

# 信息与电子工程导论

Introduction to Information Science and Electronic Engineering

## 2.4 电磁场与波

章献民 主编

浙江大学出版社

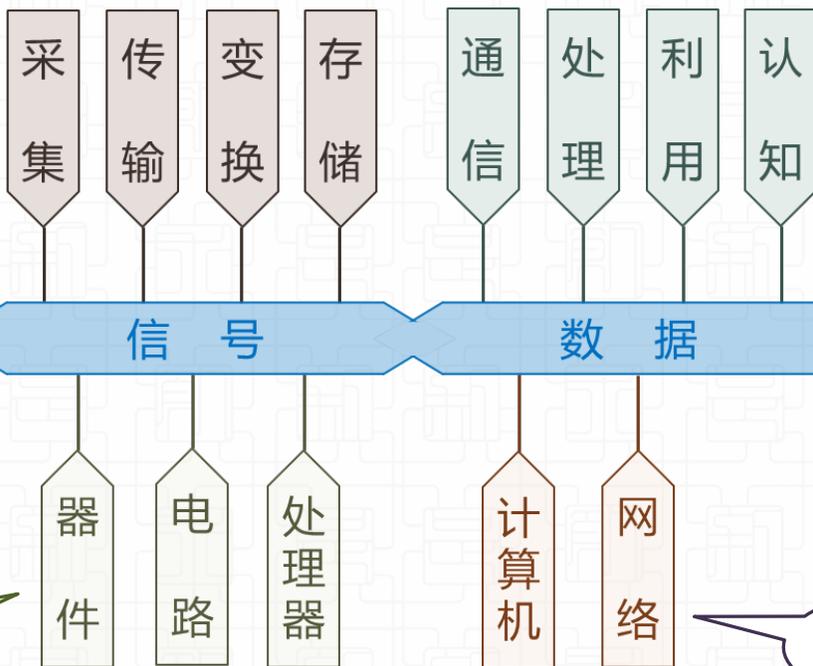
2023年9月

# 知识图谱

- 2.1 时域和频域
- 2.2 模拟和数字
- 2.3 编码和调制
- 2.4 电磁场与波

## 2 信号与数据

场与波



## 1 信息与信息技术概述

信息

- 1.1 信息
- 1.2 信息科学技术概述
- 1.3 知识图谱

## 3 电子器件与电路

- 3.1 电路模型和基本定律
- 3.2 晶体管 and 集成电路
- 3.3 集成运算放大器

## 4 逻辑与数字系统

- 4.1 数字逻辑和电路
- 4.2 组合逻辑和时序逻辑
- 4.3 微处理器和计算机系统
- 4.4 嵌入式系统
- 4.5 EDA技术

## 5 互联与计算

- 5.1 通信与网络
- 5.2 物联与数联
- 5.3 计算与智能

## 内容提要

- ❖ 经典电磁理论的建立
- ❖ 麦克斯韦方程组
- ❖ 波动的基本特征
- ❖ 电磁波传播特性
- ❖ 天线

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

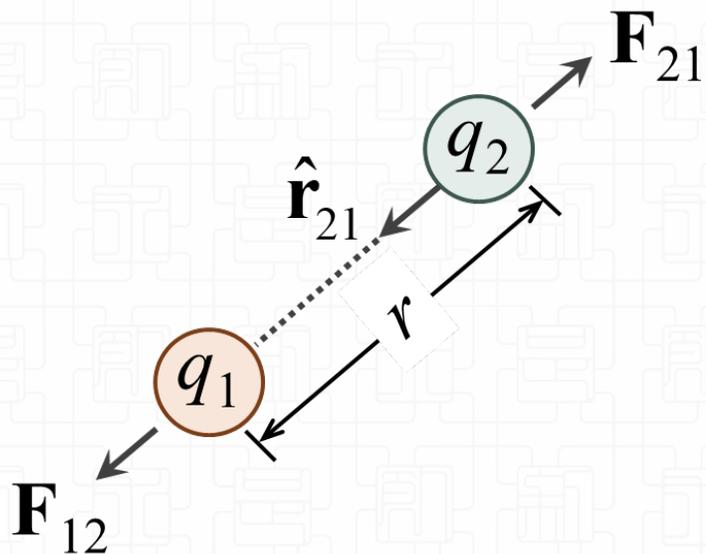
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

## 库仑定律

- ❖ 1785年，法国科学家**查利·奥古斯丁·库仑**发现，两个电荷之间的作用力大小与其距离的平方成反比。



$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{21}$$

- ❖ 1833年，德国科学家**卡尔·弗里德里希·高斯**分别提出电静力学和电动力学定律的公式，其中包括**高斯定律**（库仑定律的推广形式）



Charles Augustin de Coulomb  
Jun 14, 1736—Aug 23, 1806



Carl Friedrich Gauss  
Apr 30, 1777—Feb 23, 1855

## 直流电

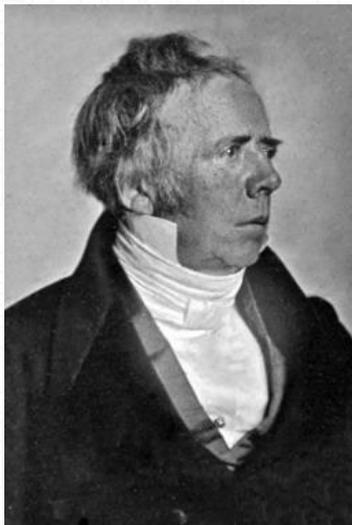
❖ 1800年，意大利物理学家、化学家**亚历山桑德罗·伏特**发明了第一块电池，使得研究人员开始在实验中利用持续的直流电。



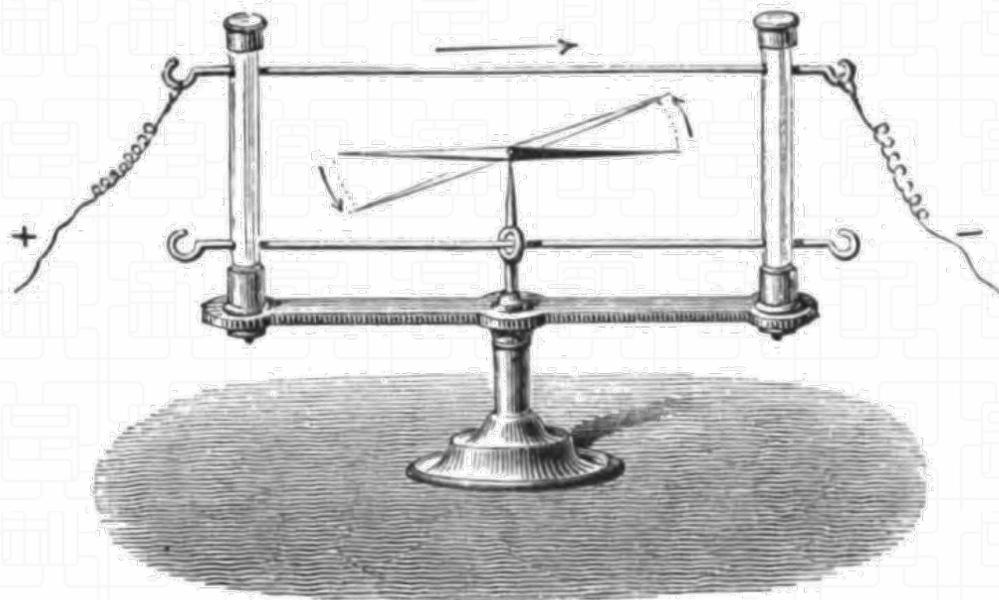
Alessandro Giuseppe  
Antonio Anastasio Volta  
Feb 18, 1745—Mar 5, 1827

## 电流的磁效应

❖ 1820年，丹麦科学家汉斯·克里斯蒂安·奥斯特展示了电与磁之间存在联系的首个证据。如果将载流导线放到指南针的附近磁针会发生偏转。

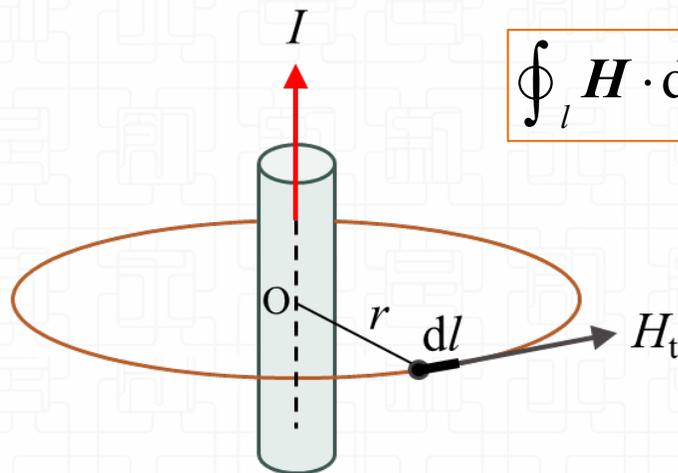
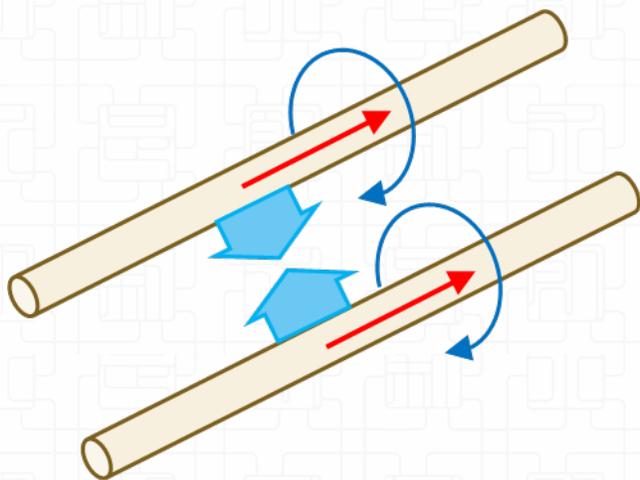


Hans Christian Ørsted  
Aug 14, 1777—Mar 9, 1851



## 安培定律

- ❖ 1820年，法国物理学家**安德烈·马里·安培**展示了两个平行的载流导线会互相吸引或排斥。吸引或排斥取决于电流的相对方向。
- ❖ 1820年底，安培发现了电流之间相互作用的规律——安培定律。同时，确定了判断电流磁场方向的安培定则和判断磁场对电流作用力方向的左手定则。



