

Premio Nobel de Física 2009

Los dominadores de la luz

El Premio Nobel de física 2009 rinde homenaje a tres científicos que han tenido un papel importante en el campo de las nuevas tecnologías de la información: **Charles Kuen Kao**, por un lado, y **Willard Sterling Boyle** y **George Elwood Smith**, por otro. Los descubrimientos de Kao han allanado el camino para la tecnología de fibra óptica, que hoy se utiliza en casi todas las comunicaciones de telefonía y transmisión de datos. Boyle y Smith han inventado un sensor de imagen digital el CCD (Charge Coupled Device) que se ha convertido en un ojo electrónico en casi todos los ámbitos de la fotografía.

Cuando se anuncia el Premio Nobel de física en Estocolmo, una gran parte del mundo recibe la noticia de forma casi instantánea. A la velocidad de la luz, la más alta de las velocidades, el mensaje se extiende por todo el mundo. Texto, imágenes, voz y vídeo son transmitidos mediante fibras ópticas y se reciben al instante en pequeños dispositivos receptores. Es algo que la mayor parte de las personas consideran ya normal. La fibra óptica ha sido un requisito previo para el desarrollo extremadamente rápido en el campo de las comunicaciones, un desarrollo que **Charles Kao** predijo hace más de 40 años.

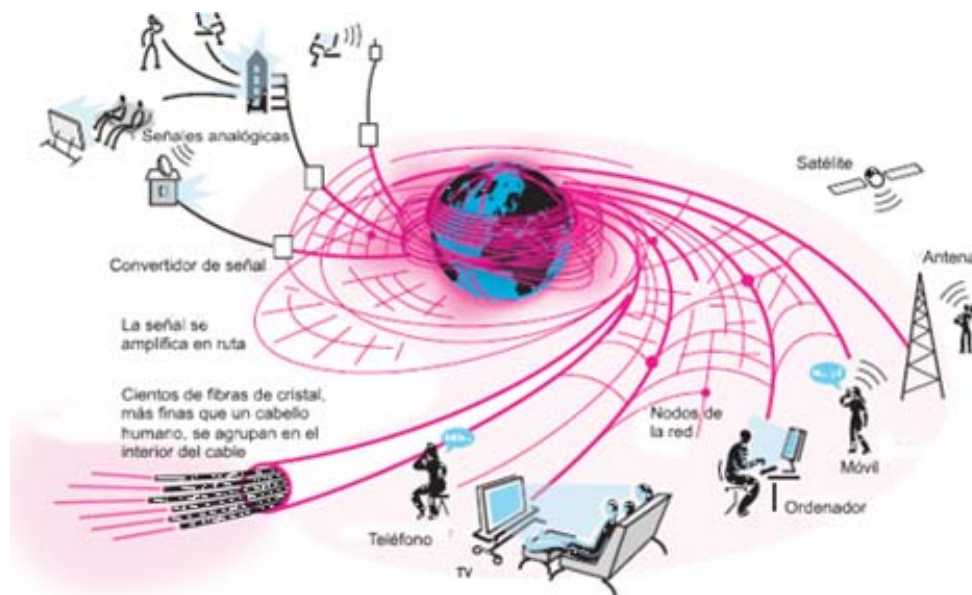


Figura 1. Fibras ópticas, hechas de vidrio, constituyen el sistema circulatorio de nuestra sociedad de la comunicación. Hay fibra suficiente para rodear la Tierra más de 25.000 veces

Pocos años más tarde, **Willard Boyle** y **George Smith** revolucionaron el campo de la fotografía al conseguir capturar las imágenes electrónicamente, mediante un sensor, haciendo innecesaria la película. El ojo electrónico, el CCD, se convirtió en la primera tecnología verdaderamente exitosa para la

transferencia digital de imágenes. Ello abrió la puerta para que una multitud de imágenes circulen diariamente a través de los cables de fibra óptica. Sólo la fibra óptica es capaz de transferir las grandes cantidades de datos que la tecnología del sensor de imagen produce.

