

# TEMAS DE FISICA

---

## ACERCA DEL FOTON

DAMIÁN CANALS FRAU

22 rue d'Athènes. F 75009 - París - Francia.  
Traducción de Mercedes Vendramini

---

### RESUMEN

*Todos los intentos por construir un modelo del fotón, basados en nuestra visión del mundo macroscópico, han fallado hasta ahora, a pesar de 80 años de extenuantes esfuerzos. Desde este fracaso podríamos concluir que tal "cuadro mental" es inalcanzable y que debemos tomar al fotón tal como aparece en nuestros experimentos físicos: como un concepto nuevo, quizá contraintuitivo, sin agregar nuestras fantasías acerca de cómo debería ser la naturaleza para resultar fácilmente comprensible para nosotros. Nos hemos acostumbrados a la idea, difícil de aceptar alguna vez, de que el concepto de "éter" no es necesario para hacer investigación en Física. Y ahora debemos acostumbrarnos a la idea de que ningún "cuadro compuesto" macroscópico del fotón es posible en los términos actuales. Además yo presento otra forma de expresar la filosofía de Copenhagen "uno no puede conocer lo que no se puede medir". Además, llamo la atención hacia otra forma de considerar las relaciones de incerteza de Heisenberg, una forma que hace posible entender por qué la interacción entre radiación y materia es una interacción cuántica.*

**Palabras claves:** fotón, dualidad onda partícula, el fotón como un concepto irreducible, filosofía de Copenhagen, relaciones de incerteza de Heisenberg.

*... Si nuestra concepción usual, que es sólo la concepción que hemos tomado el hábito de usar, no es corroborada por la naturaleza debemos liberarnos de ese hábito.(1)*

### 1. Introducción

La teoría de la luz es una situación peculiar: somos capaces de predecir el comportamiento de la luz prácticamente en todas las circunstancias, sin embargo todavía no somos capaces de proveer una descripción de su composición conceptualmente satisfactoria.

Las diferencias conceptuales parten del hecho de que la luz se comporta como una onda en ciertas circunstancias y como una partícula (una partícula no familiar, sin masa en reposo) en otras ciertas circunstancias. Ambas formas de visualizar el comportamiento básico de la luz llevan en sí mismas a representaciones macroscópicas simples que, desafortunadamente, son incompatibles. En completa desesperación los físicos han inventado lo que sería considerado como la mera vestidura de una ventana: el concepto dual de una onda-partícula, esto es, un "híbrido" de una onda y una partícula, que tiene a veces las propiedades de una de ellas y otras veces las propiedades de la otra.

Muchos físicos (2) usan la palabra "fotón" para designar el objeto que se comporta de esta forma, aún si bien el concepto originalmente fue aplicado al aspecto partícula de la luz. Este desplazamiento en el significado ha causado muchos malentendidos.

El propósito del presente estudio es sugerir que el fotón debe considerarse como un

nuevo *concepto* y no simplemente como una onda y una partícula y, también, que a pesar de sus propiedades aparentemente inconsistentes, es verdaderamente un objeto físico (aunque quizás no intuitivo) con las propiedades experimentales que se ha observado que tiene.

No es mi propósito aquí propiciar una "filosofía" negativa, de la clase que dice que, dado que no hemos sido capaces de construir un modelo de fotón macroscópica e intuitivamente aceptable nos limitaremos simplemente a hacer cálculos. Por el contrario; en lugar de hablar de un "collage" de objetos irreconciliables, nos acostumbremos a la idea de que estamos tratando con un concepto nuevo y que el objeto que tiene estas propiedades duales de una onda-partícula es, por derecho propio, un objeto físico genuino y no un mero agregado de objetos físicos.

Varios modelos (3)-(5) del fotón han sido publicados recientemente, dos de los cuales siguen las líneas sugeridas aquí. Estos modelos son distintos unos de otros, pero tienen características comunes. Las diferencias entre los modelos hacen muy posible que ninguno de los tres será aceptado ecuanímanamente por los físicos, al menos no sin un estudio adicional. Además ninguno de los tres toma en consideración la longitud de coherencia.

En lo que sigue comenzaré repitiendo lo que todo el mundo conoce. Aquí, mi propósito será establecer ciertas dificultades relacionadas con nuestro conocimiento corriente de la luz. Luego seguiré mi propio análisis, es decir, que nuestra forma de concebir la luz debe ser cambiada sobre la base, por supuesto, de nuestro conocimiento experimental.

Finalmente, y especialmente desde que en uno de los estudios referidos anteriormente (5), se cita la filosofía de Copenhagen: "uno no puede conocer lo que no puede medir", yo propongo otra forma de expresar esta filosofía: Un concepto teórico no pue-

de ser considerado como un concepto físico hasta que su existencia física haya sido establecida por una medición.

