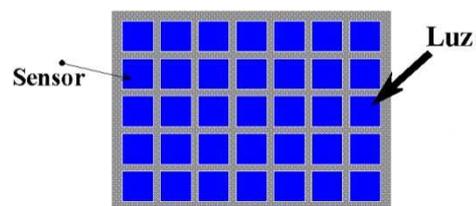
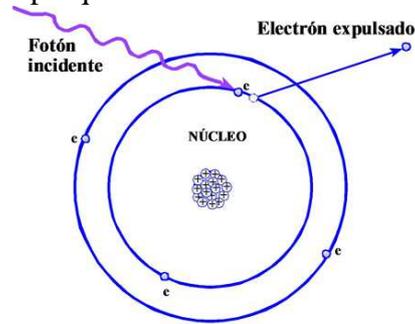


Taller de Fotometría Diferencial

Unidad 2: Sensores digitales.

- **Antecedentes:** Las primeras fotometrías se hicieron con las cámaras fotográficas analógicas (químicas), que se basa en un proceso fisicoquímico en un material fotosensible aplicado sobre una placa de vidrio, o sobre una película flexible, y que reaccionan frente a la luz dejando una impresión en la placa, que debe ser estabilizada mediante un proceso de revelado. La fotografía química se utilizó durante casi 100 años, y gran parte de la astronomía se ha hecho utilizando la fotografía química. Desde mediados de siglo pasado y hasta los años 80, los fotómetros fotoeléctricos hicieron un gran aporte a la fotometría astronómica. La revolución se produjo a partir de la fotografía digital y la utilización de la cámara digital, muy utilizada en estas últimas décadas para hacer las fotometrías en Astronomía.
- **Efecto fotoeléctrico:** El principio del funcionamiento de las cámaras digitales se basa en un sensor electrónico que utiliza el principio físico del “efecto fotoeléctrico”, descrito a fines del siglo 19 y del cual no se encontraba explicación. Fue Albert Einstein quien explicó el porqué del efecto fotoeléctrico, y por ello mereció el premio Nobel. Básicamente, demostró que al incidir una partícula de luz (fotón), sobre una placa preferentemente de metal, un átomo de la placa se excita al absorber la energía del fotón y emite un electrón. El número de electrones producidos, es proporcional a la cantidad de fotones recibidos por el detector. Si se producen electrones, podrían llegar a contarse y ello permitiría medir la luz que está incidiendo sobre la placa. A principios del siglo 20 los experimentos sobre el efecto fotoeléctrico eran sólo a nivel laboratorio, pero con el advenimiento de la era digital, se logró “contar” esos electrones y todo cambió rápidamente.
- **Sensor digital:** El desafío era lograr muchas placas de metal suficientemente pequeñas de tal modo que se pueda detectar la posición donde incida cada punto de luz de la imagen. Con esa matriz grande de puntos podemos lograr la construcción de la imagen de manera similar a como lo logra la fotografía química, pero reemplazando el principio de reacciones químicas por el del efecto fotoeléctrico. Los sensores digitales constan de una placa silicio de la que se desprenden electrones a medida que es alcanzada por fotones. Esa placa de silicio está dividida en pequeñas plaquitas o elementos llamadas “píxel” que significa: “elemento del paisaje de la figura” y se comporta como un minúsculo detector y tiene un electrodo con potencial positivo que retiene los electrones liberados por el efecto fotoeléctrico. Los pixeles están ordenados en forma de una cuadrícula con filas y columnas. Cuanto mayor sea el número de pixeles, mayor será la resolución de la imagen. Actualmente se los construye con millones de pixeles. Generalmente los pixeles son cuadrados, pero a veces son rectangulares. El tamaño de los pixeles suele ser de unos pocos micrones. Un tipo de sensor digital es el CCD inventado en 1969 por W. Boyle y



