ŠÍŘENÍ TEPLA

PŘENOSOVÉ (TRANSPORTNÍ) JEVY

- **nevratné** procesy, které se projevují transportem různých fyzikálních veličin
- toky těchto veličin jsou vyvolávány gradient stavových veličin
- transport tepla probíhá po **narušení tepelné rovnováhy** soustavy
- v soustavě proběhnou **relaxační procesy**, během nichž soustava přejde do rovnovážného stavu
- v průběhu relaxačních procesů dochází k **makroskopickým dějům** spojeným s makroskopickými toky fyzikálních veličin

Pomalé nerovnovážné děje:

- relaxační doba velmi malých dílčích částí soustavy je nesrovnatelně menší, než relaxační doba celé soustavy

… **lokální rovnováha**

Předpokládejme ROVNOVÁŽNÉ PROCESY v dílčích částech soustavy, i když v celku probíhá děj nerovnovážný.

PŘENOS TEPLA = PŘENOS ENERGIE

vedením (kondukcí)

= přenos tepla z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou vzájemnými srážkami neuspořádaně se pohybujících částic látky

= teplo se takto šíří v látkách **všech skupenství**

prouděním (konvekcí)

= přenos tepla **usměrněným pohybem částic**

= lze pouze **u tekutin** (skutečný makroskopický pohyb částic, proudění tekutin)

= kapaliny a plyny jsou špatnými vodiči tepla

= šíření tepla prouděním je mnohem účinnější

zářením (radiací)

= přenos tepla **elektromagnetickým vlněním**

= elektromagnetické vlnění vysílá **každé těleso**, jehož teplota je různá od 0 K

= **tepelné záření** je elektromagnetické vlnění v rozmezí vlnových délek od 10 μm do 340 μm (resp. do 1000 μm pro infračervené záření)

= zákony záření odvozeny podle kvantové teorie elektromagnetického záření

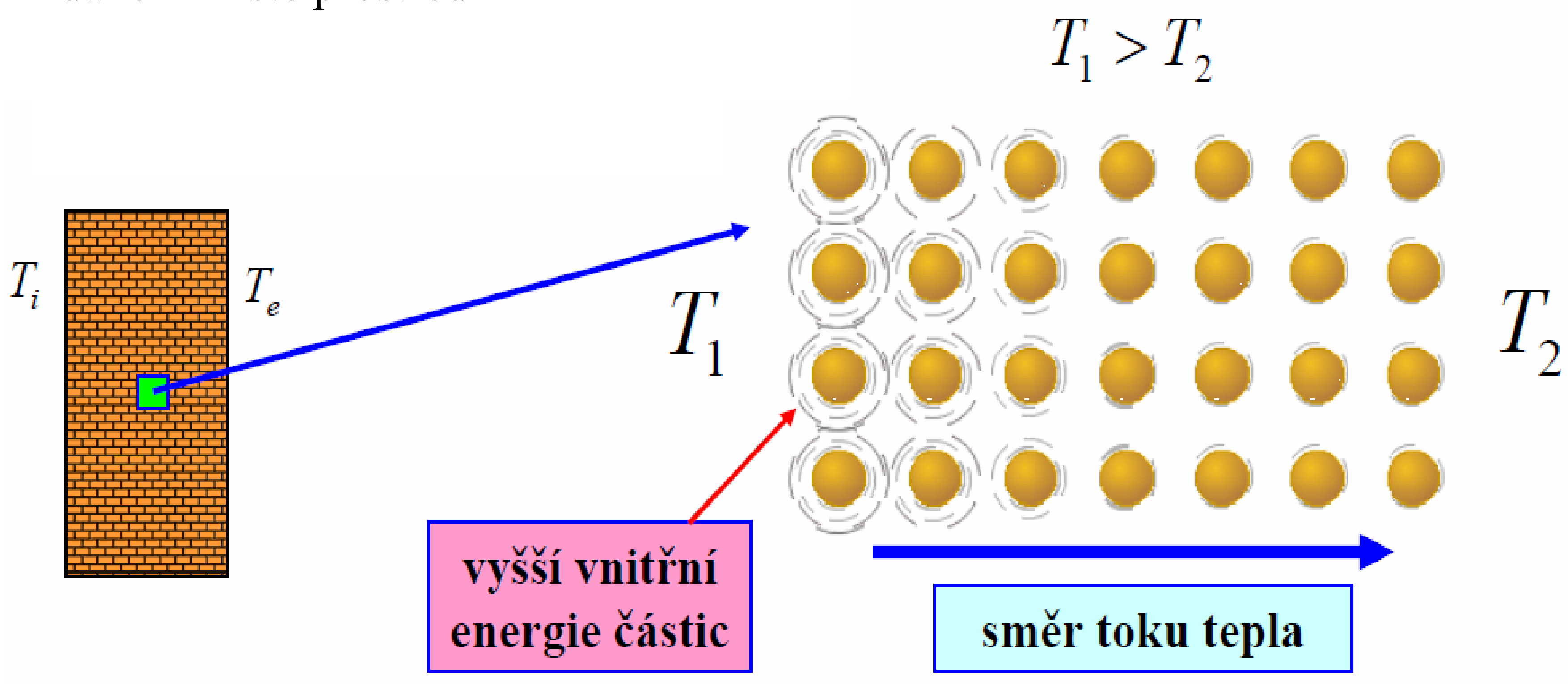
= k šíření tepla **není zapotřebí látkové prostředí** (i ve vakuu)

PŘENOS TEPLA VEDENÍM

-zejména pro **tuhé látky**

- molekuly a ionty vykonávají **tepelný pohyb** (intenzita v závislosti na lokální teplotě)
- rozdělení teplot v tělese charakterizuje tzv. **teplotní pole**
- teplo **samovolně** přechází z míst o vyšší teplotě do míst chladnějších

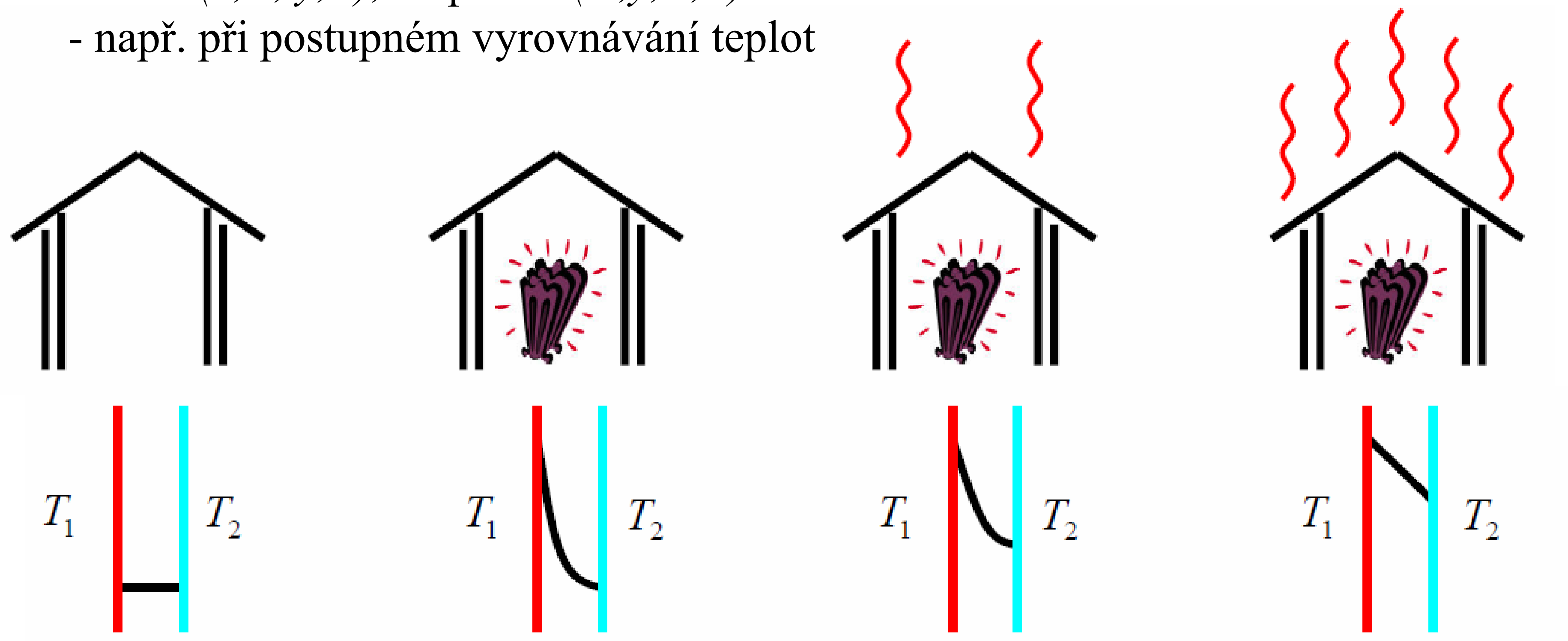
-intenzita procesu vedení tepla závisí na **maximálním teplotním spádu** v daném místě prostředí



