

---

# Počítačová grafika III

## Úvod

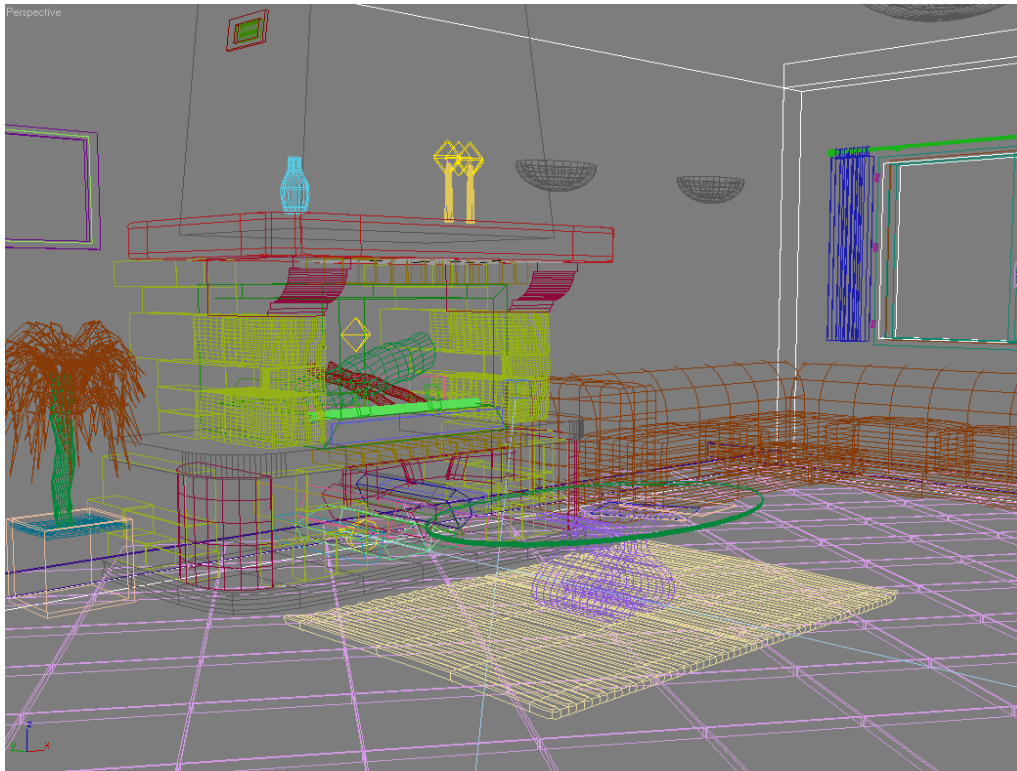
---

Jaroslav Křivánek, MFF UK

[Jaroslav.Krivanek@mff.cuni.cz](mailto:Jaroslav.Krivanek@mff.cuni.cz)

# Syntéza obrazu (Rendering)

- Vytvoř obrázek...



...z matematického  
popisu scény.

# Popis scény

## ■ Geometrie

- Kde je jaký objekt ve scéně
- Ray casting

## ■ Materiál povrchů

- Barva, lesklost, průsvitnost atd.
- BRDF

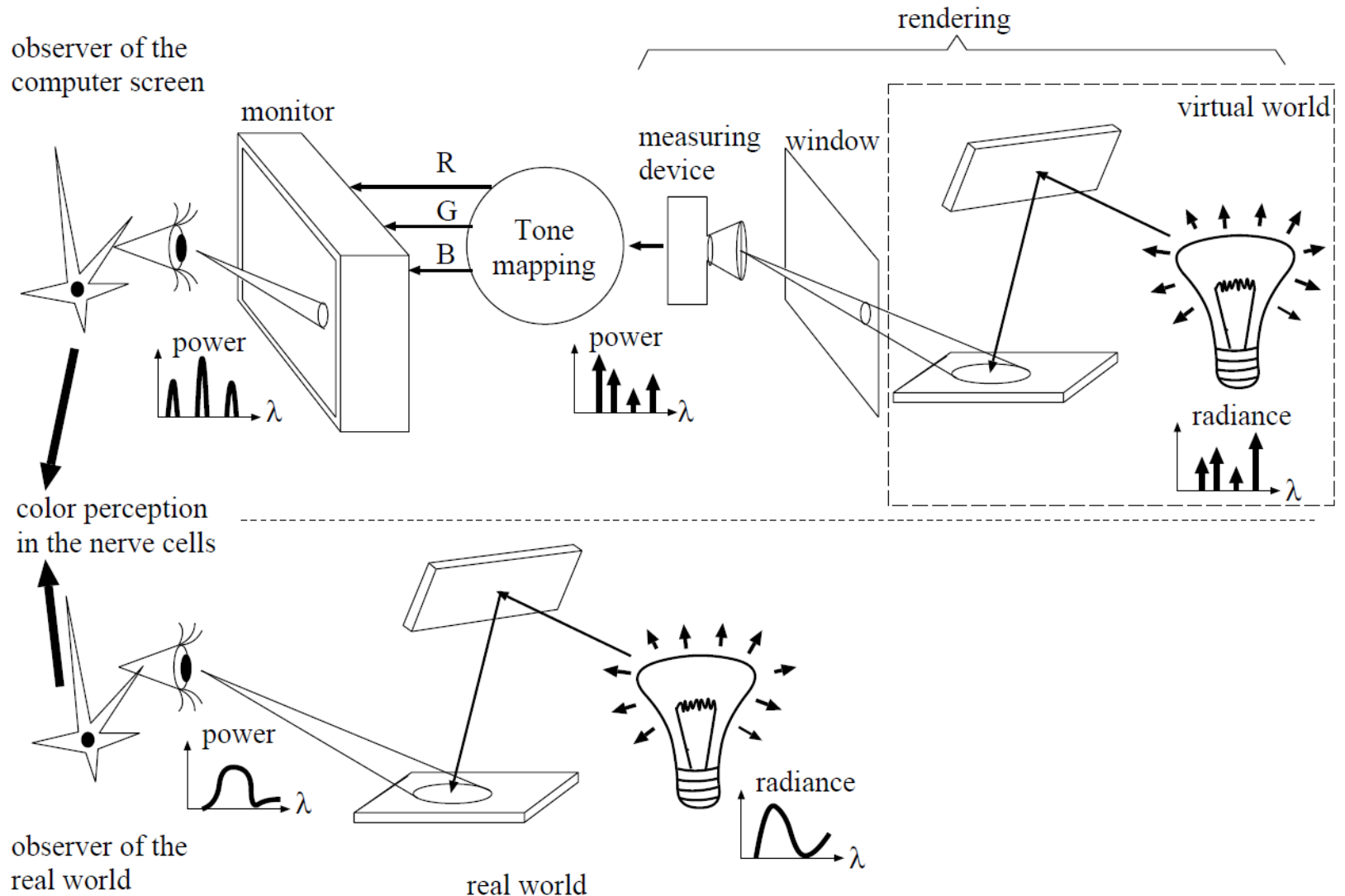
## ■ Zdroje světla

- Směrové a prostorové rozložení emitovaného světla, barva
- Radiometrie

## ■ Kamera (sensor)

- Perspektivní, sférická, ...
- „Měřicí rovnice“

# Rendering v kontextu



# Různé přístupy k renderingu

## ■ Nefotorealistický rendering

- ❑ Napodobení uměleckých stylů
- ❑ Technické nákresy
- ❑ Zdůraznění nějaké informace



## ■ Fotorealistický rendering

- ❑ *Cíl*: obrázky jako fotografie
- ❑ *Metoda*: simulace přenosu světla ve scéně
- ❑ **NAŠE TÉMA**



# Aplikace realistické syntézy obrazu

- **Filmy**
- **Interaktivní zábava (hry)**
- **Průmyslový design**
- **Architektura**
- **Virtuální showroomy**
- **On-line obchodování**
- **Kulturní dědictví**
- **Virtuální a rozšířená realita**

