大学物理
College Physics

主讲

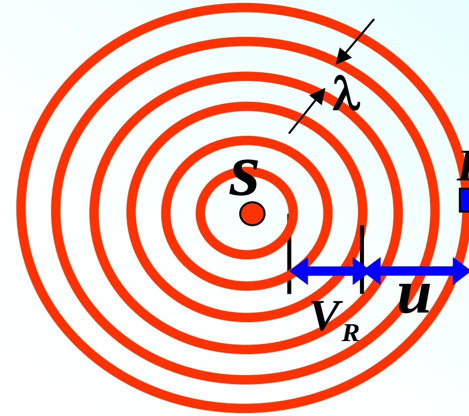
华 中 科 技 大 学
刘超飞

● 多普勒效应

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频率，这种现象称为多普勒效应。

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

选取介质中波速u为正方向



1. 波源静止，观察者朝向（远离）波源运动

波源静止，则波长不变，为λ。

观察者向着波源运动，则观察者感到波的速度为：$u + |V_R|$

$$\Rightarrow \nu_R = \frac{u \pm |V_R|}{\lambda} = \frac{u \pm |V_R|}{u}\nu_S$$ 频率变大（变小）

演示：音爆

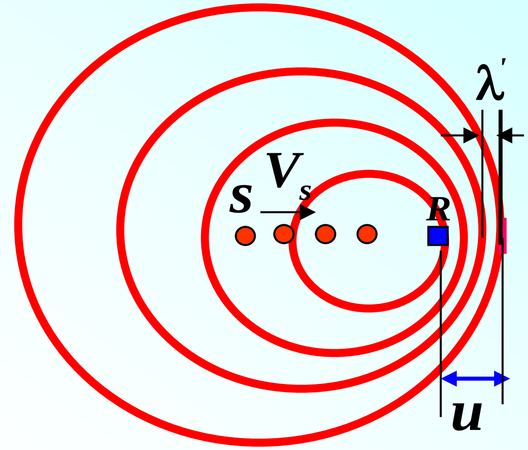
2. 观察者静止，波源朝向（远离）观察者运动

波源朝向观察者运动，则观察者感到波长变小，记为λ'。

$$\left.\begin{aligned}\lambda' &= \lambda - |V_S| \cdot T \\ \lambda &= u \cdot T\end{aligned}\right\} \Rightarrow \lambda' = \frac{u - |V_S|}{u}\lambda$$

