总复习

1、力学　　　2、热学

3、振动和波动

4、光学

力学重要概念

（1）惯性系与非惯性系

惯性力：
平动：$\vec{F}_i = -m\vec{a}$
转动：$\vec{F}_i = m\omega^2\vec{r}$

（2）力矩：$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$

动量矩：$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$

（3）质心：

$$\vec{r}_c = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i}; \quad \vec{r}_c = \frac{\int \vec{r}\, dm}{\int dm}$$

质心运动定理：$\vec{F} = m\vec{a}_c$

（4）保守力：$\oint \vec{F}_{保} \cdot d\vec{r} = 0$

势能定理：$A_{保} = -\Delta E_p$

保守力与势能梯度：$\vec{F}_{保} = -\nabla E_p$

（5）刚体平面运动=

随质心平动 + 绕质心轴转动

（6）

空间平移→动量守恒

空间转动→角动量守恒

时间平移→能量守恒

质点系平动	刚体定轴转动
①牛顿定律	①转动定律
$\vec{F}=\dfrac{d\vec{p}}{dt}=\dfrac{d(m\vec{v})}{dt}=m\vec{a}$	$\vec{M}_{外}=\dfrac{d\vec{L}}{dt}=\dfrac{d(J\vec{\omega})}{dt}=J\vec{\beta}$
作用　效果	作用　效果
②动量原理	②角动量原理
$\vec{I}=\int\vec{F}_{外}dt=\Delta\vec{p}=\Delta(m\vec{v})$	$\vec{G}=\int\vec{M}_{外}dt=\Delta\vec{L}=\Delta(J\vec{\omega})$
力随时间累积=动量增量	力矩随时间累积=角动量增量
③动量守恒定律	③角动量守恒定律
$\begin{cases}\vec{F}_{外}=0\\ \vec{p}=\text{常矢量}=m\vec{v}_0\end{cases}$ 匀速	$\begin{cases}\vec{M}_{外}=0\\ \vec{L}=\text{常矢量}=J\vec{\omega}_0\end{cases}$ 匀角速

质点系平动

④动能定理

$$A_{外}+A_{内}=\Delta E_k=\Delta(\frac{1}{2}mv^2)$$

力对空间累积 = 动能增量

⑤功能原理

$$A_{外}+A_{非保内}=\Delta E_k+\Delta E_p$$

⑥机械能守恒定律

保守系，$A_{外}=0$

$\Delta E_k+\Delta E_p=0$，　E守恒

刚体定轴转动

④转动能定理

$$A_{外}=\int M_{外}d\theta=\Delta E_k=\Delta(\frac{1}{2}J\omega^2)$$

力矩对空间累积 = 转动能增量

⑤功能原理

$$A_{外力矩}=\Delta E_k+\Delta E_p=\Delta(\frac{1}{2}J\omega^2)+\Delta(mgh_c)$$

⑥机械能守恒定律

$A_{外力矩}=0$

$\Delta E_k+\Delta E_p=0$，　E守恒

热学

$$P = nkT$$

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \bar{w}$$

$$\bar{w} = \frac{3}{2} kT$$

$$T = \frac{2}{3} \frac{\bar{w}}{k}$$

$$pV = \frac{M}{M_{mol}} RT = \nu RT$$

$$R = 8.31 \ J/(mol \cdot K)$$

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \ \mathrm{J}/\mathrm{K}$$

若一个分子有 i 个自由度，则它的平均总动能为：

$$\bar{\varepsilon}=\frac{i}{2}kT$$

1mol理想气体的内能：

$$E_{mol}=\frac{i}{2}RT$$

M kg理想气体的内能：

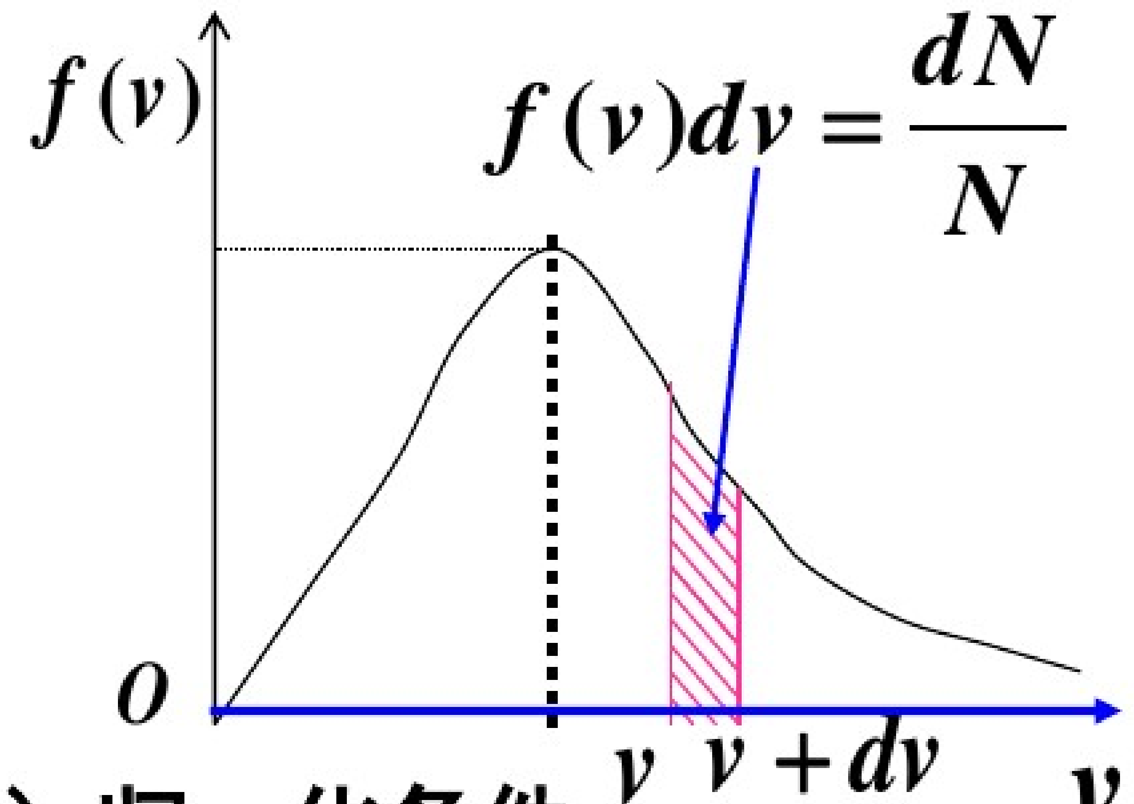
$$E=\frac{M}{M_{mol}}\frac{i}{2}RT=\nu\frac{i}{2}RT$$

麦克斯韦速率分布律

（1）分布函数——单位速率间隔内的概率——概率密度：

$$f(v)=\frac{dN/N}{dv}=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}}\cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}\cdot v^2$$

（2）分布曲线：



①分子速率在 v～$v+dv$ 间隔内

的概率：

$$\frac{dN}{N}=f(v)dv$$

②分子速率在v_1～v_2 间隔内

的概率：

$$\frac{\Delta N}{N}=\int_{v_1}^{v_2}f(v)dv$$

（3）归一化条件：

$$\int_0^{\infty}f(v)dv=100\%=1$$

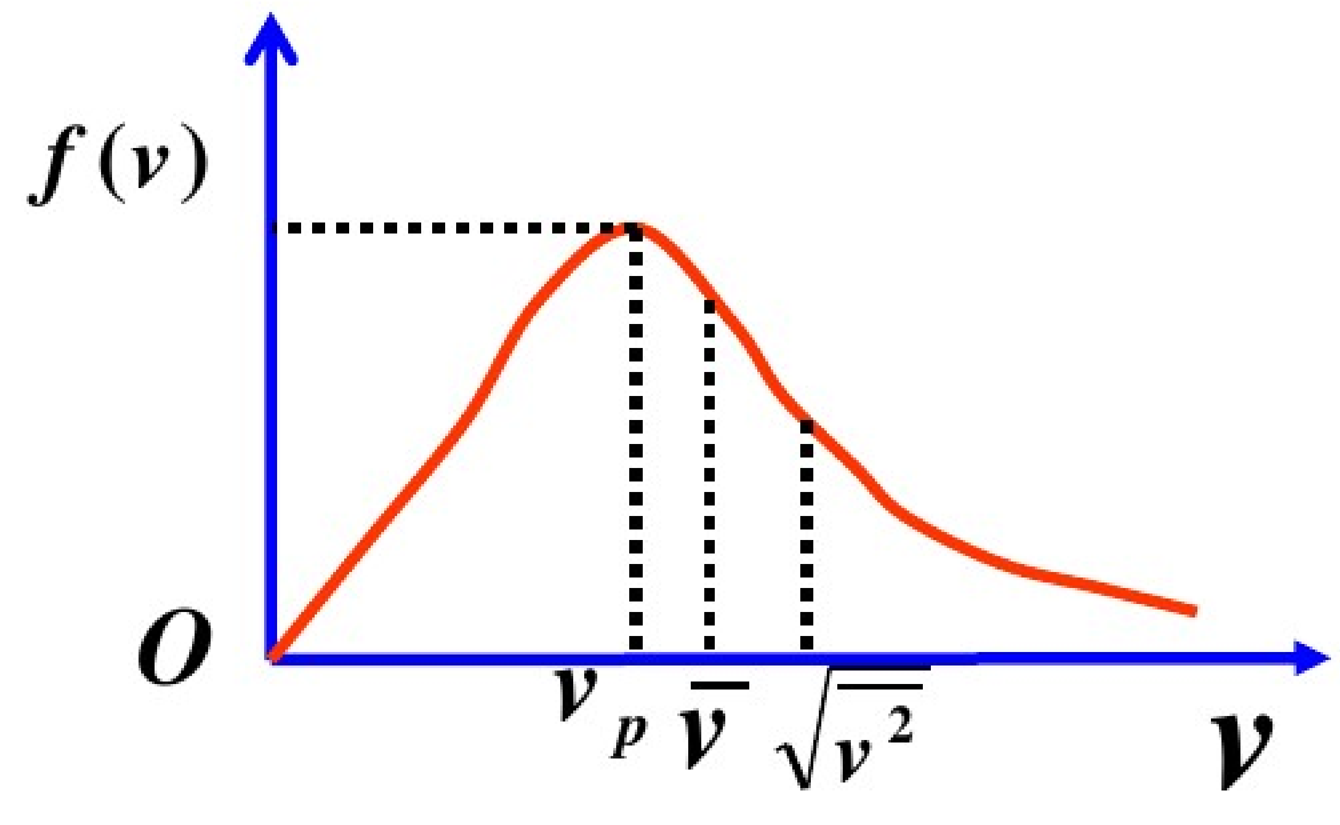
特征速率:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{mol}}} \approx 1.73\sqrt{\frac{RT}{M_{mol}}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_{mol}}} \approx 1.60\sqrt{\frac{RT}{M_{mol}}}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M_{mol}}} \approx 1.414\sqrt{\frac{RT}{M_{mol}}}$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} > \bar{v} > v_p$$