# Interdisciplinarita

## ■ Fyzika

- Radiometrie
- Modely interakce světla s materiály
- Teorie transportu světla

## ■ Matematika

- Integrální rovnice
- Metody Monte Carlo

## ■ Informatika

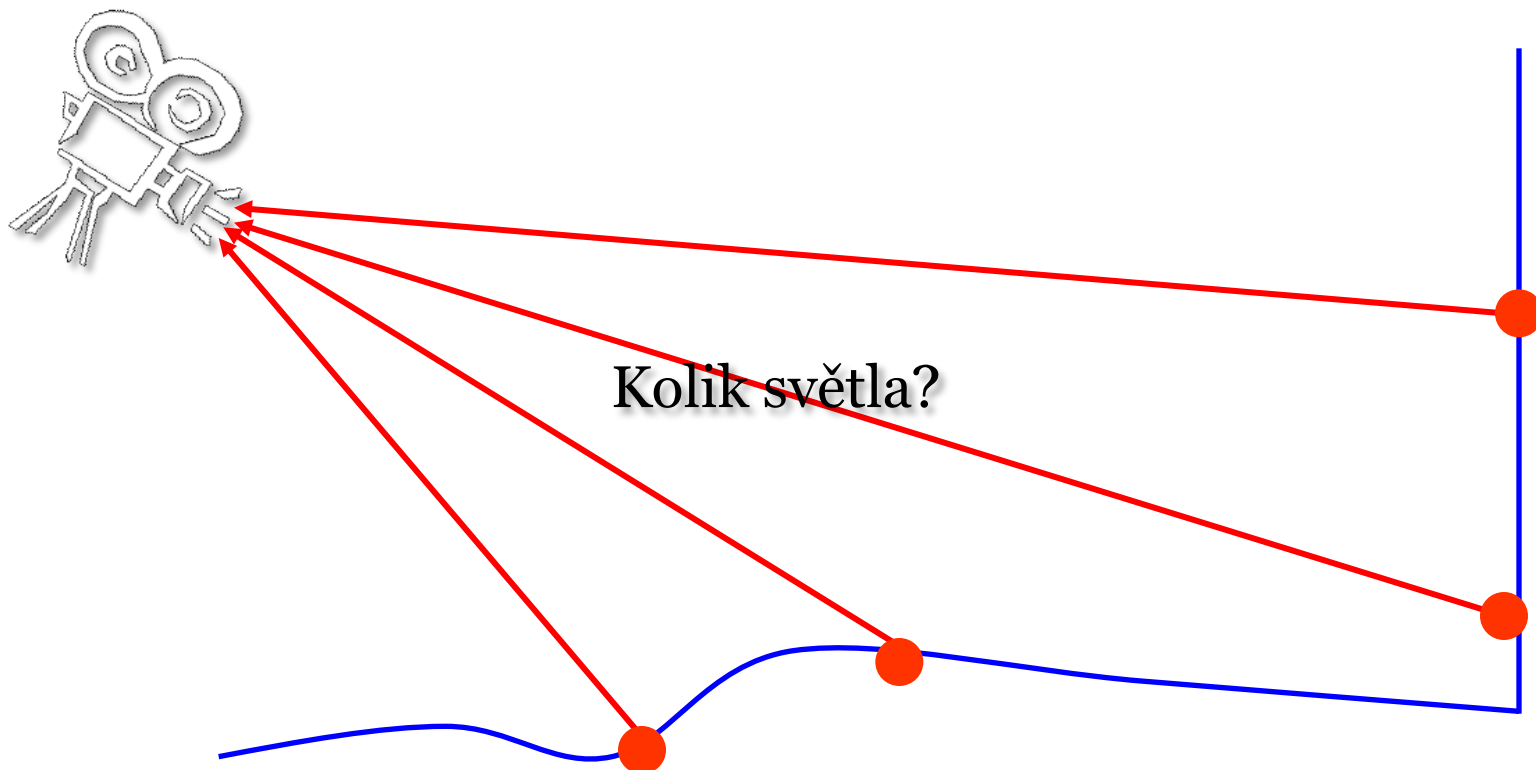
- Výpočetní geometrie
- Programování, Softwarové inženýrství

## ■ Vizuální percepce

## ■ Umění

# Fotorealistická syntéza obrazu

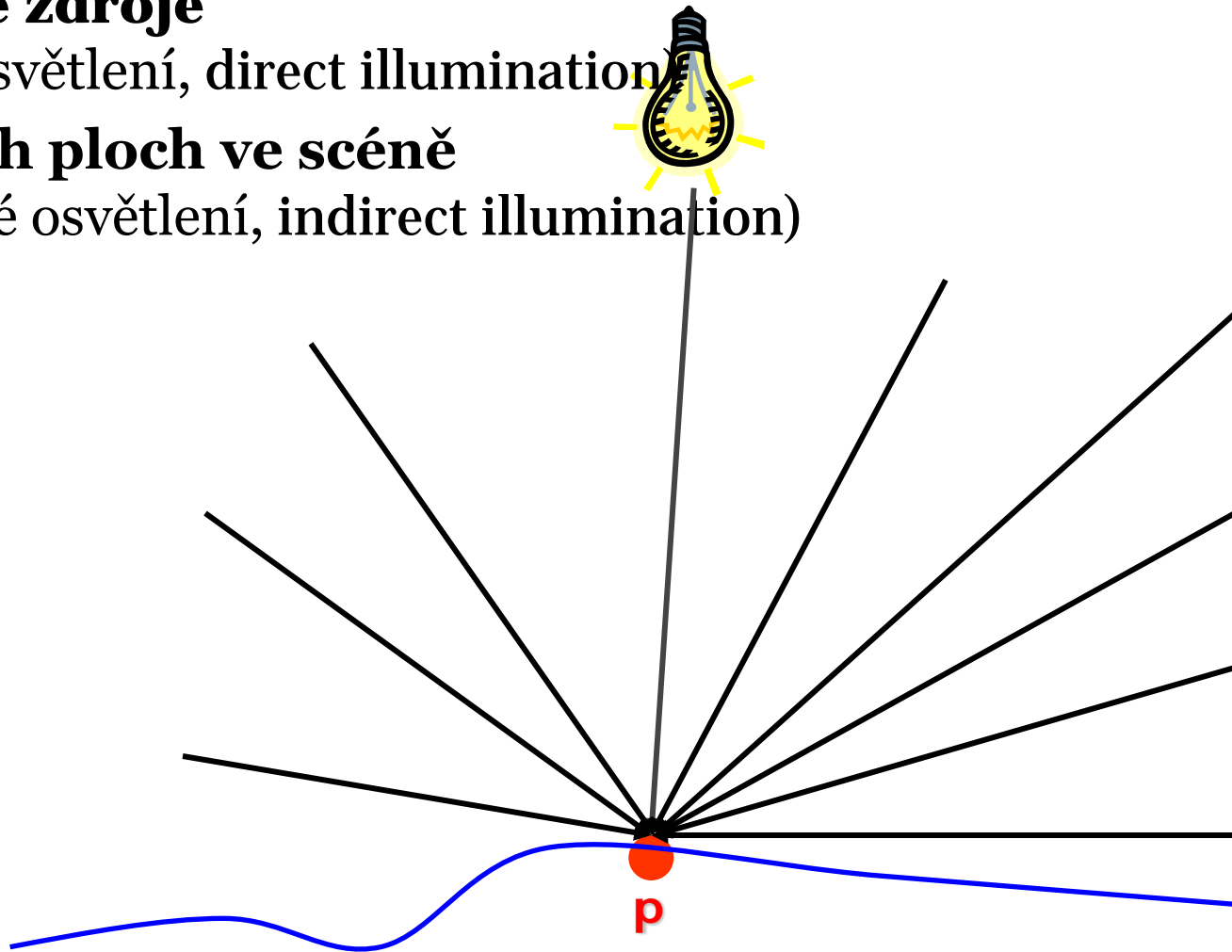
- Pro každý viditelný bod  $\mathbf{p}$  ve scéně
  - Spočítej množství světla odražené směrem ke kameře





