

CMOS contro CCD

Fine di un'era?

Prima Parte

Differenze e proprietà del CMOS

di Mauro Narduzzi - Skypoint Srl

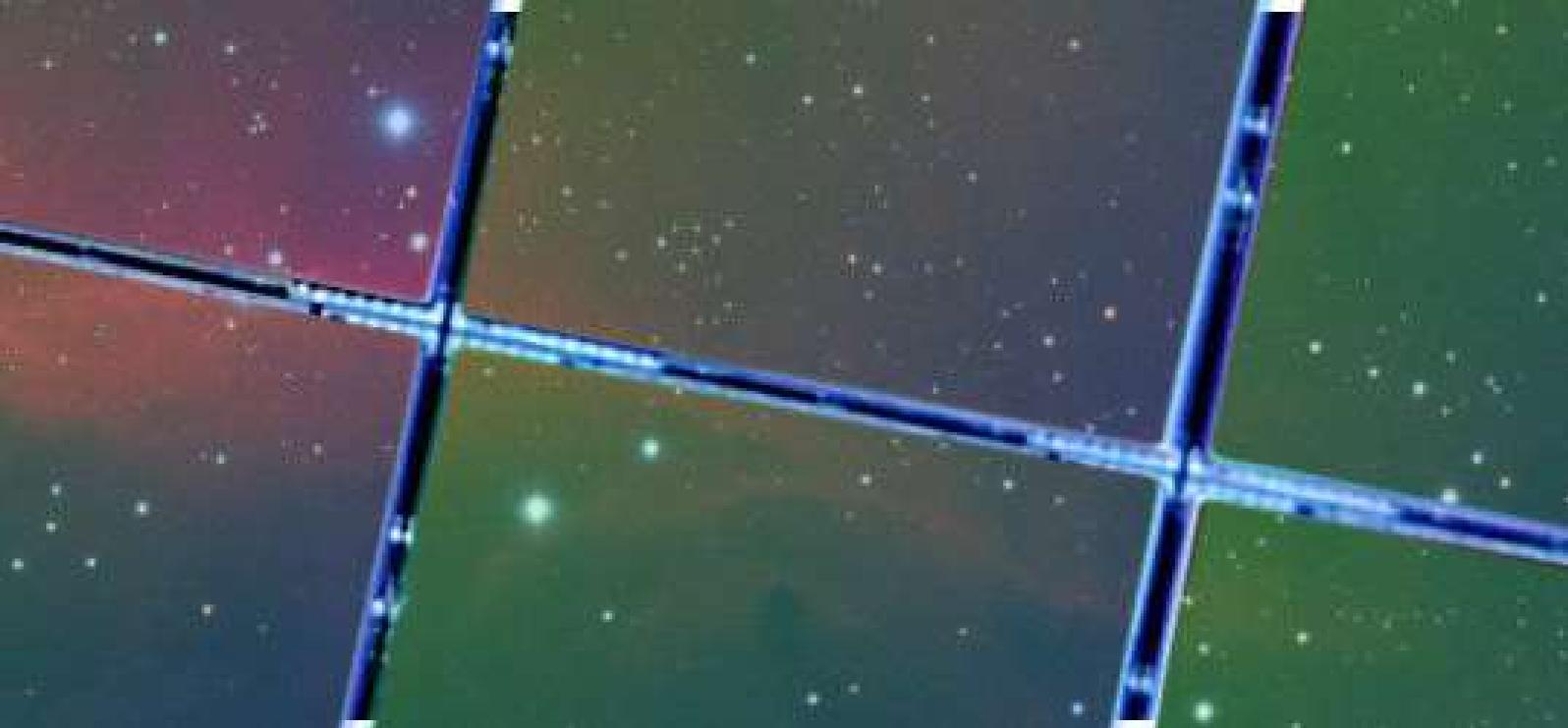
SKYPOINT®

Di recente stiamo assistendo al proliferare di camere dotate di **sensori CMOS**. In ambito reflex digitali e mirrorless la transizione verso la tecnologia CMOS pare ormai inarrestabile, per non dire che sia ormai compiuta. Anche in astronomia cominciano finalmente a presentarsi soluzioni mature che includono all'interno sensori con questa tecnologia, come ad esempio le camere ASI e QHYCCD.

D'altra parte è noto che il produttore degli efficientissimi sensori CCD Sony stia dismettendo l'intera produzione dei sensori basati su tecnologia CCD in favore della tecnologia CMOS. Il grande produttore ON Semiconductor, leader mondiale nel settore, ha ancora in produzione i celebri sensori CCD KAF e KAI, inventati anni fa in seno a Kodak e che tanto successo hanno avuto negli ultimi 20 e più anni. ON Semiconductor non pare affatto intenzionato a cessare la produzione di sensori CCD e, anzi, ha rilasciato da non molto

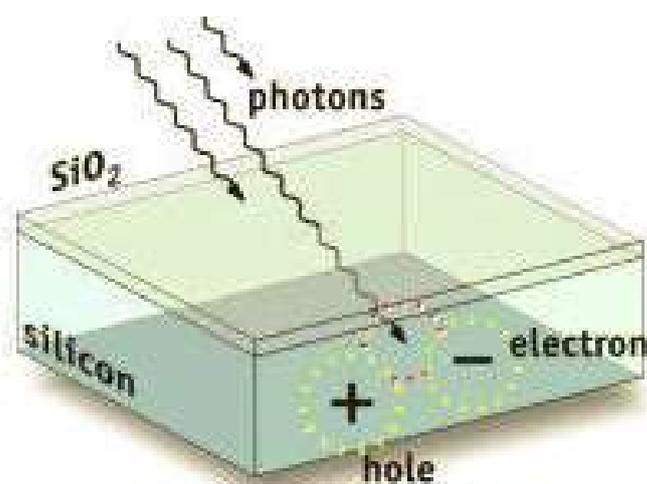
tempo il sensore KAF-16200 con formato APS-H che sta avendo un'ottima risposta presso gli appassionati.

Insomma, il CCD ancora non è morto, ma di certo sta subendo una concorrenza sempre più agguerrita da parte del CMOS. E sono pronto a scommettere che tutto questo farà molto bene al mercato dei sensori per astrofotografia deep-sky; in astrofotografia planetaria ormai la tecnologia CMOS la fa già da padrona da diverso tempo. Nel seguito di questo articolo cercherò di parlare nel dettaglio delle differenze tecnologiche tra tecnologia CCD e tecnologia CMOS. Dopo una veloce infarinatura sulle caratteristiche salienti delle due grandi famiglie di sensori, cercherò di descrivere come utilizzare correttamente una camera CMOS per ottenere il massimo dei risultati in astrofotografia deepsky. Molte sono infatti le peculiarità cui tener conto e conoscerle a fondo consentirà di raggiungere risultati per certi versi sorprendenti.



