Fotorealistická syntéza obrazu

http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/

Přednáška pro střední školy, 31. 5. 2010

Obsah přednášky

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- historie, přehled používaných přístupů
  - Ray-tracing, radiační metody
- teoretické základy – zobrazovací rovnice
  - souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- metody založené na zobrazovací teorii
  - Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)
  - hybridní metody (efektivita)
  - Photon-mapping

Cíle realistického zobrazování

- věrně **napodobit přírodu**
  - virtuální scéna reprezentovaná v počítači
- přesně **simulovat šíření světla** ve scéně
  - „predictive rendering“
- nebo „**důvěryhodné zobrazování**“
  - laický pozorovatel nemá poznat, že je obrázek umělý …
- **rychlost** vykreslování
  - „off-line“ rendering (nezáleží tolik na rychlosti)
  - „real-time“ (min. 25 fps)

Aplikace

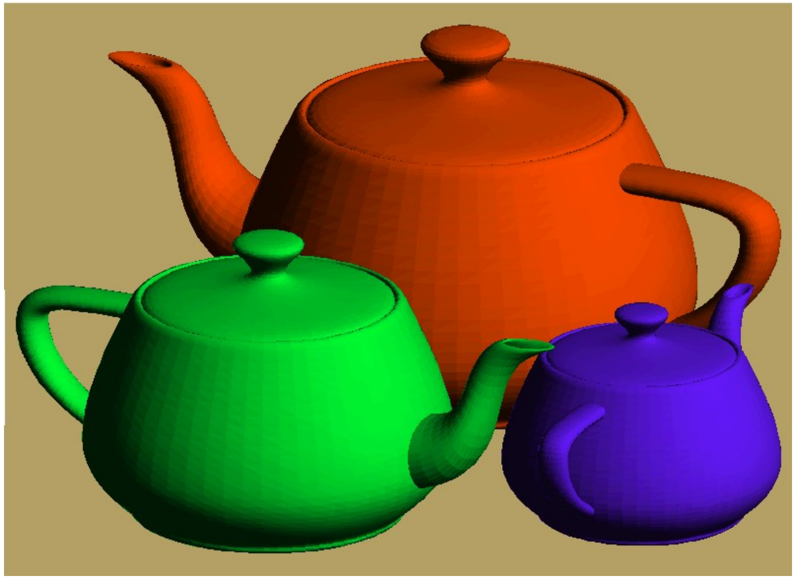
- design, architektura, umění
  - šíření světla v interiéru, kabině, ..
- zábavní průmysl
  - filmy (IL&M, Pixar, DreamWorks, … „off-line“)
  - videohry („real-time“)
- média
  - televize (virtuální studia, …)
  - reklamy

Historie

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- **historie, přehled používaných přístupů**
  - **Ray-tracing, radiační metody**
- teoretické základy – zobrazovací rovnice
  - souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- metody založené na zobrazovací teorii
  - Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)
  - hybridní metody (efektivita)
  - Photon-mapping

Historie – klasické zobrazování

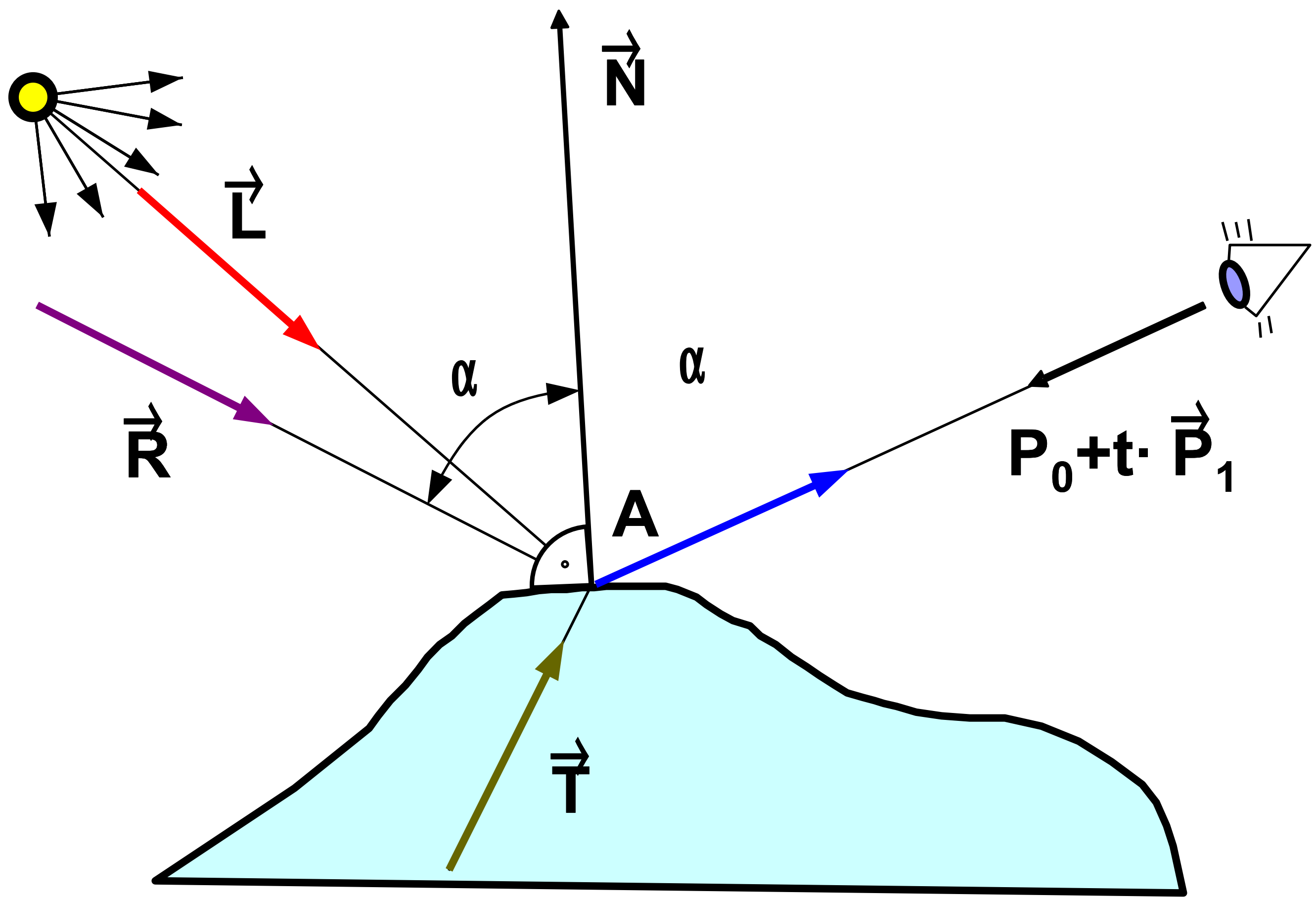
- Sutherland 1974: Z-buffer
- **ploškový model**
  - nejčastěji trojúhelníkové sítě
- **výpočet viditelnosti**
  - Z-buffer
- přibližné **světelné poměry**
  - lokální osvětlovací model, vržené stíny
- **textury**, **shadery**



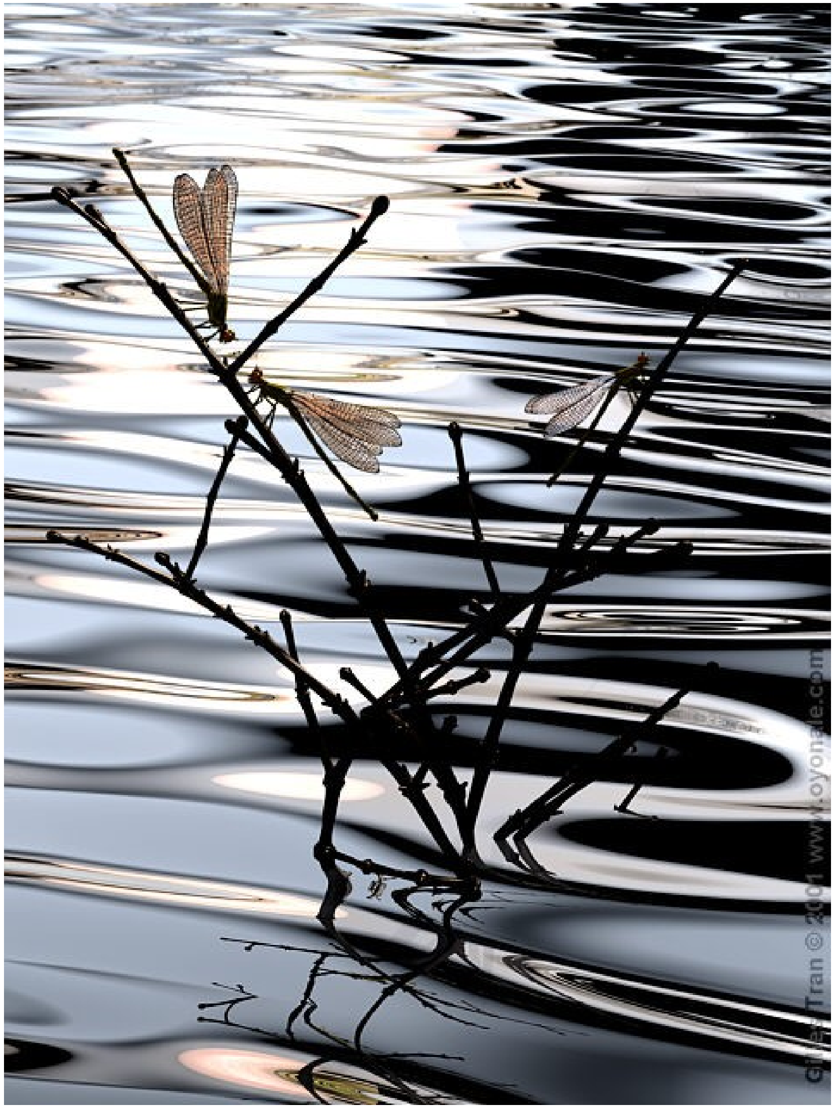
Historie – Ray-tracing I

- Whitted 1980: základní Ray-tracing
- **geometrický přístup**
  - sleduje se jenom ideálně odražený paprsek
- výpočetně velmi náročný **výpočet průsečíku** paprsku se scénou
  - 95% času → urychlovací metody
- snadné **vylepšení vzhledu**
  - textury, anti-aliasing, shadery
  - distribuované techniky (viz dále)

Historie – Ray-tracing II



Ray-tracing – příklady



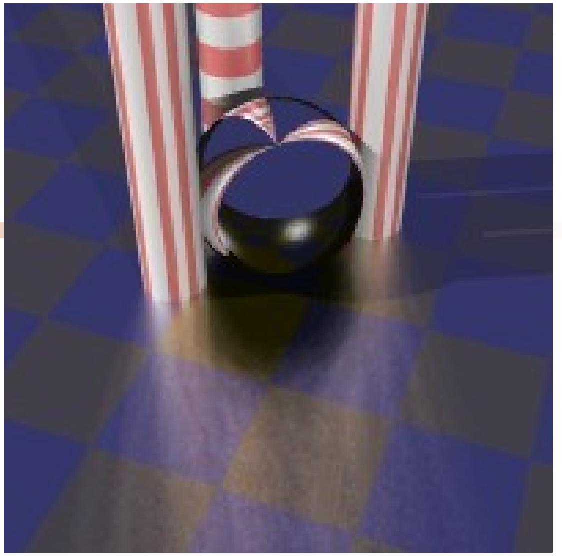
Ray–tracing – příklady

MFF UK CGG Prague

Ray-tracing – příklady

Ray–tracing – příklady

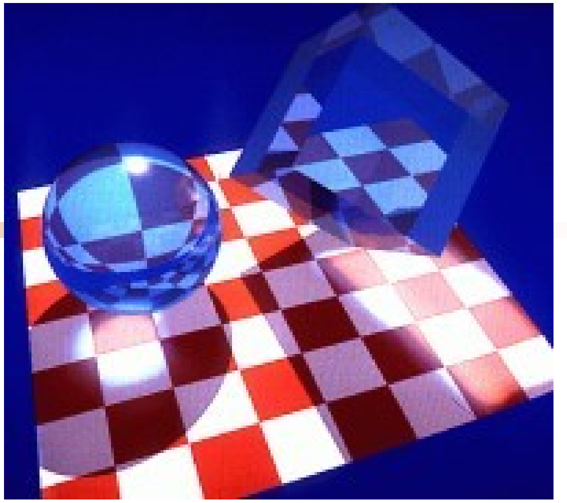
Historie – Distributed RT



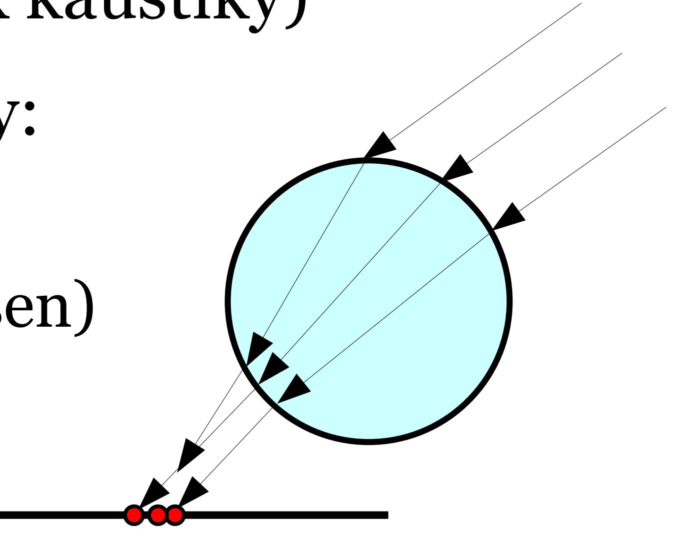
- Cook 1984: Distributed Ray Tracing
- **vylepšení kvality výsledku**
  - integrál nahrazuje původně jediný vzorek
  - měkké stíny, odrazy, lomy, difrakce
  - rozmazání pohybem
  - hloubka ostrosti kamery
- výpočetně velmi náročné metody
  - Monte-Carlo algoritmy
  - stonásobně víc paprsků...

Distributed RT – příklad

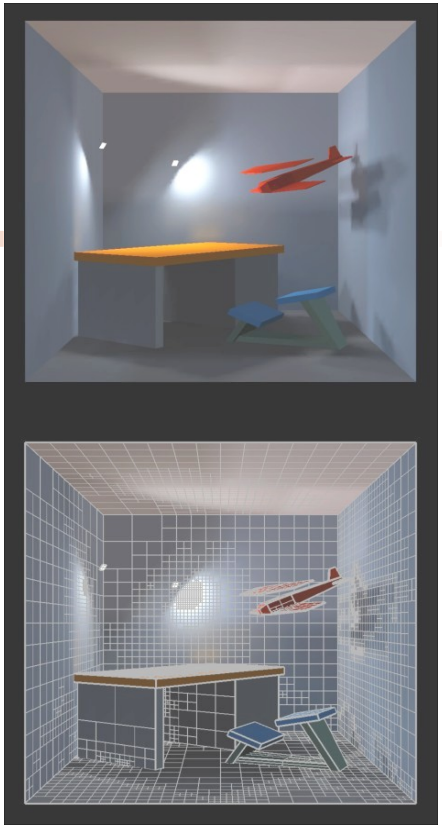
Historie – Bidirectional RT



- Arvo 1986: Backward Ray Tracing
- sledování **opačného směru**
  - v první fázi se paprsky posílají <u>ze světel</u> a zachytávají <u>na plochách</u>
  - vykreslení „kaustiky“ (1986 = rok kaustiky)
  - později se z toho vyvinuly metody:
    - Light-tracing, Photon-tracing
    - <u>Photon-maps</u> (Henrik Wann Jensen)



Historie – Radiační metoda I



- Goral et al. 1984: Illumination for Computer-Generated Pictures
- předpoklad **difusních** materiálů
  - Lambertův zákon (dokonalý rozptyl světla)
  - metoda konečných prvků vede na **soustavu lineárních rovnic**
- různá **vylepšení**:
  - iterace à la Southwell
  - hierarchické přístupy
  - zobecněné konfig. faktory (lesk)

Historie – Radiační metoda II

- základní rovnice pro **radiositu** i-té plošky:

$$B_i = E_i + \rho_i \cdot \sum_{j=1}^{N} B_j \cdot \boxed{\frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} g(y,x)\, dA_j\, dA_i}$$

geometrický člen - **konfigurační faktor $\mathbf{F_{ij}}$**
(část výkonu vyzářeného ploškou $\mathbf{A_i}$ dopadající na $\mathbf{A_j}$)

$$\boxed{B_i = E_i + \rho_i \cdot \sum_{j=1}^{N} B_j F_{ij} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]}$$

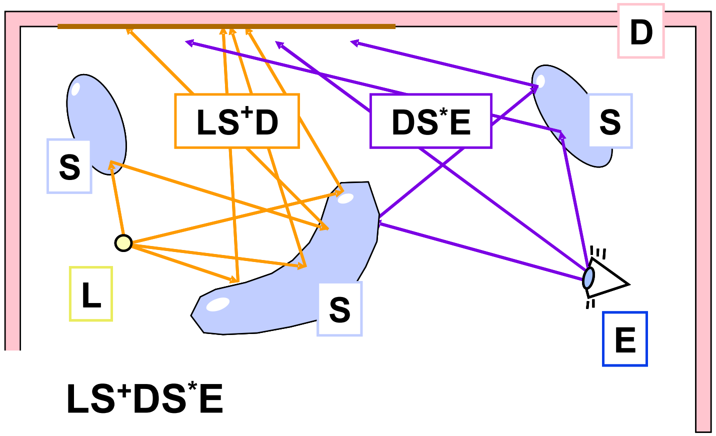
Radiační metoda – příklady

Radiační metoda – příklady

Radiační metoda – příklady

Historie – Hybridní metody

- Wallace 1987, Sillion 1989, 1991, ...
- radiační metoda umí dobře **difusní** materiály
- metody založené na paprscích umí dobře **lesklý** odraz
  - Ray-tracing, Distributed R-T
  - Path-tracing, Photon-tracing, ...

