

El

Gluón

Las grandes preguntas de la Física

Publicación del Instituto de Física, UNAM

Septiembre 2010, No. 13

¿QUÉ TAN GRANDE ES EL PROTÓN?

EL LHC, SU FÍSICA Y SU FAMA

LA INVENCION DEL CCD Y EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA 2009

FIBRA ÓPTICA: EL NACIMIENTO DE LA FOTÓNICA



Presentación

Con este número reiniciamos la publicación de El Gluón que dejó de ver la luz por varios años. Sin embargo esta nueva versión tiene un enfoque diferente respecto a la anterior. El propósito del nuevo Gluón es el de servir como un medio de información a los miembros del Instituto de Física, investigadores, técnicos académicos y estudiantes, de los temas de frontera que sin duda son de interés para todo físico profesional. Los artículos abarcarán temas como: las grandes incógnitas que la física actual pretende resolver, paradojas, proyectos de gran envergadura en donde están involucrados los físicos, últimos descubrimientos importantes, trabajos que han dado lugar a los premios Nobel, etcétera.

Será una publicación bimestral con tres o cuatro artículos en cada número escritos por colegas que conozcan el tema aunque no necesariamente sea su tema principal de trabajo. Existirá una versión en papel y otra electrónica de cada número. Los artículos tendrán una extensión y profundidad moderadas y estarán dirigidos a físicos profesionales que no necesariamente trabajen en los temas reseñados. De esta manera su propósito es el de ser una publicación de divulgación de alto nivel de las últimas novedades en física. Es claro que la publicación podrá ser útil también para todos aquellos interesados en esta ciencia con conocimientos razonables de ella. Salvo algunas excepciones, su propósito no será difundir las actividades que se desarrollan en nuestro instituto.

En el primer artículo de esta edición se reseña un experimento muy reciente que se realizó para determinar el radio del protón y el sorprendente resultado que se obtuvo. Se discuten las repercusiones que esto podría tener y que podrían modificar radicalmente las ideas que se tienen sobre las partículas elementales. El artículo está escrito por el Dr. Víctor Romero, quien hace unos pocos días tuvo la oportunidad de conversar con el investigador que llevó a cabo el experimento. En el segundo artículo el Dr. Arturo Menchaca

nos platica sobre el acelerador más grande del mundo, el “Large Hadron Collider” (LHC) y de los varios experimentos que se están haciendo o que próximamente estarán en marcha, uno de los cuales intenta confirmar la existencia de la partícula más famosa de los últimos años, el bosón de Higgs. El tercer artículo está escrito por el Dr. Arnulfo Martínez y nos cuenta sobre la invención del dispositivo de carga acoplada (CCD) que llevó a los investigadores Willard S. Boyle y George E. Smith a ganar el premio Nobel de Física 2009 que les fue otorgado cuarenta años después de su descubrimiento. La Dra. Karen Volke nos platica en el cuarto artículo sobre otro descubrimiento que revolucionó notablemente la tecnología y que llevó al otorgamiento de la otra mitad del premio Nobel de Física 2009: la fibra óptica. Este invento marcó el inicio de la fotónica y cada día se desarrollan nuevas aplicaciones.

A nombre del comité editorial agradezco en todo lo que vale la entusiasta participación de los colegas que han escrito los cuatro artículos que aparecen en este número y espero que sean recibidos con gran entusiasmo por toda la comunidad del Instituto de Física.

Guillermo Monsivais Galindo

*Instituto de Física, UNAM.
Septiembre, 2010*

¿Qué tan grande es el protón?

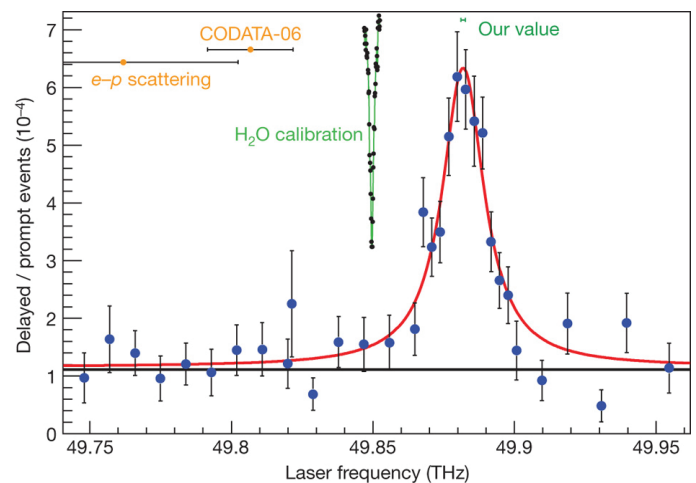
En su número del 8 de julio de 2010, la revista Nature publicó un artículo con el título The size of the proton (El tamaño del protón) [1]. Este trabajo reporta una novedosa determinación experimental del tamaño del protón. Lo sorprendente del estudio es que tal valor es 4% más pequeño que el aceptado actualmente. La discrepancia se encuentra totalmente fuera del error o incertidumbre de las correspondientes medidas. Y ese es el meollo del asunto. Este resultado no esperado se originó como consecuencia de la meta, de los investigadores que lo realizaron, de reducir el error del valor aceptado y conocido.

La investigación fue realizada por un grupo internacional de 32 investigadores de 12 universidades, dirigido por Randolph Pohl del Instituto Max Planck de Optica Cuántica de Garching, Alemania, y el experimento tuvo lugar en el acelerador de protones del Instituto Paul Scherrer de Suiza. Lo más novedoso del experimento es que se realizó analizando una espectroscopía del átomo de hidrógeno en el cuál el electrón es reemplazado por un muón. Recordemos que el muón es una partícula elemental con la misma carga negativa que el electrón, con espín 1/2, pero con una masa aproximadamente 200 veces mayor que la del electrón [2]. Esta gran disparidad de masas es la razón experimental para el reemplazo del muón por el electrón en el átomo de hidrógeno.

