

Las nuevas fronteras de la física de la materia condensada

The new frontiers of condensed matter physics

Jon A. Schuller

Department of Electrical and Computer Engineering, University of California,
Santa Barbara, CA 93106, USA.

Samuel A. Hevia

Instituto de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña
Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

Iván K. Schuller

Department of Physics and Astronomy, University of California San Diego, San
Diego, La Jolla, CA 92093, USA.

RESUMEN

La física de la materia condensada es la base de muchas ideas fundamentales en ciencia y es el origen de un sinnúmero de aplicaciones que afectan nuestras vidas diarias. La nanociencia ha producido materiales nuevos con funcionalidades inexistentes en la naturaleza. La computación cuántica aprovecha la superposición de estados físicos para producir fenómenos inesperados y para simular la evolución de sistemas complejos. Los metamateriales, forman una clase de materiales sintéticos que tienen propiedades ópticas fundamentalmente diferentes de lo que existen en la naturaleza.

Palabras Claves: Nanociencia, computación cuántica, metamateriales

ABSTRACT

Condensed matter physics is the basis for many fundamental ideas in science and the origin for a countless number of applications, which affect our daily life. Nanoscience has produced new materials with functionalities, which don't exist in nature. Quantum computing takes advantage of the superposition of quantum states to produce unexpected phenomena and for the simulation of complex systems. Metamaterials form a class of synthetic materials with optical properties unlike anything found in nature.

Key Words: Nanoscience, quantum computing, metamaterials.

A.- INTRODUCCION

El 21 de Noviembre de 1783 en los jardines de Rue de Montreuil, Paris, Benjamín Franklin era uno de los cientos que presenciaba un espectáculo maravilloso: el primer vuelo humano en la historia. Jean-François Pilâtre de Rozier y el Marques d'Arlandes eran los primeros valientes que se iban a remontar en el aire en un globo inventado por los hermanos Montgolfier. Muchos de los espectadores estaban deslumbrados por este acontecimiento, pero como sucede con cada gran descubrimiento, había algunos cínicos en la audiencia que consideraban que esto era una pérdida de tiempo. Uno de ellos tomó por el brazo a Franklin y le dijo con desprecio:

"Monsieur, franchement, à quoi peut bien servir de s'envoler dans les airs?" (¿Señor, francamente, para que sirve esto de volar en el aire?)

A lo que Franklin respondió:

"Monsieur, à quoi peut bien servir l'enfant qui vient de naître?" (¿Señor, para que sirve un bebé recién nacido?)

Esto ilustra como funciona la ciencia básica. Tal como con un bebé recién nacido, es imposible predecir a dónde va a ir y que llegará a ser. Lo que si se puede asegurar, es que la totalidad de todos los recién nacidos van a producir muchas maravillas y van a mejorarnos la vida de manera inconcebible e impredecible. Así que cuando miren a los ojos de sus hijos y nietos que recién nacen, recuerden, a lo que están predestinados es a producir algo único, inusual, maravilloso y que es imposible predecir a priori a dónde van a llegar. Como dijo Antonio Machado "Caminante no hay camino, se hace camino al andar". Lo importante es caminar y uno llegará a algún lugar.

Así es la ciencia básica. Es investigación que se hace para satisfacer la curiosidad innata del hombre de entender la naturaleza. De esto nacen no sólo los conocimientos que nos abren los horizontes, sino también las aplicaciones prácticas que mejoran nuestras vidas.

La física ha tenido un enorme impacto en todas las ciencias naturales. Desarrolló los nuevos conceptos que rigen la ciencia moderna y también es responsable de la mayoría de los métodos modernos de preparación de materiales, diagnosis, e instrumentación usados en las otras ciencias naturales. Por supuesto ésta tuvo un impacto esencial en la industria, en las telecomunicaciones, producción de energía, y dispositivos médicos. Por lo tanto, cuando miren a su alrededor se darán cuenta que la física les está impactando continuamente, mejorando y facilitando sus vidas. Por ejemplo, en un artículo reciente en el New York Times (Noviembre 8, 2009) el Dr. Brent James (el principal fiscalizador de la calidad de hospitales de Intermountain Healthcare) dijo: "El sistema Americano de salud es más caro que cualquier otro, sin producir

mejores resultados. La cura está en las mediciones”. Cuando uno habla de mediciones se refiere a lo que se hace con aparatos inventados por físicos; rayos X, ultrasonido, óptica, resonancia magnética, scanners, radiación para diagnosticar y curar, etc. Los médicos estarían completamente perdidos sin los aparatos que la física les ha brindado.

