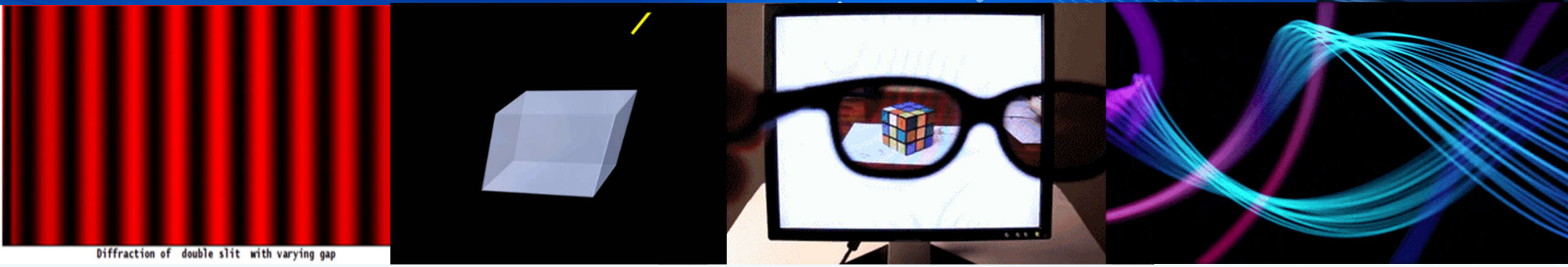
大学物理




# 第五篇 光学

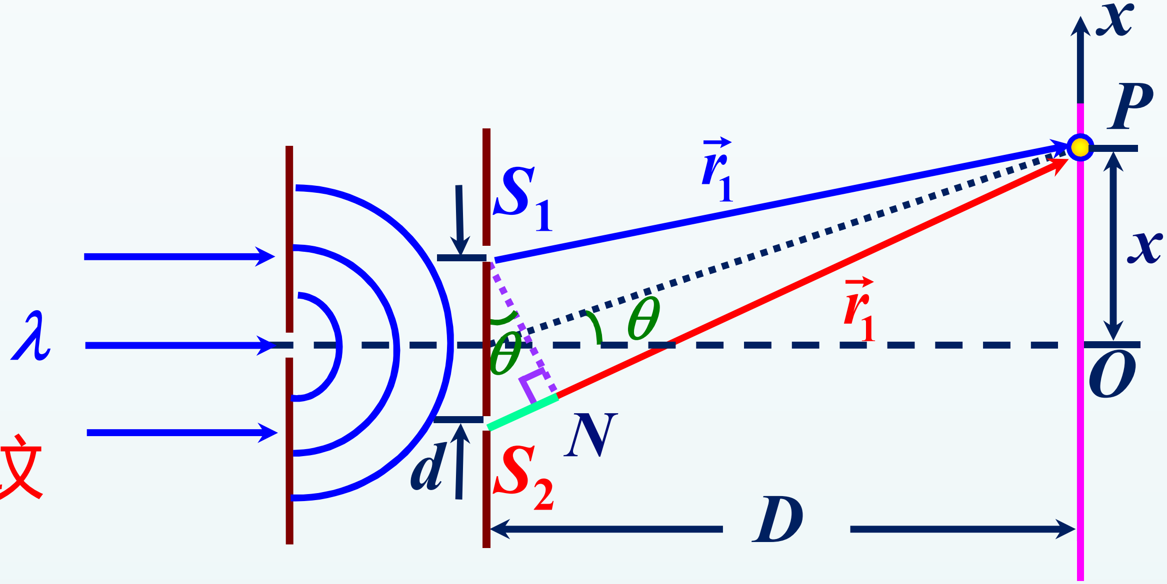
## 第13章 波动光学-3

尹 航

华中科技大学 物理学院

# 回 顾

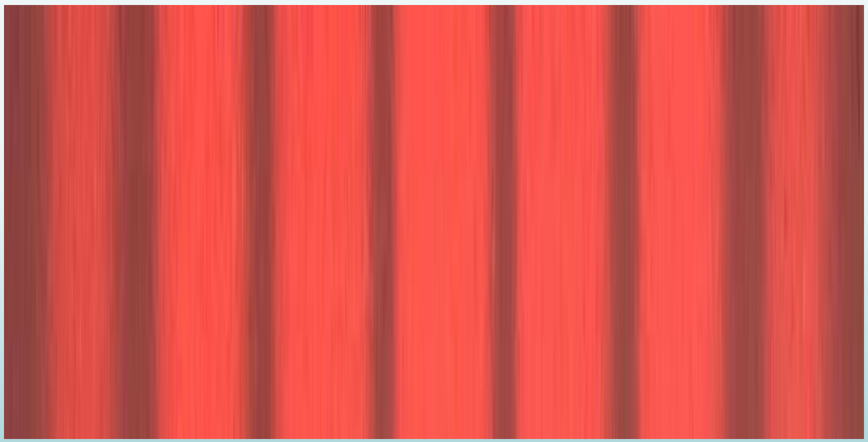
## 分波阵面干涉




杨氏双缝干涉

$$\delta = d \cdot \frac{x}{D} \begin{cases} = \pm k\lambda & \text{明纹} \\ = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases}$$

