

# Základy diaľkového prieskumu Zeme

## Radiometrické veličiny a kalibrácia

Michal Gallay

2.4.2024



PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA  
UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA  
V KOŠICIACH



ÚSTAV  
GEOGRAFIE

# Rádiometrické veličiny v DPZ a ich fotometrické ekvivalenty v optike

radiometrická veličina	opis	symbol	jednotka	fotometrická veličina	symbol	jednotka
energia vyžarovania Radiant energy	celková energia elektromagnetického žiarenia, kapacita žiarenia konat' prácu	Q	J, joule	svetelná energia Luminous energy	$Q_v$	lm.s
žiarenie (žiarivý tok) Radiant flux	celková energia vyžiarená za čas (žiarivý výkon)	$\Phi$	W, watt, J/s joule za sekundu	svetelný tok Luminous flux	$\Phi_v$	lm (lumen)
Hustota žiarenia (žiarivého toku) / intenzita ožiarenia Irradiance	žiarivý tok dopadajúci na jednotku plochy	E	$W \cdot m^{-2}$ watt na meter štvorcový	osvetlenie (miera svetla dopadajúceho na plochu) Illuminance	$E_v$	lx (lux, $lm \cdot m^{-2}$ )
hustota vyžiarenia (žiarivého toku) intenzita vyžiarenia Radiant exitance	žiarivý tok vyžarovaný z jednotky plochy	M	$W \cdot m^{-2}$ watt na meter štvorcový	svetlenie (miera svetla vyžarovaného z plochy) Luminous exitance	$M_v$	lx (lux, $lm \cdot m^{-2}$ )
žiarivosť intenzita žiarenia Radiant intensity	žiarivý tok emitovaný do jednotkového priestorového uhla	I	$W \cdot sr^{-1}$ watt na steradián	svietivosť Luminous intensity	$I_v$	cd (kandela)
Vyžarovanie / hustota žiarivého toku Radiance / radiant flux intensity	žiarivý tok emitovaný do jednotkového priestorového uhla na jednotkovú plochu zdroja (premietnutú na kolmú rovinu)	L	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ watt na steradián na meter štvorcový	jas Brightness	$L_v$	nt (nit, $cd \cdot m^{-2}$ )

# Radiometrická kalibrácia

- Výpočet hodnoty spektrálneho vyžarovania  $L$  z digitálneho čísla  $DN$ , ktoré je pôvodnou hodnotou v pixli zaznamenanou senzorom
- $DN_{\lambda} \rightarrow L_{\lambda}$

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})}{QCALMAX - QCALMIN} \times (DN - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$$

- $LMIN$  a  $LMAX$  sú hodnoty spektrálneho vyžarovania pre konkrétne spektrálne pásmo senzora pre minimálnu a maximálnu hodnotu  $DN$  (napr. 1 a 255, pre 8 bitovú škálu).
- $DN$  je hodnota konkrétneho pixla pre ktorý sa výpočet vykonáva,
- $\lambda$  je stredná vlnová dĺžka spektrálneho pásma indikujúca, pre ktoré spektrálne pásmo is výpočet spektrálneho vyžarovania vykonáva, často je iba indexom poradia spektrálneho pásma, pre ktoré treba vyhľadať  $LMIN$ ,  $LMAX$  (napr. Band 1)
- $QCALMAX$  a  $QCALMIN$  sú maximálne a minimálne hodnoty  $DN$ , ktoré pixel môže nadobúdať (napr. 1 a 255 pre 8 bitovú škálu).
- $LMIN$  a  $LMAX$ ,  $QCALMAX$  a  $QCALMIN$  sa nachádzajú v metadách.
- <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook.htmls/chapter11/chapter11.html>

# Príklad z metadát Landsat 8

GROUP = MIN\_MAX\_RADIANCE = LMIN, LMAX

RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_1 = 752.50763  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_1 = -62.14233  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_2 = 770.57697  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_2 = -63.63450  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_3 = 710.08008  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_3 = -58.63865  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_4 = 598.77954  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_4 = -49.44741  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_5 = 366.42322  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_5 = -30.25935  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_6 = 91.12612  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_6 = -7.52522  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_7 = 30.71438  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_7 = -2.53640  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_8 = 677.65363  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_8 = -55.96086  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_9 = 143.20650  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_9 = -11.82604  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_10 = 22.00180  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_10 = 0.10033  
RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_11 = 22.00180  
RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_11 = 0.10033