分子平均碰撞频率和平均自由程

$$\bar{z} = \sqrt{2}\pi \mathrm{d}^2 \bar{v} n$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \mathrm{d}^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi \mathrm{d}^2 p}$$

热力学第一定律 （能量守恒）

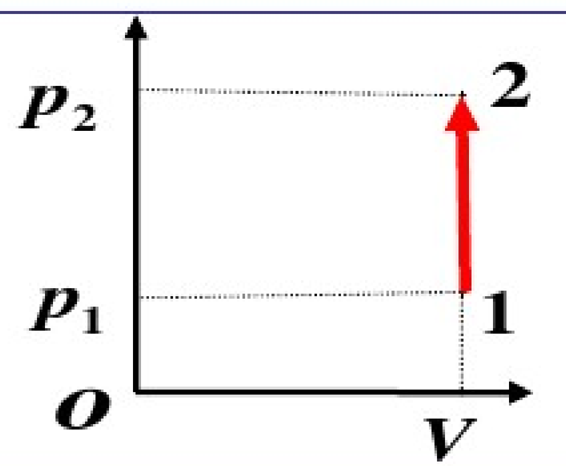
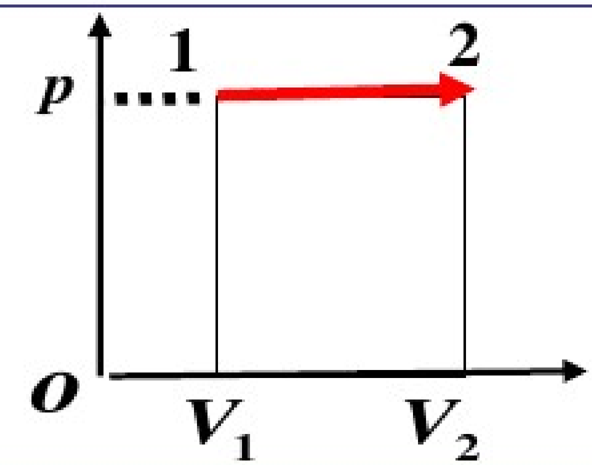
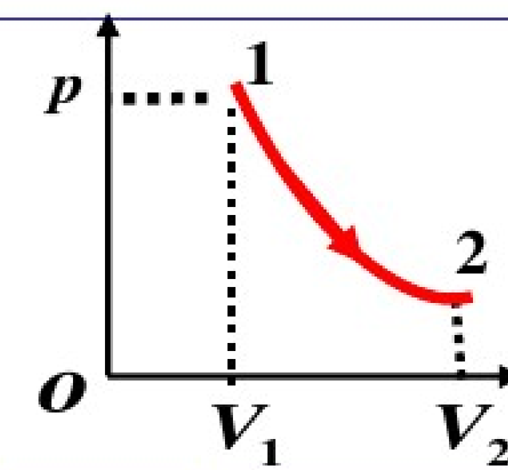
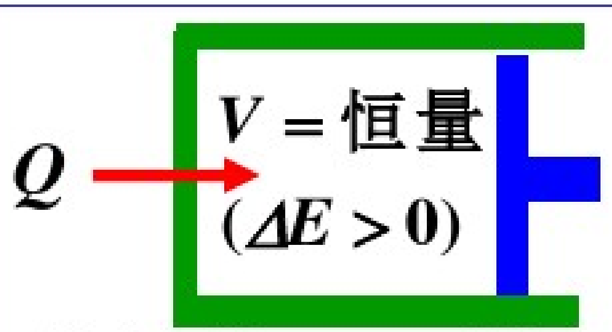
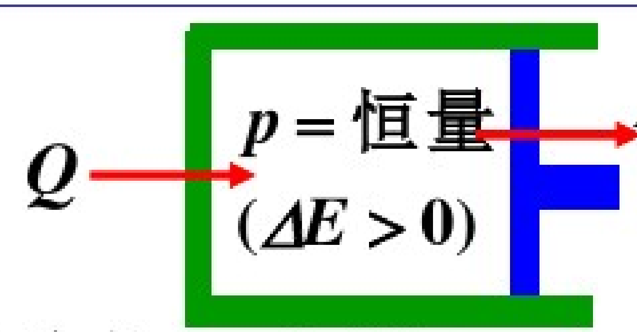
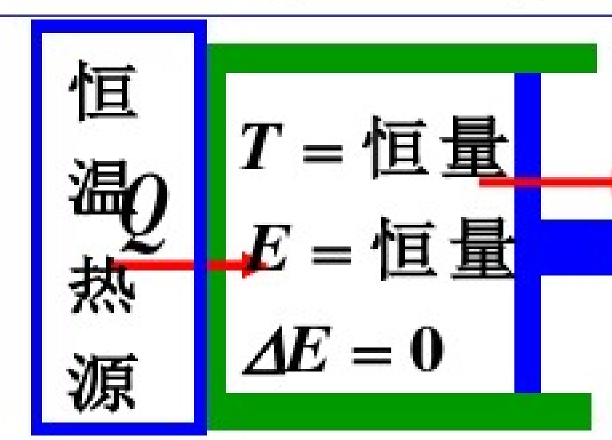
$$Q = \Delta E + A$$

$$\Delta E = \nu C_V \Delta T$$

$$C_P = C_V + R$$

$$C_V = \frac{i}{2} R$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

	等体	等压	等温
特征	$V=$ 恒量, $dV=0$	$p=$ 恒量, $dp=0$	$T=$ 恒量, $dT=0, \Delta E=0$
过程方程	$\frac{p}{T}=$ 恒量 $=\frac{\nu R}{V}$	$\frac{V}{T}=$ 恒量 $=\frac{\nu R}{p}$	$pV=$ 恒量 $=\nu RT$
功	$A=p\int dV \overset{(dV=0)}{=} 0$	$A=p\int_{V_1}^{V_2}dV=p\Delta V$	$A=\int_{V_1}^{V_2}p\,dV=\int_{V_1}^{V_2}\nu RT\frac{dV}{V}$ $=\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}=\nu RT\ln\frac{p_1}{p_2}$
第一定律	$(Q)_V=\Delta E=\nu\frac{i}{2}R\Delta T$ $=\nu C_V\Delta T=C_V\frac{V}{R}\Delta P$	$(Q)_p=\Delta E+p\Delta V$ $=\nu\frac{i}{2}R\Delta T+p\Delta V$ $=\nu C_P\Delta T=C_P\frac{P}{R}\Delta V$	$(Q)_T=(A)_T=\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ $=\nu RT\ln\frac{p_1}{p_2}$
过程曲线 $(P-V$ 图$)$			
实例	 若放热 $Q<0$, 则 $\Delta E<0$	 若放热 $Q<0$, 则 $\Delta E+A<0$	

绝热过程

1、 特征： $dQ=0$　　$Q=0$

2、过程方程：

$$\begin{cases} pV^{\gamma} = \text{恒量} & (1) \cdots\cdots \text{泊松（Poisson）方程} \\ TV^{\gamma-1} = \text{恒量} & (2) \\ T^{-\gamma}P^{\gamma-1} = \text{恒量} & (3) \end{cases}$$

