

§ 2—1 电磁辐射理论

一、电磁波的产生

物质是由无数分子组成的。分子是由原子组成的，原子是由原子核和围绕它旋转的电子所组成。各种物质都是由各种不同的原子或者由它所组成的分子所构成。这些原子或分子当受到光和热等作用时，原子内部的原子核和电子的状态就会发生变化，进而产生可使构成分子的原子发生振动的各种运动方式。物质的这种内部状态的变化就产生了电磁波 (electromagnetic wave)。

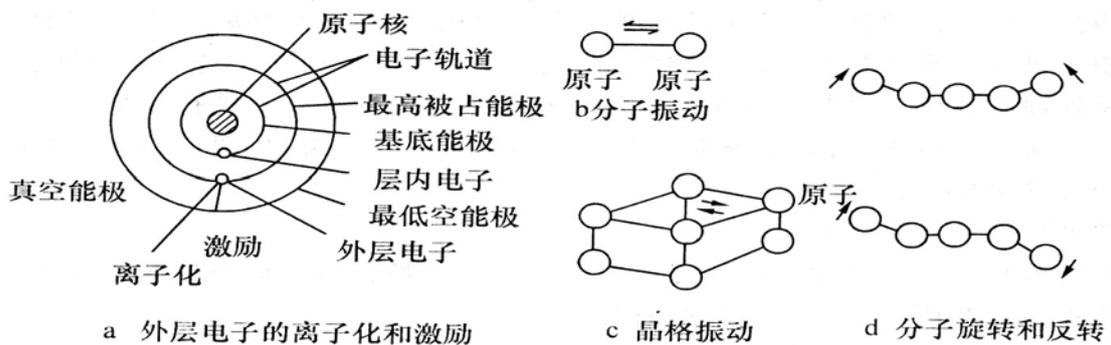


图 2—1

如图 2—1，电子向外层真空能级逸出时称为离子化；外层电子跃迁到更外层的轨道上称为激励；紫外线就是外层电子离子化产生的电磁波；可见光则是外层电子的激励而产生的电磁波。近红外线是由于构成分子的原子发生振动或分子振动而产生的；远红外线是由于分子构成的晶格发生振动而辐射出来的电磁波；毫米波和厘米波的微波是由于分子的旋转和反转而产生的。

二、电磁辐射的基本特性：

根据麦克斯韦电磁理论，任何变化的点场都会在它周围产生变化的磁场，而变化的磁场又会在其周围感应出变化的电场。电场与磁场相互激发，并以辐射方式向外传播，这就是电磁辐射。

现代物理学认为，电磁辐射的基本特性是波粒二象性。它表现为宏观的波动性与微观的粒子性(量子性)二者的对立统一。

宏观上，特别是在电磁辐射传播过程中，它的确是一种电磁能量的波动，具有时空周期性，因此通常又将它称为电磁波。电磁波在传播过程中，电场强度矢量 E ，磁感应强度矢量 H 和传播方向 V 三者始终保持相互垂直

的关系，故电磁波是一种横波。如图 2—2：

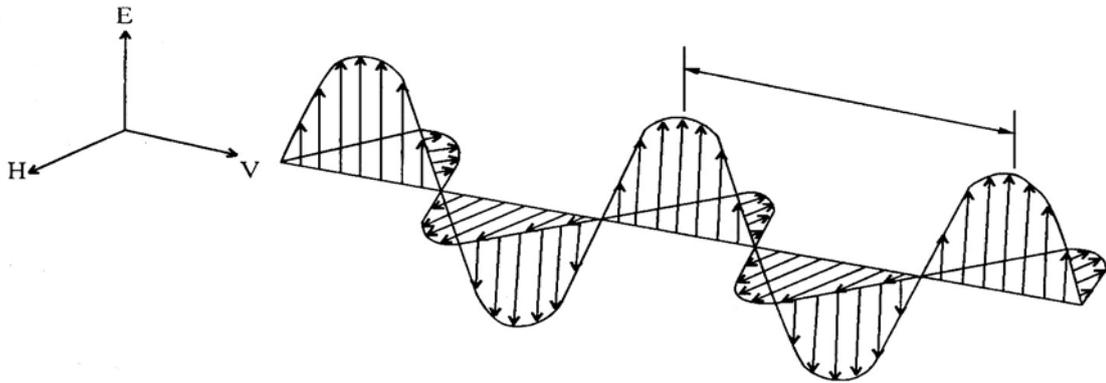


图 2—2

电磁波的波动性，通常是以波长 (λ)，波速 (C)，周期 (T) 或频率 (ν) 来描述。它们之间满足如下关系式：

即：
$$C = \lambda * \nu = \lambda / T;$$

这种表现在电磁波可以产生干涉，衍射，偏振及色散等物理现象。

可是电磁辐射（光）的波动学说却无法解释光化学作用和光电效应等现象。光电效应实验证明，对某种而言，入射光的频率只要大于某一阈值，即使光照强度较弱，也有光电效应发生；低于此频率，任你增加光照强度和时间，均不能产生光电效应。

爱因斯坦 1905 年首先提出光子理论，指出电磁辐射不仅在发射或被吸收时以能量为 $h\nu$ 的微粒形式出现，而且以这种形式在空间传播，这种微粒叫“光子” (photon) 或光量子。当频率为 ν 的光照射到某种金属表面时，光子整份能量 $h\nu$ 被自由电子吸收；电子将能量一部分用来克服金属表面的束缚力(既化为脱出功 W)，余下部分作为电子离开金属后的动能($mv^2/2$)。

即：
$$h\nu = W + mv^2/2$$

对于各种金属，均可按上述方程式求出其产生光电效应的最低频率或最大波长。

光电效应有力地证明了电磁辐射实质上是光子微粒流的有规律的运动。“波”是微粒流的宏观统计平均状态。“粒子”是波的微观量子化，这便是“波粒二象性”。电磁辐射在传播过程中，主要表现为波动性，当其与物质相互作用时，则主要表现为粒子性；波长越短的辐射粒子性越明显，波长较长的辐射波动性更明显。

电磁波有 4 个基本要素，即频率(或波长)、传播方向(transmission direction)、振幅(amplitude)及偏振面(plane of polarization)。振幅表示电场振动的强度，振幅的平方与电磁波具有的能量大小成正比。从目标物体中辐射的电磁波的能量叫辐射能。包含电场方向的平面叫偏振面，偏振面方向一定的情况叫直线偏振。

这 4 个基本要素与电磁波所具有的信息相适应。频率(或波长)对应于可见光领域中目标的颜色，包含了与目标有关的丰富信息。在各个波长中表示目标体辐射能量大小的曲线反映了该固有物体的形状。在微波领域，根据目标和飞行平台的相对运动，利用频率上表现的多普勒效应可以得到地表物体的信息。物体的空间配置及形状等，可以根据电磁波传播的直线性从传播方向上知道。此外，也可以从电磁波的强度即振幅中得知。当电磁波反射或散射的时候，偏振的状态往往发生变化，此时，电磁波与反射面及散射体的几何形状发生关系。偏振面对于微波雷达是极为重要的，因为从水平偏振和垂直偏振中得到的图像是不同的。

