



INTERFERENCIA BIFOTÓNICA EN UN DIVISOR DE HACES
ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

Adriano Ibarra – Durán
SERLAB S.A. (Servicios de Laboratorio S.A.)
e-mail:adrian_ibarra@hotmail.com

RESUMEN

Revisamos como la interferencia tipo HOM permitió explorar una nueva entidad física: el Bifotón. Este Bifotón es producto directo de la Conversión Paramétrica Baja (PDC) y su existencia constituye otra evidencia del “enlace cuántico”. Dicho enlace, en términos de energía y momentum lineal, además de sus polarizaciones permite obtener los cuatro estados de Bell. La misma interferencia HOM sirve para hacer mediciones de los Estados de Bell (BSM) y permite distinguir uno de éstos Estados. Esta característica le brinda una gran importancia en el desarrollo de los nuevos campos de aplicación de la mecánica cuántica.

PALABRAS CLAVES

Interferencia, Interferencia HOM, Bifotón, Divisor de Haces.

ABSTRACT

We review HOM interference and explore a new physical entity: The Two-Photon or Biphoton. This Two-Photon is product of Parametric Down-Conversion (PDC) and its existence is a new evidence of quantum entanglement. This entanglement, on energy and momentum, besides on polarization allow us to produce any of the four Bell's states [ref 12]. Finally, the HOM interference can be used to develop Bell's State Measurements (BSM) and distinguish one of Bell's States [ref 5]; this is a very important feature to use it in new fields of applications of quantum mechanics.

KEYWORDS

Interferente, HOM Interferente, Biphoton, Beam splitter, Two-photon.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de interferencia es la esencia del peculiar comportamiento de los sistemas mecánico-cuánticos. Basta recordar el experimento de la doble rendija de Young, aplicado a fotones y/o electrones, el cual revela efectos cuánticos producto de la interferencia. (Feynman 1965, Hetch 1997). Aquí, revisamos la “superposición” de dos fotones que alcanzan un divisor de haces, analizando algunos experimentos relacionados. Este tipo de “superposición” es fundamental en interferómetros y en campos tales como computación cuántica, la criptografía cuántica y la teleportación cuántica (Jennewein et al., 1999, Bennett et al., 1993, Bouwmeester et al., 1998).

EL DIVISOR DE HACES DE DIRAC

El Divisor de Haces (DH) puede consistir en un sencillo espejo semiplatado o en uno, mas elaborado, que genere haces polarizados (Hetch 1997). En cualquier caso, este elemento permite dividir un haz de luz en dos, con direcciones diferentes. En la Figura 1 vemos un DH del tipo 50/50. Este tipo de DH permite que la mitad de los fotones que componen el haz sean transmitidos, y la otra mitad serán reflejados. Al recombinar los dos haces componentes, se origina un patrón de interferencia, como el caso de los interferómetros. Podría pensarse, entonces, que algunos fotones se duplican (superposición constructiva) y otros se aniquilan (superposición destructiva), pero ¿Qué pasa con la conservación de energía? Los fotones son paquetes discretos de energía radiante que no pueden sólo desaparecer.

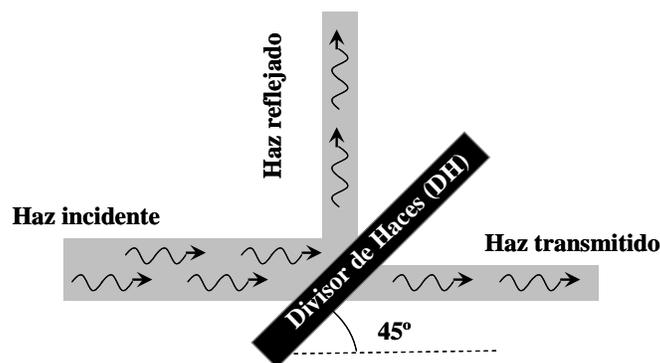


Fig. 1. Funcionamiento de un divisor de haces del tipo 50/50, desde un punto de vista semiclassical.