一系列平行的明暗相间的条纹

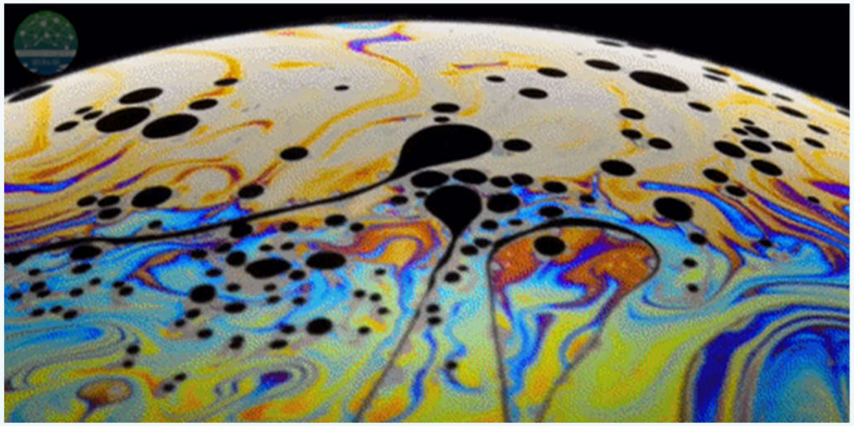


条纹间距 $\Delta x = \dfrac{D}{d}\lambda$

中间级次低，两边级次高 $k = \dfrac{r_2 - r_1}{\lambda}$

# 引子

**几个例子**



日常见到的薄膜干涉

分振幅干涉

# 本节内容

1 分波阵面干涉

2 分振幅干涉

# 分振幅干涉

## □ 分振幅干涉

**薄膜干涉**

膜为什么要薄？ —— 光的相干长度所限。

厚度多少才算薄？

膜的薄、厚是相对的，与光的单色性好坏有关。

有实际意义的薄膜干涉：

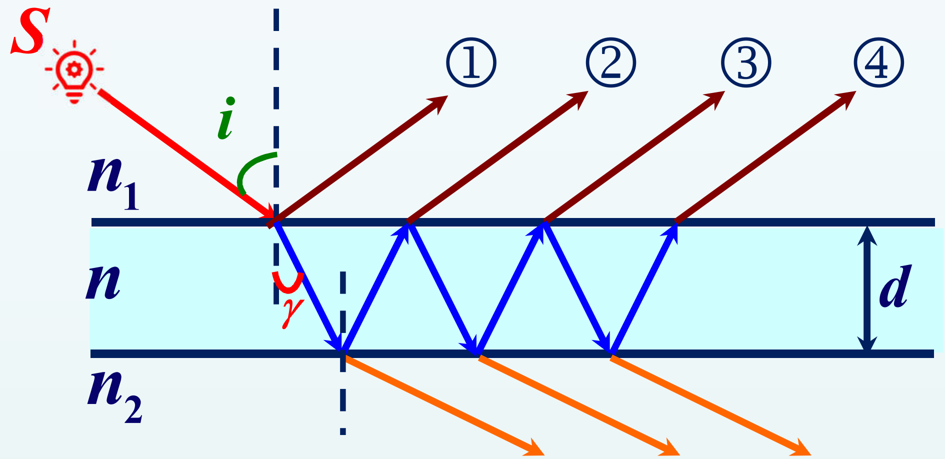
- 厚度均匀薄膜在无穷远处的**等倾条纹**
- 厚度不均匀薄膜表面的**等厚条纹**

# 等倾干涉

## □ 等倾干涉

厚度均匀的薄膜所形成的干涉。

光源照射薄膜，其反射和透射光如图所示：



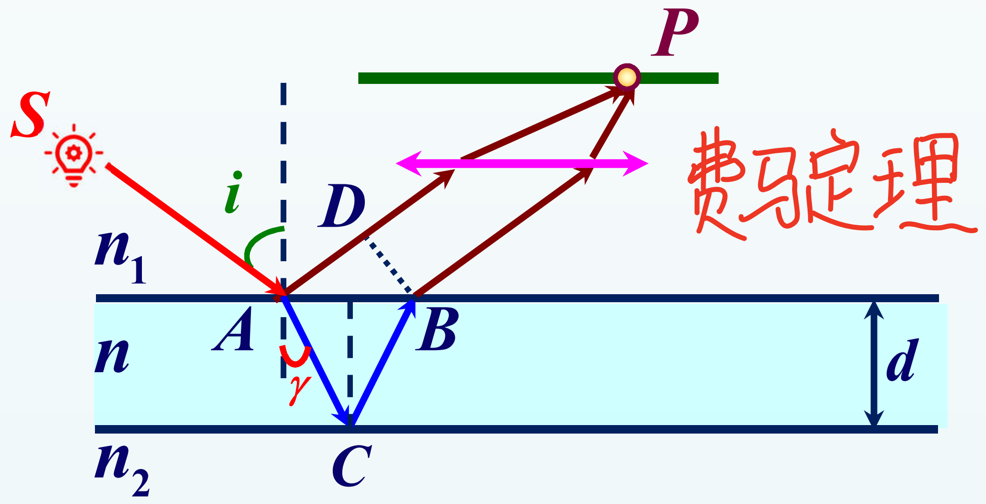

设入射光振幅为$A$，电磁理论给出一系列反射光振幅比：

①：②：③：④=0.2A: 0.192A: 0.00768A: $1.2\times10^{-5}$A

所以，我们只考虑前两条出射光①、②的干涉。

# 等倾干涉

## □ 等倾干涉




若$n_1 < n < n_2$

$$\left.\begin{aligned} &\delta = n(AC+BC) - n_1 AD \\ &AC = BC = \frac{d}{\cos\gamma} \\ &AD = AB\sin i = 2d\tan\gamma\sin i \\ &\text{折射定律}\quad n_1\sin i = n\sin\gamma \end{aligned}\right\} \delta = \frac{2nd}{\cos\gamma} - 2n_1 d\tan\gamma\sin i = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i}$$

$$\boxed{2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i}} = \begin{cases} k\lambda & (k = 1,2,\cdots) \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0,1,2\cdots) \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

$\downarrow$

$2dn\cos r$

# 等倾干涉

$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & (k = 1, 2, \cdots) \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0, 1, 2 \cdots) \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

**注 意:**

① “明纹”公式中，$k \neq 0$，因为光程差不可能为零。

② 明暗条件中**没有±号。**

③ 明暗条件还可用折射角表示：

$$2nd\cos\gamma = \begin{cases} k\lambda & (k = 1, 2, \cdots) \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0, 1, 2 \cdots) \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

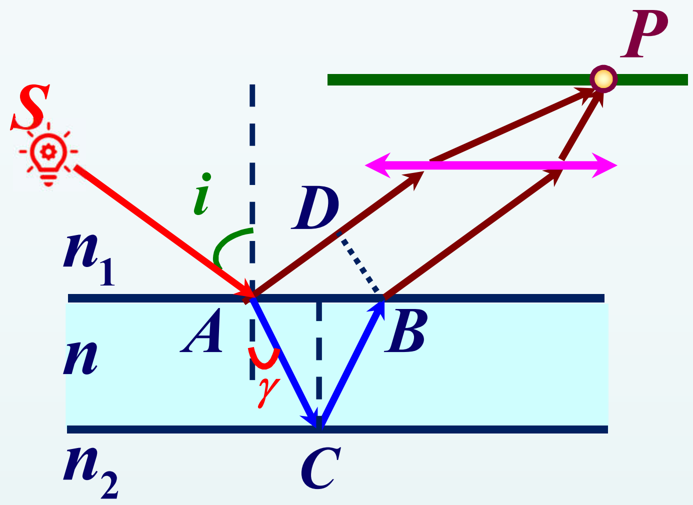
# 等倾干涉

**注 意:**

④ 明暗条件中是否考虑半波损失，要看$n$、$n_1$、$n_2$的关系。

$$\left.\begin{array}{l} n_1 > n > n_2 \\ n_1 < n < n_2 \end{array}\right\} \text{不考虑}$$

