大学物理(下)

华 中 科 技 大 学
张智
zzhang@hust.edu.cn

第8节　多普勒效应

此效应是出生于德国的奥地利物理学家多普勒(Johann Doppler，1802－1853)在1842年首次发现的.

◆ 当观察者与波源之间有相对运动时，观察者所测得的频率不同于波源的频率，这种现象称为多普勒效应。

比如：当鸣笛的火车驶向站台时，站台上的观察者听到的笛声变尖，即频率升高；相反，当火车驶离站台时，听到的笛声频率降低。

奥地利物理学家多普勒(Johann Doppler，1802－1853)

波源的频率ν_s 是单位时间内波源作完整振动的次数或发出的‘完整波长’的个数。

观察者接收到的频率ν_R是观察者在单位时间内接收到的完整的振动次数或完整的波长数。

波速u是单位时间内振动状态 (相位)传播的距离。

相对于媒质

波源的周期T_S 是波源作一次完整的振动所需的时间。

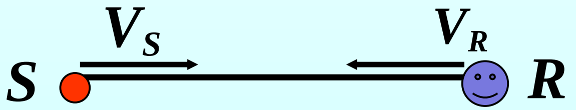
观察者测得的周期T_R 是观察者观测到的一次完整的振动所经历的时间。

◆ 以下考虑波源的频率和观测频率的关系

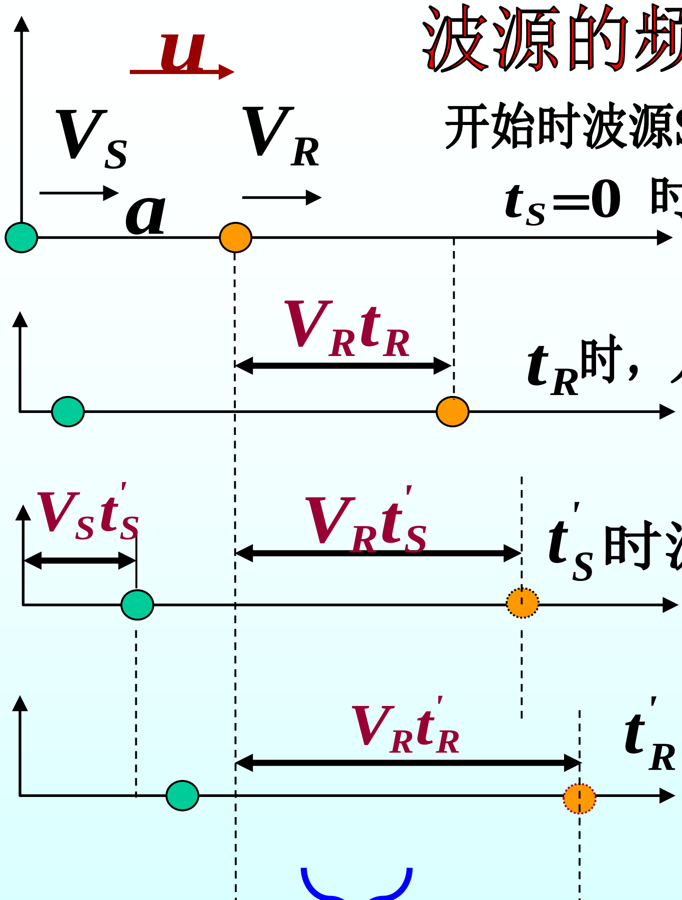
思路：先考虑周期之间的关系，再进而得到频率的关系。

■ 为此，取媒质为参考系，设波速为u，波源的速度为V_S，观察者的速度为V_R，且波源和观察者在同一条直线上运动。

比如：



波源的频率与观测频率的关系式



开始时波源S刚好在坐标原点，与观察者R相距a

$t_S=0$ 时，波源S到达振动状态H并将之向右传出

t_R时，人R测到由波源传来的振动状态H

$$\begin{cases} t_R=\dfrac{a+V_R t_R}{u} \\ \therefore t_R=\dfrac{a}{u-V_R} \end{cases}$$

t'_S时波源S回到并传出振动状态H

$$\boxed{T_S = t'_S - t_S = t'_S}$$

t'_R 时，人R再次测到振动状态H

$$\boxed{T_R = t'_R - t_R}$$

$$t'_R=t'_S+\frac{a+\overbrace{V_R t'_R}-V_S t'_S}{u}$$

$$t'_R=\frac{a+(u-V_S)t'_S}{u-V_R}$$

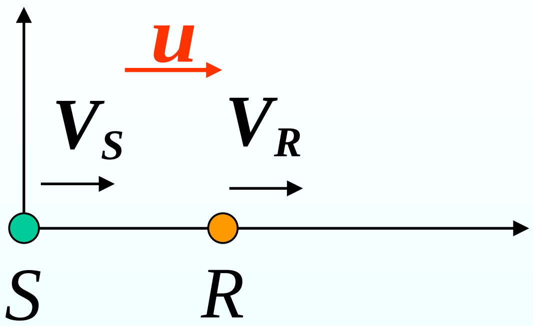
$$=\frac{a+(u-V_S)t'_S}{u-V_R}-\frac{a}{u-V_R}$$

$$=\frac{u-V_S}{u-V_R}t'_S=\frac{u-V_S}{u-V_R}T_S$$

$$\boxed{\nu_R=\frac{u-V_R}{u-V_S}\nu_S}$$

实际上已把 u 的方向定为正方向。

波源的频率与观测频率的关系式



$$\boxed{\nu_R = \frac{u - V_R}{u - V_S}\nu_S}$$

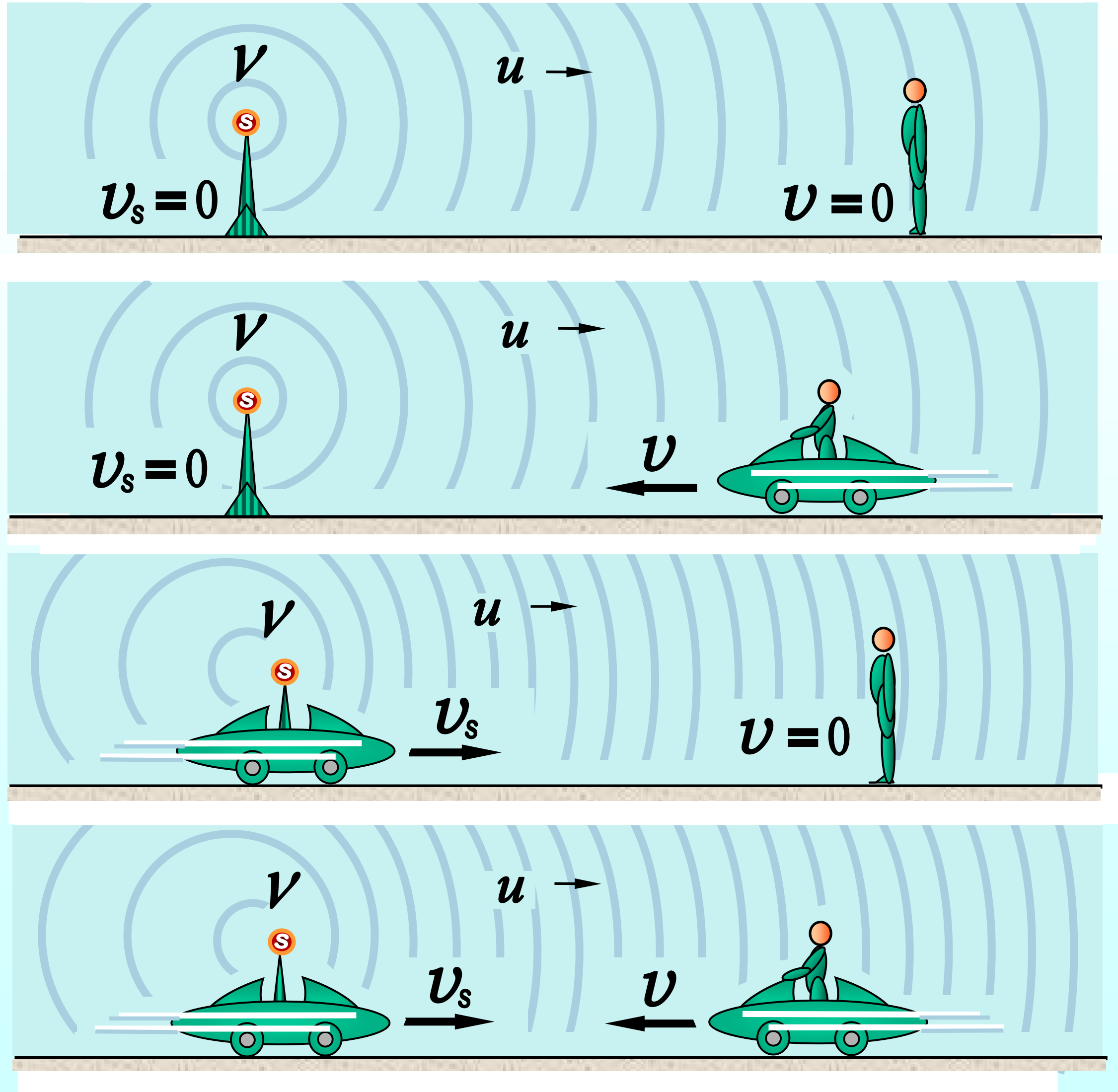
以 u 的方向为正方向。

注意：上式中波源和观察者的速度可正可负。

当 $V_R = V_S$ 时，波源和观察者无相对运动， $\nu_R = \nu_S$ $\boxed{\lambda_R = \frac{u}{\nu_R}}$

当 $V_S = 0$ 时，
- 若观察者向波源运动，则 $\nu_R > \nu_S$；波长变短。
- 若观察者背离波源运动，则 $\nu_R < \nu_S$；波长变长。

当 $V_R = 0$ 时，
- 若波源向观察者运动，则 $\nu_R > \nu_S$；波长变短。
- 若波源背离观察者运动，则 $\nu_R < \nu_S$；波长变长。



多普勒效应

$$\nu' = \nu$$

（向）　（背）

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

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

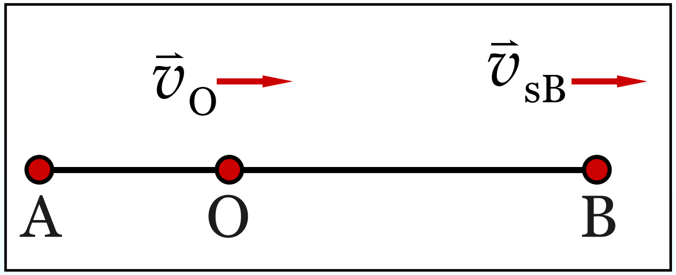
$$\nu' = \left(\frac{u \pm v}{u \mp v_s}\right)\nu$$

例. 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

(2) 观察者听到来自B 的频率

(3) 观察者听到的拍频



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

$$\nu_R=\frac{u-V_R}{u-V_S}\nu_S$$

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

(2) $\nu''=\dfrac{330+30}{330+60}\times 500=461.5\ \text{Hz}$

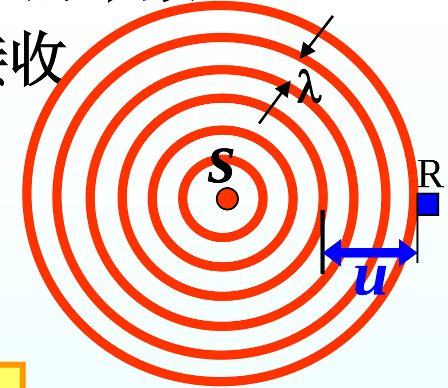
(3) 观察者听到的拍频

$$\Delta\nu=\left|\nu'-\nu''\right|=7\ \text{Hz}$$

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

波源的频率ν_S 是单位时间内发出的“完整波长”的个数。

观察者接受到的频率ν_R是观察者在单位时间内接收到的完整的波长数。

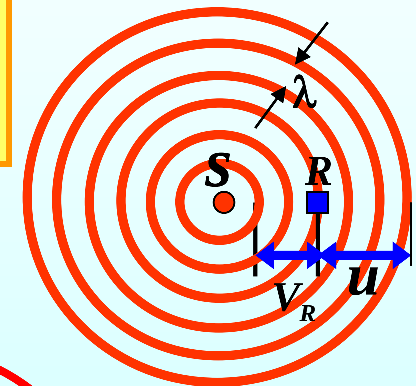


1. 波源和接收器都静止

单位时间通过**R**的波长的个数，即为**R**收到的频率

$$\nu_R = \frac{u}{\lambda} = \nu_S$$

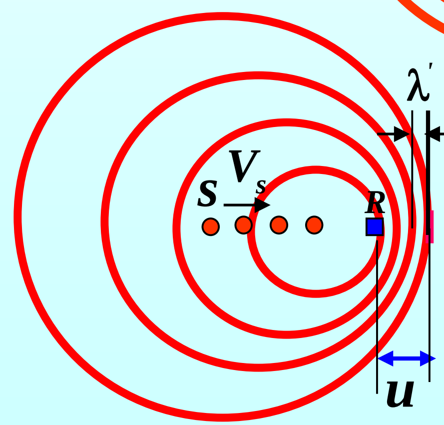
$$\boxed{\nu_R = \frac{u - V_R}{u - V_S}\nu_S}$$