Además, dirijo la atención a otra forma de considerar las relaciones de incerteza de Heisenberg, una que hace posible entender, por qué la interacción entre radiación y materia es una interacción cuántica.

## 2. Algunas paradojas acerca de los fotones.

En la literatura física, el concepto "fotón" tiene varios significados diferentes. A menudo la palabra se usa meramente como un sinónimo de luz. Otras veces un fotón es considerado como una "partícula de luz", y un haz de luz es considerado como una "lluvia de fotones".

Es una práctica común considerar la onda por un lado y el fotón por el otro; -y para contrastar la onda con el fotón- llamar fotón al aspecto de la luz como partícula. En otras palabras, campo y partículas son considerados más o menos como entidades separadas. Ver por ejemplo el modelo de radiación de Mc Lennan (3) "Tal radiación parece involucrar dos mecanismos diferentes: (1) un campo de ondas, viajero, transversal en el cual las oscilaciones son trenes de ondas continuos, y (2) una propiedad de las partículas llamada fotón. El parámetro físico común que conecta los dos mecanismos es la frecuencia de oscilación" (p.51).

Pero para muchos físicos (2) el fotón no es ni una partícula ni una onda. Este concepto se refiere a algo que en algunas circunstancias puede interpretarse como siendo una onda, y en otras circunstancias como siendo un cuanto de acción. Y la palabra fotón es el rótulo para referirse al objeto que se comporta de esa forma. Ver, por ejemplo el modelo de fotón de Deutsch (4): "Este modelo de fotón tiene ambas características: de onda y de partícula" (p.3).

Entonces, considerando esta definición: fo-

tones = objetos que tienen propiedades como de ondas, si consideramos su propagación en un medio transparente en la distribución espacial de energía y no en la energía misma (por ejemplo, interferencia, difracción, refracción, etc.); y tiene propiedades de partícula cuando recibe o transmite energía a los constituyentes de la materia. "Propiedades como de partícula" significa propiedades que uno puede considerar con la idea de una partícula en la mente, pero una "partícula" extraña, sin masa en reposo. De todos modos, muchas de estas propiedades tales como el efecto fotoeléctrico, pueden ser tratadas matemáticamente si uno supone que hay una onda que interactúa con átomos cuantizados, como en las teorías semiclásicas.

En 1916 Millikan (6) dijo, "Invertí 10 años de mi vida probando la ecuación de Einstein de 1905, y contrariamente a todas mis expectativas, fui obligado en 1915 a esperar su verificación experimental sin ambigüedades, a pesar de su falta de razonabilidad, dado que parecía violar todo lo que sabíamos sobre interferencia de la luz" (7). La ecuación de 1905 de Einstein es el certificado de nacimiento de el *Lichtenergiequanten*. (8) (La palabra fotón fue acuñada por el químico Lewis en 1916) (9).

La interferencia de la luz (o la superposición de ondas coherentes o la superposición coherente de fotones, o, con palabras de Dirac, (10) "la superposición de un fotón consigo mismo") es una redistribución espacial de la energía de un haz de luz: Si en ciertos lugares la densidad de energía es cero, o menor que el promedio, en otros lugares es mayor que el promedio. No es necesariamente correcto decir que donde la energía es cero no hay fotones; puede decirse también que en esos lugares el estado, (esto es, la fase) de los fotones es tal que resulta en un efecto cero en átomos sensibles a la radiación corriente.

En teoría cuántica el fotón es el portador de la interacción electromagnética entre par-

tículas cargadas y su propia anti-partícula. La teoría cuántica no se hace estas preguntas. Es una teoría heurística que siempre da el resultado correcto, dado que fue diseñada con ese propósito. En el caso del interferómetro, como en todos los casos análogos, la "receta" es la siguiente: Si la luz puede seguir dos o más caminos para ir de la entrada a la salida del interferómetro, uno puede sumar las amplitudes complejas correspondientes a los varios caminos. Cada camino es una "historia posible" para el fotón. Y el resultado final depende de (el cuadrado de los módulos de) la suma de todas las historias posibles, siempre que la diferencia en las longitudes ópticas de los diferentes caminos sea menor que la longitud de coherencia. Este procedimiento funciona siempre, pero no da ninguna clase de imagen visual del fotón.

La longitud de coherencia se define experimentalmente por la desaparición gradual de las franjas de interferencia cuando se aumenta la diferencia en el camino óptico en un interferómetro. Con ciertas fuentes de luz térmicas, esta longitud puede alcanzar 1 m, y el tiempo de coherencia puede ser tan largo como  $10^{-8}$ s. (11). Esto hace posible atribuir al fotón una longitud proporcional a la longitud de coherencia.

