§3 惠更斯原理 波的衍射

一、惠更斯原理

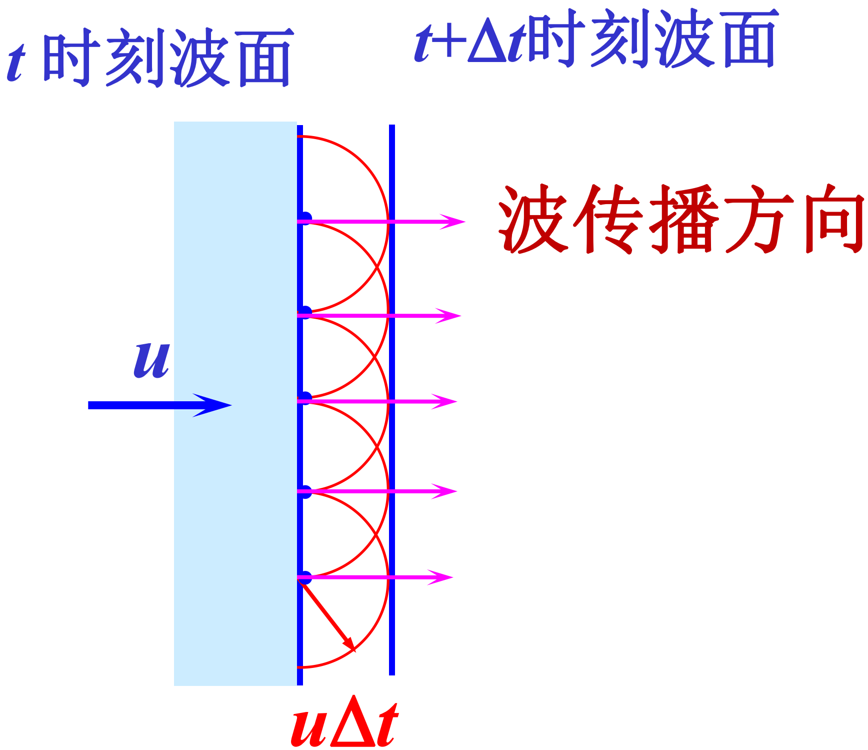
➢ 1678年惠更斯提出的惠更斯原理，利用简洁的作图法定性解决了波的传播问题。

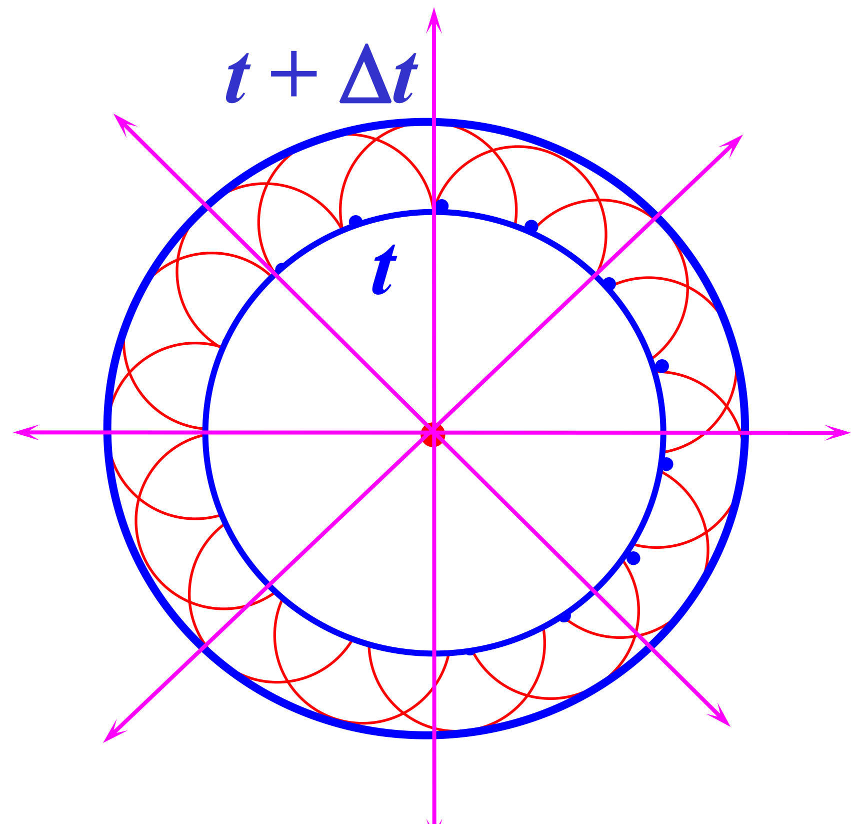
波动传播到的任一点都可以看成是产生次级子波的波源，在其后的某一时刻，这些次级子波的包迹（包络线）就决定了新的波阵面。

