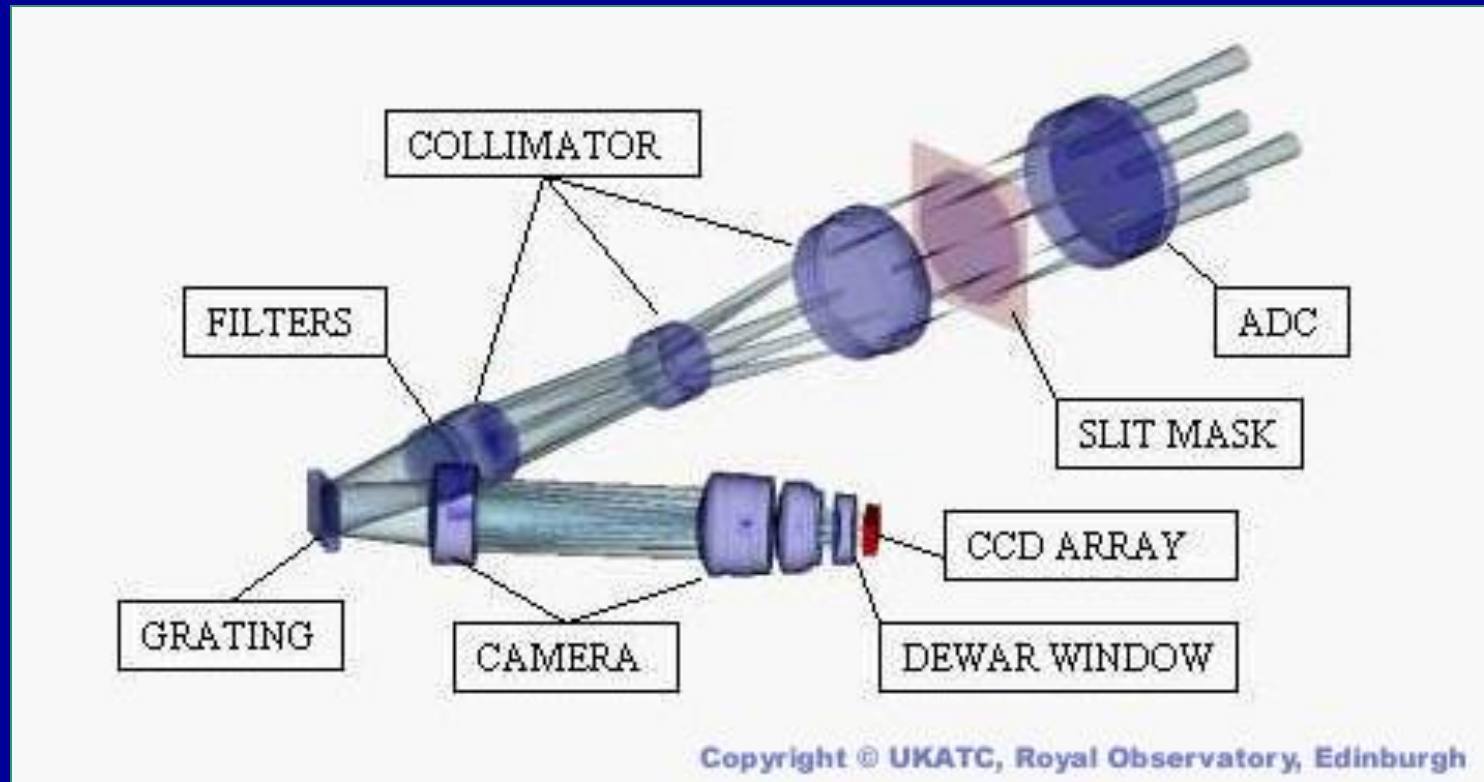


# 5. 光谱观测

1. 光谱观测背景知识
2. 光谱仪性能参量
3. 棱镜光谱仪
4. 光栅光谱仪
5. 光谱仪系统分类

# 5.4.1 光栅光谱仪组成

准直系统 + 色散系统(衍射光栅) + 接收系统



Gemini Multi-Object Spectrograph

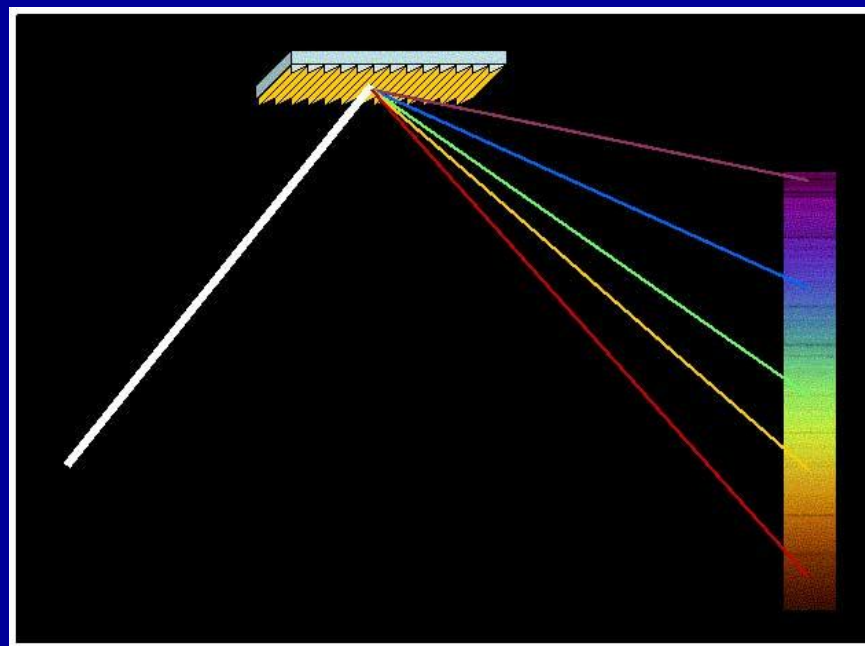
## 5.4.2 衍射光栅(Grating)

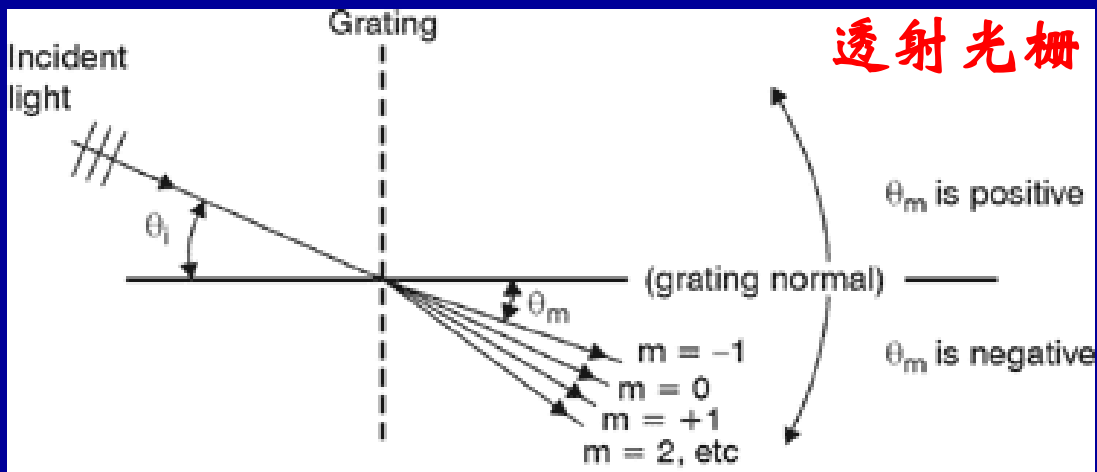
### ■ 衍射光栅：

- 衍射光栅是由许多互相平行、等宽、等距的狭缝(或反射面)组成的光学元件。

### ■ 光栅工作原理：

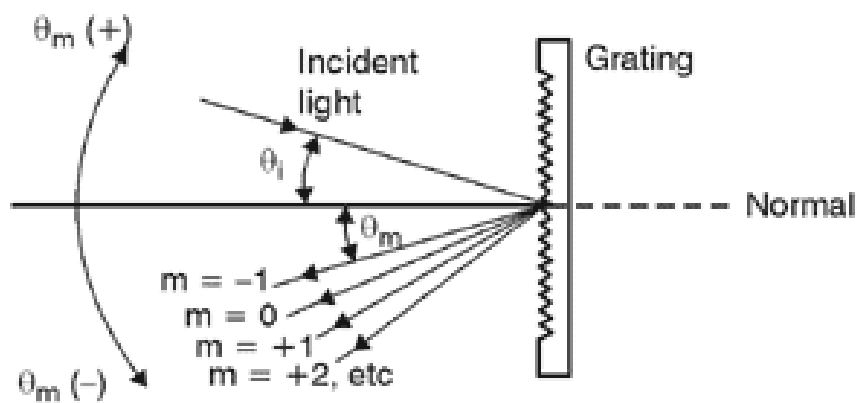
- 利用光的干涉与衍射的叠加，使接收屏出现交替的亮暗条纹，使光分解成光谱。





a. Transmission grating.

透射光栅



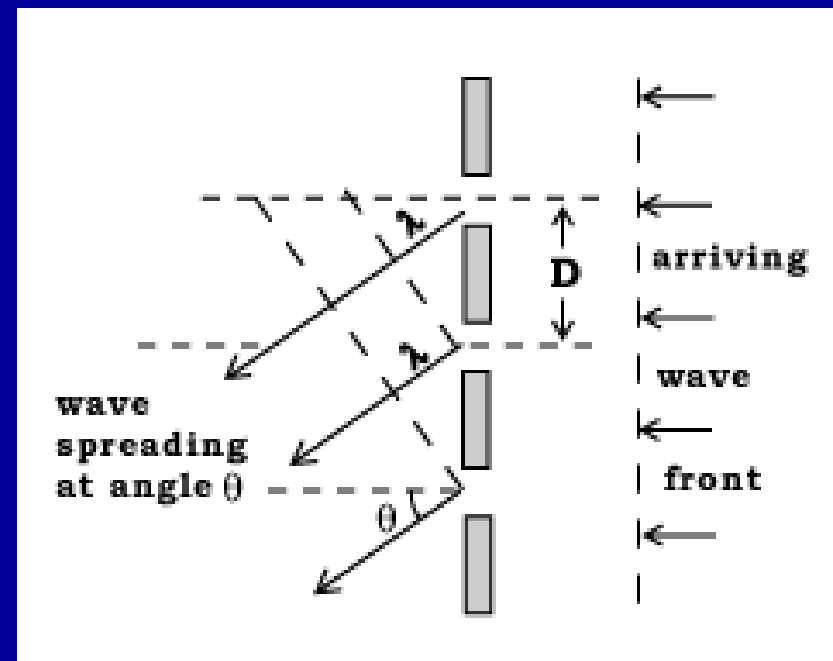
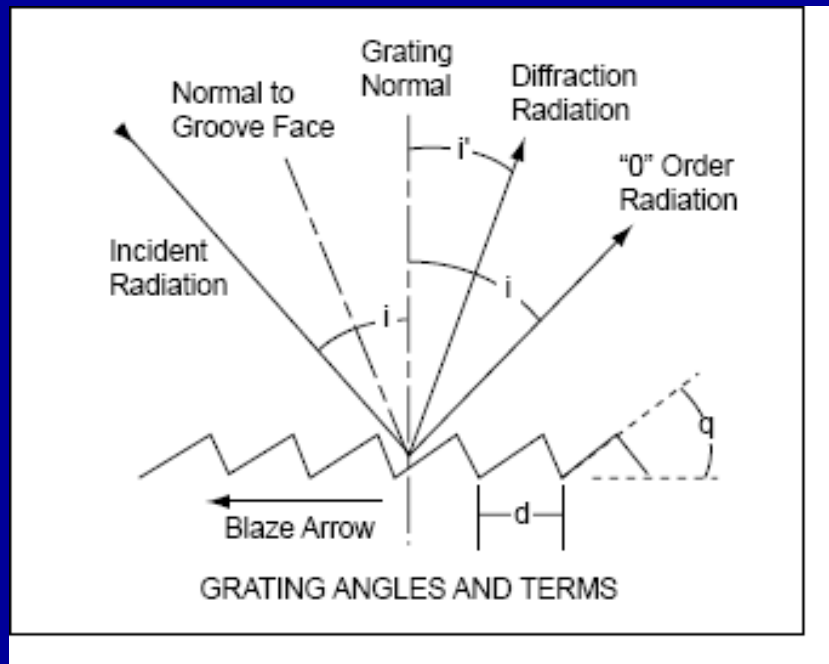
b. Reflection grating.

