Radiation

Jintai Lin

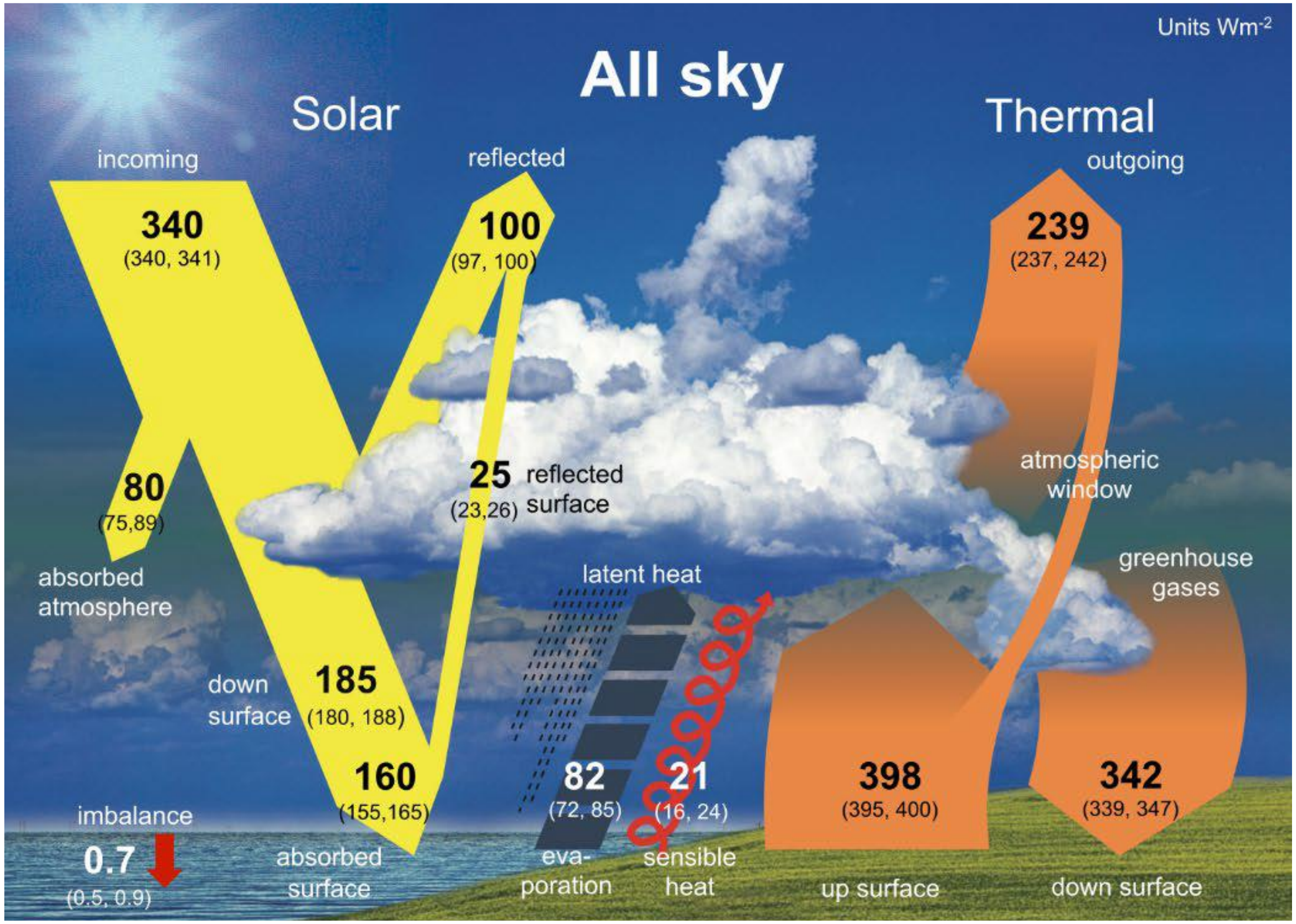
致谢：本课件中部分资料来自李成才老师（特别是关于辐射的部分）。

北京大學
PEKING UNIVERSITY

Outline

- Introduction
- Basics
- Absorption
- Scattering
- Radiative transfer
- Radiative equilibrium temperature
- Radiative heating and cooling

