大学物理

张磊 （13072919527）

B824，Cyrus Tang Building

本学期大学物理期中考试时间
2023-10-28 15:00-17:00 (星期六)

考试内容
机械振动、机械波、波动光学

大家做好复习和考试准备
预计在考试前一周左右，考试会在系统发布，
大家关注系统

迈克耳逊干涉仪

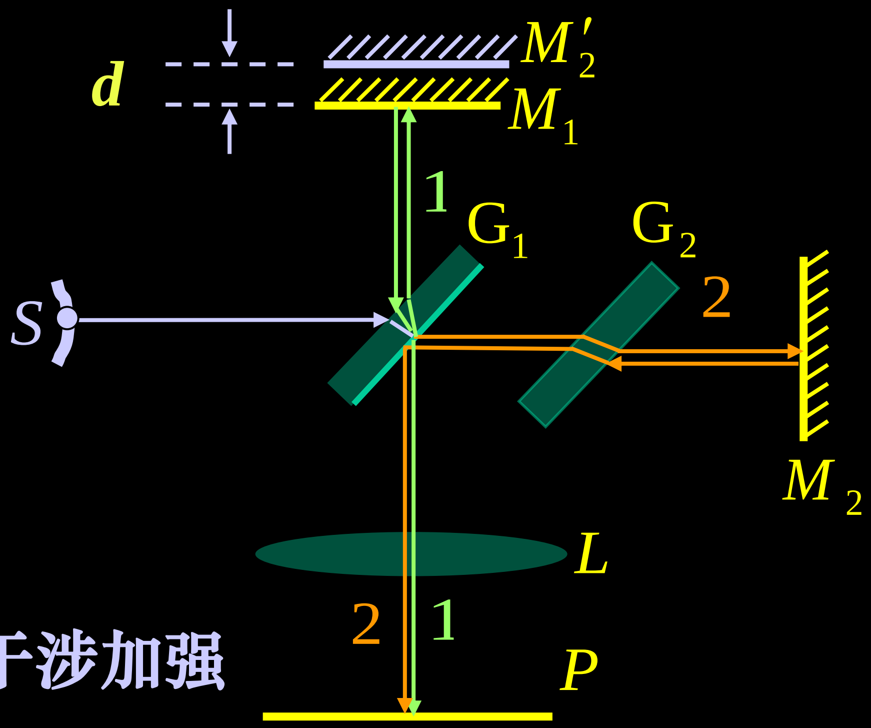
光束 1 和 2 发生干涉

光程差 $\delta = 2d$　　(无半波损)

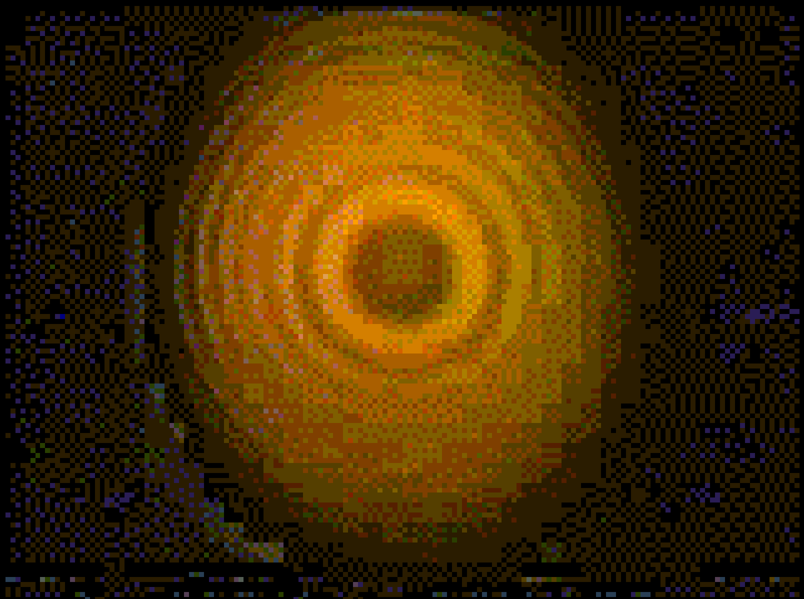
$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$ (有半波损)

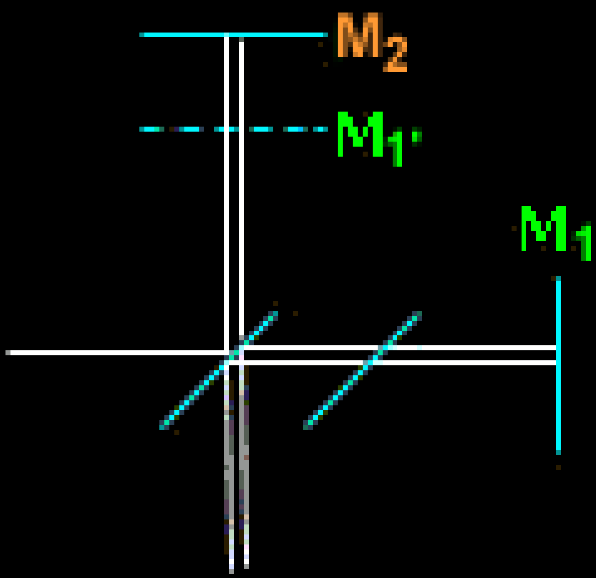
$2d = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$　　$k = 1,2,\cdots$　　干涉加强

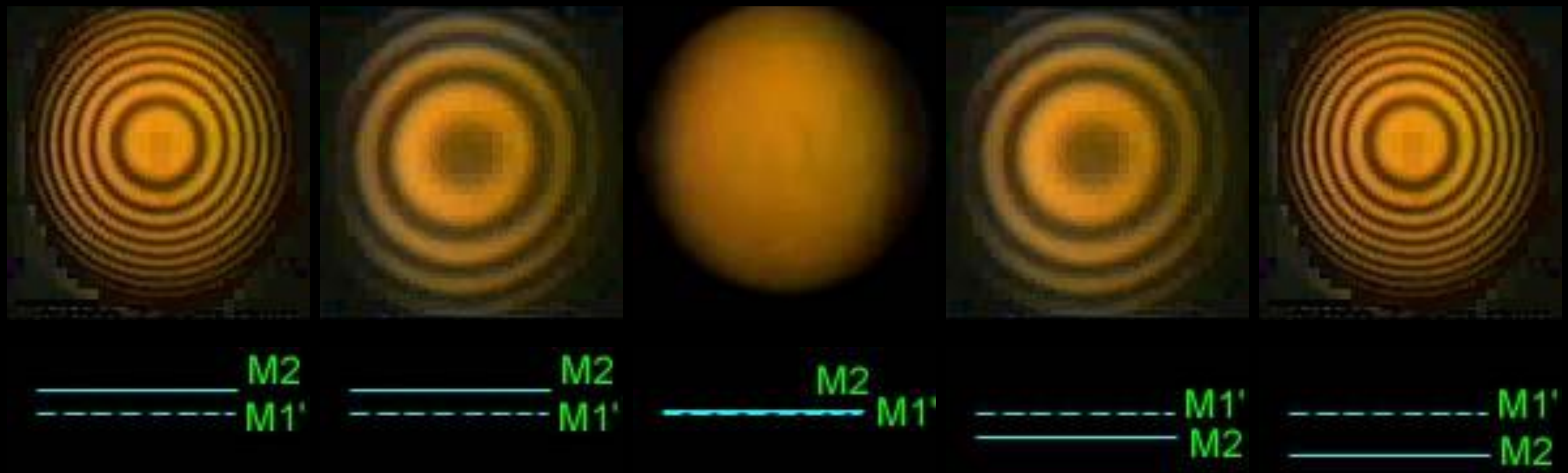
$2d = (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$　　$k = 0,1,2,\cdots$　　干涉减弱



