

# CMOS contro CCD. Fine di un'era?

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 riscontrando un ottimo riscontro presso la clientela astrofila.

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 si cercherà 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 cercheremo 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 cui principio fu scoperto da Albert Einstein e che valse il Nobel per la Fisica nel 1921).

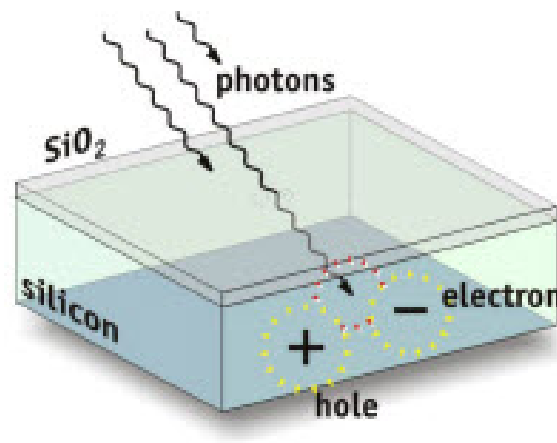


Figura 1 - Sia il CCD sia il CMOS basano il loro funzionamento sul cosiddetto effetto fotoelettrico

### Il sensore CCD

In un sensore CCD, acronimo di Charged-Coupled Device (o 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 tensione 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 (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.

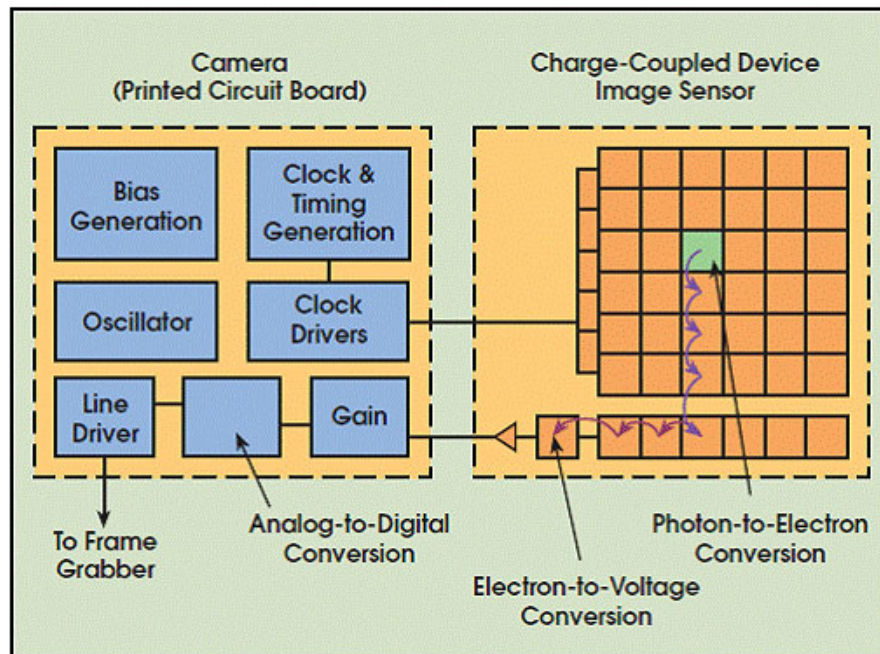


Figura 2 - Diagramma che illustra la composizione di una camera CCD

## 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. ecc. Tuttavia la continua attività di ricerca di alcuni produttori hanno prodotto 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.

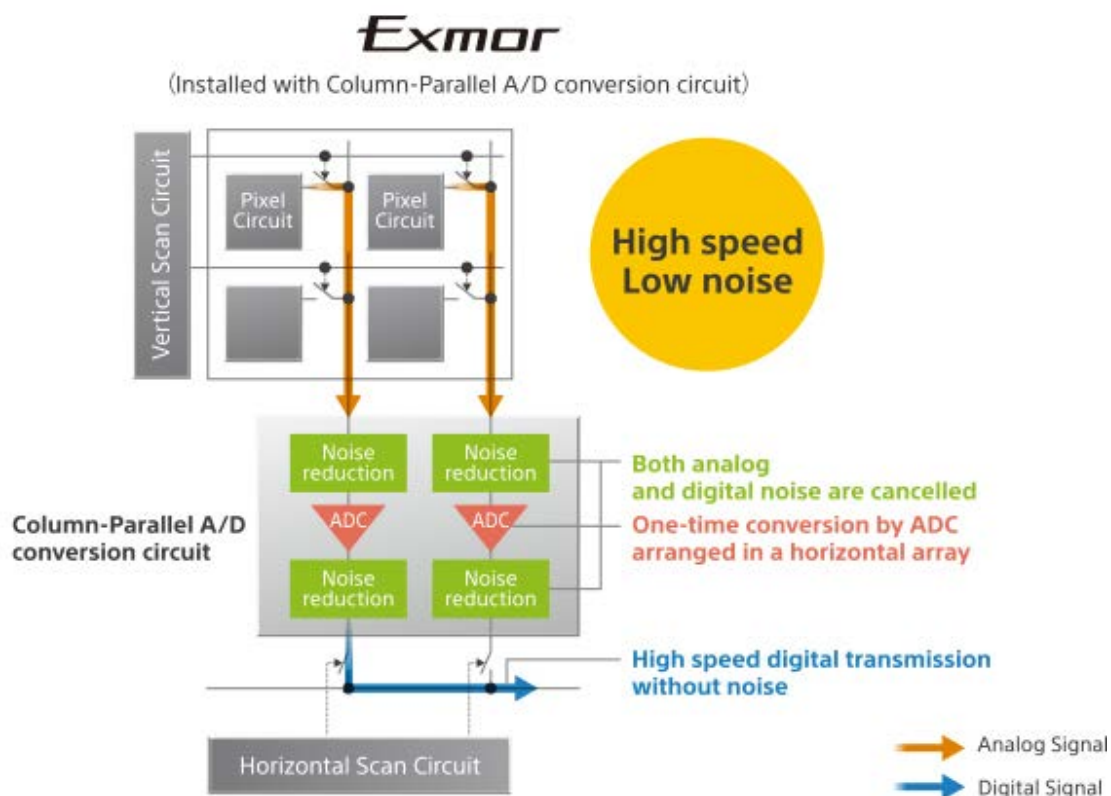


Figura 3 - Schema del sensore CMOS con tecnologia Exmor come implementato da Sony

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.

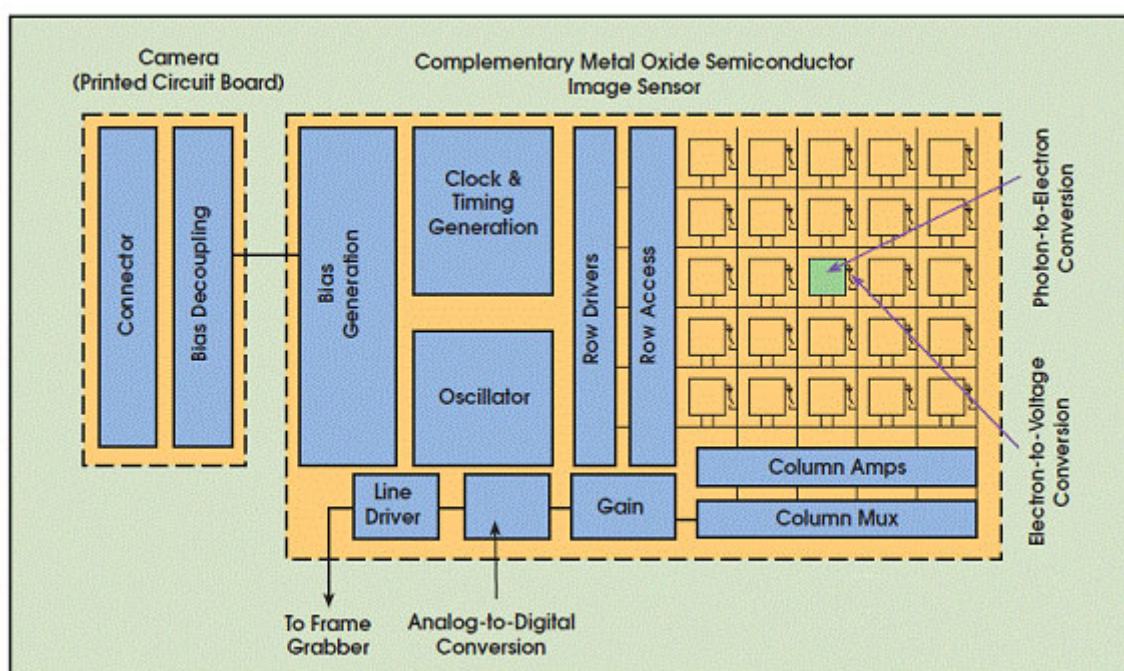


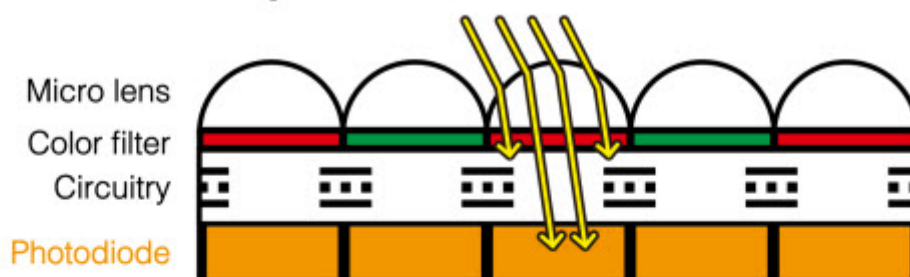
Figura 4 - Diagramma che illustra la composizione di una camera CMOS

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 fotodiode 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.