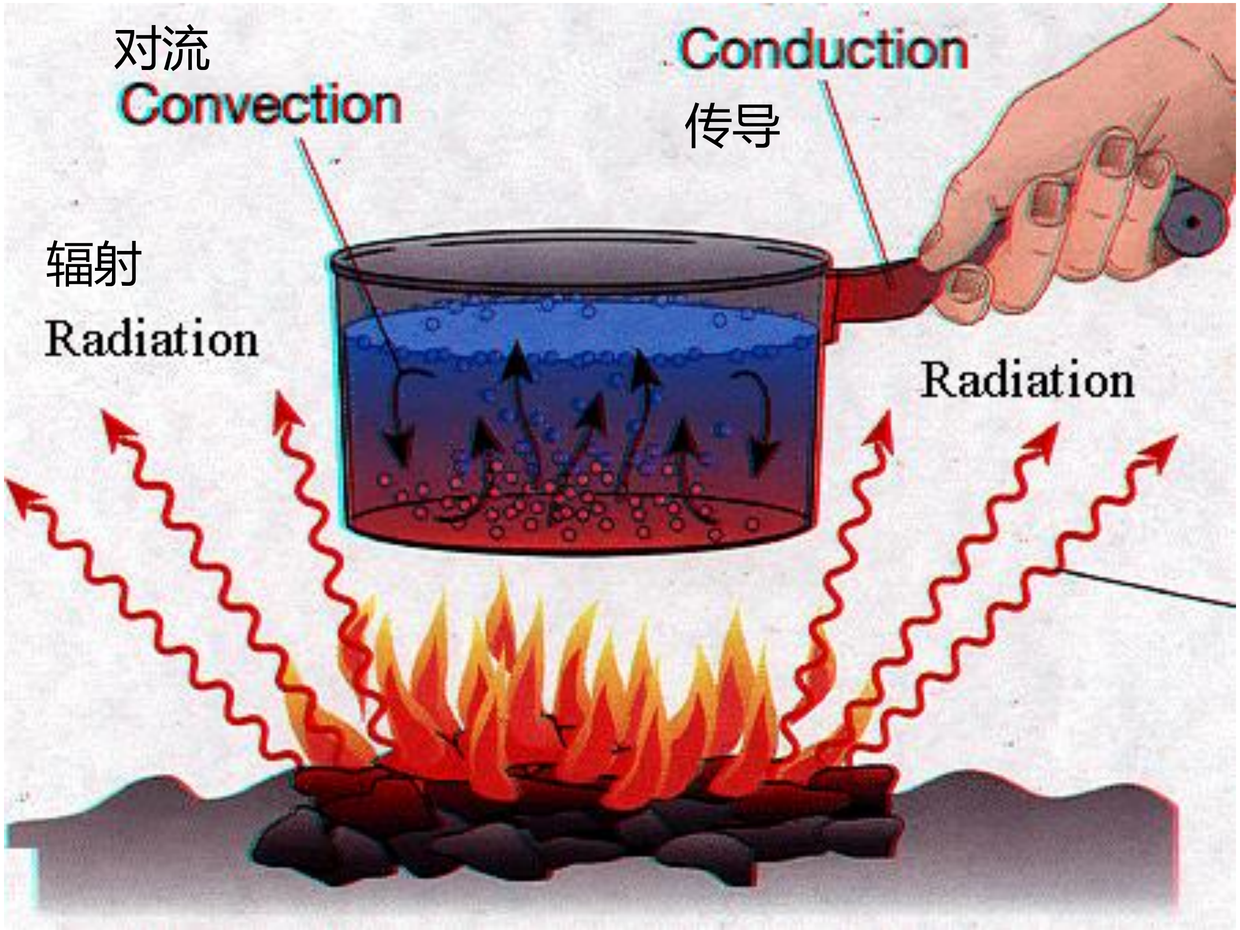
Earth Energy Balance



IPCC, 2021

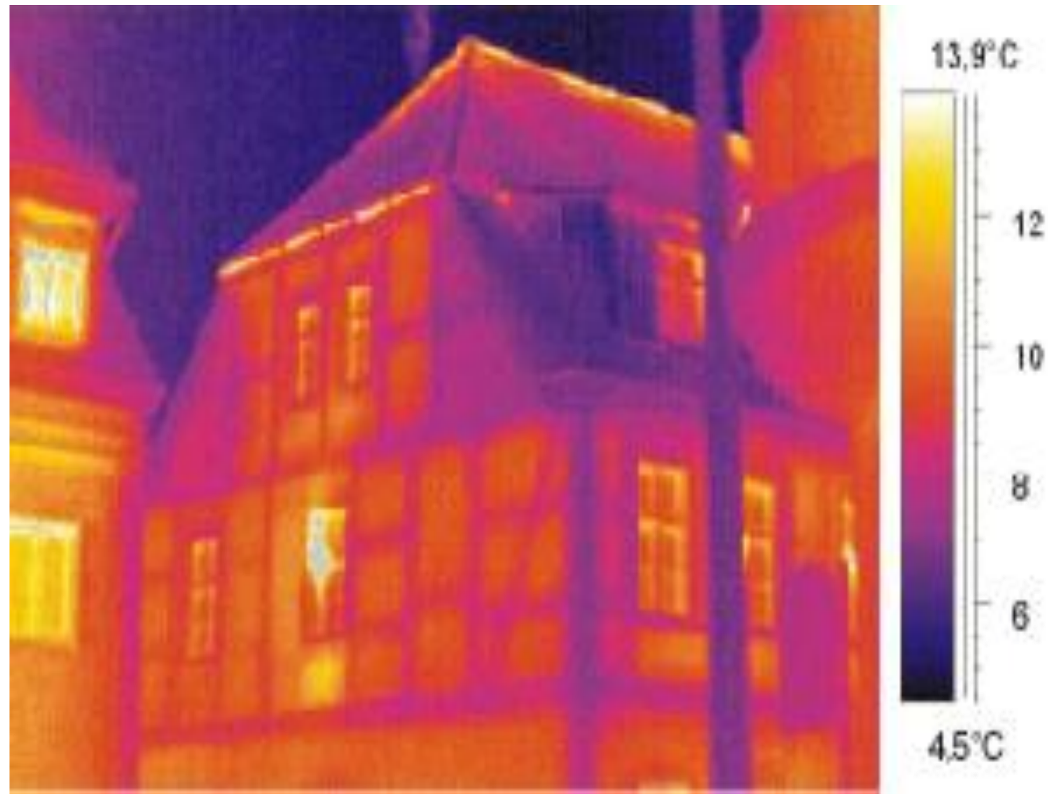
- Energy balance: Atmosphere 80+(398-40)+21+82-342-(239-40), Surface 160+342-398-21-82, Earth 340-100-239
- Planetary albedo: ～29% (surface 7%, atmosphere 22%)