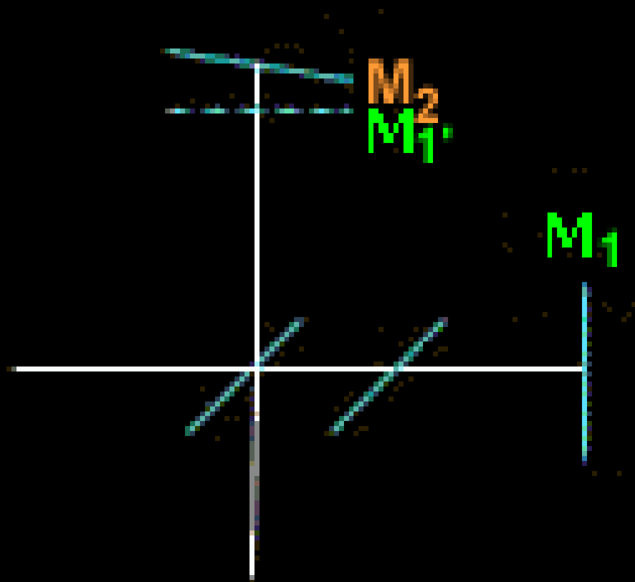
迈克耳孙等倾干涉

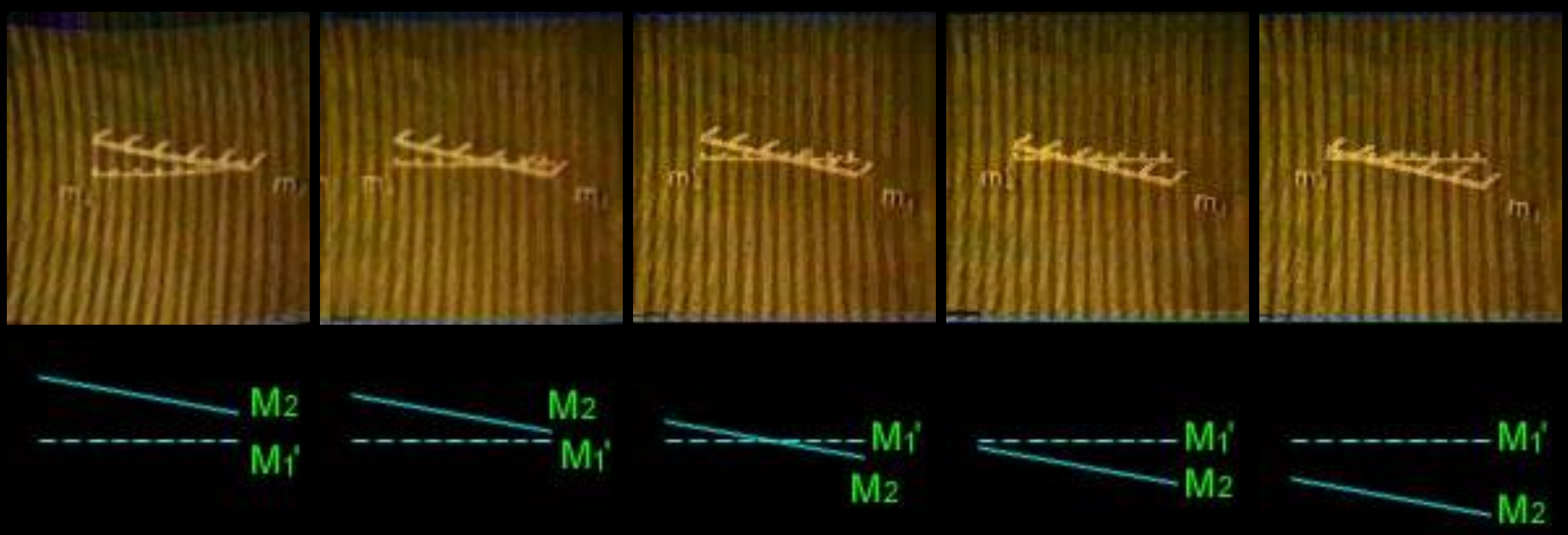






迈克耳孙等厚干涉



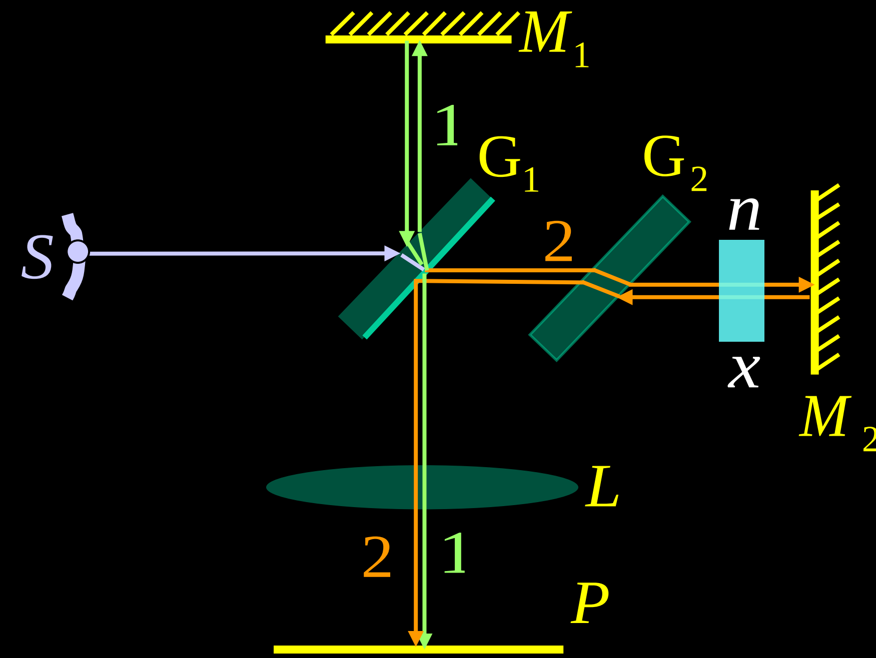


四. 应用

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

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

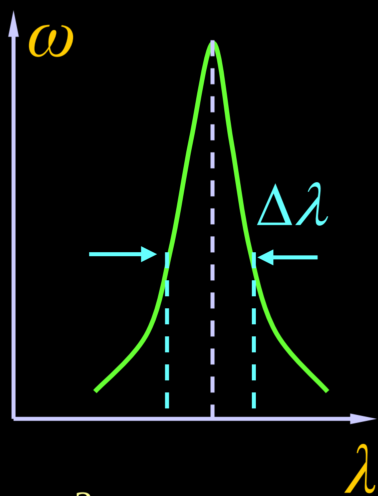
3. 测折射率



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 $L \approx 4\times 10^{3}\,\mathrm{m}$

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。

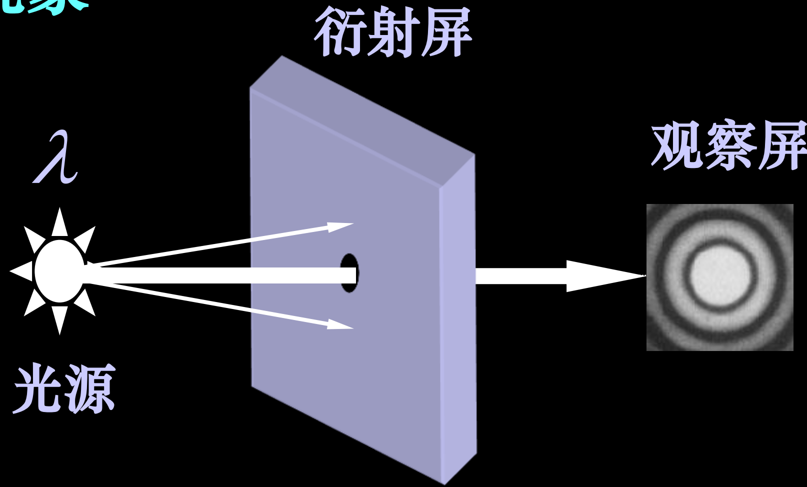
当时认为光的传播介质是“以太”。由此产生了一个新的问题：地球以每秒30公里的速度绕太阳运动，就必须会遇到每秒30公里的“以太风”迎面吹来，同时，它也必须对光的传播产生影响。这个问题的产生，引起人们去探讨“以太风”存在与否。如果存在以太，则当地球穿过以太绕太阳公转时，在地球通过以太运动的方向测量的光速（当我们对光源运动时）应该大于在与运动垂直方向测量的光速（当我们不对光源运动时）。

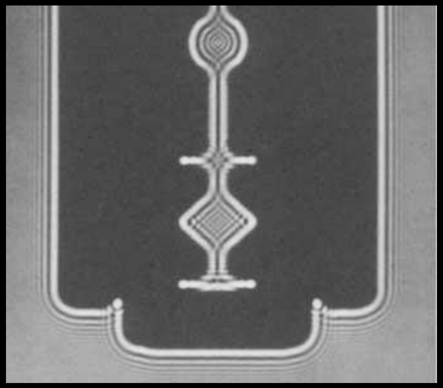
1905年，在洛仑兹提出光速不变观点10年后，爱因斯坦认为既然光速不变，作为静止参考系的以太就没有理由存在。于是抛弃静止参考系以太，以光速不变原理和狭义相对性原理为基本假设的基础上建立了狭义相对论。同时保留洛仑兹变换来解释迈克尔逊-莫雷实验和光速不变。

§14.7 惠更斯—菲涅耳原理

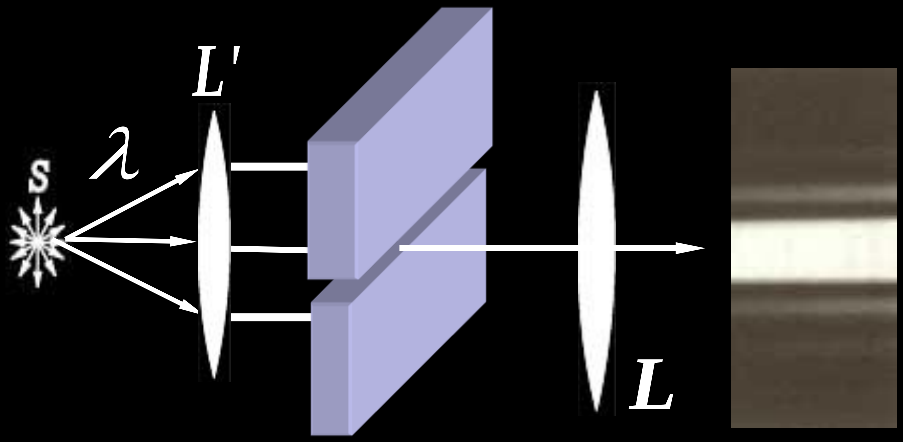
一. 光的衍射现象

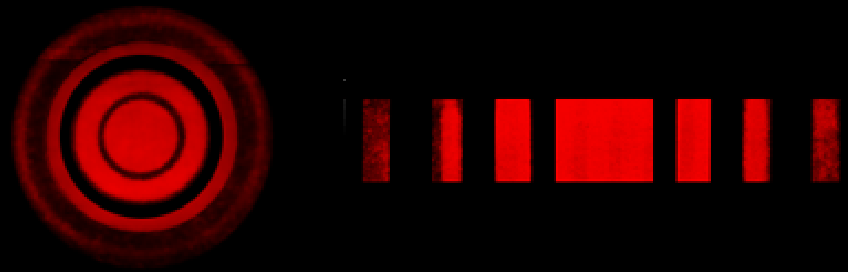
1. 现象





(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

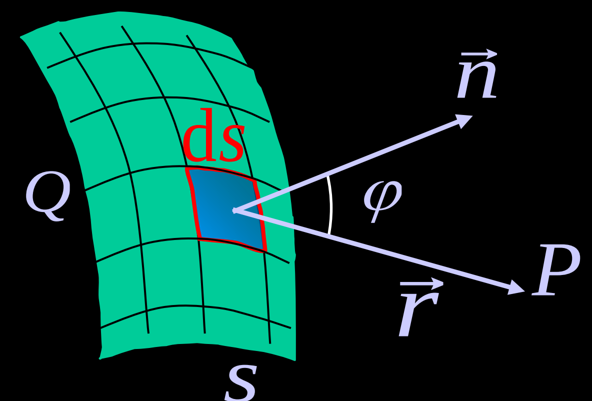
1. 原理内容

- 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

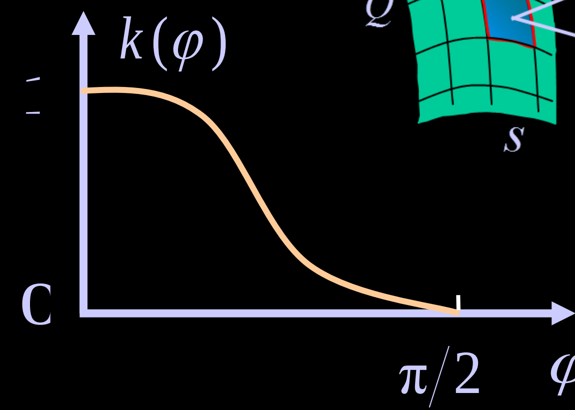


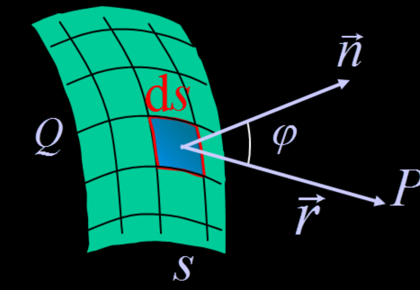
$$\mathrm{d}E_{(p)} \propto k(\varphi)\frac{\mathrm{d}s}{r}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$$

