

Unificación de la óptica clásica (Comentarios a una distinción científica)

Román Castañeda Sepúlveda

*“El científico no estudia la naturaleza porque sea útil;
la estudia porque se deleita con ella y
se deleita con ella porque es hermosa.
Si la naturaleza no fuera bella, no valdría la pena conocerla,
y si no ameritara saber de ella, no valdría la pena vivir la vida”*

Henri Poincaré

1 “Seamos honestos, nosotros no sabemos realmente nada sobre la naturaleza de la luz y es deshonesto emplear palabras rimbombantes carentes de sentido” Con esta contundencia describió el padre Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) el estado del conocimiento de la óptica en su época. El profesor de la Universidad de Bologna “la Docta”, la más antigua de Europa, lo escribió así en su libro *Physico-Mathesis de Lumine Coloribus et Iride* (1665), en el que también estrenara la palabra *diffractio* para bautizar un fenómeno que cambiaría para siempre la manera de pensar sobre la luz.

Y no era para menos. Apenas unos 45 años antes, el profesor de Leyden, Willebrod Snellius (1591-1626) había logrado formalizar la ley de refracción de la luz, que explica como los rayos cambian de dirección cuando atraviesan la superficie que separa dos medios diferentes. La segunda ley establecida en siglos, desde que el alejandrino Euclides (315-250 AC) hubiera reportado la ley de reflexión de los rayos de luz en sus *Elementos de Geometría*.

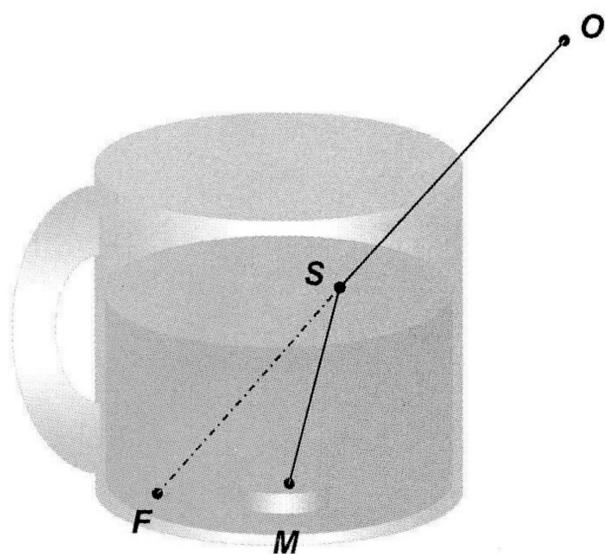


Figura 1: Experimento de Ctesibiu: si el ojo del cliente se coloca en la posición O verá el punto F del fondo del vaso si no hay agua, es decir, no verá la moneda M. Pero si el tabernero vierte suficiente agua, entonces, podrá ver la moneda en el fondo del vaso.

La ley de refracción resolvió por fin una charada de taberna elevada a la categoría de problema científico, que hubiera sido formulada hacia el año 50 por Ctesibiu (Figura 1). La broma consistía en que si un cliente del local ponía una moneda en el fondo de su vaso y lo dejaba sobre la mesa, de manera que no alcanzara a verla mirando a través de la boca del vaso, la vería aparecer mágicamente cuando el tabernero vertiera agua en él hasta una cierta altura.

Ptolomeo el astrónomo, el científico más destacado de Alejandría en el momento, reconoció el fenómeno de refracción pero no pudo explicarlo adecuadamente, en parte porque

creía en la teoría de la visión planteada por Demócrito (460-370 AC). El sabio de Abdera, más conocido por su concepción atomista, pensaba que diminutas partículas eran emanadas por los ojos y, luego de chocar con los objetos, regresaban a ellos elaborando una réplica de la escena sobre sus tejidos. Bastaba con mirar los ojos de alguien para percatarse de ese hecho.

Se necesitaron catorce siglos y otra cultura para pensar distinto y corroborarlo. En 1026, el sabio árabe Abu Ali Al-Hasen ibn Al-Hasan ibn Al-Haytan (~965-1039), más conocido como Alhazen, astrónomo, matemático y criador de hermosos caballos dorados de crines blancas, clausuró las creencias en efluvios luminosos de los filósofos griegos, mostrando que la luz era un fenómeno completamente externo a nosotros que, al entrar en los ojos nos revelaba la visión del entorno.

El asombro ante la broma alejandrina sólo fue borrado enteramente por Snellius, al establecer la ley que describe correctamente el cambio de dirección de la luz, cuando pasa de un medio (agua) a otro diferente (aire), como se evidencia en la Figura 1. Ni el florecimiento alejandrino, ni las máquinas de guerra con las que se dice que Arquímedes de Siracusa dirigía la luz del sol para incendiar flotas navales agresoras, ni los descubrimientos sobre la visión de Alhazen, ni los avances del coloso Da Vinci con la cámara oscura propuesta por Alhazen, tuvieron el impacto de la ley de refracción Snellius.

