

ASTRONOMÍA CON CCD

Francisco A. Violat Bordonau - fviolat@yahoo.es

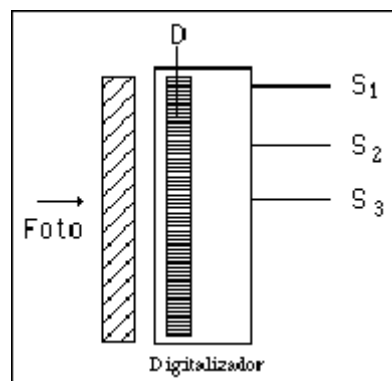
Las imágenes son ya esenciales en todos los trabajos astronómicos de investigación: baste recordar que muchos fenómenos no hubiesen sido descubiertos sin la fotografía por ser una técnica capaz de acumular *luz + tiempo*; entre los mismos se puede citar la estructura de las galaxias espirales, la presencia de millones de nuevas galaxias, las supernovas en galaxias distantes o las nebulosas más tenues, todos ellos objetos tan débiles que son invisibles a simple vista en los mayores telescopios sin ayuda fotográfica. Cuando los objetos a estudiar son tan débiles que la fotografía no puede casi captarlos -como los quásares más distantes o los arcos gravitatorios- se recurre a la microelectrónica: se ha comenzado a emplear en todas partes el chip CCD. El detector de imagen CCD fue desarrollado en 1970 por los investigadores norteamericanos Boyle y Smith de los *Laboratorios Bell*, en principio sin ninguna utilidad astronómica, y aplicado a la Astronomía en 1976.

Con el correr del tiempo la técnica fotográfica se está quedando obsoleta; ¿por qué?: sencillamente

porque la electrónica está ofreciendo un montón de ventajas sobre la fotografía convencional, algunas de las cuales son:

- las imágenes son analizables por medios digitales (ordenadores).
- un almacenamiento masivo de imágenes en un volumen mínimo (discos magnéticos, magneto-ópticos y ópticos en un futuro próximo), lo que no ocurre con los frágiles archivos en placas de vidrio de los centros profesionales clásicos.
- es capaz de obtener imágenes retocadas, mejoradas, coloreadas artificialmente, etc... proceso que cuesta bastante trabajo en la fotografía clásica.
- es fácil la transmisión de imágenes a larga distancia por medio de *Internet*, el correo electrónico, las líneas telefónicas y otros similares.
- la suma de varias imágenes en una (adición electrónica) posibilita efectuar exposiciones "virtuales" de varias horas: así en enero de 1994 un grupo de 9 tomas de 25 minutos cada una (exposición virtual de 3,75 horas) permitió la captura del cometa Halley, con un brillo de 26ª magnitud, cuando estaba más allá de los 2.800 millones de kilómetros.

¿Cómo se efectúa el paso de imagen fotográfica (contenido analógico) a imagen digital (contenido digital)?, el proceso es bien sencillo y lo represento en este ejemplo simplificado:



dada una imagen fotográfica ya revelada y con una alta resolución (una buena fotografía) por medio de un detector se lee punto a punto y línea a línea toda la imagen; esto puede lograrse

por medio de una cadena de sensores (fotodetectores) que convierten cada nivel de brillo de la imagen original (variaciones analógicas) en un impulso eléctrico proporcional al brillo de cada punto (valores digitales). Estos impulsos van a almacenarse en diferentes posiciones de memoria que registran su valor y posición, según dos ejes ortogonales x e y; cuando el detector ha barrido completamente la imagen (con una resolución que depende del número de detectores capaces de leer la imagen en cada línea) tenemos un registro digital de la misma: un conjunto ordenado de valores numéricos que corresponden a la *posición* y *brillo* de cada uno de los puntos leídos en la imagen analógica. Así en un detector capaz de leer sólo 10 puntos por línea la resolución de la imagen digitalizada será la mitad de otro detector capaz de leer 20 puntos por línea; de la misma forma si el detector es capaz de leer 100 puntos por cada línea de barrido la resolución sería 10 veces superior a la del primer detector y sólo 5 que la del segundo. Un buen ejemplo de digitalizador simple lo encontramos en el caso de un *telex*: por la entrada (indicada en la parte izquierda del esquema) se introduce el material gráfico a reproducir que puede ser texto, fotografías, diagramas o cualquier imagen que refleje la luz. Un dispositivo mecánico adecuado toma y arrastra de manera homogénea el material a reproducir, de modo que pasa de forma adecuada bajo la cadena de fotodetectores; éstos leen línea a línea (cada una formada por un número determinado y fijo de puntos) el brillo de la imagen, transformando en impulsos eléctricos de valor variable (según el brillo de cada punto) cada zona fotográfica. Si la lectura ha sido homogénea en el arrastre (algo siempre deseable) al final el detector emite información digital en varias salidas:

- la rotulada como S1 refleja la posición mecánica de cada zona de la fotografía original; servirá para colocar -al reconstruir la imagen- en el lugar exacto el valor de cada punto y de cada línea según estos dos ejes: el del arrastre (x) y la posición en cada línea (y).
- la rotulada como S2 contendría el valor de brillo de cada punto en cada línea.
- la rotulada como S3 puede contener otra información auxiliar: si la toma se ha digitalizado de manera normal o en alto contraste, si en exploración normal o de alta resolución, si se ha aclarado u oscurecido, si contiene o no medios tonos, etc ...

