

# Le prime prove



sulla mia CCD

## INDICE

Introduzione	
1. Come è fatta una camera con sensore a CCD	4
1.1 Composizione e funzionamento del sensore a CCD	4
1.2 I parametri del sensore a CCD	5
1.3 L'elettronica della camera e lo scaricamento del sensore	9
1.4 I parametri di una camera a CCD	11
1.5 Il raffreddamento del sensore	12
2. Le misure su una camera a CCD	13
2.1 Il Gain	13
2.2 Readout Noise	14
2.3 Termal Noise	15
2.4 Caratteristica Termal Noise - Temperatura	17
2.5 Caratteristica Termal Noise – Tempo di Esposizione	17
2.6 Caratteristica ingresso-uscita del sensore	17
Bibliografia	19

Roma, ottobre 2005

## Introduzione

Queste brevi note sono dedicate a chi, finalmente in possesso della camera a CCD da tempo sognata, torna a casa e vuole verificare quanto le caratteristiche dell'apparecchiatura acquistata sono rispondenti a quelle dichiarate dal costruttore.

Inoltre la determinazione del valore dei parametri caratteristici della propria camera risulta necessaria nelle attività amatoriali scientifiche, quali la fotometria, l'astrometria, ecc.

Il livello di dettaglio nelle descrizioni e nel trattamento dei temi di elettronica è volutamente superficiale, per permettere a persone con cultura "da liceo scientifico" di rendersi conto dei temi trattati; le spiegazioni, anche se non rigorose, cercano comunque di dare indicazioni pratiche all'amatore che vuole andare dritto alla parte pratica del suo hobby.

La bibliografia fornita è invece pensata per coloro che intendono approfondire gli argomenti e presuppone qualche nozione tecnica e scientifica di base in più.

Augurandomi di essere stato chiaro e soprattutto utile in questa breve descrizione del mondo delle camere da ripresa astronomica, resto a disposizione per critiche e miglioramenti al mio indirizzo di e-mail **[gianni.ros@tiscali.it](mailto:gianni.ros@tiscali.it)**

Metterò questa memoria a disposizione di tutti gli astronomi non professionisti, cercando di completarla con nuovi spunti che man mano dovessero sorgere nella pratica giornaliera del nostro hobby.

## 1. Come è fatta una camera con sensore a CCD

Una camera con sensore a CCD è costituita da una scatola metallica che contiene, oltre al sensore a CCD, il circuito elettronico che lo alimenta e ne gestisce le funzioni. La scatola, oltre a contenere la realizzazione elettronica della camera, è equipaggiata con i circuiti per raffreddare il sensore e portare all'esterno il calore generato al suo interno ed ha anche la funzione di collegare meccanicamente il sensore a CCD al telescopio o ad altro dispositivo di ripresa. Infine, il più delle volte, è presente sul cammino ottico un otturatore che, come per una macchina fotografica, attiva l'esposizione del sensore per un determinato periodo di tempo.

Analizzeremo qui nel dettaglio alcuni elementi di una camera a CCD, con lo scopo di capire il suo funzionamento ed il significato dei parametri che la caratterizzano.

### 1.1 Composizione e funzionamento del sensore a CCD

La parte "nobile" di una camera da ripresa è il suo sensore e cioè il chip che contiene il sistema a stato solido che trasforma i fotoni che lo colpiscono in elettroni.

Nel caso di questi dispositivi di ripresa, la parte sensibile alla radiazione elettromagnetica incidente presenta una tecnologia nota come CCD, o Charge Coupled Device (dispositivo ad accoppiamento di carica) e quindi la camera è detta "con sensore a CCD".

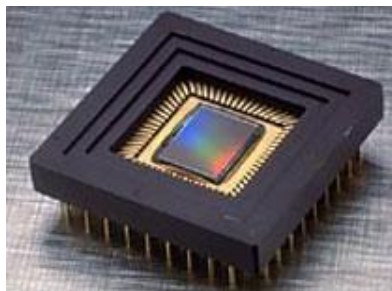


fig. 1.1 Sensore KAF-1402E

Questo è costituito da uno strato di silicio opportunamente realizzato in modo da presentare alla radiazione incidente una serie di cellette elettricamente isolate, dette "pixel", organizzate in una matrice ordinata di righe e colonne.

Il sensore KAF 1402E della Kodak di fig. 1.1 ha una matrice di 1.320 x 1.035 pixel, ciascuno di dimensioni 6.8 x 6.8 micron e quindi un'area sensibile di 8.98 mm x 7.04 mm.

La separazione tra le colonne del sensore è strutturale perché creata tramite zone verticali di silicio drogato che impediscono agli elettroni presenti nel silicio di diffondere da una colonna all'altra; la suddivisione

## Le prime prove sulla mia CCD

in righe è invece ottenuta deponendo sul silicio "strisce conduttrici" mantenute a opportuni potenziali che sbarrano la strada agli elettroni del pixel lungo la colonna nella fase di ripresa e li accelerano durante lo scaricamento del sensore.