三、电磁波谱

实验证明，不同辐射源产生的辐射，如 γ 射线，X 射线，紫外线，可见光，红外线，微波，无线电波等等，都是电磁波。只是波长(或频率)不同，能量高低不同而已。按波长(或频率)将它们顺序排列，画成图表，叫“电磁波谱”(electromagnetic spectrum)。如图 2—3 所示。

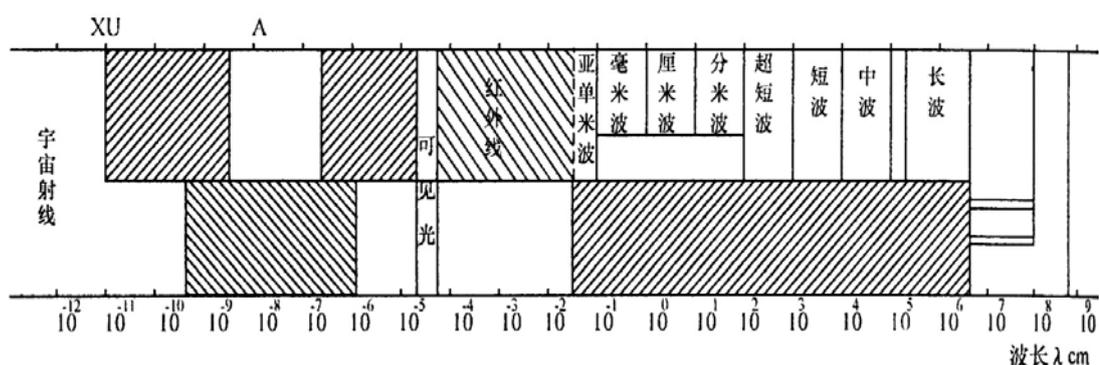


图 2—3 电磁波谱图

遥感中采用的电磁波波段，可以从紫外一直到微波波段。

一般把波长大于 1 米的称为无线电波，它们是由电容和电感振荡回路通过偶极天线 向外界辐射的。由于辐射强度随频率四次方下降，波长大于几百千米的低频电磁波没有什么实用价值，实用的无线电波波长小于几

千米。微波是以厘米波为中心的无线电波波段的总称。人眼可见的电磁波段称为可见光。我们平常说的光就是指可见光。根据它们的波长或频率，可划分为七种单色波。

红色波 $0.75 \sim 0.62 \mu$ (微米)

橙色波 $0.62 \sim 0.59 \mu$

黄色波 $0.59 \sim 0.56 \mu$

绿色波 $0.56 \sim 0.50 \mu$

青色波 $0.50 \sim 0.48 \mu$

蓝色波 $0.48 \sim 0.45 \mu$

紫色波 $0.45 \sim 0.40 \mu$

其它一些电磁波波长范围如下：

γ 射线 波长小于 0.3 埃

X 射线 波长 0.3 埃 \sim 3 纳米

紫外线 波长 3 纳米 \sim 0.4 微米

可见光 0.4 微米 \sim 0.75 微米

近红外 0.75 微米 \sim 3 微米

中红外 3 微米 \sim 6 微米

远红外 6 微米 \sim 15 微米

超远红外 15 微米 \sim 1000 微米

毫米波 1 毫米 \sim 10 毫米

厘米波 1 厘米 \sim 10 厘米

分米波 10 厘米 \sim 1 米

超短波 1 米 \sim 10 米

短波 10 米 \sim 100 米

中短波 100 米 \sim 1000 米

长波 1000 米 \sim 3000 米

注：1 毫米 (mm) = 1000 微米 (μ m)

1 微米 (μ m) = 1000 纳米 (nm)

1 纳米 = 10 埃 (\AA)

§ 2—2 电磁辐射源

凡是能够产生(或发射)电磁辐射的物体,都是电磁辐射源。它分为天然电磁辐射源和人工辐射源。

一、天然电磁辐射源

在地球环境中,最强大的天然电磁辐射源是太阳。它是当前航天,航空可见光及近红外遥感的主要辐射源。地球本身也是天然电磁辐射源,是目前远红外遥感的主要辐射源。

(一) 绝对黑体辐射

绝对黑体(有时简称黑体)是在一定温度下各波长的电磁波都达最大出射度的物体。或定义为能全部吸收投射到其表面的电磁辐射能的物体。

绝对黑体的辐射出射度 M_b 是波长 λ 和绝对温度 T 的函数。用普朗克公式描述为:

$$M_{b(\lambda T)} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{hc/\lambda K T} - 1}$$

式中 M_b : 单位表面积上单位时间内,黑体辐射出的能量在单位波长内的大小 ($W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)

λ : 波长 (μm)

T : 绝对温度 (K)

h : 普朗克常数 ($6.626 \cdot 10^{-34} W \cdot S^2$)

C : 电磁波传播速度 ($2.998 \cdot 10^{10} cm \cdot S^{-1}$)

K : 波尔兹曼常数 ($1.38 \cdot 10^{-23} W \cdot S \cdot K^{-1}$)

设 $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \cdot 10^{-16} (W \cdot m^2 \cdot \mu m^{-1})$

$C_2 = hc/K = 1.43879 \cdot 10^4 (\mu m \cdot K)$, 则上式可简化为:

$$M_{b(T)} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \approx \sigma T^4$$

此式称为斯蒂芬—玻尔兹曼定律。

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} (W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-4})$ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数。

该定律说明黑体在一定温度下的总出射度 $M_{b(T)}$ 与绝对温度 T^4 成正比。

当温度 T 不同时,黑体辐射出射度达极大值处波长 λ_{max} 也随着变化。

如图 2—4,从图中可知,当温度 T 增加时 λ_{max} 向短波。用维恩公式表示为:

$\lambda_{max} * T = C_2 / 4.96511 = 2897.8$ 此式称为维恩位移定律。

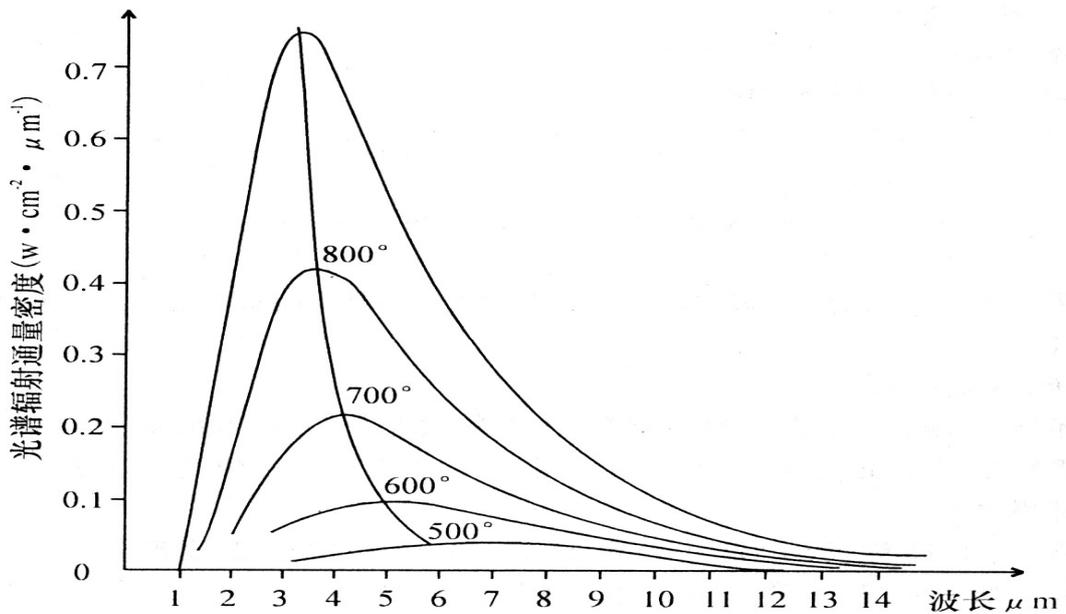


图 2—4 维恩位移定律

从上式中计算出给定温度 T 所对应的 λ_{\max} ，列于表 2—1，从表中可知，常温为 27°C ($K=300$) 时，黑体辐射的极大值波长在 $10\mu\text{m}$ 附近， T 达到 1000K 时， λ_{\max} 在 $2.9\mu\text{m}$ 附近，只有 T 升高到 400K 以上时， λ_{\max} 才进入可见光波段范围内。

表 2—1

$T(\text{K})$	300	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
$\gamma(\mu\text{m})$	9.66	5.80	2.90	1.45	0.97	0.72	0.58	0.48

从图 2—4 可以看出，每条曲线彼此并不相交；温度越高，所有波长的辐射通量密度也越大。总之，温度是一个决定因素，任何黑体，只要温度一定，它的热辐射光谱曲线，能量大小，及相应峰值波长均可求得。因此，黑体被广泛用作热辐射测量的标准辐射源。

(二) 实际物体辐射

1. 发射率

绝对黑体是一种理想的辐射体，自然界中很难发现这样的物体。自然界中的实际物体，在一定温度下只能吸收投射到其表面的部分电磁辐射，即吸收率 $\alpha < 1$ 。为了说明实际物体的辐射特性，引入发射率 ε 。我们把实际物体辐射出射度 $M_e(\lambda, T)$ 与同温黑体辐射出射度 $M_b(\lambda, T)$ 之比定义为发射率 ε

$$\varepsilon_{(\lambda T)} = M_{e(\lambda T)} / M_{b(\lambda T)}$$

由于实际物体出射度总是小于黑体出射度(同温条件下),所以 $0 < \varepsilon < 1$ 。

2. 灰体和选择性辐射体

实际物体可以分为灰体和选择性辐射体。灰体是在整个电磁波谱范围内发射率都为常数的物体;选择性辐射体的发射率则随波长的变化而变化。如图 2—5 表示黑体、灰体、选择性辐射体发射率的关系。

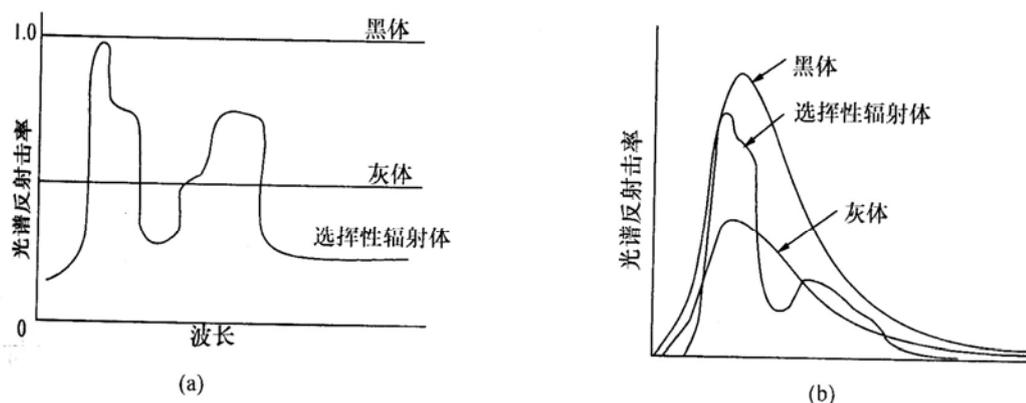


图 2—5

自然界中大多数物体都可以近似地看作灰体。则灰体的总出射度 M_e 为: $M_{e(T)} = \varepsilon \sigma T^4$, 此式说明灰体的辐射能量等于同温度黑体的辐射能与灰体的发射率之乘积。

3. 基尔霍夫定律(Kirchhoff's law of radiation)

早在 1860 年基尔霍夫就通过试验发现物体的辐射出射度 M_e 与吸收率 $\alpha_{(\lambda T)}$ 之间的内在联系: 吸收率高的物体, 出射度也大。且发现下述关系式成立

$$M_{e(\lambda T)} / \alpha_{(\lambda T)} = M_{b(\lambda T)}$$

黑体的辐射出射度 $M_{b(\lambda T)}$, 与物体性质无关, 仅与 λ , T 有关, 其吸收率 $\alpha = 1$ 。对于黑体而言 $M_e = M_b$, 这就是基尔霍夫定律用于不透明材料(半无穷浓度材料)的结果。说明好的吸收体也是好的发射体, 反之亦然。

(三) 太阳辐射

太阳是一个表面温度达 6000°K 的炽热发光体。可近似把它看成一个黑体。太阳辐射到达地面之前, 要穿过地球大气层, 其能量一部分被云层反射, 一部分被大气吸收, 一部分被大气散射, 经过地球大气层后到达地面的能量约为 17.3×10^{23} 尔格/秒

在太阳电磁辐射中，不同波长的辐射能量大小是不同的，太阳辐射能量绝大部分分布在 $0.3\sim 3.0\mu$ 范围内，可见光的辐射强度最大，可见光和红外两部分的辐射能量占总辐射能的 90%以上，微波波段的辐射能量极为微弱。

太阳辐射通常用太阳常数和太阳光谱辐照度表示

1. 太阳光的光谱特性(如图 2—6 所示)