Todas estas salidas S1, S2, S3, ... Sn van con posterioridad al codificador que convierte los impulsos de manera adecuada y los codifica en forma de *bits* (dígitos binarios) para su emisión a distancia: en el caso de un telex esta distancia puede oscilar entre una decena de metros (en unas oficinas de varias plantas) a miles de kilómetros (en el caso de oficinas comerciales en el extranjero). Es posible la existencia de ruido en la línea (que puede ser un conductor, en el caso de líneas telefónicas, o el espacio en el caso de radioenlaces), ruido que degrada la calidad de la información transmitida llegando, en ocasiones, a perder parte de la información si los bits afectados son adyacentes. Para evitar este efecto se introducirá en cada porción de la información ("palabras" en el argot informático) unos bits que sirvan en el receptor para saber si en su llegada hay o no cambios con respecto a lo que se emitió del emisor: el ejemplo más sencillo es el denominado *bit de paridad*, que detecta y corrige la presencia de un bit erróneo. Esto se consigue por medio de códigos correctores, de los cuales no hablaré porque nos centraremos en la digitalización y no en la transmisión de datos; basta saber que en los fax actuales es posible reconstruir parcialmente una imagen ligeramente degradada, aunque no si el ruido es notorio y se pierde mucha información.

La imagen digitalizada constará, como es lógico, de una cantidad limitada aunque puede ser muy grande, de puntos de información (o bits) cada uno de ellos con 3 valores:

- el valor de posición del eje x, el lugar que ocupa en cada línea.
- el valor de posición del eje y, la línea en que se encuentra.
- el valor de brillo.

En el caso de una imagen normal -ideal para transmitir textos- este último valor sólo puede ser 0 ó 1, dependiendo de si ese punto contenía o no luminosidad y de si ésta alcanzó un umbral mínimo de activación, pero esto son aguas mayores que no trataré ahora por ser algo fuera de nuestro interés; en el caso de que esta imagen se desee leer en modo *medios tonos* o imagen con grises -ideal para transmitir fotografías- este valor puede variar entre 0 (para un punto totalmente blanco) y un cierto valor máximo que puede ser 7 si el detector trabaja con 8 niveles de gris (0, 1, ..., 7) ó superior si trabaja con un número mayor de bits. A menor valor más claro y a mayor valor más oscuro; de este modo puede simularse una escala de grises, aunque

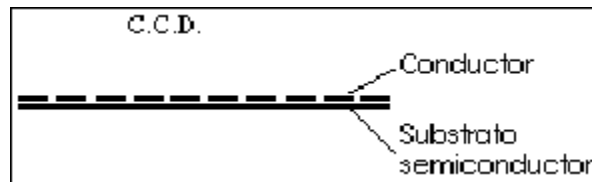
según la electrónica de los procesadores se pueden utilizar otras técnicas matemáticas más complejas, como la interpolación o el tramado.

Este ejemplo del fax, tan corriente hoy en día en nuestra sociedad informatizada, nos ha servido para conocer de un modo superficial la conversión analógico-digital. Para los más curiosos puedo decir que en 1842 Alexander Baim sentó sus principios, en 1902 Arthur Kirn empleó ya la célula fotoeléctrica, en 1922 se transmitió la primera imagen (Roma-Bar Harbor, Maine) y en 1937 fue lanzado el primer periódico emitido por radio-facsímil, difundiéndose esta técnica comercialmente desde 1948. Hoy en día no se concibe una oficina sin fax. ➔ **EI C.C.D.** Para capturar una imagen por medios electrónicos tenemos dos posibilidades:

- utilizar una cámara de TV o

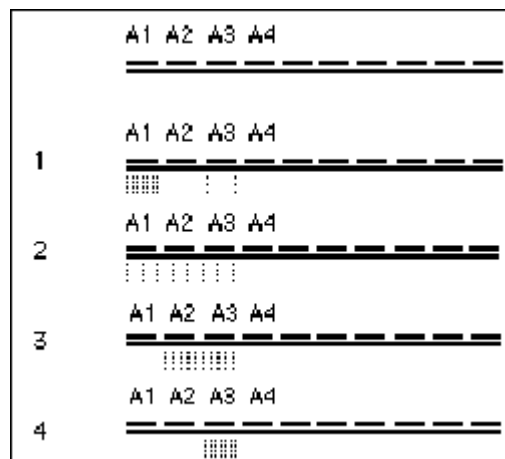
- emplear un detector CCD.

Ambos casos transforman las variaciones lumínicas analógicas del objeto a captar en valores digitales (números) que se pueden interpretar electrónicamente. Pero hay dos diferencias fundamentales entre el tubo y el sensor CCD: la primera es que mientras el tubo está formado por una capa fotoconductiva homogénea (el *target*), que será explorada y propociona una señal de salida continua, el chip CCD está formado por una serie de elementos discretos que serán interrogados de forma secuencial. La segunda diferencia es que la superficie del *target* del tubo puede ser variada durante la exploración (para adaptarla a la imagen originada por el objetivo), pero el formato del CCD es fijo y habrá de ser la lente la que se tendrá que adaptar al formato que se desee. El sistema del tubo no nos interesa en absoluto en este caso.



En el segundo caso partimos también de una imagen analógica en la cual encontramos variaciones

de brillo de unas zonas a otras; esta imagen puede ser lo mismo una toma viva (obtenida a través de un telescopio) como una imagen sobre soporte (una fotografía) que va a ser analizada. En estos dos ejemplos el sistema de captación o transformación de imagen es similar: la utilización de un chip CCD.



