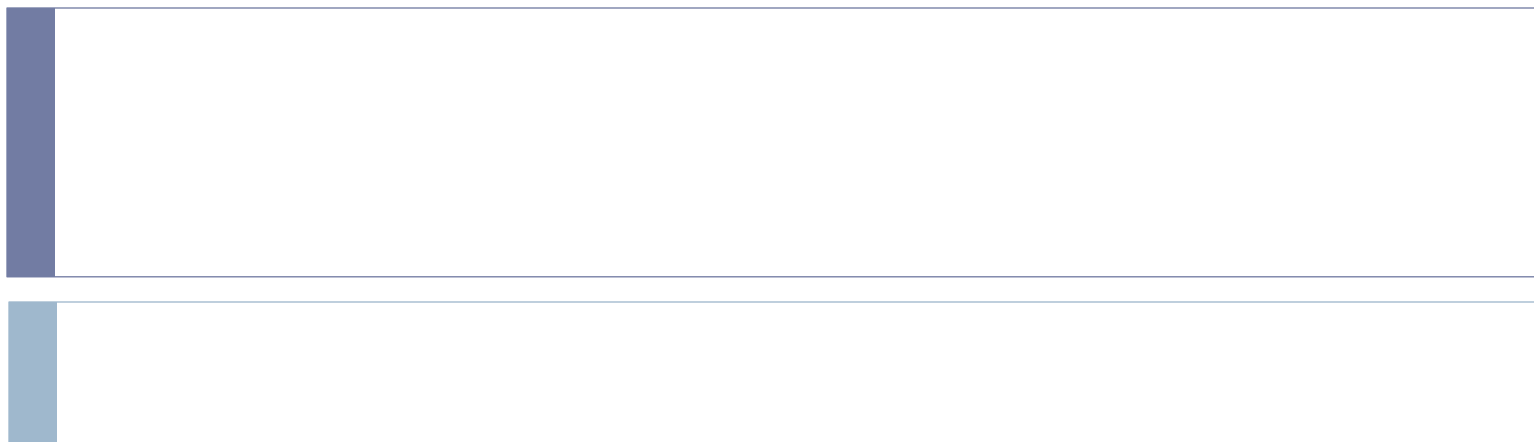


Oświetlenie, modele oświetlenia



Oświetlenie – kilka truizmów

- ▶ Oświetlenie jest zjawiskiem fizycznym, z którym wszyscy mamy do czynienia.
- ▶ Najogólniej opiera się na tym, że światło (pochodzące ze źródeł światła) odbija się od otaczających nas obiektów i część tego co się odbije wpada do naszego oka.
- ▶ Oświetlenie w przyrodzie jest kluczowym elementem tego co i jak widzimy (i że w ogóle cokolwiek widzimy)
- ▶ Dokładne odwzorowanie rzeczywistego oświetlenia w komputerze jest praktycznie niemożliwe

Oświetlenie w grafice 3D

- ▶ Ma za zadanie stworzyć na obrazie wrażenie realizmu (fotorealizmu)
- ▶ Między innymi
 - ▶ Stworzenie wrażenia trójwymiarowości obiektów
 - ▶ Pokazanie odbicia i załamania światła
 - ▶ Rzucania cienia
 - ▶ Innych efektów, o których wspomnimy później
- ▶ Właściwie nie jest do tego konieczny model komputerowy...

Podjęcie malarskie



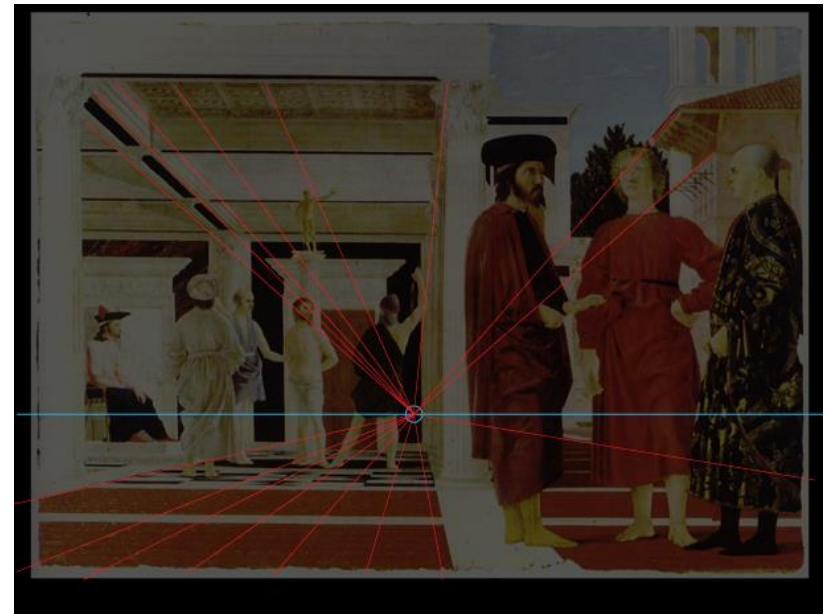
Światłocień – podejście malarskie



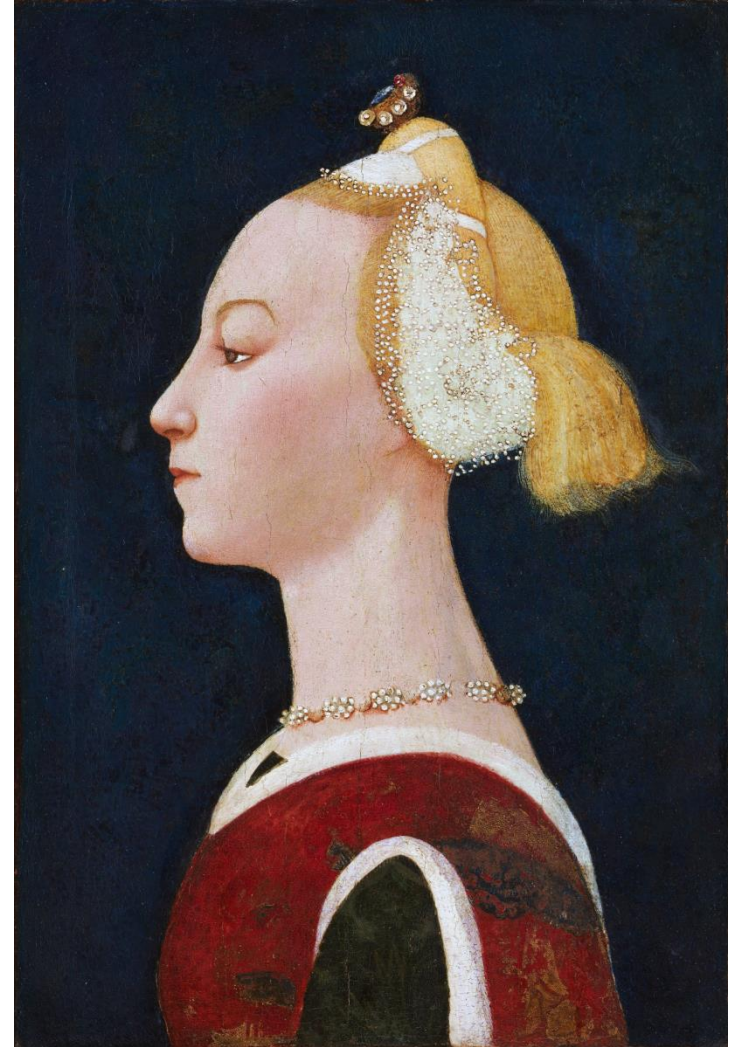
Oświetlenie jest jednym z elementów podkreślających trójwymiarowość postaci i w jakiejś mierze sceny

Oświetlenie – dygresja z perspektywą

- ▶ Drugim elementem podkreślającym trójwymiarowość sceny jest perspektywa.



Wiele stylów malarstwa (i rysunku) obywateli się bez światłocienia



Modele oświetlenia

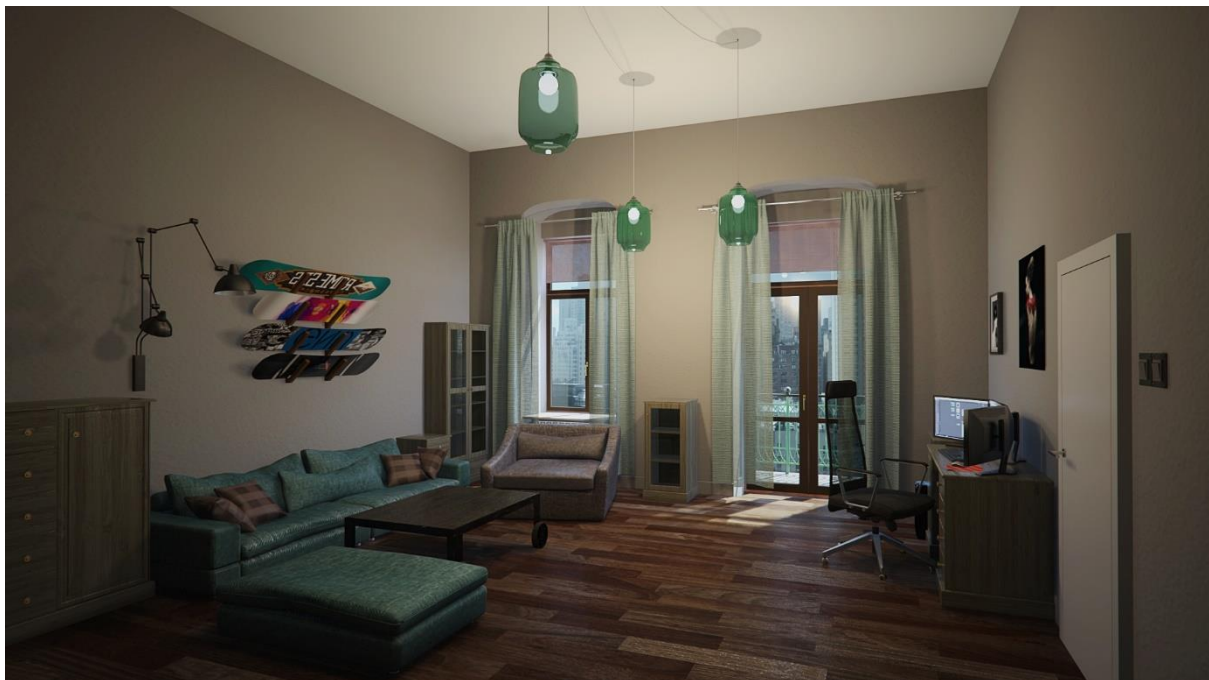
Oświetlenie w grafice komputerowej

- ▶ Różne modele oświetlenia dają różne rezultaty – to dość oczywiste

Oświetlenie pokoju w 3ds Max



To samo z nieco lepszym modelem



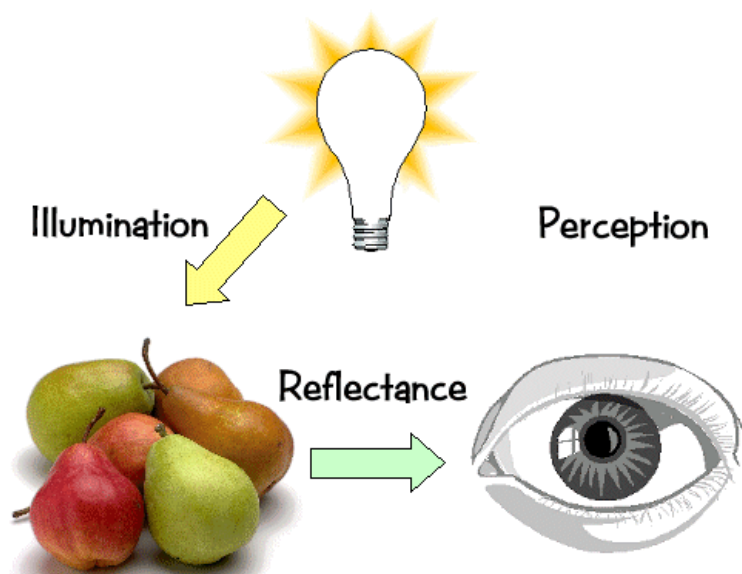
Modele oświetlenia

- ▶ Próba zrozumienia oświetlenia wymaga (jak to w fizyce) zbudowania modelu.
- ▶ Jak wspomnieliśmy:

Modele oświetlenia (o różnej skali złożoności) obejmują:
promieniowanie świetlne (*jak je reprezentować?*),
obiekty na scenie (*jak reagują na światło?*),
relacje między obiektami (*wzajemne odbicia?*),
relacje między obiektami, a obserwatorem.

Składowe modelu oświetlenia obejmują....

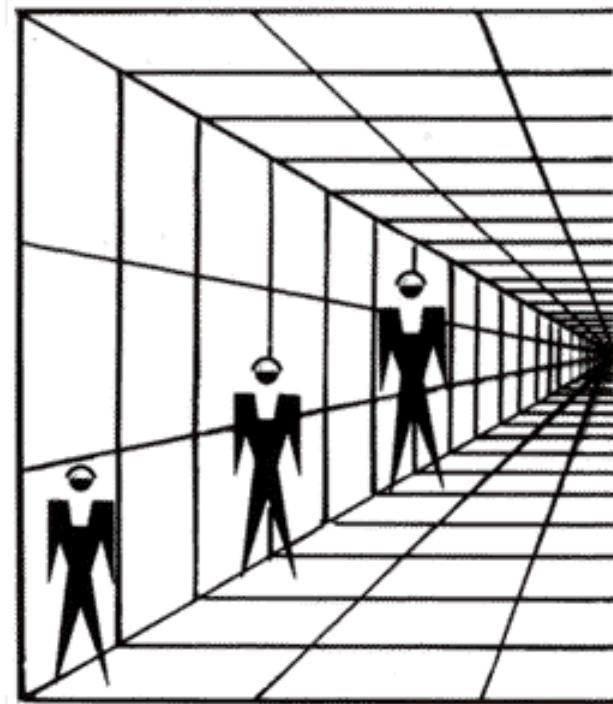
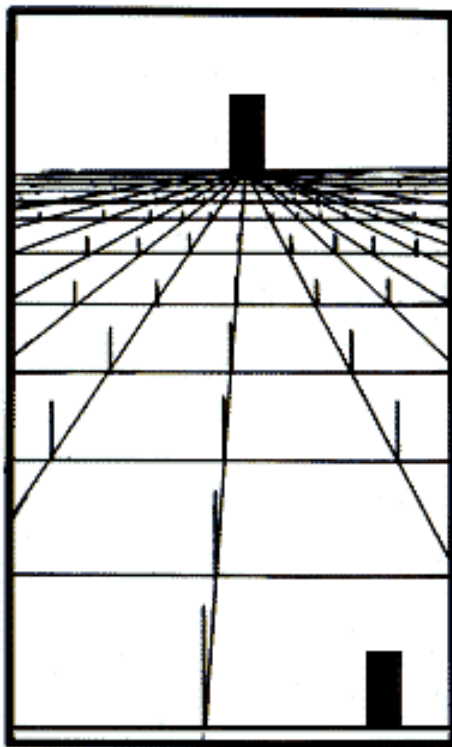
- ▶ Własności światła
- ▶ Własności materiałowe obiektów
- ▶ Reguły odbicia światła
- ▶ Percepcję światła



