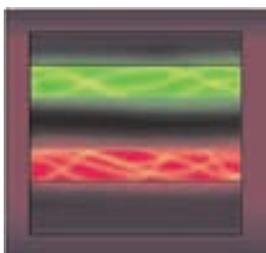


# Controlando luz con luz



Con la aparición de los láseres, hace cerca de cuarenta años, el estudio de la óptica tuvo una de sus mayores revoluciones. Los desarrollos tecnológicos derivados de este hallazgo se utilizan especialmente en las comunicaciones.

**Sabino Chávez Cerda, Baldemar Ibarra Escamilla, Marcelo David Iturbe Castillo, Eugene Kuzin, Nicolai Korneev, Rubén Ramos García y Carlos Gerardo Treviño Palacios**

## INTRODUCCIÓN

**E**l ser humano, desde sus primeros días, ha observado el mundo a su alrededor y ha sido capaz de aplicar estas observaciones para modificar el entorno en el que vive. Desde muy temprano, buscó maneras para controlar la luz y aprovecharla en situaciones tan simples como iluminarse en la oscuridad o para comunicarse con sus semejantes. En la actualidad, después de varios milenios, este afán de tener el control de la luz no ha cesado, y el hombre continúa explorando técnicas y generando conocimiento sobre las características y comportamiento de la luz en muy diversas circunstancias, lo que ha dado lugar al estudio de la óptica.

La óptica es el campo de la ciencia y la tecnología que trata los fenómenos asociados con la generación, transmisión, manejo, detección y uso de la luz. La luz es una forma de energía compuesta de campos eléctricos y magnéticos cuyas longitudes de onda se extienden desde varios kilómetros hasta nanómetros (millonésimas de milímetro). A este intervalo lo llamamos espectro electromagnético. Nuestros ojos pueden detectar solamente una parte muy pequeña del espectro, comprendida entre 400 y 700 nanómetros.

Desde los comienzos de la civilización, la luz ha estado presente en el quehacer humano, y ha sido la precursora de muchos avances en la ciencia, lo que ha permitido a la humanidad tener acceso a nuevas posibilidades. Recordemos que las primeras lentes y espejos fueron hechos en el antiguo Egipto. De manera más reciente, se han generado instrumentos que permitieron el desarrollo de diversos campos de estudio; por ejemplo el microscopio, inventado en 1590 por Zacharias Janssen, es una herramienta invaluable en la biología y la medicina; el telesco-

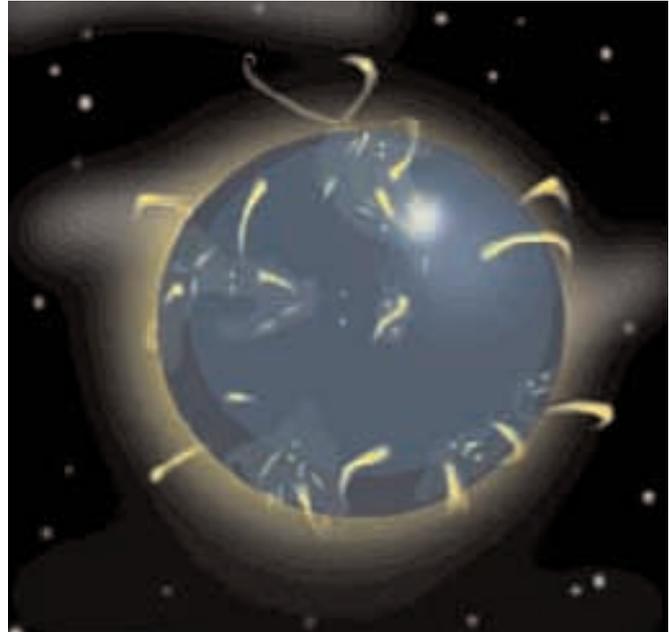
pio inventado en 1608 por Hans Lippershey y perfeccionado por Galileo en 1609 dio origen a la astronomía, y por último la cámara fotográfica, desarrollada por Joseph Nicéphore en 1826, permitió registrar eventos importantes.

