

El presente texto forma parte del libro
“RADIACIONES: UNA MIRADA MULTIDIMENSIONAL”
del Programa “ESCRITURA EN CIENCIAS”
INSTITUTO NACIONAL DE FORMACIÓN DOCENTE
MINISTERIO DE EDUCACIÓN DE LA NACIÓN.
Publicado en 2014

Disponible en <http://portales.educacion.gov.ar/infd/escritura-en-ciencias/> y
http://cedoc.infed.edu.ar/upload/Radiaciones_una_mirada_multidimensional.pdf



ESCRITURA EN CIENCIAS 2013

RADIACIONES

Una mirada multidimensional.

Autores

Gerónimo Leonardo Cortez
Néstor Camino
Liliana Lacolla
María Laura Melchiorre
María Eugenia Huaranca
Miguel Curell

Orientación y asesoramiento científico: Jorge Torga
Coordinación de Escritura: Verónica Bibiana Corbacho

Presidenta de la Nación
Cristina Fernández De Kirchner

Ministro de Educación
Alberto Sileoni

Secretaría de Educación
Jaime Perczyk

Secretario del Consejo Federal de Educación
Daniel Belinche

Secretario de Políticas Universitarias
Martín Gil

Subsecretario de Planeamiento Educativo
Marisa del Carmen Díaz

Subsecretaría de Equidad y Calidad
Gabriel Brener

Instituto Nacional de Formación docente
Verónica Piovani

Dirección Nacional de Formación Docente e Investigación
Andrea Molinari

Coordinadora de Investigación Educativa del INFD
Inés Cappellacci

Radiaciones : una mirada multidimensional /
Gerónimo Leonardo Cortez ... [et.al.]. - Ciudad Autónoma de Buenos

Aires :
Ministerio de Educación de la Nación, 2014.
196 p. : il. ; 15x21 cm. - (Escritura en ciencias; 17)

ISBN 978-950-00-1046-7

1. Educación en Ciencias. I. Cortez, Gerónimo Leonardo
CDD 507.11

Fecha de catalogación: 22/09/2014

Introducción

¡Bienvenidos a nuestro universo de Radiaciones!

Este libro fue pensado para ser leído y utilizado, en principio, por estudiantes y profesores de Profesorados de Química, Biología y Física, aunque también por capacitadores y profesores que trabajan en otros niveles del sistema educativo. Tenemos, además, la ilusión de que pueda ser leído por lectores en general, más allá de si su profesión es la educación.

Nuestra intención al escribir este libro no es establecer una instancia de autoridad *per se* sobre las radiaciones, sino generar un espacio de diálogo con otros colegas y futuros colegas que invite al análisis crítico sobre los paradigmas y concepciones que, al respecto del concepto de radiación, la ciencia fue construyendo a lo largo de la historia, y su influencia en los modelos escolares, universitarios y de formación docente.

Quienes nos desempeñamos en la tarea de formar a futuros docentes valoramos este tipo de publicaciones que complementan textos académicos, a los que solemos recurrir para preparar nuestras propuestas de clase. En especial, esta valoración reside en que propuestas como las de nuestro libro fortalecen una visión didáctica de los temas trabajados, sin perder rigurosidad conceptual, aunque sin hacer énfasis en la estructura lógica conceptual de la disciplina que fuera, a lo que sí se dedican principalmente los textos académicos tradicionales. Por esta razón, este texto presenta, a nuestro juicio, aspectos que consideramos relevantes para el tratamiento didáctico de la radiación, desde las distintas áreas del conocimiento, en la formación docente.

En primer lugar, consideramos el término radiación a partir de un campo semántico que incorpora una visión más amplia e integra las miradas de distintas disciplinas científicas, como la Física y la Astronomía.

De esta forma, el término radiación se refiere a un conjunto de agentes físicos (ondas electromagnéticas y partículas), sus orígenes (naturales y tecnológicos) y efectos (ionizantes y no ionizantes), nucleados detrás del proceso de transferencia de energía a través del espacio y del tiempo, desde y hacia distintas porciones de materia.

En segundo lugar, hemos adoptado la acepción del término luz como la totalidad del espectro electromagnético, y no únicamente como la porción de éste que el ojo humano puede detectar. Cabe destacar que la utilización de “luz” para designar únicamente a lo que detectamos los seres humanos tiene principalmente dos orígenes: uno antropocéntrico y otro histórico.

Con respecto al primero, hemos dado entidad a este rango espectral y construido los modelos del entorno en que vivimos, considerando sólo lo que nosotros “vemos”. Es decir, la porción del espectro electromagnético que los seres humanos podemos percibir.

Desde el punto de vista histórico, hasta fines del Siglo XIX “luz” remitía a la porción visible del espectro, y es recién en 1868 que James Clerk Maxwell conceptualiza lo que hoy denominamos espectro electromagnético.

Así, al hablar de “luz”, en este libro incluimos todos los rangos espectrales posibles, cuyas propiedades son comunes y diferenciamos la porción detectable por los seres humanos con la nominalización “el visible” o directamente “luz visible”¹.

En tercer lugar, intentamos mostrar diversas interacciones de la radiación con el entorno natural y social en el que vivimos, a través de sus distintas características, efectos y rangos de intensidad. Buscamos así contribuir a desmitificar las connotaciones negativas del término radiación como propias de la civilización actual, así como también la concepción de que toda radiación de origen natural es beneficiosa en sí misma.

Escribir un libro en conjunto no es una tarea fácil. Quienes hemos concretado éste, tenemos una muy interesante diversidad: en la formación inicial (profesores todos, pero de distintas disciplinas), en la formación de postgrado, al respecto de los lugares en donde trabajamos (institutos de formación docente, escuelas secundarias, universidad), y de los lugares donde hemos elegido vivir: Buenos Aires, Jujuy y Chubut. Y esta diversidad nos demandó lograr acuerdos, aunar miradas y aprender...

Aprendimos, por ejemplo, a reconocer que cada uno de nosotros había construido diferentes conceptualizaciones sobre la radiación, y que la importancia que le asignamos en nuestro trabajo como educadores es también muy distinta. Los encuentros presenciales fueron muy intensos, y de gran riqueza: discutir durante horas, con argumentos a veces muy firmes, para luego tener la capacidad de comprender al otro y modificar nuestros escritos, ajustar lo que se iba gestando en nuestras mentes a las páginas asignadas, escribir pensando en nuestros lectores y no sólo en lo que nosotros queríamos decir. Fue un aprendizaje de gran valor que nos permitió reflexionar sobre nuestras propias concepciones, reformularlas y crecer personal y profesionalmente.

Esperamos que los temas que hemos tratado en este libro los intriguen, los maravillen y los interpielen a profundizar en la concientización de que interactuamos con un entorno natural atravesado permanentemente por diversos tipos de radiaciones, las que provienen de la propia Tierra, del Sol, del conjunto de cuerpos que conforman el Universo y las producidas por los seres humanos. No son ni buenas ni malas, simplemente están aquí, como parte constitutiva del espacio en que vivimos. Conocerlas para comprenderlas, nos permite no sólo explicar y predecir (propósitos más que importantes en la educación científica) sino también decidir y participar en la toma de decisiones, como ciudadanos científicamente alfabetizados.

¹ En palabras de Richard Feynman (2006, p. 13): “Cuando digo “luz” en estas conferencias, no me refiero simplemente a la luz que podemos ver, desde el rojo al azul. Resulta que la luz visible es sólo una parte de una larga escala análoga a la escala musical, en la cual hay notas más altas y notas más bajas que lo que podemos escuchar. La escala de la luz puede ser descripta por números –denominados frecuencia– y a medida que los números se hacen más grandes, la luz pasa de rojo a azul a violeta a ultravioleta. Nosotros no podemos ver luz ultravioleta, pero la misma puede afectar placas fotográficas. (No debíamos ser tan provincianos: ¡lo que podemos detectar directamente con nuestro propio instrumento, el ojo, no es la única cosa en el mundo!). Si continuamos simplemente cambiando el número, vamos hacia los rayos X, los rayos gamma, y así sucesivamente. Si cambiamos el número en la otra dirección, vamos desde el azul al rojo a las ondas de infrarrojo (calor), a las ondas de televisión, y a las ondas de radio. Para mí, todo esto es “luz””.

CAPÍTULO 2

La luz en el Universo actual

Néstor Camino

La historia del desarrollo social de la especie humana bien podría contarse tomando como eje los esfuerzos por sostener a la producción de luz como un bien disponible y manejable. Desde el primigenio manejo del fuego (Sagan y Druyan, 1993; Sagan, 2003), pasando por el desarrollo de la iluminación artificial (mediante tendidos domiciliarios de gas y luego a fines del siglo XIX por medio de la novedad que constituía la electricidad, con las primeras lámparas de filamento y las redes que electrificaban ciudades), hasta lo más actual, con lámparas de bajo consumo, leds de alta potencia, y otros dispositivos aún en desarrollo (Asociación Argentina de Luminotecnia, 2013), la ciencia y la tecnología han dedicado grandes esfuerzos en comprender de qué manera producir luz en forma permanente.

Por contraparte, es notorio tomar conciencia de que no hemos avanzado demasiado en cuanto al “manejo” de la oscuridad, por ejemplo, a cómo convivir como individuos y como sociedad planetaria con la noche: basta ver una imagen de la cara oscura de la Tierra desde el espacio, poblada de ciudades iluminadas (NASA, 2000), para comprender nuestra avidez por la iluminación, como si no quisiéramos (o no pudiéramos) vivir como especie con la oscuridad, la cual, de todos modos, es siempre transitoria y no permanente (al menos, hasta la próxima salida del Sol).

