

---

# **B4M39RSO**

- \* Úvod do globálního osvětlení**
  - \* Radiometrie**
  - \* Světelné zdroje**
- 

Vlastimil Havran

ČVUT v Praze

---

# Úvod do globálního osvětlení

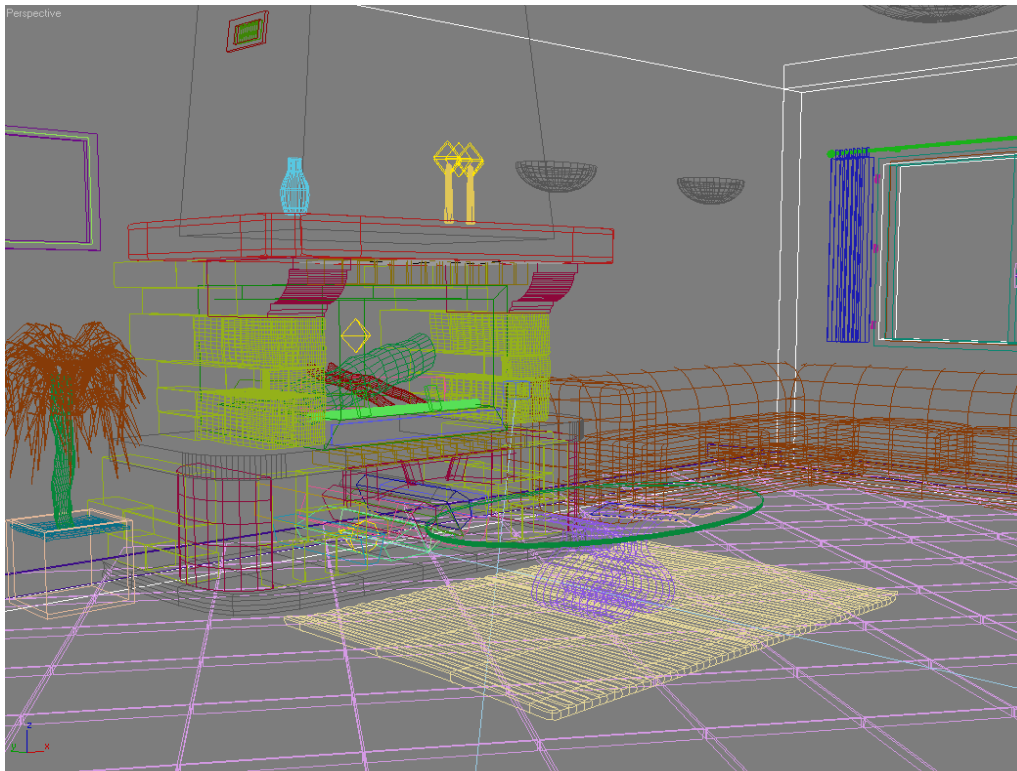
---

# Počítačová grafika

- Mezioborová tematika
- Matematický popis světa
- Animace objektů
- Zpracování obrazu
- ...
- ... a také SYNTÉZA OBRAZU = rendering

# Rendering

- Vytvoř obrázek...



...z popisu scény.

# Popis scény

## ■ Geometrie

- Kde je jaký objekt ve scéně
- Nejčastěji hraniční reprezentace (sít' trojúhelníků – mesh, nebo v průmyslové praxi plochy vyššího řádu – Bézier, NURBS, subdivision surfaces)

## ■ Materiály povrchů

- Barva, lesklost, ...

## ■ Zdroje světla

- Poloha, směr, velikost
- Směrové a prostorové rozložení intenzity, spektrum

## ■ Kamera

- Perspektivní, ortografická, sférická ...

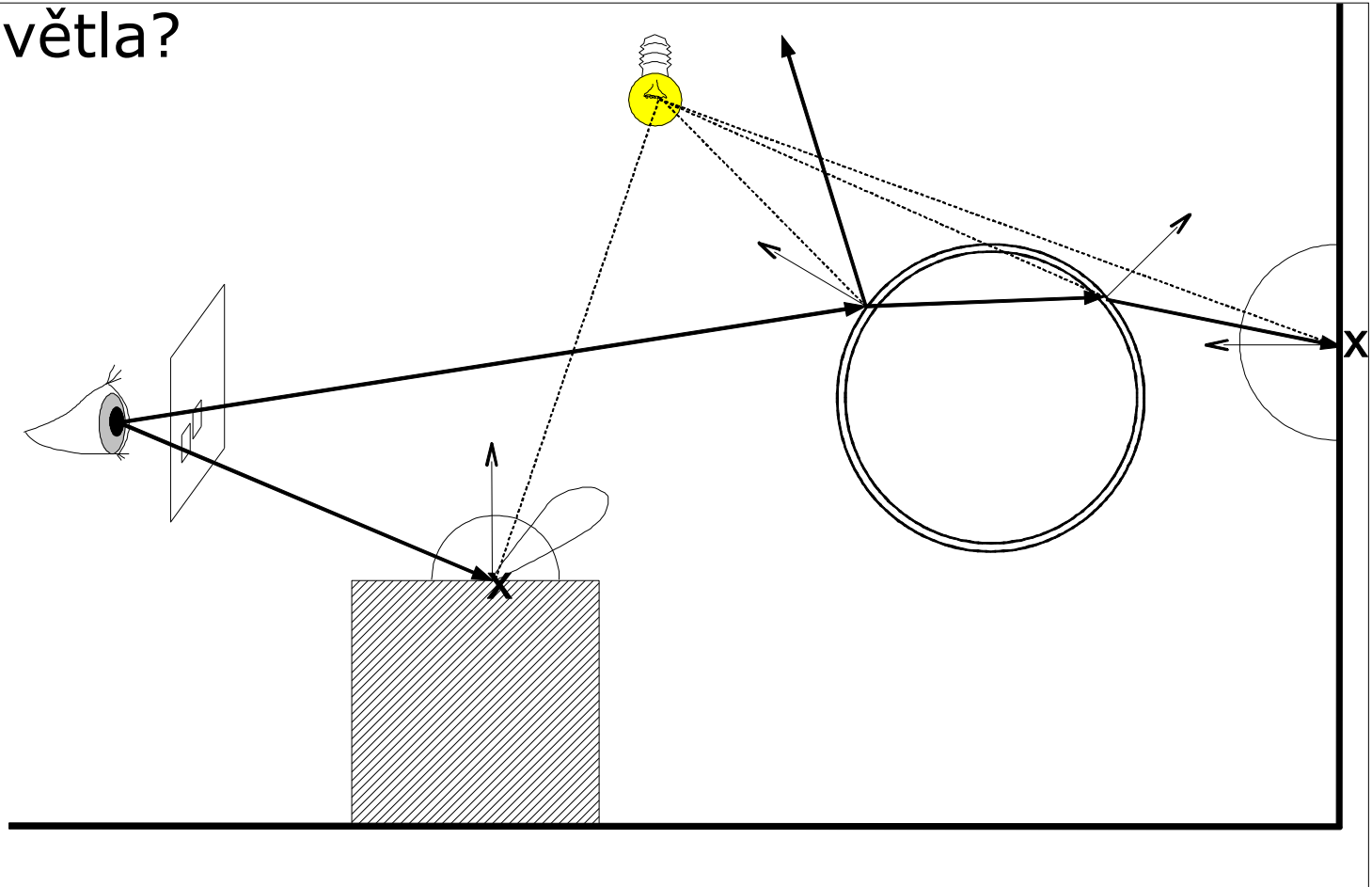
# Přístupy k renderingu

- *Nefotorealistický rendering*
  - ❑ Cíl: napodobení uměleckých stylů či technické nákresy
  - ❑ Zdůraznění nějaké informace
- *Fotorealistický rendering*
  - ❑ Cíl: obrázky podobné realitě
  - ❑ Metoda: simulace a a aproximace přenosu světla ve scéně
- ❑ *Prediktivní rendering*
  - ❑ Cíl: obrázky co nejpřesněji odpovídající realitě
  - ❑ Metoda: věrná matematická simulace přenosu světla ve scéně