La era de la luz

Gracias a la luz del sol vemos el mundo. Sin embargo, pasaría mucho tiempo antes de los humanos adquirieran las habilidades necesarias para controlar la luz y dirigirla a través de un cable. De esta manera se pueden transmitir de forma simultánea mensajes codificados a muchas personas.

Este desarrollo requiere numerosos inventos, grandes y pequeños, que forman las bases de la sociedad moderna de la información. La fibra óptica requiere que se desarrolle una moderna tecnología en la fabricación del vidrio. También se necesitaba una fuente fiable de luz que fue proporcionada por la tecnología de los semiconductores. Por último, era necesario montar una ingeniosa red de transistores, amplificadores, conmutadores, transmisores y receptores. La revolución de las telecomunicaciones ha sido posible gracias al trabajo de miles de científicos e inventores de todo el mundo.

Jugando con la luz

La exposición universal de 1889 en París celebró el centenario de la revolución francesa. La Torre Eiffel se convirtió en uno de los monumentos más conocidos de esta exposición. No obstante, un juego de luces realizado con chorros de agua coloreados con haces de luz resultó un espectáculo no menos memorable. El espectáculo se inspiró en intentos realizados a mediados del siglo XIX para crear haces de luz guiados por agua. Los ensayos habían demostrado que cuando un chorro de agua se expone a la luz del sol, la luz viaja en su interior adoptando la forma curva del chorro.

Mucho antes se habían descubierto los efectos que la luz produce cuando viaja a través del vidrio o del agua. Hace 4 500 años, ya se fabricaba vidrio en Mesopotamia y Egipto. Los maestros vidrieros venecianos tampoco ignoraban el hermoso juego de luces que se producía en sus piezas. El vidrio tallado se utilizó para hacer lámparas y candelabros, y el escurridizo misterio de la descomposición de la luz en colores desafió la imaginación de muchos hombres y mujeres mucho antes de que las leyes de la óptica proporcionaran la respuesta en el siglo XVII. Sin embargo, sólo hace unos 100 años que se planteó la posibilidad de usar haces de luz guiados.

Capturando la luz

Un rayo de luz que incida sobre el agua sufre una desviación cuando llega a la superficie debido a que el índice de refracción del agua es mayor que el índice de refracción del aire. Si se invierte la dirección del haz de luz, viajando del agua al aire, se puede conseguir que la luz no emerja al aire y se refleje en la superficie hacia el interior del agua. Este fenómeno constituye la base de la tecnología de fibra óptica, donde se captura luz dentro de una fibra con un índice de refracción mayor que su

entorno. Un rayo de luz dirigido al interior de una fibra, rebota contra la pared de vidrio y se propaga en ella, ya que el índice de refracción de vidrio es mayor que el aire circundante (figura 2).

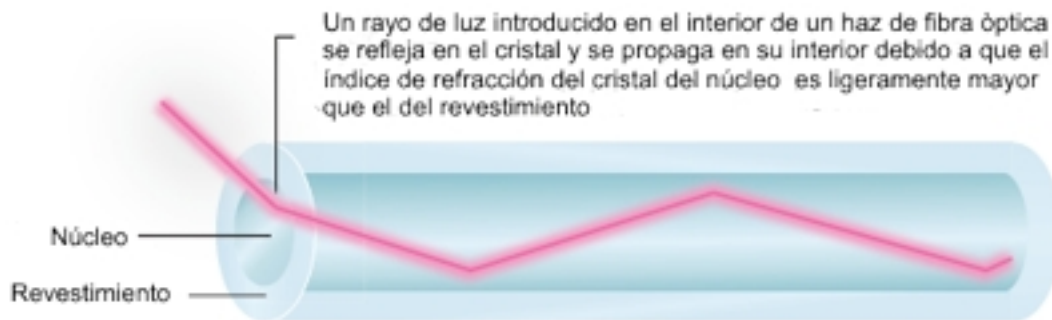


Figura 2. La fibra óptica tiene un grosor de 125 micrómetros. El diámetro del núcleo típico es de 10 micrómetros, menos que el diámetro de un cabello. La luz infrarroja de 1,55 micrómetros de longitud de onda ofrece los costos más bajos y es la más usada para la comunicación óptica.

