

# Borrador Cuántico

Universidad de Los Andes  
Laboratorio Intermedio

Víctor Hugo Bastidas  
Luisa Fda. Chaparro

23 de Mayo de 2007

## Abstract

En Física el experimento del Borrador Cuántico demuestra varias leyes de la Mecánica cuántica incluyendo la dualidad onda partícula la cual busca explicar ciertas propiedades de la materia, conjuntamente con la interpretación de Copenhagen. Mediante el uso de los instrumentos ópticos y la teoría cuántica, se comprendió el funcionamiento de dicho experimento. Esto se logró mediante el análisis clásico de los fenómenos ondulatorios de la luz y su extrapolación a nivel cuántico. Se observó como al hacer uso de polarizadores se puede obtener la información sobre el camino que elige un cierto grupo de fotones y su posterior perdida al superponer los estados propios del sistema y recuperar un patrón de interferencia, tal y como se conoce clásicamente.

## Palabras Claves

Principio de incertidumbre, Matriz densidad, Experimento de la doble rendija de Young, Estado puro, Mezcla de estados, Interpretación de Copenhagen.

## Introducción

### Sobre la interferencia.

La interferencia no ocurre solamente en fenómenos de mecánica cuántica, ocurre con cualquier tipo de ondas, incluyendo las mecánicas y acústicas.

Este fenómeno se define como el proceso en el cual dos o más ondas (de la misma clase) se sobrelapan combinándose dando como resultado un patrón de interferencia, que en el caso específico de la luz, produce franjas brillantes y franjas oscuras, donde las brillantes corresponden a una interferencia constructiva y las oscuras a la destructiva.

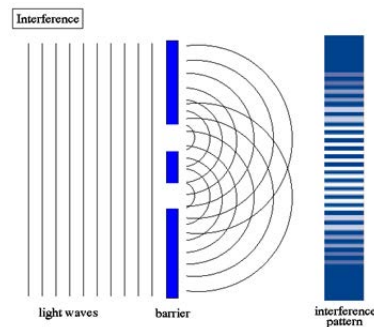


Figura 1: Patrón de interferencia. Interferencia constructiva para  $n$  entero, según la ley de Bragg:  $2d\sin\theta = n\lambda$ [2]

Por lo tanto, la explicación de dicho efecto se puede entender de forma clásica. Claro está que si se repite este experimento en el régimen cuántico, se obtendrá el mismo resultado como se explicará más adelante [1].

La interferencia es útil para explicar más fenómenos ondulatorios como por ejemplo la difracción.

## La Difracción

‘Este efecto es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurren donde quiera que una parte de un frente de onda sea sonido, onda material o de luz, este obstruida [3]’.

Si al encontrar un obstáculo transparente u opaco se altera la amplitud de la longitud de onda o la fase de una región del frente de onda se produce la difracción [1, 3].

Para entender el fenómeno de difracción es necesario acudir al principio de Huygens<sup>1</sup> y al de Fresnel encontrando una relación entre ambos: ‘cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo determinado, sirve como fuente de trenes de onda secundarios esféricos (de la misma frecuencia de la onda primaria). La amplitud del campo óptico en cualquier punto más allá es la superposición de todos estos trenes de onda [3]’. Lo que se conoce como interferencia múltiple.

Un ejemplo claro de interferencia múltiple, ocurre cuando un haz de luz encuentra un obstáculo del orden de su longitud de onda. En este caso, es conveniente considerar que la luz produce un gran número de ondas al rodear el alambre, ya que cada punto de la superficie del alambre actúa como una rendija, es decir se puede considerar la interferencia resultante como la suma de la interferencia de infinitas rendijas.

<sup>1</sup>véase pág. 105 de[3]

Para explicar matemáticamente este fenómeno, es conveniente considerar en primera instancia el campo eléctrico de una sola rendija:

$$E = \frac{\epsilon_L D}{R} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right) \sin(\omega t - kR) \quad (1)$$

Donde  $\beta = (kD/2) \sin \theta$ .

La cantidad que interesa es la intensidad, que se obtiene del valor absoluto del cuadrado del campo eléctrico, (olvidando las constantes):

$$I(\theta) = \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_L D}{R} \right)^2 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (2)$$

Donde el último término de  $E$ , se convierte en  $1/2$ .