El trabajo de Pohl y colaboradores tiene una historia de doce años de ardua investigación y desarrollo experimental y la originó una observación teórica de hace más de cuarenta años: debido al enorme valor de la masa del muón, comparada con la del electrón, la dependencia del corrimiento Lamb de la transición 2S - 2P, con el radio de carga del protón, es dos órdenes de magnitud mayor en el átomo con muón que en el átomo con electrón. Esta dependencia abría pues la puerta para reducir la incertidumbre del radio del protón en un orden de magnitud con respecto a mediciones hechas en el átomo de hidrógeno ordinario. En palabras de los autores [1], por más de cuarenta años el corrimiento Lamb del átomo muón-protón había sido considerado como uno de los experimentos fundamentales de la espectroscopía atómica. El logro actual se debe a avances recientes tanto en la producción de haces de muones como en la tecnología de los láseres pulsados. El experimento consistió en hacer incidir un haz “lento” de muones, desarrollado ex profeso por este grupo de investigadores, a un gas de baja densidad de hidrógeno molecular. Los muones son “detenidos” por el gas, y en el proceso los electrones de algunos átomos son arrancados y se tiene la probabilidad de ser reemplazados por muones, formando átomos muón-protón. Estos átomos típicamente se forman en un estado altamente excitado. De la subsecuente desexcitación tan sólo el 1% termina en el

estado 2S. Con pulsos láser de gran intensidad y de longitudes de onda apropiadas, se consigue entonces la transición Lamb 2S - 2P. Estos pulsos son necesarios debido a la corta vida media del muón. Del estado excitado 2P el muón decae al estado fundamental 1S con la emisión de un rayo X. Sorteando una gran cantidad de dificultades técnicas, el resultado final es la línea de resonancia de tal transición. Esta se obtiene midiendo el número de rayos X emitidos durante la duración del pulso láser, como función de la longitud de onda de tal pulso, vea la figura. Esta medición da lugar a la diferencia de energías entre los estados 2P y 2S junto con su incertidumbre experimental. Reemplazando tal diferencia de energías medida en la correspondiente expresión teórica de la transición, se puede inferir el valor del radio de carga del protón.

El cálculo de la diferencia de energías del corrimiento Lamb 2S - 2P es también un trabajo muy complicado, con su propia y fascinante historia, en el que se consideran todos los aspectos involucrados, a saber, efectos radiativos, de retroceso, de estructura fina e hiperfina, y necesariamente, de efectos de tamaño finito del protón. La contribución radiativa es muy importante y requiere el uso de la teoría de la electrodinámica cuántica (QED). En conjunción con el cálculo de la razón giromagnética del electrón, el cálculo del corrimiento Lamb es de los más precisos que existen. Así, la fórmula obtenida para el



Los círculos azules son el número de eventos (normalizado) de rayos X. El ajuste en rojo es una Lorentziana. Las predicciones de la posición de la línea usando el radio del protón de CODATA y de dispersión de electrones se muestran en amarillo. El valor de Pohl et al. está marcado como “our value”. Se muestra también una de las medidas de calibración con absorción de agua.

La figura está tomada de la referencia [1].

corrimiento Lamb involucra parámetros y constantes fundamentales, por supuesto las masas del protón y del muón o electrón, dependiendo del átomo usado, y la contribución del radio finito del protón se incluye hasta segundo orden. El radio es la única incógnita en la expresión mencionada.

Debido a la masa tan pequeña del electrón, las contribuciones del radio del protón son mucho menores que en el caso del muón. Esto puede entenderse recordando que el radio de Bohr correspondiente es inversamente proporcional a la masa del electrón o del muón. Por lo tanto, el radio de Bohr del muón es 200 más pequeño que el del electrón. Es decir, el muón se encuentra “más cerca” del protón que el electrón. De hecho, las funciones de onda del muón tienen un traslape considerable con la región donde se encuentra el protón. Esta cercanía, por lo tanto, permite un mayor sondeo del tamaño del protón y termina siendo una contribución más grande en el caso del muón que en el del electrón. Esto a su vez reditúa en una mayor precisión en la determinación del radio del protón.

Y es aquí donde está la sorpresa. Cuando se utiliza la masa del electrón y el correspondiente valor medido del corrimiento Lamb, se encuentra el valor del radio del protón igual a 0.8768 femtómetros [3], con una desviación estándar de 69 en las dos últimas cifras, mientras que para el muón el valor del radio del protón es de 0.84184 femtómetros, con desviación estándar 67 en las dos últimas cifras. Ciertamente es una mejora por un factor de 10 en la incertidumbre, como era de esperarse, lo “grave” es que ¡el valor central es 4% más pequeño en el muón! El valor del radio del protón del átomo de hidrógeno ordinario está reportado en la compilación CODATA [4], que actualiza periódicamente tales valores, y otros como la constante de Rydberg, usando mediciones y cálculos de diversos grupos en todo el mundo. Cabe mencionar que el valor de CODATA es consistente, aunque con un error

aún mayor, con mediciones de dispersión de electrones. Si se acepta que el valor medido con el átomo con muón es el correcto, la constante de Rydberg, que es la constante universal más precisa medida, ¡tendría que ser recorrida en 5 desviaciones estándar!

¿Qué está mal? si es que algo lo está. Hay tres posibilidades. El experimento tiene un error sistemático no detectado. El grupo de investigadores ha evaluado esta posibilidad y concluyen que no es posible ya que su técnica sí está de acuerdo cuando se utiliza en otros sistemas conocidos, como ciertas líneas del agua. El cálculo de electrodinámica cuántica es incompleto, en el sentido que correcciones de orden superior pueden ser más importantes que lo esperado. Existen planes de realizar experimentos con deuterio y con átomos de helio reemplazando un electrón por un muón para ver efectos en núcleos más grandes. La tercera, especulativa pero emocionante posibilidad, es que se estén detectando, de manera indirecta, nuevos efectos como nuevas partículas elementales. Al momento no existe explicación de la discrepancia.