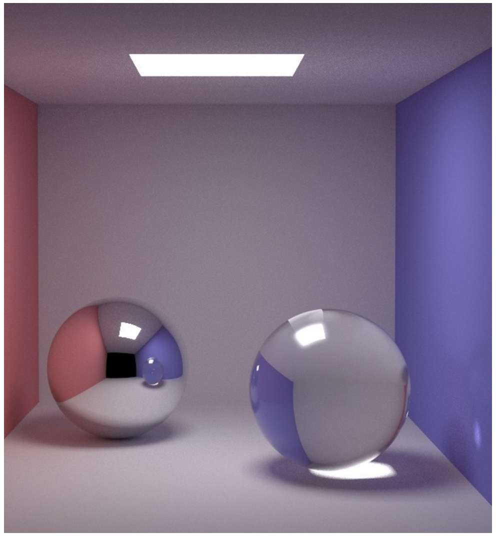


LS^+DS^*E

- **kombinace** několika metod
  - pozor na duplikace!
  - většinou sériové zapojení = více fází za sebou
  - vykreslení: Ray-tracing, Path-tracing

Historie – Zobrazovací rovnice

- J. T. Kajiya: The Rendering Equation (SIGGRAPH '86)
- matematický přístup k zobrazování
  - integrální rovnice popisující šíření světla, nestranné řeš.
- algoritmy založené na **Monte-Carlo**
  - .. přesné (analytické) řešení není možné
- **Path-tracing** (už Kajiya)
  - později: Light-tracing, Photon-tracing, Bidirectional Path-tracing, hybridní alg., Metropolis metody

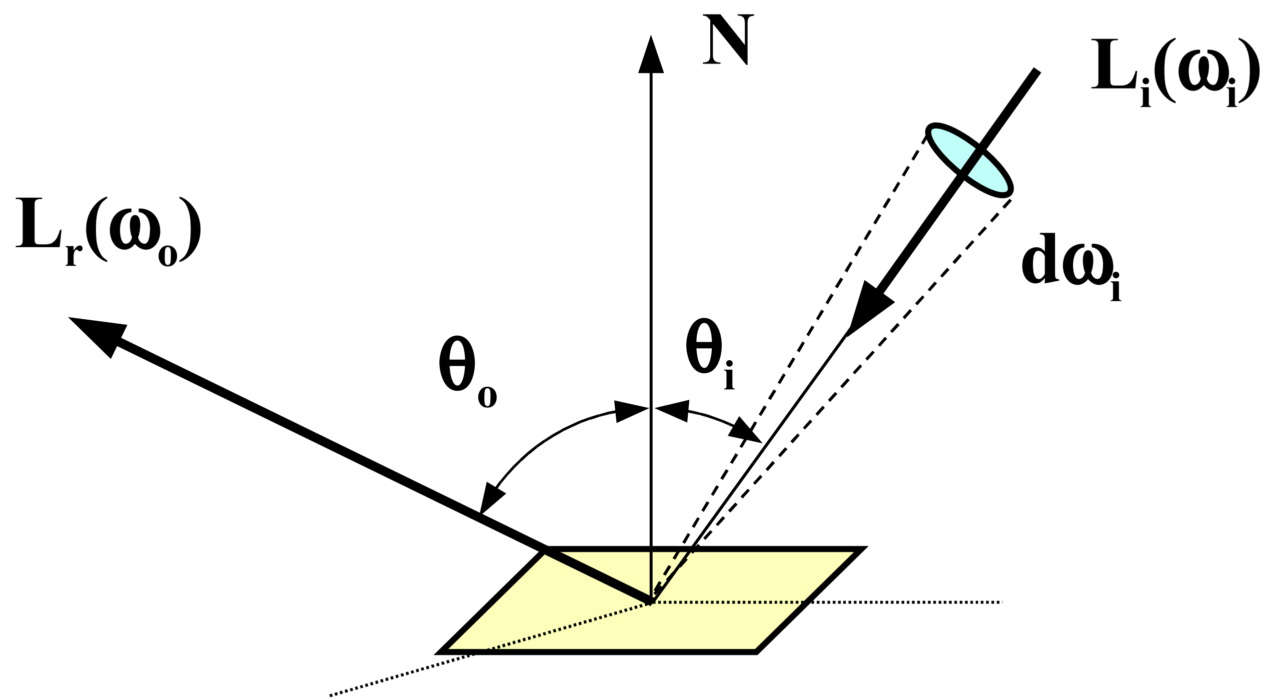


Teoretické základy

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- historie, přehled používaných přístupů
  - Ray-tracing, radiační metody
- **teoretické základy – zobrazovací rovnice**
  - souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- metody založené na zobrazovací teorii
  - Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)
  - hybridní metody (efektivita)
  - Photon-mapping

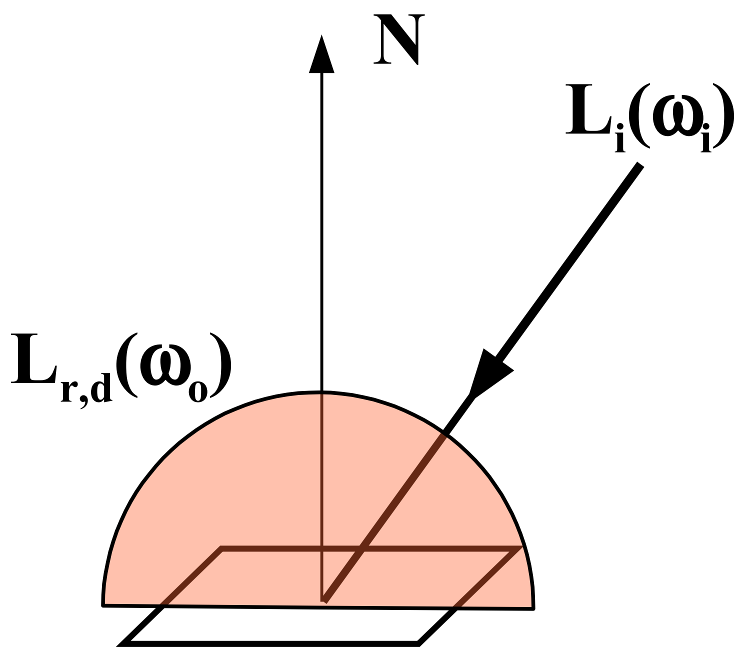
BRDF (lokální funkce odrazivosti)

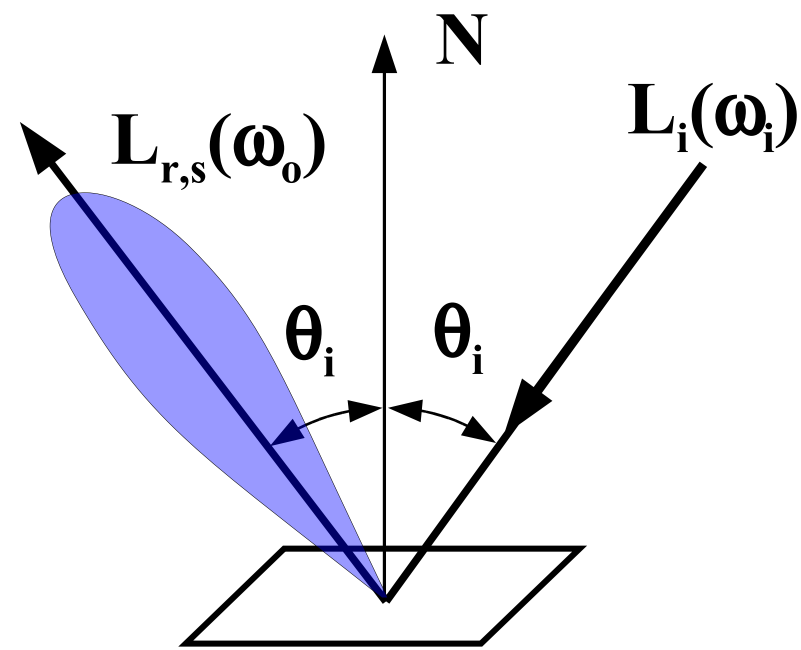
(„Bidirectional Reflectance Distribution Function“)



$$f_r(\omega_i, \omega_o) = \frac{\partial L_r(\omega_o)}{\partial E(\omega_i)} = \frac{\partial L_r(\omega_o)}{L_i(\omega_i) \cos\theta_i \, \partial \omega_i}$$

Klasické složky odrazu světla





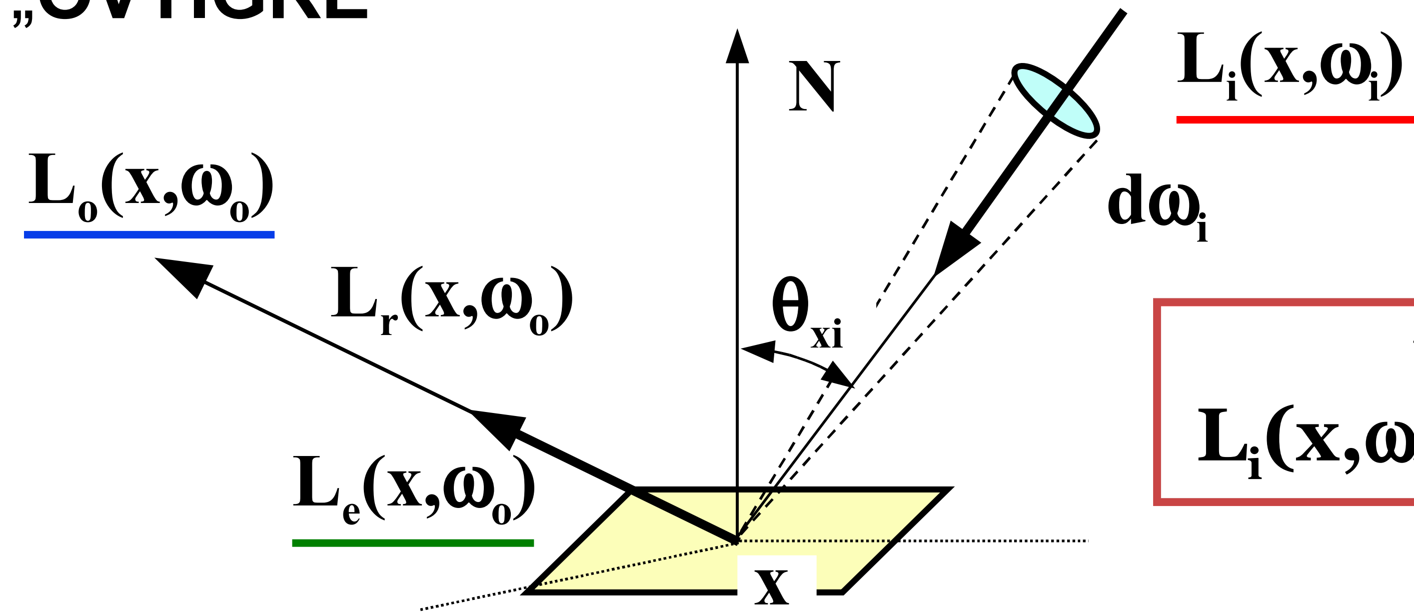
Difusní („diffuse“)

Lesklý („specular“)

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_{r,d}(\omega_i, \omega_o) + f_{r,s}(\omega_i, \omega_o)$$

Lokální zobrazovací rovnice

„OVTIGRE“



vakuum:

$L_i(x,\omega_i) = L_o(y,-\omega_i)$

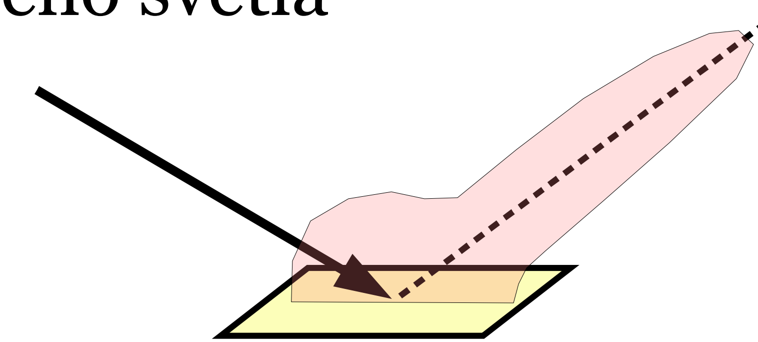
vyzařování zdroje

$$L_o(x,\omega_o) = L_e(x,\omega_o) + \int f_r(x,\omega_i \rightarrow \omega_o) \cdot L_o(y,-\omega_i) \cdot \cos\theta_{xi}\, d\omega_i$$

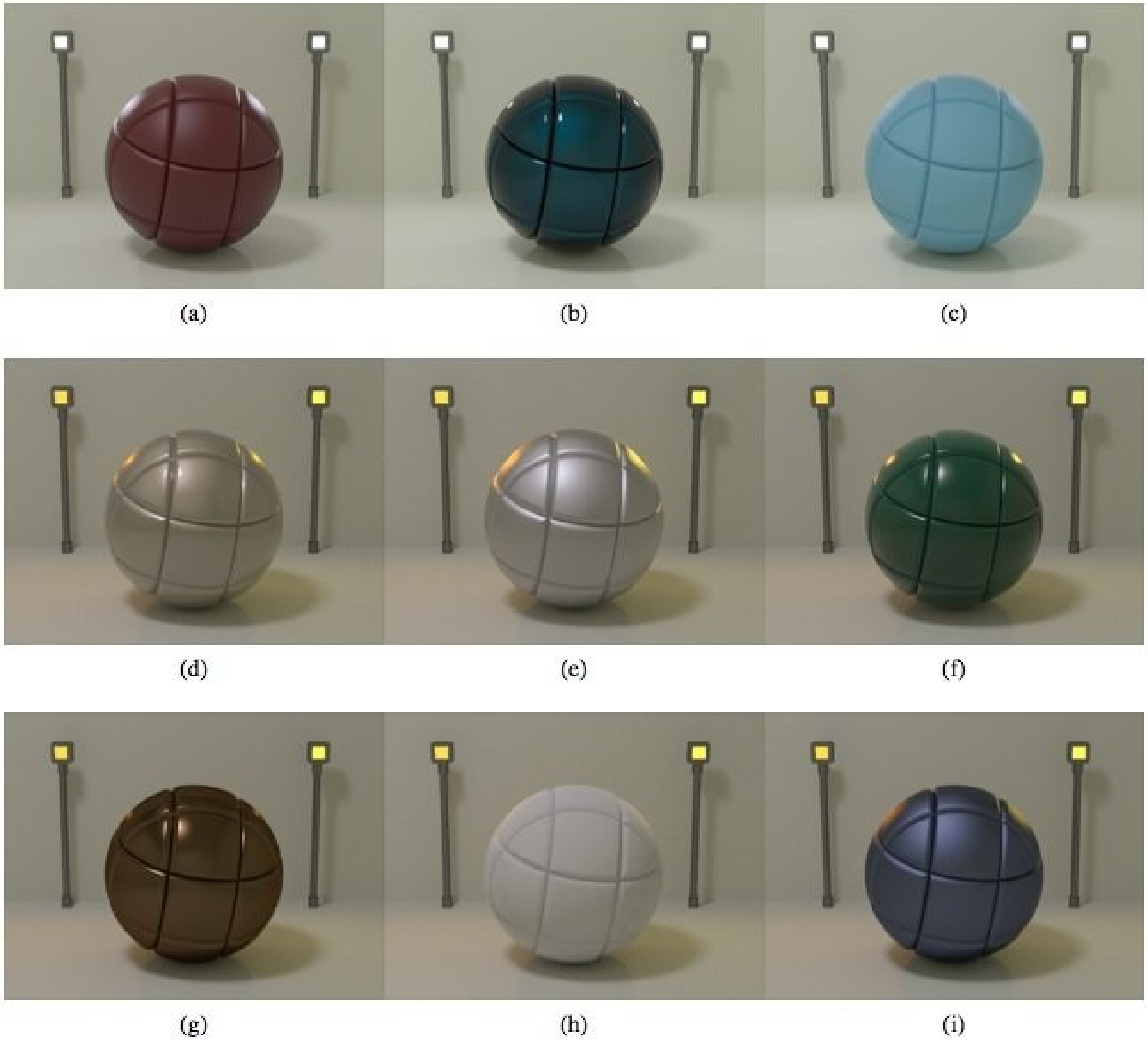
Lokální světelné modely

- **Bouknight** 1970: difusní (Lambert) a ambient
- **Gouraud** 1971: interpolace barvy z vrcholů
- **Phong** 1975: navíc lesklá složka, interpolace normály
- **Blinn** 1977, **Cook** et al. 1982: „mikroplošky"
- **Kajiya** 1985, **Cabral** et al. 1987: vylepšení (anizotrop.)
- **Wolf** 1990: polarizace odraženého světla
- **Oren-Nayar** 1993: difusní mikroplošky

  ...



