大学物理

张磊 （13072919527）
B824，Cyrus Tang Building

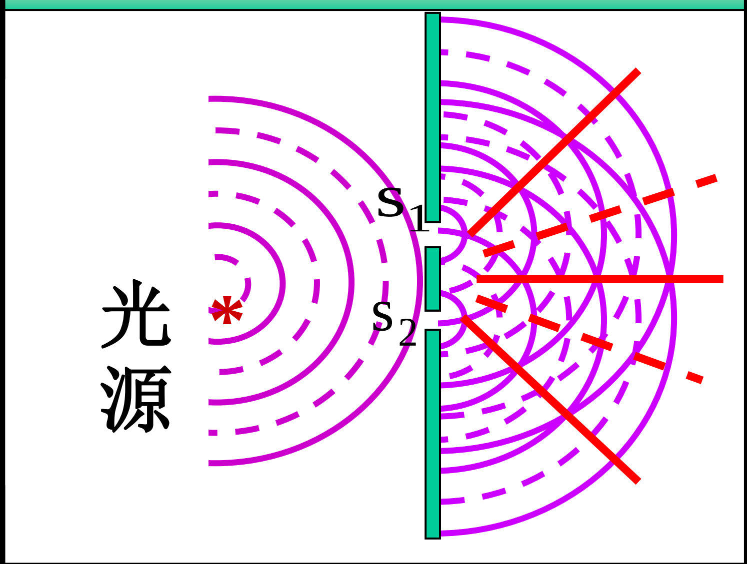
获得相干光的方法 杨氏实验

原理： 将同一光源上同一点或极小区域发出的一束光分成两束

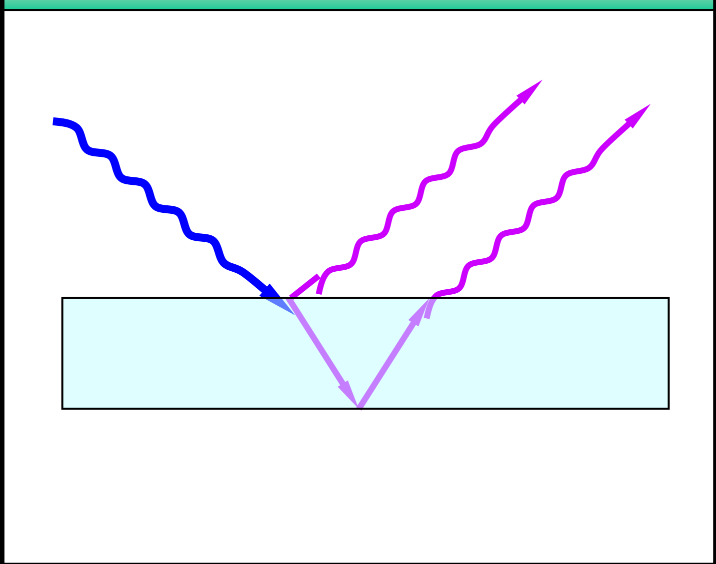
这两束光满足相干条件，是相干光；让它们经过不同的传播路径后，再使它们相遇，发生干涉现象

获得相干光的方法
- **1. 分波阵面法**（杨氏实验）
- **2. 分振幅法**（薄膜干涉）

分波阵面法



分振幅法

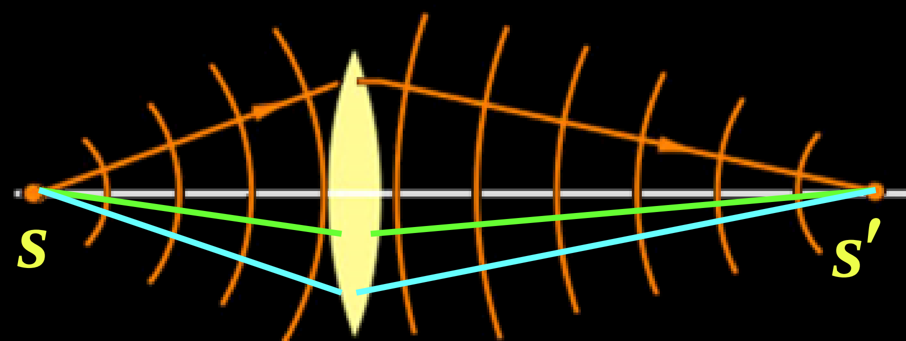


光程和光程差

光程是一个折合量，在相位改变相同的条件下，把光在介质中传播的路程折合为光在真空中传播的路程

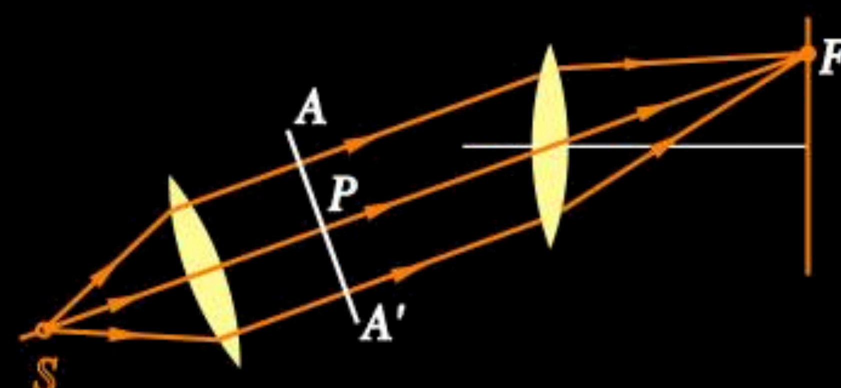
$$x = nr \qquad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\delta$$

透镜物象等光程原理



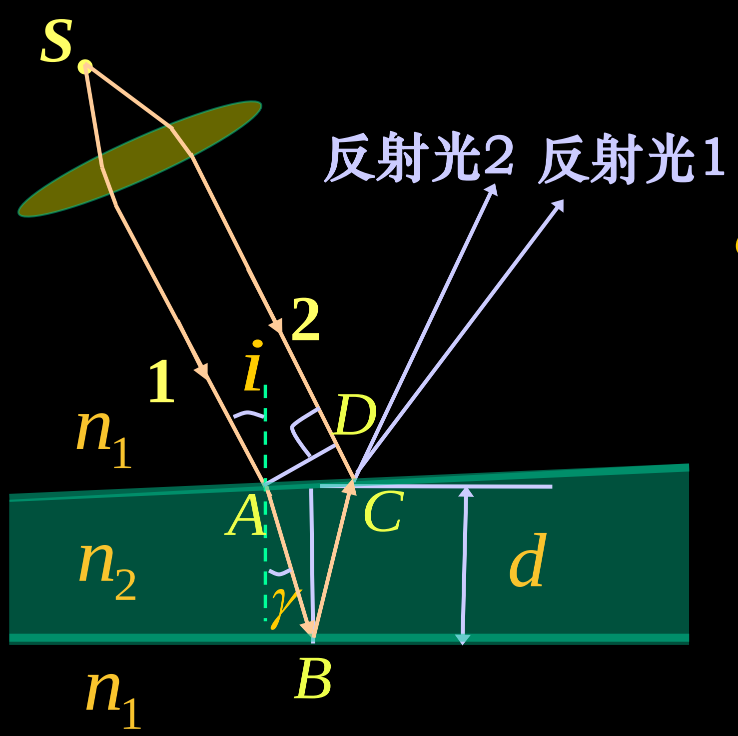
像点是物点光线经透镜后干涉加强点

物点发出的经透镜折射后到像点的所有光线的光程相等



透镜能改变物象间光线传播方向，但不附加光程差

薄膜干涉之等厚干涉(厚度不均匀的薄膜)

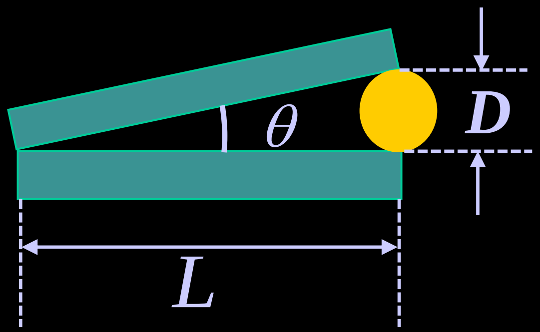


$$\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \frac{\lambda}{2}$$

$$= \begin{cases} 2k \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 1,2,\cdots \text{相长干涉} \\ (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \text{相消干涉} \end{cases}$$

例 为了测量一根细的金属丝直径 D，按图办法形成空气劈尖，用单色光照射形成等厚干涉条纹，用读数显微镜测出干涉明条纹的间距，就可以算出 D。已知 单色光波长为589.3 nm，测量结果是：金属丝与劈尖顶点距离 L=28.880 mm，第1条明条纹到第 31 条明条纹的距离为 4.295 mm

