

Grafika komputerowa – obrazowanie fotorealistyczne

Dr inż. Piotr Gronek

Wykład dla Studium Podyplomowego
„Informatyka w Szkole”

Rendering

Rendering – proces przekształcania opisanej sceny, uzyskanej w wyniku modelowania, w obraz.

Parametrami wejściowymi do procesu renderingu są:

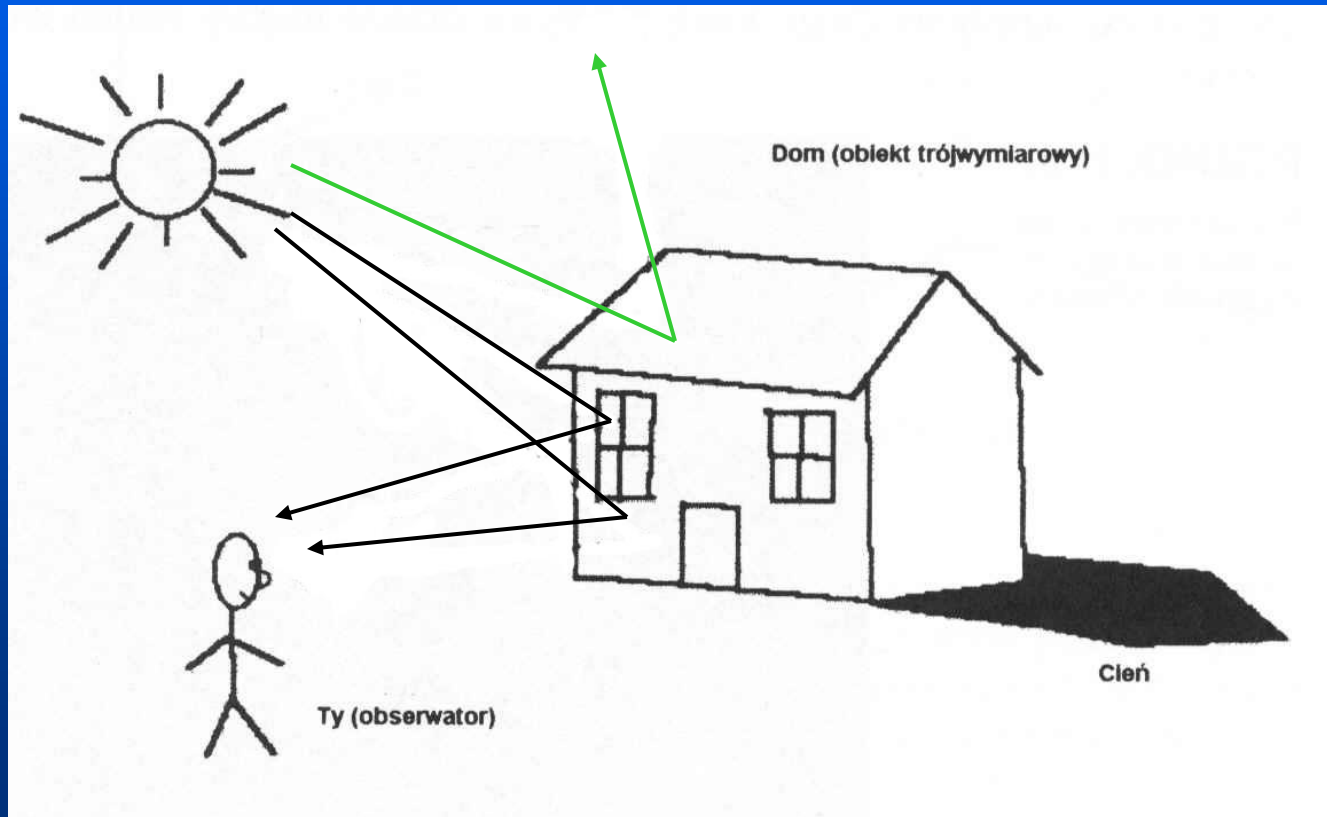
- opis sceny,
- lokalizacja punktu obserwacji,
- rozdzielczość docelowa (z jaką obraz ma zostać wygenerowany),
- parametry metody renderingu.

Metoda śledzenia promieni (*raytracing*)

- Opracowana przez T. Whitted'a w roku 1980.
- Analizowane są tylko te promienie, które docierają do oka przez piksele powierzchni obrazu.
- Metoda śledzenia promieni działa w kierunku przeciwnym do rzeczywistego kierunku biegu promieni. Oznacza to, że program śledzi światło zaczynając od poszczególnych piksli, badając drogę promienia odpowiadającego danemu punktowi powierzchni przez całą scenę aż do momentu, gdy promień osiągnie źródło światła.

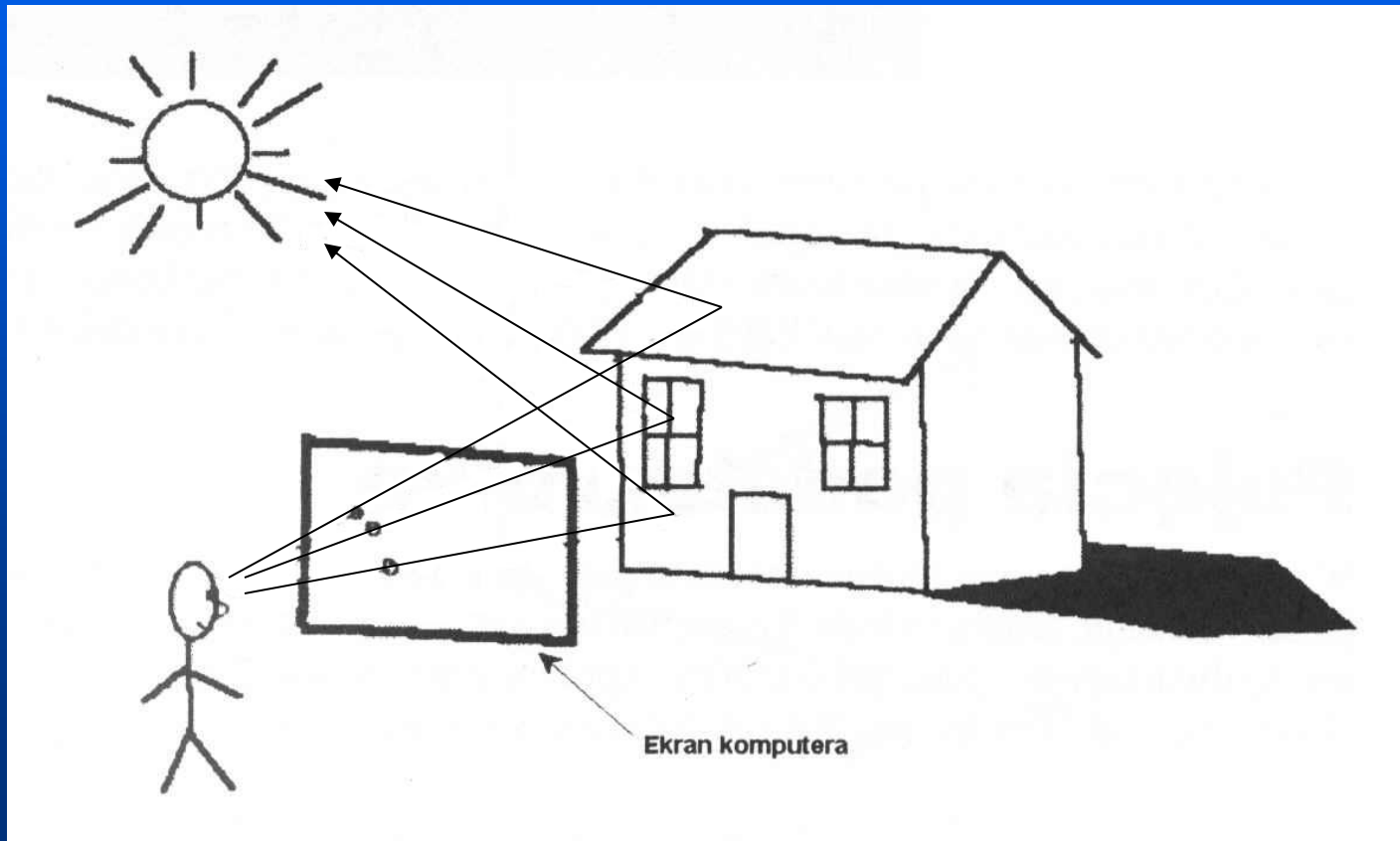
Metoda śledzenia promieni

- Podstawowa scena obejmująca źródło światła, obiekt trójwymiarowy i obserwatora.
- Bieg promieni obserwowany w rzeczywistości.



Metoda śledzenia promieni

- Modelowanie sceny z użyciem śledzenia promieni.
- Bieg promieni występujący w klasycznej metodzie śledzenia promieni.



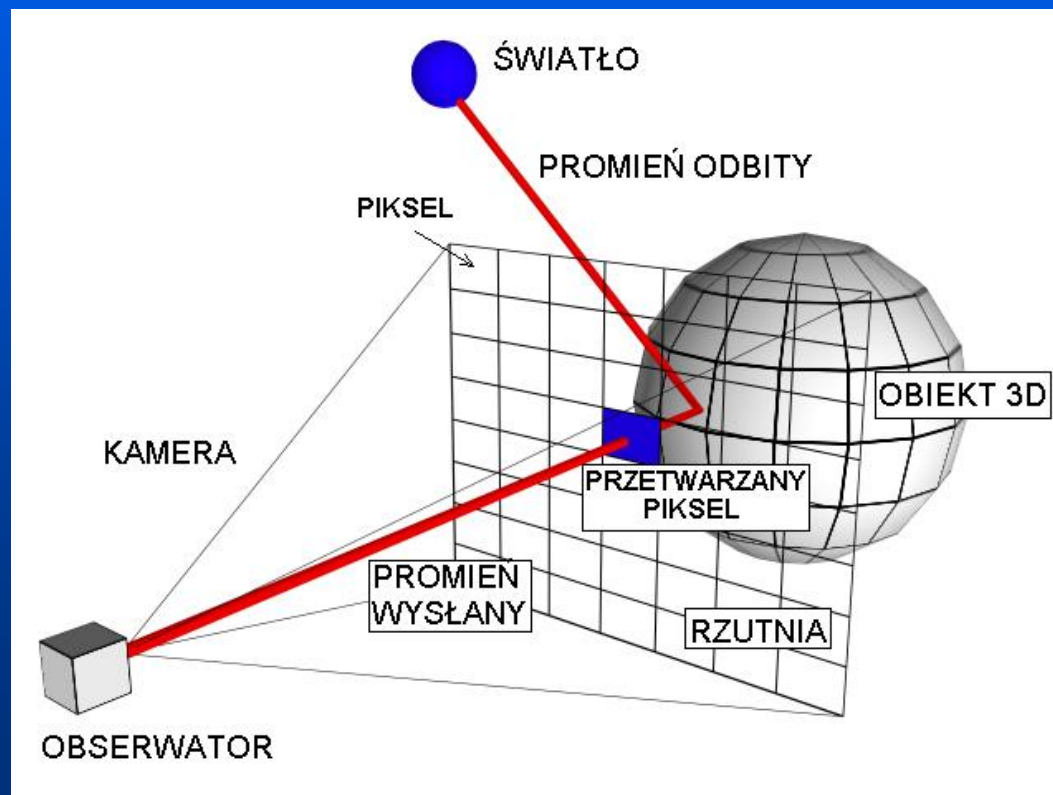
Metoda śledzenia promieni

Podstawowe elementy występujące w metodzie śledzenia promieni:

- trójwymiarowy układ współrzędnych,
- punkt obserwacji,
- geometria trójwymiarowa,
- źródła światła,
- właściwości powierzchni (tekstury).

