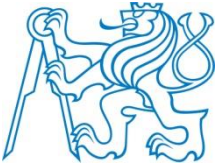




# Sluneční energie

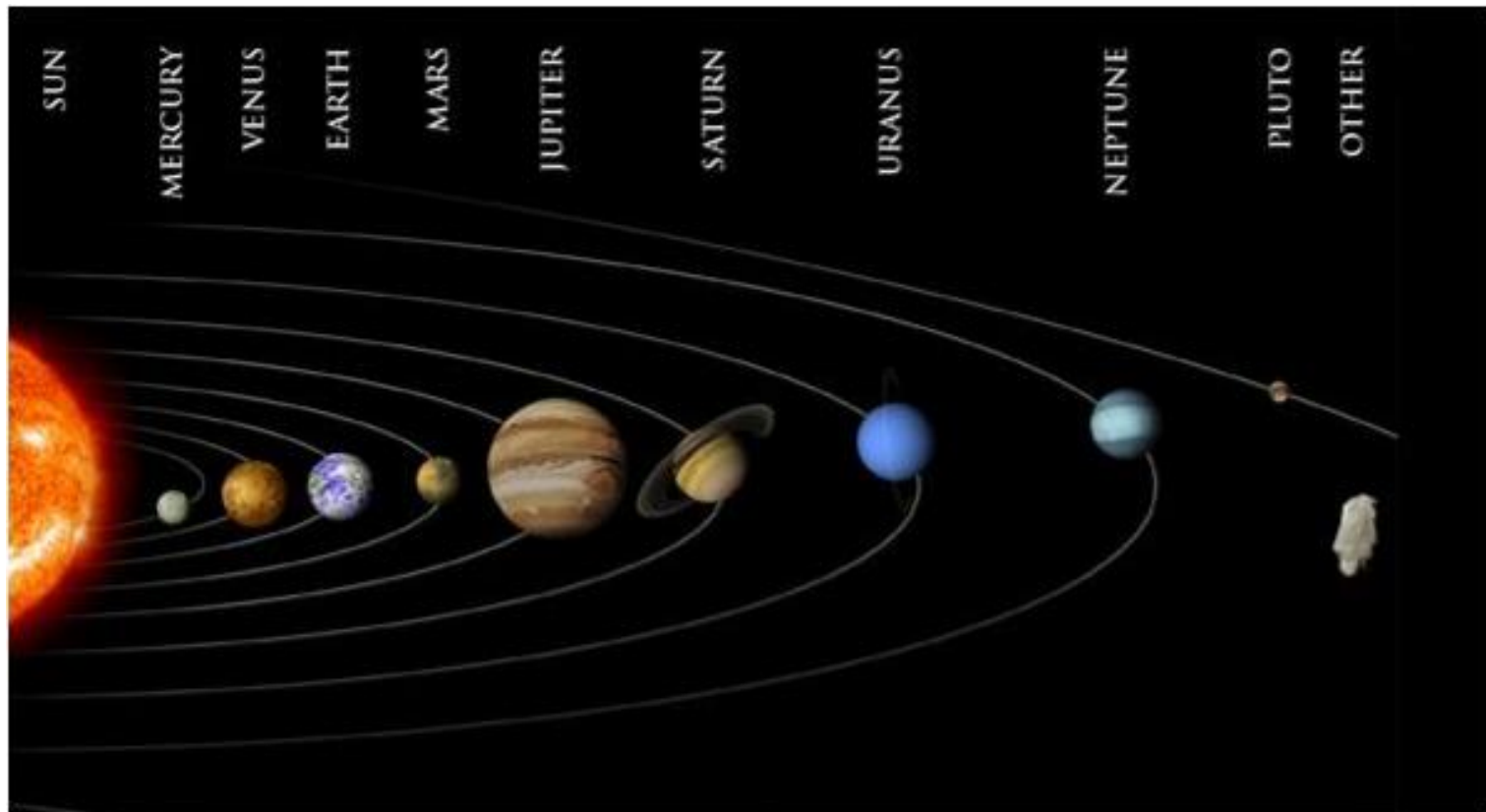
- sluneční záření
- základní pojmy
- dopadající energie

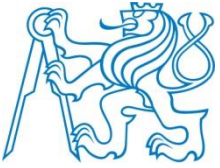




# Slunce

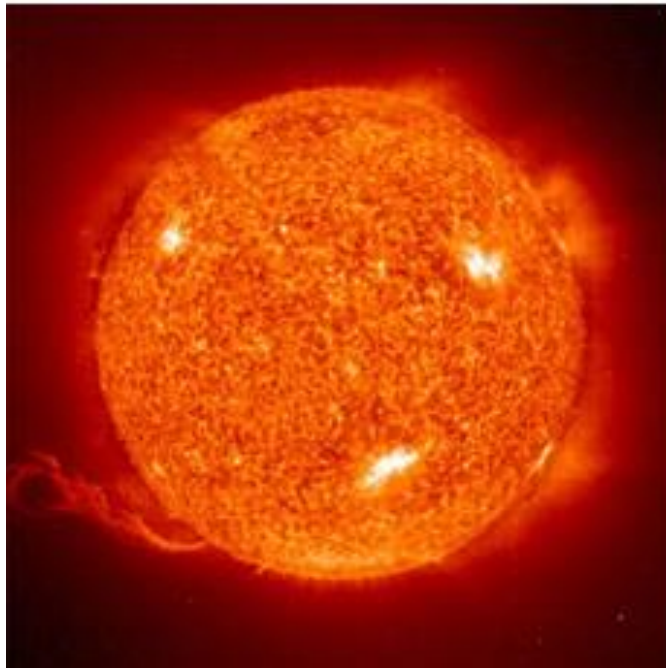
- nejbližší hvězda
- střed naší planetární soustavy – sluneční soustavy

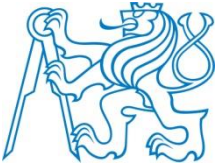




# Slunce

- průměr 1 392 000 km                      109 x větší než průměr Země
- hmotnost  $2 \times 10^{30}$  kg                      330 000 x větší než Země  
99,86 % hmotnosti sluneční soustavy
- složení: 70 % vodík **H**, 28 % helium **He**, 2 % ostatní prvky





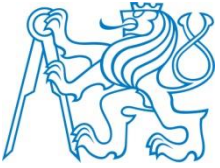
# Slunce

---

- původ sluneční energie v **jaderných** reakcích
- uvnitř jádra Slunce probíhá jaderná syntéza za vysokých teplot cca  **$10^6$  K** a tlaků cca  **$10^{10}$  MPa** slučování jader vodíku (H) → jádra hélia (He)
- **$564 \times 10^9$  kg/s H** se přemění na  **$560 \times 10^9$  kg/s He**
- rozdíl hmot  **$4 \times 10^9$  kg/s** se vyzáří ve formě energie

$$E = m \cdot c^2$$

- celkový vyzařovaný výkon:  **$3,6 \times 10^{26}$  W**
- hustota vyzařovaného výkonu:  **$6 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>**



# Slunce

- **jádro** (do 23 %  $R$ )  
teplota desítky mil. K, rentgenové záření  
produkce 90 % energie Slunce
- **radiační zóna** (od 23 do 70 %  $R$ )  
teplota klesá až na 130 000 K  
přenos energie zářením (fotony)
- **konvekční zóna** (od 70 do 100 %  $R$ )  
menší hustota, konvekční přenos energie
- **fotosféra** (viditelný povrch Slunce)  
teplota 5800 K, sluneční záření





# Spektrální hustota zářivého toku

- Slunce září jako **dokonale černé těleso** s povrchovou teplotu **5800 K**
- spektrální hustota slunečního zářivého toku (Planckův zákon)

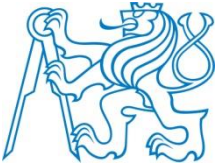
$$E_{\check{c}}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \left[ e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1 \right]^{-1} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}]$$

$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  Planckova konstanta

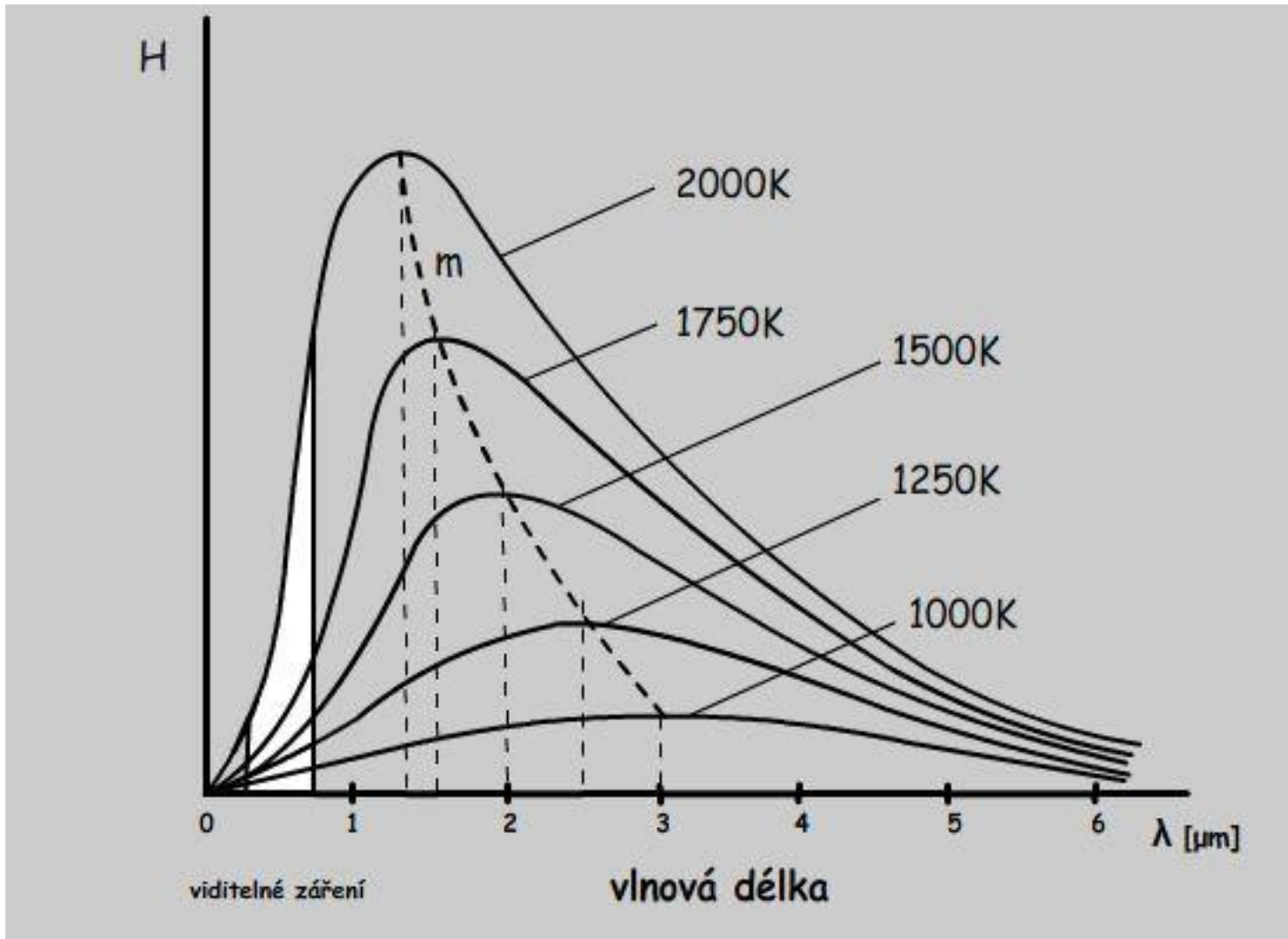
$k = 1,3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  Boltzmannova konstanta

$c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$  rychlost světla ve vakuu

$T$  povrchová absolutní teplota tělesa [K]