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

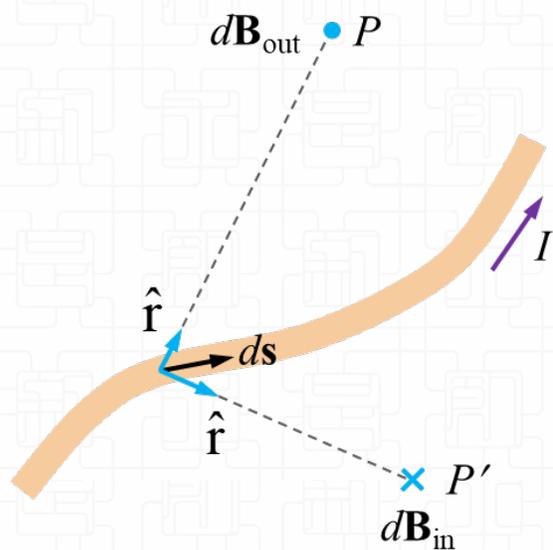


André-Marie Ampère  
Jan 20, 1775—Jun 10, 1836

- ❖ 磁场强度沿闭合曲线的线积分等于穿过闭合曲线所包围的面积上的电流。

## 毕奥—萨伐尔定律

❖ 1820年10月，法国物理学家**毕奥**和**萨伐尔**，通过实验测量了长直电流附近小磁针的受力规律，发表了题为《运动中的电传递给金属的磁化力》的论文。

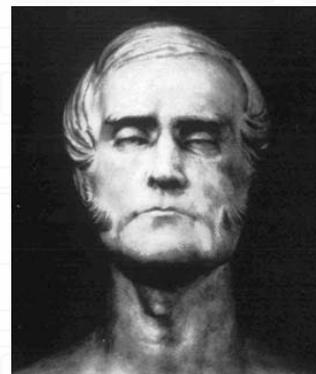


$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

❖ 法国数学、物理学家**拉普拉斯**由实验规律推出载流线段元（电流元）磁场公式。毕奥和萨伐尔用实验验证了该公式。



Jean-Baptiste Biot  
Apr 21, 1774—Feb 03, 1862



Félix Savart  
Jun 30, 1791—Mar 16, 1841



Pierre-Simon Laplace  
Mar 23, 1749— Mar 05, 1827

## “力线” 和 “场”

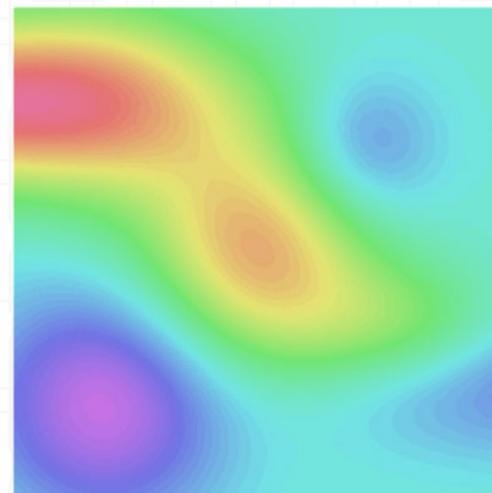
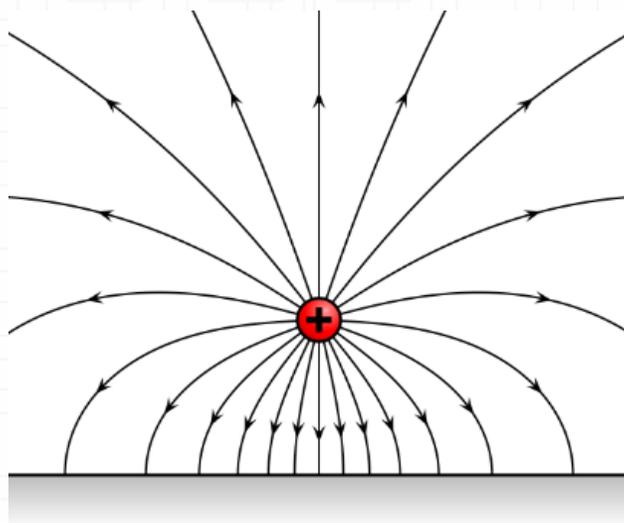
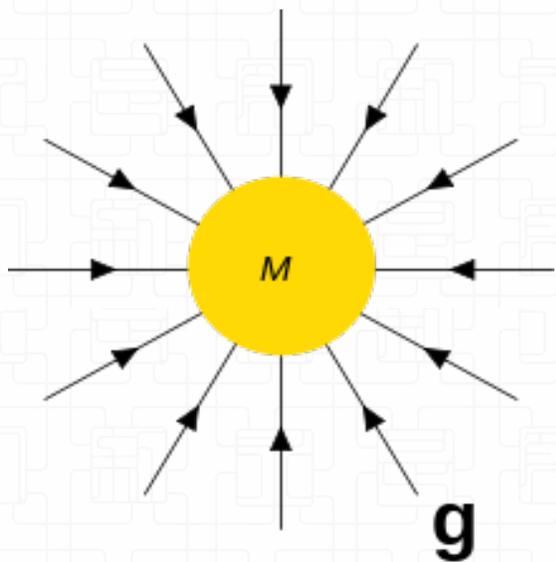
- ❖ 英国科学家法拉第在实验和理性思维相结合的基础上，首先提出了“力线”和“场”模型的思想。
- ❖ 1821年，法拉第关于载流导线绕磁极转动的研究，能用于电磁现象的解释。
- ❖ 1831年，法拉第在向英国皇家学会宣读电磁感应的论文中，首次使用“磁力线”这个词。电磁感应现象的发现，使“力线”概念成了法拉第思想的核心。
- ❖ 1832年，他指出，与磁力线类似，在带电体之间有“电力线”。
- ❖ 1845年他第一次使用了“磁场”这个词，两年后他又单独使用“场”这个词，将“电力线”和“磁力线”概念发展成“电磁场”概念。



Michael Faraday  
Sep 22, 1791—Aug 25, 1867

## “场”的基本概念

- ❖ **场**：一个物理量是时间和空间的函数。
- ❖ 如果在全部空间或部分空间的每一点，都对应着某个物理量的一个确定的值，就说在这个空间确定了该物理量的一个场。
- ❖ **实物与场是物质存在的两种形式**



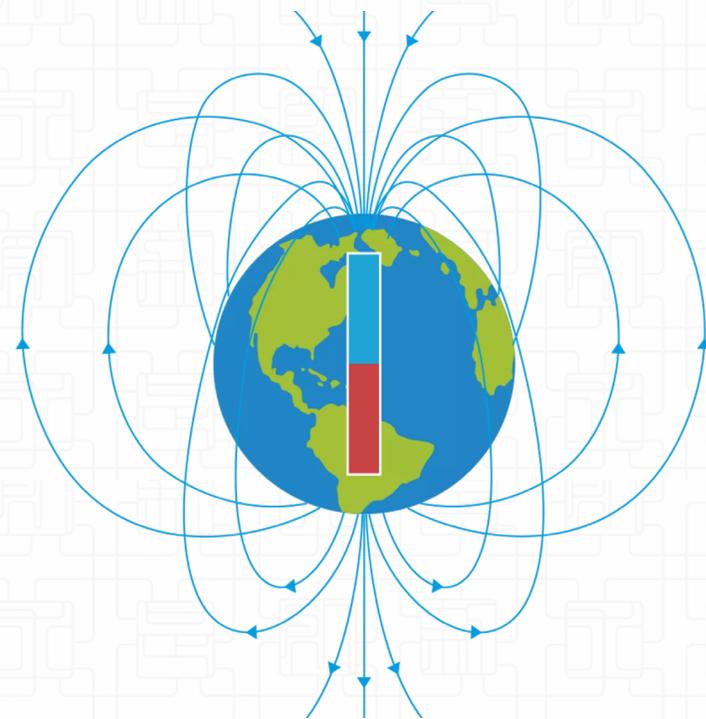
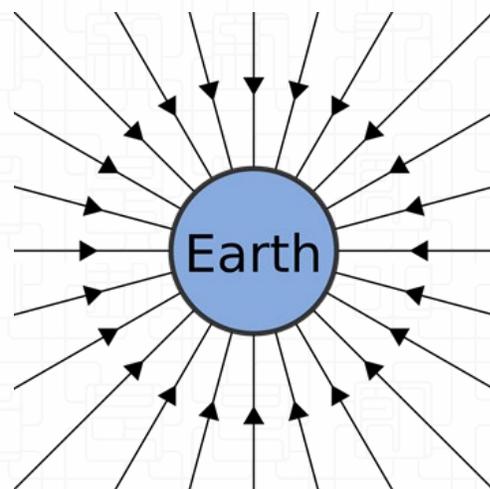
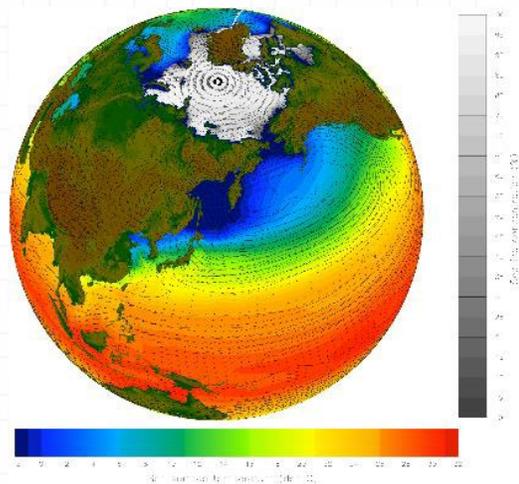
## “场”的基本性质

### ❖ 场是传递物质间相互作用的媒质

- 一般表现为不同形式的相互作用力，如引力、电磁力

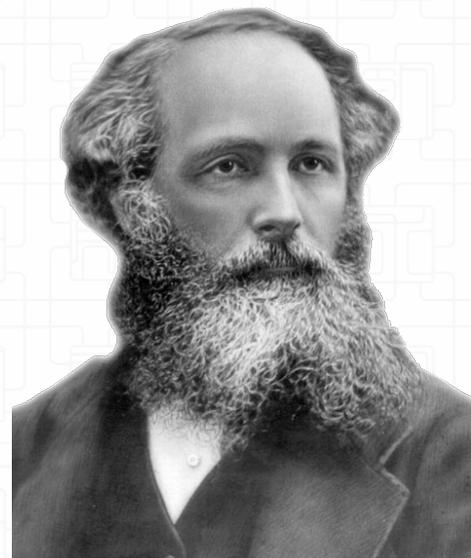
### ❖ 场具有独立性和可叠加性

- 空间某一点可以有各种不同的场同时存在，各自保持独立存在的特征
- 相同性质的场在空间某一点可相互叠加



## 麦克斯韦电磁理论

- ❖ 1855年，麦克斯韦发表了第一篇关于法拉第的观测结果和理论的论文。
- ❖ 1861年和1862年，麦克斯韦出版了由四部分组成的论文“**论物理力线**”，介绍了一个重要的核心概念，即在表面变化的电通量会产生磁场。
- ❖ 首创了“**位移电流**”的新概念，指出位移电流存在于任何电场变化的电介质中，在位移电流的周围空间同样产生磁场，这种磁场和传导电流产生的磁场完全一样。
- ❖ 1865年，麦克斯韦提出电磁场的基本方程组，并推断光是一种电磁波，为电磁波理论奠定了基础。
- ❖ 1873年，麦克斯韦发表了巨著《**电磁学通论**》，其中包含进一步的数学运算和说明。
- ❖ 当时的公式包括20个联立方程，20个变量。方程的维分量（x，y和z方向）都单独阐述。



James Clerk Maxwell  
Jun 13, 1831—Nov 5, 1879

## 麦克斯韦方程组的改写



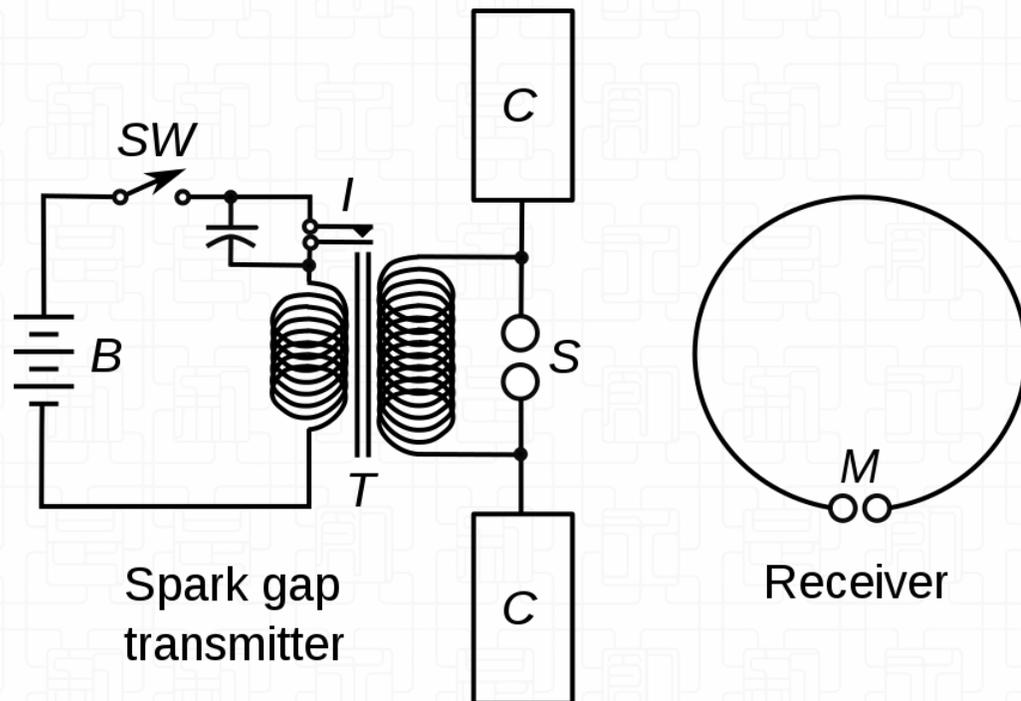
Oliver Heaviside  
May 18, 1850—Feb 03, 1925

