

# NUEVOS OJOS

## para ver el cielo

Héctor Hernández Toledo

NASA

La imagen clásica del astrónomo mirando a través del ocular de un telescopio ha desaparecido. En su lugar, el desarrollo de nuevos dispositivos, complejos sistemas de control y telescopios robot está revolucionando las técnicas de observación astronómicas.

### Introducción

Los avances en nuestro entendimiento del universo han estado fuertemente relacionados con nuestra capacidad para registrar y distinguir con detalle objetos cada vez más débiles en observaciones profundas del cielo.

Esta tendencia ha continuado a lo largo de la historia, desde la invención del telescopio y el uso que posteriormente le dio Galileo Galilei en 1609 para ver el cielo, hasta nuestros días, con nuevas herramientas tecnológicas que permiten nuevos descubrimientos y a su vez estimulan el desarrollo de mejores tecnologías de detección.

En el siglo XX la astronomía óptica alcanzó un gran impulso, debido entre otras cosas a: 1) la construcción de varios de los mayores observatorios en sitios aislados de diferentes partes del mundo, como el telescopio Hooker, en el observatorio de Mount Wilson, en los Estados Unidos, donde años más tarde, en 1929, Hubble y Humason descubrieron la evidencia de la expansión del universo; 2) el desarrollo de la astronomía en ondas de radio (radioastronomía); 3) el éxito de los programas espaciales; y 4) la llegada de una variedad de dispositivos fotoelectrónicos, como fotoceldas, tubos fotomultiplicadores y cámaras de televisión, producto del rápido desarrollo de la microelectrónica que aceleró dramáticamente las posibilidades de detección de objetos astronómicos

En el siglo XX la astronomía óptica alcanzó un gran impulso, debido entre otras cosas a la construcción de varios de los mayores observatorios en sitios aislados de diferentes partes del mundo, como el telescopio Hooker, en el observatorio de Mount Wilson, en los Estados Unidos



en formato susceptible de ser manejado por computadora.

La última década del siglo XX quizás debería ser reconocida como la era de los semiconductores, que ha tocado prácticamente todos los aspectos de nuestra vida diaria, desde las computadoras personales hasta los recientemente desarrollados telescopios robot. En la actualidad prácticamente toda la investigación astronómica se lleva a cabo con equipo fotoelectrónico, que convierte las más débiles

señales de radiación de objetos distantes en señales eléctricas que pueden ser digitalizadas para analizarse en una computadora. El desarrollo alcanzado en la capacidad de cómputo es ahora fundamental no sólo para obtener información que proviene del espacio, sino también para analizar, interpretar y modelar la prodigiosa cantidad de datos que producen estos nuevos instrumentos.

El notable aumento en nuestra capacidad de generar datos en los últimos 15 años se debe al desarrollo de nuevos detectores electrónicos de estado sólido, optimizados para trabajar con la nueva generación de telescopios. Ahora es posible alcanzar

los límites naturales de sensibilidad y resolución de estos instrumentos en diferentes longitudes de onda, haciendo patente la necesidad de telescopios con área colectora cada vez mayor, tanto en tierra como en el espacio.

El mensaje del universo está codificado en forma de luz, y es al detectar y analizar esta luz, emitida por los objetos en el espacio en diferentes regiones del espectro electromagnético, que los astrónomos pueden aprender sobre su distancia, movimiento, temperatura, densidad y composición química.

### La luz, en el umbral de la astronomía

La luz puede viajar durante miles de millones de años antes de llegar a nuestros telescopios. En este sentido, la astronomía

no es como otras ciencias, donde podemos disponer de muestras en un laboratorio o interactuar físicamente con su ambiente para estudiarlas en detalle.

Casi todo lo que sabemos sobre el universo ha sido inferido a partir del estudio de la luz que es emitida por diferentes objetos en el espacio. Para estudiar el cosmos, los astrónomos colectan y analizan cada fotón de luz proveniente de objetos distantes.

A partir del entendimiento de las leyes de la física que gobiernan la luz es posible extraer la información que ésta trae consigo. El mensaje del universo está codificado en forma de luz, y es al detectar y analizar esta luz, emitida por los objetos en el espacio en diferentes regiones del espectro electromagnético, que los astrónomos pueden aprender sobre su distancia, movimiento, temperatura, densidad y composición química.

### Del ojo a los detectores electrónicos

Los vestigios arqueológicos y documentales nos sugieren que la actividad de observar el cielo fue determinante para el funcionamiento de diversas sociedades. En Mesoamérica, el registro de dicha actividad fomentó el desarrollo de un sistema calendárico que permitió organizar todas sus activida-



El telescopio Hooker se encuentra en el observatorio de Mount Wilson, en los Estados Unidos.

des. A partir del reconocimiento de fenómenos importantes en el firmamento, los pueblos mesoamericanos elaboraron criterios basados en la estructura de su calendario para establecer alineaciones de templos, palacios e incluso de ciudades enteras (Figura 1).

### La emulsión fotográfica

Casi toda la astronomía moderna, incluyendo la astronomía de rayos X y la radioastronomía, depende en buena medida de la capacidad de transformar la información obtenida en forma gráfica, para visualizarla y analizarla. La astronomía comenzó de manera natural siendo una ciencia óptica, y no es de sorprender que la astronomía óptica se expandiera rápidamente con la llegada de la emulsión fotográfica.

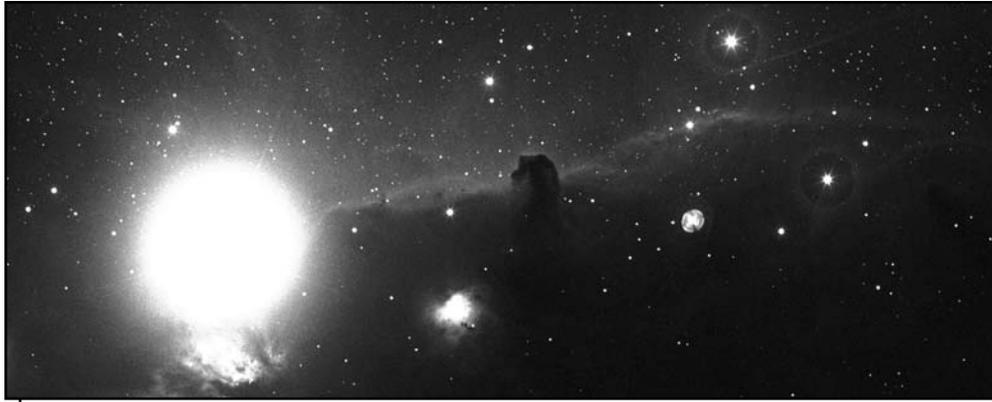
La permanencia de la emulsión fotográfica como medio de detección a lo largo de casi todo el siglo XX se debió a que proporcionaba un registro permanente de información, de bajo costo, capaz, a diferencia del ojo humano, de acumular luz por periodos largos y por tanto detectar objetos de brillo débil, y también por su facilidad de almacenaje.