Es aquí cuando P. Dirac nos ofrece una interpretación alternativa: Cuando se dice que un DH es 50/50, lo que en realidad significa es que cada fotón tiene un 50% de probabilidad de ser transmitido y 50% de ser reflejado. La función de onda, asociada a cada fotón, viaja parcialmente en cada componente del haz para luego realizar la interferencia. Obsérvese que hablamos de la función de onda que se divide e interfiere, no del fotón.

De esta forma, Dirac establece el principio que “cada fotón, entonces, interfiere sólo consigo mismo. La interferencia entre dos diferentes fotones nunca ocurre”.

INTERFERENCIA TIPO SA/HOM

Entre 1987 y 1988 dos equipos independientes: Y.H Shih y C.O Alley (SA), y por otro lado, C.K. Hong, Z.Y. Ou y L. Mandel (HOM), reportaron un fenómeno que llamó la atención de los investigadores (Branning 2000) A continuación describimos tal fenómeno con la ayuda de la Figura 2: Un haz de luz incidente (láser ultravioleta), llamada luz de *bombeo*, atraviesa un cristal no lineal de Beta-Borato de Bario (BBO) y emergen de éste dos haces que llamamos “ordinario” y “extraordinario”¹. Ambos componentes de la luz inicial cumplen con las condiciones de conservación de energía y momento ($\omega_B = \omega_S + \omega_O$ y $\vec{k}_B = \vec{k}_S + \vec{k}_O$).

El proceso completo recibe el nombre de Conversión Paramétrica Baja (PDC, por sus siglas en inglés) y puede tener dos variantes según si los haces emergentes poseen igual polarización (Tipo-I) o si poseen polarizaciones perpendiculares (Tipo-II) (Kurtsiefer et al. 2001).

Siguiendo con el diagrama, los fotones que conforman los haces emergentes (F1 y F2) son enviados a dos espejos que los redirigen al DH. De allí, los fotones transmitidos/reflejados son registrados por los detectores D1 y D2. Note que el recorrido de F2 puede alterarse cambiando la posición relativa del espejo E2. De esta forma, se incluye un retraso relativo (Δ) entre la llegada de los fotones al DH.

¹ Estos rayos también reciben los nombres de “señal” y “ocioso”.

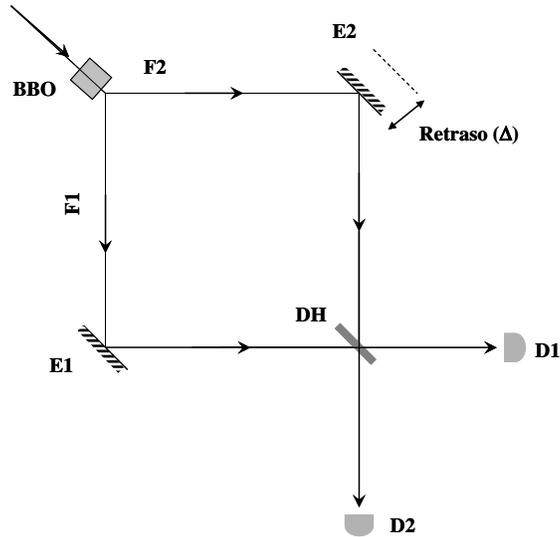


Fig. 2. Esquema del interferómetro tipo HOM.

En esta prueba se analiza el número de coincidencias (N_c) en ambos detectores, en función de retraso relativo, Δ . Llamamos coincidencia al evento en que ambos detectores registran un fotón cada uno, aunque no de forma simultánea. En la Figura 3 tenemos un diagrama representativo del resultado de tal experiencia.

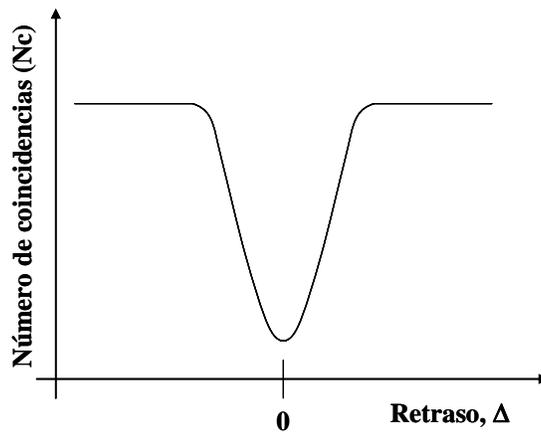


Fig. 3. Forma representativa de los resultados experimentales del interferómetro HOM.

