

# Základy optoelektroniky

Letný semester 2011

# Zdroje svetla

- Z fyzikálneho hľadiska je rozumnejšie považovať za
- a) prirodzené zdroje svetla také objekty, v ktorých spomínané procesy (excitácia a relaxácia elektrónov v atómovom obale) prebiehajú v jednotlivých atómoch žiariaceho objektu nekoordinovane,
- b) pôvodne sa v prírode nevyskytujúce zdroje svetla také objekty, v ktorých k vyžarovaniu jednotlivých atómov dochádza tak, že fáza svetelných vln vyžiarených rôznymi atómami je tá istá. Takéto zdroje sa nazývajú **lasery**

# Zdroje svetla

- Podľa spôsobu, akým je budené svietiace teleso rozlišujeme tri hlavné kategórie svetelných zdrojov:
  - a) teplotné zdroje,
  - b) výbojové zdroje,
  - c) luminiscenčné zdroje.

# Zdroje svetla

- **Teplotné zdroje** vyžarujú svetlo ako súčasť svojho teplotného žiarenia, ale ak majú slúžiť ako zdroje svetla potom je dôležité, aby čo najväčšia časť ich žiarenia pripadla na viditeľnú oblasť spektra. Je preto nutné, aby zdroj žiaril pri dost' vysokej teplote a takisto, že svietiaci látka musí mať čo najväčšiu pohltivosť vo viditeľnej časti spektra. Týmto požiadavkám vyhovujú v podstate látky pevného a kvapalného skupenstva. Pre takéto zdroje je charakteristické, že vyžarujú „spojité spektrum“, t.j., že ich spektrum obsahuje všetky vlnové dĺžky .

# Zdroje svetla

- **Výbojové zdroje** sa líšia od teplotných zdrojov hlavne tým, že ich svetlo nemá spojité spektrum a navyše u týchto zdrojov prakticky chýba dlhovlnná časť spektra, preto sa ich svetlo nazýva studené. Látkou vhodnou pre tieto zdroje sú veľmi zriedené plyny budené zrážkami atómov spravidla s elektrónmi urýchlenými elektrickým poľom.

# Zdroje svetla

- Pod luminiscenciou rozumieme svetelné žiarenie, ktoré vydávajú látky pod účinkom rôznych vplyvov: pôsobením UV žiarenia, chemickými procesmi, elektrickým poľom a pod.
- Luminiscencia – je prebytok nad tepelným žiarením látky v tom prípade, keď toto nadbytočné žiarenie má konečnú dĺžku trvania, ktorá značne prevyšuje periódu svetelných kmitov (S. I. Vavilov).
- Táto definícia odlišuje luminiscenciu od rovnovážneho tepelného žiarenia látky a oprávňuje zaradiť ju k súboru nerovnovážnych žiarení.

# Zdroje svetla

- Kritériom pri klasifikácii luminiscencie býva najčastejšie pôvod excitačnej energie:
- fotoluminiscencia
- katódoluminiscencia
- rádioluminiscencia
- elektroluminiscencia
- triboluminiscencia
- chemoluminiscencia
- bioluminiscencia

# Zdroje svetla

## Charakteristiky luminiscencie

- Luminiscenciu, rovnako ako ktorékoľvek elektromagnetické žiarenie, môžeme charakterizovať:
- Intenzitou
- Spektrálnym zložením
- Polarizáciou
- Koherentnosťou
- Dobou trvania dodatočného svetielkovania



# Zdroje svetla

- Zdroje žiarenia môžeme deliť aj podľa ďalších kritérií, nie len podľa pôvodu alebo spôsobu budenia látky.
- z hľadiska charakteru spektra rozlišujeme zdroje so **spojitým, čiarovým alebo zmiešaným spektrom**
- ak má pre nás z nejakého dôvodu význam napríklad len šírka spektra, hovoríme buď o **širokospektrálnych** alebo **úzkospektrálnych** zdrojoch žiarenia.
- ak si všímame napríklad fyzikálne rozmery zdroja, môžeme hovoriť o **bodových** alebo **plošných** zdrojoch.