Dygresja o percepcji na początek

- ▶ Żeby później się już tym nie zajmować

Obraz tworzy się w mózgu



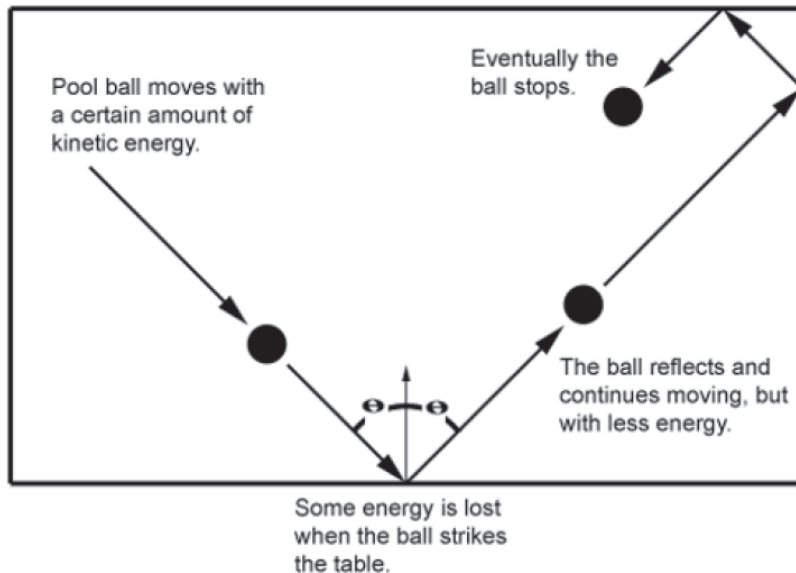
Obraz tworzy się w mózgu



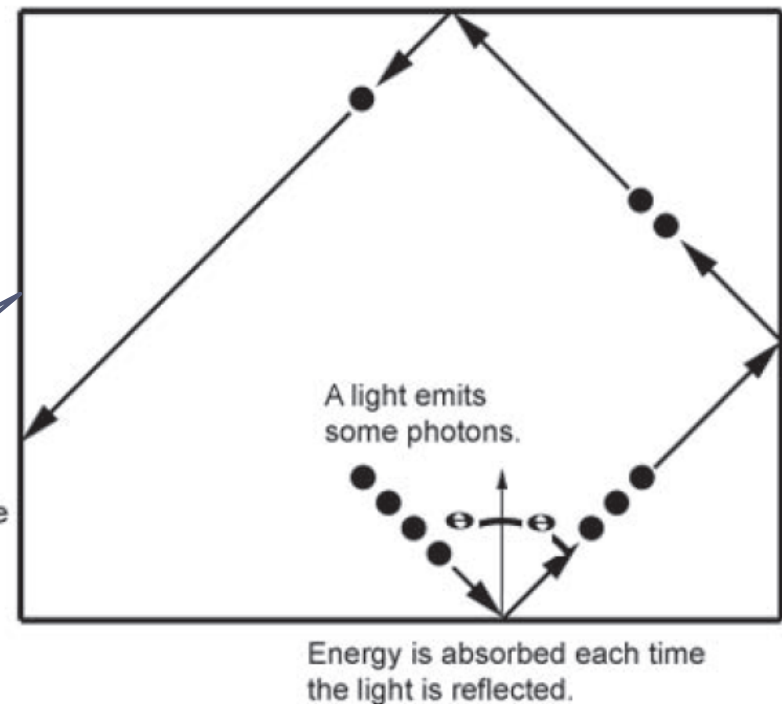
Jak powinniśmy traktować światło?

- ▶ Dualizm korpuskularno-falowy?
- ▶ Korpuskuły?
- ▶ Fale?
- ▶ Energia?

Światło jako cząstki



Możemy je sobie wyobrazić jako kule bilardowe, które tracą część energii przy odbiciu

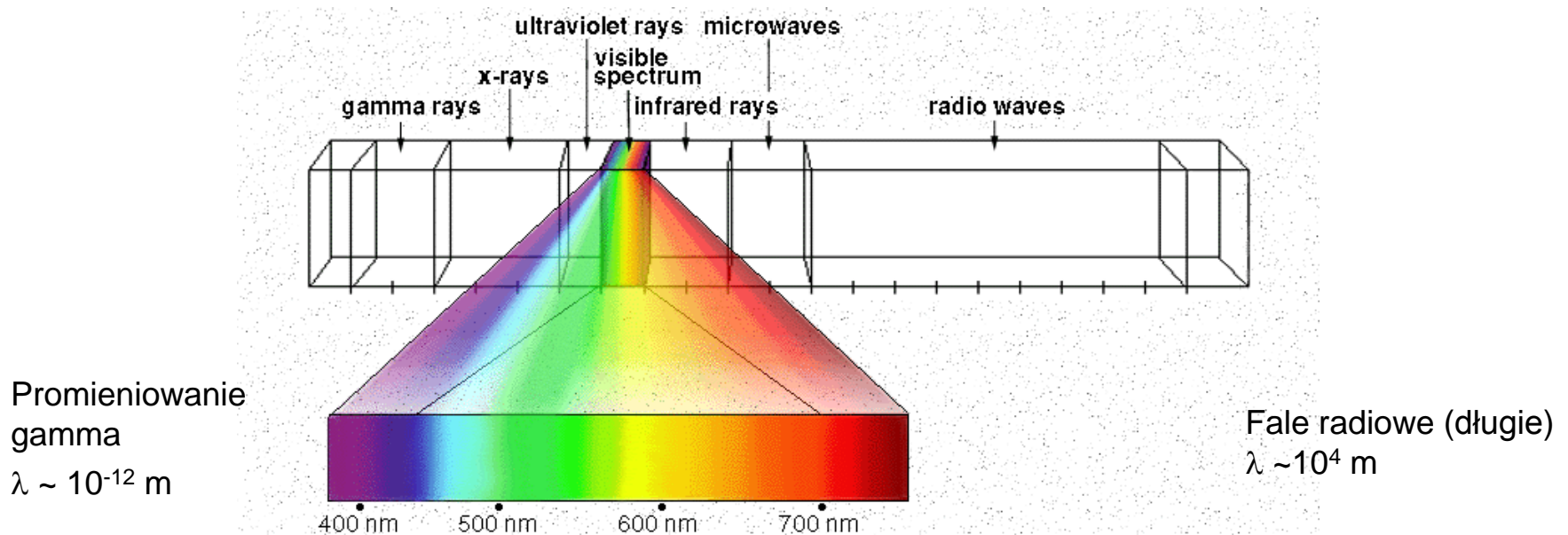


Albo lepiej jako strumień fotonów, które są częściowo pochłaniane przy każdym odbiciu

Eventually, all the energy is absorbed and there is no more light to reflect.

Światło jako fala

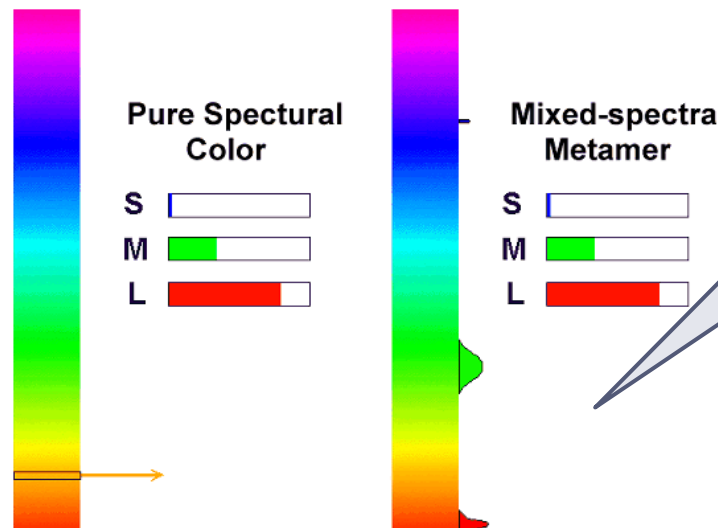
- ▶ reprezentuje zjawiska falowe: interferencję, dyfrakcję
- ▶ reprezentuje również barwę:



- ▶ Raczej rzadko stosowany model w grafice komputerowej

Barwa światła

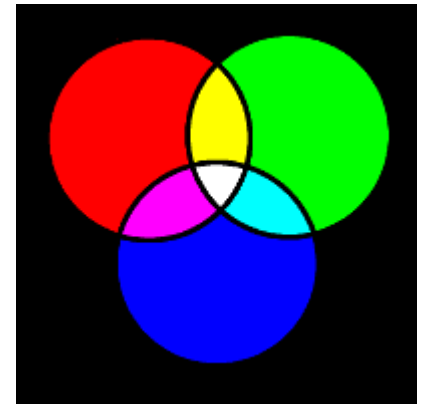
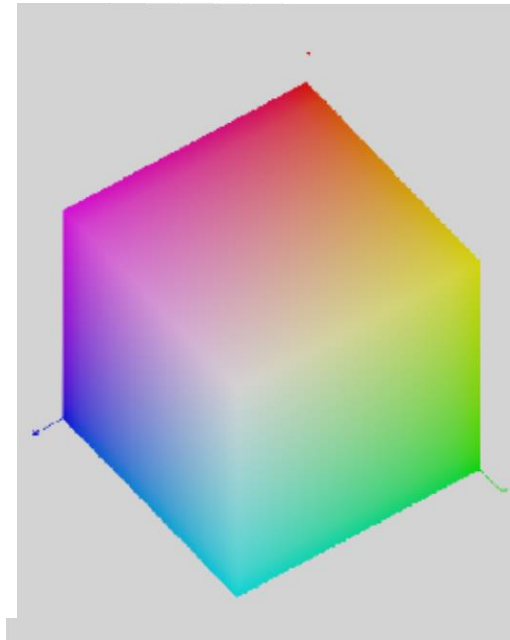
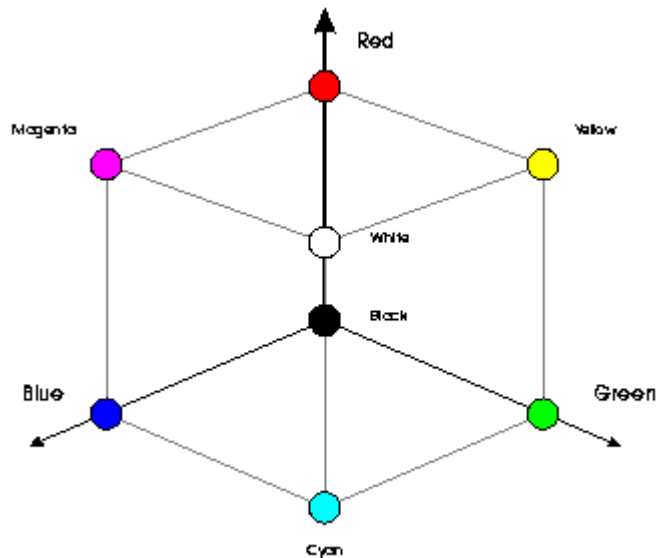
- ▶ kolor (postrzegana barwa) jest funkcją długości fali
- ▶ kolor jest również funkcją naszej percepcji
- ▶ Określony kolor może być uzyskany na podstawie fali monochromatycznej lub mieszanki innych fal



Tu pomarańczowy
jest efektem
wymieszania RGB

Barwa światła

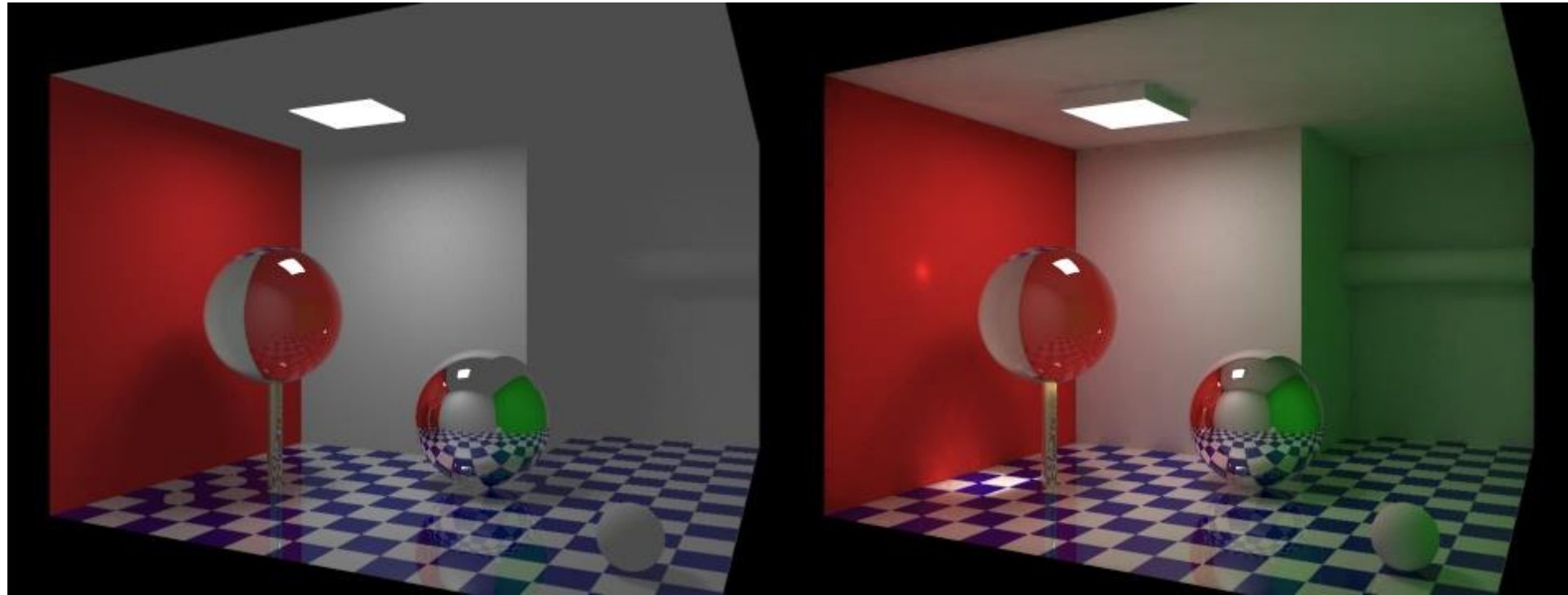
- ▶ Dzięki naszej percepcji potrafimy zsyntezować prawie każdą barwę z trzech barw podstawowych



Global Illumination vs. Local Illumination

- ▶ W oświetleniu globalnym uwzględniane są odbicia światła między obiektami -> każdy obiekt staje się wtórnym źródłem światła.
- ▶ Przeciwnie, w oświetleniu lokalnym, bierzemy pod uwagę tylko oświetlenie obiektów bezpośrednio przez źródło światła.

