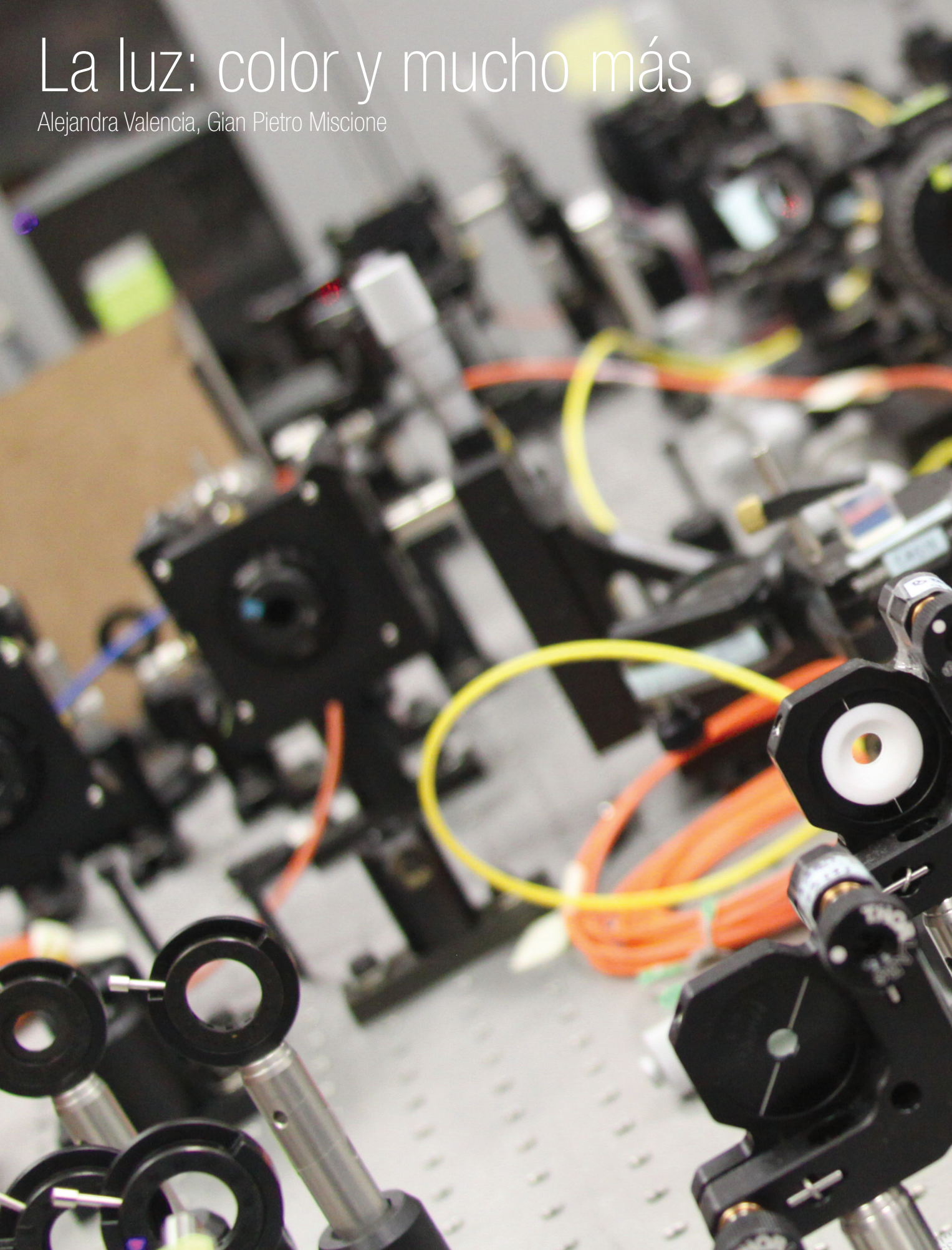
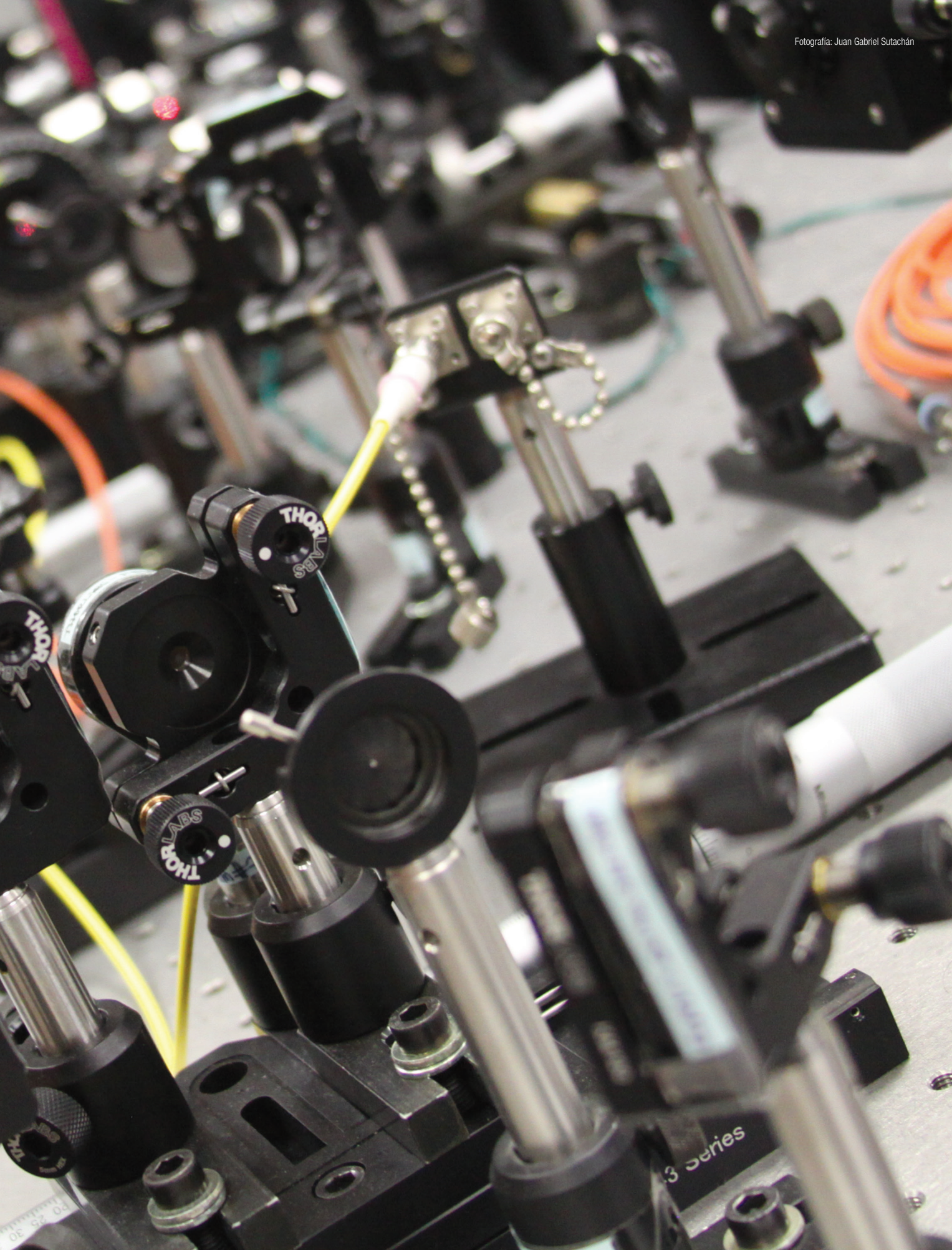