# Fotometrické veličiny

- Bežnými svetelnými zdrojmi, či už prirodzenými alebo umelými, sú v podstate telesá zohriate na vysokú teplotu. Žiarenie takéhoto zdroja pozostáva z rôznych vlnových dĺžok, ale len istá časť žiarivej energie zdroja je schopná vzbudiť u človeka zrakový vnem. Veličiny, ktoré vystihujú schopnosť žiarenia vzbudiť zrakový vnem a poskytujú informáciu o tom ako oko zhodnotí žiarivú energiu, ktorá doňho vstupuje zo žiariča, sa nazývajú **fotometrické**.

# Fotometrické veličiny

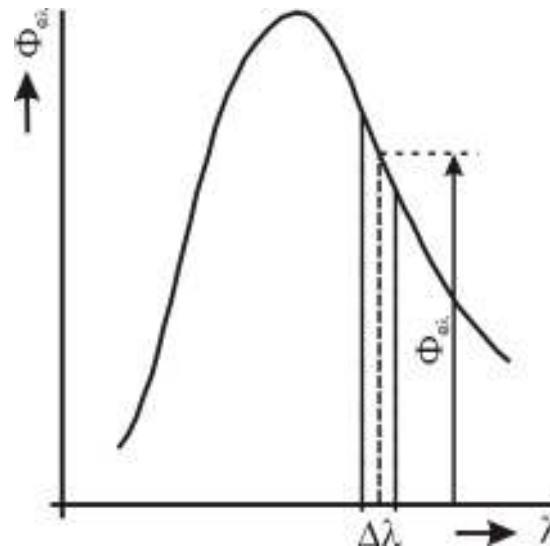
- Žiarivá energia  $W_e$  prechádzajúca nejakou plochou za jednotku času sa nazýva **žiarivý tok** touto plochou a označuje sa  $\Phi_e$ . Žiarivý tok teda udáva výkon prenášaný žiarením

$$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt}$$

# Fotometrické veličiny

- Rozdelenie celkovej energie na konkrétne vlnové dĺžky závisí od pôvodu žiarenia, teploty zdroja a ďalších faktorov. Z toho dôvodu má zmysel definovať tzv. **spektrálnu hustotu žiarivého toku**  $\Phi_{e\lambda}$ , ktorá určuje žiarivý tok pripadajúci na interval vlnových dĺžok jednotkovej veľkosti

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$$



# Fotometrické veličiny

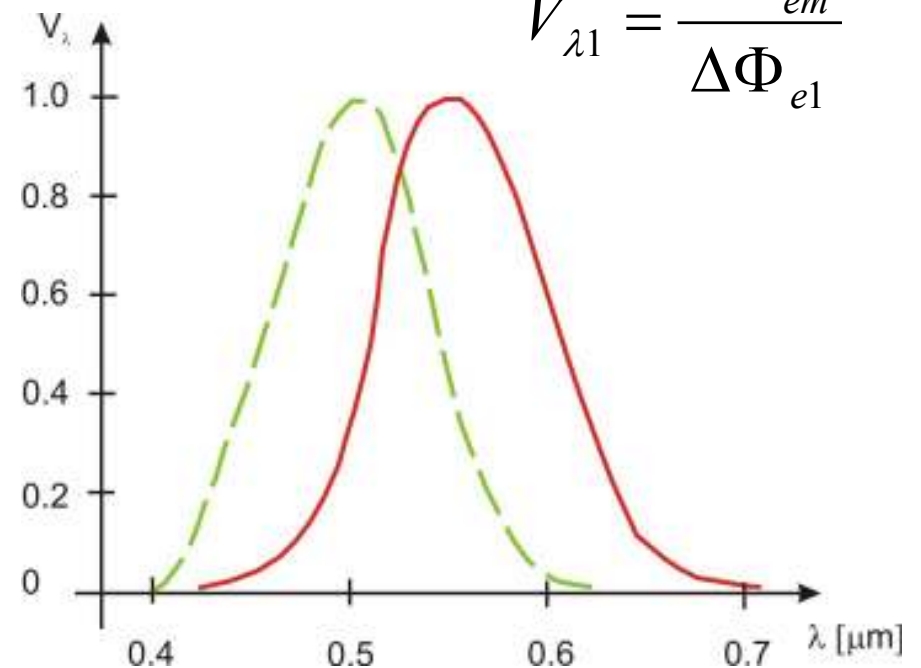
- Z celkového žiarivého toku zdroja len istá časť má schopnosť vzbudiť zrakový vnem.
- Veľkosť tejto časti v pomere k celkovému žiarivému toku závisí od teploty zdroja.
- Naše oko nie je rovnako citlivé pre všetky vlnové dĺžky ani vo viditeľnej časti elektromagnetického spektra. (Najcitlivejšie je na žltozelené svetlo s vlnovou dĺžkou 555 nm.)

