

CISE 11120010

电磁场与电磁波

第1讲

电磁运动规律的实践经验总结
——麦克斯韦方程（积分形式）

Maxwell肖像



1873年Maxwell的巨著《A Treatise of Electricity and Magnetism》预言电磁波的存在

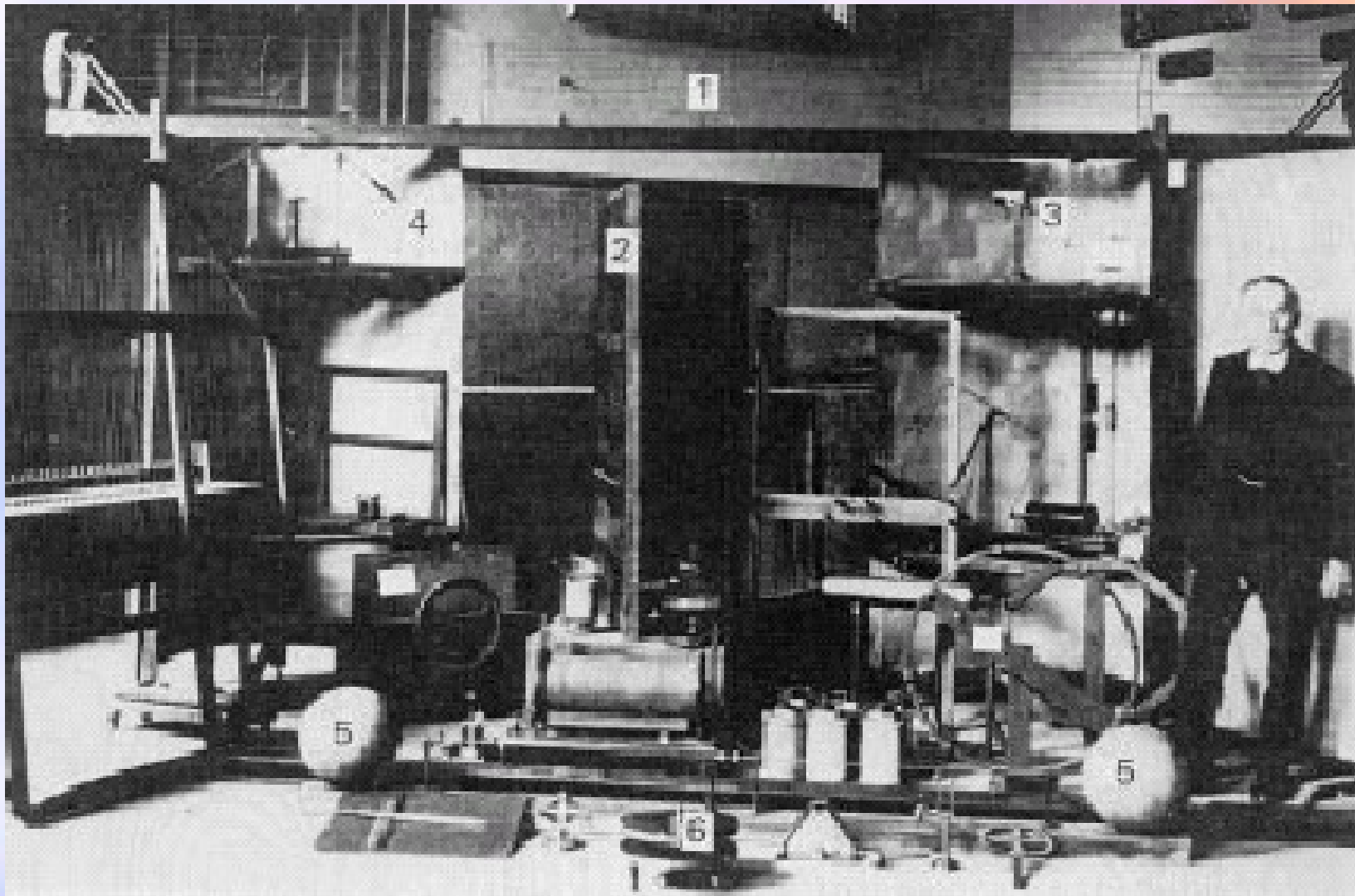
$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{array} \right.$$



