

El Experimento de Feynman

Juan María Fernández

Departamento de Física y Química, Instituto Jorge Manrique de Palencia,

jmfernandezprof@gmail.com

Resumen

Este documento tiene dos objetivos:

1. Describir el **Experimento de Feynman**, tal como él lo explicó a sus alumnos y como consta en el sitio web de Caltech (Instituto de Tecnología de California) en la referencia [1]. Este experimento contiene casi todo (Feynman decía «todo») el gran misterio de la **Mecánica Cuántica** y el extraño comportamiento de la materia y la luz en las escalas atómica y subatómica.
2. Presentar la **Guía del Usuario** del simulador EJS[9, 10] **El_ExperimentodeFeynman.jar**, que desarrolla todos los fenómenos de **dualidad onda-corpúsculo**, **interferencia** y **probabilidad**, que Feynman ilustró con su gedanken experiment, en una de las construcciones mentales más brillantes y celebradas de la Física Teórica del siglo XX.

Si Ud. encuentra en este documento errores de concepto, de lenguaje o del cualquier tipo, por favor, utilice el correo electrónico del autor y comuníquelos allí.

Créditos adicionales

El contenido de este documento ha sido revisado y debatido en un **Grupo de Trabajo sobre la Mecánica Cuántica**, realizado en el Departamento de Física y Química del Instituto Jorge Manrique de Palencia durante el curso académico 2019-2020, cuyos participantes fueron:

Juan María Fernández Martínez, autor, email: jmfernandezprof@gmail.com
Félix Mocha Garrofé
Guillermo Granja Barón
Miguel Adán Merino
Raúl Merino Benito

La versión del documento es **V1.0**, y se cede con la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International ([CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/))





Índice

I Comportamiento Cuántico: El Experimento de Feynman	3
1. Mecánica atómica	4
2. Un experimento con balas	5
3. Un experimento con ondas	7
4. Un experimento con electrones	9
5. La interferencia de las ondas electrónicas	10
6. Vigilando a los electrones	12
II Guía del Usuario del simulador El_ExperimentodeFeynman.jar	16
7. Descripción General	17
8. El Experimento con Balas	18
9. El Experimento con Agua	21
10.El Experimento con Electrones	24

Parte I

Comportamiento Cuántico: El Experimento de Feynman

La descripción que sigue es una traducción directa de lo que públicamente se ve en el sitio web de las **Feynman Lectures on Physics** <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/info/>. Este sitio web es por derecho propio uno de los lugares sobresalientes de la Web para cualquier persona interesada en la Ciencia con mayúsculas. La traducción, que se hace sin ningún ánimo de lucro, solamente pretende hacer llegar a personas interesadas, que no puedan leer el original en inglés, lo que Feynman explicó. ¡Y cómo lo explicó!

La traducción es no literal, y se han introducido puntos y a parte cuando las cláusulas lo permitían, para aligerar el aspecto macizo que tendrían las páginas de seguir la versión web, que aprovecha las generosas anchuras de los monitores actuales, cosa que no puede hacerse con el papel virtual de un documento pdf. Por otro lado es muy difícil traducir la viveza de la expresión oral de Feynman. Para disfrutarla hay que verle en alguno de los registros de él que hay en la Red.

§1 Mecánica atómica

«Mecánica Cuántica» es la descripción del comportamiento de la materia y la luz en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. En una muy pequeña escala las cosas se comportan de manera distinta a todo aquello de lo que ustedes¹ hayan tenido cualquier experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o bolas de billar, o pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan podido ver.

Newton pensaba que la luz está constituida por partículas, pero luego se descubrió que se comporta como una onda. Más tarde, no obstante (al principio del siglo XX), se encontró que la luz ciertamente se comporta a veces como una partícula. Históricamente, el electrón, por ejemplo, se pensaba que actuaría como una partícula, y entonces se descubrió que en muchos aspectos lo hace como una onda. En realidad se comporta como ninguna. Ahora nos hemos rendido. Decimos «es como ninguna otra cosa».

Pero hay un golpe de suerte, sin embargo-los electrones se comportan justamente igual que la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones y demás) es el mismo para todos ellos, todos son «**onda-partículas**» o como quieran ustedes llamarles. De modo que cuanto aprendamos de los electrones (que usaremos para nuestros ejemplos) también se aplica a todas las «**partículas**», incluyendo a los fotones de luz.

La acumulación gradual de información sobre el comportamiento atómico y a pequeña escala durante el primer cuarto del siglo XX, que dio ciertas indicaciones acerca de como se comportan los objetos pequeños, produjo una confusión creciente que finalmente se resolvió en 1926 y 1927 por Schrödinger, Heisenberg y Born. Ellos obtuvieron finalmente una descripción consistente del comportamiento de la materia a pequeña escala. Abordaremos los principales aspectos de esa descripción en este capítulo.

Debido a que el comportamiento atómico es tan diferente de la experiencia ordinaria, es muy difícil acostumbrarse a él, y a todo el mundo le parece peculiar y misterioso-tanto a los novicios como a los físicos experimentados. Incluso los expertos no lo comprenden en la manera que querrían, y es perfectamente razonable que ocurra así, porque toda la experiencia humana directa y toda la intuición humana se aplican a objetos grandes. Sabemos cómo se comportan los objetos grandes, pero a pequeña escala los objetos no actúan así. De modo que tenemos que aprender acerca de ello en una manera abstracta o imaginativa y no por conexión con nuestra experiencia directa.

En este capítulo vamos a abordar inmediatamente los elementos básicos de ese misterioso comportamiento en su más extraña forma. Elegimos examinar un fenómeno que es imposible, *absolutamente* imposible de explicar de ninguna manera clásica, y que está en el núcleo de la Mecánica Cuántica. En realidad contiene el *único* misterio². No podemos disipar el misterio «explicando» como funciona. Justamente vamos a decirles a ustedes cómo funciona. Al decirles a ustedes cómo funciona les habremos informado sobre las peculiaridades básicas de toda la Mecánica Cuántica.

¹Feynman hablaba para un auditorio de estudiantes de tercer año. Las Feynman Lectures son una transcripción de las grabaciones que se hicieron en sus clases.

²Años más tarde Feynman incluyó en el «misterio» el **entrelazamiento cuántico**, que tampoco se puede explicar de una manera clásica.

§2 Un experimento con balas

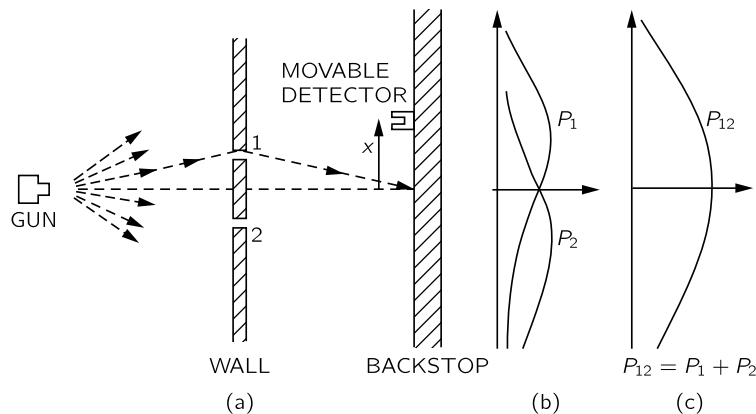


Figura 1: Experimento de Interferencia con balas.

Para intentar comprender el comportamiento cuántico de los electrones, vamos a comparar y contrastar su actuación, en un determinado dispositivo experimental, con el más familiar de partículas como las balas, y con el comportamiento de ondas como las del agua. Primero consideremos el comportamiento de las balas en el dispositivo experimental de la Figura 1. Tenemos una ametralladora que dispara un haz de balas. No es una ametralladora muy buena, de modo que dispersa las balas (al azar) en un abanico angular bastante grande, como se ve en la Figura. Frente a la ametralladora hay una pared, hecha con acero de blindaje, que tiene dos agujeros justamente tan grandes como para dejar pasar una bala cada vez. Más allá de la pantalla hay una barrera (podemos pensar en una gruesa plancha de madera) que «absorbe» las balas según van llegando a ella. Frente a la barrera hay un objeto que vamos a llamar «detector de balas». Puede ser una caja llena de arena. Cualquier bala que entre en el detector es detenida y almacenada. Cuando queramos, podemos vaciar la caja y contar el número de balas que ha capturado. El detector puede moverse arriba y abajo (en lo que llamaremos dirección x).

Con este aparato, podemos encontrar experimentalmente la respuesta a la pregunta: «¿Cuál es la probabilidad de que una bala que pase a través de los agujeros de la pared llegue a la barrera a distancia x del centro?». Primero, ustedes deben notar que debemos hablar de probabilidad, porque no podemos decir de manera concreta dónde irá una bala determinada. Una bala que llega a los agujeros, rebotará en los bordes del agujero, y puede acabar en cualquier parte. Por «probabilidad» entendemos la de que la bala llegue al detector, que podemos medir contando el número de las que llegan en un cierto tiempo y tomando el cociente de este número respecto al número *total* de las que llegan a la barrera durante ese tiempo. O, si suponemos que la ametralladora siempre dispara a la misma velocidad durante las medidas, la probabilidad que buscamos es precisamente proporcional a las que alcanzan el detector en un cierto intervalo estándar de tiempo.

Para nuestros propósitos aquí, nos gustaría imaginar un experimento algo idealizado, en el que las balas no son de verdad, sino que son balas *indestructibles*-que no pueden romperse por la mitad. En nuestro experimento encontramos que las balas siempre llegan en bultos, y cuando encontramos algo en el detector, siempre es una bala completa. Si velocidad a la que dispara la ametralladora es muy baja, encontramos que en un momento dado o bien no llega nada, o bien una-exactamente

una-bala llega a la barrera. Además, con toda certeza, el tamaño del bulto no depende de la velocidad de disparo de la ametralladora. Debemos decir: **«Las balas llegan *siempre* en bultos idénticos»**.

Lo que medimos con nuestro detector es la probabilidad de llegada de un bulto. Y medimos la probabilidad en función de x . El resultado de tales medidas con ese aparato (no hemos hecho aún el experimento, de modo que estamos imaginando el resultado) está trazado en el gráfico de la parte (c) de la Figura 1.