La profesión médica ha utilizado fibras ópticas cortas y sencillas desde la década de 1930. Un delgado haz de fibra de vidrio puede hacerse llegar hasta el estómago de los pacientes para visualizar su interior o destacar los dientes durante las operaciones. Sin embargo, debido al contacto entre las fibras la luz se filtra al exterior extinguiéndose la señal fácilmente. Recubriendo la fibra con un revestimiento de vidrio que tenga un menor índice de refracción se logra una mejora considerable, lo que en la década de 1960 allanó el camino para la fabricación industrial de instrumentos para gastroscopías y otros usos médicos.

Para la comunicación de larga distancia, sin embargo, estas fibras de vidrio eran inútiles. Además, pocos estaban realmente interesados en la luz: eran los días de la electrónica y la tecnología de la radio. En 1956 se desplegó el primer cable trasatlántico con capacidad para 36 llamadas telefónicas simultáneas. Pronto los satélites comenzarían a cubrir las crecientes necesidades de comunicación, pero el enorme aumento de la telefonía y las emisiones de televisión requerían cada vez mayor capacidad de transferencia. En comparación con las ondas de radio la luz infrarroja o visible lleva decenas de miles de veces más información, así que el potencial de las ondas luminosas no podía demorarse más.

La transmisión de la luz

La invención del láser a principios de la década de 1960 fue un paso decisivo para la fibra óptica. El láser es una fuente estable de luz que emite haces de luz intensos y altamente focalizados que podían ser bombeados al interior de una fibra óptica. El primer láser emitía luz infrarroja y necesitaba ser refrigerado. Alrededor de 1970 se desarrollaron láseres más prácticos capaces de funcionar continuamente a temperatura ambiente. Fue un avance tecnológico que facilitó el desarrollo de la comunicación óptica.

Toda la información podía ser codificada ahora mediante una luz intermitente, extremadamente rápida, que transmitía unos y ceros. Sin embargo, la manera de transmitir esas señales a distancias más largas todavía no se conocía (después de tan sólo 20 metros, sólo el 1% de la luz que había entrado en la fibra de vidrio permanecía en su interior).

Reducir esta pérdida de la luz se convirtió en un desafío para un visionario como **Charles Kuen Kao**. Nacido en 1933 en Shanghai, se trasladó a Hong Kong junto con su familia en 1948. Como ingeniero electrónico defendió su tesis doctoral en Londres en 1965. Entonces era un empleado de Standard Telecommunication Laboratories, donde estudió de manera concienzuda las fibras de vidrio junto con su joven colega **George A. Hockham**. Su objetivo era que al menos el 1 % de la luz introducida en la fibra de vidrio permaneciera en su interior después de haber viajado 1 kilómetro.

En enero de 1966, Kao presentó sus conclusiones. Las imperfecciones de la fibra eran el principal problema, el vidrio tenía que ser purificado. Admitió que esto sería muy difícil pero factible. El objetivo era fabricar vidrio de una transparencia nunca alcanzada antes. El entusiasmo de Kao llevó a otros investigadores a compartir su visión del futuro potencial de la fibra óptica.

El cristal se fabrica a partir de cuarzo, el mineral más abundante en la tierra. Durante su producción, se utilizan diferentes aditivos como sosa y cal a fin de simplificar el proceso. Sin embargo, a fin de producir el vidrio más puro del mundo, Kao sugirió que se utilizara sílice en lugar de cuarzo. Su punto de fusión alcanza casi los 2 000 ° C, una temperatura difícil de alcanzar y controlar, pero a la que podrían obtenerse fibras ultrafinas.

Después de cuatro años, en 1971, científicos del Corning Glass Works (USA), una fábrica de vidrio con más de cien años de experiencia, produjeron una fibra óptica de 1 kilómetro largo usando procedimientos químicos.

Lleno de luz

Las ultrafinas fibras de vidrio pueden parecer muy frágiles. Sin embargo, cuando el vidrio se obtiene correctamente tras un largo proceso, cambian sus propiedades. Se vuelve fuerte, ligero y flexible, lo cual es un requisito previo para ser enterrado, hundido en agua o doblado. A diferencia de los cables de cobre, no es sensible a los rayos, y a diferencia de las comunicaciones por radio, no se ve afectado por el mal tiempo.

