

Nevratné a nerovnovážné procesy

Nerovnovážný děj:



Nevratné děje

- ⊕ **probíhá po narušení termodynamické rovnováhy** soustavy
- ⊕ v soustavě proběhnou **relaxační procesy**, během kterých soustava přejde do rovnovážného stavu
- ⊕ v průběhu těchto procesů dochází k makroskopickým dějům (vyrovnávání teploty, hustoty, koncentrace,...) – spojeny s **makroskopickými toky fyzikálních veličin** (např. hmotnostní tok, tepelný tok, elektrický proud)

Pomalé nerovnovážné děje:

relaxační doba τ velmi malých (makroskopických) dílčích částí soustavy je mnohem menší nežli relaxační doba celé soustavy

hypotéza lokální rovnováhy

předpokládáme rovnovážné procesy v dílčích částech soustavy, i když v celku probíhá nerovnovážný děj (např. vedení tepla)

Nevratné a nerovnovážné procesy

Přenosové (transportní) jevy:

- ⊕ nevratné procesy se projevují transportem různých fyzikál.veličin
- ⊕ toky těchto veličin $\vec{J}$ jsou vyvolávány gradienty stavových veličin $\vec{X}_k$ (tzv. **termodynamické síly**)
- ⊕ pokud probíhá nevratný proces pomalu, potom **plošná hustota makroskopických proudů (toků)** se dá v lineárním přiblížení vyjádřit jako lineární funkce gradientů jednotlivých makroskopických stavových veličin $\vec{Y}_k$ (např. gradientu koncentrace částic, gradientu teploty, gradientu el.potenciálu,...)

$$\vec{J}_i = \sum_k L_{ik} \vec{X}_k \quad \longleftarrow \quad \vec{X}_k = -\text{grad } Y_k$$

**Plošná hustota
toku veličiny**

**Termodynamické
síly**

Přenosové jevy

Přenosové jevy:

⊕ popisují přenos různých fyzikálních veličin (energie, materiálu látky, el.náboje,...) v termodynamických soustavách

a) Přenos tepla $\Rightarrow$ tepelná vodivost

b) Přenos látky $\Rightarrow$ difúze

c) Přenos el.náboje $\Rightarrow$ elektrická vodivost

Přenos tepla

PŘENOS TEPLA:

jde o přenos energie

a) vedením (kondukcí)

- dochází k němu v hmotném prostředí (pevná, kapalná i plynná fáze)
- energie si předávají sousední částice pomocí vzájemných srážek
- při vedení tepla nedochází k pohybu prostředí

b) prouděním (konvekci)

- dochází k němu v hmotném prostředí v kapalně nebo plynné fázi
- při proudění dochází k pohybu částic prostředí
- energii přenáší částice prostředí, které se v makroskopickém měřítku přemísťují (proudění může např. vzniknout v plynných nebo kapalných látkách pokud vlivem nerovnoměrné teploty není všude stejná hustota)

c) zářením (sáláním)

- dochází k němu v jakémkoliv prostředí (i ve vakuu nebo jestliže je teplota prostředí nižší nežli teplota zářiče a přijímače)
- energie je přenášena elektromagnetickým zářením

Přenos tepla vedením

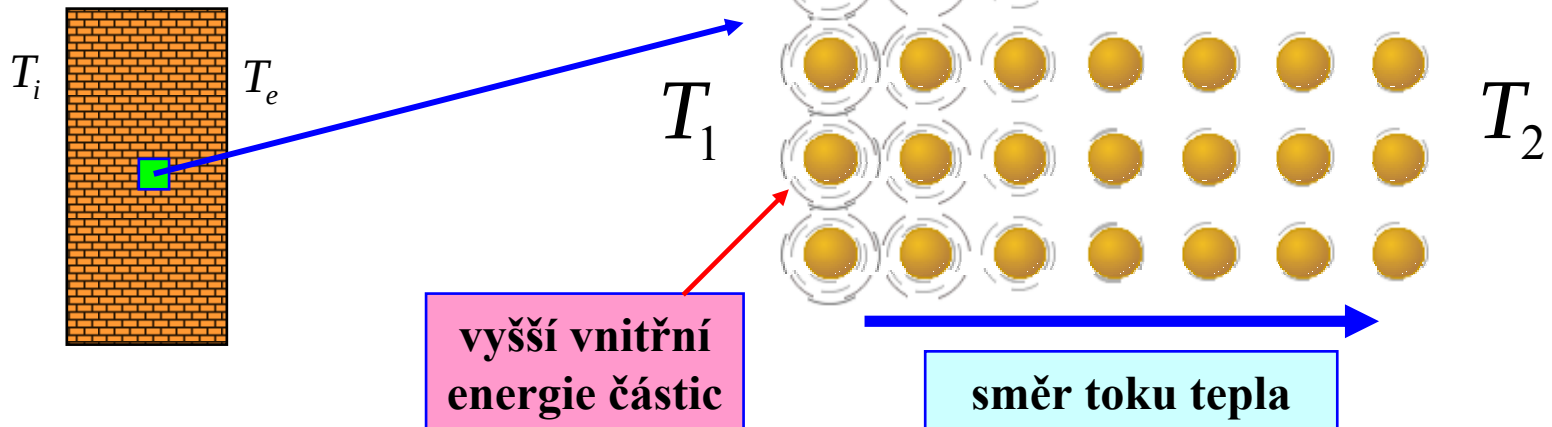
PŘENOS TEPLA VEDENÍM:

- ☉ teplo samovolně přechází od míst z vyšší teplotou do míst o nižší teplotě
- ☉ intenzita procesu vedení tepla závisí na maximálním teplotním spádu v daném místě prostředí (směr průběhu tepelné výměny)

Tepelný tok:

$$P_Q = \frac{dQ}{d\tau} \text{ [W]}$$

- ☉ teplo, které projde určitou plochou za jednotku času



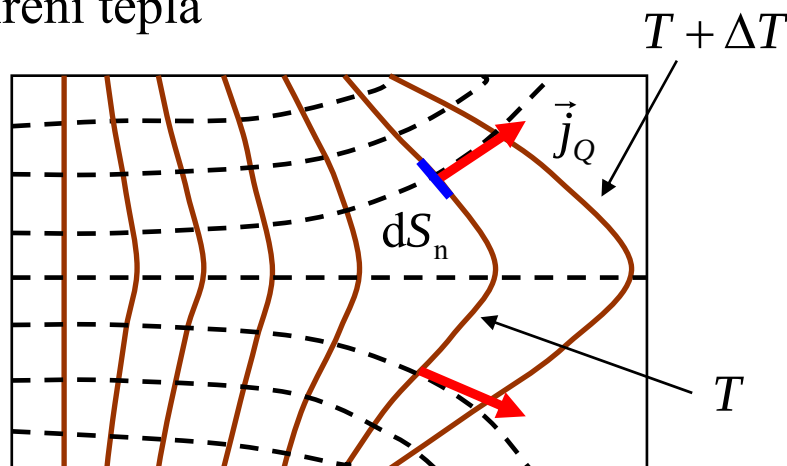
Přenos tepla vedením

PŘENOS TEPLA VEDENÍM:

Hustota tepelného toku:

$$\vec{j}_Q = \frac{dP_Q}{dS_n} \vec{n} = \frac{d^2Q}{dS_n d\tau} \vec{n} \quad [\text{W/m}^2]$$

- ⊕ množství tepla, které projde jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření tepla



$$\vec{n} = -\frac{\text{grad}T}{|\text{grad}T|}$$

Fourierův zákon

$$\vec{j}_Q = -\lambda \text{grad}T$$

součinitel tepelné vodivosti
 $\lambda \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$

Přenos tepla vedením

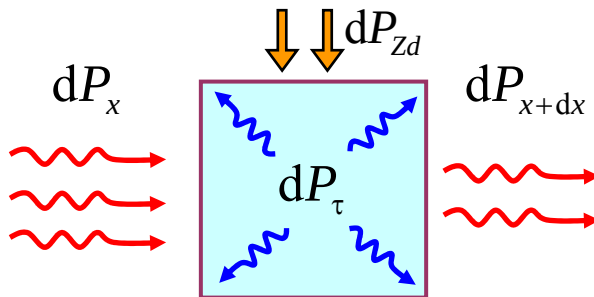
Tepelný tok ve směru osy x:

$$dP_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydz$$

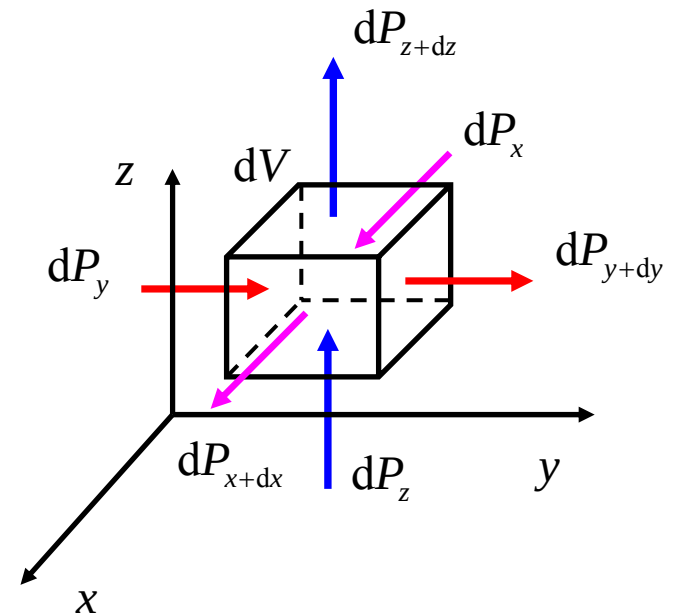
$$dP_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydz + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydz \right) dx$$

Rozdíl tepelných toků ve směru osy x:

$$dP_x - dP_{x+dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV$$



$$dP_{\tau} = dP_x - dP_{x+dx}$$



**absorbované teplo za čas $d\tau$
potřebné na změnu teploty o dT**

$$dP_{\tau} = \frac{\partial Q}{\partial \tau} = c \cdot dm \frac{\partial T}{\partial \tau} = c \rho dV \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

výkon tepelného zdroje

$$dP_{zd} = q_z(\vec{r}, T, \tau) dV$$

Přenos tepla vedením

Rovnice vedení tepla

$$dP_{\tau} = dP_x - dP_{x+dx} + dP_{zd}$$

vyjadřuje zákon zachování energie

$$c\rho dV \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + q_z dV$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + q_z$$



