

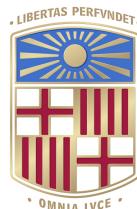
ULTRACOLD UB

Autor: Ivan Morera Navarro

Tutor: Bruno Juliá Díaz

Facultat de Física. Grau en Física.

Departament de Física Quàntica i Astrofísica.



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Índex

Introducció	2
1 Introducció Teòrica	3
1.1 Equació de Schrödinger	3
1.2 Condensació de Bose-Einstein	3
1.3 Solucions a l'equació de Gross-Pitaevskii	4
2 Ultracold UB	6
2.1 Primer apropament	6
2.2 Primera fase de la interfície	6
2.3 Creació total de la interfície	7
2.4 Mòdul: Wave Packet Dispersion	8
2.4.1 Demo 1: Cas lliure	9
2.4.2 Demo 2: Oscil·lador harmònic	11
2.5 Mòdul: Dark solitons	12
2.5.1 Demo 1: Dark soliton	13
2.5.2 Demo 2: Pèndol de Newton quàntic	14
3 Codi i documentació	18
4 Divulgació	21
4.1 YoMo 2017	21
4.2 Espai Ciència 2017	22
4.3 Festa de la Ciència 2017	23
5 Conclusions	25
Referències	26

Introducció

En aquest informe es presentarà el treball realitzat en el projecte ULTRACOLD UB, durant el semestre de tardor del curs 2016-2017 en l'assignatura Pràctiques en empresa del grau de Física. Les pràctiques es van realitzar al departament de Física Quàntica i Astrofísica i van ser supervisades per Bruno Juliá Díaz i Antonio Muñoz Mateo. El principal objectiu d'aquest projecte era crear una sèrie de mètodes numèrics per resoldre l'equació de Schrödinger i la de Gross-Pitaevskii, per finalment crear una aplicació la qual fos d'alguna manera atractiva, per tal de poder fer divulgació amb aquesta i així apropar diversos conceptes de Mecànica Quàntica a un públic poc experimentat. Es va decidir centrar els temes a tractar en: una introducció a la Mecànica Quàntica, la física dels gasos ultrafreds i solitons.

La meva participació en aquest projecte va passar per diferents fases. Per començar, vaig fer un apropament a l'estiu de l'any 2016, en el qual juntament amb l'equip vam desenvolupar els mètodes numèrics per resoldre les equacions (d'aquesta etapa no en parlaré gaire ja que tècnicament no entra dins del període de pràctiques). Al setembre de 2016 va començar la primera fase per crear l'aplicació de divulgació (on Laura Moreno es va afegir a l'equip). Finalment, cap al mes de Desembre, l'aplicació estava totalment complerta i llavors quedava la prova final. Durant els últims mesos hem tingut l'oportunitat de portar la nostra aplicació a diverses fires de divulgació com: YoMo 2017, Espai Ciència i la Festa de la Ciència. Tots aquests aspectes seran tractats en aquest informe.

Durant el semestre que es van realitzar les pràctiques, per tal de tenir una certa regularitat fèiem una reunió per setmana, a més al ser dos alumnes treballant en el mateix projecte havíem de mantenir un cert contacte, sobretot quan vam unificar el treball dels dos. A les reunions presentàvem els nostres avenços i resultats als nostres supervisors. S'ha de comentar que, encara que Antonio Muñoz no figuri com a tutor (per temes burocràtics) va estar totalment present en el desenvolupament del projecte. Així, durant la realització d'aquestes pràctiques en el semestre, vaig acumular una quantitat total aproximada d'unes 300 hores de treball (sense tenir en compte el treball durant l'estiu i la fase de divulgació).

1 Introducció Teòrica

Primer de tot farem una introducció teòrica als diversos aspectes que es tracten en el programa ULTRACOLD UB. Començarem veient l'equació de Schrödinger per introduir la Mecànica Quàntica i continuarem amb els sistemes de N cossos, com és la condensació de Bose-Einstein. Veurem l'equació que governa aquest sistema, l'equació de Gross-Pitaevskii, i dues solucions a aquesta: l'estat fonamental en aproximació de Thomas-Fermi i l'estat excitat d'un solitó fosc.

1.1 Equació de Schrödinger

En Mecànica Quàntica els estats d'un sistema venen caracteritzats per l'anomenada funció d'ona $\psi(\mathbf{r}, t)$. Per una partícula sense espí $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ ens dóna la densitat de probabilitat de trobar la partícula a la posició \mathbf{r} .

Tal i com a Mecànica Clàssica l'evolució d'un sistema està determinada per la segona llei de Newton ($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$), en Mecànica Quàntica l'evolució de la funció d'ona per un cas no-relativista ve determinada per l'equació de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t). \quad (1)$$

En aquesta equació podem observar que l'evolució en el temps de la funció d'ona ve donada per un operador (l'Hamiltonià) que es pot descompondre en dos termes: el cinètic $(-\frac{\hbar^2}{2m})$ i el potencial $(V(\mathbf{r}))$.

1.2 Condensació de Bose-Einstein

La Mecànica Quàntica també pot descriure un sistema format per N cossos. En concret, és interessant estudiar un sistema format per bosons. Aquests estan caracteritzats per poder ocupar el mateix estat quàntic, a diferència dels fermions degut al principi d'exclusió de Pauli. Per tant, quan estem a prop del 0 absolut de temperatura la majoria dels bosons ocupen el mateix estat d'energia, el fonamental. En aquestes condicions tenim un nou estat d'agregació de la matèria, la condensació de Bose-Einstein. Aquest sistema està caracteritzat per presentar una funció d'ona macroscòpica que caracteritza tot el sistema

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N) = \psi_0(\mathbf{r}_1)\psi_0(\mathbf{r}_2)\dots\psi_0(\mathbf{r}_N). \quad (2)$$

Així podem escriure un Hamiltonià

$$H = \sum_{i=1}^N -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 + V_{ext}(\mathbf{r}_i) + \sum_{i < j} V(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|). \quad (3)$$

On hem considerat un potencial extern que confinarà el sistema de bosons i un terme d'interacció entre ells.

Si considerem que el potencial entre bosons és de contacte ho podem modelitzar com $V(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) = \frac{4\pi\hbar^2}{m} a_s \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$, on a_s és el "s-wave scattering length". Així podem considerar una equació d'evolució temporal per als orbitals monoparticulars $\psi_0(\mathbf{r}_i)$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi_0(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{ext}(\mathbf{r}) + gN|\psi_0(\mathbf{r}, t)|^2 \right] \psi_0(\mathbf{r}, t). \quad (4)$$

On $g = \frac{4\pi\hbar^2}{m} a_s$ és l'anomenada constant d'acoplament. Aquesta és l'equació de Gross-Pitaevskii i és una aproximació de camp mig on es considera que cada bosó interacciona amb tots els resultants ($N-1$) mitjançant un camp efectiu. Això crea el terme no-lineal $gN|\psi_0(\mathbf{r}, t)|^2$ que veiem que si $g = 0$ retrobem l'equació de Schrödinger. Així que tenim una equació de Schrödinger no-lineal. Per trobar una versió independent del temps podem buscar estats estacionaris de la forma $\phi(\mathbf{r}) = e^{-i\mu t/\hbar} \psi_0(\mathbf{r}, t)$ on μ és el potencial químic del nostre sistema.

1.3 Solucions a l'equació de Gross-Pitaevskii

El problema que ens concerneix presenta una equació diferencial parcial i no-lineal, un problema d'alta dificultat per a resoldre analíticament. La primera aproximació que podem considerar és quan el sistema presenta un gran nombre de partícules i llavors podem despreciar el terme cinètic, aproximació de Thomas-Fermi. Així podem trobar una solució al nostre problema

$$\phi(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{\mu - V_{ext}(\mathbf{r})}{gN}}. \quad (5)$$

El nostre sistema el modelitzarem atrapat mitjançant un potencial extern tipus oscil·lador harmònic $V_{ext}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2}mw^2r^2$. L'aproximació de Thomas-Fermi presenta un radi màxim pel qual la funció d'ona cau a 0, $R = \sqrt{2\mu}$, condició deguda a que la densitat $|\phi(\mathbf{r})|^2$ no pot ser negativa.

