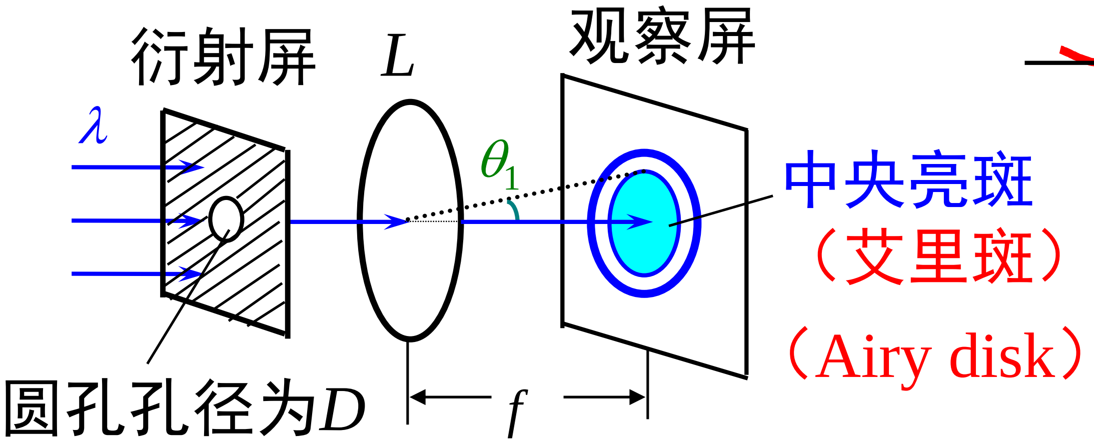
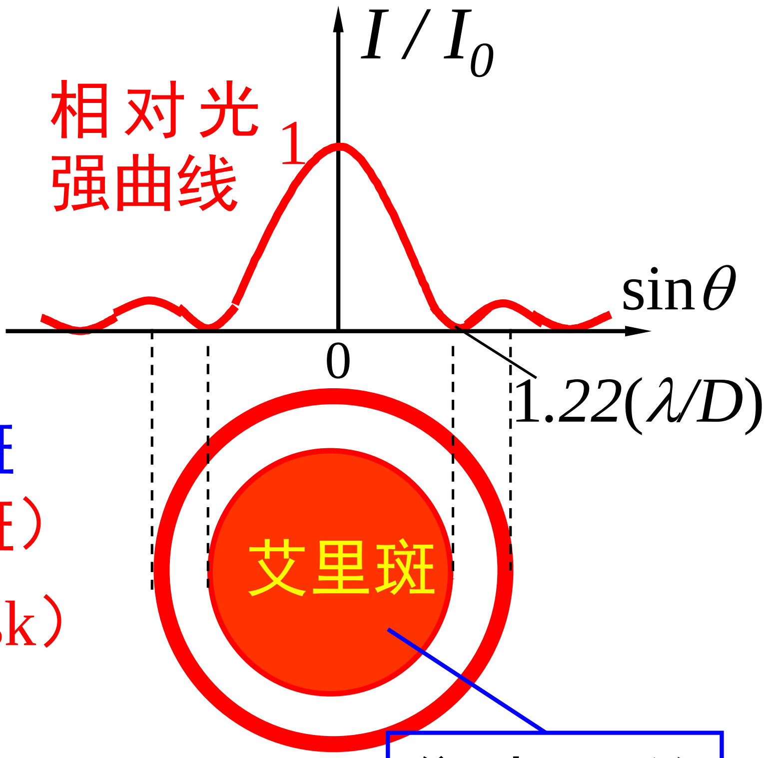
23.3 光学仪器的分辨本领

一、透镜的分辨本领

1、圆孔的夫琅禾费衍射





集中了约84%的衍射光能。

$$\boxed{D\cdot\sin\theta_1\approx1.22\lambda}$$

$\left.\begin{matrix}D\uparrow\\ \lambda\downarrow\end{matrix}\right\}$爱里斑变小

光学仪器的像分辨本领 (分辨极限)

在仪器孔径上的衍射限制了像的可分辨极限。

圆孔的 Fraunhofer 衍射

$$\boldsymbol{I(\theta) \propto I_0 \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2}, \quad \boldsymbol{I_0 \propto \left(\frac{\pi a^2}{\lambda} \right)^2}$$

(a 是孔半径)

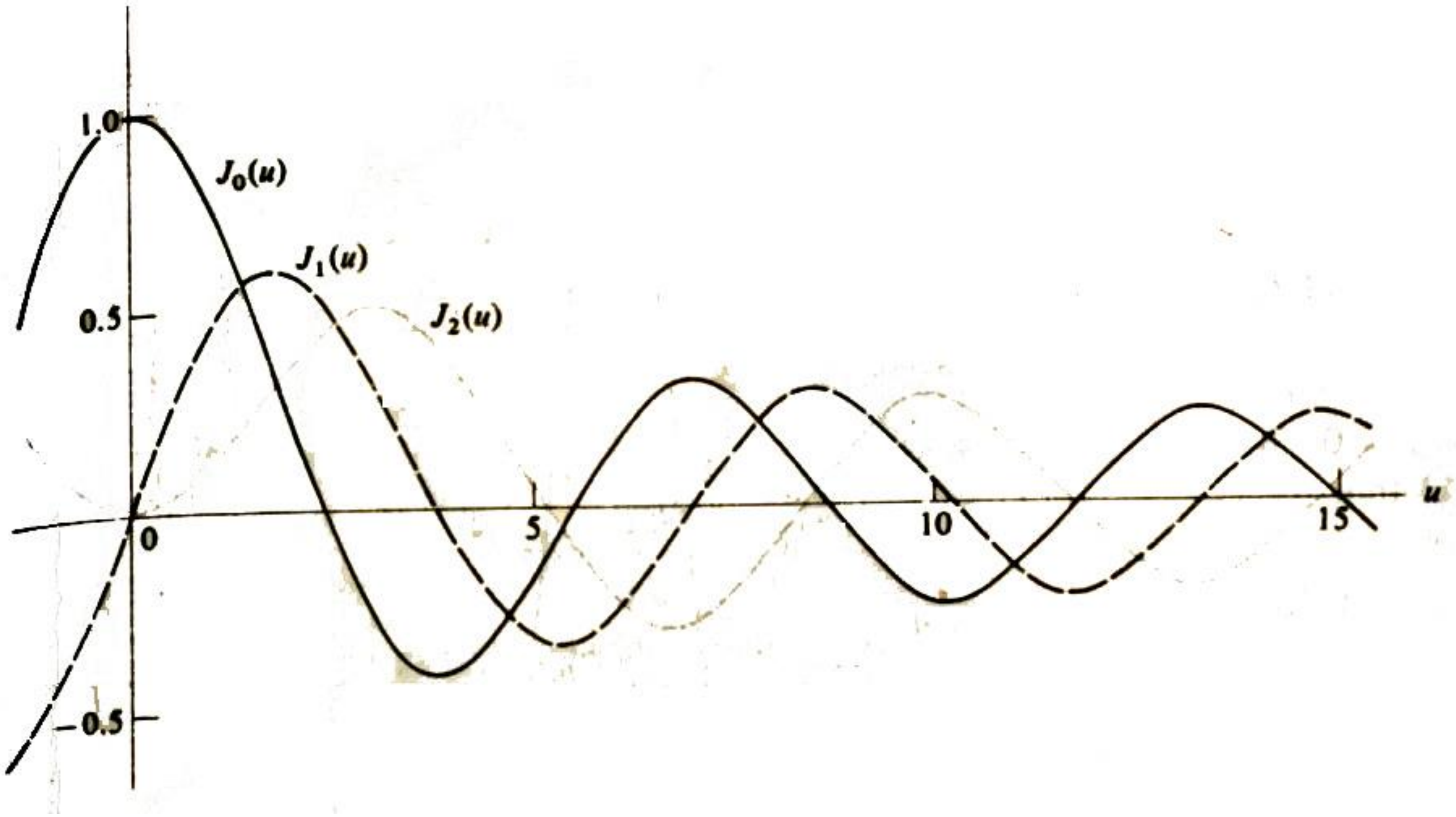
(一阶第一类贝塞耳函数)

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin\theta$$

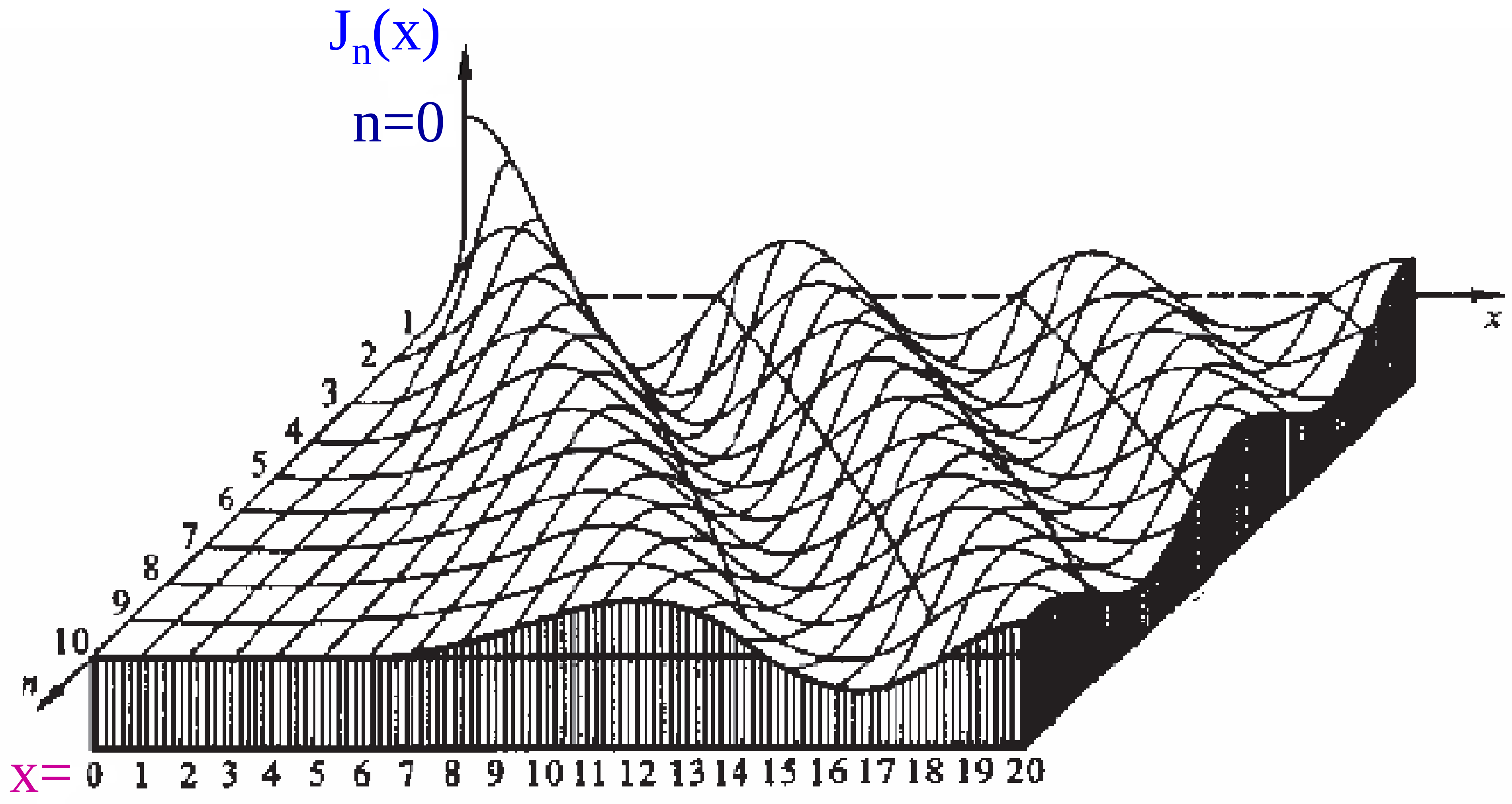
第一暗圈，$x \approx 3.832 \approx 1.22\,\pi$

(84 % 能量)

中央亮斑 ($x < 1.22\,\pi$)叫做 爱里斑 (Airy disk)