Para el experimento del borrador cuántico, su análisis se puede hacer usando este mismo principio pero extrapolándolo para varias rendijas, de tal forma que la ecuación (1), se transforma en:

$$E = bC \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right) \left( \frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right) \sin(\omega t - KR + (N-1)\alpha) \quad (3)$$

Donde la fase de  $E$  corresponde a la de una onda emitida desde el punto medio de la fuente. De igual forma, la intensidad es:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left( \frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \quad (4)$$

Siendo lógico que ahora las expresiones dependen del número de rendijas.

Este patrón puede aparecer y desaparecer al incluir un polarizador [3].

## La polarización

En una onda transversal, la vibración es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Por ejemplo en una onda de luz viajando en la dirección

z, el campo eléctrico es perpendicular a esta (el campo magnético de la luz es también perpendicular a la dirección z). Si la vibración se mantiene fija en una línea en el espacio la onda se considera linealmente polarizada.

Se puede visualizar la polarización de una forma más fácil considerando ondas mecánicas en una cuerda. Si se ata un extremo de la cuerda y se mueve el otro extremo de arriba hacia abajo, la onda resultante está linealmente polarizada en la dirección vertical. Similarmente si el movimiento es de derecha a izquierda la onda resultante estará linealmente polarizada en la dirección horizontal [4].

Si ahora el movimiento de la cuerda es circular, la onda resultante se considera circularmente polarizada.

Una onda sin polarización puede ser producida por un movimiento aleatorio en las direcciones horizontal y vertical. Por ello las vibraciones de la cuerda tendrán componentes  $x$  y  $y$  de manera aleatoria [5].

En 1938, E. H. Land inventó un simple polarizador comercial llamado ‘polaroid’. Este material contiene cadenas largas de moléculas de hidrocarburos que están alineadas. Cuando la luz incide con su campo eléctrico paralelo a las cadenas de hidrocarburos, la energía de la luz es absorbida. Si el campo eléctrico es perpendicular a estas cadenas, la luz es transmitida. El eje de transmisión es entonces la dirección perpendicular a las cadenas. Aquí se asume que la luz es totalmente transmitida cuando su campo eléctrico es paralelo al eje de transmisión y es totalmente absorbido cuando es perpendicular al eje de transmisión [1, 4].

Se considera un haz de luz no polarizada viajando en la dirección  $z$ . Este haz incide en una película cuyo eje de transmisión hace un ángulo  $\theta$  con respecto a un segundo polarizador (analizador) ubicado como se muestra en la Figura 2

Si  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico entre los dos polarizadores, su componente en la dirección del eje de

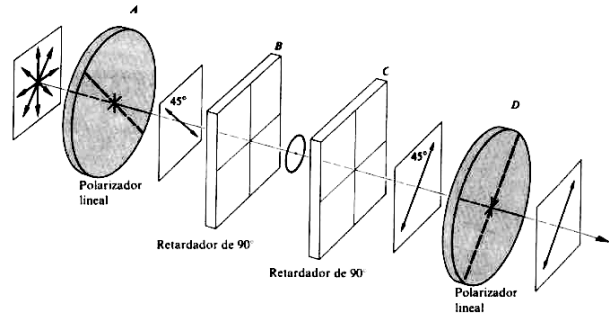


Figura 2: Polarización de un haz de luz[7]

transmisión del segundo polarizador será:  $E \cos \theta$ . Siendo la intensidad de la luz proporcional a  $E^2$ , la intensidad de luz transmitida por ambos polarizadores estará dada por:  $I = I_0 \cos^2 \theta^2$ , donde  $I_0$  es la intensidad del haz que incide en el analizador, que por su puesto, es la mitad de la intensidad incidente en el primer polarizador.

Nótese que cuando  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , la intensidad de la luz es cero. Si el ángulo para un tercer polarizador ubicado entre el primer polarizador y el analizador es intermedio una porción de luz se verá al final del montaje. Esto se debe a que la luz proveniente del polarizador intermedio se polariza a lo largo de su eje de transmisión formando un ángulo que ya no es ortogonal al analizador.

## ¿Cuál es la función que cumplen los polarizadores sobre los fotones?

La descripción cuántica de la polarización de los fotones es un poco diferente en comparación con la clásica. Se sabe que la luz está compuesta de partículas individuales llamadas fotones, pero como la luz también se comporta como un onda, cada uno de estos fotones puede oscilar en una dirección distinta. Un fotón logrará atravesar si golpea a un polarizador que tenga el eje de transmisión paralelo al eje de polarización del fotón, mientras que un

<sup>2</sup>ley de Malus

polarizador que se encuentre en forma perpendicular lo bloqueará. Si el polarizador se encuentra ahora a un ángulo de  $45^\circ$  el fotón tendrá un 50% de probabilidad de atravesar y un 50% de no hacerlo, es decir, la probabilidad de atravesar o no hacerlo varía a medida que lo hace el ángulo de polarización [4, 5].