Llevó poco tiempo rodear la Tierra con fibra óptica. El primer cable óptico fue tendido en 1988 a lo largo del Océano Atlántico entre los Estados Unidos y Europa. Tenía 6 000 km de largo. Hoy en día datos telefónicos y de comunicación fluyen a través de una red de fibra de vidrio, cuya longitud total es de más de mil millones de km. Si esa cantidad de fibra óptica se enrollara sobre nuestro planeta podría dar la vuelta al mismo más de 25 000 veces, y la cantidad de fibra está aumentando cada hora

Incluso en una fibra de vidrio de alta pureza la señal se reduce ligeramente a lo largo del camino y tiene que reforzarse cuando se transmite a distancias más largas. Hoy se realiza esta tarea, que anteriormente requería electrónica, mediante amplificadores ópticos. Esto ha puesto fin a las pérdidas innecesarias que se producen cuando la luz se transforma en señales electrónicas.

Hoy el 95 % de la luz sigue en el interior de la fibra después de recorrer un kilómetro completo, un número que debe compararse con el objetivo perseguido por Kao, que aspiraba a retener un escaso 1%. Además, no es posible hablar de un único tipo de fibra. Elegir qué fibra utilizar es una decisión complicada en la que hay que tener en cuenta consideraciones técnicas, necesidades de comunicación y el coste.

Es necesario llegar a un complicado equilibrio entre el tamaño, propiedades del material y longitudes de onda de la luz. Láseres semiconductores y diodos del tamaño de un grano de arena llenan las redes de fibra óptica con luz que transporta la comunicación de datos telefónicos por todo el mundo. Luz infrarroja con una longitud de onda de 1,55 micrómetros se utiliza hoy en día en todas las comunicaciones a larga distancia.

La capacidad de las redes de cable óptico sigue creciendo a una velocidad sorprendente; transferir miles de gigabits por segundo ya no es un sueño. El desarrollo tecnológico avanza en la dirección de una comunicación más interactiva, donde los cables de fibra óptica están diseñados para llegar a los hogares de todos y cada uno de nosotros. La tecnología ya existe. Lo que hacemos con ella es una cuestión totalmente diferente.