反射光栅



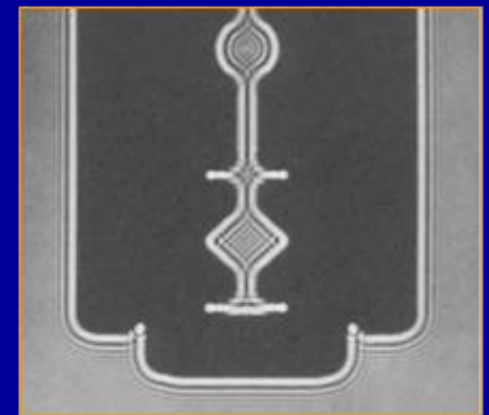
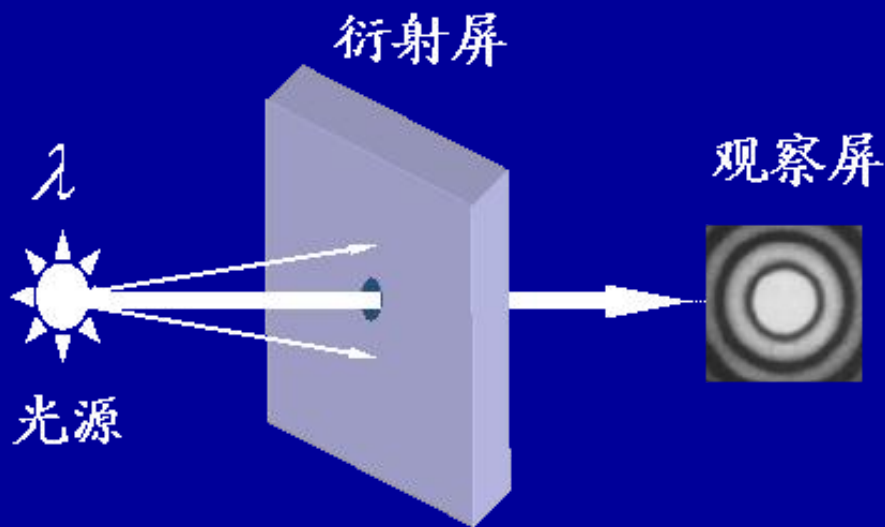
## ■ 光栅常数(d): grating constant

- 是光栅空间周期性的表示,  $d = a + b$
- 等于狭缝宽度(a)和两狭缝间距离(b)之和。
- a是透光(或反光)部分的宽度, b是不透光
- 光栅刻线: 几十条/mm – 几万条/mm
- 2000 lines per millimeter,  $d = 0.0005\text{mm}$



## 5.4.3 光栅工作原理

- **光的衍射**：光在传播过程中能绕过障碍物的边缘而偏离直线传播的现象。光沿被限制方向扩展，光强重新分配。



(剃须刀边缘衍射)

# 光的衍射

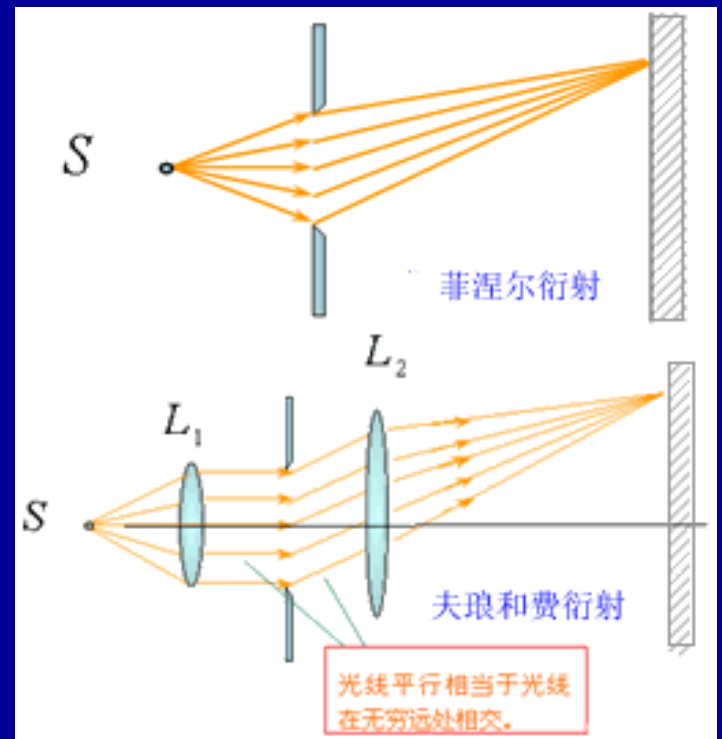
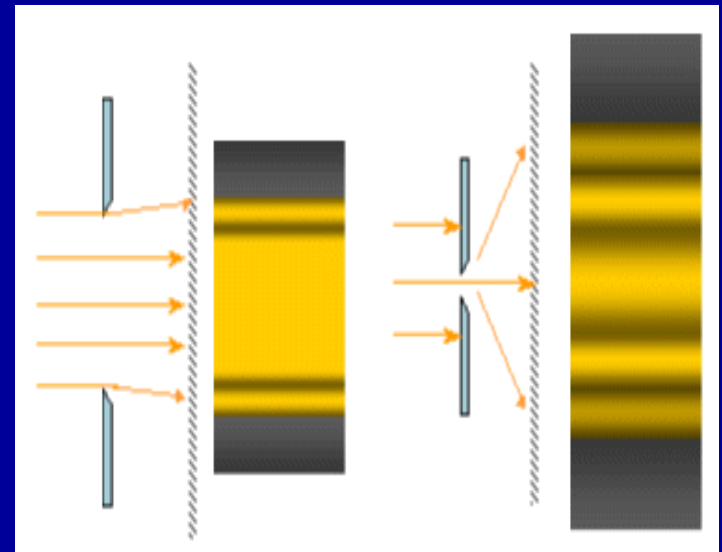
- 衍射现象取决于障碍物线度与波长比，波长越大，障碍物越小，衍射越明显

- 衍射分类：

- 光源和观察点距障碍物为有限远的衍射称为菲涅尔衍射

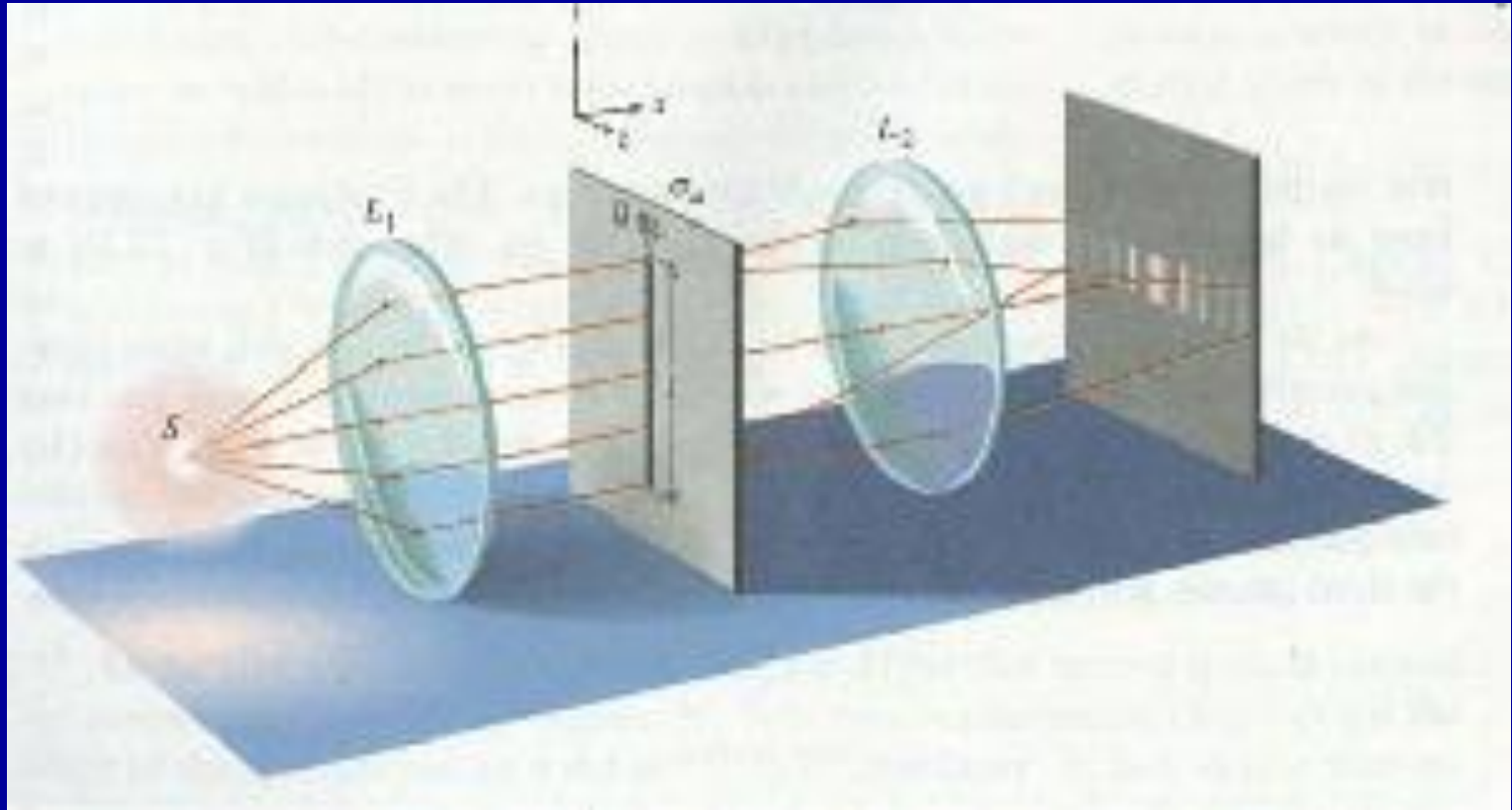
- 光源和观察点距障碍物为无限远，即平行光的衍射为夫琅和费衍射

- 夫琅和费多缝衍射



# 夫琅禾费单缝衍射

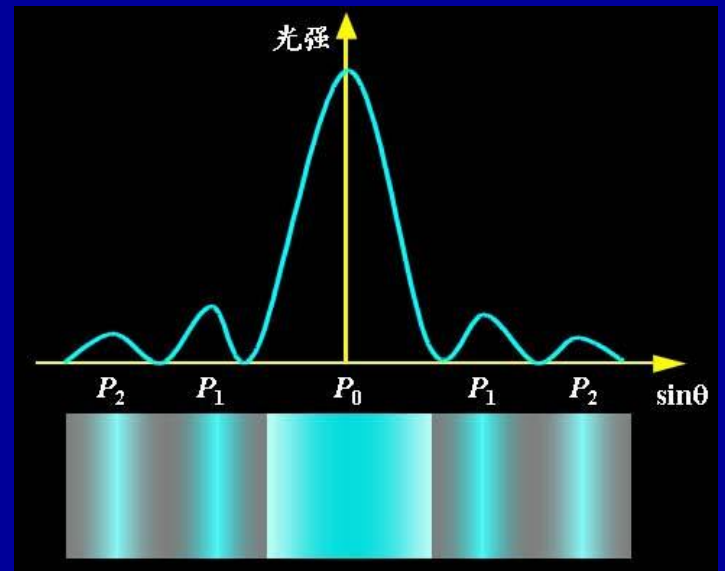
## 一. 装置和光路



$S$ :单色线光源； $a$ :缝宽； $\theta$ :衍射角，出射光与光轴夹角



- 衍射条纹：平行于单缝的一组直条纹，中央明纹最亮，并且宽度是其他明纹的两倍，从中央往外各次极大的光强依次减弱。



$$I = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2, \alpha = \pi a \sin \theta / \lambda$$

## ■ 光强公式

- 中央明纹中心位置
- 暗纹位置
- 次极大位置
- 中央明纹宽度

$$\theta = 0 \rightarrow \sin \alpha / \alpha = 1 \rightarrow I = I_{\max}$$

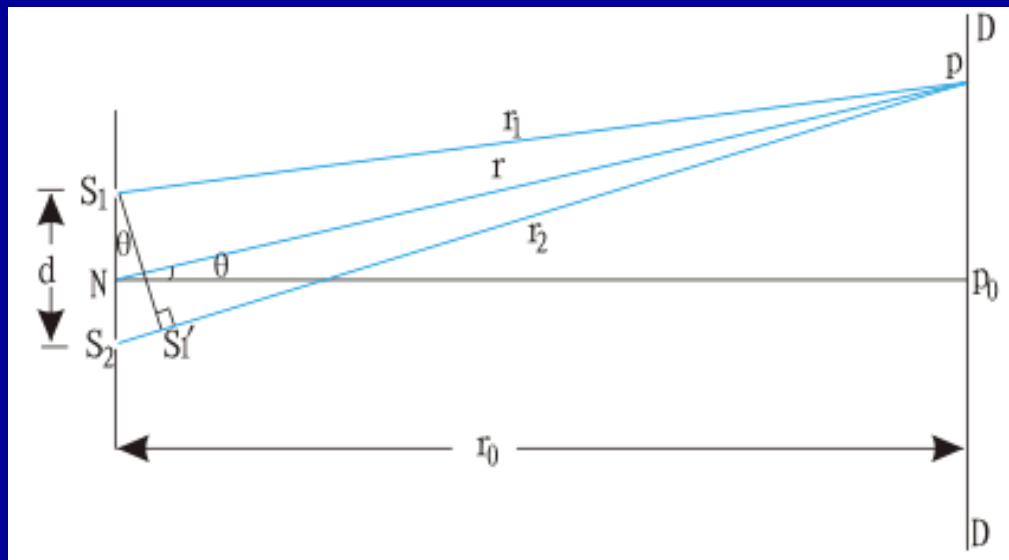
$$a \sin \theta = \pm k \lambda \rightarrow \alpha = \pm k \pi \rightarrow I = 0$$

$$dI/d\alpha = 0 \rightarrow a \sin \theta = \pm 1.43 \lambda, \dots$$

$$\text{when } \sin \theta_1 \approx \theta_1, \Delta \theta_0 = 2\theta_1 \approx 2 \lambda / a$$

