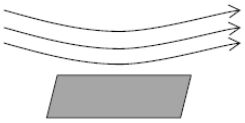
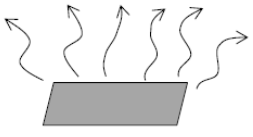
به نام پروردگار یکتا

# مکانیزم های انتقال حرارت

- مکانیزم‌های انتقال حرارت در محیط فضا
- هدایت
- تشعشع



| | Conduction | Convection | Radiation |
|---|---|---|---|
| Material parameters | Thermal conductivity | Convective heat transfer coefficient, fluid properties | Thermo-optical properties |
| Geometric parameter | Cross section, length | Surface area | Surface area, view-factor |
| Distance | low | medium | ∞ |
| 2 nodes equation | $Q = k\frac{S}{L}(T_2 - T_1)$ | $Q = hA(T_2 - T_1)$ | $Q = GR\sigma(T_2^4 - T_1^4)$ |
| Example:<br>100 x 100 mm²<br>$Q = 10$ W<br>$T_{env} = 20$ °C | Copper strap,<br>$k = 390$ W/mK<br>$S = 50$ mm²<br>$L = 100$ mm<br> <br>$T = 71$°C | Wind speed: 1m/s<br>$h \sim 50\ W/m^2K$<br>  <br>$T = 40$°C | view factor: 1<br>Emittance: 1<br>  <br>$T = 125$°C |

# انتقال حرارت هدایتی

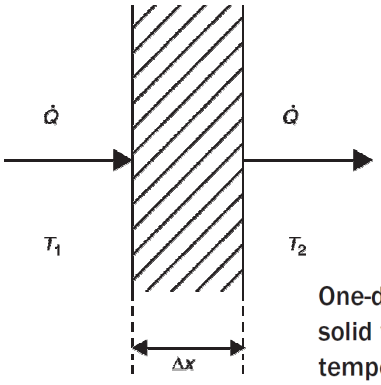
❖ قانون فوریه (Fourier's law)

- رابطه‌ای تجربی (Empirical)
- نرخ شار حرارتی در ماده‌ای یکنواخت متناسب است با:
  - سطح انتقال حرارت
  - اختلاف دمای در راستای شار حرارتی
  - نسبت معکوس فاصله در راستای شار حرارتی
- ضریب هدایتی (Thermal conductivity) از خواص ماده بوده و واحد آن در سیستم SI (W/mK)

$$\dot{Q} \propto A\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{Q} = kA\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{Q} = -kA\frac{dT}{dx}$$




One-dimensional heat conduction, $\dot{Q}$, across a solid wall of thickness, $\Delta x$, whose surfaces are at temperatures $T_1$ and $T_2$ ($T_1 > T_2$), respectively

