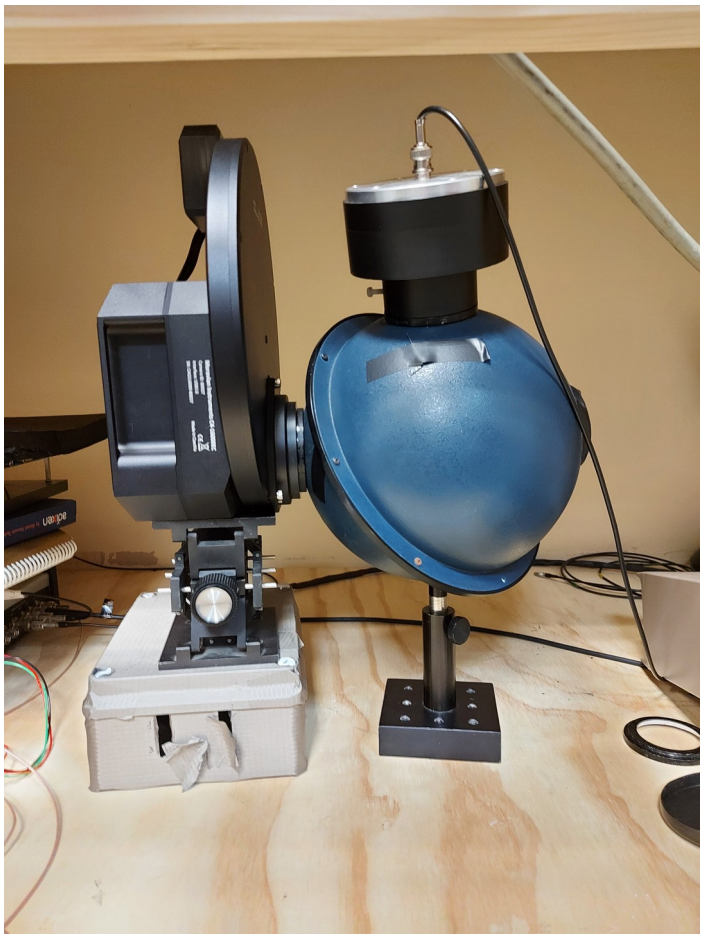
Caratterizzazione del sensore CMOS GSENSE-4040 della camera C4 della Moravian



A. Frasca[*], G. Romeo[*], G. Bonanno[*], G. Occhipinti[*],
J. Alonso-Santiago[*], P. Bruno[*], G. Catanzaro[*]

[*] INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania
via S. Sofia, 78 – 95123 Catania

Caratterizzazione del sensore CMOS GSENSE-4040 della camera C4 della Moravian

La camera C4 della Moravian, che è stata acquistata per effettuare imaging al telescopio Cassegrain 91-cm della sede *M.G. Fracastoro* (Serra La Nave, Etna) dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Catania (OACt), utilizza un sensore CMOS a grande area, il GSENSE-4040 della Gpixel. Si tratta di un chip *front-illuminated* con *rolling shutter* composto da 4096 x 4096 pixel di dimensioni 9µm x 9µm ciascuno. Le dimensioni del chip sono 36.8 x 36.8 mm^2 e può essere letto ad una velocità massima di 24 frame/sec, nella modalità HDR con un binning 1x1. Le specifiche riportano un rumore di lettura di 3.7 e- e una efficienza quantica di picco del 74 % a 600 nm.
Nella modalità HDR le immagini sono campionate a 16 bit con le unità del convertitore analogico/digitale, ADU, che vanno da 0 a 65535.
Il valore medio del Bias è di circa 100 ADU.
Le specifiche di questo sensore, così come riportate dalla Gpixel, sono elencate in Tab. 1.

Specifications

Photosensive area	36.8 mm x 36. 8mm	Angular response	>25 deg (80% response)
Pixel size	9 µm x 9 µm	Dark current	12.2 e-/pixel/sec @ 25C
Number of active pixels	4096 x 4096	Maximum frame rate	24 fps @ HDR mode, 96 fps @ 2×2 HDR mode
Full well capacity	74 ke- @ PGA Gain x2.8	Supply voltages	3.3V for analog, 1.8V for digital
Temporal noise	3.7 e- @ PGA Gain x16.5	Output format	18 pairs LVDS data, 1 pair control
Dynamic Range	86 dB @ HDR mode	Channel multiplexing	/
Peak QE	74% @ 600nm (microlens) / 50% @ 600nm (no microlens)	Power consumption	1.2 W
Parasitic Light Sensitivity	/	Package	140-pin PGA

Tab. 1. Specifiche del sensore GSENSE4040 come riportate dalla Gpixel https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gsense/gsense4040/

Fattore di conversione, Readout-noise e linearità

Abbiamo verificato e testato le caratteristiche del sensore GSENSE4040 utilizzato nella camera C4 Moravian nel laboratorio COLD dell'INAF-OACt. La temperatura del sensore è stata impostata a -20°C; questo valore si è mantenuto stabile entro 0.2°C grazie anche al raffreddamento dell'ambiente che ospitava la camera Moravian.

