

1. Movimiento libre

1.1. Introducción

Para empezar a adentrarnos en el mundo de la Mecánica Cuántica, estudiaremos posiblemente el caso más sencillo existente. Éste es el estudio del movimiento de una partícula en reposo. Intuitivamente según la física clásica la partícula permanecerá en reposo en su posición, lógicamente. Estudiemos este movimiento desde el punto de vista de la Cuántica, donde posiblemente quedemos fascinados por su interpretación.

1.2. Simulación

Para empezar con la simulación entramos en el módulo *WavePacketDispersion*. Una vez dentro pulsamos el botón *Demo1*, automáticamente se iniciará el cálculo de una simulación con una configuración adecuada. Una vez finalizado el tiempo de carga, debemos ver una imagen como la mostrada en Fig. 1. Podemos observar en la gráfica central la evolución de nuestra partícula. Para controlar la simulación existen tres botones: *Go on*, *Go back*, *Pause* que evolucionan el sistema hacia adelante, atrás o lo pausan, respectivamente.

La figura coloreada de azul muestra la probabilidad de encontrar nuestra partícula. La figura coloreada de amarillo muestra la probabilidad de encontrar nuestra partícula con una cierta velocidad.

- **Te atreves?** (Nivel bajo): ¿Dónde es más probable que encontremos nuestra partícula al inicio del movimiento? Y al final? Lo mismo para la velocidad.
- **Te atreves?** (Nivel medio): A pesar de que nuestra probabilidad vaya cambiando con el tiempo, ¿dónde estará situada la media respecto la posición y velocidad de nuestra partícula?

Pista: Entrar en la sección *Mean Value X*.

Así podemos ver que a pesar de que tengamos toda una zona de probabilidad donde encontrar nuestra partícula, en media tenemos que estará en el centro. Justamente lo esperado por la física clásica, la partícula se queda en reposo en un punto determinado. En la sección *Mean Value X* podemos

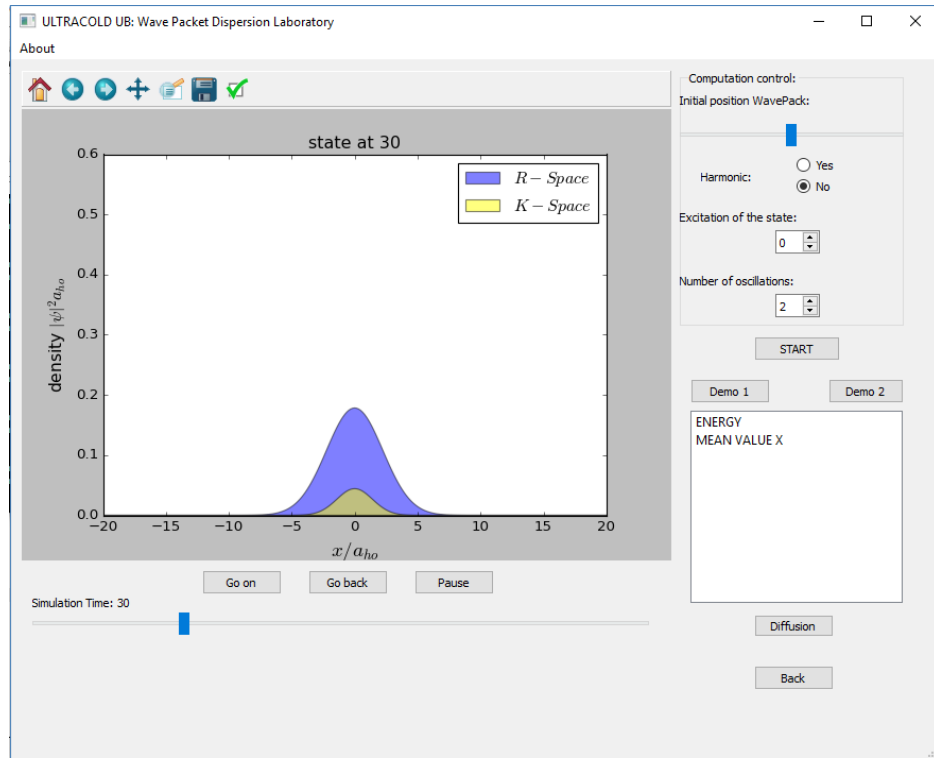


Figura 1: Ejemplo de la interfaz para el caso del movimiento libre

encontrar también la evolución de los valores de la desviación típica de estas distribuciones (anchura de ellas).