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

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

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





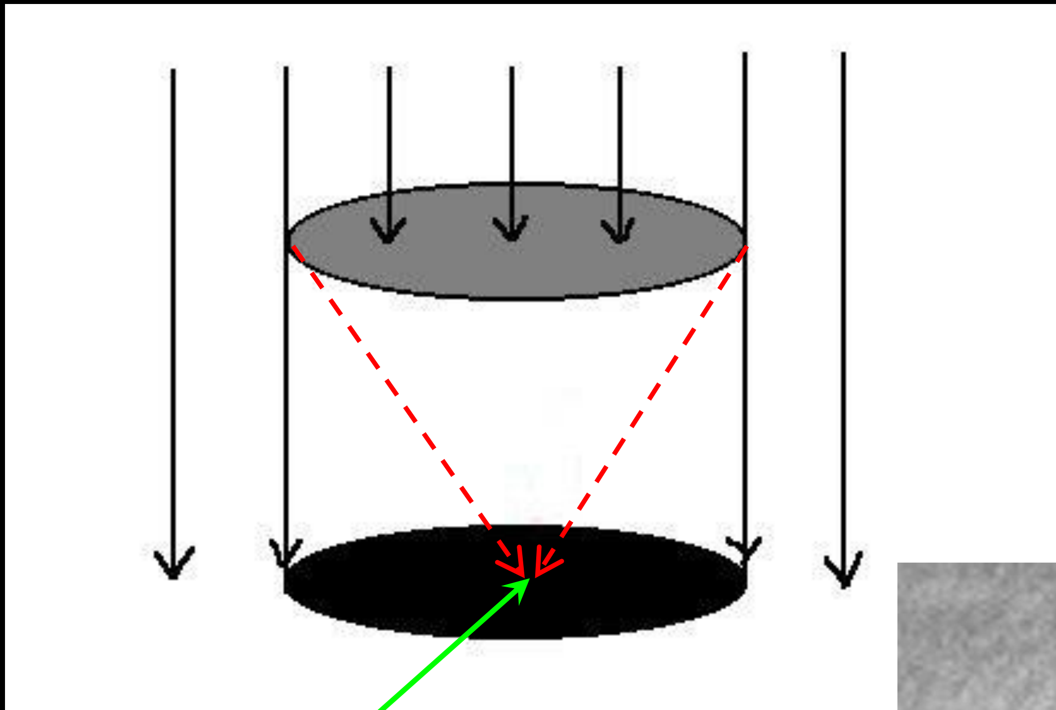
$$E_{(p)}=\iint_s\frac{F(Q)\cdot k(\varphi)}{r}\cdot\cos(\omega t-\frac{2\pi r}{\lambda})\cdot ds=E_{0(p)}\cos(\omega t+\varphi_{(p)})$$

P 处波的强度 $I_p\propto E_{0(p)}^2$

说明

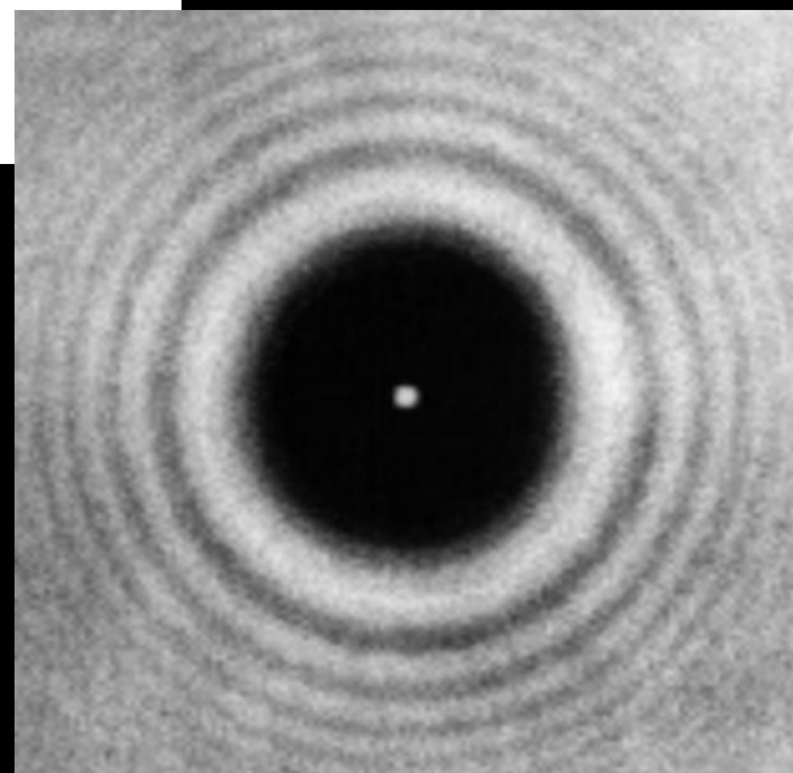
(1) 对于一般衍射问题，用积分计算相当复杂；
实际中常用**半波带法**和**振幅矢量法**分析。

(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

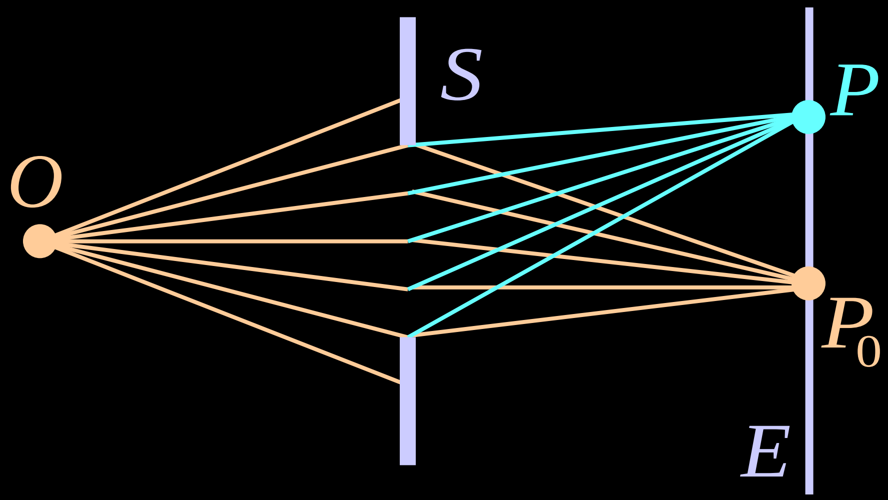
泊松光斑



三. 光的衍射分类

1. 菲涅耳衍射(近场衍射)

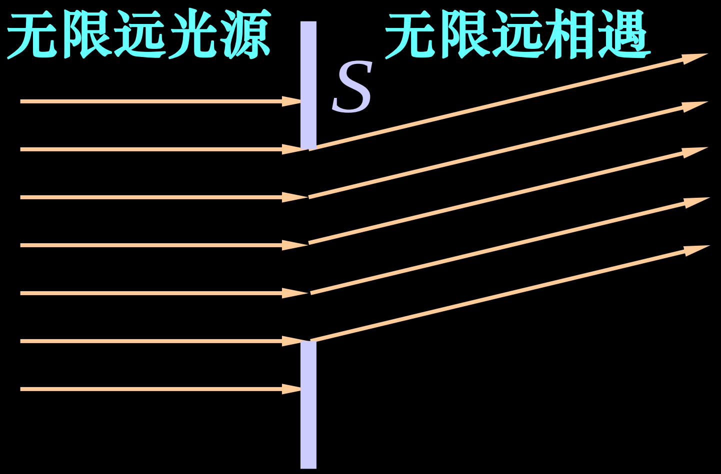
光源 O，观察屏 E (或二者之一) 到衍射屏 S 的距离为**有限远**的衍射



（ 菲涅耳衍射 ）

2. 夫琅禾费衍射(远场衍射)