Pero ¿qué es un chip CCD?; un chip CCD (siglas que corresponden a *Charge Coupled Device* o Dispositivo de Carga Acoplada) no es más que una pastilla semiconductor de tecnología MOS (Semiconductor Metal Óxido) sobre la cual se han grabado con técnicas especiales miles de condensadores: cada uno de ellos se forma colocando un conductor en la superficie del silicio semiconductor (substrato); el conductor y el substrato están separados por un estrecho aislante. Si se aplica una tensión al conductor primero se formará en el substrato, inmediatamente debajo del conductor, una región de depleción en la cual se pueden mantener las cargas; es decir, que si se aplica una tensión positiva al conductor la región de depleción se

forma y si proyectásemos inyectar cargas negativas en esa región citada la carga se mantendrá allí: así pues las cargas que en un condensador normal se mantienen en las placas conductoras -separadas una de la otra por la capa de aislante- en el chip se albergan en una zona inmediatamente debajo del conductor.

La estructura de un *registro de desplazamiento acoplado por carga* o CCD se produce porque a lo largo de las superficies del sustrato se localiza, en las proximidades, un array de electrodos de

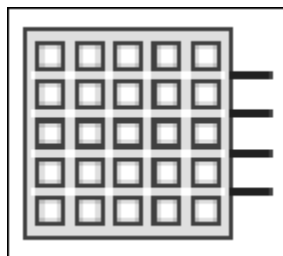
conducción. En el esquema he marcado un array de 4 electrodos adyacentes que están gobernados por 4 señales de reloj. Como se indica en este esquema en el primer ciclo t_1 del reloj mientras en el condensador A1 tenemos carga en el A2 y A3 no la hay; en el siguiente paso del reloj t_2 la zona de depleción bajo A1 persiste mientras que se forma una nueva bajo A3. En el siguiente ciclo t_3 se forma una zona de depleción debajo de A2 con lo cual la carga de A1 se extiende hasta A3 a través de A2: como resultado la carga se ha repartido por toda la región extendida. Durante los dos intervalos t_2 y t_3 una y otra región están sin formar, empujando la carga a la derecha para que en el intervalo siguiente t_4 la carga existente originalmente en A1 se desplace lateralmente hasta la zona A3. Disposiciones especiales deben hacerse para inyectar carga en la primera región de depleción cuando se requiera y para detectar presencia o ausencia de carga en la última región de depleción; estas inyecciones y detecciones se realizan siempre en sincronismo con la señal del reloj. Como es natural en todo circuito, siempre existe una cierta disipación de energía en la carga cuando ésta se transfiere en el registro de desplazamiento, siendo por ello necesario incluir provisión para refrescar la carga periódicamente a lo largo de toda la estructura.

Un ejemplo de CCD simple puede ser el chip *Intel 2.464 CCD*: la memoria contiene 256 registros de desplazamiento recirculantes cada uno con 256 bits; con una capacidad de 256×256 ó 65.536 bits (64 Kb en total) la memoria tiene una única línea de entrada y otra de salida de datos. Mientras que los primeros chips CCD se fabricaron experimentalmente a inicios de los años 1970, no llegaron a las cámaras de televisión comercial hasta 1986 (con el modelo ICX-018, de 268.000 píxeles en un formato de 510 columnas por 493 filas), mejorados en 1987 (con la atenuación del smear*) y 1988 (chips de 380.000 píxeles y 778 columnas por línea). Las cámaras modernas de TV comercial o las videocámaras de aficionado son todavía más eficientes y presentan muy pocos problemas comparados con sus ventajas.

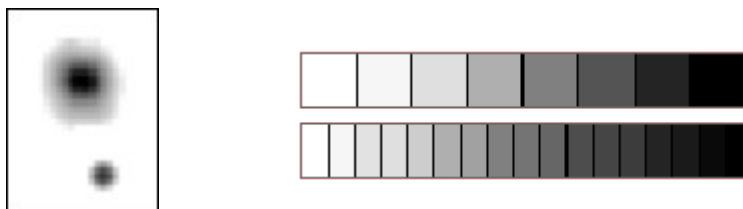
Todo esto está muy bien y quizá algún aficionado se haya enterado más o menos de su funcionamiento teórico, pero ¿cómo se presenta el chip CCD? Para el aficionado profano el chip no es más que un pequeño dispositivo integrado muy reducido (unos 3 mm de lado y hasta 8,6 x 6,5 mm en los nuevos modelos, algo mayor en los más recientes) similar a otros de su estilo que es capaz de los mayores milagros nunca antes logrados por aficionados a la astronomía: posee una sensibilidad superior a los 20.000 ASA, es capaz de detectar estrellas individuales en la galaxia M-31 con exposiciones de sólo 5 minutos -en un reflector de 400 mm- y puede conseguir con una imagen deficiente o mediocre auténticas maravillas.

¿Cómo funciona este milagro?; es bien sencillo: tal y como he explicado el pequeño chip empaqueta de manera muy densa una malla de fotodiodos microscópicos (los condensadores A1, A2, ... del ejemplo anterior) cada uno de los cuales va a recibir la luz y formará un elemento de imagen (picture element o *pixel*). Al recibir luz cada uno de estos condensadores se activará con una eficiencia cuántica que ronda el 50-80% según la calidad del chip o la longitud de onda recibida -compárese con el 2% de los filmes usuales o el 5% de los mejores filmes fotográficos- acumulando una carga eléctrica en la citada zona de depleción. A medida que el chip recibe luz con el paso del tiempo va almacenando electrones en cada pixel en proporción a la luz recibida; al cabo de un período de tiempo t (tiempo de integración) se mide la carga acumulada en cada celdilla por el procedimiento de *correr* las cargas de cada pixel al adyacente, como ya he indicado: de este modo las cargas son conducidas de uno en uno hasta salir por el extremo del chip; en este punto un circuito especial cuantifica el valor de la carga acumulada que va siendo expulsada del chip por las salidas del mismo (emitiendo un valor en forma numérica-digital-). En este esquema he representado un chip hipotético de 5 líneas con 5 elementos por

línea, es decir 25 píxeles en total; los modelos usuales poseen 192 x 165 píxeles e incluso superior en los más complejos. Este proceso que comienza en el primer pixel de la primera línea se va repitiendo línea por línea hasta haber leído todo el chip: de este modo se ha obtenido una larga lista de valores numéricos que corresponden a la carga eléctrica de cada pixel ordenados línea a línea; ahora esta larga lista de números puede ser tratada de manera digital, almacenándose en formato magnético si se desea o dirigiendo la señal hasta un tubo catódico en donde formará una imagen reconocible, previa codificación por el circuito adecuado.



