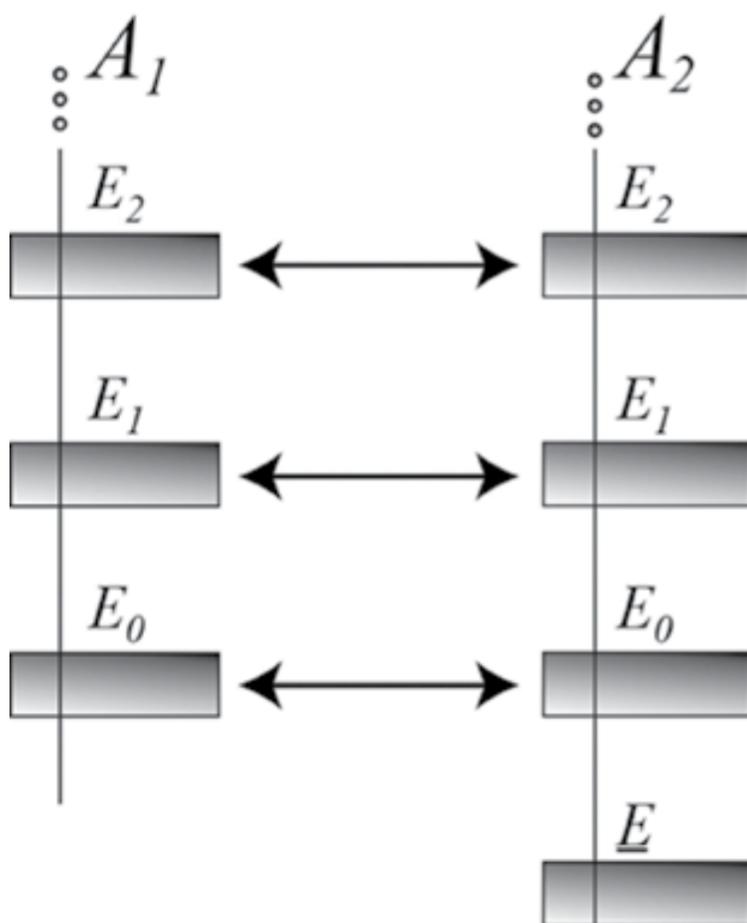


## Supersimetría: nano-láseres y láseres de alta potencia



**FIGURA 1.** Un sistema  $A_1$  (izquierda) con energías  $E_0, E_1, E_2, \dots$  permite la construcción de su sistema 'compañero supersimétrico'  $A_2$  (derecha) con las mismas energías –más una energía básica  $E$  por debajo de la primera. Las energías corresponden a frecuencias de la luz emitida por un láser. Las frecuencias armónicas  $E_0, E_1, E_2, \dots$  se hacen interferir para extinguirlas, dejando solamente la frecuencia básica  $E$  como salida del sistema compuesto. (Figura por Guillermo Kröttsch.)

**KURT BERNARDO WOLF**

• [kwolf@fis.unam.mx](mailto:kwolf@fis.unam.mx)

Pensé que sería interesante poner por escrito un cuento (verdadero) sobre las vidas paralelas que a veces siguen la investigación teórica y la aplicada, con la intención de que sirva, aun siendo anecdota, para calmar el ansia de aquellas autoridades que esperan y demandan que toda investigación científica lleve rápido a innovaciones, patentes y empresas.

Primero quiero aclarar un poco los términos del título: la "supersimetría" es una técnica matemática que tiene algunas implicaciones físicas que se tratarán adelante (los nombres que se adhieren a técnicas y teorías son a veces un tanto caprichosos). Los láseres son seguramente conocidos para el lector por sus múltiples aplicaciones; su nombre es acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación), los cuales han sido progresivamente reducidos hasta dimensiones nanométricas. Por otra parte, la alta potencia se refiere a láseres con aplicaciones industriales y militares, usadas para cortar placas de metal o intentar la destrucción de un

misil en la estratósfera. El principio del láser es tener un material (sólido o gas) cuyos átomos estén en un estado energético alto tal que, al ser estimulados por una radiación (óptica) con la frecuencia adecuada, caigan todos en cascada a su estado energético base emitiendo luz con esa frecuencia. Este material se coloca entre dos espejos, uno de los cuales es sólo semi-reflejante, de modo que por allí saldrá un pulso coherente de fotones, todos marchando al paso como uno solo.

