大学物理
University Physics

华中科技大学物理学院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

回顾 第七节 波的干涉与衍射

一、惠更斯原理

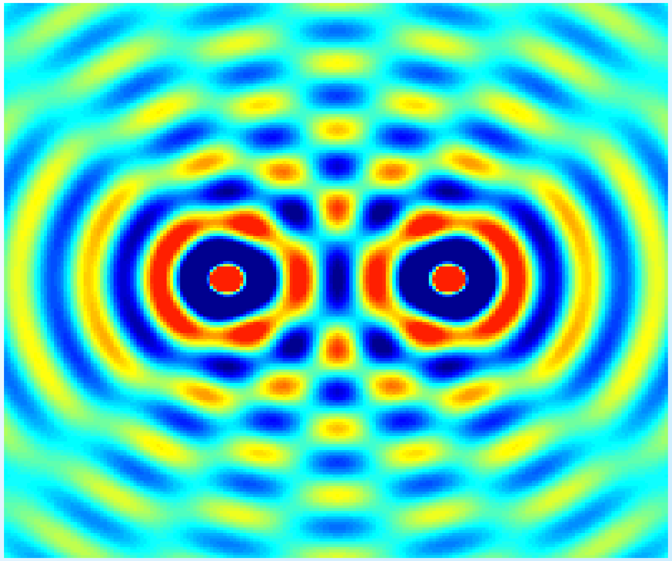
某一时刻，同一波面上的各点都可以看作是产生子波的波源，其后任一时刻，这些子波源发出的波面的包络面就是新的波面。这就是惠更斯原理。

应用：波的反射与折射

惠更斯原理定性解决波传播方向的问题

二、波的干涉：

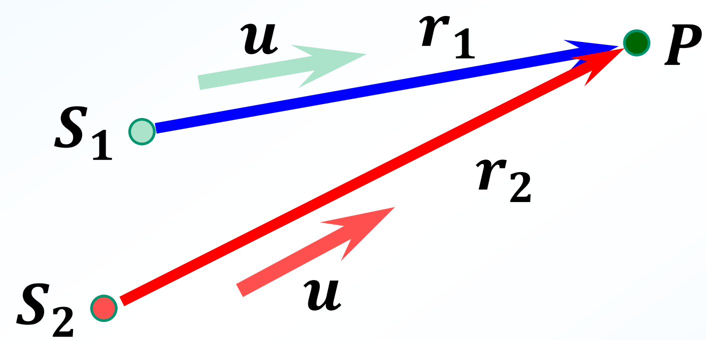
当几列波同时在某一区域内传播时，使空间某些点的振动始终加强，另一些点的振动始终减弱，重叠区呈现出有规则的稳定分布的现象，叫做波的干涉。



1). 相干条件； ①频率相同；

②振动方向相同；

③位相差恒定。



2). 干涉加强与减弱的条件；

$$\begin{cases} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\phi} \\ \Delta\phi = (\varphi_2 - \varphi_1) - \dfrac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) \end{cases}$$

$$\Delta\phi = \begin{cases} \pm 2k\pi\ (k = 0,1,2,\cdots) & A = A_1 + A_2 \\ \pm(2k+1)\pi\ (k = 0,1,\cdots) & A = |A_1 - A_2| \end{cases}$$ 加强(极大) 减弱(极小)

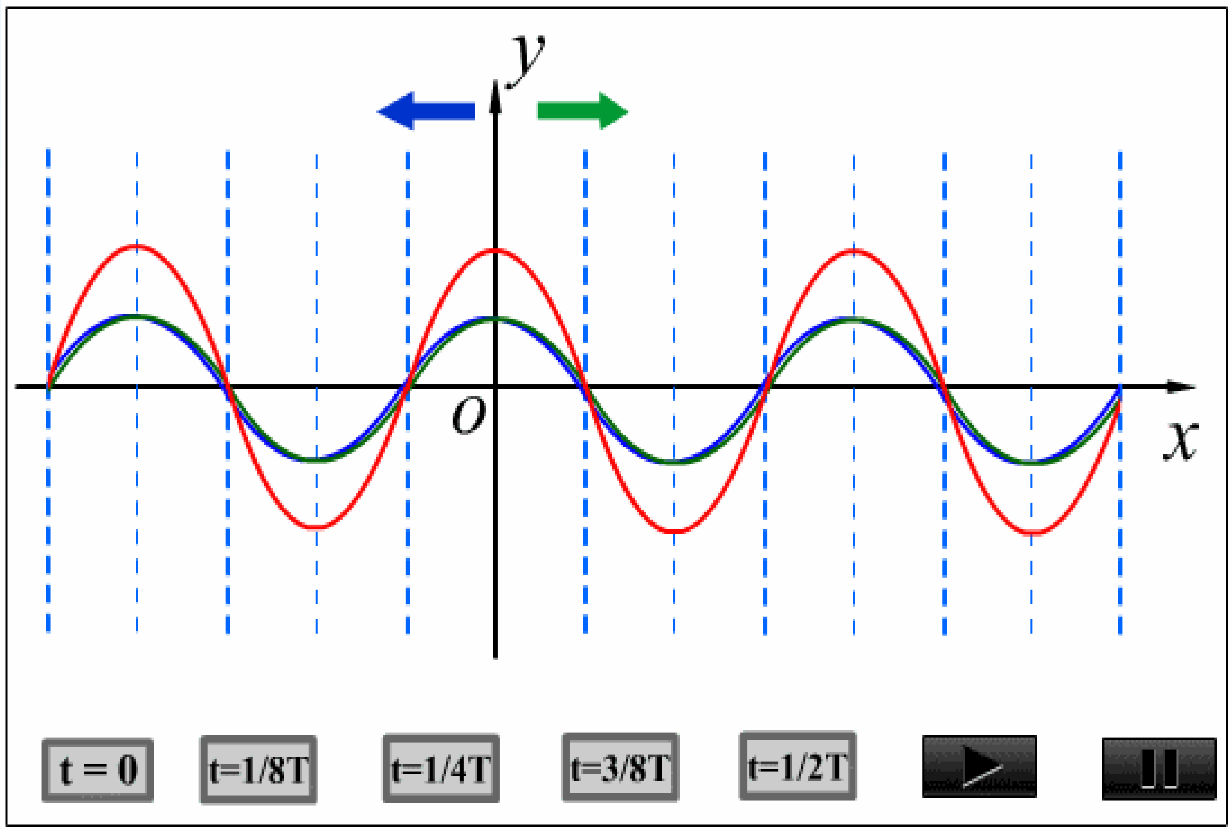
若$\varphi_1 = \varphi_2$，即两波源初始相位相同，则：

波程差： $\Delta r = r_2 - r_1 \begin{cases} \pm k\lambda & \text{干涉加强(相长，极大)} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{干涉减弱(相消，极小)} \end{cases}$

三、驻波

1. 驻波的形成

振幅、频率、传播速度都相同的两列相干波，在同一直线上沿**相反**方向传播时叠加而形成的一种特殊的干涉现象。



2. 驻波方程

设有两列相干波，分别沿x轴正、负方向传播，选初相位均为零的表达式为：

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

合成后

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

得**驻波方程**：

$$\boxed{y = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x \cdot \cos\omega t}$$

驻波中各点作振幅为$\left|2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right|$，角频率为 ω 的简谐振动。

3. 驻波的基本特点

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

1) 振幅呈周期性的空间分布

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

振幅最大的点称为**波腹**

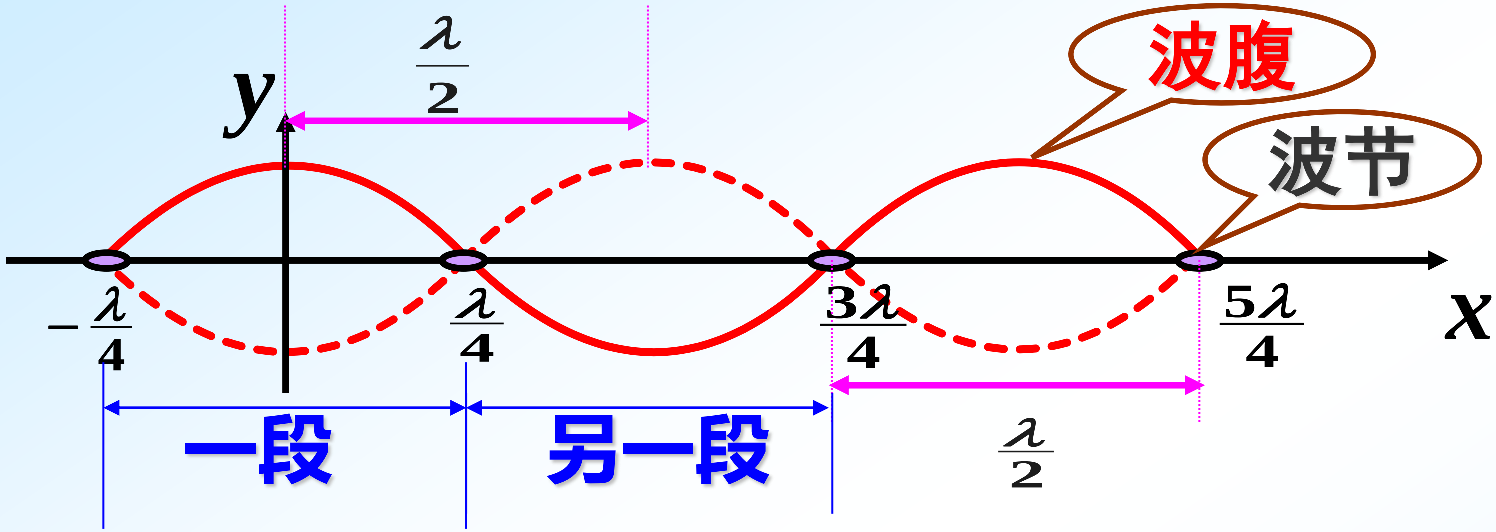
$$\left|\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right| = 1 \qquad \frac{2\pi}{\lambda}x = k\pi$$

波腹的位置: $x = k\dfrac{\lambda}{2}, \quad k = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$