Differenze tra le tecnologie CCD e CMOS FSI e BSI

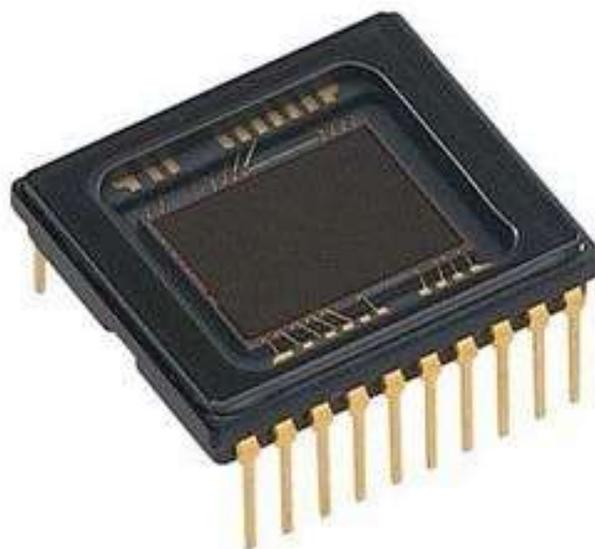
Sia la tecnologia CCD che la tecnologia CMOS si basano sull'utilizzo di **diodi fotosensibili**. L'unità fotosensibile, il diodo, viene colpito da un raggio di luce che viene convertito in carica elettrica grazie al cosiddetto effetto fotoelettrico (il principio fu scoperto da Albert Einstein e che gli valse il Nobel per la Fisica nel 1921).

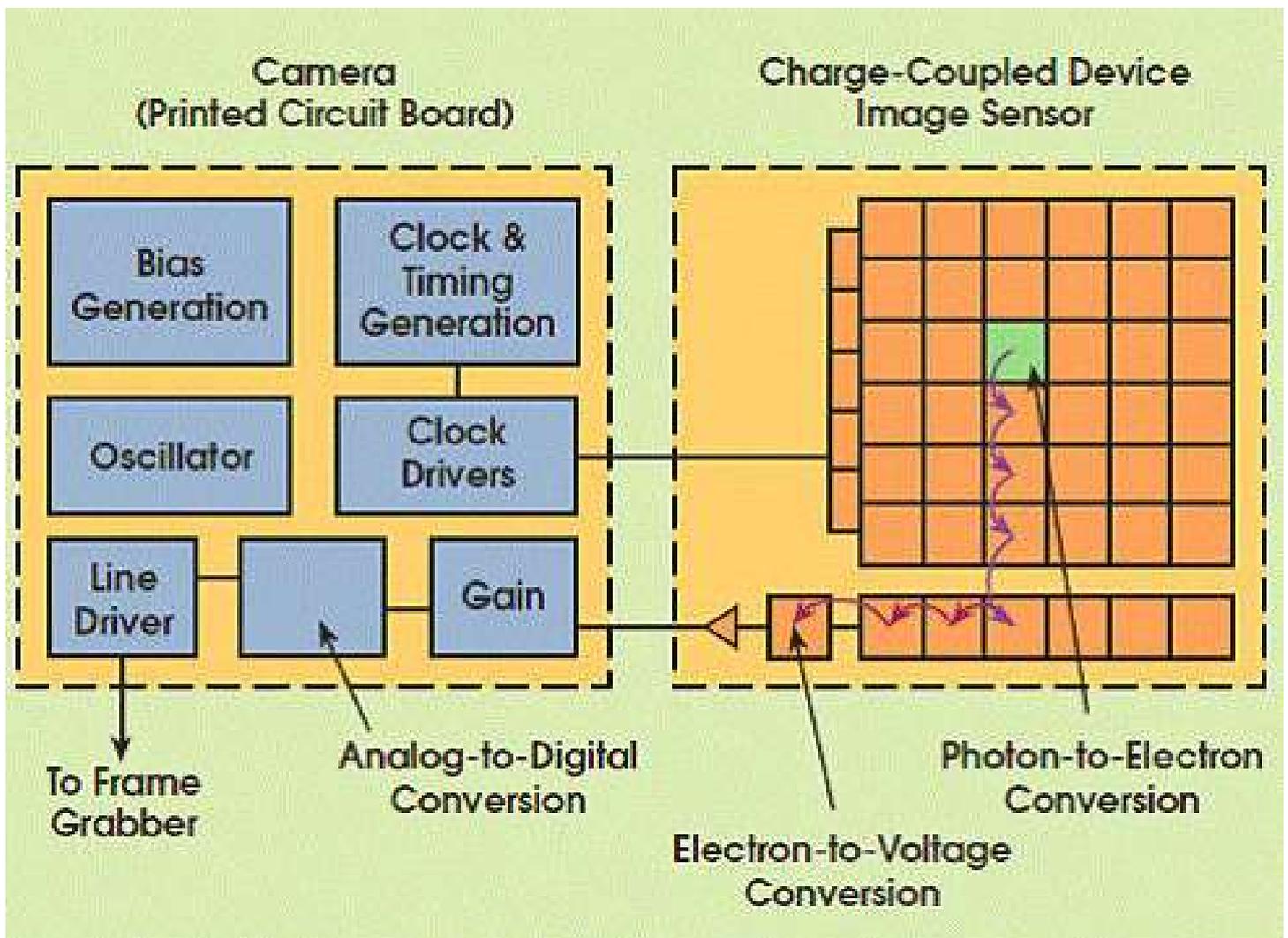


Sopra. Sia il CCD sia il CMOS basano il loro funzionamento sul cosiddetto effetto fotoelettrico.

Il sensore CCD

In un sensore CCD, acronimo di *Charged-Coupled Device* (Dispositivo ad Accoppiamento di Carica), la carica accumulata da ogni elemento fotosensibile (pixel) viene trasferita verso un numero limitato (spesso anche solo uno) di nodi di uscita per essere poi convertita in volt e veicolata come un segnale analogico verso il convertitore analogico/digitale o A/D. Tipicamente il convertitore A/D ha una risoluzione di 16 bit corrispondenti a 65536 livelli di grigio. Ciascun pixel ha il solo scopo di convertire la luce in carica elettrica e l'uniformità del segnale





Sopra. Diagramma che illustra la composizione di una camera CCD.

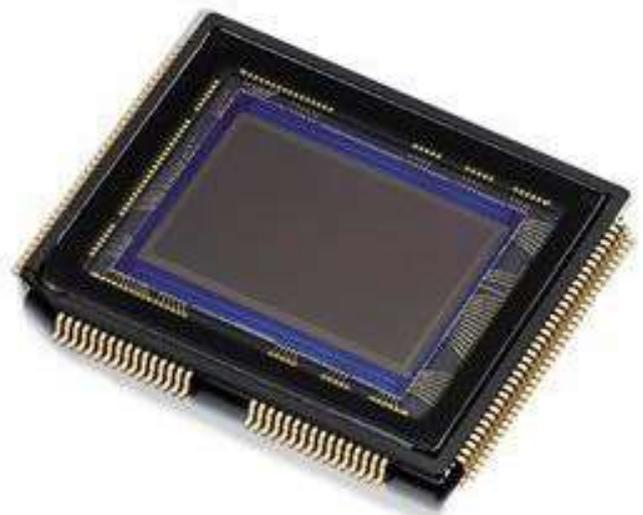
(caratteristica distintiva del CCD) è molto elevata. Anche il rumore è molto basso. L'elaborazione successiva del segnale avviene esternamente al sensore stesso e l'elettronica utilizzata deve essere piuttosto sofisticata. Ma per quanto

sofisticata sia ha il grosso limite di introdurre un rumore di lettura piuttosto elevato se confrontato con la tecnologia CMOS.

