Del gas de fotones al líquido de luz

Humberto Michinel Álvarez, Víctor M. Pérez García y María J. Paz Alonso

Einstein y el "gas de quanta de luz"

El 18 de Marzo de 1905, la prestigiosa revista alemana *Annalen der Physik* recibía para su publicación un artículo titulado "Acerca de un punto de vista heurístico sobre la creación y la conversión de la luz" [1]. El trabajo estaba firmado por un funcionario de la oficina de patentes de Berna, su nombre era Albert Einstein. En este artículo Einstein abordaba de un modo directo y motivado por las experiencias 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. Es lo que se conoce como 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 de los *Annalen*, 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.

Resulta curioso que al leer el artículo de Einstein no queda claro si él estaba en aquel momento completamente convencido de la realidad de su idea y que habla de ella como una explicación "heurística" útil para entender el efecto fotoeléctrico o si más bien simplemente suavizó sus afirmaciones para no espantar a los evaluadores de entonces, al estilo de nuestras prácticas científicas actuales.

Enfriando el gas de fotones

Así pues, en la línea de los famosos *gedankenexperiment* que tanto gustaban a Einstein, podemos plantear la siguiente cuestión: si la luz es un gas de fotones y dado que los gases se pueden licuar, ¿Será posible licuar un gas de fotones? ¿Qué propiedades tendría la luz en estado líquido? Como veremos inmediatamente, 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 estilo, 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 índice de refracción 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 figura 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.

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.

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

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

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

Otros medios se comportan como un medio Kerr en un cierto rango de potencias I dado que cualquier dependencia

no lineal del índice de refracción en I puede aproximarse 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.

La condensación de la luz

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

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

donde $k = 2\pi/\lambda$ 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 $\psi(x,y,z)$ 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 $f(|\psi|^2)$ indica la dependencia del índice de refracción no lineal con la potencia del haz dado que la intensidad del mismo viene dada por la ecuación $I = |\Psi(x,y,z)|^2$. Por ejemplo, en los materiales ópticos cúbico-quínticos, tendremos $f(|\Psi|^2) = n_2|\Psi|^2 - n_4|\Psi|^4$.

La ecuación (3) no es más que la mecánica newtoniana de ondas. Esencialmente nos indica que la evolución del haz de luz viene determinada por dos términos: uno de energía cinética o *temperatura* de la distribución de luz ($= \nabla_\perp^2 \Psi$) 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 haces con una potencia superior a 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].

Como se muestra en la figura 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 depencia temporal añadida no incluida en la ecuación (3) esta analogía es más evidente, pues se formarían "gotas de luz" localizadas en las tres direcciones espaciales.

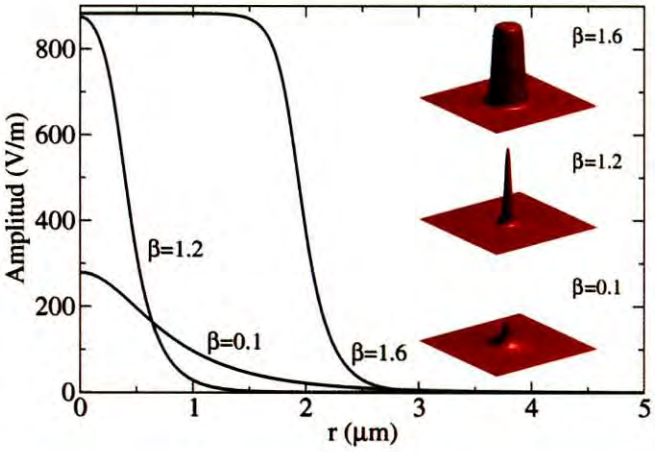

Figura 2. Perfil de amplitud de haces de luz de potencia creciente, indicando la formación de un condensado de luz a potencias altas líquida.

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 ($\sigma = (9\pi\, r/16)(n_2/n_4)^3$), 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 figura 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.