Observe que el número de coincidencias cae rápidamente cuando el retraso entre fotones se acerca a cero, esto es, cuando los caminos

ópticos de ambos fotones son iguales. Este es el efecto SA/HOM ó efecto HOM (*Hong-Ou-Mandel*).

Un análisis de la situación indica que los fotones F1 y F2, serán registrados en los detectores si ocurre una doble reflexión (evento r-r) o una doble transmisión (evento t-t) en el DH. La Figura 4 muestra los eventos r-r y t-t, en un diagrama tiempo-espacio, donde la línea vertical gris representa al DH y los colores se utilizan para distinguir la trayectoria de ambos fotones.

El evento r-r se distingue de uno t-t por la secuencia en que activan los detectores. En la figura vemos que la secuencia D1-D2 indica un evento r-r, mientras que la inversa (D2-D1) indica un evento t-t.

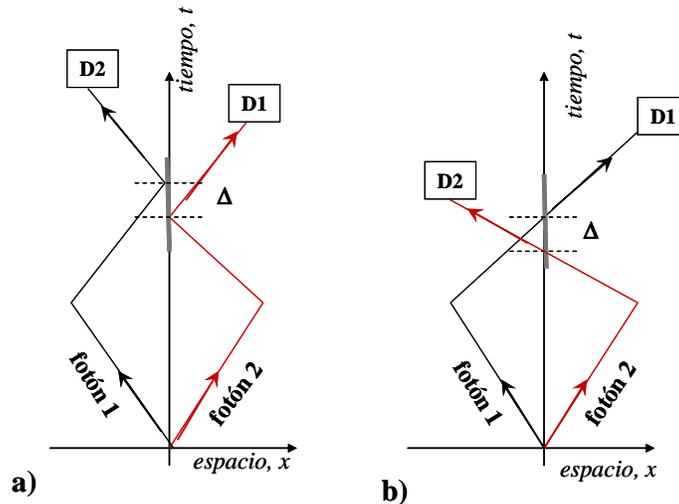


Fig. 4. Diagramas tipo Feynmann de a) un evento r-r y b) un evento t-t. Ambos producen coincidencia en los detectores D1 y D2.

La Figura 3 muestra que mientras $\Delta \neq 0$ el número de coincidencias permanece casi constante. Sin embargo, cuando no existe diferencia en las trayectorias de ambos fotones ($\Delta = 0$), no es posible distinguir un evento r-r de uno t-t. (Fig. 5). Se registran detecciones simultáneas en D1 y D2. El hecho de que las coincidencias caigan a cero en este momento se interpreta como una superposición o interferencia destructiva que ocurre en el DH (Pitman et al., 1996, Braunstein et al., 1995).

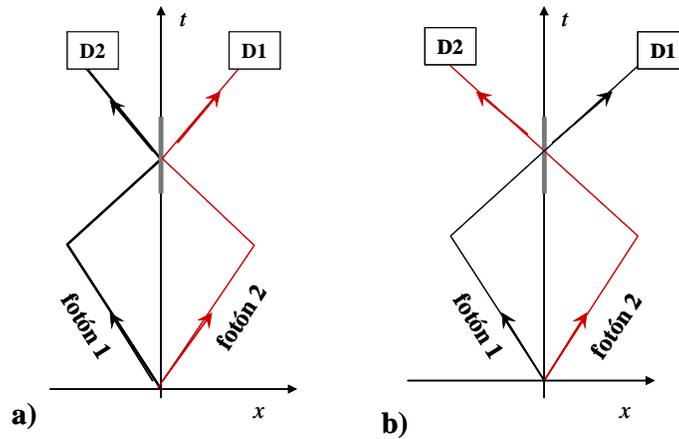


Fig. 5. Diagrama de Feymann de a) un evento r-r y b) un evento t-t, cuando los fotones siguen caminos ópticos idénticos ($\Delta=0$).