No obstante, no fue suficiente para mitigar la denuncia del padre Grimaldi. Por esa misma época, el holandés Christiaan Huygens (1629-1695) discrepaba de las ideas de su amigo Isaac Newton (1642-1727), al plantearle que la luz debía estar conformada por vibraciones parecidas a las acústicas. Incluso, Newton no se animó a publicar su libro *Opticks*, la obra

que tal vez culminara su enorme contribución a la *filosofía de la naturaleza* sino hasta cerca de su muerte, porque no se convenció del todo de que los chorros de pequeñas partículas que, según él, componían la luz realmente dieran cuenta de su naturaleza.

Otros dos siglos se precisaron para que la concepción ondulatoria sobre la luz se consolidara y fuera respetada por académicos y científicos. Podría decirse que el Waterloo de la concepción corpuscular de la línea de pensamiento que debieron seguir Demócrito, Euclides, Snellius y Newton, quedó señalado con el irónico nombre de **Punto de Poisson** (Figura 2). Ironía que la historia le tenía reservada al insigne matemático francés Simeon Poisson (1781-1840), miembro de la Academia de Ciencias, quien al lado de Cauchy, Laplace y Arago, conformara el jurado del famoso concurso, convocado por la Academia hacia 1818, para resolver de una vez el problema de la naturaleza de la luz, pues la concepción Newtoniana había sido herida por un experimento simplísimo, realizado en 1805 por el inglés Thomas Young (1773-1829): la luz interfería, como lo hacían las ondas mecánicas, cuando atravesaba una pantalla oscura donde se habían practicado dos agujeros muy cercanos entre sí. Este fenómeno, emparentado con la

difracción descubierta por Grimaldi, no podía ser explicado apelando a los chorros de partículas de Newton.

Augustin Jean Fresnel (1788-1827), ingeniero de caminos francés, caído en desgracia por su posición en contra de Napoleón, fue animado por su amigo Dominique François Jean Arago (1786-1853) a concursar con sus ideas ondulatorias sobre la luz. Fresnel no conocía los trabajos clásicos sobre la luz porque solo hablaba su lengua materna. Aún así, Arago, que a la postre presidió el jurado, conocía su genialidad.

Luego de leer el trabajo de Fresnel, Poisson lo descalificó porque predecía la aparición de una sombra en el centro del patrón luminoso, que se producía cuando la luz atravesaba una pantalla oscura, sobre la que se había perforado un agujero. Peor aún, predecía la aparición de un punto luminoso en el centro de la sombra geométrica causada por la iluminación de un objeto opaco sobre una pantalla, colocada a una cierta distancia del obstáculo (Figura 2). Esas predicciones no eran físicamente posibles a los ojos de Poisson, pues no podían ser producidas iluminando la pantalla o el obstáculo con un chorro de partículas.

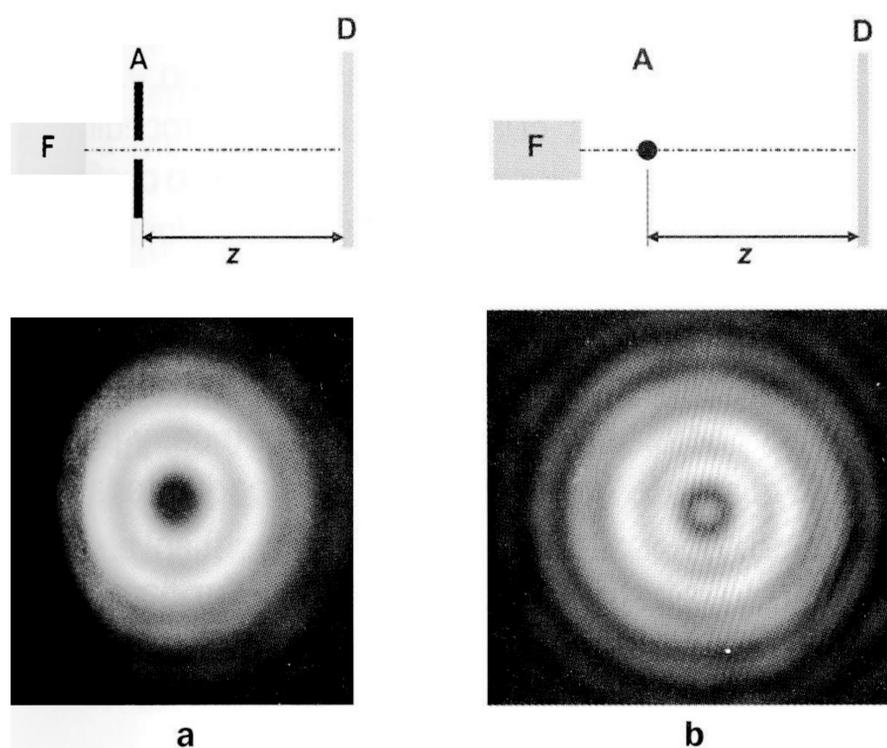


Figura 2: Patrones luminosos predichos por Fresnel. Éstos son recogidos sobre una pantalla D cuando la luz de una fuente F ilumina a) un agujero circular practicado sobre una pantalla oscura A (nótese la sombra en el centro) y b) un obstáculo opaco en la posición A (balín); nótese el punto de Poisson en el centro de la sombra geométrica del obstáculo.