B.- PASADO

En 1871 cuando comenzó sus clases de física en Cambridge, James Clerk Maxwell, el inventor de las ecuaciones que describen el electromagnetismo, dijo: “en unos pocos años los físicos se dedicaran a agregar algunos decimales a las constantes físicas”. El famoso Lord Kelvin, cuyo nombre se usa como unidad para medir la temperatura (grados Kelvin), dijo al final del siglo XIX que la física estaba acabada, que todo se entendía y que las teorías físicas funcionaban tan bien que no podían estar mal y que sólo alguna que otra “cosita” necesitaba explicación. Fueron justamente los estudios de estas “cositas” que llevaron a la teoría cuántica y a la relatividad.

Los logros pasados de la física antes de la era moderna son tan numerosos que es casi imposible resumir sus efectos sobre la sociedad. Sin embargo, hay algunos conceptos claves que han tenido un efecto inmedible. Uno de estos, debido al famoso físico italiano Galileo Galilei, es que la manera de entender el universo es haciendo experimentos y observaciones. Con anterioridad a él, las ideas aristotélicas planteaban que el pensamiento puro podía llevarnos a un entendimiento de la naturaleza. Galileo hizo experimentos sobre la caída de objetos desde la torre de Pisa y apuntó sus telescopios a los cielos descubriendo nuevos astros. Esta idea de no sólo pensar y elucubrar, sino que además comparar y aprender observando la naturaleza, delinea las actividades científicas modernas.

1. Mecánica Clásica

La mecánica clásica, principalmente desarrollada por Newton y contenida en las leyes que llevan su nombre, describen el comportamiento de prácticamente todos los objetos macroscópicos. La gran revolución en el pensamiento científico introducido por Newton, fue que las mismas leyes rigen el comportamiento de los astros y de los objetos terrestres. Lo interesante y fascinante es que las ideas de Newton son simples y se pueden resumir en tres leyes que cualquier estudiante de física elemental las puede entender y aplicar. Estas leyes se utilizan en el diseño de variadas máquinas, como por ejemplo las que se usan en sistemas industriales o en el transporte que reemplazó a los animales de carga. Nos permitieron mandar un hombre a la luna y nos ayudan a ubicar satélites que facilitan las comunicaciones. Así que cuando manejen sus

autos, viajen en avión, usen el GPS o miren televisión, recuerden que todo esto sería imposible sin el desarrollo de la física.

2. Electricidad y Magnetismo

Antes del siglo XIX la electricidad y el magnetismo eran una de esas curiosidades descubiertas por los griegos y los chinos en minerales como la magnetita y el ámbar. Eran dos fenómenos que aparentemente no tenían ninguna relación entre sí, pero en el siglo XVIII una gran actividad en el desarrollo de experimentos y teorías dio origen al entendimiento moderno de la electricidad y el magnetismo como fenómenos que tienen un origen común. El origen y comportamiento de estos, fue resumido de una manera muy compacta por Maxwell, en lo que hoy en día se conoce como las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones no sólo explican de una manera unificada muchos experimentos y observaciones, sino que además condujeron a la generación de electricidad por medios mecánicos, tal como los utilizados en plantas hidroeléctricas. Esto nos permitió modificar el mundo a nuestro alrededor, ya no dependíamos del sol o de velas para calentarnos e iluminar el ambiente.

