14-7 多普勒效应（The Dopple effect）

波源（静止、运动） ⟺ 观察者（静止、运动）

由于观察者（接收器）或波源、或二者同时相对媒质运动，使观察者接收到的频率与波源发出的频率不同的现象。

—— 多普勒效应

观察者接收到的频率

$$f = \frac{\text{相对于观察者的波速}}{\text{波长}}$$

设相对于媒质而言，波源（频率 f_0）运动的速度为 v_s

波速为 u，观察者运动速度为 v_0

下面分四种情况来讨论

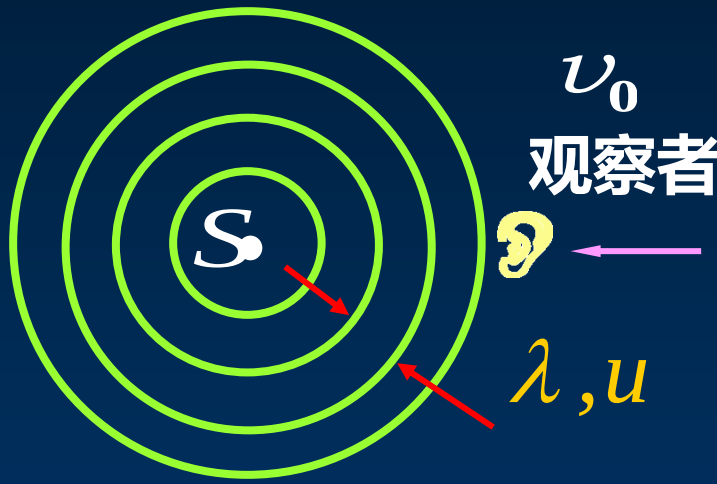
一、波源和观察者都静止

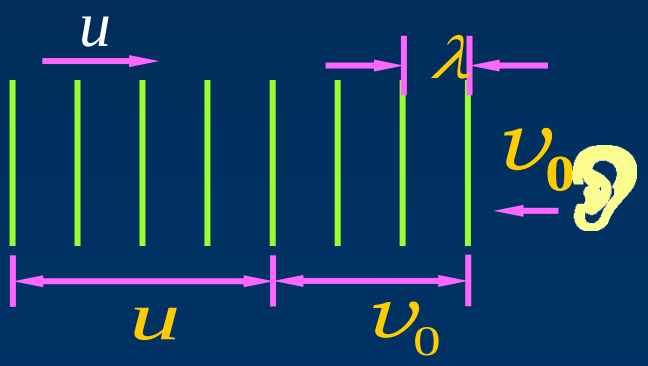
$$f = \frac{u}{\lambda} = f_0$$ 观察者听到的频率等于波源的频率

二、波源静止，观察者运动

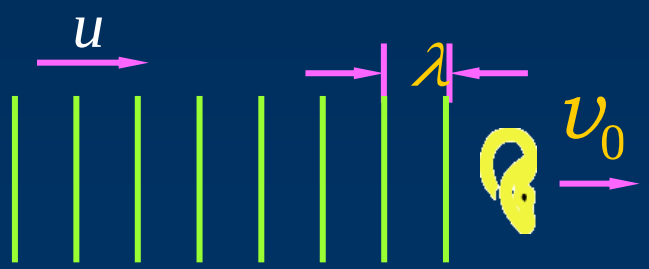
$$f = \frac{u'}{\lambda'} = \frac{u + v_o}{\lambda} = \frac{u + v_o}{u / f_0}$$