Al tener un rendimiento cuántico tan elevado su sensibilidad a la luz es equivalente a la de un film fotográfico de 10.000-50.000 ASA o más, además de tener una respuesta prácticamente lineal a la recepción de la luz: no posee el nefasto y tan molesto efecto de reciprocidad (efecto Schwarzschild citado) típico de los filmes corrientes. Otra ventaja es que permite obtener tiempos de integración (o intervalos de lectura de los píxeles) que oscilan entre los 50 milisegundos y los 10 minutos o más, con lo cual estamos en disposición de controlar el tiempo de exposición. Por lo general el rango de trabajo con luz oscila entre los 400 nanómetros (luz azul) y los 1.100 (infrarrojo cercano), siendo bastante sensible al rojo y algo menos al azul; ello se puede evitar o paliar empleando filtros correctores de color si así se desea. En general la eficiencia es del 10% para los 450 nm, sube a 45% en los 600 nm, alcanza el máximo (55%) en los 650 nm y se estabiliza en los 46-48% en el trayecto 680-800 nm, para descender rápidamente al 20% al llegar a los 880 nm bajando ya al 10% en los 900 nm. Los chips más novedosos tienen una eficiencia cuántica ligeramente diferente a la aquí descrita. * *Smear*: línea de saturación que se produce en los tubos de televisión, similar al *blooming* de las CCD.



CONTROVERSIA SOBRE EL CCD Pero no todo en el CCD son ventajas; entre los inconvenientes que encuentran los detractores de esta novedosa técnica caben destacar los siguientes:

- **resolución escasa:** ello viene originado por el tamaño limitado del chip (1,64 mm de lado en el TC-211 de la cámara ST-4 y 8,6 x 36,53 en la ST-6) que proporciona imágenes de 192 x 165 píxeles en los modelos más sencillos como el citado ST-4; los chips medianos pueden tener 192 x 330 píxeles como la EDC-1000, 500 x 290 en la MX5, 375 x 242 en la ST-6 y los muy buenos hasta 754 x 488 (la EDC-1000HR), aunque después han aparecido los modelos ST-7 (de 768 x 512 píxeles) y ST-8 que contienen nada menos que 1.536 x 1.024 píxeles (1.572.864 en total): compárese con los 512 x 512 de las videocámaras caseras, los 800 x 800 del telescopio espacial *Hubble*, los 2.048 x 2.048 en los mejores chips astronómicos profesionales o incluso de 8.192 x 8.192 en los modelos más avanzados. Esto origina una imagen *cuadrículada* en la cual se aprecian los píxeles individuales cuando se amplía un poco la toma: un claro ejemplo es esta imagen agrandada (negativa) de una estrella binaria. La escasa resolución de los modelos modestos impide obtener tomas planetarias muy detalladas, salvo que se consiga que el planeta cubra completamente todo el chip en base a utilizar focales de varios metros con muy buenos seguimientos. Los chips actuales van ofreciendo ya una cantidad mayor de píxeles con un mismo tamaño, de modo que la resolución ya va siendo algo mayor; todavía estamos lejos de conseguir una resolución tan

competitiva como la que ofrece un film fotográfico de baja a media resolución, defecto que en los próximos años habrá desaparecido con toda seguridad.