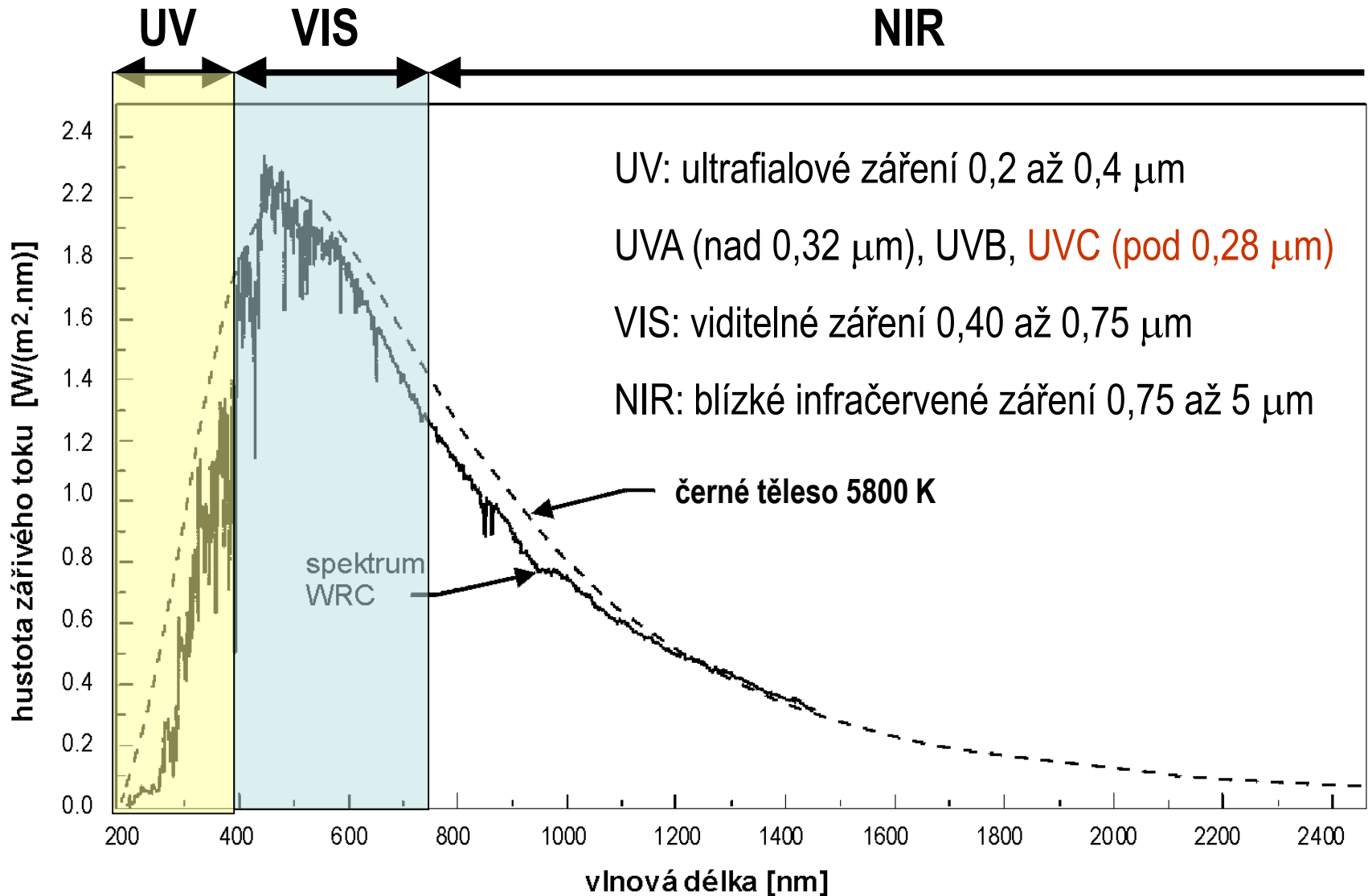


# Planckův vyzařovací zákon





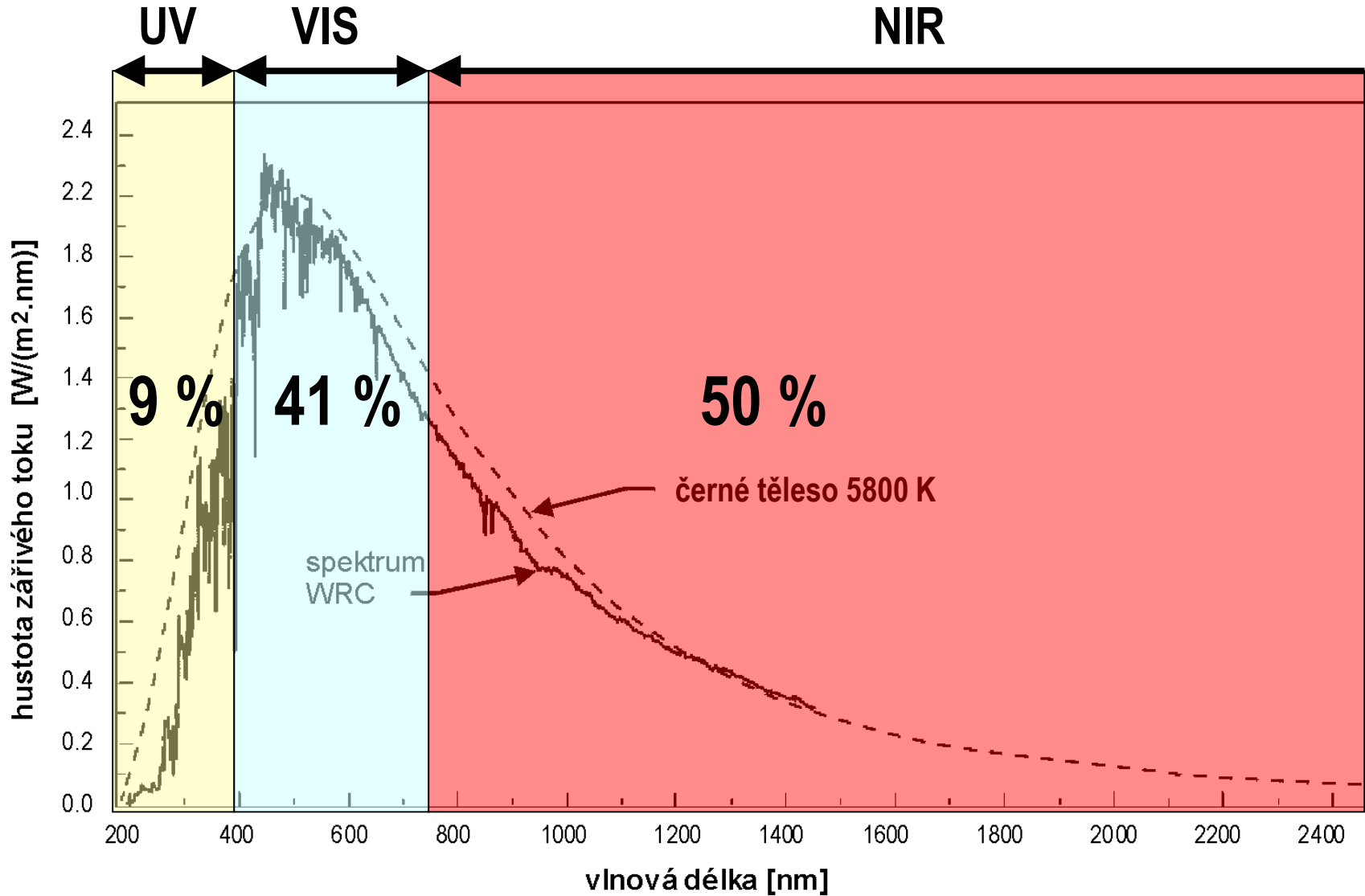
# Spektrální hustota zářivého toku

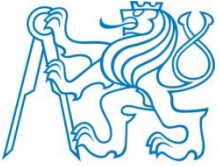






# Vyzařovaná sluneční energie

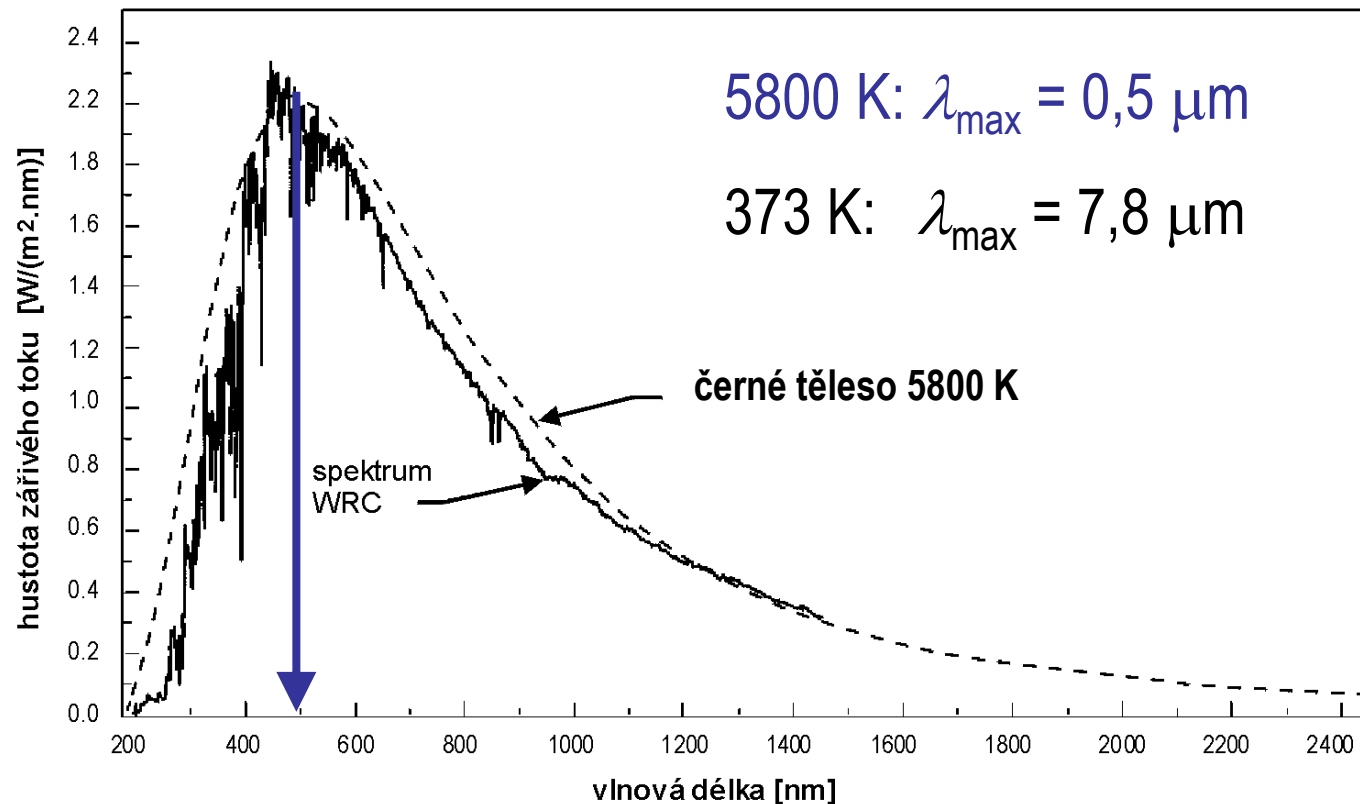


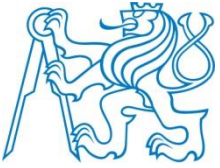


# Hustota zářivého toku

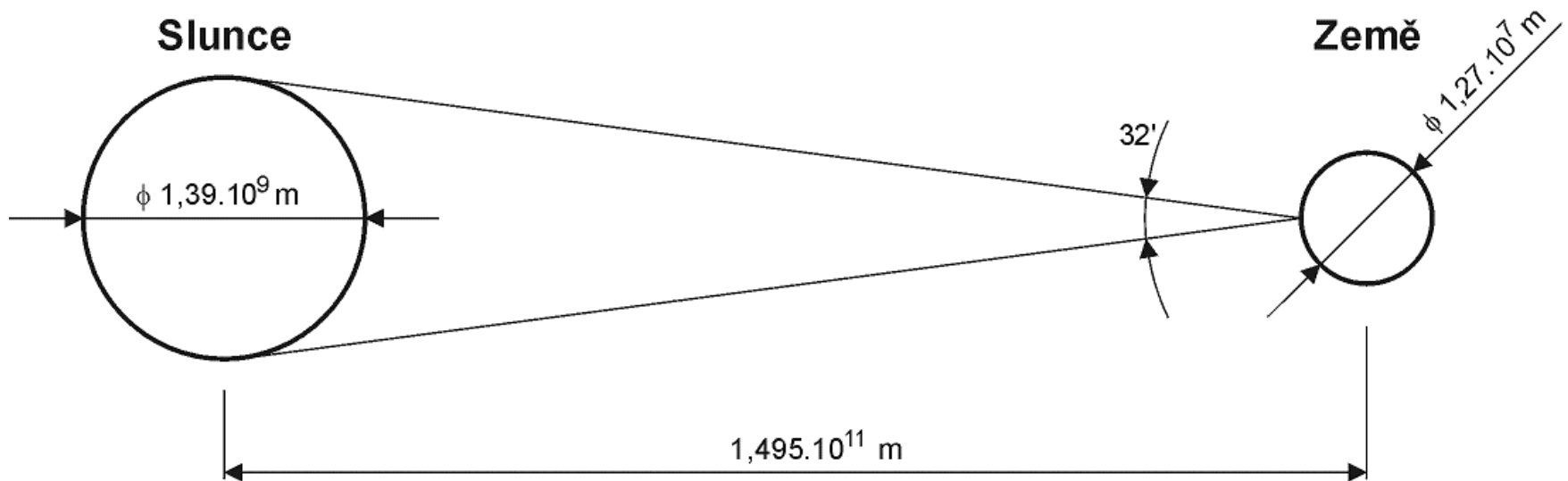
- maximum hustoty zářivého toku – hledání extrému Planckovy funkce

$$\frac{\partial E_{\check{c}}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \quad \rightarrow \quad \lambda_{\max} \cdot T = 2898 \quad [\mu\text{m} \cdot \text{K}] \quad \text{Wienův zákon}$$

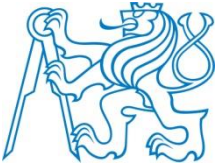




# Šíření sluneční energie

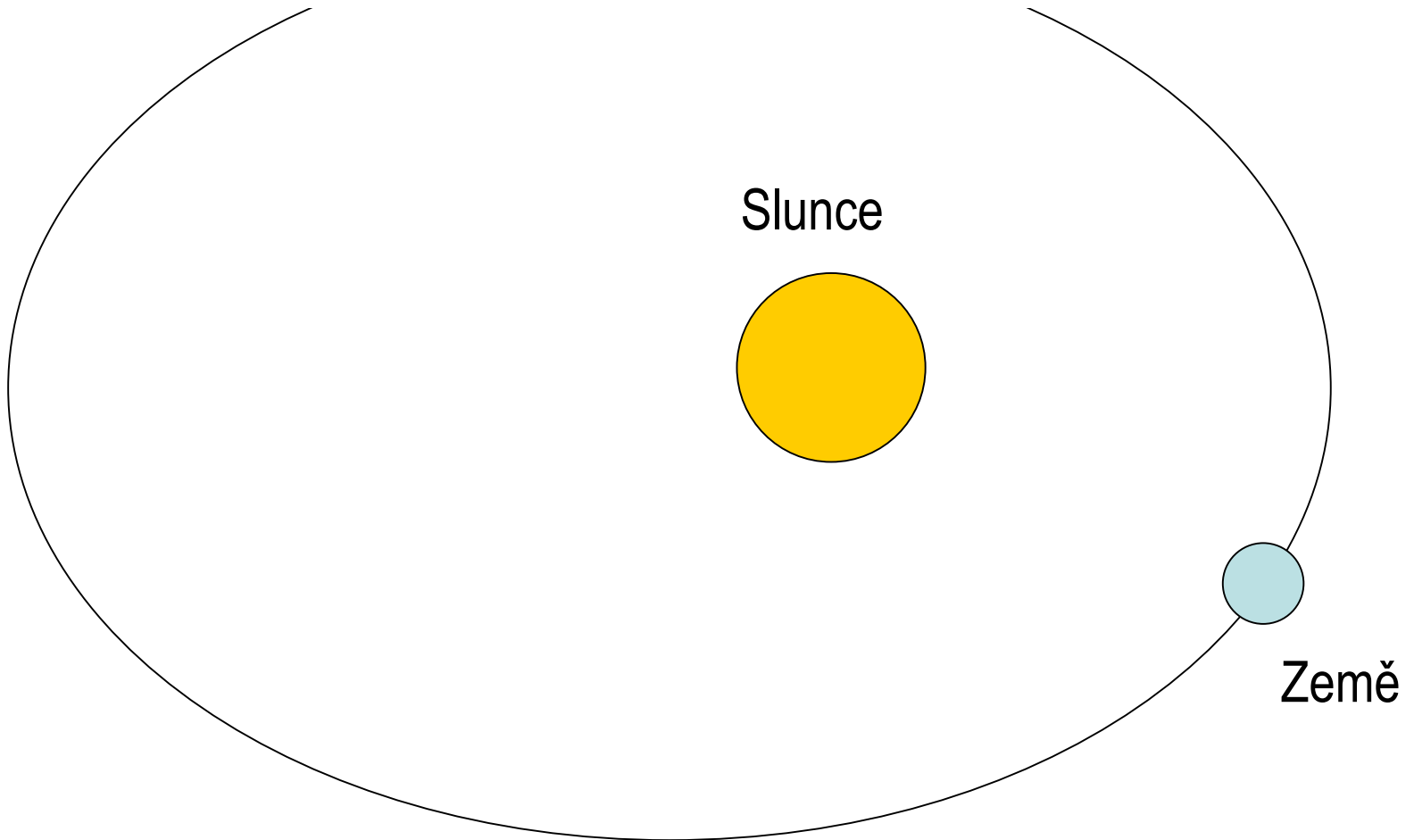


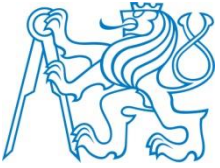
- s rostoucí vzdáleností od Slunce se výkon rozptyluje na větší plochu
- na planetu Zemi dopadá cca  $0,5 \times 10^{-9}$  (cca půl miliardtiny) výkonu zářivý tok  **$1,7 \times 10^{17} \text{ W}$**
- svazky slunečních „paprsků“ uvažovány jako rovnoběžné ( $32'$ )



# Země obíhá okolo Slunce

eliptická dráha (téměř kruhová), Slunce v jednom z ohnisek





# Hustota zářivého toku vně atmosféry

- na vnější povrch atmosféry dopadá na jednotku plochy kolmé ke směru šíření sluneční zářivý tok
- mění se v průběhu roku vlivem proměnlivé vzdálenosti Slunce-Země (eliptická dráha Země kolem Slunce)

změna vzdálenosti  $\pm 1,7 \%$ , změna zářivého toku  $\pm 3,3 \%$

- hodnota ve střední vzdálenosti Země-Slunce

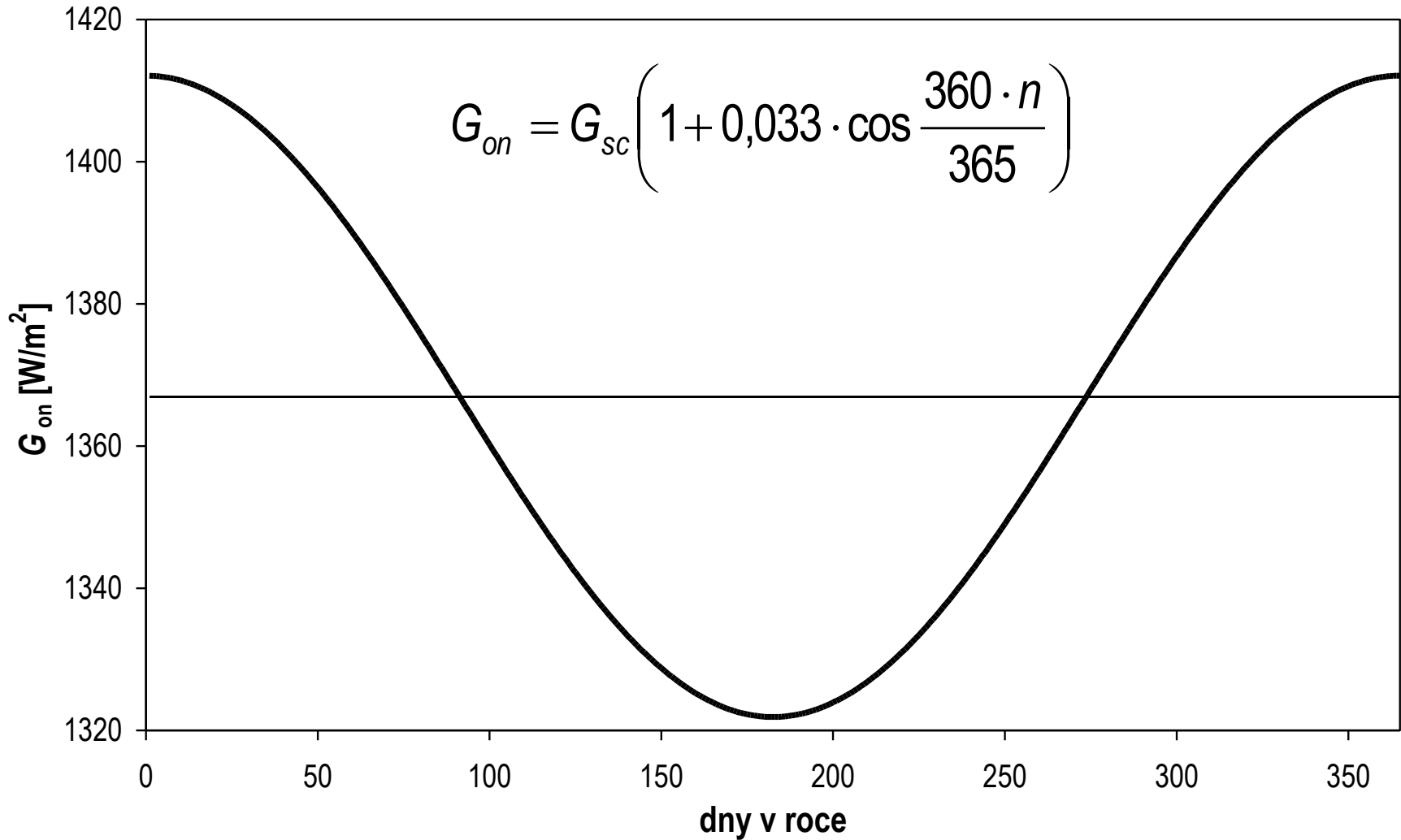
**sluneční konstanta  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$**  (údaj WRC, 1 %)