Las ecuaciones de Maxwell tienen incorporados una serie de fenómenos tales como la relatividad especial, que fue desarrollada mucho más tarde por Einstein, o la existencia de ondas electromagnéticas. Según esto, el universo está lleno de campos electromagnéticos que bajo ciertas condiciones pueden producir ondas que se propagan de un lugar a otro con la velocidad de la luz. Esto suena como ciencia ficción o más aun, magia. Pero el hecho es que estas mismas ondas electromagnéticas son las que se usan para transmitir señales de radio y televisión. Por lo tanto cuando miren la TV recuerden: ¡esto se debe todo a la física! Incluyendo el televisor.

C.- PRESENTE

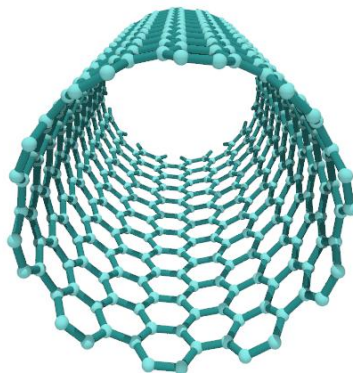


Figura 1 Un ejemplo de un material nanométrico es el “nanotubo” formado por átomos de carbono. Las propiedades de este diminuto “tubo” son regidas por la mecánica cuántica (**Saito et al.** 1998).

Durante el principio del siglo XX una gran revolución ocurrió en la física solo por intentar resolver las “cositas” inexplicables que mencionaba Lord Kelvin. Una de estas cositas era la “emisión espectral” de los diferentes elementos del sistema periódico. Los átomos de los distintos elementos pueden liberar energía mediante la emisión de luz. Esta emisión de luz consiste de un conjunto de diferentes colores (longitudes de ondas) que es propio de cada elemento. Estos “espectros de emisión” eran una de esas curiosidades que no se entendían y que parecían sumamente complicadas. La teoría de la mecánica cuántica, un tema que ahora se enseña en los cursos elementales de las carreras de física y química, explicó estas emisiones de una manera relativamente sencilla. Otra “cosita” curiosa e inexplicable era el experimento (Michelson-Morley, 1887) en el cual se demostró que la luz viajaba a una velocidad constante independiente de si el observador se está moviendo o no. Note que esta observación es muy poco intuitiva, ya que no es cierta para ningún otro objeto que estamos acostumbrados a observar. Por ejemplo, si un niño hace rodar una pelota por el pasillo de un tren en movimiento, la velocidad de la pelota vista desde la estación es diferente a la vista por un pasajero del tren. Esta “pequeña” curiosidad dio origen a la relatividad especial, que ahora se enseña en los cursos de física básica.

La mecánica cuántica logró explicar los fenómenos a escala atómica, o sea, fenómenos que se manifiestan cuando se estudian objetos constituidos de tan sólo unos pocos átomos. El comportamiento de la materia a esta escala es completamente diferente a lo que estamos acostumbrados. Por ejemplo, un fenómeno extremadamente exótico e inesperado es el llamado “efecto túnel”, el cual es predicho por la ecuación fundamental de la mecánica cuántica, conocida como la ecuación de Schrödinger. Esta predice por ejemplo, que cuando un objeto choca contra una muralla, en lugar de rebotar a veces la atraviesa. Esto nuevamente suena a magia porque contradice nuestra experiencia diaria. A pesar de ello, cada uno de nosotros utiliza este fenómeno millones de veces al día en el cabezal que lee la información en el computador. Así, otra vez la física triunfa incluso cuando las predicciones suenan esotéricas o contradicen nuestra intuición común. La mecánica cuántica explica un sinnúmero de fenómenos químicos, bioquímicos, electrónicos y propiedades de materiales, incluso a escala subatómica. Ejemplos de estos nuevos fenómenos son el efecto transistor (Premio Nobel de Física 1956), el efecto láser (Premios Nobel de Física 1964), la superconductividad (Premios Nobel de Física 1972), la teoría de las interacciones químicas (Premio Nobel de Química 1998), el comportamiento de fibras ópticas (Premio Nobel de Física 2009), etc. Los resultados prácticos que surgieron de estos descubrimientos fundamentales cubren toda la electrónica moderna, comunicaciones, mediciones en medicina, dispositivos médicos para

hacer operaciones o para mejorar la visión en oftalmología. Todo debido en gran parte... ¡a la física!