A pesar de su baja eficiencia para registrar eventos y de su respuesta fuertemente no lineal a diferentes niveles de luz incidente, el impacto de la placa fotográfica en el desarrollo de la astronomía fue fundamental. Con ella fue posible extender la investigación astronómica al dominio de la astrofísica cuantitativa, y ya durante la primera mitad del siglo XX el desarrollo de nueva instrumentación optimizada para detectores fotográficos generó una gran cantidad de descubrimientos, además de proveer de un registro permanente que podía ser reanalizado posteriormente para estudiar cómo cambiaban con el tiempo diferentes objetos astronómicos.

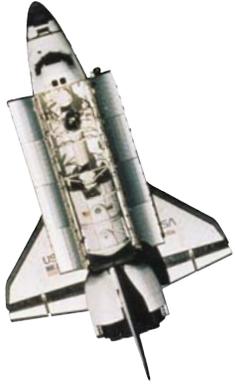
Cuando apareció la primera edición de esta revista *Ciencia*, la emulsión fotográfica era todavía el principal medio para capturar imágenes en astronomía. La emulsión fotográfica con soporte de vidrio fue ampliamente utilizada en aplicaciones astronómicas que requerían registrar grandes áreas del cielo (campo amplio), como ocurrió con las placas fotográficas del Observatorio Astrofísico de Tonantzintla, en Puebla. La Figura 2 ilustra una sección del complejo molecular de Orión en la dirección de la nebulosa Cabeza de Caballo. Esta imagen fotográfica fue obtenida por el



**Figura 1.** Códice de Dresden. El calendario maya consistía en tres diferentes cuentas de tiempo que transcurrían simultáneamente: el sagrado, o Tzolkin, de 260 días; el civil, o Haab, de 365 días, y la "cuenta larga", de 144 mil días.



**Figura 2.** Sección del complejo molecular de Orión en la dirección de la nebulosa Cabeza de Caballo. La placa fotográfica original fue obtenida por G. Haro con la cámara Schmidt del Observatorio Astrofísico de Tonantzintla, y abarca 5 por 5 grados cuadrados en el cielo (20 por 20 centímetros), con una escala de 96 segundos de arco por cada milímetro de la placa fotográfica. Las líneas delgadas que emanan de la estrella son patrones de difracción producidos por los soportes en el tubo del telescopio. El anillo circular blanco se produce por reflexión de luz de la estrella en las paredes del soporte de vidrio de la placa fotográfica.



Sección del complejo molecular de Orión en la dirección de la nebulosa Cabeza de Caballo (Ryan Steinberg y Family, Adam Block, NOAO, AURA, NSF).



astrónomo Guillermo Haro con la cámara Schmidt que actualmente se encuentra en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica en la misma Tonantzintla.

Guillermo Haro desarrolló una técnica de observación novedosa que utilizaba película fotográfica de amplia sensibilidad espectral en la que ligeros desplazamientos del telescopio entre exposiciones con filtros sensibles a diferentes colores le permitieron, junto con sus colaboradores mexicanos, Enrique Chavira y Braulio Iriarte, descubrir y catalogar un número importante de objetos azules, entre los cuales se encontraba una fracción importante de cuasares (cuerpos celestes de gran luminosidad que emiten grandes cantidades de radiación, y que se consideran el tipo de astro más alejado en el universo) que fueron designados con las siglas TON (por el observatorio de Tonantzintla).

Sin embargo, la era de la emulsión fotográfica en astronomía terminó. Las últimas imágenes en placa fotográfica tomadas en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California, se obtuvieron en 1992 (Moreno-Corral, 2007).

### Hacia los detectores electrónicos

El trabajo pionero de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, e investigaciones subsecuentes en el periodo 1900-1930, sentaron las bases para el desarrollo de la mecánica cuántica, y también para una nueva generación de detectores de luz. En las décadas de 1940 y 1950 aparecieron nuevas alternativas para el registro de imagen, ahora de naturaleza electrónica.

El tubo fotomultiplicador (Figura 3) fue perfeccionado para obtener mediciones precisas de brillo en objetos astronómicos. En este dispositivo, los fotones inciden sobre un cierto material que responde, gracias al efecto fotoeléctrico, emitiendo electrones. Estos electrones son reenocados para chocar con otras superficies que generan a su vez más electrones, y el proceso se repite en varias etapas hasta que una superficie final colecta la cascada de electrones producidos a partir del impacto de un solo fotón. Este proceso de amplificación de señal, manipulable a través de computadora, estimuló el desarrollo de las comunicaciones remotas y satelitales. Los fotomultiplicadores, sin embargo, tenían una gran desventaja para producir imagen, ya que sólo permitían observar regiones minúsculas del cielo, debido a su escasa capacidad de visión panorámica.

Paralelamente al tubo fotomultiplicador, se desarrollaron tubos de televisión e intensificadores electrónicos de imagen,

útiles para la detección de imágenes de muy baja intensidad en astronomía. Se trataba de combinar los largos tiempos de exposición que permitían los fotomultiplicadores con la capacidad de visión panorámica de las cámaras de televisión.

Las cosas comenzaron a tomar un rumbo distinto a finales de los años cincuenta, con la puesta en operación de los primeros circuitos integrados, que ocurrió sólo diez años después de la invención del transistor en los laboratorios Bell, en 1948. En los años sesenta las técnicas de manufactura permitieron producir circuitos integrados cada vez más pequeños; posteriormente fue posible fabricar fotodiodos



Figura 3. Un tubo fotomultiplicador.

con eficiencias cuánticas hasta del 90 por ciento, comparadas con la de la emulsión fotográfica, que alcanzaba sólo un 5 por ciento en el mejor de los casos, y un 10 a 20 por ciento en el caso de los fototubos.

Además de la astronomía, las aplicaciones de los CCD van desde cámaras caseras de video hasta cámaras profesionales de televisión; percepción remota, robótica, medicina y ciencia en general

En los últimos 20 años, el vigoroso desarrollo de nuevos detectores de luz a base de materiales semiconductores ha producido dispositivos con propiedades muy superiores para generar imagen en forma digital. Los dispositivos de inyección de carga (CID, por las siglas en inglés de *charge injection devices*), los arreglos de fotodiodos (PDA, del inglés *photodiode array*) y los dispositivos de transferencia de carga (CCD, del inglés *charge-coupled devices*) fueron los más exitosos. Entre ellos, los CCD han recibido la mayor atención en los últimos años debido a sus características superiores para uso en sistemas de obtención cuantitativa de imagen.

