
B4M39RSO

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

Vlastimil Havran

ČVUT v Praze

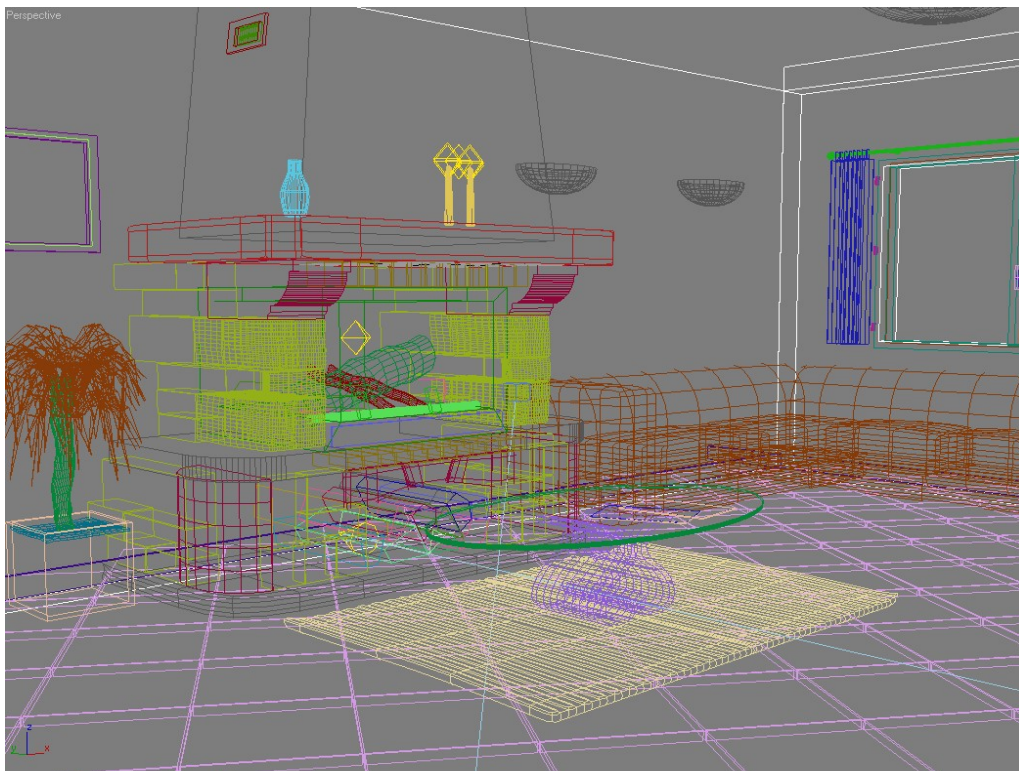
Úvod do globálního osvětlení

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

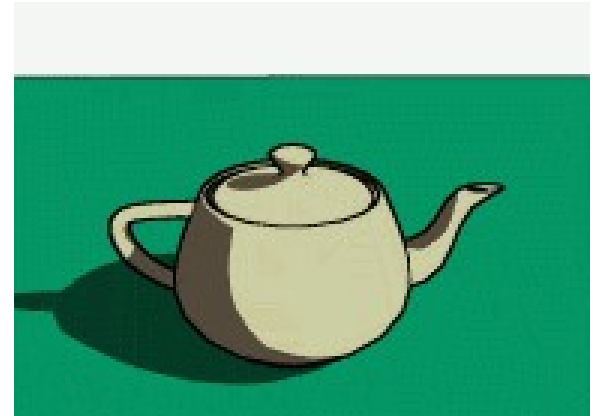
- Poloha, směr, velikost
- Směrové a prostorové rozložení intenzity, spektrum

■ Kamera

- Perspektivní, ortografická, sférická ...