Estos resultados se pueden obtener cuantitativamente al desarrollar el formalismo teórico <sup>3</sup>.

Primero se debe suponer un estado inicial como la combinación lineal de los dos estados propios del sistema (polarización vertical  $|V\rangle$  y polarización horizontal  $|H\rangle$ <sup>4</sup> para un haz de luz polarizado) como representan direcciones ortogonales no se puede expresar una en términos de otra, lo que permite definir estos estados como una base ortonormal, la cual cumple con las siguientes relaciones [2, 4, 5]:

$$\langle H|H\rangle = \langle V|V\rangle = 1 \quad (5)$$

$$\langle H|V\rangle = \langle V|H\rangle = 0 \quad (6)$$

Cuando el estado se encuentra polarizado (justo después de atravesar el polarizador), este puede escribirse:

$$|\varphi\rangle = \cos\theta |H\rangle + \sin\theta |V\rangle \quad (7)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo formado entre el eje de transmisión del polarizador y la horizontal.

Si ahora se rota el polarizador, la representación más fácil es producir un cambio de base para el nuevo estado, donde cada uno de los estados propios del sistema se escribe en términos de la base anterior, la cual sigue las mismas relaciones de la base original [4,5].

$$|H\rangle = \cos\theta |H'\rangle - \sin\theta |V'\rangle \quad (8)$$

$$|V\rangle = \sin\theta |H'\rangle + \cos\theta |V'\rangle \quad (9)$$

<sup>3</sup>similar al desarrollo del experimento de Stern-Gerlach pág. 388 Cohen

<sup>4</sup>tomando la misma notación que en el documento de physics P371- Quantum mechanics

Se sabe que un polarizador deja pasar los fotones que van paralelos a su eje de transmisión y absorbe los que están polarizados en la dirección perpendicular a este eje. El estado de polarización del fotón después de ser polarizado se alinea al eje de transmisión del polarizador. Si el estado del eje de transmisión del polarizador es  $|H'\rangle$ , la acción de este sobre el estado del fotón se representa por el proyector:

$$P_{H'} = |H'\rangle \langle H'| \quad (10)$$

El fotón transmitido que se encuentra inicialmente en el estado  $|\phi\rangle$  al atravesar el polarizador resulta en la proyección:  $P_{H'} |\phi\rangle$ . Después de la polarización el fotón está en el estado  $|H'\rangle$ , la amplitud de probabilidad para la transmisión de la proyección está dada por:

$$\langle H'|P_{H'}|\phi\rangle$$

Es decir, la probabilidad del fotón transmitido es igual a:

$$P = |\langle H'|P_{H'}|\phi\rangle|^2 = |\langle H'|\phi\rangle|^2 \quad (11)$$

Este mismo procedimiento se puede relacionar para un polarizador que proyecte un estado  $|\phi\rangle$  sobre  $|V'\rangle$ , donde la probabilidad de ser transmitido estará dada por:

$$P = |\langle V'|P_{V'}|\phi\rangle|^2 = |\langle V'|\phi\rangle|^2 \quad (12)$$

## Instrumentación y montaje

Para realizar este experimento se necesita de un cuarto oscuro, un laser, un colimador (puede ser papel aluminio con un pequeño agujero), polarizadores (4 por lo menos), un alambre delgado<sup>5</sup>, soportes y una pantalla blanca.

<sup>5</sup>Ver cuidados en la medición

## Identificación del patrón de interferencia

Envolviendo el papel aluminio con un pequeño agujero (o un colimador), sobre la salida del laser para permitir un mayor enfoque, se ilumina una pantalla a una distancia de 1,66 metros. Luego se coloca verticalmente centrado un alambre delgado entre el laser y la pantalla como se indica en la figura (3).

Para que el análisis sea más fácil, se debe ubicar un polarizador haciendo un ángulo de  $45^\circ$  justo después del laser. De esta forma, se podrá apreciar más claramente el patrón de interferencia múltiple mencionado anteriormente.



Figura 3: Haz de luz incidiendo en un alambre delgado.