### Detectores de transferencia de carga (CCD)

Hacia finales de 1969 dos investigadores de los laboratorios Bell, Willard S. Boyle y George E. Smith (Figura 4), estaban explorando nuevas maneras de producir imagen a base de detectores de estado sólido de silicio con la idea de desarrollar la telefonía de imagen. Este concepto requería de una cámara de estado sólido integrada en el receptor telefónico, con el fin de que los interlocutores pudieran verse uno al otro. Se trataba de un método fuertemente innovador que estaba destinado a cambiar los procesos de captura y producción de imagen.

Las primeras aplicaciones de los CCD en astronomía ocurrieron en la década de los setenta. Desde entonces se han convertido en los dispositivos dominantes para detectar radiación óptica en observatorios profesionales, y su distribución está alcanzando rápidamente a los astrónomos aficionados. Su popularidad se debe a su capacidad de integración por largos periodos de tiempo con un comportamiento lineal, y sin que sus elementos constitutivos se saturen, lo que permite detectar objetos extremadamente débiles; a su alta eficiencia para detectar fotones de diversas longitudes de onda, y a su versatilidad para formar arreglos bidimensionales para generar imágenes de alta resolución (con píxeles típicamente entre 6 y 30 micrómetros). Son dispositivos muy compactos, estables y que requieren poca corriente de operación. Han logrado producirse con excelente sensibilidad que responde a intervalos cada vez mayores de longitudes de onda. No producen distorsión de imagen, ya que todos los elementos de imagen en el arreglo de silicio están fijos por construcción.

El principio básico de detección de los CCD también está relacionado con el efecto fotoeléctrico. La luz que incide sobre un material semiconductor (silicio, por ejemplo) libera electrones, así como los “espacios” dejados por éstos; normalmente se los denomina “pares electrón-hoyo”. Los electrones pueden ser atrapados en pozos de potencial producidos por arreglos de electrodos pequeños. Ahí se acumulan hasta que su suma total es leída acoplando electrodos de detección a un electrodo de lectura de salida.



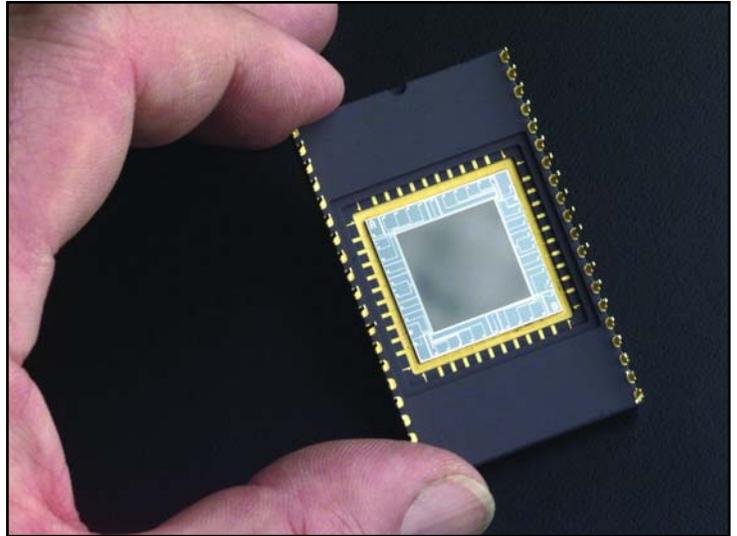
**Figura 4.** Willard S. Boyle y George E. Smith, inventores del dispositivo de transferencia de carga, CCD, en los laboratorios Bell AT&T en Murray Hill, Nueva Jersey, Estados Unidos.

Típicamente, los dispositivos de imagen de silicio se procesan sobre pastillas de silicio de entre 10 y 20 centímetros de diámetro, con un espesor de 500 micrómetros (Figura 5), y es posible formar un arreglo de tales electrodos, de modo que cada uno desarrolle una carga que es proporcional a la intensidad de la radiación que incide sobre él. Así, es posible generar una imagen análoga de la imagen óptica original a partir de la distribución espacial de las cargas. Luego, es necesario coleccionar esta imagen análoga y transformarla a una forma utilizable. Esto se logra a través del acoplamiento de carga. En este tipo de esquema, el sistema requiere ciclos de voltaje aplicados a los electrodos para mover la carga (CCD de fase). La separación de paquetes individuales de carga se mantiene durante este proceso y no ocurre mezcla en el proceso.

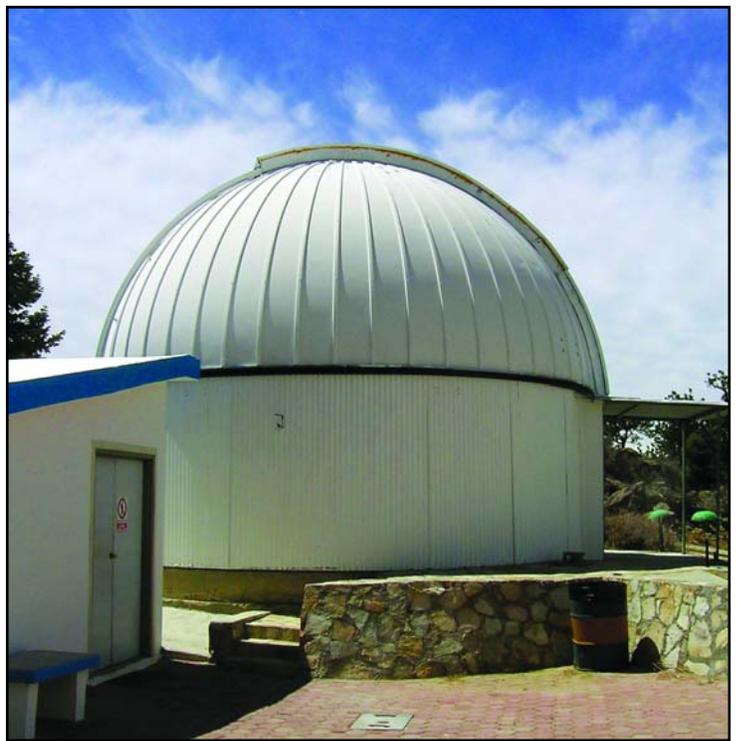
Es necesario enfriar un CCD para reducir lo que se conoce como “señal oscura”: electrones que pueden generarse en el material semiconductor a la temperatura ambiente, pero que no provienen de ninguna fuente de radiación cósmica. Utilizando nitrógeno líquido y operando el detector a temperaturas de  $-100$  grados Celsius es posible alcanzar tiempos de integración que van desde minutos hasta horas, en contraste con lo que sucedía con la emulsión fotográfica, en la que un tiempo exposición similar produciría una imagen totalmente ennegrecida que hacía imposible recobrar la información.