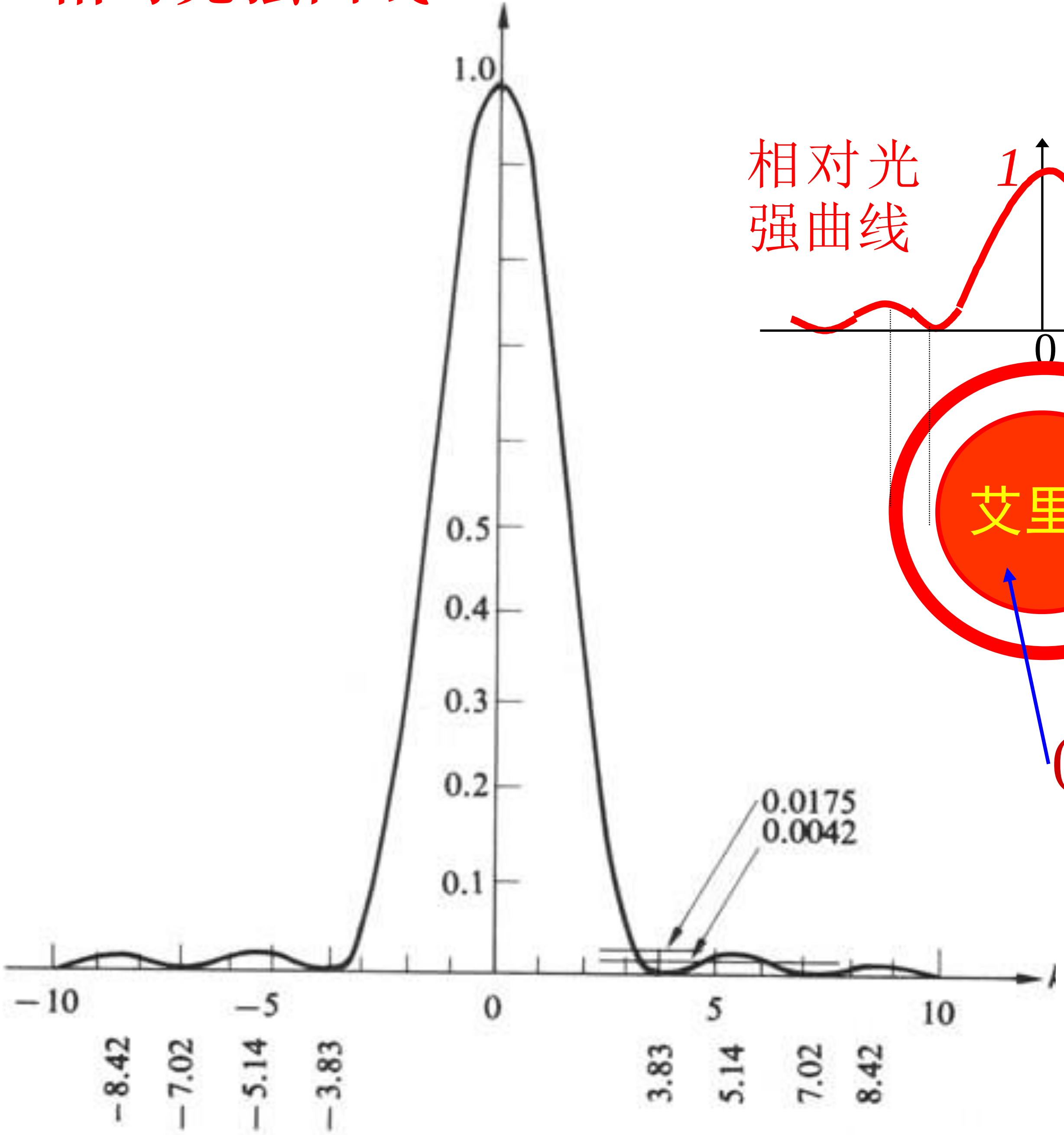


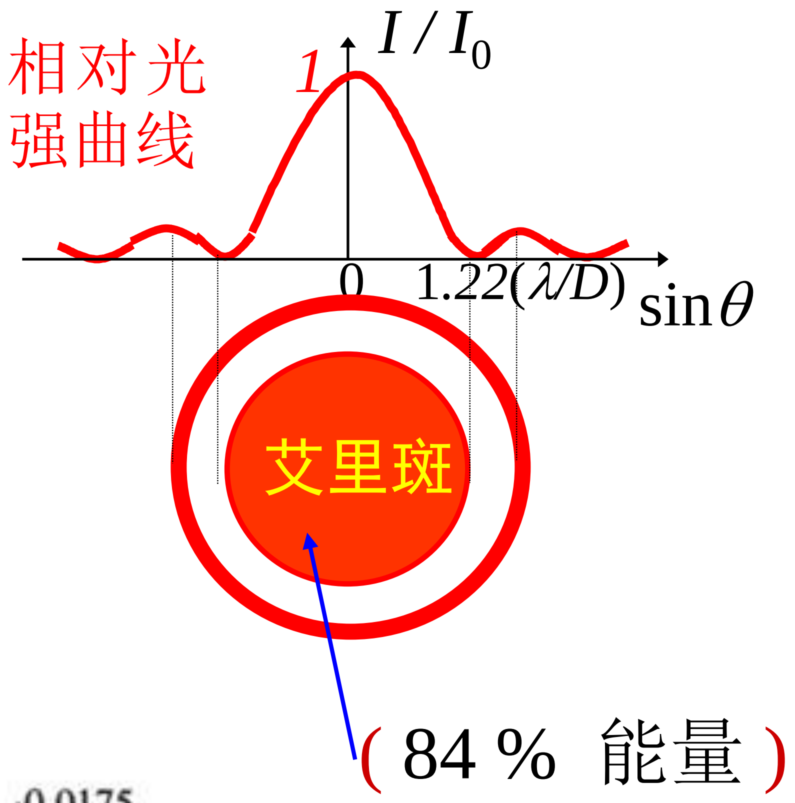
1.0
0.5
−0.5
0
5
10
15
u
$J_0(u)$
$J_1(u)$
$J_2(u)$



贝塞尔（Bessel）函数图形

相对光强曲线





$$\mathbf{x} = \frac{\pi D}{\lambda}\sin\theta$$

英国天文学家艾里

(1801-1892)

格林尼治天文台

2、透镜的分辩本领

几何光学：（经透镜）

物点 $\Rightarrow$ 象点

物（物点集合）$\Rightarrow$ 象（象点集合）

波动光学：（经透镜）

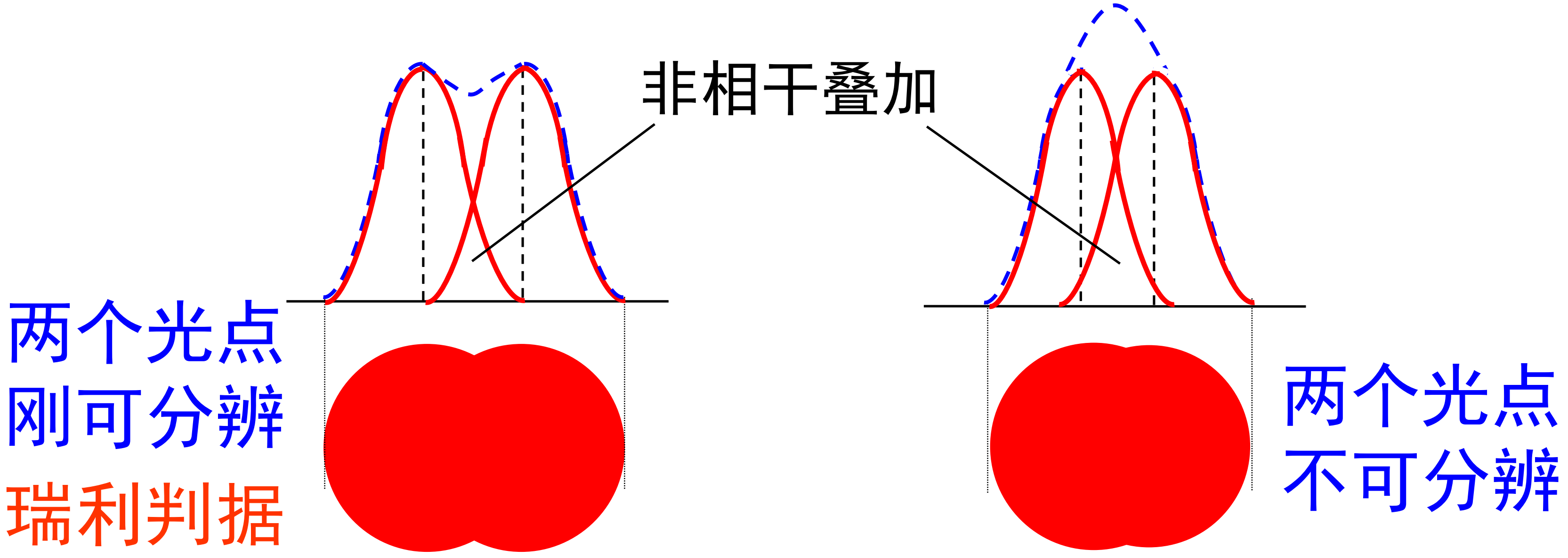
物点 $\Rightarrow$ 象斑

物（物点集合）$\Rightarrow$ 象（象斑集合）

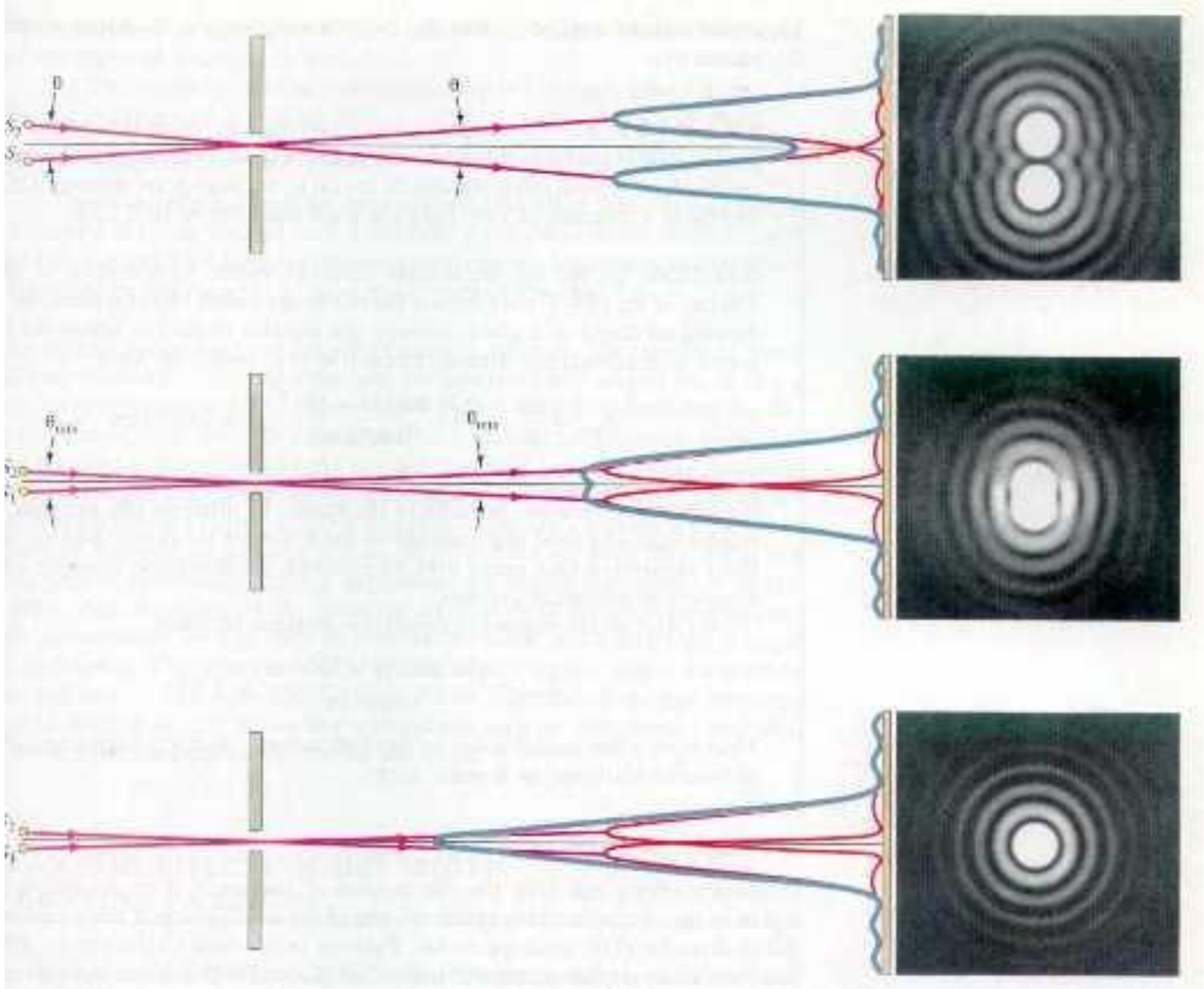
衍射限制了透镜的分辨能力。

瑞利判据（Rayleigh criterion）：

对于两个等光强的非相干的物点，如果一个象斑的中心恰好落在另一象斑的边缘（第一暗纹处），则此两物点被认为是刚刚可以分辨的。若象斑再靠近就不能分辨了。



小孔（直径D）对两个靠近的遥远的点光源的分辨



离得远

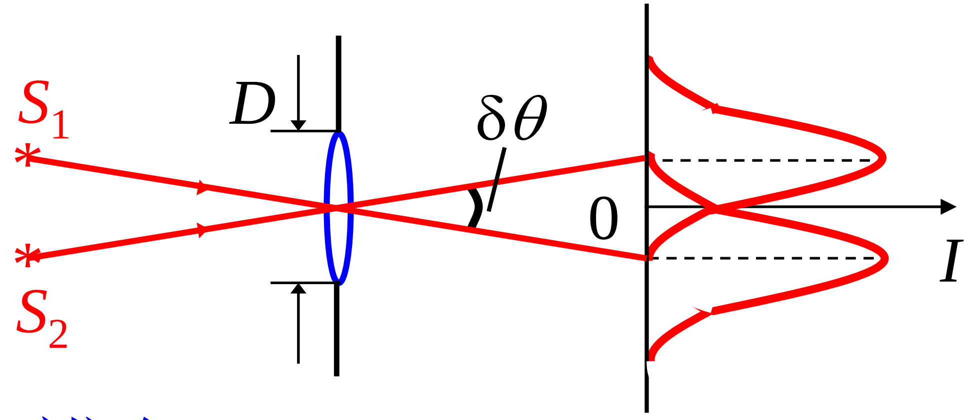
可分辨

瑞利判据

刚能分辨

离得太近

不能分辨



最小分辨角

$$\delta\theta = \theta_1 \approx 1.22\frac{\lambda}{D}$$

分辨本领

$$R \equiv \frac{1}{\delta\theta} = \frac{D}{1.22\lambda} \qquad \left.\begin{matrix} D\uparrow \\ \lambda\downarrow \end{matrix}\right\} \rightarrow R\uparrow$$

望远镜：λ不可选择，可 $\uparrow D \rightarrow \uparrow R$

显微镜：D不会很大，可 $\downarrow \lambda \rightarrow \uparrow R$

望远镜：λ 不可选择，但 $\uparrow D \rightarrow \uparrow R$

▲ 世界上最大的光学望远镜：$D = 8\ \mathrm{m}$

建在了夏威夷山顶。

▲世界上第二大的射电望远镜：

$D = 305\ \mathrm{m}$

建在了波多黎各岛的Arecibo

阿雷西博天文台的这台射电望远镜——也称为阿雷西博射电望远镜 (Arecibo Radio Telescope)——直到 2016年6月为止都是世界上最大的单一口径射电天文望远镜。这一称号于2016年7月让位给了新竣工的口径 500米的“中国天眼”。

显微镜：D不会很大，**但**$\downarrow\lambda \to \uparrow R$

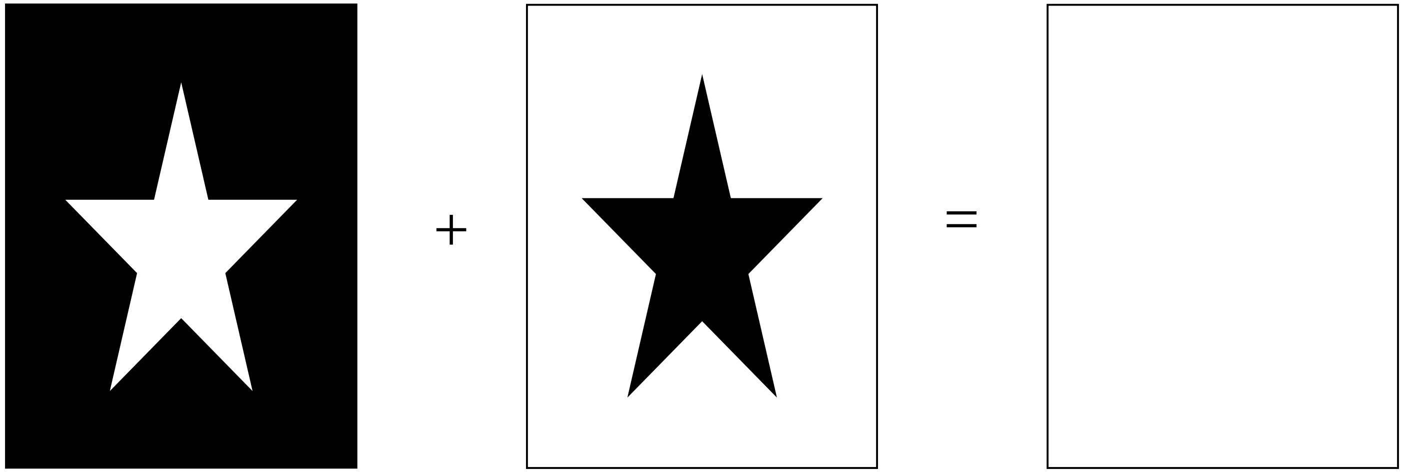
电子λ：$0.1\mathring{A} \sim 1\mathring{A}$（$10^{-2} \sim 10^{-1}$ nm）