⊕ pro izotropní a homogenní prostředí bez zdrojů tepla: $\lambda = \text{konst.}$ $q_z = 0$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

a [m²s⁻¹] ...součinitel teplotní vodivosti

-určuje, jak rychle se v látce vyrovnávají teplotní rozdíly

Řešení rovnice:

$$T = f(x, y, z, \tau)$$

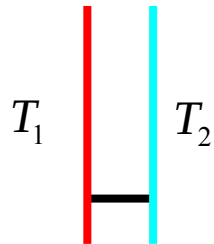
+ okrajové a počáteční podmínky

Přenos tepla vedením

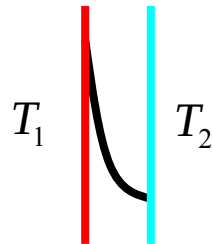
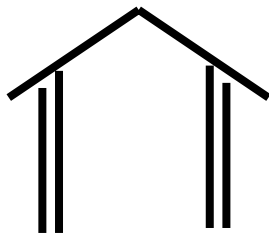
Nestacionární vedení tepla

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T$$

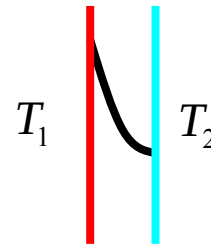
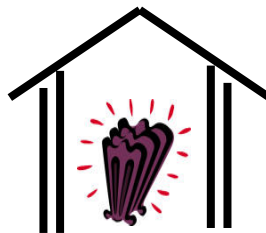
rozložení teploty je závislé na čase



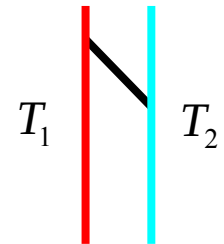
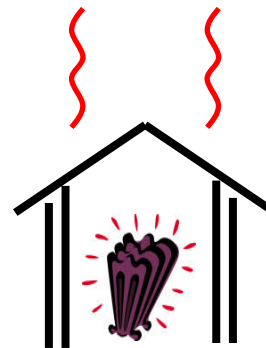
$\tau = 0$
vyrovnaná
teplota
 $T_1 = T_2$



$\tau = 10 \text{ min.}$
postupné
prohřívání
stěny
 $T_1 > T_2$



$\tau = 30 \text{ min.}$
oteplování
vnějšího povrchu
stěny
 $T_1 > T_2$



$\tau = 60 \text{ min.}$
ustálený stav
 $T_1 > T_2$
 $T_1, T_2 \dots \text{konst.}$



Přenos tepla vedením

Stacionární (ustálené) vedení tepla

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$$

- ⊕ celkový tepelný tok vstupující do materiálu je roven toku, který materiál opouští (je konstantní v čase)
- ⊕ prostorové rozložení teploty T je konstantní v čase $\nabla^2 T = 0$

Jednorozměrné vedení tepla:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

- ⊕ dá se použít, pokud můžeme přibližně uvažovat přenos tepla pouze v jednom směru (např. vedení tepla homogenní stěnou)

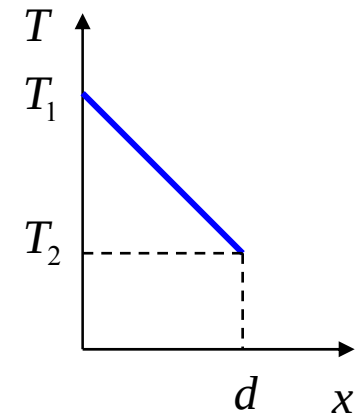
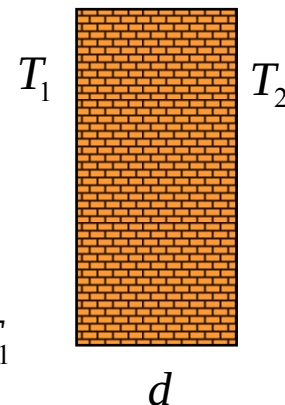
$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$



$$T(x) = C_1 x + C_2$$

+ 2 okrajové podmínky
 $T(x_1) = T_1, T(x_2) = T_2$

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{d} x + T_1$$



$$j_Q = -\lambda \text{grad} T = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d}$$

teplota T při ustáleném jednorozměrném vedení tepla je lineární funkcí souřadnic

Přenos tepla vedením

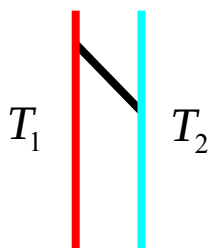
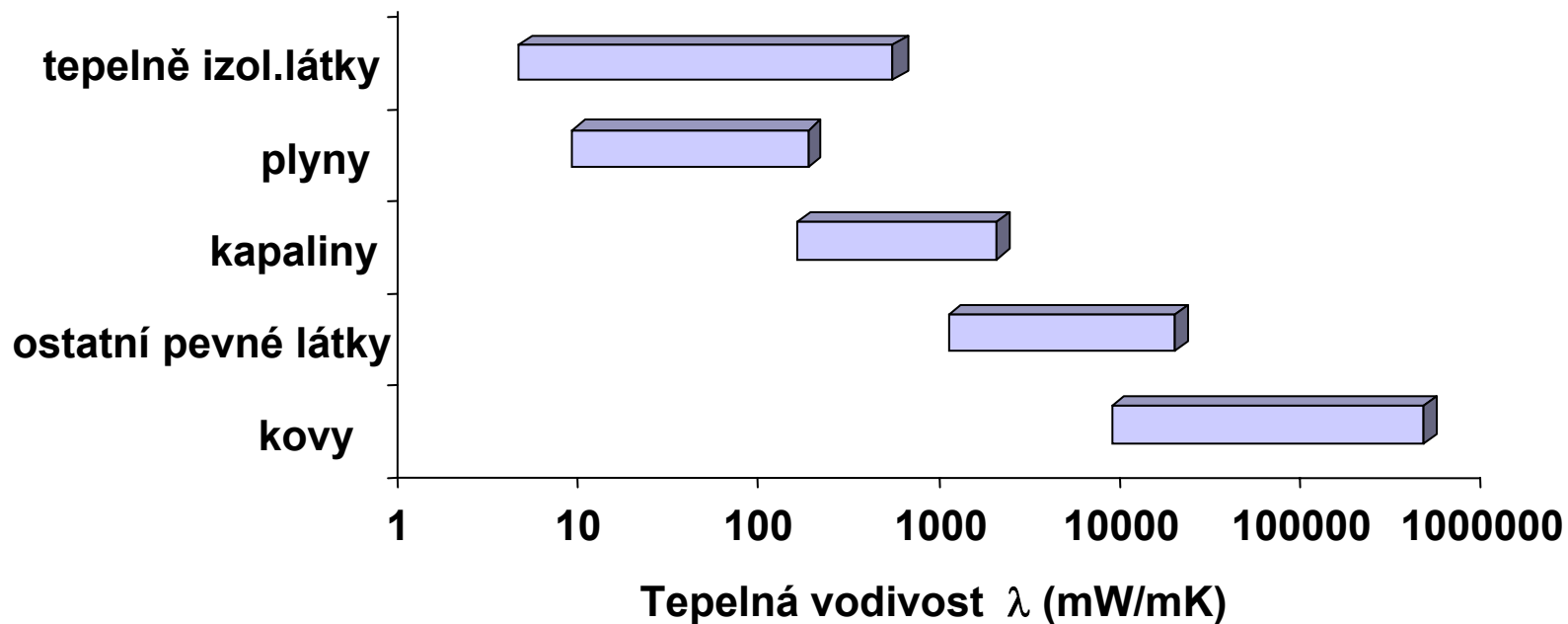
Tepelná a teplotní vodivost materiálů:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

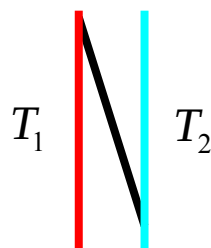
Materiál	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [kJkg ⁻¹ K ⁻¹]	$a \cdot 10^6$ [m ² s ⁻¹]
ocel	80-90	7800	0,4-0,5	20-29
hliník	229	2700	0,89	95
dřevo	0,7-1,6	500-1000	1,0-1,5	0,5-3,2
cihla	0,2-0,8	1400-2100	1,0-1,5	0,08-0,6
beton	0,5-0,8	1800-2200	0,7-1,1	0,2-0,6
sklo	0,75	2400-4700	0,7-0,9	0,18-0,45
led	2,2	917	2,09	1,1
voda	0,55-0,75	1000	4,2	0,13-0,18
suchý vzduch	0,025-0,03	1,0-1,45	1,0-1,05	16-30

Přenos tepla vedením

Tepelná vodivost materiálů:



špatná
izolace



dobrá
izolace

Přenos tepla vedením

Příklad: (růst ledu na rybníku)

- určete, za jak dlouho naroste vrstva ledu tloušťky h na rybníce při stálé teplotě t_2 okolního vzduchu

$$l = 333,2 \text{ kJ/kg}$$

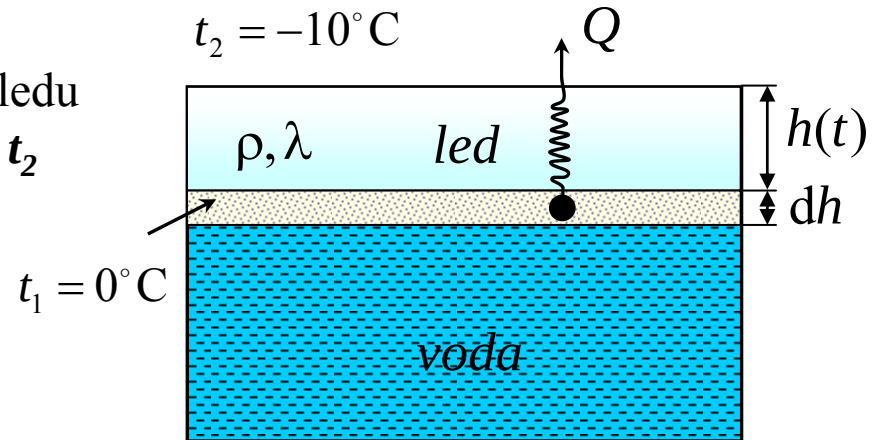
$$\lambda = 2,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\rho = 917 \text{ kg/m}^3$$