赫兹实验装置



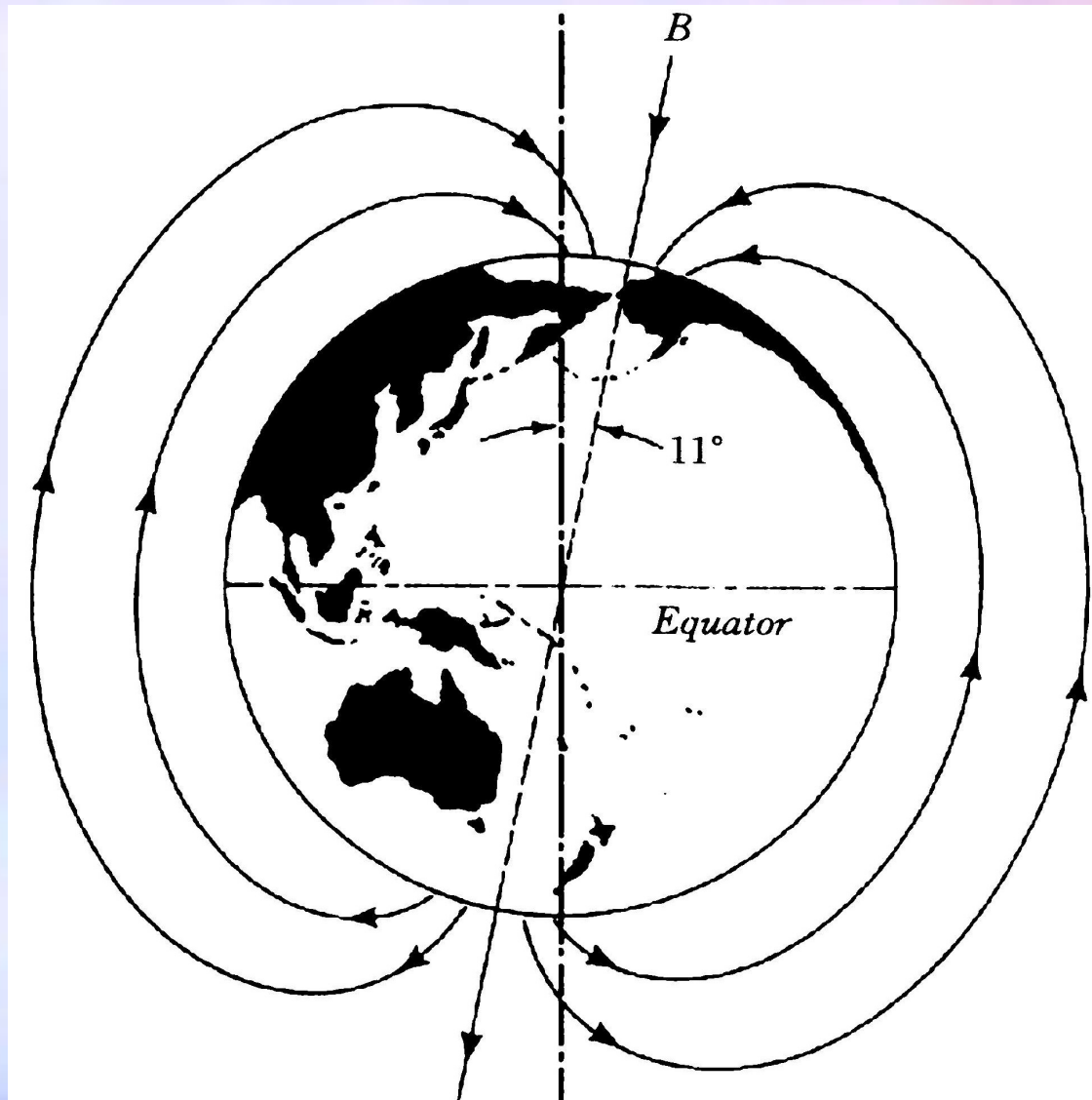
1888年赫兹实验证明电磁波的存在



磁场的存在

4

世界上最早认识到地球磁场的存在并从而发明指南针的是中国



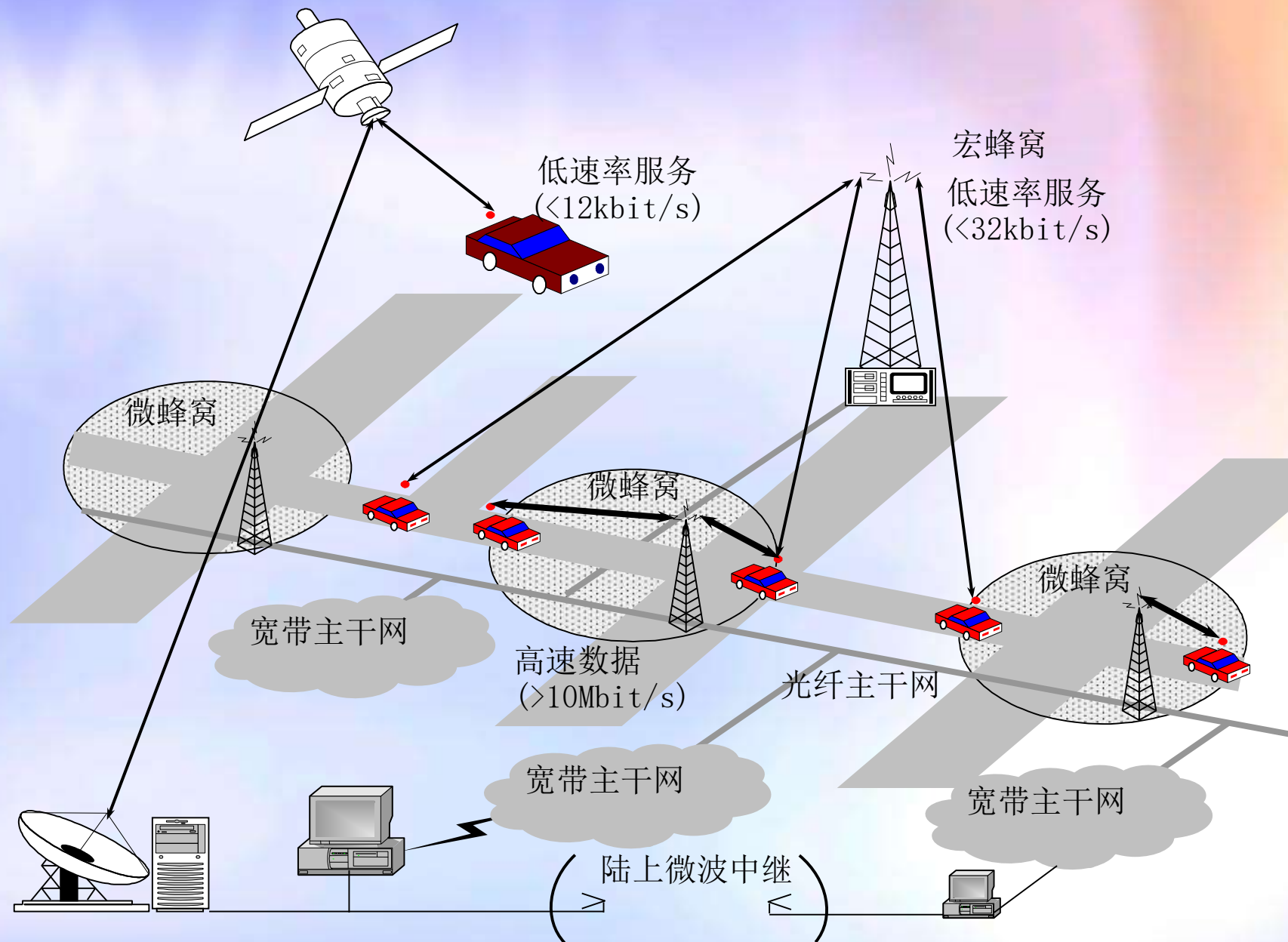
EM anywhere anytime



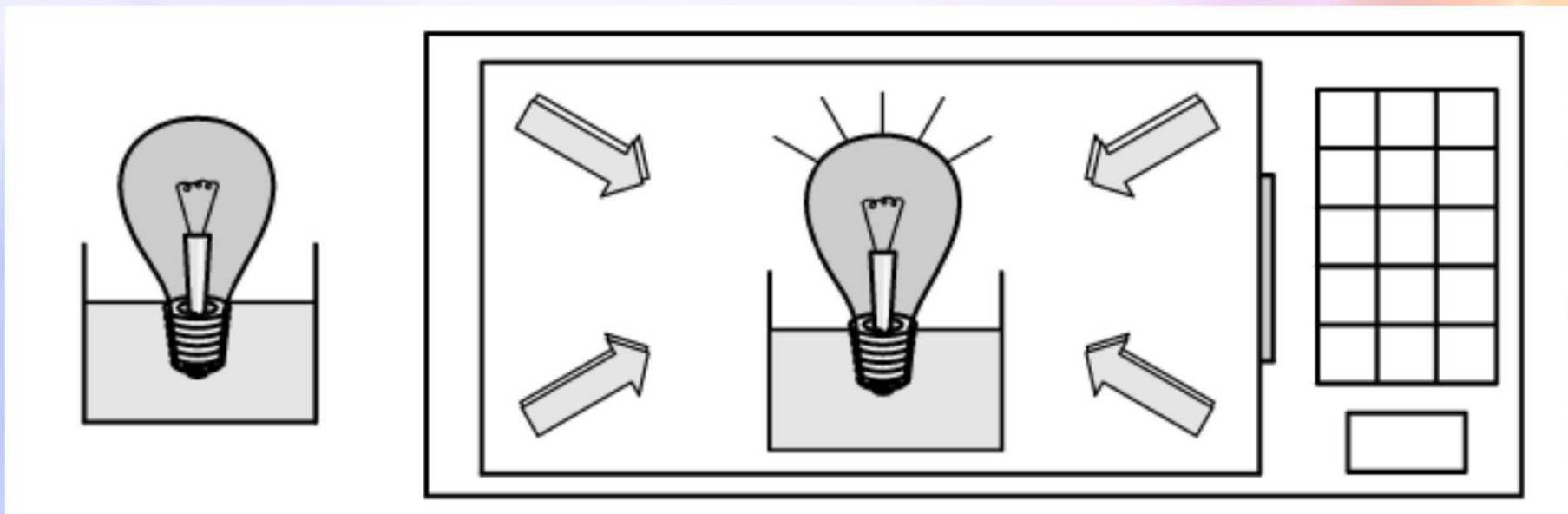
任何时候、任何地方都有电磁场与电磁波；
人类社会、人们生活离不开电磁场与电磁波；
信息时代更离不开电磁场与电磁波；
网络上的信息都是通过电磁波这个载体传播的；
请列举电磁场与电磁波的应用实例。

通信网系统

6



微波炉使白炽灯发光



电磁运动三大特点



1. 电磁波有能量。
2. 电磁波从一点传播到另一点有时间延迟，即电磁波以一定速度传播，其传输速度等于光速。
3. 在线性介质中，电磁波传播满足线性叠加定理。
所谓线性，即一个波的传播并不影响另一个波的传播。
如两个人交谈，一个人声带振动发出的声波并不影响另一个人发出的声波传播。两个声波相遇，其总的波只是两个波的简单叠加。

描述电磁场与电磁波的四个场量



| 场量 | 单位 |
|--------------------|--|
| 电场强度 E | 伏特/米 (V/m) |
| 电通量密度 (或电位移) D | 库仑/米 ² (C/m ²) |
| 磁通量密度 (或磁感应强度) B | 韦伯/米 ² (Wb/m ²) |
| 磁场强度 H | 安培/米 (A/m) |

真空中

$$D = \epsilon_0 E \quad B = \mu_0 H$$

ϵ_0 真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ (法拉/米)

μ_0 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (亨利/米)

一般介质中

$$D = \epsilon E, \quad \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \epsilon_r \text{——介质相对介电常数}$$

$$B = \mu H, \quad \mu = \mu_r \mu_0 \quad \mu_r \text{——介质相对磁导率}$$

人们通过什么途径认识这四个场量？

电荷与电流是产生电磁场的源



电荷量 Q 的单位是库仑 (C)

电流强度 I 的单位是安培(A)

体积 V 内电荷量 Q

流过截面 S 的电流 $I(t)$

$$Q(t) = \int_V \rho_v(\mathbf{r}', t) dV'$$

$$I(t) = \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}', t) \cdot d\mathbf{S}'$$

电荷体密度 ρ_v (C/m³)

电流体密度 \mathbf{J}_v (A/m²) 定义为

$$\rho_v(\mathbf{r}', t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

$$\mathbf{J}_v = \rho_v \mathbf{v}$$

人们通过物体间相互作用认识重力场 g



质量为 m_1 、 m_2 两物体间的引力 F_{g21}

$$\mathbf{F}_{g21} = -\mathbf{r}_{12_0} \frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2}$$

r_{12} 为两物体质心间距， G 为普适引力常数

地球对任一质量为 m 的物体的作用力（重力）可认为是地球产生的重力场 g 对 m 的作用

$$\mathbf{g} = -\mathbf{r}_0 \frac{GM}{r^2}$$

人们通过电荷之间的相互作用认识电场

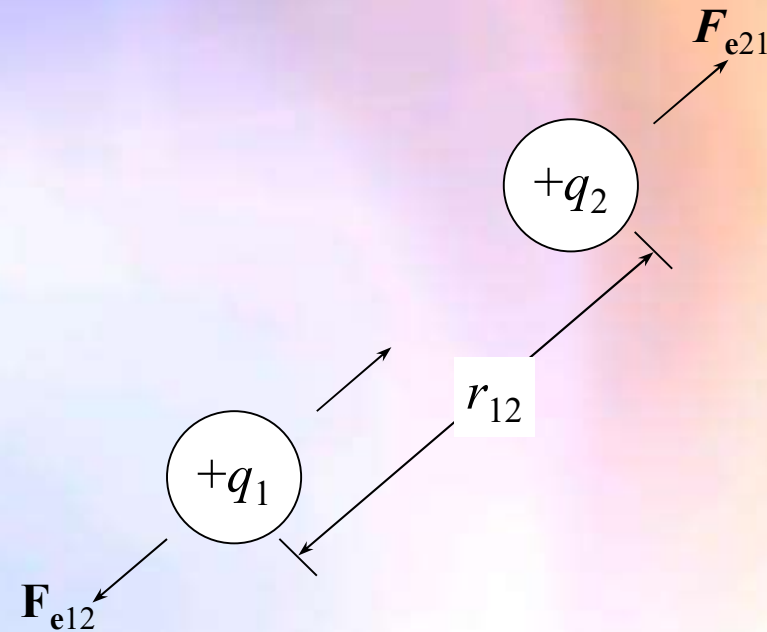
12

库仑定理

$$\mathbf{F}_{e21} = \mathbf{r}_{12_0} \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2}$$