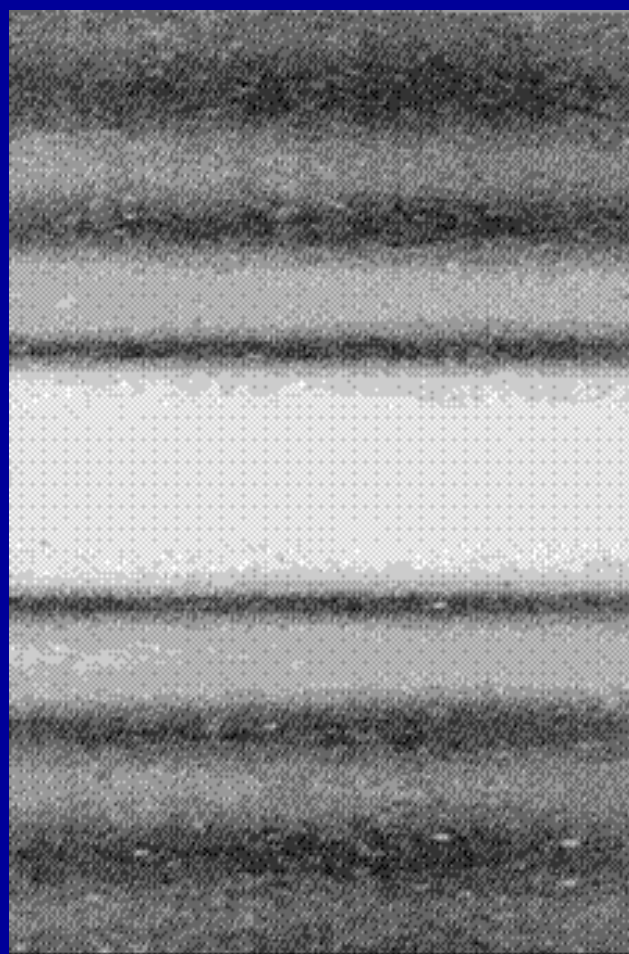
$$\Delta x_0 = 2f \cdot \text{tg} \theta_1 = 2f \theta_1 = 2f \lambda / a$$

- **光的干涉：**两束以上的光波在一定条件下相遇叠加，在叠加区域某些点的光振动加强，某些点的光振动减弱，在重叠区域形成**稳定的、不均匀的**光强分布，出现了明暗相间的条纹。

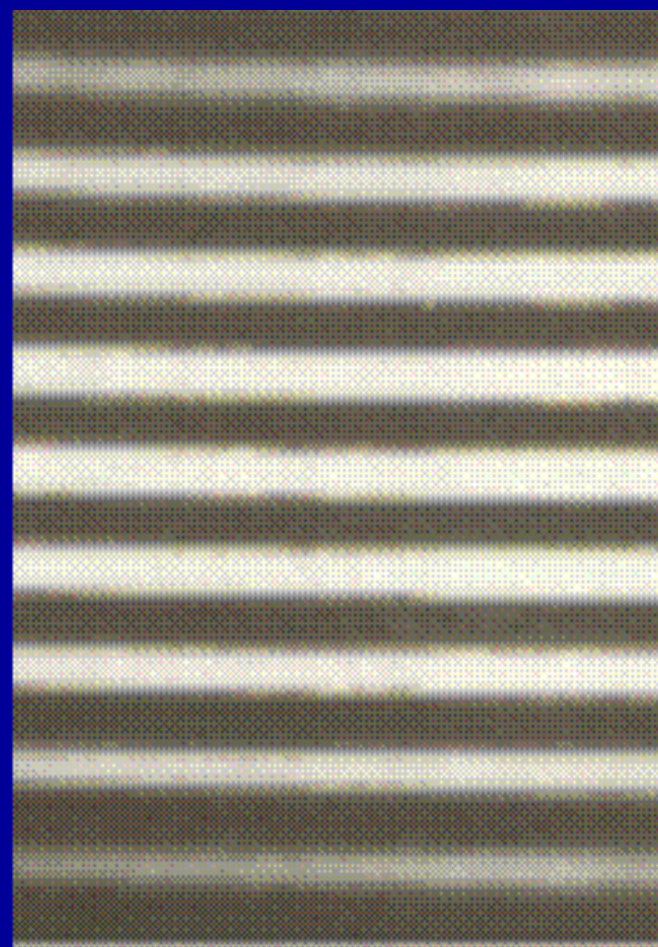


$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$$



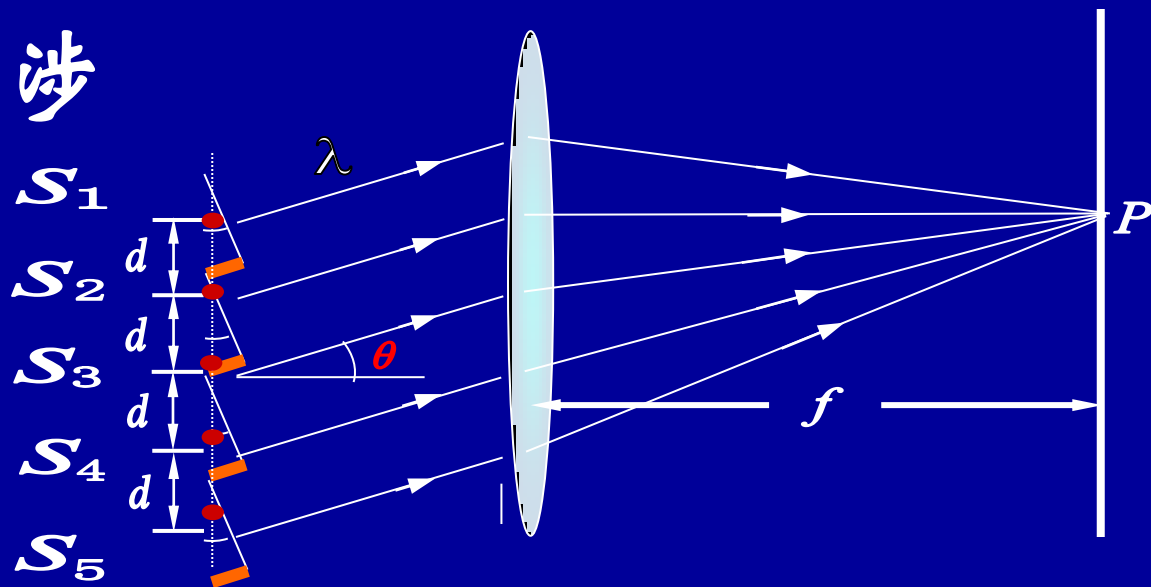
单缝衍射条纹



双缝干涉条纹

# 多光束(缝)干涉

$N$ 个初相相同的相干点光源(缝), 缝距 $d$

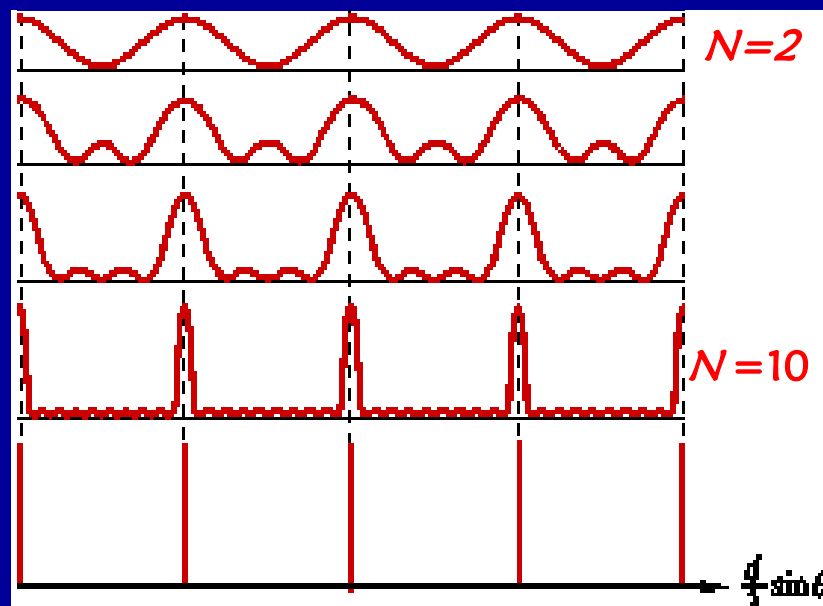


相邻两光线的光程差

$$\delta = d \sin \theta$$

相应的相位差

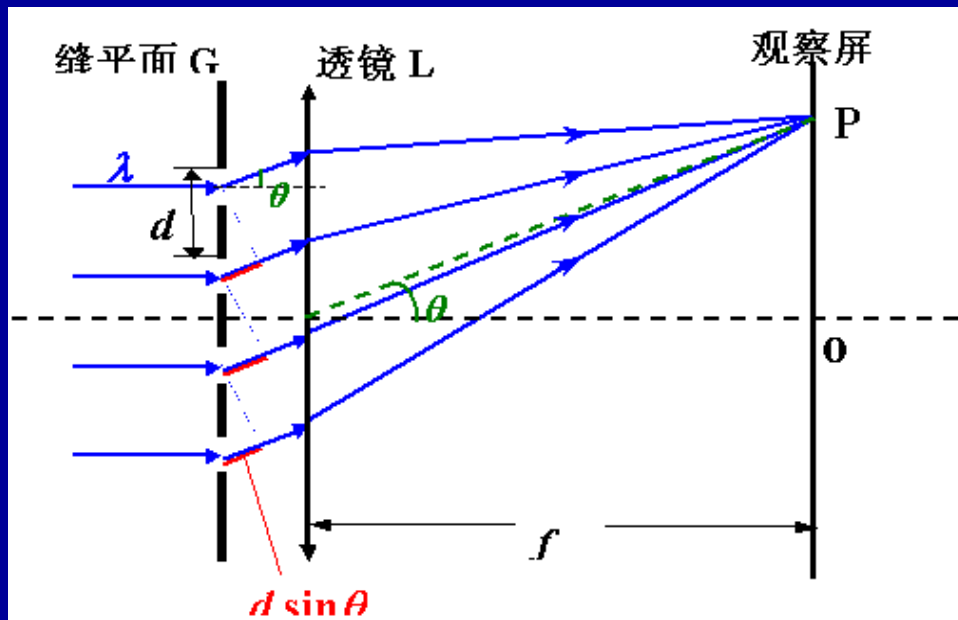
$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$



$N$ 增大, 主极大条纹变亮变窄, 次极大数目变多而相对强度变小

干涉和衍射都是波的相干叠加，但：

- 干涉是有限多个分立光束的相干叠加
- 衍射是波阵面上无限个子波相干叠加
- 干涉和衍射经常同时出现



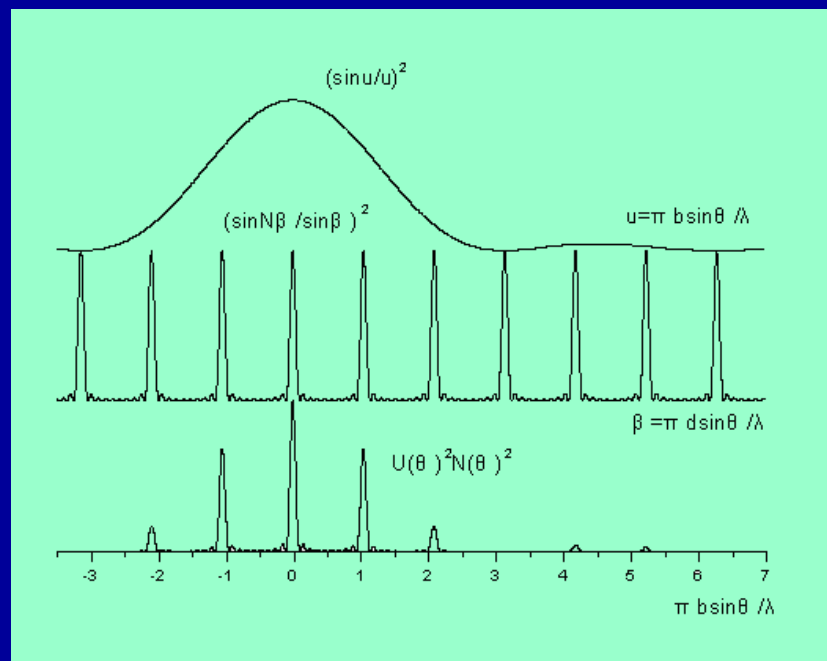
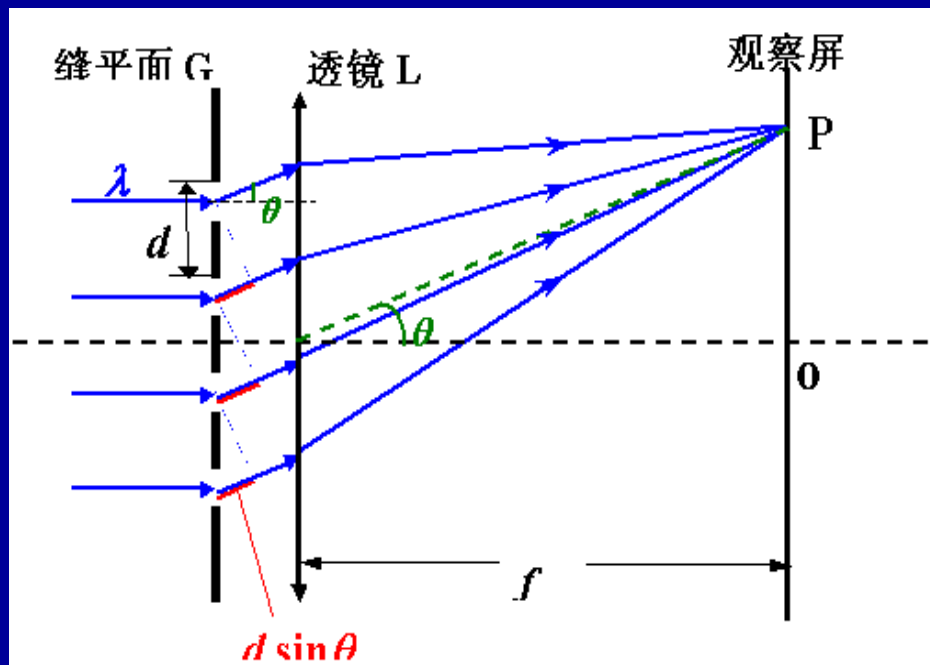
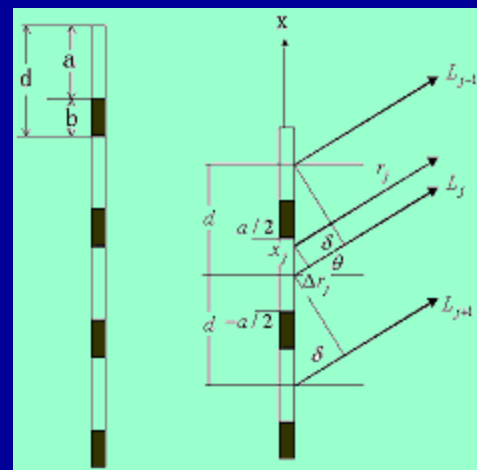
光栅衍射：单缝衍射和缝间干涉的共同结果

