



Università degli Studi di Genova

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN FISICA

Risoluzione dell'equazione di Schrödinger mediante la simulazione di un pacchetto d'onda gaussiano

Tesina per Fisica Computazionale 2

Daniele Rapetti

Sommario

Ho sviluppato e generalizzato il metodo di Crank-Nicolson per adattarlo all'equazione di Schrödinger . Ho quindi analizzato i risultati e provato l'evoluzione con un salto di potenziale e una barriera rettangolare.

Indice

I	Teoria	3
1	Introduzione: matematica	4
1.1	Derivate numeriche	4
1.2	Equazione del calore	4
1.2.1	Eulero esplicito, “in avanti”	4
1.2.2	Eulero implicito, “all’indietro”	4
1.3	Un esempio di come ricavare il metodo di Crank Nicolson: l’equazione del calore	5
2	Costruzione dell’algoritmo	6
2.1	Ottenere il sistema	6
2.2	La matrice Tridiagonale: soluzione	6
3	Condizioni al contorno	9
3.1	Dirichlet	9
3.2	Neumann	9
3.3	Robin	9
3.4	Osservazione	11
4	Applicazioni	12
4.1	Equazione del calore	12
4.2	Equazione di Schrödinger	12
4.3	Stabilità	13
II	Simulazione	15
5	Il programma: descrizione e scelta dei parametri	16
5.1	Impostazioni	17
5.2	Condizioni iniziali	18
5.3	Lancio senza potenziale: velocità	19
5.4	Lancio senza potenziale: errore	20
5.5	Dispersione dei pacchetti d’onda	21
5.6	La forma delle condizioni iniziali	23
5.7	Condizioni al contorno	24
5.8	Prime Conclusioni	25
6	Dati e analisi	26
6.1	Il salto di potenziale	26
6.2	La barriera rettangolare	27
III	Appendice	30
A	Tabelle	31
B	Varie	32
B.1	Calcoli Salto	33
B.2	Calcoli Barriera	34

Parte I
Teoria

1 Introduzione: matematica

1.1 Derivate numeriche

Prima di tutto faccio un piccolo elenco di metodi di calcolo per le derivate, usando il metodo delle differenze finite:

La derivata prima (in avanti) è:

$$\frac{\partial F}{\partial x}(a) \simeq \frac{F(a+h) - F(a)}{h} + O(h) \quad (1.1.1)$$

Ma la sua precisione è al primo ordine, per cui si può utilizzare la cosiddetta definizione “centrale”:

$$\frac{\partial F}{\partial x}(a) \simeq \frac{F(a+h) - F(a-h)}{2 * h} + O(h^2) \quad (1.1.2)$$

Per la derivata seconda il discorso è simile ma in entrambi i casi la precisione è sempre al secondo ordine:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}(a) \simeq \frac{\frac{\partial F}{\partial x}(a+h) - \frac{\partial F}{\partial x}(a)}{h} = \frac{F(a+2h) + F(a) - 2F(a+h)}{h^2} + O(h^2) \quad (1.1.3)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}(a) \simeq \frac{F(a+h) + F(a-h) - 2F(a)}{h^2} + O(h^2) \quad (1.1.4)$$

Definito come si calcolano le derivate si può iniziare a pensare di risolvere delle equazioni differenziali in maniera numerica.

1.2 Equazione del calore

Il metodo che voglio illustrare inizialmente è stato concepito per la risoluzione di equazioni differenziali iperboliche, come quella del calore:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.2.1)$$

La prima cosa da fare è calcolare i valori delle derivate:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = \frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} \quad (1.2.2)$$

e

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) = \frac{T(x + \Delta x, t) + T(x - \Delta x, t) - 2T(x, t)}{\Delta x^2} \quad (1.2.3)$$

1.2.1 Eulero esplicito, “in avanti”

Quindi prendo i risultati e li sostituisco nell’equazione le derivate (con queste definizioni si ha precisione Δx^2 nello spazio e Δt nel tempo):

$$\frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = k \frac{T(x + \Delta x, t) + T(x - \Delta x, t) - 2T(x, t)}{\Delta x^2} \quad (1.2.4)$$

e andando avanti:

$$T(x, t + \Delta t) = k \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T(x + \Delta x, t) + T(x - \Delta x, t) - 2T(x, t)) + T(x, t) \quad (1.2.5)$$

A questo punto calcolo ogni punto conoscendo il corrispondente e i due primi vicini del passo precedente.

1.2.2 Eulero implicito, “all’indietro”

Posso, volendo, calcolare la derivata spaziale nell’istante temporale successivo:

$$\frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = k \frac{T(x + \Delta x, t + \Delta t) + T(x - \Delta x, t + \Delta t) - 2T(x, t + \Delta t)}{\Delta x^2} \quad (1.2.6)$$

proseguo:

$$T(x, t + \Delta t) - k \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T(x + \Delta x, t + \Delta t) + T(x - \Delta x, t + \Delta t) - 2T(x, t + \Delta t)) = T(x, t) \quad (1.2.7)$$

Anche in questo caso non approfondisco, l’approccio è simile al metodo di Crank-Nicolson, ma preferisco parlarne direttamente di quest’ultimo per poi generalizzarlo e descriverne l’algoritmo utilizzato per la risoluzione dell’equazione di Schrödinger

1.3 Un esempio di come ricavare il metodo di Crank Nicolson: l'equazione del calore

Innanzitutto utilizziamo la definizione centrale della derivata prima in modo da avere una precisione di Δt^2 anche per quanto riguarda il tempo, ma calcolandola in $t + \Delta t/2$ con incremento $\Delta t/2$:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x, t + \Delta t/2) \simeq \frac{T(x, t + \Delta t/2 + \Delta t/2) - T(x, t - \Delta t/2 + \Delta t/2)}{2\Delta t/2} = \frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} \quad (1.3.1)$$

Per lo spazio utilizziamo le derivate calcolate negli esempi precedenti. A questo punto abbiamo $\frac{\partial T}{\partial t}(x, t + \Delta t/2)$, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t)$ e $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t + \Delta t)$ per calcolare l'equazione facciamo la media delle due derivate spaziali ai tempi t e $t + \Delta t$.

$$\begin{aligned} \frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = \frac{K}{2} \left(\frac{T(x + \Delta x, t) + T(x - \Delta x, t) - 2T(x, t)}{\Delta x^2} \right. \\ \left. + \frac{T(x + \Delta x, t + \Delta t) + T(x - \Delta x, t + \Delta t) - 2T(x, t + \Delta t)}{\Delta x^2} \right) \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

In pochi passaggi si arriva a separare le parti a tempo differente, con $\eta = K \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$:

$$\left(\frac{2}{\eta} + 2 \right) T(x, t + \Delta t) - T(x + \Delta x, t + \Delta t) - T(x - \Delta x, t + \Delta t) = \left(\frac{2}{\eta} - 2 \right) T(x, t) + T(x + \Delta x, t) + T(x - \Delta x, t) \quad (1.3.3)$$

Per ogni istante di tempo ho una matrice tridiagonale per il passo temporale che conosco e una per quello successivo. In sottosezione 2.2 descriverò come si risolve una di queste matrici.

2 Costruzione dell'algoritmo

2.1 Ottenere il sistema

Ho fatto un esempio con l'equazione del calore. Prima di procedere alla spiegazione su come si semplifica e si risolve il sistema di equazioni riconducibile ad una matrice tridiagonale spiegherò come condurre la PDE più generale ad un sistema del genere.

Scrivo la più generica equazione risolvibile con questo metodo:

$$\partial_t F = D_2 \partial_x^2 F + D_1 \partial_x F + V(x, t)F + U(x, t) \quad (2.1.1)$$

Il coefficiente della derivata temporale è ignorato perché è incluso negli altri coefficienti e deve essere diverso da 0, ovviamente anche D_2 , il coefficiente della derivata seconda spaziale non deve essere mai uguale a zero! Inoltre preferisco lasciare D_1 e D_2 come costanti nel tempo e nello spazio, ma cambiare le costanti costa poco a livello di complessità del calcolo, ma lascio però la dipendenza temporale e spaziale a V e U .

In seguito indicherò la il passo nello spazio a pedice con i e quello nel tempo in apice con j . Discretizzo l'equazione, calcolando la derivata temporale in $j + 1/2$ con passo $\Delta t/2$ e usando la definizione centrale, per quanto riguarda le derivate spaziali faccio la media tra quelle calcolate in j e in $j + 1$. I potenziali sono noti.

$$\begin{aligned} \frac{F_i^{j+1} - F_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(D_2 \frac{F_{i+1}^j + F_{i-1}^j - 2F_i^j}{\Delta x^2} + D_1 \frac{F_{i+1}^j - F_{i-1}^j}{2\Delta x} + F_i^j V_i^{j+1} + U_i^{j+1/2} + \right. \\ \left. D_2 \frac{F_{i+1}^{j+1} + F_{i-1}^{j+1} - 2F_i^{j+1}}{\Delta x^2} + D_1 \frac{F_{i+1}^{j+1} - F_{i-1}^{j+1}}{2\Delta x} + F_i^j V_i^j + U_i^{j+1/2} \right) \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

ho usato la definizione di derivata centrale anche per ∂_x in modo da mantenere la precisione Δx^2 .

Non mostro i passaggi che portano al risultato. Per comodità indico $\eta = \frac{D_2 \Delta t}{\Delta x^2}$ e scrivo:

$$\begin{aligned} \left(-\eta + D_1 \frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) F_{i-1}^{j+1} + \left(2 + 2\eta - \Delta t V_i^{j+1/2} \right) F_i^{j+1} + \left(-\eta - D_1 \frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) F_{i+1}^{j+1} - \Delta t U_i^{j+1/2} = \\ \left(\eta - D_1 \frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) F_{i-1}^j + \left(2 - 2\eta + \Delta t V_i^{j+1/2} \right) F_i^j + \left(\eta + D_1 \frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) F_{i+1}^j + \Delta t U_i^{j+1/2} \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

Per rendere più chiara spiegazione e risoluzione della matrice tridiagonale riassumo l'equazione precedente in:

$$a_i^j F_{i-1}^{j+1} + d_i^j F_i^{j+1} + c_i^j F_{i+1}^{j+1} + e_i^j = a k_i^j F_{i-1}^j + d k_i^j F_i^j + c k_i^j F_{i+1}^j + e k_i^j \quad (2.1.4)$$

con:

$$\begin{aligned} a_i^j &= -1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{\Delta x}{2} & a k_i^j &= 1 - \frac{D_1}{D_2} \frac{\Delta x}{2} & \text{parametri dei } (F_{i-1}^*) \\ d_i^j &= \frac{1}{\eta} \left(2 - \Delta t V_i^{j+1/2} \right) + 2 & d k_i^j &= \frac{1}{\eta} \left(2 + \Delta t V_i^{j+1/2} \right) - 2 & \text{parametri dei } (F_i^*) \\ c_i^j &= -1 - \frac{D_1}{D_2} \frac{\Delta x}{2} & c k_i^j &= 1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{\Delta x}{2} & \text{parametri dei } (F_{i+1}^*) \\ e_i^j &= -\frac{\Delta x^2}{D_2} U_i^{j+1/2} & e k_i^j &= \frac{\Delta x^2}{D_2} U_i^{j+1/2} & \text{funzioni esterne} \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

In realtà i parametri e_i^j e $e k_i^j$ dato che non moltiplicano la funzione possono essere accorpati. Ho preferito mantenerli separati perché mi sembrava che in questo modo fosse più chiaro capirne la provenienza. Per lo stesso motivo ho preferito mantenere separati i valori che moltiplicano la funzione nota e quelli che moltiplicano il passo successivo.

2.2 La matrice Tridiagonale: soluzione

D'ora in avanti ometto la dipendenza temporale delle componenti della matrice. Per ogni istante di tempo j ho un sistema di N equazioni nella forma:

$$a_i F_{i-1}^{j+1} + d_i F_i^{j+1} + c_i F_{i+1}^{j+1} + e_i = a k_i F_{i-1}^j + d k_i F_i^j + c k_i F_{i+1}^j + e k_i \quad (2.2.1)$$

Dove j rappresenta l'istante di tempo che conosco e $j + 1$ quello che sto calcolando. La prima cosa da fare è portare nel membro a destra tutti i parametri noti, dando per scontato che l'unica incognita dell'equazione è la funzione:

$$a_i F_{i-1}^{j+1} + d_i F_i^{j+1} + c_i F_{i+1}^{j+1} = a k_i F_{i-1}^j + d k_i F_i^j + c k_i F_{i+1}^j + e k_i - e_i \quad (2.2.2)$$

Per proseguire con la risoluzione è meglio passare alla rappresentazione matriciale del sistema (rappresento gli N punti rispettando le convenzioni del C, quindi $i = 0 \rightarrow N - 1$):

$$\begin{pmatrix} d_0 & c_0 & & & \\ a_1 & d_1 & c_1 & & \\ & & \dots & & \\ & & & a_{N-2} & d_{N-2} & c_{N-2} \\ & & & & a_{N-1} & d_{N-1} \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} dk_0 & ck_0 & & & \\ ak_1 & dk_1 & ck_1 & & \\ & & \dots & & \\ & & & ak_{N-2} & dk_{N-2} & ck_{N-2} \\ & & & & ak_{N-1} & dk_{N-1} \end{pmatrix} \mathbf{F}^j + \begin{pmatrix} ek_0 - e_0 \\ ek_1 - e_1 \\ \dots \\ ek_{N-2} - e_{N-2} \\ ek_{N-1} - e_{N-1} \end{pmatrix} \quad (2.2.3)$$