انتقال حرارت

انتقال حرارت هدایتی

| Group | Material | Chemical composition | k [W/(m·K)] |
|---|---|---|---|
| Aluminium and Al alloys | Aluminium (ISO Al 99.5) | 99.5% Al | 230 |
| | Aluminium-copper alloy (ISO AlCu4Mg1) | 4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn, remaining Al | 150 to 180 |
| | Aluminium-magnesium alloy (ISO AlMg2) | 1.7% to 2.4% Mg, remaining Al | 155 |
| | Aluminium-magnesium-silicon alloy (ISO AlMgSi) | 0.4% to 0.9% Mg, 0.3% to 0.7% Si, remaining Al | 197 to 201 |
| | Aluminium-zinc alloy 7075 | 5.6% Zn, 2.5% Mg, 1.6% Cu, 0.3% Cr, remaining Al | 134 |
| | 2219 Aluminium-copper-manganese alloy (ISO AlCu6Mn) | Cu 5.8% to 6.8%, Mn 0.2% to 0.4%, remaining Al | 116 to 170 |
| Copper and Cu alloys | Copper (Oxygen-Free High-Conductivity, OFHC) | 99.95% Cu | 394 |
| | Beryllium-copper (CDA 170) | 1.8% Be, 0.3% Co + Ni, remaining Cu | 84 to 150 |
| | Brass ($\alpha$-$\beta$) leaded | 40% Zn, 2% Pb, remaining Cu | 117 |
| | Phosphor bronze (CDA 510) | 5% Sn, 0.2% P, remaining Cu | 75 |
| Titanium and Ti alloys | Timetal 35A (IMI 115) | Commercially pure Ti | 16 |
| | Ti 6Al 4V (IMI 318) | 6% Al, 4% V, remaining Ti | 6 |
| | Ti 4Al 4Mo – Si (IMI 550) | 4% Al, 4% Mo, 2% Sn, 0.5% Si remaining Ti | 8 |
| Stainless steels | Stainless steel A286 | 25% Ni, 15% Cr, 2% Ti, 1.5% Mn, 1.3% Mo, 0.3% V, remaining Fe | 23.7 |
| | Stainless steel AISI 304L | 8% to 12% Ni, 18% to 20% Cr, 2% Mn max, 1% Si max, 0.03% C max, remaining Fe | 16.2 |
| | Stainless steel AISI 316L | 12% Ni, 17% Cr, 2.5% Mo, 2% Mn, 1% Si, 0.03% C max, remaining Fe | 16 |
| Miscellaneous metallic materials | Magnesium-aluminium-zinc alloy | 8.5% Al, 0.5% Zn, remaining Mg | 90 |
| | Magnesium-aluminium-zinc-manganese alloy | 3% Al, 1% Zn, 0.2% Mn, remaining Mg | 84 |
| Adhesives, coatings and varnishes | Araldite AV138/HV998 (100/40 pbw) | Epoxy | 0.35 |
| | D.C. 93500 | Silicone | 0.146 |
| | Eccobond 'solder' 56C | Epoxy-silver-loaded | 5.8 |
| | RTV S 691 | Silicone, filled | 0.39 |
| | RTV S 695 | Silicone | 0.21 |
| | Epo-tek 930 | 2-part epoxy, boron nitride filled | 4.1 |
| Potting compounds, sealants and foams | D.C. 340 | Silicone compound, filled | 0.55 |
| | RTV 566 | Silicone (methyl, phenyl) | 0.3 |
| | Stycast 1090 | Epoxy | 0.167 |
| | Stycast 2850FT | Epoxy | 1.44 |
| | Upilex foam | Polyimide | 0.03 |
| Reinforced plastics | Makrolon GV 30 | Polycarbonate/glass | 0.16 |

**Thermal conductivity, (k) of various materials of space use at room temperature**

| Group | Material | Chemical composition | $k$ [W/(m·K)] |
|---|---|---|---|
| Rubbers and elastomers | Eccoshield SV-R | Metal-filled silicone | 4.3 |
| Thermoplastics (non-adhesive tapes and foils [MLI]) | Sheldahl 146368 | Fluorocarbon (FEP), silver and Inconel coated | 0.194 |
| | Sheldahl 146372 | Fluorocarbon (FEP), aluminized | 0.194 |
| | Sheldahl 146633 | Polyimide Kapton HN, aluminium and ITO coated | 0.155 |
| | Sheldahl G423020 | Fluorocarbon (FEP), aluminized and ITO coated | 0.194 |
| | Dunmore DE291 | Polyimide (Kapton HN), aluminized with protective coating on both sides | 0.028 |
| | Dunmore DM100 | Polyimide (Kapton HN), aluminized/acrylic adhesive | 0.0155 |
| | Dunmore DE 028 | Polyethylene terephthalate/PETP, aluminized | 0.61 |
| | Dunmore DE 320 | Polyimide (Kapton HN), aluminized | 0.155 |
| | Dunmore TM05564 | Fluorocarbon (FEP–Type C), aluminized | 0.194 |
| | Kapton H, HN | Polyimide | 0.155 |
| | Hostaform C9021 | Acetal copolymer | 0.31 |
| | PETP (Mylar, Melinex, Terphane, . . .) | Polyethylene terephthalate | 0.61 |

**Thermal conductivity, (k) of various materials of space use at room temperature**

| | | | |
|---|---|---|---|
| | PTFE (Teflon, Halon, Fluon, Hostaflon) | Polytetrafluoroethylene | 0.25 |
| | Sheldahl 146401 (previously G401500) | Fluorocarbon (FEP), silver and Inconel coated | 0.194 |
| | Sheldahl 146383 (previously G400900) | Fluorocarbon (FEP), aluminized | 0.194 |
| | Sheldahl 146631 (previously G425120) | Polyimide (Kapton H), ITO/aluminized | 0.155 |
| | UPILEX S | Polyimide | 0.29 |
| Thermoset plastics | Rexolite 1422 | Polystyrene, cross-linked | 0.146 |