- ❖ 1885年，英国自学成才的物理学家**奥利弗·赫维赛德**发表了麦克斯韦方程组的精简版，方程数从20个减到4个。
- ❖ 1893年赫维赛德在他的三卷著作《电磁理论》的第一卷序言中写道，如果我们有充分的理由“**相信麦克斯韦本人会认同公式改动的必要性，那么我想完善后的理论还是称为麦克斯韦理论比较好。**”

## 实验证实



Heinrich Hertz  
Feb 22, 1857—Jan 1, 1894



- ❖ 1879年，德国物理学家**海因里希·赫兹**开始对麦克斯韦的工作感兴趣，这主要是因为普鲁士科学院举行了提供支持或反对电磁波存在的实验证据的竞赛。
- ❖ 1888年，赫兹在搬到位于卡尔斯鲁厄（Karlsruhe，德国西南部城市）一个设备完善的实验室的几年后证实了电磁波的存在，印证了麦克斯韦的预测。

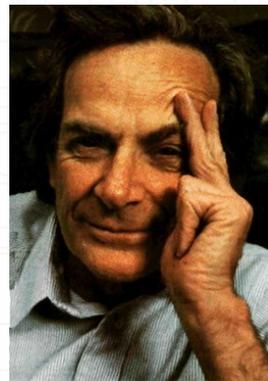
## 意义

❖ 20世纪著名物理学家理查德·费曼评价麦克斯韦的贡献：

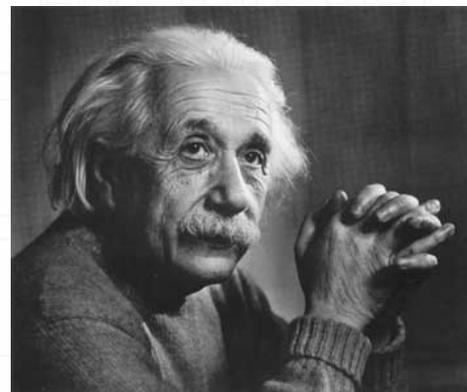
– “From a long view of the history of mankind, seen from, say, ten thousand years from now, there can be little doubt that the most significant event of the 19th century will be judged as Maxwell’s discovery of the laws of electrodynamics.”

❖ 爱因斯坦在自传中说：“在我求学的时代，最吸引人的题目就是麦克斯韦的理论”，“特殊的相对论起源于麦克斯韦的电磁场方程”。

❖ 1931年，在纪念麦克斯韦诞生100周年时，爱因斯坦把麦克斯韦的电磁场贡献评价为“自牛顿时代”以来物理学所经历的最深刻最有成效的变化。”



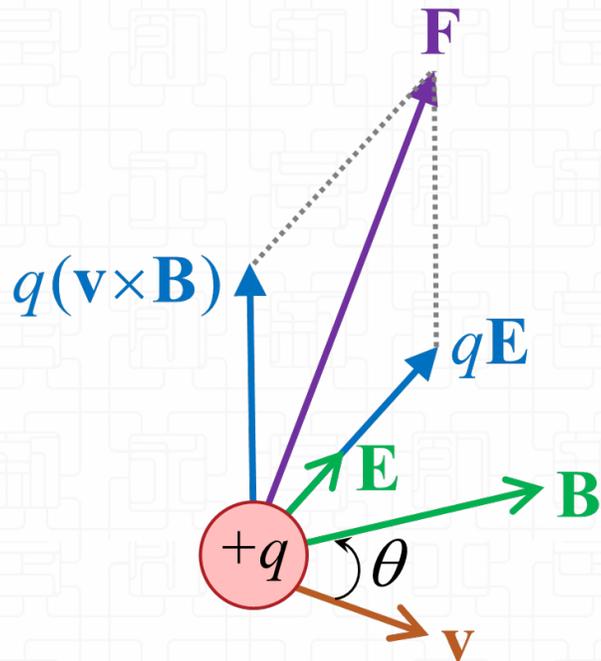
Richard Phillips Feynman  
May 11, 1918—Feb 15, 1988



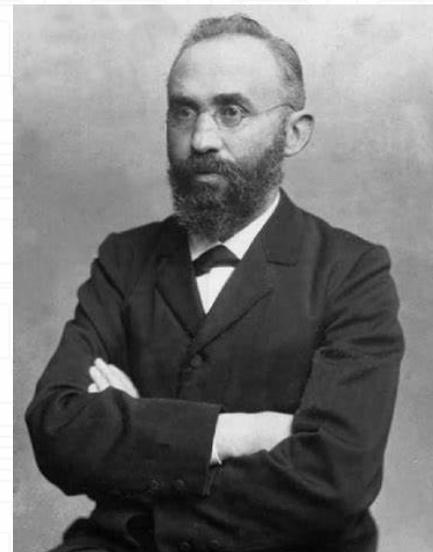
Albert Einstein  
Mar 14, 1879—Apr 18, 1955

## 洛伦兹力——电场、磁场对物质的相互作用

- 荷兰科学家洛伦兹以电子概念为基础来解释物质的电性质。1895年，从电子论推导出运动电荷在磁场中要受到力的作用，即洛伦兹力。



$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



Hendrik Antoon Lorentz  
1 Jul 18, 1853—Feb 4, 1928

- 麦克斯韦方程和洛伦兹力方程构成了经典电磁学的完整组合。

## 内容提要

- ❖ 经典电磁理论的建立
- ❖ 麦克斯韦方程组
- ❖ 波动的基本特征
- ❖ 电磁波传播特性
- ❖ 天线

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

## 麦克斯韦方程组

- ❖ 麦克斯韦方程组系统、完整地概括了电磁场的基本规律，它含有4个方程，不仅分别描述了电场和磁场的行为，还描述了它们之间的关系。
- ❖ 在麦克斯韦方程组中，电场和磁场已经成为一个不可分割的整体。电与磁之间的关系以及光与电磁辐射的波动性，均可由4个麦克斯韦方程表示。
- ❖ **E** 为电场强度，**D** 为电通量密度（电位移）；**H** 为磁场强度，**B** 为磁通量密度（磁感应强度）；**J** 为电流密度， $\rho_v$  为电荷密度。

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho_v dV \quad \text{高斯定律}$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad \text{法拉第电磁感应定律}$$

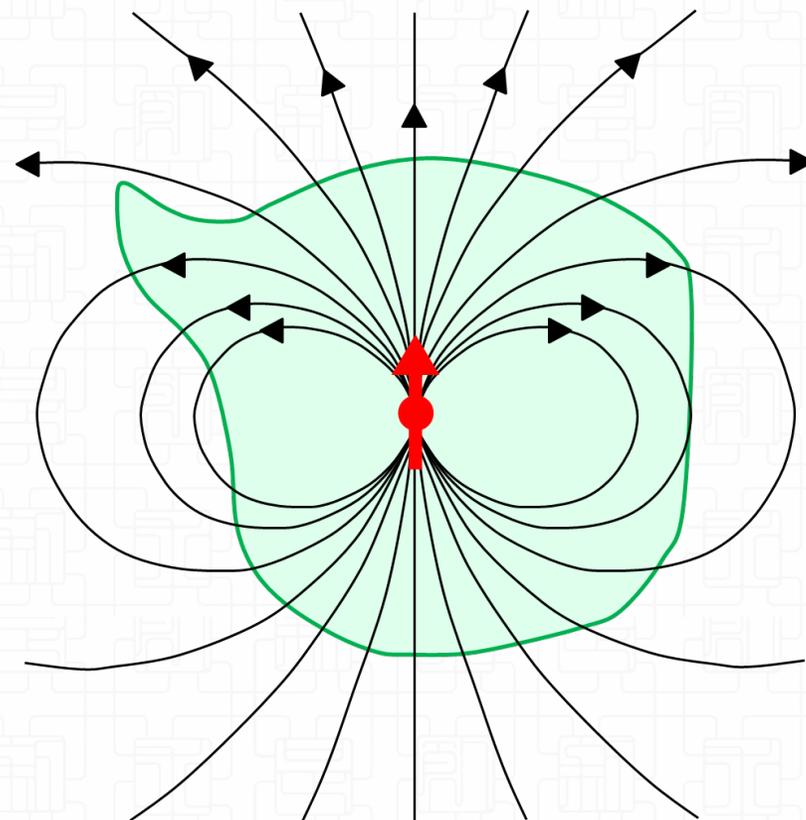
$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad \text{高斯磁定律}$$

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad \text{安培—麦克斯韦定律}$$

## 高斯定律

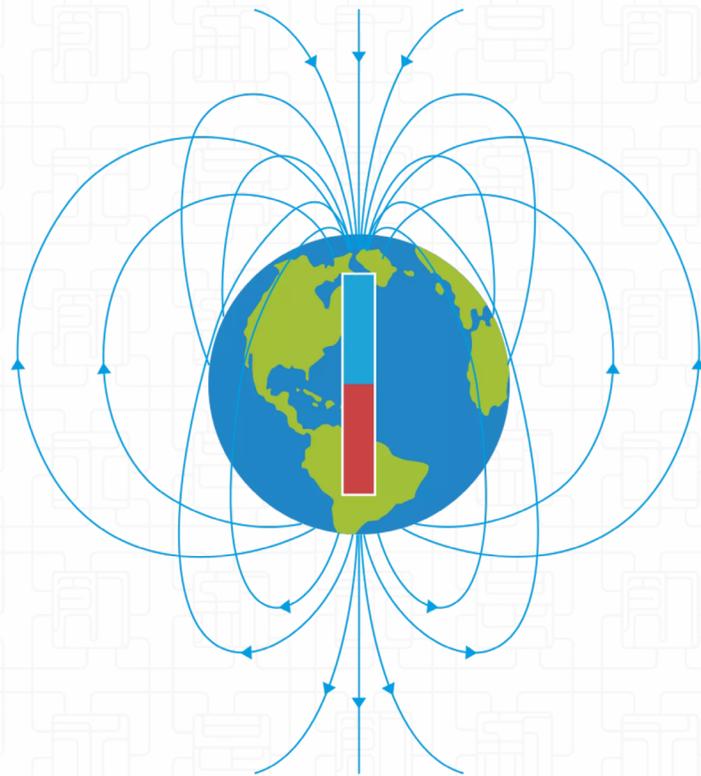
- ❖ 描述电荷是如何产生电场。
- ❖ 高斯定律给出了电场在任意闭合曲面上的面积分和包围在闭合曲面内的总电荷量之间的关系。
- ❖ 电通量密度  $\mathbf{D}$  通过任一闭合曲面的通量，即对该曲面的积分等于该曲面所包围的总电荷量。
- ❖  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ ,  $\varepsilon$  是介质的介电常数。

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



## 高斯磁定律

- ❖ 描述了**磁单极子不存在的磁通连续性原理**。
- ❖ 在磁场中，由于自然界中没有单独的磁极存在，**N极和S极总是成对出现，磁力线都是闭合曲线**。
- ❖ 因此任何一条进入一个**闭合曲面**的磁力线必定会从曲面内部出来，否则这条磁力线就不会闭合起来了。如果定义向外为正法线的指向，则进入曲面的磁通量为负，出来的磁通量为正，那么就可以得到**通过一个闭合曲面的总磁通量为零**。
- ❖ 这个规律类似于电场中的高斯定律，因此也称为高斯磁定律。

