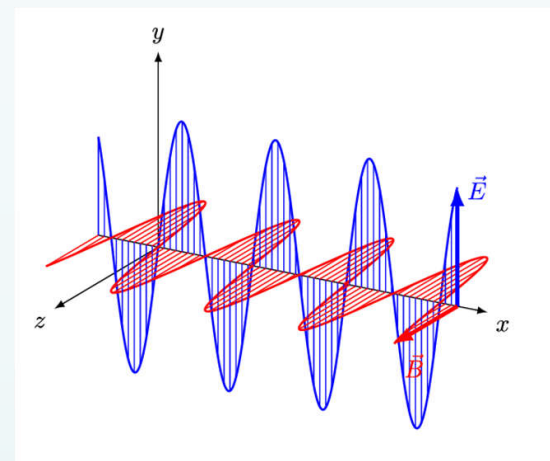
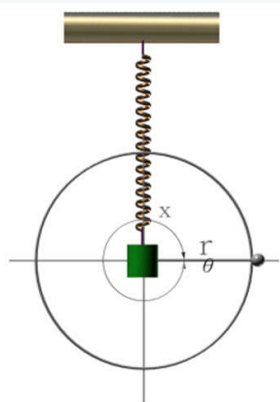


大学物理

第11章-5 振动与波动



主讲: 尹 航

华中科技大学 物理学院

回顾

波的现象

反射

反射定律：入射角=反射角 惠更斯原理解释

半波损失：垂直入射，波疏进入波密，相位加 π

折射

折射定律： $\frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{u_1}{u_2}$ 惠更斯原理解释

*全反射：波从波密进入波疏 $\gamma > \frac{\pi}{2}$ 入射全被反射

衍射：波绕过障碍物继续传播 惠更斯定原理定性解释

干涉

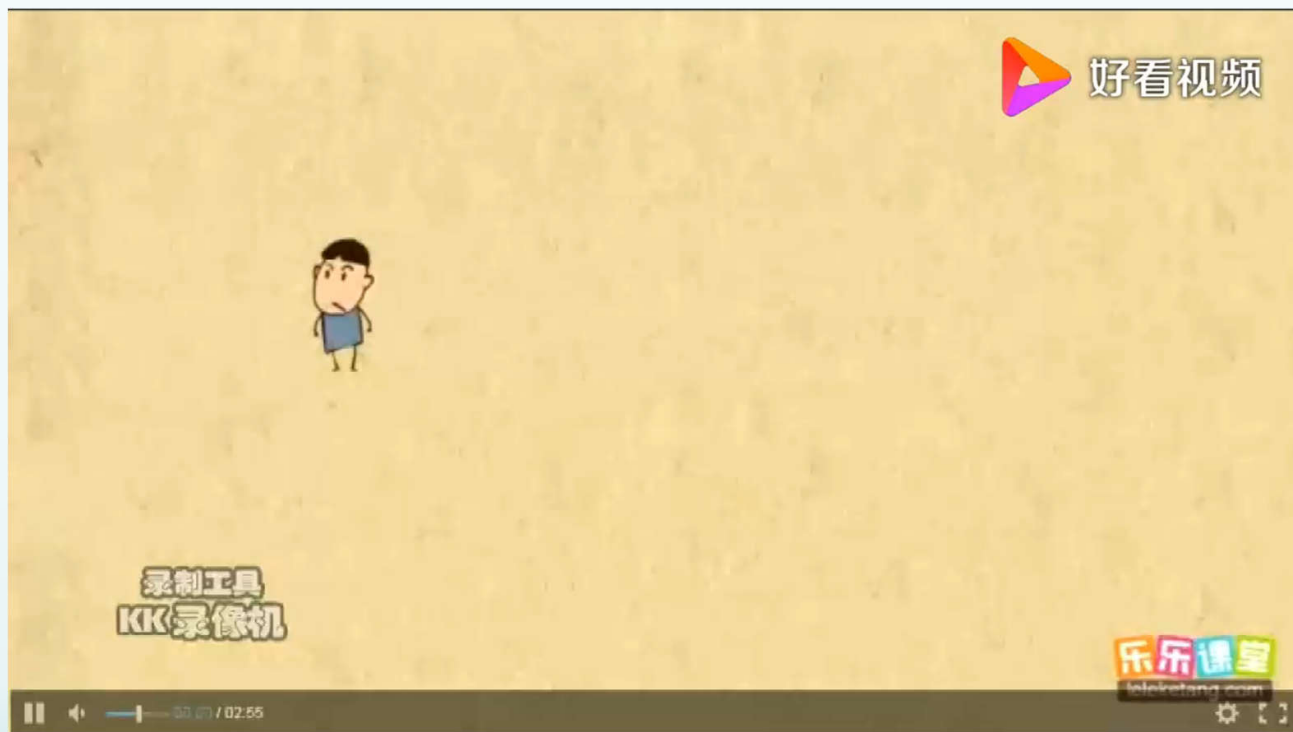
干涉现象 相干条件

干涉图样
$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi$$
$$\Delta\varphi = k\Delta x$$

