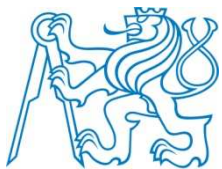


Sluneční energie

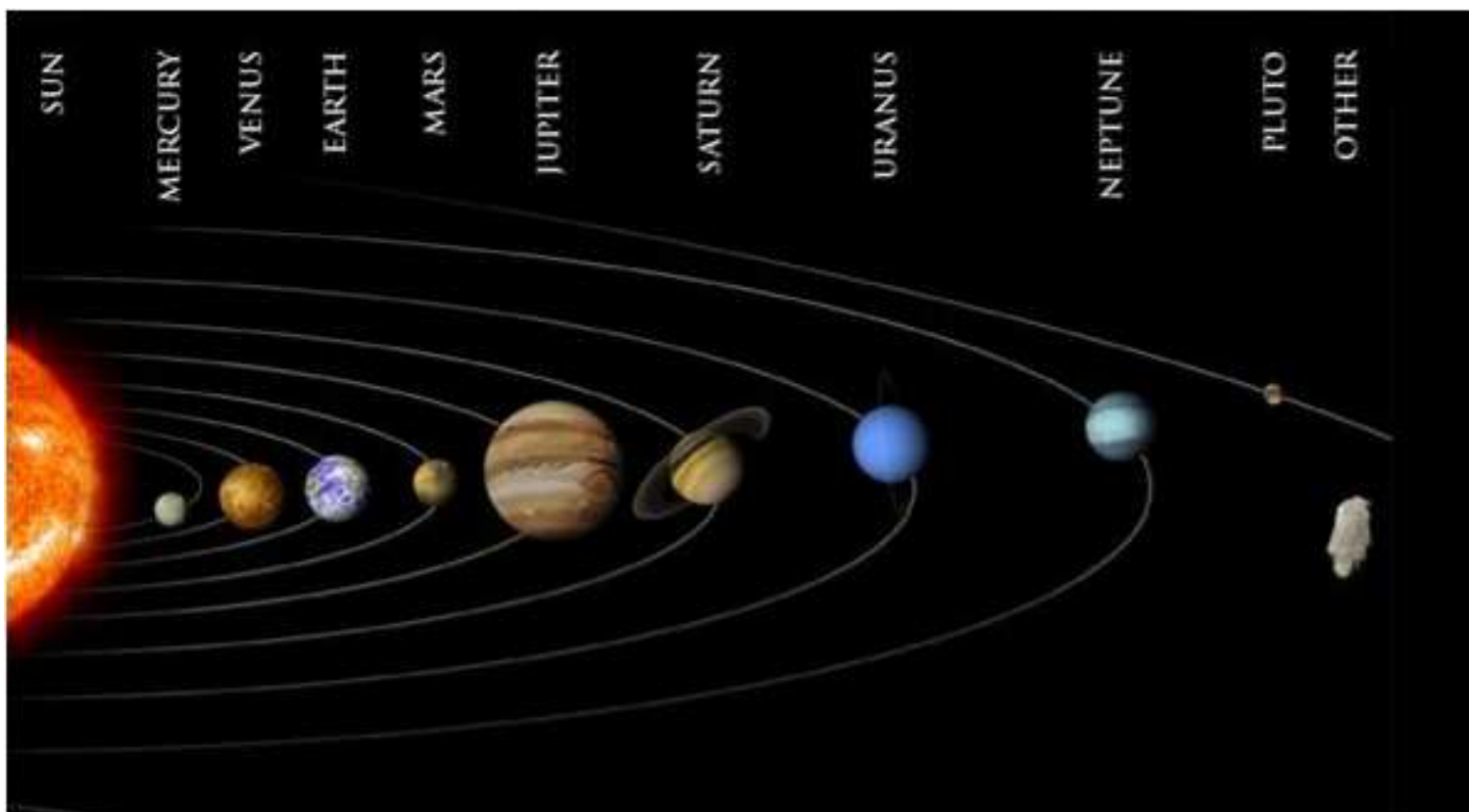
- sluneční záření
- základní pojmy
- dopadající energie
- teoretické výpočty
- praktické výpočty

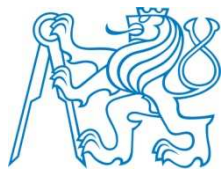




Slunce

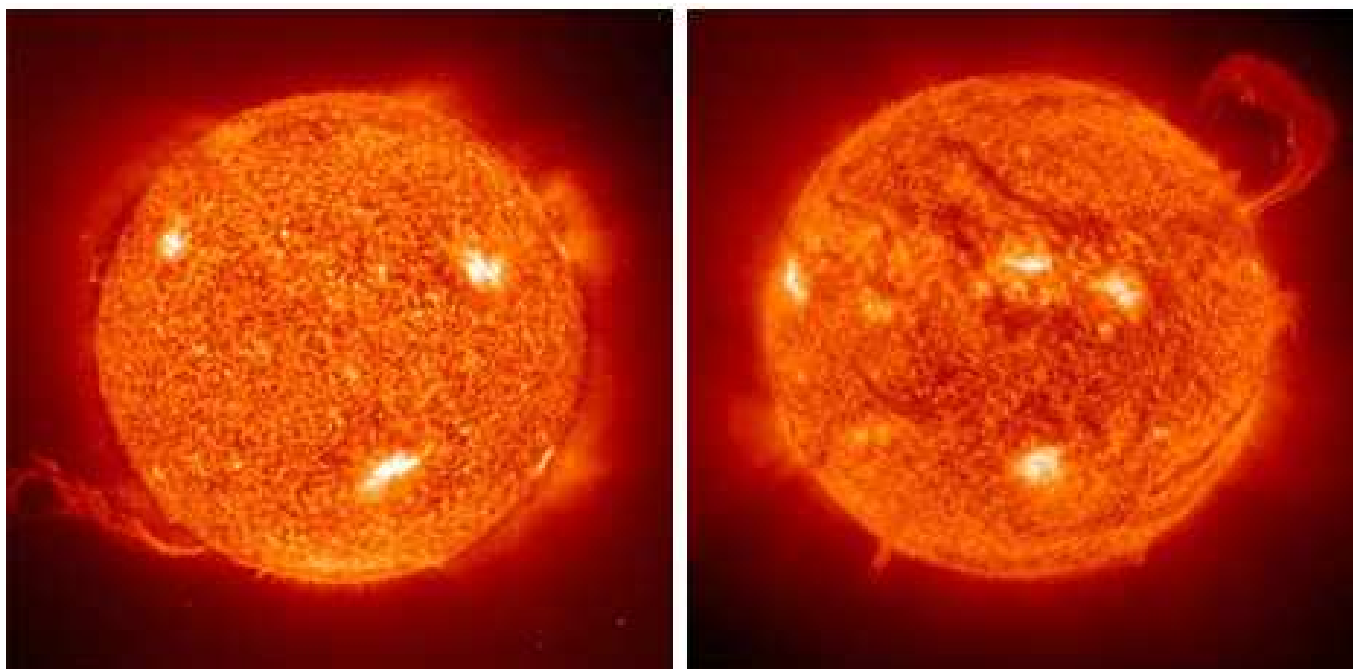
- nejbližší hvězda
- střed naší planetární soustavy – sluneční soustavy





Slunce

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



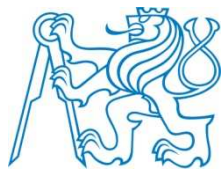


Slunce

- původ sluneční energie v **jaderných** reakcích
- uvnitř jádra Slunce probíhá jaderná syntéza
za vysokých teplot cca **15×10^6 K** a tlaků cca **2×10^{10} MPa**
slučování jader vodíku (H) $\rightarrow$ jádra hélia (He)
- **564×10^9 kg/s** H se přemění na **560×10^9 kg/s** He
- rozdíl hmot **4×10^9 kg/s** se vyzáří ve formě energie

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

- celkový vyzařovaný výkon: **$3,6 \times 10^{26}$ W**
- hustota vyzařovaného výkonu: **6×10^7 W/m²**



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

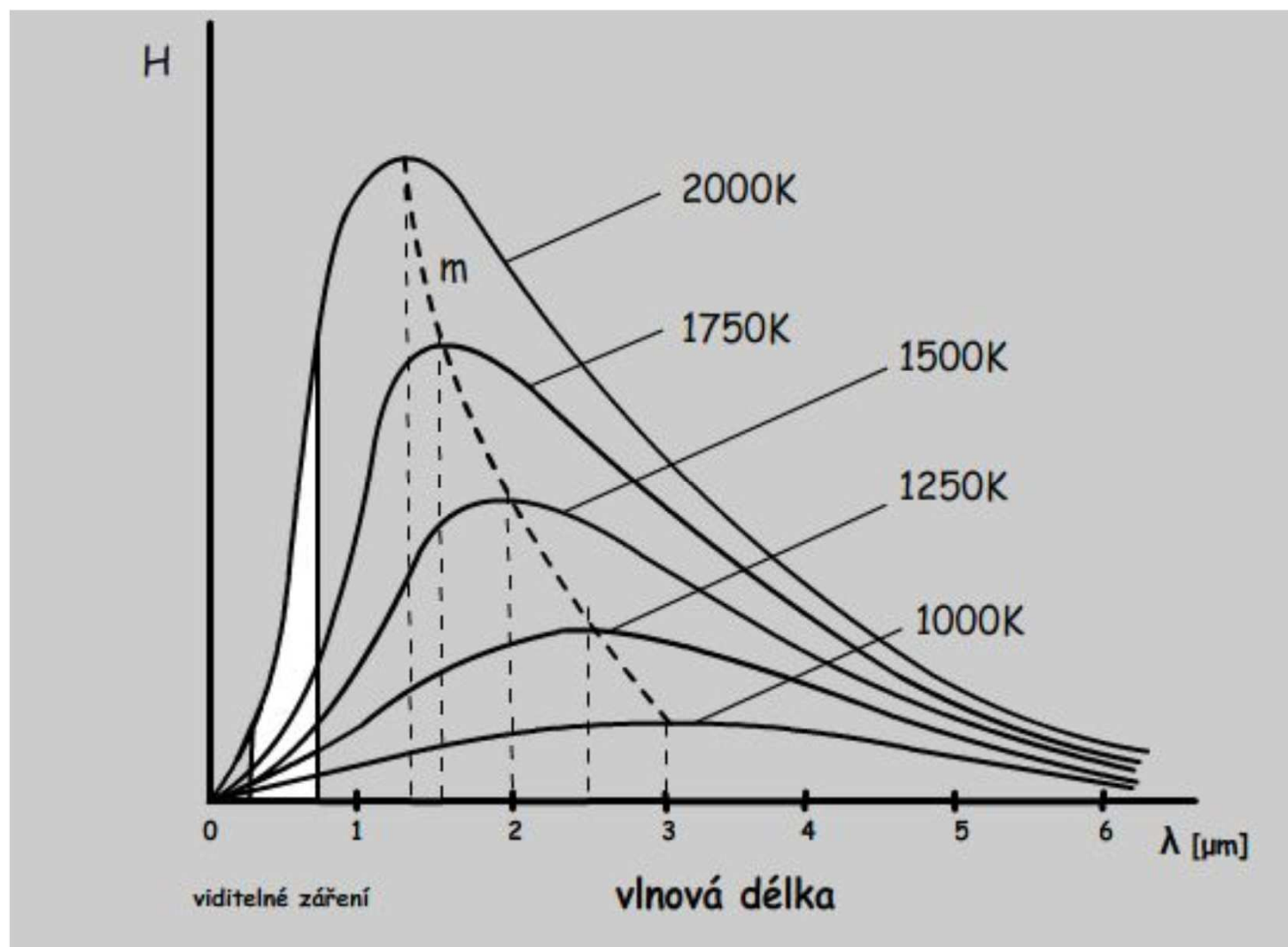
$k = 1,3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmannova konstanta

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

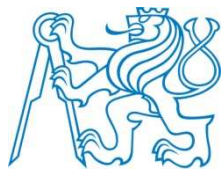
T povrchová absolutní teplota tělesa [K]