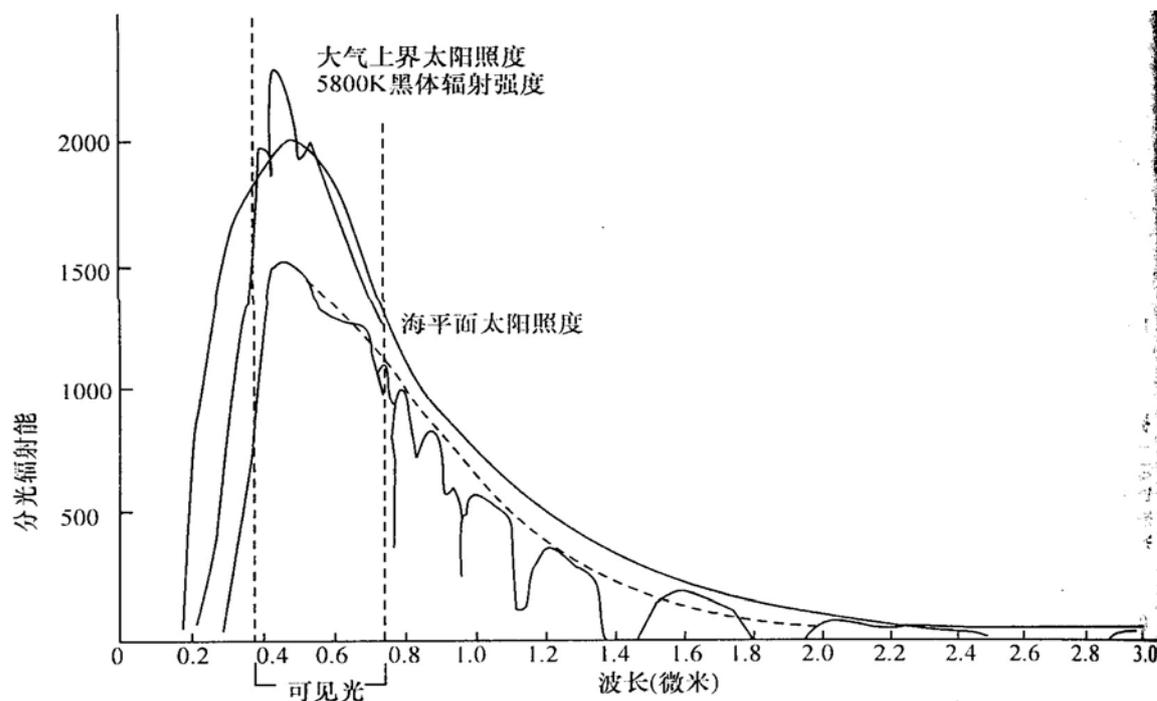


图 2—6 太阳辐射度分布曲线

其中上面那根连续曲线给出了大气上界太阳照度。太阳照度的最大值位于 $0.47\mu\text{m}$ 波长下，大约 $1/4$ 的太阳辐射能在波长 $\lambda < 0.47\mu\text{m}$ 的波谱区内；太阳辐射能总数的 46% 在 $0.40\sim 0.76\mu\text{m}$ 的可见光谱段。图中虚线代表 $T=5800^\circ\text{K}$ 时黑体辐射照度。图中最下面的曲线表示海平面上阳光直射时的辐照度。两条连续曲线之间的差值表示大气散射和吸收所引起的衰减。

2. 太阳常数 S

用来表示太阳的电磁辐射。

是指大气层顶部之上，平均日—地距离处，垂直于太阳射线的单位面积上，单位时间内接受到的太阳辐射总能量。其数值约为 1400 瓦/米^2 它是有周年变化的。

3. 太阳的光谱辐照度 E_0

它主要取决于日—地距离和太阳高度角的变化。设太阳高度角为 θ ，AC 为垂直于入射方向的平面，AB 为水平面，如图 2—7。

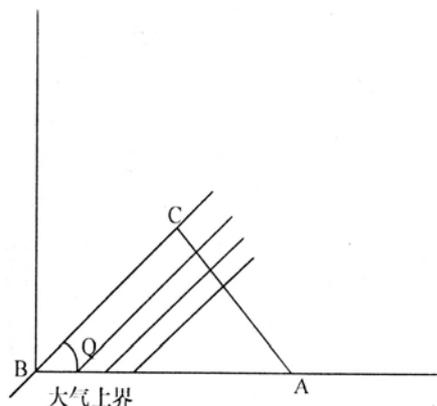


图 2-7

则 $AC=AB\sin\theta$

太阳常数是太阳电磁辐射各波长能量的总值。若用 $S(\lambda)$ 表示单位波长的太阳常数，则有：

$$S = \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda$$

大气上界 AB 面上的辐射照度 E_0 与 S 的关系为：

$$E_0 = S * \sin\theta = \sin\theta * \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda$$

综合考虑日—地距离和太阳高度角的变化，得：
$$E_0 = \left(\frac{Y_0}{Y}\right)^2 * S * \sin\theta$$

其中 Y_0 ：日地平均距离； Y ：日地瞬时距离，因此，大气上界的太阳辐射照度与日地瞬时距离的变化率的平方成正比，与太阳高度角的正弦成正比。

据测，在近日点 E_0 比 S 大 3.4%；在远日点 E_0 比 S 小 3.5%。故日—地距离变化的影响，一般可忽略不计。

太阳高度角随纬度、时间变化，关系式如下：

$$\cos\theta = \sin\Phi \cdot \sin\delta + \cos\Phi \cos\delta \cdot \cos t。$$

其中， Φ ：地理纬度； δ ：太阳赤纬，即太阳光线与地球赤道面的夹角； t ：太阳时角，当地方时为 12 时时， $t=0$ ，地方为 6 时时， $t=-\pi/2$ ，地方时为 18 时时， $t=+\pi/2$ 。

可见，不同时间，不同纬度上的太阳辐照度不同。

(四) 地球的电磁辐射

地球是另一个大的天然电磁辐射源。地球除以反射太阳辐射的方式以外,还可以火山喷发、温泉、大地热流等形式向宇宙空间不断地辐射能量。每年通过在地面流出的总热量 $1 \times 10^{21} \text{J}$ 。

