

Monte Carlo: symulacja rozpraszania fotonów w ośrodku częściowo przeźroczystym

Filip Brodacz

4 czerwca 2025

1 Wstęp teoretyczny

Symulacja rozpraszania i absorpcji promieniowania świetlnego w ośrodkach wielowarstwowych jest istotna w wielu dziedzinach fizyki, biologii i inżynierii (np. obrazowanie medyczne, fotonika).

W zadaniu wykorzystano metodę Monte Carlo (MC) do symulacji trajektorii pojedynczych wiązek (fotonów) światła w dwuwymiarowym układzie warstw o różnych właściwościach optycznych.

1.1 Model fizyczny

Ośrodek składa się z n warstw, zdefiniowanych przez następujące parametry:

- Współczynnik absorpcji μ_a [$1/cm$],
- Współczynnik rozpraszania μ_s [$1/cm$],
- Grubość warstwy d [cm],
- Współczynnik anizotropii g [$-$],
- Współczynnik załamania n [$-$].

Światło pada na dolną krawędź obszaru, a symulacja śledzi ruch fotonów, ich absorpcję, odbicie i transmisję.

1.2 Algorytm Monte Carlo

- Każdy foton jest emitowany z losowego punktu źródła o zadanym położeniu i kierunku.
- Ruch fotonu modelowany jest jako skok o długości wyznaczonej przez rozkład wykładniczy zależny od sumy $\mu_a + \mu_s$.
- Po każdym skoku foton może zostać pochłonięty (absorpcja) lub ulec rozproszeniu.
- Kierunek rozproszenia jest generowany zgodnie z rozkładem Henyeya-Greensteina uwzględniającym anizotropię g .
- Algorytm stosuje metodę ruletki do przyspieszenia symulacji i uniknięcia śledzenia fotonów o bardzo małej wadze.
- Symulacja kończy się, gdy foton opuści obszar lub jego waga stanie się zbyt mała.

1.3 Kluczowe wzory

Rozkład długości kroku:

$$s = -\frac{\ln(\xi)}{\mu_a + \mu_s}$$

gdzie ξ to losowa liczba z przedziału $(0, 1)$.

Rozkład kąta rozproszenia w 2D wg Henyeya-Greensteina:

$$p(\theta) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}$$

2 Wyniki

2.1 Parametry symulacji:

W symulacjach przyjęto następujące parametry podstawowe. W kolejnych przypadkach zmieniano jedynie wybrane parametry względem tego zestawu.

Ustawienia ogólne symulacji

- Liczba warstw: $n_{\text{layers}} = 3$
- Wymiar siatki: $n_x = n_y = 100$
- Zakres osi x : $x_{\text{max}} = 0.2 \text{ cm}$
- Pozycja źródła: $x_{\text{source}} = 0.1 \text{ cm}$, szerokość: $dx_{\text{source}} = 0.0 \text{ cm}$
- Pozycja detektora: $x_{\text{detect}} = 0.15 \text{ cm}$, szerokość: $dx_{\text{detect}} = 0.01 \text{ cm}$
- Kierunek padania wiązki: $r_x = 0.0$, $r_y = 1.0$
- Liczba fotonów: $N = 200\,000$