Per comodità compatto il lato conosciuto in un vettore \mathbf{B}^j le cui componenti sono:

$$b_i^j = ak_i F_{i-1}^j + dk_i F_i^j + ck_i F_{i+1}^j + ek_i - e_i \quad (2.2.4)$$

$$\begin{pmatrix} d_0 & c_0 & & & \\ a_1 & d_1 & c_1 & & \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ & & & a_{N-2} & d_{N-2} & c_{N-2} \\ & & & & a_{N-1} & d_{N-1} \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \mathbf{B}^j \quad (2.2.5)$$

A questo punto procedo con il trasformare la matrice nella somma di una matrice identità e di una matrice con valori non nulli solo nelle celle sopra alla diagonale. Svolgo i primi passaggi:

$$\begin{pmatrix} d_0 & c_0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & d_1 & c_1 & \dots & 0 \\ & . & . & . & . \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & \frac{c_0}{d_0} & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & d_1 & c_1 & \dots & 0 \\ & . & . & . & . \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} \frac{b_0}{d_0} \\ b_1 \\ \dots \end{pmatrix} \quad (2.2.6)$$

Proseguendo, chiamando $h_0 = \frac{c_0}{d_0}$ e $p_0 = \frac{b_0}{d_0}$, multiplico la prima riga per a_1 e la sottraggo alla seconda, in modo da eliminare a_1 dalla seconda riga:

$$\begin{pmatrix} 1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 - a_1 & d_1 - a_1 h_0 & c_1 & \dots & 0 \\ & . & . & . & . \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} p_0 \\ b_1 - a_1 p_0 \\ \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \frac{c_1}{d_1 - a_1 h_0} & \dots & 0 \\ & . & . & . & . \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} p_0 \\ \frac{b_1 - a_1 p_0}{d_1 - a_1 h_0} \\ \dots \end{pmatrix} \quad (2.2.7)$$

A questo punto chiamo $h_1 = \frac{c_1}{d_1 - a_1 h_0}$ e $p_1 = \frac{b_1 - a_1 p_0}{d_1 - a_1 h_0}$ e ripeto il ragionamento precedente sottraendo la seconda riga alla terza:

$$\begin{pmatrix} 1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & h_1 & \dots & 0 \\ 0 & a_3 - a_3 & d_3 - a_3 h_1 & c_3 & \dots \\ & . & . & . & . \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ b_3 - a_3 p_1 \\ \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & h_1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{d_3 - a_3 h_1} & \dots \\ & . & . & . & . \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \frac{b_3 - a_3 p_1}{d_3 - a_3 h_1} \\ \dots \end{pmatrix} \quad (2.2.8)$$

A questo punto chiamo $h_3 = \frac{c_3}{d_3 - a_3 h_1}$ e $p_3 = \frac{b_3 - a_3 p_1}{d_3 - a_3 h_1}$ e proseguo, ottengo così le regole:

$$h_i = \frac{c_i}{d_i - a_i h_{i-1}} \quad (2.2.9)$$

e

$$p_i = \frac{b_i - a_i p_{i-1}}{d_i - a_i h_{i-1}} \quad (2.2.10)$$

A questo punto ho semplificato il sistema:

$$\begin{pmatrix} 1 & h_0 & & & \\ & 1 & h_1 & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 & h_{N-2} \\ & & & & & 1 \end{pmatrix} \mathbf{F}^{j+1} = \mathbf{P} \quad (2.2.11)$$

(2.2.12)

Per risolvere il sistema devo calcolare il vettore delle \mathbf{P} per poi ottenere i valori di F^{j+1} a partire dall'ultimo $F_{N-1}^{j+1} = p_{N-1}$ con la formula:

$$F_i^{j+1} = p_i + h_i F_{i+1}^{j+1} \quad (2.2.13)$$

A questo punto ho bisogno di conoscere come trattare le condizioni al contorno.

3 Condizioni al contorno

In seguito espongo come è possibile adottare alcune condizioni al contorno:

- Dirichlet: Conosco i valori della funzione negli estremi del dominio
- Neumann: Conosco i valori della derivata della funzione negli estremi del dominio
- Robin: Conosco una combinazione lineare tra il valore della funzione e la sua derivata negli estremi del dominio
- Miste: Negli estremi ho tipi differenti di condizioni al contorno

3.1 Dirichlet

Conosco il valore della funzione negli estremi del dominio.

$$F(x, t) = f(x, t) \forall x \in \partial D \quad (3.1.1)$$

Assegno a F_0^{j+1} e F_{N-1}^{j+1} il valore noto, e' quindi inutile calcolare la prima e l'ultima riga della matrice $N \times N$ e posso trattare tutto come se la matrice fosse $N - 2 \times N - 2$, con indici da 1 a $N - 2$. Per tenere conto delle condizioni, senza dover apportare modifiche all'algoritmo devo cambiare i valori:

$$\begin{array}{cc|cc} a'_0 = 0 & ak'_0 = 0 & a'_1 = 0 & ak'_1 = ak_1 \\ d'_0 = 1 & dk'_0 = 0 & d'_1 = d_1 & dk'_1 = dk_1 \\ c'_0 = 0 & ck'_0 = 0 & c'_1 = c_1 & ck'_1 = ck_1 \\ e'_0 = -F_0^{j+1} & ek'_0 = 0 & e'_1 = e_1 + a_1 F_0^{j+1} & ek'_1 = ek_1 \end{array} \quad (3.1.2)$$

Che equivale a scrivere:

$$\begin{array}{ccc} b'_0 = F_0^{j+1} & h'_0 = 0 & p'_0 = F_0^{j+1} \\ b'_1 = b_1 - a_1 F_0^{j+1} & h'_1 = \frac{c_1}{d_1} & p'_1 = \frac{b'_1}{d'_1} \end{array} \quad (3.1.3)$$

Di conseguenza $F_1^{j+1} = p'_1 + h'_1 F_2^{j+1}$ e $F_0^{j+1} = p'_0 + h'_0 F_1^{j+1} = F_0^{j+1}$.

Mentre se la condizione si presenta come l'ultimo punto del dominio:

$$\begin{array}{cc|cc} a'_{N-2} = a_{N-2} & ak'_{N-2} = ak_{N-2} & a'_{N-1} = 0 & ak'_{N-1} = 0 \\ d'_{N-2} = d_{N-2} & dk'_{N-2} = dk_{N-2} & d'_{N-1} = 1 & dk'_{N-1} = 0 \\ c'_{N-2} = 0 & ck'_{N-2} = ck_{N-2} & c'_{N-1} = 0 & ck'_{N-1} = 0 \\ e'_{N-2} = e_{N-2} + c_{N-2} F_{N-1}^{j+1} & ek'_{N-2} = ek_{N-2} & e'_{N-1} = -F_{N-1}^{j+1} & ek'_{N-1} = 0 \end{array} \quad (3.1.4)$$

Che posso riscrivere:

$$\begin{array}{ccc} b'_{N-2} = b_{N-2} - c_{N-2} F_{N-1}^{j+1} & h'_{N-2} = 0 & p'_{N-2} = p_{N-2} \\ b'_{N-1} = F_{N-1}^{j+1} & h'_{N-1} = 0 & p'_{N-1} = F_0^{j+1} \end{array} \quad (3.1.5)$$

e di conseguenza $F_{N-1}^{j+1} = p'_{N-1} = F_{N-1}^{j+1}$ e $F_{N-2}^{j+1} = p'_{N-2} + h'_{N-2} F_{N-1}^{j+1} = p'_{N-2}$.

3.2 Neumann

Conosco il valore della derivata negli estremi del dominio.

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x, t) = f(x, t) \forall x \in \partial D \quad (3.2.1)$$

La spiegazione e l'esempio per questa risoluzione lo fornisco nel paragrafo dedicato a Robin.

3.3 Robin

Conosco una combinazione lineare tra la derivata e il valore della funzione negli estremi del dominio.

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x, t) + r(x, t)F(x, t) = g(x, t) \forall x \in \partial D \quad (3.3.1)$$

Come prima, per mantenere la precisione del metodo (Δx^2) non posso usare la definizione centrale, ho quindi bisogno di inventarmi un "nodo fantasma" F_{-1}^{j+1} (o F_N^{j+1} se fosse la condizione nell'ultimo punto del dominio):

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x(i=0), t(j=j+1)) = \frac{F_1^{j+1} - F_{-1}^{j+1}}{2\Delta x} \quad (3.3.2)$$

Sostituisco nella (3.3.1) per $i=0$ e al tempo geerico $j=n$:

$$\frac{F_1^n - F_{-1}^n}{2\Delta x} + R_0^n F_0^n = g_0^n \rightarrow F_{-1}^n = F_1^n + 2\Delta x (R_0^n F_0^n - g_0^n) \quad (3.3.3)$$

Partendo dalla forma matriciale del problema generico:

$$a_0 F_{-1}^{j+1} + d_0 F_0^{j+1} + c_0 F_1^{j+1} + e_0 = a k_0 F_{-1}^j + d k_0 F_0^j + c k_0 F_1^j + e k_0 \quad (3.3.4)$$

e sostituendo F_{-1}^n :

$$a_0 \left(F_1^{j+1} + 2\Delta x \left(R_0^{j+1} F_0^{j+1} - g_0^{j+1} \right) \right) + d_0 F_0^{j+1} + c_0 F_1^{j+1} = a k_0 \left(F_1^j + 2\Delta x \left(R_0^j F_0^j - g_0^j \right) \right) + d k_0 F_0^j + c k_0 F_1^j \quad (3.3.5)$$

A questo punto raccolgo i termini dello stesso punto della funzione:

$$\left(d_0 + 2a_0 R_0^{j+1} \Delta x \right) F_0^{j+1} + (c_0 + a_0) F_1^{j+1} - 2a_0 g_0^{j+1} \Delta x = \left(d k_0 + 2a k_0 R_0^j \Delta x \right) F_0^j + (c k_0 + a k_0) F_1^j - 2a k_0 g_0^j \Delta x \quad (3.3.6)$$

E quindi i parametri interessati della matrice diventano:

$$\begin{aligned} a'_0 &= 0 & a k'_0 &= 0 \\ d'_0 &= d_0 + 2a_0 R_0^{j+1} \Delta x & d k'_0 &= d k_0 + 2a k_0 R_0^j \Delta x \\ c'_0 &= a_0 + c_0 & c k'_0 &= a k_0 + c k_0 \\ e'_0 &= e_0 - 2a_0 g_0^{j+1} \Delta x & e k'_0 &= e k_0 - 2a k_0 g_0^j \Delta x \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

Che equivale a scrivere:

$$\begin{aligned} b'_0 &= d k'_0 F_0^j + c k'_0 F_1^j + 2\Delta x \left(a_0 g_0^{j+1} - a k_0 g_0^j \right) + e k_0 - e_0 \\ h'_0 &= \frac{c'_0}{d'_0} \\ p'_0 &= \frac{b'_0}{d'_0} \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

e di conseguenza $F_0^{j+1} = p'_0 + h'_0 F_1^{j+1}$.

Mentre se la condizione si presenta come ultimo punto del dominio:

$$\frac{F_N^n - F_{N-2}^n}{2\Delta x} + R_{N-1}^n F_{N-1}^n = g_{N-1}^n \rightarrow F_N^n = F_{N-2}^n - 2\Delta x (R_{N-1}^n F_{N-1}^n - g_{N-1}^n) \quad (3.3.9)$$

Salto i passaggi, molto simili a quelli della spiegazione precedente, per il calcolo di b'_{N-1} andranno usati i seguenti parametri:

$$\begin{aligned} a'_{N-1} &= a_{N-1} + c_{N-1} & a k'_{N-1} &= a k_{N-1} + c k_{N-1} \\ d'_{N-1} &= d_{N-1} - 2c_{N-1} R_{N-1}^{j+1} \Delta x & d k'_{N-1} &= d k_{N-1} - 2c k_{N-1} R_{N-1}^j \Delta x \\ c'_{N-1} &= 0 & c k'_{N-1} &= 0 \\ e'_{N-1} &= e_{N-1} + c_{N-1} g_{N-1}^{j+1} \Delta x & e k'_{N-1} &= e k_{N-1} + c k_{N-1} g_{N-1}^{j+1} \Delta x \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

Che equivale a scrivere:

$$\begin{aligned} b_{N-1} &= a k'_{N-1} F_{N-2}^j + d k'_{N-1} F_{N-1}^j - 2\Delta x \left(c_{N-1} g_{N-1}^{j+1} - c k_{N-1} g_{N-1}^j \right) + e k_{N-1} - e_{N-1} \\ h'_{N-1} &= 0 \\ p'_{N-1} &= \frac{b'_{N-1} + a'_{N-1} p_{N-2}}{d'_{N-1} - a'_{N-1} h_{N-2}} \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

e di conseguenza $F_{N-1}^{j+1} = p'_{N-1}$, anche perchè è il primo punto da cui si parte per calcolare il valore della funzione in $j+1$.

Se faccio in modo di eliminare il coefficiente che moltiplica il valore della funzione (gli R) ottengo le condizioni a contorno di Neuman.

3.4 Osservazione

Il modo in cui ho trattato i parametri per quanto riguarda le condizioni al contorno di Dirichlet nei punti 0 e $N - 1$, non è matematicamente corretto infatti i parametri andrebbero messi tutti a 0 in quanto quei punti non fanno parte dell'algoritmo.

Ho impostato i valori per avere un algoritmo che possa svolgere il calcolo rispettando le condizioni al contorno senza sapere quali siano, mettendo nelle mani dell'utente, che si occuperà di impostare i corretti parametri della matrice, la gestione delle condizioni.

4 Applicazioni

4.1 Equazione del calore

Riprendiamo l'equazione del calore:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = k \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) \quad (4.1.1)$$

Per rispettare la convenzione che ho scelto $D_2 = k$, $D_1 = U = V(x, t) = 0$.