Una altra solució interessant són els anomenats solitons foscos, que es presenten quan tenim

una interacció repulsiva entre els bosons del sistema. Aquestes solucions són excitacions no-lineals i localitzades del sistema que viuen dins d'un *background* estable. En aquest projecte només s'han considerat casos unidimensionals, on el solító fosc és una analogia dels vòrtexs. Si utilitzem l'aproximació de Thomas-Fermi podem trobar un solító fosc que viu en aquest fons:

$$\phi(x) = \sqrt{\frac{\mu - \frac{1}{2}mw^2x^2}{gN}} \tanh\left(\frac{x}{2\sqrt{\xi}}\right). \quad (6)$$

On $\xi = \frac{\hbar}{\sqrt{2mgN}}$ és l'anomenada *healing length*. És interessant veure que en el punt on trobem el solító fosc la densitat cau a 0. A més, aquests presenten una gran fenomenologia, poden tenir dinàmica propia i efectuar oscil·lacions al voltant del centre de la trampa harmònica, que serà un dels punts que es tractarà en aquest projecte.

2 Ultracold UB

El principal objectiu d'aquest projecte era apropar conceptes de Mecànica Quàntica i gasos ultrafreds a la societat, sobretot a un públic que no estigués familiaritzat amb aquests. Per aconseguir aquest objectiu vam realitzar una aplicació interactiva que reflectís aquests conceptes d'una forma dinàmica, on l'usuari pogués recorrer diferents aspectes, des d'una introducció a la Mecànica Quàntica fins a solitons en gasos ultrafreds, sempre buscant una analogia amb el món clàssic per facilitar la comprensió d'aquests conceptes.

2.1 Primer apropament

El projecte s'inicia al juliol de l'any 2016. En aquesta primera fase l'objectiu era programar mètodes numèrics per tal de resoldre tant l'equació de Schrödinger com la de Gross-Pitaevskii. Així es va construir un programa on s'utilitzava el mètode *Split – Step* per resoldre les equacions i a més, s'utilitzava evolució en temps imaginari per trobar solucions a l'equació. Amb aquesta combinació dels dos mètodes, es va construir un codi eficient per trobar solucions a les dues equacions; a més, canviant l'evolució de temps imaginari a real es podien fer evolucionar les solucions que no fossin estacionàries. Per facilitar els càlculs es va utilitzar el paquet *Fast Fourier Transform* (FFT) per la seva rapidesa a l'hora de calcular transformades de Fourier. En concret, jo em vaig dedicar a les seccions de *Wave Packet Dispersion* on es calculaven dues solucions a l'equació de Schrödinger (cas lliure i oscil·lador harmònic) i l'altra *Dark solitons* on es presentaven l'aproximació de Thomas-Fermi i les solucions excitades tipus soliton fosc.

2.2 Primera fase de la interfície

Una vegada acabada la primera fase, al setembre de 2016 va començar un nou objectiu. Ara havíem de mostrar tots els resultats que es podien obtenir amb el mètode numèric d'una forma dinàmica i visualment agradable. La solució que es va plantejar va ser crear una aplicació amb una interfície on es poguessin recórrer tots els resultats obtinguts. Primer de tot, es va haver de buscar un bon entorn on fos fàcil adaptar el nostre codi de càlcul per portar-lo a una interfície. Finalment, jo mateix vaig trobar l'entorn *PyQt* on es podien crear interfícies amb codi *Python* la qual cosa era molt positiva, ja que el codi de resolució numèrica estava escrit en *Python*. *PyQt* és un entorn molt potent i el qual és fàcil d'entendre i dominar, a més hi ha molta informació a Internet per facilitar l'aprenentatge. Així que, el primer pas que vaig realitzar, va ser aprendre a dominar aquest nou entorn al qual mai m'havia apropat. Primer vaig

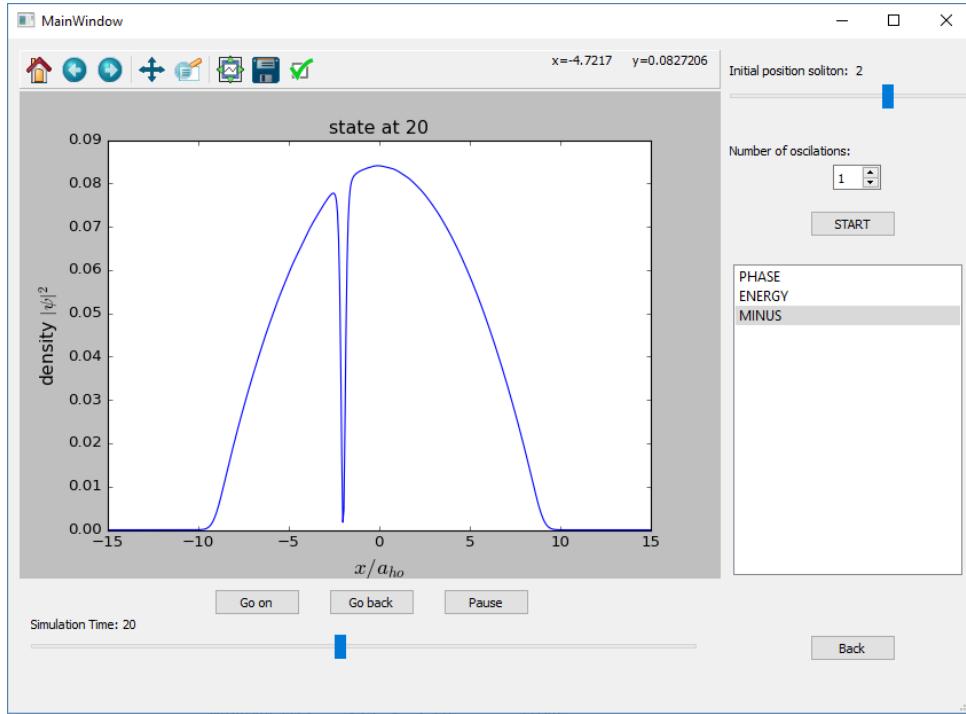


Figura 1: Primera fase de la interfície per al paquet *Dark solitons*. On ja es mostrava l’evolució en temps real d’un solító fosc sota la trampa harmònica i es mostraven diverses magnituds seleccionant les opcions adequades: energia, fase i posició del solító fosc en el temps.

construir una base de la interfície, la qual havia de córrer el nostre codi numèric i agafés els resultats donats per aquest i els mostrés a la interfície Figura 1.

2.3 Creació total de la interfície

Una vegada estava construïda la base s’havia de plantear què volíem mostrar i, el més important, com mostrar-ho d’una forma entenedora i entretinguda. El programa es volia orientar cap a gent en un estat pre-universitari (preferentment joves d’entre 16-18 anys). Llavors es va plantejar buscar analogies amb la Física Clàssica, que per aquesta edat era més o menys ben coneguda. Però per fer la tasca més entretinguda per a l’usuari, va sorgir la idea de realitzar certs ”jocs” on pogués interaccionar amb l’aplicació d’alguna manera. La primera analogia en forma de joc va ser clara, l’oscil·lador harmònic, on es podia comparar el moviment des del punt de vista quàntic i clàssic. Poc a poc, es van anar introduint resultats a l’aplicació, i més mòduls on observar diferents situacions. Així, poc a poc, es va anant construint una aplicació on primer de tot es fes una introducció a la Mecànica Quàntica i finalment es poguessin veure diferents conceptes del

gasos ultrafreds. Així, vaig crear dos mòduls *Wave Packet Dispersion* i *Dark solitons*, i la meva companya Laura Moreno es va encarregar del mòdul *Bright solitons*. Finalment, tots tres es van unir en una única aplicació on es pogués accedir a qualsevol dels tres Fig. 2.

