

Dálkový průzkum Země

Fyzikální základy

RNDr. Ladislav Plánka, CSc.

Institut geodézie a důlního měřictví, Hornicko-geologická fakulta, VŠB – TU Ostrava

*Podkladové materiály pro přednáškový cyklus předmětu „Dálkový průzkum Země“
(jazyková ani odborná korektura neprovedena)*

Fyzikální základy dálkového průzkumu

Dálkový průzkum je založen na fyzikálním poznatku, že **pro každý fyzikální objekt a jeho stav je charakteristický způsob, jakým ovlivňuje okolní silová, resp. elektromagnetická pole.**

Měřením charakteristik silových a elektromagnetických polí lze zpětně zjistit údaje o objektu. aniž bychom se s ním dostali do přímého kontaktu.

Fyzikální základy dálkového průzkumu

- Pro dálkový průzkum Země je charakteristické, že získávání potřebných údajů se neomezuje jen na cesty přímo vnímatelné lidskými smysly.
- Použití přístrojové techniky umožňuje registrovat jevy a údaje, které jsou pro člověka nepostižitelné a navíc nabízejí možnost vyjádřit jejich velikost i číselně.
- Údaj o silovém či elektromagnetickém poli tak lze zaznamenat a převést do podoby akceptovatelné člověkem (lidskými smysly).

„Exkurze“ do (fyzikální) historie

- 1666 – Isaac Newton pomocí optického hranolu rozložil bílé světlo na jednotlivé spektrální barvy,
- 1800 – sir W. Herschel objevil infračervené záření,
- 1839 – vynález fotografie (Nicephore Niepce, William Henry Fox Talbot, Louis Jacques Mande Daguerre),
- 1847 – A.H.L. Fizeau a B.L. Foucault dokázali, že infračervené záření má podobné vlastnosti jako viditelné záření,
- 1873 – J.C. Maxwell (teorie elektromagnetického záření).

Elektromagnetické záření

Základní princip, objasňující metodu dálkového průzkumu (Země) vyplývá ze skutečnosti, že každý předmět, který má teplotu vyšší než je

absolutní nula ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$),

absorbuje, odráží a vyzařuje elektromagnetické záření, které lze pomocí opticko-mechanických, elektronických aj. zařízení zachycovat a registrovat i na velké vzdálenosti.

Nositelem informace je tedy v dálkovém průzkumu elektromagnetické záření, které je tvořeno elektromagnetickými vlnami.

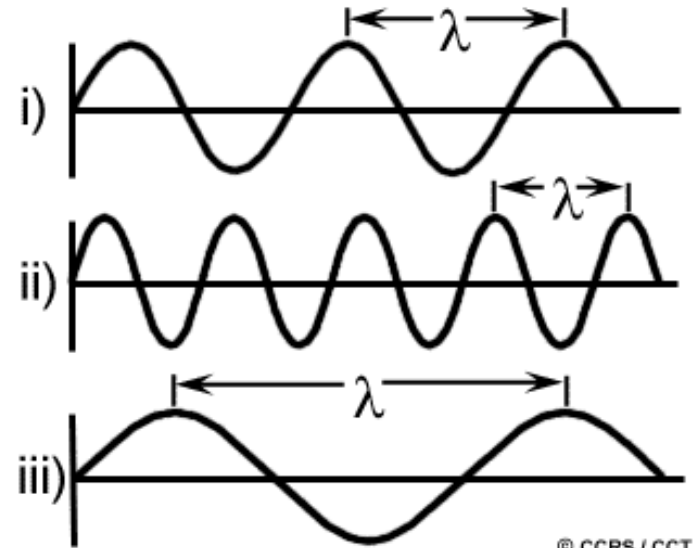
Elektromagnetické záření vzniká pohybem nabitých částic.

Elektromagnetické záření

Vlnová délka $\lambda = c \cdot T$ je vzdálenost mezi dvěma sousedními vrcholy sinusoid, kde:

- c je rychlost světla (cca $3 \cdot 10^8$ km.s⁻¹)
- T je doba jedné periody
- f je frekvence, což je celkový počet vrcholů procházejících jedním bodem za 1 vteřinu a platí:

$$f = 1/T, \text{ resp. } \lambda = c/f.$$



Elektromagnetické záření

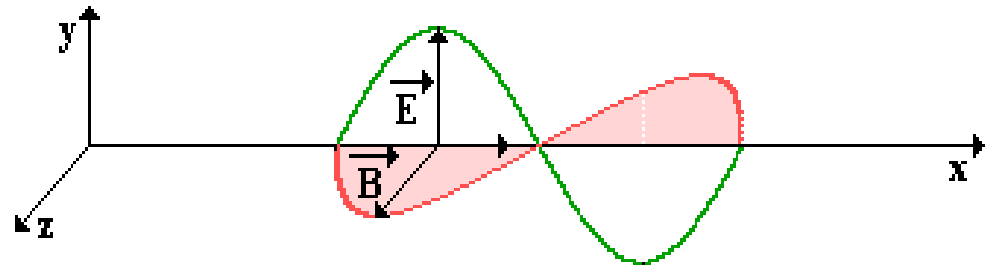
Přestože jsou vlnové délky udávané nejčastěji v mikrometrech (μm), používají se i jiné jednotky, např. nanometry (nm) a Ångströmy (Å).

Vztah mezi různými jednotkami je následující:

$$10\,000 \text{ Å} = 1\,000 \text{ nm} = 1 \mu = 1 \mu m$$

Elektromagnetické záření

- Foton (někdy též nejmenší částice světla) je forma kvanta, což je základní částice studovaná kvantovou mechanikou (část fyzika zabývající se malými částicemi na úrovni atomů).
- Foton se pohybuje formou vln (má tzv. duální charakter) a obsahuje záření
 - emitované,
 - absorbované, nebo
 - odražené.
- Foton ve formě elektromagnetické vlny tedy má 2 složky:
 - elektrickou s vektorem intenzity E elektrického pole a
 - magnetickou s vektorem intenzity B , resp. H magnetického pole.



Elektromagnetické záření

Energie jednoho fotonu vyjadřuje Planckova rovnice:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,986 \cdot 10^{-19}}{\lambda}$$

kde:

h je Planckova konstanta 6.6260×10^{-34} J.s,

f je frekvence,

c je rychlost světla (m.s^{-1}) a

λ je vlnová délka (μm).

Energie záření

Základním fyzikálním jevem, na kterém je celý princip dálkového průzkumu založen, je interakce elektromagnetického záření se zkoumaným látkovým objektem.

Informace o průběhu této interakce udává jediná fyzikální veličina, a to energie výsledného záření, neboli zářivá energie Q nesená vlnou (též viz dále).

Elektromagnetická vlna nese energii rovnou intenzitě vyzařování M

$$M = B \cdot E$$

kde:

B je intenzita magnetického pole záření,

E je intenzita elektrického pole záření (určuje polarizaci vlny směrem k zemskému povrchu).

Radiometrické/fotometrické veličiny

Veličina (symbol)	Fyzikální rozměr (jednotka)
zářivá energie (Q) /světelná energie	J (lm.s)
zářivý tok (Φ) /světelný tok	W (lm)
intenzita vyzařování (M) /světelné vyzařování	$W \cdot m^{-2}$ (lm.m ⁻²)
intenzita ozařování (E) / osvětlení	$W \cdot m^{-2}$ (lux=lm.m ⁻²)
zářivost (I) /svítivost	$W \cdot sr^{-1}$ (cd=lm.sr ⁻¹)
zář (L) /jas	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ (nit = cd.m ⁻²)

Radiometrické/fotometrické veličiny (1/4)

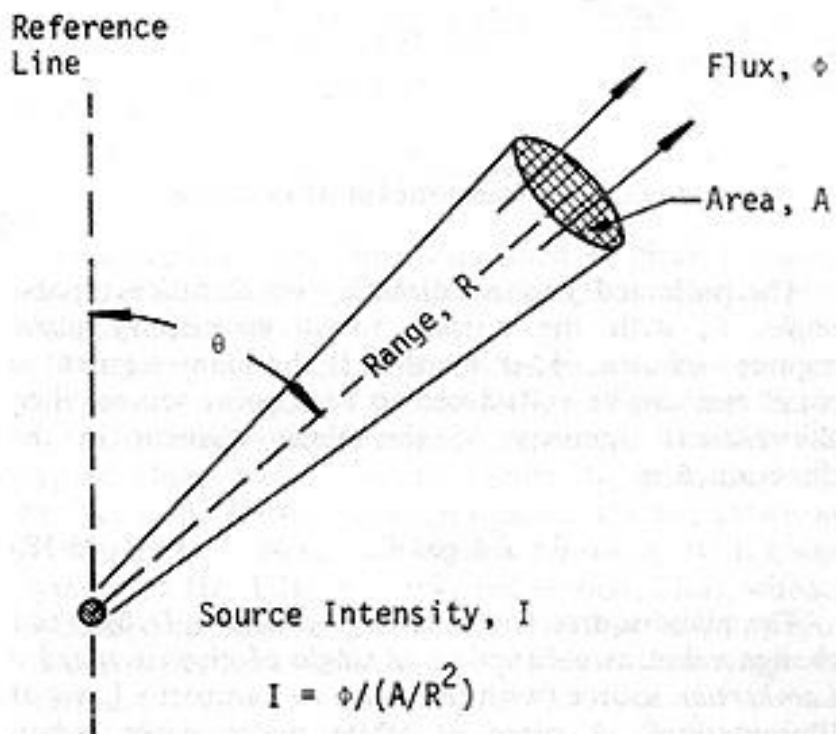
- zářivá energie (Q)
- zářivý tok (Φ)
- intenzita vyzařování, intenzita ozařování (E , resp. M)

$$Q = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda).d\lambda \quad \Phi = dQ / dt$$

$$E = d\Phi / dA, \text{ resp. } M = d\Phi / dA,$$

Radiometrické/fotometrické veličiny (2/4)

Zářivost (I) - zářivý tok vyzařovaný z bodu na ploše dA do prostorového úhlu $d\Omega$.