# Fotometrické veličiny

- Citlivosť oka na svetlo s vlnovou dĺžkou  $\lambda_1$  v porovnaní s maximálnou citlivosťou na svetlo s vlnovou dĺžkou  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$  sa vyjadruje tzv. **pomernou svetelnou účinnosťou jednofarebného žiarenia**

$$V_{\lambda_1} = \frac{\Delta\Phi_{em}}{\Delta\Phi_{e1}}$$

- Pomerná svetelná účinnosť  $V_{\lambda}$  umožňuje vyjadriť ako ľudské oko zhodnotí žiarivý tok pripadajúci na oblasť viditeľného žiarenia.



# Fotometrické veličiny

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad V_{\lambda 1} = \frac{\Delta\Phi_{em}}{\Delta\Phi_{e1}}$$

$$d\Phi_{em} = V_{\lambda} d\Phi_e = V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

ekvivalentný diferenciálny tok žiarenia s vlnovou dĺžkou  $\lambda_m$ , ktorý v oku vyvolá rovnako silný zrkový vnem ako tok žiarenia  $d\Phi_e$  s vlnovou dĺžkou  $\lambda$ .

# Fotometrické veličiny

- Integráciou predchádzajúceho vzťahu dostaneme celkový tok žiarenia  $\Phi$  s vlnovou dĺžkou  $\lambda_m$ , ktorý v oku budí rovnako intenzívny zrakový vnem ako zdrojom vysielaný celkový žiarivý tok, ktorý zdroj vysiela na všetkých vlnových dĺžkach

$$\Phi = \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

- z hľadiska intenzity zrakového vnemu pociťuje oko žiarivý tok  $\Phi_e$  ako taký tok žiarenia  $\Phi$  s vlnovou dĺžkou  $\lambda_m$  (na ktorú je nacistlivejšie), ktorý v ňom vyvoláva rovnako silný vnem ako tok  $\Phi_e$



# Fotometrické veličiny

- Žiarivý tok  $\Phi$ , charakterizujúci zhodnotenie výkonu prenášaného žiarením ľudským okom s prihliadnutím na odlišnú citlivosť na farbu, nazývame **svetelným tokom**.
- Podľa medzinárodnej dohody je jednotkou svetelného toku **lumen** (lm). Je to svetelný tok, ktorý vysiela absolútne čierne teleso do celého polpriestoru pri teplote tuhnutia platiny ( $1772\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri tlaku  $1,0131 \cdot 10^5\text{ Pa}$ ) plochou s veľkosťou  $5,305 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2$ .
- Pod pojmom „absolútne čierne teleso“ máme na mysli taký objekt, ktorého koeficient odrazu pre všetky vlnové dĺžky je rovný nule.

# Fotometrické veličiny

- Pre absolútne čierne teleso je závislosť spektrálnej hustoty žiarivého toku od vlnovej dĺžky daná Planckovým vyžarovacím zákonom (bude uvedený neskôr). Dosadením tejto závislosti do integrálu  $\Phi = \int_0^{\infty} V_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda$  pre teplotu tuhnutia platiny a jeho vyčíslením dostaneme

$$\Phi = 0,00147 \text{ W} = 1 \text{ lm} \quad \text{alebo} \quad 1 \text{ W} = 680 \text{ lm},$$

čo sú prevodové vzťahy medzi jednotkou svetelného toku lumen a jednotkou watt.