En la actualidad los CCD en operación alcanzan tamaños típicos de 2k por 4k (2 048 por 4 096 píxeles) e incluso hay tamaños mayores para aplicaciones de imagen panorámica o de gran tamaño angular. Los CCD pueden operarse en forma de mosaicos para abarcar más área proyectada en el cielo. Algunos de los mosaicos más grandes en operación en la actualidad (30 CCD de 2 048 por 2 048 píxeles) están siendo utilizados en el proyecto Sloan de Registro Digital del Cielo en el hemisferio norte.

Además de la astronomía, las aplicaciones de los CCD van desde cámaras caseras de video hasta cámaras profesionales de televisión; percepción remota, robótica, medicina y ciencia en general. Sólo han bastado unos cuantos años desde la aparición del primer dispositivo de 100 por 100 píxeles para encontrar una amplia gama de aplicaciones en las ciencias.



**Figura 5.** Un dispositivo de transferencia de carga (CCD). Nótese el pequeño tamaño de estos detectores de estado sólido.



Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California.

En la tabla siguiente se muestra el tipo de objetos astronómicos que ha sido posible estudiar con más detalle gracias a la incorporación de los CCD en astronomía.

El Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California, comenzó la operación regular con CCD a partir de 1987. En la actualidad, ningún observatorio importante carece de una cámara CCD.

**CCD: tendencias para el futuro**

El progreso en el diseño de circuitos integrados y técnicas de fabricación ha dado como resultado un crecimiento continuo en el tamaño y eficiencia de los detectores de estado sólido. En la actualidad, los CCD operados a muy bajas temperaturas están muy cerca de alcanzar sus límites naturales de detección en virtualmente todo tipo de aplicaciones, desde los rayos X hasta las radiaciones con longitud de onda de un micrómetro.

Se están desarrollando detectores con nuevos diseños conceptuales: entre ellos, detectores superconductores de unión túnel, que pue-

den operar desde el ultravioleta, infrarrojo y hasta los rayos X, y que pueden detectar fotones individuales con una respuesta rápida. Su principio de operación está basado en un tipo de unión especial que contiene dos capas superconductoras separadas por una capa aislante extremadamente delgada. Debido a su naturaleza onda-partícula, y por el efecto túnel de la mecánica cuántica, los electrones pueden cruzar la unión y por tanto puede fluir una corriente a través de la unión a pesar de la presencia de una capa aislante.

Estos detectores consisten en nuevos materiales superconductores dentro de un campo magnético. Se enfrían a aproximadamente una décima de la temperatura crítica del superconductor (normalmente debajo de 1 kelvin). Un fotón absorbido en el superconductor puede separar uno de los pares electrón-hoyo. Esto requiere una energía de un milielectrón-volt, comparado con un electrón-volt para la producción de pares en un CCD actual. Potencialmente, estos dispositivos podrán detectar fotones con longitudes de onda hasta en la región milimétrica.

**Procesamiento y visualización de imágenes CCD: del telescopio a Monet**

Un aspecto fundamental directamente ligado al uso de los CCD en astronomía son las computadoras y los dispositivos de visualización de imágenes.

Tipo de radiación	Temperatura característica	Objetos que emiten este tipo de radiación
<b>Rayos X</b>	$10^6$ - $10^8$ kelvins	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regiones con gas caliente chocado</li> <li>• Gas en cúmulos de galaxias</li> <li>• Estrellas de neutrones</li> <li>• Remanentes de supernova</li> <li>• Coronas estelares</li> </ul>
<b>Ultravioleta</b>	$10^4$ - $10^6$ kelvins	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remanentes de supernova</li> <li>• Estrellas muy calientes</li> <li>• Cuasares</li> </ul>
<b>Visible</b>	$10^3$ - $10^4$ kelvins	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planetas</li> <li>• Estrellas</li> <li>• Galaxias</li> <li>• Nebulosas de reflexión</li> <li>• Nebulosas en emisión</li> </ul>
<b>Infrarrojo</b>	$10$ - $10^3$ kelvins	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrellas frías</li> <li>• Regiones de formación de estrellas</li> <li>• Polvo interestelar calentado por luz estelar</li> <li>• Planetas</li> <li>• Cometas</li> <li>• Asteroides</li> </ul>

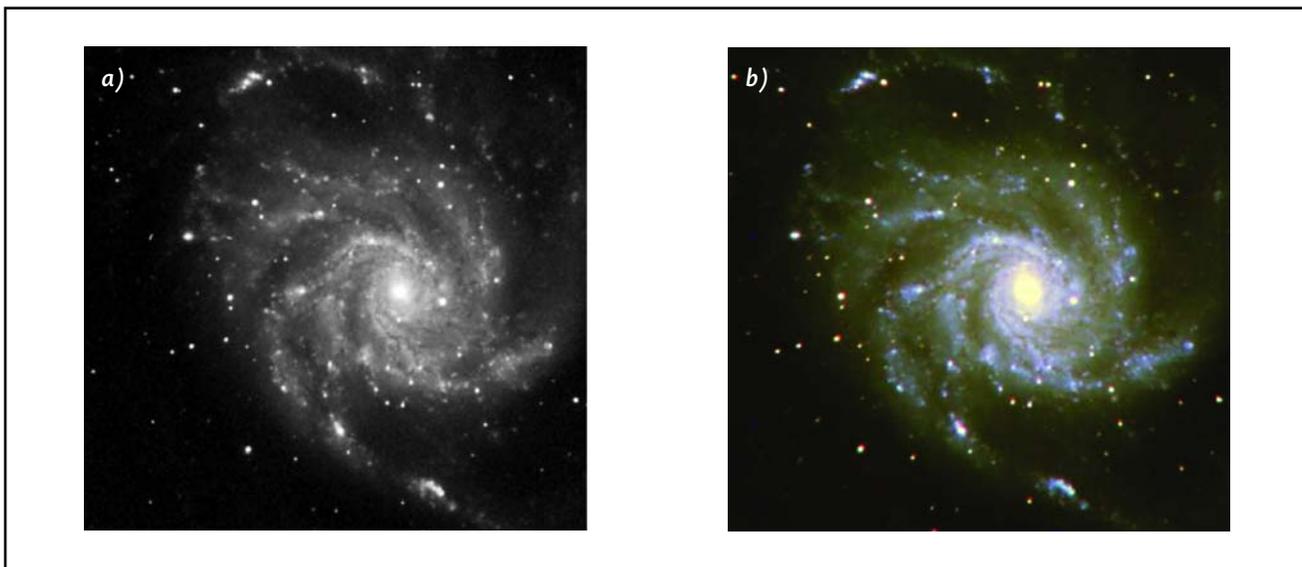
Las señales digitales registradas en un CCD necesitan ser transformadas y visualizadas apropiadamente para llevar a cabo diferentes procesos de evaluación y análisis. Estos procesos requieren un conocimiento detallado de las diferentes componentes del CCD. En la práctica, muchas de estas transformaciones se llevan a cabo sobre las imágenes mismas, a través de un proceso matemático de manipulación del arreglo bidimensional (coordenadas  $x$  y  $y$ ) de números que representan la intensidad sobre cada pixel del CCD. Esto permite llevar a cabo la corrección de propiedades como la sustracción de la corriente oscura o emisión de electrones.