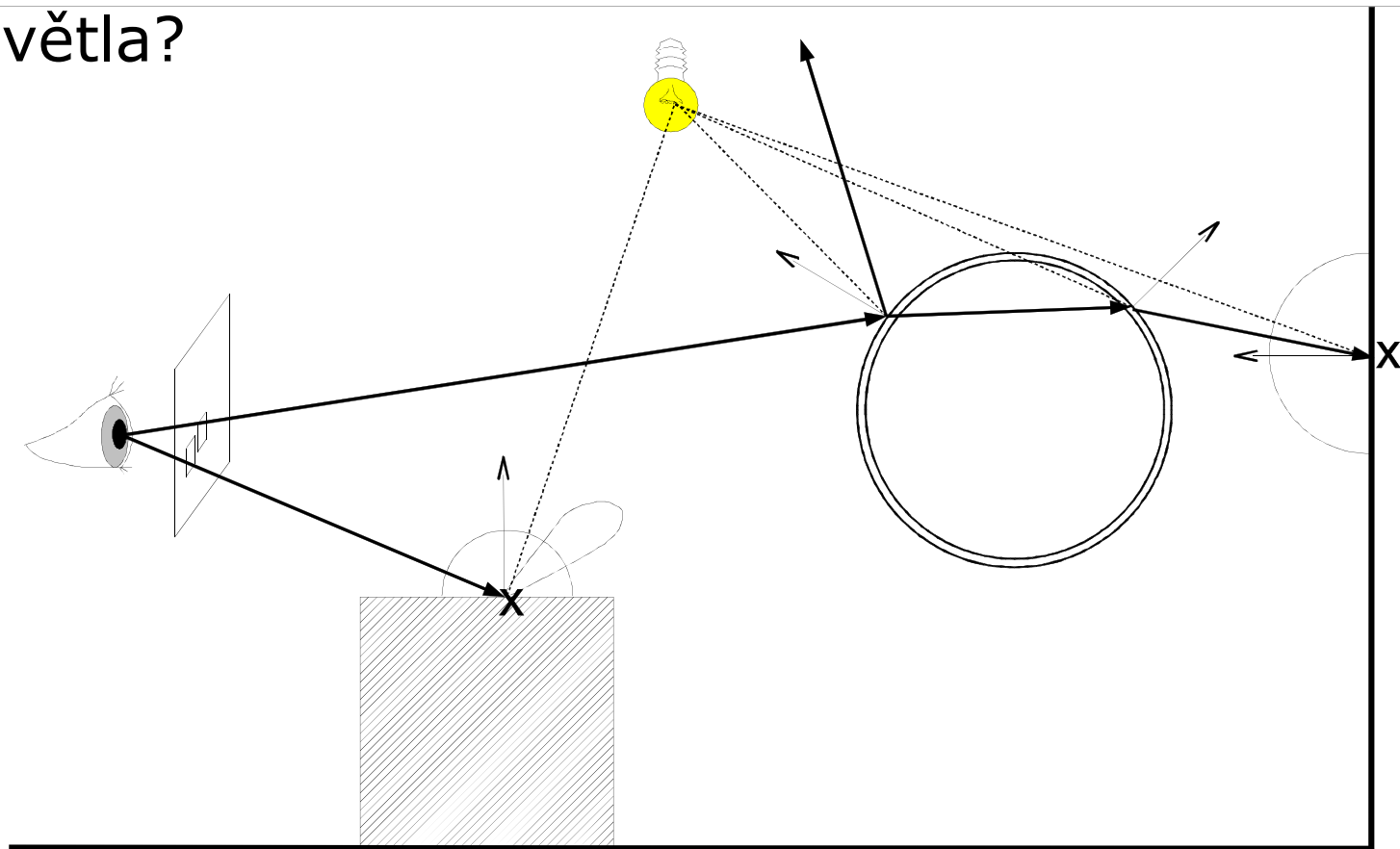
Přístupy k renderingu

- 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



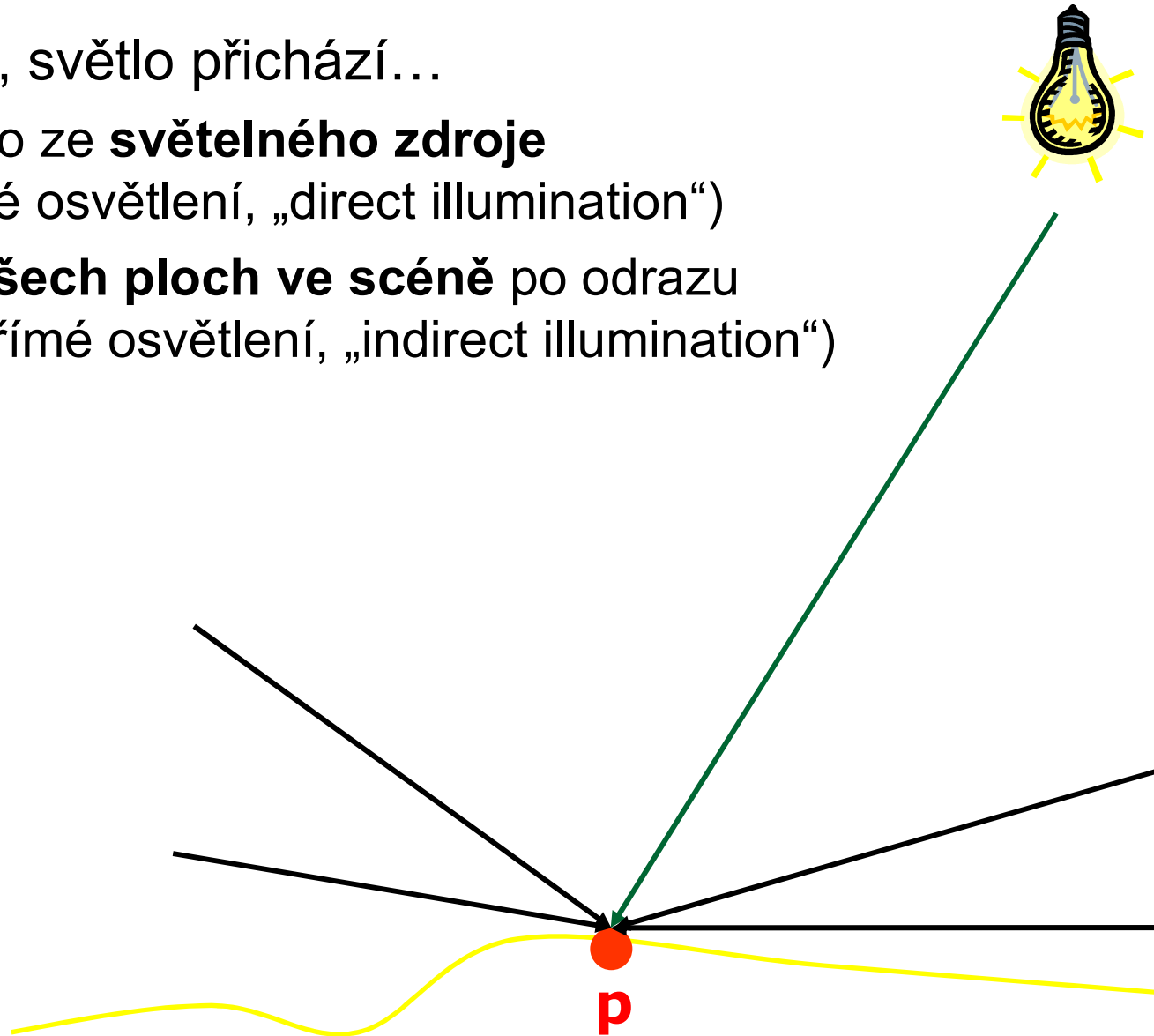
Simulace používaná v renderingu

Kolik světla?



Odkud se přichází světlo?

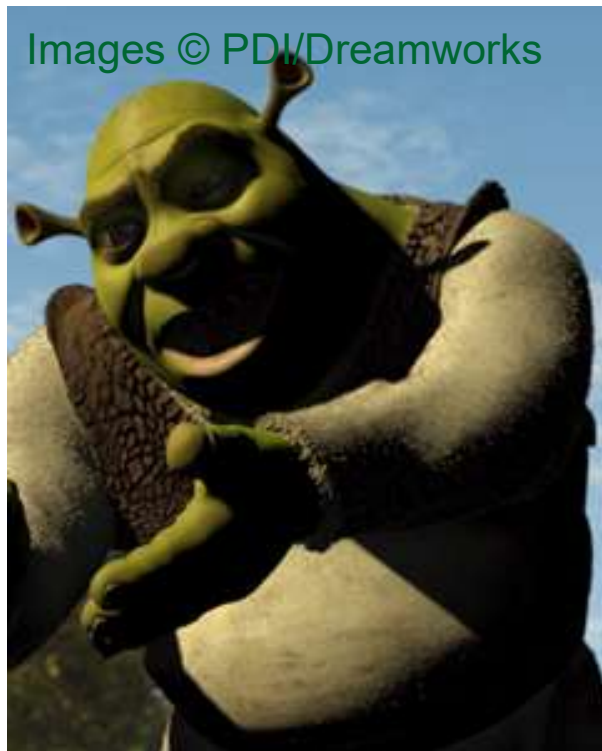
- V bodě **p**, světlo přichází...
 - ...přímo ze **světelného zdroje**
(=přímé osvětlení, „direct illumination“)
 - ...**ze všech ploch ve scéně** po odrazu
(= nepřímé osvětlení, „indirect illumination“)



Globální osvětlení (Global illumination – GI)

- **Pouze přímé osvětlení**

- Světlo se odrazí JEDNOU na cestě ze zdroje do kamery

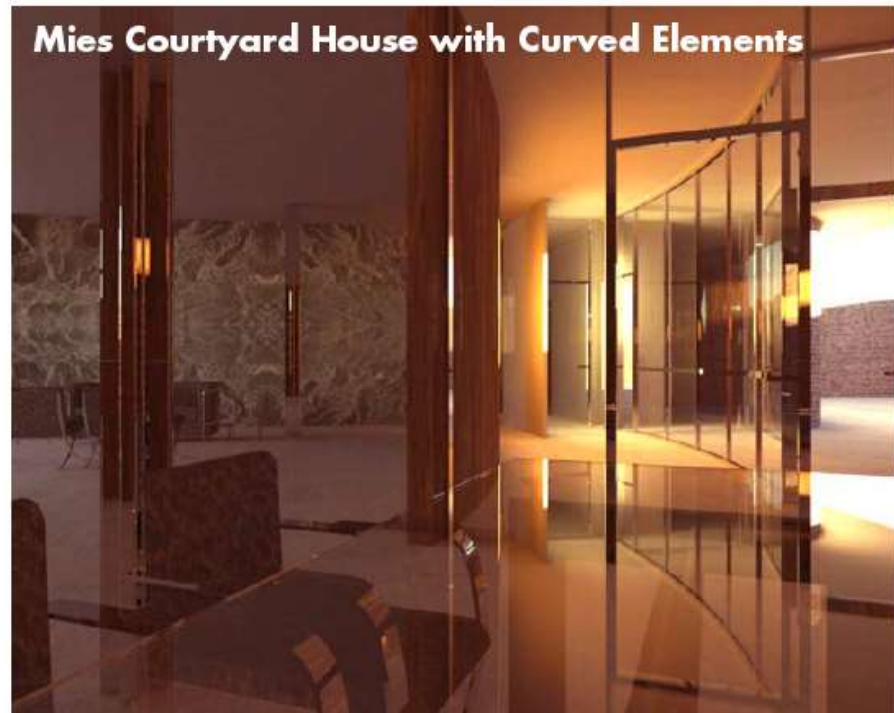


- **Globální osvětlení**

- 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)