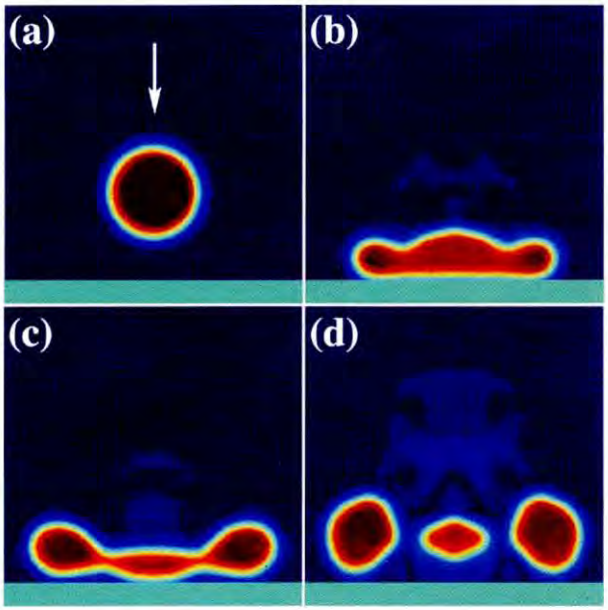

Figura 3. Choque de un condensado de luz líquida (reflexión total) contra una superficie plana, observándose la formación de gotas más pequeñas por filamentación.

En la figura 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, tras un rebote, el haz de luz recupera su forma original.

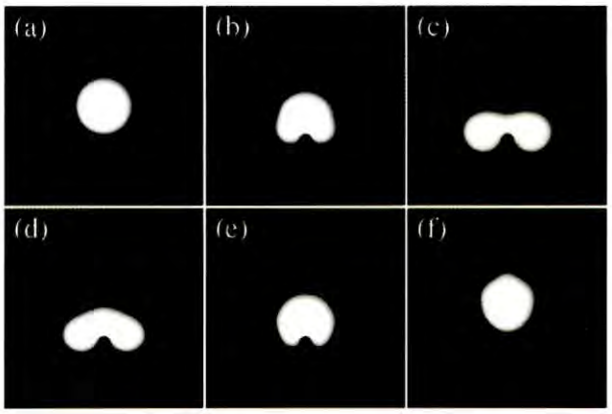

Figura 4. Colisión de un condensado de luz contra un agujero de aire que está inmerso en el material no lineal. El efecto es análogo a intentar pinchar una gota de líquido con alta tensión superficial.

Remolinos en un 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 helio 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 figura 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.

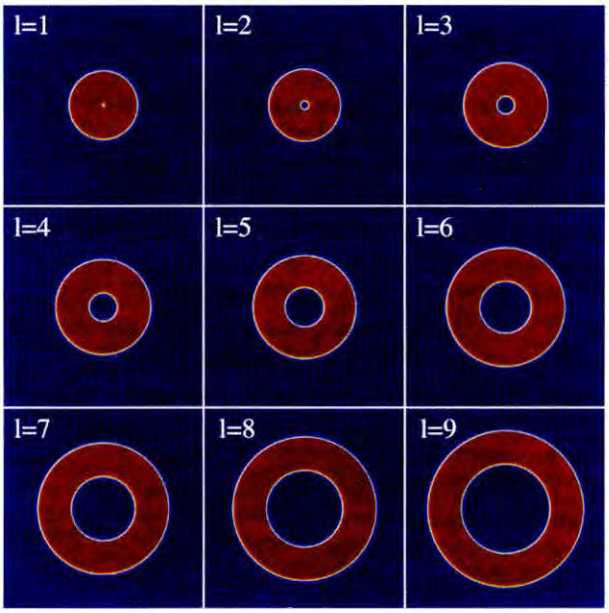

Figura 5. Remolinos de luz que tienen valor creciente de la carga topológica.

En la figura 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.