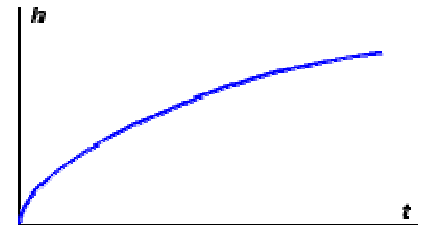
led

teplo uvolněné při
fázovém přechodu

tepelný tok procházející
vrstvou ledu



$$dQ = l dm = l \rho dV = l \rho S dh$$



$$j = \frac{dQ}{S d\tau} = -\lambda \text{grad} T = \lambda \frac{\Delta T}{h} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{h}$$

$$\frac{dh}{d\tau} = \lambda \frac{\Delta T}{l \rho h}$$

$$\int_0^h h dh = \lambda \frac{\Delta T}{l \rho} \int_0^\tau d\tau$$

$$\tau = \frac{l \rho h^2}{2 \lambda \Delta T}$$

$$h = 10 \text{ cm}$$

$$\tau \doteq 19 \text{ hod}$$

Přenos tepla prouděním

PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM:

- ⊕ přenos tepla pohybujícími se částicemi kapaliny nebo plynu

volné proudění

Pohyb kapaliny či plynu je způsobován pouze rozdíly v hustotě látky, vyvolanými její různou teplotou



nucené proudění

Příčinou pohybu je rozdíl tlaků vytvořený uměle (např. čerpadlem, větrákem)

- využíváno pro rychlejší vyrovnávání teplotních rozdílů v tekutině (míchání)

- ⊕ teoretický popis proudění tepla je složitý (v technické praxi se často určuje experimentálně)
- ⊕ v praxi chceme zjistit, jaký tepelný tok j_Q přechází mezi proudící tekutinou a okolními objekty (např. pevnou stěnou)

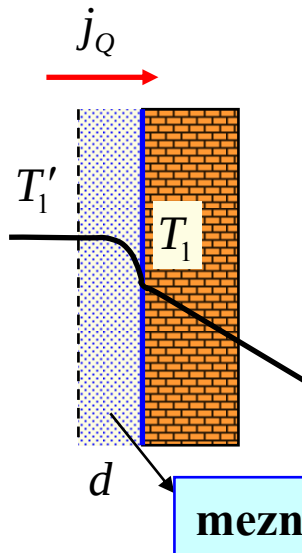
Přenos tepla prouděním

- ⊕ Při proudění tekutin kolem pevných těles se vlivem přilnavosti molekul vytvoří **tenká mezní vrstva s velmi malou tepelnou vodivostí** (funguje jako izolant), ve které probíhá sdílení tepla prakticky pouze vedením
- ⊕ **Hustotu tepelného toku** mezi proudící tekutinou a okolními objekty (např. pevnou stěnou) je možno velmi přibližně vyjádřit jako:

Newtonův zákon

$$j_Q = \alpha (T_1' - T_1) = \alpha \Delta T$$

součinitel přestupu tepla
 α [Wm⁻²K⁻¹]



dochází k teplotnímu skoku v mezní vrstvě
povrchová teplota se liší od teploty tekutiny

mezní vrstva

Přenos tepla prouděním

součinitel přestupu tepla α

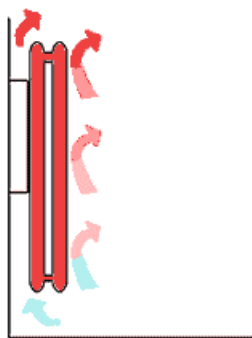
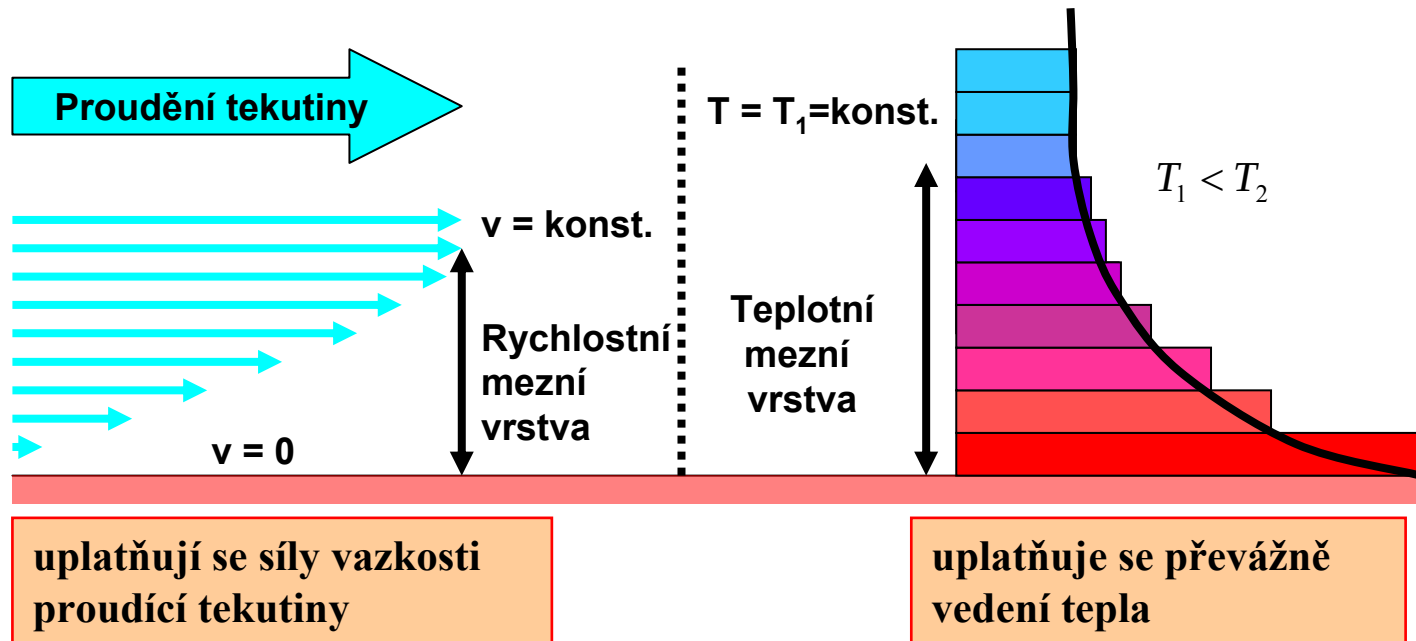
Prostředí	α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
volné proudění	
plyny	2–25
tekutiny	50–1000
nucené proudění	
plyny	25–250
kapaliny	50–20000
proudění při fázové změně	
var a kondenzace kapaliny	2500–100000

- obecně závisí na:

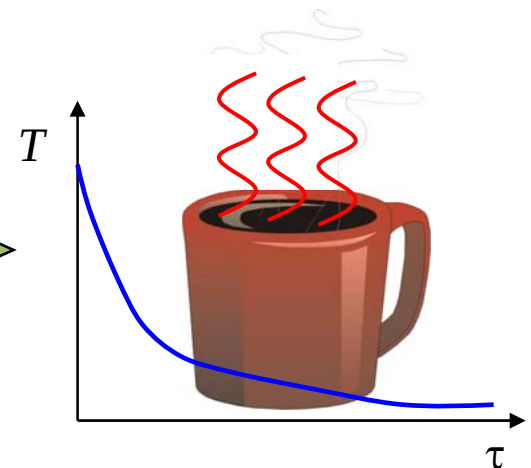
- a) vlastnostech tekutiny,
- b) povrchu stěny,
- c) rozložení teploty a rychlosti proudění v okolí stěny

určuje tepelnou ztrátu
(zisk) povrchu pevné látky
při proudění okolní
tekutiny

Přenos tepla vedením a prouděním



kombinované
případy sdílení
tepla



Přenos tepla vedením a prouděním

⊕ Příklad: (Prostup tepla zdi)

- zeď v příčném směru homogenní
- tepelný tok je časově konstantní v příčných řezech zdi

$$j_Q = \alpha_i (t_i - t_1)$$

Přestup tepla (vnitřní povrch)

$$j_Q = \frac{\lambda_1}{d_1} (t_1 - t_2)$$

Vedení tepla (vnitřní omítka)

$$j_Q = \frac{\lambda_2}{d_2} (t_2 - t_3)$$

Vedení tepla (zeď)

$$j_Q = \frac{\lambda_3}{d_3} (t_3 - t_4)$$

Vedení tepla (vnější omítka)

$$j_Q = \alpha_e (t_4 - t_e)$$

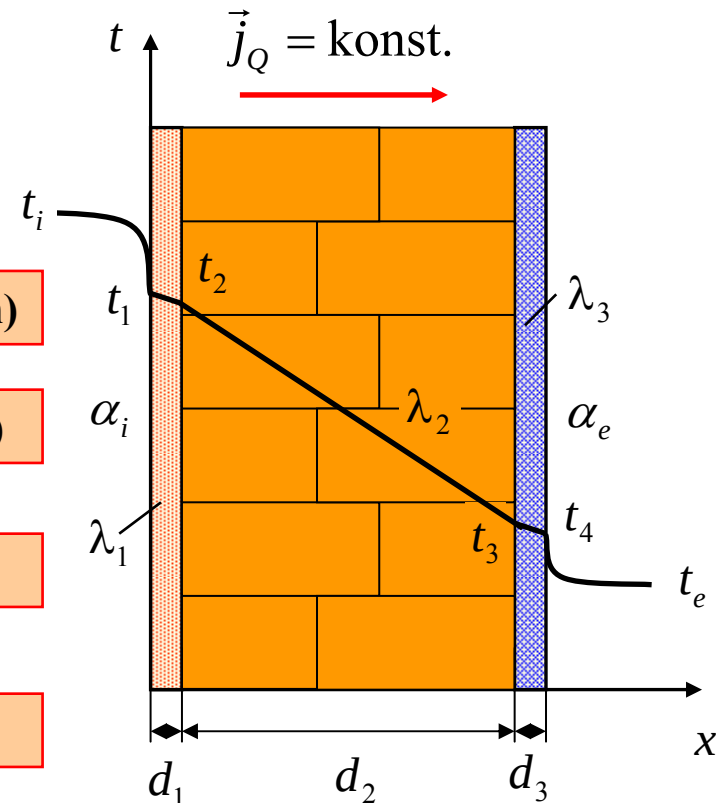
Přestup tepla (vnější povrch)