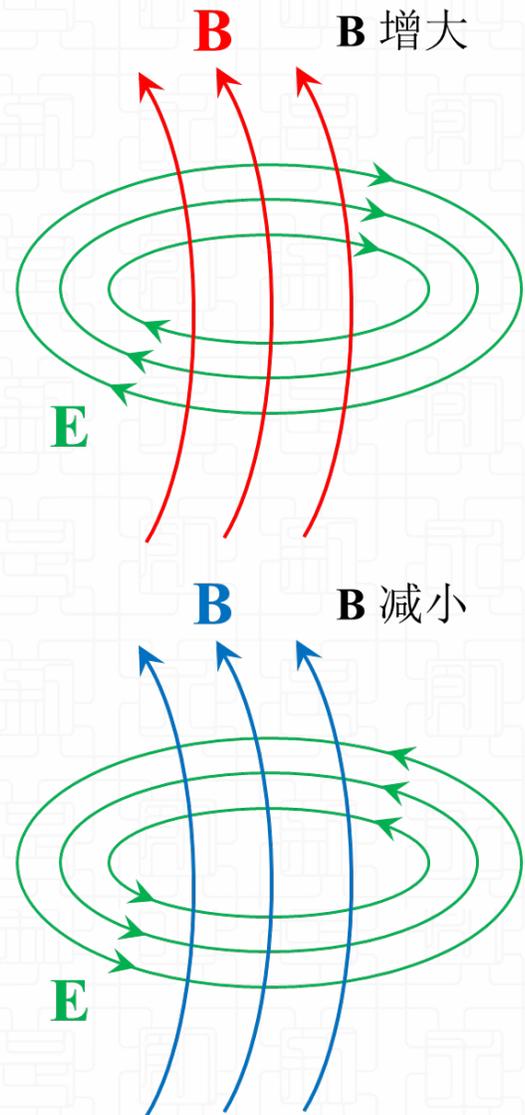


$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

## 法拉第电磁感应定律

- ❖ 描述磁场是如何激发产生电场。
- ❖ 在没有自由电荷的空间，由变化磁场激发的涡旋电场的电场线是一系列的闭合曲线。
- ❖ 在一般情况下，电场可以是库仑电场也可以是变化磁场激发的感应电场，而感应电场是涡旋场，它的电力线是闭合的。
- ❖ 麦克斯韦提出的涡旋电场的概念，揭示出变化的磁场可以在空间激发电场，并通过法拉第电磁感应定律得出二者的关系。任何随时间而变化的磁场，都是和涡旋电场联系在一起的。

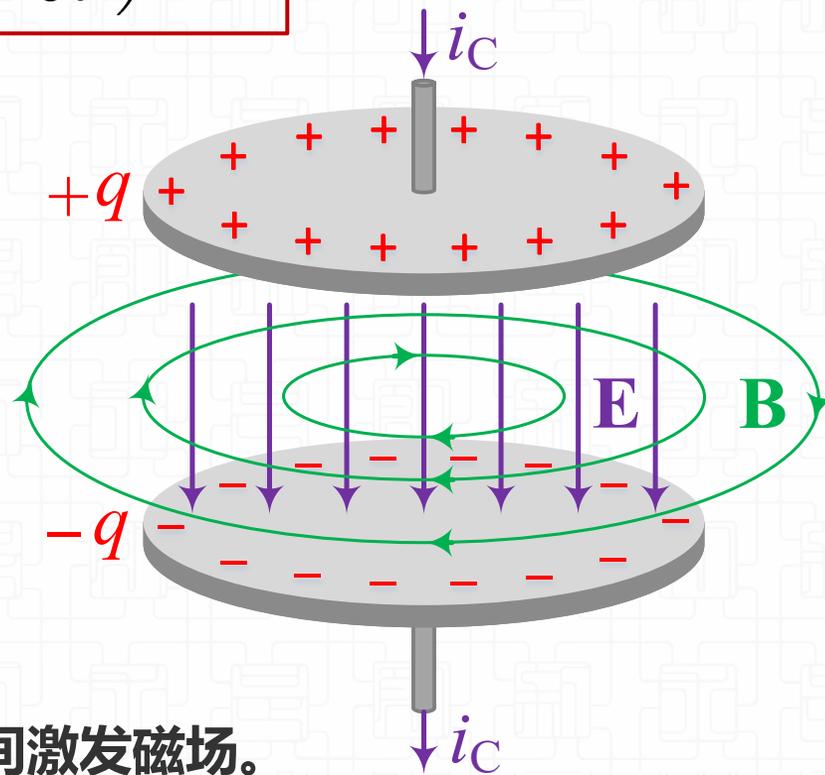
$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$



## 安培—麦克斯韦定律

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

- ❖ 描述了**电流和变化的电场是怎样激发产生磁场**。
- ❖ 变化的电场产生的磁场和传导电流产生的磁场相同，都是**涡旋状的场，磁力线是闭合线**。
- ❖  $\mathbf{H} = \mu \mathbf{B}$ ， $\mu$  是介质的磁导率。
- ❖ 沿任何闭合路径的线积分，等于这闭合路径所包围的各个**电流之代数和**。
- ❖ 麦克斯韦提出的**位移电流**的概念，揭示出变化的电场可以在空间激发磁场。
- ❖ 通过**全电流**概念（传导电流和位移电流之和）的引入，得到了一般形式下的的安培环路定律在真空或介质中的表示形式。**任何随时间而变化的电场，都是和磁场联系在一起的。**



## 微分形式的麦克斯韦方程组

- ❖ 麦克斯韦方程组的积分形式反映了空间某区域的电磁场量 ( $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ ) 和场源 (电荷、电流) 之间的关系, 而微分形式的麦克斯韦方程组则反映电磁场在空间每一点的性质, 它是积分形式的麦克斯韦方程当积分域缩小到一个点的极限。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

微分算子  $\nabla = \hat{x}_0 \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y}_0 \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z}_0 \frac{\partial}{\partial z}$

本构关系  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$

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

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{欧姆定律})$$

## 内容提要

- ❖ 经典电磁理论的建立
- ❖ 麦克斯韦方程组
- ❖ 波动的基本特征
- ❖ 电磁波传播特性
- ❖ 天线

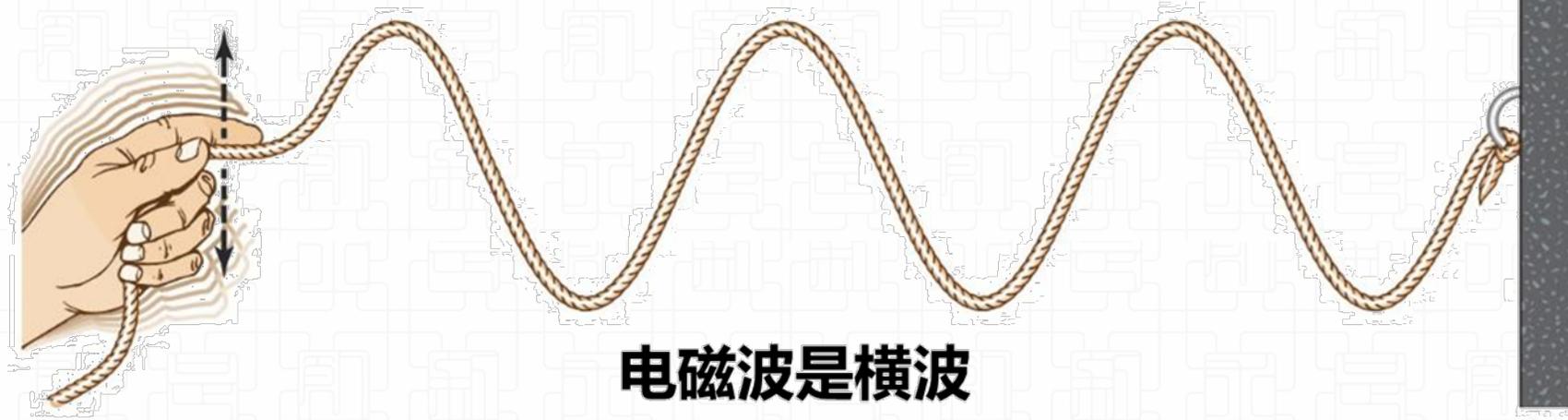
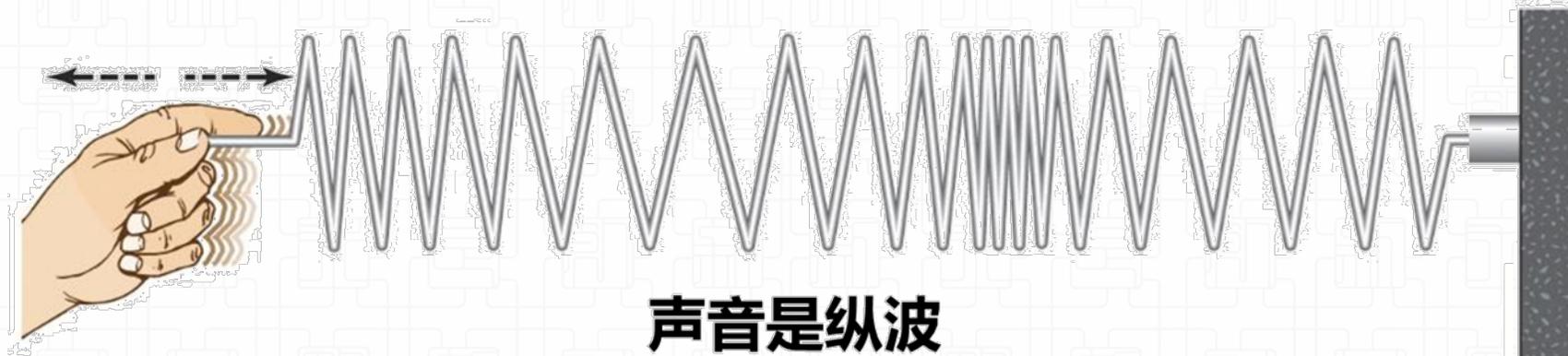
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

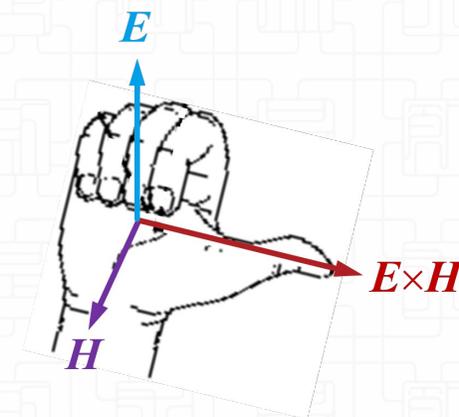
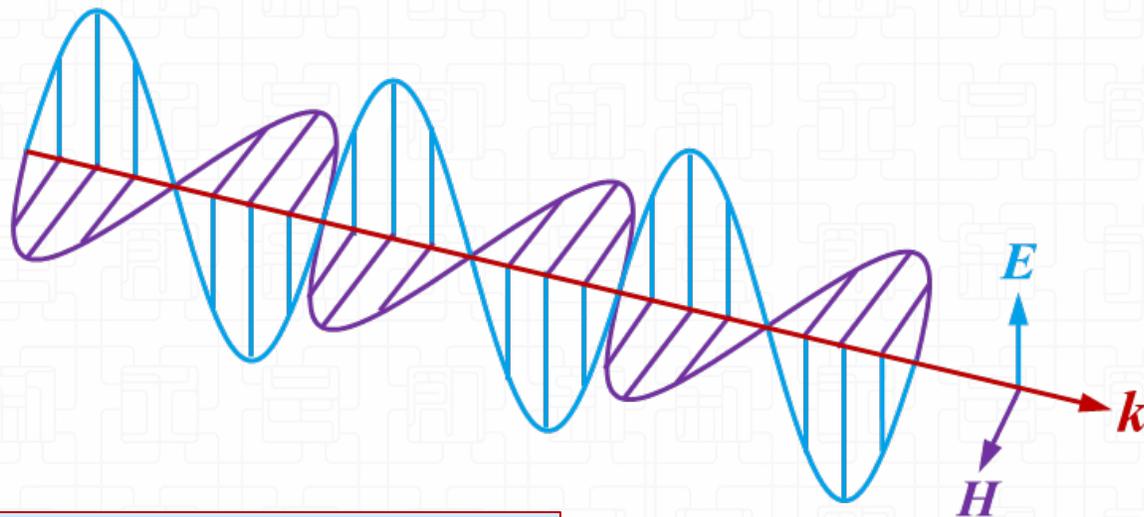
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

## 纵波和横波



## 电磁波



$$A(z, t) = A_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0)$$

$A_0$ : 振幅

$\omega t - kz + \varphi_0$ : 相位 ( $\varphi_0$ : 初相)