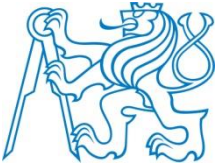
původní měření Ch. Abbot v horách  $1322 \text{ W/m}^2$ , dnes družice

- Merkur:  $9040 \text{ W/m}^2$  ... Neptun:  $1,5 \text{ W/m}^2$



# Hustota zářivého toku vně atmosféry





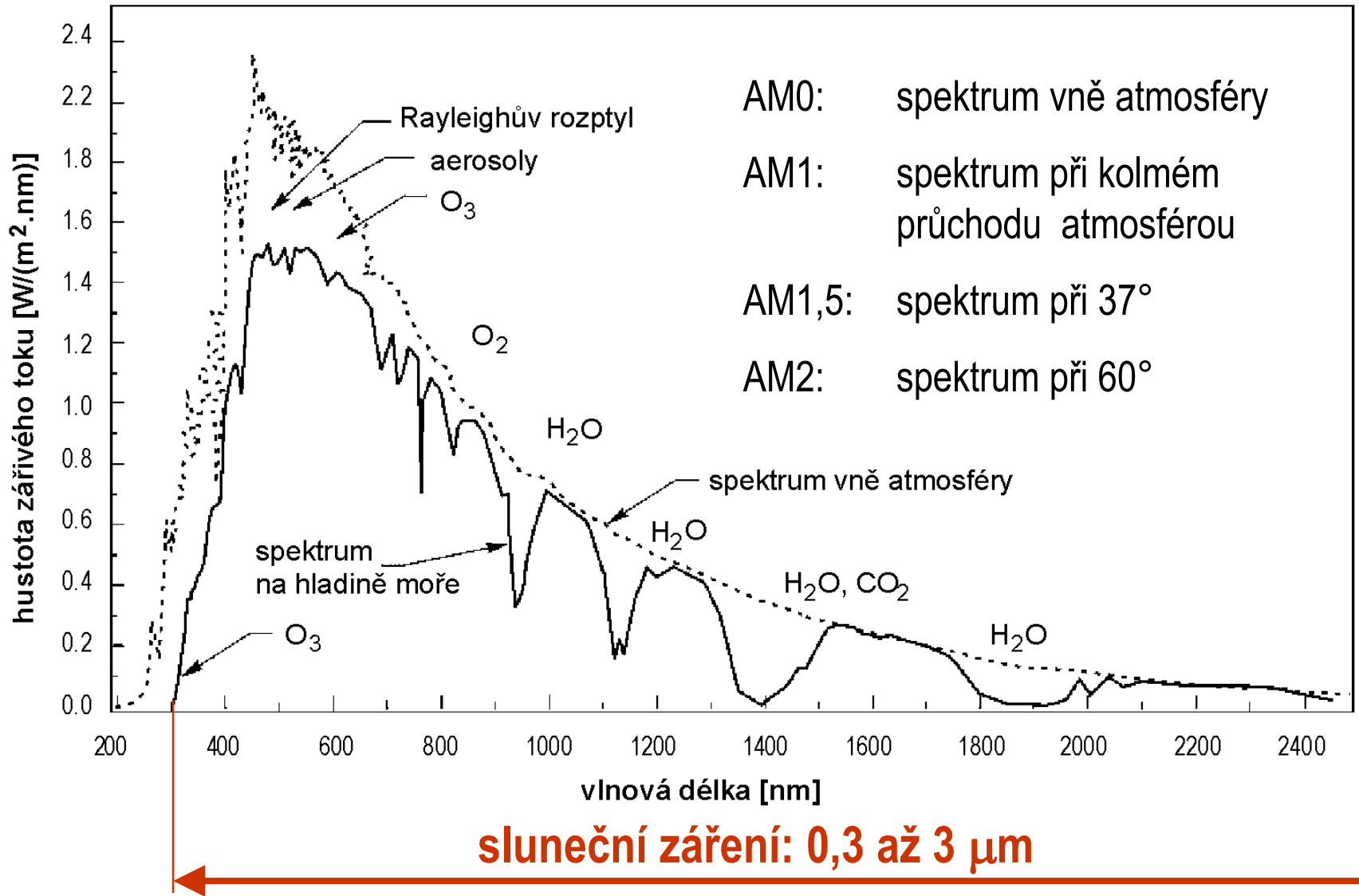
# Průchod slunečního záření atmosférou

---

- sluneční záření vstupuje do atmosféry (není jednoznačná hranice, exosféra plynule přechází do meziplanetárního prostoru)
- **ionosféra** (60 km)  
atmosférické plyny  $O_2$ ,  $N_2$  pohlcují **ultrafialové** a rentgenové záření a ionizují se
- **ozonoféra** (20 až 30 km)  
ozón  $O_3$  pohlcuje zbytek škodlivého **ultrafialového** záření (UVC)
- **troposféra** (nejnižší vrstva, mraky)  
vodní pára,  $CO_2$ , prach, kapičky vody pohlcují **infračervené** záření



# Průchod slunečního záření atmosférou

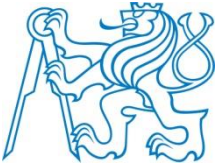




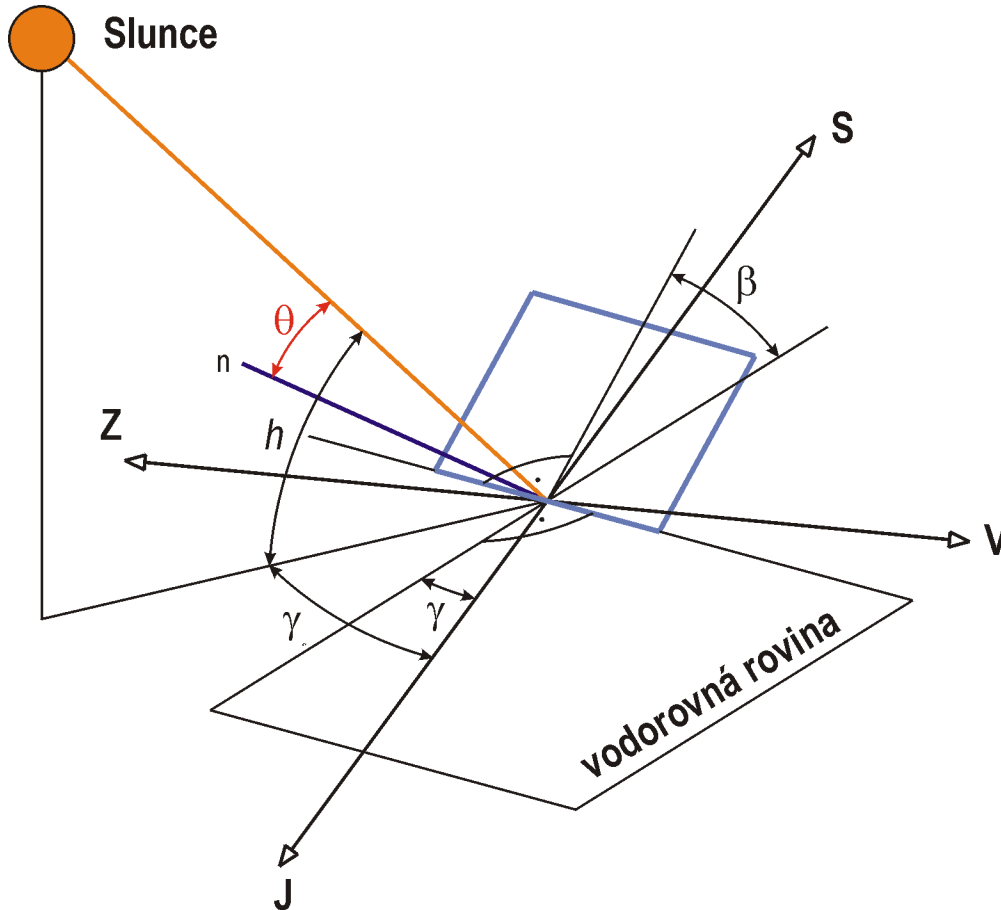


## Roční bilance (průměr)

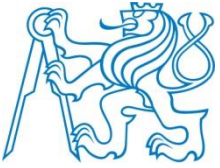
- odraz od atmosféry 34 %
- pohlcení v atmosféře 19 %
- **dopad a pohlcení zemským povrchem 47 %**
  - z toho
    - tepelné záření zemského povrchu zpět 14 % energie prostředí
    - vypařování vody (oceány) 23 % vodní energie
    - konvekce, proudění vzduchu, vítr 10 % větrná energie
    - biologické reakce, fotosyntéza 1 ‰ energie biomasy



# Geometrie slunečního záření



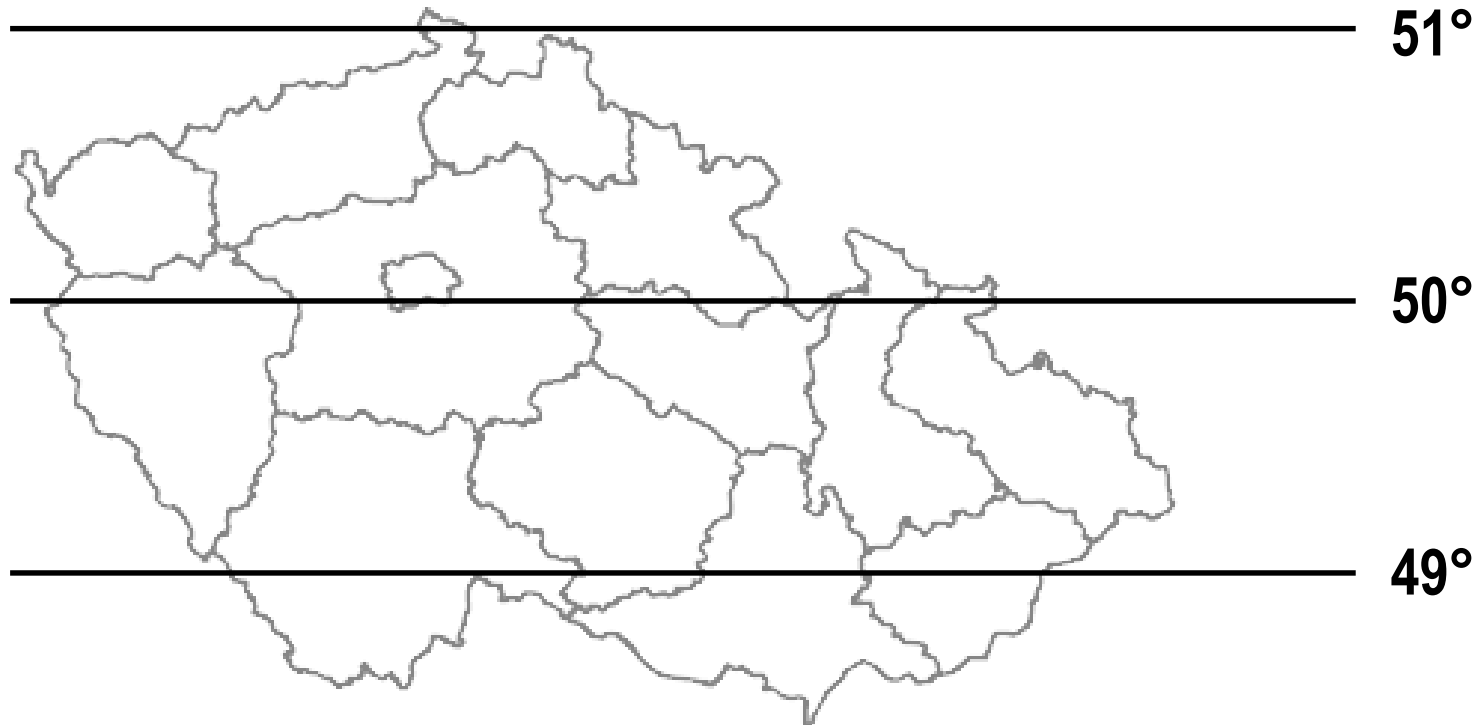
- sklon plochy  $\beta$
  - azimut plochy  $\gamma$
  - zeměpisná šířka místa  $\phi$
- 
- čas, datum
  - sluneční časový úhel  $\tau$
  - deklinace  $\delta$
  - výška slunce nad obzorem  $h$
  - azimut slunce  $\gamma_s$
- 
- úhel dopadu paprsků  $\theta$

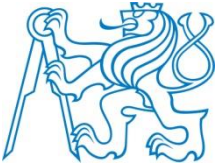


# Poloha plochy

- **zeměpisná šířka  $\phi$**       konvence: severně (+), jižně (-)

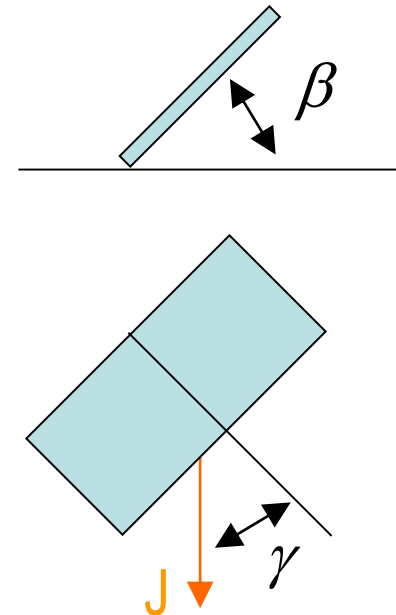
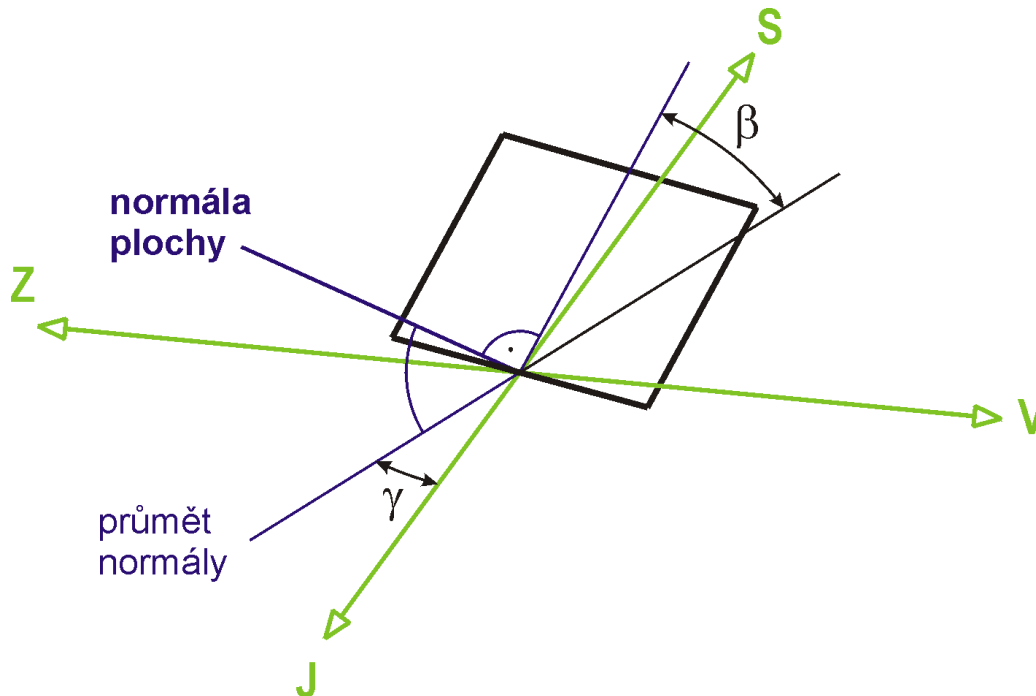
úhel mezi rovinou rovníku a přímkou spojující střed Země a dané místo na povrchu