Abbiamo acquisito coppie di immagini di *Flat field* a diversi tempi di posa, da 0.5 a 40 secondi, con la camera connessa ad una sfera integratrice, illuminata da un LED con lunghezza d'onda centrale di 450 nm alimentato a 2.3 V. La tensione di alimentazione è stata selezionata per avere un flusso luminoso sufficiente per ottenere nel singolo pixel del CMOS segnali da poche migliaia di ADU fino quasi alla saturazione del convertitore AD (65535 ADU) con tempi di esposizione di pochi secondi.
Uno schema del set-up utilizzato nel laboratorio COLD per effettuare le misure in oggetto è

mostrato in Fig. 1.

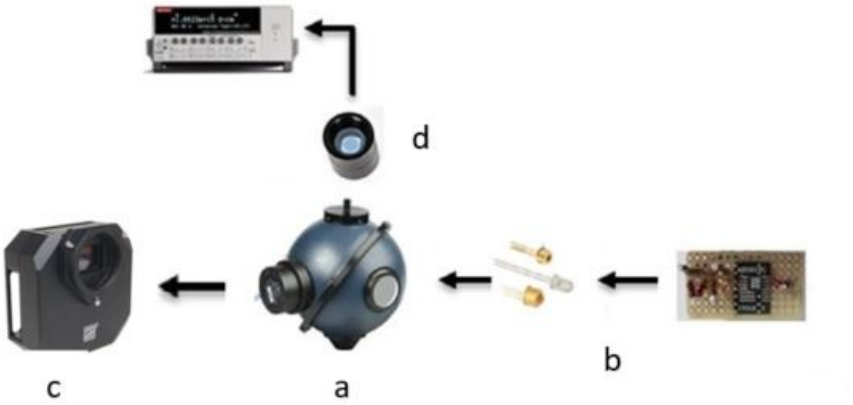


Fig. 1. Schema del set-up utilizzato per misurare la Quantum Efficiency del sensore GSENSE4040 presente nel laboratorio COLD: **a-** Sfera integratrice con le tre porte di ingresso/uscita della luce; **b-** **S**orgente LED; **c-** Camera Moravian C4; **d-** Fotodiodo NIST.

La sfera integratrice agisce come diffusore di luce e consente di ottenere un flusso luminoso uniforme nella superficie attiva del sensore. Per ottenere misure accurate, risulta estremamente importante garantire la stabilità del flusso luminoso su tempi abbastanza lunghi in modo da completare il ciclo di esposizioni a diversi tempi di esposizione (T_{exp}). Questo è garantito assicurando una alimentazione del LED stabile attraverso l'uso di un alimentatore stabilizzato a basso rumore. Ciò è particolarmente rilevante ai fini della verifica della linearità del sensore, ma anche per ottenere coppie di immagini con lo stesso livello di segnale che servono per la misura del fattore di conversione da ADU in elettroni. In questo ultimo caso, essendo le immagini ottenute in rapida sequenza entro poche decine di secondi al più, questo effetto è normalmente trascurabile.

Abbiamo misurato i segnali medi in 4 aree di 111 x 111 pixel (1 mm^2) vicino al centro del sensore (vedi Fig. 2). Le immagini sono state "pre-ridotte" sottraendo il corrispondente *Dark* acquisito subito dopo ciascuna coppia di immagini di Flat con lo stesso tempo di esposizione.
Come appare evidente in Fig. 2, le immagini mostrano un chiaro *vignetting*, ossia il livello di segnale non è costante su tutta l'area, ma diminuisce dal centro ai bordi del sensore (circa del 35% su ciascun bordo) a causa dell'interfacciamento con la sfera integratrice (essenzialmente il foro di uscita) e delle grandi dimensioni del chip. Ciò permette di illuminare correttamente solo la parte centrale del chip. Nelle aree scelte vicino al centro del sensore, la variazione di segnale può essere del tutto trascurata.