振幅为零的点称为**波节**

$$\left|\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right| = 0 \qquad \frac{2\pi}{\lambda}x = (2k+1)\frac{\pi}{2}$$

波节的位置: $x = (2k+1)\dfrac{\lambda}{4}, \quad k = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$



相邻波腹（节）间的距离为：$\frac{\lambda}{2}$ 可测行波波长。

2) 位相分段相等

$$\boxed{y = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x \cdot \cos\omega t}$$

时间部分提供的位相对于所有的 x是相同的，而空间变化带来的位相是不同的。

两个波节之间的各点称为一段： 如 $-\lambda/4 \le x \le \lambda/4$

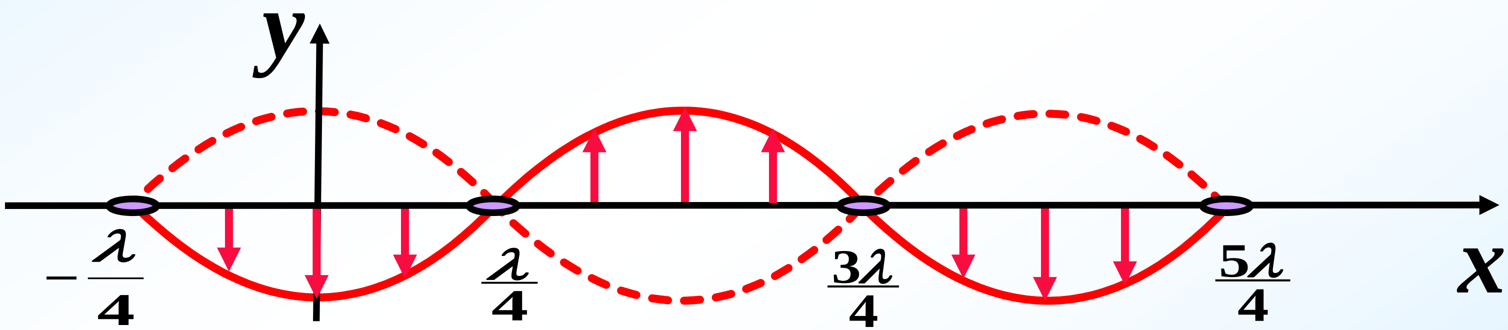
考查一段：$-\lambda/4 \le x \le \lambda/4$

$$\boxed{y = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\cdot\cos\omega t}$$

$\cos\frac{2\pi}{\lambda}x \ge 0$；　　各点位相均为 ωt

其邻近下一段：　$\lambda/4 \le x \le 3\lambda/4$　　$\cos\frac{2\pi}{\lambda}x \le 0$

各点位相均为：$\omega t + \pi$



两个波节之间一段中的各点振动位相相同。

在波节两侧的点（邻近两段）振动位相相反。

3) 驻波不传播能量

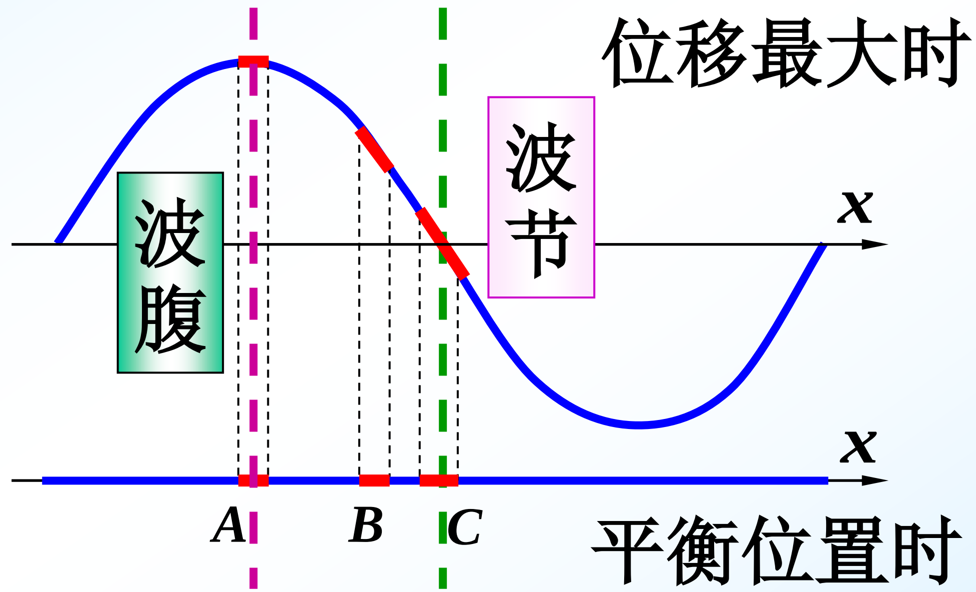
$$\vec{I}=\overline{w}\vec{u}=\frac{1}{2}\rho A^2\omega^2\vec{u}$$

驻波能流密度:

$$u\overline{w}-u\overline{w}=0$$

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

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



驻波的动能主要集中在波腹，势能主要集中在波节。能量在相邻的波腹和波节间往复变化。

驻波中没有振动状态或位相的传播，也没有能量的传播，实际上是分段振动。

驻波不是波动，而是一种特殊形式的振动。

4) 半波损失（相位跃变）

反射波：**波传播到两种介质的分界面时，经界面反射而形成的波。**

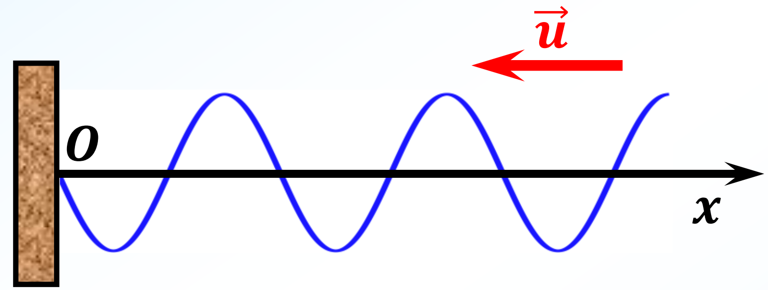
半波损失：**在反射点入射波与反射波有相位π的突变。**

垂直入射时，是否发生半波损失由介质性质决定：

波密介质：ρu大的介质

波疏介质：ρu小的介质

半波损失垂直入射



一弦线一端固定在墙上，

设入射波： $y_1 = A_1 \cos\omega\left(t + \frac{x}{u}\right)$

反射波为： $y_2 = A_2 \cos\omega\left(t - \frac{x}{u}\right)$

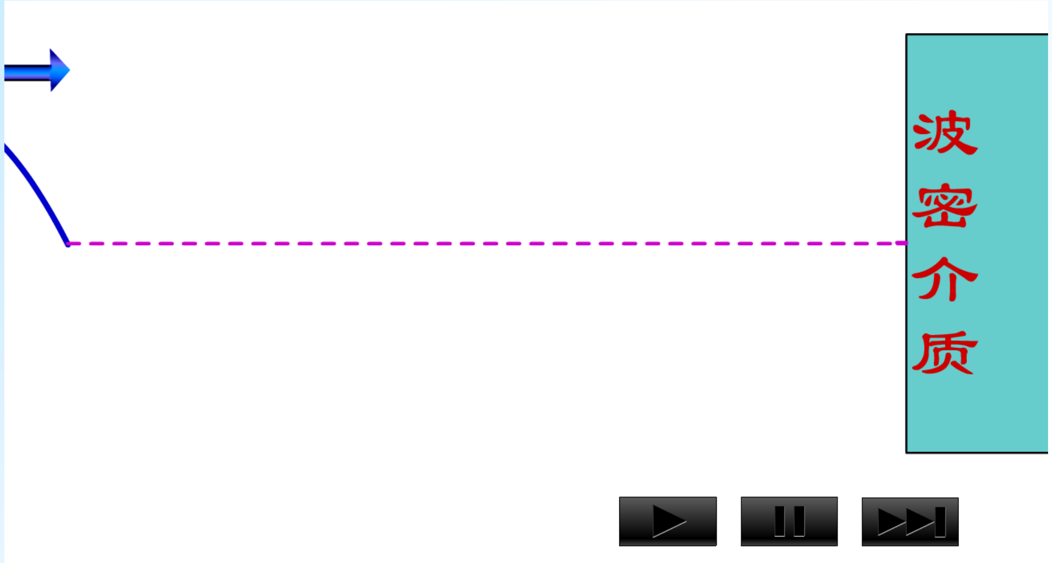
若反射点O为固定点： $y_O = y_1 + y_2 = (A_1 + A_2)\cos\omega t = 0$

$\therefore \quad A_2 = -A_1 \qquad y_2 = -A_1 \cos\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) = A_1 \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \pi\right]$

在O点处： $\begin{cases} y_1\big|_{x=0} = A_1 \cos\omega t \\ y_2\big|_{x=0} = A_2 \cos\omega t = A_1 \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$

在反射点O入射波与反射波有相位π的突变，成为半波损失。

$$\Delta\phi = \frac{\omega}{u}\Delta x = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x = \pi \quad \Rightarrow \quad \Delta x = \frac{\lambda}{2}$$

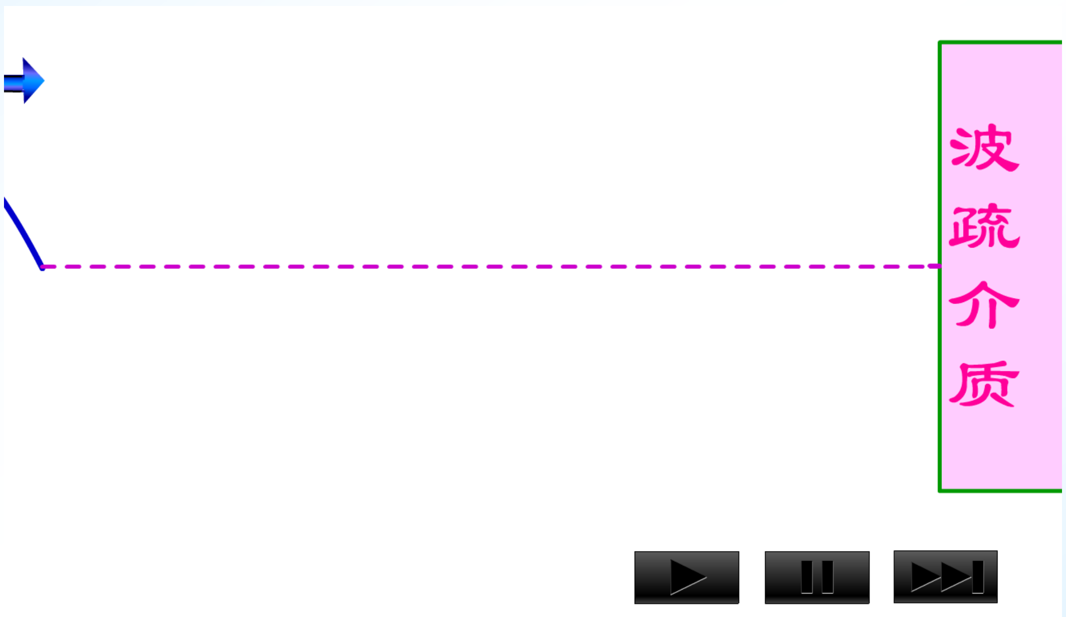


有半波损失!