Referencias

- [1] R. Pohl et al, *The size of the proton. Nature* 466, 213 (2010).
- [2] *La masa del muón es de 105.7 MeV/c², mientras que la del electrón es de 0.51 MeV/c².*
- [3] *Un femtómetro es igual a 10⁻¹⁵ m.*
- [4] P.J. Mohr, B.N. Taylor, and D.B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006. Rev. Mod. Phys.* 80, 633 (2008).

El LHC, su física y su fama

El CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) fue fundado en 1954 por 12 de países y hoy participan en él otros 28, denominados no-miembros, entre los cuales se encuentra México. La UNAM, el CINVESTAV y la BUAP se encuentran entre las 220 instituciones que tienen científicos involucrados en los diversos proyectos de este gran centro. En este lugar se han realizado numerosas investigaciones que han merecido varios premios Nobel, sin embargo para la gente común el CERN es conocido últimamente porque allí se inventó la World-Wide-Web. En la práctica se trata de un conjunto enorme y caótico de edificios, ubicados en la frontera que forman la ciudad suiza de Ginebra y el pueblito francés de Saint Genis-Pouilly, con apenas 7000 habitantes, muchos de los cuales trabajan en el CERN. Este gran laboratorio posee varios aceleradores de partículas, especies de poderosos microscopios para observar la materia en su escala más pequeña, y desde hace unos meses ahí opera el LHC (Large Hadron Collider) [1], el acelerador más grande del mundo, unas 30 veces más poderoso que su antecesor (denominado RHIC y ubicado en Brookhaven, cerca de la ciudad de Nueva York). El LHC utiliza el túnel circular subterráneo, de 27 km de perímetro, construido originalmente para el Colisionador de Electrones y Positrones (LEP).

El LHC lleva varios meses produciendo haces de protones de 3.5 TeV cada uno. Así, la energía total de cada una de esas interacciones es equivalente a $\sim 7,000$ veces la masa del protón (multiplicada por c^2). Esto, que es apenas la mitad de la capacidad de diseño del LHC, permite ya explorar los límites de validez del Modelo Estándar, reproduciendo en la Tierra condiciones de densidad y temperatura hadrónica que debieron ocurrir un microsegundo después del Big-Bang. En noviembre de este mismo año se iniciará la experimentación con haces de ^{208}Pb a una energía en el centro de masa de 2.76 TeV por pareja de nucleones.

El programa científico del LHC incluye, entre otros proyectos, confirmar la existencia del bosón de Higgs, elemento esencial del Modelo Estándar (ME), con el que se explica cómo las otras partículas elementales adquieren propiedades como la masa. El LHC también permitirá poner a prueba la Cromodinámica Cuántica así como buscar partículas predichas por teorías más allá del ME, como la Super-Simetría, la Materia Oscura, los mini-hoyos negros, los strangelets, el monopolio magnético, etc.

El LHC está constituido por 4 instrumentos principales, denominados ALICE (A Large Ion Collider Experiment), CMS (Compact Muon Solenoid Experiment), LHCb (LHC-Beauty) y ATLAS (A Toroidal Lhc Aparatus). Hay otros dos experimentos de menor tamaño que son TOTEM (Total Elastic and diffractive cross section Measurement) y el LHCf (LHC-Forward).

El propósito del ALICE es observar el llamado Plasma de Quarks y Gluones. En la figura 2 se muestra el diagrama de fase que, se espera, sigue la materia nuclear cuando aumenta su densidad (eje horizontal) y/o su temperatura (eje vertical). Aquí la densidad está referida a la media observada para núcleos estables. Vemos que al incrementar lo suficiente cualquiera de estas variables ocurre una transición entre la materia hadrónica y una zona “de color” en que los quarks y los gluones se desconfinan, formando su llamado



Figura 1. Los técnicos del CERN tienen que utilizar diferentes métodos para transportarse a lo largo del túnel de 27 km de largo. Foto proporcionada por el CERN.

“plasma”. En la región de baja densidad se indica con una flecha (roja) ascendente la trayectoria que seguiría la materia en la etapa inicial de las colisiones que ocurren en el LHC, así como en el acelerador RHIC, de Brookhaven.

También se dibuja la trayectoria descendente que seguiría la materia primordial al enfriarse, un microsegundo después del Big-Bang. Naturalmente, la trayectoria roja está incompleta, pues luego de la colisión la materia debe volver al estado hadrónico. En este experimento participa el número más importante de investigadores mexicanos, incluyendo miembros del IFUNAM. Si bien ALICE fue diseñado para observar colisiones entre núcleos pesados, en los primeros meses de colisiones protón-protón el ALICE ya ha reportado observaciones importantes, como un ligero exceso en la producción de partículas cargadas, sobre predicciones basadas en observaciones de menores energías.

ATLAS y CMS, en que también colaboran mexicanos, tienen programas científicos parecidos entre sí, pero utilizan diferentes configuraciones experimentales. Ambos buscan el Higgs, y las partículas que constituyen la materia oscura así como evidencias de la existencia de nuevas dimensiones, predichas por las teorías de cuerdas. Esta experimentación se desarrolla utilizando haces de protones, aunque ambos experimentos también incluyen

programas para investigar diversos aspectos de las colisiones entre núcleos pesados. En los primeros cuatro meses de experimentación, ATLAS ya reporta haber observado por primera vez el decaimiento de un bosón Z vía la producción de un par electrón positrón. En tanto la colaboración CMS logró, en el mismo período, identificar la producción de pares de Top quarks. Sobre el Higgs cabe agregar que observaciones concluidas hace pocos días en el Tevatrón del Fermilab, eliminan (con un 95% de confiabilidad) la posibilidad de que esa partícula tenga una masa intermedia (158-175 GeV/c²), favoreciendo la hipótesis de un Higgs más ligero, lo que haría más difícil su detección en el LHC.