Si veda lo schema in alto.

Il sensore CMOS

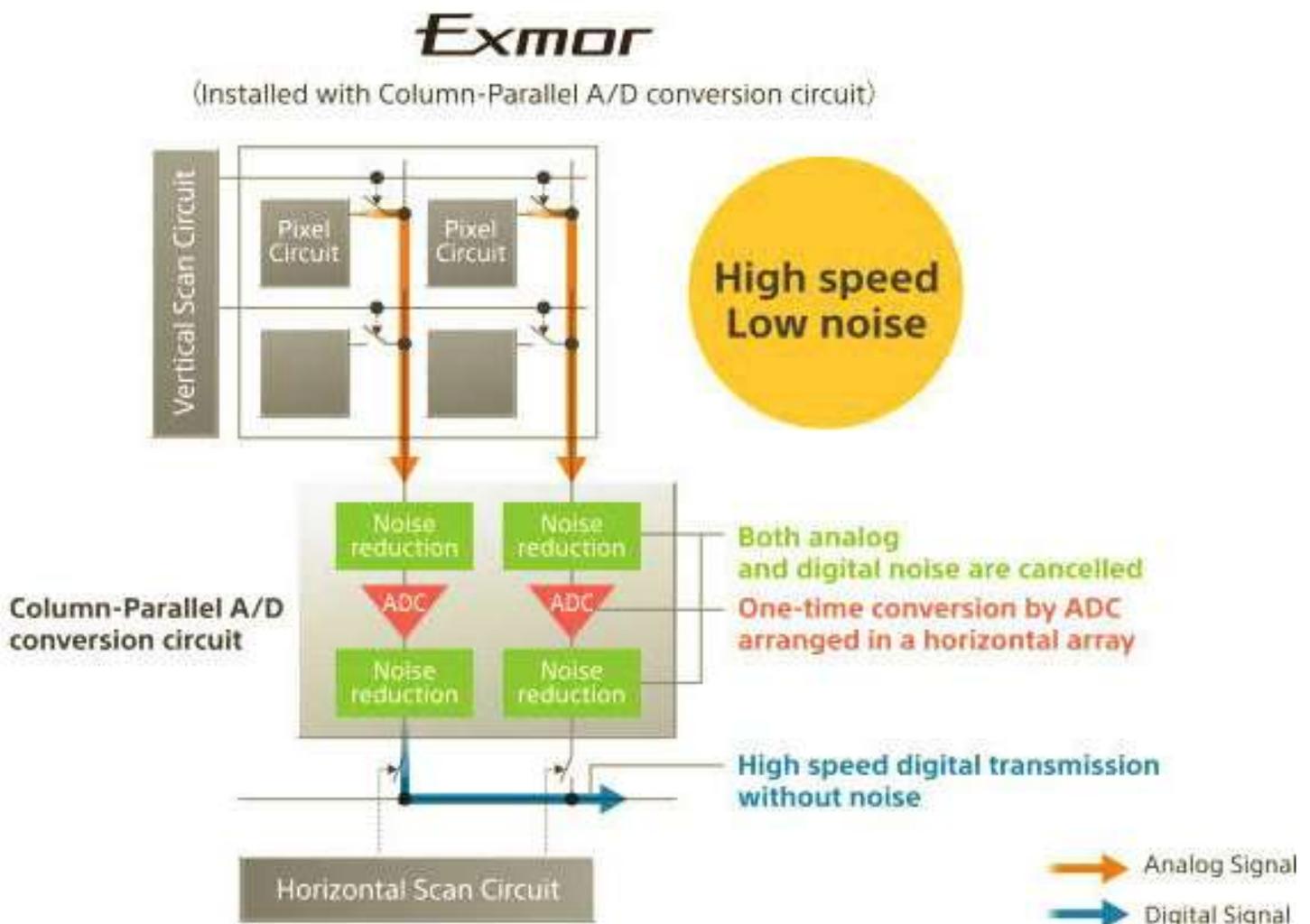
Nel sensore CMOS ogni unità fotosensibile contiene la propria circuiteria, per la conversione da numero di elettroni accumulati a tensione, mentre ogni colonna contiene l'elettronica per la conversione digitale del segnale, eventualmente già normalizzata da filtri contro il rumore, ecc. **L'elaborazione del segnale avviene dunque ad alto grado di parallelismo e con un'efficienza e una velocità totale di elaborazione del segnale molto elevata.**