INTERFERENCIA BI-FOTONICA

Una primera interpretación del análisis anterior puede conducirnos a la idea de que estamos frente a una interferencia de dos fotones, que alcanzan un mismo punto de manera simultánea. Tal como las ondas en una cubeta.

Ante una perspectiva como esta, T.B. Pittman et al. (1996), además de otros investigadores, proponen y desarrollan una serie de experimentos tendientes a dilucidar la verdadera naturaleza de este fenómeno.

A continuación, analizamos el arreglo experimental utilizado por Y-H Kim, mostrado en la Figura 6. Aquí, la luz de bombeo utilizada, consiste en pulsos láser ultra-rápidos de unos 120 fs de duración (Kim 2003 a y b). La PDC tipo II ocurre en el cristal de BBO de donde emergen los haces que llamamos extraordinario (rayo-e) y ordinario (rayo-o).

En este tipo de conversión paramétrica los dos haces resultantes tienen forma de conos intersectados. Los fotones que conforman el rayo-e poseen polarización vertical ($|V_e\rangle$), mientras que los fotones del rayo-o poseen polarización horizontal ($|H_o\rangle$). En la Figura 7 se muestran éstos rayos.

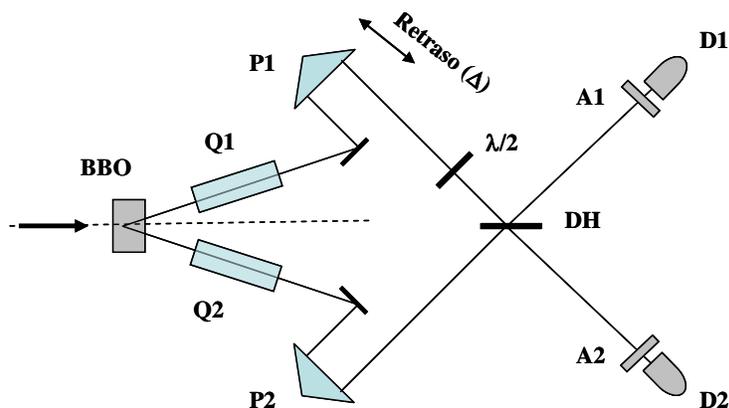


Fig. 6. Arreglo experimental empleado por Y-H Kim, para el estudio de la “interferencia tipo HOM” (Preprint; arXiv:quant-ph/0304030).

Los puntos donde ambos rayos se interceptan se generan fotones con polarización no definida, pero que tomados en pares poseen polarizaciones ortogonales. Estos pares de fotones son los utilizados en esta experiencia. La polarización de un par de fotones sería, entonces, $|H_o\rangle_1|V_e\rangle_2$ o $|V_e\rangle_1|H_o\rangle_2$. Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a los caminos ópticos seguidos por los fotones.

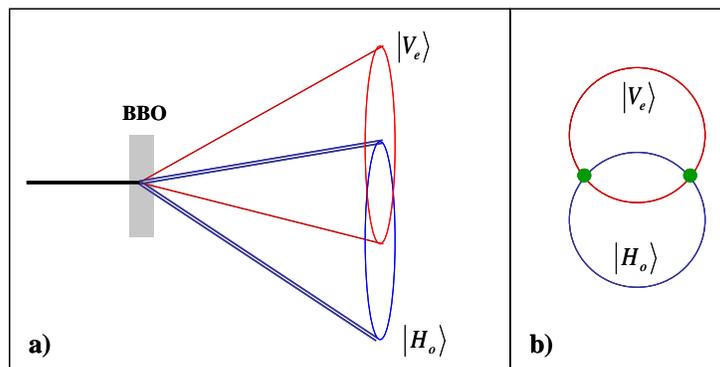


Fig. 7. Resultado de la PDC tipo II donde los haces cónicos resultantes poseen polarizaciones distintas, no así la intersección de dichos conos.

Una vez generados, los fotones atraviesan dos piezas idénticas de cuarzo (Q1 y Q2) con ejes ópticos verticales las que, añaden un

desfase temporal (τ) entre ellos². El desfase introducido es del orden de 630 fs.