点电荷 Q 对另一点电荷 q 的作用可认为是点电荷 Q 在其周围产生的电场 \mathbf{E} 对另一点电荷 q 的作用

\mathbf{r}_0 是以点电荷 Q 所在点为球心的径向单位矢量



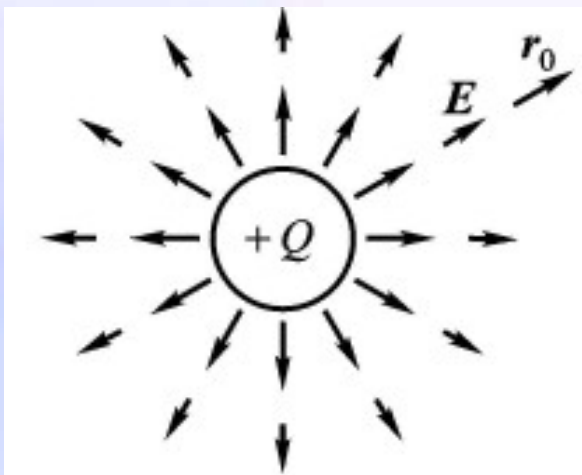
$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_0$$

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

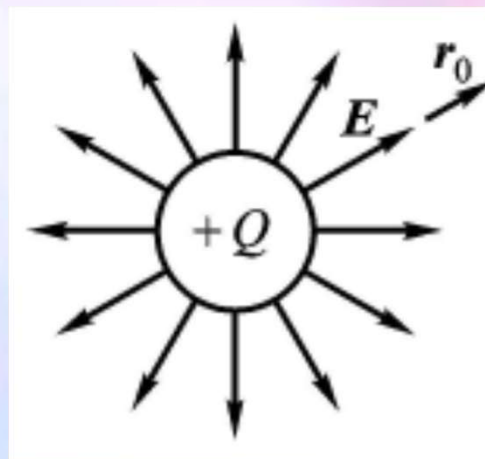
电场线表示电场是人们认识电场的飞跃



点电荷 $+Q$ 产生的电场



点电荷 Q 产生的电场线图

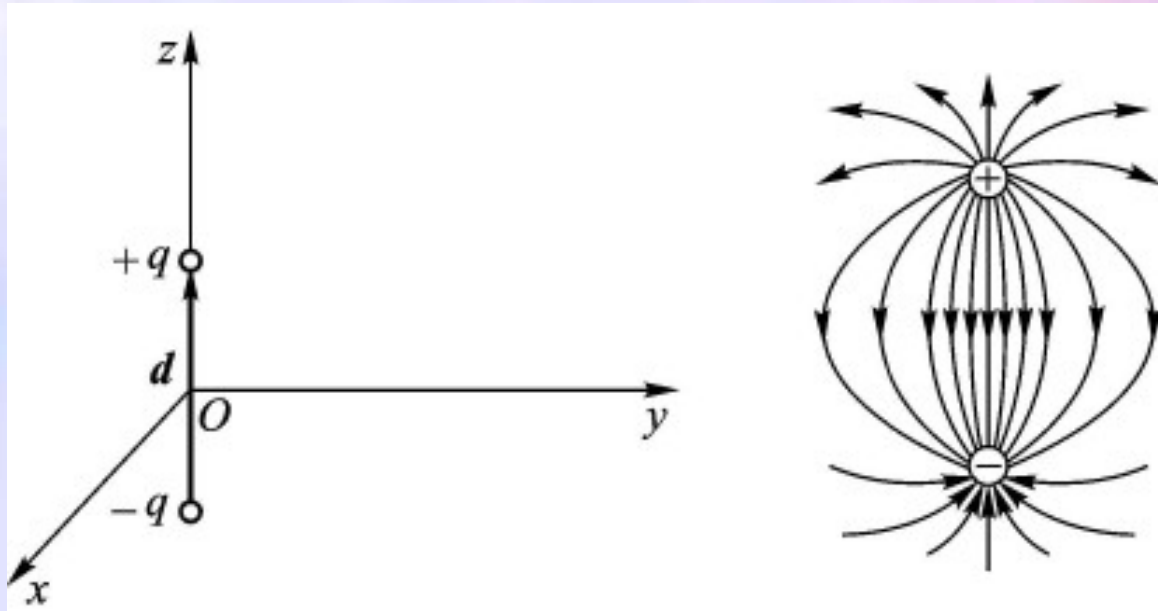


电场线上任一点的切线方向表示该点电场强度 E 的方向，而穿过垂直于电场线方向单位面积的电场线数就表示该点的电场强度。

电偶极子产生的场

14

电偶极子产生的场就是两个点电荷产生场的叠加



电偶极子

电偶极子用电矩 \boldsymbol{p} 表示

$$\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{d}$$

电偶极子产生的电场线图

电场中介质看成无限多电偶极子集合



介质中总的电场包括没有介质时点电荷 q 产生的电场以及因介质极化而致的诸多偶极子 p 产生的电场

$$\mathbf{E} = r_0 \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$$

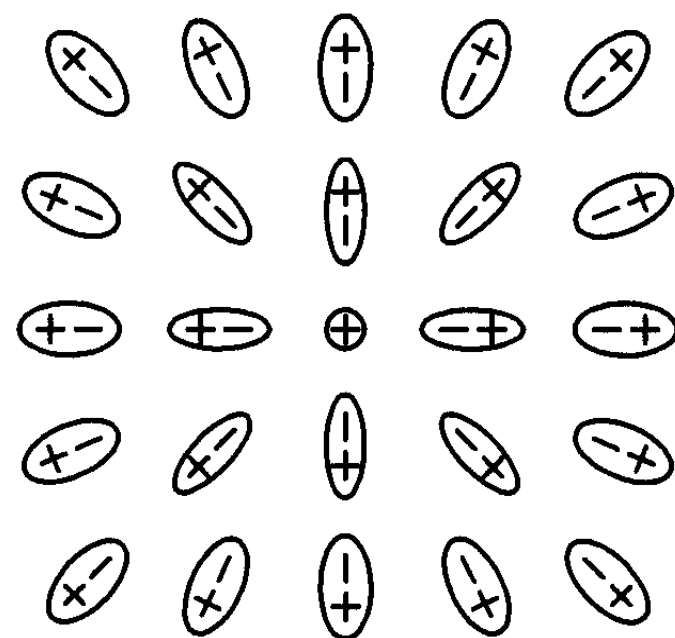
ϵ 叫做介质的介电常数（或电容率）

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

定义电通量密度或电位移 D

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

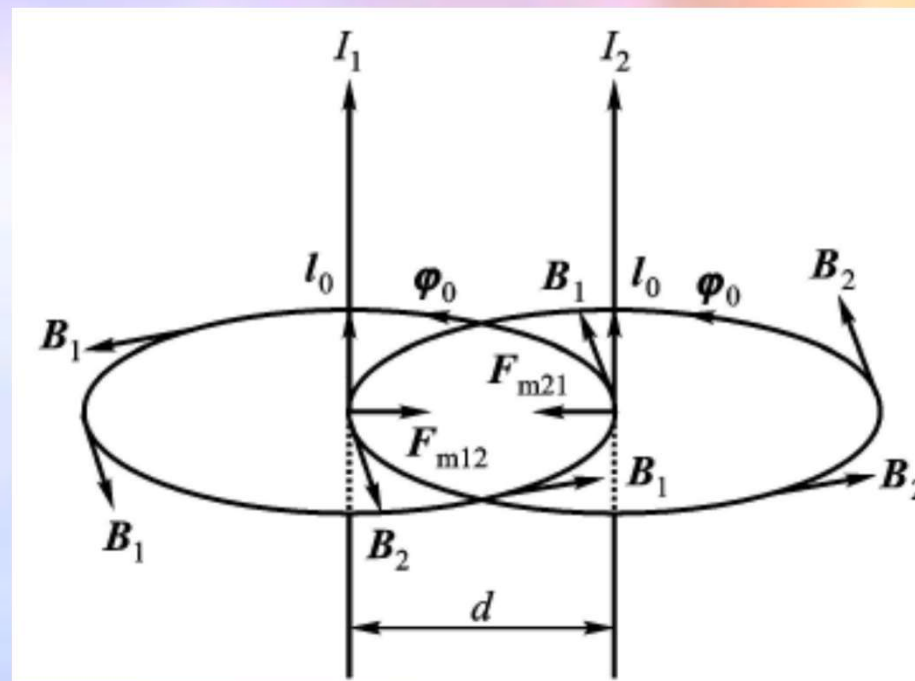
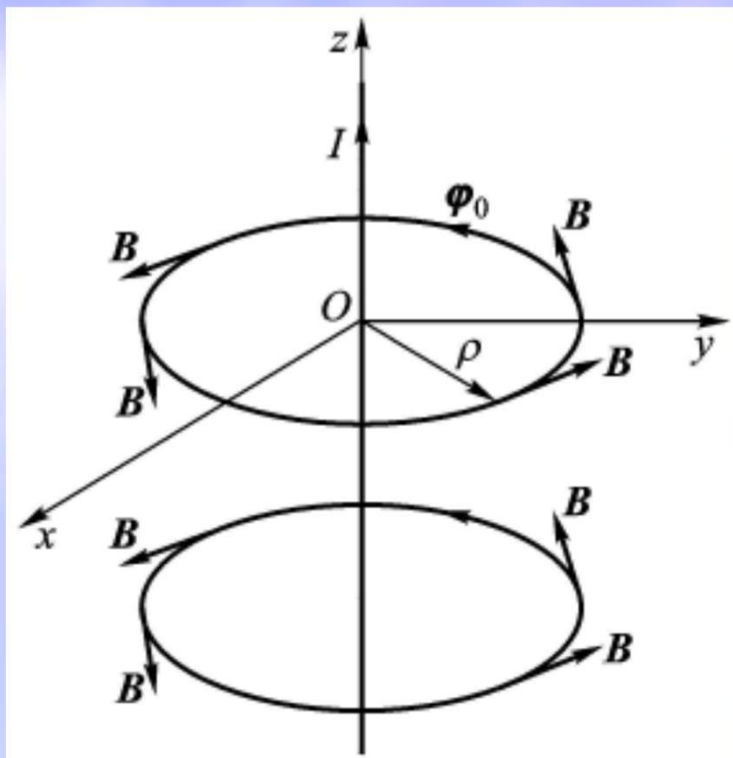
它与电场强度 \mathbf{E} 的关系由介质特性决定。



