

# Záření absolutně černého tělesa

## Teplotní záření

Všechny látky libovolného skupenství vydávají elektromagnetické záření, které je způsobeno termickým pohybem jejich nabitých částic. Toto záření se nazývá **teplotní záření**. Při teplotách menších než 530°C tělesa vyzařují pouze v infračervené oblasti a jejich záření není viditelné. Při teplotách nad 530°C se ve spektru objevují i viditelné vlnové délky a s rostoucí teplotou roste intenzita tohoto záření a těleso září na stále kratších vlnových délkách.

## Definice veličin

Energii, kterou povrch tělesa vyzařuje do prostoru za jednotku času, nazýváme **zářivý tok  $\Phi$**  a měříme ji ve wattech. Zářivý tok samozřejmě závisí na velikosti povrchu tělesa, a proto zavádíme veličinu **intenzita vyzařování  $H$** , která je definována jako zářivý tok  $\Phi$  z nějaké plošky  $S$ , vydělený touto ploškou

$$H = \frac{\Phi}{S}. \quad (24.1)$$

Intenzita vyzařování se měří ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Intenzita vyzařování sice popisuje celkové množství energie vyzařené z jednotky plochy za jednotku času, ale nepodává žádnou informaci, jak je tato energie rozdělena mezi vlnové délky. Proto se zavádí **spektrální hustota intenzity vyzařování  $H_\lambda$**

$$H_\lambda = \frac{dH}{d\lambda}, \quad (24.2)$$

kteřá udává podíl energie, která se vyzařuje z jednotky plochy za jednotku času na intervalu vlnových délek od  $\lambda$  do  $\lambda+d\lambda$  a šířky tohoto intervalu  $d\lambda$ .

## Pohltivost

Těleso záření nejen vyzařuje, ale může i dopadající záření pohlcovat. Poměr energie tělesem pohlcené k energii na těleso dopadající nazýváme **pohltivost** a značíme  $\alpha$ . Těleso s nulovou pohltivostí 0 nepohlte žádné dopadající záření (vše projde nebo se odrazí) a těleso s pohltivostí 0,2 pohltí 20 % dopadajícího záření. Těleso s pohltivostí 1 pohltí veškeré dopadající záření a nazývá se proto **absolutně černé těleso**.

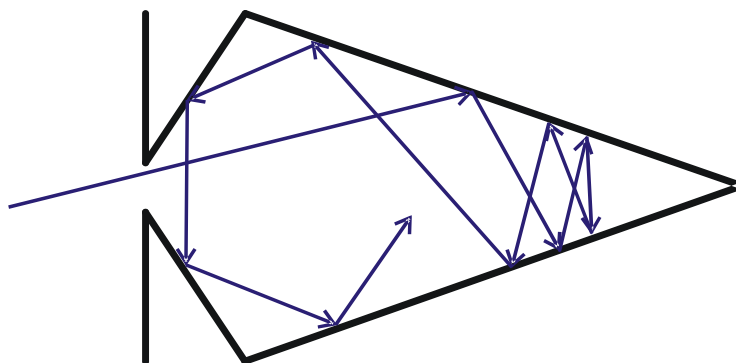
Abychom objasnili, proč v kapitole o záření těles najednou mluvíme o pohltivosti, pokusme se odvodit, zda souvisí pohltivost s vyzařováním. Předpokládejme, že máme dvě tělesa o stejné teplotě, která si mohou vyměňovat energii pouze zářením (obr. 24.1). Těleso A má velkou pohltivost a těleso B malou. Těleso A pohltí velkou část energie vyzařovanou tělesem B, zatímco těleso B většinu energie, která na něj dopadá z tělesa A odrazí zpět na A. Podle druhého zákona termodynamiky nemůže teplo samovolně přecházet z chladnějšího tělesa na teplejší. Tělesa A a B jsou v tepelné rovnováze a musí v ní setrvat. To znamená, že těleso A, které hodně energie pohltí, jí musí mnoho i vyzařit, zatímco těleso B musí vyzařovat málo, protože málo energie přijímá. Platí tedy závěr, že **čím větší má těleso pohltivost, tím víc vyzařuje**. Absolutně černé těleso má největší intenzitu vyzařování ze všech těles o stejné teplotě. Těleso o pohltivosti  $\alpha$  má intenzitu vyzařování  $H_\alpha$ , která je jen  $\alpha$  ve srovnání s intenzitou vyzařování absolutně černého tělesa  $H_{ač}$ ,



Obr. 24.1: Pohltivost

$$H_\alpha = \alpha H_{ač}. \quad (24.3)$$

Absolutně černé těleso přesně vzato neexistuje, protože každý povrch aspoň malou část dopadajícího záření odrazí. Absolutně černé těleso lze aproximovat malým otvorem do dutiny se začerněnými vnitřními stěnami (obr. 24.2). Záření, které projde otvorem dovnitř, se po několika odrazech na stěnách dutiny zeslabí natolik, že se z dutiny prakticky žádné nedostane ven.