Antes de llegar al DH, y después de reflejarse en los prismas P1 y P2, se cambia la polarización de uno de los fotones con una lámina de media onda ($\lambda/2$) orientada 45°.

Los detectores D1 y D2 registrarán los fotones reflejados/transmitidos por el DH. Frente a dichos detectores se colocan dos analizadores (polarizadores), llamados A1 y A2.

Al igual que el experimento anterior, se hace un estudio del número de coincidencias en función del retraso (Δ) introducido al desplazar el prisma P1. Notamos que, aun cuando las trayectorias de los fotones sean iguales ($\Delta=0$), existirá una diferencia de tiempo τ en su llegada al DH.

Sólo los eventos de una doble reflexión (r-r) o una doble transmisión (t-t) darán como resultado una coincidencia.

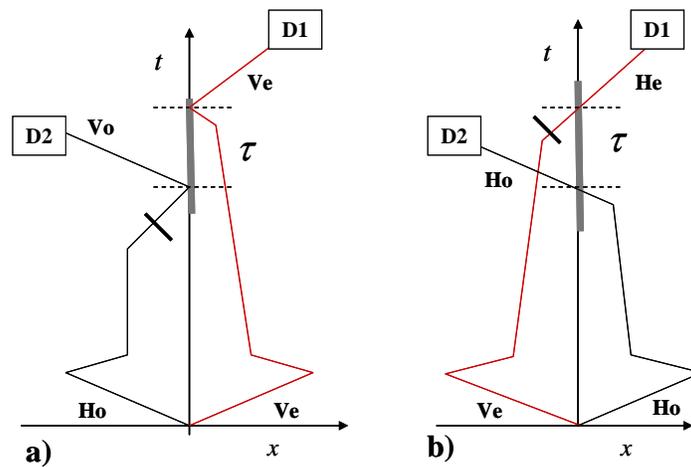


Fig. 8. Posibles trayectorias de los fotones que llevan a una coincidencia en a) un evento r-r y b) un evento t-t.

Ya que la lámina de media onda cambia el estado de polarización $|V\rangle \leftrightarrow |H\rangle$, solo existen dos posibilidades para lograr la

² Para el cuarzo el “eje lento” coincide con el eje óptico, mientras su “eje rápido” es perpendicular a éste.

coincidencia. Las alternativas, cuando $\Delta=0$, se muestran esquemáticamente en la Figura 8.

En los diagramas se nota el retraso de un fotón respecto al otro, y aunque la secuencia de detección es la misma para ambos, podríamos distinguir un evento t-t de uno r-r por las polarizaciones de los fotones detectados.

Para “borrar” la distinguibilidad de los fotones se colocaron los analizadores A1/A2 con orientaciones $45^\circ/45^\circ$, manteniendo así la fase entre ambas señales. También se hizo con polarizaciones $45^\circ/-45^\circ$. Una representación de los resultados experimentales se muestra en la Figura 9 (Pittman et al., 1996).

La polarización de A1 y A2 nos permite pasar de un patrón de interferencia destructiva, visto en la experiencia original de HOM, a una constructiva. Note que a pesar de que los fotones no llegan simultáneamente al DH, aun así se obtiene un patrón de interferencia.

Un punto crítico de esta experiencia, es permitir que ambos fotones lleguen simultáneamente al DH y determinar si ocurre la esperada interferencia.