A questo punto posso sostituire, con $\eta = k \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$:

$$\begin{aligned} a_i^j &= -1 & ak_i^j &= 1 \\ d_i^j &= \frac{2}{\eta} + 2 & dk_i^j &= \frac{2}{\eta} - 2 \\ c_i^j &= -1 & ck_i^j &= 1 \\ e_i^j &= 0 & ek_i^j &= 0 \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

sostituire i parametri nella matrice, scegliere le condizioni al contorno e procedere con i calcoli.

4.2 Equazione di Schrödinger

Lavoriamo con l'equazione di Schrödinger dipendente dal tempo:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \psi(x, t) \quad (4.2.1)$$

prima di tutto portiamola in una forma tale che non ci sia nulla a moltiplicare la derivata temporale:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = \left[i \frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\Lambda(x, t)}{i\hbar} \right] \psi(x, t) \quad (4.2.2)$$

Ho usato Λ per indicare il potenziale per rispettare la convenzione. $D_2 = i \frac{\hbar}{2m}$, $D_1 = U = 0$ e $V(x, t) = \frac{\Lambda(x, t)}{i\hbar}$.

A questo punto, con $\eta = i \frac{\hbar}{2m} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$, posso sostituire, usando k come indice spaziale:

$$\begin{aligned} a_k^j &= -1 & ak_k^j &= 1 \\ d_k^j &= \frac{1}{\eta} \left(2 - \Delta t V_k^{j+1} \right) + 2 & dk_k^j &= \frac{1}{\eta} \left(2 + \Delta t V_k^j \right) - 2 \\ c_k^j &= -1 & ck_k^j &= 1 \\ e_k^j &= 0 & ek_k^j &= 0 \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

4.3 Stabilità

Per mostrare che lo schema proposto è stabile utilizzo il principio di Von Neumann: perché un metodo si riveli stabile non deve propagare eventuali errori che nascono dal calcolo. Definiamo l'errore come:

$$E_k^j = F_k^j - u_k^j \quad (4.3.1)$$

Dove ho usato k invece che i per non creare confusione con l'unità immaginaria. F_k^j è il valore della soluzione calcolata con l'algoritmo mentre u_k^j è il valore reale della funzione nel punto (k, j) .

Si definisce il fattore crescita:

$$G = \left| \frac{E_k^{j+1}}{E_k^j} \right| \quad (4.3.2)$$

che serve come criterio per comprendere la stabilità dello schema. Come vedremo più avanti è comodo studiare G in funzione delle frequenze spaziali. Per ogni frequenza:

- $G < 1$: l'algoritmo è stabile e gli errori vengono attenuati passo per passo.
- $G > 1$: l'algoritmo non è stabile e gli errori vengono amplificati passo per passo.
- $G = 1$: gli errori non vengono né amplificati né ridotti dall'evoluzione, anche in questo caso viene considerato stabile.

se $G < 1$ per tutte le frequenze allora il l'algoritmo si considera incondizionatamente stabile.

Per fare l'analisi in frequenza faccio la trasformata di Fourier spaziale dell'errore della funzione:

$$E_k^j = \sum_{\omega} \hat{e}_{\omega}^j e^{i\omega x} \quad (4.3.3)$$

Della trasformata prendiamo un solo termine per una data ω . Mi aspetto che la propagazione dell'errore soddisfi la stessa equazione che sto simulando e quindi procedo sostituendo l'espressione nello schema , a partire da (2.2.2), e ignorando per semplicità i termini e e ek ottengo:

$$\left(a_k e^{i\omega(k-1)\Delta x} + d_k e^{i\omega k \Delta x} + c_k e^{i\omega(k+1)\Delta x} \right) \hat{e}_{\omega}^{j+1} = \left(a k_i e^{i\omega(k-1)\Delta x} + d k_i e^{i\omega k \Delta x} + c k_k e^{i\omega(k+1)\Delta x} \right) \hat{e}_{\omega}^j \quad (4.3.4)$$

abbiamo:

$$\frac{\hat{e}_{\omega}^{j+1}}{\hat{e}_{\omega}^j} = \frac{a k_i e^{-i\omega \Delta x} + d k_i + c k_k e^{i\omega \Delta x}}{a_k e^{-i\omega \Delta x} + d_k + c_k e^{i\omega \Delta x}} \quad (4.3.5)$$

dalla (2.1.5) deduco:

$$\begin{aligned} a_k^j &= -a k_k^j \\ c_k^j &= -c k_k^j \\ c_k^j &= -a_k^j - 2 \end{aligned}$$

e sostituisco nell'uguaglianza:

$$\frac{\hat{e}_{\omega}^{j+1}}{\hat{e}_{\omega}^j} = - \left(1 - \frac{d + dk}{d - 2 \cos(\omega \Delta x) - 2i(1 + a) \sin(\omega \Delta x)} \right) \quad (4.3.6)$$

da cui ricavo G :

$$G = \left| 1 - \frac{d + dk}{d - 2 \cos(\omega \Delta x) - 2i(1 + a) \sin(\omega \Delta x)} \right| \quad (4.3.7)$$

Non posso più essere generale. Per fare il valore assoluto devo conoscere se a , d e dk sono reali o complessi. Per esempio, sostituendo i valori che trovo in (4.1.2) per l'equazione del calore, dopo le sostituzioni e varie semplificazioni trovo che:

$$G = \frac{|\Delta x^2 - \Delta t k (1 - \cos(\omega \Delta t))|}{\Delta x^2 + \Delta t k (1 - \cos(\omega \Delta t))} \quad (4.3.8)$$

In cui si vede che $G < 1$ per tutte le frequenze diverse dai multipli di $\omega = 2\pi/\Delta x$, in quei casi $G = 1$ e quindi tenderanno a rimanere delle oscillazioni nella soluzione.

Mentre usando i valori di (4.2.3) che uso per la risoluzione dell'equazione di Schrödinger , utilizzando le stesse notazioni ottengo:

$$G = \left| \frac{(\Delta x^2 \Lambda m - \hbar^2 (1 - \cos(\omega \Delta x))) \Delta t + 2i \Delta x^2 \hbar m}{(\Delta x^2 \Lambda m - \hbar^2 (1 - \cos(\omega \Delta x))) \Delta t - 2i \Delta x^2 \hbar m} \right| \quad (4.3.9)$$

Si nota facilmente che $G = 1$ per tutte le frequenze; vuol dire l'algoritmo propagherà gli errori, ma senza amplificarli.

Parte II

Simulazione

5 Il programma: descrizione e scelta dei parametri

Per semplicità e alleggerire i calcoli ho impostato $\hbar = 1$, Gli eseguibili compilabili dal Makefile sono i seguenti, nei commenti è spiegato come eseguirli:

```
#il progama principale
single: MainC.cpp TridiagC.o CrankSolverC.o impostazioniC.o experimentC.o
    @echo Compilo $$
    @$(CC11) $(CFLAGS) -o $$ $^ -DUSECOMPLEX
#funziona come single, ma ripete l'esperimento per una lista di potenziali
experiment: Experiments.cpp TridiagC.o CrankSolverC.o impostazioniC.o experimentC.o
    @echo Compilo $$
    @$(CC11) $(CFLAGS) -o $$ $^ -DUSECOMPLEX
#disegna soluzione, errore e pesi dell'integrale del file di dati in argomento
drawer: drawer.cpp preparedraw.o
    @echo Compilo $$
    @$(CC11) $(CFLAGS) -o $$ $^ $(LIBROOT) $(CFLAGSROOT)
#controlla i .dat letti in namelist.txt, varie opzioni con --help
analisi: analisi.cpp preparedraw.o
    @echo Compilo $$
    @$(CC11) $(CFLAGS) -o $$ $^ $(LIBROOT) $(CFLAGSROOT)
#visualizza vari potenziali in diversi files
CVD: CVDrawer.cpp impostazioniC.o TridiagC.o
    @echo Compilo $$
    @$(CC11) $(CFLAGS) -o $$ $^ -DUSECOMPLEX $(LIBROOT) $(CFLAGSROOT)
#una interfaccia grafica per osservare un esperimento alla volta
preview: preview.cpp visual.o libVisual.so
    @echo Compilo $$
    @$(CC11) $(CFLAGS) -o $$ -DSTANDALONE $^ $(LIBROOT) $(CFLAGSROOT)
```

- Il programma più semplice (*single*) è composto da un blocco *impostazioni* che carica i file con le informazioni sulla simulazione, crea la trimatrice e le condizioni iniziali, e un blocco *CrankSolver* che si occupa di svolgere risolvere il sistema passo per passo (nel nostro caso non avendo potenziali che dipendono dal tempo la riduzione della trimatrice viene fatta solo una volta, nella costruzione del *CrankSolver*). Ho scelto di impostare il *CrankSolver* in modo che contenga solo i punti del passo attuale perché l'elevato numero di punti rischia di intasare la memoria del sistema piuttosto in fretta: i punti calcolati vengono salvati su un file in una cartella `./results`, che deve essere creata prima di lanciare l'eseguibile, il numero di punti e la frequenza di essi viene deciso nei file di impostazione.
- *experiment* funziona come *single* ma ripete la simulazione per ogni potenziale che trova nella lista *namelist.txt* nella cartella in cui viene chiamato.
- *drawer*, *analisi*, *CVD* e *preview* sono i programmi che vengono utilizzati nell'analisi delle simulazioni:
 - *analisi* carica i file *.dat* contenuti in *namelist.txt* e ne fa varie analisi (plot degli errori, plot degli integrali nella prima/seconda metà del dominio, plot della posizione dei massimi).
 - *drawer* fa le stesse operazioni di analisi, ma relative a un singolo file *.dat*, inoltre mostra l'evoluzione dell'onda grazie a un *TGraph2D*.
 - *CVD* mostra i vari potenziali il cui elenco è contenuto nel file *inforamelist.txt*, carica le impostazioni del dominio da un file *settings.set* dato.
 - *preview* deve essere lanciato con `./runscript.sh` (che imposta `export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH`) è una piccola interfaccia grafica che permette di fare qualche analisi sui risultati della simulazione.

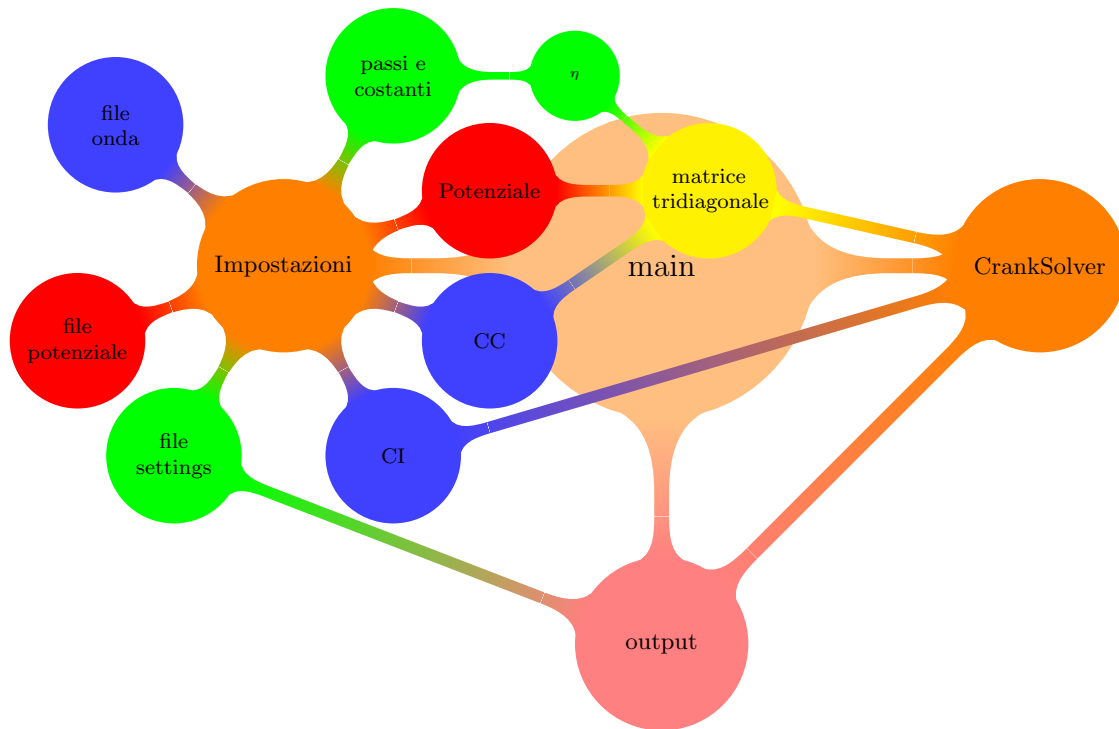


Figura 5.1: Collegamenti tra i blocchi del programma

5.1 Impostazioni

Il programma più semplice, compilabile con `$> make single` carica i dati da tre file di impostazioni, in cui viene alternata una riga di commento, anticipata da un “#” e una con i valori dell’impostazione, l’ordine è importante e il commento non deve contenere spazi.