Cuando la distribución de brillos en una imagen CCD se representa en colores arbitrarios, ésta se conoce como “de color falso”. También es posible construir imágenes en color “real” escalando o balanceando apropiadamente las imágenes CCD obtenidas con diferentes filtros. Sin embargo, el uso de este término requiere cuidado, pues aun cuando se trata de luz visible, ésta ha sido adquirida con la combinación de filtros ópticos y detectores con sensibilidades muy diferentes a las del ojo humano.

Las figuras 6a y 6b muestran imágenes CCD de la galaxia espiral M101 obtenidas en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir con el telescopio de 0.84 metros de

diámetro, usando la cámara de campo amplio SOPHIA (Sistema Óptico Para Hacer Imágenes Astronómicas) y un CCD de 1 024 por 1 024 pixeles de 16 bits. La combinación del telescopio, el detector y las condiciones locales de la atmósfera en el observatorio dieron como resultado imágenes con una resolución de 2 segundos de arco. La sección rectangular presentada tiene un tamaño angular de 14 por 11 minutos de arco.

La imagen del lado izquierdo utiliza un escalamiento especial en grises para acomodar el intervalo dinámico de la imagen CCD a los niveles de intensidad accesibles en la pantalla de la computadora, aplicando una transformación que permite apreciar simultáneamente detalles de muy alto brillo en la región central y de bajo brillo en la partes externas de la galaxia. La imagen a la derecha ilustra el resultado de la combinación de las imágenes de los filtros rojo, verde y azul. Esta representación en color se conoce como RGB (Red, Green and Blue), por los colores involucrados.



**Figura 6.** M101 es una galaxia gigante (casi el doble del tamaño de nuestra galaxia, la Vía Láctea) que se halla a 25 millones de años luz de la Tierra, en dirección de la constelación de la Osa Mayor. La combinación de colores resalta enormes regiones donde conviven cúmulos de estrellas jóvenes (azul) gas y polvo (filamentos rojizos) que permiten trazar en plenitud los brazos espirales. El color amarillento del fondo representa la estructura del disco, dominada por estrellas más viejas, como el Sol, que le dan ese tono. Estas imágenes fueron obtenidas por Héctor Hernández Toledo y Marco Moreno (Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, y Observatorio Astronómico Nacional, San Pedro Mártir).

La Figura 7 ilustra una región de formación estelar en nuestra galaxia, obtenida con el telescopio de 0.9 metros del Observatorio de Kitt Peak en Arizona, Estados Unidos, a la que se ha aplicado la representación RGB utilizando imágenes con filtros sintonizados en líneas de emisión nebular.

Es importante notar que la calidad de todas las imágenes adquiridas por telescopios en la Tierra se ve afectada por las condiciones atmosféricas. Aunque el telescopio de mayor apertura actualmente en operación (el Keck, de 10 metros) debiera ser capaz de resolver o distin-

guir objetos tan cercanos como 0.013 segundos de arco, en la práctica este límite nunca se alcanza. La atmósfera degrada el tamaño de las imágenes de 0.5 a 1 segundo de arco, aun en las mejores condiciones de observación (cielo oscuro, noches despejadas y poca turbulencia atmosférica, como es el caso del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir).

Sin embargo, las capacidades actuales de cómputo ya permiten controlar con gran precisión la forma de los espejos primarios y corregir los frentes de onda de luz que son deformados en su paso a través de la atmósfera antes de llegar al CCD. Estas correcciones forman parte de la óptica adaptativa. La Figura 8 ilustra cómo un sistema de óptica adaptativa compensa los efectos de turbulencia de la atmósfera, proporcionando imágenes

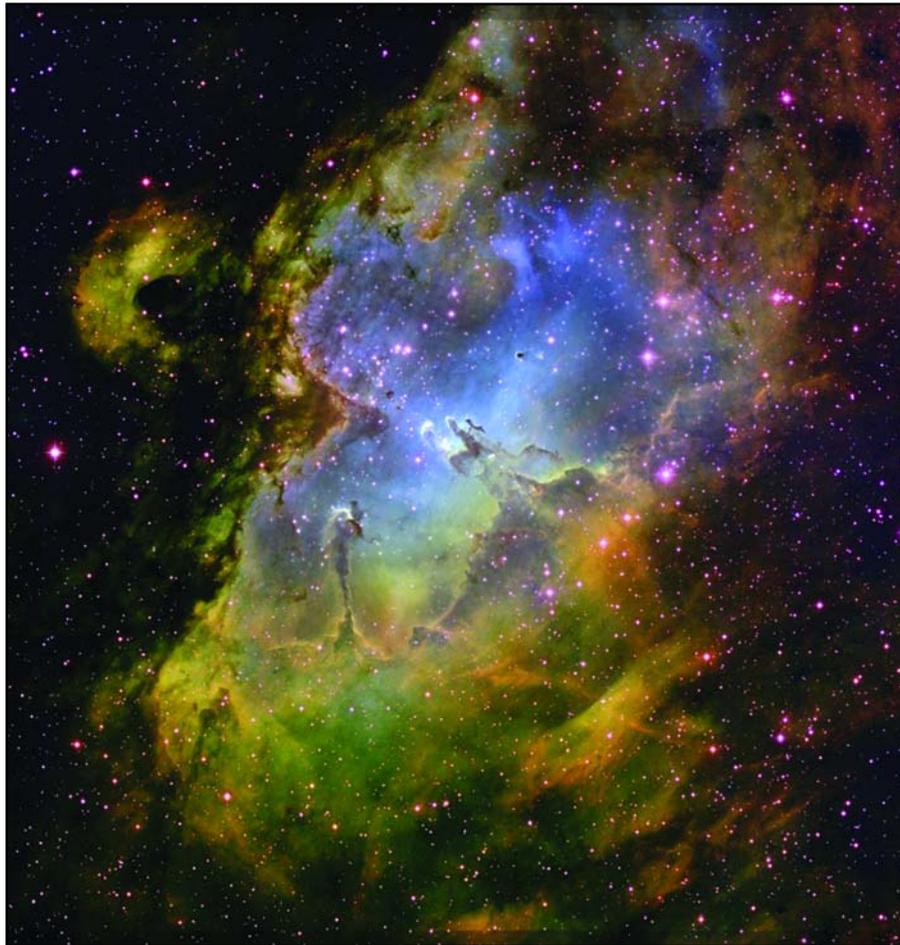
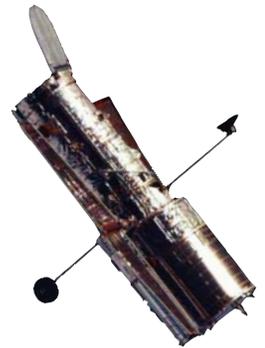


Galaxia M101 (NASA, ESA, CFHT, NOAO).

con mayor nitidez y resolución. Los sistemas de óptica adaptativa, en combinación con los telescopios de nueva generación, permiten ahora optimizar el uso de los CCD, generando imágenes con niveles de resolución sin precedente en astronomía.