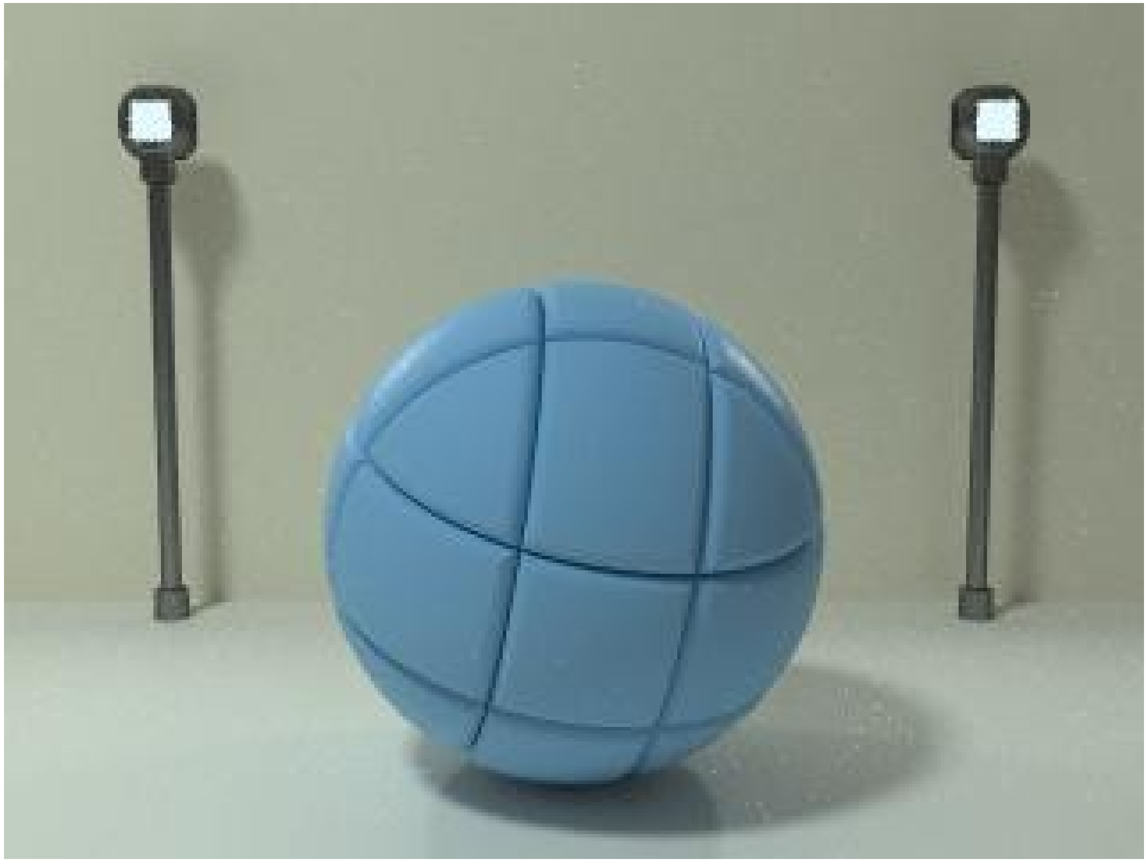
Příklady BRDF



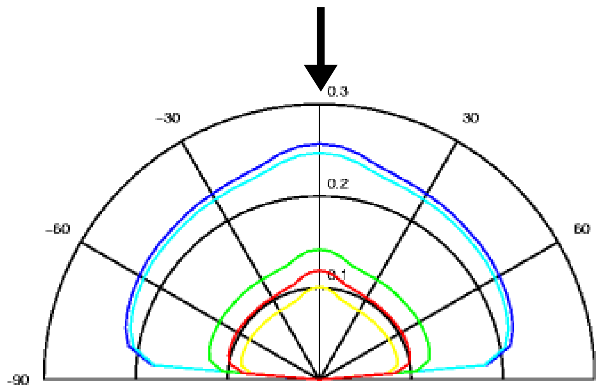
Příklady BRDF

Příklady BRDF – latexový nátěr

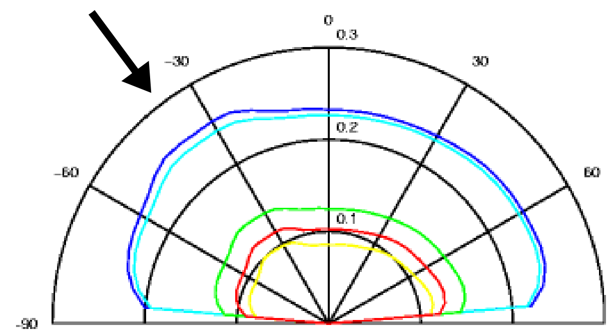
- stříkaný latexový (matnější) lak



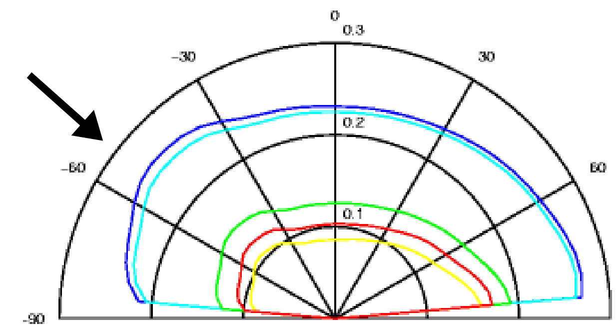
Příklady BRDF – latexový nátěr



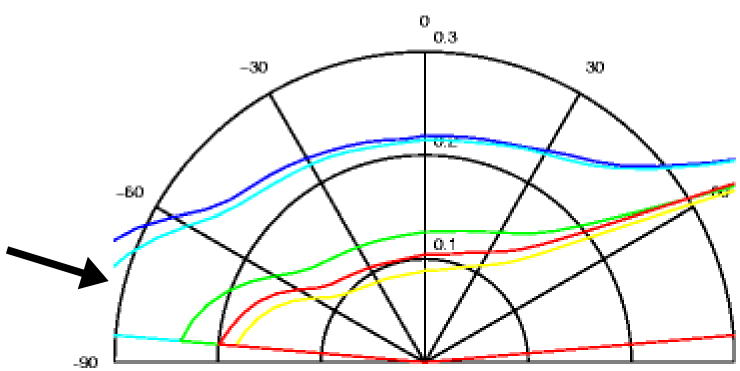
0° (kolmo)



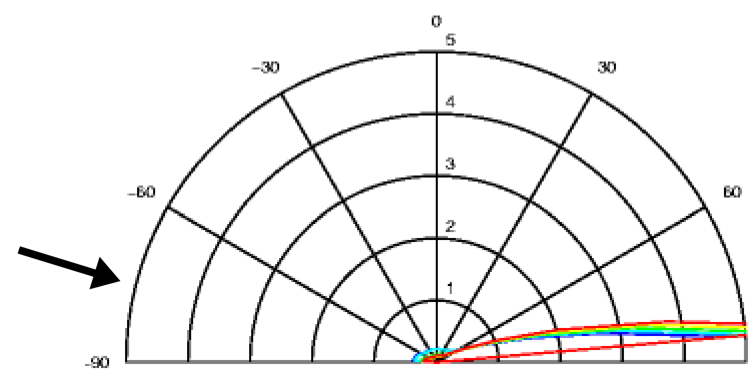
35°



55°



75°



75° (zmenšeno)

Doplnění – radiometrické veličiny

- **výkon** procházející nějakou plochou („radiant flux“):
  Φ_i (Φ_o)   **[W]**

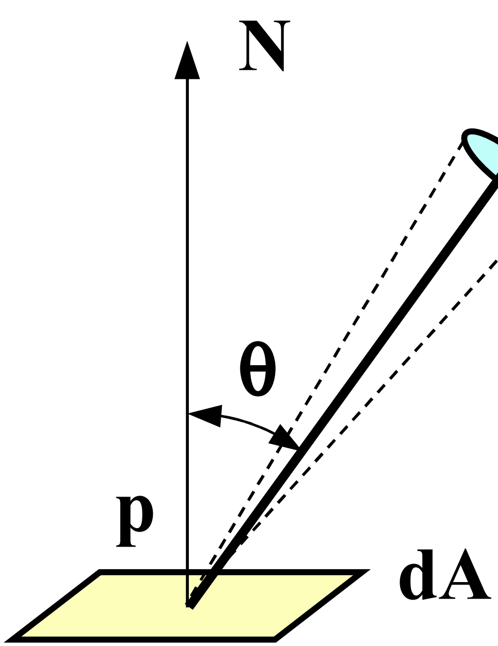
$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

- **radiosita (irradiance)** – hustota výkonu na ploše:
  B_o (E, B_i)   **[W / m^2]**

$$E(p) = \frac{\partial \Phi(p)}{\partial A}$$

Radiance – cíl „renderingu“

- přijímaná (výsledná, vlastní) **radiance** v bodě **p** a směru **ω**: $L_i(p,\omega)$ ($L_o(p,\omega)$, $L_e(p,\omega)$) [W / m^2 sr]



$$L_o(p,\omega) = \frac{\partial^2 \Phi(p,\omega)}{\partial A \, \partial\omega \, \cos\theta} = \frac{\partial E(p,\omega)}{\partial\omega \, \cos\theta}$$

Je **konstantní na paprsku** ve vakuu.
Vyjadřuje **jas** vnímaný okem/kamerou.

Irradiance

- příchozí hustota výkonu – integrace přes celou horní hemisféru:

$$E(p) = \int_{\Omega^+} L_i(p,\omega) \cos\theta \; d\omega$$

Souhlas starších metod s teorií

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- historie, přehled používaných přístupů
  - Ray-tracing, radiační metody
- teoretické základy – zobrazovací rovnice
  - **souhlas starších metod s teorií (fyzikou)**
- metody založené na zobrazovací teorii
  - Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)
  - hybridní metody (efektivita)
  - Photon-mapping

Operátory šíření světla

Zobrazovací rovnice pro **radianci**:

$$\boxed{L = e + TL}$$

$$L = e + Te + T^2 e + T^3 e + \ldots$$ (Neumannova řada)

Integrální **operátor T** lze rozložit na difusní (**D**) a lesklou (**S**) složku odrazu:

$$T = D + S$$

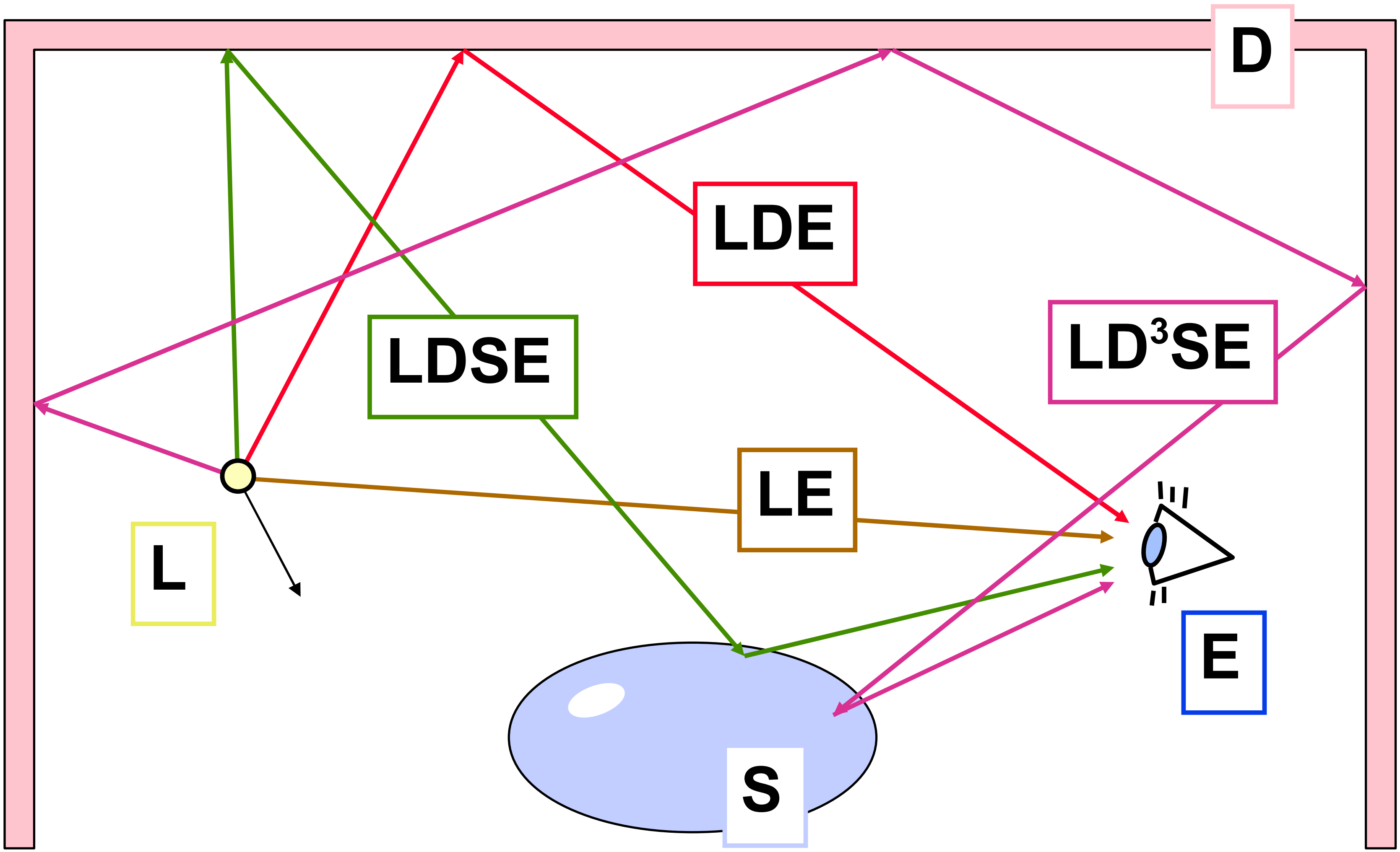
$$L = e + (D + S)e + (D + S)^2 e + \ldots$$

$$\underline{L = e + De + Se + DDe + DSe + SDe + SSe + \ldots}$$

Abeceda regulárních výrazů

- **zdroj světla** **L** („light“)
- **difusní odraz** **D** („diffuse“)
  - odraz podle Lambertova zákona (všesměrový)
- **lesklý odraz** **S** („specular“)
  - směrový odraz, odlesk – směrová část BRDF
  - idealizovaný **zrcadlový odraz**: $\mathbf{S_M}$
- **oko pozorovatele** **E** („eye“)
  - příspěvek výslednému obrazu