El experimento LHCb tiene como propósito estudiar la violación de CP (que ocurre en interacciones en que se conjugan la carga (C) eléctrica y la paridad (P), simultáneamente), a través del decaimiento de mesones con “belleza”, y buscar decaimientos raros. Sin embargo, aún no se han establecido las condiciones para realizar experimentos con este aparato. Con el LHCf se estudia la producción de los chubascos iniciados por partículas de alta energía que sirven como un medio de calibración para experimentos con rayos cósmicos. Finalmente, el TOTEM tiene como propósito principal medir el tamaño del protón. La actualidad del tema se aprecia por el anuncio, en el Nature del 8 julio, 2010, de que el radio de esta partícula parece ser 4% menor, a partir de observar las transiciones atómicas del hidrógeno-muónico. TOTEM también se utiliza para monitorear el haz.

Más allá de la física, por su magnitud, el LHC posee una notoriedad pública internacional que no siempre le ayuda. Si bien es difícil estimar su costo real, uno encuentra cifras que van desde los 5 a los 10 “billones” (miles de millones) de dólares. Por lo mismo, cualquier falla en su operación es motivo de preocupación, por unos, y de escándalo, por otros. Hace dos años el LHC se estropeó por un problema con uno de sus imanes superconductores, que se encargan de mantener a las partículas describiendo una órbita circular. Es necesario que estos sean superconductores, pues de otra manera la órbita sería mucho mayor que los 27 km. Un problema práctico de todo imán de ese tipo es que la enorme corriente eléctrica que por ellos circula, sin resistencia eléctrica, debe suplirse desde el exterior y, si en ese proceso hay una mala conexión eléctrica, se pueden producir calentamientos que llegan a fundir los materiales que fue lo que ocurrió hace dos años en uno de sus 2000 imanes. Al calentarse, su bobina se fundió en un punto. Por ahí se fugó el helio que enfría sus bobinas, lo que elevó la temperatura y desapareció de golpe el fenómeno de la superconductividad. El cambio fue tan violento que 30 imanes resultaron afectados, además de la pérdida de una cantidad importante de helio, que es un fluido muy costoso. El impacto mediático que generó este problema puso en grave riesgo, no sólo al LHC, sino al propio CERN. Ejemplo de ellos fue la amenaza de retiro de la membresía de algunos países europeos. En consecuencia, a partir de entonces el CERN procuró mantener un bajo perfil mediático durante el año que le tardó reparar el colisionador. También decidió ser más conservador e iniciar operaciones con haces de la mitad de la energía de diseño, misma que sólo alcanzará en el año 2013. Su fama también le ha valido el ser foco de atención de predicciones fatídicas, basadas en una mala lectura de sus propósitos científicos. Por ejemplo, decir que en el LHC se reproducirán las condiciones que ocurrieron 10 microsegundos después del origen del universo fue simplificado a: reproducirá el Big-Bang. Por supuesto, esto es imposible, pues para ello haría falta toda la energía del universo. También, la posible (pero altamente improbable) producción de mini hoyos

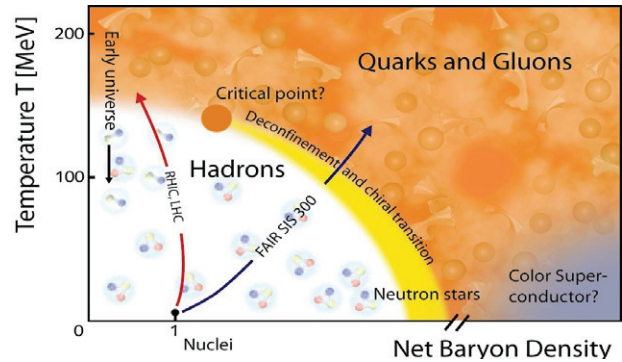


Figura 2. Diagrama de fase del plasma de quarks y gluones.

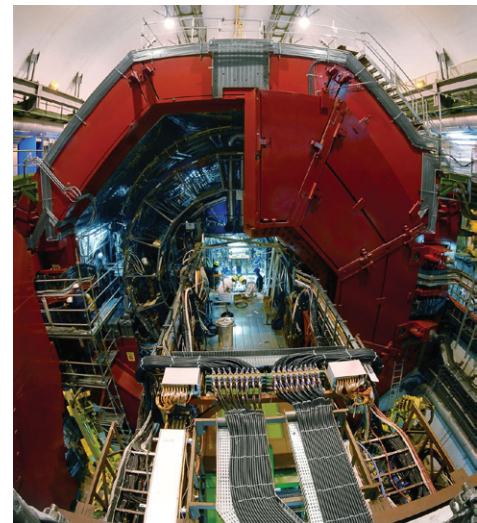


Figura 3. El imán L3 en el experimento ALICE. Foto proporcionada por el CERN.

negros se ha simplificado en la prensa como: la creación de un hoyo negro (macroscópico) que absorbería a la Tierra en un instante. Nuevamente, esto es absurdo, pues la creación de esos objetos requiere contar con energías mínimas equivalentes a 20 masas solares. Hace unos meses también aparecieron dos artículos que explican, según ellos, que es el propio Dios quien se opone al funcionamiento del LHC, para evitar que se descubra “su partícula”, el Higgs. Sobre este particular, aunque somos escépticos, preferimos no comentar sobre la viabilidad de la hipótesis. Todo esto nos recuerda que la prensa que nos corresponde es la científica.

Referencia

[1] <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc>

La invención del CCD y el premio Nobel de Física 2009

A diferencia de muchos otros casos, la fecha de invención del dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés) se conoce con absoluta precisión: el 19 de octubre de 1969 Willard S. Boyle y George E. Smith, ambos investigadores de los Laboratorios Bell en Murray Hill, Nueva Jersey, se reunieron para discutir la posibilidad de desarrollar una alternativa basada en semiconductores a la memoria de “burbuja magnética”. En la recolección de los hechos tanto Smith como Boyle señalan que la forma básica del nuevo dispositivo se desarrolló en alrededor de una hora intensa de intercambio de ideas y después de realizar algunos cálculos relativamente simples [1]. La fabricación del primer dispositivo experimental sólo llevó unos cuantos días, y en alrededor de una semana ya tenían los primeros resultados experimentales, los cuáles, para su propia sorpresa, resultaron ser mejores de lo esperado. El primer reporte científico sobre el invento se publicó en la revista interna de los Laboratorios Bell en abril de 1970 [2].