Taller de Fotometría Diferencial

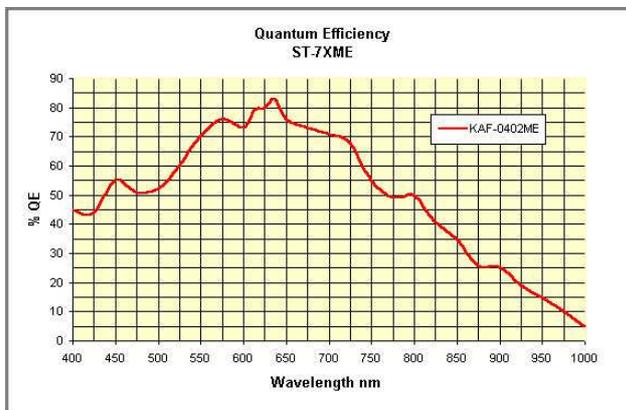
G. Smith por lo que recibieron el premio Nobel en 2009, y es el que utilizaremos en las cámaras que dispone el OAC.

- **Exposición:** El sensor digital tiene una gran cantidad de “baldecitos” (píxeles). Antes de dejar que llegue luz al sensor, los baldecitos deben estar vacíos de electrones. Si abrimos el obturador de la cámara, dejamos expuesto el sensor a recibir luz. Cada fotón va liberando un electrón, y como cada baldecito tiene un borne con carga positiva, hace que el electrón quede atrapado allí. Cuando cerramos el obturador finaliza la generación de electrones por efecto fotoeléctrico. El tiempo de exposición es el transcurrido entre la apertura y el cierre del obturador. Tenemos así, una cantidad de electrones en cada balde, generados por una determinada cantidad de fotones.
- **Digitalización:** Acabada la exposición se deben leer la cantidad de electrones almacenados en cada baldecito. Se mide píxel a píxel, línea a línea, y luego toda la información pasa a un “convertor analógico digital” (CAD). Lo que se obtiene al medir, es una señal analógica en forma de tensión (diferencia de potencial) que es directamente proporcional a la cantidad de electrones. La conversión analógica-digital -o digitalización- consiste en la transcripción de las señales analógicas en señales digitales. Las señales analógicas son convertidas en una nueva escala “discreta”, es decir: saltando escalones o niveles o cuentas, y no en valores “continuos”. A veces a las cuentas se las llama ADUs, del inglés “analog-to-digital units”. Cuanta mayor cantidad de cuentas tenga la escala, mayor será la posibilidad de captar pequeñas variaciones de luz. Cuando se digitaliza una imagen, se convierte toda la información de la placa “en una cuadrícula con valores enteros”, es decir: en una matriz que se puede procesar matemáticamente, algo que no se podía hacer con la fotografía química.
- **Rango dinámico:** Las cuentas se almacenan como números enteros. Cada modelo de cámara asigna un número máximo al nivel de saturación. Las más sencillas admiten cuentas entre 0 y 255 cuentas (8 bits). Las cámaras profesionales suelen registrar intensidades de 0 a 65535 cuentas (16 bits). Si la cámara es capaz de leer valores en toda esa escala, este intervalo de valores se lo conoce como “rango dinámico” de la cámara. Desde luego, para alcanzar la mayor precisión fotométrica interesa un gran rango dinámico, pero esto incrementa mucho el espacio ocupado por los archivos imágenes.
- **Escala de grises:** Se puede mostrar la matriz con los números correspondientes a cada pixel, pero nos resultará más fácil de interpretar si en lugar de ver números, asignamos colores -en una escala de grises, por ejemplo- a los diferentes niveles de la escala digital y que la matriz se muestre con “colores” en lugar de “números”. Aparecerá así una imagen de puntos coloreados en lugar de una matriz numérica. Un sensor de 4 bits tendría sólo 16 tonalidades de grises (ejemplo de la figura), mientras que los de 16 bits -como los que utilizaremos en este taller- tienen 65536 grises, desde el negro (0) al blanco (65535).
- **Eficiencia cuántica:** Se refiere a la cantidad de fotones efectivamente registrados frente a los que efectivamente llegaron al sensor. Refleja la capacidad de un detector de tomar fotones y convertirlos en electrones. Se suele expresar en un porcentaje de la cantidad de fotones recibidos y que fueron