I fotoni provenienti dagli oggetti astronomici, focalizzati dallo strumento ottico usato (telescopio, obiettivo fotografico, ecc.), durante l'esposizione colpiscono un certo numero di pixel del sensore ed ogni fotone libera nel reticolo cristallino del silicio una serie di elettroni che restano confinati nel pixel in cui sono stati liberati per quanto detto sopra.

Terminata l'esposizione al flusso di fotoni, nella matrice di pixel del sensore è presente la mappa dei fotoni incidenti rappresentata dagli elettroni liberi in ciascun pixel.

L'elettronica della camera provvede a leggere questa mappa "scaricando il sensore" : attraverso la gestione di opportuni potenziali relativi agli elettrodi conduttori presenti sul sensore, il contenuto in elettroni di ciascun pixel viene prelevato, misurato e trasformato in un valore numerico ad 8, 16 o 32 bit, a secondo del tipo di convertitore Analogico/Digitale presente nella camera.

Il valore numerico ricavato per ciascun pixel viene trasferito al PC collegato alla camera a CCD e così la matrice di celle di silicio del sensore viene messa in corrispondenza con una matrice di valori numerici nella memoria del PC, espressi in un'unità adimensionale detta ADU (Analog to Digital Unit).

### 1.2 I parametri del sensore a CCD

I principali parametri che caratterizzano le funzionalità e le prestazioni del sensore sono i seguenti.

#### Quantum Efficiency

I fotoni che colpiscono il pixel trasferiscono la loro energia al silicio, liberando un numero di elettroni dalla sua struttura cristallina; tali elettroni rimangono confinati all'interno del pixel stesso. Non tutti i fotoni incidenti, però, riescono a generare elettroni ed è quindi necessario introdurre il parametro **Efficienza Quantica** del sensore (Quantum Efficiency = QE) che esprime col rapporto tra il numero di fotoni incidenti ed il numero di quelli che generano elettroni l'efficienza del sensore. Il QE assume valori minori di 1 e varia fortemente con la lunghezza d'onda del fotone incidente.

## Le prime prove sulla mia CCD

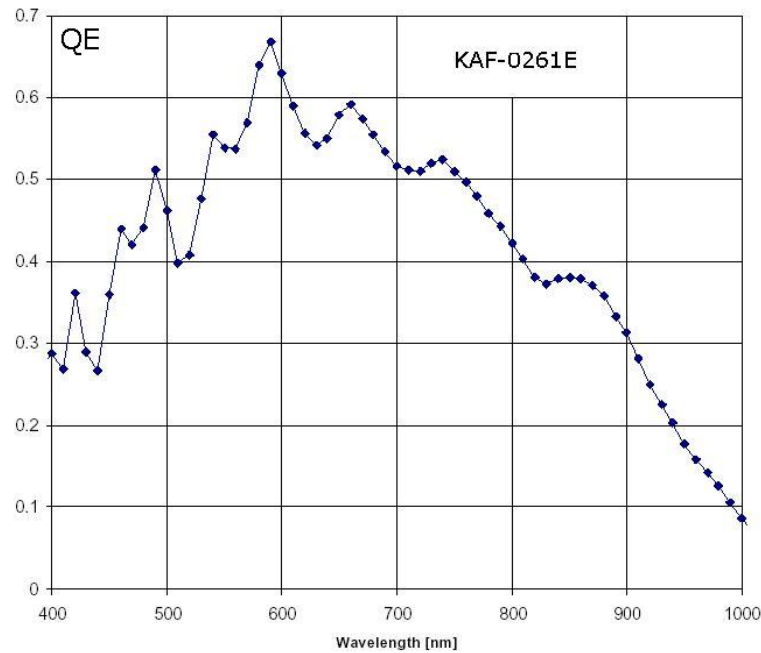


fig. 1.2 Quantum Efficiency del KAF-0261E

In fig. 1.2 viene riportato il grafico del QE in funzione della lunghezza d'onda dei fotoni incidenti per uno dei sensori della Kodak più diffusi sul mercato; si vede come la curva del QE ha una forma a campana fortemente spostata verso le lunghezze d'onda del rosso ed infrarosso.

### Linearità

Una delle caratteristiche principali del sensore a CCD, che ci permette di usarlo come strumento di misura fotometrico, è la linearità della sua caratteristica ingresso-uscita.

Supponiamo infatti di effettuare riprese di durata  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , ecc. e riportiamo in un grafico il numero di ADU relativo ad un pixel colpito dai fotoni di una stella (uscita) in funzione della durata dell'esposizione (ingresso); otterremo un andamento lineare fino a certi valori della durata dell'esposizione. Questo definisce il campo di risposta lineare del sensore a CCD, necessario per poterlo considerare uno strumento di misura; infatti questa caratteristica permette di ricavare dalla diversa luminosità delle stelle presenti nella stessa immagine (ingressi) valori corrispondenti di magnitudine (uscite).