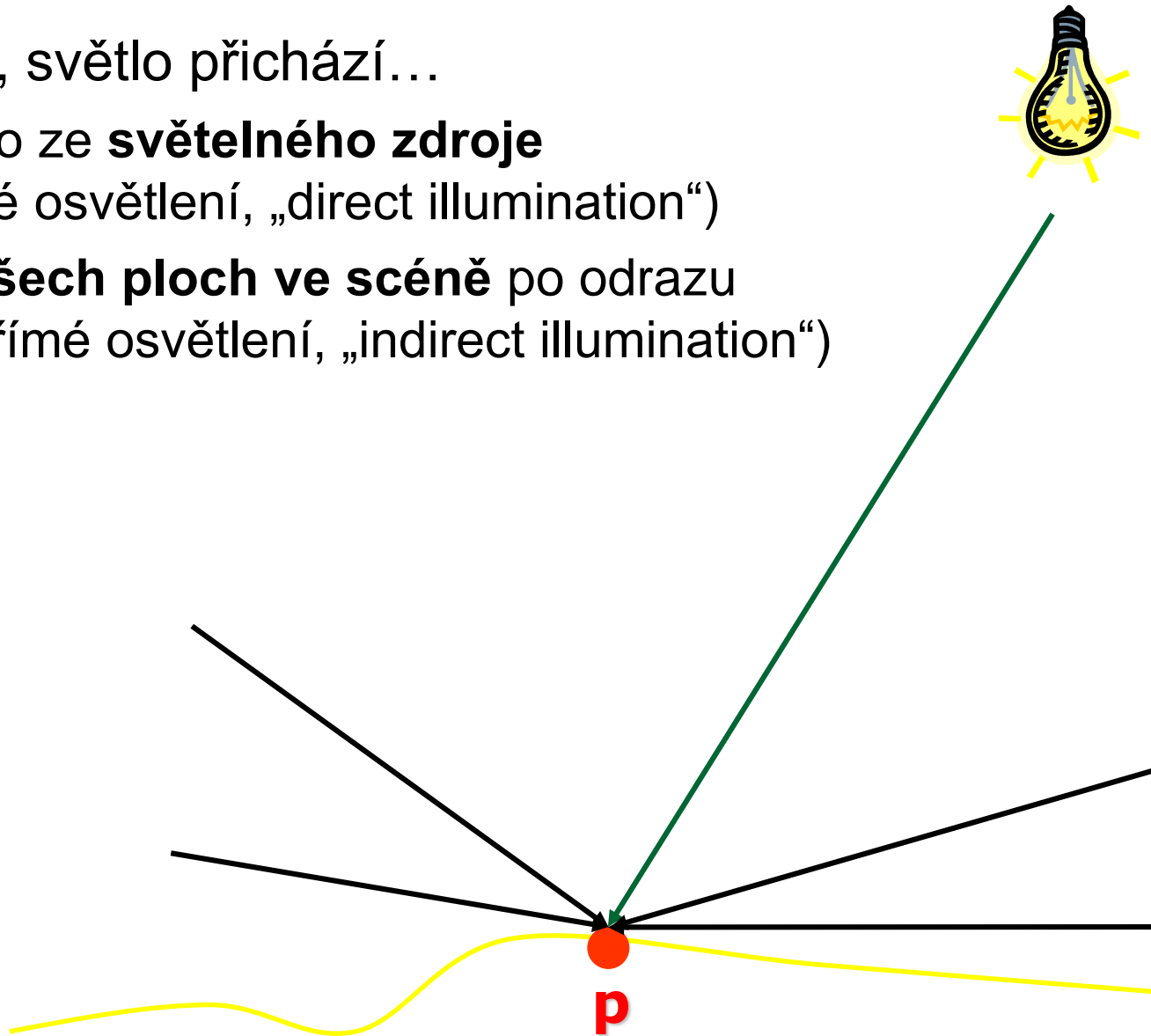
# Simulace používaná v renderingu

Kolik světla?



# Odkud se přichází světlo?

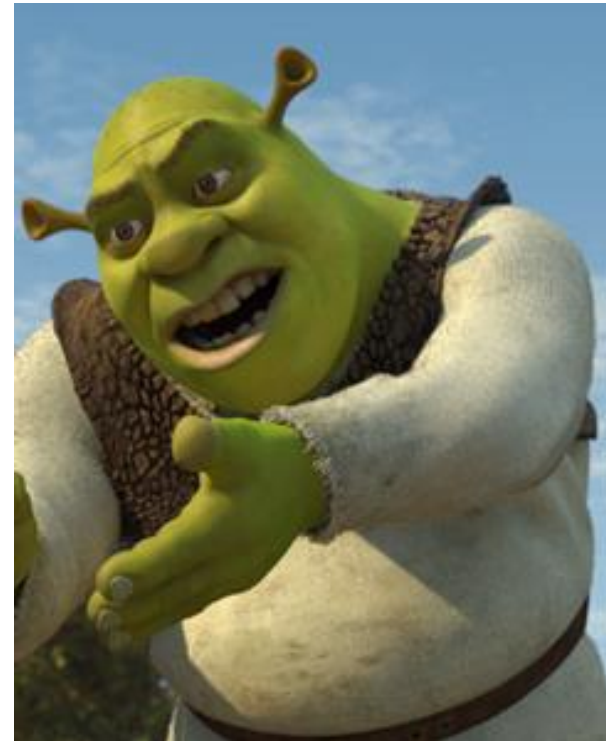
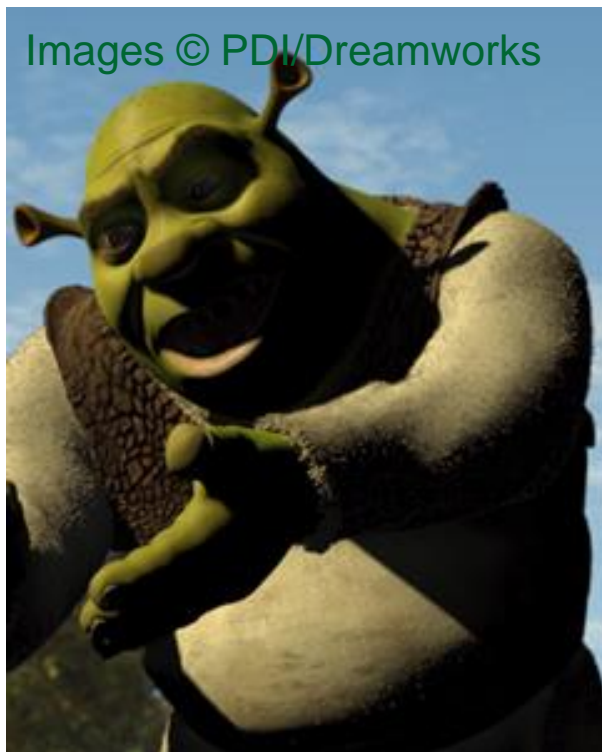
- V bodě **p**, světlo přichází...
  - ...přímo ze **světelného zdroje**  
(=přímé osvětlení, „direct illumination“)
  - ...**ze všech ploch ve scéně** po odrazu  
(= nepřímé osvětlení, „indirect illumination“)



# Globální osvětlení (Global illumination – GI)

## ■ Pouze přímé osvětlení

- Světlo se odrazí JEDNOU na cestě ze zdroje do kamery



## ■ Globální osvětlení

- Globální = Přímé + Nepřímé
- Transport světla mezi plochami ve scéně
- Mnoho odrazů světla

# Efekty globálního osvětlení

- Ideální odraz/lom světla
- Půjčování barev (Color bleeding)
- Kaustiky – „prasátka“ (Caustics)

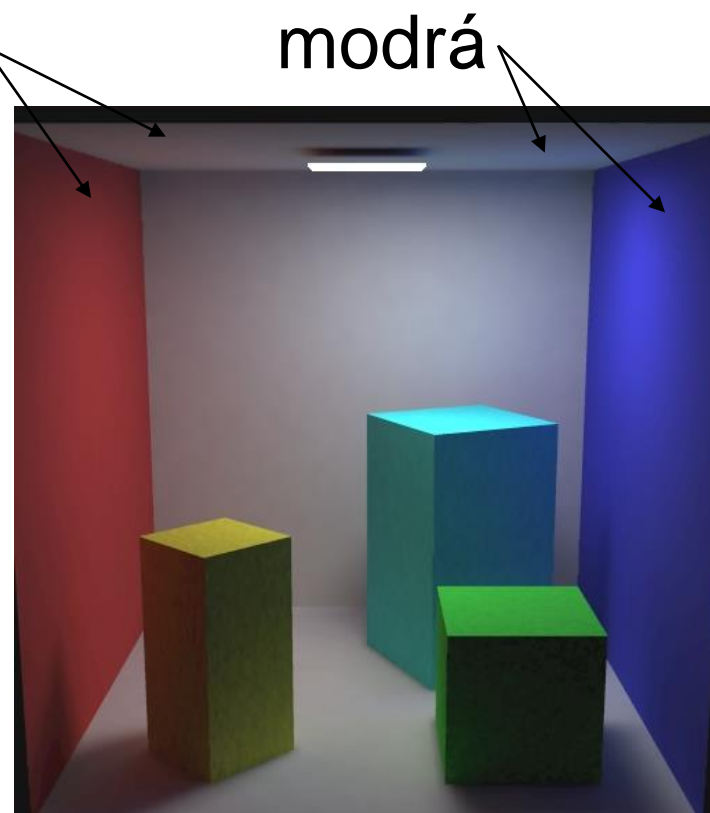
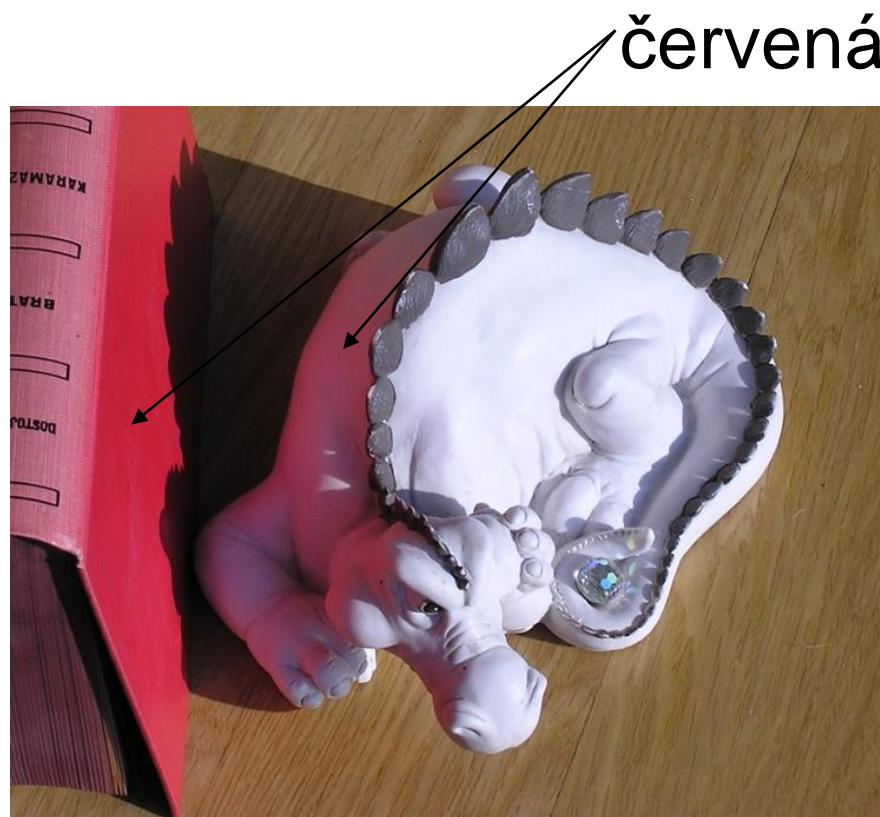


**Modeling: Stephen Duck; Rendering: Henrik Wann Jensen**

# **Efekty globálního osvětlení – Ideální odraz/lom světla**

- Sklo, zrcadlo, vodní hladina
- Obraz na povrchu vody je dán rozložením světla v úplně jiné části scény (dno, okolí, nebe, slunce)

# Efekty globálního osvětlení – Půjčování barev (color bleeding)



# Efekty globálního osvětlení – Půjčování barev (color bleeding)

- Odraz světla z jednoho difúzního povrchu na jiný
- Důležité např. v malbě
  - Lidé podvědomě používají půjčování barev mezi objekty k pochopení vzájemného prostorového uspořádání objektů podobně jako řadu dalších nápověd, ostrých a neostrých stínů, okluze atd.