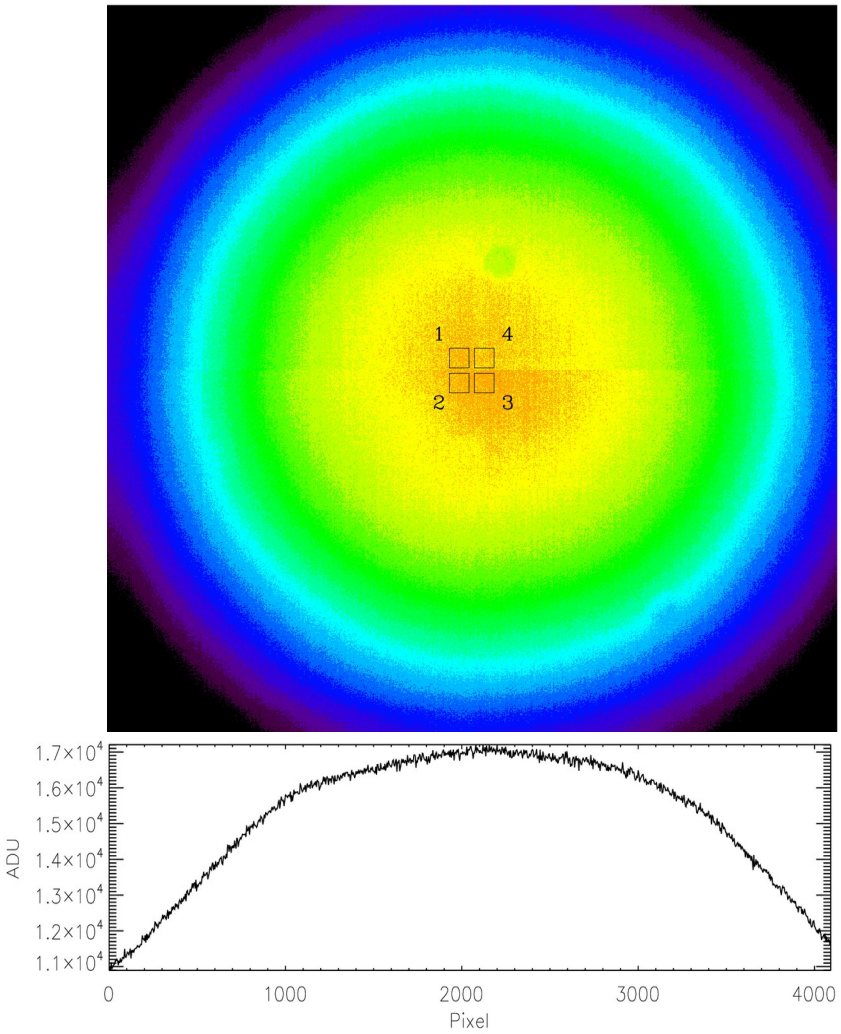


Fig. 2. Immagine in falsi colori del CMOS illuminato con il LED a 450nm e la sfera integratrice. Sono indicate le aree di 111 x 111 pixels (da 1 a 4) per le quali sono stati calcolati il segnale medio e la varianza, dopo avere sottratto il corrispondente *Dark*. Una sezione dell'immagine vicino al centro è mostrata nel grafico in basso.

Fattore di conversione

Per caratterizzare il sensore in termini del fattore di conversione *F*= elettroni/ADU, abbiamo utilizzato il metodo della varianza che è legato alla statistica Poissoniana del rumore fotonico, per cui la varianza deve essere uguale alla media. Un grafico della varianza in funzione del segnale medio permette di misurare il guadagno inverso *K* (ADU/elettroni) dalla pendenza della retta di fit (Janesick et al. 1987, Robertson 2021).

Per minimizzare gli effetti di non-uniformità del livello di illuminazione, abbiamo preferito misurare la varianza su coppie di immagini acquisite con lo stesso tempo di posa a breve distanza di tempo.

Il grafico della varianza (Fig. 3) in funzione del livello di segnale (che si fa variare cambiando T_{exp}) fornisce quindi il fattore di conversione che si ottiene dalla pendenza *K* della retta di *best-fit:*

$$Varianza = Q + K * Segnale.$$

Dove l'intercetta *Q* è una misura del readout noise (RON).
I valori di *F=1/K* sono molto simili per tutte le aree scelte. Abbiamo pertanto considerato la media pesata, utilizzando come peso $1/\sigma_K^2$, dove σ_K è l'errore sul parametro *K* calcolato dalla routine di *fit* lineare utilizzata (LINFIT in IDL).

Abbiamo anche calcolato l'errore standard sulla media dei valori di *F*, ottenendo:

$$F = 0.83 \pm 0.03 \ e^-/ADU$$

che è in ottimo accordo col valore di 0.82 riportato nelle specifiche della camera C4.

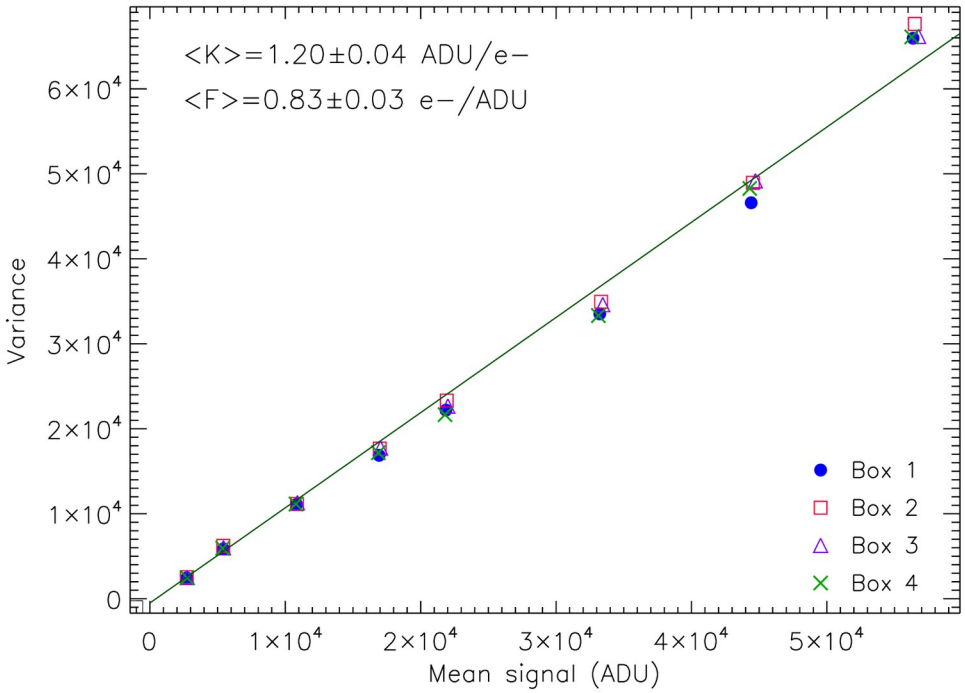


Fig. 3. Varianza in funzione del segnale medio in ADU. I simboli diversi identificano i valori misurati nelle 4 diverse aree evidenziate in Fig. 2. Il *best-fit* lineare, per ciascuna delle aree del sensore fornisce i valori del guadagno K e del suo inverso (fattore di conversione *F*).

