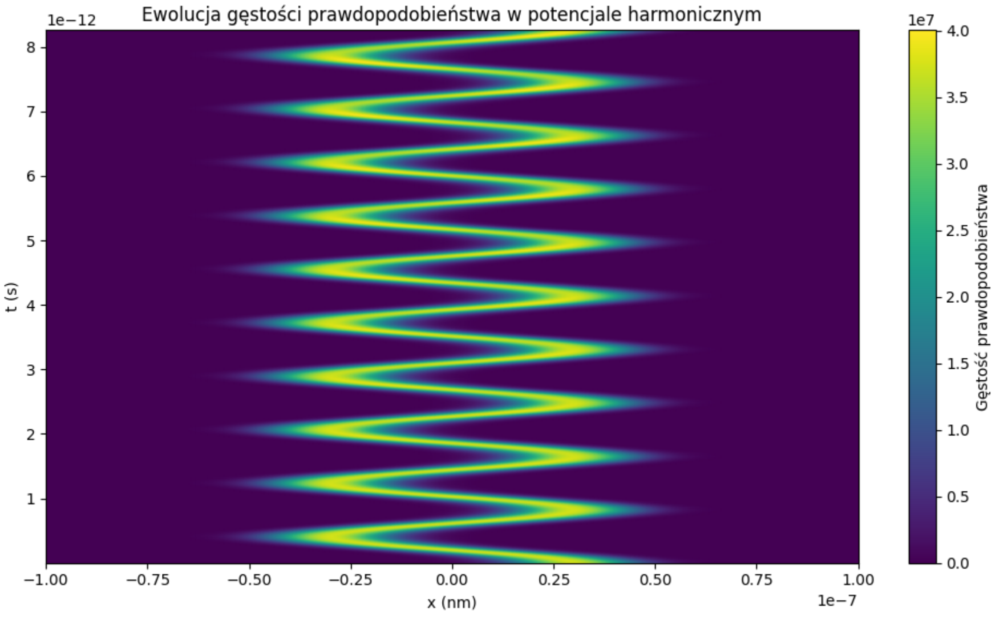
| Wydział, kierunek: WFiIS, FT | Imię i nazwisko: Marcin Mikołajczyk | Rok: 4 | Grupa: 1 |
|---|---|---|---|
| Data wykonania: | Data oddania: | | OCENA: |
| 3 listopada 2025 | 3 listopada 2025 | | |

# Laboratorium 4 - Równanie Schrodingera zależne od czasu

## Zadanie 3

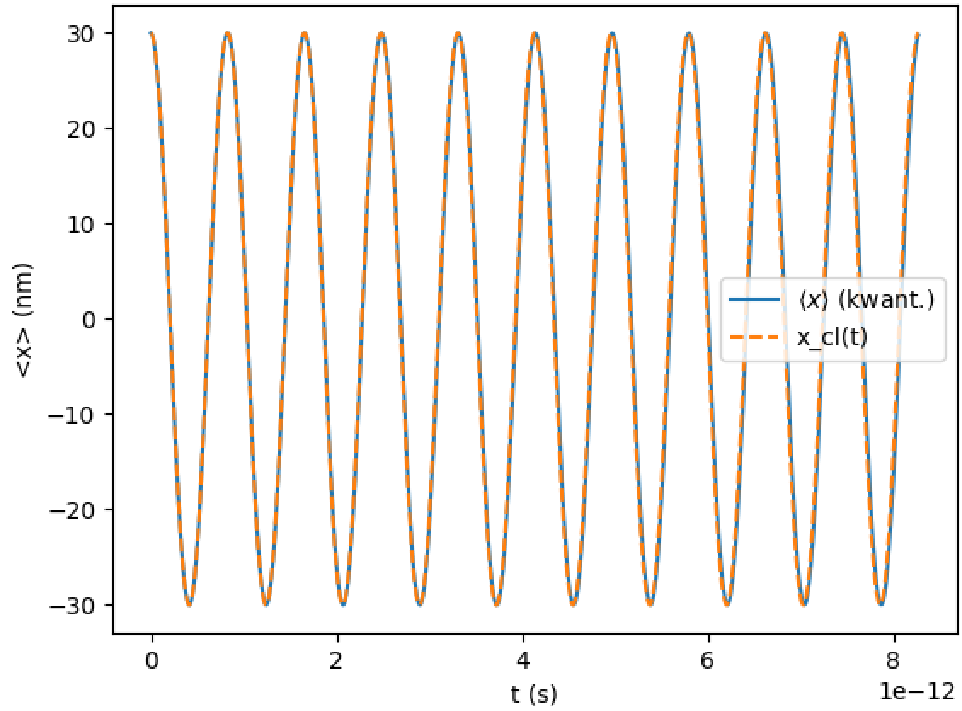
Zgodnie z poleceniem, w symulacji ustawiono parametr początkowego położenia pakietu na $x_0 = 30$ nm. Wykorzystano potencjał oscylatora harmonicznego $V(x) = \frac{m\omega^2 x^2}{2}$. Ewolucja w czasie została przeprowadzona metodą Askara, a gęstość prawdopodobieństwa zapisywano co 500 kroków czasowych.
Wynik ewolucji gęstości prawdopodobieństwa w czasie przedstawia poniższa mapa ciepła. Widać na niej oscylujący ruch paczki falowej wokół centrum potencjału (x=0). Jest to zachowanie zgodne z oczekiwaniami dla stanu koherentnego, który nie jest stanem stacjonarnym.