## Rotulación de caminos

Primero se toman dos polarizadores de tal forma que sus ejes de polarización estén perpendiculares (es decir que al sobrelaparlos temporalmente, la luz no penetre).

Luego se fijan sus lados teniendo en cuenta que no puede quedar ningún espacio entre ellos, pero tampoco pueden quedar sobrepuestos (figura 4 a). Al realizar este procedimiento, se debe cerciorar que la luz pueda pasar sin obstáculo alguno. A este par de polarizadores, los nombraremos de aquí en adelante como el 'rotulador'.

Posteriormente se ubica el rotulador justo detrás del alambre delgado, de tal forma que el alambre quede justo en la unión de los polarizadores del rotulador (figura 4 b), y así lograr borrar el patrón de interferencia.

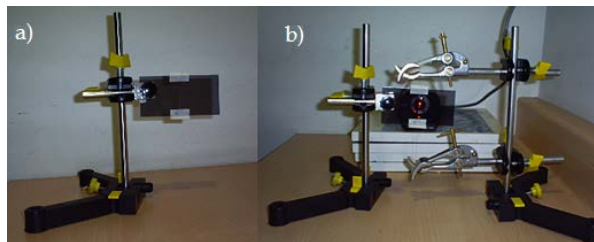


Figura 4: a) Polarizadores con ejes de transmisión perpendiculares (rotulador). b) El rotulador ha hecho disponible la información sobre el camino del haz de luz.

## Analizador de caminos

A continuación se sitúa un tercer polarizador el cual se denominará analizador de ahora en adelante. Luego se rota el analizador para establecer cuál de los dos caminos tomaron los fotones (figura 5). En esta parte del experimento se debe prestar mucha atención sobre lo que sucede si rotamos el analizador  $45^\circ$  con respecto al eje vertical, ya que a este ángulo se vuelve a recuperar el patrón de interferencia.



Figura 5: El analizador indica el camino seguido por los fotones.

## Cuidados en la medición

Para observar más claramente el patrón de interferencia, se debe ubicar la pantalla a una distancia mínima de 1.50 metros respecto al alambre, o de lo contrario se corre el riesgo de ver la sombra del alambre en vez de las franjas de interferencia de la luz.

Otro factor que se debe tener en cuenta es el grosor del alambre. Si el alambre es muy grueso, el espacio entre las franjas claras y oscuras en el patrón de interferencia será muy pequeño, variando inversamente con el grosor del alambre. Por otra parte si el grosor del alambre es muy delgado (del orden de un pelo), el patrón de interferencia será muy claro, pero el resto del experimento será muy complicado al usar el pelo con los polarizadores.

Si después de ubicar el rotulador justo detrás del alambre, se sigue observando el patrón de interferencia, se debe verificar que los polarizadores estén totalmente perpendiculares; de lo contrario, el rotulador no definirá con exactitud por cual camino tomó el fotón, resultando una pequeña cantidad de interferencia residual. Otra posibilidad es que la línea de empate de los polarizadores del rotulador, no se encuentre exactamente detrás del alambre.

También es importante mencionar que el rotulador debe estar lo más cerca posible al alambre. Si se ubica el rotulador a una distancia muy grande, en el momento en que los fotones incidan sobre él, ya existirá un patrón de interferencia, haciendo imposible saber por cual camino tomaron los fotones.

Por otra parte, si no se logra recuperar el patrón de interferencia cuando el analizador se encuentra en su posición diagonal, el problema puede provenir del laser. Si el laser tiene algún tipo de polarización, ya sea vertical u horizontal, inmediatamente después de que el haz de luz atraviese el rotulador de caminos, solo se obtendrá un camino por el cual atravesaron los fotones, ya que los fotones que tomaron el otro camino serán absorbidos por el rotulador. Al no tener los dos caminos, es imposible recuperar el

patrón de interferencia. Este problema puede ser solucionado al rotar el laser alrededor de su eje, hasta que la intensidad obtenida en la pantalla sea igual para los polarizadores verticales y horizontales o simplemente interponiendo un polarizador justo después del láser.

## Resultados y Discusión

Después de haber realizado meticulosamente el montaje experimental se obtuvo varios resultados. El primero de ellos fue el patrón de interferencia debido a la difracción múltiple, producido al hacer incidir un haz de luz no polarizada sobre un alambre de 1.5 mm de diámetro (figura 6).