# Efekty globálního osvětlení – Kaustiky (caustics)

- „Prasátka“
  1. Zaostření světla při odrazu nebo lomu – lokální zvýšení intenzity světla
  2. Dopad zaostřeného světla na difúzní plochu



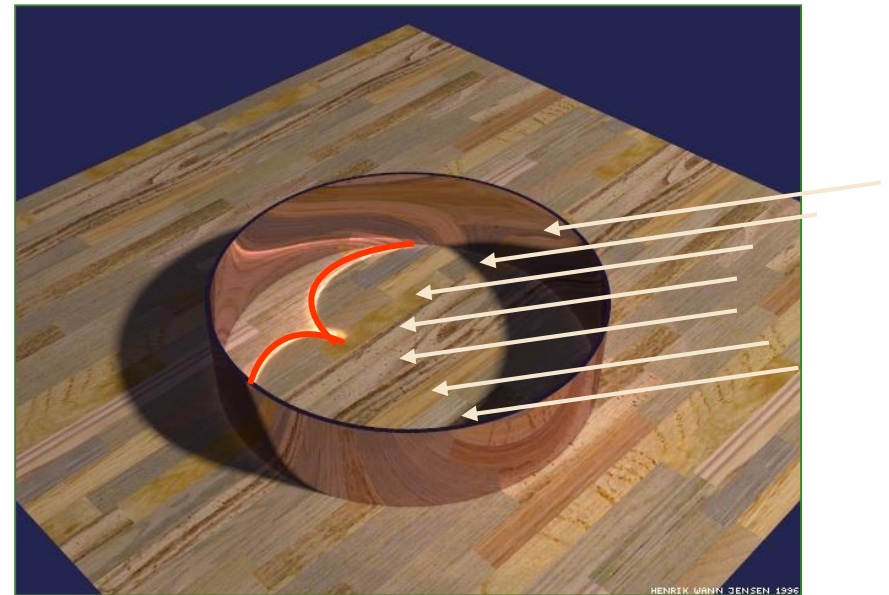
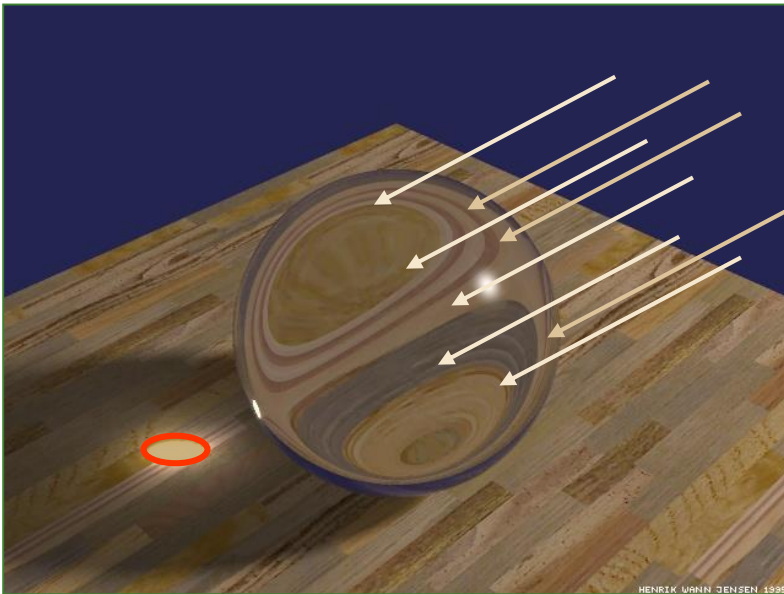
skutečnost



Simulace pomocí fotonových map

# Kaustiky

- Ve fyzice a v počítačovém vidění se kaustikou rozumí lokální maximum hustoty světla



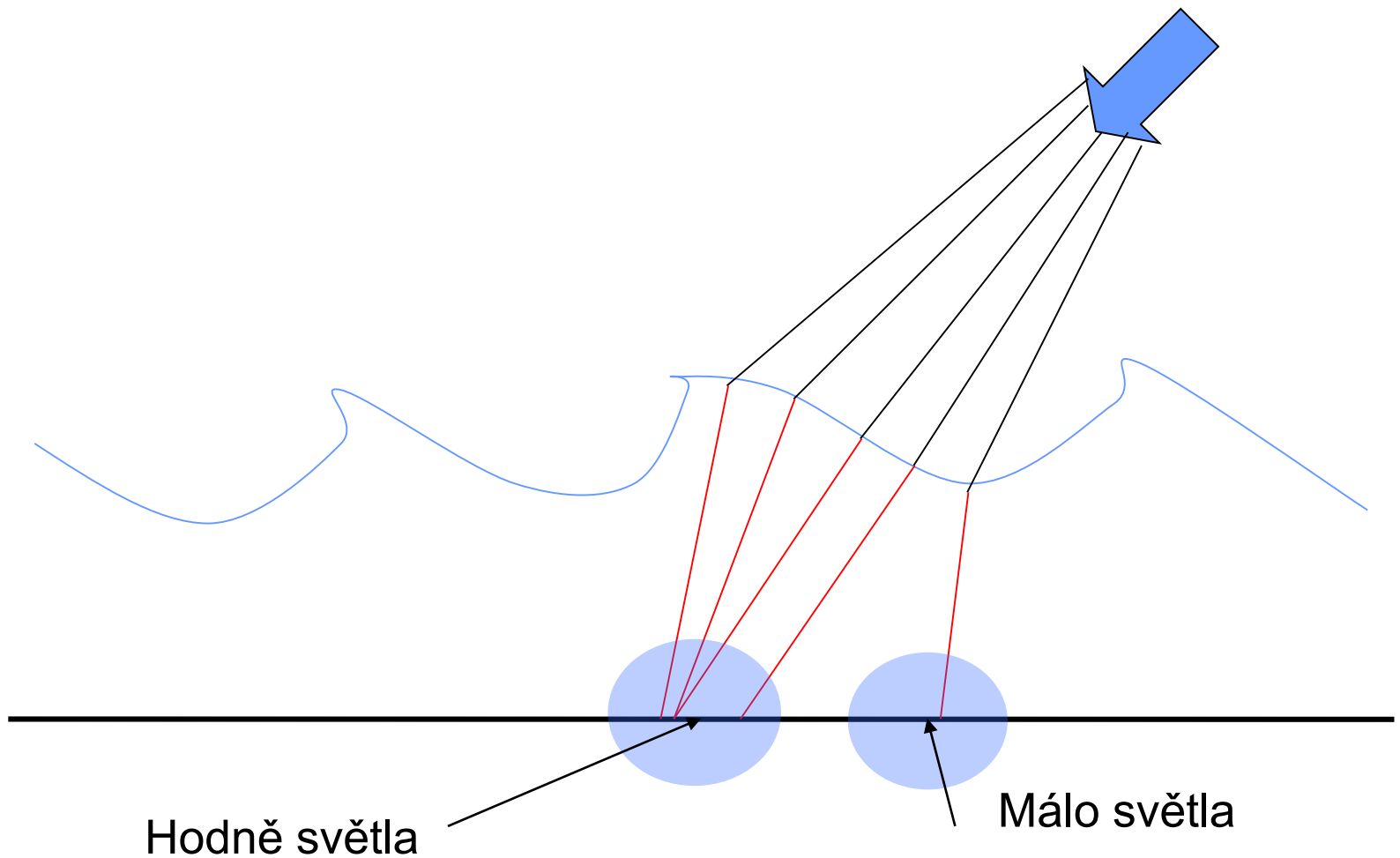
# Pohled na vodu



- Odraz + lom na povrchu vody
- Kaustiky na dně bazénu



# Kaustiky pod vodou



# Efekty globálního osvětlení...

- ... jsou důsledkem...
  - ... změn intenzity světla jako funkce prostoru a úhlu při odrazu světla na površích objektů (kaustiky)
    - Dáno geometrií objektů
    - Materiálovými vlastnostmi objektů (matný x lesklý)
  - ... změn barvy světla při odrazu (půjčování barev)
    - Tj. změn intenzity světla jako funkce vlnové délky
    - Dáno spektrální odrazivostí materiálů
      - s jakou měrou objekt odráží světlo různých vlnových délek

# Simulace globálního osvětlení

- Potřebujeme
  - Popis „množství světla“ v prostoru – radiometrie
  - Popis odrazu světla na povrchu – BRDF
  - Popis rozložení světla v rovnovážném stavu – zobrazovací rovnice
  - Efektivní algoritmy
    - Nalezení takového rozložení světla ve scéně, která odpovídá
      - Zobrazovací rovnici
      - „Okrajovým podmínkám“ = tj. popisu scény
      - radiozita, stochastický ray tracing