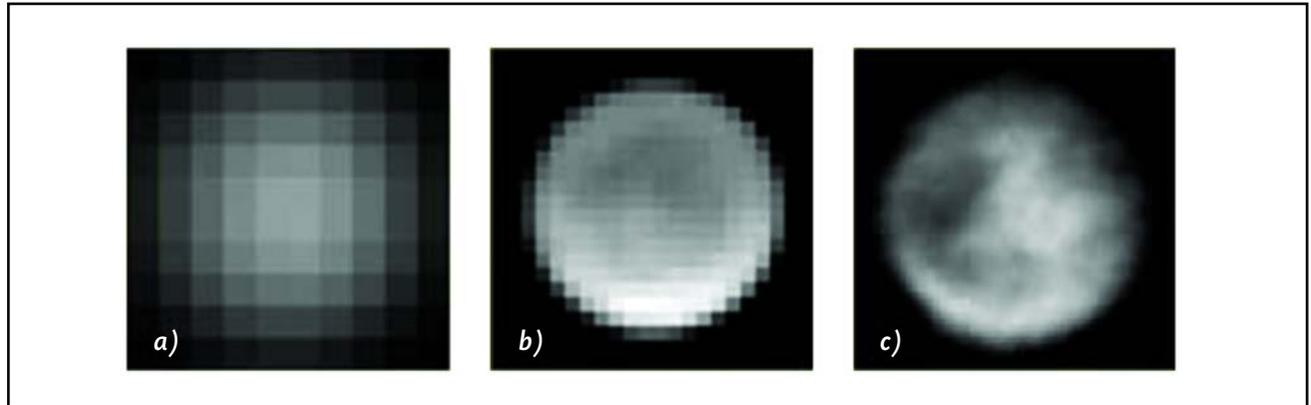
Otra forma de evitar los efectos de la turbulencia atmosférica es llevar a cabo observaciones fuera de la atmósfera. Tal es el caso de la nueva generación de satélites astronómicos en órbita. Los siguientes ejemplos ilustran el nivel de resolución angular que pueden alcanzar las observaciones con un CCD óptico en el telescopio Espacial Hubble fuera de la atmósfera, aunque se trate de un telescopio moderadamente pequeño (2.5 metros). Las imágenes también han sido representadas en color RGB.

Las capacidades actuales de cómputo ya permiten controlar con gran precisión la forma de los espejos primarios y corregir los frentes de onda de luz que son deformados en su paso a través de la atmósfera antes de llegar al CCD

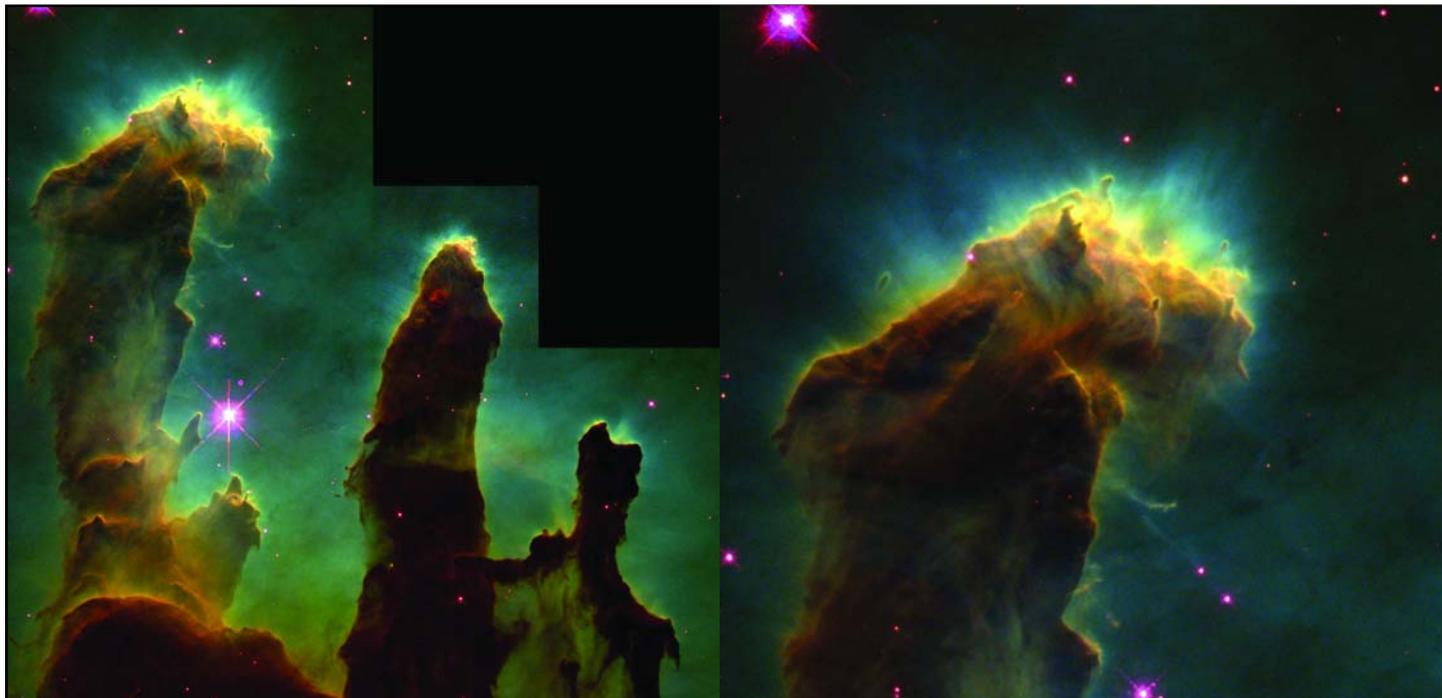


**Figura 7.** Imagen de la nebulosa del Águila (M16) adquirida con el telescopio de 0.9 metros de diámetro del Observatorio de Kitt Peak en Arizona, Estados Unidos. La nebulosa está asociada a un cúmulo abierto de estrellas a una distancia de 6 500 años luz de la Tierra, en dirección de la constelación de la Serpiente (T. A. Rector & B. A. Wolpa; NOAO; AURA; NSF).