En este largo proceso evolutivo como seres sociales, una vez que tomamos conciencia de nuestra propia existencia en un entorno natural diverso y riesgoso, seguramente muchas más preguntas comenzaron a poblar nuestra vida. Las preguntas por la luz, en particular, cobraron una importancia sustancial en la construcción de distintos tipos de cosmovisiones: religiosas, artísticas, de sentido común, científicas, míticas. (Zajonc, 1995)

Muchas de aquellas preguntas aún hoy tienen un lugar trascendental en la cosmovisión actual, aunque el tenor de la forma en que preguntamos, cuán específico es lo que buscamos, los fundamentos que construimos, y otros muchos matices, sean diferentes de los propios de siglos atrás. Sin embargo, el misterio de la luz aún persiste y ni la más vigente de las teorías científicas pareciera satisfacer plenamente lo que aún hoy, en la sociedad actual, seguimos preguntándonos sobre la luz.

En este Capítulo recordaremos preguntas hechas durante siglos, sencillas pero difíciles de responder, y sus respuestas, útiles por épocas pero inadecuadas para conformar por mucho tiempo a la siempre cambiante humanidad: qué la genera, cómo se propaga, de qué está hecha, qué efectos produce, por qué la vida depende de la luz, cuáles son sus características, en fin: ¿qué es la luz? (Moreno González, 1994)

Las respuestas a estas preguntas cuentan no sólo la historia de la luz, sino también constituyen un relato de cómo evolucionan las ideas de los seres humanos a través de los tiempos.

Las preguntas por la luz a través de la Historia

“¡Durante el resto de mi vida me preguntaré qué es la luz!”
Albert Einstein, hacia 1917.

La pregunta más habitual acerca de la luz, la que muchos de nosotros, y en especial cuando éramos más chicos, nos hemos hecho es: ¿qué es la luz? Como sucede en general, las preguntas más sencillas son las más difíciles de responder, quizás porque son elaboradas con mucha intuición y están dirigidas hacia aquello que es esencial y que define en sí mismo al sujeto de la pregunta, aunque tal profundidad no haya sido plenamente consciente ni intencional.

Sin embargo, en el contexto de las Ciencias Naturales, y en especial en el propio de la Física, preguntarse por lo que “son” las cosas no es la forma de construir conocimiento. A pesar de que sea un necesario y siempre recomendable ejercicio mental para pensar e imaginar más allá de lo evidente, lo que no es poco, preguntarse por lo que es algo no es suficiente para los fines de estas disciplinas científicas.

La tarea que realiza la Física es la de generar modelos, con el fin de buscar dar solución a algunos problemas y responder a unas cuantas preguntas que son vistos como muy importantes en cada época.

Sin embargo, en esta tarea de construir modelos para intentar comprender cómo ocurren las cosas en la Naturaleza y de qué manera los seres humanos pueden operar sobre ciertos aspectos útiles para transformar la vida en sociedad, casi nunca se comienza por la pregunta sobre qué es algo. Muy por el contrario, se comienza elaborando preguntas cercanas a lo cotidiano, a los hechos que son percibidos y a las necesidades más básicas, buscando en general relacionar los nuevos modelos con lo que ya se conoce y que ha servido para describir, explicar y predecir satisfactoriamente durante algún tiempo los fenómenos estudiados.²

¿A qué velocidad se propaga la luz?

Más allá de las distintas visiones sobre la naturaleza de la luz a través de la Historia, que trataremos en los próximos apartados, siempre se tuvo en claro que su velocidad de propagación era mayor que la velocidad de cualquiera de los fenómenos conocidos. Sin embargo, había aún dos posibilidades: afirmar que la velocidad de la luz era infinita, o bien aceptar que fuera finita, aunque muy alta. (Pla, 1947)

² El aprendizaje por analogía es, a nivel individual, una de las formas más “naturales” en que los seres humanos construimos nuevos conocimientos a partir de los aprendizajes previos y de las experiencias vividas (Poza, 1989). De forma similar, a través de los siglos las comunidades científicas han construido, en su trabajo por buscar soluciones a nuevos problemas, modelos análogos a los que probadamente fueron útiles en un momento histórico; con el tiempo, los análogos van siendo reemplazados por constructos teóricos novedosos, que antes no existían, abandonándose en general los viejos modelos, e iniciándose una nueva época en el devenir histórico de la actividad científica. Cabe citar a Sir James Jeans: “...no tenemos el derecho de esperar que siempre seamos capaces de representar nuevos fenómenos y nuevas ideas con los términos ya en uso” (citado por William Bragg, *El universo de luz*, EMECÉ, 1945, p. 284).

Se reconoce a Galileo Galilei (1564-1642), como uno de los primeros científicos que desarrolló un experimento para medir la velocidad de la luz, repitiendo el método que él mismo utilizara para medir la velocidad del sonido. En 1638 Galileo se propone medir el tiempo que la luz tardaría en recorrer una distancia de pocos kilómetros, entre dos colinas en las cuales se ubicaban él y un ayudante, con sendas lámparas; el intervalo de tiempo debía ser medido a partir de un dispositivo con un pequeño péndulo y vinculado con el propio pulso del observador. Obviamente, y a pesar de haber repetido la experiencia muchas veces, Galileo no pudo determinar un intervalo de tiempo significativo. Su fina intuición le lleva a concluir que no puede discriminar la velocidad de la luz a partir de esta experiencia. No obstante, en lugar de suponer una velocidad infinita, propone que la misma es finita, pero muy elevada como para poder medirla con los medios de los cuales él disponía.

El proceso de medición de una velocidad tan grande como la de la luz requiere o bien de distancias muy grandes, astronómicas ya no terrestres, o bien de lograr intervalos de tiempo muy pequeños. Ambas variantes estaban muy lejos de las posibilidades teóricas y tecnológicas disponibles en la época de Galileo.

Así fue que en 1676 Ole Christensen Rømer (1644-1710), utilizando un telescopio, un reloj de péndulo y observando sistemáticamente los satélites de Júpiter³, determina por primera vez un valor para la velocidad de propagación de la luz, aproximadamente 220.000 km/s (Holton y Brush, 2004).

Recién en 1849 se logra medir la velocidad de la luz en distancias cortas, terrestres, utilizando un método, esencialmente idéntico al realizado por Galileo, desarrollado por Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896). El método consistía en hacer pasar un haz de luz, que se propagaba entre una fuente y un espejo ubicado a unos pocos cientos de metros, a través de los dientes de una rueda dentada que giraba a gran velocidad. Según fuera la velocidad de rotación de la rueda, el rayo sería interrumpido regularmente, y mediante sencillos cálculos se podía medir en forma indirecta la velocidad de la luz. El valor obtenido por Fizeau fue de unos 313.000 km/s.

Posteriormente se desarrollaron muchas otras experiencias para determinar la velocidad de la luz, tanto por métodos astronómicos como por métodos terrestres, y todos llevaron, finalmente, a un valor de la velocidad de propagación de la luz en el vacío que hoy es considerado como una constante universal. Es decir, un valor fijado convencionalmente, que ya no se mide más sino que se considera un postulado fundamental.⁴

La respuesta a la pregunta por la velocidad de propagación de la luz fue entonces construida a través de los trabajos de Galileo, Rømer, Fizeau, y muchos otros, con un fuerte consenso a través de los siglos con respecto al alto valor de la misma.

³ Es muy interesante notar que Rømer logra medir la velocidad de la luz, por primera vez desde el intento de Galileo, utilizando tres de los desarrollos originales del pensador italiano: el reloj de péndulo creado por Huygens a partir del isocronismo descubierto por Galileo; el telescopio refractor perfeccionado por Galileo; y los satélites jovianos, descubiertos por Galileo.

⁴ La velocidad de la luz es considerada en la actualidad una “constante universal”, a partir de la decisión tomada por la comunidad científica internacional en 1975, durante la 15ª Conferencia General de Pesos y Medidas realizada en Sèvres, cerca de París, en Francia (consultar en el sitio web oficial de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas: <http://www.bipm.org/extra/codata/>; <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/15/2/>; y http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search_for=light).

En síntesis, tal respuesta podría ser la siguiente:

La luz se propaga en el vacío con una velocidad constante y muy elevada, pero no infinita, cuyo valor actual es definido como: 299.792,458 km/s.

¿La luz es de naturaleza continua o discontinua?

El esfuerzo más profundo por comprender a la luz pasó por construir una explicación sobre su naturaleza (ya no sobre su velocidad) que fuera adecuada a la forma de ver el mundo en cada época histórica, apelando a las ideas en vigencia. Así, fueron dos las formas de describirla.

Una, la corpuscular, propia de la visión discontinua y atomista del mundo, considera a la luz como un conjunto de pequeñas partículas en muy rápido movimiento y trayectoria rectilínea. La otra, la ondulatoria, considera a la luz como un fenómeno de naturaleza continua, que si bien se propaga a una gran velocidad, lo hace en forma de onda.

Ambas visiones satisfacen la explicación de casi todos los fenómenos que desde la más lejana antigüedad los seres humanos fueron percibiendo e intentando comprender. Sin embargo, las dos formas de conceptualizar a la luz han coexistido desde varios siglos antes de Cristo y hasta la actualidad, variando su aceptación y dominancia relativos como forma de explicar la realidad, según fueran los momentos sociales y el prestigio e influencia de los pensadores que adscribían a una u otra concepción.