Radiation: An Effective Way of Energy Transfer

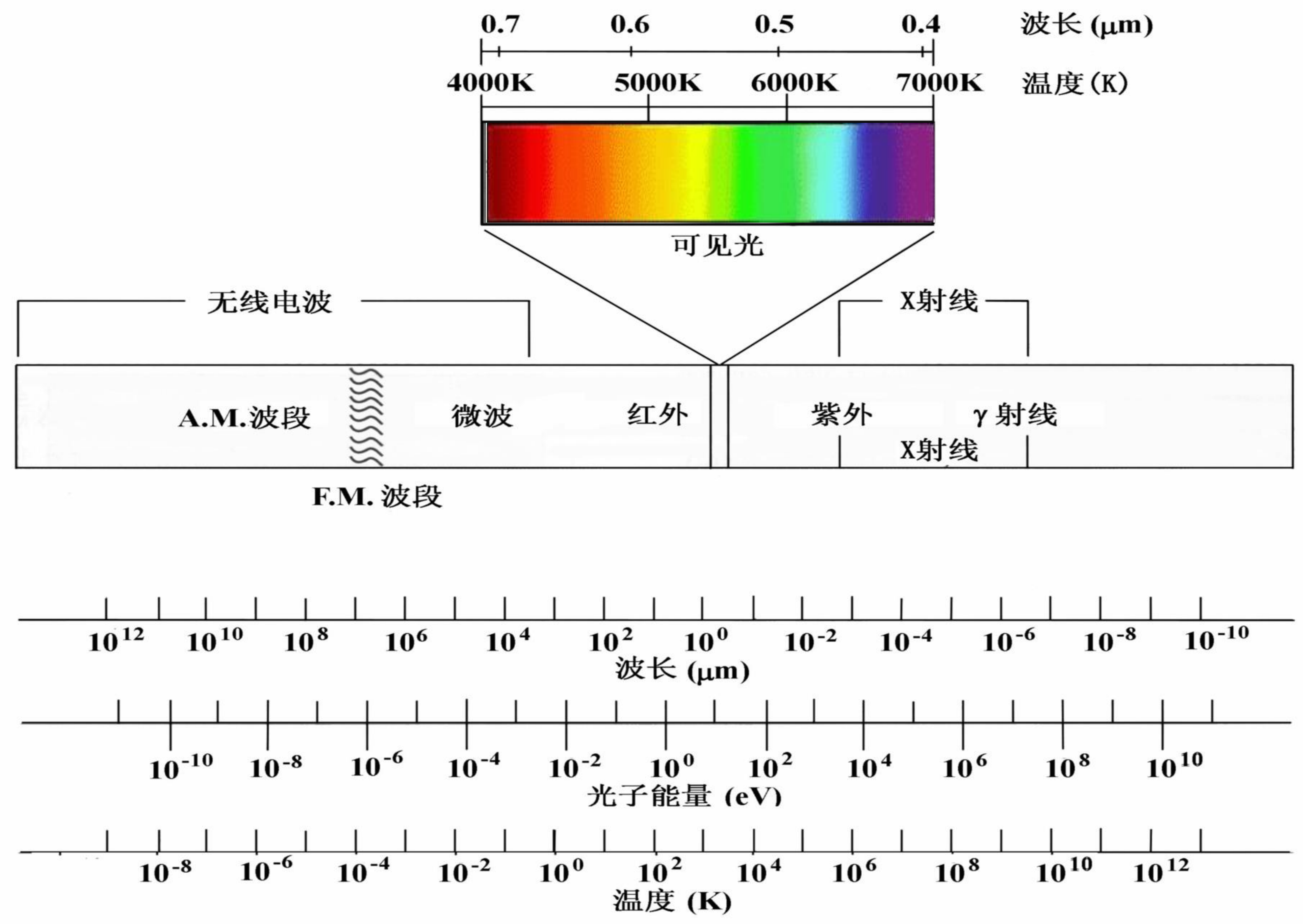


Thermal Radiation

地球<u>长波</u>辐射能量集中在波长10 μm附近



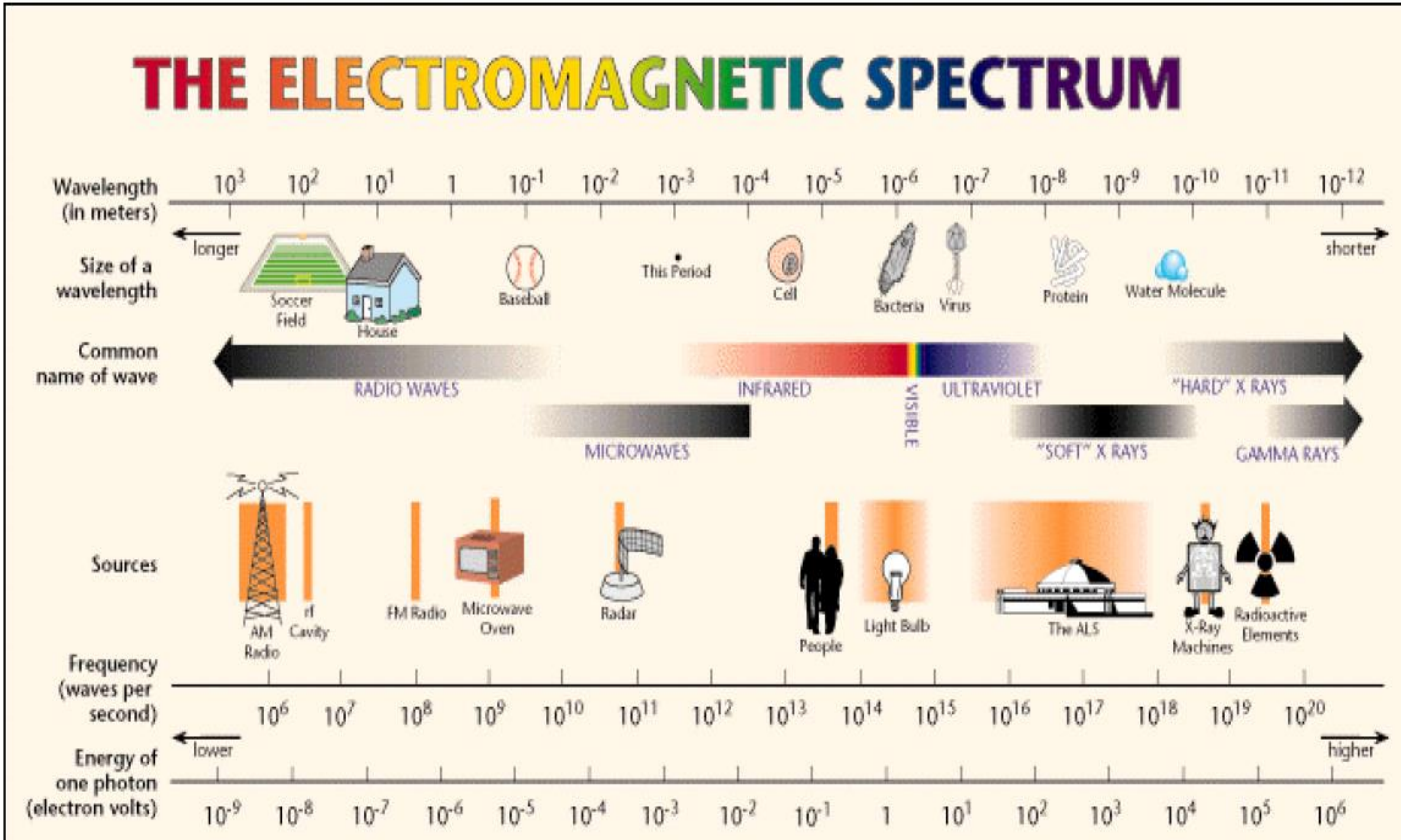
Electromagnetic Radiation Spectrum 电磁波谱



手机、微波炉：～1GHz，0.3m

1 eV = 1.6 x 10^{-19} J

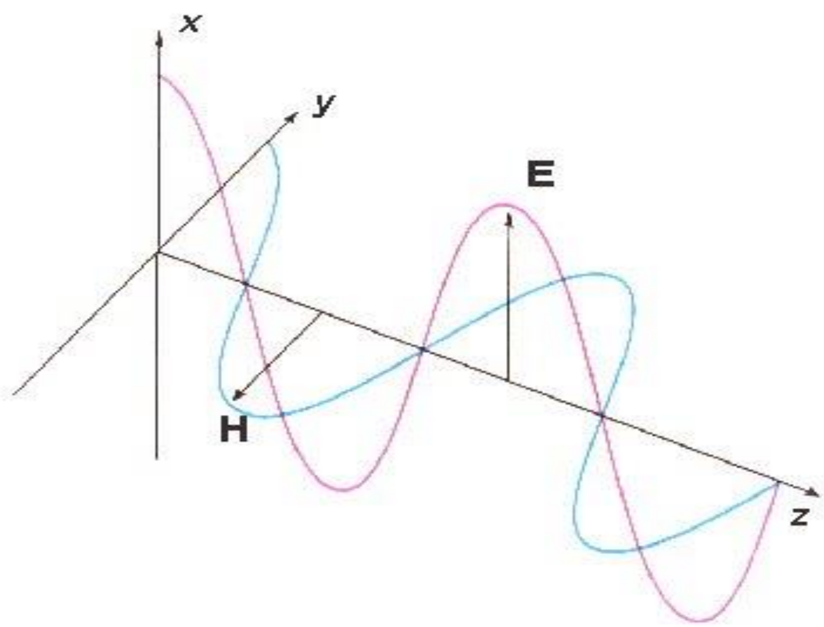
Radiation and Sources



大气科学相关的电磁波

Name of spectral region	Wavelength region, μm	Spectral equivalence
Solar	0.1 - 4	Ultraviolet + Visible + Near infrared = Shortwave
Terrestrial	4 - 100	Far infrared = Longwave
Infrared	0.7 – 100	Near infrared + Far infrared
Ultraviolet	0.1 – 0.4	Near ultraviolet + Far ultraviolet = UV-A + UV-B + UV-C + Far ultraviolet
Shortwave	0.1 - 4	Solar = Near infrared + Visible + Ultraviolet
Longwave	4 - 100	Terrestrial = Far infrared
Visible	0.4 – 0.7	Shortwave - Near infrared - Ultraviolet
Near infrared	0.7 – 4	Solar - Visible - Ultraviolet = Infrared - Far infrared
Far infrared	4 - 100	Terrestrial = Longwave = Infrared - Near infrared
Thermal	4 - 100 (up to 1000)	Terrestrial = Longwave = Far infrared
Microwave	10^3 - 10^6	Microwave