Readout Noise
Come si è detto, il RON può essere ricavato dall'intercetta *Q* del grafico della varianza.
Abbiamo misurato il RON anche sulla base della deviazione standard dei valori di ADU in regioni selezionate di immagini di *Bias* (ottenute con T_{exp}=0 sec) o dei *Dark* a più basso tempo di esposizione (0.5 sec). In tutti i casi si misura un valore di circa 5.1 ADU che, grazie al fattore di conversione *F*, fornisce un rumore di lettura:

$$RON \approx 4.2 \ e^- \text{ in rms}$$

che è in buon accordo con il valore tabulato dalla Gpixel di 3.7 e-.

Linearità

La serie di immagini a diverso tempo di posa ci consente anche di verificare la linearità di risposta del sistema e le eventuali deviazioni dalla linearità in base al segnale.

La Fig. 4 riporta il segnale medio in ADU nelle 4 aree scelte in funzione del tempo di esposizione. Come si vede dal box superiore, l'andamento è lineare ed è ben rappresentato dalla retta di *best-fit* (linea rossa) che è comunque molto prossima alla relazione di proporzionalità diretta tra conteggi e tempo di posa della forma $C=A\cdot T_{exp}$ (linea blu), nella quale si è scelto il coefficiente $A=C_6/6$ ADU/sec come rapporto tra i conteggi medi ottenuti con 6 sec di posa e il tempo di posa. Per meglio apprezzare le deviazioni dalla linearità, abbiamo rappresentato nel box sottostante le differenze tra i singoli valori e la retta di *best fit*. La deviazione dalla lineartà è entro il 1.8%, ma probabilmente è ancora più bassa, avendo dovuto effettuare le misure su un tempo di più di un'ora durante il quale la stabilità del LED potrebbe superare questo limite.

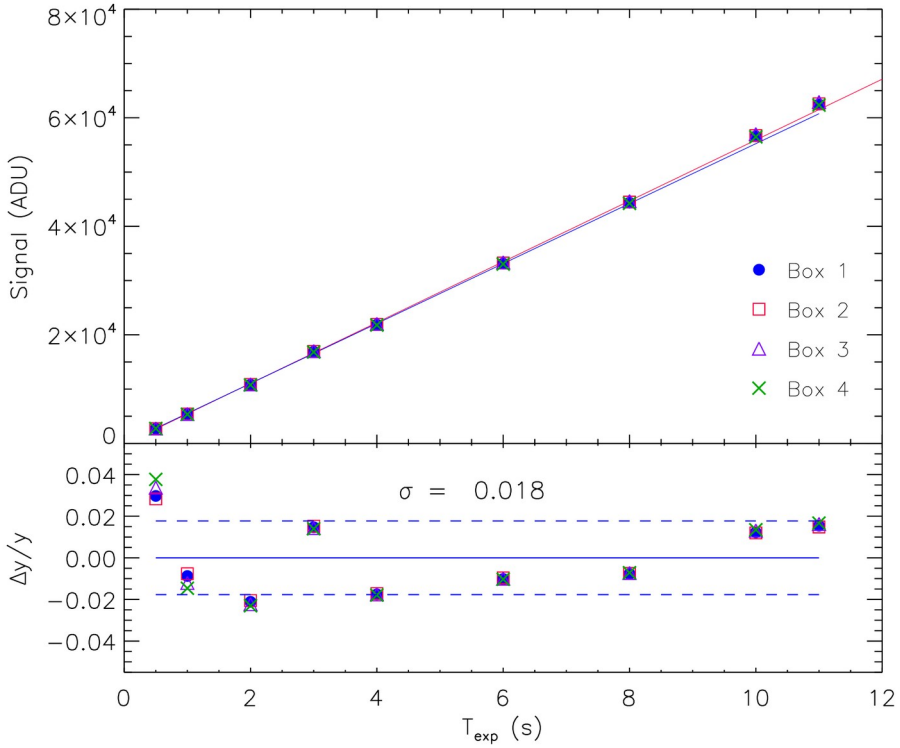


Fig. 4. *(In alto)* Segnale medio in ADU in funzione del tempo di posa per le 4 aree di 1 mm^2 di Fig. 2 (simboli come nella legenda). Il *best-fit* lineare ai dati è rappresentato dalla linea rossa. La relazione lineare $C=A\cdot T_{exp}$ è visualizzata con la linea blu. *(In basso)* Differenza dei valori rispetto al *best-fit*. La deviazione standard è σ=1.8 %.

Potrebbe anche esserci una leggera deviazione dalla linearità per elevati livelli di segnale prossimi alla saturazione del convertitore A/D.

In effetti, come si evince dalla Fig. 5, dove abbiamo escluso i valori di ADU vicini alla saturazione, il punto a 0.5 sec (segnale basso) e quello a 3 sec (effettuato alla fine del ciclo di misure e quindi probabilmente affetto da problemi di stabilità del LED), la linearità del sensore è confermata entro lo 0.7 % fino a 50000 ADU. Questo dato è in buon accordo con le specifiche della camera C4 riportate dalla Moravian che presenta dei grafici che garantiscono la linearità del sensore fino a 60000 ADU, anche se non viene precisato entro quale livello di accuratezza.