# Fotometrické veličiny

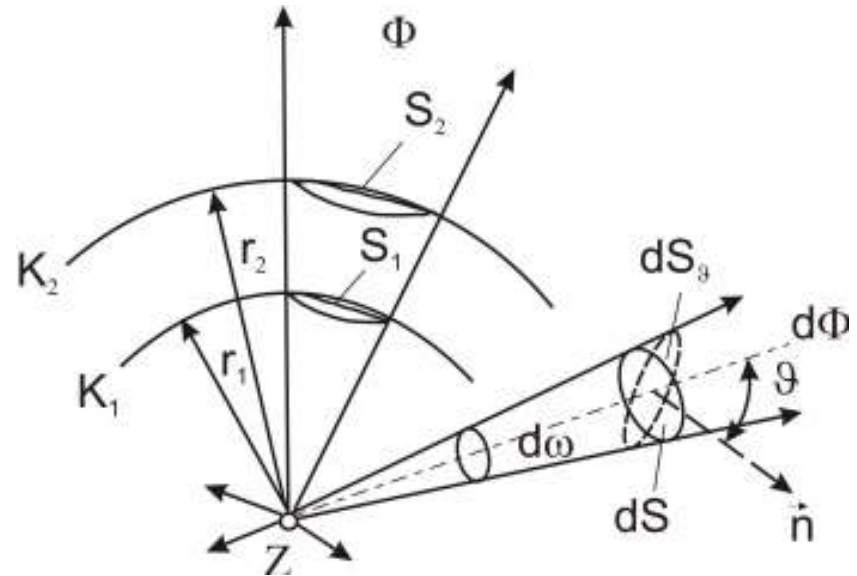
- Pomer svetelného toku  $\Phi$  k príslušnému žiarivému toku  $\Phi_e$  tou istou plochou sa nazýva svetelná účinnosť žiarenia

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e}$$

# Fotometrické veličiny

- Bodový zdroj
- Podiel elementárneho svetelného toku  $d\Phi$  a elementárneho priestorového uhla  $d\omega$  definuje fotometrickú veličinu **svietivosť bodového zdroja**

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$



# Fotometrické veličiny

- Pomocou svietivosti  $I$  vieme vyjadriť ako sa svetelný tok  $\Phi$  vysielaný zdrojom rozloží do jednotlivých smerov v priestore.
- Jednotkou svietivosti je **kandela** (cd), ktorá je definovaná ako 1/60 kolmej svietivosti centimetra štvorcového čierneho telesa pri teplote tuhnutia platiny (1772 °C pri tlaku  $1,0131 \cdot 10^5$  Pa).

# Fotometrické veličiny

- Ak na povrch telesa dopadá svetelný tok  $\Phi$ , potom pomer časti tohto toku  $d\Phi$  dopadajúceho na plošný element  $dS$  povrchu a veľkosti tohto plošného elementu nazývame **intenzitou osvetlenia** alebo **osvetlením**

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

- Jednotkou osvetlenia je **lux** (lx), čo je osvetlenie, pri ktorom na plochu  $1\text{m}^2$  dopadá rovnomerne rozložený svetelný tok 1 lumenu.

# Fotometrické veličiny

- Ak vynásobíme osvetlenie plochy dobou, počas ktorej osvetlenie trvá, dostaneme veličinu, ktorú nazývame **expozícia** (osvit) plochy

$$e = Et$$

- Jednotkou je **luxsekunda** (lxs), teda osvit plochy pri jej osvetlení 1 luxom po dobu 1 sekundy

# Fotometrické veličiny

- Plošný zdroj

Objekt považujeme za plošný zdroj, ak rozmery žiariacej časti (plochy) nie sú zanedbateľné voči vzdialenosti, z ktorej zdroj pozorujeme alebo v ktorej vyšetrujeme rádiometrické prípadne fotometrické veličiny vzťahujúce sa na daný zdroj

Ak si však na povrchu takého zdroja vymedzíme veľmi malú plošku  $\Delta S$ , môžeme ju považovať za bodový zdroj a definovať jej svietivosť podobne ako u bodového zdroja





# Fotometrické veličiny

- Ak svietivosť izotropného rovinného svetelného zdroja v každom jeho bode klesá s kosínusom uhla odklonu od kolmice k ploche zdroja, vyjadrujeme ju tzv. Lambertovým zákonom  $\Delta I_g = \Delta I_n \cos \vartheta$
- Zdroje, ktoré žiaria podľa tohto zákona sa nazývajú **kosínusové (lambertovské) žiariče**.

