
Fotorealistická syntéza obrazu

© 2006 Josef Pelikán, MFF UK Praha
Josef.Pelikan@mff.cuni.cz

10.4.2006

Obsah přednášky

- ◆ cíle a aplikace realistického zobrazování
- ◆ historie, přehled používaných přístupů
- ◆ teoretické základy – zobrazovací rovnice
- ◆ souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- ◆ metody založené na zobrazovací teorii
 - ◆ radiační metody (matné materiály)
 - ◆ Monte-Carlo zobrazování (paprsky, lesklé materiály)
 - ◆ hybridní metody

Cíl realistického zobrazování

- ◆ věrně **napodobit přírodu**
 - ◆ virtuální scéna reprezentovaná v počítači
- ◆ přesně **simulovat šíření světla** ve scéně
- ◆ test úspěšnosti
 - ◆ 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
- ◆ zábavní průmysl
 - ◆ filmy (IL&M, Pixar, DreamWorks, ... „off-line“)
 - ◆ videohry („real-time“)
- ◆ média
 - ◆ televize (virtuální studia, ...)
 - ◆ reklamy

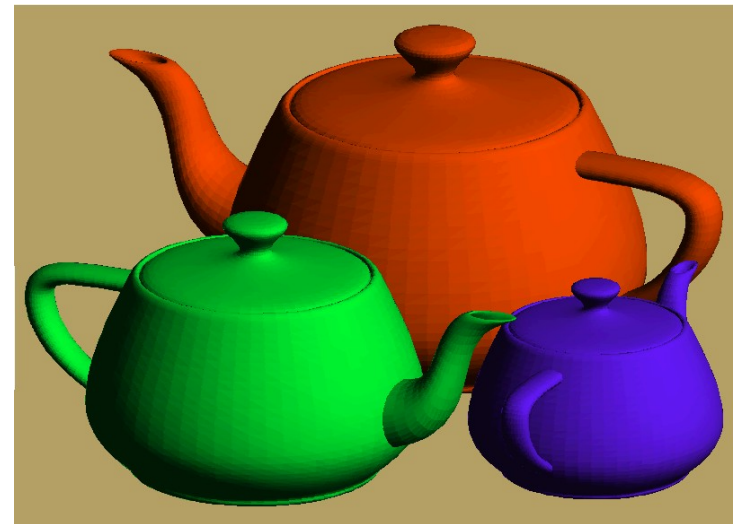


Historie

- ◆ cíle a aplikace realistického zobrazování
- ◆ **historie, přehled používaných přístupů**
- ◆ teoretické základy – zobrazovací rovnice
- ◆ souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- ◆ metody založené na zobrazovací teorii
 - ◆ radiační metody (matné materiály)
 - ◆ Monte-Carlo zobrazování (paprsky, lesklé materiály)
 - ◆ hybridní metody

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**



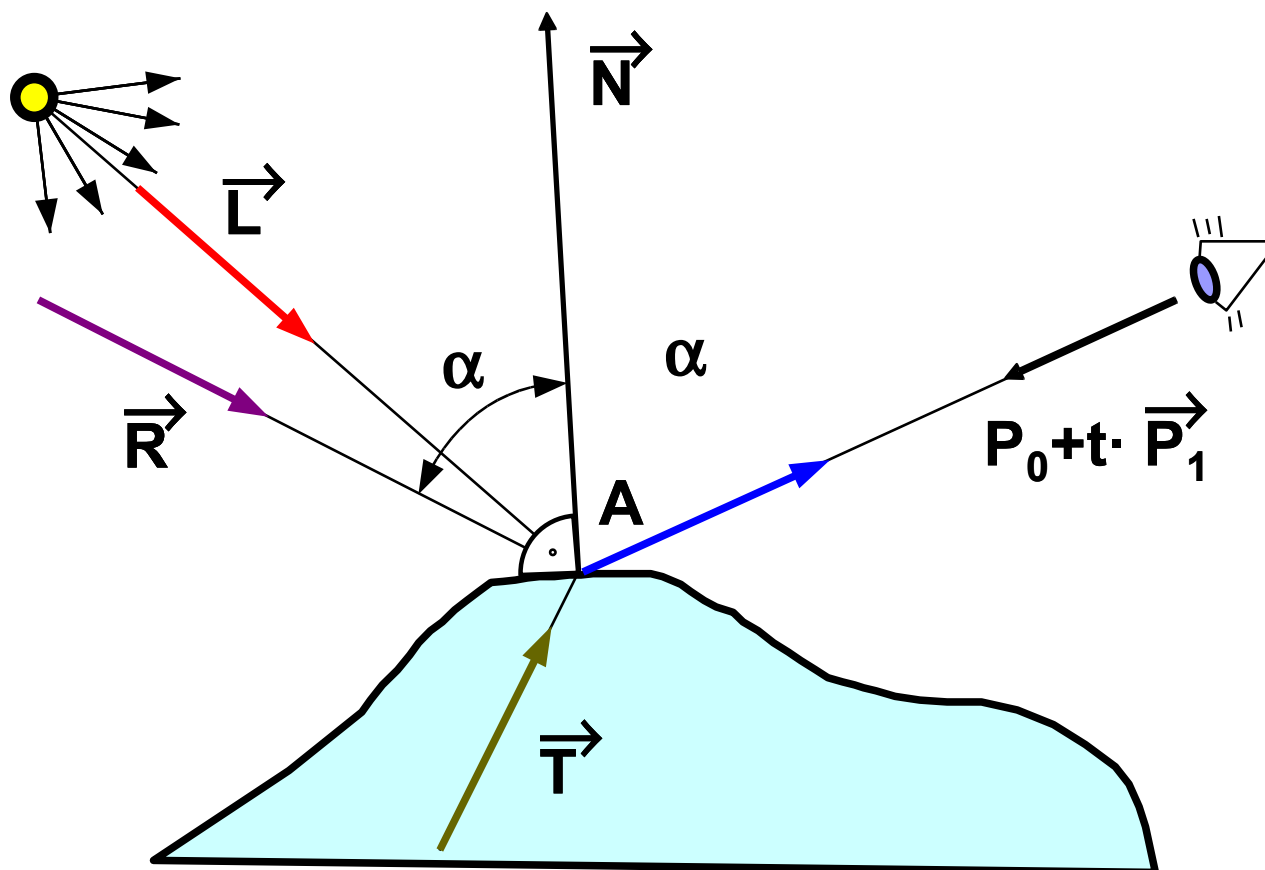
Historie – Ray-tracing I



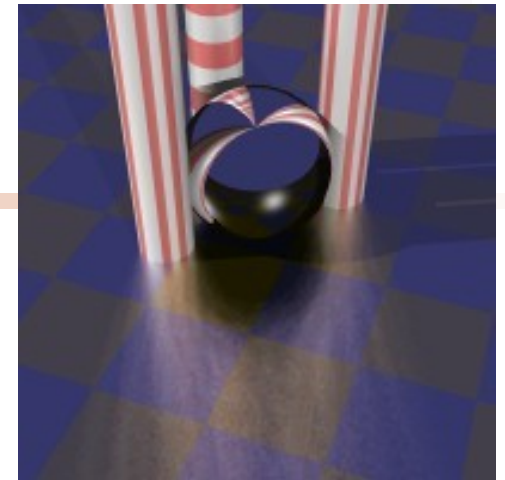
- ◆ Whitted 1980: základní Ray-tracing
- ◆ **geometrický přístup**
 - ◆ sleduje se jenom ideálně odražený paprsek
- ◆ výpočetně velmi náročný **výpočet průsečíku** paprsku se scénou
 - ◆ 95% času → urychlovací metody
- ◆ snadné **vylepšení vzhledu** obrázku
 - ◆ textury, anti-aliasing, shadery
 - ◆ distribuované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