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})}{QCALMAX - QCALMIN} \times (DN - QCALMIN) + LMIN_{\lambda}$$

GROUP = MIN\_MAX\_PIXEL\_VALUE , QCALMIN, QCALMAX

QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_1 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_1 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_2 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_2 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_3 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_3 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_4 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_4 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_5 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_5 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_6 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_6 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_7 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_7 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_8 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_8 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_9 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_9 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_10 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_10 = 1  
QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_11 = 65535  
QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_11 = 1

Aká je hodnota vyžarovania zaznamenaná v pixli s hodnotou DN = 1234?

$$L_{\text{Band 2}} = [(770.57697 + 63.63450) / (65535 - 1)] * (1234 - 1) + 63.63450 = 79.32991 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$$

# Radiometrická kalibrácia

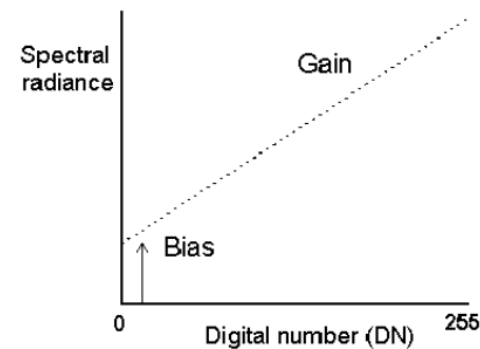
```
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2431E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2729E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1730E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.8915E-03
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.0531E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5053E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.0738E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1194E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3657E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -62.15476
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -63.64723
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -58.65038
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -49.45730
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -30.26540
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.52673
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.53691
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.97205
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.82841
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
```

- $L_{\lambda} = \text{MULT}_{\lambda} * \text{DN} + \text{ADD}_{\lambda}$

- Ak DN = 1234

$\text{MULT}_{\lambda}$  = gain, prírastok L pri zmene DN o 1

$\text{ADD}_{\lambda}$  = systematický posun, hodnota L ak DN = 0



**Figure 3.3.** Calibration of 8-bit satellite data. Gain represents the gradient of the calibration. Bias defines the spectral radiance of the sensor for a DN of zero.

The calibration is given by the following expression for at satellite spectral radiance,  $L_{\lambda}$ :

$$L_{\lambda} = \text{Bias} + (\text{Gain} \times \text{DN}) \quad \text{Equation 3.1}$$

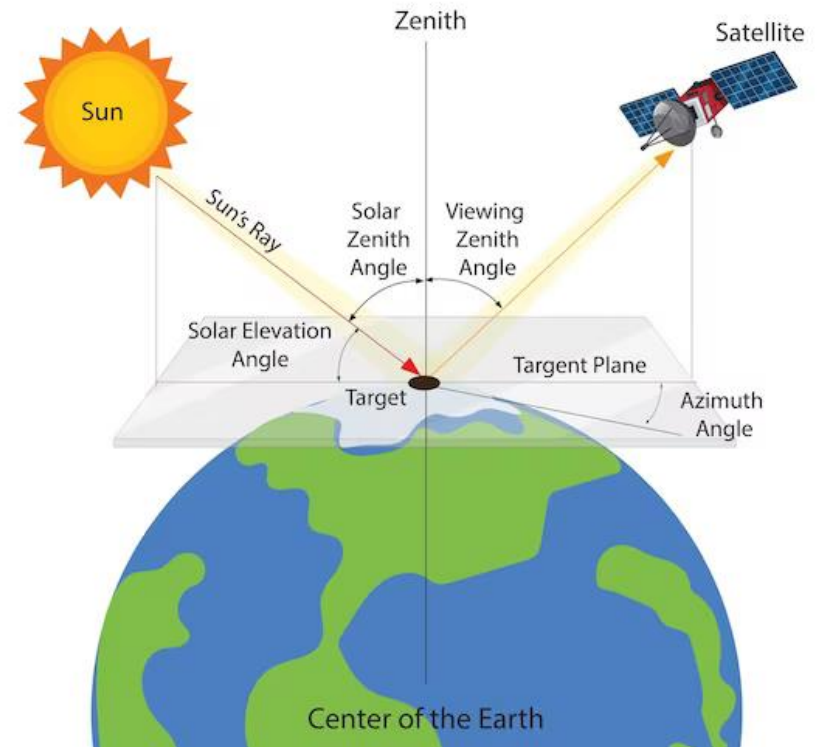
units:  $\text{mW cm}^{-2} \text{ster}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  (for Landsat)