# Fotometrické veličiny

- Podielom svietivosti  $\Delta I_g$  plôšky v smere danom uhlom  $\mathcal{G}$  a zdanlivej veľkosti  $\Delta S_g$  plôšky je definovaný jas  $L_g$  plošného zdroja v danom mieste a v smere danom uhlom  $\mathcal{G}$

$$L_g = \frac{\Delta I_g}{\Delta S_g} = \frac{\Delta I_n \cos \mathcal{G}}{\Delta S \cos \mathcal{G}} = L_n$$

- Vidíme, že jas nezávisí od orientácie, t.j. odkiaľ sa na rovnomerne vyžarujúci zdroj pozeráme. Jas nezávisí od rozmerov zdroja a ani od jeho vzdialenosti od oka, pretože je priamo úmerný svietivosti, ktorá sa so vzdialenosťou nemení.

# Fotometrické veličiny

- Jednotkou jasů je **nit** (nt), čo je jas roviny, ktorej plocha  $1\text{m}^2$  má kolmú svietivosť rovnú 1 kandeľe (teda  $1\text{nt} = \text{cdm}^{-2}$ )
- Vo fotometrii majú najväčší význam matné (nelesklé) povrchy, ktoré majú odrazivosť (pomer odrazeného svetelného toku k dopadajúcemu toku) pre všetky farby blízku jednej. Čím drsnejší je povrch, tým viac sa rozloženie jasů takéhoto telesa blíži rozloženiu podľa Lambertovho zákona

# Fotometrické veličiny

- Poslednou fotometrickou veličinou je **svetlenie** alebo **intenzita svetlenia**. Je určená podielom svetelného toku  $d\Phi$ , ktorý malá plôška  $dS$  vysiela okolo zvoleného miesta do celého polpriestoru, a veľkosťou tejto plôšky

$$H = \frac{d\Phi}{dS}$$

- Svetlenie sa číselne rovná svetelnému toku, ktorý plocha jednotkovej veľkosti vyžaruje do celého polpriestoru. Je definované rovnakým podielom ako osvetlenie, ale obidve veličiny sa od seba odlišujú tým, že svetlenie závisí od svetelného toku, ktorý plôška  $dS$  vysiela, ale osvetlenie na toku, ktorý na plôšku dopadá.

# Rádiometrické veličiny

- Vychádzajúc zo žiarivého toku, môžeme rovnakým spôsobom ako sme definovali fotometrické veličiny, definovať analogické energetické (**rádiometrické**) veličiny. Tieto sa od fotometrických líšia len tým, že nesúvisia so schopnosťou budiť zrakový vnem.
- Intenzite osvetlenia (svetleniu) odpovedá rádiometrická veličina **intenzita vyžarovania**  $H_e$ , definovaná podielom žiarivého toku  $d\Phi_e$ , ktorý vyžaruje malá ploška  $dS$  zdroja do celého polpriestoru a veľkosti tejto plošky

$$H_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$$

# Rádiometrické veličiny

- Teleso však žiarenie nie len vysiela, ale môže tiež žiarenie, ktoré naň dopadá, pohlcovať.
- Pomer energie pohltenej plochou k energii dopadajúcej na túto plochu nazývame **relatívnou absorpciou** alebo **pohltivosťou** a označujeme symbolom  $\alpha$ . V roku 1860 dospel **Kirchhoff** k dôležitému zákonu, že pomer intenzity vyžarovania  $H_e$  k pohltivosti  $\alpha$  závisí iba od teploty telesa

$$\frac{H_e}{\alpha} = f(T)$$

# Rádiometrické veličiny

- Tento zákon platí aj pre jednotlivé vlnové dĺžky, teda

$$\frac{H_{\lambda}}{\alpha_{\lambda}} = f(T, \lambda)$$

- $H_{\lambda}$  je **spektrálna hustota intenzity vyžarovania** definovaná ako časť energie pripadajúcej na vlny obsiahnuté v nekonečne malom intervale podelenej šírkou tohto intervalu, veľkosťou plošky a časom, a  $\alpha_{\lambda}$  je tzv. **monochromatická pohltivosť** pre žiarenie s vlnovou dĺžkou  $\lambda$ . Kirchhoffov zákon vyjadruje veľmi dôležitú skutočnosť, že teleso absorbuje najsilnejšie práve tie vlnové dĺžky, ktoré najsilnejšie vyžaruje.