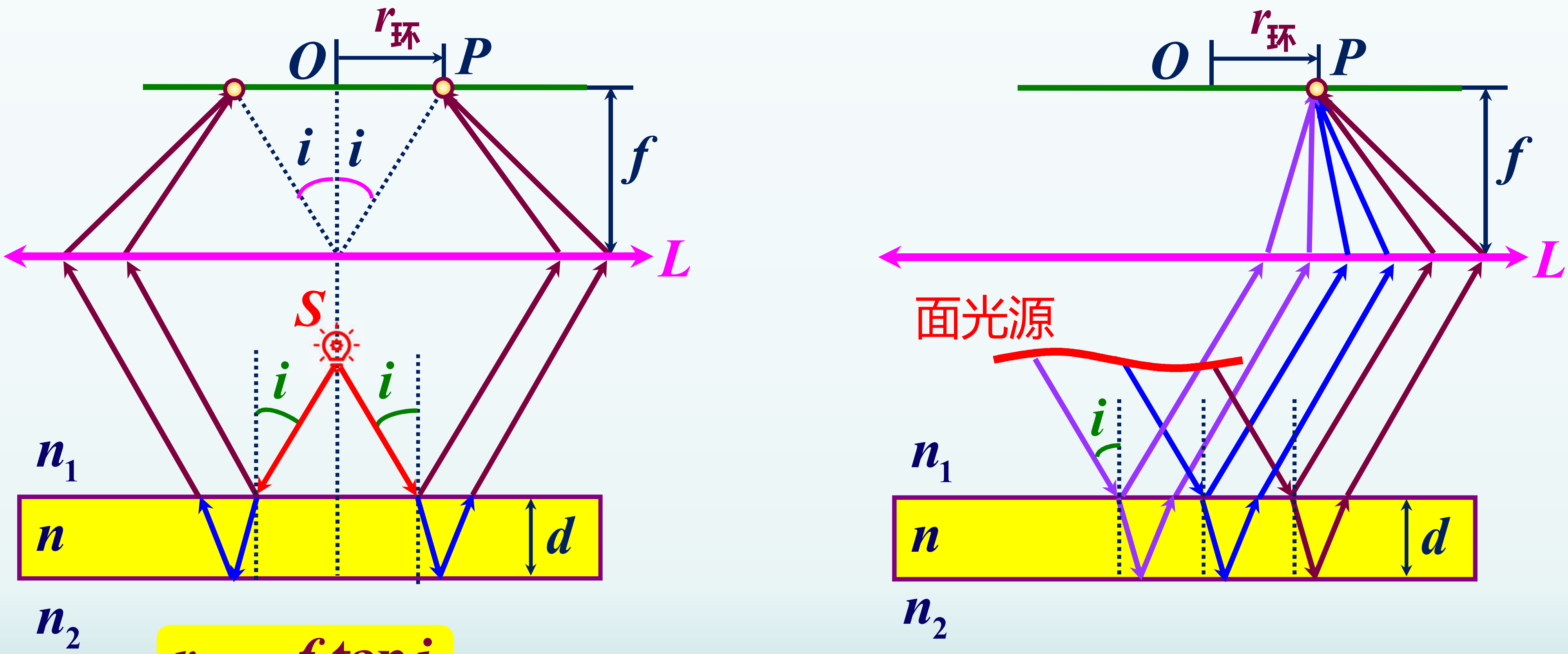
$$\left.\begin{array}{l} n_1 < n > n_2 \\ n_1 > n < n_2 \end{array}\right\} \text{考虑}$$




$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & (k = 1, 2, \cdots) \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0, 1, 2\cdots) \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