En el gráfico representamos la probabilidad a la derecha y x verticalmente, de modo que la escala de x se ajusta al diagrama del aparato. Llamamos a esta probabilidad P_{12} debido a que las balas pueden venir por el agujero 1 o por el 2. Ustedes no se extrañarán de que P_{12} sea mayor cerca del centro del gráfico y se haga menor si x es muy grande. Sin embargo ustedes pueden sorprenderse de que P_{12} tenga un valor máximo³ en $x = 0$. Podemos entender este hecho si hacemos el experimento otra vez, tapando el agujero 2, y luego tapando el agujero 1. Cuando se tapa el agujero 2, las balas solamente pueden pasar por el agujero 1, y tenemos la curva marcada como P_1 en la parte (b) de la Figura 1. Como era de esperar, el máximo de P_1 ocurre en el valor de x que está en línea con la ametralladora y el agujero 1. Cuando el agujero 1 está tapado, tenemos la curva simétrica P_2 trazada en la Figura. P_2 es la distribución de probabilidad para las balas que pasan por el agujero 2.

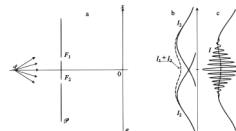
Comparando las partes (b) y (c) de la Figura 1, se encuentra el importante resultado de que

$$P_{12} = P_1 + P_2 \quad (1)$$

Las probabilidades se suman. El efecto de los dos agujeros abiertos es la suma de los efectos de cada agujero abierto en solitario. Debemos denominar esto una observación de **«no interferencia»**, por motivos que se verán luego.

Suficiente sobre las balas. **Llegan en bultos, y su probabilidad de llegada no muestra interferencia.**

3



En el original dice «máximo». Pero el valor no es necesariamente un máximo, como puede verse, entre otros, en la referencia [5](vea la figura en esta nota). En el simulador **El_ExperimentodeFeynman.jar** se adopta la configuración sin máximo central

§3 Un experimento con ondas

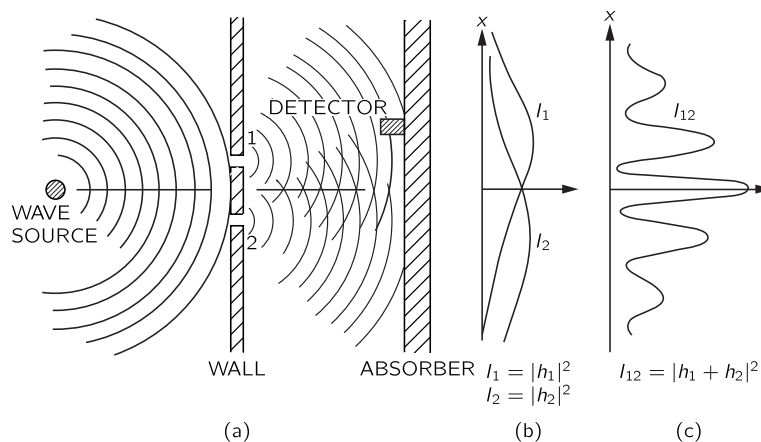


Figura 2: Experimento de Interferencia con Ondas de Agua

Ahora queremos considerar un experimento con ondas de agua. El aparato está representado esquemáticamente en la Figura 2. Tenemos un contenedor de agua poco profundo. Un pequeño objeto etiquetado como «fuente de ondas» oscila arriba y abajo mediante un motor, y provoca ondas circulares. A la derecha de la fuente tenemos otra vez una pared con dos agujeros, y más allá una segunda pared, que, por mantener las cosas simples, es un «**absorbente**», de modo que no hay reflexiones cuando las ondas llegan allí. Esto puede hacerse contruyendo una «playa» gradual de arena. Frente a la playa situamos un detector que puede moverse arriba y abajo en la dirección x como antes.

El detector mide la «**intensidad**» del movimiento ondulatorio. Pueden ustedes imaginar un cacharro que mide la altura del movimiento de la ola, pero cuya escala está calibrada en proporción al *cuadrado* de esa altura. Nuestro detector lee, pues, en proporción a la energía transportada por la onda-o mejor aún, la velocidad a la que la energía es transportada hasta el detector.

Con nuestro aparato de ondas, la primera cosa que notamos es que la intensidad de la onda puede tener *cualquier* tamaño. Si la fuente se mueve muy poco, entonces hay justo un poco de movimiento ondulatorio en el detector. Cuando hay más movimiento en la fuente, hay más intensidad en el detector. La intensidad de la onda puede tener cualquier valor. No podemos decir que haya **bultos** en la intensidad de la onda.

Ahora midamos la intensidad de la onda para varios valores de x (manteniendo la fuente de ondas operando siempre de la misma manera). Obtenemos la interesante curva marcada como I_{12} en la parte (c) de la Figura 2.

Ya hemos estudiado como se pueden producir tales patrones cuando estudiamos las interferencias en el Volumen I. Este caso podemos observar que la onda original es difractada por los agujeros, y una nueva onda circular se emite desde cada uno de ellos. Si cubrimos un agujero cada vez y medimos la intensidad en el absorbente, encontramos las más bien simples curvas de intensidad mostradas en la parte (b) de la Figura 2. I_1 es la intensidad de la onda procedente del agujero 1 (que medimos bloqueando el agujero 2) e I_2 es la intensidad de la onda procedente del agujero 2 (medida cuando el agujero 1 está bloqueado).

La intensidad I_{12} observada cuando ambos agujeros están abiertos, *ciertamente no es la suma de* I_1 e I_2 . Decimos que hay «**interferencia**» entre las dos ondas. En ciertos lugares (donde la curva I_{12} tiene sus máximos) las ondas están «**en fase**» y los picos de las ondas se suman para dar una amplitud mayor, y, por tanto, una mayor intensidad. Decimos entonces que las ondas «**interfieren constructivamente**». Habrá tal interferencia constructiva siempre que la distancia de un agujero al detector sea un número entero de longitudes de onda mayor (o menor) que la distancia del detector al otro agujero.

En los lugares en los que las dos ondas lleguen con una diferencia de fases de π (donde están «**fuera de fase**»), el movimiento ondulatorio resultante será la diferencia de las dos amplitudes. Las ondas «**interfieren destructivamente**» y obtenemos un valor bajo para la intensidad de la onda. Esperamos esos bajos valores siempre que la distancia del agujero 1 al detector difiera de la distancia del agujero 2 al detector en un número impar de semi-longitudes de onda. Los bajos valores de I_{12} de la Figura 2 corresponden a los lugares donde las ondas interfieren destructivamente.

Ustedes recordarán que la relación cuantitativa entre I_1 , I_2 e I_{12} puede expresarse de la manera siguiente:

- La altura instantánea de la onda en el detector, procedente del agujero 1, puede escribirse como (la parte real de) $h_1 e^{i\omega t}$, donde la «**amplitud**» h_1 en general es un número complejo. La intensidad es proporcional a la altura al cuadrado en promedio, o, cuando utilizamos números complejos, al valor absoluto al cuadrado $|h_1|^2$.
- Similarmente, para el agujero 2, la altura es $h_2 e^{i\omega t}$, y la intensidad es proporcional a $|h_2|^2$
- Cuando ambos agujeros están abiertos, la alturas de las ondas se suman, para dar la altura $(h_1 + h_2) e^{i\omega t}$
- y la intensidad es $I_{12} = |h_1 + h_2|^2$

Omitiendo las constantes de proporcionalidad para nuestro propósito actual, las relaciones correctas entre las *ondas que interfieren*, son:

$$I_1 = |h_1|^2, \quad I_2 = |h_2|^2, \quad I_{12} = |h_1 + h_2|^2 \quad (2)$$

Ustedes notarán que este resultado es profundamente distinto al obtenido con las balas en la ec.(1). Si desarrollamos $|h_1 + h_2|^2$ se ve que

$$|h_1 + h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2|\cos\delta \quad (3)$$

donde δ es la diferencia de fase entre h_1 y h_2 . En términos de las intensidades, podemos escribir

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta \quad (4)$$

El último término de (4) es el «**término de interferencia**» . Suficiente sobre las ondas de agua. **La intensidad puede tener cualquier valor, y muestra interferencias.**

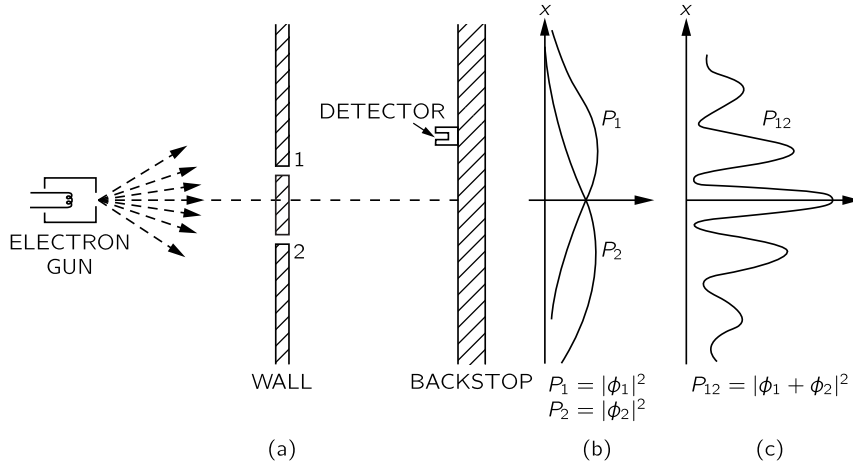


Figura 3: Experimento de Interferencia con electrones

§4 Un experimento con electrones

Ahora imaginamos un experimento similar con electrones. Se muestra esquemáticamente en la Figura (3). Hacemos un cañón de electrones que consiste en un hilo de tungsteno calentado por una corriente eléctrica y rodeado por una caja de metal con una rendija. Si el hilo está a potencial negativo respecto de la caja, los electrones emitidos por el hilo se aceleran hacia la caja y algunos traspasan la rendija. Todos los electrones que sale del cañón tienen (casi) la misma energía. Frente al cañón está otra vez una pared (justo una delgada placa metálica) con dos agujeros en ella. Más allá de la pared hay otra placa que sirve como «barrera». Frente a la barrera colocamos un detector móvil. El detector puede ser un contador geiger o, quizás mejor, un multiplicador de electrones, que está conectado a un altavoz.

Debemos decir ahora que ustedes no deben intentar construir este experimento (como podrían hacer con los que ya hemos descrito). Este experimento nunca ha sido hecho justamente así⁴. El problema es que el aparato deber hacerse en una escala imposible para mostrar los efectos en los que estamos interesados. Estamos haciendo un «experimento mental», que hemos elegido porque es fácil pensar sobre él. Sabemos que resultados se obtendrían porque hay muchos otros experimentos que se han hecho, en los que la escala y los proporciones se han elegido para mostrar los efectos que vamos a describir.

La primera cosa que notamos en nuestro experimento con electrones es que oímos unos «**clicks**» muy nítidos procedentes del detector (esto es, del altavoz). Y todos los «**clicks**» son idénticos. No hay «**medios clicks**».