正电荷 q 产生的场使介质原子极化

人们通过电流之间的相互作用认识磁场

16



$$\mathbf{B} = \Phi_0 \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho}$$

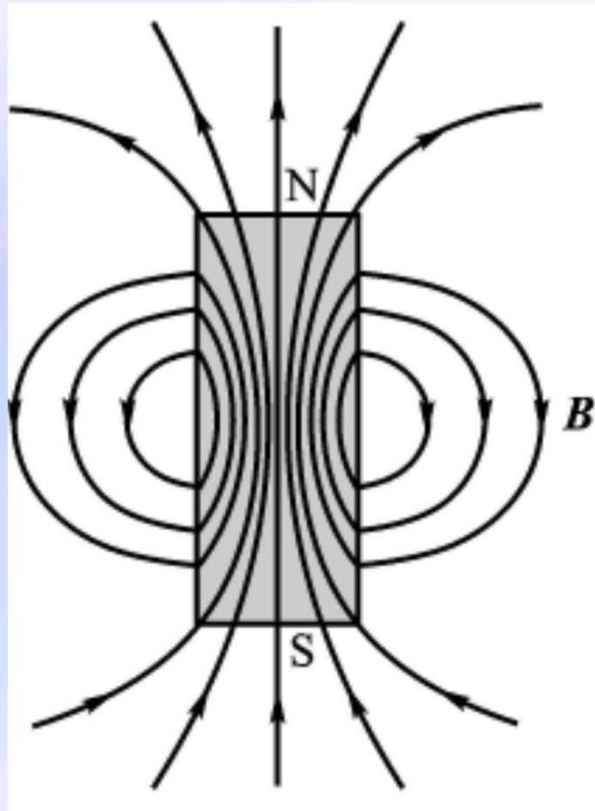
$$\mathbf{F}_{m21} = I_2 \mathbf{l}_0 \times \mathbf{B}$$

μ_0 是一个常数，称为自由空间磁导率(或真空磁导率)

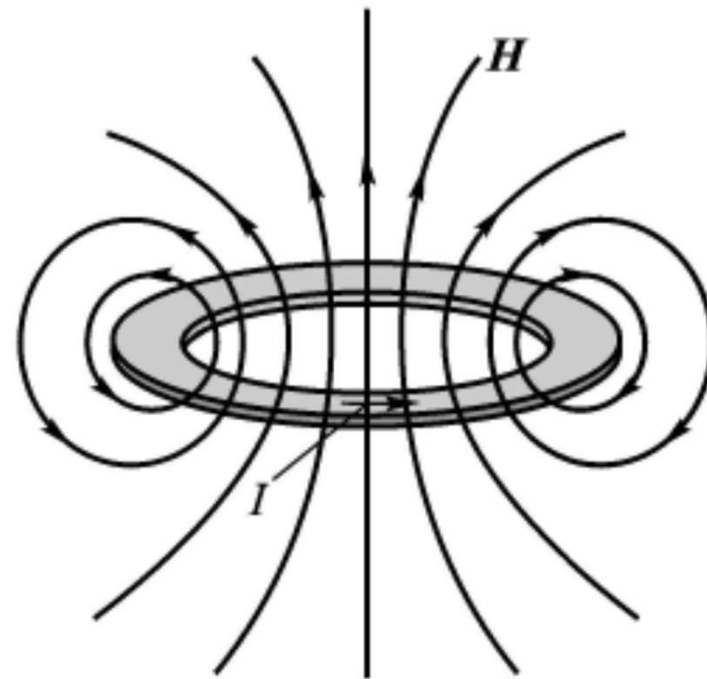
磁偶极子

17

永磁体及其产生的磁场线



磁偶极子及其产生的磁场线



磁偶极子用磁矩 \mathbf{m} 表示(dS 为环面积) $\mathbf{m} = I d\mathbf{S}$

磁场中介质可看成无限多有序排列的磁偶极子集合

18

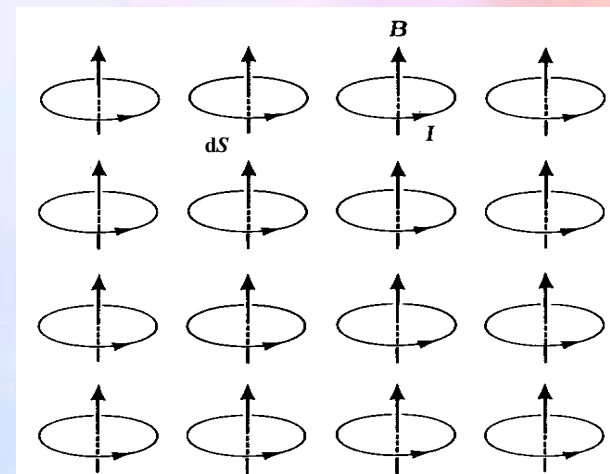
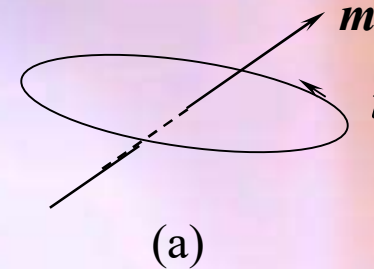
通电导线置于介质中时，除了介质不存在时通电导线产生的磁场外，又有在通电导线产生的磁场感应下，构成介质的无限多小磁体有序排列产生的净磁场。合成磁通量密度 \mathbf{B} ：

$$\mathbf{B} = \varphi_0 \frac{\mu I}{2\pi\rho} \quad \mu = \mu_r \mu_0$$

μ 叫做介质的磁导率， μ_r 叫做介质的相对磁导率，量纲为一。

定义磁场强度 \mathbf{H} (单位A/m)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$



磁偶极子及其沿磁场方向有序排列

(a) 磁偶极子；

(b) 磁矩沿磁场方向有序排列

E 与 D , B 与 H , p 与 m

19

真空中

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

一般介质中

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

ε_r 称为介质的相对介电常数

μ_r 称为介质的相对磁导率

电偶极子用电矩 p 表示

$$\mathbf{p} = q\mathbf{d}$$

磁偶极子可用磁矩 m 表示

$$\mathbf{m} = I\mathbf{S}\mathbf{z}_0$$

电场线从正电荷出发终止于负电荷，

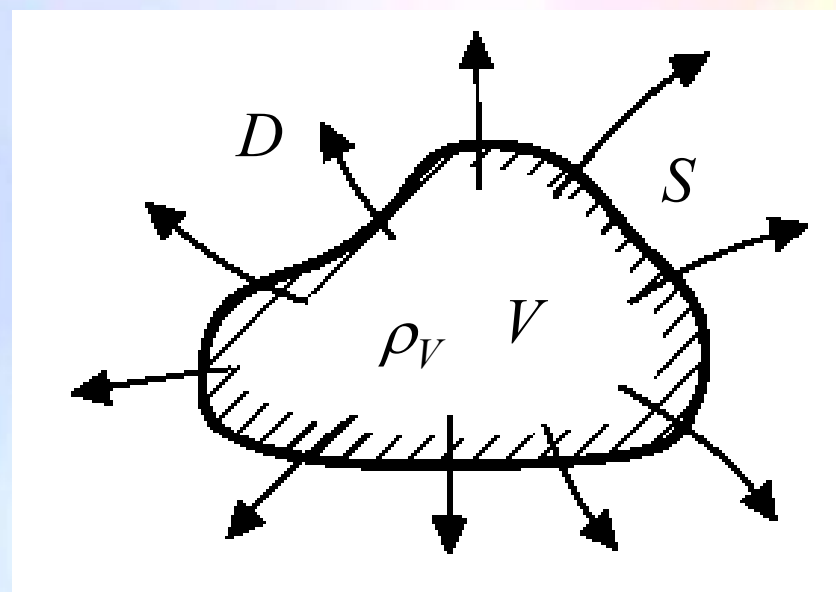
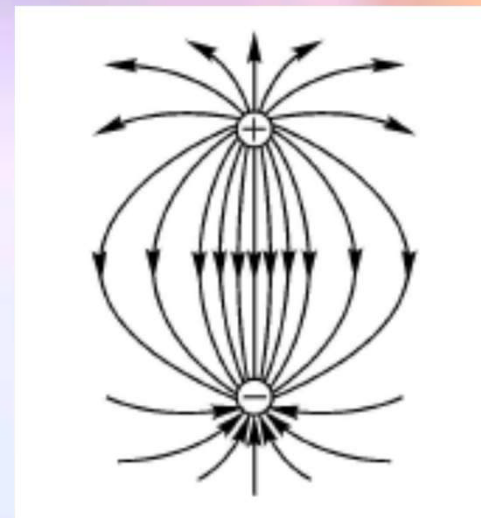
电场线有头有尾，不自行闭合。