Aunque el CCD fue concebido originalmente como un dispositivo de memoria, muy pronto fue evidente que podría usarse en muchas otras aplicaciones, tales como el procesamiento de señales analógicas y la formación de imágenes. Fue esta última aplicación la que no sólo les valió a Boyle y Smith recibir el premio Nobel de Física cuarenta años después, sino la que detonó el nacimiento de prácticamente todos los sensores semiconductores para la formación de imágenes digitales. Hoy día cada vez que usamos una cámara fotográfica o de video digital tenemos en nuestras manos a los descendientes directos de ese primer CCD.

Como ocurre con toda buena idea, el éxito de esta tecnología se debe en buena parte a su simplicidad. La estructura básica del sensor consiste en una capa de óxido semiconductor (SiO_2) depositada sobre un sustrato de silicio dopado tipo p (p-Si), con contactos metálicos en la superficie (C) conectados de manera alternada a una fuente de voltaje (V). El CCD puede almacenar y transferir información en forma de carga eléctrica usando los pozos de potencial que se forman debajo de los contactos metálicos al aplicar una serie de pulsos de voltaje a los electrodos.

Si bien hoy sabemos que la guerra entre la película fotográfica y los sensores para formar imágenes digitales fue ganada por estos últimos, también hay que reconocer que la pelea no fue fácil. El campo de batalla donde se dieron los encuentros decisivos fue la Astronomía, pues para este tipo de aplicaciones la invención del CCD no pudo llegar en mejor momento. A principios de la década de 1970 la NASA necesitaba urgentemente detectores electrónicos para algunos de sus proyectos más ambiciosos: el Gran Telescopio Espacial, hoy conocido como el Telescopio Espacial Hubble, y las sondas de exploración planetaria.

Durante esa misma década se realizaron algunos de los avances más importantes para las aplicaciones científicas de los CCDs, principalmente en el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto Tecnológico de California. Es claro que para las misiones espaciales los CCDs tienen ventajas importantes sobre la película fotográfica, tales como tamaño pequeño, bajo consumo, respuesta lineal, muy bajo ruido, amplio intervalo dinámico y alta precisión fotométrica [3]. Sin embargo fue necesario desarrollar nuevas

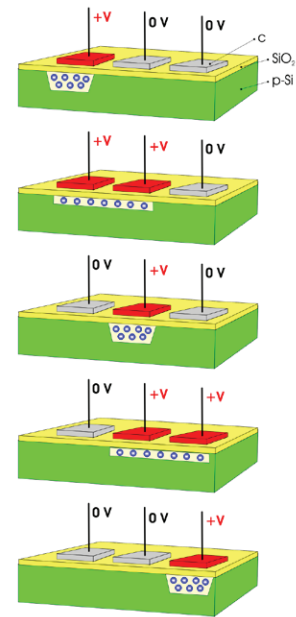


Figura 1. Esquema de funcionamiento del CCD. El voltaje se aplica secuencialmente a cada uno de los electrodos para transferir la carga almacenada debajo de uno de ellos.

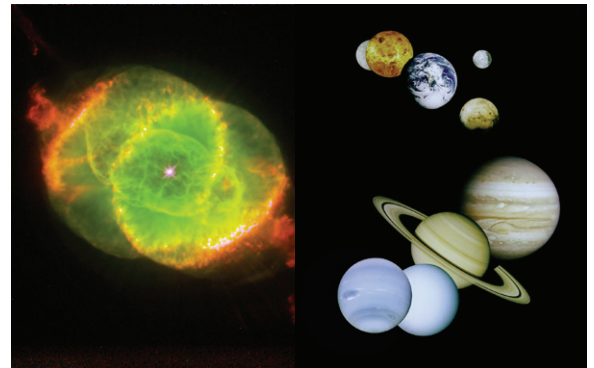


Figura 2. Imagen de la nebulosa Ojo de Gato obtenida con el Telescopio Espacial Hubble, y fotomontaje de los planetas del Sistema Solar (imágenes cortesía de la NASA).

técnicas de fabricación para alcanzar la resolución espacial necesaria y sobre todo para eliminar los problemas de baja eficiencia en la transferencia de carga debida a la presencia de trampas en la interfaz entre el sustrato de silicio y la capa de dióxido de silicio [1]. La solución a este problema la dieron también

Boyle y Smith, mediante un diseño conocido como CCD de “canal enterrado”, en el que se agrega una capa delgada de silicio ligeramente dopado tipo n entre el SiO_2 y el sustrato tipo p [1,3]. De esta manera la carga acumulada se mantiene en un pozo de potencial por debajo de la zona de contacto, evitando las trampas superficiales que afectan al movimiento de los electrones.

En la actualidad las aplicaciones de los CCDs y todos los detectores a los que dieron lugar (sensores CMOS, detectores híbridos pixelados) cubren prácticamente todas las ramas del quehacer científico, desde la física de partículas elementales hasta la cosmología, pasando por la biología, la microscopía, la medicina y la ciencia de materiales, por mencionar algunas.

Uno de los ejemplos más espectaculares es la cámara CCD que será construida para el Gran Telescopio de Rastreo Sinóptico (LSST, por sus siglas en inglés). El propósito fundamental de este proyecto es obtener un mapa tridimensional del universo muy preciso y detallado, el cuál se usará, entre otras cosas, para tratar de entender la naturaleza de la materia y energía oscuras. La cámara CCD del LSST será la más grande del mundo, haciendo palidecer a cualquier cámara fotográfica comercial: un arreglo gigantesco de 3200 megapíxeles (el equivalente a 640 cámaras del iPhone) que generará 30 terabytes de datos (7500 DVDs) cada noche.