Rysunek 1: Ewolucja gęstości prawdopodobieństwa w potencjale harmonicznym dla $x_0 = 30$ nm.

## Zadanie 4

Podczas pętli ewolucji czasowej obliczano zarówno kwantową wartość oczekiwaną położenia ($\langle x \rangle(t)$) przy użyciu całki $\int \Psi^* x \Psi \, dx$, jak i położenie klasyczne $x_{cl}(t)$ dla tych samych kroków czasowych. Obie wartości zostały następnie naniesione na wykres w celu ich wizualnego porównania.

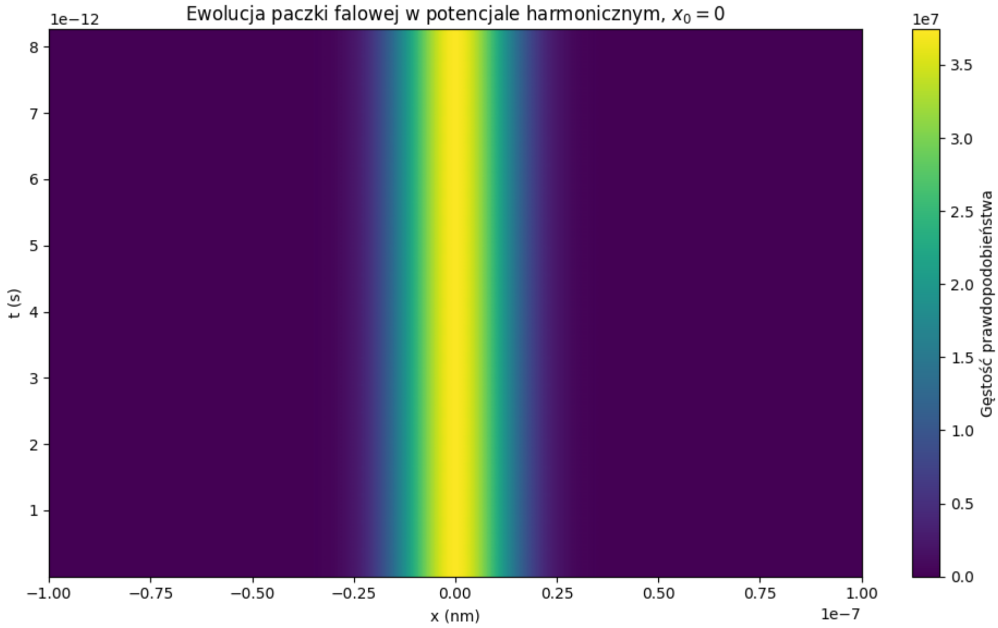



Rysunek 2: Porównanie kwantowej wartości oczekiwanej położenia $\langle x \rangle(t)$ (linia ciągła) z ruchem klasycznym $x_{cl}(t)$ (linia przerywana).

Jak widać na wykresie, kwantowa wartość oczekiwana położenia paczki falowej idealnie pokrywa się z trajektorią cząstki klasycznej. Jest to zgodne z zasadą korespondencji, która mówi, że dla potencjału harmonicznego ruch wartości oczekiwanych operatorów kwantowych jest tożsamy z ruchem klasycznym.