$$\Rightarrow \boxed{f = (1 + \frac{v_o}{u}) f_0}$$





靠近 $v_0 > 0$



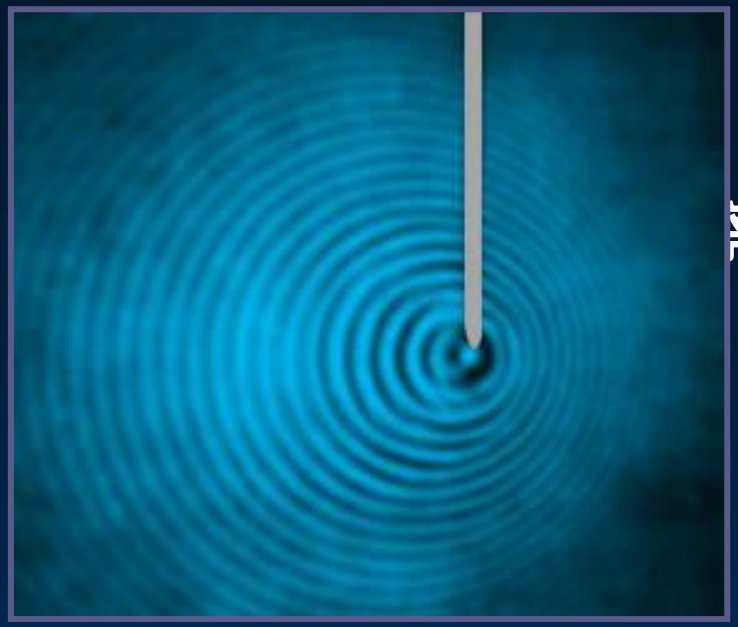
远离 $v_0 < 0$

三、观察者静止，波源运动

$$\lambda' = u'T = uT - v_s T$$

$$= \lambda - v_s T = \frac{u - v_s}{f_0}$$

$$\Rightarrow \quad f = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{u - v_S} f_0$$

