3D графика и трасиране на лъчи v.6.0

http://raytracing-bg.net/

Тема 11

Стереоскопия
Глобално осветление
Фундаментална формула на Каджия
(транспортно уравнение на светлината)
Основни алгоритми за глобално осветление

Съдържание

- Анонси
- Стереоскопия
  - Видове
  - Реализация на анаглифни изображения
- Глобално осветление
  - BRDF-и
  - Фундаментална формула на Каджия (транспортно уравнение на светлината)

Съдържание (2)

- Алгоритми за глобално осветление
  - Path tracing
  - Light tracing (накратко)
  - Bidirectional path tracing (накратко)

Анонси

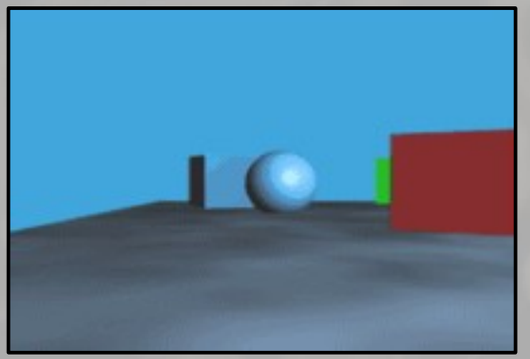
- Предстоящи дати (през семестъра):
  - До **16.05**: предаване на домашни работи към Лекция 7
  - До **22.05**: обявяване на курсови проекти / групи
  - До **26.05**: предаване на домашни работи към Лекция 9
    - Ще има и леки домашни към Лекция 10
  - **03.06** от **17:20** тук: Тест №2 в началото преди лекция №14

Анонси

- Предстоящи дати (през сесията):
  - **14.06** от **10** до **14ч** (зала TBD): Защити курсови проекти №1
  - **25.06** от **10** до **11ч** (зала TBD): Тест №1 и №2 за студентите, които не са ги правили през семестъра
  - **03.07** от **10** до **14ч** (зала TBD): Защити курсови проекти №2

Стереоскопия

- Стереоскопията е техника, с която можем да придадем усещане за обем в някакво изображение, като показваме различни картинки на двете очи
  - По подобие на това, което се случва в реалния свят
  - Паралакс ефект – при две различни гледни точки, по-близките обекти изглеждат сякаш са се изместили повече от по-далечните

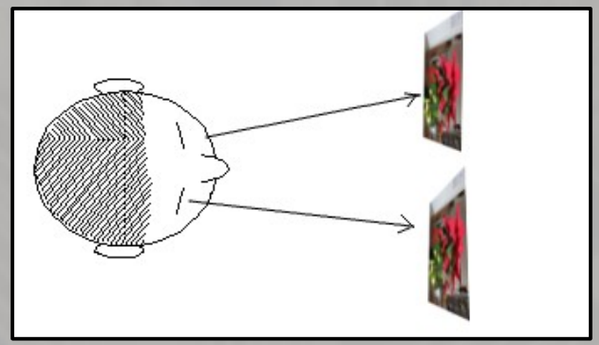


Стереоскопия

- Технически, стереоскопичните изображения са просто двойка кадри, единият от които е предназначен за лявото око, другият за дясното
- Разнообразие от начини за създаване на стереоскопични двойки:
  - Комбиниране на двойки снимки
  - Специални фотоапарати
  - Компютърно-генерирани изображения (тук се намесваме ние)

Стереоскопия

- Разглеждане на стереоскопични изображения
  - Още по-голямо разнообразие
  - Ще се спрем на част от методите тук
  - Основната идея на всички методи е: единият кадър да се вижда само от лявото око, другият – само от дясното



LCD затъмнителни очила (shutter glasses)

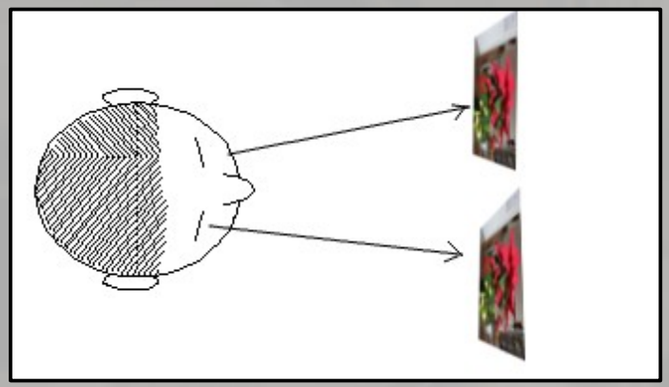
- Пред всяко око има един LCD елемент, който може да закрие плътно гледката на окото
- Монитор показва редуващи се кадри (ляв-десен-ляв-десен-...). Затъмняването на очилата се редува по подобен начин и е синхронно с монитора.
- Така всяко око вижда само „полагащите“ му се кадри

LCD затъмнителни очила (shutter glasses)

- Необходим е драйвер, който да реализира бързото сменяне на кадрите на екрана (на всяко опресняване) и да синхронизира затъмняванията на очилата
- Предимства
  - Относително евтино
  - Добро цветопредаване, добра разделителна способност
- Недостатъци
  - Трептене, монитора трябва да опреснява поне на 120 херца
  - Не работи с типичните LCD монитори (60 херца)
  - При CRT: остатъчно изображение върху фосфора (ghosting)

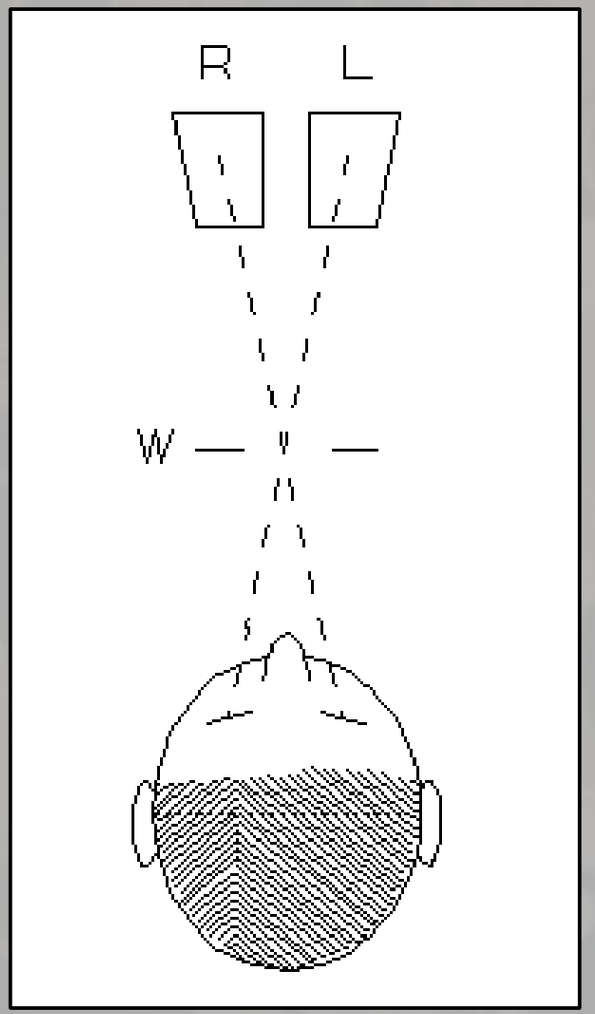
„Успореден“ метод

- Пред очите на човека се слагат две малки картинки на разстояние не повече от 65 мм една от друга
- Гледат се отблизо, очите трябва да гледат успоредно (в безкрайност), а фокусът трябва да е върху картинките
  - Това е трудната част; изисква малко тренировка



„Кръстосан“ метод

- Картинката за дясното око се поставя отляво, лявата – отдясно
- Погледът трябва да се кръстоса (сякаш гледаме нещо наблизо), а фокуса да е върху картинките (трудната част)
  - Човек трябва да „отдели“ функциите си за „следене“ и „фокусиране“ на очите
- По-добър метод от успоредния – позволява картинките да са много по-големи (и по-детайлни)



Примерна „кръстосана“ снимка

(картинките се различават много малко, но човешкото око усеща разликите много добре)

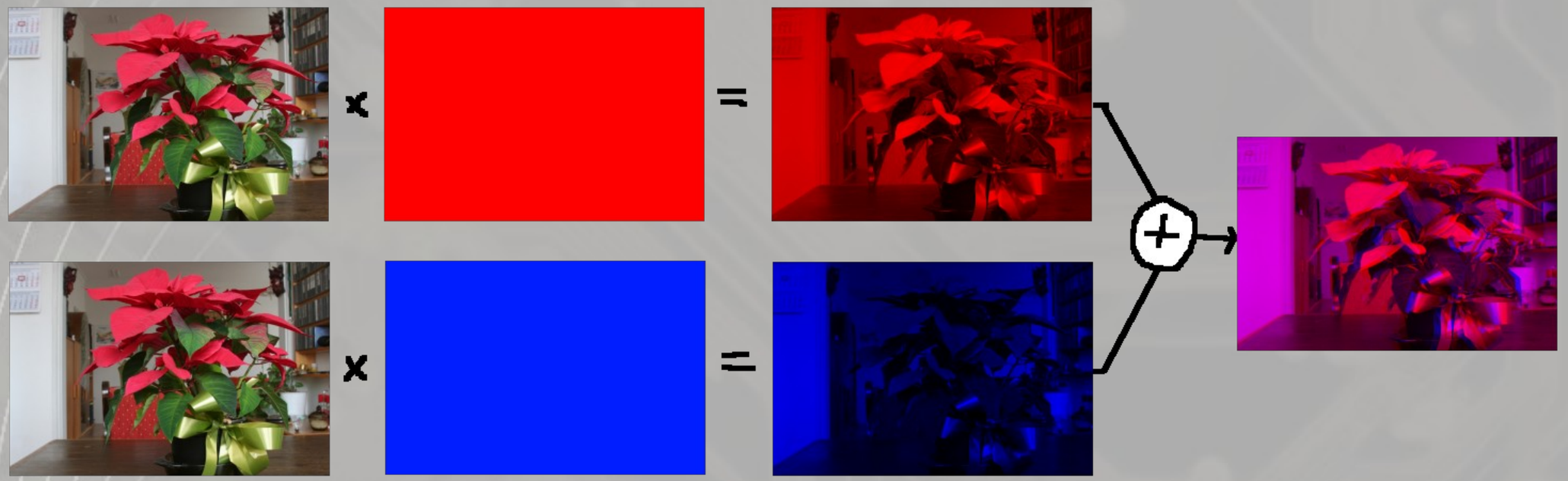
„Кръстосан“ метод

- Предимства
  - Не изисква никаква техника
  - Пълно качество: и откъм разделителна способност, и откъм цветове
- Недостатъци
  - Изисква научаване, което за някои хора е доста трудно
  - Кара мускулите на очите да се напрягат по необичайни за тях начини („Vergence-accomodation conflict“)

Анаглифни очила

- Идеята: всеки от двата кадъра да мине предварително през цветен филтър (например, червен или син). Резултатите се смесват в един кадър. Разглеждането става чрез очила със същия цвят филтри. Всеки филтър пропуска само „съответстващия“ си кадър, и поглъща другия (светлината, минала веднъж през син филтър, не минава през червен).

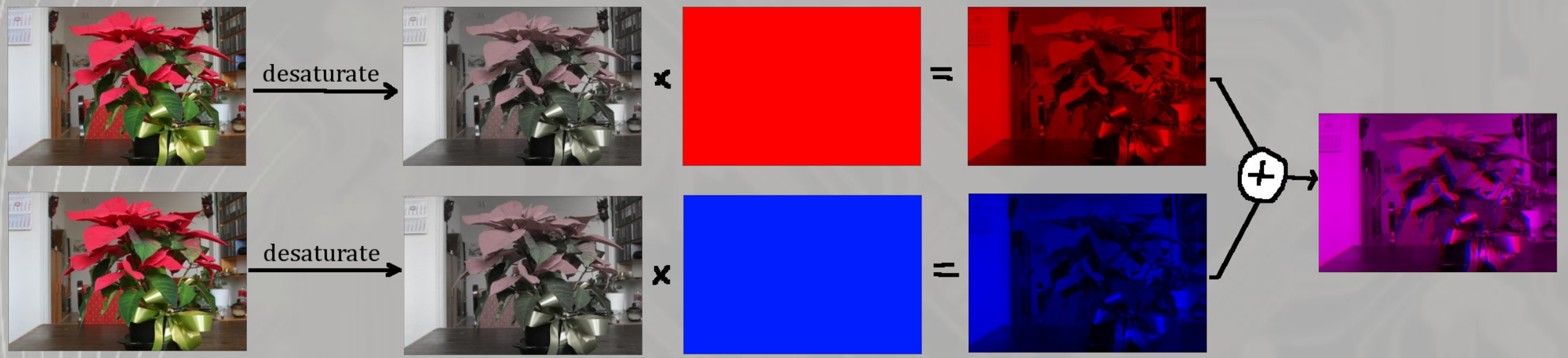
Анаглифни очила



При картинки с наситени цветове (като примерната), обаче, филтрирането отрязва доста информация (например, червените листа не се виждат в десния кадър)

Анаглифни очила

- Оказва се благодатно да „убием“ малко цветовете на входните изображения (desaturation):

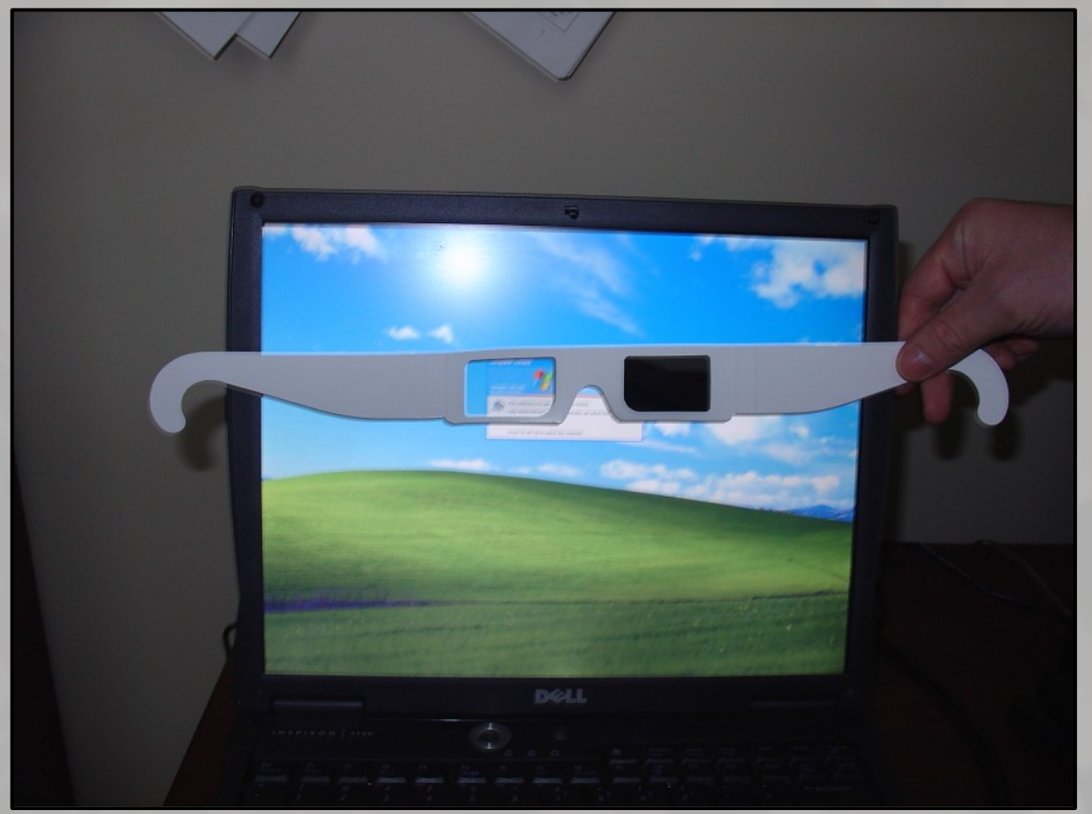


Анаглифни очила

- Освен червено-сини, често ползвани са червено-циан, жълто-циан, червено-зелени ...
- Недостатъци
  - Губи се много от усещането за цветовете. В повечето случаи, картинките изглеждат все едно са били черно-бели
  - Ако филтрите не са перфектни, може част от неправилния кадър да прозира (ghosting)