NEUSTÁLENÉ (NESTACIONÁRNÍ) VEDENÍ TEPLA

-v případě **nestacionárního teplotního pole**, rozložení teploty je závislé na čase

- $T = T(x, z, y, \tau)$, resp. $t = t(x, y, z, \tau)$.
- např. při postupném vyrovnávání teplot



vyrovnaná teplota

postupné prohřívání stěny

ohřívání vnějšího povrchu

ustálený stav

USTÁLENÉ (STACIONÁRNÍ) VEDENÍ TEPLA

-v případě **stacionárního teplotního pole** $T = T(x, y, z)$, resp. $t = t(x, y, z)$
- prostorové rozložení teploty je **konstantní** v čase
- např. při trvale udržovaném teplotním rozdílu dvou částí tělesa

Základní charakteristiky vedení tepla (stac. i nestac.):

TEPELNÝ TOK

$$\Phi = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}\tau}$$

- teplo, které projde určitou plochou za jednotku času
- **výkon** přenášený při průchodu tepla danou plochou
- **jednotka**: W

HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU

$$\varphi = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}S_n} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}\tau . \mathrm{d}S_n}$$

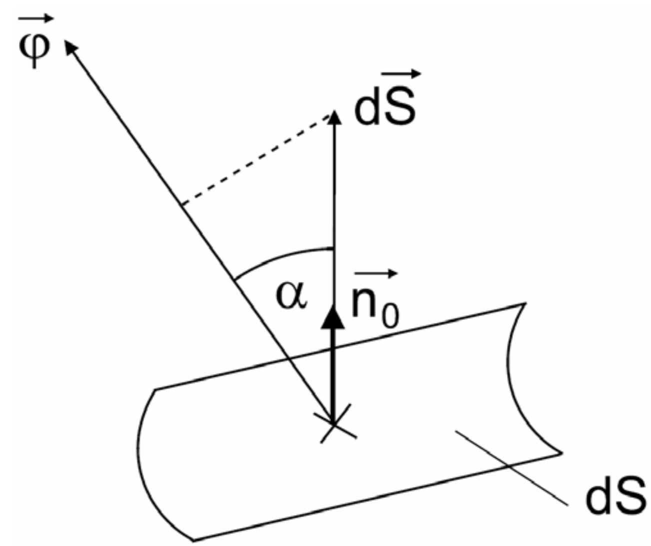
$$\vec{\varphi} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}\tau . \mathrm{d}S_n}\vec{n}$$

- **vektorová veličina**
- přenos tepla lokálně
- množství tepla, které projde jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření tepla
-**jednotka**: $\mathrm{W.m^{-2}}$

FOURIERŮV ZÁKON

hustota tepelného toku:

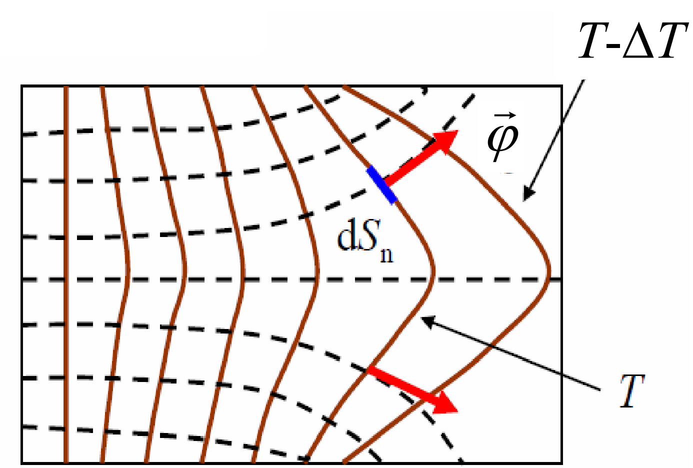
$$\vec{\varphi} = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}\tau.\mathrm{d}S_n}\vec{n}$$



hustota tepelného toku φ je **úměrná spádu teploty:**

$$\varphi \sim -\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$$

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



$$\boxed{\varphi = -\lambda\,\mathrm{grad}\,T = -\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}}$$

- **součinitel tepelné vodivosti**
- jednotka W.m^{-1}.K^{-1}

schopnost látky přenášet teplo vedením

OBECNÁ FOURIEROVA ROVNICE PRO NESTACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA

I. pro **homogenní a izotropní prostředí** bez zdrojů tepla:

$$\lambda \neq \lambda(x)$$
$$\Rightarrow \lambda = \text{konst.}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

ρ ... hustota materiálu
c ... tepelná kapacita

určuje rychlost vyrovnávání teplotních rozdílů v látce

- **součinitel teplotní vodivosti *a***
- jednotka $m^2.s^{-1}$

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

JEDNOROZMĚRNÁ FOURIEROVA ROVNICE VEDENÍ TEPLA

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = a\,\Delta T$$

TROJROZMĚRNÁ FOURIEROVA ROVNICE VEDENÍ TEPLA

II. pro homogenní a izotropní prostředí se zdroji tepla:

- v látce může vznikat další teplo přeměnou jiných druhů energie

Fourierova rovnice vedení tepla v homogenním izotropním prostředí

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\,\Delta T + \frac{q_0}{\rho c}$$

q_0 … tepelný výkon zdroje
… jednotka: $W.m^{-3}$

STACIONÁRNÍ VEDENÍ TEPLA

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

- celkový tepelný tok vstupující do materiálu je roven toku, který materiál opouští (je konstantní v čase)

$$\Delta T = 0$$

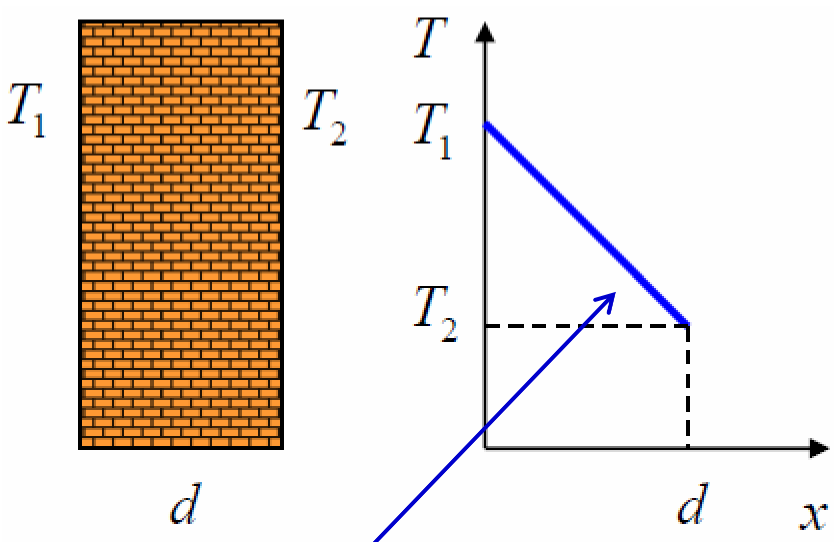
- prostorové rozložení teploty je konstantní v čase