# 等倾干涉

- **点光源和面光源的干涉条纹特征**



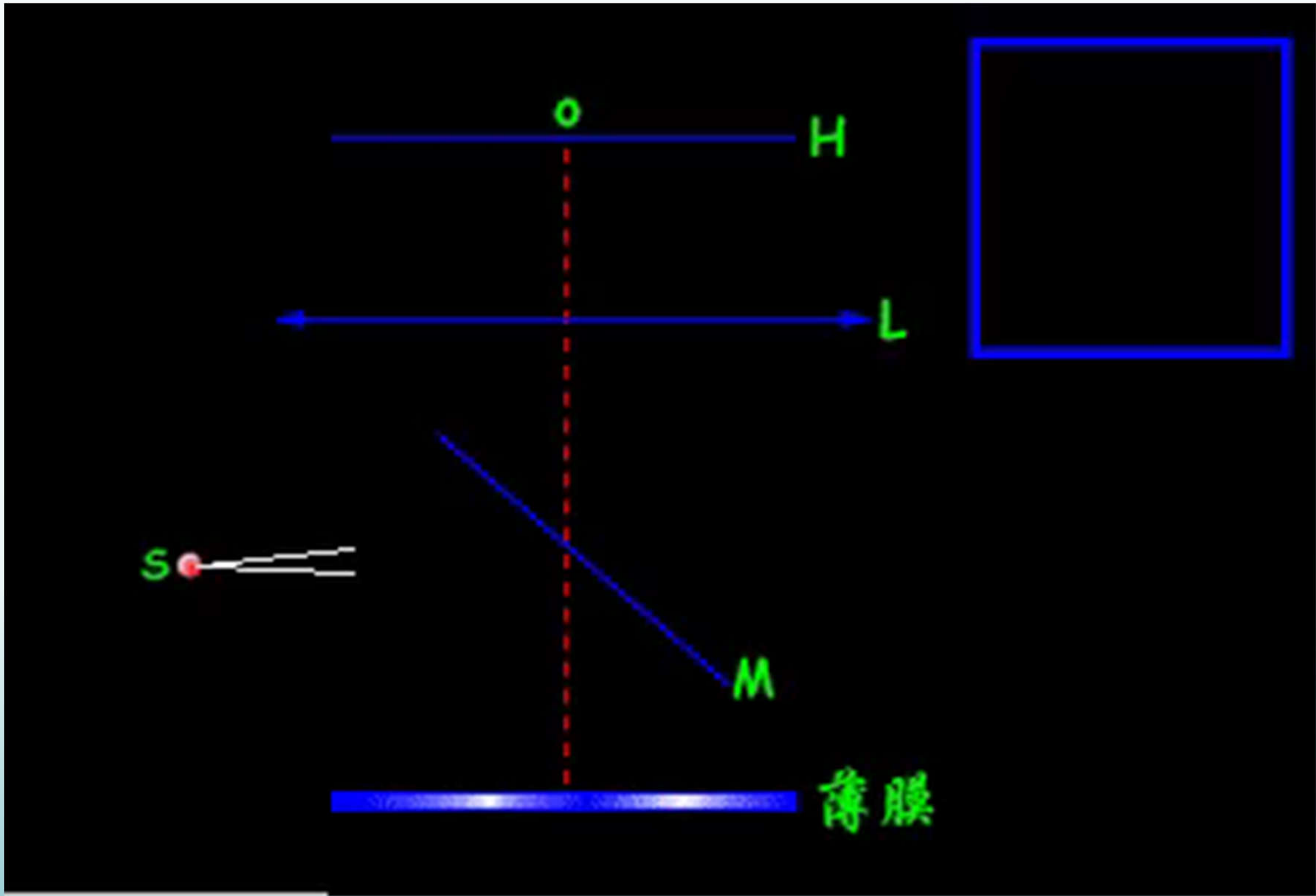

$$r_环 = f\tan i$$

**等倾干涉** 倾角$i$相同的光线对应同一条干涉圆环条纹

不同倾角构成的等倾条纹是一系列同心圆环。

# 等倾干涉

## 等倾干涉过程



# 等倾干涉

- **条纹级次分布**

等倾干涉光程差（无半波损失时）

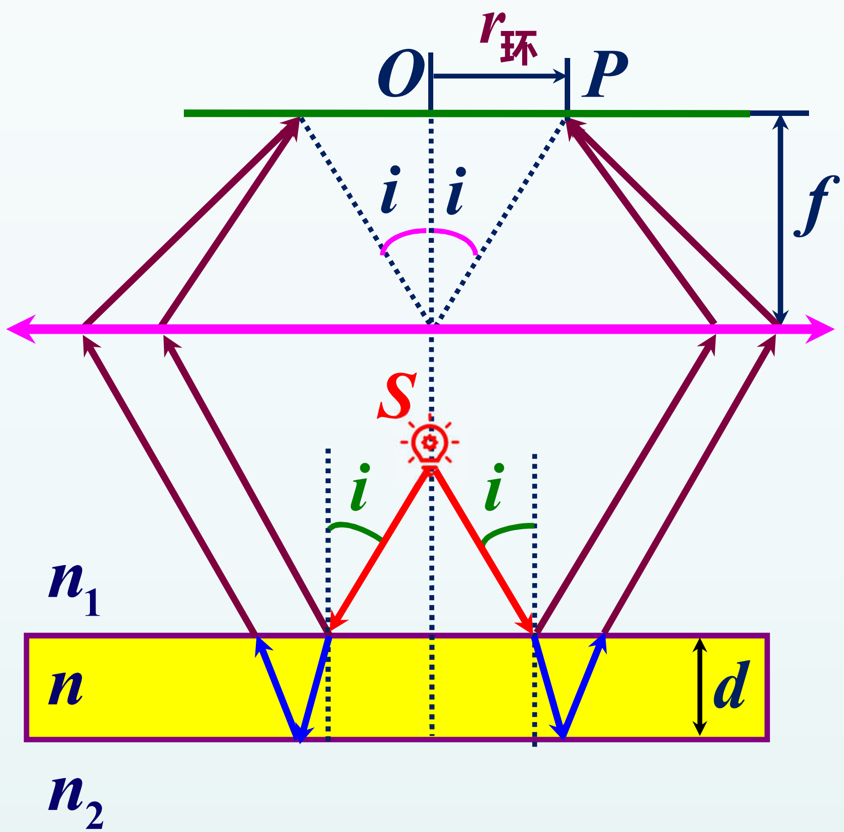
$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} = k\lambda$$ 明纹

干涉圆环半径 $r_{环} = f\tan i$

当$d$一定时 $k\uparrow \longrightarrow i\downarrow \longrightarrow r_{环}\downarrow$

**愈往中心，条纹级数愈高**

中心$O$点处的干涉级数最高！

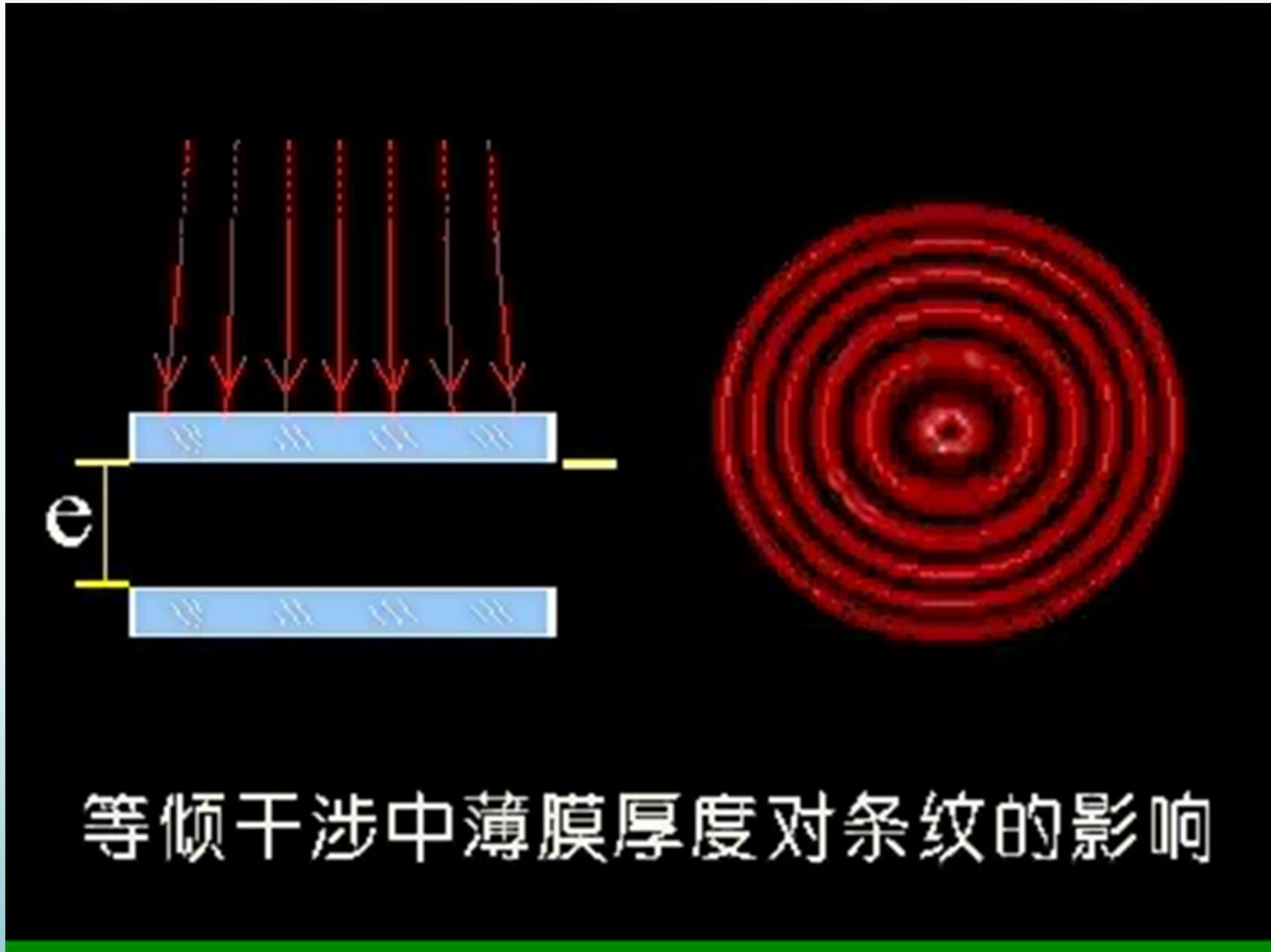



若改变$d$：

- 第$k$级条纹：$d\uparrow \longrightarrow i\uparrow \longrightarrow r_{环}\uparrow$ 中心向外冒条纹
- 第$k$级条纹：$d\downarrow \longrightarrow i\downarrow \longrightarrow r_{环}\downarrow$ 中心向内吞条纹