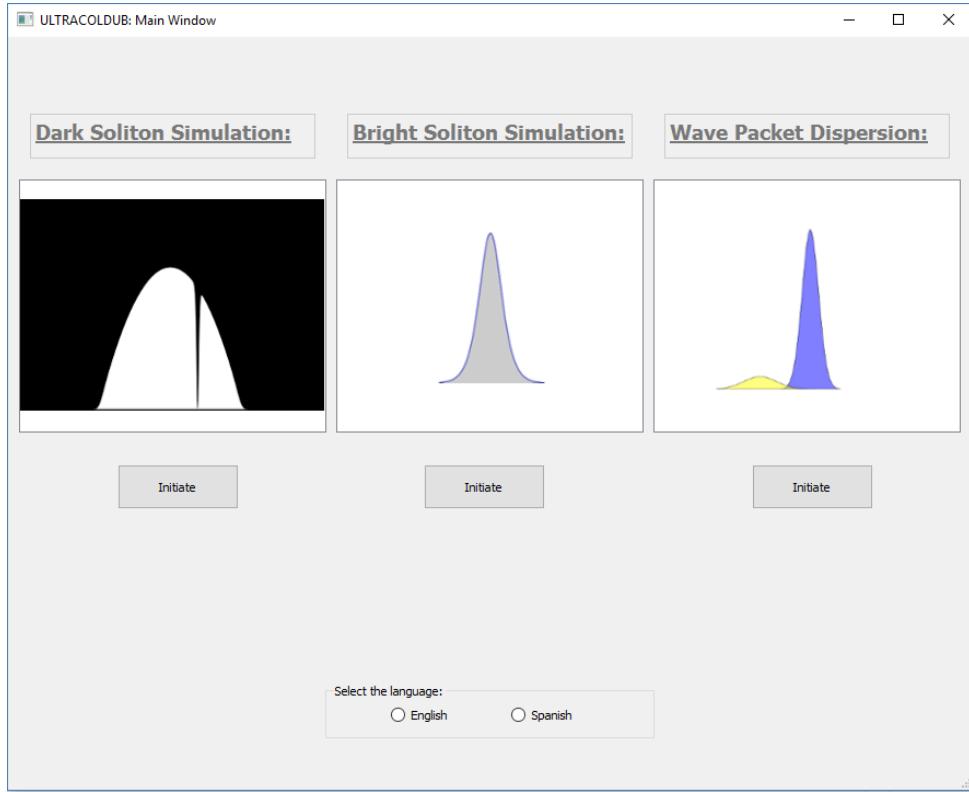


Figura 2: Pantalla de benvinguda a ULTRACOLD UB. Aquí es pot seleccionar quin dels tres mòduls es vol veure.

2.4 Mòdul: Wave Packet Dispersion

A continuació, faré una explicació detallada de totes les opcions que vaig incorporar en aquest mòdul. Aquest estava pensat per ser el primer de tots a veure, i ser així una introducció a la Mecànica Quàntica, el qual no es una tasca fàcil. Vam voler enfocar el problema tractant els dos casos més comuns, almenys els dos primers que es solen ensenyar als joves estudiants a Mecànica Quàntica: el cas lliure i l'oscil·lador harmònic. Seleccionant aquest mòdul el primer que veiem és la finestra presentada a la Fig. 3. A partir d'aquest punt hi han diverses configuracions que es poden tractar. Primer de tot hem d'escolllir la posició on situarem el nostre estat (un paquet gaussià), hem de seleccionar si volem un potencial tipus oscil·lador harmònic

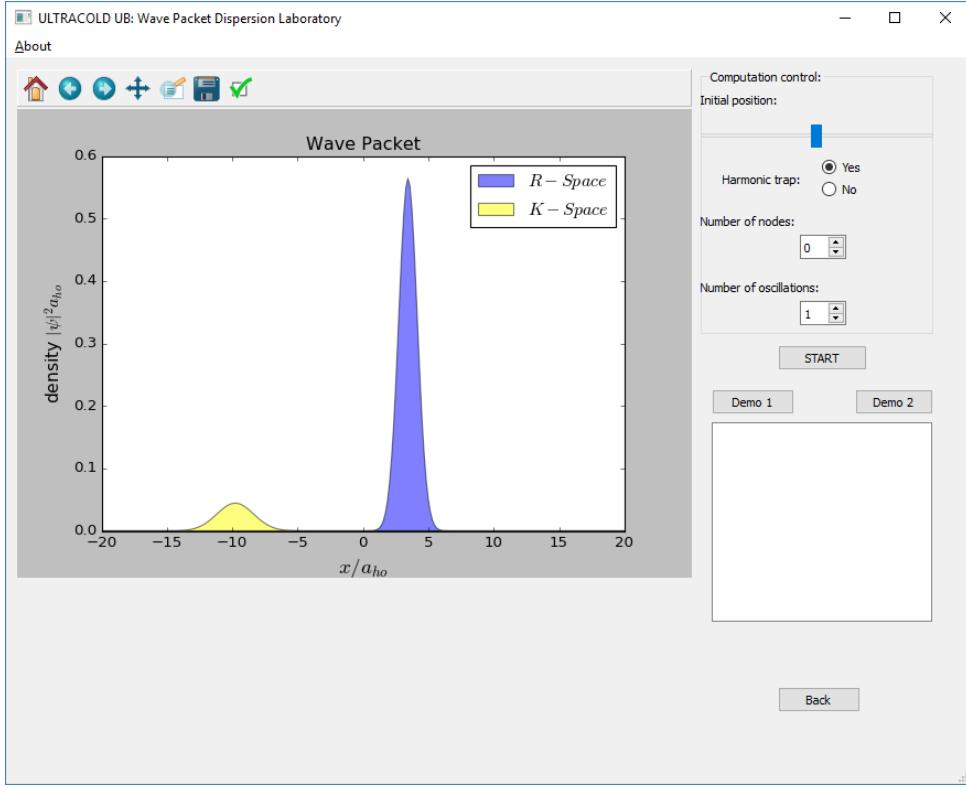


Figura 3: Pantalla d’introducció al mòdul *Wave Packet Dispersion*.

o si no volem potencial (cas lliure), també podem escollir si volem tindre una solució excitada en comptes del simple paquet gaussià i finalment quan de temps durarà l’evolució en temps real que s’efectui que està expressat com un enter de les oscil·lacions del cas amb oscil·lador harmònic (encara que estem al cas lliure). Per facilitar la tasca de l’usuari el que vam fer va ser crear dos *Demos* on només fent click sobre elles el programa ja corregué unes opcions predefinides que vam seleccionar nosaltres, les quals ens van semblar interessants. A continuació anem a veure en detall aquestes dos *Demos*.

2.4.1 Demo 1: Cas lliure

Per començar, l’usuari s’havia de familiaritzar amb el concepte de funció d’ona. El cas lliure en Mecànica Clàssica és del més fonamental que hi ha en la Física i és un concepte que la majoria de gente té ben assumit, però què succeeix en el món quàntic? Si un examina les energies en funció del temps *ENERGY*, pot comprovar que l’energia total coincideix amb la cinètica, quadra amb el conegut en clàssica, però què passa si un observa l’evolució en temps real? A Física Clàssica sabem per la primera llei de Newton que un cos que no està sotmès a una

força segueix un moviment rectilini uniforme, a velocitat constant. El que observem en el cas quàntic és que la nostra funció d'ona pateix l'anomenada dispersió, i és que podem veure com aquesta va augmentant la seva amplada i disminuint la seva alçada a mesura que passa el temps. Recordem que el mòdul al quadrat de la funció d'ona estava relacionat amb la probabilitat de trobar una partícula en una regió de l'espai, llavors si a l'inici teníem un estat on la funció d'ona era estreta i molt picada a una posició (la partícula es troba molt localitzada en una regió de l'espai) a mesura que avança el temps aquesta es deslocalitza en l'espai. Un primer resultat donat per la Mecànica Quàntica és que, en el cas lliure, la funció d'ona tendeix a ocupar tot l'espai que sigui accessible.