Global Illumination vs. Local Illumination



Local (Raytracing)

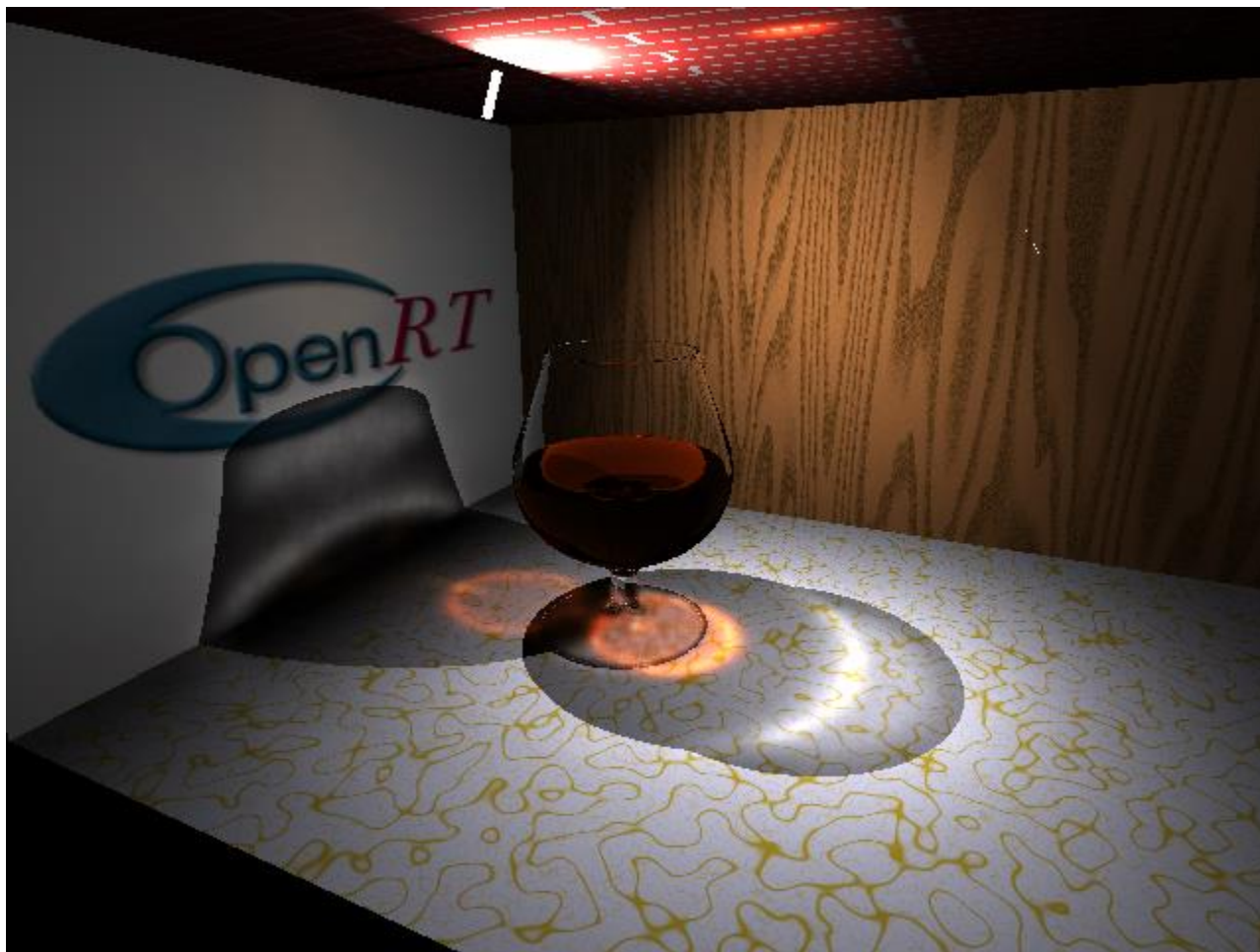
Global

Caustics (kaustyka)

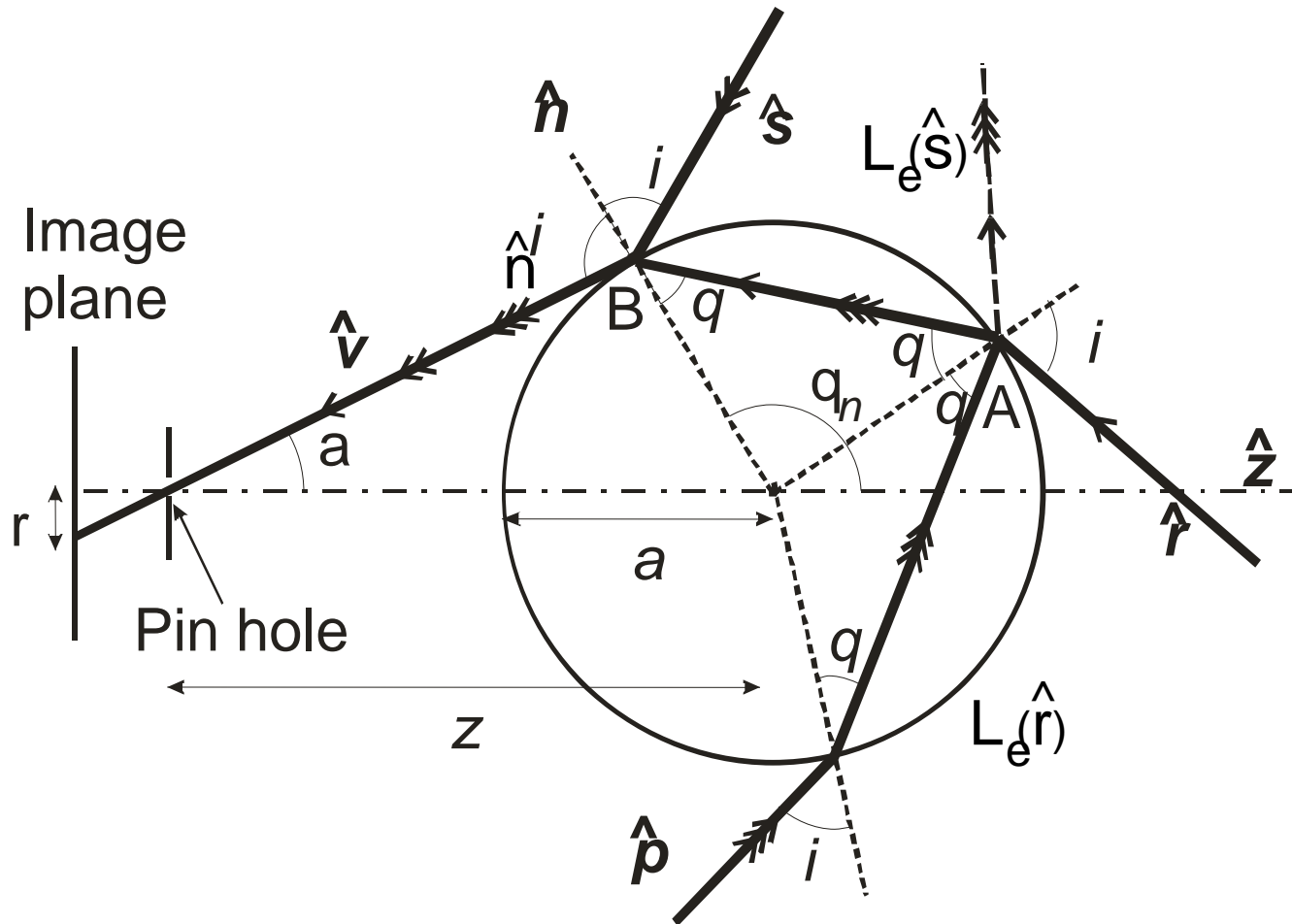
- ▶ Co jest nie w porządku z tym obrazkiem?



Efekty globalne poprawiają ten obrazek



Refraction and Reflection



Spojrzenie na wodę

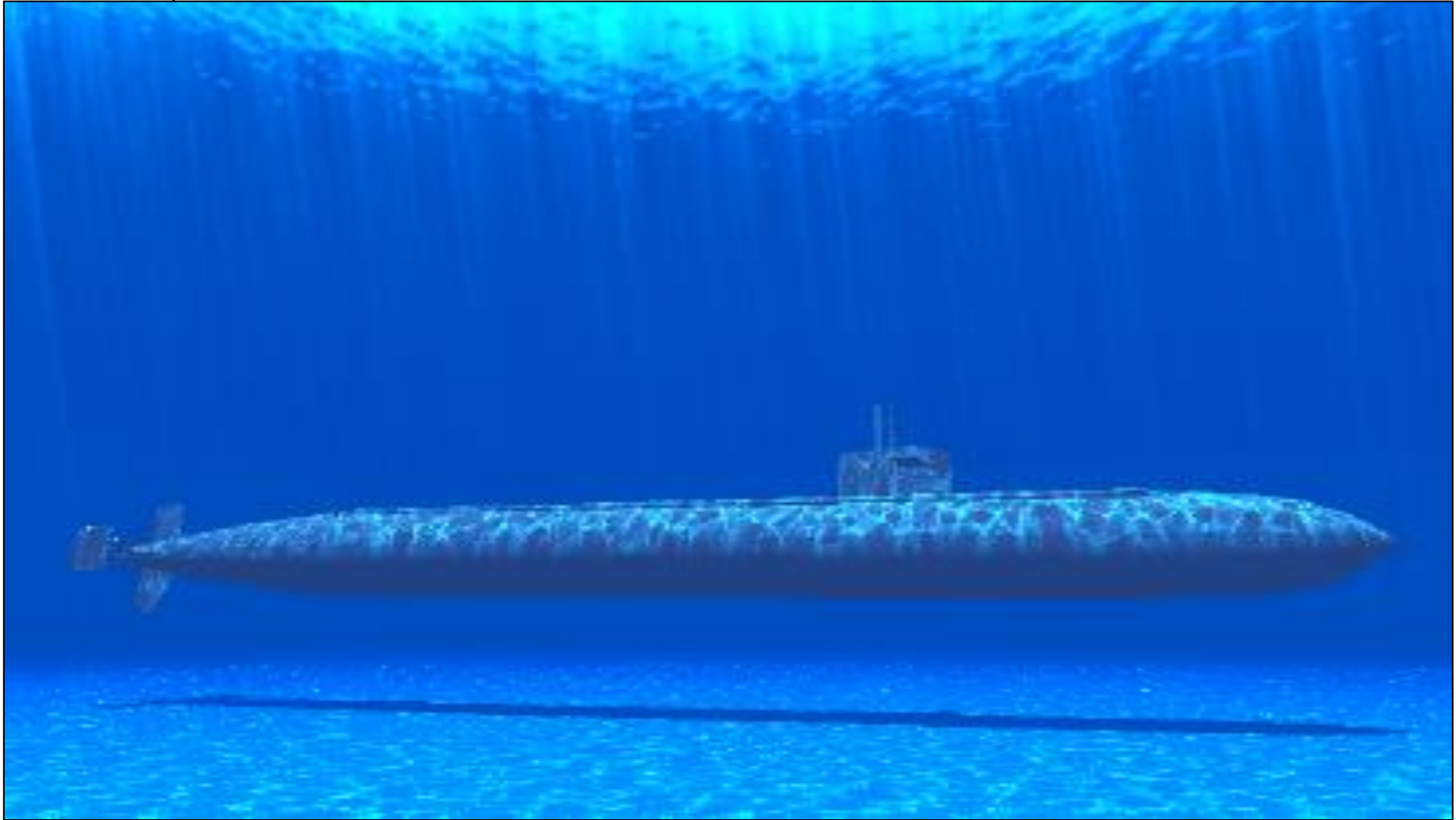


- Światło jest jednocześnie odbijane i załamywane
 - Charakterystyczny wzór światła na dnie (Caustics)
-



► Strumienie światła i kaustyki:

- z pracy : [Kei Iwasaki](#), [Tomoyuki Nishita](#), [Yoshinori Dobashi](#) , Efficient Rendering of Optical Effects within Water Using Graphics Hardware, Pacific Conference on Computer Graphics and..., 2001



Kaustyki wynikające z załamania



- ▶ Światło jest załamywane na powierzchni
- ▶ Niektóre punkty są jaśniejsze od innych

Modele realizujące oświetlenie globalne

- [illegible]

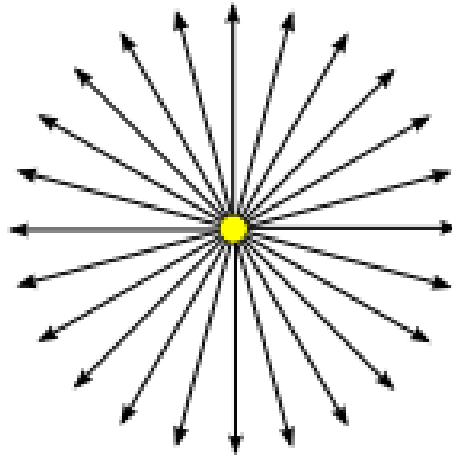
Krótki przegląd rodzajów źródeł światła

Krótki przegląd rodzajów źródeł światła

- ▶ W rzeczywistym świecie mamy do czynienia z wielką liczbą źródeł światła, których obecności możemy sobie nawet nie uświadamiać. Dodanie kolejnego źródła nie stanowi problemu.
- ▶ W grafice komputerowej każde dodatkowe źródło światła jest również źródłem dodatkowych obliczeń. Dlatego liczba źródeł jest ograniczona, a one same – uproszczone.
- ▶ Przegląd nawiązuje do podejścia wysokopoziomowego, obiektowego, gdzie źródła (takie lub podobne) są *explicité* definiowane (np. w Blenderze, 3ds Max, bibliotece three.js i dziesiątkach innych aplikacji)

Światło punktowe

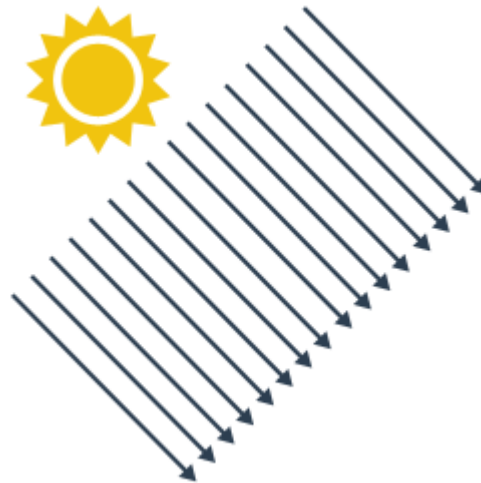
- ▶ Można powiedzieć, że reprezentuje nieskończenie małą żarówkę, która świeci na wszystkie strony



- ▶ Jest to podstawowe źródło światła, inne są z niego wywiedzione.

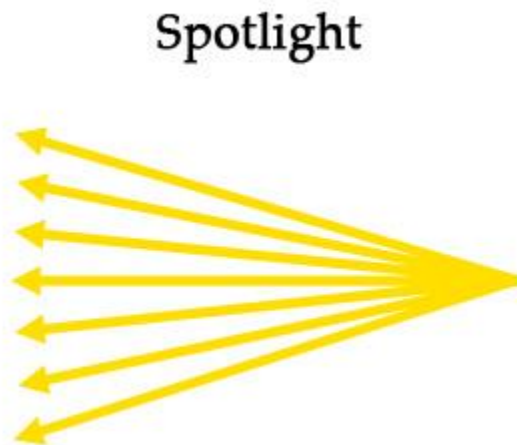
Światło kierunkowe

- ▶ Światło kierunkowe można interpretować jako światło od nieskończenie wielkiego źródła światła.
- ▶ Używane jest do reprezentowania światła słonecznego.