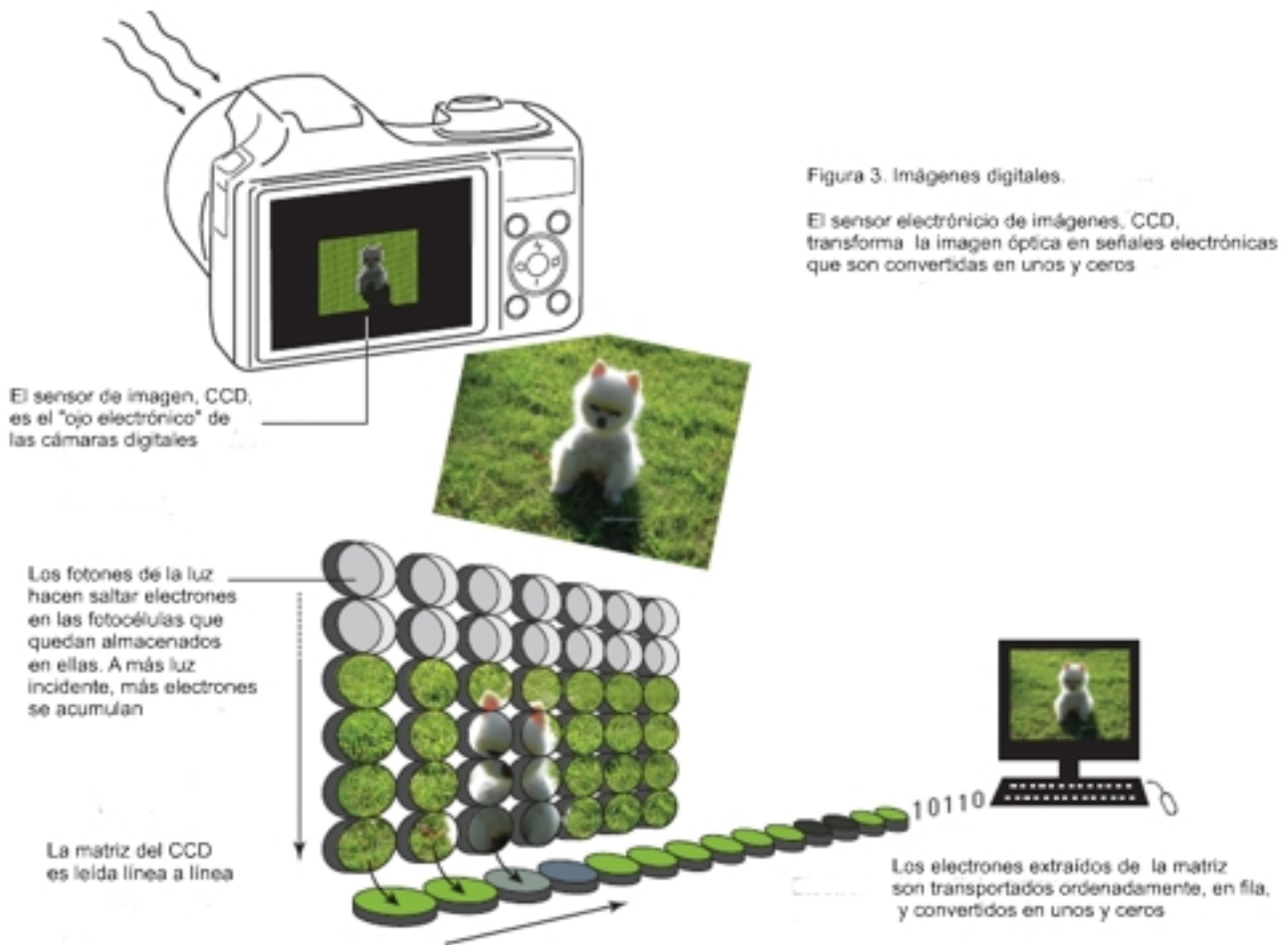
Ojos electrónicos

A veces las invenciones son totalmente imprevistas. El sensor de imagen, CCD (Charge Coupled Device), es una de ellas. Sin el CCD el desarrollo de las cámaras digitales habría sido más lento. Sin CCD no habríamos visto las sorprendentes imágenes del espacio tomadas por el telescopio espacial Hubble, o las imágenes del desierto rojo de nuestro vecino planeta Marte.

No era eso lo que los inventores del CCD, **Willard Boyle** y **George Smith**, habían imaginado cuando empezaron su trabajo. Un día de septiembre de 1969 dibujaron el esquema básico de un sensor de imagen en una pizarra en la Oficina de Boyle. En ese momento no pensaban en imágenes fotográficas. Su objetivo con el CCD era crear una memoria electrónica mejor. La posibilidad de usar el dispositivo como una memoria ha sido hoy olvidado. Sin embargo, es considerado como una parte importante de la moderna tecnología de la imagen. El CCD es otra historia de éxito de la era de la electrónica.

La imagen se convierte en digital

Al igual que muchos otros dispositivos en la industria electrónica, un sensor de imagen digital, CCD, está hecho de silicio, una placa de silicio del tamaño de un sello que contiene millones de fotocélulas sensible a la luz. El procesamiento de imágenes se basa en el efecto fotoeléctrico, interpretado por Albert Einstein y por el que le dieron el Premio Nobel en 1921. Debido al efecto fotoeléctrico se liberan electrones en las fotocélulas cuando la luz llega a la placa de silicio. Los electrones liberados se acumulan en las células donde son almacenados. Cuanto mayor sea la cantidad de luz, mayor sea el número de electrones.