2. 波源静止,接收器运动

$$\nu_R = \frac{u+V_R}{\lambda} = \frac{u+V_R}{u/\nu_S} = \frac{u+V_R}{u}\nu_S \quad \text{变大}$$

R 远离 **S** 则 $\nu_R = \frac{u-V_R}{u}\nu_S$ 变小



3. 接收器静止, 波源运动

波长变化：左边变长，右边变短

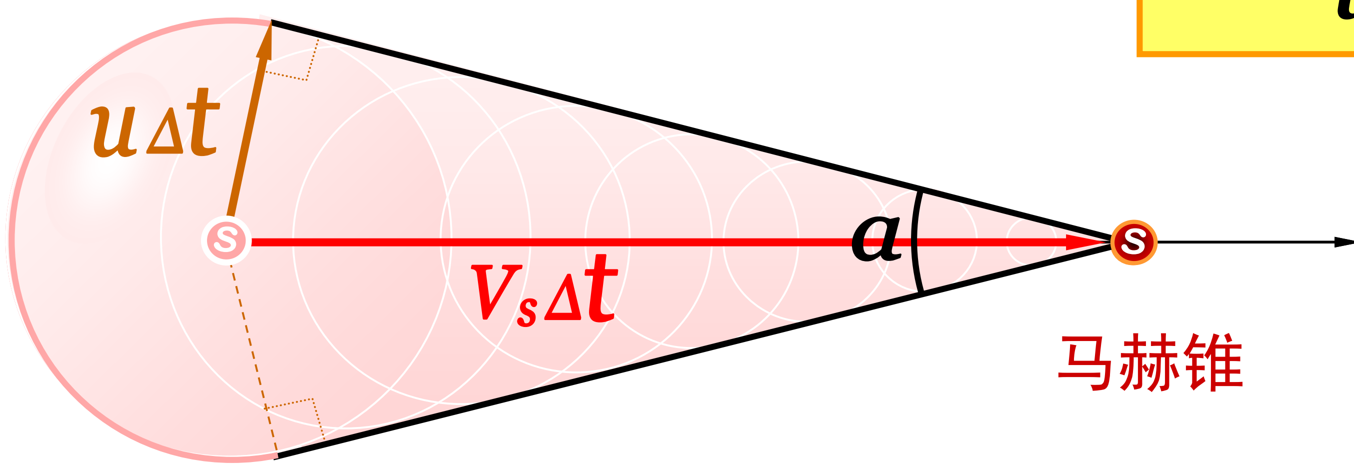
冲击波

前面在介绍波源相对于媒质运动所引起的多普勒效应时，讨论了波源速率V_s<波速u的情况。

波源速率V_s>波速u？？？

若$V_s>u$，波源就会冲出自身发出的波阵面，在Δt时间内，波源所发出的一系列波的波前包络面是一个圆锥面，称为马赫锥。这种波称为冲击波。

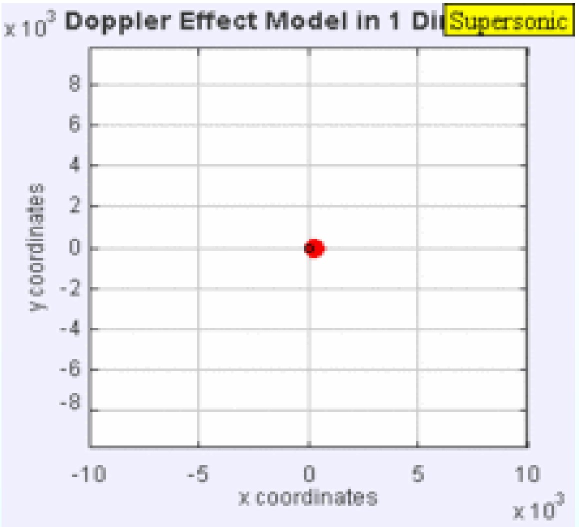
$$\nu_R = \frac{u - V_R}{u - V_S}\nu_S$$



马赫锥的顶角α（马赫角）满足

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{u\Delta t}{V_s\Delta t} = \frac{u}{V_s} = \frac{1}{M} \qquad M = \frac{V_s}{u}$$ 称为马赫数

◆ 锥面是受干扰的介质和未受干扰的介质的分界面，在两侧有压强、密度和温度的突变。



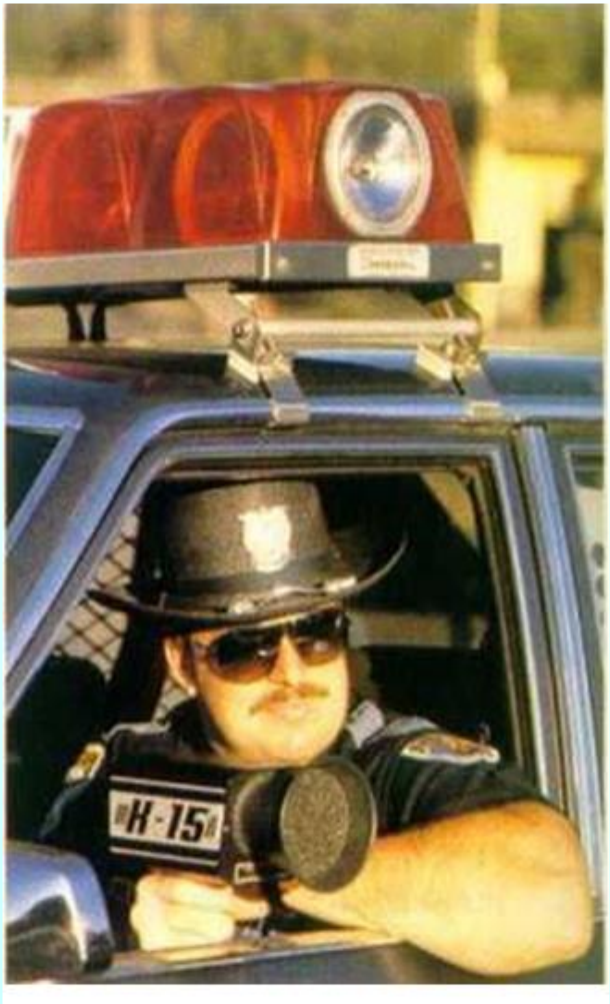
飞机、炮弹等以超音速飞行时，都会在空气中激起冲击波。冲击波面到达的地方，空气压强突然增大。

◆ 过强的冲击波可使掠过地区的物体遭到损坏，如使玻璃窗破裂等，这种现象称为声暴。

类似的现象在水波中也可以看到。

◆ 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。



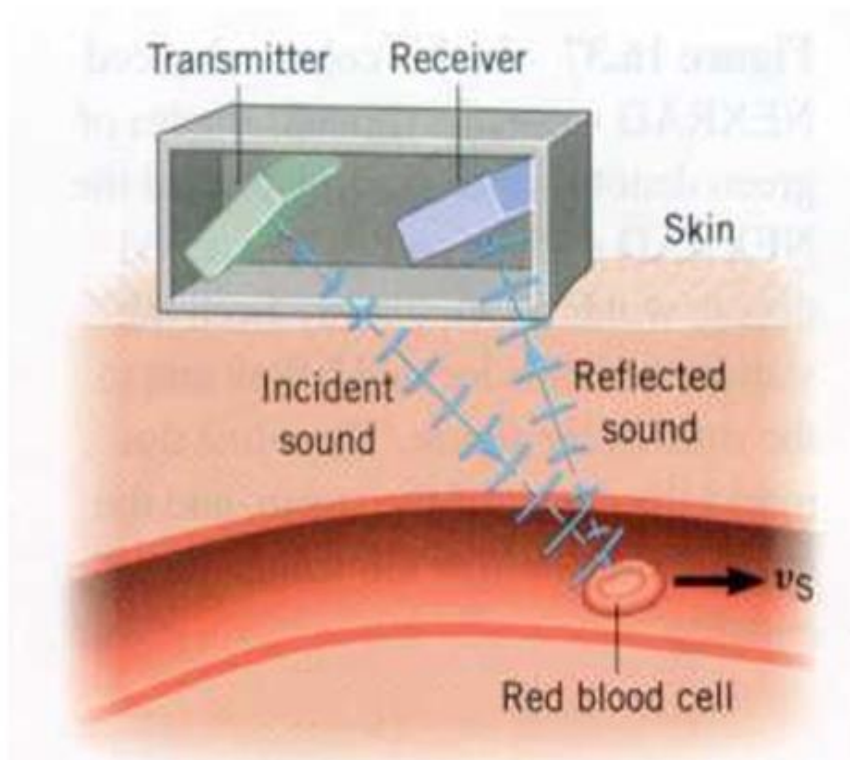
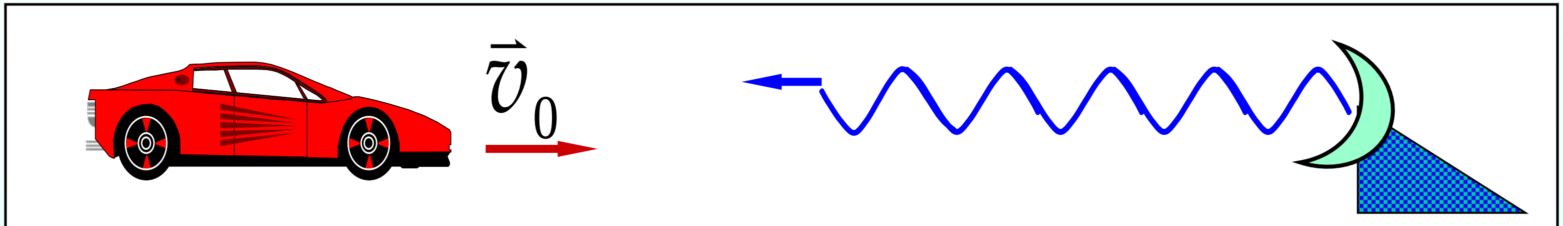


Figure : A Doppler flow meter measures the speed of red blood cells.