驻波在界面处是**波节**。

固定端

反射波位相中加π。



无半波损失!

驻波在界面处为**波腹**。

自由端

反射波位相不加π。

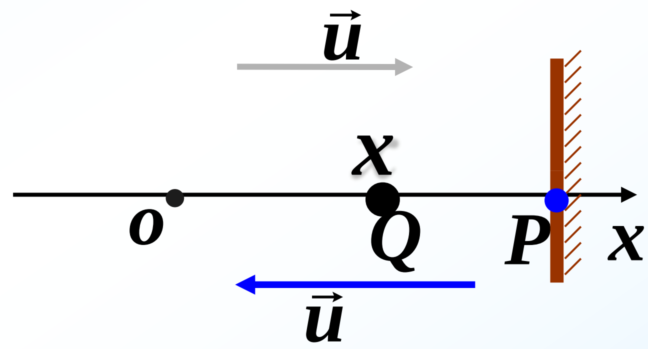
4. 由波源振动方程写反射波波函数

法1、将反射点作为反射波波源：

已知O点**振动方程**为：$y_o = A\cos(\omega t + \phi)$

则入射波波函数：

$$y_{入} = A\cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \phi)$$



入射波P点的振动方程：

$$y_{入P} = A\cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x_P + \phi)$$

反射波P点的振动方程：

可能的半波损失项

反射波： $$y_{反P} = A\cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x_P + \phi + \boxed{\pi})$$

任意x处质元位相落后P处质元 $$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\overline{\mathrm{PQ}} = \frac{2\pi}{\lambda}(x_P - x)$$

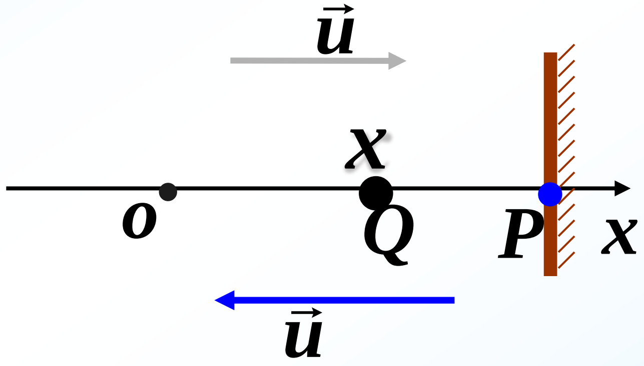
则反射波波函数： $$y_{反} = A\cos[\omega t + \phi - \frac{2\pi(2x_P - x)}{\lambda} + \pi]$$

$$y_{反} = A\cos[\omega t + \varphi - \frac{2\pi(2x_P - x)}{\lambda} \pm \pi]$$

法2、直接将已知点作为反射波波源：

已知O点**振动方程**为：

$$y_o = A\cos(\omega t + \phi)$$



反射波：

任意x处质元位相落后O处质元

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\overline{\mathrm{OP}} + \overline{\mathrm{PQ}}) \boxed{+\pi} = \frac{2\pi}{\lambda}(2x_P - x) + \pi$$

半波损失

则反射波波函数：

$$y_{反} = A\cos[\omega t + \phi - \frac{2\pi(2x_P - x)}{\lambda} + \pi]$$

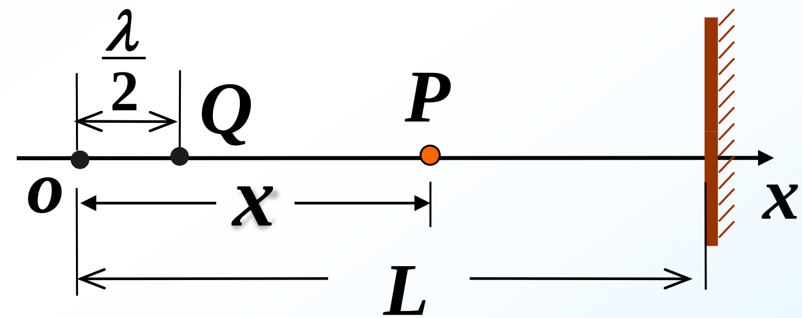
例3. 波长为λ的平面简谐波沿x正向传播，已知在 $x=\dfrac{\lambda}{2}$ 处振动方程为 $y_Q=A\cos(\omega t-\pi)$。波在$x=L=5\lambda$处遇到一波密媒质反射面，且反射波振幅仍为A。求：

1、该平面简谐波方程。

2、反射波方程。

3、合成驻波方程。

4、在L范围内有几个波腹。



解： 1、P的振动位相落后Q：

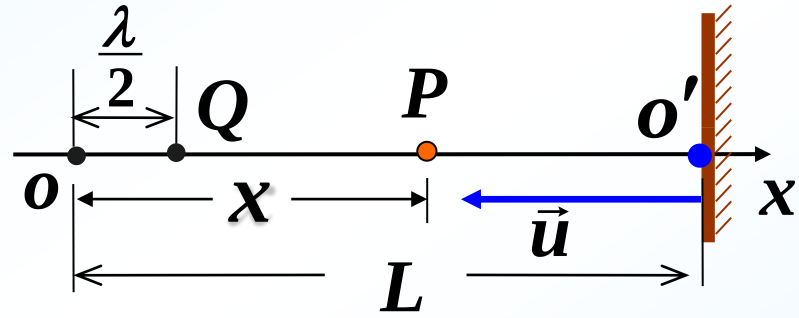
$$\frac{2\pi}{\lambda}(x-\frac{\lambda}{2})=\frac{2\pi}{\lambda}x-\pi$$

故波动方程为： $y=A\cos[\omega t-\dfrac{2\pi x}{\lambda}]$

$$\boxed{y = A\cos[\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}]}$$

2、求反射波方程

入射波在 o' 产生的振动方程为：



$$y_{o'} = y\big|_{x=5\lambda} = A\cos\omega t$$

以 o' 为波源产生的反射波方程：

$$y_{反} = A\cos[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(5\lambda - x)\boxed{+\pi}]$$

$$= A\cos[\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x + \pi]$$

反射时必须考虑半波损失！

3、合成驻波

$$y_{合} = 2A\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right]\cos\left[\omega t + \frac{\pi}{2}\right]$$

$$\boxed{y_{合} = 2A\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right]\cos\left[\omega t + \frac{\pi}{2}\right]}$$

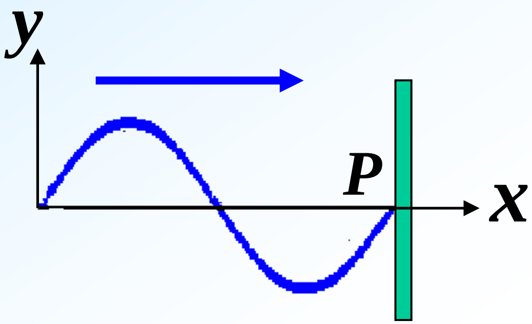
4、对于波腹 $\left|\cos\left[\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right]\right| = 1$ 则：

$$\sin\left[\frac{2\pi x}{\lambda}\right] = \pm 1$$

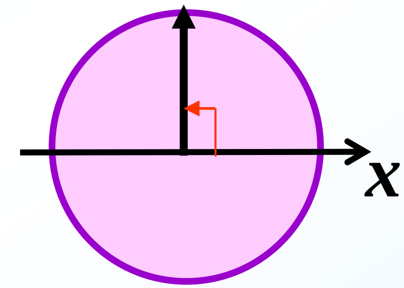
于是有：$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4} \cdots\cdots \frac{19\lambda}{4}$，共10个波腹。