A partir de la invención del láser por Maiman, en 1960, surge una transformación en el estudio de la óptica. Tal vez la revolución más importante surgida después de tal paso fue la posibilidad de cambiar las propiedades de la luz al interactuar con la materia. Este cambio ocurre principalmente al usar campos ópticos intensos, con lo que empieza el estudio de la óptica no-lineal, o al confinar la luz en áreas reducidas donde las aproximaciones de la óptica clásica ya no son válidas, como en la óptica integrada. La meta última es controlar la propagación de la luz cambiando alguno de sus parámetros, usando a la materia como catalizador de estos cambios. Es decir, controlar la luz por medio de la luz misma.

## LÁSERES

La invención del láser no fue un acto fortuito, sino la culminación de varios desarrollos y teorías, y marcó lo que podemos llamar el comienzo de la óptica moderna. “Láser” es el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, o amplificación de luz por efecto de radiación estimulada. El fenómeno de emisión estimulada fue sugerido por Albert Einstein en 1916, en el mismo artículo donde probó la ley de radiación de Planck. Esta idea y la posible interacción de la luz con un medio excitado fueron consideradas insustanciales en su tiempo.

Para tener emisión láser se requiere conjuntar cuatro condiciones: un medio activo, un mecanismo de excitación, un resonador y un sistema para extraer una pequeña porción de luz de la cavidad. Así, un láser comienza con una colección de átomos. Estos átomos (o moléculas) pueden estar en estado sólido, líquido o gaseoso, y se caracterizan, como todos los átomos, por poseer un conjunto definido de niveles de energía. Por medio del mecanismo de excitación se les suministra energía adicional a esos átomos. Este mecanismo puede ser óptico, eléctrico, químico, por enfriamiento rápido de átomos, o por explosiones nucleares. En cualquier caso, lo esencial es tener más átomos en el estado excitado que en el estado base. La cavidad resonante (formada por espejos) ayuda a que sólo la luz que se propaga paralela al eje del resonador se vea amplificada a través



La invención del láser  
no fue un acto fortuito,  
sino la culminación  
de varios desarrollos  
y teorías

En los años siguientes  
a la operación  
del primer láser  
se logró observar  
acción láser  
en prácticamente  
todo medio conocido

del proceso de emisión estimulada. Es decir, los átomos en el estado superior ceden su energía, en fase (es decir, coherentemente), al haz de luz. Si la ganancia en el resonador es superior a las pérdidas en el sistema por absorción y reflexión finita en los espejos, la señal en la cavidad láser llegará a generar una oscilación coherente de manera análoga a un oscilador de radio. Finalmente, haciendo que uno de los espejos sea ligeramente transparente, parte de la luz saldrá, en forma muy dirigida y con una sola frecuencia (es decir, es altamente coherente, espacial y temporalmente).

El precursor del láser fue el llamado máser. En el máser se amplifica radiación electromagnética en el intervalo de las microondas (de ahí la *m* en vez de *l*). El máser surgió como continuación de los estudios del radar en la Segunda Guerra Mundial. El primer máser fue creado por Townes, Gordon y Zeiger en 1954. Los rusos Basov y Prokhorov perfeccionaron el sistema, por lo que recibieron, junto con Townes, el premio Nobel de física en 1964 por el desarrollo del concepto del máser.

Después de la demostración del máser se comenzó la búsqueda de emisión estimulada en otras regiones del espectro electromagné-

tico. Townes y Schawlow comenzaron la investigación para obtener máseres ópticos o infrarrojos. Fue Gordon Gould quien en 1957 bautizó el “máser óptico” como “láser”, y después de una larga disputa legal obtuvo su patente en 1977, originalmente otorgada a Townes y Schawlow.

Theodore Maiman construyó en 1960 el primer láser, en el que como medio activo utilizó un cristal de rubí, como mecanismo de excitación una lámpara de destello, y la luz era emitida de manera pulsada. En los años siguientes a la operación del primer láser se logró observar acción láser en prácticamente todo medio conocido; hoy día se ha logrado obtener emisión láser en medios que incluyen 78 de los elementos de la tabla periódica.

Algunas de las áreas donde el láser ha tenido mayor repercusión han sido en la espectroscopía y las comunicaciones. Actualmente, la alta monocromaticidad (longitud de onda homogénea) de los láseres permite realizar estudios de espectroscopía con alta precisión en las regiones visible, infrarrojo y ultravioleta. También ayudó a concebir la llamada espectroscopía Raman, al excitar los modos de vibración de la materia. Otra técnica desarrollada a partir de la invención del láser, es la química inducida por láser (como parte de la fotoquímica), en la que la luz sirve como catalizador para algunas reacciones químicas. Más adelante hablaremos de cómo los láseres, junto con el desarrollo de las fibras ópticas, han impactado en las comunicaciones.