- **imágenes con medianos niveles de grises:** una electrónica de 8 bits logra obtener $2^8 = 256$ niveles diferentes de gris (entre 0 y 255), escalado que no permite detectar todos los ricos matices de una imagen astronómica sobre todo en planetas; ejemplos son las conocidas EDC, ST-4 o Meade Pictor 208XT. Los chips algo más avanzados permiten obtener hasta 4.096 niveles de gris -como la Lynxx pese a que sólo tiene 192×165 píxeles aunque con una electrónica excelente- pero algunas de ellas tienen un precio casi prohibitivo para los aficionados; con la aparición de las revolucionarias ST-6, ST-7 y ST-8 o las Meade Pictor 216XT y 416XT la situación ha mejorado notablemente ¡tienen nada menos que 64.256 niveles! Es de esperar que muy pronto la electrónica permita obtener más niveles de los que actualmente disfrutamos; por el momento los 256 niveles de las más simples facilitan la toma de las primeras imágenes, que nos servirán para aprender la técnica, iniciarnos en el *arte* del tratamiento digital y para adquirir experiencia. Este diseño ofrece una escala de 8 y 16 niveles de gris: incluso con esta gama tan reducida (como cuando se posteriza una imagen digital) es factible obtener resultados mínimamente detallados, en los cuales se puedan apreciar detalles plenamente reconocibles. Indudablemente una cámara de 16 bits es mucho mejor para planetas que otro modelo inferior, aunque el dinero tiene siempre la última palabra.
- **campo visual muy reducido:** con una focal de 1.000 mm (algo normal en muchos reflectores de 100 a 150 mm de apertura) la MX516 presenta un campo de visión de $16 \times 8'$ que se ven reducidos a $8 \times 6'$ en un catadióptrico de 2.000 mm de focal o aumentar a $30 \times 15'$ en un reflector de 750 mm de focal: apenas si permite la captura de objetos medianamente extensos. Sin embargo en el nuevo modelo ST-6 el campo cubierto en su nuevo y mayor chip de $8,6 \times 6,5$ mm cubre los $29 \times 22'$ en una focal de 1.000 mm o los $14,6 \times 11'$ en un catadióptrico de 2.000 mm de focal. En la toma de objetos extensos (una nebulosa, una galaxia, la Luna, etc...) nos encontramos con la necesidad imperiosa de efectuar un mosaico componiendo dos o más imágenes del objeto a estudiar; en ocasiones los objetos extensos no son muy interesantes para nosotros (nebulosas) y, caso de serlo, deberíamos utilizar focales más reducidas bien sea empleando instrumentos de focal corta o intercalando un reductor de focal. Con un campo tan reducido se pueden estudiar cómodamente todos los planetas, casi todos los cúmulos globulares, dobles y variables a centenares o ciertas zonas más internas o muy concretas de galaxias (como el núcleo, las zonas de condensaciones o una supernova); para obtener imágenes de toda una galaxia extensa (como son las grandes y cercanas M-31 o M-33) se habrá de componer la misma a base de un mosaico, cosa que no es difícil porque la imagen puede ser desplazada según los ejes **x** e **y**, lo que facilita el montaje de varias tomas en una. Si empleo un teleobjetivo con una focal de 200 mm acoplado a una CCD ST-4 capto un campo de $40 \times 40'$: cabe holgadamente la Luna entera o un sector celeste de esa amplitud; la resolución de esta imagen (suponiendo que midiese 192 píxeles de lado) sería de aproximadamente $13''$ por píxel: incluso el planeta Júpiter (con $45''$ de diámetro) no ocuparía más que un cuadrado de 9 píxeles (3x3) o poco más incluyendo la difusión de la luz en el chip. Este montaje nos permitiría captar nebulosas difusas o galaxias enteras pero con una resolución bastante baja; puede que esto sea interesante para la búsqueda de supernovas en galaxias cercanas (que cabrían enteras en la imagen) dado que ninguna estrella ocuparía más de uno o dos píxeles de lado; almacenando una imagen de cada galaxia y capturando periódicamente imágenes de estas mismas galaxias la resta de la imagen actual a la almacenada nos pondría de manifiesto los cambios (supernovas o incluso novas) que se produzcan en ella.
- **corriente de oscuridad:** ello quiere decir que incluso cuando no recibe luz el chip, en integraciones largas, detecta "luz" espúrea proveniente del ruido térmico originado en el interior del propio chip; en general por cada 8° de incremento de la temperatura se dobla el ruido termal en la imagen. Ello nos va a impedir alargar las exposiciones más allá de algunos minutos (compárese con los incluso 60 minutos de las astrofotografías clásicas) porque la relación señal/ruido se haría muy baja salvo que el chip se enfríe termoeléctricamente como en algunos modelos más caros; de todos modos incluso así las exposiciones no pueden

alcanzar los 30 minutos en ningún modelo barato del mercado por lo que para conseguir una exposición prolongada se harán varias tomas cortas y se sumarán las imágenes: el resultado es equivalente a la suma de las exposiciones. La ST-6 dispone de dos platinas termoeléctricas de refrigeración con temperaturas seleccionables: un termistor de regulación en el cabezal del CCD estabiliza la temperatura en largos períodos permitiendo realizar exposiciones ¡incluso de 60 minutos! Ahora el astro más débil todavía detectable está limitado sólo por el ruido (iluminación) del fondo celeste y la cantidad de luz recibida en el chip. Una solución casera es mejorar la evacuación del calor del cabezal con el empleo de un ventilador, que mueve el aire en torno al mismo y disipa este calor: no es tan efectivo como el método anterior pero algo ayuda...

Entre las indudables ventajas de esta novedosa tecnología destacan:

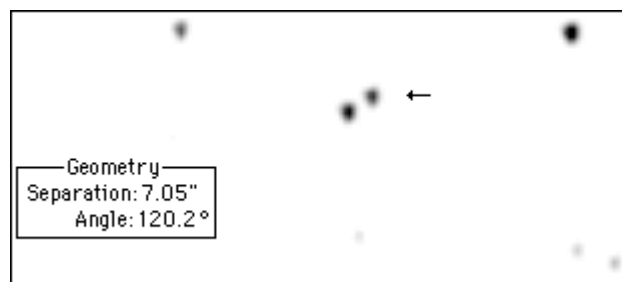
- **magnitud límite escandalosa:** con la "barata" ST-4 y sólo 5 s de exposición en un reflector de 254 mm se alcanza la magnitud 14^a, 60 s de exposición en un reflector de 200 mm caza la magnitud 16^a subiendo a la 17^a con 5 minutos de exposición. Nunca jamás se podría llegar a ese límite con un reflector de ese diámetro en ese mismo tiempo de exposición utilizando técnicas fotográficas; en la nueva ST-6 se alcanza con un reflector de 200 mm la magnitud 15^a en una integración de 1 s (para cazar Plutón), la magnitud 18^a con 1 minuto (para estudiar cúmulos globulares en M-31) y la 19^a en 5 minutos (estrellas cefeidas en M-33); esto deja obsoleto cualquier trabajo fotográfico anterior similar. Ni que decir tiene que en Marte, Júpiter o Saturno tenemos un montón de pequeños y débiles satélites al alcance; tampoco habrá galaxia, nebulosa planetaria o cúmulo globular que se nos resista por su debilidad o distancia. Precisamente con una CCD se descubrió la primera supernova por aficionados el 22 de junio de 1990: se trataba de la catalogada como SN-1990-N en la galaxia NGC 4.639, que con magnitud 15,4^a era visible en uno de los débiles brazos de la misma. Adicionando varias imágenes se obtiene una magnitud límite muy superior a la que se obtiene con una única exposición, con la ventaja de evitar el ruido térmico originado por una integración larga. A medida que los chips evolucionan la magnitud límite va a ir aumentando poco a poco, aunque probablemente la polución lumínica de las ciudades y del conjunto de ellas (pensemos en el área de Madrid, de Barcelona, el gran Londres...) también, salvo que lo evitemos con las campañas adecuadas.
- **adición de imágenes:** si obtenemos una toma de 1 s tendríamos una turbulencia congelada correspondiente a 1 s; adicionando varias imágenes la turbulencia sería mínima (ya que eliminando los píxeles no redundantes en todas las imágenes se borra o atenúa la turbulencia) pero la magnitud límite (cantidad de fotones recibidos menos iluminación celeste) *crece con el tiempo*, algo muy útil en la observación de estrellas binarias débiles, en el seguimiento de asteroides muy pequeños o en los planetas más lejanos. Este efecto adicionador permite que se puedan obtener fotografías de larga exposición sin seguimiento o con seguimiento medianamente defectuoso: basta sumar varias imágenes de corta exposición (en donde el movimiento celeste no se nota en absoluto o es muy reducido) para obtener una imagen de larga exposición con una magnitud límite muy superior; a modo de ejemplo sumando una docena de imágenes de 5 s se obtiene una suma equivalente a una toma de 60 s pero con un desplazamiento estelar equivalente a 5 s. Conocedor de los problemas mecánicos de los pequeños telescopios, algunas nuevas cámaras incorporan ya una exclusiva característica denominada *seguidor automático acumulador de imágenes*, que permite un seguimiento preciso de aquellas imágenes que necesiten largas exposiciones: basta con marcar en la pantalla una estrella de referencia para que el aparato, al hacer otras exposiciones, tome la estrella como punto de referencia y superponga las demás exposiciones sobre la misma; la toma resultante (que puede acumular y superponer hasta 64 imágenes) es casi tan perfecta como una única exposición prolongada, sin los inconvenientes de la misma. Esta nueva técnica permitiría que un telescopio refractor de 60 mm de diámetro, instalado sobre una montura azimutal inestable, pueda efectuar trabajos de la misma profundidad óptica (aunque no poder resolutive) que un reflector de 300 mm de abertura con montura motorizada en ambos ejes: se trata de la *magia* del mundo digital.
- **tratamiento de la imagen:** como la salida de la información digital se puede almacenar en

formato TIF, JPG, RIF, FIT o similar esto permite que programas adecuados de tratamiento de imágenes corrijan todos los defectos de la misma, tales como emborronamiento (o desenfoque), mal seguimiento, reforzamiento de los bordes, falso color, variación de los tonos, aumento de ciertos sectores (zoom digital), rotación de la toma, mapeo con isofotas, interpolación de información en sectores defectuosos o perdidos... Con los 256 niveles de gris y un buen programa adecuado se puede sacar un gran partido de la imagen y si son 4.096 niveles mejor todavía; muchas CCD llevan incorporado ya el programa de tratamiento de imágenes lo que multiplica su capacidad. Una imagen puede ser mejorada restando una toma oscura de igual exposición a la original: así los *píxeles calientes* (ruido electrónico) son anulados y limpiamos la imagen de ruido térmico causado por la temperatura del cabezal CCD; capturando tomas oscuras y promediándolas (para minimizar el ruido aleatorio) podemos obtener imágenes de galaxias cuando tenemos la Luna Llena en el cielo: basta restar de la imagen recién obtenida el cuadro oscuro para eliminar los bits que han sido iluminados sólo por el ruido térmico quedando los bits activados por la luz estelar (yo aconsejo tomar los campos oscuros en la misma sesión de trabajo y no tenerlos archivados.) El tratamiento de imágenes permitió a C. Buil obtener fotos de Júpiter con una resolución de 0,3" con el reflector de 1 m de abertura desde Pic du Midi: fotográficamente es muy difícil llegar a este límite en una imagen astronómica si se trabaja desde un observatorio terrestre a causa de la atmósfera. Es necesario procesar la imagen también de *campo plano*, para minimizar los errores en el conjunto sistema óptico+CCD (por ejemplo motas de polvo o sensibilidad dispar a la luz) y mejorar la imagen final, aunque sobre el tratamiento de imagen se puede obtener información útil en el siguiente archivo: [CCD.pdf](#) (170 Kb).