La razón para proponer que la naturaleza de la luz es corpuscular, bien podría originarse en la experiencia habitual de ver un haz de luz a través de las nubes o a través de una rendija en el interior de una habitación a oscuras. Esta situación refuerza naturalmente la imagen de un “chorro” de pequeñas partículas moviéndose en línea recta. Así, la luz fue descrita mediante parámetros comunes al estudio de los cuerpos materiales y su movimiento: masa, tamaño, forma, rozamiento, velocidad. Estos parámetros, propios de objetos macroscópicos cotidianos, fueron utilizados para describir todas las características de la luz y de los fenómenos lumínicos. Fue Isaac Newton (1642-1727) el más fuerte representante de la concepción corpuscular de la luz. En su *Opticks* de 1704 (su otra obra fundamental, junto a los *Principia*), estableció los principios del estudio de los fenómenos lumínicos y de la tecnología asociada con ellos (prismas, telescopios). Sin embargo, no todos los fenómenos allí estudiados fueron explicados satisfactoriamente por la concepción corpuscular, como por ejemplo los denominados “anillos de Newton” (lo que años más tarde se lograría mediante la concepción ondulatoria de la luz).

Por contraparte, la sensación de que la luz “todo lo llena” y que no está circunscripta a la fuente que la produce sino que ocupa el espacio que la rodea, refuerza, también naturalmente, la imagen de un ente de naturaleza continua. Por analogía, se la relacionó entonces directamente con el sonido. En la concepción ondulatoria, la luz fue por esta razón descrita mediante parámetros muy distintos: frecuencia, longitud de onda, intensidad, velocidad, intentando asociar lo que se conocía muy bien sobre los fenómenos audibles y la producción de sonido con los fenómenos visibles y las fuentes de luz. Fue Christiaan Huygens (1629-1695), contemporáneo de Newton, el máximo exponente de la visión ondulatoria de la luz. Huygens desarrolló tal concepción ondulatoria en su obra *Traité de la Lumière*, de 1678, dando allí explicación a los fenómenos ópticos más relevantes para la época.

Si bien durante más de un siglo hubo varios otros grandes pensadores que acordaban con la visión ondulatoria, no fue hasta que la profunda influencia de Newton comenzó a declinar, hacia principios del Siglo XIX, que Thomas Young (1773-1829) y Augustin Fresnel (1788-1827), entre otros, comenzaron a desarrollar una nueva visión ondulatoria de la luz. Tal visión, en concordancia con los trabajos de Huygens pero con nuevos fundamentos, tanto físicos como matemáticos, y principalmente con desarrollos experimentales de gran precisión, posibilitó el resurgimiento de la concepción ondulatoria de la luz, en desmedro de la visión corpuscular.

Sin embargo, y a pesar de relativos éxitos y fracasos durante más de veinte siglos, no sucedió nunca algo tan definitivo, ni empírico ni teórico, que pudiera convencer finalmente a unos y a otros sobre cuál forma de imaginar a la luz era definitivamente más satisfactoria.

Muy por el contrario, en cada época de dominio relativo de una visión por sobre la otra, surgían nuevas preguntas, antes nunca hechas, que si bien profundizaron las búsquedas y resolvieron ciertas cuestiones, fueron marcando inconsistencias que mostraban que tanto el modelo corpuscular como el ondulatorio de la luz no eran satisfactorios para explicar todos los fenómenos y resolver los muchos conflictos aún abiertos.

Hoy es también así la situación, como ya veremos más adelante.

Si la luz fuera un conjunto de pequeñas partículas, ¿de qué estarían hechas?

Parte importante de la discusión sobre la naturaleza corpuscular de la luz consistía en establecer qué característica tendrían tales partículas.

Para Newton, las partículas de luz eran muy pequeños cuerpos similares a los objetos cotidianos estudiados por su Mecánica. Estos pequeñísimos cuerpos se movían muy rápidamente, no podían visualizarse individualmente, y estaban hechos de materia. Así, explicar los fenómenos lumínicos consistió en adaptar la Mecánica newtoniana a lo muy pequeño y muy rápido, haciendo valer rigurosamente conceptos como masa, rozamiento, forma, cantidad de movimiento, entre otros.

Si bien existieron en la misma época otras explicaciones⁵, el modelo corpuscular se sostuvo en una concepción mecanicista, newtoniana, hasta principios del Siglo XX, cuando los trabajos de Max Planck (1858-1947) y de Albert Einstein (1879-1955), produjeron un cambio en aquella concepción, el cual aún hoy está en vigencia: si la luz fuera de naturaleza corpuscular, tales corpúsculos estarían hechos de *energía* (y no de materia).

Fue Planck quien propone en 1900 el “cuanto de energía” (Kuhn, 1980), buscando dar solución al “problema del cuerpo negro”, es decir: la emisión y absorción de energía lumínica por parte de un cuerpo a una cierta temperatura. Planck postuló que la energía transferida en estos procesos estaba organizada en cantidades discretas, “cuantizada”, y no en forma continua como lo requería la visión mecanicista clásica.

Pocos años más tarde, en 1905, el cuanto de energía fue utilizado por Einstein para explicar el “efecto fotoeléctrico”, es decir: la liberación de electrones en ciertas superficies metálicas al ser iluminadas por luz de frecuencias particulares.

⁵ René Descartes (1596-1650), sin ir muy lejos respecto de la época de Newton, consideraba que la luz era un fenómeno producido por pequeños torbellinos de materia sutil, pero distribuida continuamente por todo el espacio (Berkson, 1985).

En 1926, Gilbert Lewis (1875-1946) propone el nombre de “fotón” para el cuanto de energía del modelo corpuscular de la luz.

Así, una pregunta abierta durante al menos tres siglos y medio, desde Huygens y Newton hasta Planck y Einstein, tuvo una respuesta que aún hoy es considerada satisfactoria (Kuhn, 1980; Holton y Brush, 2004):

La naturaleza corpuscular de la luz consiste en un enorme conjunto de muy pequeños paquetes de energía, denominados fotones, que se mueven a la velocidad de la luz.

Vale recordar aquí las palabras de Louis de Broglie (1892-1987), uno de los fundadores de la Teoría Cuántica, al respecto de la naturaleza de los cuantos: “...los cuantos son una cosa muy misteriosa. Tenía yo veinte años cuando comencé a ocuparme de ellos y hace por tanto un cuarto de siglo que medito sobre el tema. Pues bien, debo confesar humildemente que he llegado en mis meditaciones a comprender algo mejor algunos de sus aspectos, pero no sé todavía con exactitud lo que se oculta detrás de la máscara que cubre su faz”. (de Broglie, 1939 p.7)

Si la luz fuera un fenómeno ondulatorio, ¿qué tipo de onda sería?

Quienes no compartían la visión corpuscular de la luz, y sostenían una visión continua, ondulatoria, debían resolver un conflicto no menos complejo que la composición de los corpúsculos de la visión alternativa. Desde siglos se sabía que existían dos clases de fenómenos ondulatorios, longitudinales y transversales: la luz debía ser de una única clase.

El sonido, fenómeno al cual se refería por analogía el modelo ondulatorio de la luz, se representa desde mucho antes de Cristo mediante ondas longitudinales. Este tipo de ondas son aquellas en las que la perturbación (la variación de la presión del aire atmosférico, en el caso del sonido), se propaga por el espacio en la misma dirección en la que sucede tal perturbación. Sin embargo, hacia mediados del Siglo XVIII surgieron distintas experiencias que mostraron que la luz, si fuera descrita mediante ondas, debía ser de naturaleza transversal (aquellas en las que la perturbación sucede perpendicularmente a la dirección de la propagación de la onda). Esto implicaba que la analogía original con el sonido dejaba de ser útil y que se requerirían distintos constructos teóricos para explicar estos fenómenos.

En 1808, Étienne Louis Malus (1775-1812) nota que la intensidad de la luz reflejada en el vidrio de una ventana, vista a través de un cristal de calcita, variaba entre un máximo y un mínimo según fuera el ángulo en que ubicara el cristal. Este hecho estaba claramente en conflicto con un modelo de luz como onda longitudinal, ya que era bien conocido que el sonido no cambia, de ningún modo, si se mueve la cabeza rotándola en uno u otro sentido con respecto a la dirección de la cual proviene el sonido.

Se originan entonces una serie de estudios que llevaron a Fresnel, a Young, a François Arago (1786-1853), y al mismo Malus a desarrollar en profundidad los fenómenos relacionados con la polarización⁶ de la luz, y que fueron anticipados por el mismo Huygens y también por Newton, quienes conocían las propiedades de la calcita, aunque ninguno pudo construir una explicación satisfactoria acorde con su forma de imaginar a la luz, más de un siglo antes de Malus.

Finalmente, y ya bien entrado el Siglo XIX (hacia 1823), se llega a la otra respuesta satisfactoria que aún hoy se sostiene:

La naturaleza ondulatoria de la luz consiste en ondas de tipo transversal.

Si la luz es de naturaleza ondulatoria y transversal, ¿qué es lo que ondula?

Siendo coherentes con el modelo de ondas mecánicas, llevado por analogía a la luz, y ya discriminada su naturaleza transversal, los científicos del Siglo XVIII trabajaron confiados en que para que la luz se propague por el espacio era necesario un medio material como sustento para la existencia misma de tal fenómeno ondulatorio (el sonido requiere del aire, los sismos requieren del suelo terrestre, etc.).

El medio material que se postuló se denominó “éter luminífero”, y tenía unas propiedades realmente especiales⁷. Debía ser muy sutil, debido a que llenaba en forma continua absolutamente todo el universo, incluso por dentro de la propia materia. Debía ser transparente por completo, ya que no se percibía atenuación alguna en la luz que se recibía del entorno, principalmente astronómico. No tenía que producir ningún rozamiento, porque era claro que los planetas se movían por el espacio lleno de éter sin frenarse. Y, además, debía ser muy rígido, mucho más que el hierro, para permitir que la velocidad de la luz a través del éter fuera tan grande (ya que se conocía bien que las ondas en general se propagan a mucha mayor velocidad en los medios materiales rígidos que en aquellos que no lo son).