JEDNOROZMĚRNÉ VEDENÍ TEPLA:

přenos tepla v jednom směru

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

homogenní stěna



řešení rovnice: $T = Ax + B$

okrajové podmínky:

$$T_1 = B$$
$$T_2 = Ad + B \quad \Rightarrow A = \frac{T_2 - T_1}{d}$$

$$T_1 \succ T_2$$

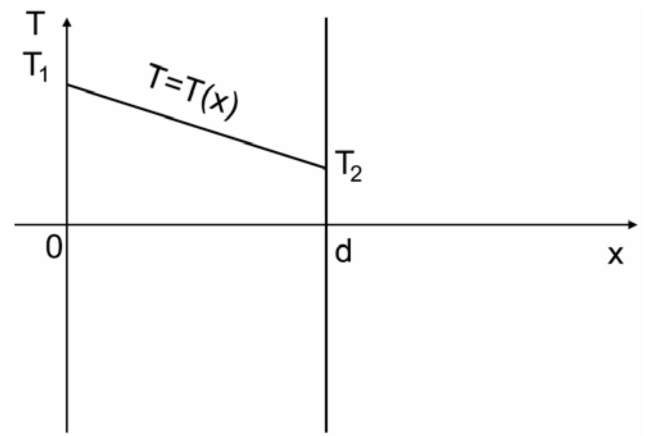
$$T = T(x) = \frac{T_2 - T_1}{d} x + T_1 = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{d} x$$

JEDNOROZMĚRNÉ VEDENÍ TEPLA HOMOGENNÍ ROVINNOU STĚNOU:

hustota tepelného toku $$\varphi = -\lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$$

směrnice přímky

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = -\frac{T_1 - T_2}{d}$$



$$\boxed{\varphi = \frac{\lambda}{d}\left(T_1 - T_2\right) = \mathrm{konst.}}$$

Teplo prošlé rovinnou stěnou o ploše S za čas τ:

$$\boxed{Q = \varphi S \tau = \frac{\lambda}{d}\left(T_1 - T_2\right) S \tau}$$

tepelná propustnost stěny

Jednorozměrné stacionární vedení tepla SLOŽENOU rovinnou stěnou

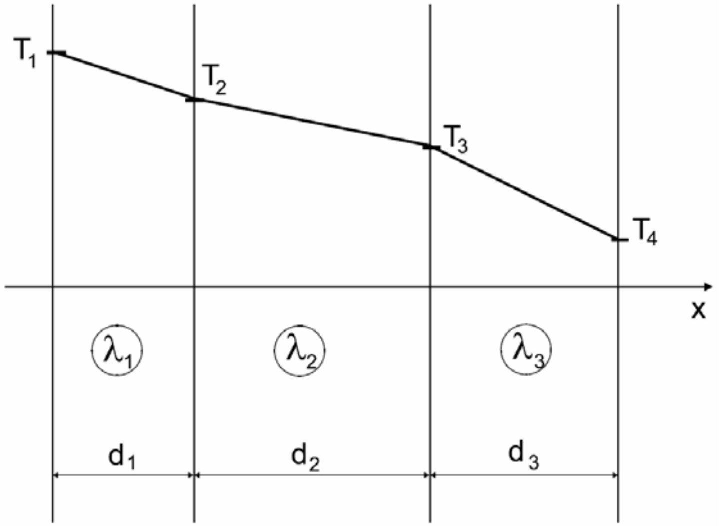
$$\varphi = \text{konst}$$

$$\varphi = \frac{\lambda_1}{d_1}(T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2}{d_2}(T_2 - T_3) = \frac{\lambda_3}{d_3}(T_3 - T_4)$$

$$(T_1 - T_2) = \frac{d_1}{\lambda_1}\varphi$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{d_2}{\lambda_2}\varphi$$

$$(T_3 - T_4) = \frac{d_3}{\lambda_3}\varphi$$



rovnice sečteme

$$T_1 - T_4 = \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}\right)\varphi$$

$$\varphi = \frac{T_1 - T_4}{\boxed{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}}}$$

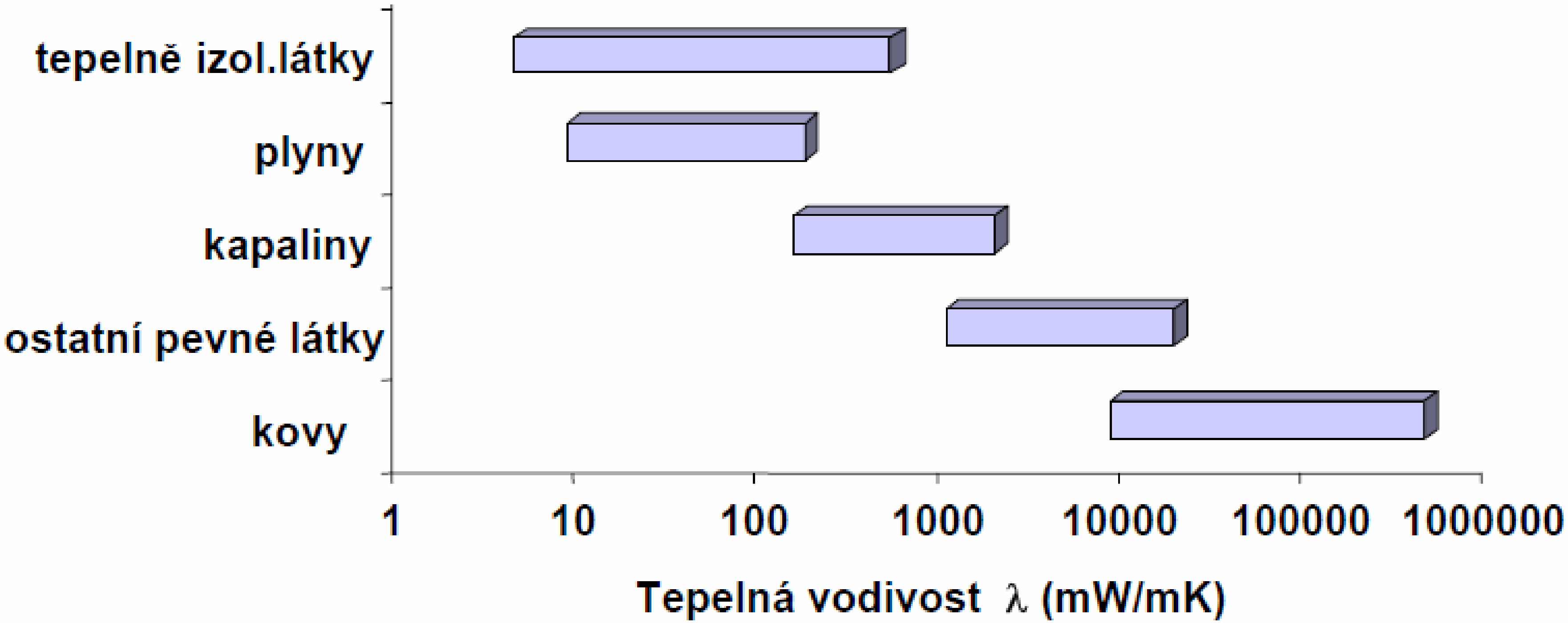
tepelný odpor rovinné stěny
složené ze tří vrstev

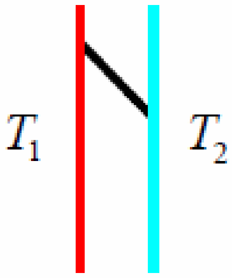
Tepelná a teplotní vodivost materiálů:

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

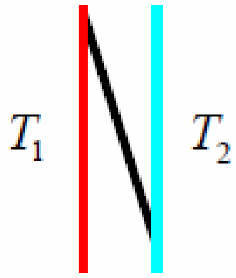
Materiál	λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [$kJkg^{-1}K^{-1}$]	$a \cdot 10^6$ [m^2s^{-1}]
ocel	80-90	7800	0,4-0,5	20-29
hliník	229	2700	0,89	95
dřevo	0,7-1,6	500-1000	1,0-1,5	0,5-3,2
cihla	0,2-0,8	1400-2100	1,0-1,5	0,08-0,6
beton	0,5-0,8	1800-2200	0,7-1,1	0,2-0,6
sklo	0,75	2400-4700	0,7-0,9	0,18-0,45
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

Tepelná vodivost materiálů:





špatná izolace



dobrá izolace

ŠÍŘENÍ 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 rozdílnou teplotou

Nucené proudění:

- příčnou pohybu je **rozdíl tlaků vytvořený uměle** (čerpadlem, ventilátorem…)
- využíváme pro rychlejší vyrovnávání teplotních rozdílů v tekutině

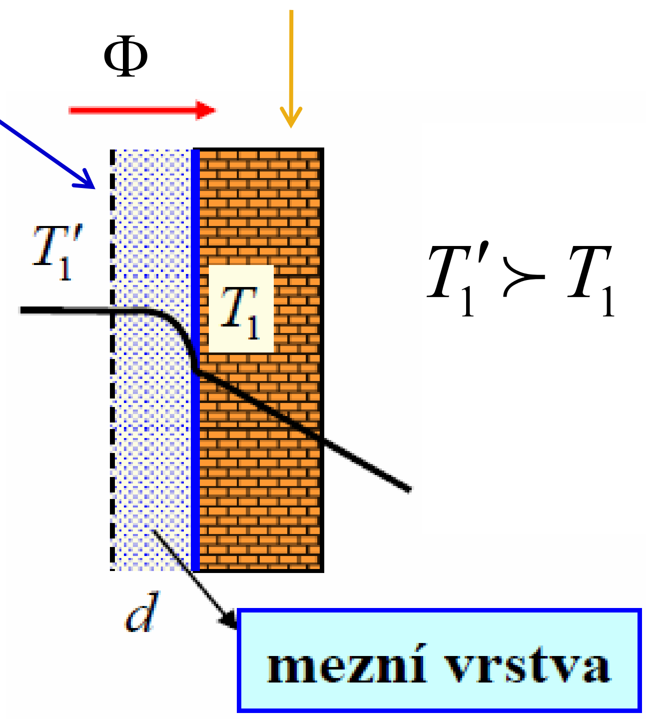
- teoretický popis proudění tepla je složitý, v technické praxi se zpravidla určuje **experimentálně**
- veličiny popisující proudění **reálné tekutiny** jsou funkcemi velkého počtu proměnných parametrů
- řešení daných problémů pomocí teorie podobnosti

= **hydromechanika a termomechanika**

PŘESTUP TEPLA

-přechod tepla z prostředí, ve kterém se šíří teplo prouděním, do prostředí, ve kterém se šíří teplo vedením (nebo obráceně)

- např. proudění z kapaliny či plynu do pevné látky:



$$T_1' \succ T_1$$

mezní vrstva:

-vytvořena díky **přilnavosti** molekul tekutiny

- molekuly kapaliny (plynu) těsně poutány ke stěně a nemohou proudit

- teplo se šíří pouze **vedením**

- tenká vrstva s **minimální tepelnou vodivostí**

v mezní vrstvě dochází k teplotnímu skoku

NEWTONŮV ZÁKON

hustota tepelného toku: $\varphi = \alpha\left(T_1' - T_1\right)$

součinitel přestupu tepla
[W.m^{-2}.K^{-1}]

TEPLO PŘEDANÉ STĚNĚ: $Q = \alpha S\left(T_1' - T_1\right)\tau$

součinitel přestupu tepla α

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

$$\frac{1}{\alpha}$$

tepelný odpor přestupu tepla rozhraním

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

závisí na:

-vlastnostech tekutiny (hustota, viskozita,…)

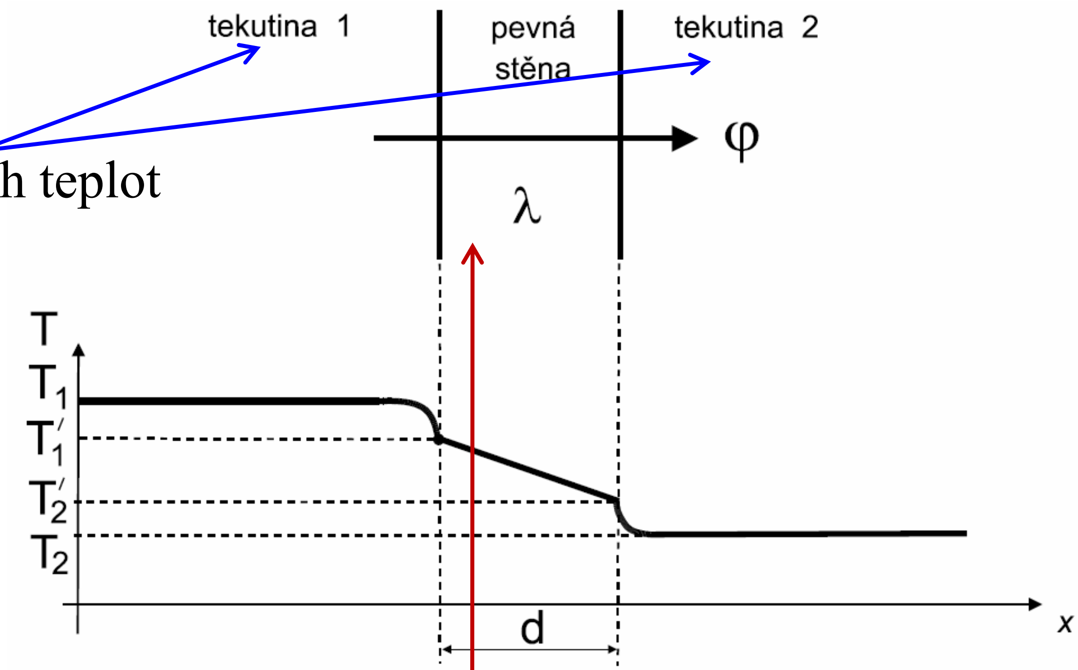
-povrchu stěny

- rozložení teploty a rychlosti proudění v okolí stěny

PROSTUP TEPLA

-tepelná výměna **mezi dvěma tekutinami** oddělenými stěnou z pevné látky
- přenos tepla vedením a prouděním
- za ustáleného stavu je hustota tepelného toku φ při přestupu tepla **konstantní**

dvě tekutiny různých teplot
T_1, T_2 ($T_1 > T_2$)