例4. 已知入射波t 时刻的波动曲线，问哪条曲线是t 时刻反射波曲线（反射壁是波密媒质）？

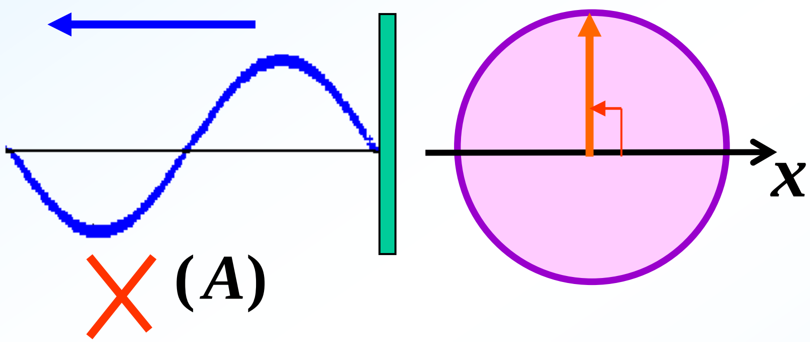
入射波



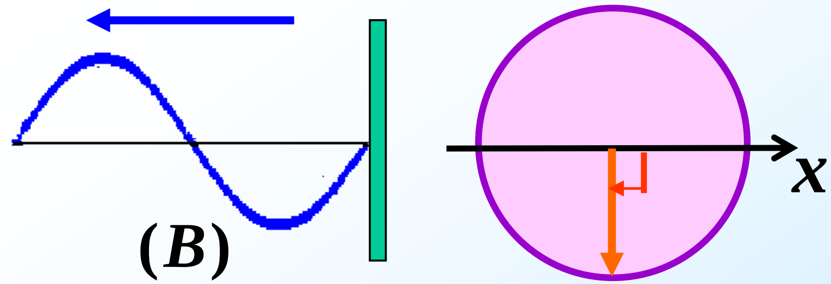
入射波在P点的位相：



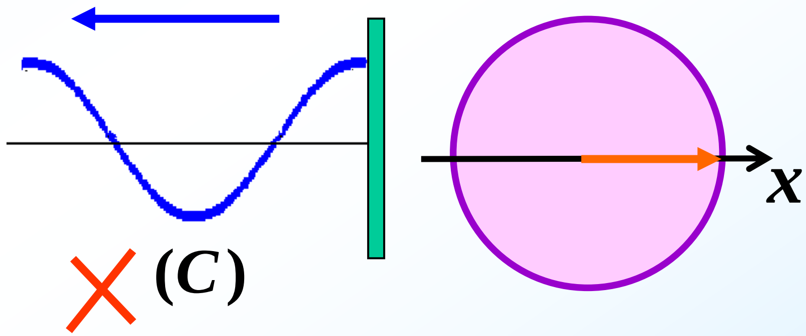
反射波在P点的位相：



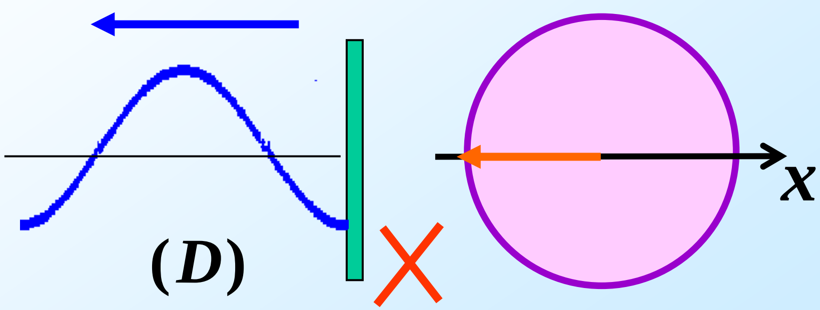
(A)



(B)



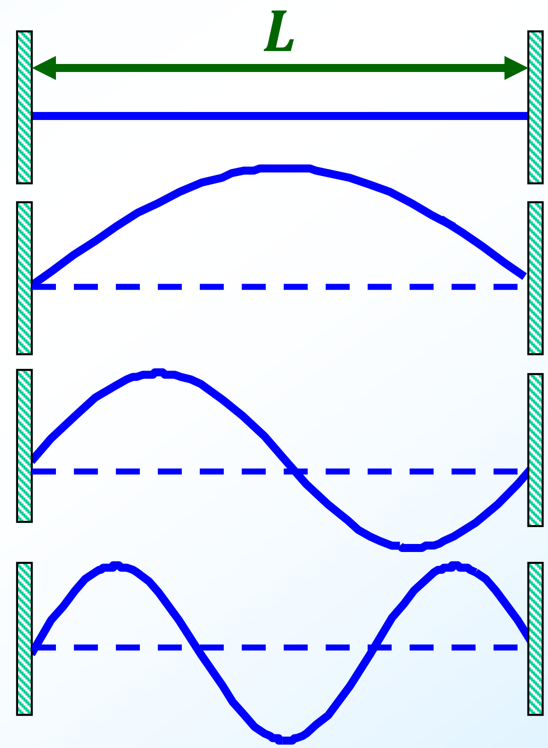
(C)



(D)

5.弦线上的驻波

将弦线两端固定，波动弦线时会形成稳定的驻波。



简正模式

边界条件： 两端点必定是波节

弦长等于半波长的整数倍。

$$\boxed{L = n\frac{\lambda}{2}} \quad n = 1, 2, 3, \cdots$$

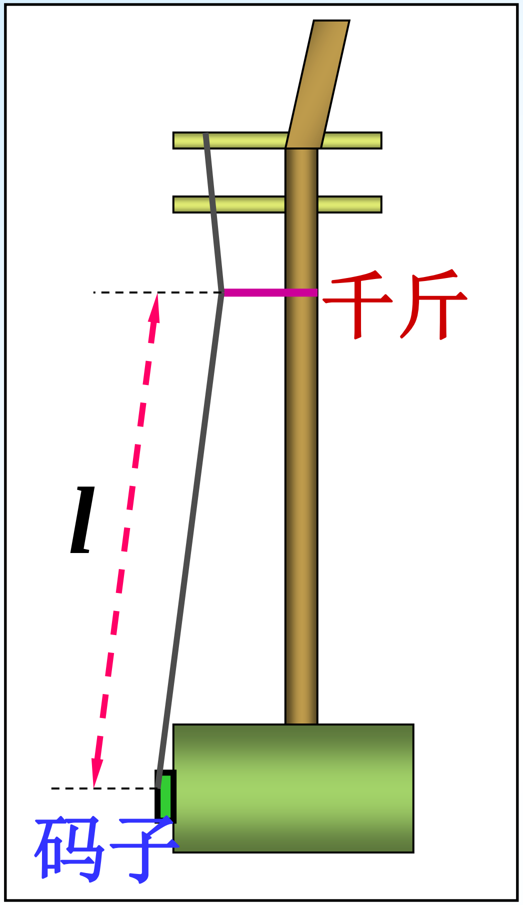
对应于某一特定n值

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \nu_n = \frac{u}{\lambda_n} = n\frac{u}{2L}$$ 本征频率