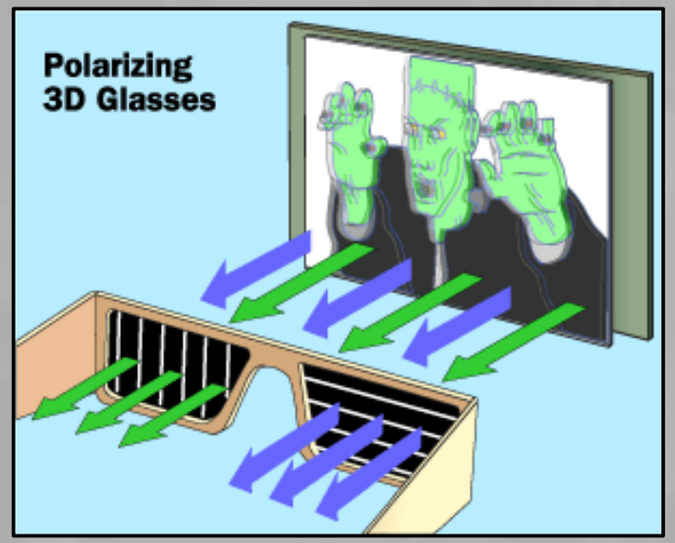
Очила с поляризационни филтри

- Използват се свойството „поляризация“ на светлината
  - Съществуват филтри, които пропускат светлина само с определена поляризация (например хоризонтална или вертикална)
  - Очилата са с два различни типа филтри пред всяко око



Очила с поляризационни филтри

- Кадърът се смесва от два прожектора, пред всеки от които също са поставени разнородни поляризиращи филтри
- Тъй като всеки филтър блокира светлината с несъвпадаща поляризация, то лявото око вижда само светлината от „левия“ прожектор, а дясното – само от „десния“



Очила с поляризационни филтри

- Предимства
  - Не се губят цветове или разделителна способност
- Недостатъци
  - Ghosting
    - Заради недобри филтри
    - Ако главата на човек не е точно изправена. Дори при леко завъртане на главата, филтрите почват да пропускат и от другия кадър
      - Това може да се поправи, ако филтрите са с кръгова (вместо линейна) поляризация (примерна реализация в RealD 3D)
  - Изисква или два проектора, или сложна технология за смяна на поляризацията на един

Спектрално-разделени очила

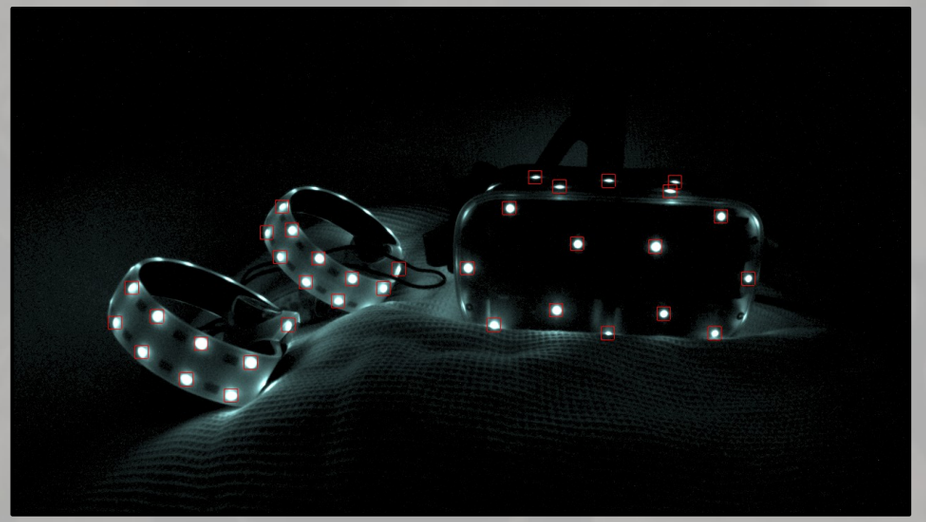
- Същата идея като при поляризиращите филтри, само че филтрите са спектрални – пропускат само различни (непресичащи се) части от спектъра
  - За разлика от поляризиращите филтри, няма проблеми при накланянето на главата
- Човек не усеща „нарязаността“ на спектъра; ако дразнението на R, G и B рецепторите му правилно, ще приеме изображението за пълноцветно

Двойка екрани

- Представляват малки екрани, по един за всяко око
  - Недостатъци:
    - Изисква специализиран софтуер и хардуер
    - Относително скъпи
      - Но VR индустрията работи по въпроса
    - Ниска разделителна способност
    - Vergence-accomodation conflict

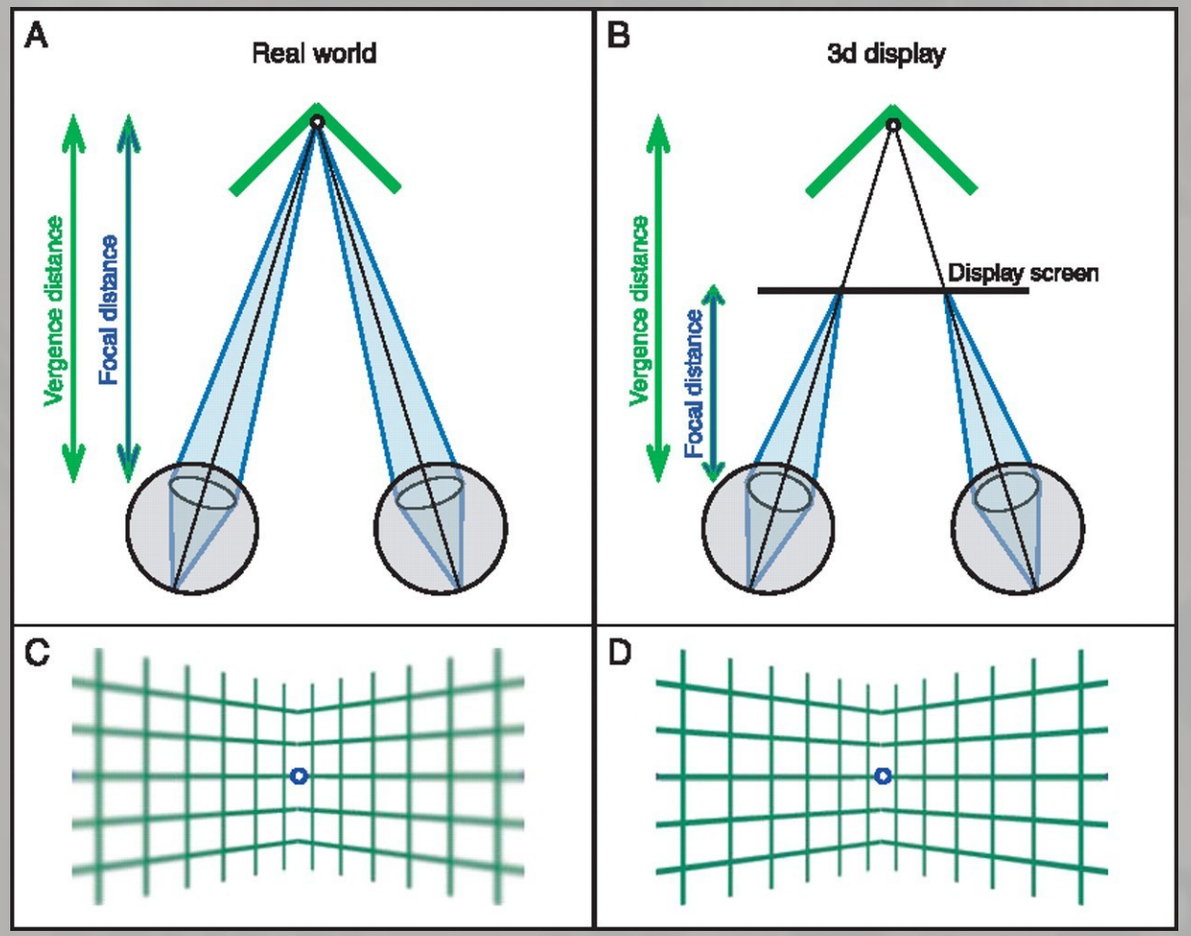
Очила за виртуална реалност (VR)

- Екранът е един, но чрез фокусиращи лещи, всяко око вижда отделна част от него
- Очилата съдържат система за следене („tracking“) на позицията на зрителя в пространството
  - Бърза (msec) и точна (mm)
  - Това позволява много бърз motion-render-display цикъл (90+ fps, под 20ms motion-to-photon)



Очила за виртуална реалност (VR)

- Oculus Rift, HTC Vive и т.н. се различават основно по вида на tracking решението, но дисплеите са много сходни
  - Дисплеят е много близо пред очите, затова има лещи, симулиращи отдалечен екран
  - Очите фокусират на това (фиктивно) разстояние



Vergence-accomodation conflict

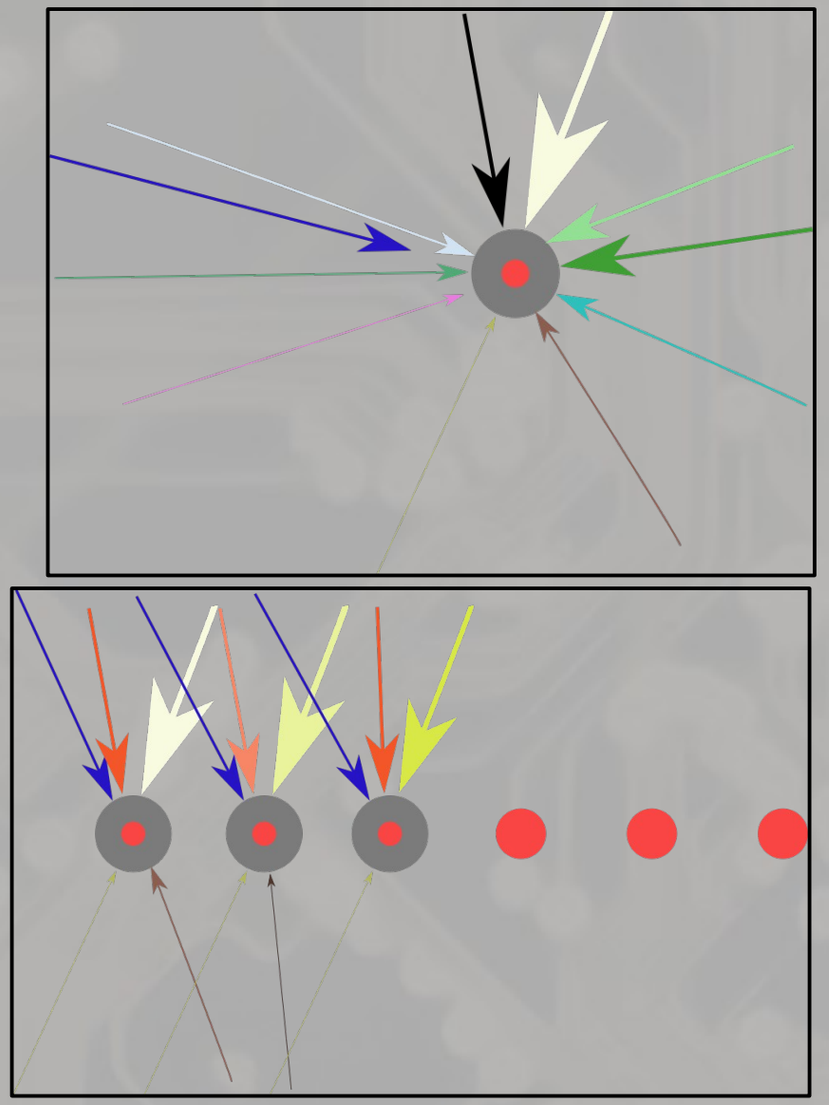
- Фокусирането на очите (*акомодация*) е фиксирано и не зависи от обектите 3D сцената
  - Обикновено се избира разстояние, близко до безкрайност
- Същевременно, различните 3D обекти са на различни разстояния (по паралакс), от 0m до безкрайност
  - Очите конвергират на тези разстояния (*конвергенция/vergence*)
- Несъответствието между двете се нарича *vergence-accomodation conflict* и е съществен проблем на тази технология

Vergence-accomodation conflict

- Конфликтът причинява различни неудобства на зрителите
  - Немалко хора чувстват главоболие, гадене и замаяност след употреба на VR очила
  - Създателите на игри и програми се стараят да няма много близки обекти, за да ограничат несъответствието

Light-field Images

- Ако в дадена точка измерим светлинните лъчи, идващи от *всички* посоки (2D карта, примерно чрез сферични координати), то все едно имаме pinhole камера
- Ако съберем тези данни за всички точки в дадена малка 2D област (примерно колкото челната леща на фотоапарат), то ние имаме *Light-field image* (4D карта)