Parametry optyczne warstw

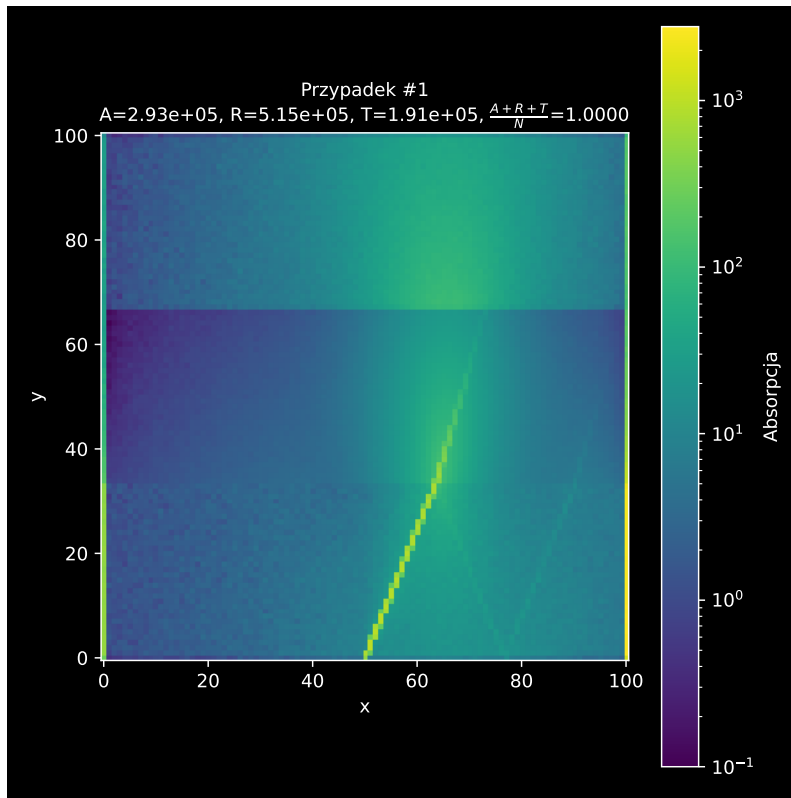
Warstwa	$\mu_a \left[\frac{1}{\text{cm}} \right]$	$\mu_s \left[\frac{1}{\text{cm}} \right]$	$d \text{ [cm]}$	$g \text{ [-]}$	$n \text{ [-]}$
1	1	10	0.02	0.75	1.3
2	1	190	0.02	0.075	1.0
3	10	90	0.02	0.95	1.0

Tabela 1: Podstawowe parametry optyczne warstw ośrodka.

2.2 Symulacje z wewnętrznym odbiciem wiązki

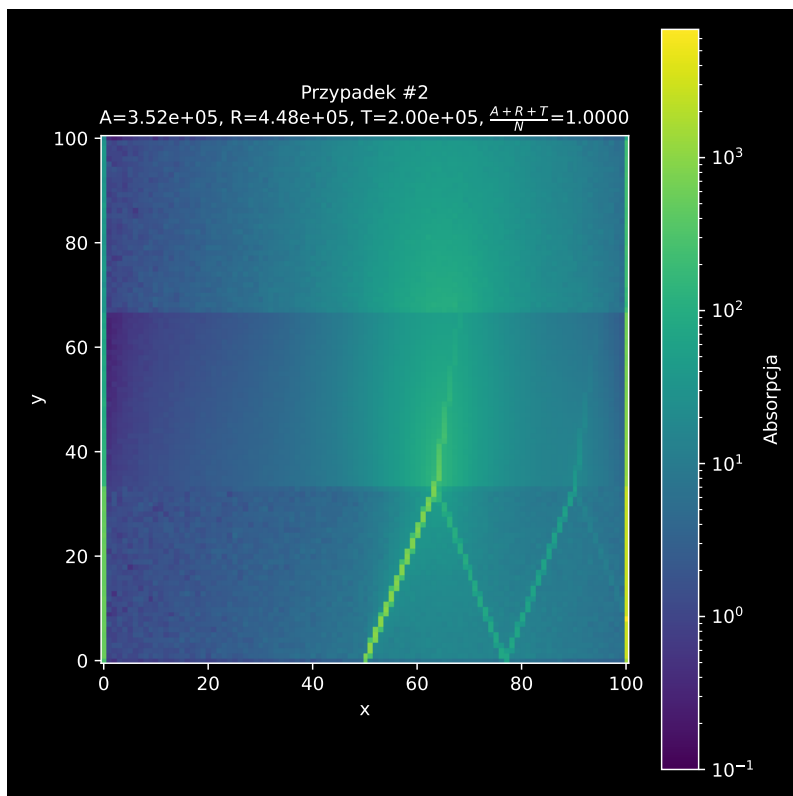
W tej części przeprowadzono symulacje z parametrami wiązki o kierunku padania zmienionym na $r_x = 0.8$, $r_y = 0.6$ oraz różnymi wartościami współczynnika załamania n w warstwach, zgodnie z zadaniem.