➢ 在研究光的衍射等问题时，菲涅尔利用叠加的概念对惠更斯原理做了重要发展，称惠更斯—菲涅尔原理。

惠更斯原理：

波动传播到的任一点都可以看成是产生次级子波的波源，在其后的某一时刻，这些次级子波的包迹（包络线）就决定了新的波阵面。

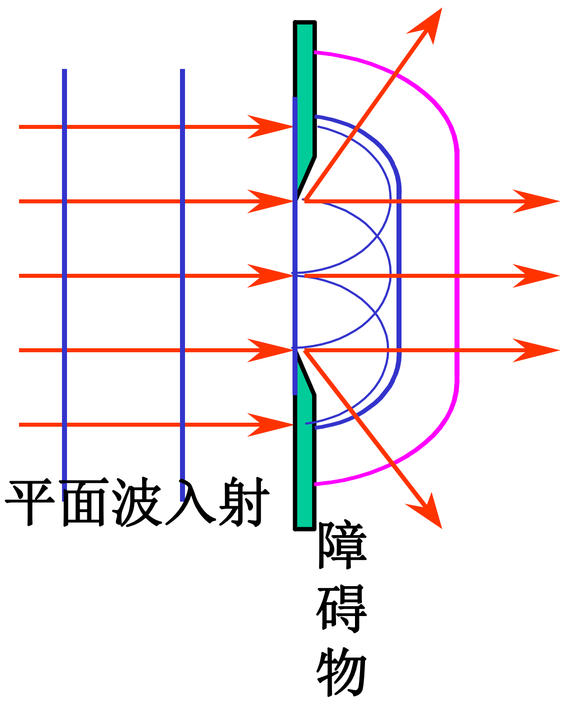


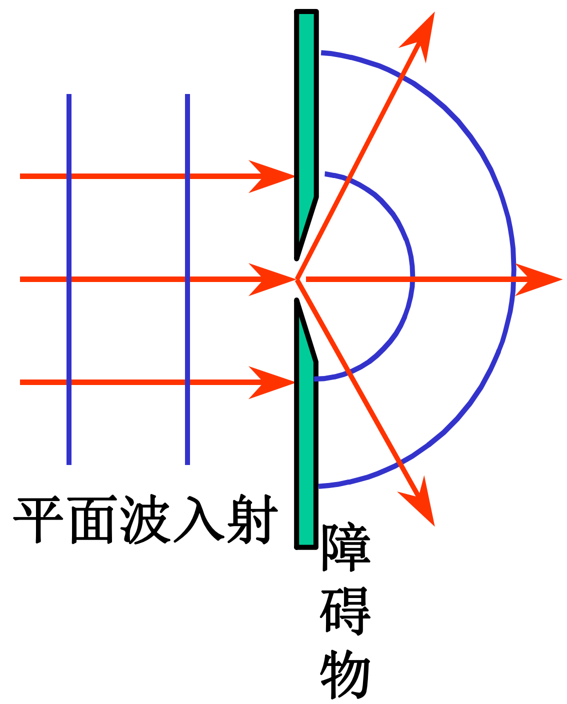


二、波的衍射

衍射——波传播遇到障碍物时，发生偏离原来直线传播方向的现象。（波面破损或畸变）

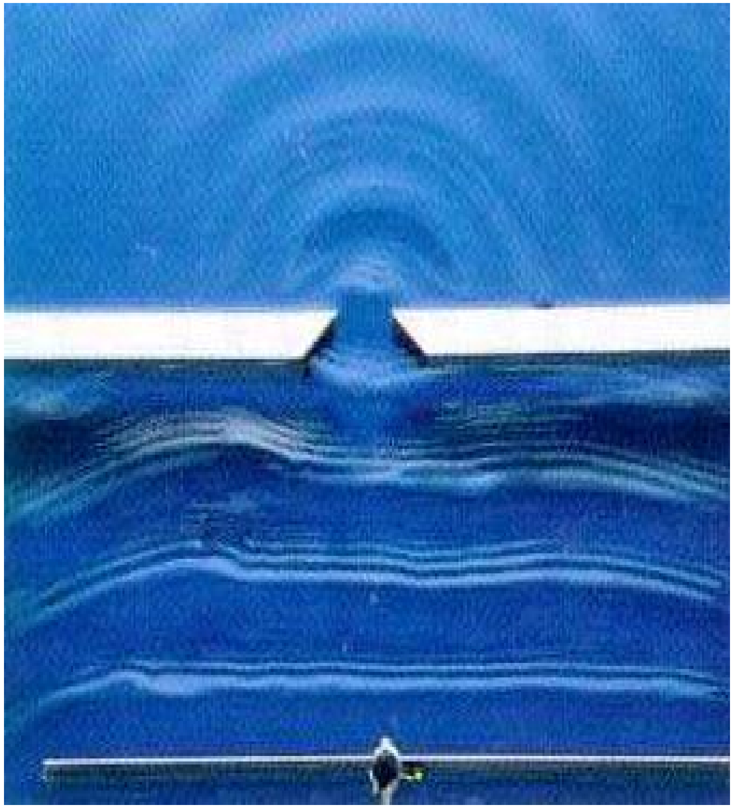
- 衍射是波动的直接证据之一
- 一切波动都具有衍射现象



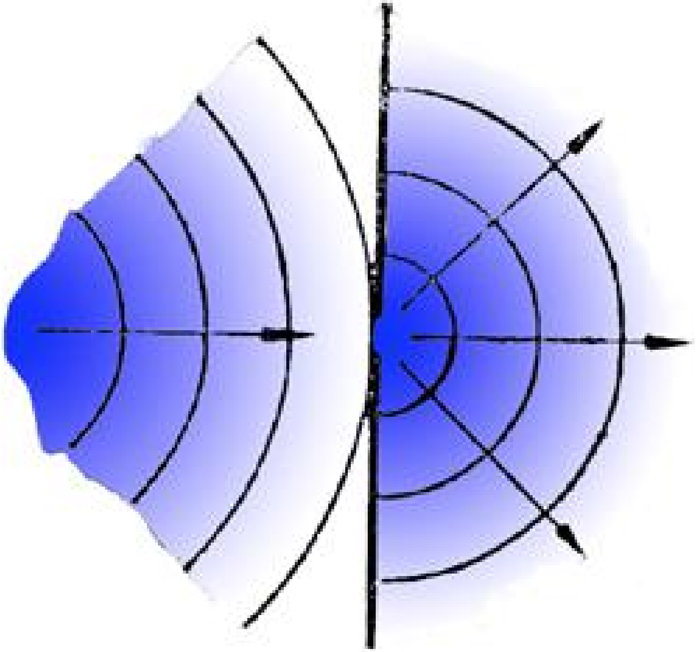


平面波经小孔衍射成球面波

衍射是否明显决定于障碍物（包括孔、缝）的线度与波长的比较。对一定波长的波： 线度小的障碍物衍射现象明显； 线度大的障碍物衍射现象不明显。



水波通过窄缝时的衍射



障碍物的小孔成为新波源

§4 波的干涉

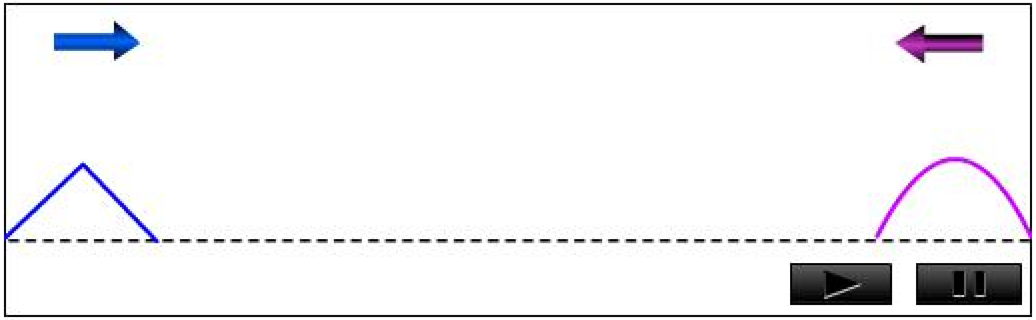
一. 波的独立传播原理与波的叠加原理

波的独立传播原理：

——几列波同时在一介质中传播，每列波都将独立地保持自己原有的特性传播，就象在各自的路程中，没有遇到其它波一样，这称为波传播的独立性。

波的叠加原理：

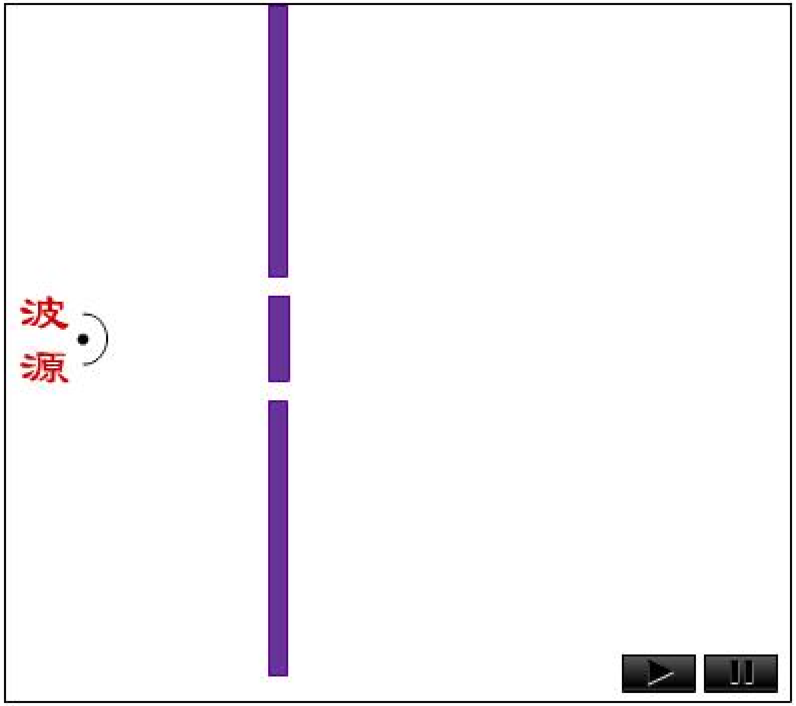
——在波相遇的区域内，任一点的合振动是各列波在该点分振动的矢量和。



二、波的干涉

1. 干涉现象

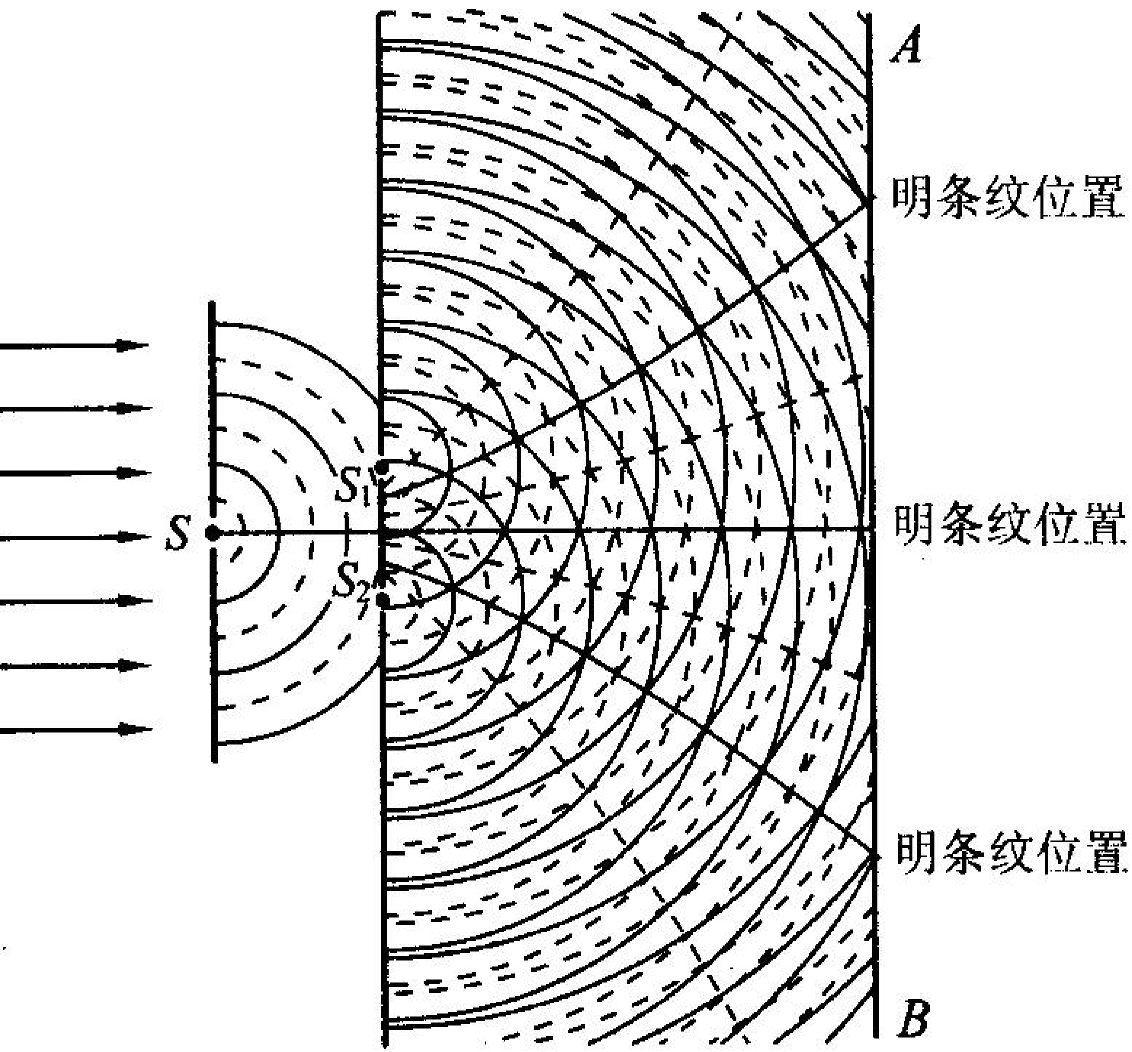
——满足一定条件的两列波相遇时，某些点的振动始终加强，某些点的振动始终减弱的现象。