A més, podem observar un altre aspecte important. Si un observa el valor mig de la posició en funció del temps (*MEAN VALUE X*), un pot veure que aquest no evoluciona amb el temps, és una constant, just com en el cas clàssic on una partícula sense velocitat i a la qual no se li aplica cap força, roman a la seva posició. Llavors podem apreciar un nou concepte introduït a Mecànica Quàntica, els valors esperats ens donen informació dels observables del sistema. A més, en aquest mateix gràfic un pot veure l'evolució de la dispersió (relacionada amb l'amplada de la funció d'ona) i pot veure que creix linealment amb el temps. Cal comentar, que també tenim accès a les mateixes variables per a l'espai dels moments. Podem veure com la funció d'ona en aquest espai no evoluciona, el qual té sentit ja que estem tractant amb el cas lliure i la funció d'ona en aquest espai és un estat propi de l'hamiltonià.

Llavors ara falta veure l'analogia amb el mòn clàssic. Encara que els resultats no quadrin analitzant el moviment d'una partícula en repòs en Física Clàssica podem trobar una altra analogia, la llum. Si un clica sobre l'opció *Dispersion* apareix una finestra com la mostrada a la Fig. 4. Aquí vaig realitzar un petit model per mostrar la dispersió de la llum. Un conjunt de boles comencen a avançar totes a la mateixa posició amb la mateixa velocitat. Arribat a un punt (la llum entra al material difractant) a cada bola se li suma una nova velocitat segons una distribució gaussiana i s'assigna un color a cada bola segons el valor d'aquesta velocitat. Així el que obtenim és l'espectre de colors. Això es visualitza a l'animació de la finestra d'adalt a l'esquerra. Just a sota podem veure un histograma per a la posició de les boles i una gaussiana ajustada segons els paràmetres. Adalt a la dreta podem veure l'evolució de la dispersió que presenta aquest moviment. Observem que la dependència d'aquesta té la mateixa fucionalitat que l'observada en el cas quàntic. Per últim, es veu una representació artística de la dispersió de la llum en un prisma. És important remarcar que això només és una analogia entre els dos efectes per fer més comprensible el sistema quàntic.

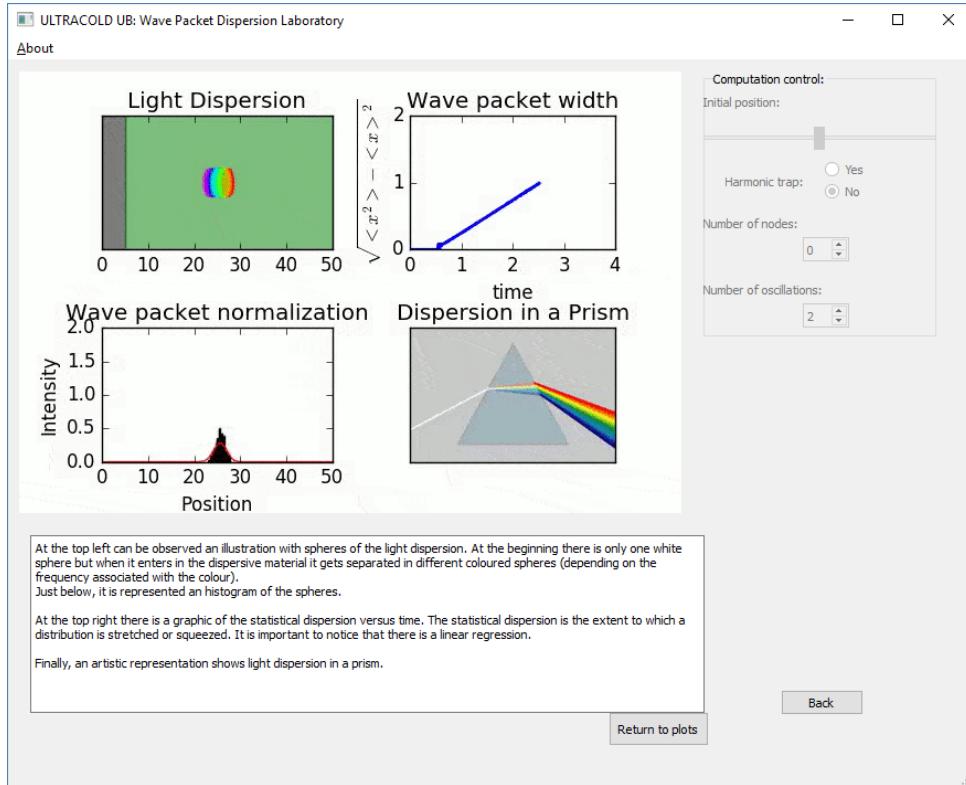


Figura 4: Finestra per mostrar la similitud entre la dispersió de la llum i la d'un estat en el cas quàntic lliure.

2.4.2 Demo 2: Oscil·lador harmònic

Ara afegim un potencial tipus oscil·lador harmònic a l'equació de Schrödinger. A la *Demo 2* la opció predeterminada presenta un paquet d'ona gaussià descentrat i amb la seva representació en l'espai de moments (també una gaussiana) centrada. Si examinem l'evolució en temps real veiem com totes dues efectuen oscil·lacions entorn el centre. Tal que quan una està centrada l'altra no. Si observem l'energia del sistema *ENERGY* podem veure una evolució ben definida: quan l'energia potencial és mínima, la cinètica és màxima i al revés, tenim l'evolució típica donada per un oscil·lador harmònic en l'àmbit clàssic. Recordem que ja havíem vist en l'anterior *Demo* que els valors esperats són observables del sistema, llavors què passarà amb el valor esperat de la posició en aquest cas? Si fem clic a *Guess Function* entrem en el primer joc de l'aplicació. S'obre una finestra on es mostra el valor esperat de la posició de l'anterior moviment. Ara tenim dos paràmetres a controlar: l'amplitud i la freqüència, els quals són paràmetres que caracteritzaran un moviment oscil·latori harmònic clàssic, com és el d'un objecte lligat a una molla. Així l'usuari modificant aquests paràmetres pot arribar a quadrad els

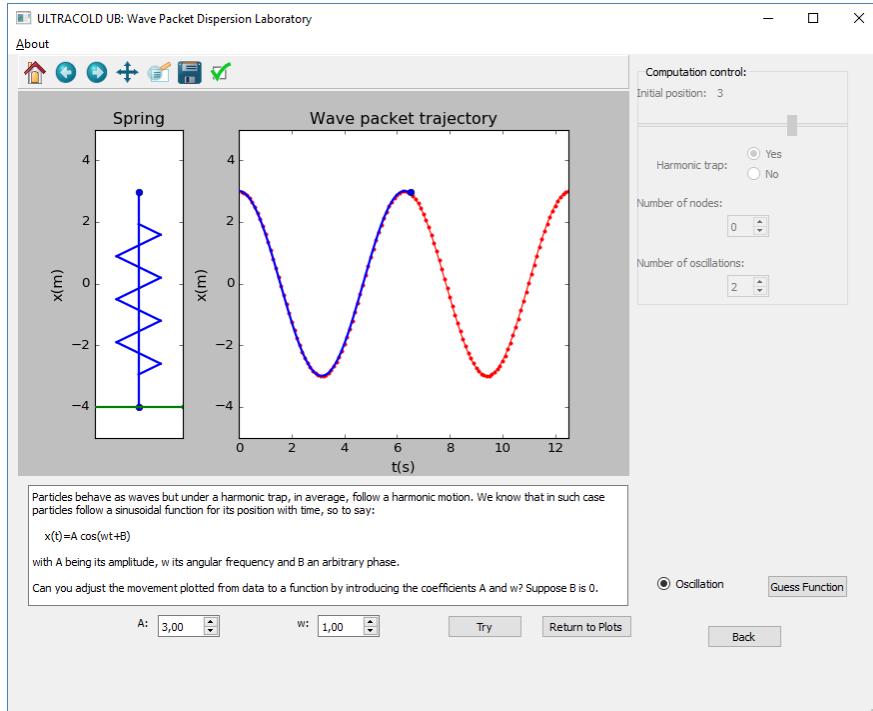


Figura 5: Exemple del joc de la molla amb uns paràmetres adequats per quadrar els dos moviments.

dos moviments, el clàssic i el quàntic. Així comprovant la total similitud, també amb les seves diferències a l'hora d'interpretar els resultats, entre ambdós móns. Un típic exemple es mostra a la Fig. 5.