# 等倾干涉

## 等倾干涉薄膜厚度对条纹的影响

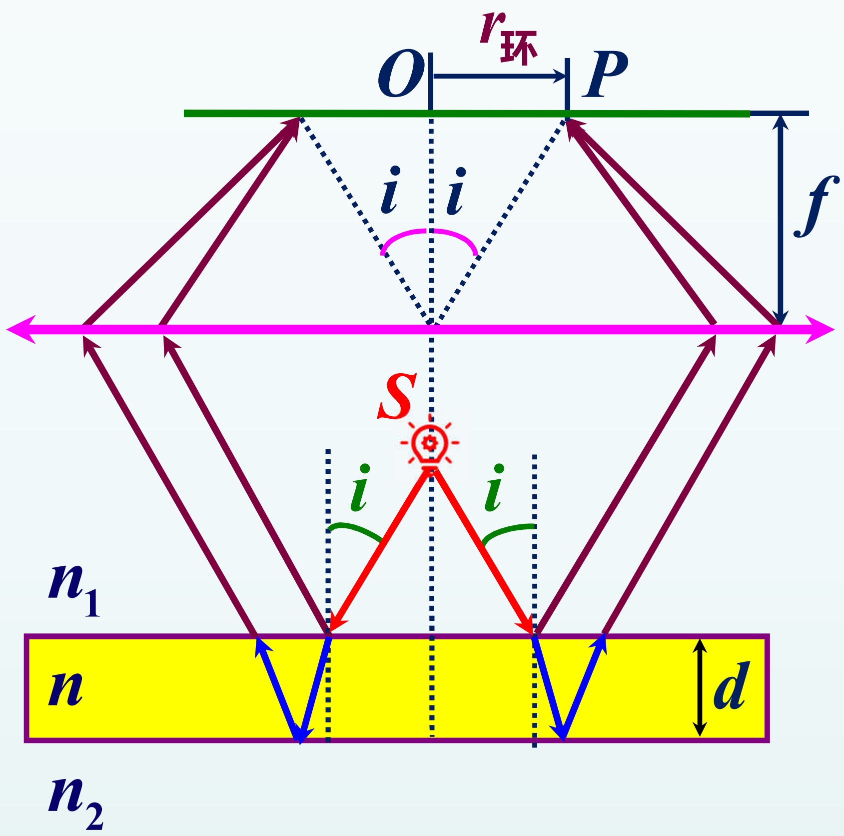


# 等倾干涉

- **条纹间隔分布**

用折射角表示光程差

$$\begin{cases} 2nd\cos\gamma_k = k\lambda \\ 2nd\cos\gamma_{k+1} = (k+1)\lambda \\ \cos\gamma_{k+1} = \cos(\gamma_k - \Delta\gamma_k) \\ \qquad \approx \cos\gamma_k + \Delta\gamma_k \sin\gamma_k \end{cases}$$




$$\longrightarrow |\Delta\gamma_k| \approx \frac{\lambda}{2nd\sin\gamma_k} \longrightarrow \gamma_k\uparrow \longrightarrow |\Delta\gamma_k|\downarrow$$

一系列干涉圆环**内疏外密**

$\gamma_k$越大，干涉圆环越靠外

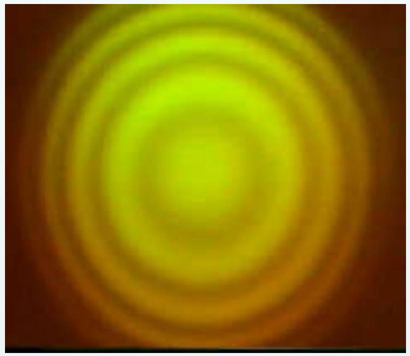
# 等倾干涉

- **条纹间隔分布**

$$|\Delta\gamma_k| \approx \frac{\lambda}{2nd\sin\gamma_k} \longrightarrow \gamma_k\uparrow \longrightarrow |\Delta\gamma_k|\downarrow$$

一系列干涉圆环**内疏外密**

$\gamma_k$越大，干涉圆环越靠外



若光源为**白光** $\delta = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = k\lambda$

$k$、$d$一定 $\lambda\uparrow \longrightarrow i\downarrow \longrightarrow r_{环}\downarrow$

不同波长对应不同半径的干涉圆环

彩色干涉条纹

# 等倾干涉

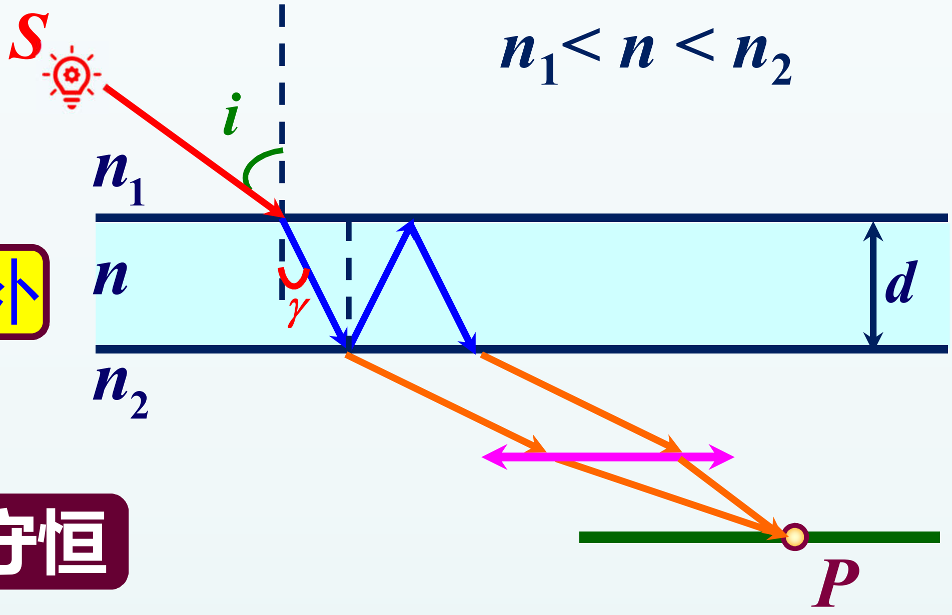
**说 明:**

① 透射光也有干涉现象

透射光干涉图样与反射光互补

互补原因：半波损失

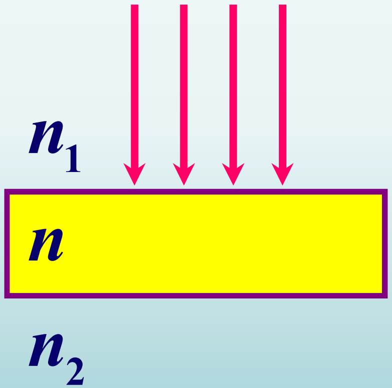
*透射不存在半波损失　**能量守恒**




② 平行光垂直入射的干涉现象：

单色光垂直入射时：

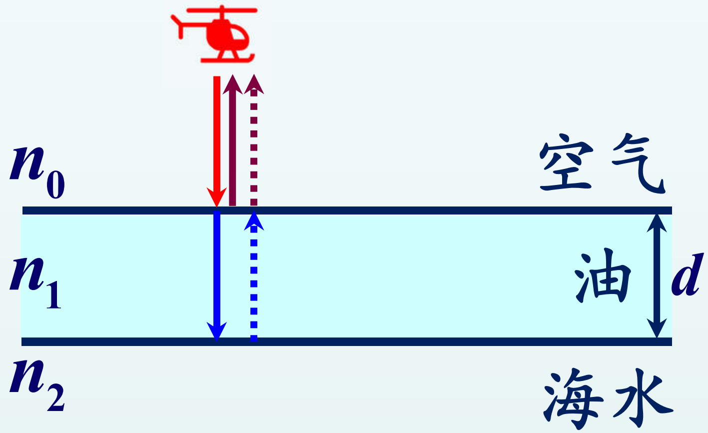
薄膜表面或全亮、或全暗。




白光垂直入射时，薄膜表面有的颜色亮，有的消失

# 等倾干涉

例. 一油轮漏出的油 ($n_1$=1.20)污染了某海域，在海水 ($n_2$=1.30)表面形成一层薄薄的油污。(1) 如果太阳正位于海域上空，一飞机驾驶员从机上向下观察，他所正对的油层厚度为460nm，他将观察到油层呈什么颜色？