Cuando se aplica un voltaje a la matriz del CCD, el contenido de las fotocélulas puede ser leído; fila a fila, los electrones vacían la matriz en una especie de cinta transportadora (figura 3). Por ejemplo, una matriz de 10 x 10 puntos de imagen se transforma en una larga cadena de 100 puntos. De esta manera el CCD transforma la imagen óptica en señales eléctricas que posteriormente se traducen en unos y ceros. A continuación cada celda puede recrearse como un punto de imagen, un píxel. Cuando se multiplica el ancho del CCD, expresado en píxeles, con su altura, se obtiene la capacidad de imagen del sensor. Por lo tanto un CCD con 1280 x 1024 píxeles produce una capacidad de 1,3 me-

gapíxeles (1,3 millones de píxeles).

La CCD dan una imagen en blanco y negro, por lo que para obtener los colores se utilizan varios filtros. Un filtro que contiene uno de los colores básicos: rojo, verde o azul, se coloca sobre cada célula en el sensor de imagen. Debido a la sensibilidad del ojo humano, el número de píxeles verdes debe ser doble que el número de píxeles de color rojos o azules. Para imágenes más avanzadas, se puede utilizar un mayor número de filtros.

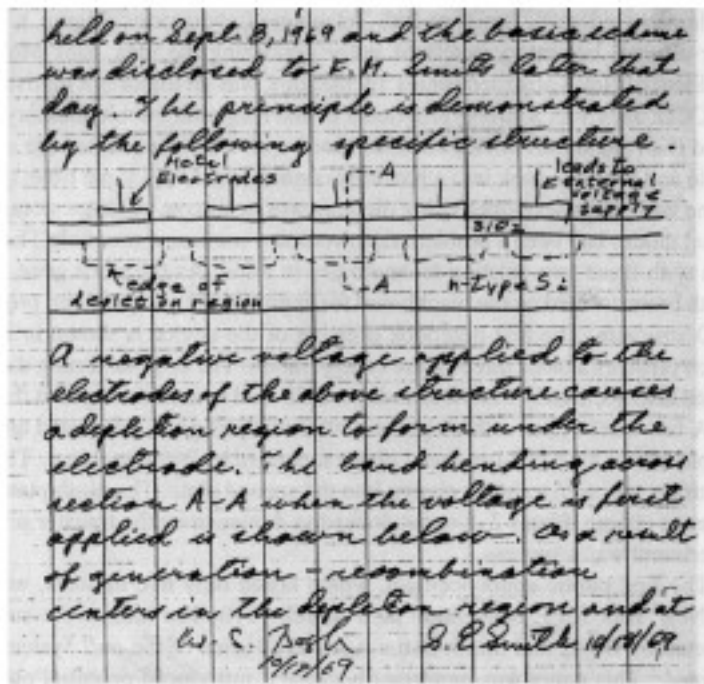


Figura 4. Notas originales de Boyle y Smith tomadas en la “tormenta de ideas” del 8 de septiembre de 1969, cuando hicieron el primer esquema del CCD

El hecho de que Boyle y Smith tuvieran la idea del CCD durante una sesión de “tormenta de ideas” hace 40 años se debe a la política de la compañía. Su jefe en los laboratorios Bell de Nueva York, los alentó a asumir el reto de competir para desarrollar una mejor memoria de burbuja, otra de las invenciones de los laboratorios Bell. El primer prototipo de CCD fue construido sólo una semana después de que fuera terminado el diseño básico. Una nueva memoria rápidamente es olvidada, pero el CCD se ha convertido en el centro de muchas técnicas de procesamiento de imágenes digitales.

El estadounidense de George Smith fue contratado en los laboratorios Bell en 1959 y produjo treinta patentes durante su tiempo en la empresa. Cuando se retiró en 1986, él pudo dedicarse plenamente a su gran pasión: navegar, lo que le llevó a dar varias veces la vuelta al mundo.

En 1969, Willard Boyle hizo muchos descubrimientos importantes, por ejemplo en relación con el desarrollo del primer láser de luz roja del mundo. Boyle nació en la lejana Nueva Escocia, en Canadá, y fue educado en casa por su madre hasta la edad de 15 años. Empezó a trabajar en los laboratorios Bell en 1953, y en la década de los sesenta se unió a los 400 000 científicos norteamericanos cuyos esfuerzos se orientaron a llevar al primer hombre a la Luna el 20 de julio de 1969.