Cesty šíření světla



Přehled zobrazovacích metod

- **stínování** s odlesky a **vrženými stíny** (např. Phongův model): **L (D | S) E**
  – často se ignoruje výpočet vržených stínů
- **Ray-tracing** (Whitted): **L [D | S] S_M* E**
  – první lesklý odraz se počítá přesně, ostatní se nahrazují ideálním zrcadlovým odrazem
- **Distributed Ray-tracing** (Cook): **L [D] S* E**
  – všechny lesklé odrazy se odhadují korektně

Přehled zobrazovacích metod

- obyčejná **radiační metoda**: **L D* E**
  – pouze difusní odraz světla

- **všechny možné** cesty světla: **L (D | S)* E**
  – přesné řešení zobrazovacích rovnic, nestranné Monte-Carlo metody
  – první z nich byla „Path-tracing“ (Kajiya)

Monte–Carlo zobrazování

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- historie, přehled používaných přístupů
  - Ray-tracing, radiační metody
- teoretické základy – zobrazovací rovnice
  - souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- **metody založené na zobrazovací teorii**
  - **Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)**
  - hybridní metody (efektivita)
  - Photon-mapping

Monte–Carlo zobrazování

- **Monte-Carlo kvadratura**: integrály zobrazovacích rovnic jsou **mnoho-rozměrné**
  - anti-aliasing, hloubka ostrosti, rozmazání pohybem
  - Monte-Carlo metody nejsou citlivé na vyšší dimenze
- integrandy mají mnoho **nespojitostí** různých druhů
- obyčejně se **nepožaduje velká přesnost**
  - lidské vidění má velmi omezenou absolutní citlivost
  - běžně postačí relativní přesnost ½ ÷ 4 %

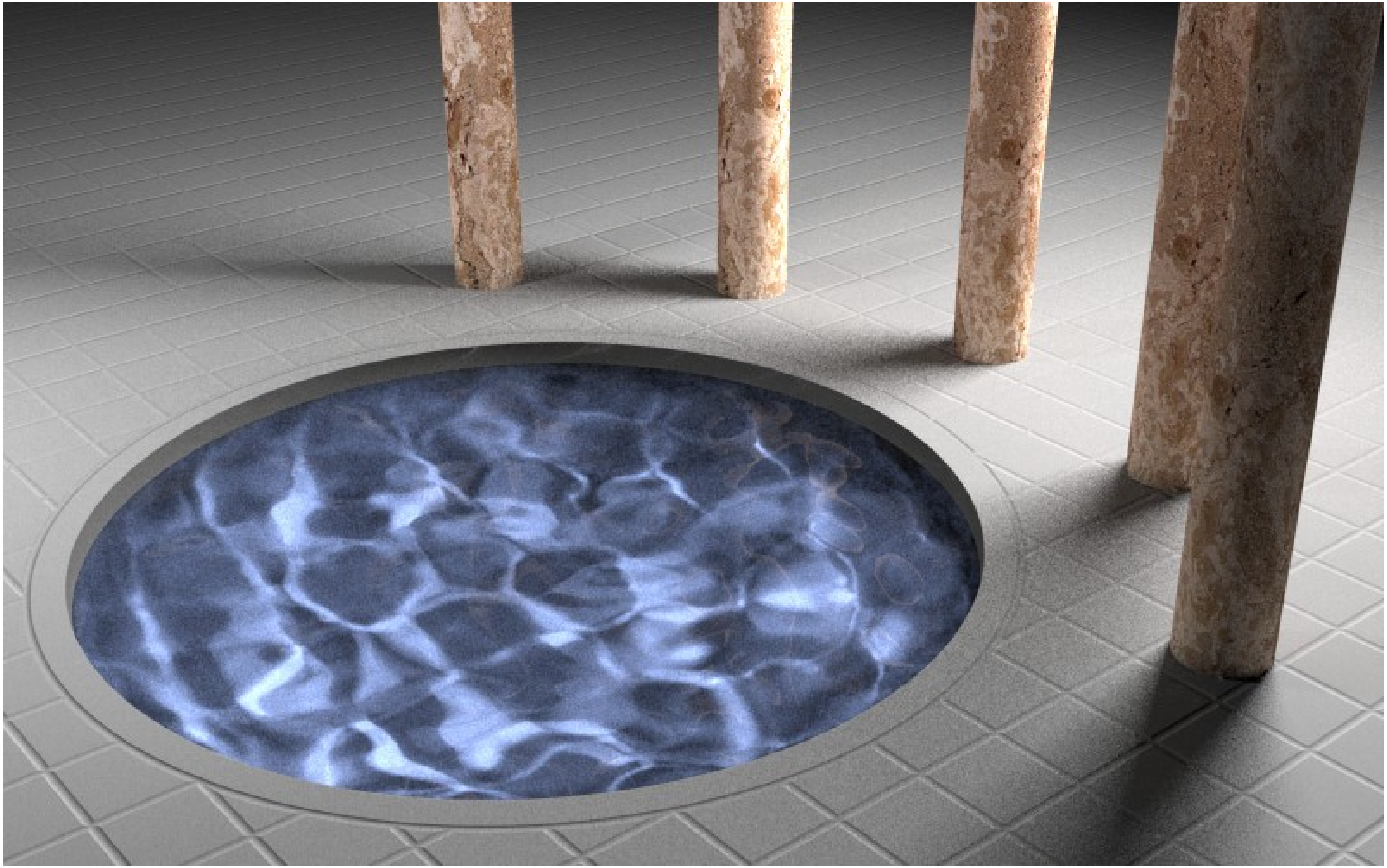
Urychlení konvergence M–C

- „jittering“, „stratified sampling“
  - vzorkování s nižší diskrepancí
- vzorkování podle důležitosti („importance sampling“)
  - hustota pravděpodobnosti podobná integrované funkci
  - generování vzorků s libovolnou hustotou pravděpodob.
- kombinované odhady, smíšené heuristiky (různé pr.)
  - různá vzorkování (= hustoty pravděpodobnosti) pro různé složky integrované funkce
- Metropolis vzorkování (super-nerovnoměrné distr.)

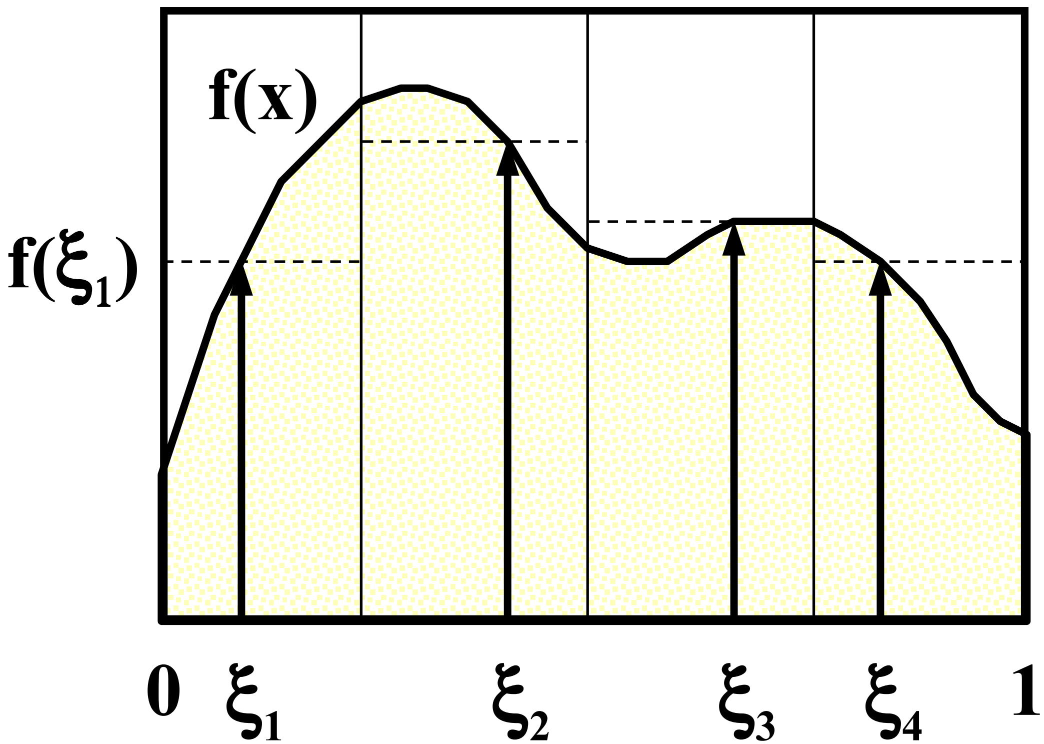
Příklady M–C zobrazování

Příklady M–C zobrazování

Příklady M–C zobrazování



Stratified sampling



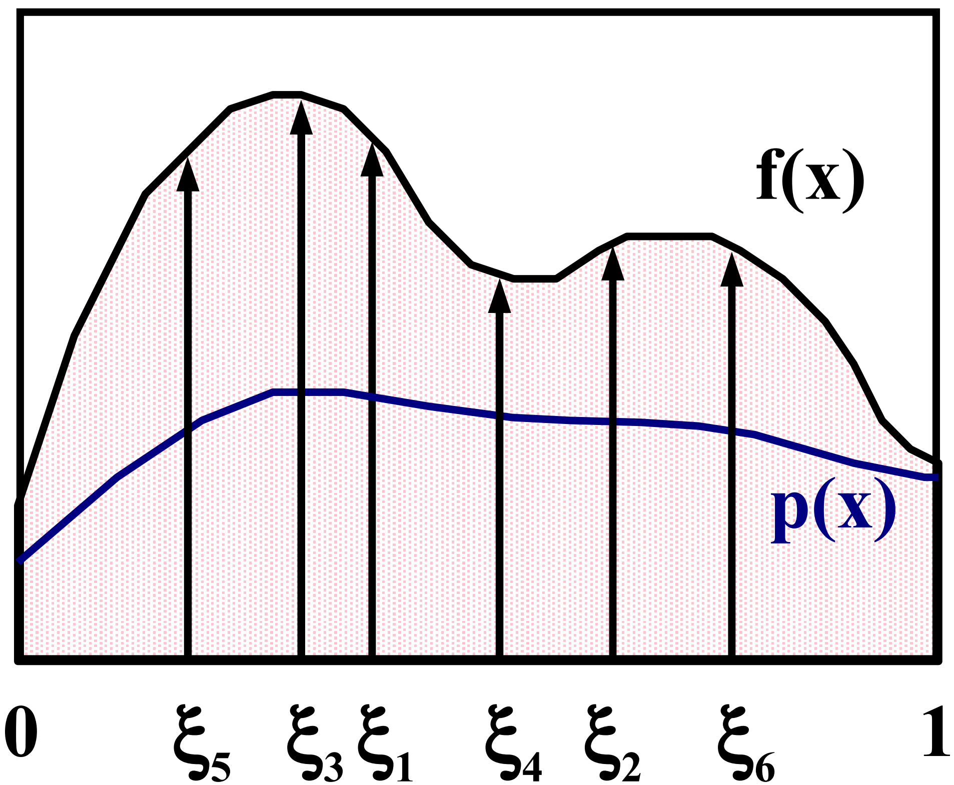
$$\int_0^1 f(x)\,dx = \sum_{i=1}^{N} \int_{A_i} f(x)\,dx$$

$$\boxed{\langle I \rangle_{strat} = \sum_{i=1}^{N} f(\xi_i)\,\mu(A_i)}$$

$$\xi_i \in A_i$$

- „chytrý“ rozklad na subintervaly:
  - funkce f(x) má na subintervalech co nejmenší variaci

Importance sampling



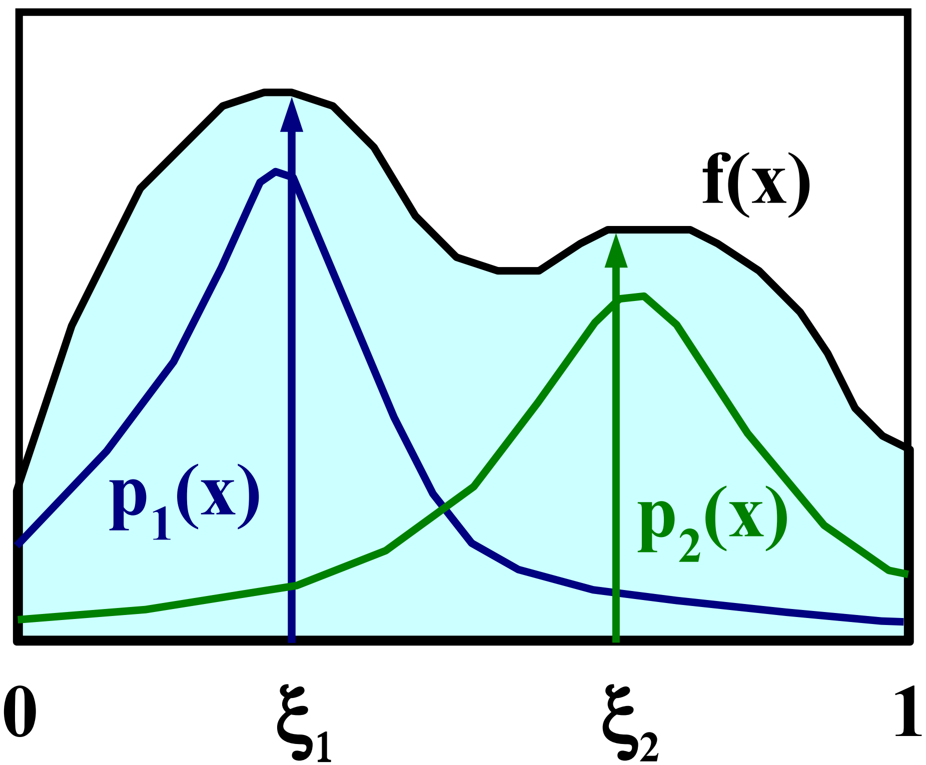
$$\int_0^1 f(x)\,d\mu(x) = \int_0^1 \frac{f(x)}{p(x)}\,dp(x)$$

$$\boxed{\langle I \rangle_{imp} = \frac{f(\xi)}{p(\xi)}}$$

$$\xi_i \in Rnd(p)$$

- hustota p(x) má být co nejpodobnější funkci f(x)
  - ?! efektivní generování vzorků podle hustoty p(x) !?

Combined sampling



$$\langle I \rangle_{comb} = \sum_{i=1}^{N} w_i(\xi_i) \frac{f(\xi_i)}{p_i(\xi_i)}$$

$$\xi_i \in Rnd\,(p_i)$$

$$0 \le w_i(x)$$

$$\sum_{i=1}^{N} w_i(x) = 1$$

- odhaduje se podle několika náhodných rozdělení
  - každé rozdělení může charakterizovat jinou složku f(x) ..