驻波 波腹 波节 特殊的振动

引子

身边的一种现象



声音：由大变小

音调：由高转低

问题：汽车喇叭的问题？ 司机的问题？

本节内容

1

多普勒效应

2

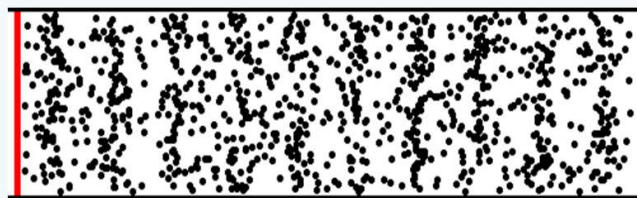
电磁波

多普勒效应

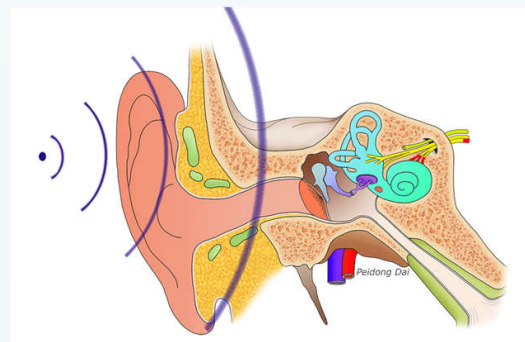
人耳听声音原理



波源



传播



接收（鼓膜振动）

音量

声波的幅度

音调

声波的频率

频率高 → 音调高

频率低 → 音调低

描述

多普勒效应

多普勒效应

□ 多普勒效应



Christian J. Doppler

- ◆ 奥地利物理学家、数学家、天文学家。
- ◆ 1842年提出著名的“多普勒效应”



迎面疾驰驶来的列车，鸣笛声音尖锐高亢
疾驰驶离而去的列车，鸣笛声音浑厚低沉

- ◆ 哈勃“红移”的理论基础

多普勒效应

□ 多普勒效应 (波源与观察者相对运动带来的效应)

参考系：介质

• 波源和接收器都静止 $v_S=0$ $v_R=0$

设波源的振动频率为 ν

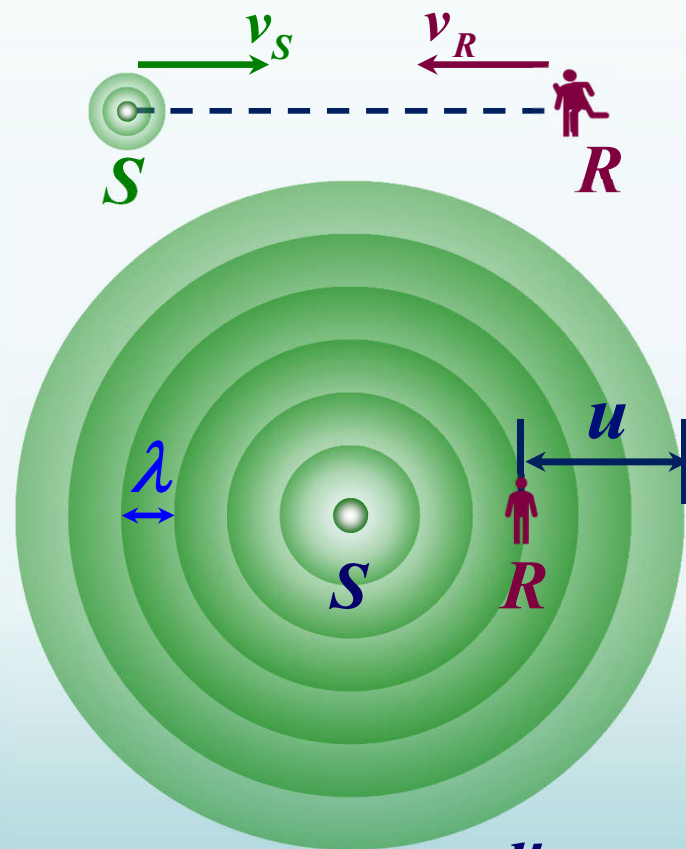
静止波源 \rightarrow 球面波

波速由介质决定，与波源和接收器无关

波一发出就会脱离波源运动

每隔一周期画一波面，间隔为 λ

R 接收到的波的频率 \rightarrow 单位时间通过 R 的波的个数 $\nu_R = \frac{u}{\lambda} = \nu$



多普勒效应

- 波源静止，接收器运动 $v_S=0$ $v_R \neq 0$

R 朝着波源运动 速度 v_R

R 收到的频率为

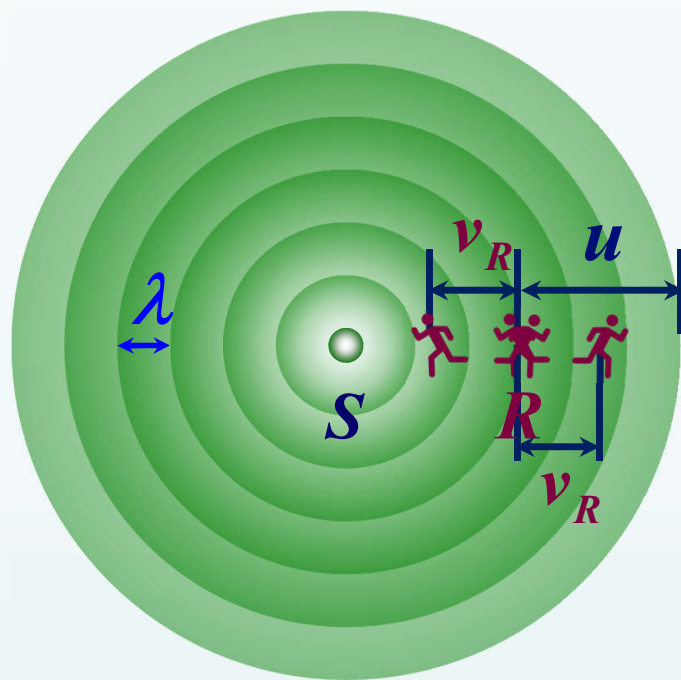
$$\nu_R = \frac{u + v_R}{\lambda} = \frac{u + v_R}{u/\nu} = \frac{u + v_R}{u} \nu \longrightarrow \nu_R > \nu$$