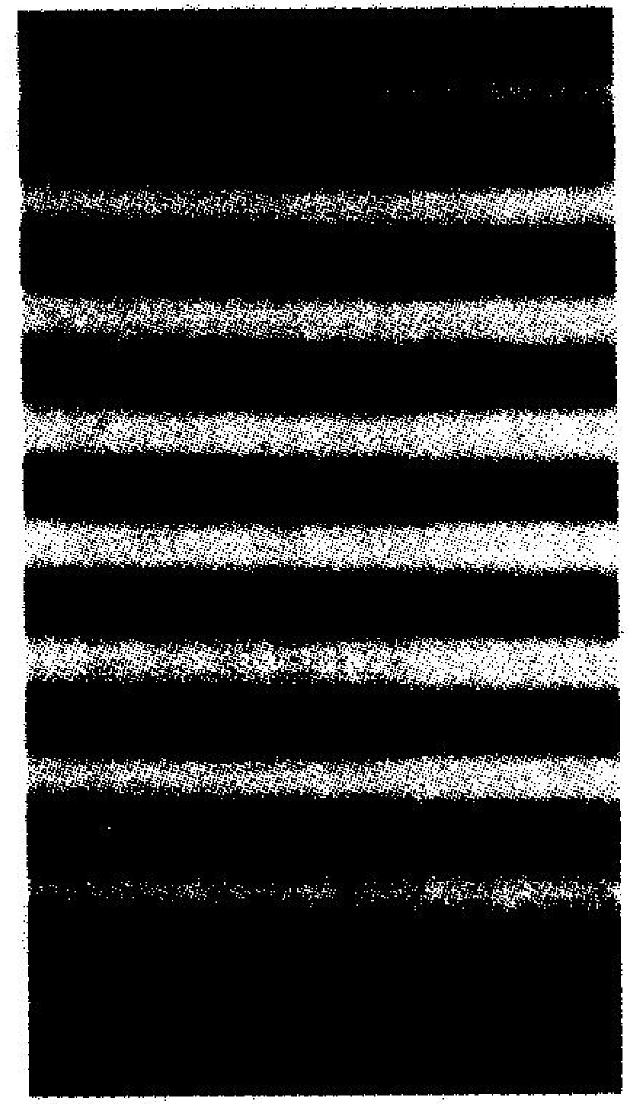
2. 相干条件

频率相同
振动方向相同
有恒定相位差

——满足相干条件的两列波称为**相干波**；

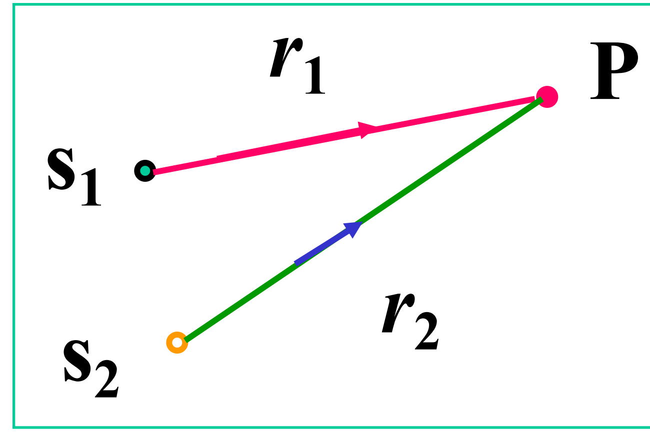


(a)



(b)

3. 相干波的干涉



相干波源s_1 和 s_2振动方程：

$$y_{10} = A_{10}\cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_{20} = A_{20}\cos(\omega t + \varphi_2)$$

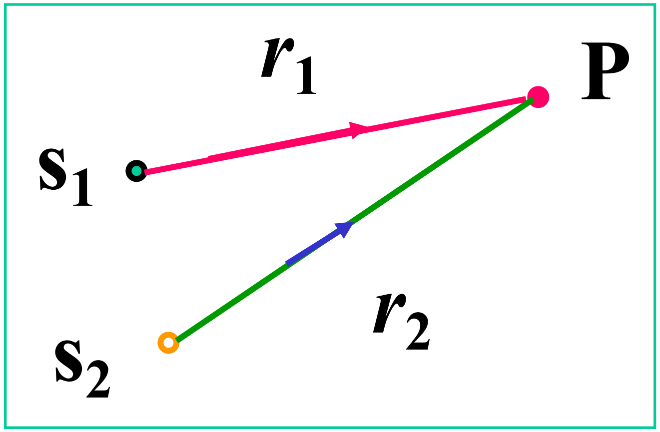
P 点振动方程

$$y_1 = A_1\cos\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right) \qquad y_2 = A_2\cos\left(\omega t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda} r_2\right)$$

$$\therefore y = y_1 + y_2 = A\cos(\omega t + \varphi)$$

式中 $\varphi = tg^{-1}\dfrac{A_1\sin\left(\varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right) + A_2\sin\left(\varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda} r_2\right)}{A_1\cos\left(\varphi_1 - \frac{2\pi_1}{\lambda} r_1\right) + A_2\cos\left(\varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda} r_2\right)}$

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



$$\Rightarrow\ I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi$$

相位差 $\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2+\dfrac{2\pi}{\lambda}\left(r_2-r_1\right)$

讨论：

（1） $\Delta\varphi=\pm 2n\pi \quad n=0,1,2......$

$A=A_1+A_2$ 相干波干涉加强

（2） $\Delta\varphi=\pm(2n+1)\pi \quad n=0,1,2......$

$A=\left|A_1-A_2\right|$ 相干波干涉减弱

（3）若 $\varphi_2 = \varphi_1$ 则 $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}\left(r_2 - r_1\right)$

波程差：$\Delta r = r_2 - r_1$ $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}\Delta r$

（i）$\Delta\varphi = \pm 2n\pi$ $\Delta r = \pm n\lambda$ $n=0,1,2......$

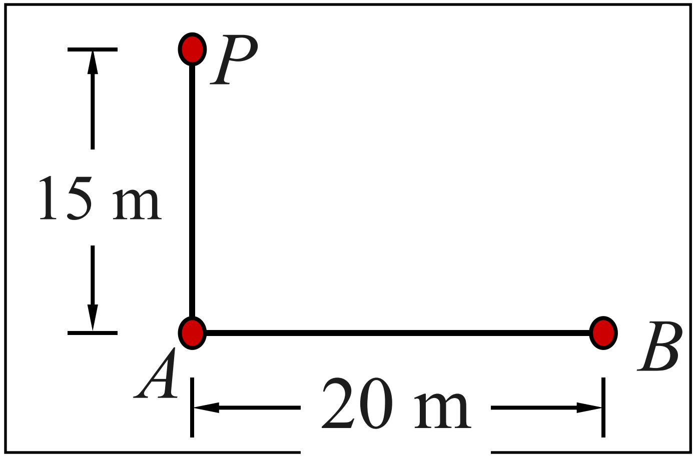
$A = A_1 + A_2$ 相干波干涉加强

（ii）$\Delta\varphi = \pm\left(2n+1\right)\pi$

$\Delta r = \pm\left(2n+1\right)\dfrac{\lambda}{2}$ $n=0,1,2......$

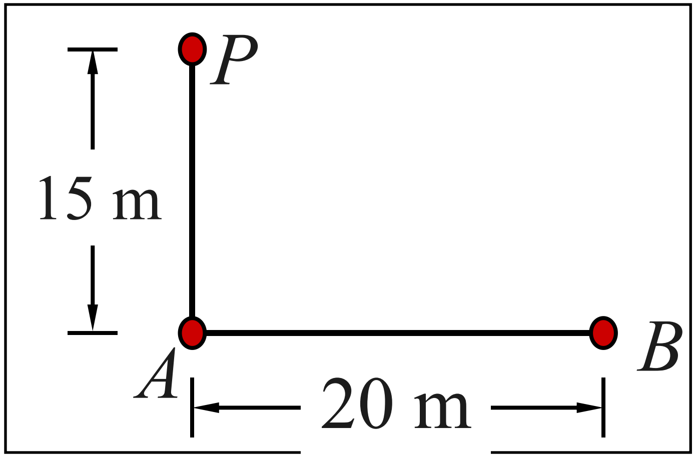
$A = \left|A_1 - A_2\right|$ 相干波干涉减弱

例　如图所示，A、B 两点为同一介质中两相干波源.其振幅皆为5 cm，频率皆为100 Hz，但当点 A 为波峰时，点B 恰为波谷.设波速为$10\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，试写出由$A$、$B$发出的两列波传到点$P$ 时干涉的结果.



解 $BP=\sqrt{15^2+20^2}=25$

$$\lambda=\frac{u}{\nu}=\frac{10}{100}=0.10$$



设 A 的相位较 B 超前

$$\varphi_A-\varphi_B=\pi$$

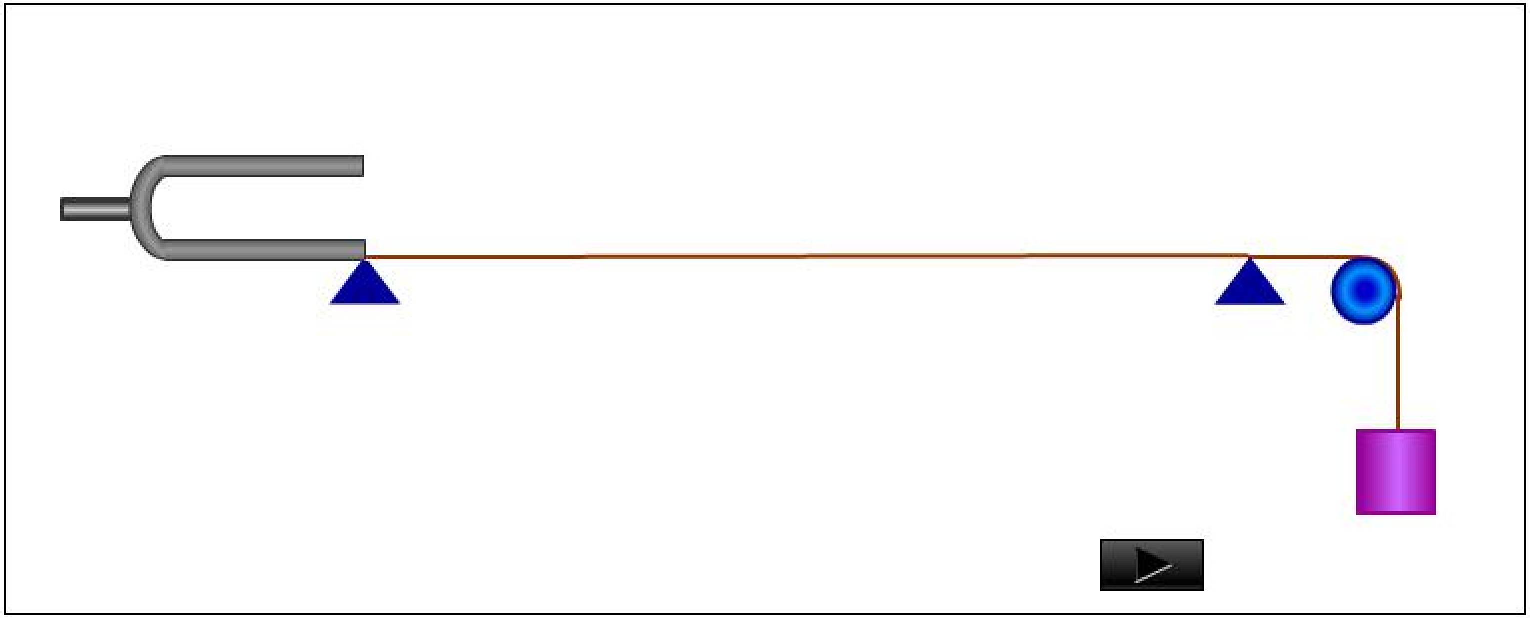
$$\Delta\varphi=(\varphi_B-2\pi\frac{BP}{\lambda})-(\varphi_A-2\pi\frac{AP}{\lambda})$$

$$\Delta\varphi=\varphi_B-\varphi_A-2\pi\frac{BP-AP}{\lambda}=-\pi-2\pi\frac{25-15}{0.1}=-201\pi$$