Radio	> 10^6	Radio

电磁波：一种电场和磁场的交变波动



- A schematic view of an electromagnetic wave propagating along the *z* axis.
- Electromagnetic radiation has the dual nature:
  - its exhibits wave properties and particulate properties.

Poynting Vector 能流密度适量

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

S is energy per unit time per unit area (e.g., W m^{-2})

E is electric field (unit: Volt/meter or Newton/Coulomb)

H is magnetic field (unit: ampere/meter)

In a propagating sinusoidal linearly polarized electromagnetic plane wave of a fixed frequency:

$$\langle \boldsymbol{S} \rangle = \frac{\mathbf{1}}{\eta} \cdot |\boldsymbol{E_m}|^2$$

E_m is the complex amplitude of the electric field
η is the characteristic impedance of the transmission medium,
or just $\eta_0 \approx 377\Omega$ for a plane wave in free space

Basic Concepts of Radiation

电磁波可以用角频率(angular frequency, ω)、频率(frequency, f)、波长(wavelength, λ)、波数(wavenumber, υ)和波速(speed, V)来描述

$$\omega = 2\pi f$$

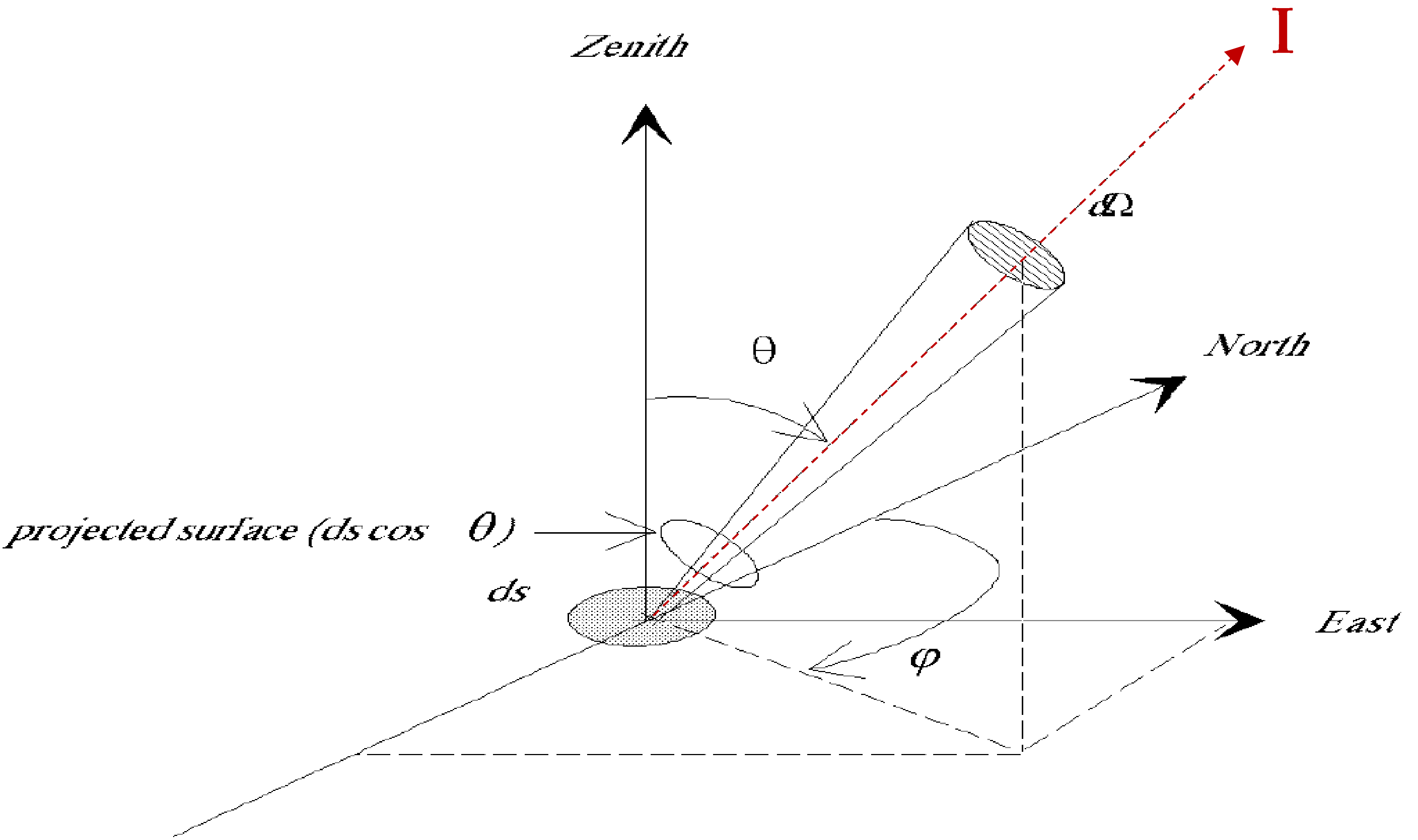
$$V = f\lambda \qquad\qquad df = ?\, d\lambda$$