- **Te atreves?** (Nivel bajo): Cómo avanza la anchura de las dos distribuciones respecto el tiempo?

Ahora veremos una analogía con el movimiento visto anteriormente y la dispersión de la luz al travesar un medio transparente en el cual se refracta. Pulsamos el botón *Dispersion*.

Aquí podemos ver una simulación que ilustra el efecto de la dispersión de la luz. Incidimos luz blanca en un medio; como la luz blanca está compuesta por diferentes colores (frecuencias), cada componente de la luz obtendrá una velocidad diferente, esto producirá que la luz blanca se descomponga en

todos los colores.

Con esto hemos visto una clara analogía entre la dispersión de la luz y la dispersión de la probabilidad de encontrar una partícula libre. Esto es debido a que, como en la luz blanca, tenemos luz formada por diferentes frecuencias, en nuestra distribución pasa algo muy similar. Cada componente que forma nuestra distribución posee una velocidad diferente, esto hace que se disperse con el tiempo, al igual que la luz. Así vemos que al inicio tenemos un régimen, más o menos clásico, las probabilidades de encontrar la partícula en posición o velocidad 0 son realmente grandes, pero al avanzar en el tiempo estas probabilidades se dispersan y perdemos nuestro régimen clásico. A pesar de que pensemos que nuestra partícula está en reposo, podemos encontrarla en diferentes puntos de nuestro sistema, asombroso!

2. Movimiento oscilatorio armónico

2.1. Introducción

Uno de los movimientos más presentes a nivel físico, incluso en nuestra vida cotidiana, es el movimiento oscilatorio armónico. A nivel fundamental tenemos los muelles o péndulos. Qué pasará si analizamos este tipo de movimiento desde el punto de vista de la Mecánica Cuántica?

2.2. Simulación

Para empezar con la simulación pulsamos el botón *Demo2*. Una vez finalizado el periodo de cálculo veremos una ventana central muy similar a la del apartado *Movimientolibre*, donde la gráfica tiene el mismo significado.

- **Te atreves?** (Nivel bajo): Dado que estamos bajo un movimiento oscilatorio armónico. Sabrías decir donde estará centrada la distribución 'azul' cuando la 'amarilla' esté en un extremo? Y al revés?

Pista: recuerda de la sección anterior el significado de estas distribuciones.
- **Te atreves?** (Nivel medio): Ahora que has empezado a notar la presencia del movimiento oscilatorio armónico, vamos a dar un paso más. Entra en la sección *ENERGY* y observa el gráfico. Está en coherencia este gráfico con la observación que has hecho antes? Cuándo será máxima la velocidad y cuándo mínima?
- **Te atreves?** (Nivel alto): Ahora que finalmente estamos viendo un claro símil con el movimiento oscilatorio armónico entra en *MEANVALUEX*. Céntrate en las líneas: $R - Space < x >$ y $K - Space < k >$. Éstas representan el valor medio de la posición de nuestra partícula y el valor medio de su velocidad, respectivamente. Sabiendo esto, sabrías dar una forma funcional a estas dos variables?

Ahora finalmente iremos a observar una analogía clásica con nuestro problema. Como ya se ha comentado al principio uno de los movimientos con los que puede estar uno más familiarizado es el de un muelle, veámos la similitud entre éste y nuestra partícula. Entremos en el apartado *GuessFunction*. En él, tendremos la capacidad de simular un muelle.