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 ad introdurre nel mercato questa evoluzione del sensore CMOS, inizialmente con la sua tecnologia Exmor R, poi introducendo 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!

Conventional CMOS image sensor



Backside illumination CMOS image sensor

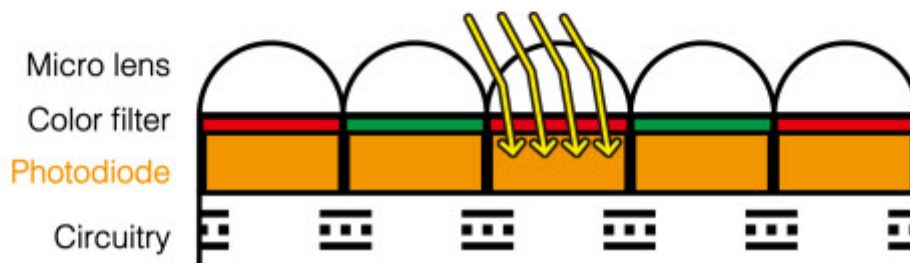


Figura 5 - Tecnologia CMOS FSI e BSI a confronto

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 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).

## Proprietà dei sensori CMOS

Come abbiamo visto dal punto di vista tecnologico le differenze tra sensori CCD e sensori CMOS sono profonde. Le differenze non si limitano solo a questo, vi sono altre proprietà importanti che vanno ad impattare anche 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.**

### Rumore di lettura

I sensori CMOS di ultima generazione sono caratterizzati da un rumore di lettura (**Readout Noise** o **RON**) estremamente basso, nell'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 7/8 e- nei casi migliori. Valori di RON così elevati come nel caso del KAF-8300 vanno a compromettere parzialmente le prestazioni in condizioni di scarsissimo rapporto segnale / rumore (ad esempio nelle riprese a banda molto stretta) e costringono ad 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 aumentare con la lunghezza dell'esposizione e decrescere 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  $-30^{\circ}/-40^{\circ}$  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, ...).

Con i sensori CMOS dobbiamo però tenere in considerazione le varie disuniformità che si possono rilevare sui frame. Ad esempio con i sensori CMOS è comune rilevare banding verticale o il cosiddetto *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

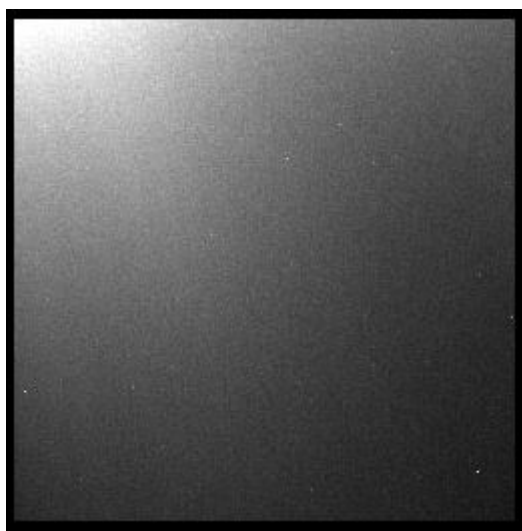


Figura 6 - Esempio di amp glow.

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 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 tensione (Volt), per mezzo di un circuito di amplificazione dedicato. Il circuito di amplificazione riceve in *input* un valore di tensione che viene poi aumentato (amplificato) in *output*. Il *gain* si esprime dunque in  $e^- / \text{ADU}$ .

**L'amplificazione della tensione (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  $1 e^- / \text{ADU}$  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<sup>-</sup> / 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<sup>-</sup> / *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., ed 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 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.

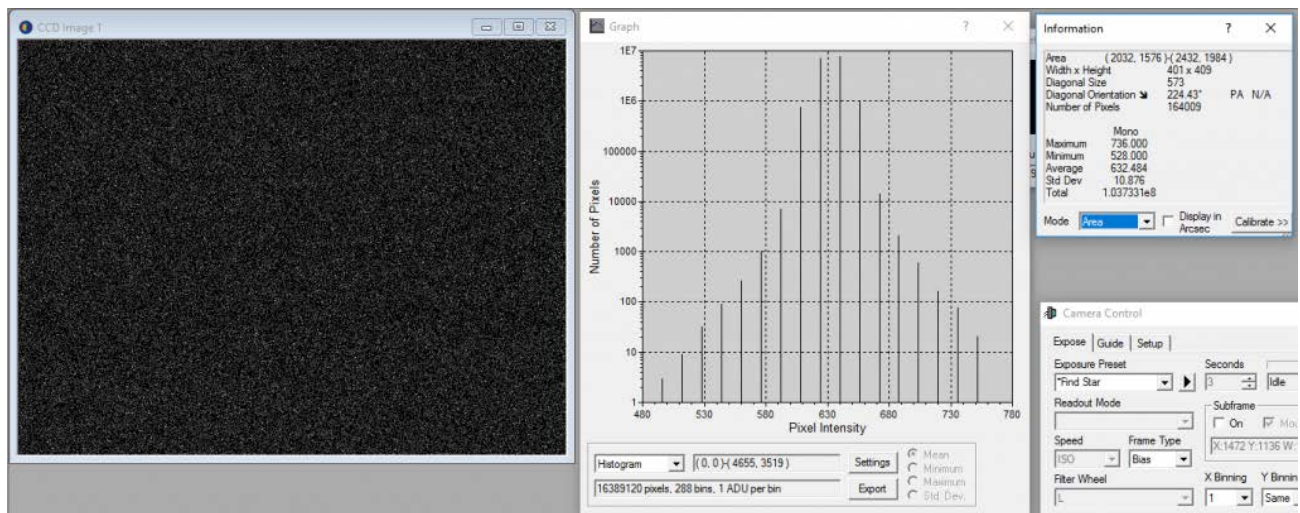


Figura 7 - Istogramma di un *bias frame* ripreso con camera CMOS raffreddata QHY163M con gain=0 e offset=40: l'istogramma è completo e con valori che partono da circa 400 ADU, quindi il valore di offset è sufficiente.

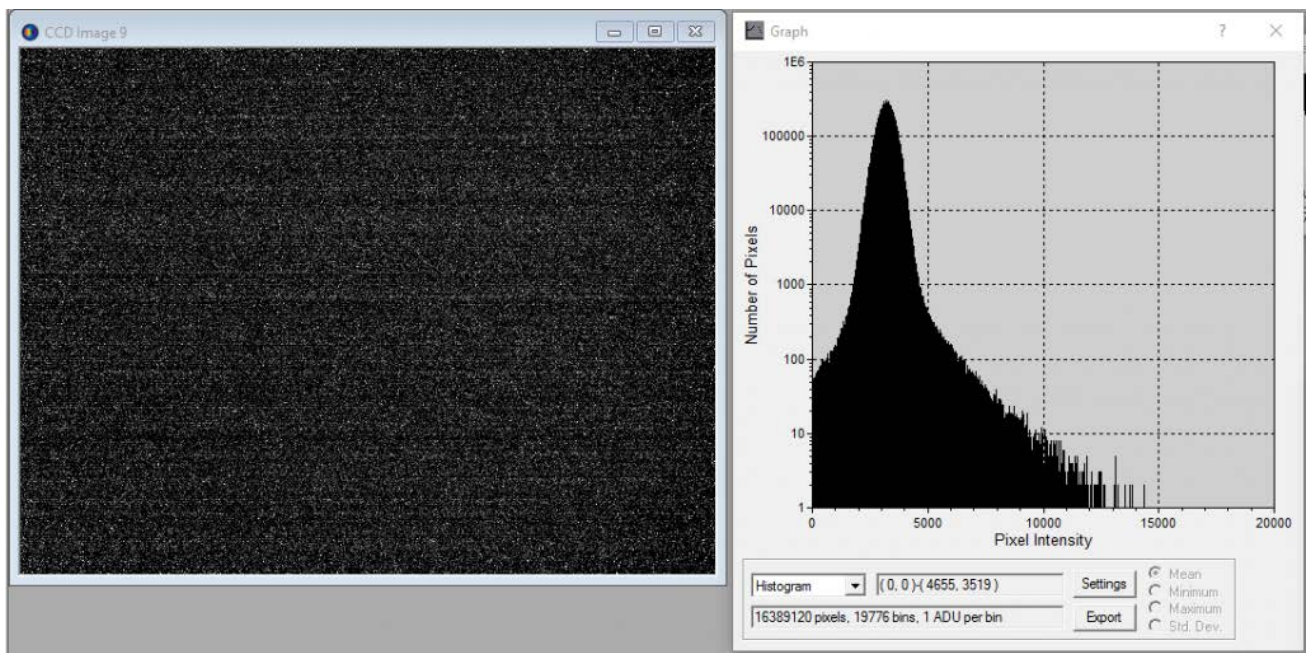


Figura 8 - Istogramma di un *bias frame* ripreso con camera CMOS raffreddata QHY163M con gain=20 e offset=40: si noti come ora l'istogramma sia invece tagliato con molti pixel con valore di ADU pari a zero, quindi il valore di offset è ora insufficiente. Sarà necessario alzare tale valore.

## Convertitore analogico-digitale

Un'altra proprietà molto importante dei sensori CMOS è la risoluzione del convertitore analogico-digitale (A/D). Tipicamente questa è ridotta a soli 12 (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 unitamente ad una velocità di conversione sufficientemente veloce. Laddove è veramente necessaria una gamma dinamica più elevata (ad es. fotocamera 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 per ogni 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 ad 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.