De manera notable se han desarrollado técnicas de manejo de pequeñas partículas, conocidas como “pinzas ópticas”, en las que la luz atrapa y controla el movimiento de partículas tan pequeñas como un micrómetro, y el desarrollo de trampas de átomos para generar haces de átomos coherentes. Esto último permitió lograr recientemente un nuevo estado de la materia: los condensados de Bose-Einstein. Estas técnicas permiten manipular pequeñas partículas para escribir y controlar la materia a escalas atómicas y en tiempos tan cortos como el movimiento de los electrones.

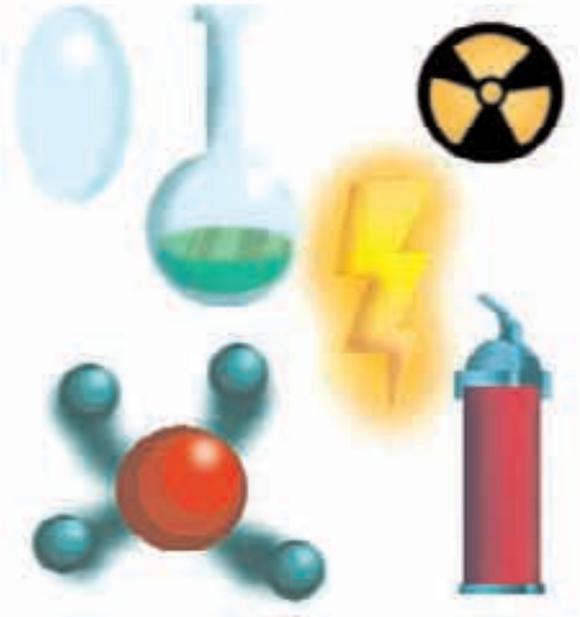
Si bien el láser ha dejado de ser un objeto de estudio básico desde hace varias décadas, ha permitido la creación de varios subcampos donde la interacción radiación-materia permite el estudio de efectos fundamentales, así como un sinnúmero de aplicaciones en la tecnología moderna: procesado de materiales, discos compactos, video discos y comunicaciones, por nombrar algunos. Dentro de la óptica también ha permitido el estudio de nuevos fenómenos que conforman la óptica moderna y nos permiten concebir cómo controlar la luz con luz misma.

## SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR FIBRAS ÓPTICAS

La necesidad de comunicarse es fundamental entre los humanos. Manipular la luz para comunicarse ha sido una constante necesidad a través de los siglos. Desde señales de humo usadas en la antigüedad, pasando por el semáforo desarrollado por solicitud de Napoleón, hasta los modernos sistemas de comunicación por fibra óptica actuales. Hoy día, los sistemas de comunicación permiten transmitir información entre lugares separados desde unos cuantos metros hasta distancias transoceánicas, e incluso astronómicas. Si bien hay varias maneras de transmitir información, hasta hace tan sólo unas décadas los sistemas más rápidos hacían uso de cables metálicos, o enviaban señales de radio o microondas en el espacio libre. Con el desarrollo de la fibra óptica y los láseres, las comunicaciones han evolucionado de manera considerable. Los sistemas de comunicación óptica transmiten usando luz visible o cercana al infrarrojo. Actualmente los sistemas de comunicación por fibra óptica son usados predominantemente por redes telefónicas de larga distancia, áreas metropolitanas de alta densidad y en las principales líneas de televisión, al igual que para comunicación transcontinental bajo el mar.