$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \frac{d\Phi}{dA / R^2}$$

Radiometrické/fotometrické veličiny (3/4)

Zář (L) – vyjadřuje závislost na prostorovém úhlu a na směru.

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega}$$

$dA_0 = dA \cdot \cos \theta$ je efektivní plocha zářiče, tj. kolmý průmět zářivé plochy do směru pozorování.

Radiometrické/fotometrické veličiny (4/4)

Svítivost je základní fotometrickou veličinou (odpovídá jí radiometrická veličina zářivost).

Vztah mezi zářivým tokem Φ a světelným tokem Φ_v vyjadřuje světelná efektivita K .

$$K = \frac{d\Phi_v}{d\Phi}$$

Velikost světelné efektivity je různá pro různé vlnové délky.

Maximální je pro $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$, kdy platí:

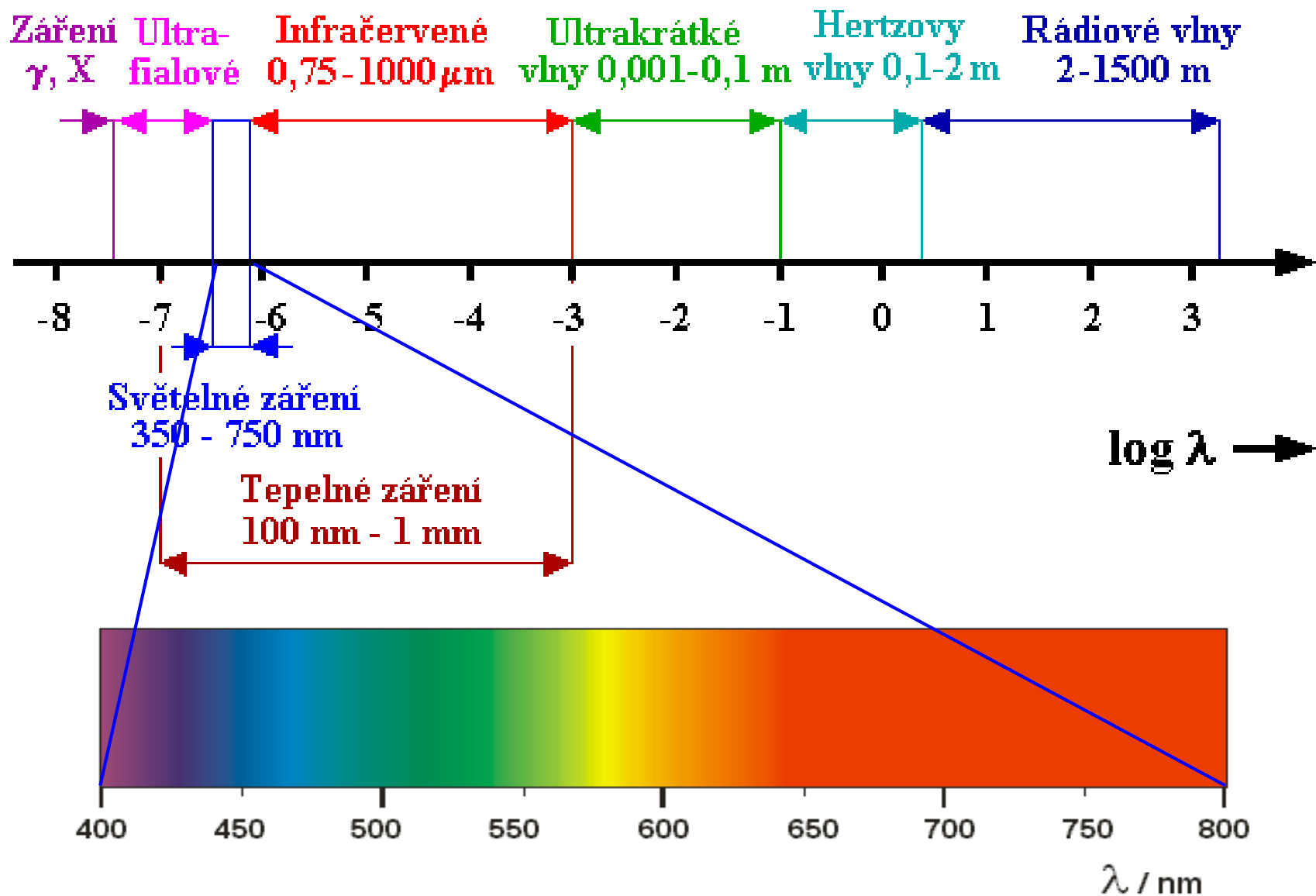
$$1 \text{ watt} = 680 \text{ lm}$$

$$1 \text{ lm} = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Elektromagnetické spektrum

- Rozsah mezi největší a nejmenší známou vlnovou délkou elektromagnetického záření činí téměř 20 řádů.
- Elektromagnetické záření tak má frekvenci od cca 10⁴ Hz (rozhlasové vlny) až po cca 10²³ Hz (kosmické záření).

Elektromagnetické spektrum



Český název	Frekvence	Vlnová délka	Anglické označení
Extrémně dlouhé vlny	0,3 - 3 kHz	10^3 - 10^2 km	Extremely Low Frequency (ELF)
Velmi dlouhé vlny	3 - 30 kHz	10^2 - 10 km	Very Low Frequency (VLF)
Dlouhé vlny (DV)	30 - 300 kHz	10 - 1 km	Low Frequency (LF)
Střední vlny (SV)	0,3 - 3 MHz	1 - 0,1 km	Medium Frequency (MF)
Krátké vlny (KV)	3 - 30 MHz	100 - 10 m	High Frequency (HF)
Velmi krátké vlny (VKV)	30 - 300 MHz	10 - 1 m	Very High Frequency (VHF)
Ultra krátké vlny (UKV)	0,3 - 3 GHz	1 - 0,1 m	Ultra High Frequency (UHF)
Mikrovlny	3 - 30 GHz	100 - 10 mm	Super High Frequency (SHF)
Mikrovlny	30 - 300 GHz	10 - 1 mm	Extremely High Frequency (EHF)
Infračervené záření	10^{10} - 10^{14} Hz	1 mm – 0,72 mm	Infra Red (IR)
Viditelné záření	10^{14} Hz	720 -380 nm	Visible (VIS)
Ultrafialové záření	10^{14} - 10^{16} Hz	380 - 10 nm	Ultra Violet (UV)
Rentgenové záření	10^{16} - 10^{19} Hz	10 - 0,1 nm	X-Rays
Gama záření	10^{19} - 10^{24} Hz	10^{-10} - 10^{-14} m	Gamma Rays

Záření pro dálkový průzkum Země

- Ultrafialové záření od 300 Å do cca 3800 Å
- Viditelné záření 380 nm – 720 nm
- Infračervené záření *blízké* 0,72 μm – 1,3 μm
- Infračervené záření *střední* 1,3 μm – 4 μm
- (*Infračervené záření tepelné*) 8 μm – 14 μm
- Infračervené záření *daleké* 4 μm – 25 μm
- Mikrovlnné záření 0,1 cm – 10 cm

Ultrafialové záření

- **Škodlivé pro živé organismy.**
- Má velké prostorové rozlišení.
- Je výrazně pohlcováno atmosférou (**do jisté míry prochází vodním sloupcem**).

Využívá se především v geologických aplikacích pro detekci složení zemského povrchu, hornin a minerálů.

Intenzita pohlcování UV záření ozonem slouží k monitorování mocnosti ozónové vrstvy.

Viditelná část spektra

Lze zaznamenat pouze v denních hodinách, neprochází oblačností a mlhou, je značně rozptylováno a pohlcováno (velká ztráta kontrastu).

Je nejvyužívanější částí spektra (především z historického hlediska).