La luz: color y mucho más

Alejandra Valencia, Gian Pietro Miscione





La luz: color y mucho más

Alejandra Valencia

Ph. D, profesora asistente del
Departamento de Física de la
Universidad de los Andes
ac.valencia@uniandes.edu.co

Gian Pietro
Miscione

Ph. D, profesor asistente del
Departamento de Química de la
Universidad de los Andes
gp.miscione57@uniandes.edu.co

Yo estaba ahí. Él me llevó consigo, ese día, hace más de 30.000 años, cuando entró a aquella cueva oscura. Sin mí, nunca se habría atrevido a entrar. Sin embargo, allí llegamos, me dejó en el piso y ¡empezó a pintar!

¿No me reconocen? Nos conocemos desde siempre, desde el comienzo de todo. Aunque les ha costado mucho tiempo y trabajo entender quién soy. Cuando lograron controlarme, su historia cambió radicalmente: cambiaron sus costumbres, abrieron nuevos caminos, conquistaron lugares aparentemente inaccesibles, y ahora pueden ver lo invisible, comunicarse casi instantáneamente, curar enfermedades de manera que nunca habían podido imaginarse y atrapar objetos microscópicos.

Los primeros en preguntarse quién soy, fueron los griegos. Ellos me asociaron a la visión, y pensadores como Pitágoras, Tolomeo y Euclides creían que los ojos emiten rayos que investigan el ambiente, golpean los objetos y se devuelven con sus imágenes. Otros, como Epicuro, Demócrito y Leucipo, opinaban que son los objetos los que envían algo, corpúsculos, hacia los ojos, y que esos corpúsculos penetran en las almas. Platón también habló mucho sobre mí: estaba convencido que el alma produce en el ojo un “fuego” que puede mezclarse conmigo para transferir al ojo la información sobre los objetos y permitir verlos. Por eso, cuando yo no estoy, la visión es imposible: el solo “fuego” emitido por el ojo no es suficiente, necesita mi presencia. Cuando los ojos se cierran, ese fuego se transforma en sueños...

Según una leyenda, también participo en la guerra. En particular, se cuenta que Arquímedes, después de haberme hecho rebotar en varios espejos, me mandó contra unos barcos romanos que trataban de conquistar su ciudad, Siracusa, alrededor del 200 a. C. Y yo, después de esos rebotes, quemé los barcos y salvé a Siracusa y sus habitantes.

En esa época, ni Arquímedes ni los romanos podían imaginar que esta capacidad de reflejarme iba a ser utilizada más de dos mil años más tarde para algo mucho más bello: comunicar y transferir información desde un lado del mundo al otro y para generar energía.

Cuando cayó el Impero romano y empezó la Edad Media, la cultura siguió viva entre los muros de los monasterios cristianos y en el mundo islámico. Los literatos islámicos tradujeron libros del griego al árabe y muchos siguieron interesados en mí. En particular, un científico originario del actual Iraq, llamado Alhacén, entendió algo muy importante: yo soy un agente externo, no perteneciente al cuerpo, algo distinto del proceso de visión, y existo por mí misma, sin necesidad de considerar el ojo, el alma o rayos que salen del cuerpo.

En 1015, Alhacén publicó un libro muy importante sobre mí o, más exactamente, sobre la óptica (*Kitab al-Manāẓir [El libro de la óptica]*), de la cual es considerado fundador. Alhacén estudió cómo me

comporto cuando cambio de medio, cuando paso, por ejemplo, del aire al agua, es decir, la refracción, y también la reflexión.

