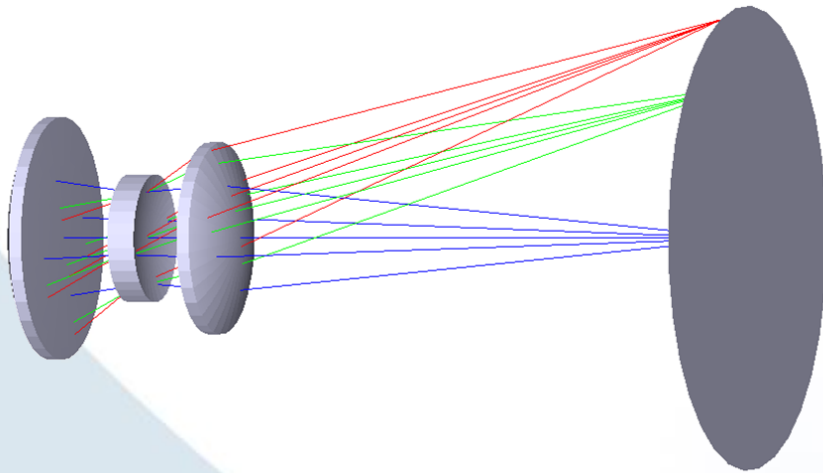
- 1) 轴上点成像在轴上
 - 2) 过光轴的某一截面内的物点与对应的像点在同一平面内
 - 3) 过光轴的任意截面成像性质是相同的
- 空间的问题简化为平面问题，系统可用过光轴的一个截面来代表

1.9 理想像和理想光学系统



◆ 共轴理想光学系统的成像性质

→ 空间的问题简化为平面问题，系统可用过光轴的一个截面来代表

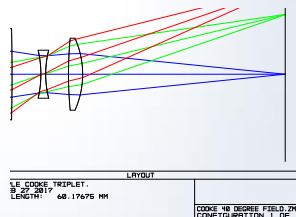
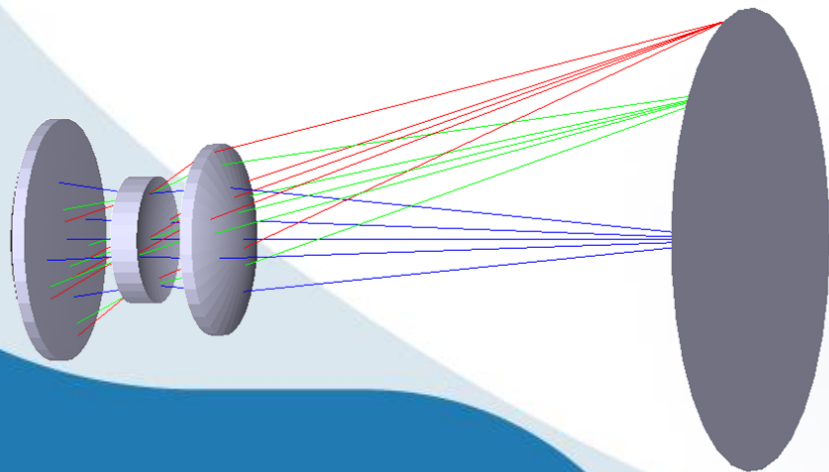
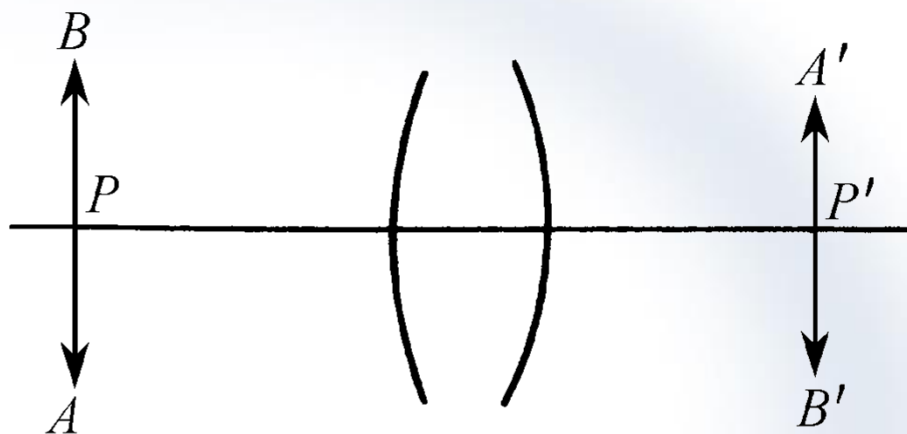