点P 合振幅 $A=\left|A_1-A_2\right|=0$

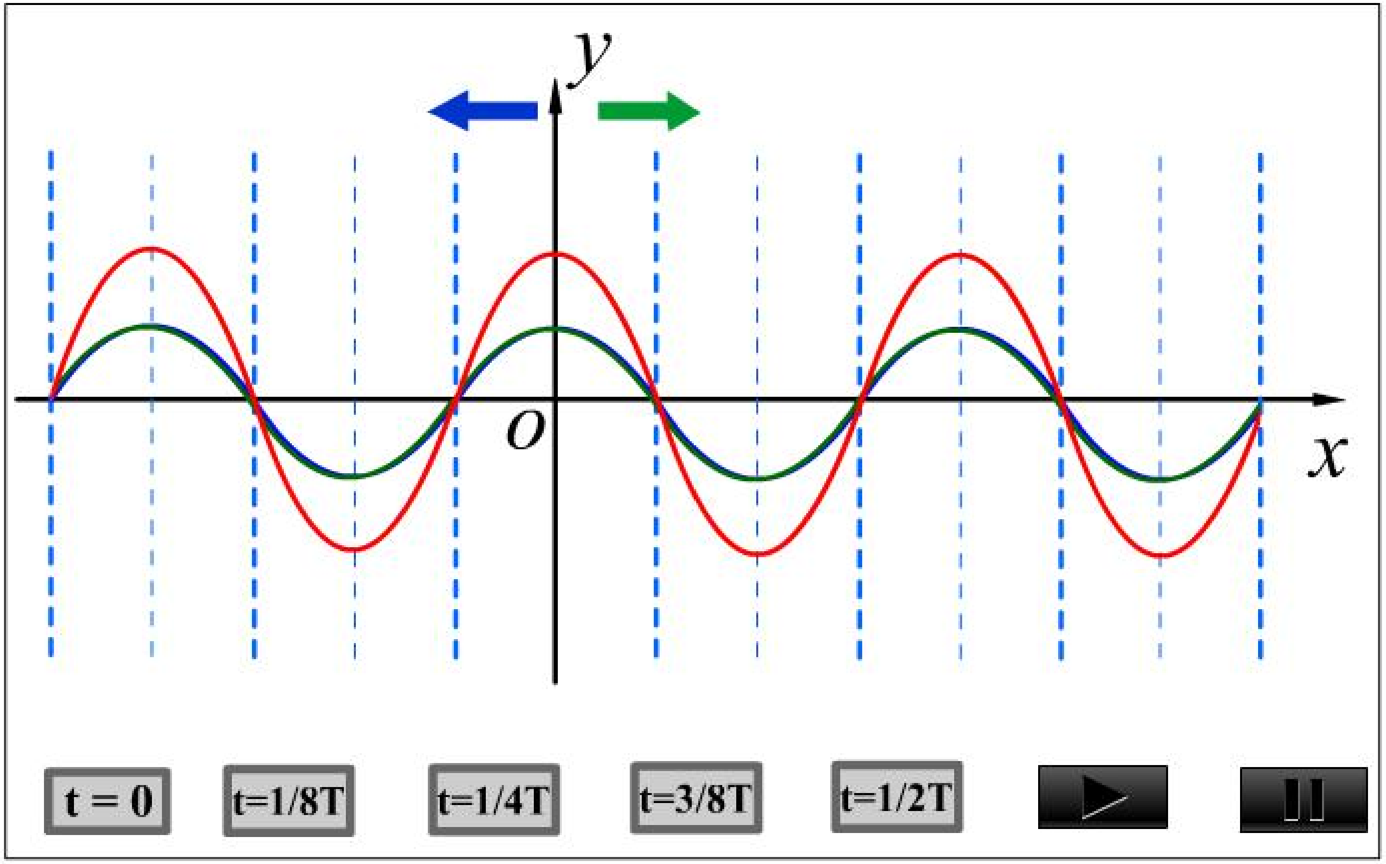
三、驻波

1. 驻波的产生



驻波实验

两列相干波，振幅相同，传播方向相反（初位相为 0）叠加而成驻波



2. 驻波波动方程

$$y_1 = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \qquad y_2 = A\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

$$y = y_1 + y_2 \qquad y = \left(2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\cos\omega t$$

振幅 $A' = \left|2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right|$

1）当 $\cos\frac{2\pi}{\lambda}x = \pm 1$ $\quad A' = 2A$ 称为 波腹

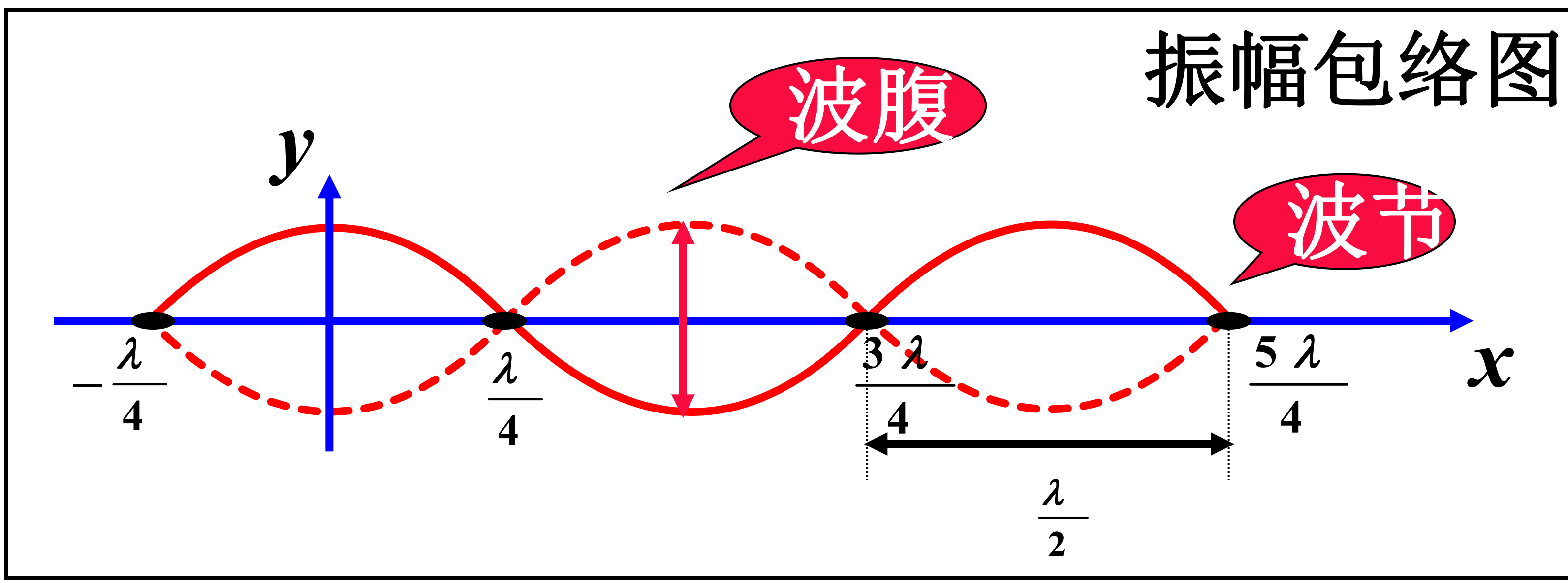
$\because \frac{2\pi}{\lambda}x = \pm n\pi$ $\quad\therefore$波腹位置 $\quad x_{腹} = \pm 2n\frac{\lambda}{4}$

2）当 $\cos\frac{2\pi}{\lambda}x = 0$ $\quad A' = 0$ 称为 波节

$\because \frac{2\pi}{\lambda}x = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2}$ $\quad\therefore$波节位置 $\quad x_{节} = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{4}$