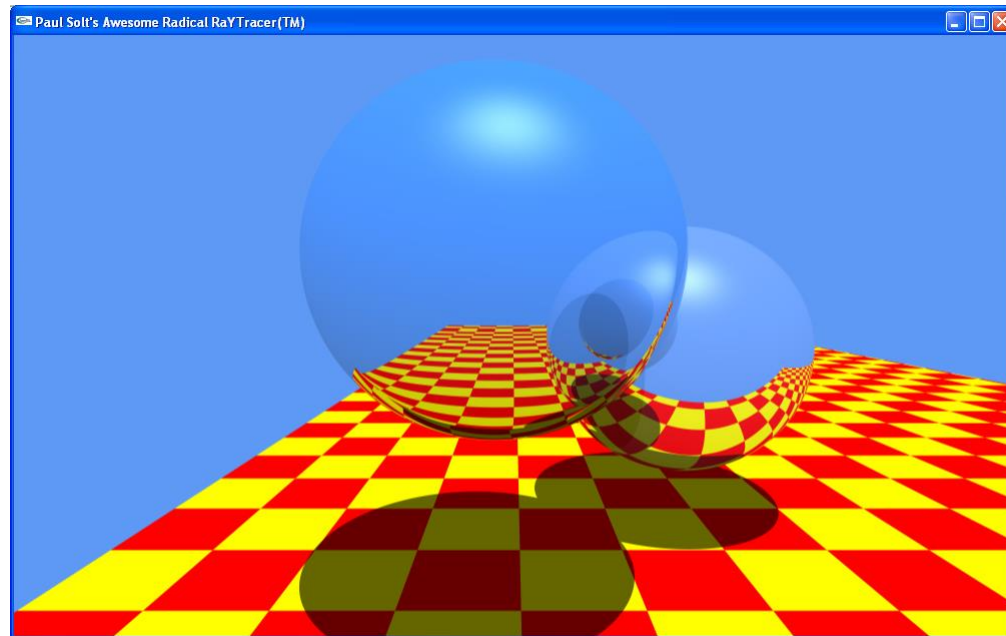
Światło reflektora (spotlight)

- ▶ Światło typu spotlight jest zbliżone do światła punktowego

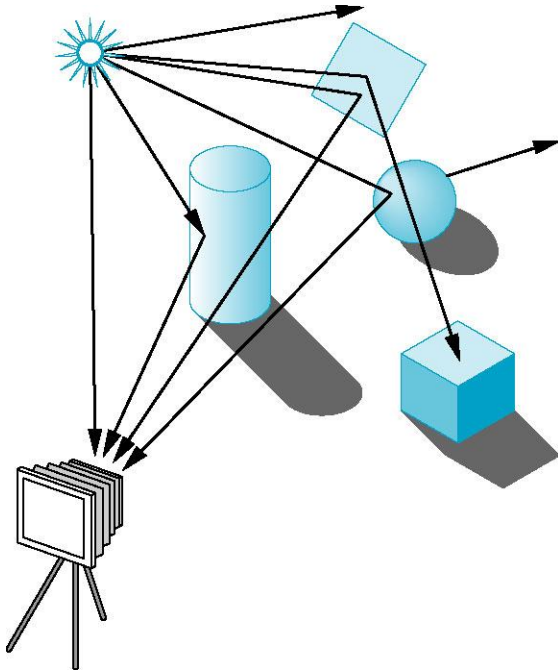


Popularna metoda pośrednia – lokalna, ale z dodatkowymi efektami

- ▶ Ray-Tracing (śledzenie promieni) – podstawowa metoda Whitteda (1980) śledzi promienie od obserwatora do źródeł światła. Obsługuje odbicia lustrzane, załamania i bezpośrednie oświetlenie.

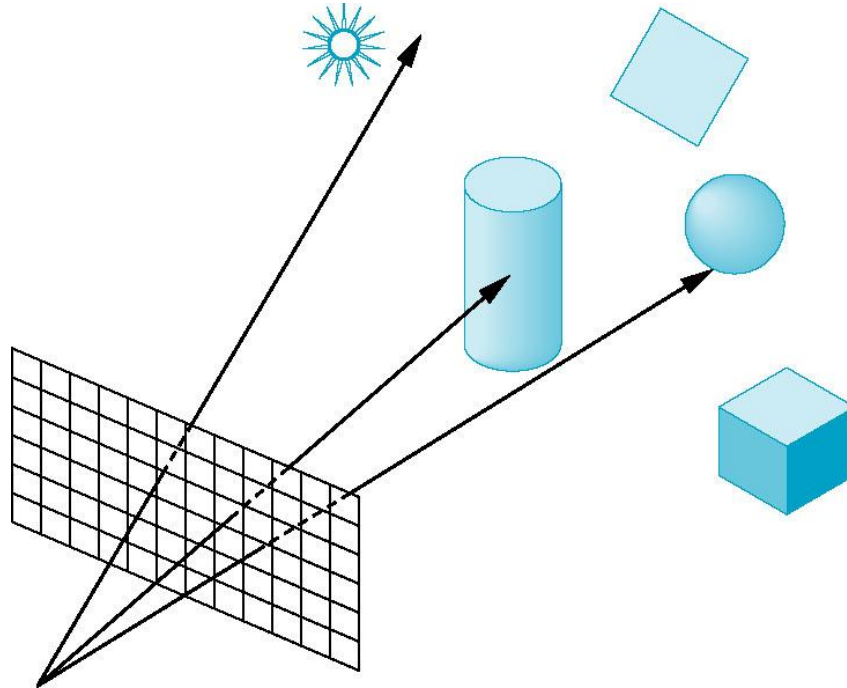


Próba śledzenia wprost



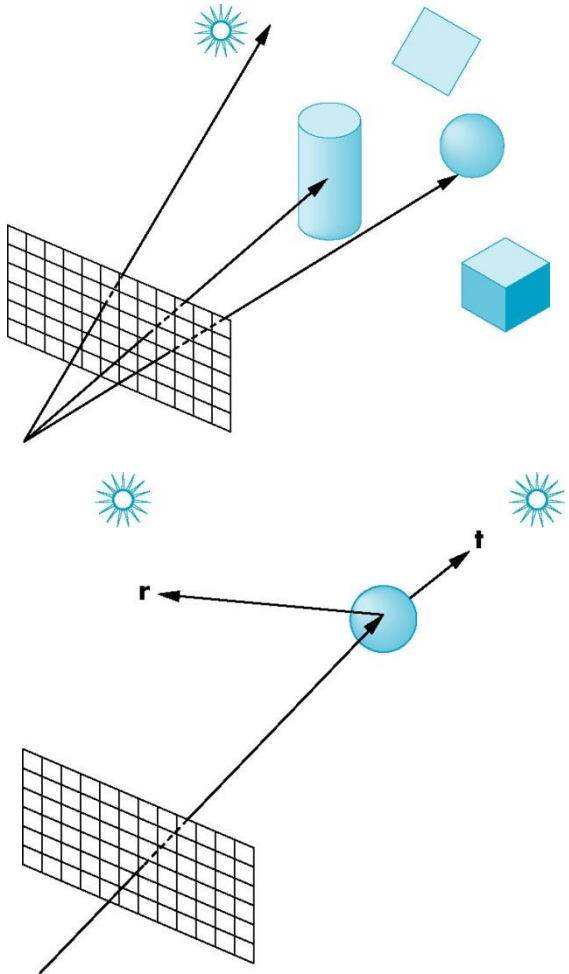
- Ten rodzaj śledzenia wydaje się fizycznie poprawny
- Jednak niewielka liczba promieni dociera do oka

Śledzenie wstecz

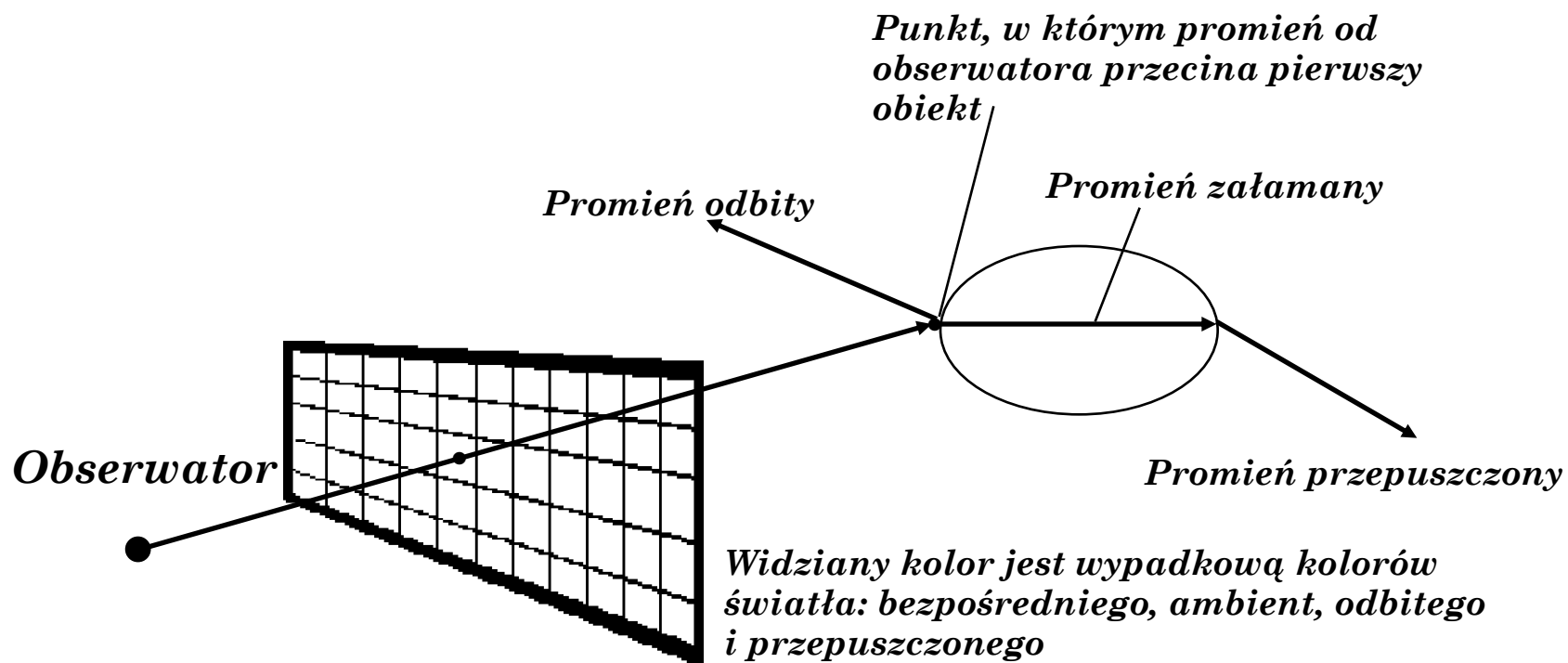


Bierzemy pod uwagę tylko te promienie, które tworzą obraz

Ray casting, a ray tracing

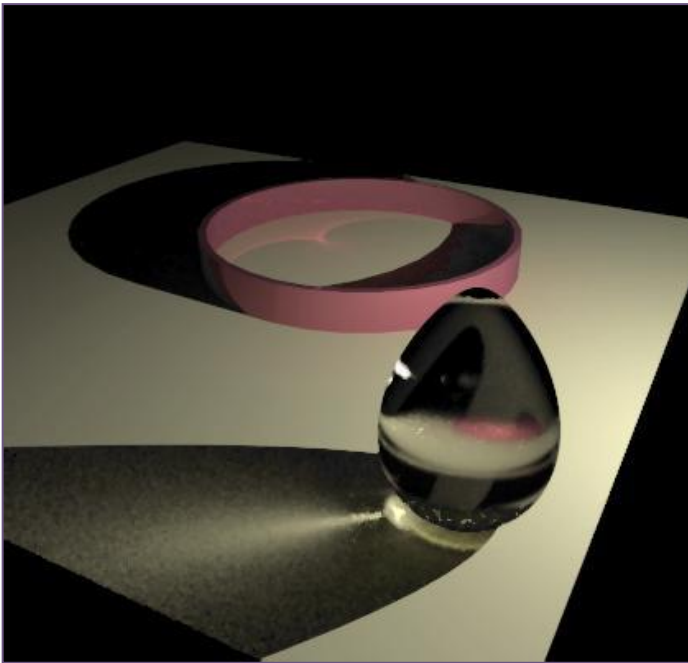


Rekursywny Ray-Tracing



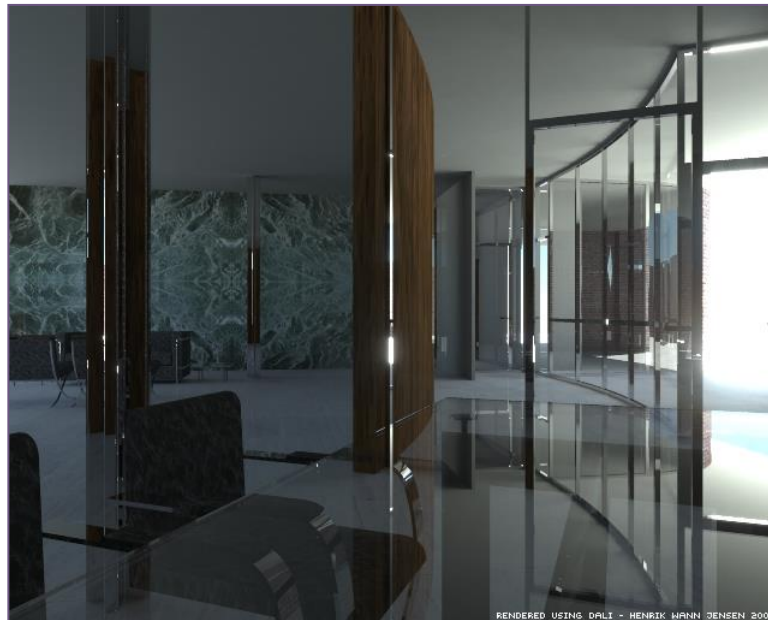
Techniki idące w stronę oświetlenia globalnego c.d.

- ▶ Monte Carlo Ray-Tracing dodaje głębię ostrości, rozmycie w ruchu, kaustyki, oświetlenie odbite, odbicia połyskliwe.



Techniki idące w stronę oświetlenia globalnego c.d.

- ▶ Monte Carlo Ray-Tracing dodaje głębię ostrości, rozmycie w ruchu, kaustyki, oświetlenie odbite, odbicia połyskliwe.



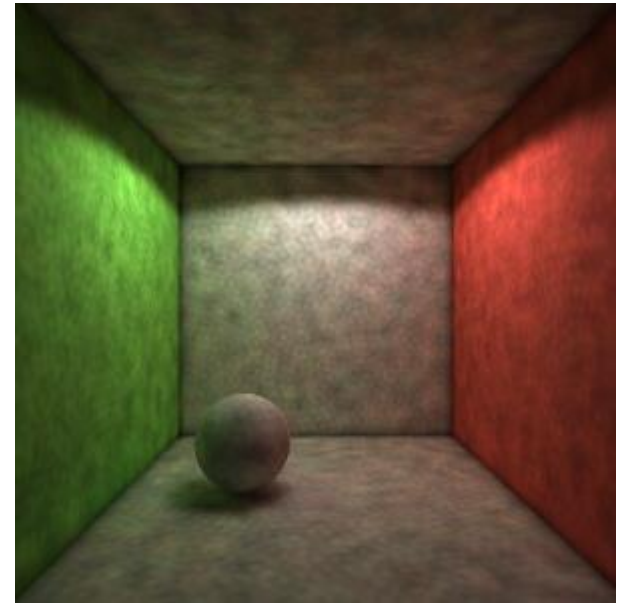
Techniki idące w stronę oświetlenia globalnego c.d.

► Radiosity (Metoda energetyczna)



Techniki idące w stronę oświetlenia globalnego c.d.