$$j_Q = \frac{Q}{S\tau} = \frac{(t_i - t_e)}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{k=1}^3 \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{(t_i - t_e)}{R_\lambda}$$



$$R_\lambda = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_e} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$



měrný tepelný odpor R_λ

Přenos tepla vedením a prouděním

⊕ **Příklad:** (tepelná ztráta okenní konstrukce)

$$d_s = 4 \text{ mm}$$

$$d_v = 30 \text{ mm}$$

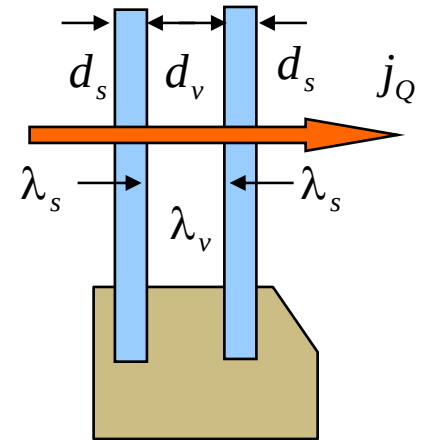
$$\lambda_s = 0,75 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\lambda_v = 0,02 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

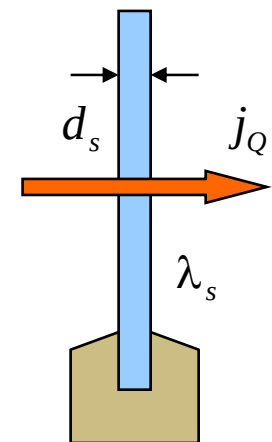
$$t_e = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_i = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$j_Q = \frac{Q}{S\tau} = \frac{(t_i - t_e)}{\frac{2d_s}{\lambda_s} + \frac{d_v}{\lambda_v}} = 26,5 \text{ W/m}^2$$



$$j_Q = \frac{Q}{S\tau} = \frac{(t_i - t_e)}{\frac{d_s}{\lambda_s}} = 7500 \text{ W/m}^2$$



Přenos tepla vedením a prouděním

- ✦ Efekt proudění tepla je možné demonstrovat na tzv. ochlazovacím účinku větru (wind chill effect)

$$\text{člověk... } j_Q = 60 - 180 \text{ W/m}^2$$

- ✦ Pocit tepla resp. zimy u člověka (živého organismu) je závislý na velikosti tepelného toku j_Q , který je mu dodáván resp. odebírán zvenku přes pokožku

$$T_1^*$$

vnímaná teplota

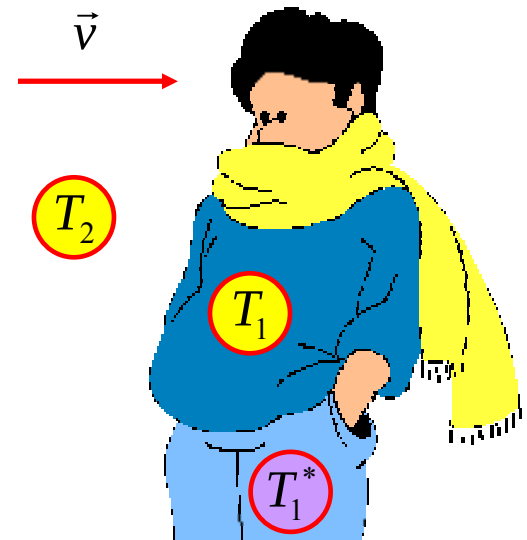
- ✦ Součinitel přestupu tepla α je závislý na rychlosti proudění

$$j_Q = \alpha \cdot (T_1 - T_2)$$

Wind-chill faktor

$$T_1^* = 13.2 + 0.6215 T_2 - 11.37 v^{0.16} + 0.3965 T_2 v^{0.16}$$

vyjadřuje pouze subjektivní
pocit vnímání chladu



Přenos tepla vedením a prouděním

Wind-chill efekt

	Teplota okolního vzduchu T_{air} (°C)					
V_{10} (km/h)	5	0	-5	-10	-15	-20
5	4	-2	-7	-13	-19	-24
10	3	-3	-9	-15	-21	-27
15	2	-4	-11	-17	-23	-29
20	1	-5	-12	-18	-24	-30
25	1	-6	-12	-19	-25	-32
30	0	-6	-13	-20	-26	-33
35	0	-7	-14	-20	-27	-33
40	-1	-7	-14	-21	-27	-34
45	-1	-8	-15	-21	-28	-35
50	-1	-8	-15	-22	-29	-35
55	-2	-8	-15	-22	-29	-36
60	-2	-9	-16	-23	-30	-36
65	-2	-9	-16	-23	-30	-37
70	-2	-9	-16	-23	-30	-37
75	-3	-10	-17	-24	-31	-38
80	-3	-10	-17	-24	-31	-38

Přenos tepla zářením

PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (SÁLÁNÍM):

- ⊕ energie tepelného záření je přenášena elektromagnetickým zářením (fotony)
- ⊕ každé těleso vyzařuje elektromagnetické záření (oscilace elektronů)
- ⊕ vyzařování je závislé na absolutní teplotě těles
- ⊕ přenos tepla probíhá i ve vakuu
- ⊕ každé těleso též pohlcuje elektromagnetické záření
- ⊕ zářením se může přenášet energie i v prostředí s nižší teplotou než je teplota těles, která vyzařují a přijímají záření

Emise záření

Absorpce záření

Intenzita záření

- ⊕ záření je charakterizováno intenzitou, což je množství energie dopadající za jednotku času na jednotkovou plochu ve směru šíření energie

Přenos tepla zářením

spektrální odrazivost

$$R_\lambda = R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

spektrální pohltivost

$$A_\lambda = A(\lambda) = \frac{I_A(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

spektrální propustnost

$$T_\lambda = T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

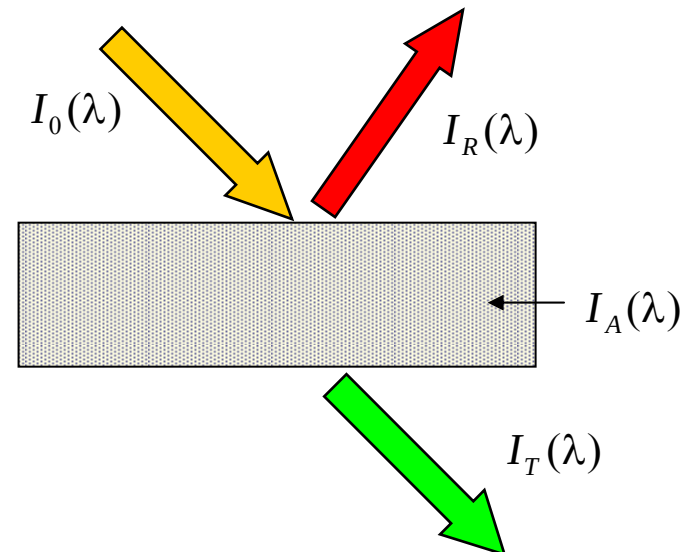
$A = 1$... absolutně černé těleso

$R = 1$... zrcadlové nebo bílé těleso

$T = 1$... průteplivé těleso

$$R(\lambda) + T(\lambda) + A(\lambda) = 1$$

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{\int_0^\infty I_R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty I_0(\lambda) d\lambda} \quad \text{apod.}$$



Přenos tepla zářením

POPIS VYZÁŘOVÁNÍ TĚLES:

Intenzita vyzařování: $I_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \text{ [W/m}^2\text{]}$

⊕ zářivý tok vyzařený jednotkovou plochou povrchu tělesa

Spektrální intenzita vyzařování: $I_\lambda = \frac{dI_e}{d\lambda} \text{ [W/m}^3\text{]}$

⊕ část intenzity vyzařování připadající na interval $(\lambda, \lambda + d\lambda)$



Kirchhoffův zákon

poměr spektrální intenzity vyzařování I_λ ke spektrální pohltivosti A_λ nezávisí na povaze těles (materiálu, úpravě povrchu,...), ale pouze na jejich teplotě T a vlnové délce λ

**látky absorbují
nejsilněji spektrum,
které vyzařují nejvíce**

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

$$\frac{I_e}{A} = g(T)$$

Přenos tepla zářením

ZÁŘENÍ ABSOLUTNĚ ČERNÉHO TĚLESA:

- ⊕ teoreticky bylo zkoumáno tzv. **absolutně černé těleso** $A_\lambda = 1$ ($A = 1$)

$$\frac{I_{0\lambda}}{A_\lambda} = f(T, \lambda)$$

$$\frac{I_{0e}}{A} = g(T)$$

pohlcuje všechnu
dopadající energii

- ⊕ úkolem bylo nalézt správný tvar **funkcí** $f(T, \lambda)$ a $g(T)$

Planckův zákon

- ⊕ odvozen na základě kvantové teorie

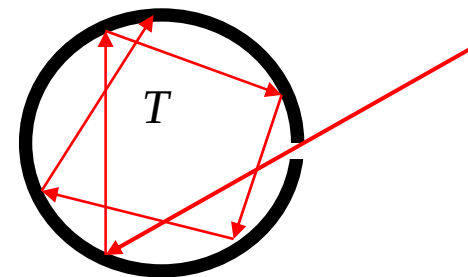
$$I_{0\lambda} = \frac{hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} = f(T, \lambda)$$

$$h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Planckova konstanta

$$k = \frac{R}{N_A} = 138,05 \cdot 10^{-25} \text{ JK}^{-1}$$

Boltzmanova konstanta



Přenos tepla zářením

Planckův zákon

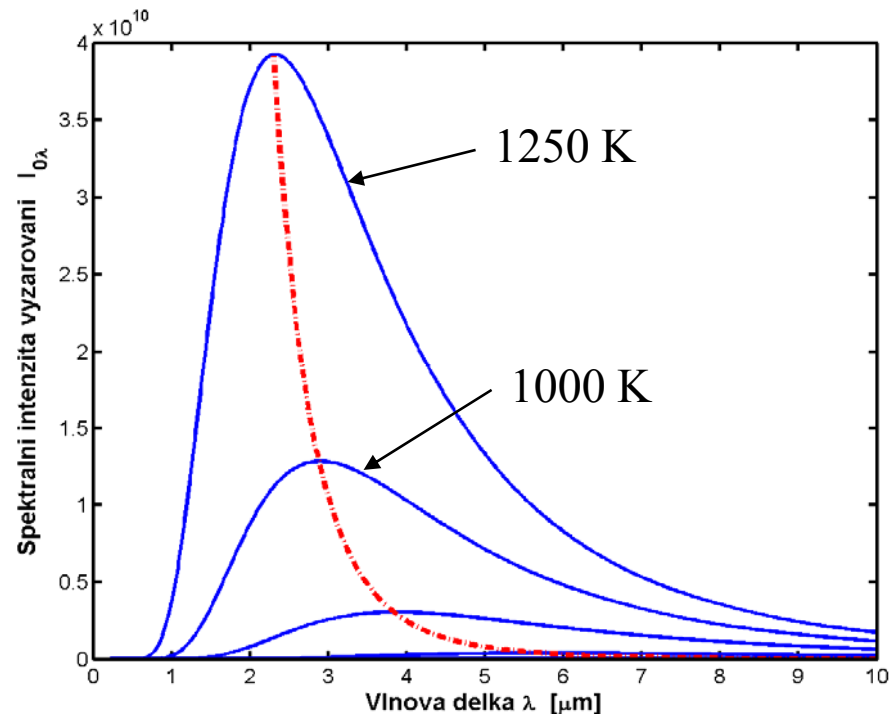
- ⊕ maximum vyzařování se posouvá s rostoucí teplotou ke kratším teplotám (vyzařované záření tedy můžeme registrovat i lidským okem)

$$\frac{\partial I_{0\lambda}}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$



**můžeme určit střední
teplotu povrchu
vyzařujících těles**

Wienův zákon



Přenos tepla zářením

Stefan-Boltzmannův zákon

$$I_{0e} = \int_0^{\infty} I_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \longrightarrow$$

intenzita vyzařování
absolutně černého
tělesa je úměrná čtvrté
mocnině absolutní
teploty T



$$\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Stefan-Boltzmannova konstanta

⊕ z praktických důvodů se Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje ve tvaru:

$$I_{0e} = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$C_0 = 10^8 \sigma \quad \longrightarrow$$

součinitel sálání
černého tělesa

Přenos tepla zářením

- ⊕ v praxi neexistují absolutně černá tělesa, tělesa vždy částečně odrážejí záření

Šedá tělesa

- ⊕ mají konstantní pohltivost pro všechny vlnové délky

$$A = A_\lambda = \frac{C}{C_0} = \text{konst.}$$

Pohltivost závisí na povrchu tělesa (hladký x drsný povrch)

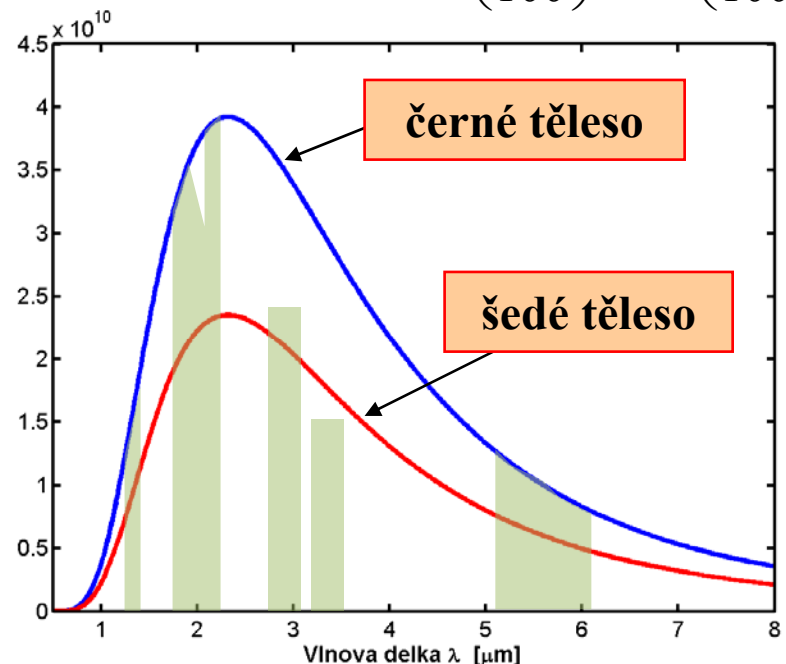
Selektivní zářiče

$$A_\lambda \neq \text{konst.}$$

- ⊕ na různých vlnových délkách mají různou pohltivost (např. kovy, plyny a páry)

intenzita
vyzařování
šedého tělesa

$$I_e = C_0 A \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4$$



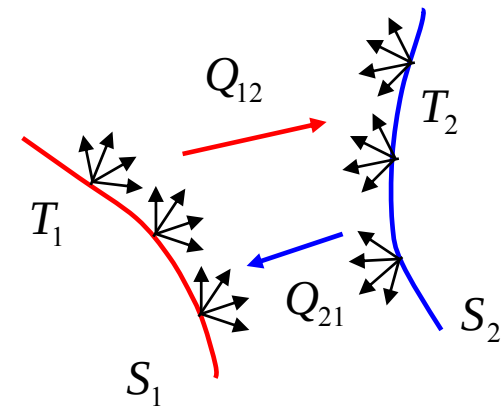
Přenos tepla zářením

⊕ pro **sdílení tepla zářením** mezi dvěma plochami S_1 a S_2 platí:

$$Q_{12} = C_{12} S_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

**energie vyzářená z tělesa 1 za 1s a
pohlčená tělesem 2**

C_{12} ... **vzájemný součinitel sálání**
(v tabulkách nebo výpočtem)
- závisí na tvaru a poloze ploch

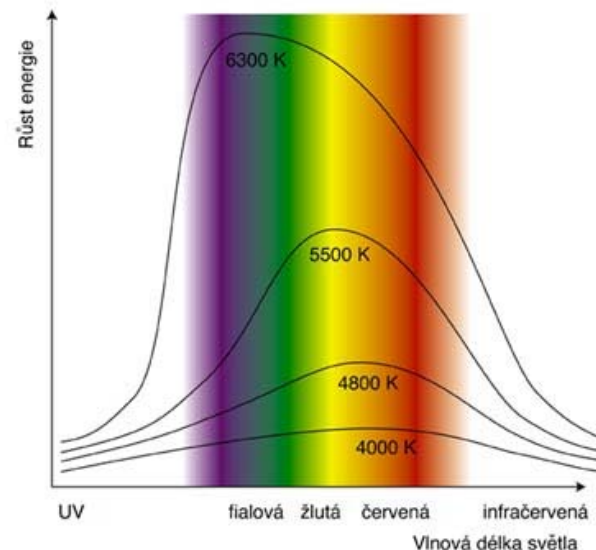


Přenos tepla zářením

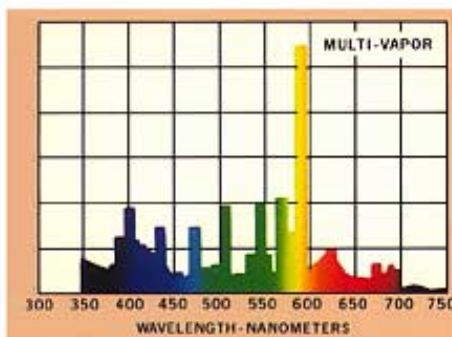
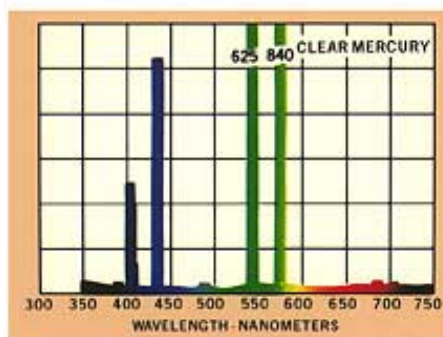
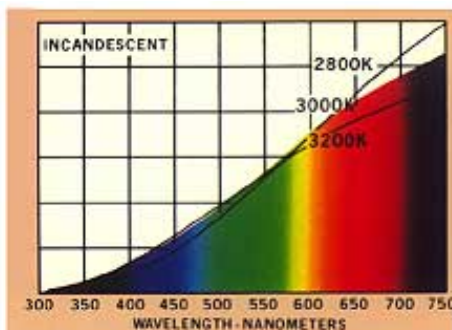
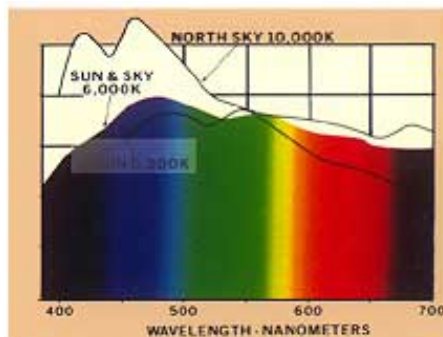
Teplota barvy světla:

- ⊕ absolutní teplota černého tělesa, jehož vyzařované světlo má tutéž barvu

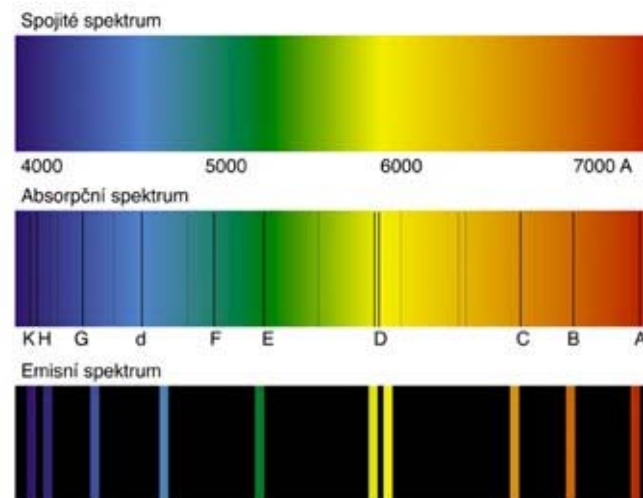
Druh světla	Teplota barvy T [K]
plamen svíčky	1850
40-200 W žárovka	2700-3000
východ Slunce	3200
měsíční světlo	4100
přímé slunce	5000-5400
denní světlo (slunce)	5500-6500
denní světlo (zataženo)	6000-7500
modrá obloha	9000-14000