En noviembre pasado me sorprendió que el Dr. Blas Rodríguez me invitara a dar una plática plenaria en el taller anual de óptica cuántica, en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, en Tonantzintla, sobre un artículo que escribí, junto con el entonces asociado postdoctoral Sergey M. Chumakov, más de veinte años atrás [1]. Caí en cuenta del motivo de la invitación cuando en el hotel me encontré con otro conferencista plenario, el Dr. Ramy El-Ganainy de la Universidad Tecnológica de Michigan, y nos fuimos a cenar a la plaza de Cholula. Él trabaja con 'nano'-láseres integrados en micro-chips que son necesarios para la nueva generación de computadoras con circuitos ópticos (llamados

también  *fotónicos*  porque las 'partículas de luz' son  *fotones* ) en lugar de electrónicos. En un nano-láser, el material activo es de tamaño comparable y aún considerablemente menor a la longitud de onda de la luz emitida; han logrado reducir estos láseres a 10 nm (nanómetros), dentro de la escala de las redes cristalinas [2]. En comparación, la luz visible contiene longitudes de onda entre 400 y 700 nm. (Un milímetro es la milésima de un metro, un micrómetro la milésima de un milímetro, y un nanómetro la milésima de un micrómetro.) En el Recuadro se resumen y explican algunos de los conceptos usados en este texto.

Cuando se requiere que la luz del haz de salida tenga una intensidad mucho mayor de la que puede proveer un nano-láser, pero que no produzca tanto calor como para derretir el chip, es natural considerar un diseño donde haya varios nano-láseres en paralelo disparando al mismo tiempo. Sin embargo, tales chips no han funcionado bien porque los nano-láseres componentes generalmente tienen pequeñas irregularidades en su red cristalina y su sincronización es difícil. Por ello producen haces que no son completamente coherentes porque contienen, además de la frecuencia fundamental, varias frecuencias  *armónicas*  (ver el Recuadro) como las de una cuerda de guitarra pinchada que no produce una nota pura [3]. Y para remediar esto se recurre a la supersimetría [4].

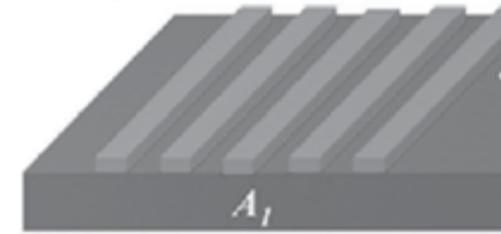
La técnica de supersimetría (coloquialmente llamada SUSY) consiste esencialmente en lo siguiente: como se ilustra en la figura 1, dado un sistema con su conjunto de estados energéticos, diseñar otro sistema que tenga los  *mismos*  estados de energía, más (¡importantísimo!) un estado energético  *extra*  debajo del estado base del sistema original. Los dos sistemas son llamados 'compañeros supersimétricos'. Las ideas seminales de esta técnica fueron matemáticas y datan de los años 50s del siglo pasado. La formalización y extensión del método SUSY a sistemas cuánticos fue hecha en 1984 por investigadores del CINVESTAV-IPN en Zacatenco: Bogdan Mielnik [5] y David Fernández [6], quienes han formado toda una corriente de trabajo desde entonces, en México y en el extranjero. En Google, "supersymmetry" ofrece 597,000 resultados.

Pues bien, trabajando en 1994 con la ecuación de onda para luz monocromática (ecuación "de Helmholtz"), notamos que guías

de onda, como las fibras ópticas usadas en telecomunicaciones, pero con un perfil trasversal de densidad específico, resultaban tener por compañeros supersimétricos a guías de onda con un perfil similar, que difería únicamente por su profundidad [1]. Esto a diferencia de otros sistemas cuánticos considerados antes [5,6], donde los compañeros supersimétricos son muy distintos y dudosamente realizables experimentalmente. Nuestro modelo fueron guías de onda –y no láseres; las matemáticas son prácticamente las mismas, pero en aquel entonces no reparamos en ello.