# Odkud se přichází světlo?

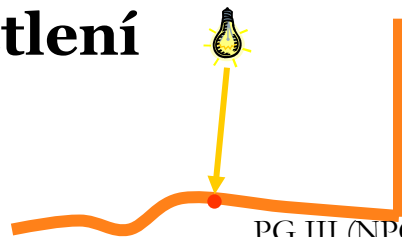
- ❑ ...přímo **ze zdroje**  
(=přímé osvětlení, direct illumination)
- ❑ ... **ze všech ploch ve scéně**  
(= nepřímé osvětlení, indirect illumination)



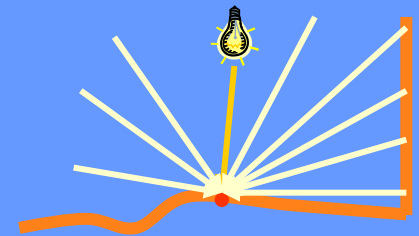
# Globální osvětlení (Global illumination – GI)



**Přímé osvětlení**



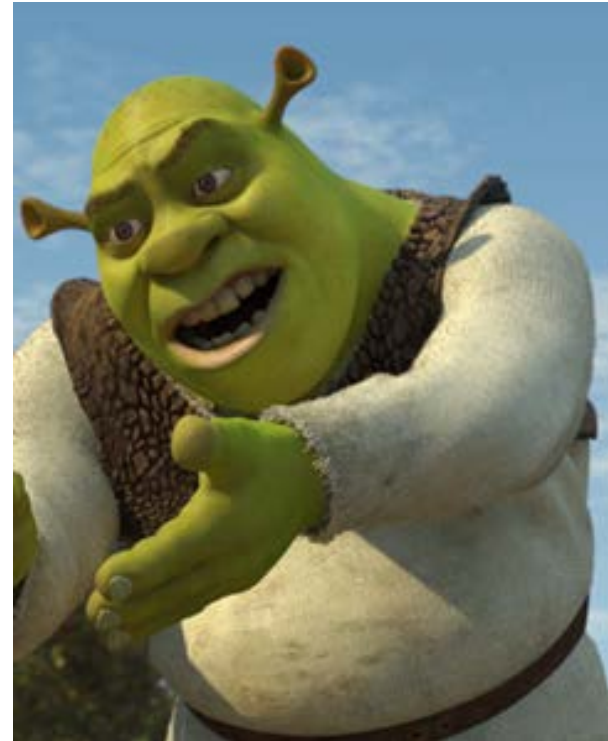
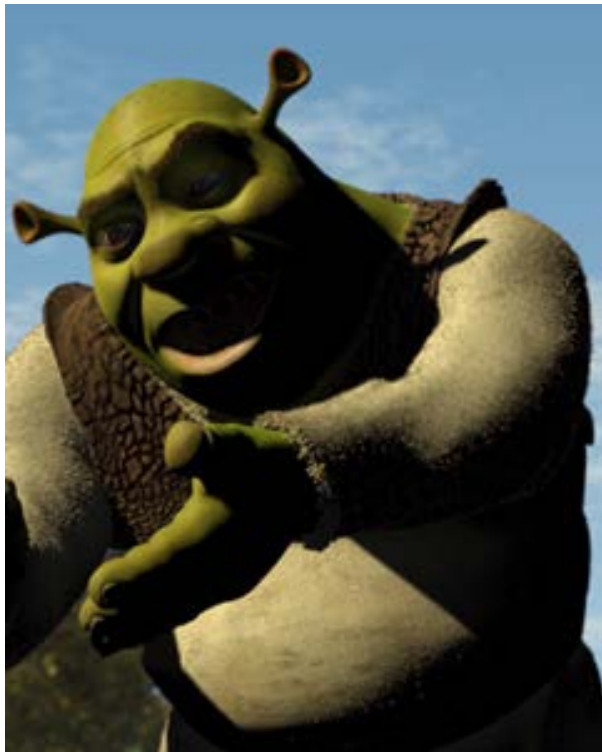
**Globální =  
přímé +  
nepřímé**



# 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)



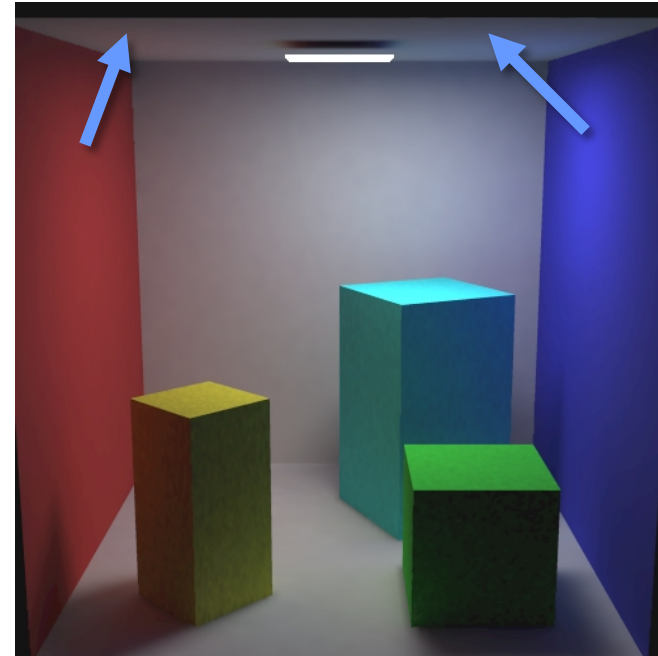
**Modeling: Stephen Duck; Rendering: Henrik Wann Jensen**

# Ideální odraz/lom

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



# Půjčování barev (Color Bleeding)



- Odraz světla z jednoho difúzního povrchu na jiný
- Důležité např. v malbě
  - Lidé podvědomě využívají půjčování barev k pochopení vzájemného prostorového uspořádání objektů

# Půjčování barev



# “Manuální” globální osvětlení

Monsters Inc., 2001

© Pixar Animation Studios



- Manuálně umístěné zdroje světla nahrazují GI
  - Např. modré světlo na zelené příšerce



# Kaustiky (Caustics)

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



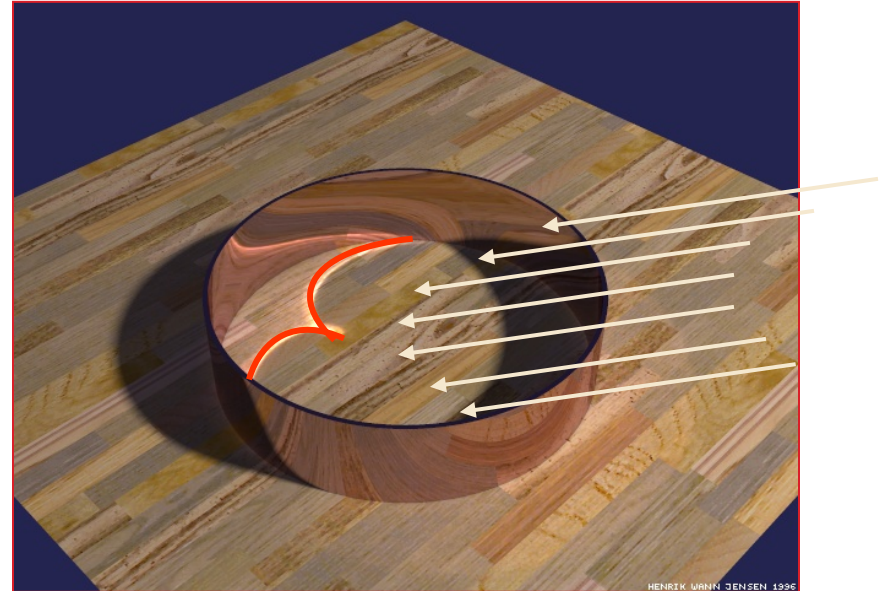
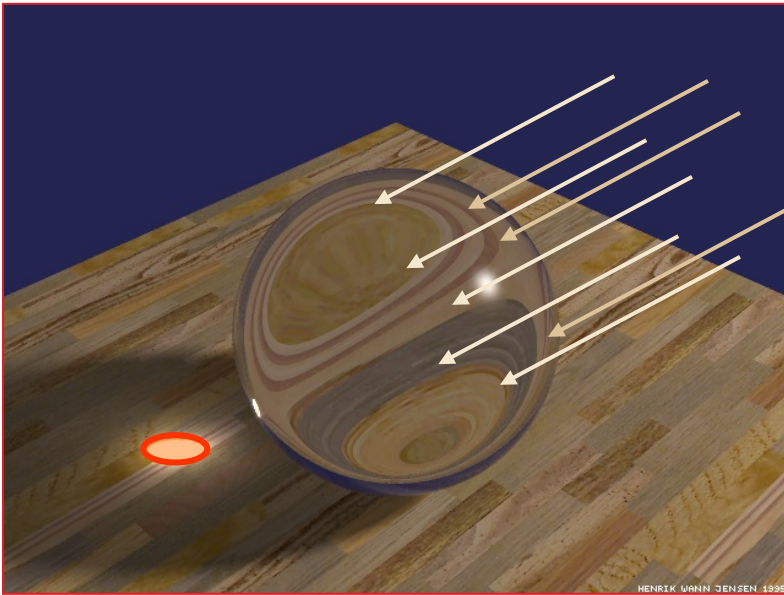
Fotografie