求 金属丝直径 D



解 $\sin\theta \approx \dfrac{D}{L}$ $\quad a\cdot\dfrac{D}{L}=\dfrac{\lambda}{2}$ $\quad D=\dfrac{L}{a}\cdot\dfrac{\lambda}{2}$

由题知 $a=\dfrac{4.295}{30}=0.14317\text{mm}$

直径 $D=\dfrac{L}{a}\cdot\dfrac{\lambda}{2}=\dfrac{28.880}{0.14317}\times\dfrac{1}{2}\times 0.5893\times10^{-3}\,\text{mm}$

$=0.05944\text{mm}$

例 一平面单色光波垂直照射在厚度均匀的薄油膜上，油膜覆盖在玻璃板上，所用光源波长可连续变化，观察到500nm和700nm这两个波长的光在反射中消失。油的折射率为1.30，玻璃的折射率为1.50

求 油膜的最小厚度

解 根据题意，不需考虑半波损失，暗纹的条件为

$$\begin{cases} 2nd = (2k_1 + 1)\dfrac{\lambda_1}{2} \\ 2nd = [2k_2 + 1]\dfrac{\lambda_2}{2} \end{cases} \qquad k_1 = k_2 + 1$$

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{500 \times 700}{2 \times 1.30 \times (700 - 500)}$$

$$= 6.73 \times 10^2 (\text{nm})$$

例 在平面玻璃板上滴一滴油，用 λ=576nm 的单色光垂直照射，从反射光中看到图示的干涉条纹。

问 (1)油滴与玻璃交界处是明条纹还是暗条纹?

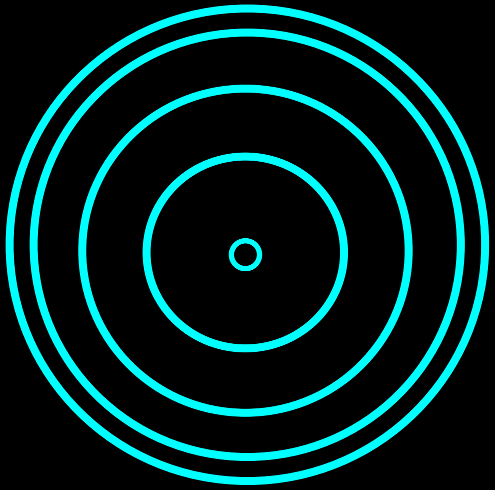
(2)油膜的最大厚度是多少? (油: n_2=1.60, 玻璃: n_3=1.50)

(3)若油滴逐渐摊开，条纹将如何变化

解 (1)因 $n_1<n_2$，$n_2>n_3$，所以要考虑半波损失

由光程差 $$2n_2d+\frac{\lambda}{2}=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

→ 交界处 $d=0$ 对应于 $k=0$ 的暗纹



(2) 中心点为 $k=4$ 的暗纹

$$\therefore d_{\max}=\frac{k\lambda}{2n_2}=7.2\times10^{-7}\ \mathrm{m}$$

(3) 最外暗环逐渐向外扩大，中心点明暗交替变化，条纹级数逐渐减少

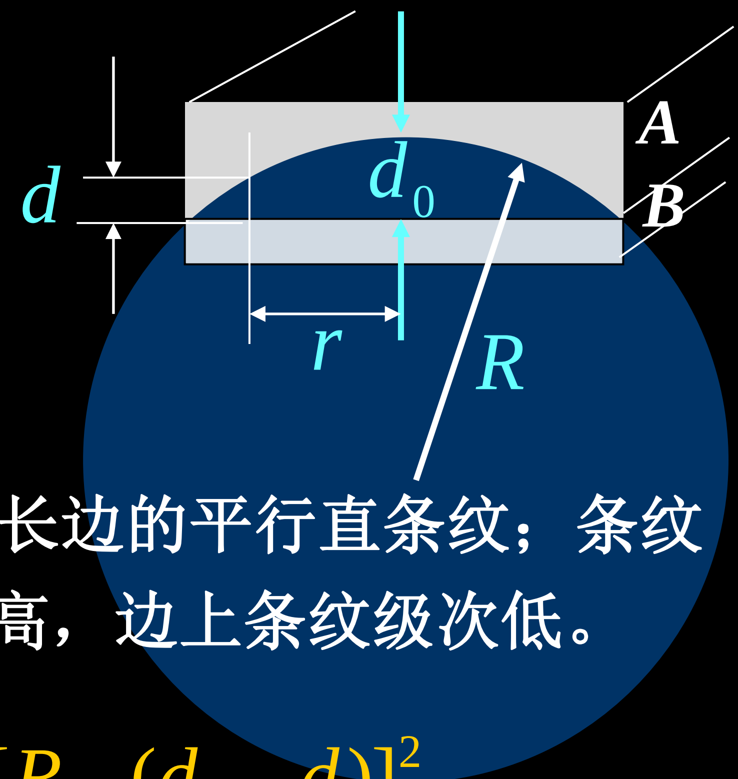
例 如图A为一柱面状平凹透镜，B为一平面玻璃片。现用波长为 λ 的单色平行光自上方垂直往下照射，观察A和B间空气薄膜的反射光干涉的等厚条纹。已知 R，d_0 $d_0 = 2\lambda$

求 (1) 分析干涉条纹的特点(形状，分布，级次高低)

(2) 明条纹距中心线的距离

(3) 共能看到多少条明条纹

(4) 若玻璃片B向下平移，条纹如何移动？



解 (1) 关于中心对称的平行于玻璃片长边的平行直条纹；条纹中间疏两侧密；中间条纹级次高，边上条纹级次低。

(2) $\delta = 2d + \dfrac{\lambda}{2}$ $R^2 = r^2 + [R - (d_0 - d)]^2$

$$d \approx d_0 - \frac{r^2}{2R} \qquad \delta = 2(d_0 - \frac{r^2}{2R}) + \frac{\lambda}{2}$$

明条纹 $\delta = 2(d_0 - \frac{r^2}{2R}) + \frac{\lambda}{2} = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad k = 1,2,3\cdots$

$$r = \sqrt{2Rd_0 - (k - \frac{1}{2})R\lambda} \qquad k = 1,2,3\cdots$$

(3) 中间条纹级次高

$$\delta_{\max} = 2d_0 + \frac{\lambda}{2} = 2(2\lambda) + \frac{\lambda}{2} = 4.5\lambda$$