Independientemente de nuestro trajinar, la investigación con láseres cada vez más minúsculos llevó al grupo de El-Ganainy a darse cuenta de que dos láseres cercanos y compañeros supersimétricos pueden construirse de tal manera que los armónicos indeseados interfieran destructivamente entre sí y se extingan, dejando como salida un pulso láser con la energía y frecuencia del único estado base que no está empatado, como se ilustra en la figura 1; y éste será prácticamente coherente y monocromático. En la figura 2 reproducimos el arreglo de nano-láseres con compañeros supersimétricos que tomamos de la referencia [4]. Es necesario aclarar que la validación experimental de estas predicciones es muy ardua, que la fabricación de estos microchips aún no tiene la precisión necesaria, y que muchos detalles ya están patentados; también que, curiosamente, estas aplicaciones tampoco eran conocidas por mis colegas del campo, a pesar de que –nuevamente Google– ya provee 164,000 resultados para "supersymmetry lasers". El Dr. El-Ganainy me relató que se había encontrado muy recientemente con nuestro artículo [1] por casualidad, habiendo tecleado "supersymmetry Helmholtz", donde sólo hay 32,800 resultados, pero donde el nuestro aparece como primero entre los artículos publicados en .pdf.

Arriba mencioné láseres de alta potencia. Éstos son necesarios para uno de los continuados esfuerzos de reproducir en laboratorio las condiciones en el centro del Sol, para iniciar y mantener el proceso de fusión nuclear de hidrógeno en helio. Entre los diversos métodos que se han investigado (ya por décadas) está calentar una pequeña pastilla de este «combustible» a dos millones de grados Celsius mediante un arreglo de láseres enfocados. La National Ignition Facility en Livermore, California [7], usa 192



**FIGURA 2.** Un arreglo en paralelo de láseres  $A_1$  (izquierda) se hace interferir con un arreglo compañero supersimétrico  $A_2$  (derecha) de manera que el sistema compuesto extingue las frecuencias armónicas y emite un haz.

poderosos láseres, cada uno del tamaño de un poste de teléfono, los cuales en conjunto emiten un pulso con potencia de 500 TW (tera-watts; un tera-watt es un millón de millones de watts) dentro de unos cuantos ps (pico-segundos; un pico-segundo es una millonésima de millonésima de segundo) depositando, después de un sistema de convertidores de frecuencia, lentes y espejos enfocadores (donde se pierde un 85% de la luz), una energía neta de 1.8 MJ (megajoules; aproximadamente medio kilogramo de TNT) sobre un blanco de dos milímetros de diámetro, comprimiéndolo a una densidad de 1 kg/cm<sup>3</sup> (kilogramo por centímetro cúbico; mil veces mayor que la densidad del agua). Después de disparar, los láseres deben dejarse enfriar por varias horas [7]. El Santo Grial de la fusión nuclear es llegar al punto de  *ignición* , donde el combustible produzca más energía que la que se invierte en encenderlo. Ahora imaginense una pantalla de TV digital donde los pixeles son pequeños láseres, debidamente enfriados y supersimetrizados. Si los científicos logran entonarlos todos e imprimirles patrones temporales de disparo, podrían generar poderosos haces convergentes que no requieran de lentes y espejos para depositar su energía completa. Con un arreglo suficientemente grande –y un pulso suficientemente corto para no perturbar la homogeneidad de la atmósfera– se podría fundir una roca en la Luna. Nuestros colegas experimentales andarán detrás de esto.

¿Dónde deja esto a nuestro pequeño artículo [1]? Pues es una anecdota más en el desarrollo imprevisto y caótico con el que pintamos el mural de la ciencia. Agradable sin duda y digna de contarse.

[1] S.M. Chumakov y K.B. Wolf (1994), "Supersymmetry in Helmholtz optics"  *Phys. Lett. A*  **193**, p. 51–53.

[2] Ver, por ejemplo: P.S. Antón, R. Silbergliitt y J. Schneider (2015), "The Global Technology

# ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial @acmor.org.mx



Revolution: Bio/Nano/Materials Trends and Their Synergies with Information Technology by 2015" (Rand National Defense Institute).