Przypadek 1: $n^{(2)} = 1.5$



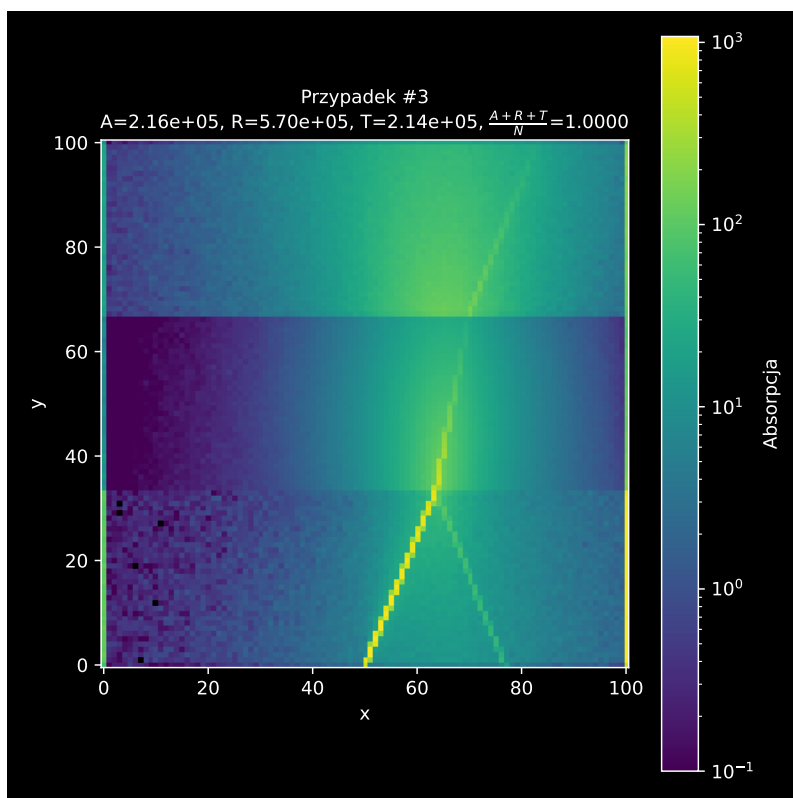
Rysunek 1: Rozkład absorpcji energii, $r_x = 0.8$, $r_y = 0.6$, $n^{(2)} = 1.5$.

Przypadek 2: $n^{(2)} = 2.5$



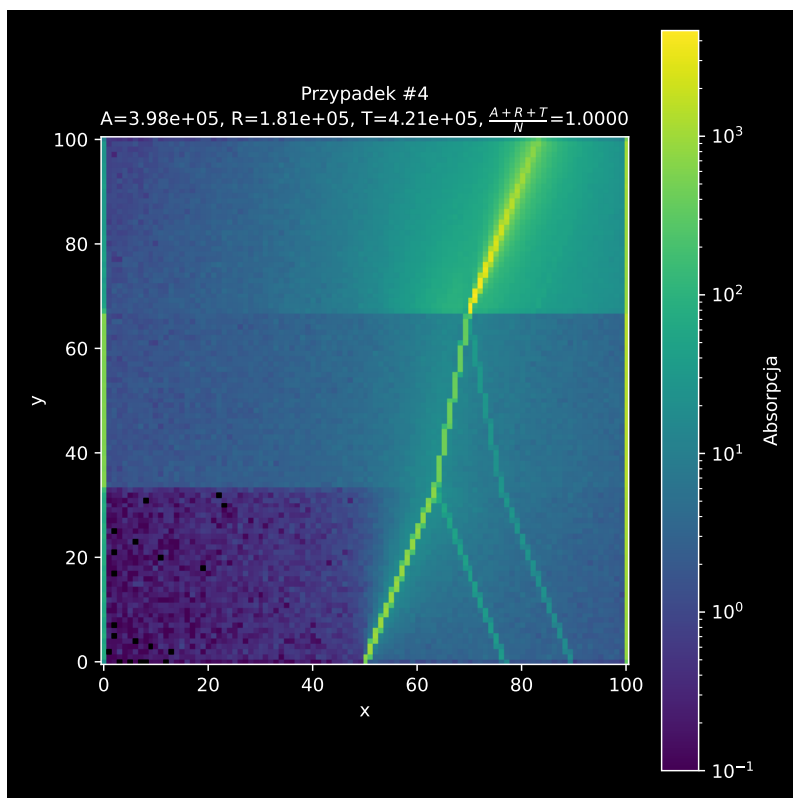
Rysunek 2: Rozkład absorpcji energii, $r_x = 0.8$, $r_y = 0.6$, $n^{(2)} = 2.5$.