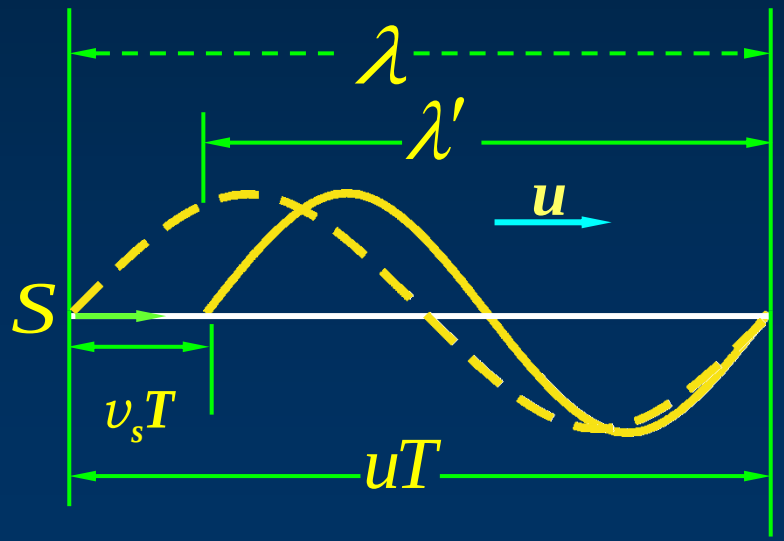


察者

四、波源和观察者同时运动

$$f = \frac{u'}{\lambda'} = \frac{u + v_o}{\lambda - v_S T}$$

$$\Rightarrow \quad f = \frac{u + v_o}{u - v_S} f_0$$

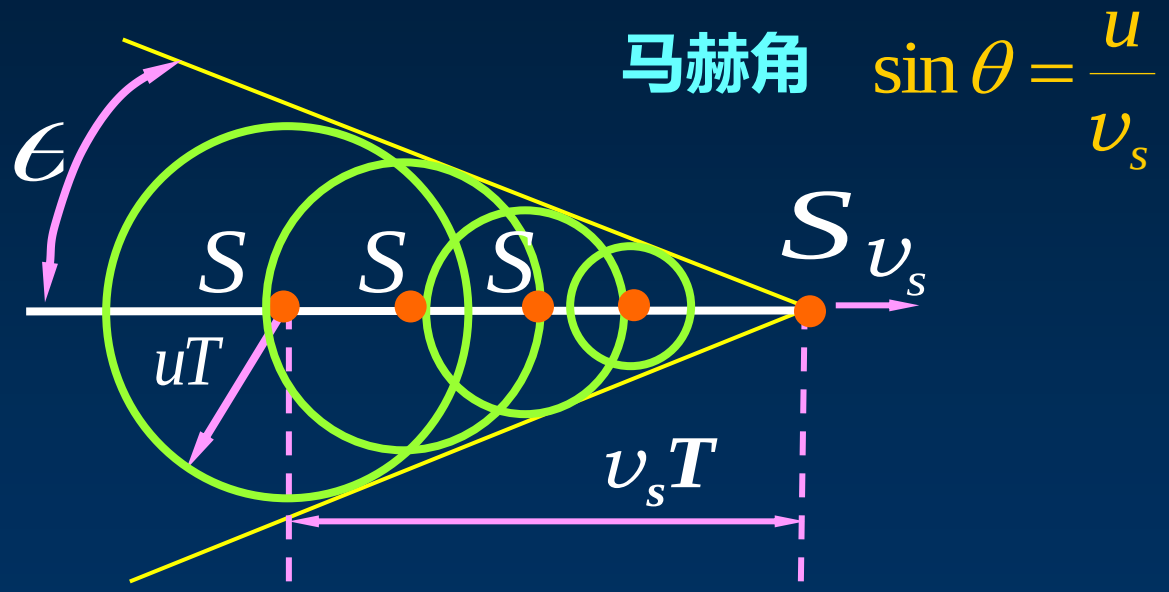


S 运动的前方波长变短

波源和观察者相向运动时符号为(+)，背离运动时符号为(-)。

讨论: (1) 当波源或观察者在二者联线**垂直方向上**运动时，**无多普勒频移。**

(2) $v_s > u$ 时，多普勒效应失去意义，此时,形成冲击波。



v_s为波源和接收器的相对速度

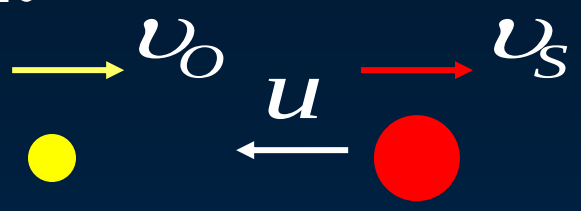
(3) 应用: 监测车辆行驶速度、测量血液流速、跟踪卫星等。



超音速飞机突破音障的瞬间

例1： 一警笛发射频率为1500Hz的声波，并以22m/s的速度向某一方向运动，一人以6m/s的速度跟踪其后。

求： 该人听到的警笛发出的声音的频率以及在警笛后方空气中声波的波长?



解： 观察者接收到的频率(波源和观察者同时运动)：

$$f_R = \frac{u + v_o}{u - v_S} f_S = \frac{330 + 6}{330 + 22} \times 1500 = 1432\,(\mathrm{Hz})$$

警笛后方空气中声波的频率(观察者静止，波源运动):

$$f = \frac{u}{u - v_S} f_S = \frac{330}{330 + 22} \times 1500 = 1406\,(\mathrm{Hz})$$

警笛后方空气中声波的波长:

$$f = \frac{u}{\lambda'} \longrightarrow \lambda' = \frac{u - v_S}{f_S} = \frac{330 + 22}{1500} = 0.23\,(\mathrm{m})$$

例2： 一固定的超声波波源发出频率为ν_0=100 kHz 的超声波. 当一汽车迎面驶来时,在超声波所在处收到了从汽车反射回来的超声波其频率为ν=110 kHz. 设声波的速度为 u=330m/s.

求： 汽车的行驶速度.

解： 汽车作为观察者接收到的频率 $\nu' = \dfrac{u+v}{u}\nu_0$

汽车反射波(**作为波源发出**)在空气中的频率

$$\nu'' = \frac{u}{u-v}\nu' = \frac{u+v}{u-v}\nu_0$$

所以，汽车的行驶速度为

$$v = \frac{\nu''-\nu_0}{\nu''+\nu_0}u = \frac{110\times10^3-100\times10^3}{110\times10^3+100\times10^3}\times330$$

