

COLABORACIONES EN FÍSICA

FOTÓNICA EN UN MUNDO GLOBAL: UNA REVISIÓN DE ALGUNAS MODERNAS TECNOLOGÍAS DE IMPACTO ACTUAL

INTRODUCCION

En este artículo se recoge y desarrolla, en parte, el contenido de la conferencia impartida en la Facultad de Ciencias de la UNED con ocasión de la festividad de San Alberto Magno. Esta conferencia ha estado enmarcada en la celebración del Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basada en la Luz 2015. El año especial de 2015 ha generado un gran proyecto multidisciplinar, aprobado por la Asamblea General de Naciones Unidas en septiembre de 2013. Su lanzamiento, a nivel mundial, ha tenido un gran alcance dando lugar a compromisos de divulgación en múltiples áreas de la ciencia y la tecnología. Dentro de estas actividades, aquellas relacionadas con el mundo de la educación han tenido, en particular, una gran resonancia. Por ello, los eventos organizados por instituciones académicas, como es el caso de la UNED, son de gran repercusión y este último caso viene además reforzado por su proyección en los medios de divulgación audiovisuales. En este número de 100cias@uned, se dedican varios artículos a las distintas efemérides que han configurado esta celebración del Año Internacional de la Luz, y que van desde la conmemoración de la publicación del Libro de la Óptica de Alhacén hace aproximadamente mil años, pasando por las contribuciones fundamentales de Augustin Fresnel, James Clerk Maxwell y Albert Einstein, siguiendo con el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas y de la fibra óptica.

El presente artículo comienza con una sección dedicada a los antecedentes de la Fotónica desde la década de los años 30 en el pasado siglo y antes, por tanto, de la segunda guerra mundial, hasta nuestros días. La siguiente sección se dedica a profundizar en los aspectos de la Fotónica como tecnología horizontal y clave en los siglos XX y XXI. Se concentra en el análisis de las tec-

nologías que derivarían de las propiedades fundamentales de la luz. Ello nos permite estudiar, si bien con un enfoque más divulgativo, tecnologías de gran impacto, hoy en día, como las pinzas ópticas, la metrología óptica, y en particular las técnicas derivadas del llamado peine de frecuencias y su relación con el desarrollo de los relojes atómicos ópticos. También hacemos mención y revisamos los premios Nobel de Física y de Química 2014 dedicados a investigación en la luz y su conexión con las tecnologías fotónicas. Cerramos todas esas panorámicas con la sección dedicada a las conclusiones.

FOTÓNICA: BREVES ANTECEDENTES

La Fotónica es la parte de la ciencia y de la tecnología dedicada a la generación, control y detección de fotones, que son los constituyentes elementales o cuantos de la luz. La Fotónica es la base de un alto número de tecnologías actuales imbricadas en nuestra vida cotidiana, desde la telefonía inteligente hasta los ordenadores portátiles, el acceso a Internet o la instrumentación biomédica, como ejemplo de tecnologías fundamentales basadas en la luz. El S. XXI es y seguirá siendo un siglo dependiente de la Fotónica como lo fue el S. XX de la Electrónica.

Históricamente, no hay acuerdo entre las distintas aportaciones que se han publicado respecto al origen del término “fotónica” y cuál y cuándo fue su primera propuesta. En algunas fuentes europeas y, en particular, anglosajonas se menciona al científico francés Pierre Agrain como artífice del término, hacia 1967 [1]. En 1973 Agrain escribía: “*I believe that tomorrow, that is to say in 1990, photonics will play an important part in the transmission of information... Photonics is a technology of tomorrow*”¹. También, analizando contribuciones sobre tecnologías asociadas al mundo de la fotografía de alta velocidad, nos encontramos con la introducción de la definición de “fotónica” hacia el año 1970. Como ejemplo, William G. Hyzer, un ingeniero optoelectrónico de Estados Unidos publicaba en 1974 que el término

¹ “*Creo que mañana, es decir, 1990, la Fotónica jugará un papel importante en la transmisión de la información... La Fotónica es una tecnología del mañana*”.

SUR LE PASSAGE DES RAYONS PHOTONIQUES PAR LES ATOMES ⁽¹⁾

Par le Prof. Dr V. POSEJPAL.

Université Charles IV, Praha II, u Karlova 5.

Figura 1. Inicio del artículo de V. Posejpal "Sur le passage des rayons photoniques par les atomes" [Sobre el paso de los rayos fotónicos a través de los átomos] publicado en 1932. El autor, V. Posejpal, era profesor de física en la Universidad Carlos IV de Praga.