Náhodná procházka

- řešení Fredholmovy soustavy druhého druhu:

$$f(x) = g(x) + \int_0^1 K(x,y)\cdot f(y)\,dy$$

neznámá funkce

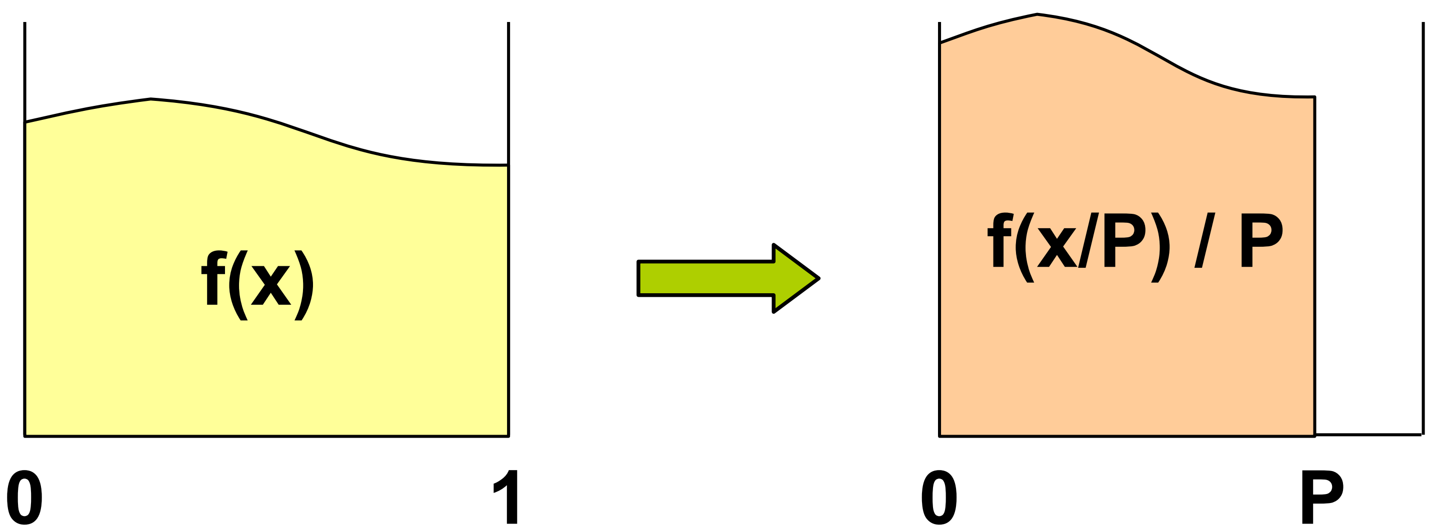
zadání

- nekonečná náhodná procházka řízená distribucemi p_i

$$\langle f(x)\rangle_r = \sum_{i=0}^{\infty}\left[\prod_{j=1}^{i}\frac{K(\xi_{j-1},\xi_j)}{p_j(\xi_j)}\right] g(\xi_i), \qquad \xi_0 = x$$

Ruská ruleta

- odstranění nekonečného výpočtu (řady)
  - stochastický přístup: jen s jistou pravděpodobností **P < 1** se pokračuje (počítá..)
  - nutná kompenzace výsledku: $\mathbf{P^{-1}}$



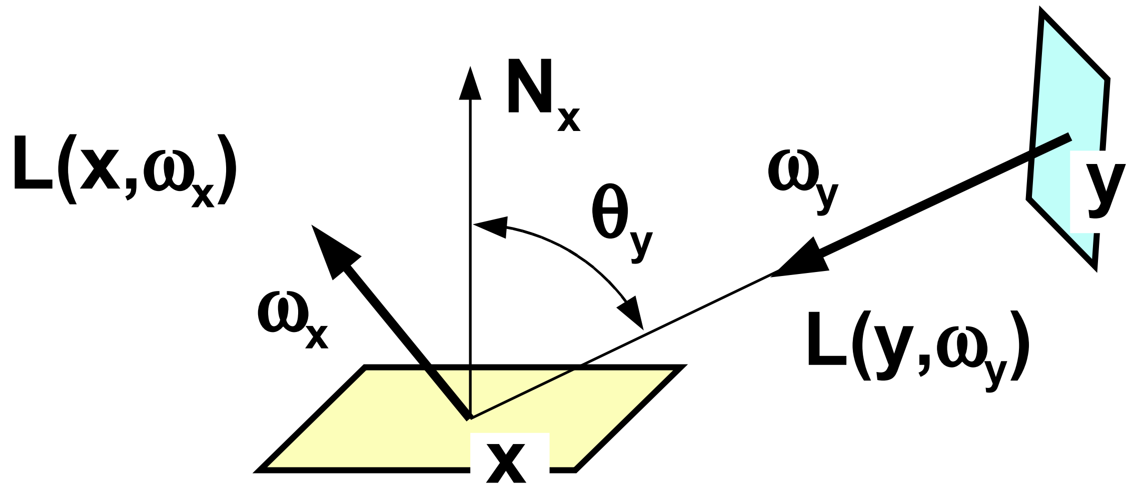
Ruská ruleta pro Neumannovy řady

- odstranění nekonečné procházky:

$$\boxed{\langle f(x) \rangle_{Russ,r} = \sum_{i=0}^{k} \left[\prod_{j=1}^{i} \frac{K(\xi_{j-1}, \xi_j)}{P_j \cdot p_j(\xi_j)} \right] g(\xi_i)}$$

- $\mathbf{P_j}$ udává pravděpodobnost pokračování v kroku **j**
  - je logické, aby byla úměrná celkové odrazivosti ∫K(x,y)
- $\mathbf{p_j(x)}$ je distribuce pro výběr dalšího prvku posloupnosti: $\boldsymbol{\xi_j}$

Zobrazovací rovnice pro radianci



$$L(x,\omega_x) =$$

$$= L_e(x,\omega_x) + \int_{\Omega_x^{-1}} f(x,\omega_y \to \omega_x) \cdot L(y,\omega_y) \cdot \cos\theta_y \, d\omega_y$$

$$\Phi_o(S) = \int_A \int_{\Omega_x} L(x,\omega_x) \cdot W_e(x,\omega_x,S) \cdot \cos\theta_x \, d\omega_x \, dA_x$$

Path–tracing

Monte-Carlo odhad toku $\mathbf{\Phi(S)}$ i radiance $\mathbf{L(x_0,\omega_0)}$ (omezení náhodné procházky ruskou ruletou):

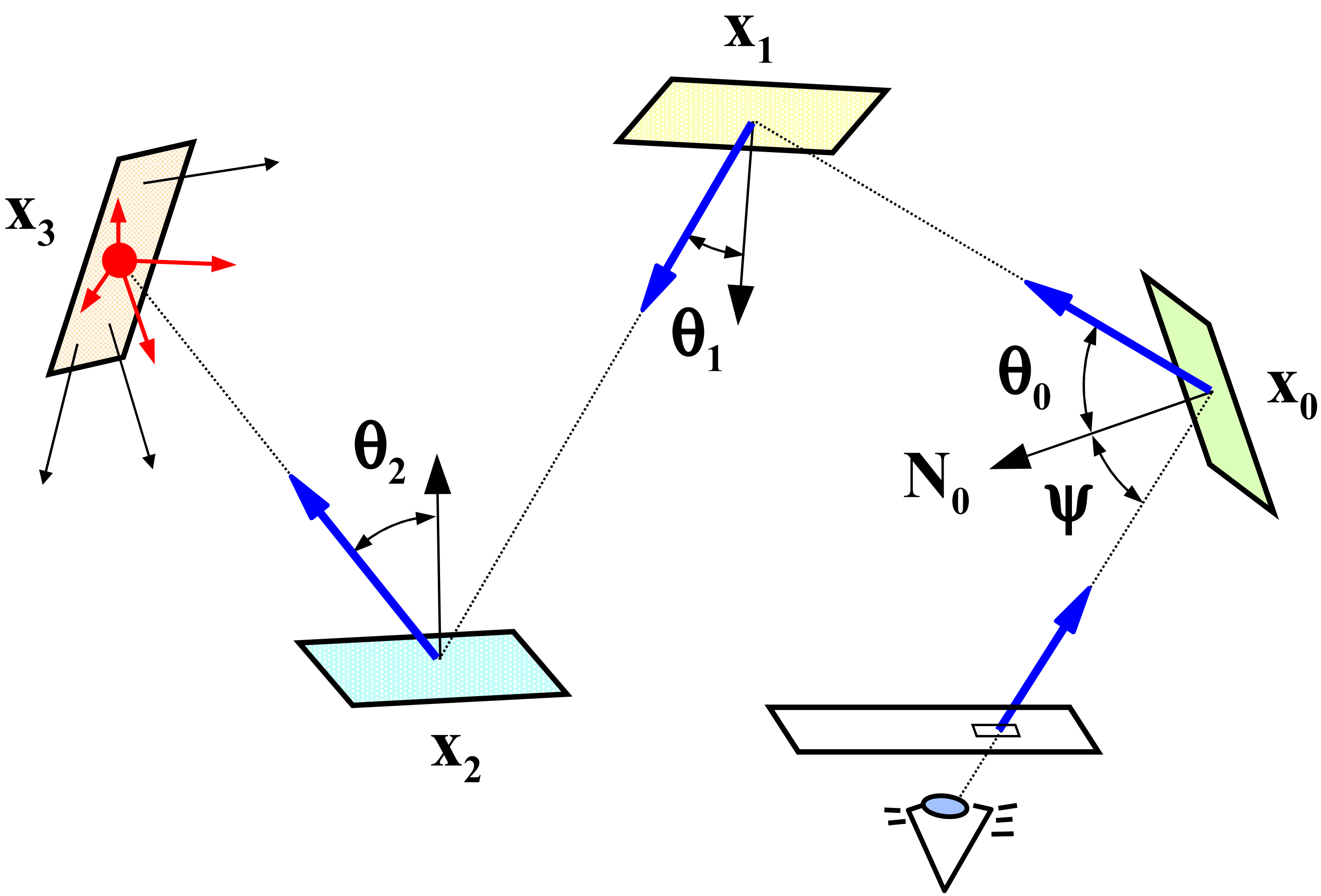
$$\left\langle \Phi\left(S\right)\right\rangle_{path} = \frac{W_e\left(x_0,\omega_0,S\right)\cdot\cos\psi}{p_0\left(x_0,\omega_0\right)}\cdot$$

$$\cdot\sum_{i=0}^{k}\left[\prod_{j=1}^{i}\frac{f\left(x_{j-1},\omega_j\to\omega_{j-1}\right)\cdot\cos\theta_{j-1}}{P_j\cdot p_j\left(\omega_j\right)}\right]\cdot L_e\left(x_i,\omega_i\right)$$

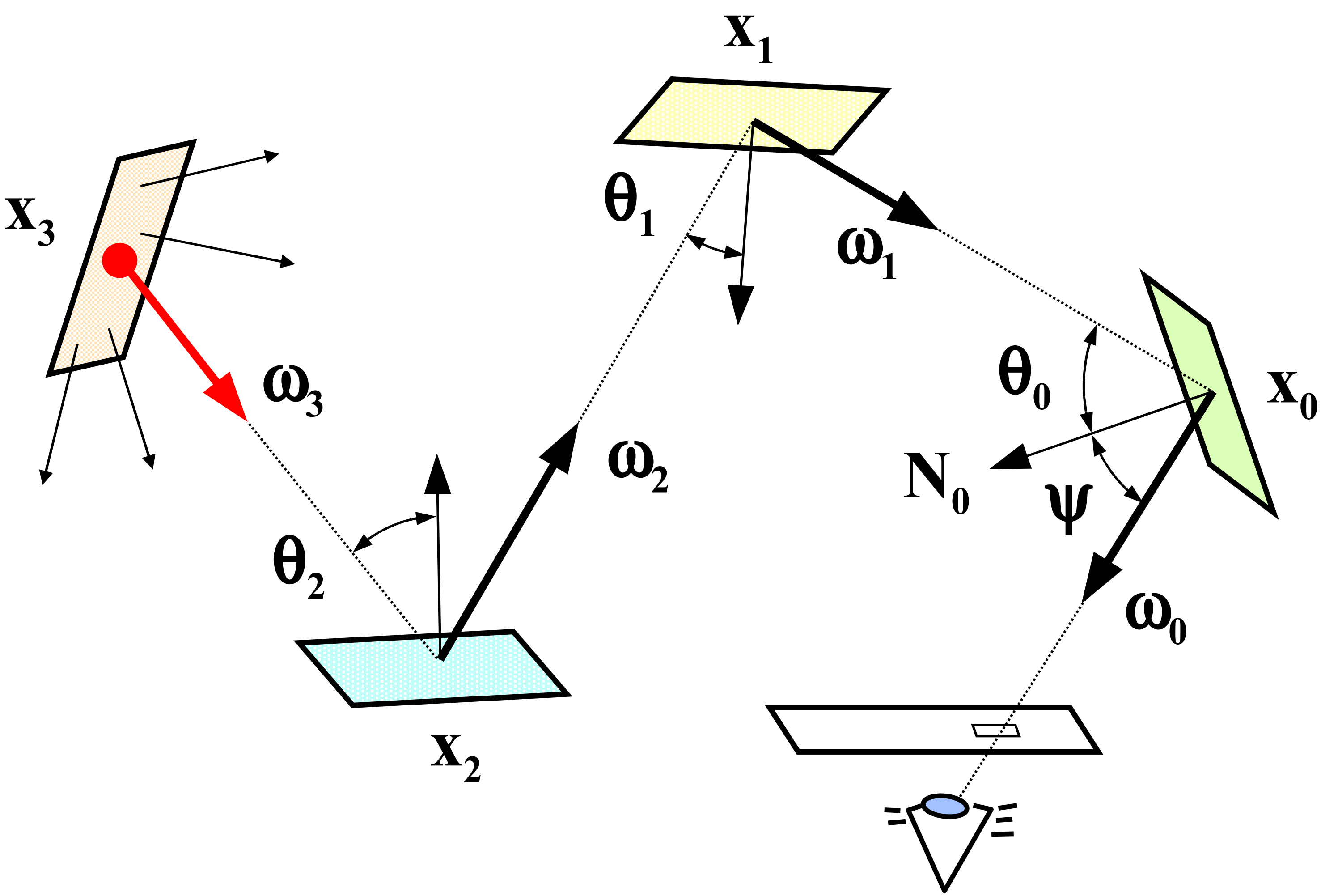
pravděpodobnost pokračování krokem **j**

hustota pravděp. pro vstupní směr $\boldsymbol{\omega_j}$

PT – postup výpočtu (procházka)



PT – šíření světla



Odhad příští události (NEE)

- obyčejný Path-tracing je velmi **neefektivní**
  – náhodná procházka se musí trefit do zdroje světla!
- **odhad příští události** („Next Event Estimation“)
  – zařídím příspěvky od zdrojů v každém kroku
- NEE je nejvýhodnější pro scény s **malými** ale **dobře viditelnými** plochami světelných zdrojů
  - vzorkování světelných zdrojů tvoří dominantní složku výsledku

Odhad příští události II

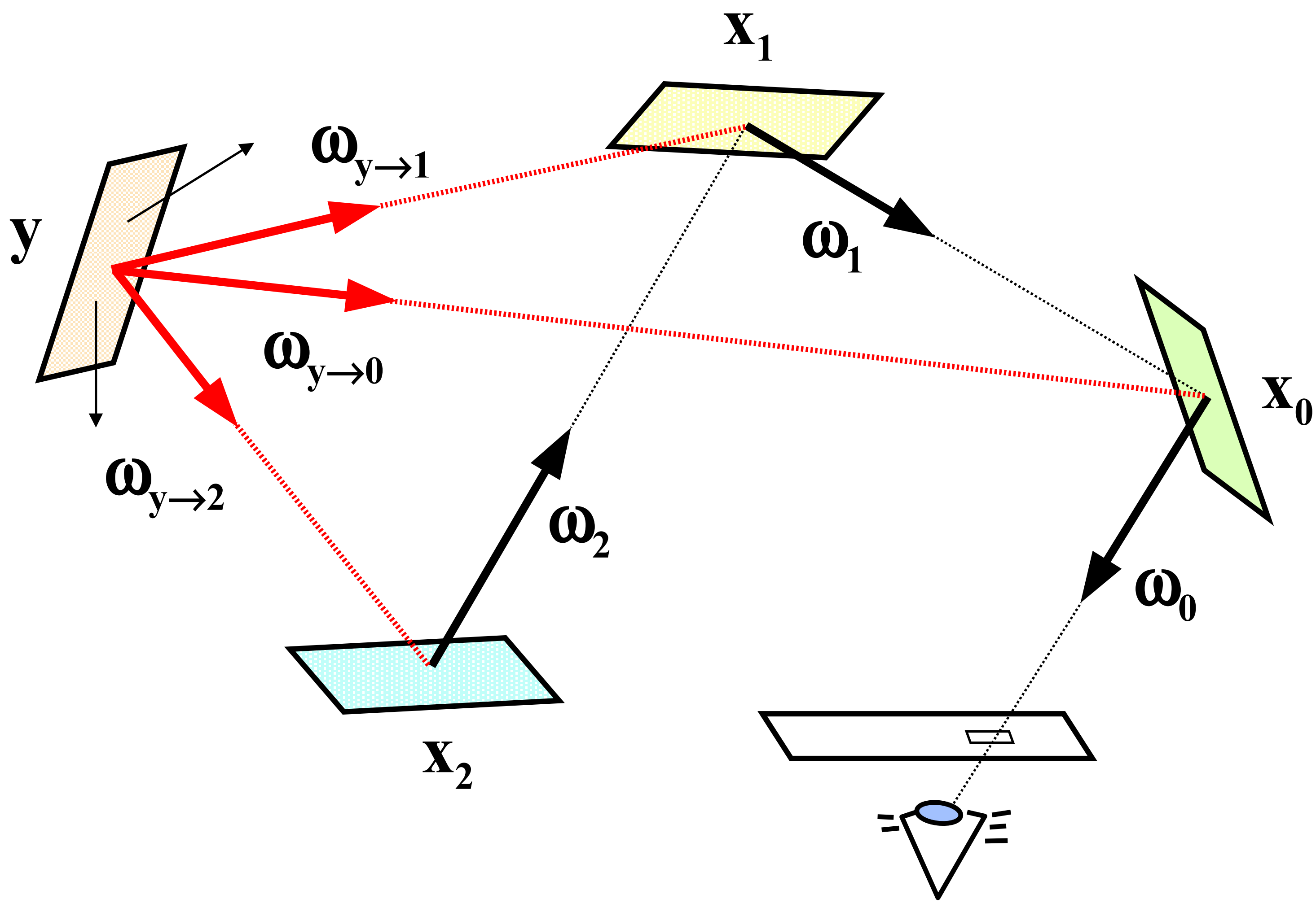
Rozdělení **nepřímého osvětlení** na dvě složky:

$$L(x,\omega_x) = L_e(x,\omega_x) + L_r(x,\omega_x)$$

$$\underline{L_r(x,\omega_x)} = \int_{\Omega_x^{-1}} f(x,\omega_y \to \omega_x)\cdot L(y,\omega_y)\cdot \cos\theta_y \, d\omega_y =$$