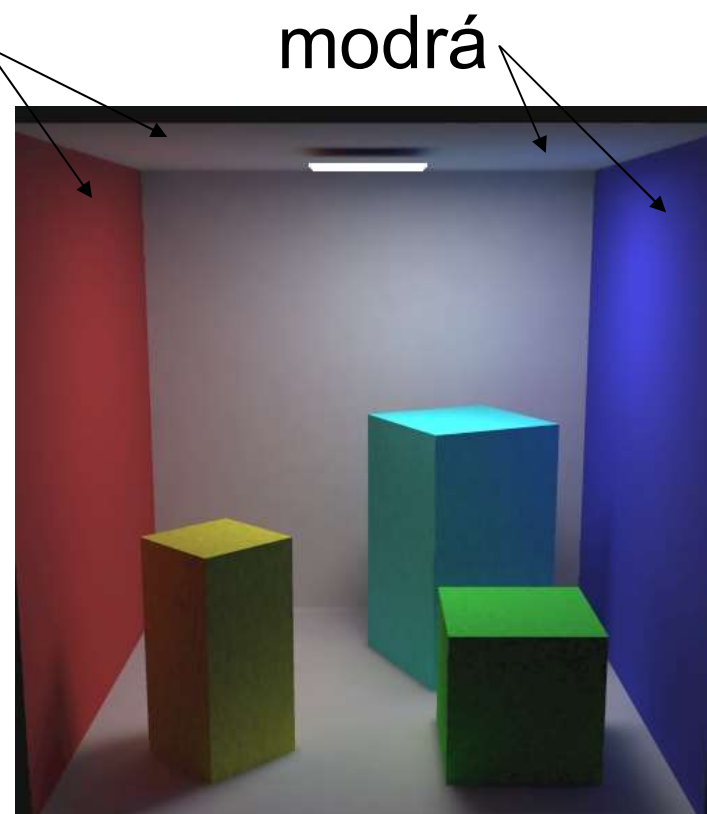
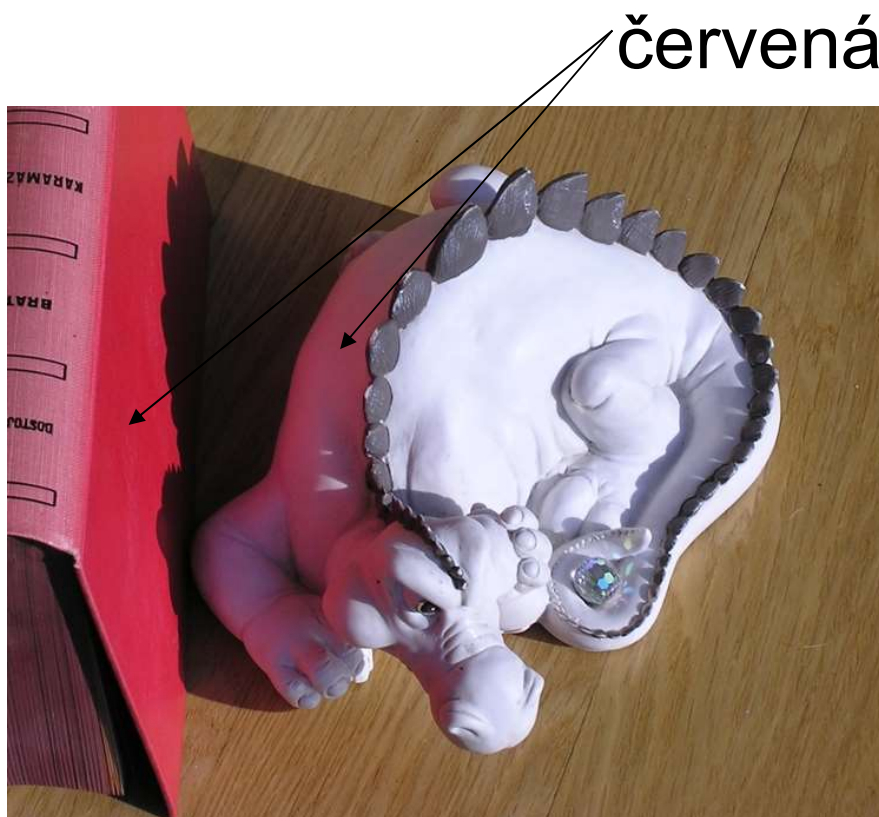


Modeling: Stephen Duck; Rendering: Henrik Wann Jensen

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



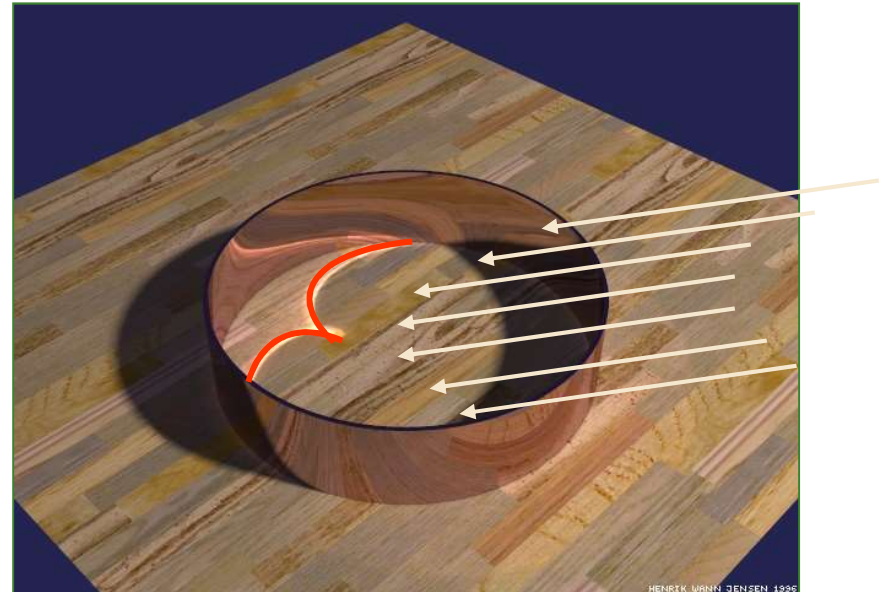
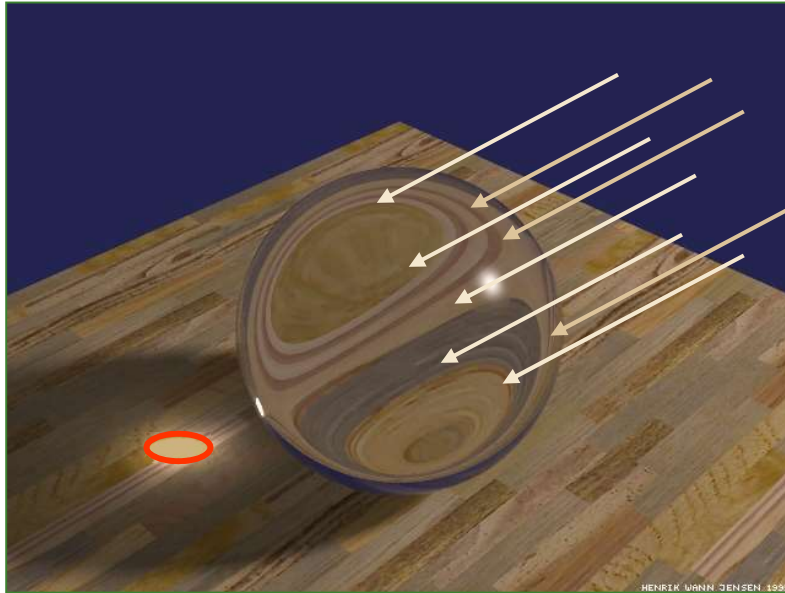
skutečnost