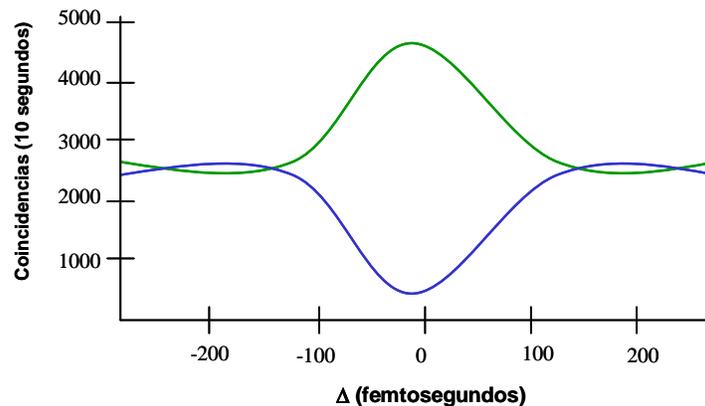


Fig. 9. Representación experimental de la interferencia de dos fotones. La línea azul corresponde a las orientaciones $45^\circ/45^\circ$, mientras que la línea verde corresponde a $45^\circ/-45^\circ$. Los efectos de interferencia destructiva y constructiva son evidentes. (Preprint; arXiv:quant-ph/0304030).

Para esto, se colocan $Q1=V$ y $Q2=H$, de tal forma que ambos fotones posean el mismo retardo τ .

Las alternativas para el registro de una coincidencia, para cuando $\Delta=0$, se muestran en la Figura 10. Observe como los detectores se disparan al mismo tiempo y no se distingue un proceso del otro. Adicional a esto, las polarizaciones son idénticas y los analizadores tienen orientaciones $A1/A2 = 45^\circ/45^\circ$.

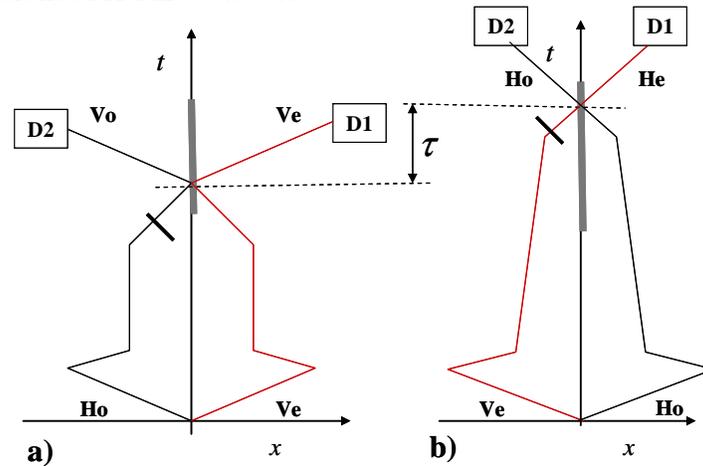


Fig.10. Posibilidades para una coincidencia para los casos de a) una doble reflexión y b) una doble transmisión. Note que no existe un desfase entre los fotones cuando alcanzan el DH.

Tal como deseábamos, ambos fotones llegan al DH al mismo tiempo y solo el retraso introducido (Δ) hace que sean distinguibles (al igual que en las Figs. 4 y 5).

Aunque ambos procesos parecen ser indistinguibles, no lo son del todo, puesto que el intervalo de tiempo para un evento r-r es menor que para uno t-t. En este caso, El número de coincidencias permaneció constante, y no se apreció ningún tipo de interferencia.

ANÁLISIS

Lo que muestran estas y otras experiencias es una nueva faceta de la interferencia cuántica. Vemos como fotones que llegan en diferentes intervalos de tiempo al DH, producen un patrón de interferencia, mientras que llegados de manera simultánea, no lo hacen.

Según lo expresó R. Feynman, es la capacidad de distinguir los procesos que tienen lugar lo que permite observar o no, el patrón de interferencia. Así, mientras no conozcamos cual de los eventos ocurren (t-t o r-r), observaremos una interferencia o superposición de ambas posibilidades (Feynman 1965). Lo que estas experiencias revelan, es el “redescubrimiento” de un viejo pero importante principio, con nuevas implicaciones.

Si las palabras de Dirac son ciertas, respecto a que “la interferencia de dos fotones nunca ocurre”, ¿Que tipo de fenómeno estamos observando?. Parece ser, entonces, que los fotones producidos por la PDC no son en si mismos, fotones individuales e independientes, sino que forman parte de una entidad física única, de las que dichos fotones forman parte. Esta entidad, que podríamos denominar el “Bifotón”, funciona como un sistema unitario y conserva este carácter, a pesar de los distintos caminos que siguen sus componentes.

Esto es lo que se llama efecto no-local; algún tipo de correlación que mantiene “enlazados” ambos componentes.