No obstante, Arago diseñó y realizó con éxito un experimento que mostraba claramente un punto brillante en el centro de la sombra geométrica proyectada por un obstáculo opaco: el punto de Poisson predicho por Fresnel y que le mereciera a éste la nominación al premio de la Academia y el reconocimiento del carácter ondulatorio de la luz.

Hacia 1865, James Clerk Maxwell (1831-1879) sintetizó las leyes de la electricidad y el magnetismo y predijo la existencia de ondas electromagnéticas, en su Teoría Electromagnética. A pesar de los antecedentes del efecto Faraday (1845), que revelaba cierta sensibilidad de la luz a los campos magnéticos y de la coincidencia entre el valor de la velocidad de la luz medida por Fizeau y Foucault (1849) y el predicho teóricamente por Maxwell, sólo veintitrés años después de la aparición de la Teoría Electromagnética los experimentos del berlinés Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) dejaron en claro que la luz era, en efecto, una onda electromagnética.

Estos hallazgos, unidos al descubrimiento de la naturaleza electromagnética de la materia, iniciado por los experimentos del británico Joseph John Thomson (1856-1940, premio Nobel de física de 1906) y del norteamericano Robert Andrews Millikan (1868-1953, premio Nobel de física de 1923), y a los procesos básicos de producción y absorción de luz mediante transiciones atómicas, determinados por Albert Einstein (1879-1955, premio Nobel de Física en 1926) en 1905, le confirieron a la luz un nuevo carácter al inicio del siglo XX:

De luz son las palabras con las que la materia habla, y también las que a menudo escucha.

Así, la óptica entra al siglo XX escindida en dos formas de pensamiento, ambas

significativamente poderosas pero irreducibles:

◆ La óptica geométrica, muy cercana a la concepción corpuscular del universo. Su concepto básico es el **rayo de luz**, pensado como una línea recta entre la fuente y el receptor. Aunque la óptica geométrica no puede explicar el transporte de energía y otros fenómenos ópticos, provee un sólido soporte para el entendimiento de la formación de imágenes a través de sistemas ópticos, soporte que se utiliza aún en nuestros días.

◆ La óptica ondulatoria, consistente, como su nombre lo indica, con la concepción ondulatoria del universo. En contraste con la óptica geométrica, esta teoría, cuyo concepto básico es la **onda de luz**, explica exitosamente los fenómenos de interferencia y difracción de la luz, y da cuenta directamente del transporte de energía luminosa. Desde el siglo XIX se emplean instrumentos ópticos, tales como interferómetros y espectrómetros, cuya operación se basa en los conceptos de la óptica ondulatoria. Éstos no pueden ser operados adecuadamente partiendo únicamente de los principios de la óptica geométrica.

Con el dominio de la electricidad y la capacidad de producir luz con ella, desarrollado entre finales del siglo XIX y comienzos del XX, apareció la necesidad de caracterizar apropiadamente las nuevas fuentes de luz y describir el transporte de energía luminosa en el espacio a través de parámetros cuantitativos. Los procedimientos experimentales empleados para ello configuraron una disciplina, denominada **Radiometría**, que le aportó a la óptica geométrica lo que le faltaba: una manera de describir y controlar el transporte de energía luminosa, compatible con los principios de la óptica geométrica, y por tanto, distante de los de la óptica ondulatoria.

No obstante, su concepto fundamental, la radiancia, no puede derivarse directamente de tales principios.

2

¿Por qué unificar en un marco conceptual y matemático estas tres teorías? Incluso una cuarta o una quinta que pudieran formularse en referencia al fenómeno que hemos llamado *luz*. La pulsión unificadora en física no es exclusiva de algunas de sus ramas ni de ciertas épocas. Obedece, más bien, a una posición filosófica y epistemológica, acuñada magistralmente por Newton en el libro III de sus *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1726). Bajo el título de *Regulae Philosophandi*, Newton enuncia las siguientes cuatro reglas a seguir para el estudio de la filosofía de la naturaleza:

◆ *No se deben admitir otras causas que las necesarias para explicar los fenómenos.*

◆ *Los efectos del mismo género deben siempre ser atribuidos, en la medida en que sea posible, a la misma causa.*