"fotónica" había sido acuñado por el ingeniero holandés L. J. Poldervaart, en el IX Congreso Internacional de Fotografía de Alta Velocidad en 1970 [2]. Ciertamente, en dicho congreso el panel de educación introdujo la siguiente definición: "Photonics is the name given to the field of science covering systems in which photons are the principal carrier of information"² [3]. Estas fuentes indican que en los comienzos de la década de los 70 del pasado siglo, el término "fotónica" se utilizaba en ciertos campos de la tecnología como la fotografía de alta velocidad, donde los registros se realizan a más de ciento veintiocho tomas por segundo.

Como curiosidad y complemento a este tema, en busca de un estudio más detallado, se pueden encontrar otros datos de interés en otras fuentes. Por ejemplo, una inspección pormenorizada en *ISI Web of Knowledge* nos lleva a fuentes de publicaciones anteriores a la década de los 60 del S. XX. Efectivamente, se puede comprobar que el término "fotónica" fue introducido, o al menos como tal aparece en publicaciones de la época en francés (*photonique*) en 1933, por el físico checo Václav Posejpal en su artículo: "Sur le passage des rayons photoniques par les atomes" publicado en el *Journal de Physique et Radium* [4] (véase Figura 1). Existe una fotografía histórica donde se encuentran científicos de gran prestigio de la época: los físicos franceses Paul Langevin y Pierre Weiss junto con Václav Posejpal, otros colegas checos, como Jaroslav Heyrovský (Premio Nobel de Química, 1959), Václav Dolejšek y el presidente del país en 1925 en Praga (véase Figura 2).

Uno de los problemas por los que este artículo no tuvo posteriormente la trascendencia esperada fue debido al rechazo de sus colegas a ciertos contenidos erróneos del mismo. Por ejemplo, se consideraba el coeficiente de absorción como una función lineal con la longitud de onda, lo que conducía a valores erróneos

² "Fotónica, es el nombre dado al campo de la ciencia que cubre aquellos sistemas donde los fotones son los principales portadores de información".

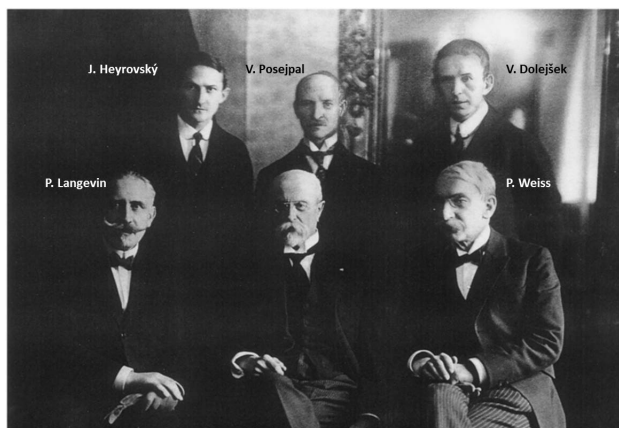


Figura 2. Una fotografía histórica (Praga, 1925).

sobre las distancias de las capas electrónicas al núcleo en átomos de ciertos gases [5].

Podemos argumentar, que el nacimiento de la Fotónica, tal y como la conocemos en nuestros días, fue paralelo a descubrimientos fundamentales en física como el láser en 1960 y la fibra óptica en 1965 [6]. Como ejemplo, en el congreso sobre Óptica Integrada, celebrado por la *Optical Society of America* (OSA) en 1975, se consideraron contribuciones en amplios temas desde fibras ópticas, láminas delgadas, láseres, guías de onda y acopladores, hasta materiales como AsGa que han sido cruciales en el desarrollo de dispositivos fotónicos hasta nuestros días [7]. Actualmente, el número de publicaciones, conferencias, congresos y actividades científicas dedicadas a temas sobre Fotónica se ha diversificado, ha crecido exponencialmente y sigue creciendo. Para comprobarlo es suficiente observar los datos proporcionados, por ejemplo, por el *ISI web of Science*. Se pueden contabilizar del orden de veinte mil publicaciones sobre dispositivos fotónicos en un periodo de treinta años (1985-2015).