- $L_{\text{Band 2}} = 0.012729 * 1234 - 63.64723 =$

# Výpočet odrazivosti na hranici s atmosférou (TOA, top of atmosphere)

$$R_{TOA} = \frac{\pi * L}{\frac{1}{d^2} * I_{Sun} * \cos\theta_{Sun}}$$

- Odrazivosť je pomerom medzi energiou dopadnutou na povrch a odrazenou energiou od povrchu
- L – vyžarovanie zaznamenané v pixli pre dané spektrálne pásmo
- d – vzdialenosť Zem-Slnko v astronomických jednotkách (AU) pre daný dátum
- $I_{Sun}$  – priemerná extraterrestrická hustota žiarenia (irradiance  $W.m^{-2}$ ) pre strednú vlnovú dĺžku daného spektrálneho pásma na hranici atmosféry
- $\theta_{Sun}$  – solárny zenitový uhol – uhol medzi normálou k zemskému povrchu a slnečným lúčom (smerom k Slnku)
- Pre presný výpočet by bolo ešte potrebné zohľadniť efekt vlastností atmosféry a drsnosti povrchu
- Vypočítajte odrazivosť v pixli, ak jeho  $L = 80 W.m^2.sr^{-1}$ ,  $I_{Sun}$  pre Band 2 je  $1842 W.m^2$  a  $d = 0,98341$  pre 10. deň v roku.



# Vzdialenosť Zem – Slnko v astronomických jednotkách pre jednotlivé dni v roku

Earth-Sun distance (d) in astronomical units for Day of the Year (DOY)

DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d
1	0,98331	61	0,99108	121	1,00756	181	1,01665	241	1,00992	301	0,99359		
2	0,98330	62	0,99133	122	1,00781	182	1,01667	242	1,00969	302	0,99332		
3	0,98330	63	0,99158	123	1,00806	183	1,01668	243	1,00946	303	0,99306		
4	0,98330	64	0,99183	124	1,00831	184	1,01670	244	1,00922	304	0,99279		
5	0,98330	65	0,99208	125	1,00856	185	1,01670	245	1,00898	305	0,99253		
6	0,98332	66	0,99234	126	1,00880	186	1,01670	246	1,00874	306	0,99228		
7	0,98333	67	0,99260	127	1,00904	187	1,01670	247	1,00850	307	0,99202		
8	0,98335	68	0,99286	128	1,00928	188	1,01669	248	1,00825	308	0,99177		
9	0,98338	69	0,99312	129	1,00952	189	1,01668	249	1,00800	309	0,99152		
10	0,98341	70	0,99339	130	1,00975	190	1,01666	250	1,00775	310	0,99127		
11	0,98345	71	0,99365	131	1,00998	191	1,01664	251	1,00750	311	0,99102		
12	0,98349	72	0,99392	132	1,01020	192	1,01661	252	1,00724	312	0,99078		
13	0,98354	73	0,99419	133	1,01043	193	1,01658	253	1,00698	313	0,99054		
14	0,98359	74	0,99446	134	1,01065	194	1,01655	254	1,00672	314	0,99030		
15	0,98365	75	0,99474	135	1,01087	195	1,01650	255	1,00646	315	0,99007		
16	0,98371	76	0,99501	136	1,01108	196	1,01646	256	1,00620	316	0,98983		
17	0,98378	77	0,99529	137	1,01129	197	1,01641	257	1,00593	317	0,98961		
18	0,98385	78	0,99556	138	1,01150	198	1,01635	258	1,00566	318	0,98938		
19	0,98393	79	0,99584	139	1,01170	199	1,01629	259	1,00539	319	0,98916		
20	0,98401	80	0,99612	140	1,01191	200	1,01623	260	1,00512	320	0,98894		
21	0,98410	81	0,99640	141	1,01210	201	1,01616	261	1,00485	321	0,98872		
22	0,98419	82	0,99669	142	1,01230	202	1,01609	262	1,00457	322	0,98851		
23	0,98428	83	0,99697	143	1,01249	203	1,01601	263	1,00430	323	0,98830		
24	0,98439	84	0,99725	144	1,01267	204	1,01592	264	1,00402	324	0,98809		
25	0,98449	85	0,99754	145	1,01286	205	1,01584	265	1,00374	325	0,98789		
26	0,98460	86	0,99782	146	1,01304	206	1,01575	266	1,00346	326	0,98769		
27	0,98472	87	0,99811	147	1,01321	207	1,01565	267	1,00318	327	0,98750		
28	0,98484	88	0,99840	148	1,01338	208	1,01555	268	1,00290	328	0,98731		
29	0,98496	89	0,99868	149	1,01355	209	1,01544	269	1,00262	329	0,98712		
30	0,98509	90	0,99897	150	1,01371	210	1,01533	270	1,00234	330	0,98694		
31	0,98523	91	0,99926	151	1,01387	211	1,01522	271	1,00205	331	0,98676		
32	0,98536	92	0,99954	152	1,01403	212	1,01510	272	1,00177	332	0,98658		
33	0,98551	93	0,99983	153	1,01418	213	1,01497	273	1,00148	333	0,98641		
34	0,98565	94	1,00012	154	1,01433	214	1,01485	274	1,00119	334	0,98624		
35	0,98580	95	1,00041	155	1,01447	215	1,01471	275	1,00091	335	0,98608		
36	0,98596	96	1,00069	156	1,01461	216	1,01458	276	1,00062	336	0,98592		
37	0,98612	97	1,00098	157	1,01475	217	1,01444	277	1,00033	337	0,98577		
38	0,98628	98	1,00127	158	1,01488	218	1,01429	278	1,00005	338	0,98562		
39	0,98645	99	1,00155	159	1,01500	219	1,01414	279	0,99976	339	0,98547		
40	0,98662	100	1,00184	160	1,01513	220	1,01399	280	0,99947	340	0,98533		
41	0,98680	101	1,00212	161	1,01524	221	1,01383	281	0,99918	341	0,98519		
42	0,98698	102	1,00240	162	1,01536	222	1,01367	282	0,99890	342	0,98506		
43	0,98717	103	1,00269	163	1,01547	223	1,01351	283	0,99861	343	0,98493		
44	0,98735	104	1,00297	164	1,01557	224	1,01334	284	0,99832	344	0,98481		
45	0,98755	105	1,00325	165	1,01567	225	1,01317	285	0,99804	345	0,98469		
46	0,98774	106	1,00353	166	1,01577	226	1,01299	286	0,99775	346	0,98457		
47	0,98794	107	1,00381	167	1,01586	227	1,01281	287	0,99747	347	0,98446		
48	0,98814	108	1,00409	168	1,01595	228	1,01263	288	0,99718	348	0,98436		
49	0,98835	109	1,00437	169	1,01603	229	1,01244	289	0,99690	349	0,98426		
50	0,98856	110	1,00464	170	1,01610	230	1,01225	290	0,99662	350	0,98416		
51	0,98877	111	1,00492	171	1,01618	231	1,01205	291	0,99634	351	0,98407		
52	0,98899	112	1,00519	172	1,01625	232	1,01186	292	0,99605	352	0,98399		
53	0,98921	113	1,00546	173	1,01631	233	1,01165	293	0,99577	353	0,98391		
54	0,98944	114	1,00573	174	1,01637	234	1,01145	294	0,99550	354	0,98383		
55	0,98966	115	1,00600	175	1,01642	235	1,01124	295	0,99522	355	0,98376		
56	0,98989	116	1,00626	176	1,01647	236	1,01103	296	0,99494	356	0,98370		
57	0,99012	117	1,00653	177	1,01652	237	1,01081	297	0,99467	357	0,98363		
58	0,99036	118	1,00679	178	1,01656	238	1,01060	298	0,99440	358	0,98358		
59	0,99060	119	1,00705	179	1,01659	239	1,01037	299	0,99412	359	0,98353		
60	0,99084	120	1,00731	180	1,01662	240	1,01015	300	0,99385	360	0,98348		
										361	0,98344		
										362	0,98340		
										363	0,98337		
										364	0,98335		
										365	0,98333		
										366	0,98331		