Y es exactamente esa misma tecnología la que nos permite estudiar la anatomía de pequeños animales de laboratorio con un nivel de detalle exquisito usando rayos X, e incluso estudiar procesos metabólicos mediante la tomografía molecular de fluorescencia. A este tipo de técnicas de tomografía híbrida, que combinan información anatómica y funcional, se les considera la última frontera de la óptica en biología [4].

En los cuarenta años transcurridos desde su invención el CCD ha pasado de ser una curiosidad de laboratorio a un elemento que trastoca todos los aspectos de la vida cotidiana y de nuestra actividad científica. No sólo nuestras memorias quedan registradas digitalmente al transformar la luz en cadenas de bits, como una extensión de nuestros ojos [5]. Ahora, y cada vez en mayor

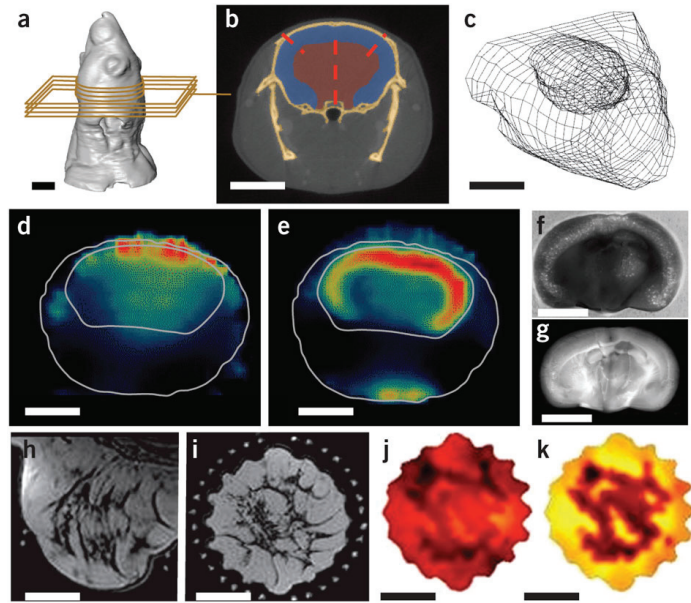


Figura 3. Ejemplo de tomografía híbrida del cerebro de un ratón de laboratorio usando rayos X (a-c) y fluorescencia óptica (d-e). Para una descripción detallada de la figura consultar la referencia original en Nature [4].

medida, estos detectores nos permiten registrar lo que ocurre en el interior de las células, formar imágenes radiológicas, y escudriñar el universo. Con toda justicia la revista Nature ha incluido la invención del CCD como una de las piedras angulares de la ciencia y la tecnología asociadas al estudio del fotón (Nature Milestones: Photons).

Referencias

1. G. E. Smith, “Nobel Lecture: The invention and early history of the CCD”, *Rev. Mod. Phys.* 82 (2010) 2307-2312.
2. W. S. Boyle and G. E. Smith, “Charge Coupled Semiconductor Devices”, *Bell Sys. Tech. J.* 49-4 (1970) 587-593.
3. J. R. Janesick, “Scientific Charge-Coupled Devices”, SPIE Press, Bellingham, Washington 2001.
4. V. Ntziachristos, “Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology”, *Nature Methods*, 7 (2010) 603-614
5. W. S. Boyle, “Nobel Lecture: CCD—An extension of man’s view”, *Rev. Mod. Phys.* 82 (2010) 2305-2306.

Fibra óptica: el nacimiento de la fotónica

Pocos inventos han revolucionado tanto la tecnología como la fibra óptica, en particular las telecomunicaciones. Es por esto que Charles K. Kao recibió la mitad del premio Nobel de Física 2009 “por sus sobresalientes logros concernientes a la transmisión de luz en fibras para comunicaciones ópticas”. Hoy en día, el uso de la fibra óptica nos es familiar y está muy bien establecido. Sin embargo, a pesar de su simplicidad conceptual, el desarrollo tecnológico de las telecomunicaciones por fibra óptica no fue sencillo; tiene una larga e interesante historia.

Los primeros antecedentes datan desde 1841, cuando el suizo Daniel Colladon demostró en Ginebra que la luz se puede guiar a través de finos chorros de agua, gracias al fenómeno de reflexión total interna. Casi simultáneamente, el francés Jaques Babinet, también reportó en 1842 la guía de luz en chorros de agua y en varitas de vidrio dobladas. Para 1853 la idea del chorro de agua luminoso fue utilizada en la Ópera de París como parte de la escenografía en la representación de Fausto. Al parecer estas noticias no llegaron a América, o al menos no se popularizaron. Es por ello que la demostración pública hecha en 1870 por John Tyndall, un físico irlandés radicado en Boston, de que la luz podía viajar en una trayectoria curva a través de un chorro de agua que caía desde un tanque iluminado por su lado opuesto causó tanta admiración. Tyndall había hecho esta misma demostración en 1854 ante la Royal Society de Londres.

Hacia finales del siglo XIX y principios del siglo XX ya existían patentes de varillas de vidrio dobladas para usarse como lámparas quirúrgicas y sistemas de iluminación para microscopio. Más aún, ya había surgido incluso la idea de utilizar este principio para transmitir imágenes. Pero fue hasta 1930 que Heinrich Lamm, un estudiante alemán de medicina, ensambló por primera vez un manojo de fibras transparentes (hechas de varitas de vidrio calentadas y estiradas) para transmitir una imagen. El desarrollo del endoscopio se había puesto en marcha. Sin embargo, las imágenes logradas eran pobres en resolución, debido a que parte de la información se cruzaba entre fibras vecinas o se perdía en la interfaz vidrio-aire. Estos problemas se comenzaron a solucionar a mediados de los años 50, cuando el holandés Abraham van Heel propuso utilizar un revestimiento transparente, con índice de refracción ligeramente menor al de la fibra, para protegerla de contaminación y reducir sensiblemente el cruce de información. Si bien esto significó un avance muy importante en el terreno de la medicina, había dos grandes limitantes para llevar las fibras al terreno de las telecomunicaciones: la atenuación era demasiado alta (mayor a un decibel por metro) y no se habían desarrollado fuentes de luz suficientemente intensas.