◆ *Las cualidades de los cuerpos que no son susceptibles de aumento ni disminución y que pertenecen a todos los cuerpos sobre los cuales se pueden hacer experimentos, deben ser miradas como pertenecientes a todos los cuerpos en general.*

◆ *En la filosofía experimental, las proposiciones sacadas por inducción de los fenómenos deben ser miradas, a pesar de las hipótesis contrarias, como exacta o aproximadamente verdaderas, hasta que algunos otros fenómenos las confirmen enteramente o hagan ver que están sujetas a excepciones.*

Entre las muchas lecturas posibles de estas reglas, interesa señalar su definición del principio rector de economía del pensamiento científico, basado en el compromiso de unificar las reflexiones sobre la naturaleza a través de una reducción máxima del número de causas y efectos de los fenómenos, y de la aplicación de un sistema de clasificación de rigor espartano, que opera por asociación y se valida por experimentación.

Para emplearlas apropiadamente en óptica, habría que responder de manera precisa la pregunta ¿qué es un **observable** en óptica? Porque causas y efectos deben plasmarse en estados específicos de ese **observable**, los cuales deben poder determinarse por medio de experimentos. En el contexto de la óptica, el concepto **observable** se refiere a las cantidades que pueden ser registradas por un detector, sea éste una foto-celda, una película fotográfica o la retina del ojo.

Así, un rayo de luz no es estrictamente una cantidad observable, porque es simplemente una línea recta que no está asociada a ninguna forma de energía. Tampoco lo es la **amplitud compleja** de la luz, la cual no puede ser registrada por los detectores convencionales, debido a sus rápidas variaciones en cada punto del espacio-tiempo. Las únicas cantidades ópticas observables según la anterior definición son el color y la intensidad de la luz. En este ensayo nos ocuparemos únicamente de la segunda. Así, un marco teórico unificado debe proveer predicciones y explicaciones precisas sobre la distribución de intensidad a la salida de cualquier experimento óptico.

Para construir dicho marco se requiere de un concepto adicional, capaz de englobar a los tres anteriores, que son entre ellos irreducibles: el rayo, la onda y la radiancia. Ese concepto es el de **coherencia óptica**. Tal vez la primera referencia a ese concepto fue introducida por Max Theodor Felix von Laue (1879, 1960, premio Nóbel de física de 1914), quien llamó «Kohärenz» a la habilidad de la luz de producir patrones de interferencia estables, caracterizados por franjas brillantes y oscuras (Figura 3). Además, propuso una medida cuantitativa del grado de coherencia de la luz a partir de mediciones de su distribución de intensidad.

Algunos años más tarde, Fritz Zernike (1888-1966, premio Nóbel de física de 1953) reunió las ideas de von Laue y una teoría anterior, propuesta por el físico holandés Van Cittert, en una definición simple de la **coherencia parcial** de la luz, apoyada en el experimento de interferencia de Young. Zernike enfatizó el hecho de que el grado de coherencia puede ser identificado a partir de la **visibilidad** de las

franjas de interferencia, un parámetro que había sido formalizada en 1890 por el físico norteamericano Albert Abraham Michelson (1852-1931). Éste toma valores entre cero y uno, siendo igual a cero cuando la intensidad registrada por el detector no presenta franjas (luz incoherente) e igual a uno cuando presenta franjas de alto contraste (luz coherente) (Figura 3).