► Photon Mapping

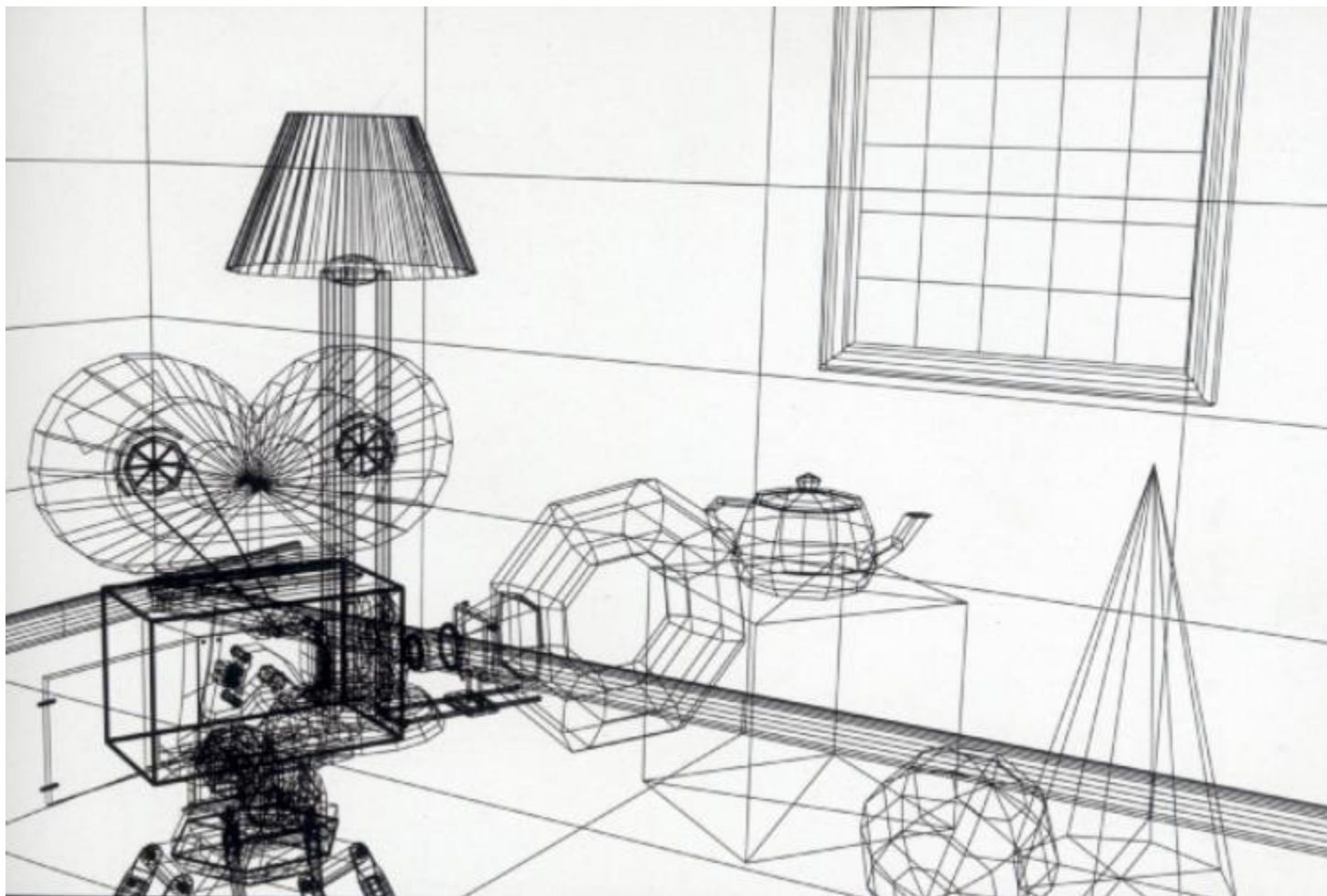


ele oświetlenia

Krótki przegląd efektów w lokalnych modelach oświetlenia

- ▶ Na kolejnych, historycznych, slajdach jest przedstawiony przegląd efektów jakie dają różne modele oświetlenia. Uwzględnione są jedynie najprostsze modele

Różne modele – różne efekty



Solid Model: światło ambient, wszystkie powierzchnie obiektu zamalowane jednakowo



Flat shading: każdy wielokąt oświetlony jednolicie światłem kierunkowym



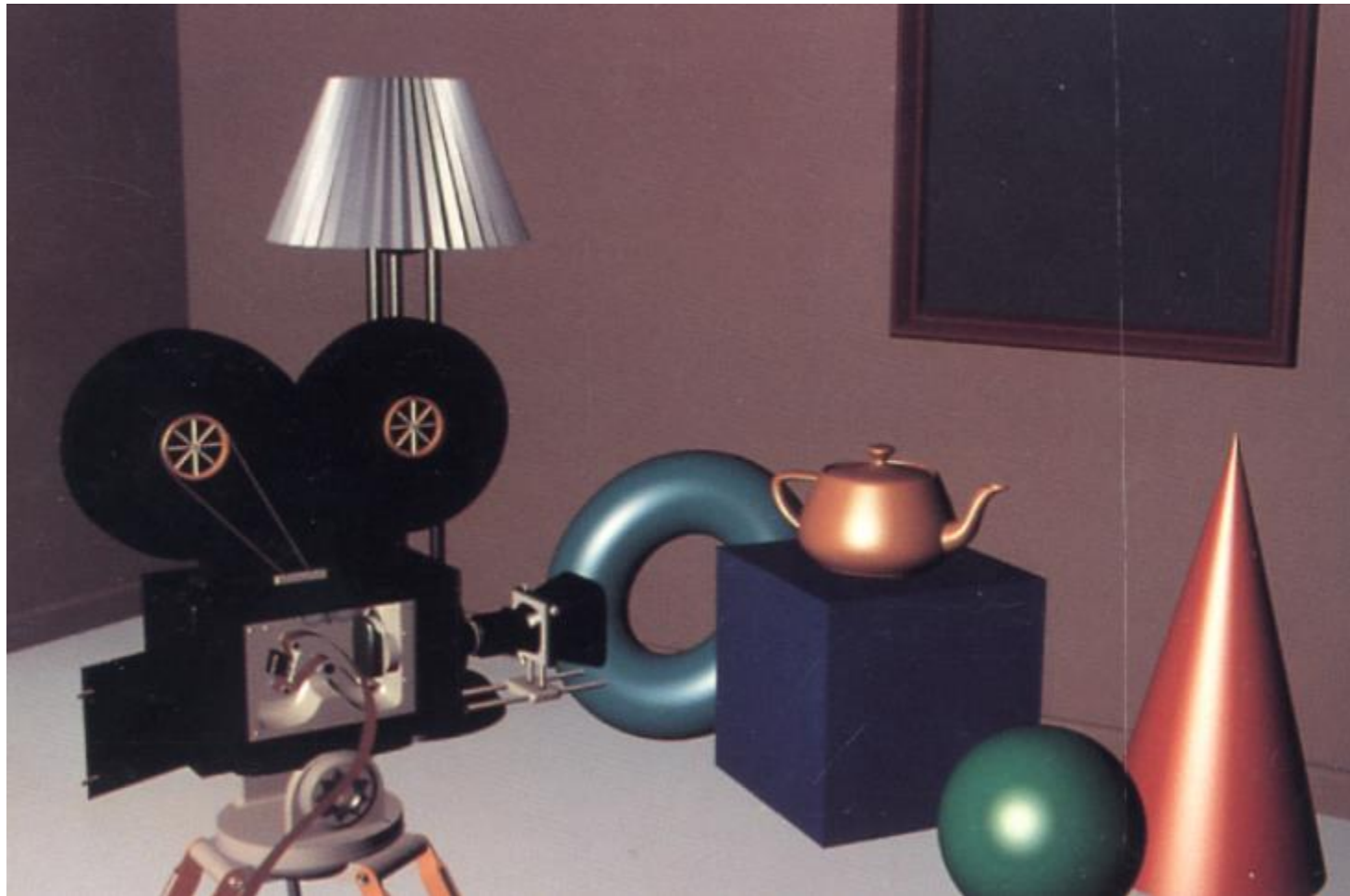
Gouraud shading: liniowa interpolacja oświetlenia w obrębie wielokąta



Phong shading: dodane odblaski



Curved surfaces: powierzchnie opisane przez wielomiany



Illumination with shading



Texture mapping: dodane tekstury



Dodatkowe efekty: odblaski, cienie i bump mapping

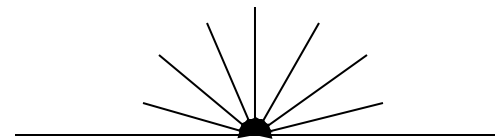
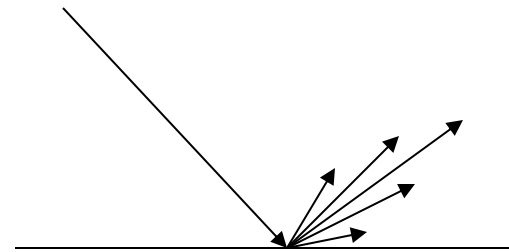
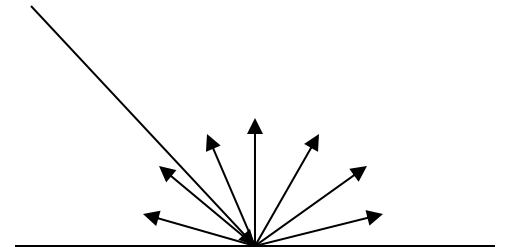


Zaczynamy od radykalnych uproszczeń

- ▶ Uwzględniamy tylko bezpośrednie oświetlenie od źródeł światła do powierzchni i odbicie do obserwatora.
- ▶ Zakładamy proste kształty źródeł (praktycznie tylko punktowe lub nieskończone).

„Standardowy” model oświetlenia ADS

- Zbudowany z kombinacji trzech czynników:
 - *Diffuse*
 - *Specular*
 - *Ambient*



Światło bezkierunkowe, otaczające, środowiska (ang. *ambient light*)

- ▶ wszystkie powierzchnie oświetlone są jednakowo,
- ▶ natężenie odbitego światła zależy jedynie od własności powierzchni i wynosi:

$$I_R = k_A \cdot I_A$$

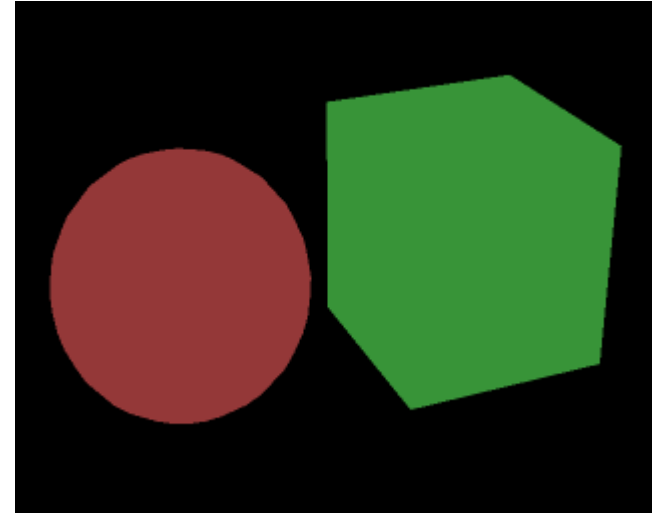
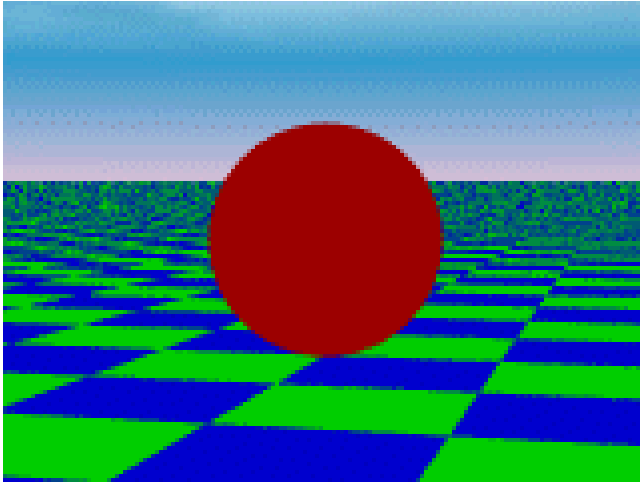
- ▶ zaś w rozbiciu na składowe RGB:

$$I_R^R = k_A^R \cdot I_A^R$$

$$I_R^G = k_A^G \cdot I_A^G$$

$$I_R^B = k_A^B \cdot I_A^B$$

Przykładowe sceny oświetlone wyłącznie światłem *ambient*



Składowa ambient reprezentuje w uproszczony sposób wszystkie odbicia światła od obiektów sceny



Odbicie rozproszone

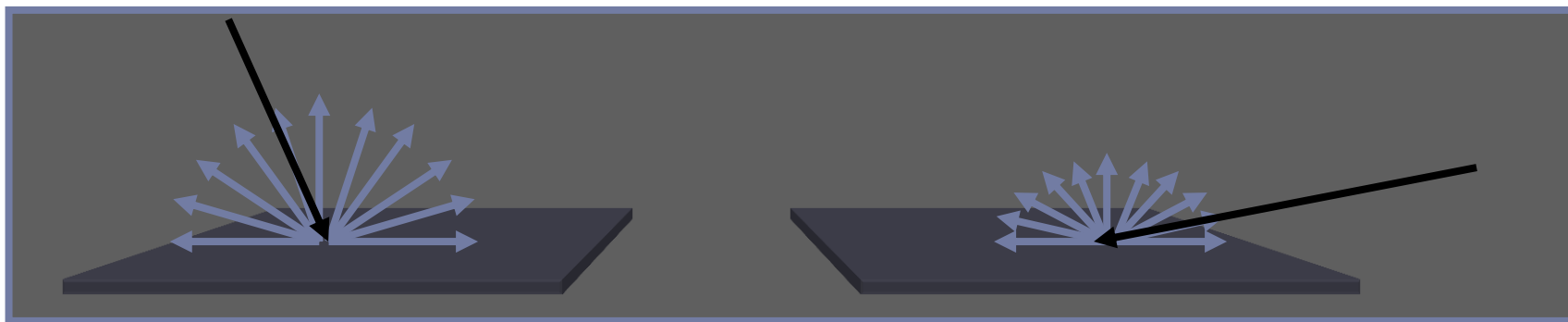
- ▶ Podstawowym rodzajem odbicia, jest odbicie rozproszone – od powierzchni matowych. Wynika z nierównomierności powierzchni



Fizyka odbicia światła

► Odbicie doskonale rozproszone

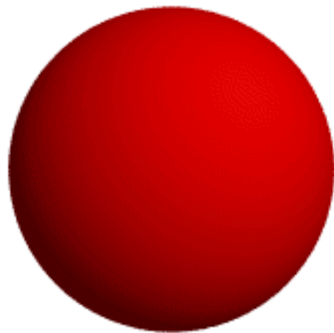
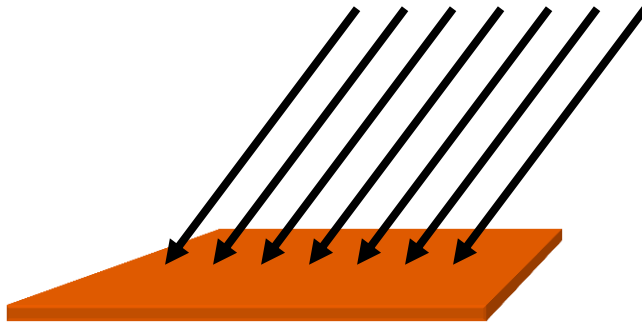
- Na poziomie mikroskopowym odbicie doskonale rozproszone odpowiada szorstkiej, matowej powierzchni (kreda jest dobrym przykładem)
- Ze względu na nierównomierną powierzchnię padający promień może zostać odbity w dowolnym kierunku z jednakowym prawdopodobieństwem. Takie odbicie nazywa się odbiciem Lamberta