Light-field Images

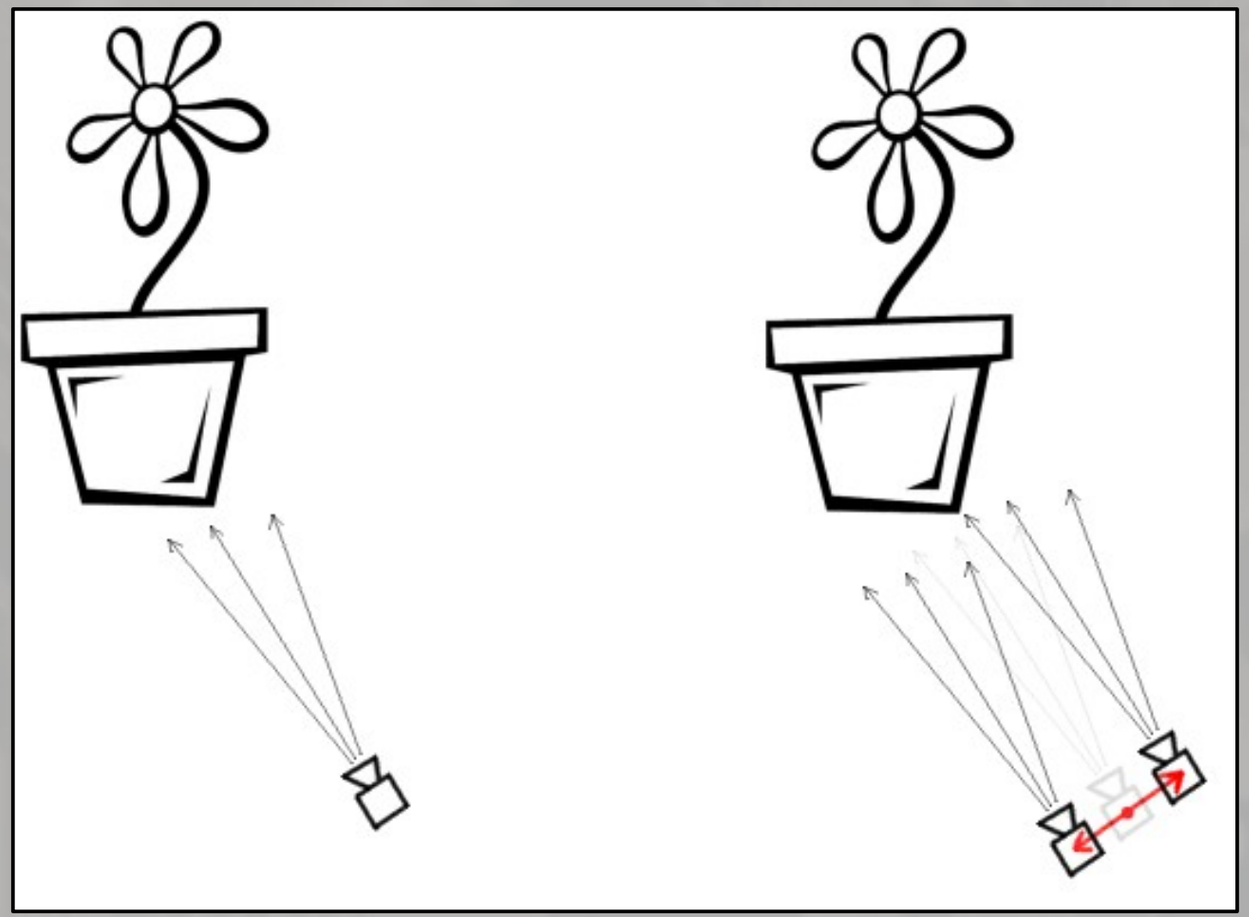
- Събраните данни са пълният комплект „светлинни лъчи“, които са минали пред очите на зрителя
  - Можем да симулираме фокусиране (вкл. произволно рефокусиране)
  - Можем да генерираме стереоскопични изображения
  - и т.н.
- Има камери (напр., Lytro), които „заснемат“ light-field снимки в ограничена форма (low-res, 4D ain't cheap)

Light-field displays

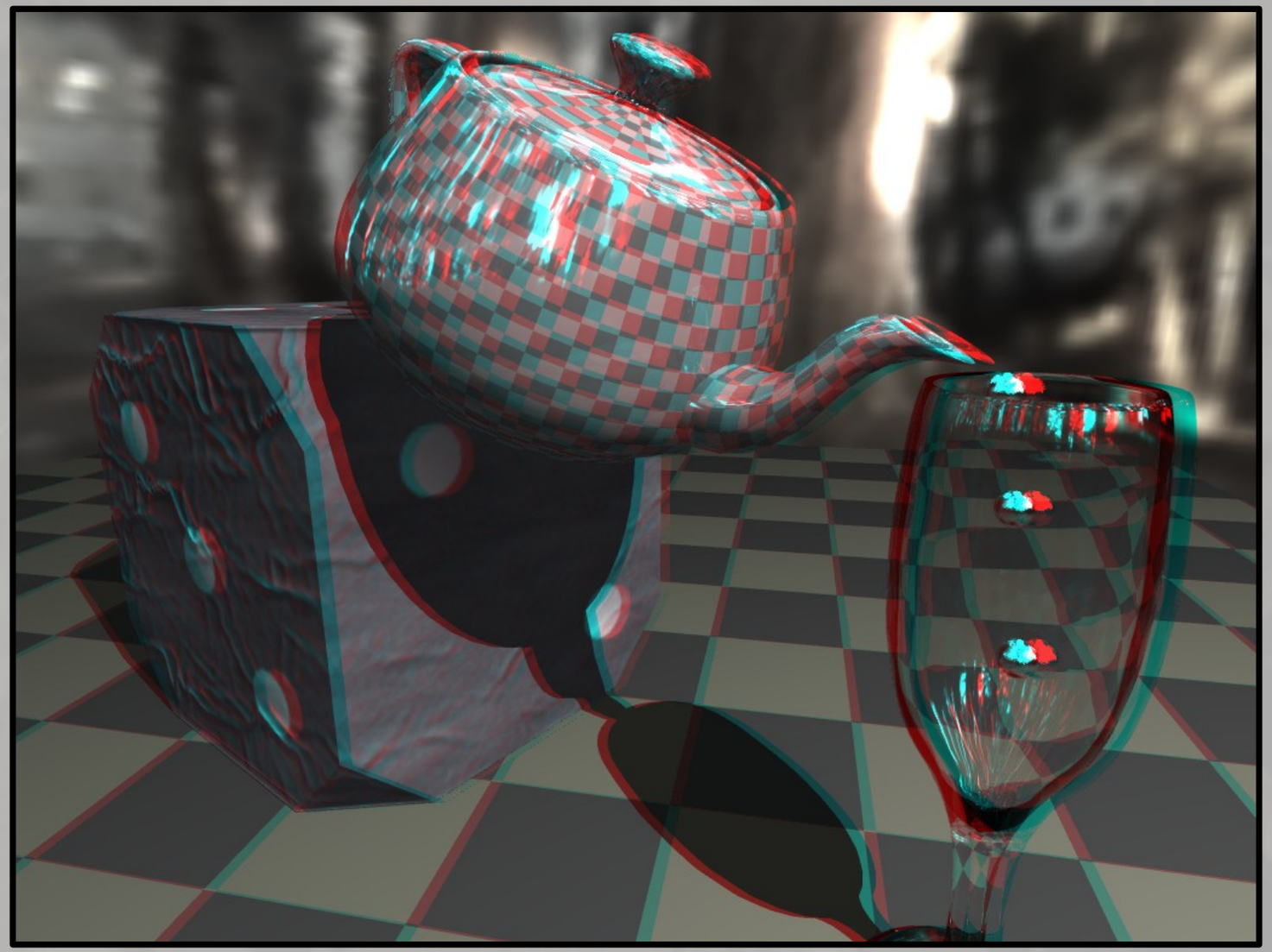
- Предизвикателството пред индустрията сега е да създаде light-field display
  - Екран с пиксели, които излъчват различно количество светлина в различните посоки

Стереоскопично рендериране

- Рендерираме два кадъра от две гледни точки, раздалечени по посоката rightDir на камерата
- За анаглифен образ, смесваме двата кадъра с подходящо маскиране



Резултат



Стереоскопично рендериране

- Разделението между двете виртуални камери – stereoSeparation – е съществен параметър; то определя колко „голям“ е наблюдателя в сравнение със сцената
  - По-голям stereoSeparation допринася за по-силно усещане за обем. Възможно е да преувеличим с цел артистичен ефект
  - При прекалено голям stereoSeparation, картината изглежда неестествена и „сбъркана“
  - При прекалено малък stereoSeparation, стерео-ефекта се губи
  - Точното му калибриране е индивидуално за всяка сцена

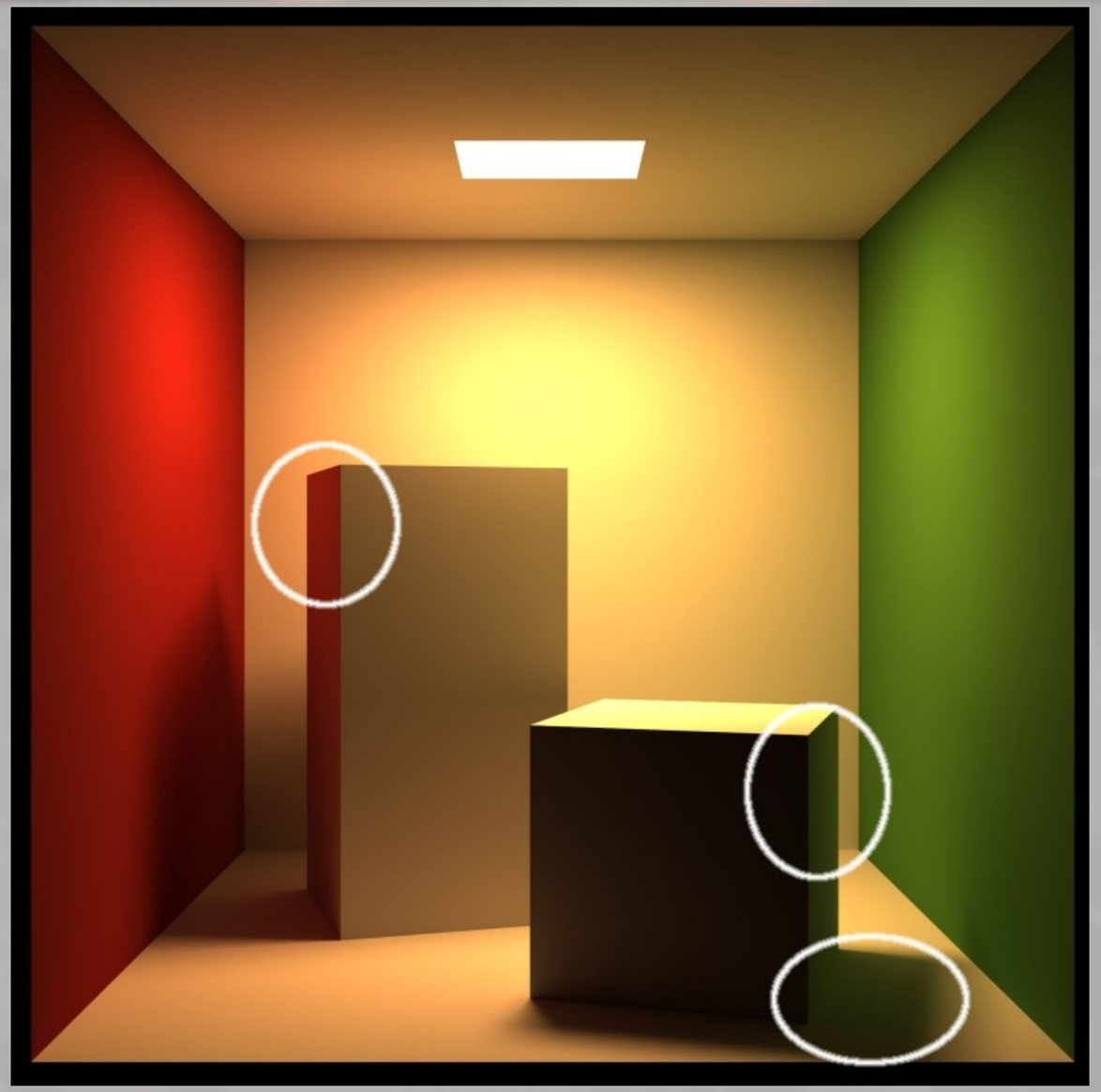
Глобално осветление

Глобално осветление

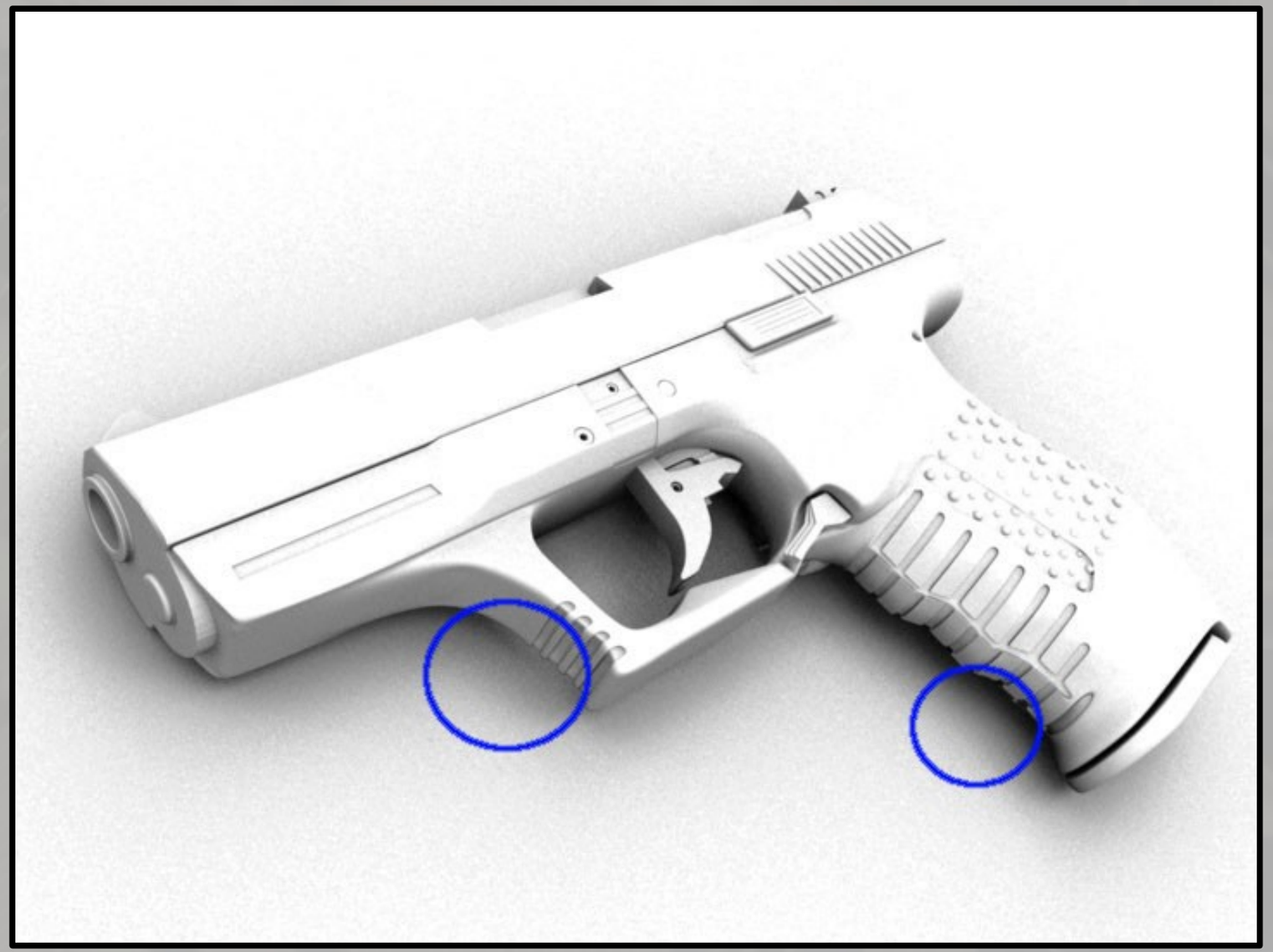
Глобално осветление = директно осветление + индиректно осветление