Dado que al enviar cualquier señal ésta se atenúa a lo largo de la línea de transmisión, es necesario contar con sistemas que la amplifiquen o regeneren. Los amplificadores ópticos juegan un papel muy importante en las transmisiones a larga distancia. Los primeros sistemas de comunicación por fibra óptica utilizaban repetidores electrónicos para amplificar la señal de luz cada 10 kilómetros, aproximadamente. Estos repetidores usaban un detector que convertía la señal de luz en una señal eléctrica, la cual era amplificada electrónicamente, y un fotodiodo la convertía nuevamente en señal de luz. Tales repetidores estaban limitados por la velocidad de sus componentes electrónicos, con lo cual se limitaba el ancho de banda de transmisión. Los amplificadores actuales son puramente ópticos y no requieren de circuitos electrónicos de alta velocidad. La señal no es detectada sino meramente amplificada, por lo que no está limitada por ningún ancho de banda electrónico. Es decir, podemos controlar las características de la luz manipulando solamente la luz misma.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica comerciales utilizan amplificadores de fibra que contienen trazas de un



Con el desarrollo de la fibra óptica y los láseres, las comunicaciones han evolucionado de manera considerable

Podemos decir  
que el nacimiento  
de la óptica no lineal  
se da inmediatamente  
después de la invención  
del láser en 1960

elemento de las tierras raras, el erbio. Usando esta tecnología, la distancia promedio que se necesita para colocar un amplificador de fibra es entre 40 y 80 kilómetros, con un ancho de banda de hasta cinco mil millones de bits (5 gigabits) por segundo. En la actualidad se comienza a usar una nueva tecnología de multiplexión de información, que manda información en diferentes colores, o longitudes de onda de la luz, usando amplificadores ópticos. Con esta nueva tecnología se han reportado experimentos que han rebasado la barrera de los terabits (millones de millones de bits) por segundo.

Dada su composición, las fibras ópticas comerciales son casi transparentes en una zona que va desde los 1300 hasta los 1700 nanómetros. Los amplificadores de fibra con erbio tienen un excelente desarrollo en longitudes de onda en la región de 1530 a 1565 nanómetros, conocidas como la banda C. Es decir, con el uso de amplificadores de fibra con erbio sólo se abarca un 10 por ciento del total de la zona donde las fibras ópticas tienen la menor pérdida. Para usar toda la capacidad de las fibras ópticas se desarrolla una nueva tecnología usando el fenómeno de amplificación Raman. Los amplificadores Raman se basan en la capacidad que tiene la luz de que podemos cam-

biarla manipulando únicamente el color y la intensidad del láser de bombeo. En los siguientes años veremos los frutos de esta investigación.

#### MATERIALES ÓPTICOS NO LINEALES

En la física clásica del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX se sabía que un material reaccionaba de manera directamente proporcional al campo de la luz incidente. Las características del material, su índice de refracción y de absorción, no eran cambiadas por el hecho de que la luz se propagara en ellos. Con eso, uno estaba en la cómoda región de los procesos lineales. O sea, para saber cómo respondía el medio al hacer incidir en él dos haces de luz, era suficiente considerar cada haz por separado y luego sumar sus respuestas. Si la onda en la entrada tenía cierta frecuencia, la misma frecuencia se obtenía a la salida. Aun así, los problemas de difracción, interferencia y propagación de ondas están muy lejos de ser simples e inútiles. Los grandes avances técnicos basados en electrodinámica y óptica —radio, radar, interferómetros etcétera— se basaban en procesos lineales. Claro, uno no puede pegar más y más fuerte a los átomos de algún material con la luz y esperar a que éste siempre tenga una respuesta proporcional a la fuerza del golpe —finalmente algo debe pasar. La naturaleza de este “algo” se empezó a aclarar con la aparición de los primeros láseres de pulsos en la década de 1960.

Podemos decir que el nacimiento de la óptica no lineal se da inmediatamente después de la invención del láser en 1960, debido a que el campo eléctrico generado por la luz láser es comparable con el campo eléctrico interatómico. Estos campos eléctricos tan grandes producen desplazamientos inarmónicos (o sea, no periódicos) de los electrones de los átomos.

Una de las consecuencias prácticas de los desplazamientos anarmónicos de los electrones de los átomos inducidos por luz láser de suficiente potencia es la generación de un amplio espectro de nuevas longitudes de onda (desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano), vía la generación de segundo armónico (por ejemplo, conversión de luz infrarroja en verde), generación de armónicos de orden más alto, amplificación paramétrica, dispersión Raman, etcétera. Los materiales ópticos no lineales típicos usados en estas aplicaciones fueron cristales (niobato de litio, trifosfato de potasio, difosfato de amonio), gases (benceno, metano) y líquidos (disulfuro de carbono, tetracloruro de carbono). Todos estos materiales tienen algo en común: su susceptibilidad no lineal es muy pequeña y por lo tanto

deben usarse láseres de muy altas potencias (miles o incluso millones de watts). La susceptibilidad no lineal es una medida de la eficiencia de conversión de luz. Así, mientras más grande sea, menor será la potencia de luz requerida.