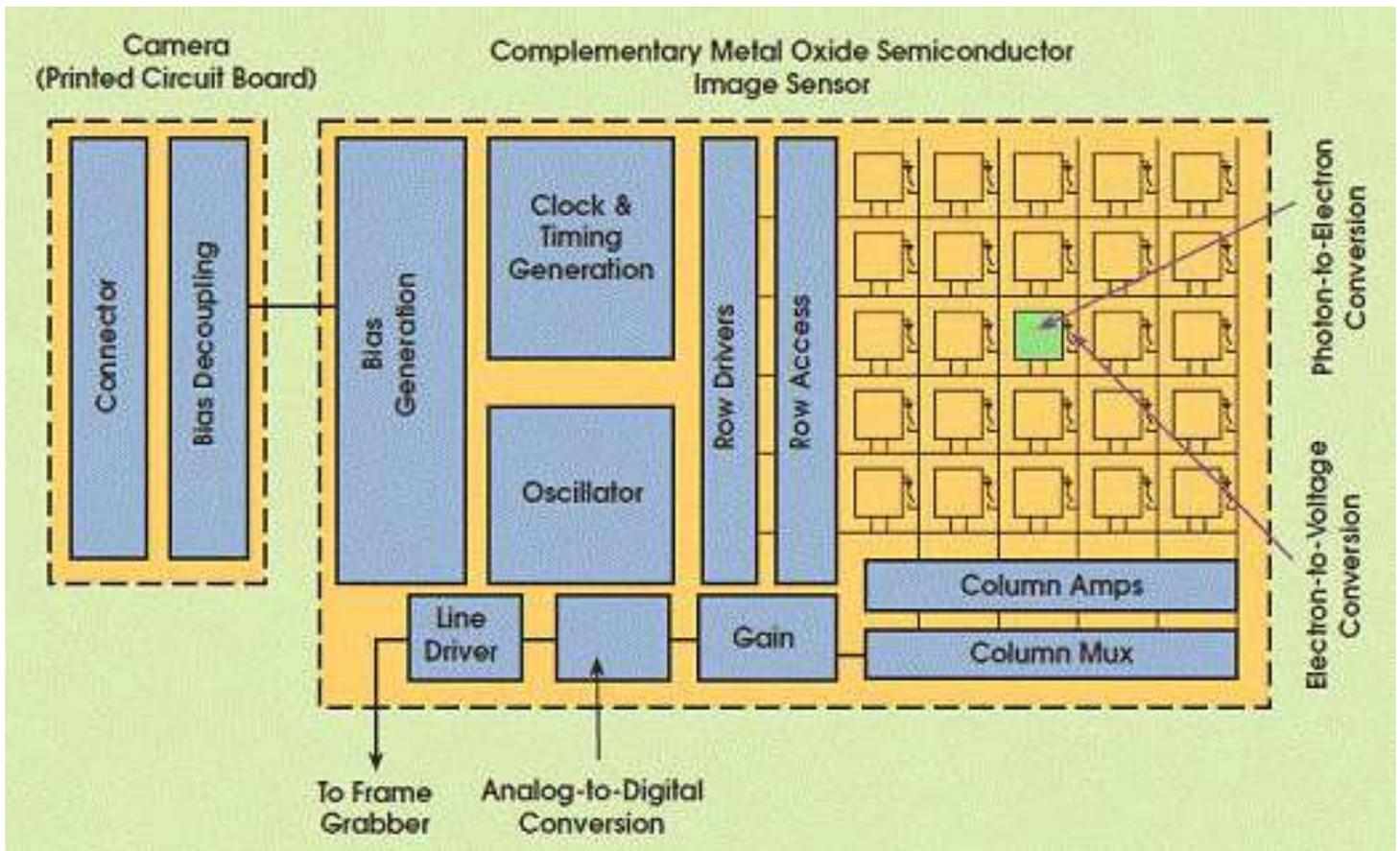
L'uniformità del sensore CMOS rispetto al sensore CCD è storicamente più bassa: è facile rilevare bordi illuminati (*amp glow*), righe verticali, risposta non uniforme dei pixel, ecc. Tuttavia la continua attività di ricerca di alcuni produttori ha portato a sensori sempre più efficienti e puliti. Tra questi vale la pena citare Canon, Panasonic, Samsung e soprattutto Sony – i cui sensori CMOS sono ormai tra i migliori e più diffusi in ogni settore, compreso quello delle camere per astronomia, e rappresentano lo stato dell'arte in fatto di tecnologia CMOS. In particolare Sony è stata la prima a introdurre sul mercato, con la tecnologia proprietaria *Exmor*, il parallelismo della circuiteria per la conversione analogico-digitale e la riduzione del rumore. **Si veda lo schema successivo.**

Sebbene la complessità del sensore CMOS sia molto più elevata rispetto al sensore CCD, le economie di scala e la continua attività di ricerca hanno permesso di assottigliare sempre di più il gap e di offrire quindi altissima tecnologia a costi sempre più accessibili.

Un'evoluzione interessante e molto recente che ha coinvolto la tecnologia CMOS è l'implementazione di **sensori** cosiddetti **retroilluminati** (o back-illuminated o BSI) in cui la circuiteria è posta sotto al fotodiodo sensibile, mentre nella tecnologia CMOS convenzionale (front-illuminated o FSI) la circuiteria è posta frontalmente all'elemento sensibile causando una certa diaframmatatura che ne abbassa l'efficienza complessiva.



Sopra - Schema del sensore CMOS con tecnologia Exmor come implementato da Sony.



Sopra. Diagramma che illustra la composizione di una camera CMOS.

I sensori retroilluminati sono disponibili da tempo anche nelle camere CCD. Queste sono però tipicamente disponibili per il solo ambito professionale, dati i costi molto elevati e le caratteristiche intrinseche che le rendono usabili prevalentemente in campo scientifico.

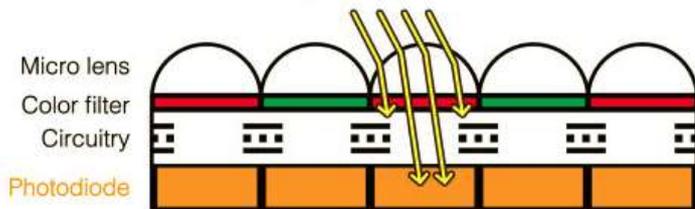
Ancora una volta Sony è riuscita per prima a introdurre nel mercato questa evoluzione del sensore CMOS, inizialmente con la sua tecnologia Exmor R e introducendo quella Starvis in seguito. La tecnologia Starvis è un'evoluzione della Exmor R nel senso che estende la campana di sensibilità anche verso il vicino IR. Il settore dell'imaging a bassa illuminazione gode dunque di sensori dedicati proposti a prezzi molto competitivi e dotati di sensibilità elevatissima. L'efficienza quantica è nell'ordine del 70/80% e anche oltre! Questo tipo di sensori sta già trovando impiego anche in astrofotografia estetica, dapprima con soluzioni per l'alta risoluzione planetaria (si pensi ai sensori Sony IMX290 o IMX178 montati su molte camere per l'alta risoluzione come le

QHYCCD QHY5III290), e più di recente anche su camere CMOS raffreddate pensate per la ripresa del profondo cielo (si veda la recente QHYCCD 183C dotata di sensore Sony Exmor R IMX183 a colori da ben 20 Megapixel).

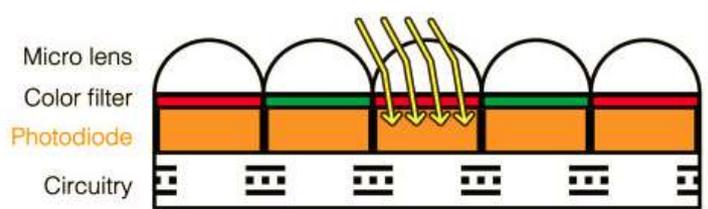


Sopra. Alcune camere per alta risoluzione QHYCCD dotate di sensore CMOS Sony Exmor.

Conventional CMOS image sensor



Backside illumination CMOS image sensor



Sopra. Tecnologia CMOS FSI e BSI a confronto.

Proprietà dei sensori CMOS

Come abbiamo visto, dal punto di vista tecnologico le differenze tra sensori CCD e sensori CMOS sono profonde. Vi sono però anche altre proprietà importanti che vanno a impattare sulle modalità d'uso. Conoscere tali differenze permetterà di ottenere risultati migliori da entrambi i tipi di sensori.

Alcune caratteristiche del sensore CMOS vengono dichiarate come profondamente limitative nei confronti del sensore CCD (prendiamo ad esempio la gamma dinamica molto ridotta).

Ma è veramente così? Non proprio, e nel corso dei prossimi paragrafi cercheremo di capire perché.