---

# **Radiometrie, fotometrie**

---

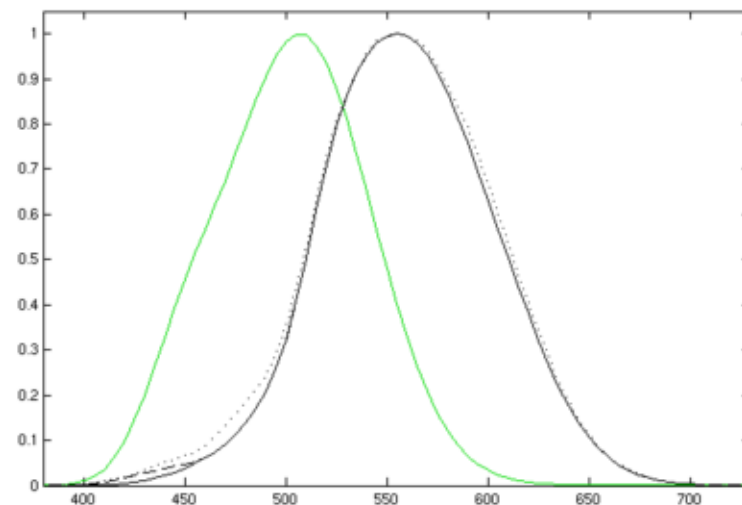
# Radiometrie, fotometrie

## ■ Radiometrie

- Popisuje optické záření (EM záření o vlnové délce 0,01 – 1000  $\mu\text{m}$  – ultrafialové, viditelné, infračervené)
- Všechny radiometrické veličiny jsou funkcí vlnové délky

## ■ Fotometrie

- Popisuje světlo (EM záření viditelné lidským okem)
- Jako radiometrie, až na to, že všechny veličiny jsou váženy spektrální odezvou oka („CIE luminanční funkcí“, CIE luminous efficiency curve)



# Jednotky SI – zopakování fyziky

<i>Veličina</i>	<i>Název-Jednotky</i>	<i>Značka jednotky</i>
délka	metr	m
hmotnost	kilogram	kg
čas	sekunda	s
elektrický proud	ampér	A
teplota	kelvin	K
svítivost	kandela	cd
látkové množství	mol	mol

Redefinice SI jednotek: 20. května 2019

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustava\\_SI](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustava_SI)

# Odvozené jednotky – zopakování fyziky 2

Název veličiny	Název-jednotky	Značka jed.	Rozměr
Prostorový úhel	steradián	sr	[-]
Kmitočet	hertz	Hz	$s^{-1}$
Rychlost	metr za sekundu	--	$m.s^{-1}$
Zrychlení	---	--	$m.s^{-2}$
Síla	newton	N	$kg.m.s^{-2}$
Tlak	pascal	Pa	$kg.m^{-1}.s^{-2}$
Energie	joule	J	$kg.m^2.s^{-2}$
Výkon	watt	W	$kg.m^2.s^{-3}$

# Odvozené jednotky – zopakování fyziky 3

Název veličiny	Název-jednotky	Značka jed.	Rozměr
Elektrický náboj	coloumb	C	s.A
Elektrické napětí	volt	V	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> .A <sup>-1</sup>
Elektrická kapacita	farad	F	kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>4</sup> .A <sup>2</sup>
Elektrický odpor	ohm	--	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> .A <sup>-2</sup>
Magnetická indukce	tesla	T	kg.s <sup>-2</sup> .A <sup>-1</sup>
Indukčnost	henry	H	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> .A <sup>-2</sup>


# Zářivá energie – $Q$ [J]

- Anglický název: Radiant energy
- Značka:  $Q$ ,  $W$
- Jednotka: Joule,  $J$
- Význam: „Kolik fotonů je na nějakém místě v ohraničeném prostoru.“
- Fotometrická veličina:
  - Světelná energie (luminous energy), jednotka Talbot (=lumen.s)

# Zářivý tok – $\Phi$ [W]

- A.k.a „výkon“
- Anglický název: Radiant flux, Power
- Značka:  $\Phi$ ,  $P$
- Jednotka: Watt [W]
- Definice: 
$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \text{ [W]}$$
- Význam:
  - Jak rychle se mění množství fotonů v určitém místě.
  - Neboli jak rychle fotony „tečou“ z/do daného místa.
- Fotometrická veličina:
  - Světelný tok (luminous flux), jednotka Lumen
  - Převod pro denní vidění: 683 Lumen ~ 1 Watt

# Intenzita ozáření – $E$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

- A.k.a.: Hustota zářivého toku
- Anglický název: **irradiance** (flux density)
- Značka:  $E$
- Jednotka: Watt na metr čtvereční [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
- Definice: 
- Význam: Kolik fotonů dopadne na jednotkovou plochu v daném místě (za jednotku času).
- Vždy definováno vzhledem k nějakému bodu  $\mathbf{x}$  na ploše  $S$  se specifikovanou normálou  $N(\mathbf{x})$ . Zajímá nás pouze světlo přicházející z horní strany plochy.
- Fotometrická veličina:
  - osvětlení (illuminance), jednotka Lux = lumen. $\text{m}^{-2}$

# Intenzita vyzařování – $B$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

- A.k.a.: **Radiozita**
- Anglický název: Radiant exitance, **radiosity**
- Značka:  $B$ ,  $M$
- Jednotka: Watt na metr čtvereční [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

■ Definice:

$$B = \frac{dQ}{dA} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$$

■ Význam:

- Kolik fotonů na jednotkovou plochu je vyzářeno z daného místa (za jednotku času).
  - Jako irradiance, avšak místo dopadnutého světla nás zajímá světlo vyzářené.
  - Vyzářené světlo může být emitováno z plošky (pokud jde o světelný zdroj) nebo odraženo – to radiozita nerozlišuje.
- Fotometrická veličina:
- Luminosity, jednotka Lux =  $\text{lumen}\cdot\text{m}^{-2}$

# Vsuvka: Směr ve 3D

- Směr = jednotkový vektor ve 3D

- Kartézské souřadnice

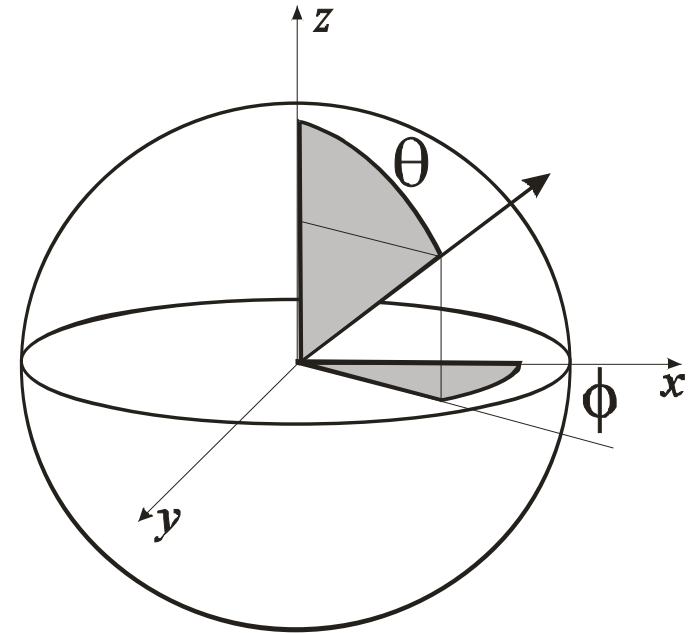
$$\omega = [x, y, z], \quad x^2 + y^2 + z^2 = 1$$

- Sférické souřadnice

$$\omega = [\theta, \varphi]$$

$$\theta \in [0, \pi/2] \quad \theta = \arccos z$$

$$\varphi \in [0, 2\pi] \quad \varphi = \arctan \frac{y}{x}$$



$$x = \sin\theta \cos\varphi$$

$$y = \sin\theta \sin\varphi$$

$$z = \cos\theta$$

- $\theta$  ... *polární úhel* - odchylka od osy Z

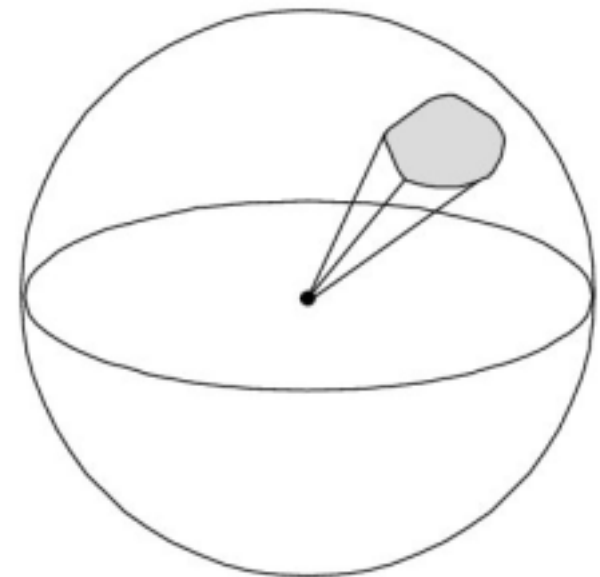
- $\phi$  ... *azimut* - úhel od osy X

# Vsuvka: Funkce na jednotkové kouli

- Funkce jako každá jiná, ale argumentem je směr ve 3D
- Funkční hodnota je číslo (nebo třeba trojice čísel RGB)
- Zápis např.
  - $F(\omega)$
  - $F(x,y,z)$
  - $F(\theta,\phi)$
  - ...
  - Závisí na zvolené reprezentaci směrů ve 3D