Simulace pomocí fotonových map

Kaustiky

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



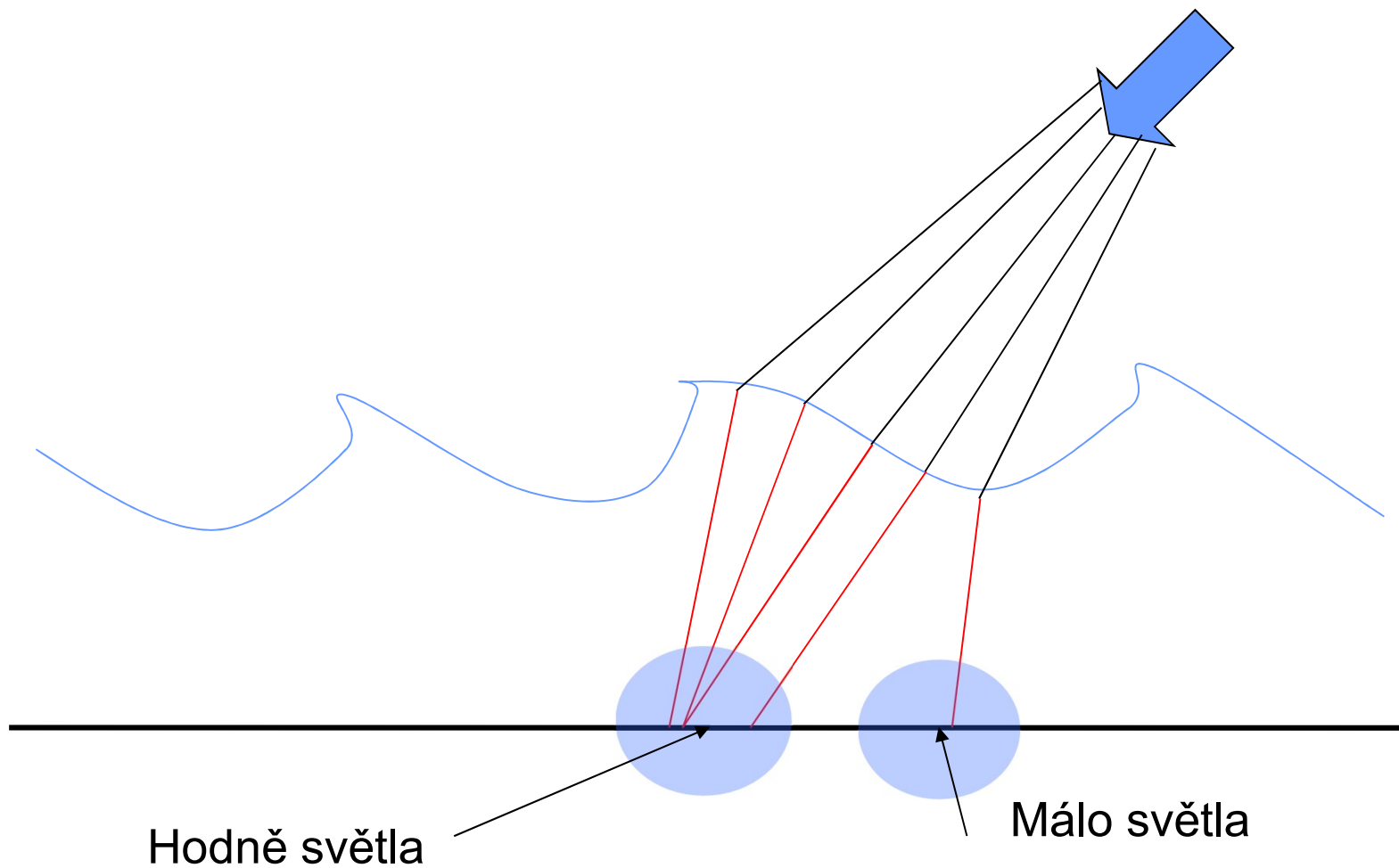
Pohled na vodu



- 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

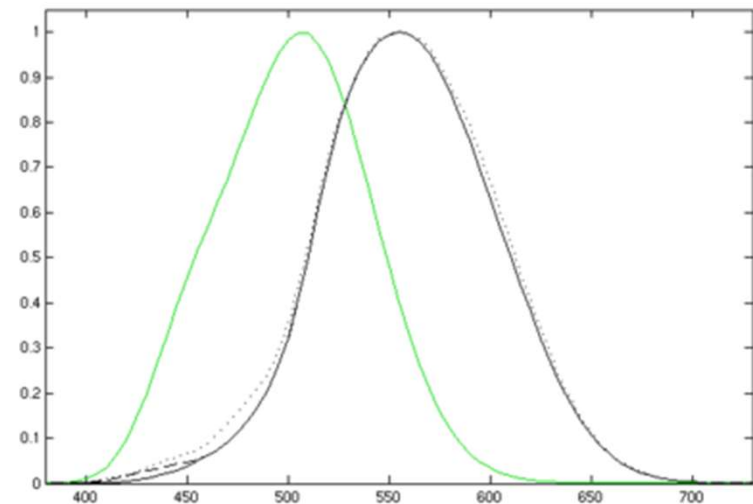
Simulace globálního osvětlení

- 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 μm – 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

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	--	$m \cdot s^{-1}$
Zrychlení	---	--	$m \cdot s^{-2}$
Síla	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
Tlak	pascal	Pa	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
Energie	joule	J	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Výkon	watt	W	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$

Odvozené jednotky – zopakování fyziky 3

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

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 – Φ [W]

- A.k.a „výkon“
- Anglický název: Radiant flux, Power
- Značka: Φ , P
- Jednotka: Watt [W]
- Definice: $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ [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 [$W.m^{-2}$]

- A.k.a.: Hustota zářivého toku
- Anglický název: **irradiance** (flux density)
- Značka: E
- Jednotka: Watt na metr čtvereční [$W.m^{-2}$]
- Definice:
$$E(\mathbf{x}) = \frac{d\Phi(\mathbf{x})}{dA} \quad [W.m^{-2}]$$
- 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.m⁻²

Intenzita vyzařování – B [$W.m^{-2}$]

- A.k.a.: **Radiozita**
- Anglický název: Radiant exitance, **radiosity**
- Značka: B , M
- Jednotka: Watt na metr čtvereční [$W.m^{-2}$]
- Definice:
$$B(\mathbf{x}) = \frac{d\Phi(\mathbf{x})}{dA} \quad [W.m^{-2}]$$
- 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 = lumen.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

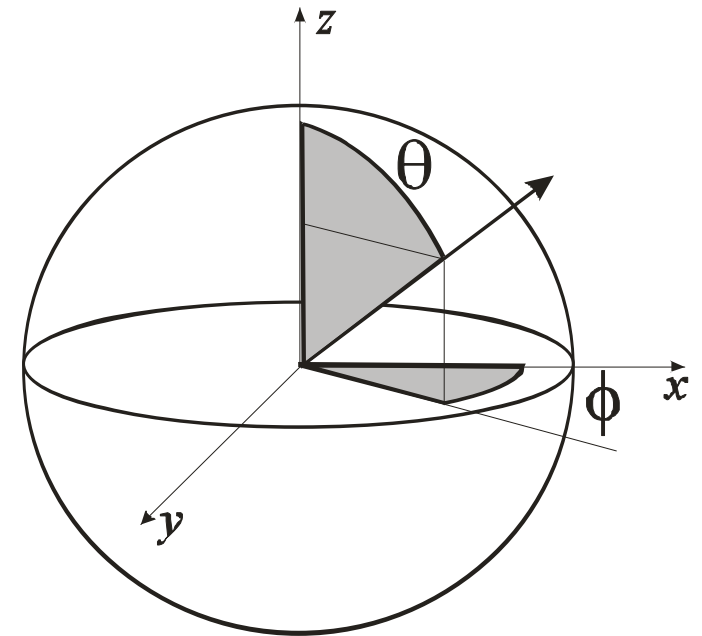
$$\omega = [\theta, \varphi]$$

$$\theta \in [0, \pi/2]$$

$$\theta = \arccos z$$

$$\varphi \in [0, 2\pi]$$

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x}$$



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

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

$$z = \cos \theta$$

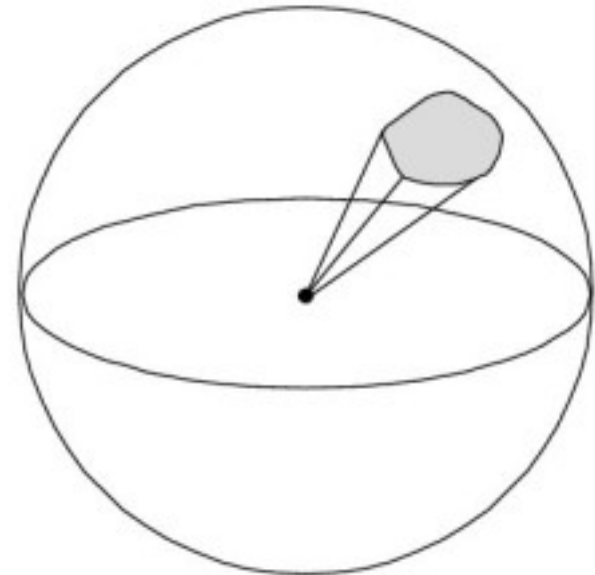
- θ ... *polární úhel* - odchylka od osy Z
- ϕ ... *azimut* - úhel od osy X