# 多缝夫琅和费衍射-光栅衍射

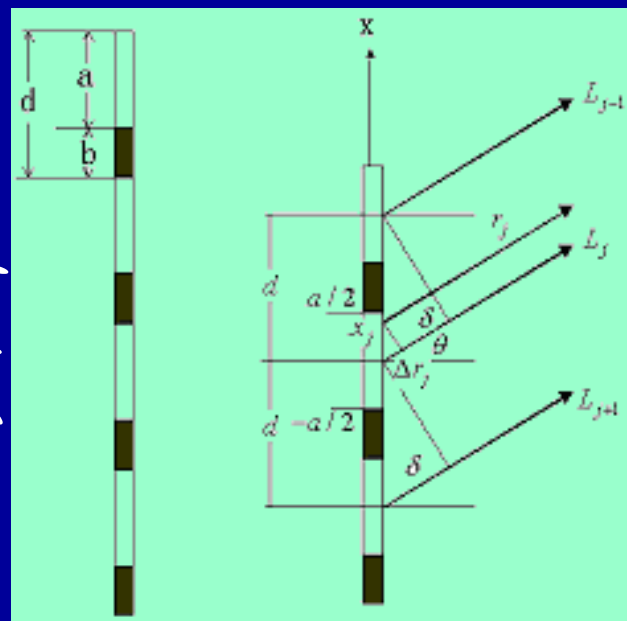
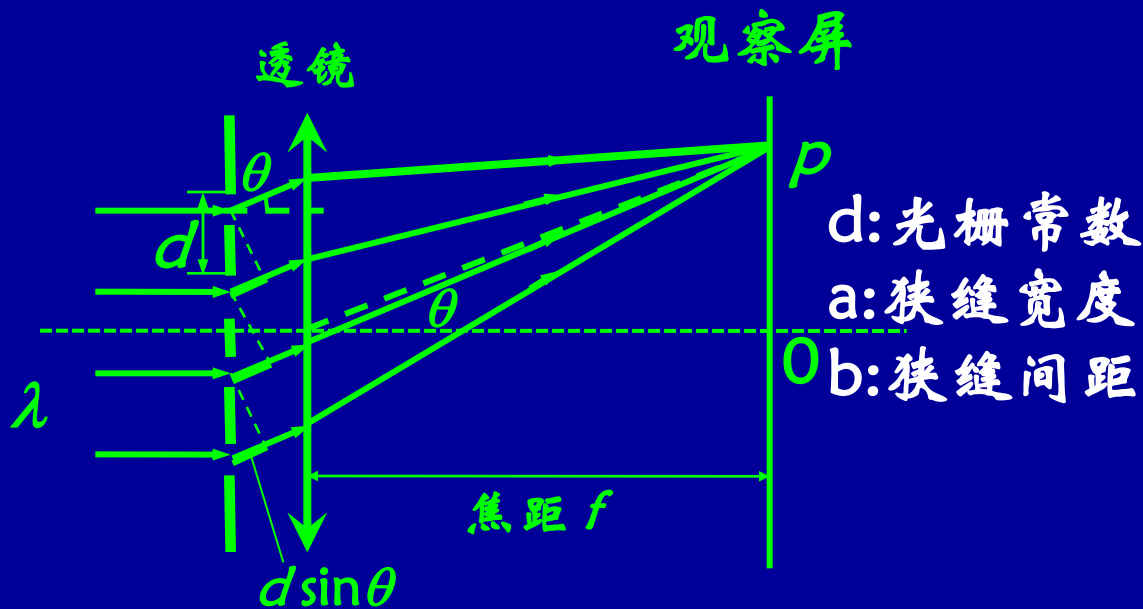
光栅是由一系列等宽等间距的平行狭缝组成，在1cm的长度上往往刻有上万条的刻痕

光栅衍射是单缝衍射和多缝干涉的总效果

狭缝宽度为  $b$   
不透光宽度  $a$   
 $d = a + b$



# 多缝夫琅和费衍射



- 对每一个狭缝的积分是求得入射光经该狭缝后的衍射在P点引起的振动，为光的衍射
- 对所有狭缝的求和是将每一个狭缝射出的光在P点引起的振动进行叠加，为光的干涉

■夫琅和费衍射,不考虑干涉:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

$$\alpha = \pi a \sin \theta / \lambda$$

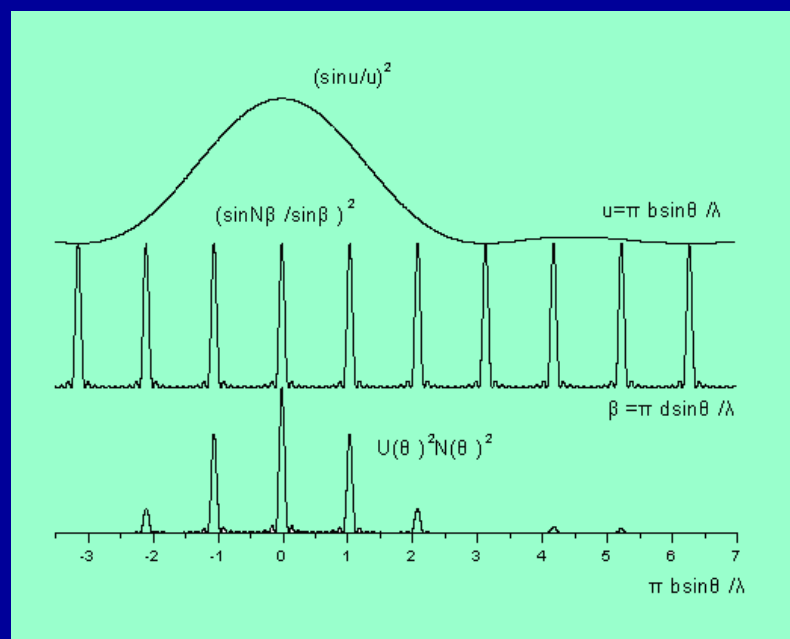
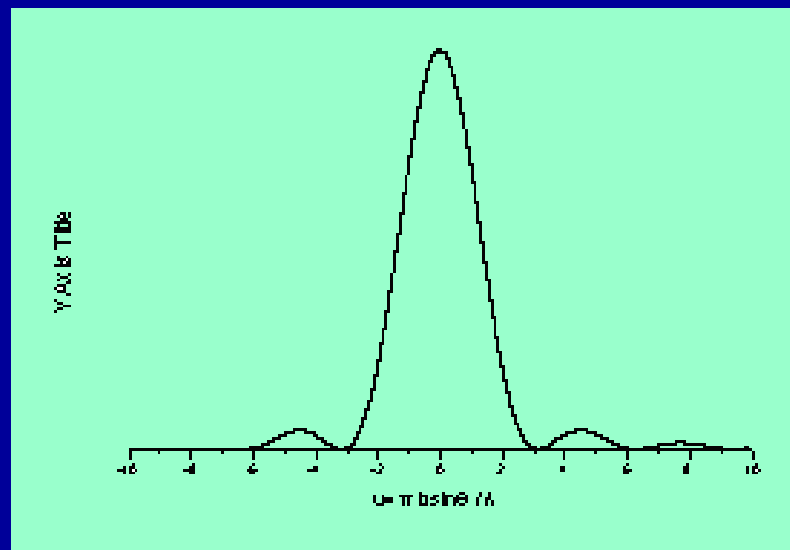
■不考虑衍射对光强的影响,只分析多光束的干涉

正入射光栅方程,明纹条件:

$$d \sin \theta = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\delta = 2\pi d \sin \theta / \lambda$$

$$\Delta l = d \sin \theta$$





多光束的干涉：设有N个缝，每个缝发的光在对应衍射角 $\theta$ 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 $\delta$ ，光程差为 $\Delta l$ ，则多光束干涉的强度分布为：

$$I(P) = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\sin(N\beta)}{\sin(\beta)} \right]^2$$

$$\alpha = \pi a \sin \theta / \lambda$$

$$\beta = \pi d \sin \theta / \lambda$$

两个主极大间有N-1个零点, N-2个次极大

单缝衍射光强曲线

$$I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

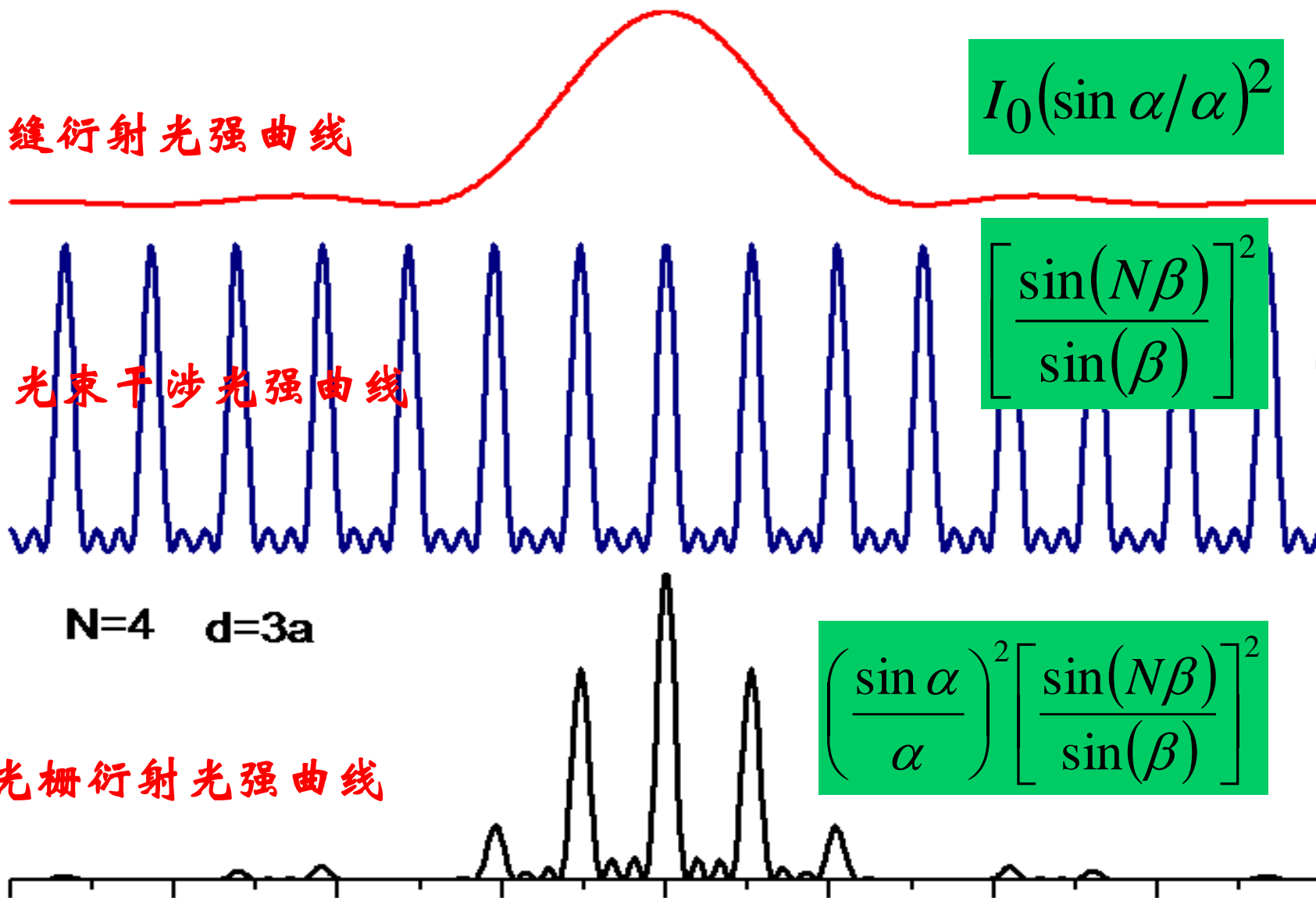
多光束干涉光强曲线

$$\left[ \frac{\sin(N\beta)}{\sin(\beta)} \right]^2$$

$N=4$   $d=3a$

光栅衍射光强曲线

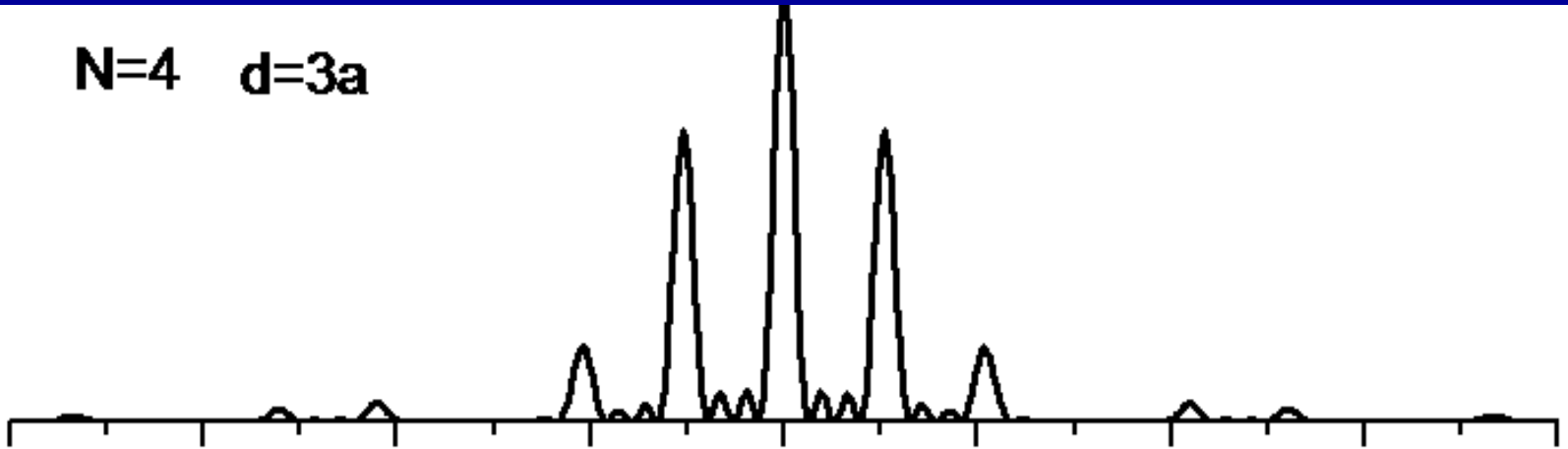
$$\left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\sin(N\beta)}{\sin(\beta)} \right]^2$$