2.5 Mòdul: Dark solitons

Una vegada han sigut introduïts els conceptes bàsics de la Mecànica Quàntica ara el convenient és que l'usuari entri en un dels dos mòduls següents: *Dark solitons* o *Bright solitons*, on es veuran conceptes més avançats dels gasos ultrafreds; aquí explicaré el mòdul de *Dark solitons* que és el que vaig desenvolupar jo mateix. En aquest mòdul ens centrarem en les solucions tipus solitó fosc, que com hem comentat anteriorment es donen per condensats de Bose-Einstein en el cas de tenir una interacció entre bosons repulsiva. Només entrar en el mòdul s'obre la finestra observada en la Fig. 6. Només obrir-se la finestra podem veure un exemple típic d'un condensat de Bose-Einstein, on veiem la densitat d'aquest en funció de la posició.

Aquí tenim tres opcions a escollir: *Nonlinearstates*, *Darksolitonsstudy* i *Newton'scradle*, dintre de les quals hi han moltes possibilitats a configurar, per això vam decidir destacar dos

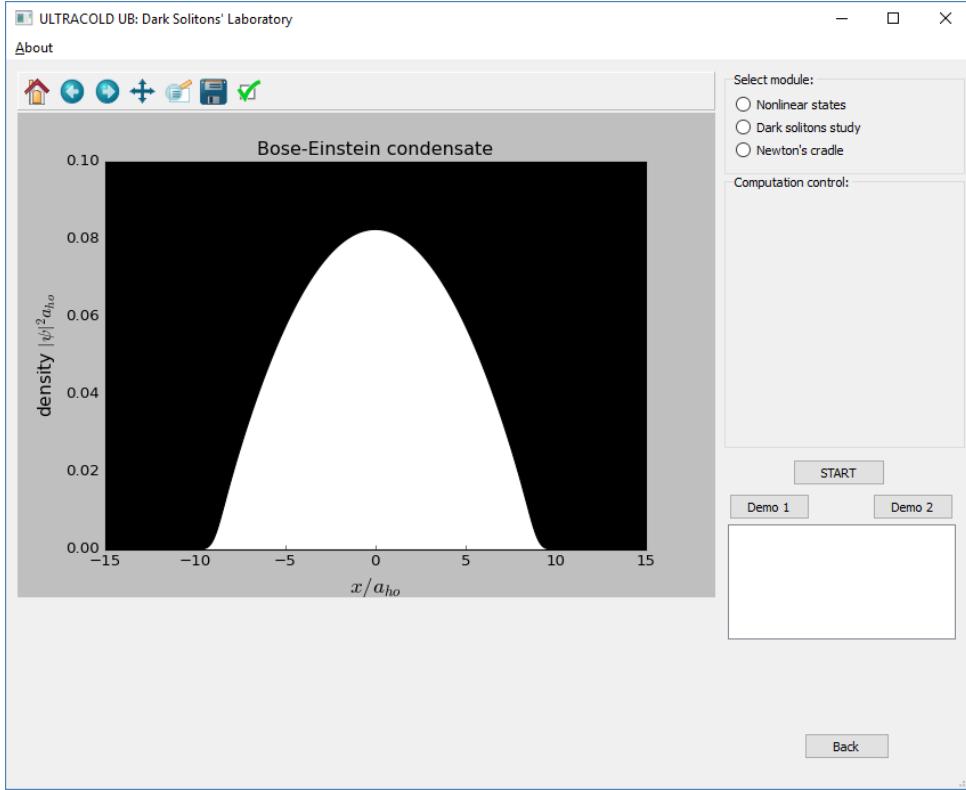


Figura 6: Finestra principal del mòdul *Dark Solitons*.

casos interessants a tractar i vam crear dos *Demos*. Una de les tres opcions queda exclosa *Nonlinear states* ja que vam considerar que el tractament era massa avançat per al públic al qual estava enfocat, però vam decidir deixar-la implementada per si en un futur s'ampliaven les opcions. Bàsicament en aquesta opció es volia mostrar com l'estat fonamental de l'equació de Gross-Pitaevskii és la continuació no-lineal de l'estat fonamental de l'oscil·lador harmònic de l'equació de Schrödinger. Per fer això vaig crear un mètode iteratiu que trobava solucions per petits augmentos del terme no-lineal, el qual no comentaré amb detall. A continuació em centraré en descriure els diversos aspectes que es poden tractar en les dos *Demos* predeterminades.

2.5.1 Demo 1: Dark soliton

En aquesta *Demo* es vol mostrar diverses propietats dinàmiques d'un solító fosc. En concret, com un solító fosc descentrat de la trampa harmònica efectua un moviment oscil·lant entorn el centre d'aquesta. Així l'estat inicial del qual partirem serà un solító fosc imprès fora del centre de la trampa, com el que es veu a la Fig. 7. Veient la simulació en temps real podem observar aquest fet, així podem comprovar que aquesta solució es comporta com una partícula (segueix

un moviment oscil·latori). Aquest fet queda remarcat fent clic a *Guess Function*. Aquí ens apareixerà una finestra on es pot veure la posició del solitó fosc en front del temps. Ara tenim el mateix joc de la molla presentat en la *Demo 2* del paquet *Wave Packet Dispersion*; la idea torna a ser la mateixa: intentar ajustar els dos moviments. El que podem apreciar ara és que, tot i que la freqüència de la trampa tingui el valor 1 trobem una freqüència diferent per al solitó fosc $1/\sqrt{2}$. Això és degut a que estem obviant un aspecte i és que el solitó fosc "viu" dintre del condensat de Bose-Einstein, i pateix una força d'empenta degut a aquest. El quotient entre aquesta i la de la trampa harmònica crea aquesta freqüència efectiva. És interessant veure que tot i que estem tractant amb un sistema purament quàntic podem trobar equacions efectives regides per conceptes clàssics, com la força.

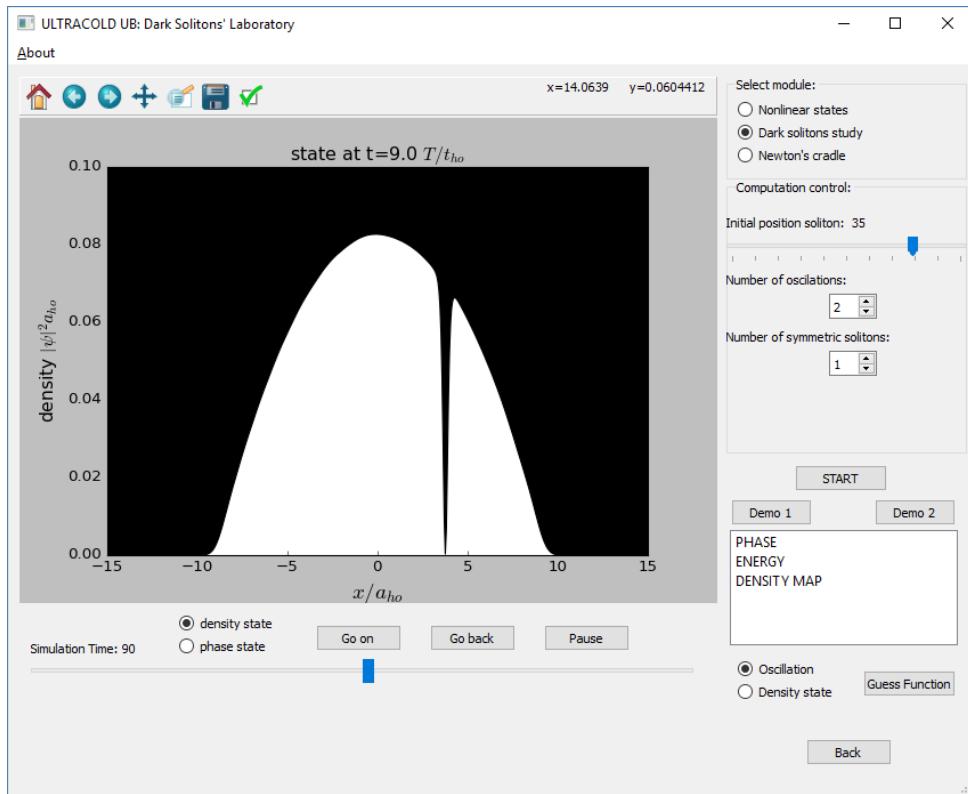


Figura 7: Exemple d'un solitó fosc imprès fora del centre de la trampa.