3、功：

$$\boxed{A=-\Delta E=-\nu C_V \Delta T}$$

$$\boxed{A=\frac{1}{\gamma-1}(P_1V_1-P_2V_2)}$$

多方过程

$$pV^n = \text{恒量}$$

$$A = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{n-1}$$

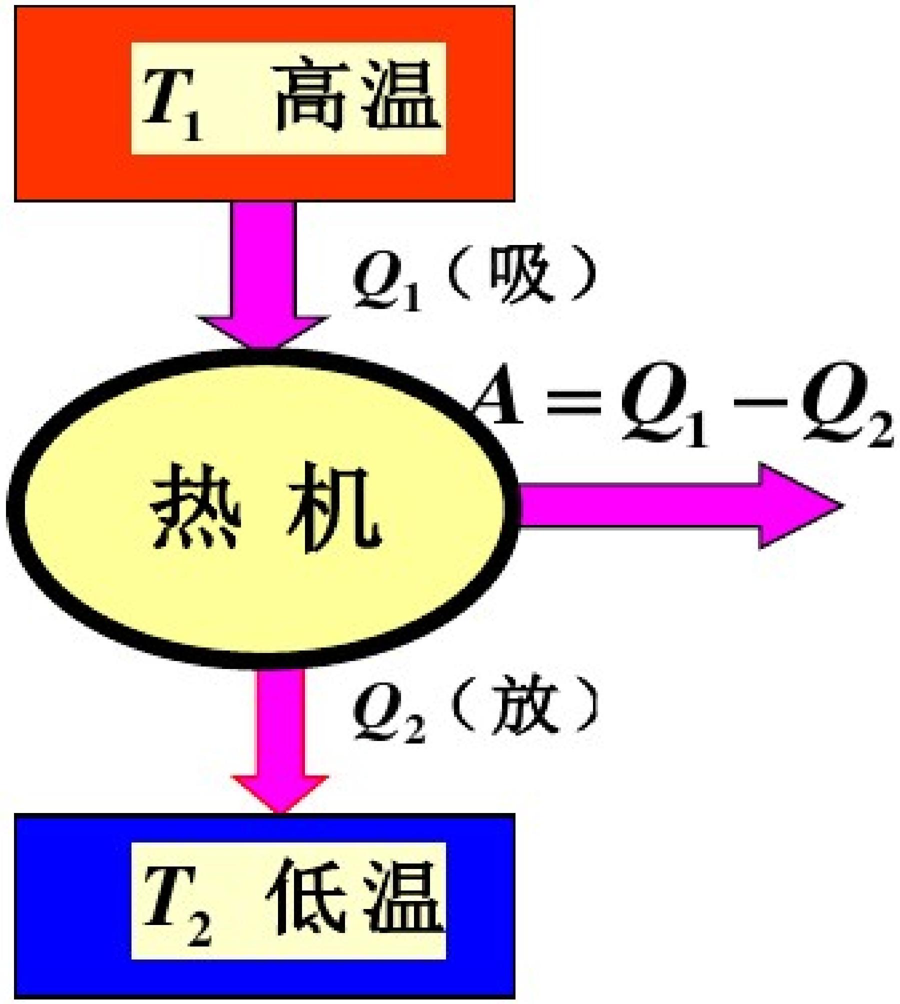
热机效率与制冷系数

注意：$Q_{吸}=|Q_{吸}|>0$

$Q_{放}=|Q_{放}|>0$

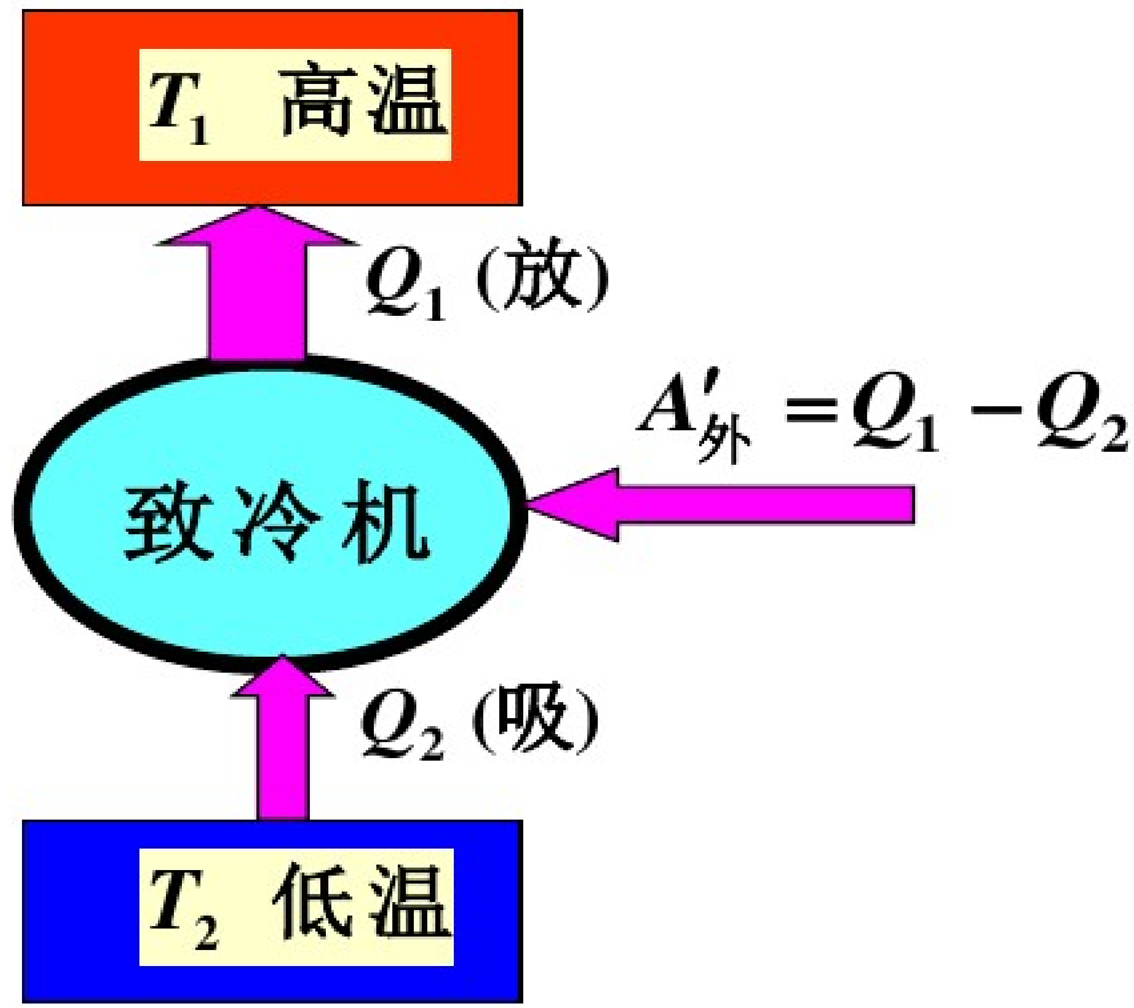
(1) 热机的效率

$$\eta=\frac{A}{Q_{吸}}=\frac{Q_{吸}-Q_{放}}{Q_{吸}}=1-\frac{Q_{放}}{Q_{吸}}$$



(2) 制冷系数

$$\omega=\frac{Q_{吸}}{A'}=\frac{Q_{吸}}{Q_{放}-Q_{吸}}=\frac{1}{\dfrac{Q_{放}}{Q_{吸}}-1}$$



$$\eta_{卡诺}=1-\frac{Q_{放}}{Q_{吸}}=1-\frac{Q_2}{Q_1}=1-\frac{T_2}{T_1}<1$$

$$w_{卡诺}=\frac{Q_{吸}}{Q_{放}-Q_{吸}}=\frac{Q_2}{Q_1-Q_2}=\frac{T_2}{T_1-T_2}$$

热力学第二定律

1、克劳修斯表述：

热量不能自动地从低温物体传向高温物体。

2、开尔文表述：

不可能制成一种循环动作的热机，只从单一的热源吸收热量，使之完全变成有用的功，而周围其他物体不发生任何变化。

——即 第二类永动机（单源热机）不可实现

熵 与 熵增加原理

$$S = k\ln\Omega$$

- 熵是态函数
- 熵的微观意义——

  系统内分子热运动无序性的一种量度。

熵增加原理——

孤立系统内部所发生的过程总是朝着熵增加的方向进行。

振动与波

1、简谐振动

$$F=-kx \quad (1)$$

$$\ddot{x}+\omega^2 x=0 \quad (2)$$

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \quad (3)$$

谐振子：$\omega=\sqrt{\dfrac{k}{m}}$

单摆：$\omega=\sqrt{\dfrac{g}{l}}$

复摆：$\omega=\sqrt{\dfrac{mgl}{J}}$

2、旋转矢量法

[例1] 一谐振的位移时间曲线如图所示，试写出其运动方程.

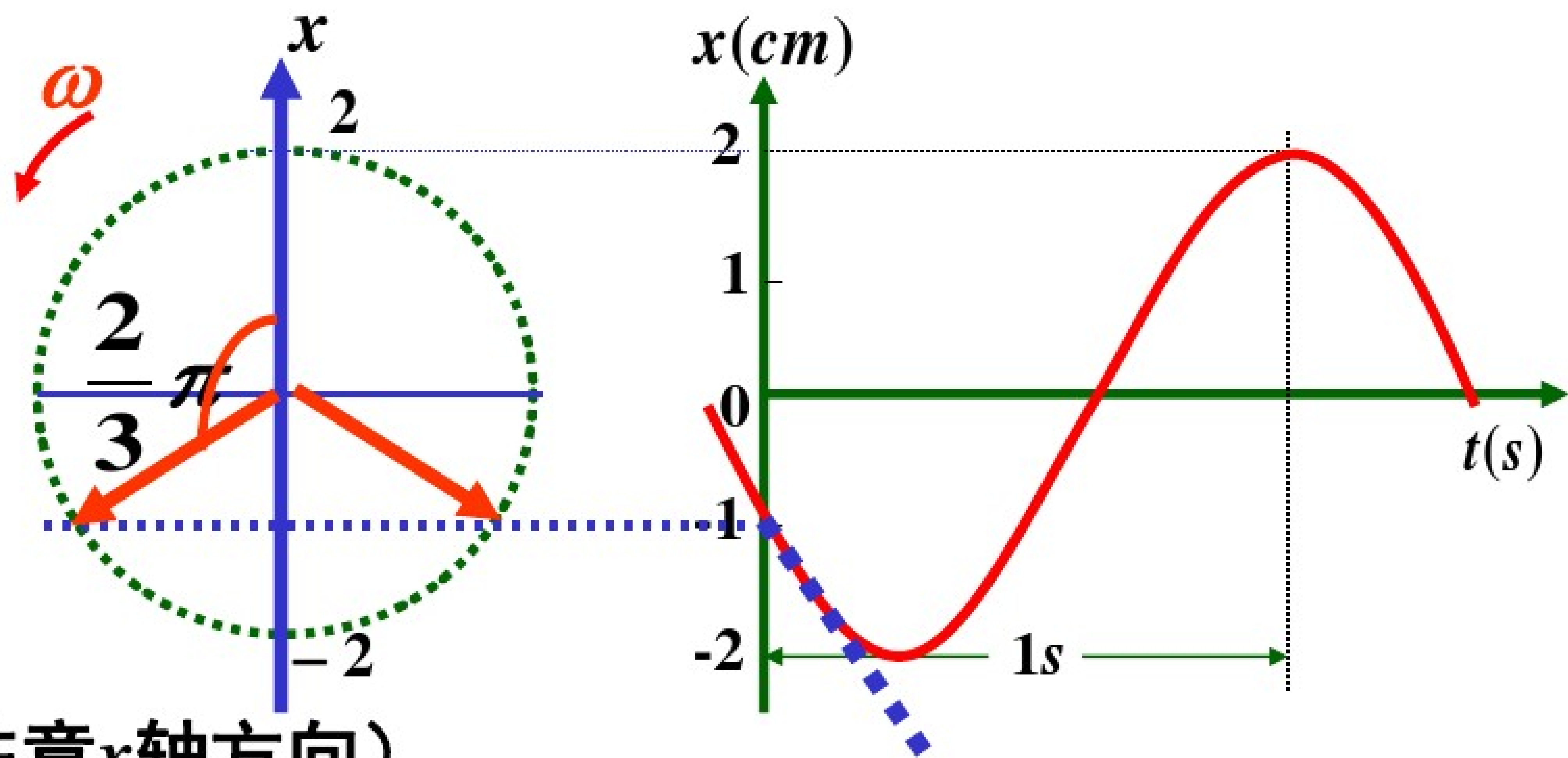
解：设运动方程为 $x = A\cos(\omega t + \varphi)$

由图知：

$A = 2cm$

$t = 0, \quad x_0 = -1$

$t = 1s, \quad x = A$



由旋转矢量图：（注意x轴方向）

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

$$A = A\cos(\omega \times 1 + \varphi) \qquad \therefore \omega + \varphi = 2\pi$$

$$\therefore \omega = 2\pi - \varphi = 2\pi - \frac{2\pi}{3} = \frac{4}{3}\pi \qquad \therefore x = 2\cos(\frac{4}{3}\pi t + \frac{2}{3}\pi) \quad (cm)$$