1.9 理想像和理想光学系统



◆ 共轴理想光学系统的成像性质

4) 当物平面垂直于光轴时，像平面也垂直于光轴



1.9 理想像和理想光学系统



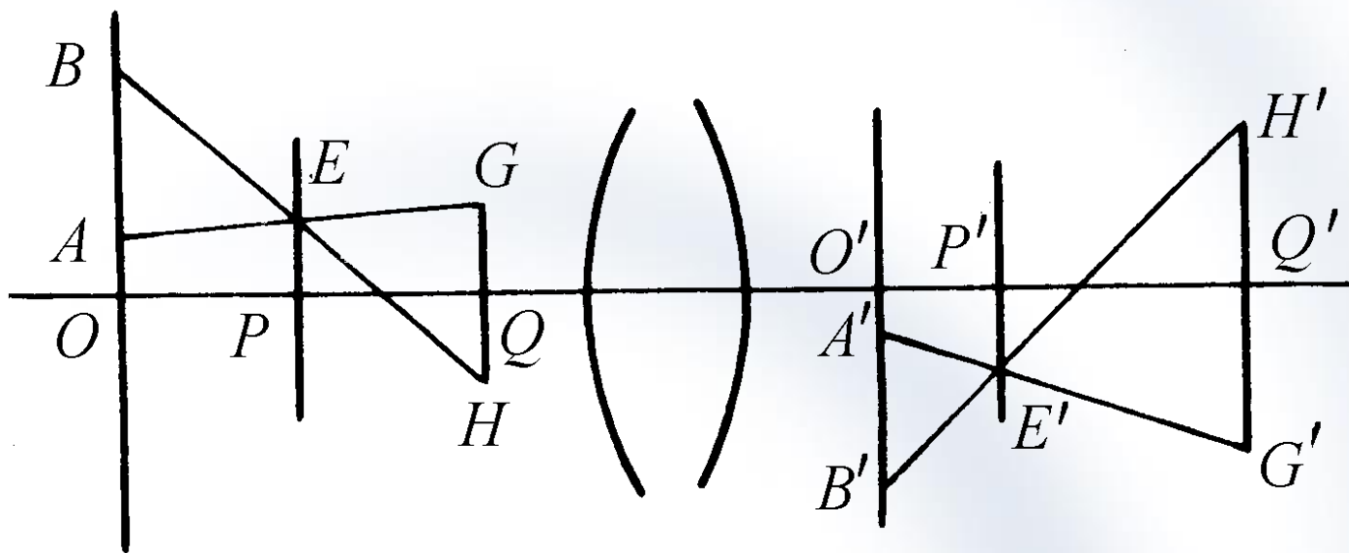
◆ 共轴理想光学系统的成像性质

5) 当物平面垂直于光轴时，像与物完全相似

像高和物高的比值叫放大率： $\beta = \frac{y'}{y}$

相似：物平面上无论什么部位成像，都是按同一放大率成像，即放大率是一个常数

1.9 理想像和理想光学系统



$$\frac{AB}{GH} = \frac{OP}{PQ}$$

$$AB = \frac{OP \times GH}{PQ} = \text{常数}$$

$$\frac{A'B'}{G'H'} = \frac{O'P'}{P'Q'}$$

$$A'B' = \frac{O'P' \times G'H'}{P'Q'} = \text{常数}$$

1.9 理想像和理想光学系统



◆ 共轴理想光学系统的成像性质

6) 如果已知:

- ① 两对共轭面的位置和放大率, 或者:
- ② 一对共轭面的位置和放大率, 以及轴上两对共轭点的位置

则, 其他一切物点的像点都可以根据这些已知的共轭面和共轭点来表示

这些已知的共轭面和共轭点称作基点和基面

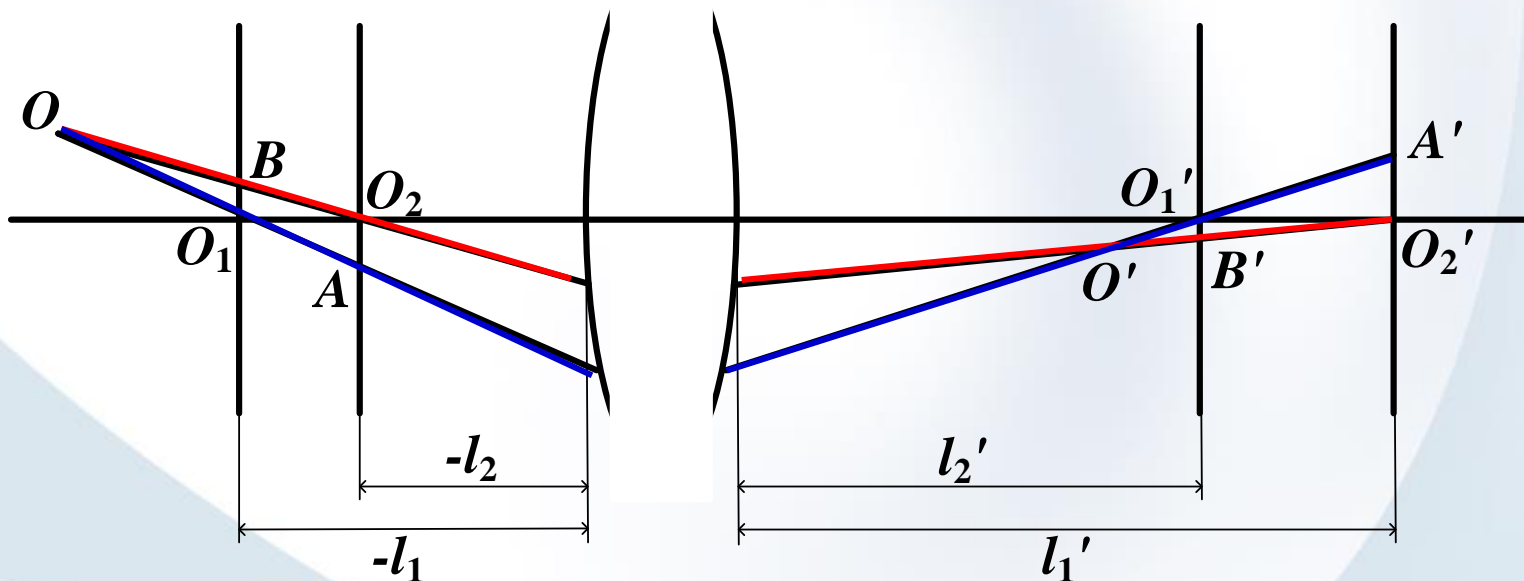
1.9 理想像和理想光学系统



◆ 共轴理想光学系统的成像性质

① 已知两对共轭面的位置和垂轴放大率的情况

$l_1, l_1', l_2, l_2', \beta_1, \beta_2$ 已知

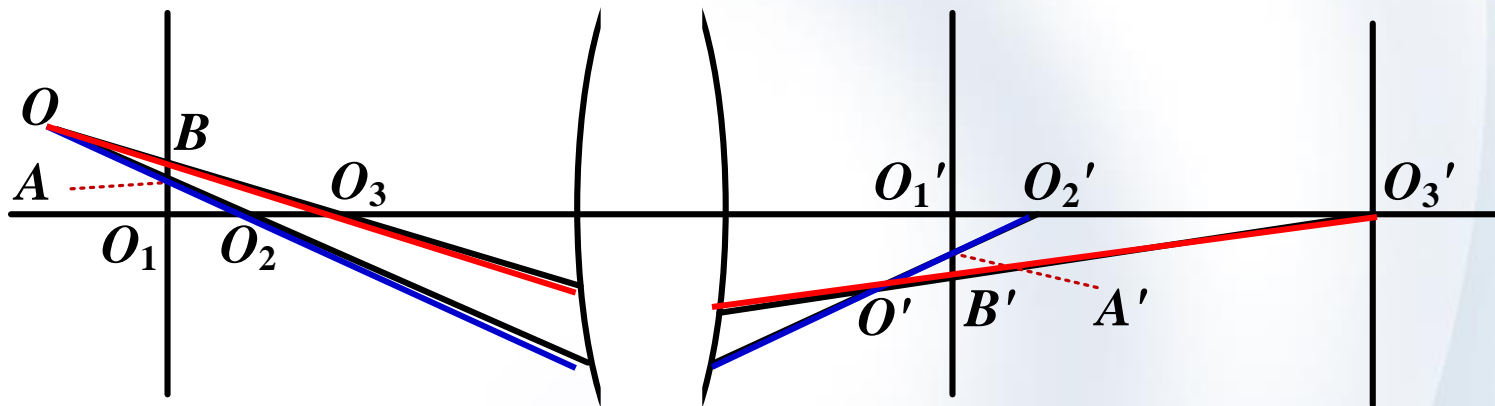


1.9 理想像和理想光学系统



◆ 共轴理想光学系统的成像性质

② 已知一对共轭面的位置和放大率及轴上的两对共轭点的位置





- ◆ 几何光学适用条件
- ◆ 光线、光束、波面等基本概念
- ◆ 光线传播的三大定律
- ◆ 折射率的概念
- ◆ 光路可逆定理、全反射现象
- ◆ 费马原理
- ◆ 成像、理想光学系统的概念