- Досега апроксимирахме индиректното осветление чрез ambient light – но това е много неточен подход
- Има редица ефекти, които не можем да пресъздадем само чрез директно осветление

Color bleeding



Ambient occlusion

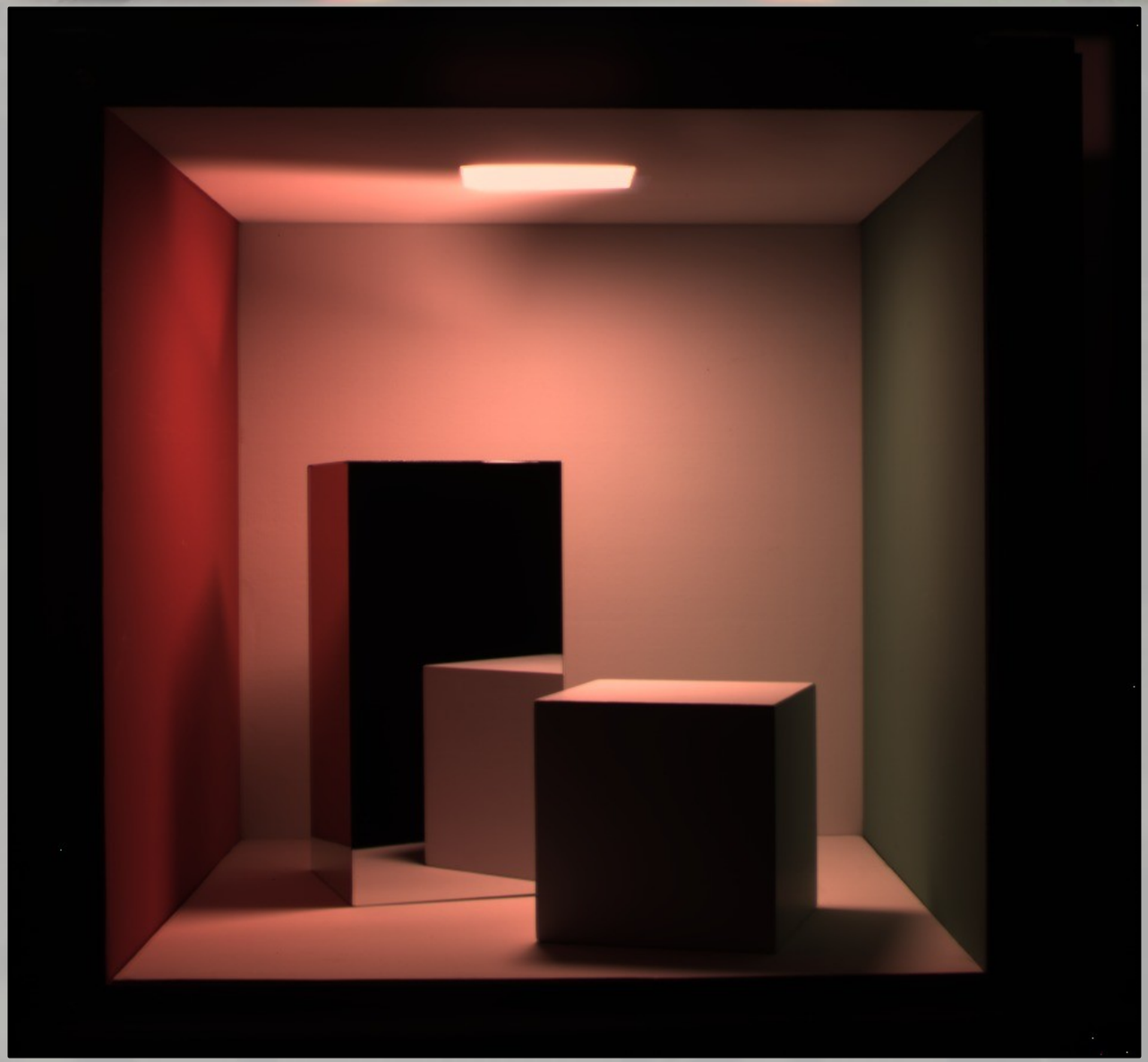


Indirect illumination

Indirect Illumination IRL

[Видеоклип от Блейчево]

The Cornell box

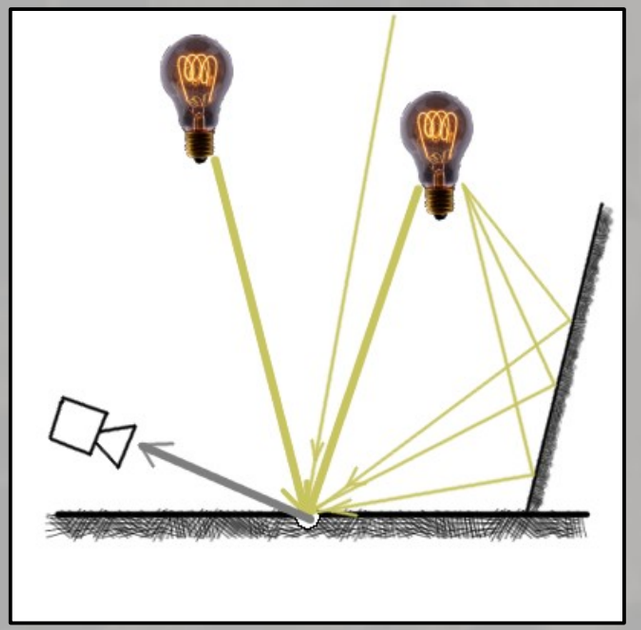


The Cornell box

- Това е стандартна тестова сцена, която са си сътворили от университета Cornell през 80-те за тестване на рендериращи алгоритми (вкл. GI такива)
- Действителен модел на сцената е заснет с фотоапарат; после се опитват да го пресъздадат компютърно
  - Cornell box не е предизвикателство за модерните GI алгоритми

Глобално осветление

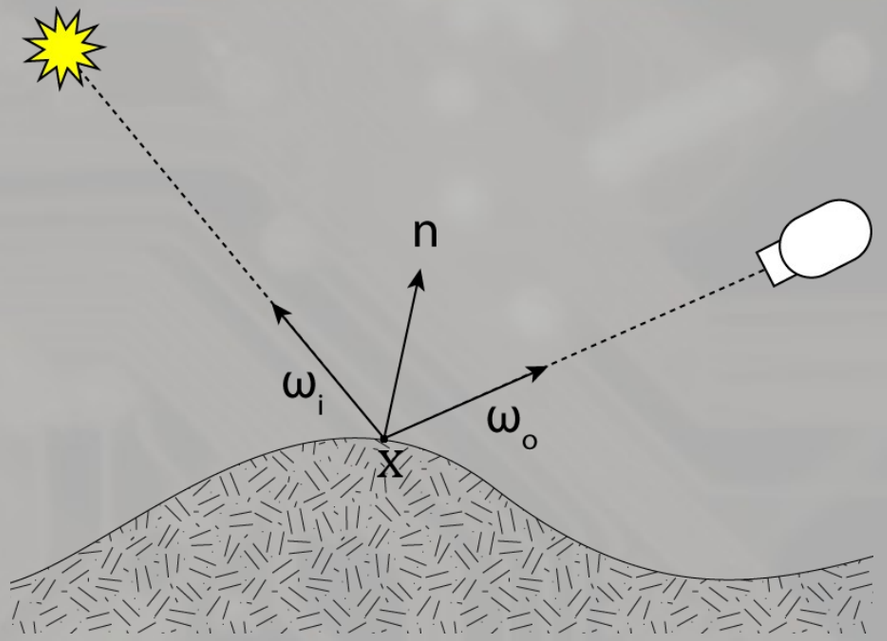
- Най-общо казано, за да пресмятаме глобалното осветление в дадена точка, трябва да:
  - Пресметнем светлината, идваща от цялата сцена, в тази точка (irradiance)
  - В зависимост от отражателните свойства на повърхността, да сметнем каква част от входната светлина се отразява по посока камерата
    - Тук ни трябва някакъв начин да моделираме отражателните свойства на повърхността (шейдърите не са подходящи)



Шейдъри vs BRDF-и

- Шейдърите не са подходящи за моделиране на отражателните свойства на повърхността
  - Те по-скоро задават алгоритъм, който описва какви други лъчи трябва да пуснем от точката, за да пресметнем осветлението; отражателните свойства са „вградени“ вътре в този алгоритъм, и са „недостъпни“ отвън
  - Иначе казано, пресмятането чрез шейдъри е ефективно, но не достатъчно общо, за да се ползва в GI алгоритмите
  - Необходимо е да използваме отделна функция, която моделира именно отражателните свойства.

Функция на отраженията (BRDF)



Bidirectional **R**eflectance **D**istribution **F**unction или f_r:

$f_r(x, \omega_i, \omega_o)$:= „каква е вероятността, лъч светлина, идващ от ω_i в точката x, да се отрази в посоката ω_o“

Примери за BRDF

- Дифузен BRDF (Lambertian), за бяла повърхност:

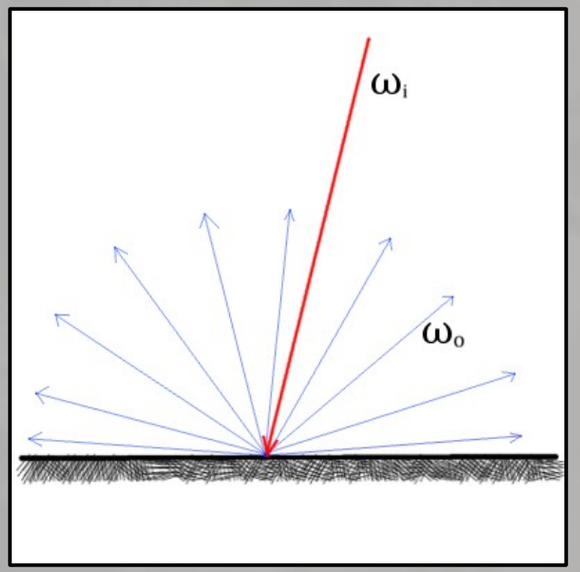
  $f_r(x, \omega_i, \omega_o) := \mathbf{1/\pi}$

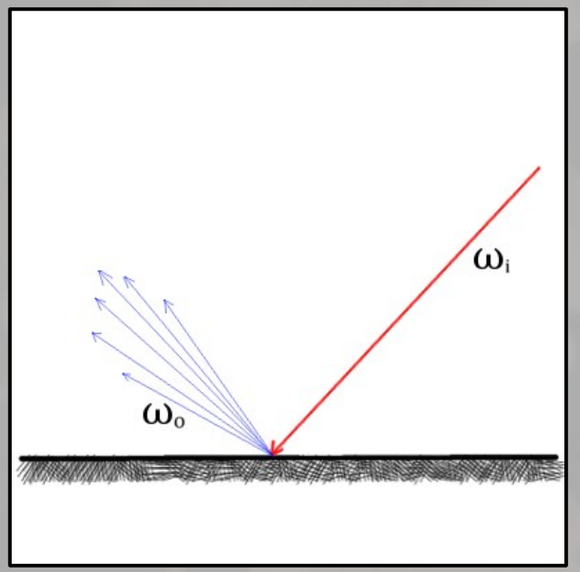
  (ще обясним защо 1/π след малко)

- Glossy BRDF (за грапави отражения):

  $f_r(x, \omega_i, \omega_o) := \mathbf{S(n)*max(0, cos(\angle(reflect(\omega_i), \omega_o)))^n}$

  (където S(n) е нормираща константа, целяща запазване на енергията)



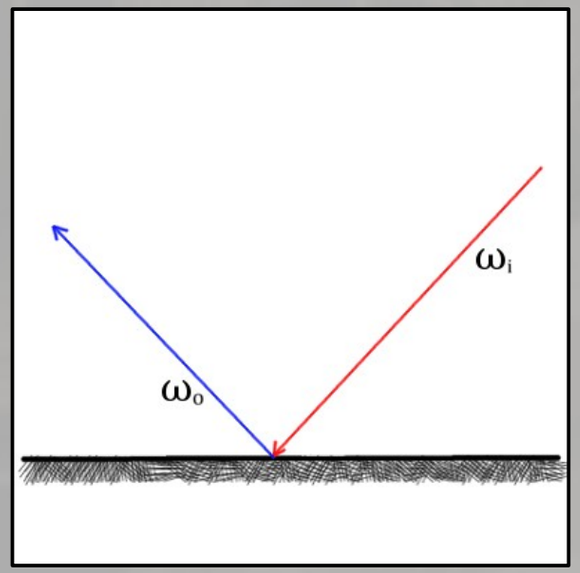


Примери за BRDF

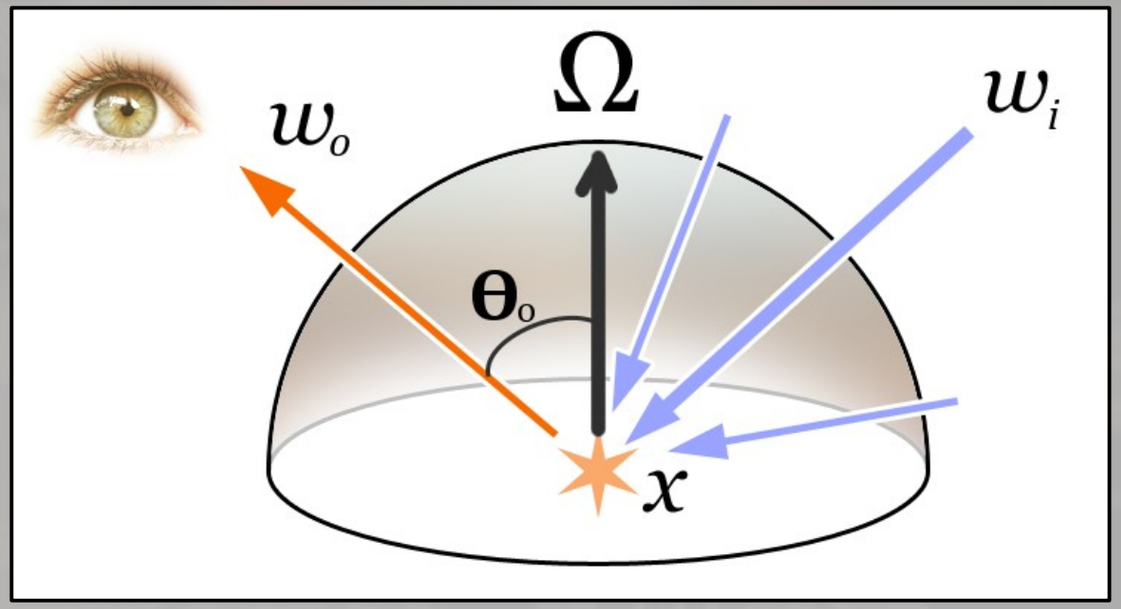
- Чисто отражение:

$$f_r(x, \omega_i, \omega_o) := \begin{cases} \infty, & \text{ако } \omega_o = \text{reflect}(\omega_i) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

- Т.е., BRDF-ът може и да е прекъсната функция



Свойства на BRDF-ите



- Запазване на енергията: $\int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o)\cos(\Theta_o)\, d\,\omega_o \leq 1$
  - Това гарантира, че не се „създава“ светлина
  - Заради това изискване имаме *1/π* и *S(n)* нормировките
- Симетричност: $f_r(x, \omega_i, \omega_o) = f_r(x, \omega_o, \omega_i)$

BRDFs: малко по-сложно

- Казахме, че дифузния BRDF е 1/π навсякъде, но това е само при бял обект без текстура. Ако има (дифузна) текстура, то връщаният резултат зависи от точката *x*:

  $f_r(x, \omega_i, \omega_o)$:= texture.sample(*x*) / π

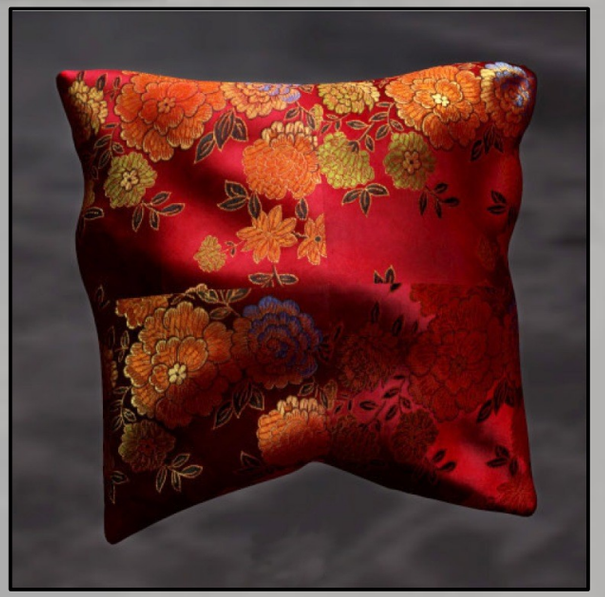
  - Подобно и за останалите BRDF-и, които споменахме. Например, reflect() функцията изисква нормал, около който да отразява, а той зависи от точката *x*.