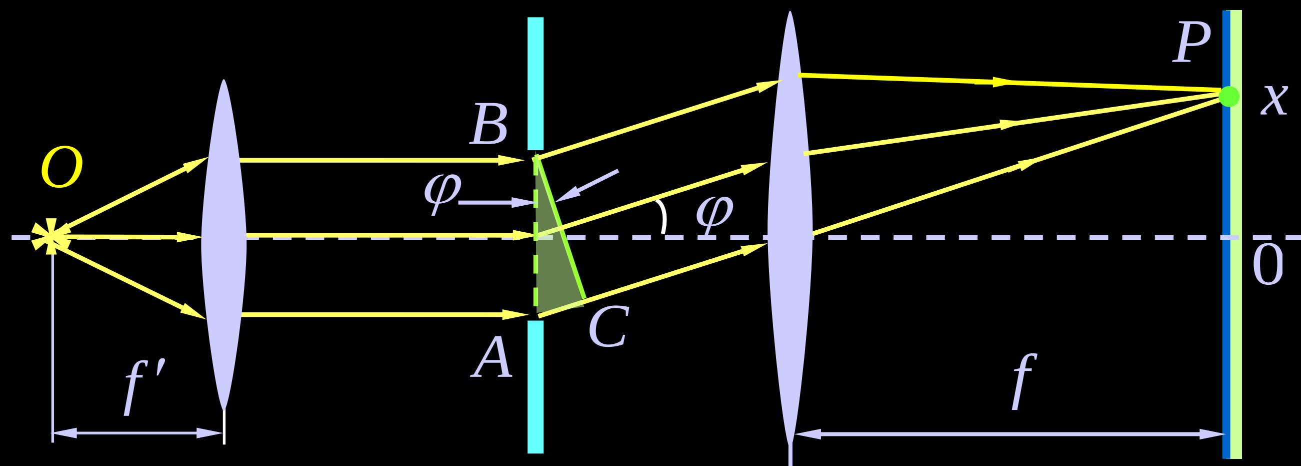
光源 O，观察屏 E 到衍射屏 S 的距离均为**无穷远**的衍射

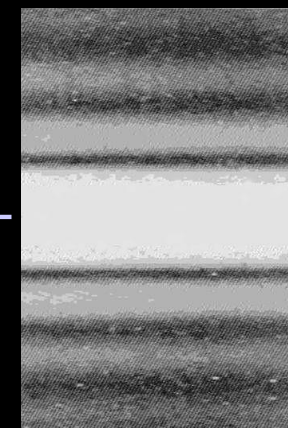


（ 夫琅禾费衍射 ）

§14.8 单缝的夫琅禾费衍射

一. 典型装置

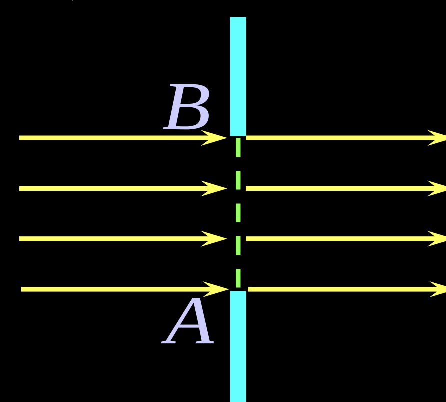




（单缝夫琅禾费衍射典型装置）

$A, B \rightarrow P$ 的光程差 $\Delta = AC = a\sin\varphi$ （a 为缝 AB 的宽度）

二. 菲涅耳半波带法

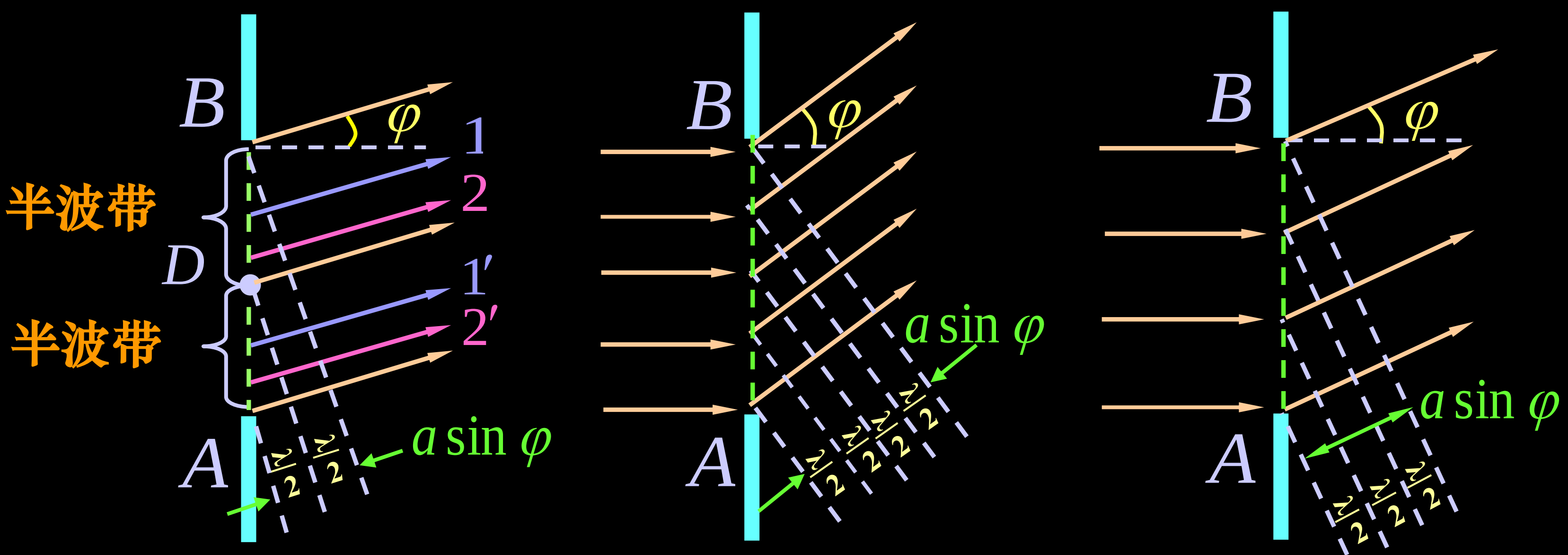


1. 衍射暗纹、明纹条件

- $a\sin\varphi = 0$ —— 中央明纹

- $a\sin\varphi = 2\dfrac{\lambda}{2}$　此时缝分为两个“半波带”，P 为暗纹。

暗纹条件　$$\boxed{a\sin\varphi = \pm 2k\frac{\lambda}{2},\quad k = 1,2,3\cdots}$$



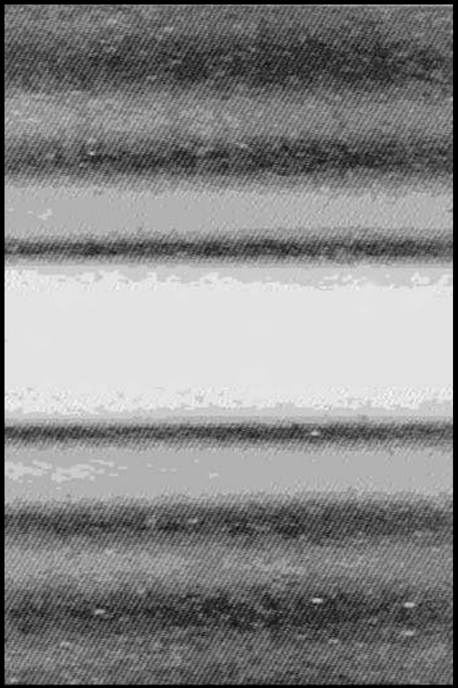
- $a\sin\varphi = 3\dfrac{\lambda}{2}$　此时缝分成三个“半波带”，P 为明纹。

明纹条件　$$\boxed{a\sin\varphi = \pm(2k'+1)\frac{\lambda}{2},\quad k' = 1,2,3\cdots}$$