$$\upsilon = 1/\lambda = f/V \qquad\qquad d\upsilon = ?\, d\lambda$$

波数变化1 cm^{-1}时，对应的波长变化：

- ✓ 在1000 cm^{-1} (10 μm) 处：10 nm
- ✓ 在10000 cm^{-1} (1 μm) 处：0.1 nm

Radiance or Intensity: （分光）辐亮度



Radiance or Intensity: （分光）辐亮度

- **Radiance is a 7-dimensional variable**

$$I(t; x, y, z; \lambda; \Omega) = I(t; x, y, z; \lambda; \theta, \varphi)$$

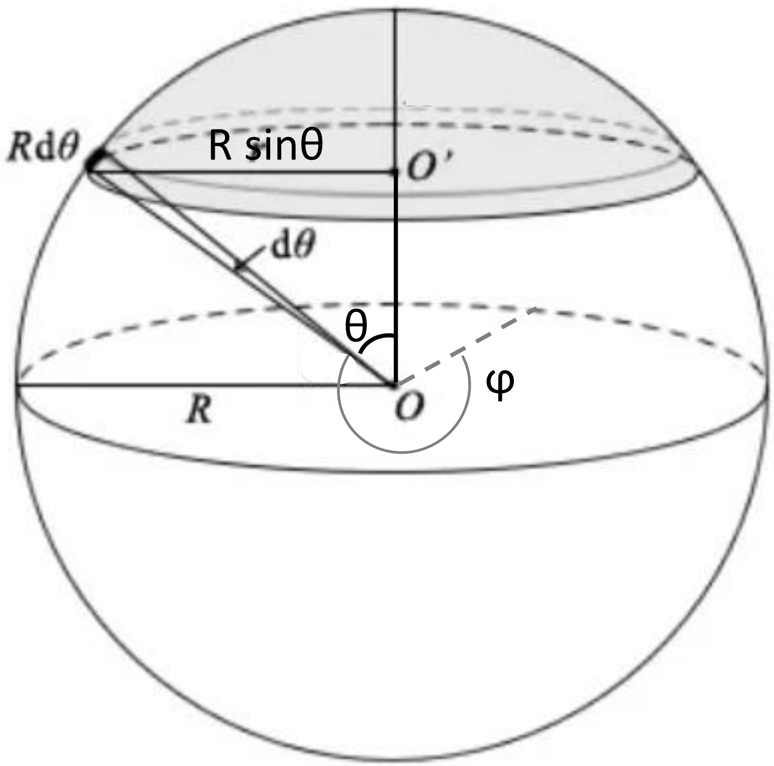
- **Radiance can be measured by photometer 光度计**
- **Monochromatic energy per unit time per unit area per solid angle**

$$I = dQ/dt/dA/d\lambda/d\Omega = dQ/dt/dA/d\lambda/(\sin\theta \, d\theta d\varphi)$$

Unit: $w/m^2/\mu m/sr$,   where sr = steradian 立体弧度

Ω = Solid angle 立体角, $d\Omega = \sin\theta \, d\theta d\varphi$

Calculation of Solid Angle



球面面积元

$$dS = R^2 d\Omega = R^2 \sin\theta \, d\theta d\varphi$$

球表面积 $$S = \oint_{\Omega} dS = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} R \cdot \sin\theta \, d\varphi \cdot R \, d\theta = 4\pi R^2$$

全空间立体角 $$\oint_{\Omega} d\Omega = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \sin\theta \, d\varphi \cdot d\theta = 4\pi$$

Radiance v.s. Flux Density

- **Flux Density or Irradiance（分光）辐射通量密度:**

$$F_\lambda = \int_\Omega I_\lambda \cdot \cos\theta \cdot d\Omega = \int_\theta \int_\varphi I_\lambda \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \, d\varphi \cdot d\theta$$