En años recientes, las investigaciones de materiales no lineales, incentivadas por la capacidad de controlar luz con luz, hicieron posible el descubrimiento de nuevos efectos no lineales cuya susceptibilidad no lineal es órdenes de magnitud superior a la de los materiales disponibles en el pasado. Se han reportado efectos no lineales con láseres de baja potencia (de millonésimas a milésimas de watt) en semiconductores, materiales orgánicos, materiales fotorrefractivos, cristales líquidos y fibras ópticas de vidrio. El resultado práctico de la no linealidad en estos nuevos materiales es el cambio en el índice de refracción fotoinducido por la luz; generalmente donde la intensidad es mayor, mayor es el cambio del índice de refracción, fenómeno conocido como efecto Kerr. Así por ejemplo, un haz láser con una distribución de intensidad mayor en el centro que en las orillas puede fotoinducir lentes ópticas en un material inicialmente homogéneo o incluso puede llevar a la formación de guías de ondas llamados solitones espaciales. Si hacemos interferir un par de haces coherentes dentro de un material lineal, el resultado será una distribución periódica del índice de refracción, esto es, una copia del patrón de interferencia. De esta manera podemos escribir hologramas dinámicos, ya que si removemos la iluminación, el holograma también desaparecerá. Estas rejillas de índice de refracción tienen propiedades especiales, ya que pueden cambiar la dirección de propagación de un haz que incide sobre ellas. Si la luz de un foco (que incluye un espectro ancho, de aproximadamente 500 nanómetros) incide sobre una rejilla, ésta puede transmitir o reflejar luz con ancho espectral muy angosto (0.1 nanómetros). Esta posibilidad se usa actualmente en sistemas de comunicación ópticos para el multiplexado y demultiplexado de información.

Los materiales orgánicos y poliméricos han mostrado un gran potencial para tales aplicaciones, ya que exhiben polarizaciones no lineales muy grandes. Un ejemplo de tales materiales son los polímeros fotorrefractivos. El efecto fotorrefractivo consiste en cambios en el índice de refracción inducidos por una redistribución espacial de los portadores de carga, la cual a su vez, es fotoinducida por un patrón espacial de luz no uniforme. El efecto fotorrefractivo se observa en materiales que son a la vez fotoconductores y no lineales (es decir, que exhiben efectos electro-ópticos).

Los elementos necesarios para obtener un efecto fotorrefractivo son: 1) un generador de carga fotoionizable, 2) un medio transportador de carga, y 3) un medio no lineal donde el índice de refracción dependa del campo eléctrico local, fenómeno conocido como “efecto Pockels”. Una vez que se escoge un material fotorrefractivo inorgánico, es muy difícil controlar la densidad de generadores fotoionizables y más difícil aún cambiar las propiedades fotoconductoras y electro-ópticas del material. En cambio, los polímeros fotorrefractivos son sistemas altamente flexibles que permiten optimizar de manera casi independiente cada una de las propiedades mencionadas. En muestras de sólo 100 micrómetros (milésimas de milímetro) de grosor se han obtenido características que superan con mucho las propiedades fotorrefractivas de varios materiales inorgánicos.

Todavía queda mucho camino por recorrer hasta que las grandes ideas puedan realizarse. Cuando apareció el láser, los escépticos lo llamaron “la solución sin problema”. Después de 40 años, los láseres ya aparecieron en los hogares, supermercados, etcétera; son ahora objetos de uso común. Es probable que lo mismo suceda con los materiales ópticos no lineales. Posiblemente dentro de algunos años los dispositivos que los usen sean tan comunes como ahora son los láseres.

Después de 40 años,  
los láseres ya aparecieron  
en los hogares,  
supermercados, etcétera;  
son ahora objetos  
de uso común

## HACES INVARIANTES

Una de las características de la luz es que en ocasiones se pone en evidencia su carácter ondulatorio y en otras su carácter corpuscular. En su propagación sufre del fenómeno denominado *difracción*, que se manifiesta cuando un haz de luz se va expandiendo conforme va viajando. Es posible usar lentes o espejos para intentar disminuir este efecto; sin embargo, la física de ondas lo obliga a expandirse al propagarse.