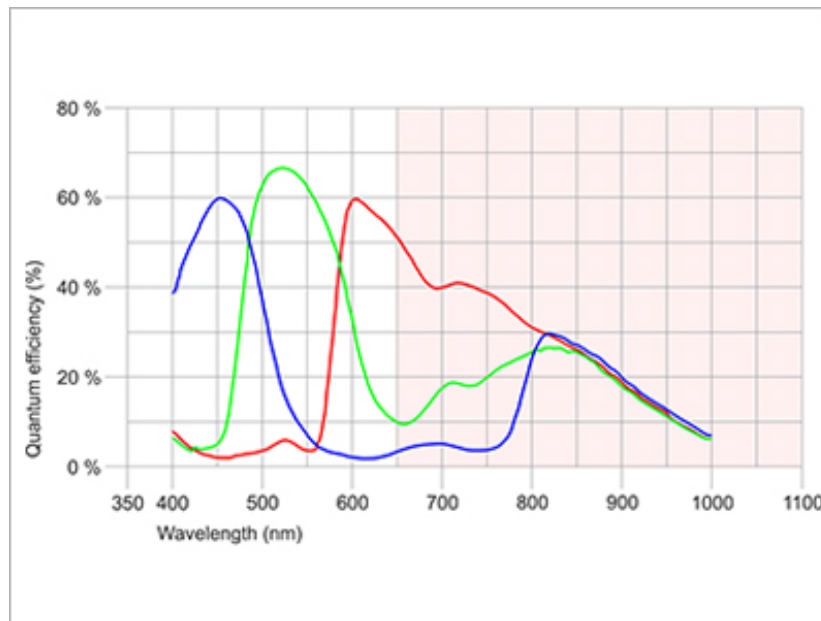


Figura 9 - Diagramma dell'efficienza quantica assoluta del sensore CMOS retroilluminato Sony IMX290 dotato sia della tecnologia Exmor R che della tecnologia Starvis in grado di estendere la sensibilità anche nel vicino infrarosso.

## 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 ad 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 aberrazione 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

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 fotodiode così piccolo (1-3 micron) se confrontato col fotodiode 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.

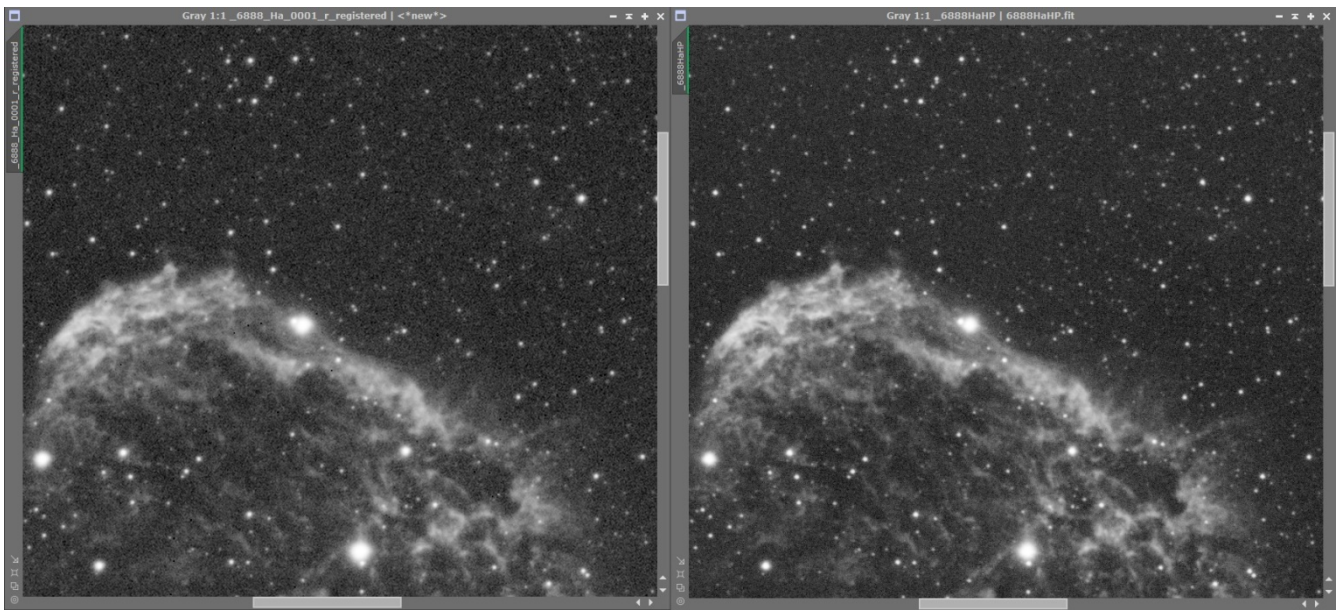


Figura 10 - A sinistra la Crescent Nebula (NGC6888) ripresa con sensore CCD KAF-8300 caratterizzato da pixel da 5.4 micron, a destra la stessa nebulosa ripresa con camera CMOS QHYCCD 163M con pixel da 3.8 micron. La maggior risoluzione raggiunta è palese.

## Interpretazione del sensore CMOS

Fino ad ora abbiamo parlato delle differenze tra sensori CCD e sensori CMOS senza 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, è giunto il momento di mettere assieme tutti gli elementi e dare qualche interpretazione, che si tradurrà poi in un impiego pratico sul campo.

Abbiamo visto che il rumore di lettura di un sensore CMOS è tipicamente molto contenuto e variando (alzando) il gain è addirittura possibile abbassarlo ulteriormente. Lo scotto da pagare è una forte compressione della dinamica.

Prendiamo ad esempio le seguenti tabelle contenenti alcune misurazioni a differenti livelli di gain, ottenute con una camera CMOS raffreddata QHY163M del produttore cinese QHYCCD e dotata del sensore CMOS Panasonic MN34230.

GAIN	ADU (1s exp)	Gain (dB)	Gain (e-/ADU)	Readout noise (e-)	Sat. Level (e-)	DR (dB)	DR(EV stops)
0	380	0,0	4,16000	2,431	18000	77,39	12,9
10	1216	10,1	1,30000	1,431	5625	71,89	11,9
20	3878	20,2	0,40768	1,105	1764	64,06	10,6
30	13215	30,8	0,11968	1,061	518	53,77	8,9
40	38687	40,2	0,04080	1,039	177	44,62	7,4
50	137200*	51,2	0,01152	1,035	50	33,65	5,6
<b>Typical KAF-8300 ccd camera</b>				10	25500	68,13	11,3

Tabella 11 - Tabella con misurazioni effettuate su una camera CMOS raffreddata QHYCCD QHY163M dotata di sensore Panasonic MN34230. L'ultima riga riporta le caratteristiche tipiche di un sensore CCD tra i più diffusi, il KAF-8300. Nota: il valore 137200 è estrapolato da una media di 10 frame da 0.1 secondi moltiplicando poi il valore per 10. Integrando 1 secondo si andava in saturazione e dunque non si sarebbe potuto ottenere un numero direttamente comparabile.

La prima colonna indica il valore di gain così come indicato nei parametri del software di acquisizione. La seconda colonna riporta il valore di ADU misurato in un secondo di esposizione. La terza e la quarta colonna mostrano il valore di gain reale misurato in dB e in e-/ADU. Le ultime tre colonne riportano invece rispettivamente il valore di saturazione in e- (dunque la **Full Well Capacity**) e il range dinamico (**Dynamic Range**) in dB e in stop (EV).

L'ultima riga riporta per confronto i valori tipici offerti da un sensore KAF-8300, tra i più usati in astrofotografia grazie all'ottimo rapporto qualità/prezzo offerto.

È immediato notare che all'aumentare del gain il rumore di lettura si abbassa sempre di più fino a stabilizzarsi, nel caso di questo esemplare testato, attorno ad 1 e-, mentre il range dinamico e soprattutto il livello di saturazione del sensore si abbassano drasticamente. Oltre gain=30 non c'è guadagno sensibile sul rumore di lettura.

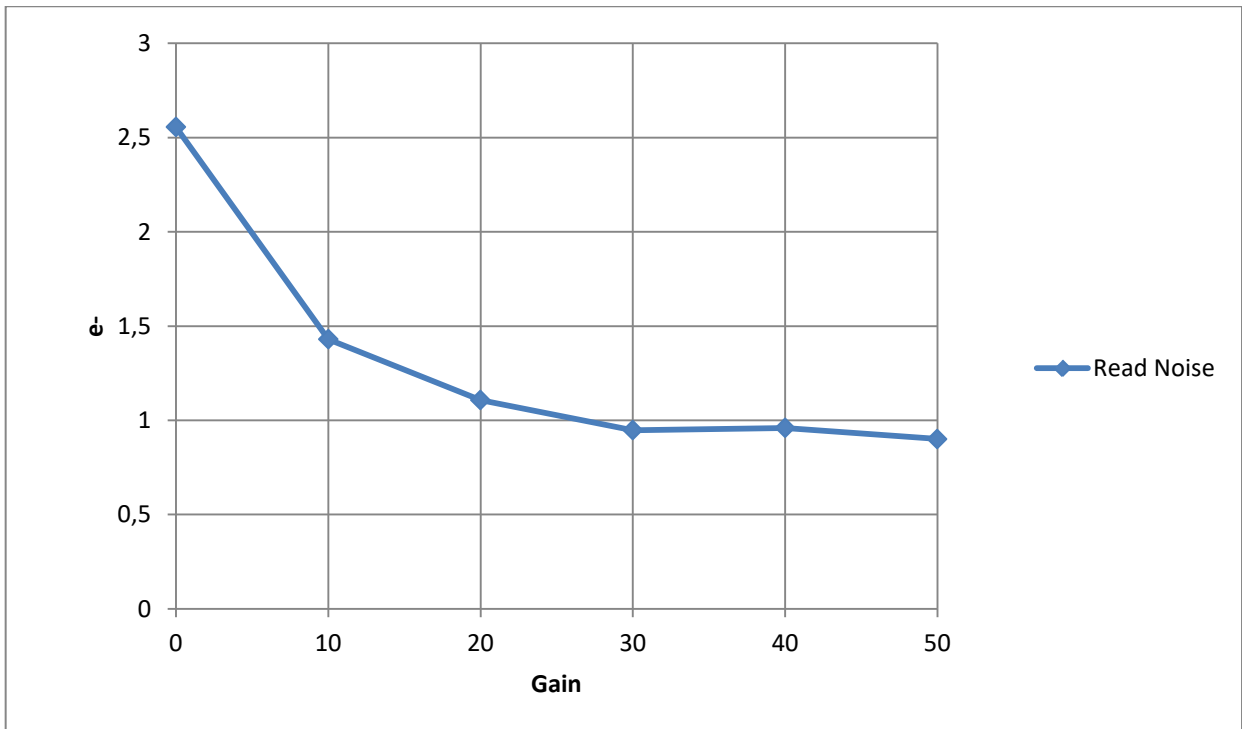


Grafico 1 - Grafico relativo all'andamento del rumore di lettura in rapporto al gain software su camera CMOS raffreddata QHYCCD QHY163M dotata di sensore Panasonic MN34230. Cortesia Marco Svettni.