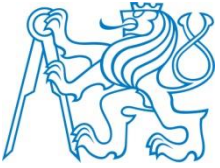




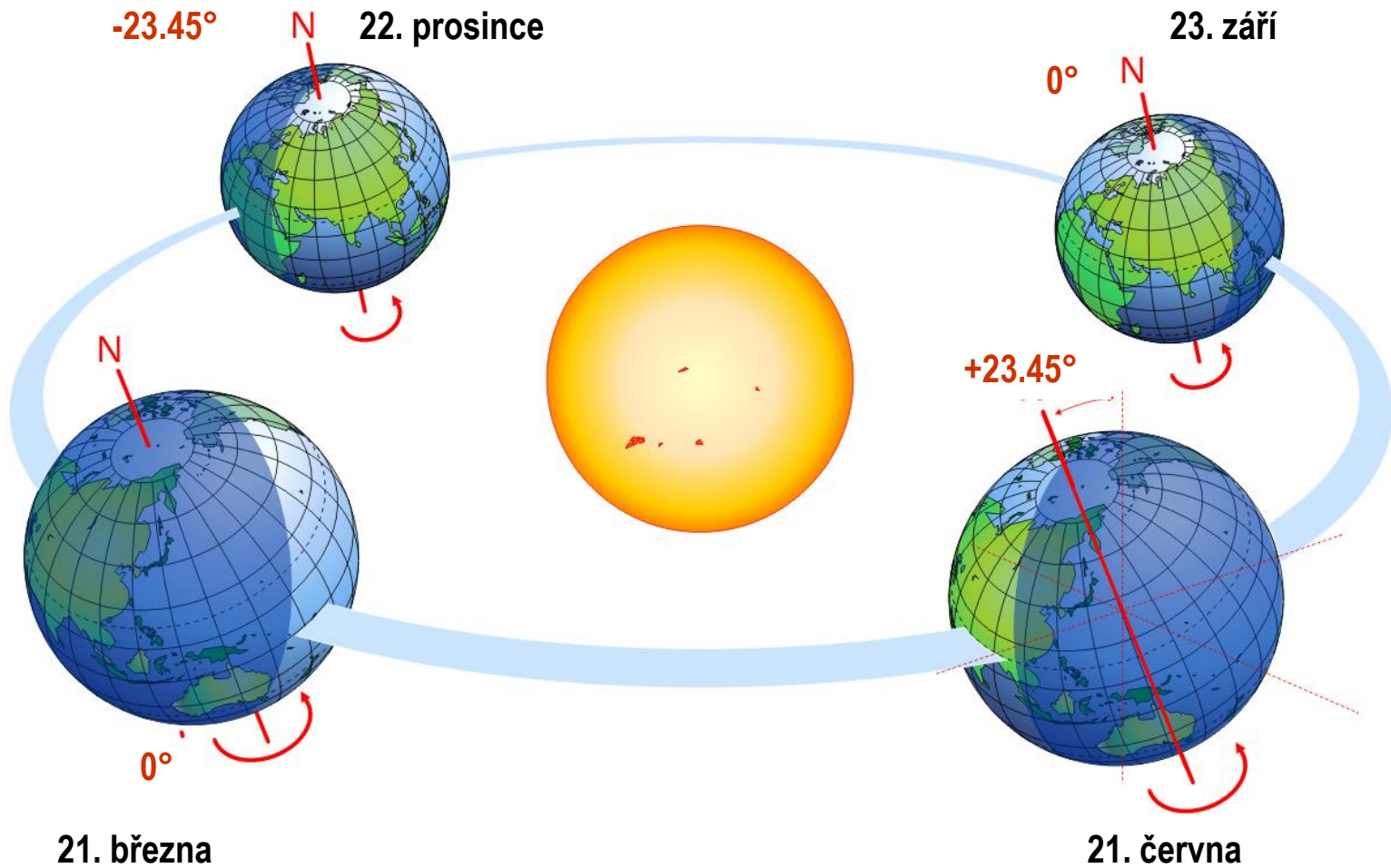
# Orientace plochy

- **úhel sklonu plochy  $\beta$**       konvence: vodorovně  $0^\circ$ , svisle  $90^\circ$   
úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou plochy
- **azimut plochy  $\gamma$**       konvence: východ (-), západ (+), jih ( $0^\circ$ )  
úhel mezi průmětem normály plochy a lokálním poledníkem (jihem)





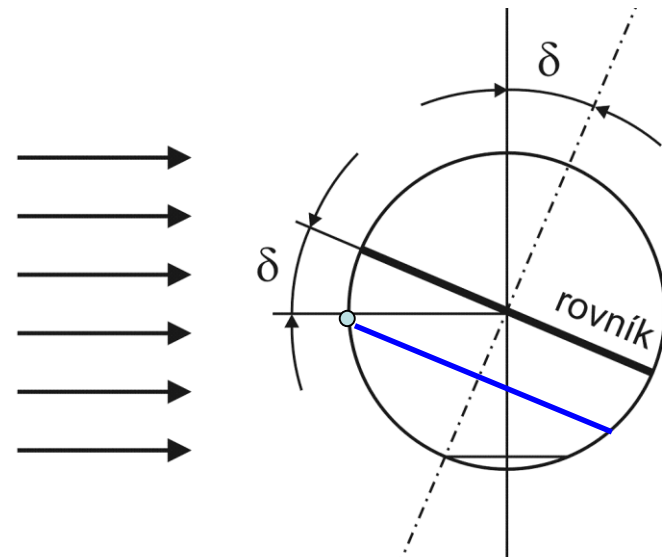
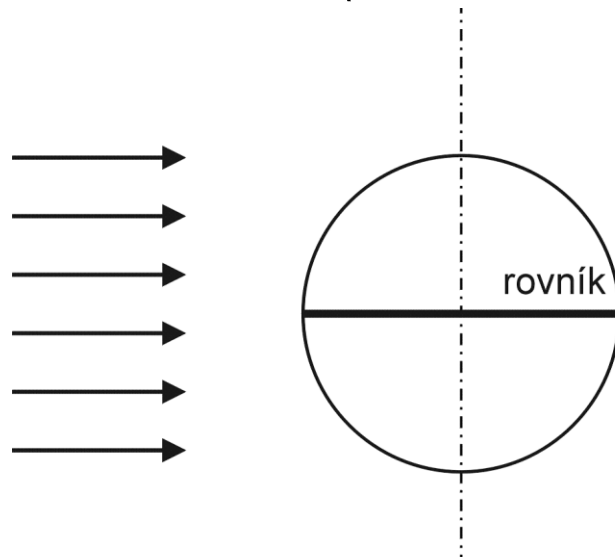
# Deklinace

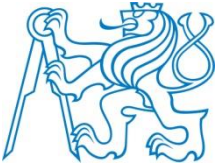




# Deklinace $\delta$

- úhel náklonu zemské osy vlivem precesního pohybu během rotace
- úhel, který svírá spojnice středů Země a Slunce s rovinou zemského rovníku
- zeměpisná šířka místa, kde v daný den v poledne je Slunce kolmo nad obzorem (v nadhlavníku)





# Výpočet deklinace $\delta$

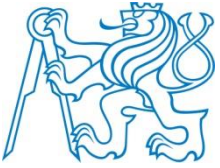
---

- na základě kalendářního data ***DD.MM.***

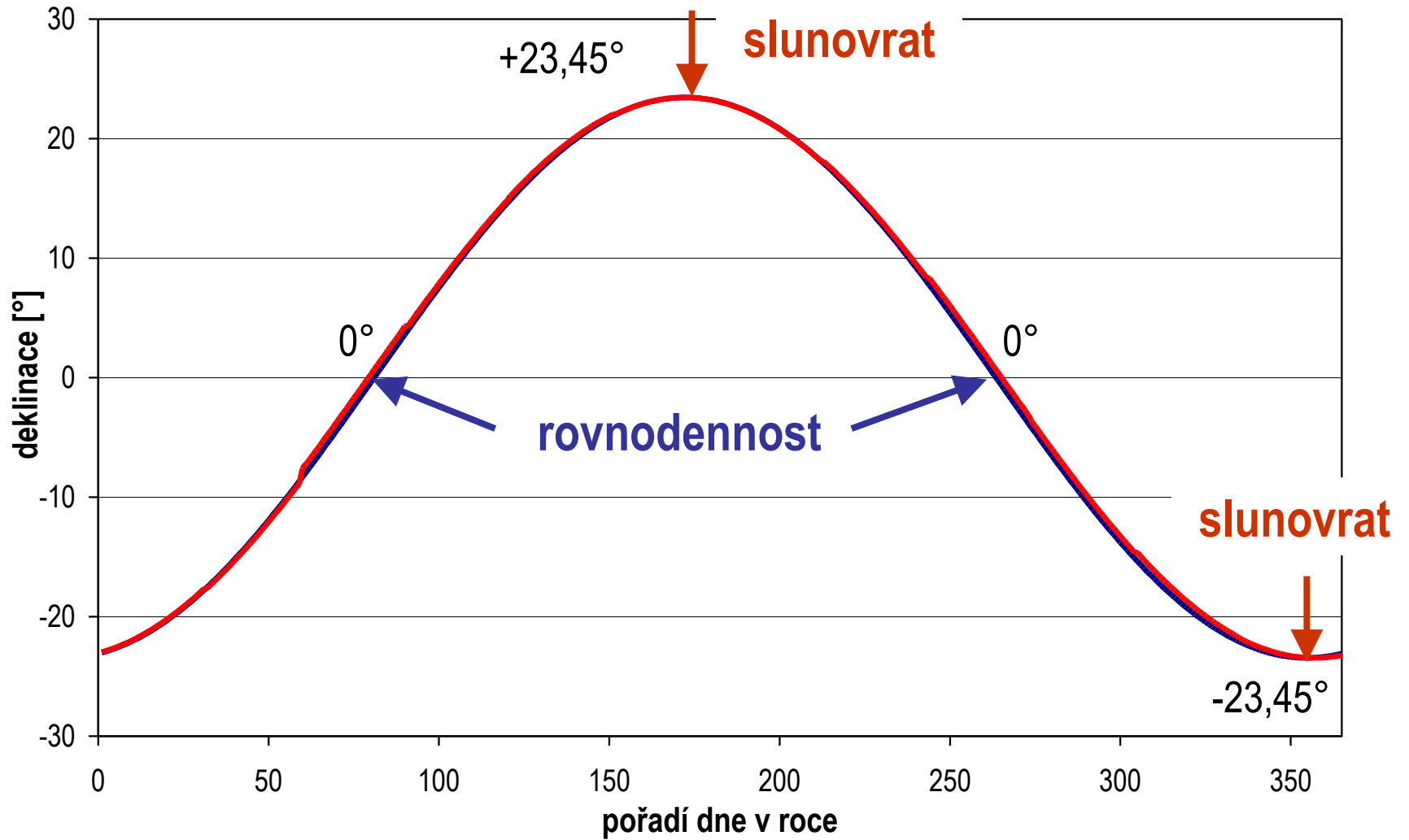
$$\delta = 23,45^\circ \sin(0,98 \cdot DD + 29,7 \cdot MM - 109^\circ)$$

- na základě pořadí dne v roce ***n***

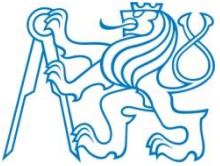
$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$



# Výpočet deklinace $\delta$







# Sluneční časový (hodinový) úhel $\tau$

---

- úhel **zdánlivého** posunu Slunce nad místními poledníky vlivem rotace Země, **vztažený ke slunečnímu polední**
- Země se otočí kolem své osy ( $360^\circ$ ) jednou za 24 h  
→ posun Slunce  $15^\circ$  za 1 hodinu
- sluneční časový úhel se určí ze slunečního času  $ST$

$$\tau = 15^\circ \cdot (ST - 12)$$

konvence: dopoledne (-), odpoledne (+)



# Sluneční čas *ST*

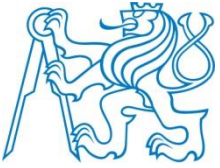
- každé časové pásmo má čas vztažený k místnímu poledníku  
časová pásma po 1 h ~ poledníky po 15°
- SEČ: místní sluneční čas poledníku 15° východní délky (J. Hradec)
- **sluneční čas**: denní čas určený ze zdánlivého pohybu Slunce
- pozorovatel na vztažném poledníku: místní čas = sluneční čas
- pozorovatel mimo vztažný poledník: místní čas  $\neq$  sluneční čas  
odchylka až 30 minut

**příklad:** sluneční poledne

Praha 14,4° 12:02

Brno 16,6 ° 11:53

Košice 21,2° 11:35



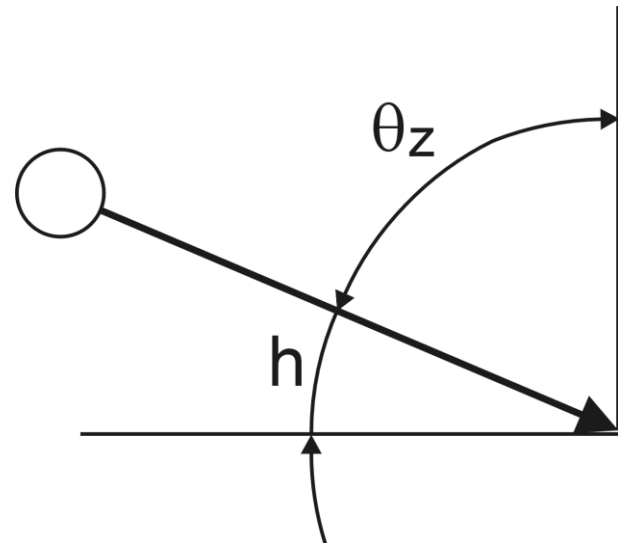
# Výška Slunce $h$

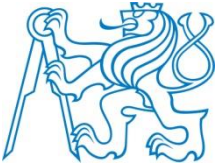
- úhel sevřený spojnici plocha-Slunce s vodorovnou rovinou