Metoda śledzenia promieni

- W punkcie kolizji promienia z obiektem obliczana jest wartość oświetlenia przez źródło światła.



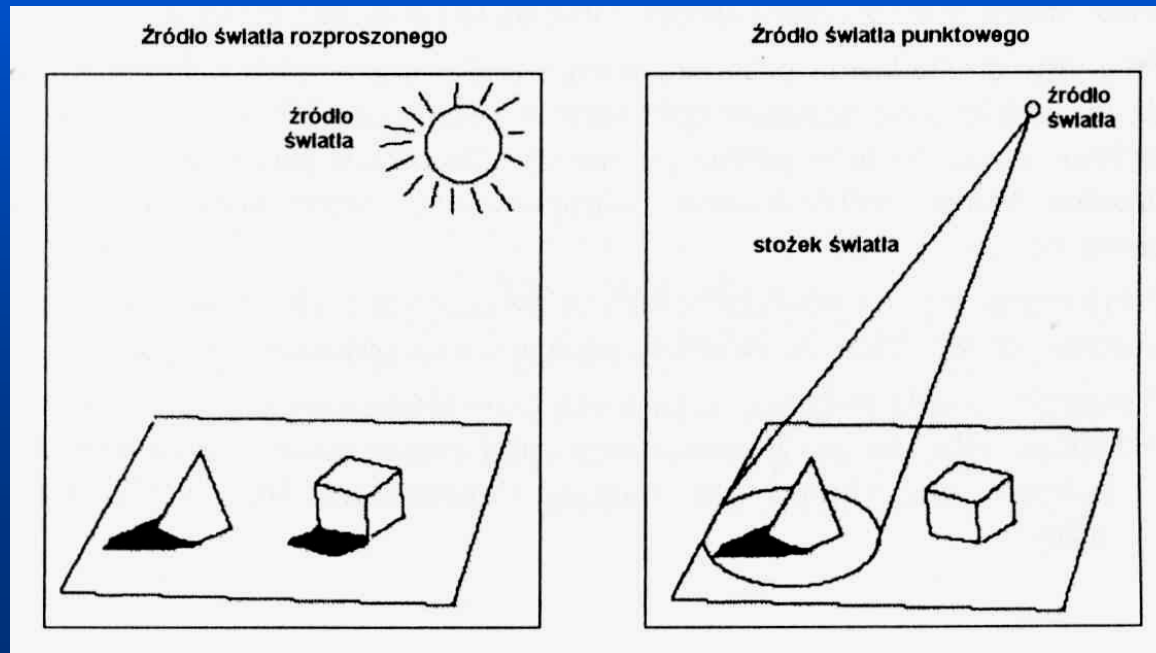
Metoda śledzenia promieni

- Trójwymiarowy kartezjański układ współrzędnych złożony jest z osi opisanych jako X , Y i Z (najczęściej stosowany jest układ lewoskrętny).
- Punkt obserwacji definiuje położenie obserwatora, kierunek obserwacji oraz punkt, który jest widziany.
- Geometria trójwymiarowa to zbiór zdefiniowanych obiektów trójwymiarowych, zwanych podstawami (ang. *primitives*). Zbiór taki obejmuje zazwyczaj kule, stożki, elipsoidy, torusy, walce i inne. Z takich brył podstawowych można stworzyć dowolne obiekty.

Metoda śledzenia promieni

- *Źródła światła:*

- otaczające (słońce, żarówka) – światło rozchodzi się we wszystkich kierunkach,
- skierowane – promienie światła występują jedynie w obrębie stożka.



Metoda śledzenia promieni

Właściwości powierzchni

- Tworząc obiekty trójwymiarowe, oprócz możliwie jak najlepszego odtworzenia kształtów geometrycznych, należy zadbać także o zasymulowanie powierzchni, która ma odpowiadać powierzchni rzeczywistego przedmiotu.
- Większość programów do śledzenia promieni daje możliwość doboru jednej ze zdefiniowanych właściwości powierzchni, zwanych *teksturami*. Przykładami tekstur mogą być szachownica, marmur, drewno, złoto, miedź, lustro i szkło.

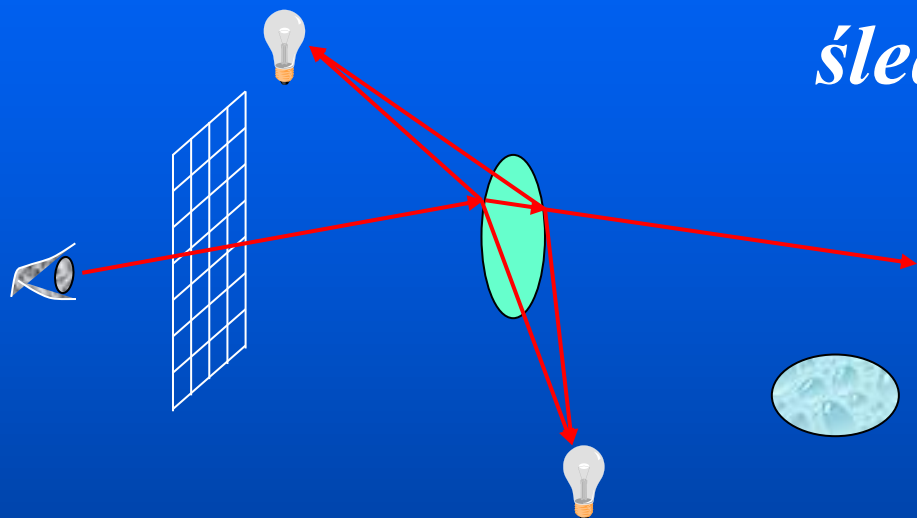
Metoda śledzenia promieni

Rekurencyjne śledzenie promieni

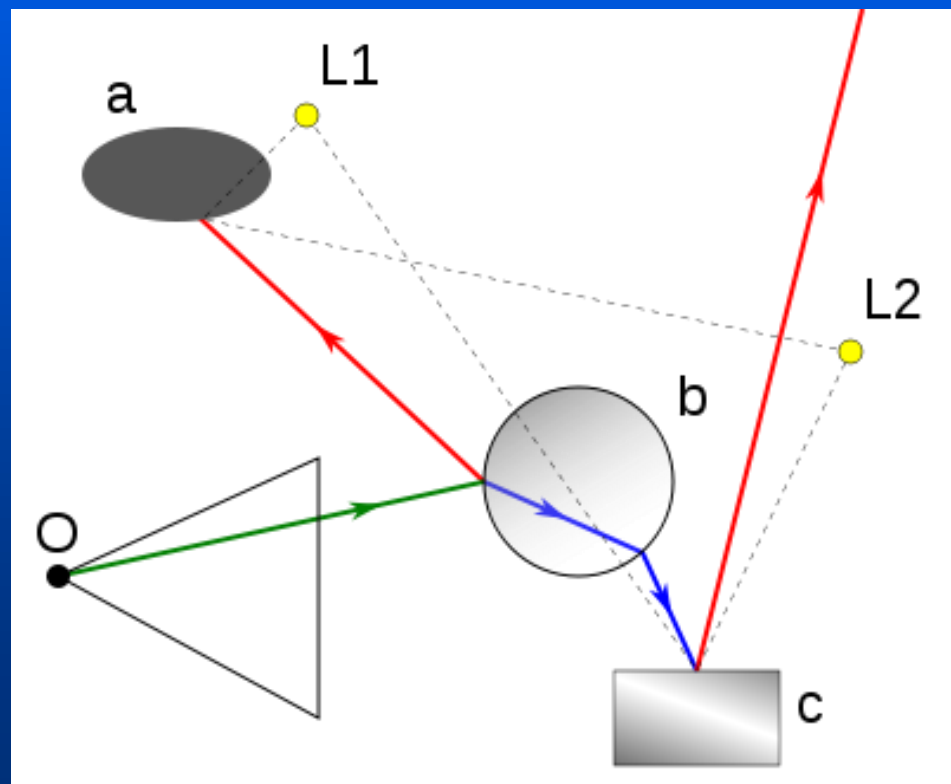
- Stosowane jest w celu wyznaczenia cieni, odbić i załamania.
- Z miejsc, gdzie promień pierwotny (promień wychodzący z oka) oraz promienie odbite i załamane przecinają się z powierzchnią obiektu, wysyłane zostają kolejne promienie (tzw. promienie wtórne) w kierunku źródeł światła.
- Algorytm uważa się za zakończony, gdy promienie odbite i załamane nie przecinają obiektu i osiągnięta zostaje określona maksymalna głębokość analizy.
- Promienie odbite i załamane można przedstawić za pomocą tzw. drzewa promieni.