También notamos que los «**clicks**» llegan muy erráticamente. Algo como: «**click**».....«**click**»-«**click**»..«**click**».....«**click**» «**click**».....«**click**», etc., precisamente en la forma que ustedes habrán oído, sin duda, en un detector geiger operando. Si contamos los cliks que llegan en un tiempo suficientemente largo-digamos de minutos-y luego contamos otra vez por igual período, encontramos que los números son casi el mismo. Por tanto podemos hablar de la velocidad promedio a la que se oyen los clicks (tales-y-cuales clicks por minuto en promedio).

⁴Esto era cierto en 1965. Ahora (2019) resulta que sí se ha hecho así. Vea [2, 3, 4]

Según movemos el detector, la velocidad a la que suenan los clicks es mayor o menor, pero el tamaño (el volumen) de cada click es siempre el mismo. Si bajamos la temperatura del hilo de cañón, la velocidad de los clicks disminuye, pero cada click sigue sonando lo mismo. También podemos notar que si colocamos dos detectores separados en la barrera, suena uno u otro, pero nunca suenan los dos a la vez. (Excepto por que de vez en cuando si hubiera dos clicks muy próximos muy próximos en el tiempo, nuestro oído puede no percibir la separación). Concluimos, por tanto, que sea lo que sea que llega a la barrera, llega en «bultos». Todos los «bultos» son del mismo tamaño: solamente llegan «bultos» enteros, y llega uno cada vez a la barrera. Decimos: «los electrones llegan en bultos idénticos».

Igual que en nuestro experimento con balas, podemos ahora proceder a encontrar experimentalmente la respuesta a la cuestión: «¿Cuál es la probabilidad relativa de que el bulto de un electrón llegue a la barrera a varias distancias de centro?». Como antes, obtenemos la probabilidad relativa observando la velocidad de los clicks, manteniendo el operativo del cañón constante. La probabilidad de que los bultos lleguen a un x determinado es proporcional a la velocidad promedio de los clicks en ese x .

El resultado de nuestro experimento es la interesante curva denominada P_{12} en la parte (c) de la Figura (3). ¡Sí! Esa es la manera de ir los electrones.

§5 La interferencia de las ondas electrónicas

Ahora vamos a analizar la curva de la Figura 3 para ver si podemos comprender el comportamiento de los electrones. La primera cosa que podemos decir es que como llegan en bultos, cada bulto, que también podemos llamar un electrón, tiene que haber venido bien por el agujero 1, bien por el agujero 2. Escribamos esto en la forma de una «Proposición»:

Proposición A: Cada electrón *bien* pasa por el agujero 1 o *bien* pasa por el agujero 2.

Suponiendo cierta la Proposición A, todos los electrones que lleguen a la barrera pueden dividirse en dos clases:

- a) Los que llegan a través del agujero 1, y
- b) Los que llegan a través del agujero 2.

Por tanto la curva observada debería ser la suma de los efectos de los electrones que llegan a través del agujero 1 y de los electrones que llegan a través del agujero 2. Comprobemos esta idea mediante el experimento. Primero hacemos una medida para los electrones que llegan a través del agujero 1. Para ello bloqueamos el agujero 2 y contamos los clicks del detector. A partir de la velocidad de los clicks⁵, obtenemos P_1 . El resultado de la medida se muestra en la curva etiquetada como P_1 en la parte (b) de la Figura 3. El resultado parece completamente razonable. De manera similar, medimos P_2 . El resultado de esta medida también aparece en la Figura.

⁵La cantidad de ellos que suenan por minuto en una ubicación del detector.

El resultado P_{12} obtenido con ambos agujeros abiertos claramente no es la suma de P_1 y P_2 , las probabilidades para cada agujero en solitario. En analogía con nuestro experimento de ondas de agua, decimos: «**Hay interferencia**».

$$\text{Para electrones : } P_{12} \neq P_1 + P_2 \quad (5)$$

¿De dónde puede proceder tal interferencia? Quizá debieramos decir: «Bien, eso significa, presumiblemente, que *no es cierto* que los bultos lleguen bien a través del agujero 1 o del agujero 2, porque si lo hicieran, la probabilidades deberían sumarse. Quizá van de una manera más complicada. Se dividen por la mitad y....» ¡Pero no! No pueden, siempre llegan como un bulto.... «Bien, quizá algunos van a través del agujero 1, y luego vuelven por el 2, y luego así unas cuantas veces, o por cierto otro complicado camino...entonces cerrando el agujero 2, hemos cambiado las posibilidades de que un electrón que *empezó* por el agujero 1 acabara finalmente en la barrera...» ¡Pero note esto! Hay ciertos puntos a los que llegan muy pocos electrones⁶ cuando *ambos* agujeros están abiertos, pero que reciben muchos más electrones si cerramos un agujero. Por tanto, *cerrar* un agujero *aumentó* el número de los que fueron por el otro. Noten, no obstante, que el centro del patrón P_{12} es más de dos veces mayor que $P_1 + P_2$. Esto es como si cerrar un agujero *disminuyera* el número de electrones que van por el otro. Parece difícil explicar *ambos* efectos proponiendo que los electrones viajen por trayectorias complicadas.

Todo es muy misterioso. Y cuanto más se mira, más misterioso parece. Se han urdido muchas ideas para intentar explicar la curva P_{12} en terminos de electrones individuales yendo y viniendo de maneras complicadas por los agujeros. Ninguna de ellas ha tenido éxito. Ninguna de ellas puede obtener la curva P_{12} a partir de P_1 y P_2 .

Pero, sorprendentemente, las matemáticas para relacionar P_1 y P_2 con P_{12} es extremadamente simple. Porque P_{12} es como la curva I_{12} de la Figura 2, y eso fue simple. Lo que sucede en la barrera puede describirse mediante dos números complejos que podemos denominar ϕ_1 y ϕ_2 (que son funciones de x , por supuesto):

- El valor absoluto del cuadrado de ϕ_1 da el efecto con solamente el agujero 1 abierto. Esto es, $P_1 = |\phi_1|^2$
- El efecto con solamente el agujero 2 abierto está dado por ϕ_2 de la misma forma. Es decir, $P_2 = |\phi_2|^2$
- Y el efecto combinado de los dos agujeros es justamente $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$

¡Las matemáticas son las mismas que teníamos para las ondas de agua! (Es difícil ver cómo puede obtenerse un resultado tan simple a partir de un juego complicado de electrones que van y vienen atravesando la pared en cierta extraña trayectoria).

Concluimos lo siguiente: **Los electrones llegan en bultos, como las partículas, y la probabilidad de llegada de esos bultos está distribuida como la intensidad de una onda.** Es en este sentido en que el electrón se comporta «a veces como una onda y a veces como una partícula».

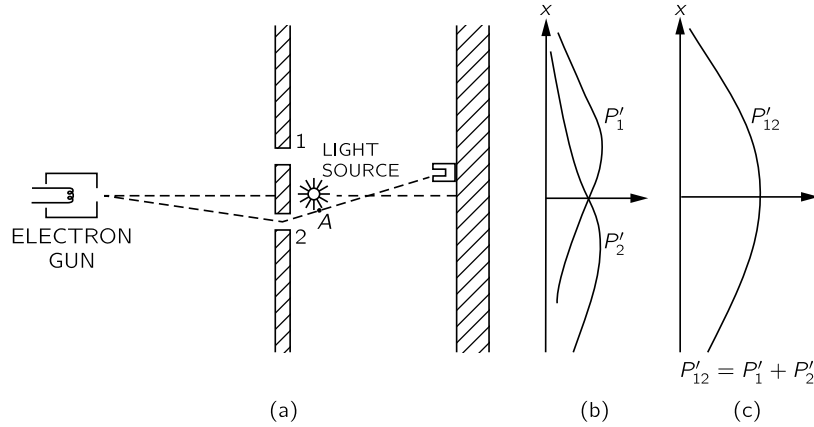


Figura 4: Un experimento diferente con electrones

§6 Vigilando a los electrones

Vamos a intentar ahora un experimento diferente. A nuestro aparato de electrones añadimos una fuente de luz muy intensa, situada tras la pared y entre los dos agujeros, como se muestra en la Figura 4. Sabemos que las cargas eléctricas dispersan la luz. De modo que cuando un electrón pase, por dondequiera que pase, en su camino al detector, dispersará alguna luz hasta nuestro ojo y podremos ver hacia dónde va el electrón. Por ejemplo, si el electrón fuese a tomar su camino vía el agujero 2, como se muestra en la Figura, veríamos un relámpago de luz procedente de las proximidades del lugar marcado como A en la Figura. Si un electrón pasara por el agujero 1, esperamos ver el relámpago desde las cercanías del agujero de arriba. Si sucede que obtenemos luz de ambos lugares al mismo tiempo, porque los electrones se dividen en mitades... ¡Hagamos el experimento!

He aquí lo que se observa:

- Cada vez que se oye un click del detector de electrones, en la barrera, también vemos un relámpago o bien cerca del agujero 1, o bien cerca del agujero 2, ¡pero nunca de los dos a la vez!
- Y observamos lo anterior sin importar dónde coloquemos el detectores

De las anteriores observaciones concluimos que cuando miramos a los electrones, encontramos que los electrones van o por un agujero, o por el otro. Experimentalmente la Proposición A de §5 es necesariamente cierta.

Entonces, ¿qué es erróneo en nuestro argumento *contra* la Proposición A? ¿Por que *no ocurre* que P_{12} sea $P_1 + P_2$? ¡Vuelta al experimento! Vamos a contabilizar los electrones y ver qué están haciendo. Para cada ubicación (la posición x) del detector vamos a contar los electrones que llegan, y al mismo tiempo vamos determinar a través de qué agujero pasan, observando los relámpagos. Podemos hacer el registro de esta forma: cada vez que oigamos un click, ponemos una marca en la

⁶Los mínimos de P_{12} .

Columna 1⁷ si vemos el relámpago cerca del agujero 1, y si lo vemos cerca del agujero 2, ponemos la marca en la Columna 2.

Cada electrón que llega es registrado en una de las dos clases:

- la de los que llegan por el agujero 1.
- y la de los que llegan por el agujero 2.

Del número registrado en la Columna 1 obtenemos la probabilidad P'_1 de que un electrón llegue al detector vía el agujero 1. Del número registrado en la Columna 2 obtenemos la probabilidad P'_2 de que un electrón llegue al detector vía el agujero 2. Si luego repetimos dichas medidas para muchos valores de x , obtenemos las curvas P'_1 y P'_2 mostradas en la parte (b) de la Figura 4.