观察者静止，感到波的速度不变，为 u

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



$$\Rightarrow \nu_R = \frac{u}{u \mp |V_S|}\nu_S$$

频率变大（变小）

● 非共线情况

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)。

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

● 如果$V_S>u$：音爆

电磁振荡与电磁波

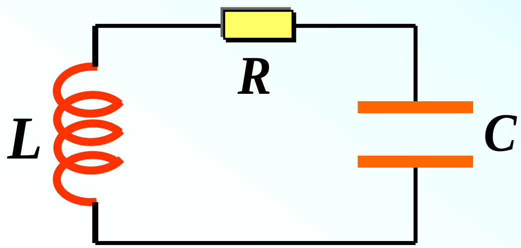
一、电磁振荡

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。



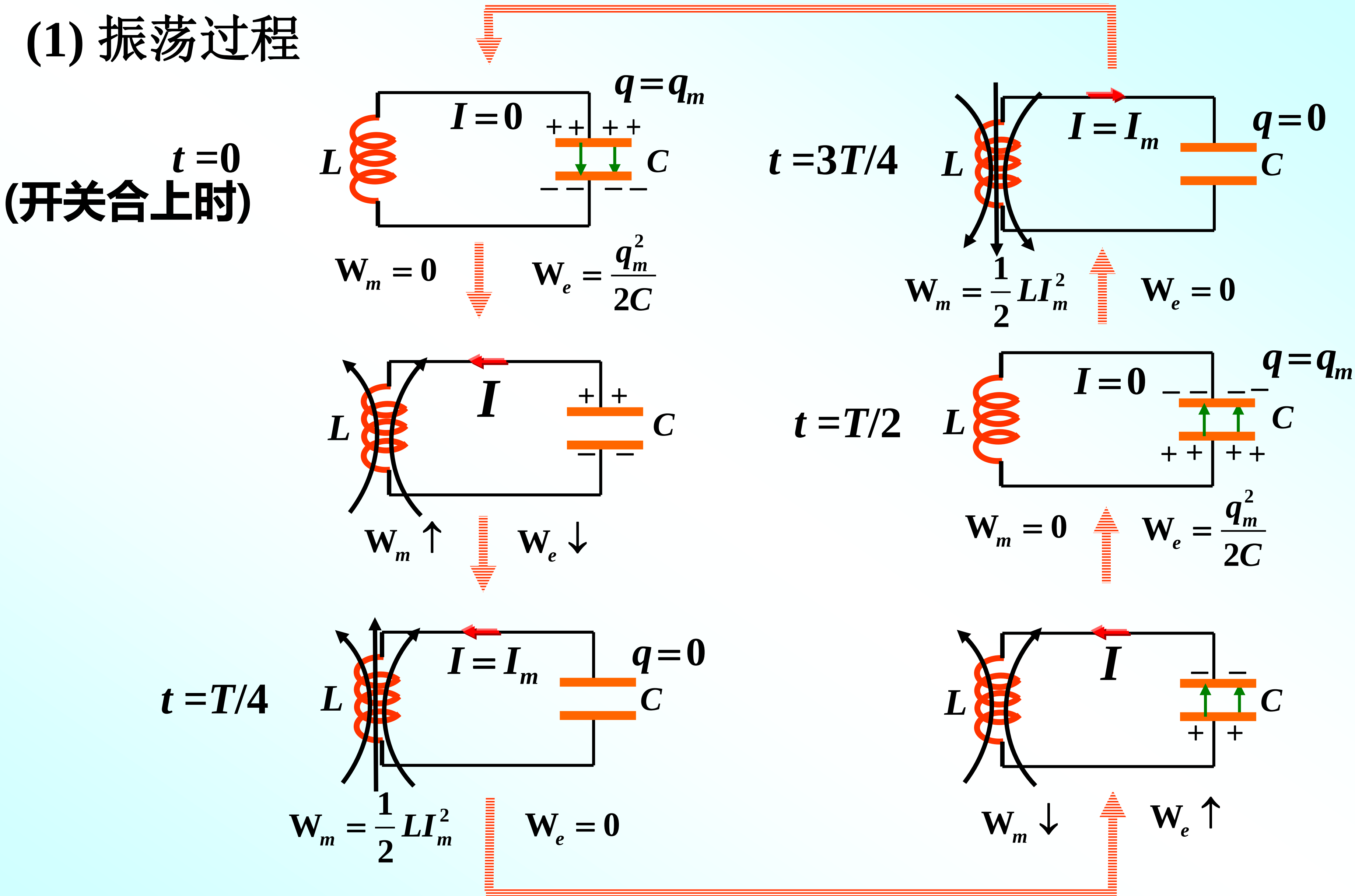
振荡电路

1. *LC*无阻尼自由振荡（*R*=0）

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。

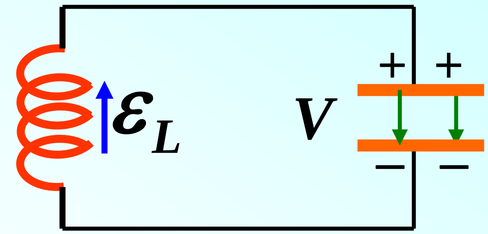
(1) 振荡过程



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 $\varepsilon_L = V$



$$\left.\begin{cases} \varepsilon_L = -L\dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \\ C = \dfrac{q}{V} \\ I = \dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \end{cases}\right\} \Rightarrow -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} = \frac{q}{C}$$

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

解为： $q = q_m \cos(\omega t + \phi)$

$$I = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = -\omega q_m \sin(\omega t + \phi) = I_m \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2})$$

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。

$$\boxed{q = q_m \cos(\omega t + \phi)} \qquad \boxed{I = I_m \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2})} \qquad \boxed{\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}}$$

可见：

（1）无阻尼自由振荡是简谐振荡，电流的变化超前电量 $\frac{\pi}{2}$

（2）特征量求法与弹簧振子相同

设初始条件为： q_0, I_0

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

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

$$\boxed{q = q_m \cos(\omega t + \phi)} \qquad \boxed{I = I_m \cos(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2})} \qquad \boxed{\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}}$$

2. LC振荡电路的能量

$$\begin{cases} W_e = \dfrac{q^2}{2C} = \dfrac{1}{2C} q_m^2 \cos^2(\omega t + \phi) \\ \omega^2 = \dfrac{1}{LC} \Rightarrow \dfrac{1}{C} = L\omega^2 \end{cases} \qquad \begin{cases} W_m = \dfrac{1}{2} L I^2 \\ I = -\omega q_m \sin(\omega t + \phi) \end{cases}$$

$$\Rightarrow W_e = \frac{1}{2} L\omega^2 q_m^2 \cdot \cos^2(\omega t + \phi) \qquad \Rightarrow W_m = \frac{1}{2} L\omega^2 q_m^2 \cdot \sin^2(\omega t + \phi)$$

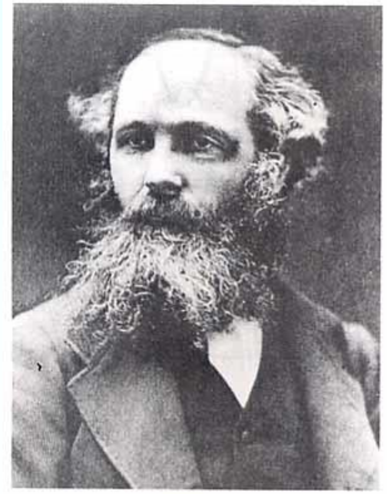
$$\Rightarrow \boxed{W_{总} = W_m + W_e} = \frac{1}{2} L\omega^2 q_m^2 \begin{cases} = \dfrac{1}{2} \dfrac{1}{C} q_m^2 & \text{电能极大值（常数）} \\ = \dfrac{1}{2} L I_m^2 & \text{磁能极大值（常数）} \end{cases}$$

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）$\overline{W_e} = \overline{W_m} = \dfrac{1}{2} W_{总}$