Přenos tepla zářením

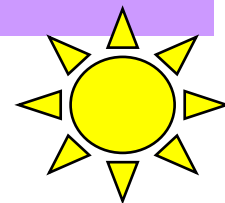


barevné složení
zdrojů světla



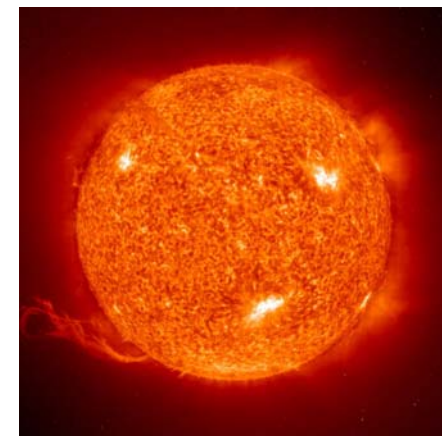
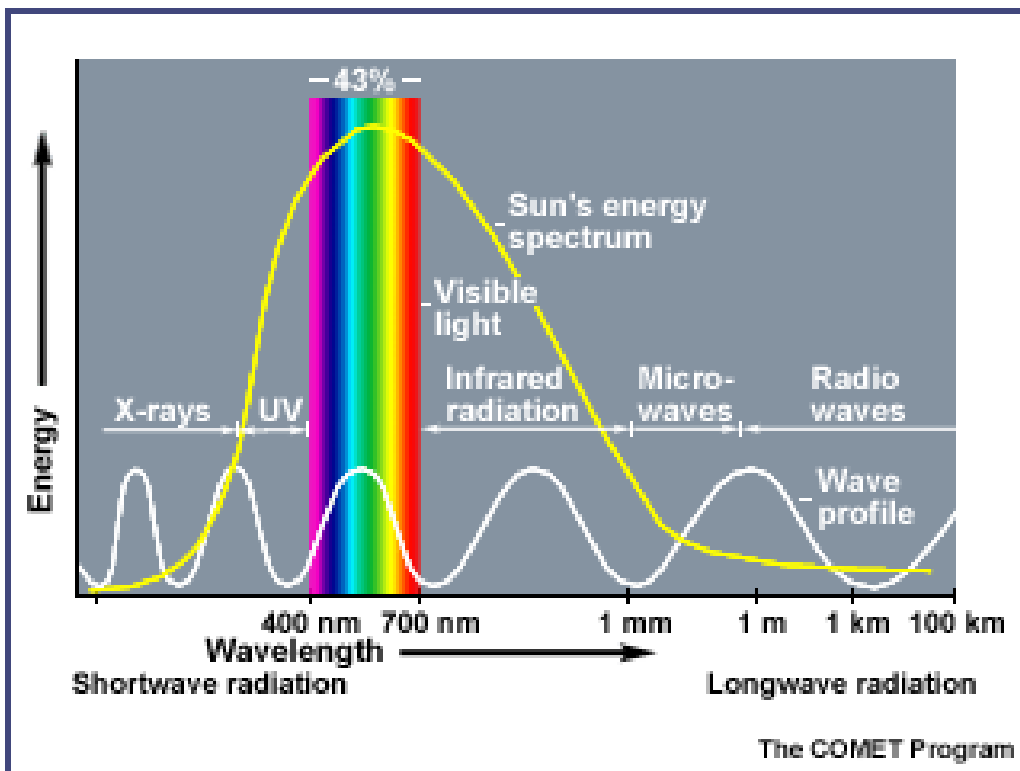
rostoucí teplota

Přenos tepla zářením



Záření Slunce

- ⊕ přibližně se dá uvažovat, že Slunce vyzařuje jako černé těleso s maximální intenzitou vyzařování vlnových délek okolo $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$



Složení Slunce:

80 % ... vodík

20 % ... helium

Přenos tepla zářením

Záření Slunce

střední teplota povrchu Slunce

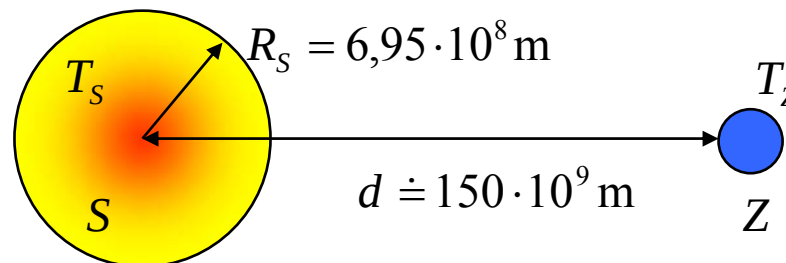
$$T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{\max}} \doteq 5780 \text{ K}$$

intenzita vyzařování
povrchu Slunce

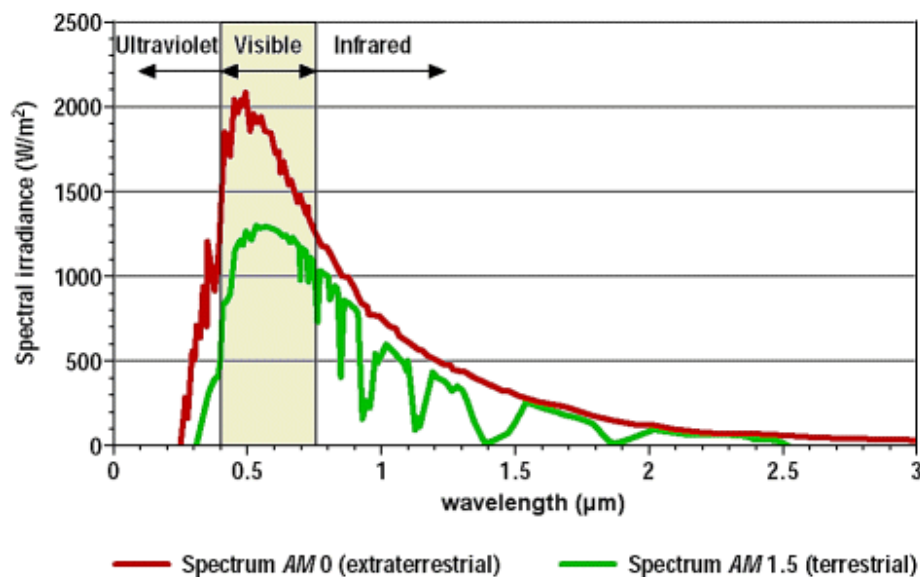
$$I_{0e} = \sigma T_S^4 \doteq 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

intenzita dopadajícího
slunečního záření na Zemi

$$I_d = \frac{P}{S'} = \frac{I_{0e} S_s}{4\pi d^2} = \frac{R_S^2 \sigma T_S^4}{d^2} \doteq 1377 \text{ W/m}^2$$

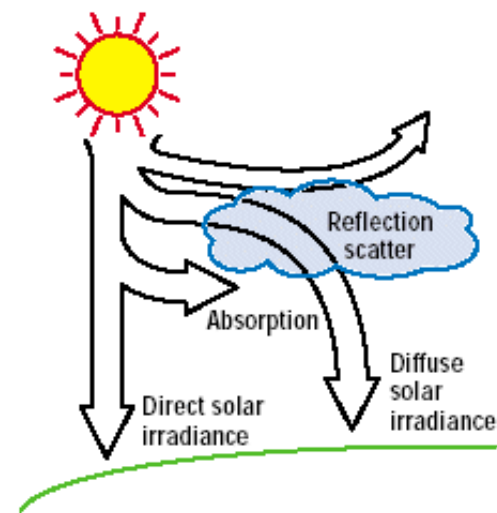


Přenos tepla zářením



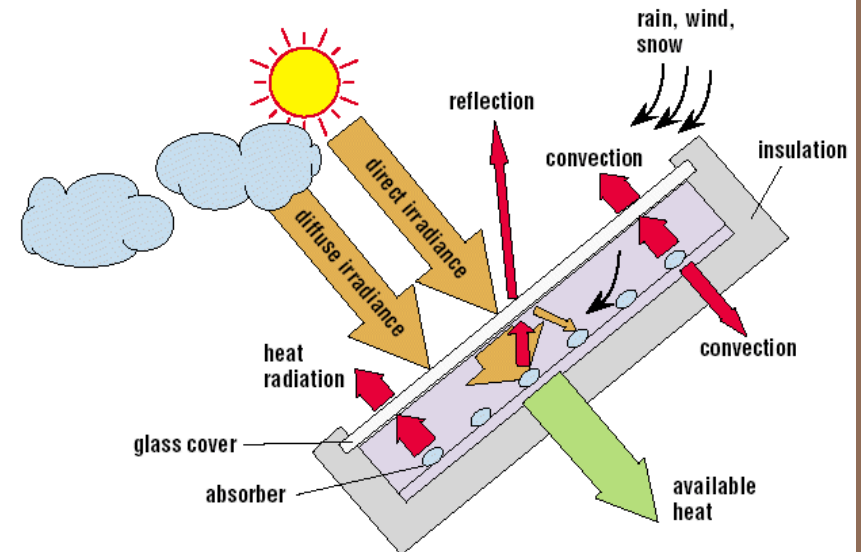
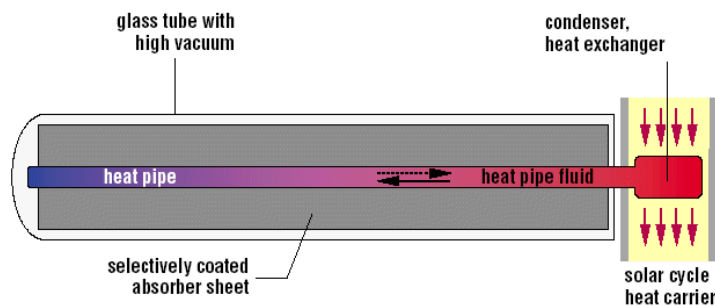
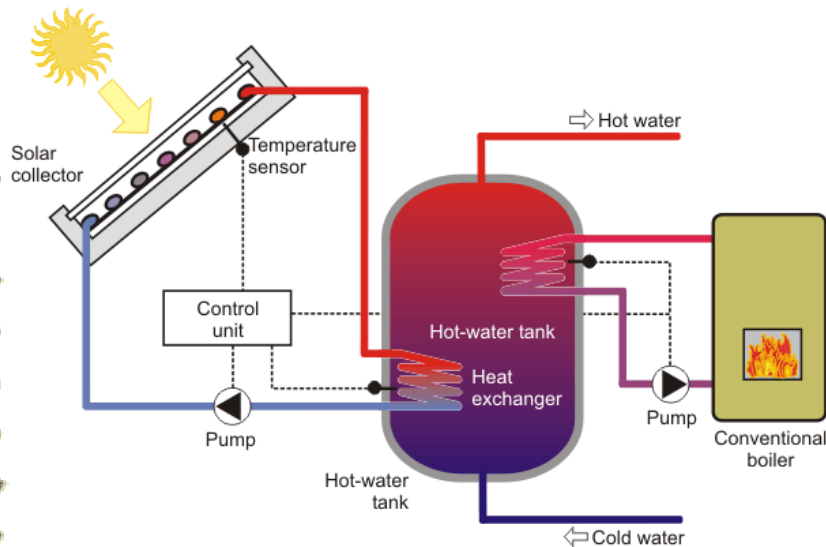
Energie slunečního záření dopadající na zemský je obrovská – dá se využít jako „téměř nevyčerpatelný“ zdroj energie