所以电子显微镜分辨本领很高,可观察物质的结构。

▲在正常照明下，人眼瞳孔直径约为3mm，对$\lambda = 0.55\ \mu m$（$5500\mathring{A}$）的黄光，$\delta\theta \approx 1'$，可分辨约 9m 远处的相距 2mm 的两个点（见书P.39，例23.2）。

▲夜间观看汽车灯，远看是一个亮点，逐渐移近才看出是两个灯。

23.4 巴比涅 (Babinet)原理



a　　　　b　　　　c

$$\boxed{\tilde{U}(P) = \frac{-i}{\lambda r_0} \iint_{\Sigma_0} \tilde{U}_0(Q)\; e^{ikr} d\Sigma}$$

$$\Sigma_0 = \Sigma_a + \Sigma_b$$

$$\iint_{(\Sigma_0)} \mathrm{d}\Sigma = \iint_{(\Sigma_a)} \mathrm{d}\Sigma + \iint_{(\Sigma_b)} \mathrm{d}\Sigma$$

互补屏Σ_a和 Σ_b，必有 $\tilde{U}_a(P)+\tilde{U}_b(P)=\tilde{U}_0(P)$

$\tilde{U}_0(P)$ 表示无屏时的自由光场在 P 点的复振幅。

特例：衍射屏由点光源照明，屏之后有成像光学系统，在光源的像平面上接收衍射图样。

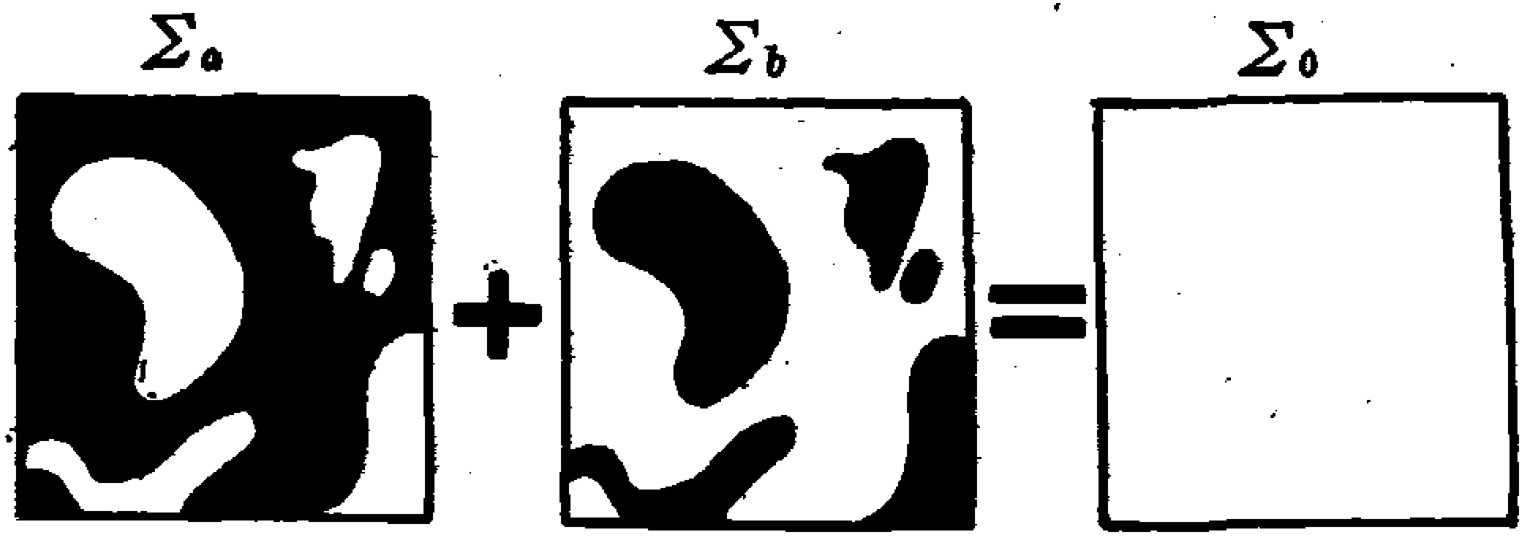
这时的自由光场中像平面上，除了像点外各处的 $\tilde{U}_0(P)$ 皆为 0，所以除了像点外各处有

$\tilde{U}_a(P)=-\tilde{U}_b(P)$ ，从而 $I_a(P)=I_b(P)$

除了光源的几何光学像点外，互补屏在像平面上产生的衍射图样是完全一样的！

两屏互补，即：$\Sigma_0 = \Sigma_a + \Sigma_b$

$$\tilde{U}_a(P) + \tilde{U}_b(P) = \tilde{U}_0(P)$$



注意：

$I_a(P) = I_b(P)$ 不是普遍成立。

几何像点处没有 $I_a(O) = I_b(O)$

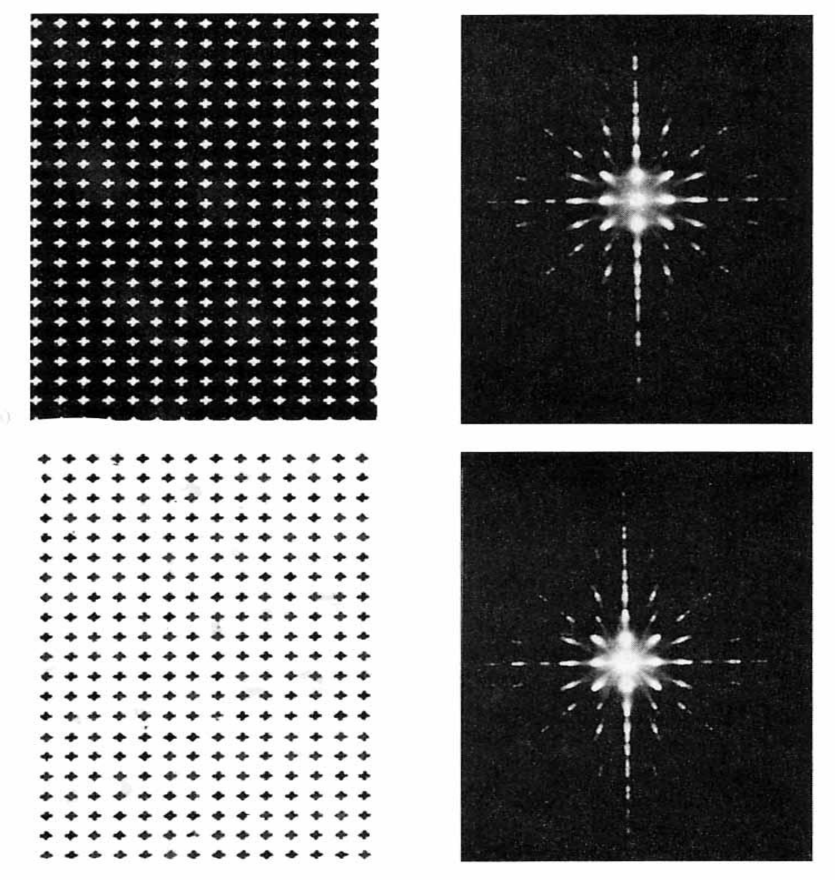
因为 $U_0(P) \neq 0$

Babinet's Principle

The diffraction pattern of a hole is the same as that of its opposite!

Holes
$A(x,y)$

Anti-Holes
$1-A(x,y)$



Neglecting the center point:

$$\tilde{U}_{\text{holes}} = -\tilde{U}_{\text{anti-holes}}$$

$$\Downarrow$$

$$I_{\text{holes}} = I_{\text{anti-holes}}$$

23.5 光栅衍射

一、光栅（grating）

光栅是现代科技中常用的重要光学元件。

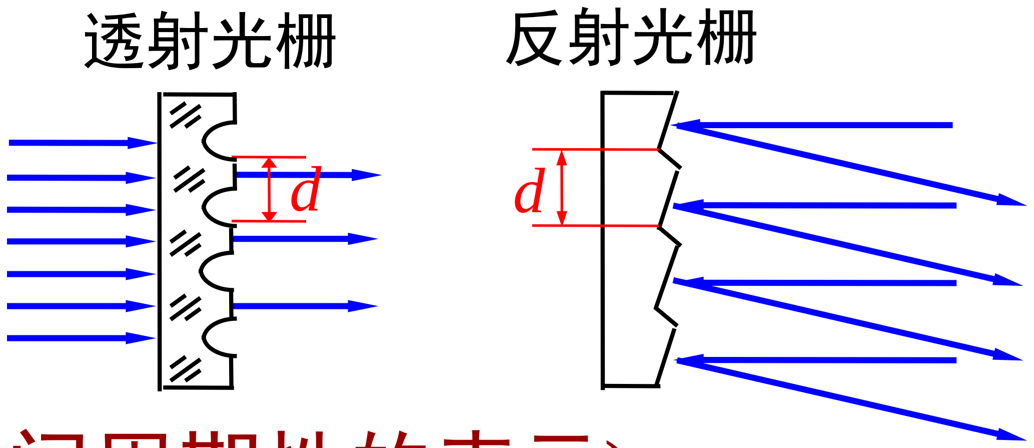
光通过光栅衍射可以产生明亮尖锐的亮纹，复色光入射可产生光谱，用以进行光谱分析。

1、光栅的概念

光栅是由大量的等宽等间距的平行狭缝（或反射面）构成的光学元件。

从广义上理解，任何具有空间周期性的衍射屏，都可叫作光栅。

2、光栅的种类：



3、光栅常数(空间周期性的表示)