**Figura 8.** Imagen del satélite natural más grande de Saturno, Titán. **a)** Imagen adquirida con un telescopio convencional (2 metros) en tierra. **b)** Imagen adquirida con el telescopio espacial Hubble (2.5 metros). **c)** Imagen adquirida con el telescopio Keck (10 metros) en tierra, utilizando un sistema de óptica adaptativa (Imagen del consorcio Center for Adaptive Optics, en Estados Unidos).



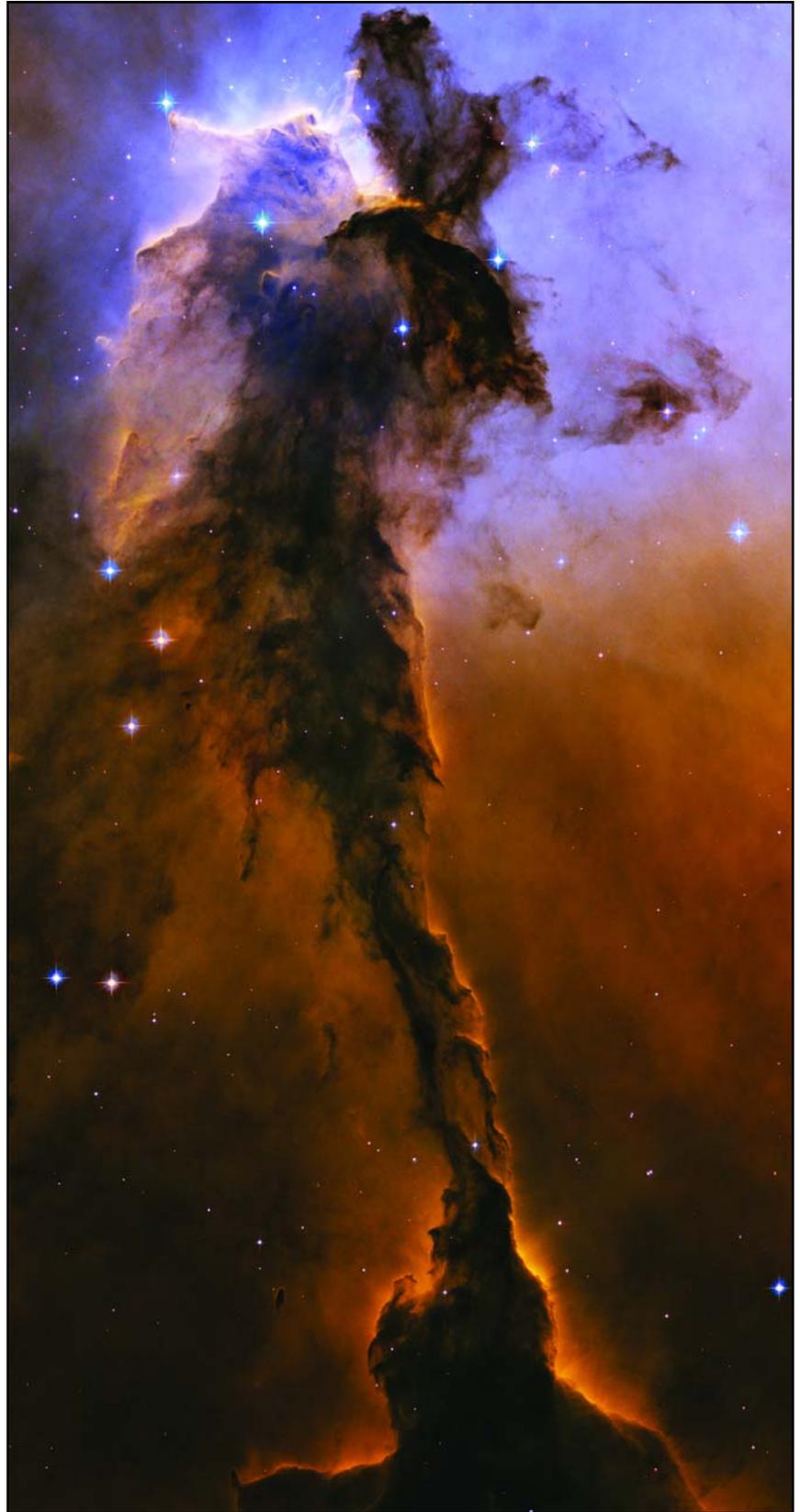
**Figura 9.** Detalle de la nebulosa del Águila (M16) vista por el Telescopio Espacial Hubble. Dentro de la nebulosa las estrellas se están forjando a partir de enormes columnas de gas y polvo. En la parte superior de las imágenes se notan estructuras filamentosas que emergen de los bordes de estas columnas. Las estrellas masivas cercanas calientan el gas y el polvo formando ondas de choque, que erosionan a la columna. El gas se comprime estimulando la formación de nuevas estrellas. La representación RGB utiliza el rojo (emisión de átomos de azufre una vez ionizado), el verde (emisión del hidrógeno) y el azul (emisión de átomos de oxígeno dos veces ionizado) (NASA, ESA, STScI, J. Hester y P. Scowen, Arizona State University).

Las imágenes del Hubble alcanzan diez veces mayor resolución que las obtenidas por cualquier telescopio en tierra (sin óptica adaptativa). El impacto que estos resultados han tenido en nuestro entendimiento de los procesos de formación estelar ha sido extraordinario. Estas imágenes permitieron visualizar por primera vez el proceso de erosión (fotoevaporación) que las nubes moleculares sufren debido a la radiación emitida por estrellas cercanas.