Hace aproximadamente quince años se descubrió que era posible generar haces circulares de luz que no tuvieran prácticamente nada de difracción, a los que se les llamó “haces adifraccionales”, o de Bessel, por su representación matemática. Esto trajo consigo muchas controversias en la comunidad científica (comenzando por el nombre), debido a que los haces de luz sin difracción violaban las leyes de la física. Tuvieron que transcurrir casi diez años para poder resolver totalmente el enigma de la propagación de estos haces.

Existía otra familia de haces de luz cuya descripción matemática era la misma que la de los haces adifraccionales: la de los haces que no cambian de forma al propagarse en un medio no lineal, conocidos como “solitones espaciales”. Al tratar de entender el origen físico de esta nueva familia, fue posible entender no sólo su dinámica, sino también la de los haces adifraccionales, y esto permitió desarrollar una teoría sobre su naturaleza. Esta teoría explicó satisfactoriamente todas las controversias anteriores conocidas, y además dio pie al descubrimiento de otras familias de haces adifraccionales, así como el diseño de un sistema láser cuyo haz de salida tuviera características adifraccionales. Hoy, en la comunidad científica, se sigue usando el nombre de “haz adifraccional”, aunque se prefiere el término “haz de propagación invariante”.

¿Para qué tener un haz de luz adifraccional? Hoy los láseres forman parte de nuestra vida cotidiana. En las aplicaciones actuales de los láseres, al final de la trayectoria se coloca una lente que permite enfocar el rayo en un volumen muy pequeño (por ejemplo, para hacer un corte). Esto se traduce en que la profundidad de penetración del láser está limitada. A diferencia de esto, un haz no difractivo, en una cierta distancia, se comporta como las ficticias espadas láser que aparecen en las películas de cine de ciencia ficción. Un haz láser así, además de ser más preciso, podría cortar más material disminuyendo el tiempo y el costo de producción.

Otra característica de estos haces, que los hace extraordinarios, es que pueden reconstruirse totalmente aunque una parte



de ellos sea obstruida. Esto se ha aplicado recientemente al utilizar ciertas distribuciones de luz en la manipulación de partículas y organismos vivos en tres dimensiones a escalas micro y nanométricas (milésimas y millonésimas de milímetro). Además, estos haces son capaces de poner en rotación microengranes y así permitir el funcionamiento de micromotores. Si a esto le agregamos su poder de reconstrucción, podríamos tener varios micromotores alineados controlados por un solo haz.

Todo lo anterior hace imperativo continuar las investigaciones de haces adifraccionales y sobre su comportamiento en condiciones limitadas en el tiempo. Sin duda alguna, habrá un sinnúmero de aplicaciones para esta clase de haces.

## SOLITONES ÓPTICOS

Como ya mencionamos, la óptica no lineal nació cuando se pudieron obtener intensidades de campo electromagnético que produjeran un movimiento anarmónico en los electrones de la materia o se confinara luz en dimensiones muy pequeñas. En esta área existen distribuciones de campo que pueden propagarse sin distorsión con un adecuado balance entre el fenómeno dispersivo (o difracción) y algún fenómeno no lineal. Estas distribuciones tienen un comportamiento muy semejante a la de los haces adifraccionales y se conocen con el nombre de “solitones ópticos”.

Los solitones ópticos se observaron primero en medios que poseían una alta absorción, conocidos como medios resonantes, pero que ante ciertas intensidades de campo el medio se volvía transparente. Actualmente este campo se conoce como transparencia auto-inducida electromagnéticamente.

Un segundo tipo de solitones en óptica se presenta cuando el medio presenta una no linealidad no resonante debido a lo que se conoce como susceptibilidad de segundo o de tercer orden. Los solitones generados por una susceptibilidad de tercer orden, o sea cuando el índice de refracción se modifica con la intensidad de luz, son conocidos como tipo Kerr, y están descritos por la ecuación no lineal de Schrödinger. Además, estos solitones se subdividen en espaciales y temporales, dependiendo de qué tipo de compensación en el haz de luz se esté dando: ensanchamiento temporal o ensanchamiento espacial (difracción).