Przypadek 3: $n^{(1)} = 1.0$, $n^{(2)} = 1.5$



Rysunek 3: Rozkład absorpcji energii, $r_x = 0.8$, $r_y = 0.6$, $n^{(1)} = 1.0$, $n^{(2)} = 1.5$.

Przypadek 4: $n^{(1)} = 1.0$, $n^{(2)} = 1.5$, $\mu_s^{(2)} = 10$

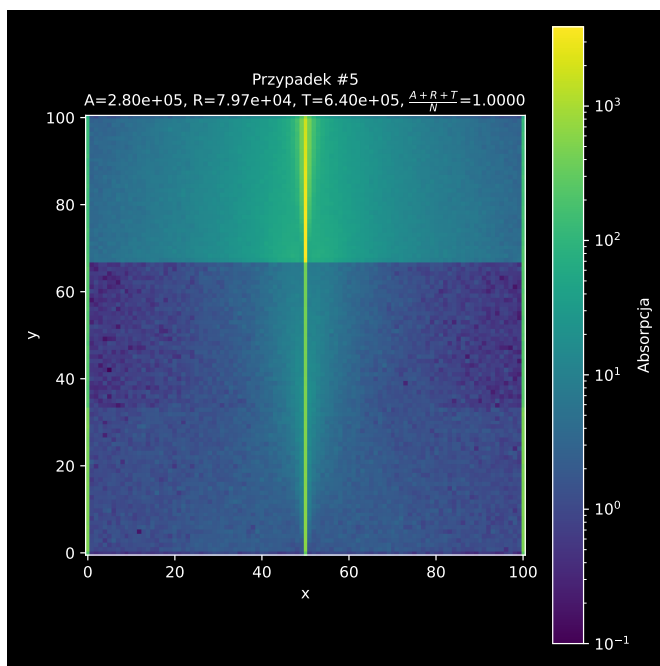


Rysunek 4: Rozkład absorpcji energii, $r_x = 0.8$, $r_y = 0.6$, $n^{(1)} = 1.0$, $n^{(2)} = 1.5$, $\mu_s^{(2)} = 10$

2.3 Symulacje z wiązką padającą prostopadle

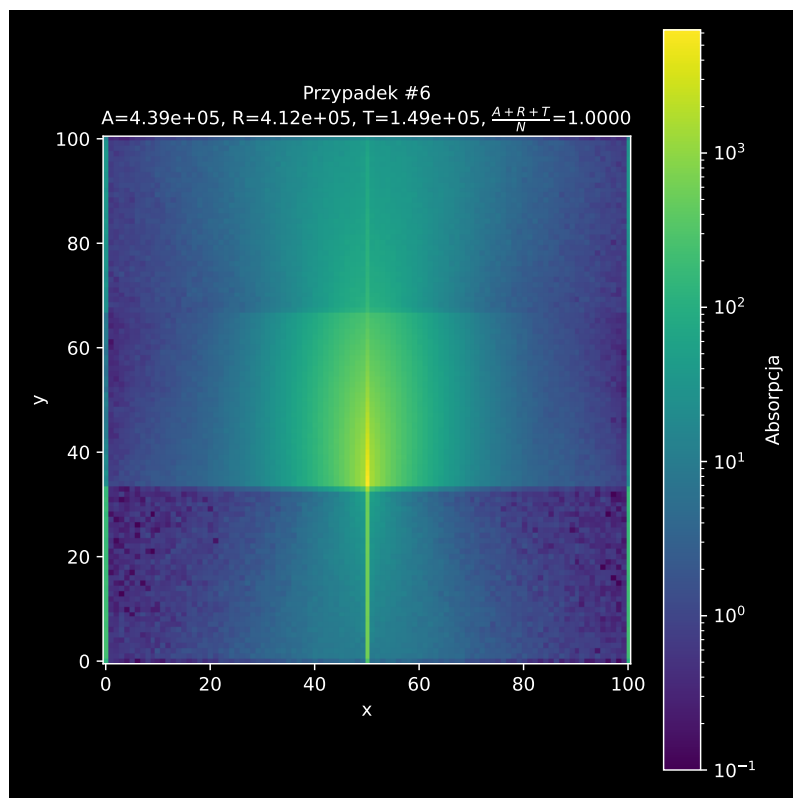
Tutaj przedstawiono wyniki symulacji dla wiązki padającej prostopadle do obiektu, zarówno dla podstawowego zestawu parametrów, jak i ich modyfikacji.