3、谐振动的合成

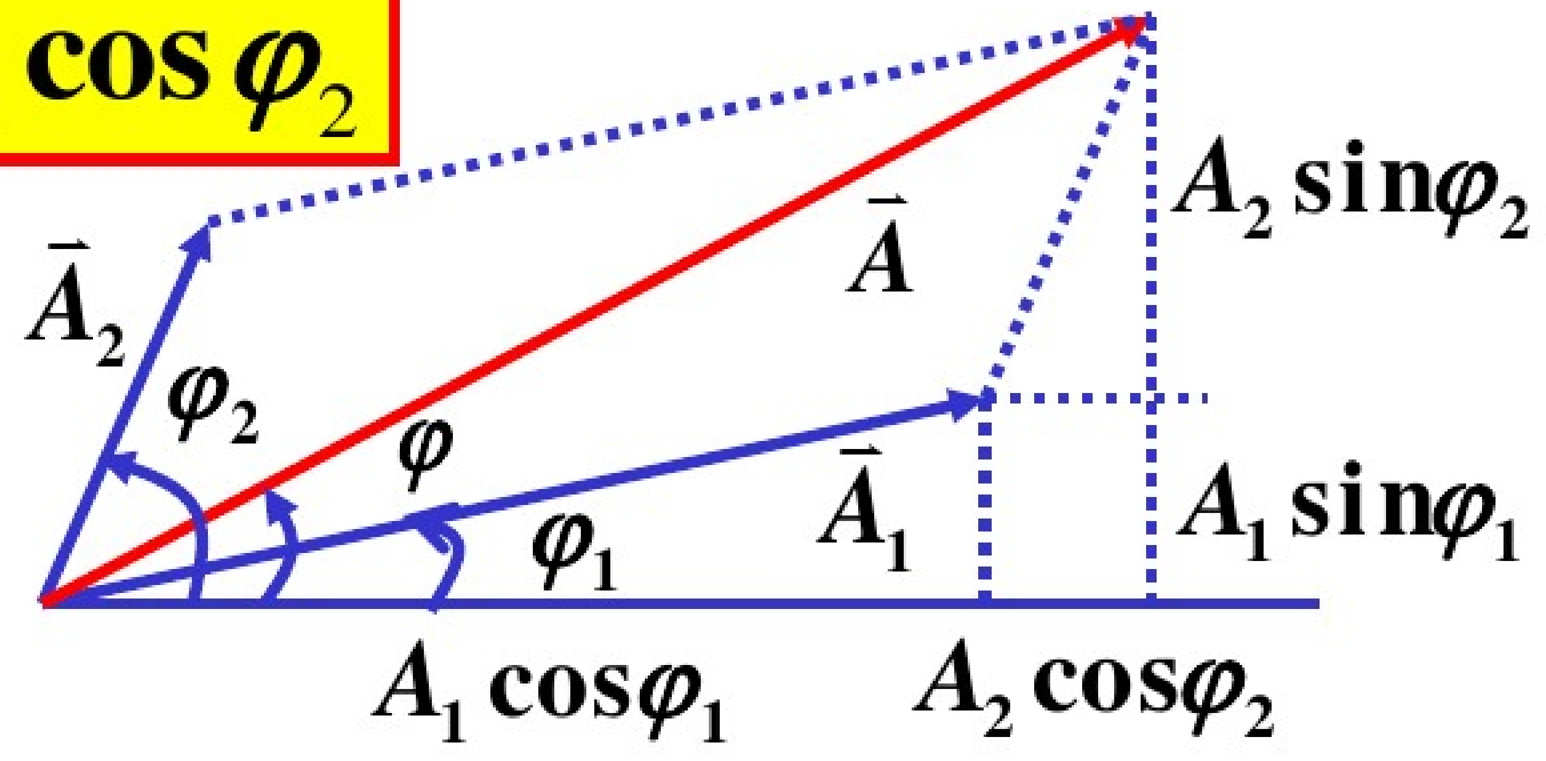
重点——同振动方向，同频率的谐振动合成

$$x_1 = A_1\cos(\omega t+\varphi_1),\quad x_2 = A_2\cos(\omega t+\varphi_2)$$

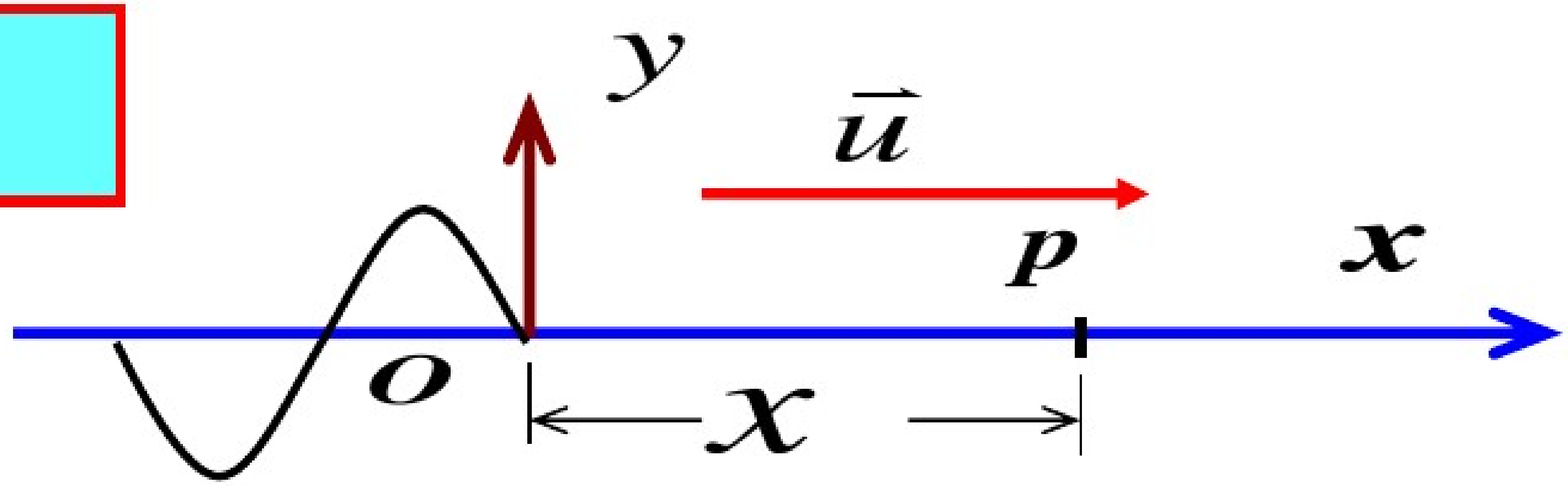
$$x = x_1 + x_2 = A\cos(\omega t+\varphi)$$

$$\boxed{A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)}}$$

$$\boxed{\tan\varphi=\frac{A_1\sin\varphi_1+A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1+A_2\cos\varphi_2}}$$



4、波动



$$y(0,t) = A\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$y(x,t) = y(0,t-\Delta t) = A\cos[\omega(t-\frac{x}{u}) + \varphi_0]$$

$$y(x,t) = A\cos[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) + \varphi_0]$$

5、行波能量特点:

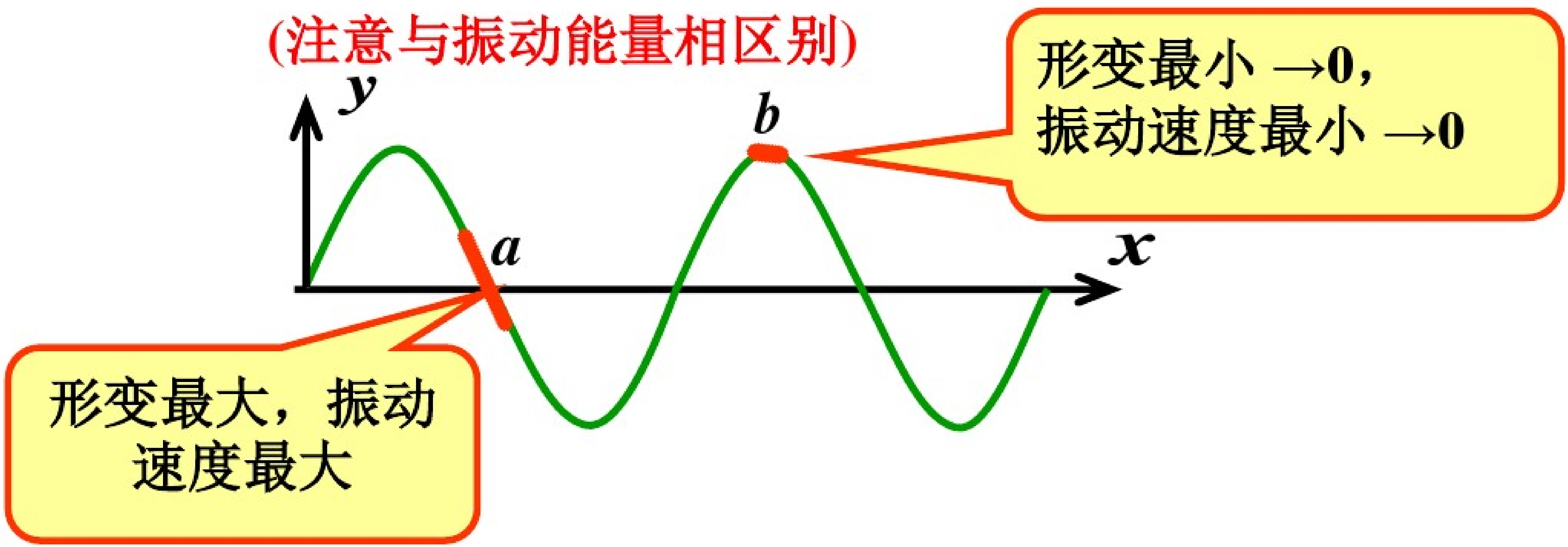
$$\Delta E_k = \frac{1}{2}\mu\Delta x A^2\omega^2 \sin^2[\omega(t-\frac{x}{u})+\phi_0]$$

$$\Delta E_p = \frac{1}{2}\mu\Delta x A^2\omega^2 \sin^2[\omega(t-\frac{x}{u})+\phi_0]$$

动能、势能的相位、大小均相同。

动能、势能 同时达到最大值、最小值。

(注意与振动能量相区别)