Los solitones temporales se pueden comparar de manera muy simple con un grupo de aves emigrando de un continente a otro. Las aves más fuertes irían adelante, cortándole el aire a las más débiles, que irían atrás; así el grupo viajaría siempre unido. La no linealidad haría que las aves rápidas se detuvieran,

y las lentas se aceleraran. Esta analogía puede aplicarse a los pulsos de luz propagándose en una fibra óptica, donde las componentes espectrales azules son más rápidas que las rojas, por lo que, en condiciones lineales, los pulsos tienden a ensancharse temporalmente al propagarse. Sin embargo, en el régimen no lineal, debido al efecto Kerr, la automodulación de la fase genera un índice de refracción dependiente de la intensidad, y puede llevar a la propagación estable de un pulso de luz. Así, los solitones temporales tienen una forma particular y existe una correspondencia entre su energía y su duración.

La existencia de los solitones temporales fue predicha en 1973, y confirmada experimentalmente en 1980

La existencia de los solitones temporales fue predicha en 1973, y confirmada experimentalmente en 1980. Alentados por esta observación se ha tratado de aplicar tales solitones en sistemas de comunicación. En 1988 se pudo obtener el primer sistema de comunicación totalmente óptico, que utilizó solitones de 55 picosegundos (billonésimas de segundo). Sin embargo, a pesar de la estabilidad de los solitones, tales sistemas presentaron otros problemas para recuperar la información, por lo que fue necesario agregarles algunos elementos. En 1996 se demostró que pueden existir pulsos tipo solitón en fibras que tengan una

Una diferencia fundamental  
entre la electrónica  
y la óptica es que  
las señales ópticas  
son necesariamente  
ondas viajeras

variación periódica de la dispersión. Tales solitones se conocen como de dispersión controlable. Con ellos se han desarrollado sistemas de 40 gigabits (miles de millones de bits) por segundo en un solo canal de 10 mil kilómetros, lo cual no se ha obtenido con ningún otro sistema de transmisión. Sin embargo, todavía es necesario resolver otros problemas para que tales sistemas puedan ser utilizados de manera comercial.

Los solitones espaciales, por su parte, son haces de luz que se auto-atrapan cuando la no linealidad óptica del medio compensa la difracción típica que sufriría el haz en un medio lineal. Este tipo de solitón requiere de medios que presenten una susceptibilidad de tercer o segundo orden. Los solitones espaciales fueron predichos mucho antes que los temporales, en 1960; sin embargo, su confirmación experimental sólo se logró hasta 1985. Actualmente los solitones espaciales han sido observados en muchos medios, pero los más interesantes se han dado en medios fotorrefractivos y medios cuadráticos, ya que se puede combinar muy bien la teoría con los experimentos.

A pesar de la diversidad de los mecanismos que pueden dar origen a solitones ópticos es-

paciales, algunas de las características de los solitones en interacción o colisión con otros solitones son universales. Los solitones espaciales exhiben una riqueza de fenómenos que no se encuentran en los solitones temporales, ya que pueden dar origen a fenómenos como fusión, fisión y aniquilación, y pueden llegar a orbitar alrededor de otros en su propagación tridimensional.

La utilidad del solitón espacial radica en sus propiedades a distancias cortas y dimensiones pequeñas, compatibles con las de una fibra óptica, donde las características no lineales inherentes del solitón espacial puedan aprovecharse para modular información.

El ámbito de las aplicaciones de los solitones espaciales se ve incrementado con el hecho de que crean distribuciones de índice de refracción, de manera que es posible que otro haz de luz se pueda guiar. Por ello es posible contar con guías de onda no prefabricadas, con características no lineales que pueden explotarse para desarrollar dispositivos totalmente ópticos, idóneos para lo operación en paralelo que se requiere en la computación óptica. Uniones tipo Y, e interruptores ópticos para haces poco intensos que trabajan con base en el comportamiento no lineal de los solitones espaciales, son ejemplos de tales aplicaciones. Obviamente, el futuro desarrollo y perfeccionamiento de dispositivos ópticos que empleen solitones espaciales como guías de onda requiere del conocimiento simultáneo de las propiedades no lineales del solitón espacial y del comportamiento de la luz confinada en ellos.