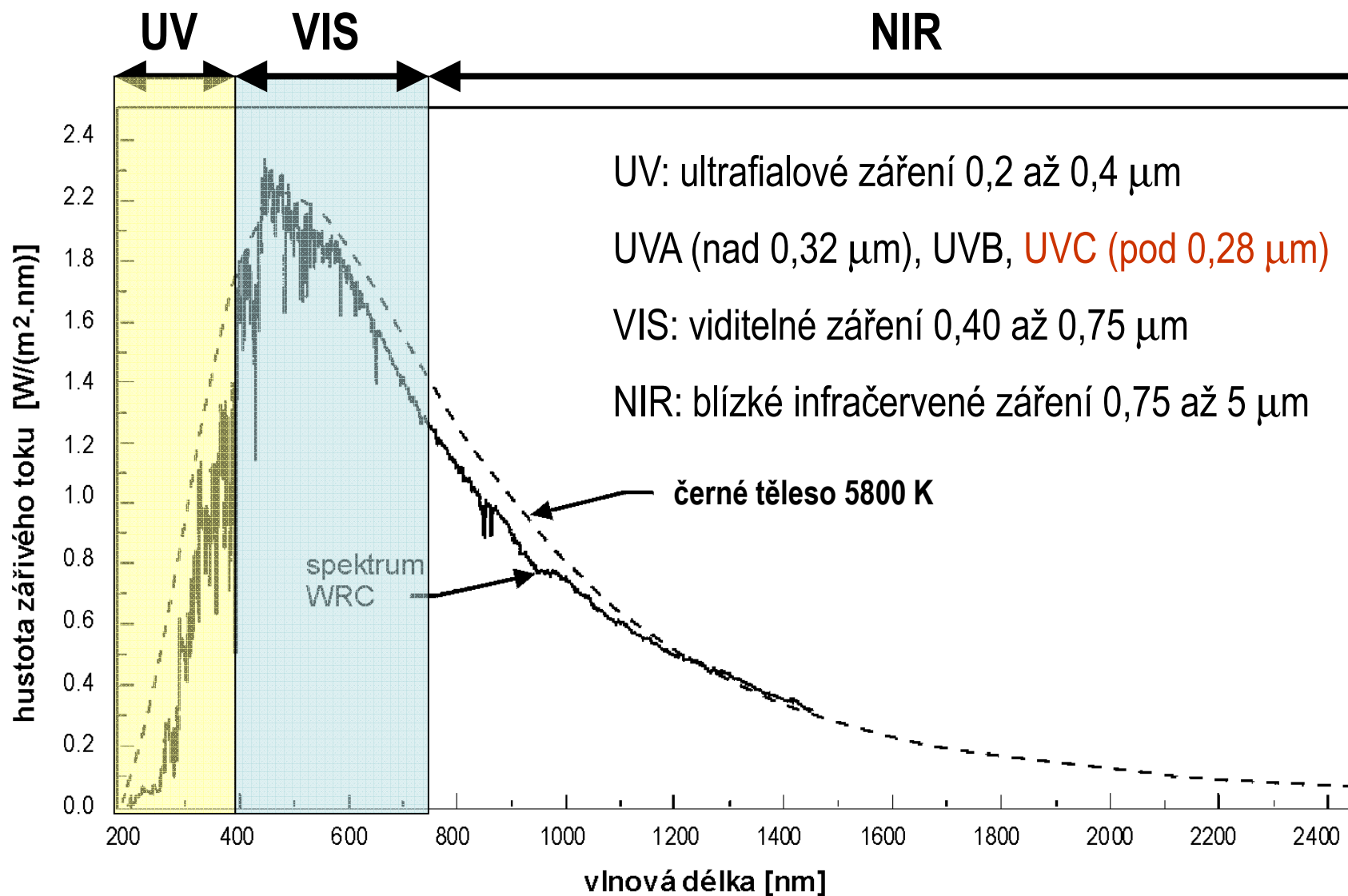
Planckův vyzařovací zákon



Černý, M. (2008)

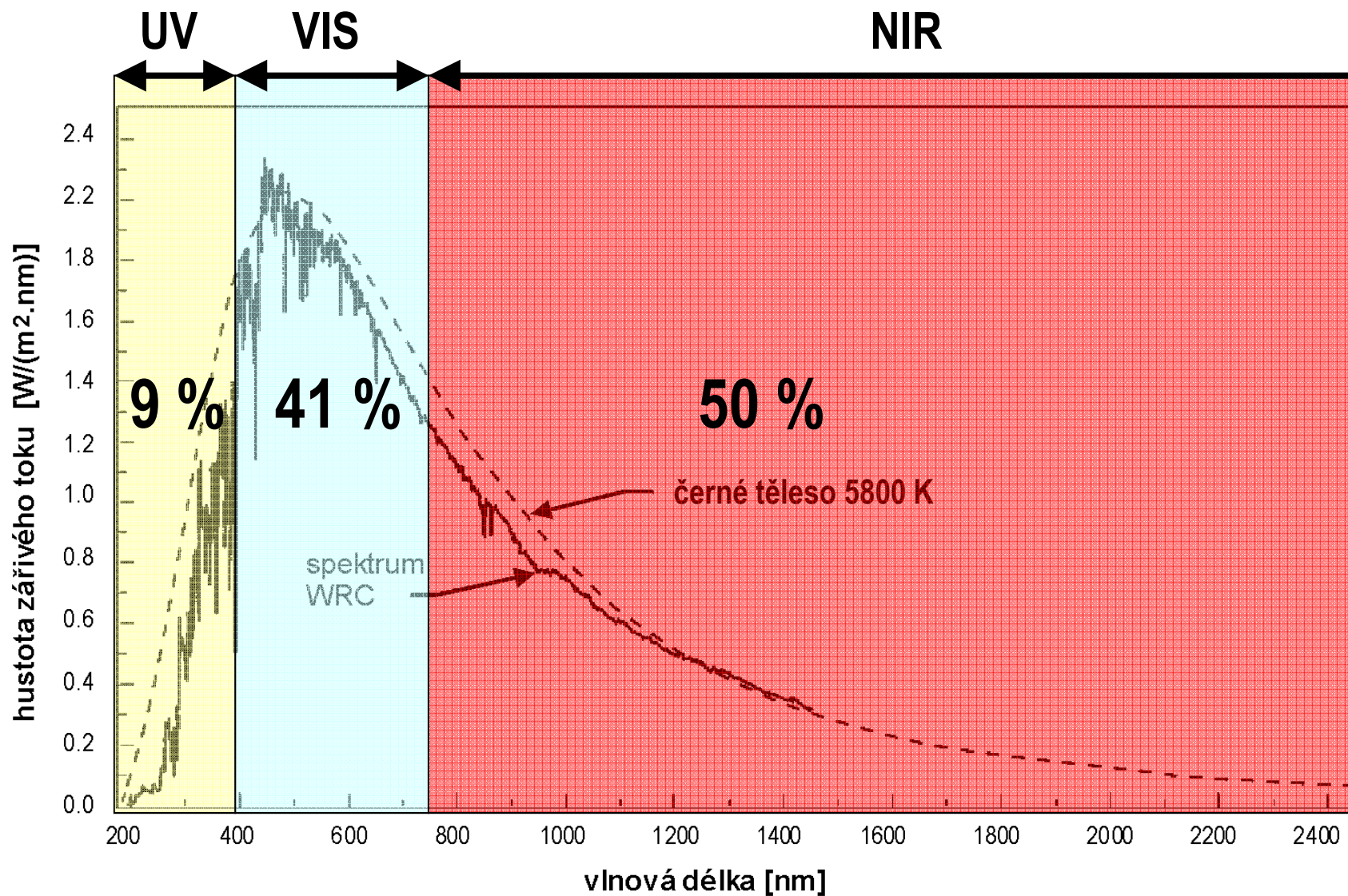


Spektrální hustota zářivého toku





Vyzařovaná sluneční energie

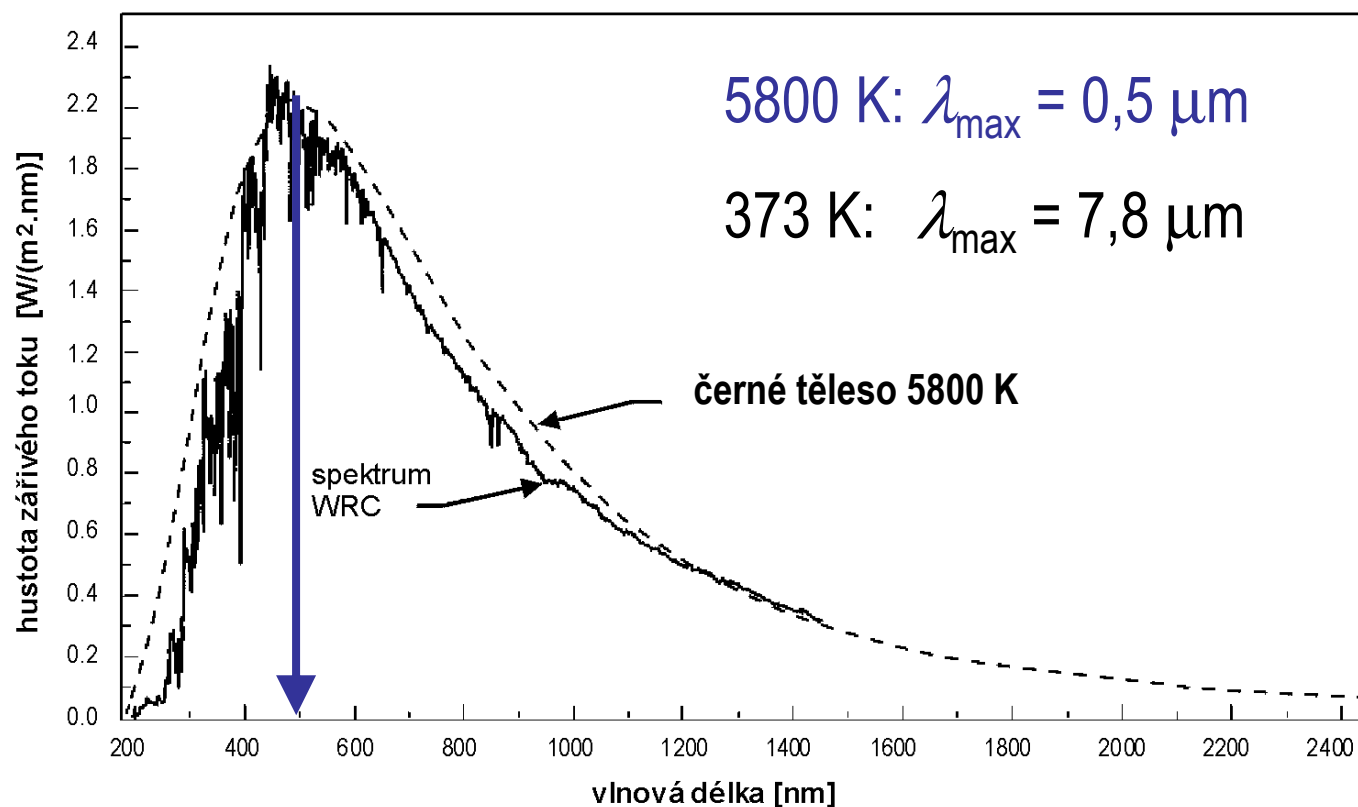




Hustota zářivého toku

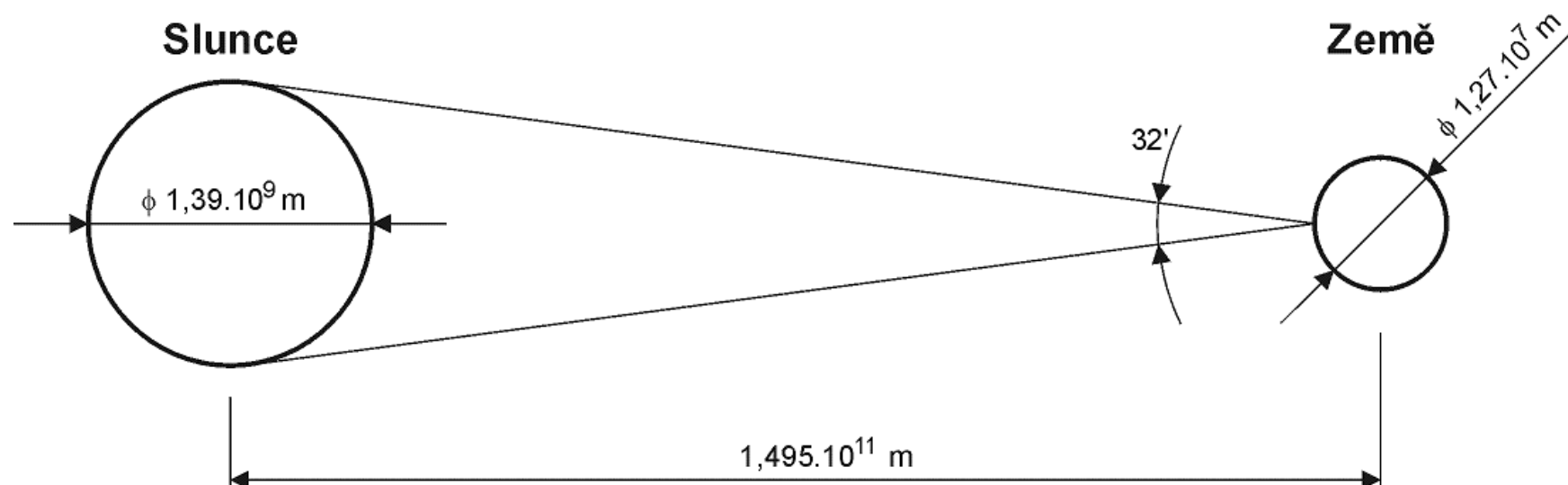
- maximum hustoty zářivého toku – hledání extrému Planckovy funkce