6、相干条件：

♣（1）同频率

♣（2）同振动方向

♣（3）同相位 或 相位差恒定

$$\boxed{A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi}$$

重点

干涉加强：

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \pm 2k\pi$$

$$A = A_{\max} = A_1 + A_2$$

干涉减弱：

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \pm(2k+1)\pi$$

$$A = A_{\min} = |A_1 - A_2|$$

当 $\varphi_{20}=\varphi_{10}$

相干条件为：

重点

相长干涉

$$\delta = r_2 - r_1 = \pm k\lambda, \quad k = 0,1,2,3,\ldots$$

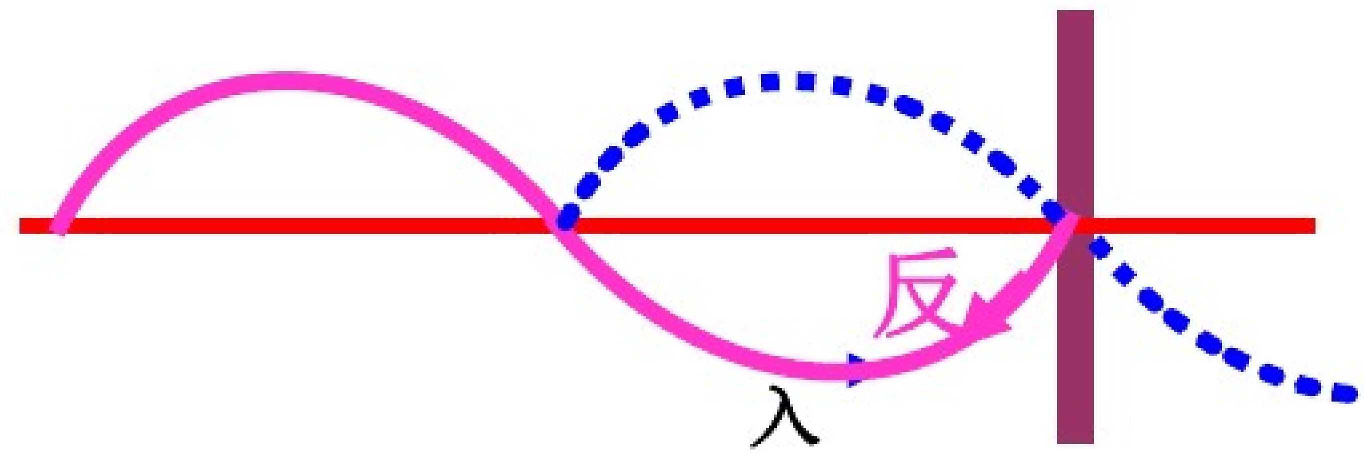
相消干涉

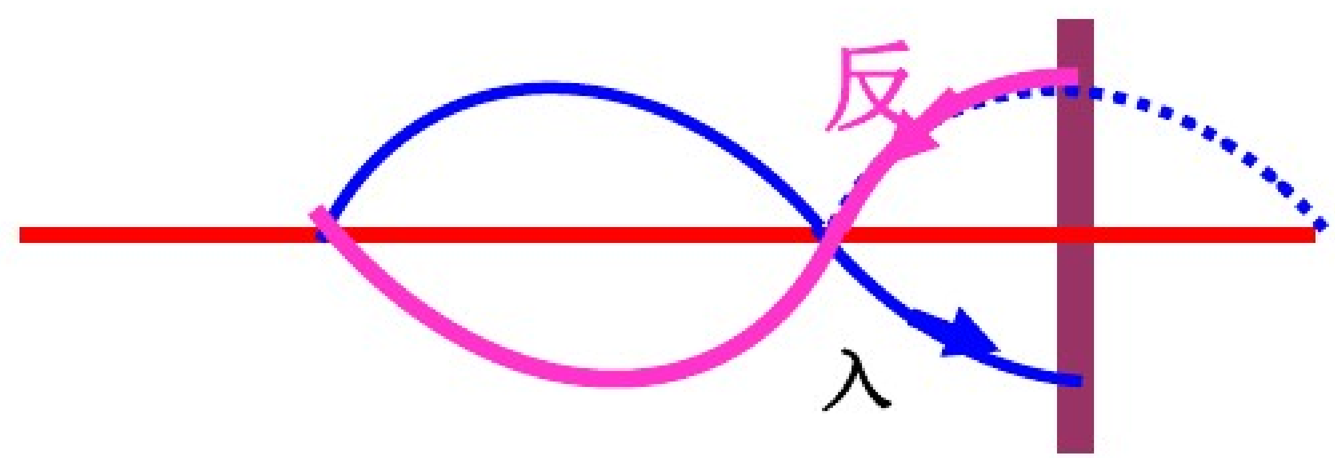
$$\delta = r_2 - r_1 = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}, \quad k = 0,1,2,3,\ldots$$

δ为波程差

7、半波损失：

入射波在反射时发生反相的现象称为半波损失。

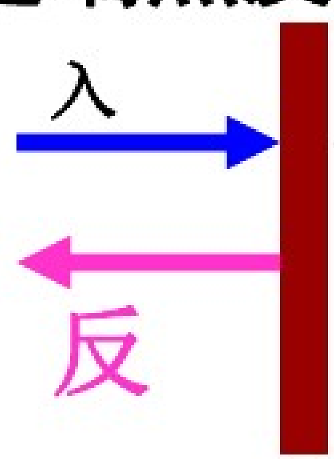




★★注意：

有半波损失的情况：

（1）固定端点反射时；

（2）疏 

密

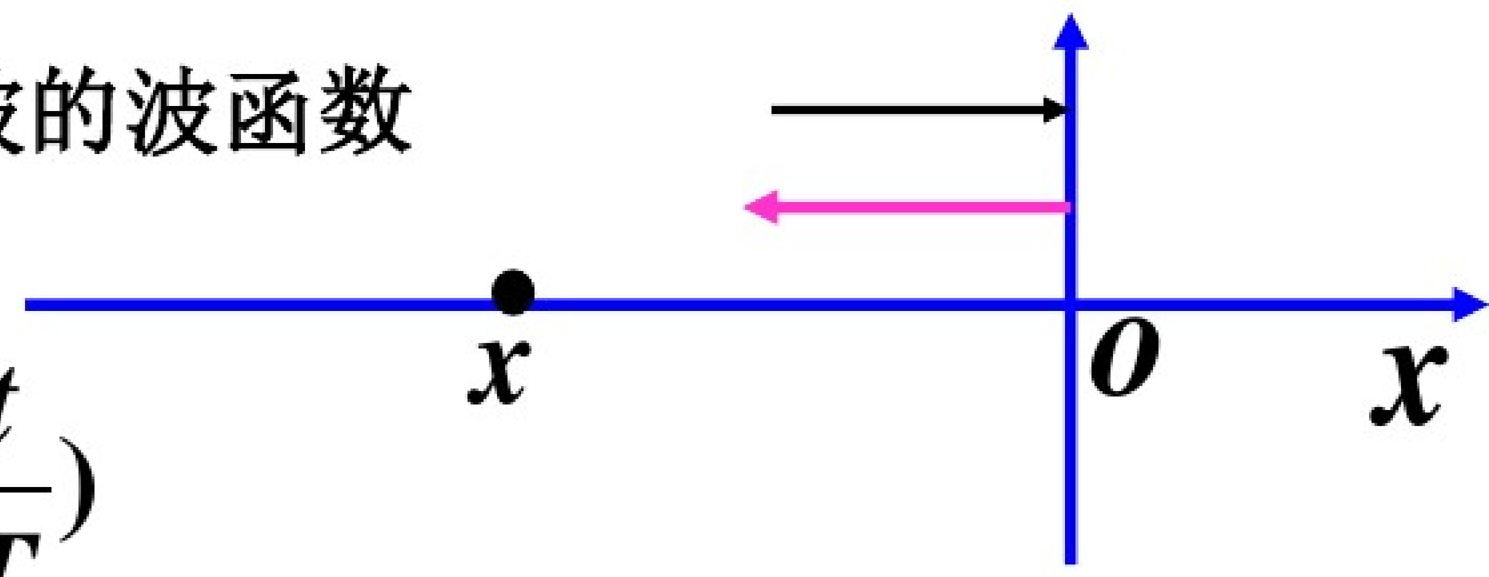
8、驻波

[例题] 一列沿 x 轴方向传播的入射波的波函数为

$y = A\cos 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})$,在$x$=0处反射,反射点为一节点

求: (1)反射波的波函数. (2)合成波的波函数

(3)波腹,波节位置坐标.



解:(1) $y_1(0,t) = A\cos(2\pi\frac{t}{T})$

$y_2(0,t) = A\cos(2\pi\frac{t}{T} - \pi)$ (节点, 半波损失

$y_2(x,t) = y_2(0,t-\Delta t) = y_2(0,t-\frac{|x|}{u}) = y_2(0,t+\frac{x}{u})$

$$\boxed{y_2(x,t) = A\cos[2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}) - \pi]}$$

(2)根据波的叠加原理,合成波的波函数为:

$$y = y_1 + y_2$$

$$= A\cos[2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})] + A\cos[2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}) - \pi]$$

$$= 2A\cos(2\pi\frac{x}{\lambda} - \frac{\pi}{2})\cos(2\pi\frac{t}{T} - \frac{\pi}{2})$$

$$= 2A\sin(2\pi\frac{x}{\lambda})\sin(2\pi\frac{t}{T})$$

(3)形成波腹的各点,振幅最大,即: $\boxed{y = 2A\sin(2\pi\frac{x}{\lambda})\sin(2\pi\frac{t}{T})}$

$$\left|\sin 2\pi\frac{x}{\lambda}\right| = 1$$ 亦即: $$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm(2k+1)\frac{\pi}{2}$$

故波腹点坐标为: $$x_{腹} = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{4}, \quad k = 0,1,2,\cdots$$

形成波节各点, 振幅最小, 即: $$\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = 0$$

即: $$2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm k\pi, \quad x_{节} = \pm k\frac{\lambda}{2} \quad k = 0,1,2,\cdots$$

因在 $x = 0$ 点反射, 所以 x 只取负值及零:

$$\boxed{x_{腹} = -(2k+1)\frac{\lambda}{4},} \quad \boxed{x_{节} = -k\frac{\lambda}{2}} \quad k = 0,1,2,\cdots$$

9、能量密度：

$$w=\rho\omega^2 A^2 \sin^2\left[\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)+\varphi_0\right]$$

10、平均能量密度 $\overline{w}=\frac{1}{2}\rho A^2\omega^2$

11、平均能流密度（波的强度）：

$$\boxed{I=u\overline{w}=\frac{1}{2}\rho A^2\omega^2 u}$$

能流密度是单位时间内通过垂直于波速方向的单位截面的平均能量。

12、多普勒效应

$$\nu_R = \frac{u \pm V_R}{(u \mp V_s)} \nu_s$$

光学

★★ 相位差与光程差的关系：

$$\boxed{\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta}$$

1、杨氏双缝干涉

明暗纹位置

$$(1)\quad \delta = \frac{nd}{D}x = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{明} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \cdots)$$

$$(2)\quad x = \begin{cases} \pm \dfrac{D}{nd}k\lambda & \text{明} \\ \pm \dfrac{D}{nd}(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \cdots)$$