Simulace pomocí fotonových map

# Kaustiky

- Ve fyzice a v počítačovém vidění se kaustikou rozumí singularita (nekonečná hustota světelné energie)



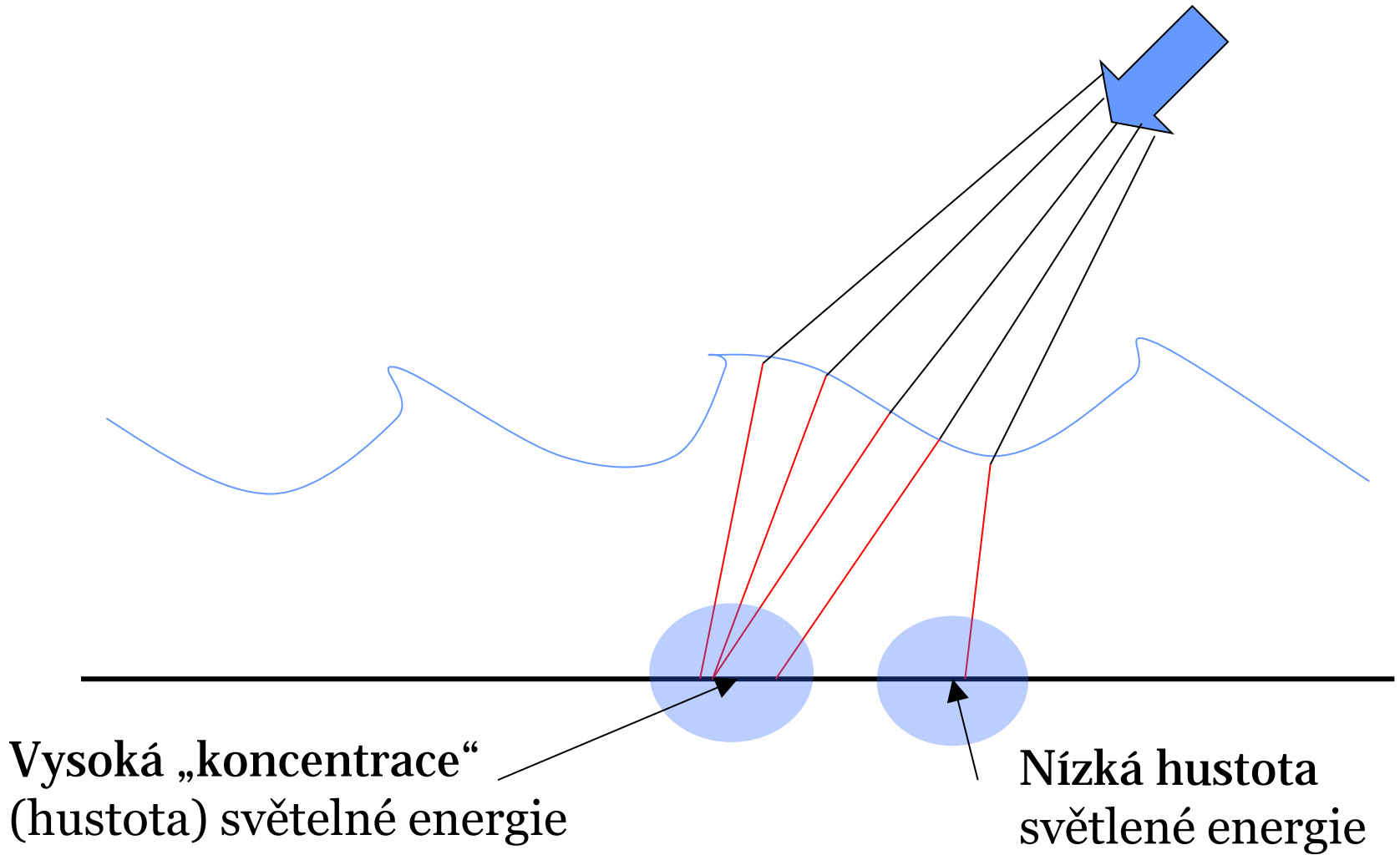
# Pohled na vodu



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



# Kaustiky pod vodou



# Efekty globálního osvětlení ...

- ... jsou důsledkem:
  - **Modulace intenzity světla jako funkce prostoru a úhlu při odrazu světla na površích objektů (*kaustiky*)**
    - Dáno geometrií objektů
    - Materiálovými vlastnostmi objektů (matný x lesklý)
  - **Modulací spektra (barvy) světla při odrazu/lomu (*půjčování barev*)**
    - Tj. změn intenzity světla jako funkce vlnové délky
    - Dáno spektrální odrazivostí materiálů
      - jak moc objekt odráží světlo různých vlnových délek

# Realistická syntéza obrazu: Ingredience

- Popis „množství světla“ v prostoru – **Radiometrie**
- Popis odrazu světla na povrchu – **BRDF**
- Popis rozložení světla v rovnovážném stavu – **zobrazovací rovnice** (rendering equation)
- Numerické metody řešení zobrazovací rovnice
  - Nalezení rozložení světla ve scéně, která odpovídá
    - Zobrazovací rovnici
    - „Okrajovým podmínkám“ = tj. popisu scény
  - Radiační metoda (radiozita), **metody Monte Carlo** (stochastický ray tracing)