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

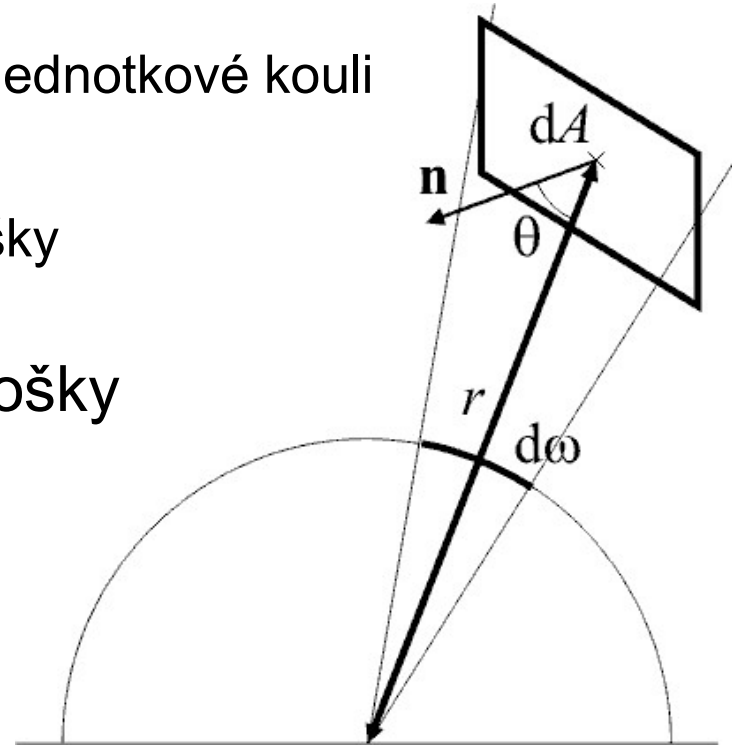
- Plocha projekce objektu na jednotkovou kouli okolo středu prostorového úhlu
- Jednotka: steradian (sr)
- Rovinný úhel
 - Délka oblouku na jednotkové kružnici
 - Kružnice má 2π radiánů
- Prostorový úhel
 - Velikost plochy na jednotkové kouli
 - Koule má 4π steradiánů



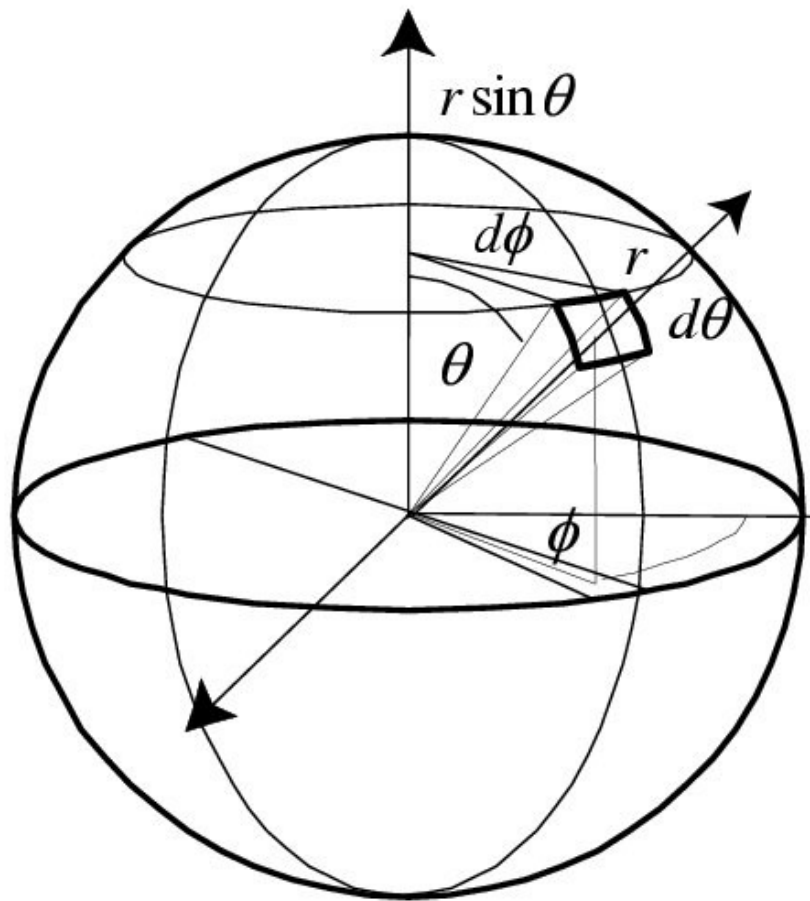
Vsuvka: Diferenciální prostorový úhel

- „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 – I [W.sr⁻¹]

- Anglický název: Radiant intensity
- Značka: I
- Jednotka: Watt na steradián – [W.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)

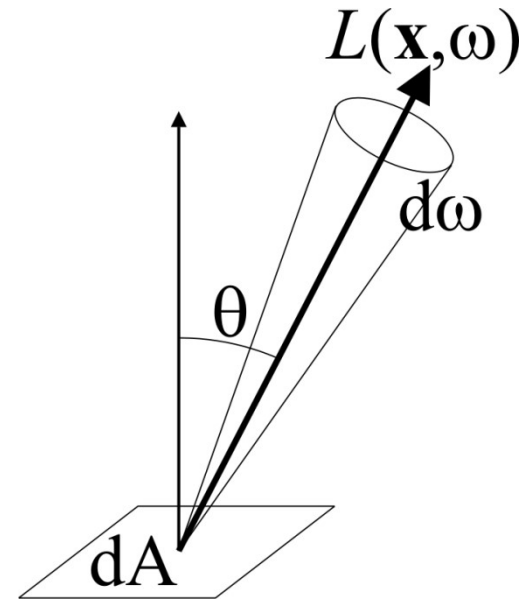
- Svítivost (luminous intensity), jednotka Candela (cd=lumen.sr⁻¹)

Kandela definice - svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření s kmitočtem 540×10^{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:
$$L(\mathbf{x}, \omega) = \frac{d\Phi}{\cos \theta dA d\omega}$$



- Fotometrická veličina
 - Jas (luminance), jednotka candela. m^{-2} (v ang. též Nit)
 - Popis záření LCD displeje v kandelách na 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 θ 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:

$$E(\mathbf{x}) = \int_{H(\mathbf{x})} L(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta d\omega = \left| \begin{array}{l} \text{substituce:} \\ d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi \end{array} \right|$$
$$= \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\mathbf{x}, \theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

Zářivý tok:

$$\Phi = \int_A E(\mathbf{x}) dA$$
$$= \int_A \int_{H(\mathbf{x})} L(\mathbf{x}, \omega) \cos \theta d\omega dA$$

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

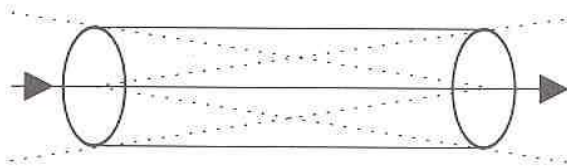
$H(\mathbf{x})$ = hemisféra nad bodem \mathbf{x}

Vlastnosti radiance (1)

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

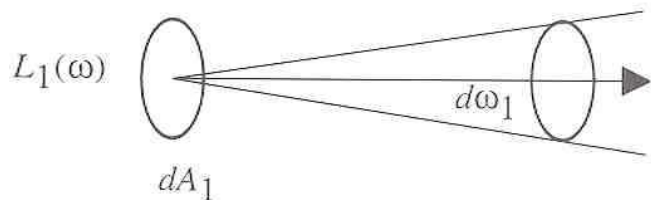
Vlastnosti radiance (2)