波长和频率不是连续的，是“量子化”的。

$$\begin{cases} n = 1 & \text{基频} \\ n \geq 2 & \text{谐频} \end{cases}$$

例5. 如图二胡弦长l=0.3m，张力T=9.4N。线密度ρ=3.8×10^{-4}kg/m，求弦发出的声音的基频与谐频。



解：弦两端为固定点，是波节。

$$l = n\frac{\lambda_n}{2} \quad n = 1, 2, \cdots$$

频率 $\nu = \dfrac{u}{\lambda} = \dfrac{nu}{2l}$　　波速 $u = \sqrt{\dfrac{T}{\rho}}$

基频　$n = 1,\quad \nu_1 = \dfrac{1}{2l}\sqrt{\dfrac{T}{\rho}} = 262\ \mathrm{Hz}$

谐频……

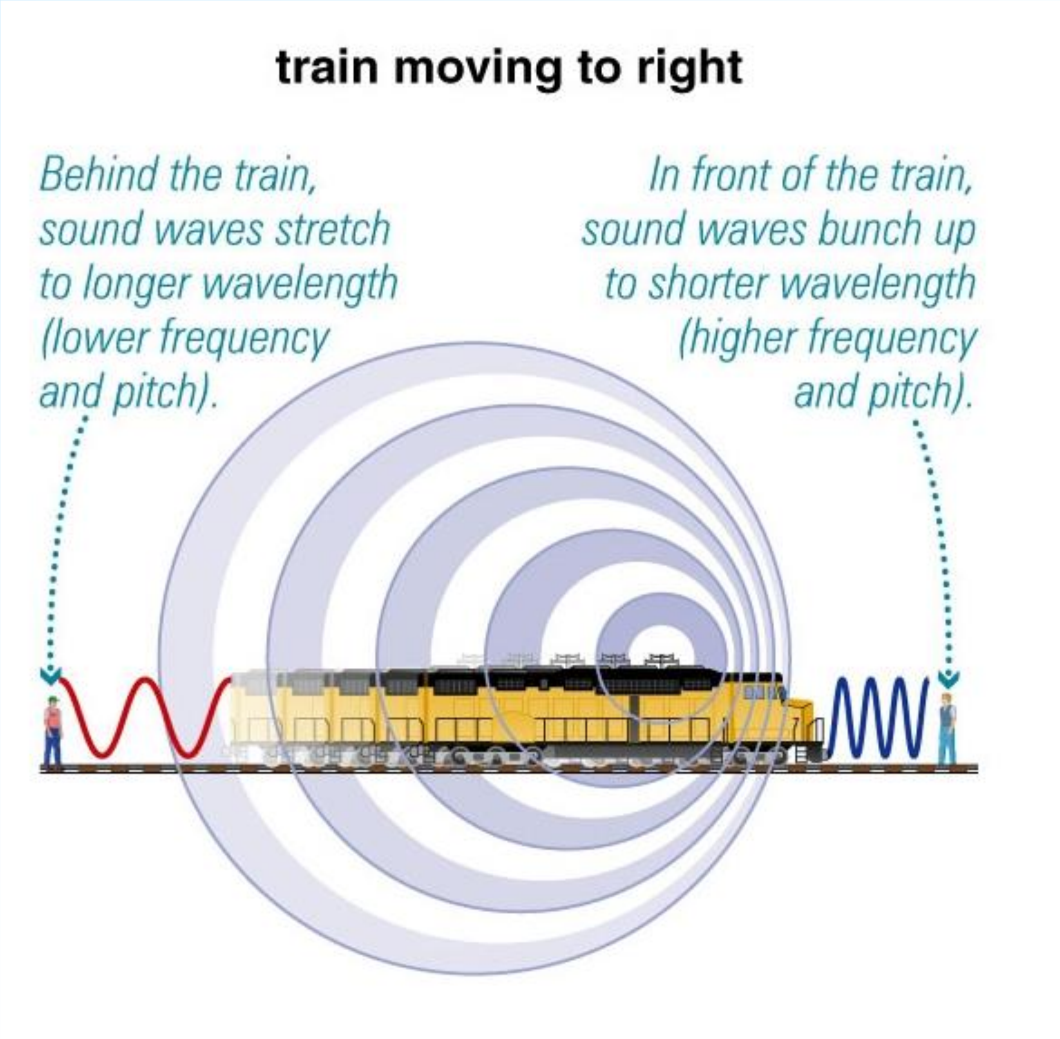
以往的讨论，波源只是在平衡位置振动，
自身的平衡位置并不发生移动。

实际过程中，波源通常是运动的。

例：火车的进站离开，飞机的起飞降落，……

问题：
雷达如何测量速度？
天文学家如何测算遥远星系的速度？

第8节 多普勒效应 Doppler effect



Christian J. Doppler

物体辐射的波长因为光源和观测者的相对运动而产生变化。

波源或者观察者相对于媒质运动，引起接收的频率与波源的频率不同的现象，称为多普勒效应。

一 声波的多普勒效应

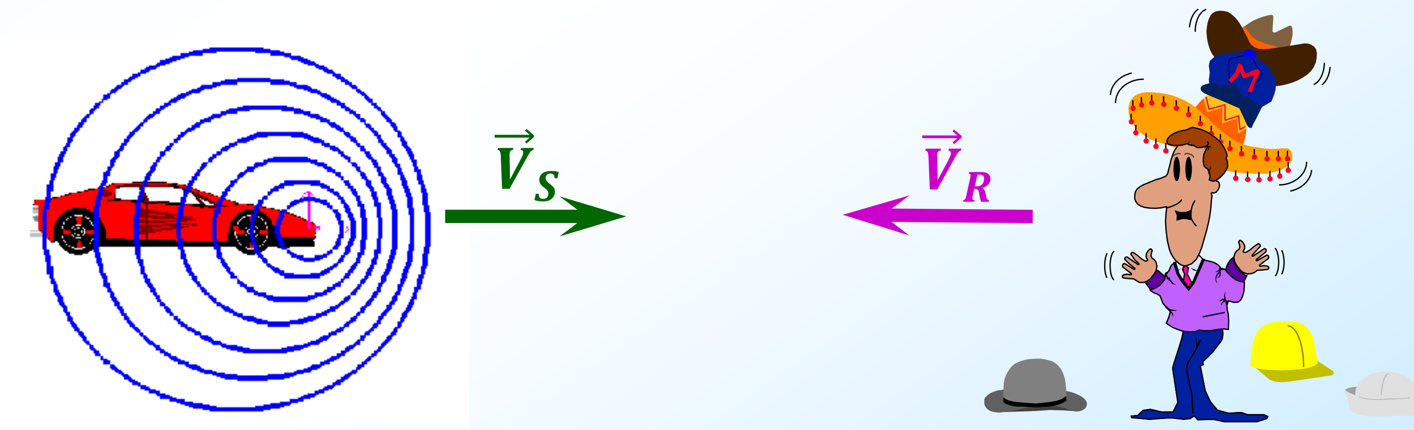
假定波源和观察者的连线，波源的运动方向，观察者的运动方向三者在同一条直线上。

波源相对于媒质的运动速度： $\vec{V}_S$

观察者相对于媒质的运动速度： $\vec{V}_R$

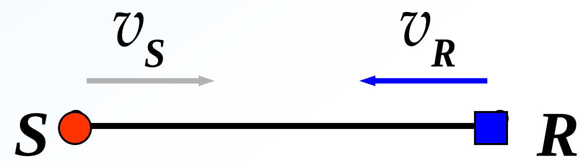
注意：

不论是$\vec{V}_S$还是$\vec{V}_R$，与波在媒质中的传播速度$\vec{u}$都不是一个概念。



一 声波的多普勒效应

参考系：介质



设波源的振动频率为 ν。

1. 波源和接收器都静止（v_S=0，v_R=0）

每隔一周期画一波面，间隔为λ,

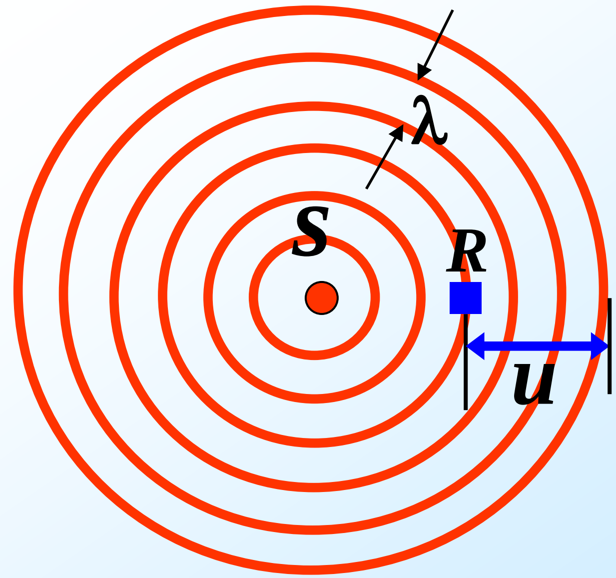
波一发出就会脱离波源运动。

波速u与波源和接收器无关。

单位时间通过R的波的个数，

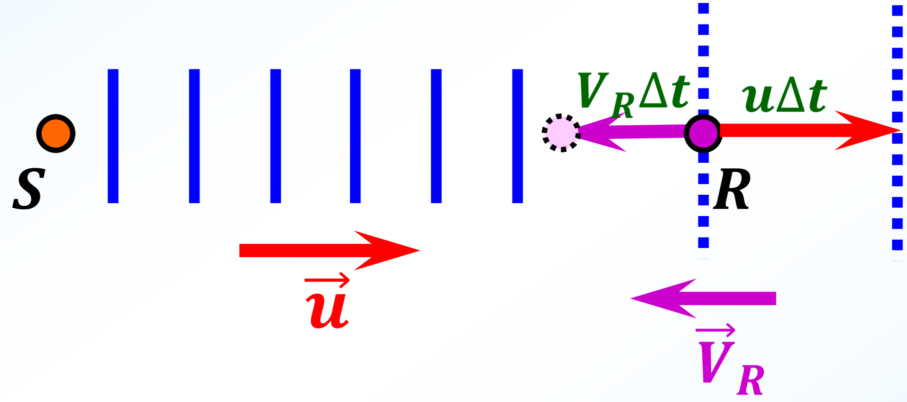
即为R接收到的频率：

$$\nu_1 = \frac{u}{\lambda} = \nu$$



2. 波源静止，接收器运动(v_S=0，v_R≠0)

1). 观察者接近波源



Δt时间间隔内波通过观察者的实际距离为：

$$u\Delta t + V_R\Delta t$$

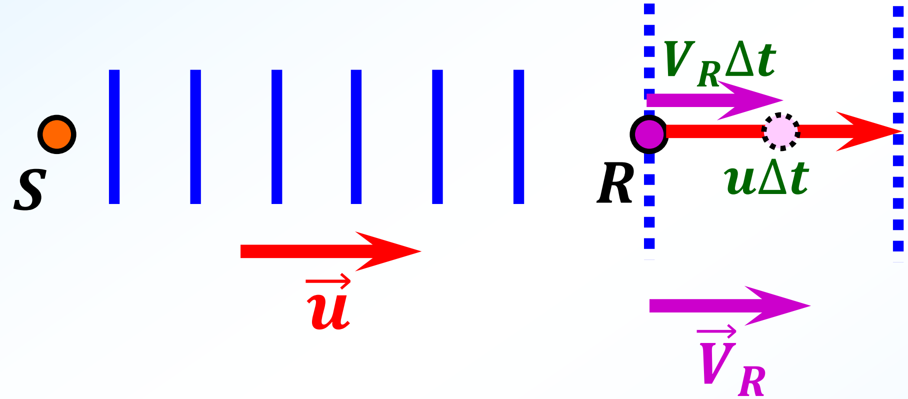
观察者感受到的有效波速为：$u' = u + V_R$

$$\nu_R = \frac{u'}{\lambda'} = \frac{u+V_R}{\lambda} = \frac{u+V_R}{uT} = \left(1+\frac{V_R}{u}\right)\nu_S$$

隐含了绝对时空观假定，
$V_R \to c$时结论不成立！

$$\therefore \nu_R = \left(1+\frac{V_R}{u}\right)\nu_S > \nu_S$$

2). 观察者远离波源



Δt时间间隔内波通过观察者的实际距离为：

$$u\Delta t - V_R\Delta t$$

观察者感受到的有效波速为：$u' = u - V_R$

$$\nu_R = \frac{u'}{\lambda'} = \frac{u - V_R}{\lambda} = \frac{u - V_R}{uT} = \left(1 - \frac{V_R}{u}\right)\nu_S$$

$$\therefore\ \nu_R = \left(1 - \frac{V_R}{u}\right)\nu_S < \nu_S$$

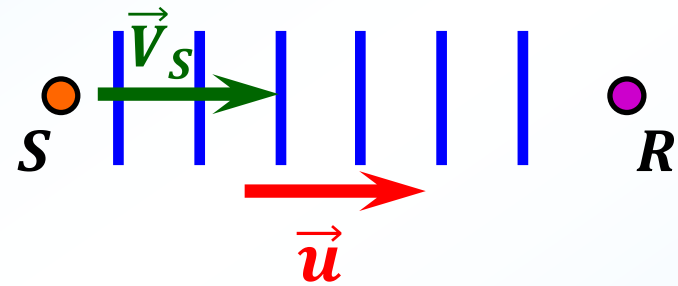
注意两种特殊情况：$\begin{cases} u = V_R & \nu_R = 0 \\ u < V_R & \nu_R < 0 \end{cases}$

观察者无法探测到波的传播。

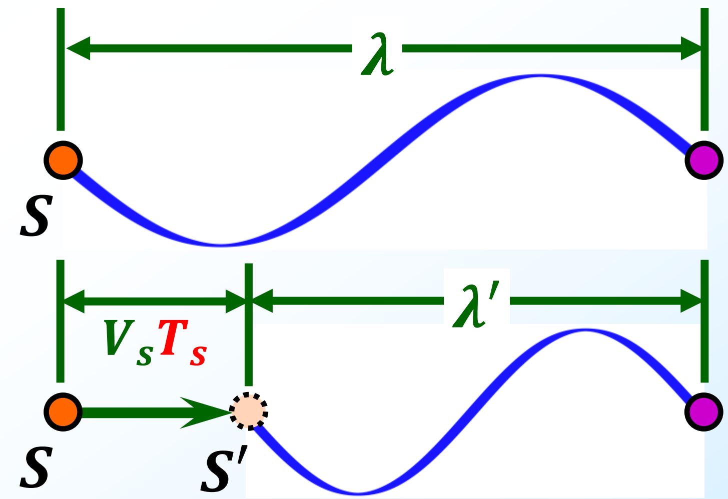
超音速

3. 接收器静止，波源运动(v_S=0，v_R=0)