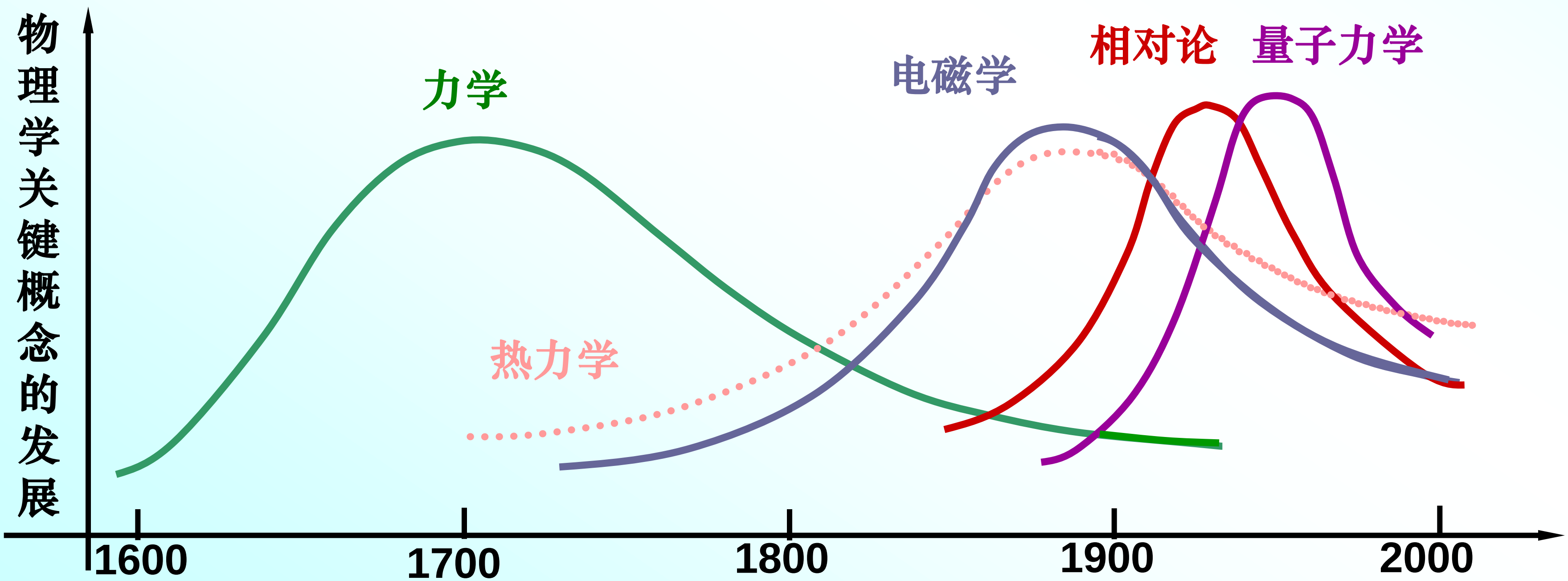
电磁波



James Clerk Maxwell
(1831–1879)

伽 利 略 … 牛 顿 … 麦克斯韦 … 爱因斯坦 …

（1564-1642） （1642-1722） （1831-1879） （1879-1955）

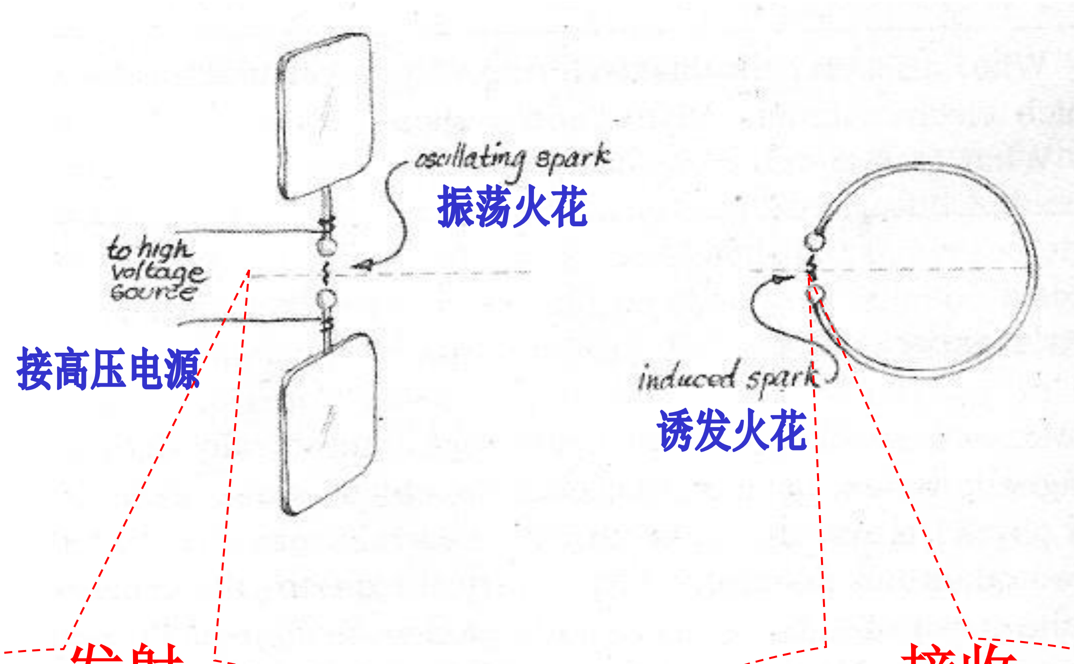


二、电磁波

麦克斯韦于1862年预言电磁波的存在。

25年后，即1887年，赫兹首次用实验证实了电磁波的存在。

赫兹(1857–1894)