Metoda śledzenia promieni

Rekurencyjne śledzenie promieni

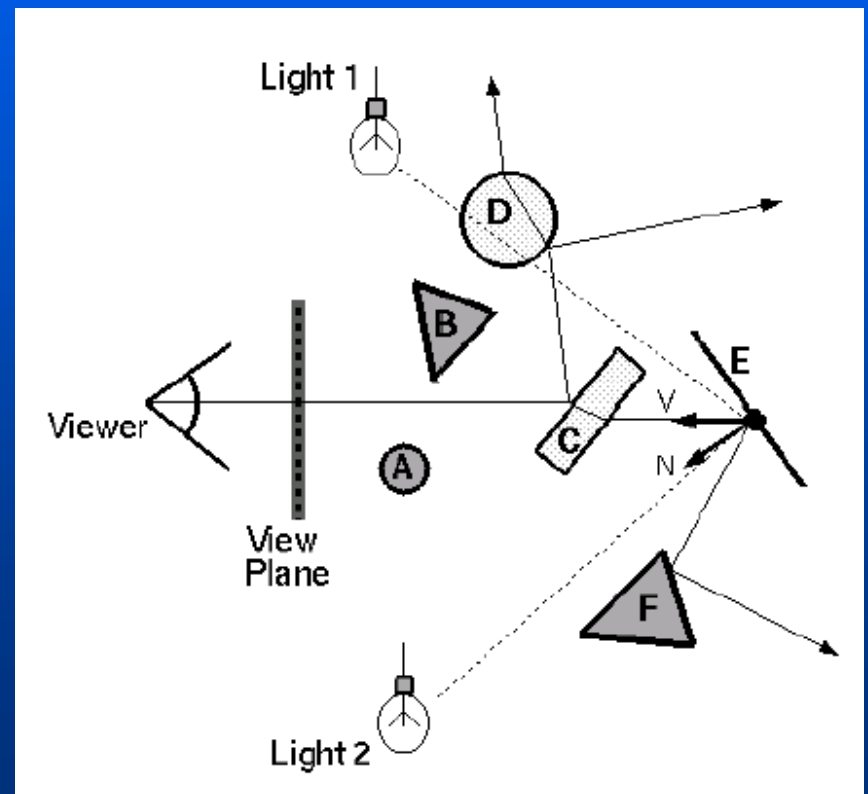
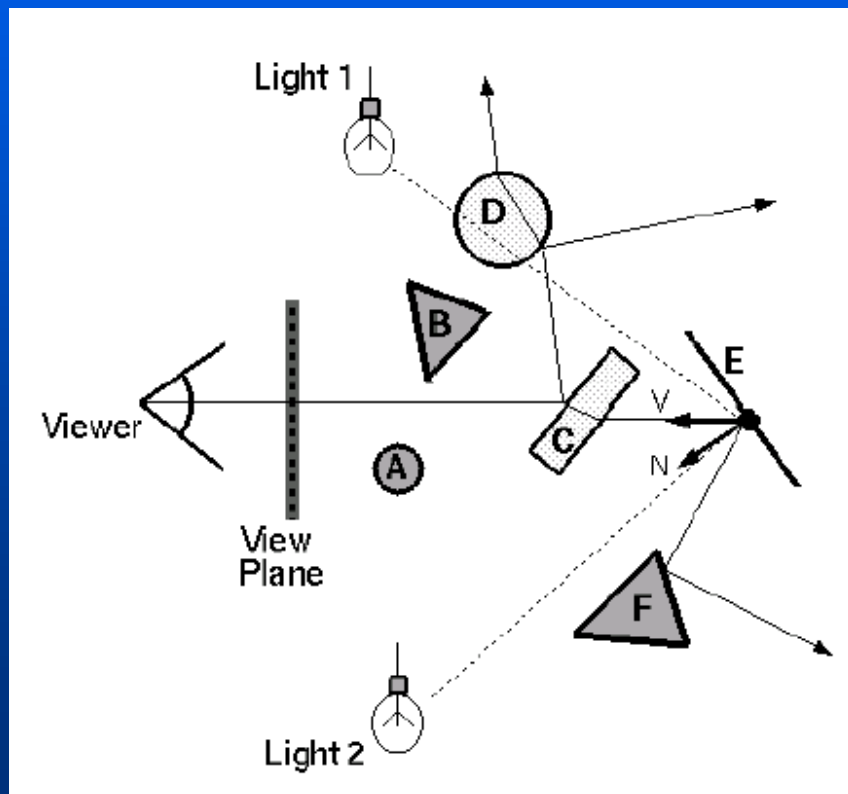


- Metoda rekurencyjna uwzględnia odbicia i załamania promieni na powierzchniach obiektów



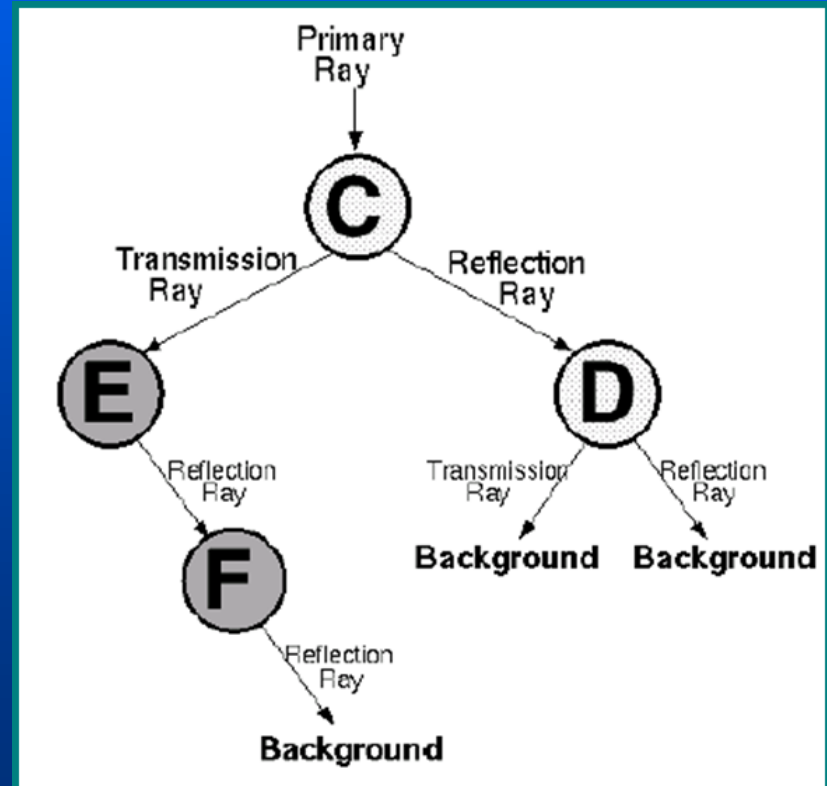
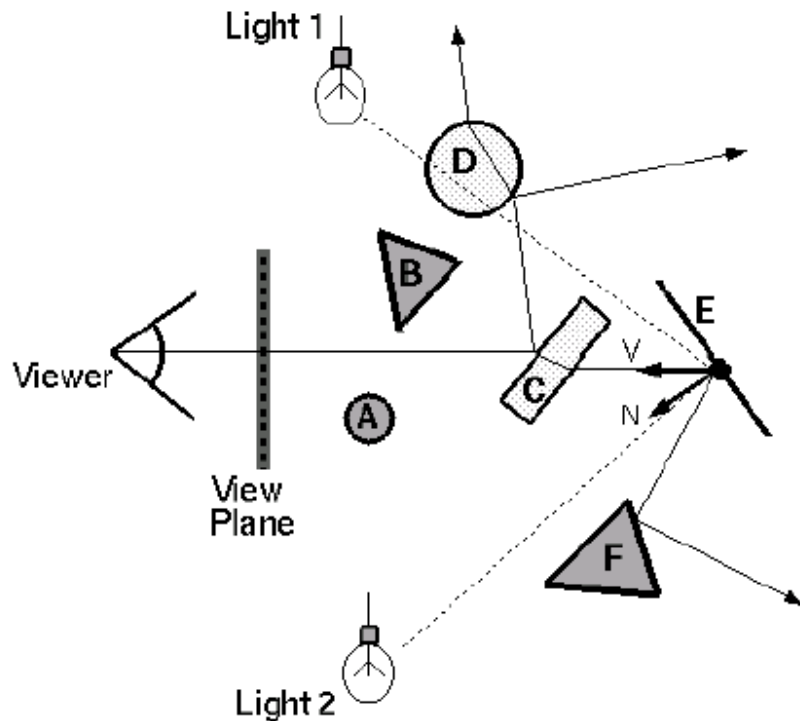
Algorytm śledzenia promieni

- Promień podstawowy
 - prowadzony do punktu przecięcia z powierzchnią najbliższego obiektu
- Promień wtórny
 - odbity od powierzchni
 - załamany dla obiektu przezroczystego



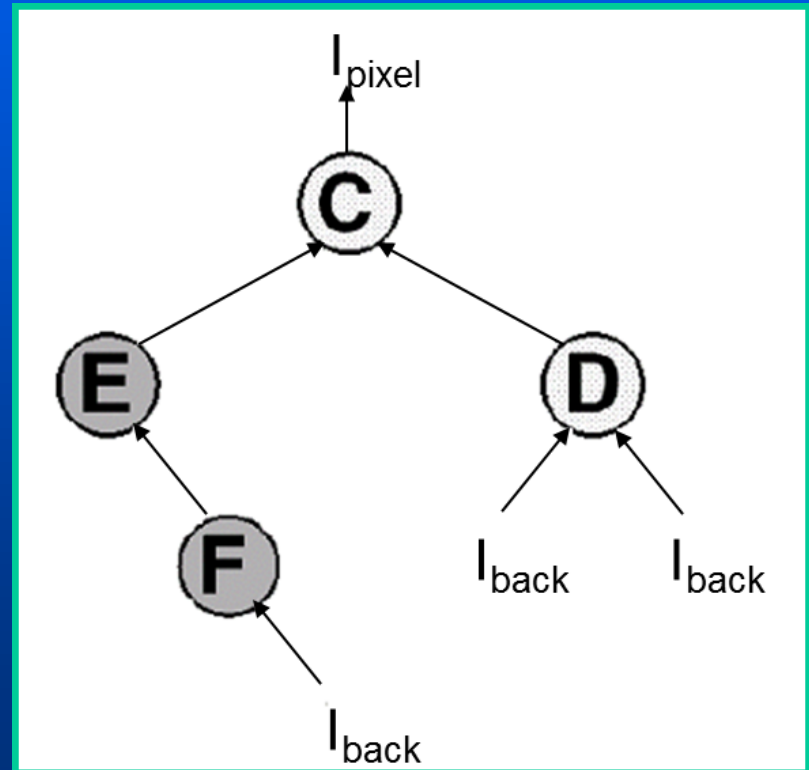
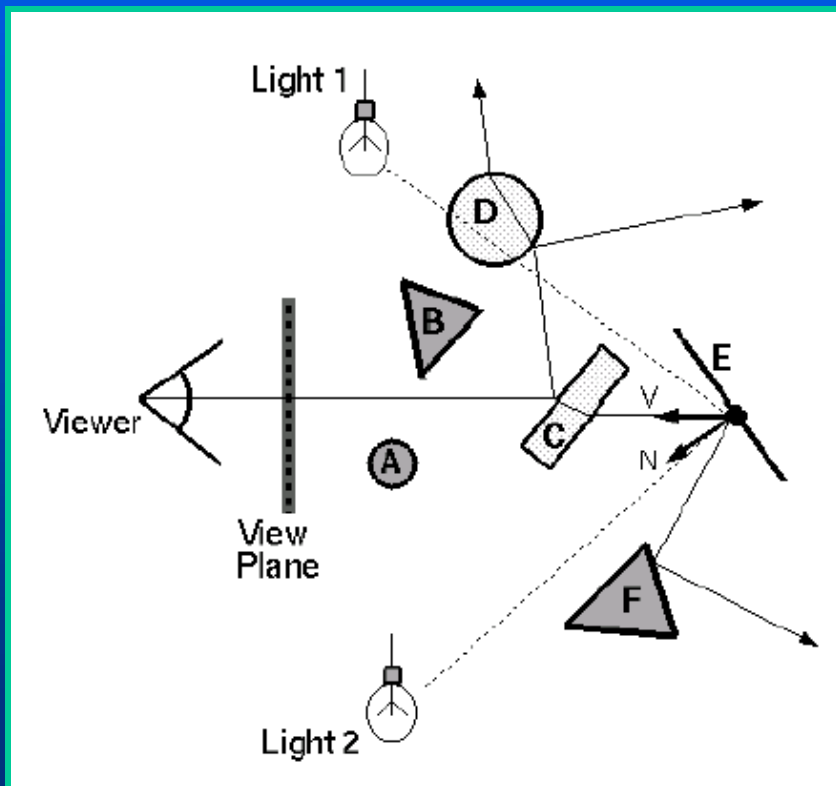
Budowa drzewa promieni

- Model sceny
 - rozwidlenia promieni
 - limit liczby odbić lub trafienie w źródło światła
- Drzewo promieni
 - charakter rozwidleń
 - ustalenie intensywności oświetlenia od tła / źródła



Intensywność pikseli

- Suma natężeń oświetlenia w korzeniu drzewa.
- W razie braku przecięcia (limit odległości) wkład od intensywności tła.



