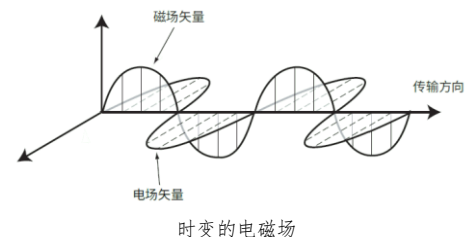


第二章 电磁辐射基础

2.1 电磁辐射



2.1.1 电磁波基本概念

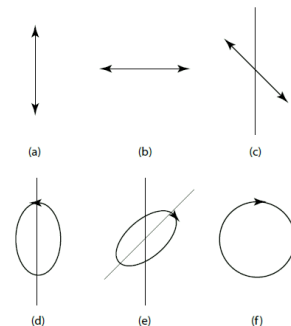
- 产生** 随时间变化的电场产生磁场，随时间变化的磁场产生电场。
- 传播** 预言了电磁波的存在，电磁场相互激发，产生向外传输的空间扰动，即电磁波。
在真空中电磁波总是以绝对常数的光速 c 无损失无限直线传播。
如果不沿直线传播，则两束同光源发出的光的光程发生改变，若正好满足一个相位差，则波峰波谷相互抵消，能量消失，明显假设不成立。要满足同一时刻的光同相位：可以解释折射定律。
- 特点**
- ① 电磁波满足**线性叠加原理**：相长、相消干涉。 $\vec{E}_{total} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ 因此可以频率分解
 - ② 电磁波传播方向垂直于电磁矢量的振动方向，即横波。
 - ③ 电磁波不需要借助任何介质就能在空间中传播。
 - ④ 在介质中电磁波相位速度可以变快或变慢，光线可以产生折射现象。

2.1.2 电磁波频率

- 频率分解** 任意电磁扰动都可以表示成不同角频率 ω 的**纯正弦波的合成** $f(t) = \int_0^\infty \alpha(\omega) \sin[\omega t + \phi(\omega)] d\omega$
- 理解电磁辐射与云、水汽、臭氧、二氧化碳等的相互作用时可以**一次考虑一个频率**，随后再将所有相关频率的结果**进行求和**。
- 单色辐射** 完全由**单一频率**组成的电磁辐射（“一种颜色”，后文讨论方程若无特殊强调，均为单色辐射）。
- 宽带辐射** 由**大范围频率组合**构成的辐射。
- 相干辐射** 单色辐射，由**单个振荡器或一组完全同步的振荡器**产生，即要求**相位相同**。
- 非相干辐射** 准单色辐射，由**一组独立的振荡器**产生，它们具有相同频率（准单色），但是**彼此不锁相**。

2.1.3 电磁辐射偏振状态

- 概念** 相干辐射中，当沿着传输方向进行观察时，**振动电场**具有一种唯一且重复的模式
- 线偏振** 电场可能在一个**固定的平面内**来回振动，像摆锤(a)-(c)。
- 圆偏振** 电场可能围绕传播方向以**顺时针或逆时针螺旋方式**振荡(f)。
例如 $E_x = A_1 \cos \omega t$ $E_y = A_2 \sin \omega t$ 若 $A_1 \neq A_2$ ，得到椭圆偏振。
- 椭圆偏振** 可以视为同时包含线偏振和圆偏振这两种情况(d)-(e)。
- 注意** 在非相干辐射中，朝着一种偏振类型的系统性趋势可能或不可能被识别，还必须指定偏振度。偏振实际中常用 Stokes 矢量。
- 非偏振光** **太阳光属于非偏振光（热辐射光为非偏振光）**
其到达大气，若经历**瑞利散射**，则将转变为**线偏振光**。



2.1.4 麦克斯韦方程组

高斯定律	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_F$	\vec{D} 电位移矢量	ρ_F 自由电荷密度	电荷(右边)激发通量
高斯磁定律	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	\vec{B} 磁感应强度	磁场无源, 通量为零。	
法拉第电磁感应定律	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	\vec{E} 电场强度	时变的磁场产生涡旋电场	
麦克斯韦-安培定律	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_F + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	\vec{H} 磁场强度	\vec{J}_F 自由电流密度	电流\时变电场产生磁场
连续性方程	$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_F = 0$	随时间变化的电荷与电流通量要平衡		