Obr. 24.2: Realizace absolutně černého tělesa.

Vzhledem k tomu, že existují pigmenty, které některé vlnové délky pohlcují a jiné odráží, je zřejmé, že pohltivost  $\alpha$  závisí na vlnové délce. Tělesa, u kterých lze pohltivost na dostatečně širokém intervalu vlnových délek považovat za konstantní, nazýváme šedé zářiče.

## Stefanův-Boltzmannův zákon

Slovinský matematik, fyzik a básník Jožef Stefan (1835-1893) zjistil v roce 1879 měřením intenzity vyzařování kuželové dutiny, že intenzita vyzařování je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Jeho žák, Ludwig Boltzmann (1844-1906), odvodil na základě představy, že se záření uvnitř dutiny chová jako ideální plyn, teoreticky tuto závislost v roce 1884. Pro absolutně černé těleso platí

$$H = \sigma T^4, \quad (24.4)$$

kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta. Vztah (24.4) umožňuje vypočítat celkovou energii vyzařovanou libovolným tělesem o teplotě  $T$  z jednotky plochy za jednotku času. Nic ale neříká o rozdělení této energie mezi různé vlnové délky.

Ze solární konstanty (množství energie, která dopadá za sekundu ze Slunce na  $1 \text{ m}^2$  Země kolmý k dopadajícímu záření)  $1350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , vzdálenosti Země od Slunce a poloměru Slunce lze odhadnout povrchovou teplotu Slunce na  $5900 \text{ K}$ .

## Wienův zákon

Na základě termodynamických úvah odvodil Wilhelm Wien (1864-1928) v roce 1896 Wienův posunovací zákon pro vlnovou délku  $\lambda_{\text{max}}$ , na které je spektrální hustota intenzity vyzařování  $H_\lambda$  maximální.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b, \quad (24.5)$$

kde  $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ . S rostoucí teplotou zářiče se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování přesouvá ke kratším vlnovým délkám. Při teplotě  $300 \text{ K}$  ( $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) je maximum  $H_\lambda$  na vlnové délce přibližně  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , při zvýšení teploty na  $800 \text{ K}$  ( $528 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se maximum posune na  $3,6 \text{ }\mu\text{m}$  a ve spektru začne být pozorovatelný podíl vlnových délek z viditelné oblasti spektra. Při dalším zvyšování teploty se vlnová délka maxima stále zkracuje a ve spektru záření je stále větší podíl vlnových délek z viditelné oblasti. Slunce při teplotě  $5700 \text{ K}$  má maximum na vlnové délce  $500 \text{ nm}$ , která odpovídá přibližně středu viditelné oblasti světla. Můžete přemýšlet, proč se teploty Slunce v této a předchozí kapitole liší o  $200 \text{ K}$ .

## Planckův zákon

Odvození závislosti  $H_\lambda$  na vlnové délce dlouho naráželo na konci 19. století na nepřekonatelné problémy. Správný matematický tvar závislosti uhadl v srpnu 1900 Max Planck (1858-1947) a v následujícím roce se mu ji podařilo i odvodit. Při odvození opustil tehdy platný předpoklad, že energie je libovolně dělitelná, a použil Planckovu kvantovou hypotézu:

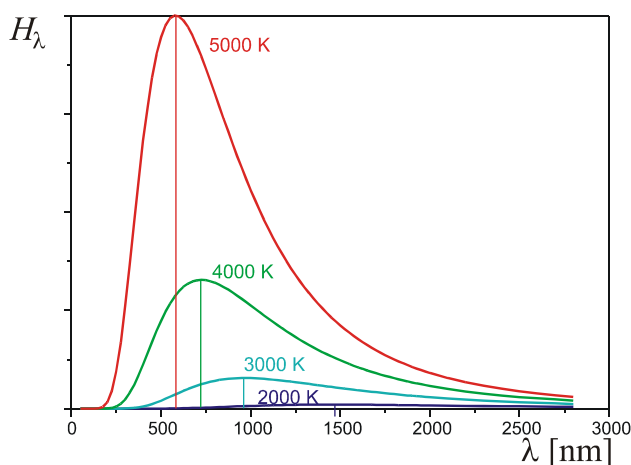
Emise a absorpce zářivé energie se může dít jen po celistvých násobcích kvanta  $E = hf$ ,

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s je Planckova konstanta a  $f$  vlastní frekvence oscilátoru. Spektrální hustota intenzity vyzařování je dána vztahem

$$H_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp(hc / \lambda kT) - 1)}, \quad (24.6)$$

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s je Planckova konstanta,  $c = 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup> rychlost světla,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> Boltzmannova konstanta,  $T$  absolutní teplota a  $\lambda$  vlnová délka záření. Planck svou kvantovou hypotézu považoval spíše za matematický trik vedoucí ke správnému řešení než za fyzikální princip. Albert Einstein (1879-1955) však dokázal svým vysvětlením fotoelektrického jevu, že energie světla je skutečně kvantována podle Planckovy kvantové hypotézy. Tato kvanta elektromagnetického záření se nazývají **fotony**.