Bassissimo rumore di lettura

I sensori CMOS di ultima generazione sono caratterizzati da un rumore di lettura (**Readout Noise** o **RON**) estremamente basso, dell'ordine di 1 o 2 e-. In pratica, il contributo al rumore totale della camera CMOS nel processo di lettura del singolo frame è estremamente ridotto se comparato con il rumore di lettura tipico di una camera CCD. Questo garantisce ai sensori CMOS di ultima generazione una efficienza nettamente superiore rispetto ai CCD, efficienza che però deve essere valutata includendo anche le altre proprietà di cui andremo a parlare in seguito. I migliori sensori CCD attualmente disponibili sul mercato, presi tra quelli commercialmente disponibili per il mercato amatoriale, raggiungono valori di rumore di lettura di 4/5 e-. Il popolare

sensore CCD KAF-8300 raggiunge valori di 8/9 e- nei casi migliori. Valori di RON così elevati vanno a compromettere parzialmente le prestazioni in condizioni di scarsissimo rapporto segnale/rumore (ad esempio nelle riprese a banda molto stretta) e costringono a eseguire singole pose molto lunghe per cercare di limitare il più possibile il contributo del RON nello *stacking finale*.

Corrente di buio

Partiamo da un dato di fatto: nei sensori più recenti, sia che essi siano CCD o che siano invece CMOS, la corrente di buio (**dark current**) – che ricordiamo aumenta con la lunghezza dell'esposizione e decresce col calare della temperatura – ormai non rappresenta più un problema. Il livello di rumore accumulato nel tempo è talmente basso da poter addirittura fare a meno della calibrazione con dark frame e bias frame, a patto di riuscire a raffreddare sufficientemente il sensore.

Chi scrive fa spesso a meno dei dark frame usando un CCD basato sul diffuso sensore KAF-8300, raffreddato a $-30/-40^{\circ}\text{C}$, cercando però di integrare molti frame, eseguire un buon *dithering* e utilizzare tecniche di *stacking* con eliminazione dei cosiddetti *outliers* (ad esempio algoritmi di somma complessi come Sigma Clipping, SD Mask, etc.).

Con i sensori CMOS dobbiamo però tenere in considerazione le varie disuniformità che si

possono rilevare sui frame. Ad esempio è comune rilevare banding verticale o il già citato amp glow, un fenomeno di elettroluminescenza che può capitare sul bordo dei frame causato dall'elettronica stessa. L'amplificatore di lettura genera infatti continuamente calore (ossia radiazione infrarossa), calore che a sua volta genera elettroni sulla matrice di pixel del sensore. Questi elettroni si vanno a sommare agli elettroni che giungono sugli elementi fotosensibili dall'esterno, falsando il valore reale.

Normalmente questo fenomeno è visibile nelle fotografie a lunga esposizione (appunto perché l'amplificatore è acceso per parecchio tempo) e tende a concentrarsi in una zona ben definita del sensore (tipicamente nella zona più vicina all'amplificatore stesso). Nell'immagine **qui sopra** la zona in alto a sinistra è molto chiara: l'alone chiaro è appunto l'amp glow.

È sufficiente eseguire una calibrazione con dark frame per eliminare questo alone, ma alcune soluzioni in commercio includono accorgimenti in grado di inibire la formazione dell'amp glow, anche se non sono in grado di correggere del tutto il problema. QHYCCD, ad esempio, con le sue serie di camere CMOS raffreddate, tipo la QHY163M o la QHY183C, ha implementato questo tipo di sistema che pare funzionare abbastanza bene.

Si noti che l'amp glow è un fenomeno che è possibile rilevare anche sui CCD, tuttavia i produttori hanno trovato già da tempo soluzioni efficaci per la completa soppressione di tale effetto.

Il gain (guadagno)

Una proprietà molto importante delle camere basate su sensori CMOS è la possibilità di variare il **gain** (o guadagno). Anche un sensore CCD ha un gain e un *offset* (di cui parleremo successivamente) che possono essere regolati, ma tipicamente questi valori vengono impostati in fabbrica dal produttore in modo tale da essere



Sopra. Esempio di amp glow.

ottimizzati rispetto all'elettronica che accompagna il sensore, pena un decadimento netto delle prestazioni. Al più si hanno gain (e offset) diversi per differenti livelli di *binning hardware* (ciò non si applica ai sensori CMOS in quanto il binning avviene solamente via software, è dunque un binning fittizio).

Ma cos'è il gain? In ambito elettronico il **gain** è l'amplificazione del segnale luminoso rilevato dal sensore, convertito in volt, per mezzo di un circuito di amplificazione dedicato. Il circuito di amplificazione riceve in input un valore di voltaggio che viene poi aumentato (amplificato) in output. Il gain si esprime dunque in e-/ADU.

L'amplificazione del voltaggio (ossia del segnale luminoso convertito da e- in V) consente di abbassare ulteriormente il rumore di lettura, a scapito però della gamma dinamica che viene fortemente compressa all'aumentare del gain. Questo è il compromesso di cui dobbiamo tenere conto, e la cui spiegazione risiede nel fatto che il convertitore A/D ha una risoluzione fissa (ad esempio 12 bit).

Per questo motivo, per le lunghe esposizioni è bene non eccedere col guadagno, mentre per le esposizioni molto corte è possibile alzare di moltissimo il valore di gain. L'ultimo caso si

applica in particolar modo alle riprese in alta risoluzione di Luna e pianeti.

Se stabiliamo un gain pari 1 e-/ADU avremo il cosiddetto **unity gain** o gain unitario. Così facendo tramite il convertitore analogico/digitale (o convertitore A/D) andremo ad assegnare a ogni elettrone catturato esattamente un valore digitale o **ADU** (Analog to Digital Unit). In altre parole non vi sarà alcuna amplificazione o attenuazione del segnale in arrivo.

La differenza rispetto al CCD è in questo caso direttamente dipendente dall'implementazione tecnologica: nel CCD l'amplificazione avviene esternamente al sensore stesso tramite una circuiteria dedicata, cui confluiscono i dati in arrivo dall'intero sensore, dunque vi è amplificazione sia del segnale sia del rumore stesso e questo rumore aumenta considerevolmente a gain particolarmente elevati. Nel CMOS, invece, l'amplificazione avviene attraverso una circuiteria dedicata a ogni colonna o addirittura a ogni elemento sensibile. Si modifica direttamente l'efficienza di conversione elettrone/tensione e vengono quindi forniti al resto dell'elettronica segnali già amplificati, di conseguenza meno sensibili ai disturbi. È per questo che il rumore di lettura nel CMOS è meno sensibile al variare del gain e anzi, alzando il gain si abbassa il rumore di lettura.

Una nota finale sull'implementazione della variazione del gain sulle camere CMOS.