$k = 0,\ x = 0$ 为中央明纹（零级）中心的位置

零级暗纹有两条，分别位于中央明纹两侧。

(3) 相邻明(暗)纹间距：

$$\boxed{\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{D}{nd}\lambda}$$

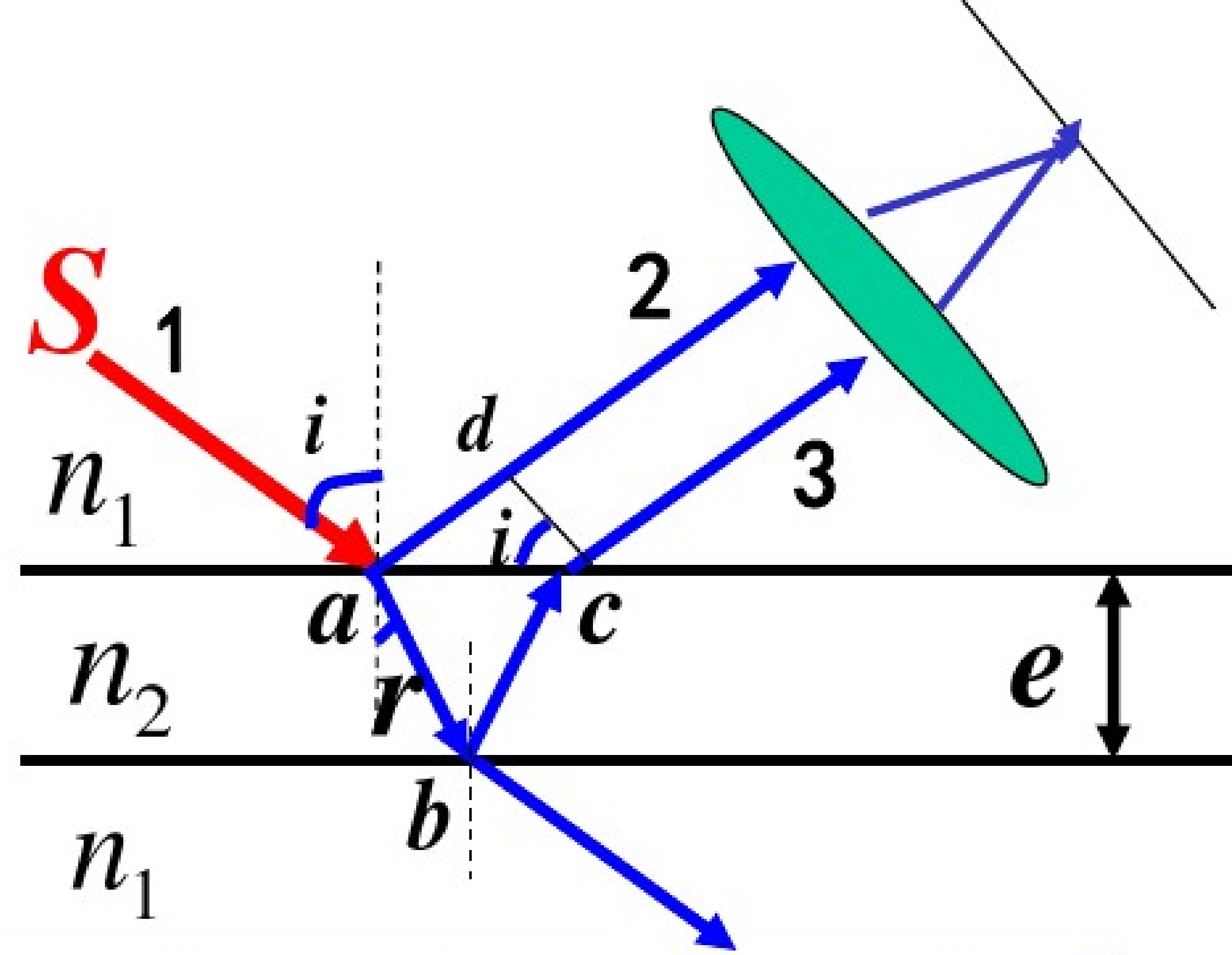
λ 大的(红光)间距大，条纹稀

λ 小的(紫光)间距小，条纹密

(4)一般情况：

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \begin{cases} \pm 2k\pi & \text{明} \\ \pm(2k+1)\pi & \text{暗} \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \cdots)$$

2、薄膜干涉（等倾）



（1）明暗纹条件：

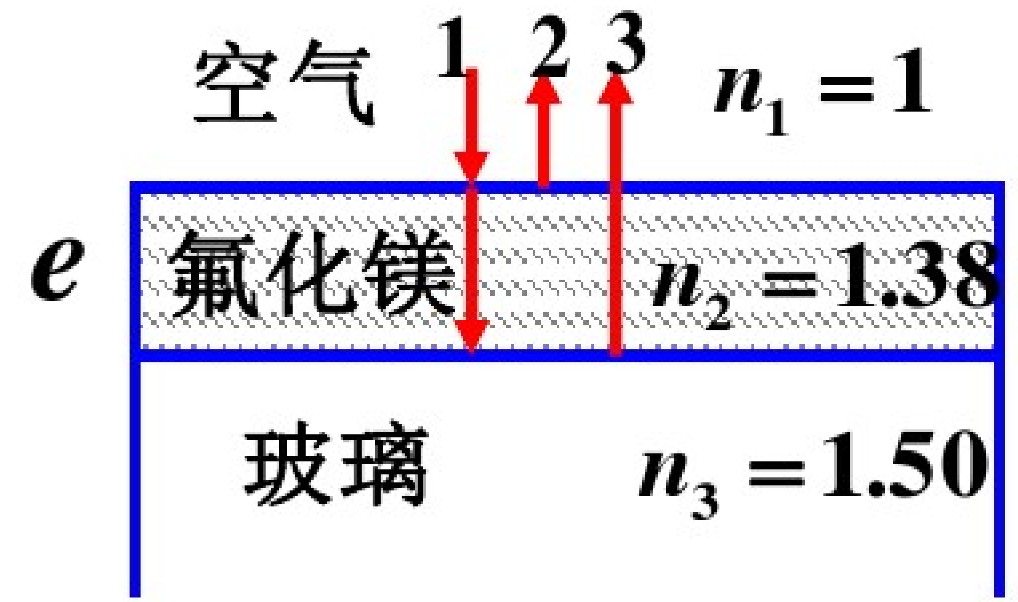
$$\delta=\underbrace{2e\sqrt{n_2^2-n_1^2\sin^2 i}+\lambda/2}_{\text{恒正}}=\begin{cases}k\lambda & (k=1,2,\cdots)\text{明}\\(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k=0,1,\cdots)\text{暗}\end{cases}$$

（2）增反与增透：

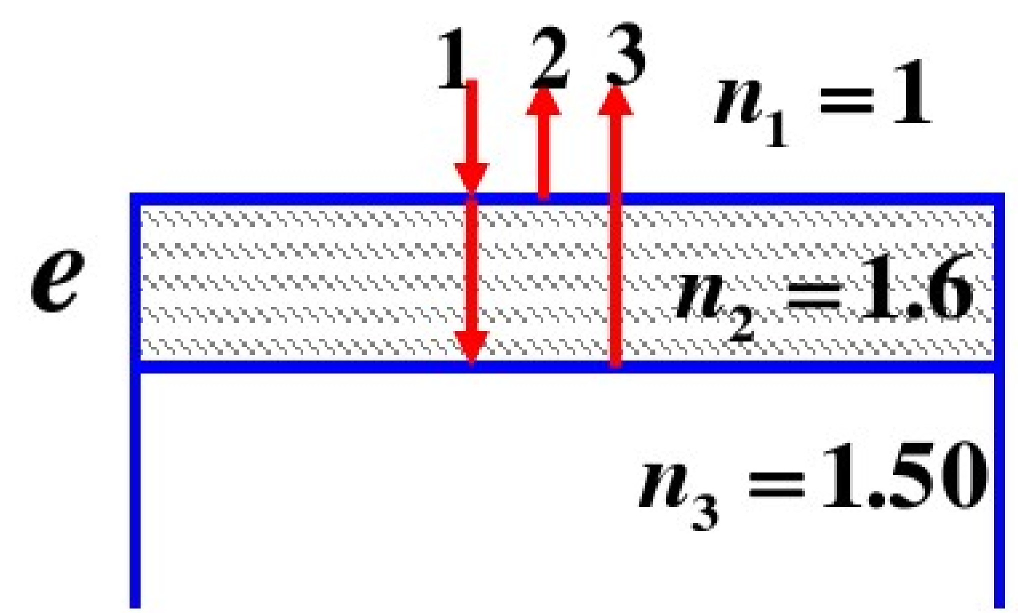
$$\begin{cases}\text{增反：}\delta=k\lambda\\ \text{增透：}\delta=(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}\end{cases}$$

注意：

- （1）增反膜与增透膜是相对而言的，是相对某些特定λ而言的。对某λ_1增反，而可能同时对某λ_2增透。
- （2）光程差δ要视具体 n_1、n_2、n_3 情况 而计算出。
- [例 1]：（如图）
- 当 $n_1 < n_2 < n_3$ 时，$\delta = 2n_2 e$ ；

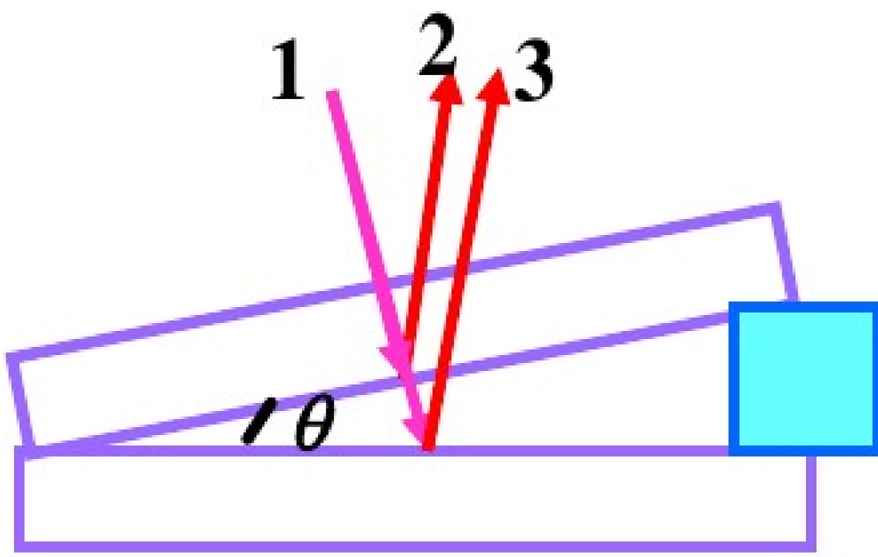


- [例 2]：（如图）
- 当 $n_1 < n_3 < n_2$ 时，$\delta = 2n_2 e + \dfrac{\lambda}{2}$



这时反射线 2 比 1 有半波损失，
反射线 3 比 1 无半波损失，
于是 2 比 3 有半波损失。

3、劈尖干涉 （等厚）

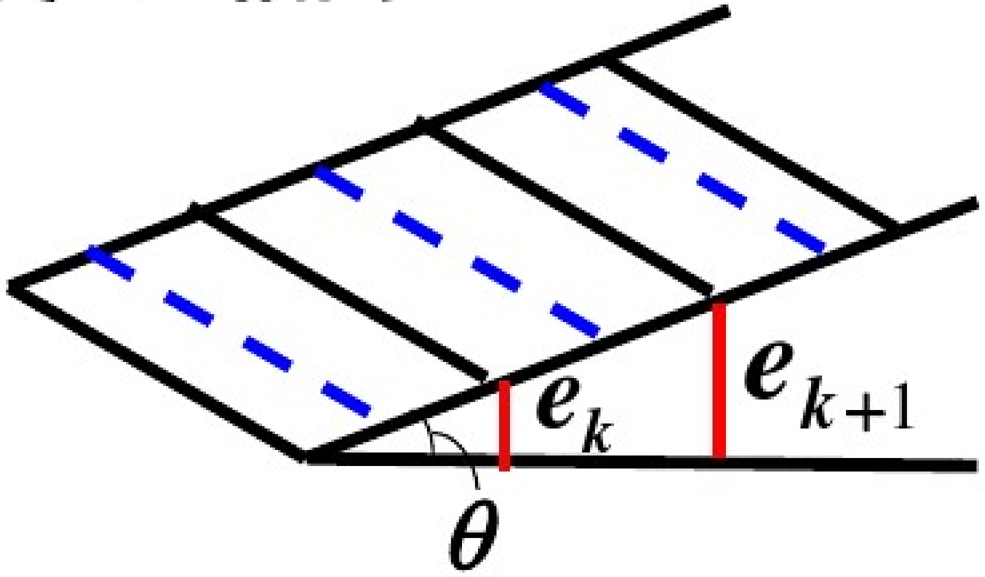


①、明暗纹条件：（设空气膜n=1）

$$\delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & (k = 1,2,\cdots) \ \text{明} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0,1,\cdots) \ \text{暗} \end{cases}$$