Przypadek 1: Zestaw podstawowy (parametry z tabeli)



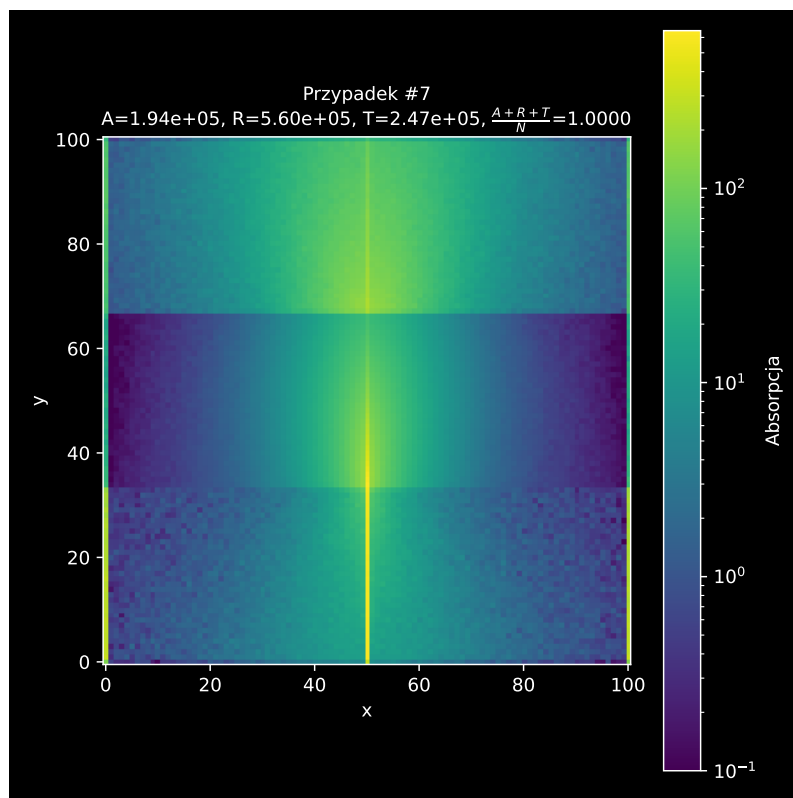
Rysunek 5: Rozkład absorpcji energii dla wiązki prostopadłej, zestaw podstawowy.

Przypadek 2: $n^{(1)} = 1.0$, $\mu_a^{(2)} = 10$, $\mu_s^{(2)} = 210$, $n^{(2)} = 1.5$