穿出闭曲面 S 电通量密度线数等于

闭曲面 S 包围的体积 V 中的电荷 Q

$$\oint_V \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q = \int_V \rho_V dV$$

ρ_V 为体电荷密度。

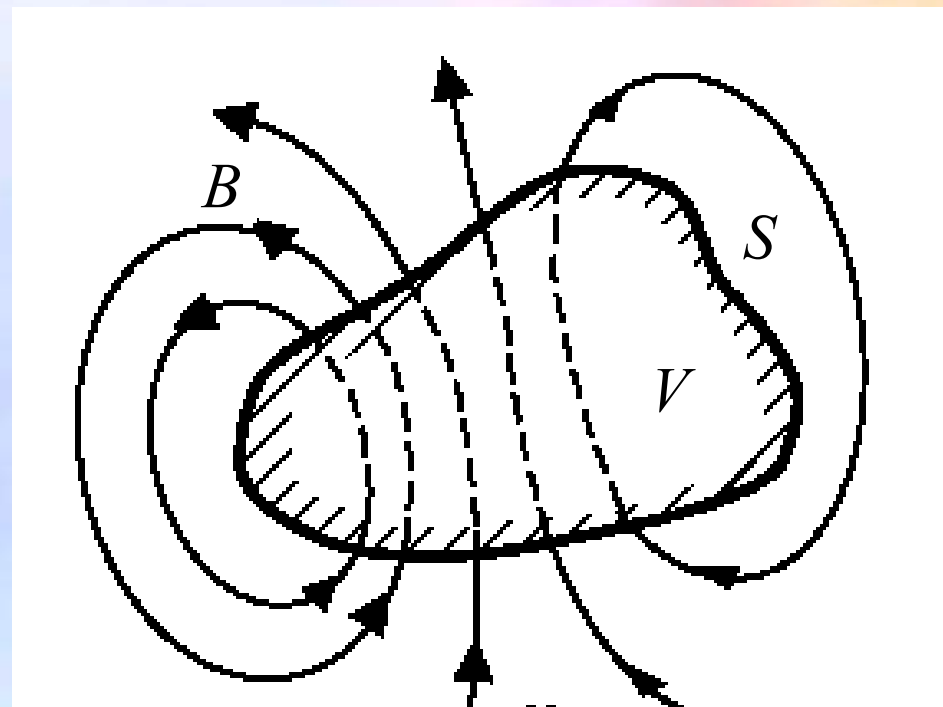
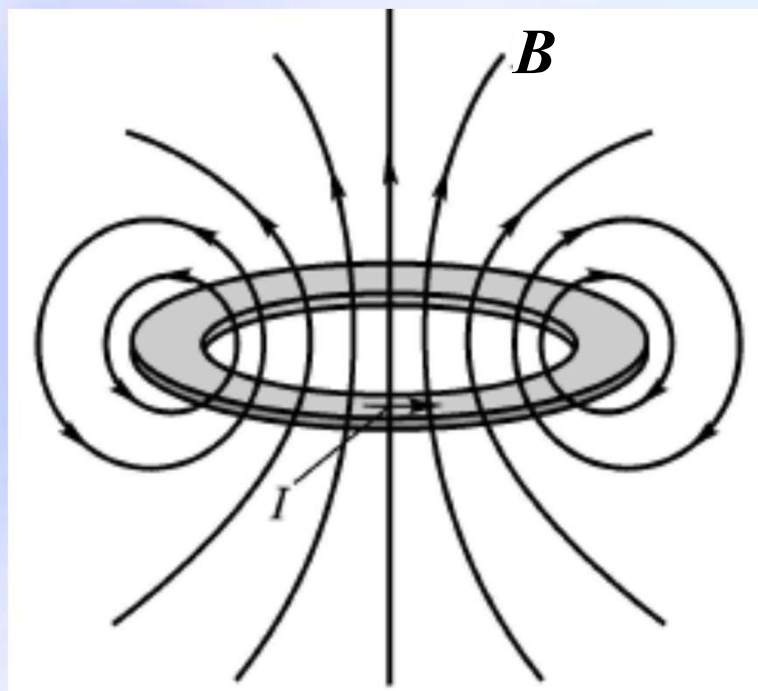


电磁运动规律的实验总结——磁通连续性原理

21

磁场线无头无尾，总是一闭合曲线，因此穿出任一闭曲面磁场线数总是等于零的。

$$\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$



电磁运动规律的实验总结——法拉第定理

22

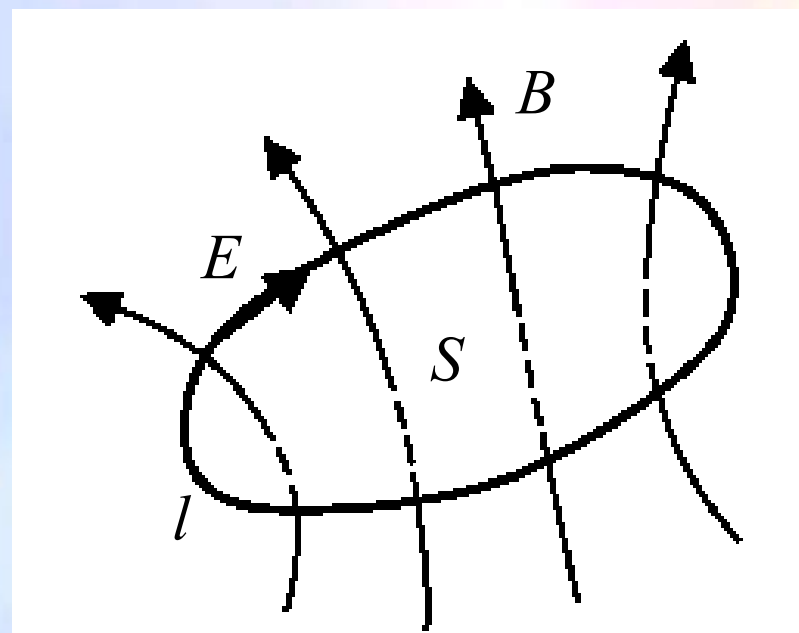
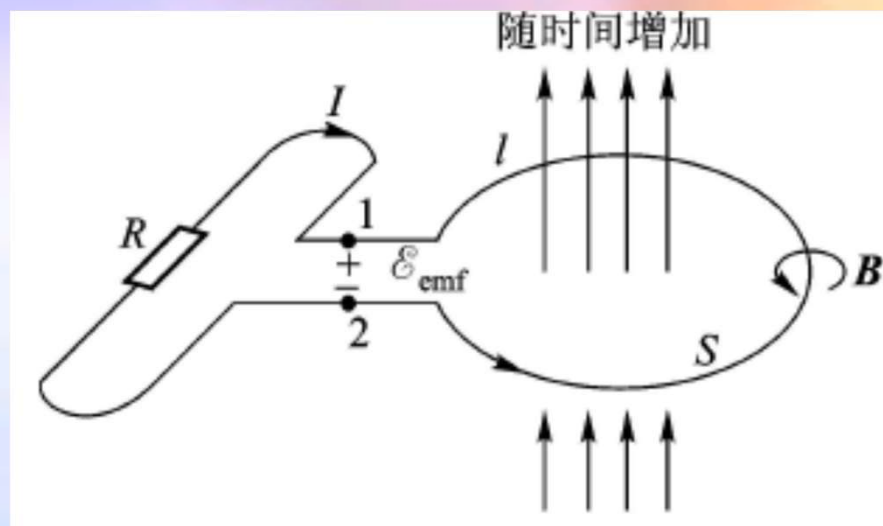
穿过闭合导线 l 所包围的面积 S 的磁通量 ψ_m 随时间变化，则会感应一个电动势 \mathcal{E}_{emf}

$$\mathcal{E}_{\text{emf}} = \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

\mathcal{E}_{emf} 的大小等于穿过闭合导线 l 所包围面积 S 的磁通量随时间变化率的负数，即

$$\begin{aligned}\psi_m &= \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \\ \mathcal{E}_{\text{emf}} &= \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \psi_m}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}\end{aligned}$$

$$\text{所以 } \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$



电磁运动规律的实验总结——推广的安培定理

23

磁场强度 \mathbf{H} 沿闭合曲线 l 的线积分等于穿过闭合曲线 l 所包围的面积 S 的电流 I

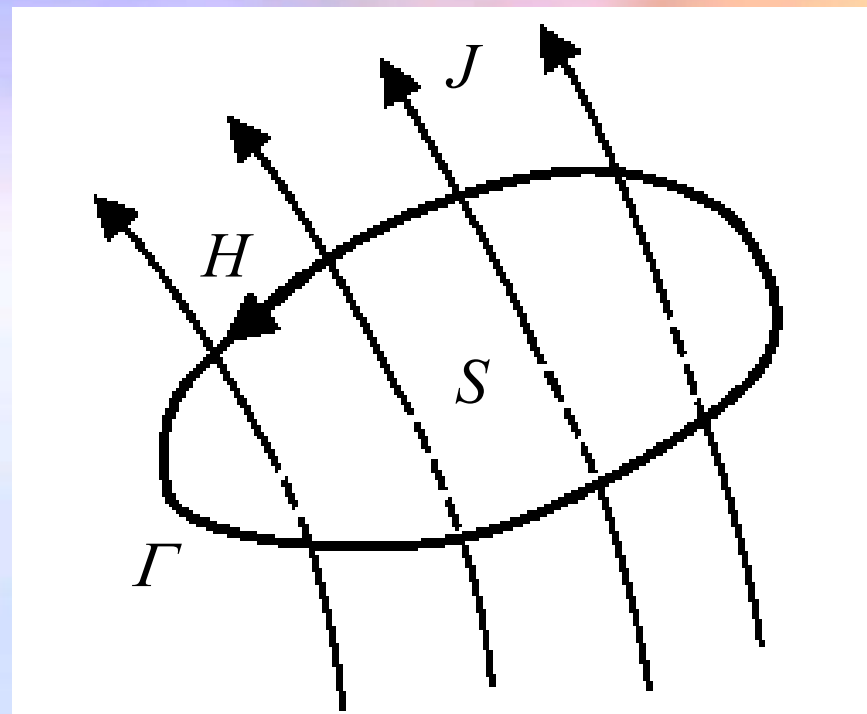
$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_d$$