例. 利用多普勒效应监测车速，固定波源发出频率为ν=100kHz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ν''=110kHz。已知空气中的声速为u=330m/s， 求车速。



$$\nu_R = \frac{u - V_R}{u - V_S} \nu_S$$

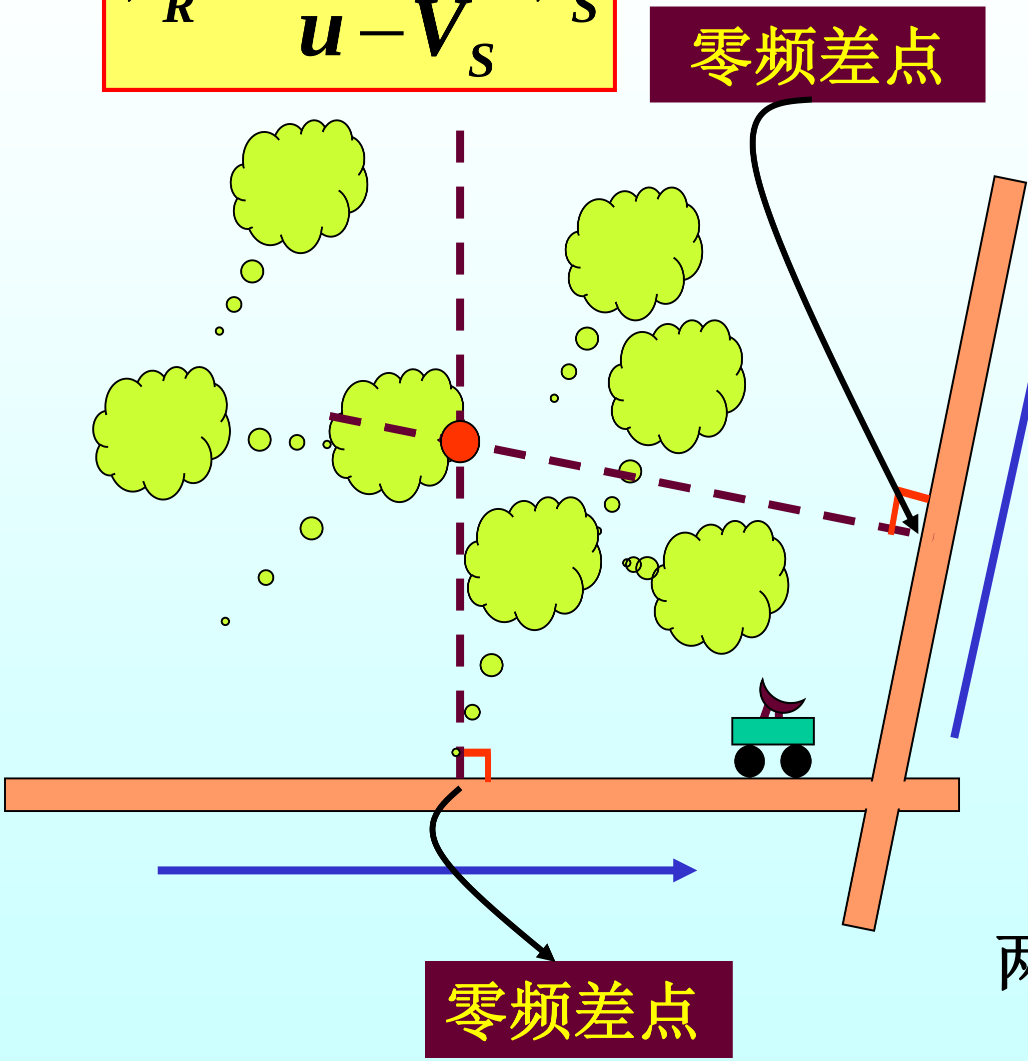
解： 1）车为接收器 $\nu' = \frac{u + v_O}{u} \nu$

2）车为波源 $\nu'' = \frac{u}{u - v_s} \nu' = \frac{v_O + u}{u - v_s} \nu$

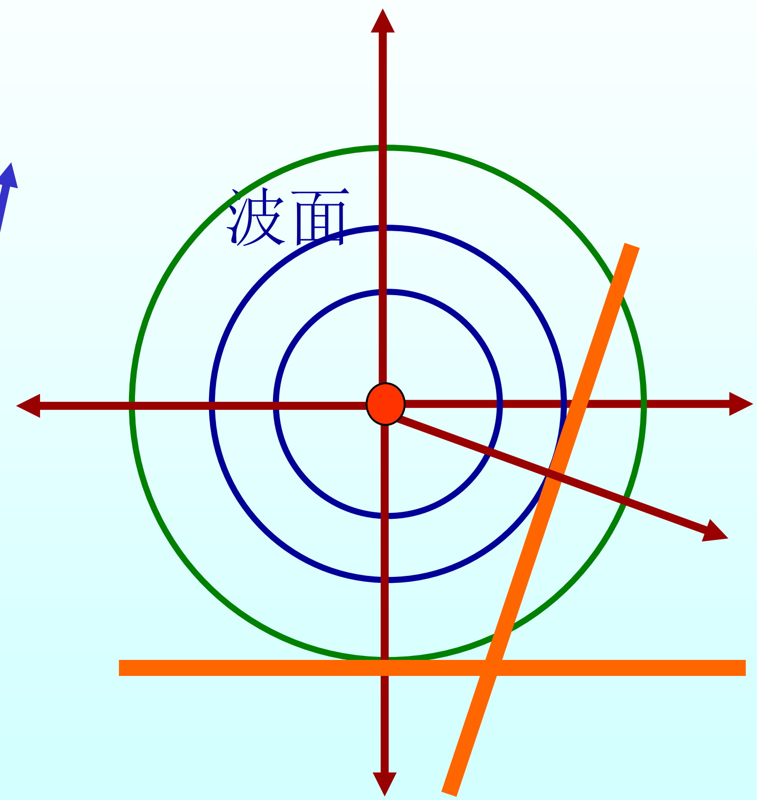
车速 $v_O = v_s = \frac{\nu'' - \nu}{\nu'' + \nu} u = 56.8\ \text{km/h}$

例： 利用多普勒效应测定隐蔽的信号源。请说明其方法。

$$\nu_R = \frac{u - V_R}{u - V_S}\nu_S$$



解：点波源产生球面波



两条路分别和两条波线垂直。

◆ 以上所有结论的前提是：波源和观察者在同一直线上运动，故称为纵向多普勒效应。

因此，如果波源和观察者的运动不是沿它们连线方向（纵向），则以上公式中V_S , V_R应理解为波源和观察者在它们连线方向上的速度分量(即纵向分量)。

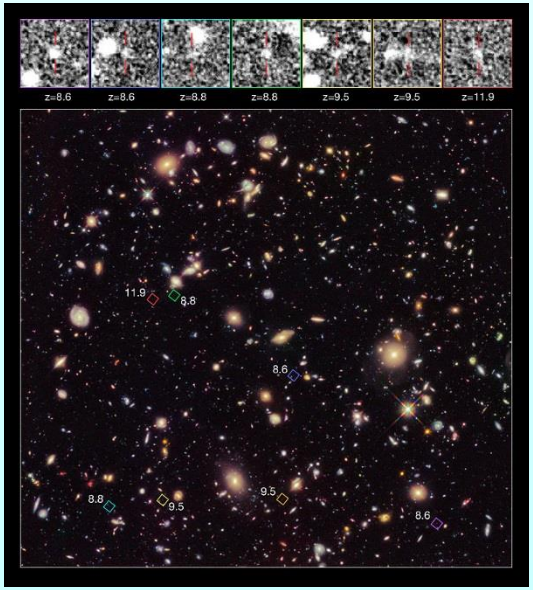
电磁波(比如光) ，也有多普勒效应，光源与接收器的相对速度决定接收器接收的频率。

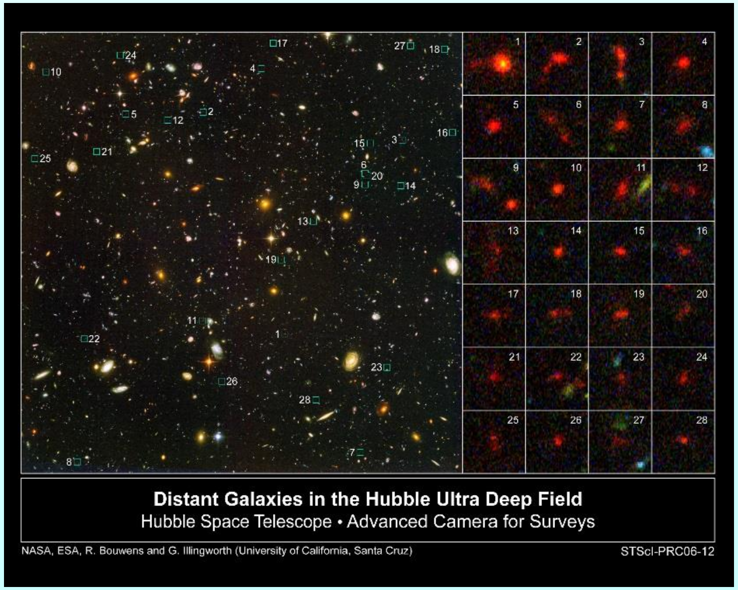
电磁波的多普勒效应

电磁波也存在多普勒效应，但是涉及狭义相对论的相对性原理和光速不变原理，较复杂。在此我们仅作简单介绍。当波源和接收器在同一直线上运动时，相对运动的速率为 v，由相对论可得，

两者接近时有：$\nu' = \sqrt{\dfrac{1+v/c}{1-v/c}}\,\nu$　　$\nu\uparrow$，$\lambda\downarrow$，紫移

两者远离时有：$\nu' = \sqrt{\dfrac{1-v/c}{1+v/c}}\,\nu$　　$\nu\downarrow$，$\lambda\uparrow$，红移





$$\nu_R = \sqrt{\frac{1+V/c}{1-V/c}}\,\nu_S$$

当光源远离接收器时，接收到的频率变小，因而波长变长，这种现象叫做“红移”。

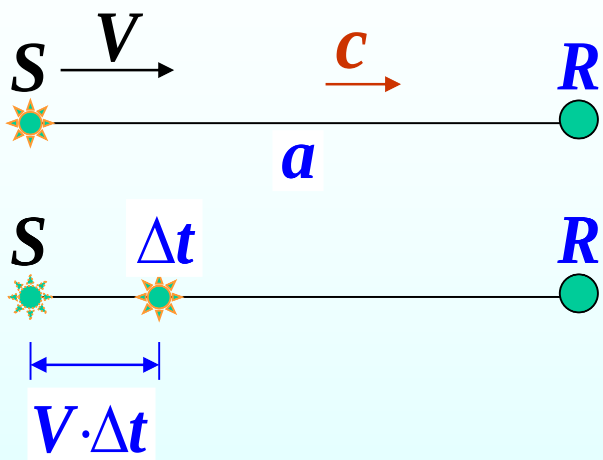
把接收到的其它星球上元素的光谱与地面上同一元素的光谱作比较，发现几乎都发生红移。由此推断这些星系正在远离地球向四周飞去，即在“退行”。这就是“大爆炸”宇宙学理论的重要依据。

电磁波的多普勒效应也为跟踪人造地球卫星提供了一种简便的方法。

卫星地面站确定远在10^8m处的卫星位置变化时，可以精确到10^{-2}m~10^{-3}m.

电磁波的多普勒效应

电磁波(比如光) ,也有多普勒效应。光源与接收器的相对速度决定接收器测到的频率。以下假设光源S和接收器R在同一直线上运动时，且相对于接收器的速度为V .



设在S上看，波源S在t_S=0时发出一个光信号；经过一个周期后，即$t'_S=T_S$时发出第二个光信号。

设在接收器R上看，R在t_R时收到第一个光信号；在t'_R时收到第二个光信号。开始时光源到R的距离为a. 则接收器R测到的周期$T_R= t'_R- t_R$

事件1: S 发出第一个光信号

事件2: S 发出第二个光信号

Δt : 在R上看，两个事件的时间间隔

t'_S : 在S上看，两个事件的时间间隔

故 $\Delta t = \dfrac{t'_S}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$ 原时

而 $t_R = \dfrac{a}{c}$

$$t'_R = \frac{a - V\cdot\Delta t}{c} + \Delta t$$

$$T_R = t'_R - t_R$$

$$= \frac{a - V\cdot\Delta t}{c} + \Delta t - \frac{a}{c}$$

$$= (1 - \frac{V}{c})\cdot\Delta t$$

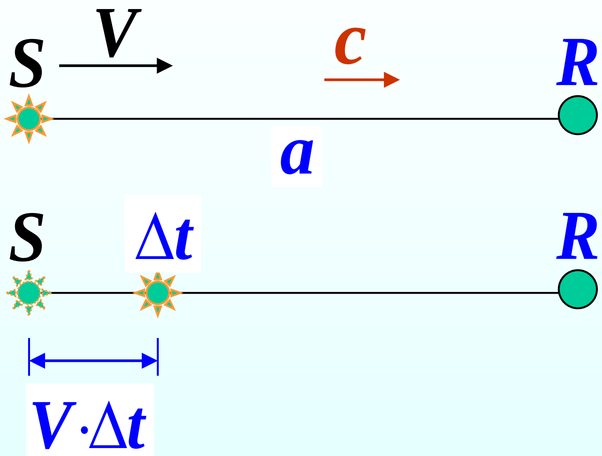
$$= (1 - \frac{V}{c})\cdot\frac{t'_S}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$$

$$= (1 - \frac{V}{c})\cdot\frac{T_S}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$$

$$\therefore\ T_R = \sqrt{\frac{1-V/c}{1+V/c}}\,T_S$$

电磁波的多普勒效应

电磁波(比如光) ,也有多普勒效应。光源与接收器的相对速度决定接收器测到的频率。以下假设光源S和接收器R在同一直线上运动时，且相对于接收器的速度为V .