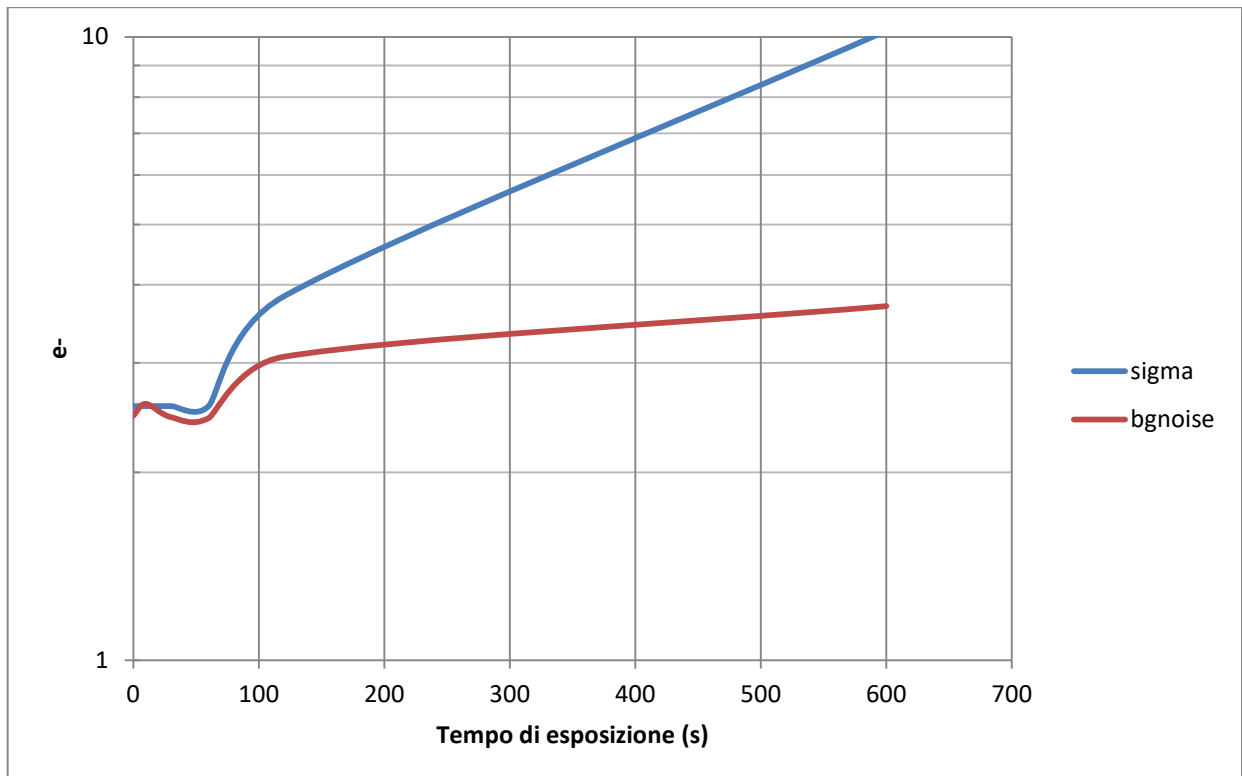


Grafico 2 - Analisi del rumore a gain=0 e offset=10. La misurazione è stata effettuata prendendo come riferimento un quadrato centrato di 512x512 pixel. Il bgnoise è il rumore di fondo a meno degli hot pixel, mentre sigma è la pura deviazione standard rilevata sull'area selezionata. La sigma dei frame cresce con il tempo di esposizione più velocemente del bgnoise a causa dell'aumento del

numero e dell'intensità degli hot pixel. Misurazioni effettuate con software IRIS. Cortesia Marco Svettni.

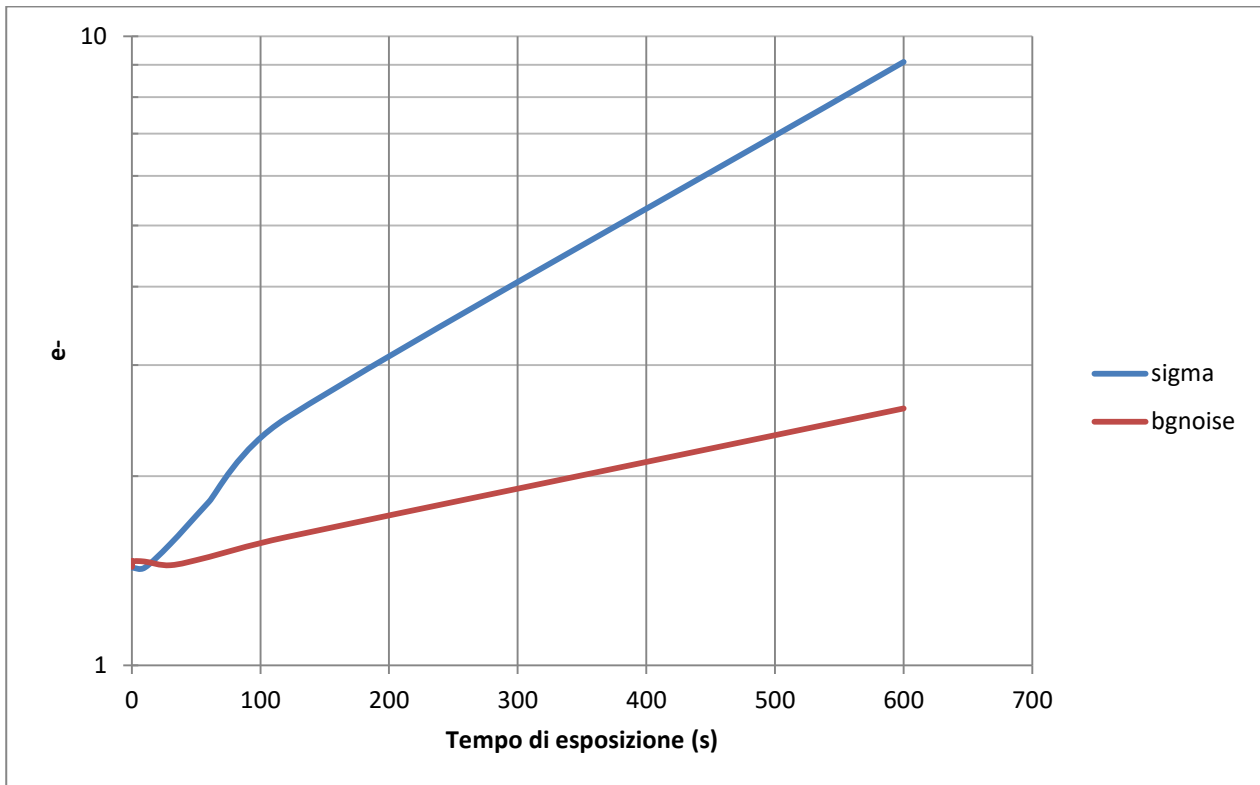


Grafico 3 - Analisi del rumore a gain=10 e offset=20. Vedi grafico 2 per spiegazione del metodo di analisi. Cortesia Marco Svettni.

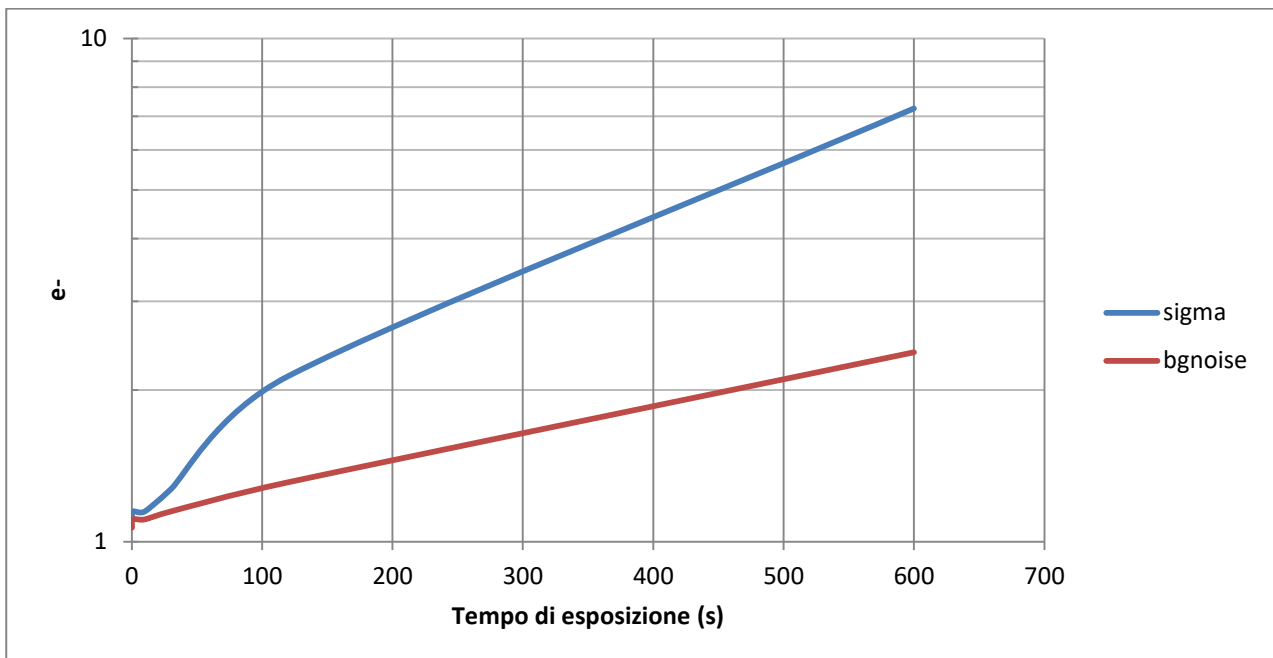


Grafico 4 - Analisi del rumore a gain=20 e offset=40. Vedi grafico 2 per spiegazione del metodo di analisi. Cortesia Marco Svettni.