انتقال حرارت هدایتی

انتقال حرارت

- تعمیم قانون فوریه برای هندسه‌های پیچیده

$$q = -k\frac{dT}{dx}$$

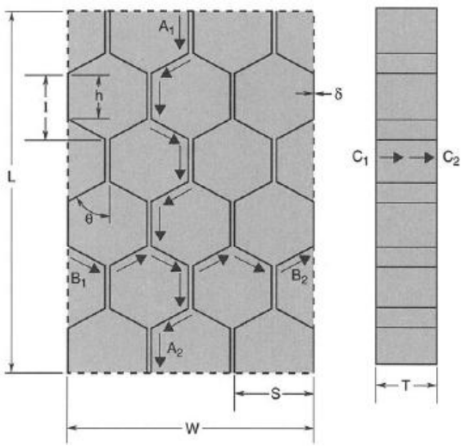
heat flux per unit of time and area (W/m²)

- فرم عمومی قانون فوریه برای سه بعد

$$\mathbf{q} = -k\nabla T = q_x\mathbf{u}_x + q_y\mathbf{u}_y + q_z\mathbf{u}_z =$$

unit vectors

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\mathbf{u}_x + \frac{\partial T}{\partial y}\mathbf{u}_y + \frac{\partial T}{\partial z}\mathbf{u}_z\right),$$



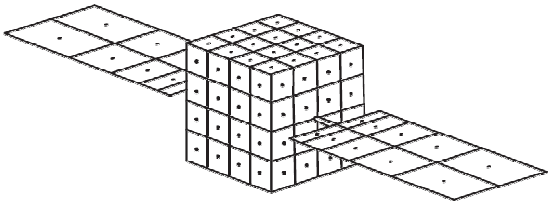
# انتقال حرارت هدایتی

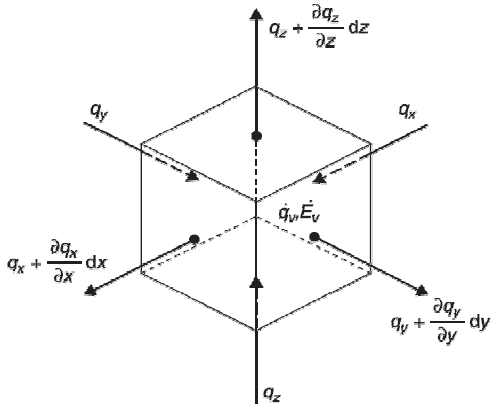
- قانون فوریه و قانون اهم
  - اختلاف دما معادل اختلاف پتانسیل
  - مقاومت حرارتی معادل با مقاومت الکتریکی
  - شار حرارتی معادل با شدت جریان

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

- بالانس انرژی برای یک المان در سیستم مختصات کارتزین

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}_v=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}$$






انتقال حرارت

# انتقال حرارت هدایتی

- بالانس انرژی برای یک المان در سیستم مختصات استوانه‌ای

$$\mathbf{q}=-k\nabla T=q_r\mathbf{u}_r+q_\phi\mathbf{u}_\phi+q_z\mathbf{u}_z=$$

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\mathbf{u}_r+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \phi}\mathbf{u}_\phi+\frac{\partial T}{\partial z}\mathbf{u}_z\right)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}_v=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}$$

- بالانس انرژی برای یک المان در سیستم مختصات کروی

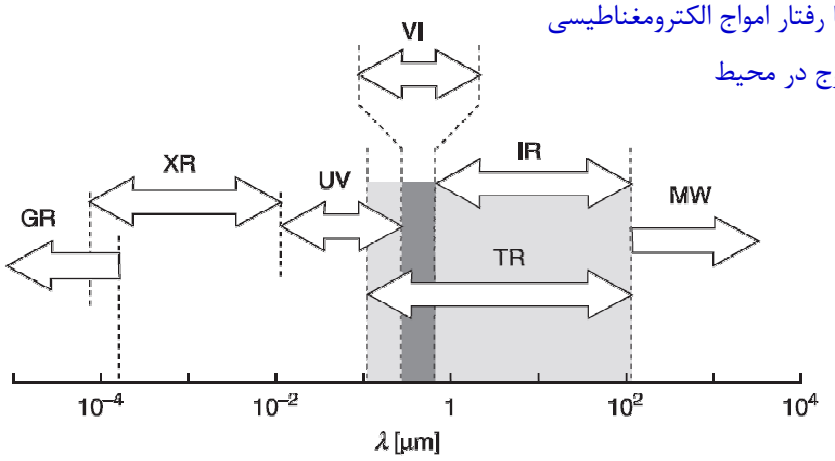
$$\mathbf{q}=-k\nabla T=q_r\mathbf{u}_r+q_\theta\mathbf{u}_\theta+q_\phi\mathbf{u}_\phi=$$