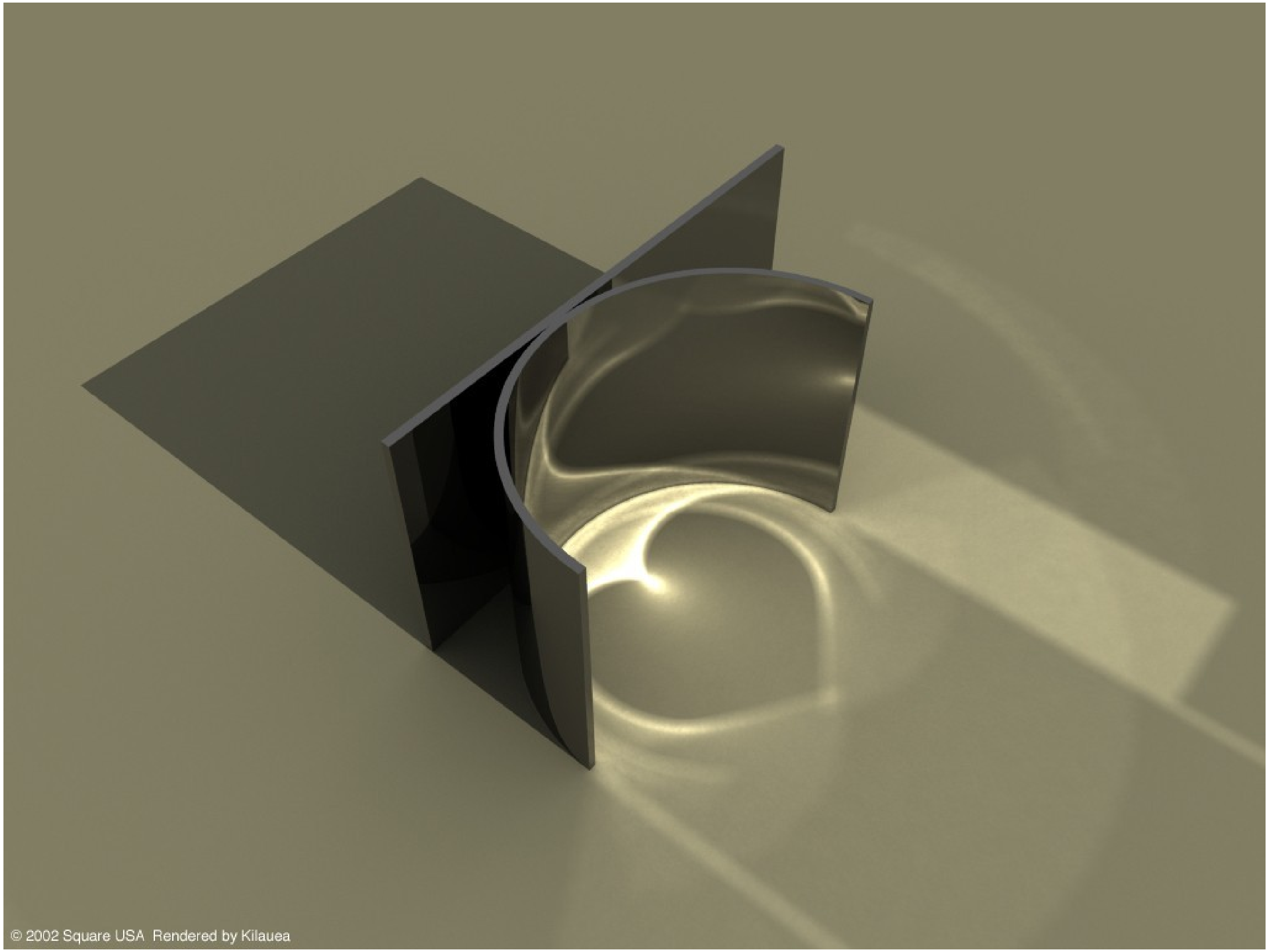
$$\boxed{= \int_A f(x,\omega_y \to \omega_x)\cdot L_e(y,\omega_y)\cdot G(y,x)\, dA_y + \int_{\Omega_x^{-1}} f(x,\omega_y \to \omega_x)\cdot L_r(y,\omega_y)\cdot \cos\theta_y \, d\omega_y}$$

Schema šíření světla (PT+NEE)

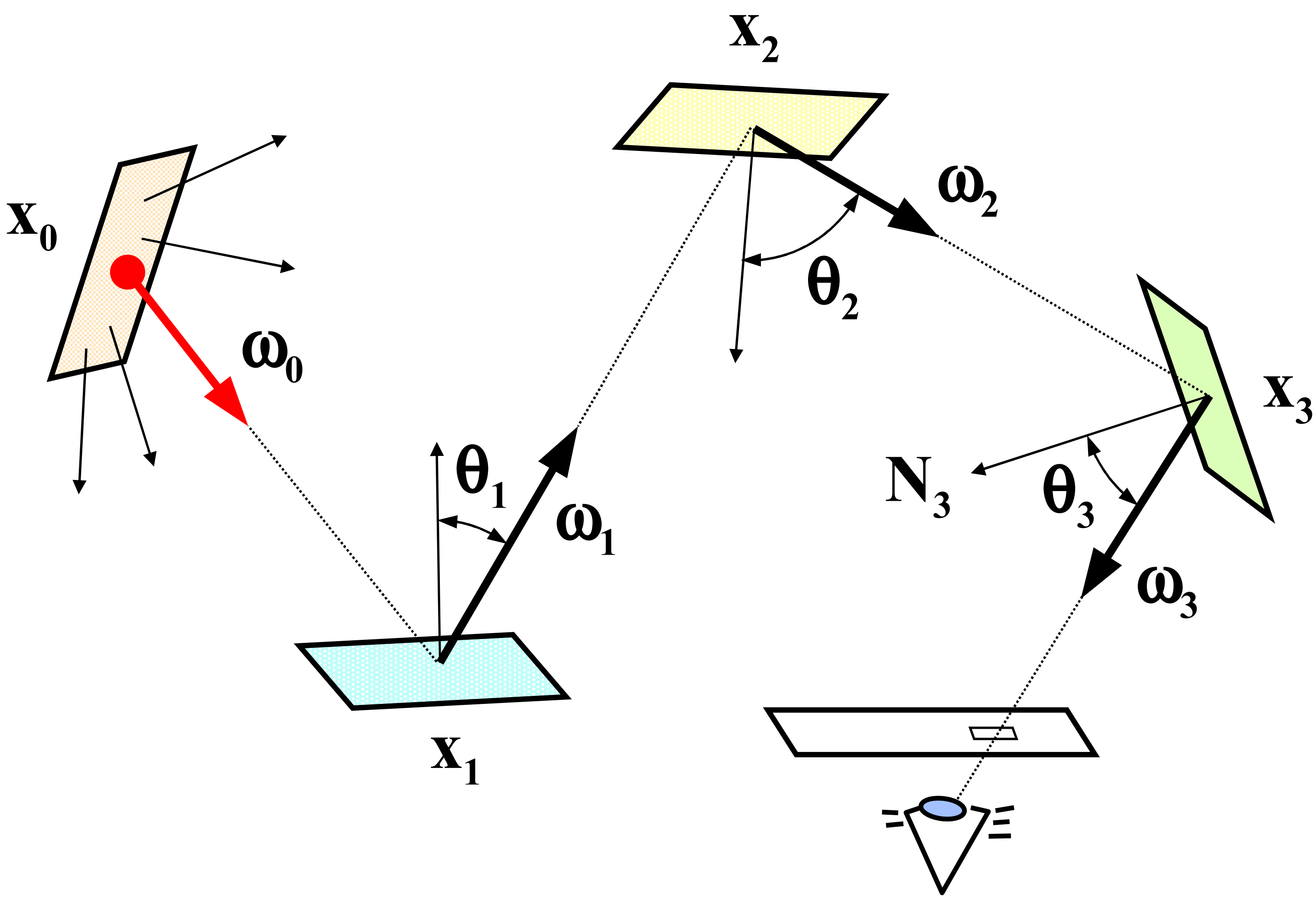


Light-tracing – příklad

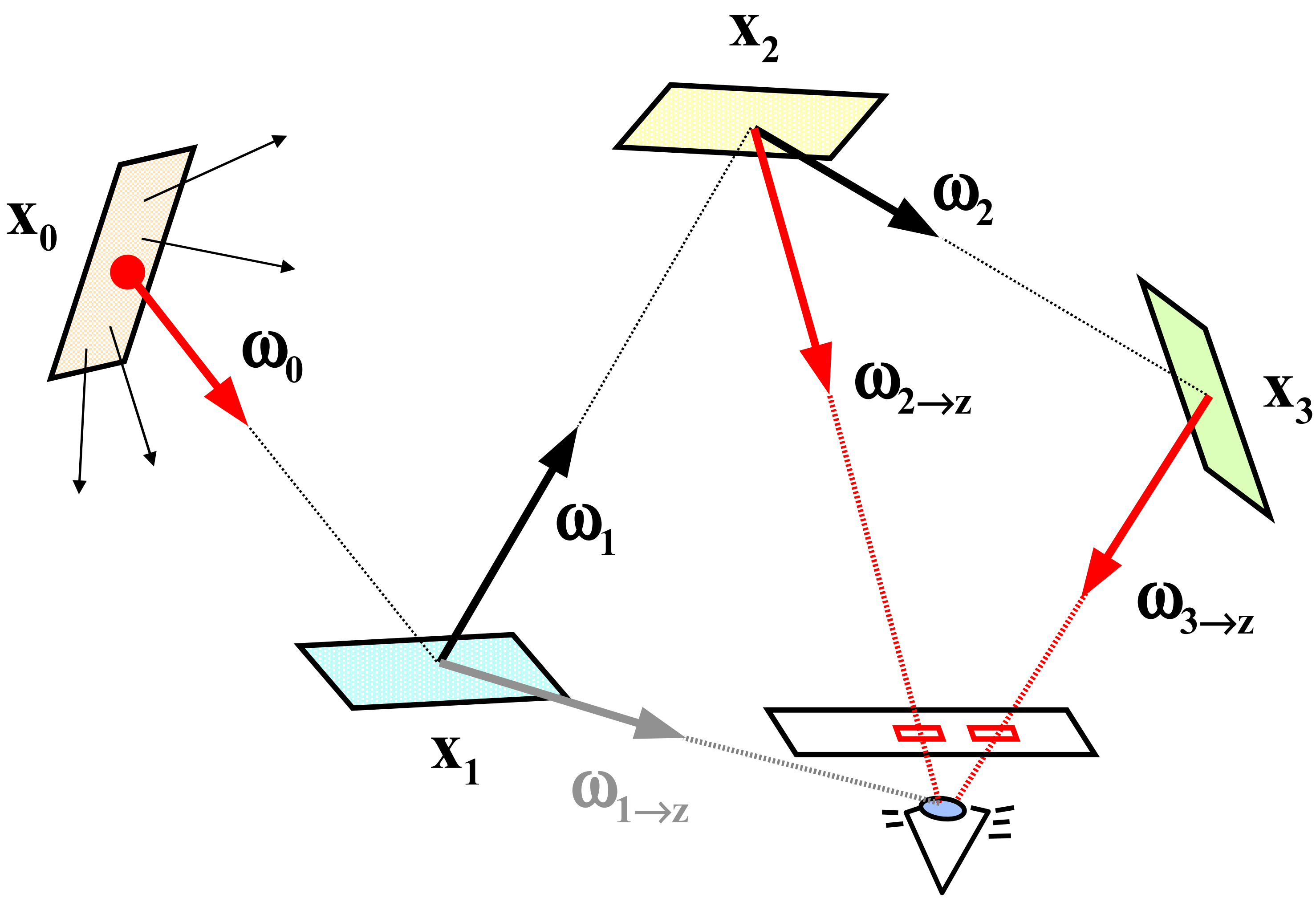
Photon-tracing – příklad (kaustika)



LT – šíření světla (střílení)



NEE pro Light–tracing



Aplikace Light–tracingu

- přímý **výpočet realistického obrázku**
  - světlo se přijímá kamerou a ukládá v průmětně
- **pomocný výpočet** pro některou kombinovanou metodu
  - světlo se ukládá do tzv. světelných map (fotonové mapy, „Photon-tracing“)
  - větší suma potenciálu $\mathbf{W}_e$ vede k efektivnějšímu výpočtu (nemusí se dělat NEE)
  - „**Photon-mapping**“: moderní, ale ne zcela korektní metoda zobrazování (Henrik Wann Jensen, 1995)

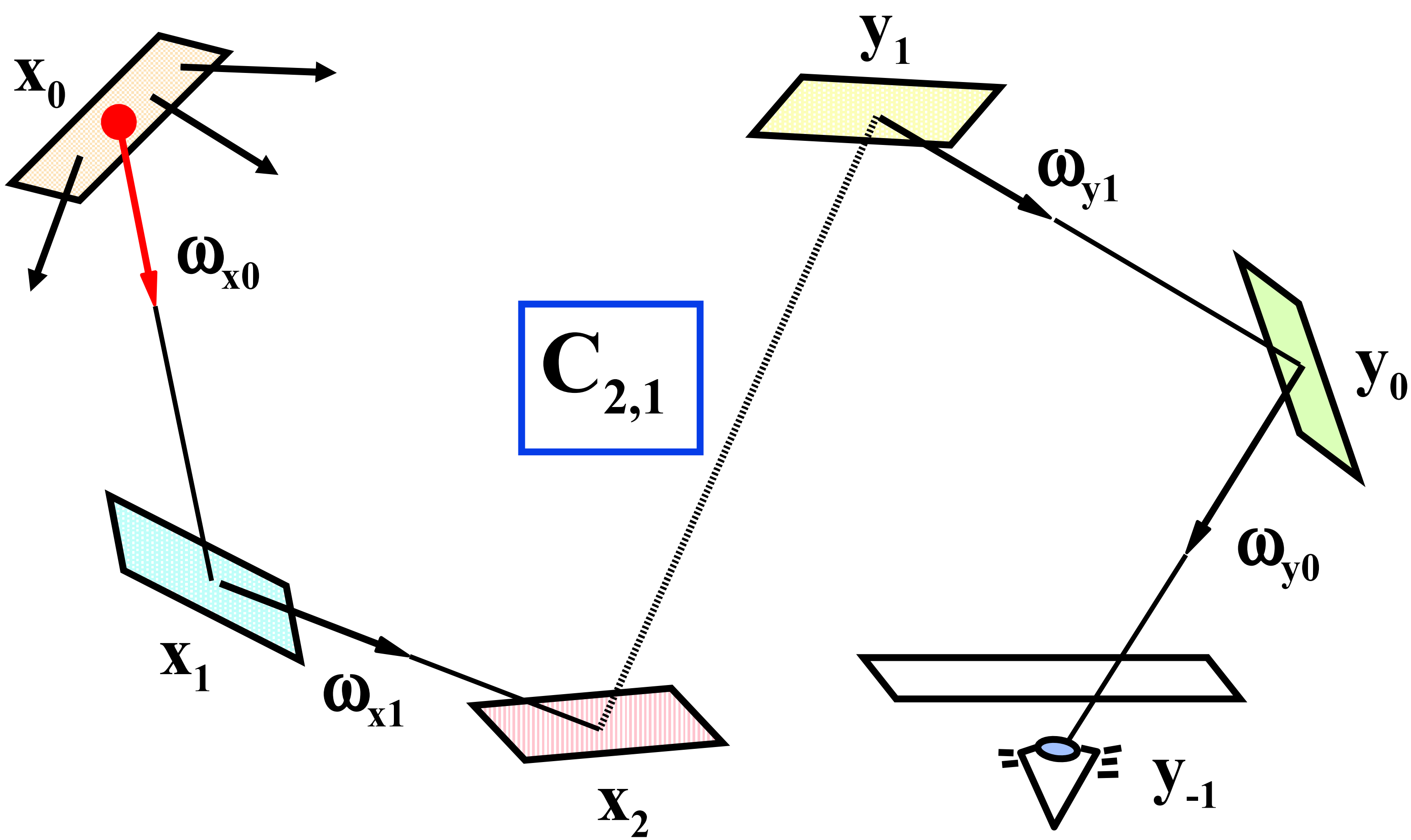
Obousměrný Path-tracing

Uzavřené i neuzavřené cesty světla:

$$\langle \Phi \mid S \rangle_{bipath,nee} = \sum_{i=-1}^{k} \sum_{j=-1}^{k^*} w_{ij} C_{ij}$$

i = –1, j > 0: cesta od pozorovatele (bez NEE)
i = 0, j ≥ 0: cesta od pozorovatele se vzorkem na zdroji
i > 0, j > 0: světlo i-krát odražené od zdroje a j-krát od pozorovatele
i ≥ 0, j = 0: cesta od zdroje se vzorkem na receptoru
i > 0, j = –1: cesta od zdroje (bez NEE - neefektivní)