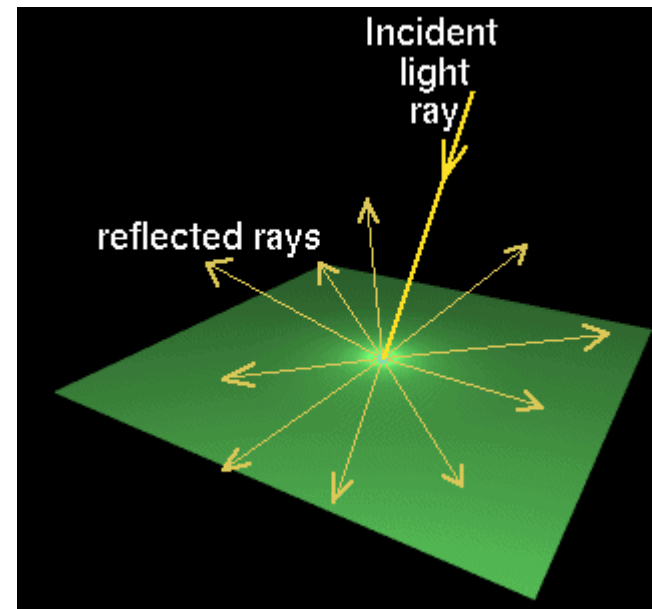
- *Od czego zależy intensywność odbitego światła?*

Światło rozproszone (ang. *diffuse light*)

Diffuse + ambient

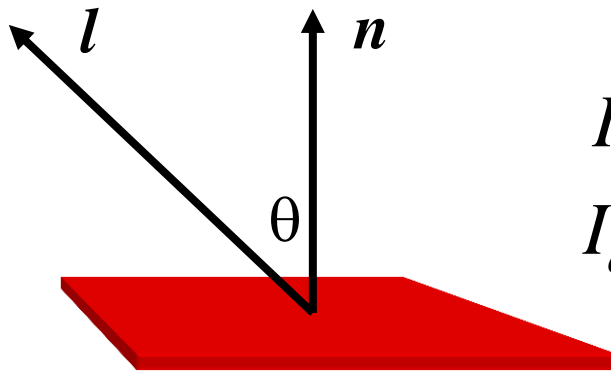


Diffuse Lighting



Światło rozproszone (*diffuse*)

Zakładamy oświetlenie od rzeczywistego źródła światła (tutaj kierunkowego) oraz odbicie rozproszone (Lamberta, we wszystkich kierunkach)

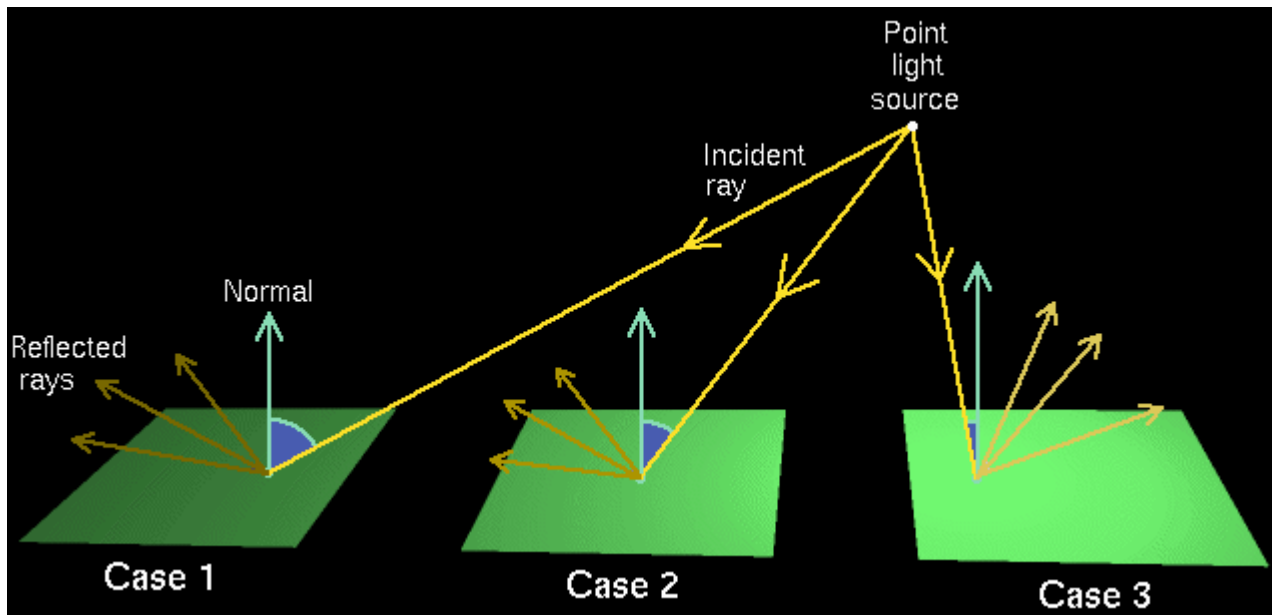


$$I_{diffuse} = k_d I_{light} \cos \theta$$

$$I_{diffuse} = k_d I_{light} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})$$

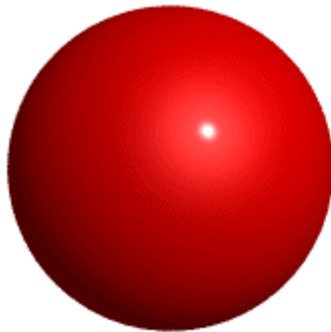
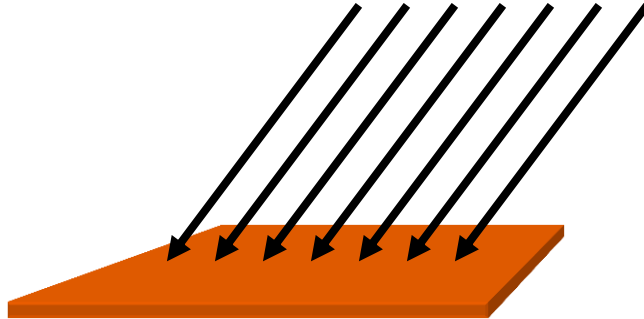
Natężenie światła odbitego zależy tylko od współczynnika odbicia k_d i orientacji powierzchni do kierunku padającego światła

Odbicie światła rozproszonego

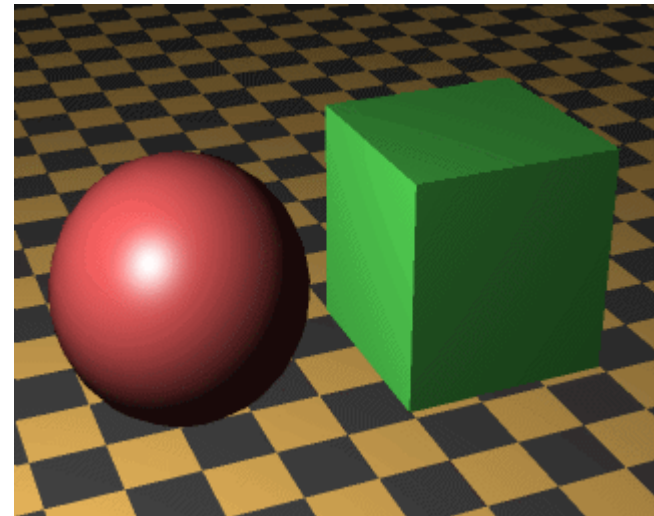


Światło odbite połyskliwie (ang. *specular light*)

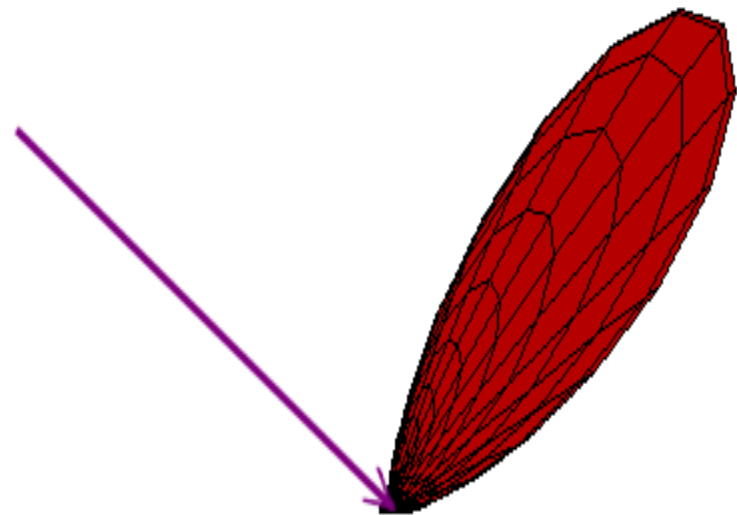
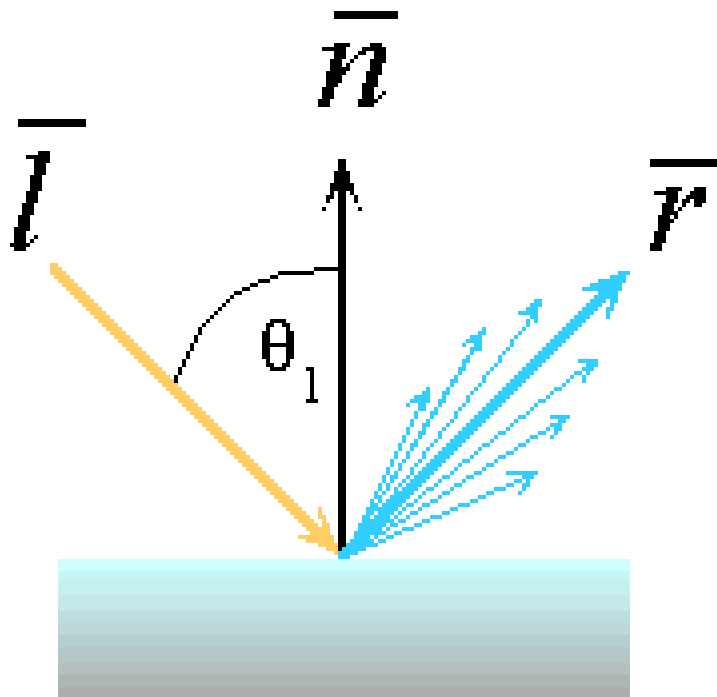
Diffuse + Specular +
ambient



Plus Specular Highlight

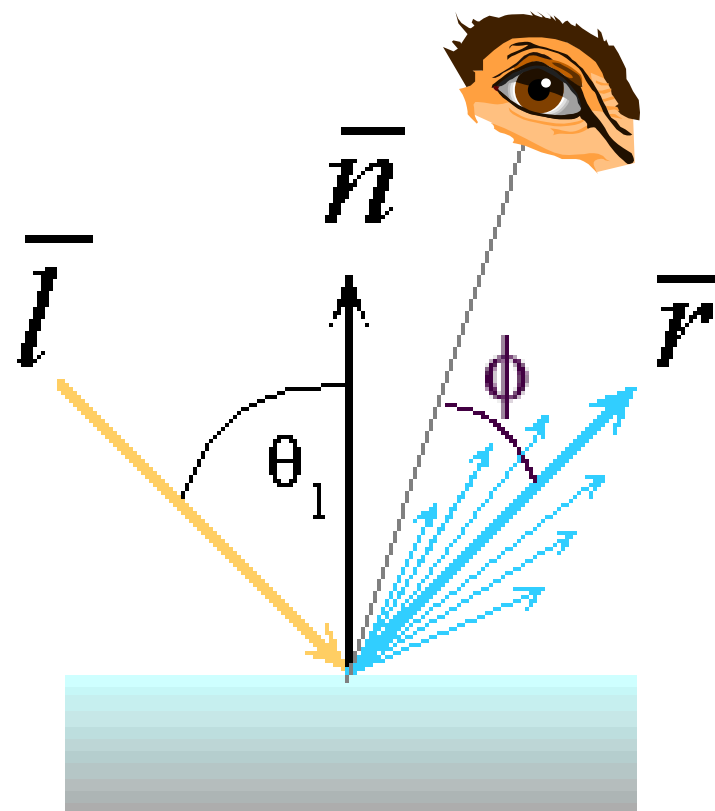
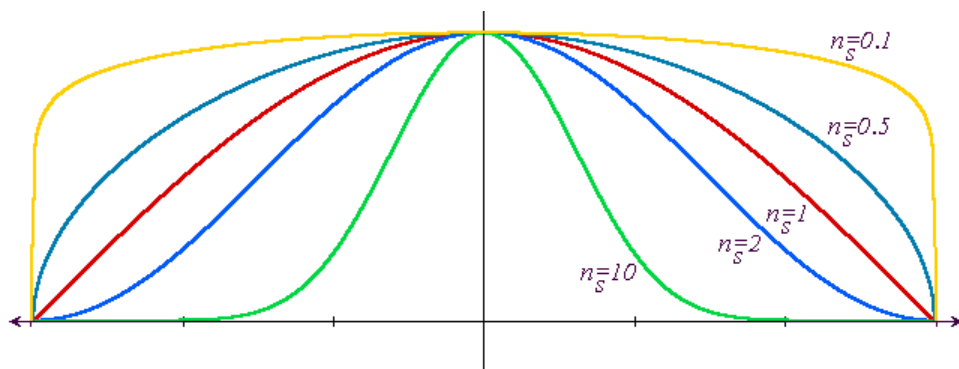


Odbicie połyskliwe



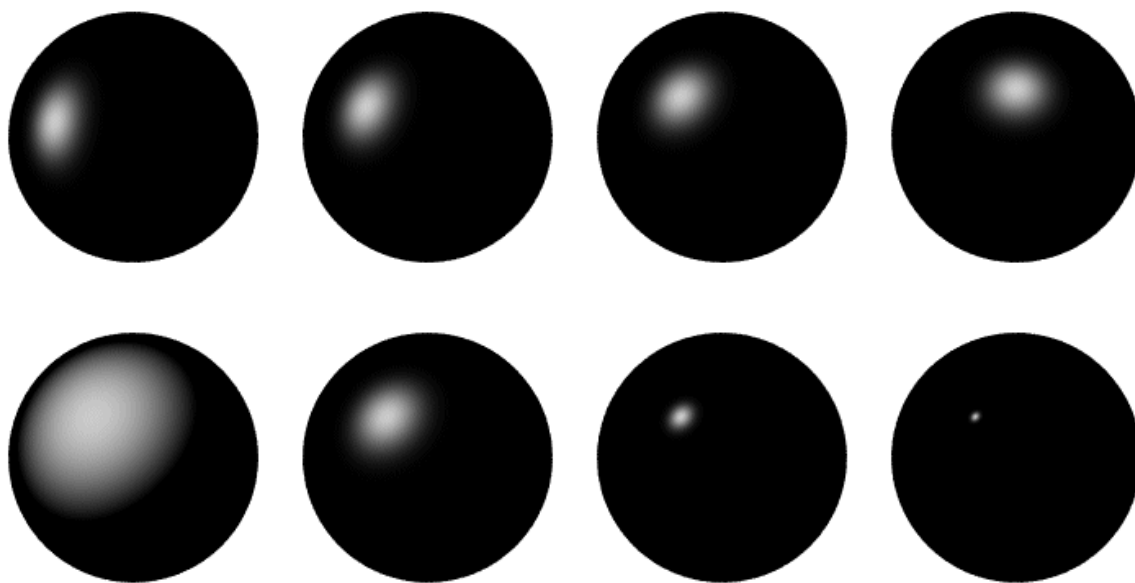
Odbicie połyskliwe – model Phong

$$I_{\text{specular}} = k_s I_{\text{light}} (\cos \phi)^{n_{\text{shiny}}}$$



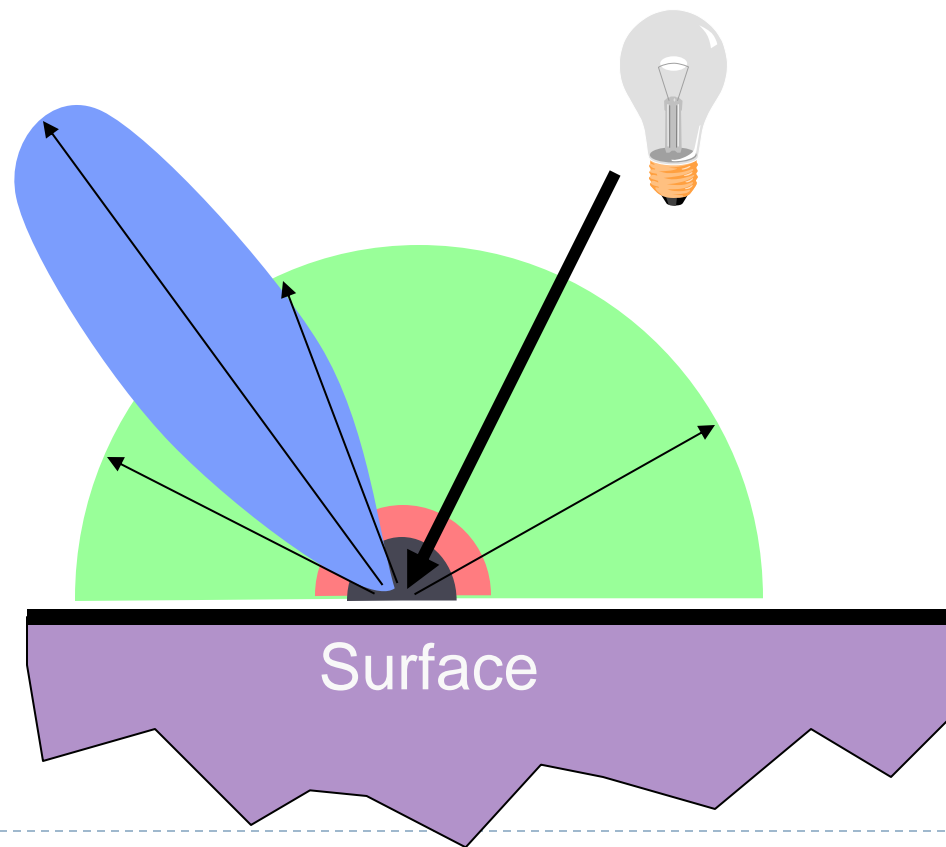
Przykłady Phong

- ▶ Zmieniające się kierunki padania światła i współczynniki połyskliwości.