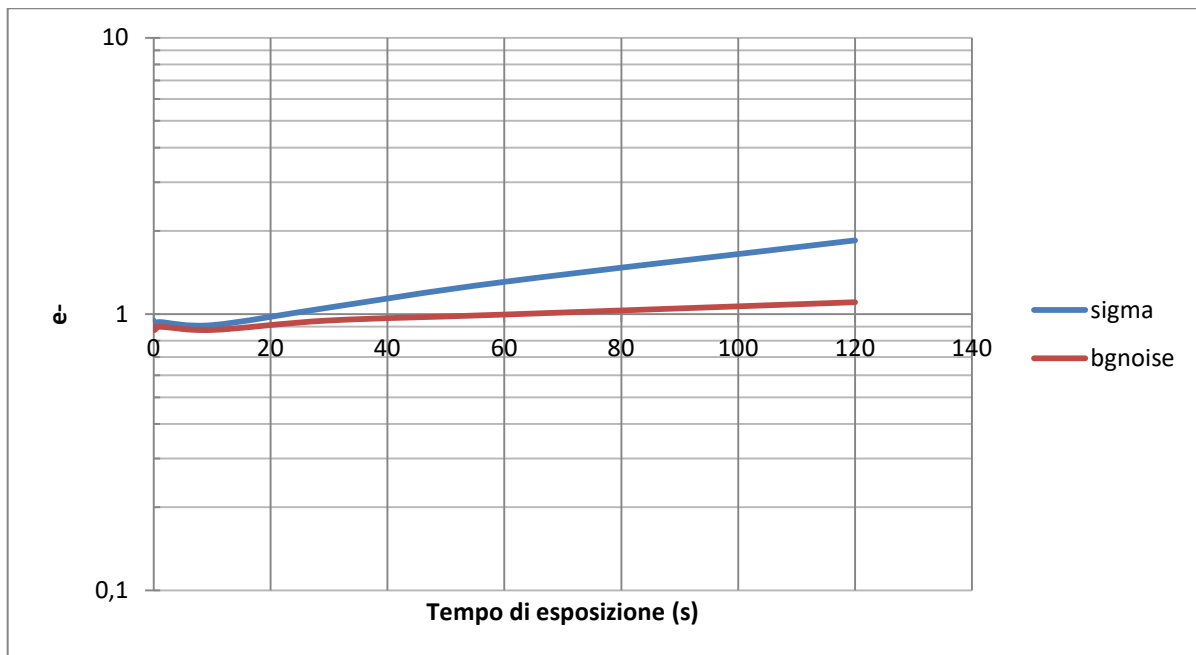


Grafico 5 - Analisi del rumore a gain=30 e offset=80. Vedi grafico 2 per spiegazione del metodo di analisi. Cortesia Marco Svetini.

Alla luce delle analisi presentate, un primo giudizio che possiamo dare è che **i sensori CMOS di ultima generazione sono molto efficienti**, addirittura alla pari, se non più efficienti, dei migliori sensori CCD in circolazione. Possiedono una ottima dinamica, se usati a gain bassi, ed hanno un rumore molto contenuto.

In secondo luogo possiamo affermare che **più si alza il guadagno e più conveniente sarà produrre tantissime pose molto corte**, anche solo pochi secondi. Questo vale soprattutto in condizioni di segnale debole, ossia in ripresa LRGB di zone molto deboli (pensiamo alla elusiva IFN – Integrated Flux Nebula) e in riprese a banda stretta dove necessariamente si dovranno allungare i tempi di posa per raggiungere un **rapporto segnale/rumore (SNR)** sufficiente. Discorso simile può essere applicato a rapporti focali lunghi (F/8 - F/10) che richiederanno tipicamente di alzare il guadagno per raggiungere un sufficiente SNR.

La differenza col CCD è profonda: in un CCD il rumore di lettura è piuttosto elevato e sommare tante pose molto corte fa sì che il contributo del rumore di lettura renda vana la lunghezza totale della ripresa. Nel caso del sensore CMOS, invece, il contributo del rumore di lettura è minimo ad alto guadagno, ed essendo la dinamica disponibile estremamente limitata ad alto guadagno non avrà senso allungare le pose. Le parti più brillanti (ad es. le stelle) satureranno immediatamente. Facendo un esempio numerico, se col CCD conviene riprendere 30 pose da 10 minuti, col sensore CMOS è invece più conveniente fare 150 pose da 120 secondi o 300 pose da 60 secondi e così via. Più si alzerà il gain e più piccola potrà essere la singola posa. Ad esempio, a gain molto elevati (e su

soggetti particolarmente brillanti) potrà essere conveniente riprendere 3600 pose da 5 secondi ciascuna.

Questo tipo di modalità operativa, che ribadiamo essere molto differente dal CCD, offre una serie di vantaggi non indifferenti:

1. **Grazie all'impiego di pose molto corte l'eventuale presenza di subframe rovinati (ad esempio mossi) risulterà meno penalizzante.** Se perdiamo una posa da 20/30 minuti con un CCD perdiamo una fetta consistente della nostra integrazione totale, se perdiamo (anche decine) di pose da 5, 10, anche 60 secondi non ne faremo di certo un dramma.
2. **A gain elevati potremo anche fare a meno dell'autoguida.** Subframe da pochi secondi sono molto permissivi in tal senso ed è addirittura possibile pensare di usare sistemi altazimutali purché motorizzati. Bisognerà tenere naturalmente conto della rotazione di campo, dunque il caso è un po' al limite, ma per certi impieghi è sicuramente possibile ed in rete si trovano già diversi esempi molto interessanti. Già fare a meno dell'autoguida - fonte di grattacapi soprattutto per gli astrofotografi principianti – sarebbe un grandissimo risultato.
3. **L'uso di pose molto corte consente di impiegare tecniche di *lucky imaging*** usate con profitto in alta risoluzione planetaria, e con un accurata selezione dei frame migliori sarà possibile registrare dettagli finissimi, stelle più deboli e con aspetto più puntiforme. Si apre in sostanza la possibilità di fare una sorta di alta risoluzione del profondo cielo, specialmente su certi soggetti particolarmente brillanti e compatti, e sarà possibile ottenere immagini con un livello di dettaglio raramente visto in precedenza. Pensiamo ad esempio gli intricati dettagli della nebulosa planetaria M57 nella Lira.
4. Abbiamo già detto che su pose molto lunghe si nota maggiormente l'effetto deleterio del *seeing* che si evidenzia in stelle generalmente più "grosse". **Usando pose molto corte si avrà invece una maggiore puntiformità stellare e più dettagli fini.** In altre parole, per registrare il minimo dettaglio possibile dato dall'ottica sarà ora necessario un campionamento più elevato. Ecco allora che la piccola dimensione dei pixel, di cui il sensore CMOS è solitamente dotato, potrà essere ora un vantaggio. Naturalmente senza esagerare!
5. **La somma di tantissime immagini di durata molto breve consente di ovviare al problema della riduzione della dinamica quando vengono impostati gain elevati.** Come per l'alta risoluzione planetaria, sommando tantissime immagini si aumenta il range dinamico e la profondità in bit. La regola è molto semplice: a parità di tempo di esposizione del subframe, per duplicare il range dinamico (ossia aumentare di 1 stop la dinamica) bisognerà quadruplicare il numero di pose. Naturalmente vi potrà essere un limite pratico oltre il quale non diventa più conveniente andare. Se il

seniore CMOS è invece dotato di un convertire A/D a 14 bit il problema è meno sentito a basso guadagno.

In banda stretta, a causa dello scarso rapporto segnale/rumore che tipicamente caratterizza tali riprese, sarà necessario allungare le pose anche a diversi minuti per i soggetti più deboli. La scarsissima dinamica a disposizione imposta dalle modalità ad alto guadagno causerà probabilmente la saturazione delle stelle più brillanti presenti nel campo. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, le stelle sature saranno statisticamente molto poche. Dovremo comunque tenere conto delle possibili eccezioni, pensiamo ad esempio ad una ripresa in banda stretta sulla Nebulosa Fiamma (NGC2024) con la vicinissima e brillantissima Alnitak ( $\zeta$  Orionis) o IC59 e IC63 appena ad Sud-Ovest di Tsih ( $\gamma$  Cassiopeiae).

Si noti che su una reflex digitale cambiare la sensibilità ISO significa semplicemente variare il gain e tutte le proprietà riportate per i sensori CMOS si applicano alla stessa maniera. La differenza significativa è che le reflex digitali non sono raffreddate, anche se esistono soluzioni commerciali che aggiungono la termostatazione con celle di Peltier (vedi CentralDS). Altra differenza significativa è la risoluzione del convertitore A/D che generalmente è pari a 14 bit.