El “éter luminífero” era una herencia de siglos atrás, y todavía se lo consideraba necesario para dar una explicación ondulatoria de la luz (de hecho, la teoría de Maxwell lo utilizaba). Sin embargo, hacia fines del Siglo XIX la gran mayoría de los científicos de la época comenzaban a pensar que tal ente tenía enormes dificultades ontológicas. Ya era casi imposible creer en su existencia; se lo utilizaba por necesidad y no por creer que tal cosa pudiera existir realmente.

⁶ La polarización es una característica propia de todos los fenómenos ondulatorios transversales. Básicamente, consiste en que, a medida que la onda se propaga, la perturbación sólo ocurre en un cierto plano en el espacio tridimensional, plano que contiene a la dirección de propagación y que permanece constante en su orientación espacial durante el tiempo en que el fenómeno ondulatorio esté sucediendo. Esta característica implica una cierta asimetría espacial, ya que la perturbación ocurre en un plano y no en otro cualquiera, lo que a su vez genera una gran diversidad de efectos al interactuar la onda polarizada con la materia. (Jenkins y White, 1976)

⁷ No sólo para la visión actual, sino también para la época, como se desprende de las discusiones entre los científicos dedicados al estudio de la luz y el Electromagnetismo, como por ejemplo Maxwell, Lorentz, y muchos otros (Berkson, obra ya citada).

Fueron los trabajos de Albert Abraham Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923) los que definitivamente contribuyeron a que el concepto de éter luminífero fuera abandonado como parte importante del modelo físico de universo. La experiencia de Michelson y Morley buscaba medir posibles cambios en la velocidad de la luz, según fuera la dirección en que el planeta Tierra se moviera con respecto al éter luminífero⁸. La experiencia tuvo una altísima precisión para la época, y fue repetida posteriormente en muchas oportunidades; en ningún caso se encontró variación alguna en la velocidad de la luz. Es decir, prácticamente podría decirse que daba lo mismo que existiera o que no existiera el problemático “éter luminífero”. Por esto, se considera a esta experiencia como la primera prueba empírica contundente en contra de la necesidad del éter como medio material que todo lo llena y como requisito necesario para la existencia de las ondas de luz. (Pla, obra ya citada)

Posteriormente, hacia 1905, Albert Einstein presenta su Teoría Especial de la Relatividad, en la cual ya no existe el éter, y se fortalece la concepción electromagnética de la luz, en directa relación con los trabajos de Michael Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879). Más aún, Einstein postula que el valor de la velocidad de la luz en el vacío no depende del movimiento relativo entre la fuente y el observador (Hecht y Zajac, 1986). A partir de entonces, la velocidad de la luz se simboliza con la letra “c”, del latín “*celeritās*”.

Así, se cierra con Einstein un proceso iniciado en 1865 por Maxwell en su obra *Una teoría dinámica del campo electromagnético*, para llegar a otra de las respuestas sobre la luz que aún nos son satisfactorias y por esto siguen aún vigentes:

La naturaleza ondulatoria de la luz consiste en ondas electromagnéticas de tipo transversal, y se propaga por el espacio sin necesidad de medio material alguno, a una velocidad cuyo valor en el vacío (c) es la máxima velocidad posible para cualquier ente (materia, campo, etc.) en el universo, e independiente del movimiento relativo entre la fuente de luz y el observador.

El hecho de que el concepto de “éter luminífero” haya dejado de utilizarse en la estructura teórica de la Física a partir del mismo inicio del Siglo XX no es un hecho menor en la Historia de la Ciencia. Por el contrario, y por dos razones, constituye uno de los hitos más importantes en el cambio de cosmovisión cuyo protagonista es, sin dudas, la luz.

⁸ Se continuaba aún con la analogía con respecto al sonido: el resultado de medir la velocidad del sonido emitido por una fuente varía según sea la velocidad de ésta con relación al medio material por el cual se desplaza mientras emite. Se buscaba entonces que lo mismo ocurriera con la velocidad de la luz, al emitir un rayo de luz en el sentido de movimiento de la Tierra en su órbita o en el sentido contrario, la velocidad medida debiera ser diferente.

En primer lugar, y por primera vez quizás desde la época de Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.), se pasa de un universo lleno de materia continua a un universo vacío, conformado sólo por espacio y tiempo⁹. Es un cambio que llevó siglos: despegarse del horror al vacío¹⁰, que dominó durante eras a las distintas concepciones, incluso religiosas, y a los modelos de constitución y funcionamiento del mundo natural.

En segundo lugar, se responde que “lo que ondula”, en el fenómeno ondulatorio transversal en que se convirtió la luz, es un ente nuevo, ya firmemente establecido: el campo electromagnético. Si bien el germen de la noción de campo, un ente de naturaleza continua no discreta, está ya en Descartes, Huygens, Kepler, y muchos otros, es en Faraday y Maxwell con quienes cobra la suficiente identidad, fuerza conceptual y fundamentos teóricos y empíricos como para establecerse como el nuevo paradigma, aún hoy en vigencia. (Berkson, obra ya citada; Kuhn, 1992)

La luz y su lugar en el modelo actual de Universo

“...la luz se extiende desde la gran escala del universo hasta el mundo cotidiano de los humanos. Ningún otro fenómeno cruza tantas categorías físicas y humanas.” (Perkowitz, 1996, p. 2)

Ya respondidas aquellas preguntas sobre la luz y sus características (velocidad, naturaleza, composición de las partículas de luz, clase de onda, qué es lo que ondula en tal onda), preguntas que acompañaron por siglos el desarrollo de las cosmovisiones de la Humanidad, es momento en este Capítulo de proponer una síntesis sobre cuál es la visión actual sobre la luz y su lugar en el modelo de universo físico en vigencia.

La luz como resultado y generadora de procesos en la materia

En 1913 Niels Bohr (1885-1962) propone un nuevo modelo de átomo, el cual integra los trabajos de Planck con los desarrollos teóricos de la segunda mitad del Siglo XIX (ver Capítulo 3). Así se completa la visión que desde muchos años antes ya se intuía claramente: la emisión de luz se origina cuando porciones de materia (electrones, protones, átomos, moléculas) pasan de un estado de mayor energía a otro de menor energía, liberando en esa transición cantidades discretas de energía en forma de fotones. La cantidad de energía emitida y consecuentemente la frecuencia de la luz resultante, dependen del tipo de proceso y de la materia que haya estado involucrada en tal proceso.

⁹ Es cierto que, en nuestra época, el Universo tampoco está “vacío”, sino que está lleno de campos, electromagnéticos y gravitatorios, principalmente, que también son entes continuos (aunque no materiales).

¹⁰ Por horror al vacío se sintetizan, metafóricamente, un conjunto de teorías acerca de la materia y el universo, desde los antiguos griegos hasta bien entrado el Siglo XVII. Sintéticamente, la naturaleza funcionaba de modo tal que no podían haber volúmenes del espacio, a gran o pequeña escala, sin estar llenos de materia por sutil que ésta fuera (como el éter). En caso de que por algún proceso y por un breve intervalo de tiempo se produjera vacío en alguna región, rápidamente la materia del entorno convergería hacia esa región recomponiendo el estado original. Con esta metáfora se explicaba desde el movimiento de una flecha hasta el funcionamiento de bombas hidráulicas, entre muchos otros fenómenos y aplicaciones tecnológicas (Holton y Brush, 2004).

Por otra parte, el modelo atómico de Bohr¹¹ tiene una importante característica de simetría en lo que respecta a la relación de la luz con la materia: el proceso por el cual la materia emite luz (al desexcitarse, liberando energía) es simétrico completamente al proceso por el cual la luz transfiere energía a la materia (al excitarse, absorbiéndola) (ver Capítulos 4 y 5).

Es decir, si un átomo puede emitir en ciertas condiciones un fotón, también puede absorberlo cuando las condiciones son las inversas.¹²

Más aún, existe un supuesto fundamental en todos los modelos sobre la materia, el espacio y el tiempo: lo que sucede en una parte del universo es equivalente a lo que pueda suceder en cualquier otra parte.

Es decir, si un átomo emite cierto tipo de luz en un laboratorio terrestre, un átomo idéntico en una galaxia lejana emitirá exactamente el mismo tipo de luz, siempre que las condiciones de estado (temperatura, presión, etc.) sean las mismas que en el laboratorio.¹³

Veamos un ejemplo (Figura 2.1). Cuando se analiza la luz emitida al calentar sodio ($_{11}\text{Na}$)¹⁴ con una llama en el laboratorio, la misma tiene un color característico amarillo-anaranjado y una porción de su espectro muestra una fuerte línea en emisión en los 589,3nm (línea D, arriba al centro). De noche, en cualquier ciudad, las luminarias de avenidas y calles dan una luz de color anaranjada, muy parecida al color de la llama en el laboratorio: estas lámparas contienen gas de sodio a alta presión, y su luz amarillenta es elegida para que la visión nocturna no se aleje demasiado de la sensación de colores que tenemos durante el día¹⁵. Más aún, si analizamos la luz del Sol, es posible identificar la misma línea espectral, pero esta vez oscura, no brillante, “en absorción” (abajo al centro). Tal característica, descubierta en 1814 por Joseph von Fraunhofer (1787-1826), se interpreta como que la luz emitida por el sodio que existe en el interior del Sol, luego es absorbida por sodio a menor temperatura en la región exterior de la estrella. Así, el sodio en el laboratorio, en las lámparas y en el Sol, reacciona en forma idéntica emitiendo y absorbiendo luz, según la temperatura a la que se encuentre (considerando por válidos los principios físicos y epistemológicos antes indicados).