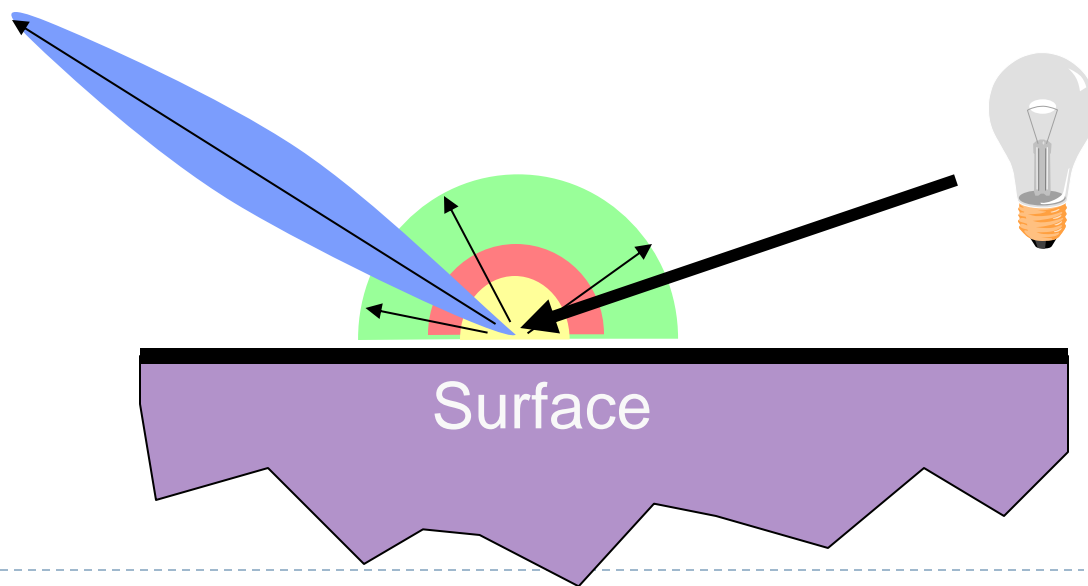
Połączenie wszystkich elementów

- ▶ diffuse reflection +
- ▶ specular reflection +
- ▶ emission +
- ▶ “ambient”

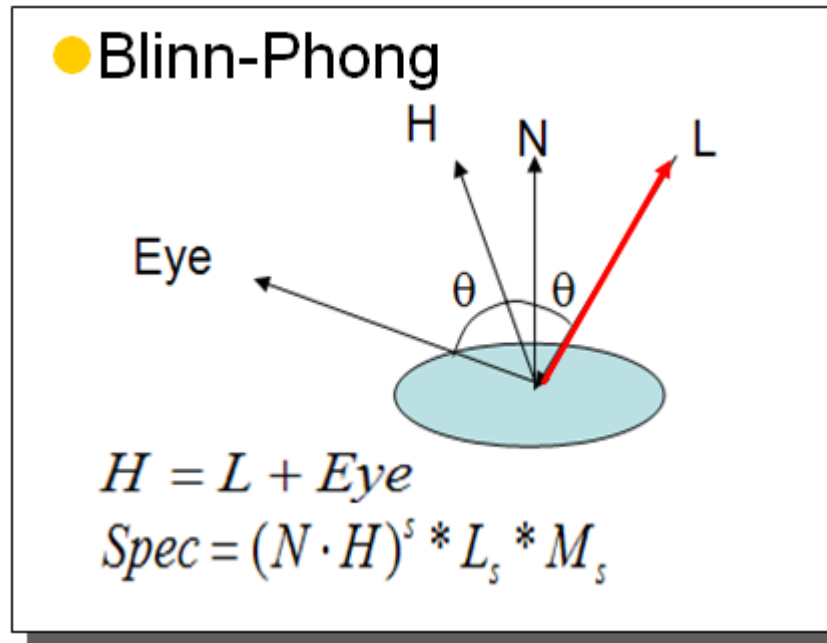


Połączenie wszystkich elementów

- ▶ diffuse reflection +
- ▶ specular reflection +
- ▶ emission +
- ▶ “ambient”



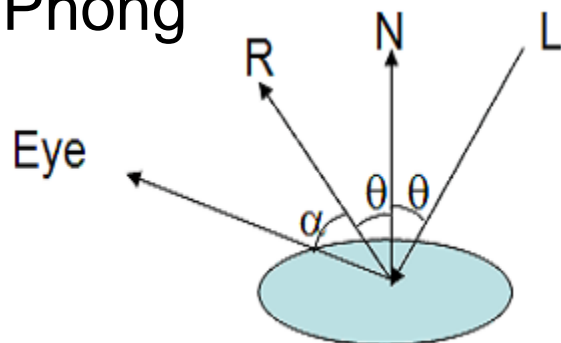
Model Blinna-Phonga



W modelu Blinna-Phonga nie wylicza się kierunku promienia odbitego, natomiast korzysta się z kierunku połowiącego kąt pomiędzy kierunkiem padającego światła i kierunkiem patrzenia obserwatora

Model Blinna-Phonga vs model Phong

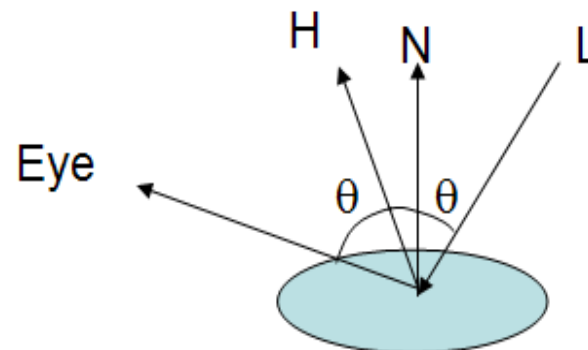
● Phong



$$R = 2N(L \cdot N) - L$$

$$Spec = (R \cdot Eye)^s * L_s * M_s$$

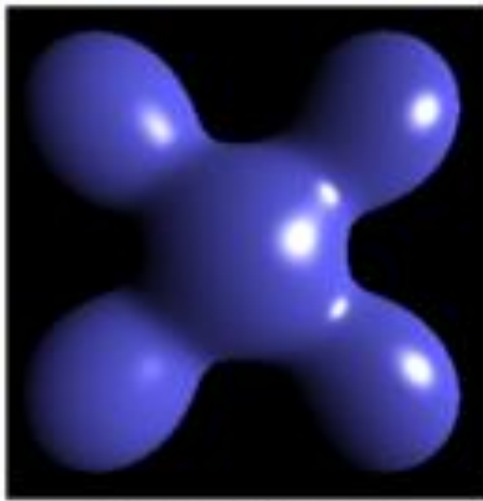
● Blinn-Phong



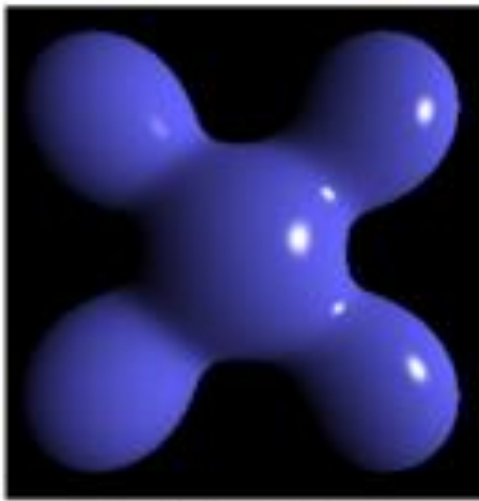
$$H = L + Eye$$

$$Spec = (N \cdot H)^s * L_s * M_s$$

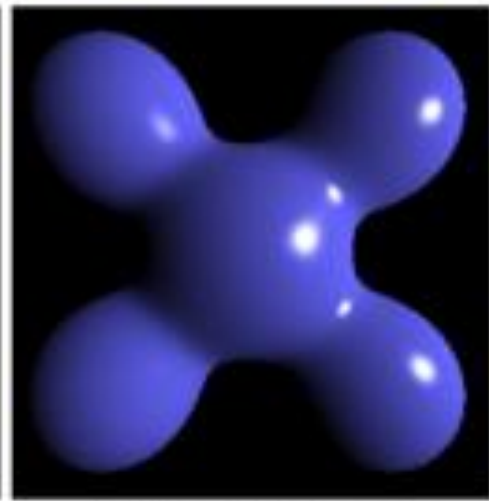
Model Blinna-Phonga vs model Phonga



Blinn-Phong



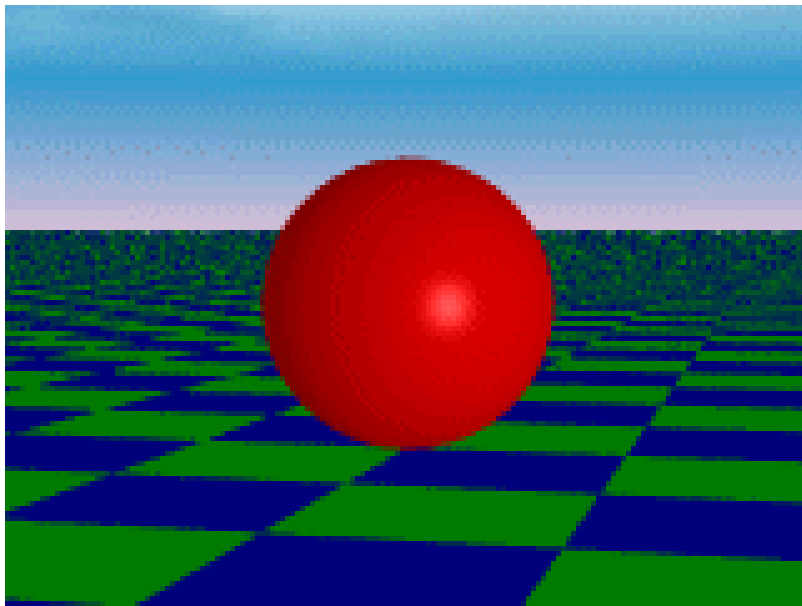
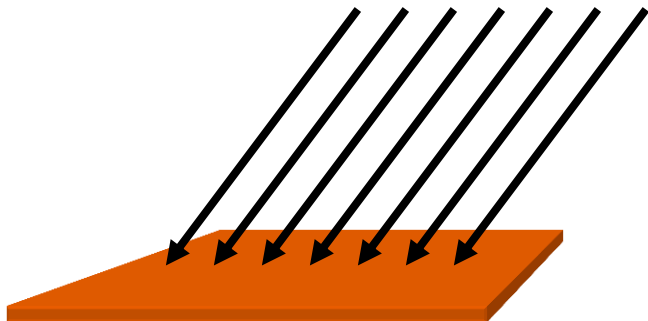
Phong



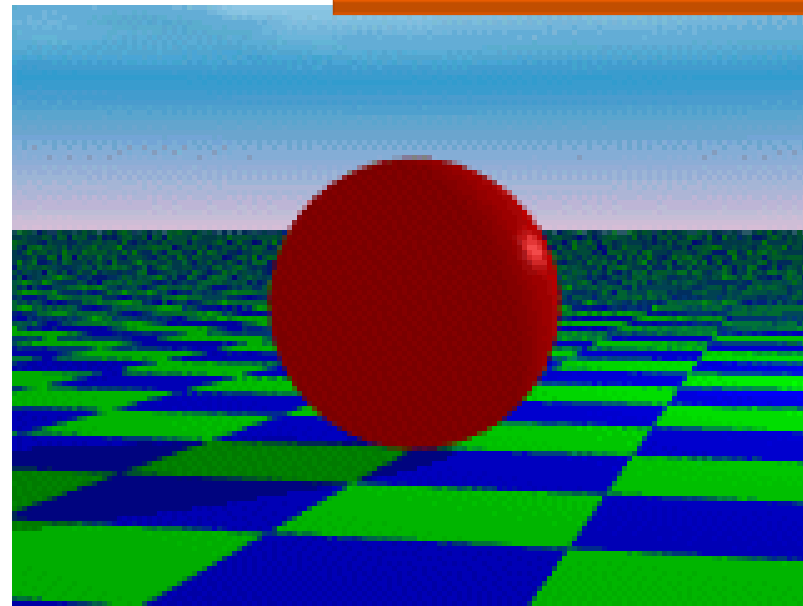
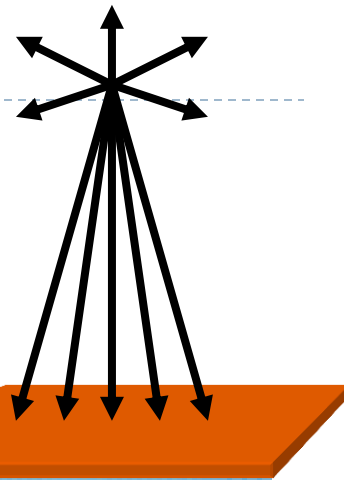
**Blinn-Phong
(Lower Exponent)**



Światło kierunkowe vs punktowe (directional light vs point light)



Directional + ambient



ambient + point



Światło punktowe – osłabienie natężenia z odległością

- współczynnik f_{att} wprowadza zależność od odległości od źródła światła

$$I_{diffuse} = k_d f_{att} I_{light} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})$$

- fizyka podpowiada:

$$f_{att} = 1/(d_{Light})^2$$

- dla ułatwienia sobie sterowania:

$$f_{att} = 1/(d_0 + \alpha d_{Light} + \beta d_{Light}^2)$$



Kompletna formuła modelu ADS z odbiciem połyskliwym Phong

$$I = k_{ambient} I_{ambient} + \frac{I_{diffused}}{d_0 + \alpha d + \beta d^2} \left[k_d (n \cdot l) + k_s (v \cdot r)^{n_{shiny}} \right]$$

Jeśli d jest duże – przyjmujemy $nl = const$

Jeśli obserwator daleko – przyjmujemy $vr = const$



Jedna z klasyfikacji modeli oświetlenia

- ▶ **Modele empiryczne:** zaniedbują fizyczne własności materiału, ale dzięki dobrze dobranym formułom odbicia światła mogą dać dobre rezultaty.
- ▶ Modele analityczne
- ▶ Modele hybrydowe

Interpolacja oświetlenia (cieniowanie, shading)

Problemy z tłumaczeniem pojęć: *shadowing* i *shading*.