Atmosféra Země pohlcuje účinně některé typy záření (UV, IR), viditelné záření dobře propouští



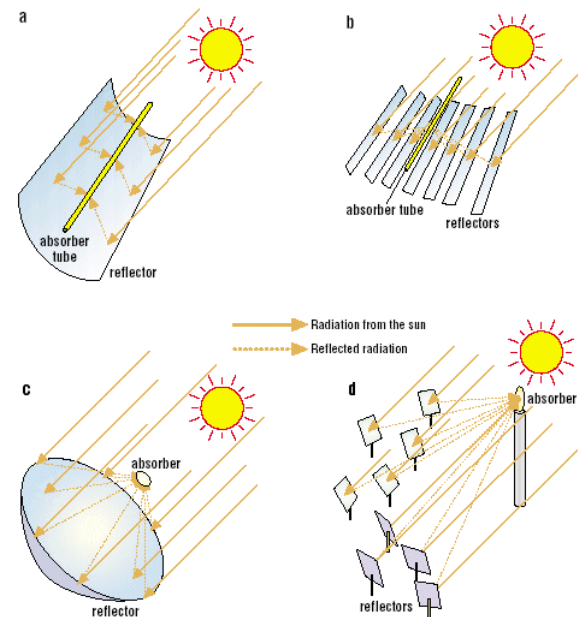
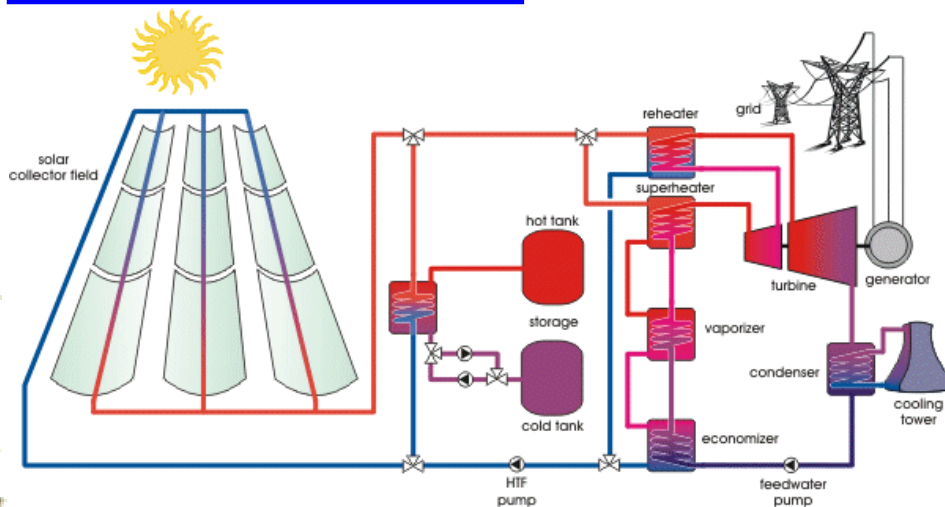
Přenos tepla zářením

Solární termální kolektory:



Přenos tepla zářením

Solární elektrárny:



Účinnost: 13-25%

Dopadající energie: $W > 1800 \text{ kWh/m}^2$ za rok



1% plochy Sahary
pokryté solárními
panely by bylo
schopno zajistit
veškerou poptávku
energie

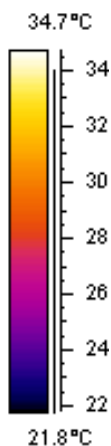
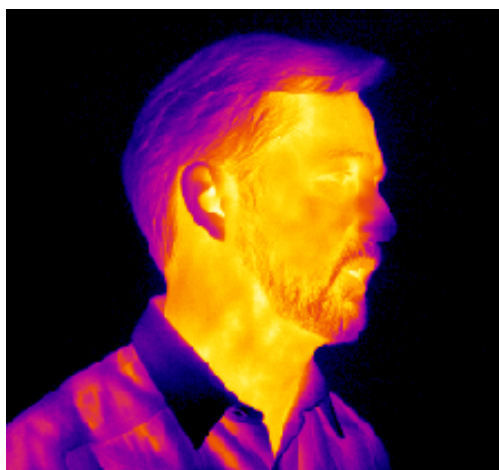
Přenos tepla zářením

Příklad: (tepelné vyzařování živočichů)

- budeme-li zjednodušeně předpokládat, že člověk (resp. jiný živočich) vyzařuje na stejné vlnové délce jako černé těleso o stejné teplotě $t \doteq 37\text{ }^{\circ}\text{C}$

vlnová délka záření:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \doteq 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9,3 \text{ }\mu\text{m}$$



**energie je vyzařována v oblasti
infračerveného záření**

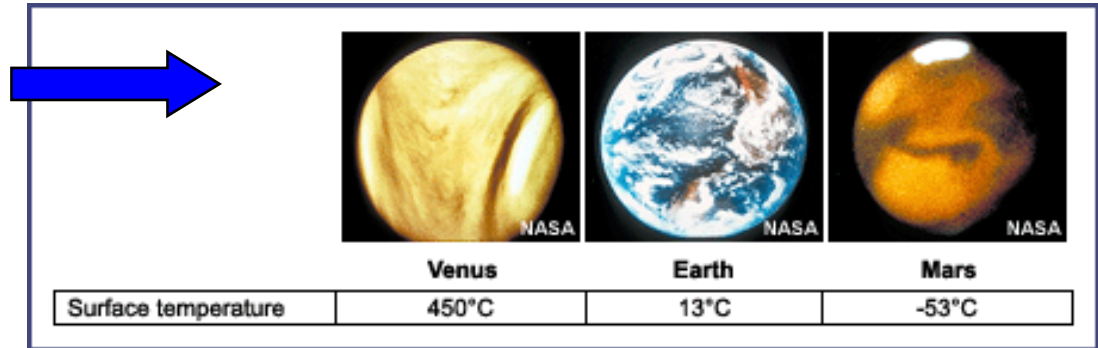


**aplikace v infračervených
systémech pro detekci
pohybu živých objektů**

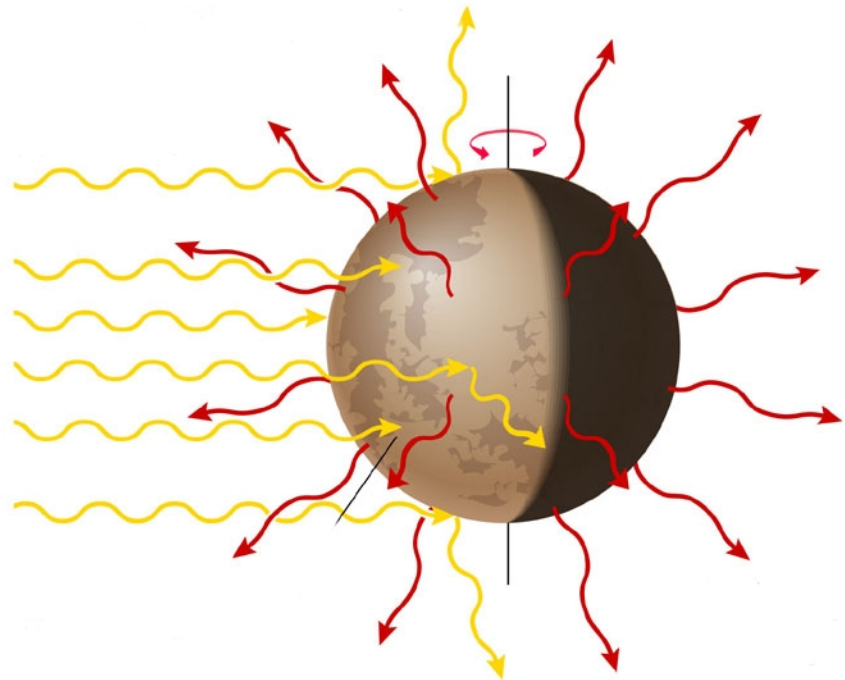


Přenos tepla zářením

povrchová teplota
planet



část dopadající energie je
absorbována a planeta
zpětně vyzařuje svým
povrchem



Přenos tepla zářením

výkon dopadajícího záření na Zemi:

$$P_d = I_d S_d = \frac{R_s^2 \sigma T_s^4}{d^2} \pi R_z^2$$

výkon vyzářeného záření Zemí:

$$P_v = I_z S_z = 4\pi R_z^2 \sigma T_z^4$$

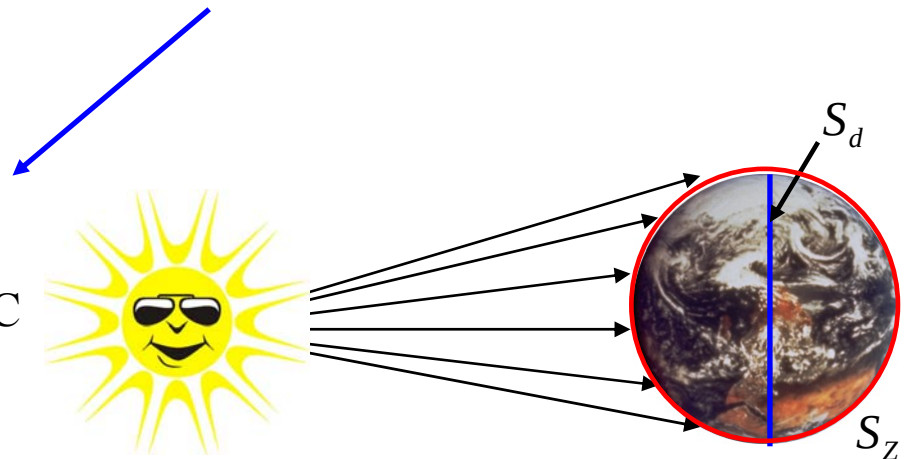
zákon zachování energie:

$$\xi P_d = P_v \quad \longrightarrow \quad T_z = \sqrt{\frac{\sqrt{\xi} R_s}{2d}} T_s$$

$$\xi = 64 \% \quad \longrightarrow \quad T_z \doteq 249 \text{ K} = -24^\circ \text{C}$$

$$\xi = 100 \% \quad \longrightarrow \quad T_z \doteq 278 \text{ K} = 5^\circ \text{C}$$

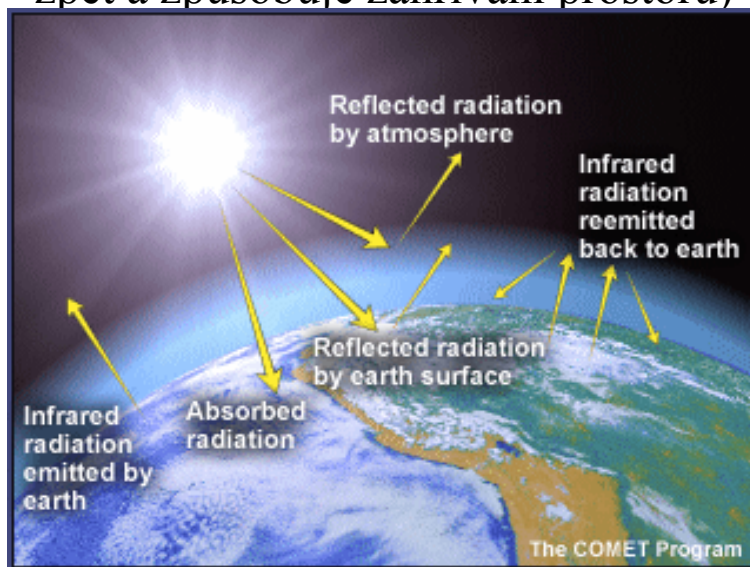
**bez uvažování vlivu
atmosféry
(skleníkového efektu)**



Přenos tepla zářením

Skleníkový efekt

- ⊕ různé materiály mají různou spektrální propustnost a odrazivost
- ⊕ mnohé průhledné nebo průsvitné materiály (sklo, vzduch) propouštějí krátkovlnné viditelné sluneční záření
- ⊕ toto sluneční záření je částečně pohlcováno běžnými materiály (např. zemským povrchem) - způsobuje ohřívání materiálů
- ⊕ předměty ovšem vzhledem ke své nízké teplotě vyzařují dlouhovlnné záření, které neprochází např. sklem nebo je absorbováno určitými plyny (odráží se zpět a způsobuje zahřívání prostoru)

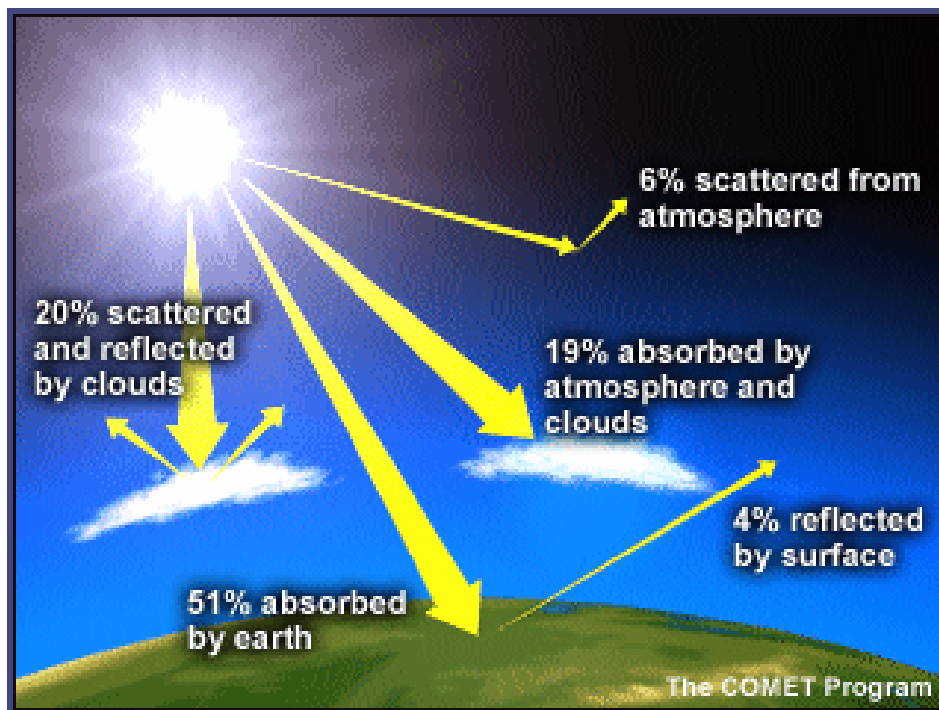


**skleníkový efekt
umožňuje život na
Zemi**

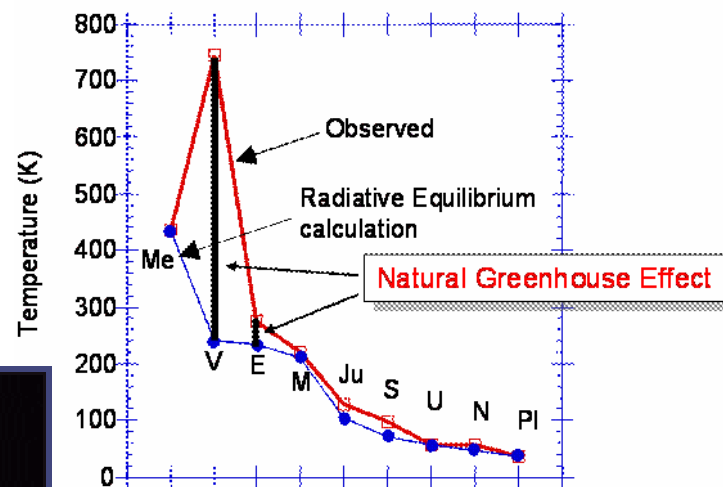
bez tohoto jevu by
nebyla na Zemi
příjemná teplota

Přenos tepla zářením

Skleníkový efekt



Natural Greenhouse Effect



skleníkové plyny

- kyslíčník uhličitý CO_2
- vodní páry (H_2O),
- methan (CH_4),
- oxid dusičitý (NO_2) ...

tyto plyny absorbují
tepelné záření

Difúze

PŘENOS HMOTY DIFÚZÍ:

jde o přenos hmoty

- ⊕ samovolné pronikání molekul z oblasti vyšší koncentrace do oblasti nižší koncentrace vlivem tepelného pohybu částic a jejich vzájemných srážek
- ⊕ **Difúzní proud** může být vyvolán různými způsoby:

Obyčejná difúze

**vyvolána
gradientem
koncentrace**

Termodifúze

**vyvolána
gradientem
teploty**

Barodifúze

**vyvolána
gradientem
tlaku**



Difúze

OBYČEJNÁ DIFÚZE

- ⊕ uvažujme **dvousložkovou směs** chemicky neaktivních látek
- ⊕ každá složka a směs jako celek se může pohybovat různou rychlostí

parciální hustoty složek ρ_1, ρ_2

$$\rho_i = \frac{dm_i}{dV}$$

$$\rho = \frac{dm}{dV} = \sum \rho_i$$

koncentrace složek:

$$c_1 = \frac{m_1}{m} = \frac{\rho_1}{\rho}$$

$$c_2 = \frac{m_2}{m} = \frac{\rho_2}{\rho}$$

$$\longrightarrow c_1 + c_2 = 1$$

bilance hybnosti:

$$\rho \vec{v} = \rho_1 \vec{v}_1 + \rho_2 \vec{v}_2$$

Tok hmotnosti

hustota difúzního proudu:

$$\vec{j}_1 = \rho_1 (\vec{v}_1 - \vec{v})$$

$$\vec{j}_2 = \rho_2 (\vec{v}_2 - \vec{v})$$

**hmotnost složek prošlá
zvoleným průřezem za
jednotku času**

$$\vec{j}_1 + \vec{j}_2 = \vec{0}$$

**bilance hmotnosti
(rovnice kontinuity):**

$$\longrightarrow \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_i = 0 \quad i = 1, 2$$

Difúze

OBYČEJNÁ DIFÚZE

⊕ pro obyčejnou difúzi platí:

- pokud se směs nepohybuje:

$$\vec{v} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$



$$\frac{\partial c_i \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{j}_i = 0$$



$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\text{div } \vec{j}_i = -\text{div}(-\rho D \text{grad } c_i)$$



$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D \nabla^2 c_i$$

$$\vec{j} = -\rho D \text{grad } c$$

1. Fickův zákon

součinitel difúze
 $D \text{ [m}^2\text{s}^{-1}\text{]}$

2. Fickův zákon

diferenciální
rovnice difúze