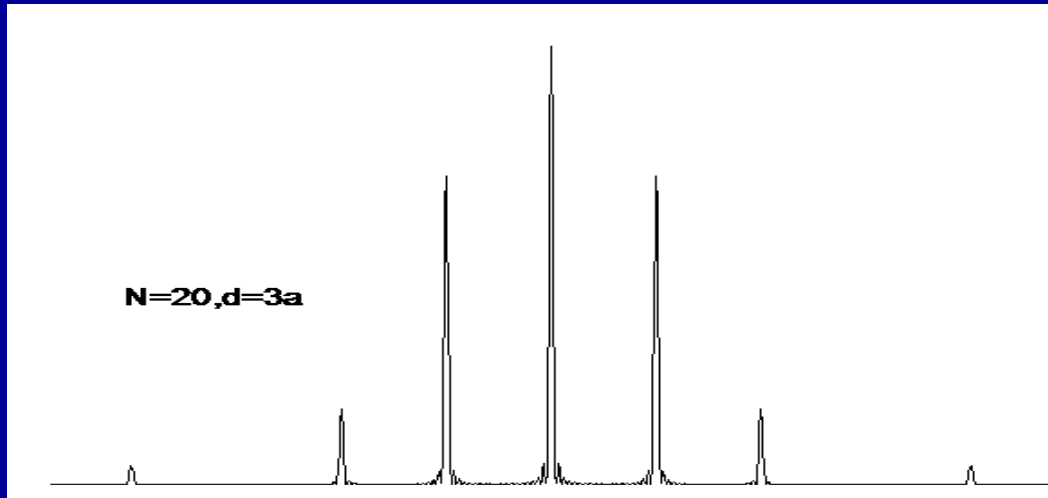
$$I_{\theta} = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\sin(N\beta)}{\sin(\beta)} \right]^2$$

- 第一项来源于单缝衍射，叫单缝衍射因子
  - 第二项来源于缝间干涉，叫缝间干涉因子
  - 单缝衍射因子改变光强度在各级主极大条纹间的分配，并产生干涉条纹缺级现象，干涉因子极大，且单缝衍射因子极小， $k=Nd/a$
  - 多缝干涉因子决定了主极大，次极大和零点位置
    - 主极大位置： $d \sin \theta = \pm m \lambda$
    - 零点位置： $d \sin \theta = m \lambda / N, k' \neq mN$
    - 两个主极大间有 $N-1$ 个零点， $N-2$ 个次极大
    - 主极大半宽： $\Delta \theta = \lambda / (N d \cos \theta)$
- $\beta = \pi d \sin \theta / \lambda$

$N=4$   $d=3a$

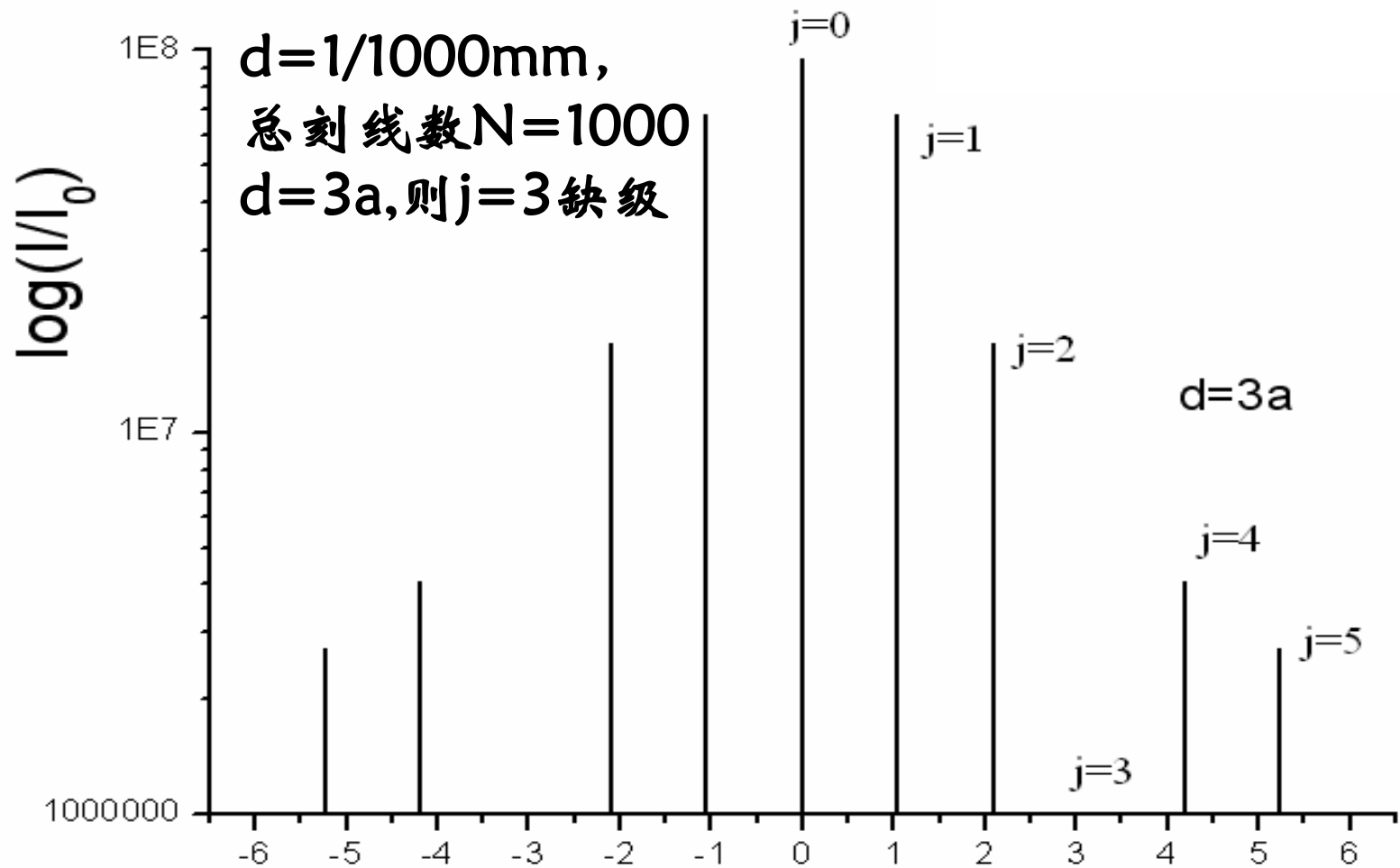


$N=20, d=3a$



- 多光束干涉使能量高度集中于各个主极大
- 主极大半角宽度 $=\lambda/Nd$ ， $Nd$ 越大，主极大宽度越窄。

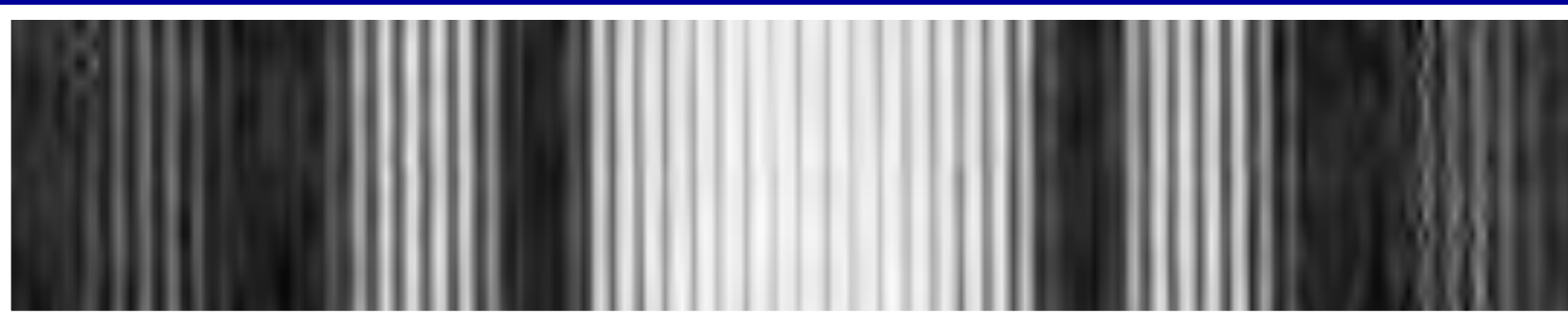
当干涉的最大值( $d\sin\theta=k\lambda$ )与衍射的极小值 $a\sin\theta=n\lambda$ 重合时, 即 $j=Nd/a$ , 出现缺级



单缝



多缝



缺级

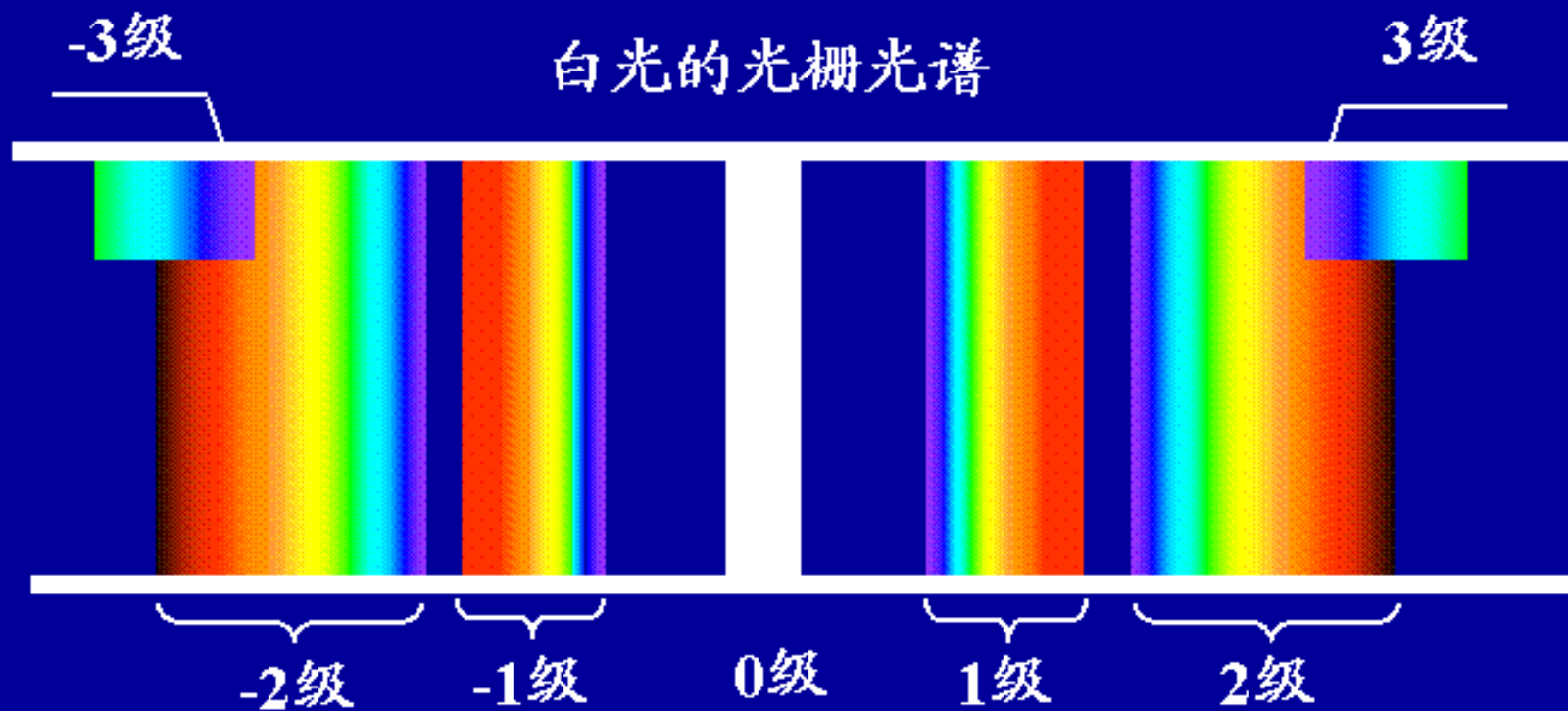
19个明条纹

缺级

单缝衍射和多缝衍射干涉的对比 ( $d = 10a$ )