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\mathbf{u}_r+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta}\mathbf{u}_\theta+\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial T}{\partial \phi}\mathbf{u}_\phi\right)$$

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr^2\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(k\sin\theta\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)+\dot{q}_v=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}$$

# انتقال حرارت تشعشعی

- **تشعشع حرارت (Thermal radiation)**
  - تشعشع الکترومغناطیسی که از تمامی موادی که دارای دمای غیر صفر می‌باشند بین طول موج‌های ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرومتر ساتع می‌گردد
  - اطلاق تشعشع حرارتی به دلیل صدور انرژی به دلیل وضعیت دمایی جسم
  - برخلاف انتقال حرارت هدایتی برای انتقال نیاز به محیط ندارد
  - مکانیزم تشعشع براساس انرژی آزاد شده در نتیجه نوسانات و جابجایی الکترون‌های ماده
  - خواص و رفتار انتشار مشابه با رفتار امواج الکترومغناطیسی
  - وابستگی به سرعت حرکت موج در محیط
  - وابستگی به طول موج
  - وابستگی به فرکانس

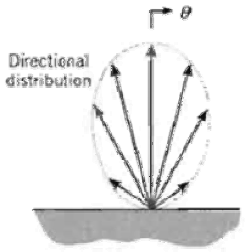



$$\lambda = c/v$$

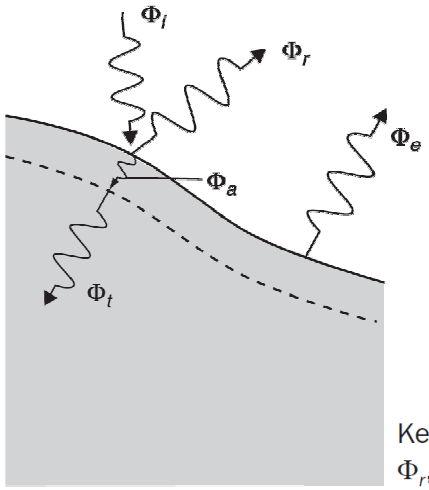
$$c = c_0 = 2.998 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$$

انتقال حرارت

# انتقال حرارت تشعشعی



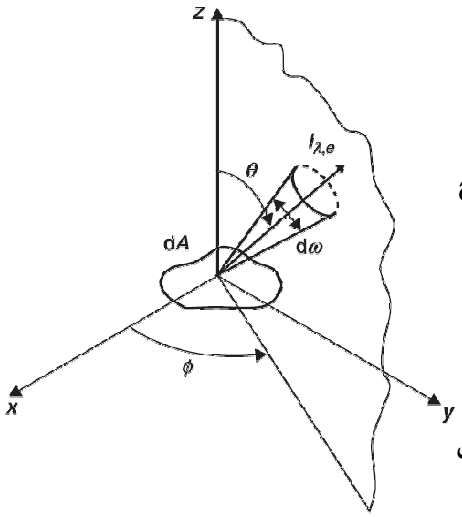

- **پیچیدگی مطالعه و بررسی تشعشع حرارت**
  - ماهیت طیفی (Spectral nature)
  - ماهیت جهتی (Directionality)
    - صدور انرژی حرارتی بیشتر در یک جهت خاص (جهتی)
    - صدور انرژی حرارتی یکسان در تمامی جهات (پخشی)
- **انرژی ساتع شده از یک جسم در برخورد با سطح جسم دیگر**
  - قسمتی از آن جذب (Absorbed)
  - قسمتی از آن منعکس (Reflected)
  - قسمتی از آن از جسم عبور (Transmitted)




Key: $\Phi_e$, emitted radiation; $\Phi_i$, incident radiation; $\Phi_a$, absorbed radiation; $\Phi_r$, reflected radiation; and $\Phi_t$, transmitted radiation.