Por ser excitaciones del campo electromagnético, los fotones pertenecen al ámbito de la electrodinámica cuántica (QED). La electrodinámica cuántica provee esencialmente la cuantización de la interacción sin invocar al modelo corpuscular. Corrientemente QED es la única teoría que describe correctamente ciertos resultados experimentales en óptica cuántica, tales como el antiempaquetamiento del fotón y los estados "estrujados" del campo electromagnético, lo que aparentemente requiere la cuantización del campo. Es por ello más completa que las teorías semiclásicas y muy frecuentemente probó ser exitosa. Sin embargo esta situación no es enteramente satisfactoria: "Aún cuando hemos aprendido a manejar las divergencias de QED con arte sufi-

ciente como para extraer resultados finitos, plenos de significado, parece innegable que hay defectos fundamentales en la formulación básica de la presente teoría; una teoría formulada correctamente no debería requerir diseños ad hoc para obtener predicciones físicas" (12). Hay algunos desagradables infinitos flotando alrededor con los que uno tiene que argumentar para alejarlos ... Hay también sutiles diferencias asociadas con la invariancia en la medición que son importantes para un número de aplicaciones de óptica cuántica..." (13). La observación de Dirac continúa siendo actual: "Parece que algunas ideas físicas esencialmente nuevas, se necesitan aquí" (14). "Los fotones son más como coeficientes en una serie de Fourier -o incrementos a los coeficientes" (15). Esto coincide con una observación que cualquiera puede hacer: es suficiente "encerrar" una onda entre dos "paredes" para producir una resonancia. Esto significa por supuesto, números enteros y por lo tanto una "cuantificación". Y los coeficientes de Fourier, siendo integrales definidas de funciones oscilatorias, son por lo tanto oscilaciones acotadas en el "espacio".

Cada vez que se observa un fenómeno óptico la observación es realizada sobre la base del efecto fotoeléctrico (o un efecto análogo): la luz absorbida ioniza un átomo, o cambia a un electrón de su nivel de energía en el átomo, ya sea en la retina, o en una emulsión fotográfica, o sobre la superficie sensible de un fotodetector. En el lenguaje de la teoría cuántica, lo que siempre está involucrado es una aniquilación de fotones.

Los libros de texto también dicen que el "fotón" considerado como una partícula es útil para la absorción y emisión de la luz, pero, por el contrario, la propagación de la luz está perfectamente descrita por la teoría de ondas, o sea la teoría semiclásica de los fenómenos ópticos.

Las teorías semiclásicas describen los átomos como sistemas mecánicos cuánticos, y los campos que interactúan con los áto-

mos están representados como números o dentro del análisis mecánico cuántico. "En años recientes métodos semiclásicos han sido mostrados para describir exitosamente el efecto de mutación transitoria, ecos fotónicos, emisión estimulada, el efecto Compton" (16). "Y con éxito variable Bremsstrahlung, efecto Ramán, la ecuación de Klein-Nishima, polarización del vacío, el espectro de radiación de un cuerpo negro, resonancia de fluorescencia, operación laser, "bunching" de fotones. <sup>1</sup> (17)

En particular, el efecto fotoeléctrico, que jugó un rol especial en la génesis de la Lichtenenergiquanten de Einstein, (18), "puede ser explicado completamente, sin invocar los conceptos de cuantos de luz, iluminando átomos cuantizados con un campo electromagnético clásico" (18).

Recientemente, Kidd, Ardini y Anton, escribieron una breve investigación histórica sobre el desarrollo del concepto de fotón. (17). Los autores también clasifican en cuatro grupos las distintas formas de definir el fotón: fotón I (el modelo puramente corpuscular); fotón II (el modelo de singularidades de campo); fotón III (el modelo del paquete de ondas) y fotón IV (el modelo QED).<sup>2</sup> El modelo semiclásico es una buena aproximación al QED.

Para el común de la gente las peculiaridades del fotón son numerosas: podemos hablar de fotones sólo en tiempo pasado; de todos modos, nunca hemos encontrado el "cuerpo" de un fotón, solamente podemos decir: "aquí estuvieron los fotones" sobre la base de un cambio en la energía de la materia (por ejemplo nuestra retina). "Ver" a los fotones significa que ellos ya han desaparecido, y antes de "verlos" no sabíamos que ellos "existían". Además, los físicos describen a los fotones con fórmulas que les asignan una masa en reposo nula.

<sup>1</sup>"Empaquetamiento", sería la traducción más cercana. (N T)

<sup>2</sup>Quantum Electrodynamics (Electro Dinámica Cuántica)

También, los fotones intercambian energía con la materia a través de los cuantos de energía  $h\nu$ ), y es conceptualmente difícil incorporar una frecuencia en una teoría corpuscular.

A esto debe agregarse que las partículas elementales "normales", esto es, con masa en reposo  $\neq 0$ , también exhiben un comportamiento ondulatorio intrínseco, (9), que aparece en ciertas situaciones: electrones, neutrones, protones, por ejemplo, dan origen a figuras de difracción.