$$= 15.7\ (\mathrm{m/s}) = 56.6\ (\mathrm{km/h})$$

(4)电磁波的多普勒效应

经典多普勒效应：

$$f = \frac{u + \upsilon_0}{u - \upsilon_s} f_0$$

对于光波，有 $\lambda \nu = c$

与空间有关　　与时间有关

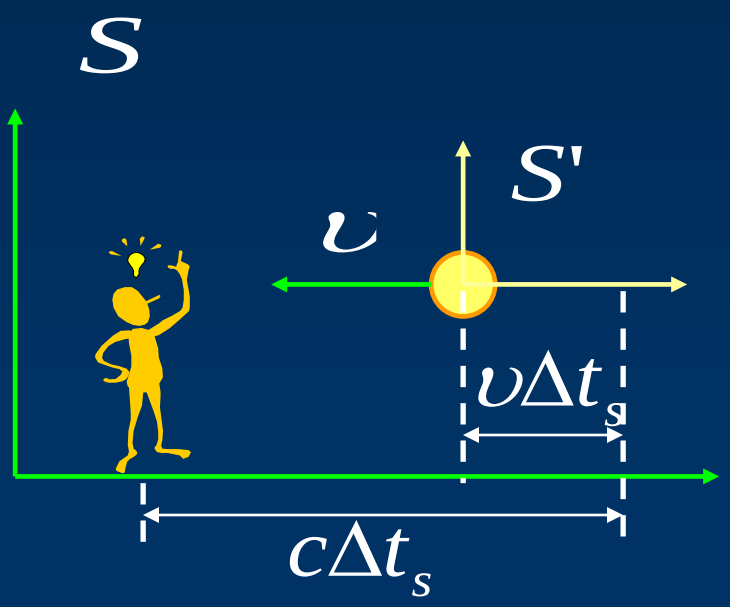
经典多普勒效应对光是不正确的。

在相对论中，不同的惯性系中波长和频率将不同，但两者的乘积恒为 c

♣ 多普勒效应的相对论方程

假定光源以速度 υ 向着观察者运动，在观察者参照系中计算。设光源发出 N 个波，在 S 中测得在 Δt_S 时间里，有

$$N\lambda = c\Delta t_S - \upsilon\Delta t_S$$



S 系观察者观测到的频率为

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{c-\upsilon}\cdot\frac{N}{\Delta t_S}$$

$$= \frac{1}{(1-\upsilon/c)}\cdot\frac{N}{\Delta t_S}$$

若光源频率为 ν_0，在光源系中测得的 $\Delta t_{S'}$ 时间里，光源发出光波个数为

$$N = \nu_0 \Delta t_{S'}$$

时间膨胀

$$\Delta t_S = \Delta t_{S'} / \sqrt{1-\upsilon^2/c^2}$$

$$\nu = \frac{1}{(1-\upsilon/c)}\cdot\frac{\nu_0 \Delta t_{S'}}{\Delta t_{S'}/\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} = \nu_0\sqrt{\frac{1+\upsilon/c}{1-\upsilon/c}}$$

多普勒频移公式

$$\nu' = \nu_0\sqrt{\frac{1+\upsilon/c}{1-\upsilon/c}}$$

当两者相互靠近时，观察者所收到的光源频率增加 —— 蓝移公式

当光源和观察者相互分离时，观察者所收到的光源频率公式

$$\nu' = \nu_0 \sqrt{\frac{1-\upsilon/c}{1+\upsilon/c}}$$

—— 红移公式 ⇨ 多普勒效应应用

机械波

▲ 建立波函数 （振动方程，波动曲线，初始条件，振动曲线）

$y = A\cos[\omega(t-\frac{x}{u})+\varphi_0]$ 与坐标的关系（超前与落后）

波动方程

▲ 波的干涉（相干条件，叠加原理）

① 干涉条件 $\Delta\varphi = 2k\pi, (2k+1)\pi$ $\Delta r = k\lambda, (2k+1)\frac{\lambda}{2}$

波程差与相位差的关系

② 驻波（现象，波腹和波节的位置，相位特征，能量分布）

③ 半波损失（含义，图示，公式表示）

④ 惠更斯原理（会作图）

▲ 波的能量（特征，E_P，E_k 的关系，与总能量守恒的关系）

① 平均能量密度

② 强度关系

▲ 多普勒效应

★分清波源与观测者→应用“拍频”

注意：① 振动能量与波动能量的区别

② 波速与振动速度的区别

③ 振动与波动不可分

④ 反射波函数的确定，波的叠加

第15章　波动光学基础

- 几何光学 (Geometrical optics)
- 波动光学 (Wave optics)
- 量子光学 (Quantum optics)

1　光是电磁波

应用电磁场理论说明光的基本现象和性质

2　光的干涉

光波叠加和光强度呈现稳定的分布规律

3　光的衍射

在光的衍射中，应用叠加原理说明光强分布

4　光的偏振

光矢量和光的各种偏振态及其变化

15-1 光是电磁波

引言

(1) 微粒学说 (Corpuscular theory)

(2) 波动学说 (Undulatory theory)