设在S上看，波源S在$t_S=0$时发出一个光信号；经过一个周期后，即$t'_S=T_S$时发出第二个光信号。

设在接收器R上看，R在t_R时收到第一个光信号；在t'_R时收到第二个光信号。开始时光源到R的距离为a. 则接收器R测到的周期$T_R= t'_R- t_R$

事件1: S 发出第一个光信号

事件2: S 发出第二个光信号

Δt : 在R上看，两个事件的时间间隔

t'_S : 在S上看，两个事件的时间间隔

故 $\Delta t=\dfrac{t'_S}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$ 原时

而 $t_R=\dfrac{a}{c}$

$$t'_R=\frac{a-V\cdot\Delta t}{c}+\Delta t$$

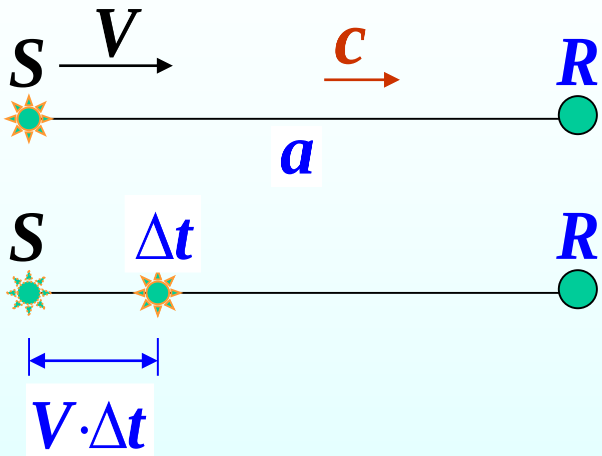
$$T_R=t'_R-t_R$$

$$T_R=\sqrt{\frac{1-V/c}{1+V/c}}\,T_S$$

$$\therefore\ T_R=\sqrt{\frac{1-V/c}{1+V/c}}\,T_S$$

电磁波的多普勒效应

电磁波(比如光) ,也有多普勒效应。光源与接收器的相对速度决定接收器测到的频率。以下假设光源*S*和接收器*R*在同一直线上运动时，且相对于接收器的速度为*V* .



设在*S*上看，波源*S*在t_S=0时发出一个光信号；经过一个周期后，即$t'_S=T_S$时发出第二个光信号。

设在接收器*R*上看，*R*在t_R时收到第一个光信号；在t'_R时收到第二个光信号。开始时光源到*R*的距离为*a*. 则接收器*R*测到的周期$T_R= t'_R- t_R$

事件1: *S* 发出第一个光信号

事件2: *S* 发出第二个光信号

Δt : 在*R*上看，两个事件的时间间隔

t'_S : 在*S*上看，两个事件的时间间隔

故 $\Delta t=\dfrac{t'_S}{\sqrt{1-(V/c)^2}}$ 原时

而 $t_R=\dfrac{a}{c}$

$$t'_R=\frac{a-V\cdot\Delta t}{c}+\Delta t$$

$$T_R=t'_R-t_R$$

$$T_R=\sqrt{\frac{1-V/c}{1+V/c}}\,T_S$$

$$\therefore \nu_R=\sqrt{\frac{1+V/c}{1-V/c}}\,\nu_S$$

以上取 *c* 为正，即以 *c* 的方向为正方向，*V* 相对于此方向可正可负。接近时频率变高，紫移；远离时频率变低，红移。

波按性质分类

- 机械波：机械振动在弹性媒质中的传播过程
- 电磁波：电磁场周期性变化在空间的传播
- 引力波：时空形变，以c的速度在空间传播

教学视频-引力波

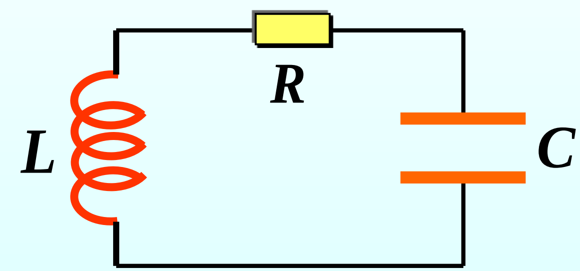
第9节　电磁振荡与电磁波

一、电磁振荡

机械振动：　物体在某一位置附近做周期性运动。

电磁振荡：　电路中电量和电流的周期性变化。

振荡电路：　产生电磁振荡的导体回路。



振荡电路

1. *LC*无阻尼自由振荡（*R*=0）

◆一个电容器和一个自感线圈串联而成的电路称为**LC电路**。最简单的电磁振荡电路。

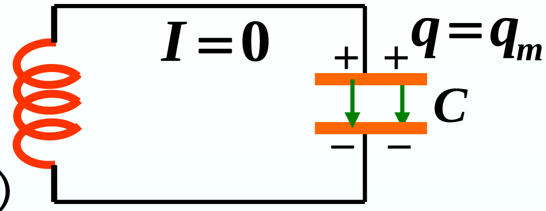
□ 无阻尼振荡电路：

电路无电阻、无辐射，产生的电磁振荡是无阻尼自由振荡。

(1) 振荡过程

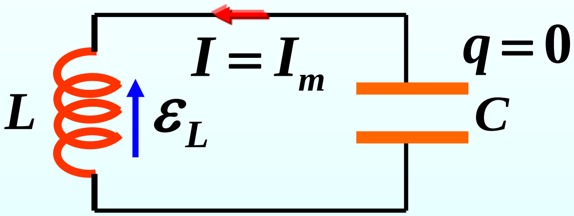
$t=0$

（开关合上时）



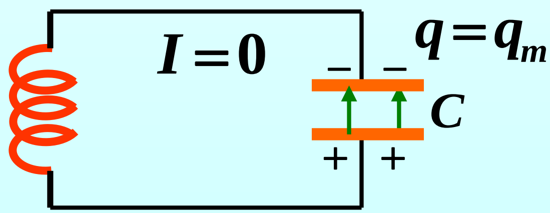
$W_e=\dfrac{q_m^2}{2C}$， $W_m=0$

$t=T/4$

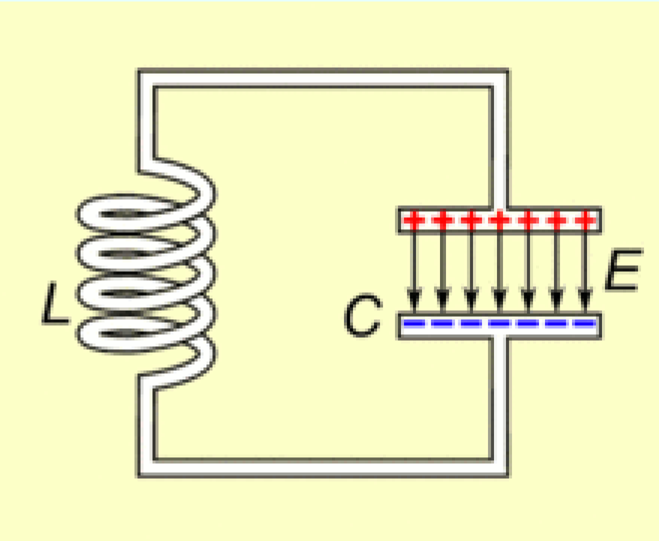


$W_e=0$， $W_m=\dfrac{1}{2}LI_m^2$

$t=T/2$



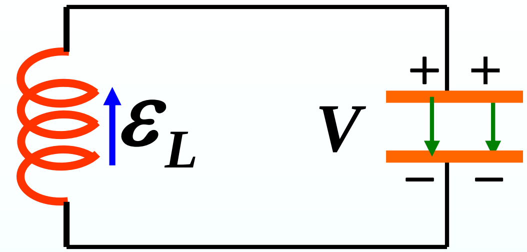
$W_e=\dfrac{q_m^2}{2C}$， $W_m=0$



q、I、$\vec{E}$、$\vec{B}$、W_e、W_m都作周期性变化，产生电磁振荡。

(2) 振荡方程

LC电路中，任意 t 时刻都有 $\varepsilon_L = V$



即： $-L\dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}=\dfrac{q}{C}$　　$\boxed{I=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}}$

$$\frac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2}+\frac{1}{LC}q=0 \qquad \text{令：} \omega=\sqrt{\frac{1}{LC}}$$

另： $\boxed{\dfrac{1}{2}LI^2+\dfrac{1}{2}\dfrac{q^2}{C}=const}$

振荡方程： $\dfrac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2q=0$ （类似于 $\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2x=0$ ）

$\boxed{\varepsilon_L=-L\dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}}$　$\boxed{C=\dfrac{q}{V}}$

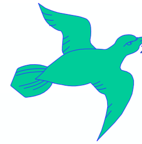
解为：

$$q=q_m\cos(\omega t+\varphi)$$

$$I=-\omega q_m\sin(\omega t+\varphi)=I_m\cos(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2})$$

式中，q_m、I_m、φ 是常量。

电磁振荡中，q、I、W_e、W_m都作周期性变化。



$$q=q_m\cos(\omega t+\varphi)$$

$$I=I_m\cos(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2})$$

可见：

（1）无阻尼自由振荡是**简谐振荡**， q_m, I_m是常数

（2）**特征量**求法与弹簧振子相同

$$q\sim x \quad q_m\sim A$$

$$I\sim v \quad I_m\sim v_{max} \quad (I_m=q_m\omega)$$

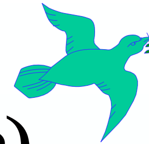
初始条件
$q_0\,,I_0$

$$\begin{cases} q_m=\sqrt{q_0^2+(\dfrac{I_0}{\omega})^2} \\ \varphi=tg^{-1}(-\dfrac{I_0}{q_0\omega}) \end{cases}$$

$$\omega=\sqrt{\frac{1}{LC}}$$ ——系统的固有频率

（3）电流的变化超前电量 $\frac{\pi}{2}$

2. LC振荡电路的能量



$q=q_m\cos(\omega t+\varphi)$

$I=I_m\cos(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2})$

$I=-\omega q_m\sin(\omega t+\varphi)$

$$W_e=\frac{q^2}{2C}=\frac{1}{2C}q_m^2\cos^2(\omega t+\varphi)$$

$$=\frac{1}{2}L\omega^2q_m^2\cos^2(\omega t+\varphi)$$

$$W_m=\frac{1}{2}LI^2=\frac{1}{2}Lq_m^2\omega^2\sin^2(\omega t+\varphi)$$

$$\because\begin{cases}\omega^2=\frac{1}{LC}\\ \frac{1}{C}=L\omega^2\end{cases}$$

$$\boxed{W_{总}=W_m+W_e}=\frac{1}{2}L\omega^2q_m^2=\frac{1}{2}\frac{1}{C}q_m^2$$ 电能极大值（常数）

$$\boxed{W_{总}=W_m+W_e}=\frac{1}{2}L\omega^2q_m^2=\frac{1}{2}LI_m^2$$ 磁能极大值（常数）

注意:

（1） $W_{总}\propto q_m^2$ (电荷振幅）

（2）能量变化的频率是振荡频率的 2 倍

（3） $\overline{W_e}=\overline{W_m}=\frac{1}{2}W_{总}$

$$\boxed{x = A\cos(\omega t + \varphi)}$$

$$\boxed{q = q_m \cos(\omega t + \varphi)}$$

$$\boxed{v = -A\omega\sin(\omega t + \varphi)}$$

$$\boxed{I = I_m \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2})}$$

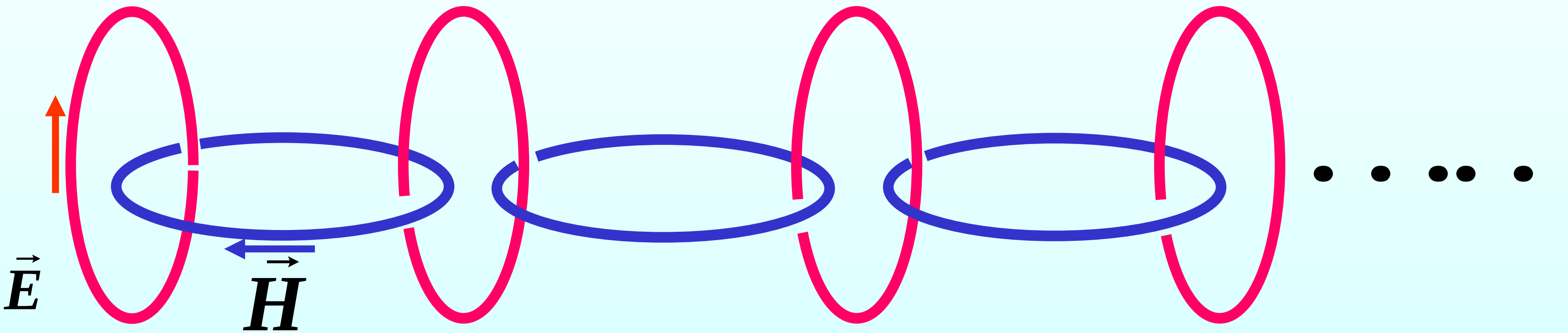
弹簧振子	LC电路
位移：x	电荷：q
速度：v	电流：I
质量：m	电感：L
劲度系数：k	电容的倒数：$1/C$
阻力系数：γ	电阻：R
弹性势能：$\frac{1}{2}kx^2$	电场能量：$\frac{1}{2C}q^2$
振动动能：$\frac{1}{2}mv^2$	磁场能量：$\frac{1}{2}LI^2$