¹¹ Característica que también tienen los modelos de átomo posteriores, incluyendo al actual Modelo Standard de la materia.

¹² Este resultado tan importante está en la esencia del modelo actual de materia y es lo que permitió en particular que los desarrollos de Planck dieran satisfactoria solución al “problema del cuerpo negro” (Kuhn, 1980).

¹³ Este principio epistemológico es fundamental para cualquier modelo físico del universo: todo lo que conocemos del mundo exterior (exterior a la experiencia inmediata y cotidiana) lo hemos construido considerando que las descripciones (teorías, modelos) tienen “pretensión de universalidad”. Es decir, lo que vale para el pequeño volumen de espacio y breve intervalo de tiempo centrados en nuestro lugar y época de trabajo, vale para cualquier punto del universo en cualquier época. Así, cuando vemos luz de una estrella, podemos afirmar (en este contexto epistemológico) que allá lejos en el espacio y en el tiempo, donde jamás estaremos, existen los mismos compuestos en iguales condiciones físicas que los que aquí, en nuestra mesada de un laboratorio científico o escolar, están produciendo el mismo tipo de luz. Este es un principio profundamente fuerte, pero muy pocas veces explicitado tanto en el ámbito científico como, y mucho menos, en el ámbito educativo.

¹⁴ El sodio fue aislado hacia 1807 por primera vez por Sir Humphry Davy (1778-1829), quien fuera mentor de Michael Faraday.

¹⁵ Se estima que aproximadamente el 50% de la iluminación urbana mundial es a base de lámparas de sodio. Si existiera una civilización extraterrestre estudiando nuestro planeta a través de la luz que emite la Tierra, tal como nosotros hoy día estamos haciendo con los recientemente descubiertos exoplanetas, notarían que en el espectro del lado oscuro del planeta existe una componente identificable con sodio, la cual no aparece en el espectro del lado diurno (quizás podrían concluir que la Tierra está habitada por una especie inteligente que genera luz artificial para atenuar la oscuridad de la noche).

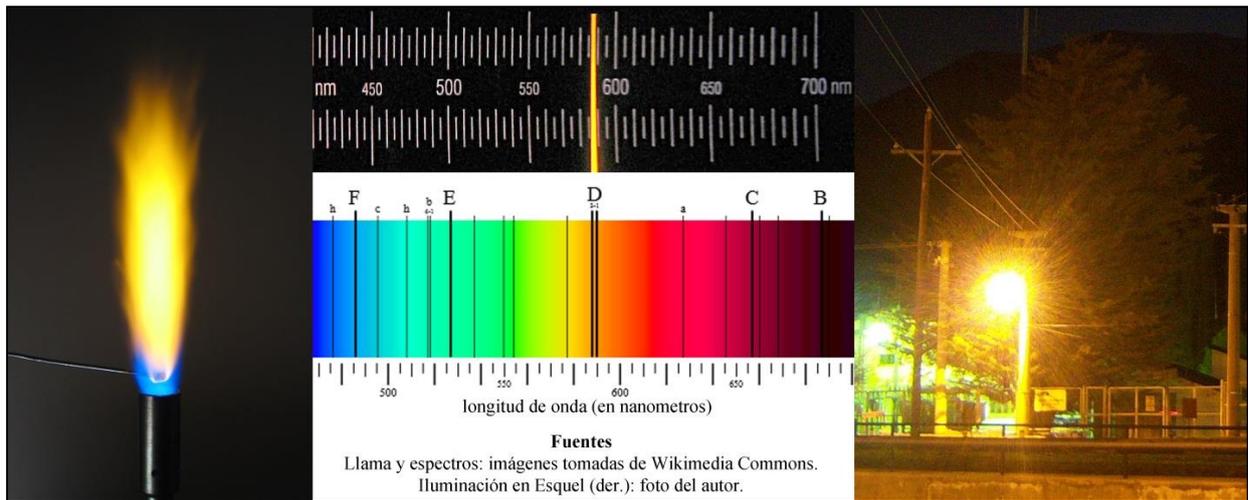


Figura 2.1.
Luz emitida y absorbida por el sodio.

La luz no se ve (o, de qué manera hacer evidente la existencia de la luz)

Un corolario de las dos características anteriores (la luz se genera en procesos en los que necesariamente debe participar la materia, y a su vez la luz interactúa con la materia) es que, aunque suene paradójico: la luz no puede verse en sí misma. La luz es invisible.

Cuando “vemos” luz, lo que vemos en realidad es cierta luz que alguna porción de materia ha emitido, en la dirección exacta del detector que dispongamos en cada caso (ojos, células fotovoltaicas, hojas, telescopios) (ver Capítulo 6).

La luz que viaja por el espacio no es visible, en sí misma, de ninguna manera; sólo la materia hace posible ver luz, al absorberla y reemitirla hacia los detectores que fueran.

William Bragg, en su obra *El universo de luz* (1945, pp. 25-26) presenta una experiencia demostrativa a partir de una caja cuyo interior está pintado completamente de negro, y se ha asegurado que no hay ningún vestigio de polvo dentro de ella. En los extremos de la caja existen dos pequeñas aberturas que permiten que un rayo de luz visible pase a través de los mismos, cruzando todo el interior de la caja. En una de las paredes laterales se hace una pequeña ventana para que un observador pueda ver hacia el interior de la caja. El observador ve claramente el rayo de luz visible al entrar y al salir de la caja, pero no puede verlo en su interior. Esta experiencia muestra que en realidad no es posible ver a la luz en sí misma, sino sólo a la luz que fue dispersada por las partículas en suspensión fuera de la caja, y que re-emitieron luz hacia los ojos del observador. Esta sencilla demostración posibilita, por ejemplo, comprender por qué el cielo diurno en la Luna es completamente oscuro, siendo que el cielo diurno en la Tierra es brillante.

Uno de las ideas más habituales en chicos y grandes sobre la luz es identificar a la luz con la fuente que la genera. Así, cuando pedimos que se indique dónde está la luz, en general se señala al Sol, a un foco o al fuego. ¿Qué vemos en realidad cuando miramos directamente al fuego o a una lámpara? Sin dudas vemos luz: la que proviene directamente de la fuente debido a que la línea de visión ojo-fuente coincide con la dirección de propagación de una parte de la luz que emite la fuente. Así, esa parte de la luz emitida interactúa directamente con nuestra retina, y ahí entonces podemos decir que “vemos”. Si la dirección de propagación de la luz no intersecta a nuestra retina, por más que realmente haya luz llenando todo el universo, nuestra sensación es que no vemos nada.

La luz no es un “objeto estático” (o, de por qué la luz no puede atraparse)

De acuerdo con lo anterior, es fundamental comprender además que la luz no es un objeto, no existe en sí misma más allá de los procesos que le dan origen. No es un ente equivalente a un planeta, o a una piedra, o a otros objetos los cuales, más allá de en qué estado se encuentren (a mayor o menor temperatura, por ejemplo), existen *per-se*. Tampoco es una sustancia, como se pensaba tiempo atrás (Holton y Brush, 2004).

En otros términos, si en alguna parte del universo no hubiera al menos una porción de materia (el gas que forma una estrella, por ejemplo), en la cual se esté dando el proceso físico de desexcitación (por estar a mayor temperatura que el cero absoluto, 0 K o -273°C), liberándose así energía según lo descrito por Planck, no habría luz de ninguna clase en ninguna parte del espacio físico. Es decir, la existencia de la luz depende, como condición necesaria, de que se den estos procesos en la materia; de lo contrario, si tales procesos no ocurrieran, no habría ninguna posibilidad de que existiera luz en el universo. Sin embargo, la materia sí existiría independientemente del estado en que se encuentra (a qué temperatura, en qué medio, en qué estado de movimiento, etc.). La existencia de la materia, en sí misma, no está determinada por los procesos de los que participa; la luz, por el contrario, se genera en tales procesos.

Del mismo modo, no existe luz “en reposo” (como sí podría definirse para un objeto cualquiera, con respecto a algún sistema de referencia arbitrario).

La propia existencia de la luz requiere del movimiento, no es posible detener la luz, ni reducirla a una “foto instantánea”.

Es decir, si bien la luz es emitida como resultado de procesos que suceden en la materia, no depende su velocidad de cuál haya sido tal proceso, ni del estado de movimiento que tenía la porción de materia que le dio origen al desexcitarse.¹⁶

Se podría asumir que, de alguna manera, luz y movimiento son conceptos indisolublemente unidos en la estructura conceptual de los modelos físicos en vigencia actualmente.

La luz no se propaga en línea recta (o, de qué depende su dirección de propagación)

Aquella primera intuición de que la luz, ya fuera concebida como un chorro de partículas o como un fenómeno de naturaleza ondulatoria, se propaga en forma rectilínea, puede resignificarse para estar de acuerdo con una visión más actualizada de la estructura del espacio y del tiempo.

En la concepción newtoniana clásica, absoluta, el espacio y el tiempo forman una estructura independiente de lo que existe en el universo, sea materia, campos u otro ente físico. En esta estructura, típicamente cartesiana, la luz se propaga efectivamente en línea recta.

¹⁶ Es posible ver en este proceso de generación de luz en el seno de la materia un fundamento más del postulado de Einstein de la independencia de la velocidad de la luz tanto con el movimiento de la fuente como con el movimiento del detector, que dio origen a la Teoría de la Relatividad, en acuerdo con los trabajos previos de Hendrik Lorentz (1853-1928) sobre cómo una carga eléctrica oscilante debería emitir luz y sobre los efectos de cambiar los sistemas de referencia espaciotemporales al describir el estado de un cierto cuerpo y su influencia sobre el entorno físico.