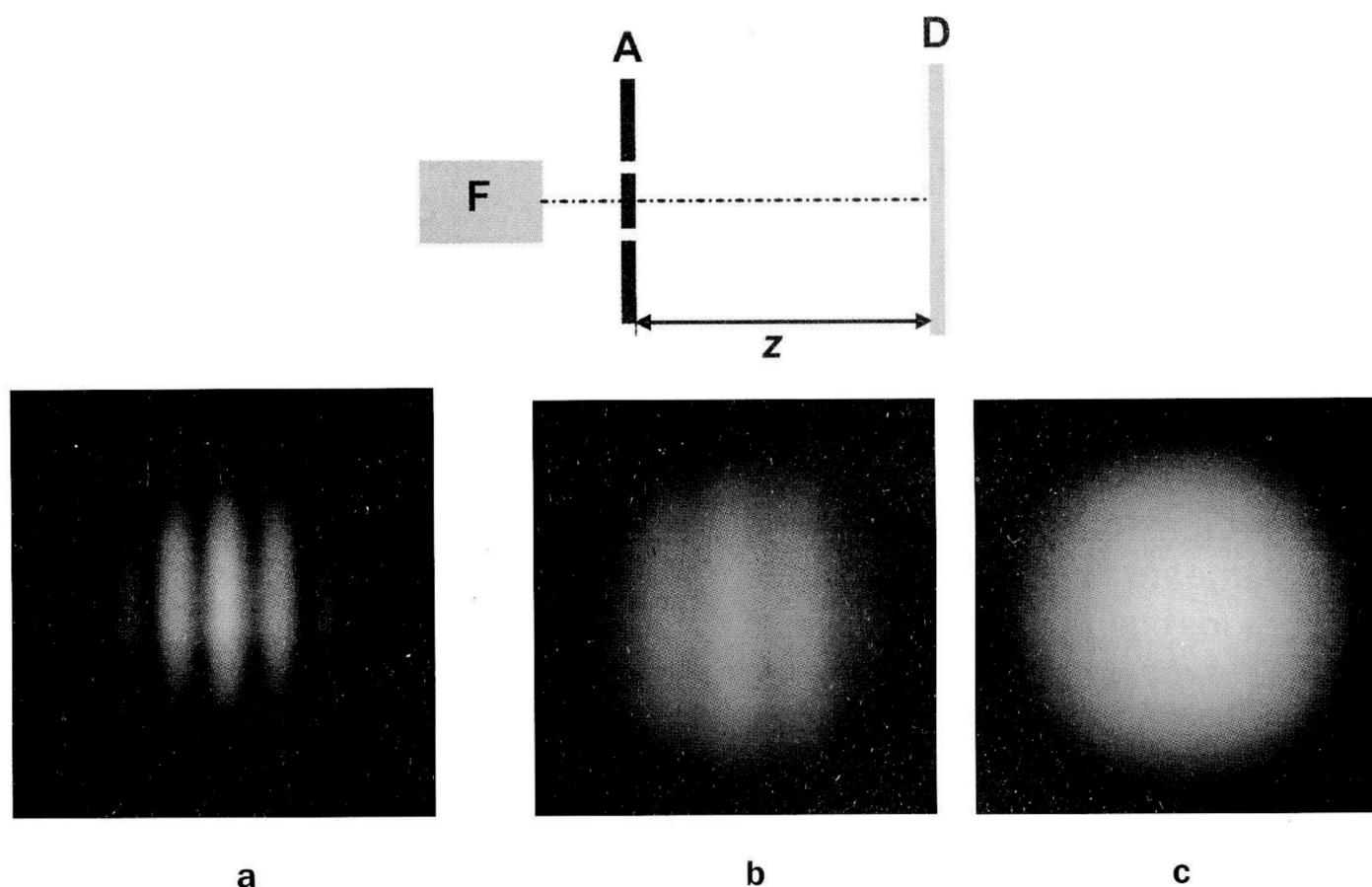


Figura 3: Ilustrando el concepto de coherencia óptica. Una fuente de luz F ilumina una pantalla oscura con dos agujeros. La luz prosigue y las ondas, provenientes de los agujeros, se superponen en el detector D (diagrama superior). Diferentes intensidades son registradas por el detector, dependiendo de la coherencia de la luz: a) patrón de franjas (interferencia) para luz con alto grado de coherencia (por ejemplo: un láser). b) patrón de intensidad de luz parcialmente coherente (se advierten franjas, pero éstas están muy borrosas). c) patrón de intensidad para luz incoherente (las franjas han desaparecido)

Una formulación más general, que permitió describir la propagación de las propiedades de coherencia en el espacio en forma de ondas, junto con la luz misma, fue desarrollada por Emil Wolf hacia 1955. Él expresó el grado de coherencia en términos de una función matemática que bautizó con el nombre de **densidad espectral cruzada**, cantidad básica

de su teoría, conocida en la actualidad como **teoría de coherencia de segundo orden**. Ahora bien, quizá el primer paso hacia una unificación de esta teoría con la radiometría fue dado por Walther, quien introdujo una nueva función en 1968, que llamó **radiancia generalizada**, para describir la energía radiante emitida por una fuente de luz. En contraste con la radiancia

clásica, que es compatible con la óptica geométrica, la radiancia generalizada lo es con la óptica ondulatoria y tiene en cuenta las propiedades de coherencia de la luz.

A pesar de este avance, la radiancia generalizada asociada a ciertas fuentes de luz tiene la propiedad matemática de tomar valores negativos, propiedad que no es compatible con los postulados de la radiometría ni con las propiedades físicas atribuidas a la radiancia clásica. Entonces, se planteó la pregunta sobre la existencia de una radiancia generalizada que fuera simultáneamente compatible con la radiancia clásica y con las propiedades de coherencia de la luz. En un célebre teorema, demostrado en 1979, el físico finlandés Ari Friberg estableció que no existe una función de radiancia generalizada que cumpla ambos requisitos. En consecuencia, la radiancia generalizada no tiene en general el significado físico intuitivo de energía luminosa emitida, asignado a la radiancia clásica.