二、电磁波

1. 电磁波产生的条件

只要波源 ——电磁振荡源

根据麦克斯韦理论：变化的磁场与变化的电场互相激发形成电磁波



*LC*振荡电路理论上可以发射电磁波(实际上不能)。

原因：
- 电场、磁场分别集中在电容器、自感线圈中
- $I \propto \omega^4$　ω 太小，辐射功率很低

平均能流密度

$$\omega^2=\frac{1}{LC}$$

$$\frac{1}{C}=L\omega^2$$

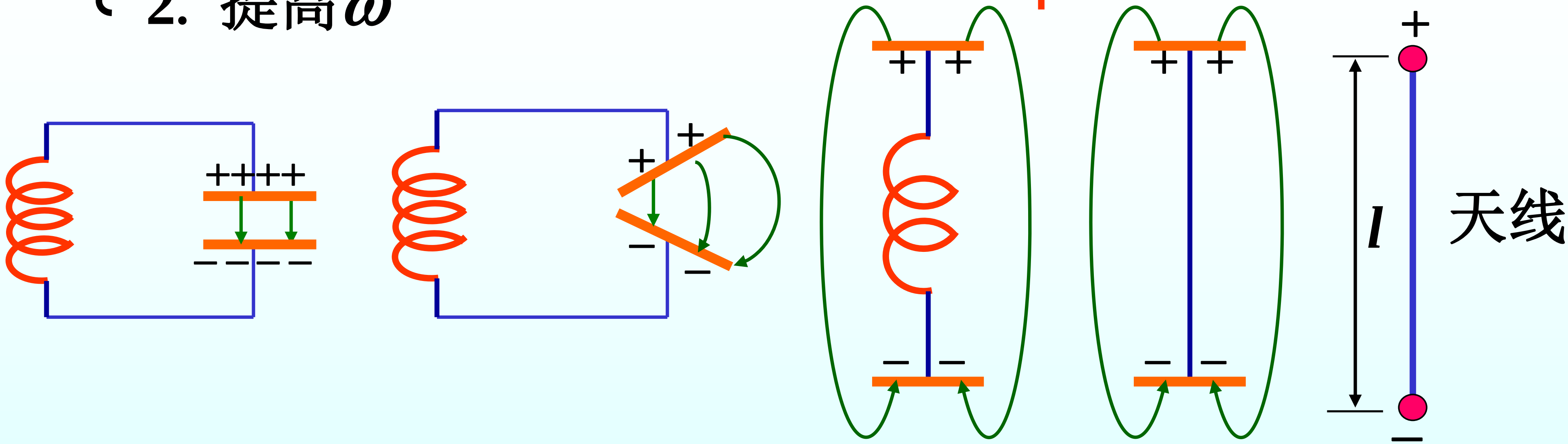
$$L=\frac{\psi}{i}=\mu n^2 V$$

1. 开放电路
2. 提高ω

$$\omega=\sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$\downarrow C=\frac{\varepsilon S}{d}$$

$$\downarrow L\propto N^2$$



发射天线上电流在往复振荡，两端出现正、负交替等量异号电荷 $q=q_0\cos\omega t$

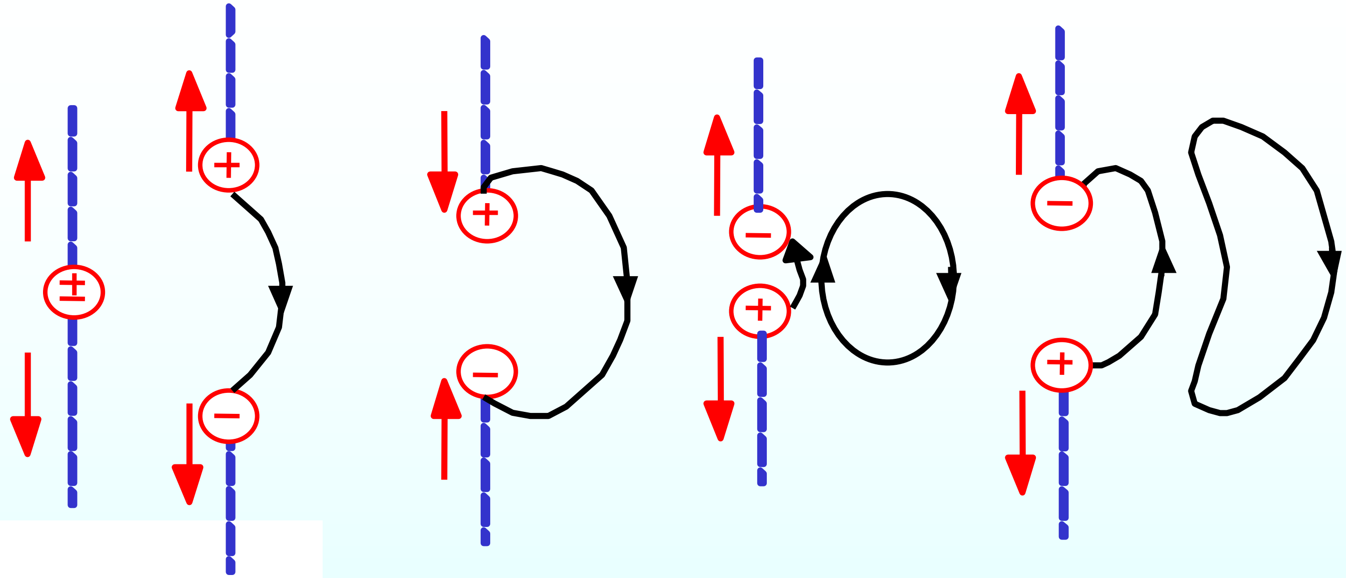
天线上存在振荡的电偶极子：$p=ql=q_0 l\cos\omega t$

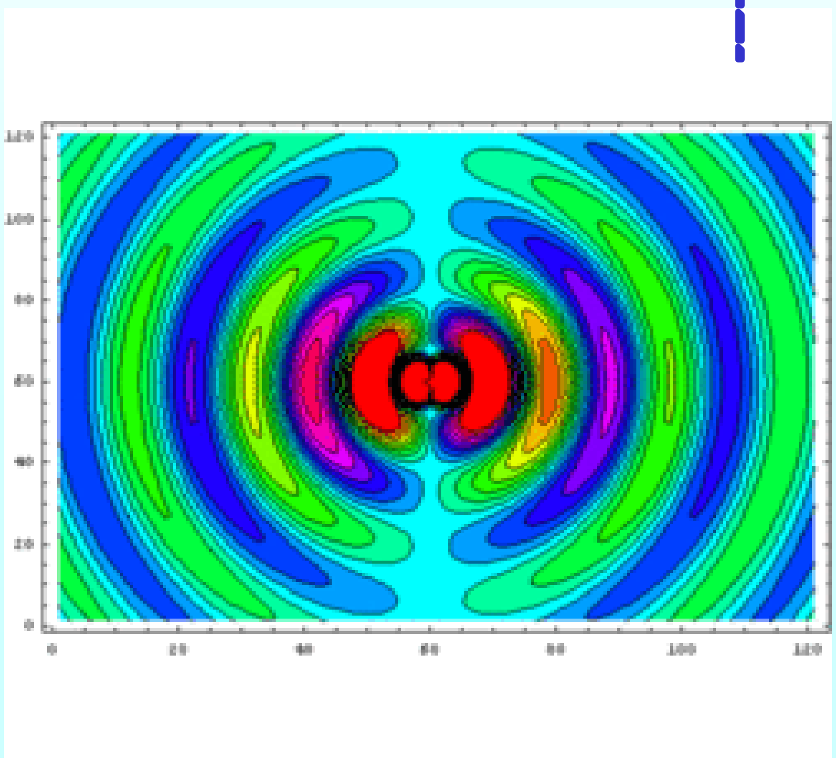
$$p=p_0\cos\omega t$$

发射天线 = 振荡的电偶极子(产生电磁振荡，发射电磁波)