说明　　暗纹条件 $a\sin\varphi=\pm 2k\dfrac{\lambda}{2},\quad k=1,2,3\cdots$

(1) 得到的暗纹和中央明纹位置精确，其它明纹位置只是近似

(2) 单缝衍射和双缝干涉条纹比较



单缝衍射条纹

双缝干涉条纹

从本质上讲
—— 干涉和衍射都是波的相干叠加

干涉: 有限多的子波的相干叠加

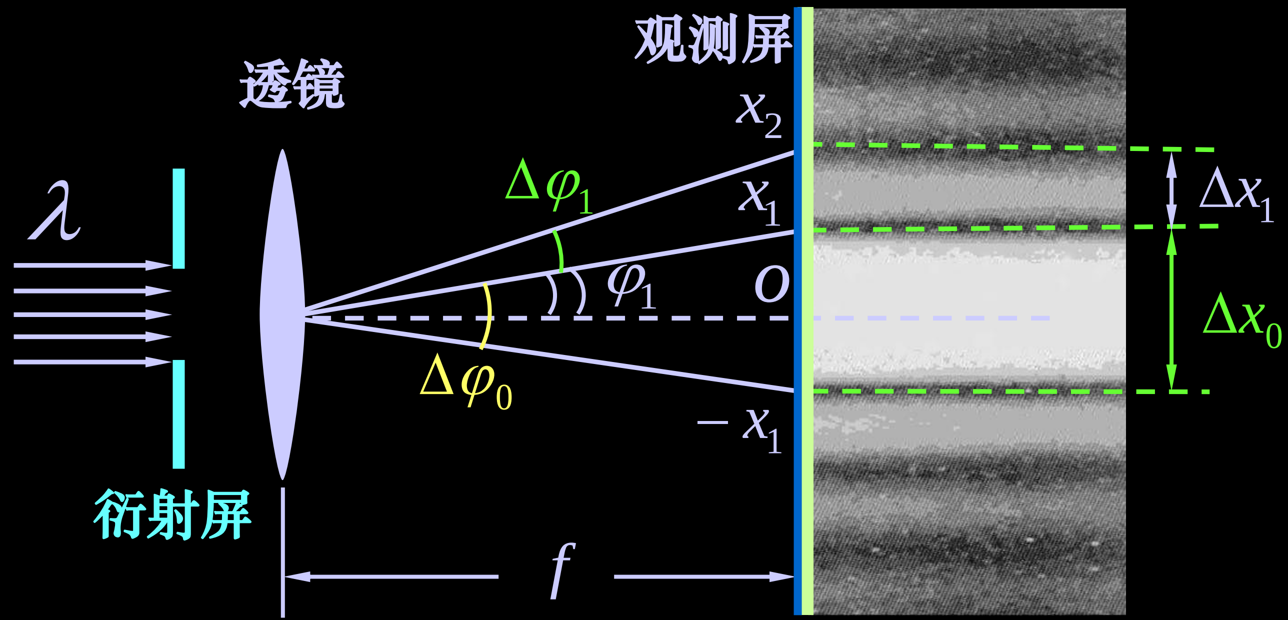
衍射: 无限多的子波的相干叠加

二者常常同时出现在同一现象中

2. 单缝衍射明纹-角宽度和线宽度 $a\sin\varphi = \pm k\lambda$

角宽度 相邻两暗纹中心对应的衍射角之差

线宽度 观察屏上相邻两暗纹中心的间距



中央明纹 角宽度 $\Delta\varphi_0 = 2\varphi_1 = 2\arcsin(\lambda/a) \approx 2\lambda/a$

线宽度 $\Delta x_0 = 2f\cdot\tan\varphi_1 \approx 2f\varphi_1 \approx 2f\lambda/a$

第 k 级明纹 角宽度 $\Delta\varphi_k \approx \lambda/a$ 请写出线宽度

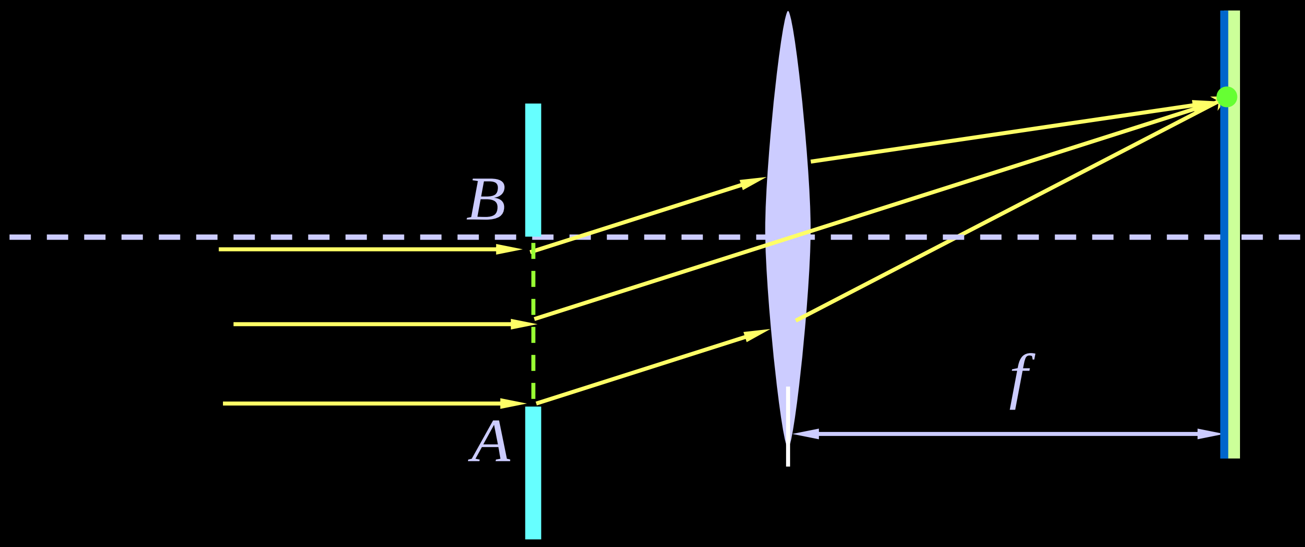
讨论　$\Delta\varphi_0 = 2\varphi_1 = 2\arcsin(\lambda/a)$

(1) $\Delta\varphi_0 \approx 2\lambda/a$　波长越长，缝宽越小，条纹宽度越宽。

(2) $\lambda/a \to 0$　$\Delta\varphi_0 \to 0$　波动光学退化到几何光学。

(3) $\lambda/a \to 1$　$\Delta\varphi_0 \to \pi$　观察屏上不出现暗纹。

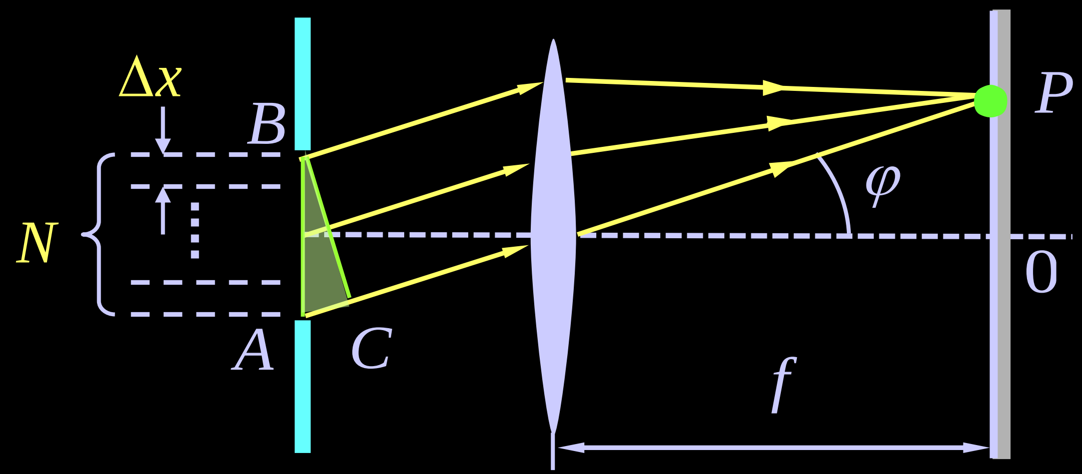
(4) 缝位置变化 → **不影响**条纹位置分布



（单缝夫琅禾费衍射典型装置）

单缝衍射强度 (振幅矢量法)

1. 单缝衍射强度公式



将缝 ***AB*** 均分成 ***N*** 个窄带，每个窄带宽度为 $\Delta x = a/N$

设每个窄带在 ***P*** 点引起的振幅为 ΔE_{φ}

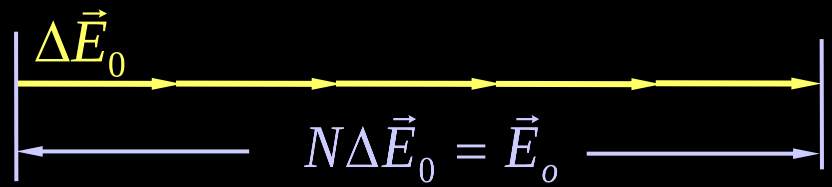
A、***B*** 点处窄带在 ***P*** 点引起振动的相位差为 $\beta = 2\pi a \sin\varphi/\lambda$

相邻窄带的相位差为 $\delta = \beta/N$　令 ***P*** 处的合振幅为 E_p

$$\boxed{\delta = \beta / N = 2\pi a \sin\varphi / N\lambda}$$

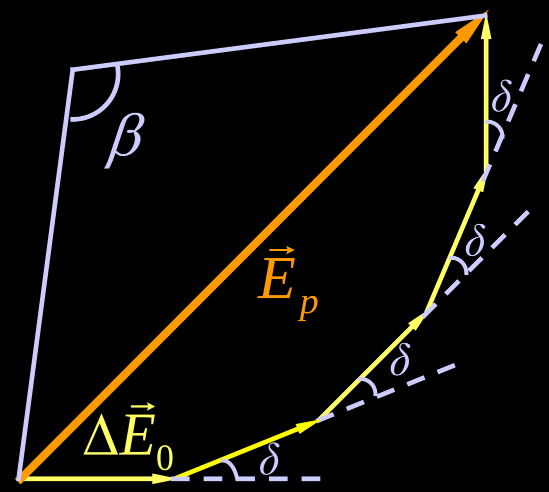
对于 *O* 点

$\varphi = 0 \quad \beta = 0 \quad E_o = E_{max}$



对于其它点 *P*

$E_p < E_o$ （如当 *N* 取 5 时）



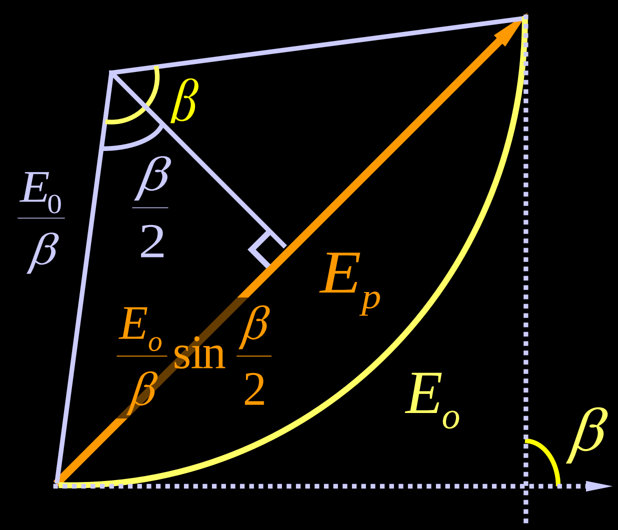
***N* 取无穷大时**

$$E_p = 2\frac{E_o}{\beta}\sin\frac{\beta}{2}$$

令 $\alpha = \dfrac{\beta}{2} = \dfrac{\pi}{\lambda} a \sin\varphi$

$$E_p = E_o \frac{\sin\alpha}{\alpha}$$

$$\boxed{I_p = I = I_o\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2}$$



$$\boxed{\frac{I}{I_o} = \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} a \sin\varphi$$

2. 明、暗纹条件

- **中央明纹**

$\varphi = 0$处， $\alpha = 0$

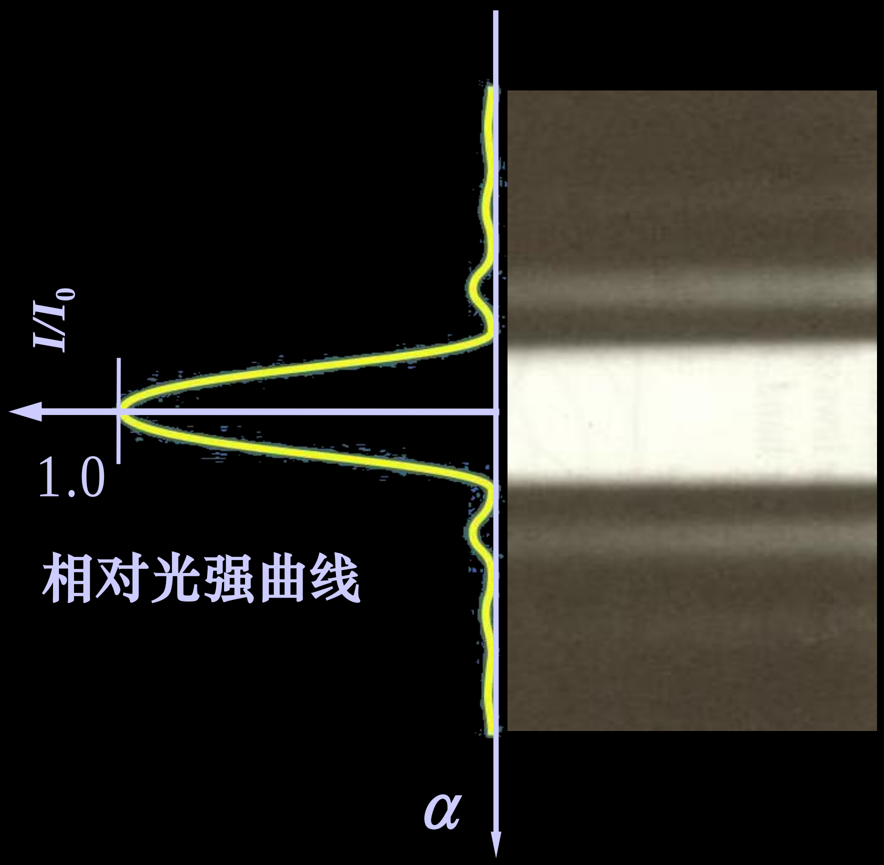
$I = I_o = I_{max}$

- **暗纹条件**

$I = 0 \rightarrow \sin\alpha = 0$

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} a \sin\varphi = \pm k\pi$$