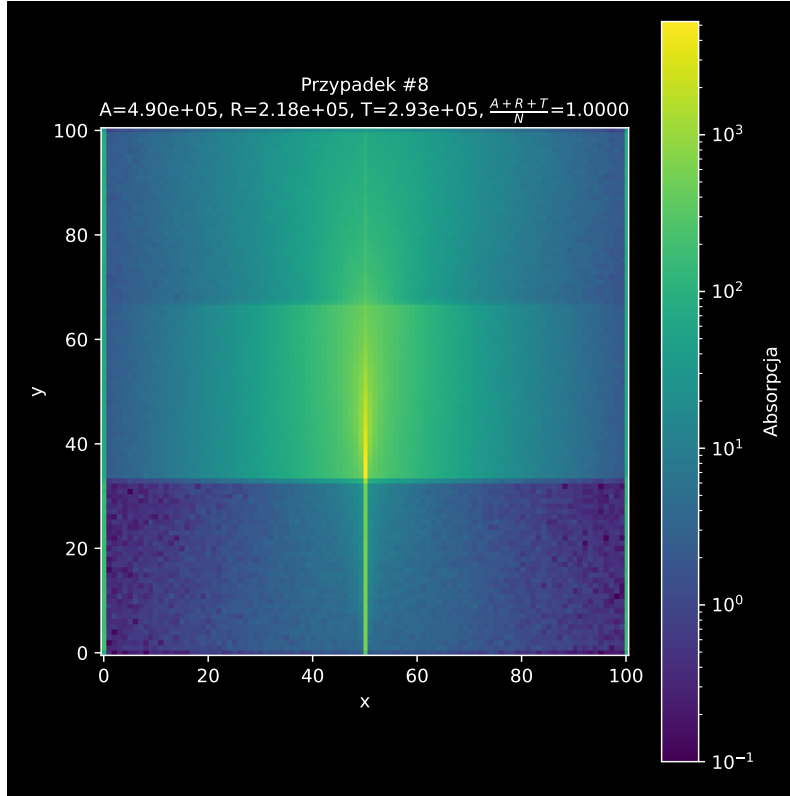
Rysunek 6: Rozkład absorpcji energii dla zmienionych parametrów z przypadku 2.

Przypadek 3: $n^{(1)} = 1.0$, $\mu_a^{(2)} = 1$, $\mu_s^{(2)} = 210$, $n^{(2)} = 1.5$



Rysunek 7: Rozkład absorpcji energii dla zmienionych parametrów z przypadku 3.

Przypadek 4: $n^{(1)} = 1.0$, $\mu_a^{(2)} = 10$, $\mu_s^{(2)} = 210$, $n^{(2)} = 1.5$, $g^{(2)} = 0.75$



Rysunek 8: Rozkład absorpcji energii dla zmienionych parametrów z przypadku 4, uwzględniający anizotropię $g^{(2)} = 0.75$.

2.4 Analiza uzyskanych wyników

Przeprowadzone symulacje pokazują, że zmiany parametrów optycznych mają istotny wpływ na rozkład absorpcji oraz wartości współczynników A , R i T :

- Zwiększenie $n^{(2)}$ prowadzi do silniejszego wewnętrznego odbicia, co zwiększa absorpcję i zmniejsza transmisję.
- Zmniejszenie $\mu_s^{(2)}$ skutkuje głębszą penetracją fotonów i wyraźnym przesunięciem maksimum absorpcji.
- Ukośne padanie wiązki ($r_x = 0.8$) przesuwa miejsce absorpcji i zwiększa liczbę odbić.
- Wysoka anizotropia ($g^{(2)} = 0.75$) sprzyja propagacji fotonów w głąb ośrodka.
- Duże wartości $\mu_s^{(2)}$ i $\mu_a^{(2)}$ powodują silną lokalną absorpcję i tłumienie sygnału.

Sumy $A + R + T$ we wszystkich przypadkach były bliskie jedności, co potwierdza poprawność symulacji.

3 Podsumowanie

W pracy przeprowadzono symulacje Monte Carlo propagacji światła w ośrodkach wielowarstwowych o różnych parametrach optycznych. Analiza wyników pokazała istotny wpływ zmian współczynników załamania, rozpraszania, absorpcji oraz anizotropii na rozkład absorpcji i skuteczność transmisji światła. Wyniki potwierdzają zgodność modelu fizycznego oraz poprawność implementacji, co widać po zachowaniu bilansu energetycznego $A + R + T \approx 1$ w każdym przypadku.