频率变**大** 音调变高、尖锐

R 远离波源运动

同理分析 R 收到的频率为
$$\nu_R = \frac{u - v_R}{\lambda} = \frac{u - v_R}{u} \nu \longrightarrow \nu_R < \nu$$

频率变**小** 音调低沉、浑厚



多普勒效应

- 波源运动，接收器静止 $v_S \neq 0$ $v_R = 0$

波源**靠近**接收器 波长变化变短

$$\lambda' = \lambda - v_S T = uT - v_S T = \frac{u - v_S}{\nu}$$

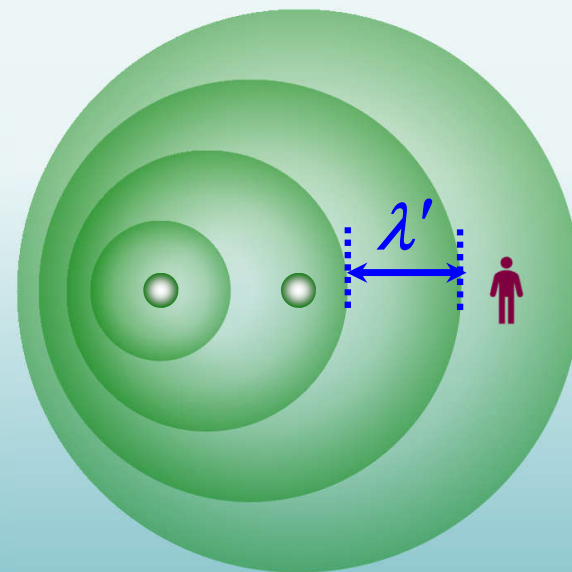
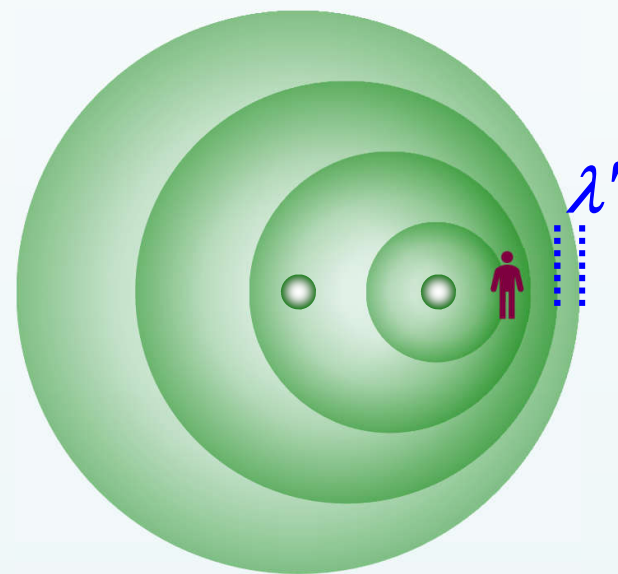
R收到的频率为

$$\nu_R = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{u - v_S} \nu > \nu \quad \text{变大}$$

波源**远离**接收器 波长变化变长

$$\lambda' = \lambda + v_S T = uT + v_S T = \frac{u + v_S}{\nu}$$

$$\nu_R = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{u + v_S} \nu < \nu \quad \text{变小}$$



