# Soluzioni esercizi Meccanica Quantistica

Grufoony
https://github.com/Grufoony/Fisica_UNIBO

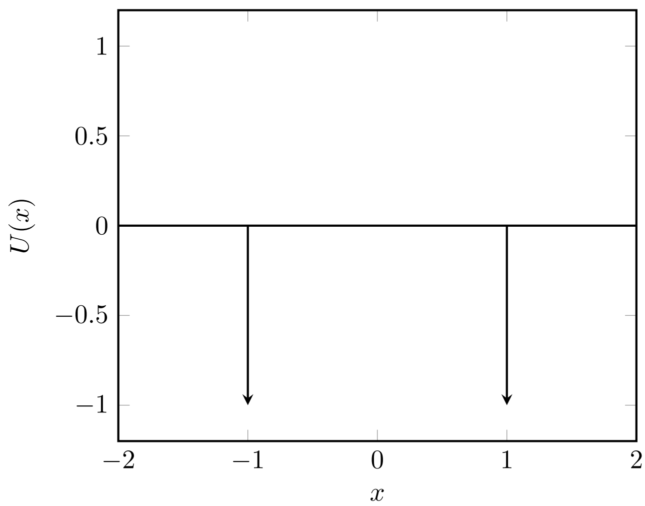
17 dicembre 2025

## Esercizio 1 (esame del 09/01/2017)

Una molecola di idrogeno ionizzata puó essere descritta come un sistema unidimensionale formato da un singolo elettrone soggetto al potenziale

$$U(x) = -\frac{\hbar^2\Omega}{m}\left[\delta(x-a) + \delta(x+a)\right]$$

ove $a > 0$ é la semidistanza dei due protoni pensati fissi e $\Omega > 0$ ha le dimensioni di una lunghezza inversa. Trovare gli autovalori e le autofunzioni dell'energia dello spettro discreto.




Scriviamo subito l'equazione di Schroedinger

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} + \left\{k^2 - 2\Omega\left[\delta(x-a) + \delta(x+a)\right]\right\}\Phi = 0$$

La soluzione é nota

$$\Phi^{\pm}(x) = \begin{cases} A^{\pm}e^{ikx} + B^{\pm}e^{-ikx} & x < -a \\ C^{\pm}e^{ikx} + D^{\pm}e^{-ikx} & -a < x < a \\ E^{\pm}e^{ikx} + F^{\pm}e^{-ikx} & a < x \end{cases}$$

Notiamo che il potenziale ha partitá definita $U(-x) = U(x)$ allora possiamo imporre la condizione $\Phi^{\pm}(-x) = \pm\Phi^{\pm}(x)$, ottenendo

$$\begin{cases} E^{\pm} = \pm A^{\pm} \\ F^{\pm} = \pm B^{\pm} \\ D^{\pm} = \pm C^{\pm} \end{cases}$$

La funzione assume ora la forma piú semplice

$$\Phi^{\pm}(x) = \begin{cases} C^{\pm}\left(e^{ik|x|} \pm e^{-ik|x|}\right) & |x| < a \\ \sigma_{\pm}(x)\left[A^{\pm}e^{ik|x|} + B^{\pm}e^{-ik|x|}\right] & a < |x| \end{cases}$$

con

$$\sigma_{\pm}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ \pm 1 & x < 0 \end{cases}$$

Notiamo peró che lo spettro discreto si avrá per $w < 0$, quindi $k = i\tilde{k}$, ma la funzione d'onda non puó esplodere all'infinito, quindi necessariamente si avrá $B^{\pm} = 0$ e, riscalando $A^{\pm} = A^{\pm}e^{-ika}$

$$\Phi^{\pm}(x) = \begin{cases} C^{\pm}\left(e^{-\tilde{k}|x|} \pm e^{\tilde{k}|x|}\right) & |x| < a \\ \sigma_{\pm}(x)A^{\pm}e^{-\tilde{k}(|x|-a)} & a < |x| \end{cases}$$