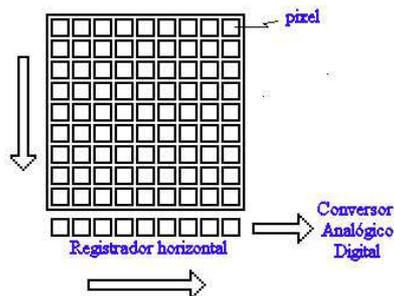


Taller de Fotometría Diferencial

efectivamente convertidos en electrones. Una cámara ideal -que fuera ultrasensible- convertiría el 100% de los fotones en electrones, pero no existe esa cámara. No sólo que nunca alcanza el 100%, la eficiencia cuántica de un sensor también es diferente para las diferentes longitudes de onda de la luz. Si una cámara se destinará a observar siempre el mismo tipo de objetos, será conveniente comparar: las longitudes de onda en las que emite ese tipo de objetos y las longitudes de onda en las que el detector tiene sus máximas eficiencias cuánticas. Los fabricantes de sensores digitales ofrecen curvas de eficiencia cuántica (o curvas de sensibilidad) que facilitan esa comparación. No todos los sensores tienen curvas iguales de eficiencia cuántica, los picos de máxima eficiencia cuántica pueden estar en diferentes colores y pueden tender distintos valores y formas. Hoy se diseñan detectores para que sean sensibles a determinadas longitudes de onda. En general, los sensores digitales tienen sensibilidad mucho más alta que el ojo humano, y ven muchas más longitudes de onda.



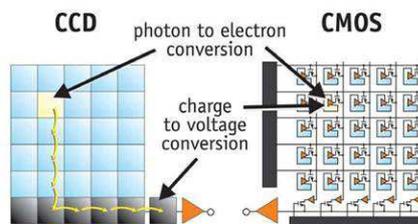
- **Ventajas y desventajas de la fotografía digital:** La sensibilidad de un detector digital puede alcanzar hasta un 70%, comparada con la sensibilidad típica de películas fotográficas en torno al 2%. La facilidad con la que la imagen puede corregirse de defectos por medios informáticos, además de otras ventajas técnicas. Cada vez que la cámara toma una foto, crea un archivo de datos no visuales y guarda: la fecha, la hora y otra información relevante de la captura. Permite disponer de las imágenes visibles al instante, sin necesidad de llevar la película al laboratorio y revelar los negativos para poder ver las imágenes. Se pueden ver en una pantalla las fotos que se acaban de tomar. Una desventaja importante de las cámaras digitales frente a la película convencional es la reducida área de los sensores digitales, lo que impide tomar fotografías de gran campo comparable a algunas tomadas con película clásica.
- **Formato FIT:** Es un formato de archivo digital que permite: el almacenamiento, transmisión y procesamientos de imágenes. Además de archivar la imagen, guarda en un “encabezado o header” información sobre la imagen y sobre todos los procesos a los que se someta y que modifiquen la imagen. Los programas de procesamiento de imágenes fits, no sólo interpretan la imagen, también los datos del encabezado, entre los que pueden estar: la fecha, la hora, el tiempo de exposición, el tamaño del detector, el binning utilizado, etc.
- **Sensores CCD:** En el sensor CCD la señal eléctrica producida en cada pixel tiene que ser enviada a un registrador -exterior al detector- y desde allí a un amplificador y convertor analógico digital que cuenta los electrones de cada pixel y transforma ese valor en un número de la escala digital. Los CCD necesitan una electrónica externa compleja que eleva el costo de este tipo de detectores. Todos



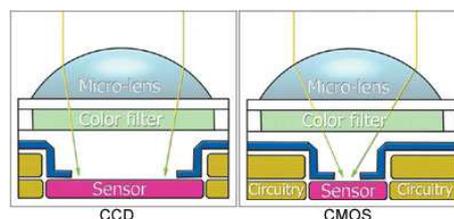
Taller de Fotometría Diferencial

los píxeles de un CCD pasan por una etapa común de amplificación y conversión digital, de este modo se evita el problema de los CMOS en los que actúan amplificadores diferentes para cada píxel. En todos los CCD el ruido electrónico aumenta fuertemente con la temperatura y suele duplicarse cada 6 u 8 °C. En aplicaciones astronómicas de la fotografía CCD es necesario refrigerar los detectores para poder utilizarlos durante largos tiempos de exposición.