复色光照射光栅时，谱线按波长向外侧依次分开排列，形成了光栅光谱

中央亮条纹仍呈白色，两侧是彩色条纹，内紫外红，越向外，重叠部分越多。

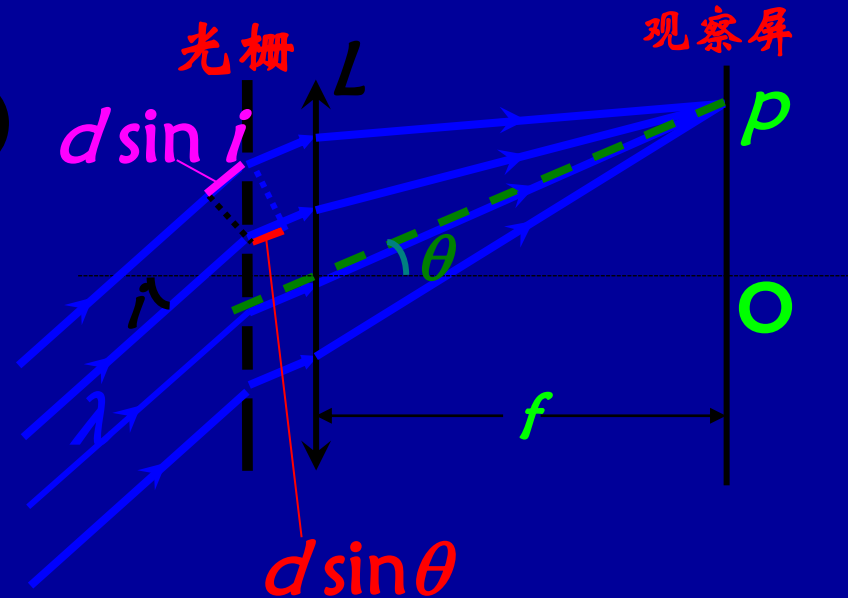


## 5.4.4 斜入射情况

### ■ 相邻两线光程差：

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

- 入射平行光与光栅法线成  $i$  角
- $\theta$  为衍射角； $d$  为光栅常数
- 当  $i$  和  $\theta$  在光栅法线同侧时， $\theta$  为正。
- 适用于透射和反射光栅



$$d(\sin\theta - \sin i) = \pm m\lambda$$



## 斜入射的光栅方程

$$d(\sin \theta - \sin i) = \pm m\lambda$$

- 光谱级数  $m=0,1,2\cdots$
- $m$  确定时, 调节  $i$ , 则  $\theta$  相应改变。
- 不同波长的光, 达到极大的衍射角  $\theta$  不相同 (光谱)
- 对应于各种  $m$  值, 得到不同组的光谱,
- 平面光栅最大的极大值在  $\theta=-i$  处, 但该处色散为 0
- 大量的光将损失于零级, 从而大大降低了光栅效率

## 5.4.5 定向光栅

平面光栅：

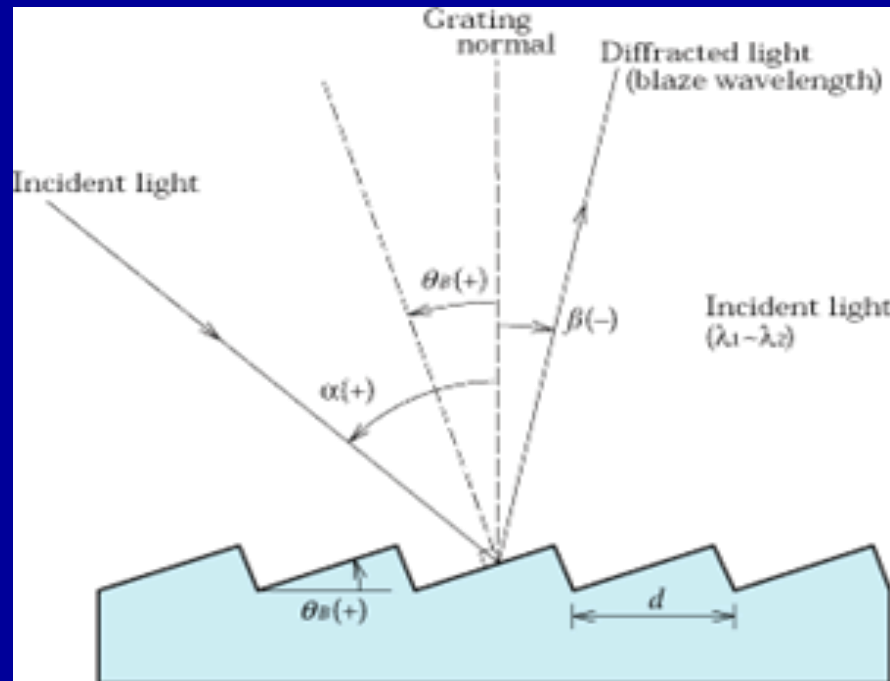
- 没有色散的零级主极大与单缝衍射的中央主极大相重合
- 所利用的那级光谱只分配到很少的能量，光谱变得很弱

解决办法：

- 光栅单缝衍射的中央主极强方向转移到光栅衍射的较高级次的主极大方向，使得利用的那级光谱分配到较大的能量
- 定向光栅，也称闪耀光栅

## ■ 定向光栅：

- 用刻刀将反射面刻划成具有特定形状的刻槽，使光栅反射的绝大部光都集中在所应用的那一级光谱的一定波段范围内（比较确定的方向），这种光栅称作定向光栅或闪耀光栅。这种集中光能量的原理通常称为“闪耀”



# 定向光栅参量

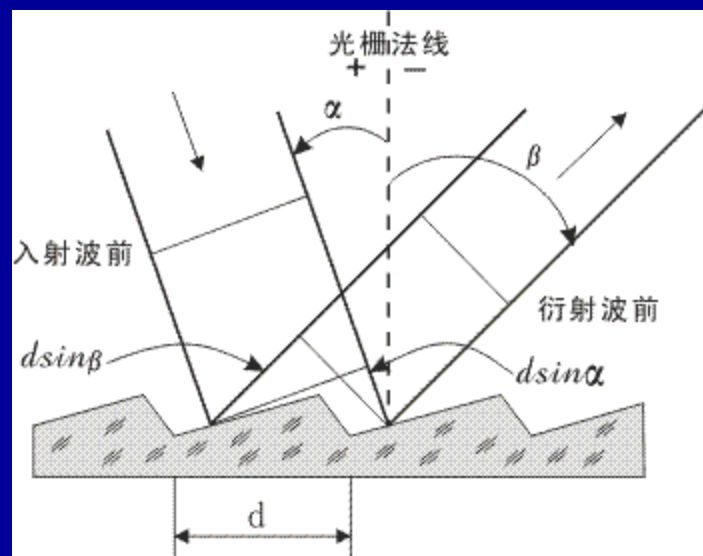
## ■ 闪耀角 $\theta$

- 刻面法线(FN)与光栅基面法线(GN)的夹角。

## ■ 闪耀波长 $\lambda_b$ :

- 衍射方向与光栅槽刻面上反射方向相同的光线的波长
- 由反射定律可求出闪耀波长  $\lambda_b$  对应的衍射角  $\beta_b$

同侧取正 反之取负

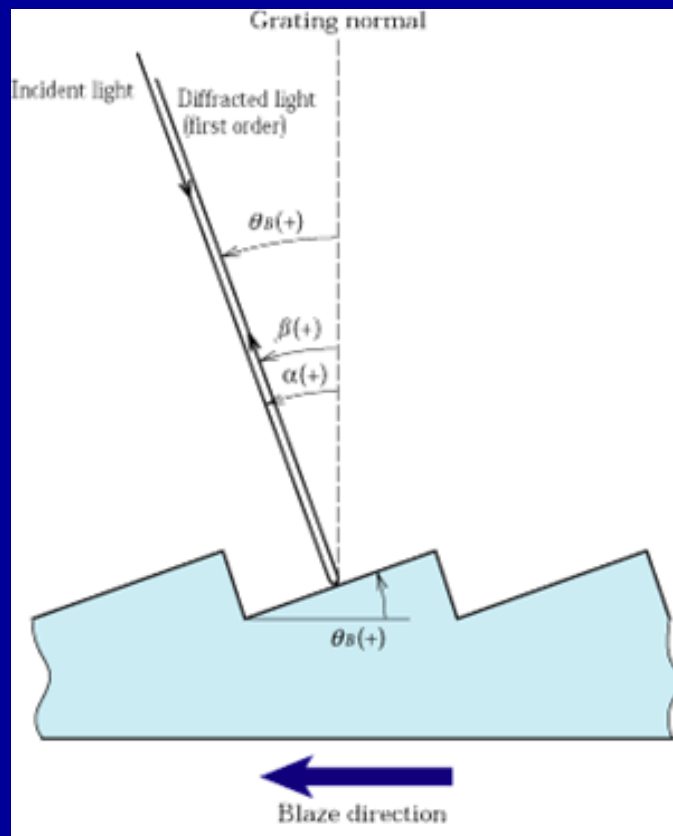


$$\alpha - \theta = \theta - \beta_b$$

$$\theta = (\alpha + \beta_b) / 2$$

## ■ 利特罗 (Littrow) 条件:

- 入射光垂直于光栅槽刻面, 即  $\alpha = \theta$
  - 其时, 反射方向同样垂直于光栅槽面,  $\beta_b = \alpha$ 。
- 一般给出的是在利特罗条件下, 光栅的一级闪耀波长  $\lambda_0 = 2b \sin \theta$
- 已知入射角  $\alpha$ 、闪耀角和  $\lambda_0$ , 可求非利特罗条件下的  $m$  级闪耀波长



$$\lambda_b = d(\sin \alpha + \sin \beta_b) / m = \frac{2b}{m} \sin \frac{\alpha + \beta_b}{2} \cos \frac{\alpha - \beta_b}{2}$$

$$= \frac{2b}{m} \sin \theta \cos \frac{\alpha - \beta_b}{2} = \frac{\lambda_0}{m} \cos \frac{\alpha - \beta_b}{2} = \frac{\lambda_0}{m} \cos(\alpha - \theta)$$

## 5.4.6 光栅光谱仪参量

1. 角色散度：一般入射角固定，只需对光栅方程微分

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos\theta} = \frac{\sin i + \sin\theta}{\lambda \cos\theta}$$

$$d(\sin i + \sin\theta) = m\lambda$$
$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

2. 线色散度：

$$\frac{ds}{d\lambda} = f_2 \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{mf_2}{d \cdot \cos\theta}$$

3. 倒线色散度

$$p = \frac{d\lambda}{ds} = \frac{d \cdot \cos\theta}{m \cdot f_2}$$

主极大半宽：主极大和相邻的第一个极小的角间距

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda$$

$$d[\sin i + \sin(\theta + \Delta\theta)] = m\lambda + \lambda/N$$

$$\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin \theta = 2 \cos(\theta + \Delta\theta/2) \sin(\Delta\theta/2)$$

$$\cos \theta \cdot \Delta\theta = \lambda/Nd$$

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

#### 4. 分辨本领R

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda}{\Delta\theta} \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = (Nd \cos \theta) \cdot \left( \frac{m}{d \cos \theta} \right) = mN$$

- m为光谱级数；N为光栅刻线总数
- R取决于所用光栅的光谱级次m和光栅刻线总数N

# 实际分辨本领 $R$ 还需考虑的因素:

- 入射狭缝的宽度, 光谱纯度
  - 越窄分辨本领越高, 但不能过窄
  - 一般取与星视影直径相当即可, 以便让大部分天体的光能量进入狭缝
- 受准直镜的衍射极限限制
  - 准直镜的大小一般要与光栅大小匹配。
- 探测器像元尺寸愈小, 分辨本领愈高。
  - 谱线宽度覆盖两到三个像素。



## 5. 光谱的纯度 $\Delta\lambda_s$

- 考虑狭缝有一定宽度时，狭缝像宽度在光谱中对应的波长间隔。

$$\Delta\lambda_s = s' d\lambda/ds$$

$$s' = -(\cos i / \cos \theta) \times (f_2 / f_1) s$$

$$\Delta\lambda_s = s' \times \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta \times f_2} = -\cos i \times \frac{s}{f_1} \times \frac{d}{m}$$

$s'$ : 入射狭缝的像宽度

$s$ : 入射狭缝宽度

$f_1 f_2$ : 准直镜和照相镜焦距

$i$ : 入射角

$\theta$ : 出射角

$d$ : 光栅常数

光谱纯度受光栅参数  $d$ 、 $m$ ，和光谱仪参数  $s$ 、 $f_1$  影响。当光谱仪的工作状态确定后 ( $a$ 、 $d$ 、 $f_1$ 、 $m$  确定)，选择适当窄的狭缝宽度  $s$  对提高光谱纯度至关重要。

## 6. 自由光谱范围-- free spectral range

干涉仪同一衍射角 $\beta$ 方向上，相邻两光谱级两波长之间的波长差，即光栅各级光谱**不重叠**的部分。

$$d(\sin i - \sin \beta) = (m + 1)\lambda$$

$$d(\sin i - \sin \beta) = m(\lambda + \Delta\lambda)$$

$$\Delta\lambda = \lambda/m$$

$\lambda$ 为被测波段的短波限。

例如：假设白光范围为4000-7600，则其短波限为4000Å。

一级光谱的自由光谱范围 $\Delta\lambda = 4000/1 = 4000$

二级光谱的自由光谱范围 $\Delta\lambda = 4000/2 = 2000$

三级光谱的自由光谱范围 $\Delta\lambda = 4000/3 = 1333$

- 由光栅得到的各级光谱可能彼此重叠：在同一衍射角  $\beta$  处，既可观测到波长为  $\lambda_1$  的第一级光谱，也可看到二级、三级等高级次光谱，对应波长满足  $\lambda_1 = 2\lambda_2 = 3\lambda_3 \cdots = m\lambda_m$

- 同一  $\beta$  处，相邻两光谱级  $m$ 、 $(m+1)$  两波长之间的波长差：

$$m\lambda = (m+1)(\lambda - \Delta\lambda) \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda}{m+1}$$

- 同样， $m$  级与  $(m-1)$  级之间的两波长差：

$$(m-1)(\lambda + \Delta\lambda) = m\lambda \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda}{m-1}$$

- 自由光谱范围表示各级光谱**不重叠**的部分
- 低级光谱  $\Delta\lambda_m$  大，不易重叠，但色散小
- 用高级光谱时， $R$  大， $\Delta\lambda_m$  小，重叠非常厉害