- 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

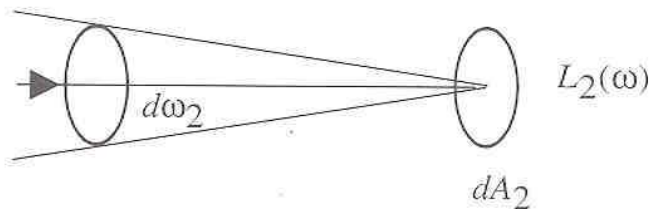


$$d\Phi_1 = L_1 d\omega_1 dA_1 = L_2 d\omega_2 dA_2 = d\Phi_2$$

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



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



$$\therefore L_1 = L_2$$

Příchozí / odchozí radiance

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

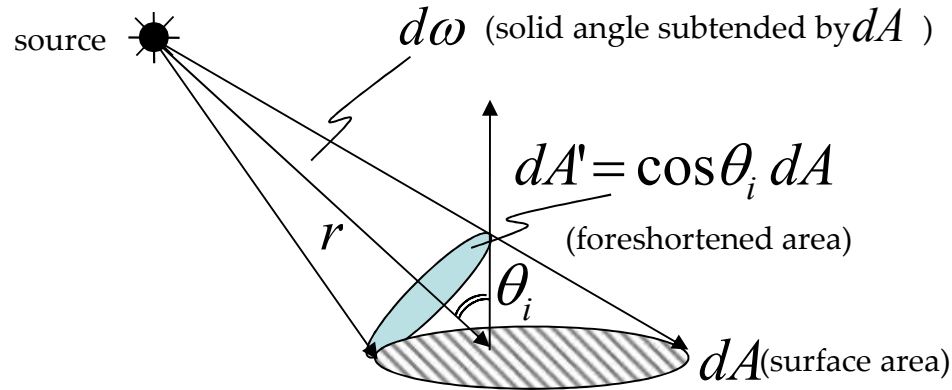
$L^o(\mathbf{x}, \omega)$ Odchozí (**outgoing**, odražená) radiance – radiance po odrazu

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

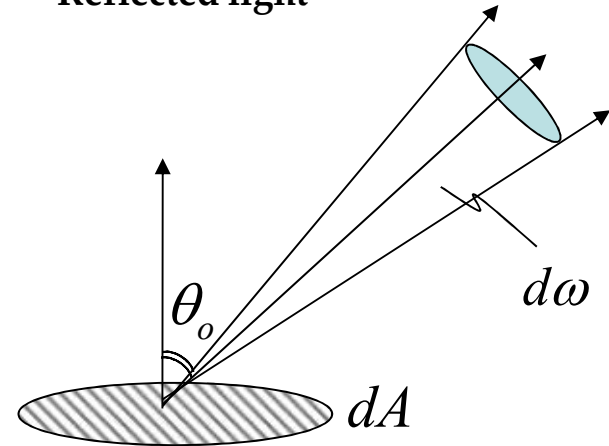
Ve volném prostoru platí: $L^o(\mathbf{x}, \omega) = L^i(\mathbf{x}, -\omega)$

Radiometric concepts – recap

Incident light



Reflected light



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

(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 :**

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

- 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 _v	luminous energy

zářivý tok	watt	[W]	Φ	radiant flux
světelný tok	lumen	[lm]	Φ _v	luminous flux

intenzita ozáření		[W.m ⁻²]	E	irradiance
osvětlení (illuminance)	Lux	[lm.m ⁻²]	E _v	illuminance

intenzita vyzařování		[W.m ⁻²]	B	radiant exitance, radiosity
luminosity	Lux	[lm.m ⁻²]	B	luminous exitance

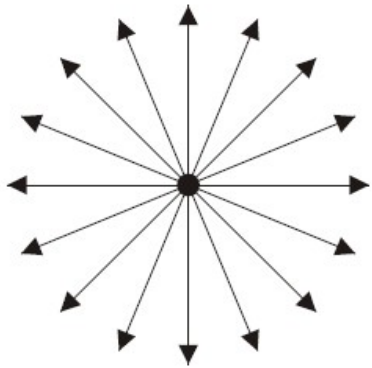
zářivost		[W.sr ⁻¹]	I	radiant intensity
svítivost	candela	[cd=lm.sr ⁻¹]	I _v	luminous intensity

zář		[W.m ⁻² .sr ⁻¹]	L	radiance
jas		[cd.m ⁻²]	L _v	luminance

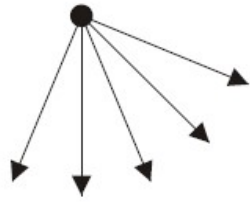
Část 3:

Modely světelných zdrojů

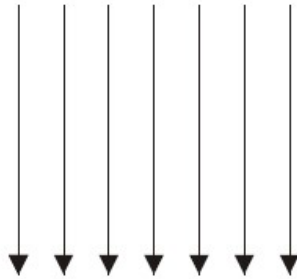
Světelné zdroje



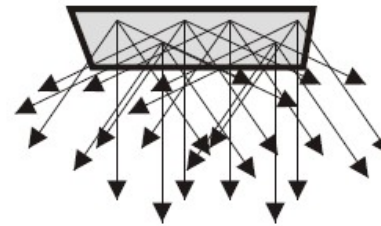
A) Omnidirectional point light



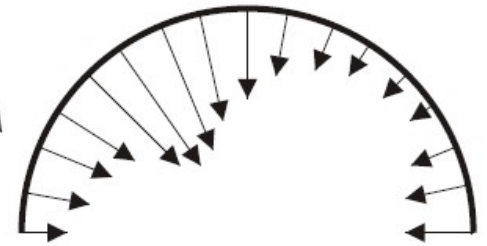
B) Spot light



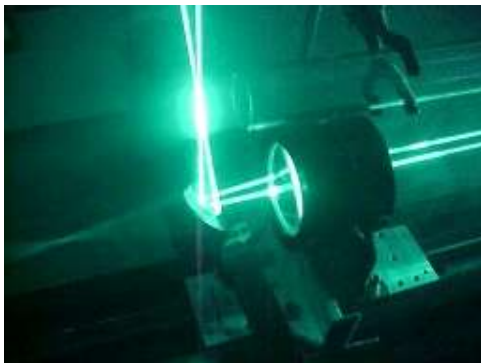
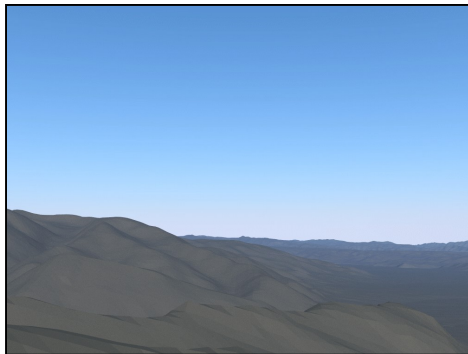
C) Directional light