C.- FUTURO

Predecir a dónde van a llevar los nuevos desarrollos científicos es muy difícil, quizás imposible. Niels Bohr mismo dijo que "lo más difícil para predecir, es el futuro". Durante los últimos 25 años hubo un desarrollo vertiginoso de las telecomunicaciones y la computación, lo que nos condujo a tener acceso casi ilimitado a información y nos permitió poder comunicarnos a cualquier parte del mundo de manera instantánea a través del Internet. Todo esto es consecuencia inesperada y sorprendente debida en gran parte al desarrollo científico en el ámbito de la física de la materia condensada. Pocas personas vislumbraron a mediados del siglo XX que hoy en día casi todo el mundo iba a tener acceso a un computador, el cual le permitiría comunicarse con sus amigos y tener acceso ilimitado a cualquier biblioteca en el mundo. ¡Gratis!

En lo que prosigue de este artículo trataremos de hacer una extrapolación realista de la nueva ciencia y posibles aplicaciones que podrían surgir en tres áreas que se están investigando intensamente. Estas investigaciones seguramente van a llevar a nuevas ideas, nuevos materiales, dispositivos, funcionalidades y aplicaciones que son difíciles de predecir. Las ideas que vamos a describir son extensiones de ciencia y tecnología presente, aunque lo más probable es que no van a ser aplicadas tal como las describimos. Para algunos, esto va a parecer ciencia ficción, pero cuando eso suceda piensen que lo mismo dirían a comienzos del XX cuando les hablaran de las tecnologías actuales.

1. Nanociencia

La Nanociencia se refiere al estudio y manipulación de objetos con dimensiones mayores que las de un átomo pero mucho más pequeñas que las de un objeto macroscópico (ver figura 2). Los conocimientos desarrollados durante el siglo XX llevaron a un entendimiento cuantitativo de la estructura atómica y de las propiedades de los materiales con dimensiones macroscópicas. Sin embargo, en el rango de tamaños intermedios, del orden de unos cientos de nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro), la materia tiene propiedades completamente nuevas e inesperadas. No se comporta ni como los constituyentes atómicos ni como el material masivo (**Montero et al.** 2003). Por lo tanto mediante la manipulación de objetos con estas dimensiones intermedias, es posible crear materiales y dispositivos con nuevas propiedades (**Fullerton et al.** 2007). Por ejemplo, materiales aisladores se pueden transformar en metálicos (**Ohtomo et al.** 2004), materiales químicamente inertes se ponen reactivos (**Yoon et al.** 2007) o propiedades magnéticas son manipulables con estímulos externos como la luz (**Cauro et al.** 2001). Estos descubrimientos y posibilidades que ofrece la investigación básica en la física de

la materia condensada nos da la capacidad de crear nuevos materiales y desarrollar dispositivos con funcionalidades nuevas que no existen en la naturaleza. ¡El sueño del alquimista! Esto abre una amplia gama de posibles aplicaciones en diversos campos. Por ejemplo, nos va a permitir estudiar y simular inteligencia artificial, desarrollar nuevos catalizadores, producir energía limpia de manera más eficiente, guiar drogas a determinados sitios en el cuerpo y soltarlos precisamente donde producen los mayores beneficios. Diagnosticar y quizás reparar órganos con técnicas no invasivas. Pero como siempre, primero viene la investigación fundamental que desarrolla las ideas que son la base de las aplicaciones. Es muy importante darse cuenta que la conexión entre los resultados de la ciencia básica y las aplicaciones es imposible de predecir a-priori.