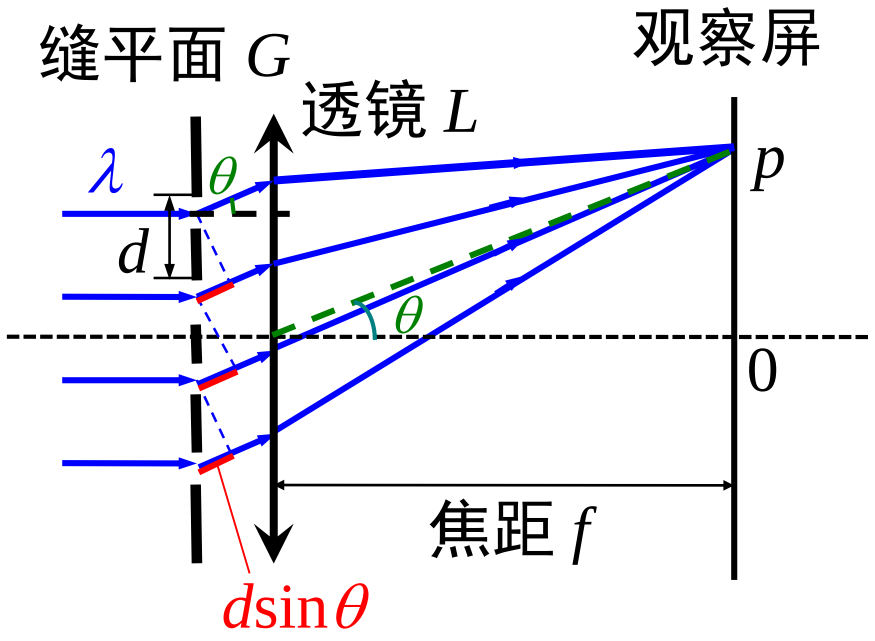
$$\boxed{d = a+b}$$

a — 透光（或反光）部分的宽度

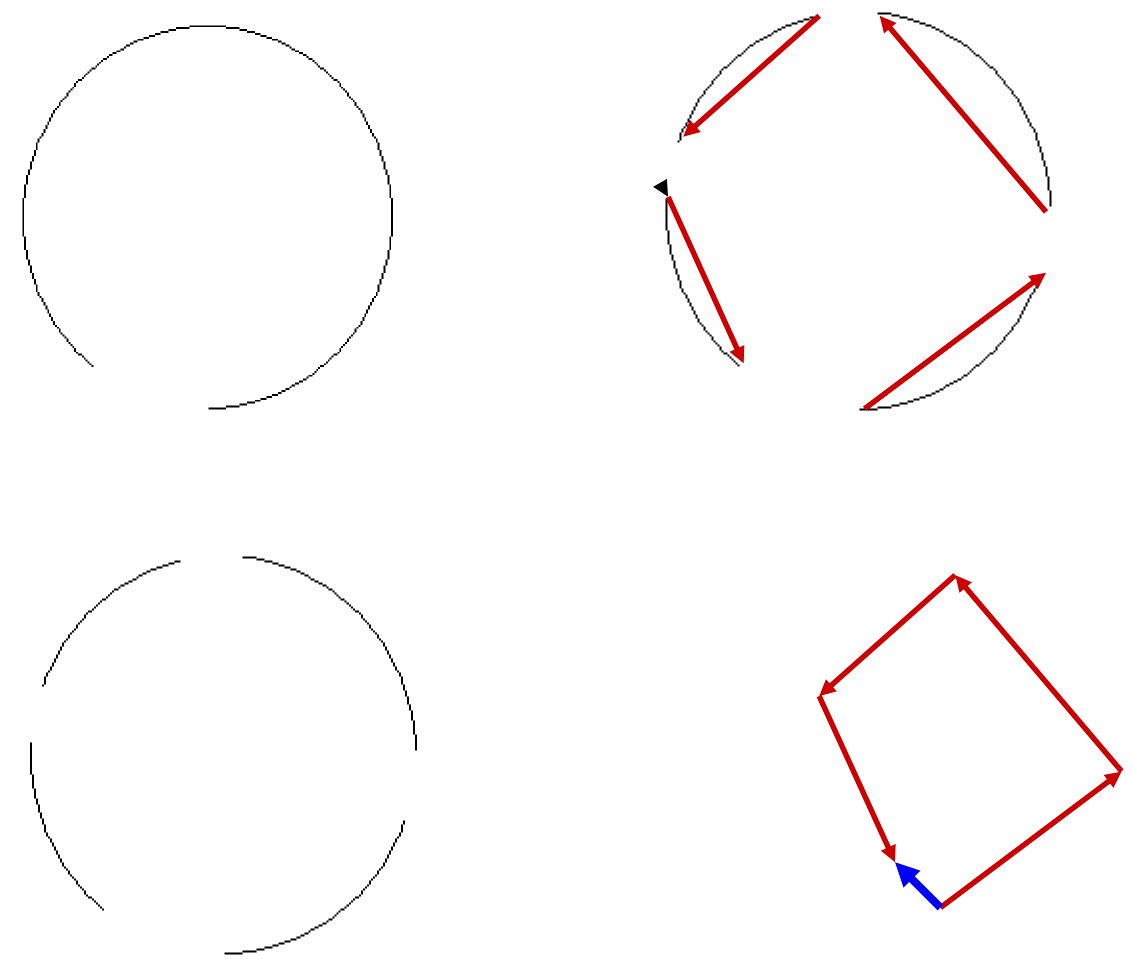
b — 不透光（或不反光）部分的宽度

普通光栅刻线为数十条/mm — 数千条/mm，用电子束刻制可达数万条/mm（$d \sim 10^{-1}\mu m$）。

二、光通过光栅后的光强分布



各缝之间的干涉和每缝自身的夫琅禾费衍射，决定了光通过光栅后的光强分布——多光束干涉和单缝衍射联合作用的结果。

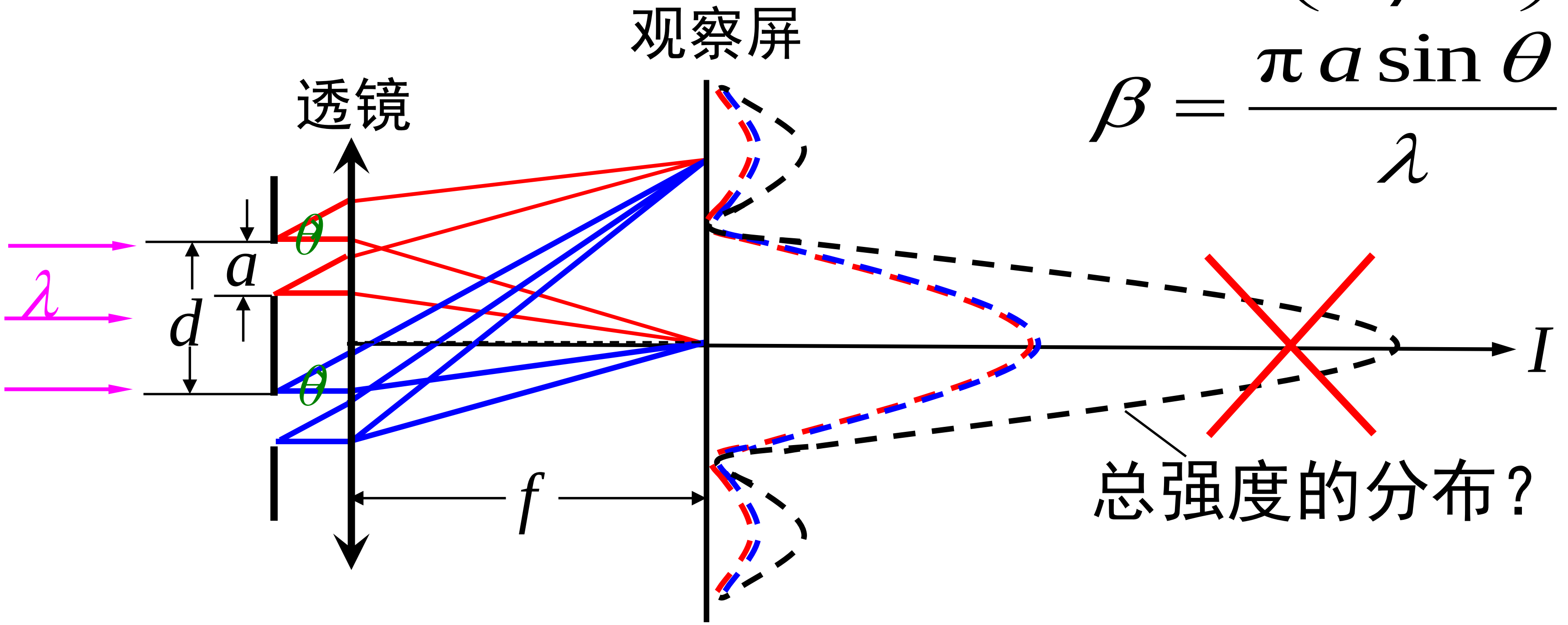


多缝夫琅禾费衍射可以看作对单缝进行了部分遮挡

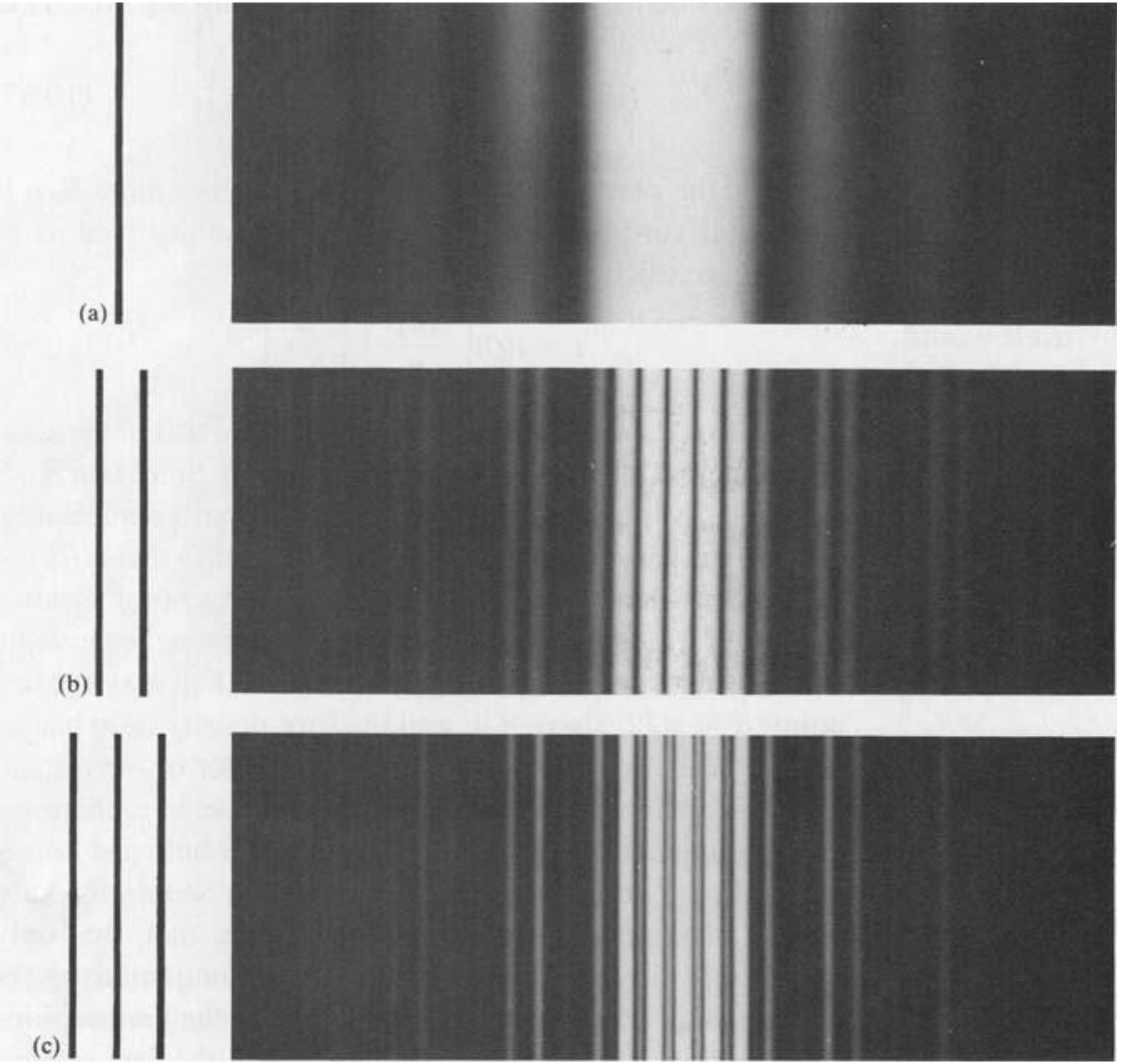
1、各缝衍射光强度极大值位置重叠

以双缝为例　　　单缝衍射：$I = I_0\left(\dfrac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$

$$\beta = \frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}$$



缝衍射光强极大值的位置，在屏上重叠。
总强度的分布，是两束光的相干叠加。

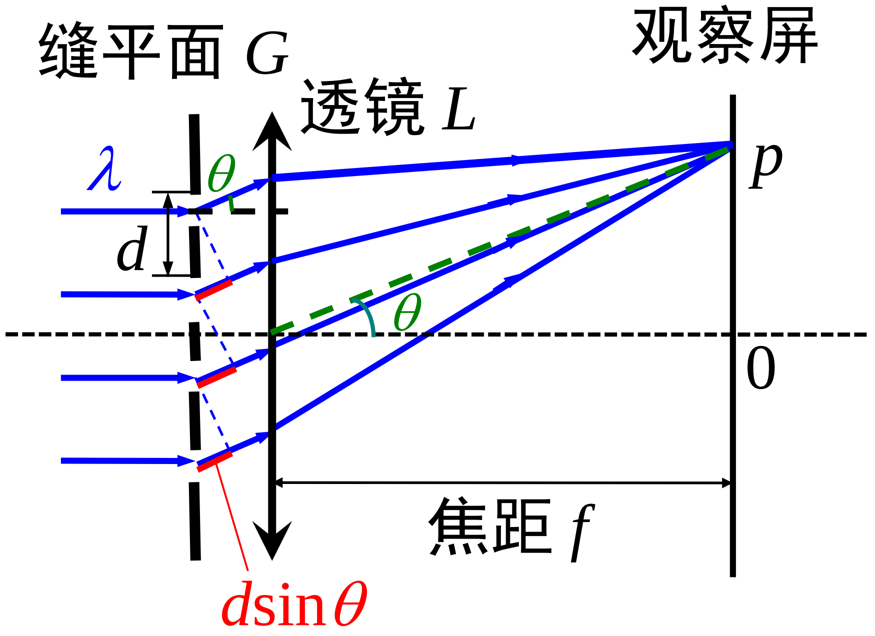


(a) (b) (c)

2、多光束干涉（multiple-beam interference）

先不考虑衍射对光强的影响，只看多光束的干涉。

(1) 明纹（主极大）条件：

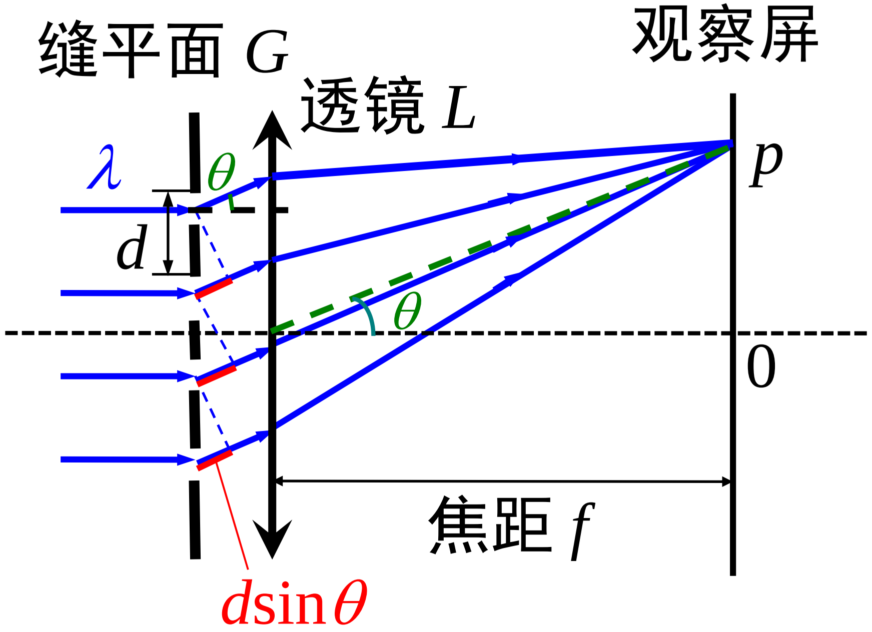


$$d\sin\theta = \pm k\lambda$$

$$k = 0,1,2,\ldots$$

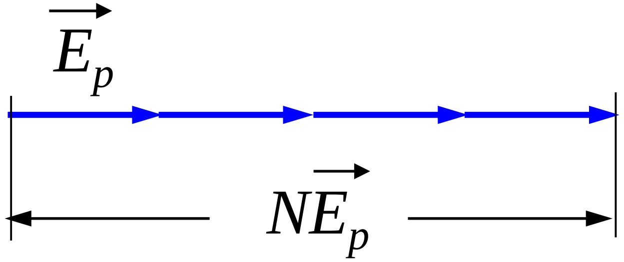
— 正入射光栅方程

多光束干涉主极大的位置与缝的个数无关



设有4个缝，每个缝发的光在对应衍射角θ方向的p点的光振动的振幅为E_p，相邻缝发的光在p点的相位差为$\Delta\varphi$。

p点为干涉主极大时：$\boldsymbol{\Delta\varphi = \pm 2k\,\pi}$, $k = 0,1,2,\ldots$



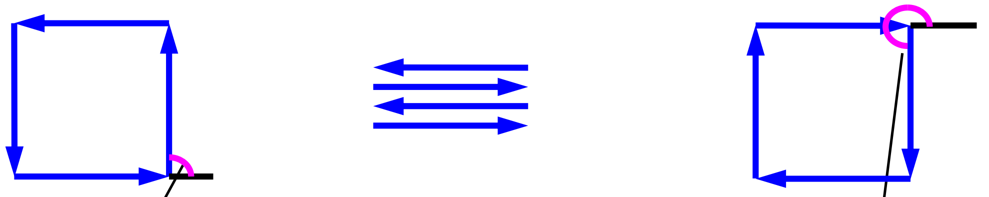
0 级亮纹中心：$\boldsymbol{\Delta\varphi = 0}$