LA FOTÓNICA: IDENTIFICADA COMO UNA TECNOLOGÍA HORIZONTAL Y CLAVE EN EL S. XXI

Todas las agencias internacionales coinciden en identificar la Fotónica como una de las tecnologías horizontales clave en el S. XXI y como pilar de los avances científicos y tecnológicos de una gran variedad de áreas de conocimiento que incluye las tecnologías de la información y las comunicaciones, las nanotecnologías, las tecnologías energéticas y de medio ambiente, la detección remota, la seguridad, las tecnologías asociadas a las ciencias de la vida, etc. El impacto de las tecnologías fotónicas en el sector industrial es transversal [8].

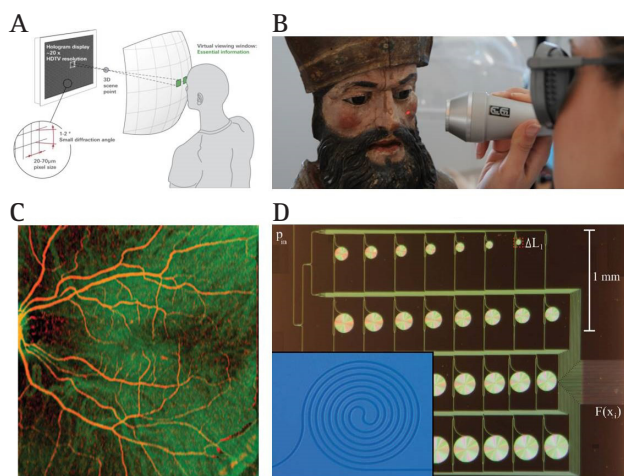


Figura 3. Ejemplos de dispositivos y tecnologías fotónicas. (A) Monitor holográfico [9]. (B) La Fotónica al servicio de la preservación del patrimonio cultural [10]. (C) Imagen de fondo de ojo obtenida por Tomografía Óptica Coherente (OCT) [11]. (D) Espectrómetro por Transformada de Fourier en un microchip con guías en espiral [12].

En la Figura 3 podemos apreciar algunos ejemplos de aplicaciones y dispositivos donde interviene de forma directa la Fotónica y cuya herramienta fundamental es por tanto, la luz.

Las tecnologías fotónicas tienen como herramienta fundamental la luz, que puede generarse en fuentes tanto coherentes (por ejemplo, los láseres) como fuentes incoherentes (por ejemplo, LED emitiendo con luz blanca). Aparte de las propiedades inherentes a su espectro de emisión, que les confiere la característica mencionada de coherencia temporal, existen otras propiedades fundamentales. Estas últimas proporcionan también la gran potencialidad de aplicaciones y la versatilidad en el diseño de aplicaciones de amplio alcance y multidisciplinariedad, como ya hemos comentado. Resumimos aquí algunas de las propiedades de la luz que nos interesa resaltar:

1) **Alta capacidad de focalización.** Ello permite conseguir, mediante sistemas ópticos adecuados, estructuras de focos con diámetros que pueden llegar a valores cercanos a 10^{-9} m, permitiendo así la focalización de la luz a escala nanométrica. Esta manipulación obtenida en un haz de luz le confiere propiedades de alta coherencia espacial. Por ello, diremos que la propiedad de coherencia espacio-temporal [13] permite la observación de fenómenos particulares y la obtención de mecanismos muy singulares, como las trampas ópticas, que pueden revolucionar los dispositivos fotónicos y la microscopía de alta resolución. Dedicamos la siguiente sección a este tema.

2) **Velocidad de propagación.** El valor de la velocidad de propagación de la luz en el vacío, c , se obtiene a partir de dos parámetros electromagnéticos, la permitividad dieléctrica ϵ y la susceptibilidad magnética μ . Para el vacío: $\epsilon = \epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$ F/m, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ NA⁻², por tanto, de acuerdo con: $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, se obtiene: $c = 299.792.458$ m/s. Este parámetro fundamental permite o bien la definición de metro (m), unidad de longitud³, o bien la definición de segundo (s), unidad de tiempo⁴. La medida del tiempo asociada a esta definición sienta las bases de una de las ramas más activas e importantes de la Óptica y la Fotónica: la Metrología Óptica, a la cual vamos a dedicar una sección.

3) Fuente de luz capaz de generar emisión pulsada de radiación, con **pulsos ultracortos**, del orden de attosegundos (10^{-18} s). El intervalo de tiempo más corto medido hasta la fecha es de 100 attosegundos (10^{-16} s). Los pulsos de attosegundos se han generado en el rango del UV extremo con una energía del fotón típicamente entre 20 y 200 eV.

4) **Alta capacidad de superposición de señales luminosas** (por ejemplo, en el rango de IR próximo, generando empaquetamiento de la información del orden de Tbits (1 Tbit = 10^{12} bits)).