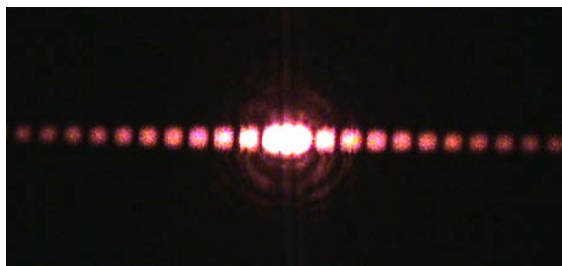


Figura 6: Patrón de interferencia múltiple producido por el haz de luz que pasa por un lado o el otro del alambre. Las regiones oscuras corresponden a los lugares donde las ondas interfieren destructivamente, cancelándose entre sí, y las regiones brillantes corresponden a los lugares donde las ondas se suman constructivamente.

Para explicar este efecto, no es necesaria la noción de la mecánica cuántica (si consideramos la luz de forma clásica es decir que no esté cuantificada). Pero si se repite este experimento en el régimen cuántico (mandando fotón por fotón), el resultado sería el mismo. Esto quiere decir que cada fotón interfiere con sí mismo, y que cada fotón es una superposición cuántica de pasar por un lado o el otro del alambre.

Usando la relación ( $I \propto E^2$ ), se puede inferir que  $E(r, t)$  es la superposición de los campos eléctricos detectados en un punto en la pantalla, en consecuen-

cia,  $E(r,t)$  es el que permite explicar el fenómeno de interferencia en óptica clásica [6].

En mecánica cuántica, la figura 6 puede ser explicada por medio del campo eléctrico  $E(r,t)$  pero interpretándolo como una amplitud de probabilidad. Por lo tanto lo único que se puede decir es que cuando un fotón es emitido, la probabilidad de que golpee un punto  $x$  de la pantalla, es proporcional a la intensidad  $I(x)$ . Esto se debe a que la luz se comporta como una onda y una partícula simultáneamente. Por ende, el comportamiento ondulatorio es el que permite calcular la probabilidad de la manifestación de la partícula, es decir que la predicción del comportamiento de un fotón puede ser únicamente probabilístico.

Para entender mejor esta nueva interpretación del campo eléctrico  $E(r,t)$ , se puede analizar el experimento de la doble rendija de Young<sup>6</sup>. Si se cierra una de las rendijas, en la pantalla se obtendrá una distribución de intensidad de luz  $I_1(x)$ . De la misma forma, si se cierra la otra rendija la distribución de intensidad de la luz será  $I_2(x)$ . Cuando las dos rendijas se abren simultáneamente, se observa un patrón de interferencia en la pantalla. Por lo tanto es obvio que la intensidad total  $I(x)$  no es la suma de las intensidades producidas separadamente:

$$I(x) \neq I_1(x) + I_2(x) \quad (13)$$

Por lo tanto, la intensidad de la luz debe ser proporcional a la amplitud del campo eléctrico en ese punto. Si  $E_1(x)$  y  $E_2(x)$ , representan, en notación compleja, el campo eléctrico producido por las dos rendijas en el punto  $x$ , la intensidad total será proporcional a:

$$I(x) \propto |E(x)|^2 = |E_1(x) + E_2(x)|^2 \quad (14)$$

$$I(x) = |E_1(x)|^2 + 2 \cos \theta E_1(x)E_2(x) + |E_2(x)|^2 \quad (15)$$

<sup>6</sup>Para mayor información ver: 'Quantum Mechanics' de Cohen-tannoudji [6]

Gracias a estos términos cruzados y al desfase entre los campos eléctricos se puede interpretar el patrón de interferencia. De la misma manera se puede aplicar este procedimiento matemático en el caso del borrador cuántico, pero teniendo en cuenta que cada punto de la superficie del alambre se comporta como una rendija, como ya lo mencionamos anteriormente. Por lo tanto, si se observa con atención la figura 6, se puede ver que estas franjas de máximos están subdivididas en franjas más pequeñas, y a su vez estas están divididas en franjas más pequeñas y así sucesivamente.

La analogía entre la mecánica cuántica y la óptica clásica es muy útil, pero se debe notar que no es rigurosamente correcto considerar que  $E(r,t)$  representa el estado cuántico de un fotón. Por lo tanto de aquí en adelante se hablará del estado cuántico de un fotón como  $|\varphi\rangle$  (o función de onda  $\varphi(r,t)$ ).