1 级亮纹中心：$\boldsymbol{\Delta\varphi = 2\pi}$

0 级亮纹和1级亮纹之间有暗纹吗？

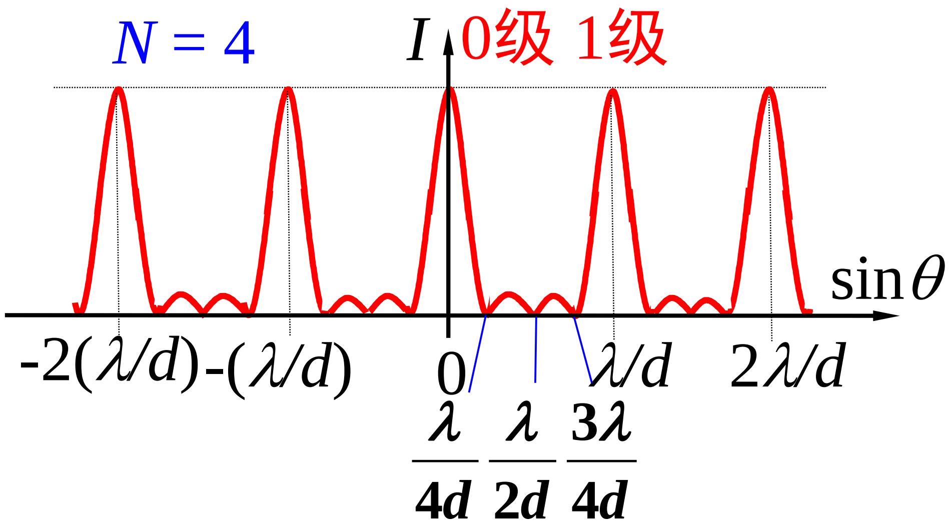
(2) 暗纹条件：各振幅矢量构成闭合多边形

$$0 \le \Delta\varphi \le 2\pi$$



$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \qquad \Delta\varphi = \pi \qquad \Delta\varphi = \frac{3\pi}{2}$$

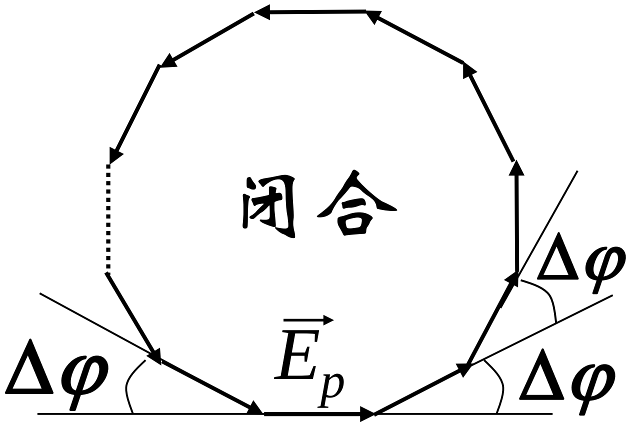
$$\sin\theta = \frac{\lambda}{4d} \qquad \sin\theta = \frac{\lambda}{2d} \qquad \sin\theta = \frac{3\lambda}{4d}$$



- 主极大位置不变
- 相邻主极大间有3个 暗纹和2个次极
- 条纹变窄、变亮。

N个缝的暗纹，要求：$N\Delta\varphi = \pm 2k'\pi$

$k' = 1,2,\cdots \neq Nk$



而：$\Delta\varphi = \dfrac{d\cdot\sin\theta}{\lambda}\cdot 2\pi$

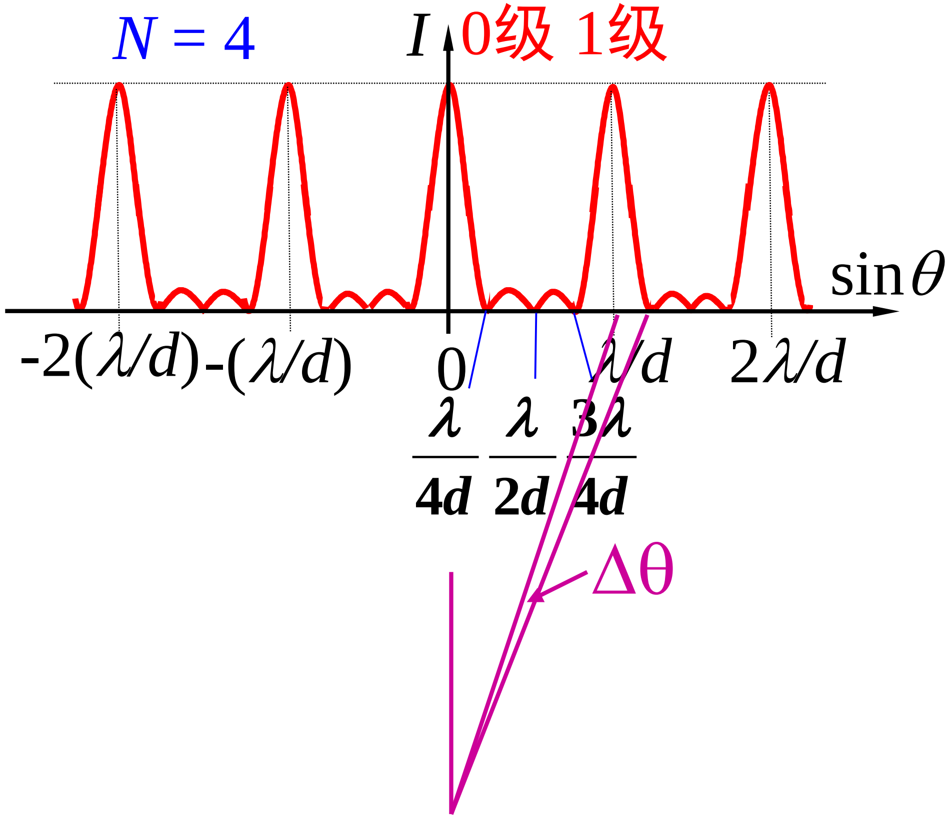
$$\boxed{\begin{array}{l} d\cdot\sin\theta = \dfrac{\pm k'}{N}\lambda \\ k' \neq 0, k' \neq Nk \end{array}}$$

相邻主极大间距：$\Delta|d\sin\theta| = \lambda$

相邻暗纹间距：$\Delta|d\sin\theta| = \lambda/N$

相邻主极大间有$N-1$个暗纹和$N-2$个次极大

(3) 主极大的半角宽度



$$\sin\theta_k = k\frac{\lambda}{d}$$

$$\sin(\theta_k + \Delta\theta) = \left(k + \frac{1}{N}\right)\frac{\lambda}{d}$$

$$\sin(\theta_k + \Delta\theta) - \sin\theta_k = \frac{\lambda}{Nd} \quad (1)$$

而

$$\sin(\theta_k + \Delta\theta) - \sin\theta_k = \left(\frac{d\sin\theta}{d\theta}\right)_{\theta=\theta_k}\Delta\theta = \cos\theta_k \Delta\theta \quad (2)$$

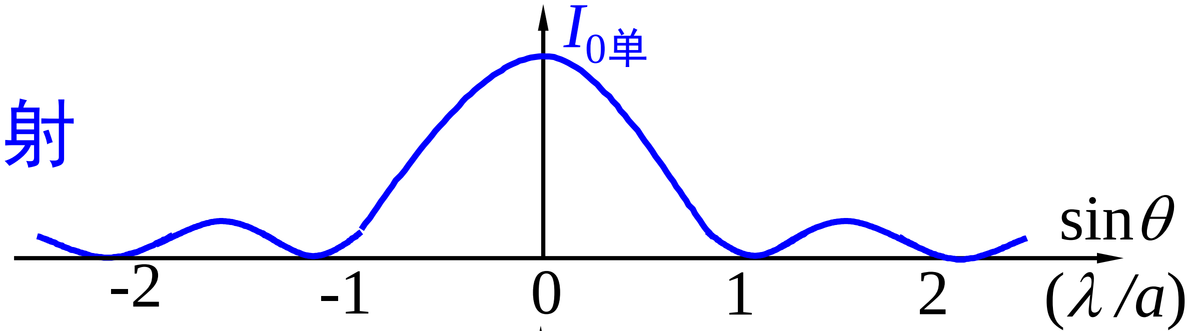
由(1)、(2)

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd\cos\theta_k}$$

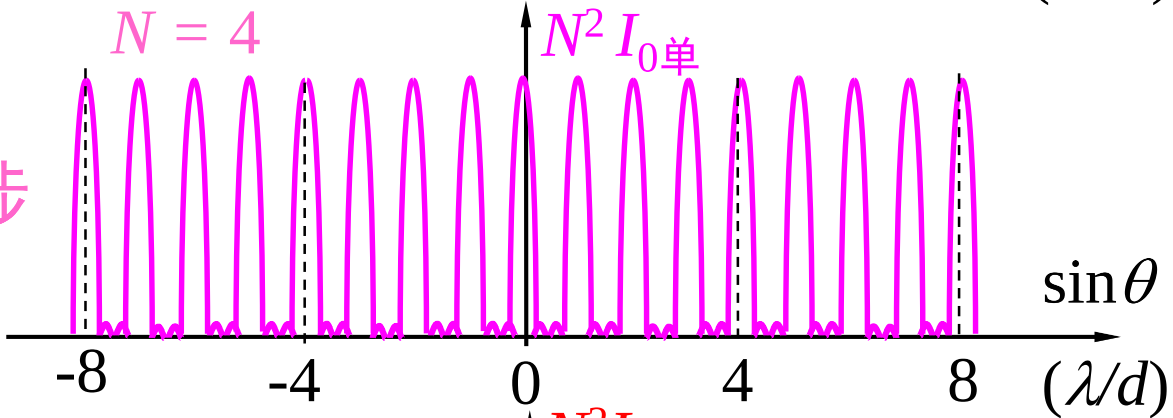
3、光栅衍射（grating diffraction）

（1）多缝干涉主极大受单缝衍射的调制

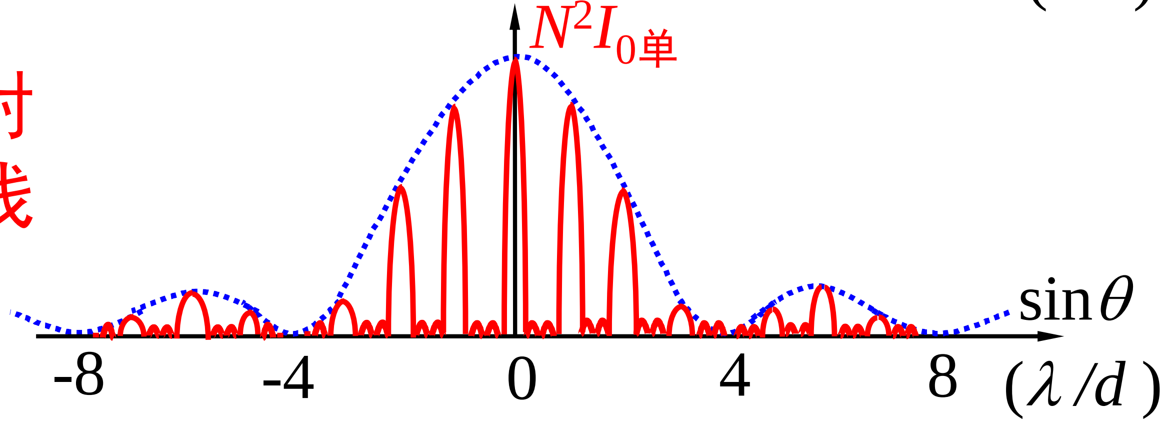
单缝衍射



多缝干涉



光栅衍射
光强曲线



（2）缺级现象

干涉明纹位置： $d\sin\theta = \pm k\lambda$， $k = 0,1,2,\cdots$

衍射暗纹位置： $a\sin\theta' = \pm k'\lambda$， $k' = 1,2,3,\cdots$

$\dfrac{d}{a} = \dfrac{k}{k'}$ 时，$\theta = \theta'$，此时在应该干涉加强的位置上没有衍射光到达，从而出现缺级。

干涉明纹缺级级次：

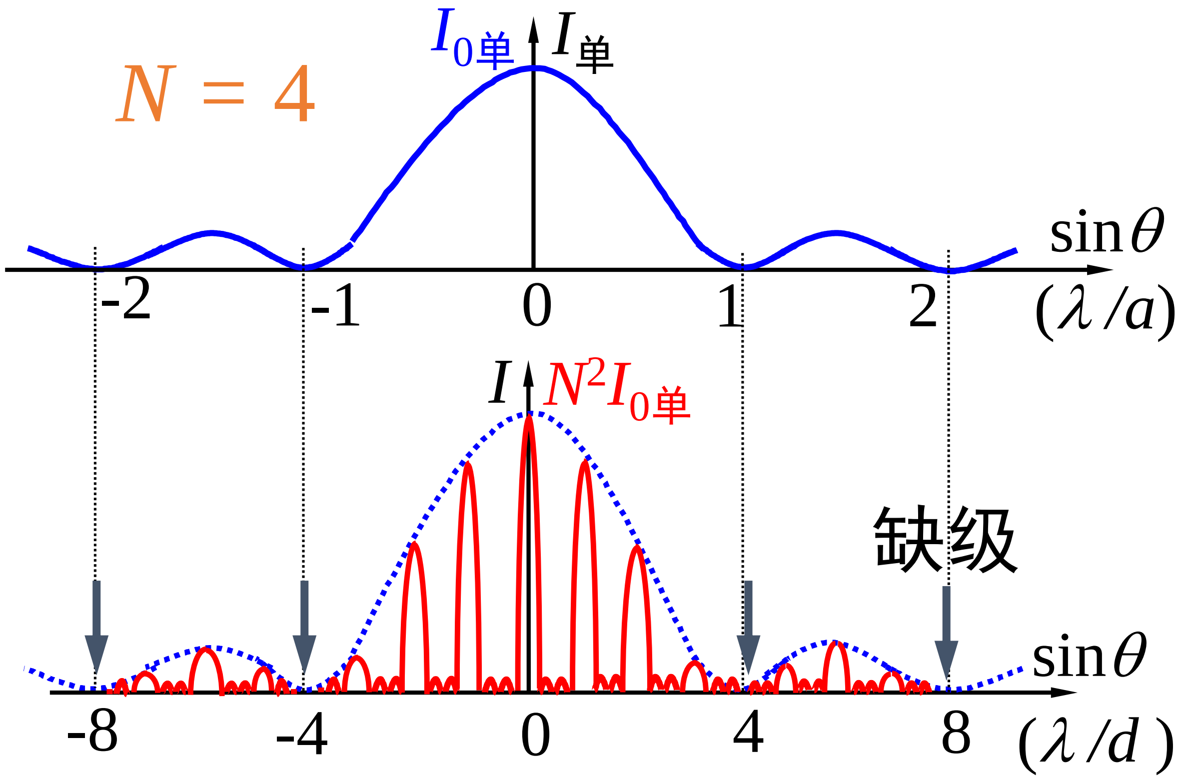
$$\boxed{k = \pm\frac{d}{a}k'}\,,\ k' = 1,2,3,\cdots$$