在真空或气体中, $\mathbf{J}_v = \rho \mathbf{v}$

在导体中 $\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E}$

位移电流 $\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$



$$I_c = \int_S \mathbf{J}_c \cdot d\mathbf{S}$$

$$I_v = \int_S \mathbf{J}_v \cdot d\mathbf{S}$$

$$I_d = \int_S \mathbf{J}_d \cdot d\mathbf{S}$$

推广的安培定理成功地解释了电容器回路电流连续

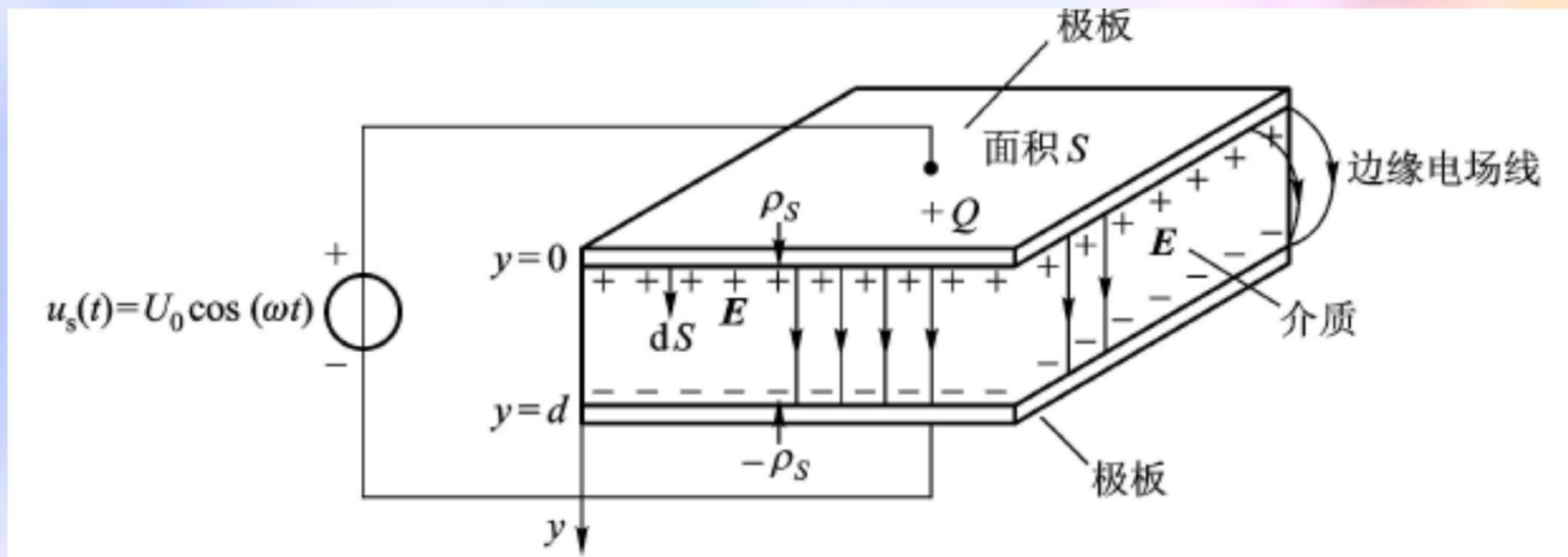
24

推广的安培定理

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

位移电流

$$\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$



交流电源与平行板电容器相连构成的回路