D) Area light



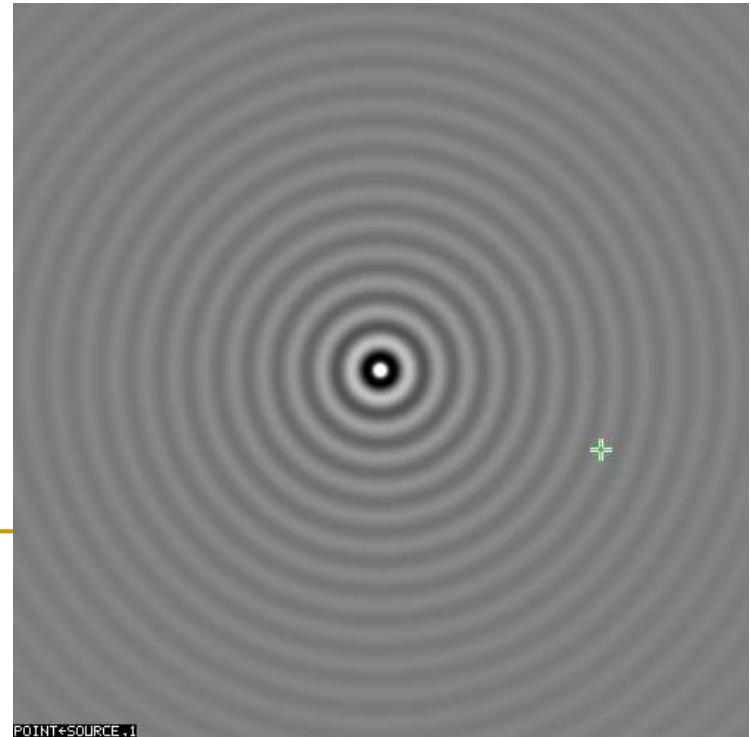
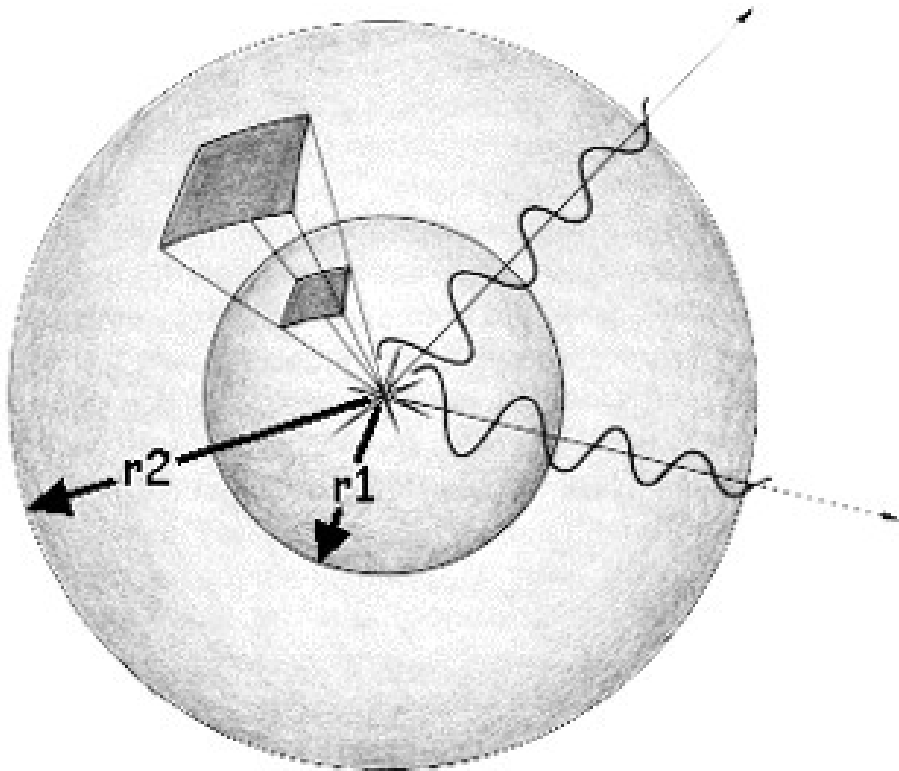
E) Environment map



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:

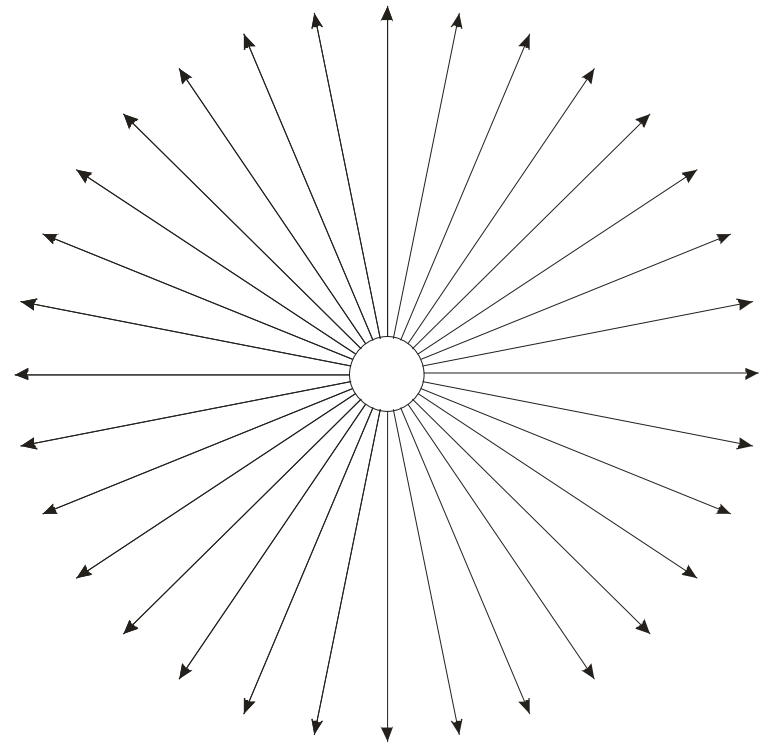
$$\Phi = \int_{\Omega} I(\omega) d\omega = \left| \begin{array}{l} \text{substituce:} \\ d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi \end{array} \right|$$

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

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

$$= 4\pi I$$

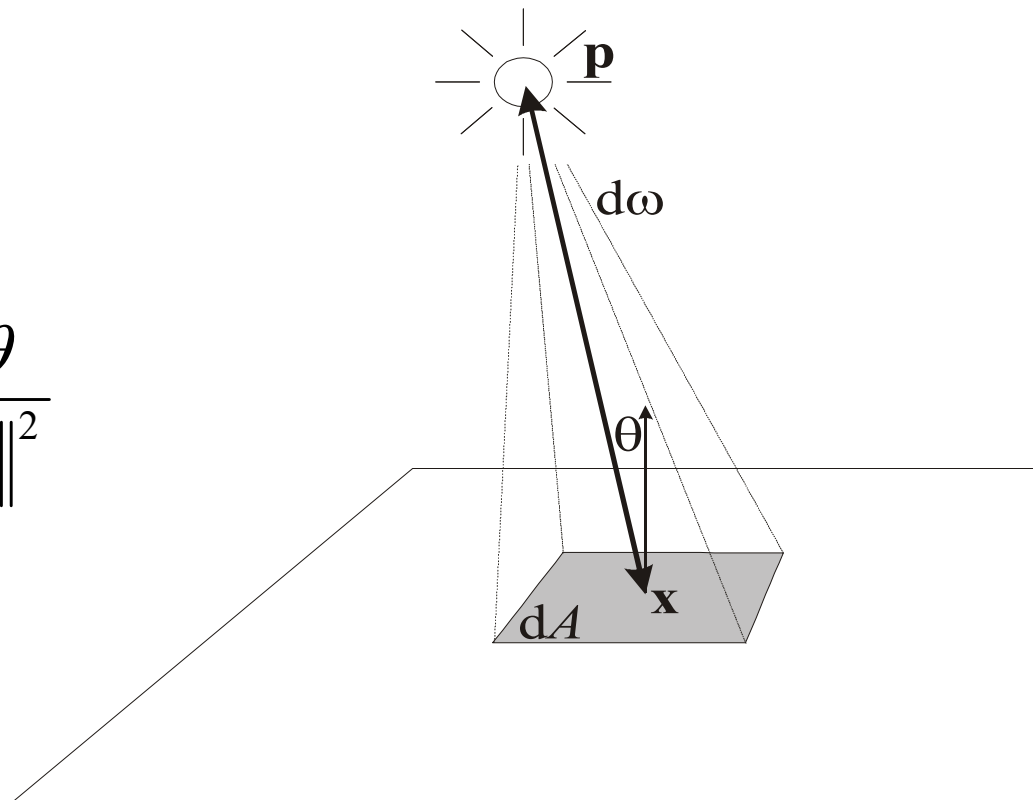
$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$



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} :

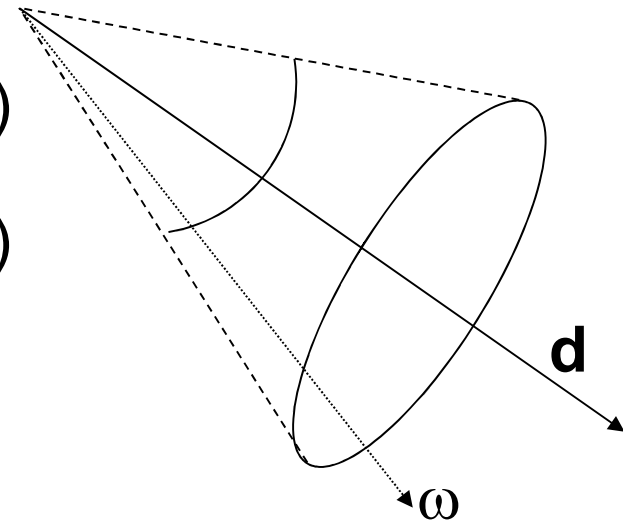
$$I(\omega) = f(\angle \omega, \mathbf{d})$$

- Např.