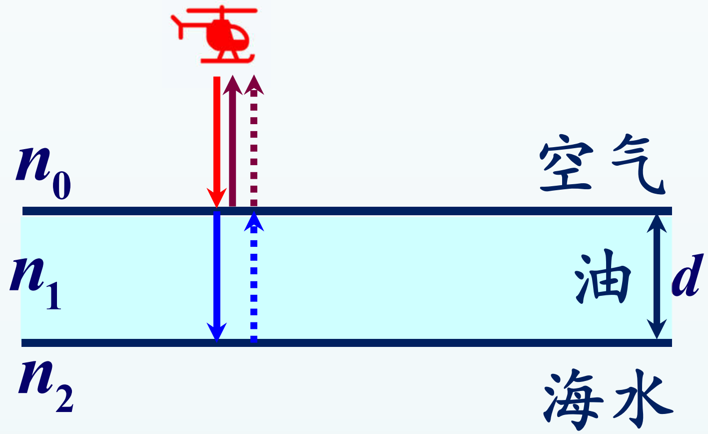

解：油层上下表面反射的太阳光均有半波损失。

光程差 $\delta = 2n_1 d$

飞行员看到的颜色 → 该颜色光波在油膜表面干涉加强

可见光频段范围　760 nm ~ 400 nm

# 等倾干涉




**解：** 油层上下表面反射的太阳光均有半波损失。

光程差 $\delta = 2n_1 d$

飞行员看到的颜色 ⟶ 该颜色光波在油膜表面干涉加强

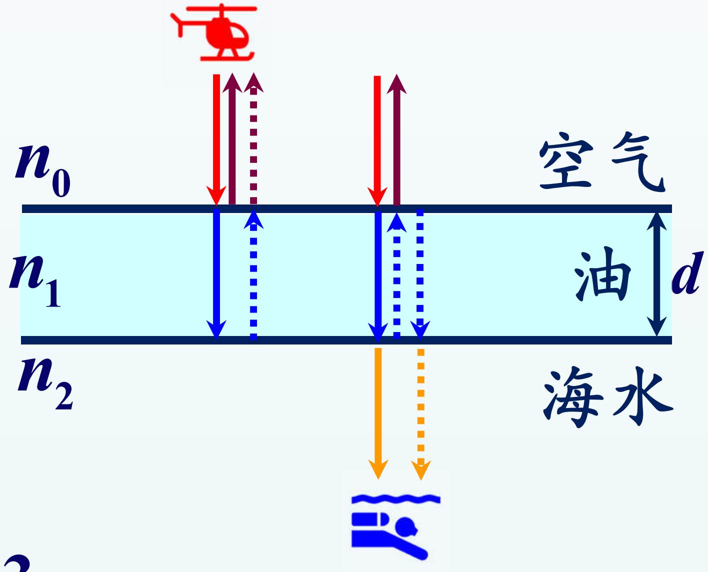
看到 → 可见光频段范围 760 nm ~ 400 nm

干涉加强条件 $\delta = 2n_1 d = k\lambda$

$$\begin{cases} k=1 & \lambda_1 = 1104\ \text{nm} & \text{红外} \\ k=2 & \lambda_2 = 552\ \text{nm} & \text{可见} \longrightarrow \text{绿} \\ k=3 & \lambda_3 = 368\ \text{nm} & \text{紫外} \end{cases}$$

# 等倾干涉

(2) 如果一潜水员潜入该区域水下，又将观察到油层呈什么颜色？




**解：** 透射光无半波损失

油与海水界面的反射光存在半波损失

光程差 $\delta = 2n_1 d_1 + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda \quad k = 1,2,3......$