Bien, ¿esto no es demasiado sorprendente! Obtenemos para P'_1 algo completamente similar a lo que obtuvimos para P_1 bloqueando el agujero 2; y P'_2 es similar a lo que obtuvimos para P_2 bloqueando el agujero 1. De modo que no es nada complicado como ir a través de los agujeros. Cuando los vigilamos, los electrones van por un agujero u otro tal como esperábamos que hicieran. Tanto si los agujeros están cerrados o abiertos, los electrones de los que detectamos que vienen por el agujero 1 se distribuyen de la misma forma, esté cerrado o no el agujero 2.

¡Pero alto! ¿Qué tenemos *ahora* para la probabilidad *total*, la probabilidad de que un electrón llegue al detector por cualquier ruta? Ya tenemos esa información. Vamos a hacer como si no hubiéramos mirado nunca a los relámpagos de luz, y ahora acumulamos los clicks del detector, que tenemos separados en dos columnas⁸. *Tenemos que sumar* los números⁹. Para la probabilidad de que un electrón llegue a la barrera a una cierta altura x , encontramos que $P'_{12} = P'_1 + P'_2$. Es decir, aunque hemos tenido éxito al observar de qué agujero vienen los electrones, ya no tenemos la vieja curva de interferencia P_{12} , sino una nueva P'_{12} que no muestra interferencia. Si apagamos la luz, vuelve P_{12} .

Debemos concluir que, cuando observamos los electrones, la distribución de ellos en la pantalla es diferente que cuando no miramos. ¿Quizá sea que encender la luz perturba las cosas? Puede que los electrones sean muy delicados, y que la luz cuando se dispersa con los electrones, cause sobre ellos un empujón que cambia su movimiento (el de los electrones). Sabemos que el campo eléctrico de la luz actuando sobre una carga ejercerá una fuerza sobre ella. Tal vez debieramos esperar que el movimiento cambiara. De cualquier manera, la luz ejerce una gran influencia sobre los electrones. Intentando «**vigilar**» a los electrones hemos cambiado su movimiento. Esto es, el empujón dado al electrón, cuando el fotón es dispersado por él, es tal que cambia el movimiento del electrón lo suficiente como para que si hubiera podido ir a donde P_{12} era máxima, acabe aterrizando donde P_{12} era mínima. Por eso ya no vemos las interferencias ondulatorias.

Pueden pensar ustedes: «**¡No use una luz tan brillante! ¡Baje el brillo! Las ondas de luz serán más débiles y no perturbarán tanto a los electrones. Seguramente haciendo la luz más y más débil, eventualmente será lo suficientemente débil como para tener un efecto despreciable**». OK, vamos a intentarlo. La primera cosa que observamos es que los relámpagos de la luz dispersada por los electrones cuando pasan no se hace más débil. *Siempre es el mismo relámpago*. Lo único que sucede es que alguna vez oímos un «**click**» pero no vemos un

⁷En un cuaderno cuadriculado, por ejemplo.

⁸Y en los que cada fila corresponderá a una posición x .

⁹De cada fila.

relámpago. El electrón ha pasado sin ser **«visto»**. Lo que estamos observando es que *la luz también actúa como los electrones*, sabemos que es **«ondulatoria»**, pero ahora vemos que también tiene **«bultos»**. Siempre llega-o se dispersa-en bultos que denominamos **«fotones»**. Al disminuir la intensidad de la luz no cambiamos el tamaño de los fotones, solamente la velocidad a la que se emiten. *Eso explica* por qué, cuando la fuente es débil, algunos electrones pasen sin ser vistos. Porque ocurre que no hay un fotón cerca cuando pasa el electrón.

Esto es un poco descorazonador. Si es cierto que cada vez que «vemos» el electrón vemos un relámpago del mismo tamaño, entonces ocurre que los electrones que detectamos son siempre los perturbados. A pesar de todo, intentemos el experimento con una luz más débil. Ahora cada vez que oigamos un click en el detector vamos llevar la contabilidad en tres columnas:

- en la Columna 1, como antes, los electrones a los que se ve pasar por el agujero 1.
- en la Columna 2, también, los electrones a los que se ve pasar por el agujero 2.
- en la Columna 3 aquellos electrones que no veamos.

Cuando se trabajan esos datos (calculando las probabilidades) encontramos los siguientes resultados para los electrones:

- Los «detectados que pasan por el agujero 1» tienen una distribución como P'_1 .
- Los «detectados que pasan por el agujero 2» tienen una distribución como P'_2 .
 - De esa manera «los detectados que pasan por algún agujero» tienen una distribución como P'_{12} .
- Los «no detectados» tienen una distribución como P_{12} en la Figura 3.

¡Si los electrones no son vistos, hay interferencia!

Esto es comprensible. Si no vemos al electrón, ningún fotón lo perturba, y cuando lo vemos, es porque un fotón lo ha perturbado. Siempre hay la misma cantidad de perturbación porque los fotones de luz producen todos los mismo efectos colaterales y el efecto de los fotones al ser dispersados es suficiente para eliminar cualquier interferencia.

¿No habrá alguna forma de que podamos ver los electrones sin perturbarlos? Hemos aprendido en un capítulo anterior que el momento lineal que porta un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda ($p = \hbar/\lambda$). Ciertamente el empujón dado al electrón cuando el fotón es dispersado hacia nuestro ojo depende del momento lineal que porta el fotón. ¡Ajá! Si pretendemos perturbar muy poco, *no solo hay que disminuir la intensidad de la luz*, también la frecuencia (que es lo mismo que aumentar su longitud de onda). Utilicemos luz de un color más rojizo. Podemos incluso utilizar luz infrarroja, o radio-ondas (como el radar), y «ver» los electrones con equipo que permita detectar la luz de esas longitudes de onda mayores. Si utilizamos una luz más «suave» quizá podamos evitar perturbar tanto a los electrones.

Intentemos el experimento con longitudes de onda mayores. Repetiremos el experimento cada vez con luz de longitudes de onda crecientes. Al principio nada parece cambiar. Los resultados son los mismos. Entonces ocurre una cosa terrible. Ustedes recuerdan que cuando estudiamos el microscopio puntualizamos que, debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, hay una limitación

sobre cuán cerca pueden estar cerca dos puntos y verse como dos puntos diferentes¹⁰. Esta distancia es del orden de magnitud de la longitud de onda de la luz. Así, cuando hacemos la longitud de onda de la luz mayor que la distancia entre los dos agujeros, vemos un gran relámpago borroso cuando la luz es dispersada por los electrones. ¡Ya no podemos decir por qué agujero pasó el electrón! Solamente sabemos que vino de algún sitio. Y es justo con luz de este color¹¹ con la que P'_{12} comienza a parecerse a P_{12} -cuando comienza a haber cierto efecto de interferencia. Y solamente con longitudes de onda mucho mayores que la separación de los huecos (cuando no tenemos posibilidad de decir de dónde vino el electrón) la perturbación de la luz es lo suficientemente pequeña para obtener la curva P_{12} de la Figura 3.

En nuestro experimento encontramos que es imposible disponer la luz de manera que se pueda decir por qué agujero pasó el electrón, y al mismo tiempo no perturbar el patrón de interferencias. Heisenberg sugirió que las entonces nuevas leyes¹² de la naturaleza solamente podrían ser consistentes si hubiera cierta básica limitación en nuestra capacidad de hacer experimentos que antes no se había reconocido. Propuso, como una regla general, su **Principio de Incertidumbre**, que, en términos de nuestro experimento, puede formularse así: «**Es imposible diseñar un aparato para determinar por qué agujero pasa el electrón, y que al mismo tiempo no perturbe a los electrones lo suficiente como para destruir el patrón de interferencias**». Si un aparato es capaz de determinar el agujero por el que pasó el electrón, *no puede ser tan delicado* que no perturbe drásticamente al patrón de interferencias. Nunca nadie ha encontrado (ni pensado) una manera de circunnavegar el Principio de Incertidumbre¹³. Por tanto debemos suponer que se trata de una característica básica de la naturaleza.

La completa Teoría de la Mecánica Cuántica que vamos a utilizar para describir los átomos y, de hecho, toda la materia, depende de la corrección del **Principio de Incertidumbre**. Ya que la Mecánica Cuántica es una teoría exitosa, nuestra creencia en el **Principio de Incertidumbre** está reforzada. Pero si alguna vez se descubre una manera de batir al **Principio de Incertidumbre**, la Mecánica Cuántica proporcionaría resultados inconsistentes y habría que descartarla como una teoría válida para describir la naturaleza.

«Bien», dirán ustedes, «¿qué pasa con la Proposición A? ¿Es cierto o no es cierto que el electrón o bien va por el agujero 1 o bien va por el agujero 2?» La única respuesta que se puede dar es que hemos encontrado experimentalmente que hay una cierta nueva manera especial en la que tenemos que pensar para no caer en inconsistencias. Lo que debemos decir (para evitar hacer predicciones falsas) es lo siguiente:

- Si se atiende a los agujeros, o más precisamente, si se dispone de un aparato que es capaz de determinar si los electrones van por el agujero 1 ó por el agujero 2, entonces uno **SÍ PUEDE** decir que va por el agujero 1 ó por el 2.
- Pero cuando no se intenta determinar¹⁴ por qué agujero ha ido el electrón, cuando no hay nada que perturbe a los electrones, entonces **NO PUEDE** decir que el electrón pasa por uno u otro de los agujeros. Si se dice tal cosa, y comienzan a hacerse deducciones a partir de ello, se cometen errores en el análisis.

Esta es la cuerda floja lógica sobre la que debemos caminar si pretendemos describir la naturaleza con éxito.

¹⁰El llamado «poder de resolución».

¹¹De esta λ .

¹²Las de la Mecánica Cuántica de 1926 y 1927.

¹³Y algunos, como Einstein en la Conferencia Solvay de 1927, lo intentaron con ahínco.

¹⁴Con un aparato como el indicado antes.