$\omega$ : 角频率

$k$ : 传播常数

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}$$

## 时间域中看波

❖ 固定于空间某一点，观察随时间的变化。 $A$  随  $t$  作周期变化。

❖  $T$ : 周期

- 相位变化  $2\pi$  的时间，即  $\omega T = 2\pi$

❖  $f$ : 频率

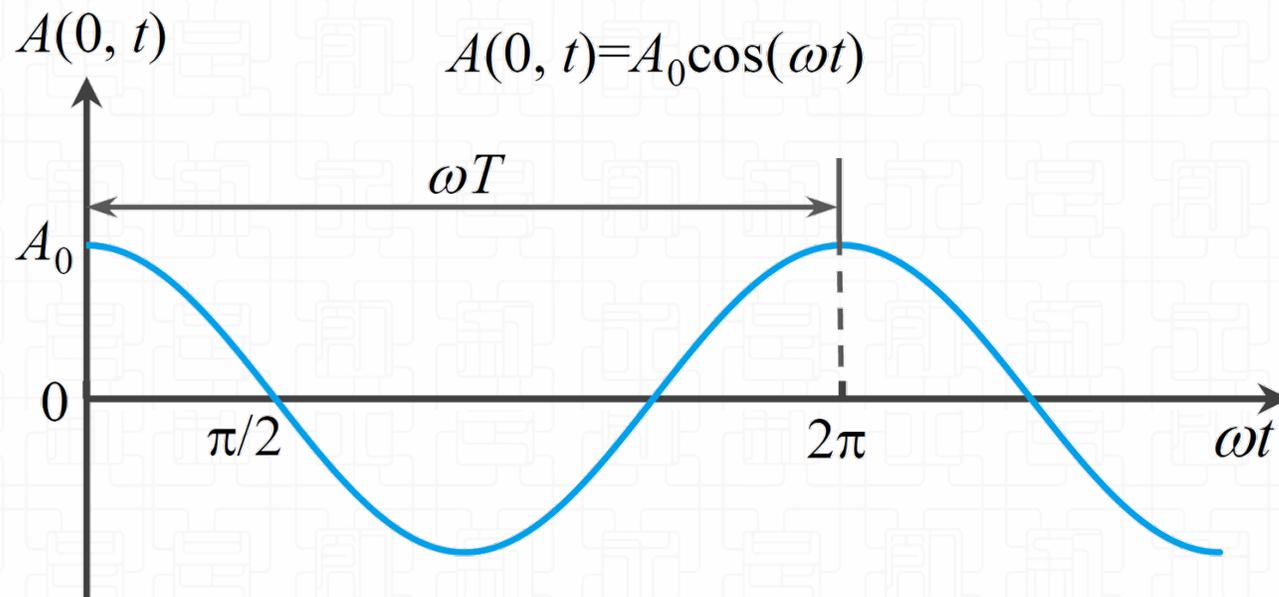
-  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

- 单位: Hz

❖  $\omega = 2\pi f$ , 角频率

- 单位: rad/s

$$A(z, t) = A_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0)$$



## 空间域中看波

$$A(z, t) = A_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0)$$

❖ 固定时间 $t$ ，观察 $A$ 随 $z$ 的变化

❖  $A$ 在 $z$ 方向也是周期变化的。

❖ 波长 $\lambda$

- 相位变化 $2\pi$ 的距离

-  $k\lambda = 2\pi$

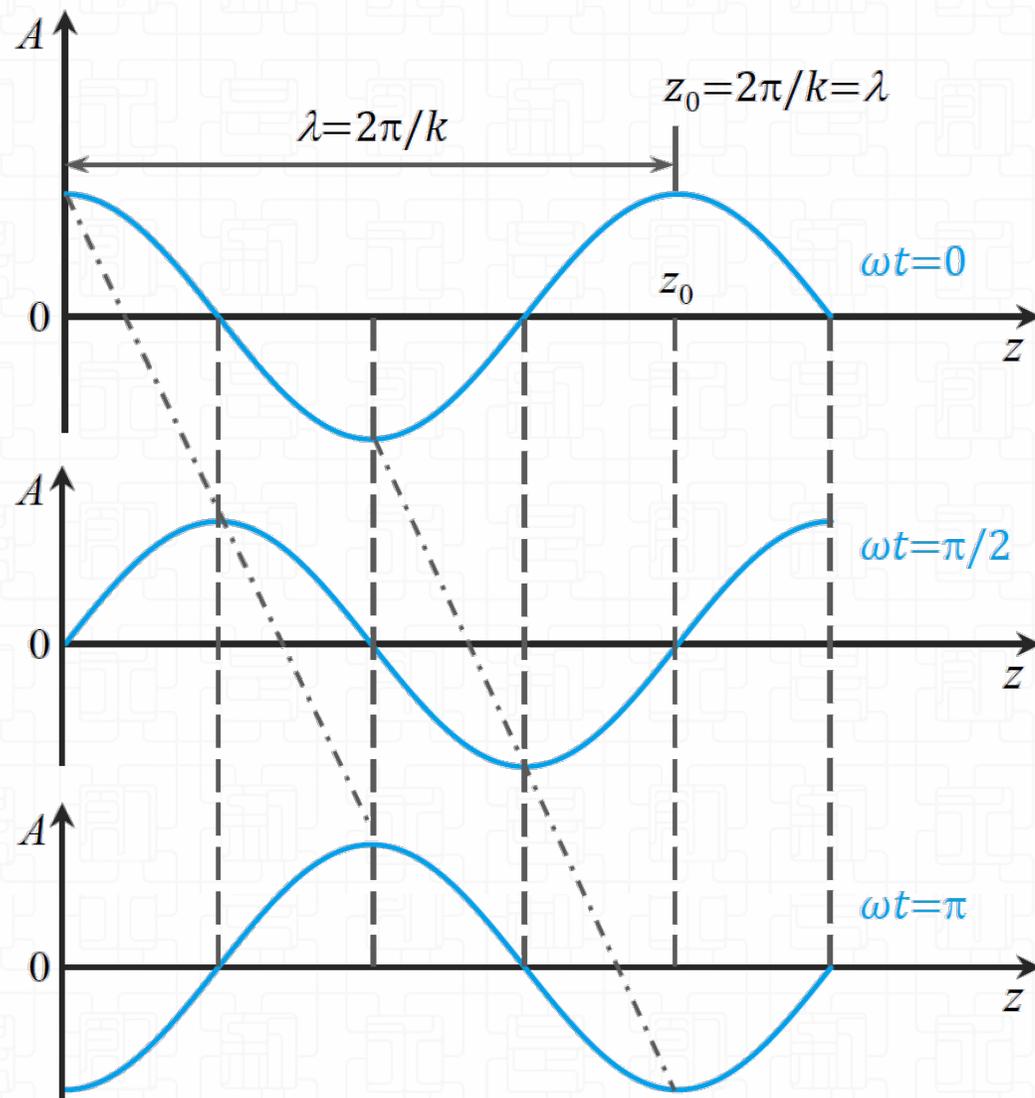
$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

❖ 传播常数  $k$

-  $2\pi$  距离内包含的空间周期数

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

❖ 空间域中波长 $\lambda$ 、传播常数 $k$ 与时间域中周期 $T$ 、角频率 $\omega$ 是等价的。



## 波的速度

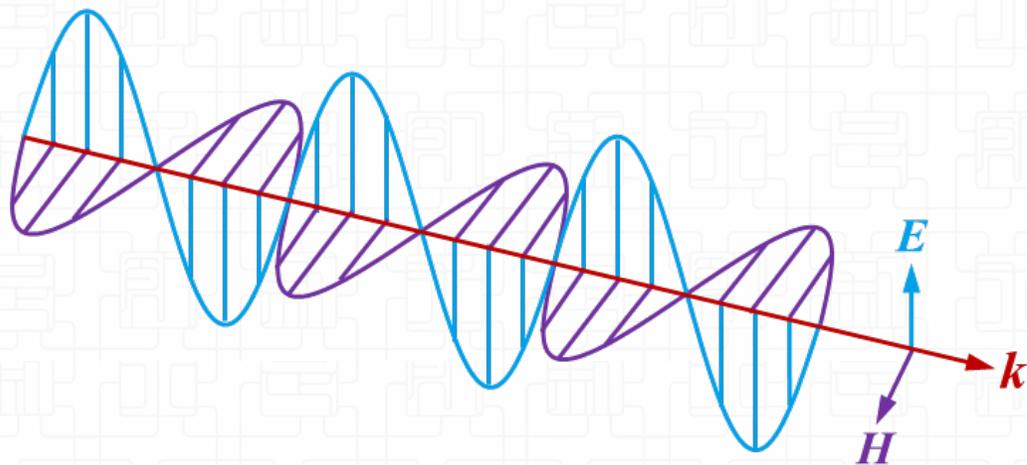
$$A(z, t) = A_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0)$$

❖ 设想有一个人站在波峰上，随着波峰前进的速度即波的速度，这就要求 $\cos(\omega t - kz)$ 是常数，或者波的相位是常数： $\omega t - kz = \text{常数}$

❖ 所以波传播速度就是

$$\frac{dz}{dt} = v = \frac{\omega}{k}$$

❖ 因为  $\omega = 2\pi f$ ，而  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，所以  $v = f\lambda$



## 内容提要

- ❖ 经典电磁理论的建立
- ❖ 麦克斯韦方程组
- ❖ 波动的基本特征
- ❖ 电磁波传播特性
- ❖ 天线

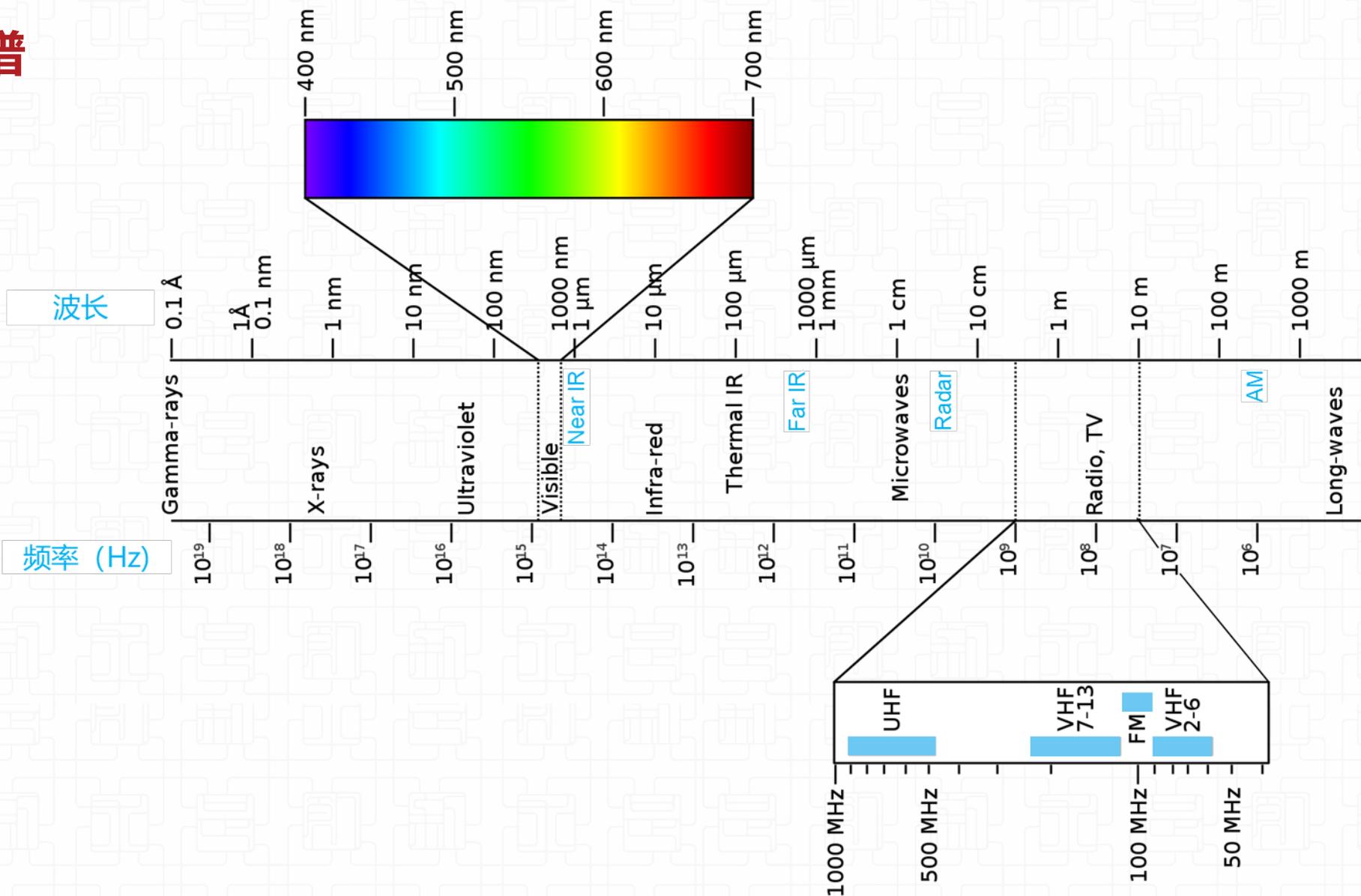
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