Estas posibilidades tecnológicas han producido un desarrollo de gran impacto para las tecnologías de las comunicaciones ópticas, que se han visto expandidas en las últimas décadas con la introducción de tecnologías basadas en cristales fotónicos y en el diseño de estructuras de guías por debajo del valor de la longitud de onda de la radiación que incide en el dispositivo⁵ (véase Figura 4). En estas estructuras los efectos de la difracción de la luz quedan suprimidos. Matemáticamente, para la aplicación de la teoría electromagnética de la luz, en la interacción de la radiación con estas estructuras, con dimensiones inferiores a la longitud de onda de la

³ En el año 2002 el Comité Internacional de Pesas y Medidas enunció una definición de longitud como: valor ℓ suficientemente corto para que los efectos predichos por la teoría de la relatividad general sean despreciables con respecto a la incertidumbre de la medida.

⁴ Según la definición del Sistema Internacional de Unidades, un segundo (s) es la duración de 9.192.631.770 oscilaciones de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de cesio (¹³³Cs), medidos a 0 K. Precisión: error de 1 s en 30.000 años.

⁵ En la literatura anglosajona "subwavelength structures".

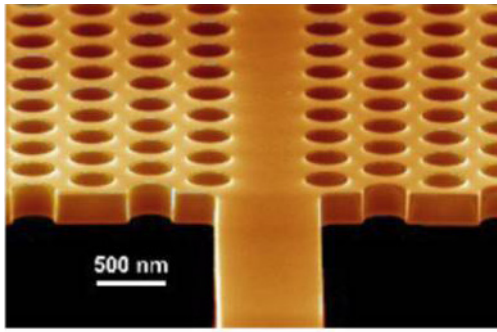


Figura 4. Imagen submicroscópica de una sección de dispositivo acoplador de guía de onda microfotónica basada en estructuras periódicas [14].

radiación incidente, se puede considerar que estos medios particulares son ópticamente homogéneos.

ALTA CAPACIDAD DE FOCALIZACIÓN DE LA LUZ: TRAMPAS ÓPTICAS

En 1986 el físico estadounidense Arthur Ashkin y sus colaboradores de los Laboratorios Bell observaron experimentalmente, por vez primera según se considera actualmente, un fenómeno de atrapamiento estable de una partícula por métodos ópticos [15]. Posteriormente, la técnica derivada de este fenómeno se definió como pinzas ópticas. Este atrapamiento se consiguió por la acción de una fuerza de gradiente, originada en la incidencia particular de un haz láser sobre una micropartícula. La fuerza ejercida sobre dicha partícula es del orden de los pN.

La luz, que incide altamente focalizada sobre una partícula esférica (con un diámetro del orden de 5 a 10 μm), crea una respuesta dieléctrica. Ello es debido a la polarizabilidad de los átomos que constituyen el material de que está compuesta la partícula⁶. Ésta se comporta como un dipolo induciéndose un momento dipolar:

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E}$$

donde, α es el coeficiente que define la polarizabilidad de la partícula y \vec{E} es el campo eléctrico asociado a la radiación. En un campo electromagnético con intensidad espacial variable, se genera un gradiente de fuerzas:

$$\vec{F}_{grad} = -\nabla U = -p \nabla \vec{E} = -\alpha (E \cdot \nabla) \vec{E}$$

siendo U la energía interna del sistema. Por tanto, esta fuerza de gradiente es linealmente proporcional a la intensidad de la luz que incide sobre la partícula. En la

⁶ En general, son partículas de poliestireno, con índice de refracción: $n = 1,5916$ ($\lambda = 587,6 \text{ nm}$).