Ve srovnání s delšími vlnovými délkami je toto záření schopno procházet vodním sloupcem, především v modré části spektra. To umožňuje studovat mnoho fyzikálních i biologických vlastností vodních objektů.

Tón	Rozsah v μm	Tón	Rozsah v μm
Červená	0,620 – 0,720	Zelená	0,500 – 0,578
Oranžová:	0,592 – 0,620	Modrá	0,446 – 0,500
Žlutá:	0,578 – 0,592	Fialová	0,380 – 0,446

Infračervená část spektra

Označení	Vlnový rozsah (μm)
Blízké IČ	0,72 – 1,30
Střední IČ	1,30 – 4,00
Daleké (vzdálené) IČ	4,00 – 25,0
<i>Tepelné IČ</i>	<i>8,0 – 14,0</i>

Blízké infračervené záření

Tvoří pokračování atmosférického okna z viditelné části spektra.

Lze je zaznamenávat jak fotochemickými metodami (do $0,9 \mu\text{m}$) tak i elektronicky.

Je již méně pohlcováno a rozptylováno atmosférou. V důsledku toho jsou snímky pořízené v této části spektra ostré a s dobrým kontrastem.

Hodí se k topografickým účelům, důležitá je tato část elektromagnetického spektra pro studium vegetace (lesnictví a zemědělství).

Voda se v těchto vlnových délkách chová téměř jako absolutně černé těleso.

Střední infračervené záření

Zahrnuje dvě atmosférická okna se středy přibližně 1,5 a 2,2 μm . Obě jsou důležitá především pro vegetační a geologické studie (identifikace některých minerálů).

První okno umožňuje např. dobré odlišení druhů vegetace, hodí se k rozpoznávání ledu a sněhu, k odlišení oblačnosti a ke studiu zdravotního stavu vegetace.

Druhé okno je oblastí, ve které má mnoho minerálů charakteristický absorpční pás.

V této části elektromagnetického spektra je množství odraženého záření výrazně větší, než množství záření emitovaného. V důsledku tohoto nelze střední (ale ani blízké) infračervené vlnové délky využít ke zjišťování teplotních vlastností povrchů.

Daleké (vzdálené) infračervené záření

Obsahuje dvě atmosférická okna v intervalu přibližně 3-5 a 8-14 μm , která se využívají ke zjišťování teploty povrchů (oceánů a moří, tepelné znečištění řek a jezer i samotné krajiny, lokalizace lesních požárů, vojenské účely apod.).

Protože v oblasti 3-5 μm je ještě množství odraženého záření poměrně značné, k měření radiální teploty lze využívat pouze nočních hodin.

V oblasti 8-14 μm je již množství odraženého slunečního záření ve srovnání s emitovaným zářením velmi malé. Těchto vlnových délek (tepelné infračervené záření) potom lze využít ke zjišťování radiální teploty i během denních hodin.

K přesným kvantitativním měřením je nutná dobrá znalost tzv. emisivity objektů a procesů, které ovlivňují záření v atmosféře. V případě přesné kalibrace umožňují snímky získávat poznatky o tepelné bilanci objektů.

Záření je málo rozptylováno atmosférou. Umožňuje získávat informace s nižším prostorovým rozlišením, lze ale např. rozlišit objekty s rozdílem teplot až 0,1 $^{\circ}\text{C}$.

Mikrovlnné záření

Pásmo	Frekvence (GHz)	Vlnový rozsah (cm)
Ka	40,0 – 26,5	0,8 – 1,1
K	26,5 – 18,0	1,1 – 1,7
Ku	18,0 – 12,5	1,7 – 2,4
X	12,5 – 8,00	2,4 – 3,8
C	8,00 – 4,00	3,8 – 7,5
S	4,00 – 2,00	7,5 – 15
L	2,00 – 1,00	15 – 30
P	1,00 – 0,30	30 – 100

Mikrovlnné záření

Je využíváno pasivními i aktivními (RADAR) snímacími metodami . Mikrovlnné záření může za vhodných podmínek pronikat i pod zemský povrch. Nejméně závisí na podmínkách počasí, je výrazně zeslabováno pouze v případě vydatného deště.

Intenzita přirozeně emitovaného mikrovlnného záření je velmi nízká, proto musí snímací zařízení k zachycení zjistitelného signálu zabírat poměrně velkou plochu. To je příčinou obvykle malého prostorového rozlišení dat získaných pasivními metodami v mikrovlnné části spektra (rychle se vyvíjí).

Značný rozvoj zaznamenávají aktivní systémy, poskytující data využitelná především pro studium georeliéfu, plovoucího ledu, v lesnictví i v zemědělství.

Pomocí aktivních mikrovlnných systémů lze získat i neobrazová data, informace o výškových poměrech, o řadě meteorologických prvků (srážkové oblasti a intenzita srážek aj.) atd.

Základní zákony vyzařování

Stefan-Boltzmannův zákon

Planckův vyzařovací zákon

Wienův posunovací zákon

Pozn.: Jsou definovány a jednoznačně platí pro absolutně černé těleso (viz dále).

Stefan-Boltzmannův zákon

Výsledná intenzita vyzařování absolutně černého tělesa roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa:

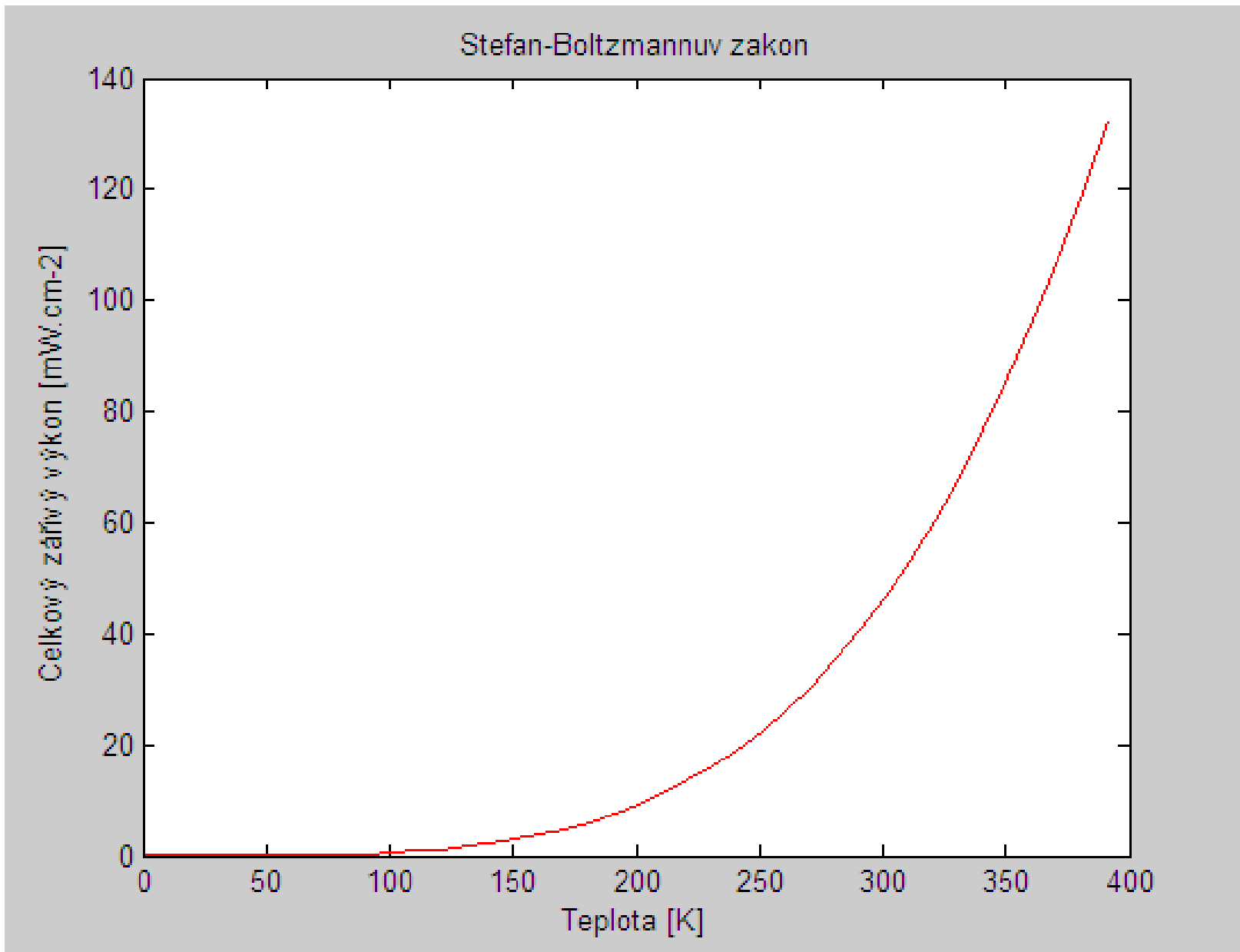
$$M = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,6693 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Vyjadřuje vztah mezi celkovou intenzitou záření produkovanou černým tělesem (veškerá kinetická energie se změní na zářivou) a jeho termodynamickou teplotou.