La radiación de baja energía producida por osciladores de radio-frecuencia (partículas cargadas eléctricamente, periódicamente aceleradas) es descripta adecuadamente por la teoría ondulatoria. La radiación de alta energía producida por transiciones cuánticas nucleares, atómicas, o moleculares exhiben tanto propiedades de partícula como de ondas.

Así los físicos hablan de la "dualidad" onda-partícula de los fotones. En un artículo que informa sobre experimentos de interferencia de un solo fotón, con fotones de una cascada atómica, Grangier, Roger, y Aspect (20) escriben: "Dos experimentos disparatados han sido así realizados, usando la misma fuente y los mismos esquemas de disparos para los detectores. Ellos ilustran la dualidad onda-partícula de la luz. Efectivamente si queremos usar conceptos o descripciones clásicas para interpretar estos experimentos, debemos usar un modelo de partícula para el primero, (los fotones no son partidos en un haz divisor", dado que violamos una desigualdad mantenida para todo modelo clásico. Por el contrario estamos obligados a usar un modelo de onda (el campo electromagnético es coherentemente partido en un divisor de haz) para interpretar el segundo experimento (de interferencia). Por supuesto, las dos descripciones complementarias corresponden a pasos experimentales mutuamente excluyentes"

La palabra "clásico" debe manejarse con mucho cuidado, en particular cuando uno

está tratando con experimentos de un solo fotón, dado que la radiación emitida por un átomo obviamente es una radiación no clásica en el sentido estricto.

"Algunos consideran la dualidad onda partícula como contradictoria, pero no hay buenas razones para proceder así, dado que ésta solamente estipula que la descripción apropiada está condicionada por el proceso de observación. La pregunta de qué "es" realmente, una onda o una partícula, es vana para el físico. Tal pregunta cae en el campo de otras ciencias más verbales" (2).

"Partículas y ondas son conceptos macroscópicos que gradualmente pierden su relevancia a medida que nos aproximamos al dominio submicroscópico" (21).

### 3. El Fotón, un nuevo concepto

Por lo tanto existe la posibilidad de que pueda no ser posible describir a los fotones con los términos que usamos para los objetos de la vida diaria, que el concepto de fotón sea un concepto irreducible, un concepto básico que no puede ser explicado reduciéndolo a una descripción en términos comunes (3), pero que nosotros debemos aceptarlo como él emerge directamente de nuestro experimentos. En otras palabras es un concepto nuevo quizá contraintuitivo, que tiene su origen en el trabajo de Einstein y ha sido moldeado lentamente desde 1905. De todos modos es entendible que los físicos han hecho todos los esfuerzos para encadenar las propiedades aparentemente extrañas de los fotones, con las propiedades de los objetos ordinarios macroscópicos.

De allí, los intentos para descomponer el concepto de fotón en otro más simple, por ejemplo, onda + partícula, o en algo así como un híbrido entre estos dos conceptos. Un intento interesante en esta dirección ha sido hecho por de Broglie y su escuela. Recomendaciones dificultades matemáticas y conceptuales han sido superadas. (22). De todos modos, los resultados alcanzados hasta hoy

no son completamente satisfactorios. Lo menos que podemos decir es que la comprensión del fotón todavía deja mucho que desear.

Por ejemplo, en óptica clásica el comportamiento de un interferómetro puede ser calculado con toda la precisión deseada, suponiendo que los fotones (ver definición) se comportan como las ondas electromagnéticas clásicas. Entonces, si "el hombre de la calle" pregunta, ¿cuál de los dos caminos siguen los fotones en el interior del interferómetro? la respuesta podría ser: todos al mismo tiempo (dado que los fotones se comportan como ondas) Y si él pregunta, ¿cuál de los caminos siguió la energía que los fotones "transfieren" desde la fuente hacia el detector? La respuesta podría ser también: Todos al mismo tiempo (dado que una modificación en uno de los caminos cambia la distribución espacial de la energía, el patrón de interferencia, y nosotros sabemos que reduciendo drásticamente la densidad de flujo que llega y aumentando el tiempo de exposición no se obtiene un descenso en la nitidez de la figura de interferencia), pero estas preguntas y respuestas no tienen significado para el físico. De acuerdo con la metodología post clásica (4), las únicas afirmaciones que tienen sentido físico son aquéllas cuya certeza o falsedad pueden establecerse experimentalmente. Y nunca hemos encontrado en ninguno de los dos caminos del interferómetro fotones de frecuencia cuya energía es una fracción de la energía  $h\nu$  transferida desde la fuente al detector.