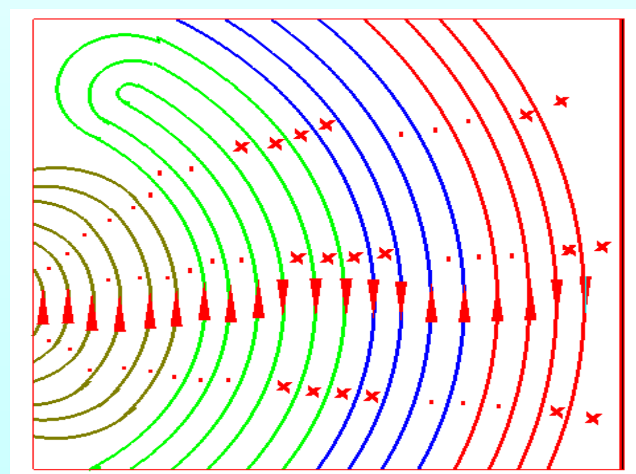
2. 振荡电偶极子辐射的电磁波

一条闭合电场线的形成过程

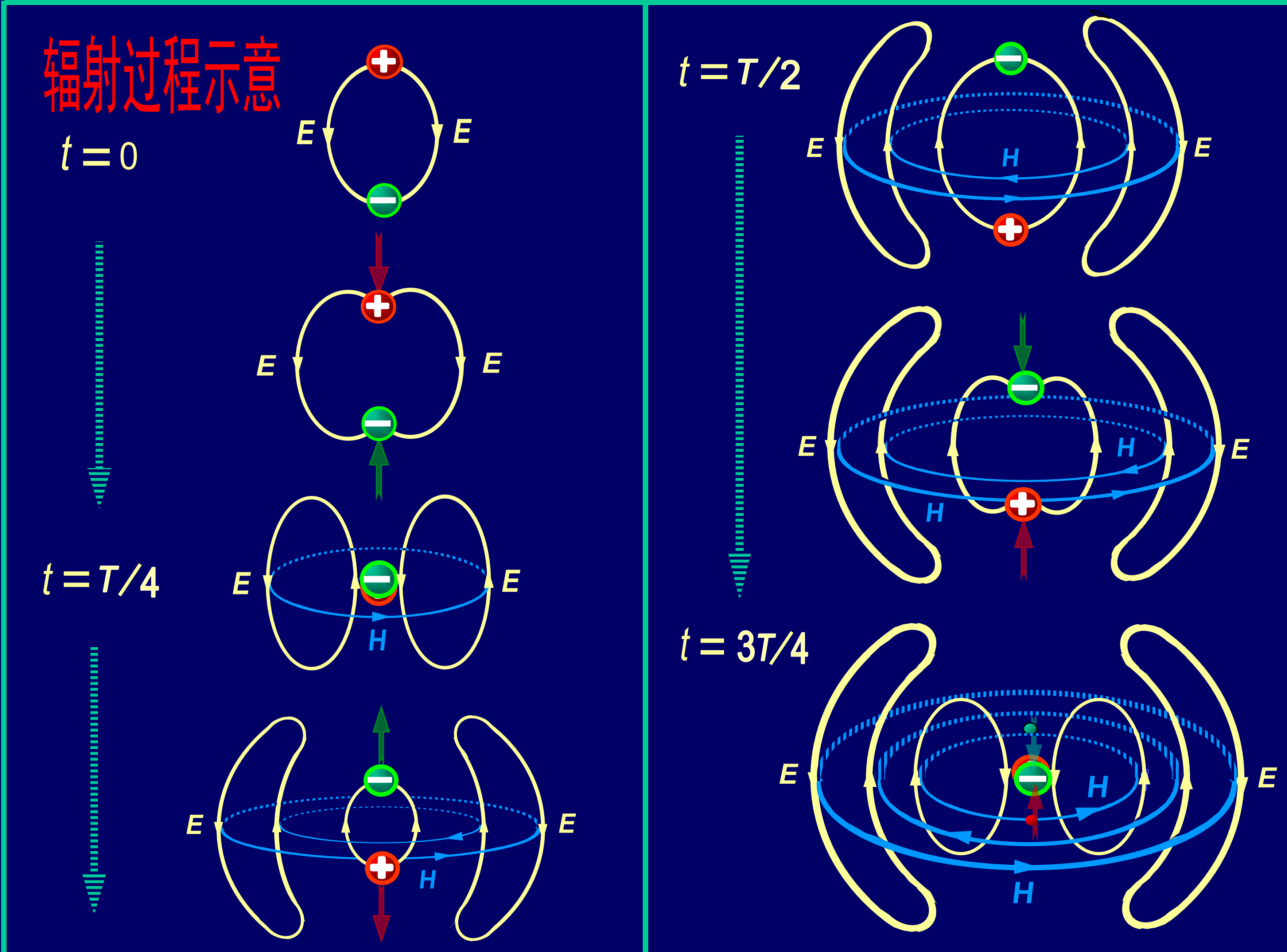


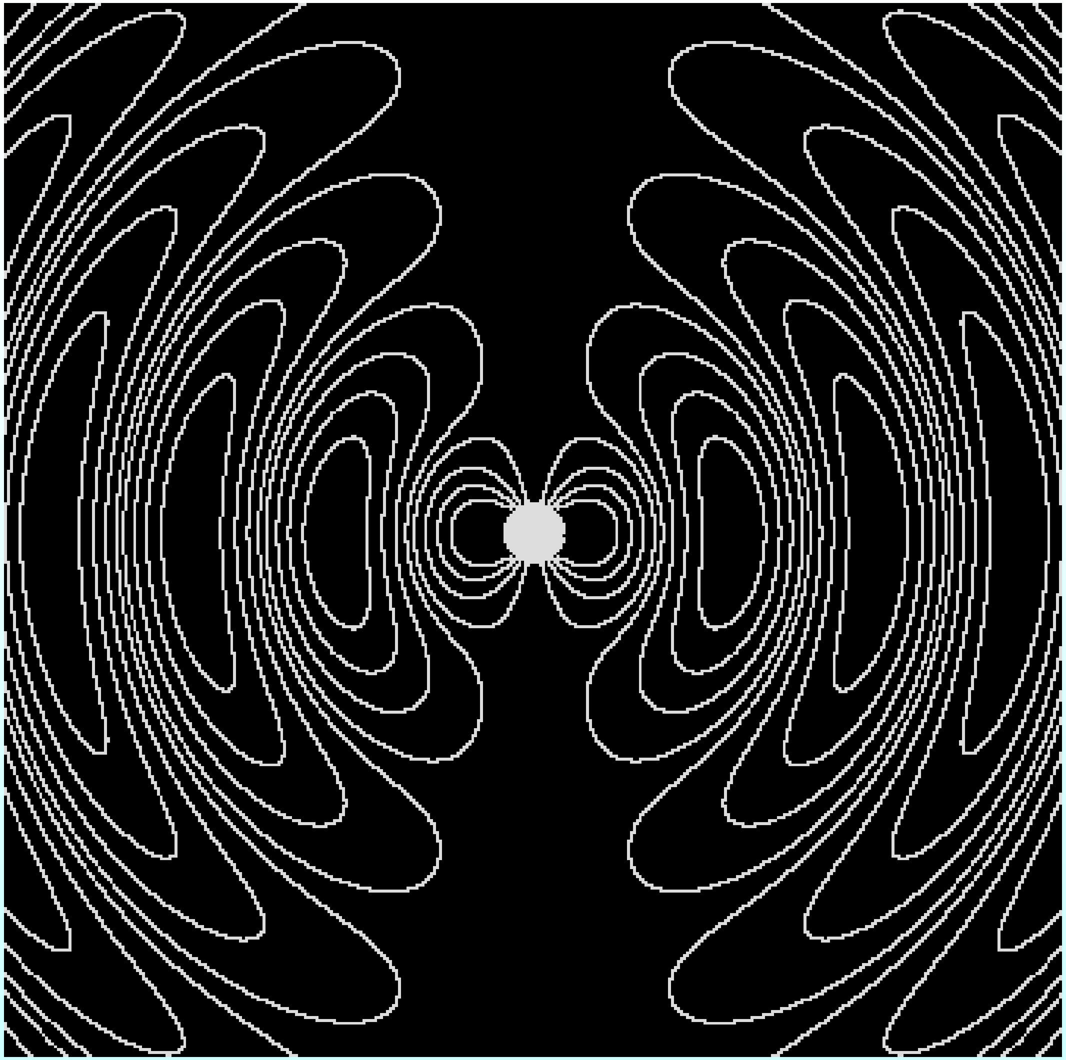


沿偶极子方向辐射为零，
垂直于偶极子方向辐射最强。



辐射过程示意





(电场线)

沿电偶极子方向辐射为零;

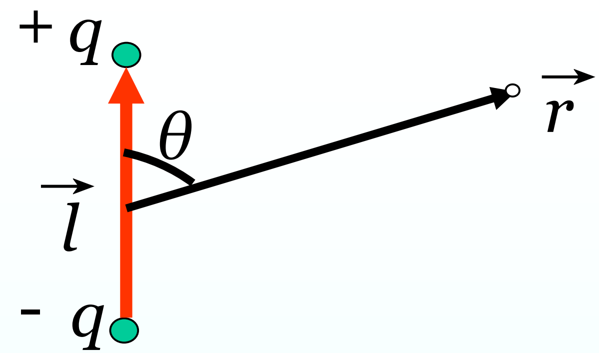
垂直于电偶极子方向辐射最强。

3. 平面电磁波

(1) 球面波

电场和磁场的波动方程：

$$\begin{cases} E = E_m \cos\omega(t - \dfrac{r}{u}) \\ H = H_m \cos\omega(t - \dfrac{r}{u}) \end{cases}$$

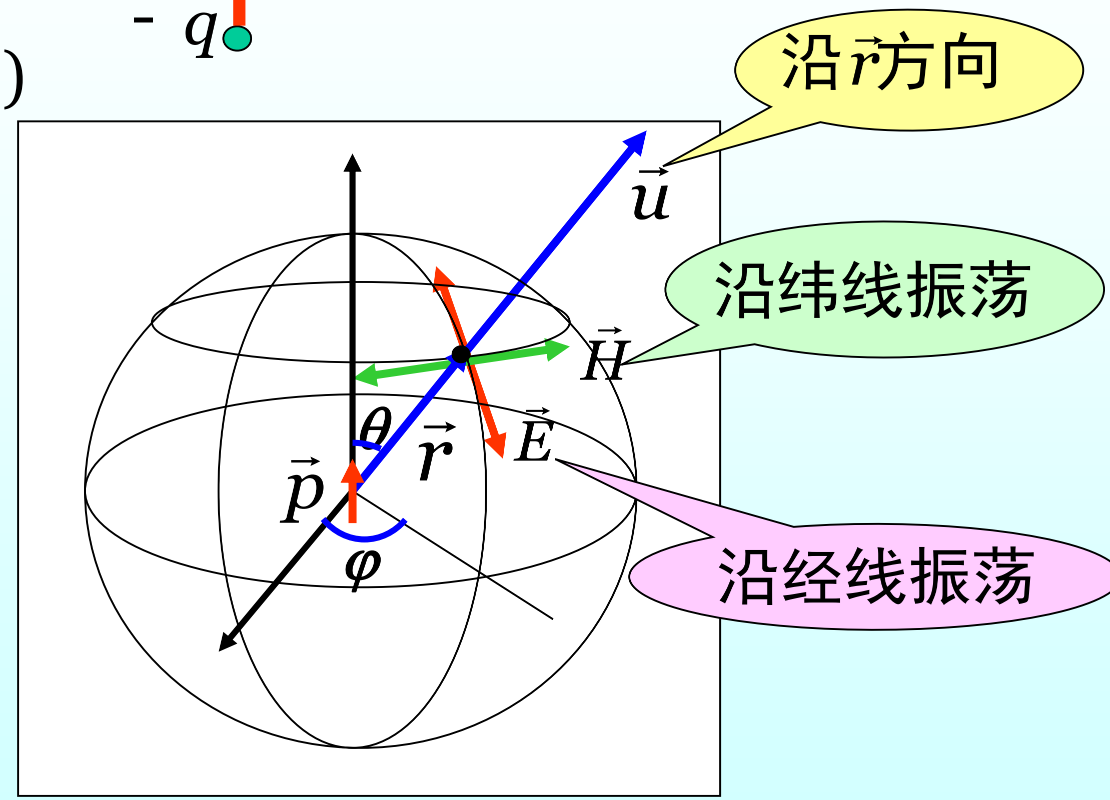


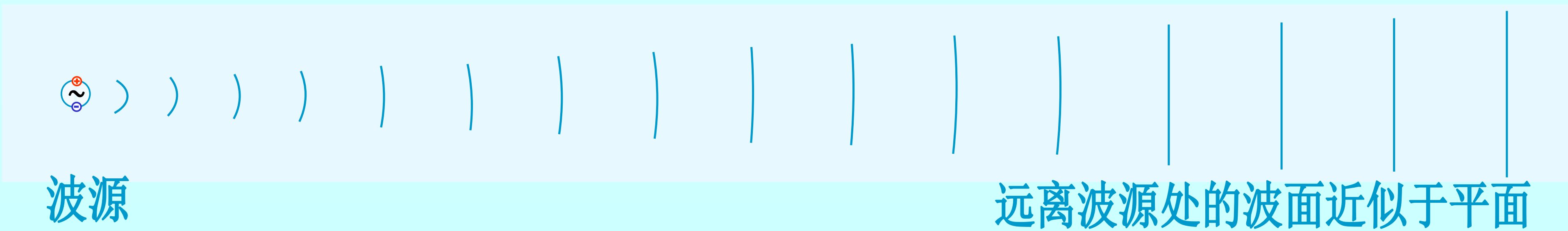
可以证明：

$$E_m = \frac{\omega^2 p_m \sin\theta}{4\pi\varepsilon u^2 r}$$

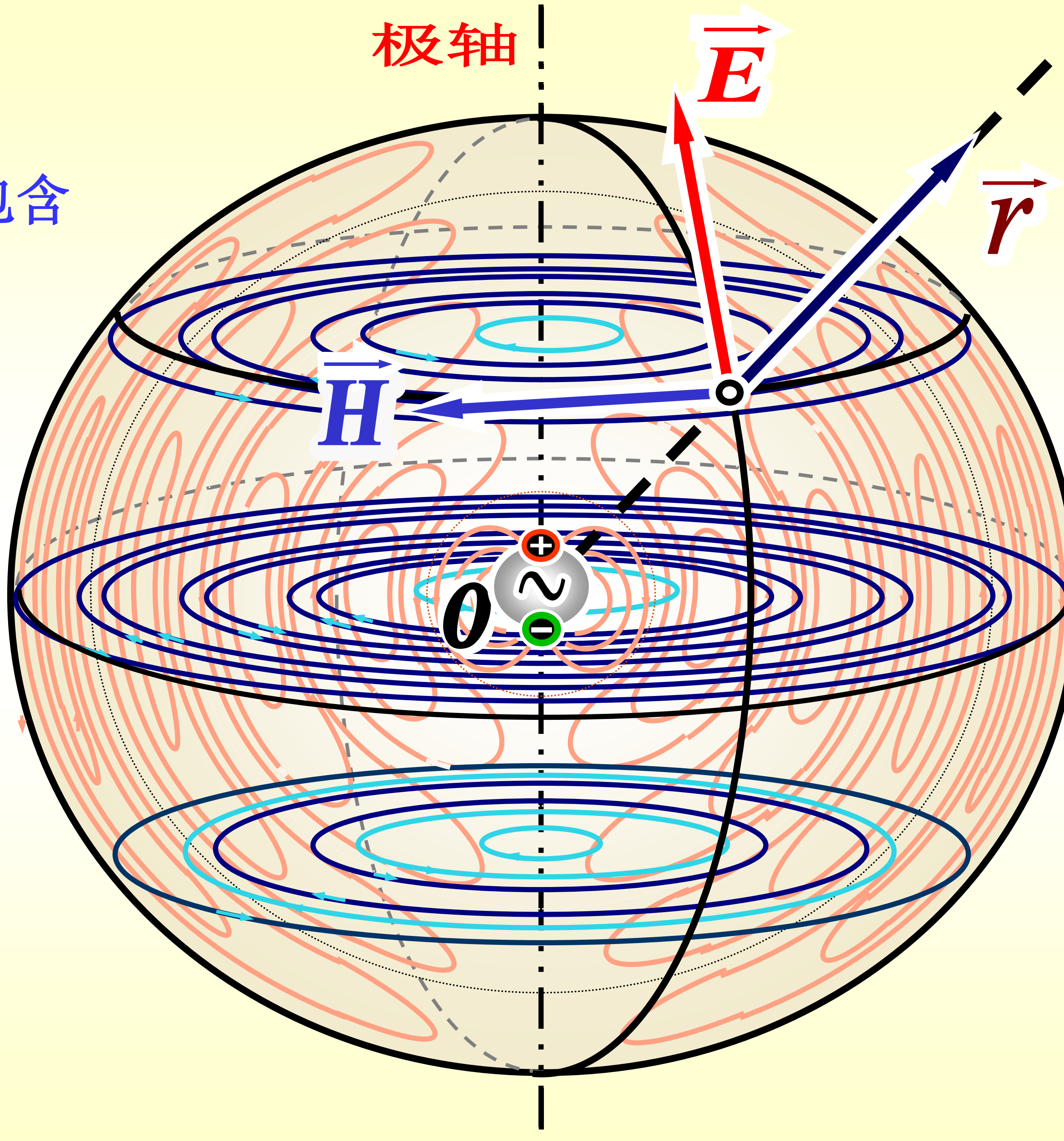
$$H_m = \frac{\omega^2 p_m \sin\theta}{4\pi u r}$$