***λ* … tepelná vodivost pevného tělesa** (stěny)

teploty povrchů stěny nejsou obecně známy $T_1^/ , T_2^/$

Příklad: PROSTUP TEPLA ZDÍ

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

$$\varphi = \alpha_i \left(T_i - T_1\right)$$

přestup tepla (vnitřní povrch)

$$\varphi = \frac{\lambda_1}{d_1}\left(T_1 - T_2\right)$$

vedení tepla (vnitřní omítka)

$$\varphi = \frac{\lambda_2}{d_2}\left(T_2 - T_3\right)$$

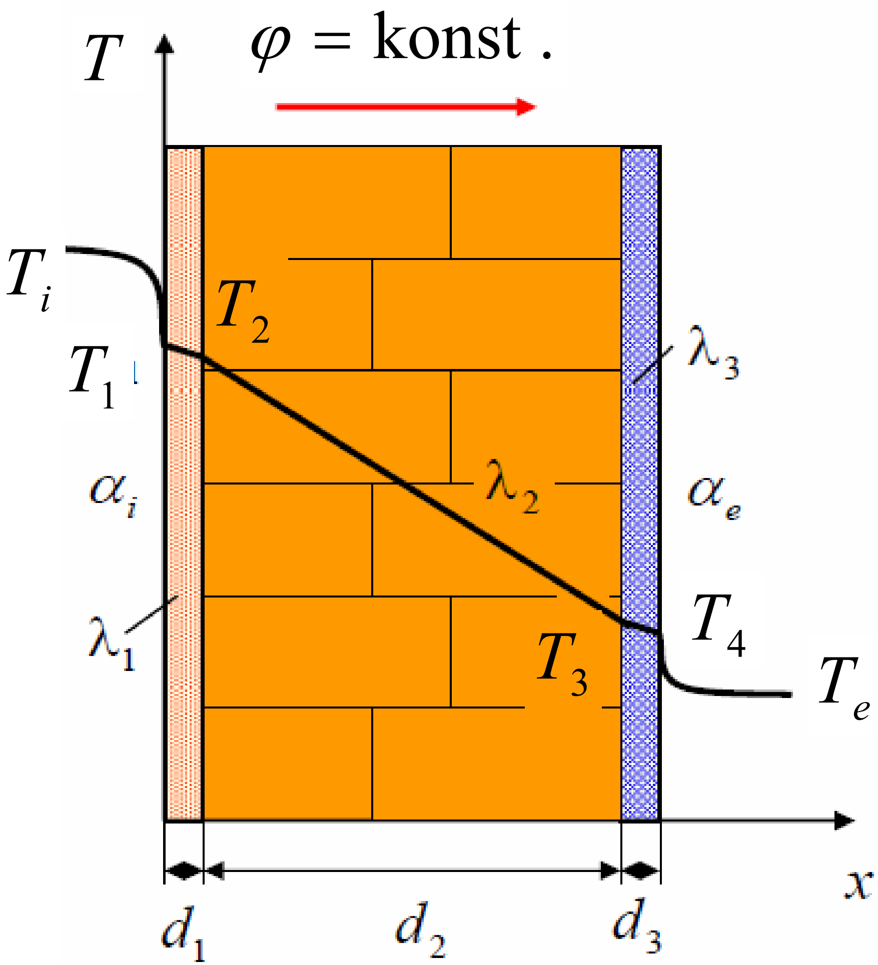
vedení tepla (zeď)

$$\varphi = \frac{\lambda_3}{d_3}\left(T_3 - T_4\right)$$

vedení tepla (vnější omítka)

$$\varphi = \alpha_e \left(T_4 - T_e\right)$$

přestup tepla (vnější povrch)



srovnáním hustot tepelných toků pro jednotlivá prostředí vyjádříme teplotní rozdíly:

$$\left.\begin{aligned}
(T_i - T_1) &= \frac{\varphi}{\alpha_i} \\
(T_1 - T_2) &= \frac{d_1}{\lambda_1}\varphi \\
(T_2 - T_3) &= \frac{d_2}{\lambda_2}\varphi \\
(T_3 - T_4) &= \frac{d_3}{\lambda_3}\varphi \\
(T_4 - T_e) &= \frac{\varphi}{\alpha_e}
\end{aligned}\right\}$$

sečtením rovnic dostáváme:

$$\varphi = \frac{(T_i - T_e)}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\varphi = k(T_i - T_e)}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

součinitel prostupu tepla

… jednotka $W.m^{-2}.K^{-1}$

OCHLAZOVACÍ ÚČINEK VĚTRU
(wind chill effect)

-důsledek efektu **proudění tepla**

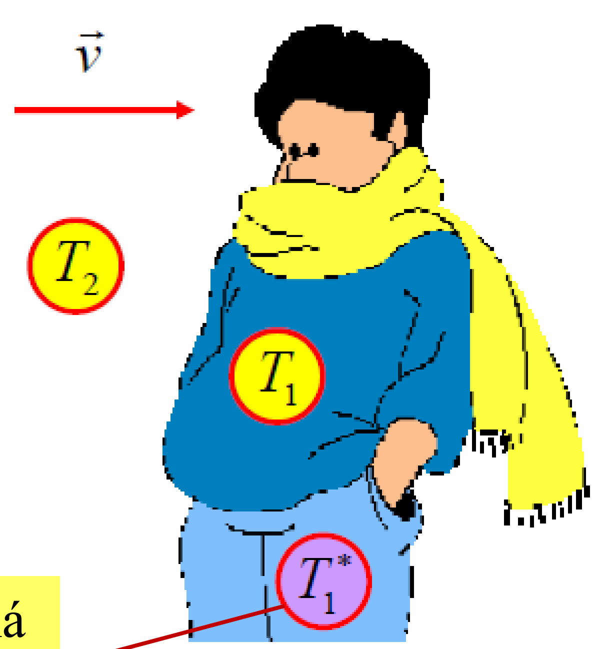
- **pocit tepla nebo zimy** je u člověka (i jiných živých organismů) závislý na velikosti tepelného toku dodávaného nebo odebíraného přes pokožku

- součinitel prostupu tepla pokožkou je závislý na rychlosti proudění větru

tepelný tok pro člověka: 60 – 180 W.m^{-2}

$$\varphi = \alpha \left(T_1 - T_2\right)$$

$$\boxed{T_1^* = 13{,}2 + 0{,}6215\,T_2 - 11{,}37\,v^{0{,}16} + 0{,}3965\,T_2\,v^{0{,}16}}$$



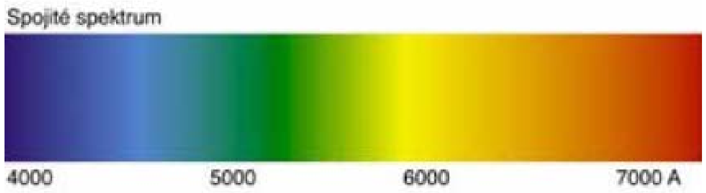
subjektivně vnímaná teplota

Wind-chill efekt

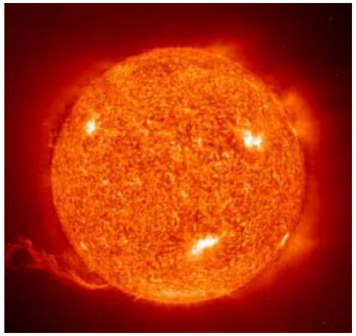
	Teplota okolního vzduchu T_{air} (°C)					
V_{10} (km/h)	**5**	**0**	**-5**	**-10**	**-15**	**-20**
5	4	-2	-7	-13	-19	-24
10	3	-3	-9	-15	-21	-27
15	2	-4	-11	-17	-23	-29
20	1	-5	-12	-18	-24	-30
25	1	-6	-12	-19	-25	-32
30	0	-6	-13	-20	-26	-33
35	0	-7	-14	-20	-27	-33
40	-1	-7	-14	-21	-27	-34
45	-1	-8	-15	-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