A medida que nuestras mediciones han devenido más y más sofisticadas y precisas, han aparecido otros fenómenos tales como correlación de intensidades. Así, como la coherencia de la óptica clásica se mide con una correlación de primer-orden, (una correlación de segundo-orden en amplitud) (23), Hanbury Brown y Twiss (24) han medido correlaciones de segundo-orden (correlaciones de cuarto-orden en amplitud) esto es, correlaciones de intensidad. Ellos des-

cubrieron que los fotoelectrones liberados por la luz desde fuentes térmicas no son estadísticamente independientes y tienen una tendencia a unirse: los fotones tienen una clara tendencia a arribar en pares (25). Esta liberación de fotoelectrones puede llevar a pensar que cada fotoelectrón fue liberado por un fotón partícula. Sin embargo se ha establecido en lo anterior que esta idea no es necesariamente cierta dado que el efecto fotoeléctrico puede explicarse en una forma semiclásica.

El empaquetamiento de fotones desde una fuente de luz térmica puede ser interpretado como una emisión estimulada local causada por emisiones espontáneas en su vecindad (las condiciones necesarias para una emisión estimulada general no se dan en una fuente de luz térmica abandonada a sí misma. En este caso los dos fotones son coherentes.

Por el contrario los fotoelectrones liberados por la luz de un laser bien estabilizado son independientes estadísticamente, no muestran empaquetamiento y son coherentes en primer orden como en segundo orden.

El trabajo teórico de Glauber (26), que abrió un nuevo camino en el campo de la Óptica Cuántica, ha mostrado que es posible "construir" campos electromagnéticos que no tienen equivalente en la naturaleza no perturbados por la actividad humana (5). Uno de estos campos muestra un efecto "antiempaquetamiento": en lugar de unirse más o menos en grupos, los fotoelectrones parecen dispersarse. Esta es una correlación negativa. Estos efectos fueron descubiertos y medidos por Kimble, Dagnais y Mandel (27).

Es este objeto, con este comportamiento lo que los físicos llaman un fotón. Finalmente, considerando todas estas cosas, esta "rareza" no es ni más ni menos remarcable que aquélla de la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo relativísticas, incomprensibles para el sentido común, pero que los físicos deben aceptar si quieren que

sus predicciones matemáticas y sus experimentos físicos coincidan.

En este tema no debemos olvidar lo que hemos aprendido a nuestras expensas en el área de las muy altas velocidades y muy pequeñas dimensiones comparadas con nuestra vida diaria: la naturaleza no siempre funciona en la forma que nuestra intuición desearía. Y debemos recalcar que el "sentido común" es un prejuicio que se origina en nuestra experiencia real como seres humanos macroscópicos.

Yo repito: debemos considerar la posibilidad de que el concepto de fotón no pueda "construirse" superponiendo dos imágenes mentales simples ya conocidas (por ejemplo, un objeto como onda + partícula); que es un nuevo concepto, irreducible, que debería ser integrado en nuestro esquema físico del universo como resulta de nuestros experimentos, simplemente ratificando nuestros resultados experimentales, sin añadir nuestras fantasías acerca de cómo la naturaleza debería ser, para que fuese fácilmente comprensible para nosotros.

Del hecho de que los físicos necesitan introducir un nuevo concepto para describir la naturaleza -un concepto que no es familiar todavía- los filósofos no deben inferir que el universo no puede ser "visualizado", descrito con todo detalle, que no es "anschaulich" (esto es, intuitivamente representable). Pero ellos más bien debieran decirse a sí mismos que, después de 10, 15, o veinte mil años de más y más información elaborada de nuestro universo, nosotros descubrimos un nuevo concepto (1905) el cual no pudo ser confirmado experimentalmente antes, (Compton 1923, Millikan 1926), dado que nuestros instrumentos no eran lo suficientemente sofisticados. Además cuando los seres humanos se acostumbren a algo que todavía aparece como un concepto "raro", éste se transformará en un concepto ordinario, por esto es intuitivamente representable (esto es, *anschaulich*).

Finalmente, yo quiero referirme nuevamen-

te a lo que ahora llamamos la dualidad onda-partícula. Podría decirse que como todos los objetos de la vida diaria, el "lado" que nos muestra el fotón depende de la forma en que nosotros "lo miramos". Pero en la vida diaria los diferentes aspectos de un objeto pueden ser fácilmente "sintetizados" en una imagen total, inequívoca de este objeto, si bien nunca vemos simultáneamente todos sus lados. En el caso del fotón, esta "imagen" total, este concepto sintetizado, plantea un problema. Al menos en la extensión que, llevados por nuestra visión macroscópica del mundo, creemos absolutamente necesario construir una imagen total compatible con nuestros hábitos actuales como seres macroscópicos. Así, creamos" dificultades que no existen en la naturaleza: queremos adaptar la naturaleza a nuestra comprensión presente, en lugar de adaptar nuestra comprensión a la naturaleza. Aquí es donde los físicos deben recordar la frase mencionada al comienzo de este trabajo: Si nuestra concepción usual, que es sólo la convención que hemos tomado el hábito de usar, no es corroborada por la naturaleza, nosotros mismos debemos liberarnos de ese hábito.