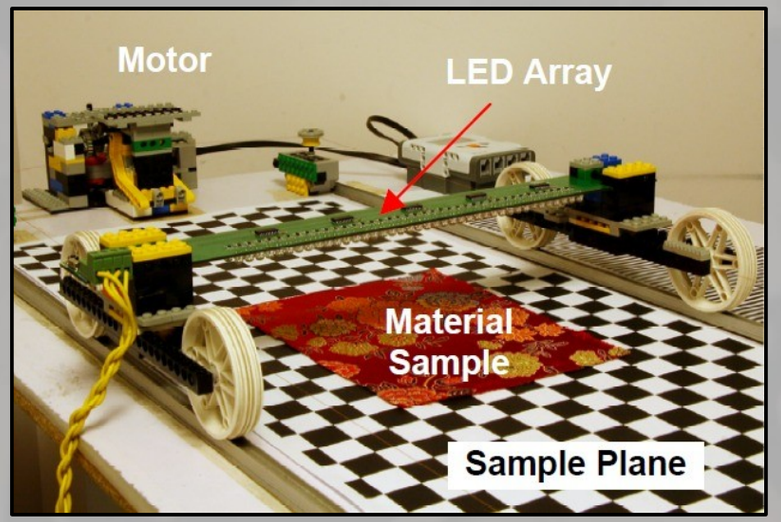
BRDFs: още по-сложно

- В някои статии, BRDF-ите имат и четвърти параметър – дължина на вълната. Това е полезно, ако се опитваме да реализираме BRDF на хроматично пречупване
  - Ние няма да го реализираме, но е хубаво да се знае

Непроцедурни BRDF-и

- В някой случай, свойствата на BRDF-а може да не се изчисляват чрез формула, а да се взимат директно от текстура (или някакъв друг начин за справка с предварително известни данни)
- Съществуват устройства, който „сканират“ даден материал и извличат BRDF-то му [041-wang-video]
  - Вижте също talk-а от CG^{2}2013



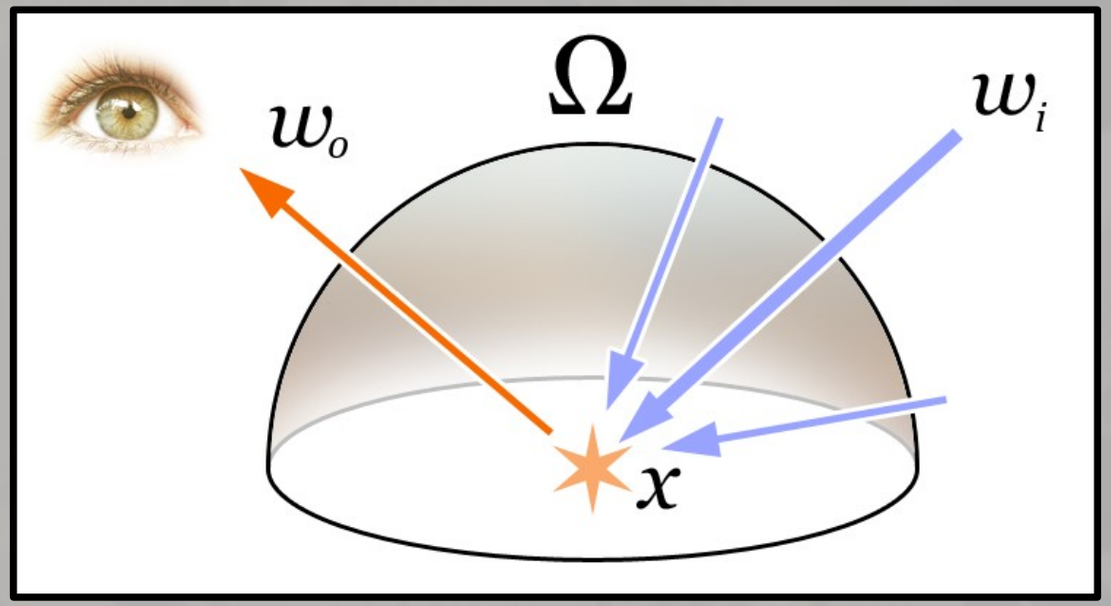


„Фундаменталната формула“ на Каджия

- Jim Kajiya през 1986 представя своя основополагащ труд в областта на глобалното осветление - „The Rendering Equation“ [SIGGRAPH-1986]
- Самата „фундаментална формула“ представлява транспортно уравнение на светлината, което ни дава израз за пресмятане на глобалното осветление във всяка точка от сцената

The Rendering Equation

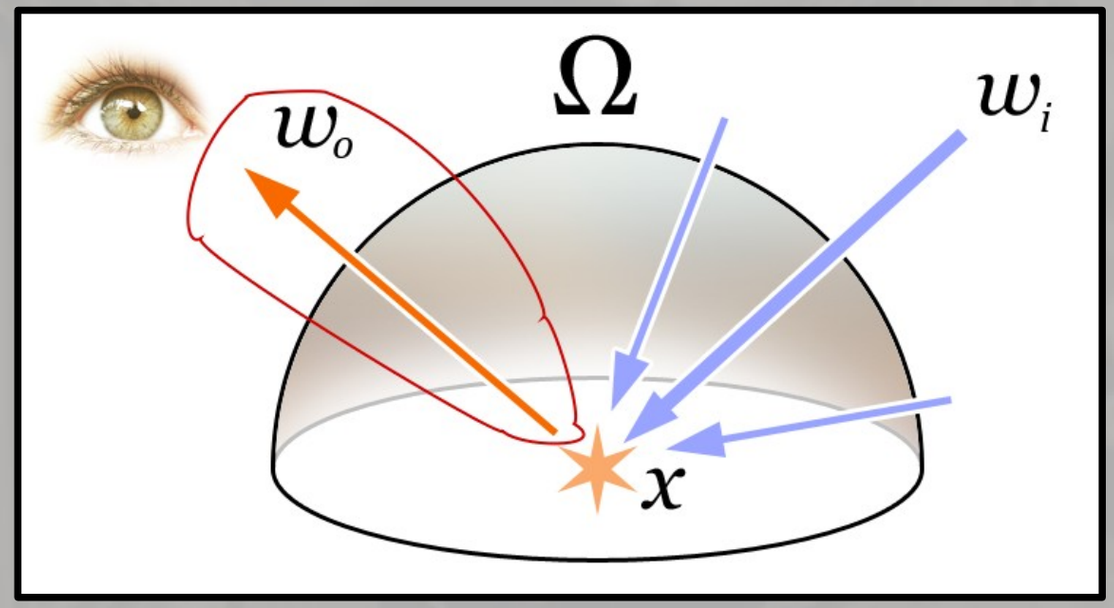
$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_\Omega f_r(x, \omega_i, \omega_o)\, L_i(x, \omega_i)\, (-\omega_i \cdot n)\, d\omega_i$$



The Rendering Equation

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_\Omega f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (-\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

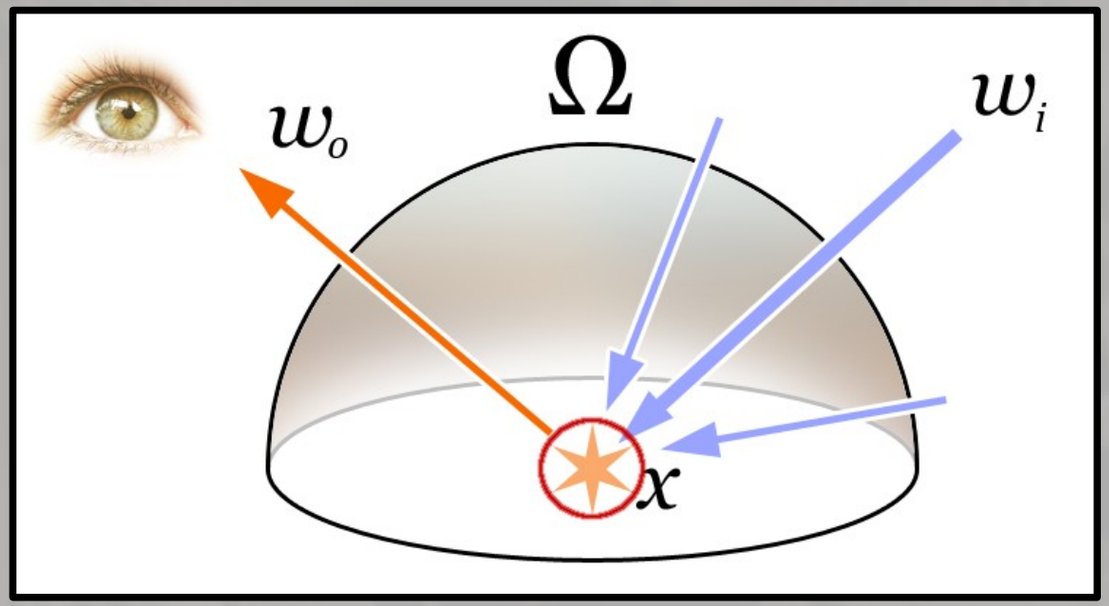
- $L_o(x, \omega_o)$ показва отразената светлина от точката x в посока ω_o
  Например, към камерата:
  - Ако от камерата сме пуснали лъч $-\omega_o$, който е пресякъл геометрията в точка x.



The Rendering Equation

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_\Omega f_r(x, \omega_i, \omega_o)\, L_i(x, \omega_i)\, (-\omega_i \cdot n)\, d\omega_i$$

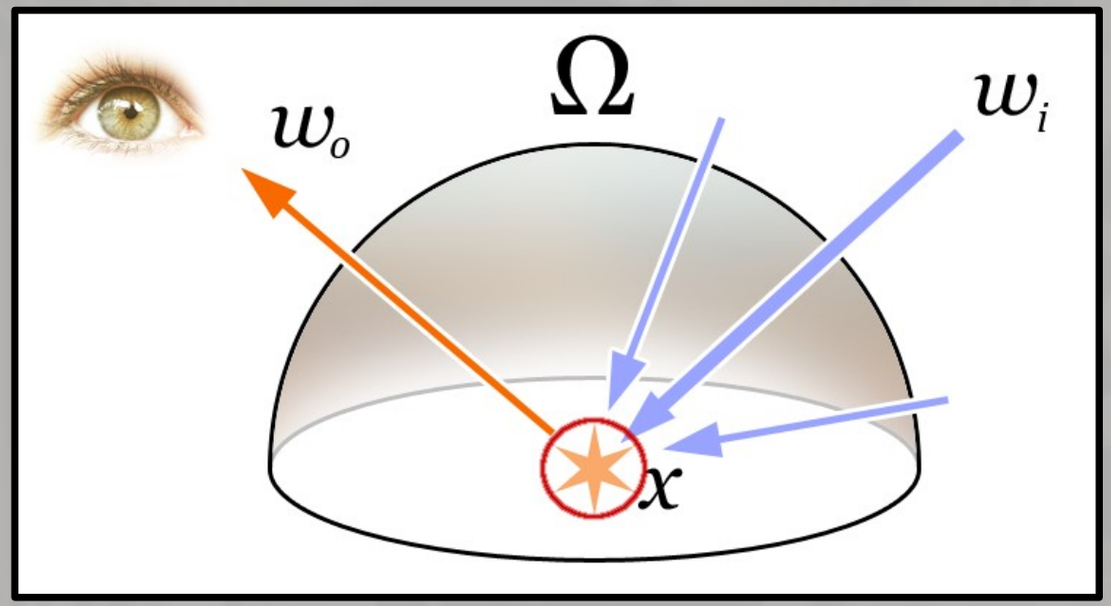
- Ако x е част от лампа, $L_e(x, \omega_o)$ показва излъчваната светлина от точката x в посока ω_o
- 0 за всички неизлъчващи обекти.