Ora imponiamo la continuitá della funzione e della sua derivata

$$\begin{cases} \sigma_{\pm}(x)A^{\pm} = C^{\pm}\left(e^{-\tilde{k}a} \pm e^{\tilde{k}a}\right) \\ -\sigma_{\pm}(x)A^{\pm} - C^{\pm}\left(e^{-\tilde{k}a} \mp e^{\tilde{k}a}\right) = -\frac{2\Omega}{\tilde{k}}\sigma_{\pm}(x)A^{\pm} \end{cases}$$

Si puó riscrivere il tutto nella forma

$$\begin{cases} \sigma_{\pm}(x)A^{\pm} = C^{\pm}\left(e^{-\tilde{k}a} \pm e^{\tilde{k}a}\right) \\ \sigma_{\pm}(x)A^{\pm}\left(\frac{2\Omega}{\tilde{k}} - 1\right) = C^{\pm}\left(e^{-\tilde{k}a} \mp e^{\tilde{k}a}\right) \end{cases}$$

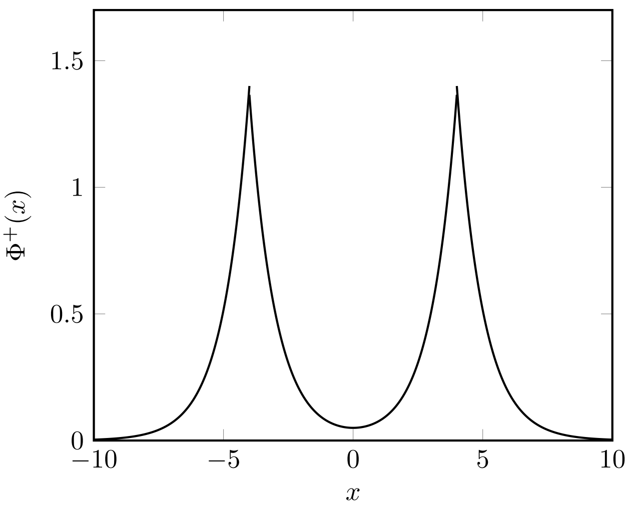
Dividendo la seconda per la prima si ottiene

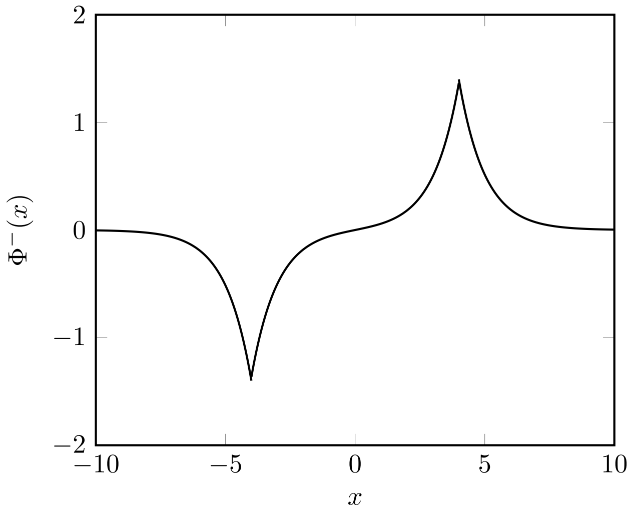
$$\frac{e^{-\tilde{k}a} \mp e^{\tilde{k}a}}{e^{-\tilde{k}a} \pm e^{\tilde{k}a}} = \frac{2\Omega}{\tilde{k}} - 1$$

Si ottengono le equazioni

$$\begin{cases} \tanh(\tilde{k}a) = 1 - \frac{2\Omega}{\tilde{k}} \\ \coth(\tilde{k}a) = 1 - \frac{2\Omega}{\tilde{k}} \end{cases}$$

ognuna delle quali mi fornisce una soluzione unica quindi ho due soli livelli energetici corrispondenti ai valori di $\tilde{k}_0^{\pm}$.