TEPLOTNÍ ZÁŘENÍ TĚLES

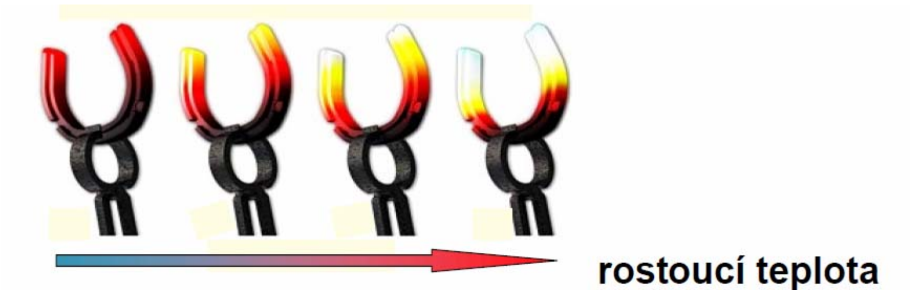
ZÁKONY TEPLOTNÍHO ZÁŘENÍ PEVNÝCH A KAPALNÝCH LÁTEK

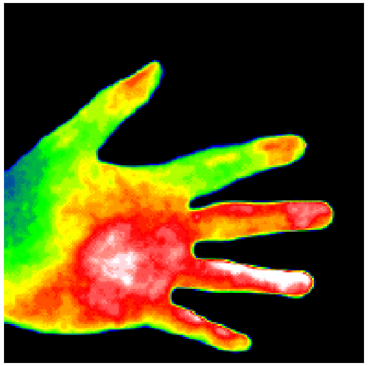


- energie tepelného záření je přenášena **elektromagnetickým zářením** (fotony)
- přenos tepla může probíhat i ve **vakuu**
- **všechny** zahřáté látky vyzařují elektromagnetické záření (důsledek oscilace elektronů v atomech)

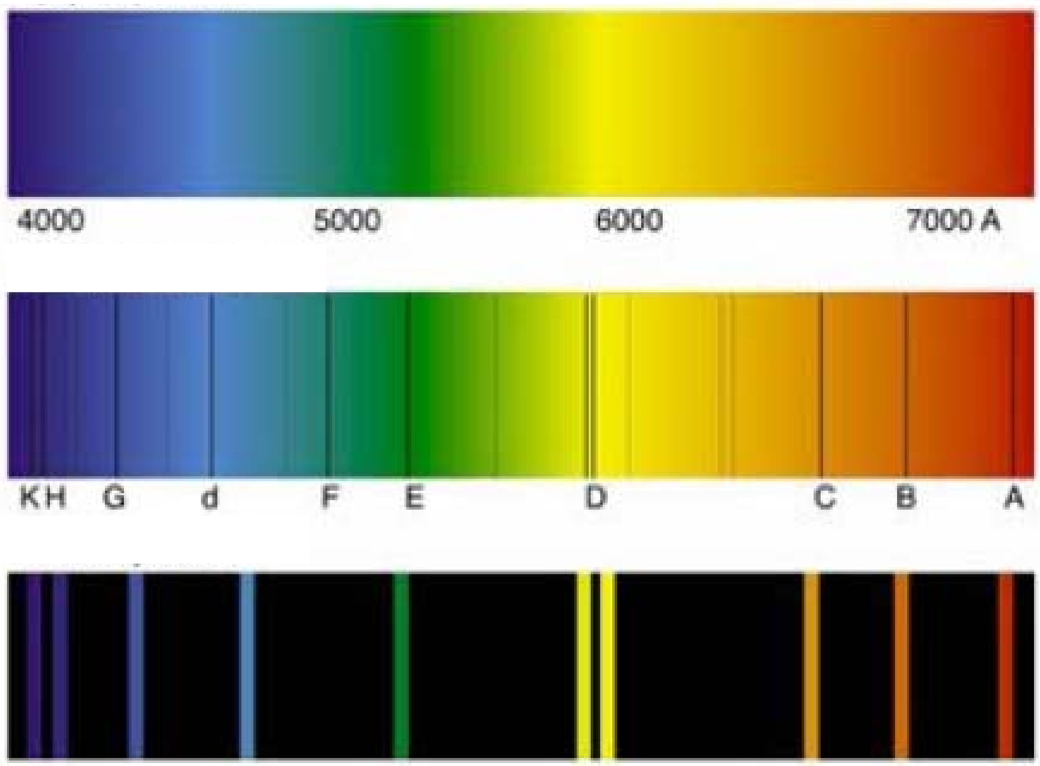


- při nižších teplotách (cca do 500 °C) je toto záření **infračervené**
- se zvyšující teplotou roste energie záření a záření má kratší vlnové délky
- vyzařování je **závislé na teplotě** těles
- každé těleso také **pohlcuje** elektromagnetické záření
- zářením je možné přenášet energii i v prostředí s nižší teplotou, než je teplota těles vyzařujících nebo absorbujících záření
- **spektrum** teplotního záření pevných a kapalných látek je **spojité**





SPOJITÉ SPEKTRUM



ABSORPČNÍ SPEKTRUM

EMISNÍ SPEKTRUM

POPIS EMISE A ABSORPCE ZÁŘENÍ

RADIOMETRIE:

popisuje energetické vlastnosti zdrojů elektromagnetického záření a rozdělení energie elektromagnetického záření v prostoru

FOTOMETRIE:

posuzuje radiometrické veličiny podle účinků na zrakový orgán člověka, popřípadě jiné detektory záření

Zářivý tok Φ_e (jednotka W, watt)

- výkon elektromagnetického záření procházejícího plochou kolmou ke směru šíření za jednotku času:

$$\Phi_e = \frac{\mathrm{d}E_e}{\mathrm{d}t}$$

E_e ... je celková energie přenášená zářením

⇨ spektrální **zářivý tok**: $$\Phi_{e\lambda} = \frac{\mathrm{d}\Phi_e}{\mathrm{d}\lambda}$$ … vztažen k určité vlnové délce

⇨ integrální **zářivý tok**: $$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}\,\mathrm{d}\lambda$$

Zářivost bodového zdroje I_e (jednotka W.sr^{-1})

- vyzařuje-li bodový zdroj zářivý tok $\mathrm{d}\Phi_e$ do prostorového úhlu $\mathrm{d}\Omega$

$$I_e = \frac{\mathrm{d}\Phi_e}{\mathrm{d}\Omega}$$

Intenzita vyzařování plošného zdroje M_e (jednotka W.m^{-2})

$$M_e = \frac{\mathrm{d}\Phi'_e}{\mathrm{d}S}$$

Φ'_e ... zářivý tok vycházející z plošky dS zdroje do celého poloprostoru

Spektrální intenzita vyzařování plošného zdroje $M_{e\lambda}$ (jednotka W.m^{-3})

$$M_{e\lambda} = \frac{\mathrm{d}M_e}{\mathrm{d}\lambda}$$

intenzita vyzařování připadající na záření vlnových délek z intervalu (λ, λ+d λ) dělená šířkou intervalu dλ

$$\Rightarrow \quad M_e = \int_0^\infty M_{e\lambda}\,\mathrm{d}\lambda$$

JEVY NA ROZHRANÍ DVOU PROSTŘEDÍ

- při dopadu elektromagnetického záření na rozhraní dvou prostředí se část energie odrazí, část projde do druhého prostředí a část se pohltí

Odrazivost $R = \dfrac{\Phi_{eR}}{\Phi_e}$

Propustnost $T = \dfrac{\Phi_{eT}}{\Phi_e}$

Pohltivost $A = \dfrac{\Phi_{eA}}{\Phi_e}$

integrální veličiny

$$T + R + A = 100\,\%$$

Spektrální odrazivost $R_\lambda = \dfrac{\Phi_{eR}(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}$

Spektrální propustnost $T_\lambda = \dfrac{\Phi_{eT}(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}$

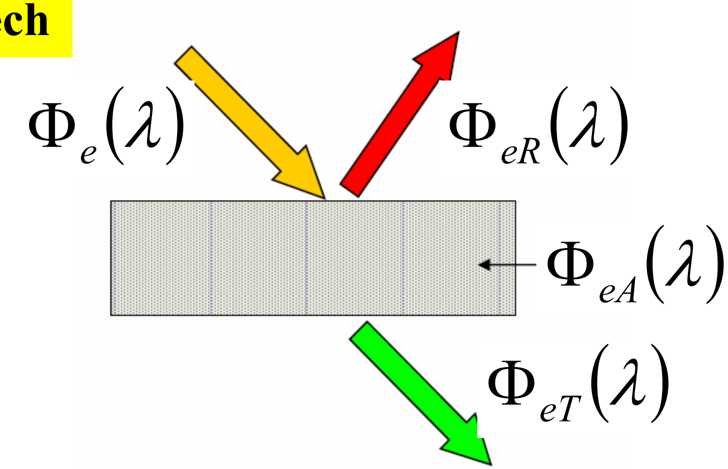
Spektrální pohltivost $A_\lambda = \dfrac{\Phi_{eA}(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)}$

$$T_\lambda + R_\lambda + A_\lambda = 100\,\%$$

bezrozměrné veličiny

vyjadřujeme v procentech

$A = 1$ … **absolutně černé těleso**
$R = 1$ … **zrcadlové nebo bílé těleso**
$T = 1$ … **průteplivé těleso**