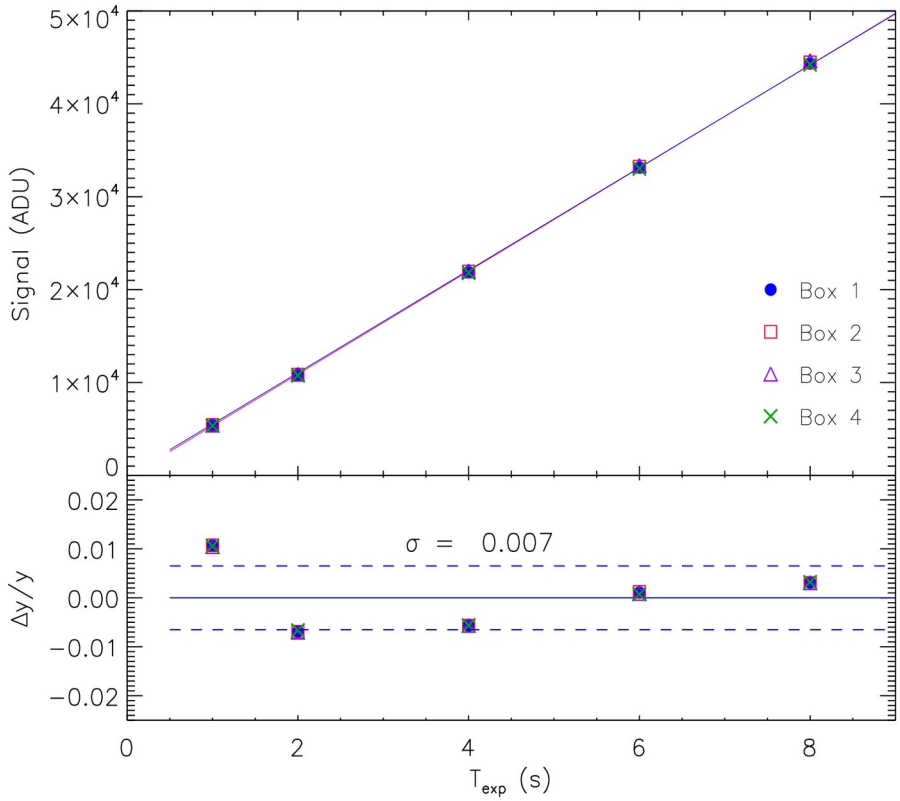


Fig. 5. Come in Fig. 4, ma per valori di T_{exp} da 1 a 8 sec. La deviazione standard è di 0.7 %.

Efficienza quantica

Per misurare l'Efficienza Quantica (QE) in funzione della lunghezza d'onda (*Responsive Quantum Efficiency* = RQE) del sensore GSENSE-4040 è stato utilizzato lo stesso set-up adottato per le precedenti misure e presente presso il laboratorio COLD.
Allo scopo di ottenere una curva di QE completa, abbiamo utilizzato una serie di LED della THORLABS a diversa lunghezza d'onda, elencati nella Tab. 2.

Source	λ_c (nm)	FWHM (nm)	$R(\lambda_c)$ (%)
LED315W	315	10	2.4
LED341W	341	15	4.8
LED385L	385	12	48.2
LED405L	405	15	60.1
LED430L	430	20	66.3
LED450L	450	20	67.3
LED465E	465	25	68.4
LED505L	505	30	71.8
LED525L	525	25	73.0
LED570L	570	15	73.3
LED591E	591	20	69.9
LED660L	660	14	68.4
LED780E	780	30	51.0
LED851L	851	40	32.2

Tab. 2. Sorgenti LED utilizzate per misurare l'efficienza quantica del sensore GSENSE-4040. Sono riportate la lunghezza d'onda centrale (λ_c) e la larghezza a metà altezza (FWHM) della distribuzione spettrale del LED. La efficienza quantica $R(\lambda_c)$ del sensore, calcolata come descritto nel testo, è riportata nell'ultima colonna.

Le tensioni di alimentazione di ciascun LED sono state regolate per avere un flusso luminoso sufficiente per ottenere nel singolo pixel del CMOS segnali da circa 10000 a 30000 ADU con tempi di esposizione da qualche secondo a poche decine di secondi.
Le immagini di *Dark* con lo stesso tempo di posa sono state acquisite subito dopo quelle di *Flat.*
Per misurare l'efficienza quantica del sensore CMOS GSENSE-4040, è stata utilizzata una sfera integratrice il cui scopo è quello di rendere uniforme il flusso di luce che illumina le superfici dei sensori. Infatti in essa viene interfacciato, oltre al sensore da caratterizzare, anche il rivelatore di riferimento calibrato, costituito da un fotodiodo IRD (International Radiation Detectors) NIST *traceable* e un fento-amperometro (Keithley 6514) per misurare la foto-corrente (vedi Fig. 1). Affinchè il flusso incidente di fotoni sia lo stesso sui due sensori, il fotodiodo e il CMOS vengono interfacciati alla sfera integratrice in modo da

avere la stessa distanza (d=51 mm) dalla rispettiva finestra di interfacciamento.
La corrente $I(\lambda_c)$ rivelata da 1 cm^2 di area del fotodiodo alla lunghezza d'onda λ_c emessa dal LED è stata convertita nel numero di fotoelettroni/cm^2 rivelati dal fotodiodo dividendola per la carica elettronica *e*. Dividendo ancora per l'efficienza quantica $r(\lambda_c)$ del fotodiodo, si ricava $N(\lambda_c)$, che è il numero di fotoni incidenti per cm^2.