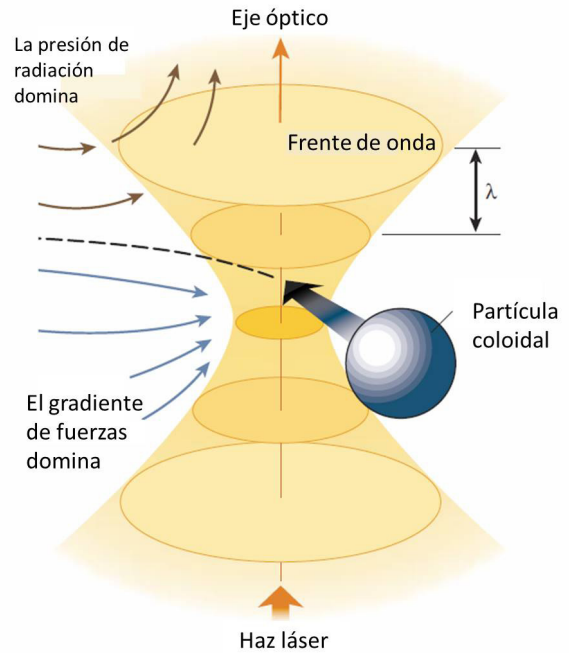


Figura 5. Las pinzas ópticas utilizan un haz de luz altamente focalizado para atrapar partículas. El gradiente de intensidad converge situando a la partícula en el foco del haz láser. Contrariamente, la presión de radiación hace que la partícula se aleje del foco. Cuando domina la fuerza de gradiente, la partícula queda confinada en la región del foco del haz láser [16].

Figura 5 se muestra un esquema que explica los tipos de fuerzas que se generan en un fenómeno de atrapamiento óptico de partículas.

Cuando la partícula tiene un índice de refracción mayor que el medio que la rodea (este es el caso del poliestireno), el gradiente de fuerza actúa sobre el punto de máxima intensidad de la luz (el foco). Opuestamente, las partículas con índice de refracción menor que el medio que las rodea quedan atrapadas en regiones de mínima intensidad. El resultado del fenómeno completo, en los dos casos citados, es equivalente a un muelle elástico⁷. En la actualidad y mediante la configuración y diseño de sistemas ópticos complejos que incluyen hologramas digitales, moduladores espaciales de luz, haces láser con una intensidad conveniente y configuración espacial y longitud de onda adecuadas, se pueden conseguir trampas ópticas singulares, operando no sólo en el plano (es lo que correspondería a la Figura 5) sino produciendo atrapamientos en tres dimensiones (3D). La Figura 6 muestra algunos resultados obtenidos con este tipo de

⁷ Diríamos que este muelle cumple la ley de Hooke para medios linealmente elásticos.

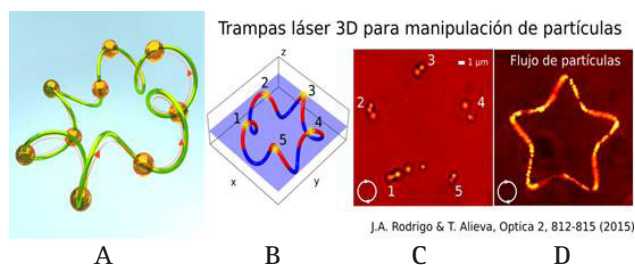


Figura 6. (A) Recreación del movimiento realizado por partículas atrapadas en una región tridimensional de un haz láser toroidal. (B) Secuencia de la trayectoria toroidal seguida por las partículas. (C) Visualización del campo del foco, donde se produce el atrapamiento. Se indica numéricamente la secuencia. (D) El lapso de tiempo revela una imagen de tipo estrellado para el flujo de partículas.

trampas tridimensionales, configurando lo que se da en llamar micromotores ópticos [17].

Estos novedosos resultados demuestran que los fenómenos de atrapamiento óptico de partículas pueden conseguir altos niveles de grados de libertad. Los motores ópticos se pueden aplicar en microfluídica y como herramientas para aplicar en reología.

PEINES DE FRECUENCIA: UNA REVOLUCIÓN EN LA METROLOGÍA ÓPTICA

Hemos mencionado anteriormente la propiedad primordial de la luz, su velocidad de propagación y la medida de dicha velocidad. Como parámetro básico hemos introducido la definición de segundo. Dicha definición se basa en la frecuencia de la radiación emitida en la transición entre dos niveles hiperfinos de ciertos átomos, como el del cesio 133. La Figura 7 muestra la estructura atómica de dicho elemento. Esta definición del segundo en el SI data de 1967 [18].

Los procesos atómicos, como el representado en la Figura 7, configuran la base de los llamados relojes atómicos y de la metrología y otras ramas fundamentales de la física como la geodesia. Desde 1967, el desarrollo

Estructura hiperfina de los niveles electrónicos del átomo de Cs 133

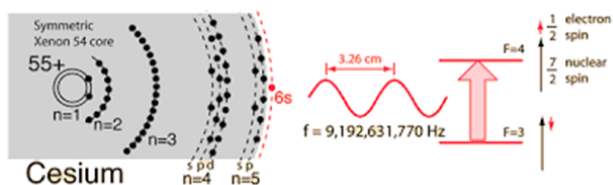


Figura 7. Esquema que recrea la estructura atómica del cesio 133. La frecuencia orbital electrónica con valor 9.192.631.770 Hz proporciona la definición estándar del segundo, como tiempo asociado a dicha transición. Modificada de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acloc.html>

de nuevos relojes atómicos ha producido un importante aumento en la resolución y precisión de los mismos. En la actualidad, del orden de doscientos cincuenta relojes atómicos están conectados en una red a nivel mundial.