$k=1 \quad \lambda_1 = 2208\ \text{nm}$ 红外

$k=2 \quad \lambda_2 = 736\ \text{nm}$ 可见，红

$k=3 \quad \lambda_3 = 441.6\ \text{nm}$ 可见，紫

紫红色

$k=4 \quad \lambda_4 = 315.4\ \text{nm}$ 紫外

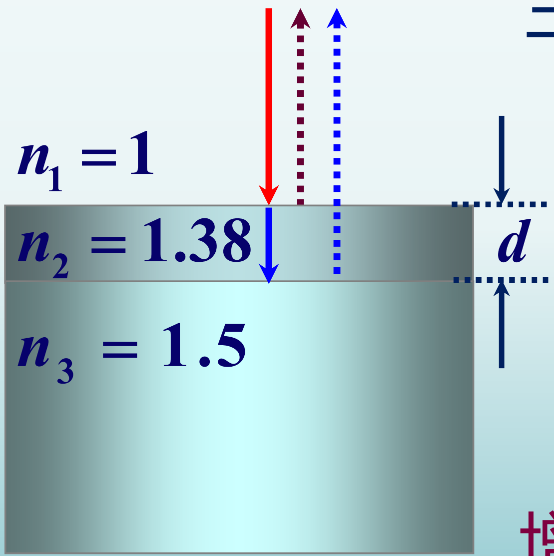
# 等倾干涉

- **等倾干涉应用**

① 测定波长或薄膜的厚度 $2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = k\lambda$

② 增透膜、增反膜（提高或降低光学器件的透射率）

增透 → 减少反射 ⟶ 薄膜上下两界面反射光干涉相消




干涉相消条件得 $\delta = 2n_2 d = (2k-1)\dfrac{\lambda}{2}$

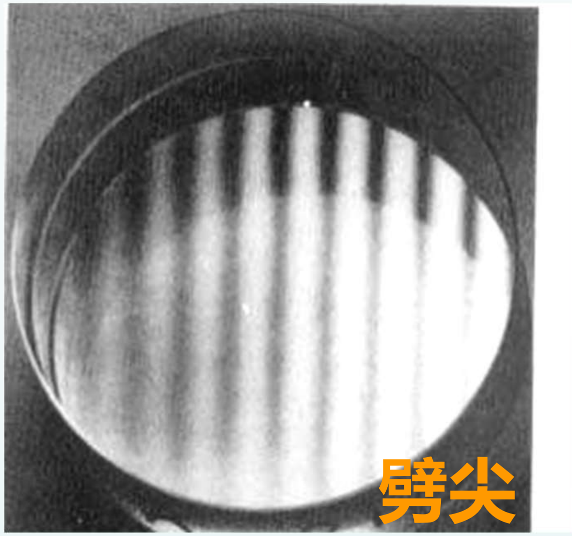
$k = 1,2,3......$

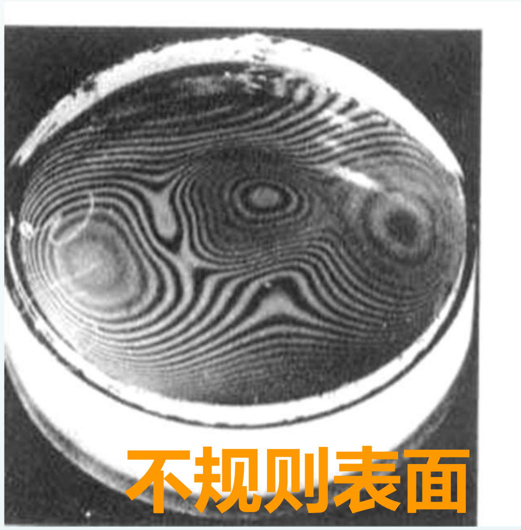
膜的最小厚度为：$d = \dfrac{\lambda}{4n_2}$

增反膜：薄膜上下界面反射光干涉相长

# 分振幅干涉

## 等厚干涉




# 等厚干涉

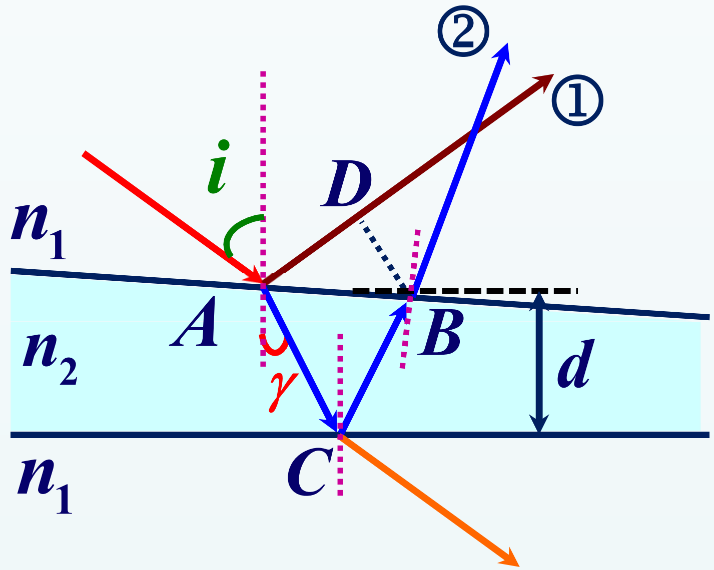
## □ 等厚干涉

厚度不均匀的薄膜干涉

$$\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \frac{\lambda}{2}$$

通常观察方向垂直于膜面：

$$\delta = 2n_2 \boxed{d} + \frac{\lambda}{2}$$




光束①和②相交在膜的附近，观测条纹需将系统要调焦于膜附近。

膜上厚度相同的位置→相同的光程差 ⟶ 对应同一级条纹

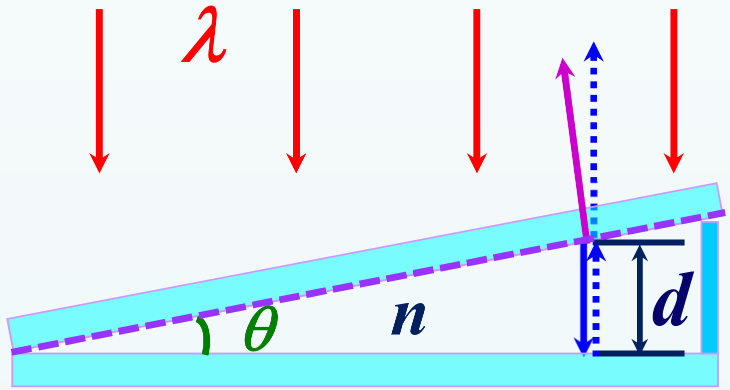
→ **等厚干涉** ←

干涉条纹形状反映膜的等厚点轨迹。

# 等厚干涉

## □ 等厚干涉的应用

- **劈尖干涉**




薄膜两表面为平面，且有一极小夹角

**空气劈尖：** 薄膜中间是空气 $n=1$

劈尖角很小，若垂直入射，则为垂直折、反射。

明暗条件：

$$2d+\frac{\lambda}{2}=\begin{cases} k\lambda & k=1,2,3\ldots\ldots \quad \text{明纹中心} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k=0,1,2\ldots\ldots \quad \text{暗纹中心} \end{cases}$$

# 等厚干涉

- **等厚干涉条纹的分布特征**

$$2d+\frac{\lambda}{2}=\begin{cases}k\lambda\\(2k+1)\frac{\lambda}{2}\end{cases}$$

① 每一$k$ 值对应劈尖某一确定厚度$d$

同一厚度对应同一干涉条纹 —— **等厚条纹**

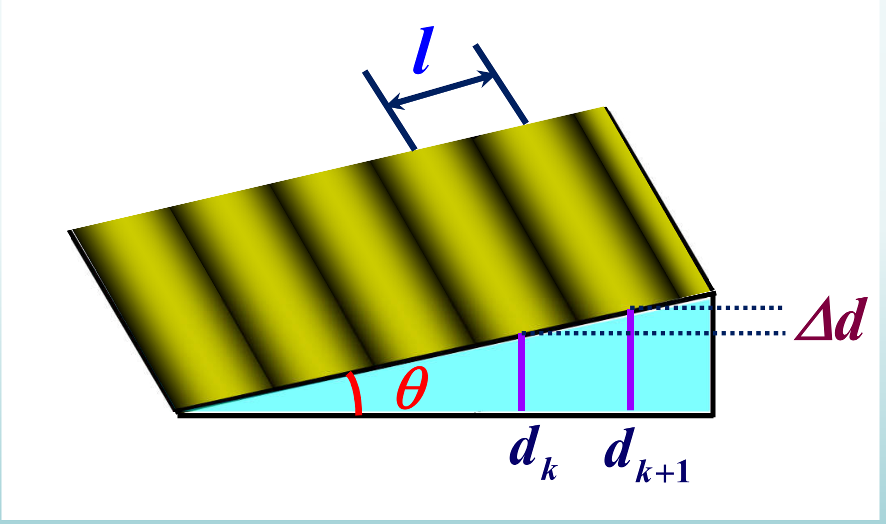
② 条纹形状：平行于棱边的直线 ⟶ 等厚点轨迹

棱边处 $d=0$，$\delta=\frac{\lambda}{2}$ **暗条纹**

③ 相邻两明（暗）纹间对应

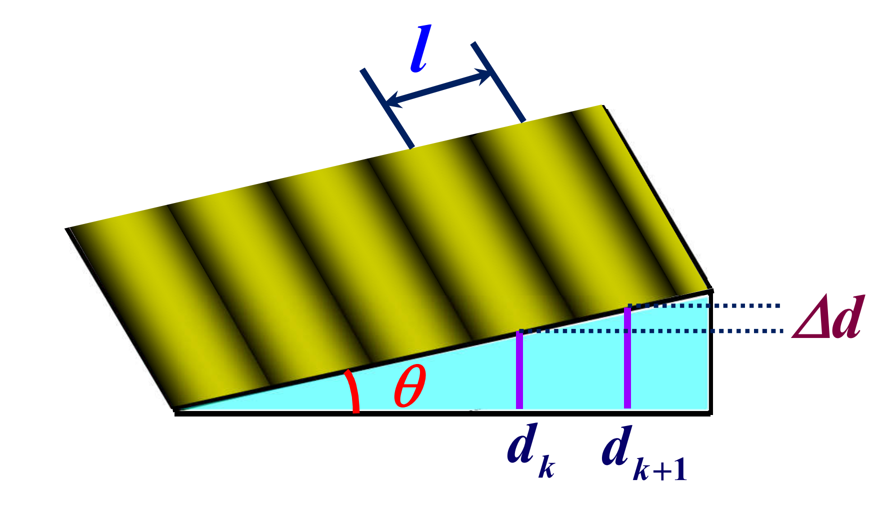
厚度差 $\Delta d$

④ 相邻两明（暗）纹对应间距$l$



# 等厚干涉

③ 相邻两明（暗）纹间对应




厚度差 $\Delta d$

以相邻的两条明纹为例

$$\left.\begin{aligned} 2d_k+\frac{\lambda}{2}&=k\lambda \\ 2d_{k+1}+\frac{\lambda}{2}&=(k+1)\lambda \end{aligned}\right\}\Delta d_{\Delta k=1}=\frac{\lambda}{2}$$

