

# El experimento de las dos ranuras

## 1. Introducción.

El experimento de las dos ranuras se llama también experimento de Young. Es uno de los dos experimentos más misteriosos, desconcertantes e inverosímiles de la física porque contradice el sentido común. El otro experimento misterioso es el de entrelazamiento cuántico; el presente artículo lo menciona al final. En lo que sigue, se emplea la llamada interpretación de Copenhague de la teoría cuántica. Esta interpretación es la ortodoxa. La otra interpretación es la de Bohm.

## 2. Caso de una ranura.

Tal como se muestra en la figura 1, se dispone un foco que envía fotones monocromáticos que iluminan una pantalla. Casi todos los fotones chocan contra la pantalla, pero algunos atraviesan una estrecha ranura que tiene, se difractan y dispersan levemente, y dejan después una marca en una placa fotográfica colocada a distancia. Esta disposición no está a escala en la figura.

Al cabo de un rato de enviar fotones, se apaga el foco y se miran las marcas de la placa fotográfica. Se constata que las intensidades relativas de la cantidad de marcas forman un gráfico que depende de los ángulos  $\beta$  con los que los fotones se han desviado. Para concretar, supongamos que se escoge:

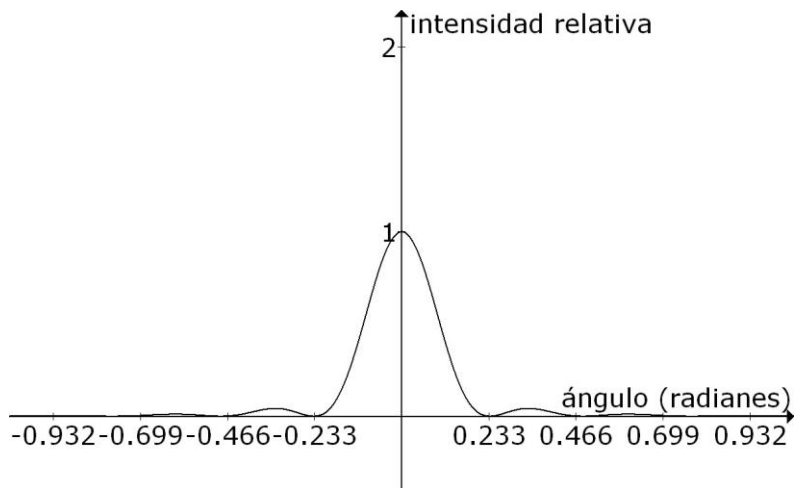
Luz monocromática de longitud de onda  $\lambda = 0,0007$  mm,  
ancho de la ranura  $a = 0,003$  mm,  
distancia entre la pantalla y la placa fotográfica  $D = 1000$  mm.

Los ángulos  $\beta$  de desviación a la salida de la ranura se miden en radianes (1 radián =  $360^\circ / 2\pi = 57,29578^\circ$ ).

Puesto que  $D$  es mucho mayor que  $a$ , se puede aceptar la aproximación:  $\text{tg } \beta = \text{sen } \beta = \beta$  (radianes).

También se puede aceptar la aproximación de que las intensidades de las marcas de la placa fotográfica no variarán por el hecho de que los fotones recorren distancias distintas desde la pantalla hasta la placa fotográfica. Con estas simplificaciones, la distribución de intensidades relativas  $I_r$  de las marcas respecto a los ángulos  $\beta$  de desviación vienen dadas por la ecuación siguiente representada en la figura 1 (se ha añadido  $\cos^2 \beta$  porque la intensidad relativa disminuye con el cuadrado de la longitud de la trayectoria desde la ranura):

$$I_r = \cos^2 \beta \frac{(\text{sen} \frac{\pi a \text{ sen } \beta}{\lambda})^2}{(\frac{\pi a \text{ sen } \beta}{\lambda})^2} = \cos^2 \beta \frac{(\text{sen} \frac{\pi 0,003 \text{ sen } \beta}{0,0007})^2}{(\frac{\pi 0,003 \text{ sen } \beta}{0,0007})^2}$$