UNA APLICACIÓN: MEDICIÓN DE LOS ESTADOS DE BELL (BSM)

El fenómeno del “enlace cuántico” (entanglement en inglés) nació con la Mecánica Cuántica y fue combatido por Einstein y otros científicos que veían en sus consecuencias, violaciones a la relatividad y al principio de Localidad³.

El caso más sencillo de “enlace” esta asociado con el spin de dos partículas. Supongamos que las dos partículas se generan con spines opuestos ($-1/2$ y $+1/2$) y dichas partículas están enlazadas. Antes de cualquier medición, el spin de una partícula no esta definido, pero cuando se mide, sus posibilidades colapsan a sólo una, es decir $-1/2$ o $+1/2$. De manera inmediata la otra partícula “sabe” que su spin debe ser contrario a la primera, sin importar si ambos están separados por varios kilómetros (Nielsen 2003, Strekalov 1998). Además, si cambiamos la polarización de una de ellas, la otra, instantáneamente, reconoce el cambio y altera su spin, para no violar las leyes de

³ Este principio establece que objetos lo suficientemente lejanos no se afectan de forma directa unos a otros.

conservación. Einstein se refirió a este fenómeno como un “misterioso efecto a distancia”. Hoy en día, los experimentos han demostrado la realidad del “enlace” o “efecto EPR” (Aspect 1999).

Como hemos visto, el bifotón, producido por PDC tiene las características de un sistema enlazado, en lo referente a sus polarizaciones, además de su energía y momentum lineal. Considerando las polarizaciones de la intersección de los rayos ordinario y extraordinario, podemos escribir el estado de una pareja de fotones como

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|H\rangle_1 |V\rangle_2 + e^{-i\alpha} |V\rangle_2 |H\rangle_1 \right)$$

Donde $|H\rangle_1 |V\rangle_2$ y $|H\rangle_2 |V\rangle_1$ representan los posibles estados de polarización del bifotón. El factor $e^{-i\alpha}$, contiene el desfase α entre estas dos posibilidades, debido a la birrefringencia del cristal de BBO. El factor $1/\sqrt{2}$ sirve como constante de normalización.

Wiat et al. (1995), mostraron que este estado bifotónico puede manipularse hasta obtener los estados con polarizaciones enlazadas, que se pueden escribir como

$$\begin{aligned} \Psi^\pm &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|H\rangle_1 |V\rangle_2 \pm |V\rangle_2 |H\rangle_1 \right) \\ \Phi^\pm &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|H\rangle_1 |H\rangle_2 \pm |V\rangle_1 |V\rangle_2 \right) \end{aligned}$$

Estos son los llamados Estados de Bell⁴. Las dos primeras funciones (Ψ^\pm) representan la función simétrica y antisimétrica de un estado en que los fotones poseen polarizaciones ortogonales $|H\rangle_1 |V\rangle_2$ o $|H\rangle_2 |V\rangle_1$, mientras que las dos funciones restantes describen la situación para fotones con igual polarización.

Braunstein S. & A. Mann (1995) fueron los primeros en proponer la interferencia tipo HOM como un mecanismo para determinar si un bifotón se encuentra en uno de los estados de Bell. Ellos demuestran, entonces, que la coincidencia de los detectores D1 y D2, del

⁴ El estado de Bell es un estado cuántico de máximo enlace entre dos partículas. Éstos representan la forma más simple de enlace cuántico y la más utilizada en la Informática Cuántica.

interferómetro HOM sólo ocurre cuando el estado de polarización del bifotón, al abandonar el DH, es descrito por una función antisimétrica de polarizaciones ortogonales. Esto es

$$\Psi^- = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle_1 |V\rangle_2 - |V\rangle_2 |H\rangle_1)$$

De este hecho, se sigue toda una nueva interpretación a los resultados experimentales que hemos presentado: La anulación de las coincidencias, entonces, nos indica la superposición destructiva de las dos posibles polarizaciones del bifotón ($|H\rangle_1 |V\rangle_2$ o $|H\rangle_2 |V\rangle_1$). Dichas polarizaciones son indistinguibles al momento que se abandona el DH, por lo que observamos el patrón de interferencia.