$$N(\lambda_c) = I(\lambda_c)/e/r(\lambda_c)$$

Il numero di fotoni incidenti in 1 cm^2 si deve confrontare col numero $N_r(\lambda_c)$ di fotoni rivelati da una identica area del CMOS, per avere l'efficienza quantica. Il valore di $N_r(\lambda_c)$ si ottiene sommando il segnale fotonico (al netto dei conteggi di *Dark*) di tutti i pixel in un'area di 1 cm^2 vicina al centro del recettore.
Abbiamo preferito, come fatto in precedenza, utilizzare le aree di 1 mm^2 vicine al centro del frame (Fig. 2) e il segnale totale in ADU è stato moltiplicato per il guadagno per passare ai fotoelettroni rivelati; inoltre è stato moltiplicato per un fattore 100 per portarlo a una superficie di 1 cm^2. L'efficienza quantica del CMOS si ottiene quindi da

$$R(\lambda_c) = N_r(\lambda_c)/N(\lambda_c)$$

I valori di efficienza quantica ottenuti sono riportati in Tab. 2 e graficati in Fig. 6 insieme alla efficienza quantica riportata dalla Gpixel per un tipico CMOS GSENSE-4040 https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gsense/gsense4040/
Le nostre misure sono in buon accordo con il grafico della Gpixel; a differenza di quest'ultimo, noi misuriamo RQE >0 (3-5 %) a λ<350 nm, e un'efficienza leggermente più bassa nel vicino infrarosso (λ>800 nm).

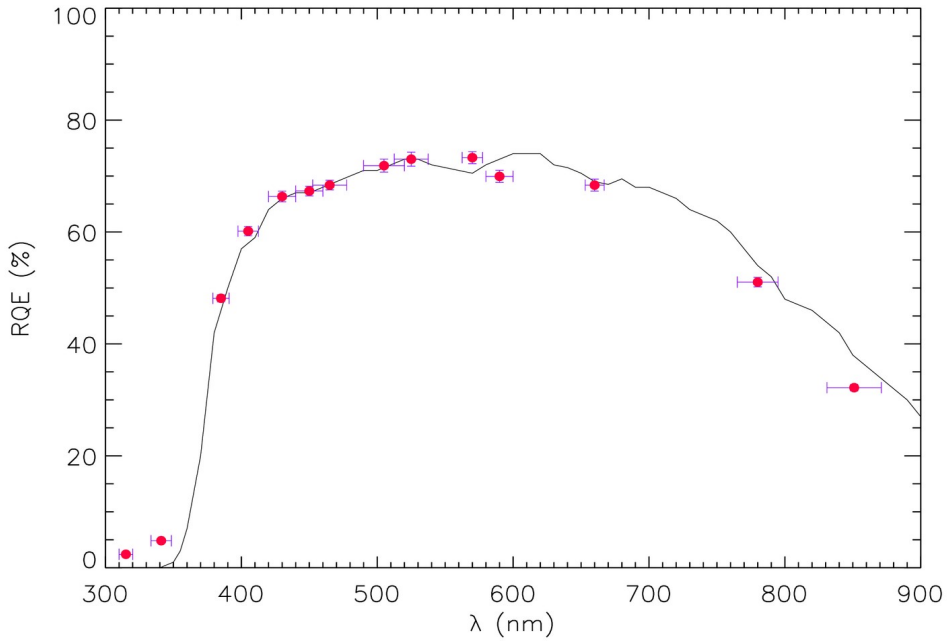


Fig. 6. Efficienza quantica di risposta (RQE) del sensore CMOS GSENSE-4040 come riportata dalla Gpixel (linea continua) confrontata con le misure effettuate nel laboratorio COLD (pallini rossi). Le barre d'errore verticali includono gli errori relativi di misura (deviazioni standard) su $N_r(\lambda_c)$, $I(\lambda_c)$ e $r(\lambda_c)$ che sono stati sommati in quadratura. Le barre di errore orizzontali denotano la FWHM della distribuzione spettrale di ciascun LED.

Caratteristiche del Dark

Abbiamo effettuato diverse pose di *Dark* (esposizioni con otturatore chiuso) con vari tempi di esposizione, T_{exp} da 0 sec fino a 600 sec con il CMOS a temperatura di -20.0 °C.

Abbiamo scelto le due aree #2 e #4, evidenziate in Fig. 2, per valutare il livello di segnale e il rumore nel *Dark*, rappresentati rispettivamente dal valore medio e dalla deviazione standard dei valori in ADU nelle suddette aree del sensore, dopo avere applicato un criterio di rigetto (σ-*clipping*) per eliminare gli *spikes* prodotti dai raggi cosmici.

I risultati, per diverse immagini di *Dark*, sono riportati in funzione del tempo di esposizione nelle Fig. 7 e 8.