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

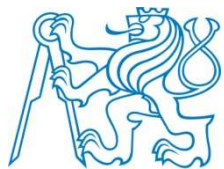




Šíření sluneční energie

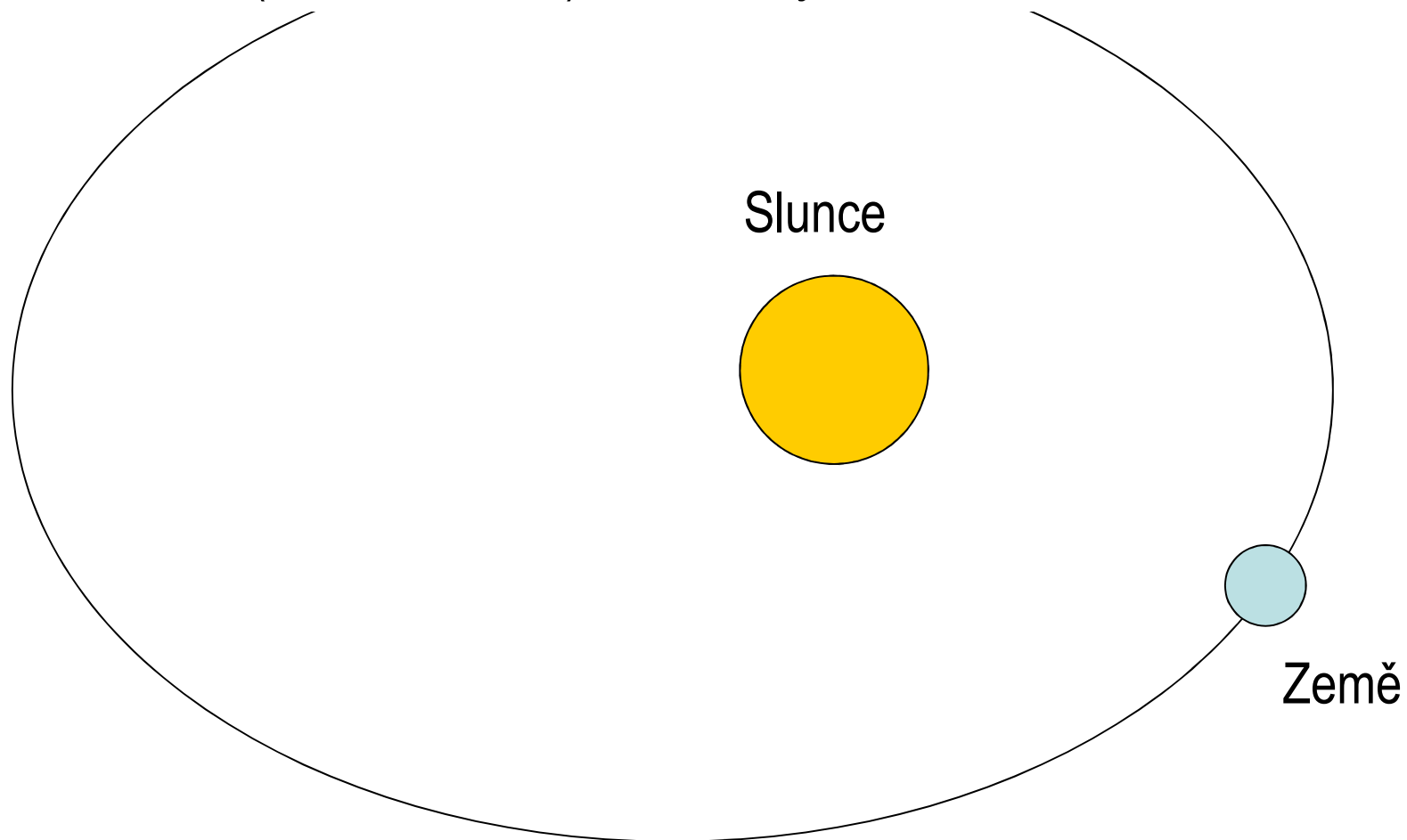


- s rostoucí vzdáleností od Slunce se výkon rozptyluje na větší plochu
- na planetu Zemi dopadá cca $0,5 \times 10^{-9}$ (cca půl miliardy) výkonu zářivý tok **$1,7 \times 10^{17} \text{ W}$**
- svazky slunečních „paprsků“ uvažovány jako rovnoběžné ($32'$)



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

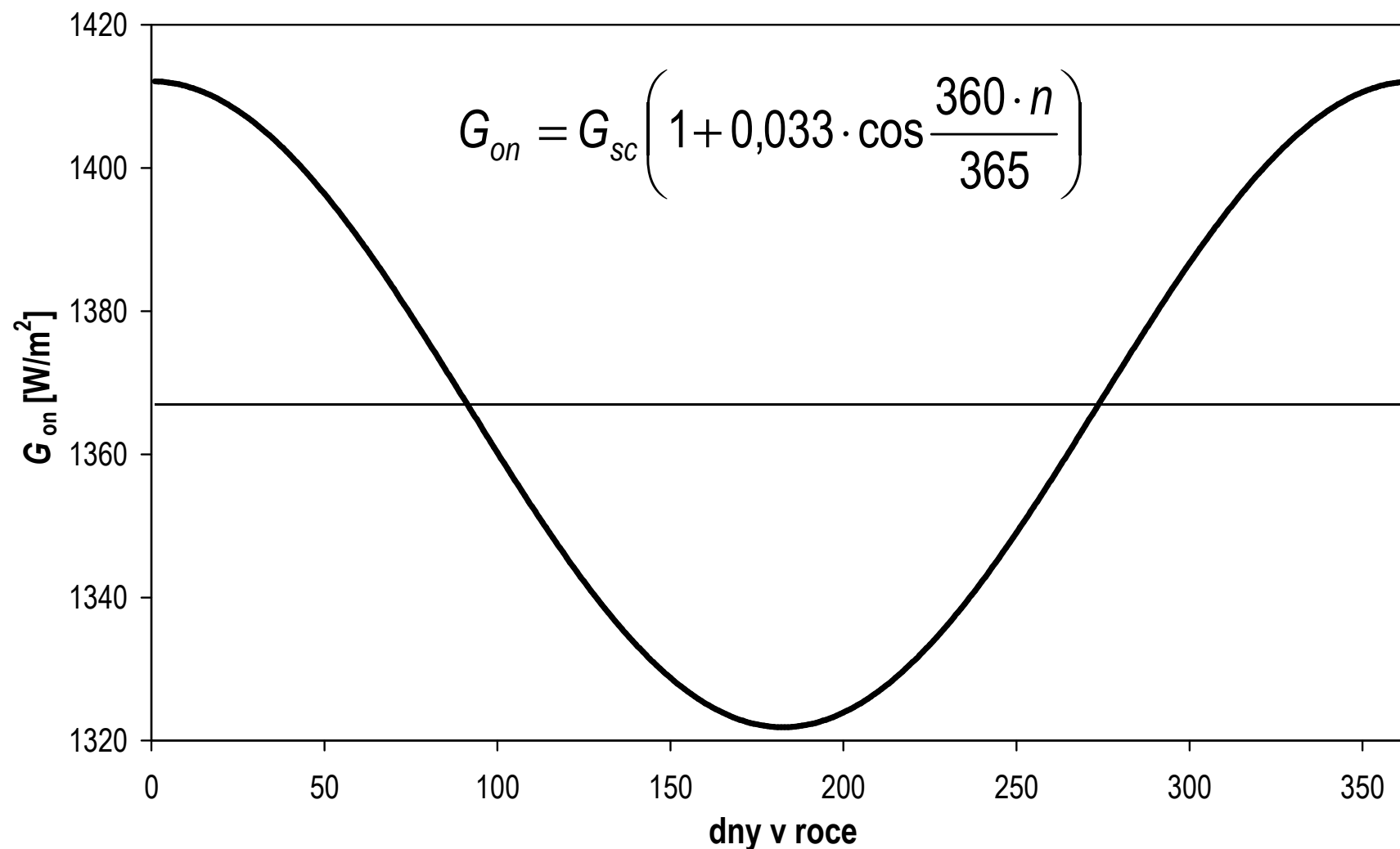
sluneční konstanta $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ (údaj WRC, 1 %)

původní měření Ch. Abbot v horách 1322 W/m^2 , dnes družice

- Merkur: 9040 W/m^2 ... Neptun: $1,5 \text{ W/m}^2$ Pluto: $0,8 \text{ W/m}^2$



Hustota zářivého toku vně atmosféry



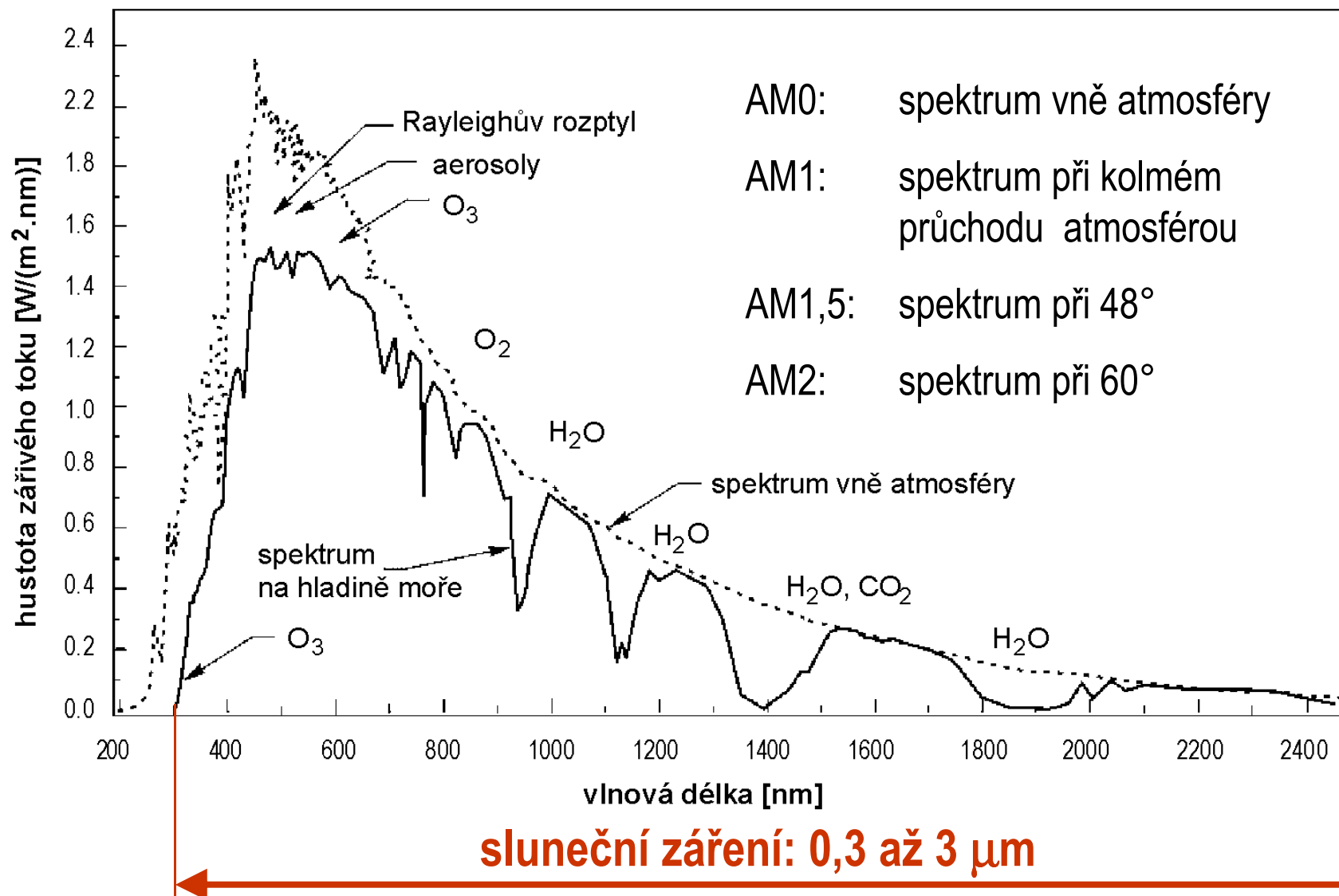


Průchod slunečního záření atmosférou

- 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
- **troposféra** (nejnižší vrstva, mraky)
vodní pára, CO_2 , prach, kapičky vody pohlcují **infračervené** záření



Průchod slunečního záření atmosférou



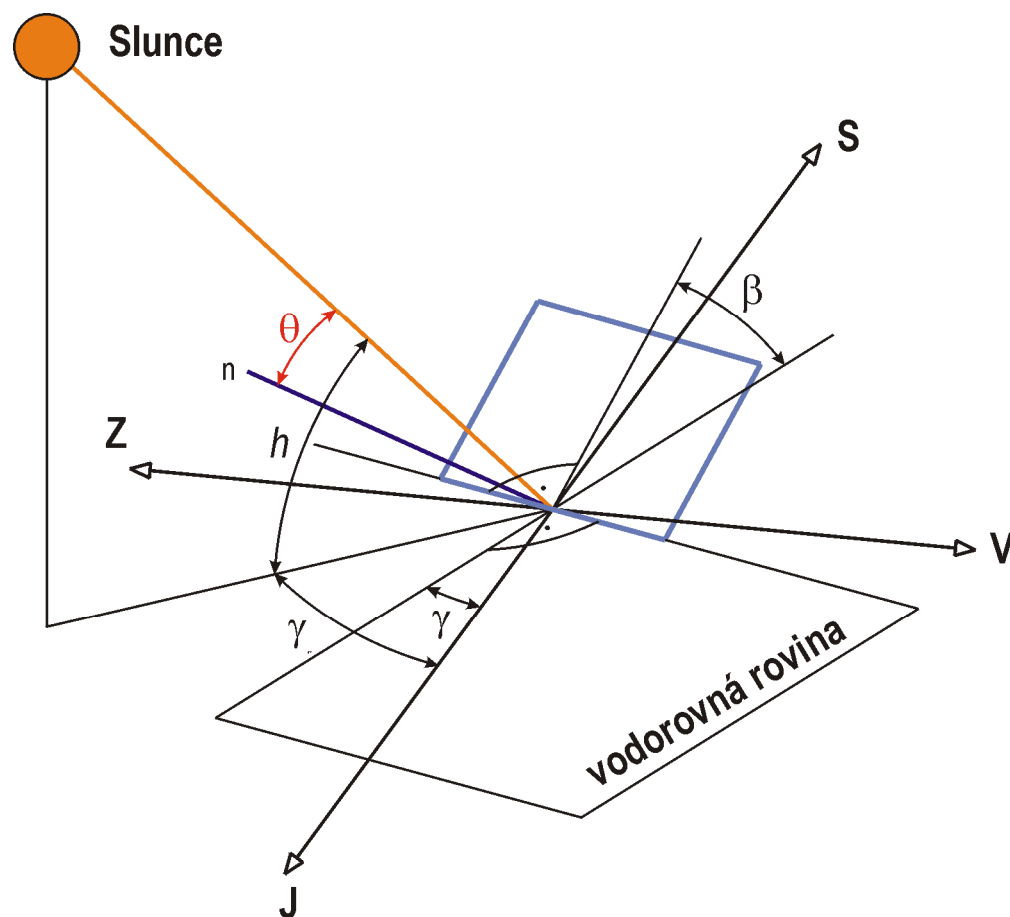


Roční bilance

- 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, větry 10 % větrná energie
 - biologické reakce 1 ‰ energie biomasy