Escalas de longitud características

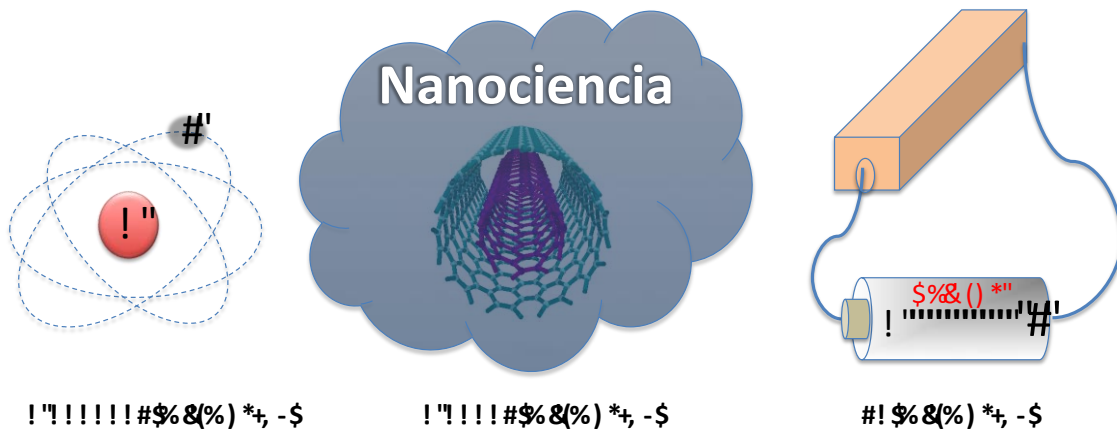


Figura 2 Nanociencia, estudio y manipulación de objetos con dimensiones mucho mayores que las de un átomo pero mucho más pequeñas que las de un objeto macroscópico.

2. Computación Cuántica

La computación actual se basa en dispositivos llamados “bits” que pueden estar en dos estados distintos, comúnmente designados como un cero o un uno. Por ejemplo, un interruptor puede estar abierto (un cero) o cerrado (un uno). Toda la computación está basada en manipular estos ceros y unos en millones de dispositivos, millones de veces por segundo. A pesar del continuo aumento en la capacidad de cómputo de los computadores actuales, existe un límite superior que no podrá ser superado si no se modifica la tecnología en la cual están basados. Una alternativa es la planteada por la computación cuántica (**DiVincenzo et al.** 1995). Esta se basa en un concepto sumamente extraño, pero que es real y está comprobado experimentalmente; la superposición de estados cuánticos. Esto dio origen a la famosa paradoja del gato de Schrödinger, en que un gato puede estar vivo y muerto a la vez, o sea está en la superposición de sus dos posibles estados. En un dispositivo cuántico de dos estados, no sólo

existe la posibilidad de que el dispositivo esté en uno de esos dos estados, sino que también puede estar en una “superposición” de los dos estados cuánticos. Por ejemplo, el interruptor no sólo está abierto o cerrado, si no que también puede estar cerrado y abierto a la vez.

La computación cuántica está basada en manipular esta superposición de estados cuánticos. En principio de esta manera la computación ocurre en paralelo, acelerando los cálculos miles de millones de veces. Un logro extraordinario. El desafío es como implementar estas ideas en dispositivos que se puedan construir y manipular con la tecnología presente. Varias implementaciones se están investigando, incluyendo: átomos confinados en un campo electromagnético, junturas de Josephson, electrones flotando en la superficie del helio, nanopuntos semiconductores, etc.Cuál de ellos eventualmente surgirá como la solución, es difícil de predecir.

Los campos aplicados que podrían beneficiarse enormemente del crecimiento en poder computacional incluyen: la predicción del clima, traductores instantáneos, inteligencia artificial o diagnósticos médicos continuos. Todo consecuencia inesperada de la física de la materia condensada.