The Rendering Equation

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_\Omega f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i)(-\omega_i \cdot n)\, d\omega_i$$

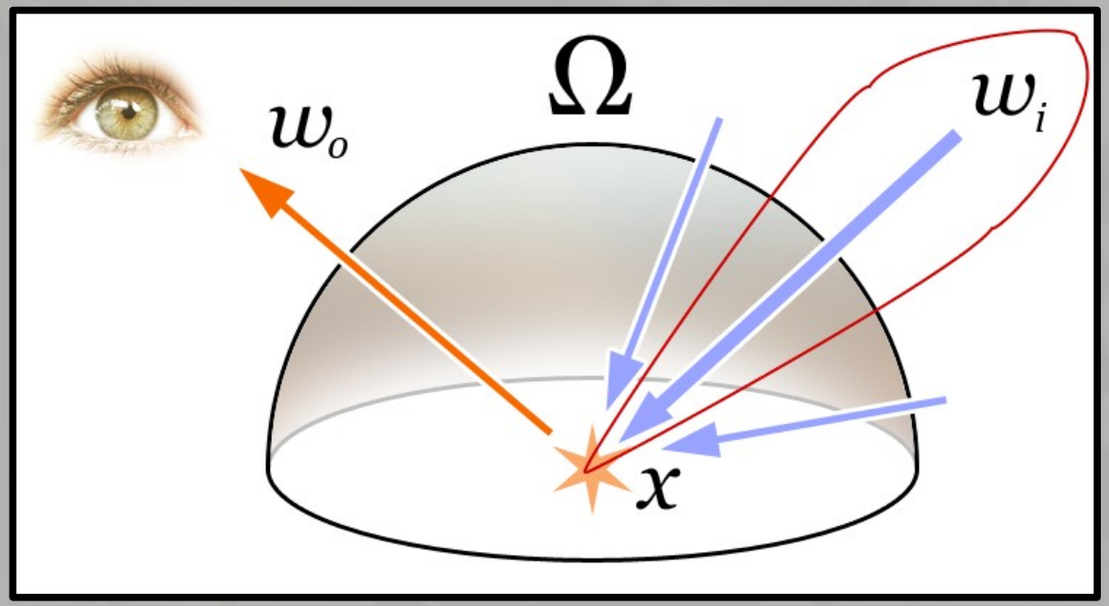
- $f_r(x, \omega_i, \omega_o)$ е BRDF-ът на материала в точката x



The Rendering Equation

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_\Omega f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (-\omega_i \cdot n) \, d\omega_i$$

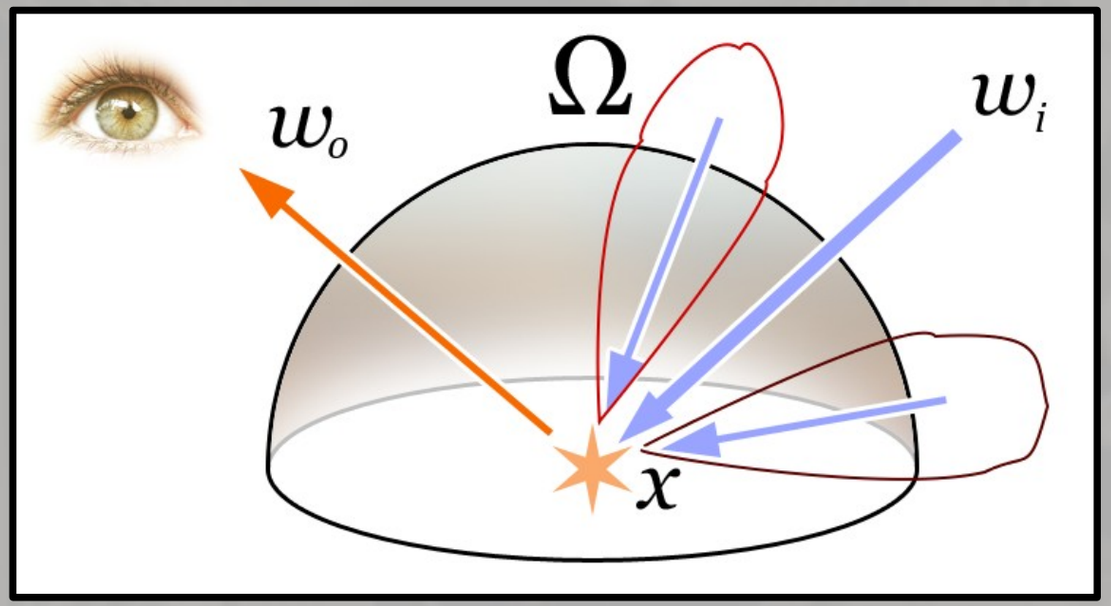
- $L_i(x, \omega_i)$ показва входящата светлина в точката x по някое направление ω_i. Тя може да идва както от лампа, така и от неизлъчващ обект (чрез отражение на светлината, т.е. от друг екземпляр на транспортното уравнение)



The Rendering Equation

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_\Omega f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (-\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

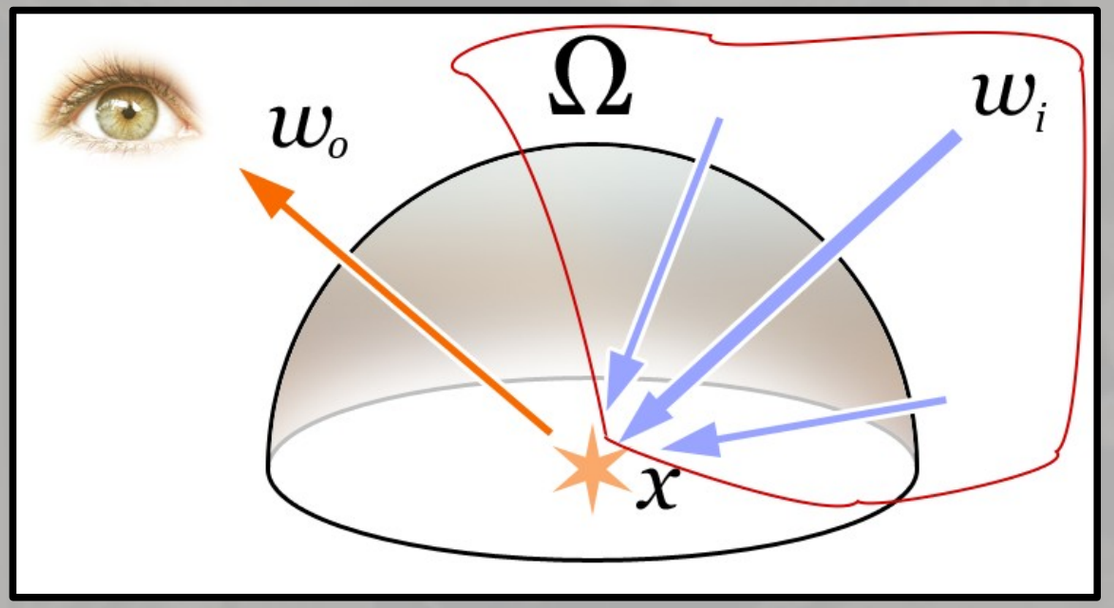
- Косинусът на ъгъла между ω_i и нормалата n в точката *x* участва, защото, под коси ъгли, входната светлина се разпределя на по-голяма площ. Така, на единица площ, осветяването е по-слабо, следователно и отражението трябва да е по-слабо.



The Rendering Equation

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i)(-\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

- Чрез интеграла ние сумираме цялата входяща светлина, отразена от BRDF-а в конкретната посока. Т.е. вътрешната сметка извършваме за всички входящи направления на светлината – което е цялата полусфера Ω над точката *x*.

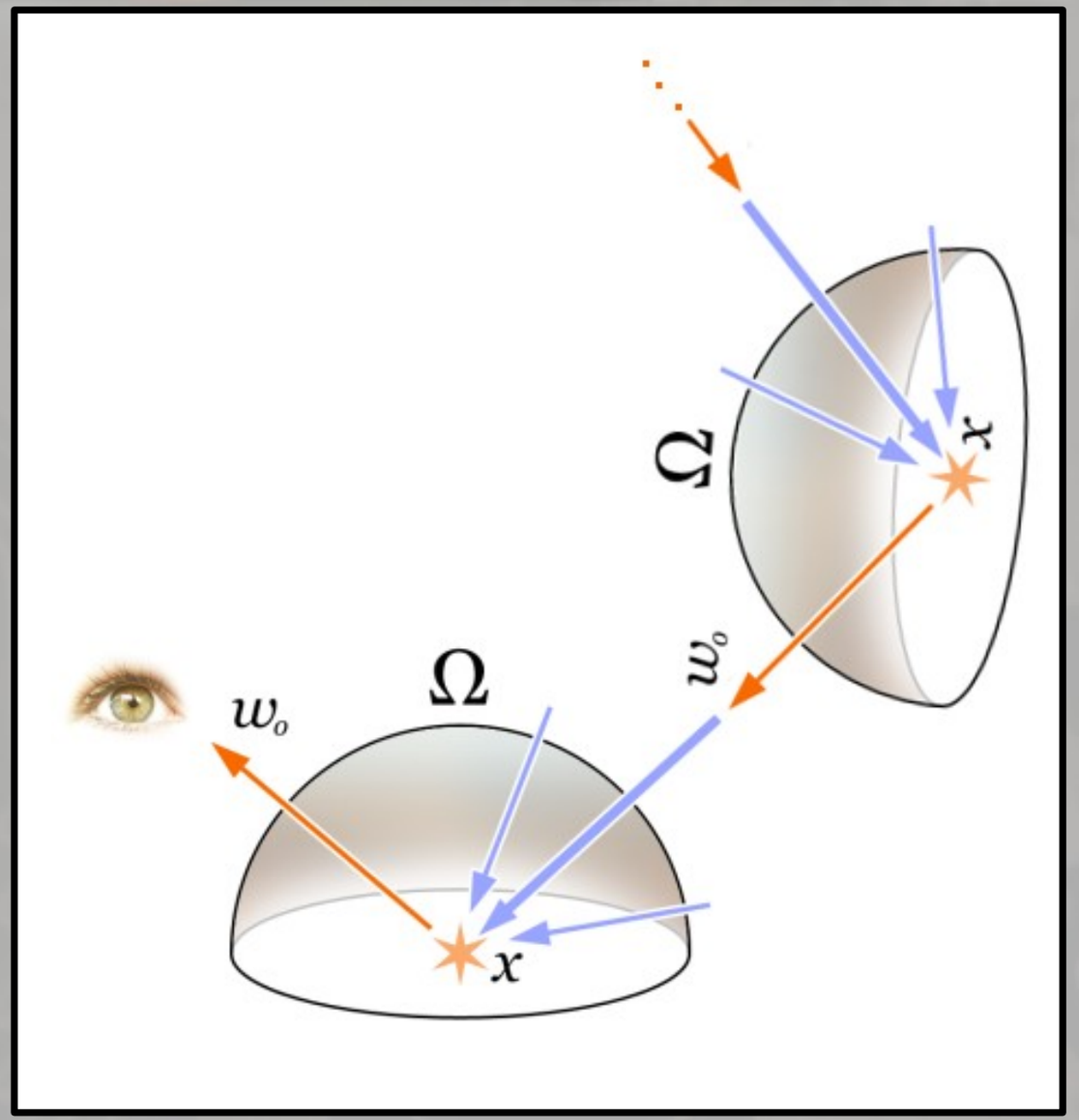


Особености на уравнението

- Уравнението е линейно – абстрахирайки се от BRDF-а, във формулата участват само събирания и умножения. Това дава възможност на практика да се правят разнообразни опростявания и апроксимации.
- Уравнението е рекурсивно – ако тръгнем да го решаваме с Monte Carlo метод, ще стигнем до друг екземпляр от уравнението, за решението на който отново ще ни трябва да решим друг екземпляр, и т.н.
- Изглежда, че всяка точка от сцената зависи от всяка друга точка от сцената!

Рекурсивност

- За да се получим повечето от GI ефектите, то обикновено трябва да преровим сцената поне няколко нива рекурсивно.
- Т.е., като от точката *x* пуснем случаен лъч -ω_i, проследим къде се удря той в сцената (*x*') и после пресметнем транспортното уравнение в точката *x*'

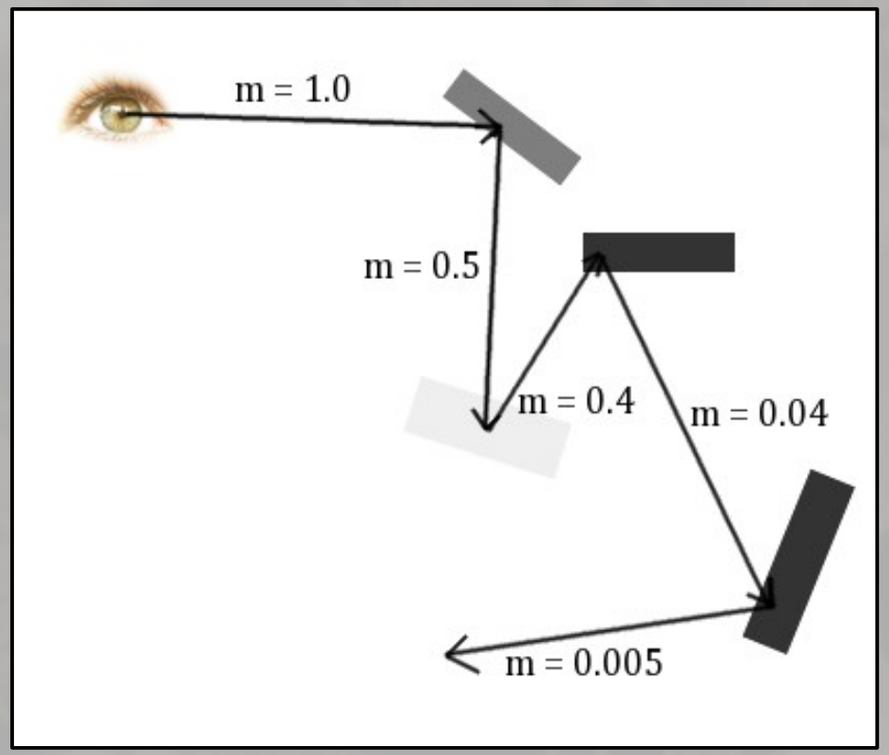


Рекурсивност

- Кога приключва рекурсията?
  - Ако ударим светлина
    - BRDF-а на светлината спокойно може да приемем за 0
  - Ако не ударим нищо (т.е. попаднем в Environment-а – тогава вземаме цвета от околната среда в тази посока)
  - Ако ударим слабо-отразяващ обект (т.е. BRDF-а е 0 или почти 0)

Рекурсивност

- Последната идея може да разширим така: може да пазим текущото произведение от всички BRDF-и по пътя на рекурсията. Ако това произведение стане почти 0, то може да прекратим рекурсията (приносът от обхождането още надолу ще е прекалено малък и може да го пренебрегнем)



Решаване чрез Monte Carlo метод

- Така зададеното уравнение може да сметнем чрез Monte Carlo метод
  - При пресмятането на интеграла, ще пуснем много случайни лъчи от точката x, ще сметнем осветлението от всеки от тях, и ще ги съберем, умножавайки по BRDF-а. Резултата ще разделим на броя на лъчите
  - Но така получаваме комбинаторна експлозия: за добро качество трябва да пускаме по много лъчи (над 20), и само няколко нива надолу вече трябва да трасираме милиони лъчи (за единствен пиксел от екрана!)

Решаване чрез Monte Carlo метод

- Можем да пускаме по много лъчи само на най-горното ниво на рекурсията, а по-долните да смятаме само с по няколко лъча; въпреки това, този метод не се справя добре и е много бавен
- По-добър алгоритъм предлага самият Каджия, в същата статия. Алгоритъмът се нарича Path tracing.