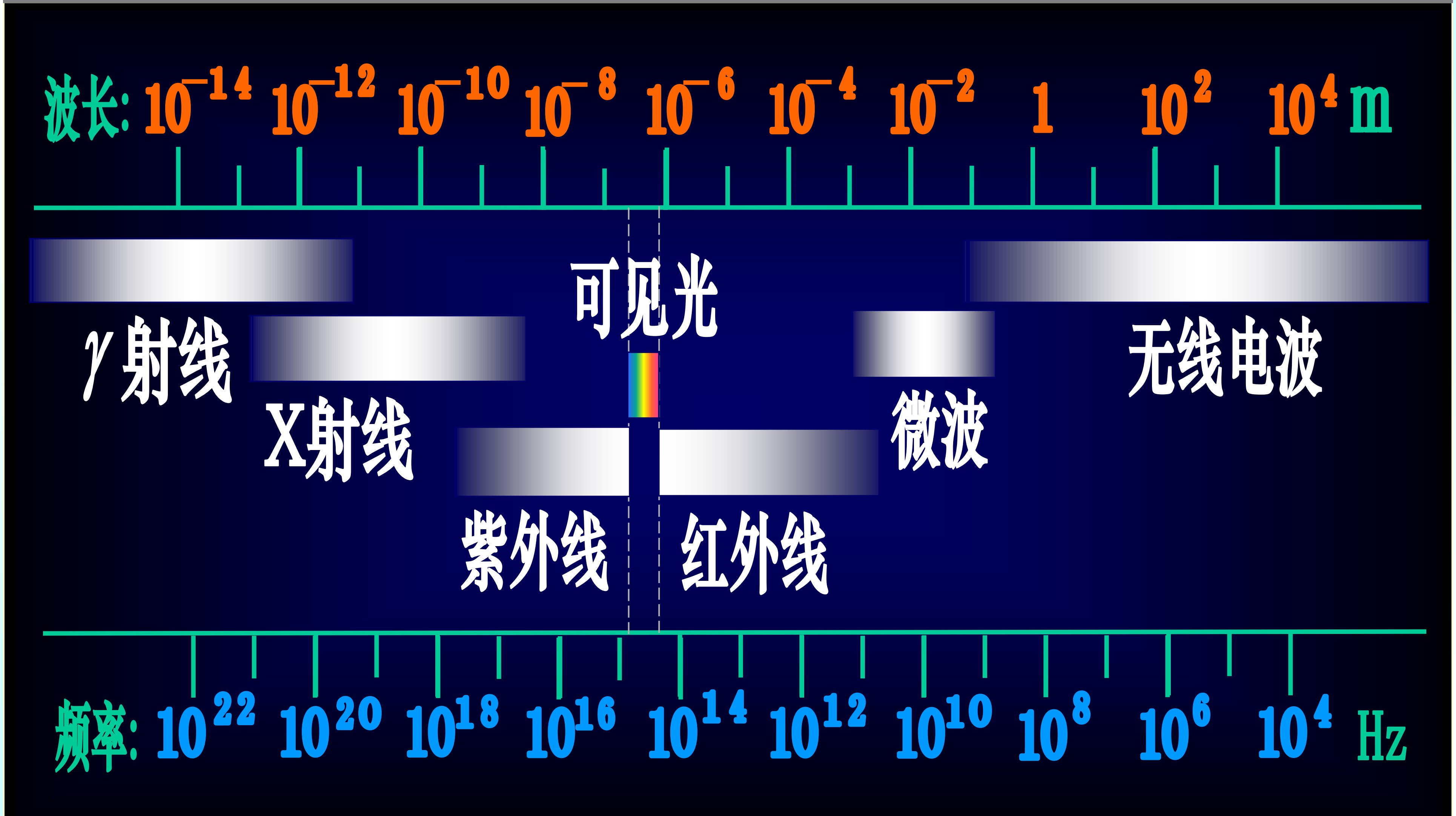
发射

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。

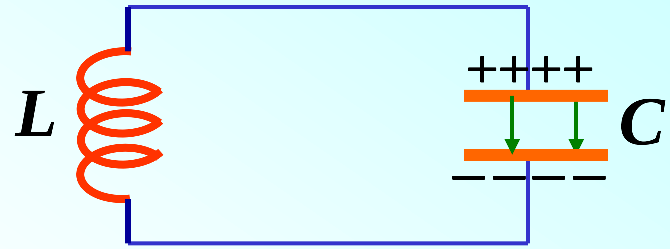
接收

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

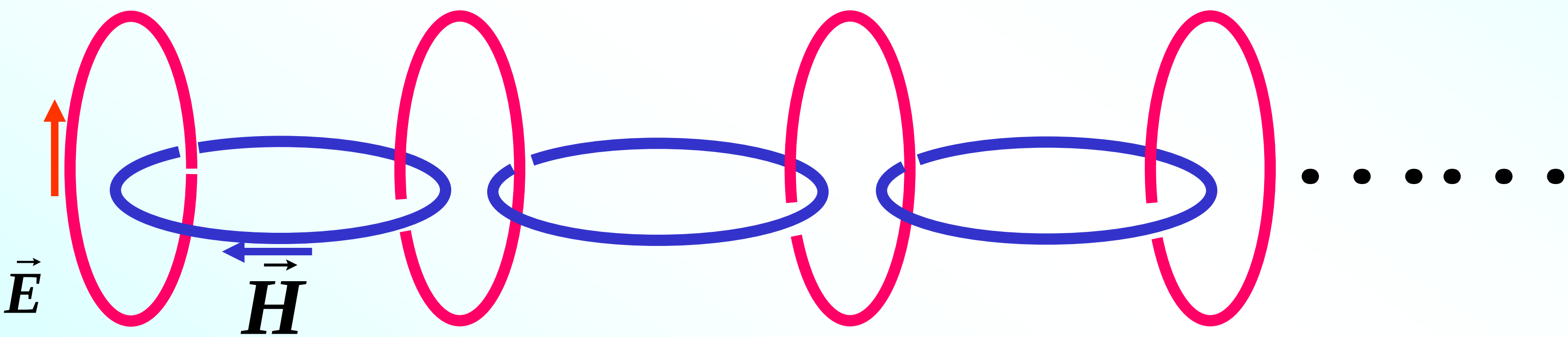

波长: 10^{-14} 10^{-12} 10^{-10} 10^{-8} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 1 10^{2} 10^{4} m
γ射线
X射线
可见光
紫外线
红外线
微波
无线电波
频率: 10^{22} 10^{20} 10^{18} 10^{16} 10^{14} 10^{12} 10^{10} 10^{8} 10^{6} 10^{4} Hz