Historie - Ray-tracing II



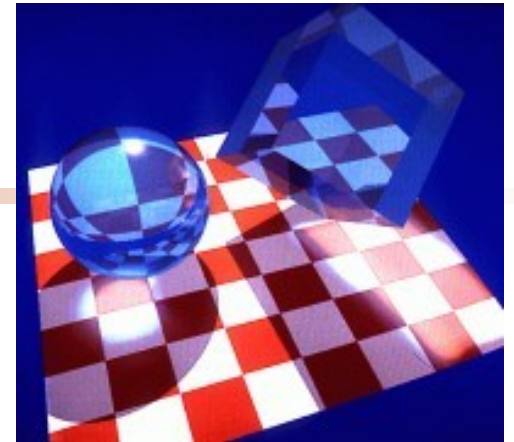
Historie – Distributed R–T



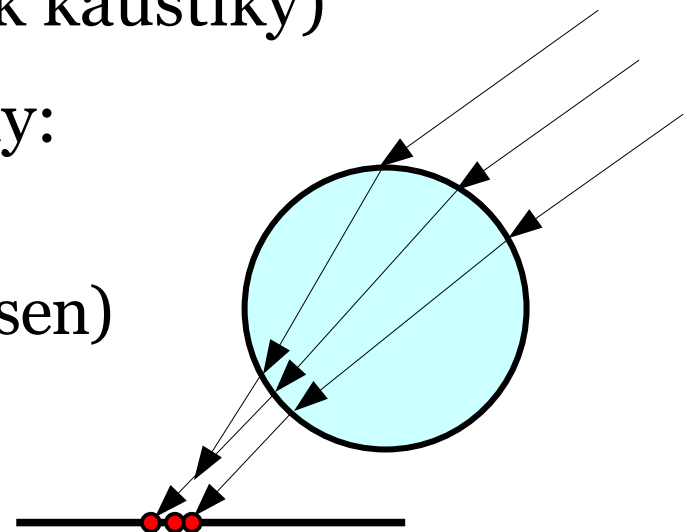
- ◆ Cook 1984: Distributed Ray Tracing
- ◆ **vylepšení kvality výsledku**
 - ◆ integrál nahrazuje původně jediný vzorek
 - ◆ měkké stíny, odrazy, lomy, difrakce
 - ◆ rozmazání pohybem
 - ◆ hloubka ostrosti kamery
- ◆ výpočetně velmi náročné metody
 - ◆ Monte-Carlo algoritmy
 - ◆ stonásobně víc paprsků...



Historie – Bidirectional R–T

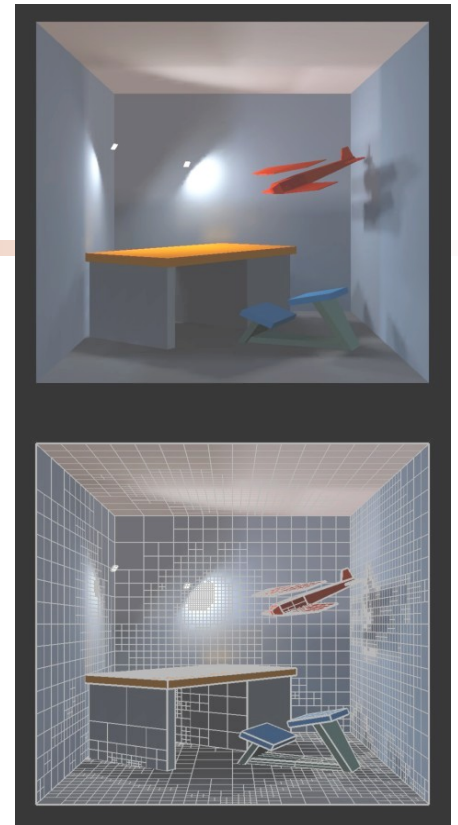


- ◆ Arvo 1986: Backward Ray Tracing
- ◆ sledování **opačného směru**
 - ◆ v první fázi se paprsky posílají ze světla a zachytávají na plochách
 - ◆ vykreslení „kaustiky“ (1986 = rok kaustiky)
 - ◆ později se z toho vyvinuly metody:
 - Light-tracing, Photon-tracing
 - Photon-maps (Henrik Wann Jensen)



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 konfigurační faktory (lesklé odrazy)



Historie – Radiační metoda II

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

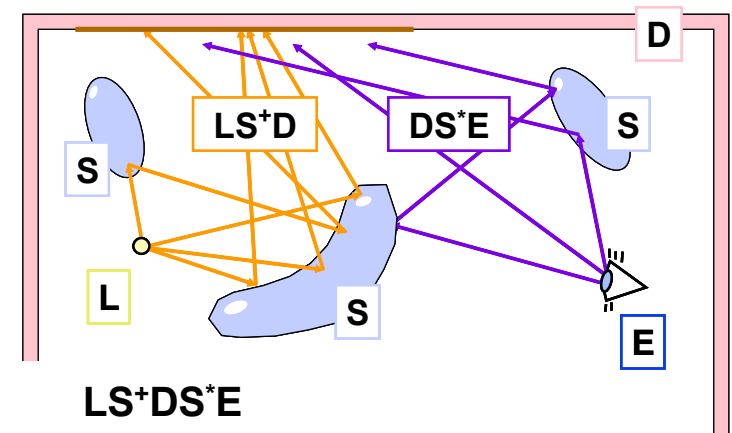
$$B_i = E_i + \rho_i \cdot \sum_{j=1}^N B_j \cdot \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} g(y, x) dA_j dA_i$$

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

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

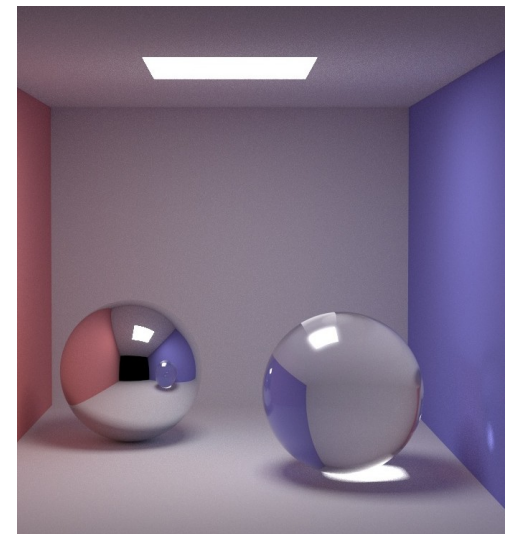
Historie – Hybridní metody

- ◆ Wallace 1987, Sillion 1989, 1991, ...
- ◆ radiální metoda umí dobře **difusní** materiály
- ◆ metody založené na paprscích umí **lesklé** odrazy
 - ◆ Ray-tracing, Distributed R-T
 - ◆ Path-tracing, Photon-tracing, ...
- ◆ **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
- ◆ algoritmy založené na **Monte-Carlo**
 - ◆ .. přesné (analytické) řešení není možné
- ◆ **Path-tracing** (už Kajiya)
 - ◆ později: Light-tracing, Photon-tracing, Bidirectional Path-tracing, hybridní alg.



Teoretické základy

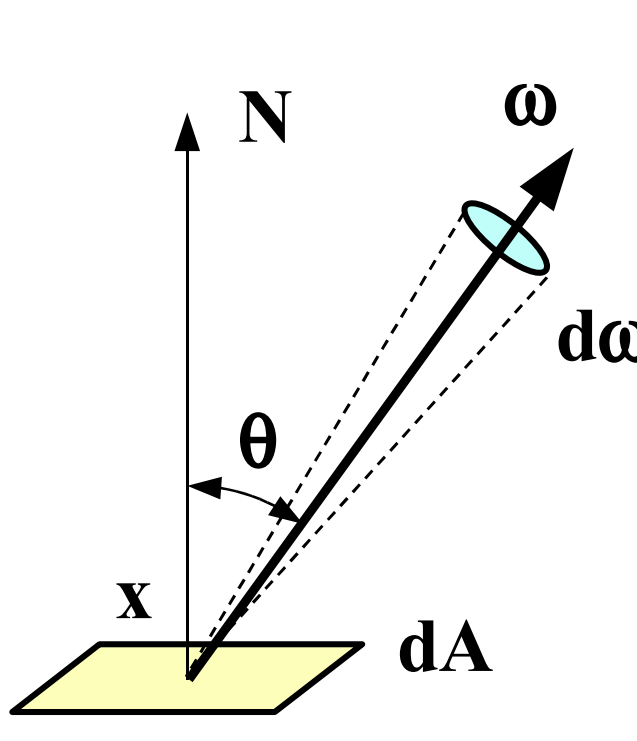
- ◆ cíle a aplikace realistického zobrazování
- ◆ historie, přehled používaných přístupů
- ◆ **teoretické základy – zobrazovací rovnice**
- ◆ souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- ◆ metody založené na zobrazovací teorii
 - ◆ radiační metody (matné materiály)
 - ◆ Monte-Carlo zobrazování (paprsky, lesklé materiály)
 - ◆ hybridní metody