Grafické znázornění Planckova zákona pro čtyři různé teploty je na obrázku 24.3. Dále si ukážeme některé souvislosti Planckova zákona.



Obr. 24.3: Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce pro čtyři různé teploty.

## Stefanův-Boltzmannův zákon

Podle (24.2) je intenzita vyzařování  $H$  integrálem  $H_\lambda$ , tedy plochou pod křivkou v grafu 24.3. Tato plocha je podle 24.4 úměrná čtvrté mocnině teploty. Například poměr dvou nejvyšších teplot v grafu 24.3 je  $5000/4000 = 1,25$ . Poměr ploch pod červenou a zelenou křivkou je  $1,25^4 = 2,44$ .

## Wienův zákon

Wienův zákon (vztah 24.5) určuje polohu maxima na křivce spektrální hustoty intenzity vyzařování. Na obrázku 24.3 je dobře patrné, jak se maximum  $H_\lambda$  s rostoucí teplotou posouvá k nižším vlnovým délkám.

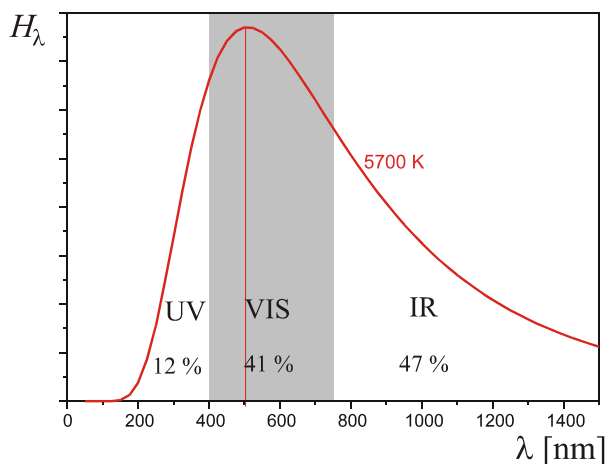
## Slunce a oko

Slunce má povrchovou teplotu asi 5700 K. Závislost  $H_\lambda(\lambda)$  pro tuto teplotu je vynesena na obrázku 24.4 s vyznačením viditelné oblasti spektra. Na ultrafialové (UV) záření připadá pouze 12 %, na viditelné (VIS) 41 % a na infračervené (IR) zbylých 47 % energie. Maximum energie vyzářené Sluncem připadá na vlnovou délku asi 500 nm, kde je také lidské oko nejcitlivější. Při pohledu na úzký interval viditelného záření v elektromagnetickém spektru (obr. 20.1) každého napadne, proč není tento interval širší. Rozšířením do ultrafialové oblasti

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky



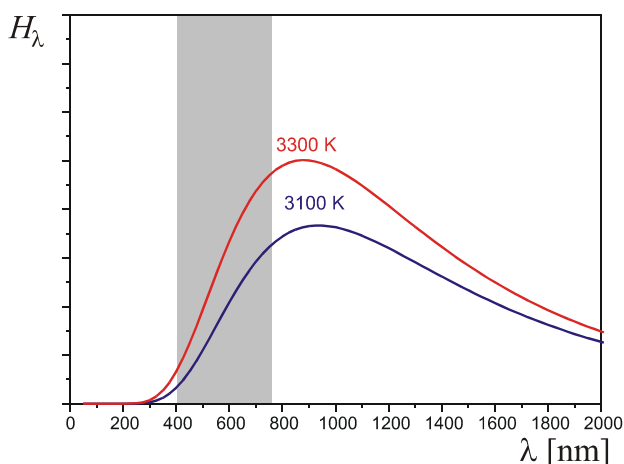
bychom nic nezískali, na UV záření připadá jen 12 % energie vyzářené Sluncem a navíc je toto záření silně pohlcováno v atmosféře. Prostudujme nyní důsledky změny rozsahu viditelného záření do infračervené oblasti. Teplota lidského těla je 310 K. Intenzita vyzařování při této teplotě je  $523 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z toho na oblast vlnových délek kratších než 750 nm připadá  $2,7\cdot 10^{-20} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Energie fotonu pro  $\lambda = 750 \text{ nm}$  je  $2,6\cdot 10^{-19} \text{ J}$ . To znamená, že člověk vyzáří z  $1 \text{ m}^2$  asi jeden foton z viditelné oblasti za 10 s, tedy prakticky nic. Na oblast vlnových délek kratších než 1000 nm připadá  $6,3\cdot 10^{-14} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a tomu odpovídá asi 200 000 fotonů. To znamená, že na vlnových délkách 750 – 1000 nm člověk začíná zářit (maximum je až na 10000 nm). Nemá-li tedy vnímat záření, které sám vydává, nelze rozšířit viditelnou oblast ani do infračervené.