多普勒效应

- 接收器、波源都运动

R 收到的频率为

$$\nu_R = \frac{u \pm \nu_R}{u \mp \nu_S} \nu$$

靠近运动，取上面符号

远离运动，取下面符号

靠近 \longrightarrow 频率变大

远离 \longrightarrow 频率减小

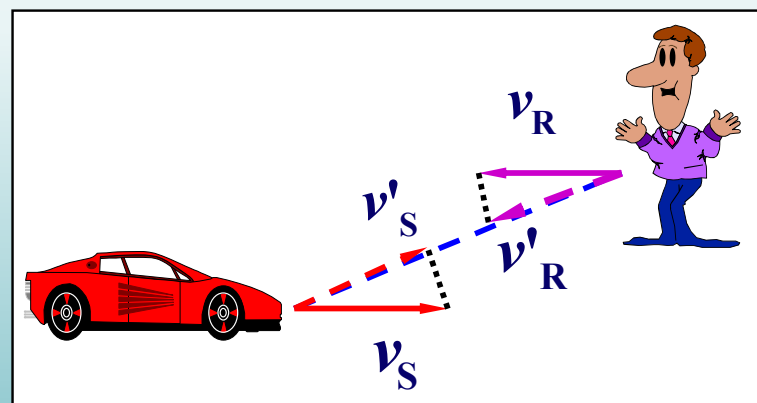
若波源与接收器不沿二者连线运动

将相对运动投影到

二者连线上

波线

$$\nu'_4 = \frac{u \pm \nu'_R}{u \mp \nu'_S} \nu$$



多普勒效应

多普勒效应

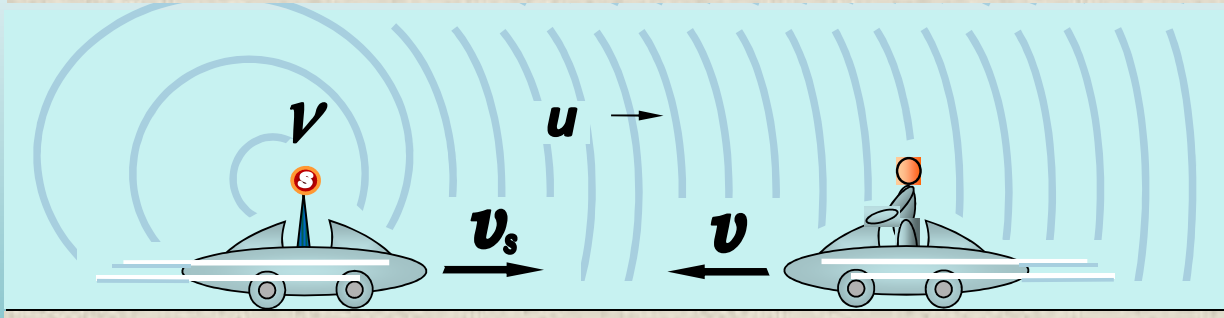
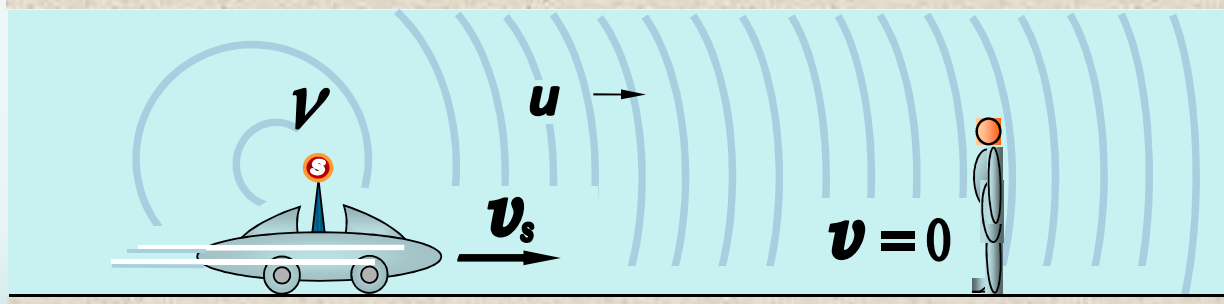
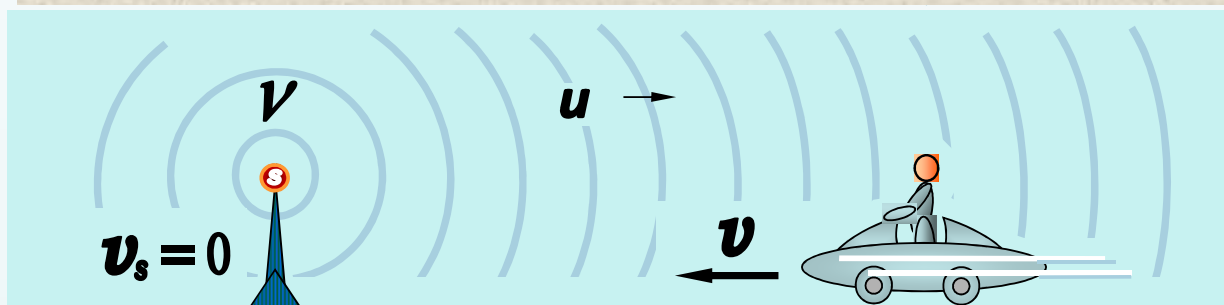
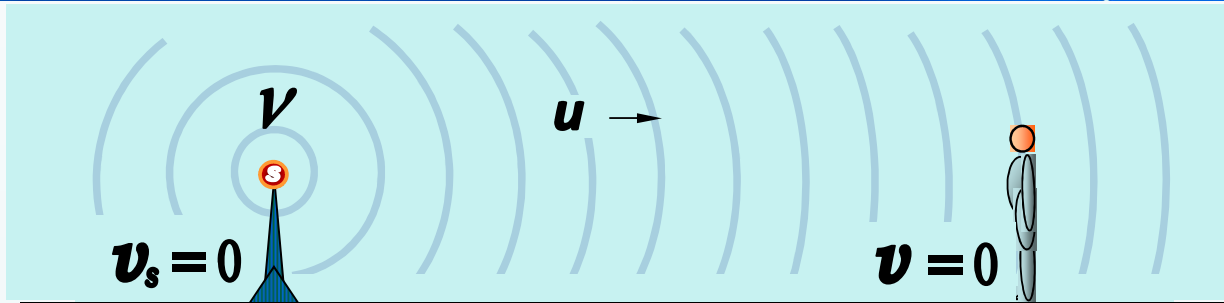
$$\nu_R = \nu$$