## Zadanie 5

Zmieniono warunek początkowy na $x_0 = 0.0$ i ponownie przeprowadzono symulację w tym samym potencjale harmonicznym.

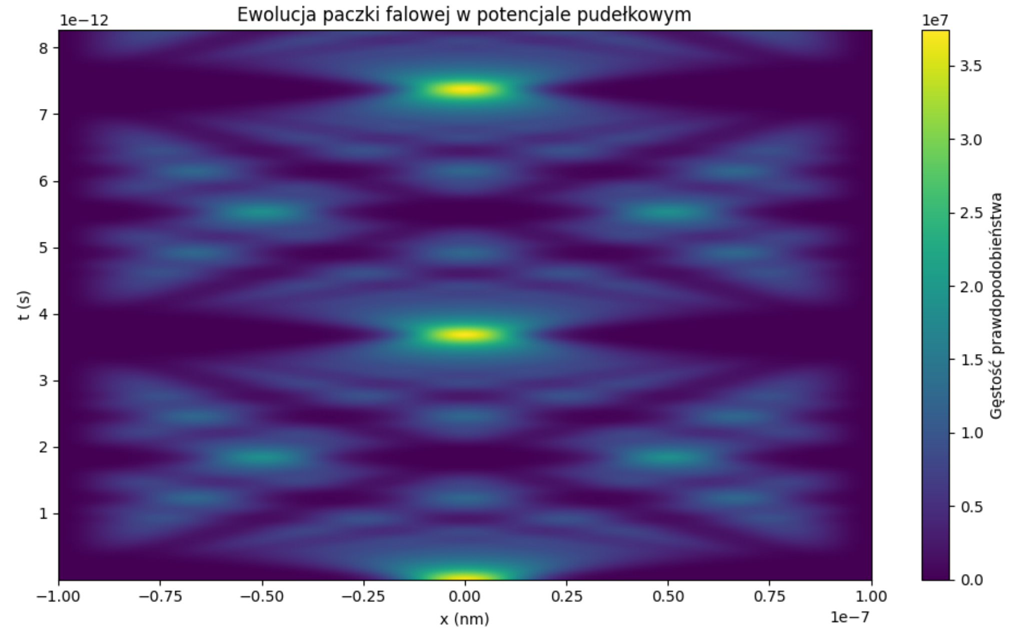



Rysunek 3: Ewolucja gęstości prawdopodobieństwa w potencjale harmonicznym dla $x_0 = 0$.

Gdy paczka falowa startuje idealnie w centrum potencjału ($x_0 = 0$), jej wartość oczekiwana położenia pozostaje zerowa ($\langle x \rangle(t) = 0$) przez cały czas symulacji. Gęstość prawdopodobieństwa nie oscyluje w przestrzeni (nie przemieszcza się), lecz pozostaje stacjonarna (pakiet jedynie nieznacznie zmienia swoją szerokość). Jest to zachowanie charakterystyczne dla stanu stacjonarnego, który nie wykazuje dynamiki klasycznej.

## Zadanie 6 (10 pkt)

W ostatniej części symulacji ustawiono $x_0 = 0.0$ oraz wyzerowano potencjał ($V_{box} = 0$). Warunki brzegowe Dirichleta ($\Psi = 0$ na krańcach pudełka $x \in [-100, 100]$ nm) symulują nieskończoną studnię potencjału.




Rysunek 4: Ewolucja gęstości prawdopodobieństwa w potencjale pudełkowym (nieskończona studnia) dla $x_0 = 0$.

W przypadku swobodnego pakietu falowego (zerowy potencjał) umieszczonego w centrum studni, gęstość prawdopodobieństwa wykazuje dynamiczną ewolucję. Paczka falowa, nieograniczona potencjałem harmonicznym, rozszerza się w obu kierunkach. Następnie odbija się od ścian studni, a jej odbite części zaczynają interferować ze sobą, co prowadzi do złożonych wzorów gęstości prawdopodobieństwa widocznych w późniejszych chwilach czasu.

## Literatura

[1] *Instrukcja do ćwiczenia UPEL MOFiT2, dostęp 3 listopada 2025*