- **CMOS:** En el CMOS, a diferencia del CCD, se incorpora un amplificador de la señal eléctrica en cada píxel y es común incluir el conversor digital en el propio chip. La ventaja es que la electrónica puede leer directamente la señal de cada píxel con lo que se soluciona el problema conocido como blooming. La desventaja es que entre los receptores de luz (píxeles) se encuentra mucha electrónica

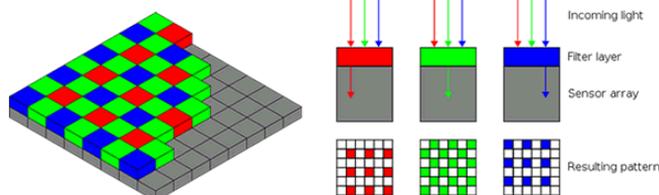


que no es sensible a la luz, lo que implica que no pueda captar tanta luz en una misma superficie del chip. La solución al problema vino no sólo por una mayor densidad de integración, por lo que la electrónica no sensible se reducía en tamaño, sino por la aplicación de microlentes que -a modo de lupa- concentran la luz de cada celda en su píxel. Los sensores CMOS tienen un elevado ruido porque tienen un amplificador por separado en cada píxel y estos amplificadores normalmente no son uniformes por todo el chip y la desigualdad residual será la que genere el ruido. Los sensores CMOS tienen un bajo consumo de energía y son de menor costo que los CCD. Lectura simultánea de mayor número de píxeles, lo que disminuye el tiempo de lectura. Tienen una escasa sensibilidad a la luz ultravioleta e infrarroja.



- **Cámaras color:** Existen cámaras digitales color, pero en realidad son cámaras monocromáticas, pero para poder representar el color y saber si el objeto que estamos viendo es rojo azul verde, los píxeles tienen filtros de diferentes colores que trabajan simultáneamente. Esos filtros solo van a dejar pasar los fotones que vengan en dicha longitud de onda. Los píxeles con filtro azul, van a dejar pasar fotones de esa longitud de onda y el resto los rechaza.

Los píxeles rojos dejan pasar sólo los rojos y lo correspondiente ocurre con los verdes. Si leemos sólo los azules, podemos medir



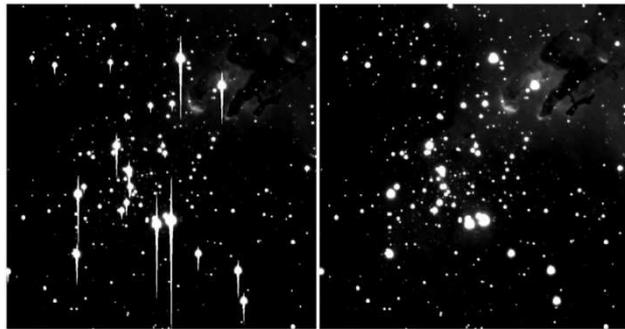
que tan azules este objeto, y así con los otros filtros. La imagen color se logra combinando la información de los tres tipos de filtros, haciendo una sola captura de luz. En astronomía se usan cámaras monocromas y se usan filtros que se anteponen a todo el detector. Se puede sacar imágenes sucesivas en los tres filtros y luego se pueden combinar para convertirla en una imagen de color. De todos modos, para aplicaciones científicas interesa más el análisis de imágenes con filtros adecuados, y no las combinaciones de imágenes en diferentes filtros.