# Vsuvka: Prostorový úhel

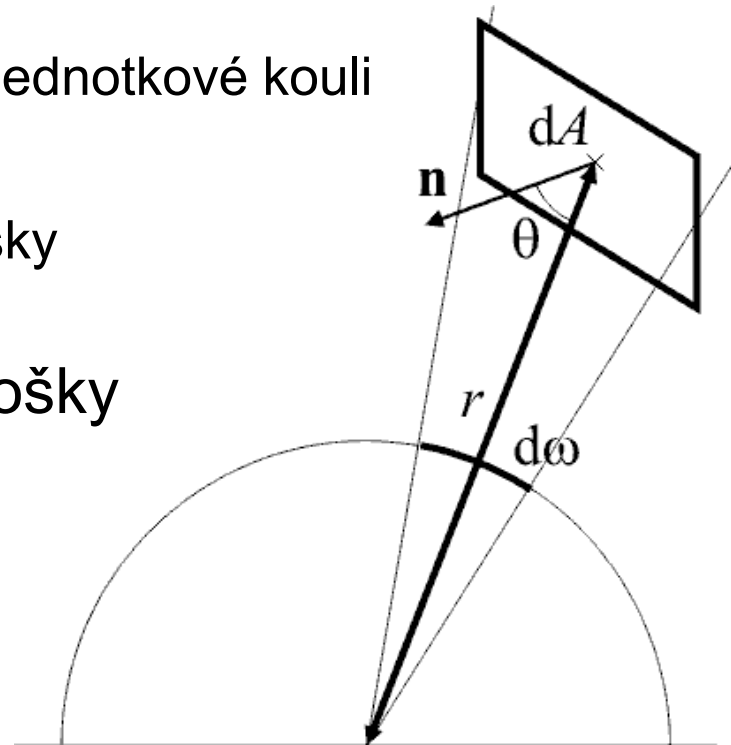
- Plocha projekce objektu na jednotkovou kouli okolo středu prostorového úhlu
- Jednotka: steradian (sr)
- Rovinný úhel
  - Délka oblouku na jednotkové kružnici
  - Kružnice má  $2\pi$  radiánů
- Prostorový úhel
  - Velikost plochy na jednotkové kouli
  - Koule má  $4\pi$  steradiánů



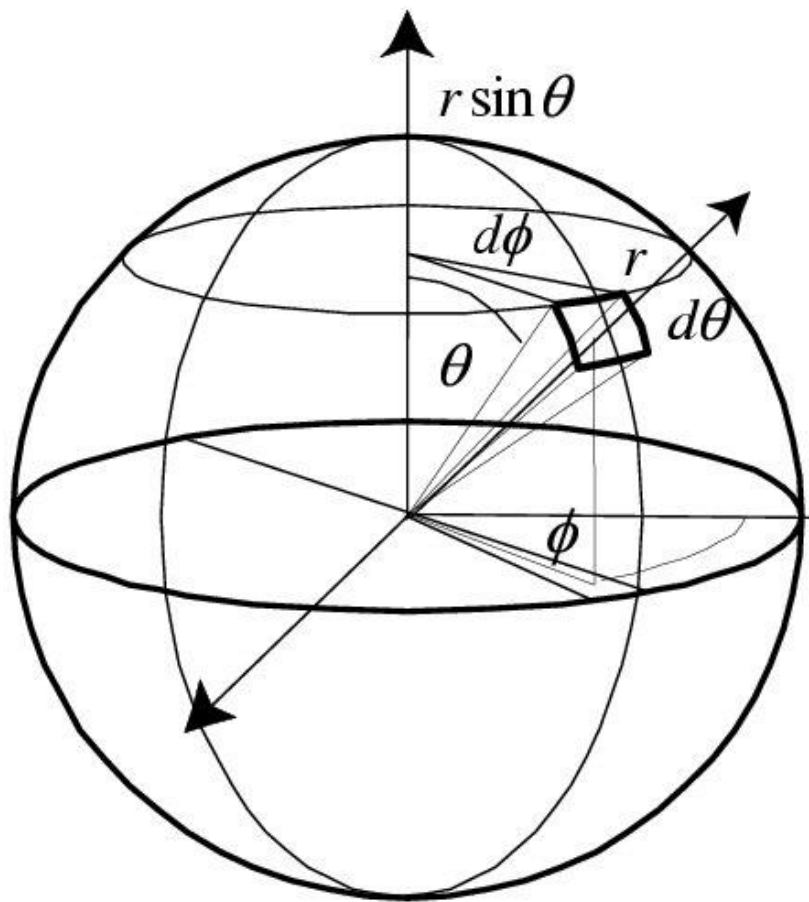
# Vsuvka: Diferenciální prostorový úhel

- „Nekonečně malý“ prostorový úhel okolo směru
- 3D vektor
  - Velikost  $d\omega$ 
    - velikost diferenciální plošky na jednotkové kouli
  - Směr  $d\omega$ 
    - střed projekce diferenciální plošky na jednotkovou kouli
- Prostorový úhel diferenciální plošky

$$d\omega = dA \frac{\cos\theta}{r^2}$$



# Differential Solid Angles



$$\begin{aligned}dA &= (r d\theta)(r \sin \theta d\phi) \\ &= r^2 \sin \theta d\theta d\phi\end{aligned}$$

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi$$

$$S = \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta d\phi = 4\pi$$

# Zpět k radiometrii: Zářivost – $l$ [ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ]

- Anglický název: Radiant intensity
- Značka:  $l$
- Jednotka: Watt na steradián – [ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ]
- Definice:

- Význam: 
$$I(\omega) = \frac{d\Phi(\omega)}{d\omega}$$

- Kolik fotonů na jednotkový úhel je vyzářeno v daném směru (za jednotku času).“

- Použití

- Popis vyzařování bodových zdrojů světla

- Fotometrická veličina (důležité, Candela = zákl. jedn. SI)

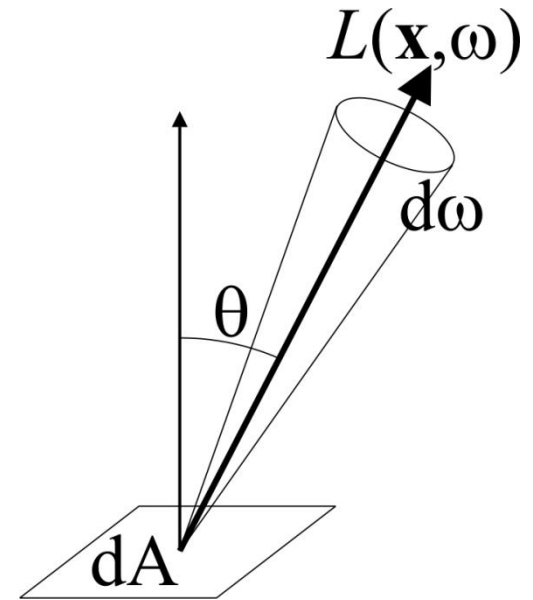
- Svítivost (luminous intensity), jednotka Candela ( $\text{cd} = \text{lumen}\cdot\text{sr}^{-1}$ )

**Kandela definice** - svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření s kmitočtem  $540 \times 10^{12}$  hertzů a jehož zářivost v tomto směru je  $1/683$  wattů na steradián

# Zář – $L$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ]

- Anglický název: **Radiance**
- Značka:  $L$
- Jednotka:  
Watt na metr čtvereční na steradián,  
[ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ]

- Definice: 
$$L(\mathbf{x}, \omega) = \frac{d\Phi}{c \, dA \, d\omega}$$



- Fotometrická veličina
  - Jas (luminance), jednotka candela. $\text{m}^{-2}$  (v ang. též Nit)
  - Popis záření LCD displeje v kandelách na  $\text{m}^2$
- Z hlediska předmětu nejdůležitější jednotka, ze které lze ostatní odvodit integrací.

# Faktor $\cos \theta$ v definici radiance

- Faktor  $\cos \theta$  kompenzuje úbytek irradiance na ploše se zvyšujícím se  $\theta$  při stejné míře osvětlení.
  - Tj. svítím-li na nějakou plochu zdrojem světla, jehož parametry neměním, a otáčím onou plochou, pak:
    - Irradiance se s otáčením mění (protože se mění tok na plošce).
    - Radiance se nemění (protože změna toku na ploše je kompenzována faktorem  $\cos \theta$  v definici záře).

# Výpočet ostatních veličin z radiance

Intenzita ozáření:

$$I(\mathbf{x}) = \int_{H(\mathbf{x})} K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cos \theta \, d\omega$$

*substitue*

$$= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cos \theta \, d\theta \, d\phi$$

Zářivý tok:

$$\Phi = \int_A I(\mathbf{x}) \, dA$$

$$= \int_A \int_{H(\mathbf{x})} K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cos \theta \, d\omega \, dA$$

$\cos \theta \, d\omega$  = promítnutý prostorový úhel  
(projected solid angle)

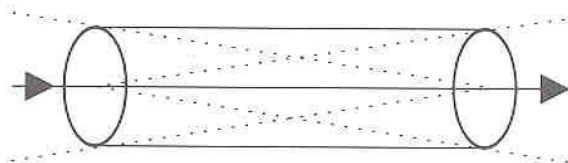
$H(\mathbf{x})$  = hemisféra nad bodem  $\mathbf{x}$

# Vlastnosti radiance (1)

- Odezva senzoru kamery (nebo lidského oka) je přímo úměrná hodnotě radiance odražené od plochy viditelné senzorem.