$I_{Sun}$  – priemerná extraterestrická hustota žiarenia (irradiance  $W.m^{-2}$ ) pre strednú vlnovú dĺžku daného spektrálneho pásma na hranici atmosféry

Recommended Solar Exoatmospheric Spectral Irradiances ( $I_{Sun}$ ) Values (in $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ )				
Band Number	Landsat 7 ETM+	Landsat 5 TM	Landsat 4 TM	Landsat 1-5 MSS
1	1970	1958	1958	1848
2	1842	1827	1826	1588
3	1547	1551	1554	1235
4	1044	1036	1033	856.6
5	225.7	214.9	214.7	-
7	82.06	80.65	80.70	-
8	1369	-	-	-

$$R_{TOA} = \frac{\pi * L}{\frac{1}{d^2} * I_{Sun} * \cos\theta_{Sun}}$$

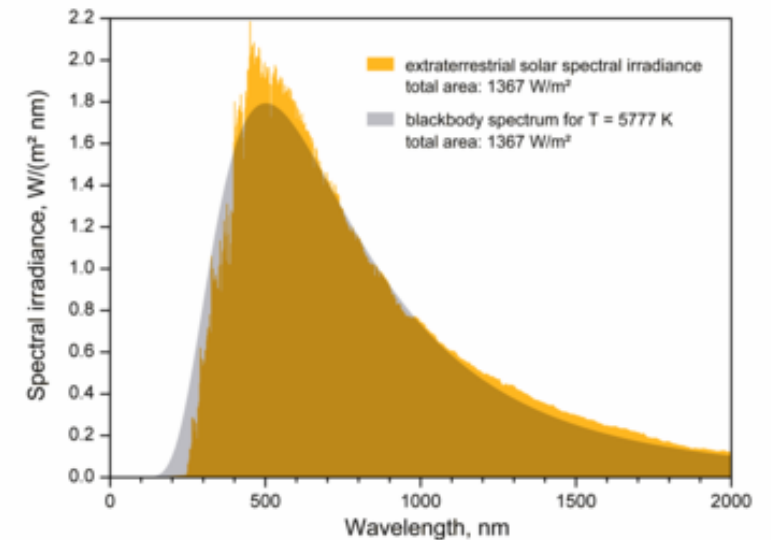
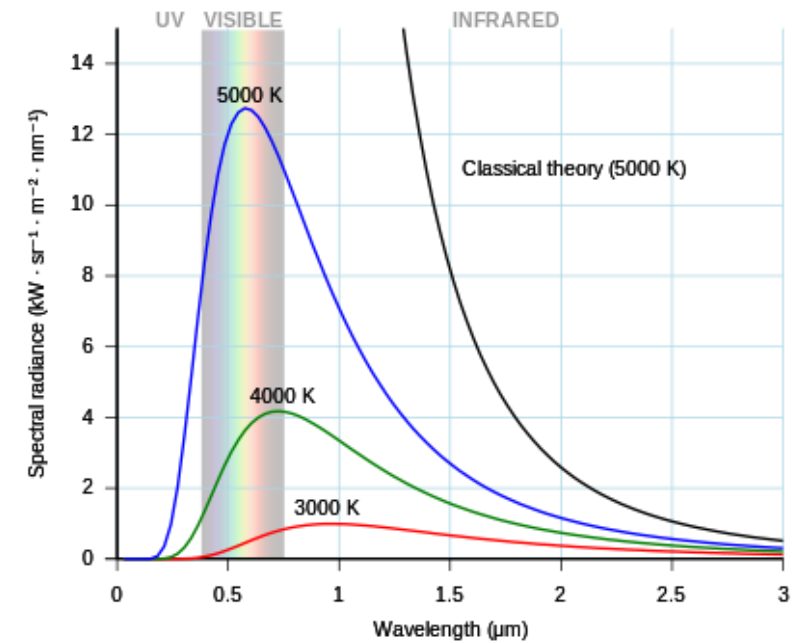
Vypočítajte exoatmosferickú odrazivosť (TOA) v pixli pre Band 2, ak jeho  $L = 200 W.m^{-2}.sr^{-1}$ ,  $I_{Sun}$  pre Band 2 je  $1842 W.m^{-2}$  a  $d = 0,98341$  pre 10. deň v roku, a solárny zenitový uhol  $\theta_{Sun} = 0^\circ$ .