I risultati che cominciano a vedersi in rete mostrano le enormi potenzialità di queste tecniche di ripresa applicate al mondo dei sensori CMOS. Vediamo alcuni esempi.



Figura 12 – La celebre galassia a spirale NGC7331 in Pegaso ripresa da Emil Kraaikamp con una camera non raffreddata dotata di sensore CMOS Sony IMX249. L'immagine elaborata è il risultato di una somma di 3800 pose da 1 secondo ciascuna. Lo strumento utilizzato è un dobson 40 cm F/5 su piattaforma equatoriale. L'immagine è utile anche per ribadire un altro concetto: il rumore elettronico nei sensori CMOS di ultima generazione è così basso che non si sente la mancanza del raffreddamento. L'immagine parla da sola.



Figura 13 - Altra immagine di Emil Kraaikamp con strumentazione simile a quella citata precedentemente. Il soggetto è la nebulosa planetaria NGC1501 in Toro. Questa volta il sensore è un CMOS a colori IMX224. 2300 pose da 1 secondo. Si noti la delicata trama interna alla nebulosa planetaria. La risoluzione raggiunta è elevatissima.



Figura 14 - La regione della Bubble Nebula (NGC7365) ripresa in banda stretta con camera raffreddata dotata di sensore CMOS Panasonic MN34230 da Jon Rista (Colorado) con obiettivo Canon EF 600 mm F/4. Si tratta di solo 1 ora e 45 minuti di posa totale, suddivisi in 9x90s con filtro

Halpα, 25x90s con filtro OIII e 36x90 secondi con filtro SII. La camera è stata naturalmente impostata in modalità ad alto guadagno.

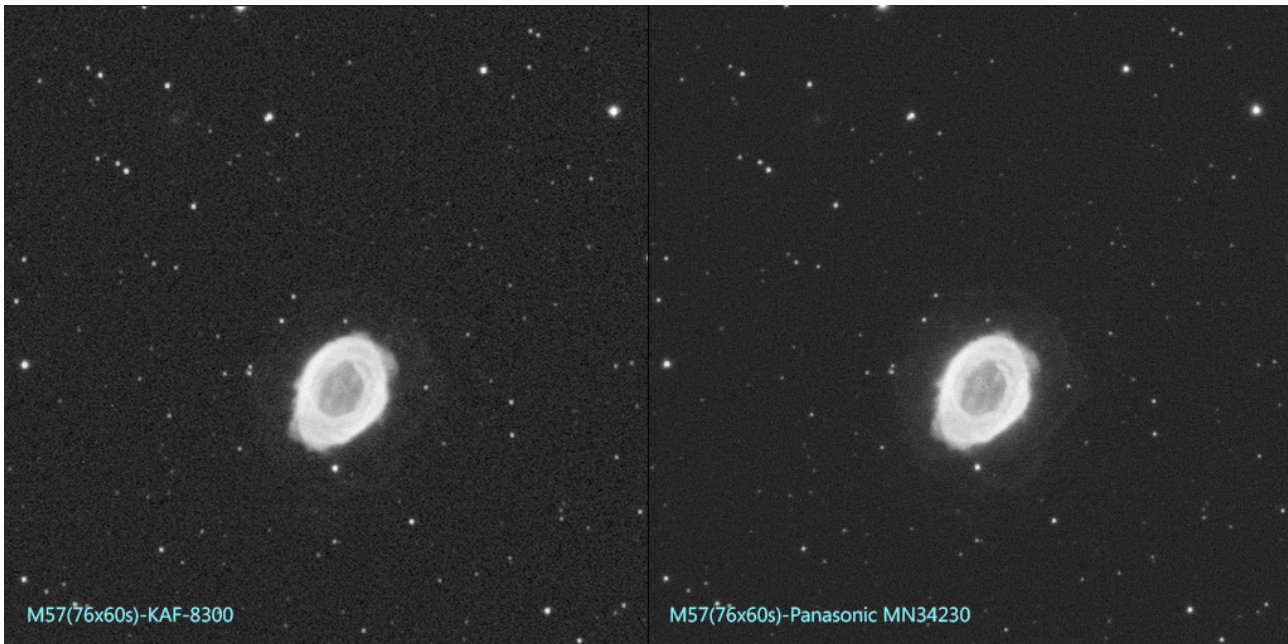


Figura 15 - Confronto tra una ripresa ottenuta col popolare sensore CCD KAF-8300 e una ripresa ottenuta invece con un sensore CMOS Panasonic MN34230. L'elevata efficienza del sensore CMOS ha prodotto un'immagine con un rapporto segnale/rumore decisamente migliore nella stessa unità di tempo e impiegando lo stesso numero di pose.



Figura 16 – La nebulosa planetaria M76 in Perseo ripresa dall'autore con un rifrattore apocromatico 152 mm F/8 e camera CMOS QHY163M raffreddata a  $-25^{\circ}$  C. Si tratta della somma con *sigma clip rejection* di 200 pose da 10 secondi l'una a gain 30 e offset 120, ripresa in forti condizioni di inquinamento luminoso. La serata era contraddistinta da forti correnti in quota, ma usando pose così corte il FWHM della somma si è attestato a 2 secondi d'arco circa, quando tipicamente nelle stesse condizioni e usando una camera CCD con pose di diversi minuti i diametri stellari difficilmente scendono sotto i 3 o 4 secondi d'arco di FWHM.



Figura 17 - Altra bellissima immagine ripresa da Jon Rista, questa volta in banda larga, sempre con ottica Canon 600 mm EF F/4 e camera raffreddata dotata di sensore CMOS Panasonic MN34230. La ripresa è avvenuta in forti condizioni di inquinamento luminoso (dunque con contributo rumore da parte del cielo piuttosto importante), motivo per cui l'autore ha deciso di usare un settaggio del guadagno al minimo e prolungare il tempo di posa sul subframe. In particolare sono stati ripresi 116x60" in L, 10x120" in B, 15x120" in G e 10x240" in R. In questo contesto operativo il raffreddamento del sensore CMOS è indispensabile per raggiungere questo risultato.



Figura 18 – L’elusivo resto di supernova Abell 86 o CTB-1 in Cassiopea ripreso in bicromia narrow band Ha / OIII. Il soggetto perfetto per testare le potenzialità del sensore CMOS, ancora una volta Panasonic MN34230, in condizioni di scarsissimo SNR. L’autore è sempre Jon Rista e l’obiettivo utilizzato è il Canon EF 600 mm F/4. Si tratta di 72 pose da 600 secondi cadauna per ciascun filtro. La camera è stata impostata a gain medio-alto per via dell’elusività della nebulosa.

## Linee guida per la ripresa con camere CMOS raffreddate

Ora che abbiamo dato anche un’interpretazione delle proprietà dei sensori CMOS possiamo stendere alcune linee guida per l’uso in astrofotografia a lunga posa del cielo profondo.

Cominciamo col dire che **comprendere come impostare gain (e di conseguenza anche l’offset) e quanto lunghe eseguire le singole pose su un particolare soggetto, valutandone le caratteristiche a priori, considerando le condizioni del cielo e la tipologia di strumento impiegato sarà molto importante.** Purtroppo per questo è necessaria una grande esperienza sul campo oppure affidarsi all’esperienza altrui. Ma l’astrofotografia del cielo profondo con sensori CMOS è ancora “materia giovane”, non si trovano molti esempi in rete sebbene questi siano in continuo aumento. Inoltre vi è ancora

un certo pregiudizio dato da anni ed anni di utilizzo della tecnologia CCD che confonde un po' le idee.

Stendiamo di seguito alcune linee guide, ribadendo però che il *setting* migliore dovrà essere valutato di volta in volta a seconda del soggetto, condizioni di ripresa e strumento utilizzato.

1. **Soggetti ripresi a banda larga (es. L-RGB) estremamente luminosi e compatti** (ad es. M57): essendo tipicamente appannaggio di focali molto lunghe in grado di dare una buona scala d'immagine, è l'esempio perfetto per l'uso di gain elevati e pose molto corte, anche di pochissimi secondi. I pixel piccoli e la lunga focale daranno campionamenti molto elevati, ma l'impiego di tecniche di *lucky imaging* (ossia la selezione dei migliori frame) - usate anche in alta risoluzione planetaria - potranno dare risultati sorprendenti.
2. **Soggetti ripresi a banda larga (es. L-RGB) estesi con forti variazioni di luminosità** (ad es. M42): è il caso più eterogeneo dove possono andare bene sia gain bassi sia gain elevati, magari per lo sviluppo di un HDR che riesca a dare una buona dinamica su zone brillanti e zone più deboli. In caso di inquinamento luminoso è tipicamente meglio scegliere gain bassi (diciamo attorno all'*unity gain*) e raccogliere comunque un numero di pose elevato, a patto di possedere uno strumento con rapporto focale favorevole. Rimanendo sull'esempio proposto della Grande Nebulosa di Orione (M42), il nucleo può essere ripreso con la tecnica al punto 1.
3. **Soggetti ripresi a banda larga (es. L-RGB) deboli**: se la qualità del cielo è buona è opportuno alzare il gain e allungare a diverse decine di secondi o qualche minuto la lunghezza delle pose. In caso di inquinamento luminoso è invece meglio abbassare il gain e allungare le pose a diversi minuti, tendendo presente che il numero di pose dovrà essere necessariamente alto. Non serve sottolineare che la soluzione al cielo inquinato non esiste!
4. **Soggetti ripresi a banda stretta luminosi**: possiamo assimilarlo al caso dei soggetti LRGB deboli, in questo caso però il contributo dell'inquinamento luminoso sarà minore e dunque con qualsiasi setup può essere utile alzare il guadagno ed eseguire pose di qualche decina di secondi o qualche minuto.
5. **Soggetti ripresi a banda stretta deboli**: è il caso peggiore in qualsiasi condizioni. Non c'è sostituto al gain alto e tempo di posa di diversi minuti. In questi casi diventa determinante poter utilizzare uno strumento a rapporto focale basso per poter raccogliere un buon SNR.