---

# **Globální osvětlení ve filmu**

---

# 2001: “Manuální” globální osvětlení





# 2004: “Shrek 2” – Irradiance caching

- První použití GI v animovaném celovečerním filmu
- Irradiance caching



# Irradiance caching

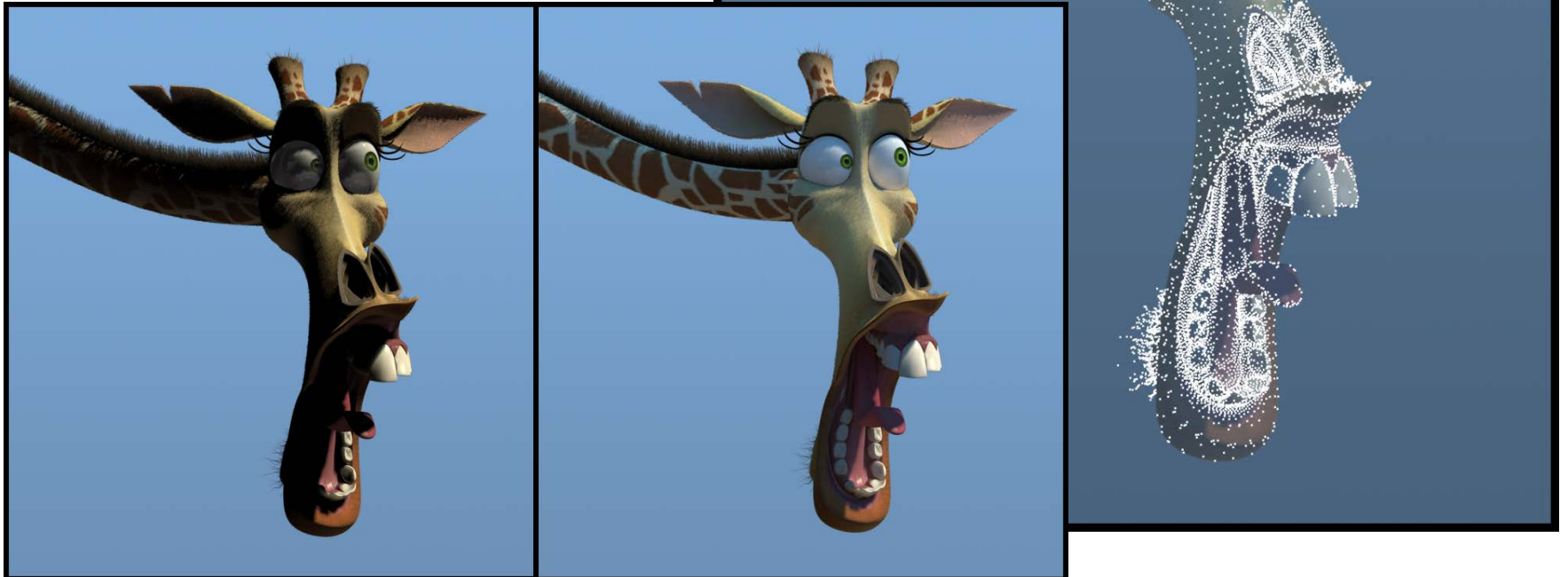


Image credit: Eric Tabellion, PDI DreamWorks

# Irradiance caching



Image credit: Eric Tabellion, PDI DreamWorks

# 2006: „Monster house“ – Sledování cest (Path tracing)



Image courtesy of Columbia Pictures. © 2006 Columbia Pictures Industries, Inc. All rights reserved.

# Sledování cest (Path tracing)



Image courtesy of Sony Pictures Animation. © 2009 Sony Pictures Animation, Inc. All rights reserved.

# Sledování cest (Path tracing)



Image courtesy of Columbia Pictures. © 2009 Columbia Pictures Industries, Inc. All rights reserved.

# Sledování cest (Path tracing)

Alice in the Wonderland, 2010



# Point-based GI: “Up” (bez GI)



PG III (NPGR010) – J. Křivánek 2014 © Pixar Animation Studios  
Image credit: Per Christensen