El hecho de que la interferencia tipo HOM sirva para hacer mediciones de los Estados de Bell (BSM, siglas en inglés)⁵ es lo que da importancia al análisis aquí mostrado: Aunque el estado individual de los fotones no pueda conocerse con precisión (debido al principio de incertidumbre), la capacidad de medir el “estado enlazado” del bifotón, nos permite, en cierto sentido, “vencer” el principio de incertidumbre de Heisenberg y prepara el camino para la revolución cuántica actual.

CONCLUSIÓN

La interferencia tipo HOM nos ha permitido “redescubrir” la esencia de la interferencia cuántica: La indistinguibilidad de los procesos que se puedan dar en determinada interacción. Aunque no sea algo nuevo, sus implicaciones actuales si lo son.

Confirmamos lo expresado por Dirac en cuanto a que “la interferencia de dos fotones nunca ocurre”, y al mismo tiempo, reconocemos la existencia de la entidad física llamada bifotón, el cual posee características no-locales.

Su uso como BSM, hace de la interferencia tipo HOM, una herramienta potente en el desarrollo de los nuevos campos que surgen del dominio de la Mecánica Cuántica.

⁵ Es una medida mecánico-cuántica conjunta de dos partículas enlazadas, para determinar en cual de los cuatro estado de Bell se encuentran.

REFERENCIAS

- Aspect, A. 1999. *Bell's Inequality test: more ideal than ever*. *Nature*, Vol.398, 189.
- Bennett, C., G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres & W. Wothers. 1993. *Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channel*. *Phys Rev. Lett.* Vol. 70, 1895.
- Bouwmeester, D., Pan, J-W. Mattle, K. Eibl, M. Weinfurter & H. Zeilinger, A. 1998. *Experimental quantum teleportation*. *Nature* Vol 390, 575.
- Branning, D. & A. Migdall. 2000. *Simultaneous measurement of group and phase delay between two photons*. *Phys. Rev A.* Vol 62, 063808.
- Braunstein, S. & A. Mann. 1995. *Measurement of the Bell Operator and Quantum Teleportation*. *Phys. Rev A.* Vol 51, R1727.
- Feynman, R., R. Leighton & M. Sands. 1965. *Lectures on Physics, Vol III*. Addison-Wesley. E.U.A.
- Hecht, E. & A. Zajac. Óptica. 1977. Fondo Educativo Interamericano S.A. E.U.A.
- Jennewein, T., C. Simon, G. Weihs, H. Weinfurter & A. Zeilinger, 1999. *Quantum Cryptography with Entangled Photons*. Preprint; arXiv:quant-ph/9912117
- Kim, Y-H. & W. Grice. 2003. *Quantum interference with distinguishable photons through indistinguishable pathways*. Preprint; arXiv: quant-ph/0304086.
- Kim, Yoon-Ho. 2003. *Two-Photon interference without bunching two photons*. Preprint; arXiv:quant-ph/0304030.
- Kurtsiefer, C., M. Oberparleiter & H. Weinfurter. 2001. *Generation of correlated photon pairs in type-II parametric down conversion – revisited*. *J. Mod. Opt.* Vol. 48, No. 13.

Kwiat, P., K. Mattle, H. Weinfurter & A. Zeilinger. 1995. *New High – Intensity source of polarization-entangled photon pairs*. Phys. Rev. Lett. Vol 75, 4337.

Nielsen, M.A. 2003. *Complex Quantum World*. Sci. Am., Vol 13 No.1 (Edición especial: the edge of physics).

Pittman, T., D. Strekalov, A. Migdall, M. Rubin, A. Sergienko & Y. Shih. 1996. *Can Two-Photon interference be considered the interference of two photons?* Phys. Rev. Lett. Vol 77, 1917.

Strekalov, D., Y-H. Kim & Y. Shih. 1998. *Experimental Study of A Photon as A Subsystem of An Entangled Two-Photon State*. Preprint; arXiv:quant-ph/9811060.

Recibido febrero de 2005, aceptado enero de 2006.