Per ottenere il massimo dalle caratteristiche proprie messe a disposizione dalla tecnologia CMOS sarà necessario inoltre impiegare opportune tecniche di ripresa che già risultavano molto utili anche con i CCD. È molto importante ad esempio eseguire un buon *dithering*, ossia introdurre uno spostamento casuale del frame tra una posa e l'altra così da eliminare



il rumore di natura statistica (*random noise*) ed eventuali piccoli problemi che possono capitare in un subframe (ad esempio un raggio cosmico).

Sommando poi i subframe con tecniche di **sigma rejection** si andranno ad eliminare del tutto variazioni di natura statistica che possono trovarsi sui frame (pensiamo ad esempio ai raggi cosmici, strisciate di satelliti, ecc.). Più alto sarà il numero delle pose e migliore risulterà l'impiego di *dithering* e *sigma rejection*.

## Calibrazione dei frame e altre considerazioni pratiche

Sebbene i sensori CMOS e CCD di ultima generazione soffrano molto poco di rumore termico, è consigliabile calibrare completamente i frame ottenuti con camere CMOS raffreddate con opportuni *dark frame* che consentiranno anche di rendere molto più omogenea l'immagine (ad esempio eliminando il fastidioso *amp glow*).

Teniamo comunque in considerazione il fatto che un sensore CMOS tende a sviluppare parecchio calore durante l'uso (causa principale dell'*amp glow* ad esempio) e – pur aggiungendo le celle di Peltier per il raffreddamento – la temperatura di esercizio sarà generalmente variabile entro qualche grado. Una differenza importante rispetto ai CCD raffreddati, dove la termostatazione avviene invece con precisione molto più elevata (frazioni di grado).

**Ragionando sulle modalità d'uso del sensore CMOS ci rendiamo subito conto che sarà necessario integrare una libreria di dark per ogni coppia (gain, offset) impiegata.** E lo stesso varrà per tutti gli altri frame di calibrazione, ossia *bias frame* e *flat frame*. Con i CMOS assisteremo dunque a un proliferare di file di calibrazione con ovvie conseguenze sullo spazio necessario sull'hard disk del proprio computer.

Un'altra deduzione logica immediata è che con i sensori CMOS avremo generalmente un numero di frame decisamente elevato, soprattutto quando vorremo impiegare tecniche di *lucky imaging*. In quest'ultimo caso potremo avere anche centinaia e centinaia di frame, con uno spazio occupato su disco di diversi Gigabyte.

Ciascun FIT ottenuto con una camera CMOS dotata di sensore tipo Panasonic MN34230 (16 Megapixel) pesa 32 Mb dunque 100 frame peseranno ben 3,2 Gb! E se consideriamo anche tutti i file di calibrazione necessari capiremo come i nostri Hard-Disk potrebbero presto diventare troppo piccoli. Inoltre sarà necessaria anche una certa potenza di calcolo, oltre che software opportuni, per poter sommare in tempi ragionevoli tutti i file ripresi.

Teniamo anche in considerazione che scaricare file così pesanti da una camera CMOS, anche se dotata di connessione USB 3.0 ad alta velocità, richiede alcuni secondi. Questi

secondi si vanno a sommare al tempo di integrazione aggiungendo dunque un certo tempo di gestione del frame che dobbiamo inevitabilmente considerare. In una recente prova eseguita dall'autore, per riprendere 1000 frame da 2 secondi ci è voluto un tempo totale di oltre 1:30 ore! In sostanza per poco più di mezzora di posa effettiva ci è voluto il triplo del tempo.

Fino ad ora non abbiamo parlato di *binning* con i sensori CMOS: a differenza dei sensori CCD con cui è possibile ottenere un *binning* hardware, con i sensori CMOS avviene a livello software e la sua presenza diventa praticamente irrilevante.

Chi è abituato al mondo dei CCD sa che spesso è conveniente riprendere la luminanza alla massima risoluzione possibile (ossia *binning* 1x1) e i colori a una risoluzione inferiore così da ottimizzare il rapporto segnale/rumore. Con i CMOS tutto questo non è possibile e bisognerà riprendere tutto alla massima risoluzione, perdendo dunque questa possibilità di ottimizzazione temporale offerta invece dai CCD.

Del CMOS fino ad ora non abbiamo menzionato la capacità di riprendere in **ROI (Region of Interest)** ossia solo una piccola parte dell'intera area di immagine. Questa modalità consente di trasformare le camere CMOS raffreddate più grandi in formidabili strumenti per la ripresa in alta risoluzione di Luna e pianeti come le ormai celebri camerine CMOS non raffreddate. Utilizzando il ROI, il numero di frame per secondo dello *stream* video generato può raggiungere anche 100 fps ed oltre. A questo alto numero di frame per secondo bisognerà però anche tenere conto della tipologia di otturatore impiegato. Senza entrare nel dettaglio diciamo solo che un otturatore di tipo *global shutter* è preferibile ad un otturatore di tipo *rolling shutter*.

**Alla luce di tutto quanto scritto possiamo certamente affermare che un punto di forza delle camere basate su sensore CMOS è la versatilità.** Se poi consideriamo che il tutto viene offerto a prezzi decisamente convenienti, possiamo dire che stiamo assistendo ad una vera e propria rivoluzione del mondo dell'astrofotografia del profondo cielo (il mondo dell'astrofotografia in alta risoluzione è già stato rivoluzionato dal sensore CMOS qualche anno fa!).

Concludo dicendo che il sensore CMOS è una tecnologia in forte sviluppo che al momento non consente di capire quando potrà raggiungere la piena maturità. Da un certo punto di vista è una cosa bellissima, la tecnologia avanza e avremo prodotti sempre più performanti e ottimizzati. D'altro canto è concreta la possibilità di una precoce obsolescenza dei dispositivi attualmente in commercio e ciò può essere fonte di malumori tra i neo-acquirenti.

## Il CCD è morto, lunga vita al CCD!

E il CCD? Dopo tutti questi elogi alla tecnologia CMOS sembrerebbe proprio che il CCD sia prossimo alla morte. Come anticipato in apertura di questo articolo, non è infatti una novità che Sony abbia annunciato la completa cessazione di ogni produzione di sensori CCD a favore invece della produzione di sensori CMOS. Altri produttori, come ad esempio ON Semiconductor, continuano invece a fare ricerca e portare novità in questo settore.

**Il CCD dunque è tutt'altro che morto e dobbiamo pur sempre considerare che si tratta di una tecnologia affidabile, matura, consolidata e ancora in grado di offrire eccellenti risultati. In ambito scientifico il CCD è ancora lo strumento di eccellenza e lo rimarrà per molto tempo ancora.**

Dal punto di vista qualitativo la pulizia e l'omogeneità dell'immagine offerta da una camera CCD è ancora insuperabile, grazie alle caratteristiche intrinseche della tecnologia stessa coadiuvata anche dalla perfetta termostatazione raggiungibile (indispensabile per una perfetta calibrazione dei frame) ed al consolidato *know-how* di cui i produttori di camere CCD godono.

Molte camere CCD disponibili sul mercato offrono inoltre dimensioni del sensore enormi. Si pensi ad esempio al diffuso KAF-16803, un sensore quadrato di ben 36 mm per lato con pixel da 9 micron.

Sul mercato esistono inoltre molti produttori di camere CCD di provata affidabilità, sia dal punto di vista della longevità del prodotto sia dal punto di vista della presenza sul mercato. L'assistenza tecnica è spesso presente quantomeno a livello continentale e tra gli stessi rivenditori di materiale astronomico è possibile godere di un primo livello di assistenza piuttosto qualificato.

Non dimentichiamo inoltre l'importanza della letteratura disponibile sul web: i forum, i social network, la rete Internet in generale è piena di utenti di camere CCD che riescono a portare la loro esperienza di svariati anni sul campo aiutando il neofita a muovere i primi passi e familiarizzare con la tecnologia.

Insomma il CCD ha ancora tutte le sue ragioni per continuare ad essere ancora preferito alle camere CMOS. Il gap si sta però assottigliando di anno in anno e credo che nel prossimo futuro assisteremo ad una progressiva integrazione di camere basate su tecnologia CMOS da parte di nuovi produttori o da parte degli attuali produttori di camere CCD (Atik, Apogee, FLI, Moravian, QSI, SBIG per citarne alcuni tra i più famosi). Chi non si adeguerà rischierà di venire travolto dall'avanzata inesorabile del sensore CMOS.

Chi scrive possiede una camera CCD e nel prossimo futuro probabilmente punterà nuovamente ad un CCD più evoluto e grande da utilizzare sempre come camera primaria per la ripresa del profondo cielo, ma sta pensando di integrare anche una piccola camera CMOS raffreddata per alcuni esperimenti in alta risoluzione *deep-sky*.

Una riflessione conclusiva: chi sta cercando una camera di ripresa per iniziare a fotografare le meraviglie del cosmo o chi desidera integrare il proprio parco strumenti con qualcosa di complementare, ora ha a disposizione un'ottima alternativa a costi non troppo elevati, e l'invito è quello di fare le opportune valutazioni cercando di comprendere i punti salienti, i pro e i contro che contraddistinguono le due grandi famiglie di sensori messi a confronto in questo articolo. L'invito consiste nel prendere in considerazione anche le caratteristiche accessorie che accompagnano una camera di ripresa per astrofotografia: reputazione produttore, capacità di raffreddamento, sistemi per la soppressione dell'*amp glow*, velocità scaricamento frame, ampiezza di banda necessaria per le riprese di *stream video*, disponibilità ruote portafiltri, tipo di filtri da usare, assorbimento corrente, ecc. ecc..