1)．波源以速率V_S向观察者运动



波源在运动，两个相同振动状态是在不同地点发出的。



设0时刻波源开始振动，经过T_S时间传播了一个完整的波形，

此时波源向前前进的距离：V_sT_s

并且再发射一个相同的振动状态。

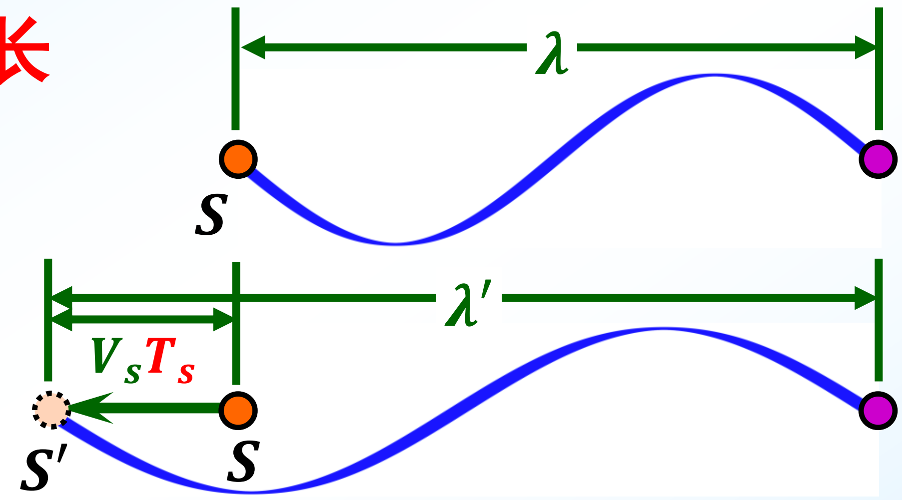
有效波长缩短为：$\lambda' = \lambda - V_S T_S$ **波速与波源无关，保持不变。**

$$\nu_R = \frac{u'}{\lambda'} = \frac{u}{\lambda - V_S T_S} = \frac{u}{u - V_S}\cdot\frac{1}{T_S} = \frac{u}{u - V_S}\nu_S \qquad \therefore\ \nu_R > \nu_S$$

2). 波源以速率V_S远离观察者运动

利用同样的分析可知，**有效波长增加为**：

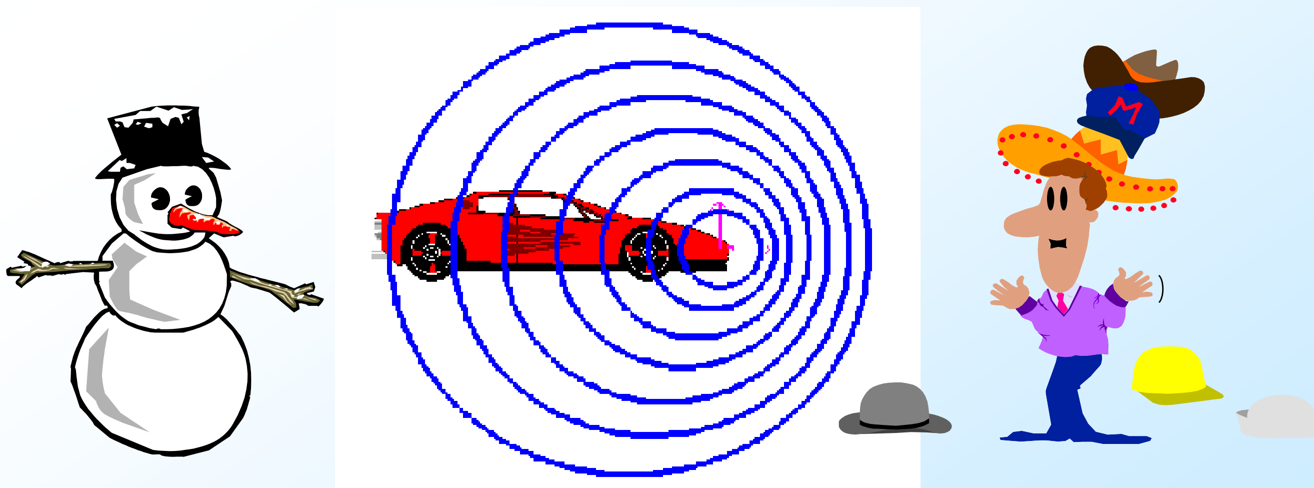
$$\lambda' = \lambda + V_S T_s$$



观察者接收的频率：

$$\nu_R = \frac{u}{u + V_S}\nu_S$$

$$\therefore \quad \nu_R < \nu_S$$



比较以上两种情况 $\begin{cases} \vec{V}_S = 0, & \vec{V}_R \neq 0 \\ \vec{V}_S \neq 0, & \vec{V}_R = 0 \end{cases}$

观察者运动与波源运动，所引起的结果完全不同。

观察者运动： $\nu_R = \left(1 \pm \frac{V_R}{u}\right)\nu_S$

波源运动： $\nu_R = \frac{u}{u \pm V_S}\nu_S$

问题：为什么这样的相对性是不对称的？

4. $\vec{V}_S \neq 0$, $\vec{V}_R \neq 0$

$\vec{V}_S \neq 0$ 接收的波长变化

$\vec{V}_R \neq 0$ 接收的波速变化

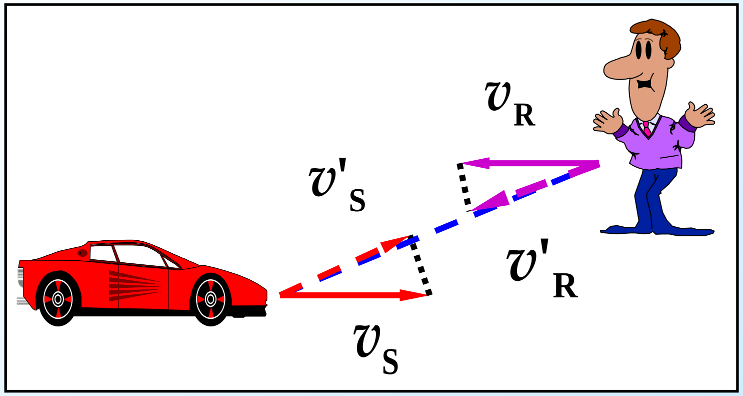
$$\nu_R = \frac{u \pm V_R}{u \mp V_S}\nu_S$$