# Point-based GI: “Up” (s GI)



# Point-based GI: “Toy Story 3” (bez GI)



# Point-based GI: “Toy Story 3” example (with GI)



---

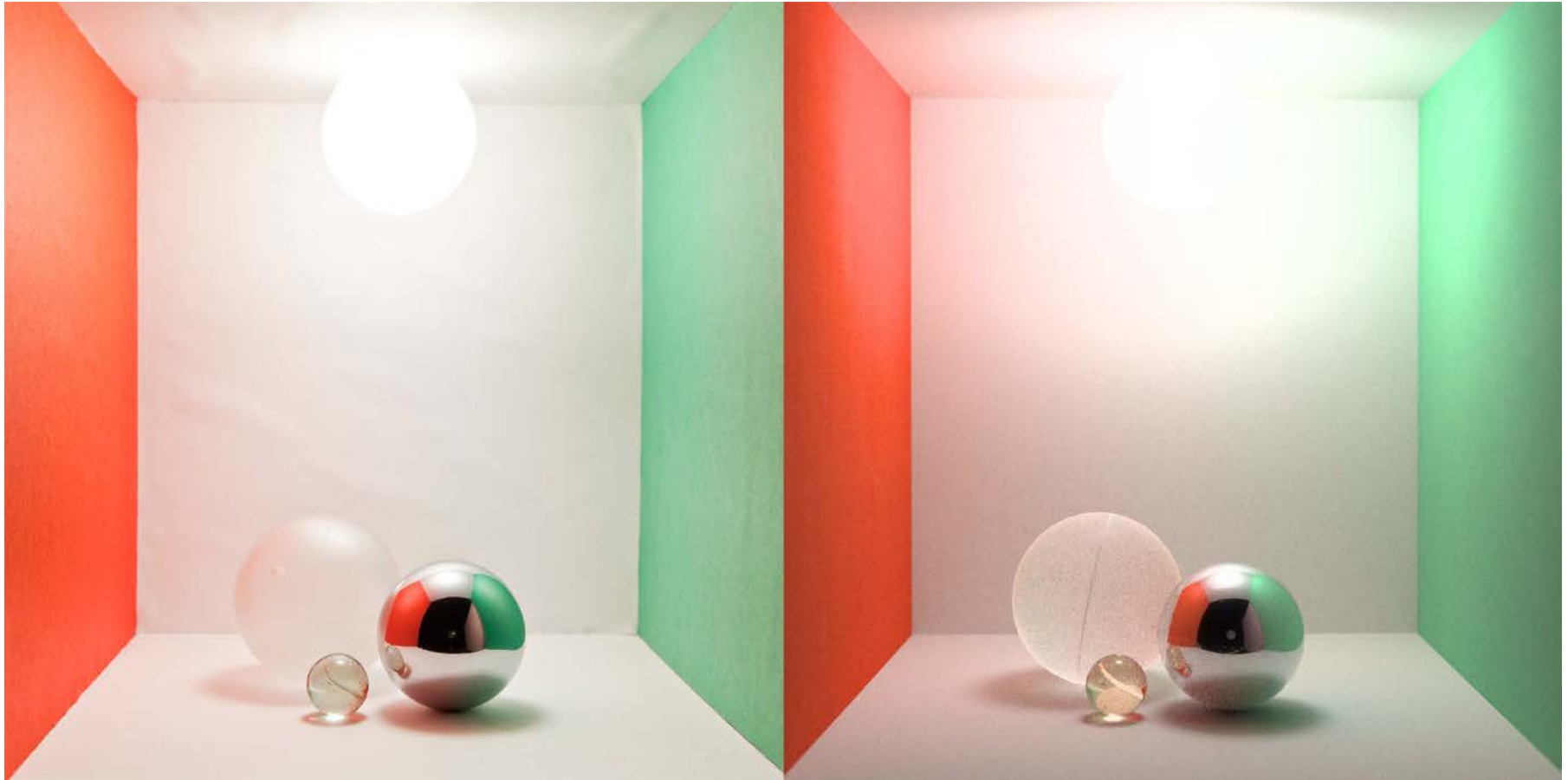
# **Realita vs. Rendering**

---

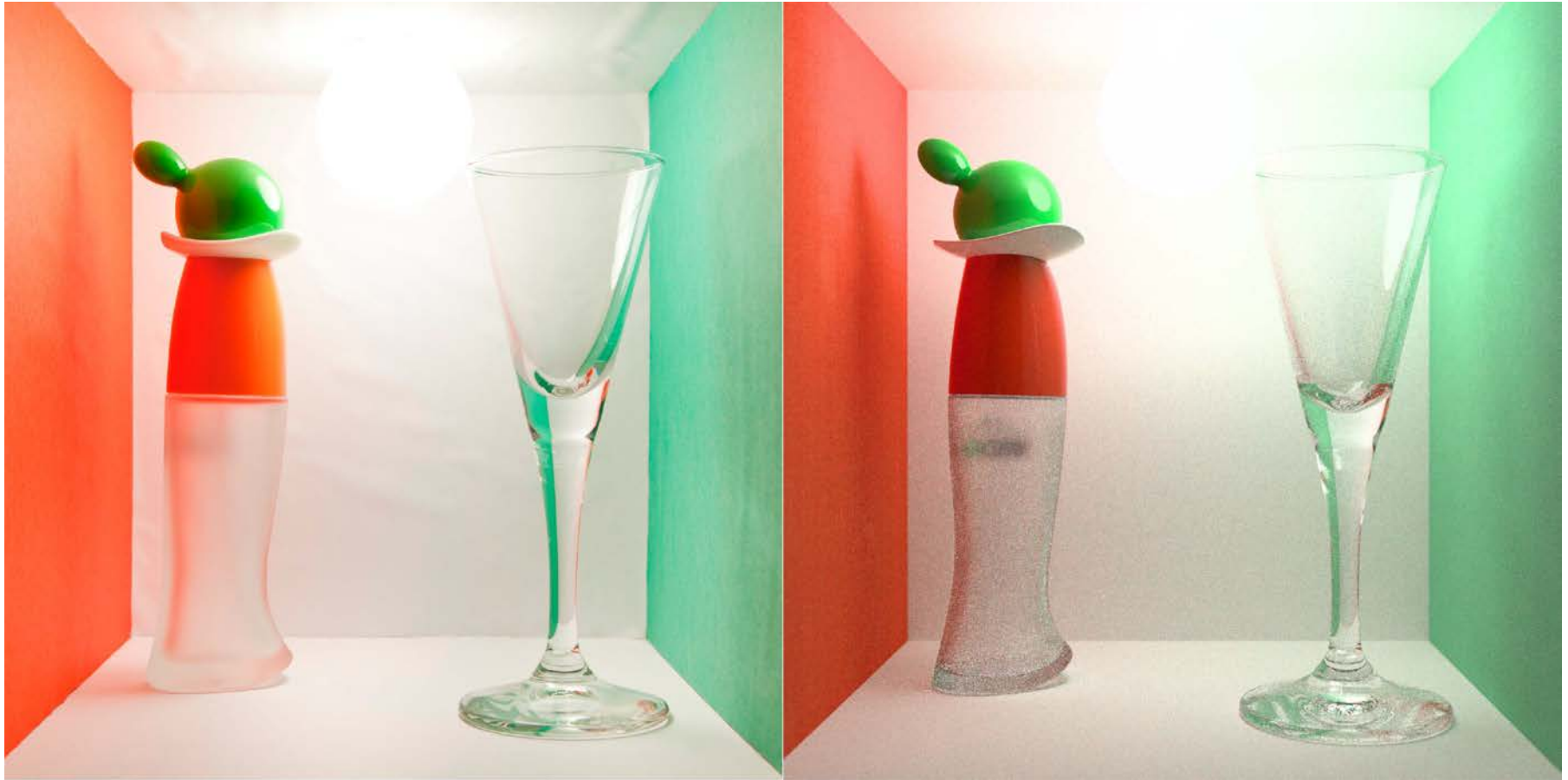
# První porovnání – Cornell box



# Realita vs. Rendering



# Realita vs. Rendering



# Realita vs. Rendering





# Realita vs. Rendering

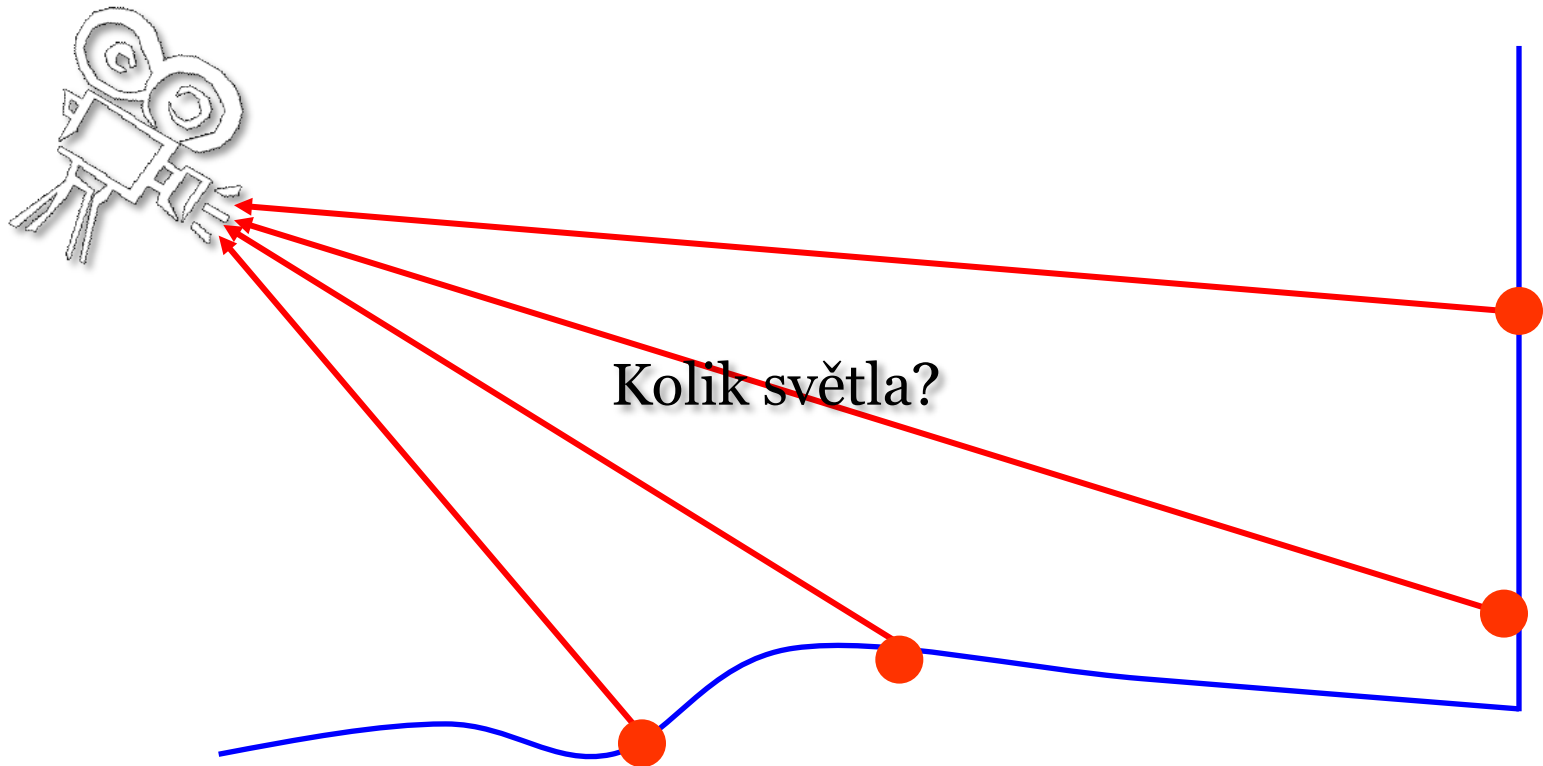


---

# Světlo

---

# Fotorealistická syntéza obrazu



# Různé přístupy k renderingu

## ■ **Fenomenologický**

- Tradiční počítačová grafika
- Např. Phongův model, Barva mezi 0 a 1, atp.