3. Metamateriales

Generalmente se dice que “nada puede viajar más rápido que la luz”, pero esto no es completamente cierto. Esta frase hay que modificarla levemente: “nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz *en el vacío*”. Cuando la luz viaja dentro de un material, su velocidad baja por un factor n , que se denomina el “índice de refracción”. En los materiales transparentes comunes, como el vidrio, el índice de refracción es positivo y tiene un valor cercano a uno ($n \sim 1.5$). En materiales más exóticos, como un vapor atómico ultra-frío, algunos físicos han logrado aumentar el índice de refracción muchas veces, bajando la velocidad de la luz acercándose a la velocidad de una bicicleta (**Hau et al.** 1998). Al poner en contacto dos materiales de índice de refracción distintos y hacer pasar un rayo de luz a través de ellos, la luz, además de cambiar su velocidad en la interfaz entre los materiales, también cambia su dirección. Este efecto es el que origina que una cuchara se vea doblada cuando está dentro de un vaso con agua.

En los materiales comúnmente encontrados en la naturaleza, el índice de refracción es siempre positivo. ¿Que pasaría si uno lograra crear un material que tenga un índice de refracción negativo? La predicción es que los rayos de luz se doblarían en la dirección opuesta a la cual se doblan en un material común. Como consecuencia, un simple bloque de un “metamaterial” formaría una imagen, pero una lente curvada no (ver figura 3) (**Smith et al.** 2004). Estas predicciones se hicieron hace varios años pero nunca se habían comprobado experimentalmente. En los últimos años la tecnología ha avanzado considerablemente, lo que nos ha permitido poder fabricar materiales artificiales

con índice de refracción negativo, o sea, “metamateriales”. Además de modificar nuestro entendimiento de conceptos básicos de óptica, esto tiene un potencial enorme en el desarrollo inesperado de muchas nuevas aplicaciones. Ejemplos de aplicaciones que se vislumbran incluyen aviones invisibles al radar (**Schurig et al. 2006**), lentes que pueden resolver estructuras mucho más pequeñas (**Fang et al. 2005**), ópticas nuevas para curar el desprendimiento de retina, la degeneración macular y la ceguera. Y como ya lo pueden adivinar ¡todo debido a la física de la materia condensada!

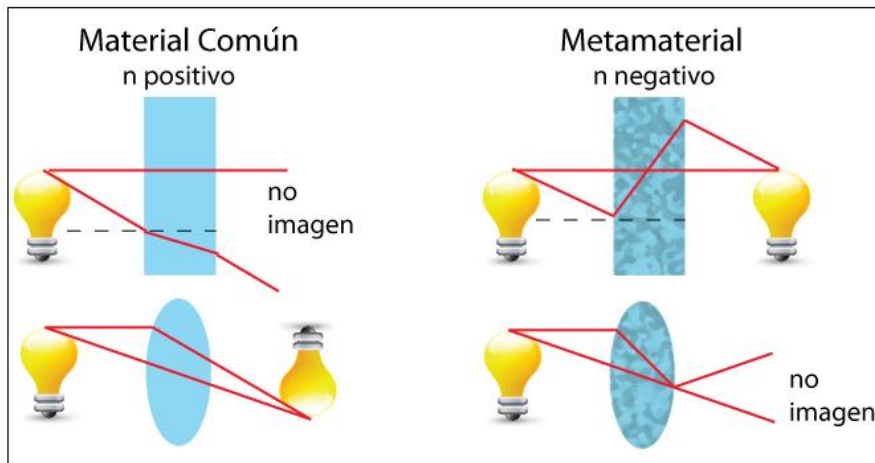


Figura 3 Comparación de las propiedades ópticas de un material común y un metamaterial.

D.- RESUMEN

Como siempre y como un buen resumen de este artículo, hay que tomar en consideración que los metamateriales son un tema de investigación básica. Al igual que con todos los demás temas de investigación básica, es difícil predecir dónde y cómo estos van a ser utilizados. Lo que podemos asegurar con certeza absoluta es que la totalidad de la investigación va a llevar a muchas nuevas maravillas todavía inconcebibles. Tal como nuestros hijos que van a caminar por nuevos senderos todavía inimaginables.

