ÁTOMOS TRANSPARENTES QUE VUELVEN LÍQUIDA LA LUZ

MICHINEL ÁLVAREZ, Humberto
Departamento de Física Aplicada
UNIVERSIDADE DE VIGO - CAMPUS DE OURENSE

1. INTRODUCCIÓN

El 18 de Marzo de 1905 un funcionario de la oficina de patentes de Berna, Albert Einstein, enviaba a la prestigiosa revista alemana *Annalen der Physik* un artículo para su publicación: «Acerca de un punto de vista heurístico sobre la creación y la conversión de la luz» [1]. En el mencionado trabajo, Einstein abordaba de un modo directo la explicación de un fenómeno que se había resistido a los científicos del siglo XIX: el cambio de color que experimenta la luz que emite un cuerpo en función de su temperatura (problema del *cuerpo negro*).

A finales del siglo XIX se conocía experimentalmente la forma del espectro de luz del cuerpo negro y se sabía que existía un rápido incremento en la intensidad de la radiación emitida en función de la frecuencia, a una temperatura dada, seguido de un brusco decaimiento a frecuencias elevadas. La forma de esta curva, que no dependía del tipo de cuerpo, fue reproducida teóricamente por Max Planck [2] pero él fue incapaz de explicar su forma utilizando sólo termodinámica o electromagnetismo. La única manera que había encontrado Planck de explicar la forma de la curva era suponer que la radiación fuese emitida en paquetes discretos llamados «cuantos». Sin embargo Planck sólo vio su descubrimiento como un artilugio matemático. Fue Einstein en 1905 el que explicó la ley de Planck $E=h\nu$ como un resultado fundamental sobre la naturaleza de la luz y sus interacciones con la materia.

En el mencionado trabajo, Einstein utiliza la idea de un gas de fotones con un carácter cuasi-corpuscular, aunque el término *fotón* es muy posterior y él empleó

la denominación *quanta de luz*. En ese mismo artículo Einstein abordó la explicación del *efecto fotoeléctrico*, en el que un metal irradiado por luz emite electrones sólo para frecuencias superiores a una frecuencia umbral de la luz incidente. Además la energía de los electrones emitidos era independiente de la intensidad de la luz incidente y dependía linealmente de la frecuencia de la luz incidente. Estos resultados no podían explicarse con las teorías ondulatorias de la luz. Por este trabajo, Einstein recibió el premio Nobel en 1927.

2. ENFRIAMIENTO DEL GAS DE FOTONES

De este modo, si la luz se puede considerar como un gas de fotones y dado que los gases se pueden licuar, tiene sentido preguntarse si sería posible obtener un «líquido de luz» y qué propiedades tendría éste. A continuación veremos que en los últimos años ha habido una cierta actividad científica relacionada con estas cuestiones.

El campo en el que se han desarrollado estas ideas es la óptica de los medios *no lineales*, que son materiales en los que el índice de refracción *n* es proporcional a la intensidad *I* del haz de luz incidente. En un material de este tipo, cuando la luz se propaga tiende a acumularse en las zonas donde hay más radiación. Ello es debido a que, por el principio de Fermat, los rayos se dirigen a las zonas de *n* elevado. Por ejemplo, un haz de un láser tiene una intensidad mucho mayor en su centro que en los bordes; si este haz penetra en un material en el que *n* crezca linealmente con *I*, los fotones del gas de luz se dirigirán hacia el centro de modo que el haz de luz se vuelve cada vez más estrecho a medida que avanza. Este fenómeno se conoce como *autoenfoque* de la luz (ver Fig. 1). Al irse focalizando, el haz aumenta la densidad de energía en su centro de manera que el proceso se refuerza y termina por formar un punto de intensidad enorme, de modo análogo al *colapso* gravitatorio que origina los agujeros negros.