## ■ **Exaktní – Fyzikálně založený**

- Formulace matematického modelu
- Algoritmy = různé přístupy k řešení rovnic tohoto modelu

# Matematický model

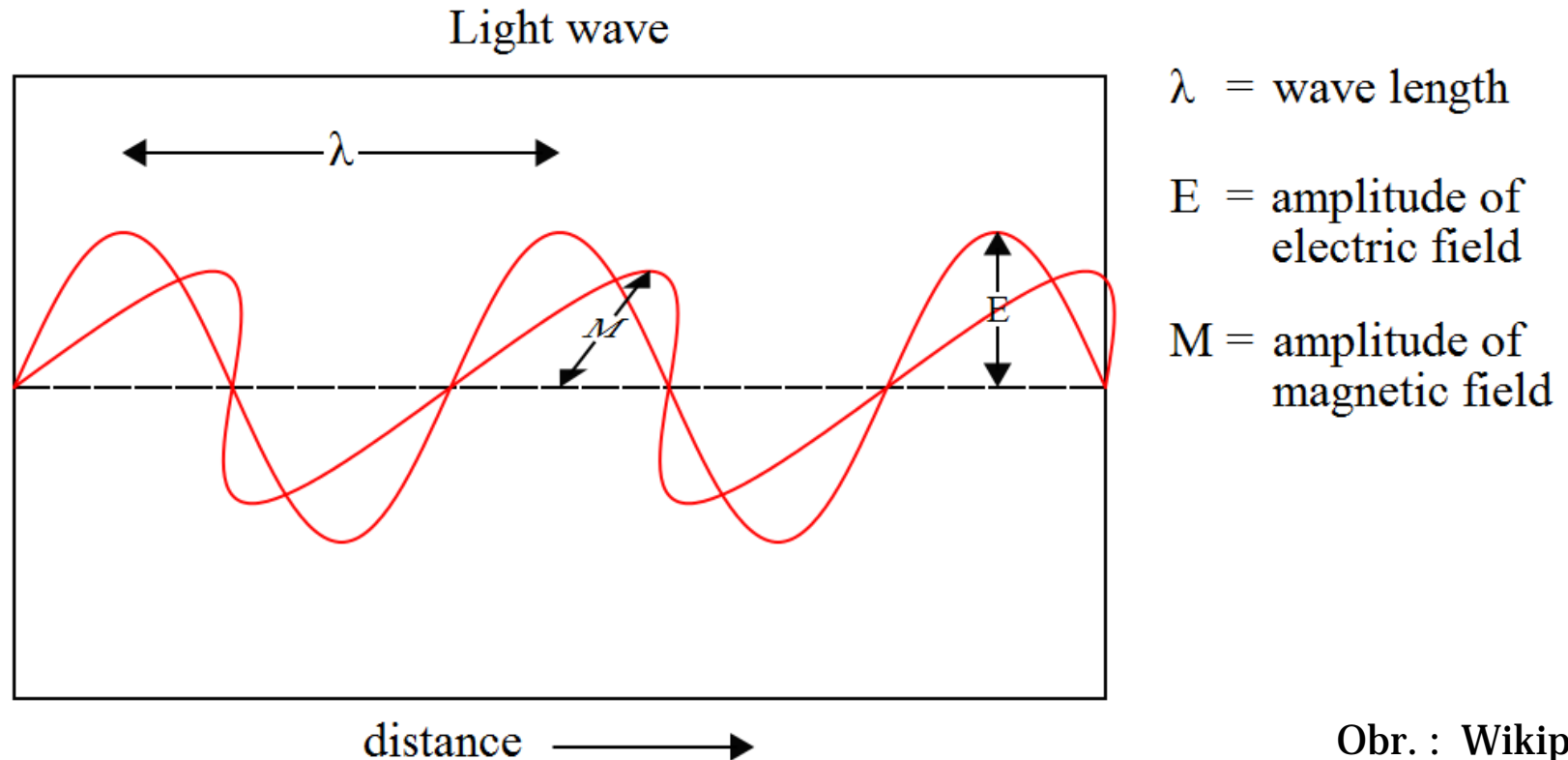
- Syntéza obrazu (rendering) = Simulace propagace světla
- Potřebujeme **matematický model**
  - Popis scény (geometrie, materiály, zdroje světla, kamera, ...)
  - Matematický model světla a jeho chování
- Formulace modelu = volba úrovně detailu
  - Nepotřebujeme modelovat chování každého fotonu
  - Nutnost zjednodušujících předpokladů

# Formulace modelu světla

1. Co je světlo, jak je charakterizováno a měřeno
2. Jak popisujeme prostorové rozložení světla
3. Jak charakterizujeme interakci světla s hmotou
4. Jaké jsou podmínky na rovnovážné rozložení světla ve scéně

# Světlo

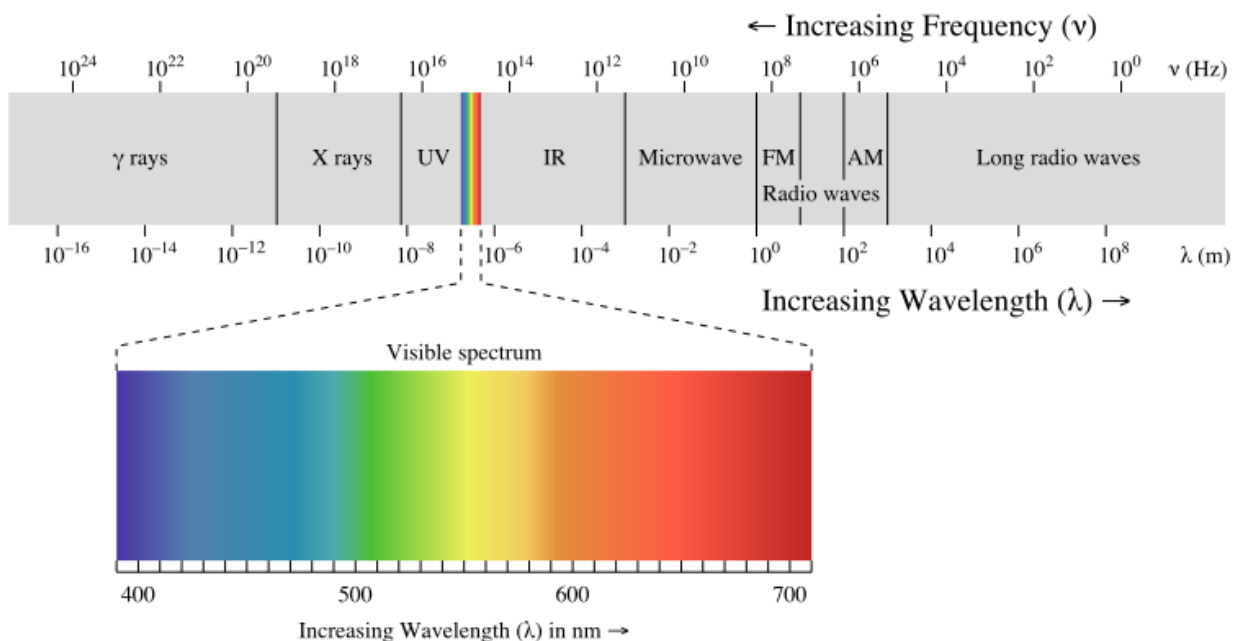
- EM záření (EM vlna šířící se prostorem)