Základní radiometrické veličiny

- **výkon** přijímaný (emitovaný) nějakou částí plochy:
 $\Phi_{in} (\Phi_{out}) [W]$
- přijímaná (emitovaná) **radiosita** (hustota výkonu na ploše): $B_{in} (E, B_{out}) [W / m^2]$
- **intenzita** (hustota výkonu v prostorovém úhlu ω):
 $I = d\Phi / d\omega [W / sr]$

Radiance

- přijímaná (emitovaná) **radiance** ve směru ω :
 $L_{in}(\omega)$ ($L_e(\omega)$, $L_{out}(\omega)$) [W / m² sr]



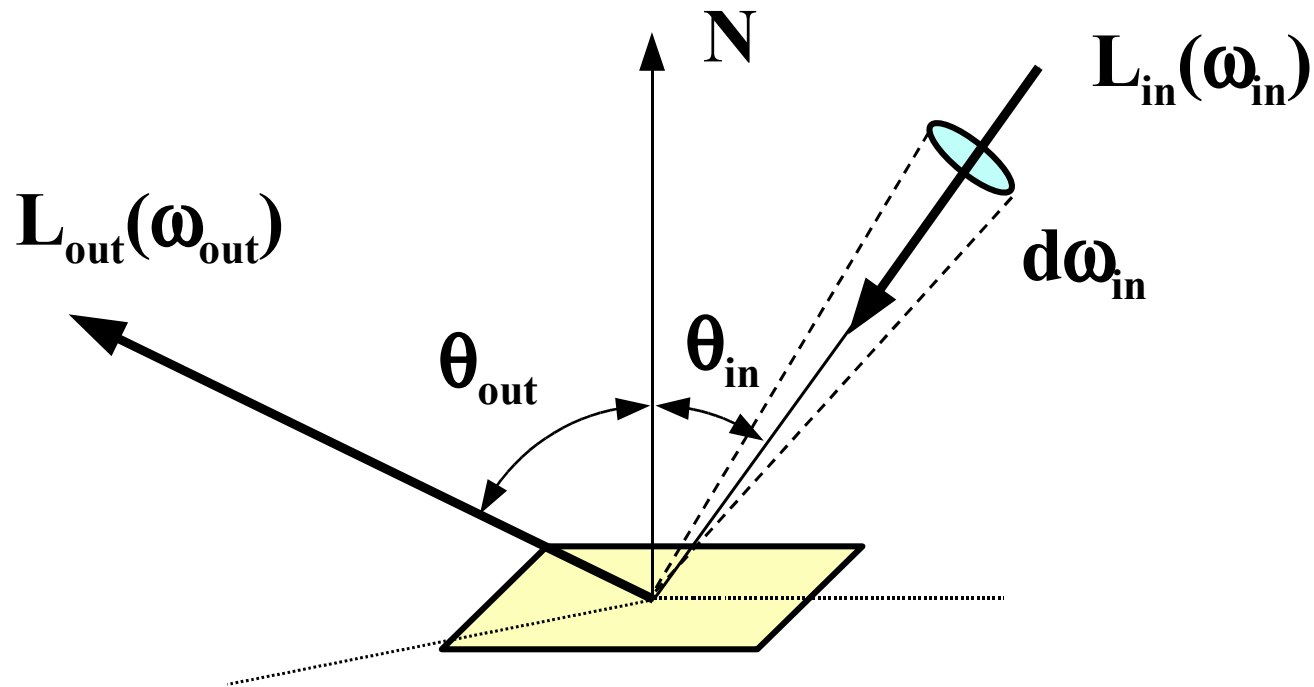
$$L_{out}(x, \omega) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \partial \omega \cos \theta}$$

$$= \frac{\partial B_{out}}{\partial \omega \cos \theta}$$

$$= \frac{\partial I}{\partial A \cos \theta}$$

BRDF (lokální fce odrazivosti)

(“Bidirectional Reflectance Distribution Function”)

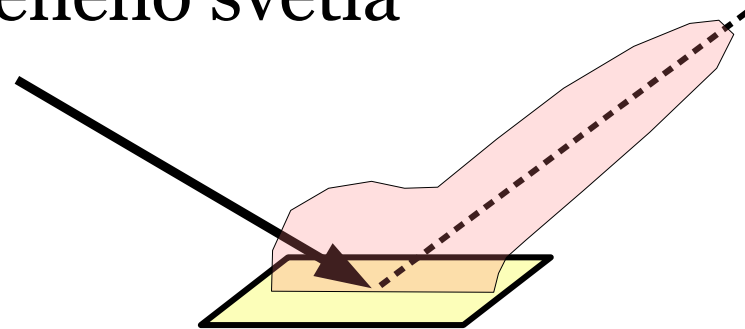


$$f(\omega_{in} \rightarrow \omega_{out}) = \frac{\partial L_{out}(\omega_{out})}{L_{in}(\omega_{in}) \cdot \cos \theta_{in} \cdot \partial \omega_{in}} \quad [sr^{-1}]$$

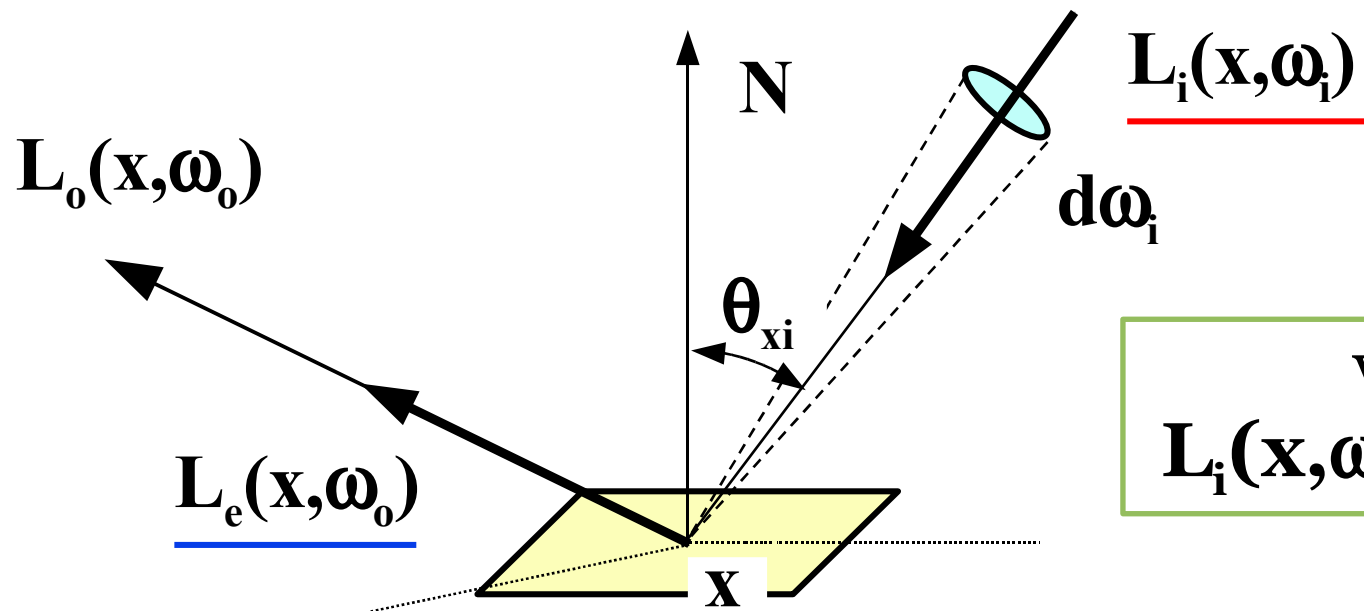
Lokální světelné modely

- ◆ **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

...