# 电磁频谱



# 无线电频谱

段号	频段名称	代号	频率范围	波段名称	波长范围
1	极低频	ELF	3~30 Hz	极长波	100,000~10,000 km
2	超低频	SLF	30~300 Hz	超长波	10,000~1,000 km
3	特低频	ULF	0.3~3 kHz	特长波	1,000~100 km
4	甚低频	VLF	3~30 kHz	甚长波	100~10 km
5	低频	LF	30~300 kHz	长波	10~1 km
6	中频	MF	0.3~3 MHz	中波	1~0.1 km
7	高频	HF	3~30 MHz	短波	100~10 m
8	甚高频	VHF	30~300 MHz	米波	10~1 m
9	特高频	UHF	0.3~3 GHz	分米波	1~0.1 m
10	超高频	SHF	3~30 GHz	厘米波	100~10 mm
11	极高频	EHF	30~300 GHz	毫米波	10~1 mm
12	至高频	THF	0.3~3 THz	丝米波	1~0.1 mm

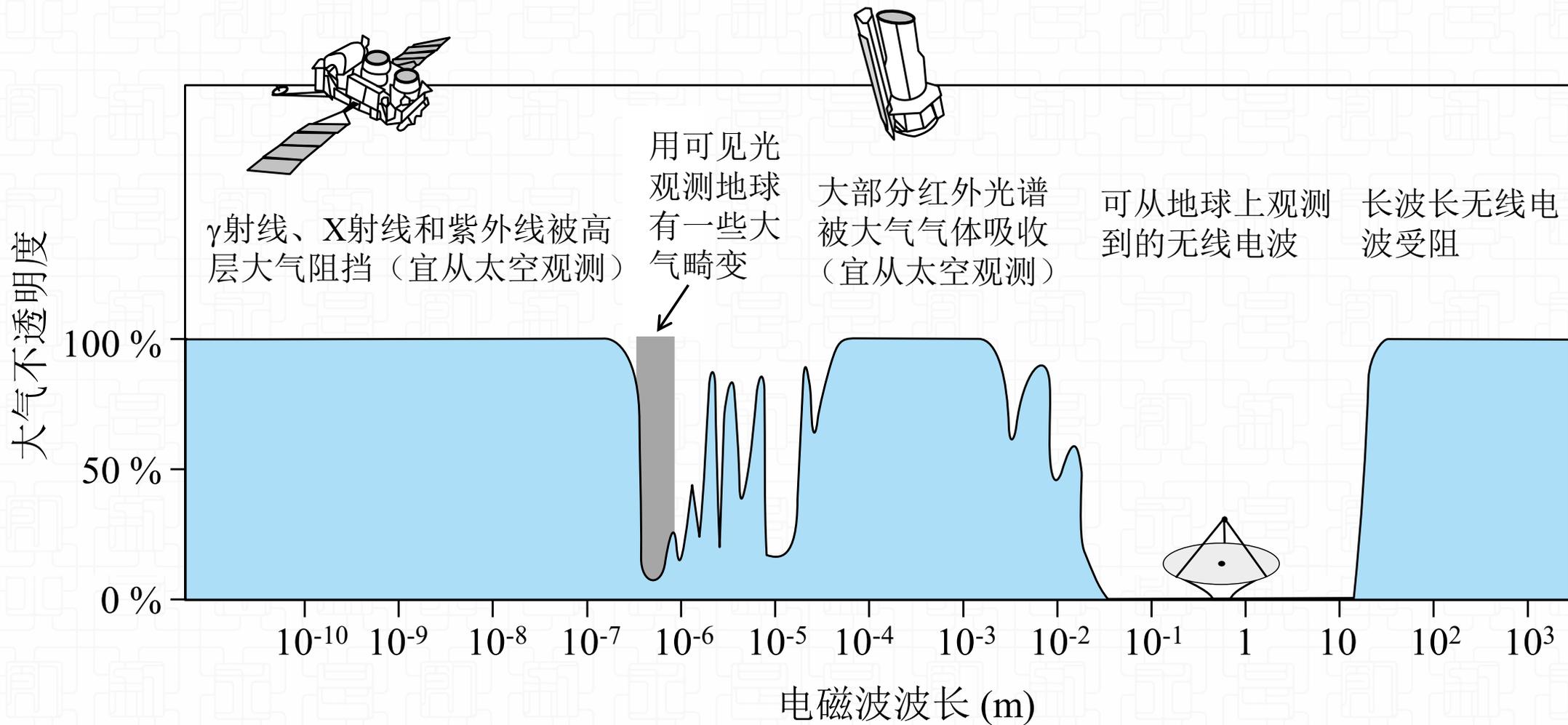
射频

(Radio Frequency)

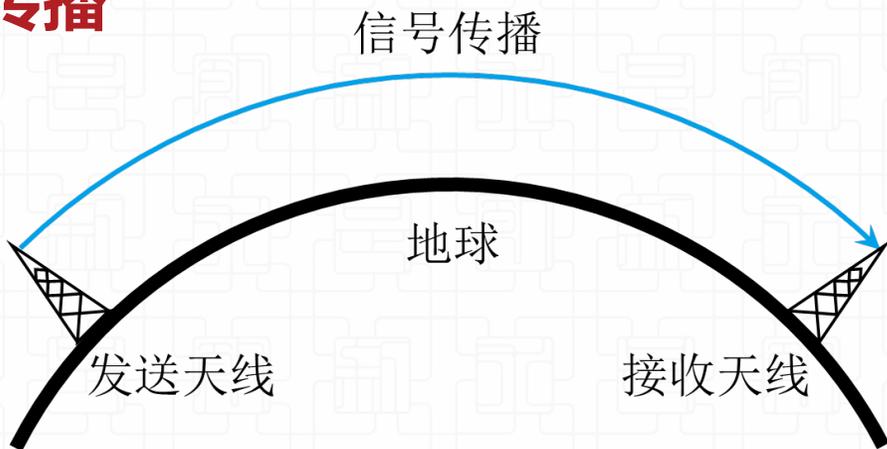
微波

(Microwave)

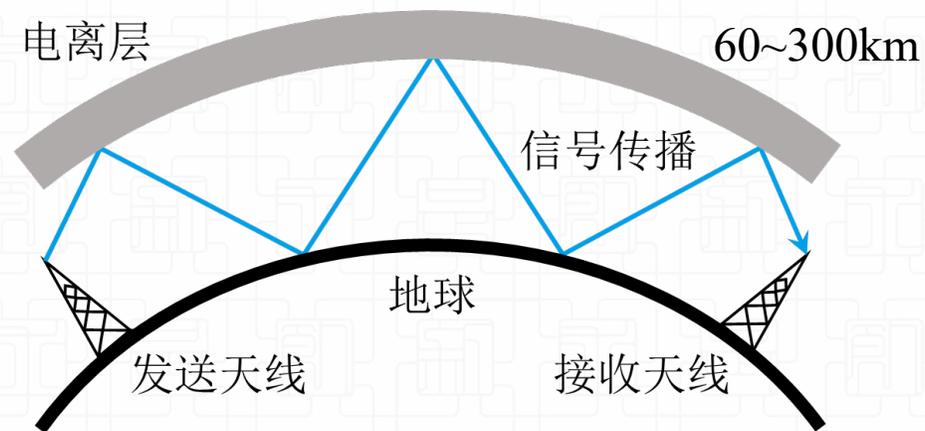
# 电磁波大气传输窗口



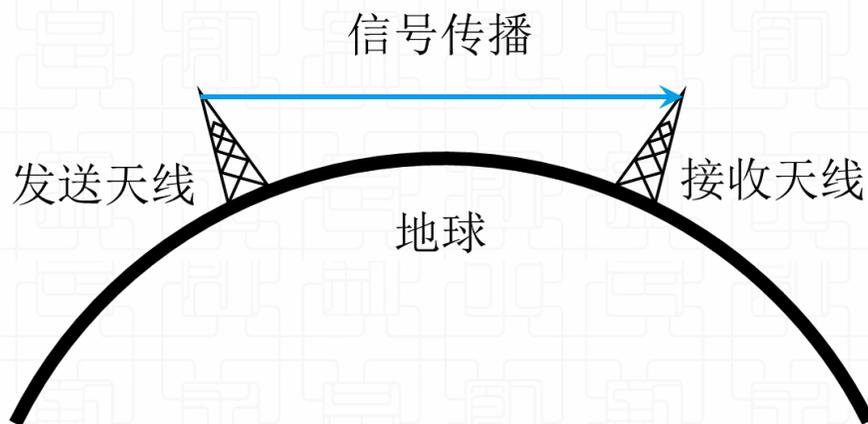
# 电波传播



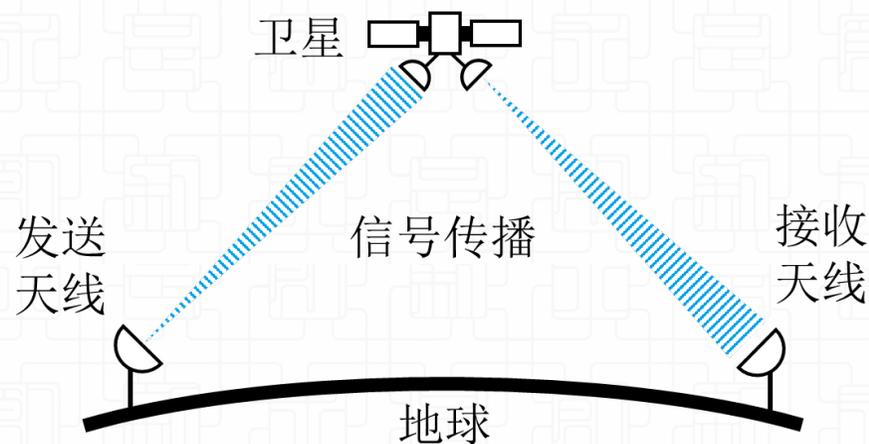
地波传播 (2 MHz以下)



天波传播 (2 ~ 30 MHz)



视距传播 (30 MHz以上)



空间传播

## 内容提要

- ❖ 经典电磁理论的建立
- ❖ 麦克斯韦方程组
- ❖ 波动的基本特征
- ❖ 电磁波传播特性
- ❖ 天线

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

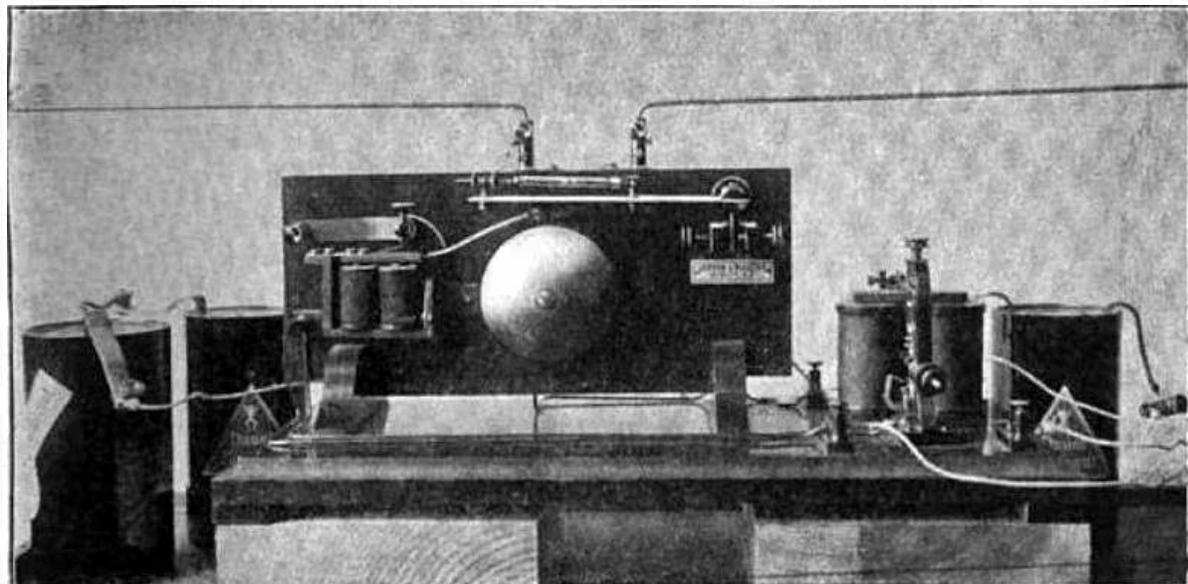
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