Il file generale delle impostazioni:

Listing 1: Impostazioni principali

```

#massa
1
#lunghezza
60
#tmax
10
#Ndipende_da_intervallo=0
0
#Nl
10000
#spacestep.
0.0015
#Nt
1000
#timestep
0.001
#timeskip
100
#spaceskip
1
#precisione
5e-3

```

In questo file fornisco i parametri principali della simulazione, quelli che ho previsto che avrei cambiato più di rado durante la simulazione. “*#massa*” e “*#lunghezza*” sono ovvi, “*#tmax*” è il tempo a cui si ferma la simulazione. L’opzione “*#Ndipende_da_intervallo=0*” se impostata uguale a 0 fa sì che il numero di passi (spaziali e temporali) venga calcolato conoscendo la lunghezza totale e il passo, se impostata diversa da 0 invece fa sì che il programma calcoli il passo a partire dalla lunghezza totale e il numero di punti voluti. Le opzioni “*#timeskip*” e “*#spaceskip*” servono nel momento di salvare i risultati: il primo imposta ogni quanti passi temporali esportare il vettore di punti, che vengono salvati ad intervalli decisi dal secondo parametro. Il parametro “*#precisione*” invece blocca la simulazione prima del tempo massimo se l’errore (vedi sottosezione 5.4) supera il valore impostato, se lo si imposta a 0 salta il controllo.

Il file delle condizioni iniziali:

Listing 2: Impostazioni CI

```
#Bump_Gauss
G
#impostazioni_onda_norm_stdev_midpoint
1 2 5
#impostazionicc0_012DNR_val_pesorobin
2 0 0
#impostazioniccN_012DNR_val_pesorobin
2 0 0
#Energia
10
```

Il primo parametro deve essere una lettera e serve a indicare al programma la forma del pacchetto d’onda nelle condizioni iniziali, se viene scritto “*b*” il programma disegnerà la funzione “bump” con parametri presi dalla riga successiva, nell’ordine “altezza del massimo”, “larghezza” e “punto del massimo”; negli altri casi una gaussiana con i parametri “altezza”, “deviazione standard” e “punto medio”. I due set successivi alle impostazioni dell’onda riguardano le condizioni al contorno, la prima che può essere 0, 1 o 2 indica il tipo di condizione, rispettivamente Dirichlet, Neumann o Robin sulla stessa riga il primo numero indica il valore della funzione, della derivata o della combinazione lineare, il terzo parametro viene solo utilizzata da Robin ed è il peso della funzione¹. L’ultima impostazione è l’energia con cui si vuole lanciare l’onda.

Il file del potenziale:

Listing 3: Impostazioni potenziale

```
#tipo_Gauss_Muro_Salto
M
#impostazioni_Val_Pos_Vpar
10 30 4
```

Il primo parametro imposta la forma del potenziale, che può essere una gaussiana, un “bump”, un rettangolo oppure un salto. Nella riga successiva il primo parametro imposta l’altezza del punto più alto del potenziale, se messo a 0 dice all’algoritmo di calcolare l’evoluzione in assenza di potenziale, il secondo parametro indica il centro della funzione se è pari, oppure la posizione del salto, l’ultimo parametro indica la larghezza o la deviazione standard del potenziale non viene utilizzato se la forma è il salto.

5.2 Condizioni iniziali

La mia idea è di simulare l’evoluzione di un pacchetto di onde piane quindi nella forma

$$\Psi(x, t) = \psi(x, t)e^{ik_0x - \omega t} \rightarrow \Psi(x, 0) = \psi(x, 0)e^{ik_0x} \quad (5.2.1)$$

O, meglio:

$$\Psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k)e^{ikx - \omega t} dk \quad (5.2.2)$$

Dato che utilizzerò un pacchetto di forma gaussiana, nel programma non farò mai l’integrale in quanto la trasformata di Fourier di una gaussiana è una gaussiana. Avrò:

$$\Psi(x, 0) = Ae^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} e^{ikx} \quad (5.2.3)$$

¹Per Dirichlet $f(\bar{x}) = var$, per Neumann $\left.\frac{df}{dx}\right|_{\bar{x}} = var$ e per Robin $\left.\frac{df}{dx}\right|_{\bar{x}} + (pesorobin)f(\bar{x}) = var$

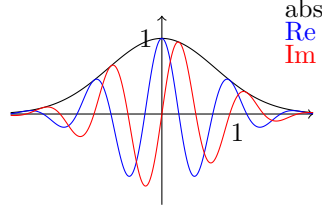


Figura 5.2: Le condizioni iniziali, con $x_0 = 0$, $A = 1$, $\sigma = 1$ e $k = 7$

Dove x_0 è il punto del massimo dell'onda, σ la sua deviazione standard e A un parametro che cambia l'altezza del massimo. La velocità di gruppo k dipende dall'energia secondo la relazione di dispersione $k(E) = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} E}$, tenendo conto che nelle condizioni iniziali le particelle del treno sono da considerarsi libere (ovvero non sono influenzate dal potenziale nel punto in cui le ho depositate).

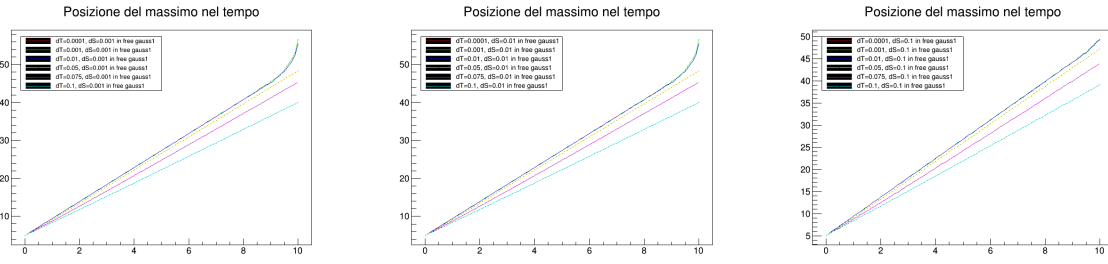
Poiché la forma dell'onda è moltiplicata per e^{ikx} e deve essere discretizzata devo come minimo scegliere un passo che non cada in problemi di aliasing, e quindi campionare con una frequenza superiore a k , ovvero il passo deve essere più piccolo di $1/k$.

La discretizzazione delle condizioni iniziali, gaussiane:

$$CI[j] = Ae^{-\frac{(j \cdot dx - x_0)^2}{2\sigma^2}} + ikj \cdot dx \quad (5.2.4)$$

5.3 Lancio senza potenziale: velocità

Voglio effettuare qualche simulazione senza potenziale per poter osservare come si comporta l'onda.



(a) Le differenze per $dS = 0.001$

(b) Le differenze per $dS = 0.01$

(c) Le differenze per $dS = 0.1$

Figura 5.3: Le posizioni dei massimi nel tempo della simulazione a vari passi temporali e spaziali

Prima di tutto effettuo diversi lanci per vedere come si comporta la simulazione al variare dei parametri. Dai primi lanci capisco che devo scartare l'idea di usare un passo temporale grande in quanto ho notato che le funzioni d'onda vengono "rallentate", come si può vedere in Figura 5.3 le simulazioni con un passo temporale più grande di 0.01 sono da scartare. Il punto in cui gli andamenti perdono l'andamento lineare e' dovuto al fatto che il pacchetto sta impattando contro il bordo del dominio e quindi inizia a rimbalzare e si iniziano a vedere le figure di interferenza.

Analizzando meglio l'equazione svolgo i calcoli e mi aspetto che la simulazione ritorni:

$$\Psi(x, t) = A(t)e^{-\frac{(x-x_0-vt)^2}{2\sigma(t)^2}} e^{ikx-\omega t} \quad (5.3.1)$$

dove $\omega = \frac{E}{\hbar}$ e $v = \frac{p}{m} = \frac{\sqrt{2mE}}{m}$, ricordando che stiamo lavorando con pacchetti di onde piane monocromatici. Quindi che i massimi delle onde da me simulate si spostino nel tempo seguendo la legge:

$$x_0(t) = x_0(0) + \sqrt{2\frac{E}{m}}t \quad (5.3.2)$$

Ho quindi verificato che la relazione funzionasse ma come si può osservare da (5.4) la simulazione tende a essere più vicina alla teoria solo a basse energie o ad avvicinarsi di più aumentando la precisione.

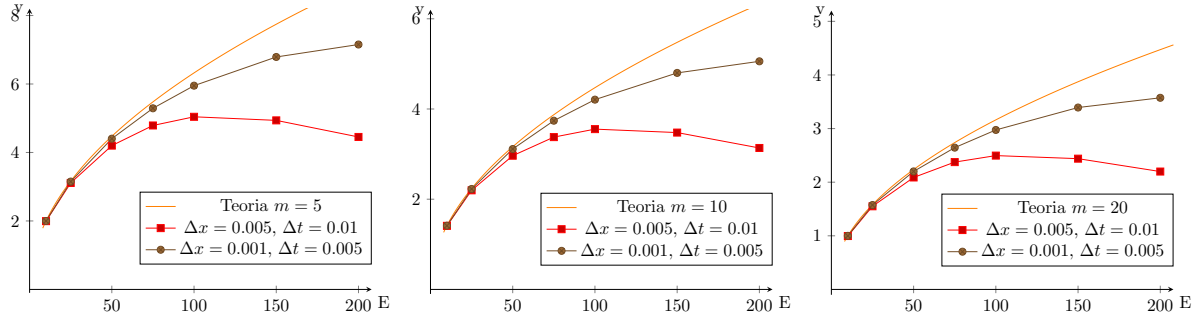


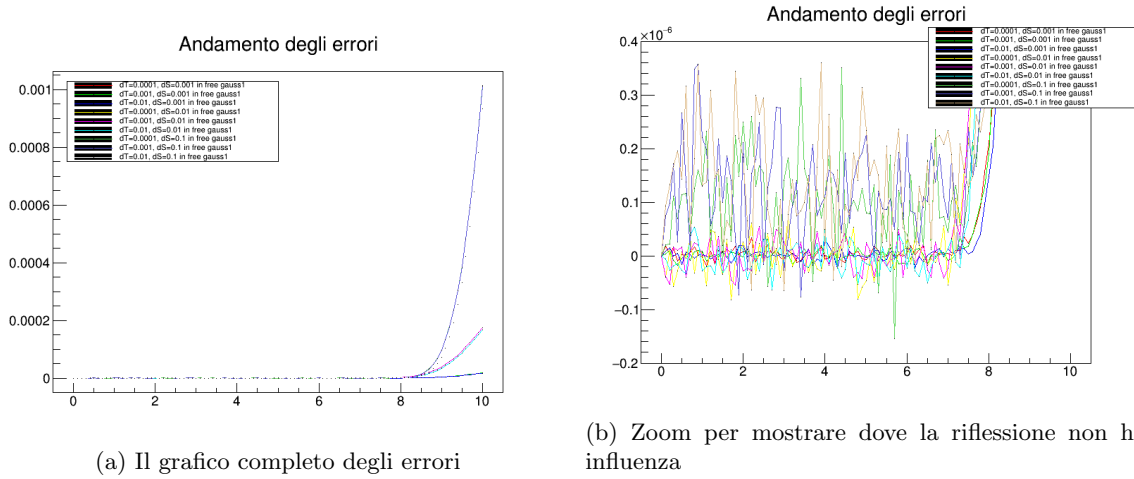
Figura 5.4: Studio velocità: si può osservare che con basse energie la simulazione tende a essere più fedele alla teoria.

5.4 Lancio senza potenziale: errore

Ho deciso di definire un “errore” per capire quanto la simulazione possa essere andata a buon fine utilizzando la norma della funzione, ricordando che le funzioni d’onda sono L^2 e quindi la loro norma è $|f|^2 = \int_X |f|^2 d\mu$. Per calcolarlo ho utilizzato la definizione dell’integrale discreto di Simpson, il che mi limita a poter fare solo simulazioni con un numero di passi pari (e in particolare multipli di 4 per aver un integrale preciso anche quando calcolo l’integrale solo nella prima o seconda metà del dominio) nello spazio.

Nella simulazione blocco il calcolo se la norma della funzione si discosta troppo dalla norma delle condizioni iniziali, il limite viene scelto nel file delle impostazioni.

A questo punto ho guardato l’errore nelle simulazioni, scartando a priori i passi temporali più grandi di 0.01, Figura 5.5a e 5.5b.



(a) Il grafico completo degli errori

(b) Zoom per mostrare dove la riflessione non ha influenza

Figura 5.5: Il grafico degli errori, si vede anche quanto la riflessione influisca sul modulo della funzione.

Quindi ho fatto una simulazione diminuendo il tempo massimo a 6 in modo da non avere a che fare con l’esplosione dell’errore dovuta al limite del dominio. e così da poter osservare quale fosse il miglior passo spaziale. Ho fatto i lanci con due diverse condizioni iniziali (gaussiana con σ 1 e 2).

Osservando Figura 5.6 utilizzare come passi spaziali e temporali valori compresi tra 0.01 e 0.001 ha un buon rapporto “errore sulla simulazione/peso sul calcolatore”, in particolare si nota che il passo spaziale influenza di più l’errore. Ho scelto di continuare con $dt = 0.01$ e $ds = 0.005$ in quanto hanno errore molto simile a $ds = 0.001$ (Figura 5.7) ma sono più rapidi nei calcoli (sulla mia macchina).