El libro de Alhacén se tradujo al latín y se volvió el texto de referencia en la Europa occidental para el estudio de los mecanismos de la visión y la óptica durante varios siglos. En el Medioevo, con una teoría muy parecida a la actual, el franciscano inglés Roger Bacon (1214-1294) logró entender mi relación con el arcoíris. Los estudiosos se concentraron cada vez más en mí como entidad física y menos en el proceso sensorial y psíquico de la visión. Bacon también intuyó que mi velocidad es finita y que no me desplazo instantáneamente de un lugar a otro. Sin embargo, solo después de 400 años y muchas discusiones en las que participaron personajes como Kepler, Galileo y Descartes, un astrónomo danés, Ole Rømer, en 1675, observando las lunas de Júpiter, demostró que mi velocidad no es infinita, y la estimó en 200.000 km/s.

A principios del siglo XVII ya se conocían muchas cosas sobre mí: me muevo en línea recta, soy “algo” que no depende del cuerpo humano, tengo una velocidad, me refracto, reflejo o soy

absorbida según la superficie en la cual incido. Pero ¿qué soy exactamente? ¿Cuál es mi naturaleza? Estas preguntas desatarían un debate científico durante los siguientes tres siglos. Y la respuesta final sería la más inesperada y la más difícil de asimilar para la mente, que siempre necesita clasificar todo de forma definida: blanco o negro, bonito o feo, bueno o malo.

En 1665, en un tratado escrito por el jesuita italiano Grimaldi se describe por primera vez lo que hago cuando encuentro un obstáculo o una abertura muy pequeña: me desvío, o sea, dejo de moverme en línea recta. Este fenómeno, llamado *difracción*, obligó a Grimaldi a concebir la idea de que, “por lo menos en algunos casos”, yo me propago como una onda que puede rodear obstáculos. Entonces surgió la gran pregunta: ¿soy “movimiento o materia”, es decir, soy una onda que se propaga como las ondas del agua en una tina cuando se le tira una piedra, o estoy formada por corpúsculos que interactúan con el resto del mundo más o menos como bolitas? Ambas ideas pueden explicar algunos fenómenos, pero ninguna de las dos puede explicarlos todos. Si soy una onda no se explican las sombras, porque las ondas son capaces de rodear los obstáculos; si soy partícula, no se explica por qué dos rayos luminosos pueden intersectarse sin disturbarse.

Estas dos hipótesis, completamente opuestas, fueron desarrolladas por el holandés Huygens (1629-1695), a favor de la teoría ondulatoria, y el inglés Newton (1642-1727), a favor de la corpuscular. Según Newton, yo transporto materia acompañada de energía luminosa. En cambio, según Huygens, yo no soy materia, sino energía que se mueve en un medio, como las ondas de sonido se mueven en el aire y las ondas de agua en un estanque en el agua. ¿Qué es ese medio? Se propuso una hipótesis: se trataría del éter, una sustancia sutil y sin peso que permearía todo el espacio y estaría compuesta de esferas elásticas que, al chocar, producirían un impulso ondulatorio.

En parte por el gran prestigio de Newton, la teoría corpuscular fue la más aceptada durante todo el siglo XVIII. Los corpúsculos de Newton rebotan cuando golpean un cuerpo o son absorbidos cuando el cuerpo es poroso y los deja pasar. En este segundo caso, son acelerados por la atracción gravitacional generada por las partículas del cuerpo y, si este es muy denso, cambian de dirección (refracción).

La magnitud de esta desviación dependería de la masa de las partículas de las cuales yo estaría hecha: las más pesadas se desvían menos, las más livianas, más. Esta idea está relacionada con una gran novedad sobre mi naturaleza. Haciéndome pasar por un prisma, Newton logró descomponerme (dispersarme) en distintos colores. Esto significa que, por primera vez, hubo una prueba experimental de que yo no soy una entidad homogénea, sino compuesta por colores, que son entidades físicas, y no fenómenos subjetivos. Como demostración del misterio y de la sorpresa que causó este fenómeno, Newton llamó a la serie de

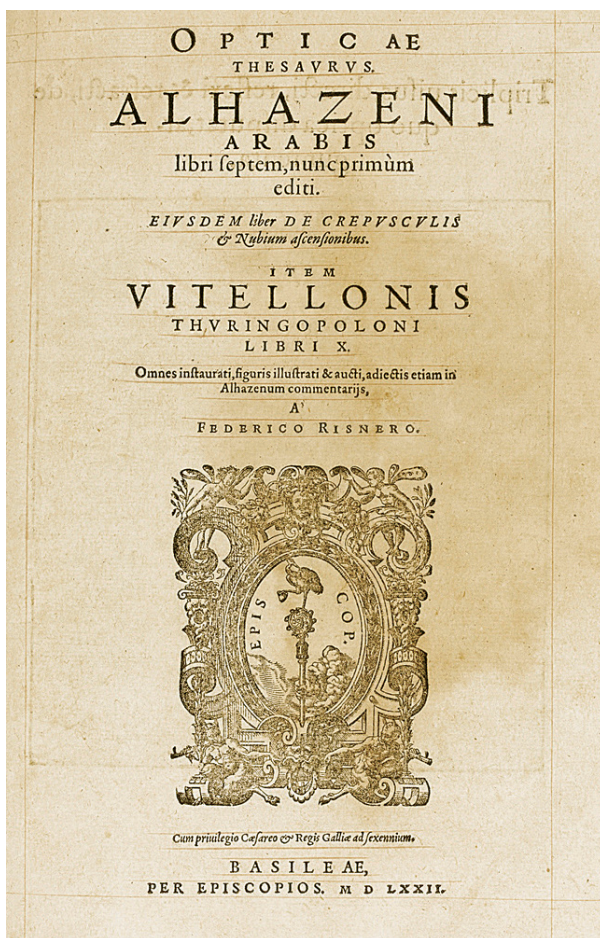


Figura 1. Portada del "Libro de la óptica" de Alhacén
Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Book_of_Optics_Cover_Page.jpg