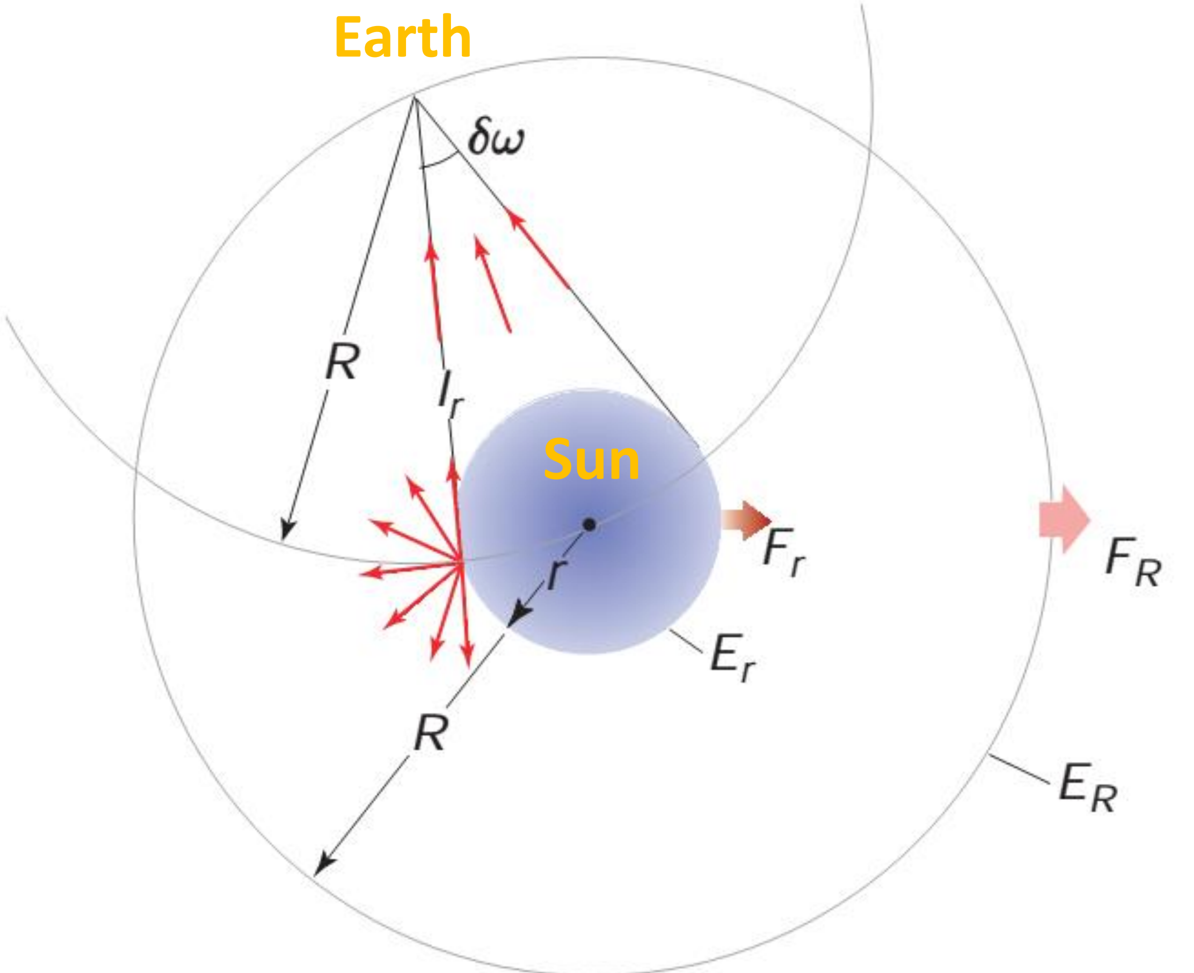
- **Within a range of wavelength:**

$$F_{\lambda_1,\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda \cdot d\lambda$$

平行光?

- **F decreases with R^2**

Solar Radiance and Irradiance



对所有波长积分后，$I_s = 2.00 \times 10^7 \ W\ m^{-2}\ sr^{-1}$

（电磁）辐射源，点源和面源

- 往外发射辐射的物体称为辐射源。
- 最简单的辐射源是点源，这是一种理想的情况，即其几何尺度可以被忽略。
- 面辐射源向 2π 立体角中发射辐射能。我们绝大部分时间遇到的都是这种源。对面辐射源首先关心的是其出射的辐射通量密度（ 辐出度 ），即单位时间内通过单位面积在面的法线方向射出的能量有多少。

Lambertian Surface（朗伯面）

在大气科学问题的讨论中我们常常用到朗伯面，其定义是该表面向所有方向发出（作为光源）或者反射出（作为反射物）均一的亮度 ***I***

$$F=\int_0^{2\pi} I\cos\theta\, d\Omega = I\int_0^{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\cos\theta\sin\theta\, d\theta d\varphi=\pi I$$

吸收、反射、透射

- 入射至物体的辐射能，一部分会被物体吸收变为物体的内能或其它形式的能量，一部份会被反射回去，而另一部分则会透过物体。
- 投射到物体的辐射能为Q_0，其中部分被吸收Q_a、部分被反射Q_r、部分被透射Q_t。根据能量守恒：

$$Q_0 = Q_a + Q_r + Q_t$$

- 定义：吸收率$A = Q_a / Q_0$，反射率$R = Q_r / Q_0$，透射率$T = Q_t / Q_0$，则：

$$A + R + T = 1$$

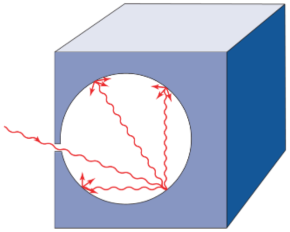
- A、R、T与波长有关！

黑体和灰体

- 绝对黑体：对任何波长的辐射都能全部吸收，即$A = 1$。相应的必有$R = 0$, $T = 0$。
- 绝对黑体在自然界是不存在的，但在实验室可以人工制造出尽可能接近于绝对黑体的表面。
- 如果物体仅对某一波长有$A_l = 1$，则称该物体对这一波长为黑体。

【2014年，英国的萨里纳米系统公司（Surrey Nanosystems）推出了一种全新材料Vantablack，对于特定波长（750nm）的吸收率达到创纪录的99.965%】

- 如果物体的吸收率A 不随波长而变，但$A < 1$，则称该物体为灰体。
- 黑体 v.s. 黑色物体？ 冰雪？



热力学平衡、热平衡、温度

- 热力学平衡：热平衡、力平衡、辐射平衡、化学平衡
- 孤立系统的热平衡：孤立系统内部无净热交换。可以用一态函数“温度”来描述。
- 局地（准）热平衡：局地孤立系统内部达到热平衡的时间远小于与外界作用的时间，因此系统内部有一个近似一致的温度。这一温度可以受到外界影响而随时间变化。
- 对流层和平流层大气可视为处于局地（准）热平衡状态，因此可以应用热平衡辐射的规律来研究其大气辐射问题。
- 如何理解“全球平均温度”、“体温”？

基尔霍夫（热辐射）定律

- 基尔霍夫在1859年由热力学定律论证指出：

  在一定的温度 T 时，任何处于热力学平衡的物体的辐亮度 $I_{\lambda,T}$ 和它的吸收率 $A_{\lambda,T}$ 之比值是一个普适函数 $B(\lambda,T)$ 。

- $B(\lambda,T)$ 只是温度和波长的函数，而与物体的其他性质无直接关系

$$\frac{I_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = B(\lambda,T)$$

$$\varepsilon(\lambda,T) = \frac{I_{\lambda,T}}{B(\lambda,T)} = A_{\lambda,T}$$

发射率 = 吸收率

普朗克定律（绝对黑体辐射）

1900年，普朗克引入量子概念，得到：

$$B(\lambda, T) = \frac{2c^2h}{\lambda^5}\left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1\right)^{-1} = \frac{c_1}{\lambda^5}\left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right)^{-1}$$

$$c_1 = 2c^2h = 1.19 \times 10^8\ W\ \mu m^4\ m^{-2}\ sr^{-1}$$

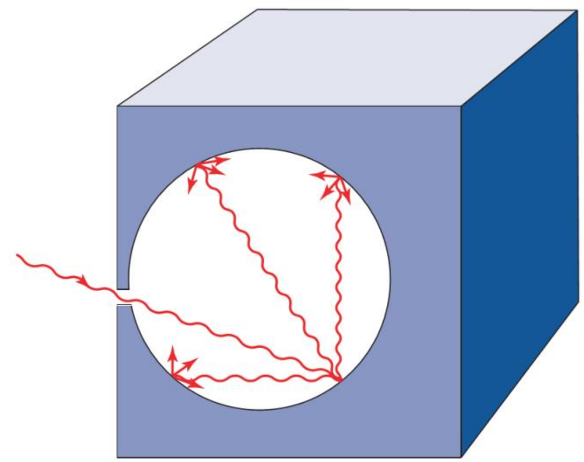
$$c_2 = \frac{ch}{k} = 14388\ \mu m\ K$$