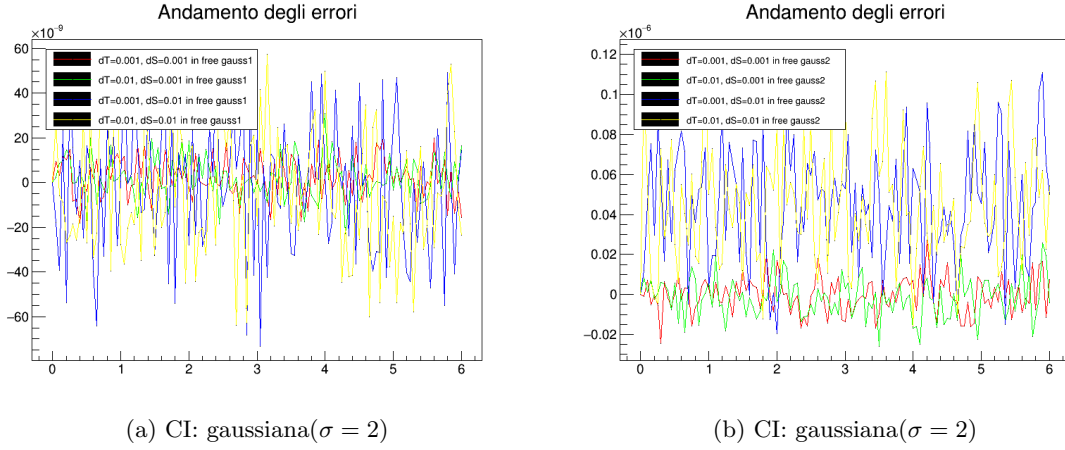


Figura 5.6: I passi che mi sembravano più opportuni a confronto

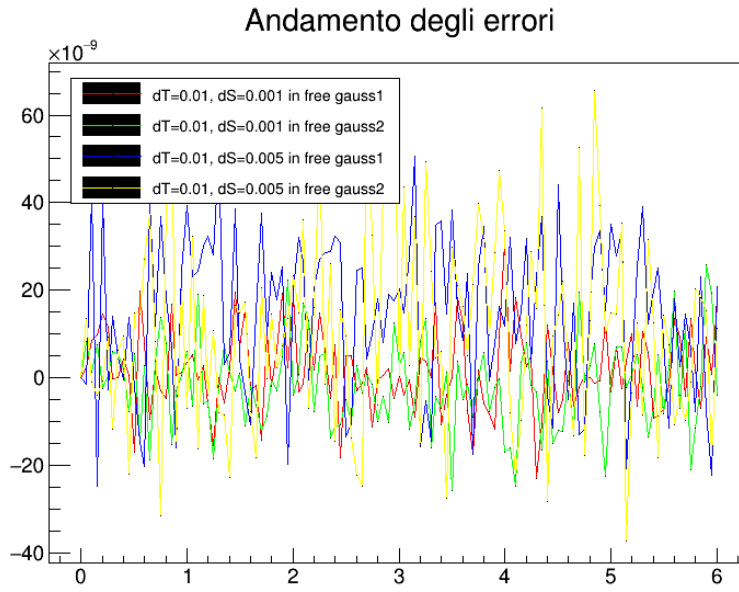


Figura 5.7: Gli errori dei passi che ritengo più convenienti

5.5 Dispersione dei pacchetti d'onda

La prima cosa che si può osservare nelle simulazioni (e in particolare in Figura 5.8) è la dispersione dell'onda, ovvero il pacchetto si allarga nel tempo. Questa è una caratteristica dell'equazione di Schrödinger, in quanto la sua forma è appunto quella di una qualsiasi equazione che descriva la dispersione.

Voglio calcolare la teoria di questo fenomeno per poterlo confrontare con i risultati che ho ottenuto nelle prime simulazioni. Per ottenere la soluzione dell'equazione con condizioni iniziali $\psi(x, 0) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ si passa dalla trasformata di Fourier spaziale $\hat{\psi}(x, 0) = \sqrt{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{k^2\sigma^2}{2}}$, che porta ad avere la funzione, con dipendenza temporale:

$$\hat{\psi}(k, t) = \sqrt{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{k^2\sigma^2}{2}}e^{-i\frac{E}{\hbar}t} = \sqrt{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{k^2\sigma^2}{2}}e^{-i\frac{\hbar^2 k^2}{2m}t} = \sqrt{2\pi\sigma^2}e^{-k^2 \frac{(\sigma^2 + i\hbar t/m)}{2}} \quad (5.5.1)$$

e poi ritrasformando:

$$\psi(x, t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + i\hbar t/m}}e^{-\frac{k^2}{2(\sigma^2 + i\hbar t/m)}} \quad (5.5.2)$$

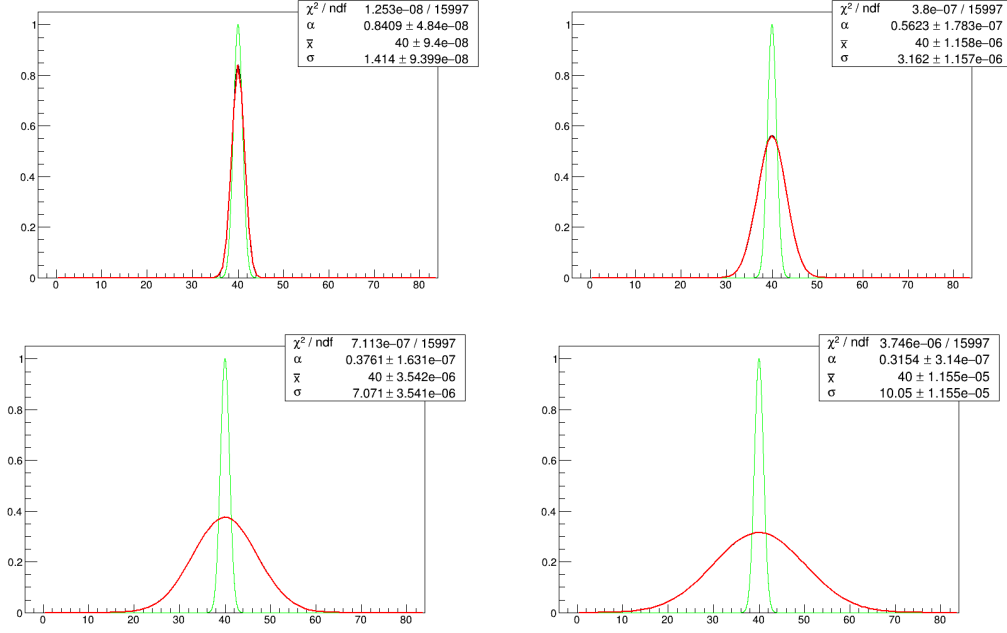


Figura 5.8: La dispersione delle gaussiane a $\sigma = 1$, in verde le condizioni iniziali

ora calcolo il valore assoluto della funzione:

$$|\psi(x, t)| = \frac{\sigma}{\sqrt[4]{\sigma^4 + (\hbar t/m)^2}} e^{-\frac{k^2}{2} \frac{\sigma^2}{\sigma^4 + (\hbar t/m)^2}} = \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma(t)}} e^{-\frac{k^2}{2\sigma^2(t)}} \quad (5.5.3)$$

E, chiamando σ_0 il valore assegnato nelle condizioni iniziali, mi aspetto dalla simulazione che σ evolva come

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sigma_0^4 + \left(\frac{\hbar}{m}t\right)^2}{\sigma_0^2}} \quad (5.5.4)$$

Ho fatto diversi fit, sul parametro σ , con diverse masse e diversi valori di σ iniziali, utilizzando come funzione da fittare (5.5.4). L'algoritmo sembra rispettare la dispersione, come si può vedere in Figura 5.9, in Figura 5.10 e in Figura 5.11 dove la funzione ha energia diversa da 0

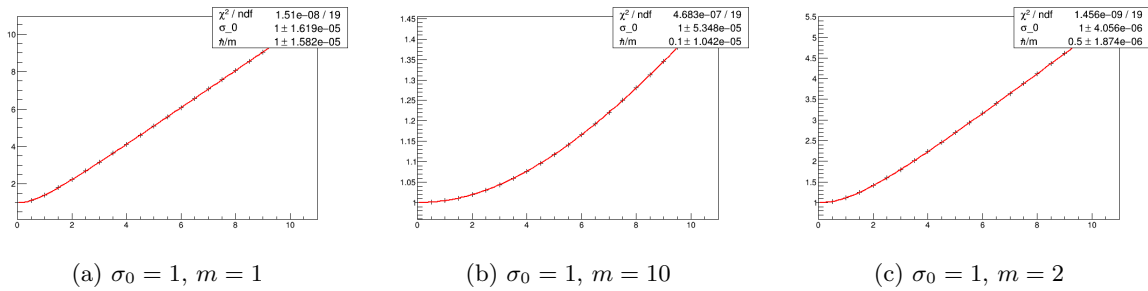


Figura 5.9: Alcuni fit dell'andamento della dispersione

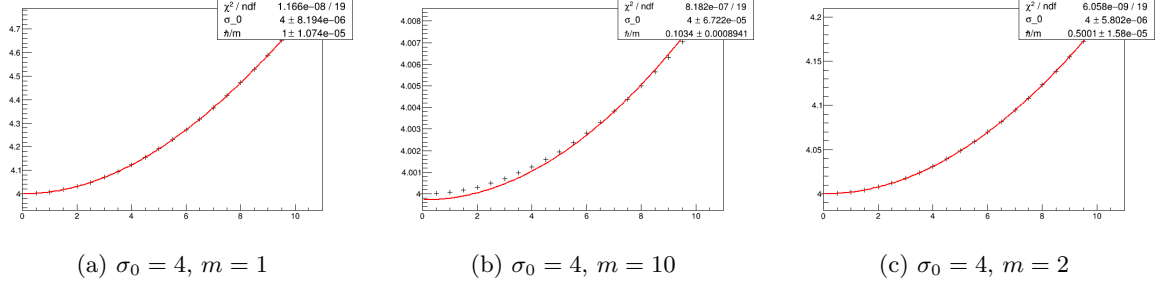


Figura 5.10: Alcuni fit dell'andamento della dispersione

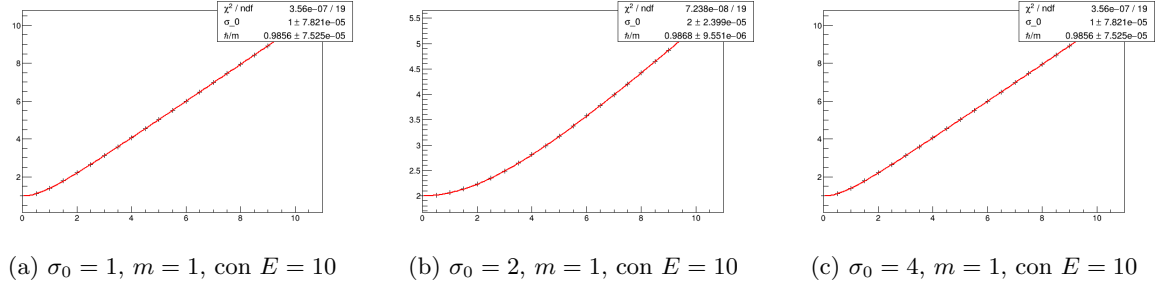


Figura 5.11: Alcuni fit dell'andamento della dispersione

5.6 La forma delle condizioni iniziali

Ho effettuato i test precedenti utilizzando come condizione iniziale un pacchetto d'onda gaussiano. Per effetto della dispersione è un pacchetto deltiforme che nel tempo si è disperso allargandosi in una gaussiana.

Ho provato ad utilizzare una forma differente per il pacchetto: la funzione "bump":

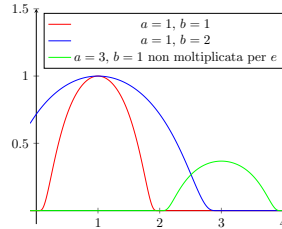


Figura 5.12: Alcuni esempi della funzione bump

$$bump = (x) = \begin{cases} e^{-\frac{b^2}{b^2 - (x-a)^2}} & \text{per } |x-a| < b \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (5.6.1)$$

Il "bump" è una funzione di test quindi è definita differente da 0 solo in un intervallo aperto, ed ha la caratteristica di avere tutte le derivate continue, questo mi permetterebbe di ignorare completamente le condizioni al contorno quando la funzione si trova lontano dai bordi della simulazione. Inoltre moltiplico il risultato per e per avere un pacchetto con il massimo alto 1, vedi Figura 5.12.

A questo punto simulo il pacchetto e confronto l'errore con uno gaussiano. Come si può vedere dalla Figura 5.13 non è una buona idea.

L'errore cresce molto verso la fine della simulazione, questo potrebbe essere dovuto al fatto che sta impattando contro i limiti del dominio, inoltre se si osserva l'evoluzione della funzione si vede che perde praticamente subito la forma iniziale e quindi anche i vantaggi di avere le code pari a 0.

A questo punto l'idea migliore per il pacchetto d'onda sembra essere la gaussiana.

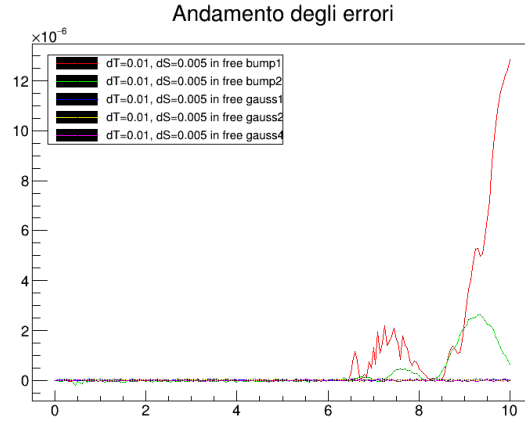


Figura 5.13: l'evoluzione dell'errore del “bump” confrontata con quella di un pacchetto gaussiano

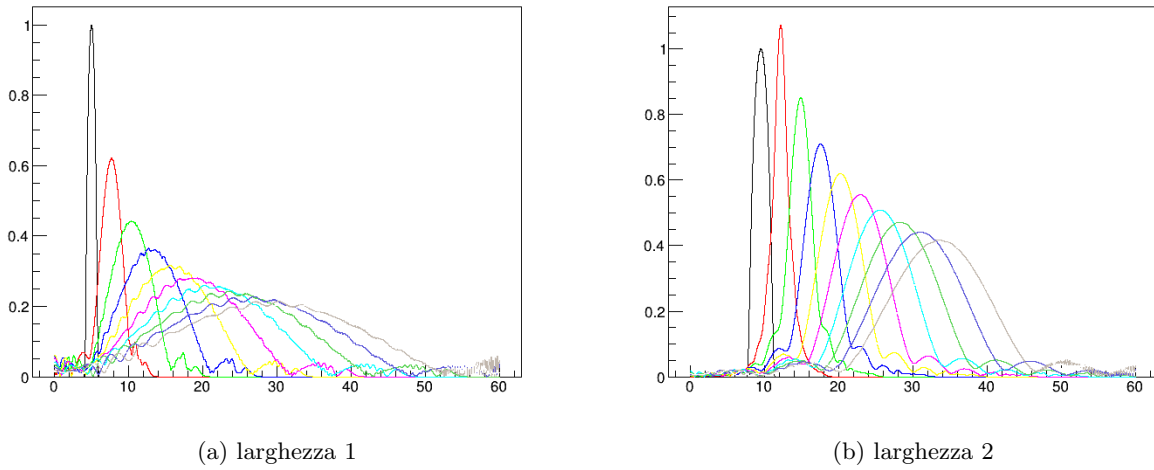


Figura 5.14: L'evoluzione del “bump”, le “increspature” sull'onda che si vedono ai lati sono le figure di interferenza dovute alla riflessione

5.7 Condizioni al contorno

Quello che vorrei simulare è un pacchetto d'onda che sia partito da $-\infty$ e arrivi nel “punto interessante”, l'area che osservo nella simulazione, e poi prosegua fino all'infinito (o venga eventualmente riflesso).