2.5.2 Demo 2: Pèndol de Newton quàntic

Fins ara hem vist el moviment d'un solitó fosc sota l'efecte d'una trampa harmònica i hem arribat a la conclusió que es comporta com una partícula (exerceix un moviment oscil·latori

harmònic) amb una freqüència efectiva. Ara la pregunta que ens concerneix és: com interaccions més d'un solító fosc? I aquesta pregunta va desencadenar la següent qüestió: podem crear un pèndol de Newton utilitzant el sistema de la condensació de Bose-Einstein amb diversos solitons foscos? A continuació anem a veure-ho. La *Demo 2* està configurada per a trobar un estat on es trobin dos solitons foscos en posicions simètriques respecte el centre de la trampa, de tal forma que aquest estat seria estacionari (la interacció entre solitons foscos és repulsiva i això fa que podem trobar un estat estacionari d'aquest tipus). A més, superposem en aquest estat un solító fosc imprès de forma descentrada a la trampa, a la Fig. 8 podem veure aquesta configuració inicial. Ara deixem evolucionar en temps real el nostre sistema, com ja hem vist abans el solító fosc descentrat començarà un moviment oscil·latori. El punt interessant és quan aquest es troba el dos solitons foscos estacionaris i comencen un moviment oscil·latori junts. Així, tots tres solitons foscos efectuen un moviment oscil·latori. En aquesta representació no podem discernir correctament el moviment.

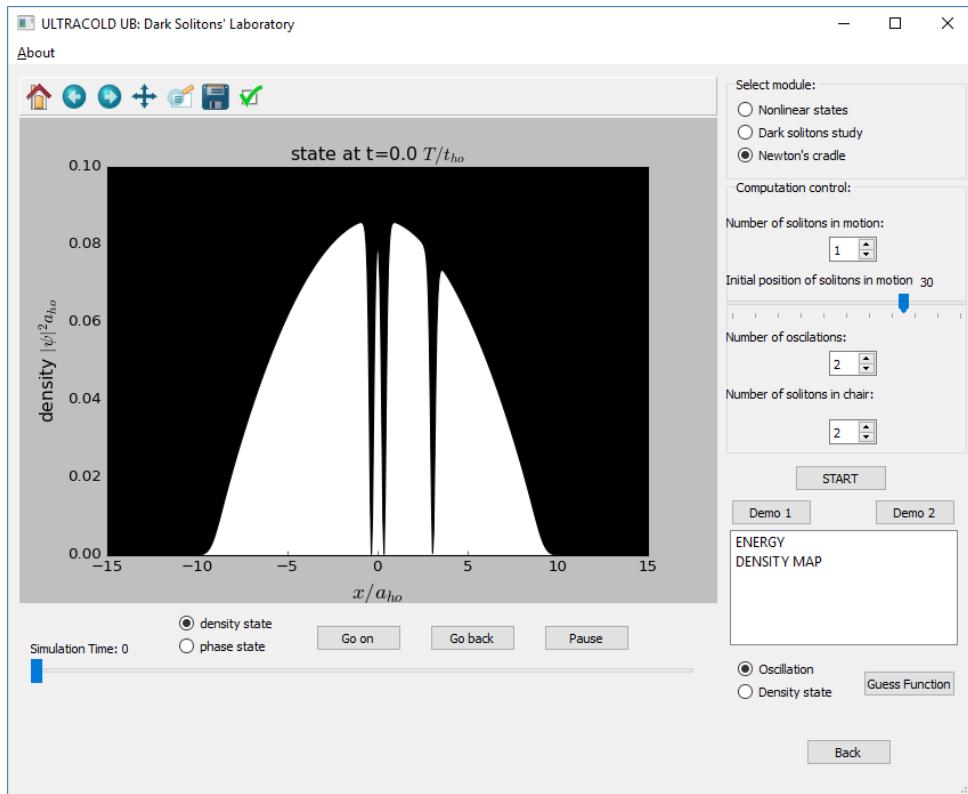


Figura 8: Configuració inicial per reproduir un pèndol de Newton quàntic.

El que vam plantejar va ser crear un joc que permetés visualitzar les possibles similituds entre aquest moviment i un pèndol de Newton, així que havíem de modelitzar un pèndol de Newton. El que vaig idear va ser posar una cadena de N boles en un potencial harmònic de tal forma que en la seva configuració fossin estacionàries (posades de forma simètrica entorn el centre on el potencial és 0), degut al contacte entre elles. També s'inclouria una cadena de M boles descentralada del potencial. És interessant remarcar que aquest model no és l'usual quan un parla de pèndol de Newton. En els que estem acostumats a veure nosaltres cada bola té la seva pròpia posició d'equilibri, és a dir, cada una romandria estacionària a la seva pròpia posició d'equilibri, per això la cadena inicial és estacionària. En el nostre model la posició d'equilibri és comuna per a totes les boles, i això produeix que quan hi ha l'impacte inicial la cadena que era estacionària ara queda descentralada i també oscil·larà; és a dir, tindrem en moviment les boles inicials que ja estaven en moviment i la cadena que era estacionària, a diferència del pèndol de Newton usual on la cadena estacionària sempre roman quieta.

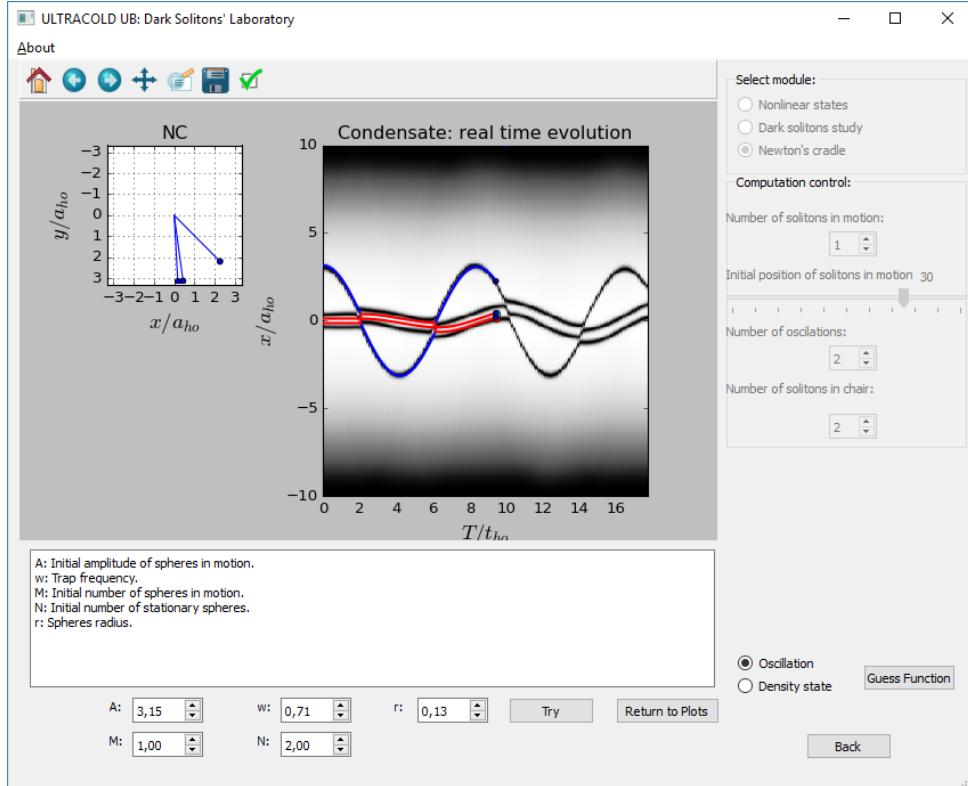


Figura 9: Joc del pèndol de Newton per una configuració on es pot apreciar la similitud entre els dos moviments.