②、等厚干涉：同级条纹（k 相同）厚度 e 相同：

$$e = \begin{cases} (2k-1)\dfrac{\lambda}{4} & (k = 1,2,\cdots) \ \text{明} \\ k\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0,1,\cdots) \ \text{暗} \end{cases}$$



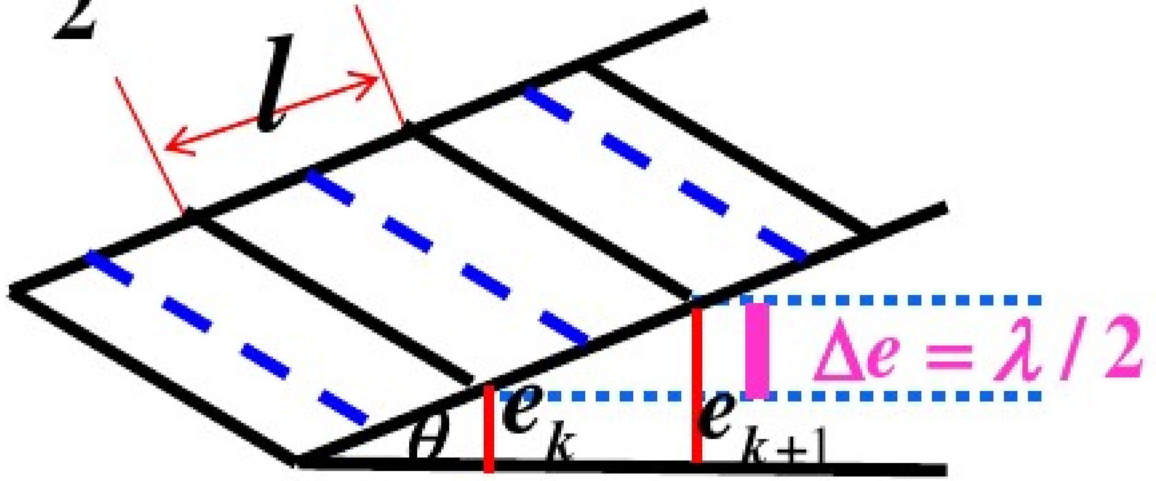
③、棱边为零级暗纹—— $e = 0, \quad \delta = \dfrac{\lambda}{2}, \quad k = 0$

④、相邻两明(暗)纹间厚度差:

$$e=\begin{cases}(2k-1)\dfrac{\lambda}{4} & (k=1,2,\cdots)\text{明}\\ k\dfrac{\lambda}{2} & (k=0,1,\cdots)\text{暗}\end{cases}$$

$$\boxed{\Delta e=e_{k+1}-e_k=\frac{\lambda}{2}}$$

⑤、相邻两明(暗)纹的间距:



$$\boxed{l=\frac{\Delta e}{\sin\theta}=\frac{\lambda}{2\sin\theta}\approx\frac{\lambda}{2\theta}}$$

l = 常数，所以条纹等距分布。

$$\begin{cases}\theta\text{越小}, l\text{越大，条纹越疏}\\ \theta\text{越大}, l\text{越小，条纹越密}\end{cases}$$

当 θ 逐渐变大时，条纹由疏变密，向棱边移动。

当 θ 逐渐变小时，条纹由密变疏，远离棱边移动，扩展。

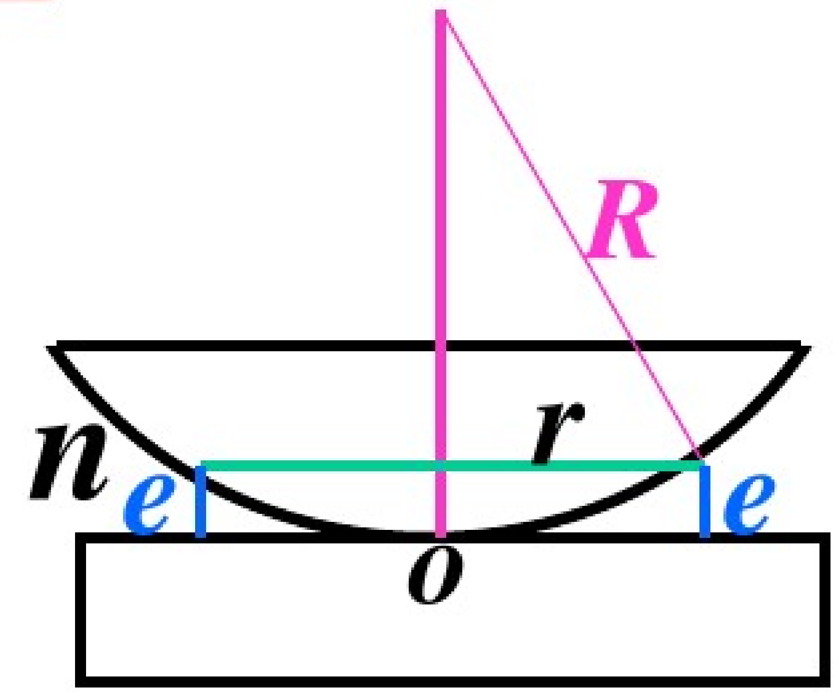
⑥、当劈尖不是空气，而是 $n>1$ 的媒质时:

$$\boxed{\delta=2ne+\frac{\lambda}{2},\quad \Delta e=\frac{\lambda}{2n},\quad l=\frac{\lambda}{2n\sin\theta}}$$

4、牛顿环（等效于一圈劈尖）

①光程差和明暗条纹条件：

$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & (k = 1,2,\cdots) \quad 明 \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0,1,\cdots) \quad 暗 \end{cases}$$



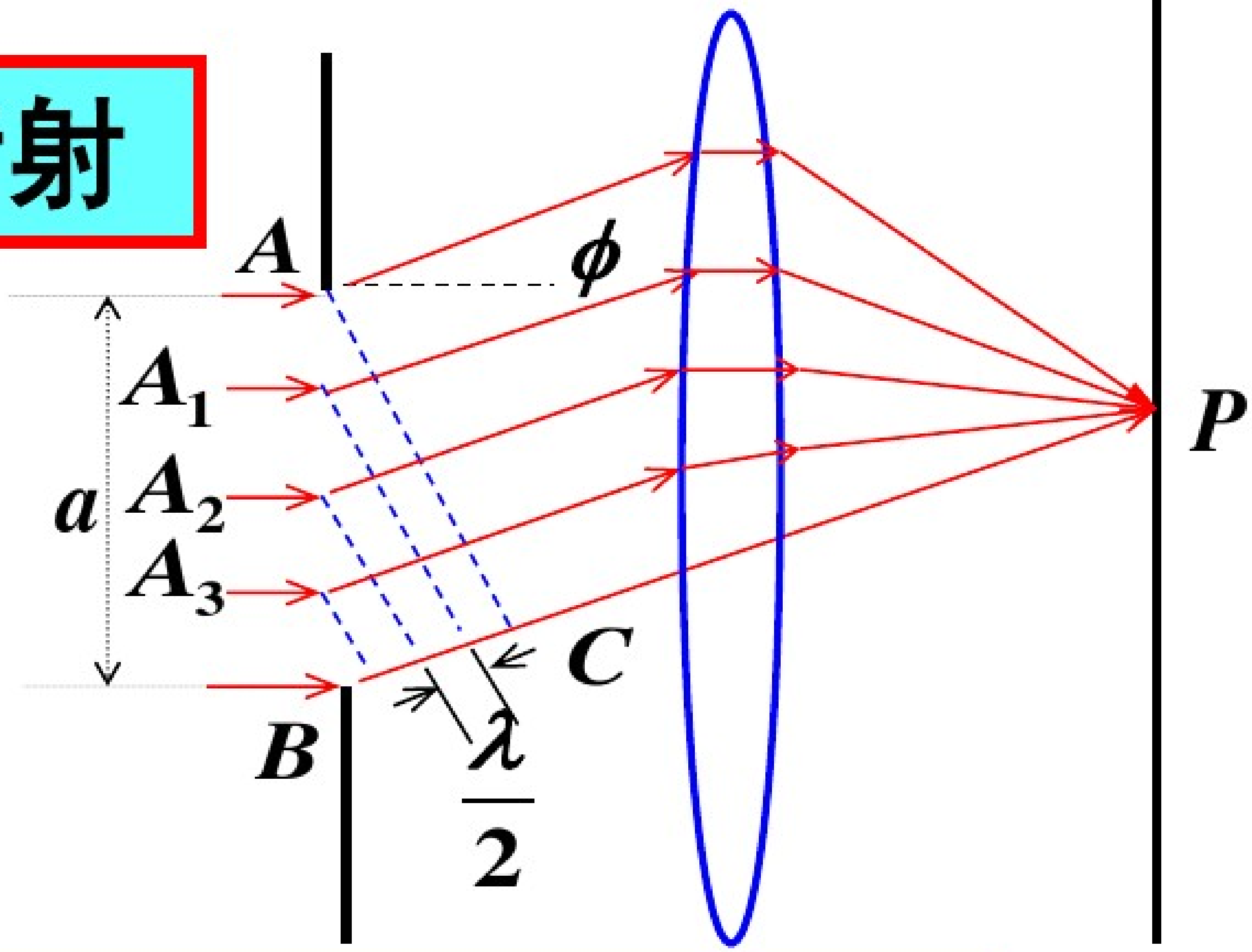
②中央（$e = 0$）为零级暗纹（$k = 0$，$r = 0$）

③ $e = r^2 / 2R$

④牛顿环半径

$$r = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{(2k-1)R\lambda}{2n}} & 明 \quad (k = 1,2,3\cdots) \\ \sqrt{\dfrac{kR\lambda}{n}} & 暗 \quad (k = 0,1,2,3\cdots) \end{cases}$$