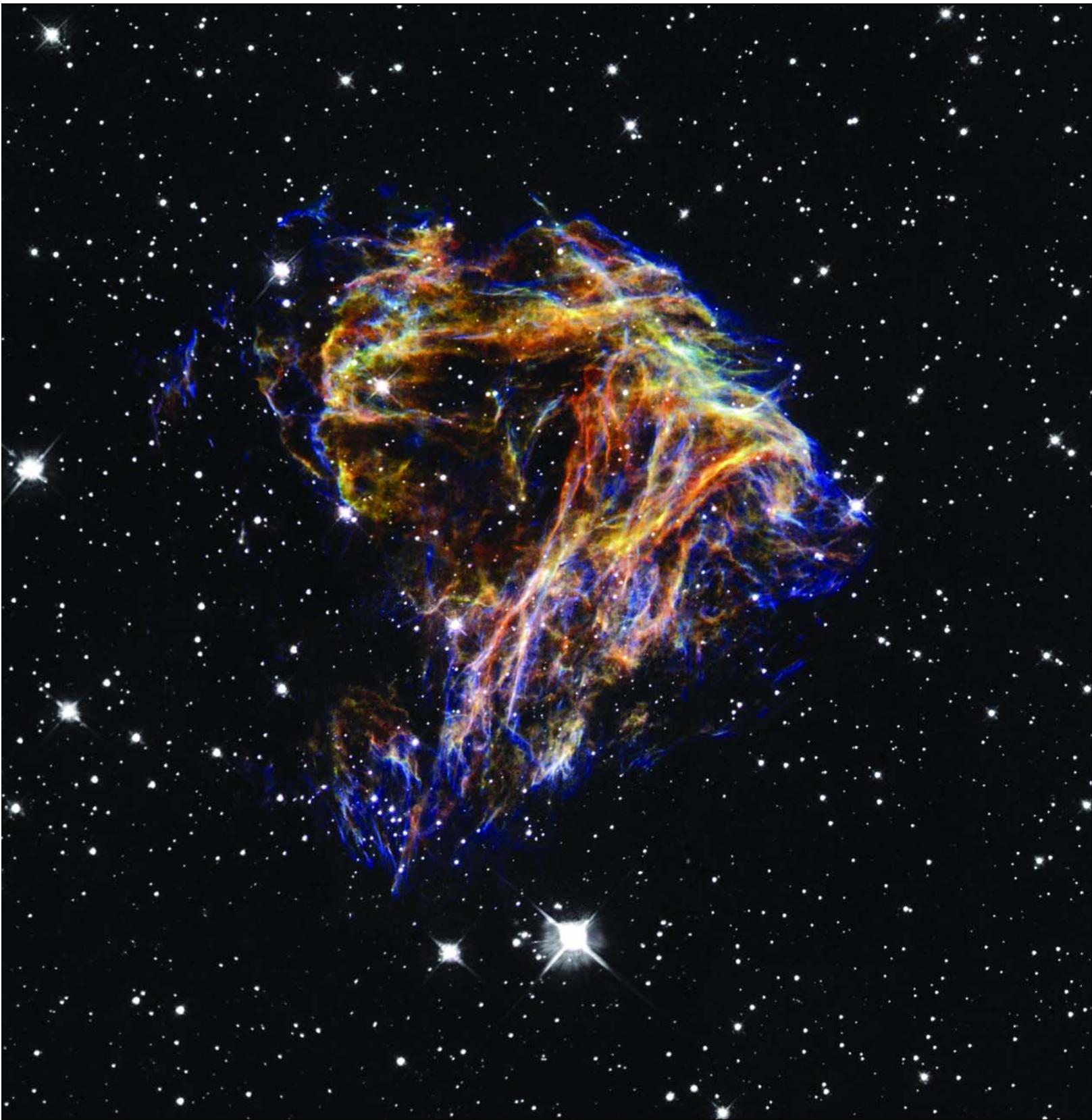
La Figura 10 presenta los restos de una estrella masiva después de la fase de supernova. Este remanente, llamado N49, se encuentra en una galaxia cercana, satélite de nuestra galaxia: la Nube Mayor de Magallanes. El material eyectado en forma de filamentos enriquecerá al gas circundante, que dará origen a nuevas generaciones de estrellas en un ciclo fundamental. Esta estructura filamentaria alberga a una potente estrella de neutrones que rota una vez cada ocho segundos, también conocida como *magnetar*, por contener un campo magnético miles de millones de veces más intenso que el de la Tierra. La combinación RGB presenta la contribución del gas excitado por choques de alta velocidad vistos a través de elementos como azufre ([SII]; transición de azufre una vez ionizado), oxígeno ([OIII]; transición del oxígeno dos veces ionizado) e hidrógeno en fase gaseosa (H $\alpha$ ). La imagen resultante fue superpuesta con una imagen en tonos de gris (también del telescopio espacial Hubble) que ilustra el campo de estrellas en dirección de N49.

### Reflexiones finales

En la era de la astronomía tecnológica, las altas demandas de funcionamiento impuestas por los astrónomos para el funcionamiento de los CCD los han hecho encontrar formas más eficientes de



Detalle de la nebulosa del Águila (M16) (NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)).



**Figura 10.** Imagen del telescopio espacial Hubble del remanente de Supernova N49, en la Nube Mayor de Magallanes (NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)).

implementarlos, incluyendo nuevos instrumentos contruidos para optimizar su uso. Cada vez más, estos instrumentos deben satisfacer una serie de estándares en los que las computadoras juegan un papel fundamental en el control, automatización y adquisición de imágenes.

En la actualidad, tan sólo la astronomía óptica produce datos, principalmente en forma de imágenes y espectros, en tal cantidad que es prácticamente imposible analizarlos por medios humanos. Algunos de los registros del cielo accesibles en la actualidad contienen aproximadamente 20 terabytes (millones de millones de bytes) de información, y se calcula que estos datos se incrementarán a una tasa promedio de cinco terabytes por año. La cantidad de información acumulada en astronomía en la actualidad es ya de varios miles de terabytes, y existen proyectos astronómicos como el Gran Telescopio Synóptico que generarán más de 5 terabytes de datos por día en los próximos años.

La misma tecnología de semiconductores que aportó una capacidad sin precedentes para la producción de imágenes astronómicas nos brinda ahora computadoras increíblemente rápidas y compactas, capaces de manipular estos datos. El acceso a esta información a través de “observatorios virtuales” está emergiendo como una nueva alternativa.

En resumen, el impacto que la nueva generación de detectores de luz basados en semiconductores ha producido en la astronomía óptica en los últimos años ha desencadenado la era de la astronomía tecnológica. La revolución producida por los dispositivos de transferencia de carga o CCD, capaces de detectar luz que es invisible para los ojos del ser humano y de producir imagen de bajo ruido en forma digital, es comparable con el salto tecnológico en detección que produjo el uso del telescopio por Galileo.

## Bibliografía

- Berry, R. y J. Burnell (2002), *The handbook of astronomical image processing*, Willmann-Bell.
- Bok, B. J. y P. F. Bok (1974), *The Milky Way*, Harvard University Press.
- Kitchin, C. R. (2003), *Astrophysical techniques*, Institute of Physics Publishing.
- Kutner, M. L. (2003), *Astronomy: a physical perspective*, Cambridge University Press.
- McLean, I. S. (1999), *Electronic and computer-aided astronomy*, John Wiley & Sons.
- Moreno-Corral, M. A. (comunicación privada).
- Roth, G. D. (editor) (1994), *Compendium of practical astronomy*, vol. 1, “Instrumentation and Reduction Techniques”, Springer-Verlag.

**Héctor Hernández Toledo** es doctor en astronomía; su línea de investigación es la astronomía extragaláctica y núcleos activos de galaxias. Actualmente es investigador del Instituto de Astronomía de la UNAM.  
hector@astroscu.unam.mx