3

A mediados de los noventa, los profesores Román Castañeda Sepúlveda y Francisco Fernando Medina Estrada, respectivamente de las Universidades Nacional de Colombia- Sede Medellín, y de Antioquia, avanzaron hacia la unificación de la óptica clásica, a través de una perspectiva de investigación diferente. A finales de esa década se les unió Jorge Iván García Sucerquia de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, quien fuera estudiante doctoral del profesor Castañeda Sepúlveda.

Cincuenta años atrás, Emil Wolf probó que la coherencia óptica, más que el resultado de una operación matemática, es un fenómeno que se comporta siguiendo las leyes de la óptica

ondulatoria. Recientemente, los profesores Castañeda Sepúlveda y García Sucerquia propusieron el concepto más básico para la descripción de la naturaleza de la luz en ese contexto: su propagación en términos de elementos fundamentales denominados **onditas de coherencia espacial**. El término **ondita** es una traducción libre del término inglés **wavelet**.

Tales onditas de coherencia espacial son los vehículos primarios para el transporte tanto de la coherencia como de la intensidad de la luz. Entonces, explicaron que las diversas configuraciones del **observable óptico** registrado por los detectores (ver las fotografías en la Figura 3) se deben a redistribuciones de intensidad causadas por las propiedades de coherencia de la luz. Además, mostraron que tanto la densidad espectral cruzada de Wolf como la energía del campo óptico pueden expresarse mediante superposiciones adecuadas de onditas de coherencia espacial.

Designaron como **potencia espectral cruzada marginal** a la “amplitud” de las onditas de coherencia espacial y probaron que esta cantidad es proporcional a la radiancia generalizada de Walther y, por su forma matemática (es una **función de distribución de Wigner**), la propusieron como cantidad fundamental de la naciente **Óptica de Wigner**. Muchos de estos resultados se reportaron en la Tesis Doctoral del profesor García Sucerquia (**Onditas de Coherencia Espacial**, 2003), la cual fue distinguida con la mención **Magna Cum Laude** por la Universidad de Antioquia, la más alta mención otorgada hasta el momento a tesis doctorales en física desarrolladas en esa institución.

El último y más destacado logro de los profesores mencionados lo constituye la Teoría Unificada de la Óptica Clásica, basada precisamente en el concepto de **onditas de coherencia espacial**.

Dicha Teoría abarca la óptica geométrica (en lo referente a su capítulo fundamental: los instrumentos formadores de imágenes), la óptica ondulatoria (interferencia Young-Michelson y difracción Fraunhofer-Fresnel), la teoría de coherencia de segundo orden y la radiometría. Ellos han mostrado que los procesos ópticos fundamentales en estas teorías, en apariencia irreductibles, no son más que casos particulares de difracción de onditas de coherencia espacial, retornando al fenómeno descubierto por el padre Grimaldi en el siglo XVII, y que le hiciera formular la categórica sentencia con la que inicia este ensayo. Tal perspectiva combina de manera ideal la apreciación fenomenológica con los cálculos, tanto analíticos como numéricos. Su validez está sustentada no sólo por la capacidad de reproducir resultados conocidos con anterioridad, sino también por la generación de nuevo conocimiento en el dominio de la luz parcialmente coherente que ya reposa en artículos de circulación internacional, publicados en las más importantes revistas de la comunidad óptica mundial.

Ello puede estimarse, por ejemplo, considerando la solución propuesta para el problema de los valores negativos de la radiancia generalizada. Los autores demuestran que esta peculiaridad no representa una inconsistencia física, puesto que la radiancia generalizada o su equivalente, la potencia espectral marginal, no es un **observable** en términos de ser una cantidad registrada por detectores de luz. El **observable** obligado a tomar sólo valores positivos o nulos es la intensidad, la cual resulta de adicionar múltiples contribuciones de potencia espectral marginal. Esto significa que contribuciones de valor negativo son indispensables para explicar apropiadamente las franjas oscuras que caracterizan a los patrones de interferencia de alto contraste (Figura 3) y, por lo tanto, son necesarios para dar cuenta del carácter ondulatorio de la luz. Tal conclusión coincide

con afirmaciones reportadas previamente por diversos autores reconocidos en el área.

No obstante, los profesores referidos avanzan un paso al lograr una interpretación fenomenológica de dicha propiedad matemática, exhibida por el espectro de potencia marginal: una fase adicional aportada a las onditas de coherencia espacial, que salta entre los valores cero (para excursiones positivas de dicha potencia espectral marginal) y π (para excursiones negativas) solamente. Dicha fase especifica el mecanismo de superposición de las onditas, revelando adelantos y atrasos en el momento de adicionar la energía luminosa. Tal mecanismo formaliza, de manera rigurosa, la noción de que la coherencia óptica constituye un principio de organización de la intensidad que se propaga.

