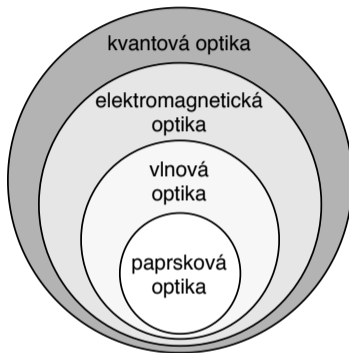


# Photometry and Radiometry: Overview

Michal Vlnas

Fakulta informačních technologií Vysokého učení technického v Brně  
Božetěchova 1/2, 612 66 Brno - Královo Pole  
[ivlnas@fit.vutbr.cz](mailto:ivlnas@fit.vutbr.cz)





**Obrázek:** Teorie světla je rozdělena na čtyři postupně detailnější modely, kde každý model sám o sobě popisuje chování světla. Každý tento model postupně přidává další poznatky o chování světla.

## Předpoklady:

- uvažujeme pouze **paprskovou optiku** a **elektromagnetickou teorii**
- světlo letí nekonečně rychle po přímé dráze

Radiometrické veličiny jsou definovány pro všechny druhy elektromagnetického záření. Fotometrické veličiny jsou omezeny pouze na záření viditelné lidským okem, dle spektrální citlivosti.

radiometrie	angl. název	symbol	jednotka	fotometrie	angl.název	symbol	jednotka
zářivá energie	radiant energy	$Q_e$	J	světelné množství	luminous energy	$Q$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
zářivost	radiant intensity	$I_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	svítivost	luminous intensity	$I$	cd (kandela)
zářivý tok	radiant flux	$\phi_e$	W	světelný tok	luminous flux	$\phi$	lm (lumen)
intenzita ozáření	irradiance	$E_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	osvětlení	illuminance	$E$	lx (lux)
zář	radiance	$L_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	jas	luminance	$L$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
expoze	radiant exposure	$H_e$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} = \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	osvit	luminous exposure	$H$	$\text{lx} \cdot \text{s}$
intenzita vyzařování	radiant exitance	$M_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita světlení	luminous exitance	$M$	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
radiozita	radiosity	$J_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	-	-	-	-

... dále existují bezrozměrné veličiny typu **reflectance**, **absorptance**, **transmittance** a **emissivity**

- **Pozor:** v GI se často vypouští index „e“ u radiometrických veličin, který je odlišuje od fotometrických
- **Pozor:** ve většině případů index „e“ nabývá významu reprezentující emitovanou zář (např. u světelných zdrojů odvozeno z intenzity vyzařování)
- Ke každé veličině existuje její spektrální varianta

## Zářivá energie (radiant energy)

---

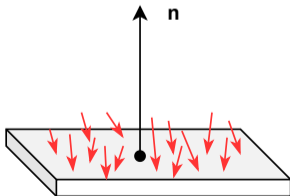
Základem všech radiometrických veličin je zářivá energie  $Q_e$ , která reprezentuje elektromagnetickou energii vyzářenou nějakým zdrojem záření.

$$Q_e \text{ [J]}$$

## Zářivý tok (radiant flux)

Zářivý tok je emitovaná, odražená, propuštěná nebo obdržená zářivá energie  $Q_e$  o všech přípustných vlnových délkách za jednotku času  $t$ .

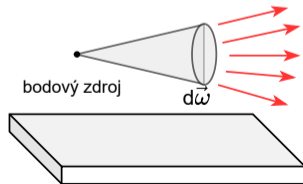
$$\Phi = \frac{dQ_e}{dt} \text{ [W = J} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$



## Zářivost (radiant intensity)

Zářivost je emitovaný, odražený, propuštěný nebo obdržený zářivý tok na prostorový úhel.

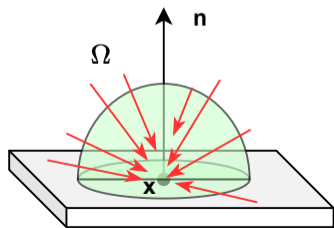
$$I(\vec{\omega}) = \frac{d\Phi(\vec{\omega})}{d\vec{\omega}} \text{ [W} \cdot \text{sr}^{-1}\text{]}$$



## Intenzita ozáření (irradiance)

Intenzita ozáření je zářivý tok **přijímaný** povrchem na jednotku plochy  $A$ . Prakticky se měří na povrchu v konkrétním bodě  $\mathbf{x}$ .