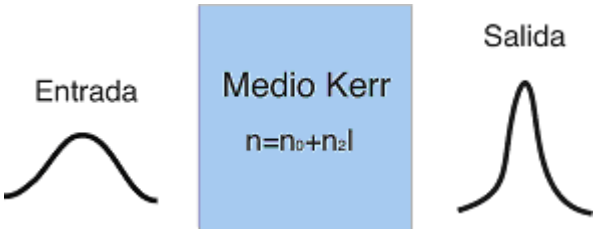

***Fig. 1**. Autoenfoque de un haz gaussiano tras atravesar un medio Kerr con $n_2>0$.*

Este proceso de autoenfoque puede razonarse en términos de un balance térmico. Podemos imaginar que la tendencia natural de un haz de láser a ensancharse a medida que se propaga es un efecto análogo a la expansión térmica de un gas cuyas partículas tienen una cierta energía cinética. Entonces, la autofocalización que se produce en la luz que viaja dentro del material no lineal debería corresponder a una disminución de la temperatura del haz de luz. Podemos decir entonces que el material no lineal actúa como una «nevera» para el gas de fotones.

En la naturaleza existen muchos materiales cuyo comportamiento da lugar al autoenfoque de la luz. Concretamente, en los medios denominados de tipo Kerr, el índice de refracción es proporcional a la intensidad *I* del haz de luz incidente con la ecuación:

$$n(I) = n_0 + n_2 I \qquad (1)$$

Hay otros medios que se comportan como un medio Kerr en un cierto rango de potencias *I* puesto que cualquier dependencia no lineal del índice de refracción en *I* se puede aproximar a primer orden por una expresión como la dada por la fórmula (1). En principio, el fenómeno de autoenfoque puede ser problemático debido a la concentración de energía que implica y al hecho de que cuando un haz comienza a autoenfocarse el fenómeno se continúa hasta el infinito de modo que si no hubiera algún otro mecanismo físico que limitase el autoenfoque tendríamos la formación de una singularidad. En los denominados materiales cúbico-quínticos (C-Q), la dependencia del índice de refracción con *I* es de la forma:

$$n(I) = n_0 + n_2 I - n_4 I^2 \qquad (2)$$

con n_2, n_4>0. De nuevo el principio de Fermat nos da una idea del comportamiento de la luz al propagarse por estos medios. Cuando comienza el proceso de autoenfoque y la intensidad de la luz en una región del espacio sea suficientemente grande, el término proporcional a $n_4 I^2$ domina al autoenfoque inhibiendo el colapso.

3. CONDENSACIÓN DE LA LUZ

Para estudiar el proceso de enfriamiento del gas de fotones analizaremos la propagación paraxial de un haz de luz láser a través de un material óptico no lineal, que viene descrita por una ecuación tipo Schrödinger de la forma:

$$-2ikn_0 \frac{\partial \psi}{\partial z} = \nabla_\perp^2 \psi + 2k^2 n_0 f\left(|\psi|^2\right)\psi \qquad (3)$$

donde k=2ð/ë es el número de onda en el vacío, n_0 es el índice de refracción lineal, $\nabla_\perp^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ es el operador Laplaciano transversal y ø(x,y,z) es la envolvente lenta del campo eléctrico de la luz que se propaga en el medio a lo largo de la dirección z. La función $f(|ø|^2)$ indica la dependencia del índice de refracción no lineal con la potencia del haz. Por ejemplo, en los materiales ópticos cúbico-quínticos, tendremos $f(|ø|^2)=n_2|ø|^2-n_4|ø|^4$.

La ecuación (3) nos indica que la evolución del haz de luz viene determinada por dos términos: uno de energía cinética o *temperatura* de la distribución ($\nabla_\perp^2$) que tiende a ensanchar el haz a medida que se propaga, y otro de condensación. En un material C-Q, para intensidades bajas este último es despreciable. Si se aumenta la potencia, el autoenfoque tiende a compensar la difracción y puede llegar a superarla para una potencia crítica. En el caso de materiales puramente Kerr (n_4=0), esto podría conducir al colapso. Como hemos dicho antes, para potencias más altas, el efecto desenfocante del término n_4 evita el colapso. Cuando las tres tendencias (ensanchamiento, autoenfoque y autodesenfoque) se equilibran se genera un haz de luz que se propaga sin variar su forma y que presenta propiedades de tensión superficial similares a las de los líquidos habituales. Este es el estado conocido como *luz líquida* [3].