Definicja:

***shading* jest określeniem metody determinującej jasność i barwę punktu na powierzchni.**

Polski termin, **cieniowanie**, niezbyt fortunny, ale trudno o lepszy.



Cieniowanie lokalne

- Mówimy o **modelu cieniowania lokalnego** gdy obiekty na scenie traktowane są lokalnie, to znaczy jeden obiekt nie uwzględnia pozostałych, zwłaszcza w aspekcie wzajemnych odbić światła.
- Stosujemy je, gdyż są szybkie i proste w obliczeniach. Nie dają jednak wrażenia pełnego realizmu sceny.
- Modele lokalne nie wymagają wiedzy o całej scenie, a jedynie o bieżącym fragmencie powierzchni.



Podstawowe modele cieniowania lokalnego

Cieniowanie stałą wartością (*flat shading*)

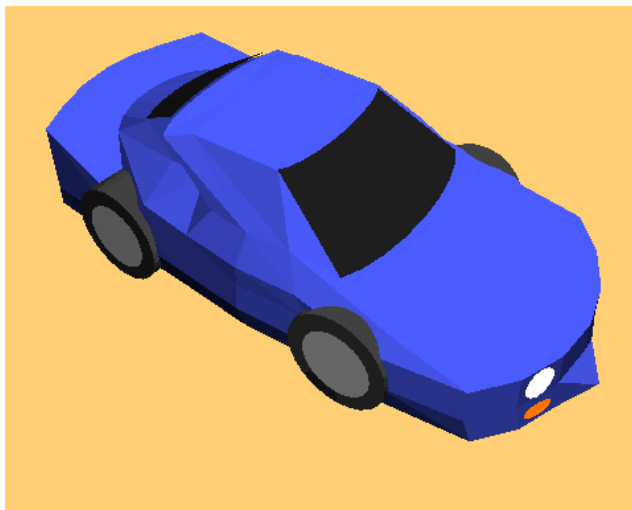
Cieniowanie z interpolacją jasności i barwy
(*Gouraud shading*)

Cieniowanie z interpolacją wektora
normalnego (*Phong interpolation*)



Cieniowanie stałą wartością

Każdy wielokąt oświetlony jest ze stałą intensywnością i barwą na całej swojej powierzchni.



Cieniowanie stałą wartością

Kiedy jest uzasadnione?

1. Gdy rysowane wielokąty przedstawiają rzeczywistą powierzchnię obiektu (np. wielościanu), a nie są aproksymacją powierzchni krzywoliniowej.
2. Gdy źródło światła jest w nieskończoności; wtedy $N \cdot L$ można przyjąć za stałe dla całej powierzchni wielokąta.
3. Gdy obserwator jest w nieskończoności; wtedy $N \cdot V$ można przyjąć za stałe dla całej powierzchni wielokąta.



Interpolacja Gourauda

Dygresja.

Przeciwnym podejściem w stosunku do ustalania stałej barwy/jasności dla całego wielokąta jest wyliczanie oświetlenia dla każdego punktu oddzielnie. Jest to jednak kosztowne obliczeniowo i niejasne – co to znaczy „każdy punkt”

Rozwiązanie pośrednie: liniowa interpolacja jasności i barwy.

Pionierskie prace z tego zakresu:

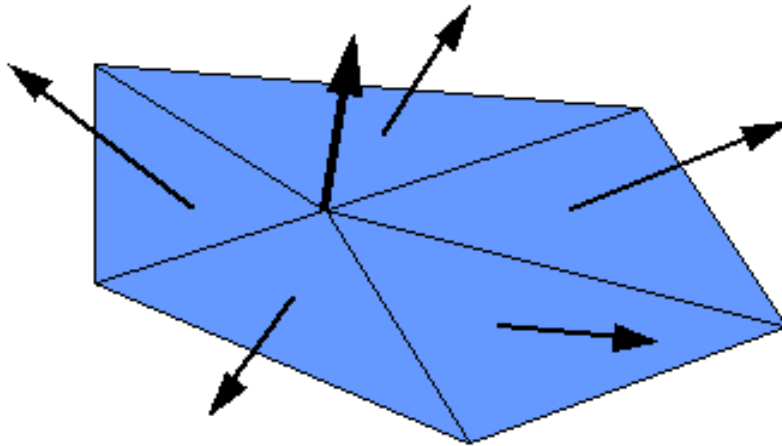
Wylie, Romney, Evans, Erdahl: „Halftone Perspective Drawings by Computer”, FJCC 67, Thompson Books, Washington DC, 1967, 49-58.

Gouraud, H. „Continuous Shading of Curved Surfaces”, *IEEE Trans. On Computers*, C-20(6), June 1971, 623-629.

Interpolacja Gourauda

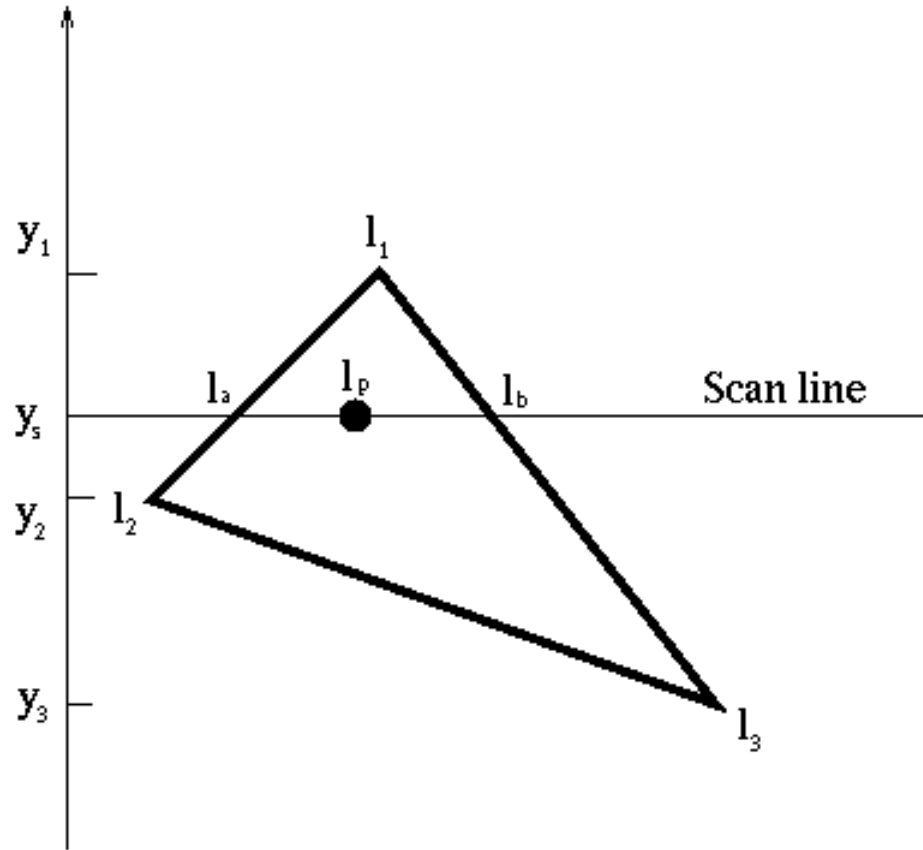
Interpolacja jasności/barwy odbywa się na podstawie wartości wyznaczonych w wierzchołkach wielokątów.

Musimy więc znać wartości normalnych w tych wierzchołkach.
Jak je policzyć?



$$\vec{N}_v = \frac{\sum_{1 \leq i \leq n} \vec{N}_i}{|\sum_{1 \leq i \leq n} \vec{N}_i|}$$

Interpolacja Gourauda

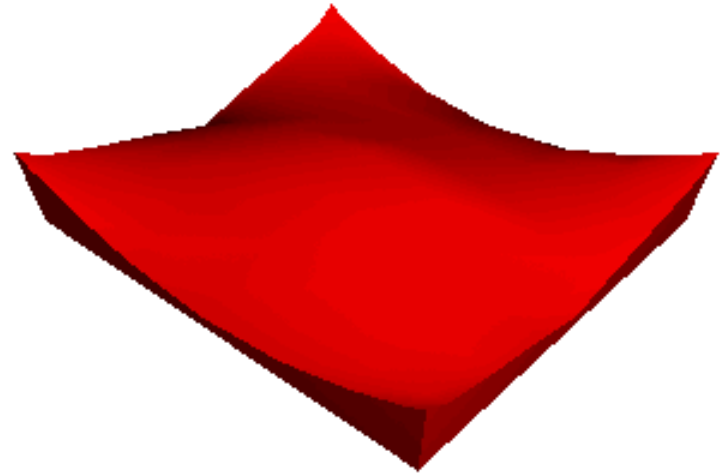


$$I_a = I_1 - (I_1 - I_2) \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_2}$$

$$I_b = I_1 - (I_1 - I_3) \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_3}$$

$$I_p = I_b - (I_b - I_a) \frac{x_b - x_p}{x_b - x_a}$$

Interpolacja Gourauda - efekty



Inerpolacja Gourauda

– zalety i wady

Zalety:

- Stosunkowo szybkie obliczenia
- Skuteczne wygładzanie krawędzi

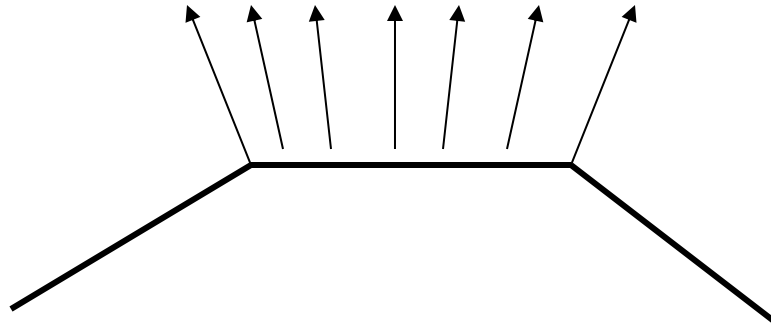
Wady:

- Krawędzie wygładzane są również tam, gdzie jest to niepożądane
- Metoda zasadniczo nie oblicza odbłasków, a jeśli wprowadza się je w sposób sztuczny, to są one rozmazane (kredowe, *chalky*)



Interpolacja Phong

To nie to samo co model odbicia połyskliwego Phong!



Opiera się na interpolacji normalnych sąsiadujących wielokątów.

Bui-Tuong Phong: „Illumination for Computer Generated Pictures”, *CACM* 18(6), June 1975, 311-317.

Interpolacja Phong

Zalety:

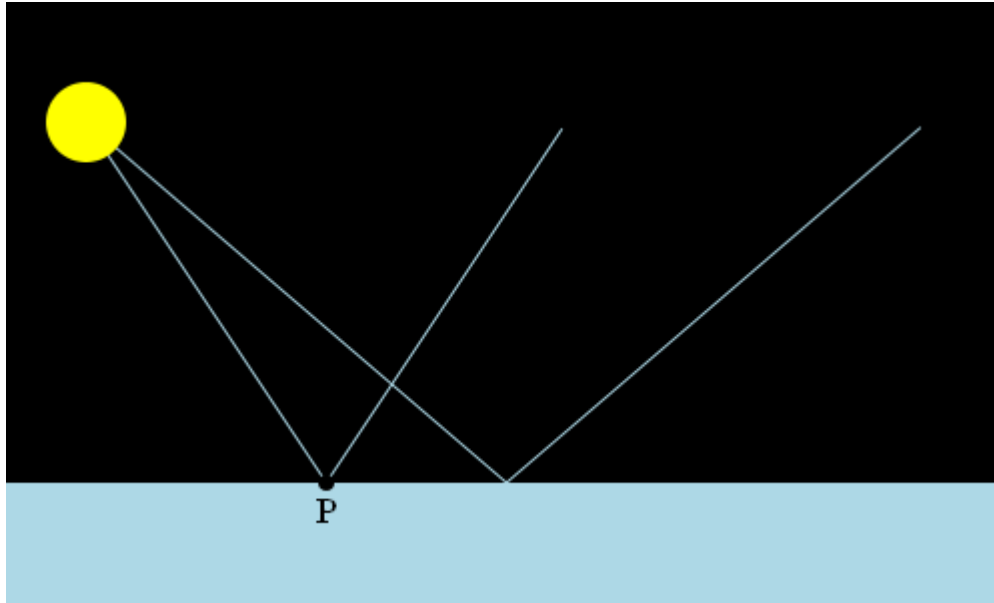
- Cieniowanie wysokiej jakości z ostrymi odblaskami

Wady:

- Metoda kosztowna obliczeniowo
- Jest to jednak metoda przybliżona, co w niektórych przypadkach jest widoczne



Kolejny model: microfacets (model Cooka-Torrance'a)



W idealnej sytuacji odbicie od powierzchni może wyglądać jak powyżej i wtedy model Phong'a może być wystarczający.

Microfacets

W praktyce zawsze mamy do czynienia z powierzchniami o pewnym stopniu nierówności:



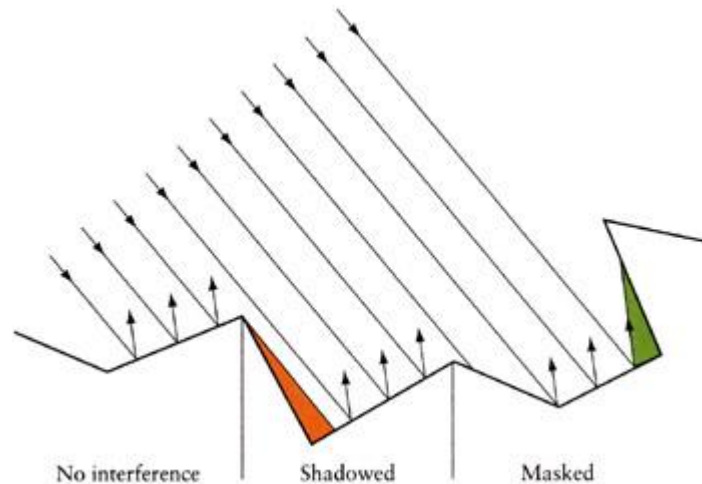
Model oparty na fasetkach

- ▶ Nierówność powierzchni reprezentowana jest przez elementy większe niż długość fali świetlnej.
- ▶ Geometria powierzchni jest zbudowana z elementów v-kształtnych (fasetek).
- ▶ Fasetki są zorientowane losowa.
- ▶ Każda fasetka odbija światło lustrzanie..

Model oparty na fasetkach

▶ Trzy przypadki odbicia światła

- ▶ Odbicie idealne
- ▶ Odbicie osłabione przez cień wynikający z geometrii
- ▶ Zablokowanie części odbicia, wynikające z geometrii



- ▶ Możliwe różne rozkłady fasetek: Gaussa (model Blinna) lub Beckmanna (model Cooka-Torrance'a). Nie wchodzimy jednak w szczegóły rozkładów.