相对运动: **相向** **相背**

$$\nu_R = \frac{u + \underline{\nu}}{u} \nu$$

$$\nu_R = \frac{u}{u \mp \nu_s} \nu$$

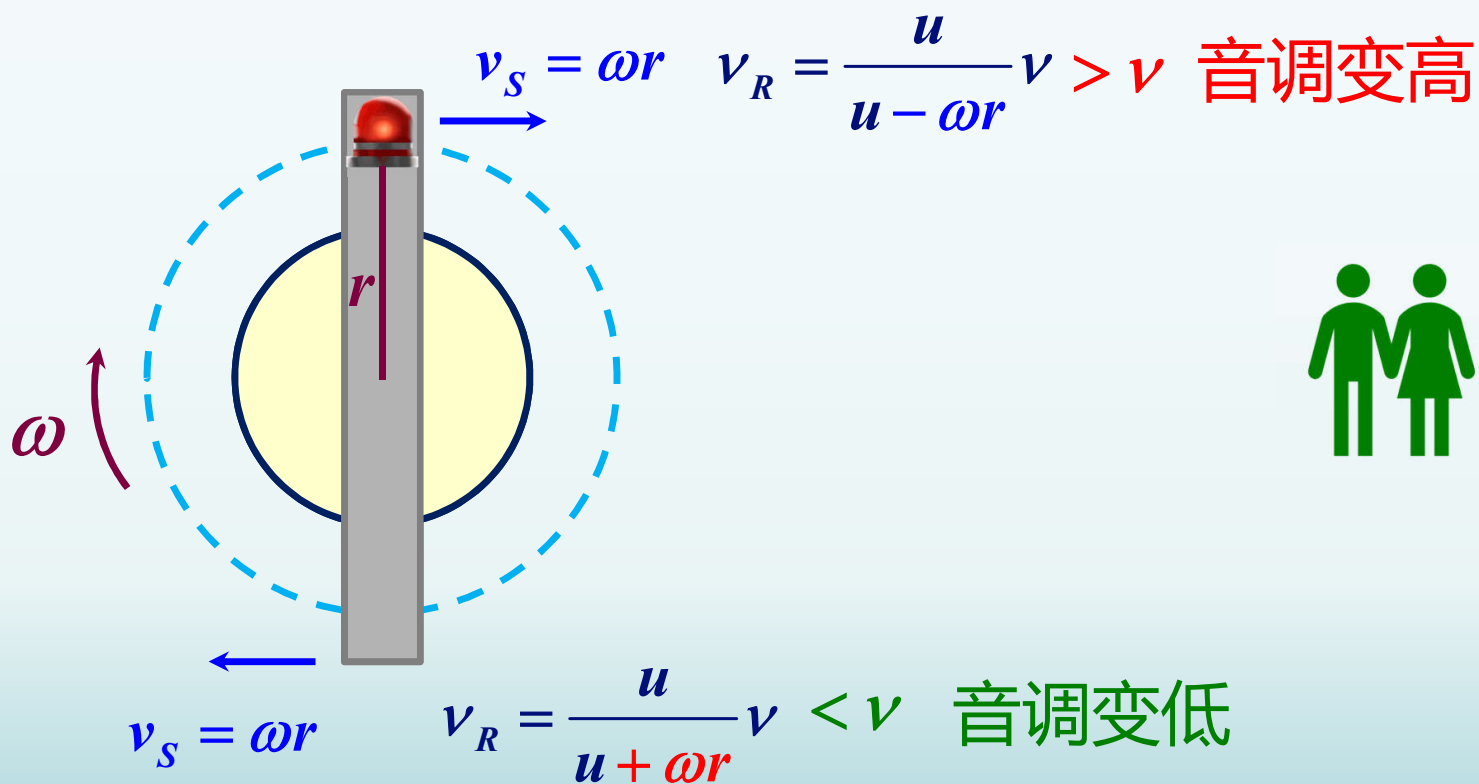
$$\nu_R = \frac{u + \underline{\nu}}{u \mp \nu_s} \nu$$



运动波源的多普勒效应

演示实验

为什么旋转的报警器发出的警铃声忽高忽低？



多普勒效应

□ 冲击波与马赫锥

波源速度小于波速 $v_s < u$

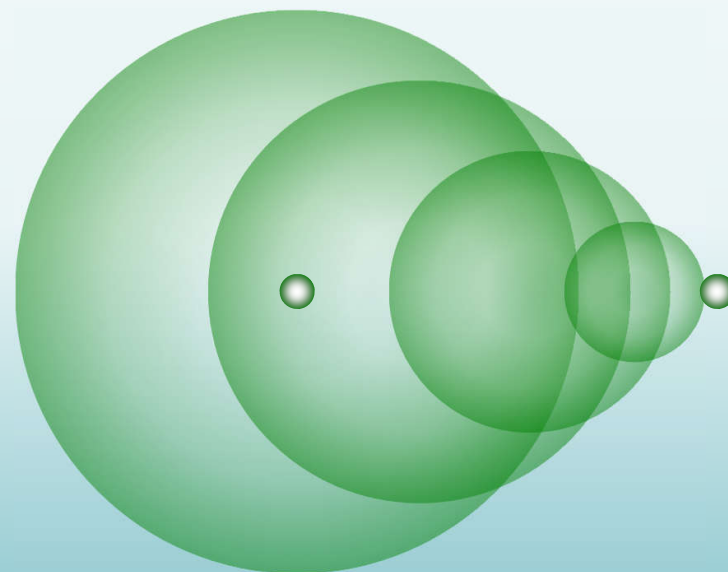
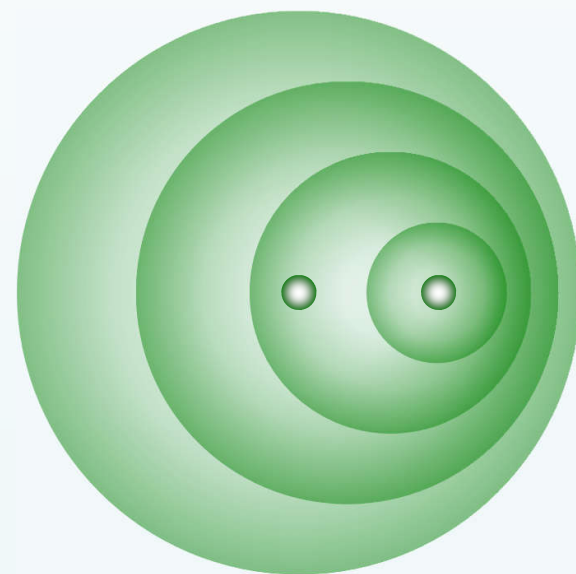
波源追不上波阵面