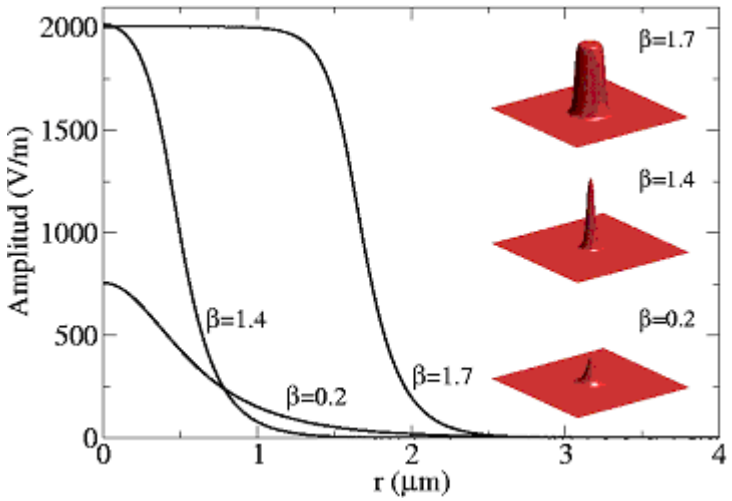

Fig. 2 Perfil de amplitud de haces de luz de potencia creciente, indicando la formación de un condensado de luz líquida.

Como se muestra en la Fig. 2, para valores bajos de la potencia, las distribuciones de luz son cuasi-gaussianas, mostrando un pico suave. Esto es el aspecto que debe presentar una nube de gas de luz. A medida que se aumenta la potencia, las formas espaciales se estrechan, pero mantienen el perfil gaussiano. Pero para valores más altos de la potencia, el pico de intensidad de luz se satura debido al efecto de un n_4 negativo, originando distribuciones de luz con perfiles aproximadamente cuadrados.

La interpretación física es la siguiente: potencias bajas conllevan distribuciones espaciales del «gas de fotones» de tipo gaussiano y la contribución dominante en la ecuación (3) es la difracción ($\nabla_\perp^2\psi$), que puede interpretarse como un término cinético (expansión del gas de fotones). Para estados estacionarios con potencias superiores, el término Kerr autoenfocante (n_2) comienza a ser importante y tiende a estrechar la forma de la distribución de luz. El haz colapsaría para potencias superiores a una crítica, sin embargo, el efecto desenfocante (n_4) domina para potencias altas evitando así el colapso. La comparación de los perfiles espaciales para potencias bajas y altas se asemeja a las distribuciones de densidad de partículas dentro de un gas para valores bajos de la potencia (distribuciones espaciales casi gaussianas, representando deslocalización alta) o una forma supergausiana condensada para potencias altas (densidad de fotones casi constante dentro del haz y descenso brusco en el borde). Esta analogía adquiere un mayor sentido si recordamos el razonamiento del material no lineal como una «región fría» donde el término cinético $\nabla_\perp^2\psi$ es compensado por los efectos no lineales. De este modo se originan «flujos de luz» estables debido a los efectos competitivos de difracción, término Kerr y no linealidad desenfocante, de manera similar a cómo las fuerzas de Van der Waals forman gotas de líquido en una condensación gas-líquido. En el caso de haces pulsados, esto es, con dependencia temporal añadida no incluida en la ecuación (3) esta analogía es más evidente, pues se formarían «gotas de luz».