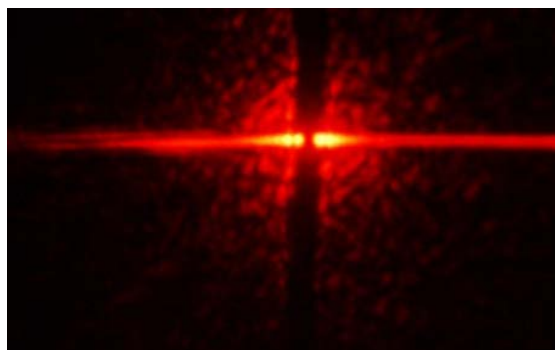


Figura 7: Al colocar el rotulador, se pierde el patrón de interferencia, haciendo accesible la información por la cual paso el fotón.

Al ubicar el rotulador como se indica en el procedimiento experimental, se obtuvo la figura 7.

La desaparición de las franjas, pueden ser explicadas por medio de óptica clásica. La interferencia destructiva que produce las franjas oscuras en el patrón de interferencia resulta cuando hay una diferencia de fase de  $\pi$  entre la onda luz proveniente de una parte del alambre con la onda de

luz proveniente de otra parte del mismo. Por lo tanto, el campo eléctrico de estas ondas, apuntan en direcciones opuestas y de esta forma se cancelaran. Por el contrario, si los polarizadores se encuentran en un ángulo correcto entre ellos, por definición, los campos eléctricos tendrán un ángulo correcto entre ellos de tal forma que no sea posible que se cancelen mutuamente (es decir que estos campos eléctricos viajan en direcciones ortogonales). Como veremos más adelante, si un tercer polarizador se interpone, toda la luz estará polarizada en la misma dirección de nuevo, y de esta manera producirá interferencia. Pero la explicación clásica de este experimento no puede decir nada al respecto del régimen cuántico. Por tal razón, es necesario explicar estos eventos cuánticamente como se verá a continuación.

La figura 7 se puede explicar cuánticamente por medio de la siguiente comparación. Considerando la paradoja que ocurre en el experimento de la doble rendija, el cual consiste en que el fotón se comporta diferente dependiendo en si las dos rendijas están abiertas o si una de ellas se encuentra cerrada, se puede observar que cuando se intenta detectar el camino tomado por el fotón, se previene la formación del patrón de interferencia. En general, es imposible observar el patrón de interferencia y saber al mismo tiempo por cual rendija pasó el fotón. Por lo tanto, para resolver esta paradoja es necesario renunciar a la idea de que el fotón pasa inevitablemente por una de las rendijas. Entonces, Podríamos considerar que el fotón pasa por los dos caminos simultáneamente. En el caso del alambre, esta misma paradoja ocurre, considerando que el fotón es una superposición cuántica de pasar por un lado o el otro del alambre. Por lo tanto, en este experimento también se cumple que no podemos saber por qué camino tomaron los fotones y observar el patrón de interferencia simultáneamente.

La función del rotulador es hacer accesible la información acerca de cuál camino tomó cada fotón, previniendo la formación del patrón de interferencia (figura 7). Esto significa que justo después de que un fotón pasa por el alambre y luego atraviesa el rotulador, la función de onda tiene dos partes separadas:

un pedazo polarizado en la dirección vertical ( $|V\rangle$ ) y otro pedazo polarizado en la dirección horizontal ( $|H\rangle$ ). A medida que estas dos partes de la onda viajan hacia el detector, se esparcen y se sobrelapan más y más. Cuando el fotón golpea la pantalla, ambas partes de la onda están presentes, la parte que pasó a la derecha y la parte que pasó a la izquierda. Pero surge la pregunta: ¿Por qué estas dos partes no se combinan e interfieren? La respuesta de esta pregunta, tiene que ver con la precisión del ángulo con la que se construye el rotulador. Si el ángulo de estos dos polarizadores es exactamente de 90 grados, ellos producen eficientemente dos partes de la onda totalmente diferentes. Es por esto que no se pueden cancelar de ninguna forma para producir las franjas típicas de interferencia.

Para entender mejor esta parte del experimento se debe considerar como dos ‘eventos independientes’, la parte que pasó por la izquierda y la parte que paso por la derecha en el rotulador. Este hecho se puede explicar cuánticamente por medio de la matriz densidad. Esta matriz debe tener la forma de una mezcla de estados, ya que precisamente este es el caso.