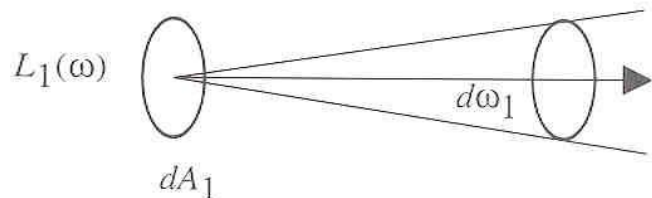
# Vlastnosti radiance (2)

- Radiance (zář) je konstantní podél paprsku.
  - Proto je právě radiance radiometrickou veličinou spojenou s paprskem v ray traceru a jiných algoritmech, kde se simuluje šíření světelné energie podél paprsků.
  - Odvozeno ze zachování toku

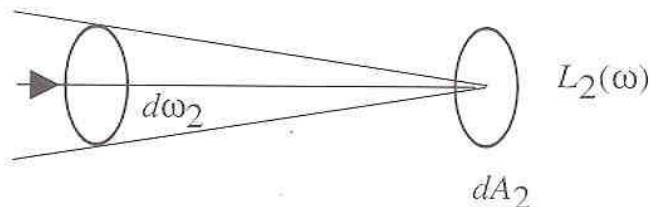


$$d\Phi_1 = L_1 d\omega_1 dA_1 = L_2 d\omega_2 dA_2 = d\Phi_2$$

$$d\omega_1 = dA_2 / r^2 \quad d\omega_2 = dA_1 / r^2$$



$$d\omega_1 dA_1 = \frac{dA_1 dA_2}{r^2} = d\omega_2 dA_2$$



$$\therefore L_1 = L_2$$

# Příchozí / odchozí radiance

$L^i(\mathbf{x}, \omega)$  Příchozí (**incoming**) radiance – radiance před odrazem

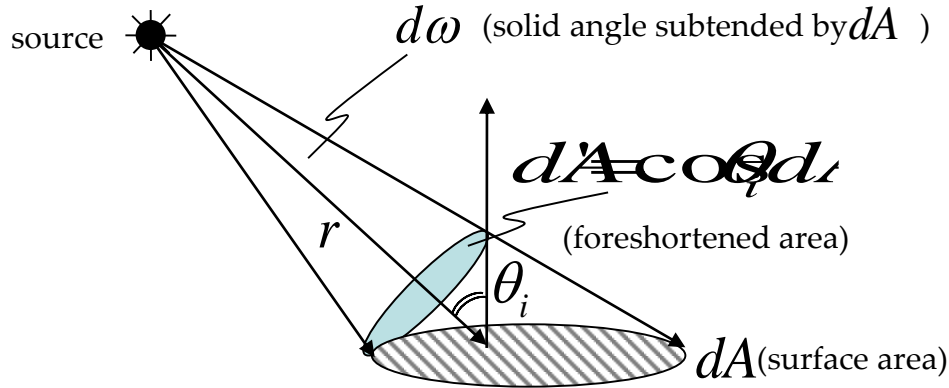
$L^o(\mathbf{x}, \omega)$  Odchozí (**outgoing**, odražená) radiance – radiance po odrazu

Radiance na plošce je nespojitá – proto rozlišení příchozí a odchozí.

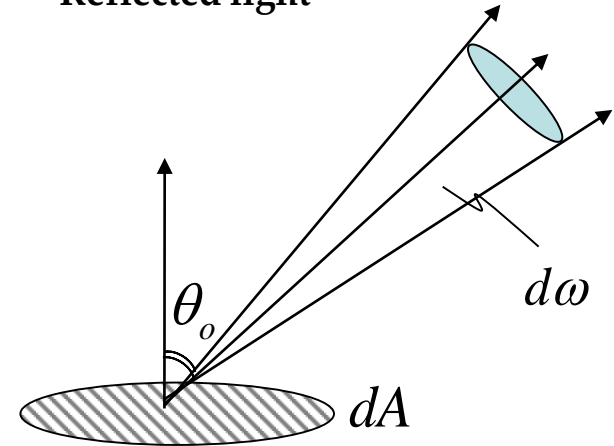
Ve volném prostoru platí:  ~~$L(\mathbf{x}, \omega) = I(\mathbf{x}, \omega)$~~

# Radiometric concepts – recap

**Incident light**



**Reflected light**



(1) Solid Angle : 
$$d\omega = \frac{dA \cos \theta_i}{r^2} \quad (\text{steradian})$$

(2) Radiant Intensity of Source : 
$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (\text{watts / steradian})$$

Light Flux (power) emitted per unit solid angle

(3) Surface Irradiance : 
$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{watts / m}^2)$$

Light Flux (power) incident per unit surface area.

Does not depend on where the light is coming from!

(4) Surface Radiance :

$$L = \frac{d\Phi}{dA \cos \theta_o d\omega} \quad (\text{watts / m}^2 \text{ /steradian})$$

- Flux emitted per unit foreshortened area per unit solid angle.
- Surface can radiate into whole hemisphere.
- $L$  depends on reflectance properties of surface.

# Radiometrické a fotometrické veličiny

Název veličiny	Název-jednotky	Značka	Symbol	Anglicky
zářivá energie	joule	[J]	Q	radiant energy
světelná energie	talbot	[Tb, lm.s]	Q <sub>v</sub>	luminous energy
-----				
zářivý tok	watt	[W]	Φ	radiant flux
světelný tok	lumen	[lm]	Φ <sub>v</sub>	luminous flux
-----				
intenzita ozáření		[W.m <sup>-2</sup> ]	E	irradiance
osvětlení (illuminance)	Lux	[lm.m <sup>-2</sup> ]	E <sub>v</sub>	illuminance
-----				
intenzita vyzařování		[W.m <sup>-2</sup> ]	B	radiant exitance, radiosity
luminosity	Lux	[lm.m <sup>-2</sup> ]	B	luminous exitance
-----				
zářivost		[W.sr <sup>-1</sup> ]	I	radiant intensity
svítivost	candela	[cd=lm.sr <sup>-1</sup> ]	I <sub>v</sub>	luminous intensity
-----				
zář		[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]	L	radiance
jas		[cd.m <sup>-2</sup> ]	L <sub>v</sub>	luminance

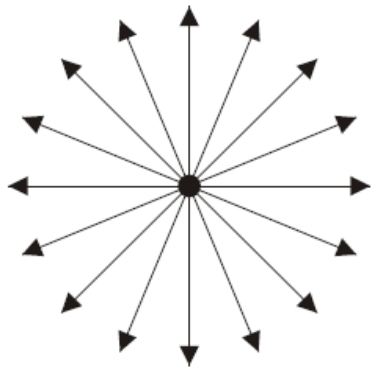
---

# **Část 3:**

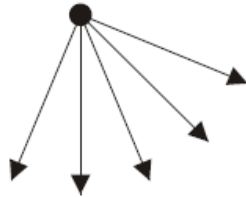
# **Modely světelných zdrojů**

---

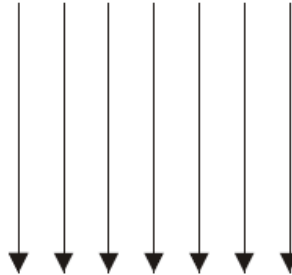
# Světelné zdroje



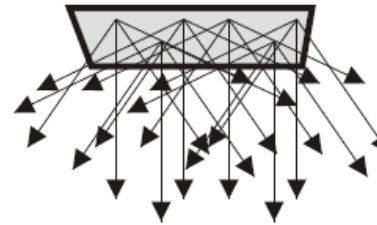
A) Omnidirectional point light



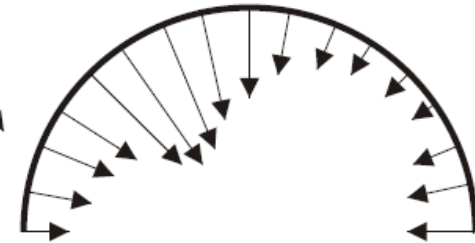
B) Spot light



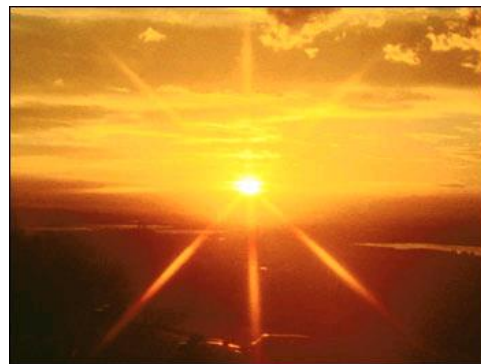
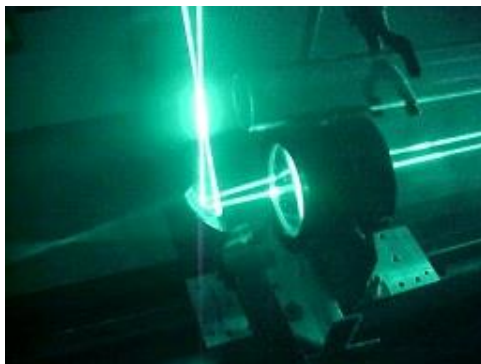
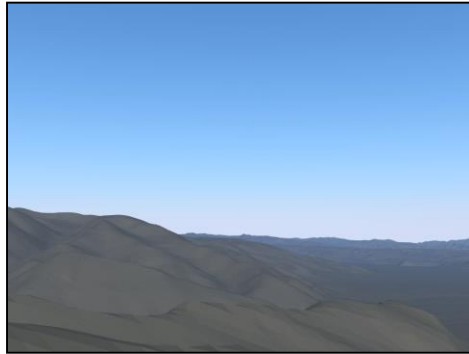
C) Directional light