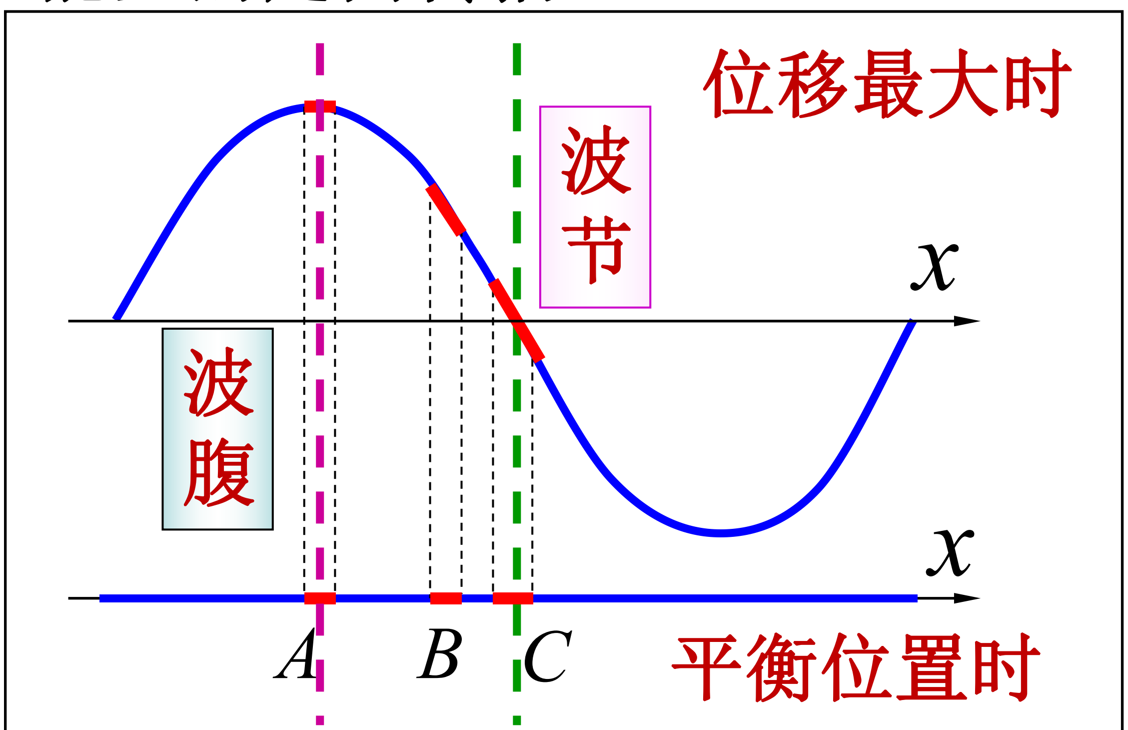
结论 有些点始终不振动, 有些点始终振幅最大.

- 相邻波腹（节）间距 $=\lambda/2$
- 相邻波腹和波节间距 $=\lambda/4$
- 相邻两波节间各点振动相位相同
- 一波节两侧各点振动相位相反



**驻波的能量

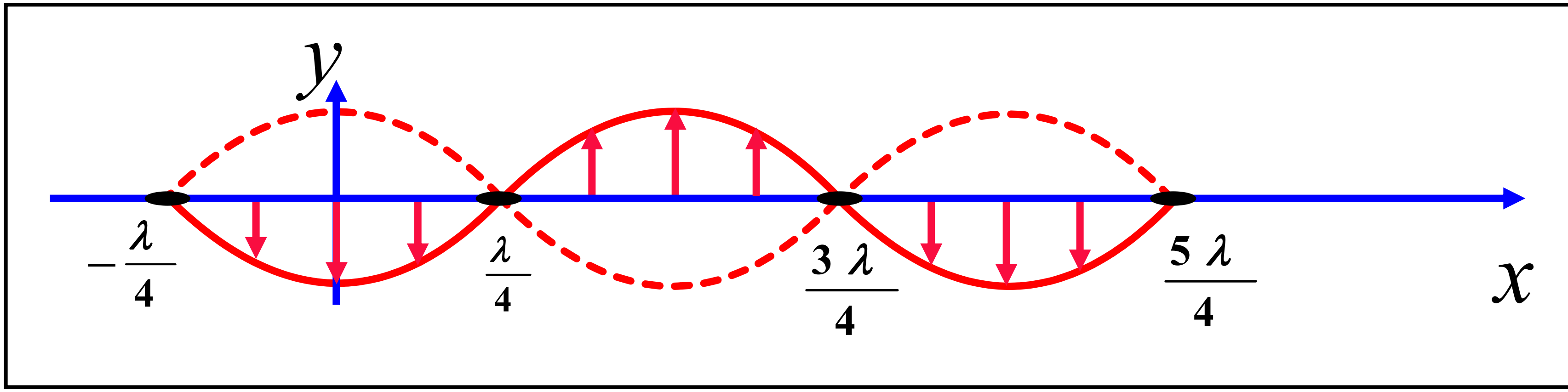
驻波的能量在相邻的波腹和波节间往复变化，在相邻的波腹和波节间发生动能和势能间的转换，动能主要集中在波腹，势能主要集中在波节，但无能量的定向传播。



$$\mathrm{d}E_{\mathrm{p}} \propto \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2$$

$$\mathrm{d}E_{\mathrm{k}} \propto \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2$$

四、半波损失



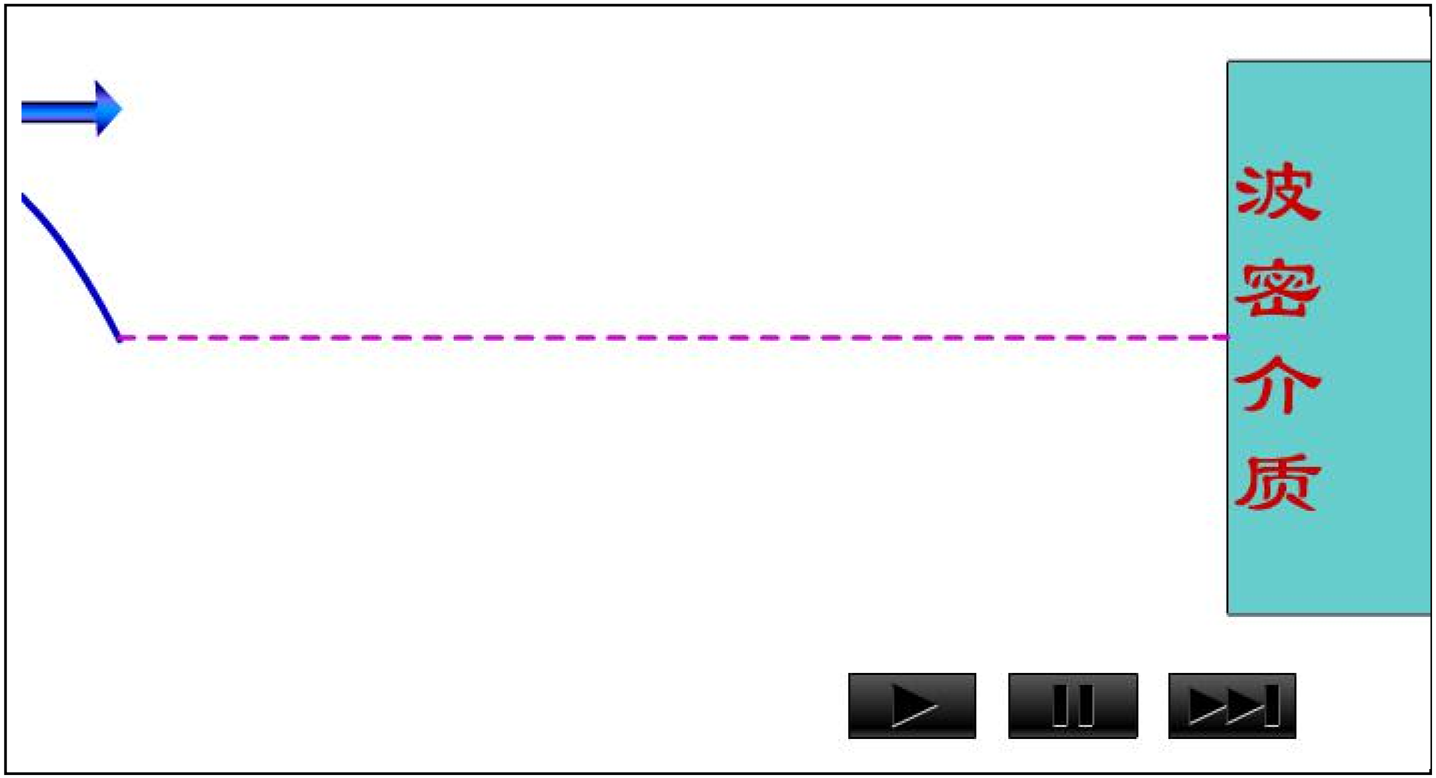
边界条件　驻波一般由入射、反射波叠加而成，反射发生在两介质交界面上，在交界面处出现波节还是波腹，取决于介质的性质.