Geometrie slunečního záření



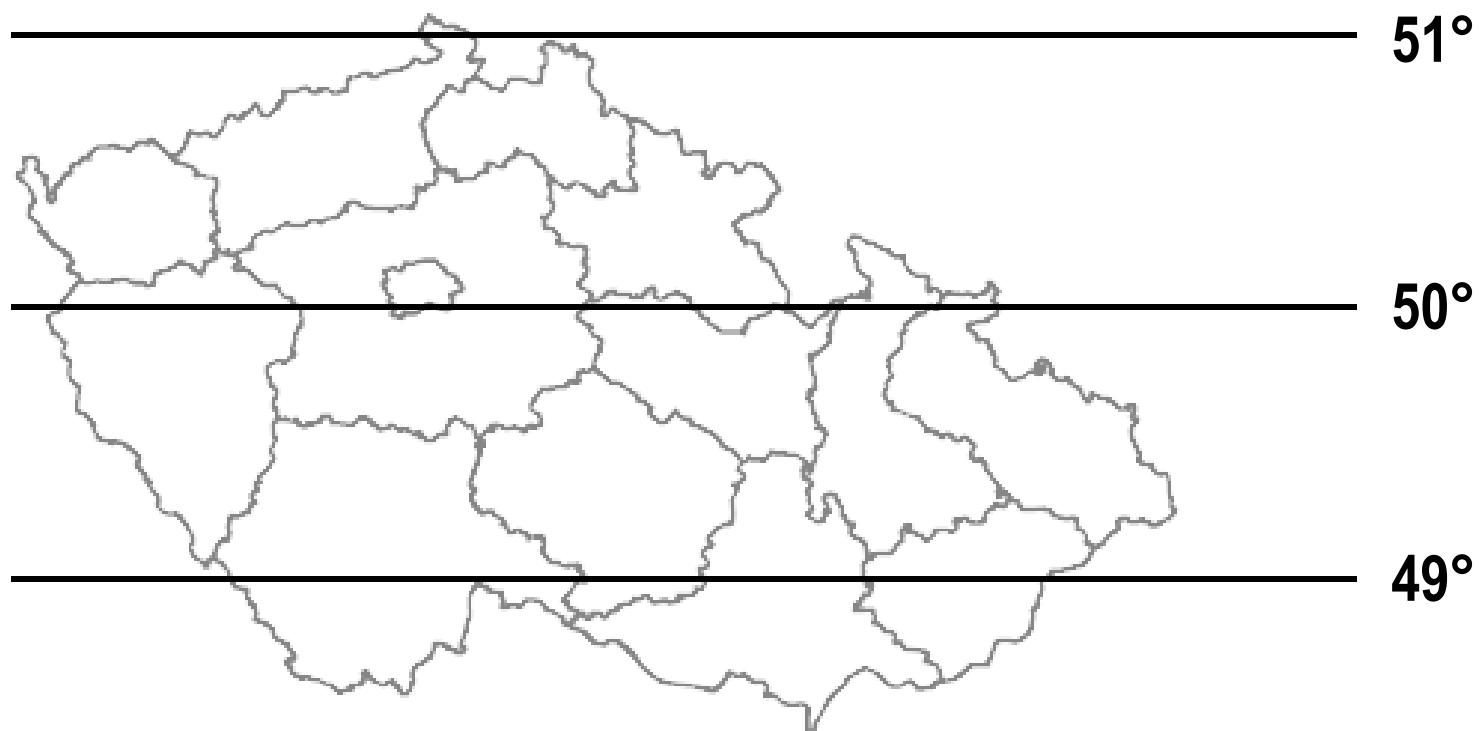
- sklon plochy β
 - azimut plochy γ
 - zeměpisná šířka místa ϕ
-
- čas, datum
 - sluneční časový úhel τ
 - deklinace δ
 - výška slunce nad obzorem h
 - azimut slunce γ_s
-
- úhel dopadu paprsků θ

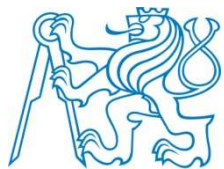


Poloha plochy

- **zeměpisná šířka ϕ** konvence: severně (+), jižně (-)

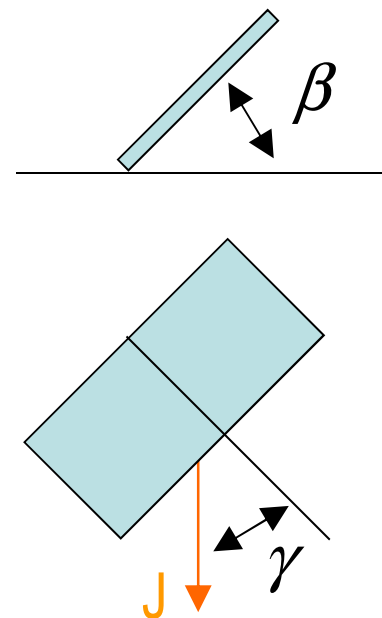
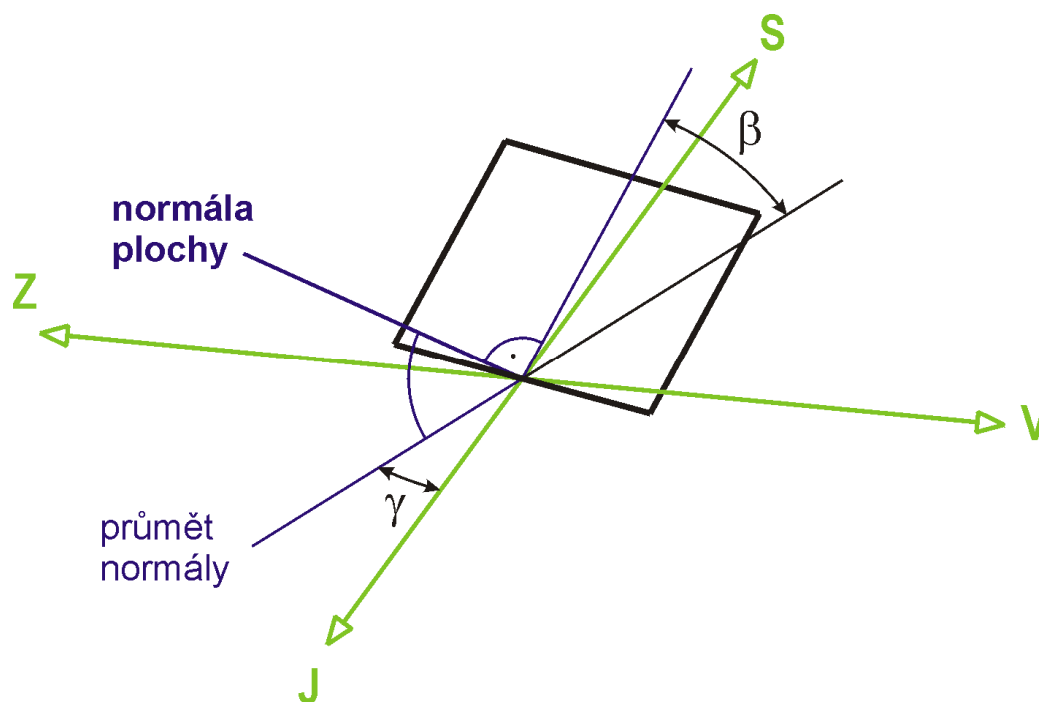
úhel mezi rovinou rovníku a přímkou spojující střed Země a dané místo na povrchu





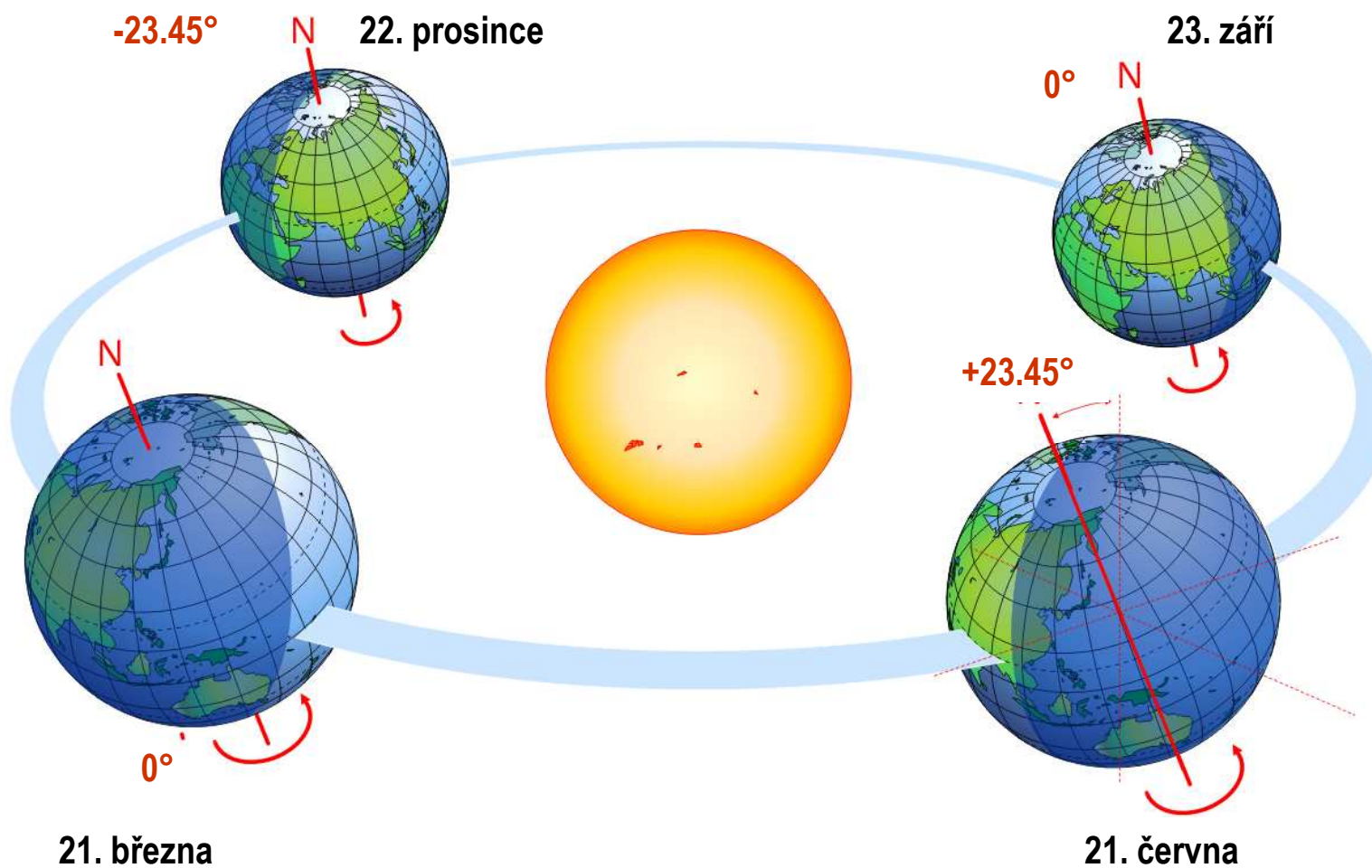
Orientace plochy

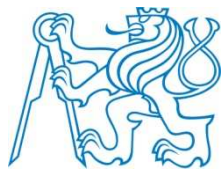
- **úhel sklonu plochy β** konvence: vodorovně 0° , svisle 90°
úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou plochy
- **azimut plochy γ** konvence: východ (-), západ (+), jih (0°)
úhel mezi průmětem normály plochy a lokálním poledníkem (jihem)





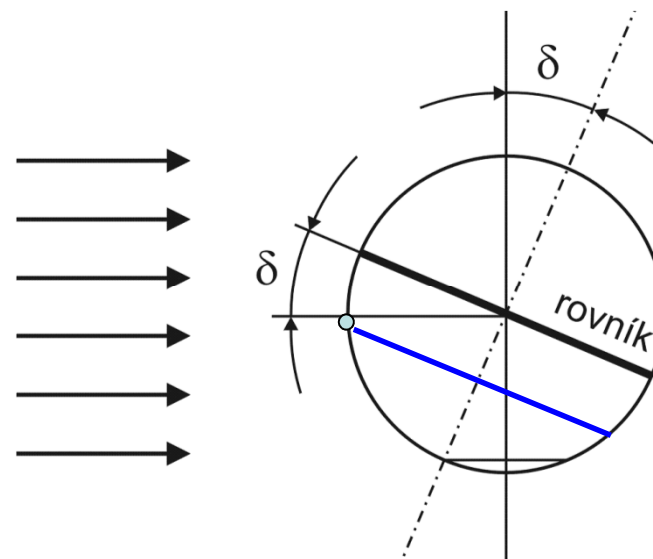
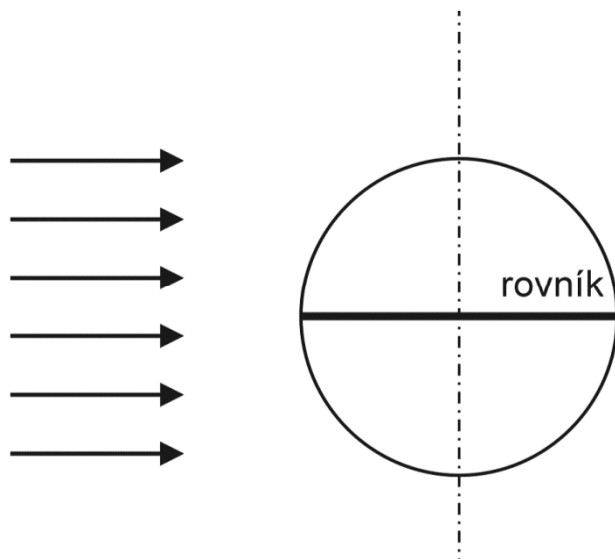
Deklinace