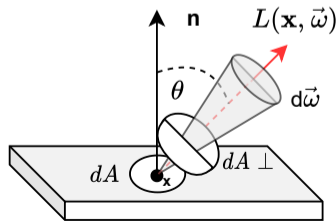
$$E(\mathbf{x}) = \frac{d\Phi(\mathbf{x})}{dA(\mathbf{x})} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$



## Zář (radiance)

Zář je emitovaný, odražený, propuštěný nebo obdržený zářivý tok na prostorový úhel  $\vec{\omega}$  na jednotku plochy  $A$ .

$$L(\mathbf{x}, \vec{\omega}) = \frac{d^2\Phi(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{d\vec{\omega} dA(\mathbf{x}) (\mathbf{n} \cdot \vec{\omega})} [\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$$



## Intenzita vyzařování (radiant exitance)

Intenzita vyzařování je zářivý tok **emitovaný** povrchem  $A$ . Jedná se o emisní složku radiozity  $J$ .

$$M(\mathbf{x}) = \frac{d\Phi(\mathbf{x})}{dA(\mathbf{x})} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

Analogickým způsobem lze definovat hypotetické veličiny reprezentující odražený a propuštěný zářivý tok, který opouští povrch  $A$ .

## Radiozita (radiosity)

Radiozita je zářivý tok opouštějící povrch na jednotce plochy (emitace, odražení, propuštění).

$$J(\mathbf{x}) = \frac{d\Phi(\mathbf{x})}{dA(\mathbf{x})} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

$$J(\mathbf{x}) = J_{em}(\mathbf{x}) + J_{tr}(\mathbf{x}) + J_{re}(\mathbf{x})$$

kde  $J_{em}(\mathbf{x}) = M(\mathbf{x})$ ,  $J_{tr}$  je propouštěná komponenta a  $J_{re}$  je odražená komponenta radiozity povrchu.

Prakticky se jedná o opak **intenzity ozáření**.



## Expozice (radiant exposure)

---

Expozice je intenzita ozáření  $E_e$  integrovaná přes čas ozáření  $T$ . Alternativně lze definovat jako obdržená zářivá energie  $Q_e$  na povrch na jednotku plochy  $A$ .

$$H(\mathbf{x}) = \int_0^T E(\mathbf{x}, t) dt \text{ [J} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

$$H(\mathbf{x}) = \frac{dQ_e}{dA} \text{ [J} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

radiometrie	angl. název	symbol	jednotka	fotometrie	angl.název	symbol	jednotka
zářivá energie	radiant energy	$Q_e$	J	světelné množství	luminous energy	$Q$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
zářivost	radiant intensity	$I_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	svítivost	luminous intensity	$I$	cd (kandela)
zářivý tok	radiant flux	$\phi_e$	W	světelný tok	luminous flux	$\phi$	lm (lumen)
intenzita ozáření	irradiance	$E_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	osvětlení	illuminance	$E$	lx (lux)
zář	radiance	$L_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	jas	luminance	$L$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
expozice	radiant exposure	$H_e$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} = \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	osvit	luminous exposure	$H$	$\text{lx} \cdot \text{s}$
intenzita vyzářování	radiant exitance	$M_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita světlení	luminous exitance	$M$	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
radiozita	radiosity	$J_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	-	-	-	-

... dále existují bezrozměrné veličiny typu **reflectance**, **absorptance**, **transmittance** a **emissivity**

zářivý tok	radiant flux	měření energie ve scéně
zářivost	radiant intensity	barva pixelů, popis světelných zdrojů
intenzita ozáření	irradiance	irradiance caching, photon mapping
<b>zář</b>	<b>radiance</b>	<b>zobrazovací rovnice, LTE, BRDF</b>
intenzita vyzařování	radiant exitance	součást radiozity, v praxi se moc nepoužívá
radiozita	radiosity	metoda radiozity - raději nepoužívat
expoze	radiant exposure	simulace kamery