- **sensibilidad dispar a los colores:** como ya comenté los chips son más sensibles a la luz de onda larga que a la corta, por lo cual los astros azules y verdes aparecen más débiles de lo que realmente son, mientras que los rojos y anaranjados aparecen más brillantes; en ocasiones esto es una bendición, en otras no tanto: cuando he estudiado las estrellas más frías de la nebulosa de Orión (M 42), en noches con Luna Llena, he insertado un filtro rojo intenso delante del chip: pese a la molesta luz azulada dispersa por la atmósfera, las estrellas rojas han aparecido en todo su esplendor ya que la luz de onda corta ha sido eliminada; si alguien desea buscar estrellas de bajo brillo y reducida temperatura (enana marrón o enana roja) el empleo de filtros rojos intensos permiten eliminar todo resto de luz de onda mediana (amarilla, verde) o corta (del añil al violeta) centrándonos sólo en esa parte del espectro: será preciso ampliar el tiempo de exposición, pero esto evita obtener imágenes estelares hinchadas debido a la luz de onda corta. Sin embargo cuando es preciso trabajar en otros campos quizá no interese esta ventaja: es hora de emplear filtros apropiados; si lo que deseamos estudiar fuese el aspecto de una nebulosa planetaria sería necesario emplear un filtro nebuloso: la luz que no sea de este cuerpo (luces del alumbrado público, por ejemplo) son eliminadas casi totalmente. En trabajos sobre astros blancos o azules, en mediciones colorimétricas, fotométricas y similares es preciso eliminar la luz infrarroja antes de que influya en el chip, falseando los resultados; los filtros de aficionados **no** sirven para este trabajo, es preciso adquirir uno (aunque cuesta trabajo y bastante dinero) que nos bloquee la parte infrarroja del espectro.
- **guía automática de telescopios:** esta opción (una de las primeras para las cuales se aplicó en el mundillo de la astrofotografía) logra que nuestro telescopio se dedique al seguimiento fotográfico con una precisión inigualable por ningún humano; precisamente la ST-4 se diseñó originalmente como seguidor automático digitalizado y como tal se presenta al aficionado: para ello se conecta el cabezal del CCD en un pequeño telescopio que sirva de *guía* (que bien puede ser un refractor de 60 mm que un reflector de 100 mm) y se apunta con éste a una estrella determinada -que puede ser de la 8ª magnitud o incluso menor-; ahora el CCD forma la imagen estelar sobre el reticulado de píxeles, detecta el movimiento de la misma sobre los píxeles si hay deriva (debido a la rotación terrestre), cuantifica la deriva y da órdenes de inmediato a los motores de ambos ejes corrigiendo la desviación a lo largo de la exposición y compensando de esta manera cualquier mínimo error. La precisión obtenida llega a 1" con un seguidor de sólo 60 mm sobre estrellas de 8ª magnitud o de 9ª magnitud en el seguidor de 80 mm de diámetro: ni qué decir tiene que las exposiciones pueden alargarse más allá de los típicos 30 minutos sin peligro alguno de estrellas movidas (salvo que se le dé

al telescopio la también típica y molesta patada accidental...) Con este *seguidor milagroso* las fotografías alcanzan una perfección (dado que en el clisé las estrellas aparecen más puntuales) y profundidad de magnitud (al concentrarse la luz en un disco estelar más reducido) difícil de lograr anteriormente por otro método tradicional para los aficionados. Además de la veterana ST-4 podemos encontrar en el mercado el modelo Meade Pictor 208XT, por unos 500\$.

- **mediciones astrométricas:** algunos modelos, actualmente casi todos, permiten al usuario efectuar mediciones astrométricas de precisión en las imágenes obtenidas como la determinación de diámetros aparentes (muy útil para planetas y sus satélites), la separación o el ángulo de posición en estrellas múltiples (difícil de efectuar por el aficionado sin muchos problemas y gran cuidado), la magnitud de cualquier objeto del campo (calibrando el brillo de algún astro del campo de brillo conocido) y otras muchas más que con el tiempo irán apareciendo. En los nuevos modelos la toma de imágenes en color permite determinar la temperatura de las estrellas basándose en el índice de color B-V y un conjunto adecuado de filtros.



Para la medición de la posición de asteroides (astrometría), basta conocer la ubicación exacta de las estrellas capturadas para que, por medio del puntero, se determine la posición del cuerpo: mediremos la distancia y AP a cada una de las estrellas más evidentes y una simple hoja de cálculos hace el resto. En este ejemplo se está determinando la distancia del asteroide 4 Vesta (marcado con una flecha) a varias estrellas: el puntero indica la distancia exacta hasta una de ellas (7,05") y su ángulo de posición determinado automáticamente por el software (120,2°).

Esta característica tan potente nos permite seguir y medir el movimiento de los asteroides, pudiendo determinar posteriormente los elementos orbitales de los mismos e incluso detectar las leves perturbaciones gravitatorias de los planetas gigantes, sin olvidarnos de que podemos encontrar nuevos cuerpos, como está haciendo ya el Observatorio Astronómico de Costitx (Mallorca), quien lleva ya varios en su haber...

Si el instrumento sobrepasa los 200 mm de abertura, la focal es amplia (al menos 2 m) y se trabaja en buenas condiciones instrumentales con algo de cuidado, no sólo podremos detectar, medir y cuantificar el movimiento de las estrellas más cercanas (por ejemplo 61 Cygni), sino incluso apreciar el *bamboleo* de su desplazamiento aparente debido al paralaje terrestre.

- **resultados de miedo:** podemos estudiar las estrellas individuales de la galaxia de Andrómeda desde la ciudad con un reflector de 250-300 mm de abertura: ¿imposible?, ¡en absoluto!; aunque desde el corazón de la ciudad tengamos el cielo totalmente polucionado (alumbrado nocturno con luces de sodio o vapor de mercurio) podemos obtener una imagen del cielo iluminado próximo a la galaxia, otra de la misma galaxia y restar de la segunda imagen el valor del brillo del polucionado cielo (que no es más que ruido) dejando sólo el valor de la luz correspondiente a la galaxia; casi lo mismo se puede lograr empleando filtros adecuados.