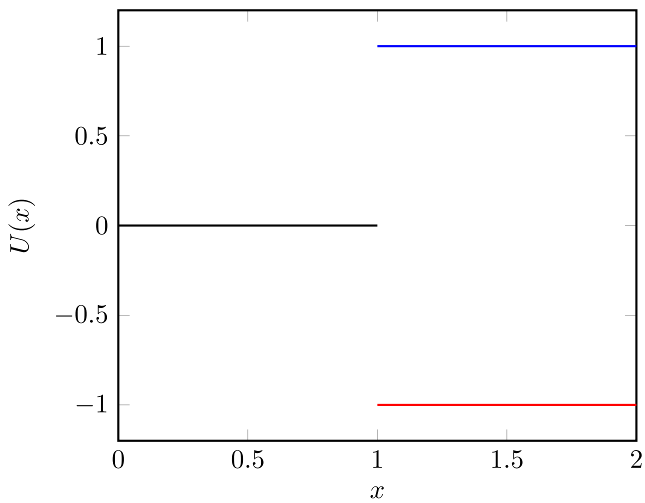



## Esercizio 1 (esame del 19/06/2017)

Trovare gli autovalori e le autofunzioni dell'energia di una particelle unidimensionale confinata nell'intervallo $0 \le x \le a$ e soggetta al potenziale

$$U(x) = \begin{cases} 0 & 0 \le x < \frac{a}{2} \\ U_0 & \frac{a}{2} \le x \le a \end{cases}$$

ove $U_0 \neq 0$ é una costante con le dimensioni dell'energia.




Suggerimento: Non tentare di risolvere l'equazione trascendente degli autovalori.

Scriviamo subito l'equazione di Schroedinger

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} + \left[k^2 - \frac{2m}{\hbar^2}U(x)\right]\Phi = 0$$

la cui soluzione generale é (con $k'^2 = k^2 - \frac{2m}{\hbar^2}U_0$)

$$\Phi(x) = \begin{cases} A\sin(kx) + B\cos(kx) & 0 \le x < \frac{a}{2} \\ C\sin(k'x) + D\cos(k'x) & \frac{a}{2} \le x \le a \end{cases}$$

Condizione al bordo $\Phi(0) = 0$ che implica $B = 0$. Condizione al bordo $\Phi(a) = 0$ che implica $C\sin(k'a) + D\cos(k'a) = 0$. Poniamo quindi

$$\begin{cases} C = E\cos(k'a) \\ D = -E\sin(k'a) \end{cases}$$

e possiamo riscrivere la soluzione come

$$\Phi(x) = \begin{cases} A\sin(kx) & 0 \le x < \frac{a}{2} \\ E\sin[k'(x-a)] & \frac{a}{2} \le x \le a \end{cases}$$

Continuitá della funzione (ponendo $x_k = \frac{ka}{2}$ e $x_{k'} = \frac{k'a}{2}$):

$$A\sin(x_k) = -E\sin(x_{k'})$$

Continuitá della derivata:

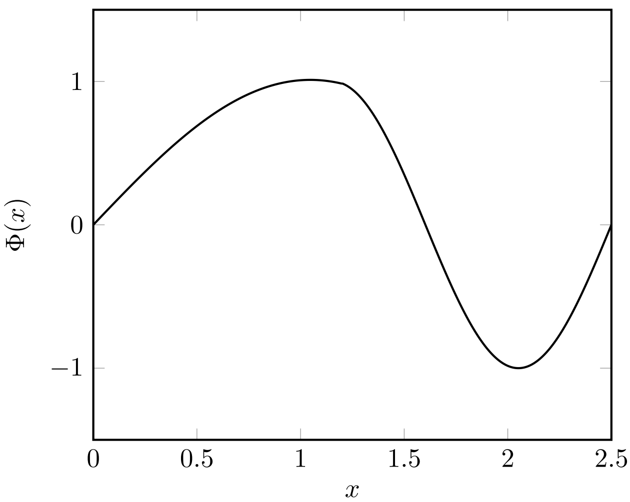
$$Ax_k\cos(x_k) = Ex_{k'}\cos(x_{k'})$$

Dividendo la prima per la seconda si trova l'equazione agli autovalori

$$\frac{\tan(x_k)}{x_k} = -\frac{\tan(x_{k'})}{x_{k'}}$$

che fornisce valori $k_n$ per lo spettro discreto $w_n = \frac{\hbar^2}{2m}k_n^2$, come previsto dal TSS. La soluzione é quindi (con un $k_n$ qualsiasi)

$$\Phi_n(x) = \begin{cases} -E\frac{\sin(x_{k'_n})}{\sin(x_{k_n})}\sin(k_n x) & 0 \le x < \frac{a}{2} \\ E\sin[k'_n(x-a)] & \frac{a}{2} \le x \le a \end{cases}$$