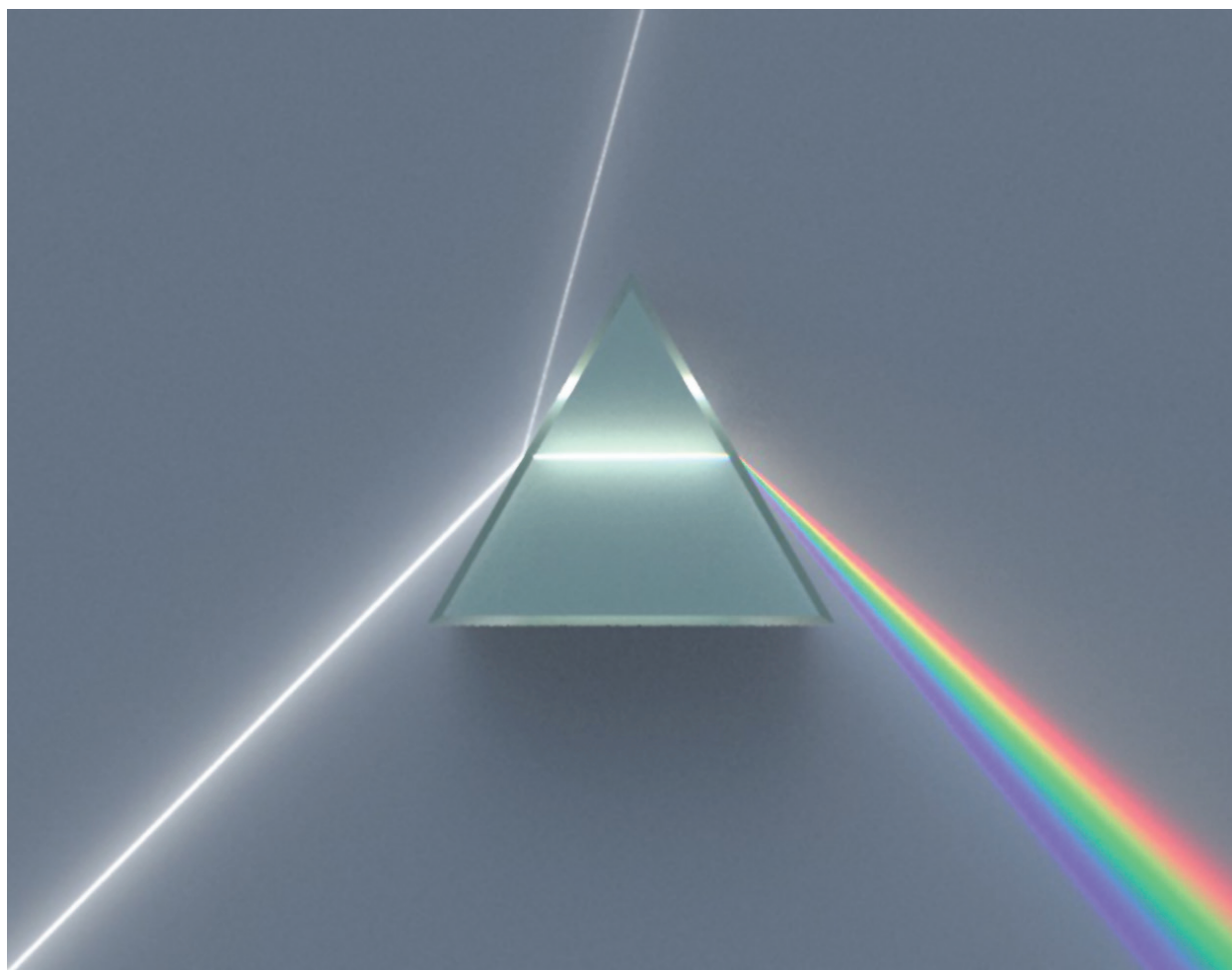


Figura 2. El prisma de Newton

Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration.jpg

colores que salen del prisma “espectro”, una palabra del latín que significa “visión” o “imagen”, pero también “fantasma”. Según Newton, cuando soy blanca, estoy compuesta por muchísimas partículas de diferente masa: las correspondientes al color rojo son las más pesadas, y por eso son las menos desviadas por el prisma; las de color violeta son las más livianas y más desviadas.

Si el siglo XVIII fue el siglo en que se afirmó mi naturaleza corpuscular, en el siglo XIX se afirmó la ondulatoria. En 1801, el inglés Thomas Young (1773-1829) realizó un experimento en el que me hizo pasar por dos rendijas. Observó que al salir de ellas produzco un fenómeno llamado *interferencia*, típico de las ondas. Básicamente, las ondas que salen de las rendijas pueden encontrarse y, de forma similar a las ondas de agua, sumarse y amplificarse, o cancelarse. Se trata de una prueba contundente de la validez de la teoría ondulatoria, que contrasta con la de Newton. Paralelamente, en Francia, en 1815 el físico francés Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) publicó unos estudios teóricos que confirmaron los resultados de Young, lo cual reforzó

la teoría ondulatoria, que finalmente fue establecida en 1865, cuando el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) desarrolló unas ecuaciones que prevén que el campo electromagnético se propaga por el espacio en forma de ondas. Maxwell encontró que la velocidad de estas ondas es muy cercana a mi velocidad, y por lo tanto supuso que yo tengo que ser una onda electromagnética.