Lokální zobrazovací rovnice



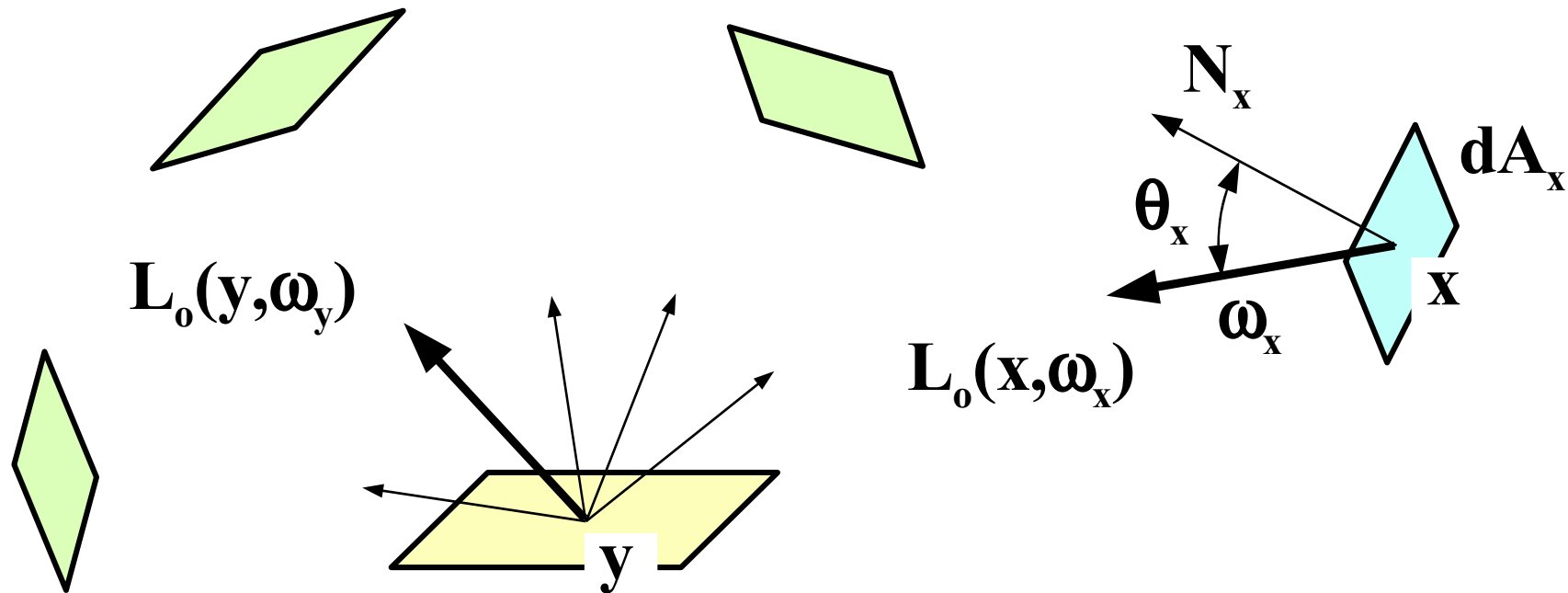
vakuum:
 $L_i(x, \omega_i) = L_o(y, \omega_i)$

vlastní vyzařování

$$L_o(x, \omega_o) = \underline{L_e(x, \omega_o)} + \int f(x, \omega_i \rightarrow \omega_o) \cdot \underline{L_i(x, \omega_i)} \cdot \cos \theta_{xi} d\omega_i$$

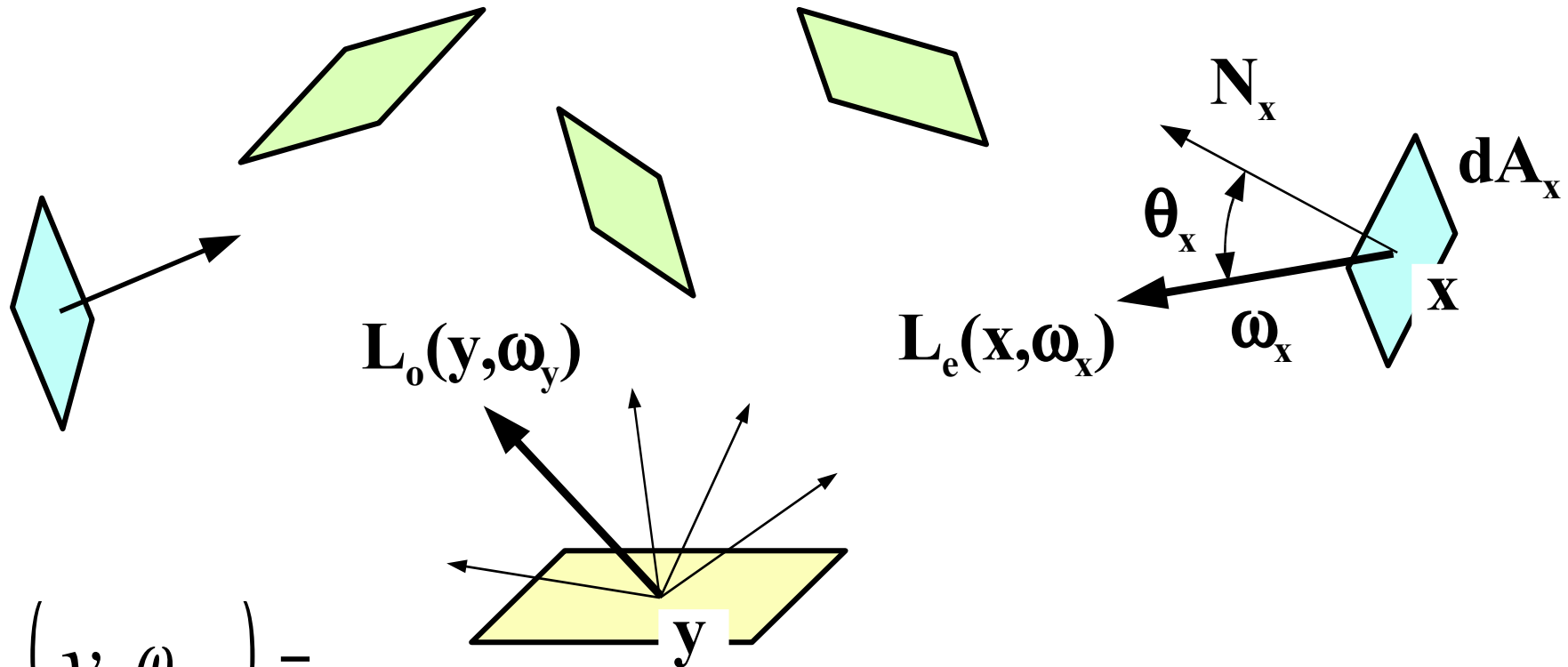
GRDF (globální fce odrazivosti)

(“Global Reflectance Distribution Function”)



$$F(x, \omega_x \rightarrow y, \omega_y) = \frac{\partial^2 L_o(y, \omega_y)}{L_o(x, \omega_x) \cdot \cos \theta_x \cdot \partial A_x \partial \omega_x} \quad [m^{-2} sr^{-1}]$$

Globální zobr. rovnice (s GRDF)



$$L_o(y, \omega_y) =$$

$$= \int_A \int_{\Omega_x} L_e(x, \omega_x) \cdot F(x, \omega_x \rightarrow y, \omega_y) \cdot \cos \theta_x d\omega_x dA_x$$

Souhlas starších metod s teorií

- ◆ cíle a aplikace realistického zobrazování
- ◆ historie, přehled používaných přístupů
- ◆ teoretické základy – zobrazovací rovnice
- ◆ **souhlas starších metod s teorií (fyzikou)**
- ◆ metody založené na zobrazovací teorii
 - ◆ radiační metody (matné materiály)
 - ◆ Monte-Carlo zobrazování (paprsky, lesklé materiály)
 - ◆ hybridní metody