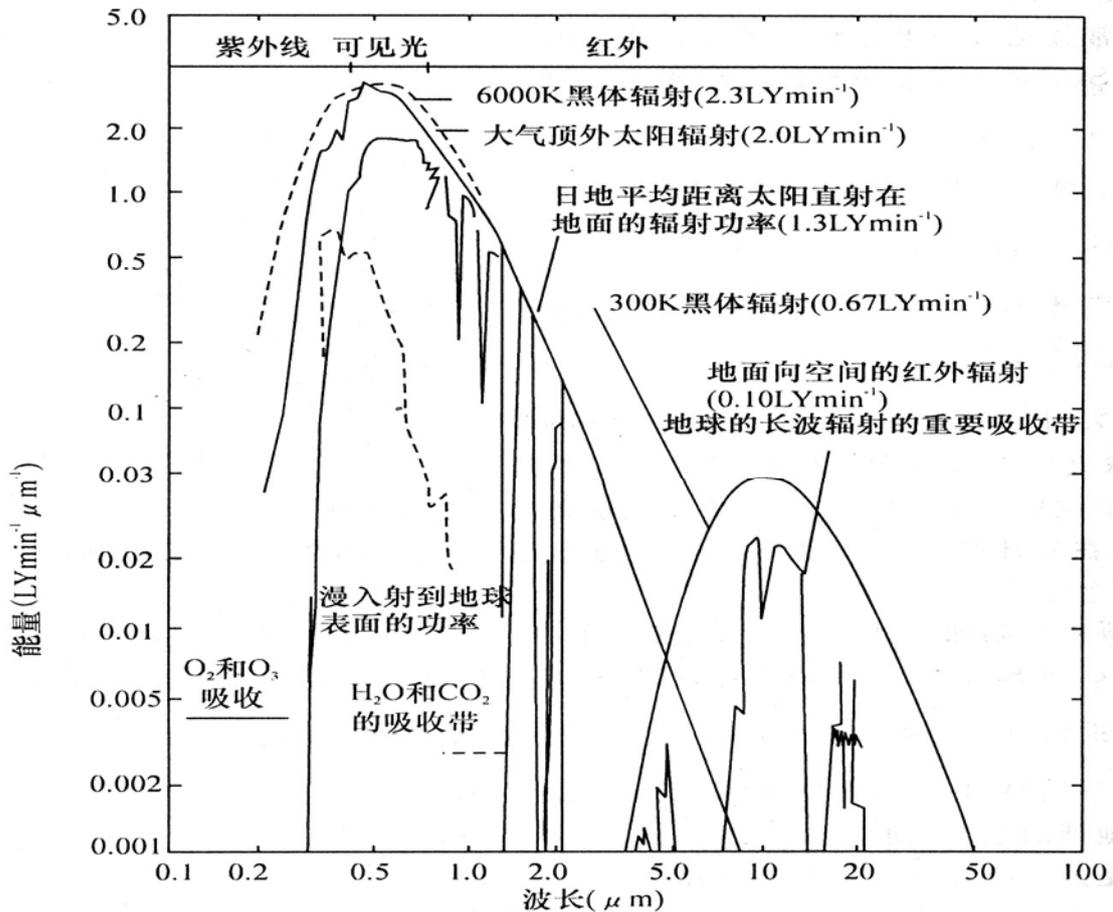


图 2—8

地球的电磁辐射特性如图 2—8。右下方那条平滑的曲线代表黑体在 300K 时的辐射能;下面那条不规则的曲线代表地球表面的实际辐射能。从图中可见,地球辐射能量集中在远红外及中红外波段,其峰值波长在 $9.7 \mu\text{m}$ 处。这是由于地球表面的平均温度约 27°C , 接近 300K, 故可被 300K 黑体光谱辐射曲线所包络。图中左边为太阳辐射波谱曲线,它与地球的辐射波谱曲线在波长约 $3 \mu\text{m}$ 处相交。由此可知,当我们对地面目标进行遥感时,传感器接收到的波长小于 $3 \mu\text{m}$ 部分,主要是地物反射太阳辐射的能量;波长大于 $3 \mu\text{m}$ 部分,主要是地物自身的发射辐射(热辐射)能量(在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 内,反射太阳辐射能量也不可忽略)。

二、人工电磁辐射源

人工电磁辐射源用于主动遥感之中。辐射源直接安装在传感器里，产生所需波长(或频率)和功率的电磁辐射能。如侧视雷达系统中的微波脉冲发生器，激光雷达中使用的脉冲输出激光器等。在资源遥感中，比较常用的是微波侧视雷达。

(一) 微波辐射源

微波属于无线电波中波长最短，频率最高的部分。这种超高频电磁振荡主要由微波谐振器来产生。微波谐振器一般是指一个由任意形状的导电壁所封闭的体积(或空腔)，其内能产生高频电磁振荡。

微波之所以被遥感技术所采用，主要是由于它具有如下特点：

1. “似光性”传播特性与可见光相似；
2. 频率高，可用频带宽，信息容量大；
3. 可穿透电离层，是人类探测外层空间的“宇宙窗口”；
4. 具有一定穿透性。如波长为 3.2cm 微波束，穿过 4000m 厚度的云层，只衰减 1dB，大气影响可忽略不计。可穿透干沙土几十米，可穿透冰层上百米。

(二) 激光辐射源

“激光”是 60 年代发展起来的一种新型人工辐射源。它具有方向性好，亮度高，单色性和相干性强等优异特性。

激光是由各类激光器发射的。按工作物质有固体、气体、液体、半导体、染料等激光器；按输出方式分，又有连续输出激光器，脉冲输出激光器。这些激光器的发射波谱，短波端可至 0.24 μm 下，长波端可达 1000 μm 以至微波，输出功率低者几微瓦，高者达几兆瓦以上。

激光在遥感技术中的应用日益广泛，如用激光雷达，可精确测定卫星的位置、高度、速度等；可测量地形，绘制地图，记录海面波浪的情况；还可利用物体的散射性能及荧光、吸收等性能监测污染及勘察资源。

§ 2—3 地物的电磁辐射特性

任何物体对外来电磁波均有反射、吸收和透射作用。同时，任何物体只要其温度高于绝对零度就会不断地向外界发射电磁波(热辐射)。在入射电磁波与反射、吸收、透射电磁波之间，遵循能量守恒定律，即：

$$E = E_0 + E_r + E_p$$

α : 吸收率, 即吸收功率与入射功率的比值

$$\alpha = \frac{E_0}{E}$$

τ : 透射率, 即透射功率与入射功率的比值

$$\tau = \frac{E_t}{E}$$

ρ : 反射率, 即反射率与入射功率的比值

$$\rho = \frac{E_r}{E}$$

则有 $\alpha + \tau + \rho = 1$

吸收率, 反射率, 透射率分别表示物体对外来电磁波吸收, 反射和透射能力的大小。不同物体, 这些能力各不相同。另外, 不同物体发射电磁波的能力也各不相同, 地物对外来电磁波的反射、吸收、透射以及地物本身发射电磁波的特性, 即地物的电磁辐射特性中, 都含有丰富的遥感信息, 是遥感据以探测和识别各种目标物的依据。目前遥感传感器所能接收、探测的主要是地物反射、发射的电磁波信息。因此, 本节主要讨论地物反射和发射电磁波的特性。

一、地物反射电磁波的特性

根据电磁波理论, 当电磁波从较稀疏的介质(如空气)入射到较密的介质(如物体)界面上时, 将产生反射。此时电磁波与物体相互作用, 实际上是累积地发生在物体表面以下, 发生在构成表面的物质内部, 并产生不同程度的内反射, 散射及绕射效应。但对绝大多数天然表面而言, 这种表层内部效应极小, 一般情况下可忽略不计, 故可认为反射基本上发生在物体的表面上。

(一) 不同界面的反射形式

根据界面平滑程度的不同, 有镜面反射, 漫反射和混合反射三种。不过, 界面的平滑程度是相对的, 应由入射电磁波的波长与界面起伏高度之比来确定。

当界面起伏高度以相对于入射电磁波的波长而言很小(即界面光滑)时, 产生镜面反射。反射电磁波具有严格的方向性(反射角等于入射角)位相相干, 并有偏振化现象。

当界面起伏高度相对于入射电磁波而言比较大(即界面粗糙)时,产生漫反射。它没有方向性。均匀的漫反射面称为朗伯面。朗伯面反射的电磁波在各个方向上辐射亮度值相同,漫反射的电磁波位相不相干,也无偏振化现象。

当界面起伏高度介于上述两种情况之间(中等粗糙)时,则产生混合反射;不同方向上反射电磁波强度不同,在相当于镜面反射的方向上反射能量较强。

从上可见,不同界面对同一波长的入射电磁波可产生不同的反射;而同一界面对不同波长的入射电波也可产生不同的反射。如平坦的沙地表面;对可见光将产生漫反射,而对微波,则产生镜面反射。 :