placa fotográfica

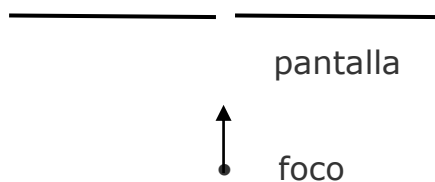


figura 1

Se ha escogido convencionalmente una intensidad máxima igual a 1; el área subtendida por la curva vale 0,23 entre los valores -1 y 1 radianes del ángulo; esta área es proporcional al número de fotones que llegan a la placa.

El experimento concuerda con la ecuación anterior. No son una sorpresa las franjas pequeñas de interferencia de ondas que se observan; en la placa fotográfica hay zonas sin marcas que corresponden a lugares en que se anulan las ondas de dos fotones emitidos desde ambos extremos del ancho de la ranura; es debido a que sus recorridos difieren en una o varias semi-longitudes de onda. La distancia entre estas zonas es de:

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{0,0007}{0,003} = 0,233 \text{ radianes} = 13,49^\circ$$

No obstante, si se repite el experimento lanzando un fotón tras otro (en lugar de un haz de fotones como en el caso antes expuesto), las marcas de la placa fotográfica son las mismas; esto sí que es una sorpresa, ya que la mejor interpretación de los expertos es que cada fotón interfiere consigo mismo; lo cual es contrario al sentido común.

### 3. Caso de dos ranuras sin detectores.

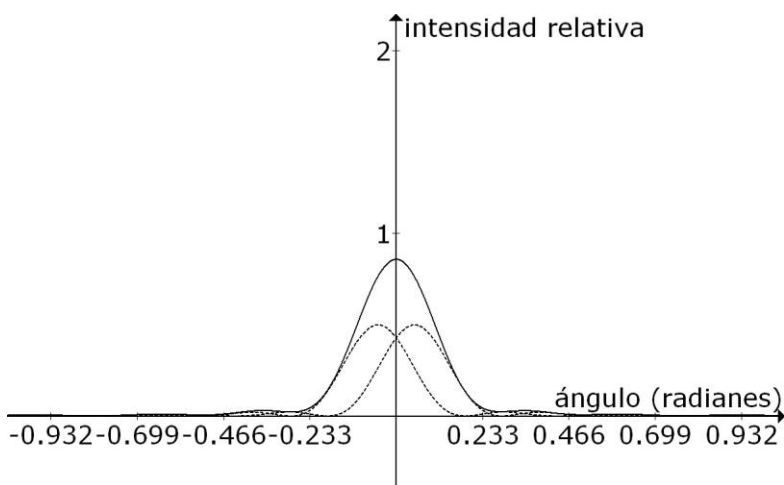
Para concretar, se supone que se emplea el disco de doble ranura del modelo Y-SLIT-3/8-DISC de la empresa Lenox Laser ([www.lenoxlaser.com](http://www.lenoxlaser.com)) de la figura 2.

Es de acero inoxidable AISI 304, de diámetro exterior de 9,5 mm, de espesor de 0,013 mm, de ancho de ranura de 0,003 mm, de distancia entre ranuras de 0,009 mm y de longitud de las ranuras de 3 mm.



figura 2

En la figura 3 hay la disposición del experimento y la curva esperada que es la suma de las dos curvas a trazos (que se han dibujado exageradamente separadas); el área subtendida por la curva vale 0,23 entre los valores -1 y 1 radianes del ángulo. No se ponen detectores; se ponen en los experimentos de los apartados posteriores.