B (λ, *T*) 的单位为 W m^{-2} μm^{-1} sr^{-1}

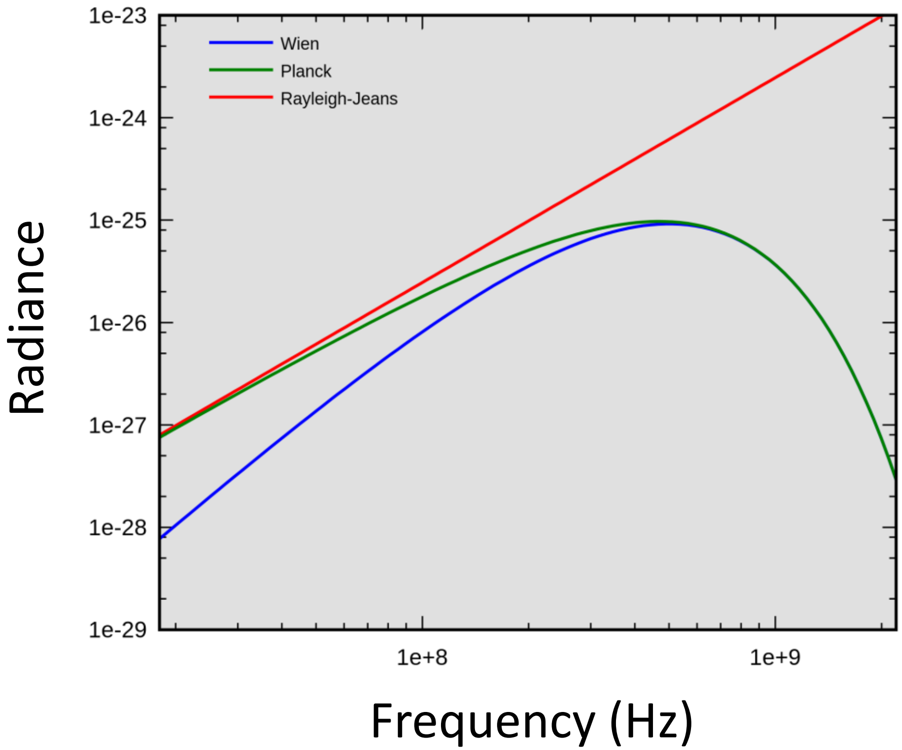
c = 2.99793×10^8 m s^{-1}，是真空光速

h = 6.6262×10^{-34} J s，是普朗克常数

k =1.3806×10^{-2} J K^{-1}，是波尔兹曼常数



普朗克定律、瑞利-金斯近似、维恩近似



长波 $\longrightarrow$ 短波

Planck:

$$B(\lambda,T)=\frac{2c^2h}{\lambda^5}\left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}}-1\right)^{-1}$$

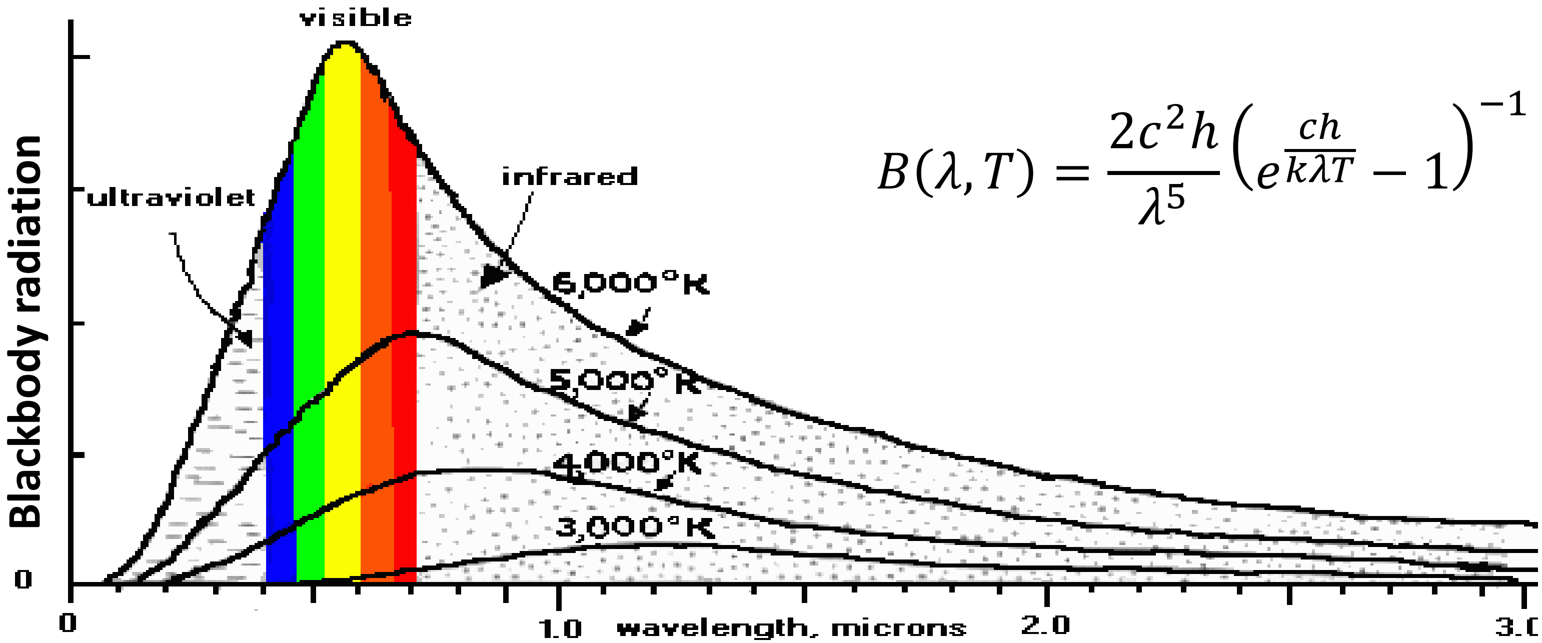
R-J (1905): $$B(\lambda,T)=\frac{2ckT}{\lambda^4}$$

$\lambda \rightarrow \infty$

Wien (1896): $$B(\lambda,T)=\frac{2c^2h}{\lambda^5}e^{-\frac{ch}{k\lambda T}}$$

$\lambda \rightarrow 0$

Blackbody Radiation



$$B(\lambda, T) = \frac{2c^2h}{\lambda^5}\left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1\right)^{-1}$$