积分形式的麦克斯韦方程

25

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho_V dV$$

电荷是产生电场的源，电场线从正电荷出发终止于负电荷

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

磁场线总是闭合的

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

电流产生磁场，
随时间变化的电场产生磁场

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

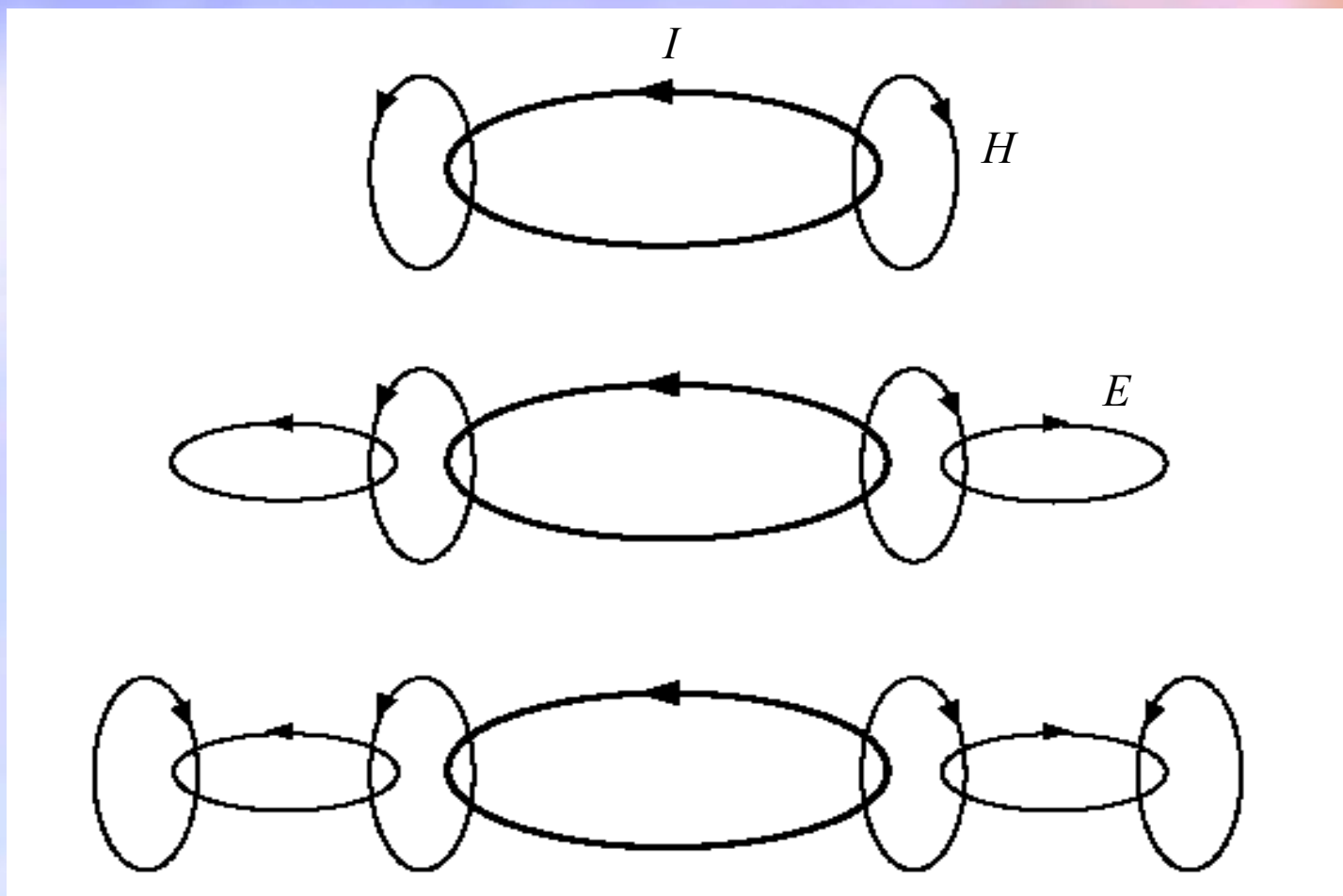
随时间变化的磁场产生电场

从这四个方程麦克斯韦预言电磁波的存在。

赫兹实验证明电磁波的存在，因此麦克斯韦引入位移电流概念是正确的。

随时间变化的电场、磁场耦合在一起

26



随时间变化的电场产生磁场，随时间变化的磁场产生电场

怎么产生电磁波？



从闪电想到电磁波的产生

从电焊想到电磁波的产生

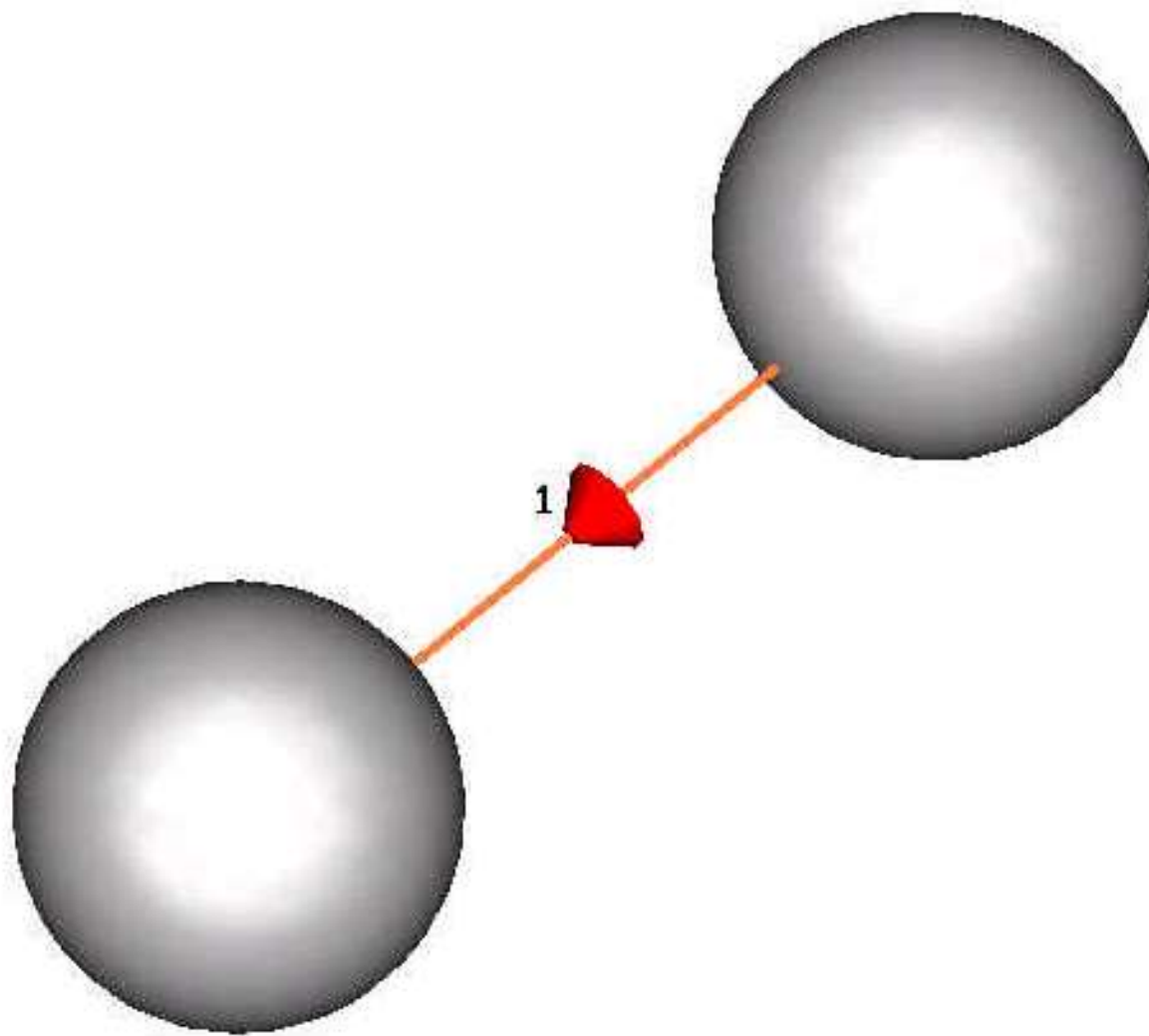