↑ foco

figura 3

Pero, y aquí viene la sorpresa, la curva observada es muy diferente a la esperada; es como la figura 4 que corresponde a la ecuación siguiente en la que se ha añadido el coeficiente 2 para que el área subtendida por la curva sea también 0,23 entre los valores -1 y 1 radianes del ángulo y pueda compararse con la figura 1. Este fenómeno está en contra del sentido común y parece un milagro. Se ha añadido  $\cos^2 \beta$  porque la intensidad relativa disminuye con el cuadrado de la longitud de la trayectoria desde la ranura.

$$I_r = 2 \cos^2 \beta \frac{(\sin \frac{\pi a \sin \beta}{\lambda})^2}{(\frac{\pi a \sin \beta}{\lambda})^2} \cos^2 \frac{\pi a \sin \beta}{\lambda} =$$

$$= 2 \cos^2 \beta \frac{(\sin \frac{\pi 0,003 \sin \beta}{0,0007})^2}{(\frac{\pi 0,003 \sin \beta}{0,0007})^2} \cos^2 \frac{\pi 0,003 \sin \beta}{0,0007}$$

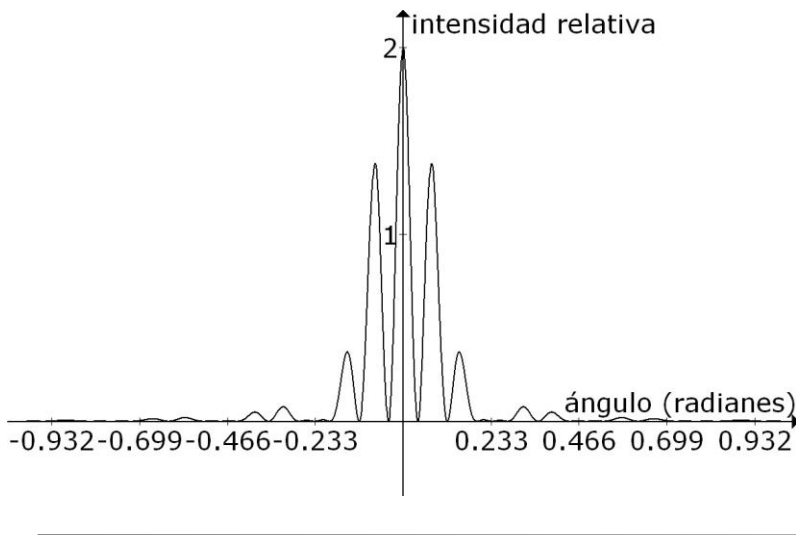


figura 4

Además, esto ocurre aunque se lancen los fotones uno a uno. En este caso, también la distancia entre zonas de intensidad relativa mínima es de:

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{0,0007}{0,003} = 0,233 \text{ radianes} = 13,49^\circ$$

pero, además hay otras zonas de intensidad mínima relativa intermedias separadas por la distancia de:  $\frac{\lambda}{d} = \frac{0,0007}{0,009} = 0,0778$  radianes = 4,4563°

Por otra parte, si se acerca progresivamente la placa fotográfica a la pantalla, la curva de la figura 4 se va modificando progresivamente hasta semejar la curva de la figura 1.

Si los proyectiles fuesen objetos mucho mayores, tales como balas, también pasarían simultáneamente por las dos ranuras e interferirían. Pero la curva resultante tendría tantas crestas que se confundería con su curva envolvente y parecería como si los objetos no pasasen simultáneamente por las dos ranuras y como si no hubiese interferencia.

#### 4. Fotón polarizado.

La intensidad de un campo eléctrico mide la mayor o menor atracción entre una carga eléctrica positiva y una carga eléctrica negativa; o mide la mayor o menor repulsión entre dos cargas eléctricas positivas; o mide la mayor o menor repulsión entre dos cargas eléctricas negativas.

Una característica del fotón es que propaga a lo largo de su trayectoria un campo eléctrico plano como el de la figura 6. En esta figura, las líneas verticales indican las diferentes intensidades del campo eléctrico; se ve que desde cero de la izquierda aumentan hasta un máximo positivo, disminuyen hasta cero, continúan disminuyendo hasta un mínimo negativo y finalmente aumentan hasta cero; la envolvente está dibujada a trazos y representa una sola onda; no se sabe cuantas ondas tiene un fotón ni si las ondas tienen la misma intensidad del campo eléctrico.