- **Te atreves?** (Nivel bajo): Observa que tienes dos parámetros a introducir para empezar la simulación (A y w). Sabrías explicar el significado de ambos? Puedes ajustar finalmente los parámetros de tal forma de aproximar nuestro muelle al movimiento de nuestra partícula?

Felicidades! Acabas de comprobar que el movimiento oscilatorio armónico des del punto de la Mecánica Cuántica, es totalmente análogo al dado por la clásica. Sin embargo, recuerda que aquí estamos hablando de medias, por lo tanto, al hacer un experimento con una partícula podemos encontrarla en toda la zona sombreada de 'azul', al igual que con una velocidad en la zona 'amarilla'. Esto significa que a la hora de realizar un experimento con una partícula, posiblemente veamos que cuando la detectemos no está en un punto dado por la trayectoria del movimiento armónico, ahora bien, si repetimos el experimento una cantidad de veces muy elevada, en media, tendremos que nuestra partícula se sitúa en los puntos dados por el movimiento del oscilador armónico.

3. Solitones oscuros y condensados de Bose-Einstein

3.1. Introducción

Sigamos con la Mecánica Cuántica, pero ahora daremos un gran salto hacia delante. A diferencia de lo visto anteriormente donde estábamos estudiando el comportamiento de una única partícula, ahora nos centraremos en estudiar el comportamiento de una gran agrupación de partículas. Entramos en el mundo de los gases ultrafríos.

Imaginemos que tenemos un gas y lo enfriamos hasta tal punto de llegar al 0 absoluto (0 grados Kelvin). En estas condiciones nuestro gas empezará a presentar efectos cuánticos, entramos en un nuevo estado de la materia; más allá de los gases, líquidos y sólidos. Veamos este asombroso efecto.

Entramos en el módulo *DarkSolitonSimulation*. Nada más entrar podemos ver el gas del cuál estábamos hablando (parte blanca). Para que el gas no se escape lo hemos confinado (atrapado) con un potencial armónico, por eso adopta tal forma. En esta sección nos centraremos en los llamados 'dark solitons', los cuales los podemos entender como 'agujeros' en nuestro gas. Es decir, zonas donde la densidad del gas disminuye drásticamente.

3.2. Simulación

Para empezar pulsamos el botón *Demo1* y esperamos a que finalice el cálculo. En la ventana central podemos ver nuestro gas pero observamos como ahora se ha formado un dark soliton (agujero) en la parte derecha de éste. Si ahora pulsamos *GoOn* y así la simulación se pone en marcha, podemos ver como el agujero empieza a oscilar sobre un punto central. Sorprendente!

- **Te atreves?** (Nivel medio): Sabrías explicar el motivo por el cual el agujero empieza a oscilar?

Pista: recuerda las condiciones a las cuales está sometido el gas.

Lo que está pasando es ciertamente increíble. Nuestro agujero (ausencia de partículas en una zona), se está comportando como si fuera una partícula.

- **Te atreves?** (Nivel bajo): Si ahora entramos en la sección *DENSITYMAP* podemos ver como avanza nuestro 'dark soliton' con el tiempo. Te resulta familiar esta forma? Podrías compararla con alguno de los casos vistos anteriormente?

Finalmente volveremos a entablar una analogía con la física clásica y, volveremos a recurrir al movimiento del muelle. Para ello presionamos el botón *GuessFunction*.

- **Te atreves?** (Nivel bajo): Dados los parámetros A y w (sabrías explicar a que corresponden?) puedes ajustarlos de tal forma que nuestro muelle coincida con el movimiento de el 'dark soliton'?
- **Te atreves?** (Nivel muy alto): Una vez encontrados los parámetros adecuados para que coincidan los movimientos, si como dada sabemos que la frecuencia del movimiento armónico es equivalente a la unidad. Podrías explicar por qué el 'dark soliton' no sigue esta frecuencia?

Vamos a concluir con un repaso de lo que hemos visto, ya que han aparecido muchos conceptos. Tenemos un conjunto de partículas (gas), el cual se ha enfriado hasta el 0 absoluto. Una vez llegados a este punto, se ha atrapado el gas con un potencial armónico. Ahora que tenemos nuestro estado atrapado le hemos hecho un 'agujero' (dark soliton), el cual se ha empezado a mover como una partícula! Esto último es realmente asombroso.