En la concepción relativista del universo, la trama básica está conformada por un continuo espaciotemporal, que es afectado por la presencia de materia, la cual tiene la propiedad de curvar tal trama espaciotemporal. A su vez, el efecto de tal curvatura del espaciotiempo einsteniano es que los cuerpos que se mueven en una determinada región son perturbados, desviándose de una trayectoria rectilínea y siguiendo una trayectoria que “copia” la trama geométrica local del espaciotiempo, denominada “geodésica”. Tal efecto de curvatura local de la trama del espaciotiempo es lo que se denomina “gravedad”, en esta nueva forma de concebir el universo.

Así, es posible decir que la luz (en la visión relativista) no se propaga en línea recta, sino que se propaga por las geodésicas de cada región (vale aclarar que, en el caso clásico, las geodésicas son líneas rectas). Pero esta conclusión implica que es posible afirmar que la luz es afectada por la gravedad, en su acepción de curvatura local del espaciotiempo (lo que no ocurría, de ninguna manera, en la visión newtoniana clásica, ya que la luz no tiene materia como lo requiere la Teoría de la Gravitación de Newton).

Esta nueva forma de explicar la interacción de la luz con la estructura espaciotemporal del universo fue uno de los primeros logros de predicción experimental de la aún nueva Teoría de la Relatividad General de Einstein, a principios del Siglo XX. La predicción consistió en estimar la desviación de la dirección de la luz proveniente de una estrella, al pasar cerca del Sol (cuya gran masa curvaría el espaciotiempo local). El proceso experimental se desarrolló durante el eclipse total de Sol de 1919 (condición para ver, al mismo tiempo, al Sol y a una estrella). Fue Sir Arthur Eddington (1882-1944) el encargado de realizar las observaciones y mediciones durante aquel eclipse, y sus resultados corroboraron plenamente las predicciones de la teoría desarrollada por Einstein.

Las características de la luz como agente físico

De acuerdo con los apartados anteriores, podemos entonces imaginar a la luz como un “agente físico”: un ente que transporta y potencialmente transfiere energía entre dos regiones del Universo. En tales regiones espaciales, para que tal transferencia de energía se dé efectivamente, debe necesariamente existir materia: de lo contrario, o bien la luz no será generada, o por el contrario la luz seguirá viajando, sin transferir nada de la energía que transporta.¹⁷

Podemos imaginar entonces que cuando la luz se propaga a través del espacio se manifiesta su naturaleza ondulatoria, como por ejemplo al viajar desde una estrella hasta un telescopio, o desde un objeto cotidiano hasta nuestros ojos. En este proceso, el agente físico que hemos denominado “luz” cumple la función de transportar energía, sin transferirla.

Asimismo, podemos imaginar que en brevísimos períodos de tiempo la materia y la energía cobran protagonismo, ya no en cuanto a la propagación sino en el proceso de la transferencia propiamente dicha, tanto en la emisión cuando la materia se desexcita, cuanto en la absorción cuando ésta es excitada por la energía entrante al sistema material. En este proceso, se manifiesta la naturaleza corpuscular de la luz (lo que fue descrito a través del trabajo de Planck).

¹⁷ Cabe destacar que las ondas electromagnéticas, la luz, también transfieren cantidad de movimiento lineal \mathbf{p} y angular \mathbf{L} , además de energía. Sin embargo, no focalizaremos la atención en esta importante característica de la luz, debido a que los efectos de la misma intervienen en procesos que exceden los objetivos de este Capítulo.

Es esta característica esencial de la luz, ser un agente físico que transporta y transfiere energía, lo que le da fundamental importancia en cuanto a que es principalmente a través de la luz que se intercambia información en el Universo, sea a pequeña escala (al leer un libro) o a escala astronómica (al estudiar una galaxia lejana). En palabras de Bragg, “la luz...el gran transmisor de energía en el mundo y en el universo.” (1945, p. 11)

Cuando la luz es emitida por la materia, lleva en sí misma una gran cantidad de información sobre qué tipo de materia la generó (qué tipo de carga, qué elemento o compuesto, etc.) y en qué estado estaba (presión, temperatura, campos que la afectaban, rotación).

En su viaje por el espacio-tiempo, cada vez que la luz interactúa con la materia (el medio interestelar, por ejemplo, o una nube en la atmósfera terrestre), lleva en su viaje posterior información nueva, propia de aquello con lo que interactuó.

Por esta razón, es posible considerar que el carácter “granuloso” de la luz (su naturaleza corpuscular, hecha de fotones) no es un rasgo de la luz en sí misma, sino la rúbrica de sus orígenes en la materia y de sus múltiples interacciones con la materia, la cual es en sí misma discontinua y cuantizada. (Zajonc, obra ya citada, p. 240)

Finalmente, al llegar a un detector (cualquier porción de materia, un ojo, un telescopio o una molécula de clorofila), la transferencia de energía que tiene efecto puede ser, además, interpretada como información (si quien recibiera tal transferencia de energía, por ejemplo, fuera un astrónomo).

Vale recordar que casi la totalidad de lo que conocemos del universo lo hemos construido a partir de analizar la luz que llega a nuestros detectores (ojos, telescopios) desde todas las direcciones posibles y en todos los rangos del espectro electromagnético, y que así ha sido desde el inicio de los tiempos (a excepción del polvo y meteoritos provenientes del entorno astronómico local, los cuales son materia y no luz, y que también nos brindan información sobre lo que existe más allá de la Tierra).

La maravillosa diversidad de la luz

La formulación de la teoría del Electromagnetismo por James Clerk Maxwell, hacia 1868, fue uno de los desarrollos que más impacto han producido en la historia de la Humanidad, por muchas razones.

En primer lugar, su trabajo significó una síntesis de prácticamente todo lo hecho desde tres o cuatro siglos antes de Cristo hasta la mitad del Siglo XIX, tanto a nivel teórico como experimental en los campos de la electricidad, el magnetismo y la óptica. Tales desarrollos fueron subsumidos completamente en la nueva teoría, algo que jamás había ocurrido en la estructura de las ciencias hasta ese momento.

Por otra parte, la Teoría tuvo una potencia predictiva inusual. Una de las consecuencias más importantes del trabajo de Maxwell fue la predicción de que era posible que existieran campos eléctricos y magnéticos en un volumen del espacio, sin la presencia en ese volumen de materia alguna como cargas aisladas o corrientes eléctricas. Maxwell deduce que estos campos debían cumplir necesariamente con ciertas condiciones para que su existencia fuera posible. Debían ser mutuamente dependientes, es decir, la existencia de uno de los campos era condición necesaria para la existencia del otro, y viceversa. Sus respectivas distribuciones espaciales debían ser mutuamente perpendiculares, y además variar en el tiempo con la misma frecuencia (ver Capítulo 1). Finalmente, ambos campos se propagaban por el espacio (no debían ser estáticos) e indisolublemente juntos a una gran velocidad, posible de ser calculada sólo conociendo las propiedades eléctricas y magnéticas del medio material a través del cual tales campos se propagaran.

La solución matemática al sistema de ecuaciones planteado por Maxwell para ambos campos eléctrico y magnético, que satisface tal conjunto de condiciones, consiste en un ente matemático denominado “onda”, para la época completamente conocido, en particular por los estudios sobre fenómenos ondulatorios en sonido, cuerdas y agua. Sin embargo, estas nuevas ondas derivadas del trabajo con campos electromagnéticos describen una realidad física muy diferente a todas las anteriores: éstas serían “ondas electromagnéticas”. Las flamantes ondas electromagnéticas describen cómo coexisten y de qué manera se propagan por el espacio y el tiempo campos eléctricos y magnéticos en forma ondulatoria.

Al calcular la velocidad de propagación para las ondas electromagnéticas en un entorno espacial identificable como el espacio interestelar, el cálculo llevó a una clara coincidencia con los valores obtenidos por Rømer y otros para la velocidad de la luz visible (el único tipo de luz que se conocía en la época de aquellas mediciones de velocidad).

Así, y casi por fuerza de la evidencia¹⁸, se identificó a la luz visible con aquellas ondas electromagnéticas, lo que fue luego rápidamente corroborado por los más grandes científicos de la época, en una gran cantidad de experiencias en situación de laboratorio.

Maxwell predice, además, que debían existir otros tipos de ondas electromagnéticas, de la misma naturaleza y velocidad que aquellas identificadas con la luz visible, pero con características bien distintas. Maxwell muere sin ver siquiera si la existencia de tales nuevas ondas podría corroborarse (ya no sus aplicaciones tecnológicas).

Es recién en 1887 que Heinrich Hertz (1857-1894), logra generar y detectar ondas electromagnéticas no visibles para el ser humano, las hoy llamadas “onda corta”. Aquí radica otro de los profundos impactos de la teoría de Maxwell: a partir de este momento, el desarrollo de los mecanismos de generación y detección de ondas electromagnéticas fue una reacción en cadena, fruto de la cual es el presente de las comunicaciones diversas, potentes y globalizadas, propias de la civilización actual (ver Capítulo 6).

¹⁸ “Difícilmente podríamos eludir la conclusión de que la luz consiste en oscilaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos”. Traducción libre de: “We can scarcely avoid the conclusion that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena”. James Clerk Maxwell, hacia 1862. Tomado de <http://turnbull.mcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Maxwell.html>

Pero lo que más nos interesa resaltar aquí no es el desarrollo tecnológico derivado del trabajo de Maxwell, sino que con éste nace el concepto de “espectro electromagnético” (ver Capítulo 1).

Es difícil comprender hoy día que, antes de Maxwell, no existía tal concepto: la luz era, únicamente, lo que hoy llamamos la luz visible, aquello que detectan los ojos de los seres humanos.