Obecná cesta (obousměrná)



Bidir PT – přehled vzorkování

závislost příspěvku na		vzorku na cestě od zdroje světla				
			x_0	x_1	x_2	x_3
vzorku na cestě od receptoru		PT		$C_{1,-1}$	$C_{2,-1}$	$C_{3,-1}$
	y_{-1}	LT	$C_{0,0}$	$C_{1,0}$	$C_{2,0}$	$C_{3,0}$
	y_0	$C_{-1,1}$	$C_{0,1}$	$C_{1,1}$	$C_{2,1}$	$C_{3,1}$
	y_2	$C_{-1,2}$	$C_{0,2}$	$C_{1,2}$	$C_{2,2}$	$C_{3,2}$

Příklad rozkladu výpočtu

Bidir PT – příklady

Bidir PT – příklady

Bidir PT – příklady

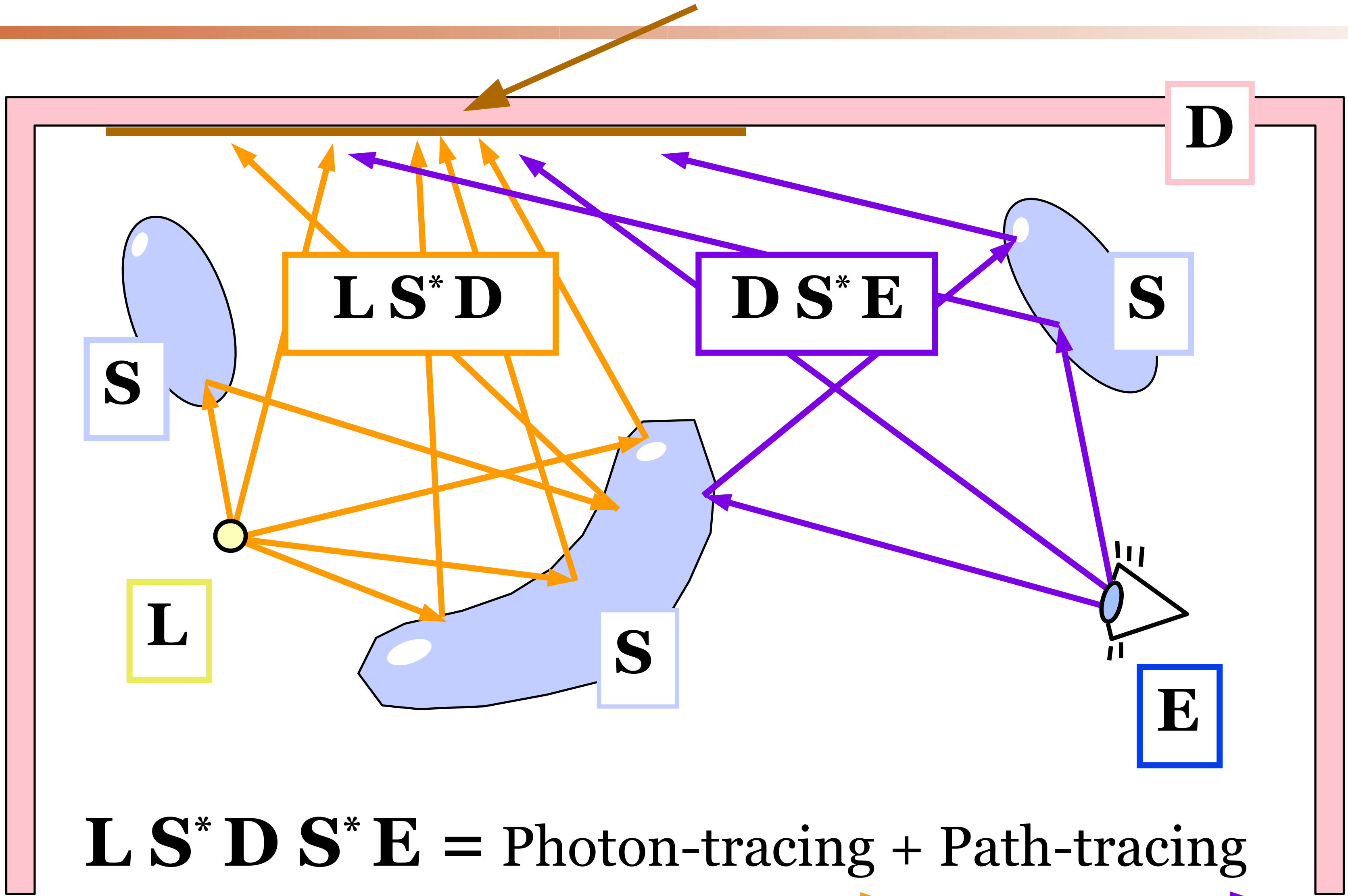
Hybridní metody

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- historie, přehled používaných přístupů
  - Ray-tracing, radiační metody
- teoretické základy – zobrazovací rovnice
  - souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- metody založené na zobrazovací teorii
  - Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)
  - **hybridní metody (efektivita)**
  - Photon-mapping

Vícekrokové (hybridní) metody

- kombinace **radiačních metod** (difusní odrazy) a **sledování paprsku** (lesklé odrazy)
  - většinou se tyto dva přístupy střídají (algoritmus se dělí na jednotlivé „průchody“ nebo kroky)
- **radiační přístup** řeší (nepřímé) difusní osvětlení: **D***
- **sledování paprsku** počítá lesklé odrazy: $\mathbf{S}_{[M]}{}^{*}$
  - navíc se používá pro finální průchod (zobrazení)
  - místo R-T lze použít **Path-tracing** nebo jeho vylepšení

Mezivýsledek = světelná mapa



L S* D S* E = Photon-tracing + Path-tracing

Optimální hybridní metody

- rozklad celkové množiny cest světla **L (D | S)* E** na disjunktní podmnožiny
  - každou řešíme algoritmem, který tam nejlépe konverguje
  - např. difusní šíření světla radiačními metodami nebo pomocí „Irradiance caching“
- příklad – **Chen et al.** (1991):
  - **L [D] S* E** – M-C Path-tracing
  - **L S+ D S* E** – Photon-tracing na difusních plochách + M-C Path-tracing do první difusní plochy
  - **L (D|S)* D S* D S* E** – progresivní radiační metoda (zobecněné form-factory) + M-C Path-tracing do 2. dif.pl.

Photon–Mapping

- cíle a aplikace realistického zobrazování
- historie, přehled používaných přístupů
  - Ray-tracing, radiační metody
- teoretické základy – zobrazovací rovnice
  - souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- metody založené na zobrazovací teorii
  - Monte-Carlo zobrazování (paprsky, „unbiased“)
  - hybridní metody (efektivita)
  - **Photon-mapping**

Základy Photon-mappingu

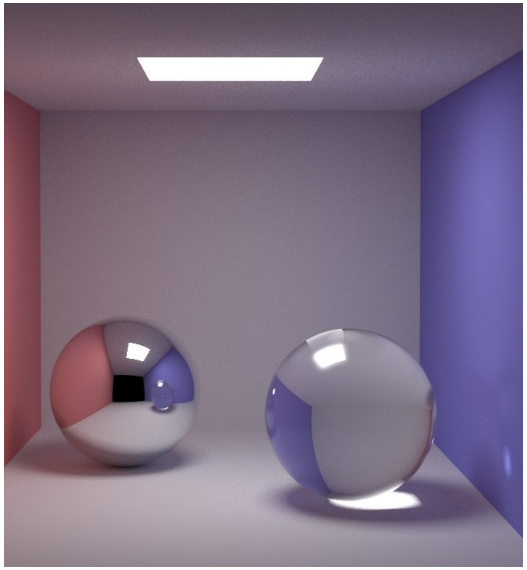
- založen na **vrhání paprsků**
  - libovolná **geometrie scény**
  - využití dlouho laděných **knihoven**, **urychlovacích technik**, apod.
- světlo se sleduje **zepředu** (od zdroje) i **zezadu** (od kamery)
  - kamera reprezentuje důležitost (potenciál)
  - světla jsou zdroje fotonů
- oddělení geometrie scény od reprezentace světla
  - umožňuje mít libovolně složitou 3D scénu
  - reprezentaci světla lze nezávisle optimalizovat

Fotonová mapa (Photon-map)

- datová struktura ukládající **dopady jednotlivých fotonů**
  - reprezentuje dobře i velmi variabilní funkci osvětlení
  - zcela oddělena od geometrie scény
  - úsporná reprezentace v paměti
- „cache cest světla obousměrného Path-tracingu“
  - odhad funkce osvětlení však nevykazuje VF šum
  - .. při stejné kvalitě je mnohem rychlejší než M-C techniky
- ztráta **nestrannosti** !
  - ale <u>konzistentní</u> (konverguje při zvětšování počtu fotonů)

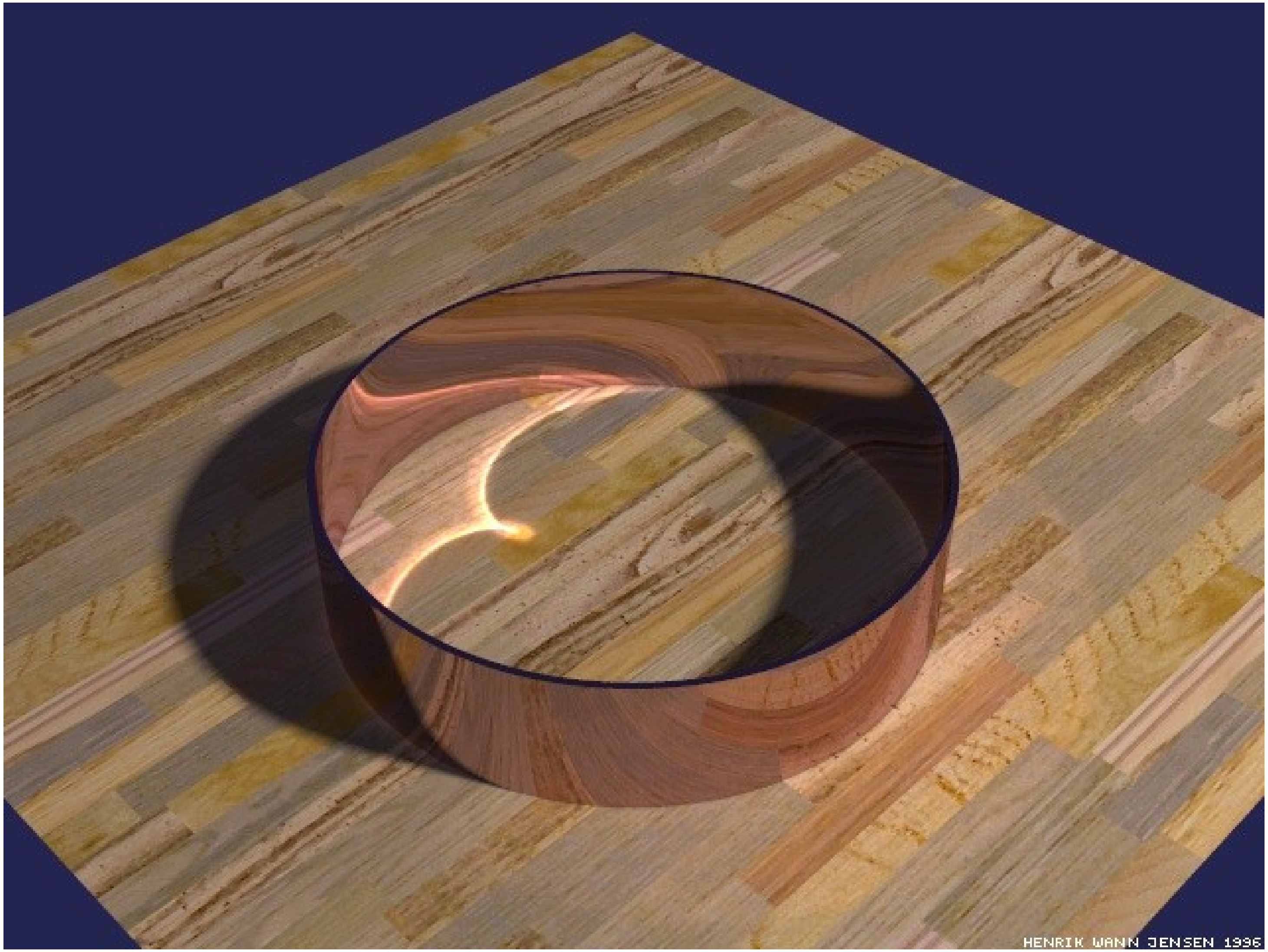
Struktura algoritmu

- **Photon-tracing**
  - fotony jsou generovány světelnými zdroji,
  - propagují se do scény (Monte-Carlo)
  - a ukládají se do fotonových map (**globální** pro pomalé změny a **kaustická** pro koncentraci světla)