Deklinace δ

- 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





Výpočet deklinace δ

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

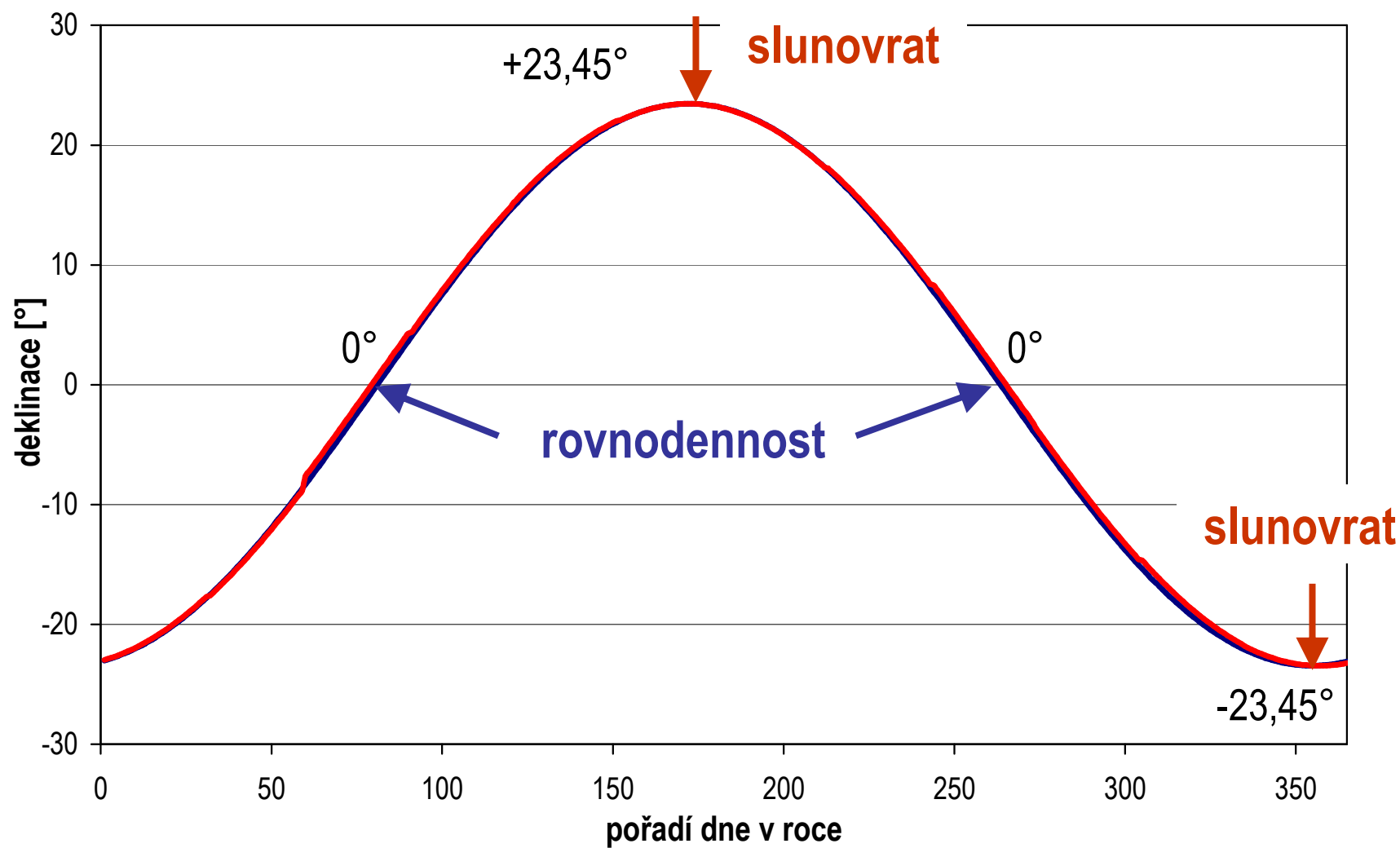
$$\delta = 23,45^\circ \sin(0,98 \cdot DD + 29,7 \cdot MM - 109^\circ)$$

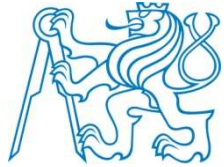
- na základě pořadí dne v roce ***n***

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



Výpočet deklinace δ





Sluneční časový (hodinový) úhel τ

- úhel **zdánlivého** posunu Slunce nad místními poledníky vlivem rotace Země, **vztažený ke slunečnímu polední**
- Země se otočí kolem své osy (360°) jednou za 24 h
→ posun Slunce 15° 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



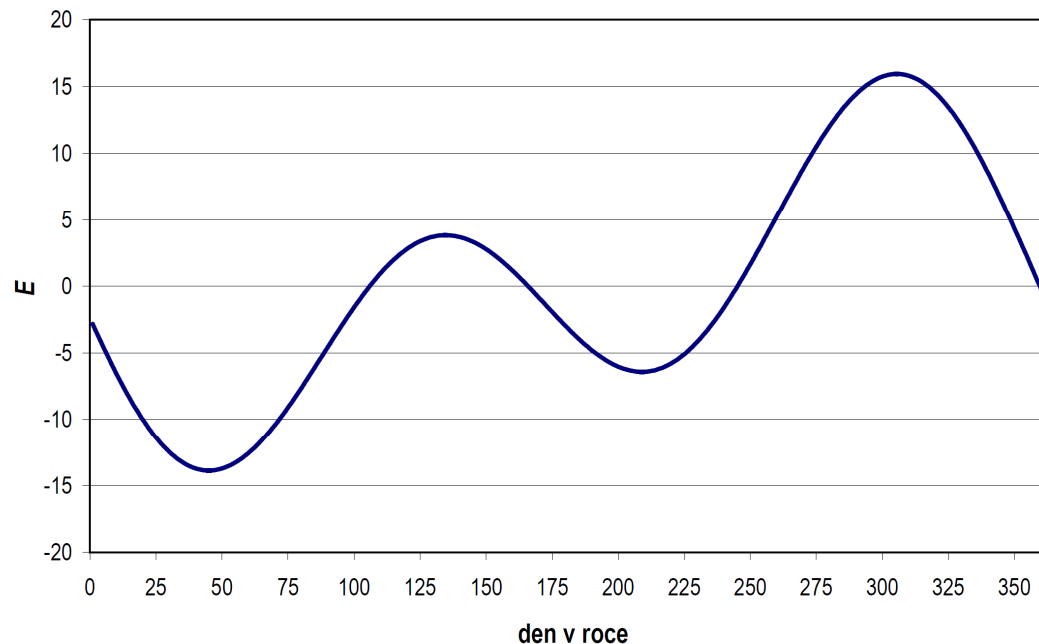
Sluneční čas ST

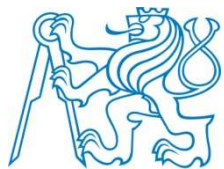
■ $ST = \text{standardní čas} + 4 (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E$

E ... odchylka vlivem nerovnoměrnosti rotace Země

$$E = 222,9(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$





Výška Slunce h

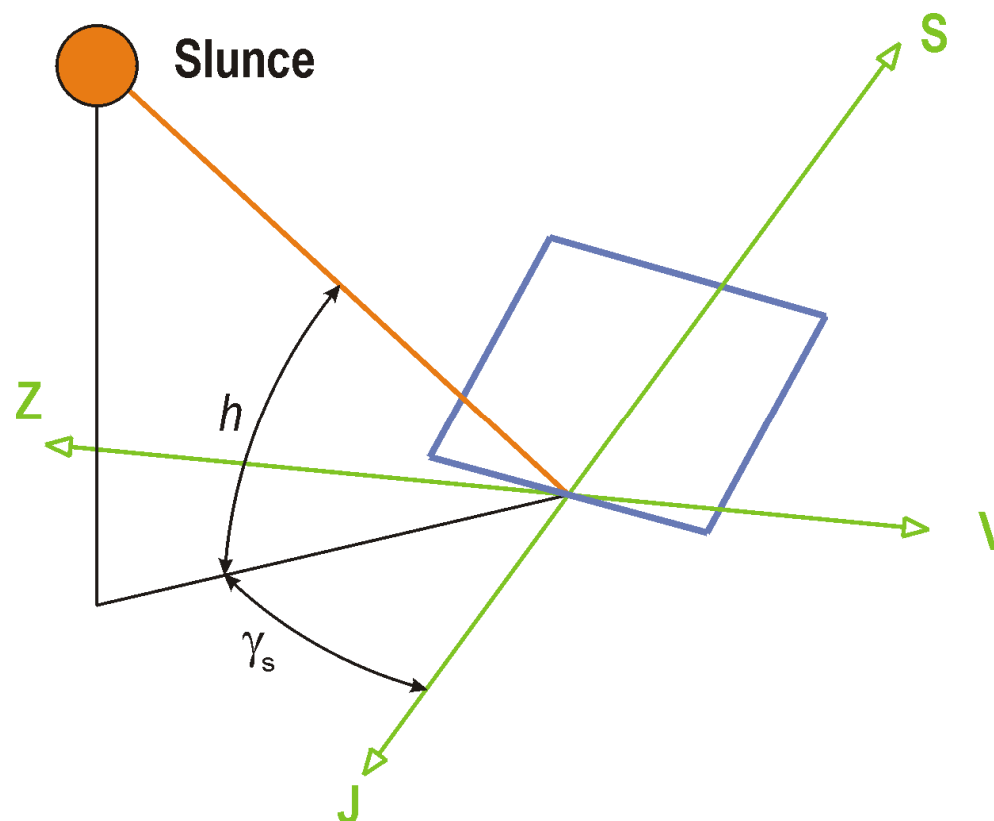
- úhel sevřený spojnici plocha-Slunce s vodorovnou rovinou

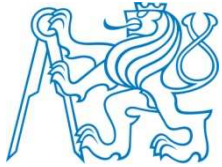
$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau$$

- doplňkový úhel do 90° :

úhel zenitu θ_z

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



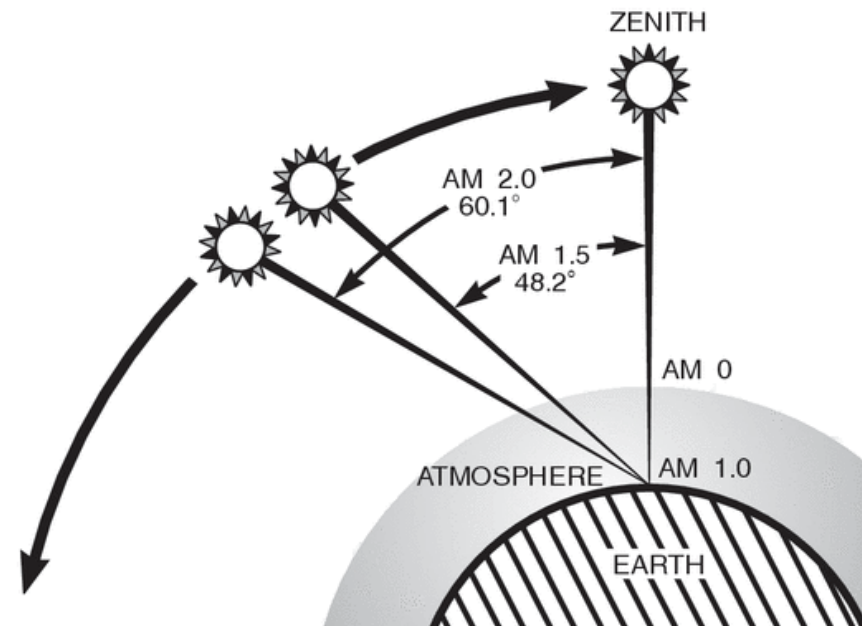


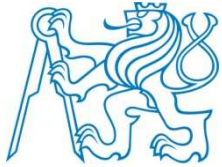
Air mass (vzduchová hmota)