Nel caso in cui si abbia $U_0 < 0$, $k = i\tilde{k}$ immaginario puro (con $\tilde{k} \in \mathbb{R}$) per $w < 0$. L'equazione agli autovalori diventa quindi

$$\frac{\tan(x_{\tilde{k}})}{x_{\tilde{k}}} = -\frac{\tanh(x_{k'})}{x_{k'}}$$

L'equazione é trascendente e possiamo ordinare le soluzioni $k_n$ anche in questo caso (spettro discreto non degenere). In entrambi i casi si avrá uno spettro continuo non degenere per $E \pm U_0 \ge 0$.

# Esercizio 1 (esame del 03/07/2017)

Una particlella é confinata in una regione sferica di raggio $R$ ed é soggetta ad un campo di forza centrale con potenziale

$$U(r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq \frac{R}{2} \\ U_0 & \frac{R}{2} < r \leq R \end{cases} \qquad U_0 \neq 0$$

ove $U_0 > 0$ é una costante con le dimensioni di un'energia. Calcolare gli autovalori e le autofunzioni dell'energia della particella. Suggerimento: Derivare ma non tentare di risolvere l'equazione agli autovalori trascendente.

Per il TSS notiamo subito come tutto lo spettro energetico sia discreto non degenere.
Scriviamo subito l'equazione di Schroedinger radiale

$$\frac{d^2\chi}{dr^2} + \left[k^2 - \frac{l(l-1)}{r^2} - \frac{2m}{\hbar^2}U(r)\right]\chi = 0$$

la cui soluzione é

$$\chi(r) = \begin{cases} Akrj_l(kr) + Bkrn_l(kr) & 0 \leq r \leq \frac{R}{2} \\ Ck'rj_l(k'r) + Dk'rn_l(k'r) & \frac{R}{2} < r \leq R \end{cases}$$

con $k'^2 = k^2 - \frac{2m}{\hbar^2}U_0$ Condizione al bordo $\chi(0) = 0$ quindi $B = 0$. Continuitá della funzione

$$Ak\frac{R}{2}j_l(k\frac{R}{2}) = Ck'\frac{R}{2}j_l(k'\frac{R}{2}) + Dk'\frac{R}{2}n_l(k'\frac{R}{2})$$

Ponendo $x_k = \frac{kR}{2}$, $x_{k'} = \frac{k'R}{2}$, $C = En_l(2x_{k'})$ e $D = -Ej_l(2x_{k'})$ si ottengono le autofunzioni energetiche

$$\chi(r) = \begin{cases} Akrj_l(kr) & 0 \leq r \leq \frac{R}{2} \\ Ek'r\left[n_l(2x_{k'})j_l(k'r) - j_l(2x_{k'})n_l(k'r)\right] & \frac{R}{2} < r \leq R \end{cases}$$

Continuitá della derivata

$$A\left\{x_kj_l(x_k) + x_k^2j_l'(x_k)\right\} = E\left\{n_l(2x_{k'})\left[x_{k'}j_l(x_{k'}) + x_{k'}^2j_l'(x_{k'})\right] - j_l(2x_{k'})\left[x_{k'}n_l(x_{k'}) + x_{k'}^2n_l'(x_{k'})\right]\right\}$$
$$Ax_k^2j_l'(x_k) = E\left[n_l(2x_{k'})x_{k'}^2j_l'(x_{k'}) - j_l(2x_{k'})x_{k'}^2n_l'(x_{k'})\right]$$

I $k_n$ sono forniti quindi dal sistema di equazioni (risolvibile)

$$\begin{cases} Ax_kj_l(x_k) & = E\left[n_l(2x_{k'})x_{k'}j_l(x_{k'}) - j_l(2x_{k'})x_{k'}n_l(x_{k'})\right] \\ Ax_k^2j_l'(x_k) & = E\left[n_l(2x_{k'})x_{k'}^2j_l'(x_{k'}) - j_l(2x_{k'})x_{k'}^2n_l'(x_{k'})\right] \end{cases}$$