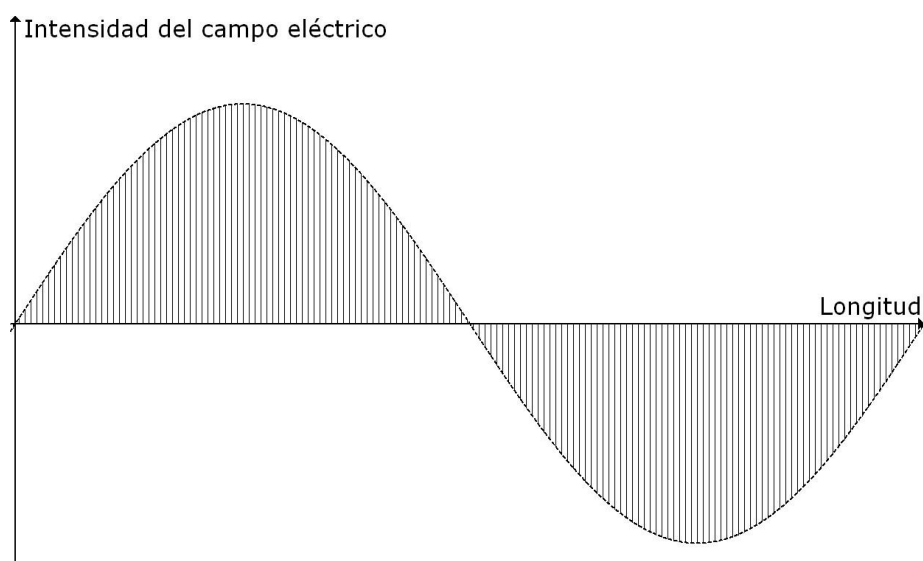


figura 5

Normalmente, un haz de fotones consiste en fotones con campos eléctricos planos distintos, todos perpendiculares a la trayectoria. La figura 6 muestra

algunos de estos planos vistos de frente a la trayectoria del haz. Un haz de fotones con un solo plano se llama polarizado; si el haz es de sólo un fotón, claro está que siempre está polarizado y con cualquier inclinación. Si un fotón pasa por un polarizador, éste sólo deja pasar la proyección del plano, tal como se muestra en la figura 7, es decir, deja pasar sólo una parte del campo eléctrico; en la figura 7 es un polarizador horizontal. En el apartado siguiente se emplearán polarizadores. Además, hay polarizadores llamados de polarización circular a la derecha y polarizadores llamados de polarización circular a la izquierda.