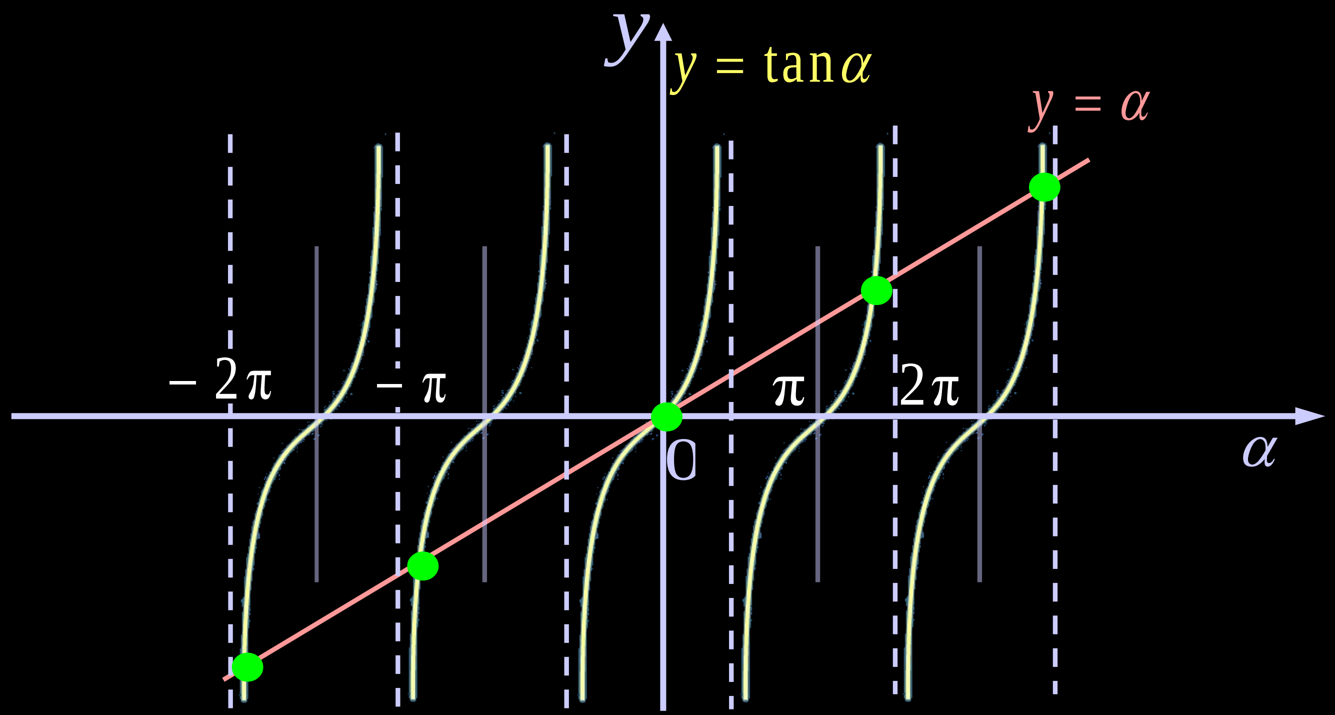
$a \sin\varphi = \pm k\lambda \qquad k = 1,2,3\cdots$



相对光强曲线

和半波带法得到的暗纹条件一致

- **明纹条件** $\dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}\alpha}=0 \Rightarrow \tan\alpha=\alpha$



解得 $\alpha=\pm1.43\pi,\pm2.46\pi,\pm3.47\pi,\ \cdots$

相应 $a\sin\varphi=\pm1.43\lambda,\ \pm2.46\lambda,\ \pm3.47\lambda,\cdots$

半波带法得到的明纹位置 $a\sin\varphi=(2k+1)\lambda/2$ **是比较好的近似**

例 如图示，设有一波长为 λ 的单色平面波沿着与缝平面的法线成 θ 角的方向入射到宽为 a 的单缝 AB 上。

求 写出各级暗条纹对应的衍射角 φ 所满足的条件。

解 在狭缝两个边缘处，衍射角为 φ 的两光的光程差为

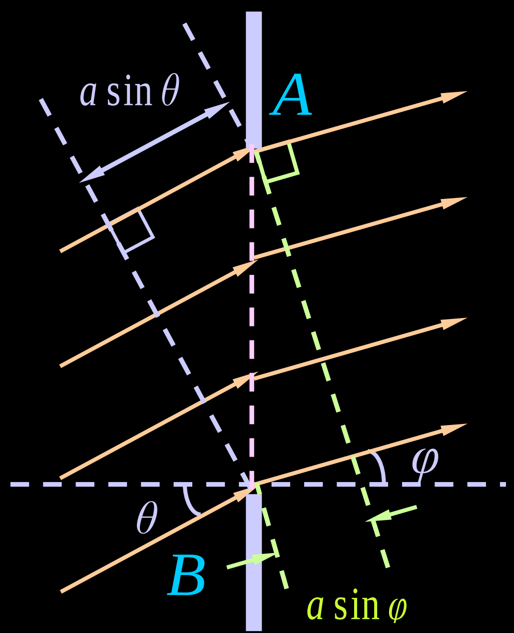
$$\Delta = a(\sin\varphi - \sin\theta)$$

对于暗纹有 $\Delta = \pm k\lambda$

则 $a(\sin\varphi - \sin\theta) = \pm k\lambda$

$$\sin\varphi = \pm\frac{k\lambda}{a} + \sin\theta$$

$$(k = 1,2,3,\cdots)$$



例 用波长为λ_1和λ_2的平行光垂直照射一单缝，在距缝很远的屏上观察衍射条纹，如果λ_1的第一级衍射暗纹与λ_2的第二级衍射暗纹重合

求 (1) 两种波长之间的关系；

(2) 这两种波长的衍射图样中是否还有其它级的暗纹重合

解 (1) 单缝衍射暗纹条件

$$a\sin\varphi = k\lambda$$

$$\left.\begin{aligned} a\sin\varphi_1 &= \lambda_1 \\ a\sin\varphi_2 &= 2\lambda_2 \\ \text{重合，即}\quad \varphi_1 &= \varphi_2 \end{aligned}\right\} \longrightarrow \lambda_1 = 2\lambda_2$$

(2) 单缝衍射暗纹条件

$$a\sin\varphi = k\lambda$$

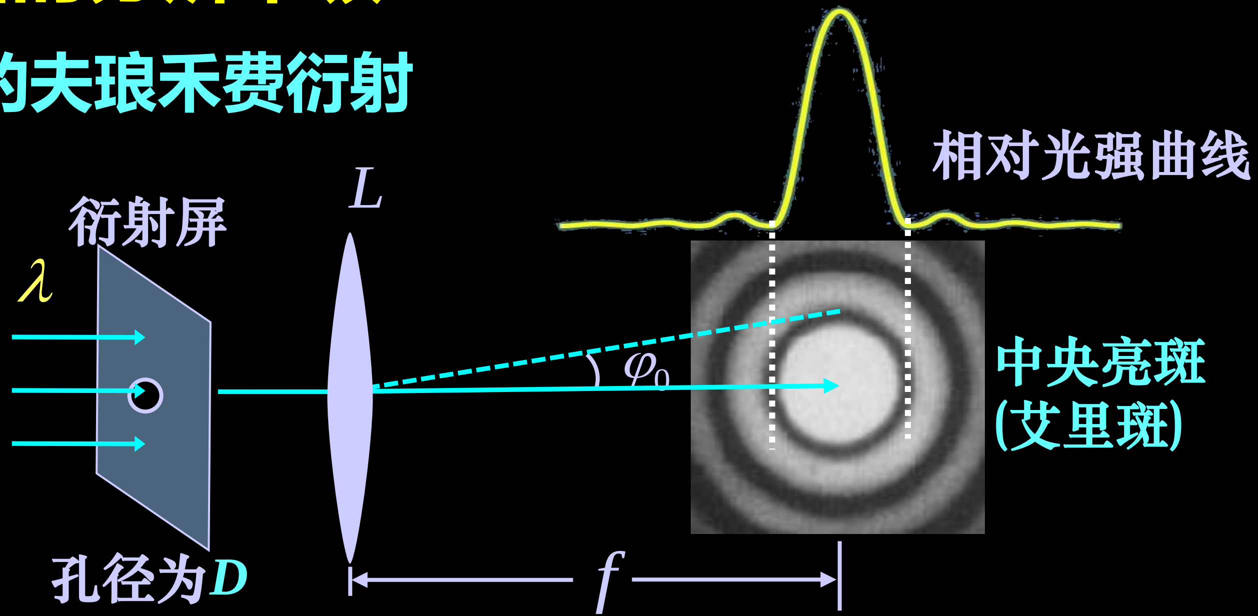
$$\left.\begin{aligned} a\sin\varphi_1 &= k_1\lambda_1 \\ a\sin\varphi_2 &= k_2\lambda_2 \\ \varphi_1 &= \varphi_2 \\ \lambda_1 &= 2\lambda_2 \end{aligned}\right\} \longrightarrow k_2 = 2k_1$$