Taller de Fotometría Diferencial

- **Tiempo de lectura:** Cuando termina la exposición a la luz proveniente de un objeto astronómico, en una cámara CCD se produce la lectura de los píxeles, cuya demora suele ser importante. Recién concluida la lectura, los píxeles están en condiciones de ser expuestos para obtener una nueva imagen. En el CMOS el tiempo de lectura o tiempo muerto es menor, y eso permite tener muchos cuadros en pequeños tiempos, lo que lo hace ideal para la observación de eventos cortos, de unos pocos segundos como en el caso de las ocultaciones de estrellas por asteroides. Los CMOS son muy usados en filmadoras. Por ahora, se prefiere el CCD en el uso astronómico, porque -en general- tienen mayor nivel de eficiencia cuántica.
- **Saturación:** Los electrodos que retienen los electrones en cada pixel, tienen una capacidad de almacenamiento de carga que está limitada por las características de su construcción, de manera tal que al alcanzar una determinada cantidad de electrones son incapaces de seguir almacenándolos. En esas condiciones, se dice que el pixel esta “saturado” y pierde la capacidad de seguir reteniendo electrones. En sensores de 16 bits, ese límite de saturación se produce al alcanzar el valor 65.535 cuentas, máximo de la escala digital.

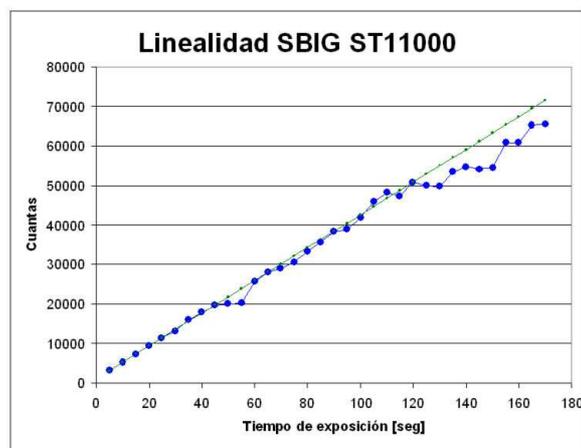
- **Blooming:** La saturación, no suele ocurrir en todo el detector a la vez, sino en los píxeles más iluminados.

Cuando un píxel se satura, los electrones producidos -y que no puede retener- emigran a los píxeles contiguos a lo largo de las columnas que conducen al registrador de lectura. Por eso es frecuente en las imágenes astronómicas digitales ver estrellas



brillantes que vierten luz en franjas perfectamente rectas y largas. Esos desbordes de electrones se conoce con el nombre de “blooming”.

- **Linealidad:** La linealidad se refiere a la proporcionalidad entre la cantidad de fotones que inciden sobre el detector y el valor digitalizado que representa la cantidad de electrones efectivamente leídos por el detector. Si esa proporcionalidad existe, entonces serán válidas las medidas fotométricas. Los sensores CCD son lineales, pero antes de llegar a la saturación, ocurre que los electrones previamente almacenados forman una pantalla electrostática que dificulta la incorporación de los que se vayan generando a continuación. Cuando ello ocurre, se pierde la linealidad y desde allí hasta la saturación la lectura no servirán esos datos para mediciones fotométricas, porque muchos electrones ya no serán



contados. Si no se expone el sensor a la luz, no debería generarse ningún electrón porque no llega ningún fotón al detector, sin embargo los diferentes

Taller de Fotometría Diferencial

componentes electrónicos del CCD generan calor que es detectado por los sensores y eso hará que nunca obtengamos una imagen completamente oscura, lo que falsea la información de la linealidad a bajas cuentas.