Per descriure el model es van imposar unes condicions en el moment d'impacte. La conservació del moment lineal, energia i una condició extra: el nombre de boles entrant en un impacte ha de ser el mateix que el sortint del impacte. És a dir, si per exemple tenim una cadena estacionària formada per dues boles i a l'inici només hi ha una bola en moviment, quan es produeixi l'impacte sortirà una bola ejectada de la cadena i aquesta quedarà desplaçada del centre justament el diàmetre d'una bola, així que també començarà a oscilar.

Llavors l'usuari entrant a *Guess Function* pot jugar a veure quins paràmetres són els adequats per veure si hi ha una real similitud entre els dos moviments. A l'esquerra es representarà una animació del pèndol de Newton clàssic que crea el model ; el model és unidimensional, en aquesta representació 2D l'eix Y simplement és una perllongació del X, que es va realitzar per fer més entenedor el model. A la dreta apareix l'evolució del condensat en funció del temps, de la qual podem discernir la posició dels solitons foscos enfront del temps. Ara teníem que fer la prova definitiva, quadrarien els dos moviments? A la Fig. 9 podem veure una configuració on la similitud és més que apreciable. És inclús sorprenent la similitud que es pot trobar entre els dos moviments tot i que un sigui descrit purament per lleis clàssiques i l'altra per quàntiques. Així podem conculoure que els solitons foscos es poden arribar a comportar com a partícules fins a uns punts inimaginables.

3 Codi i documentació

Tot el desenvolupament del codi es va fer de forma oberta i lliure, utilitzant la plataforma GitHub¹. D'aquesta manera el projecte és accessible per a qualsevol persona que vulgui participar; de fet, esperem que això només sigui el començament i esperem que s'incorpori més gent i que el projecte creixi, que es puguin tractar més aspectes interessants dels gasos ultrafreds (hi ha un gran repertori) i que sorgeixin nous participants.

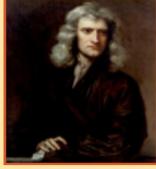
En aquesta pàgina web hi ha molta informació respecte l'aplicació; des de comentaris en els codis fins a petits manuals. De fet, es pot accedir a dos manuals (un per *WavePacketDispersion* i *Dark solitons*, l'altre per *Bright solitons*) en els quals es guia a l'usuari per tal de fer un recorregut per tot el programa. Així, pot veure totes les *Demos* creades, i alhora es van plantejant certs aspectes per tal de que reflexioni sobre la Física que hi ha darrere del que està veient. Aquest manual està pensat per a que l'usuari pogui recórrer el programa de forma autònoma, ja que el programa per sí sol no conté la suficient informació com per a que una persona inexperta l'entengui bé. El programa es va dissenyar amb la idea de que els creadors d'aquest estiguèssim presents quan l'usuari l'utilitzés i, anèssim explicant la Física alhora que s'avancava.

Una vegada tota la feina estava enllestida, volíem mostrar el nostre projecte. Per això, vam crear un material addicional amb aquest fi. Vam crear una sèrie de pòsters per tal de fer més visual el projecte, en els quals jo vaig participar en la creació de dos. En aquests vam volem mostrar els conceptes principals que es podien veure en l'aplicació, concretament les *Demos*, i a més introduir conceptes de Mecànica Quàntica, gasos ultrafreds i solitons, on alhora es relacionen amb conceptes de la Física Clàssica. D'aquesta manera, la gent només llegint els pòsters ja tenia una lleugera idea de la temàtica del projecte. Els pòsters estan afegits a les figures 10 i 11.

També, com he comentat, es va afegir a la plataforma GitHub una sèrie de manuals, però eran massa extensos com per a portar als events. Així, vam crear un manual d'un únic full on es recollís el més important, alhora creant reptes per a que l'experiència fos més entretinguda, on es formulaven preguntes amb diverses categories de dificultat.

¹<https://github.com/brunojulia/ultracoldUB>

ANALOGIES IN CLASSICAL MECHANICS



Sir Isaac Newton

Whenever one thinks of physics, **Classical Physics** is what comes to mind. Everybody has heard of Newton and his apple, but physics has its dark and far from being completely understood side: **Quantum Physics**. Though they are ruled by different laws, there are some effects that are quite similar between both of them, let's see some of them!



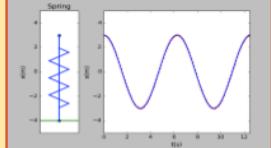
Erwin Schrödinger

$\vec{F} = m\vec{a}$

$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(x)\Psi(\vec{r}, t)$

In nature, a light beam is composed by **different frequencies**. The predominance of a certain frequency —or wavelength— over the others gives place to the concept of colour. This composite nature can be shown by illuminating a prism with a white light beam. The incoming beam is split into its constituent colours, as in the rainbow, because the way a material transmits light depends on the colour. Or a bit more technical, the refractive index of a material varies with wavelength.





In classical physics a particle attached to a spring or under a harmonic potential evolves in time describing a **harmonic motion**. It experiences a force, given by **Hooke's law**, that tends to return the particle to its equilibrium position.

 $F_{\text{spring}} = -kX$

In our daily life ordinary objects do not tunnel potential barriers, e.g. a ball thrown against a wall always bounces back. So does this mean we cannot think of an analog to the **Tunneling Effect**? In fact, it can be observed that a beam of light passing through a glass surface divides its beam into two different ones, a reflected and a refracted one! It is called **reflection and refraction**.





Newton's Cradle is one of the most famous examples that illustrates **conservation of momentum** and **energy**. If the spheres have the same mass, it can be observed that the number of them in motion is constant. Although this device is purely described by the laws of Classical Mechanics, a **quantum system** like a Bose-Einstein Condensate with **dark solitons** does exhibit the same properties!

*[Portrait of Isaac Newton - by Sir Godfrey Kneller, 1689 (public domain). Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:sir_isaac_newton_\(1643-1727\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:sir_isaac_newton_(1643-1727).jpg)
Erwin Schrödinger - by the Nobel foundation, 1933 (public domain). Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erwin_Schrödinger_\(1933\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erwin_Schrödinger_(1933).jpg)
Prism rainbow schema - by Joenjo [public domain]. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prism_rainbow_schema.png
Newton's Cradle - by DemonDeluxe [Dominique Toussaint] (public domain). Retrieved from https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/Newton's_cradle_animation_book.gif*

Figura 10: Pòster per a realitzar divulgació amb ULTRACOLD UB. Introducció als conceptes que es tracten en el programa.

BASIC PHENOMENA IN QUANTUM MECHANICS

In Quantum Physics particles are described by probabilities of being found (blue one) due to the **UNCERTAINTY PRINCIPLE**, $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar/2$. At the beginning this probability occupies a small region of space, but it evolves in time and at the end it fills all the box. It can be observed that this phenomenon shows a clear analogy with **LIGHT DISPERSION**.

Particles behave as waves but under the effect of a harmonic potential, in average, follow a harmonic motion. However, the system presents awesome and unexpected properties, such as the **ENERGY QUANTIZATION**.

$$E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

An incredible effect that appears in very small systems is the **TUNNELING EFFECT**, that can be explained with Quantum Physics.

Because of its wave-like behaviour there is some probability to find the particle on the other side of the barrier. Although it may seem impossible in our daily life, we can find an analogous situation with the **REFRACTION** and **REFLECTION** of LIGHT.