5、单缝夫琅禾费衍射



明暗纹条件：

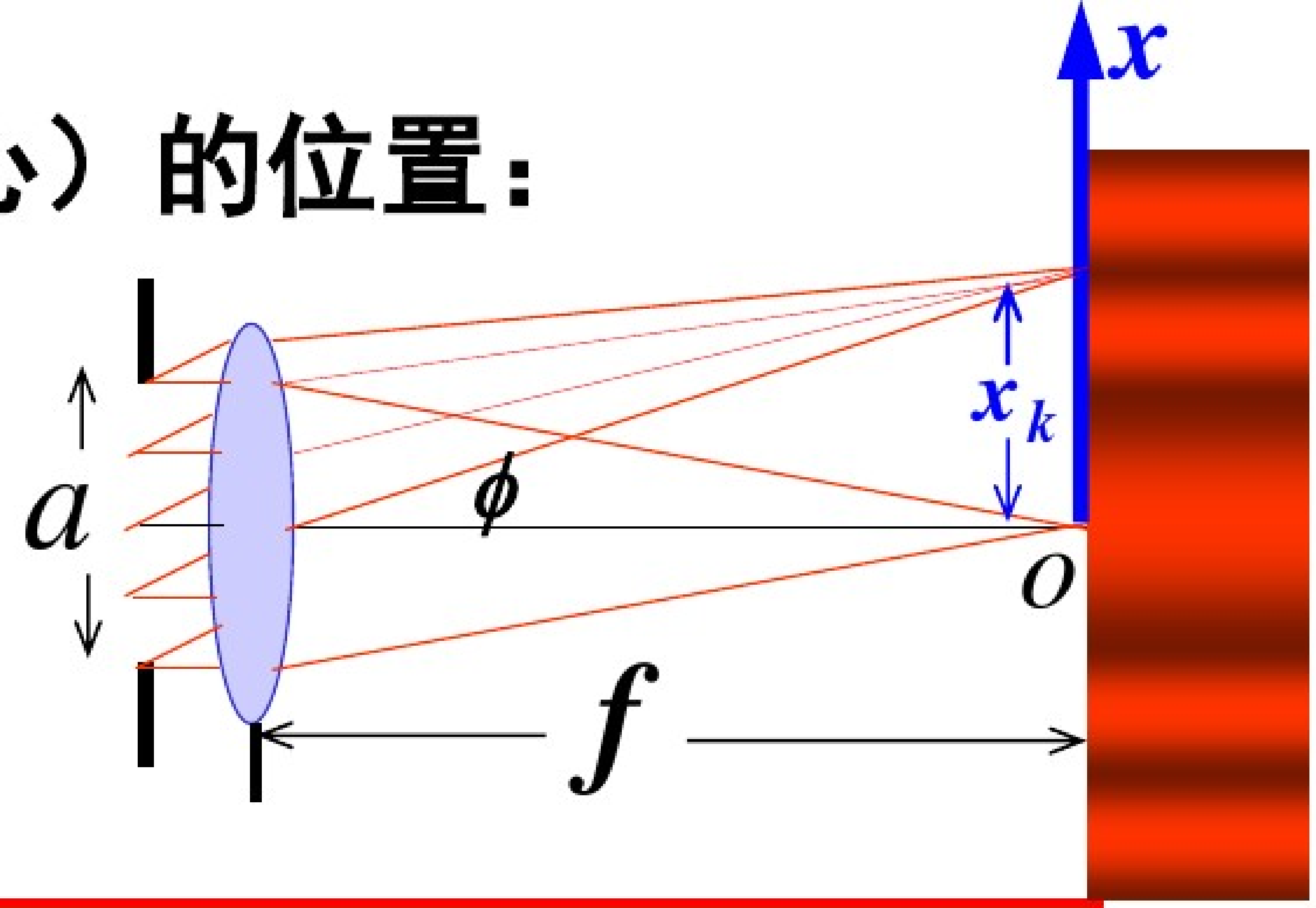
①

$$\boxed{a\sin\phi = \pm 2k\frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda \quad (k = 1,2,\cdots) \quad \text{暗}}$$

$$\boxed{a\sin\phi = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 1,2,\cdots) \quad \text{明}}$$

②中央为零级明纹　$\varphi = 0,\ \delta = a\sin\varphi = 0,\ N = 0$

③ 各级条纹（中心）的位置：

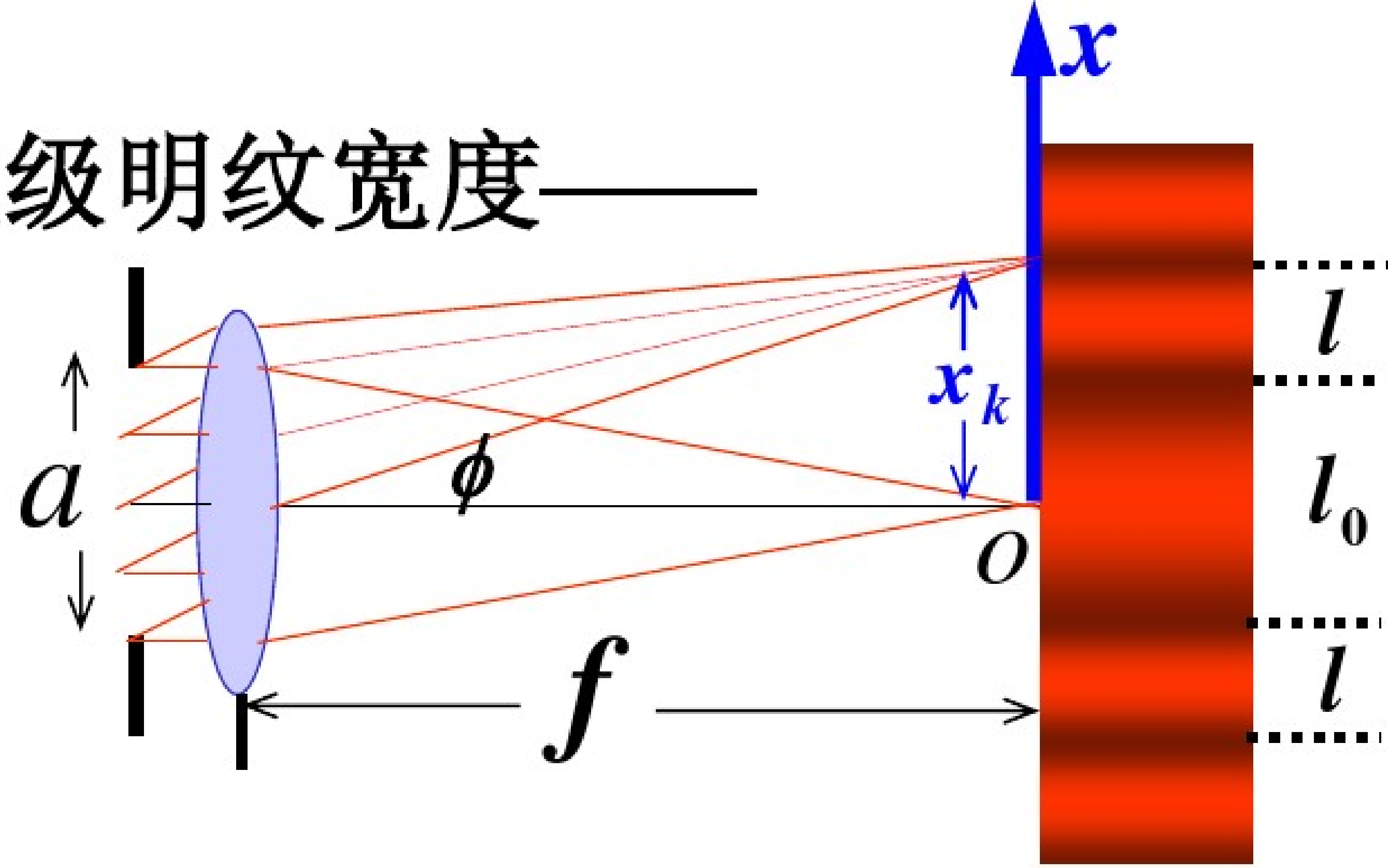


(1) 暗纹：$x_k = \pm k \dfrac{f}{a} \lambda \qquad (k = 1, 2, \cdots)$

(2) 明纹：$x_k = \pm(2k+1) \dfrac{f}{2a} \lambda \qquad (k = 1, 2, \cdots)$

④ 中央明纹及各次级明纹宽度——

$$l_0 = 2\frac{\lambda}{a}f = 2l$$



6、圆孔衍射

$$\sin\theta_0 = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

7、光栅衍射

① 光栅方程

$\delta = (a+b)\sin\phi = \pm k\lambda \quad (k = 0,1,2,\cdots)$ 明（主极大

② 能观察到的主极大的最大级数

$$\boxed{k < \frac{a+b}{\lambda}}$$

③ 谱线缺级级数为：

$$\boxed{k = \frac{a+b}{a}k'}$$

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

8、布喇格公式

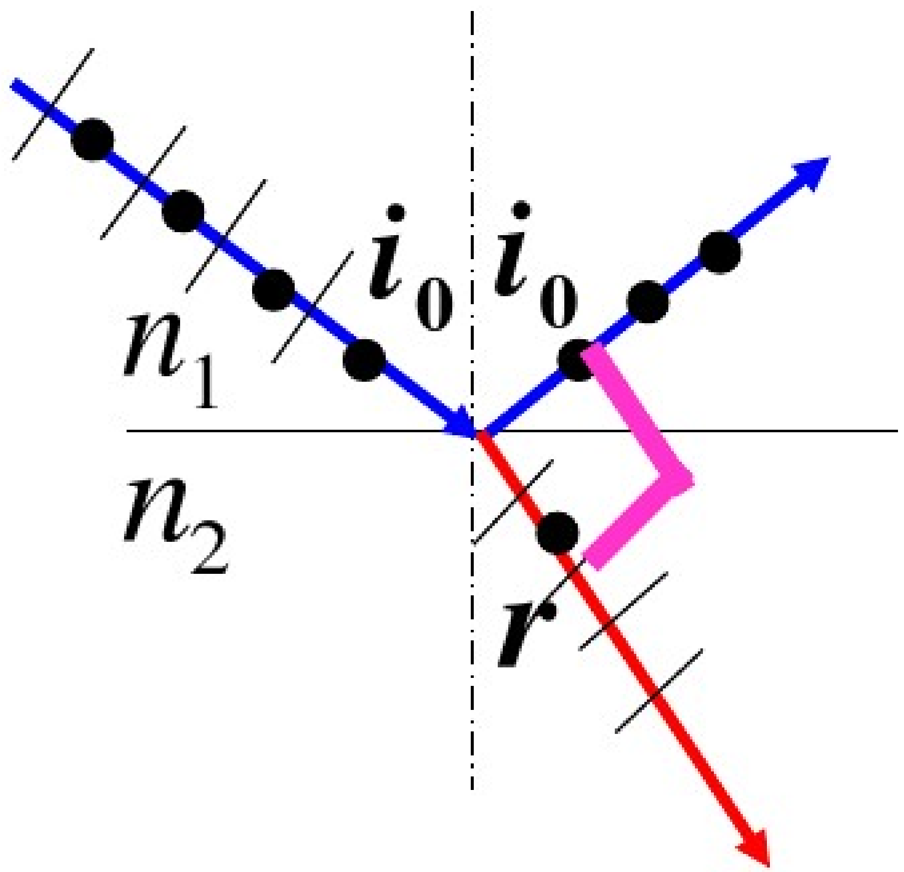
$$2d\sin\theta = k\lambda$$

9、马吕斯定律

$$I = I_0\cos^2\theta$$

10、布儒斯特定律

$$\tan i_0 = \frac{n_2}{n_1}$$



$$i_0 + r = 90^\circ$$

反射光线与折射光线垂直!

双折射：

遵守折射定律的折射光——寻常光（o光）。

不遵守折射定律的折射光——非常光（ e 光 ）。

旋光现象