Lze jej získat integrací Planckova vyzařovacího zákona.

Stefan-Boltzmannův zákon



Závislost celkového zářivého výkonu na teplotě [K]

Stefan-Boltzmanův zákon



Jozef Stefan
(1835 – 1893)



Ludwig Boltzmann
(1844 – 1906)

Planckův vyzařovací zákon

Základní zákon tepelného vyzařování absolutně černého tělesa (znázorňuje průběh závislosti intenzity vyzařování na vlnové délce jako spektrální intenzitu záření).

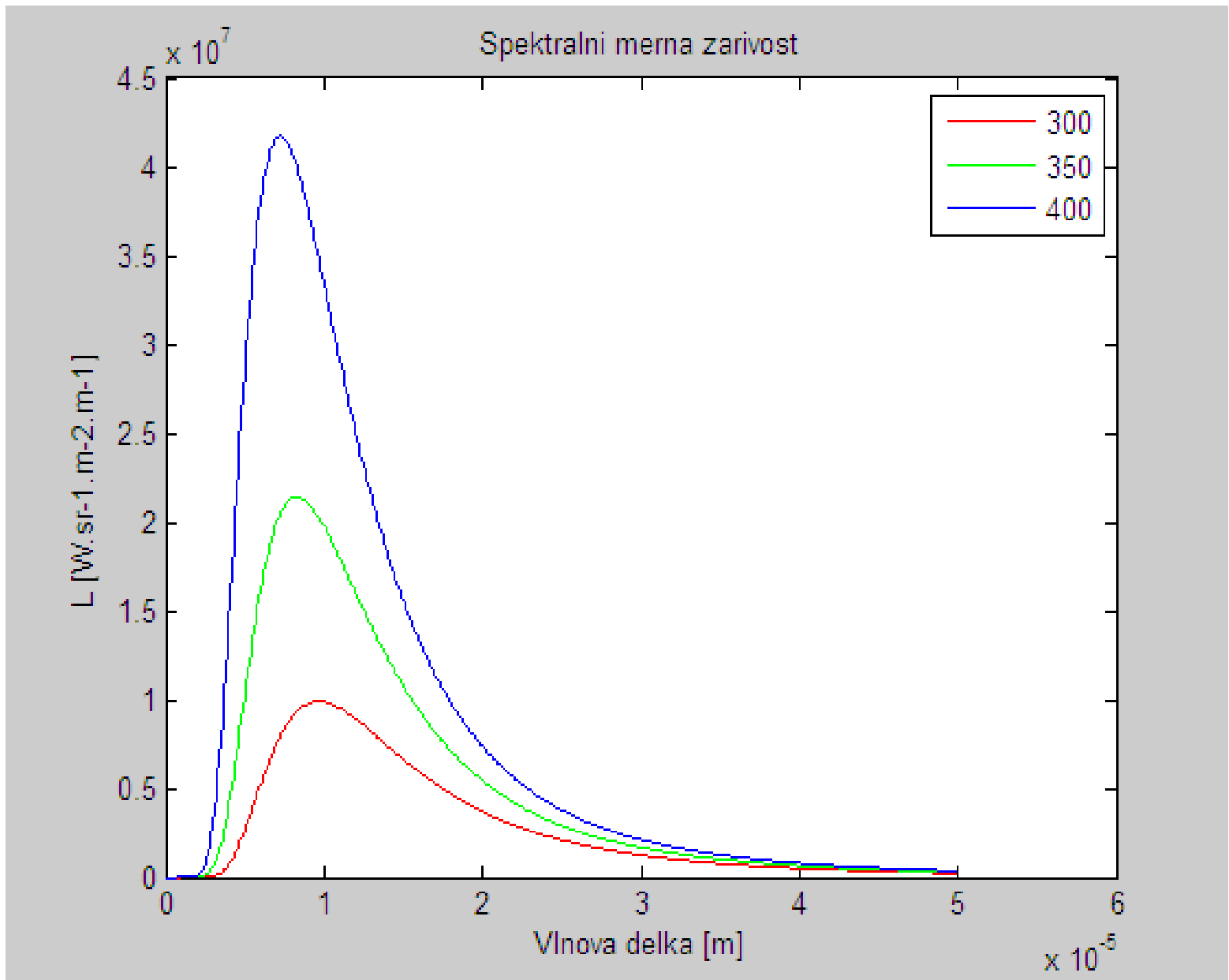
$$L_{e,\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} [W \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}]$$

$$C_1 = 2hc^2, \quad C_2 = \frac{ch}{k_B}$$

kde:

h	Planckova konstanta	$6,6256 \cdot 10^{-34}$	[J · s]
k_B	Boltzmannova konstanta	$1,3807 \cdot 10^{-23}$	[J · K ⁻¹]
c	rychlost světla	$2,9979 \cdot 10^8$	[m · s ⁻¹]
C_1	1. vyzařovací konstanta	$1,191 \cdot 10^{-16}$	[W · m ²]
C_2	2. vyzařovací konstanta	$1,4388 \cdot 10^{-2}$	[K · m]

Planckův vyzařovací zákon



Spektrální měrné zářivosti [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$] pro 300, 350 a 400 K

Max Karl Ernst Ludwig Planck

(1858 Kiel – 1947 Göttingen)

V roce 1918 byl za práci na záření černého tělesa oceněn Nobelovou cenou za fyziku.

„Pravda nikdy nezvítězí. Jen vymřou její kritikové.“

Zdroj: <https://citaty.net/autori/max-planck/>



Wienův posunovací zákon

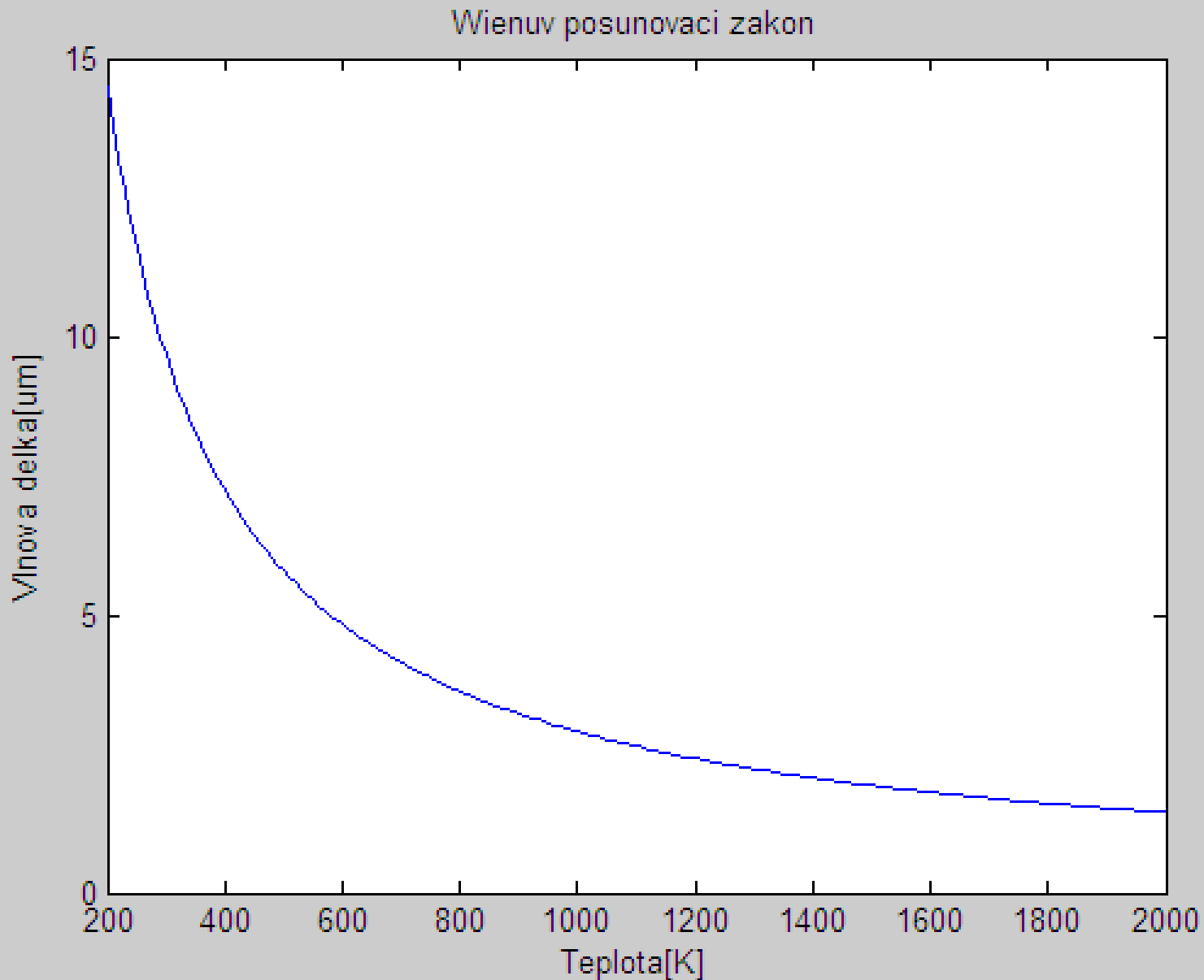
S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám (tedy do vyšších frekvencí).