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

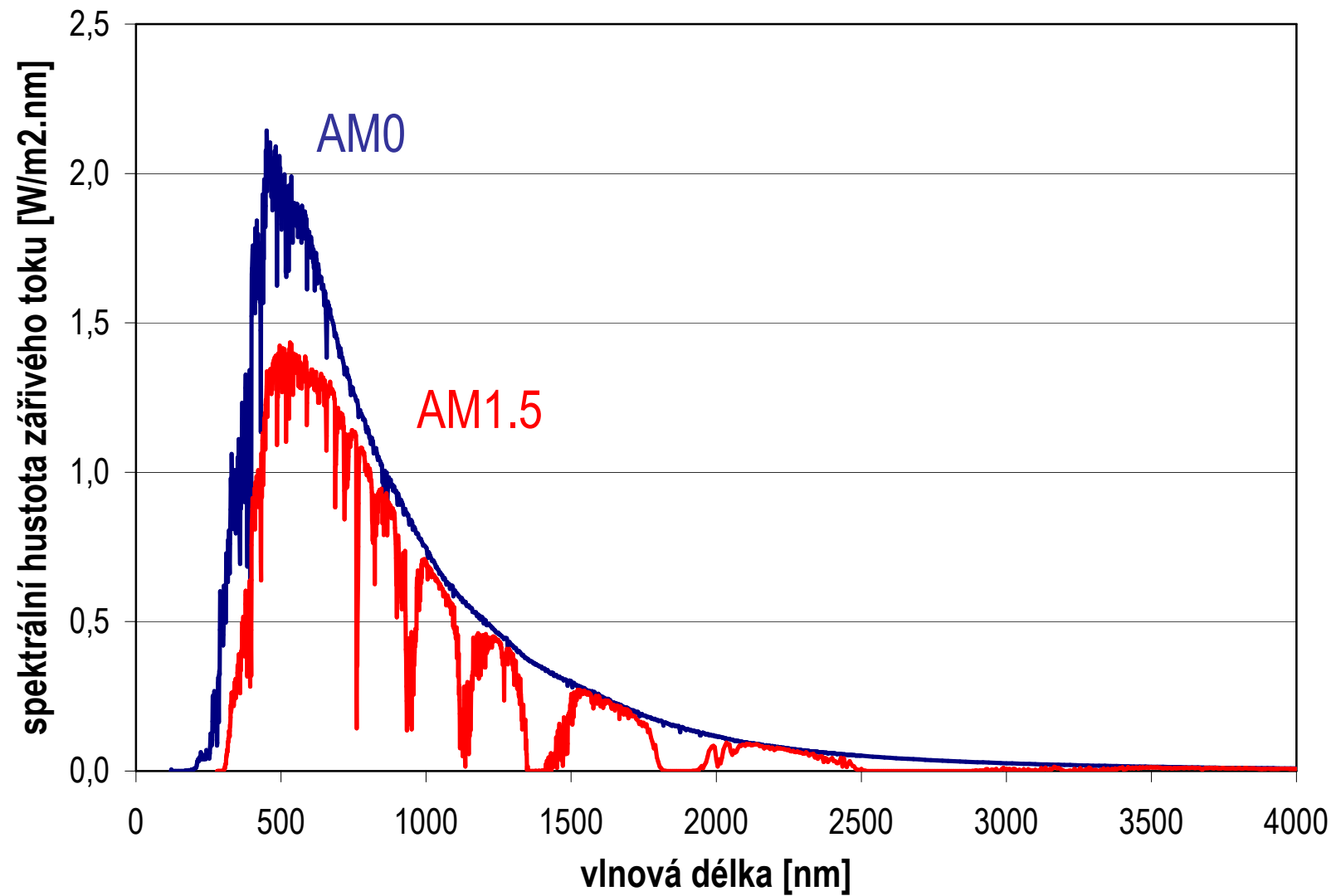
$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

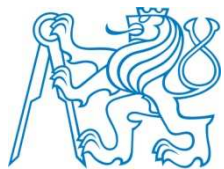
- $AM = 0$ mimo atmosféru
- $AM = 1$ zenit
- $AM = 1,5$ $\theta_z = 48^\circ$
- $AM = 2$ $\theta_z = 60^\circ$





Air mass (vzduchová hmota)





Čas východu a západu Slunce

- východ / západ Slunce: výška Slunce = 0°

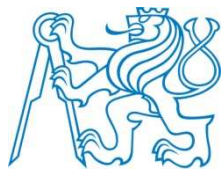
$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau = 0$$

- 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

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



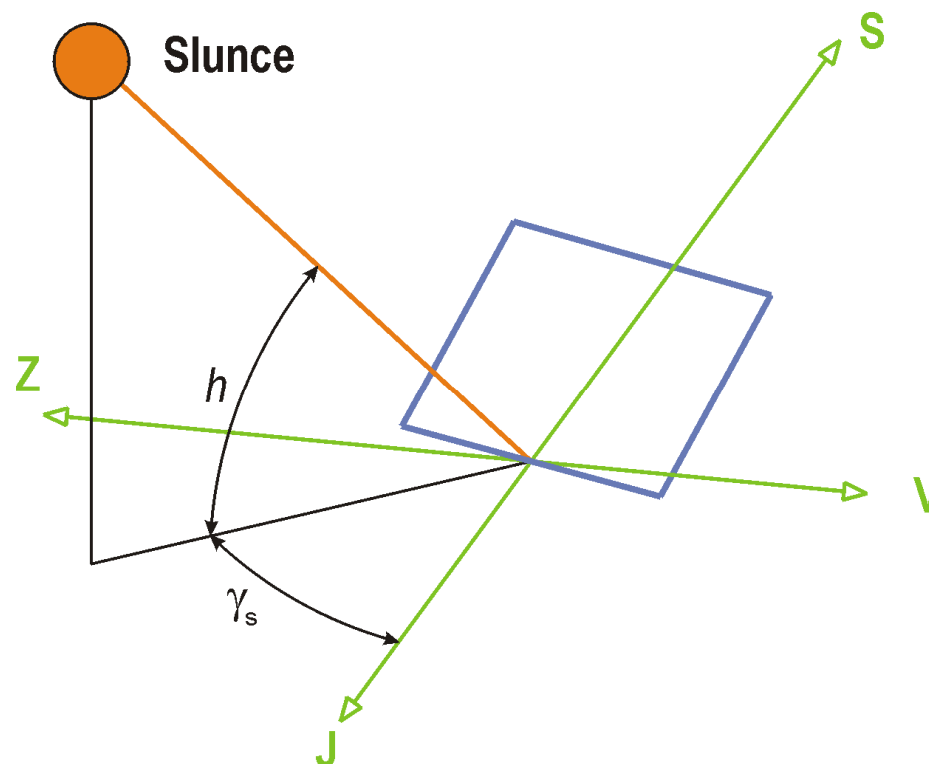
Azimut Slunce γ_s

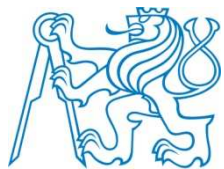
- úhel mezi průmětem spojnice plocha-Slunce a místním poledníkem (jižním směrem)

konvence: měří se od jihu

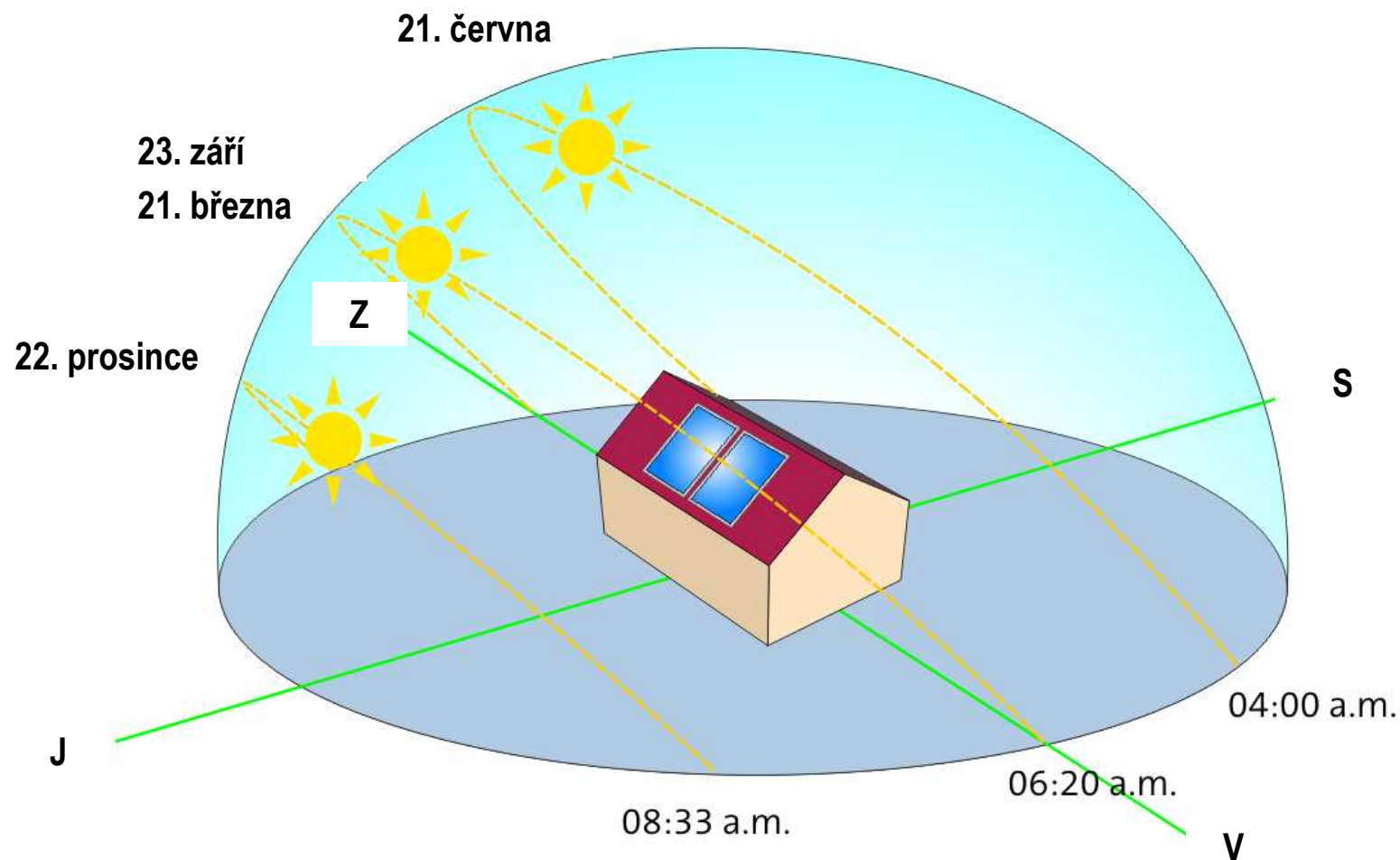
na východ (-), na západ (+)

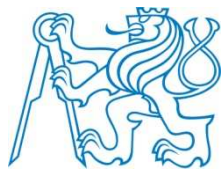
$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta}{\cos h} \sin \tau$$





Výška a azimut Slunce

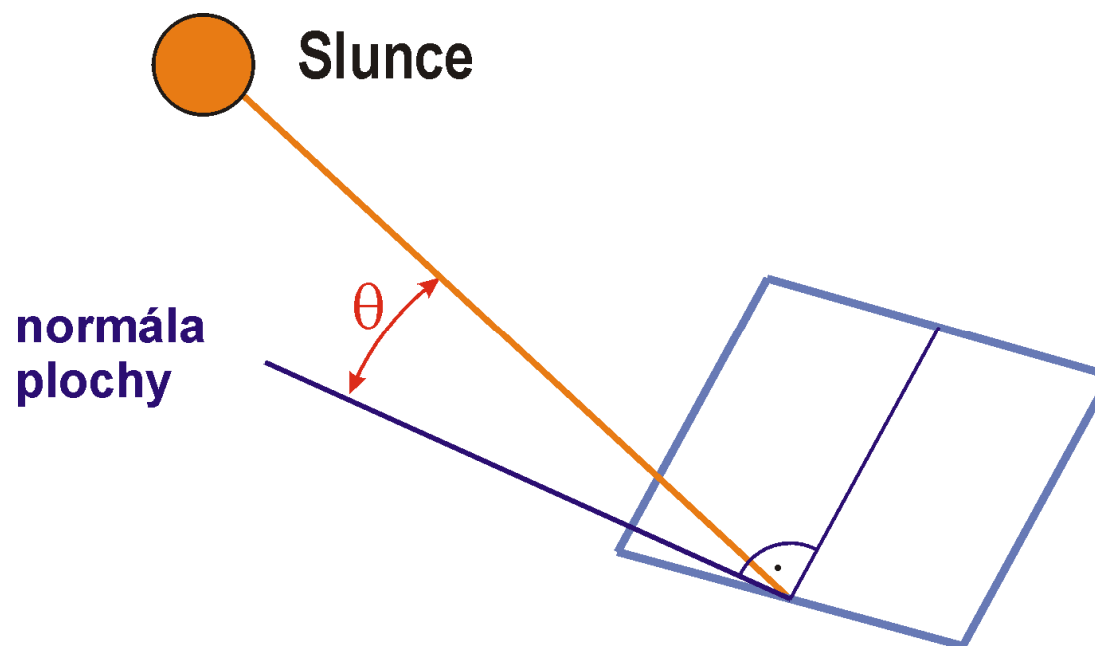




Úhel dopadu slunečního záření

- úhel mezi spojnicí 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

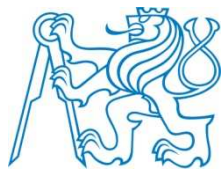
- **solární**: využívající sluneční záření
- solární kolektor, solární soustava, využitá solární energie, solární zisky



Sluneční záření - pojmy

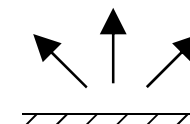
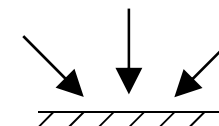
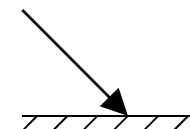
- **sluneční ozáření G [W/m²]** - zářivý **výkon** dopadající na jednotku plochy, hustota slunečního zářivého toku
- **dávka ozáření H [kWh/m², J/m²]** – hustota zářivé **energie**, hustota zářivého toku dopadající za určitý časový úsek, např. hodinu, den

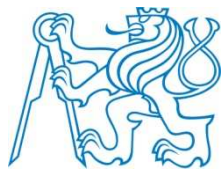
$$H = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G \cdot d\tau$$