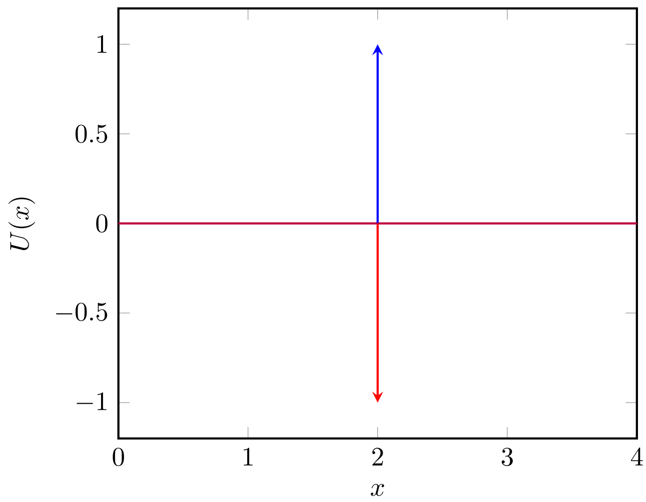
quindi gli autovalori dell'energia sono semplicemente $w_n = \frac{\hbar^2}{2m}k_n^2$.

# Esercizio 1 (esame del 15/01/2018)

Una particella di massa $m$ é confinata nello semispazio unidimensionale $x \geq 0$ ed é soggetta al potenziale

$$U(x) = \frac{\hbar^2}{m}\Omega\delta(x-a)$$

ove $a > 0$ e $\Omega \neq 0$ sono costanti con le dimensioni di una lunghezza ed una lunghezza inversa, rispettivamente. Trovare gli autovalori e le autofunzioni della energia.




Scriviamo subito l'equazione di Schroedinger

$$\frac{d^2}{dx^2}\Phi + \left\{k^2 + 2\Omega\delta(x-a)\right\}\Phi = 0$$

La soluzione generica é

$$\Phi(x) = \begin{cases} A\sin(kx) + B\cos(kx) & 0 < x < a \\ Ce^{ikx} + De^{-ikx} & a < x \end{cases}$$

Condizioni al bordo $\Phi(0) = 0$ quindi $B = 0$. Imponiamo ora la continuitá

$$\begin{cases} A\sin(ka) = Ce^{ika} + De^{-ika} \\ ik\left[Ce^{ika} - De^{-ika}\right] - Ak\cos(ka) = 2\Omega A\sin(ka) \end{cases}$$

Facendo qualche conto si ottiene l'equazione agli autovalori ($\Omega > 0$)

$$k\left\{-\cot(ka) + i\left[1 - \frac{2De^{-ika}}{A\sin(ka)}\right]\right\} = 2\Omega$$

Che fornisce valori continui di $k$ come previsto dal TSS (spettro continuo non degenere).

$$\Phi(x) = \begin{cases} \frac{Ce^{ika}+De^{-ika}}{\sin(ka)}\sin(kx) & 0 < x < a \\ Ce^{ikx} + De^{-ikx} & a < x \end{cases}$$

Considerando ora il caso in cui $\Omega < 0$ notiamo che é possibile avere $w < 0$ quindi $k = i\tilde{k}$. La funzione d'onda deve essere limitata all'infinito quindi necessariamente si deve avere $D = 0$. L'equazione agli autovalori diviene

$$\tilde{k}\left[\coth(\tilde{k}a) + 1\right] = -2\Omega$$

trascendente, che fornisce l'unico valore discreto $\tilde{k}$. Lo spettro energetico in questo caso é discreto non degenere per $w < 0$ (con un unico livello) e continuo non degenere altrimenti, come previsto dal TSS.
L'autofunzione energetica nello spettro discreto é

$$\Phi_{\tilde{k}}(x) = \begin{cases} \frac{Ce^{-\tilde{k}a}}{\sinh(\tilde{k}a)}\sinh(\tilde{k}x) & 0 < x < a \\ Ce^{-\tilde{k}x} & a < x \end{cases}$$