$\dfrac{d}{a}$ 总能化成整数比，出现明纹缺级。

例如：$d = 4a$

干涉明纹（主极大）缺级的级次：

$$k = \pm\frac{d}{a}k' = \pm 4k' = \pm 4, \pm 8, \cdots$$



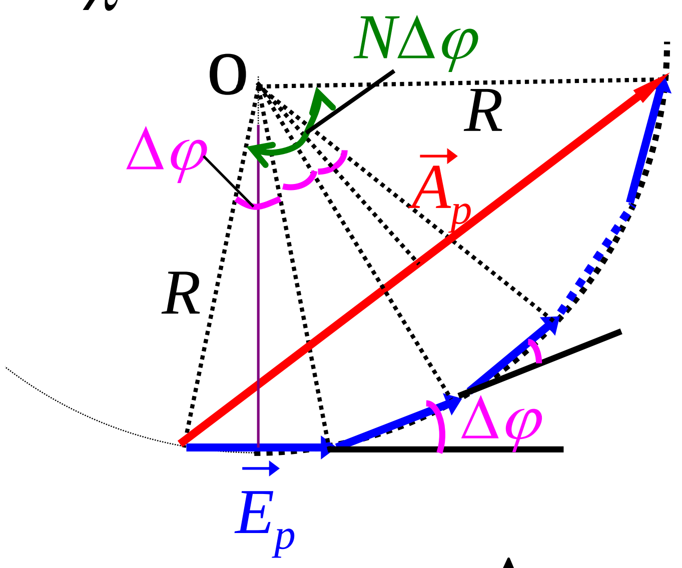
4、光栅衍射的光强公式

每个单缝在 p点（对应衍射角θ）均有

$$E_p = E_{0单}\frac{\sin\beta}{\beta} \quad , \quad \beta = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta$$

相邻缝在 p点的相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot d\cdot\sin\theta$$



p点合振幅为

$$A_p = 2R\sin\frac{N\Delta\varphi}{2}，又 \; E_p = 2R\sin\frac{\Delta\varphi}{2}$$

$$\therefore\ A_p = \left| E_p \cdot \frac{\sin N\frac{\Delta\varphi}{2}}{\sin\frac{\Delta\varphi}{2}} \right| = \left| E_{0单} \cdot \frac{\sin\beta}{\beta} \cdot \frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma} \right|$$

光栅衍射的光强：

$$\boxed{I_p = I_{0单}\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma}\right)^2}$$

$$\beta = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta$$

$$\gamma = \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{\pi d}{\lambda}\cdot\sin\theta$$

$\boldsymbol{I_{0单}}$ —— 单缝中央主极大光强

$\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$ —— 单缝衍射因子

$\left(\frac{\sin N\gamma}{\sin\gamma}\right)^2$ —— 多光束干涉因子

A_p也可由积化和差与和差化积公式得到。

$$\sin\alpha\cos\beta=\frac{1}{2}\left[\sin(\alpha+\beta)+\sin(\alpha-\beta)\right]$$

$$\sin\alpha-\sin\beta=2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\sin\frac{\alpha-\beta}{2}$$

N个同方向同频率简谐振动的叠加

$$E_i=E_p\cos\left[\omega t+(i-1)\Delta\varphi\right] \qquad i=1, 2, \cdots, N$$

$$E=\sum_{i=1}^{N}E_i=E_p\sum_{i=1}^{N}\cos\left[\omega t+(i-1)\Delta\varphi\right]$$

$$=\frac{E_p}{\sin\frac{\Delta\varphi}{2}}\sum_{i=1}^{N}\sin\frac{\Delta\varphi}{2}\cos\left[\omega t+(i-1)\Delta\varphi\right]$$

$$= \frac{E_p}{2\,sin\,\frac{\Delta\varphi}{2}} \sum_{i=1}^{N} \left\{ sin\left[\omega t + \left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta\varphi \right] - sin\left[\omega t + \left(i - \frac{3}{2} \right) \Delta\varphi \right] \right\}$$

$$= \frac{E_p}{2\,sin\,\frac{\Delta\varphi}{2}} \left\{ sin\left[\omega t + \left(N - \frac{1}{2} \right) \Delta\varphi \right] - sin\left[\omega t - \frac{1}{2} \cdot \Delta\varphi \right] \right\}$$

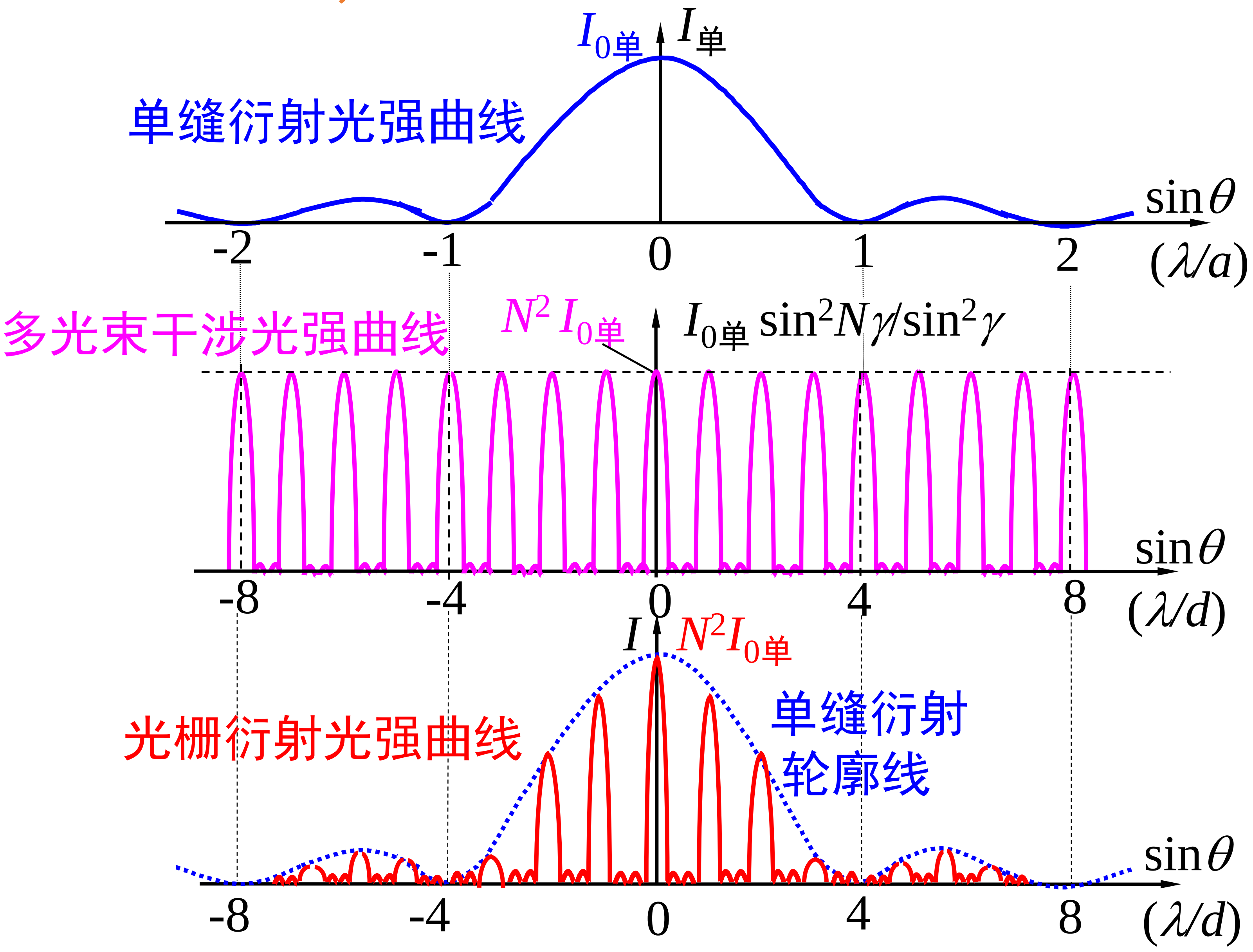
$$= \frac{E_p\, sin\,\frac{N\Delta\varphi}{2}}{sin\,\frac{\Delta\varphi}{2}} cos\left(\omega t + \frac{N-1}{2} \Delta\varphi \right)$$

$$\boxed{\therefore \;\; A_p = \left| E_p \cdot \frac{\sin N\,\frac{\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \right| = \left| E_{0单} \cdot \frac{\sin \beta}{\beta} \cdot \frac{\sin N\gamma}{\sin \gamma} \right|}$$

$$\beta = \frac{\pi\, a}{\lambda} \sin\theta$$

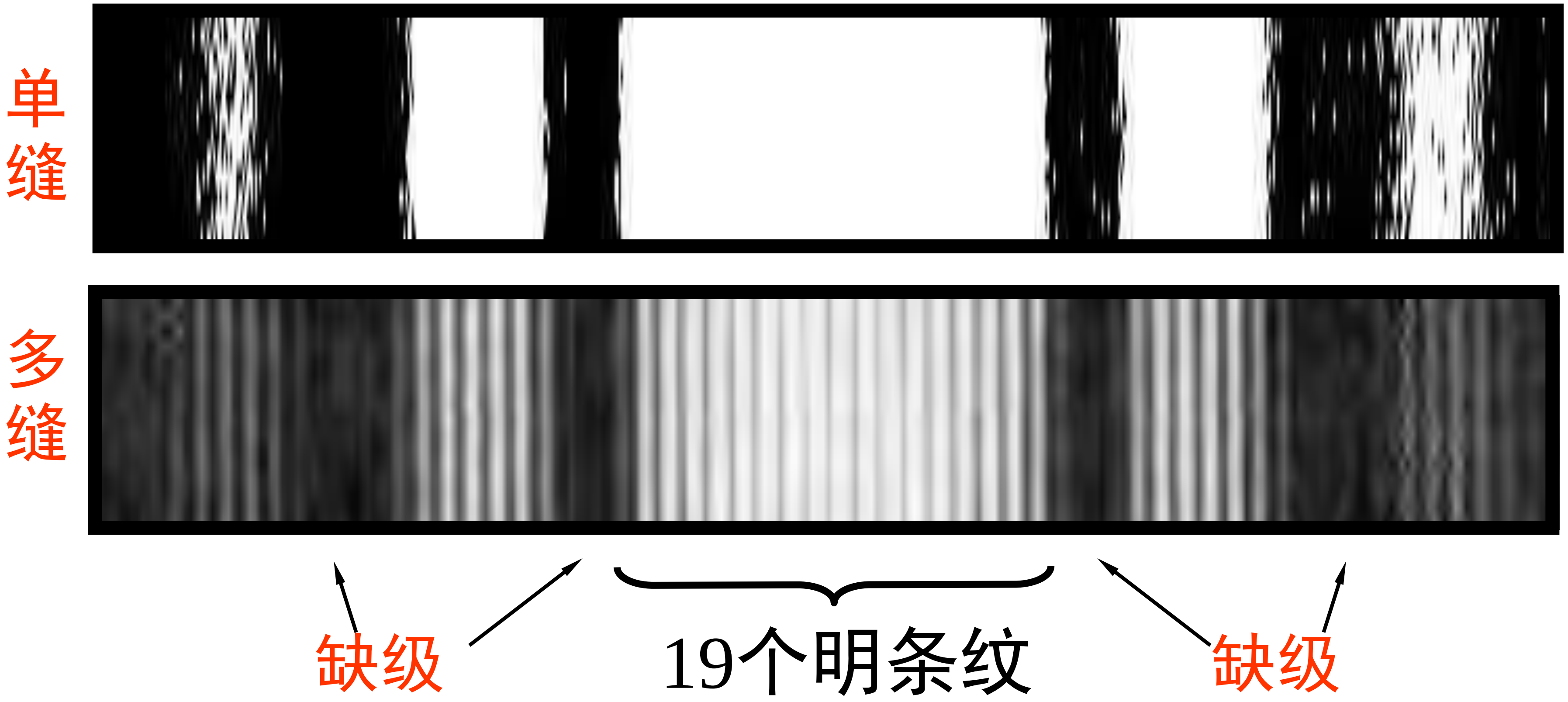
$$\gamma = \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{\pi\, d}{\lambda} \cdot \sin\,\theta$$

例如：$N=4$，$d=4a$



$I_{0单}$
$I_单$
单缝衍射光强曲线
$\sin\theta$
-2
-1
0
1
2
(λ/a)
多光束干涉光强曲线
$N^2 I_{0单}$
$I_{0单}\sin^2 N\gamma/\sin^2\gamma$
$\sin\theta$
-8
-4
0
4
8
(λ/d)
I
$N^2 I_{0单}$
单缝衍射
轮廓线
光栅衍射光强曲线
$\sin\theta$
-8
-4
0
4
8
(λ/d)