En el siglo XIX también se empezó a observar que algo ocurría entre los átomos y yo. En 1814 el alemán Joseph von Fraunhofer (1787-1826) observó que cuando el Sol me emite, no todos los colores, o longitudes de onda, llegan a la Tierra: en el espectro de emisión del Sol hay líneas negras que Fraunhofer atribuyó a la naturaleza de la luz solar, y no a una ilusión óptica. Unos años más tarde, el prusiano Gustav Kirchhoff (1824-1887) y el sueco Anders J. Ångström (1814-1874) identificaron que cada elemento químico me absorbe y me emite solamente en ciertas longitudes de onda, que por lo tanto se pueden considerar como sus huellas digitales. Gracias a esta observación se logró identificar que las líneas negras del espectro solar se deben a que

ciertos elementos en el trayecto del Sol a la Tierra me absorben en esos colores determinados. Es decir, hay una relación muy profunda entre los átomos y yo.

En 1885, un suizo, profesor de colegio, Johann Jakob Balmer (1825-1898), descubrió una fórmula que describe exactamente las longitudes de onda, es decir, los colores que el átomo de hidrógeno emite cuando se le suministra energía. La fórmula indica que hay una regularidad en los espectros de emisión de líneas de los átomos, ya que los valores de energía a los cuales los átomos emiten son múltiplos enteros de cierta cantidad. En otras palabras, se empezó a entender que, cuando se suministra energía a los átomos, por ejemplo en forma de calor, estos me generan y, en algunos casos, mi emisión ocurre únicamente al proveerme determinados valores de energía.

El primer paso del proceso decisivo para entender cómo interactúo con los átomos, y en consecuencia la manera en que soy generada, ocurrió en Berlín un domingo de octubre de 1900, cuando el físico alemán Heinrich Rubens fue a tomar onces donde su colega Max Planck. Los dos estaban trabajando sobre el espectro de emisión del cuerpo negro (un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él). Este tema interesaba a los alemanes en ese entonces, ya que estaban interesados en fijar estándares para la industria de la iluminación. Rubens, un experimentalista, confirmó a Planck, un teórico, la contradicción entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales. Para tener un modelo teórico que se ajustara a los experimentos, Planck planteó la hipótesis de que la energía podía intercambiarse solo en paquetes discretos, y no de forma continua, como parece ocurrir en el mundo macroscó-

pico. Planck consideraba que su idea de “cuantos de energía” era un artificio matemático útil para solucionar un problema específico, pero no la conectó con entidades físicas reales.

Con este nuevo concepto comenzó el siglo XX, y en 1905, hace exactamente 110 años, Albert Einstein (1879-1955), en Berna, Suiza, retomó la idea de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico, es decir, la emisión de electrones de un metal cuando yo lo golpeo. Él propuso que los electrones (considerados partículas) son extraídos del metal debido a un tipo de interacción partícula-partícula y no onda-partícula. Entonces yo soy algo localizado, es decir, una partícula, un “cuanto” que transporta cantidades discretas de energía que dependen de mi longitud de onda.

Einstein unió conceptos y comportamientos propios de las ondas y de las partículas, y así abrió el camino a la idea más contraintuitiva y revolucionaria sobre mi naturaleza, que es actualmente aceptada: yo no soy ni onda ni partícula, sino onda y partícula, y me desvelo en una forma u otra según el tipo de “pregunta” que me hagan. ¿Quieren verificar que soy una onda? Me comporto como una onda. ¿Quieren comprobar que soy una partícula? Entonces actúo como una partícula. Pero nunca las dos cosas a la vez. Todos los fenómenos que se han estudiado desde la época de los griegos se pueden explicar considerándome onda o partícula, según los casos, porque eso es lo que soy: tanto onda como partícula. Intuitivamente, la mente humana no está hecha para aferrar conceptos como este. También el hecho de que la Tierra se mueve alrededor del Sol, y no lo contrario es un concepto contraintuitivo. Pero gracias a la educación, aceptamos esta idea, aunque cuando levantamos la mirada al cielo nos parezca que es el Sol el que se mueve.