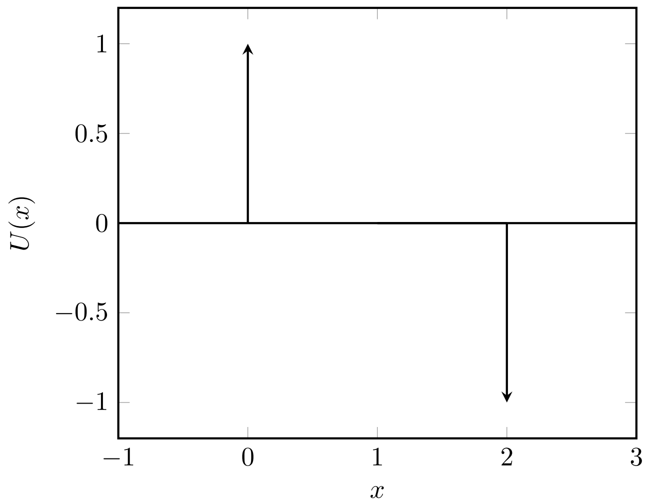
con corrispondente autovalore $w_{\tilde{k}} = \frac{\hbar^2}{2m}\tilde{k}^2$.

## Esercizio 2 (esame del 18/06/2019)

Trovare le espressioni dei coefficienti di riflessione e trasmissione della barriera di potenziale unidimensionale

$$U(x) = \frac{\hbar^2}{m}\Omega\left[\delta(x) - \delta(x-a)\right]$$

ove $a > 0$ e $\Omega > 0$ sono costanti con le dimensioni di una lunghezza ed una lunghezza inversa, rispettivamente.




Supponiamo una soluzione del tipo

$$\Phi(x) = \begin{cases} e^{ikx} + r_k e^{-ikx} & x < 0 \\ Ae^{ikx} + Be^{-ikx} & 0 < x < a \\ t_k e^{ik(x-a)} & a < x \end{cases}$$

Impongo la continuitá della funzione

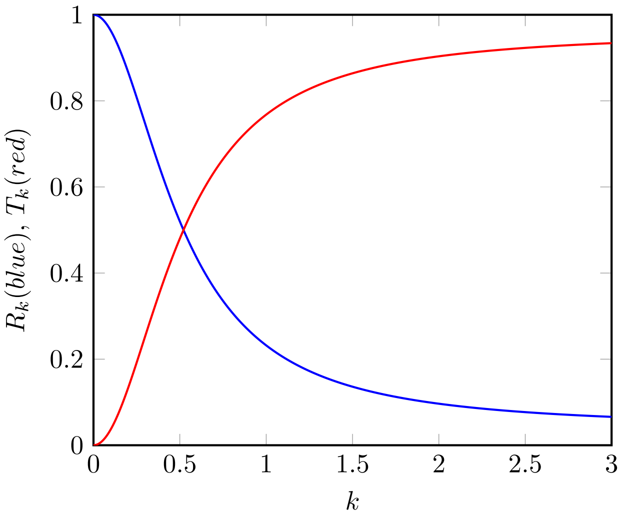
$$1 + r_k = A + B$$
$$Ae^{ika} + Be^{-ika} = t_k$$

e la continuitá della derivata prima

$$ik(A-B) - ik(1-r_k) = 2\Omega(1+r_k)$$
$$ikt_k - ik(Ae^{ika} - Be^{-ika}) = -2\Omega t_k$$

Usando le precedenti relazioni é possibile ricavare i coefficienti

$$r_k = \frac{\Omega - ikB}{ik - \Omega}$$
$$t_k = -ik\frac{B}{\Omega}e^{-ika}$$

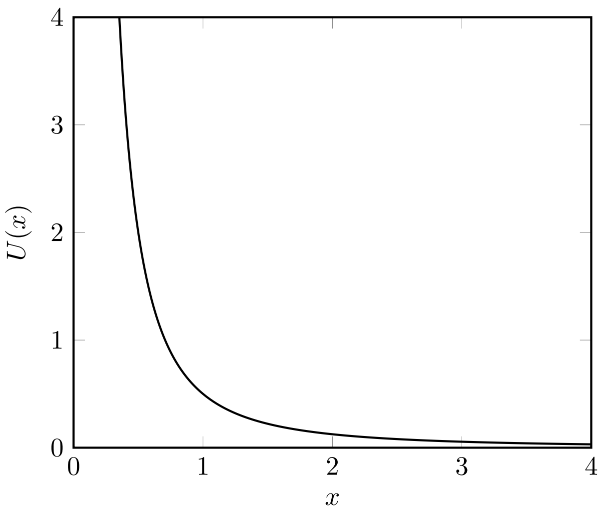



## Esercizio 1 (esame del 08/11/2019)

Una particlella é soggetta ad un campo di forza centrale di tipo armonico

$$U(r) = \frac{U_0}{2a^2} r^2$$

ove $U_0 > 0$ e $a$ sono costanti con le dimensioni di un'energia e una lunghezza, rispettivamente. Calcolare gli autovalori e le autofunzioni dell'energia per il numero quantico orbitale $l = 0$.