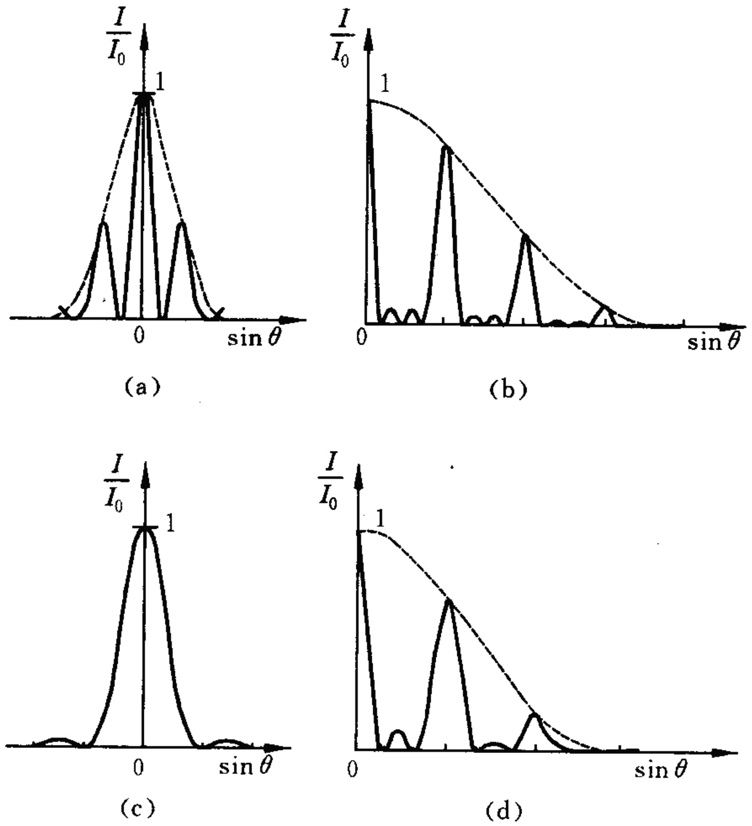
单缝衍射和多缝衍射的对比 （$d=10a$）



例23.1 图(a)-(d)是多缝衍射的强度分布曲线，试根据图线回答：(1) 图线是几缝衍射？理由是什么？

(2) 那条图线相应的缝宽a最大？ （设入射光的波长相同）

(3) 各图相应的d/a等于多少？有无缺级？



(4) 标出各图横坐标以λ/d和λ/a标度的分度值。

解： (1) N=2, 4, 1, 3

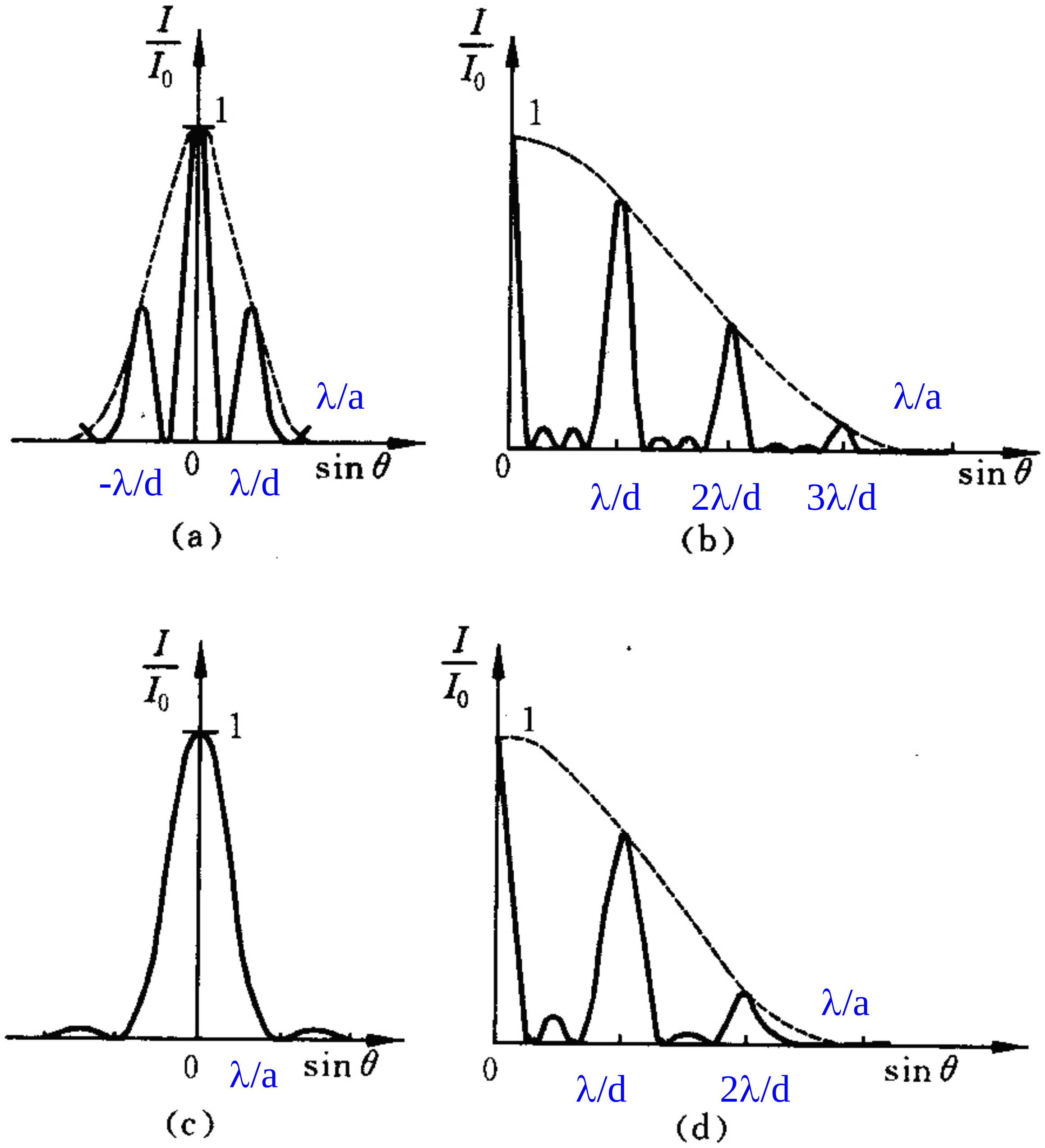
(2) (c)

(3) (a) d/a=2, k=±2, ±4, …缺级

(b) d/a=4, k=±4 , ±8, …缺级

(d) d/a=3, k=±3 , ±6, …缺级

(4)



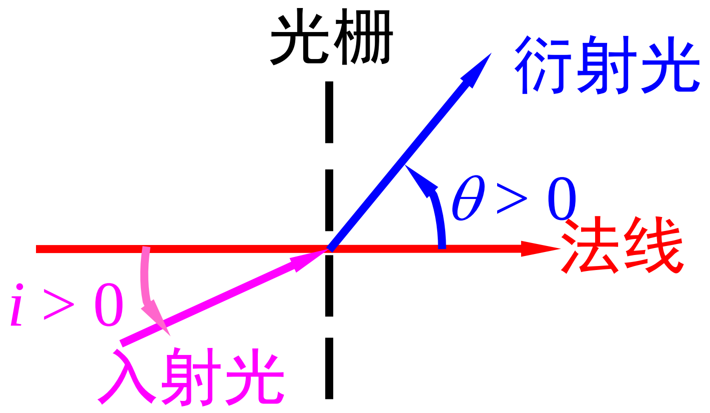
I/I0
1
λ/a
-λ/d
0
λ/d
sin θ
(a)
I/I0
1
λ/a
0
λ/d
2λ/d
3λ/d
sin θ
(b)
I/I0
1
0
λ/a
sin θ
(c)
I/I0
1
λ/a
0
λ/d
2λ/d
sin θ
(d)

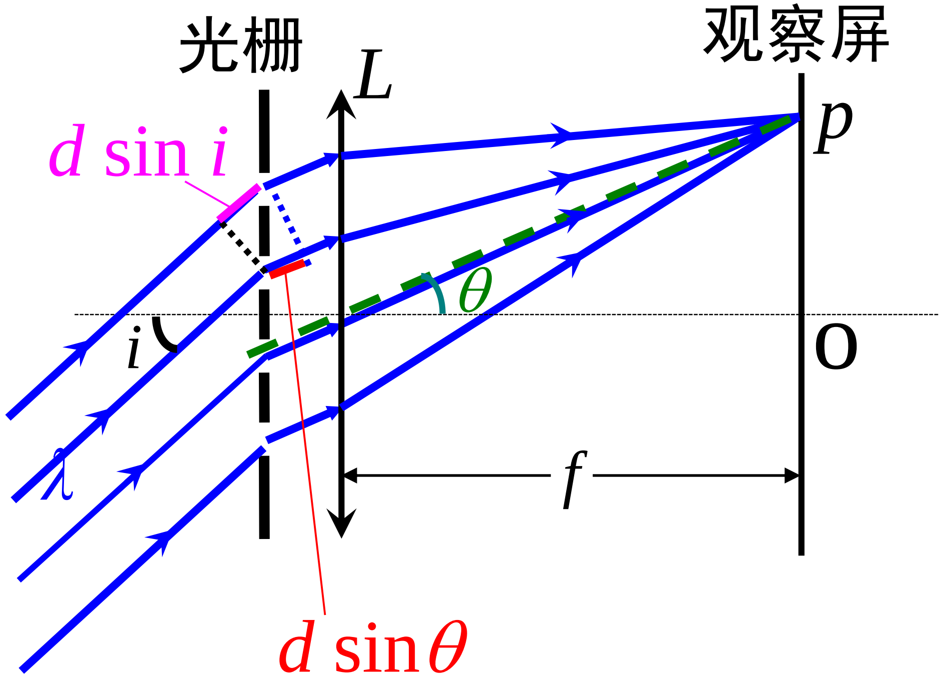
三、斜入射光栅 相控阵雷达

1、光线斜入射时的光栅方程

$$\boxed{d(\sin\theta - \sin i) = \pm k\lambda}$$

角度符号规定：由法线转向光线，逆时针为正。





$$\delta = d(\sin\theta - \sin i)$$

斜入射可获得更高级次条纹（教材p. 50，例23.6）

对于确定的k，i变化，则θ 也变化。

例如0级衍射光（$k=0$），有 $\sin\theta = \sin i$

相邻入射光的相位差：

$$\Delta\varphi = \frac{d \cdot \sin i}{\lambda} \cdot 2\pi = \frac{d \cdot \sin\theta}{\lambda} \cdot 2\pi \rightarrow \boxed{\sin\theta = \frac{\lambda}{2\pi\ d} \cdot \Delta\varphi}$$