E.- AGRADECIMIENTOS

La ciencia y en particular la física dependen crucialmente de fondos de investigación, colaboraciones y apoyo familiar. Agradecemos el apoyo financiero de las instituciones NSF, DOE, AFOSR, ONR, NATO, CONICYT, FONDECYT y la ayuda del Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y Nanotecnología (CEDENNA). Este manuscrito está basado en trabajo de muchos años y un manuscrito anterior en la Revista Franco-Chilena de Oftalmología, 12, 28 (2010). Las interacciones y ayuda de cientos de colaboradores, jóvenes y viejos, con los

cuales hemos interactuado es crucial. El apoyo y la ayuda de nuestras familias son invaluableles.

F.- LOS AUTORES

Los tres autores trabajan en la física de la materia condensada, el subcampo de la física en el cual trabajan la gran mayoría de los 500,000 físicos en el mundo. Este campo, aunque no el mas conocido por el publico, ni el que mas afecta la ciencia ficción, es el que ha tenido el efecto mayor en nuestras vidas diarias. Los tres autores están convencidos que explicar la ciencia al público, no solo es su obligación profesional, si no que lleva a desarrollar nuevas ideas impredecibles.

El Dr. Jon A. Schuller es la tercera generación dedicada a estudiar la física de materiales y sus usos; con un abuelo joyero y un padre físico. Recibió el Bachelor de la Universidad de California-Santa Bárbara y el doctorado en física de Stanford University. Pero la base del pensamiento crítico lo recibió de su madre que le dedicó largas horas a enseñarle matemáticas. El Dr. Schuller es profesor en la Universidad de California Santa Bárbara donde hace investigación en propiedades ópticas de sólidos y nanociencia.

El Dr. Samuel Hevia recibió su doctorado de la Universidad Técnica Federico Santa María y actualmente es profesor de física de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Siendo un estudiante de ingeniería descubrió las maravillas de la física y desde entonces decidió cambiar de rumbo y dedicarse completamente a ella. El profesor Hevia hace investigación básica y aplicada en materiales nanoestructurados.

El Dr. Iván K. Schuller recibió su licenciatura de la Universidad de Chile, el doctorado de Northwestern University y un doctorado honoris causa de la Universidad Complutense. Miembro de varias Academias de Ciencia en el mundo, hace investigación en Física de la Materia Condensada en la Universidad de California-San Diego, donde es profesor de física. Basado en sus estudios de teatro decidió que “ser físico es tan entretenido como ser actor, pero mucho mas fácil”.

REFERENCES

Cauro R., Gilabert A., Contour J. P., Lyonnet R., Medici M.-G., Grenet J. C., Leighton C., Schuller I. K. 2001. Persistent and transient photoconductivity in oxygen-deficient $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3-\delta$ thin films. *Phys. Rev. B* **63** (17): 174423.

DiVincenzo D. P. 1995. Quantum Computation. *Science* **270** (5234): 255–261.

Fang N., Lee H., Sun C., Zhang X. 2005. Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens. *Science* **308**: 534-537.

Fullerton E. E., Schuller I. K. 2007. The 2007 Nobel Prize in Physics: Magnetism and Transport at the Nanoscale. *Am. Chem. Soc. Nano* **1** (5): 384-389.

Hau L. V., Harris S. E., Dutton Z., Behroozi C. H. 1998. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. *Nature* **397**: 594-598.

Montero M. I., Schuller I. K. 2003. Nanoestructuras: un Viaje de Tres a Cero Dimensiones. *Revista Española de Física* **17** (2): 35-39.

Ohtomo A., Hwang H.Y. 2004. A High-Mobility Electron Gas at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ Heterointerface. *Nature* **427**: 423-426.

Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M. S. 1998. *Physical Properties of Carbon Nanotubes*. Imperial College Press. London.

Schurig D., Mock J. J., Justice B. J., Cummer S. A., Pendry J. B., Starr A. F., Smith D. R. 2006. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science* **314**: 977-980.

Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire M. C. K. 2004. Metamaterials and Negative Refractive Index. *Science* **305**: 788-792.

Yoon B., Koskinen P., Huber B., Kostko O., von Issendorff B., Hakkinen H., Moseler M., Landman U. 2007. Size-dependent structural evolution and chemical reactivity of gold clusters. *Chem. Phys. Chem.* **8** (1): 157-161.