Per quanto riguarda le condizioni al contorno ho avuto le seguenti idee:

- Non tengo conto delle condizioni al contorno, faccio in modo di usare pacchetti d'onda ristretti e blocco la simulazione quando questa va ad avvicinarsi troppo ai bordi.
- Uso una forma d'onda tale per cui conosco la funzione e la sua derivata in ogni punto
- Emulo un ambiente chiuso (con ai lati muri di potenziale alti ∞)

La prima ipotesi è stata quella che ho usato in tutte le prove che ho effettuato prima di iniziare a raccogliere dati, considerando 0 il valore della funzione negli estremi.

Per la seconda ipotesi dovrei usare come condizione iniziale una funzione e calcolarne la derivata per ogni passo negli estremi. Ma pacchetti d'onda si disperdono e tendono ad allargarsi, per cui se, per esempio avessi un pacchetto d'onda generico ($\Psi(x, t) = e^{ikx}\psi(x, t)$), la relazione dovrebbe essere $\partial_x \Psi(x, t) = ik\Psi(x, t) + e^{ikx}\partial_x \psi(x, t)$ e potrei quindi utilizzare le CC di Robin. Ma dovrei conoscere come la funzione si disperde nel tempo e ricalcolare quindi ad ogni passo le condizioni al contorno ed applicarle. Questo però mi porterebbe a svariati problemi quali l'incertezza che la simulazione e la teoria siano esattamente parallele sulla dispersione, il che porterebbe ad altri errori, ed il fatto che molto probabilmente sarebbe poco efficiente dal punto di vista della performance del calcolo.

La terza idea equivale a utilizzare Dirichlet con il valore della funzione pari a 0 nei bordi questo simula un pozzo con pareti di potenziale infinito.

5.8 Prime Conclusioni

Dopo i primi esperimenti sono arrivato a queste conclusioni:

- Farò le simulazioni utilizzando una gaussiana come forma del pacchetto d'onda, perché mantiene la propria forma.
- Per contenere la dispersione dell'onda, vista la forma di (5.5.4) posso scegliere di utilizzare un σ_0 grande oppure una massa grande
 - con una massa grande per avere la stessa velocità di gruppo devo aumentare l'energia, ma in compenso posso utilizzare dei σ_0 piuttosto piccoli e quindi questo mi rende più semplice il compito di fare confronti tra due parti di spazio limitate per analizzare la trasmissività delle barriere di potenziale
 - con σ_0 grande il pacchetto d'onda non ha bisogno di una grande energia per muoversi, ma il fatto che esso sia esteso può comportare problemi per esempio quando si riflette contro un potenziale o quando lo attraversa o nel momento di definire le condizioni iniziali, perché rischio di sovrapporre l'onda al potenziale.
- Come condizioni al contorno simulerò la scatola chiusa con pareti infinite, sebbene una prima idea fosse quella di utilizzare le condizioni “trasparenti”, ma questo oltre ad appesantire il programma farebbe uscire il pacchetto d'onda dalla mia “zona d'osservazione” e quindi non sarei più in grado di fare l'integrale di tutto il pacchetto (comprese le sue riflessioni e i pezzi in cui si è diviso).
- Per ritardare il più possibile l'interazione con le condizioni al contorno devo aumentare l'intervallo spaziale se aumento il tempo della simulazione
- Guardando i risultati che ho osservato con guardando la velocità devo limitare l'energia dei pacchetti d'onda al di sotto di $E = 25$

Con queste conclusioni in mano mi appresto a simulare le situazioni per cui ho progettato questo algoritmo e confrontarle con la teoria.

6 Dati e analisi

Con le impostazioni che ho ricavato nella sezione precedente ho quindi proceduto con la simulazione del comportamento delle onde in presenza di vari potenziali.

6.1 Il salto di potenziale

Il primo potenziale che analizzo è il salto di potenziale, posiziono un gradino a metà del dominio e variandone l'altezza ne calcolo il coefficiente di trasmissività.

$$\begin{cases} V_0 & x > a \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (6.1.1)$$

Quindi proseguiamo ed eseguiamo delle simulazioni. Per confrontare i risultati delle simulazioni con la teoria ho sostituito in (B.1.8) $V = E/x$ notando che il risultato non dipende dall'energia:

$$\begin{cases} R = \frac{2x-1-2\sqrt{x(x-1)}}{2x-1+2\sqrt{x(x-1)}} \\ T = \frac{4\sqrt{x(x-1)}}{2x-1+2\sqrt{x(x-1)}} \end{cases} \quad (6.1.2)$$

Nelle simulazioni i lanci sono stati fatti con pacchetti gaussiani inizialmente con $\sigma = 0.5$, energia 100 e massa 10. Il potenziale è stato impostato perché il salto fosse al centro del dominio e con altezza diversa per ogni lancio e ho analizzato l'andamento temporale del rapporto tra l'integrale su tutto il dominio e quello fatto nella prima metà. Ho deciso di usare come coefficiente di riflessione il valore del peso dell'integrale quando questo si è stabilizzato. Dall'andamento nel tempo si può vedere un piccolo abbassamento quando l'onda impatta il potenziale per le barriere più alte, prima di venire riflessa all'indietro penetra leggermente nell'area classicamente vietata.

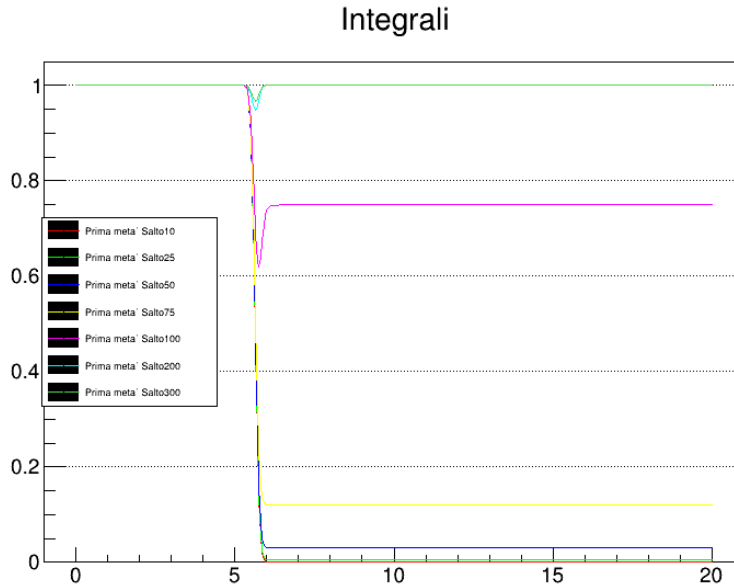


Figura 6.1: I pesi dell'integrale della prima metà del dominio per $\sigma = 0.5$. Dove c'è riflessione si nota una penetrazione parziale dell'onda nella seconda metà del dominio seguita dalla riflessione

Come si può notare dalla Tabella A.2 sebbene stia simulando un pacchetto d'onda in movimento e non un'onda piana il peso dei coefficienti ricalca abbastanza bene i coefficienti teorici, e sembra avvicinarli di più man mano che allargo il pacchetto. Notare che la simulazione si allontana dalla teoria per le onde piane più si è vicini al regime in cui il potenziale è maggiore dell'energia dell'onda.

Dai grafici si nota che se σ è piccolo c'è una tendenza a deviare dal comportamento teorico, mentre variando l'energia non sembrano esserci differenze

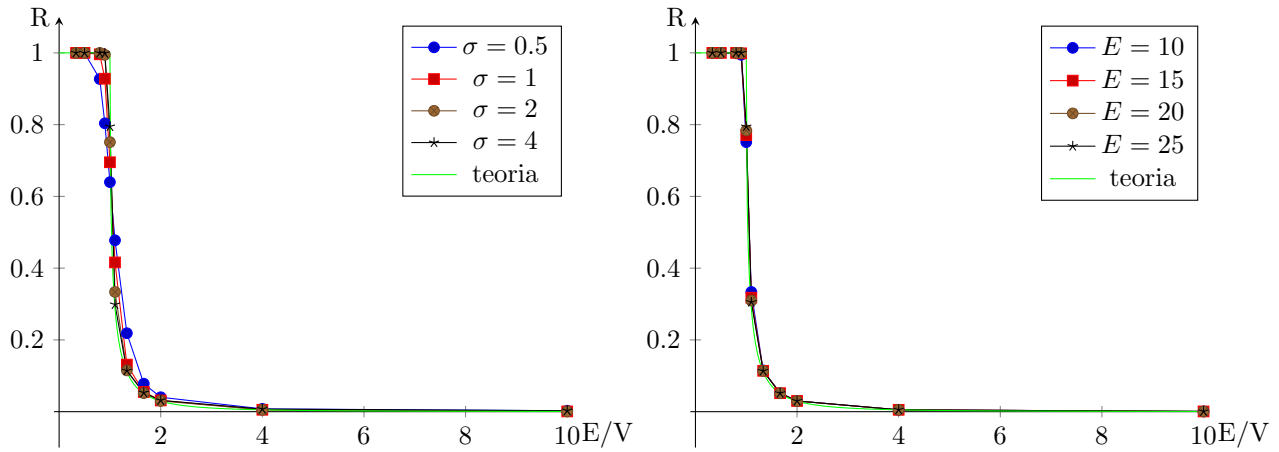


Figura 6.2: La visualizzazione dei dati e il confronto con la teoria, il primo grafico fatto con $E = 10$, il secondo con $\sigma = 2$

6.2 La barriera rettangolare

Ho quindi simulato il comportamento dell'onda in presenza di una barriera rettangolare:

$$\begin{cases} V_0 & 0 < x < a \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (6.2.1)$$

Ho svolto la teoria nella sottosezione B.2. I grafici che in seguito riporterò mostrano il valore del modulo della forma d'onda contenuta nella parte di dominio a sinistra della barriera che corrisponde al coefficiente di riflessione della teoria per le onde piane. I grafici sono disegnati in funzione del rapporto E/V , dato che nelle simulazioni ho variato il valore del potenziale ho sostituito $V = E/x$ in (B.2.12) per poterla visualizzare come confronto teorico:

$$R(m, E, x) = \begin{cases} \left(1 + 4 \frac{(x-x^2)}{\sinh^2(a\sqrt{2mE(1/x-1)})} \right)^{-1} & 0 < x < 1 \\ \left(1 + \frac{2}{a^2 m E} \right)^{-1} & x = 1 \\ \left(1 + 4 \frac{(x^2-x)}{\sin^2(a\sqrt{2mE(1-1/x)})} \right)^{-1} & x > 1 \end{cases} \quad (6.2.2)$$

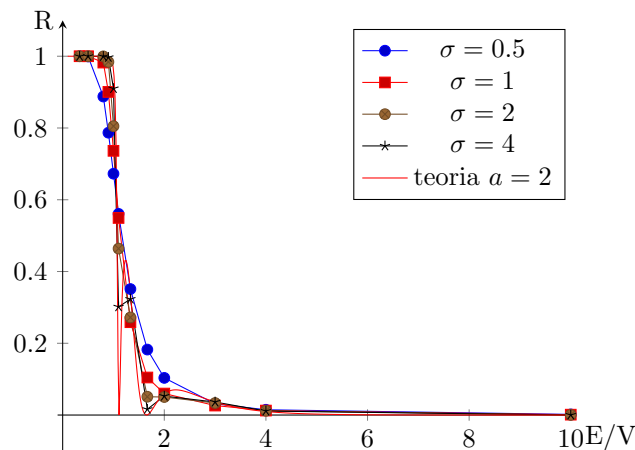


Figura 6.3: La visualizzazione dei dati e il confronto con la teoria, con $E = 5$, $m = 10$ e $a = 1$

Voglio provare a replicare le oscillazioni che si notano in Figura 6.3. Faccio simulazioni più "fitte" in un intervallo del rapporto di E/V più piccolo e con $E = 15$. La prima cosa che si può osservare dai dati è che più la barriera è grande rispetto alla larghezza del pacchetto più la simulazione si allontana dalla teoria per le