También hace falta denotar un pequeño detalle que puede que se le haya escapado al usuario y es algo crucial en el comportamiento de los solitones; y es que, el solitón al empezar a moverse no cambia su forma (en nuestro caso anchura). Parémonos a pensar en este hecho un segundo. Imaginemos que tenemos un gas clásico y, a éste se le practica un agujero, inmediatamente el gas tenderá en la medida de lo posible a volver a llenar ese espacio vacío, totalmente al contrario de lo que pasa en nuestro ejemplo.

Con esto finaliza esta sección, pero no nos quedamos aquí. A continuación se presentará un ejemplo de hasta que punto estos 'agujeros' (dark soliton) se comportan como partículas, vamos a ver un caso extremo realmente fascinante, el llamado péndulo de Newton cuántico.

4. Péndulo de Newton Cuántico

4.1. Introducción

Como ya hemos comentado anteriormente, en esta sección continuaremos analizando los 'dark soliton' y veremos hasta donde puede llegar su descripción como partícula.

Antes de nada introduciremos lo que es un péndulo de Newton. Es un sistema formado por varios péndulos; donde unos se sitúan en el centro de tal forma que no oscilan y forman una cadena y, otros se desplazan de su posición de equilibrio (en la misma dirección que la cadena). Cuando llega el momento de impacto entre ellos (si tienen la misma masa todos) observamos que sale un número de péndulos, igual que los que han impactado, eyectado por el otro lado de impacto. Así sucesivamente se va repitiendo.

Vamos a recrear este mismo sistema con nuestros 'dark solitons'. Ponemos una serie de ellos en el centro de tal forma que estén estacionarios y, pongamos otros descentrados los cuáles se empezarán a mover hacia los otros estacionarios. Veamos que pasa!

4.2. Simulación

Seleccionamos el botón *Demo2* y esperamos a que finalice el cálculo. Puedes observar la simulación utilizando los tres botones ya mencionados anteriormente, pero es posible que cueste apreciar lo que está sucediendo. Si entramos en la sección *DENSITYMAP*, donde vemos la proyección de nuestro movimiento en el tiempo. Podemos empezar a observar algo curioso en el instante donde se encuentran los 'dark soliton'. Vayamos directamente a *GuessFunction* donde vamos a ver algo asombroso, la similitud con un péndulo de Newton.

- **Te atreves?** (Nivel bajo): Los parámetros a controlar ahora son diversos. M es el número de bolas que inicialmente oscilan; N es el número de bolas que inicialmente están parados y r es el radio de las bolas, los demás parámetros deberían estar claros. Podrías ajustar los parámetros de tal forma de hacer coincidir los dos movimientos (en este caso no será posible coincidir a la perfección los dos movimientos, simplemente intenta que sean los más iguales que puedas).

- **Te atreves?** (Nivel muy alto): Serías capaz de intuir como debe variar el parámetro r en función de lo lejos que se pongan los solitones que van a impactar con los estacionarios? Aumentará al alejarlos o disminuirá? Por qué?

Pista: Si has hecho el módulo de *BrightSolitons* recuerda el efecto túnel.

Estamos viendo algo increíble. Los 'dark solitons' se comportan hasta tal punto como partículas que obedecen en gran parte la misma dinámica que un péndulo de Newton, en cierta manera están chocando entre ellos, recordemos que habíamos entendido los 'dark soliton' como 'agujeros'.

Así para concluir, simplemente dar una reflexión. Tenemos un sistema formado por un conjunto de partículas en el 0 absoluto de temperatura, confinado por un potencial armónico y al cual se le ha practicado una serie de 'agujeros' (dark solitons). Un sistema realmente complejo el cual hemos llegado a concluir que tiene una clara analogía con el movimiento tan 'simple' como es el Péndulo de Newton. Realmente asombroso.