Matematická formulace Wienova posunovacího zákona je dána vztahem:

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

kde b má velikost $2897,8 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ a λ_{\max} je vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku při dané teplotě zářiče maximální.

Wienův posunovací zákon



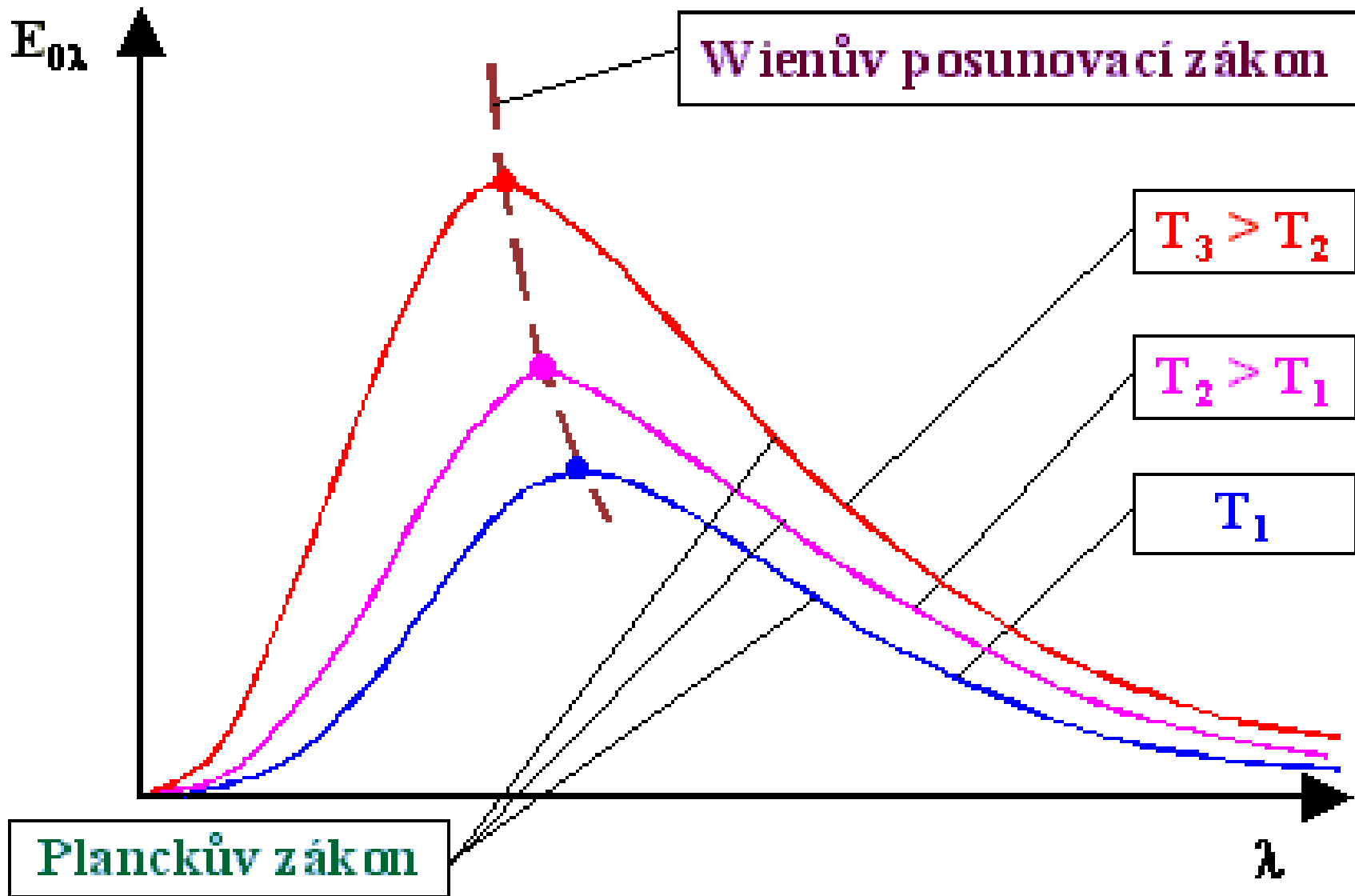
Závislost vlnové délky [μm] na teplotě [K].

Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien

(1864 Primorsk – 1928 Mnichov)

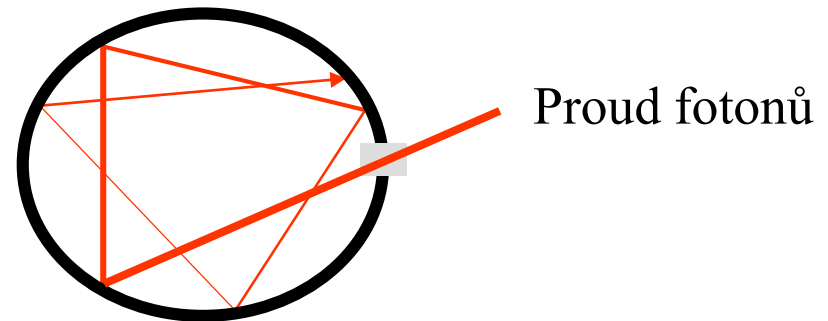
V roce 1911 obdržel Nobelovu cenu za fyziku za objevy zákonů vyzařování tepla.





Absolutně černé těleso

- Absolutně černé těleso je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření na něj dopadající, bez ohledu na vlnovou délku a úhel, pod kterým na těleso dopadá.
- Pokud je absolutně černé těleso zdrojem záření je ideálním vyzařovačem i pohlcovačem záření.
- Absolutně černé těleso vyzařuje na všech vlnových délkách při dané teplotě maximální dosažitelnou energii zářivého toku.



*Pohlcování záření a vyzařování absolutně černého tělesa je vysvětleno Kirchhoffovým zákonem (podle **Gustava Roberta Kirchhoffa**, 1824 – 1887).*

Kirchhoffův zákon

- V zájmu zachování energie musí být v termodynamické rovnováze **emitovaný tok** a **absorbovaný tok** na všech vlnových délkách a ve všech směrech při dané teplotě stejný.
- **Těleso schopné pohlcovat (absorbovat) veškeré na něj dopadající záření je schopné stejné množství záření vyzařovat (emitovat).**
- Zákon vypovídá o základních vlastnostech těles, které jsou se svým okolím v termodynamické rovnováze a dopadá na ně zářivý tok z vnějšího zdroje záření.

Kirchhoffův zákon

Dopadající zářivý tok může být rozdělen na tři složky:

$$\Phi = \Phi_{\text{pohlčený}} + \Phi_{\text{odražený}} + \Phi_{\text{prošlý}}$$

Koeficienty popisující vlastnosti těles ozářených radiálním tokem:

- **Koeficient pohltivosti** (absorpce) $-\alpha$ $\alpha = \frac{\Phi_{\text{pohlčený}}}{\Phi}$
- **Koeficient odrazivosti** (reflexe) $-\rho$ $\rho = \frac{\Phi_{\text{odražený}}}{\Phi}$
- **Koeficient propustnosti** (transmise) $-\tau$ $\tau = \frac{\Phi_{\text{prošlý}}}{\Phi}$

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

Kirchhoffův zákon

Podle velikostí jednotlivých koeficientů se těleso chová jako:

- **Absolutně černé:** dokonalý přijímač, $\alpha = 1$, $\rho = \tau = 0$
- **Šedé:** $\alpha < 1$ a konstantní, $\rho = 1 - \alpha$, $\tau = 0$
- **Antireflexní materiál:** $\alpha + \tau = 1$, $\rho = 0$
- **Zrcadlo:** dokonalý odražeč, $\rho = 1$, $\alpha = \tau = 0$
- **Dokonale propustný materiál:** $\tau = 1$, $\alpha = \rho = 0$
- **Matný (opacitní) materiál:** $\alpha + \rho = 1$, $\tau = 0$
- **Obecný materiál:** $0 \neq (\alpha, \rho, \tau) \neq 1$

Energie záření

- Většina dříve uvedených zákonů se vztahuje na ideální absolutně černé těleso (AČT), neboli takové těleso, v němž se veškerá kinetická energie změnila v zářivou.
- U skutečných látek se míra efektivity prováděné změny liší. Je dána výrazem pro **spektrální emisivitu** M_λ , která je funkcí vlnové délky a termodynamické teploty.