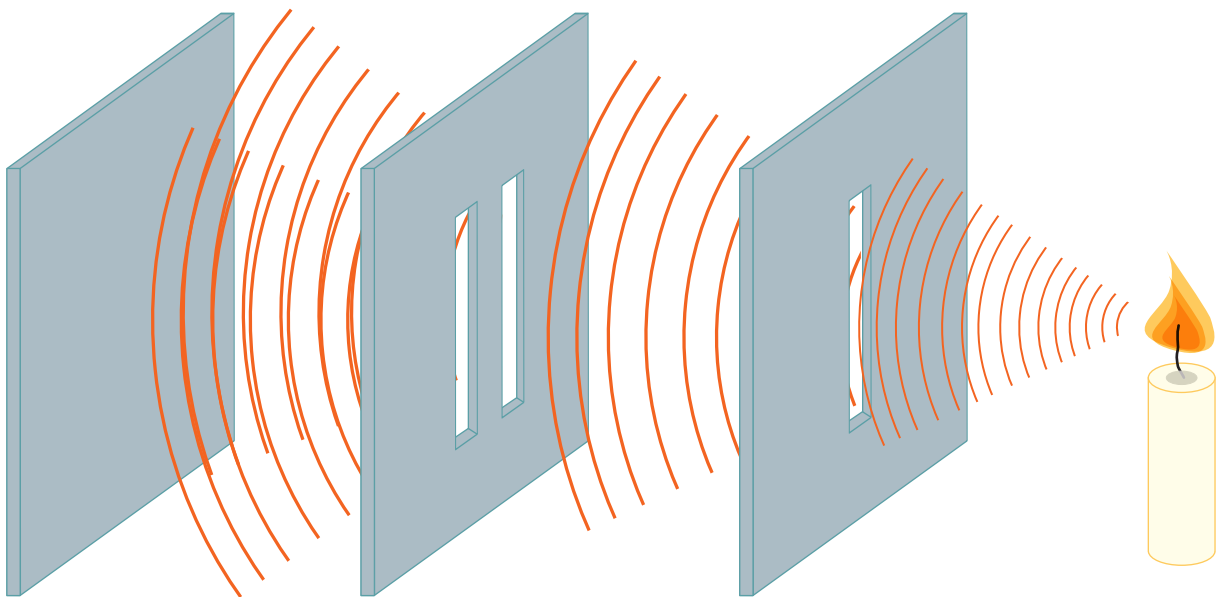


Figura 3. Experimento de la doble rendija de Thomas Young
Fuente: Autores



Figura 4. Max Planck y Albert Einstein, 1929

Fuente: Se publica con autorización de Hebrew University of Jerusalem. Cortesía de AIP Emilio Segre Visual Archives, Fritz Reiche Collection

A los “cuantos” asociados a mí, en 1926 el químico estadounidense Gilbert Lewis les asignó el nombre de *fotón*: una partícula sin masa ni carga eléctrica. En el mundo ordinario, macroscópico, es imposible darse cuenta de que estoy compuesta por corpúsculos (es decir, no se me percibe de forma intermitente), ya que, por ejemplo, un bombillo emite millones de billones de fotones por segundo.

En 1913, gracias a estos conceptos de cuantización, el físico danés Bohr (1885-1962) propuso un modelo del átomo capaz de explicar los espectros de emisión de líneas. En otras palabras, los átomos pueden absorberme, es decir, absorber fotones o absorber energía en forma de calor y luego emitirme. De hecho, este es el proceso que me produce, tanto en la antorcha que iluminaba una cueva oscura hace más de 30.000 años, como hoy en día, cada vez que se enciende un bombillo.

Todo este conocimiento acumulado para entender mi origen permite crear *maneras alternativas de generarme*. En 1960, utilizando la teoría desarrollada por Einstein en 1916, el científico estadounidense Theodore Maiman (1927-2007) construyó el primer láser (sigla de la expresión inglesa *light amplification by the stimulated emission of radiation*, que por su uso tan difundido ha acabado por convertirse en una palabra corriente). El término *láser* no es solo un acrónimo atractivo, sino que describe el principio de funcionamiento de otras maneras de producirme. “La emisión estimulada de radiación” ocurre cuando un fotón incide en un átomo excitado y lo estimula para que se desexcite, como consecuencia de lo cual emite un fotón idéntico al incidente. En la naturaleza, los átomos se encuentran de manera natural en su estado base o más bajo de energía. Sin embargo, es posible lograr que varios átomos se encuentren al tiempo en un estado excitado, fenómeno físico conocido como *inversión de población*. En esta configuración, los átomos empiezan a desexcitarse y a emitir radiación que a la vez estimula a los otros átomos para que emitan más fotones, y así repetidamente, hasta lograr una “amplificación” de la radiación.

Cuando soy emitida por un láser tengo características muy particulares: soy direccional, tengo un color muy definido y poseo algo llamado *coherencia*. En el momento de inventarse el láser fue descrito como “una solución en busca de un problema”, y ¡vaya si encontraron problemas que resolver! Hoy en día me utilizan en investigación fundamental, medicina, procesos industriales, entretenimiento y comunicaciones. Puedo ser tan delicada como para escribir sobre un huevo o tan fuerte como para soldar y cortar las partes de un coche. Además, en medicina ayudo a realizar diagnósticos, tratamientos y a prevenir enfermedades de maneras más efectivas y menos invasivas que los procedimientos convencionales, además de que proveo métodos para lograr imágenes de alta resolución.

En lo referente a las comunicaciones, soy yo justamente quien permite manejar anchos de banda lo suficientemente grandes



Figura 5. Theodore Maiman y el primer láser en 1960
Fuente: cortesía de HRL Laboratories, LLC

para navegar en Internet y disfrutar de transmisiones casi instantáneas de imágenes, video y voz. Sin embargo, en los años sesenta no se sabía cómo transmitir eficientemente esta información. En esa época ya existía la fibra óptica, que son pequeños hilos de vidrio de unos cuantos micrómetros de diámetro, en los cuales me reflejo y avanzo llevando la información codificada en mí. Es algo análogo a la demostración que hacía el profesor suizo Daniel Colladon (1802-1893) a mediados del siglo XIX, cuando me enviaba a un chorro de agua y por medio de reflexiones en la interface aire-agua yo me dejaba guiar.

En los años sesenta, después de viajar veinte metros en vidrio, me atenuaba en un 99%, lo cual hacía imposible el aprovechamiento de mi gran ancho de banda para comunicaciones. El impulso fundamental para que las telecomunicaciones ópticas se hicieran realidad se debe al chino Charles K. Kao (1933), quien en 1965 demostró que puedo viajar sin atenuarme por la fibra óptica si se logra producir un vidrio muy puro. A principios de los años setenta se logró producir vidrio de alta pureza, lo cual, unido a la producción de un láser de 1550 nm (color menos absorbido por el vidrio) abre la posibilidad de guiarme, eficientemente, por esas pequeñas autopistas de vidrio, lo cual ha hecho posible la era de Internet.

Hoy en día aún intrigo a los científicos. No todo lo han entendido sobre mí, así que sigo retándolos a comprender mi naturaleza.