# Planckov zákon

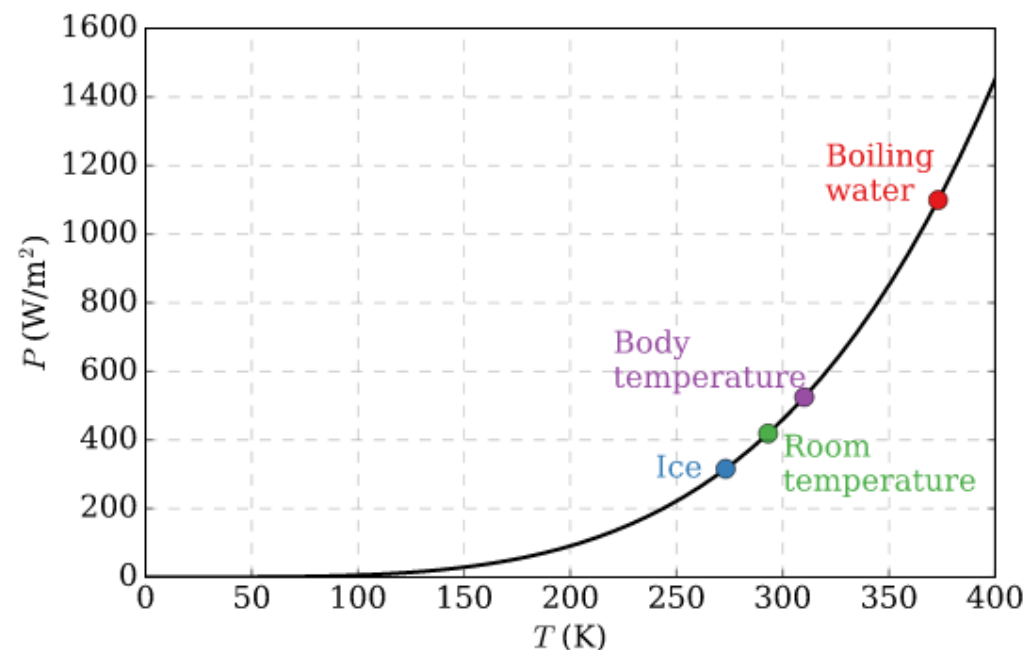
$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

- opisuje vzťah intenzity vyžarovania (L) absolútne čierneho telesa, vlnovej dĺžky žiarenia a teploty tohto telesa
- L - intenzita spektrálneho vyžarovania ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  na meter vlnovej dĺžky ( $\text{m}^{-1}$ ))
- $\lambda$  - vlnová dĺžka,
- T - efektívna teplota telesa,
- h - Planckova konštanta,  $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  ( $\text{W}\cdot\text{s}^2$ )
- c - rýchlosť svetla,
- k -  $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ .



# Stephanov-Boltzmannov zákon

- $M = \sigma \cdot T^4$
- vyjadruje celkový vyžiarený výkon čierneho telesa na jednotku plochy (intenzita vyžarovania vo  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Získame ho integrovaním Plackovho zákona.
- $T$  - je efektívna teplota telesa,
- $\sigma$  – Stephanova-Boltzmannova konštanta,  
 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
- Vypočítajte energiu vyžarovanú celým povrchom Slnka, ak jeho polomer je  $6.96 \times 10^8 \text{ m}$  a teplota jeho povrchu je  $5770 \text{ K}$ .



# Wienovo posuvné pravidlo

- $\lambda_{\max} = b/T$ ,  $b = T \cdot \lambda_{\max}$
- definuje vlnovú dĺžku, pri ktorej krivka Planckovho zákona dosahuje maximum, teda čierne teleso dosahuje maximálne vyžarovanie
- súčin teploty a vlnovej dĺžky, v ktorej teleso vyžaruje najviac, je konštantný
- $\lambda_{\max}$  - je vlnová dĺžka maximálneho vyžarovania,
- $T$  - je efektívna teplota čierneho telesa,
- $b$  - Wienova posuvná konštanta  $\approx 2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$
- Vypočítajte vlnovú dĺžku, pri ktorej teleso s teplotou 1000 K (lesný požiar) dosahuje maximálne vyžarovanie.
- Aká je teplota telesa, ak dosahuje maximálne vyžarovanie pri vlnovej dĺžke 500 nm?