1. 电磁波产生的条件



只要 波源 ——电磁振荡源

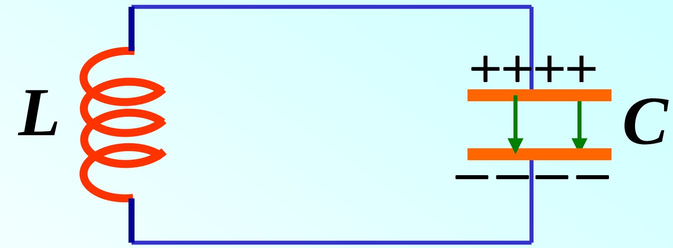
根据麦克斯韦理论：变化的磁场与变化的电场互相激发形成电磁波

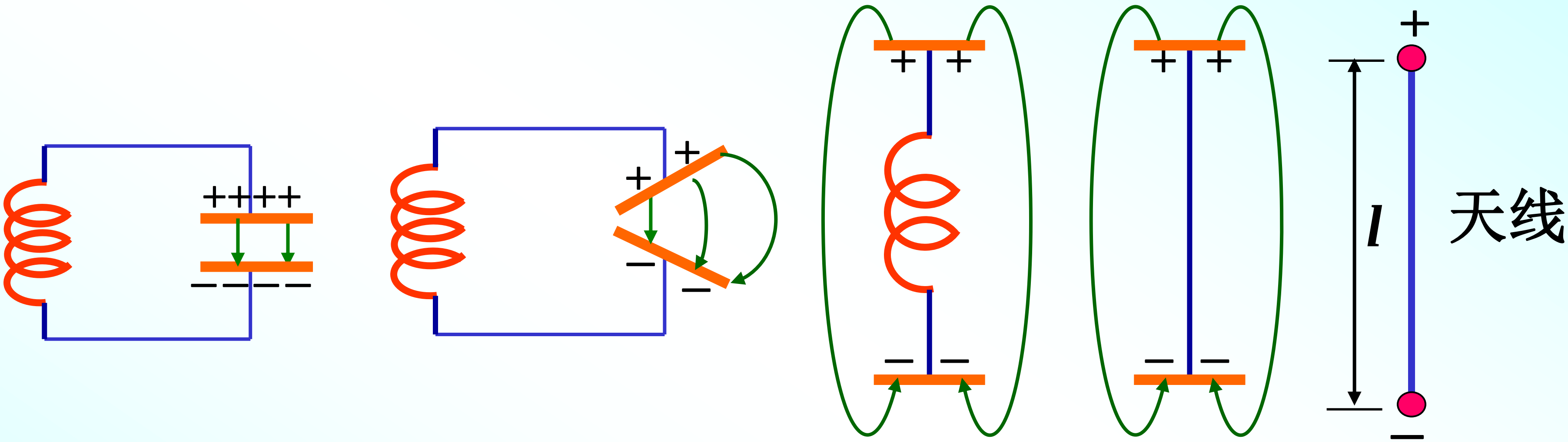


*LC*振荡电路理论上可以发射电磁波(实际上不能)。

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

解决方法：
1. 开放电路
2. 提高 ω　$\omega=\sqrt{\dfrac{1}{LC}}$





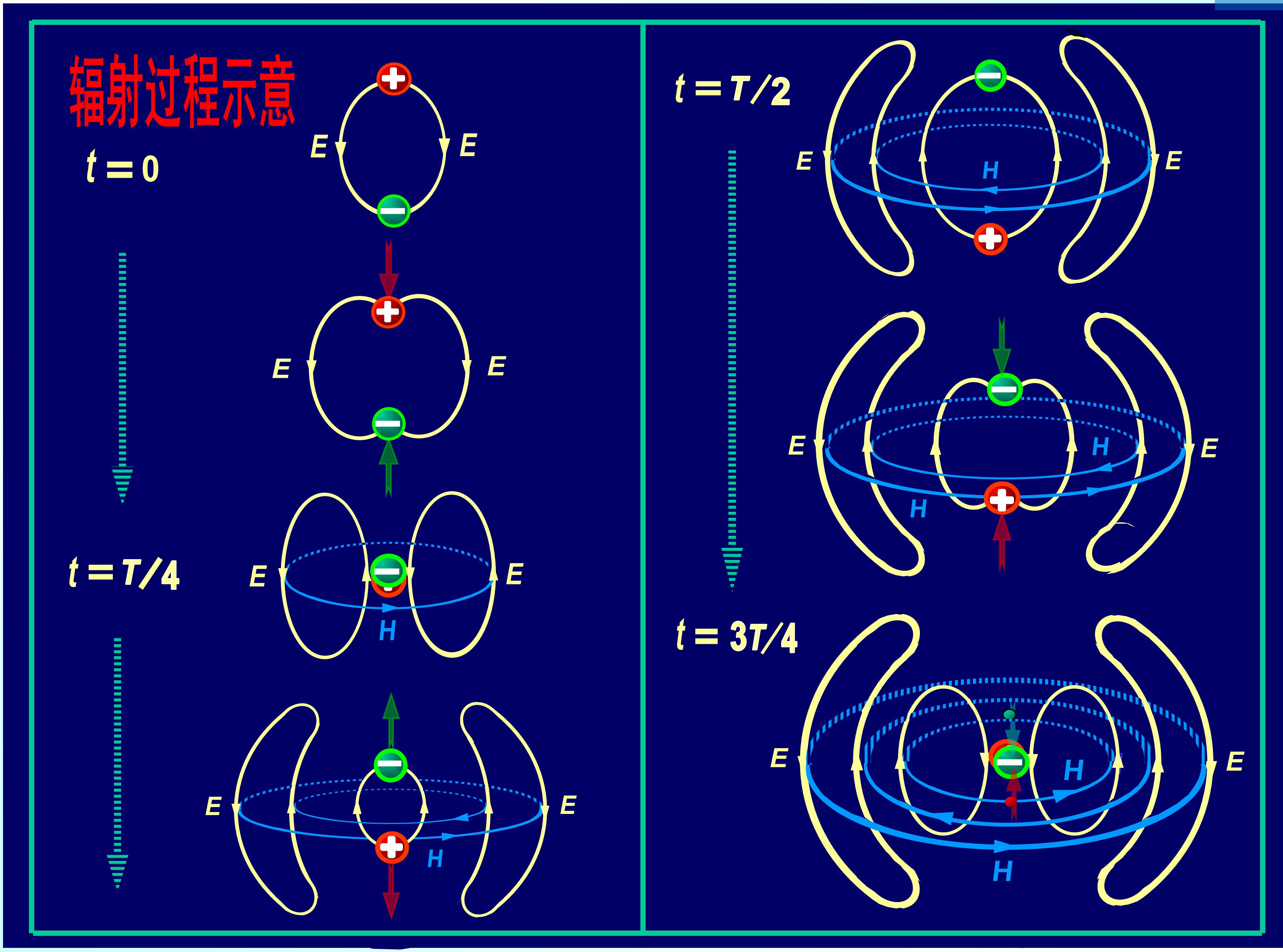
发射天线上电流在往复振荡，两端出现正、负交替等量异号电荷 $q=q_0\cos\omega t$