介质分类　波疏介质，波密介质

ρu ——波阻大：波密；波阻小，波疏

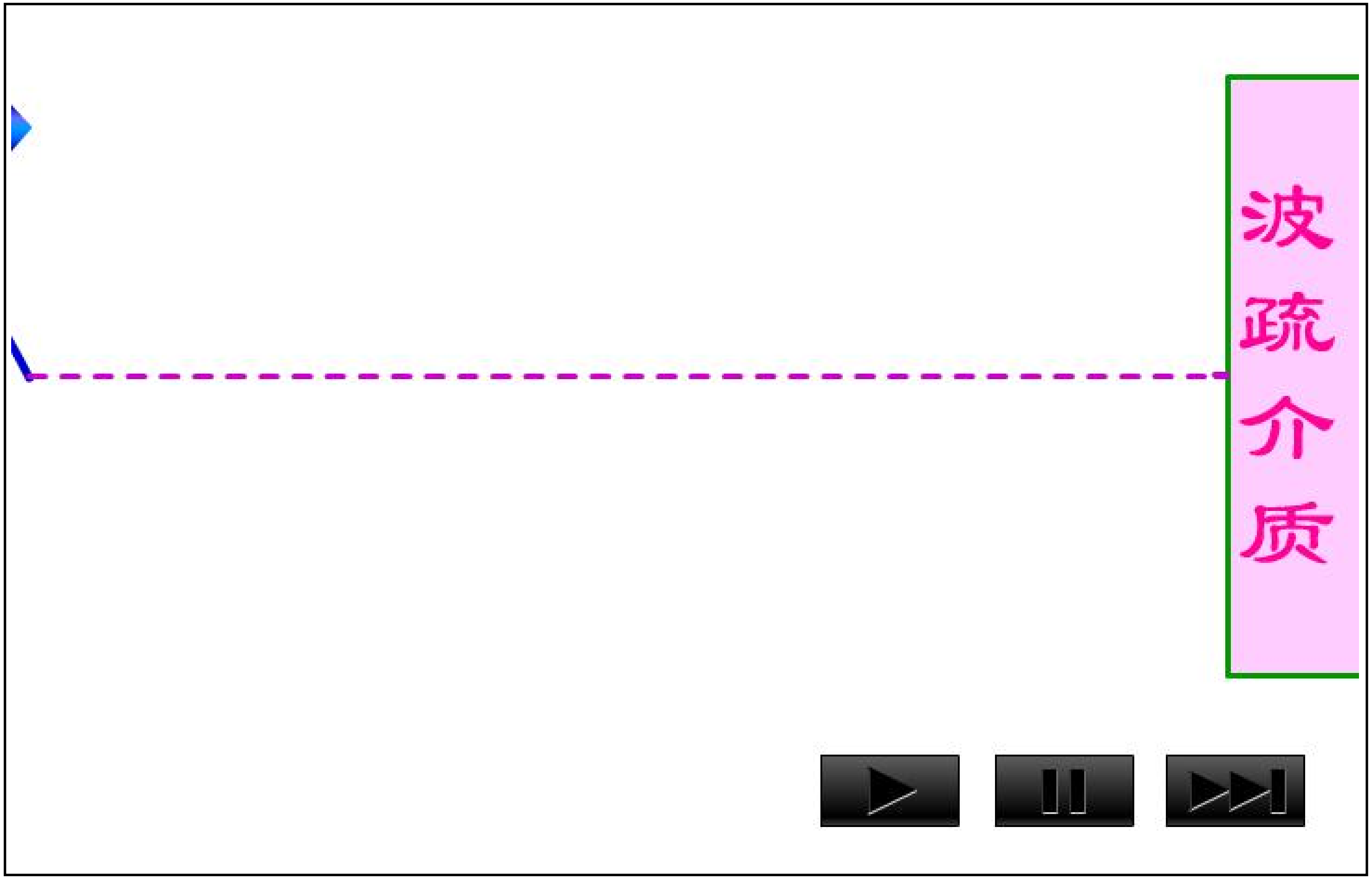
波疏介质 $\longrightarrow$ 波密介质　　ρu ——波阻

波疏介质 ρu 较小



波密介质 ρu 较大

波密介质 → 波疏介质



1. 半波损失定义

——入射波在两种介质分界面处反射时，反射波相对入射波在分界面处有相位π的突变，相当于波程差了半个波长，把这种入射波在界面反射时发生的现象称为半波损失。

2. 波密介质与波疏介质

机械波：介质的密度与波速乘积(ρu)较大的介质被称为波密介质，较小的介质被称为波疏介质。

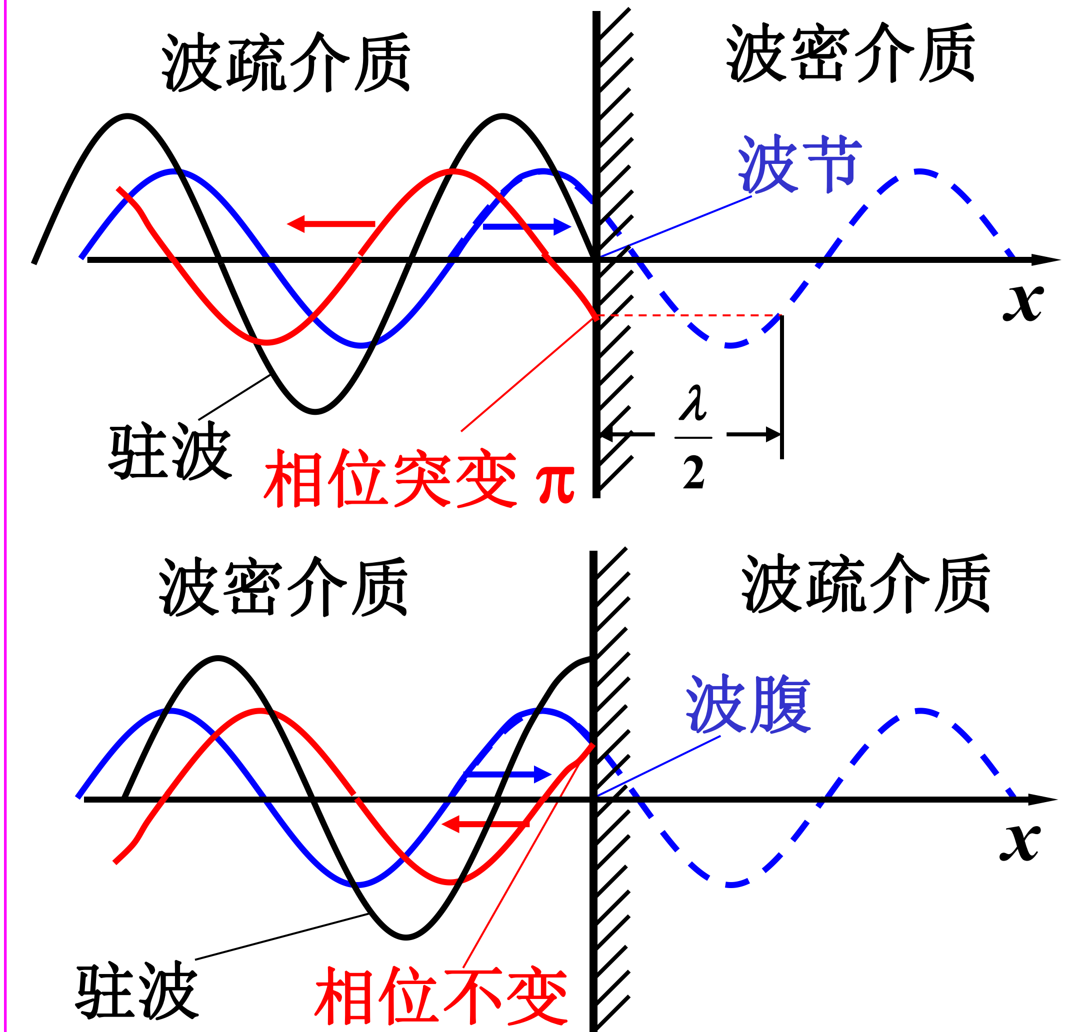
光（电磁波）：

光传播速度较小的介质被称为光密介质，光传播速度较大的介质被称为光疏介质。

3. 产生半波损失的条件

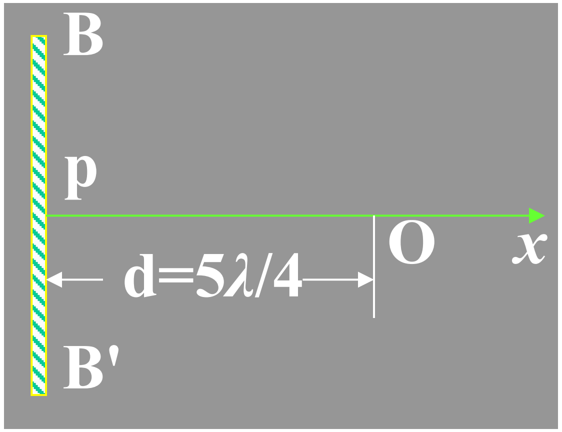
➢波从波疏介质垂直入射到波密介质界面反射时，有半波损失，此时在界面出现波节。

➢当波从波密介质入射到波疏介质界面反射时，无半波损失，此时在界面出现波腹。



例题: 如图所示，波源位于O处，由波源向左右两边发出振幅为**A**，角频率为ω，波速为u的简谐波。若波密介质的反射面BB' 与点 O 的距离为 $d=5\lambda/4$, 试讨论合成波的性质。

解: 设 O 为坐标原点，向右为正方向。



自 O 点向右的波：$y_1(x,t)=A\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x)$

自 O 点向左的波：$y_2(x,t)=A\cos(\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}x)$

反射点 p 处入射波引起的振动：

$$y_{2p}(t)=A\cos\left[\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}(-\frac{5}{4}\lambda)\right]=A\cos(\omega t-\frac{\pi}{2})$$

反射波在 p 点的振动（有半波损失）：

$$y_{3p}(t)=A\cos(\omega t+\pi-\frac{\pi}{2})=A\cos(\omega t+\frac{\pi}{2})$$

$$y_1(x,t)=A\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x) \qquad y_2(x,t)=A\cos(\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}x)$$

$$y_{3p}(t)=A\cos(\omega t+\pi-\frac{\pi}{2})=A\cos(\omega t+\frac{\pi}{2})$$

反射波的波函数

$$y_3(x,t)=A\cos\left[\omega(t-\frac{x+5\lambda/4}{u})+\frac{\pi}{2}\right]=A\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x-\frac{2\pi}{\lambda}\frac{5\lambda}{4}+\frac{\pi}{2})$$

$$y_3(x,t)=A\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x)$$

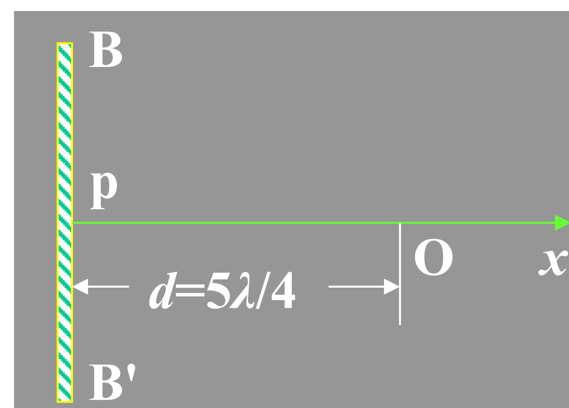
在 $-\frac{5\lambda}{4}\le x\le 0$, y_2与y_3 叠加为驻波：