D) Area light



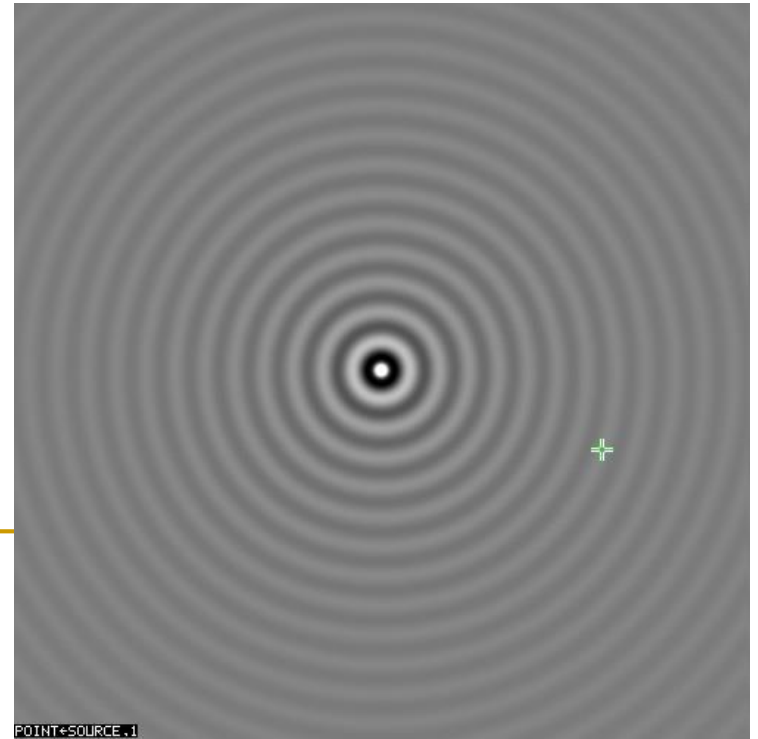
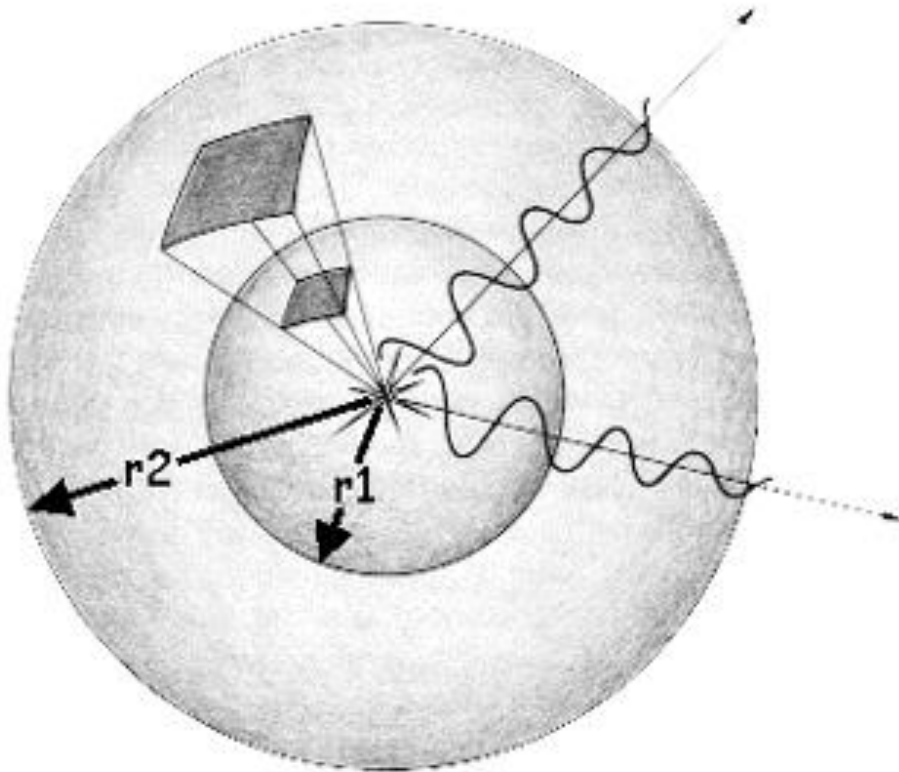
E) Environment map



# Bodové světelné zdroje

- Světlo emitováno z jednoho bodu
- Emise plně popsána intenzitou jako funkcí směru vyzařování:  $I(\omega)$ 
  - Izotropní bodové světlo
    - konstantní zářivost (intenzita) [W/sr]
  - Reflektor (Spot light)
    - Konstantní zářivost uvnitř kuželu, nula jinde
  - Obecný bodový zdroj
    - Popsán **goniometrickým diagramem**
      - Tabulkové vyjádření  $I(\omega)$  pro bodové světlo
      - Používáno v osvětlovací technice

# Isotropic Point Light Source



We see an inverse distance squared fall off in intensity.  
Here light does not weaken, but only spreads in a sphere.

# Izotropní bodové světlo

- Celkový tok:

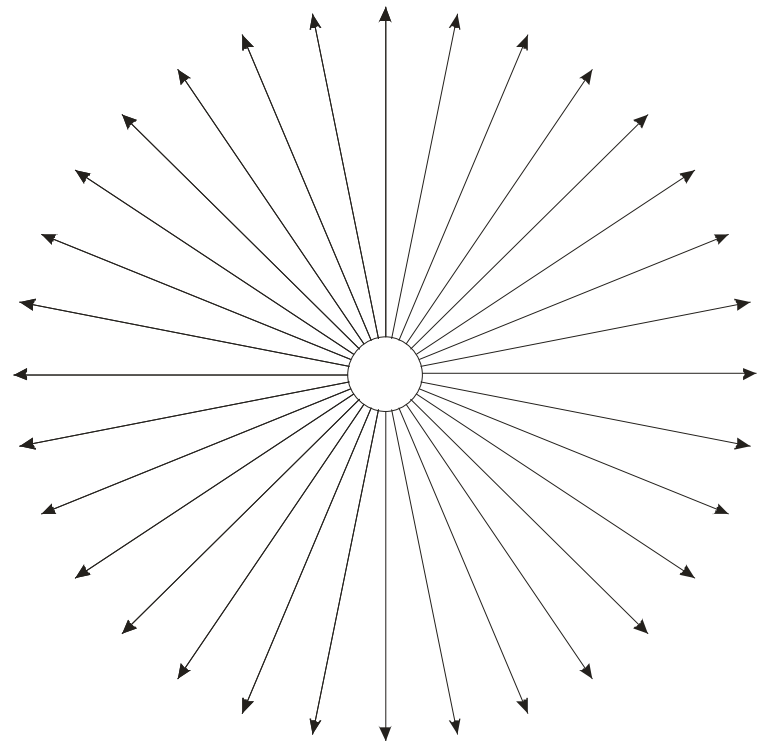
$$\Phi = \int_{\Omega} I(\omega) d\omega \quad \left| \begin{array}{l} \text{substituc} \\ d\omega = \sin\theta d\theta d\varphi \end{array} \right.$$

$$= I \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \sin\theta d\theta d\varphi$$

$$= I 2\pi \left[ -\cos\theta \right]_0^{\pi}$$

$$= 4\pi I$$

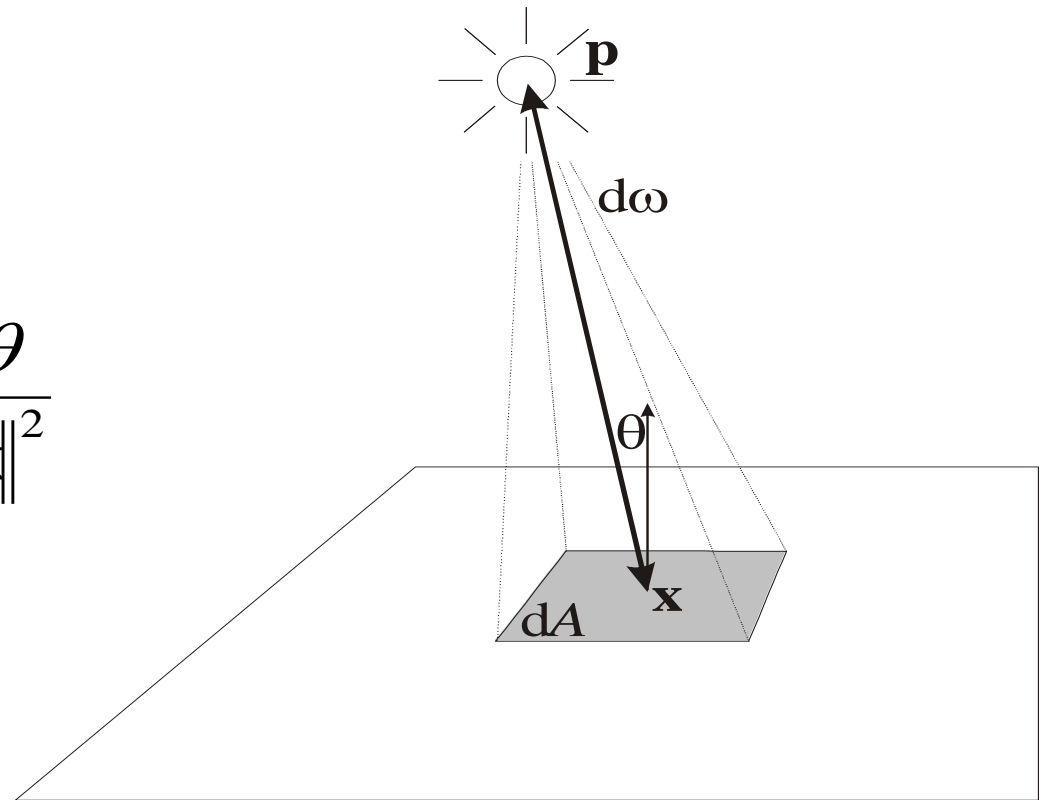
$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$



# Bodové světlo

- Irradiance bodu na ploše osvětlené bodovým zdrojem

$$\begin{aligned} E(\mathbf{x}) &= \frac{d\Phi(\mathbf{x})}{dA} \\ &= \frac{I(\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{x})d\omega}{dA} \\ &= I(\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{x}) \frac{\cos\theta}{\|\mathbf{p} - \mathbf{x}\|^2} \end{aligned}$$



# SpotLight - Reflektor

- Bodové světlo s nekonstantní závislostí intenzity na směru
- Intenzita je funkcí odchylky od referenčního směru  $\mathbf{d}$  :

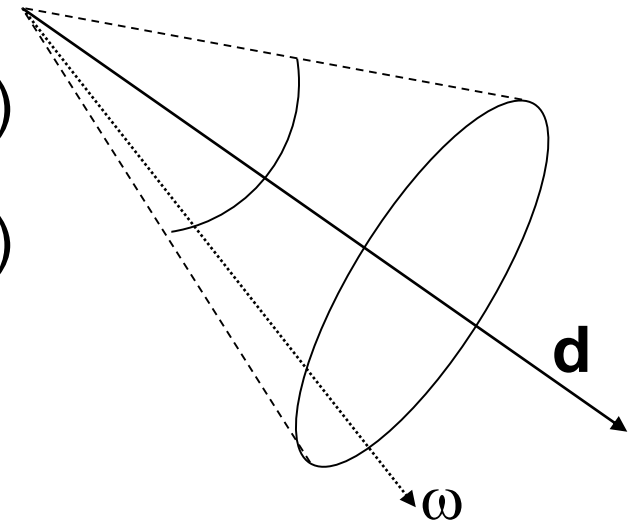
$$I(\omega) = f(\angle(\omega, \mathbf{d}))$$

- Např.