A co ta fotometrie? Věci se komplikují. . .

$$W [\lambda = 555\text{nm}] = 683 \text{ lm}$$

Pro převod nutno použít **spektrální** veličiny

## Světelný tok (luminous flux)

---

Světelný tok je definován stejně jako zářivý tok, avšak je vážený dle citlivosti lidského oka

$$\Phi = 683 \cdot \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda [\text{lm}]$$

## Svítilivost (luminous intensity)

---

Svítilivost je emitovaný, odražený, propuštěný nebo obdržný světelný tok na prostorový úhel.

$$I(\vec{\omega}) = 683 \cdot \int_0^{\infty} V(\lambda) I_{e,\lambda}(\vec{\omega}, \lambda) d\lambda [\text{cd}]$$

## Osvětlení (illuminance)

---

Osvětlení je světelný tok **přijímaný** povrchem na jednotku plochy  $A$ . Prakticky se měří na povrchu v konkrétním bodě  $\mathbf{x}$ .

$$E(\mathbf{x}) = 683 \cdot \int_0^{\infty} V(\lambda) E_{e,\lambda}(\mathbf{x}, \lambda) d\lambda \text{ [lux]}$$

## Jas (luminance)

---

Jas je emitovaný, odražený, propuštěný nebo obdržený světelný tok na prostorový úhel  $\vec{\omega}$  na jednotku plochy  $\Sigma$ .

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \vec{\omega}) &= 683 \cdot \int_0^{\infty} V(\lambda) L_{e,\lambda}(\mathbf{x}, \vec{\omega}, \lambda) d\lambda \\ &= \frac{d^2\Phi(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{d\vec{\omega} d\Sigma(\mathbf{x}) (\mathbf{n} \cdot \vec{\omega})} [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}] \end{aligned}$$

<b>radiometrie</b>	<b>angl. název</b>	<b>symbol</b>	<b>jednotka</b>	<b>fotometrie</b>	<b>angl.název</b>	<b>symbol</b>	<b>jednotka</b>
zářivá energie	radiant energy	$Q_e$	J	světelné množství	luminous energy	$Q$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
zářivost	radiant intensity	$I_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	svítivost	luminous intensity	$I$	cd (kandela)
zářivý tok	radiant flux	$\phi_e$	W	světelný tok	luminous flux	$\phi$	lm (lumen)
intenzita ozáření	irradiance	$E_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	osvětlení	illuminance	$E$	lx (lux)
zář	radiance	$L_e$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	jas	luminance	$L$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
expozice	radiant exposure	$H_e$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} = \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	osvit	luminous exposure	$H$	$\text{lx} \cdot \text{s}$
intenzita vyzářování	radiant exitance	$M_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita světlení	luminous exitance	$M$	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
radiozita	radiosity	$J_e$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	-	-	-	-

Z anglického spojení **bidirectional reflectance distribution function**, tzn. obousměrná distribuční funkce odrazu světla.

Udává **hustotu pravděpodobnosti**, že světlo dopadající ze směru  $\vec{\omega}_i$  se odrazí ve směru  $\vec{\omega}_o$ .

$$f_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_o) = \frac{dL_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}_o)}{dE(\mathbf{x})} = \frac{dL_r(\mathbf{x}, \vec{\omega}_o)}{L_i(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i) \cdot \cos(\theta_i) d\vec{\omega}_i}$$

Vlastnosti:

- **Pozitivita**
- **Linearita**
- **Zákon zachování energie**
- **Helmholzova reciprocita**



- BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)
- BTDF (Bidirectional Transmission Distribution Function)
- BDF (Bidirectional Distribution Function)
- BSSRDF (Bidirectional Surface Scattering RDF)
- BSSTDF (Bidirectional Surface Scattering TDF)
- BSSDF (Bidirectional Surface Scattering Distribution Function)
- BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function)

BRDF + BTDF = BDF nebo BSDF

BSSRDF + BSSTDF = BSSDF nebo taktéž BSDF

Nejčastěji BSDF označuje všechny typy BxDF, často se ale BSSRDF dává stranou.