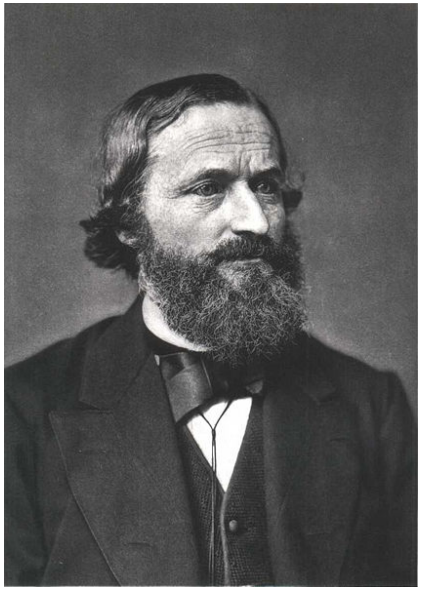
KIRCHHOFFŮV ZÁKON

Poměr intenzity vyzařování tělesa a pohltivosti je pouze funkcí termodynamické teploty a nezávisí na povaze těles (tj. materiálu, povrchové úpravě apod.).

$$\frac{M_e}{A} = f(T)$$

Poměr spektrální intenzity vyzařování tělesa a spektrální pohltivosti je pouze funkcí termodynamické teploty a vlnové délky, nezávisí na povaze těles.

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



Gustav KIRCHHOFF

⇨ těleso absorbuje nejvíce ty vlnové délky, které nejvíce vyzařuje

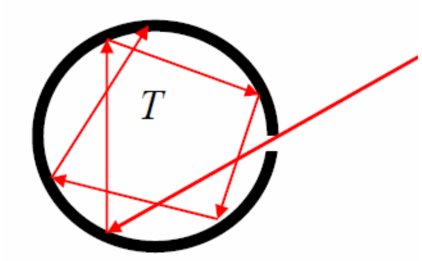
ZÁŘENÍ ABSOLUTNĚ ČERNÉHO TĚLESA:

$$\frac{M_{0e}}{A} = f(T)$$

- **pohltivost** (včetně spektrální) pro všechny vlnové délky = 1
- pohlcuje **veškerou** dopadající energii

$$\frac{M_{0e\lambda}}{A_\lambda} = g(T, \lambda)$$

ZÁŘENÍ ABSOLUTNĚ ČERNÉHO TĚLESA:



Realizace AČT:

- dutina s malým otvorem, jejíž vnitřní povrch je matně černý
- záření vstupující do dutiny se prakticky zcela při mnohonásobném odrazu pohltí
- povrch se při pohledu zvnějšku jeví jako černý

- **analytické vyjádření funkcí** z Kirchhoffova zákona: $\dfrac{M_{0e}}{A} = f(T)$ $\dfrac{M_{0e\lambda}}{A_\lambda} = g(T, \lambda)$

$$M_{0e} = \sigma T^4$$

... STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON

$\sigma = 5{,}6687.10^{-8}\ \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$ ... Stefan - Boltzmannova konstanta

„Celková intenzita vyzařování černého tělesa je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty zářiče.“

Vyjádření Stefan - Boltzmannova zákon **pro praxi**:

$$M_{0e} = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \qquad C_0 = 10^8 \sigma$$

součinitel sálání černého tělesa

PŘÍKLAD:

Ve svítící žárovce má rozžhavené vlákno o průřezu 1 mm^2 teplotu 2900 °C. Náhle přestane žárovkou procházet elektrický proud. Za jakou dobu žárovka zhasne, pokud zhasnutí odpovídá teplota vlákna nižší než 400 °C. Vlákno září jako černé těleso a další ztráty tepla zanedbáváme. Měrná tepelná kapacita materiálu vlákna je 3,14.10^{-8} m^{-2} a hustota je 19300 kg.m^{-3}.

PLANCKŮV ZÁKON

analytické vyjádření funkce *g(T,λ)* z Kirchhoffova zákona pro AČT: $\frac{M_{0e\lambda}}{A_\lambda} = g(T,\lambda)$

- odvození na základě **kvantové teorie** (r. 1900)

- vyzařovaná elektromagnetická energie nemůže být spojitě proměnnou veličinou, ale pouze celočíselným násobkem určité minimální hodnoty ε („kvanta“ energie)

$$E = n\varepsilon \quad \wedge \quad \varepsilon = h\upsilon$$

$h = 6{,}63.10^{-34}$ J.s ... Planckova konstanta

$$M_{0e\lambda} = \frac{1}{\lambda^5}\frac{2\pi hc^2}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}}-1} = \frac{1}{\lambda^5}\frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}-1}$$

... PLANCKŮV (VYZAŘOVACÍ) ZÁKON

$c_1 = 2\pi hc^2$, $c_2 = \frac{hc}{k}$ jsou konstanty

c ... rychlost světla ve vakuu

k ... Boltmannova konstanta

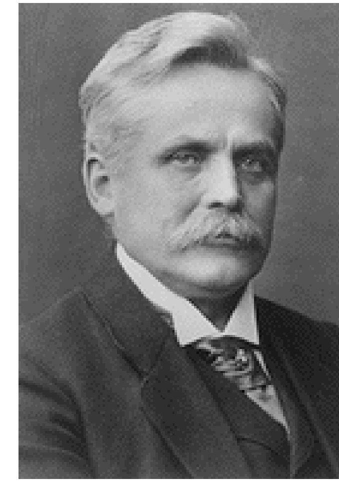
Max PLANCK

WIENŮV (POSUNOVACÍ) ZÁKON

maximum spektrální intenzity vyzařování je přímo úměrné páté mocnině termodynamické teploty