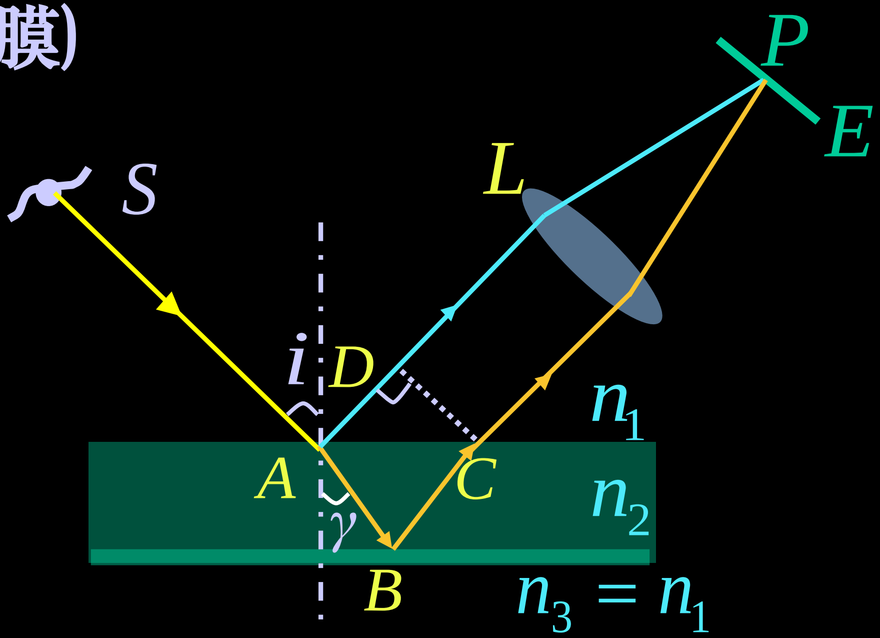
可以看到**8**条明条纹。

(4)若玻璃片***B***向下平移，条纹向两侧移动。

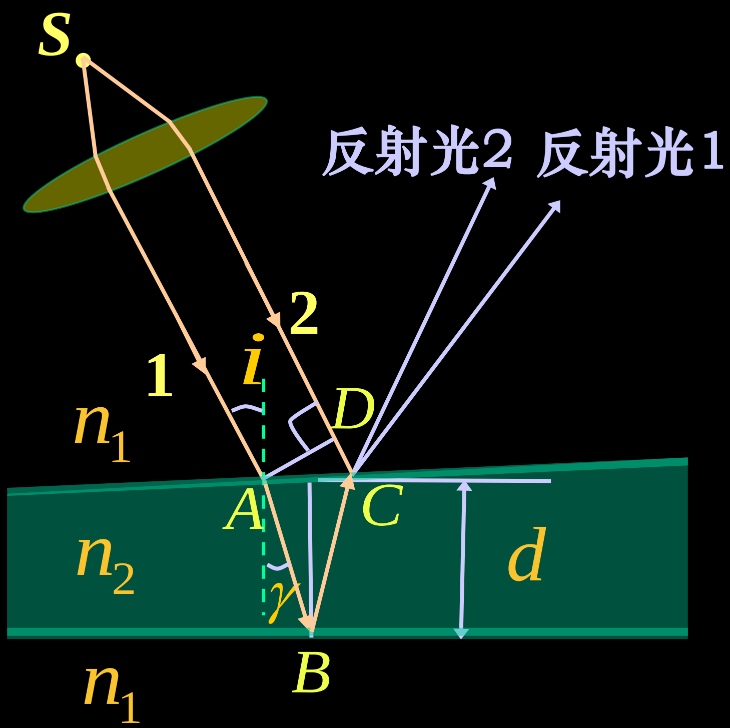
二. 等倾干涉(厚度均匀的薄膜)

两条光线的光程差

$$\delta = n_2(AB + BC) - n_1 AD$$



*等厚干涉　（分振幅法）



两条光线的光程差

$$\delta = n_2(AB + BC) - n_1 DC$$

$$\begin{cases} AB = BC = d/\cos\gamma \\ DC = AC\sin i = \sin i \cdot 2d\ \tan\gamma \\ n_1 \sin i = n_2 \sin\gamma \end{cases}$$

光程差 $\delta = 2n_2 AB - n_1 DC$

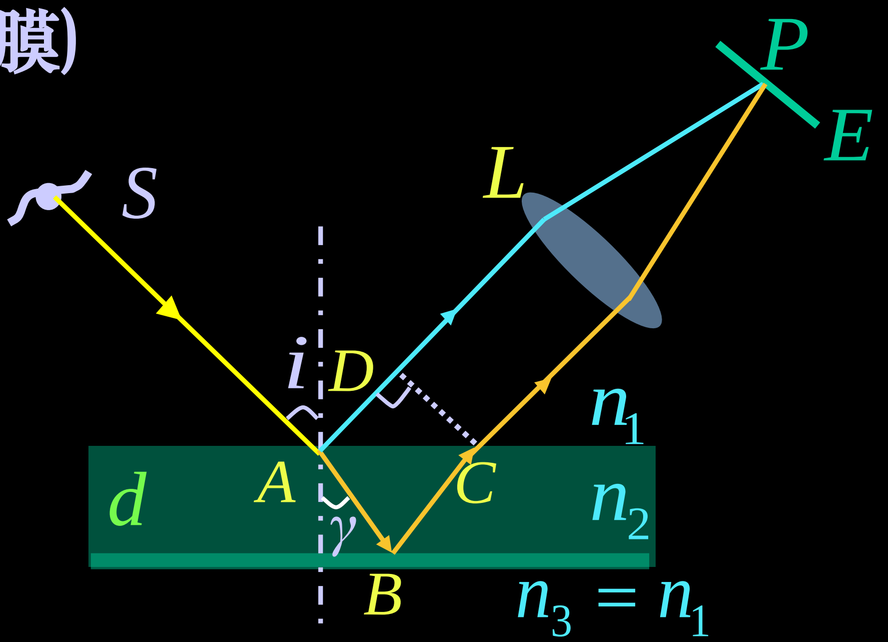
$$= 2n_2 d/\cos\gamma - n_1 \sin i \cdot 2d\ \tan\gamma$$

$$= 2n_2 d\left(\frac{1}{\cos\gamma} - \sin\gamma \cdot \tan\gamma\right)$$

$$= 2n_2 d\cos\gamma$$

二. 等倾干涉(厚度均匀的薄膜)

两条光线的光程差



$$\delta = n_2(AB+BC) - n_1 AD$$

$$= 2n_2 d\cos\gamma$$

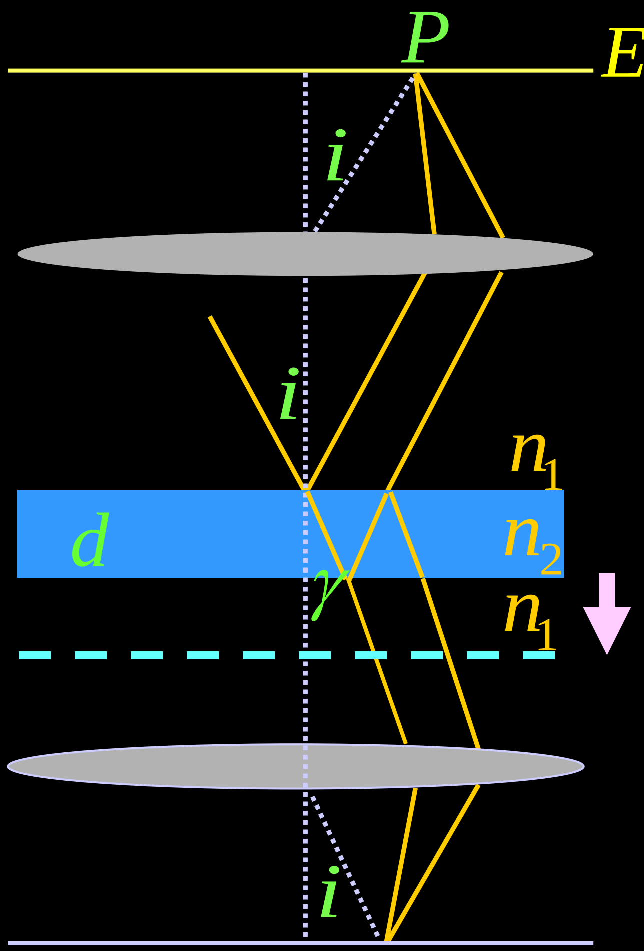
考虑到有半波损失

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

$$\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k\cdot\dfrac{\lambda}{2} & k=1,2,3\cdots \text{相长干涉} \\ (2k+1)\cdot\dfrac{\lambda}{2} & k=0,1,2,\cdots \text{相消干涉} \end{cases}$$

条纹特点 $\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \dfrac{\lambda}{2}$

(1) 等倾干涉条纹为一系列**同心圆环**；**内疏外密**；内圆纹的级次比外圆纹的级次高

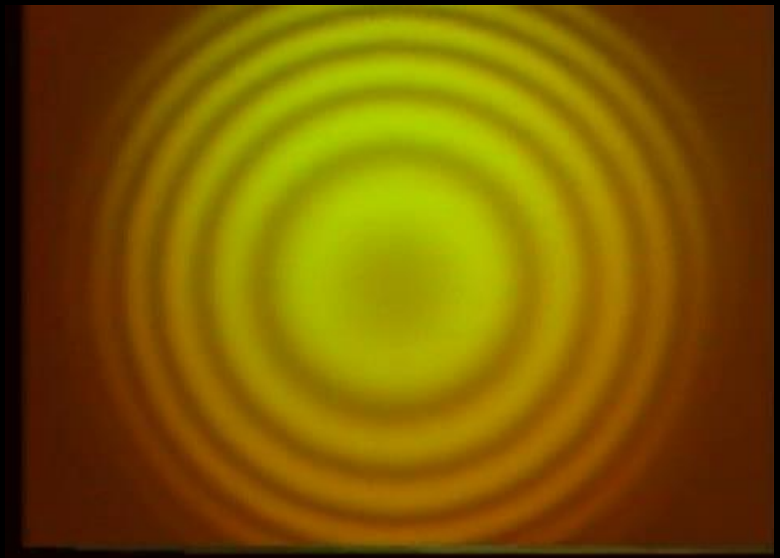


(2) 膜厚变化时，条纹发生移动。当薄膜厚度增大时，圆纹从中心冒出，并向外扩张，条纹变密

(3) 使用**面光源**条纹更清楚明亮

(4) 透射光图样与反射光图样互补

薄膜干涉的一般情况是相当复杂的。其干涉的特征与光源的尺寸、膜的厚薄和形状以及如何观测都有十分密切的关系。



等倾条纹

牛顿环

如何在实验上区分上述条纹是等倾还是牛顿环？

牛顿环与等倾条纹都是**内疏外密**的**圆环形**条纹

牛 顿 环：级次由环心向外**递增**

等倾条纹：级次由环心向外**递减**

当膜层厚度减少时，牛顿环的环纹向外扩张，等倾条纹则相反

增反膜和增透膜

增透膜 在透镜表面镀一层厚度均匀的透明介质膜，使其上、下表面对某种色光的反射光产生相消干涉，其结果是减少了该光的反射，增加了它的透射.