Como un puente entre la emisión de radiofrecuencia y las frecuencias en el dominio óptico, la tecnología asociada al llamado peine de frecuencias ha revolucionado el campo de la metrología óptica.

La generación de un peine de frecuencias está basada en la emisión de luz (en el IR próximo) en láseres pulsados estabilizados (en régimen llamado de modo anclado: *mode-locked*), con emisión de pulsos con una duración del orden de los femtosegundos (10^{-15} s)⁸. La primera demostración y observación de un peine de frecuencias tuvo lugar en la década de los 70 del pasado siglo por el grupo del físico alemán Theodore Hänsch, que posteriormente mereció el Premio Nobel de Física en 2005 junto con John L. Hall [19]. Como explicación sencilla, la generación de un peine de frecuencias requiere modulación temporal de la fase en un haz óptico para generar bandas laterales en la señal portadora, que tiene que ser de larga duración y pulsos extremadamente cortos⁹. De acuerdo con el análisis de Fourier, el espectro (proporcional a la Transformada de Fourier de la señal temporal) tiene entonces una anchura importante. La Figura 8 muestra un esquema del perfil de la señal generada en un láser de femtosegundos, tanto en el dominio temporal (Fig. 8a) como en el dominio de frecuencias (Fig. 8b).

La transformada de Fourier de la señal temporal proporciona el perfil espectral del pulso de frecuencias. Un dispositivo resonante con generación del segundo armónico permite obtener para cada modo de salida (en ausencia de ruido) una frecuencia: $2(nf_r + f_0)$, donde f_0 es la denominada frecuencia de desfase entre la envolvente y la portadora (*frequency offset*)¹⁰ y n es el orden del pulso (de 10^5 a 10^6). La anchura media del perfil espectral es del orden de 30 a 500 THz. La Figura 9 muestra una imagen del espectro de un peine de frecuencias generado por un láser de femtosegundos.

Volvamos a los relojes atómicos. La generación actual de relojes de cesio tienen una precisión de 10^{-16} ,

⁸ Por ejemplo, un láser de Ti:zafiro.

⁹ En el caso de un láser de Ti:zafiro, la duración de un pulso es del orden de 30-50 fs. Su longitud de onda de emisión sintonizable está en el rango 670 a 1070 nm.

¹⁰ *Frequency-offset*: diferencia entre la velocidad de grupo y la velocidad de fase de la señal.

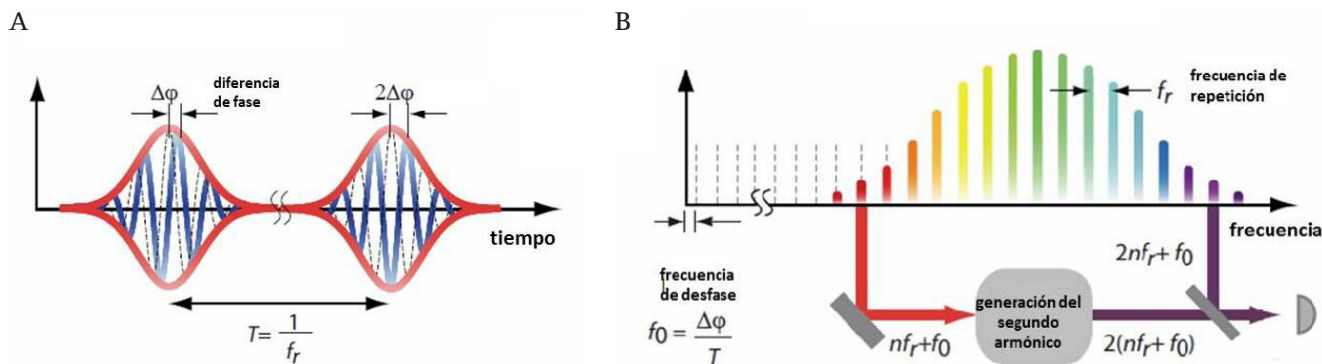


Figura 8. (A) Estructura del perfil de un peine de frecuencias en dominio temporal. Se define una diferencia de fase $\Delta\phi$ entre pulsos que se puede doblar a $2\Delta\phi$. El periodo de cada paquete de pulsos T es la inversa de la frecuencia de repetición f_r . (B) Estructura del perfil del peine de frecuencias en el dominio frecuencial.