Obr. : Wikipedia

# Světlo

- Frekvence oscilací => vlnová délka => barva



Obr. : Wikipedia

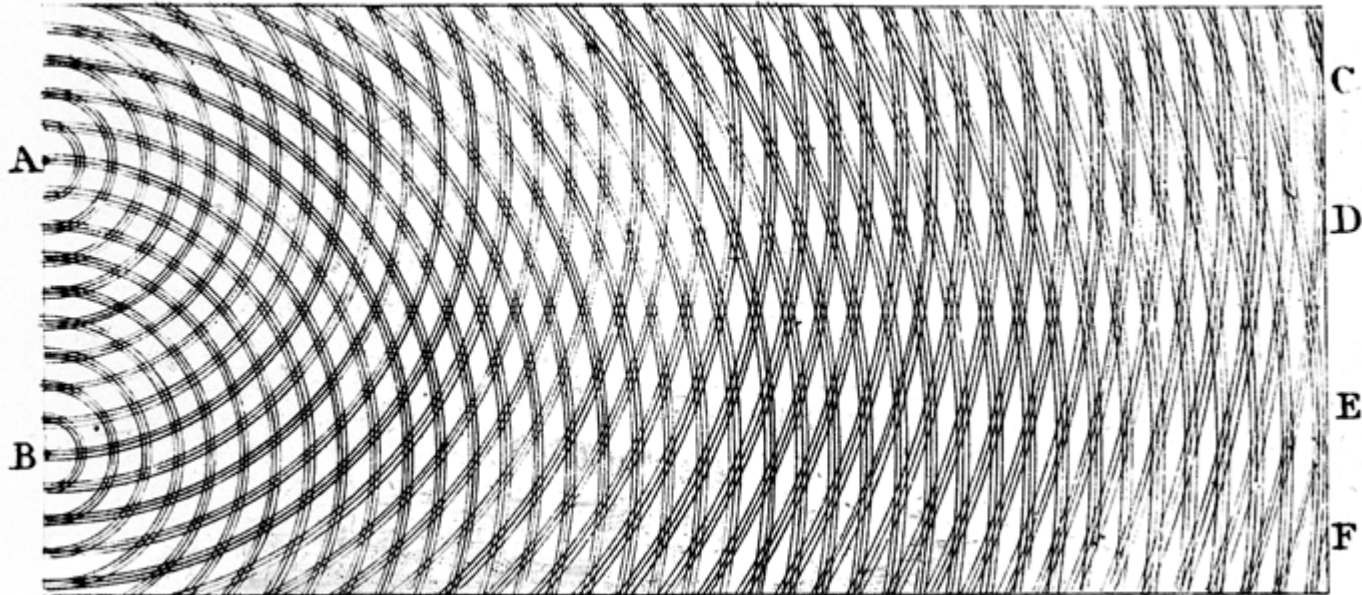


# Optika

- **Geometrická (paprsková) optika**
  - Nejužitečnější pro rendering
  - Popisuje makroskopické vlastnosti světla
  - Není kompletní teorií (nepopisuje všechny pozorované jevy – difrakce, interference)
- **Vlnová optika** (světlo = E-M vlna)
  - Důležitá pro popis interakce světla s objekty o velikosti přibližně rovné vlnové délce
  - Interference (bubliny), difrakce, disperze
- **Kvantová optika** (světlo = fotony)
  - Interakce světla s atomy

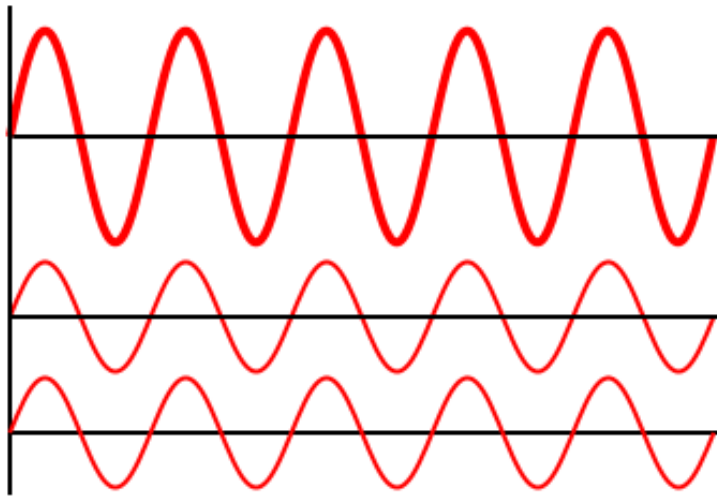
# Projevy vlnové podstaty světla

- **Difrakce (ohyb)**
  - Youngův experiment

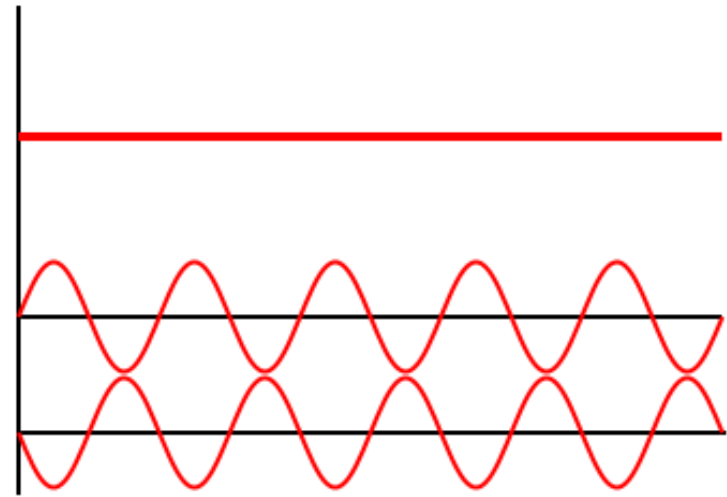


# Projevy vlnové podstaty světla

## ■ Interference



Konstruktivní



Destruktivní

- Způsobuje **iridescenci**

# Iridescence

- Změna barvy jako funkce úhlu pohledu



Obr. : <http://en.wikipedia.org/wiki/Iridescence>

# Iridescence – Strukturální barva



# Iridescence – Strukturální barva



Obr. : <http://en.wikipedia.org/wiki/Iridescence>

# Iridescence – Strukturální barva

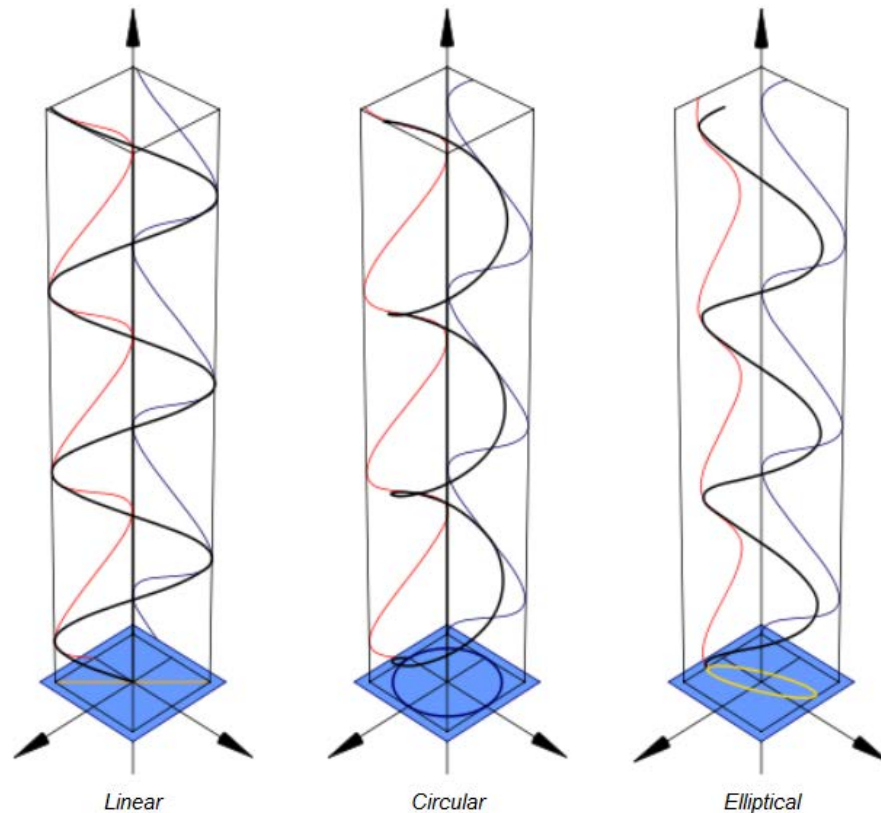


PG III (NPGR010) – J. Křivánek 2014

Obr. : <http://en.wikipedia.org/wiki/Iridescence>

# Polarizace

- Přednostní orientace E-M vln vzhledem ke směru šíření
- Nepolarizované světlo – mnoho vln s náhodnou orientací





# Polarizace

- Světlo z atmosféry je částečně polarizované



- Zrcadlové odrazy jsou polarizované