照相机镜头

眼镜

增反膜 利用薄膜干涉原理，使薄膜上、下表面对某种色光的反射光发生相长干涉，其结果是增加了该光的反射，减少了它的透射.

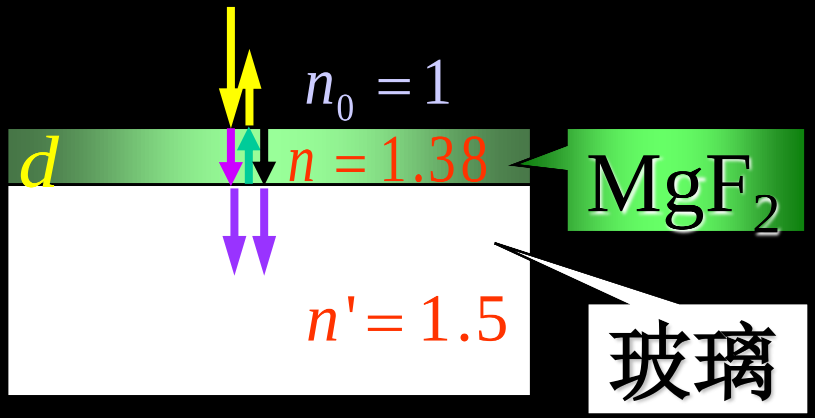
激光器谐振腔

宇航服

光学薄膜的应用

1. 增透膜

在光学器件（透镜等）镀以一层薄膜以提高或降低透射率



光在膜的上下表面反射时都有半波损失

欲使透射最大，则要求**反射光干涉相消——无反射光**

$$\delta = 2nd = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

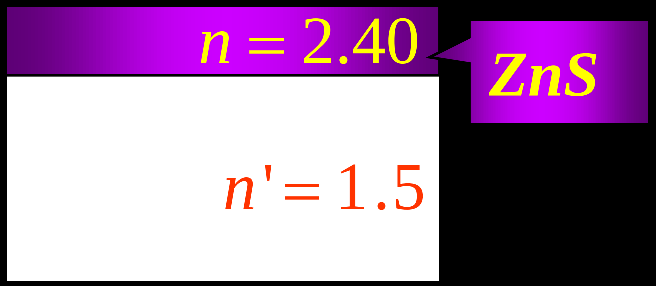
膜的最小厚度为 $d_{\min} = \dfrac{\lambda}{4n}$ ---- 此时**透射光增强**

或 $nd_{\min} = \dfrac{\lambda}{4}$

即**光学厚度为某一波长的1/4时**，则膜为**该波长的增透膜**

2. 高反射膜(增反膜)

光在每层膜的上下表面反射时只有一个面有半波损失

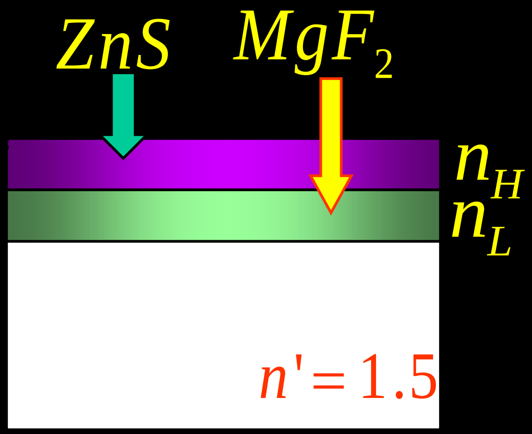


第一层

$$2n_H d_H + \lambda/2 = k\lambda, k = 1, 2,$$

最小光学厚度为

$$n_H d_H = \lambda/4$$



第二层

$$2n_L d_L + \lambda/2 = k\lambda, k = 1, 2,$$

最小光学厚度为

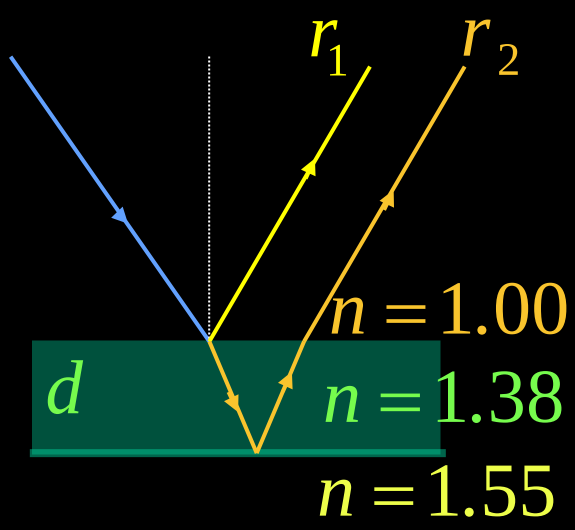
$$n_L e_L = \lambda/4$$

即每层膜的光学厚度都为λ/4时，可得到该波长的高反射膜

例 波长550 nm黄绿光对人眼和照像底片最敏感。要使照像机对此波长反射小，可在照像机镜头上镀一层氟化镁MgF_2薄膜，已知氟化镁的折射率 n=1.38 ，玻璃的折射率n=1.55

求 氟化镁薄膜的最小厚度

解 两条反射光干涉减弱条件



$$2nd=(2k+1)\frac{\lambda}{2} \qquad k=0,1,2,\cdots$$

增透膜的最小厚度

$$d=\frac{\lambda}{4n}=\frac{550}{4\times 1.38}\approx 100\text{nm}$$

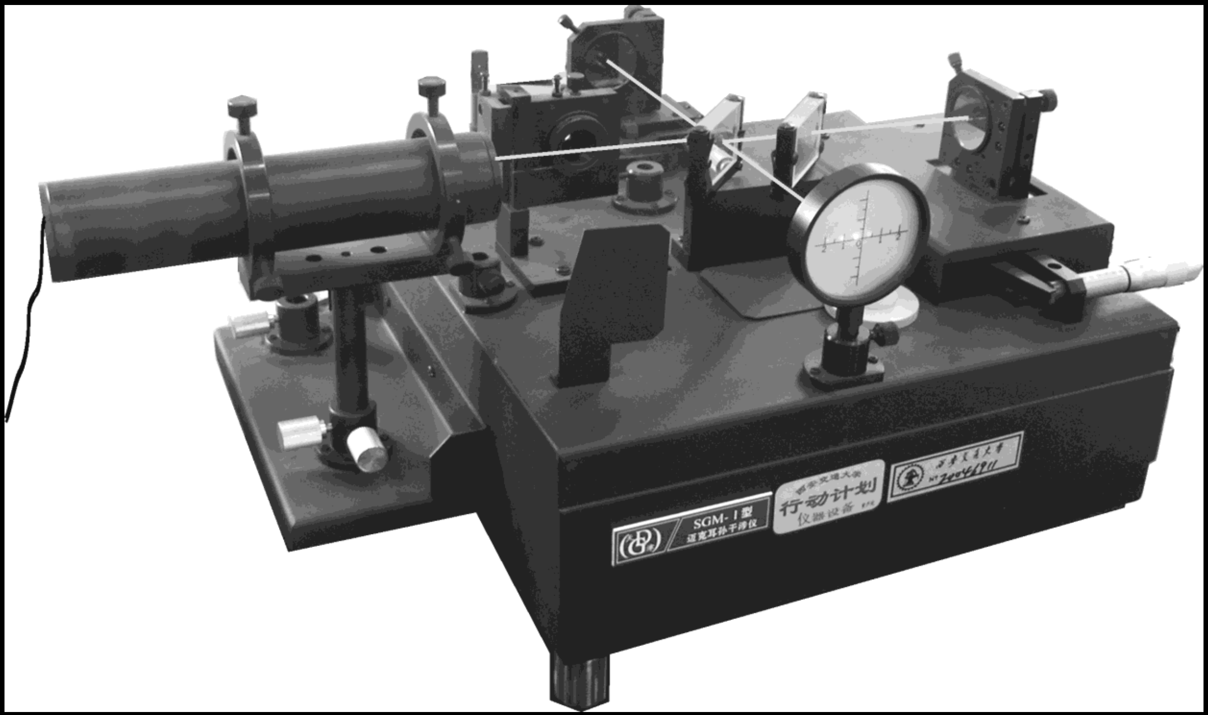
说明 **增反膜** ⟶ **薄膜光学厚度（nd）仍可以为 $\lambda/4$**

但膜层折射率 n 比玻璃的折射率大

镜头颜色为什么发紫?