Jestliže $\varepsilon_{T(\lambda)} = a$, pak

$$\varepsilon_{T(\lambda)} = \frac{M_{T(\lambda)} \text{ zdroje}}{M_{T(\lambda)} \text{ AČT}}$$

1) je-li a konstanta

- $a = 1$, jedná se o absolutně černé těleso
- $0 < a < 1$, jedná se o šedý zářič
- $a = 0$, není těleso zdrojem záření, nýbrž je jeho dokonalým odražečem

2) není-li a konstanta, jedná se o barevný zářič

Většina látek se v rozsahu 8 – 16 μm chová jako šedý zářič.

Emisivita

- ... (bezrozměrný) koeficient emisivity závisí na λ a T ; nabývá hodnot 0 až 1,
- ... vyjadřuje zhoršení vyzařovacích vlastností zdroje ve srovnání s absolutně černým tělesem,
- ... koeficient emisivity je závislý na:
 - typu materiálu zdroje,
 - vlastnostech povrchu zdroje,
 - vlnové délce,
 - teplotě materiálu,
 - směru vyzařování.

Emisivita

Základní typy radiačních zdrojů:

- Absolutně černá tělesa: $\varepsilon_{T(\lambda)} = 1$
 - Lambertovský zářič
- Šedá tělesa: $\varepsilon_{T(\lambda)} < 1$ a konstantní
 - Lambertovský zářič, ale jeho vyzařování je na všech vlnových délkách ε x menší než vyzařování absolutně černého tělesa.
- Selektivní zdroje: $\varepsilon(\lambda)$ se mění v závislosti na λ
 - emisivita je závislá na směru vyzařování

Zdroje záření v dálkovém průzkumu Země

Zdroje záření v dálkovém průzkumu

- Přírodní zdroje:
 - záření Slunce,
 - záření Země.
- Umělé zdroje:
 - radary (*Radio Detecting And Ranging*) v rozsahu mikrovln,
 - lasery (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) v rozsahu viditelného a infračerveného záření).

Sluneční záření

- Tepelné záření Slunce můžeme v hrubém přiblížení přirovnat k záření černého tělesa o teplotě 6000 K.
- Této teplotě odpovídá podle Wienova posunovacího zákona

$$\lambda_{\max} = 0,555 \mu\text{m}.$$

Sluneční záření

- Intenzita slunečního záření na horní hranici atmosféry je pro plochu 1 m^2 kolmou k opadajícím slunečním paprskům rovna 1367 W. m^2 .
- Tato hodnota je označována jako **sluneční (solární) konstanta**, přestože se její hodnota mění v rozsahu $\pm 3 \%$ v souvislosti se změnou vzdálenosti Země od Slunce během roku.
- Celkový zářivý tok vydávaný Sluncem činí $3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$, z čehož naše planeta dostává asi půl miliardytiny.

Záření Země

- Tepelné záření Země můžeme v hrubém přiblížení přirovnat k záření černého tělesa o teplotě 300 K.
- Této teplotě odpovídá podle Wienova posunovacího zákona

$$\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}.$$

Přírodní zdroje

Srovnáme-li tepelné ozařování Slunce a tepelné vyzařování Země, pak:

- mají stejné hodnoty ve středním pásmu infračerveného záření na $\lambda = 3 \mu\text{m}$,
- na kratších vlnových délkách převládá sluneční ozařování,
- na delších vlnových délkách převládá tepelné vyzařování Země.

Umělé zdroje záření

- Intenzita radarového záření závisí na výkonu vysílače W a zisku (zesílení) antény G . Ve vzdálenosti r od antény bude intenzita ozáření:

$$E = \frac{W \cdot G}{4\pi^2}$$

- Radary zpravidla nevyzařují energii stále, ale v pulsním režimu. Pulsní výkon W_p je nepřímo úměrný době trvání pulsu τ a frekvenci jejich opakování (pulsní frekvenci) f_p :

$$W_p = \frac{W}{\tau \cdot f_p}$$

Interakce elektromagnetického záření s prostředím

Interakce elektromagnetického záření s prostředím

- Parametry elektromagnetického záření se nemění jedině tehdy, jestliže prostředí, kterým se šíří, je dokonale homogenní.
- V opačném případě způsobuje každá nehomogenita změnu elektromagnetických i geometrických charakteristik záření.

Pro dálkový průzkum je podstatné, že výsledek těchto změn je závislý na fyzikálních vlastnostech každé nehomogenity.

Jestliže by tomu tak nebylo, a změna by např. byla vždy stejná, nebyl by dálkový průzkum možný.

Interakce elektromagnetického záření s prostředím

- V závislosti na chemickém složení a aktuálním fyzikálním stavu bude možné každý typ povrchu charakterizovat podle odraženého a emitovaného záření.
- Dva objekty, které v jednom intervalu odrážejí a emitují podobné množství záření, mohou v jiném intervalu odrážet a emitovat rozdílné množství energie.

Interakce elektromagnetického záření s prostředím

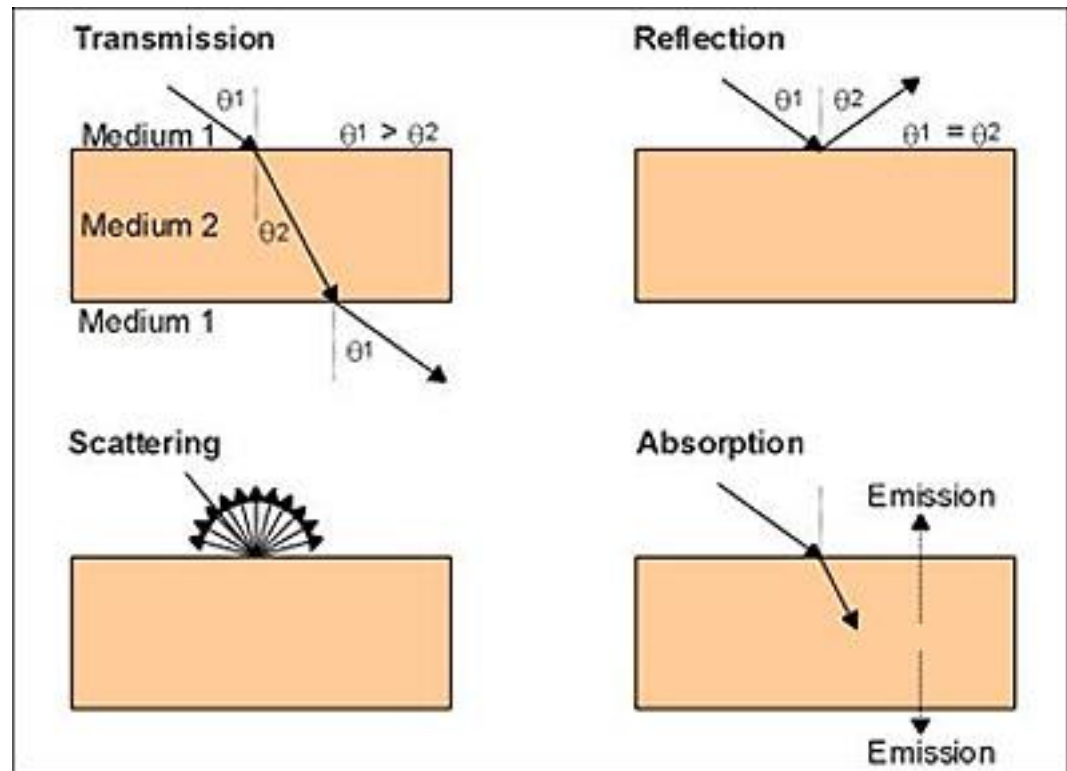
Dopadající elektromagnetická vlna indukuje na hranici dvou prostředí oscilační pohyb elektrických nábojů na povrchu tělesa, které následně produkují sekundární elektromagnetickou vlnu. Ta se může odlišovat od dopadající vlny:

- jinou intenzitou či energií,
- jinou vlnovou délkou,
- jinou polarizací a
- jiným směrem šíření.

Interakce elektromagnetického záření s prostředím

Podle směru šíření sekundární vlny se rozlišuje záření:

- a) prošlé,
- b) odražené,
- c) rozptýlené a
- d) pohlcené.



Odraz záření

Nositelem informace o zkoumaném objektu je elektromagnetické záření, a proto je nutné znát intenzitu od objektu odraženého i/nebo objektem emitovaného záření.

Emitované záření: je popsáno Planckovým zákonem aj. (viz výše).