Es también importante ampliar un poco la incorporación de los instrumentos formadores de imágenes a la Teoría Unificada de la Óptica Clásica, pues las onditas de coherencia espacial no son compatibles con el concepto de rayo de la Óptica Geométrica. Sin embargo, un cierto nivel de unificación se logra al desarrollar un modelo de formación de imágenes basado en la propagación de onditas de coherencia espacial a través de tales sistemas. Dicho modelo conduce a la definición de las funciones de transferencia y de respuesta elementales de los sistemas. Sorprendentemente, tales funciones reproducen el trazado de rayos a través del sistema cuando la iluminación es incoherente, y también permiten calcular, de manera simple e inmediata, las clásicas funciones de punto extendido (PSF) y de transferencia óptica (OTF) del sistema.

A pesar de que la mayoría de sus resultados han sido publicados en revistas científicas de primera línea en el área de óptica, como puede observarse en las referencias, la Teoría Unificada

de la Óptica Clásica fue presentada por primera vez, de manera detallada y completa, al Concurso de la Fundación Alejandro Ángel Escobar 2004, cuyos premios en Ciencias Físicas, Exactas y Naturales son los más reputados de Colombia. Por ella, los autores fueron galardonados con la **Mención de Honor en Ciencias Naturales**.

Referencias

Por motivos de extensión sólo se listan, en orden alfabético-cronológico (el año es la cifra entre paréntesis), las publicaciones de los profesores Castañeda, García y Medina.

1. Castañeda, R and F. Medina. **Illumination Schell sources in optical microscopy**. *Optik* 104 (1997), 159-162.
2. Castañeda, R and F. Medina. **Schell-model beams and interference fields**. *Optik* 105 (1997) 88-92.
3. Castañeda, R and F. Medina. **Partially coherent imaging with Schell-model beams**. *Optics and Laser Technology* 29 (1997), 165-170.
4. Castañeda, R and F. Medina. **On spatial coherence beams**. *Optik* 109 (1998), 77-83.
5. Castañeda, R. **On the relationship between the cross-spectral density and the Wigner distribution function**. *Journal of Modern Optics* 45 (1998), 587-593.
6. Castañeda, R. **Fourier analysis of spatially partial interference fields**. *Optik* 109 (1998) 41-42.
7. Castañeda, R. and F. Medina. **Moiré patterns in interference with spatial coherence beams**. Technical Digest, 18th Congress of the International Commission for Optics: Optics for the next millenium (2-6 August, 1999), SPIE Volume 3749, 668-669.
8. Castañeda, R., F. Medina, M. Garavaglia and L. Zerbino. **Partially coherent effects in Young-Michelson's interferograms**. Technical Digest, 18th Congress of the International Commission for Optics: Optics for the next millenium (2-6 August, 1999), SPIE Volume 3749, 556-557.
9. Castañeda, R. and F. Medina. **Moiré patterns in spatially partial coherent interference with non-regular gratings**. *Optik* 110 (1999) 123-126.
10. Castañeda, R. **Spatially partial coherence transfer and imaging**. *Journal of Modern Optics* 46 (1999) 1605-1610.
11. Castañeda, R. and J. García-Sucerquia. **Besselian Schell-model beams in optical microscopy**. *Optics Communications* 169 (1999) 29-35.
12. Castañeda, R. and J. Bohórquez-Ballén. **Spatial coherence beams in critical illumination for optical microscopes**. *Optics Communications* 175 (2000) 337-345.
13. Castañeda, R. and Z. Jaroszewicz. **Determination of the degree of spatial coherence of Schell-model beams with diffraction gratings**. *Optics Communications* 173 (2000) 115-121.
14. Castañeda, R. and F.F. Medina. **Far field properties of spatial coherence beams**. *Optik* 113 (2002) 171-175.
15. Castaneda, Roman, Jorge Garcia-Sucerquia and Francisco F. Medina. **Classes of source pairs and etendue renormalization in interference and diffraction**. 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO) **Optics for the Quality of Life**. Università degli Studi di Firenze, Firenze (*Italia*), 25-30 August, 2002. Technical Digest, Anna Consortini and Giancarlo Righini editors, SPIE Volume 4829, 329-330.
16. Castaneda, Roman, Jorge Garcia-Sucerquia and Francisco F. Medina. **Phase retrieval of gratings by applying Fourier analysis**. 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO) **Optics for the Quality of Life**, Università degli Studi di Firenze, Firenze (*Italia*), 25-30 August, 2002. Technical Digest, Anna Consortini and Giancarlo Righini editors, SPIE Volume 4829, 55-56.