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau$$

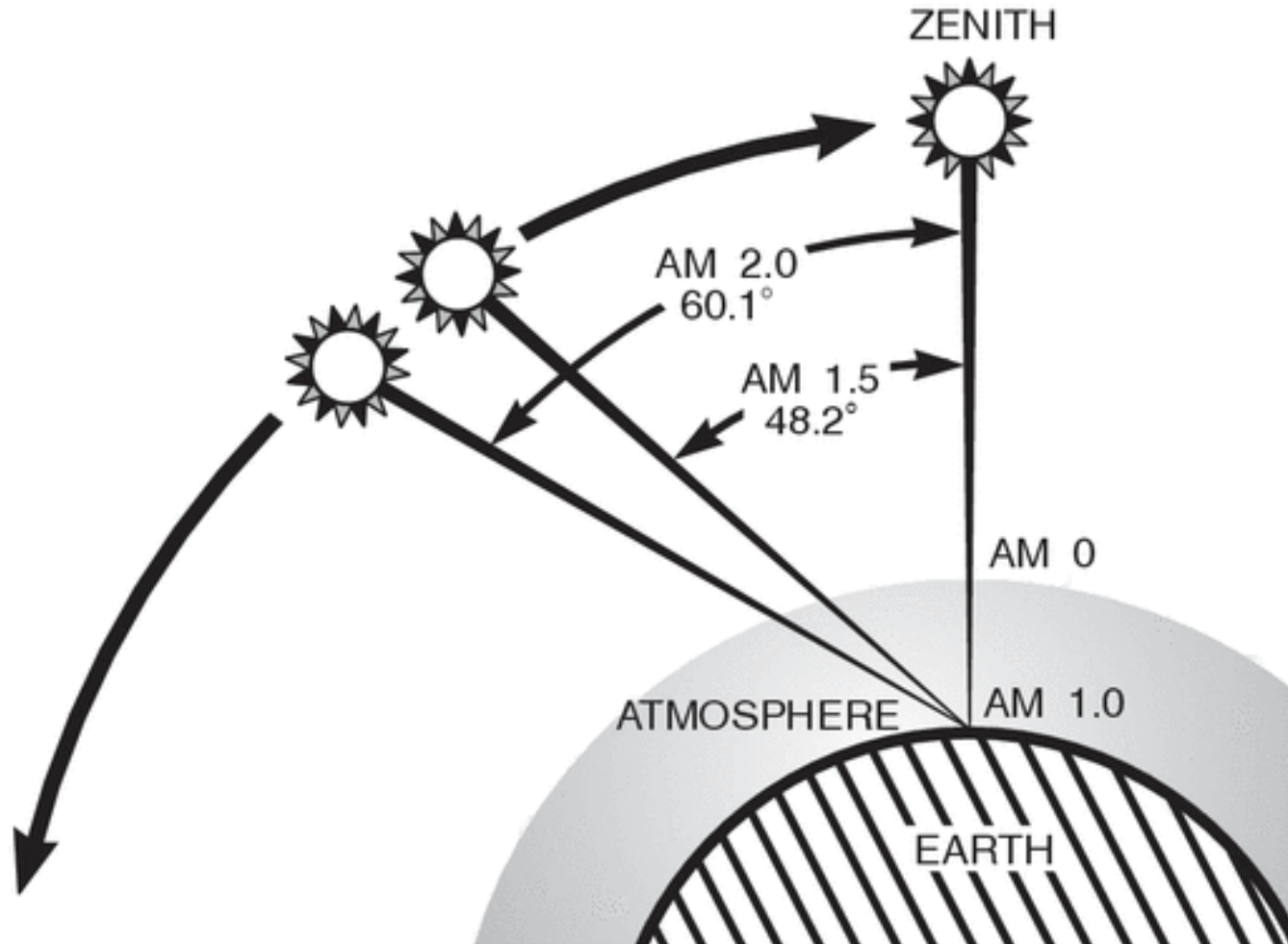
- doplňkový úhel do  $90^\circ$ : **úhel zenitu  $\theta_z$**

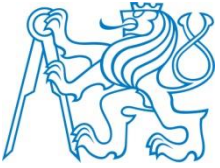
$$\theta_z = 90^\circ - h$$





# Hmota vzduchu vs. zenitový úhel



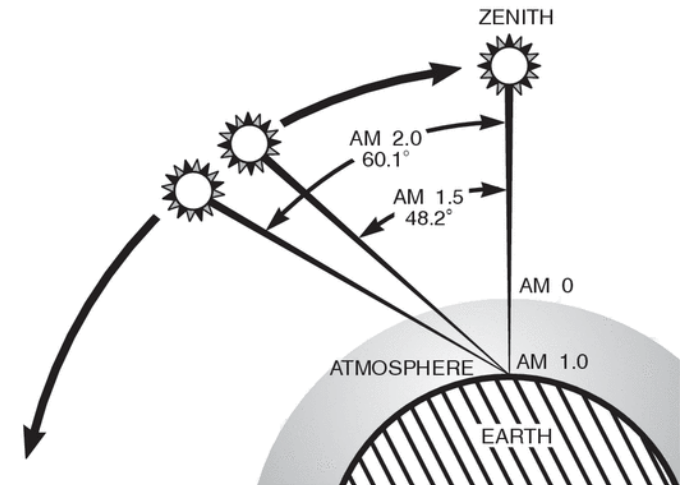


# Air mass (vzduchová hmota)

- poměr mezi hmotou atmosféry, kterou prochází sluneční záření ke hmotě, kterou by prošlo, kdyby Slunce bylo v zenitu (nadhlavníku)

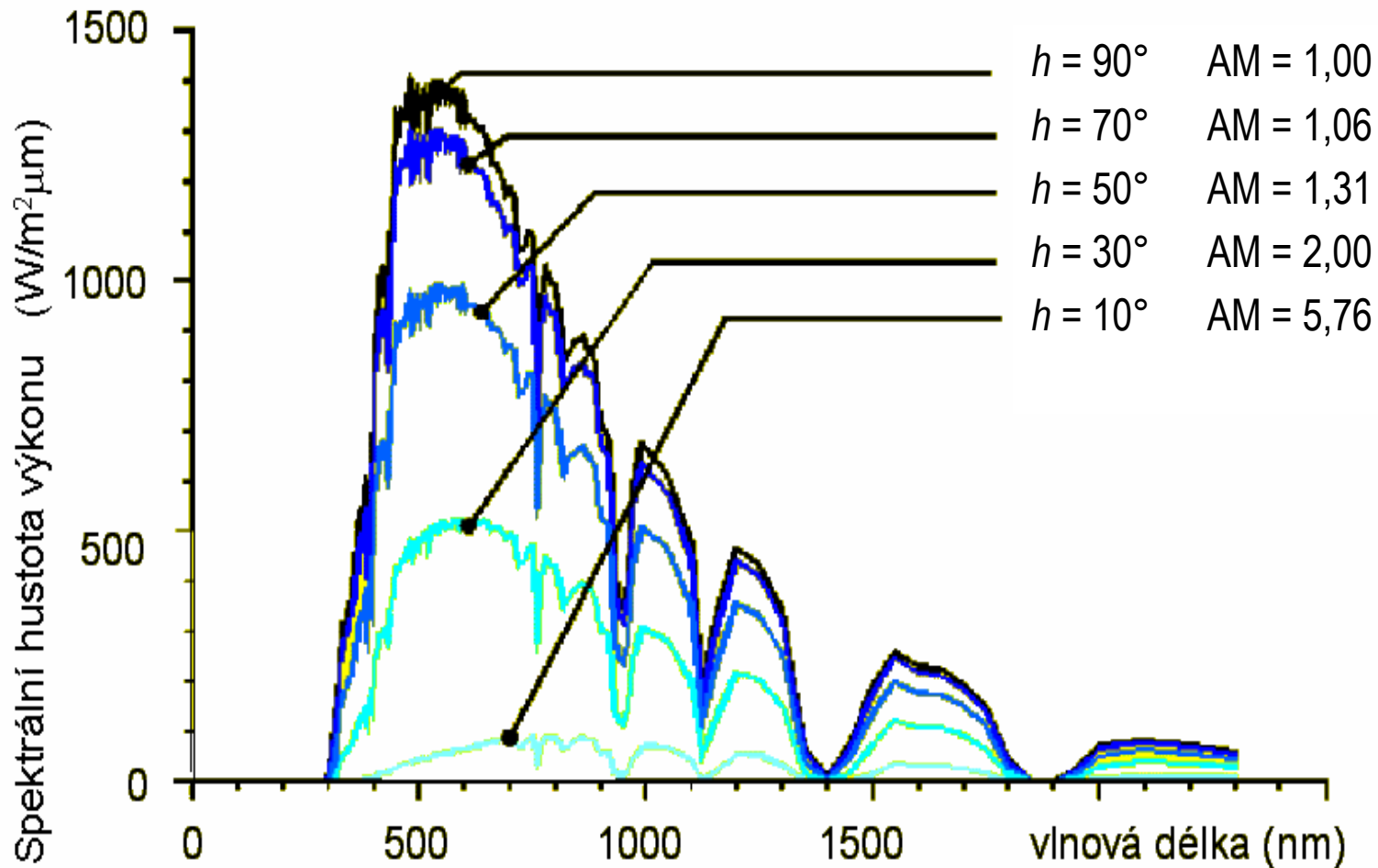
$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} = \frac{1}{\sin h}$$

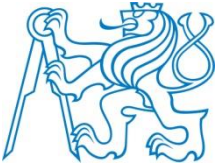
- $AM = 0$  mimo atmosféru
- $AM = 1$  zenit  $h = 90^\circ$
- $AM = 1,5$   $\theta_z = 48^\circ$
- $AM = 2$   $\theta_z = 60^\circ$   $h = 30^\circ$





# Změna spektra s hmotou atmosféry





# Čas východu a západu Slunce

---

- východ / západ Slunce: výška Slunce =  $0^\circ$

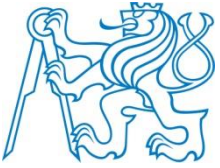
$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau = 0$$

- časový úhel východu / západu Slunce

$$\tau_{1,2} = \arccos(-\operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \delta)$$

- teoretická doba slunečního svitu = doba mezi východem a západem

$$\tau_{\text{teor}} = \frac{2 \cdot \tau_{1,2}}{15^\circ}$$



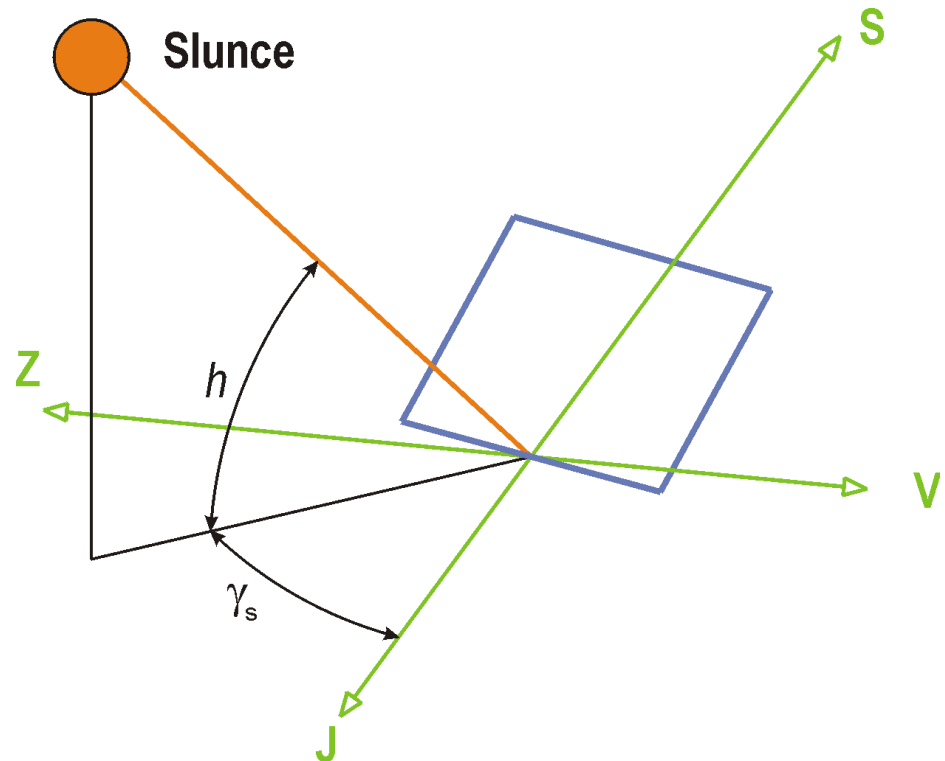
# Azimut Slunce $\gamma_s$

- úhel mezi průmětem spojnice plocha-Slunce a místním poledníkem (jižním směrem)

konvence: měří se od jihu

na východ (-), na západ (+)

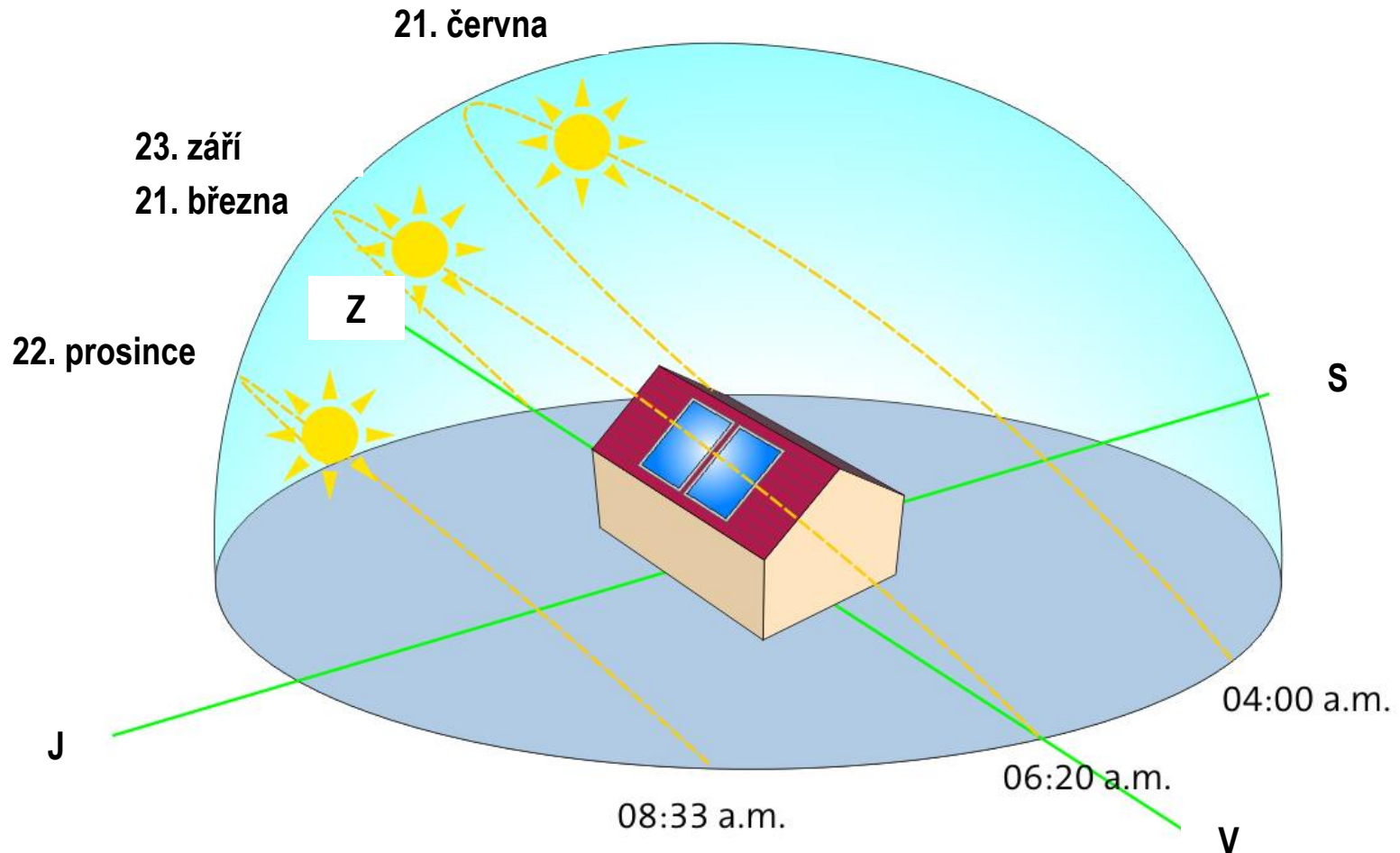
$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta}{\cos h} \sin \tau$$