若波源速度超过波速
会是怎样的情况？

$$v_s > u$$

当 $v_s > u$ 时激发的波 **冲击波**

波源在前面飞，波面在后面追



多普勒效应

波源在各时刻发出波的**波前的包络面**为一个以波源为顶点的**圆锥面**。

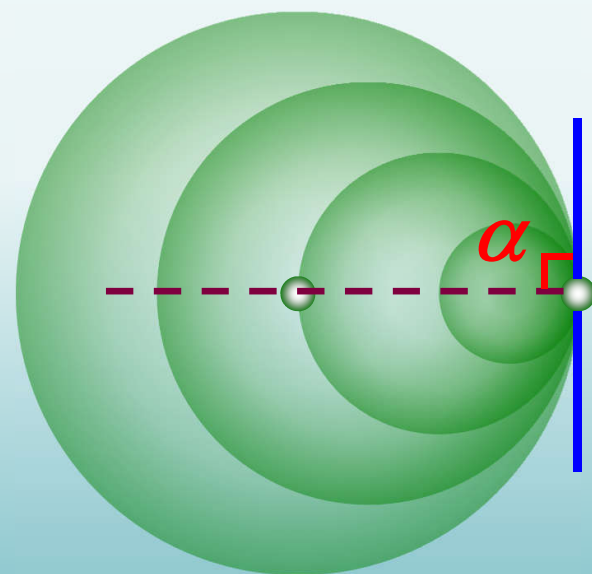
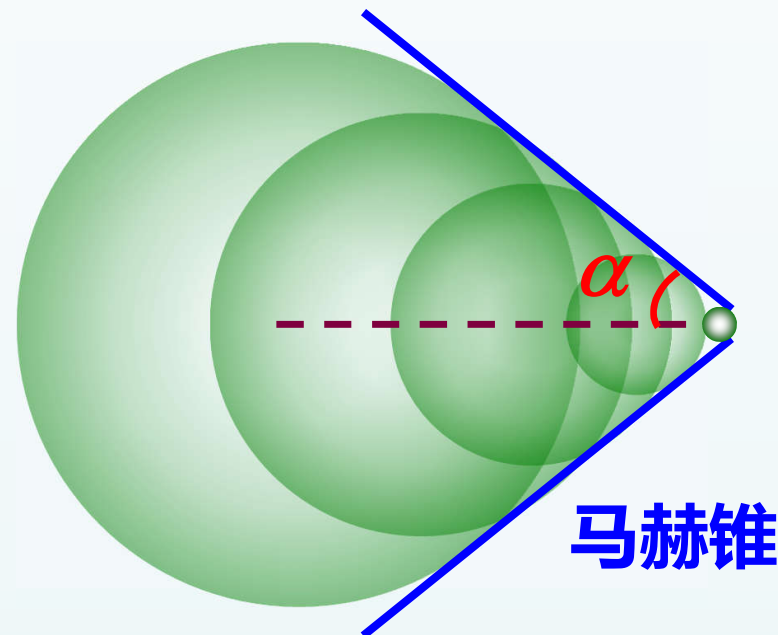
$$\sin \alpha = \frac{u}{v_s} = \frac{1}{M} \rightarrow \text{马赫数}$$

马赫锥半顶角

当 $v_s = u$ 时，**会发生什么？**

$$\text{马赫锥半顶角 } \alpha = \frac{\pi}{2}$$

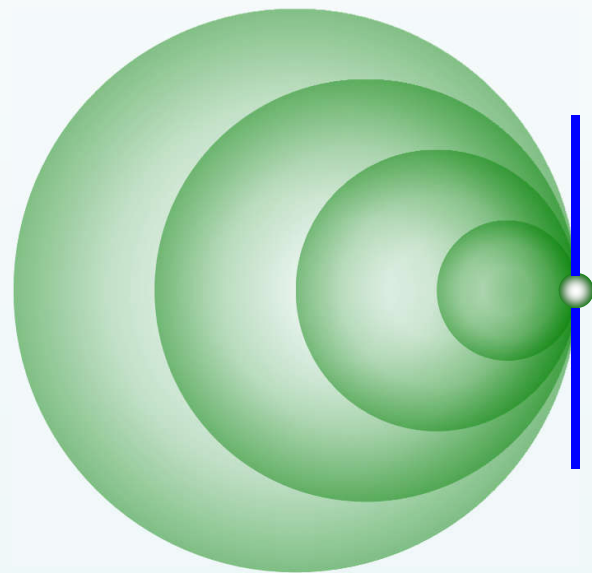
马赫锥展开成**平面**



多普勒效应

当 $v_R = u$ 时, 马赫锥展开成平面 } 音障 (声障)
针对空气中的声波

超音速战机突破音障, 在空中激起冲击波



国之利器

我国战机发展历程

歼5



自研新纪元

歼8



首款整技术出口

枭龙



1949

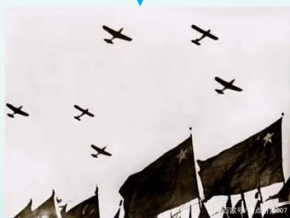
1956

1964

1969

1998

2004



战机11架

万国牌武器



歼6、歼7

首款超音

速战机

仿制米格-19&21



歼10

首款自研超

音速战机

重型战机：歼11

舰载战机：歼15

多功能战机：歼16

隐形战机：歼20、歼31

多普勒效应

例. 利用多普勒效应监测车速, 固定波源发出频率为的超声波 $\nu=100\text{kHz}$, 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 $\nu''=110\text{kHz}$ 。已知空气中的声速 $u=330\text{ m/s}$, 求车速。