#### 4. Acerca de algunos modelos recientes del fotón

En el modelo de Mc Lennan (3), que ya ha sido mencionado, el fotón ha sido considerado como una partícula: "El fotón es visto como un dipolo que consiste en un par de cargas fundamentales. Los centros de las cargas están separados por una distancia  $d = \alpha/\pi$  ( $\alpha = 1/137$ ), y el dipolo rota en un plano perpendicular a su dirección de movimiento" (p.53) "Que el fotón sea considerado o no, como fuente del campo de ondas, él oscila claramente a  $\nu$  ciclos por segundo" (p.52. No hay tal cosa como la masa en reposo de un fotón..." (p.52). Su masa inercial es una masa electromagnética. Este modelo no sigue las líneas sugeridas aquí.

El modelo de fotón de Deustch (4), por el contrario, sí sigue las líneas sugeridas en este artículo. El fotón es visualizado como un dipolo de un par de puntos cargados, sin masa, rotando en un plano perpendicular a la dirección de su movimiento. Las cargas  $(\alpha/2)^{-1/2}e^- = 16.55e^-$  y  $16.55e^+$  están separadas por  $\lambda/\pi$ . La masa inercial del fotón es una masa electromagnética.

Estos dos modelos reproducen muchas de las propiedades de la luz, pero de acuerdo con sus propios autores, requieren más desarrollo.

El tercer artículo mencionado en la Introducción, es por Hunter y Wadlinger, (5), "Nuestro concepto básico es que un fotón es energía electromagnética moviéndose a la velocidad de la luz dentro de un volumen que está limitado en extensión tanto a lo largo como en el sentido perpendicular a su dirección de propagación". (P. 159). Su fotón tiene una "forma" cilíndrica de longitud  $\lambda$  y diámetro  $\lambda/\pi$ . Ellos propician llamar a este fotón "wavicle"<sup>3</sup> (término acuñado por Eddington). Este modelo es más detallado que los dos primeros y como ellos da cuenta de muchas de las propiedades de los fotones. Sin embargo este modelo, como en los dos primeros, no toma en cuenta la longitud de coherencia.

Me gustaría hacer dos comentarios acerca de este último estudio: en la p.159 dice, acerca de una sinopsis por Wadlinger, que "de aquí se concluye que el fotón actúa por un ciclo de oscilación, esto es, actúa por un período de tiempo  $\tau = 1/\nu$ , y su longitud efectiva es una longitud de onda  $\lambda = c/\nu$ ".

"Esta conclusión es, por supuesto, contraria a la filosofía de Copenhagen, uno no puede conocer lo que no puede medir, cuya base es el principio de incerteza de Heisenberg  $\Delta E \cdot \Delta \tau = h$ , que expresa un mínimo para el producto de las incertezas  $\Delta E$  y  $\Delta \tau$  (errores experimentales intrínsecos) en

<sup>3</sup>Los traductores proponen "ondúscula" como traducción de "wavicle".

mediciones simultáneas de la energía  $E$  y el tiempo  $\tau$ ..."

En la Ref. 28 el autor presenta una interpretación de las desigualdades de Heisenberg que puede ser útil aquí para la comprensión de uno de los aspectos fundamentales del fotón. Este artículo puede resumirse en unas pocas líneas.

Cada medición es una interacción entre lo que se mide (el sistema) y el objeto que mide (el instrumento de medición). Esto significa una transferencia de energía  $\lambda E$  y/o una transferencia de cantidad de movimiento  $\lambda p_x$  desde el sistema a ser medido hacia el instrumento de medición (o vice versa). El tiempo  $\lambda t$  necesario para transferir esta energía  $\lambda E$  es considerado frecuentemente como si fuera una "incerteza" del instante de tal transferencia (supuesta instantánea). Asimismo, la distancia  $\lambda x$  cubierta durante la transferencia de la cantidad de movimiento  $\lambda p_x$  es frecuentemente considerada como una "incerteza" del lugar de esta transferencia (que se supone que ocurre en un punto). Debido al carácter cuántico de nuestro universo, ni  $\lambda E \cdot \lambda t$  ni  $\lambda p_x \cdot \lambda x$  puede ser menor que  $h$ , de aquí las desigualdades de Heisenberg.

Apliquemos este punto de vista al fotón. Un campo electromagnético de frecuencia  $\nu$  puede interactuar con un átomo sólo si este átomo contiene un "mecanismo", digamos, una posibilidad de resonancia, de período  $\Delta t = 1/\nu = \tau$ . En el lenguaje normal  $\nu$  es la frecuencia correspondiente a la diferencia entre dos niveles de energía del átomo. Dado que la transferencia de energía  $\Delta E$  desde el campo del átomo debe tener lugar en un intervalo  $\Delta t$  tal que al menos  $\Delta E \cdot \Delta t = h$ , a esto sigue que  $\Delta E = h/\Delta t = h\nu$ . Esto significa que un campo clásico continuo de frecuencia  $\nu$  puede intercambiar energía con materia solamente en cantidades iguales al menos a  $h\nu$ . Esto explica el éxito de las teorías semiclásicas y también porqué la luz clásica toma ciertas propiedades cuánticas aparen-