$$M_{0\lambda_m} = cT^5$$

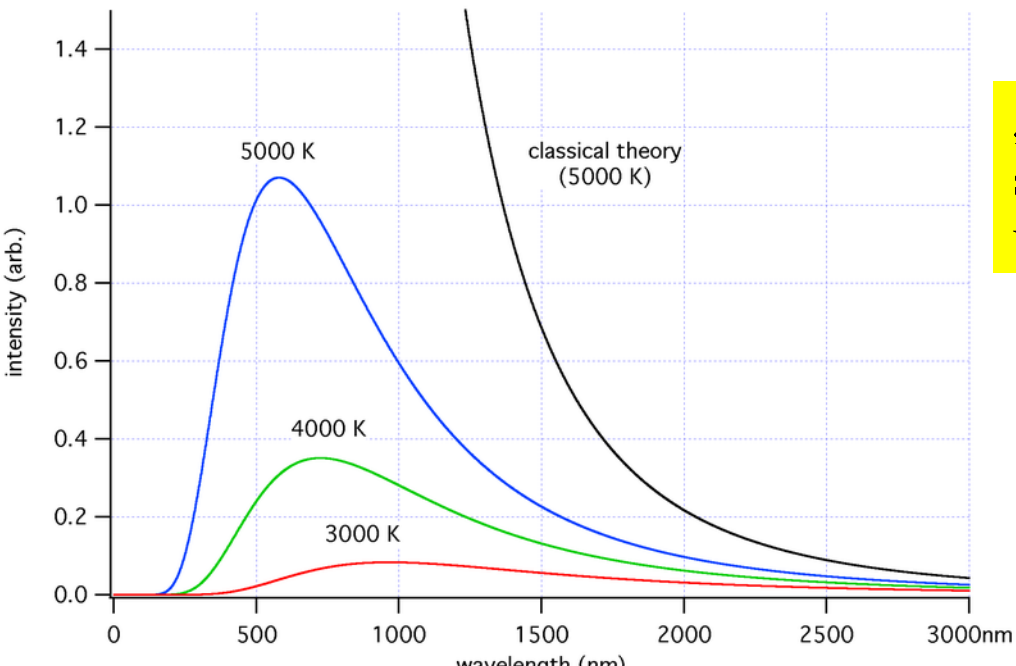
$c = 1{,}301.10^{-11}$ W.m^{-2}.K^{-5}



Wilhelm WIEN

$$\lambda_m = \lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

... délka vlny λ_m, které přísluší maximum spektrální intenzity vyzařování



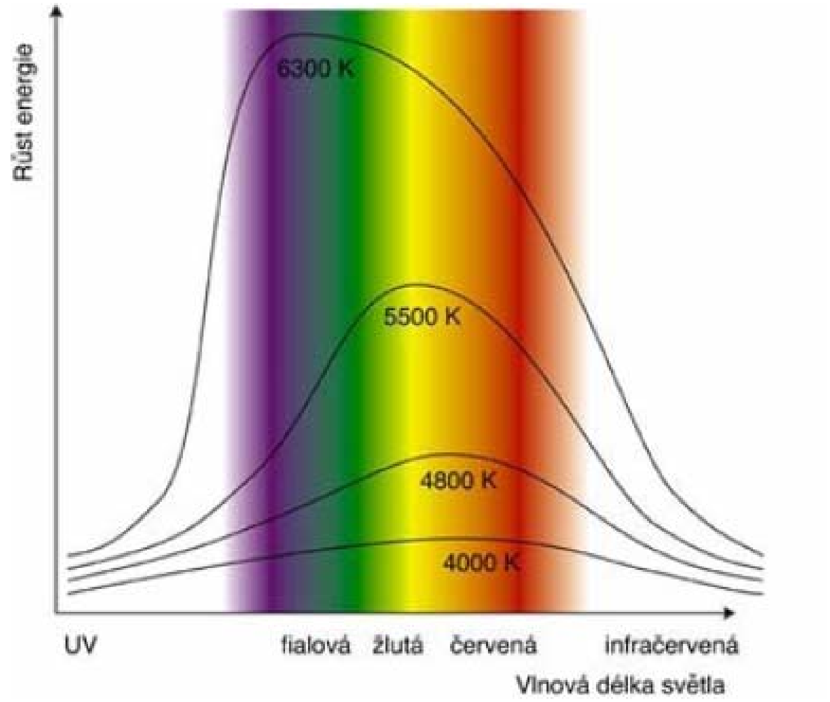
„Maximum spektrální intenzity vyzařování se s rostoucí teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám.“

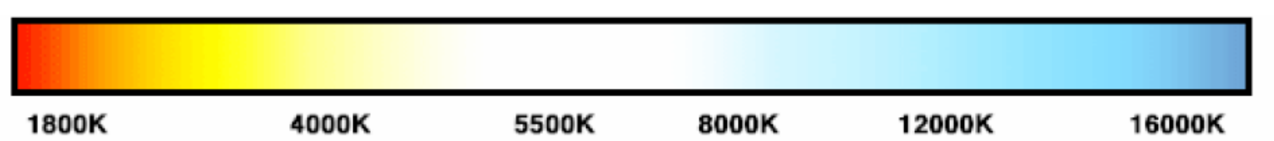
$b = 2{,}898.10^{-3}$ m.K

... Wienova konstanta

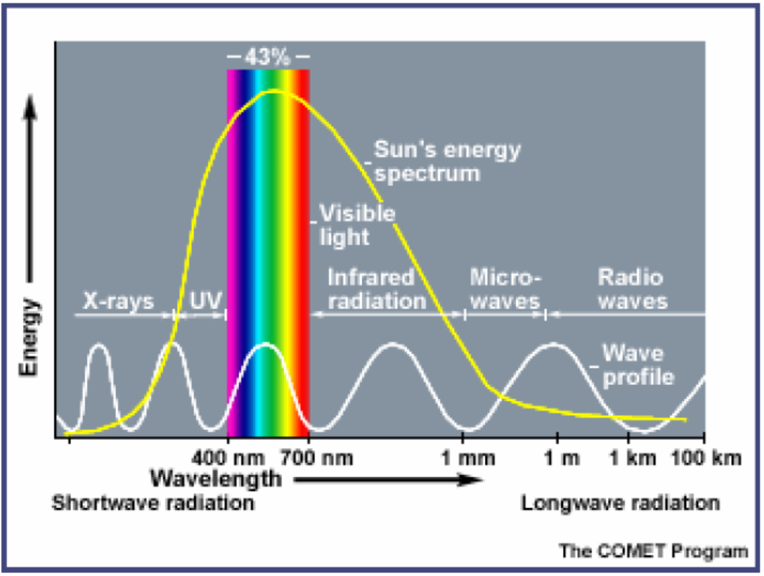
absolutní teplota černého zářiče, jehož vyzařované světlo má danou barvu:

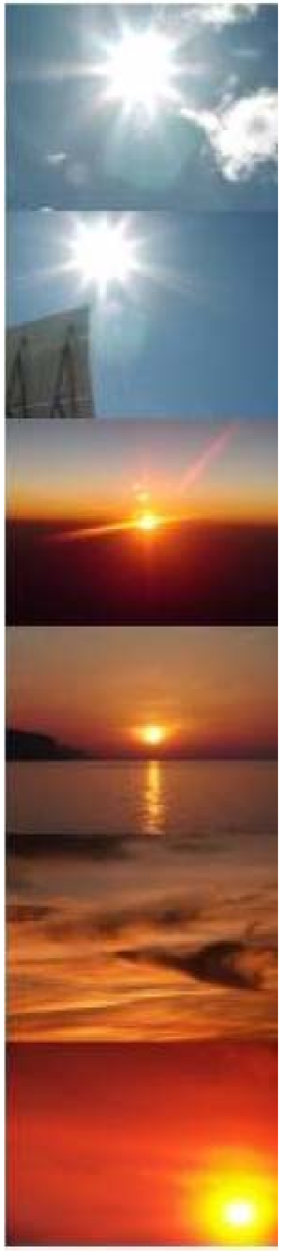
Druh světla	Teplota barvy T [K]
plamen svíčky	1850
40-200 W žárovka	2700-3000
východ Slunce	3200
měsíční světlo	4100
přímé slunce	5000-5400
denní světlo (slunce)	5500-6500
denní světlo (zataženo)	6000-7500
modrá obloha	9000-14000





ZÁŘENÍ SLUNCE





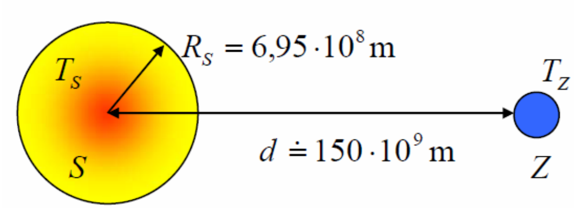
maximum intenzity vyzařování pro λ_{max} = 500 nm

střední teplota povrchu Slunce:

$$T = \frac{2{,}898.10^{-3}}{\lambda_{max}} = 5780\,\mathrm{K}$$

intenzita vyzařování povrchu Slunce:

$$M_{0e} = \sigma T_S^4 = 6{,}4.10^7 \ \mathrm{W.m^{-2}}$$



intenzita dopadajícího slunečního záření na Zemi:

$$M_{eZ} = \frac{P}{S'} = \frac{M_{0e} S_S}{4\pi d^2} = \frac{R_S^2 \sigma T_S^4}{d^2} = 1377 \ \mathrm{W.m^{-2}}$$