天线上存在振荡的电偶极子：$p=ql=q_0l\cos\omega t$

$=p_0\cos\omega t$

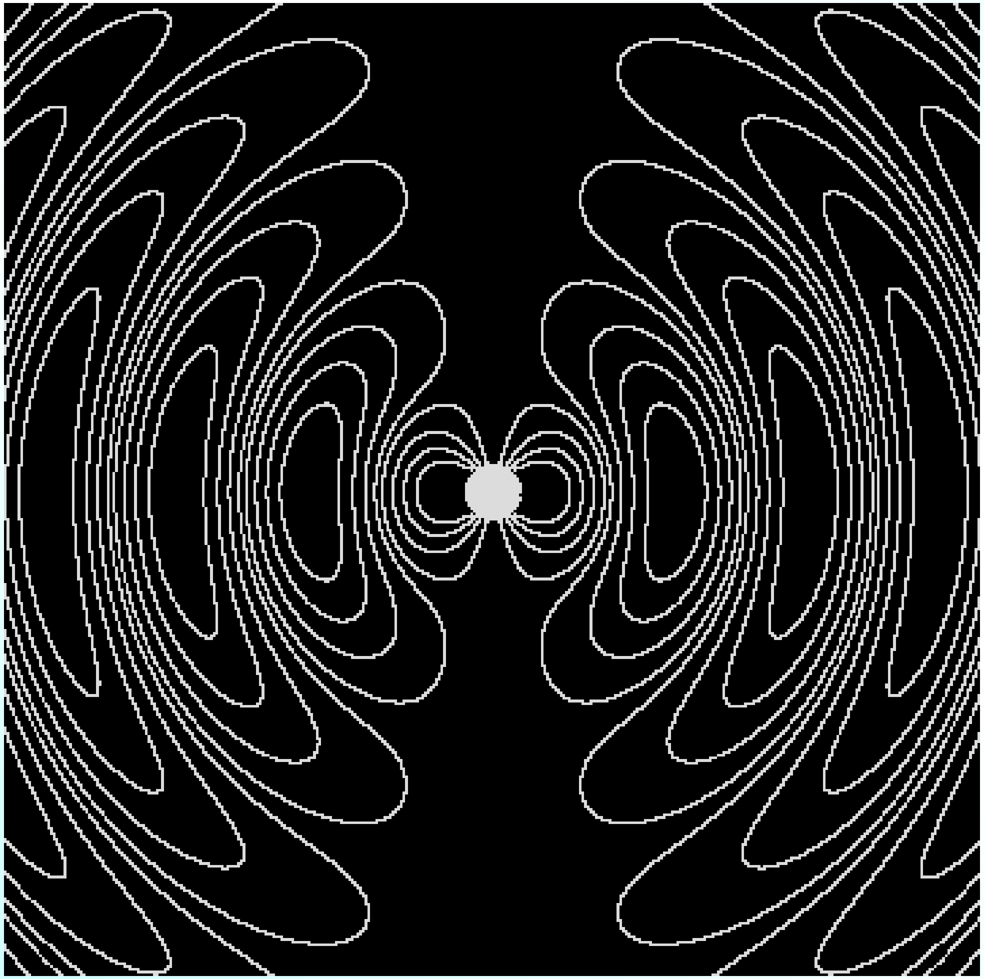
发射天线 = 振荡的电偶极子**(产生电磁振荡，发射电磁波)**

视频演示



动画演示

2. 振荡电偶极子辐射的电磁波



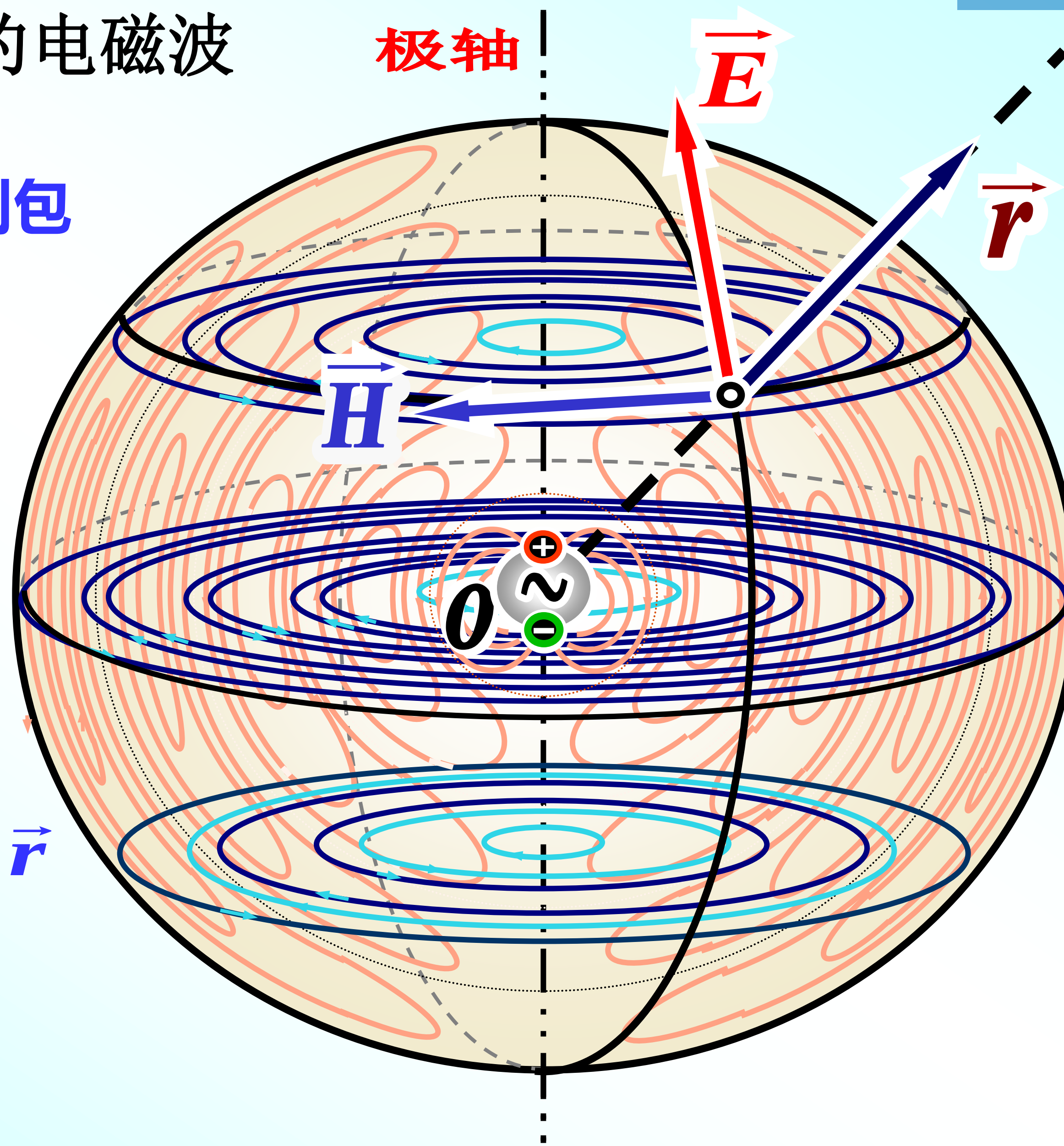
(电场线)