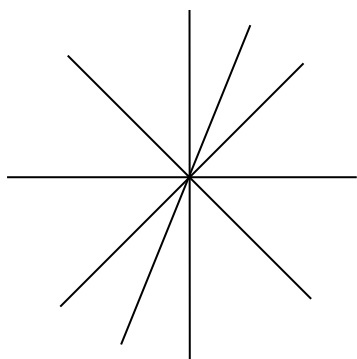


figura 6

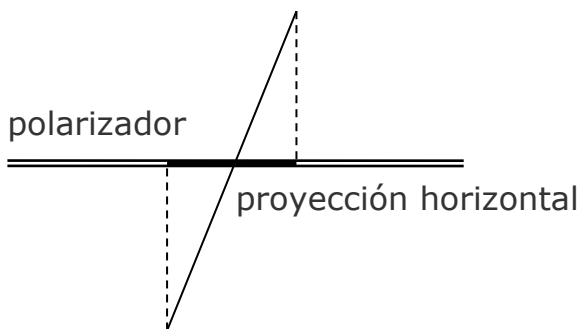
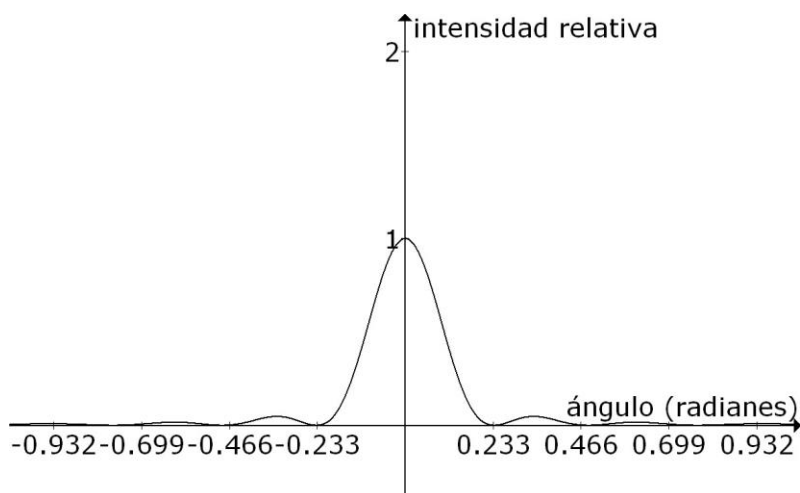


figura 7

### 5. Caso de dos ranuras con detectores.

Una variante del caso se produce si se desea saber por cual ranura pasa un fotón concreto; para ello, se coloca un detector inmediatamente después de cada ranura como en la figura 8. Inesperadamente, la curva es como la de la figura 1 y el fotón actúa como un corpúsculo. Así pues, si se ve por cual ranura pasa el fotón, desaparecen las franjas de interferencia.



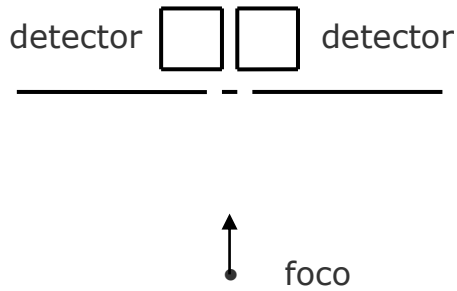


figura 8

Lo expuesto con fotones se experimenta similarmente con electrones, con neutrones, con algún átomo e incluso con alguna molécula como la del fullereno que consta de 60 átomos de carbono. No es de extrañar, ya que tal como dicen los expertos, todos los cuerpos (incluso el del lector) están formados por partículas que son corpúsculos que tienen una onda asociada.

## 6. Caso de dos ranuras con polarizadores.

La disposición se muestra en la figura 9. El foco emite un solo fotón hacia el creador de dos fotones entrelazados. Éstos tienen la extraña propiedad de parecer estar en contacto aunque estén separados, y si modificamos una propiedad de uno de ellos, instantánea y automáticamente se modifica la propiedad del otro.

Este creador emite el fotón 1 polarizado horizontalmente (el cual se dirige a las dos ranuras y con la mitad de energía del fotón del foco) y el fotón 2 polarizado verticalmente (el cual se dirige a un detector de polarización y con la otra mitad de energía del fotón del foco).

El fotón 1 pasa por el conjunto de las dos ranuras y por el conjunto de los dos polarizadores circulares; no se sabe por cual. Después, el fotón 1 entra en un detector de polarización el cual envía la información de la polarización a un receptor mediante un cable eléctrico.

El fotón 2 entra en un detector de polarización el cual envía la información de la polarización a un receptor mediante un cable eléctrico.