$$p_m = q_m l$$



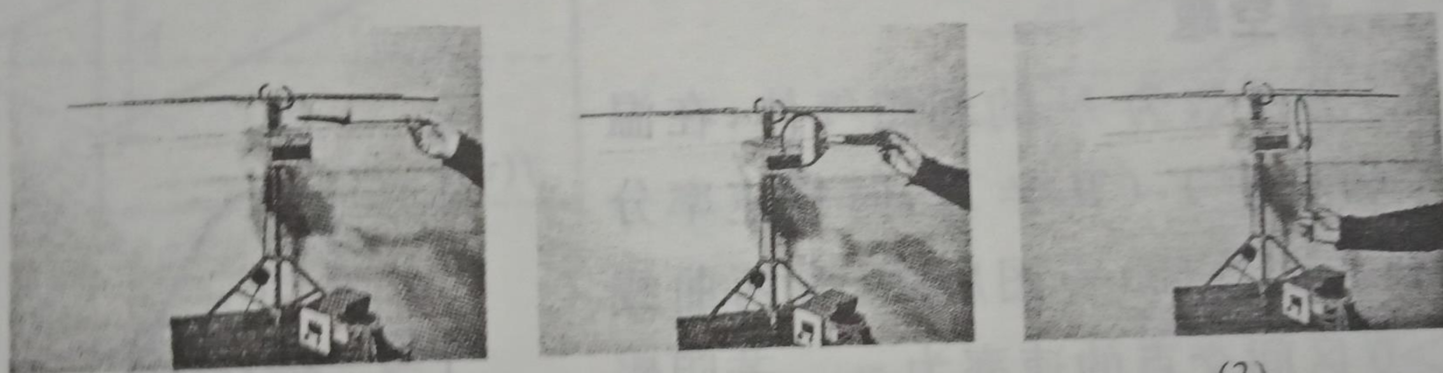


- $\vec{E}$在子午面(一系列包含极轴的平面)内。
- $\vec{H}$在与赤道面平行的平面内。
- 任意点的 $\vec{H}$ 与 $\vec{E}$ 相互垂直。
- 电磁波的传播方向 $\vec{r}$ 沿$\vec{E}\times\vec{H}$的方向。



教学视频-电磁波

工作时，对如试卷(8)-3 图(1)、(2)、(3)所示的三种操作方式，接在铜环中的小灯泡最亮的是 [ ]



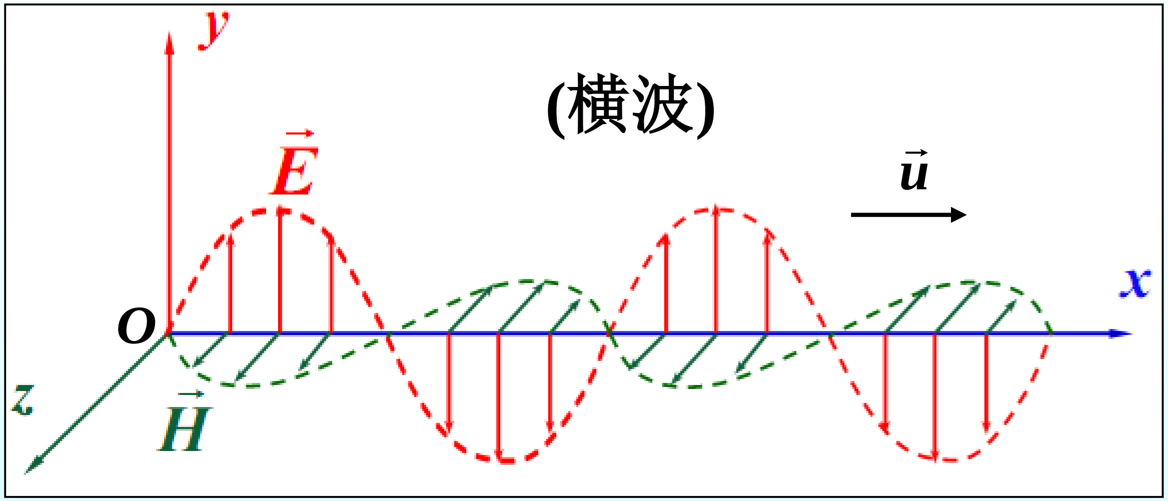
(1) (2) (3)

试卷(8)-3 图

(A) (1) (B) (2) (C) (3) (D) 不能判定

（2）平面电磁波的波函数：

理论和实践都证明：若电场 $\vec{E}$ 在 Y 方向振动，磁场 $\vec{H}$ 在 Z 方向振动，则电磁波在 X 方向传播。

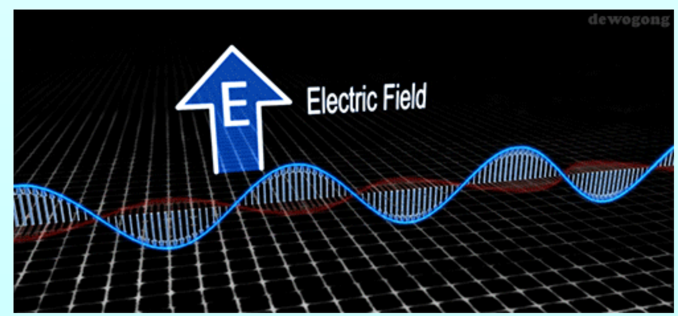


$\vec{E}\times\vec{H}$ 的方向就是电磁波的传播方向

$\vec{u} /\!/ \vec{E}\times\vec{H}$

波函数：$E_y = E_{ym}\cos\omega\left(t - \dfrac{x}{u}\right)$

$$H_z = H_{zm}\cos\omega\left(t - \frac{x}{u}\right)$$



其中：$u^2 = \dfrac{1}{\varepsilon\mu}$

波速 方向？

（3）平面电磁波的性质：

$$\boxed{\begin{aligned} E_y &= E_{ym}\cos\omega\left(t-\frac{x}{u}\right) \\ H_z &= H_{zm}\cos\omega\left(t-\frac{x}{u}\right) \end{aligned}}$$

1. 电磁波的速度：$u=1/\sqrt{\varepsilon\mu}$

电磁波在真空中的速度：$u_0=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}=3\times10^8 m\cdot s^{-1}$

$\sqrt{E_x^2+E_y^2+E_z^2}$ $\sqrt{H_x^2+H_y^2+H_z^2}$

2. $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 的变化是同步的，位相相同，并有数值关系：

$$\sqrt{\varepsilon}E=\sqrt{\mu}H \qquad H=\frac{B}{\mu} \Longrightarrow E=\frac{B}{\sqrt{\varepsilon\mu}}=uB$$

$$\sqrt{\varepsilon}E_x\neq\sqrt{\mu}H_x$$

在真空中： $E=cB$ $B<<E$

3. $\vec{E}\perp\vec{H}\perp\vec{u}$ $\vec{E}\times\vec{H}$ 的方向就是$\vec{u}$的方向

$\vec{E}$ $\vec{H}$在各自的平面上振动，是横波。

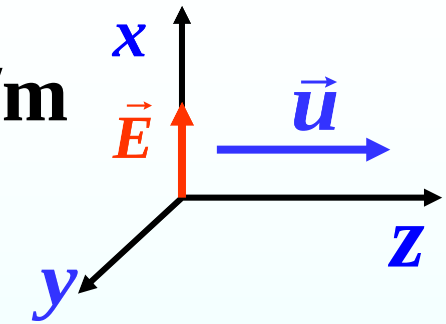
4. 电磁波的频率，等于偶极子的振动频率。

5. 电磁波具有反射、折射、干涉、衍射、偏振等特性。

例: 已知真空中电磁波的电场表达式:

$$E_x = 0.5\cos[2\pi \times 10^8 (t - \frac{z}{3\times 10^8})] \ \text{V/m}$$

$$E_y = 0 \qquad E_z = 0$$



求:（1）$\vec{E}$的振幅、频率、波长、波速、传播方向?

（2）$\vec{H}$的表达式?

解: （1） $E_m = 0.5 \ \text{V/m}$

$$\nu = 10^8 \text{Hz}$$

$$u = c = 3\times 10^8 \text{m/s}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 3\text{m}$$

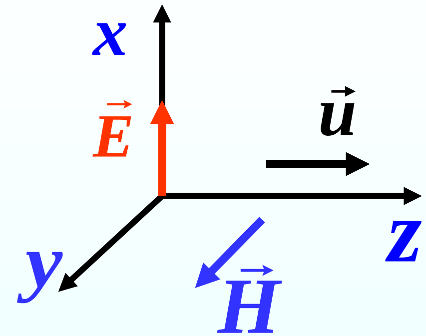
沿 z 正向传播

$$\boxed{\sqrt{\varepsilon_0}E_m=\sqrt{\mu_0}H_m}$$

（2）$\vec{H}$的表达式

$\because \vec{H}\perp\vec{E}$ 　且 $\vec{E}\times\vec{H}$ 沿 $\vec{u}$

$\therefore \vec{H}$ 沿 y 轴振动　　$H_x=H_z=0$



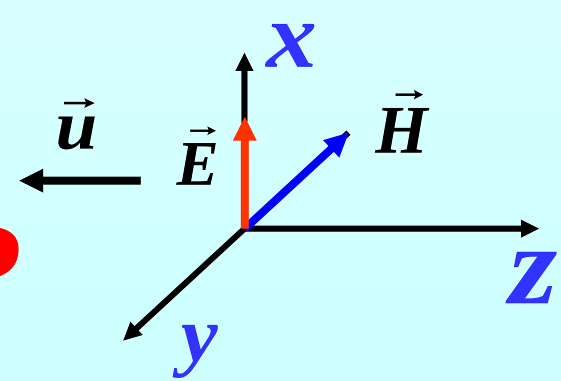
$$H_y=\underline{\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}}E_m\cos[2\pi\times10^8(t-\frac{z}{3\times10^8})]$$

$$=1\cdot32\times10^{-3}\cos[2\pi\times10^8(t-\frac{z}{3\times10^8})]\ \text{A/m}$$

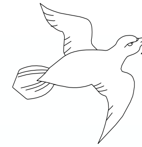
问：若波沿 z 轴反方向传播，方程如何写？

$$E=E_x=E_m\cos\omega(t+\frac{z}{u})$$

$$H=H_y=\ H_m\cos\omega(t+\frac{z}{u})\ ?$$



(4) 电磁波的能量



$$\boxed{\sqrt{\varepsilon}E_m = \sqrt{\mu}H_m}$$

a) 能量密度

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 + \frac{1}{2}\mu H^2 = \varepsilon E^2 = \mu H^2 = \sqrt{\varepsilon\mu}EH = \frac{1}{u}EH$$