17. Castaneda, Roman, Jorge Garcia-Sucerquia and Francisco F. Medina. **Classes of source pairs and etendue renormalization in interference and diffraction**. 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO) **Optics for the Quality of Life**. Università degli Studi di Firenze, Firenze (*Italia*), 25-30 August, 2002. Technical Digest, Anna Consortini and Giancarlo Righini editors, SPIE Volume 4829, 329-330.
18. Castaneda, Roman, Jorge Garcia-Sucerquia and Francisco F. Medina. **Spatial coherence beams in the far field**. 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO) **Optics for the Quality of Life**. Università degli Studi di Firenze, Firenze (*Italia*), 25-30 August, 2002. Technical Digest, Anna Consortini and Giancarlo Righini editors, SPIE Volume 4829, 45-46.
19. Castañeda, R. **Partially coherent imaging and spatial coherence wavelets**. Optics Communications 230 (2004) 7-18.
20. Castañeda, R. and J. García-Sucerquia. **Spatial coherence wavelets**. Journal of Modern Optics 50 (2003) 1259-1275.
21. Castañeda, R. and J. García-Sucerquia. **Spatial coherence wavelets: mathematical properties and physical features**. Journal of Modern Optics 50 (2003) 2741-2753.
22. Castañeda, R. and J. Garcia-Sucerquia. **Classes of source pairs in interference and diffraction**. Optics Communications 226 (2003) 45-55. ISSN 0030-4018.
23. Castañeda, R., J. García-Sucerquia and F. Brand. **Quality descriptors of optical beams based on centred reduced moments I: spot analysis**. Optics Communications 227 (2003) 37-48. ISSN 0030-4018.
24. Garcia-Sucerquia, J., R. Castañeda, F.F. Medina and G. Matteucci. **Distinguishing between Fraunhofer and Fresnel diffraction by the Young's experiment**. Optics Communications 200 (2001) 15-22.
25. García-Sucerquia, J., R.Castañeda and F.F. Medina. **Fattore M2 e l'Etendue**. 87° Congresso Nazionale della Società Italiana di Física, Milano (Italia), Sept. 2001.
26. García-Sucerquia, J., R.Castañeda and F.F. Medina. **Coerenza spaziale parziale e il dominio Fraunhofer-Fresnel**. 87° Congresso Nazionale della Società Italiana di Física, Milano (*Italia*), Sept. 2001.
27. García-Sucerquia, J., R. Castañeda and F.F. Medina. **Fresnel-Fraunhofer diffraction and spatial coherence**. Optics Communications 205 (2002) 239-245.
28. García-Sucerquia, J. and R. Castañeda. **Spatial partially coherent imaging**. Journal of Modern Optics 49 (2002) 2093-2104.
29. Garcia-Sucerquia, Jorge, Román Castañeda and Francisco F. Medina. **M² invariance through the etendue for gaussian Schell model sources**. 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO) **Optics for the Quality of Life**. Università degli Studi di Firenze, Firenze (*Italia*), 25-30 August, 2002. Technical Digest, Anna Consortini and Giancarlo Righini editors, SPIE Volume 4829, 33-34.
30. Garcia-Sucerquia, Jorge, Roman Castaneda and Francisco F. Medina. **Fresnel and Fraunhofer domains in diffraction of spatially partially coherent fields**. 19th Congress of the International Commission for Optics (ICO) **Optics for the Quality of Life**. Università degli Studi di Firenze, Firenze (*Italia*), 25-30 August, 2002. Technical Digest, Anna Consortini and Giancarlo Righini editors, SPIE Volume 4829, 53-54.
31. Garcia-Sucerquia, J. and R. Castañeda. **Full retrieving of the complex degree of spatial coherence**. Optics Communications 228 (2003) 9-19.
32. García Sucerquia, J. **Onditas de coherencia espacial**. Tesis para optar al título de Doctor en Física, Universidad de Antioquia, Medellín, 2003. Distinguida con mención de honor **Magna Cum Laude**.
33. Medina, F.F., **The Use of Fresnel Zones for Distinguishing Between Fresnel and Fraunhofer Diffraction**, Revista Mexicana de Física, 31, No. 2, (1985) 311-317.

34. Medina, F.F. and G. Pozzi. **Spatial coherence of anisotropic and astigmatic sources in interference electron microscopy and holography.** Journal of the Optical Society of America A 7 (1990) 1027-1033.
35. Medina, F.F. **Modelling the transition of the spatial coherence and the intensity distributions from the near to far zone for an anisotropic and astigmatic gaussian Schell-model source.** Optik 95 (1993) 81-85.
36. Medina, F.F., R.Castañeda y J. García. **Invarianza del factor M2 para fuentes parcialmente coherentes modelo Schell mediante conexión con el Etendue.** 4° Reunión Iberoamericana de Óptica (RIAO) y 7° Encuentro Latinoamericano de Óptica, Láseres y sus aplicaciones (OPTILAS), Tandil (**Argentina**), Sept. 2001.
37. Mejía, Y., V. Markov and R. Castañeda. **Analysis of a quasi-periodical structure through its autocorrelation function.** Optical Engineering 35 (1996). 2845-2851.



¿ Y en una caja mineral guardaron sus sueños los ricos ? (XVI)

Pablo Neruda.