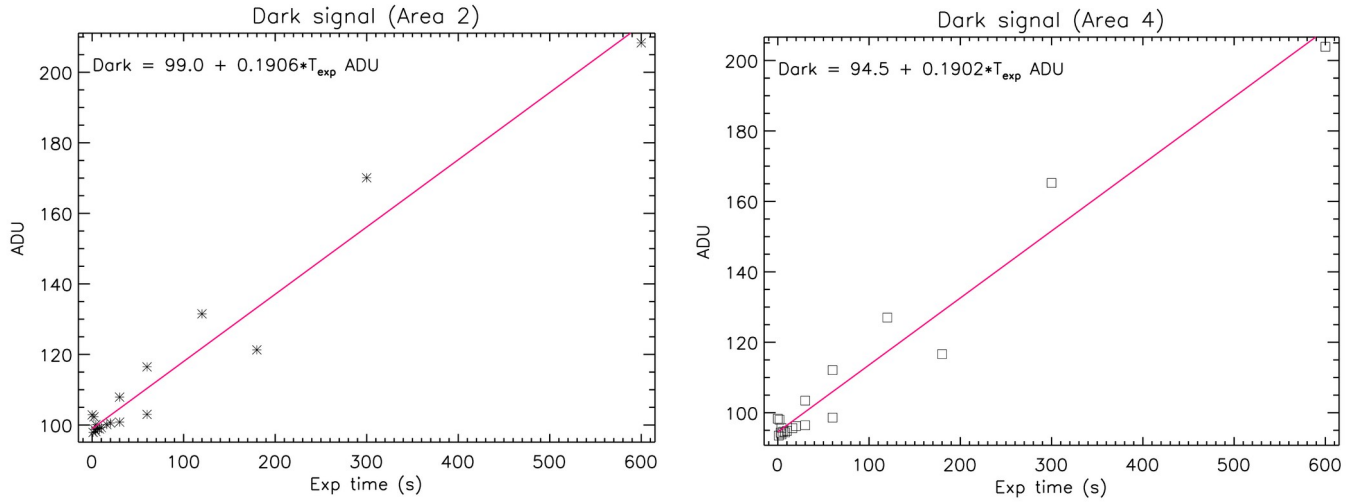


Fig. 7. Livello del *Dark* in ADU in funzione del tempo di esposizione per le due aree scelte sul CMOS. Il *best-fit* dei dati è rappresentato dalla retta in rosso.

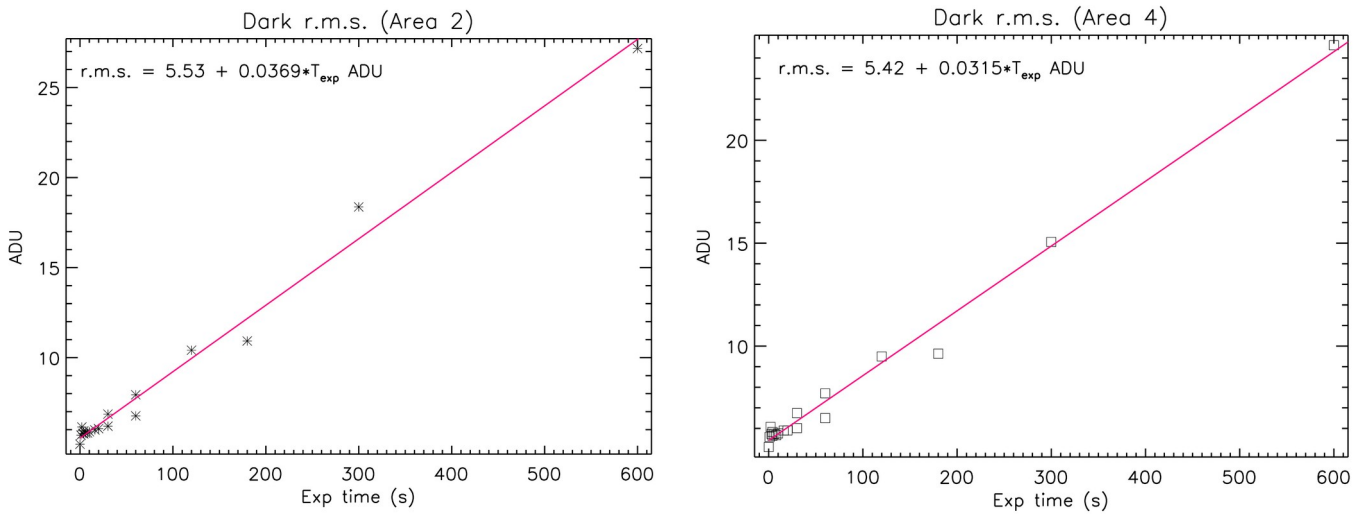


Fig. 8. Deviazione standard dei valori del *Dark* nella Area2 e Area4 in funzione del tempo di esposizione. Si noti l'andamento lineare visualizzato dalla retta di *best-fit* (in rosso).

Questi grafici dimostrano come il livello medio del *Dark*, se la temperatura viene mantenuta costante entro 1 °C, può essere valutato con buona affidabilità e che il rumore medio cresce in maniera quasi lineare fino a circa 25 ADU (circa 20 e^-, considerando il fattore di conversione di 0.82 e^-/ADU) in 10 minuti (600 sec) di esposizione. Per le osservazioni fotometriche non si prevedono tempi di posa molto più lunghi e comunque, qualora fosse necessario, è possibile farlo senza aumentare il rumore in modo eccessivo per l'utilizzo scientifico delle immagini.
Oltretutto, il rumore misurato nel *Dark* è in gran parte dovuto ad un "*pattern*" fisso e ripetibile di *pixels* che rispondono in maniera diversa e il cui segnale di *dark* cresce in maniera quasi lineare col tempo di esposizione, ma il rapporto di intensità tra i valori dei diversi pixel si mantiene pressoché costante.
Questo è chiaramente evidenziato dalla Fig. 9 nella quale sono visualizzati i valori in ADU di pixel in una porzione di immagine di 100 x 100 pixel all'interno dell'Area2, per differenti tempi di posa.