从开关合上或拉断时冒火花想到电磁波的产生

赫兹实验的原理

赫兹偶极子产生电磁辐射的数值模拟

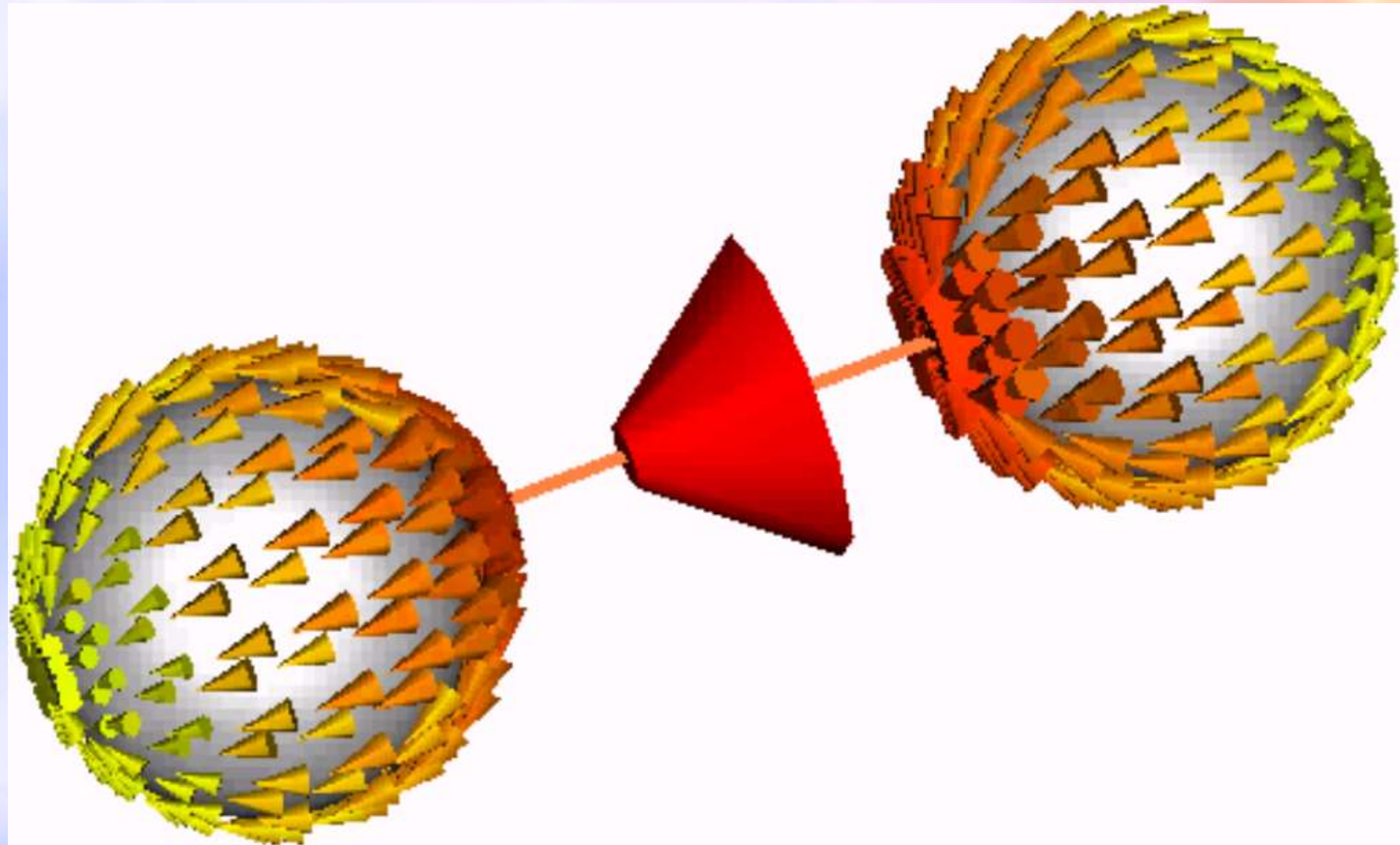
28

模型

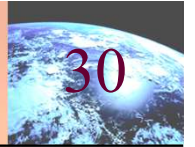




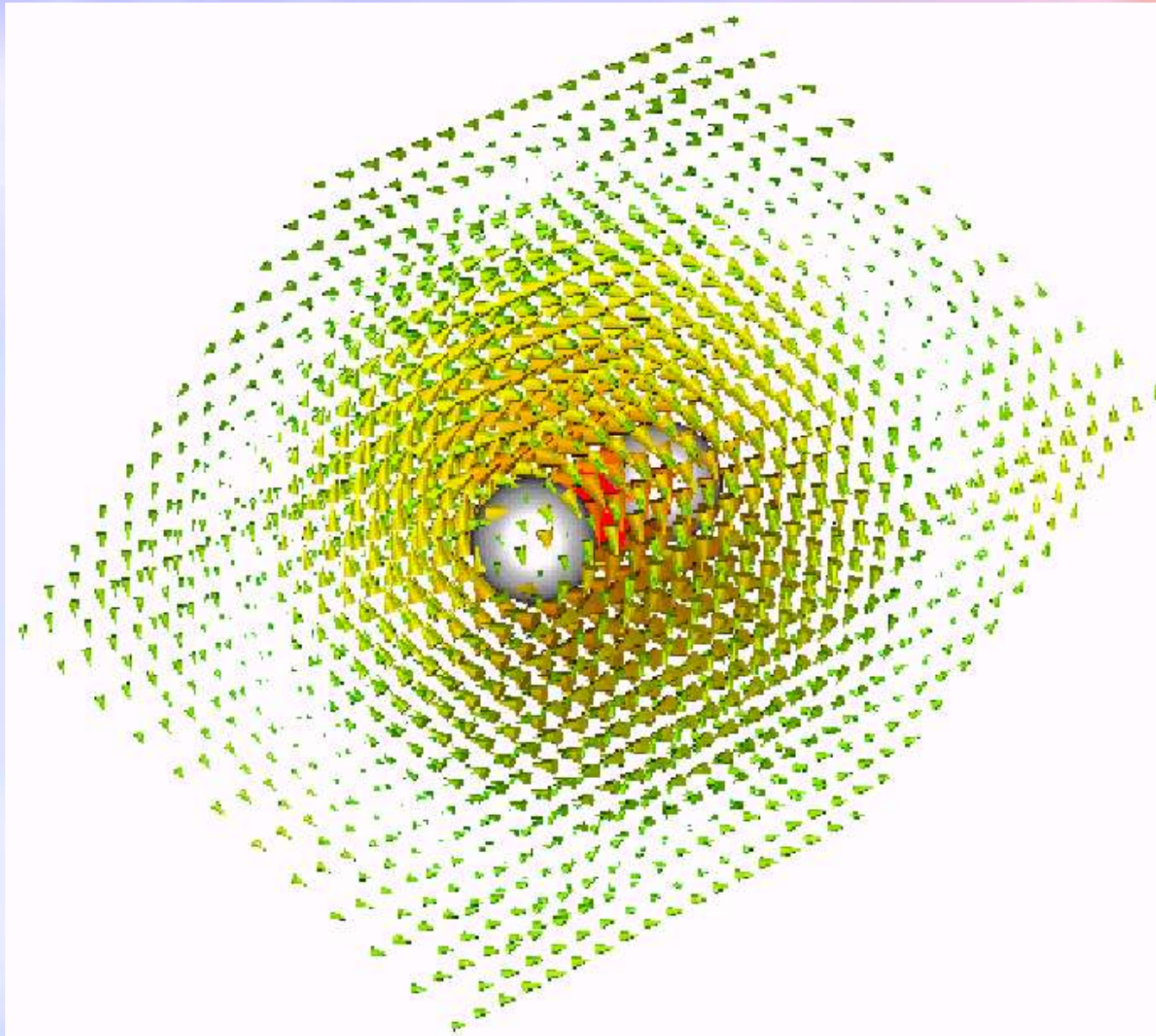
表面电流



赫兹偶极子产生电磁辐射的数值模拟



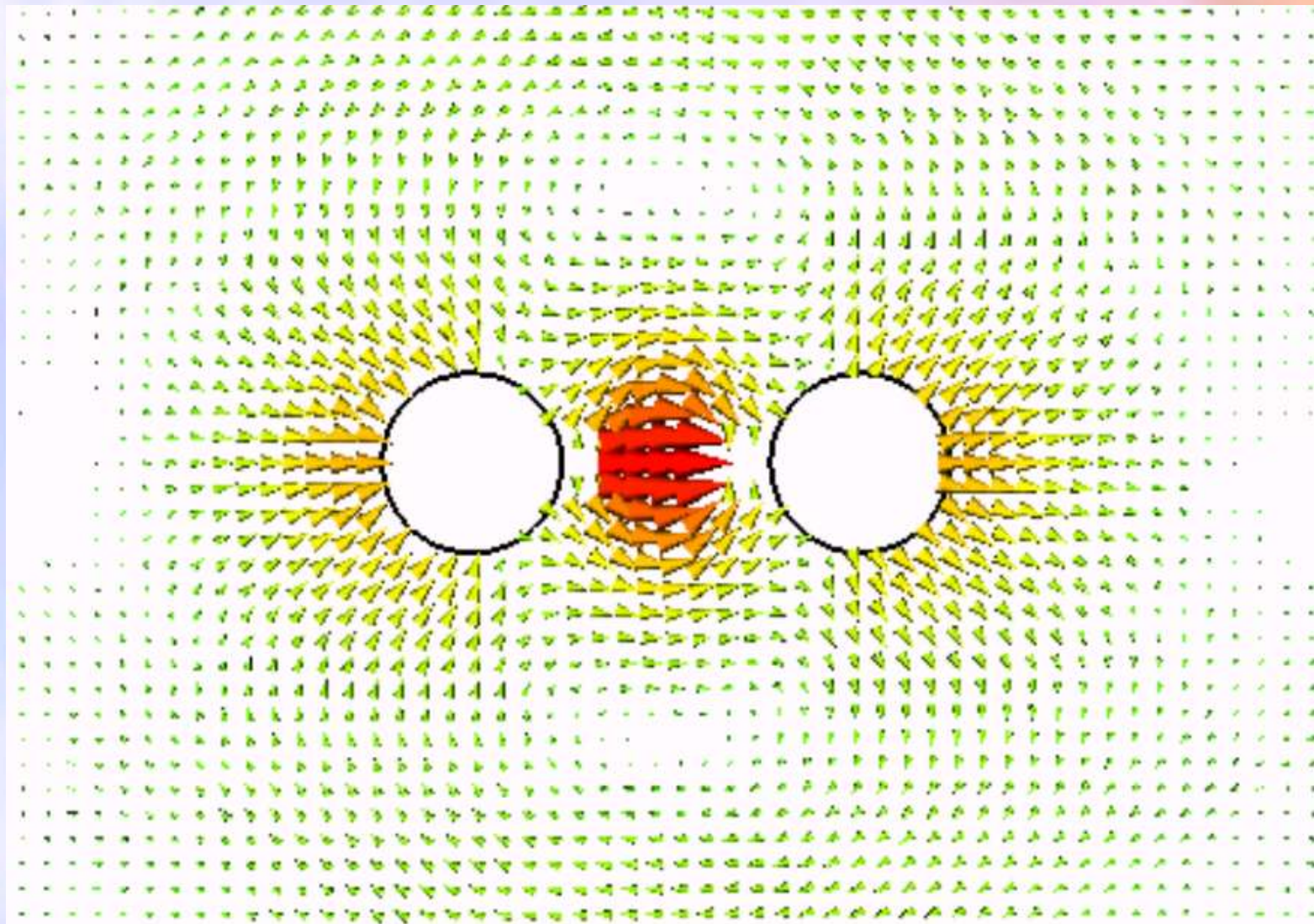
磁场



赫兹偶极子产生电磁辐射的数值模拟

31

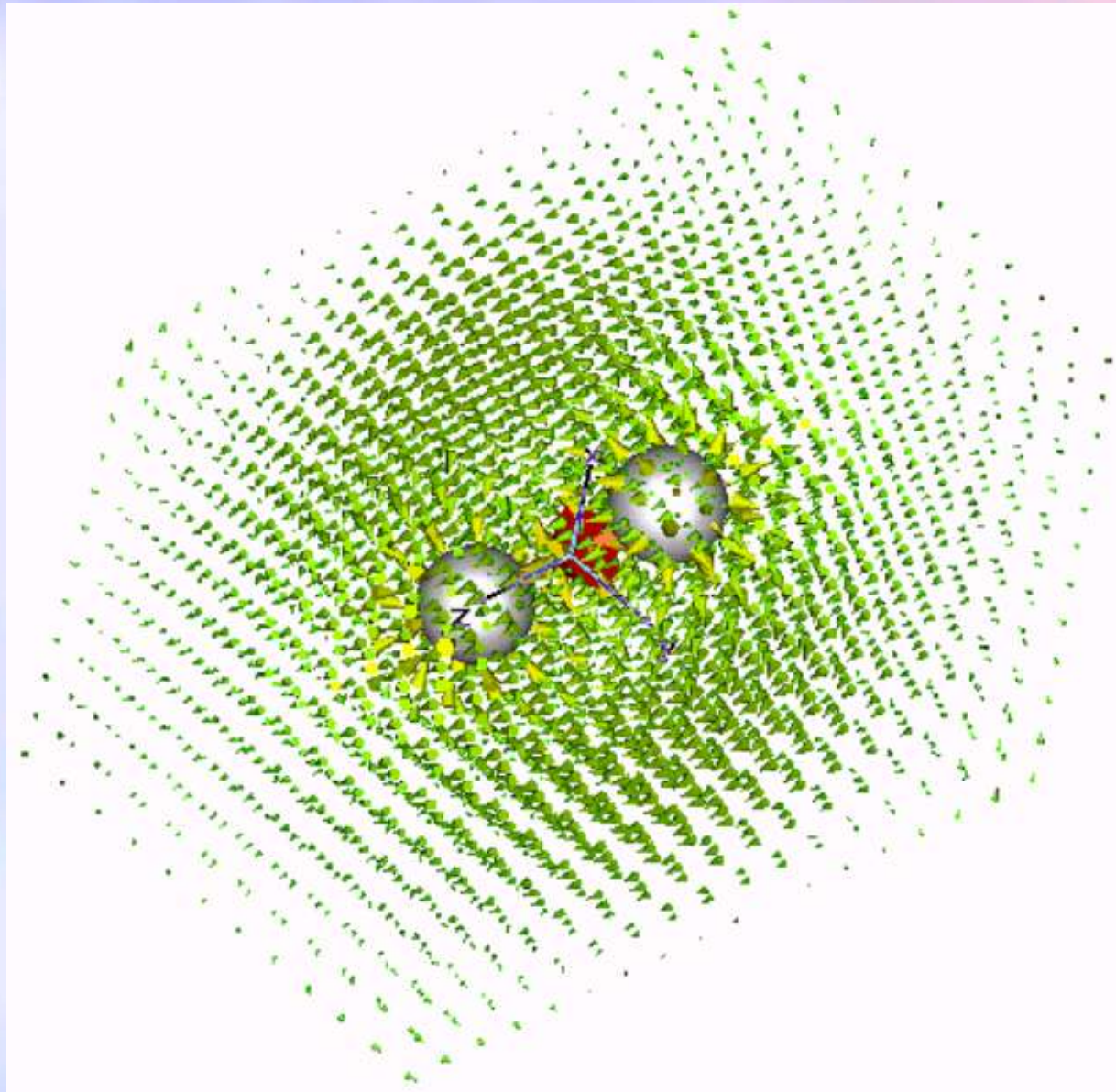
电场



赫兹偶极子产生电磁辐射的数值模拟

32

电场



第1讲复习

33

复习要点：

电磁波运动三大特点

描述电磁场与电磁波的四个场量及其单位

电磁运动规律——麦克斯韦所依据的四个从实验研究得出的定理

- (1) 高斯定理或库仑定理
- (2) 磁通连续性原理
- (3) 法拉第电磁感应定理
- (4) 推广的安培定理

复习范围

1.1, 1.2, 1.7, 3.1.1~ 3.1.4;

帮助理解的多媒体演示：MMS1

MMS3