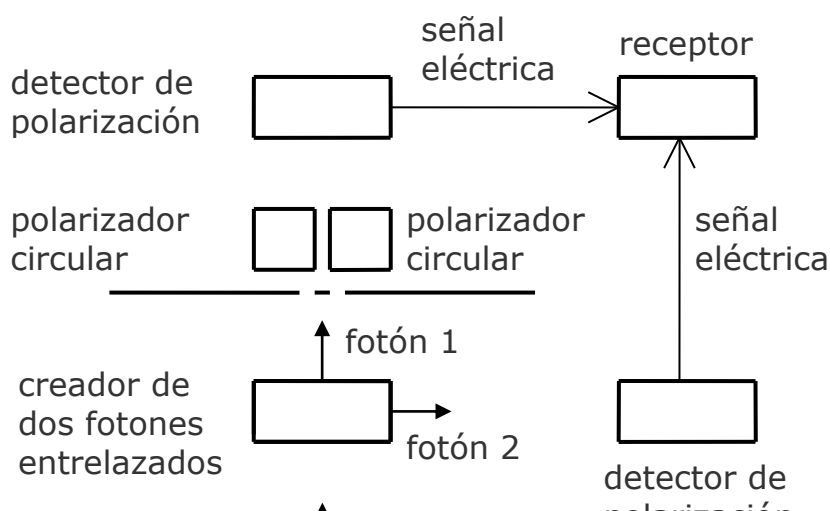


figura 9

### **6.1. Actuaciones posibles del conjunto de polarizadores circulares.**

Se exponen a continuación las diferentes posibilidades que se pueden dar teóricamente en el fotón 1.

Si el fotón 1 tuviese polarización vertical y el detector de polarización diese polarización circular derecha, significaría que ha pasado por la ranura derecha.

Si el fotón 1 tuviese polarización vertical y el detector de polarización diese polarización circular izquierda, significaría que ha pasado por la ranura izquierda.

Si el fotón 1 tuviese polarización horizontal y el detector de polarización diese polarización circular derecha, significaría que ha pasado por la ranura izquierda.

Si el fotón 1 tuviese polarización horizontal y el detector de polarización diese polarización circular izquierda, significaría que ha pasado por la ranura derecha.

### **6.2. Resultado del experimento.**

En el experimento se detecta la polarización del fotón 2. Teniendo en cuenta el apartado 6.1, tenemos:

Si la polarización del fotón 2 es horizontal, significa que el fotón 1 tenía polarización vertical; por tanto, si el fotón 1 se ha detectado después con polarización circular derecha, significa que ha pasado por la ranura derecha; mientras que si el fotón 1 se ha detectado después con polarización circular izquierda, significa que ha pasado por la ranura izquierda. Es lo que se percibe en el receptor.

Si la polarización del fotón 2 es vertical, significa que el fotón 1 tenía polarización horizontal; por tanto, si el fotón 1 se ha detectado después con polarización circular derecha, significa que ha pasado por la ranura izquierda; mientras que si el fotón 1 se ha detectado después con polarización circular izquierda, significa que ha pasado por la ranura derecha. Es lo que se percibe en el receptor.

Así pues, con esta experimento se sabe por cual ranura ha pasado el fotón 1. Si se repite el experimento con muchos fotones, no aparecen franjas de interferencia en el detector de polarización del fotón 1.



### **6.3. Como hacer aparecer franjas de interferencia.**

Para hacer aparecer de nuevo las franjas de interferencia, basta con colocar en el experimento anterior un polarizador horizontal (no dibujado en la figura 9) entre el conjunto de polarizadores circulares y el detector de polarización. Este polarizador horizontal sólo deja pasar la componente horizontal del campo eléctrico del fotón (la cual es la misma para ambos polarizadores circulares) y, por tanto, el procedimiento del apartado 6.2 ya no sirve para saber por cual ranura ha pasado el fotón 1. Este polarizador horizontal ha actuado como borrador de la información de saber por cual ranura ha pasado el fotón 1.

### **7. Conclusiones de los experimentos de las dos ranuras.**

Los expertos dicen que cada partícula pasa simultáneamente por las dos ranuras, después actúa como onda y puede interferir consigo misma. Se pueden evitar las franjas de interferencia mediante un entrelazamiento. Para saber por cual ranura pasa una partícula en el experimento de las dos ranuras, habría que interactuar con ella e inevitablemente entonces actúa como corpúsculo (y no como onda) y ya no habría franjas de interferencia.

### **8. Bibliografía.**

La revista "American Scientist" de julio-agosto de 2003.