Odražené záření: je nutné určit změnu mezi dopadajícím a odraženým zářením. Tato změna závisí na vlastnostech povrchu a je vyjádřena odrazivostí. Řeší se pro:

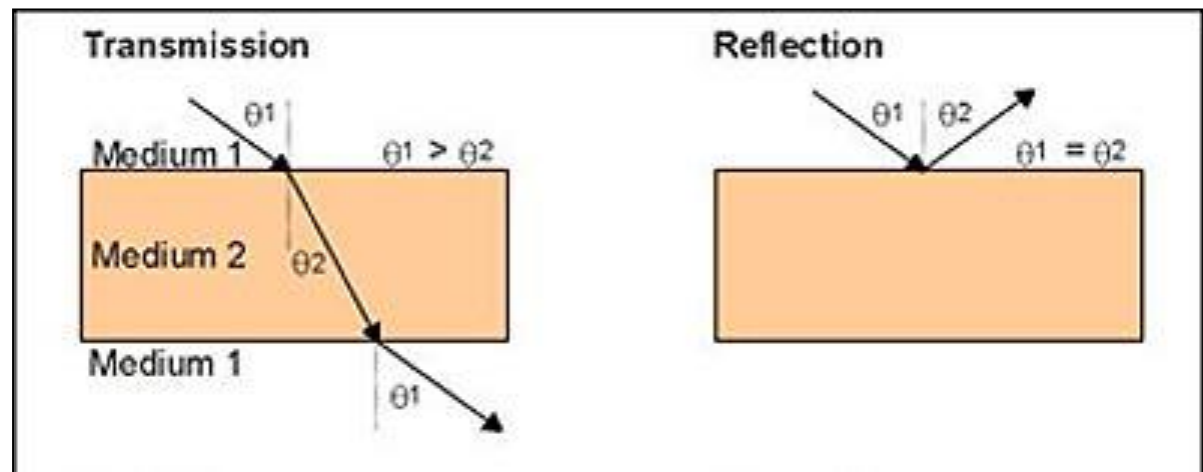
- ideální hladký povrch (platí Snellův zákon),
- reálný povrch.

Odraz od hladkého povrchu

Výpočet umožňují Fresnelovy rovnice, které platí pro ideálně rovný povrch rozhraní mezi dvěma prostředími (1,2), jež jsou samy o sobě dokonale homogenní

Rozdílnost obou prostředí vyjadřuje index lomu n_{12} .

Elektromagnetická vlna při dopadu na rozhraní dvou prostředí pod úhlem θ_1 se částečně odrazí a částečně pronikne do druhého prostředí.



Odraz od hladkého povrchu

Pro směr postupu v 1. prostředí platí, že úhel dopadu je roven úhlu odrazu, tedy, že $\theta_1 = \theta_2$

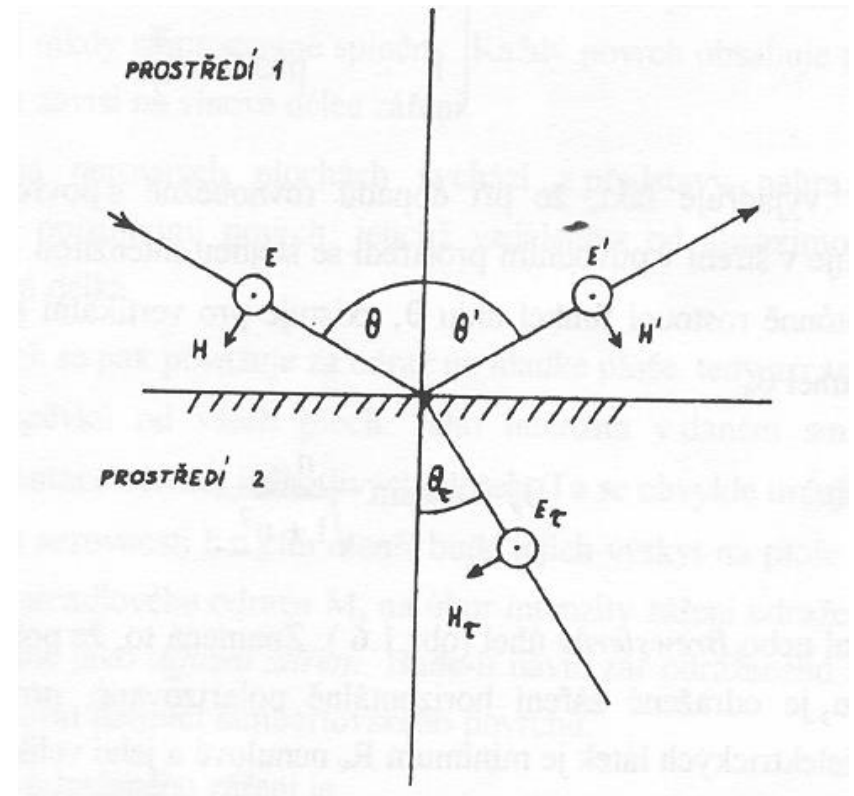
Směr postupu záření v prostředí 2 je dán Snellovým zákonem:

$$n_1 \cdot \sin \theta = n_2 \cdot \sin \theta_\tau,$$

kde: $n = \sqrt{(\epsilon_r \cdot \mu_r)}$ je absolutní index lomu,

$n_{12} = n_2/n_1$ je relativní index lomu,

$\theta_\tau =$ úhel lomu.



Odraz od hladkého povrchu

- Energetické změny mezi dopadajícím a odraženým zářením ve Fresnelových rovnicích jsou vyjádřeny poměrem velikosti intenzity elektrického pole E' vlny odražené a intenzity elektrického pole vlny dopadající E .
- Tento poměr se nazývá Fresnelův koeficient odrazu R a uvádí se pro horizontální a vertikální složku obou vln.

Odraz na nerovných plochách

- Reálné nerovnosti nahrazujeme malými dílčími tangenciálními ploškami opisujícími povrch, jejichž vzdálenost od nahrazované plochy je mnohem menší než vlnová délka dopadajícího záření.
- Odraz na dílčích ploškách je zrcadlový, výsledné odražené záření pak je součtem příspěvků od všech dílčích ploch.
- Intenzita záření ve směru θ' závisí na statistickém rozdělení směrů normál k jednotlivým dílčím ploškám. Směr normál je definován sklonem α a azimutem ϕ .
- Čím menší bude výška nerovností h , tím větší bude záření ve směru zrcadlového odrazu M_s , a to na úkor intenzity záření do ostatních směrů (difúzního záření M_d).
- Celková intenzita odraženého záření $M_p = M_s + M_d$
- Bude-li zář odraženého záření ve všech směrech stejná, pak povrch rozhraní označíme jako lambertovský.

Odraz na nerovných plochách

Je-li vlnová délka „dostatečně velká“ pro daný typ povrchu, je možné interakci popsat zrcadlovým odrazem, který je popsán Fresnelovými rovnicemi. Pojem „dostatečně velká“ je podle Rayleighovy rovnice

$$\lambda \geq 8h.\cos\theta,$$

kde: h je maximální výškový rozdíl nerovností na ploše rozhraní,

θ je úhel dopadu elektromagnetického záření

Pro mikrovlny platí Fraunhoferovo kritérium:

$$\lambda \geq (8h.\cos\theta)/4$$

Odraz na nehomogenních plochách

- V případě příměsí (nehomogenní prostředí) na nich vznikají nová rozhraní, kde dochází k dalšímu odrazu a lomu.
- Tento vliv, tedy vliv podpovrchové reakce:
 - lze zanedbat u většiny vlnových délek,
 - nelze zanedbat u mikrovlnného a radiového záření.

Lambertův (kosinový) zákon

Izotropní záření je takové záření, pro které platí, že zář L je ve všech směrech stejná.

$$E = \int_{d\Omega} L \cdot \cos \theta \cdot d\Omega = L \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = \pi \cdot L$$

Pro ostatní veličiny u tohoto záření platí Lambertův zákon ve tvaru:

$$\frac{\Phi_0}{\Phi_n} = \frac{E_0}{E_n} = \frac{I_0}{I_n} = \cos \theta$$

Plochy vyzařující v souladu s Lambertovým zákonem označujeme jako lambertovské neboli dokonale difúzní plochy.