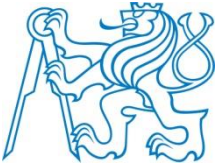






# Výška a azimut Slunce

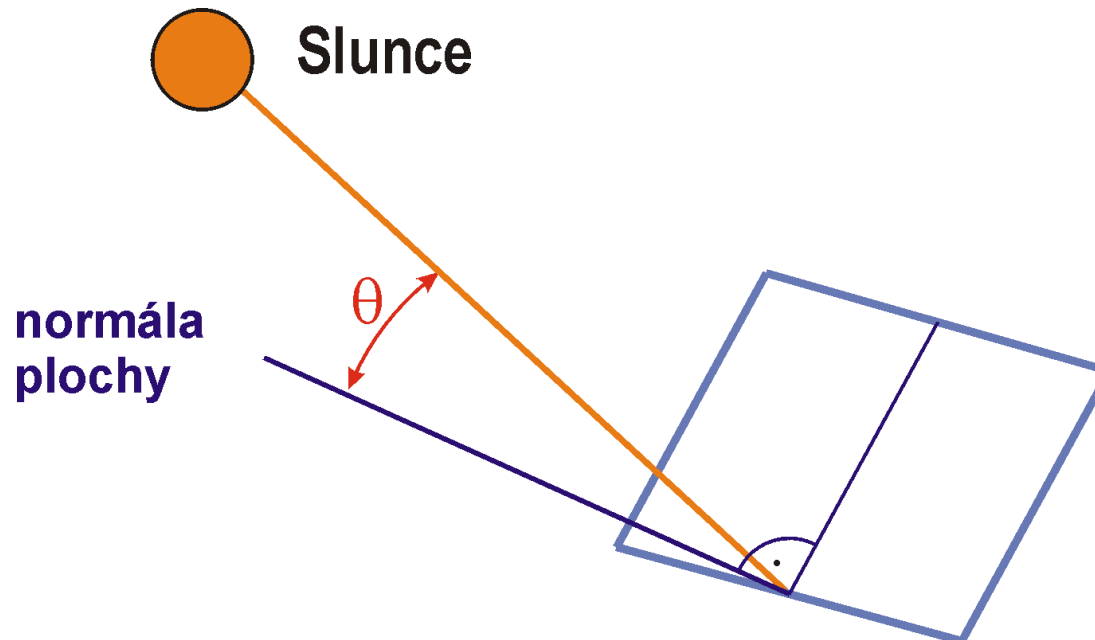


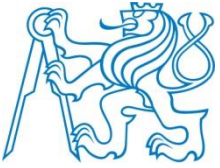


# Úhel dopadu slunečního záření

- úhel mezi spojnici plocha-Slunce a normálou plochy

$$\cos \theta = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma)$$



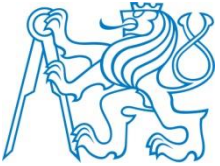


# Rozlišení termínů

---

## Sluneční energie x solární energie

- **sluneční**: přicházející od Slunce, související se Sluncem
- sluneční záření, sluneční aktivita, dopadající sluneční energie, sluneční konstanta
  
- **solární**: využívající sluneční záření
- solární kolektor, solární soustava, využitá solární energie, solární zisky

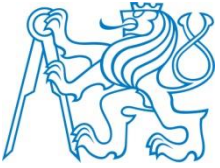


# Sluneční záření - pojmy

---

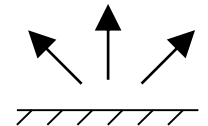
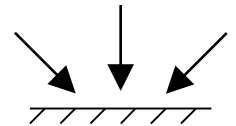
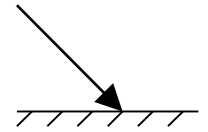
- **sluneční ozáření  $G$  [W/m<sup>2</sup>]** - zářivý **výkon** dopadající na jednotku plochy, hustota slunečního zářivého toku
- **dávka ozáření  $H$  [kWh/m<sup>2</sup>, J/m<sup>2</sup>]** – hustota zářivé **energie**, hustota zářivého toku dopadající za určitý časový úsek, např. hodinu, den

$$H = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G \cdot d\tau$$



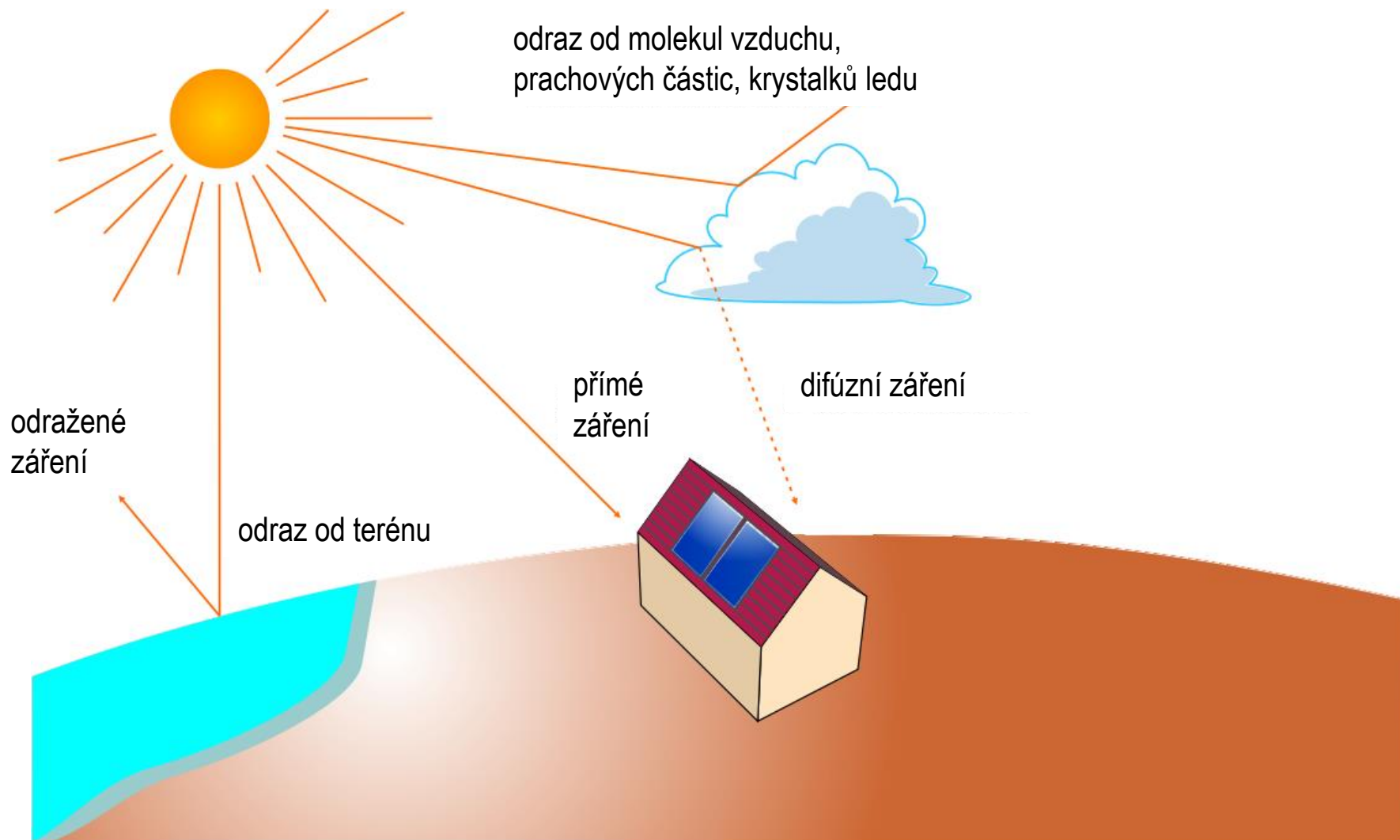
# Sluneční záření - pojmy

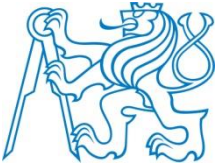
- **přímé** sluneční záření (index „b“, beam) - dopadá na plochu bez rozptylu v atmosféře  
**směrově závislé**, v jednom směru výrazná intenzita
- **difúzní** sluneční záření (index „d“, diffuse) - dopadá na plochu po změně směru vlivem rozptylu v atmosféře  
**všesměrové**, izotropické: ve všech směrech stejná intenzita
- **odražené** sluneční záření (index „r“, reflected) - dopadá na plochu po změně směru vlivem odrazu od terénu, budov, aj.  
vzhledem k běžným povrchům (difúzní odraz) se uvažuje společně s difúzním zářením





# Sluneční záření - pojmy





# Průchod slunečního záření atmosférou

- **přímé** sluneční ozáření **normálové** (na plochu kolmou ke směru šíření) po průchodu atmosférou

$$G_{bn} = G_{on} \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad [\text{W/m}^2]$$

$G_{on}$  normálové sluneční ozáření nad hranicí atmosféry

$Z$  součinitel znečištění atmosféry

$$\varepsilon = \frac{9,38076 \cdot [\sin h + (0,003 + \sin^2 h)^{0,5}]}{2,0015 \cdot (1 - L_v \cdot 10^{-4})} + 0,91018$$

$h$  výška Slunce

$L_v$  nadmořská výška daného místa [m]

**jiný vztah např. v ČSN 730548**  
**Zátěž klimatizovaných prostor**



# Součinitel znečištění atmosféry

---

- udává kolikrát by musela být atmosféra hmotnější, aby měla stejnou propustnost pro sluneční záření jako má znečištěná atmosféra
- udává snížení toku slunečního záření průchodem atmosférou

$$Z = \frac{\ln G_{0n} - \ln G_{bn}}{\ln G_{0n} - \ln G_{b0}}$$

$G_{b0}$       přímé záření při průchodu zcela čistým vzduchem ( $Z = 1$ )





# Součinitel znečištění atmosféry

Měsíc	Průměrné měsíční hodnoty součinitele Z pro oblasti s rozdílnou čistotou ovzduší			
	horské oblasti	venkov	města	průmyslové oblasti
I.	1,5	2,1	3,1	4,1
II.	1,6	2,2	3,2	4,3
III.	1,8	2,5	3,5	4,7
IV.	1,9	2,9	4,0	5,3
V.	2,0	3,2	4,2	5,5
VI.	2,3	3,4	4,3	5,7
VII.	2,3	3,5	4,4	5,8
VIII.	2,3	3,3	4,3	5,7
IX.	2,1	2,9	4,0	5,3
X.	1,8	2,6	3,6	4,9
XI.	1,6	2,3	3,3	4,5
XII.	1,5	2,2	3,1	4,2
<b>roční průměr</b>	<b>1,9</b>	<b>2,75</b>	<b>3,75</b>	<b>5,0</b>

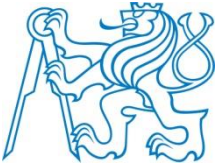
zjednodušeně:

horské oblasti  $Z = 2$

venkov  $Z = 3$

města  $Z = 4$

průmyslové oblasti  $Z > 5$



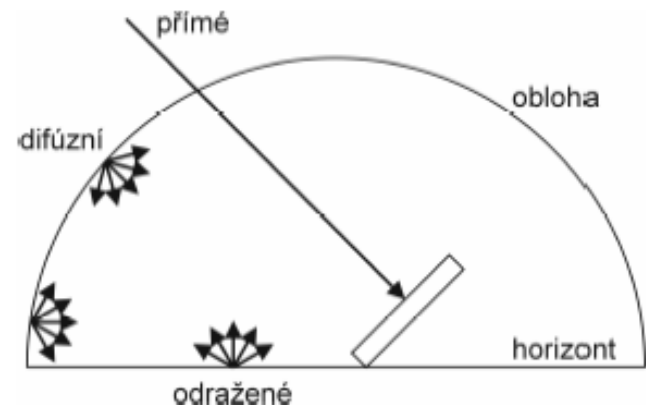
# Sluneční ozáření na obecnou plochu

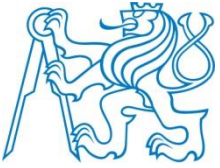
- celkové sluneční ozáření obecně orientované a skloněné plochy

$$G_T = G_{bT} + G_{dT} + G_{rT} \quad [\text{W/m}^2]$$

$G_{bT}$  → **přímé ozáření**  
 $G_{dT}$  → **difúzní ozáření z oblohy**  
 $G_{rT}$  → **odražené ozáření od okolních ploch**

**difúzní charakter**





# Sluneční ozáření na obecnou plochu

- přímé sluneční ozáření na danou plochu

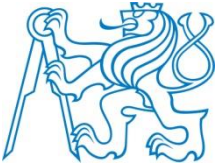
$$G_{bT} = G_{bn} \cos \theta = G_b \frac{\cos \theta}{\sin h} = G_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [\text{W/m}^2]$$

- difúzní sluneční ozáření na danou plochu

$$G_{dT} = \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) G_d \quad [\text{W/m}^2]$$

- odražené sluneční ozáření na danou plochu

$$G_{rT} = \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot (G_b + G_d) \quad [\text{W/m}^2]$$

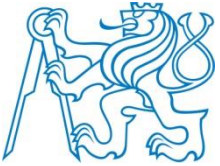


# Odrazivost terénu (albedo)

---

- poměr mezi odraženou a dopadlou hustotou slunečního zářivého toku
- pro výpočty se uvažuje  $\rho_g = 0,2$

běžná vegetace	0,10 až 0,15
sníh	0,90
zemský povrch: souš	0,35 až 0,45
zemský povrch: moře	0,05 až 0,10
albedo Země (planety)	0,30 (průměr)



# Sluneční ozáření na vodorovnou rovinu

---

- přímé sluneční ozáření na vodorovnou rovinu

$$G_b = G_{bn} \sin h \quad [\text{W/m}^2]$$

- difúzní sluneční ozáření na vodorovnou rovinu

$$G_d = 0,33 \cdot (G_{on} - G_{bn}) \cdot \sin h \quad [\text{W/m}^2]$$

zjednodušený model: 1/3 „ztraceného“ slunečního záření v atmosféře září dopadá na vodorovnou rovinu ( $\sin h$ ) jako difúzní všesměrové záření



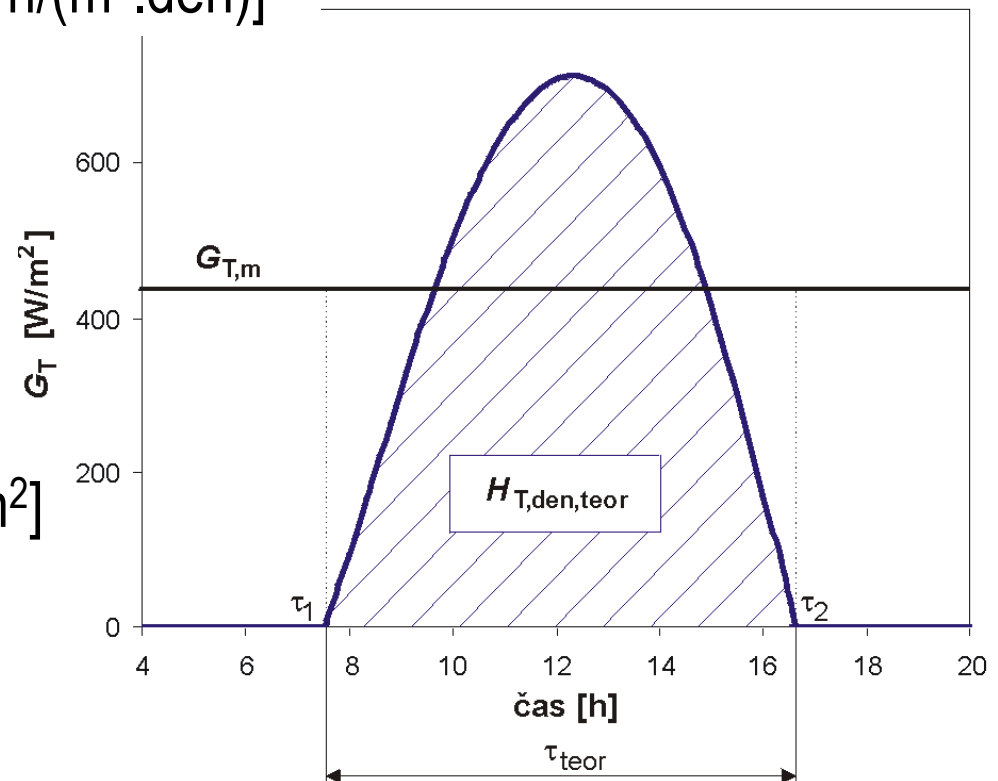
# Dávka ozáření na obecnou plochu

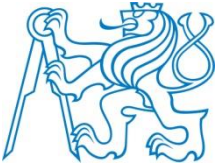
- teoretická denní dávka slunečního ozáření, integrace slunečního ozáření plochy od východu  $\tau_1$  do západu  $\tau_2$  Slunce

$$H_{T,den,teor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G_T d\tau \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{den})]$$