(二)地物反射电磁波的特性

遥感技术中,除了用反射率 ρ 外,还常用亮度系数 γ 来表示地物反射电磁波能力的大小。亮度系数是指在相同照度条件下,某物体表面亮度

B , 与纯白理想表面亮度 B_0 之比, 即
$$\gamma = \frac{B}{B_0}$$

通常用白色标准板代替纯白理想表面。

对于朗伯面,在各个方向上反射亮度值相同;而非朗伯面,在各个方向上反射亮度值不相同,一般以法线方向为准,叫法向亮度系数。

白色太阳光的照射下,物体的亮度系数具有不同特点;不同物体亮度系数变化幅度很大;干的表面比湿的表面亮度系数大;光滑表面亮度系数较大;浅色物体亮度系数较大。

实际上,同一物体对不同波长的电磁波反射能力也不同,因而还常用光谱反射率 ρ_λ 和光谱亮度系数 γ_λ 来反映物体对一定波长的电磁波的反射能力。

$$\rho_\lambda = \frac{\text{在 } (\lambda \pm \frac{1}{2} \Delta\lambda) \text{ 微小波长范围内反射电磁波的能量}}{\text{在 } (\lambda \pm \frac{1}{2} \Delta\lambda) \text{ 微小波长范围内入射电磁波的能量}} * 100\%$$

$$\gamma_\lambda = \frac{\text{物体表面在 } (\lambda \pm \frac{1}{2} \Delta\lambda) \text{ 微小波长范围内反射亮度的能量}}{\text{纯白表面在 } (\lambda \pm \frac{1}{2} \Delta\lambda) \text{ 微小波长范围内反射亮度的能量}} * 100\%$$

可见，地物的光谱反射率或光谱亮度系数是入射电磁波波长的函数，这个函数关系称为地物的反射光谱特性。通常以横坐标代表波长，以纵坐标代表光谱反射率或亮度系数，所做出的相关曲线表示，不同地物其反射特性曲线形状不同，这正是遥感识别和区分不同目标的依据所在。因此，详细地研究和测量各种地物的反射光谱特性，是遥感技术中一项十分重要的基础研究工作。

如图 2—9 是几种主要地物的反射光谱曲线，由图可以看出，雪在可见光波段(0.4~0.7 μ)是高反射体，呈耀眼的白色，在蓝光 0.49 μ 附近有个峰值，随波长的增加，反射率逐渐降低。沙漠的反射率在橙色(0.6 μ)附近有个峰值，但随波长的增加，它比雪的反射率大。湿地在整个波长范围内反射均较弱，故色调发暗。小麦叶子的反射光谱，它在绿色波长达(0.5~0.6 μ)有一个反射峰值，在近红外 0.8 μ 附近有一个强峰值。由于各自物体反射光谱特性不同，形成了各自物体的颜色不同，如雪呈白色，沙漠呈红褐色，小麦呈绿色。

同类物体由于内在的差异其反射率也是不同的。例如对植物来说，不同的植物它们的反射率是不同的，如图 2—10，是在实验室中用分光光度计测得棉花、番茄、玉米和柑桔的单片叶子的光谱反射率，以氧化镁标准白板的反射率作 100%，这些叶子在 0.55 μ 波长的附近都有极大值，说明它们呈绿色。在 0.68 μ 附近的吸收现象是叶子所含叶绿素的吸收作用。而在 0.7~1.4 μ 和 1.5~1.9 μ 的近红外波段处，反射值为极大。从该图中可

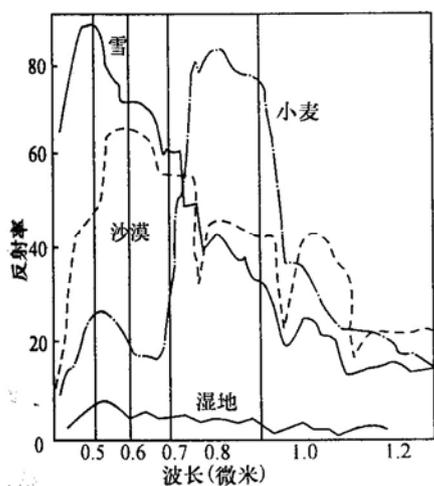


图 2—9 各种物体的反射率

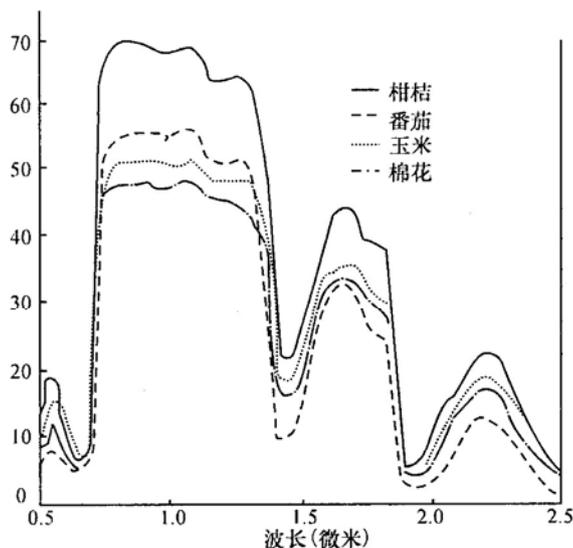


图 2—10 番茄、柑桔、玉米、棉花的光谱反射率

清楚看出：叶子种类不同，在绿色和近红外波段的反射率也有差异。

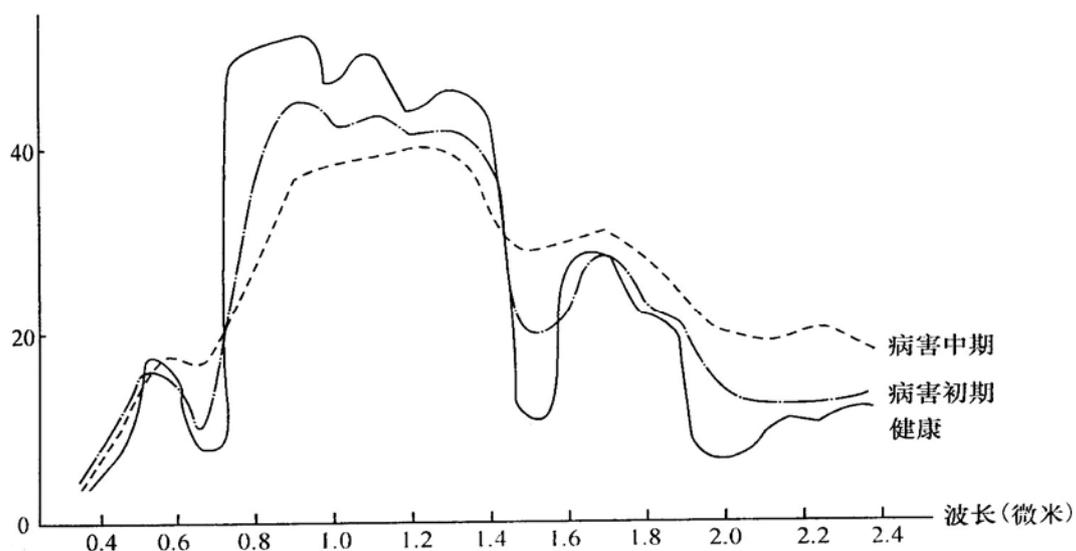


图 2—11 榕树的反射特性

同一种植物由于生长情况和健康程度不同，它们的反射率也有较大差异。如图 2—11，表示榕树健康叶子比病虫害的叶子在近红外波段反射率要高得多，根据这一重要特性，可以判断作物产量和防治农作物病虫害。植物在发生病虫害或由于环境变化而引起的生长障碍和受害情况下，初期在绿色光区几乎还没有发生什么变化的时候，在近红外波段就已出现减弱的趋势，因而在彩色红外像片上就呈现为蓝色调；受害加深，在人眼可以看到叶子发黄的时候，图像上的色调也变成黄色；当处于枯死阶段时刻变为白色色调。