Metoda śledzenia promieni

Zniekształcenia intermodulacyjne

- Metoda śledzenia promieni jest procesem próbkowania.
- Gęstość próbkowania (odległość między sąsiednimi próbkami) określa maksymalną częstotliwość próbkowania obrazu - częstotliwość Nyquista.
- Przekroczenie częstotliwości Nyquista powoduje powstanie zniekształceń intermodulacyjnych.
- Eliminacja zniekształceń intermodulacyjnych poprzez zastosowanie próbkowania stochastycznego metodą Monte Carlo (Cook, 1984).

Metoda śledzenia promieni

Metody przyspieszania obliczeń polegają na:

- redukcji średniego kosztu wyznaczania punktu przecięcia promienia z obiektami sceny,
- jednoczesnym śledzeniu wiązek promieni, (odpowiadających na ekranie obszarowi o skończonej powierzchni).

Równanie renderingu (J. Kajiya, 1986)

$$I(x, x') = g(x, x') \left[\varepsilon(x, x') + \int_S \rho(x, x', x'') I(x', x'') dx'' \right]$$

x, x', x'' - punkty w otoczeniu

$I(x, x')$ - natężenie światła w punkcie x pochodzącego od punktu x'

$g(x, x') = 1/r^2$, gdy punkty x i x' są wzajemnie widoczne

$g(x, x') = 0$, gdy punkty x i x' się nie widzą

$\varepsilon(x, x')$ - natężenie światła emitowanego od x' do x

$\rho(x, x', x'')$ - jest związane z natężeniem światła odbitego od x'' do x

Metoda energetyczna (*radiosity*)

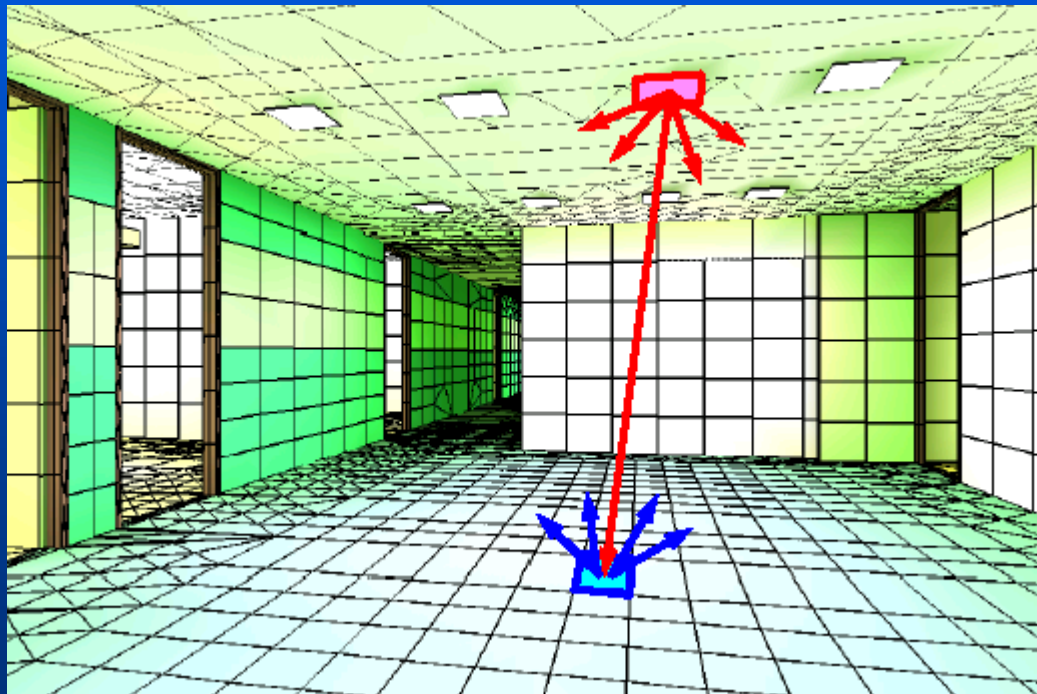
- Opracowana na Uniwersytecie Cornell w 1984 roku na podstawie teorii transportu promieniowania cieplnego stosowanej w termodynamice.
- Wykorzystuje model fizyczny globalnego oświetlenia i odbicia rozproszonego.
- Celem jest symulacja rozproszonych odbić i cieni.
- Założeniem jest, że wszystkie powierzchnie są idealnie rozpraszające i traktowane są jako źródła światła o niezerowej powierzchni.
- Nie zależna od położenia punktu obserwacji.

Metoda energetyczna

- Metoda energetyczna dyskretyzuje otoczenie i tworzy dane niezależnie od parametrów obserwatora.
Dzięki temu możliwe jest szybkie przygotowanie różnych perspektyw sceny.
- Nie uwzględnia odbić zwierciadlanych, załamania światła.
- Geometria otoczenia jest dyskretyzowana w skończone obszary, a źródła światła są widoczne.
- Po wyznaczeniu rozkładu oświetlenia konieczne jest przeprowadzenie takich procesów, jak np. usuwanie niewidocznych powierzchni, generowanie obrazu.

Metoda energetyczna

- Idea działania algorytmu metody energetycznej – każdy wielokąt stanowi źródło światła



Metoda energetyczna

Podstawowy proces wyznaczania rozkładu oświetlenia metodą energetyczną odbywa się w trzech kolejnych fazach:

- modelowanie,
- dyskretyzacja otoczenia,
- wyznaczanie współczynników sprzężenia powierzchni i dystrybucja energii świetlnej, aż do uzyskania jej równowagi w otoczeniu.

Metoda energetyczna

Modelowanie i dyskretyzacja otoczenia

- Scena, w której badany jest rozkład oświetlenia, jest dzielona na małe elementy składowe, czyli pola.
- Każde pole może być powierzchnią świecącą lub odbijającą światło.
- Dla każdego pola należy zdefiniować położenie, kształt, współczynnik odbicia ρ_i i natężenie oświetlenia emitowanego przez powierzchnię W_i .

Metoda energetyczna

Dla elementarnej powierzchni i natężenie oświetlenia można wyznaczyć z zależności:

$$E_i = W_i + \rho_i \sum_{j=1}^n E_j F_{ij} \frac{A_j}{A_i}$$

w której:

E_i, E_j – natężenia oświetlenia powierzchni i oraz j ,

W_i – natężenie oświetlenia emitowanego przez powierzchnię i ,

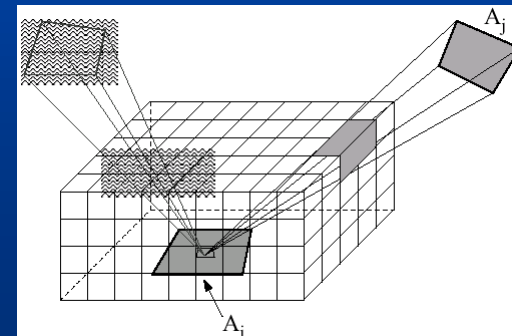
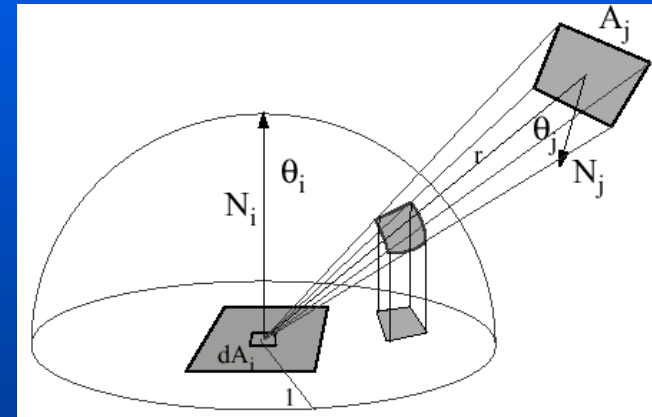
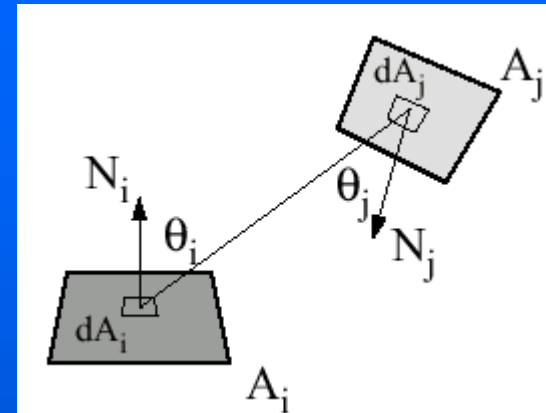
ρ_i – współczynnik odbicia powierzchni i ,

F_{ij} – współczynnik sprzężenia optycznego powierzchni j oraz i ,
uwzględniający kształt i relatywną orientację powierzchni,

A_i, A_j – rozmiary powierzchni i oraz j .