$$y=y_2+y_3=A\cos(\omega t+\frac{2\pi}{\lambda})+A\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda})$$

$$y=2A\cos(\frac{2\pi}{\lambda}x)\cos\omega t$$

在 $x>0$, y_1 和 y_3 合成为简谐波：

$$y(x,t)=y_1+y_3=2A\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x)$$



**§5 多普勒效应

一、多普勒效应

- **波速**与介质和波的类型有关，而与波源无关。

$$u = \lambda \nu$$ 是介质中某点三量的关系

- **多普勒效应:**

若波源或观察者，或两者同时相对介质运动时，则观察者接收到的的频率和波源的振动频率不同。这种现象称为多普勒效应。

二、多普勒频率

➢ 波源、观察者的运动发生在两者的连线上

v_s：波源相对于介质的速度

v_A：观察者对于介质的速度

ν_0：波源发出的频率

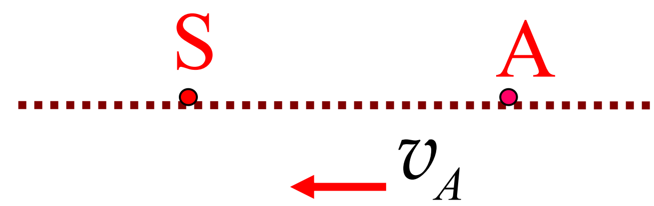
u：波在介质中传播的速度

（1） 波源和观察者相对介质均不动

$$v_S = 0 \quad v_A = 0 \qquad \nu_0 = \boxed{\nu'}$$ 观察者接收到的频率

（2） 波源 (S) 静止，观察者 (A) 相对介质运动

$(v_S = 0,\ v_A \neq 0)$



- A 迎着波源 S 运动

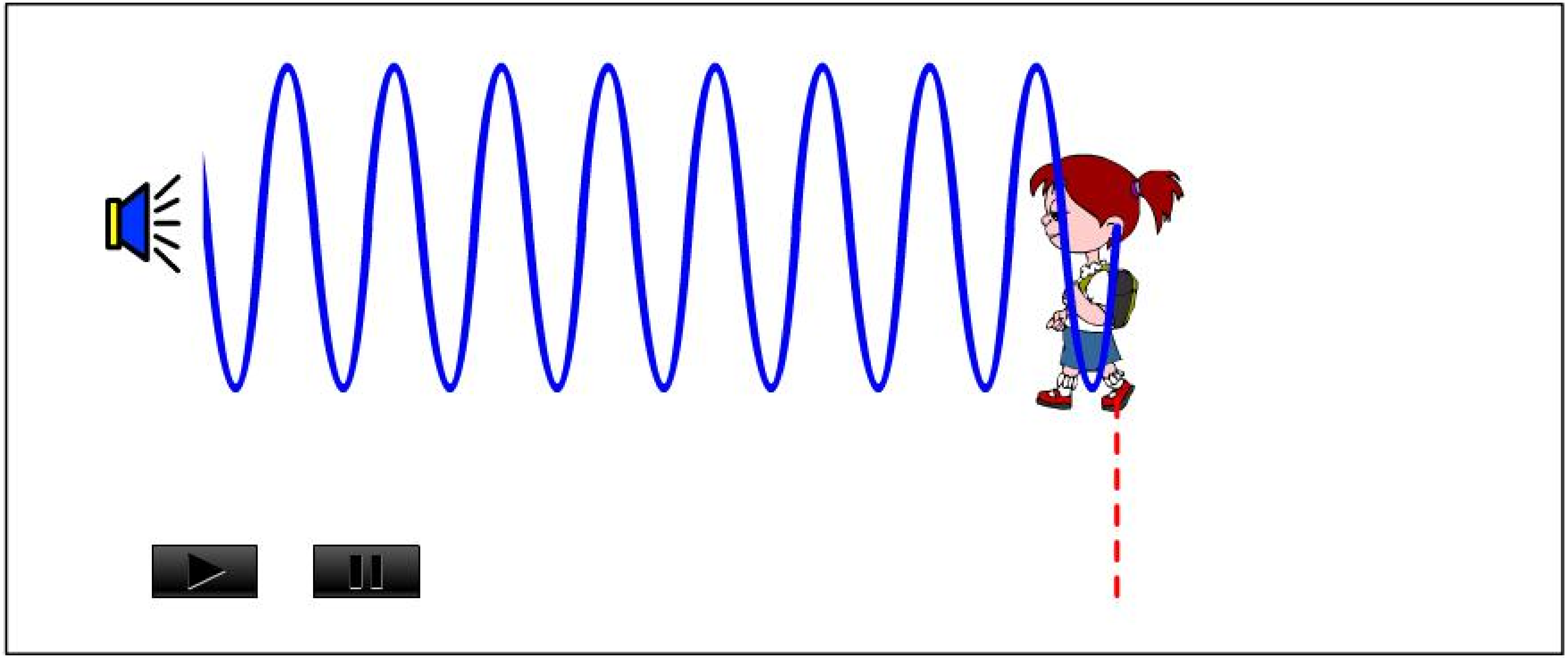
- 由于波源不动，所以介质中的波长 λ_0 不变

由 $v_A \neq 0$ 且观察者向着波源运动，则在单位时间内，观察者接收到波列的长度：$u + v_A$

$$\therefore \nu' = \frac{u + v_A}{\lambda_0} = \frac{u + v_A}{u} \nu_0$$ 观察者观察到波的频率增加

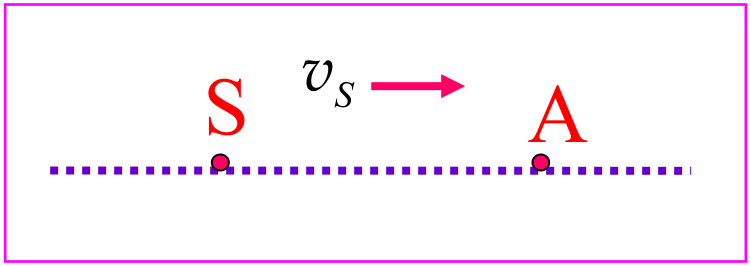
- 若A 远离S $$\nu' = \frac{u - v_A}{\lambda_0} = \frac{u - v_A}{u} \nu_0$$