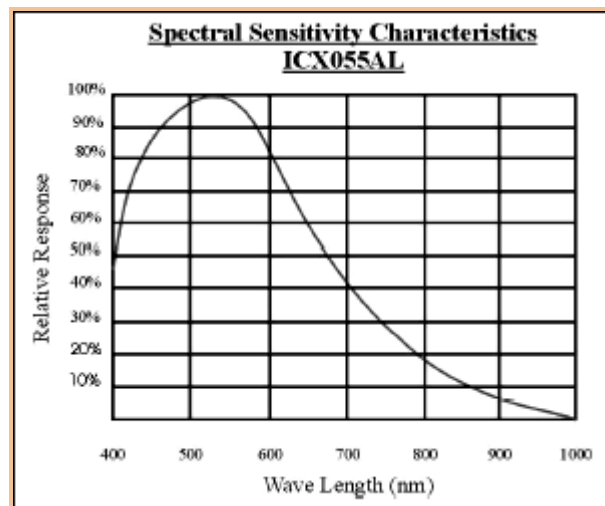
Con exposiciones de 60 s y la ST-4 se alcanza la 16ª magnitud con una abertura de 200 mm, la 17ª con 5 minutos y si disponemos de la ST-6 los resultados nos dejan helados: 14ª con 1

s, 17^a en 60 s y 18^a con 5 minutos; si el telescopio mide 254 mm de abertura los límites son: la magnitud 19^a con 1 minuto (visualizándose por ello las novas más brillantes de M-31 y M-33) y la 20^a en 5 minutos. Exposiciones de 5 s con un SC-254 mm consiguen captar las estrellas gigantes rojas individuales de 12-14^a magnitud de los cúmulos globulares como en el cercano M-13 en Hércules, no digamos ya si el tiempo de integración es levemente mayor...

Exposiciones de pocos segundos revelan la presencia de galaxias ¡localizadas a sólo 5° de la Luna Llena! e incluso sería teóricamente posible detectar la presencia de dos diminutos satélites en torno a Marte o un quinto satélite rojizo en torno a Júpiter (V Amaltea) si se trabaja con cuidado en un telescopio de 200 mm de abertura con una focal larga (por encima de 3 metros). Precisamente para evitar el excesivo brillo de ciertos objetos algunas CCD tienen una protección para el *antibrillo*, que evita este problema tan molesto. Y no sólo eso: el aficionado Maurice Gavin capturó algunas de las brillantes galaxias de 17^a magnitud del cúmulo galáctico de Corona Borealis con la rudimentaria y barata ST-4 ¡desde el mismo corazón de Londres!: imposible de ninguna manera sin la ayuda del casi mágico chip CCD.



En aquellos trabajos en los que sea necesario el uso del color (imágenes planetarias, estudios colorimétricos de sus satélites, captura de nebulosas gaseosas y planetarias, variables rojas o azules, cometas, estrellas enanas rojas o pardas, estudios sobre asteroides y sus diferentes clases, estudios estelares colorimétricos ...) se puede conseguir éste por medio de la técnica de la *tricromía*: basta obtener una imagen del objeto a través de tres filtros -rojo, verde y azul-; la adición de las tres tomas en una única fotografía, por medio del empleo del programa adecuado, crea una imagen en color que puede ser incluso bastante próximo al real. Como es de suponer hace falta controlar adecuadamente el tiempo de exposición con cada uno de los filtros, ya que al no tener la misma capacidad de transmisión ni actuar de mismo modo sobre el chip la imagen puede quedar demasiado "roja" o "azul", falseando el aspecto real: no olvidemos nunca la respuesta dispar a cada longitud de onda; un buen ejemplo de todo esto es la diferente sensibilidad a los colores que presenta el chip ICX055AL, de la cámara StarlightXpress MX516, sobre estas líneas: se ve que el pico de respuesta máxima está centrado en la zona verde del espectro (530 nm). Con varios tanteos y anotando una escala de calibración con estos resultados el asunto queda zanjado.



Curva de sensibilidad espectral de las cámaras de la marca Starlight Xpress (gentileza de Michael Hattey, SX Ltd.)

Si nuestra necesidad es imperiosa y el bolsillo lo permite, se debe adquirir una CCD que cuente ya con una adecuada rueda de filtros de color: creo que es mejor adquirir las imágenes con este tipo

de montaje óptico que "chapupear" con vidrios de color teñidos, aunque si uno no tiene la suficiente capacidad económica, pero cuenta con mucha inventiva, podrá conseguir los resultados artísticos que desea... Otra solución es adquirir filtros del tipo Kodak Wratten con los cuales incluso podemos emular los filtros fotométricos Johnson: por ejemplo el Wratten 56 (verde) equivale aproximadamente al **V**, el Wratten 25 (rojo) equivale al **R** o el Wratten 80A (azul) que equivale al **B**: sin embargo en los trabajos fotométricos serios, de calidad, recomiendo encarecidamente el uso de filtros fotométricos del tipo Johnson o similares, aunque sólo podamos comprar el **V**...

Finalmente un consejo para el bolsillo: los estudios astronómicos serios no precisan de bellas imágenes coloreadas, sino de imágenes de alta calidad; no pensemos que presentar una imagen de Saturno, con bellos pero borrosos cinturones coloreados, es más científico o valioso que una imagen en blanco y gris, sobre todo si ésta presenta más detalles nítidos que la de color. El color está bien para imágenes estéticas, si nos gusta también dedicarnos al arte, pero no es preciso ni esencial para obtener resultados científicos salvo en campos muy concretos.

*Observatorio Astronómico de Cáceres (CCD Photometry Department)
Asociación de Variabilistas de España
Gruppo di Ricerca Astrofotometrico Variabilisti -Italia-
Asesores Astronómicos Cacereños
21 de Marzo de 2004.*

Francisco A. Violat Bordonau

Asesores Astronómicos Cacereños

violat@olanet.net

fviolat@yahoo.es