L'equazione di Schroedinger diventa

$$\frac{d^2\chi}{dr^2} + \left(k^2 - \frac{2m}{\hbar^2}\frac{U_0}{2a^2}r^2\right)\chi = 0$$

conviene porre $l = \sqrt{\frac{\hbar a}{\sqrt{mU_0}}}$, $k^2 l^2 = 2n + 1$ e $x = \frac{r}{l}$ ottenendo

$$\frac{d^2\chi}{dx^2} + (2n + 1 - x^2)\chi = 0$$

Studiamo l'equazione asintotica per $x \to \infty$

$$\frac{d^2\chi_{as}}{dx^2} - x^2\chi_{as} = 0$$

che ha come soluzione

$$\chi_{as}(x) \simeq e^{-\frac{x^2}{2}}$$

La soluzione generale sará un'equazione del tipo

$$\chi(x) \simeq e^{-\frac{x^2}{2}} H(x)$$

dove $H(x)$ é determinata dalla

$$\frac{d^2H}{dx^2} - 2x\frac{dH}{dx} + 2nH = 0$$

ed é quindi un polinomio di Hermite

$$H_n(x) = (-1)^2 e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}$$

Notiamo ora che la nostra funzione d'onda deve annullarsi in zero, quindi necessariamente si deve avere $n$ dispari. Conviene ora riscalare $n \to 2n+1$ e scrivere le autofunzioni energetiche

$$\chi(r) = Ae^{-\frac{r^2}{2l^2}} H_{2n+1}\left(\frac{r}{l}\right)$$

Gli autovalori dell'energia saranno quindi

$$w_{2n+1} = \sqrt{\frac{U_0}{m}}\frac{\hbar}{a}\left(2n + \frac{3}{2}\right)$$

# Esercizio 1 (esame del 08/01/2020)

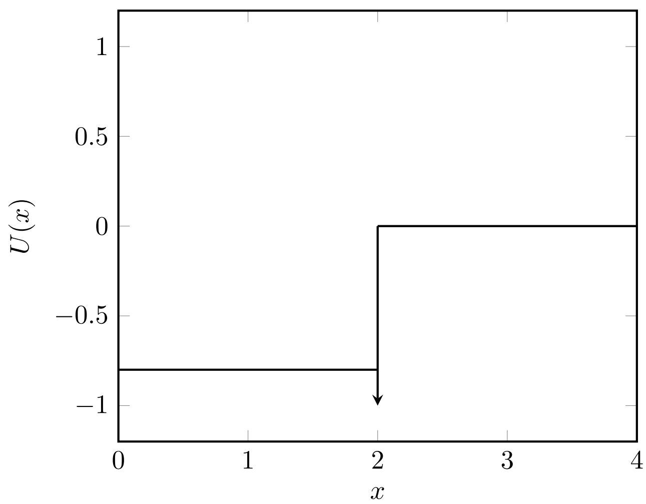
Trovare gli autovalori ed autofunzioni dell'energia di una particella confinata nella regione unidimensionale $0 < x < \infty$ e soggetta al potenziale

$$U(x) = \frac{\hbar^2}{m}\Omega\delta(x-a) + U_0(x)$$

con

$$U_0(x) = \begin{cases} U_0 & 0 < x < a \\ 0 & a < x \end{cases}$$

ove $a > 0$, $\Omega < 0$ and $U_0 < 0$ sono costanti con le dimensioni di una lunghezza, lunghezza inversa ed energia, rispettivamente. Suggerimento: Non tentare di risolvere l'equazione trascendente degli autovalori.