Diagramy odrazivosti

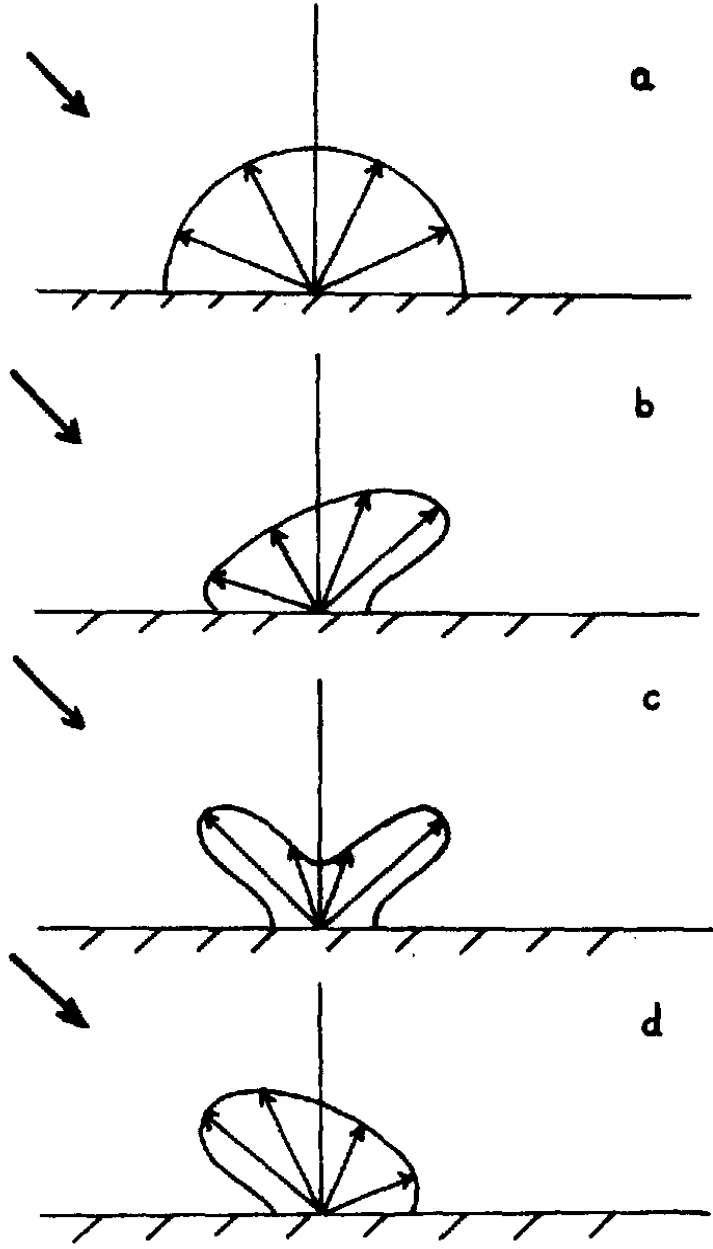
Diagram odrazivosti vyjadřuje směrovou závislost spektrálního koeficientu záře,

Pro danou polohu zdroje a pro daný azimut odrazové roviny je v něm v polárních souřadnicích vynášena závislost spektrálního koeficientu záře $R_{\lambda} = R_{\lambda}(\theta)$.

Podle tvaru odrazného diagramu lze rozeznávat:

- **difúzní plochy**, které odrážejí záření stejnoměrně do všech směrů, takže koeficient záře je konstantní. Ve viditelném oboru záření má difúzní povrch písek nebo čerstvý sníh.
- **zrcadlové plochy**, které mají výrazné maximum koeficientu záře ve směru $\Theta' = \Theta$. Tímto způsobem odráží viditelné záření např. led nebo skalní bloky.
- **kombinované povrchy** mají v diagramu odrazu kromě maxima odpovídajícího zrcadlovému povrchu ještě protilehlé maximum v blízkosti úhlu $\Theta' = -\Theta$. Tento typ povrchu je charakteristický pro některé zemědělské plodiny, zejména obilí.
- **rýhované** mají maximální odrazivost ve směru úhlu dopadu (různý vegetační kryt).

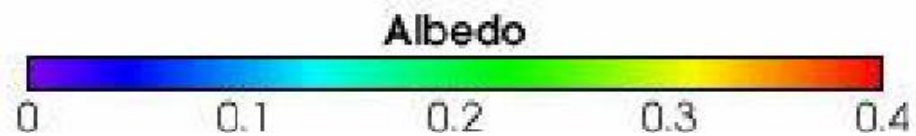
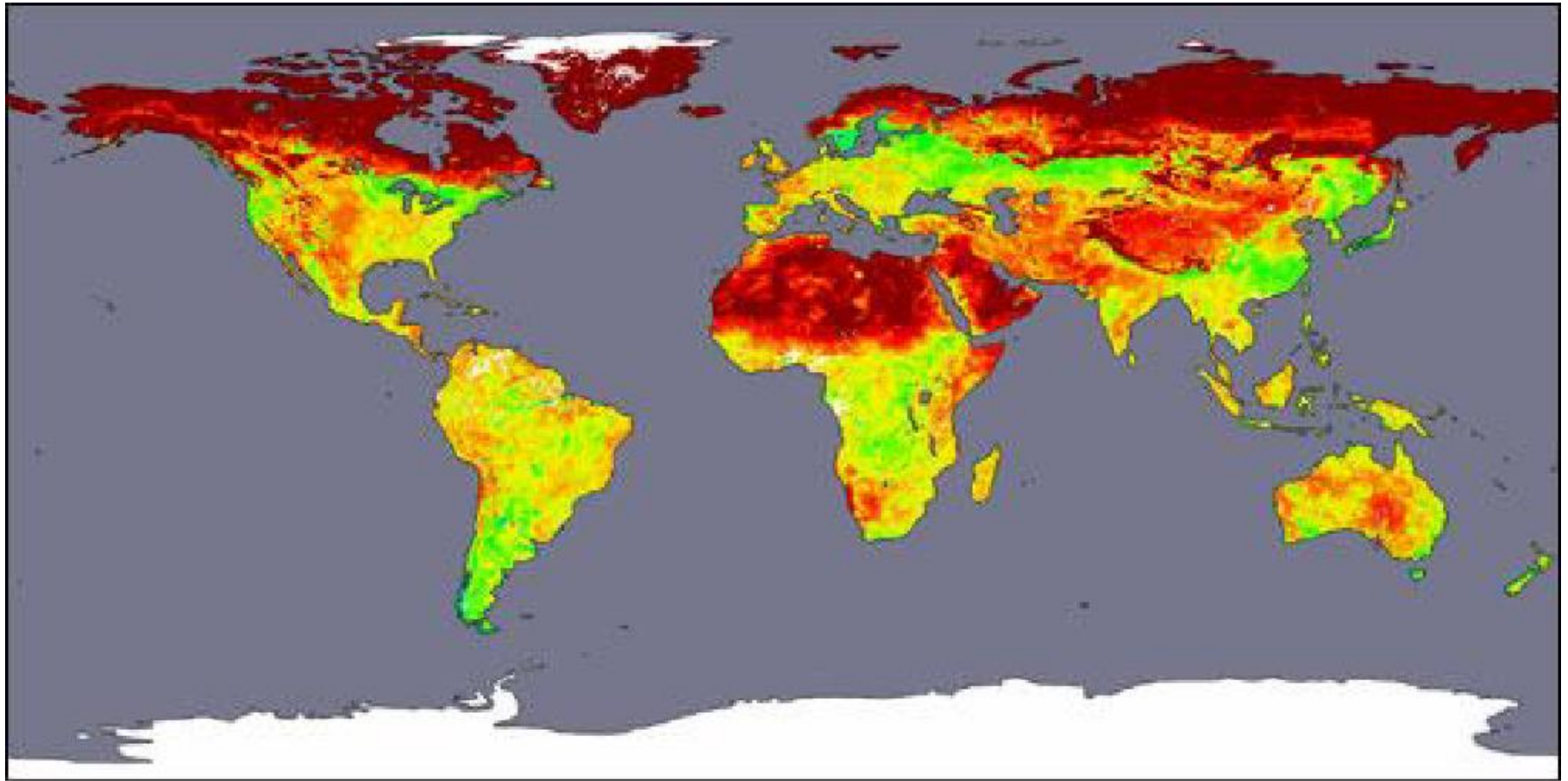
Diagramy odrazivosti



Albedo

- Pro odrazivost přírodních objektů se často používá označení **albedo**.
- Albedo se může měřit v různé výšce nad zemským povrchem. Albedo ve výšce h je dáno poměrem toku záření odcházejícího z atmosféry pod výškou h směrem nahoru k toku záření přicházejícího na této výšce do atmosféry směrem k Zemi.
- Definice albeda tak nezahrnuje jen přímé sluneční záření, ale také záření rozptýlené atmosférou.

Albedo Země



Albedo vybraných povrchů

Druh povrchu	Průměrné albedo
voda	0,05 - 0,90
sníh	0,75 - 0,95
půda tmavá	0,05 - 0,15
půda světlá	0,25 - 0,45
poušť	0,25 - 0,40
rostliny	0,05 - 0,25
Země	0,34 - 0,42

Spektrální albedo

- Vztáhneme-li pojem albedo jen na určitou část elektromagnetického spektra, pak hovoříme o **spektrálním albedu**.
- Identický význam jako spektrální albedo má, v DPZ častěji používaný termín, **spektrální odrazivost**, tj. podíl záření dopadajícího a odraženého (včetně vlastního záření objektu ve směru odrazu).
 - Obvykle se udává **koeficientem spektrální odrazivosti**, který se uvádí v desetinném čísle (je prakticky vždy menší jako 1) nebo v procentech.

Zdroje

Pekarská, V.: *Multimediální učebnice konvenčních zobrazovacích systémů-IR.*
ČVUT, Fakulta biomedicínského inženýrství, 2009