§14.6 迈克耳逊干涉仪

一. 干涉仪结构



- 迈克尔逊是著名的实验物理学家，以精密测量光的速度和以空前的精确度进行“以太漂移实验”而闻名于世。
- 获得1907年诺贝尔物理学奖："for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid"。

二. 工作原理

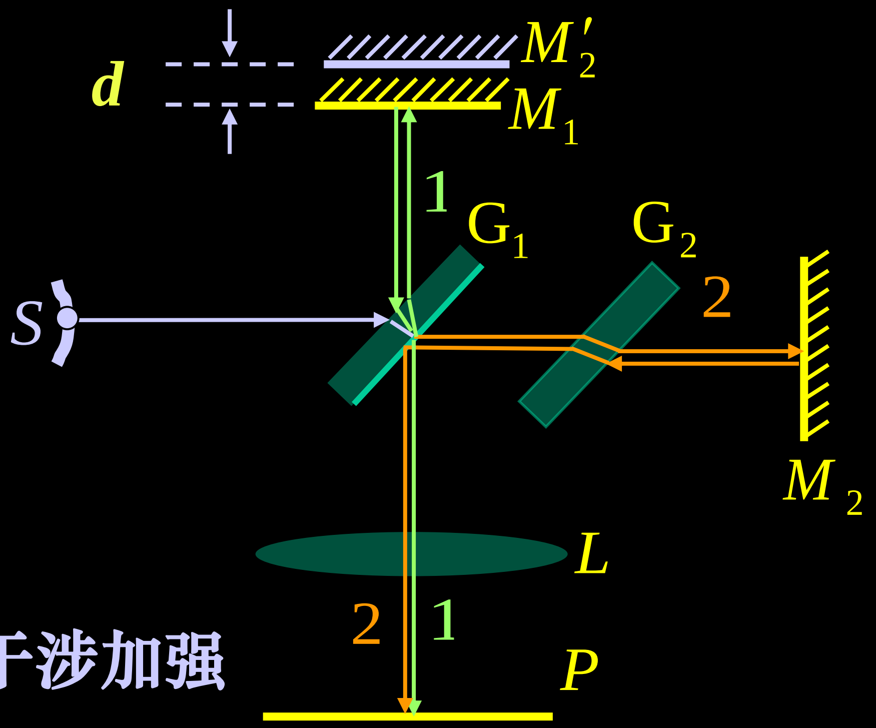
光束 1 和 2 发生干涉

光程差 $\delta = 2d$ (无半波损)

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$ (有半波损)

$$2d = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad k = 1,2,\cdots$$ 干涉加强

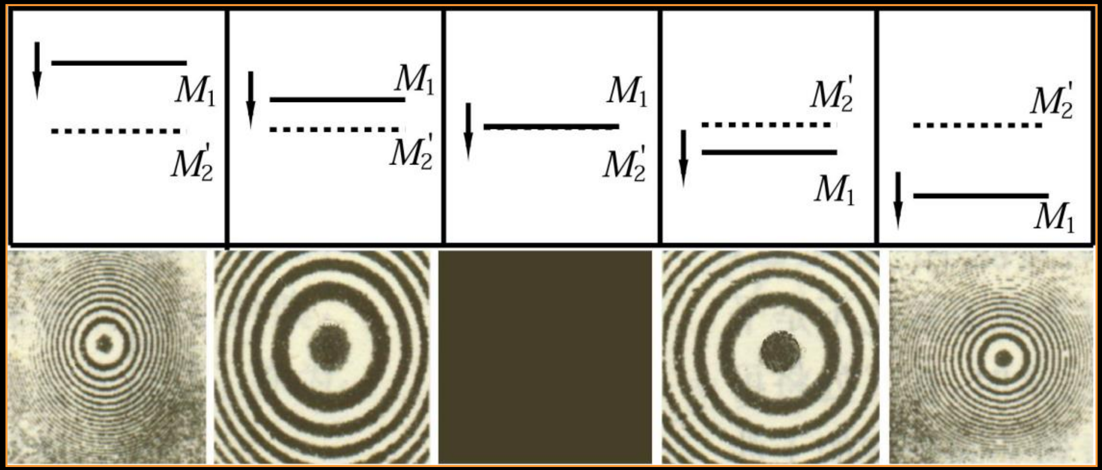
$$2d = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad k = 0,1,2,\cdots$$ 干涉减弱