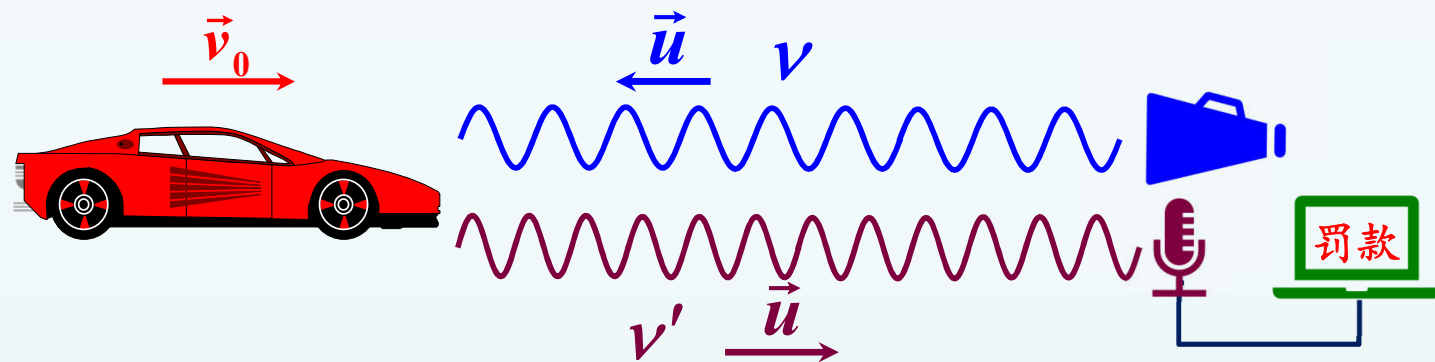
解: (1) 车为接收器

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

(2) 车为反射波的波源

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

$$\text{车速 } v_0 = \frac{\nu'' - \nu}{\nu'' + \nu} u = 56.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$



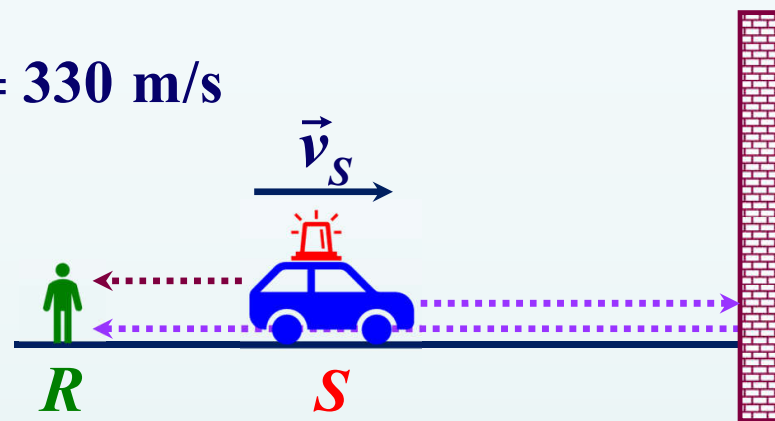
多普勒效应

例. 报警器 S 发出频率为 1 kHz 的声波, 远离静止观察者 R 向一静止反射壁运动, 其速度为 10 m/s, (声速 330 m/s)。

求: (1) R 直接从 S 收到的频率?

解: 已知 $\nu = 1000 \text{ Hz}$ $v_S = 10 \text{ m/s}$ $u = 330 \text{ m/s}$

$$\nu_1 = \frac{u}{u + v_S} \nu = 970 \text{ Hz}$$



(2) R 从反射波收到的频率?

相对于入射波而言——反射壁是接收器

相对于反射波而言——反射壁是波源

$$\text{反射壁收到的频率 } \nu_2 = \frac{u}{u - v_S} \nu = 1030 \text{ Hz}$$

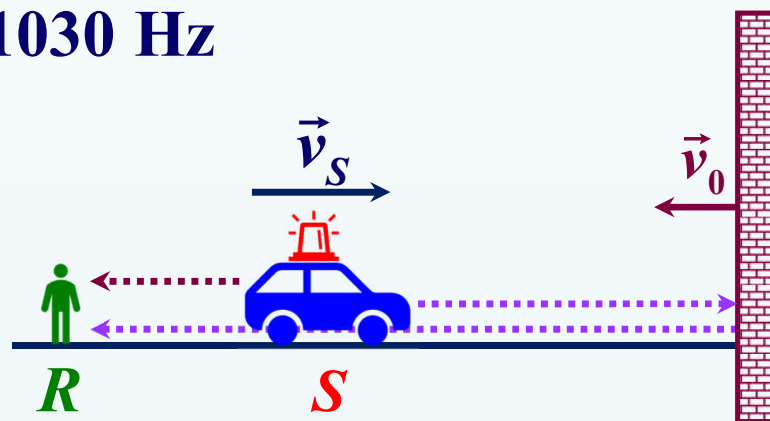
多普勒效应

解：反射壁收到的频率 $\nu_2 = \frac{u}{u - v_s} \nu = 1030 \text{ Hz}$

反射波的频率为 ν_2

反射壁与人相对静止

观察者 R 听到的频率为 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 20 m/s 向 S 运动，则拍频多少？