Es posible incluso calcular la tensión superficial de los condensados de luz. Teniendo en cuenta que la ecuación no lineal de Schrödinger nos da la energía total (hamiltoniano) e igualando esta al balance energético entre aumento de partículas y la fuerza por unidad de superficie, se obtiene un resultado interesante: la tensión superficial crece linealmente con el tamaño de la gota de luz: ó = (9ðr/16)$(n_2/n_4)^3$, al igual que en el caso de las gotas de líquido habituales. Este resultado refuerza la idea de que haces de luz en medios ópticos cúbico-quínticos pueden experimentar una transición de fase de un gas de fotones a un líquido de luz.

El efecto de la tensión superficial sobre el líquido de luz se puede apreciar simulando numéricamente el choque de una «gota de luz» contra una superficie lisa. De este modo se obtiene el comportamiento de la Fig. 3, donde se observa la

rotura de un haz de luz líquida en varias gotas de menor tamaño, en analogía con la salpicadura de las gotas de fluido cuando choca con una superficie rígida. Este comportamiento es muy diferente de los fenómenos de reflexión y refracción típicos de las ondas electromagnéticas cuando inciden sobre superficies donde hay cambios de índice de refracción.

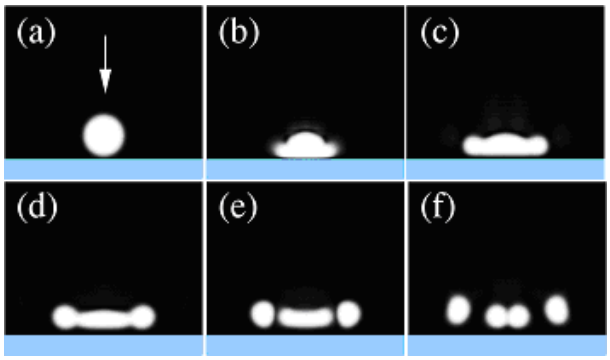

Fig. 3 Choque de un condensado de luz líquida (reflexión total) contra una superficie plana, observándose la formación de gotas más pequeñas por filamentación.

En la Fig. 4 se muestra la colisión de un haz de luz contra un agujero de aire que está inmerso en el material no lineal. En este caso, el efecto de la tensión superficial es evidente: el haz es estrangulado cuando toca el agujero. Sin embargo, el haz recupera su forma original.

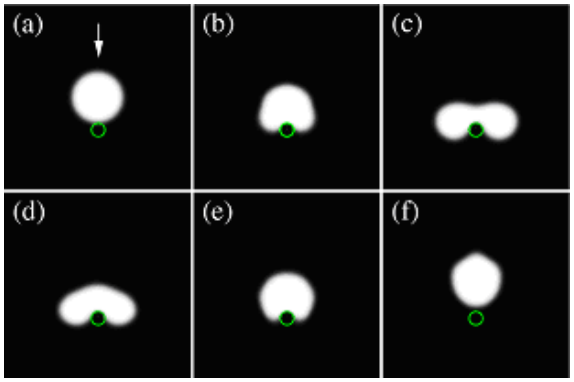

Fig. 4 Colisión de un condensado de luz contra un agujero de aire que está inmerso en el material no lineal. El efecto es análogo a intentar pinchar una gota de líquido con alta tensión superficial.

4. REMOLINOS EN EL LÍQUIDO DE LUZ

Las analogías de la luz líquida con los fluidos usuales, van más allá de las propiedades de tensión superficial. Al igual que ocurre con sistemas como el He superfluido, los haces de luz líquida presentan remolinos que nunca se disipan, ya que no existe viscosidad. Estos remolinos o vórtices son singularidades de fase donde la intensidad de la onda se desvanece. El flujo de energía rota alrededor del centro del vórtice en una dirección determinada. En el centro la velocidad de rotación sería infinita, por eso la intensidad de la luz debe ser nula. El número entero de vueltas que da la fase alrededor de la singularidad se denomina carga topológica *l* del vórtice, y juega el papel de un momento angular, igual que el *spin* de los electrones. Este tipo de defectos pueden aparecer espontáneamente durante la propagación de luz a través de medios ópticos turbulentos, o pueden producirse iluminando adecuadamente un holograma generado por ordenador.