Współczynniki sprzężenia

- *Form factor* F_{ij} – część energii emitowana z elementu j docierająca do elementu i
- Projekcja na półsferę jednostkową i zrzutowanie na podstawę
- Dzielenie przez pole podstawy półsfery
- Projekcja sceny na półsześcian



Podsumowanie

Śledzenie promieni

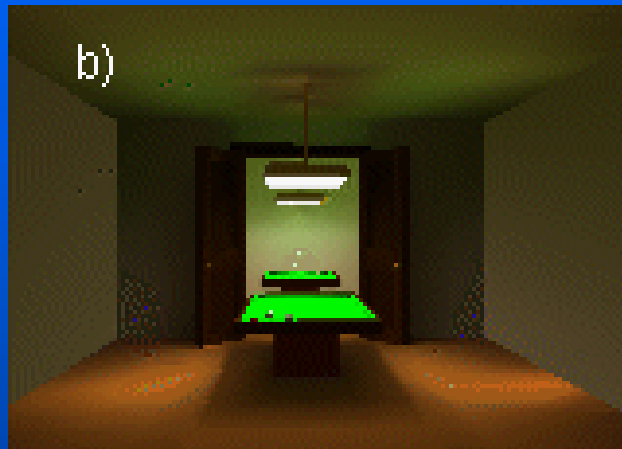
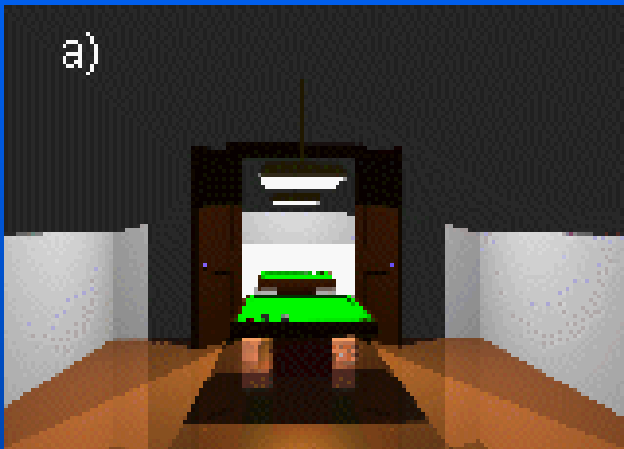
- algorytm zależny od położenia obserwatora
- algorytm zapewnia wyznaczanie powierzchni widocznych i cieniowanie
- algorytm szybszy z uwagi na mniej skomplikowane operacje
- obraz otrzymany za pomocą tego algorytmu jest mniej realistyczny
- geometria otoczenia jest dyskretyzowana w skończone obszary zwane pikselami

Metoda energetyczna

- algorytm niezależny od położenia obserwatora
- wymaga dodatkowej operacji wyznaczania powierzchni widocznych i cieniowania
- wolniejszy algorytm z uwagi na bardziej skomplikowane operacje
- obraz uzyskany tą metodą jest bardziej realistyczny
- geometria otoczenia jest dyskretyzowana w skończone obszary zwane polami

Podsumowanie

Ten sam obraz uzyskany różnymi metodami



a) metoda śledzenia promieni (*raytracing*)

b) metoda energetyczna (*radiosity*)

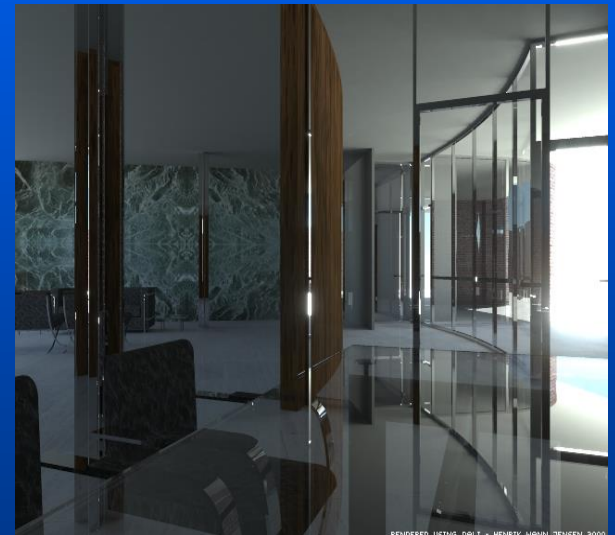
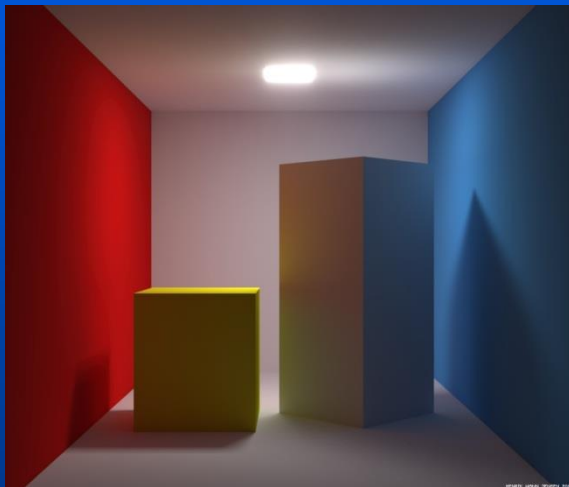
c) połączenie obu metod

Oświetlenie

- Jeśli chcemy tworzyć realistyczne obrazy musimy symulować oświetlenie powierzchni znajdujących się w scenie.
 - Symulacja **fizyki** i **optyki**.
 - By obliczenia były dostatecznie szybkie stosuje się przybliżenia wykorzystujące niedoskonałości ludzkiego wzroku.

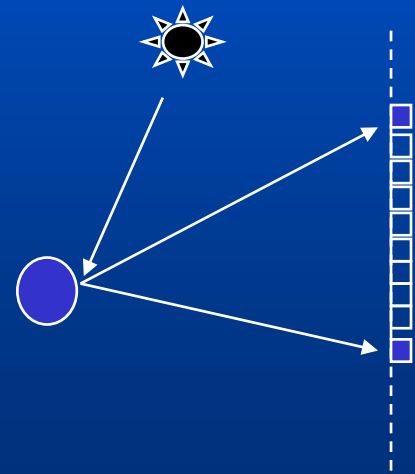
Definicje

- **iluminacja** (*Illumination*): transport energii od źródła światła do powierzchni i punktów.



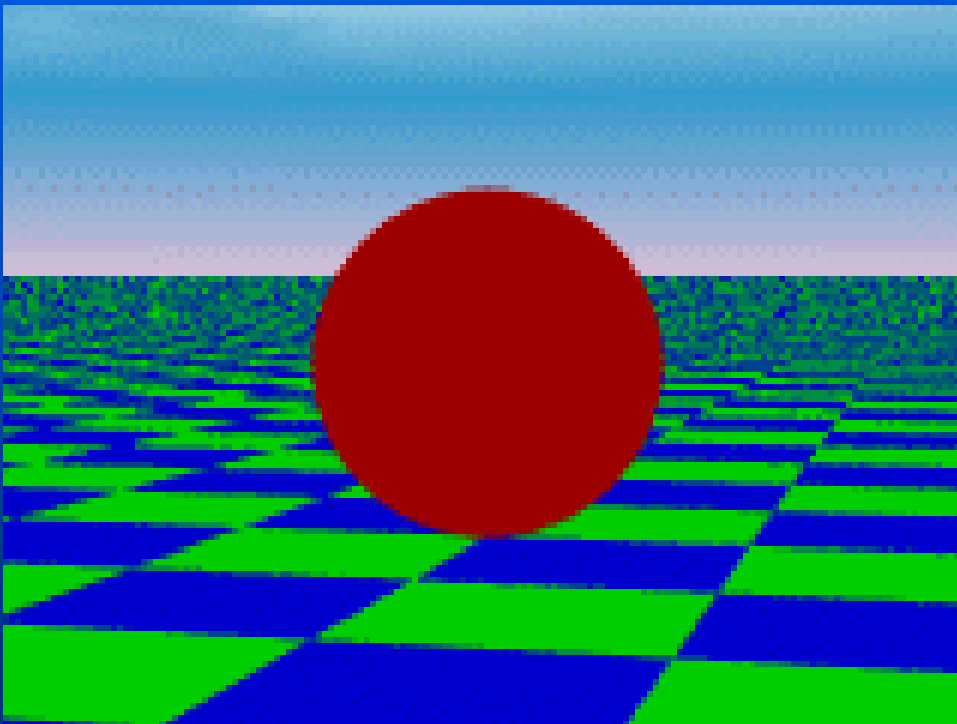
Definicje

- **Oświetlenie** (*lighting*): proces obliczania intensywności punktu (światła wychodzącego) w konkretnym miejscu przestrzeni 3-D, zazwyczaj na określonej powierzchni
- **Cieniowanie** (*shading*): proces przypisywania barw pikselom.



Źródła światła typu *ambient* (otoczenia)

- Scena oświetlona wyłącznie światłem typu *ambient*:



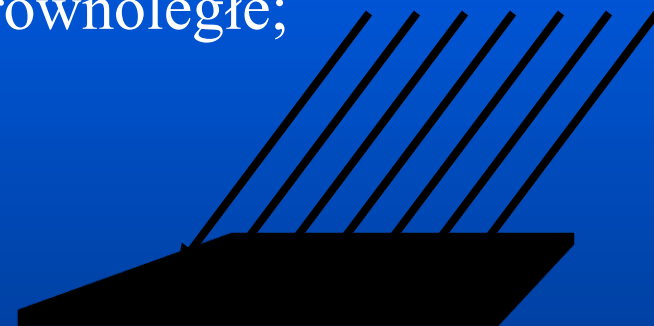
Położenie światła
nie istotne

Położenie kamery
nie istotne

Orientacja powierzchni
nie istotna

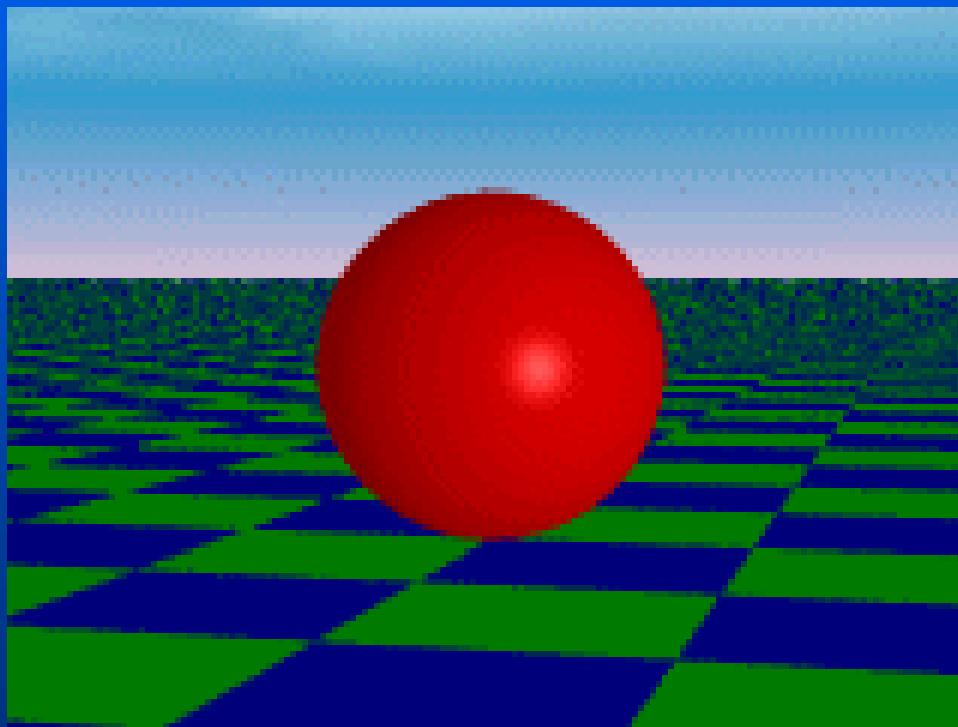
Źródło światła kierunkowego

- Dla źródła światła kierunkowego przyjmujemy pewne założenia uproszczające:
 - kierunek jest stały dla wszystkich powierzchni w scenie,
 - wszystkie promienie ze źródła są równoległe;
 - źródło nieskończenie daleko od powierzchni w scenie,
 - dobre przybliżenie słońca.
- Kierunek od powierzchni do źródła światła jest istotny w obliczeniach w modelu oświetlenia (*lighting*) dla tej powierzchni.