重合，即

可见，还有 λ_1 的 k_1 级暗纹与 λ_2 的 $2k_1$ 级暗纹重合。

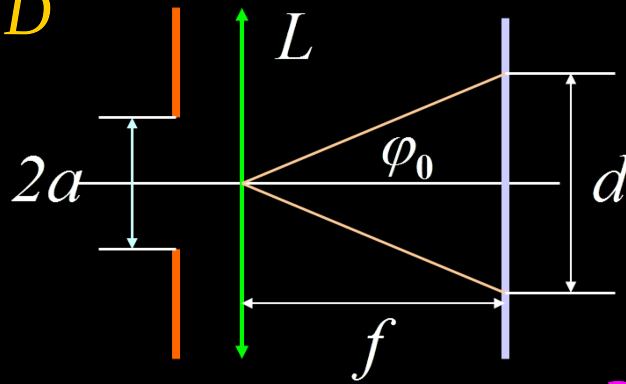
光学仪器的分辨本领

◆ 圆孔的夫琅禾费衍射



经圆孔衍射后，一个**点光源**对应一个**艾里斑**

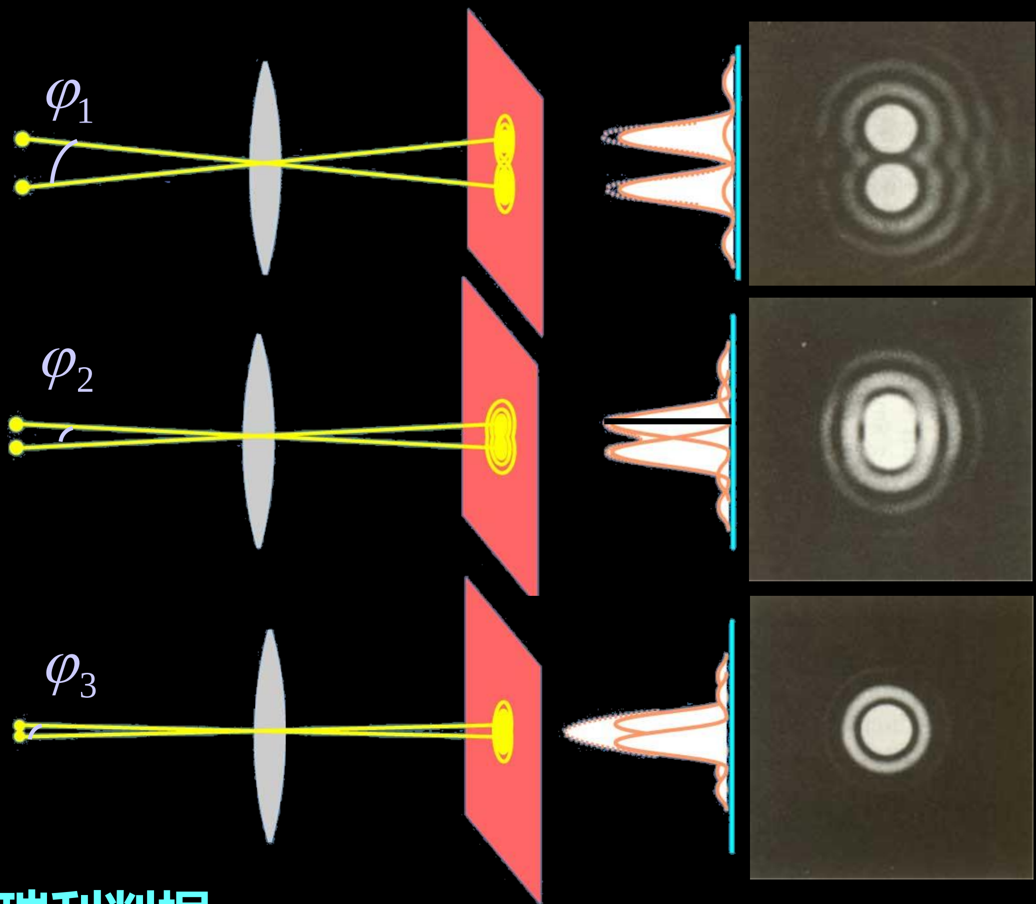
艾里斑的半角宽度为 $\varphi_0 \approx 1.22\dfrac{\lambda}{D}$



◆ 透镜的分辨本领

几何光学　　物点 $\xrightarrow{\text{一一对应}}$ 像点

波动光学　　物点 $\xrightarrow{\text{一一对应}}$ 像斑



可分辨 $\varphi_1 > \delta_\varphi$

刚可分辨 $\varphi_2 = \delta_\varphi$

不可分辨 $\varphi_3 < \delta_\varphi$

瑞利判据

对于两个等光强的**非相干物点**：如果一个像斑中心恰好落在另一像斑的边缘(第一暗纹处)，则此两像被认为是刚好能分辨。此时两像斑中心角距离为**最小分辨角**

$$\boxed{\delta_\varphi = \varphi_0 \approx 1.22\frac{\lambda}{D}}$$

最小分辨角

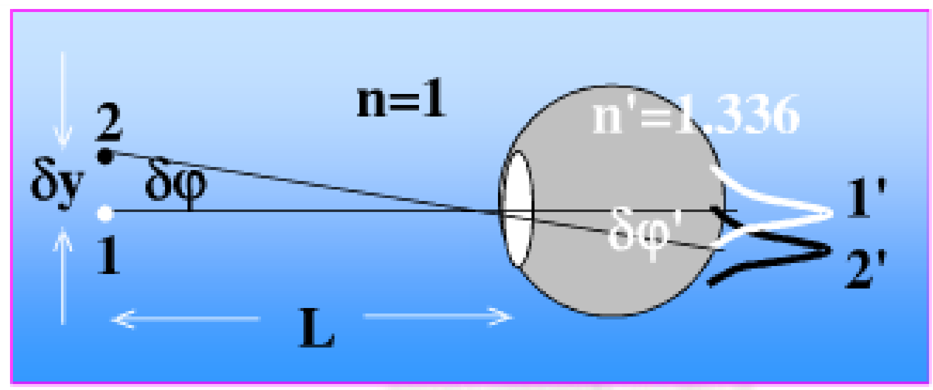
$$\delta\varphi = \varphi_0 \approx 1.22\frac{\lambda}{D}$$

分辨本领

$$R \equiv \frac{1}{\delta\varphi} = \frac{D}{1.22\lambda}$$

•人眼的分辨本领

设人眼瞳孔直径为D，可把人眼看成一枚凸透镜，焦距只有20毫米，其成象为夫琅和费衍射的图样。



例 在迎面驶来的汽车上，两盏前灯相距 120 cm， 设夜间人眼瞳孔直径为 5.0 mm， 入射光波为 550 nm。

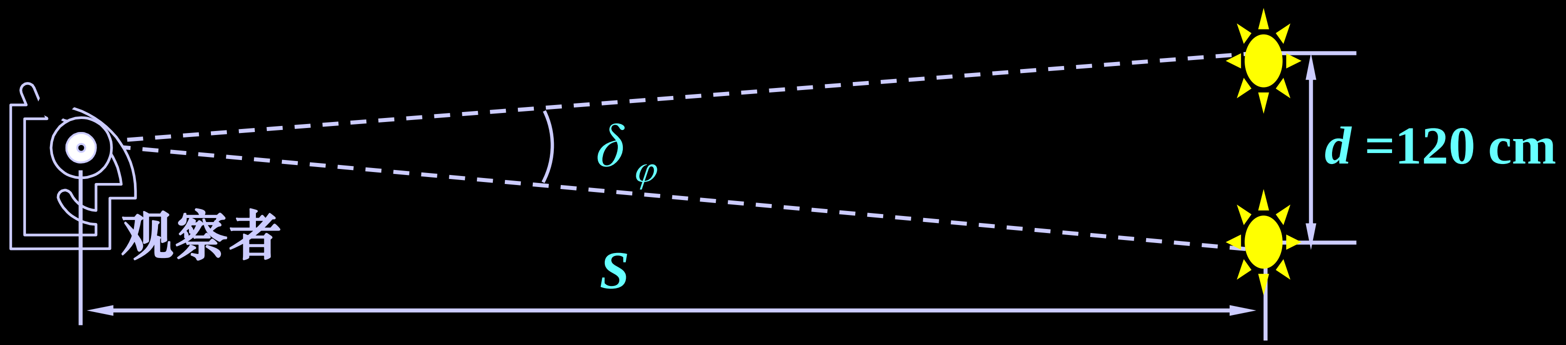
求 人在离汽车多远的地方，眼睛恰能分辨这两盏灯?

解 设人离车的距离为 S 时，恰能分辨这两盏灯

由题意有 $d = 120\ \text{cm}$ $D = 5.0\ \text{mm}$ $\lambda = 550\ \text{nm}$

眼睛的最小分辨角为 $\delta_{\varphi} = 1.22\dfrac{\lambda}{D}$ 取 $d \approx S \cdot \delta_{\varphi}$

$$S \approx \frac{d}{\delta_{\varphi}} = \frac{Dd}{1.22\lambda} = \frac{5.0\times 10^{-3}\times 1.20}{1.22\times 550\times 10^{-9}} = 8.94\times 10^{3}\ \text{m}$$



例 载人宇宙飞船在距地面 160km的轨道上运行时，宇航员恰好能分辨地面上的两点光源，设波长为550nm、瞳孔直径取5mm .