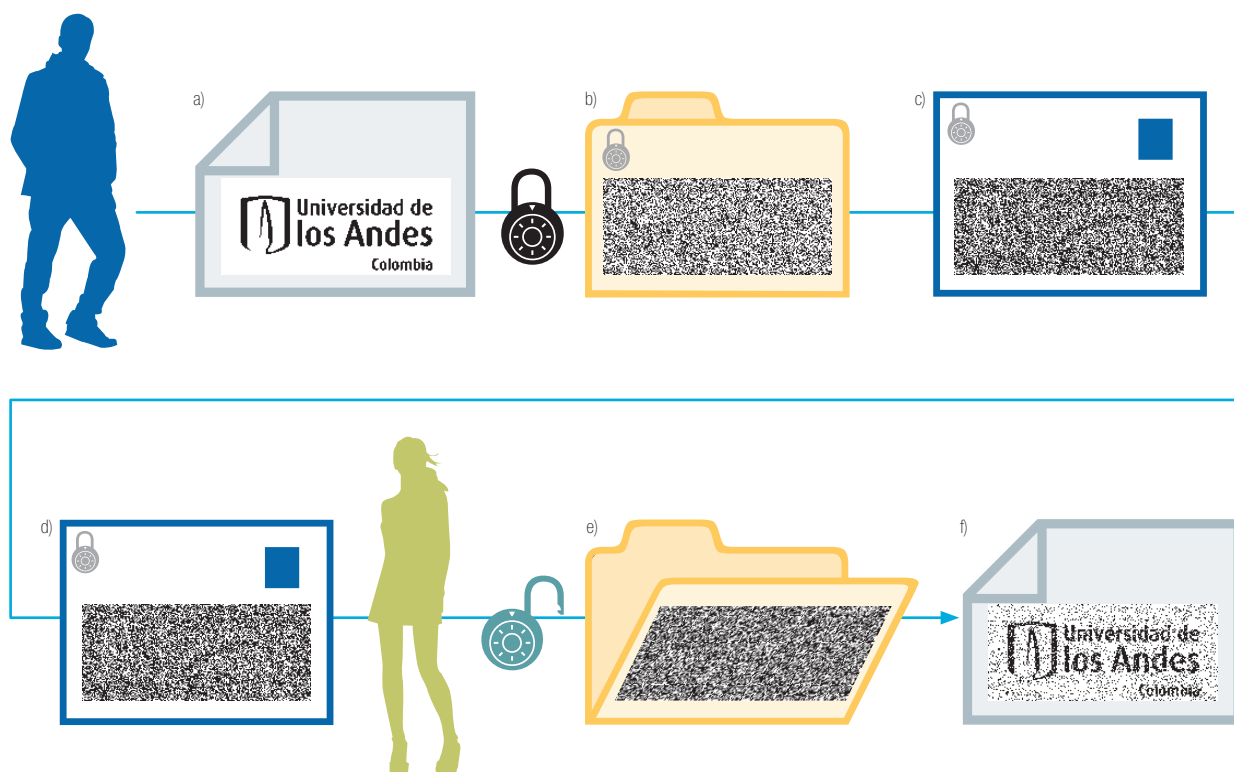


Figura 6. Una clave cuántica (b,e) es generada usando secuencias de pares de fotones enredados en el Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes. Esta clave es compartida por dos participantes para transmitir un mensaje secreto. En este ejemplo, el mensaje corresponde al logotipo de la Universidad de los Andes (a). El remitente combina este mensaje con la clave (b), produciendo un mensaje cifrado (c), que es enviado al destinatario. Al recibir el mensaje (d), se realiza un proceso de descifrado usando la clave (e) y recuperando el mensaje de manera legible (f). Fuente: elaboración de los autores. Datos experimentales de la monografía de pregrado en Física de Daniel Urrego

Gracias al descubrimiento del láser es posible obtener cantidades grandes de energía para desatar nuevos fenómenos en la naturaleza. Por ejemplo, en 1961, justo después de la invención del láser, nació lo que actualmente se conoce como *óptica no-lineal*. Esta disciplina estudia novedosos fenómenos que ocurren al contar con fuentes que me generan en alta potencia. Por ejemplo, se puede cambiar mi color al hacerme incidir en determinados materiales.

En particular, el proceso de generación paramétrica espontánea (SPDC), mediante el cual un fotón que incide en un material particular es dividido en dos fotones de más baja energía, se usa en la disciplina llamada *óptica cuántica*. Este proceso permite estudiar pares de fotones que están en un estado cuántico particular llamado *enredado*. La física detrás de estos estados particulares ha sido discutida desde 1935, cuando el enredamiento fue introducido por Einstein. Desde entonces, y hasta los años ochenta, fue un tema de debate científico basado únicamente en teoría, que empezó con discusiones entre Einstein y Neils Bohr, ya que no había modo experimental de demostrar si realmente la naturaleza permitía la existencia de los estados enredados.

El enredamiento permite el desarrollo de lo que se ha llamado *tecnologías cuánticas*, que prometen sobrepasar, en algunos as-

pectos, a sus contrapartes clásicas. Entre estas nuevas aplicaciones se encuentran la computación cuántica, que nos promete computadores más veloces que los actuales; la información cuántica, que ofrece mejores protocolos de procesamiento de información, y la criptografía cuántica, que nos permite el manejo de protocolos de seguridad 100% seguros; todas ellas se basan en principios fundamentales de la física. El hecho de que la información se codifique en sistemas puramente cuánticos, como los fotones, garantiza que se sepa inmediatamente si alguien perturba el sistema. Es decir, si la clave de una tarjeta de crédito o de una contraseña está codificada en un estado cuántico, si un espía la obtiene, se sabe inmediatamente: no hay forma de que el ladrón pueda actuar sin que se sepa. Este tipo de aplicaciones ya no son ciencia ficción. Sistemas de criptografía cuántica fueron usados en las elecciones suizas del 2007 para garantizar la seguridad de las votaciones.