Más aún, es difícil para nosotros comprender la visión de mundo que tenían pensadores como Aristóteles, Galileo, Newton, y muchísimos otros, en la que ni siquiera imaginaban que a su alrededor todo el universo emitía y absorbía energía a través de la luz, y que ni ellos ni ninguno de sus contemporáneos podía ni detectar ni conceptualizar.

Toda la Física y la Astronomía, y el resto de las disciplinas científicas, intentaban explicar el universo a partir de lo que se observaba únicamente en el visible. Toda teoría del Universo, antes de Maxwell, debía ser entonces claramente incompleta: no se sabía de la existencia de luz infrarroja, luz ultravioleta, luz en radio, luz en rayos gamma, ni del resto del espectro electromagnético.¹⁹ La luz, en toda su diversidad, siempre había estado allí, alrededor, presente, y nadie nunca había notado algo más allá de lo que detectan los ojos humanos...²⁰

Todas las características físicas de la luz (polarización, frecuencia, intensidad, velocidad de propagación) y la naturaleza dual (ondulatoria y corpuscular) son esencialmente comunes y a la vez propias de cada una de las infinitas posibilidades del espectro electromagnético (de todo el espectro, de cada uno de sus componentes y no sólo de la luz visible, que es la única que podemos detectar los humanos).

La diversidad es infinita, porque el espectro electromagnético no tiene extremos: no hay límites teóricos ni empíricos para la existencia de luz en el extremo de onda corta ni en el extremo de onda larga. Asimismo es infinita la gama de posibilidades para conocer más del entorno natural en el que vivimos, si comprendemos de qué manera decodificar la información que llega desde todo el universo por medio de la luz (en todos los rangos del espectro electromagnético).

La representación tridimensional de la luz²¹

¿De qué manera se podría representar gráficamente a la luz, tratando de evidenciar sus dos características esenciales: ondulatoria y corpuscular?

Una forma útil para imaginar la forma actual de modelizar la luz es la de un conjunto de frentes de onda²² (Figura 2.2), que se propagan por el espacio con velocidad “c”, y que tienen una “granulosidad” característica, como si los frentes estuvieran tachonados por fotones.

¹⁹ Si pensamos en esta tan movilizadora idea, a su vez debería transformarse en un serio llamado de atención hacia las afirmaciones de conocimiento y juicios de valor que realiza la Ciencia actual: ¿qué será lo que no estaremos percibiendo hoy día, y que podría ser visto como cotidiano y evidente dentro de algunos siglos? Debería servirnos como un necesario llamado a la “humildad epistemológica”, que no ha sido muy habitual en el quehacer científico, en todas las épocas.

²⁰ Vale aclarar que existen dos excepciones a lo antes descrito. El astrónomo William Herschel (1738-1822) descubrió en 1800 la luz infrarroja al ubicar un termómetro sobre un espectro visible, en una posición más lejana que el rojo. En 1801, y a partir de la noticia del descubrimiento de Herschel, Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) descubre la luz ultravioleta, al experimentar con cloruro de plata expuesto a la luz.

²¹ A partir de Einstein, 1905, y de los apuntes del autor de las clases de Física Moderna de la Dra. Titina Moco-roa (UNLP, 1979).

Si se focaliza sobre la propagación de la luz, cobra importancia el frente de onda moviéndose a gran velocidad y en una mayor escala tanto espacial como temporal, en la cual no es posible discriminar la existencia de fotones individuales, por lo cual se resalta la continuidad del fenómeno ondulatorio.

Si se focaliza sobre la transferencia de energía a la materia, cobra importancia una muy pequeña porción del frente de onda, haciéndose evidente cada fotón, en un muy pequeño instante de tiempo, resaltándose entonces la naturaleza discontinua, corpuscular, de la luz.

La teoría ondulatoria de la luz, de naturaleza continua, es excelente para explicar los fenómenos ópticos a gran escala y en mediciones experimentales promediadas en el tiempo. Sin embargo, tal teoría no satisface los requerimientos para explicar fenómenos puntuales en el espacio y casi instantáneos en el tiempo (como la emisión o absorción de un fotón).

Tal explicación la brinda en forma satisfactoria la visión corpuscular de la luz, que postula que la energía está discontinuamente distribuida en el espacio, en corpúsculos denominados fotones. Esto vale en especial para aquellos procesos relacionados con la emisión y absorción de energía lumínica por la materia (cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, fotosíntesis, etc.).

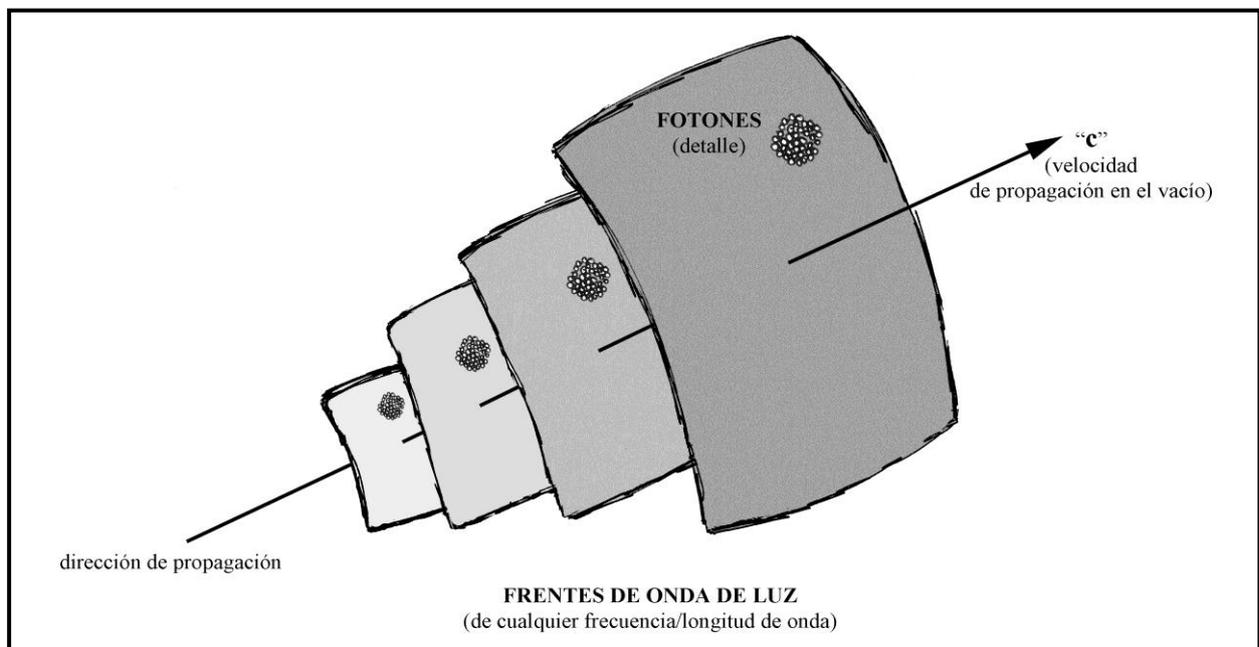


Figura 2.2
Representación gráfica para imaginar la dualidad onda-fotón de la luz.
Los frentes de onda se evidencian en la propagación por el espacio,
mientras que los fotones se evidencian en la interacción con la materia. (Fuente: del autor)

²² Un frente de onda es el conjunto de los puntos del espacio por el cual se propaga una onda de luz que tienen iguales valores instantáneos de campo eléctrico y campo magnético. La representación gráfica de los frentes de onda es una herramienta para visualizar, imaginar, de qué manera se propaga la luz y con qué geometría espacial, la que depende de la fuente que generó la emisión de luz y de las características del medio por el cual se está propagando. La convención gráfica para la representación de los frentes de onda indica que se representan únicamente frentes de onda sucesivos separados espacialmente por una distancia de una longitud de onda (1λ), los cuales son perpendiculares a la dirección de propagación, con la geometría tridimensional que corresponda.

La luz y nuestra dualidad

Finalmente, y después de varios siglos de aparente conflicto epistemológico, la denominada “dualidad onda-partícula” de la luz es en la actualidad un tema aún abierto, debido a que no existe ninguna teoría más abarcativa que posibilite explicar, en forma satisfactoria, por qué la luz, un ente fundamental en la cosmología actual, se comporta de modo tan particular.

No fueron suficientes los trabajos de Louis de Broglie para calmar esta “molestia”, cuando postuló hacia 1927 que tanto como la luz podía ser considerada onda y partícula, asimismo toda partícula (todo cuerpo, en general) podría ser considerado bajo ciertas circunstancias como una onda (la famosa “onda guía o piloto”)²³ (de Broglie, 1944).

“Así, a través de toda la gama de entidades fundamentales que conocemos, existe este comportamiento dualista: todo puede comportarse como corpúsculo o como onda, de acuerdo a las circunstancias. Nuestra distinción entre radiación y materia se transforma en una diferencia de grado y no de naturaleza”. (Bragg, 1945, p. 283).

Sería posible entonces hablar de “la dualidad de aspecto de la luz”, ya que las ideas de corpúsculo y onda son complementarias, y ambas son imágenes simples, son abstracciones e idealizaciones con el fin de explicar lo que se percibe e imagina. Para la descripción completa de los fenómenos observables se requiere la aplicación alternada de ambas concepciones, aunque sean inconciliables, ya que las imágenes que suministran jamás son simultáneamente aplicables de modo completo a la descripción de la realidad. (de Broglie, 1939, obra ya citada)

Los desarrollos desde Planck hasta de Broglie, principalmente, dieron origen a la Teoría Cuántica de la materia, en la que la dualidad onda-partícula es uno de sus pilares, junto con el Principio de Incerteza de Werner Heisenberg (1901-1976), postulado hacia 1927.