# 白光的衍射

设第二级光谱中波长为 $\lambda_x$ 的光与第三级中蓝光 $\lambda_B$ 开始重叠:

$$(k-1)\lambda_x = k\lambda_B$$

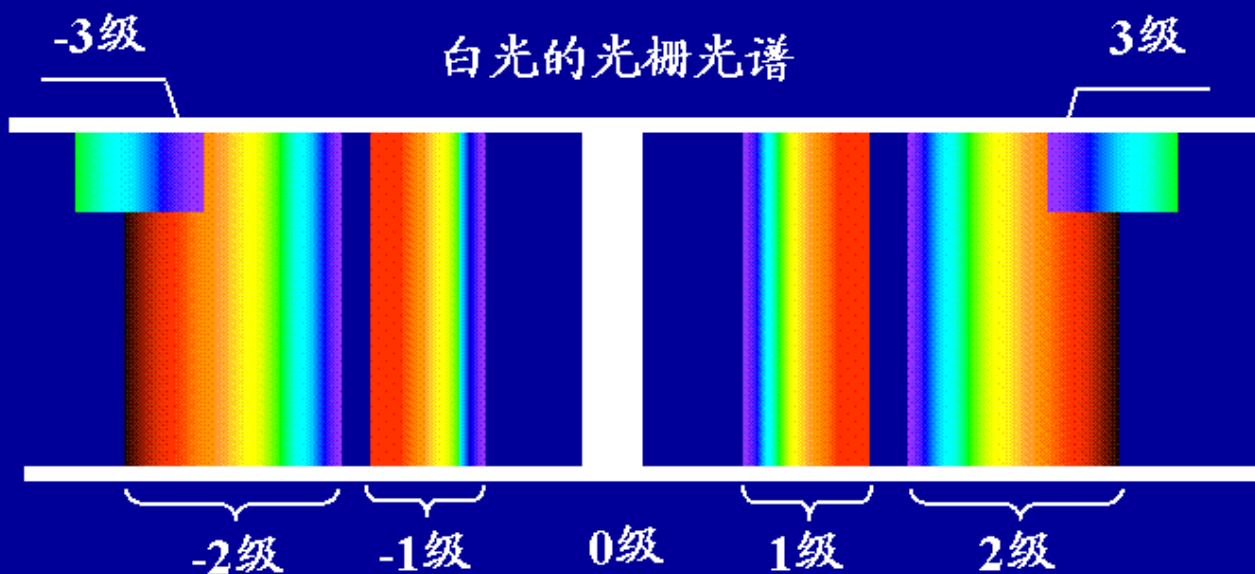
$$k = 3$$

$$\lambda_x = k \cdot 4000 / (k - 1) = 6000$$

m=2的自由光谱范围

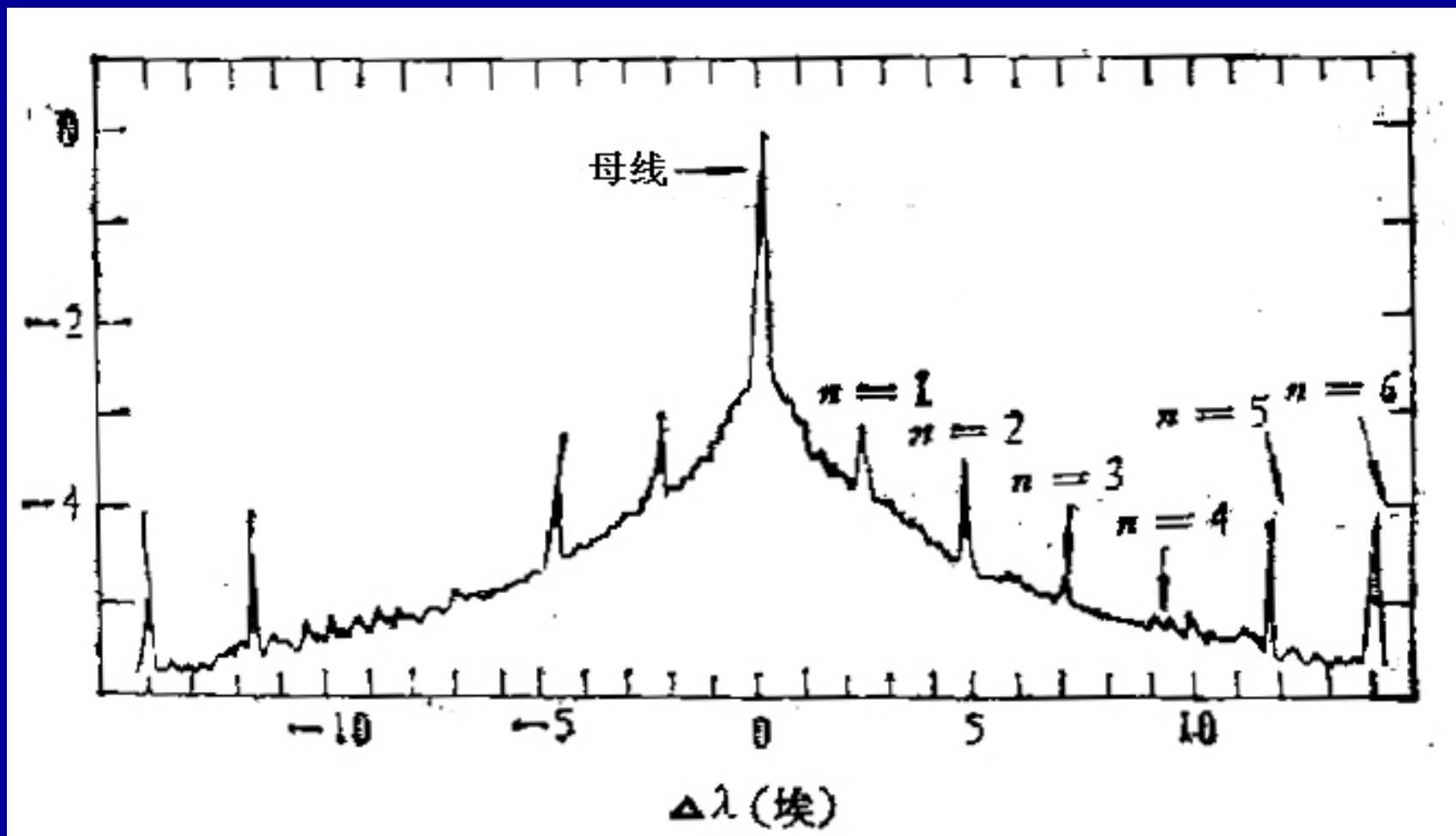
4000 - 6000Å

$\Delta\lambda = 2000\text{Å}$



## 5.4.7 光栅的鬼线

- 鬼线：光栅衍射时得到的在光谱带中某些亮线的两侧附加的比較暗弱的光谱线，称为鬼谱线，简称为鬼线。

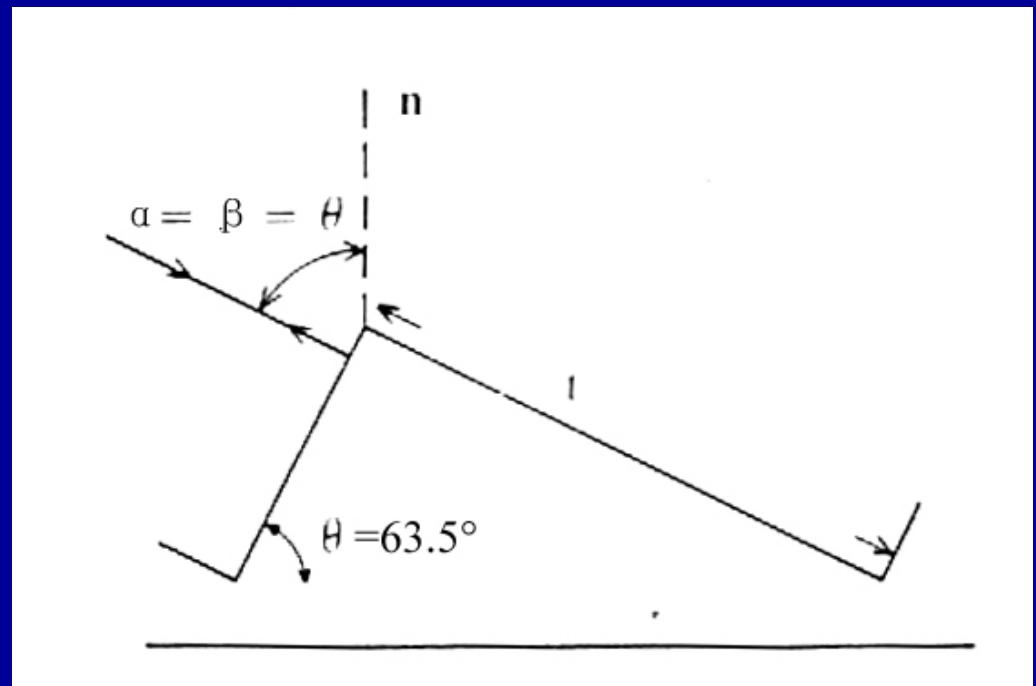


- **罗兰鬼线：** 由于刻制光栅时刻划机的螺旋齿距的**周期误差**以及刻划机螺旋系统的**局部弹性变形**等加工工艺中不可避免的缺陷引起，是鬼线中**强度最大**的一种。一般说的鬼线主要就是**指罗兰鬼线**。
- **赖曼鬼线：** 在光栅刻制过程中存在的**一个以上的周期误差**造成两个以上罗兰鬼线衍射图样的干涉而再次产生的鬼线。赖曼鬼线的强度很弱，就同一块光栅而言一般要比罗兰鬼线小**1~2个数量级**。
- **卫线：** 是一种与鬼线相似的假谱线。它是由于**光栅的局部变形**后，等效于另一块光栅重叠在主光栅上而产生的附加谱线。卫线的强度也比罗兰鬼线弱得多。

## 5.4.8 阶梯光栅光谱仪

- 由光栅角色散公式可知，使用大的级次，可获高色散光谱
- 阶梯光栅：利用高级次光谱和大入射角
- 普通闪耀光栅，小入射角， $a \sim d$ ， $2d \sin \theta = m\lambda$ ，其他级缺级，提高闪耀效率

阶梯光栅特点：是刻槽形状接近直角三角形，一般闪耀角  $\theta = 63.5^\circ$



- 阶梯光栅一般采用利特罗 (Littrow) 条件, 即  $\alpha = \beta$  ( $\alpha \approx \beta$ ), 则角色散:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\lambda \cos \beta} = \frac{2}{\lambda} \operatorname{tg} \beta$$

- 由于阶梯光栅用于大入射角,  $\beta$  也大, 角色散和分辨本领都大。角色散比普通光栅大 5~10 倍。



# 阶梯光栅光谱仪

- 基本原理与一般光栅光谱仪相同，主要区别是：
  - 1) 利用阶梯光栅代替了定向衍射光栅
  - 2) 因使用高级次光谱，不同级次光谱重叠严重，一般附加一块与阶梯光栅色散方向相垂直的棱镜或光栅，拉开重叠的不同级次光谱。
- 由于能量高度集中在某几个高级次光谱上，可增加辐照度，大大缩短曝光时间。同时获得多级光谱。都提高了光谱仪的效率。
- 但阶梯光栅的鬼线强度比一般光栅大。

[The page contains approximately 25 lines of text that is extremely faint and illegible. The text appears to be a list or a series of entries, but the specific content cannot be discerned.]

## 5.4.9 干涉仪

法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer)

利用高度平行的两片高表面光洁度的半透（反射）镜面实现多束反射透射光之间的干涉。

傅里叶变换光谱仪 (Fourier Transform Spectrometer)

也叫迈克尔逊干涉仪，利用光束分离器将入射光分成两束，经过不同的路径之后干涉。

都没有狭缝，高光通量。

光谱扫描，适合面光源。

光谱处理不直观。

# 5. 光谱观测

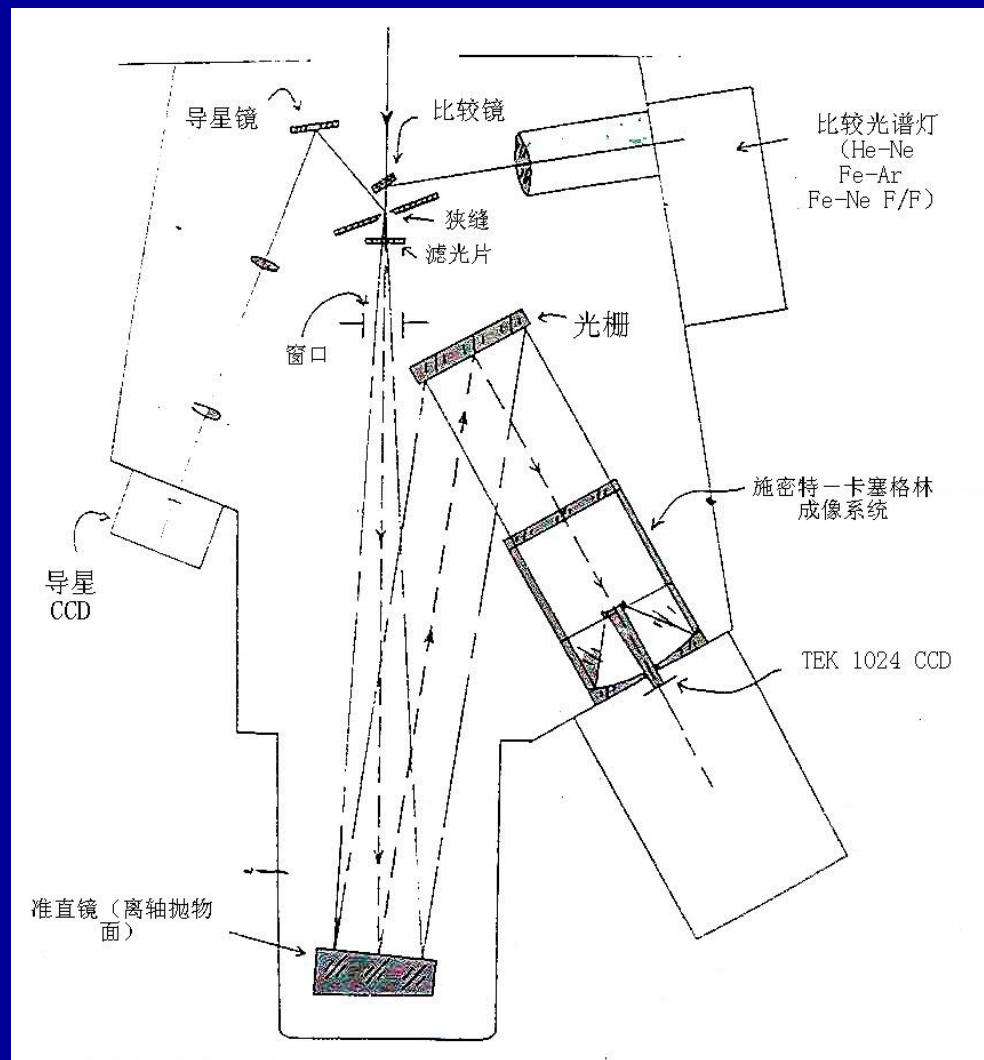
1. 光谱观测背景知识
2. 光谱仪性能参量
3. 棱镜光谱仪
4. 光栅光谱仪
5. 光谱仪系统分类