Una cámara fotográfica para todos

Las ventajas del sensor de imagen electrónica rápidamente se hicieron evidentes. En 1970, casi un año después de la invención, Smith y Boyle montaron un CCD en una cámara de vídeo por primera

vez. En 1972, la empresa estadounidense Fairchild construyó el primer sensor de imagen de 100 x 100 píxeles, que entró en producción unos años más tarde. En 1975, los propios Boyle y Smith construyen una cámara de vídeo digital con resolución suficientemente elevada para administrar las emisiones de televisión.

No sería hasta 1981 cuando la primera cámara con CCD integrado aparece en el mercado. Aunque aquellas cámaras eran muy voluminosas y primitivas, si las comparamos con las cámaras actuales, fue el inicio de la digitalización de la fotografía. Cinco años más tarde, en 1986, llegó el primer sensor de imagen de 1,4 megapíxeles y nueve años después, en 1995, aparece la primera cámara fotográfica digital del mundo. Los fabricantes de cámaras todo el mundo inundaron rápidamente el mercado con productos cada vez más pequeños y baratos.

Con las cámaras equipadas con sensores de imagen en lugar de película, había terminado una era en la historia de la fotografía que comenzó en 1839 cuando Louis Daguerre presentó su película fotográfica en la Academia Francesa de Ciencias.

En el campo de la fotografía cotidiana, las cámaras digitales han sido un éxito comercial. Últimamente el CCD ha sido desafiado por otra tecnología: el CMOS o Complementary Metal Oxide Semiconductor; una tecnología que surgió al mismo tiempo que el CCD. Ambos están basados en el efecto fotoeléctrico, pero mientras que los electrones almacenados en un CCD circulan en línea para ser leídos fuera, cada fotocélula en un CMOS se lee en el sitio.

El CMOS consume menos energía por lo que las baterías duran más tiempo y durante mucho tiempo resultaba más barato. Sin embargo, también hay que tener en cuenta sus mayores niveles de ruido y la pérdida de calidad de imagen, y en consecuencia, no es lo suficientemente sensible para muchas aplicaciones avanzadas. Los CMOS se utilizan a menudo para los dispositivos fotográficos de los teléfonos móviles y para otros tipos de la fotografía. Ambas tecnologías, sin embargo, experimentan un desarrollo constante y para muchas aplicaciones son intercambiables.

Hace tres años, el CCD superó el límite de los 100 megapíxeles, y aunque la calidad de imagen no depende sólo del número de píxeles, la superación de este límite se ha considerado en la fotografía digital un paso más hacia el futuro. Hay quienes opinan que el futuro pertenece a CMOS en lugar de al CCD. Sin embargo otros mantienen que ambas tecnologías seguirán complementándose durante mucho tiempo.

Píxeles sensibles a la luz

Inicialmente nadie predijo que el CCD pasaría a ser indispensable en el campo de la astronomía. Sin embargo gracias a la tecnología digital la cámara gran angular del telescopio espacial Hubble puede enviar a la Tierra las imágenes más sorprendentes (figura 5). El sensor de la cámara inicialmente

consistía en sólo 0.64 megapíxeles, aunque como fueron interconectados cuatro sensores, ofrece un total de 2,56 megapíxeles. Esto era mucho en la década de 1980 cuando fue diseñado el telescopio espacial. Hoy el satélite Kepler ha sido equipado con un sensor de 95 megapíxeles con el que se esperan descubrir planetas análogos a la Tierra alrededor de estrellas como el Sol.

Rápidamente los astrónomos se dieron cuenta de las ventajas del sensor de imagen digital. Abarca todo el espectro de luz, desde los rayos x hasta el infrarrojo.

Es mil veces más sensible que la película fotográfica.

De 100 partículas luminosas entrantes un CCD atrapa

hasta 90, mientras que un plato fotográfico o el ojo humano sólo detecta uno. En unos pocos segundos se reúne la luz de objetos distantes, un proceso que antes habría tomado varias horas. El efecto es directamente proporcional a la intensidad de la luz, cuanto mayor sea la cantidad de luz, mayor sea el número de electrones.