En la Fig. 5 se muestran condensados de luz con vórtices anidados de distinto momento angular e idéntica potencia. Como se puede observar, el tamaño del agujero central aumenta con *l*, mientras que el ancho de la corona se satura para valores altos del momento angular. Estos anillos de luz tienen las mismas propiedades de tensión superficial que los condensados anteriormente comentados.

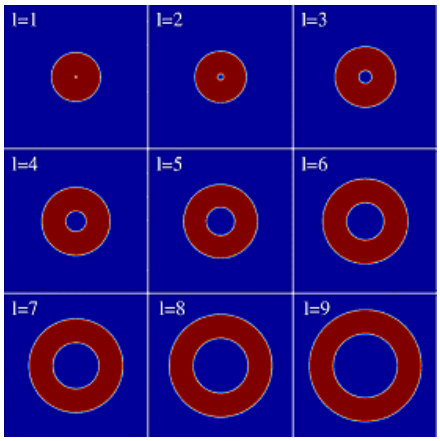

Fig. 5 Remolinos de luz que tienen valor creciente de la carga topológica.

En la Fig. 6 se muestra efecto de la tensión superficial de un haz láser con vórtice anidado que sufre reflexión total en la frontera de un material cúbico-quíntico con un material lineal. Como se puede observar, la tensión superficial impide la filamentación del haz.

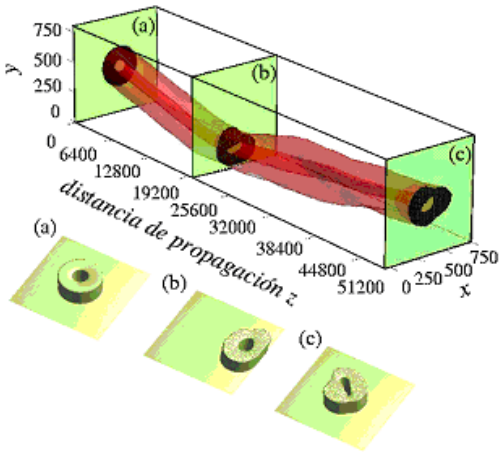

Fig. 6 Choque de un condensado de luz líquida que anida en su interior un remolino de carga topológica l=4. La tensión superficial es lo suficientemente elevada como para preservar el vórtice sin que se rompa.

5. CÓMO SE LICÚA UN HAZ DE LUZ

Hasta ahora todo lo que se ha dicho sobre luz líquida en este artículo se basa en simulaciones numéricas de la ecuación (3) bajo la hipótesis de un índice no lineal del medio de la forma dada por la ecuación (2). Surge por tanto de modo natural la pregunta: ¿es posible crear luz líquida en el laboratorio?

Desafortunadamente hasta ahora la respuesta ha sido negativa y la razón es que aunque en algún momento se encontraron materiales que supuestamente tenían las propiedades adecuadas lo cual estimuló el análisis teórico de estos sistemas, más tarde los resultados experimentales resultaron ser incorrectos.

Actualmente parece difícil conseguir estos comportamientos con materiales ópticos ordinarios, esto es, simples medios transparentes con respuesta no lineal. Sin embargo, existe un truco cuántico para conseguir materiales con una respuesta no lineal gigantesca. La idea básica es «desafinar» a los átomos (usando láseres) para volverlos invisibles. Este trabajo ha sido publicado recientemente en la revista *Physical Review Letters* [5].

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Einstein, Ann. Physik **17**, 132 (1905).

[2] M. Planck, Ann. Physik **4**, 533 (1901).

[3] H. Michinel *et. al*, «Liquid light condensates», Phys. Rev. E **65**, 066604 (2002).

[4] John Stachel, *Einstein's Miraculous Year: five papers that changed the face of Physics*, Princeton University Press (Princeton, 1998).

[3] H. Michinel, M. J. Paz-Alonso and V. M. Pérez-García, «Turning light into a liquid via quantum coherence», Phys. Rev. Lett. **96**, 023903 (2006).