求 两点光源之间的距离

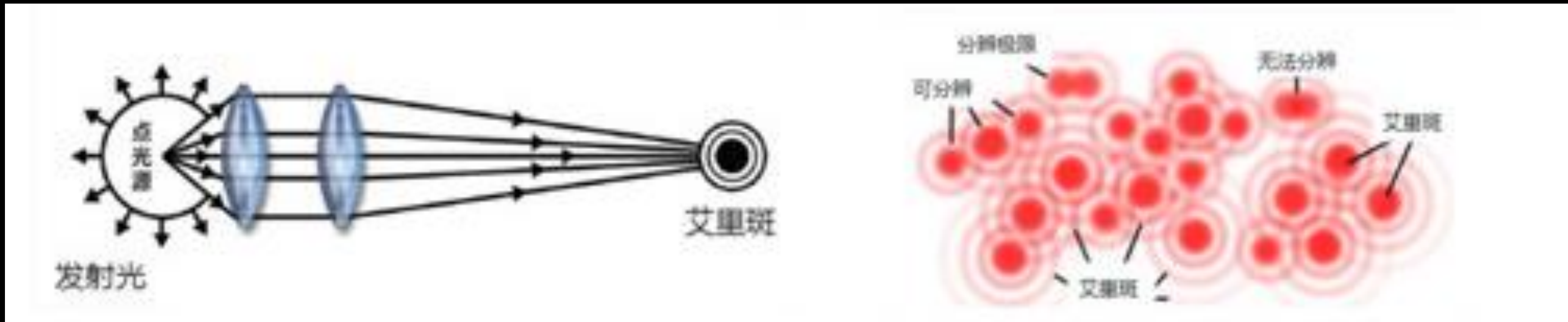
解 设两点光源之间的距离为x、飞船距地面的距离为L

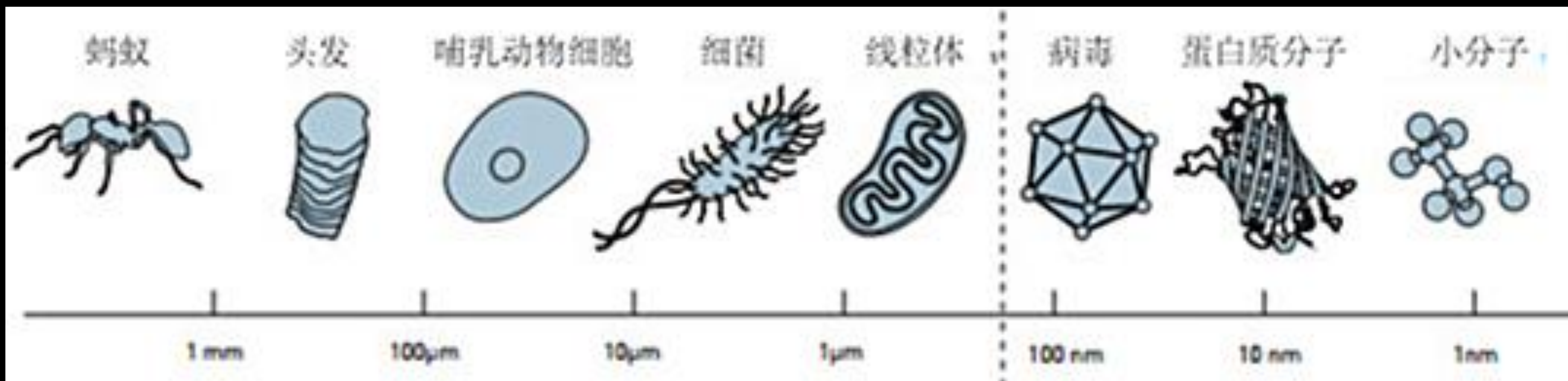
眼睛的最小分辨角 $\delta_\varphi = 1.22\dfrac{\lambda}{D}$

两点光源对人眼睛的张角 $\delta = \dfrac{x}{L}$

恰能分辨条件 $\delta_\varphi = \delta \longrightarrow 1.22\dfrac{\lambda}{D} = \dfrac{x}{L}$

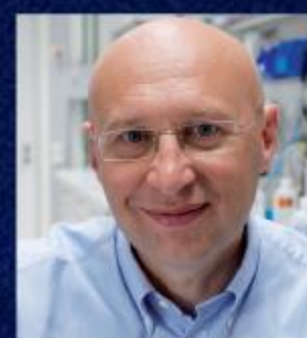
$$x = \frac{1.22\lambda L}{\mathrm{D}} = \frac{1.22\times 550\times 10^{-9}\times 160\times 10^{3}}{5\times 10^{-3}} = 21\mathrm{m}$$



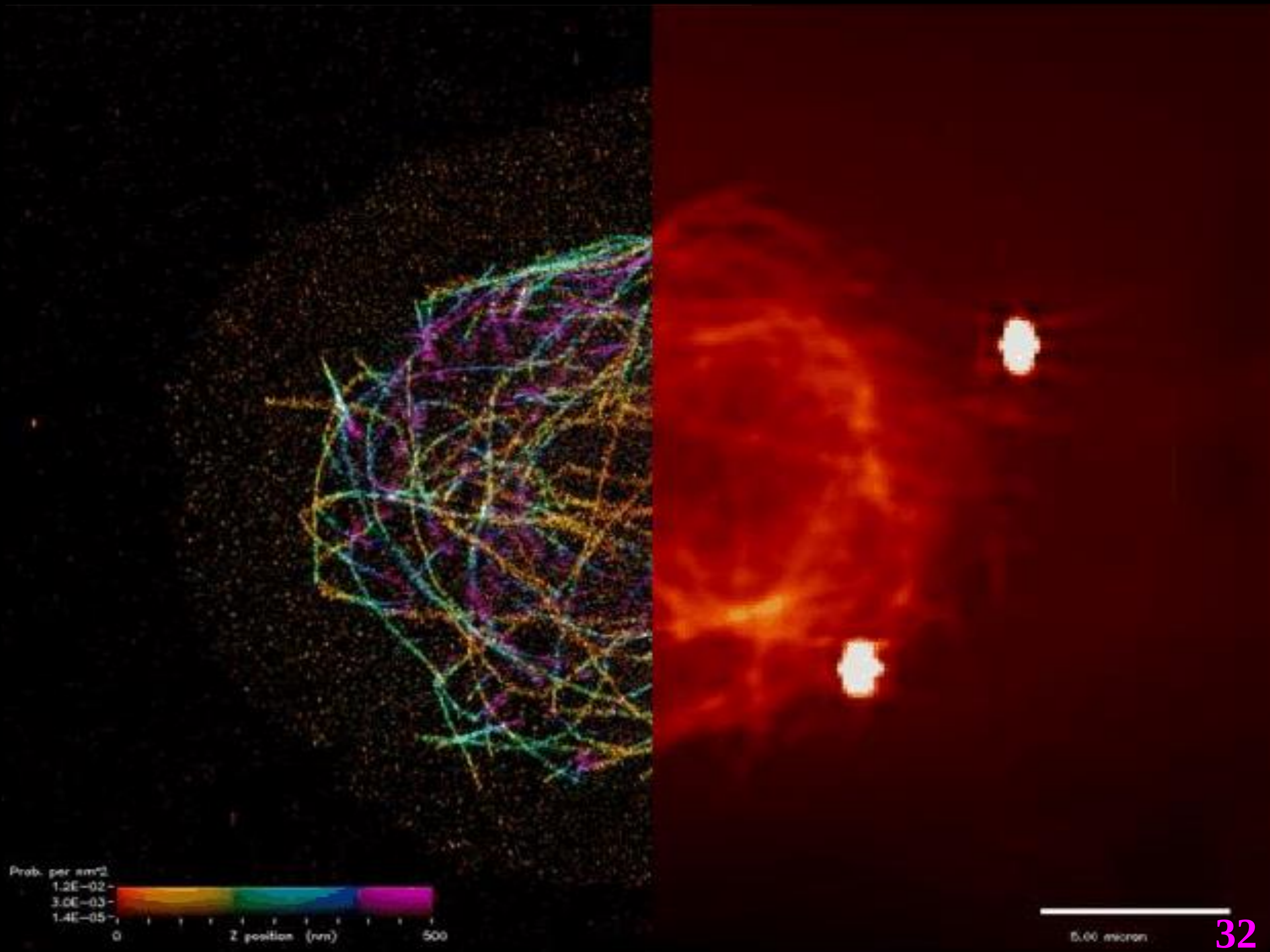


2014诺贝尔化学奖


埃里克 · 白兹格
（Eric Betzig）

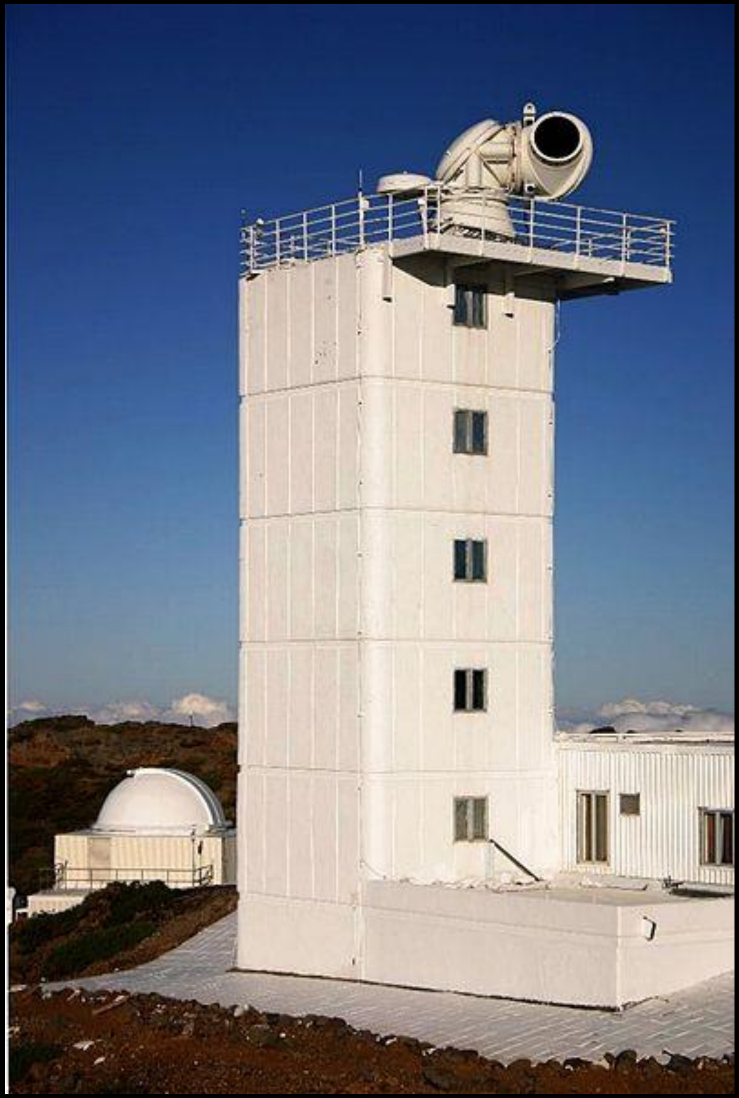

斯蒂芬 · 黑尔
（Stefan W. Hell）


威廉 · 莫尔纳
（William E. Moerner）


Prob. per nm^2
1.2E−02
3.0E−03
1.4E−05
0
Z position (nm)
500
5.00 micron

太阳望远镜

- 麦克梅斯 - 皮尔斯太阳望远镜
  1.6m, 1961年–
- McMath-Hulbert Observatory
  61cm，1941年 – 1979年
- 瑞典真空太阳望远镜
  47.5cm，1985年 – 2000年
- 瑞典太阳望远镜
  1m，2002年 –
- Richard B. Dunn Solar Telescope
  1.63m，1969年 –
- Dutch Open Telescope
  45cm, 1997年 –
- 先进技术太阳望远镜（ATST）
  4m
- 中国的巨型太阳望远镜
  8m，设计选址中



欧洲极大望远镜(E-ELT) – 39m

美国“三十米望远镜”(TMT)

射电望远镜

波多黎各境内的阿雷西博(Arecibo)天文台 —— 305→350米口径

贵州省平塘县-利用喀斯特地貌建筑的FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)

—— 500m口径