

Monte Carlo: propagacja fali termicznej w gazie - problem Riemanna

Filip Brodacz

14 czerwca 2025

1 Wstęp teoretyczny

Celem doświadczenia była symulacja propagacji fali termicznej w gazie w ujęciu mikroskopowym za pomocą metody Direct Simulation Monte Carlo (DSMC). Układ początkowo składał się z dwóch obszarów zawierających gaz o różnych temperaturach: $T_1 \gg T_2$. Rozkład prędkości cząstek w obu częściach był Maxwella-Boltzmann.

Zjawisko to odpowiada klasycznemu problemowi Riemanna, a jego ewolucja prowadzi do powstania fali termicznej i fali ciśnienia. Ponieważ $p_1 \gg p_2$, dochodzi do gwałtownego przepływu gazu z części cieplejszej do zimniejszej.

2 Metodyka

Symulacja została przeprowadzona w kilku etapach:

1. Generacja lewego podukładu:

Obszar: $x \in [0, 1.0]$, $y \in [0, 0.5]$,
Temperatura: $T_1 = 10^4$,
Liczba cząstek: $N_1 = 8 \cdot 10^5$,
Rozkład: Maxwella (`init_dist = 2`).

2. Generacja prawego podukładu:

Obszar: $x \in [1.0, 2.0]$, $y \in [0, 0.5]$,
Temperatura: $T_2 = 300$,
Liczba cząstek: $N_2 = 10^5$,
Rozkład: Maxwella (`init_dist = 2`).

3. Połączenie rozkładów:

Dane z obu części zapisano do pliku `pos_vel_start.dat`.

4. Symulacja pełnego układu:

Obszar: $x \in [0, 2.0]$, $y \in [0, 0.5]$,
Łączna liczba cząstek: $N = 9 \cdot 10^5$,
`init_dist = 0` (wczytywanie z pliku).
Symulację wykonano przez 2000 iteracji.

Parametry wspólne:

- $nx = 300$, $ny = 75$, $rc = 10^{-4}$, $mc = 1.0$,
- Warunki brzegowe: Neumanna (`tempi[0--3] = -1`).

3 Wyniki i analiza

W analizie wykorzystano dane z plików `nptv_iteracja.dat`. Dla co 2 iteracji przedstawiono animację:

- Rozkład gęstości (`density`),
- Rozkład ciśnienia (`pressure`),
- Rozkład temperatury (`temperature`),
- Rozkład średniej prędkości (`velocity`),

- Strumień cząstek $j_x = \langle v_x n(x) \rangle$.
- Rozkład ilości cząstek w molach n
- Położenia cząstek
- Histogram prędkości

Rozkład prędkości - animacja

Rozkład D-p-T-v-F-n w zależności od x - animacja

Rozkład położenia cząstek - animacja

Obserwacje:

- Początkowo obserwuje się silny skok ciśnienia i temperatury po stronie lewej.
- Z czasem powstaje czoło fali, które porusza się znacznie szybciej niż reszta cząstek.
- Cząstki z lewej strony przesuwają się ku prawej, prowadząc do wzrostu gęstości i temperatury w prawej części układu.
- W dalszej fazie fala termiczna ulega rozmyciu – obserwujemy wygładzanie rozkładów.
- Gdy fala dociera do prawego brzegu, temperatura i ciśnienie zaczynają lokalnie wzrastać.

4 Podsumowanie

Symulacja numeryczna propagacji fali termicznej potwierdziła charakterystyczne zjawiska występujące w nierównowagowej dynamice gazów:

- Wystąpienie fali uderzeniowej i frontu ciśnienia,
- Różne prędkości propagacji dla frontu fali i cząstek,
- Przemieszczanie się masy, energii i pędu z obszaru gorącego do zimnego,
- Istotny wpływ warunków początkowych na dynamikę układu.

Uzyskane wyniki są zgodne z intuicją fizyczną, mimo ograniczonej liczby cząstek (dla porównań z teorią potrzeba $> 2 \cdot 10^7$). Metoda DSMC umożliwia jakościowe odwzorowanie rzeczywistych procesów w gazach rozrzedzonych.