# انتقال حرارت تشعشعی

- شدت تشعشع صادر شده از جسمی با دمای معین




$$I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)=\frac{\delta\dot{Q}}{dA\cos\theta d\omega d\lambda}$$

- کل انرژی ساتع شده در تمام جهات در واحد سطح برای طول موج و دمای معین $W/(m^2\cdot\mu m)$

$$E_\lambda(\lambda,T)=\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi$$

- کل انرژی ساتع شده در تمام جهات در واحد سطح برای تمام طول موج‌ها در دمای معین $W/m^2$

$$E(T)=\int_0^\infty E_\lambda(\lambda,T)d\lambda=\int_0^\infty\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)\cos\theta\sin\theta d\theta d\phi d\lambda$$

انتقال حرارت

# انتقال حرارت تشعشعی

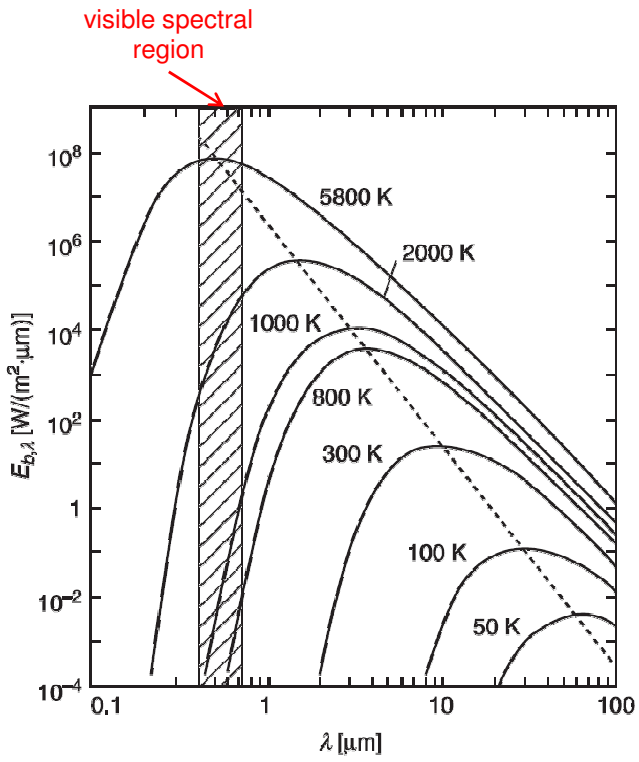
- جسم سیاه (Block body)
  - سطح ایده‌آلی که تمام انرژی تابیده شده به آن را در تمامی طول موج‌ها و جهات جذب می‌نماید (جاذب کامل Perfect absorber)
  - حداکثر تشعشع ممکن برای دما و جهتی معین
  - عدم وابستگی میزان تشعشع به جهت (diffuse)
  - مقدار تشعشع کل یا مجموع در محیط خلاء تنها وابسته به دمای جسم سیاه
  - جسم سیاه ساتع کننده کامل (Perfect emitter)
- استفاده از تعریف جسم سیاه برای مقایسه خواص تشعشعی سطوح واقعی
- بیان توان انتشار یا صدور طیفی جسم سیاه با دمای T، با رابطه Planck (۱۹۰۱)

$$E_{b,\lambda}(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1\right)}$$

ثابت بولتزمن $k=1.3807\times10^{-23}\ J/K$

ثابت پلانک $h=6.6261\times10^{-34}\ J\cdot s$

# انتقال حرارت تشعشعی




- توان کل ساتع شده از جسم سیاه

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda}(\lambda, T)\mathrm{d}\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}$$

- قانون استفان-بولتزمن (Stefan-Boltzmann)
  - انرژی ساتع شده از جسم سیاه در تمامی جهات و طول موجها