Operátory šíření světla

Zobrazovací rovnice pro **radianci**:

$$L = e + TL$$

$$L = e + Te + T^2e + T^3e + \dots$$

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

$$T = D + S$$

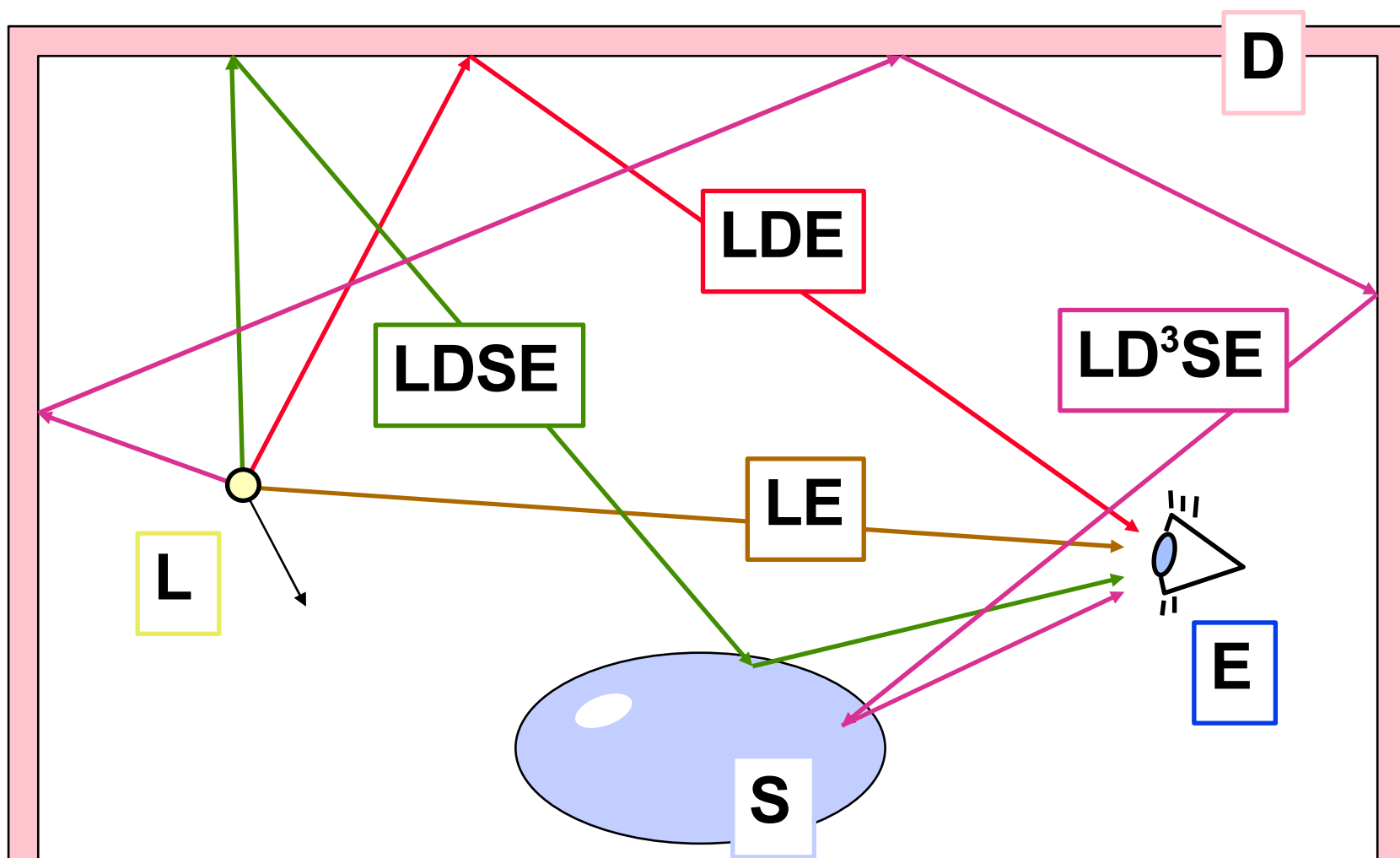
$$L = e + (D + S)e + (D + S)^2e + \dots$$

$$L = e + De + Se + DDe + DSe + SDe + SSe + \dots$$

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: **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 měkké odrazy světla
- ◆ **všechny možné** cesty světla: $L (D | S)^* E$
 - přesné řešení zobrazovacích rovnic (Kajiya)

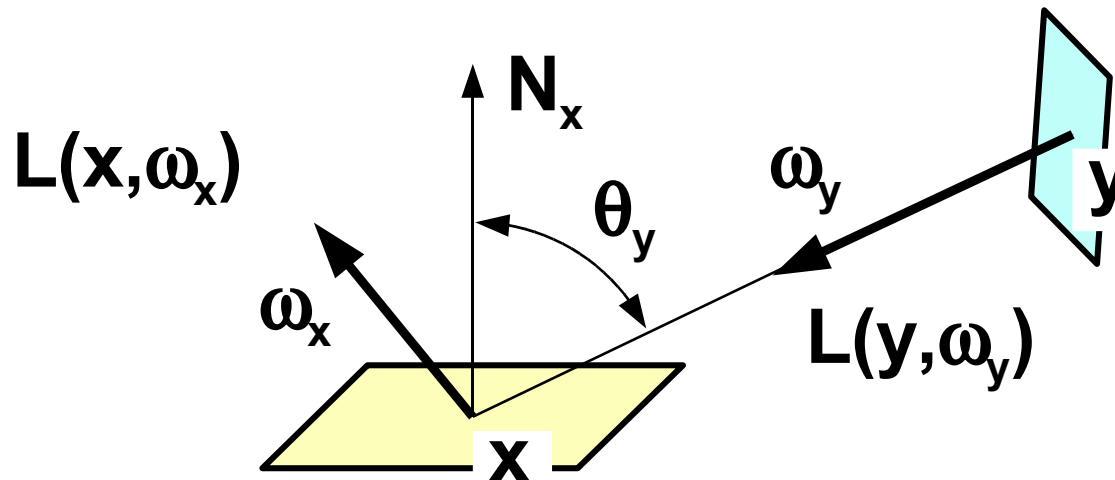
Monte-Carlo zobrazování

- ◆ cíle a aplikace realistického zobrazování
- ◆ historie, přehled používaných přístupů
- ◆ teoretické základy – zobrazovací rovnice
- ◆ souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- ◆ **metody založené na zobrazovací teorii**
 - ◆ radiační metody (matné materiály)
 - ◆ **Monte-Carlo zobrazování** (paprsky, lesklé materiály)
 - ◆ **hybridní metody**

Monte-Carlo zobrazování

- ◆ integrál zobrazovací rovnice je často **mnoho-rozměrný**
 - ◆ anti-aliasing, hloubka ostrosti, rozmazání pohybem
 - ◆ Monte-Carlo metody nejsou citlivé na vyšší dimenze
- ◆ integrandy mají mnoho **nespojností** různých druhů
- ◆ **nepožaduje se velká přesnost**
 - ◆ lidské vidění má velmi omezenou absolutní citlivost
 - ◆ běžně postačí relativní přesnost 0.5 - 2 %

Zobrazovací rovnice pro radianci



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

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

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

Path-tracing

Monte-Carlo odhad toku $\Phi(\mathbf{S})$ i radiance $\mathbf{L}(\mathbf{x}_0, \omega_0)$
(omezení náhodné procházky pomocí **ruské rulety**):

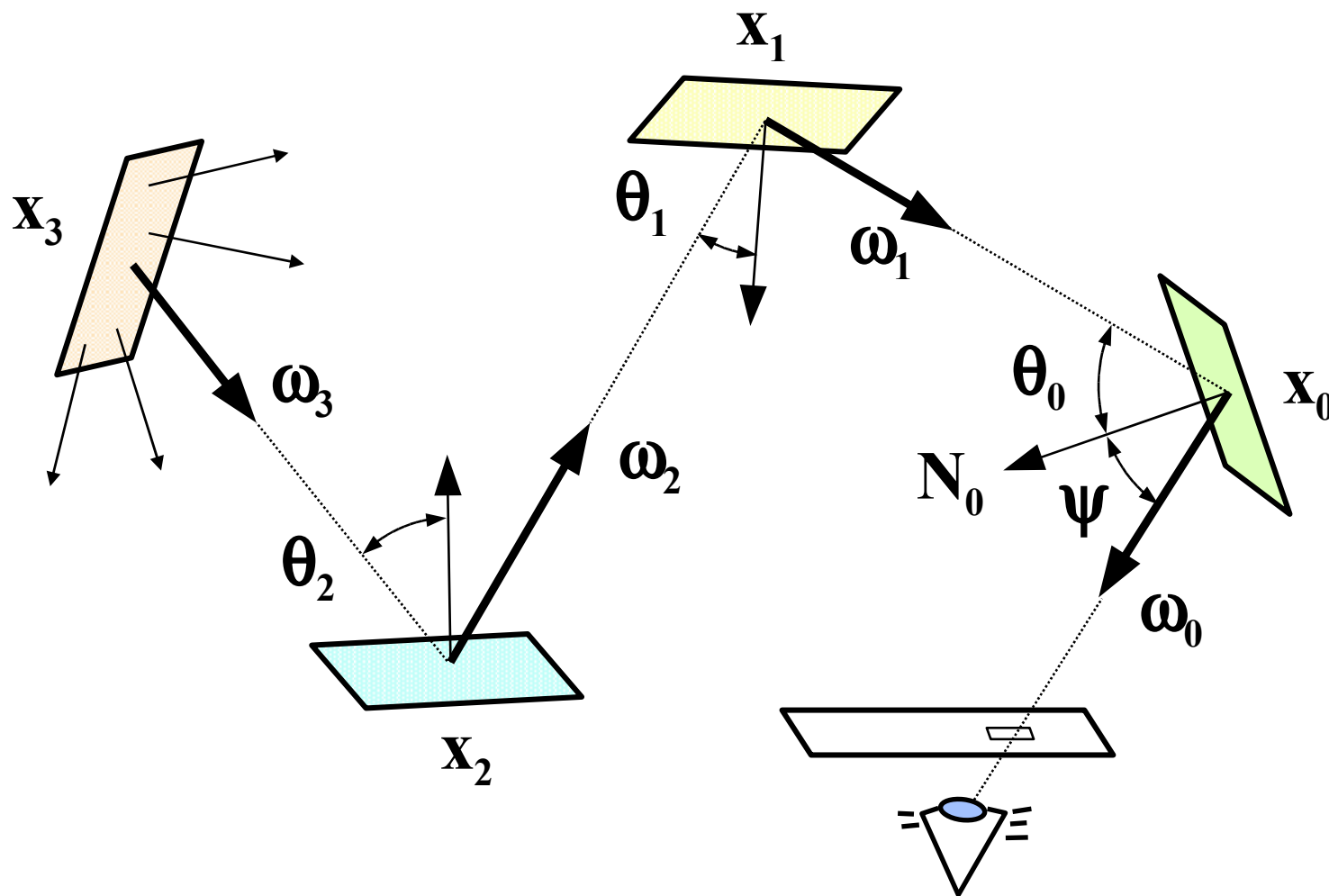
$$\langle \Phi(\mathbf{S}) \rangle_{path} = \frac{W_e(x_0, \omega_0, \mathbf{S}) \cdot \cos \psi}{p_0(x_0, \omega_0)} .$$