当波源和观察者相向运动时，都取上面符号。反向运动时，都取下面符号。

当波源和观察者同向运动时，若波源追观察者，上下都取减号。反之，上下都取加号。

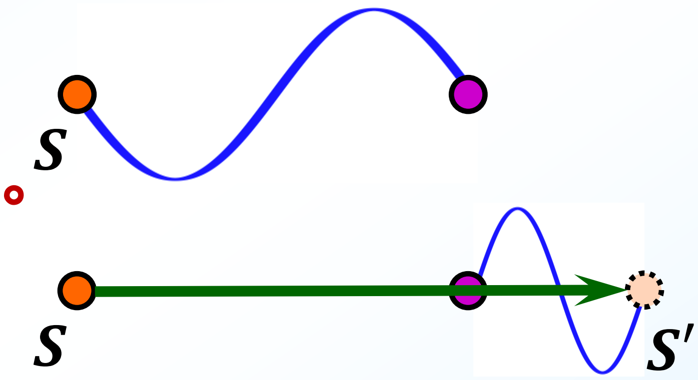
若波源与接收器不沿二者连线运动

$$\nu_4' = \frac{u \pm v_R'}{u \mp v_S'}\nu$$



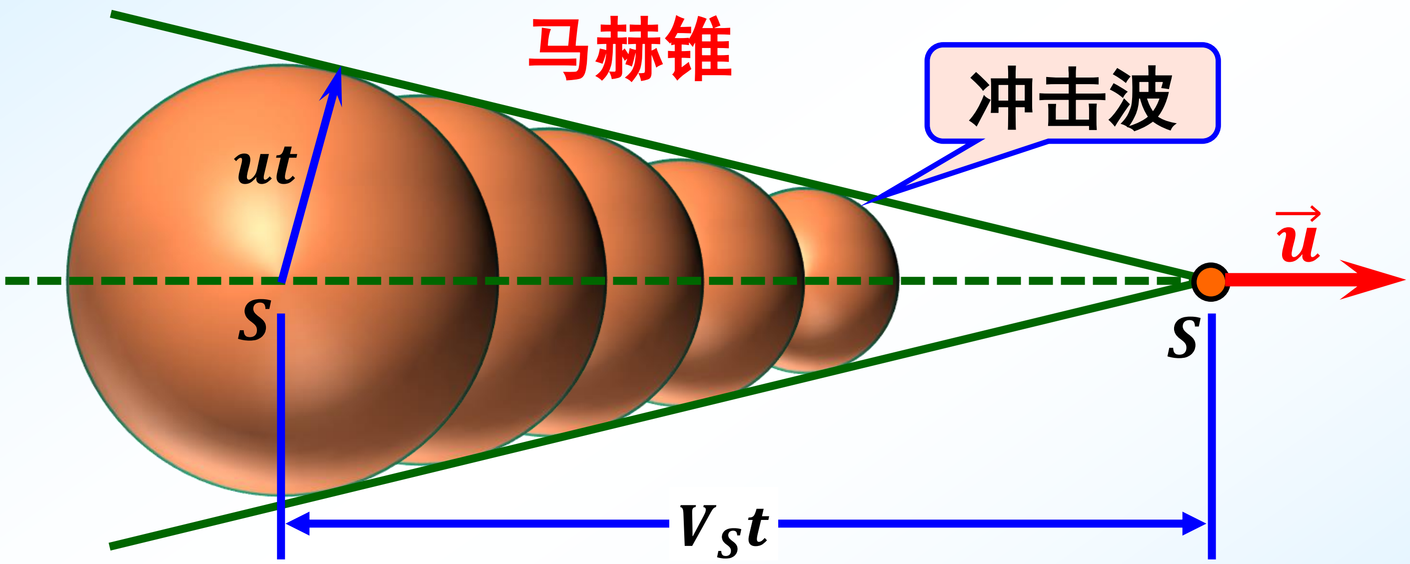
二 超波速运动

波源的运动速度大于波速：$V_S > u$



波源本身始终位于它所发出的波的前方。

波源前方不会有任何波动产生。



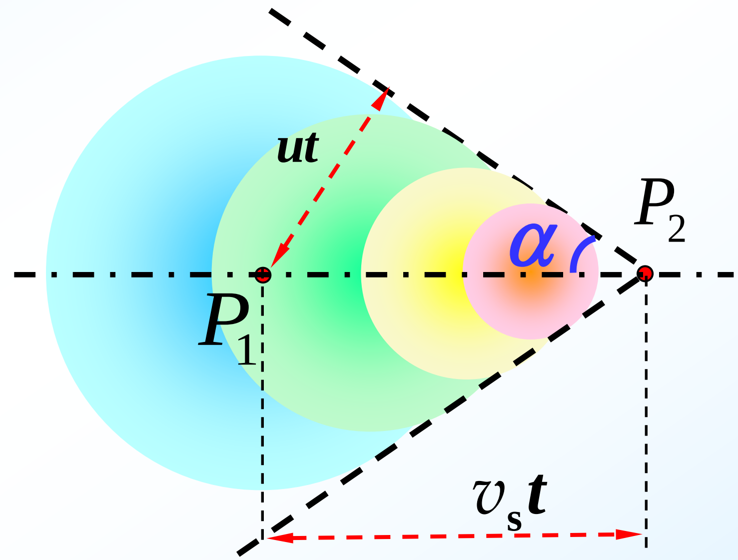
$\frac{V_S}{u}$ 马赫数

各时刻波源发出波的波前的包络面为一个以波源为顶点的圆锥面。

$$\sin\alpha = \frac{u}{v_s} = \frac{1}{\boxed{M}}$$

马赫数

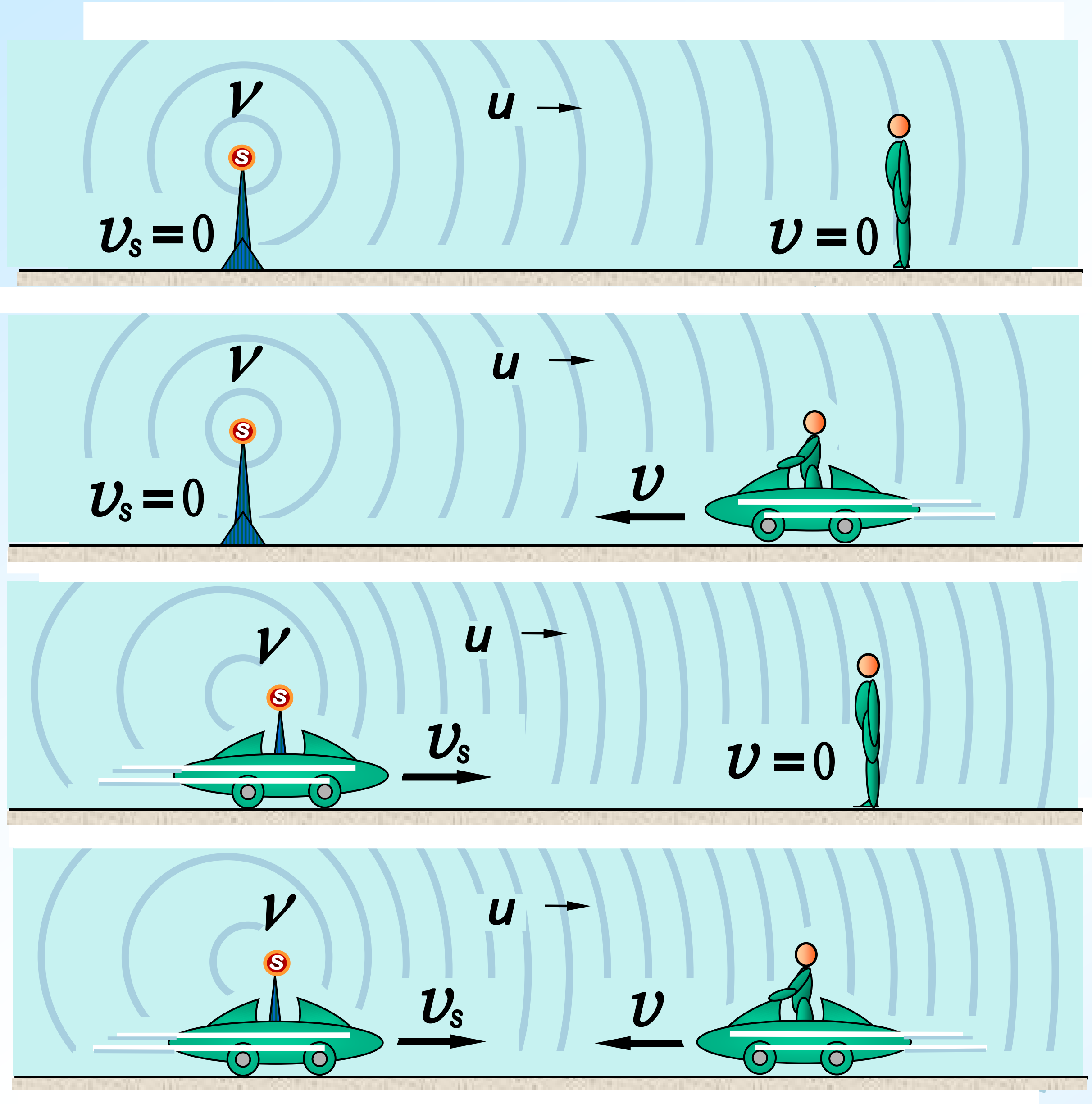
当 $v_s = u$ 时，马赫锥的半顶角 $\alpha = \frac{\pi}{2}$，马赫锥展开为平面—— “声障”



超音速飞机要冲破声障，并在空气中激起冲击波。

当船的航速超过水面上的水波速度时，在水面上激起以船头为顶端的V形波，这种波称为**艏波**。

飞机加速穿越音障



多普勒效应

$$\nu' = \nu$$

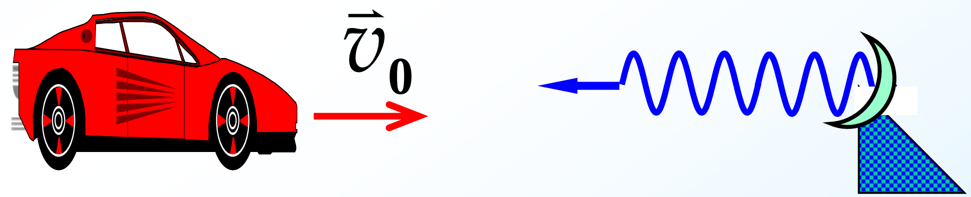
（向）（背）

$$\nu' = \left(\frac{u \pm v}{u}\right)\nu$$

$$\nu' = \left(\frac{u}{u \mp v_s}\right)\nu$$

$$\nu' = \left(\frac{u \pm v}{u \mp v_s}\right)\nu$$

例1. 利用多普勒效应监测车速，固定波源发出频率为 $\nu = 100\ \mathrm{kHz}$ 的超声波，当汽车向波源行驶时，与波源安装在一起的接收器接收到从汽车反射回来的波的频率为 $\nu'' = 110\ \mathrm{kHz}$。已知空气中的声速 $u = 330\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$，求车速。



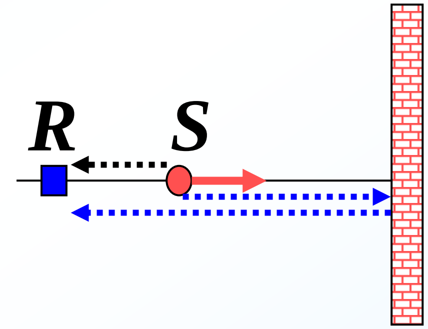
解：(1) 车为接收器

$$\nu' = \frac{u + v_0}{u}\nu$$

(2) 车为波源 $\nu'' = \dfrac{u}{u - v_s}\nu' = \dfrac{v_0 + u}{u - v_s}\nu$

车速 $v_0 = v_s = \dfrac{\nu'' - \nu}{\nu'' + \nu}u = 56.8\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$

例2. 报警器S发出频率为1000Hz的声波，离静止观察者R向一静止反射壁运动，其速度为10m/s,（声速330m/s)



求：(1)R直接从S收到的频率？

解： 已知 $\nu=10^3$ Hz　$v_S=10$ m/s　$u=330$ m/s

$$\nu_1=\frac{u}{u+v_S}\nu=\frac{330}{330+10}10^3=970\ \text{Hz}$$

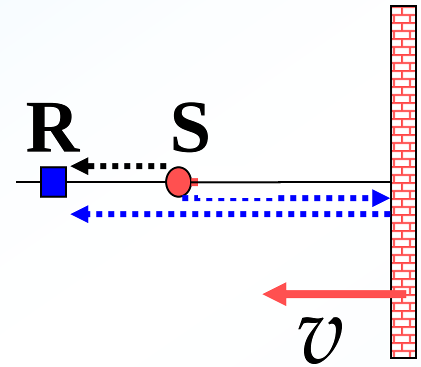
$$\boxed{\nu_4=\frac{u\pm v_R}{u\mp v_S}\nu}$$

(2) R从反射波收到的频率？

$$\nu_2=\frac{u}{u-v_S}\nu=\frac{330}{330-10}10^3=1030\ \text{Hz}$$

反射壁接收与发出的频率相同，

故R从反射波收到的频率为1030 Hz.