BRIGHT SOLITONS

A Bright Soliton is a wave that moves in space **MAINTAINING** its **SHAPE**. This kind of solitons can be found in nature for example in water. They can follow the classical dynamics –e.g. free and harmonic motions– under certain circumstances. A Bright Soliton in a BEC is able to undergo **TUNNELING EFFECT** when facing an energy barrier.

DARK SOLITONS

When working with Bose-Einstein Condensates (BEC) we can perform (using advanced technology) **HOLES** in the BEC that once created do not disappear, and which can be seen as a lack of matter. Those holes are called **Dark Solitons**. To understand this obscure problem we can think of the familiar situation of a vortex in water.

Dark Solitons show the same behaviour as a particle and it can even be described by Newton's Laws but considering a **NEGATIVE MASS** (do not forget that a Dark Soliton is the absence of matter!).

UNIVERSITAT DE
BARCELONA

ICCUB
Institut de Ciències del Cosmos

Wavefunctions of a quantum harmonic oscillator - by AllenMcC, 2010 [public domain]. Retrieved from <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HarmOszFunktionen.png>

Soliton - by Christophe Finot and Kamal HAMMAMI, 2009 [public domain]. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/File:Soliton_hydro.jpg

William Pye's 'Charybdis', Seaham Hall Hotel. The inner vortex - by Andrew Curtis, 2010 [public domain]. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:William_Pye's,_Charybdis,_Seaham_Hall_Hotel_-_geograph.org.uk_-_1706275.jpg

Figura 11: Pòster per a realitzar divulgació amb ULTRACOLD UB. Introducció a la Mecànica Quàntica i els solitons.

4 Divulgació

Finalment vam poder posar a prova la nostra aplicació en diferents fires de divulgació. Aquestes tasques tècnicament es van realitzar durant el semestre de primavera del curs 2016-2017 però crec que val la pena que quedí constància de les experiències, ja que van ser molt positives.

4.1 YoMo 2017

Vam tenir l'increïble oportunitat de participar en el Youth Mobile Festival (YoMo), un event molt important. Era la primera vegada que es feia a Barcelona, i de les primeres a nivell mundial. A més, per afegir responsabilitat èrem els únics representants de la Facultat de Física, i dels pocs de tota la Universitat de Barcelona. Era la primera vegada que anàvem a mostrar el nostre projecte a un públic desconegut i no sabíem quin seria el resultat.



Figura 12: Equip de divulgació a YoMo. D'esquerra a dreta: Maria Arazo, Montserrat Guilleumas, Artur Polls, Ivan Morera, Laura Moreno i Alejandro Romero.

Per a la nostra sorpresa, el públic a la fira era molt més jove del que ens pensàvem. Tot i això vam quedar sorpresos ja que vam tenir un gran nombre de participants i una gran part va mostrar molt d'interès en els temes que es tractaven. Amb aquesta grata experiència vam

poder comprovar la potència de l'aplicatiu, si s'adaptava el discurs i no es feia massa tècnic es podia arribar a estudiants molt joves. Van sorgir noves idees sobre expandir l'aplicació per així arribar a un públic molt més ampli. També cal comentar que vam contar amb un pèndol de Newton (per cortesia de Marc Boada) i això va fer l'experiència per molts participants molt més entretinguda. Això també ens va portar a pensar que l'aplicació es podria convertir en una eina didàctica eficient si aconseguíem portar cert material addicional: pèndol de Newton, prisma dispersiu, etc.

4.2 Espai Ciència 2017

En la següent fira que vam participar va ser a l'Espai Ciència. Aquest és un esdeveniment on es realitza divulgació científica i coincideix amb el Saló de l'Ensenyament, on els alumnes de Batxillerat busquen orientació pel seu futur acadèmic. Això va ser un avantatge per nosaltres ja que una gran part dels participants que vam atendre eren estudiants que ja s'havien informat i venien expressament al nostre stand. A més, la majoria dels estudiants estaven en l'edat que havíem considerat pel programa, entre 16 i 18 anys, per tant el discurs va ser molt adequat per a ells.



Figura 13: Equip de divulgació a l'Espai Ciència (Maria Arazo, Artur Polls, Laura Moreno i Ivan Morera) admirant la dispersió de la llum.

No només vam gaudir de l'oportunitat de divulgar Mecànica Quàntica, sinó que a més molts dels participants ens van demanar consell a nivell personal per orientar-los en el seu futur. Vam ajudar a molts estudiants a tenir les idees clares, a més, els vam poder mostrar diferents conceptes que es tracten al llarg del grau. Cal destacar que molts dels participants van comentar que, gràcies al que es veia a l'aplicació, molts conceptes de Física Clàssica (sobretot el moviment oscil·latori harmònic) quedaven millor entesos.

4.3 Festa de la Ciència 2017

L'última fira en la que vam participar va ser a la Festa de la Ciència, organitzada per la pròpia universitat de Barcelona. En aquest esdeveniment el públic era molt jove, dels que més de les tres fires, el qual va fer molt difícil poder arribar a transmetre el nostre missatge. La majoria dels participants no coneixien el moviment oscil·latori harmònic, i això va comportar una dificultat en l'explicació de molts conceptes. Per això, vam orientar el nostre discurs d'una altra manera. Vam intentar explicar conceptes molt bàsics de Mecànica Quàntica per a que, al menys els més joves, es poguessin fer una idea aproximada dels aspectes més rellevants.



Figura 14: Equip de divulgació a la Festa de la Ciència. D'esquerra a dreta: Maria Arazo, Laura Moreno, Ivan Morera, Alejandro Romero i Bruno Juliá.

Voldria destacar que tot i que la majoria del públic fos molt jove vaig tenir dos participants estudiants del grau de Física també de la Universitat de Barcelona. Va ser una experiència molt gratificant ja que encara que tinguèssim conceptes de Física Quàntica, amb les simulacions van poder veure una cara de la Quàntica que no coneixien. També van acabar de comprendre molts

conceptes, i a més van veure d'altres que mai havien vist com els gasos ultrafreds o els solitons. Això em va fer veure la potència del programa, inclús es podria plantejar utilitzar-lo per impartir classes relacionades amb aquests temes.

5 Conclusions

L'objectiu principal d'aquestes pràctiques ha estat essencialment realitzar una aplicació per tal de divulgar conceptes de Mecànica Quàntica, gasos ultrafreds i solitons. La idea era fer un programa visualment atractiu per tal de que l'experiència fos més gratificant a l'hora d'introduir tots aquests conceptes. Personalment, m'he encarregat dels mòduls de *Wave Packet dispersion* i *Dark soliton*.

En aquest projecte no només he après conceptes físics de Mecànica Quàntica, gasos ultrafreds i solitons, sinó que a més he millorat la meva habilitat programant amb Python creant mètodes numèrics per resoldre equacions, he après a crear una interfície gràfica utilitzant PyQt, i també he millorat a l'hora de fer presentacions i treballar en grup. Tanmateix, l'experiència ha sigut molt gratificant ja que he tingut l'oportunitat de divulgar física als joves.

Les experiències en les fires han estat més que satisfactoriés i, en general, el públic es va mostrar molt interessat en els temes tractats. Tot i que la idea inicial era adreçar el programa a estudiants d'entre 16-18 anys, vam poder comprobar que teníem una gran flexibilitat en el rang d'edats, inclús que es podria plantejar d'una forma més avançada per a alumnes del grau en Física.

Per últim, voldria agraïr a l'equip de la UB Divulga que en tot moment ens van ajudar a l'hora de montar els estands i varen ser els que ens van donar accès a les fires de divulgació. També és important comentar que hi ha hagut molta gent involucrada en el projecte, sobretot destacar la presència d'Antonio Muñoz que va estar present durant tot el semestre. Espero que el programa sigui creixent amb el temps i nous participants arribin.

Referències

- [1] L.P. Pitaevskii and S. Stringari, *Bose-Einstein Condensation*, Oxford University Press (Oxford, 2003).
- [2] P. G. Kevrekidis, D. J. Frantzeskakis and R. Carretero- González, *The Defocusing Nonlinear Schrödinger Equation*, SIAM (Philadelphia, 2015).