tes cuando es detectada con sistemas (átomos), que tienen propiedades cuánticas. Pero desde el punto de vista de Einstein es necesario asumir que la energía irradiada existe sólo en múltiplos de  $h\nu$ . Por la evaluación de las fluctuaciones de energía en la irradiación de un cuerpo negro, pareciera que el valor promedio de la fluctuación de energía, tiene dos términos: el primero es causado por la naturaleza cuántica de la luz, y el segundo es provisto por la teoría maxwelliana de la luz. Así el concepto de dualidad tiene su origen en la fórmula de la fluctuación de energía de Einstein (29).

Aquí, puede obtenerse una analogía con el tratamiento del problema por Hunter y Waddlinger con respecto a la duración finita de un intercambio de energía. Todavía yo podría obtener otra conclusión: en vista del hecho de que el período  $\tau = \lambda t = 1/\nu$  es el mismo para todo el fenómeno oscilatorio el mismo período corresponde a la onda (elemental) finita, entera -es posible atribuir al fotón una longitud del orden de la longitud de coherencia.

Mi segunda observación es sobre el concepto de "mediciones simultáneas". El contenido esencial de otro artículo, Ref. 30, es el siguiente: se dirige la atención al hecho de que en general, no es posible hacer mediciones exactas, de donde yo infero que el concepto de "medición exacta", es un concepto del mundo clásico de la fantasía. Se recuerda también que si es imposible conocer simultáneamente y con exactitud ambas, la posición y la cantidad de movimiento de una partícula, entonces esto es una consecuencia del funcionamiento de nuestro mundo físico y no un "a priori" de la teoría cuántica.

Mi tercer comentario tiene que ver con la afirmación frecuentemente usada para expresar la filosofía de Copenhagen: "uno no puede conocer lo que no puede medir". Yo creo que esta forma de expresar la filosofía de Copenhagen lleva a equivocaciones. Prefiero la siguiente afirmación: con-

siderando que la Física es una ciencia experimental, un concepto teórico no puede considerarse como un concepto físico, hasta que su existencia física haya sido establecida por las mediciones. Antes de su observación experimental a través de la medición, el concepto teórico es una mera "hipótesis de trabajo", o mejor aún, una "especulación" sobre el "posible" comportamiento de la naturaleza. Esta forma de expresar la filosofía de Copenhagen evita confusiones y los problemas epistemológicos asociados con el concepto de "conocimiento". En vista de lo anterior, los conceptos teóricos pueden tener valor predictivo, quedando bien entendido, que estas predicciones son también meras "especulaciones" sobre el comportamiento "posible" de la naturaleza. Ellos devendrán en conceptos físicos solamente después de que hayan sido confirmados experimentalmente.

## 5. Conclusión

Después de haber señalado algunas de las dificultades conceptuales involucradas en la comprensión de la luz, yo he sugerido la idea de que puede ser necesario crear un nuevo concepto que no sea un mero "híbrido" entre onda y partícula. Un cierto número de físicos usa la palabra "fotón" para referirse a este nuevo concepto, esto es, la concepción mental abstracta del objeto que exhibe el comportamiento dual onda-partícula revelado por experimentos. Hunter y Waddlinger proponen el nombre inventado por Eddington: "wavicle", (ondúscula).

Finalmente, he comentado sobre la frase usada algunas veces para expresar la filosofía de Copenhagen, esta es, "uno no puede conocer lo que uno no puede medir". Propongo otra formulación para la misma filosofía: un concepto teórico puede transformarse en un concepto físico solamente después de haber sido vindicado por las mediciones. Yo también recuerdo al lector que la imposibilidad de medir energía y

tiempo simultáneamente es un hecho físico y no una mera consecuencia de la teoría cuántica.

### Notas Finales

- 1) **paradoja:** Una afirmación que parece contradictoria, increíble, o absurda, pero que puede ser cierta.

(Webster New World Dictionary, 3o. College ed. 1988)

- 2) "Der Dualismus von Welle und Korpuskel wird von manchen Seiten als widerspruchsvoll empfunden, aber nicht Recht. Er besagt ja nur dass die angemessene Beschreibungsart durch das Beobachtungsverfahren bedingt wird. Die Frage, was wirklich "ist", ob eine Welle oder ein Korpuskel, hat für den Physiker keinen Inhalt, sie ist für ihn leer. Eine solche Frage gehört in den Bereich anderer, wortreicherer Wissenschaften" in R. W. Pohl, *Optik und Atomphysik* (Springer, Berlin, 1954), p. 302.