三. 条纹特点

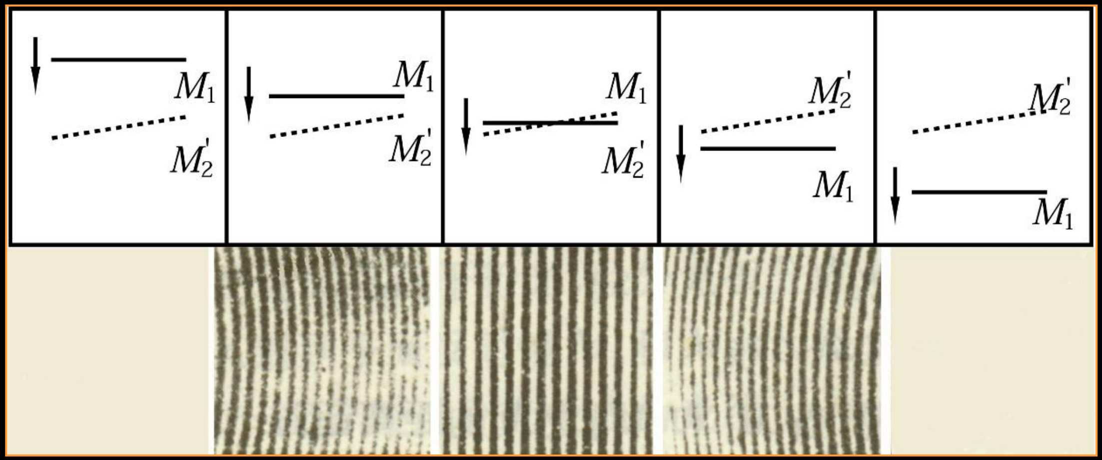
1. 若M_1、M'_2平行

等倾条纹



2. 若M_1、M'_2有小夹角

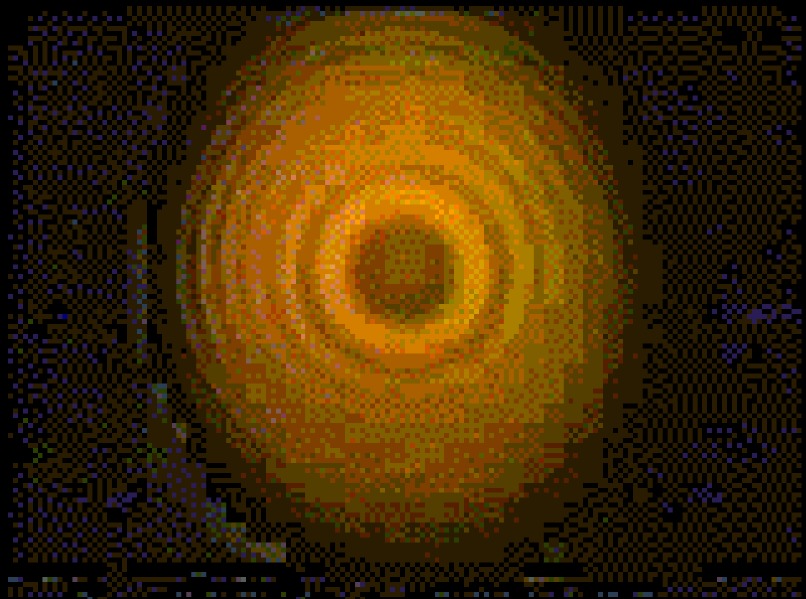
当 M_1和 M'_2不平行，且光平行入射，此时为等厚条纹

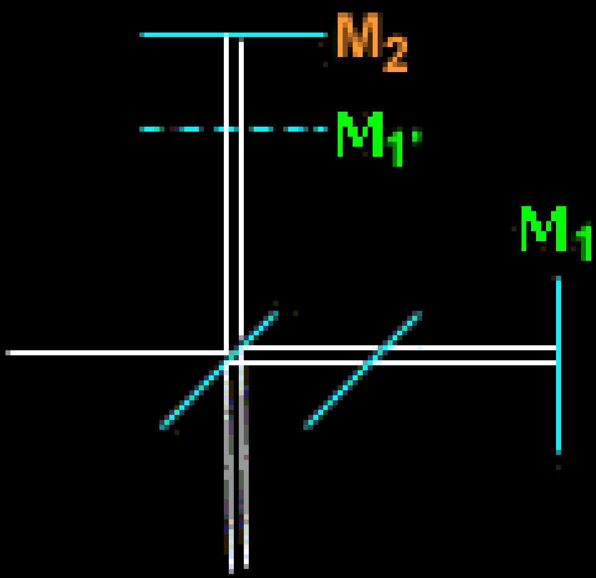


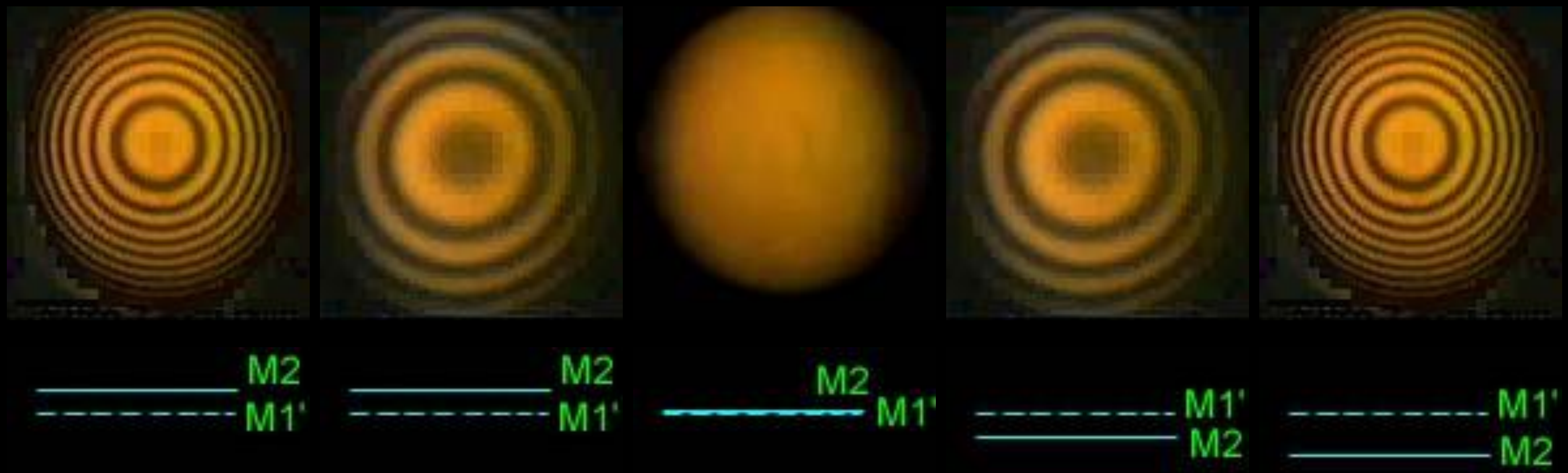
3. 若M_1平移 Δd 时，干涉条纹移过 N 条，则有

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

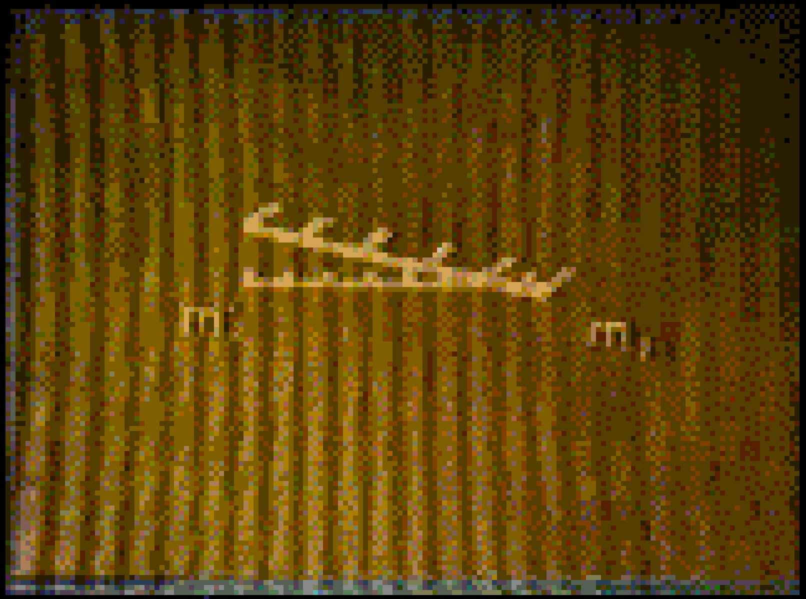
迈克耳孙等倾干涉

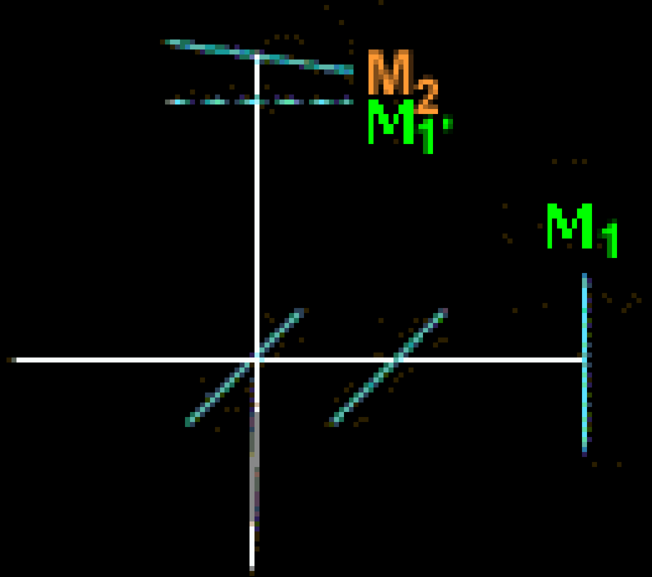






迈克耳孙等厚干涉



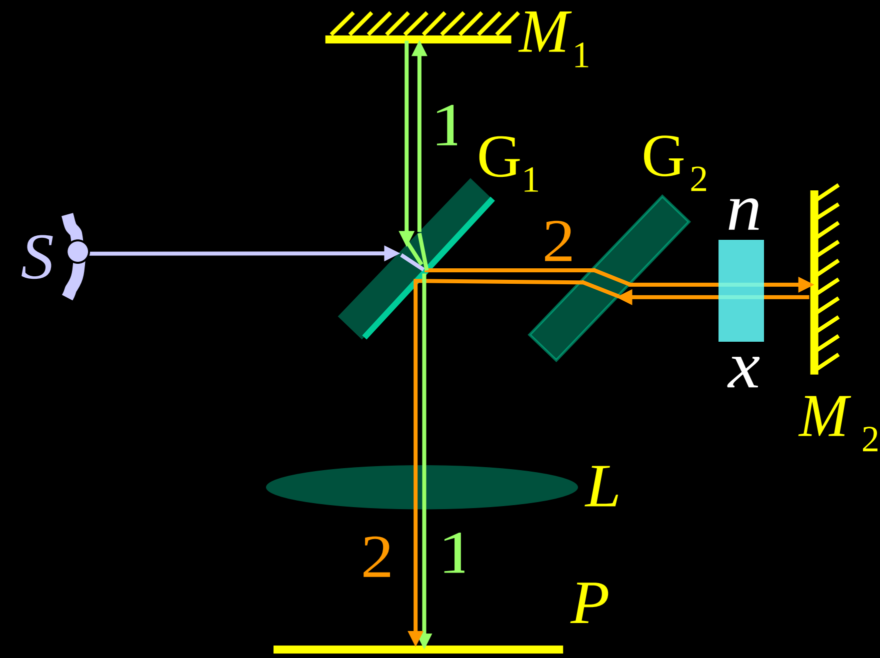


四. 应用

1. 微小位移测量 $\Delta d = N \cdot \dfrac{\lambda}{2}$

2. 测波长 $\lambda = \dfrac{2\Delta d}{N}$

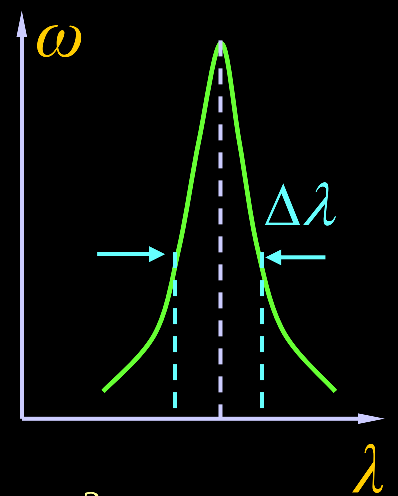
3. 测折射率



五. 时间相干性

相干长度：两光束产生干涉效应的最大光程差

相干时间：与相干长度对应的光传播时间



相干长度 L 和谱线宽度 $\Delta\lambda$ 之间的关系为 $L = \dfrac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