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

pravděpodobnost
pokračování krokem \mathbf{j}

hustota pravděp.
pro vstupní směr ω_j

Schema šíření světla



Odhad příští události (NEE)



- ◆ obyčejný Path-tracing je velmi **neefektivní**
 - náhodná procházka se musí trefit do zdroje světla!
- ◆ **odhad příští události (NEE)**
 - 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

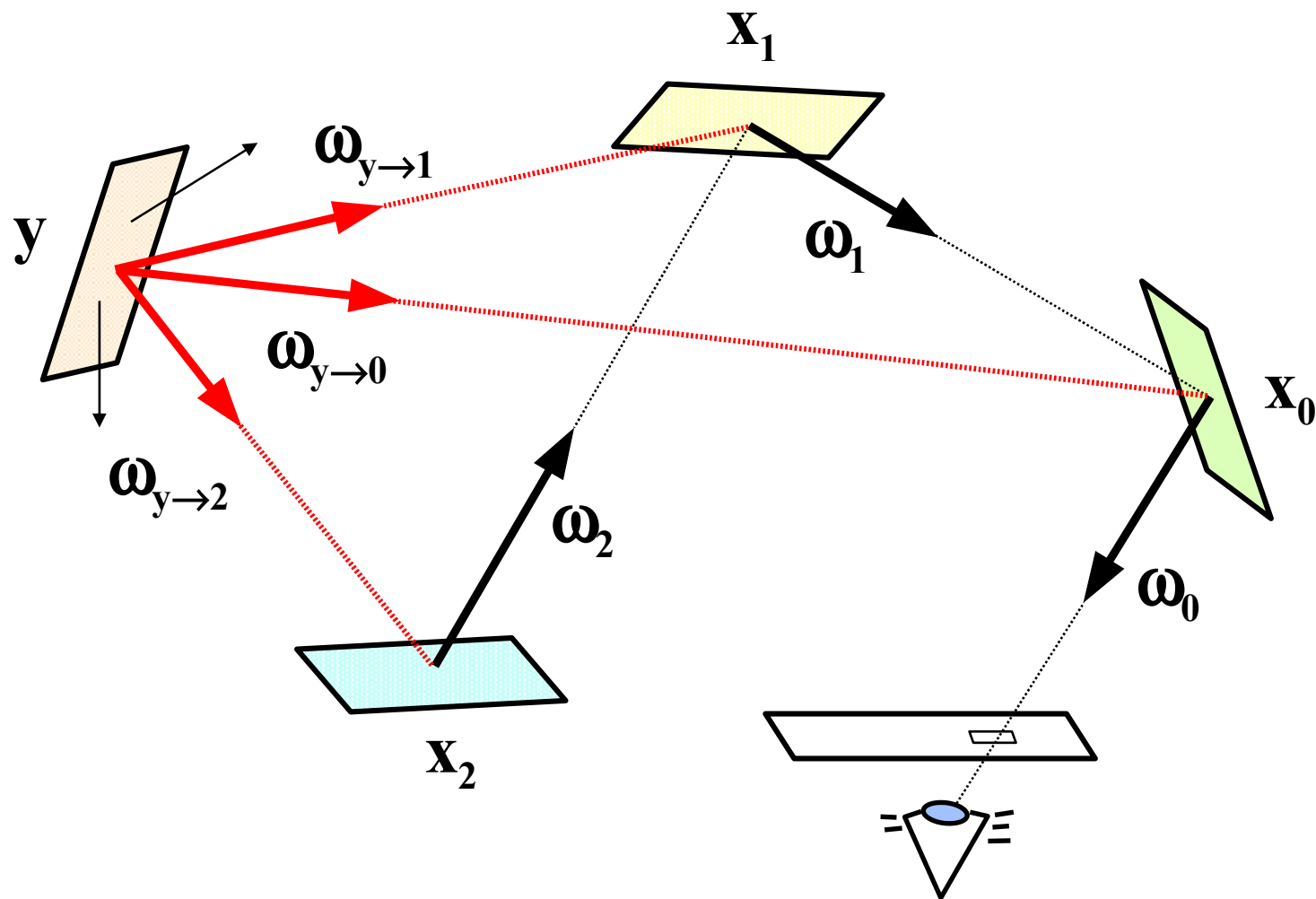
Rozdělení **nepřímého osvětlení** na dvě složky:

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

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

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

Schema šíření světla (NEE)