Cómo se licua 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

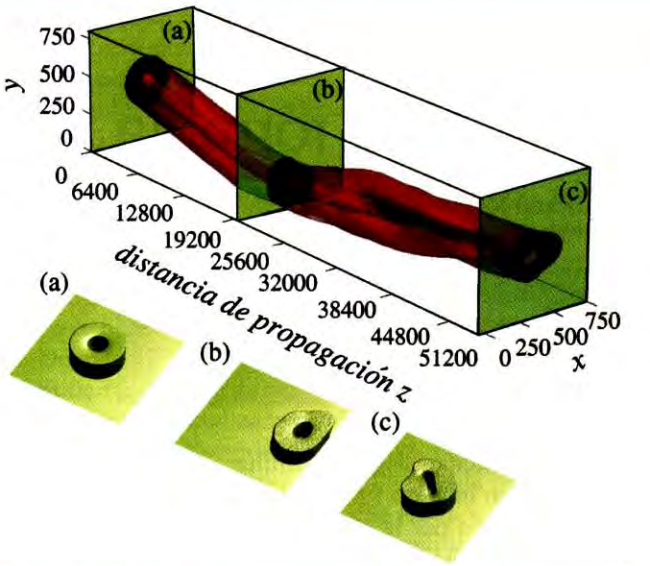

Figura 6. Choque de un condensado de luz líquida que anida en su interior un remolino de carga topológica $\ell = 4$. La tensión superficial es lo suficientemente elevada como para preservar el vórtice sin que se rompa.

natural la pregunta: ¿es posible crear luz líquida en el laboratorio?

Recientemente se encontraron materiales ópticos que supuestamente tenían las propiedades adecuadas, esto es, nolinealidades del tipo cúbico-quíntico. Este hallazgo estimuló el análisis teórico de estos sistemas. Desafortunadamente, un análisis posterior de los experimentos reveló que las medidas eran incorrectas.

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" los átomos (usando láseres) para volverlos trasparentes, fenómeno este denominado *transparencia inducida electromagnéticamente*. Animamos a los lectores de esta revista a entender la física de estos sistemas con el excelente artículo publicado en el número anterior por L. L. Sánchez-Soto *et al.* [5]. Se cree que aprovechando las propiedades de estos medios será posible diseñar sistemas en los que se produzca la licuefacción de la luz en el sentido en que la estamos describiendo aquí. Resulta fascinante comprobar cómo la utilización del mecanismo de emisión estimulada (debido una vez más a Einstein) nos proporcionaría unos sistemas donde la luz podría comportarse sorprendentemente como un líquido de fotones.

Referencias

[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] L. L. Sánchez Soto, G. Björk y A. B. Klimov, "Controlando la velocidad de la luz: luz rápida, luz lenta", *Revista Española de Física* **19**, 39 (2005).

Humberto Michinel
está en el Dpto. de Física Aplicada. Univ. de Vigo
Víctor M. Pérez
está en el Dpto. de Matemáticas. Univ. de Castilla-La Mancha
María J. Paz Alonso
está en el Dpto. de Física Aplicada. Univ. de Vigo

CURSO EN LA UIMP

Del 5 al 9 del pasado septiembre, tuvo lugar en la UIMP (Santander), dentro del programa de cursos de formación del profesorado de enseñanza secundaria y bachillerato del MEC, el curso "Einstein: 100 años de Relatividad", dirigido por J.L. Sánchez Gómez (UAM), y en el que impartieron clase los profesores A. Fernández-Rañada (UCM), M. Ferrero (Univ. Oviedo), J. García-Bellido (UAM), J. García Hourcade (Instituto Mariano Quintanilla, Segovia),R. García López (Univ de La Laguna e IAC), J. Martín (Univ. Salamanca) y E. Santos (Univ. Cantabría). La conferencia inaugural de los cursos de formación del profesorado estuvo a cargo de J.L. Sánchez Gómez y versó sobre Einstein y su "Annus Mirabilis". En el transcurso de una conferencia de prensa celebrada durante el curso, y en la que junto al director del mismo participaron J. García-Bellido y J.L. García Hourcade, se hizo especial hincapié en la necesidad de mejorar e intensificar la enseñanza de la ciencia, y en partícular de la física, durante las etapas preuniversitarias, es decir, secundaria y bachillerato, a fin de poder disfrutar en el próximo futuro del nivel científico y técnico que demanda el desarrollo social y económico de nuestro país.