2.1.5 物质方程

假设	在此假设了所考虑的宏观均匀介质电磁特性参数与电磁场无关(即 线性介质), 与位置无关(即 均匀介质), 与方向无关(即 各向同性介质)。			
方程	$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0(1 + \chi) \vec{E}$	ϵ_0 自由空间的介电常数	\vec{P} 电极化强度	χ 电极化率
	$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu \vec{H}$	μ_0 自由空间的磁导率	\vec{M} 磁极化强度	μ 磁导率
	$\vec{J}_F = \sigma \vec{E}$	σ 电导率	即欧姆定律	

2.1.6 时谐平面波

2.1.6.1 时谐平面波解

条件	设复数形式的时谐平面波如下:	$\vec{E}_c = \vec{E}_0 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{x} - i\omega t) = \vec{E}_0 \exp(-i\vec{k}'' \cdot \vec{x}) \exp[i(\vec{k}' \cdot \vec{x} - \omega t)]$ $\vec{H}_c = \vec{H}_0 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{x} - i\omega t) = \vec{H}_0 \exp(-i\vec{k}'' \cdot \vec{x}) \exp[i(\vec{k}' \cdot \vec{x} - \omega t)]$
----	----------------	--

其中 $\vec{k} = \vec{k}' + i\vec{k}''$ 为复波矢量, $\omega = 2\pi\nu$ 为角频率(单位弧度每秒), \vec{x} 为位置矢量, t 为时间。

时谐平面波是在空间中传播的最简单的波, 复数形式便于数学计算。将其代入麦克斯韦方程组可得:

解	$\vec{k} \cdot \vec{E}_0 = 0$	$\vec{k} \perp \vec{E}_0$	传播方向与电场垂直
	$\vec{k} \cdot \vec{H}_0 = 0$	$\vec{k} \perp \vec{H}_0$	传播方向与磁场垂直
	$\vec{k} \times \vec{E}_0 = \omega\mu\vec{H}_0$	$\vec{E}_0 \perp \vec{H}_0$	电场与磁场垂直
	$\vec{k} \times \vec{H}_0 = -\omega\epsilon\vec{E}_0$	$ \vec{k}' + i \vec{k}'' = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$	假设不吸收 $\vec{k}'' = 0$, 则确定光速为常数 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$

其中复介电常数 $\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi) + i\sigma/\omega$

解释	由此可知, 在平面中振动的电场和磁场矢量彼此相互垂直, 同时两者又都垂直于波的传输方向。
----	--

2.1.6.2 时谐平面波特征

相位速度	真空相位速度: $c \equiv 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$
------	---

用光速改写: 对于非真空情况 $|\vec{k}'| + i|\vec{k}''| = \frac{\omega N}{c}$ 其中**复折射率**为 $N \equiv \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{c'}$, $c' = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$

如果 N 为实数, 那么 c' 为**介质相位速度** 这里体现了复折射率 $N = n_r + in_i$ 的重要性

波印亭矢量	波印亭矢量描述电磁波 传输能量的瞬时方向和数值 $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$
-------	---

垂直传输方向面元的**辐射通量密度** $F = \langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E^2$

吸收

电磁辐射衰减规律 $F = F_0 \exp(-2\vec{k}'' \cdot \vec{x}) = F_0 e^{-\beta_a x}$

吸收系数 β_a 定义为 $\beta_a = \frac{4\pi n_i \nu}{c} = \frac{4\pi n_i}{\lambda}$

吸收系数与折射率虚部成正比，虚部越大，则吸收越强；与波长成反比：如水吸收呈蓝色。

2.1.7 辐射的量子特性

光子能量

光子能量由其频率或波长通过如下关系决定 $E = h\nu$ ，其中 ν 为频率， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