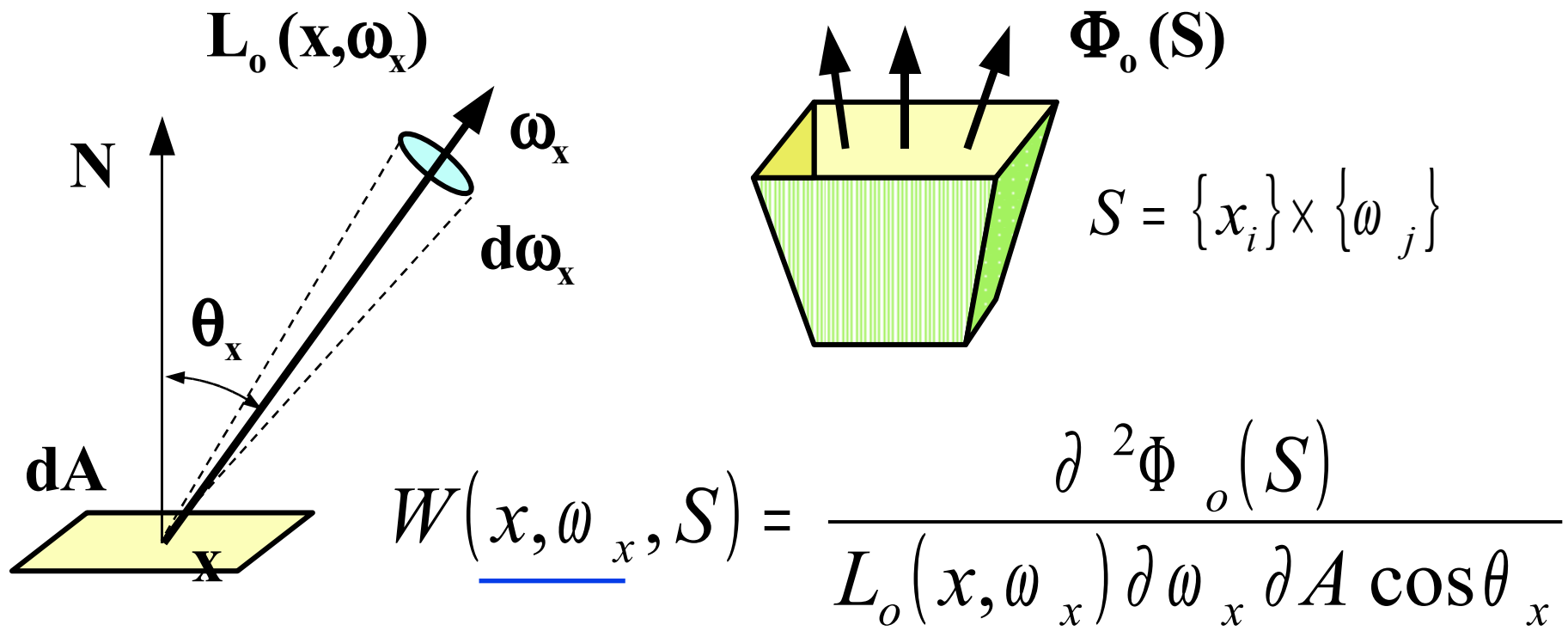
Dualita v teorii zobrazování



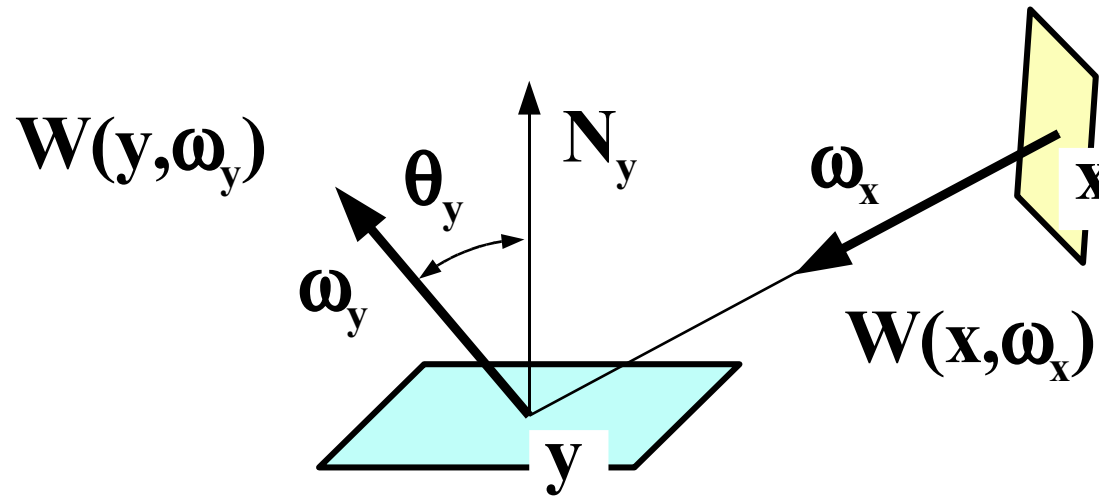
- ◆ Kajiya 1986: zobrazovací rovnice
- ◆ **Smits** 1992: zavedení pojmu „důležitost“ (potenciál)
 - aplikace v radiální metodě
- ◆ **Pattanaik** 1993: zavedení duality do teorie zobrazování
 - duální operátory a rovnice - prostředek k řešení úlohy globálního osvětlení scény

Důležitost (potenciál)

- ◆ **výkon** procházející **svazkem S** jako důsledek jednotkové radiance z bodu **x** směrem ω_x [1]



Zobrazovací rovnice pro potenciál



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

$$= W_e(x, \omega_x) + \int_{\Omega_y} f(y, \omega_x \rightarrow \omega_y) \cdot W(y, \omega_y) \cdot \cos \theta_y d\omega_y$$