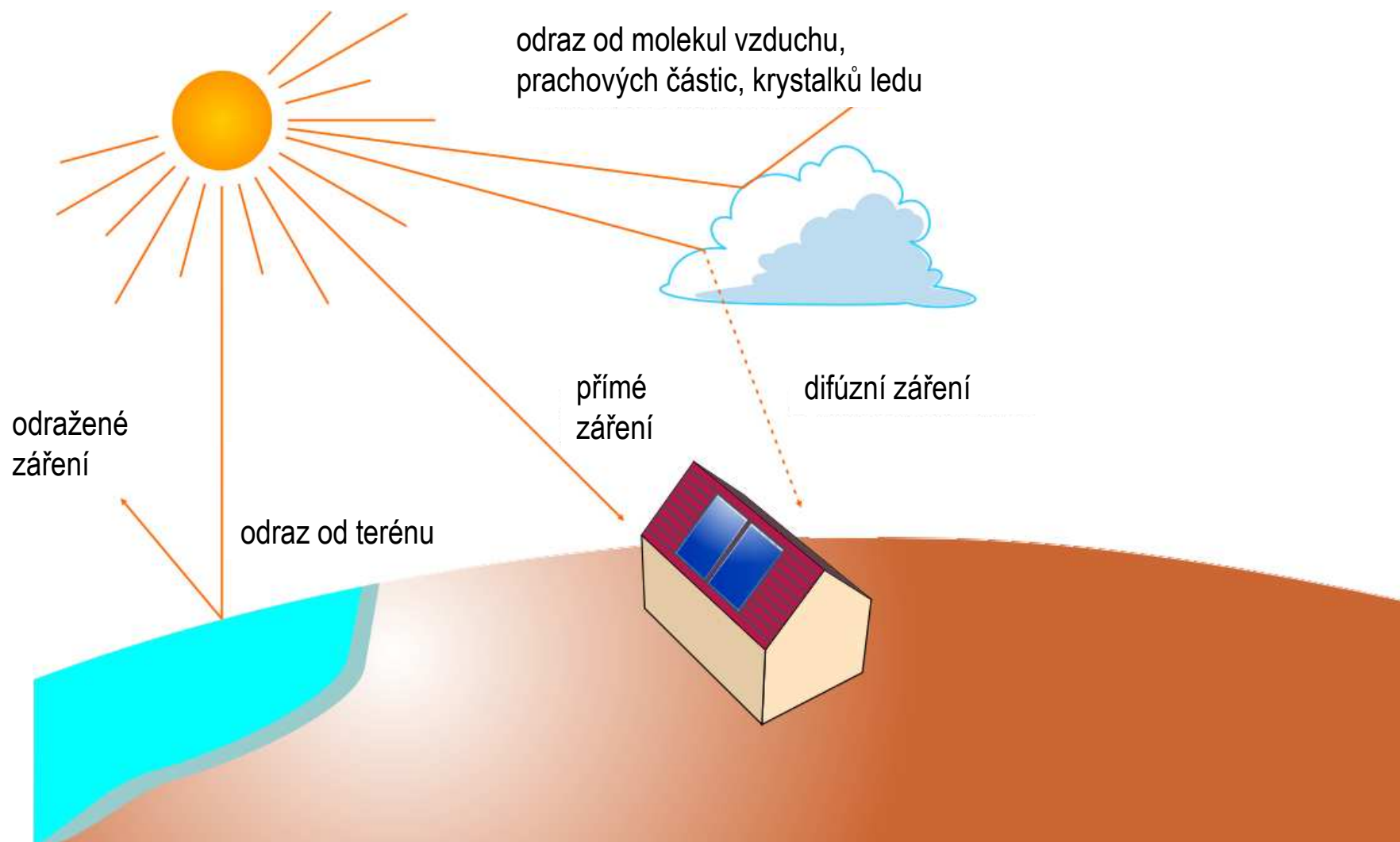
Sluneční záření - pojmy

- **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

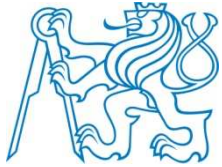
$$\varepsilon = \frac{9,38076 \cdot [\sin h + (0,003 + \sin^2 h)^{0,5}]}{2,0015 \cdot (1 - L_v \cdot 10^{-4})} + 0,91018$$

jiný vztah např. v ČSN 730548

Zátěž klimatizovaných prostor

h výška Slunce

L_v nadmořská výška daného místa [m]



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
roční průměr	1,9	2,75	3,75	5,0

zjednodušeně:

horské oblasti $Z = 2$

venkov $Z = 3$

města $Z = 4$

průmyslové oblasti $Z > 5$



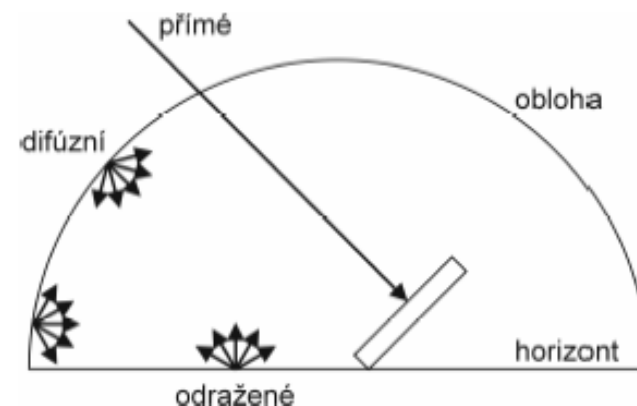
Sluneční ozáření na obecnou plochu

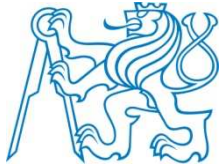
- celkové sluneční ozáření obecně orientované a skloněné plochy

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

přímé ozáření
 difúzní ozáření z oblohy
 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)

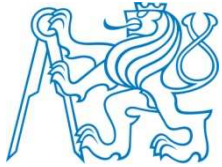
- poměr mezi odraženou a dopadlou hustotou slunečního zářivého toku
- pro výpočty se uvažuje $\rho_g = 0,2$

běžná vegetace (tráva, zemina) 0,15 až 0,25

čerstvý sníh 0,80 až 0,90 (starý 0,60)

omšelý beton 0,30

asfalt 0,15



Sluneční ozáření na vodorovnou rovinu

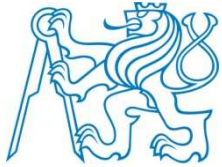
- přímé sluneční ozáření na vodorovnou rovinu

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

- 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



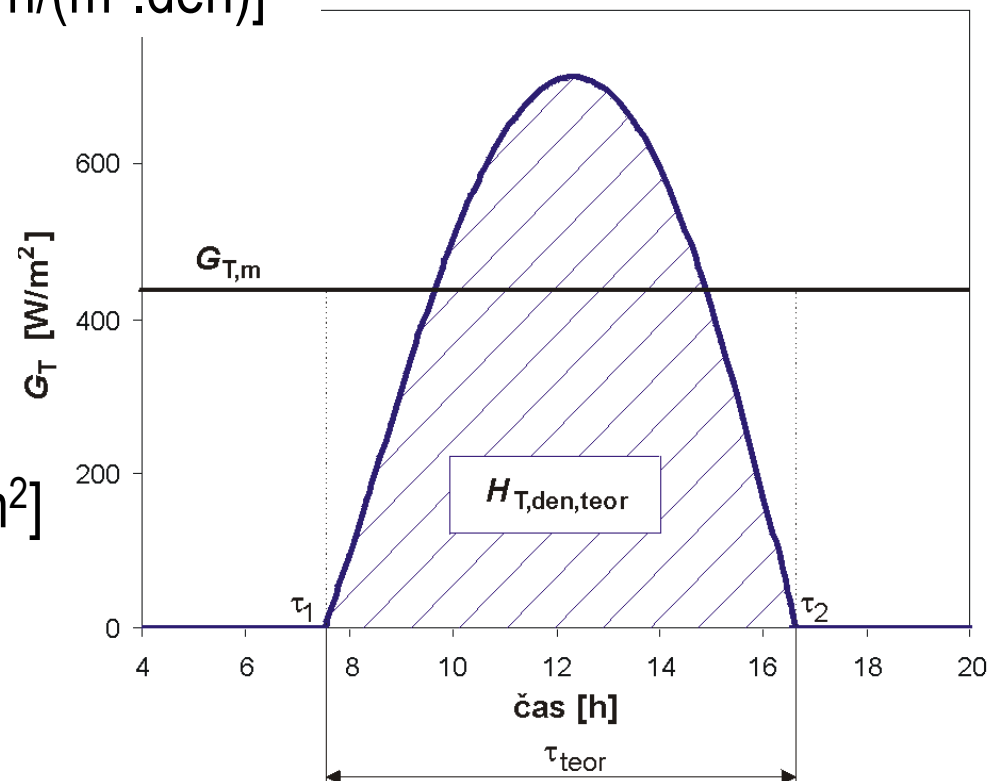
Dávka ozáření na obecnou plochu

- teoretická denní dávka slunečního ozáření, integrace slunečního ozáření plochy od východu τ_1 do západu τ_2 Slunce

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

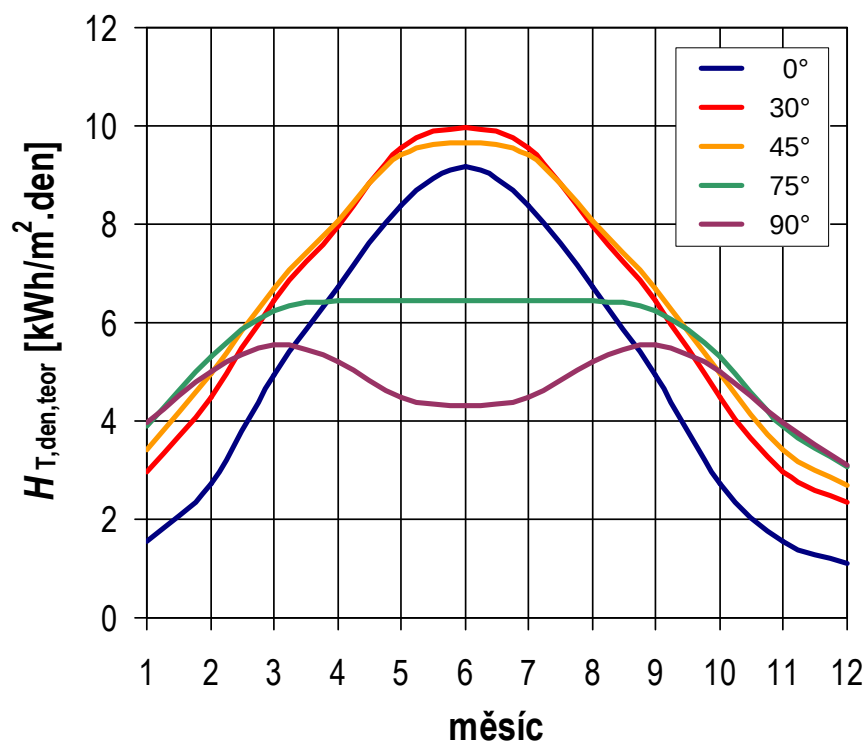
- střední denní sluneční ozáření

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

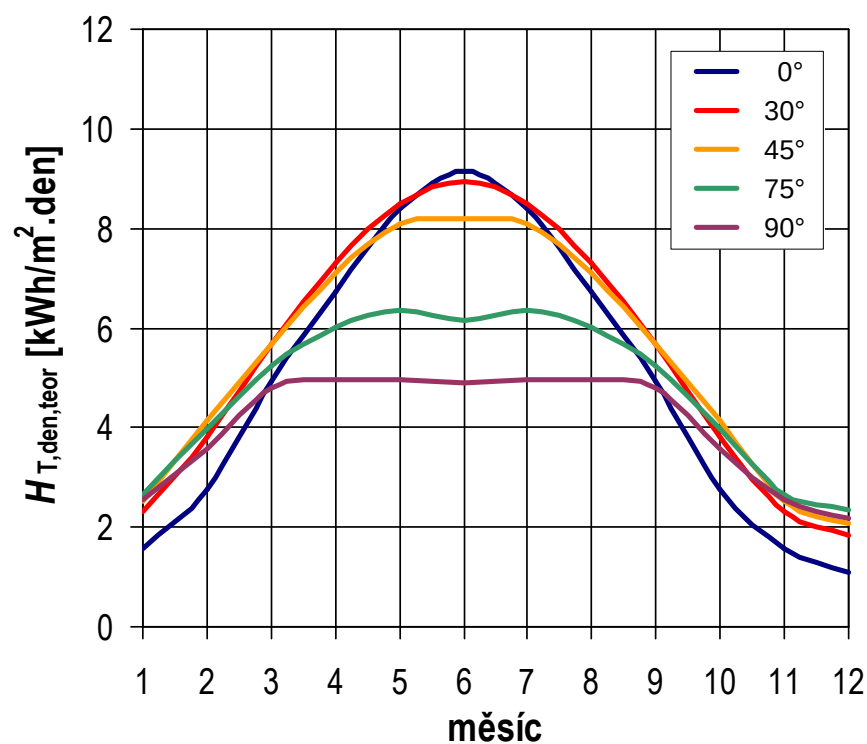




Vliv sklonu plochy



azimut 0° (jih)



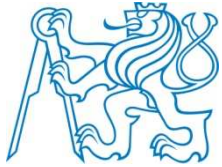
azimut 45° (JZ, JV)

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 τ_1 do západu τ_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