Parte II

Guía del Usuario del simulador El_ExperimentodeFeynman.jar

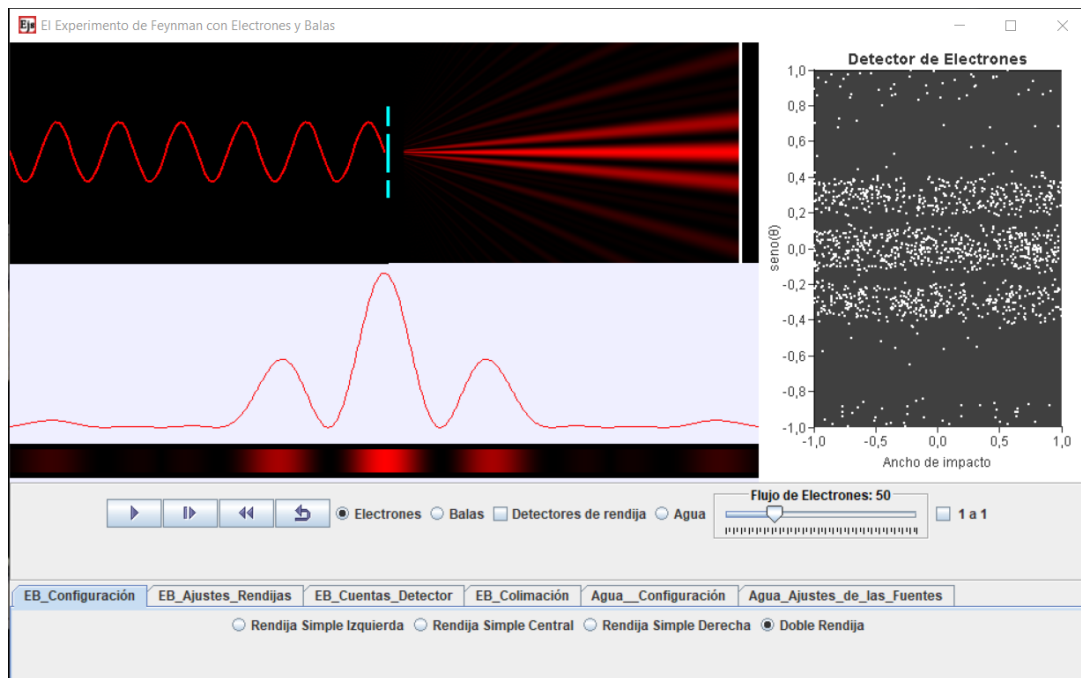


Figura 5: Ventana principal del simulador

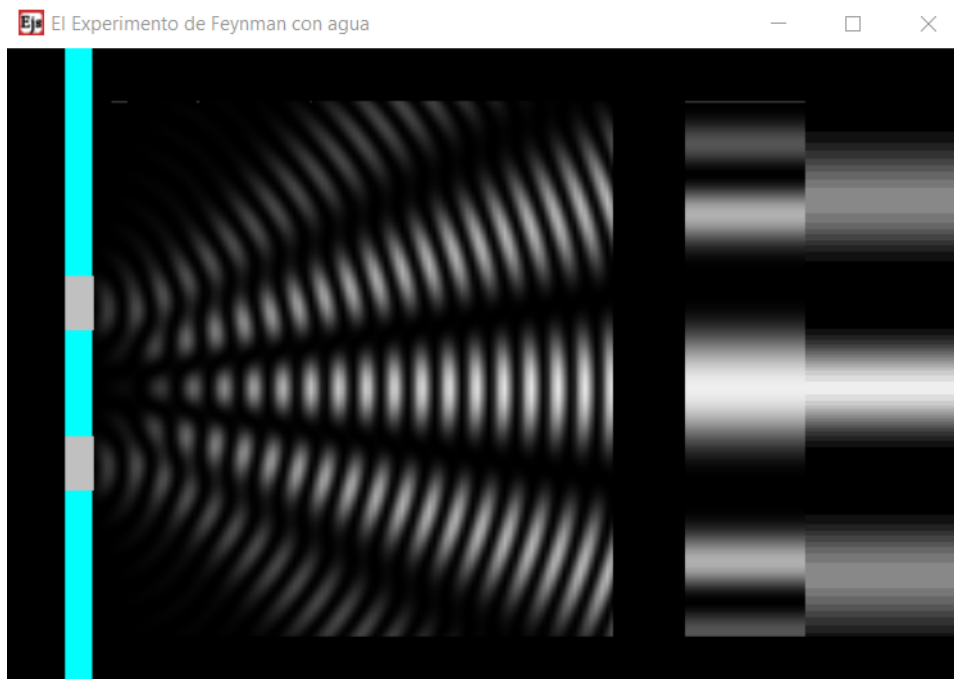


Figura 6: El Experimento con Agua

§7 Descripción General

El simulador **El ExperimentodeFeynman.jar** representa los elementos principales del «gedanken experiment»¹⁵ homónimo de Richard Feynman, mediante gráficos, animaciones y elementos numéricos, que es una forma de presentar las ideas de la Teoría Cuántica que tiene sobresalientes ejemplos en la literatura, por ejemplo en las referencias [5, 6, 7]. Las partes principales del simulador se pueden ver en las Figuras 5 y 6:

1. La zona del **Experimento con Balas y Electrones**, que contiene el cuerpo principal del simulador (Fig. 5) con:
 - a) El **Campo de Difraccion**, en la que se ven las rendijas, el espacio de propagación y la pantalla detectora.
 - b) La **Función de Probabilidad**, debajo de la anterior. Es una representación de la curva de Probabilidad/Intensidad.
 - c) La **Banda de Franjas de Interferencia**, que es una representación visual de lo que se vería en una pantalla que mostrara las franjas de interferencia.
 - d) Un **Detector CCD** para las Balas o Electrones. El **Detector CCD**¹⁶ estaría situado en la **Pantalla Blanca**¹⁷ móvil del **Campo de Difracción**, al que llegan individualmente las balas o los electrones. Cuando una bala o un electrón llega al **Detector CCD**,

¹⁵Un palabro alemán que ha pasado a la terminología usual de la Física: un experimento mental; literalmente: «experimento pensado».

¹⁶El aparato del simulador es el límite ideal de algo que ya es viable con la tecnología actual. Vea, por ejemplo,[8]

¹⁷A la que llegan las irradiaciones que parten de las rendijas.

aparece un impacto blanco en las coordenadas donde el objeto se detectó. Uno de los primeros experimentos en los que el impacto de electrones individuales se detectó se describe en [2], pero ha habido muchos más, por ejemplo los descritos en [3, 4].

- e) La **Zona** y las **Solapas de los Controles**, en las que se puede seleccionar el tipo de experimentos y las configuraciones y ajustes de las rendijas.
2. La **Cubeta de Ondas**, situada en una ventana aparte del cuerpo principal, en la que se hace el **Experimento con Agua** (Fig.6). Los controles de la **Cubeta** están en el cuerpo principal, en la **Zona** y **Solapas de los Controles**.

§8 El Experimento con Balas

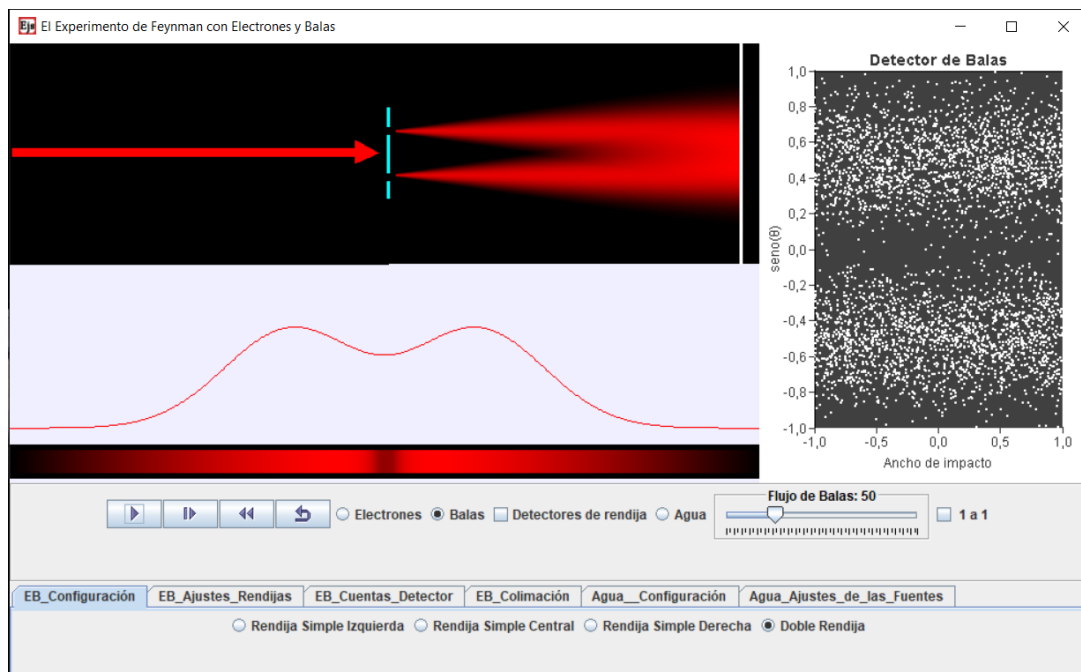


Figura 7: El Experimento con balas: Doble rendija

El **Experimento con Balas** y «**Doble Rendija**» se muestra en la Figura 7. Para proceder con este experimento:

1. Se activa en la **Zona de Controles** el radiobotón «**Balas**».
2. En las **Solapas de Controles**:
 - a) En «**EB_Configuración**»¹⁸ se elije, activando el correspondiente radiobotón, «**Doble Rendija**».

¹⁸Es una abreviatura de **Electrones-Balas_Configuración**.

- b) Si se desea modificar la posición de la **Pantalla Blanca**, pueden utilizarse el control correspondiente de la solapa «**EB_Ajustes_Rendijas**».
- c) Si se desea modificar el flujo de las Balas (número de balas por segundo), o si se desea que las balas vayan una a una, se activan la deslizadera «**Flujo de Balas**» o la casilla de control «**1 a 1**». Estos controles también están disponibles en el **Experimento con Electrones**.
- Para poner en marcha el simulador con los parámetros elegidos, se pulsa el botón «**Arrancar**», ►, en la botonera de la **Zona de Controles**. Ese mismo botón, con el símbolo de «**Pausa**», detiene el simulador.
 - El resto de los botones, «**Paso a paso**», «**Reiniciar**» y «**Reiniciar**» el simulador, permiten controlar el desarrollo de la simulación. La botonera completa, con los efectos pertinentes está disponible en todos los Experimentos.
 - Para el experimento con balas también esta disponible un control de colimación de haz, que está en la solapa «**EB_Colimación**», vea su efecto en la Figura 10.