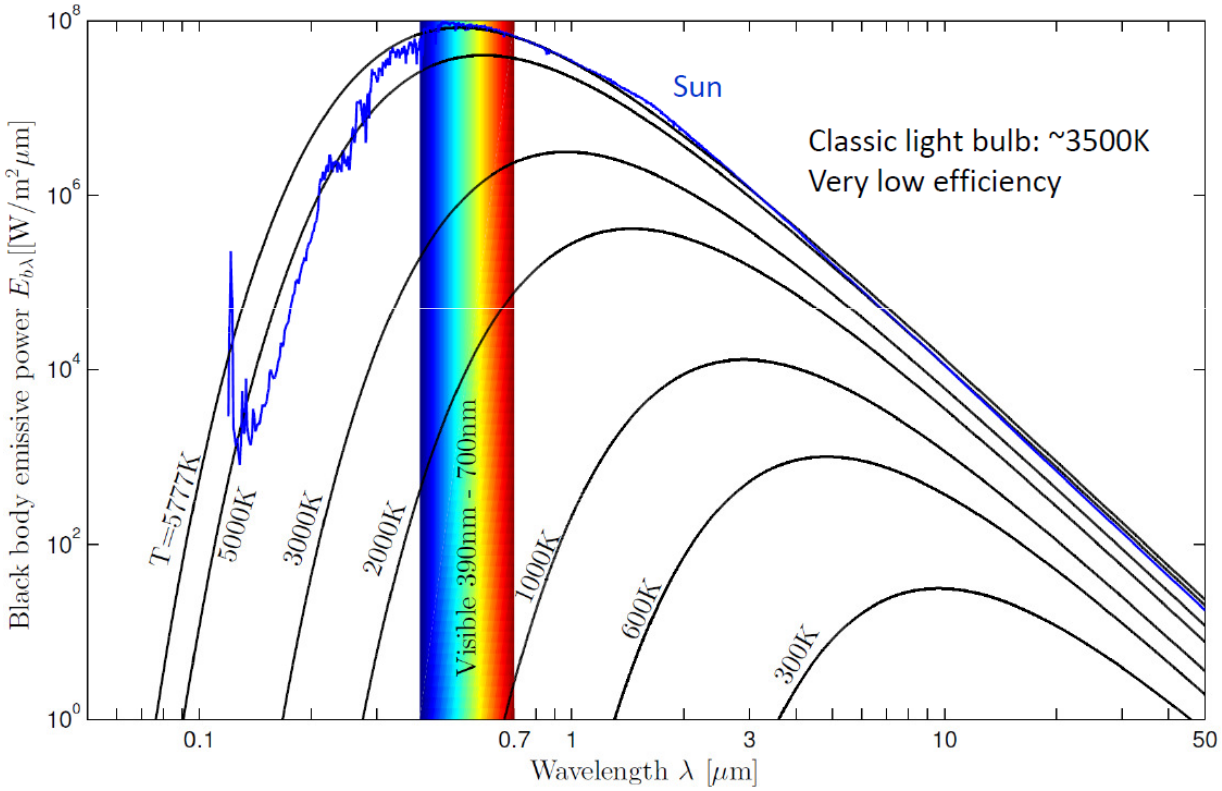
$$E_b = \sigma T^4$$

- کسری از انرژی ساتع شده از جسم سیاه در دمای T، بین طول موجهای $\lambda_1$ و $\lambda_2$

$$F_{\lambda_1 \to \lambda_2} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b,\lambda}(\lambda, T)\mathrm{d}\lambda$$

انتقال حرارت

# انتقال حرارت تشعشعی



# انتقال حرارت تشعشعی

- **خواص تشعشعی سطوح واقعی (Real surface)**
  - سطح واقعی نسبت به جسم سیاه در طول موج، جهت و دما یکسان کمتر انرژی ساتع می‌نماید
- **ضریب صدور (emissivity)**

$$\varepsilon(\lambda,\theta,\phi,T)=\frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{b,\lambda}(\lambda,T)}$$

Spectral. directional emissivity

  - برای سطوح پخشی (diffuse) ضریب صدور کروی و جهتی یکسان است
  - برای سطوح وابسته به جهت از انتگرال‌گیری از رابطه جهتی استفاده می‌شود

$$\varepsilon(\lambda,T)=\frac{E_{\lambda}(\lambda,T)}{E_{b,\lambda}(\lambda,T)}$$

Spectral hemispherical emissivity

انتقال حرارت

# انتقال حرارت تشعشعی

- **خواص سطح قرار گرفته در برابر تشعشع سایر سطوح**
- **ضریب جذب (Absorptance)**
  - کسری از انرژی برخوردی که در طول موج و جهتی معین توسط سطح جذب شده است

$$\alpha(\lambda,\theta,\phi,T)=\frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

Spectral directional absorptance

- **ضریب انعکاس (Reflectance)**
  - کسری از انرژی برخوردی که در طول موج و جهتی معین از سطح منعکس شده است

$$\rho(\lambda,\theta,\phi,T)=\frac{I_{\lambda,i,reflec}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

Spectral directional reflectance

- **ضریب عبور یا انتقال (Transmittance)**
  - کسری از انرژی برخوردی که در طول موج و جهتی معین از سطح عبور کرده است

$$\tau(\lambda,\theta,\phi,T)=\frac{I_{\lambda,i,trans}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