观察者观察到波的频率下降



（3）观测者静止，波源相对于介质运动

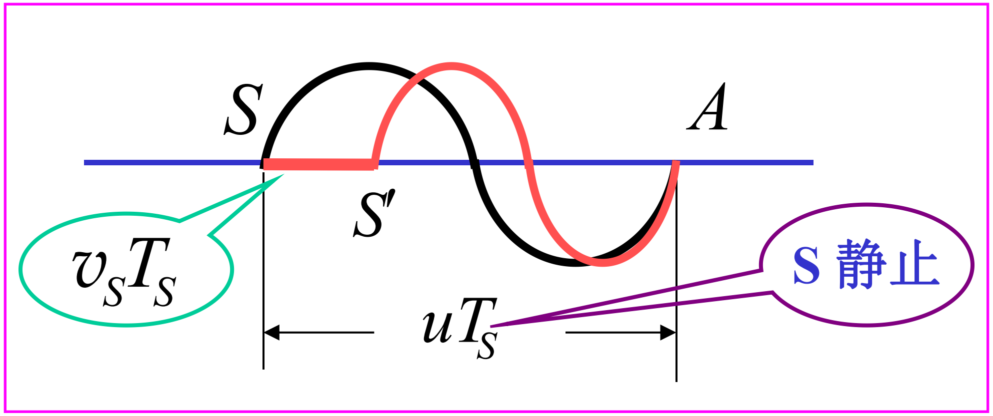
$$\left(v_S \neq 0,\ v_A = 0\right)$$



➢ S迎着A

介质中波长变为——

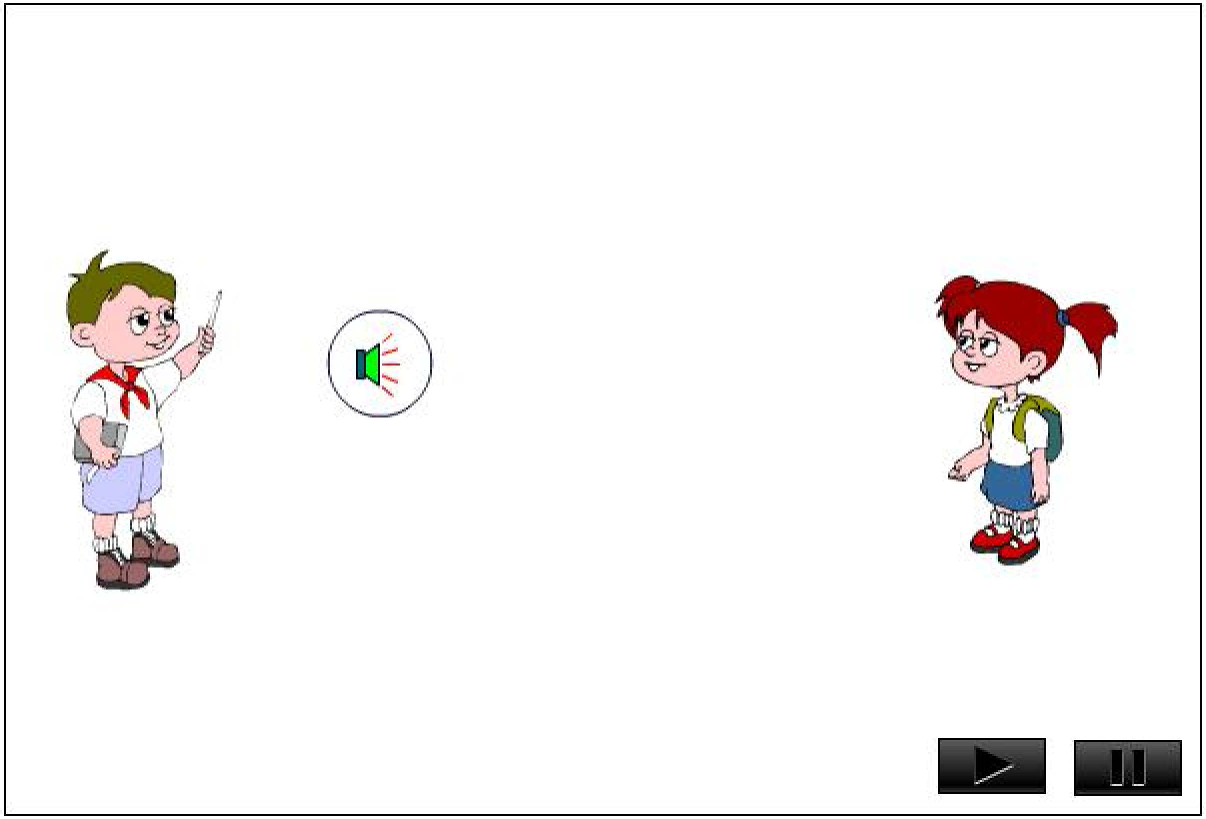
$$\lambda = uT_S - v_S T_S$$



$$\nu'' = \frac{u}{\lambda} = \frac{u}{(u - v_S)T_S}$$

$$\nu'' = \frac{u}{u - v_s}\nu_0$$

——观察者观察到波的频率增加



➢ **S 远离A** $\lambda = uT_S + v_S T_S$ 波源远离观察者运动

$$\nu'' = \frac{u}{u+v_s}\nu_0$$

——观察者观察到波的频率下降

（4）波源观测者同时相对介质运动 $(v_s \neq 0, v_A \neq 0)$

相向 $$\nu = \frac{u+v_A}{u-v_S}\nu_0$$

相当于波速增加,波长变短

远离 $$\nu = \frac{u-v_A}{u+v_S}\nu_0$$

相当于波速减少,波长变长

1. 波源静止，观察者相对介质运动 $\left(v_S = 0,\ v_A \neq 0\right)$

$$\nu' = \frac{u \pm v_A}{\lambda_0} = \frac{u \pm v_A}{u}\nu_0$$

2、观测者静止，波源相对于介质运动 $\left(v_S \neq 0,\ v_A = 0\right)$

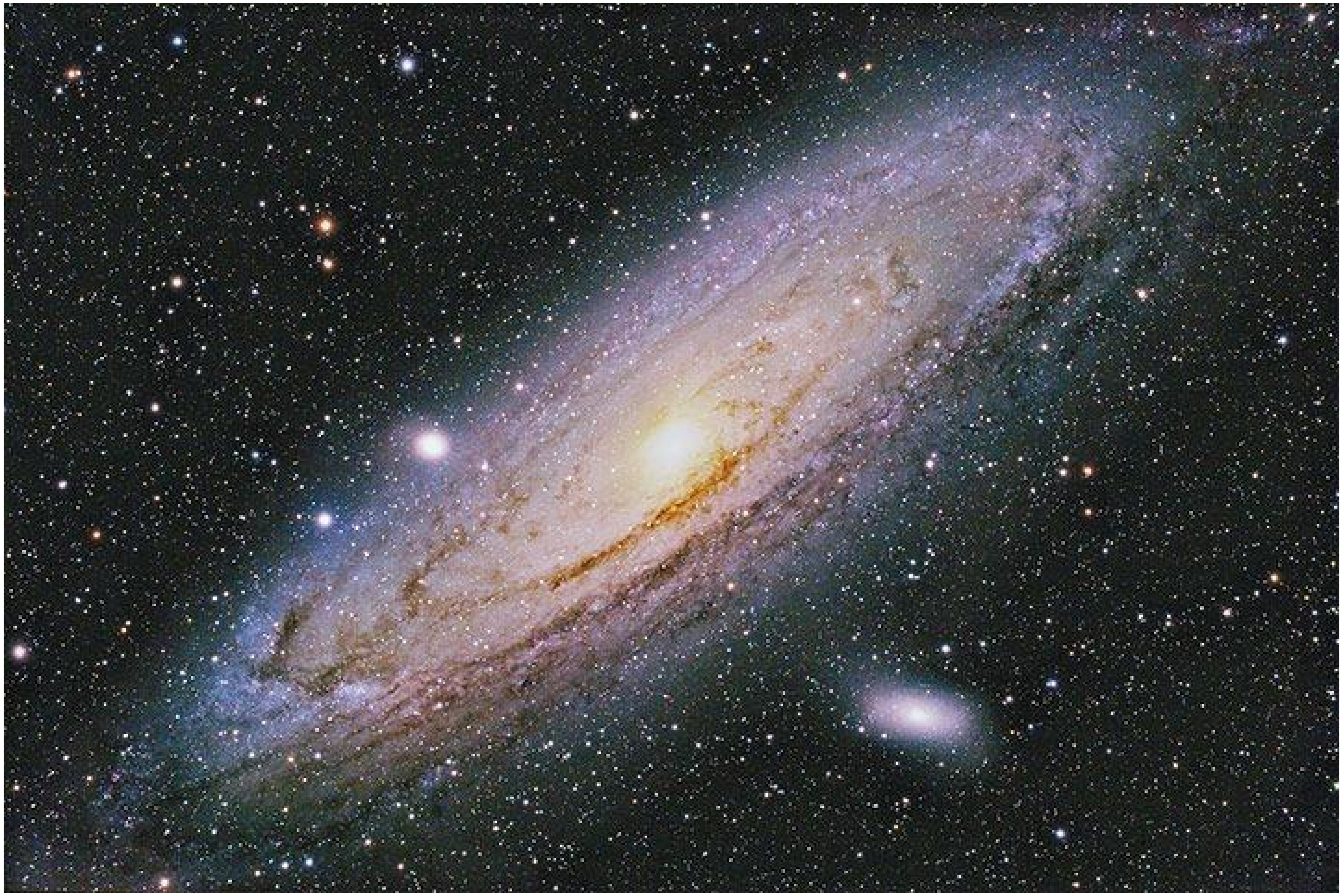
$$\nu'' = \frac{u}{u \pm v_s}\nu_0$$

3、波源观测者同时相对介质运动 $\left(v_s \neq 0, v_A \neq 0\right)$

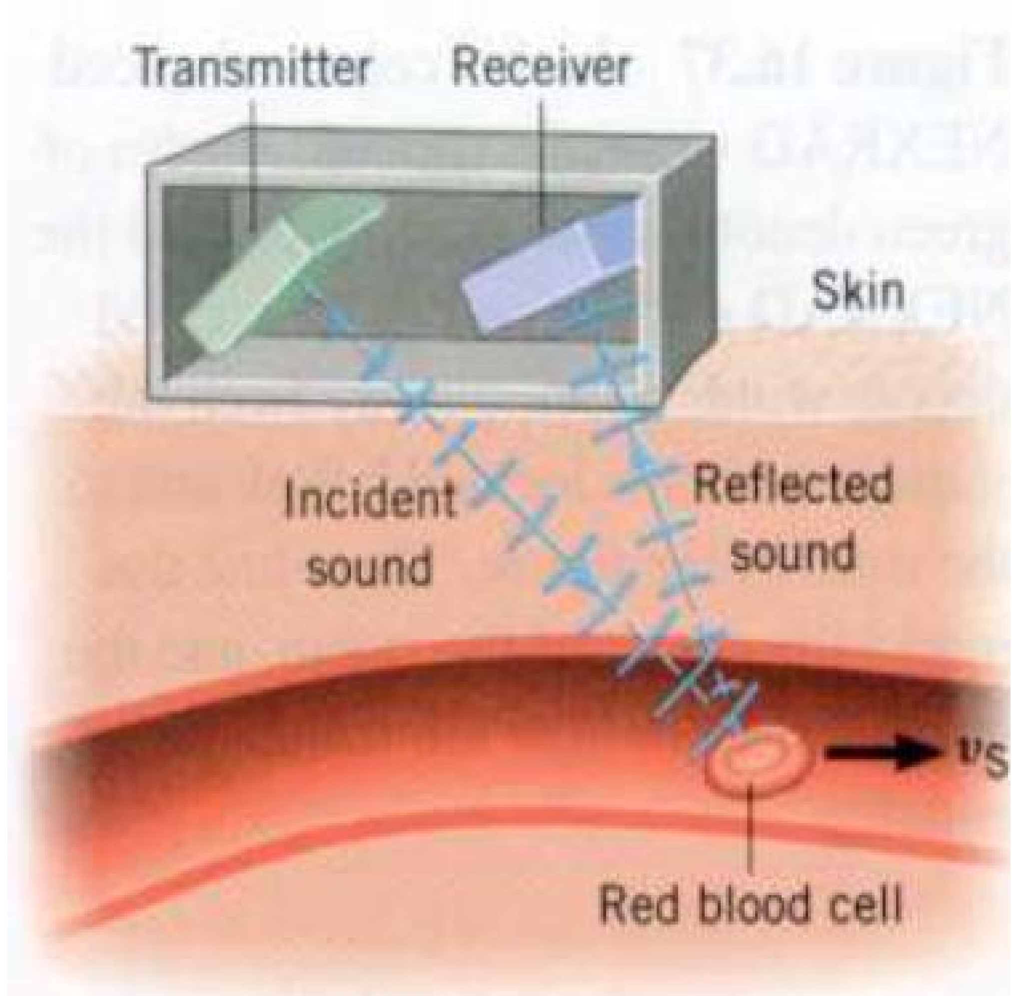
$$\nu = \frac{u \pm v_A}{u \mp v_S}\nu_0$$

****电磁波的多普勒效应：**

接近： $\nu' = \sqrt{\dfrac{c+v}{c-v}}\nu_0$ **远离：** $\nu' = \sqrt{\dfrac{c-v}{c+v}}\nu_0$



警察用多普勒测速仪测速



超声多普勒效应测血流速