equivalente a un error de 1 s en treinta millones de años. Sin embargo, hay un interés en conseguir relojes para una medida estándar universal de mayor precisión. Esto se puede realizar con sistemas donde se opera con transiciones ópticas y no con transiciones en microondas como en el caso del cesio. El mayor reto en la construcción de un reloj óptico es trasladar la definición de segundo a transiciones en el dominio óptico del espectro electromagnético. Los peines de frecuencia son las herramientas primordiales para construir dichos sistemas que permitan esta traslación desde las microondas hasta el IR próximo y, como objetivo último, una nueva definición del segundo. Como ejemplo de dispositivo, se puede diseñar un reloj óptico primario de referencia. Para ello, es necesario que el láser opere estabilizado¹¹, además debe de suprimirse el efecto de la frecuencia de desfase f_0 y fijar un único modo altamente estable en la cavidad resonante. Todo ello hace que estas líneas de investigación sigan abiertas hoy en día, en la búsqueda de dispositivos que no presenten inestabilidades.



Figura 9. Espectro de un peine de frecuencias generado por un láser de femtosegundos. Fuente: National Physical Laboratory, Teddington, Reino Unido.

PREMIOS NOBEL EN FÍSICA Y EN QUÍMICA 2014

No podemos concluir este artículo, dedicado a la Fotónica, sin mencionar los Premios Nobel en Física y en Química concedidos en 2014 (ver número 7 (2014) de

¹¹ En un reloj óptico la frecuencia del láser de referencia tiene que estar estabilizada con respecto a la transición atómica de referencia.

100cias@uned, págs. 78-81 y 84-88, respectivamente). La Academia de Ciencias de Suecia hizo el siguiente anuncio: *This year the prize goes to Light* (Este año el Premio va para la luz). Ello pretendía significar la importancia de la luz y las tecnologías basadas en la luz, como se ha reflejado en el pasado año 2015. Y la citación fue: “por la invención de diodos LED azules eficientes que han permitido obtener fuentes de luz blanca brillantes y con menor consumo de energía”. Una auténtica revolución en los sistemas de iluminación y que ayuda, sin duda, a una mayor sostenibilidad en el mundo en la utilización de fuentes de luz. La Figura 10 nos muestra un ejemplo.

En los Premios Nobel en Química 2014 se reconoció la importancia de la obtención de procedimientos, en microscopía óptica, que permiten obtener imágenes con superresolución, rompiendo la barrera de la difracción de la luz. La citación fue en este caso: “por el desarrollo de la microscopía de fluorescencia de superresolución”.

Como ejemplo de la importancia y resonancia de este descubrimiento, en la Figura 11 se muestra la imagen de una proteína obtenida con un microscopio de fluorescencia de superresolución. Se obtiene una resolución espacial del orden de 65 nm, rompiendo la barrera impuesta teóricamente por el límite de la difracción de la luz, que es del orden de la longitud de onda (unos 500 nm).

CONCLUSIONES

Como resumen, en este artículo hemos revisado brevemente algunas de las tecnologías frontera que configuran el S. XXI como el siglo de la Fotónica. Hemos enfatizado la versatilidad de diseños tanto ópticos como

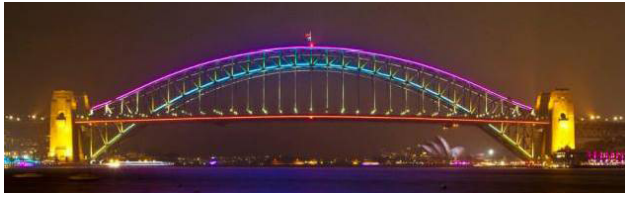


Figura 10. La bahía de Sydney iluminada con más de 100.000 LEDs.