En 1960, con el desarrollo del láser, se pensó que la posibilidad de transmitir información vía fibra óptica era cuestión de muy poco tiempo. Los ingenieros en telecomunicaciones buscaban afanosamente medios para ensanchar la banda espectral de transmisión, ya que el espectro de radioondas y microondas estaba llegando a niveles de saturación y se esperaba una demanda creciente para transmisión de televisión y teléfono, pero el problema de la atenuación en la fibra óptica seguía sin resolverse.

Cuando la industria de telecomunicaciones había abandonado casi por completo la idea de utilizar frecuencias ópticas, un pequeño grupo en Standard Telecommunications Laboratories (STL) decidió proseguir en los esfuerzos por mejorar las fibras. Precisamente a este grupo se unió Charles K. Kao, un joven ingeniero nacido en Shanghai, que se dio a la tarea de coleccionar muestras de fabricantes de fibras y analizar las propiedades de los vidrios que se utilizaban. A partir de esta cuidadosa investigación, Kao se convenció de que el problema no era el vidrio de silicato en sí mismo, sino las impurezas que contenía. Él y su equipo trabajaron en un proyecto de comunicaciones de larga distancia desarrollando fibras monomodo y, en 1966, presentaron en un congreso en Londres una fibra que tenía capacidad para transportar un equivalente a 200 canales de TV o 200 mil canales de teléfono. Más aún, Kao argumentó

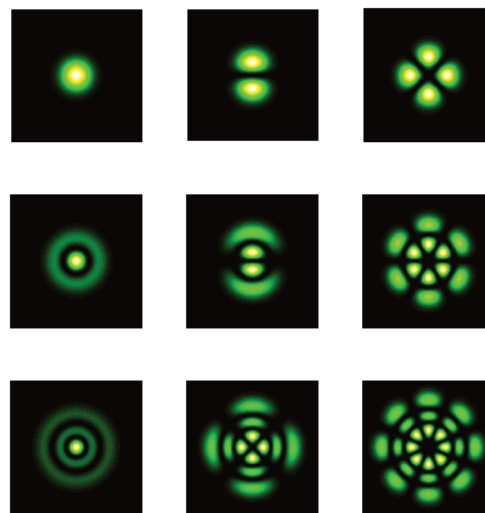


Figura 1. Algunos ejemplos de modos transversales para una fibra de gradiente de índice. En la esquina superior izquierda se muestra el modo fundamental (gaussiano), que es el único que se puede propagar en una fibra monomodo. En las fibras multimodo se pueden propagar varios modos simultáneamente, dependiendo del tamaño del núcleo. Mientras más grande es el núcleo mayor es el número de modos que la fibra puede aceptar. Si el número de modos es muy grande, la superposición de todos ellos producirá a la salida de la fibra una distribución de intensidad que más bien parece un patrón granulado de luz (speckle).

su optimismo respecto a la posibilidad de desarrollar materiales que reducirían la atenuación por debajo de 20 dB/km. Esto revivió las perspectivas de la fibra óptica y desencadenó inversiones millonarias en investigación al respecto.

Aún así, pasaron cuatro años más para que Robert Maurer, Donald Keck y Peter Schultz, de la compañía Corning Glass Works anunciaran el desarrollo de fibras monomodo con una atenuación que alcanzaba los límites previstos por Kao para luz de 633 nm de longitud de onda, correspondiente a la línea roja del láser He-Ne. Al mismo tiempo, los primeros diodos láser de estado sólido, capaces de operar a temperatura ambiente, salieron a la luz. Estos dispositivos emiten en la región del infrarrojo cercano, donde las fibras tienen una mayor transparencia.

La década de los 70 fue decisiva en el avance de las telecomunicaciones por fibra óptica. Para 1977 se llevaron a cabo las primeras pruebas en el campo de la telefonía usando fibras que podían transmitir luz de 850 nm a lo largo de varios kilómetros sin sistemas repetidores. Una segunda generación de fibras que apareció al poco tiempo utilizaba diodos láser a 1300 nm y disminuyó las pérdidas hasta 0.5 dB/km. Hoy en día las fibras operan con longitudes de onda de 1550 nm con pérdidas de entre 0.2 y 0.3 dB/km. Este nivel de atenuación es al menos un orden de magnitud menor que los que exhibe el cable coaxial de cobre, predecesor de la fibra óptica, pero además, la fibra reduce considerablemente los problemas de transmisión de señal, tales como interferencia y ruido. Por esta razón, la gran mayoría de las comunicaciones de larga distancia en la actualidad a nivel mundial se realizan vía fibra óptica y, en los países desarrollados, también las comunicaciones regionales de corto alcance. Aunque en transmisiones de corto alcance se suele utilizar fibra óptica de plástico, cuyas pérdidas son mucho mayores que las de vidrio. En los países en desarrollo, en cambio, el reemplazo del cable coaxial por fibra óptica en las comunicaciones regionales ha sido mucho más gradual, puesto que el costo de reemplazar la infraestructura es muy alto en relación con los beneficios.

La cuarta generación de fibras ópticas también ha representado una revolución tecnológica gracias al desarrollo de los amplificadores ópticos y al multiplexado en longitud de onda. En los primeros, la señal óptica se amplifica con base en la inclusión de un medio activo, del mismo modo que ocurre en un láser. De hecho, los amplificadores ópticos se pueden hacer de fibras dopadas, que también se han usado para producir láseres. En esta forma se ha eliminado el uso de dispositivos repetidores que debían convertir las señales ópticas en eléctricas y viceversa. El multiplexado, por otra parte, se refiere al envío simultáneo de múltiples señales en una sola fibra utilizando diferentes longitudes de onda. Con estos dos avances, la capacidad de transmisión de información ha alcanzado ya los 14 Tb/s, y actualmente se trabaja en la quinta generación de fibras ópticas.