## 天线

- ❖ 1894年，俄国人**亚历山大·斯捷潘诺维奇·波波夫**发明了一种天线装置。他将检波器的一端与天线连接，另一端接地，检测到了许多公里以外大气中的放电。这是人类首次利用天线，接收到自然界的无线电波。
- ❖ 1895年7月，波波夫将无线电接收机安装在圣彼得堡林业研究所的气象台上。
- ❖ 1896年3月24日，波波夫和助手雷布金在俄国物理化学协会的年会上，正式演示了用无线电传递莫尔斯电报码。
- ❖ 1896年6月，意大利人马可尼申请了自己的无线电报系统**专利**。

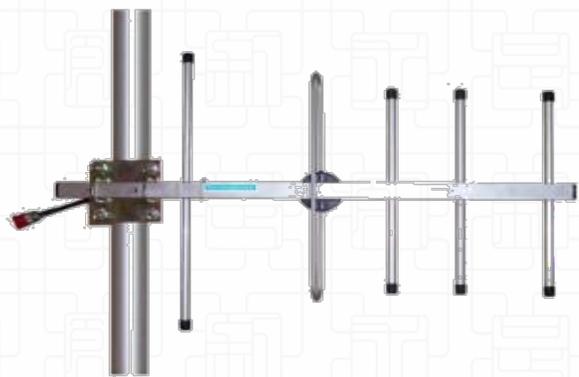


Alexander Stepanovich Popov  
Mar 16, 1859—Jan 13, 1906



## 天线

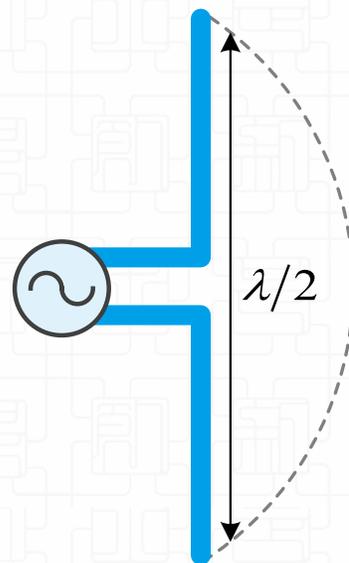
❖ 天线就是用来辐射和接收无线电波的装置。将传输线中的电磁能转化成自由空间的电磁波，或将空间电磁波转化成传输线中的电磁能。



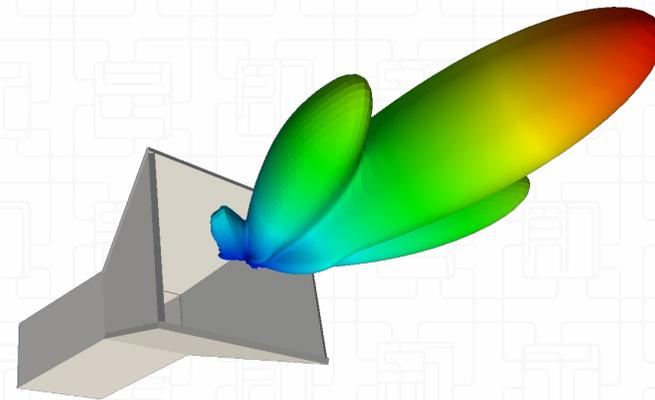
八木天线



抛物面天线



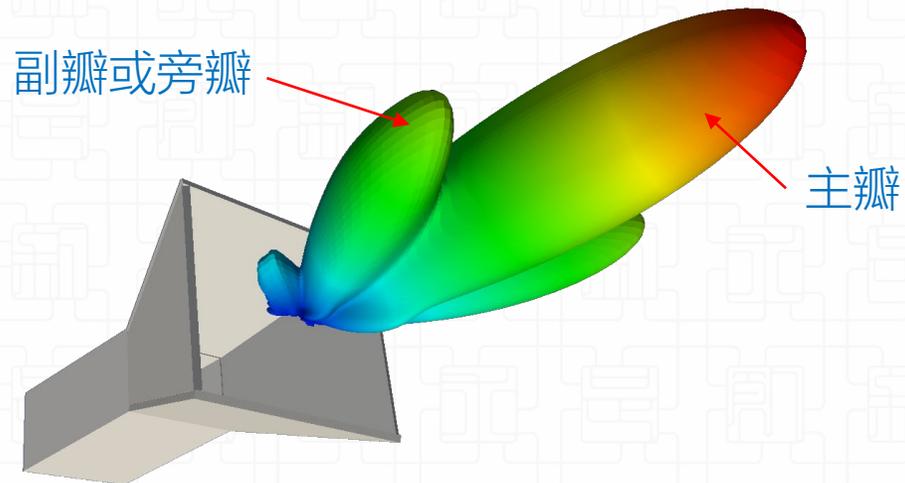
偶极子天线



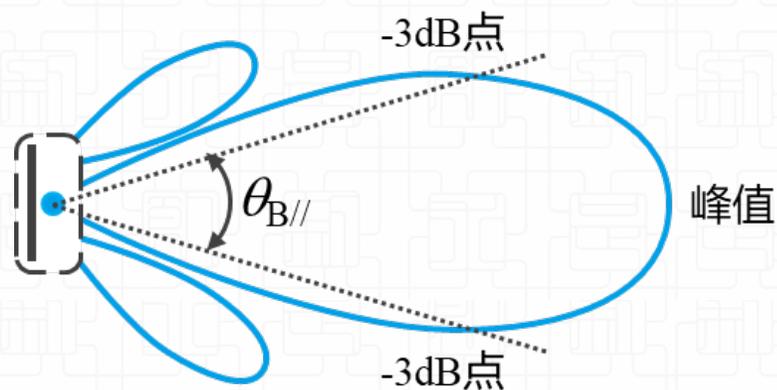
口径天线

## 天线辐射的方向图

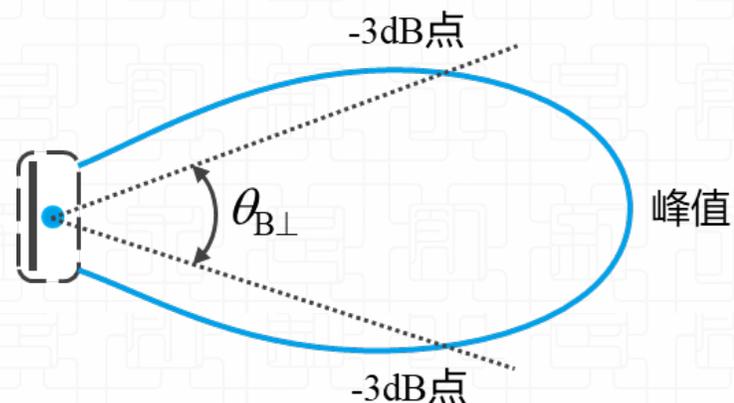
- ❖ 天线辐射电磁波是有方向性的，它表示天线向一定方面辐射电磁波的能力。
- ❖ 作为接收天线的方向性表示了它接收不同方向来的电磁波的能力。



波束宽度



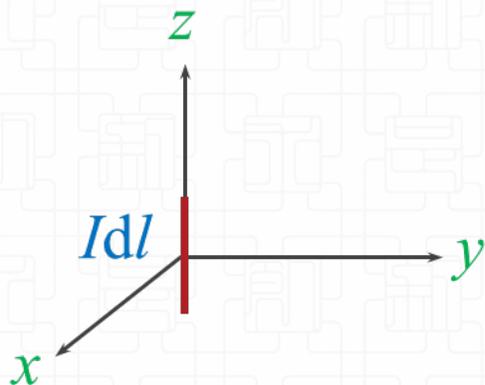
水平面方向图



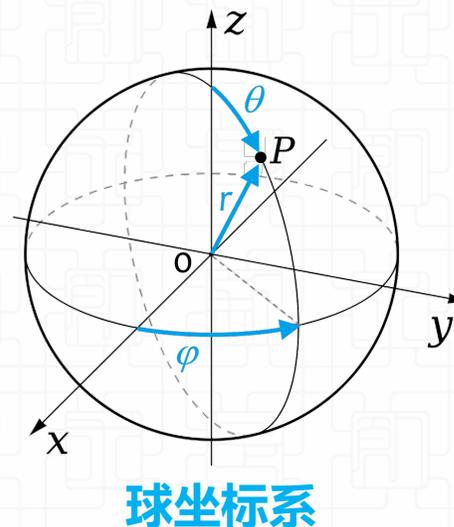
垂直面方向图

## 电基本振子天线

- ❖ 电基本振子（赫兹电偶极子）、磁基本振子（赫兹磁偶极子）是最基本的电磁辐射单元。
- ❖ 工程中应用的**众多天线都可分解为基本振子的组合**。



- 一段有高频电流的短导线
- 导线的直径  $d / \lambda \ll 1$ , 可用线电流模型近似
- 长度与波长相比很小,  $\Delta l / \lambda \ll 1$
- 假定导线上各点电流的振幅和相位是相同的



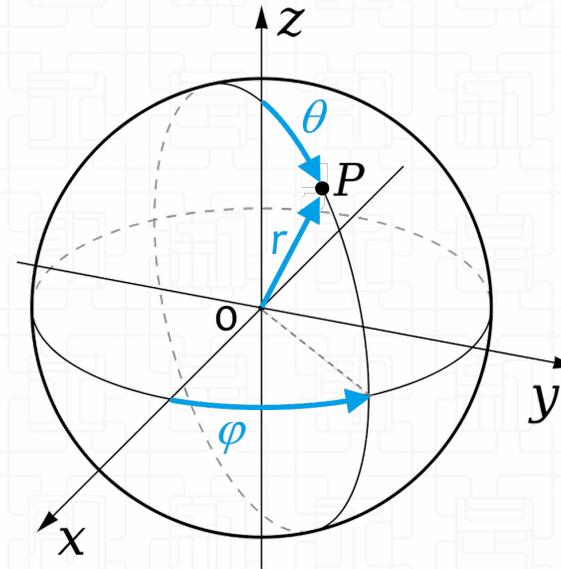
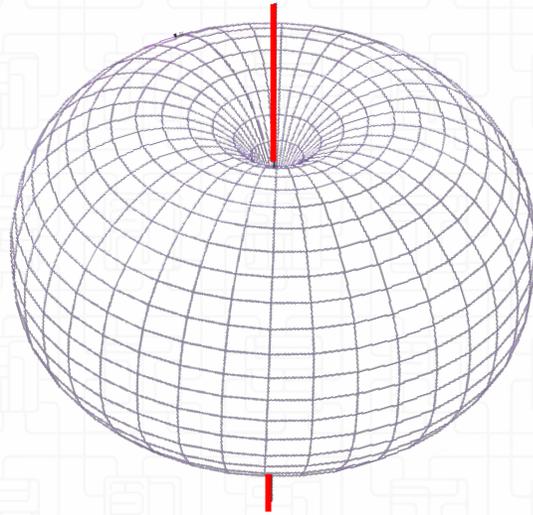
- ❖ 离开电基本振子很远处（远区），即满足  $kr = 2\pi r / \lambda \gg 1$  的条件下，可得到电基本振子远区  $r$  处的辐射场

$$E = \theta_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{jkI\Delta l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta$$

$$H = \varphi_0 \frac{jkI\Delta l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta$$