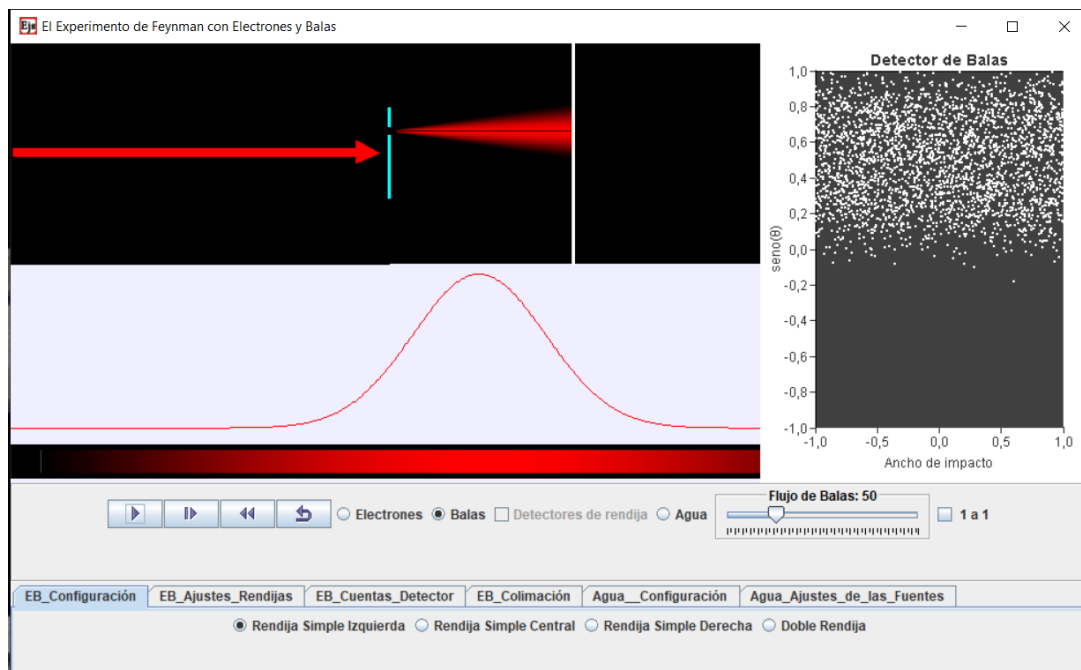


Figura 8: El Experimento con balas: Rendija Simple Izquierda

Utilizando las opciones de la solapa «**EB_Configuración**» puede configurarse el **Experimento con Balas** en:

- La **Rendija Simple Izquierda**, Figura 8
- La **Rendija Simple Central**
- La **Rendija Simple Derecha**, Figura 9

- El **Experimento con Balas** tiene un control especial en la Solapa «**EB_Colimación**»: se trata del control de «**Colimación del haz**». Disminuyendo ese control a niveles próximos a $0.1 \mu\text{m}$, la anchura del haz se reduce drásticamente, hasta el punto de que las balas que salen por una rendija no entren en la zona del haz de las que salen por la otra. La Figura 10 muestra el efecto de la colimación en la configuración de «**Doble Rendija**».

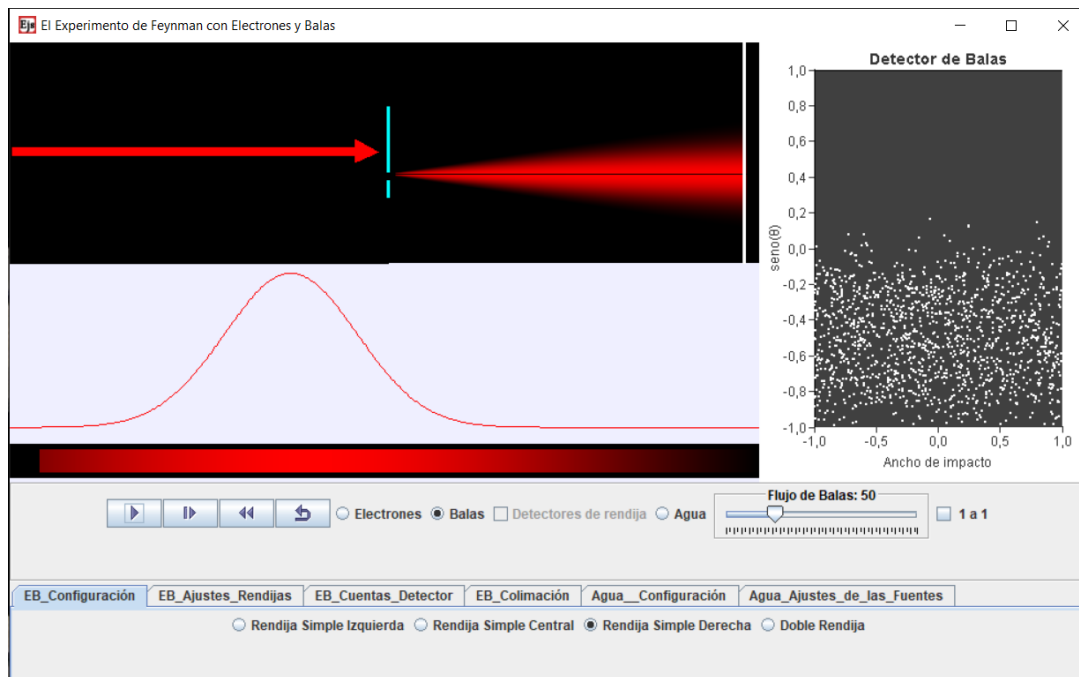


Figura 9: El Experimento con balas: Rendija Simple Derecha

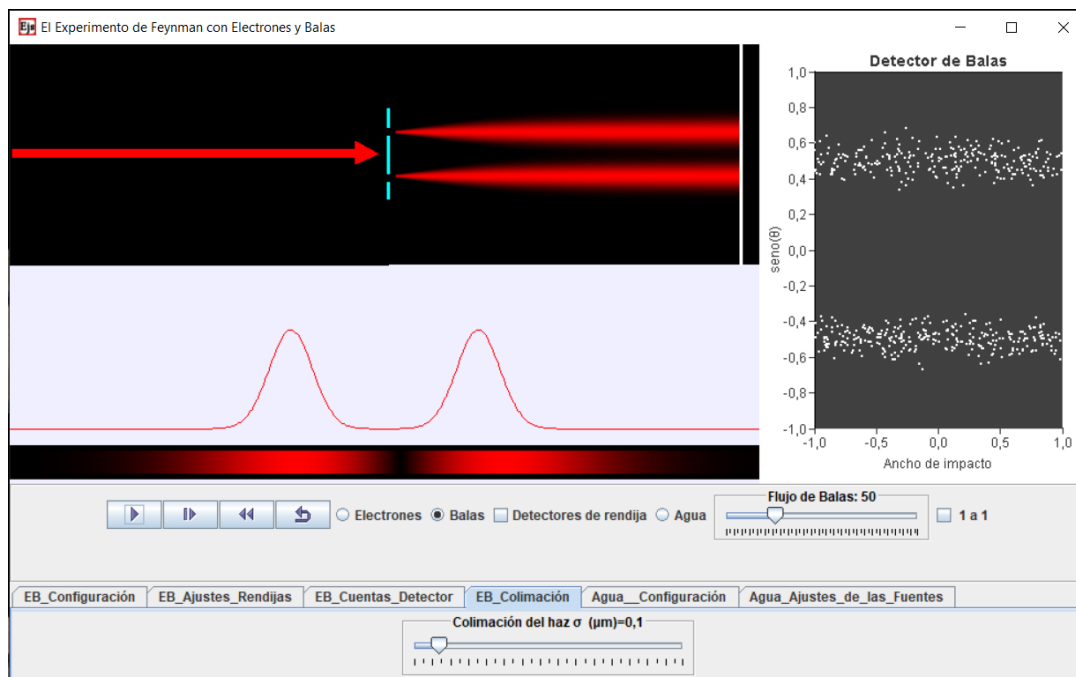


Figura 10: El Experimento con balas: Efecto de la colimación en la Doble Rendija

La descripción del **Experimento con balas** por Feynman está en §2.

§9 El Experimento con Agua

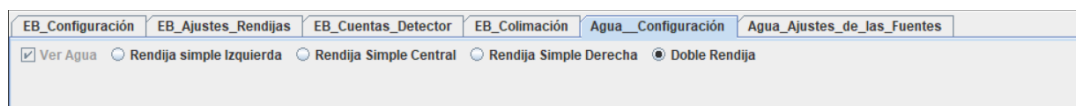


Figura 11: El Experimento con agua y su Configuración

El **Experimento con agua** se activa pulsando el radiobotón «**Agua**» de la **Zona de Controles**, en el cuerpo principal del simulador:

- La **Cubeta de Ondas** aparece en una ventana adicional que no tiene elementos interactivos, pero consta de tres zonas esenciales para el Experimento:
 - La pared color cian de las rendijas
 - El **Campo de Difracción**, en esta cubeta de ondas virtual hace el papel del agua en una cubeta real. La coloración de esta zona varía con el tiempo.
 - Una **pantalla Detectora**, que refleja el impacto instantáneo de la onda que procede de una o de ambas rendijas. La coloración de esta zona varía con el tiempo

- Una **pantalla del Promedio**, en el que se calcula el valor promedio de la intensidad que llega a la **pantalla Detectora**. Es la zona con franjas a la derecha, cuya coloración no varía con el tiempo. Es el análogo de las **Franjas de Interferencia** del cuerpo principal del simulador.
- En la solapa «**Agua_Configuración**» se puede seleccionar el tipo de rendija que se desea estudiar:
 - La **Doble Rendija**, Figura 6
 - La **Rendija Simple Izquierda**, Figura 12
 - La **Rendija Simple Central**
 - La **Rendija Simple Derecha**, Figura 13
- Para el «**Agua**» no están activados ni el «**Detector CCD**», ni el control de «**Flujo**», ni el «**1 a 1**», que no tienen sentido en este contexto.
- La solapa «**Agua_Ajustes_de_las_Fuentes**» contiene controles que permiten modificar la longitud de onda de las ondas de agua, y ver pautas de interferencia cada vez más complejas.