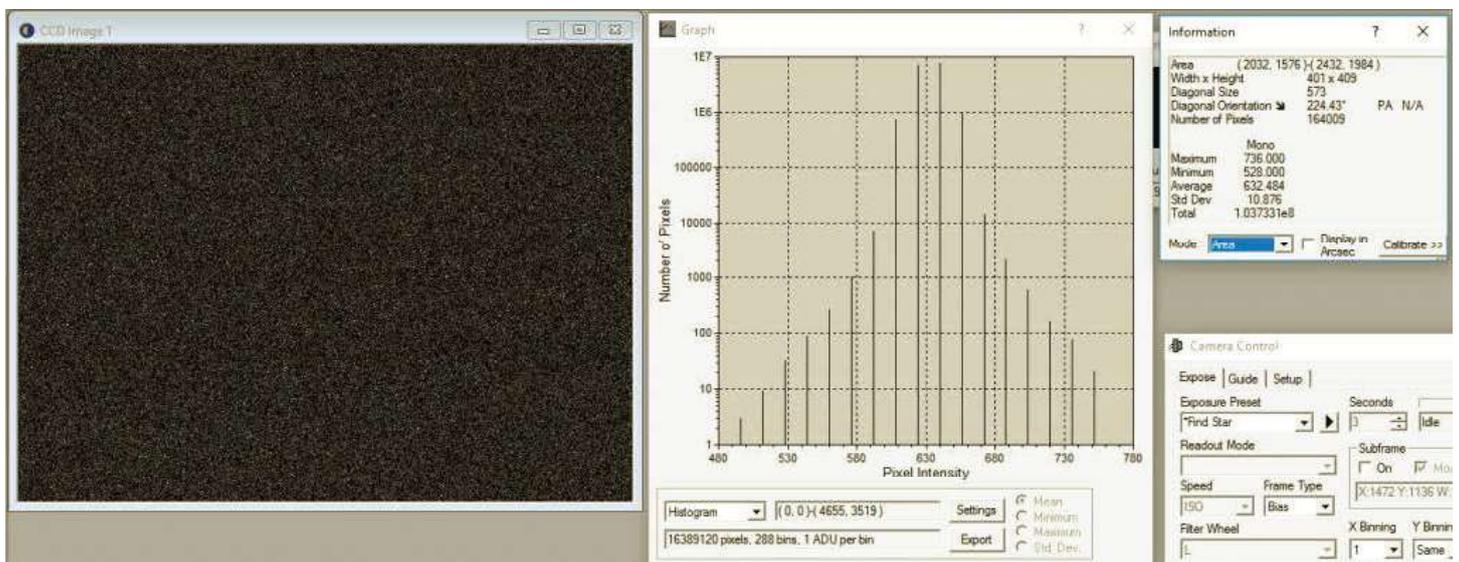
Tipicamente il valore di gain configurabile sulle camere CMOS non indica esattamente il valore di gain in e-/ADU, ma viene espresso usando scale differenti più facilmente memorizzabili. Per mezzo di opportune misure sarà possibile associare il valore di gain alla scala e-/gain e trovare così il valore reale dell'unity gain secondo la scala usata dal produttore della camera CMOS. Ad esempio le camere raffreddate QHYCCD Coldmos hanno valori di gain come 0, 7, 12, 15, 20, 30, ecc. e il gain unitario nella camera CMOS QHYCCD QHY163M si ottiene impostando un gain software di circa 12.

L'offset (o livello di bias)

Oltre al gain esiste un altro parametro correlato che deve essere contestualmente regolato.

Stiamo parlando dell'**offset** o livello di bias.

Lo scopo dell'offset è quello di incrementare il valore di bias del segnale. Dal momento che il segnale ha una sua fluttuazione statistica, è necessario indicare un valore fisso incrementale che viene aggiunto al segnale e che permetta di evitare valori negativi in lettura, che non



Sopra. Istogramma di un bias frame ripreso con camera CMOS raffreddata QHY163M con gain = 0 e offset = 40: l'istogramma è completo e con valori che partono da circa 400 ADU, quindi il valore di offset è sufficiente.

potrebbero essere gestiti dal convertitore A/D. All'aumentare del gain sarà dunque necessario alzare anche il valore dell'offset. Come capire quale valore di offset impostare? Un metodo empirico di valutazione molto semplice è questo: **per un prefissato valore di gain sarà necessario controllare che la campana dell'istogramma di un bias frame (una singola ripresa di tempo minimo possibile) non risulti tagliata, ovvero che non ci siano troppi pixel con valori ADU pari a zero.** Se la campana risulta tagliata allora bisogna alzare l'offset. Inoltre bisognerà considerare un po' di margine per le pose un po' più lunghe, l'istogramma tende infatti a "spostarsi" verso sinistra (ossia verso il valore zero) all'aumentare della posa.

Nelle camere CMOS QHYCCD tipo QHY163M consiglio di impostare un valore di offset pari ad almeno 4 volte il valore del gain desiderato. Ad esempio a gain 12 corrisponderà offset 48.

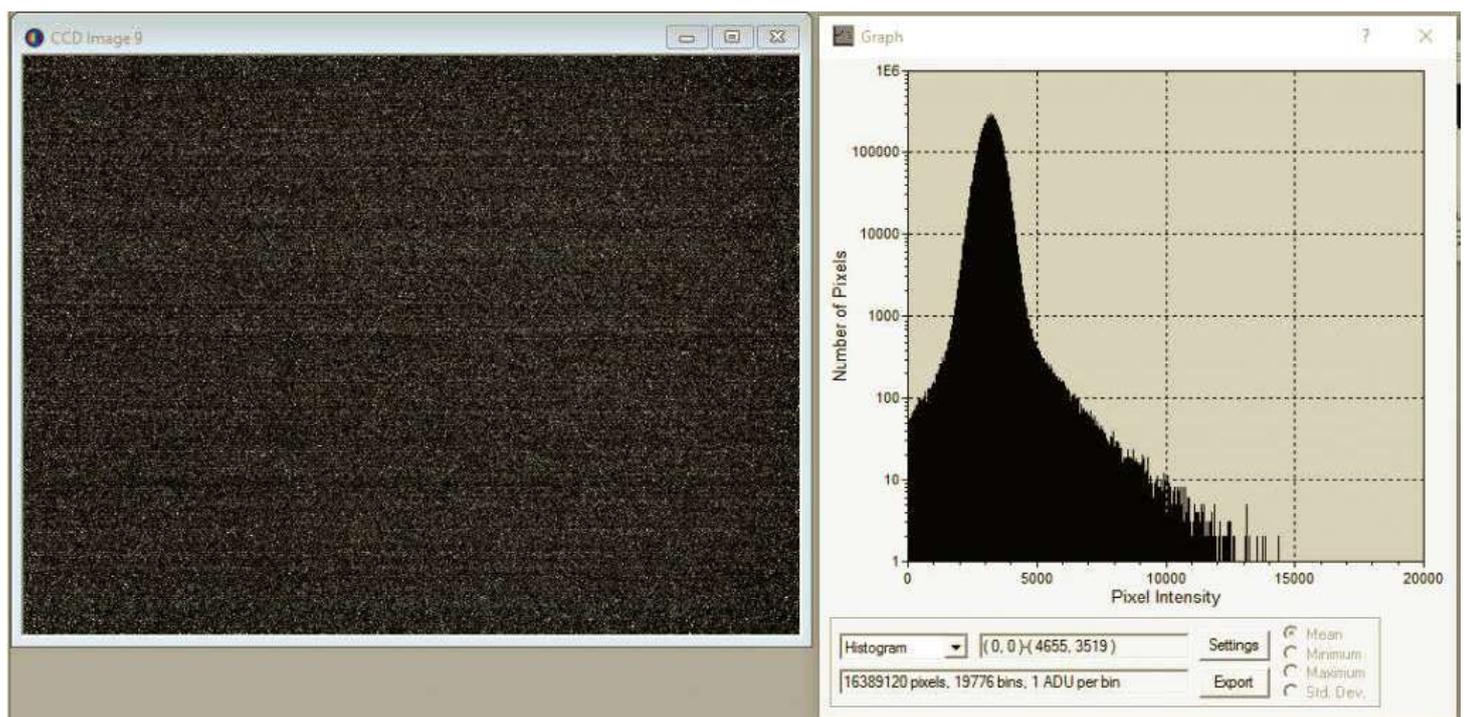
Convertitore A/D a 12 bit e a 16 bit

Un'altra proprietà molto importante dei sensori CMOS è la risoluzione del convertitore analogico/

digitale (A/D). Tipicamente questa è ridotta a soli 12 bit (in alcuni casi 14 bit, specie nei sensori CMOS destinati a fotocamere digitali), mentre nei CCD è di ben 16 bit.