Źródło światła kierunkowego

- Ta sama scena oświetlona światłem kierunkowym i światłem typu *ambient*.



Orientacja
powierzchni
ważna

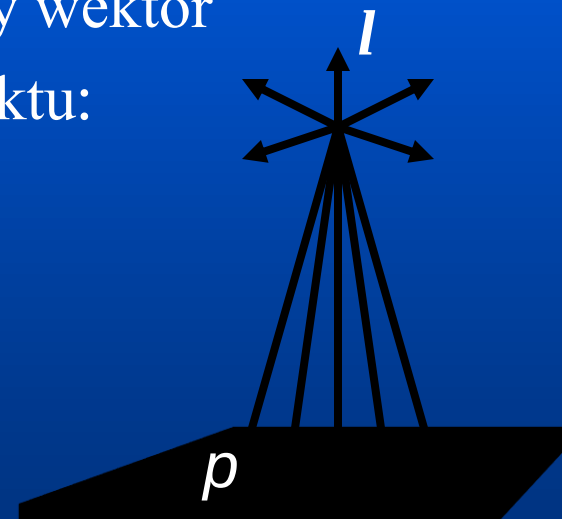
Położenie światła
nie istotne

Położenie kamery
nie istotne

Źródło światła punktowego

- Światło punktowe emituje światło równomiernie we wszystkich kierunkach z jednego punktu.
- Kierunek do źródła światła z punktu powierzchni jest zatem różny dla różnych punktów:
 - Musimy zatem obliczyć znormalizowany wektor do źródła dla każdego oświetlanego punktu:

$$\bar{d} = \frac{\bar{p} - \bar{l}}{\|\bar{p} - \bar{l}\|}$$



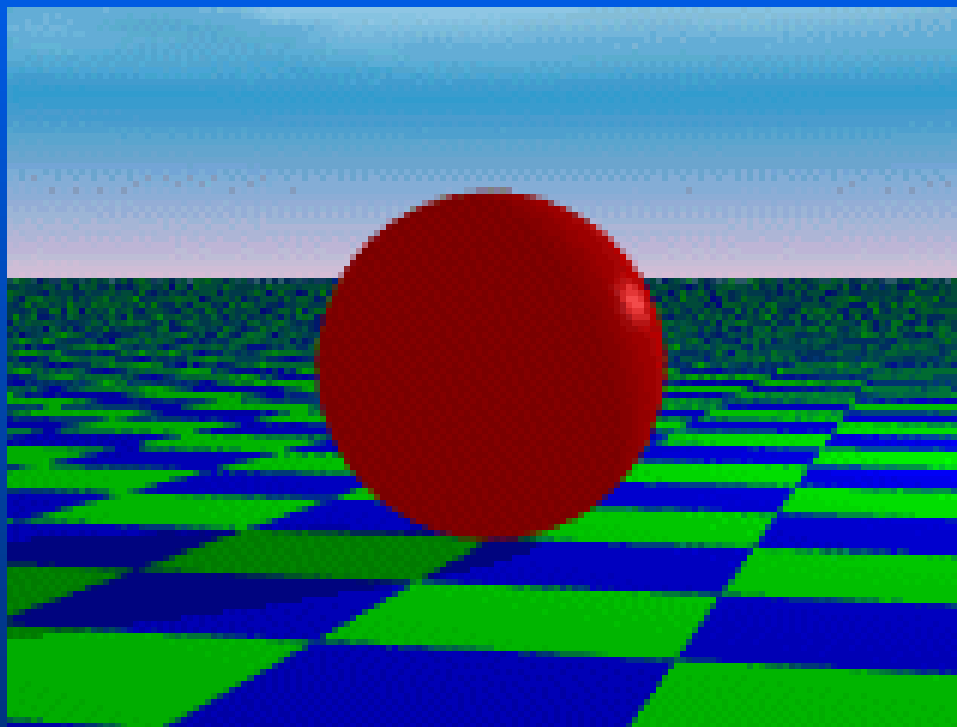
Źródło światła punktowego

- Światło *ambient* i punktowe:

Położenie światła
ważne

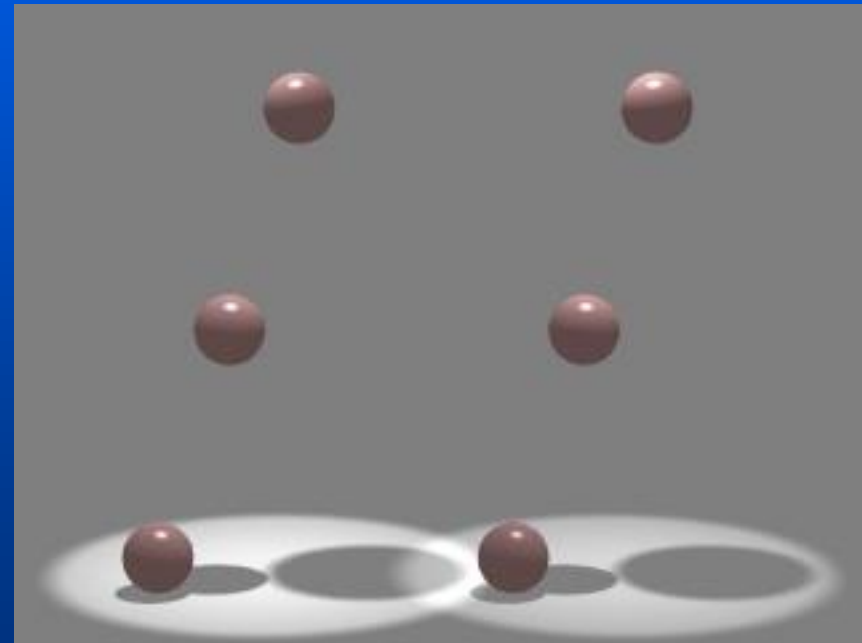
Położenie kamery
ważne

Orientacja
powierzchni
ważna



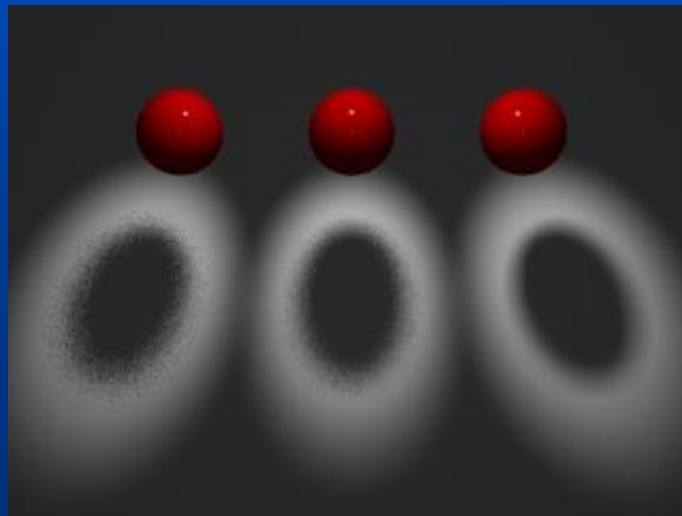
Inne źródła światła

- „*Spoty*” (*spotlights*): są światłami punktowymi, których intensywność zmniejsza się zależnie od kierunku.
 - Parametry: barwa, wektor kierunku, parametry zmniejszania.
 - Używane w OpenGL i w POV-Ray'u



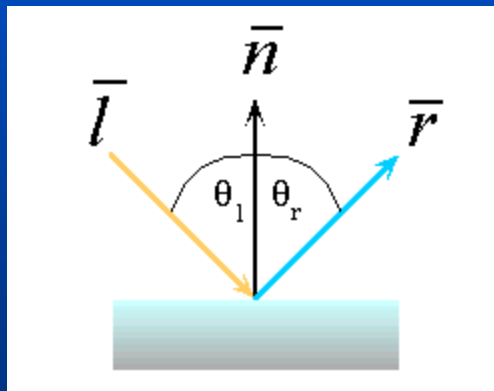
Inne źródła światła

- *Światła powierzchniowe (area light sources)*:
definiują powierzchnię 2-D emitującą światło
(zazwyczaj wielokąt).
 - Przykład: świecące panele.
 - Pozwalają generować miękkie cienie
 - (*soft shadows*).



Optyka odbicia

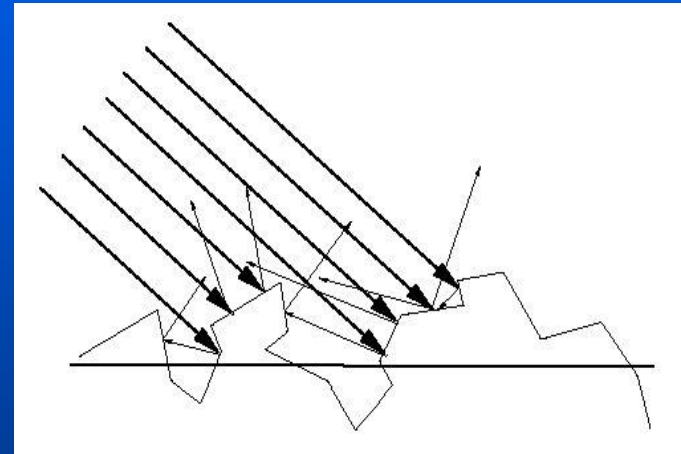
- Prawo *Snella*:
 - Promień światła padającego i światła odbitego leżą w jednej płaszczyźnie z normalną do powierzchni.
 - Kąt padania jest równy kątowi odbicia:



$$\theta_{(l)ight} = \theta_{(r)eflection}$$

Nieidealne odbicie zwierciadlane

- Prawo Snella stosuje się do powierzchni doskonale lustrzanych, ale z wyjątkiem luster i chromu niewiele powierzchni ma taką własność.
- W jaki sposób modelować miękkie odbicia nie idealnie lustrzane?
- Np. modelować mikrogeometrię powierzchni i *explicite* odbijać od niej promienie.