（3）R收到的拍频？

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 1030 - 970 = 60\ \text{Hz}$$

（4）若S不动，反射壁以20m/s向S运动，则拍频多少？

R直接从 S 收到 $\nu_1 = \nu = 10^3$ Hz

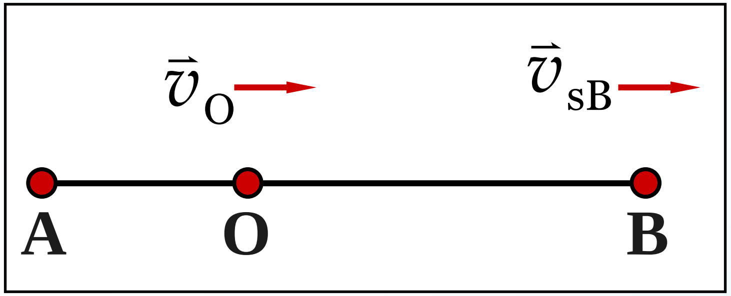
反射壁收到 $\nu' = \dfrac{u+v}{u}\nu$ 反射壁发出 ν'频率

R收到 $\nu_2 = \dfrac{u}{u-v}\nu' = \dfrac{u+v}{u-v}\nu = 1129$ Hz

拍频 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 129\ \text{Hz}$

例3. A、B 为两个汽笛，其频率皆为500Hz，A 静止，B 以60m/s 的速率向右运动。在两个汽笛之间有一观察者O，以30m/s 的速度也向右运动。已知空气中的声速为330m/s，求：

(1) 观察者听到来自A 的频率



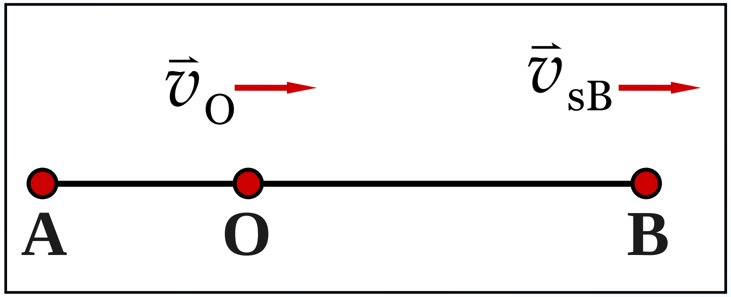
解: (1) u=330 m/s, v_{sA}=0, v_{sB}=60 m/s, v_0=30 m/s

$$\nu' = \frac{u - v_O}{u}\nu \qquad \nu' = \frac{330 - 30}{330} \times 500 = 454.5\ \text{Hz}$$

例3. A、B 为两个汽笛，其频率皆为500Hz，A 静止，B 以60m/s 的速率向右运动。在两个汽笛之间有一观察者O，以30m/s 的速度也向右运动。已知空气中的声速为330m/s，求：

(2) 观察者听到来自B 的频率

(3) 观察者听到的拍频



解: (2)

$$\nu'' = \frac{330+30}{330+60} \times 500 = 461.5 \ \text{Hz}$$

(3) 观察者听到的拍频 $\Delta\nu = \left|\nu' - \nu''\right| = 7 \ \text{Hz}$

$$\boxed{x = 2A_0 \cos\frac{\omega_2-\omega_1}{2} t \cos\left(\frac{\omega_1+\omega_2}{2} t + \phi\right)}$$

科普：

利用声波的多普勒效应可以测定流体的流速，振动体的振动和潜艇的速度，还可以用来报警和监测车速。

在医学上，利用超声波的多勒效应对心脏跳动情况进行诊断，如做超声心动、多普勒血流仪等。

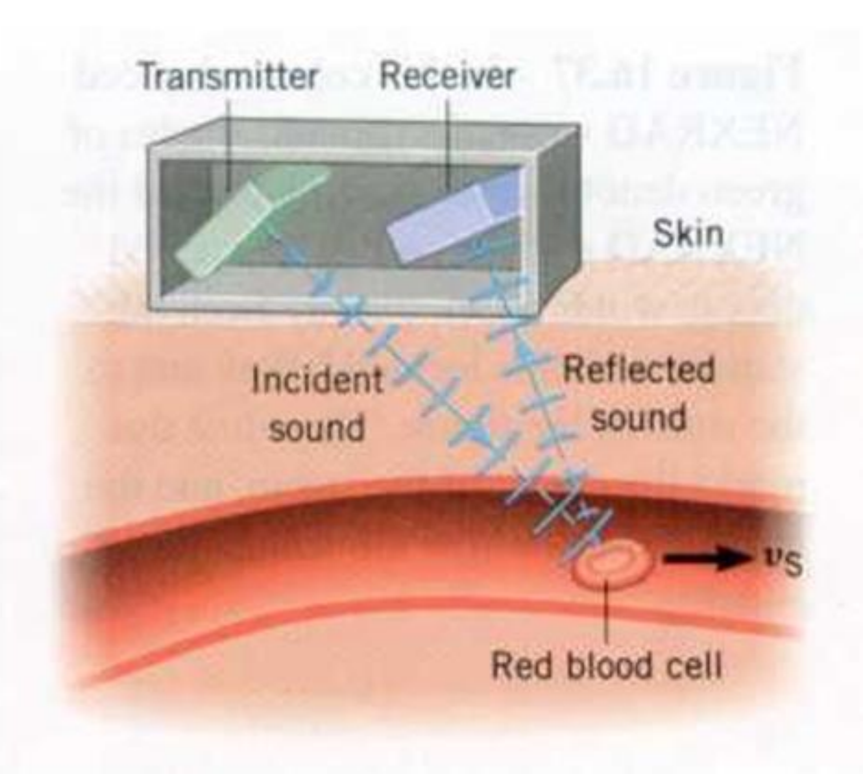


Figure : A Doppler flow meter measures the speed of red blood cells.

三 电磁波的多普勒效应

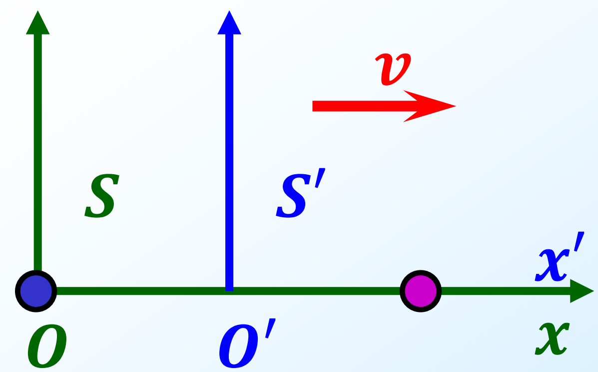
电磁波的传播速度是光速c，且传播不依赖介质；

需要考虑相对论效应。

假定波源与观察者相对运动速率为v

相对于波源静止的参考系为S系

相对于观察者静止的参考系为S'系

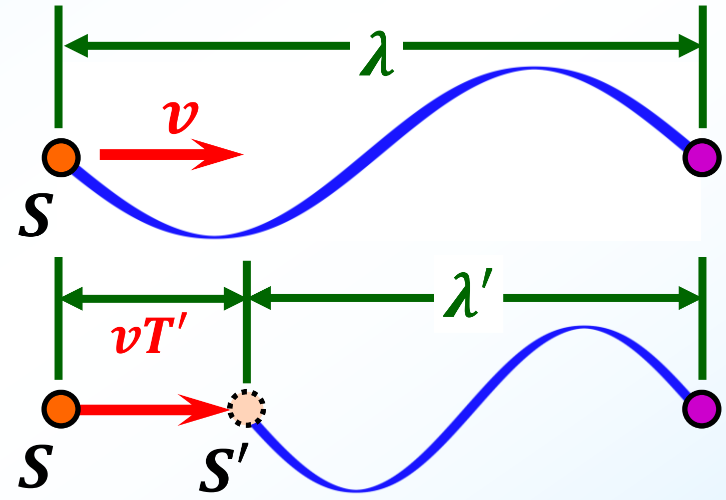


S系中波的周期：T

S'系中波的周期:$T' = T/\sqrt{1 - v^2/c^2}$

1. 两者互相接近时

在S'系中观察，波传播的一个周期内波源前进距离为vT'



$$\lambda' = \lambda - vT' = (c - v)T'$$

在S'系中观察到波的频率

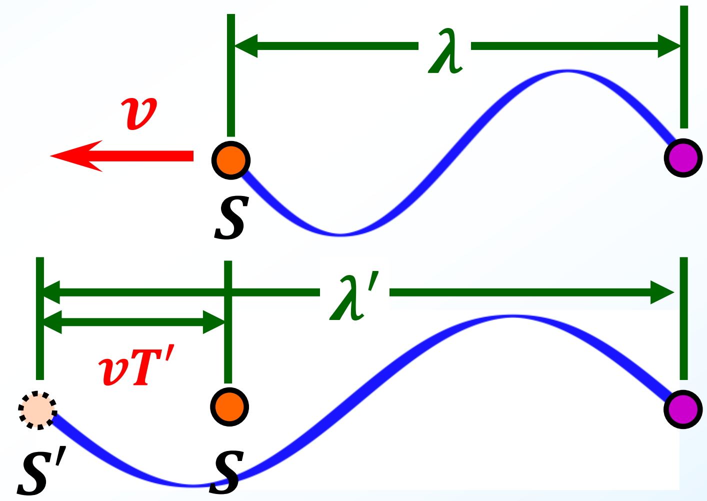
$$\nu_R = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{(c-v)T'} = \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c - v} \cdot \frac{1}{T}$$

$$\boxed{\nu_R = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}\nu_S}$$

频率变高，波长变短，蓝移

2. 两者互相远离时

在S'系中观察，波传播的一个周期内波源反方向前进距离为vT'



$$\lambda' = \lambda + vT' = (c+v)T'$$

在S'系中观察到波的频率

$$\nu_R = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{(c+v)T'} = \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c+v} \cdot \frac{1}{T}$$

$$\boxed{\nu_R = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}\nu_S}$$

频率变低，波长变长，红移

3. 电磁波的多普勒效应

两者相互接近时：$\nu_R = \sqrt{\dfrac{c+v}{c-v}}\nu_S$

频率变高，波长变短，蓝移

两者相互远离时：$\nu_R = \sqrt{\dfrac{c-v}{c+v}}\nu_S$

频率变低，波长变长，红移

问题：为什么这样的相对性是对称的？

作业： Chap.11 —T24、T25、T26、T27

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 通过学习通提交作业。
4. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。