Spectral directional transmittance

# انتقال حرارت تشعشعی

- ضریب جذب در تمامی جهات (spectral hemispherical absorptance)

$$\alpha(\lambda,T)=\frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}\alpha(\lambda,\theta,\phi,T)I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\,d\theta\,d\phi}{G_\lambda(\lambda)}$$

- ضریب انعکاس در تمامی جهات (spectral hemispherical reflectance)

$$\tau(\lambda,T)=\frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}\tau(\lambda,\theta,\phi,T)I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\,d\theta\,d\phi}{G_\lambda(\lambda)}$$

- ضریب عبور در تمامی جهات (spectral hemispherical transmittance)

$$\rho(\lambda,T)=\frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}\rho(\lambda,\theta,\phi,T)I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\,d\theta\,d\phi}{G_\lambda(\lambda)}$$

- تشعشع تابیده شده طیفی (spectral irradiance incident)

$$G_\lambda(\lambda)=\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)\cos\theta\sin\theta\,d\theta\,d\phi$$

انتقال حرارت

# انتقال حرارت تشعشعی

- برقراری رابطه زیر برای تمامی روابط ارائه شده (جهتی و مستقل از جهت)

$$\alpha+\rho+\tau=1$$

- قانون کریشلف (Kirchhoff)
  - برای تمامی جهات و طول موج‌ها ضریب جذب و صدور با هم برابر است

$$\alpha(\lambda,\theta,\phi,T)=\varepsilon(\lambda,\theta,\phi,T)$$

  - برای سطوح دارای خاصیت پخشی (diffuse)

$$\alpha(\lambda,T)=\varepsilon(\lambda,T)$$

  - برای سطوح خاکستری (gray) خواص سطوح مستقل از طول موج (تعریف)

$$\alpha(\lambda,T)=\alpha(T)$$

$$\varepsilon(\lambda,T)=\varepsilon(T)$$

سطوح واقعی کاملا رفتاری مشابه با سطوح خاکستری ندارند اما تا حد زیادی نتایج آن به یکدیگر نزدیک است به خصوص در طول موج‌هایی که تشعشع بین سطوح اتفاق می‌افتد، استقلال از طول موج معتبر است

**The surface can then be supposed to be a gray surface over two 'thermal' domains**

- ✓ Visible [0.2µm – 2.8 µm] [800°C_14000°C] (= 95% of Sun energy,<0.5% of IR energy)
- ✓ Infrared [5µm – 50µm] [-200°C_300°C] (=92% of IR energy,< 1% of the Sun energy)

# انتقال حرارت تشعشعی

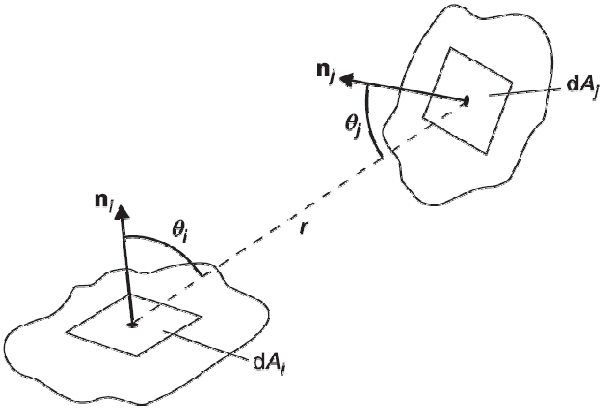
- **ضریب دید (View factors)**
  - $F_{ij}$، کسری از انرژی ساتع شده از سطح i که به سطح j برخورد می‌کند
- **محاسبه ضریب دید به کمک روش هندسی (Geometrical)**
  - ضریب دید دو سطح بی‌نهایت کوچک با خاصیت پخشی (diffuse)
  - ضریب دید دو سطح محدود با خاصیت پخشی
  - رابطه متقابل ضریب دید دو سطح
  - ضریب دید مجموعه‌ای از سطوح تشکیل دهنده یک محیط بسته

$$dF_{ij} = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j$$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