Existen varios tipos de fibra óptica, pero todas ellas tienen un núcleo a lo largo del cual se guía la luz por reflexión total interna, y un recubrimiento que lo rodea, con índice de refracción ligeramente menor. La transmisión de información se lleva a cabo mediante pulsos cortos de luz. Hay fibras en las que el cambio de índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento es gradual. Dependiendo del tamaño del núcleo en relación con la longitud de onda, las fibras pueden ser monomodo o multimodo. Las primeras tienen un núcleo muy pequeño, que solo puede albergar el modo transversal fundamental (figura 1), y son las más eficientes en telecomunicaciones. Las segundas pueden albergar varios modos transversales simultáneamente por tener un núcleo mucho más grande; son más baratas y tienen usos importantes en iluminación, por ejemplo.

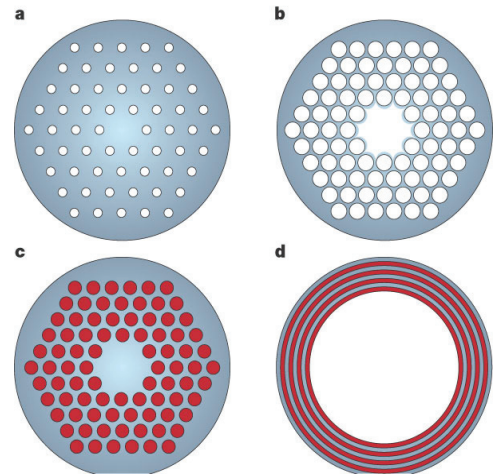


Figura 2. Corte transversal de distintos tipos de fibra óptica estructurada. (a) Fibra monomodo con núcleo de silicato rodeado de un recubrimiento de cristal fotónico con índice de refracción reducido. El mecanismo de guía es reflexión total interna modificada. (b) Fibra de núcleo hueco, la luz es guiada en aire y confinada por una banda prohibida del recubrimiento de cristal fotónico 2D hecho de vidrio-aire. (c) La luz es confinada en un núcleo de bajo índice de refracción por una banda fotónica prohibida del recubrimiento. En este caso el núcleo es de silicato puro, mientras que los agujeros en el recubrimiento se llenan de un líquido de alto índice de refracción. (d) Fibra hueca de recubrimiento sólido multicapa. En todas las figuras el blanco representa aire, el azul silicato y el rojo un material de alto índice de refracción. Figura tomada de la referencia [4].

Este campo es extremadamente dinámico; la investigación en fibra óptica sigue avanzando día con día, no sólo para mejorar las características de las fibras para telecomunicaciones, sino también en el desarrollo de nuevas aplicaciones. Particularmente importante es el uso de las fibras ópticas en medicina. Gracias a éstas ha sido posible, además de la endoscopia, la cirugía laparoscópica, que se realiza con incisiones extremadamente pequeñas en comparación con la cirugía tradicional. La fibra óptica también permite realizar sistemas de iluminación seguros en ambientes húmedos o corrosivos, donde los cables eléctricos representan un gran riesgo. Por otro lado, una sola fuente de luz es suficiente para iluminar un gran conjunto de fibras que se puede dividir en grupos en el otro extremo para formar los píxeles de una pizarra luminosa. Como éstos, existe un sinnúmero de ejemplos de aplicaciones interesantes de las fibras ópticas.

Finalmente, cabe mencionar que en años recientes se han desarrollado otro tipo de fibras ópticas basadas en cristales fotónicos, que son estructuras periódicas fabricadas, con periodos del orden de décimas de micra hasta micras, que presentan una banda prohibida en la región visible del espectro. Para guiar luz a través de un cristal fotónico basta crear un “defecto”, que sirve precisamente de camino para confinar la luz que no puede penetrar en el resto del cristal. En el caso de las fibras, el cristal fotónico juega el papel del recubrimiento, mientras que el defecto constituye el núcleo. Si uno hace un corte transversal de la fibra se aprecia la estructura periódica que rodea al defecto (figura 2). La periodicidad, así como los materiales empleados en

su fabricación, determinan la banda prohibida y las propiedades dispersivas e incluso no-lineales de la fibra, permitiendo diseñar con gran versatilidad y control, de acuerdo a las aplicaciones.

Poco a poco la fotónica está reemplazando a la electrónica, con sistemas que resultan más rápidos y eficientes; la fibra óptica ha sido el primer avance importante en esa dirección.

Referencias

1. J. Hecht, “City of Light: The Story of Fiber Optics”, (Revised and Expanded Edition), Oxford University Press (2004).
2. J. Crisp, B. Elliot, “Introduction to fiber optics”, (3rd Edition), Newnes Elsevier, Amsterdam (2005).
3. B. E. A. Saleh, M. C. Teich, “Fundamentals of Photonics”, (2nd Edition), John Wiley & Sons, Inc. (2007).
4. J. C. Knight, “Photonic crystal fibres”, Nature 424, 847-851 (2003).
5. J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, “Photonic Crystals: Molding the Flow of Light”, (2nd Edition), Princeton University Press (2008). <http://ab-initio.mit.edu/book/>

Directorio



Dr. José Narro Robles
Rector

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Secretario General

Lic. Enrique del Val Blanco
Secretario Administrativo

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Coordinador de la Investigación Científica

Guillermo Monsivais Galindo
Director

Comité Editorial

Raúl Esquivel Sirvent
Guillermo Ramírez Santiago
Mercedes Rodríguez Villafuerte
Víctor Romero Rochín
Manuel Torres Labansat

Apoyo técnico

Gustavo Gómez Macías
Desarrollo Web

Dulce María Aguilar Téllez
Diseño Gráfico y Formación



Instituto de Física, UNAM
Ciudad Universitaria, Septiembre de 2010, No. 13
www.fisica.unam.mx/elgluon