Scriviamo l'equazione di Schroedinger

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2}+\left(k^2-2\Omega\delta(x-a)-\frac{2m}{\hbar^2}U(x)\right)\Phi=0$$

e supponiamo una soluzione generale del tipo (con $k'^2=k^2-\frac{2m}{\hbar^2}U_0$)

$$\Phi(x)=\begin{cases}A\sin(k'x)+B\cos(k'x) & 0<x<a\\ Ce^{ik(x-a)}+De^{-ik(x-a)} & a<x\end{cases}$$

La funzione deve annullarsi nell'origine, quindi $B=0$. Imponiamo ora la continuitá della funzione

$$A\sin(k'a)=C+D$$

e della derivata

$$ik(C-D)-Ak'\cos(k'a)=2\Omega A\sin(k'a)$$

Da cui si ricava l'equazione agli autovalori

$$ik\left[1-\frac{2D}{A}\frac{1}{\sin(k'a)}\right]-2\Omega=k'\cot(k'a)$$

che fornisce le soluzioni per lo spettro continuo $w\geq 0$.

$$\Phi(x)=\begin{cases}\frac{C+D}{\sin(k'a)}\sin(k'x) & 0<x<a\\ Ce^{ik(x-a)}+De^{-ik(x-a)} & a<x\end{cases}$$

Poniamoci ora nel caso $w<0$, ossia quando $k=i\tilde{k}$. L'equazione agli autovalori diventa

$$k'\cot(k'a)=-2\Omega-\tilde{k}$$

che, essendo trascendente, fornisce soluzioni discrete $\tilde{k}_n$ come previsto dal TSS.

$$\Phi(x)=\begin{cases}\frac{C}{\sin(k'a)}\sin(k'x) & 0<x<a\\ Ce^{-\tilde{k}(x-a)} & a<x\end{cases}$$

# Esercizio 1 (esame del 14/01/2022)

Una particella é confinata in un intervallo spaziale di raggio $R$ ed é soggetta ad un campo di forza centrale con potenziale

$$U(r)=\frac{\hbar^2}{m}\Omega\delta(r-\frac{R}{2})$$

dove $\Omega\neq 0$ é una costante con le dimensioni di una lunghezza inversa. Calcolare gli autovalori e le autofunzioni dell'energia della particella.

Equazione di Schroedinger

$$\frac{d^2\chi}{dr^2}+\left(k^2-\frac{l(l+1)}{r^2}-2\Omega\delta(r-R)\right)\chi=0$$

con soluzione generica

$$\chi(r)=\begin{cases}Akrj_l(kr)+Bkrn_l(kr) & 0\leq r<\frac{R}{2}\\ Ckrj_l(kr)+Dkrn_l(kr) & \frac{R}{2}<r\leq R\end{cases}$$

Poniamo ora $x = \frac{kR}{2}$. Condizione al contorno $\chi(0) = 0$ implica $B = 0$. Condizione al contorno $\chi(R) = 0$ implica $Cj_l(2x) + Dn_l(2x) = 0$. Poniamo quindi

$$\begin{cases} C = En_l(2x) \\ D = -Ej_l(2x) \end{cases}$$

e la funzione diventa

$$\chi(r) = \begin{cases} Akrj_l(kr) & 0 \leq r < \frac{R}{2} \\ Ekr\left[n_l(2x)j_l(kr) - j_l(2x)n_l(kr)\right] & \frac{R}{2} < r \leq R \end{cases}$$

Continuitá della funzione:

$$Aj_l(x) = E\left[n_l(2x)j_l(x) - j_l(2x)n_l(x)\right]$$

Continuitá della derivata:

$$Ex\left[n_l(2x)j_l'(x) - j_l(2x)n_l'(x)\right] - Ax\left[j_l'(x)\right] = 2\Omega Aj_l(x)$$

Si ottiene quindi il sistema risolvibile

$$\begin{cases} Aj_l(x) & = E\left[n_l(2x)j_l(x) - j_l(2x)n_l(x)\right] \\ A\left[2\Omega Aj_l(x) + xj_l'(x)\right] & = Ex\left[n_l(2x)j_l'(x) - j_l(2x)n_l'(x)\right] \end{cases}$$

che fornisce soluzioni $k_n$ ordinate per lo spettro energetico discreto ad autovalori $w_n = \frac{\hbar^2}{2m}k_n^2$.