R 直接从 S 收到的频率 $\nu_1 = \nu = 10^3 \text{ Hz}$

反射壁收到的频率 $\nu' = \frac{u + v_0}{u} \nu$ 反射波的频率为 ν'

多普勒效应

解： (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 收到的频率

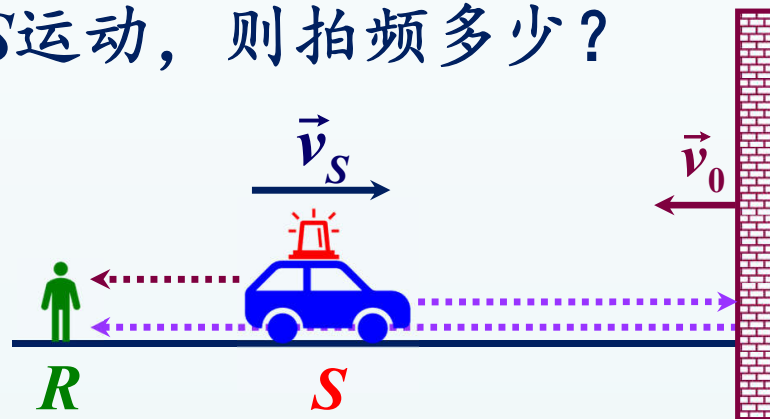
$$\nu_1 = \nu = 10^3 \text{ Hz}$$

反射壁收到的频率 $\nu' = \frac{u + v_0}{u} \nu$

反射波的频率为 ν'

R 收到反射波的频率 $\nu_2 = \frac{u}{u - v_0} \nu' = \frac{u + v_0}{u - v_0} \nu = 1129 \text{ Hz}$

拍频 $\Delta \nu = \nu_2 - \nu_1 = 1129 - 1000 = 129 \text{ Hz}$



多普勒效应

例. 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R，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；(2) 观察者听到来自B 的频率；(3) 观察者听到的拍频。

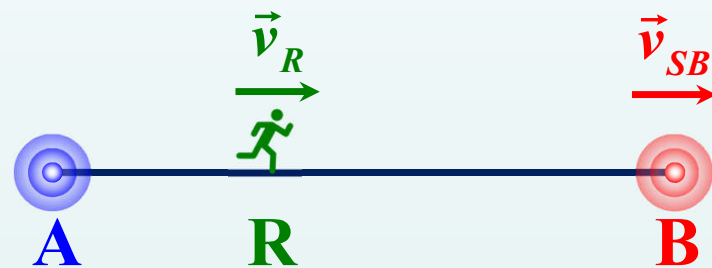
解：(1) 观察者R接收A波源

$$\nu' = \frac{u - v_R}{u} \nu \longrightarrow \nu' = 454.5 \text{ Hz}$$

观察者R与B波源

典型的波源与观察者同向移动的问题

怎样判断靠近？远离？



多普勒效应

解：(1) 观察者R接收A波源 $\nu' = 454.5 \text{ Hz}$

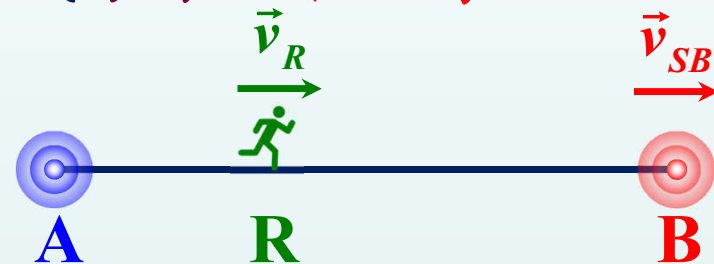
(2) 观察者R与B波源 典型的波源与观察者同向移动的问题
怎样判断靠近？远离？

若波源不动，观察者靠近波源 公式分子上取加号

若观察者不动，波源远离观察者 公式分母上取加号

观察者听到B的频率

$$\nu'' = \frac{u + v_R}{u + v_{SB}} \nu = 461.5 \text{ Hz}$$



(3) 拍频 $\Delta \nu = |\nu' - \nu''| = 7 \text{ Hz}$

多普勒效应

□ 电磁波的多普勒效应

电磁波的传播不依赖于任何介质，因此接收频率取决于光源和接收器的相对速度 v 。

$$\nu_R = \sqrt{\frac{1 \pm v/c}{1 \mp v/c}} \nu_S$$

注意 { 靠近运动，取上面符号
远离运动，取下面符号

多普勒频移 $\Delta \nu = \nu_R - \nu_S$ { 相互靠近， ν_R 变大，波长变短 蓝移
相互远离， ν_R 变小，波长变长 红移

*哈勃红移 地球上观察恒星的光，其光谱会向红色的一端移动

↓
相互远离 → 宇宙膨胀 常用于测量恒星（或星系）距离

多普勒效应

*小科普

宇宙中星间测距



在宇宙中拥有着无数的天体