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

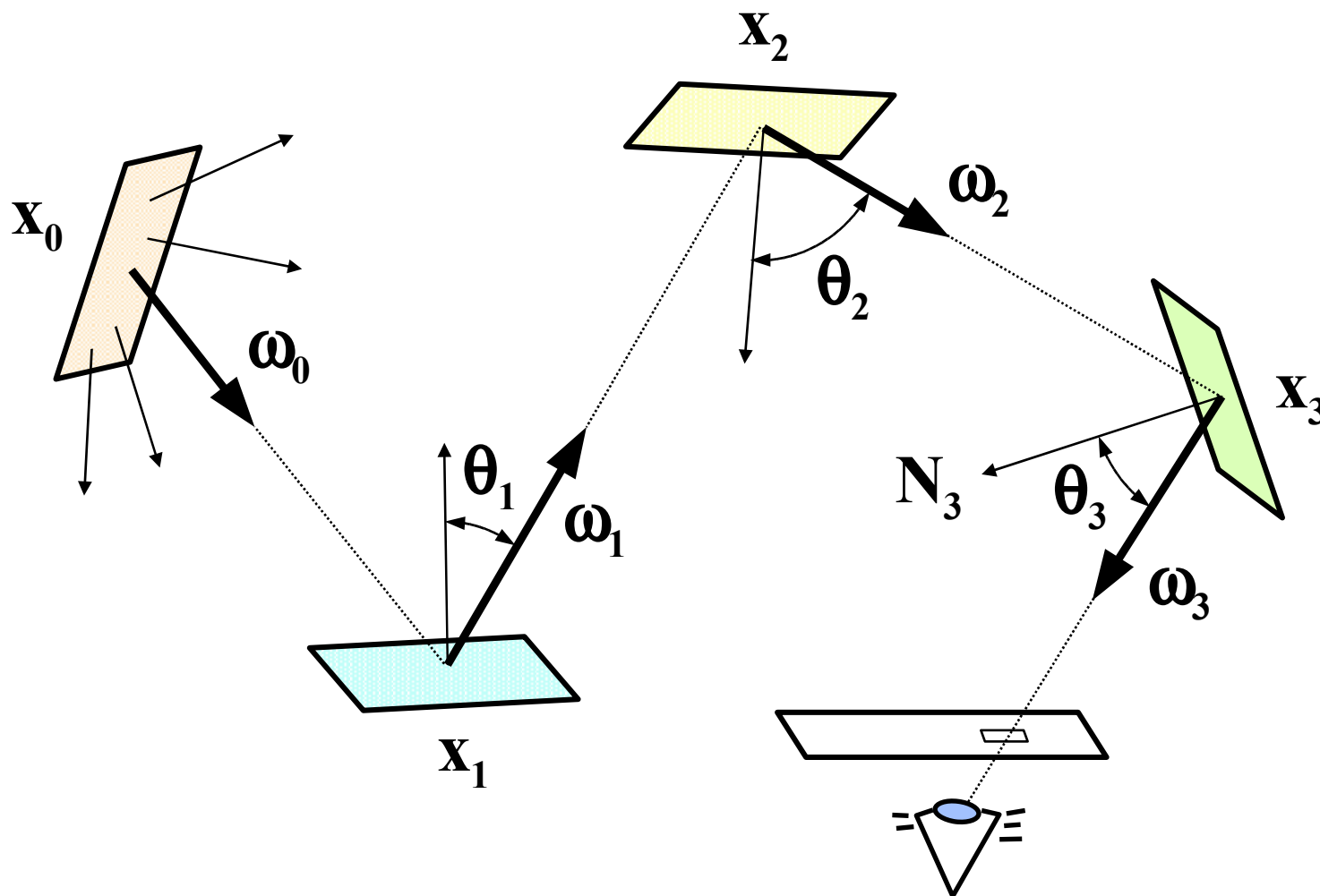
Light-tracing

celkový
odhad

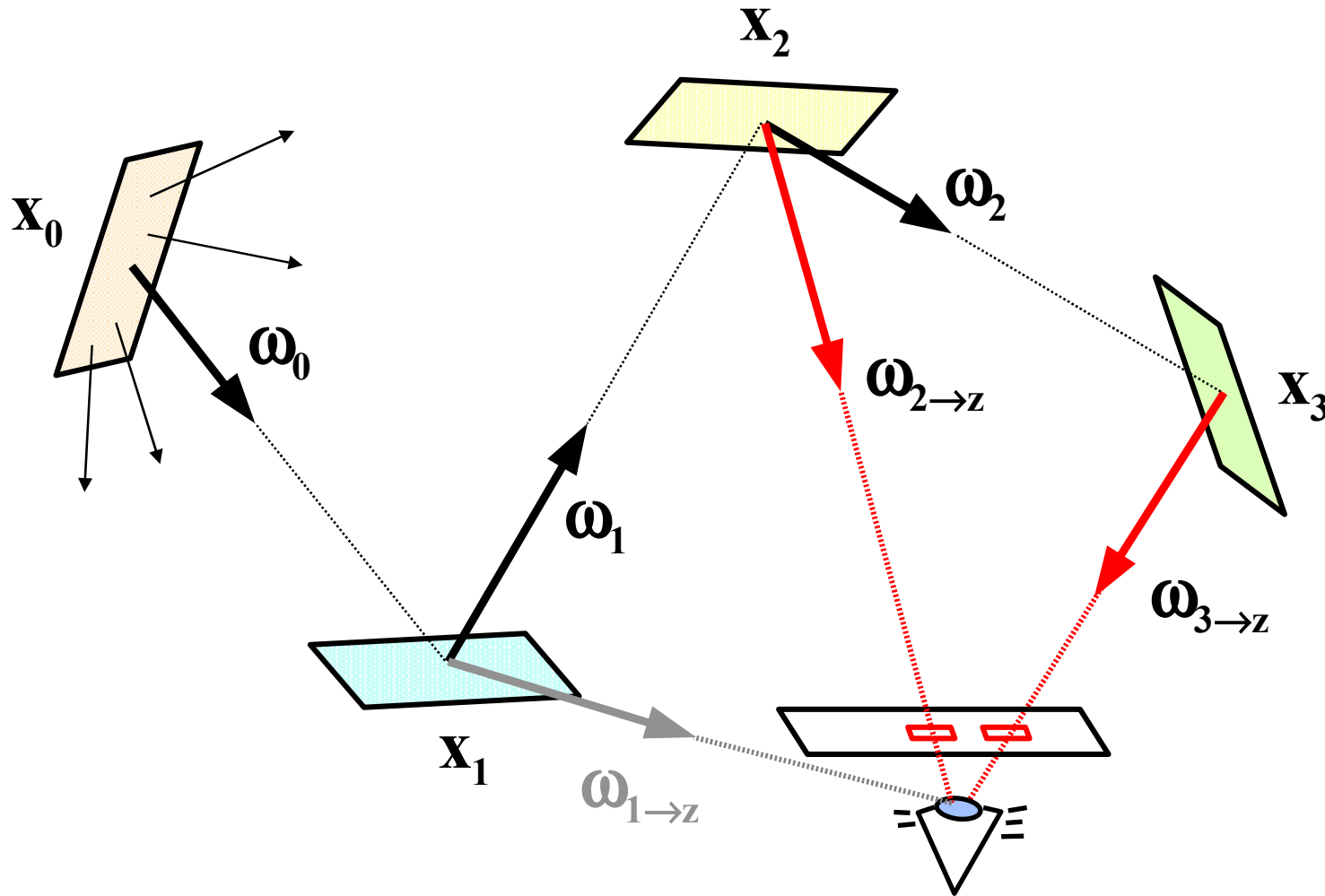
paprsek vycházející ze zdroje
(vyzařovací charakteristiky zdroje)

$$\langle \Phi(S) \rangle_{light} = \frac{L_e(x_0, \omega_0) \cdot \cos \theta_0}{P_0(x_0, \omega_0)} \cdot \sum_{i=0}^k \left[\prod_{j=1}^i \frac{f(x_j, \omega_{j-1} \rightarrow \omega_j) \cdot \cos \theta_j}{P_j \cdot P_j(\omega_j)} \right] \cdot W_e(x_i, \omega_i, S)$$

Schema 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 W_e vede k efektivnějšímu výpočtu (nemusí se dělat NEE)

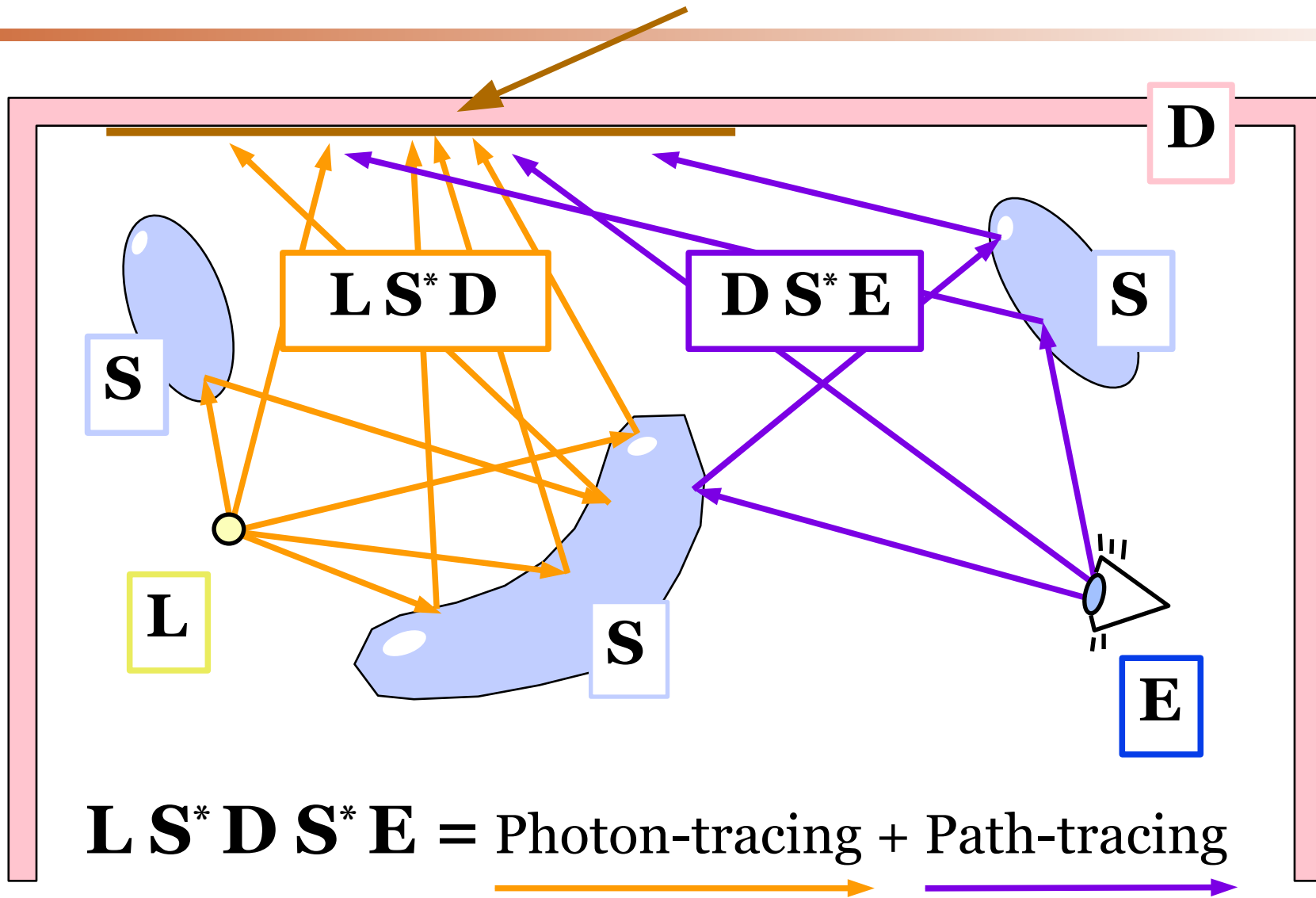
Hybridní metody

- ◆ cíle a aplikace realistického zobrazování
- ◆ historie, přehled používaných přístupů
- ◆ teoretické základy – zobrazovací rovnice
- ◆ souhlas starších metod s teorií (fyzikou)
- ◆ **metody založené na zobrazovací teorii**
 - ◆ radiační metody (matné materiály)
 - ◆ Monte-Carlo zobrazování (paprsky, lesklé materiály)
 - ◆ **hybridní metody**

Vícekové (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: $S_{[M]}^*$
 - ◆ navíc se používá pro finální průchod (zobrazení)
 - ◆ místo R-T lze použít **Path-tracing** nebo jeho vylepšení

Mezivýsledek = fotonová mapa



Literatura

- ◆ Andrew Glassner: *Principles of Digital Image Synthesis*, Morgan Kaufmann, 1995
- ◆ Eric Lafortune: *Mathematical Models and Monte Carlo Algorithms for Physically Based Rendering*, PhD thesis, KU Leuven, 1996
- ◆ Matt Pharr, Greg Humphreys: *Physically Based Rendering*, Morgan Kaufmann, 2004
- ◆ Henrik Wann Jensen: *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, A K Peters, 2001