改变$\Delta\varphi$，即可改变 0 级衍射光的方向。

2、相控阵雷达

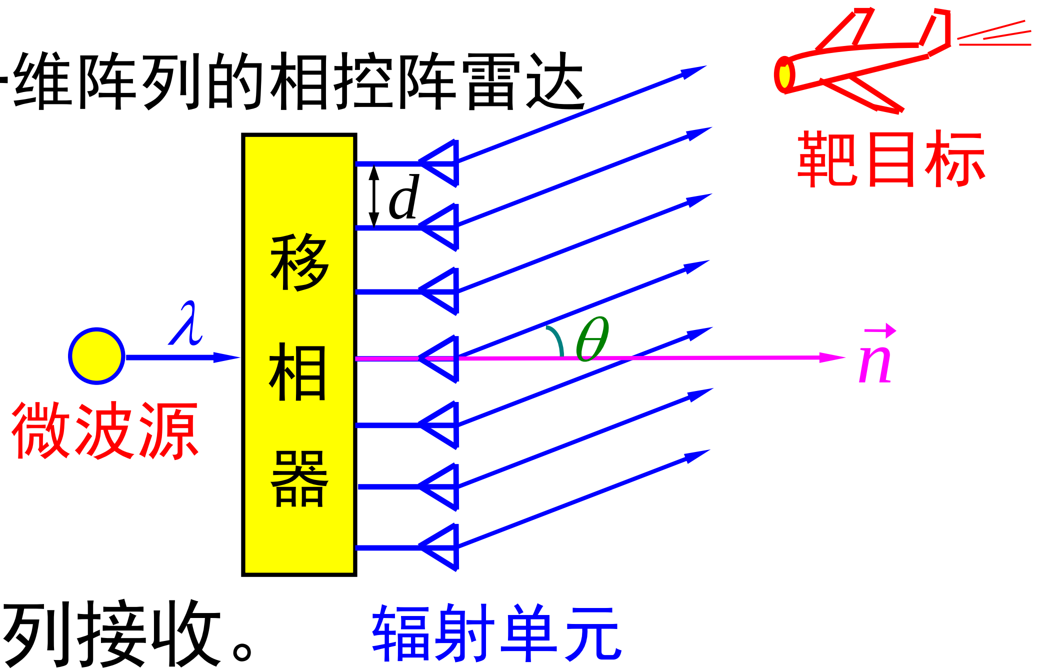
（1）扫描方式

- 相位控制扫描
- 频率控制扫描

（2）回波接收

通过同样的天线阵列接收。

一维阵列的相控阵雷达



普通的雷达

（3）相控阵雷达的优点

- 无机械惯性，可高速扫描。

  一次全程扫描仅需几微秒。

- 由计算机控制可形成多种波束。

  能同时搜索、跟踪多个目标。

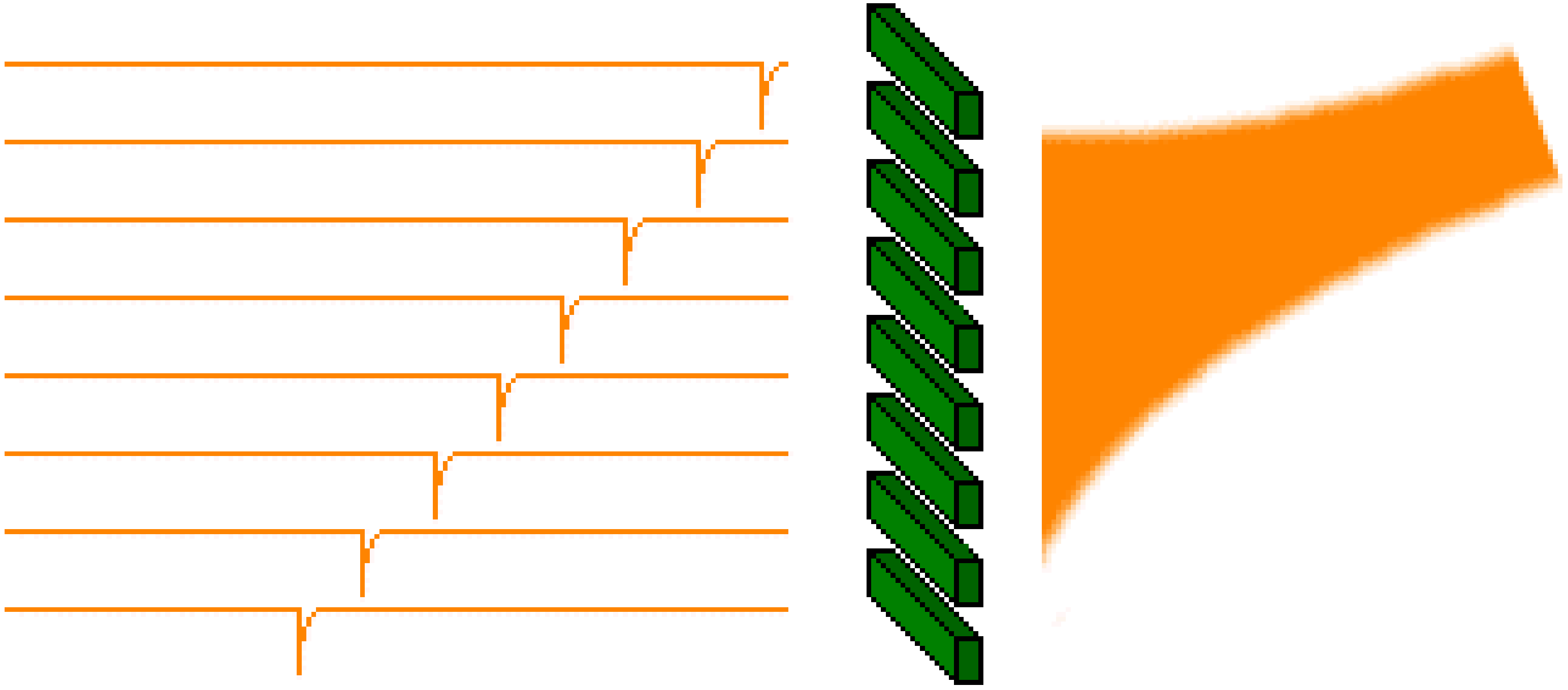
- 不转动、天线孔径可做得很大。

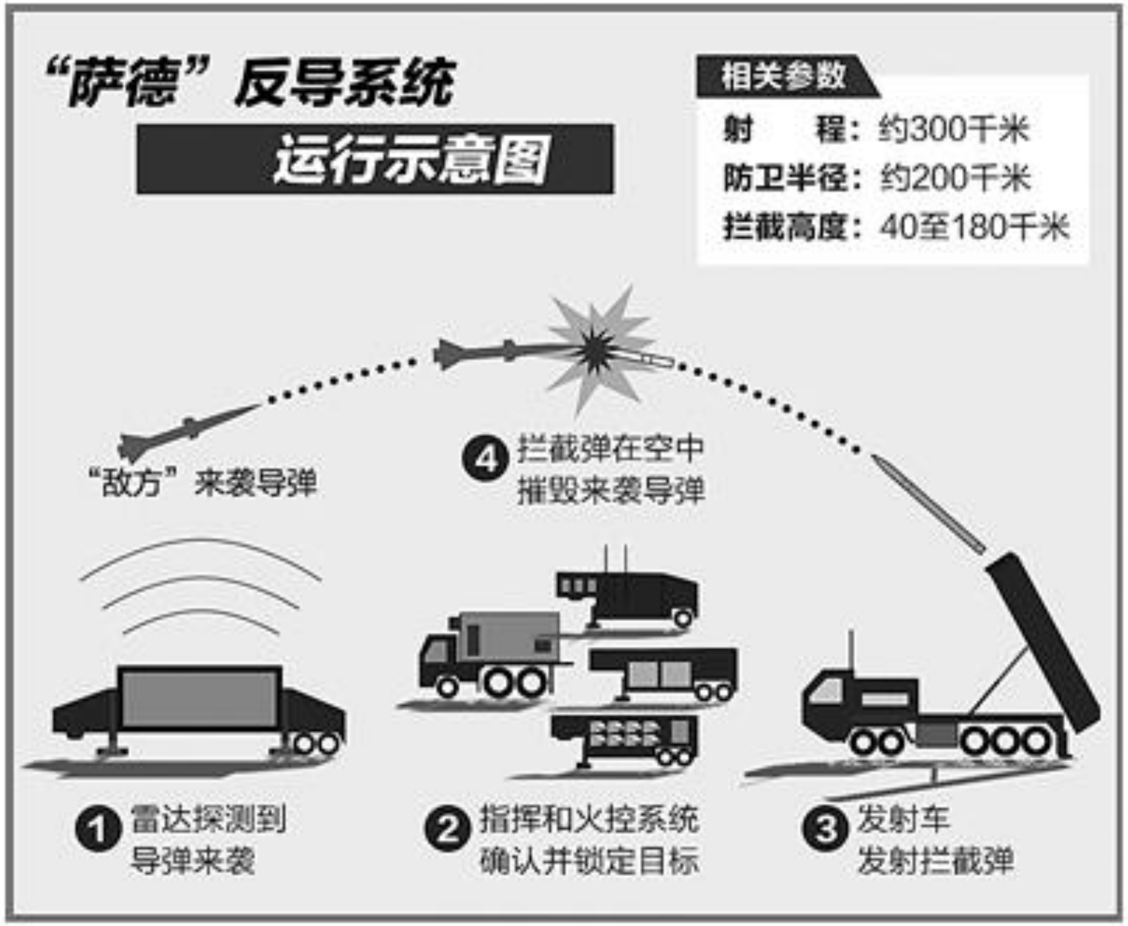
  辐射功率强、作用距离远、分辨率高…

  相控阵雷达除军事应用外，还可民用：

  如地形测绘、 气象监测、 导航、

  测速（反射波的多普勒频移）…





萨德导弹防御系统正式名称是：末段高空区域防御系统

（英语：Terminal High Altitude Area Defense，缩写：THAAD，萨德）

23.5 光栅光谱

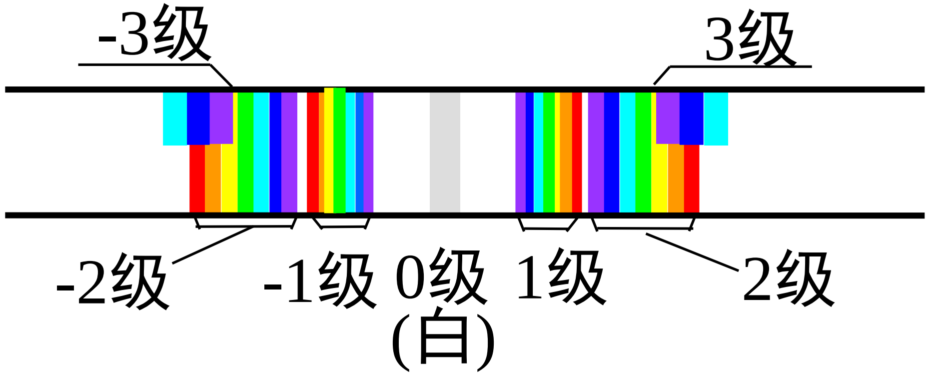
光栅光谱、 光栅的色散本领、分辨本领

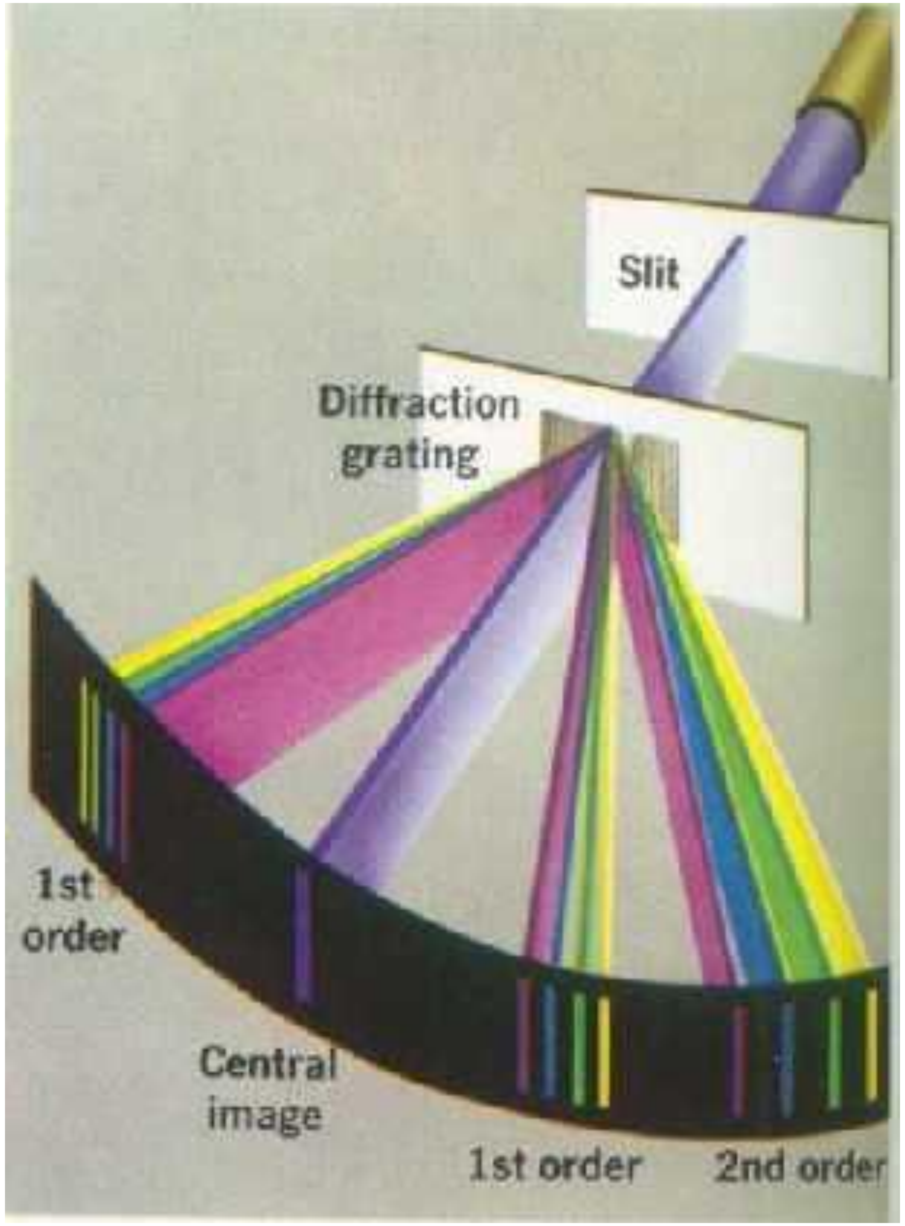
1、光栅光谱

正入射: $\boxed{d\sin\theta = \pm k\lambda,\quad k = 0,1,2,\cdots}$

k 一定时，$\lambda\uparrow \rightarrow \theta\uparrow$，不同颜色光的主极大位置也不同，形成同一级光谱。

白光（350~770nm）的光栅光谱是连续谱:




Slit
Diffraction grating
1st order
Central image
1st order
2nd order

汞的光栅光谱

2、光栅的色散本领

色散本领：把不同波长的光在谱线上分开的能力

设：波长为λ的谱线，衍射角为 θ，位置为 x；

波长$\lambda+\delta\lambda$ 的谱线，衍射角$\theta+\delta\theta$，位置 $x+\delta x$

定义：角色散本领 $\boxed{D_\theta \equiv \dfrac{\delta\theta}{\delta\lambda}}$

线色散本领 $\boxed{D_l \equiv \dfrac{\delta x}{\delta\lambda}}$

二者的关系 $\boxed{D_l = f \cdot D_\theta}$ f—光栅后的透镜焦距

由 $$\sin\theta-\sin i=k\frac{\lambda}{d}, \rightarrow \cos\theta\cdot\delta\theta=k\frac{\delta\lambda}{d},$$

有 $$\boxed{D_\theta=\frac{k}{d\cdot\cos\theta}}$$

和 $$\boxed{D_l=\frac{k\cdot f}{d\cdot\cos\theta}}$$

与光栅缝数 N 无关

减小 d 可增大色散本领,对级次k更高的光谱,色散本领还可进一步增大。增大透镜的焦距 f（通常可达数米），还可以再增大线色散本领。

由 $D_\theta = \dfrac{k}{d \cdot \cos\theta}$ 和 $D_l = \dfrac{k \cdot f}{d \cdot \cos\theta}$ 可看出：

若在 θ 不大处观察光栅光谱，$\cos\theta$ 几乎不变，所以 D_θ 和 D_l 差不多是常数，于是有 $\delta\theta \propto \delta\lambda$ 和 $\delta x \propto \delta\lambda$，此时的光谱称匀排光谱（棱镜光谱为非匀排光谱）。根据拍好的匀排光谱谱片来测量未知波长时，可采用线性内插法。

3、光栅的色分辨本领

（resolving power of grating）

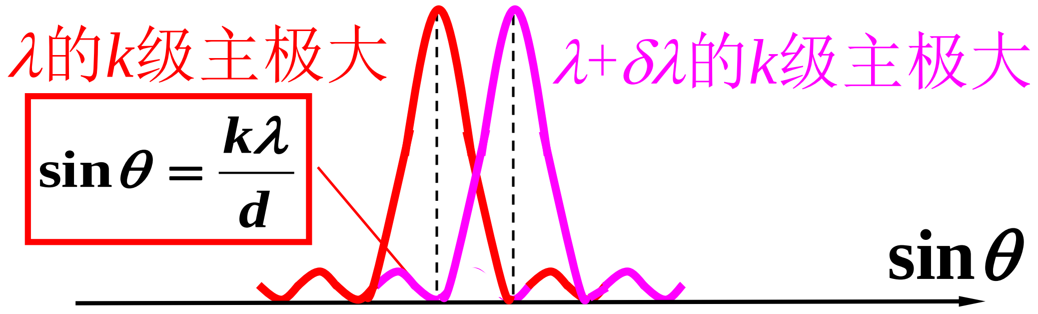
色散本领只反映谱线主极大中心分离的程度，但不能说明谱线是否重叠， 因为谱线本身是有宽度的，为此引入色分辨本领。

设入射波长为λ和$\lambda+\delta\lambda$时，两谱线刚能分辨。

定义： 光栅的色分辨本领 $\boxed{\boldsymbol{R} \equiv \dfrac{\lambda}{\delta\lambda}}$

下面分析R和哪些因素有关。

按瑞利判据：



$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd\cos\theta}$$

$$\delta\lambda = \frac{\delta\theta}{D_\theta} = \frac{\Delta\theta}{D_\theta} = \frac{d\cos\theta}{k} \cdot \frac{\lambda}{Nd\cos\theta} = \frac{\lambda}{kN}$$

$$\boxed{R \equiv \frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN}$$

光栅的色分辨本领：

$$\boxed{\boldsymbol{R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = Nk, (k \neq 0)}}$$

例如，对波长靠得很近的Na双线：

$$\lambda_1 = \lambda = 589\ \text{nm}$$

$$\lambda_2 = \lambda + \delta\lambda = 589.6\text{nm}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{589}{0.6} \approx 982 = Nk}$$

若 $k = 2$，则 $N = 491$

若 $k = 3$，则 $N = 327$

都可分辨出Na双线

例23.2 用光栅摄谱仪分析波长在900.0nm附近、相隔约0.05nm的若干谱线。设摄谱仪焦距为80cm，感光底片的空间分辨率为150条/mm。如果要求底片上记录的谱线刚好能分辨，问选用的一块光栅，其光栅常量d和有效宽度D取多少为宜?

解：在本题中首先要明确二条要求：一是两谱线在底片上的距离 δl应等于底片的最小分辨距离（$\frac{1}{150}$mm）；二是在此基础上还进一步要求两谱线的半角宽度Δθ应等于衍射角间隔δθ 。

(1) 设波长差为δλ的两谱线同级衍射角之差为δθ，由于δλ较小，因而δθ较小，所以 $\delta l = f\delta\theta$ 。

光栅的角色散本领为 $D_\theta = \frac{\delta\theta}{\delta\lambda} = \frac{k}{d\cos\theta_k}$ ，摄谱仪通常用1级谱线，此时衍射角θ_1较小，因而$\cos\theta_1 \approx 1$。

从上面的关系即可解出 $\mathbf{d} \approx \dfrac{\delta\lambda}{\delta\theta} \approx \dfrac{f\delta\lambda}{\delta l}$ 。

将 $\mathbf{f = 80cm, \delta\lambda = 0.05nm}$ 代入，即得 $\mathbf{d \approx 6.0 \times 10^{-4} cm}$ 。

当两谱线相距δl 时，如果每条谱线的半角宽度 $\Delta\theta$太大，也不能分辨。

(2) 光栅的色分辨本领

$$\boxed{R \equiv \frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN}$$

在本题中，k=1，

$$N = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{900.0}{0.05} = 1.8 \times 10^4$$

$$D = Nd = 1.8 \times 10^4 \times 6.0 \times 10^{-4} cm = 10.8\ cm$$

在上面的计算中，$\cos\theta_k$也可用光栅公式计算。取k=1时，求得的最后结果是 $\mathbf{d = 6.1 \times 10^{-4} cm, D = 11cm}$

23b结束