# Rádiometrické veličiny

- Kirchhoffov zákon pre celkové žiarenie sa dá sformulovať aj jednoduchšie, ak sa zavedie pojem **absolútne čierne teleso**.
- Ide o teleso, ktoré pohlcuje všetko žiarenie, ktoré dopadá na jeho povrch, teda pohltivosť  $\alpha = \alpha_0 = 1$ .
- Ak označíme intenzitu vyžarovania čierneho telesa  $H_0$ , potom zákon bude mať tvar

$$H_0 = f(T)$$

# Rádiometrické veličiny

- Je zřejmé, že pohltivost dokonale čierneho telesa musí byť rovná jednej pre všetky vlnové dĺžky, takže Kirchhoffov zákon pre monochromatické žiarenie bude

$$H_{0\lambda} = f(T, \lambda)$$

- Určenie neznámych funkcií  $f(T)$  a  $f(T, \lambda)$  bolo hlavným predmetom teoretického a experimentálneho bádania v druhej polovici 19. storočia.

# Rádiometrické veličiny

- Funkciu  $f(T)$  experimentálne zistil **Stefan** v roku 1879 a dospel ku vzťahu (Stefan – Boltzmannov zákon)

$$H_0 = \sigma T^4$$

- Bolo potrebné určiť ešte funkciu  $f(T, \lambda)$ , čo bola oveľa ťažšia úloha. V roku 1896 sa **Wienovi** podarilo nájsť tvar hľadanej funkcie a zistiť, že v ňom vystupuje ďalšia funkcia, ktorá je však funkciou súčinu vlnovej dĺžky a teploty,  $\varphi(\lambda T)$ .

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

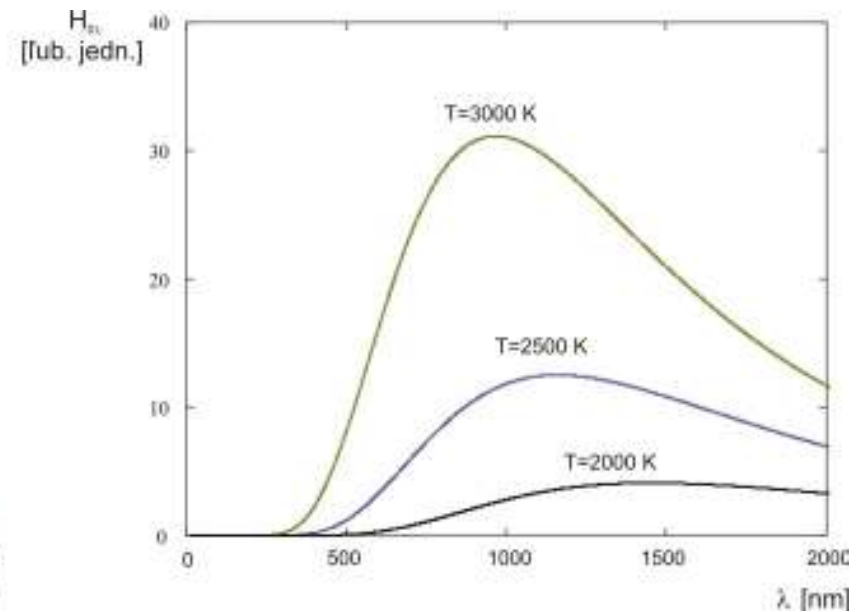
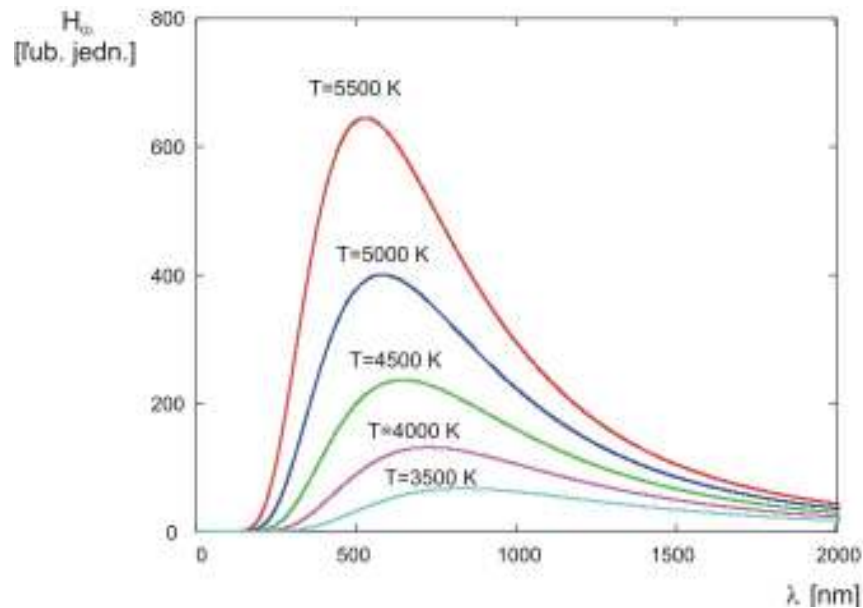
# Rádiometrické veličiny