维恩位移定律(1879年)

$$\lambda_{max} = a/T$$

a = 2897.8 μm K

斯蒂芬–玻尔兹曼定律（1893年）

（对所有波长积分）

$$F = \pi B(T) = \sigma T^4$$

σ = 5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4}

斯蒂芬–玻尔兹曼常数

Bose–Einstein integral

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$$

$$\sigma = \frac{2k^4\pi^5}{15c^2h^3}$$

黑体辐射能量分布

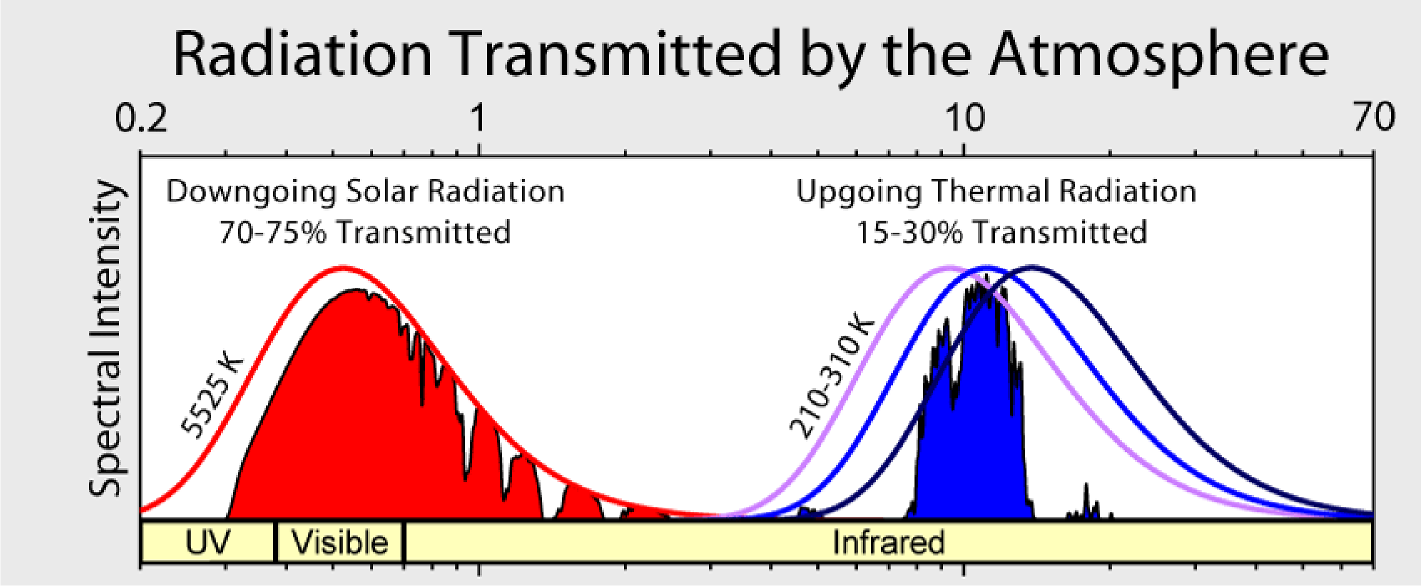
$$B(\lambda, T) = \frac{2c^2 h}{\lambda^5}\left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1\right)^{-1} = \frac{c_1}{\lambda^5}\left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right)^{-1}$$

Percentile	0.01%	0.1%	1%	10%	20%	**25.0%**	30%	40%	**41.8%**	50%	60%	**64.6%**	70%	80%	90%	99%	99.9%	99.99%
λT (μm·K)	910	1110	1448	2195	2676	**2898**	3119	3582	**3670**	4107	4745	**5099**	5590	6864	9376	22884	51613	113374

Percentile	0.01%	0.1%	1%	10%	20%	**25.0%**	30%	40%	**41.8%**	50%	60%	**64.6%**	70%	80%	90%	99%	99.9%	99.99%
Sun λ (nm)	157	192	251	380	463	**502**	540	620	**635**	711	821	**882**	967	1188	1623	3961	8933	19620
288 K planet λ (μm)	3.16	3.85	5.03	7.62	9.29	**10.1**	10.8	12.4	**12.7**	14.3	16.5	**17.7**	19.4	23.8	32.6	79.5	179	394

太阳辐射和地球辐射

- 太阳表面的温度为 6000K，其辐射能量集中在 0.1 μm至 4.0 μm之间。
- 地球大气的温度约 300K，其辐射能量主要集中在 4 μm 至 100 μm之间。
- 在大气上界，净入射的太阳长波辐射通量约 3 Wm^{-2}，而地球净出射的长波辐射通量约 240 Wm^{-2}。
- 6000K 黑体表面的辐亮度都远大于300K的黑体，但是在TOA处：



思考题

普朗克定律可以以波长 λ、频率 f 或者波数 ν 形式来表达：

$$B(\lambda,T)=\frac{2c^2h}{\lambda^5}\left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}}-1\right)^{-1}$$

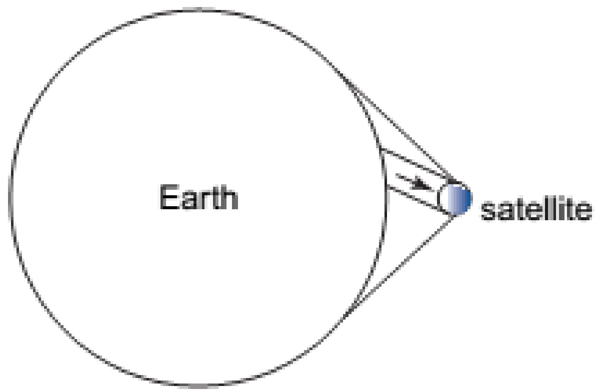
$$B(f,T)=\frac{2f^3h}{c^2}\left(e^{\frac{\tilde{\nu}h}{kT}}-1\right)^{-1}$$

$$B(\nu,T)=2\nu^3c^2h\left(e^{\frac{\nu ch}{kT}}-1\right)^{-1}$$

A. 从波长形式推导其他两种形式

B. 当普朗克函数用波长、频率、波数表达时，都会得到一个极值点。若把极值点对应的波长、频率、波数都转换成对应的波长，这3个波长是否相等？

思考题



A. A small, perfectly black, spherical satellite is in orbit around the Earth at an altitude of 2000 km. What angle does the Earth subtend when viewed from the satellite?

B. If the Earth radiates as a blackbody at an equivalent blackbody temperature Te = 255 K, calculate the radiative equilibrium temperature of the satellite when it is in the Earth's shadow.

斯蒂芬–玻尔兹曼定律和维恩位移定律

- **从普朗克定律导出：**

斯蒂芬–玻尔兹曼定律 （对所有波长积分）

$$F_T = \sigma T^4$$ **1893年**

σ = 5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4} 斯蒂芬–玻尔兹曼常数

维恩位移定律 （以波长形式表达的黑体辐射峰值所对应的波长）

$$\lambda_{max} = a/T$$ **1879年**

a = 2897.8 μm K