Cuando la luz del laser atraviesa el primer polarizador, su estado estará dado por la ecuación (7), la cual se puede interpretar como un estado puro. En este estado puro, las probabilidades de encontrar el fotón polarizado verticalmente u horizontalmente están dadas por:

$$P_H = |\langle H|\varphi\rangle|^2 = \cos^2 \theta \quad (16)$$

$$P_V = |\langle V|\varphi\rangle|^2 = \sin^2 \theta \quad (17)$$

Pero una vez que el haz de luz atraviesa el rotulador, ya no es posible considerarlo como un estado puro sino como una mezcla de estados. Es decir que para realizar el análisis cuántico, se debe asumir que el fotón se encuentra en el estado  $|V\rangle$  (pasó por la izquierda) o que está en el estado  $|H\rangle$  (pasó por la derecha).



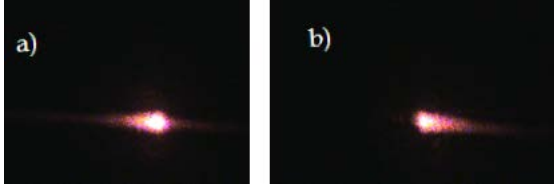


Figura 8: a) Al ubicar un analizador en la posición  $|V\rangle$ , se puede saber cuales fotones tomaron por el camino del lado izquierdo. b) Al ubicar un analizador en la posición  $|H\rangle$ , se puede saber cuales fotones tomaron por el camino del lado derecho.

Cuando se ubica un analizador en la dirección  $|V\rangle$  entre el rotulador y la pantalla, únicamente pasa por él la parte  $|V\rangle$  de la función de onda, por lo tanto en la pantalla desaparece toda la función de onda excepto la parte que paso por la izquierda del alambre (figura 8 a). Esa es la interpretación de eventos de Copenhagen o también conocido como ‘el colapso de la función de onda [5]’. En otras palabras, lo que se observa en la pantalla son los fotones que pasaron por el polarizador  $|V\rangle$  del rotulador y en ese sentido, lo que se observa en la pantalla son los fotones que pasaron por el lado izquierdo del alambre. Lo mismo sucede para el estado  $|H\rangle$ .

En general, los únicos estados posibles del analizador son  $|H'\rangle$  y  $|V'\rangle$ , los cuales se representan en términos de  $|H\rangle$  y de  $|V\rangle$  rotados un ángulo  $\beta$  con respecto al eje de polarización del analizador:

$$|H'\rangle = \cos \beta |H\rangle + \sin \beta |V\rangle \quad (18)$$

$$|V'\rangle = -\sin \beta |H\rangle + \cos \beta |V\rangle \quad (19)$$

Entonces, si asumimos que el fotón pasó por la izquierda del alambre, es decir que se encuentra en el estado  $|V\rangle$ , la probabilidad de que llegue a la pantalla después de atravesar el analizador está dada por:

$$P_V = |\langle V|V'\rangle|^2 = \cos^2 \beta \quad (20)$$

El mismo razonamiento se puede usar al asumir que el foton paso por el lado derecho del alambre, es decir que se encuentre en el estado  $|H\rangle$ .

$$P_H = |\langle H|H'\rangle|^2 = \cos^2 \beta \quad (21)$$

Por lo tanto se puede observar claramente que la probabilidad de que un fotón sea detectado en la pantalla, depende determinadamente del ángulo que forma el analizador con el polarizador del rotulador por el cual se asumió que pasó el fotón.

Entonces la probabilidad total de que el fotón que sale del laser llegue a la pantalla polarizado verticalmente u horizontalmente es respectivamente:

$$P_{totalV} = \sin^2 \theta \cos^2 \beta \quad (22)$$

$$P_{totalH} = \cos^2 \theta \cos^2 \beta \quad (23)$$

Nótese que si  $\beta = 0$ , es decir que si el ángulo que forma el polarizador del rotulador por el cual se asumió que pasó el fotón con respecto al analizador es cero, la probabilidad será máxima, mientras que si  $\beta = \Pi/2$ , la probabilidad de que llegue a la pantalla es nula.

Es esta la razón por la cual se desaparecen los rayos de un lado o del otro, dependiendo del ángulo  $\beta$ .

Esto indica que el analizador filtra todos los posibles estados (entendidos como combinaciones lineales de los estados propios del sistema) en dos grupos, derecha e izquierda. Pero es también posible filtrar la información de los caminos tomados por cada uno de los fotones y obtener en la pantalla nuevamente un patrón de interferencia (Figura 9).