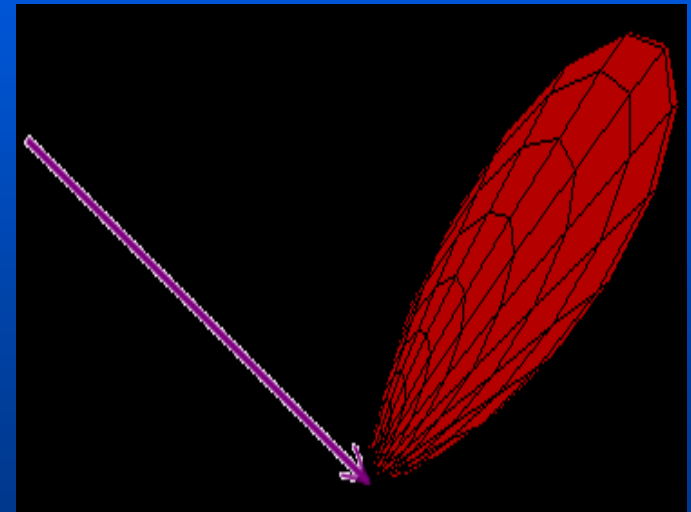
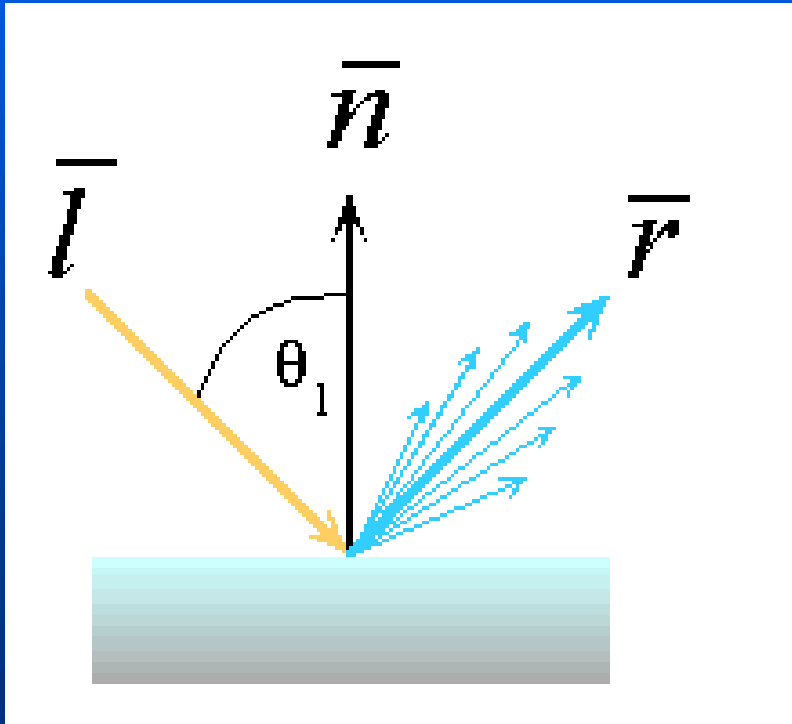
Nieidealne odbicie zwierciadlane

– przybliżenie empiryczne

- W ogólnym przypadku oczekujemy, że większość światła zachowuje się zgodnie z prawem Snella.
- Z powodu mikroskopijnych wariacji na powierzchni część światła może być odbita w kierunku nieco różnym od tego, jaki wynika z prawa Snella.
- Im większa różnica między kątem rzeczywistym a idealnym, tym oczekujemy mniejszej ilości światła odbitej pod tym kątem.

Nieidealne odbicie – przybliżenie empiryczne Lamberta

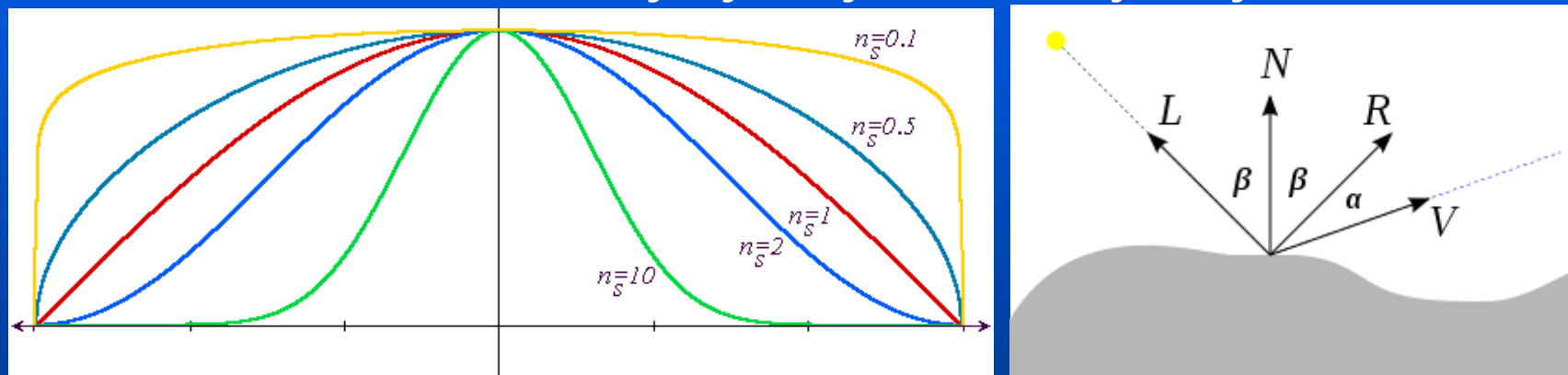
- Model oświetlenia powierzchni matowych.
- Natężenie światła docierające do obserwatora zależy wyłącznie od kąta oświetlenia powierzchni.



$$I = k_a I_a + I_d k_d \cos\theta$$

Model Phong'a – składowa n_{specular}

- Wykres poniżej pokazuje jak spada wartość składowej odbicia refleksów przy odchyleniu kąta patrzenia od kąta idealnego odbicia, w zależności od n – współczynnika określającego gładkość powierzchni.
- Model ma charakter heurystyczny, a nie fizyczny.

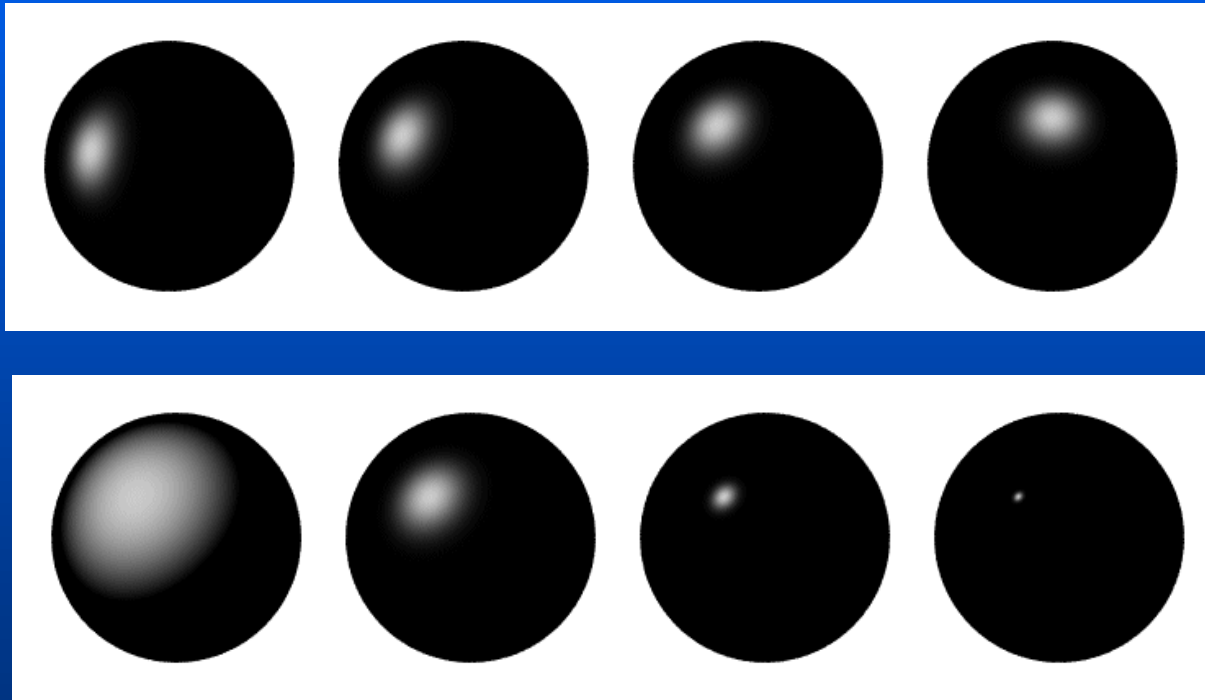


Wizualnie składowa ta wyraża zależność kąta patrzenia i kąta odbicia. W modelu Phong'a uwzględniona składowa światła otaczającego (*ambient*), rozproszonego (*diffuse*) i lustrzanego (*specular*).

$$I = k_a I_a + I_i(k_d \cos \beta + k_s f(\beta) \cos^n \alpha)$$

Przykłady modelu Phong'a

- Kule w modelu Phong'a przy zmianie l i $n_{specular}$:



Model oświetlenia - podsumowanie

- Modele
 - Ambient
 - Normalne nie mają znaczenia
 - Lambert / Diffuse
 - Kąt między normalną i światłem ($\sim \cos \alpha$)
 - Phong / Specular
 - Normalna, światło i obserwator ($\sim \cos^n \beta$)

Literatura:

- M. Domaradzki, R. Gembara, “Tworzenie realistycznej grafiki 3D”, Wydawnictwo Lynx-SFT, Warszawa, 1993.
- J.A. Bell, “3D Studio Max 2.5 – efekty specjalne”, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 1999.
- A. Butz, “Animation”, www.butz.org/~butz/publications/njit-cis270-a/index.htm.
- A. Hermido, “Przygody w świecie promieni – o technice tworzenia realistycznych obrazów komputerowych”, Intersoftland, Warszawa, 1994.
- S. Anderson, S. Anger, “Grafika PC bez tajemnic”, Interfoftland, Warszawa, 1995.
- N. Wilt, “Raytracing obiektowo zorientowany z przykładami w języku C++”, Wydawnictwo Translator, Warszawa, 1994.
- M.F. Cohen, J.R. Wallace, “Radiosity and realistic image synthesis”, Wydawnictwo AP Professional, Boston, 1993.
- “Point-Based Radiosity”, <http://www.cs.unc.edu/~harrism/pbrad/pbrad.html>.
- “Radiosity – Ray Tracing”, www.cg.tuwien.ac.at/research/rendering/rays-radio/rays-radio.html.