(3) 光波 —— 具有波粒二象性的物质

一、电磁波的产生和传播

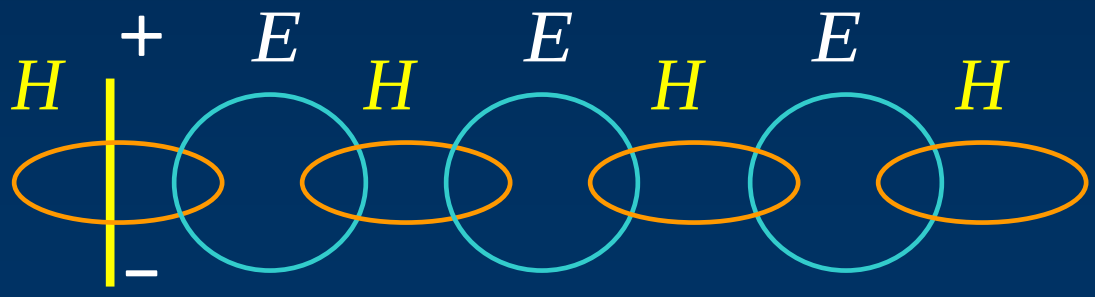
凡做加速运动的电荷都是电磁波的波源

例如：天线中的振荡电流　　分子或原子中电荷的振动

由麦克斯韦电磁场理论可知：

$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

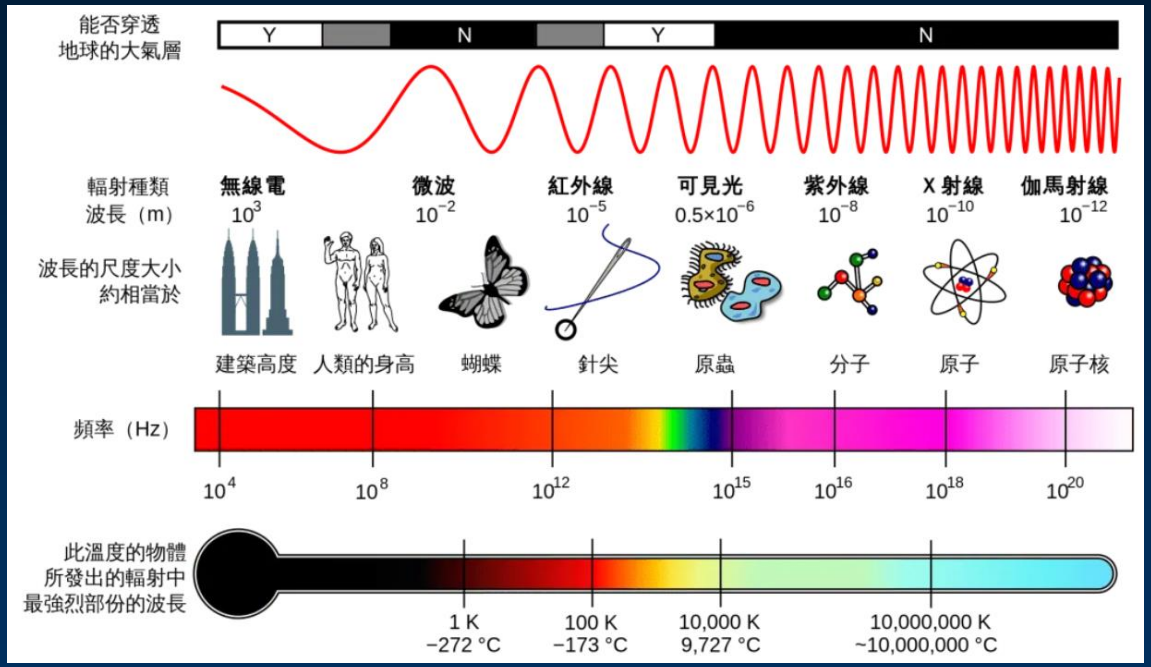


电磁波 = 交变电磁状态的传播

二、电磁波谱

1. 电磁波谱

电磁波具有各种频率：无线电，微波，红外线，可见光，紫外线，X 射线和 γ 射线等。



2. 光是电磁波

◆诸多的现象和理论研究表明：光是电磁波。

(1)光与电磁波的传播速度相等；都有反射、折射、干涉、衍射、偏振性质。

(2)用电磁波理论研究光学现象的结果都说明光是电磁波。

- 可见光 (visible light) —— 能够引起人的视觉的电磁波。

$7.60 \times 10^{-7} \sim 3.90 \times 10^{-7}\ m$ ⇒ $760 \sim 390\ nm$

可见光颜色的波长和频率

光色	波长(nm)	频率(Hz)	中心波长 (nm)
红	760~622	$3.9\times10^{14} \sim 4.8\times10^{14}$	660
橙	622~597	$4.8\times10^{14} \sim 5.0\times10^{14}$	610
黄	597~577	$5.0\times10^{14} \sim 5.4\times10^{14}$	570
绿	577~492	$5.4\times10^{14} \sim 6.1\times10^{14}$	540
青	492~470	$6.1\times10^{14} \sim 6.4\times10^{14}$	480
兰	470~455	$6.4\times10^{14} \sim 6.6\times10^{14}$	460
紫	455~400	$6.6\times10^{14} \sim 7.5\times10^{14}$	430

人眼最为敏感的光是黄绿光，即 $555\ nm$ 附近。