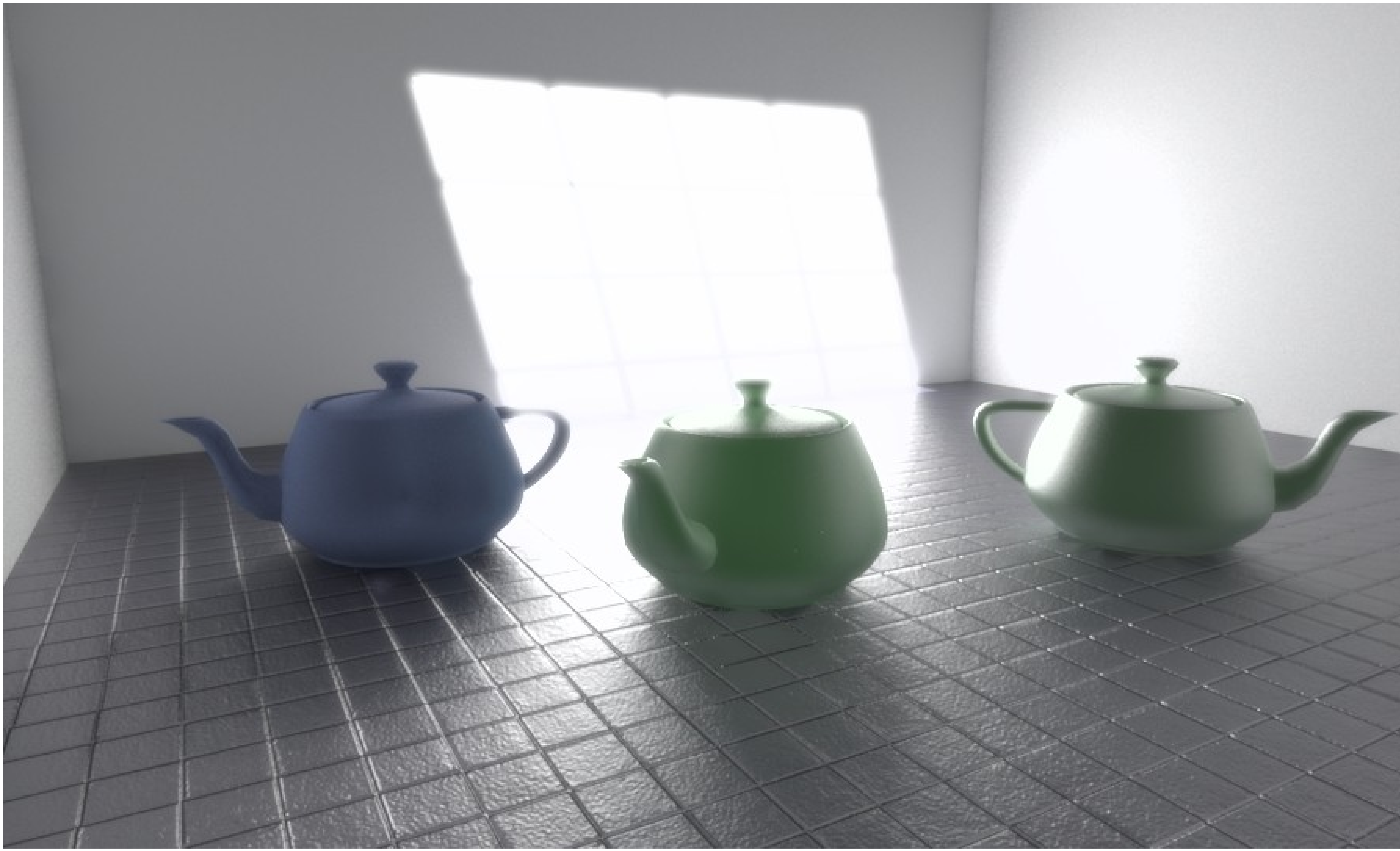
- **zobrazení** (Rendering)
  - informace uložené ve fotonové mapě se používají k efektivnímu zobrazení scény
  - obyčejný Ray-tracing nebo
  - Monte-Carlo metoda (Path-tracing)

Photon-mapping – příklady



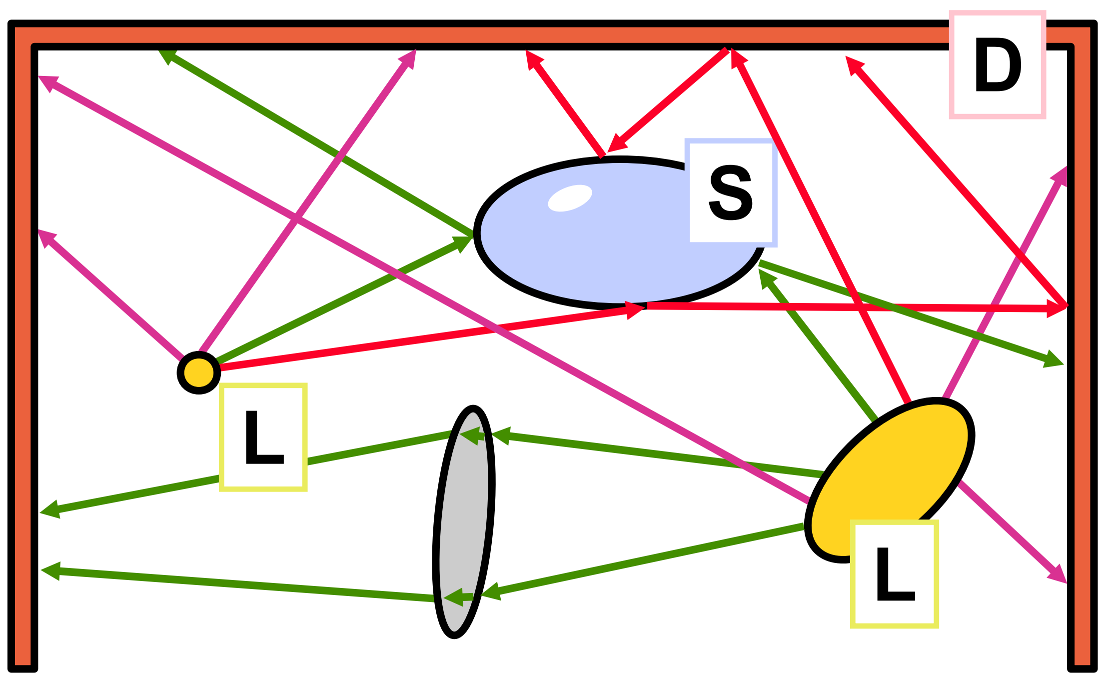
Photon-mapping – příklady

Photon-mapping – příklady



Photon-tracing

- **generování fotonů** světelnými zdroji,
- jejich **náhodný průchod scénou** a
- **ukládání do fotonové mapy**

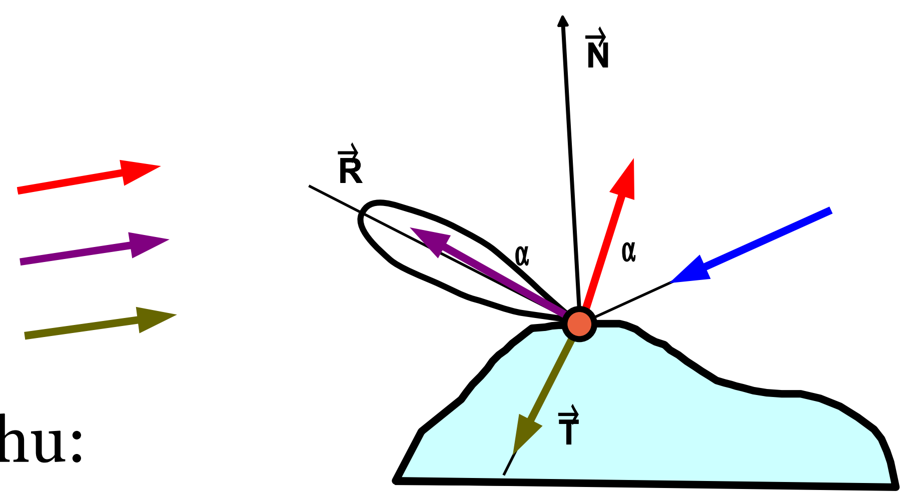


Generování fotonů

- nejvýhodnější přístup – každý foton nese **stejnou světelnou energii**
- **náhodné vzorkování** vyzařovacích funkcí světelných zdrojů
  - „rejection sampling“ pro obtížné distribuce
- **více světelných zdrojů..**
  - distribuce mezi nimi na základě jejich celkového výkonu
- **efektivní vzorkování**
  - předem připravené **projekční mapy** (viz akcelerace Ray-tracingu)

Průchod scénou (Photon scattering)

- při odrazu nebo lomu by se mohla **měnit energie fotonů**
  - foton. mapa by pak obsahovala neekvivalentní záznamy
- zachování konstantní energie fotonu .. **Ruská ruleta**
  - foton se náhodně **šíří dál s původní energií** nebo **zcela zanikne**
  - **rozhodování** mezi:
    - 1. difusním odrazem (D)
    - 2. lesklým odrazem (S, S_M)
    - 3. lomem
    - na každém difusním povrchu: příspěvek do fotonové mapy



Datová struktura fotonové mapy

foton:

- **poloha** dopadu (float[3])
- **směr** dopadu (float[2] nebo komprese do int8[2])
- **energie** fotonu (RGB, spektrum nebo RGBE = int8[4])
- příznaky pro konstrukci stromu (např. „splitting plane“)

- fotonová mapa musí být **rychlá** i při **velkém množství záznamů**
  - 10^5 až 10^7 jednotlivých záznamů
  - operace: **rychlé vyhledávání nejbližších sousedů**
    - K nejbližších nebo všech v daném okolí (poloměr R)
  - osvědčil se **KD-strom** (binární, data ve všech uzlech)

KD-strom

- ve fázi konstrukce se jen ukládají záznamy, před použitím je dobré ho **vyvážit**
- **optimalizace** pro geometrické vyhledávání:
  - **směr dělení** (splitting plane) se určí podle složky souřadnic s maximálním rozsahem (nebo rozptylem)
  - uložení v poli – **bez použití ukazatelů** !
- à la Jensen:
  - uložení jako halda (potomci mají indexy **2i** a **2i+1**)
- à la Hooley („cache-friendly"):
  - medián se nechává na místě, zbytek jako v quick-sortu

Hledání nejbližších sousedů

- používá se **halda** pro uložení větví, do kterých jsem ještě nevstoupil
- ořezávání průchodu:
  - podle vzdálenosti již nalezeného K-tého nejbližšího fotonu (hledám-li K nejbližších)
  - podle daného poloměru vyhledávání R

Odhad radiance I

Vyzařovaná **radiance z bodu x**:

$$L_r(x,\omega_o) = \int_{\Omega} f_r(x,\omega_i \to \omega_o) \cdot \underline{L_i(x,\omega_i)} \cdot \cos\theta_i \, d\omega_i$$

Vyjádření pomocí **světelného toku**:

$$L_r(x,\omega_o) = \int_{\Omega_x} f_r(x,\omega_i \to \omega_o) \cdot \frac{\partial^2 \Phi_i(x,\omega_i)}{\partial A_i}$$

Odhad radiance II

Odhad radiance z **fotonové mapy v okolí bodu x**:
(najdu **n** nejbližších fotonů)

$$L_r(x,\omega_o) \approx \sum_{p=1}^{n} f_r(x,\omega_p \rightarrow \omega_o) \cdot \frac{\Delta \Phi_p(x,\omega_p)}{\Delta A}$$

Při **kruhovém** okolí (n-tý foton má vzdálenost **r**):

$$L_r(x,\omega_o) \approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^{n} f_r(x,\omega_p \rightarrow \omega_o) \cdot \Delta \Phi_p(x,\omega_p)$$

Filtrace ve fotonové mapě

- pokud se použije menší množství fotonů, průběh odhadu radiance je rozmazaný (… „box filter“)
  - obzvlášť vadí u kaustické mapy
- vhodnější filtry zdůrazňují záznamy ve středu prohledávání
  - kuželový filtr
  - Gaussovský filtr
  - **diferenciální kontrola** – pokud se přidáváním dalších (vzdálenějších) fotonů odhad monotónně mění, ukončím přidávání a vrátím aktuální výsledek

Globální zobrazování I

Shrnutí již dříve uvedených vzorců:

$$L_o(x,\omega_o) = L_e(x,\omega_o) + L_r(x,\omega_o)$$

Odražená radiance:

$$L_r(x,\omega_o) = \int_{\Omega_x} f_r(x,\omega_i,\omega_o)\cdot L_i(x,\omega_i,\omega_o)\cdot\cos\theta_i \, d\omega_i$$

Složky funkce odrazivosti:

$$\boxed{f_r(x,\omega_i,\omega_o) = f_{r,d}(x,\omega_i,\omega_o) + f_{r,s}(x,\omega_i,\omega_o)}$$

Globální zobrazování II

Klasifikace přicházející radiance **L_i**:

$L_{i,l}(x,\omega_i)$ světlo přicházející přímo ze světelných zdrojů **L**

$L_{i,c}(x,\omega_i)$ kaustika – světlo ze zdrojů koncentrované lesklými odrazy/lomy **L S⁺**

$L_{i,d}(x,\omega_i)$ nepřímé světlo odražené minimálně jedenkrát difusně **L S* D (D|S)***

$$\boxed{L_i(x,\omega_i) = L_{i,l}(x,\omega_i) + L_{i,c}(x,\omega_i) + L_{i,d}(x,\omega_i)}$$

Globální zobrazování III

Odražená radiance (vynechán bod odrazu **x**):

$$
\begin{aligned}
L_r(\omega_o) \;=\; & \int_{\Omega_x} f_r(\omega_i,\omega_o)\cdot L_{i,l}(\omega_i,\omega_o)\cdot\cos\theta_i \; d\,\omega_i + \\
& \int_{\Omega_x} f_{r,s}(\omega_i,\omega_o)\cdot\left(L_{i,c}(\omega_i,\omega_o)+L_{i,d}(\omega_i,\omega_o)\right)\cdot\cos\theta_i \; d\,\omega_i + \\
& \int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i,\omega_o)\cdot L_{i,c}(\omega_i,\omega_o)\cdot\cos\theta_i \; d\,\omega_i + \\
& \int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i,\omega_o)\cdot L_{i,d}(\omega_i,\omega_o)\cdot\cos\theta_i \; d\,\omega_i
\end{aligned}
$$

Přesnost výpočtů

- **„přesný“ výpočet**
  - je-li bod **x** přímo vidět na obrázku .. nebo
  - je-li vidět přes několik málo lesklých odrazů .. nebo
  - je-li paprsek velmi krátký (eliminace „color bleeding“)
- **přibližný výpočet**
  - v ostatních případech
  - .. jestliže byl paprsek od oka odražen alespoň jednou difusně
  - .. nebo má-li paprsek malou váhu (kumulovaný koeficient odrazu)

Přímé osvětlení

Světlo dopadající přímo ze světelných zdrojů:

$$\int_{\Omega_x} f_r(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,l}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos\theta_i \, d\omega_i$$

- v R-T se počítá pomocí stínovacích paprsků
  - vícenásobné paprsky pro plošné zdroje („Distr. R-T“)
- přesný výpočet: stínovací paprsky nebo foton. mapa
  - urychlení .. fotonová mapa obsahuje i **„stínové fotony“**
- přibližný výpočet: jen podle globání fotonové mapy
  - bez jakýchkoli sekundárních paprsků

Zrcadlový a lesklý odraz

Nepřímé světlo odražené lesklou složkou BRDF:

$$\int_{\Omega_x} f_{r,s}(\omega_i, \omega_o) \cdot (L_{i,c}(\omega_i, \omega_o) + L_{i,d}(\omega_i, \omega_o)) \cdot \cos\theta_i \, d\omega_i$$

- klasická Monte-Carlo technika („Distributed R-T“)
  - přesnost úplně stačí i v náročnějších situacích (přímá viditelnost)
  - pro uspokojivou přesnost výsledku stačí použít pouze několik odražených paprsků

Kaustika

Světlo ze zdroje koncentrované na matném povrchu:

$$\int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i, \omega_o) \cdot L_{i,c}(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos\theta_i \, d\omega_i$$

- přesný výpočet: kaustická fotonová mapa
  - tato mapa obsahuje velkou koncentraci fotonů, přesnost je tedy velká (ostrá kaustika)
- přibližný výpočet: podle globání fotonové mapy

Mnohonásobný měkký odraz

Světlo odražené mnohokrát difusně:

$$\int_{\Omega_x} f_{r,d}(\omega_i,\omega_o)\cdot L_{i,d}(\omega_i,\omega_o)\cdot \cos\theta_i \, d\,\omega_i$$

- přesný výpočet: „Distributed R-T“ (Monte-Carlo)
  - optimalizace vzorkování podle globální fotonové mapy (znám směry dopadů fotonů v okolí daného bodu)
  - další urychlení: „Irradiance caching“ (Ward 1988)
- přibližný výpočet: podle globání fotonové mapy

Literatura – knihy

- Andrew Glassner: ***Principles of Digital Image Synthesis***, Morgan Kaufmann, 1995
- Henrik Wann Jensen: ***Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping***, A K Peters, 2001
- Matt Pharr, Greg Humphreys: ***Physically Based Rendering***, Morgan Kaufmann, 2004
- Philip Dutre, Kavita Bala, Philippe Baekert: ***Advanced Global Illumination***, A K Peters, 2006

Literatura

- Eric Veach, Leonidas J. Guibas: ***Optimally Combining Sampling Techniques for Monte Carlo Rendering***, SIGGRAPH'95 Proceedings
- Eric Lafortune: ***Mathematical Models and Monte Carlo Algorithms for Physically Based Rendering***, PhD thesis, KU Leuven, 1996
- Eric Veach: ***Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation***, PhD Thesis, 1997
- Henrik Wann Jensen et al.: ***A Practical Guide to Global Illumination using Photon Mapping***, SIGGRAPH 2002 Course