En la Universidad de los Andes también se continúa estudiando mi naturaleza y los usos prácticos que pueden hacer de mí. En particular, se me estudia ya sea en pares o aprovechando el hecho de que uno de los fotones de un par generado por SPDC puede ser usado para anunciar la presencia de su gemelo. Esto es lo que se conoce actualmente como una *fente de fotones anunciados*, aunque no es la fuente ideal, que sería una en la

que, al presionar un botón, se tuviera un único fotón, y cada vez que se oprimiera el botón se tuviera uno idéntico al anterior, este tipo de fuentes es una de las mejores herramientas con las que me pueden seguir estudiando.

Como ven, esta historia tiene mucho futuro por delante y promete nuevas aventuras y muchas sorpresas. Para conmemorar los mil años del libro de Alhacén, los 200 años de las teorías ondulatorias de Fresnel, los 150 años de la teoría de Maxwell y los 50 años de la propuesta de Charles Kao para transmitir información a grandes distancias usando vidrio, el 2015 ha sido decretado por la Unesco el Año Internacional de la Luz.

Si el siglo pasado fue el siglo del electrón, por el enorme desarrollo logrado en la electrónica, se espera que el siglo XXI sea el siglo del fotón, ya que son muchas las nuevas aplicaciones basadas en mí que se están desarrollando. Gracias a mí se ha explorado y se seguirá explorando lo más íntimo del universo. Así como hace 30.000 años se usó la luz de una antorcha para pintar las paredes de una cueva, y así como hoy en día, en un laboratorio de óptica cuántica, se utilizan láseres para estudiar los fundamentos de la óptica, del mismo modo, en el futuro, con invenciones que aún no podemos prever, los humanos avanzarán, apoyándose en mí, en el conocimiento del mundo que los rodea. En todo caso, yo estuve, estoy y estaré presente, iluminando nuevos caminos de exploraciones científicas, artísticas y culturales..., en otras palabras, en lo que los hace más orgullosos de ser humanos. ●

REFERENCIAS

- [1] Hecht J. City of light: The story of fiber optics. Oxford: Oxford University Press; 1999.
- [2] Mc Evoy JP, Zárate O. Introducing quantum theory: A graphic guide. London: Icon Books; 2007.
- [3] National Research Council. Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation; 2013, <http://www.nap.edu/catalog/13491/optics-and-photonics-essential-technologies-for-our-nation>
- [4] <http://www.light2015.org/Home.html>
- [5] <http://iyl.uniandes.edu.co/>
- [6] http://web.tiscali.it/corprovizione/02_scienze/03_luce/03.html
- [7] http://www.boscarol.com/blog/?page_id=11084
- [8] <http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/storia/index.html>
- [9] http://www.scientific.fausser.edu/luce/scientific/fotoelet/mod_confronto.htm
- [10] <http://www.mi.infn.it/~phys2000/schroedinger/two-slit1.html>

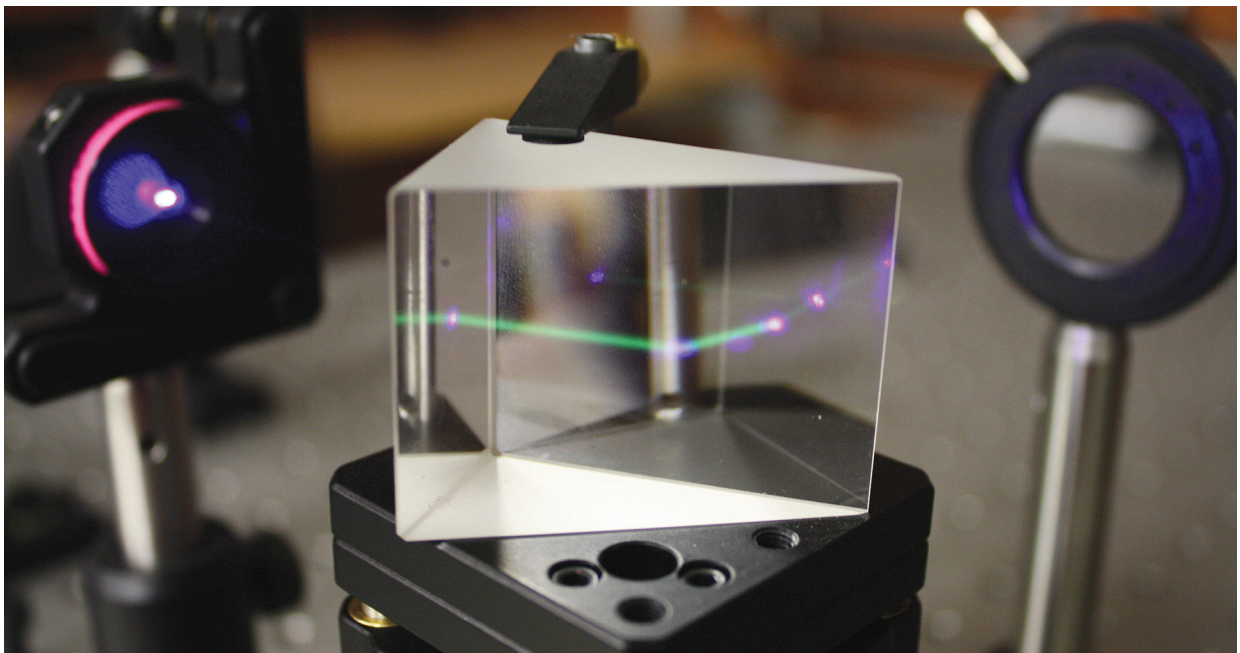


Figura 7. Rayo laser usado para la producción de pares de fotones y fotones individuales en el Laboratorio de Óptica Cuántica de la Universidad de los Andes
Fotografía: Nicolás Perdomo Madrid