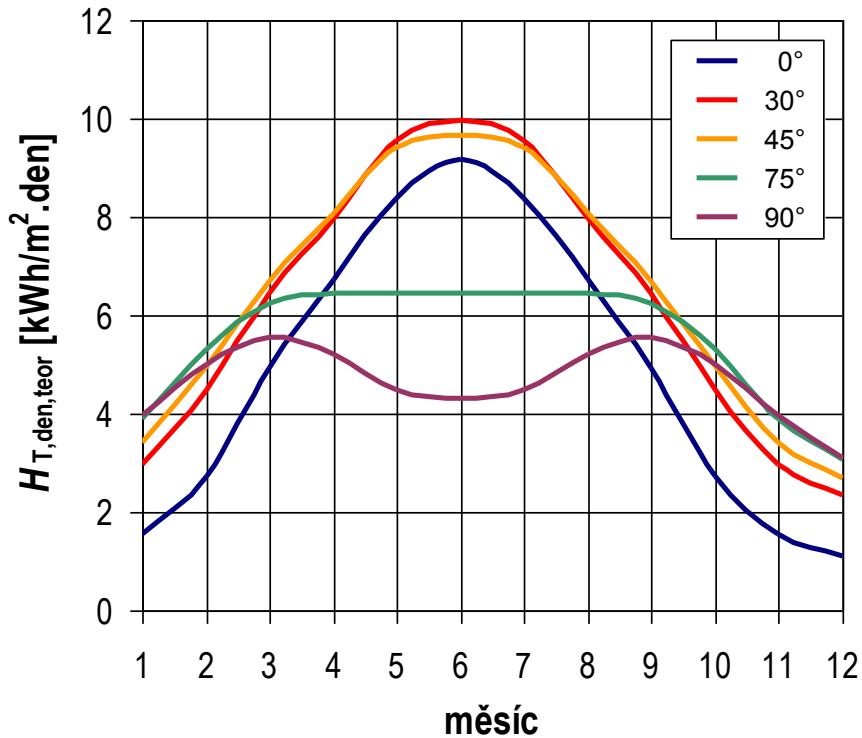
- střední denní sluneční ozáření

$$G_{T,m} = \frac{H_{T,den,teor}}{\tau_{teor}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

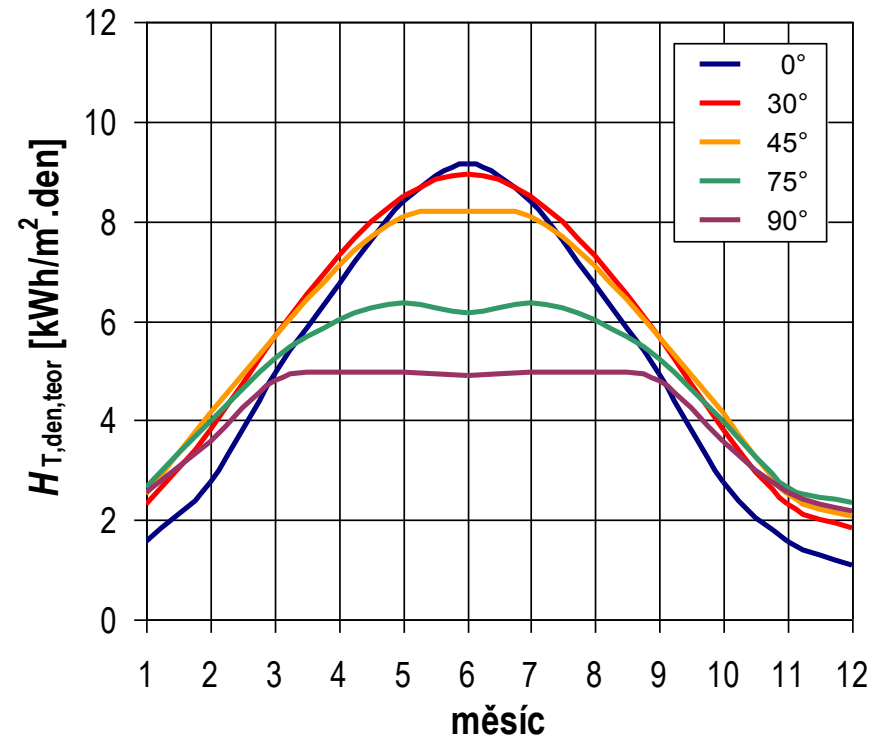




# Vliv sklonu plochy



azimut 0° (jih)



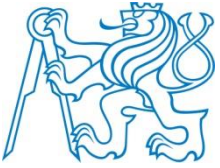
azimut 45° (JZ, JV)

**optimální sklon:**

léto 20-30°

zima 75-90°

celoročně 35-45°



# Dávka ozáření na obecnou plochu

- difúzní denní dávka slunečního ozáření, integrace difúzního slunečního ozáření plochy od východu  $\tau_1$  do západu  $\tau_2$  Slunce

$$H_{T,den,dif} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G_{dT} d\tau \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{den})]$$

$H_{T,den,teor}$

$H_{T,den,dif}$

$G_{T,m}$



tabelovány v literatuře pro různé:  
sklony, azimuty, oblasti (souč. znečištění)





# Skutečná doba slunečního svitu

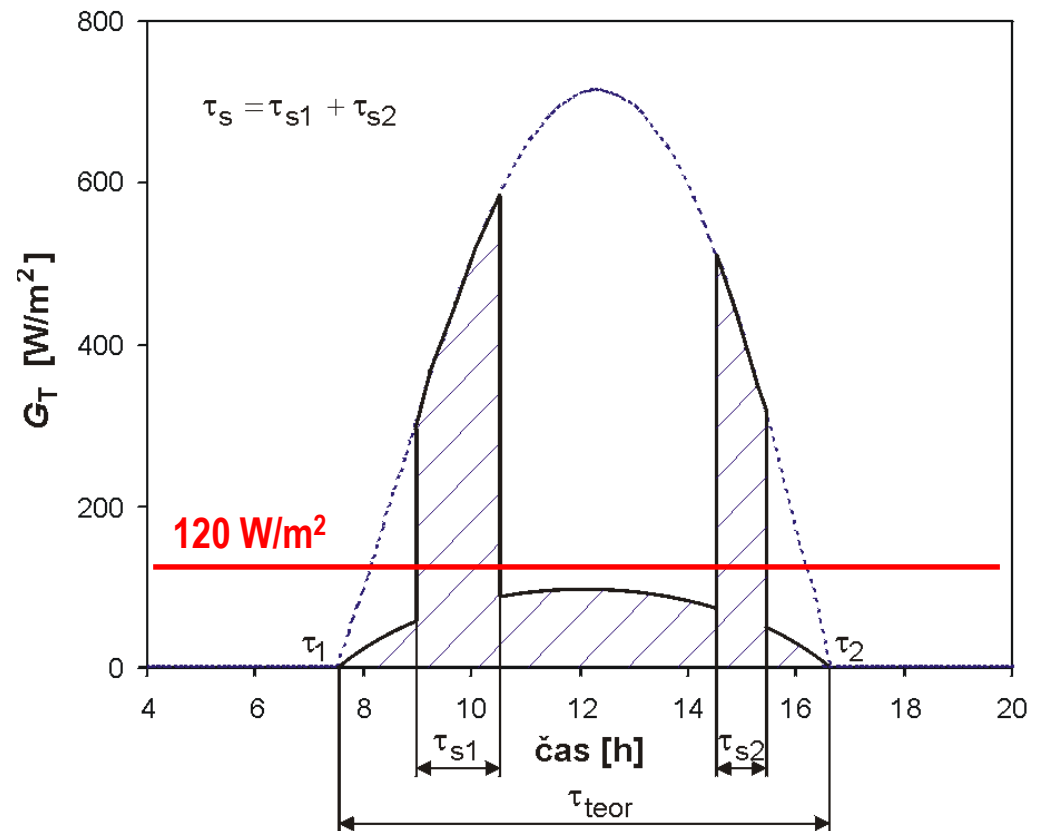
- doba trvání **přímého** slunečního záření  $> 120 \text{ W/m}^2$

$$\tau_{skut} = \sum_i \tau_{s,i} \quad [\text{h}]$$

ČHMÚ měsíční údaje pro  
22 stanic v České republice  
za posledních 10 let

- poměrná doba svitu

$$\tau_r = \frac{\tau_{skut}}{\tau_{teor}} \quad [-]$$



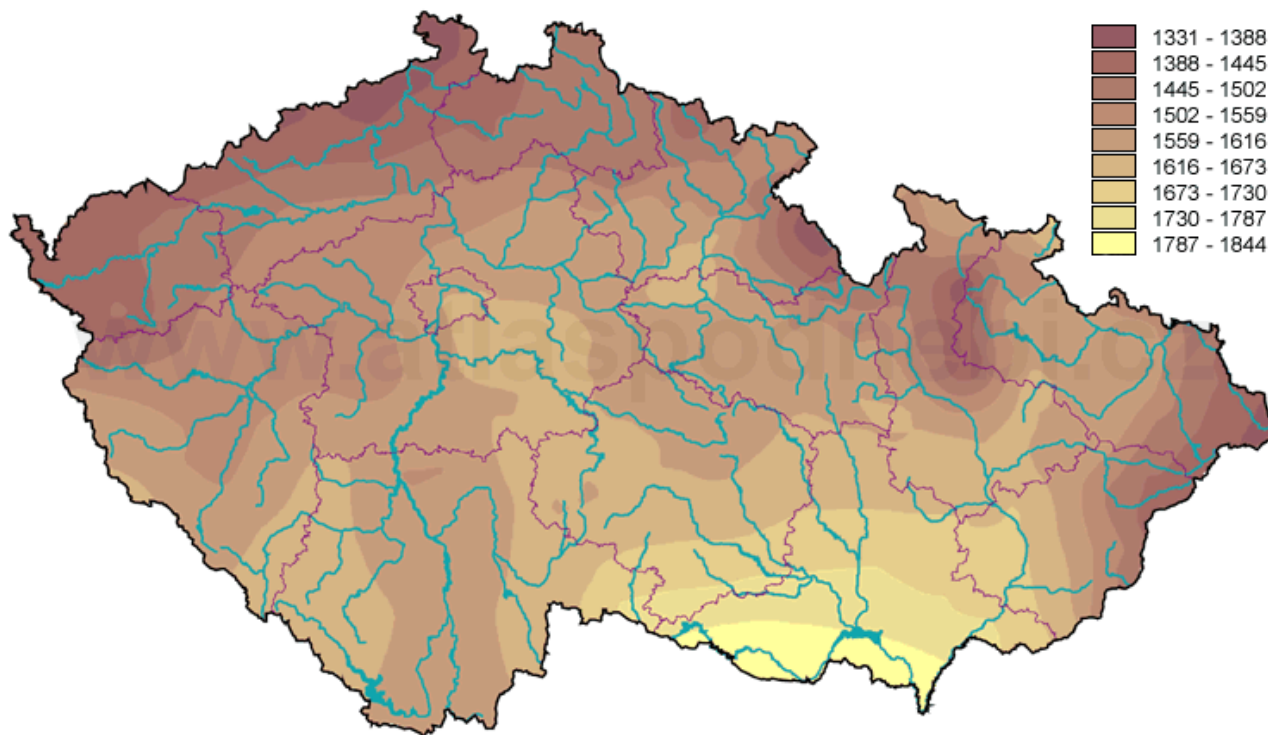


# Skutečná doba slunečního svitu

měsíc	Skutečná doba slunečního svitu $\tau_{\text{skut}}$ [h]			
	Praha	České Budějovice	Hradec Králové	Brno
I.	53	46	47	46
II.	90	82	77	88
III.	157	136	149	142
IV.	187	164	185	163
V.	247	207	241	232
VI.	266	226	249	258
VII.	266	238	252	270
VIII.	238	219	233	230
IX.	190	174	188	179
X.	117	108	115	116
XI.	53	55	48	56
XII.	35	36	42	30
$\Sigma$	<b>1 899</b>	<b>1 691</b>	<b>1 826</b>	<b>1 810</b>

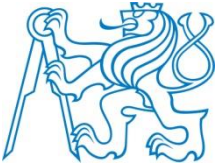


# Skutečná doba slunečního svitu v ČR



zdroj: ČHMÚ

**Doba slunečního svitu (přímé záření) v ČR: 1400 – 1900 h/rok**



# Celková dávka slunečního ozáření

---

- denní dávka slunečního ozáření

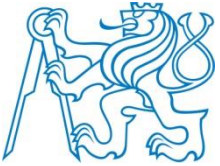
$$H_{T,den} = \tau_r \cdot H_{T,den,teor} + (1 - \tau_r) \cdot H_{T,den,dif} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{den})]$$

- měsíční dávka slunečního ozáření

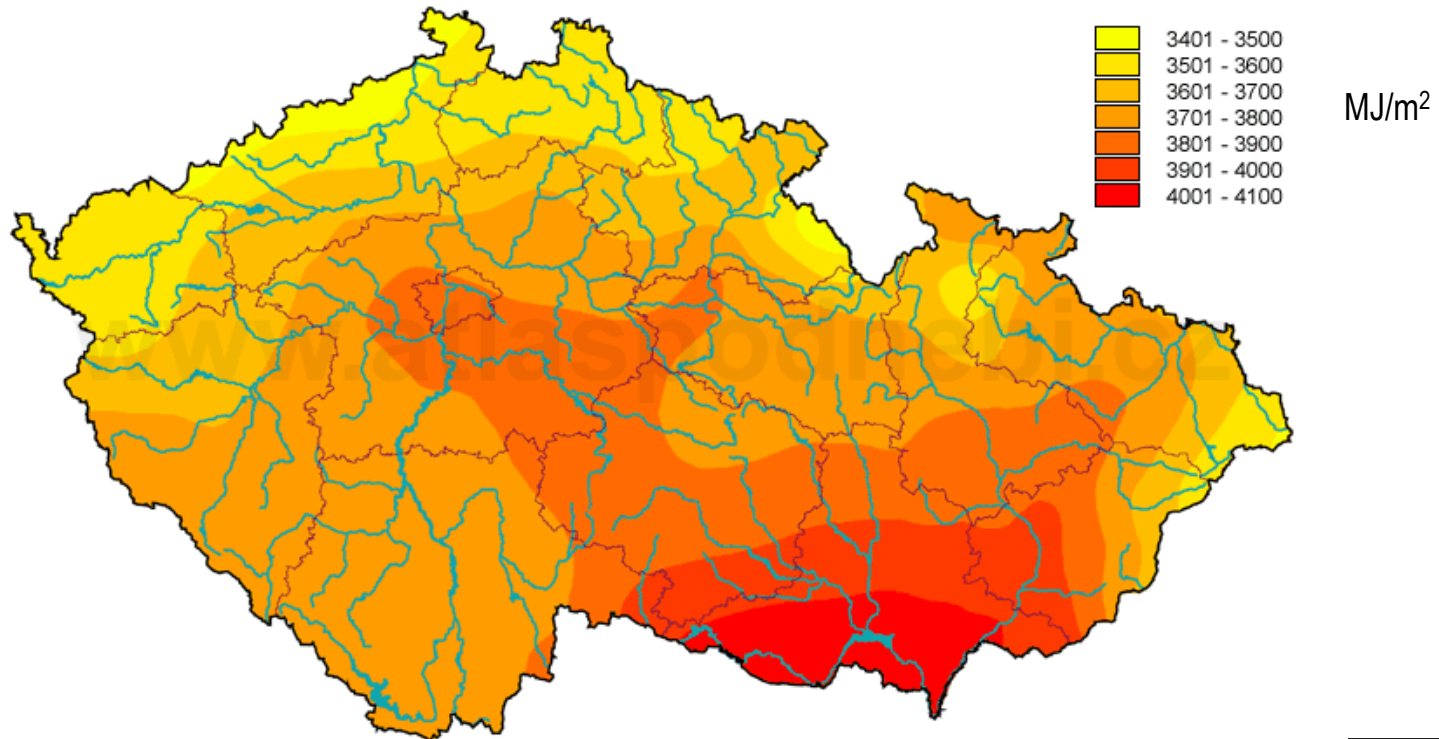
$$H_{T,mes} = n \cdot H_{T,den} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{měs})]$$

- roční dávka slunečního ozáření

$$H_{T,rok} = \sum_I^{XII} H_{T,mes} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})]$$