白光光源 $L \approx 10^{-7}\,\mathrm{m}$　　氦氖激光器 $L \approx 4\times10^{3}\,\mathrm{m}$

迈克耳逊-莫雷实验

否认了以太（绝对静止参考系）的存在，从而动摇了经典物理学基础，成为近代物理学的一个开端，在物理学发展史上占有十分重要的地位。

19 世纪流行着一种“以太”学说，它是随着光的波动理论发展起来的。那时，由于对光的本性知之甚少，人们套用机械波的概念，想像必然有一种能够传播光波的弹性物质，它的名字叫“以太”。许多物理学家们相信“以太”的存在，把这种无处不在的“以太”看作绝对惯性系，用实验去验证“以太”的存在就成为许多科学家追求的目标。

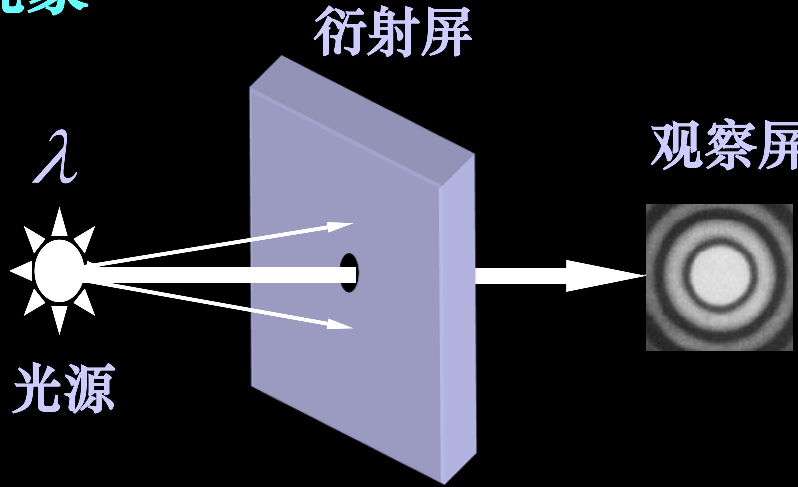
当时认为光的传播介质是“以太”。由此产生了一个新的问题：地球以每秒30公里的速度绕太阳运动，就必须会遇到每秒30公里的“以太风”迎面吹来，同时，它也必须对光的传播产生影响。这个问题的产生，引起人们去探讨“以太风”存在与否。如果存在以太，则当地球穿过以太绕太阳公转时，在地球通过以太运动的方向测量的光速（当我们对光源运动时）应该大于在与运动垂直方向测量的光速（当我们不对光源运动时）。

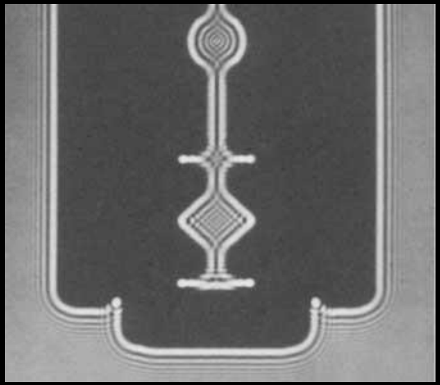
1905年，在洛仑兹提出光速不变观点10年后，爱因斯坦认为既然光速不变，作为静止参考系的以太就没有理由存在。于是抛弃静止参考系以太，以光速不变原理和狭义相对性原理为基本假设的基础上建立了狭义相对论。同时保留洛仑兹变换来解释迈克尔逊-莫雷实验和光速不变。

§14.7 惠更斯—菲涅耳原理

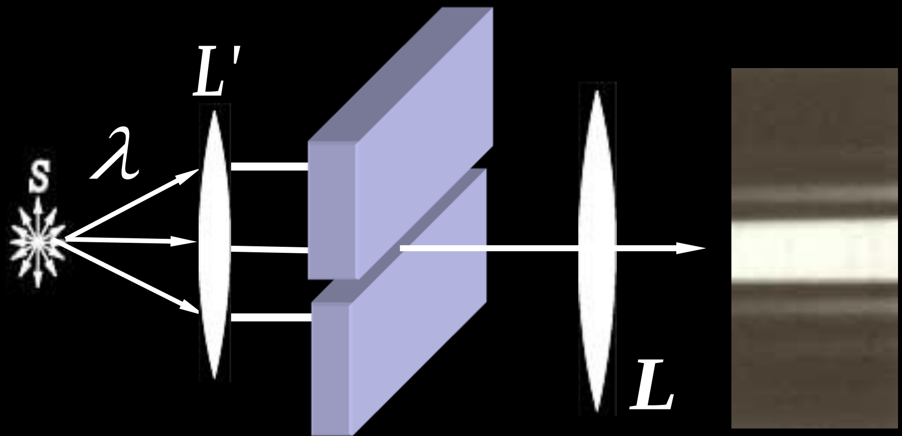
一. 光的衍射现象

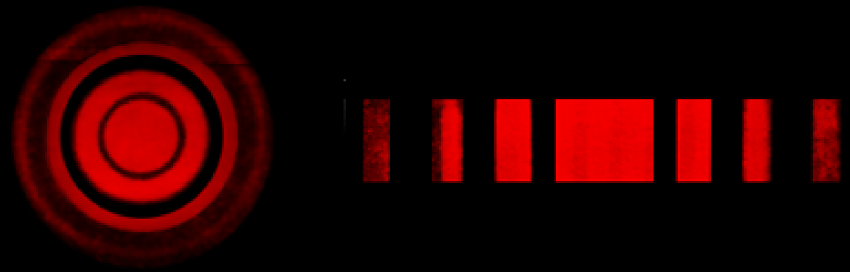
1. 现象





(剃须刀边缘衍射)





(a)　　(b)

圆孔衍射　　单缝衍射

2. 衍射

光在传播过程中绕过障碍物的边缘而**偏离直线传播**的现象

衍射的共性：

- **光沿被限制的方向扩展**
- **光强重新分配(衍射图样)**

说明

衍射现象是否明显取决于障碍物线度与波长的对比，波长越大，障碍物越小，衍射越明显。

二. 惠更斯—菲涅耳原理

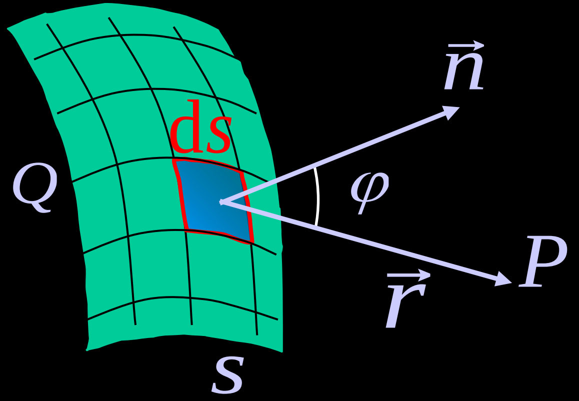
1. 原理内容

- 同一波前上的各点发出的都是**相干次波**。
- 各次波在空间某点的**相干叠加**，就决定了该点波的强度。

2. 原理数学表达

设初相为零，面积为 s 的波面 Q，

其上面元 ds 在 P 点引起的振动为

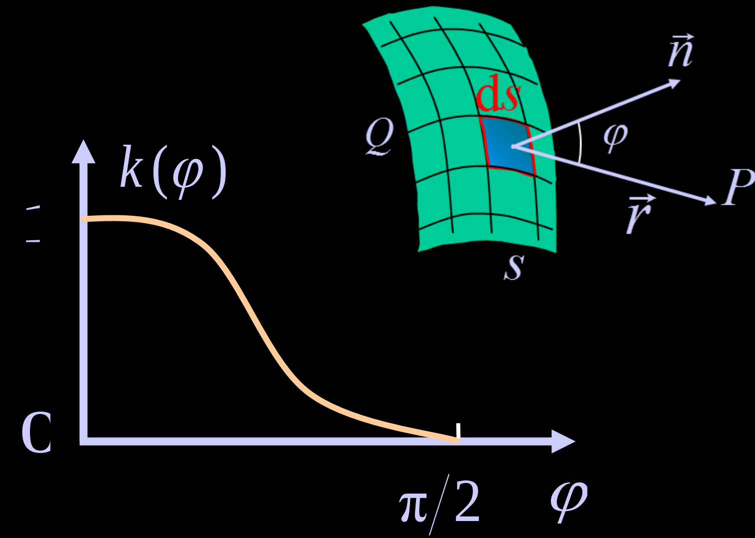


$$\mathrm{d}E_{(p)} \propto k(\varphi)\frac{\mathrm{d}s}{r}\cos(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda})$$

$$\mathrm{d}E_{(p)} = F(Q)k(\varphi)\frac{\mathrm{d}s}{r}\cos(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda})$$