#### COMENTARIO FINAL

El reto más difícil para los investigadores es integrar todos los elementos descritos para su uso en sistemas de comunicaciones. Una diferencia fundamental entre la electrónica y la óptica es que las señales ópticas son necesariamente ondas viajeras. Por ello, la óptica necesita inventar nuevas estructuras, y no sólo imitar las ya existentes de la electrónica. No obstante, los dispositivos ópticos desarrollados en algunos laboratorios de investigación muestran algunas ventajas en términos de velocidad y compatibilidad al ser totalmente ópticos. Podemos anticipar que, en algunos años, sistemas ópticos de alta velocidad y sistemas ópticos procesadores de señales serán utilizados junto con los sistemas electrónicos existentes para incrementar enormemente la capacidad y el desempeño de los sistemas de comunicaciones.

## Bibliografía

- Chávez-Cerda, S. (1999), "A New Approach to Bessel Beams", *Journal of Modern Optics*, 46, 923-930.
- Eason, R. y A. Miller (1993), *Nonlinear optics using signal processing*, Gran Bretaña, Chapman and Hall.
- Milonni P. M. y J. H. Eberly (1988), *Lasers*, Nueva York, Wiley.
- Ramaswami, R. (2002), "Optical fiber communication: from transmission to networking", *IEEE Communications Magazine*, 50Th Anniversary commemorative issue, 138-147.
- Saleh, B. E. A. y M. C. Teich (1991), *Fundamentals of photonics*, Nueva York, Wiley.
- Thomas, G. A. D., A. Ackerman, P. R. Pruncnal y S. L. Cooper (2000), "Physics in the whirlwind of the optical communications", *Physics Today*, 11, septiembre, 30-36.
- Trillo, S. y W. Torruellas, editores (2001), *Spatial Solitons*, Nueva York, Springer Verlag.

---

**Sabino Chávez Cerda** es doctor en óptica no lineal por el Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres. Es investigador titular del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Sus áreas de investigación están relacionadas con procesos de propagación de haces y pulsos láser en medios dieléctricos transparentes lineales y no lineales. [sabino@inaoep.mx](mailto:sabino@inaoep.mx)

**Baldemar Ibarra Escamilla** es doctor en ciencias por el INAOE, donde actualmente es investigador asociado. Es miembro del SNI. Sus áreas de interés son fibras ópticas, láseres de fibra de amarre de modos, láseres sintonizables, sensores de fibra y amplificadores de fibra. [baldema@inaoep.mx](mailto:baldema@inaoep.mx)

**Marcelo David Iturbe Castillo** es doctor en ciencias por el INAOE, donde es investigador titular. Es miembro del SNI y de la Academia Mexicana de Ciencias. La investigación que realiza está enfocada al área de la óptica no lineal. [diturbe@inaoep.mx](mailto:diturbe@inaoep.mx)

**Eugene Kuzin** se doctoró en el Instituto Físico-Técnico A. F. Ioffe. Es investigador titular del INAOE y miembro del SNI. Sus áreas de interés son comunicaciones por fibra, sensores de fibras, amplificadores de fibras, láseres de fibras, y fenómenos no lineales en fibras, como radiación estimulada de Raman y Brillouin y sus aplicaciones para sistemas de comunicaciones ópticas. [ekuz@inaoep.mx](mailto:ekuz@inaoep.mx)

**Nikolai Korneev** se doctoró en física en el Insituto Físico-Técnico A. F. Ioffe. Actualmente es investigador titular del INAOE y miembro del SNI. Sus áreas de interés son física de los cristales fotorrefractivos, holografía e interferometría adaptativa y sensores. [korneev@inaoep.mx](mailto:korneev@inaoep.mx)

**Rubén Ramos García** obtuvo el doctorado en física en el Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres. Es investigador titular del INAOE y miembro del SNI. Sus áreas de interés son materiales fotorrefractivos (polímeros, pozos cuánticos y cristales en volúmenes), materiales orgánicos no lineales y aplicaciones de materiales fotorrefractivos. [rgarcia@inaoep.mx](mailto:rgarcia@inaoep.mx)

**Carlos Gerardo Treviño Palacios** se doctoró en el Center for Research and Education in Optics and Lasers, en Orlando, Florida. Es investigador titular del INAOE y miembro del SNI. Su labor se ha centrado en establecer un laboratorio de caracterización no lineal e instrumentación usando láseres. [carlost@inaoep.mx](mailto:carlost@inaoep.mx)