El dualismo entre onda y corpúsculo en algunas personas ha aparecido como contradictoria pero sin razón. La manera apropiada de describir este dualismo está relacionada con la forma de observación. La pregunta de qué realmente es, si es una onda o un corpúsculo, para un físico no tiene ningún significado, esta pregunta es vacía. Tal pregunta pertenece a otras ciencias como la filosofía.

- 3) "...un concepto que admite una definición explícita no es un concepto básico". Th. Görnitz y C.F. von Weizsäcker, *Int. Theor. Phys.* 27, 237 (1988).
- 4) Esta metodología originada en 1920 debido a la revisión drástica de nuestro conocimiento acerca del mundo físico, provocada por los descubrimientos teóricos básicos (seguidos por sus

verificaciones experimentales) hecha desde 1900: el cuanto de acción (Planck), el *Lichtenergiequant*, (Einstein) la estructura atómica (Bohr), el spin (Uhlenbeck y Goudsmith), las propiedades ondulatorias de las partículas con masa en reposo (de Broglie), y así siguiendo. Nuestra metodología ha incorporado la regla del joven Einstein, que es el fundamento de la relatividad y la mecánica cuántica: la física debe ser construida sobre conceptos medibles y no sobre ideas preconcebidas. Ver, también, D. Canals-Frau, *Ann. Fond. Louis de Broglie* 14, 33 (1989).

- 5) El laser es también un ejemplo de una fuente "no natural".
- 6) Es casi innecesario decirlo, si nos confinamos en tal actitud, nunca podremos extender nuestra comprensión más allá de meras "combinaciones" o "superimposiciones" de conceptos familiares.

### Referencias Bibliográficas

1. FRANZ, W., *Quantentheorie* (Springer, Berlin, 1971), p. 26.
2. MCGRAW, HILL *Berkeley Physics Course IV*, NY, 1967, p 149
3. MC LENNAN D.E., *Phys. Essays* 2, 51 (1989).
4. DEUTSCH D.H., *Phys. Essays* 2, 3 (1989).
5. HUNTER G. and WADLINGER R.L.P., *Phys. Essays* 2, 158 (1989).
6. MILLIKAN R.A., *Phys Rev.* 7, 355 (1916).
7. HECHT E. and ZAJAC A., *Optics* (Addison Wesley, Reading, MA. 1974).
8. EINSTEIN A., *Ann. Phys.* 17, 132 (1905).
9. LEWIS G.N., *Nature* 118, 874 (1926).
10. DIRAC P.A.M., *Quantum Mechanics* (Oxford University, 1967), p. 9.
11. GASRBUNY M., *Optical Physics* (Academic, NY, 1965). p. 308.

12. CRIPS M.D. and JAYNES E.T., *Phys. Rev.* 179, 1253 (1969).
13. MEYSTRE P. and SARGENT M., III, *Elements of Quantum Optics* (Springer. Berlin, 1990), p. 336.
14. SEE J. SCHWINGER, *Phys. Today*, 42 (February 1989).
15. ARMSTRONG H.L., *Ann J. Phys.* 51, 103 (1983).
16. HENDERSON G., *Am J. Phys.* 48, 604 (1980).
17. KIDD R., ARDINI J. and ANTON A., *Am J. Phys.* 57, 27 (1989).
18. LAMB W.E. and SCULLY M.O., "The Photoelectric Effect Without Photons." en *Polarization, Matière et Radiation* (Presses Univ. de France, Paris, 1969), p. 363.
19. I. DE BROGLIE, *C.R. Acad Sci* 177, 507 (1923).
20. GRANGLER P., ROGER G. and ASPRETT A. *Europhys Lett* 1, 173 (1986)
21. HECHT and ZAJAC, *Optics*, p. 450.
22. L. DE BROGLIE. *Une Tentative d'interprétation Causale et Non Linéaire de la Mécanique Ondulatoire* (La Théorie de la Double Solution) (Gauthier Villars, Paris, 1956); *J. Phys. Rad.* 20, 963 (1959).
23. BORN M. and WOLF E., *Principles of Optics* (Oxford, 1975), Chap X.
24. HAMBURY BROWN R. and TWISS R.Q., *Proc. R. Soc. (London) A* 242, 300 (1957); A 243, 291 (1957).
25. GLAUBER R., in *Quantum Optics and Electronics, Les Houches* (Gordon and Breach, NY, 1965), p. 102.
26. *Ibid.*
27. KIMBLE H.J., DAGENAIS M. and MANDEL I. *Phys. Rev. Lett.* 39, 691 (1977).
28. CANALS FRAU D., "About Heisenberg's Inequalities", (In *Ann. Fond. Louis de Broglie.*)
29. EINSTEIN A., *Phys. Z.* 10, 185 (1909). On the energy fluctuations of polarized light beams; see, also, D. Canals-Frau, *Revista de la Unión Matemática Argentina* 14, 213 (1950).
30. CANALS FRAU D., *Ann Fond Louis de Broglie* 15, 479 (1990).