# 偶极子辐射

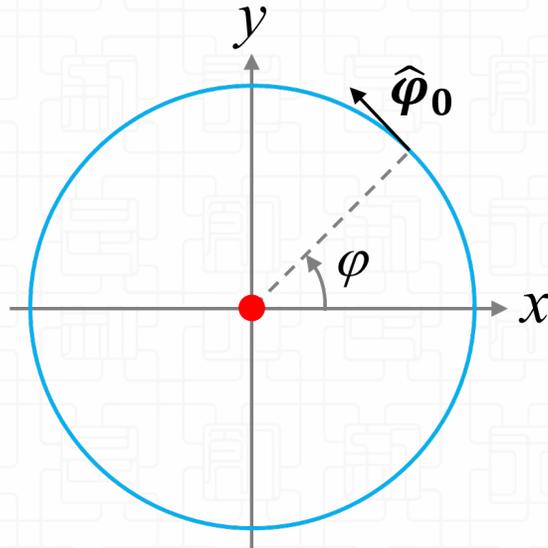
三维辐射图



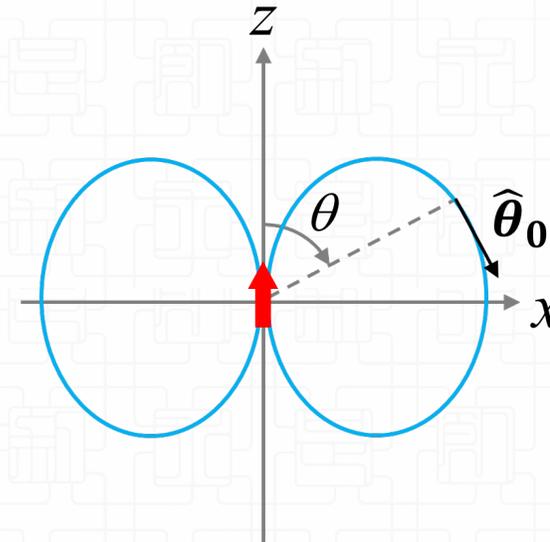
球坐标系

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \varphi \\ y &= r \sin \theta \sin \varphi \\ z &= r \cos \theta \end{aligned}$$

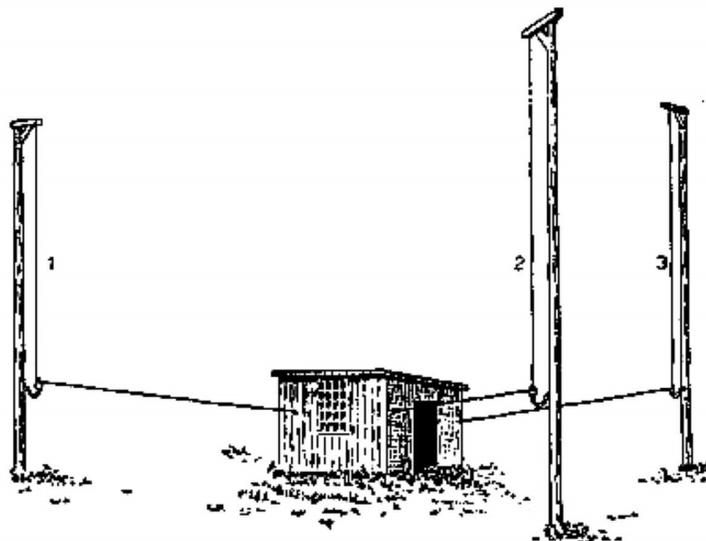
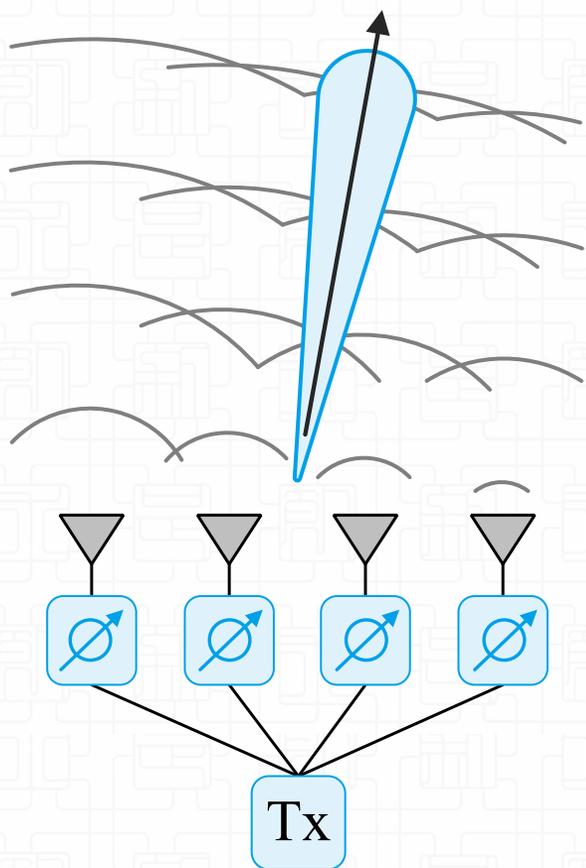
水平面



垂直面



# 阵列天线

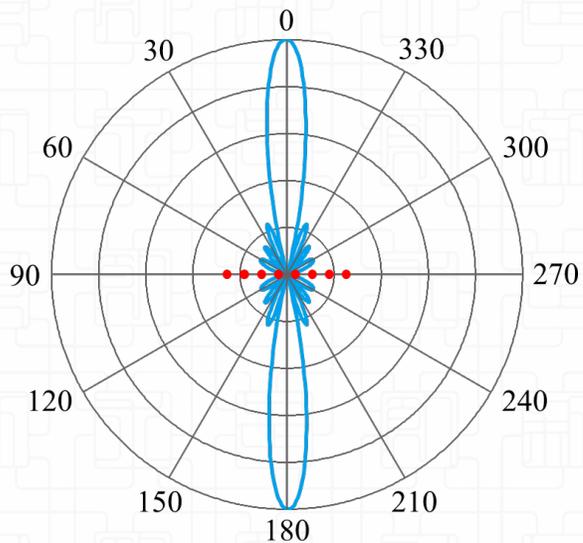


Karl Ferdinand Braun  
06 Jun 1850 ~ 20 Apr 1918

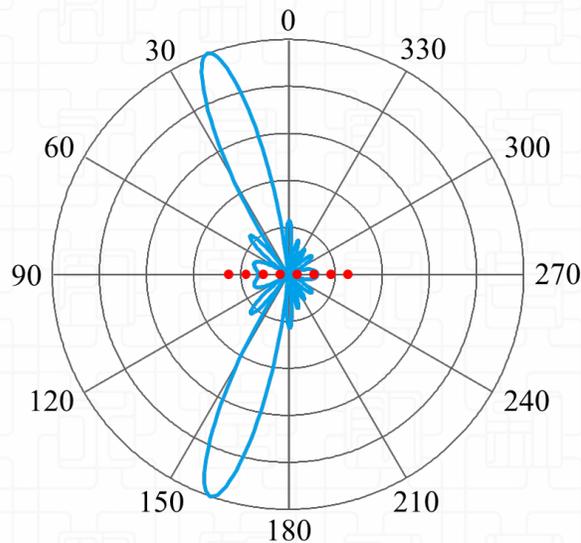
❖ 相控阵天线的概念最初是由德国物理学家卡尔·费迪南德·布劳恩于1905年提出并进行展示，他证明了通过调控天线阵列中每个阵元的幅度和相位关系可以使电磁波在一个方向上的传播得到增强，产生具有指向性的波束。

## 波束成形 (beamforming)

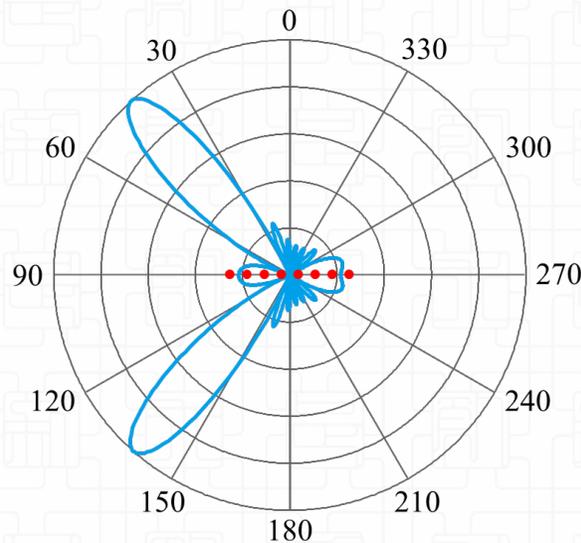
❖ 天线元间距  $d = \lambda/2$  的八阵元阵列天线，相邻两辐射单元激励电流的相位差为  $\psi$



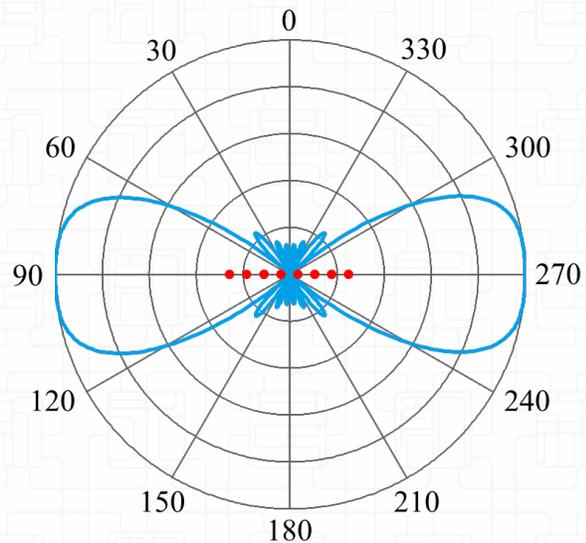
$$\psi = 0$$



$$\psi = \pi/3$$



$$\psi = 2\pi/3$$

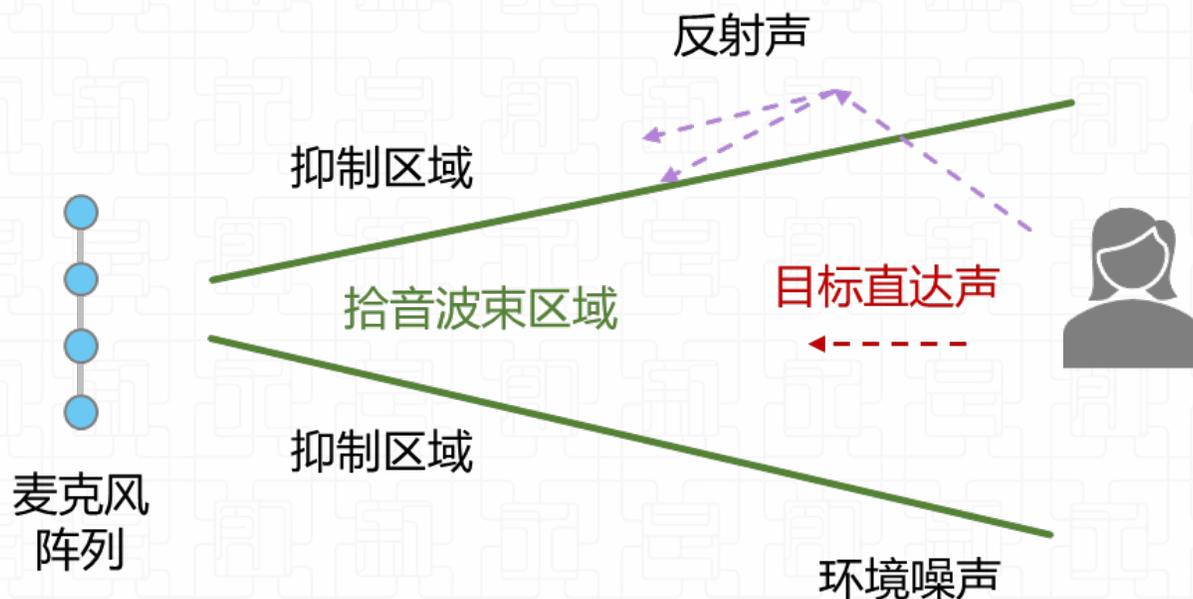


$$\psi = \pi$$

❖ 通过调整天线阵列中每个阵元的幅度和相位产生具有指向性的波束

## 麦克风阵列

❖ 在远场场景中，空间的混响、背景噪声、人声干扰以及音源的回声都会急剧的降低语音识别的体验。



❖ 麦克风阵列能对声源的距离、方向作出判断，适应各种远距离应用场合，保证准确稳定的识别效果。

❖ 同时根据麦克风阵列的空域滤波特性，在目标说话人方向形成拾音波束，抑制波束之外的噪声和反射声，以使得其具备良好的降噪和去混响效果。

**The End.**



中国大学MOOC

章献民

zhangxm@zju.edu.cn