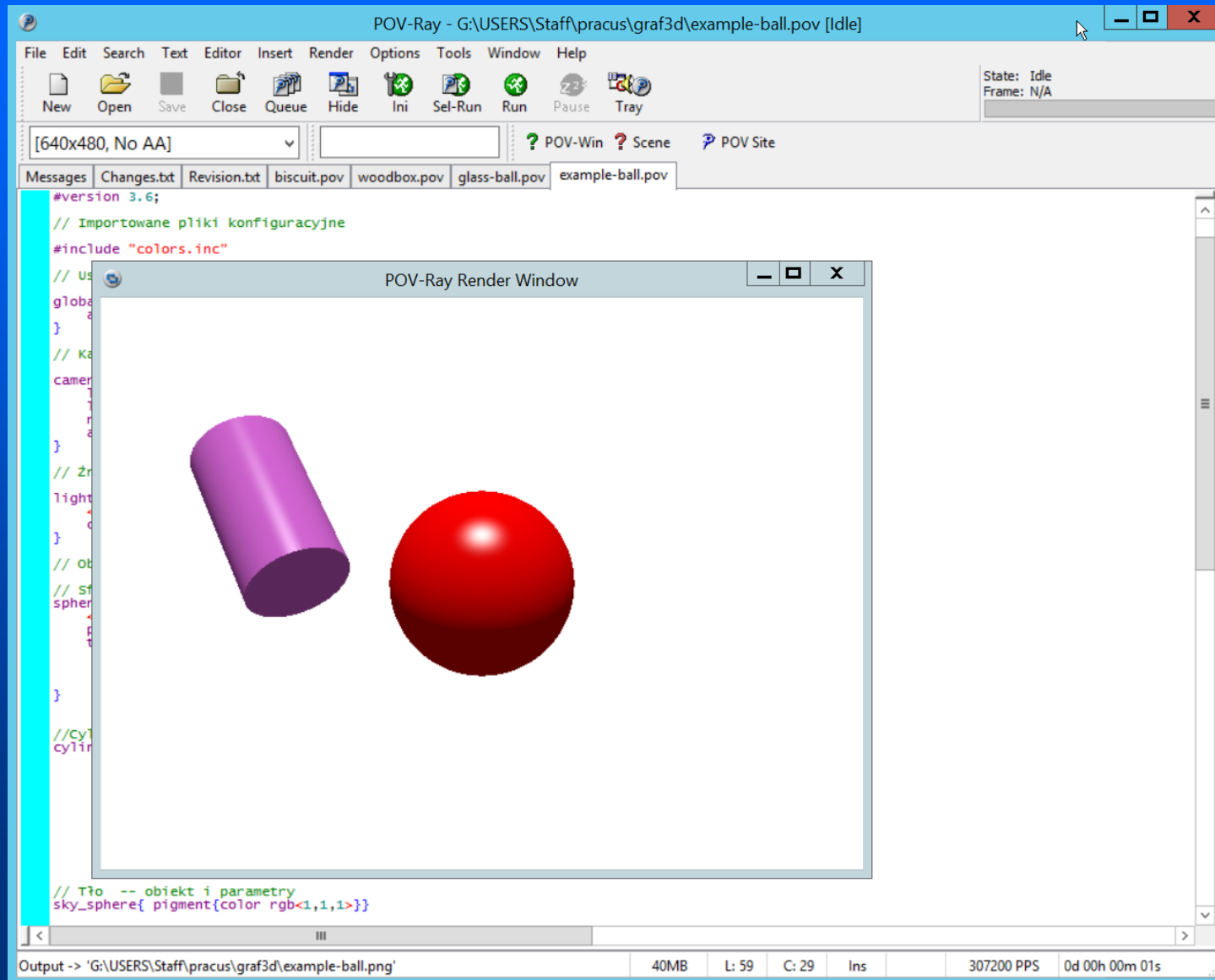
Programy komputerowe

- POV-Ray – <http://www.povray.org/>
– Persistence of Vision Ray-Tracer
- Art of Illusion – <http://www.artofillusion.org/>
- Seamless3D – <http://www.seamless3d.com/>
- Blender – <http://www.blender.org/>
- Unreal Engine – <https://www.unrealengine.com/>

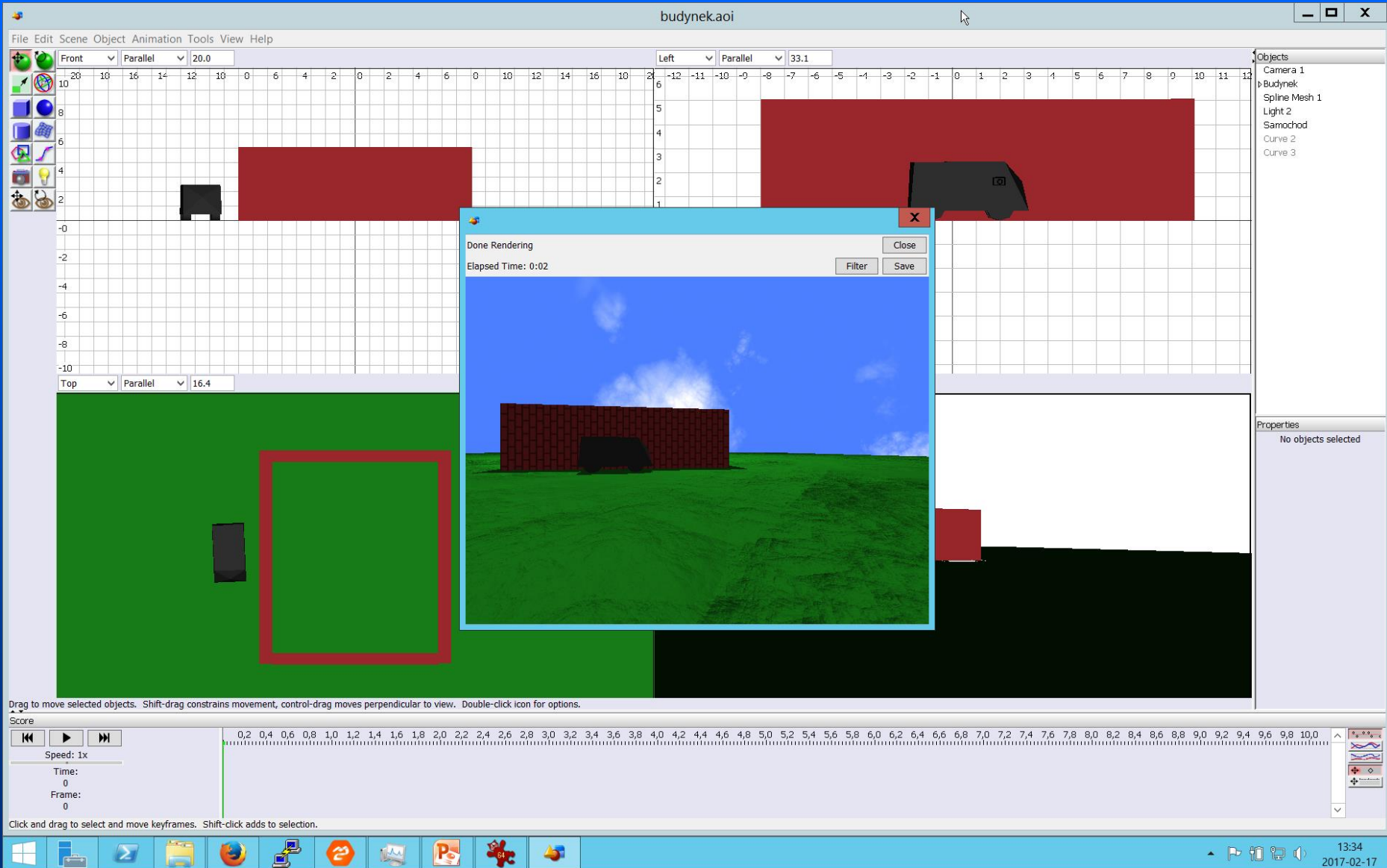
Tutoriale

- POV-Ray Tutorial & Reference
 - <http://www.povray.org/documentation/3.7.0/>
- POV-Ray - PROGRAMOWANIE 3D
 - <https://sites.google.com/view/9loinformatyka/klasa-iii/grafika-3d-povray>
- 3D Animation with POV-Ray
- <https://povlab.online/animtutorial/>
- Seamless3D – 3D Modelling Tutorials
 - <http://www.seamless3d.com/tut/index.html>

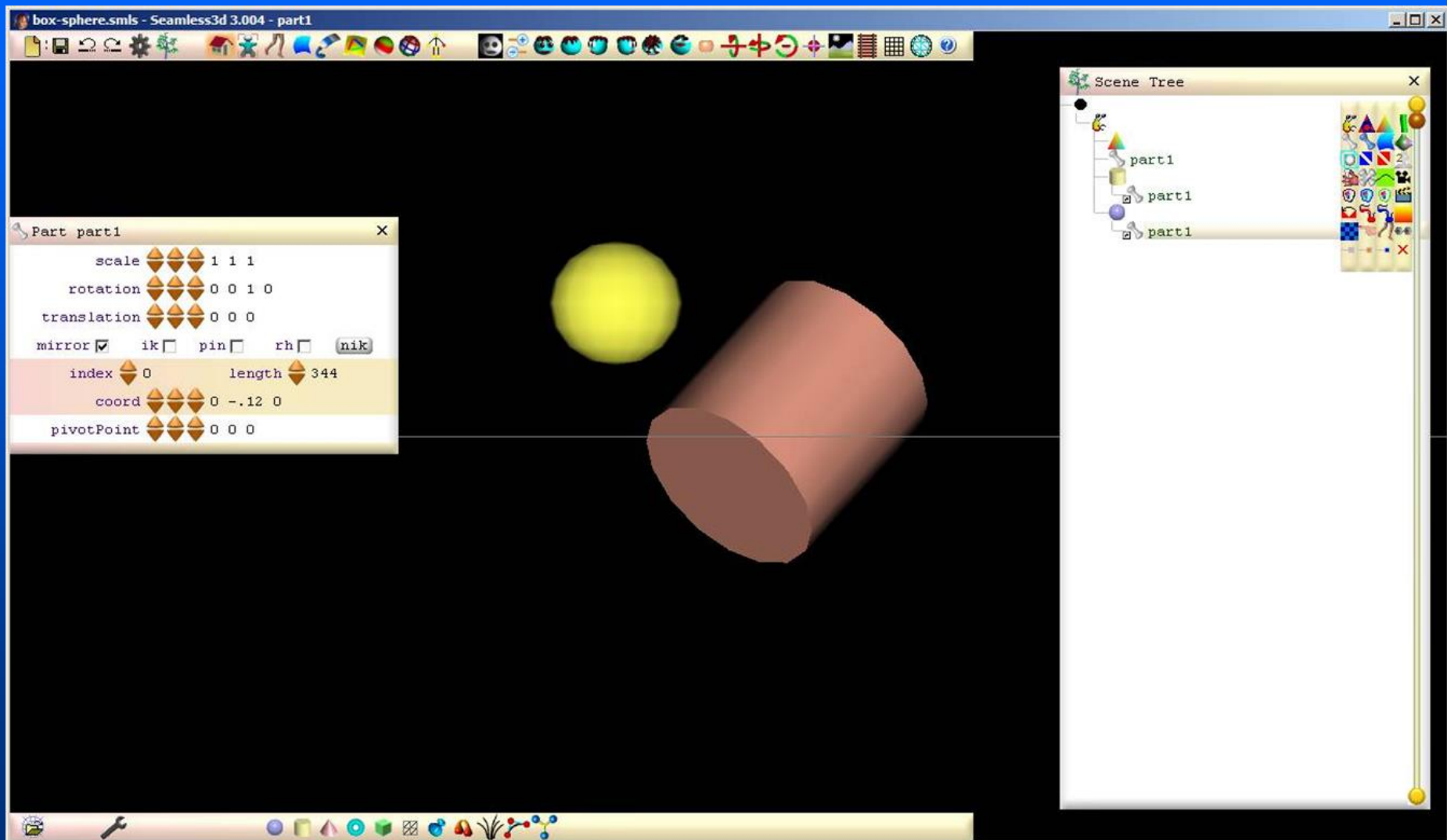
POV-Ray



Art Of Illusion



Seamless3d



Koniec