Curiosamente una camera CCD per astrofotografia (lasciando da parte sensori ad uso scientifico) genera tipicamente una gamma dinamica molto bassa tanto che un convertitore A/D da 16 bit è spesso oltremodo sovradimensionato. Un sensore CMOS invece, grazie al rumore di lettura estremamente contenuto, è in grado di generare una gamma dinamica piuttosto elevata tanto che un convertitore A/D a 12 bit (capace di soli 4096 livelli di grigio) può essere limitante in quanto non in grado di discretizzare completamente tutta la gamma dinamica a disposizione.

Perché allora nei sensori CMOS la risoluzione del convertitore A/D è così bassa? Le ragioni sono per lo più pratiche. Non dobbiamo dimenticarci infatti che non sono sensori progettati appositamente per il mondo dell'imaging astronomico, quanto piuttosto per un uso generico in svariati ambiti. Probabilmente si è ritenuto che una risoluzione di 12 bit fosse un compromesso sufficiente, in grado di dare una profondità sufficientemente elevata



Sopra. Istantanea di un bias frame ripreso con camera CMOS raffreddata QHY163M con gain = 20 e offset = 40: si noti come ora l'istogramma sia invece tagliato con molti pixel con valore di ADU pari a zero, quindi il valore di offset è ora insufficiente. Sarà necessario alzare tale valore.

unitamente a una velocità di conversione sufficientemente veloce. Laddove è veramente necessaria una gamma dinamica più elevata (ad esempio fotocamere digitali) allora la risoluzione del convertitore A/D è generalmente di 14 bit (pari a 16384 livelli) e la velocità di conversione cala drasticamente.

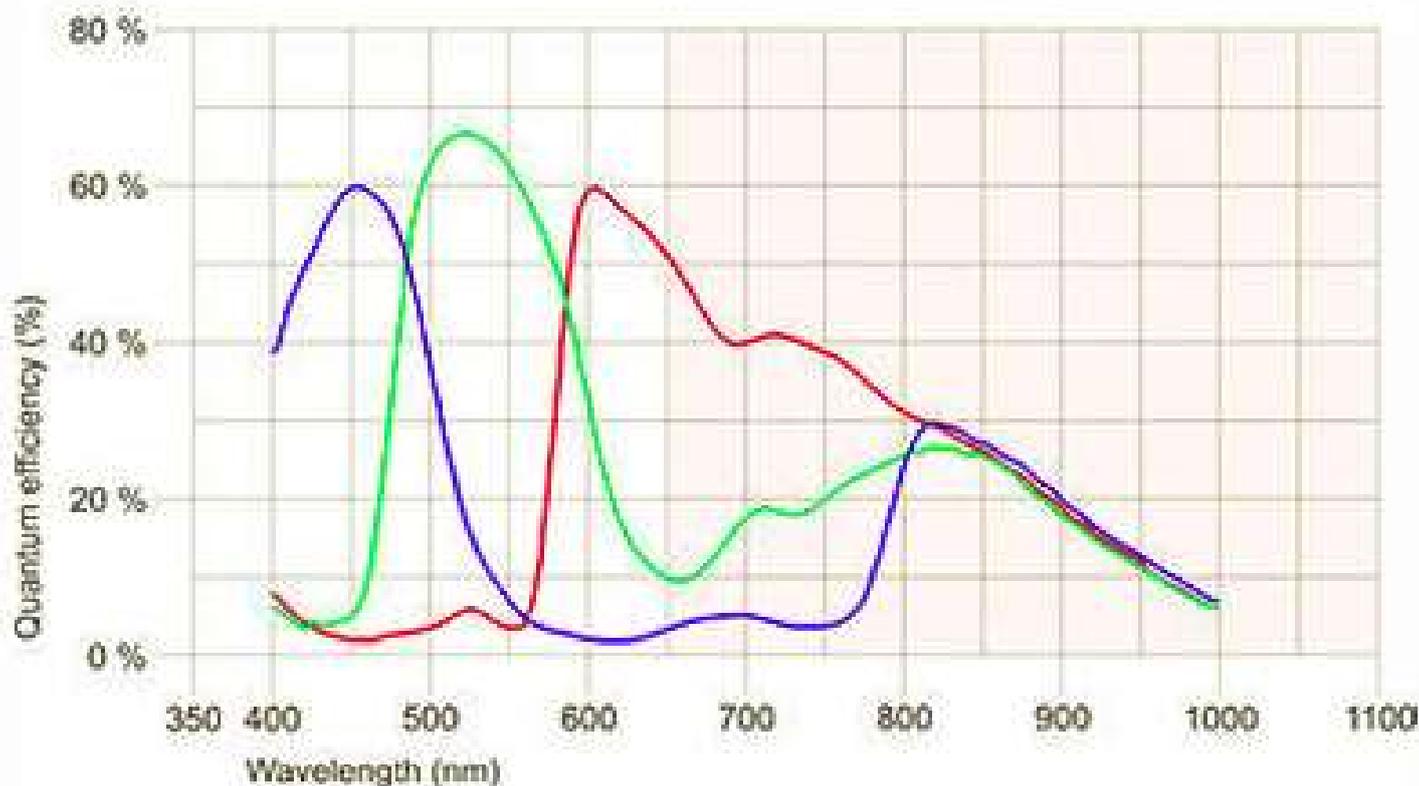
Un vantaggio tangibile dato da un convertitore a bassa risoluzione è la **velocità di conversione estremamente elevata** oltre ad un'ampiezza di banda generata non troppo grande. Se pensiamo al flusso dati generato da una camera per alta risoluzione, capace di generare tantissime immagini al secondo, si capisce che inviare un flusso dati a 12 bit sarà enormemente meno impegnativo che inviare un flusso dati a 16 bit. Anzi, in alta risoluzione si tende tipicamente a ridurre addirittura a 8 bit così da avere un flusso dati ancora più veloce per poter alzare ancora di più il numero di frame per secondo e godere appieno dei vantaggi del *lucky imaging*. Dobbiamo anche considerare il fatto che all'aumentare del numero di pose si assiste anche a un aumento della dinamica. Siccome i sensori CMOS godono di certi vantaggi quando usati con

tempi di posa molto brevi, a patto di integrare tantissime immagini, si capisce che anche un convertitore A/D a bassa risoluzione possa essere sufficiente. Approfondiremo più avanti questo importantissimo aspetto.