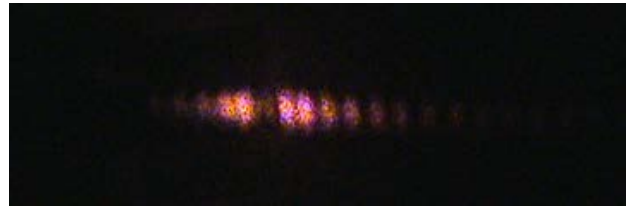


Figura 9: Borrador cuántico. Por medio de un analizador a  $45^\circ$  con respecto a la horizontal, se borra el camino tomado por los fotones, recuperando el patrón de interferencia.

Hasta el momento se ha considerado los dos polarizadores del rotulador por separado, pero en

realidad, todo el tiempo se sobrelapan más y más hasta alcanzar la pantalla. Por lo tanto al colocar el analizador a  $45^\circ$  con respecto a la horizontal, las dos partes de la onda (vertical y horizontal) se encontrarán coherentemente y producirán el patrón de interferencia que se muestra en la figura 9.

En este caso la probabilidad de obtener fotones de la derecha y de la izquierda es igual, es decir que hay 50% de probabilidad que pasen por el polarizador de la izquierda y 50% que lo hagan por el polarizador de la izquierda.

Este patrón de interferencia borra la información de distinguibilidad de los fotones, es decir que no se puede determinar que fotones pasaron por cual polarizador.

## Conclusiones

Este experimento se analiza en su mayoría en forma clásica, porque funciona igual que el experimento de la doble rendija de Young, a diferencia que el patrón observado, no se produce por interferencia sino por difracción, la cual fue trabajada como interferencia múltiple. Pero esto no quiere decir que no funcione bajo el régimen cuántico, pues como se mostró matemáticamente es consistente con lo observado de manera experimental.

En general, es imposible observar el patrón de interferencia y saber al mismo tiempo por cual rendija pasó el fotón. Por lo tanto, para resolver esta paradoja es necesario renunciar a la idea que el fotón pasa inevitablemente por una de las rendijas. Entonces, podríamos considerar que el fotón pasa por los dos caminos simultáneamente. Esta idea discrepa totalmente con los conceptos básicos de la física clásica, especialmente en el caso de la trayectoria de una partícula [6]. Pero es importante mencionar que en el mundo clásico, cuando la información sobre el camino por el cual tomó una partícula es accesible, se puede saber con seguridad que la partícula tomó por un lado o por el otro, aun si no se observa el camino tomado. Pero en el mundo cuántico, lo que

se haga para acceder a la información parece influir drásticamente en los resultados obtenidos.

Cabe notar como el uso del analizador puede producir tanto la ganancia de información al permitir la medición del camino por el cual pasan cada uno de los fotones, haciendo distinguible un grupo del otro; y la pérdida de la misma al variar el ángulo, de tal forma que los fotones se hagan indistinguibles y aparezca de nuevo el patrón de interferencia, que como se puede observar se recupera totalmente cuando el ángulo del eje de transmisión del analizador es  $45^\circ$  con respecto a cada uno de los ejes de transmisión de los polarizadores.

Al obtener la información, y perder el patrón de la interferencia, se esperaría que la intensidad de luz fuese igual a cada lado del alambre, cosa que no ocurre, pues la opacidad de cada uno de los polarizadores es distinto, produciendo una intensidad diferente a la izquierda y derecha de la pantalla. Finalmente, el resultado de colocar el analizador a  $45^\circ$  con respecto a la horizontal, puede interpretarse como si el fotón hubiese pasado por los dos caminos simultáneamente, borrando la información del camino obtenida anteriormente.

## Referencias

- [1] <http://sciam.com/article.cfm?articleID=EC067DCB-E7F2-99DF-328FD62F416B5E21>
- [2] <http://blueox.uoregon.edu/karen/astro123/images/interference.gif>
- [3] Hecht. Eugene, Óptica, Tercera Edición Addison Wisley. Capitulo 10.
- [4] Tipler. Paul A., Physics for scientist and engineers, 4th edition. Freeman and Company
- [5] <http://sciam.com/article.cfm?articleID=DD42C13E-E7F2-99DF-32C4CEB1BF9FE7E3>

[6] The Quantum eraser. Quantum mechanics, Physics P371, Spring 2005.

[7] <http://www.personal.us.es/jcordero/LUZ/teorias.htm>