El **Experimento con agua** está descrito por Feynman en §3

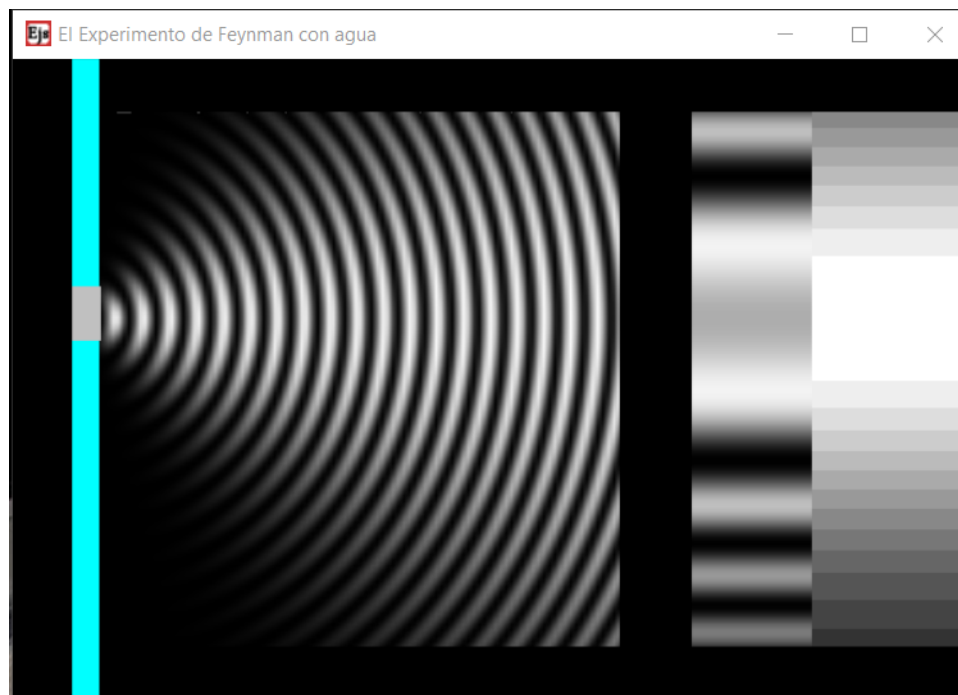


Figura 12: El Experimento con agua y Rendija Simple Izquierda

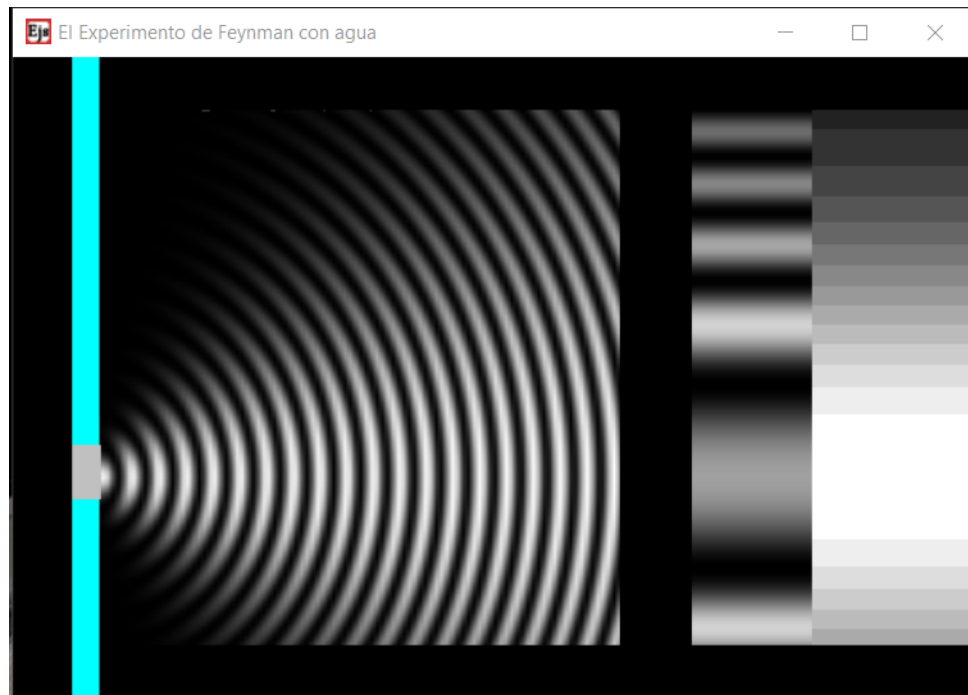


Figura 13: El Experimento con agua y Rendija Simple Derecha

§10 El Experimento con Electrones

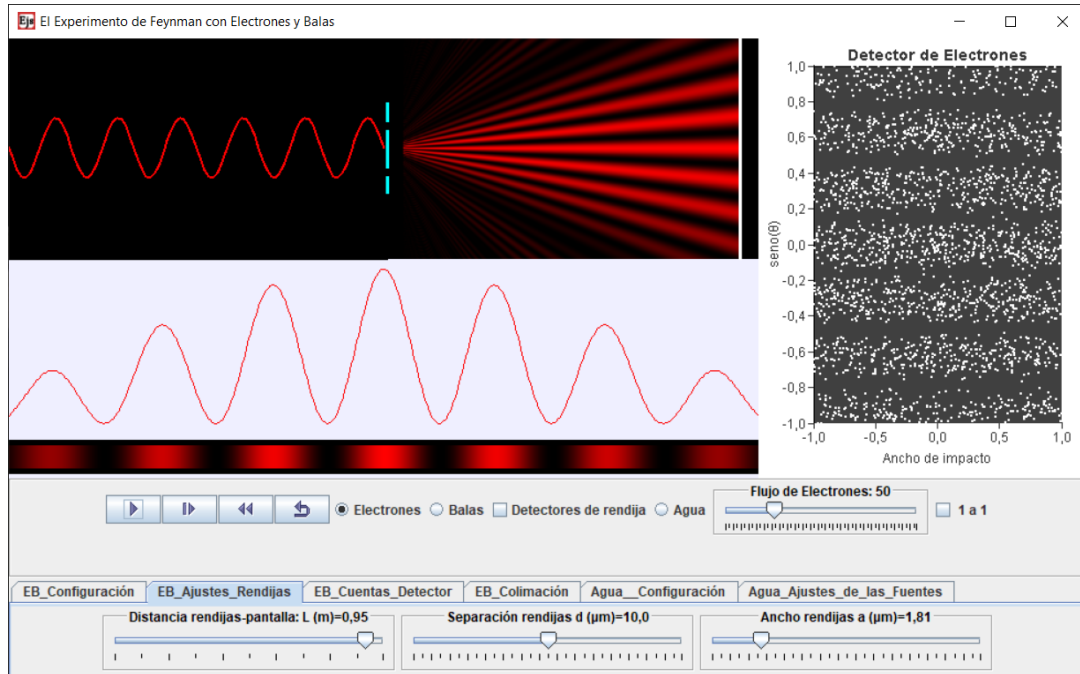


Figura 14: El Experimento con Electrones: Ajustes de las Rendijas

El **Experimento con electrones** se desarrolla tras activar el radiobotón «**Electrones**» de la **Zona de Controles**. Otras configuraciones, ajustes y datos numéricos están en las **Solapas**, Figura 14:

- La solapa «**EB_Configuración**» permite seleccionar el tipo de Rendija para el experimento. Esto puede verse, para este **Experimento con Electrones**, en las Figura 5, porque es la situación por defecto. Esa misma solapa está también activa en el **Experimento con Balas**, como se ve en las Figuras 7, 8 y 9.
- La solapa «**EB_Ajustes_Rendijas**» tiene controles para la posición de la **Pantalla Blanca**, en la deslizadera «**Distancia rendijas-pantalla**»; la deslizadera «**Separación rendijas d** (μm)» controla la separación entre los centros de las rendijas, y la «**Ancho rendijas a** (μm)» hace lo evidente, que es controlar el ancho de cada rendija (ambas tienen el mismo ancho).
- La solapa «**EB_Cuentas del Detector**» contiene información numérica sobre el número de electrones que impactan en el **Detector**, Figura 15.

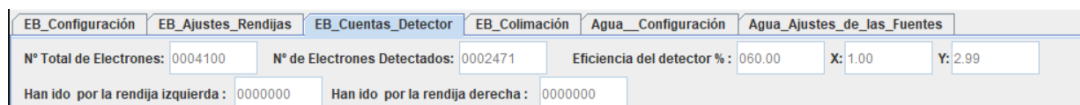


Figura 15: El Experimento con Electrones: Cuentas del Detector

Activando la casilla «**Detectores de rendija**» de la **Zona de Controles**, aparecen los **Detectores** que determinan si el electrón pasó por una u otra rendija. Es en este caso en el que la información numérica de «**EB_Cuentas del Detector**» es más relevante.

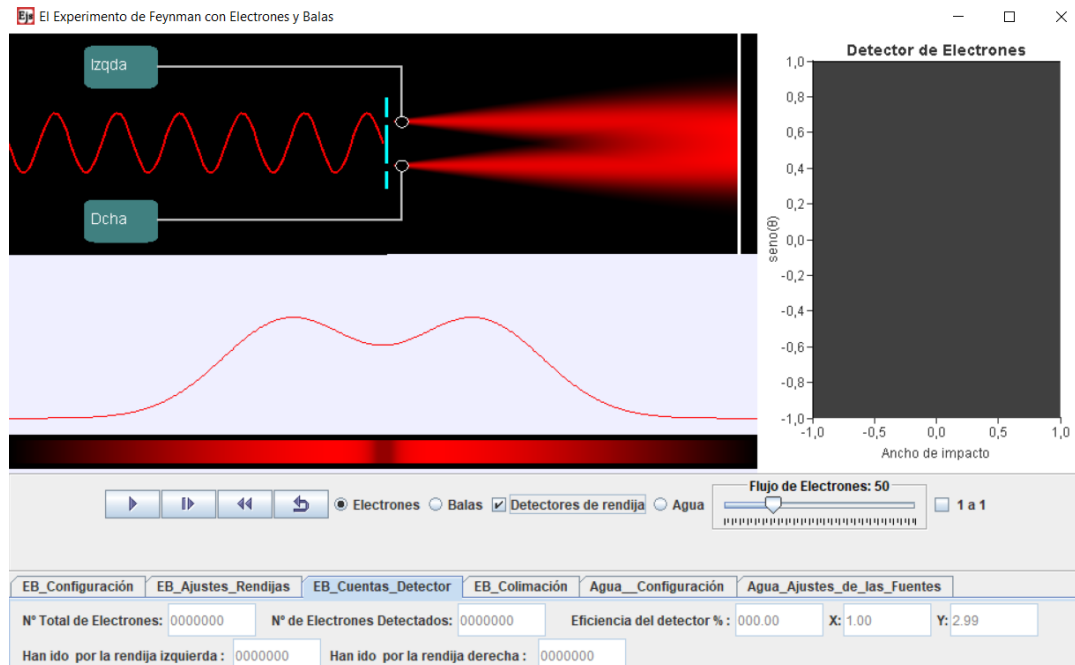


Figura 16: El Experimento con Electrones: Detectores de rendija activos

Inmediatamente aparecen los **Detectores de rendija** que determinan por qué rendija pasó el electrón que impacta en el **Detector CCD**. Podemos imaginar unos detectores en forma de cavidad resonante, en los que el electrón provoca una dispersión de algún fotón allí presente, con lo que se hace patente su paso. Inmediatamente la pauta de interferencias cambia y se hace similar a la pauta del **Experimento con Balas**. Al pulsar el botón «**Arrancar**»,►, los **detectores** de las rendijas derecha e izquierda **van encendiéndose, uno cada vez**, según los aparatos miden que **ha pasado un electrón por tal o cual rendija**, vea las Figuras 17 y 18.