La Cuántica es aún hoy una teoría en desarrollo, ya que en especial la descripción dual de la materia y de la luz es vista como algo propio de nuestra capacidad (quizás incapacidad) para generar nuevos modelos, en vez de esforzarnos en transformar sucesivamente modelos cuya evolución histórica muestra que van quedando agotados en su potencia y riqueza explicativa.

Citando nuevamente a Bragg (obra ya citada, p. 7): “...la vieja rivalidad entre las dos teorías de la luz, que ha sido uno de los más poderosos estímulos para el desarrollo de la ciencia. El corpúsculo y la onda, siempre asociados a los nombres de Newton y Huygens, respectivamente, parecieron cada uno a su vez resultar finalmente vencedores. La contienda está llegando a su fin en una manera tan inesperada como aleccionadora. Se llegará a una reconciliación de dos hipótesis que habíamos creído que se excluían mutuamente; y esto es una advertencia del peligro que significa dejar que nuestras imágenes mentales se transformen en creencias fijas.”

²³ A partir de los trabajos teóricos de de Broglie es que se desarrolla, hacia 1930, el microscopio electrónico, que utiliza electrones en su dualidad ondulatoria para extender el rango de resolución varios órdenes de magnitud por sobre el microscopio óptico clásico, lo que generó a su vez un profundo desarrollo en otras áreas, en especial en el campo de la Biología.

¿Qué es la luz?

“¿Cuál es la naturaleza de esa cosa invisible que llamamos luz y cuya presencia expone todo a la visión, con excepción de sí misma?”
Arthur Zajonc.

Esta pregunta ancestral sigue sin una respuesta plenamente satisfactoria, quizás por las mismas razones que antes expusimos: la Física no se dedica a preguntar por la esencia de las cosas, por lo que son las cosas, por su ontología.

Esto lleva a una necesaria reformulación de tal pregunta (Esquema 2.1), a menos que nos respondamos, muy filosóficamente, que no podemos saber qué es la luz.

Sin embargo, sí podemos preguntarnos por lo que hace, por lo que genera, por lo que transfiere, por cómo se propaga, por sus características físicas, por cómo se manifiesta en distintas situaciones. Esta forma de preguntar, y consecuentemente de construir respuestas, es lo que ha posibilitado a la civilización actual comprender mucho mejor la íntima relación y dependencia de la vida en la Tierra con este agente físico fundamental: la luz.

Quizás, dentro de algunas décadas o siglos, y a partir de nuevas preguntas y sus consecuentes respuestas que hoy ni siquiera imaginamos, podremos relacionarnos de nuevas maneras con la luz y a partir de esta íntima relación comprender un poco más quiénes somos los seres humanos, cómo construimos y validamos conocimiento, y de qué manera vamos viviendo en sociedad en el Universo físico del que somos parte, y en el cual la luz se constituye como el intermediario fundamental entre el mundo y nosotros.

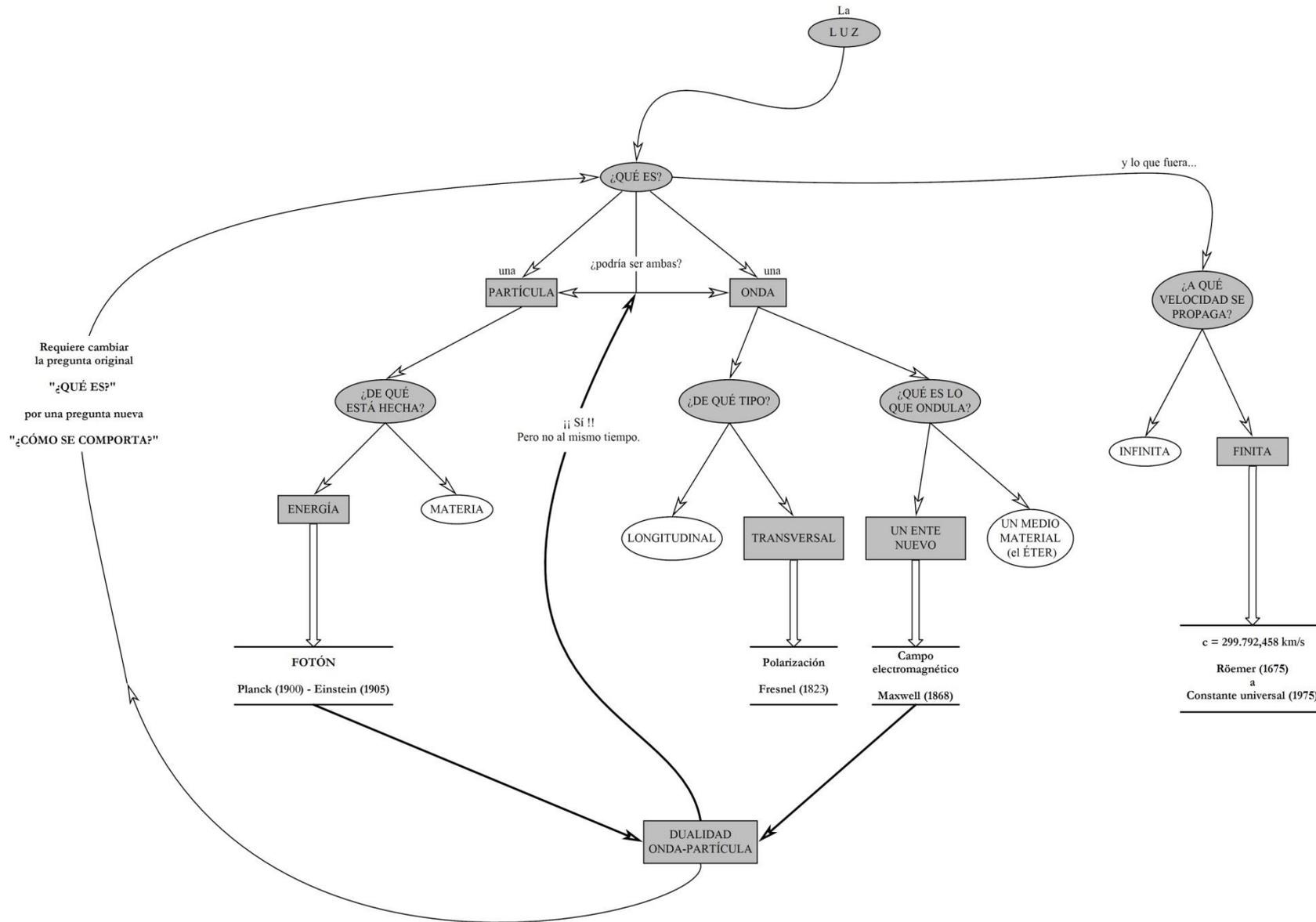


Figura 2.3
Esquema de síntesis sobre la evolución histórica de las preguntas sobre la luz y las respuestas que se fueron construyendo a través del tiempo.
Fuente: del autor.

Bibliografía del Capítulo 2

- Asociación Argentina de Luminotecnia. Sitio web oficial: <http://www.aadl.org.ar/>
- Berkson, W. (1985). *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Universidad, Madrid. Segunda Edición.
- Bragg, W. (1945). *El universo de luz*. EMECÉ, Colección Ciencia Divulgada, Buenos Aires.
- de Broglie, L. (1939). *La Física nueva y los cuantos*. Ed. Losada S.A., Buenos Aires, Argentina.
- de Broglie, L. (1944). *Materia y luz*. Espasa-Calpe Argentina S.A. Tercera Edición. Buenos Aires.
- Einstein, A. (1905). "On a heuristic point of view about the creation and conversion of Light". En *Annalen der Physik*, 17, 132-148 (original en alemán). Consultado en http://users.physik.fu-berlin.de/~kleinert/files/eins_lq.pdf, a partir de Wikisource.
- Feynman, R. P. (2006). *QED (quantum electrodynamics). The strange theory of light and matter*. Princeton University Press, NY.
- Hecht, E., Zajac, A. (1986). *Óptica*. Addison-Wesley. NY, EEUU.
- Holton, G. y Brush, S. (2004). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Segunda Edición corregida y revisada. Editorial Reverté, Barcelona, España.
- Kearney, M. (1984). *World View*. Chandler and Sharp Publishers, Inc., Novato, CA, USA.
- Kuhn, T. S. (1980). *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912*. Alianza Universidad. Madrid, España.
- Kuhn, T. S. (1992). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, Breviarios. Buenos Aires, Argentina. 4ª Reimpresión.
- Jenkins, F., White, H. (1976). *Fundamentals of optics*. McGraw-Hill.
- Moreno González, A. (1994). "Light stories: a brief history of light". En *Proceedings of the International Conference on Physics Education, GIREP '93*. Braga, Portugal. pp. 38-80.
- NASA City lights. (2000). <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=55167>
- Perkowitz, S. (1996). *Empire of light. A history of discovery in Science and Art*. Henry Holt and Company, Inc., NY.
- Pla, C. (1947). *Velocidad de la luz y Relatividad*. Historia y Filosofía de la Ciencia. Serie Menor. Editorial Espasa-Calpe Argentina S.A., Buenos Aires.
- Pozo, J. I. (1989). *Teorías cognitivas del aprendizaje*. Ediciones Morata, Madrid, España.
- Sagan, C., Druyan, A. (1993). *Sombras de antepasados olvidados*. Planeta. Barcelona.
- Sagan, C. (2003). *Los dragones del Edén. Especulaciones sobre la evolución de la inteligencia humana*. Planeta DeAgostini. Barcelona.
- Zajonc, A. (1995). *Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente*. Editorial Andrés Bello, Segunda Edición, Santiago de Chile.
-