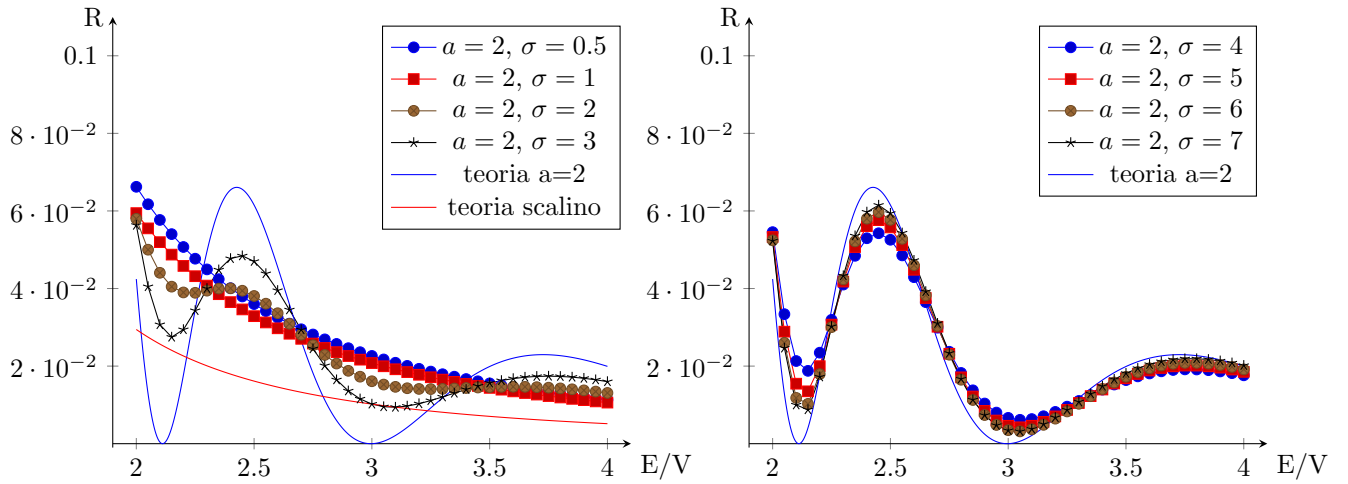


Figura 6.4: I dati tra 2 e 4 per una barriera larga 2, con $E = 15$

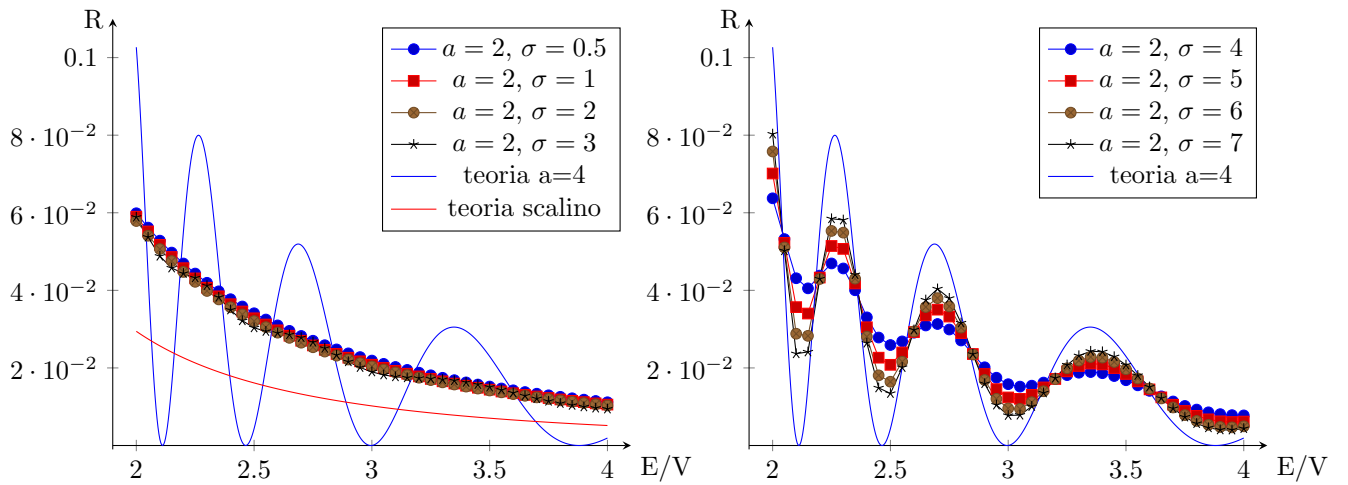


Figura 6.5: I dati tra 2 e 4 per una barriera larga 4, con $E = 15$

onde piane. Probabilmente questo è dovuto al fatto che se il pacchetto incontra una barriera più "larga" delle sue dimensioni questo tenda a comportarsi similmente a come se fosse in presenza di un salto di potenziale ma da Figura 6.4 e Figura 6.5 si nota che questa mia idea non è del tutto corretta: l'andamento è simile ma la barriera riflette di più rispetto al salto singolo questo probabilmente è dovuto al fatto che anche quando un potenziale cala si presentano riflessioni e questo contribuisce a far crescere il coefficiente di riflessione.

A questo punto provo a diminuire le dimensioni della barriera per provare l'effetto tunnel: guardo quanto cala il coefficiente di riflessione quando il rapporto tra E/V è inferiore a 1. Vario la massa del pacchetto e le dimensioni della barriera

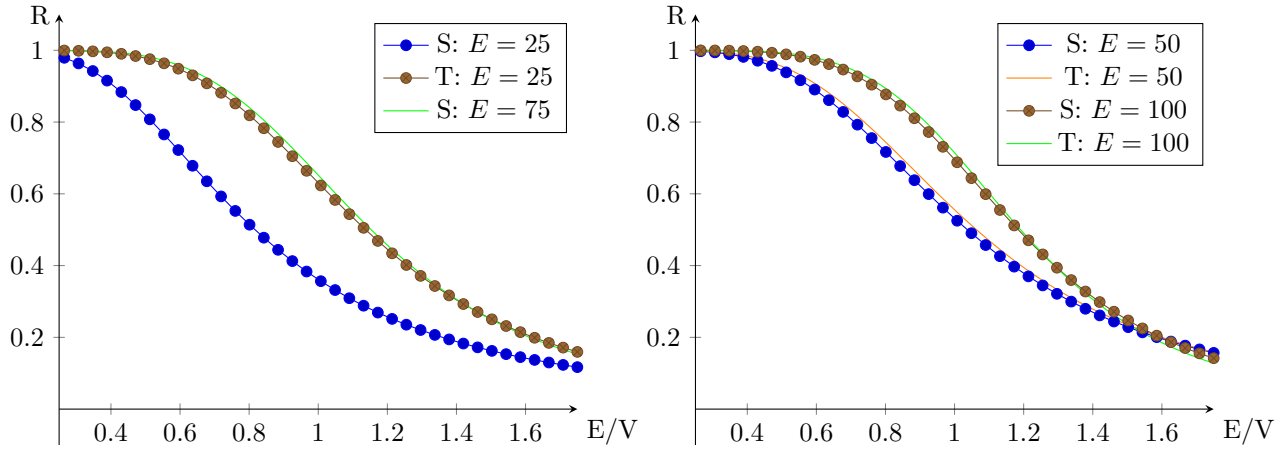


Figura 6.6: Provo a simulare l'effetto tunnel, impiegando un pacchetto con $\sigma = 4$, con massa delle particelle 5 e spessore della barriera $a = 0.1$

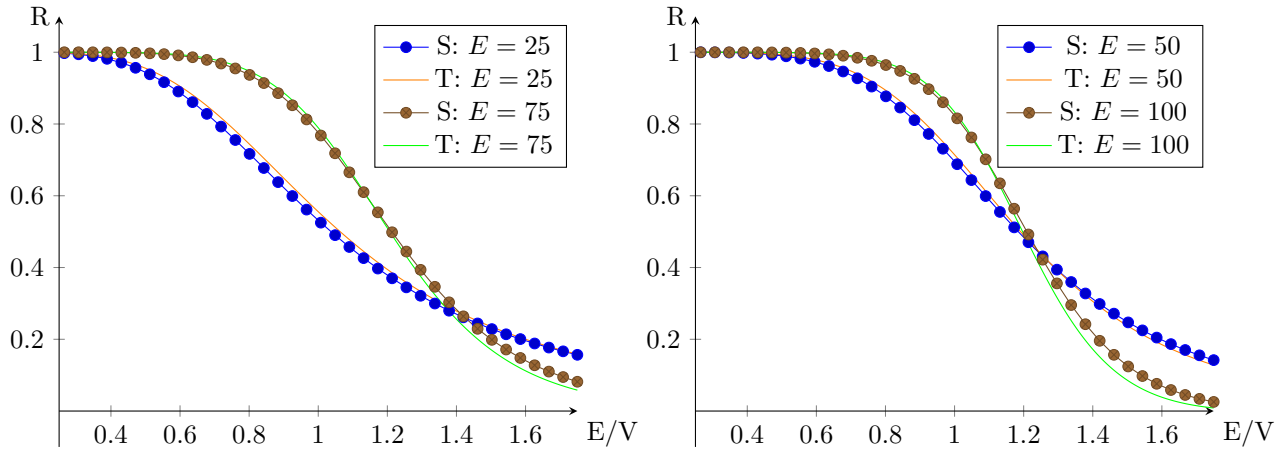


Figura 6.7: Provo a simulare l'effetto tunnel, impiegando un pacchetto con $\sigma = 4$, con massa delle particelle 10 e spessore della barriera $a = 0.1$

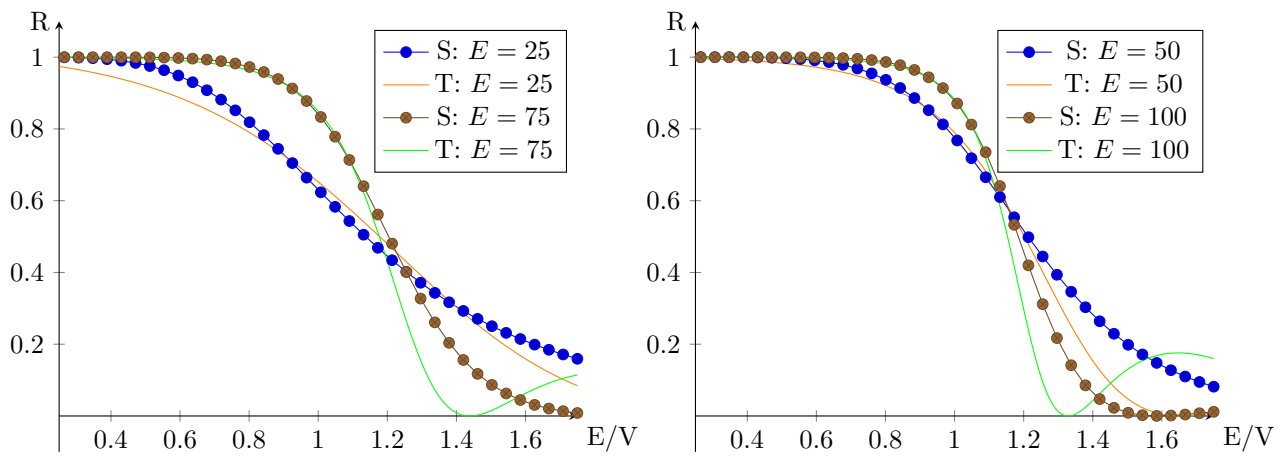


Figura 6.8: Provo a simulare l'effetto tunnel, impiegando un pacchetto con $\sigma = 4$, con massa delle particelle 15 e spessore della barriera $a = 0.1$

Parte III

Appendice

A Tabelle

t	α	\bar{x}	σ	t	α	\bar{x}	σ
0	1	40	1	5.5	0.422955	40	5.59001
0.5	0.94574	40	1.11803	6	0.405467	40	6.08259
1	0.840898	40	1.4142	6.5	0.389951	40	6.57628
1.5	0.744796	40	1.80272	7	0.376066	40	7.07086
2	0.668766	40	2.23596	7.5	0.363549	40	7.56615
2.5	0.609451	40	2.69242	8	0.352191	40	8.06202
3	0.562349	40	3.16219	8.5	0.341825	40	8.55837
3.5	0.524146	40	3.63995	9	0.332317	40	9.05512
4	0.492486	40	4.12299	9.5	0.323555	40	9.55221
4.5	0.465765	40	4.60964	10	0.315447	40	10.0496
5	0.442856	40	5.09887				

Tabella A.1: I dati di una simulazione, con $\alpha = 1$, $\sigma = 1$ e $m = 1$

E/V	simulazione σ				teoria
	0.5	1	2	4	
10	0.000724389	0.000718394	0.000716913	0.000716543	0.000693482
4	0.00539149	0.00533663	0.00532312	0.00531976	0.00515478
2	0.0309848	0.0304801	0.0303576	0.0303272	0.0294373
1.66	0.0536892	0.0525454	0.0522718	0.0522041	0.0506914
1.33	0.120552	0.1158	0.114741	0.114483	0.111112
1.11	0.344071	0.291725	0.281975	0.279959	0.269876
1	0.751078	0.815668	0.8777	0.934287	1
0.9090	0.978315	0.999843	1	1	1
0.8	0.999979	1	1	1	1
0.5	1	1	1	1	1
0.33	1	1	1	1	1

Tabella A.2: Alcuni dati delle simulazioni per il salto di potenziale

B Varie

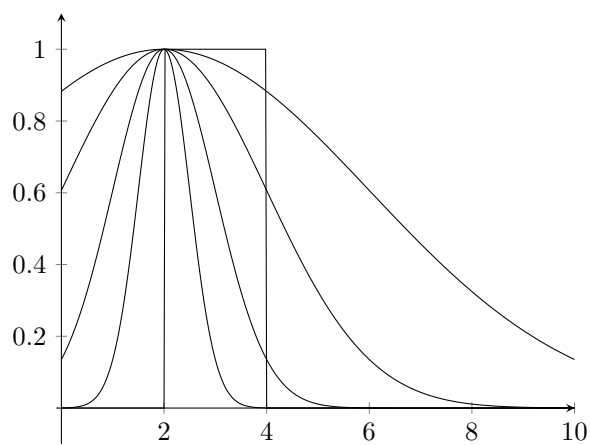


Figura B.1: In questa figura mostro il confronto tra una barriera del tipo (6.2.1) con $a = 2$ e una diverse gaussiane