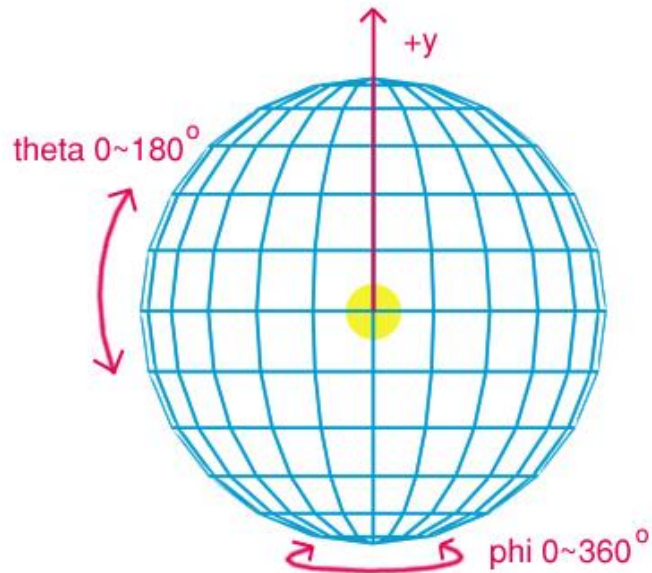
$$I(\omega) = I_0 \cos^2(\angle(\omega, \mathbf{d})) = I_0(\cos \theta)^2 \quad (1)$$

$$I(\omega) = \begin{cases} I_0 & \angle(\omega, \mathbf{d}) \leq \tau \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (2)$$

- Jaký je tok v případě (1) a (2)?



# Obecné bodové světlo



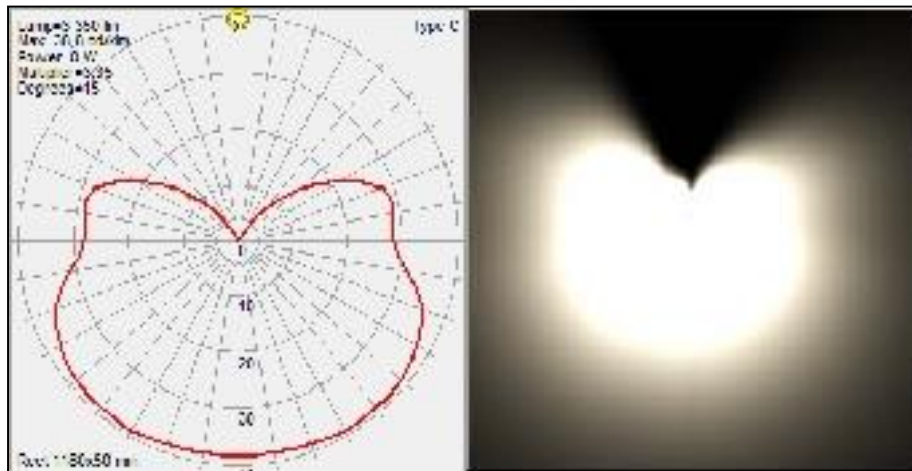
## •Formáty

ANSI/IESNA LM-63-02, LM-63-2002, CIBSE, EULUMDAT

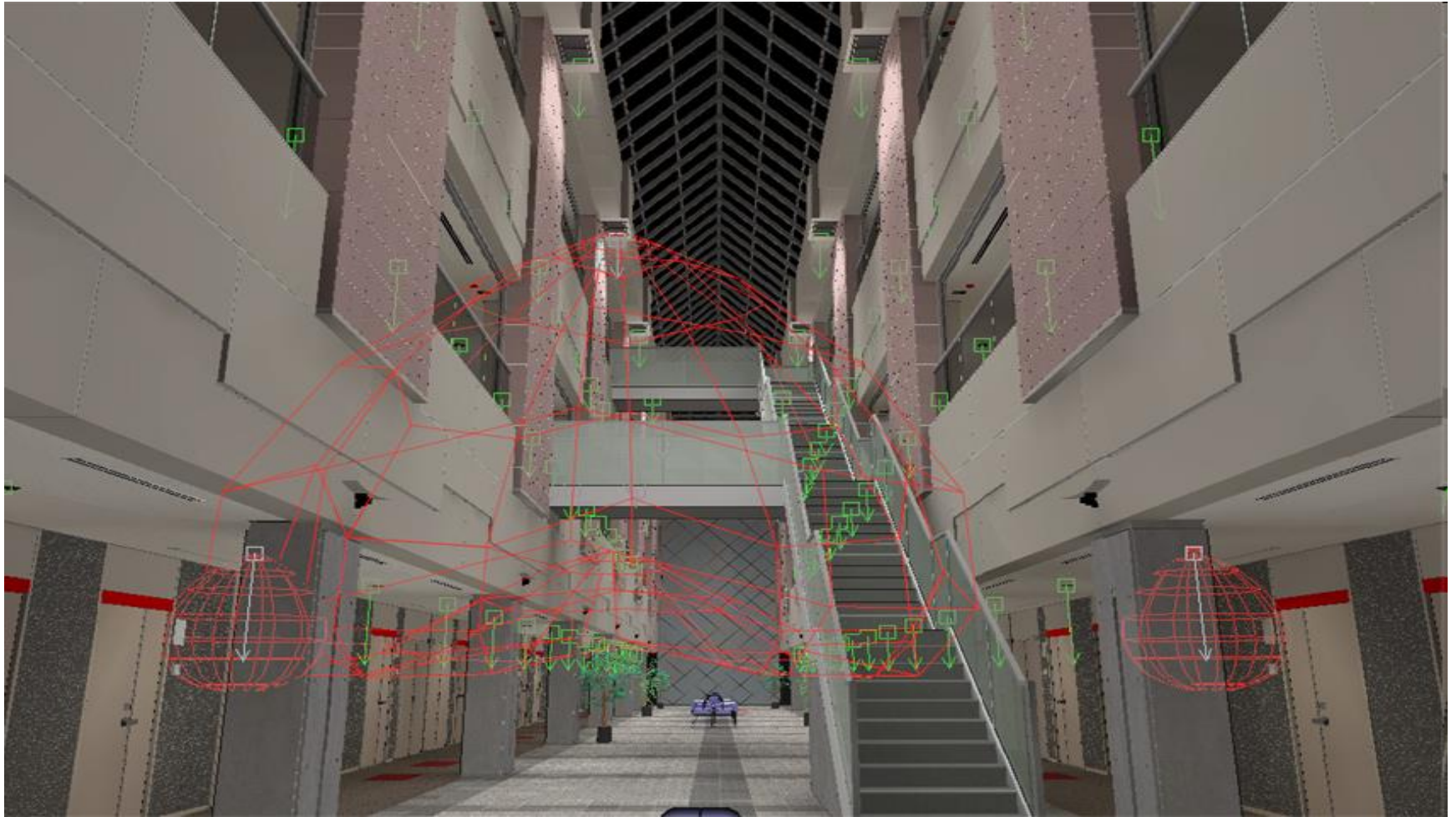
= fotometrický textový popis svítivosti [cd] pro úhly zadané goniometrickým diagramem

= často poskytovaný výrobcí svítidel

= aproximace nebodového zdroje bodovým zdrojem – “far field photometry”



# Použití v osvětlování a simulacích



# Plošné světelné zdroje

- Záření plně popsáno vyzářenou září  $L_e(\mathbf{x}, \omega)$  pro všechna místa a směry na zdroji světla
- Celkový zářivý tok
  - Integrál  $L_e(\mathbf{x}, \omega)$  přes plochu zdroje a úhly

$$\Phi_e = \int_A \int_{\Omega} L_e(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta \, d\omega \, dA$$

- Difúzní zdroj světla
  - $L_e(\mathbf{x}, \omega)$  je konstantní v  $\omega$
  - Radiozita:  $B_e(\mathbf{x}) = \pi L_e(\mathbf{x})$

$$\begin{aligned} B_e(\mathbf{x}) &= \int_{H(\mathbf{x})} L_e(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta \, d\omega \\ &= L_e(\mathbf{x}) \int_{H(\mathbf{x})} \cos \theta \, d\omega \\ &= L_e(\mathbf{x}) \pi \end{aligned}$$

- Uniformní difúzní zdroj
  - $L_e(\mathbf{x}, \omega)$  je navíc konstantní v  $\mathbf{x}$
  - Tok:  $\Phi_e = A B_e = \pi A L_e$

# Světelné zdroje – mapa prostředí

- Mapa prostředí
- Příchozí světlo nezávisí na místě v prostoru, pouze na příchozím směru
- Intenzita světla vyjádřena září (radiance) v texelu mapy prostředí