[3] W.L. Mochán, "Usted es desafiado" (parte 1 de 2), La Unión de Morelos 05/09/2011, p. 31, <http://bit.ly/20cgGPB>.

[4] R. El-Ganainy et al. (2015), "Supersymmetric laser arrays" Phys. Rev. A **92**, art. 033818 (9 p.).

[5] B. Mielnik (1984), "Factorization methods and new potential with oscillator spectrum" J. Math. Phys. **25**, 3387—3389.

[6] D.J. Fernández (1984), "New hydrogen-like potentials" Lett. Math. Phys. **8**, 337—343.

[7] Ver: [https://en.wikipedia.org/wiki/National\\_Ignition\\_Facility](https://en.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility)

**Recuadro.** Lo que llamamos "luz" son oscilaciones del campo electromagnético que

percibimos con las retinas de nuestros ojos. Podemos imaginarnos estas ondas (en primera aproximación) como las que vemos en la superficie del agua, pero en tres dimensiones. Las ondas sonoras, aunque no las vemos, tienen características similares. La distancia entre dos crestas sucesivas de la onda es su **longitud de onda**. En el aire (a 20°C al nivel del mar) la **velocidad de propagación** de las ondas sonoras es de 343.2 m/s (metros por segundo), mientras que las de luz se mueven a 299,792,458 m/s; la luz puede ir y volver de la Luna en ~2.5 segundos. Las longitudes de onda de sonidos audibles van de 17 m (el más grave) a 17 mm (milímetros, el más agudo); las ondas de luz visible en cambio, como apuntamos, tienen longitudes de onda entre 700 nm (rojo) y 400 nm (violeta), pero el 'arco iris electromagnético' es mucho más amplio: se extiende desde kilómetros (ondas de radio) hasta picómetros (milésima de nanómetro, rayos gamma). Cuando vemos (u oímos) pasar un tren de ondas, el número de crestas que transcurre en cada segundo es la **frecuencia** de la onda, que

se mide en Hertz (Hz, 1/segundo). Ondas sonoras o lumínicas de una sola frecuencia corresponden a una nota o un color puro, dependiendo de la fuente (cuerda de guitarra o láser); sus **armónicas** son ondas con múltiplos de su frecuencia. El rango audible de ondas sonoras (para humanos) está entre 20 y 20,000 Hz, mientras que las frecuencias del espectro visible (también para humanos) están entre 430 y 770 THz (tera-Hertz, millones de millones de Hertz). Sin embargo, con la mente y la tecnología moderna podemos trascender estas limitaciones que son, a final de cuentas, solamente humanas. Sobre luz coherente y fotones escribiré en otra ocasión.

**"Si te gustó este artículo y tienes algún comentario o existe un tema sobre el que te gustaría leer en este espacio, te invitamos a dirigir un correo a la Academia de Ciencias de Morelos (alma.caro@acmor.com.mx) informándonos al respecto".**

**FE DE ERRATAS:**

Por un error de diseño, en la publicación del pasado lunes 29 de febrero, la figura 4 apareció dos veces, y aunque se publicó el pie, la figura 3 no apareció, pero corresponde a la imagen que aparece en esta rectificación.

Sobre el mismo artículo del día citado, se omitió decir que el Dr. Luis Mochan agradece a Miguel Alcubierre por una divertida e ilustrativa discusión sobre este tema. Este trabajo fue parcialmente apoyado por DGAPA-UNAM a través del proyecto IN113016.

Ofrecemos una disculpa a los lectores y a la Academia de Ciencias de Morelos.



**Figura 3 Interferómetro del LIGO.** Se muestra el laser, el divisor de haz semirreflejante, las dos parejas de espejos que forman las dos cavidades Fabry-Perot de 4km de longitud en los brazos del interferómetro, el espejo para reciclar la energía que de otro modo regresaría al laser y el detector. No se muestra el modulador de fase. Se indican las potencias en las distintas partes del equipo. Adaptada de <http://slideplayer.com/slide/6600607/>