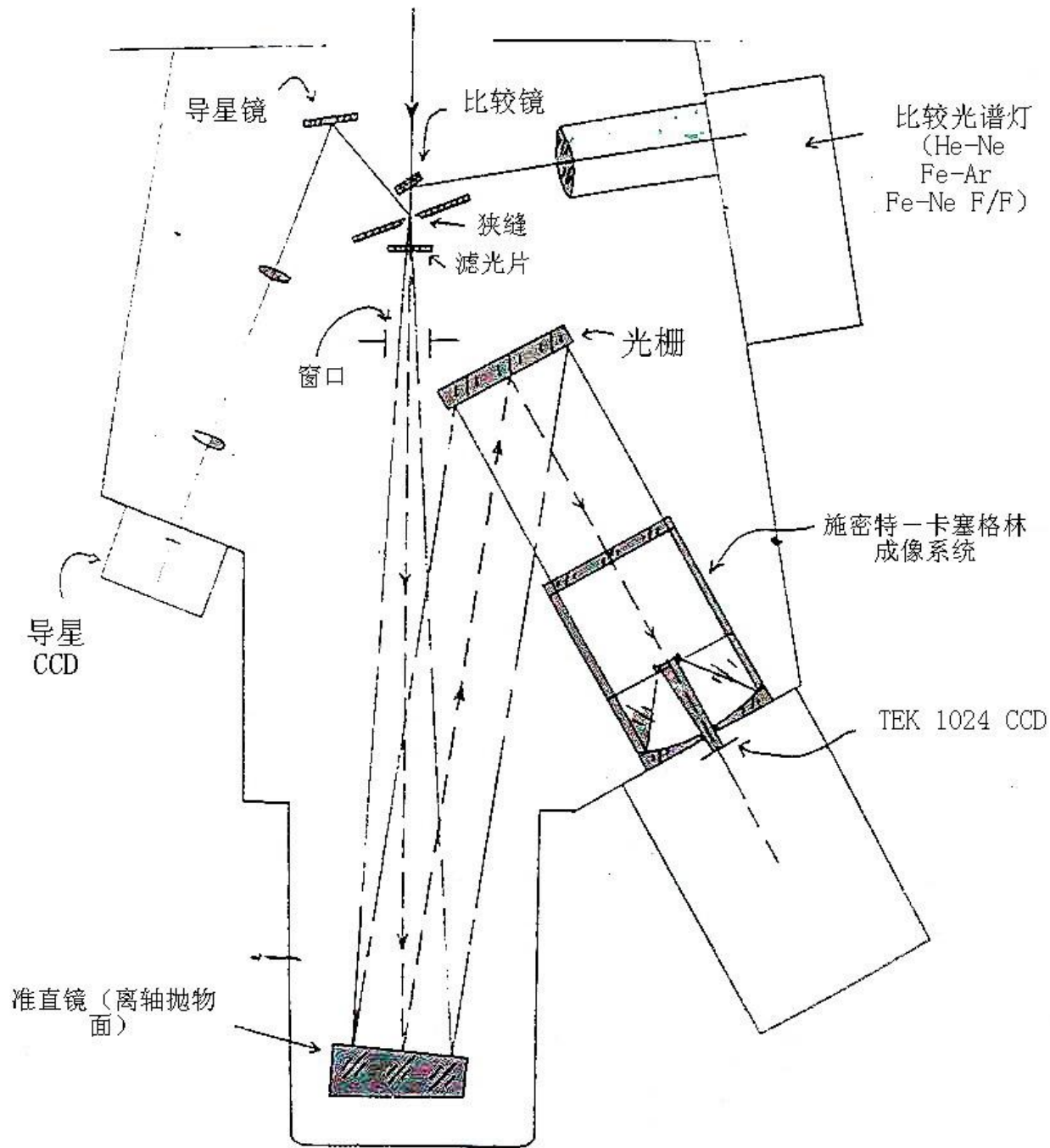
## 5.5 光谱仪系统的分类

- 卡焦光谱仪
- 折轴光谱仪
- 多缝光谱仪
- 光纤光谱仪
- 无缝光谱仪

# 5.5.1 卡焦光谱仪

- 把分光仪器的狭缝直接放置在望远镜的卡焦系统的焦平面处。
- 主要用于观测较暗弱天体的光谱，如类星体、星系等的光谱





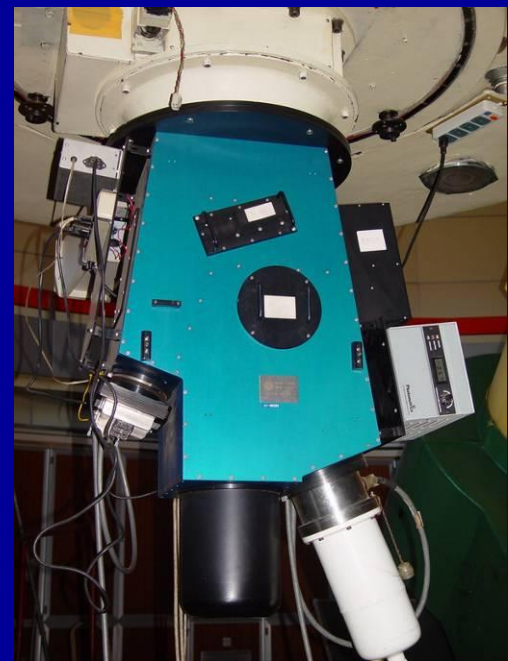
# 2.16米望远镜 OMR光谱仪

## 光谱仪本体

CCD、  
导星CCD、

控制台

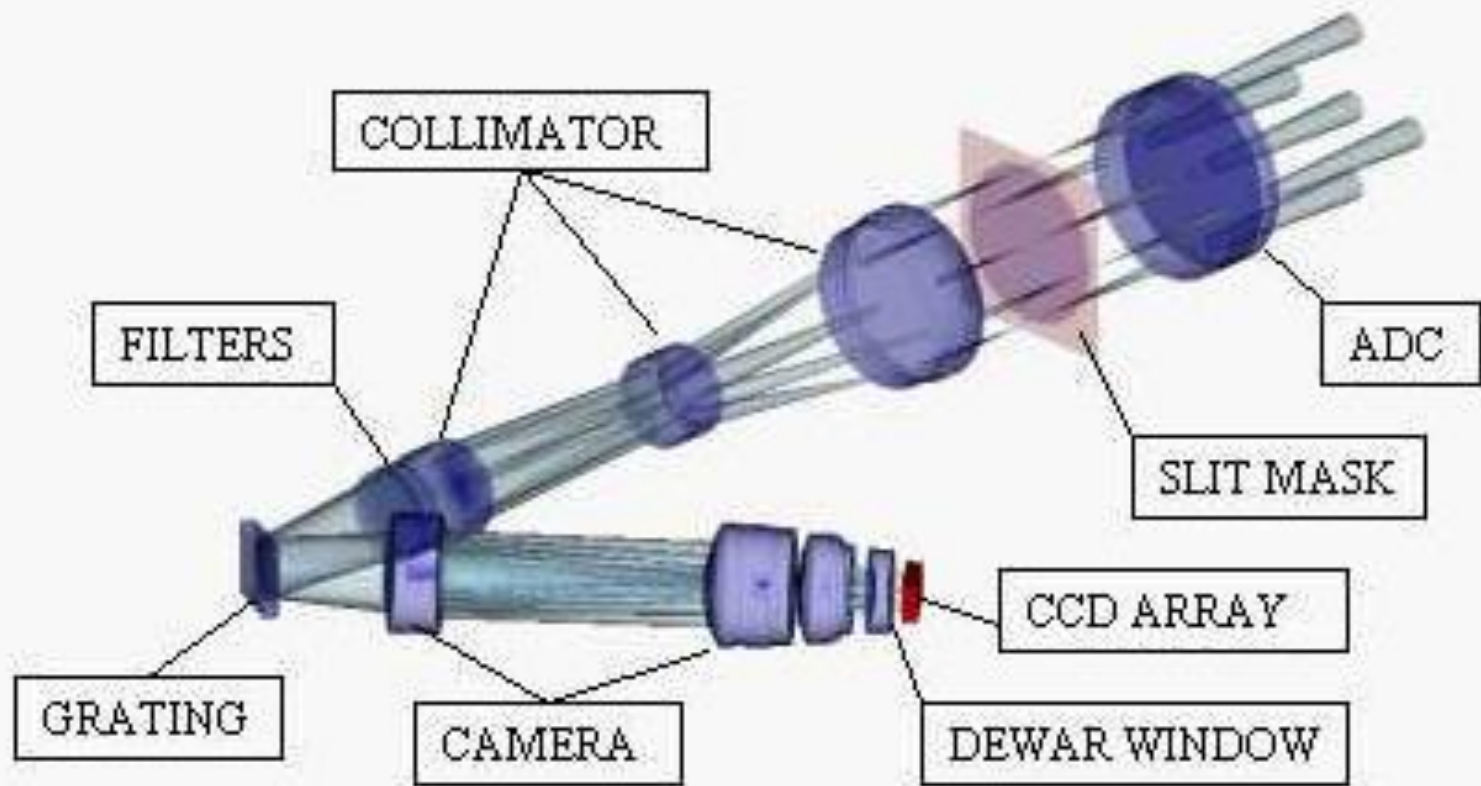
数据采集微机







## 5.5.3 多縫多天体光谱仪

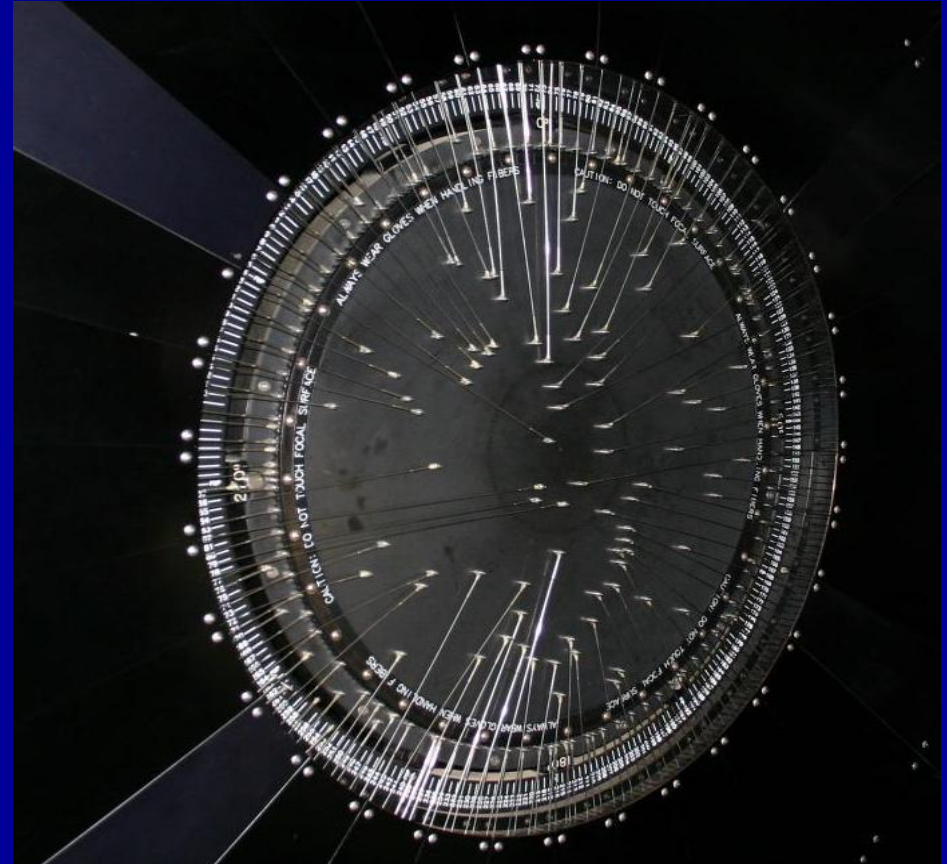


Copyright © UKATC, Royal Observatory, Edinburgh

**Gemini Multi-Object Spectrograph**

## 5.5.4 光纤引导多目标光谱仪

- Observing one star at a time is inefficient
- when many stars are available in a field (say, a star cluster) use multi-object spectroscopy
- put an optical fiber at the location of each star to take spectra.
- Feed the optical fibers into a spectrograph.



# LAMOST: 大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜

- 国家**大科学工程**，政府投资2.5+0.9亿元人民币
- 主动光学和多光纤技术，同时观测4000光谱
- 于2008年建成，光谱观测效率最高望远镜



## 3.5.5 无缝天体光谱仪

- 减少光损失
- 提高光学效率
- 适合暗弱天体—星云
- 低分辨率
- 波长定标难
- 天光背景噪声高