- **Offset:** Un problema del Conversor Analógico-Digital es que no detecta señales por debajo de cierto valor (umbral). Puede ocurrir que haya una señal por debajo de ese umbral: luces de objetos muy tenues, como nebulosas, por ejemplo. En esos casos, el CAD indicará un valor de 0 cuentas, y se perderá esa información. Es por ello que se agrega una pre-carga fija a todas las cargas provenientes de los píxeles antes de ingresar al CAD denominada “offset” y que debe ser aproximadamente igual al valor de umbral de entrada al CAD. En las cámaras CCD profesionales el valor del offset suele venir configurado de fábrica. Si se tiene que configurar el offset, se debe realizar capturas: con el menor tiempo de exposición posible y a cámara tapada, para que no entre nada de luz. La imagen que obtengamos reflejará sólo el ruido provocado por los componentes internos de la cámara. Se va subiendo el valor offset para cada imagen, hasta que se empieza a tener un mínimo de señal. El valor del offset es diferente para cada cámara, pero habitualmente se considera correcto si los valores de cuentas de offset oscilan entre 100 y 1000 (para una cámara de 16bits). Es importante tener en cuenta que el valor del Offset puede variar en función de la ganancia.
- **Ganancia:** Vimos que la imagen digital es una cuadrícula de números, uno por píxel, pero los números almacenados allí no significan la cantidad de electrones hallados en cada electrodo. La cantidad de electrones en un electrodo puede llegar a decenas de miles o centenares de miles, y reservar espacio para un número tan grande por cada píxel, haría que los archivos informáticos resultantes fueran demasiado grandes. Lo que se hace es dividir la cantidad de electrones entre un cierto número, llamado “ganancia” de la cámara. Entonces: las cuentas en un píxel no es la cantidad real de electrones, sino el resultado de dividir la cantidad de electrones por la ganancia. La ganancia es el número de electrones por cada cuenta en la escala digital. En cámaras CCD profesionales el valor de la ganancia suele venir configurado de fábrica. Si se satura un píxel con electrones, al dividir la cantidad de electrones por la ganancia ideal, debe dar 65535 (si la cámara es de 16 bits). Si la ganancia es mayor a la ideal, el píxel saturado dará menos de 65535 cuentas, por lo que el rango dinámico disminuirá, perdiendo la capacidad de detectar pequeñas variaciones de brillo. Si la ganancia es menor a la ideal, ocurrirá que muchos píxeles -antes de saturar- ya alcanzará el máximo nivel de cuentas (65535 cuentas), por lo que perderemos capacidad de ver detalles en objetos brillantes. Si se tiene que configurar la ganancia, basta con apuntar la cámara a una luz brillante que asegure que cada píxel se sature. En esta situación tenemos que ir ajustando la ganancia hasta que la imagen final no supere el máximo valor que puede entregar el CAD, en cámaras de 16 bits buscaremos que cada píxel se aproxime lo más posible a 65535.
- **Ruido:** Se llama “ruido” a las cuentas que aparecen en la imagen final y que no tienen su origen en aquello que se pretende medir. Hay distintas fuentes de ruido. Hay multitud de fuentes de ruido, pero muchas son de poca importancia. Consideremos las más importantes:
 - Ruido térmico: también llamada con más frecuencia: corriente de oscuridad. Se deben a la generación aleatoria de electrones -no por fotones- que son capturados por el campo eléctrico en el píxel y su intensidad aumenta con la temperatura.

Taller de Fotometría Diferencial

- Rayos cósmicos: Una fuente no despreciable de ruido en los CCD es el impacto de rayos cósmicos. Son partículas energéticas procedentes del espacio interestelar, que pueden atravesar el silicio del detector y causar un verdadero alud de miles de electrones, normalmente concentrados en unos pocos píxeles, y aparecen como puntos o rayas cortas muy brillantes al representar las imágenes en pantalla. Por supuesto, cuanto mayor sea el tiempo de exposición de una toma, mayor es la cantidad de rayos cósmicos que la deterioran. Además, puede comprobarse que el número de impactos de rayos cósmicos en los detectores aumenta con la altura del observatorio.
- Ruido de lectura: En el posterior proceso de transferencia de los electrones desde el pixel al canal de lectura y -finalmente- en la amplificación y conversión, es inevitable que ocurran perturbaciones aleatorias que degradan la calidad de la medida. Esas perturbaciones se conocen como “ruido de lectura”.