# Roční dávky ozáření v podmínkách ČR



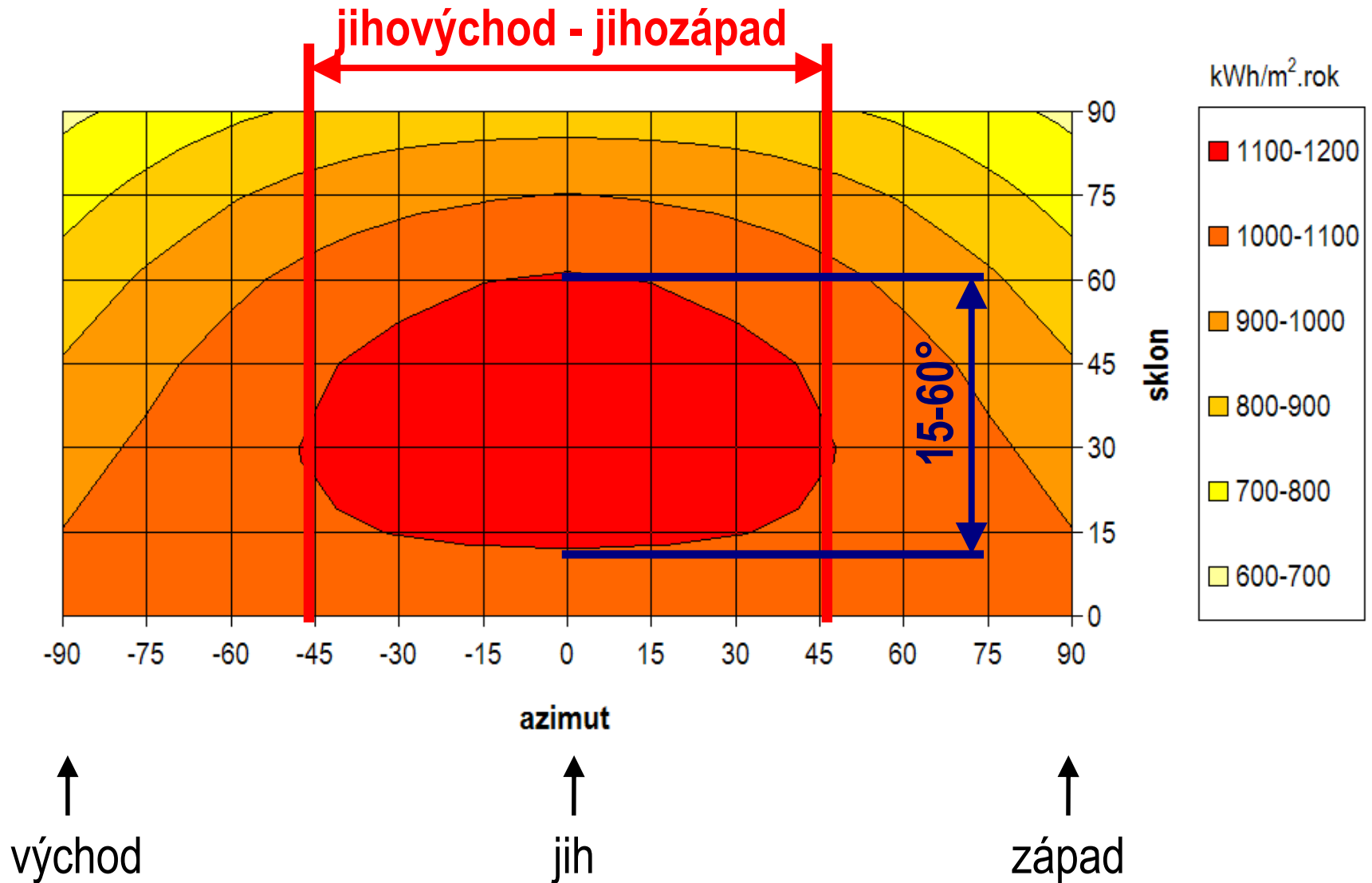
zdroj: ČHMÚ

## Roční dávka ozáření v ČR:

- pro sklon 30 až 45°, jižní orientace: **1000 až 1200 kWh/m<sup>2</sup>**
- pro sklon 90°, jižní orientace: **750 až 900 kWh/m<sup>2</sup>**



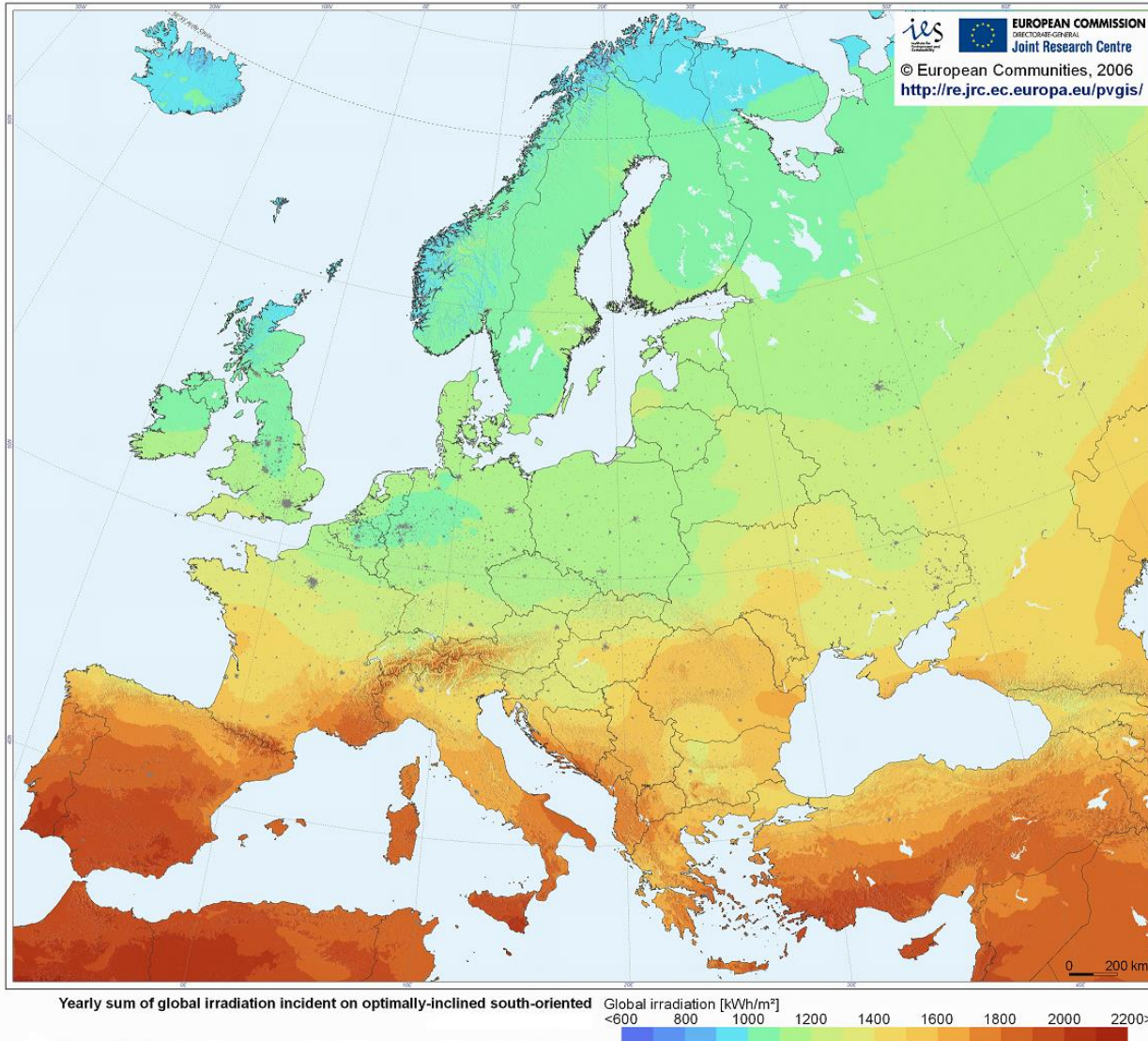
# Optimální sklon ?







# Sluneční energie v Evropě

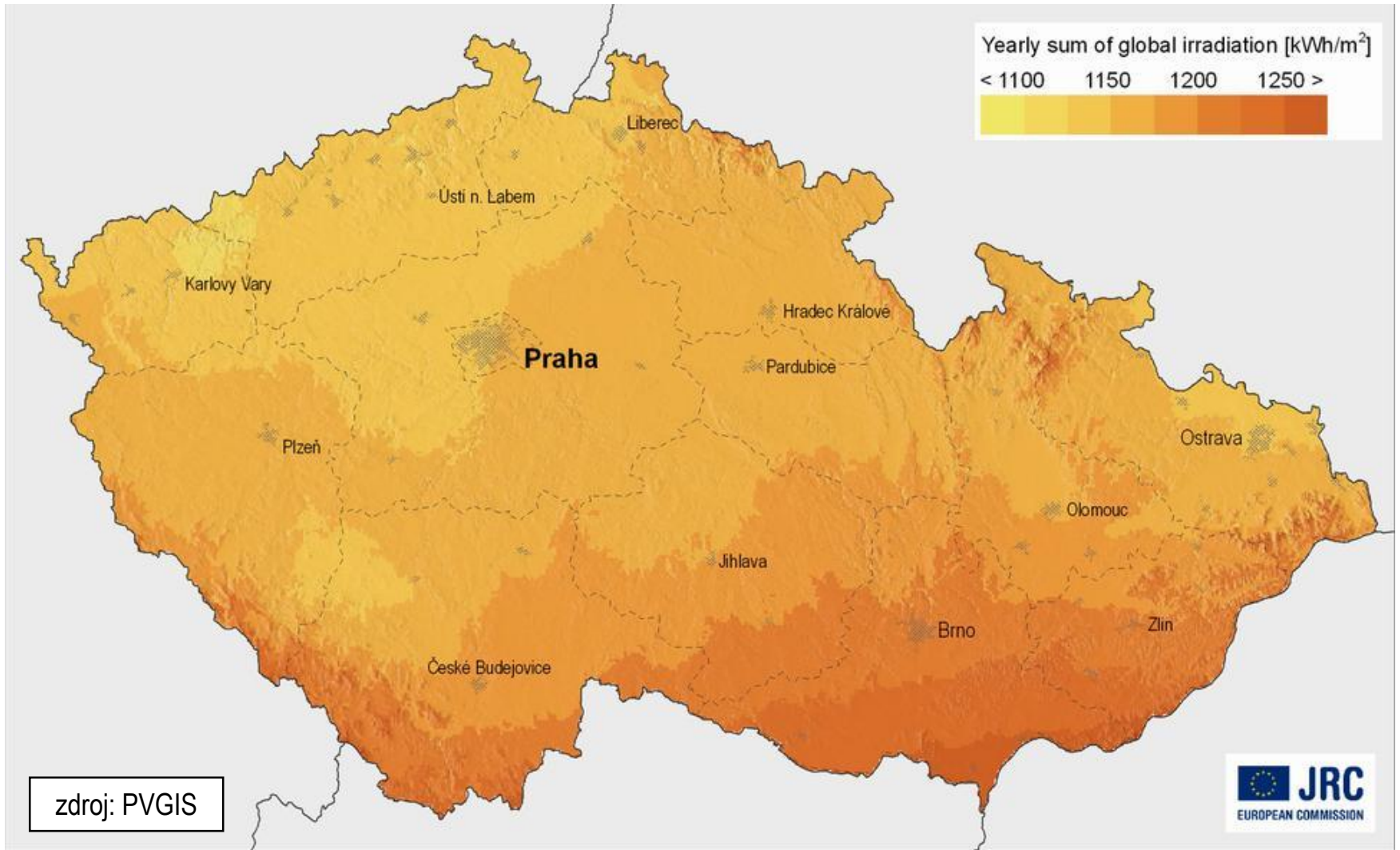


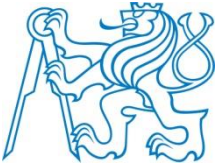
zdroj: PVGIS





# Sluneční energie v České republice





# Sluneční energie v Německu



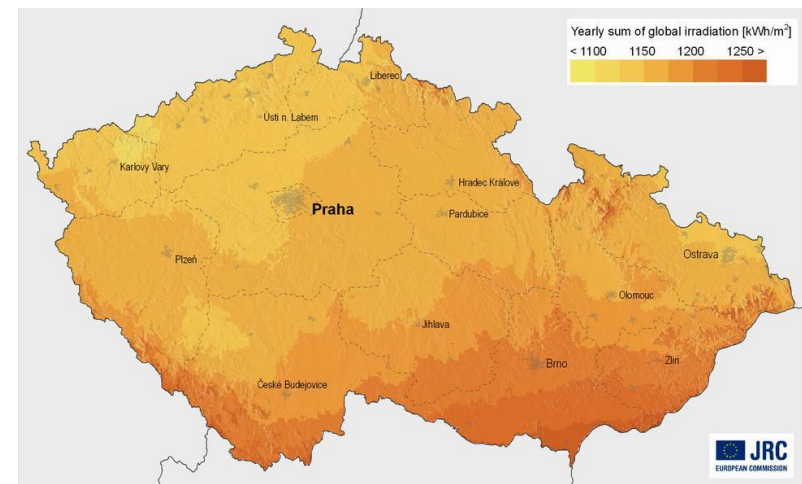
Německo a Česká republika

podobné podmínky: **1000 až 1200 kWh/m<sup>2</sup>**  
 (s výjimkou jižního Německa)

podobné solární soustavy

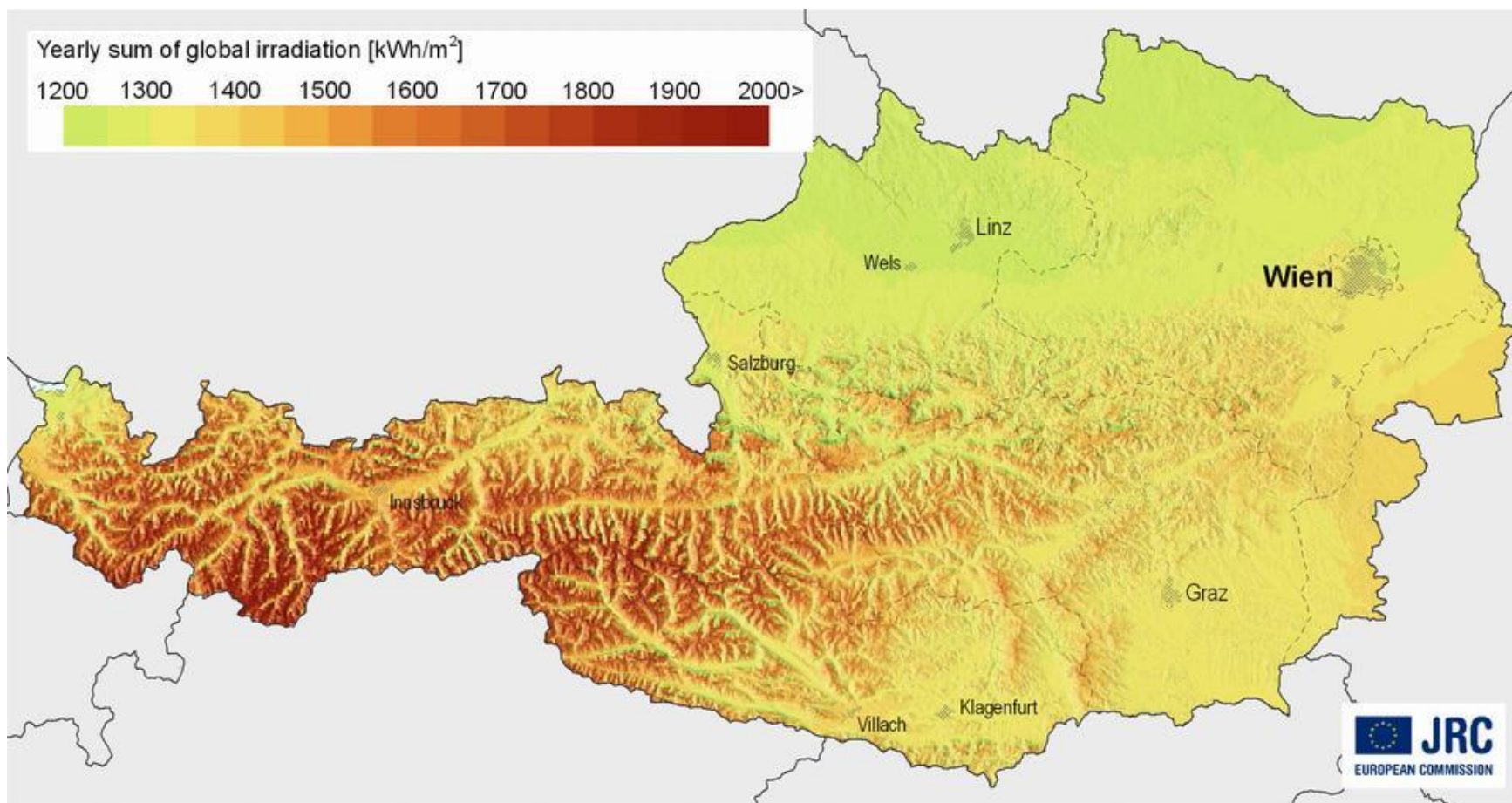
podobné typy solárních kolektorů

podobné roční tepelné zisky





# Sluneční energie v České republice



Sluneční potenciál Rakouska začíná tam kde potenciál ČR končí ...