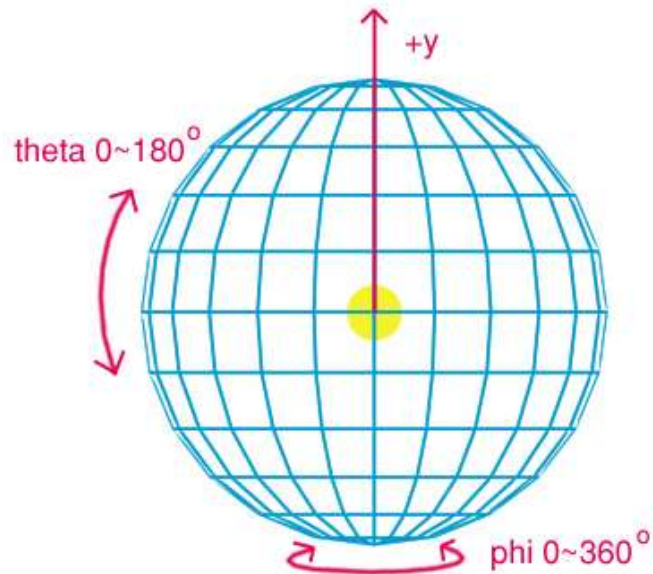
$$I(\omega) = I_o \cos \angle(\omega, \mathbf{d}) = I_o (\omega \cdot \mathbf{d}) \quad (1)$$

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

- Jaký je tok v případě (1) a (2)?



Obecné bodové světlo



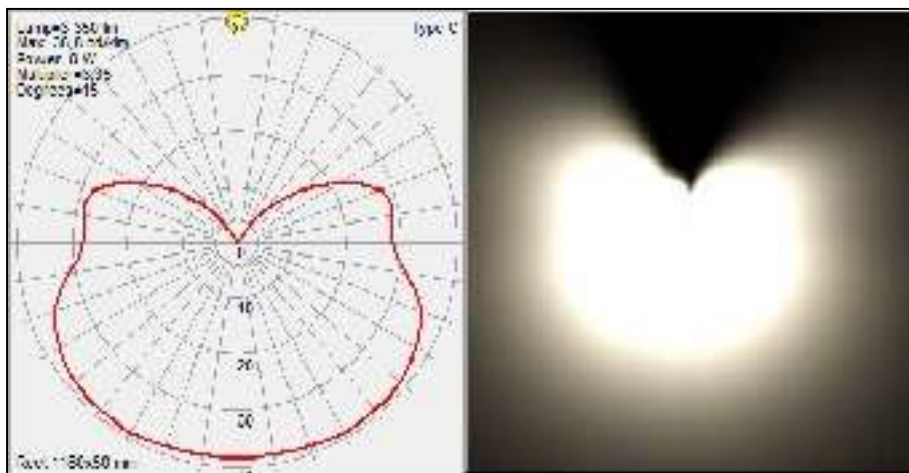
•Formáty

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

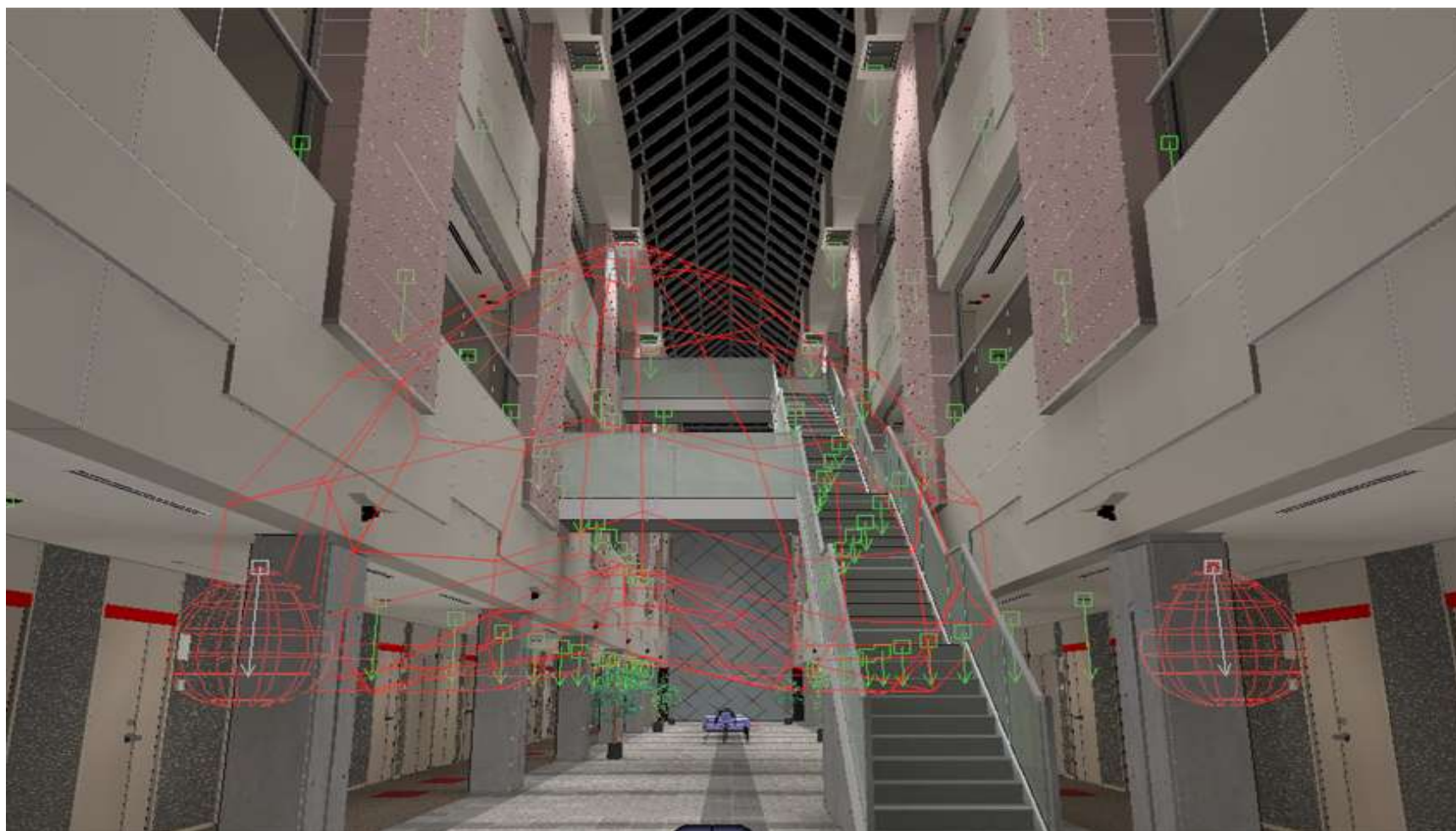
= fotometrický textový popis svítivosti [cd] pro úhly zadané goniometrickým diagramem

= 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

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

- Difúzní zdroj světla

- $L_e(\mathbf{x}, \omega)$ je konstantní v ω
- 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