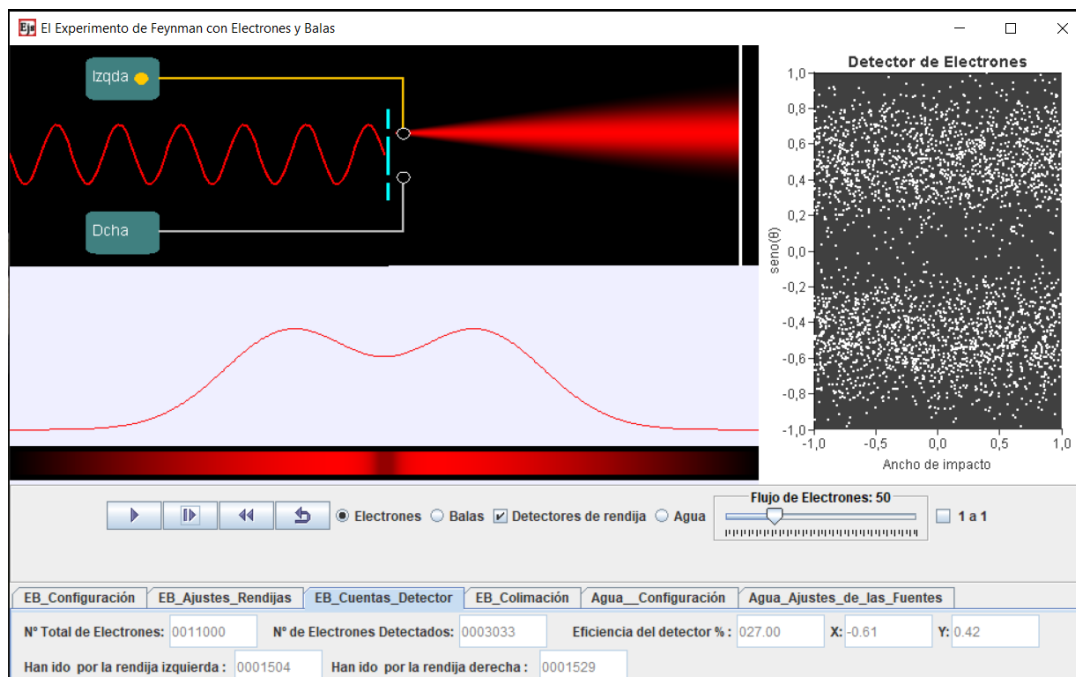


Figura 17: El Experimento con Electrones: Uno pasó por la Rendija izquierda.

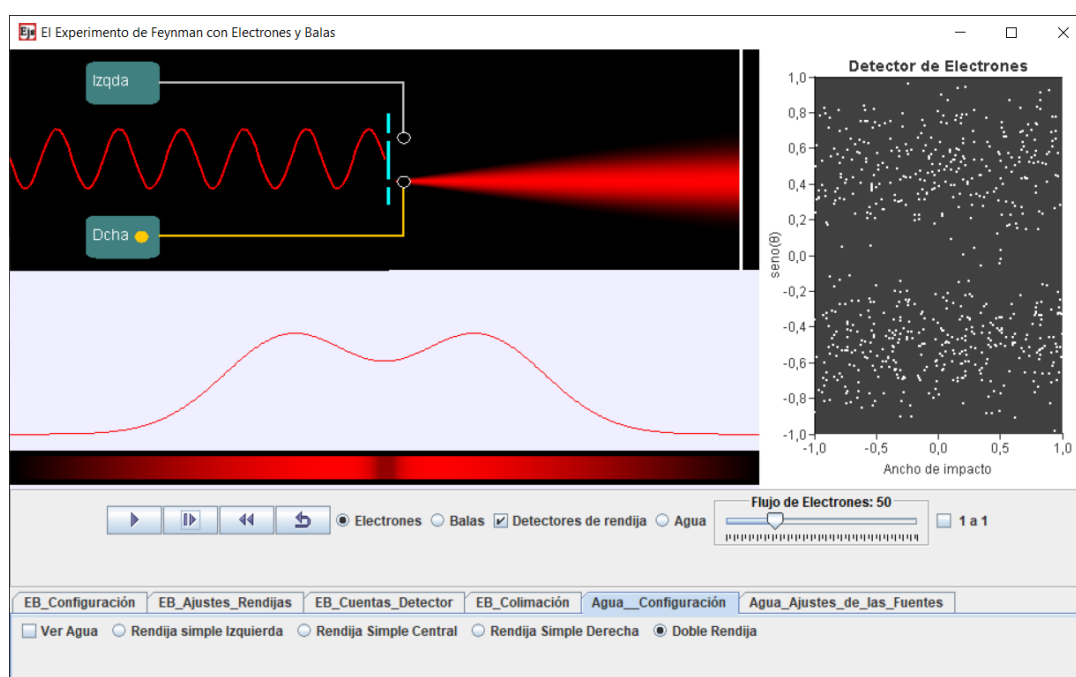


Figura 18: El Experimento con Electrones: Uno pasó por la Rendija Derecha.

Haciendo visible la solapa «EB_Cuentas_Detector» se encuentran allí los datos numéricos que arrojan estos detectores, Figura 19.

EB_Configuración	EB_Ajustes_Rendijas	EB_Cuentas_Detector	EB_Colimación	Agua_Configuración	Agua_Ajustes_de_las_Fuentes
Nº Total de Electrones:	0005350	Nº de Electrones Detectados:	0001516	Eficiencia del detector %:	028.00
				X:	1.00
				Y:	2.99
Han ido por la rendija izquierda:	0000749	Han ido por la rendija derecha:	0000767		

Figura 19: El Experimento con Electrones: Cuentas.

La conclusión de las medidas con los «**Detectores de rendija**» activados es que desaparece el patrón de interferencias característico del **Experimento con Electrones**, y se tiene una situación semejante a la del **Experimento con Balas**.

El **Experimento con electrones** está descrito por Feynman en §4

Referencias

- [1] R Feynman, R. Leighton, M. Sands, «**The Feynman Lectures on Physics, Vol III Quantum Mechanics**»; es la [edición en línea de las Feynman Lectures on Physics, Vol III Quantum Mechanics](#). En papel está la edición bilingüe (hay otras solamente en español, esta tiene la transcripción de las clases de Feynman en Caltech) Inglés-Español, Fondo Educativo Interamericano, Bogotá (1971). La parte relevante para nuestro asunto aquí está en [Chapter I. Quantum Behavior, sections 1.2 \(An experiment with bullets\), 1.3 \(An experiment with waves\), 1.4 \(An experiment with electrons\) and 1.5 \(The Interference of electron waves\)](#). Hay algunos registros de Feynman (Premio Nobel de 1965, compartido) en persona, explicando el experimento de la doble rendija. Glorioso como siempre que intervenía en público, se le puede ver en las Messenger Lectures de la Universidad de Cornell (1964), [véalo en Youtube](#).
- [2] A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T.Kawasaki y H. Ezawa, «**Demonstration of single-electron build-up of an interference pattern**», American Journal of Physics 57,17 (1989). La detección de electrones que llegan uno a uno y van conformando individualmente el esquema de interferencias se hizo por estos autores en el Laboratorio de Investigación Avanzada de Hitachi en Tokio. Allí el detector no era CCD. [Puede ver el Abstract y la referencia del artículo original en la web de la mítica revista de la AAPT](#). Tonomura es un mito de los Fundamentos de la Mecánica Cuántica, porque convirtió en experimentos de Laboratorio lo que eran Gedanken Experiments (Experimentos Mentales). Se le concedió el honor de publicar el artículo inaugural de los **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)** ,en Física Aplicada. [Véalo aquí](#).
- [3] S. Frabboni, G.C. Gazzadi and G. Pozzi, «**Nanofabrication and the realization of Feynman's two-slit experiment**», Applied Physics Letters , Vol 93,073108 (2008). Tonomura abrió un camino que muchos siguieron. Este es un ejemplo en Italia en el 2008. [Vea el artículo en la web de la APL](#)
- [4] R.Bach, D. Pope, SH. Liou y H. Batelaan, «Controlled double-slit electron diffraction», New Journal of Physics, Volume 15, March (2013) , doi:10.1088/1367-2630/15/3/033018. Este artículo de 2013 describe otra realización del Experimento de Feynman con electrones en el Laboratorio con un dispositivo muy sofisticado. Ha habido que esperar al desarrollo de la tecnología para que el Gedanken Experiment de 1965 encontrara su plasmación práctica de manera casi rutinaria. [Puede ud. verlo en la web de la revista aquí](#).
- [5] C.Cohen-Tannoudji, B.Diu y F. Laloë, «**Mécanique quantique, Tome I**», EDP Sciences col. Savoirs Actuels (Les Ullis) /CNRS Éditions (Paris) (2017 Tome III / 2018 Tomes I & II). En la sección A-2 se describe en detalle el experimento de Feynman, como prototipo del comportamiento cuántico.
- [6] A. Galindo, P. Pascual, «**Mecánica Cuántica**», Ed. Alhambra, Madrid (1978). (Hay ediciones de Eudema y otras en inglés más modernas; esta es la de mi ejemplar). En el apartado 5 del Capítulo I los autores describen el experimento de la doble rendija, el de Feynman con fotones.
- [7] B. Thaller, «**Visual Quantum Mechanics**», Springer, Heilderberg (2000) y «**Advanced Visual Quantum Mechanics**», Springer, Heilderberg (2005). Dos libros premiados por su excelencia técnica y educativa, en los que el autor proporciona un curso completo, al nivel de estudiantes de grado, de Mecánica Cuántica, con un elemento de innovación: muchos de los conceptos de la Mecánica Cuántica en 1D y 2D (Dimensiones), en el primer libro, y en 3D, en el segundo, se ilustran con excelentes animaciones y películas Quicktime. [Puede verse la web del autor aquí](#).

- [8] R. Bedington, D. Kataria y D. Walton, «**Using a CCD for the direct detection of electrons in low energy space plasma spectrometer**», Journal of Instrumentation , Vol 7, (2012). El Detector CCD de este simulador es el límite ideal de algo que se investiga y ya es posible con la tecnología actual. [Vea el artículo en la web de IOPScience.](#)
- [9] Francisco Esquembre, «**Creación de Simulaciones Interactivas en Java**», Pearson-Prentice Hall ISBN 84-205-4009-9. [EJS puede obtenerse en la Universidad de Murcia, aquí.](#)
- [10] J.M. Fernández; otros simuladores sobre Mecánica Cuántica, se pueden descargar [en el servidor de Open Source Physics.](#)