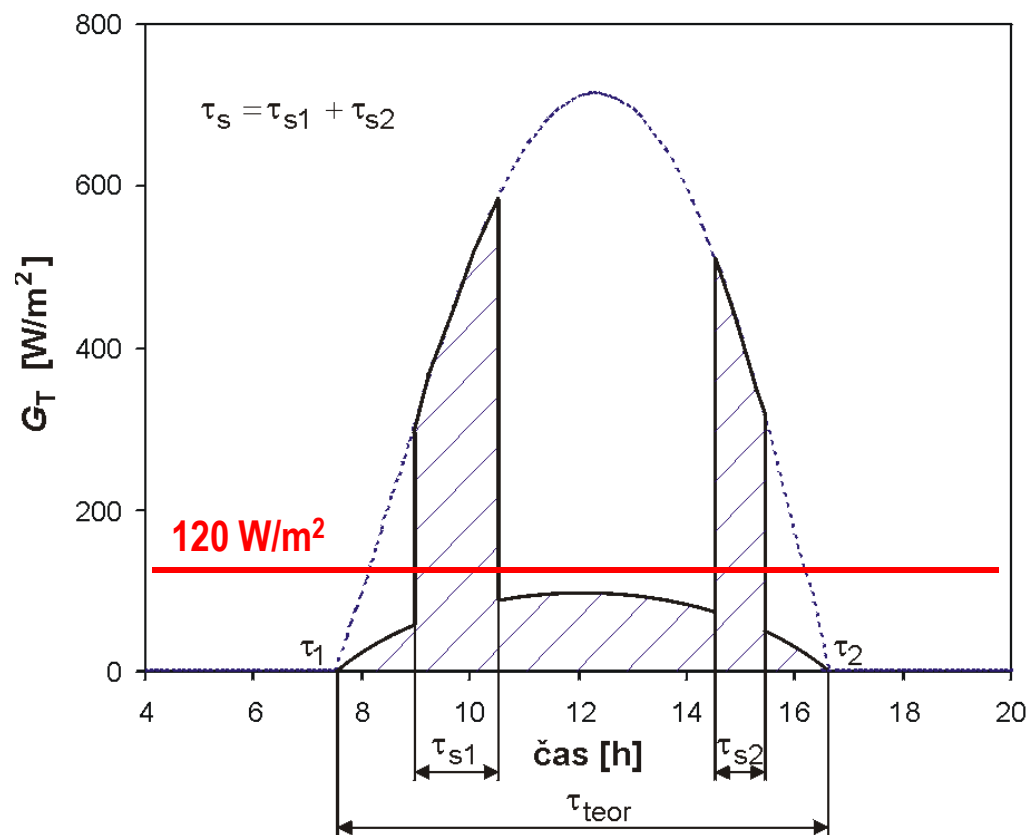
- doba trvání **přímého** slunečního záření **> 120 W/m²**

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

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

- poměrná doba svitu

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



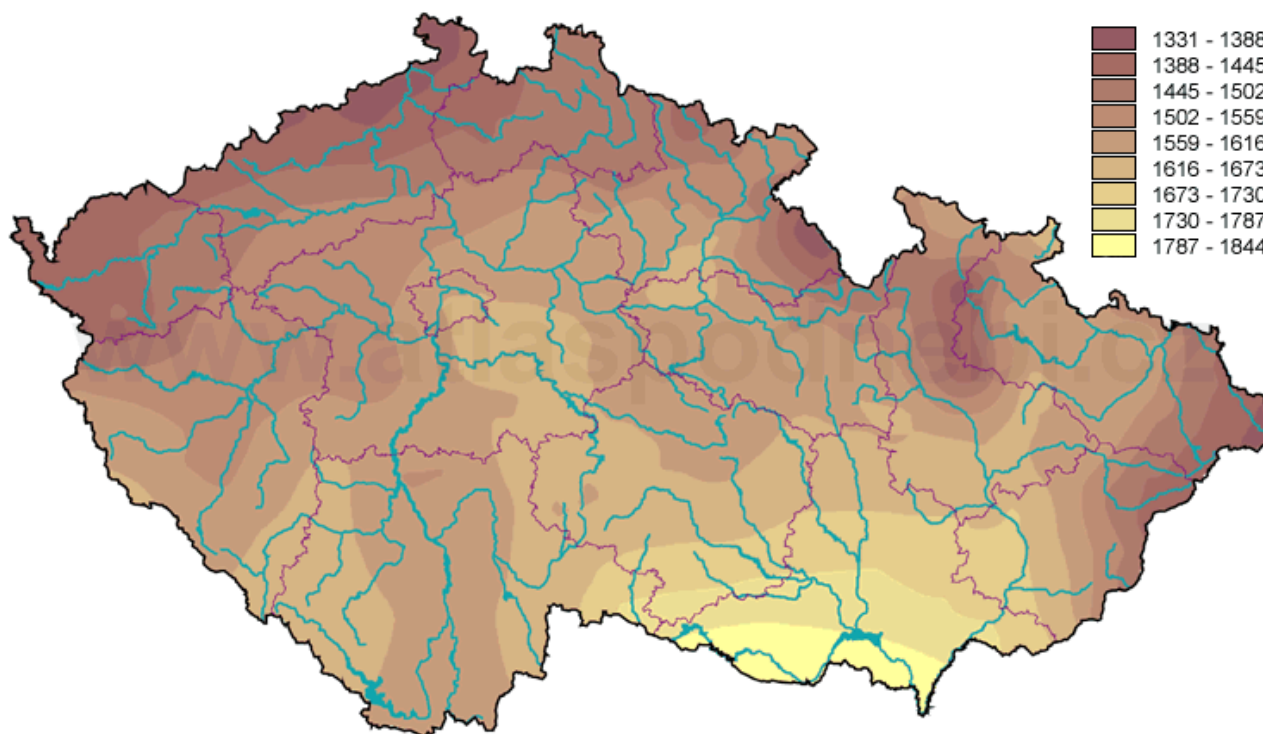


Skutečná doba slunečního svitu

měsíc	Skutečná doba slunečního svitu τ_{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
Σ	1 899	1 691	1 826	1 810



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

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

- měsíční dávka slunečního ozáření

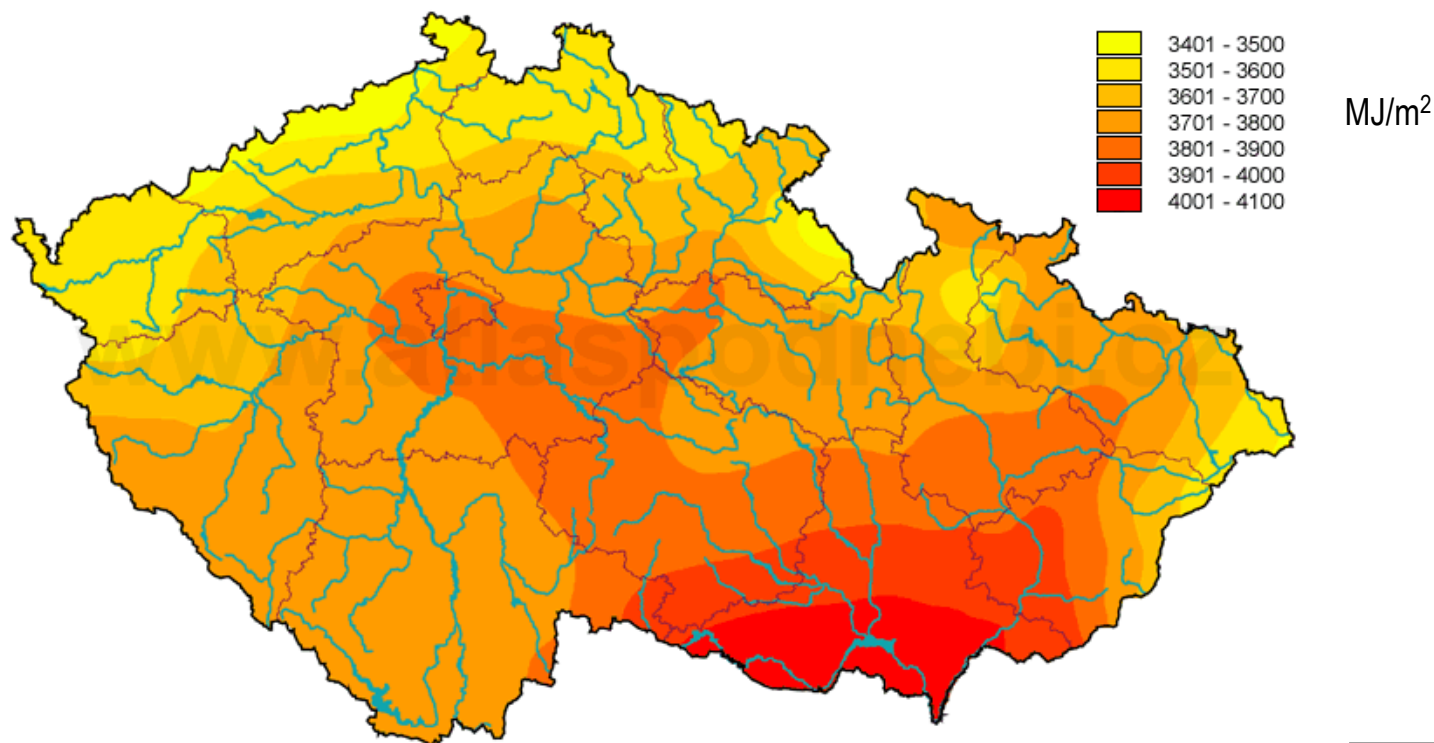
$$H_{T,mes} = n \cdot H_{T,den} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{měs})]$$

- roční dávka slunečního ozáření

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



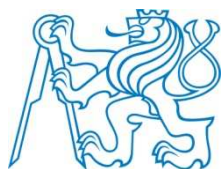
Roční dávky ozáření v podmínkách ČR



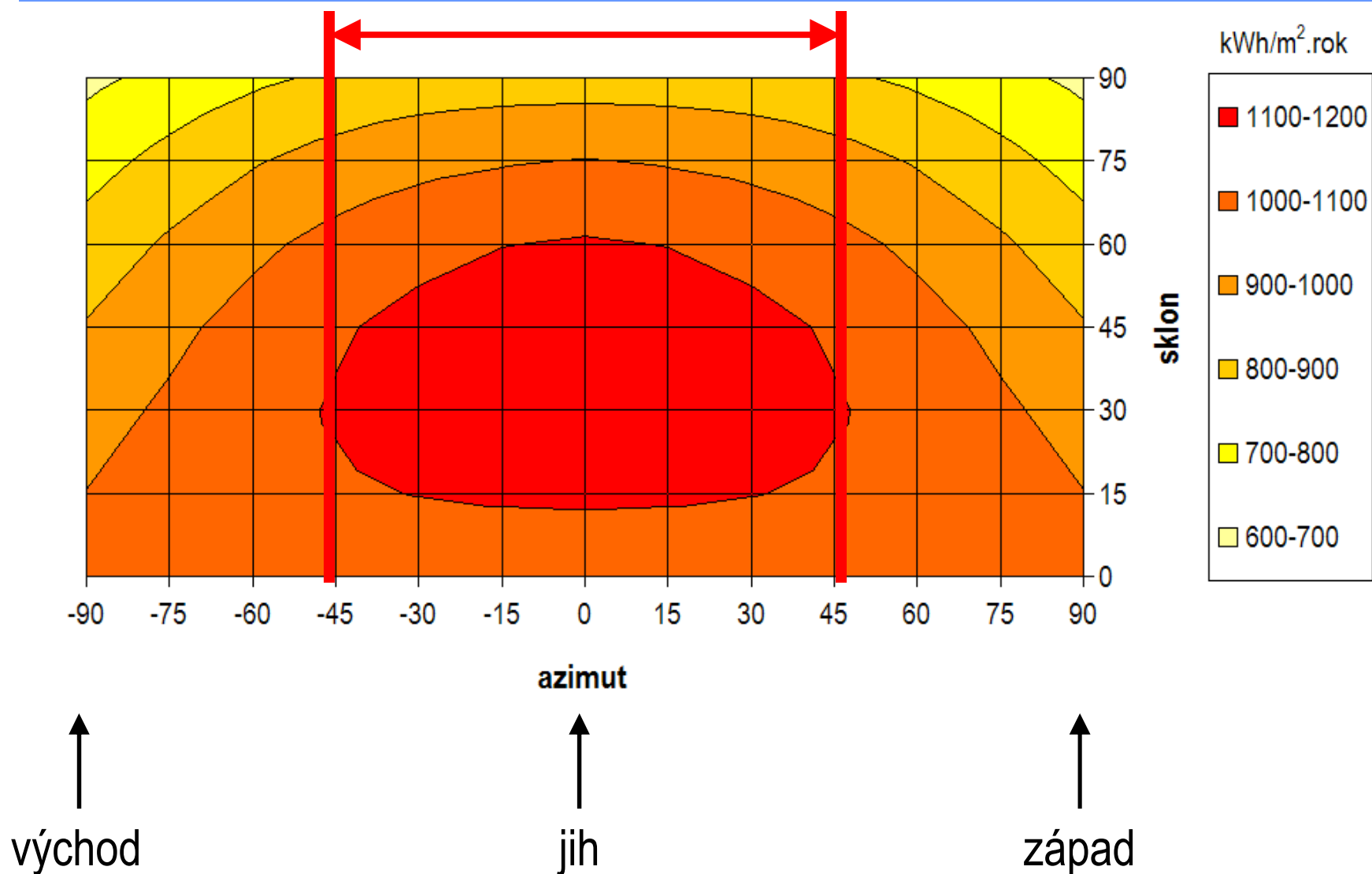
zdroj: ČHMÚ

Roční dávka ozáření v ČR:

- pro sklon 30 až 45°, jižní orientace: **1000 až 1200 kWh/m²**
- pro sklon 90°, jižní orientace: **750 až 900 kWh/m²**



Vliv azimutu a sklonu plochy





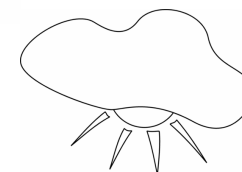
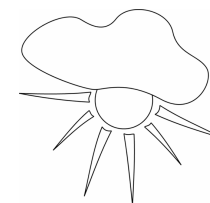
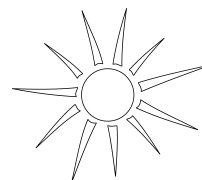
Sluneční energie v číslech

■ sluneční ozáření G (výkon)

jasná obloha 800 až 1000 W/m²

polojasno 400 až 700 W/m²

zataženo 100 až 300 W/m²



■ dávka ozáření H (energie)

zima 3 kWh/(m².den)

jaro, podzim 5 kWh/(m².den)

léto 8 kWh/(m².den)