híbridos optoelectrónicos, micro dispositivos fotónicos para comunicaciones ópticas, parándonos en la particularidad de la propiedad de la luz para ser altamente focalizada y el desarrollo de técnicas de atrapamiento de partículas y pinzas ópticas. Por otra parte, las tecnologías basadas en los peines de frecuencia han permitido abrir el camino a nuevas generaciones de relojes ópticos basados en transiciones ópticas ultra-finas. La estructura de los espectros de estas transiciones se caracteriza por ser de banda muy estrecha, discreta, estable, reproducible y controlable. Ello hace que estos peines de frecuencia se puedan usar como herramientas para una amplia gama de aplicaciones, desde relojes atómicos ópticos a espectroscopia molecular de alta resolución y como sensores de gases, como ejemplos básicos. Muchos de los desarrollos en la metrología moderna están basados en relojes de alta precisión y osciladores. Un ejemplo es el GPS (*Global Positioning System*) sistema via satélite, radares, fibras ópticas para comunicaciones e incluso teléfonos móviles. Finalmente, hemos querido terminar este artículo recordando a los galardonados con los Premios Nobel en Física y en Química de 2014 como reconocimiento de la Academia de Ciencias de Suecia a las tecnologías fotónicas frontera del S. XXI.

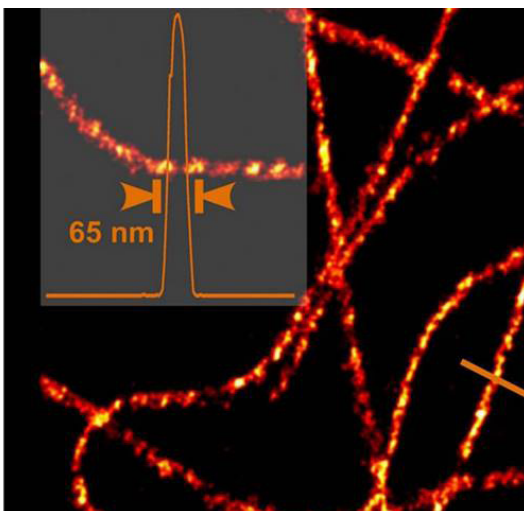


Figura 13. La gráfica muestra la llamada Función de Ensamblamiento de Punto (Point Spread Function) del microscopio de fluorescencia de superresolución.

REFERENCIAS

- [1] Overton, G.: *Laser Focus World*, August 17, 2014.
- [2] Hyzar, W.G.: *Research/Development*, 34-35 (June 1974).
- [3] Poltervaart, L.J. & Sluiter, C.G.: *Proceedings of the Int. Congress on High Speed Photography (9th)*, Denver, Colorado, 585-586 (1971).
- [4] Posejpal, V.: *J. Phys. Radium*, 3(9), 390-407 (1932).
- [5] Trkal, V. & Závíska, F.: *J. Phys. Radium*, 4(6), 269-277 (1933).
- [6] Martín Pereda, J.A.: *Revista Española de Física*, 29(1), 11-17 (2015).
- [7] Pole, R.V., Conwell, E.M., Kogelnik, H., Tien, P.K., Whinnery, J.R., Yariv, A. & De Maria, A.J.: *Applied Optics*, 14(3), 569-579 (1975).
- [8] Calvo, M.L., Guzmán, A.M. & Torner, Ll.: *Transatlántica de Educación*, 3, 128-140 (Diciembre 2007).
- [9] Yaras, F., Kang, H. & Onural, L.: *Journal of Display Technology*, 6(10), 443-454 (2010).
- [10] Georgiou, S., Anglos, D. & Fotakis, C.: *Contemporary Physics*, 49(1), 1-27 (2008).
- [11] Fercher, A.F., Drexler, W., Hitzinger, C.K. & Lasser, T.: *Reports on Progress in Physics*, 66, 239-303 (2003).
- [12] Velasco, A.V. et al.: *Optics Letters*, 38(5), 706-708 (2013)
- [13] Calvo, M.L. (Coord.): *Óptica Avanzada*, Ariel Ciencia, Barcelona, 2002. Capítulo 3.
- [14] Halir, R. et al.: *Laser Photonics Rev.*, 9(1), 25-49 (2015).
- [15] Ashkin, A., Dziedzic, J.M., Bjorkholm, J.E. & Chu, S.: *Optics Letters*, 11(5), 288-290 (1986).
- [16] Grier, D.G.: *Nature*, 424, 810-816 (2003).
- [17] Rodrigo, J.A. & Alieva, T.: *Optica*, 2, 812-815 (2015).
- [18] Terrien, J.: *Metrología*, 4(1), 41 (1968).
- [19] Eckstein, J.N., Ferguson, A.I. & Hänsch, T.W.: *Phys. Rev. Lett.*, 40, 847 (1978).

María Luisa Calvo Padilla

Dpto. de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas

Universidad Complutense de Madrid