Принципна схема на Path Tracing

- Трасиране много лъчи за всеки пиксел (тип. 100+)
  - Пак като при DoF ефекта имаме безплатен anti-aliasing
- Намираме пресечна точка както и досега
- Избираме случайно продължение от пресечната точка
  - Ползвайки BRDF-а за да ни каже как да оценим с колко да умножим идващата светлина от това продължение
- Пресичаме наново, ново случайно продължение
- Повече конкретика: в Лекция 12

Algortihms for Global Illumination

- Алгоритмите за GI могат основно да се разделят на
  - Неотместени (unbiased)
    - path tracing, light tracing, bidirectional tracing, metropolis light transport, etc.
  - Отместени (biased)
    - photon mapping, irradiance caching, instant radiosity, etc.
- Неотместен алгоритъм (грубо казано) е такъв, при който грешката се изразява само в шум
  - При отместените могат да се получат резултати, в които няма шум, но грешката да е произволно голяма

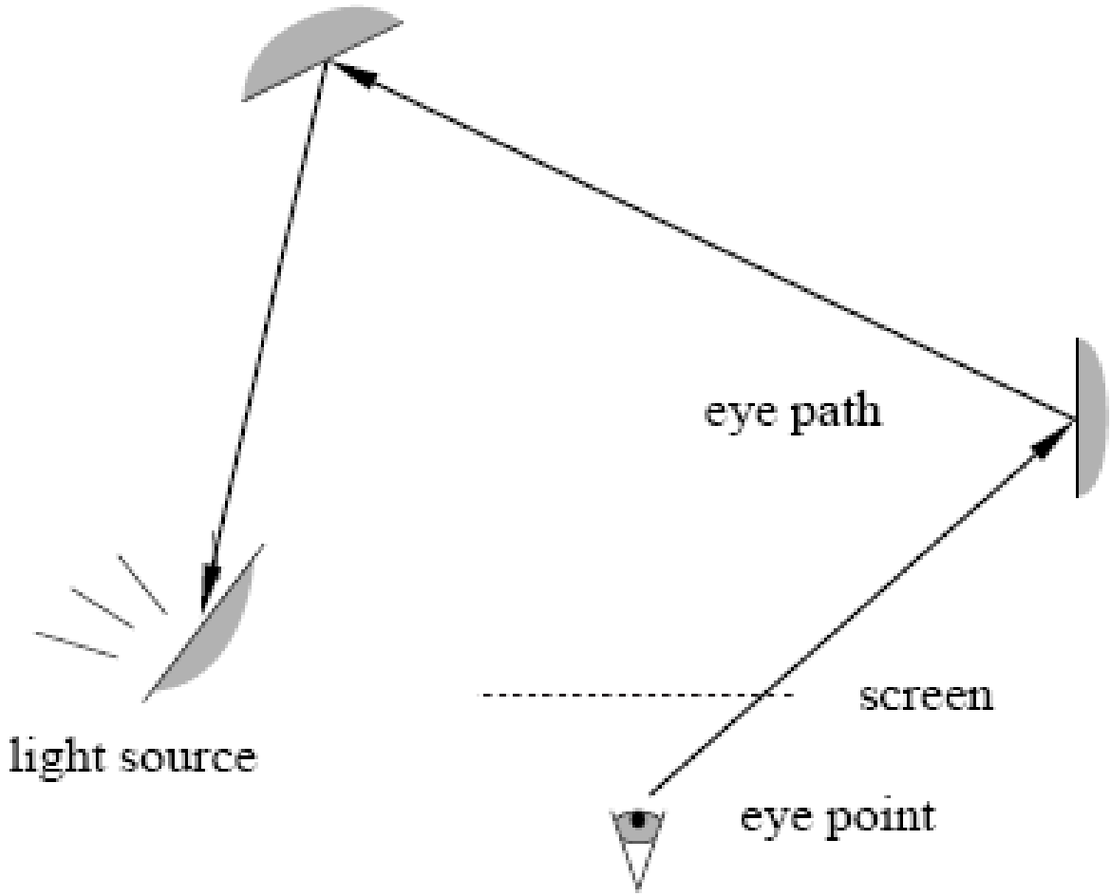
Algortihms for Global Illumination (II)

- Неотместени алгоритми са
  - + предвидими
    - и в математически смисъл на думата
  - + фотореалистични
    - но имат и ограничения, например path tracing не може да получи слънчеви зайчета от не-glossy пречупване и точкова светлина
  - - бавни
    - т.е. отместените алгоритми могат да получат гладка, но грешна картинка по-бързо, отколкото неотместените могат да сметнат гладка, но вярна

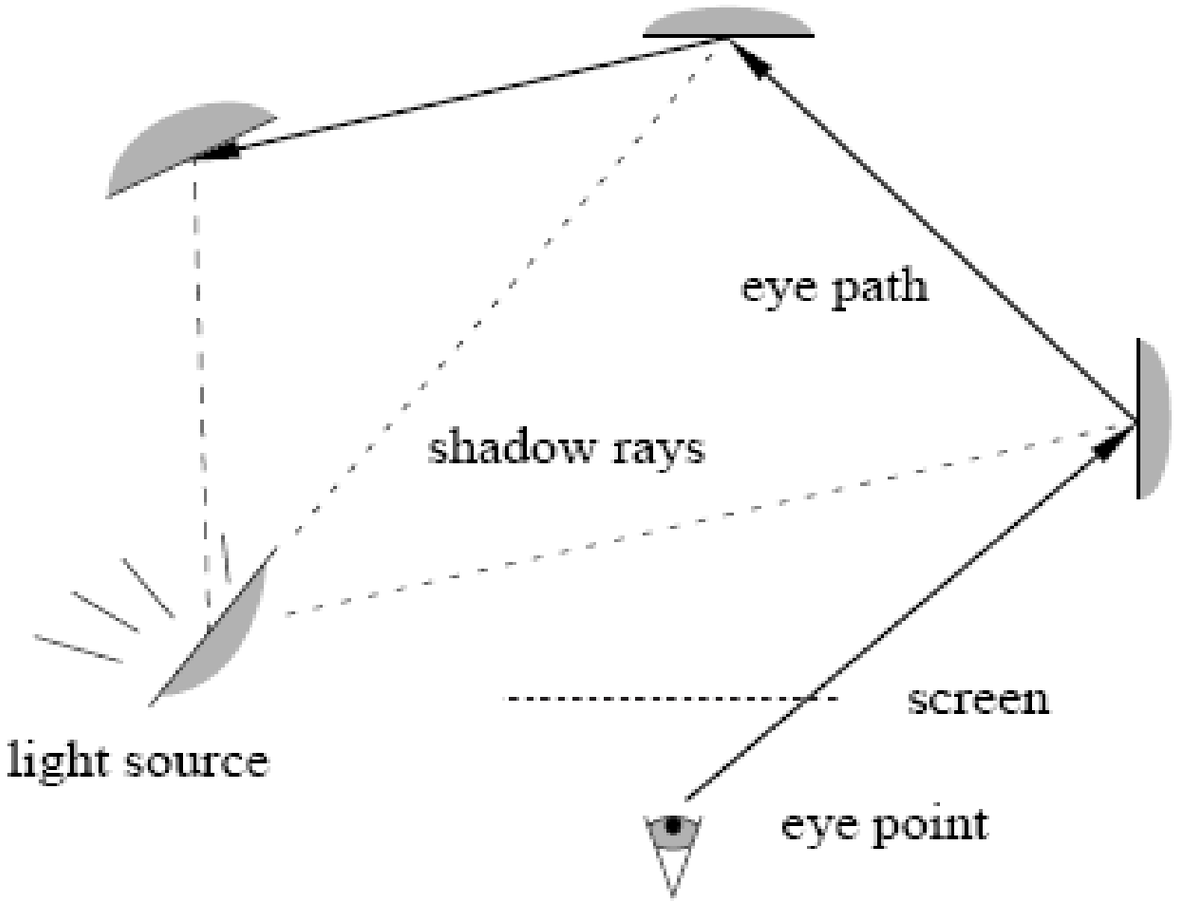
Algortihms for Global Illumination (III)

- Ще разгледаме path tracing, light tracing и bidirectional tracing
- „Път“ ще наричаме редица от точки, такива че
  - Първата точка е върху лещата на камерата
  - Последната точка е върху някоя светлина
  - Останалите точки са върху някоя от обектите в сцената
- И трите алгоритъм използват, че формулата на Каджия може да се разпише като интеграл над всички пътища от сцената
- Основната разлика между трите е в начина, по-който се генерират пътищата

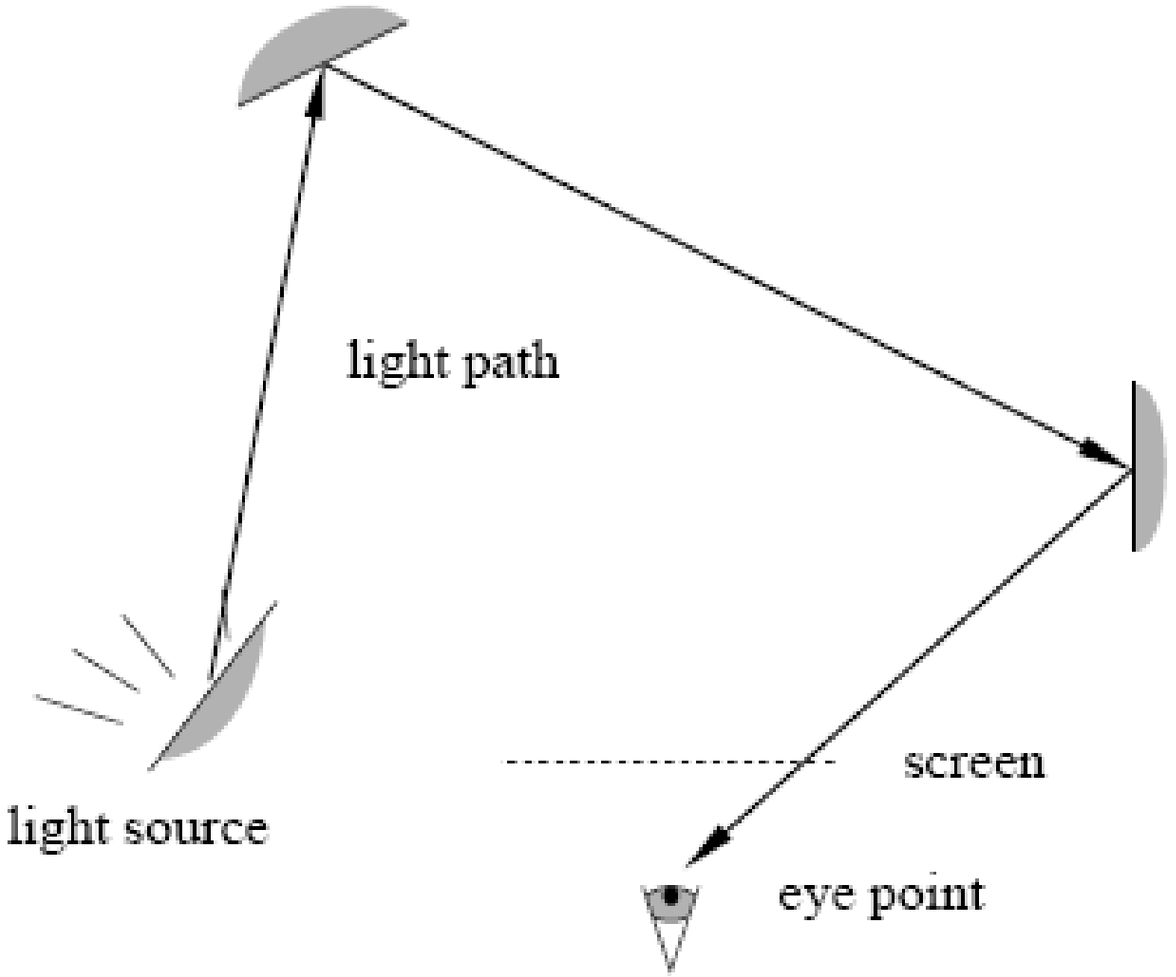
Path tracing



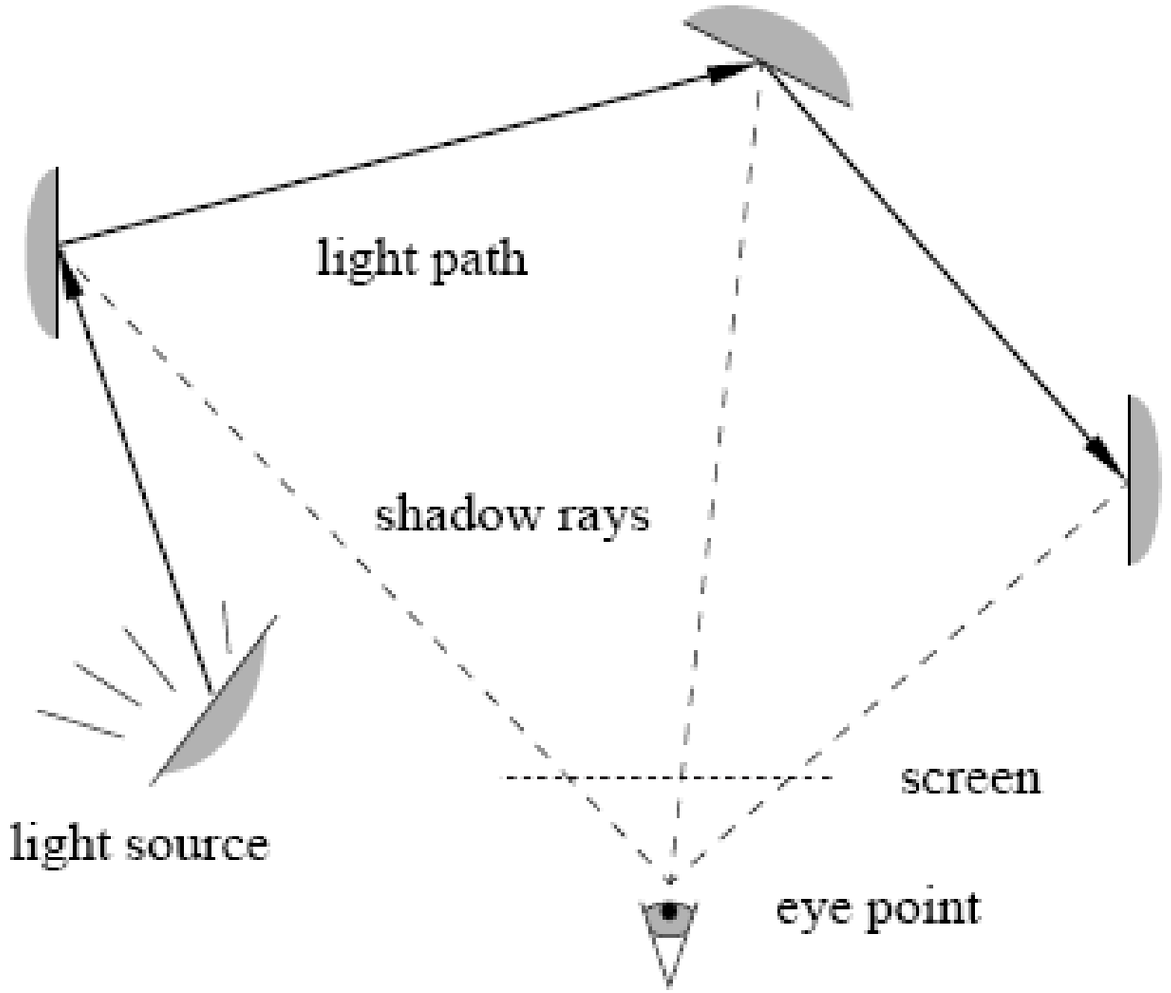
Path tracing (II)