B.1 Calcoli Salto

Procedo con il risolvere l'equazione di Schrödinger con un potenziale del tipo (6.2.1). Prendiamo un dominio infinito con in 0 il salto di potenziale, l'equazione, indipendente dal tempo, avrà la forma:

$$E\psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V_0 H(x) \right) \psi \quad (\text{B.1.1})$$

Divido lo spazio in due porzioni ($x < 0$ e $x > 0$) in cui:

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} & x < 0 \\ k_2 &= \sqrt{\frac{2m(E-V_0)}{\hbar^2}} & x > 0 \end{aligned} \quad (\text{B.1.2})$$

Se per esempio avessimo delle onde piane in ciascuna porzione dello spazio ne avrei una che si muove verso destra (ψ_{\rightarrow}) e una verso sinistra (ψ_{\leftarrow}) e quindi in 0 avrei, chiamando i coefficienti delle onde piane A per il lato sinistro e B quello destro:

$$\psi(x) \begin{cases} A_{\rightarrow} e^{ik_1 x} + A_{\leftarrow} e^{-ik_1 x} & x < 0 \\ B_{\rightarrow} e^{ik_2 x} + B_{\leftarrow} e^{-ik_2 x} & x > 0 \end{cases} \quad (\text{B.1.3})$$

Dato che il potenziale ha una discontinuità finita in 0, funzione e derivata devono essere continue:

$$\begin{cases} A_{\rightarrow} + A_{\leftarrow} = B_{\rightarrow} + B_{\leftarrow} \\ k_1 (A_{\rightarrow} - A_{\leftarrow}) = k_2 (B_{\rightarrow} - B_{\leftarrow}) \end{cases} \quad (\text{B.1.4})$$

nel caso più generico.

Nel nostro caso consideriamo un'onda piana da $-\infty$ che si muove verso destra prima di incontrare la barriera:

$$\begin{cases} A_{\rightarrow} = 1 & , & A_{\leftarrow} = r \\ B_{\rightarrow} = t & , & B_{\leftarrow} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 + r = t \\ k_1 (1 - r) = k_2 t \end{cases} \quad (\text{B.1.5})$$

Risolvendo il sistema otteniamo:

$$\begin{cases} r = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \\ t = \frac{2k_1}{k_1 + k_2} \end{cases} \quad (\text{B.1.6})$$

Quelli che mi interessano sono però il coefficiente di riflessione e trasmissione, dato che stiamo parlando di funzioni con norma L2 sono:

$$\begin{cases} R = |r|^2 = \frac{(k_1 - k_2)^2}{(k_1 + k_2)^2} \\ T = 1 - R = |t|^2 \frac{k_2}{k_1} = \frac{4k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2} \end{cases} \quad (\text{B.1.7})$$

Metto i risultati in termini di E e V

$$\begin{cases} R = \frac{2E - V - 2\sqrt{E(E-V)}}{2E - V + 2\sqrt{E(E-V)}} = \frac{2E/V - 1 - 2\sqrt{E/V(E/V-1)}}{2E/V - 1 + 2\sqrt{E/V(E/V-1)}} \\ T = \frac{4\sqrt{E(E-V)}}{2E - V + 2\sqrt{E(E-V)}} = \frac{4\sqrt{E/V(E/V-1)}}{2E/V - 1 + 2\sqrt{E/V(E/V-1)}} \end{cases} \quad (\text{B.1.8})$$

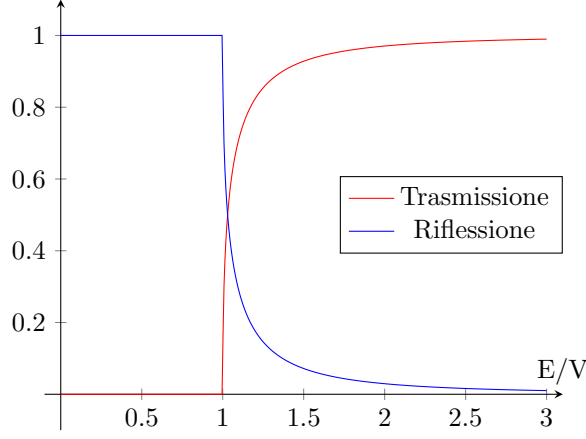


Figura B.2: Coefficienti di trasmissione e riflessione

B.2 Calcoli Barriera

Con un potenziale del tipo (6.2.1) ho tre possibilità:

$$E < V_0 \text{ per cui ho } k_2 = i\sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$$

$$E > V_0 \text{ per cui ho } k_2 = \sqrt{\frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2}}$$

$$E = V_0 \text{ per cui ho } k_2 = 0$$

Prima di separare i casi impongo la continuità di funzione e derivata nel caso $E \neq V_0$:

$$\begin{cases} A_{\rightarrow}e^{ik_1x} + A_{\leftarrow}e^{-ik_1x} & x < 0 \\ C_{\rightarrow}e^{ik_2x} + C_{\leftarrow}e^{-ik_2x} & 0 < x < a \\ B_{\rightarrow}e^{ik_1x} + B_{\leftarrow}e^{-ik_1x} & x > a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_{\rightarrow} + A_{\leftarrow} = C_{\rightarrow} + C_{\leftarrow} & \text{in } 0 \\ B_{\rightarrow}e^{ik_1a} + B_{\leftarrow}e^{-ik_1a} = C_{\rightarrow}e^{ik_2a} + C_{\leftarrow}e^{-ik_2a} & \text{in } a \\ k_1(A_{\rightarrow} - A_{\leftarrow}) = k_2(C_{\rightarrow} - C_{\leftarrow}) & \text{in } 0 \\ k_1(B_{\rightarrow}e^{ik_1a} - B_{\leftarrow}e^{-ik_1a}) = k_2(C_{\rightarrow}e^{ik_2a} - C_{\leftarrow}e^{-ik_2a}) & \text{in } a \end{cases} \quad (\text{B.2.1})$$

nel caso $E \neq V_0$. Consideriamo un'onda piana da $-\infty$ che si muove verso destra prima di incontrare la barriera:

$$\begin{cases} A_{\rightarrow} = 1 & , & A_{\leftarrow} = r \\ B_{\rightarrow} = t & , & B_{\leftarrow} = 0 \\ C_{\rightarrow} = m_1 & , & C_{\leftarrow} = m_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 + r = m_1 + m_2 \\ te^{ik_1a} = m_1e^{ik_2a} + m_2e^{-ik_2a} \\ k_1(1 - r) = k_2(m_1 - m_2) \\ k_1te^{ik_1a} = k_2(m_1e^{ik_2a} - m_2e^{-ik_2a}) \end{cases} \quad (\text{B.2.2})$$

Risolvendo il sistema ottengo:

$$\begin{cases} r = \frac{(e^{2iak_2} - 1)(k_1^2 - k_2^2)}{(k_1 - k_2)^2 e^{2iak_2} - (k_1 + k_2)^2} \\ t = -\frac{4e^{-iak_1} k_1 k_2}{(k_1 - k_2)^2 e^{2iak_2} - (k_1 + k_2)^2} \\ m_1 = \frac{2k_1(k_1 + k_2)}{(k_1 + k_2)^2 - (k_1 - k_2)^2 e^{2iak_2}} \\ m_2 = \frac{2e^{2iak_2} k_1(k_2 - k_1)}{(k_1 + k_2)^2 - (k_1 - k_2)^2 e^{2iak_2}} \end{cases} \quad (\text{B.2.3})$$

ma a noi interessa il valore del modulo quadro della funzione, e quindi:

$$\begin{cases} R = |r|^2 = \left| \frac{\sin(ak_2)(k_1^2 - k_2^2)}{(k_1^2 + k_2^2)\sin(ak_2) + 2ik_1k_2\cos(ak_2)} \right|^2 = \frac{(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2(ak_2)}{4k_1^2k_2^2 \cos^2(ak_2) + (k_1^2 + k_2^2)^2 \sin^2(ak_2)} \\ T = |t|^2 = \left| \frac{-2e^{-iak_1} k_1 k_2}{(k_1^2 + k_2^2)\sin(ak_2) + 2ik_1k_2\cos(ak_2)} \right|^2 = \frac{4k_1^2k_2^2}{4k_1^2k_2^2 \cos^2(ak_2) + (k_1^2 + k_2^2)^2 \sin^2(ak_2)} \end{cases} \quad (\text{B.2.4})$$

A questo punto esplicito in termini di E e V ed m , se $E > V$:

$$\begin{cases} R = \left(1 + 4 \frac{(E^2 - EV_0)}{V_0^2 \sin^2\left(a\sqrt{2m(E - V_0)/\hbar^2}\right)} \right)^{-1} \\ T = \left(1 + \frac{V_0^2 \sin^2\left(a\sqrt{2m(E - V_0)/\hbar^2}\right)}{4(E^2 - EV_0)} \right)^{-1} \end{cases} \quad (\text{B.2.5})$$

E se $E < V$, dato che $\sqrt{-x} = i\sqrt{x}$ e sapendo che $\sin(ix) = i\sinh(x)$:

$$\begin{cases} R = \left(1 + 4 \frac{(EV_0 - E^2)}{V_0^2 \sinh^2(a\sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2})}\right)^{-1} \\ T = \left(1 + \frac{V_0^2 \sinh^2(a\sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2})}{4(EV_0 - E^2)}\right)^{-1} \end{cases} \quad (\text{B.2.6})$$

Prima di proseguire devo risolvere l'equazione nell'ultimo caso, $E = V_0$. In questo caso mi serve sapere che la soluzione di un'equazione del tipo $\frac{\partial^2}{\partial x^2} f = 0$ è del $f(x) = C_1 x + C_0$. Riscrivo la (B.2.1):

$$\begin{cases} A_{\rightarrow} e^{ik_1 x} + A_{\leftarrow} e^{-ik_1 x} & x < 0 \\ C_1 x + C_0 & 0 < x < a \\ B_{\rightarrow} e^{ik_1 x} + B_{\leftarrow} e^{-ik_1 x} & x > a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_{\rightarrow} + A_{\leftarrow} = C_0 & \text{in } 0 \\ B_{\rightarrow} e^{ik_1 a} + B_{\leftarrow} e^{-ik_1 a} = C_1 a + C_0 & \text{in } a \\ ik_1 (A_{\rightarrow} - A_{\leftarrow}) = C_1 & \text{in } 0 \\ ik_1 (B_{\rightarrow} e^{ik_1 a} - B_{\leftarrow} e^{-ik_1 a}) = C_1 & \text{in } a \end{cases} \quad (\text{B.2.7})$$

Rifacendo il ragionamento precedente:

$$\begin{cases} A_{\rightarrow} = 1 & , & A_{\leftarrow} = r \\ B_{\rightarrow} = t & , & B_{\leftarrow} = 0 \\ C_1 = m_1 & , & C_0 = m_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 + r = m_2 \\ t e^{ik_1 a} = m_1 a + m_2 \\ ik_1 (1 - r) = m_1 \\ ik_1 t e^{ik_1 a} = m_1 \end{cases} \quad (\text{B.2.8})$$

Risolvendo il sistema ottengo:

$$\begin{cases} r & = & \frac{ak_1}{2i + ak_1} \\ t & = & -\frac{2e^{-iak_1}}{iak_1 - 2} \\ m_1 & = & -\frac{2k_1}{2i + ak_1} \\ m_2 & = & 2 + \frac{2}{iak_1 - 2} \end{cases} \quad (\text{B.2.9})$$

Proseguendo:

$$\begin{cases} R = |r|^2 = \left| \frac{ak_1}{2i + ak_1} \right|^2 = \left(1 + \frac{4}{a^2 k_1^2}\right)^{-1} \\ T = |t|^2 = \left| \frac{2e^{-iak_1}}{iak_1 - 2} \right|^2 = \frac{4}{4 + a^2 k_1^2} \end{cases} \quad (\text{B.2.10})$$

E in funzione di E :

$$\begin{cases} R = \left(1 + \frac{2\hbar^2}{a^2 m E}\right)^{-1} \\ T = \left(1 + \frac{a^2 m E}{2\hbar^2}\right)^{-1} \end{cases} \quad (\text{B.2.11})$$

Quindi avrò, per R :

$$R(m, E, V_0) = \begin{cases} \left(1 + 4 \frac{(E^2 - EV_0)}{V_0^2 \sin^2(a\sqrt{2m(E - V_0)/\hbar^2})}\right)^{-1} & E > V_0 \\ \left(1 + \frac{2\hbar^2}{a^2 m E}\right)^{-1} & E = V_0 \\ \left(1 + 4 \frac{(EV_0 - E^2)}{V_0^2 \sinh^2(a\sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2})}\right)^{-1} & E < V_0 \end{cases} \quad (\text{B.2.12})$$

mentre per T :

$$T(m, E, V_0) = \begin{cases} \left(1 + \frac{V_0^2 \sin^2(a\sqrt{2m(E - V_0)/\hbar^2})}{4(E^2 - EV_0)}\right)^{-1} & E > V_0 \\ \left(1 + \frac{a^2 m E}{2\hbar^2}\right)^{-1} & E = V_0 \\ \left(1 + \frac{V_0^2 \sinh^2(a\sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2})}{4(EV_0 - E^2)}\right)^{-1} & E < V_0 \end{cases} \quad (\text{B.2.13})$$