介质劈尖：$\Delta d_{\Delta k=1}=\dfrac{\lambda}{2n}$

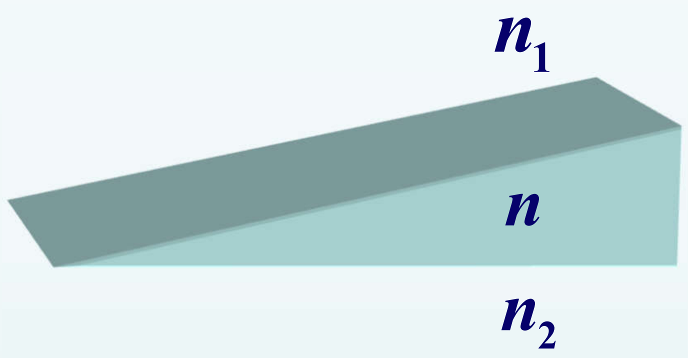
④ 相邻两明（暗）纹对应间距$l$　$l=\Delta d/\sin\theta\approx\Delta d/\theta$

$$l=\frac{\lambda}{2\theta}\xrightarrow{\text{介质劈尖}}l=\frac{\lambda}{2n\theta}\begin{cases}\theta、\lambda\text{一定}\longrightarrow\text{条纹等间距}\\ \theta\text{一定}:\lambda\uparrow\longrightarrow l\uparrow(\text{疏})\quad \lambda\downarrow\longrightarrow l\downarrow(\text{密})\\ \theta\uparrow\longrightarrow\text{条纹变密}\xrightarrow{\theta\uparrow\uparrow}\text{密不可分}\end{cases}$$

# 等厚干涉

⑤ 白光照射时，将看到由劈尖棱边逐渐分开的彩色直条纹。

⑥ 介质劈尖




光程差：$\delta = 2nd + \dfrac{\lambda}{2}$ or $\delta = 2nd$

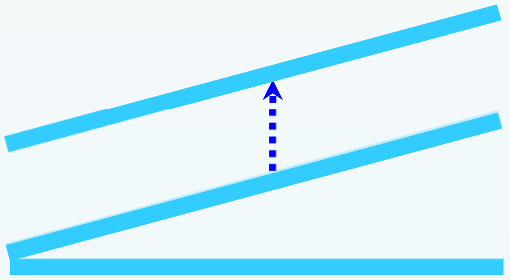
相邻条纹间距：$l = \dfrac{\lambda}{2n\theta}$

劈尖上下表面都有半波损失时　　棱边$d$=0处为**明纹**

劈尖上下表面仅一面有半波损失时　　棱边$d$=0处为**暗纹**

# 等厚干涉

例. 下图两种情况条纹的变化？



$$l=\frac{\lambda}{2\theta}$$ 间距不变

$$2d\uparrow+\frac{\lambda}{2}=\begin{cases}k\uparrow\lambda\\(2k\uparrow+1)\frac{\lambda}{2}\end{cases}$$

$$l\downarrow=\frac{\lambda}{2\theta\uparrow}$$

间距不变，从右向左平移，逐渐消失。？

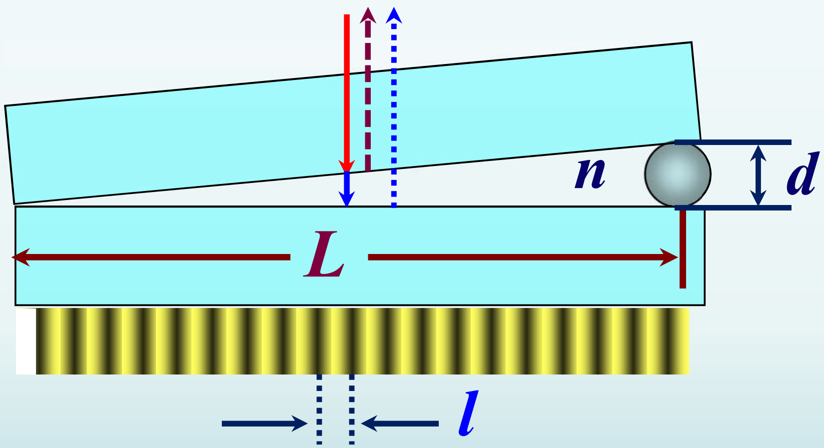
间距逐渐变小，直至密不可分，逐渐消失。

# 等厚干涉

- **劈尖的应用**

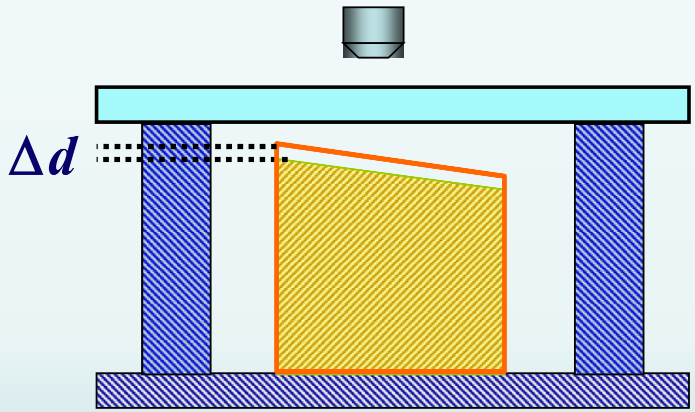
**测量：** 波长、折射率、测细丝的直径、厚度微小变化、检测表面的平整度、薄膜厚度的测定等等。

**测细丝的直径**

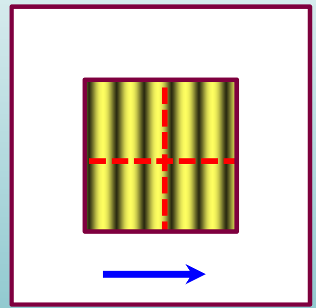



$$\left.\begin{aligned} l &= \lambda/(2n\theta) \\ \theta &= d/L \end{aligned}\right\} d = \frac{\lambda}{2n}\cdot\frac{L}{l}$$

**测微小的厚度变化**




干涉膨胀仪



$$\Delta d = \boxed{N}\frac{\lambda}{2}$$

$N$：条纹移动条数