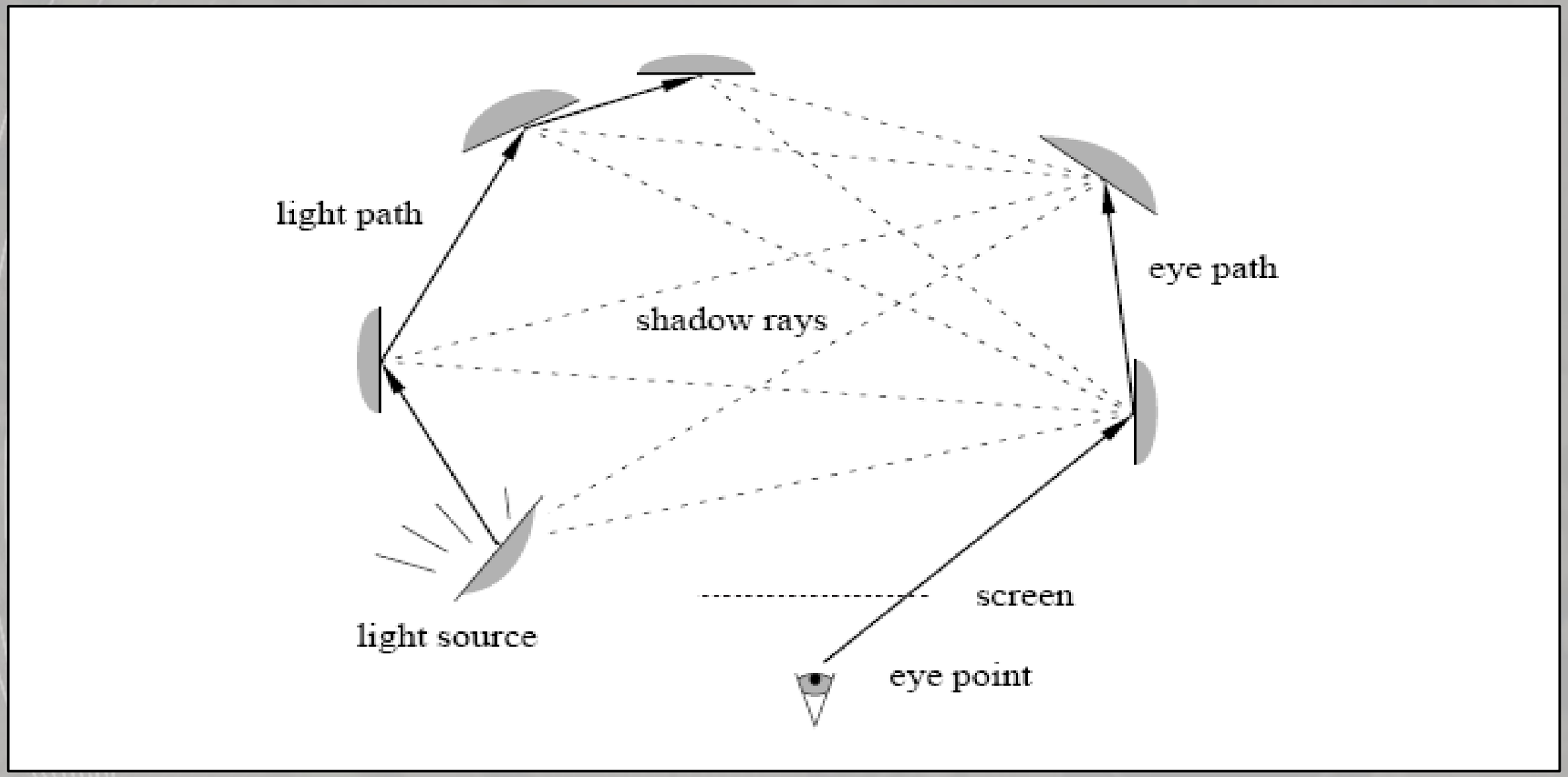
Light tracing



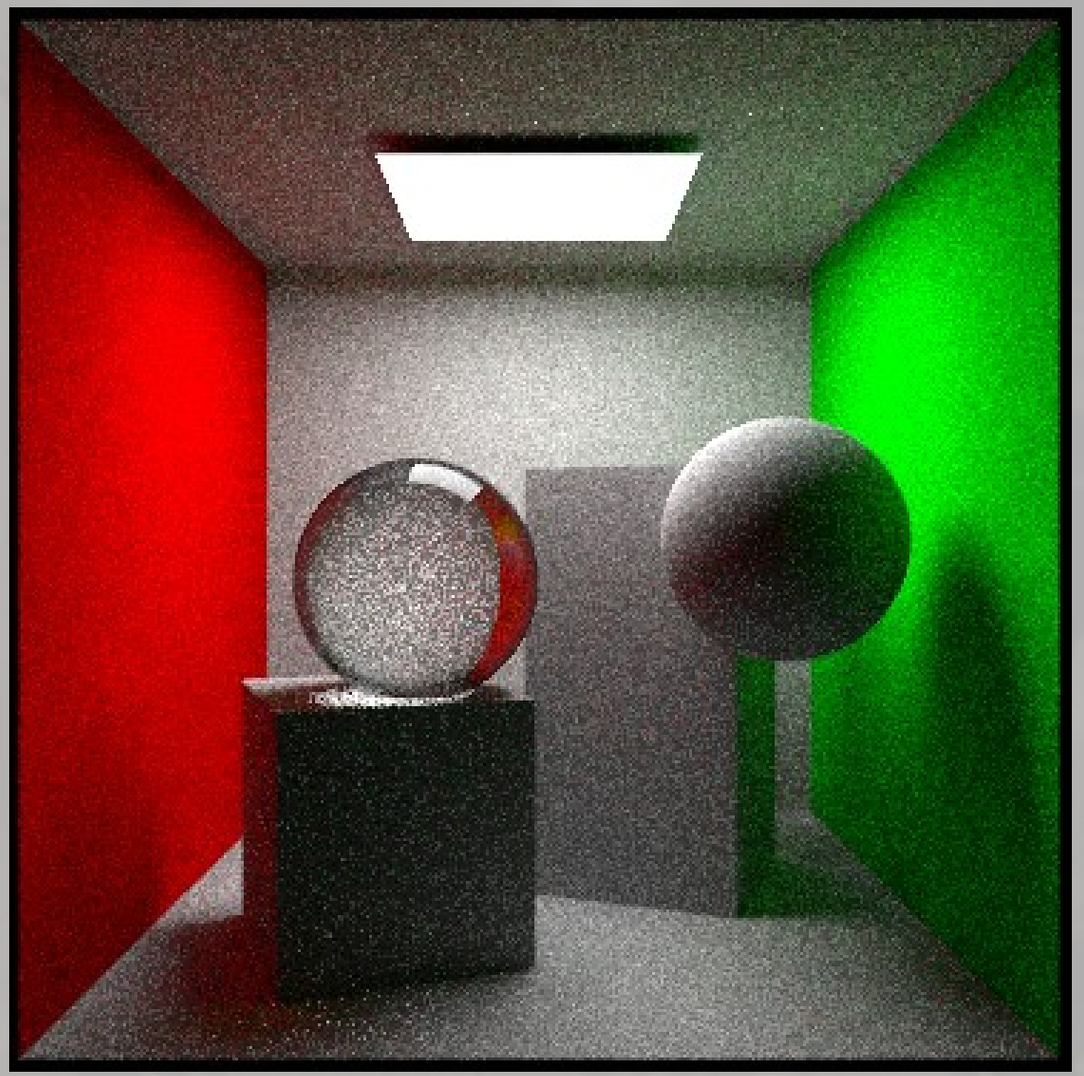
Light tracing (II)



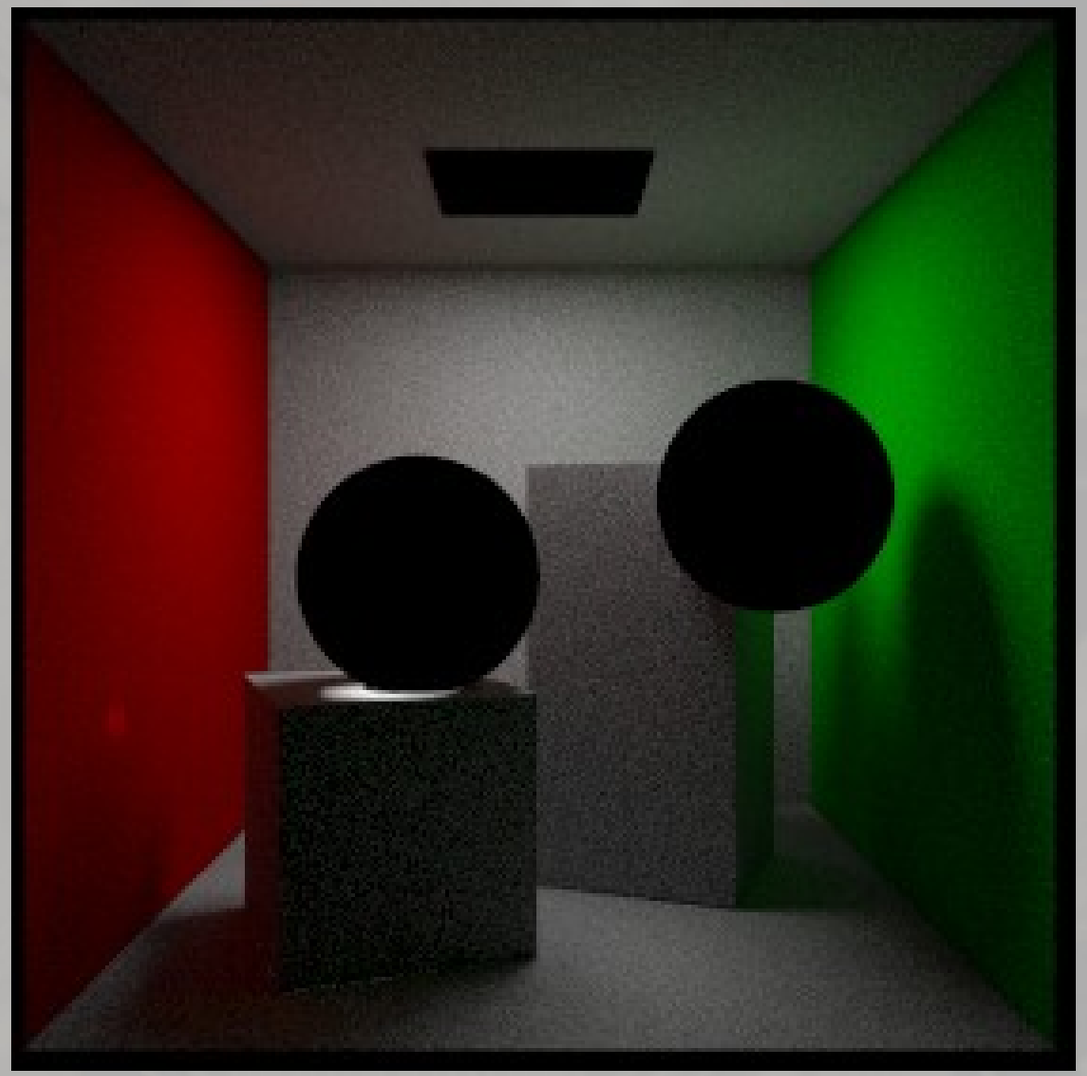
Bidirectional path tracing



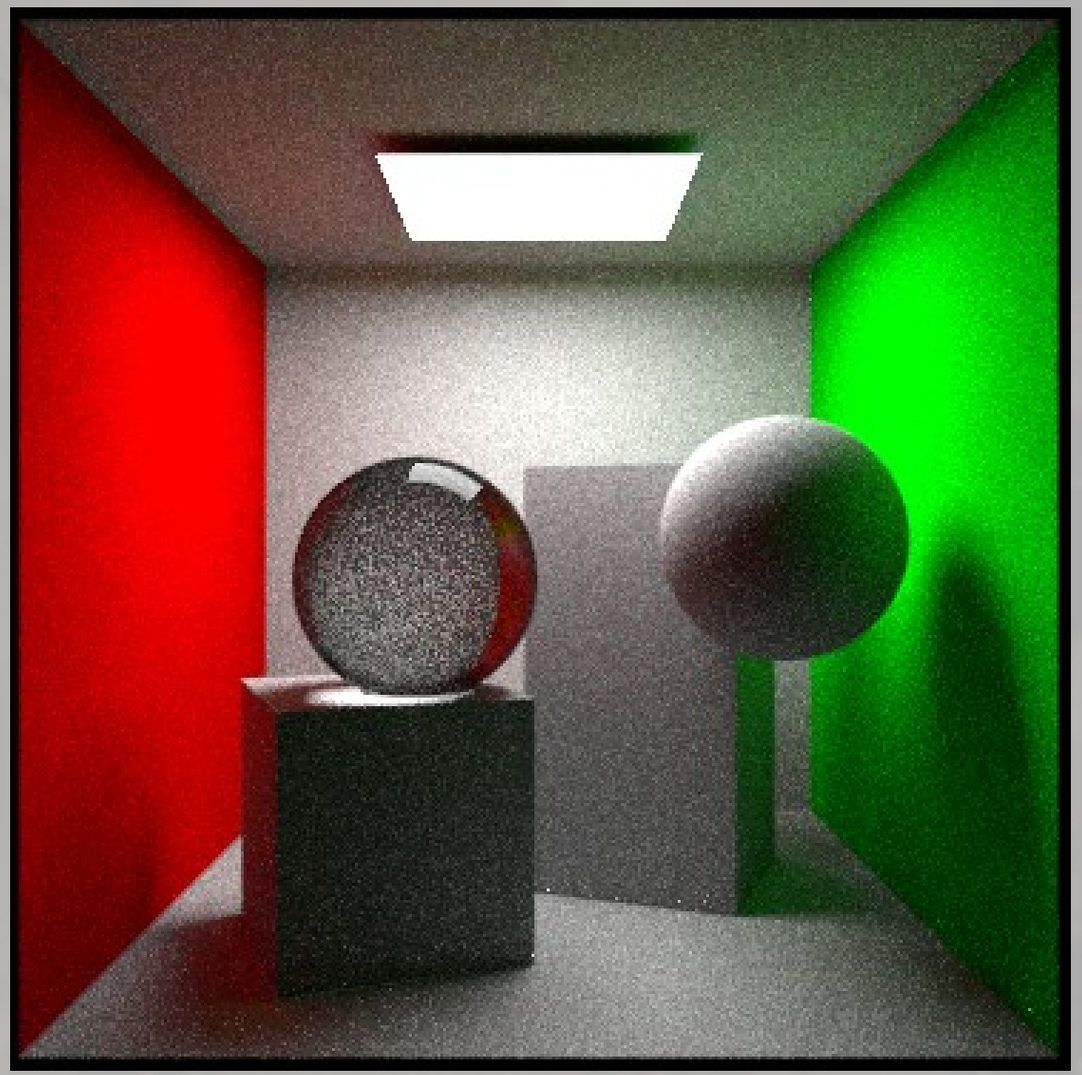
Path tracing result



Light tracing result



Bidirectional tracing result



Ресурси

- По-подробен разбор на различните алгоритми за глобално осветление, вижте лекцията от $CG^2$2012
- The holy bible по BDPT е тезиса на Eric Veach