同一种类的植物因生长期和季节不同，其反射率也不同。如图 2—12，反映出白橡树叶子在不同生长季节的反射率的变化。

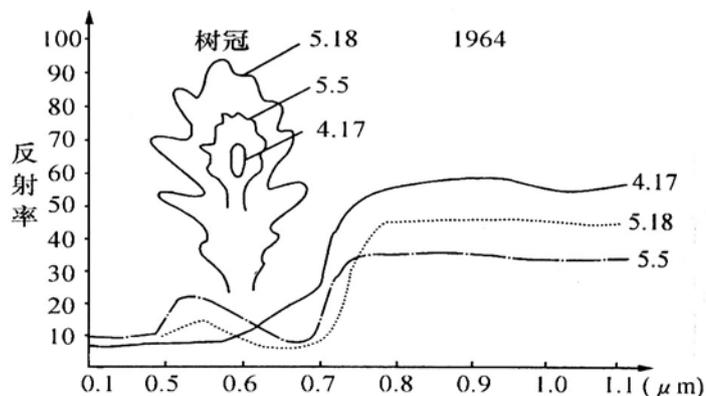


图 2—12 同类植物不同生长期的反射曲线

对于地面上几种主要地物类型的反射光谱特性曲线变化的一般规律可归纳为：

(1)土壤岩石类：波长小于1微米时，光谱反射率随波长增加而增大，接着增大的幅度变小，大于2微米后逐渐减小。

(2)植物类：波长小于0.5微米时，反射率低，0.5~0.55微米处有一小的反射峰值，0.68微米前后，叶绿素吸收，反射率很低，0.7微米开始反射率急剧增大，出现强峰值，1.5微米处也有一个低谷，1.7微米附近有一较强的峰值，2微米开始又逐渐下降。

(3)水类：波长在0.5~0.7微米处，相对反射率较大，0.7微米后由于水对红外光吸收严重，反射率很低。

(4)冰和雪：可见光部分反射率大，0.48~0.5微米附近为峰值，0.7微米以后反射率开始下降。

(三)地物颜色与反射光谱特性的关系

任何一种物体的颜色，都是它在可见光波段反射光谱特性的集中表现，因而是一种极富鉴别的重要特征。

遥感领域中，现已越来越多的使用各种彩色图像，除天然彩色航片外，还有假彩色红外航片，甚至还将多波段黑白像片采用种种方法合成各种形式的真、假彩色图像。¹

颜色是非彩色和彩色的总称。

非彩色是指白、灰、黑系列。

彩色是指白、灰、黑系列以外的各种色彩。

物体的颜色取决于它对光源发出的可见光的吸收、反射情况。

根据物体对光波的吸收特性，可将其分为消色物体和彩色物体两大类。

消色物体对入射白光中的各种色光的吸收是非选择性的。由 $\rho = 1 - \alpha$ 可知，若吸收光量极少，而反射光量很多的物体，呈白色；反之，若吸收光量很多，反射光量极少的物体，则呈黑色；中间是各种灰色。

彩色物体对入射白光具有选择性吸收的特性。有的色光吸收的多，有的色光吸收的少，所有反射色光的混合色便成为该物体的颜色。如，红花主要反射红色，绿叶主要反射绿色。彩色物体的色别，是其反射光谱曲线峰值波长的表征。

若光源的光谱成份改变，被照射物体的颜色也会随之变化。

如白纸，在红光照射下呈红色，在绿光照射下则呈绿色。若用红光照射绿叶，因红光全被绿叶吸收，无绿光反射，故呈黑色。

总之，各种物体对可见光均有固定的吸收、反射(或透射)的光谱特性，而无固定的颜色。物体的颜色是随光源的光谱成份的不同而变化的。

二、地物发射电磁波(热辐射)的特性

凡温度高于绝对零度(-273.16°C)的物体，都要不断地向外发射电磁波。地表环境中的各种物体当然概不例外，只不过由于各种物体的性质和温度不同，发射电磁波的能量和光谱成份不同而已。地物发射电磁波属长波辐射，能量主要集中在远红外波段。

地物的发射率随波长变化的函数关系，称为地物的发射波谱特性。

用地物的发射率与波长的相关曲线表示，称为地物的发射波谱曲线。

一般情况下，黑体和灰体的发射率主要随温度变化而变化；选择性发射体的发射率，主要取决于物体的热学特性且随波长变化而变化。同种物体在相同温度下其发射率又随物体的表面情况、颜色不同而不同，其基本规律是物体表面粗糙、颜色深者，其发射率大；反之则小。自然界中的物体，一般都视为灰体，它们的发射率除与其本身的性质有关外，还在很大程度上受温度的影响。

由基尔霍夫定律可知，在热平衡条件下，一种物体的光谱发射率必等于它的光谱吸收率，故在实际中，都用物体的光谱吸收率的测量，代替光谱发射率的测量，而光谱吸收率可用反射率来表示。因此，用测量反射率来代替吸收率更为方便。

总之，自然界中所有的物体，都以它们自身特有的规律来不等量地吸收、反射或发射电磁波，甚至同一物体的不同自然状态的吸收、反射、发射的电磁波也不同，这种特性叫物体的波谱特征。人们就是根据这些物体的电磁波特性的差异来判断物体的属性的。

§ 2—4 大气传输特性

一、大气成份

地球大气圈的厚度没有明显的界限，离地表高度增加，大气密度越来越小。直至 800km 高空仍有少量空气，一般认为大气厚度为 1000km。

大气是由多种成份组成的混合气体，可将它认为由两种类型的物体组成。

1. 分子：二氧化碳、臭氧、氮气等粒径小的分子。
2. 气溶胶、水汽、烟、尘埃等粒径大的气溶胶。由于有这些成份的存在，使太阳衰减和大气上界辐射不能全部到达地面。

二、大气的吸收

吸收太阳辐射的主要成份是水汽、臭氧和二氧化碳。太阳辐射被吸收后，使太阳辐射的连续光谱上产生许多吸收暗带。

1. 水汽的吸收

水汽吸收的波长很宽，对大气影响很广泛。在 0.94μ , 1.14μ , 1.87μ , 3.2μ 处有中等强度的吸收带，在 $2.5\sim 3.0\mu$, $5.0\sim 7.5\mu$ 两处有极强的吸收带，但主要吸收 $0.7\sim 3.0\mu$ 的红外线。