总能量 $\quad W = \int_V w dV$

b) 能流密度 （坡印廷矢量）

定义：单位时间内通过与传播方向垂直的单位面积的能量，指向能量传播的方向。

$$S = wu = EH \qquad \vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$E = E_m \cos\omega(t - \frac{x}{u}) \qquad H = H_m \cos\omega(t - \frac{x}{u})$$

平均能流密度：

$$\overline{S} = \frac{1}{2}E_m H_m$$

即波强，正比于振幅的平方

$$\overline{S} \propto E_m^2, \quad \overline{S} \propto H_m^2$$

例： 在地面上测得太阳光的平均能流密度约为1.4kW/m²。

（1）求E和B的最大值；

（2）从地球到太阳的距离约为1.5×10¹¹m，试求太阳的总辐射功率。

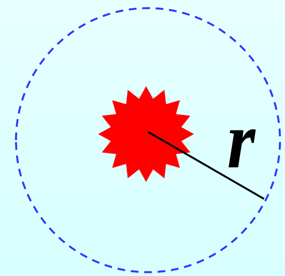
$$\sqrt{\varepsilon_0}E_m = \sqrt{\mu_0}H_m$$

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0} \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

解： (1) $\bar{S} = \frac{1}{2}E_m H_m = \frac{1}{2}E_m \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_m$

$$E_m^2 = 2\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\bar{S} = 2c\mu_0\bar{S}$$

$$E_m = \sqrt{2c\mu_0\bar{S}} = 1.03\times10^3\ \mathrm{V/m}$$



$$\sqrt{\varepsilon_0}E_m = \sqrt{\mu_0}\frac{B_m}{\mu_0} \qquad B_m = \sqrt{\varepsilon_0\mu_0}E_m = \frac{E_m}{c} = 3.43\times10^{-6}\ \mathrm{T}$$

(2) $P = \bar{S}\cdot 4\pi r^2 = 3.96\times10^{26}\ \mathrm{W}$ (约1.42×10²⁷度)。

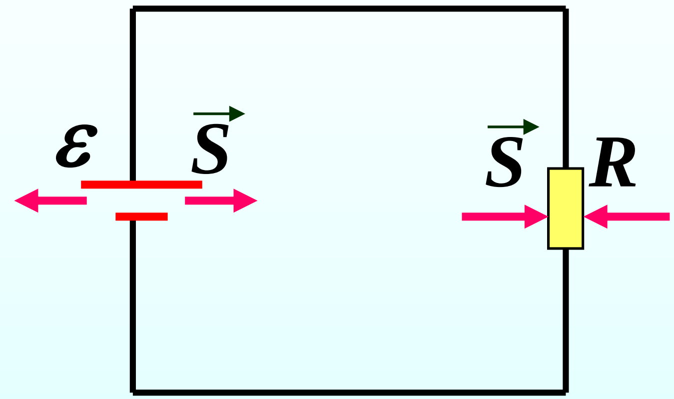
武汉市2010年夏季日用电量峰值不到1.5亿千瓦时(1.5×10⁸度)。

$$\vec{S}=\vec{E}\times\vec{H}$$

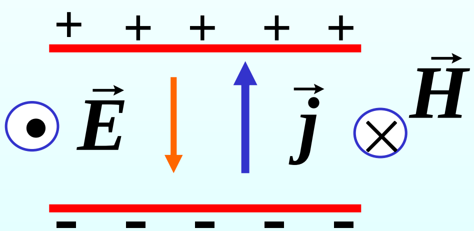
注：$\vec{S}$不仅适用于变化的电磁场，也适用于稳恒场。

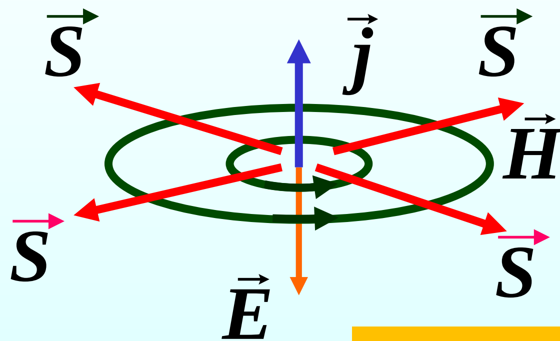
在稳恒场中，电磁能也是场传播的。

例：直流电路中的能量传递。

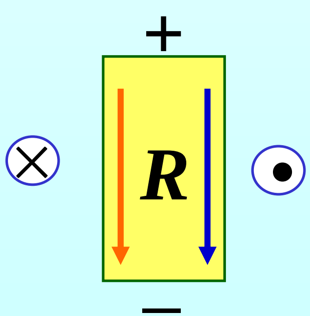


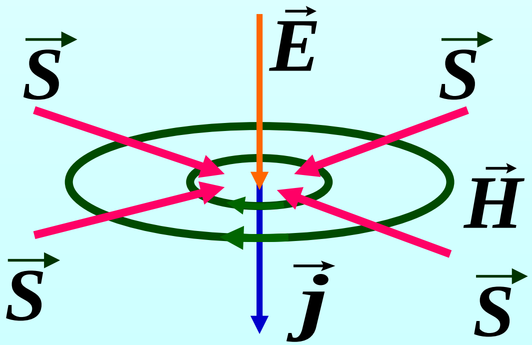
电源：





负载：





结论：

(1)电源的能量是通过电磁场从电源的侧面传出。

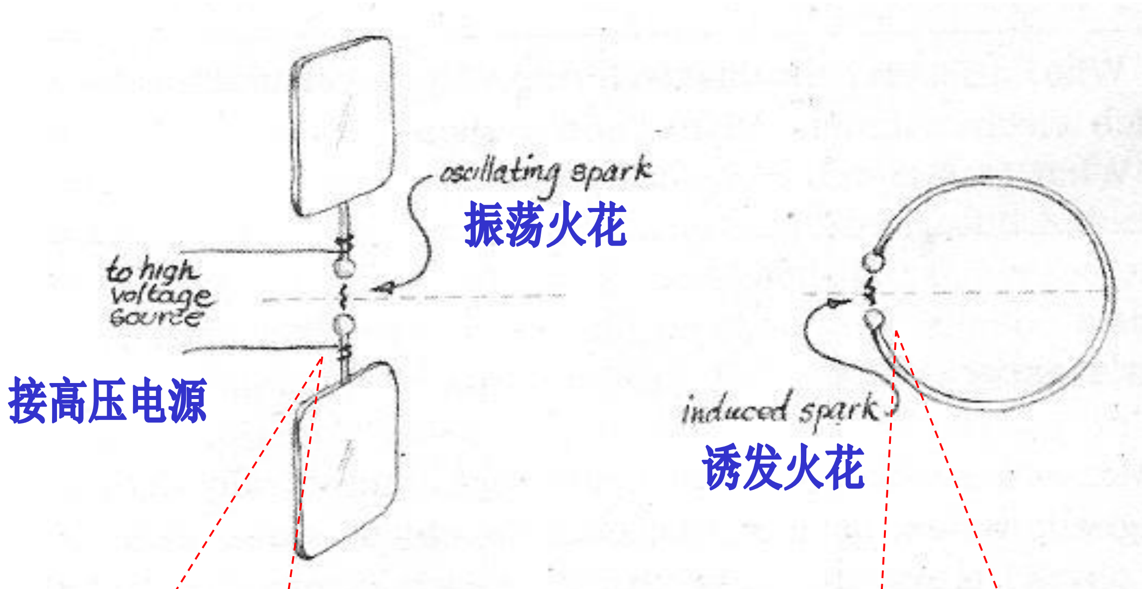
(2)电阻消耗的能量是通过电磁场从电阻的侧面传入。

导线起引导场能的作用。

麦克斯韦于1865年预言电磁波的存在。

1888年，赫兹首次用电磁振荡实验证实了电磁波的存在。

赫兹(1857–1894)



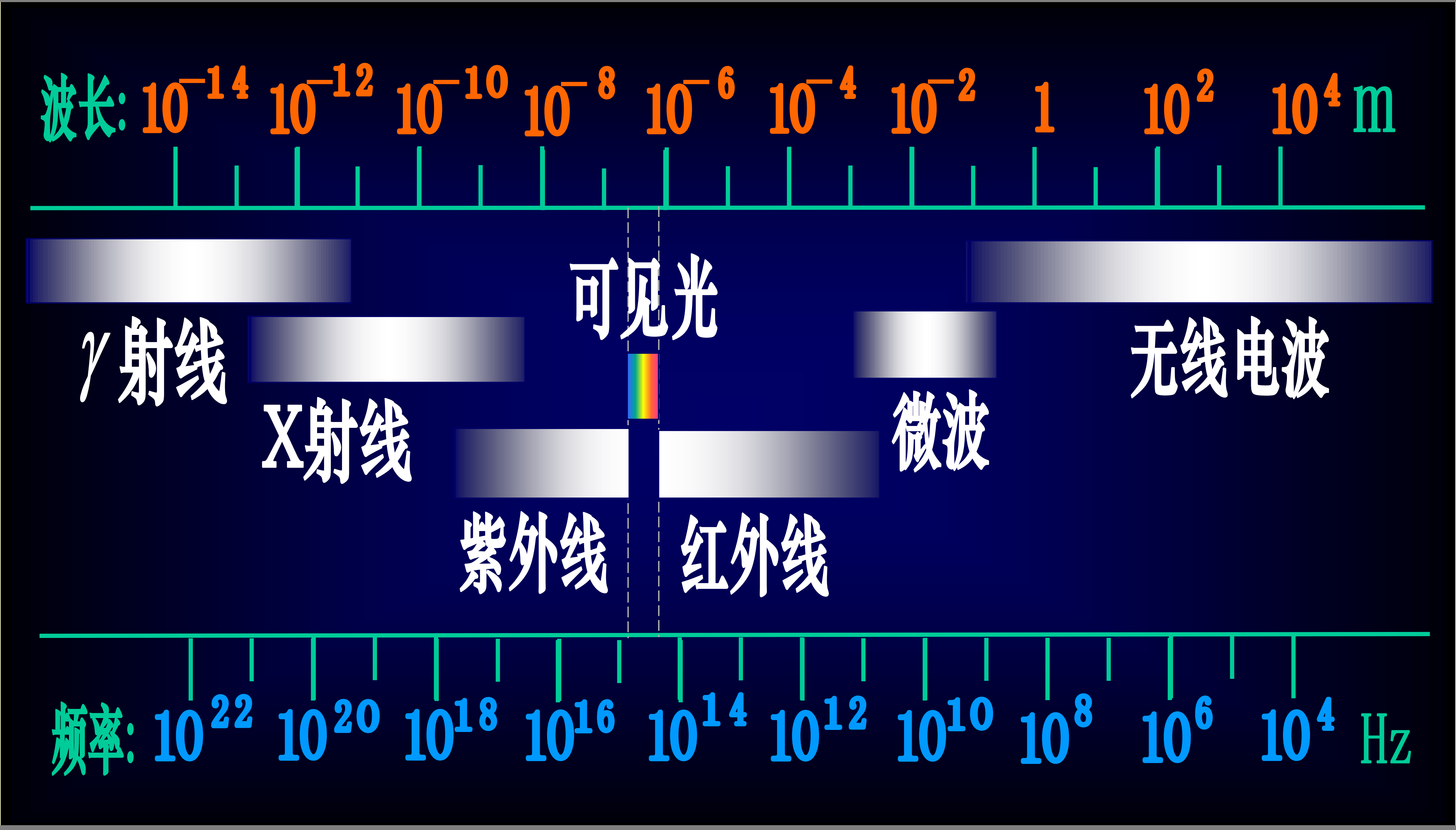
发射

将感应线圈电极产生的振荡高压，接至带有铜球和锌板的导体棒，两铜球之间产生振荡火花，发射电磁波。

接收

弯成圆弧形的铜线两端接有铜球，调节铜球间的距离，能产生诱发火花，表明接收到电磁波。

电磁波谱



波长: 10⁻¹⁴ 10⁻¹² 10⁻¹⁰ 10⁻⁸ 10⁻⁶ 10⁻⁴ 10⁻² 1 10² 10⁴ m
γ射线
X射线
可见光
紫外线
红外线
微波
无线电波
频率: 10²² 10²⁰ 10¹⁸ 10¹⁶ 10¹⁴ 10¹² 10¹⁰ 10⁸ 10⁶ 10⁴ Hz