Per alcuni il CCD potrebbe essere ancora la scelta migliore, per altri invece l'idea CMOS potrebbe essere più stuzzicante. Non c'è un vincitore assoluto, c'è una scelta da fare che deve essere ponderata sulla base delle molte informazioni disponibili. E spero che questo scritto possa essere d'aiuto nella scelta della vostra prossima camera per astrofotografia.

## Appendice A – Impianto teorico (a cura di Marco Sveltini)

Il rumore totale che affligge il segnale rilevato da ogni singolo pixel è dato dalla somma di diversi contributi.

In particolare il segnale proveniente da una qualsiasi fonte luminosa (ad esempio dalle stelle o dalle nebulose) non è privo di rumore, ma a causa dell'origine quantistica della luce, giunge al sensore con una probabilità definita dalla distribuzione di Poisson (gentil natura), che da luogo al cosiddetto *shot noise*.

Per le proprietà di tale distribuzione il valore atteso coincide con la varianza, varrà pertanto che:

$$\sigma_{obj}^2 = S_{obj} \cdot t_{sub}$$

$$\sigma_{sky}^2 = S_{sky} \cdot t_{sub}$$

Equazione 1

dove  $\sigma_{obj}^2$ , tipicamente misurato il  $(e^-)^2$ , è l'indice di rumore (varianza) associato al valor atteso del segnale  $S_{obj}$ , tipicamente misurato il  $e^-/min$ , registrato nell'intervallo di tempo  $t_{sub}$ , mentre  $\sigma_{sky}^2$  è il corrispettivo dovuto all'inquinamento luminoso (più correttamente alla radianza atmosferica) o sky background.

Tenendo conto anche del rumore di lettura del sensore, meglio noto con il nome di read noise (RN) ed espresso il  $e^-$ , (omettiamo il contributo legato al dark noise, a eventuali pattern noise, ecc.), complessivamente avremo che la singola ripresa di durata  $t_{sub}$  presenterà un rumore complessivo pari a

$$Noise = \sqrt{S_{obj} \cdot t_{sub} + S_{sky} \cdot t_{sub} + RN^2} \quad \text{Equazione 2}$$

Dunque il rapporto segnale rumore della singola esposizione vale

$$SNR_{sub} = \frac{S_{obj} \cdot t_{sub}}{\sqrt{S_{obj} \cdot t_{sub} + S_{sky} \cdot t_{sub} + RN^2}} \quad \text{Equazione 3}$$

mentre quello associato a  $n$  pose di durata  $T = n \cdot t_{sub}$ , varrà

$$SNR_n = \sqrt{n} \cdot SNR_{sub} \quad \text{Equazione 4}$$

che dunque come noto crescerà con la radice del numero totale di riprese.

A parità di esposizione totale  $T$ , per avere il massimo rendimento in termini di qualità del segnale, il tempo di singola posa dovrà essere abbastanza lungo da rendere trascurabile il rumore di lettura. Ciò si ottiene imponendo

$$S_{obj} \cdot t_{sub} + S_{sky} \cdot t_{sub} \gg RN^2$$

ovvero

$$t_{sub} \gg \frac{RN^2}{(S_{obj} + S_{sky})} \quad \text{Equazione 5}$$

Ne consegue che il tempo minimo di ripresa cresce con il quadrato del rumore di lettura, rendendo necessario usare pose molto lunghe in presenza di read noise elevati.

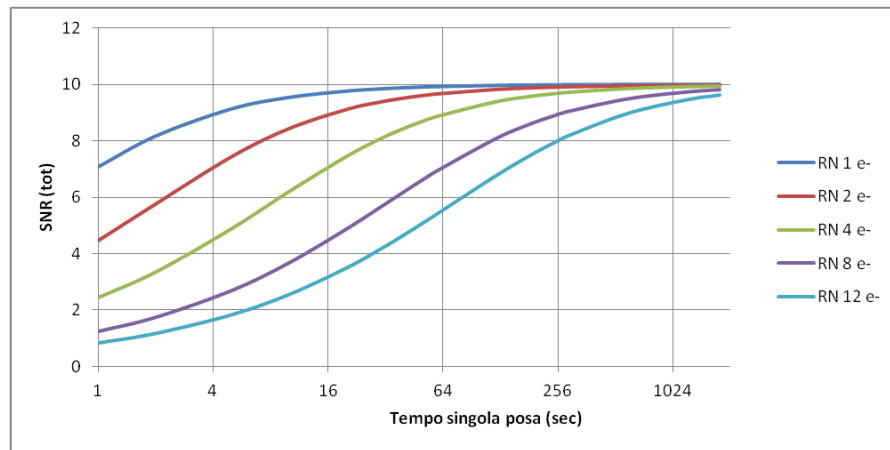


Figura 19: Andamento del  $SNR_n$  in funzione del tempo di singola posa, per diversi valori di read noise e tempo totale di esposizione  $T = 60min$ ;  $S_{obj} = 10e^-/min$ ,  $S_{sky} = 50e^-/min$

Un basso read noise permette dunque di ridurre il tempo di singola posa, con notevoli vantaggi in termini di dettaglio dell'immagine finale.

Un ulteriore vantaggio introdotto dal basso rumore di lettura si ha sui soggetti particolarmente deboli in presenza di cieli bui (ma anche lavorando in banda stretta). In tal caso il tempo totale di acquisizione necessario a raggiungere un certo valore di  $SNR$  diminuisce sensibilmente rispetto al caso di read noise elevato.

Ciò è legato al fatto che in presenza di read noise elevato e  $S_{obj} + S_{sky}$  basso, il tempo di posa  $t_{sub}$  difficilmente potrà raggiungere la condizione di cui alla Equazione 5, rendendo così il rumore di lettura dominante rispetto al segnale campionato. Generalmente infatti sarà difficile e poco sensato protrarre la singola esposizione oltre i  $20min$ .

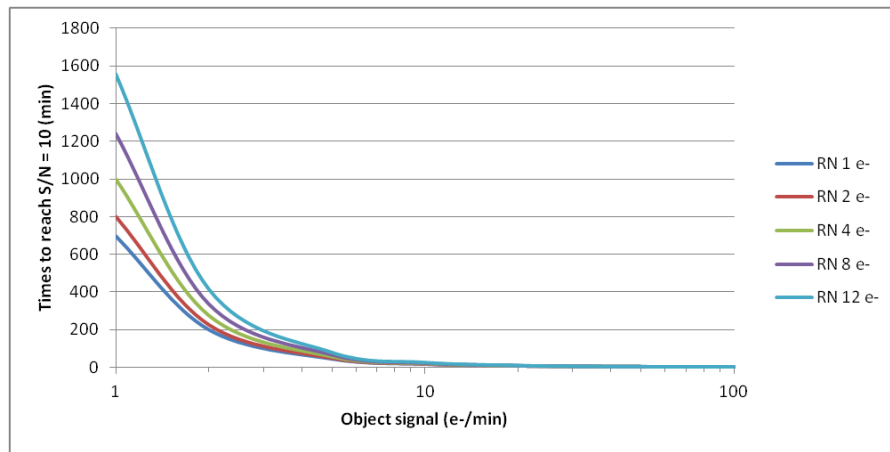


Figura 20: Tempo necessario a raggiungere  $SNR = 10$  per diversi valori di read noise;  $S_{sky} = 5e^-/min$ ,  $t_{sub}(RN = 1) = 1min$ ,  $t_{sub}(RN = 12) = 15min$ ;

un RN particolarmente basso consente di ridurre almeno a metà il tempo totale di integrazione

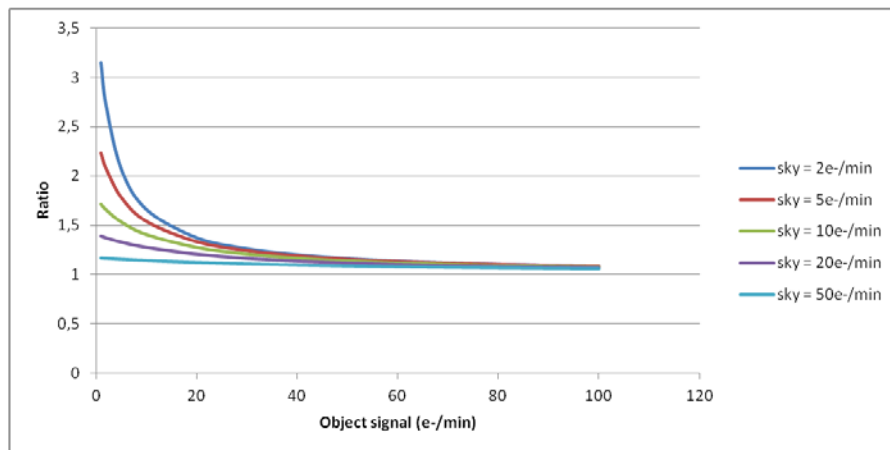


Figura 21: Rapporto tra il tempo necessario a raggiungere  $SNR = 10$  con  $RN 12e^-$  e con  $RN 1e^-$ , per diversi valori di sky background; si noti il vantaggio introdotto da un basso RN sul campionamento di oggetti deboli;  $t_{sub}(RN = 1) = 1min$ ,  $t_{sub}(RN = 12) = 15min$

Come già anticipato dalla Figura 19, quest'ultimo grafico dimostra in modo evidente che il tempo totale di integrazione necessario a raggiungere un centro SNR (in questo esempio specifico 10), con un sistema di acquisizione che goda di un RN particolarmente basso può essere ridotto anche di un fattore 3. Tale vantaggio si rende particolarmente evidente nelle riprese di soggetti deboli e può essere reso vano dalla presenza di un elevato segnale di fondo o sky background.