一般法则

① 当计算大气粒子（空气分子、气溶胶、云粒子和雨滴）散射和地表反射特性时，辐射波本质很重要。

② 当考虑单个原子和分子的辐射吸收和发射时，包括光化学反应，辐射量子本质发挥作用。

爱因斯坦双能级理论：可建立分子吸收辐射方程

③ 对于大气辐射传输计算，这两种类型的相互作用效应都已深深根植于通用的消光和散射系数(截面)。

2.2 电磁波谱

2.2.1 波长与波数

频率

辐射频率 ν 总是保持不变，直至它被吸收，转化成其他形式的能量。

在此假设观察者相对辐射源保持固定距离不动，否则因为多普勒效应频率会发生偏移。

$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ 单位为周/秒或赫兹 (Hz) $10^{12} \text{ Hz} = 10^9 \text{ KHz} = 10^6 \text{ MHz} = 10^3 \text{ GHz} = 1 \text{ THz}$

波长

在实际中，通常采用波长 λ 会比采用频率 ν 更为方便。这是因为大气科学关注的频率数值太大

$c = \lambda \nu$ 该关系仅适用于真空中的波长，单位为纳米、微米或厘米

波数

有些学者更喜欢用波数 $\tilde{\nu}$ 来进行描述 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ 通常单位为厘米分之一 常见于分子吸收光谱

2.2.2 谱带

区间

光谱(μm)

太阳比重

特性（非绝热增温、光化学、遥感）

X射线

$\lambda < 0.01$

0

光电离所有成分，被上层大气吸收

极端紫外线

$0.01 < \lambda < 0.1$

3×10^{-6}

光电离 O_2 和 N_2 ，90 km之上被吸收(打出自由电子)

远紫外线

$0.10 < \lambda < 0.2$

0.01 %

光解离 O_2 ，50 km之上被吸收(化学键破坏，游离氧)

UV-C

$0.20 < \lambda < 0.28$

0.5 %

光解离 O_2 和 O_3 ，30~60 km之间被吸收

UV-B

$0.28 < \lambda < 0.32$

1.3 %

大部分被平流层 O_3 吸收，引起太阳晒伤

UV-A

$0.32 < \lambda < 0.4$

6.2 %

对人体基本无害，能到达地表

可见光

$0.40 < \lambda < 0.76$

39 %

大部分波长对大气透明

近红外

$0.76 < \lambda < 4$

52 %

能量最多 部分吸收，主要由水汽贡献

热红外

$4 < \lambda < 50$

0.9 %

即地球长波辐射，被 H_2O 、 CO_2 、 O_3 等吸收和发射

远红外

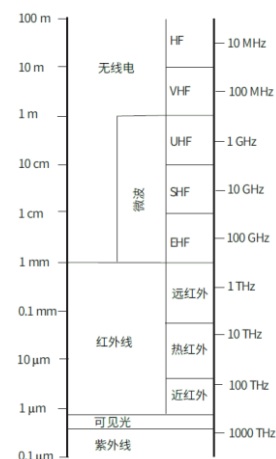
$0.05 < \lambda < 1 \text{ mm}$

被水汽吸收

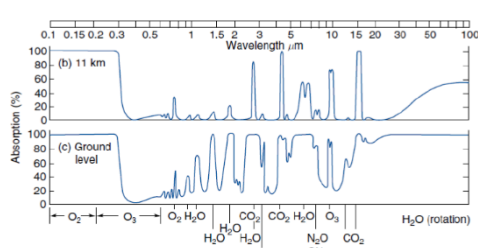
微波

$\lambda > 1 \text{ mm}$

云半透明，利于天气雷达探测其他物体(雨等)

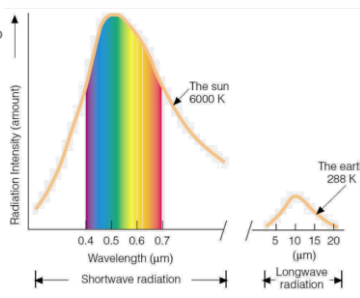


2.2.3 太阳和地球辐射



不同波长的吸收情况(地面与高空)

左侧臭氧吸收几乎 100%紫外线 可见光区间几乎透明
其后吸收选择性强，有窗区，最后热红外吸收极强



太阳短波辐射与地球长波辐射