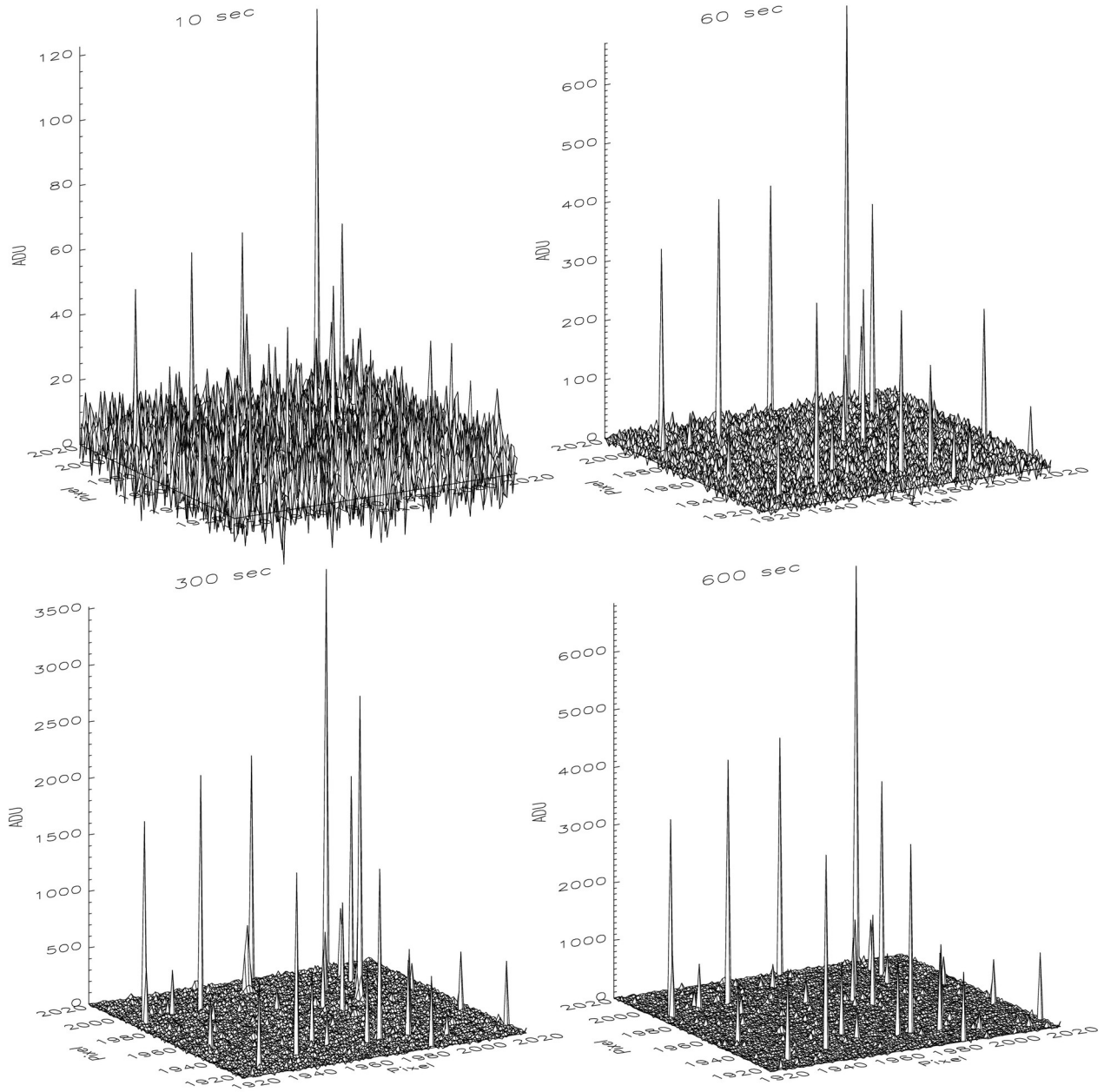


Fig. 9. Una porzione di 4 immagini di *Dark* acquisite con tempo di posa crescente (10, 60, 300 e 600 sec).

La maggior parte del rumore dovuto alla disuniformità del *Dark* può essere quindi rimossa dalle immagini scientifiche purché si sottraggano immagini di *Dark* (meglio ancora se *master-Dark*, cioè medie di diverse immagini simili) ottenute nelle stesse condizioni di osservazione (essenzialmente la temperatura del sensore) e con tempi di posa uguali o confrontabili, che possono essere acquisite all'inizio o alla fine di una notte di osservazioni.

Solo a titolo di esempio si riporta in Fig. 10 una immagine della galassia M51 ottenuta combinando delle immagini acquisite al telescopio Cassegrain 91cm con 3 pose di 200 sec in ciascuno dei filtri *B*, *V* e *R*c in condizioni mediocri di seeing e con il setup strumentale ancora da migliorare.



Fig. 10. Immagine a colori della galassia M51 ottenuta combinando immagini monocromatiche acquisite al telescopio da 91 cm di diametro della sede *M.G. Fracastoro* (Serra La Nave) dell'OACt nei filtri *B*, *V* e *R*c.

References

- Janesick, J. R., Klaasen, K. P. & Elliott, T. 1987, Opt. Eng., 26, 972
- Robertson, G. R. 2021, PASA 38, 6