- Predchádzajúci vzťah sa označuje ako **Wienov posuvný zákon**, pretože z neho vyplýva, že sa maximum spektrálnej hustoty intenzity vyžarovania s rastúcou teplotou posúva ku kratším vlnovým dĺžkam.
- Podrobným štúdiom otázky odvodenia funkcie vyžarovania  $\varphi(\lambda T)$  dospel Planck k presvedčeniu, že v klasickej štatistike je nesprávny predpoklad, ktorý bol až dovtedy považovaný za nepochybniteľný – predpoklad o neobmedzenej deliteľnosti energie žiarenia. Experimentálne zistenú funkciu bolo totiž možné teoreticky odvodiť len za prevratného predpokladu, že emisia žiarivej energie sa môže diať len po celistvých násobkoch „kvanta“,  $E = h\nu$ .

# Rádiometrické veličiny

- Planckov zákon rozdelenia spektrálnej hustoty intenzity vyžarovania má tvar

$$H_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1 \right)}$$



# Rádiometrické veličiny

- Fotometrickej svietivosti odpovedá rádiometrická **žiarivosť**  $I_e$  zdroja vo zvolenom smere. Definuje sa podielom časti žiarivého toku, vychádzajúceho zo zdroja vo zvolenom smere do malého priestorového uhla, a veľkosti tohto uhla

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$$

- Fotometrickému jasú odpovedá rádiometrická veličina nazvaná **žiar**. Je to podiel žiarivosti  $dI_e$  plôšky  $dS$  zdroja vo zvolenom smere a priemetu tejto plôšky do roviny kolmej k zvolenému smeru

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos \vartheta}$$

# Rádiometrické veličiny

- **Ožiaréním** (intenzitou ožiarénia)  $E_e$ , ktoré odpovedá fotometrickému osvetleniu, nazývame podiel žiarivého toku  $d\Phi_e$  dopadajúceho na plôšku  $dS$  na povrchu ožarovaneého telesa a veľkosti tejto plochy

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$$

# Fotometrické a rádiometrické veličiny

<i>Fotometrická veličina</i>	<i>Rádiometrická veličina</i>
Svetelný tok $\Phi$ (lm)	Žiarivý tok $\Phi_e$ (J/s)
Svietivosť $I$ (cd)	Žiarivosť $I_e$ (J/ssr)
Intenzita osvetlenia $E$ (osvetlenie) (lux)	Intenzita ožiarenia (ožiarenie) $E_e$ (J/sm <sup>2</sup> )
Expozícia $e$ (lxs)	Expozícia $e_e$ (J/m <sup>2</sup> )
Jas $L$ (nt)	Žiar $L_e$ (J/s sr m <sup>2</sup> )
Svetlenie (intenzita svetlenia) $H$ (lm/m <sup>2</sup> )	Intenzita vyžarovania $H_e$ (J/sm <sup>2</sup> )