En 1974 el primer sensor de imagen ya se había utilizado para tomar fotografías de la Luna, las primeras imágenes astronómicas tomadas con una cámara digital. Con la velocidad del rayo, astrónomos adoptaron esta nueva tecnología; en 1979 se montó una cámara digital con una resolución de 320 x 512 píxeles en uno de los telescopios en Kitt Peak en Arizona, Estados Unidos.

Hoy en día cada vez que se utiliza la fotografía, vídeo o televisión, los sensores de imagen digital están involucrados en el proceso. Son útiles para la vigilancia en la tierra y en el espacio. Además, se utiliza tecnología CCD en una serie de aplicaciones médicas, por ejemplo para obtener imágenes del interior del cuerpo humano, tanto para el diagnóstico como para operaciones quirúrgicas. El sensor de imagen digital se ha convertido en un instrumento ampliamente utilizado al servicio de la ciencia tanto en el fondo de los océanos como en el espacio. Pueden revelar detalles finos en objetos muy distantes o en objetos extremadamente pequeños. Es una muestra de cómo los avances tecnológicos y científicos se entrelazan.



Figura 5. El CCD ha abierto los ojos de la ciencia a lo que antes era invisible. Una de las muchas fotos tomada por el Hubble.

LINKS AND FURTHER READING

More information about this year’s prizes, including a scientific background article in English, is to be found at the Royal Swedish Academy of Sciences’ website, <http://kva.se> and at <http://nobelprize.org> where you can also see the press conference as web-TV. Further information about exhibitions and activities concerning the Nobel Prizes is available at www.nobelmuseum.se.

Popular science

Smith, G.E. (2009) The invention and early history of the CCD. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 607, p. 1–6.

Janesick, J.R. (2002) Duelling Detectors. *SPIE’s oemagazine*, February, p. 30-33.

Janesick, J.R. (2001) Scientific Charge-Coupled Devices. *SPIE Press Monograph*, Vol. PM83.

Hecht, J. (1991) *City of Light: The Story of Fiber Optics*. Oxford University Press.

Su, F. (1990) Technology of our times: people and innovation in optics and optoelectronics. *SPIE Press*, p. 80–95.

Scientific articles

Kao, C.K. , Hockham, G.A. (1966) Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers-London* 113, p. 1151.

Boyle, W.S., Smith, G.E. (1970) Charge Couple Semiconductor Devices. *Bell System Technical Journal* 49, p. 587.

Links

www.fiber-optics.info

www.jyi.org/volumes/volume3/issue1/features/peterson.html

THE LAUREATES

<p>CHARLES KUEN KAO Happy Valley Hong Kong China www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Oral-History:Charles_Kao British and US citizen. Born 1933 in Shanghai, China. Ph.D. in Electrical Engineering 1965 from Imperial College London, UK. Director of Engineering of Standard Telecommunication Laboratories, Harlow, UK. Vice-chancellor, Chinese University of Hong Kong. Retired 1996. WILLARD STERLING BOYLE WallaceNova ScotiaCanada www.science.ca/scientists/scientistprofile.php?plD=129 Canadian and US citizen. Born 1924 in Amherst, NS, Canada. Ph.D. in Physics 1950 from McGill University, QC, Canada. Executive Director of Communication Sciences Division, Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA. Retired 1979.</p>	<p>GEORGE ELWOOD SMITH Barnegat New Jersey USA www.ieeeeghn.org/wiki/index/.php/Oral-History:George_E_Smith US citizen. Born 1930 in White Plains, NY, USA. Ph.D. in Physics 1959 from University of Chicago, IL, USA. Head of VLSI Device Department, Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA. Retired 1986.</p>	<p>STERLING BOYLEWallaceNova Scotia-Canada www.science.ca/scientists/scientistprofile.php?plD=129 Canadian and US citizen. Born 1924 in Amherst, NS, Canada. Ph.D. in Physics 1950 from McGill University, QC, Canada. Executive Director of Communication Sciences Division, Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA. Retired 1979.</p>
--	---	---