沿电偶极子方向辐射为零;

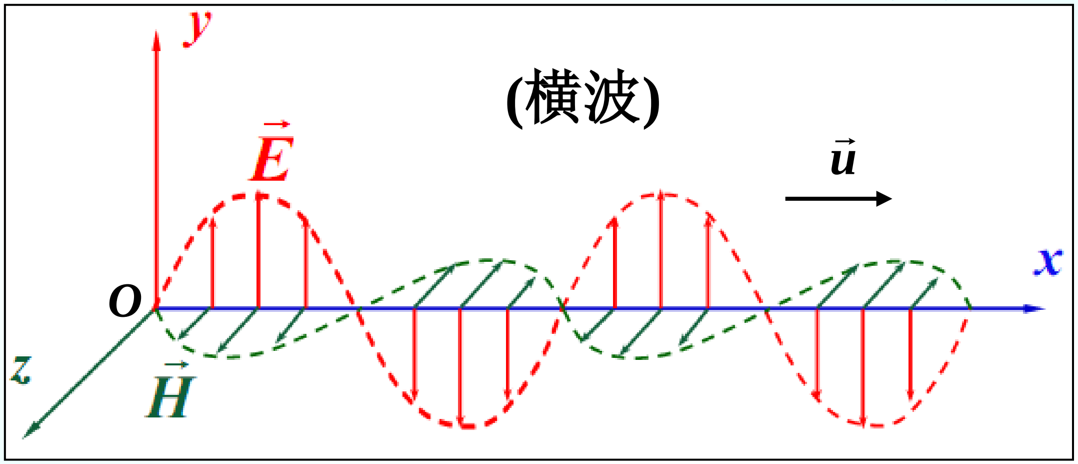
垂直于电偶极子方向辐射最强。

振荡电偶极子发射的电磁波

- $\vec{E}$ 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。



3. 平面电磁波



$\vec{E}\times\vec{H}$ 的方向就是电磁波的传播方向

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

若 $\vec{E}$ 在 Y 方向振动，$\vec{H}$ 在 Z方向振动，则电磁波在 X 方向传播。

波动表达式: $E_y = E_{ym}\cos\omega(t-\dfrac{x}{u})$ 其中: $u^2=\dfrac{1}{\varepsilon\mu}$ 波速

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

方向?

$$E_y = E_{ym} \cos\omega(t - \frac{x}{u})$$
$$H_z = H_{zm} \cos\omega(t - \frac{x}{u})$$

平面电磁波的性质：

1. 电磁波的速度：$u = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$

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

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

$$\begin{cases} \sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H \\ H = \dfrac{B}{\mu} \end{cases} \qquad \sqrt{\varepsilon}E_x \neq \sqrt{\mu}H_x$$

$$\Rightarrow E = \frac{B}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = cB$$

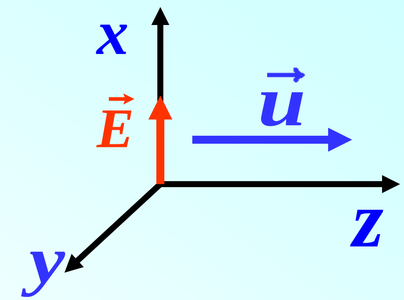
3. $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{u}$ $\qquad \vec{E}\times\vec{H}$ 的方向就是$\vec{u}$的方向

$\vec{E}$ $\vec{H}$ 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:



$$E_x = 0.5\cos[2\pi\times10^8(t-\frac{z}{3\times10^8})]\ \text{V/m}$$

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

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) 从电场表达式可以直接读出:

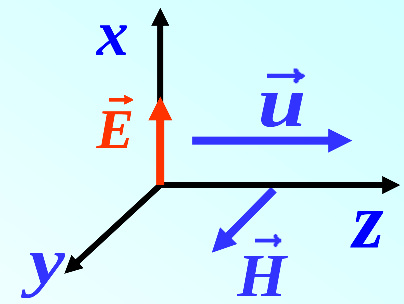
$$E_m = 0.5\ \text{V/m} \qquad \omega = 2\pi\times10^8$$

$$u = 3\times10^8\text{m/s} = c$$ 沿 z 正向传播

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = 10^8\text{Hz}$$

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

$$E_x = 0.5\cos[2\pi\times10^8(t-\frac{z}{3\times10^8})]\ \ \mathrm{V/m}$$



（2）$\vec{H}$的表达式

$\because \vec{H}\perp\vec{E}$ 且 $\vec{E}\times\vec{H}$ 沿z正方向

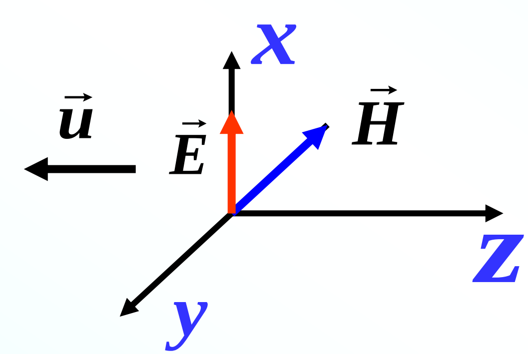
$\therefore \vec{H}$ 沿 y 轴振动：$H_x=H_z=0$

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

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

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

问：若波沿 z 轴反方向传播，方程如何写?



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

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

4. 电磁波的能量

1）能量密度： $w = w_e + w_m = \frac{1}{2}(\vec{D}\cdot\vec{E} + \vec{B}\cdot\vec{H})$

总能量： $W = \int_V w \mathrm{d}V$

2）能流密度矢量(坡印廷矢量)：

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。

$$\begin{cases} \boxed{\vec{S} = \vec{E}\times\vec{H}} \\ E = E_m \cos\omega(t - \frac{r}{u}) \\ H = H_m \cos\omega(t - \frac{r}{u}) \end{cases}$$

⟹ 平均能流密度： $I = \boxed{\bar{S} = \frac{1}{2}E_m H_m}$

光强正比于振幅的平方

$\because \sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H \quad \therefore \bar{S} \propto E_m^2 \quad \bar{S} \propto H_m^2$

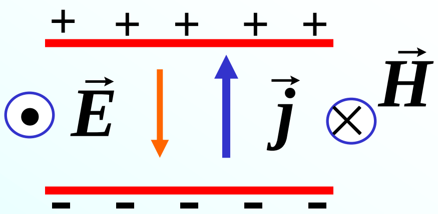
$\vec{S}=\vec{E}\times\vec{H}$

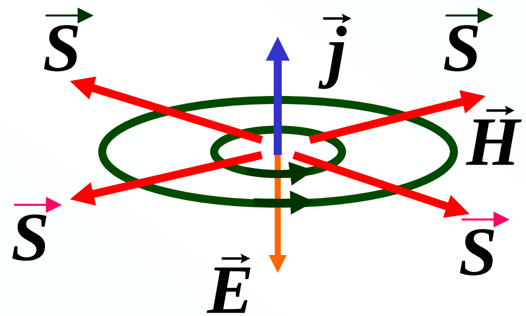
注：$\vec{S}$不仅适用于变化的电磁场，也适用于稳恒场。

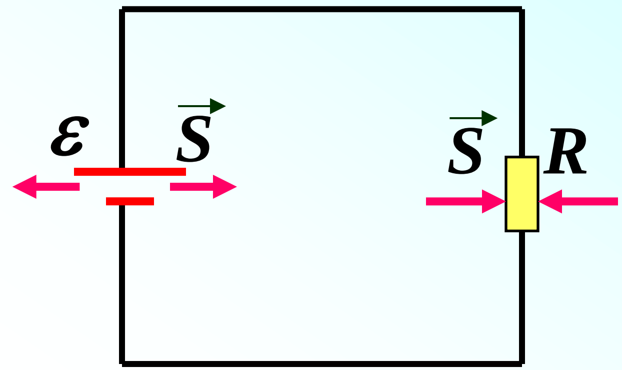
在稳恒场中，电磁能也是场传播的。

例：直流电路中的能量传递。

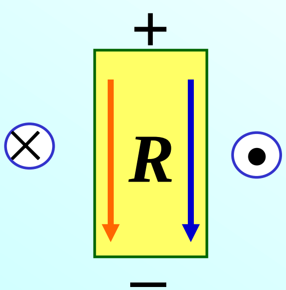
电源：

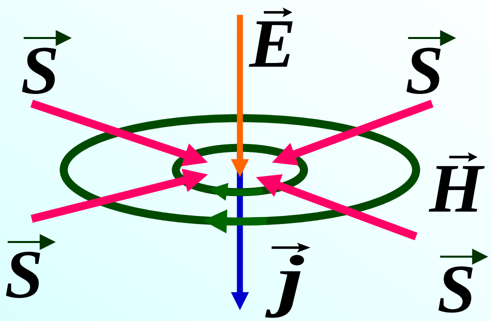






负载：





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。

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。

解： (1)

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

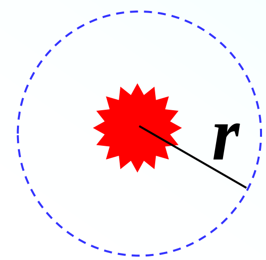
$$\sqrt{\varepsilon_0} E_m = \sqrt{\mu_0} H_m$$

$$\Rightarrow \bar{S} = \frac{1}{2} E_m \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_m$$

$$\Rightarrow E_m = \sqrt{2\bar{S}\mu_0 / \varepsilon_0} = 1.03 \times 10^3 \mathrm{V/m}$$

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0}$$

$$\Rightarrow B_m = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} E_m = E_m / c = 3.43 \times 10^{-6} \mathrm{T}$$



(2) $P = \bar{S} \cdot 4\pi r^2 = 3.96 \times 10^{26} \mathrm{W}$ （一小时约1.42×10^{27}度）

武汉市夏季日用电量峰值不到1.5亿千瓦时(1.5×10^8度)。

作业：11 —T23-T27

作业要求

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. 作业纸上每次都要写姓名以及学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周二交上周的作业。迟交不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。