$F(Q)$ 取决于波面上 ds 处的波强度，$k(\varphi)$为**倾斜因子**.

$$k(\varphi)\begin{cases}\varphi=0,\ k=k_{\max}=1\\ \varphi\uparrow \Rightarrow k(\varphi)\downarrow\\ \varphi\geq\dfrac{\pi}{2},\quad k=0\end{cases}$$



$$E_{(p)}=\iint_s\frac{F(Q)\cdot k(\varphi)}{r}\cdot\cos(\omega t-\frac{2\pi r}{\lambda})\cdot ds=E_{0(p)}\cos(\omega t+\varphi_{(p)})$$

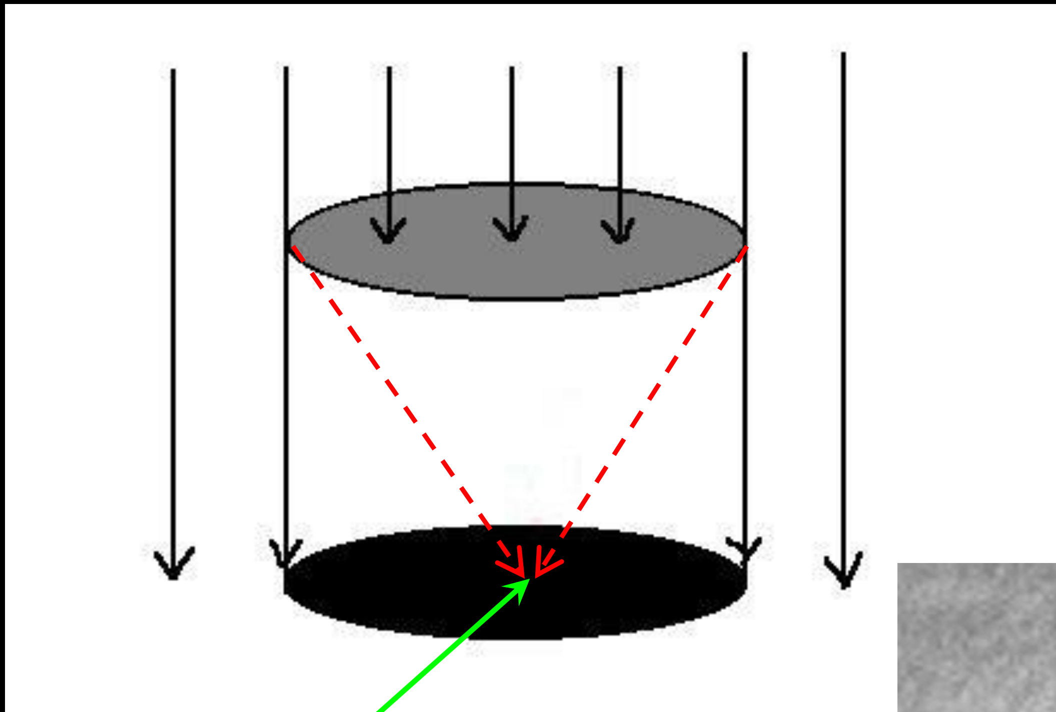
P 处波的强度 $I_p\propto E_{0(p)}^2$

说明

(1) 对于一般衍射问题，用积分计算相当复杂;

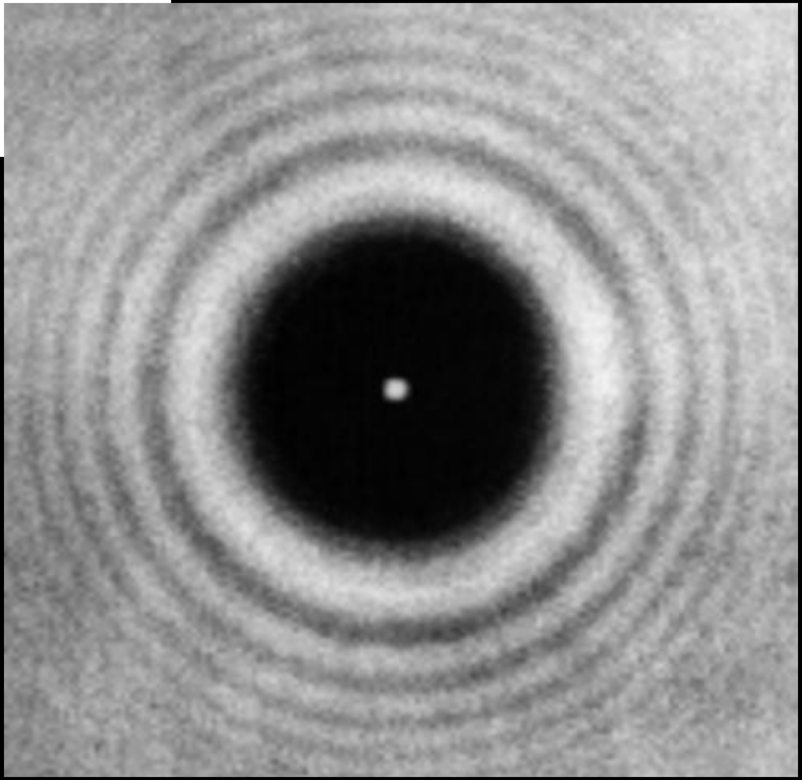
实际中常用**半波带法**和**振幅矢量法**分析。

(2) 惠更斯—菲涅耳原理在惠更斯原理的基础上给出了次波在传播过程中的**振幅变化**及**位相关系**。



中心处

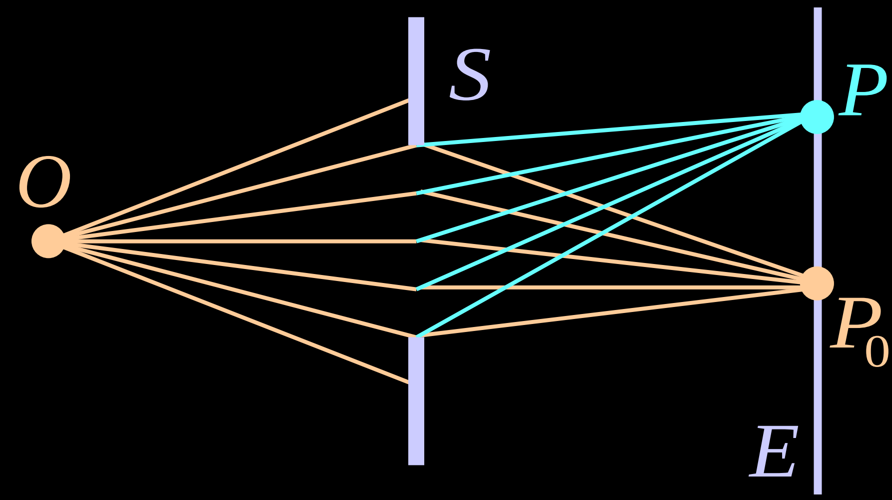
泊松光斑



三. 光的衍射分类

1. 菲涅耳衍射(近场衍射)

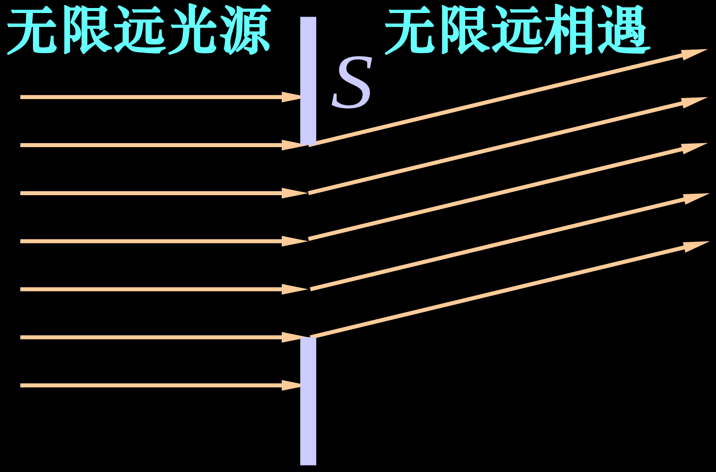
光源 O , 观察屏 E (或二者之一) 到衍射屏 S 的距离为**有限远**的衍射



(菲涅耳衍射)

2. 夫琅禾费衍射(远场衍射)

光源 O , 观察屏 E 到衍射屏 S 的距离均为**无穷远**的衍射



(夫琅禾费衍射)