Alta efficienza quantica

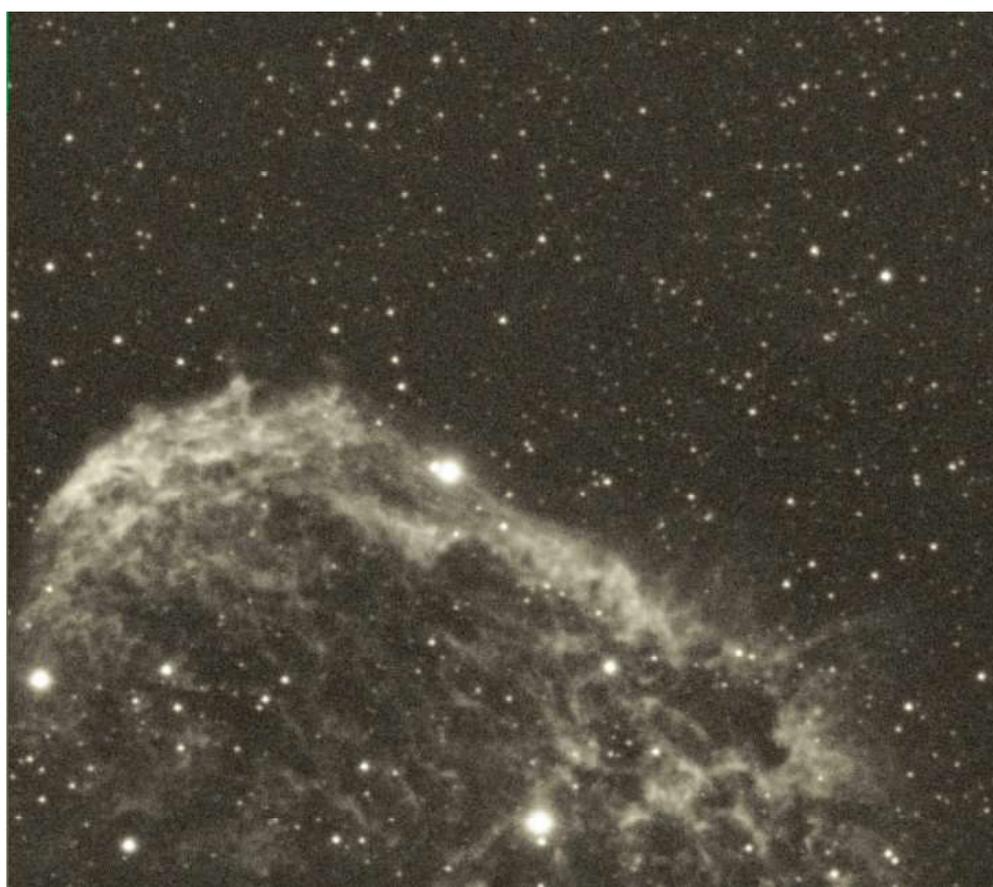
L'evoluzione tecnologica dei sensori CMOS ha consentito di raggiungere valori di **efficienza quantica (QE)** molto elevati, quanto – se non oltre – i migliori sensori CCD. L'uso combinato di microlenti ed eventualmente della retroilluminazione (come nei sensori CMOS Sony Exmor R e Starvis) consentono punte di 70% circa di QE, con picco di sensibilità generalmente nel verde.

Sotto. Diagramma dell'efficienza quantica assoluta del sensore CMOS retroilluminato Sony IMX290 dotato sia della tecnologia Exmor R che della tecnologia Starvis in grado di estendere la sensibilità anche nel vicino infrarosso.



Dimensione dei Pixel

L'unione di alta efficienza quantica e basso rumore di lettura conferisce un'altissima efficienza globale del sensore CMOS se confrontato al sensore CCD. Tipicamente però tale efficienza viene parzialmente limitata dalla



piccola dimensione dell'unità fotosensibile (il pixel), quasi sempre inferiore a 5 micron con poche eccezioni. Questo implica tutta una serie di effetti positivi e negativi che sarebbe difficile elencare completamente. Qui accenniamo

solamente ad alcuni che sarebbe opportuno tenere in considerazione.

Di positivo c'è sicuramente che la risoluzione, a parità di ottica impiegata, aumenta notevolmente rispetto a un CCD, consentendo quindi di registrare dettagli più piccoli. D'altro canto la maggior risoluzione disponibile potrà mostrare più facilmente (o rilevare nel caso in precedenza non fossero visibili tramite un sensore CCD) eventuali difetti intrinseci all'ottica.

Si puntualizza però che non è colpa della ridotta dimensione se ora vedremo qualche difetto ottico in più. L'ottica è sempre la stessa, piuttosto era il CCD usato in precedenza che non possedeva sufficiente risoluzione per mostrare il difetto. Sfortunatamente pixel piccoli non concedono nulla: le ottiche devono essere molto ben corrette pena il manifestarsi di aberrazioni varie.

Un pixel molto piccolo tenderà inoltre a produrre immagini sovracampionate rispetto al seeing medio italiano. I telescopi a focale piuttosto lunga, e in generale i telescopi a rapporto focale



Sopra. Un'immagine della Crescent Nebula (NGC 6888) utilizzata come termine di confronto tra una ripresa effettuata con un sensore CCD e una con CMOS (vedi immagini della pagina precedente). Ripresa di Luca Moretti - Photo-Coelum.

Nella pagina precedente, in alto la Crescent Nebula (NGC6888) ripresa con sensore CCD KAF-8300 caratterizzato da pixel da 5.4 micron, **in basso**, la stessa nebulosa ripresa con camera CMOS QHYCCD 163M con pixel da 3.8 micron. La maggior risoluzione raggiunta è palese.

lungo, saranno quelli più penalizzati. Ma, come vedremo successivamente, il limite inferiore di campionamento potrà essere decisamente meno restrittivo rispetto a quello imposto da un CCD.

Un altro lato negativo è la perdita di sensibilità di un fotodiodo così piccolo (1-3 micron) se confrontato col fotodiodo di un sensore CCD, generalmente compreso tra 5 e 9 micron. La perdita di sensibilità viene però parzialmente compensata dall'uso di tecnologie in grado di aumentarne l'efficienza quantica, come la sopraccitata retroilluminazione, e dalla superiore efficienza globale di un sensore CMOS.

Fino ad ora abbiamo parlato delle caratteristiche e delle differenze tra sensori CCD e sensori CMOS senza però dare un'interpretazione dei dati forniti. Dal momento che stiamo parlando di sistemi elettronici piuttosto complessi in cui molti fattori concorrono alla creazione dell'immagine finale, nella prossima puntata metteremo assieme tutti gli elementi e daremo qualche interpretazione per un impiego pratico sul campo.

L'appuntamento è quindi per il prossimo numero con la seconda parte dell'articolo!