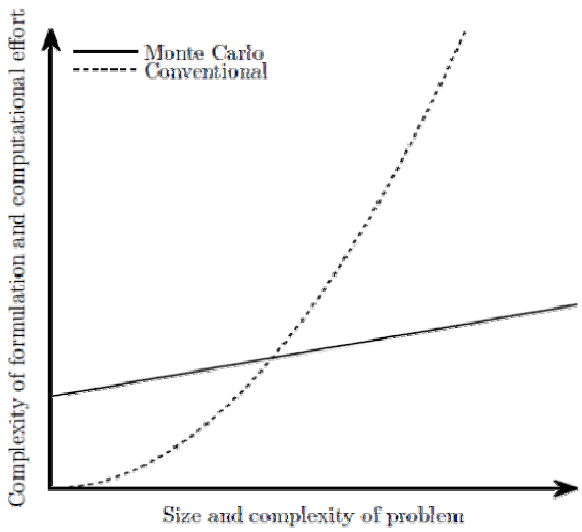
$$\sum_{j=1}^{n} F_{ij} = 1$$




انتقال حرارت

# انتقال حرارت تشعشعی

- **محاسبه ضریب دید با روش مونت کارلو (Monte Carlo ray-tracing)**
  - تولید تعداد زیادی پرتو نور (بسته‌های فوتن) در جهات مختلف از سطح i و شمارش تعداد پرتوهای برخورد نموده به سطح j
  - وابستگی نتایج به تعداد پرتوها
  - مزیت روش در هندسه‌های پیچیده




$$B_{ij} = \lim_{N_i \to \infty} \frac{N_{ij}}{N_i} \cong \left. \frac{N_{ij}}{N_i} \right|_{N_i \gg 1}$$

# انتقال حرارت تشعشعی

- **تبادل انرژی حرارتی تشعشعی بین سطوح محیط بسته**
  - مجموعه‌ای از سطوح تشکیل دهنده یک محیط بسته
  - سطوح از نوع خاکستری (gray) و مات (opaque) و دارای خاصیت پخشی $\alpha + \rho = 1$
  - فرض هم دمایی هر المان سطح i $\alpha = \varepsilon$
  - $G_i$ تشعشع تابیده شده به سطح i
  - $J_i$ تشعشع ساتع شده از سطح i
  - $Q_i$ خالص انرژی ساتع شده از سطح i (مقدار مثبت ساتع شده) $\dot{Q}_i = A_i\,(J_i - G_i)$
  - هدف: دمای سطوح با فرض معلوم بودن انرژی خالص وارد شده به سیستم

$$J_i = \varepsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i$$

$$\dot{Q}_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1-\varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}}$$

انتقال حرارت

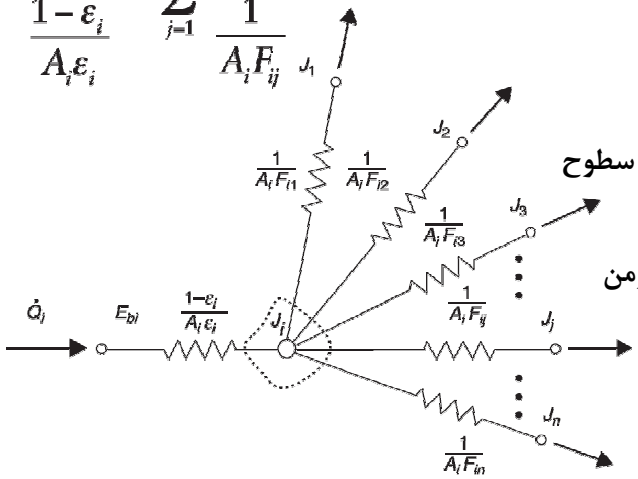
# انتقال حرارت تشعشعی

- **تبادل انرژی حرارتی تشعشعی بین سطوح محیط بسته**
  - برابری تشعشع تابیده شده به سطح i با مجموع تشعشعات سایر سطوح به سطح I

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^{n} A_j F_{ji} J_j$$

- **تشابه سیستم با سیستم الکتریکی**
  - تفاضل انرژی ساتع شده از سطوح معادل با اختلاف پتانسیل
  - شار حرارتی معادل با شدت جریان
  - مخرج کسر معادل با مقاومت

$$\dot{Q}_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1-\varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}} = \sum_{j=1}^{n} \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i F_{ij}}}$$




- **تشکیل دستگاهی از معادلات برای تمامی سطوح**
- **حل دستگاه معادلات و محاسبه $J_i$ و $E_{bi}$**
- **به دست آوردن دما از قانون استفان-بولتزمن**

$$T = (E_b/\sigma)^{1/4}$$