Obr. 24.4: Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce pro Slunce. Šedý pás znázorňuje viditelnou oblast.

## Žárovka

Světlo klasické žárovky vzniká na rozžhaveném vlákne. Aby se účinnost (množství světla na watt příkonu) žárovky co nejvíc blížila účinnosti Slunce, je třeba dosáhnout co nejvyšší teploty vlákna. První prakticky použitelnou žárovku zkonstruoval Thomas Alva Edison (1847–1931) v roce 1879, její vlákno bylo tvořeno zuhelnatělým kouskem bambusu a bylo umístěno ve skleněné baňce, ze které byl vyčerpán vzduch. Později byl uhlík nahrazen wolframem. Wolfram patří k nejhůře tavitelným kovům, jeho teplota tání je 3695 K. Teplota dvojitě vinutého vlákna žárovky je asi 3100 K a teplota vlákna halogenové žárovky může dosáhnout až 3300 K. Halogenová žárovka je totiž plněna plynem s příměsí halogenu (např. methylenbromid), který vrací odpařený wolfram zpět na vlákno. Navíc má wolfram výhodu, že nezáří jako absolutně černé těleso, ale v jeho spektru je více krátkých vlnových délek jako by teplota vlákna byla vyšší. Planckův zákon pro standardní a halogenovou žárovku je na obrázku 24.5. Je patrné, že obě žárovky září zejména v infračervené oblasti a na viditelnou oblast připadá pouze 12 % vyzářeného výkonu u standardní žárovky a 15 % u halogenové (teď neuvažujeme, že citlivost lidského oka k okrajům viditelné oblasti klesá). Účinnost halogenové žárovky je o něco vyšší. Přesto je účinnost žárovek poměrně nízká a probíhá jejich nahrazování zářivkami, které potřebují k dosažení stejného osvětlení pětinu energie. Hitem poslední doby jsou světelné diody, jejichž účinnost je až desetinásobkem účinnosti žárovky a dvojnásobkem zářivky.



Obr. 24.5: Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce pro standardní žárovku (3100 K) a halogenovou žárovku (3300 K). Šedý pás znázorňuje viditelnou oblast.

V dubnu 2007 kanadská vláda oznámila, že do roku 2012 hodlá zakázat klasické žárovky a tím přispět k obrovskému snížení emisí oxidu uhličitého. V souvislosti s tím, co jsme uvedli o účinnosti žárovky výše to vypadá jako rozumný krok. Je třeba si však uvědomit, že zářivky špatně snášejí časté zapínání a například na schodiště jsou zpravidla špatnou volbou. Žárovky také na rozdíl od zářivek neobsahují škodlivé kovy a nepřinášejí takové problémy s likvidací. Navíc se uvádí, že na osvětlení se používá asi 5 % vyrobené elektrické energie a tedy s obrovským snížením emisí to také nebude úplně pravda. Nejsem nekritickým přítelem žárovek a doma máme klasické žárovky jen v koupelně a na WC, ale myslím si, že co předvedli v Kanadě je klasickým příkladem toho, co dokáže ekologičtější, když dosáhne moci vydávat zákony.

## Skleníkový jev

V poslední době často diskutovaný skleníkový jev úzce souvisí se zářením černého tělesa. Atmosféra je (podobně jako sklo ve skleníku) dobře propustná pro viditelné záření, ale některé plyny v atmosféře obsažené (zejména vodní pára, kysličník uhličitý, metan) pohlcují a odráží infračervené záření. Slunce má povrchovou teplotu kolem 5700 K a září především ve viditelné oblasti. Sluneční záření tedy snadno prochází atmosférou. Dopadá na povrch Země a velká část záření se pohltí. Povrch Země má teplotu kolem 300 K a září především v infračervené oblasti, pro kterou je atmosféra špatně propustná. Viditelné světlo tak prochází na povrch Země velmi snadno, ale infračervené pak nemůže unikat zpět do Vesmíru. Povrch Země a atmosféra se proto otepluje. Skleníkový jev způsobuje, že je na Zemi asi o 33 °C tepleji, než odpovídá množství energie dopadající ze Slunce.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem  
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