2. 臭氧的吸收

大气中臭氧的含量很少，只占 $0.01\sim 0.1\%$ ，但臭氧的吸收波长范围比较复杂。主要吸收波长短于 0.32μ 的紫外线。由于多种大气成份都吸收紫外线，故在遥感中很少应用紫外外波段。

3. 二氧化碳的吸收

主要吸收大于 2μ 的红外线，位于 2.7μ , 4.3μ , 14.5μ 处有很强的红外吸收峰。

三、大气散射

电磁波在大气中或在水中传播时，受到分子和微小粒子的散射。散射现象使辐射的能量偏离原来的传播方向，从而使入射能量随传播距离的增加而不断衰减。散射现象是界质不均匀性造成的。散射方程式因电磁波波长与散射体大小之间的相对关系而变。

1. 瑞利散射

散射粒子大小比起波长要小得多时粒子所引起的散射。

这种散射，散射波的强度与入射波的强度成正比，而与波长的四次方成反比，且具有方向性，短波散射强，长波散射弱。在可见光波段影响较大，对红外影响小，微波影响更小。

晴朗的天空呈蓝色，是由于蓝光的波长较红光短，蓝光散射较强，

红光散射较弱，彩色摄影时，加黄色滤光片，以抵消或减弱散射蓝紫光的影响，使像片不致产生蓝色灰雾。

2. 米氏散射

散射粒子大小比起波长要大的散射。

主要是由于大气中的烟尘、气溶胶等引起的。散射方向主要是向前散射，对传播方向的能量的衰减远比瑞利散射小。

3. 无选择性散射

微粒直径远比波长大的散射。

散射强度与波长无关。即等量散射各波长的太阳电磁辐射。

四、大气反射

大气中云层和较大的尘埃能将太阳辐射中的一部分能量反射到空中，从而削弱了到达地面的太阳辐射。云层的反射最重要，云量越多，云层越厚，反射作用越强。当云层厚度为 50m 时，反射量达 50%以上，厚度为 5000m 时，反射量超过了 80%。

大气中直径大于 10^{-4} cm 的微粒也有反射作用。

总之，在大气衰减太阳辐射的三种方式中，反射最重要，散射次之，吸收最弱。若把入射大气中的太阳辐射能作为 100%，则大气吸收的占 15%，被散射和反射回空间的占 42%，只有 43%的太阳辐射到达地面。

五、太阳直接辐射与天空辐射

太阳直接投射到地面的辐射叫太阳直接辐射；被大气散射后，由散射点自天空向地面的辐射为天空辐射。两者之和为到达地面的太阳辐射。

六、大气对太阳辐射的衰减

太阳电磁辐射与大气相互作用的结果，使能量不断减弱，其中反射作用影响最大。由于云层的反射对电磁波各波段都有强烈的影响，造成遥感的严重障碍。在大多数遥感方式中，都只考虑无云天气情况下的大气散射，吸收的衰减作用。同时假定大气层为平行平面层，这样大气的衰减作用就用散射系数 γ 和吸收系数 α 及综合影响系数 $K(\lambda h)$ 表示。 $K(\lambda h)$ 称为消光系数，它是 γ 、 α 和高度 h 的函数。

大气衰减作用的另一种表示方法是大气透过率，即透过地球大气的太阳辐射能与入射的太阳辐射能之比。它取决于太阳辐射能过大气的路程

长度和大气的散射率和吸收率。 $\tau\lambda = e^{-\alpha X}$ $\sigma = \alpha + \gamma$

其中 X: 太阳辐射通过大气的路程长度, σ 为衰减系数, $e=2.718$,
 τ : 透过率

可见光的衰减以大气散射为主, 紫外辐射和红外辐射的衰减以大气分子的选择性吸收为主。

七、大气窗口

电磁波透过地球大气时, 其衰减强度随波长而异。电磁波的某些波段, 大气对它们的衰减作用较小, 透过率比较高, 这些电磁波波段称为大气窗口; 那些衰减作用大, 透过率低的电磁波波段称为大气屏障。遥感技术的重要课题之一就是研究和选择有利的大气窗口, 以利于最大限度地接收有用信息。

从紫外到微波共分 11 个窗口。

1. 0.15~0.20 μ 远紫外窗口, 这一窗口透过率小于 25%, 在遥感技术中尚未应用。

2. 0.30~1.15 μ , 这个窗口包括了全部可见光波段, 部分紫外波段和部分近红外波段。这些波段通常只能以摄影和扫描成像方式在白天感测和收集目标信息。是遥感技术的主要窗口之一。

3. 1.4~1.9 μ 近红外窗口, 透过率变化在 60%至 95%之间, 其中尤以 1.55~1.75 μ 波段的窗口有利于遥感。

4. 2.05~3.0 μ 近红外窗口, 透过率一般超过 80%, 其中尤以 2.08~2.35 μ 波段的窗口有利于遥感。

5. 3.5~5.0 μ 中红外窗口, 透过率大约为 60%~70%, 白天、夜间都可应用, 是以扫描的成像方式感测、收集目标信息。

6. 8~14 μ 热红外窗口, 透过率超过 80%, 这也是遥感应用的主要窗口, 但在 9.6 μ 处有 O_3 的强吸收。

7. 15~23 μ 远红外窗口, 透过率小于 10%, 遥感技术尚不能应用此窗口。

8. 25~90 μ 远红外窗口, 透过率虽然到 40—50%目前遥感技术尚未实际应用此窗口。

敏度和能量转换灵敏度等。

辐射传输方程式就是用数学模型来表达上述能量及其影响因素。假设地面为朗伯面，且设传感器接收的辐射亮度为 L_λ 。 L_λ 包括两部分，即物体反射和发射的光谱亮度 $L_{\lambda A}$ 和大气向上散射的光谱辐射亮度 $L_{\lambda \mu}$ 。

$$L_\lambda = L_{\lambda A} + L_{\lambda \mu}$$

L_λ 的具体数学表达式如下：

$$L_\lambda = \frac{1}{\pi} \{ [E_{0\lambda} \tau_{\theta\lambda} \sin \theta + E_{\lambda A}] \rho_\lambda + E_{\lambda T} \} \tau_{\pi\lambda} K_\lambda + \frac{1}{\pi} E_{\lambda \mu} K_\lambda$$

式中： $E_{0\lambda}$ ：大气上界垂直于太阳入射线平面上的光谱辐照度，即太阳常数。

θ ：太阳高度角。

$\tau_{\theta\lambda}$ ： θ 方向的光谱大气透过度。

$E_{\lambda A}$ ：大气在半球空间的向下光谱散射照度。

ρ_λ ：物体的光谱反射率。

$E_{\lambda A}$ ：物体在半球空间的光谱出射度。

$\tau_{\pi\lambda}$ ：垂直向上的大气光谱透过率。

$E_{\lambda \mu}$ ：大气向上散射的半球空间照度。

K_λ ：仪器的光谱响应率。

对于接收反射辐射或发射辐射的传感器，可以分别忽略发射或反射能量，于是上式中的某些项可以省略，变成相应的传输方程。