### Full Well Capacity (FWC)

E' la massima capacità che ha il singolo pixel di accumulare gli elettroni liberati al suo interno e quindi si esprime in **N. elettroni**. Superata questa capacità, se l'esposizione continua, gli elettroni ulteriormente liberati superano la barriera di potenziale del pixel e fluiscono al suo esterno invadendo i pixel adiacenti posti nella stessa colonna, dando il caratteristico fenomeno noto come "blooming" visibile in Fig. 1.3.

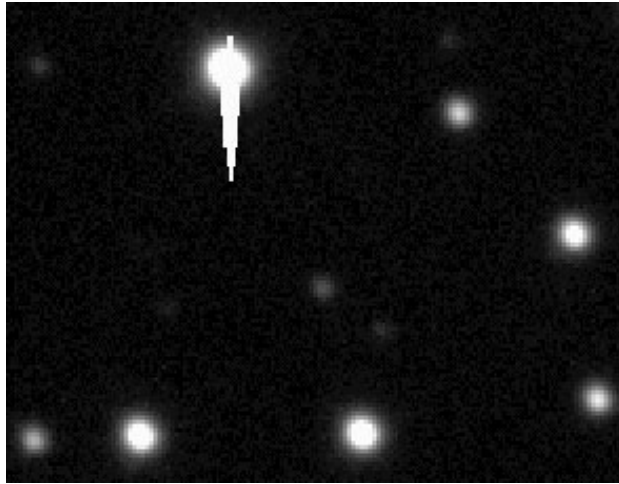


Fig. 1.3 tipico fenomeno di Blooming

### Antiblooming

E' possibile limitare fortemente il fenomeno del blooming predisponendo intorno al singolo pixel una serie di contatti mantenuti ad opportuni potenziali; quando il numero di elettroni si avvicina alla FWC del pixel questi contatti raccolgono il surplus di elettroni scaricandoli a massa ed evitando il riflusso all'esterno del pixel.

I sensori equipaggiati con questa circuiteria sono detti "sensori antiblooming" (AB) e sono fortemente sconsigliati per le attività fotometriche in quanto la presenza degli ulteriori contatti e dei relativi potenziali rende il comportamento del sensore non più lineare. Infatti, per permettere l'intervento della circuiteria aggiuntiva, di fatto tutto il sensore si comporta linearmente fino ad un certo valore di riempimento del pixel, dopodiché la funzione di trasformazione **N.fotoni → ADU** del pixel subisce una variazione tale da rendere inapplicabili le tecniche fotometriche basate sulla linearità del sensore.

### Dark Current @ 0°C

E' il valore della corrente di elettroni ottenuta con l'esposizione di 1 secondo ad otturatore chiuso, alla temperatura di 0°C. Rappresenta una misura del rumore del sensore e si esprime in pA/cm<sup>2</sup> oppure in elettroni/pixel/sec. Essendo l'otturatore chiuso non arrivano fotoni sul sensore e la corrente misurata è dovuta al rumore della camera a CCD; come vedremo in seguito più precisamente, la dark current è dovuta alla somma di rumore termico e rumore elettronico.

### Binning

Il sensore a CCD, in fase di scarica dell'immagine acquisita, ha la possibilità di fondere insieme gli elettroni provenienti da più pixel, ottenendo una misura in ADU associata ad un unico pixel-somma più grande.

## Le prime prove sulla mia CCD

Questa tecnica, nota come "binning", prevede ad esempio di scaricare il sensore ottenendo un unico valore in ADU per un'area di 2x2, 3x3 o 4x4 pixel rispettivamente.

L'effetto ricercato con la tecnica del binning è quello di avere una maggiore sensibilità, in quanto fondendo più pixel insieme si ottiene un maggior rapporto S/N del pixel-somma; lo svantaggio del binning è dato nella minore risoluzione della ripresa poiché l'aumento delle dimensioni del pixel fa aumentare la scala dell'immagine.

### Dinamica del sensore

Ciascun pixel ha la possibilità di accumulare un numero di elettroni il cui valore massimo è definito dal valore della Full Well Capacity ed il valore minimo è limitato dal numero di elettroni generato dall'elettronica della camera (Readout Noise) di cui si dirà nel prossimo capitolo.

Si può definire quindi la **Dinamica** del sensore come la capacità, da parte del singolo pixel, di poter raccogliere un numero di elettroni il cui valore varia tra quello del Readout Noise e la FWC.

La Dinamica si esprime in dB con la seguente formula :

$$D [dB] = 20 \cdot \log_{10} \left[ \frac{FWC}{RN} \right]$$

Ad esempio sensori attualmente molto diffusi presentano una FWC=100.000 elettroni ed un RN=12 elettr./pixel; in questo caso, il sensore presenterà quindi una dinamica :

$$D = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{100.000}{12} \right) \cong 78 \text{ dB}$$

### 1.3 L'elettronica della camera e lo scaricamento del sensore

Allorché l'esposizione del sensore ai fotoni è terminata, l'otturatore della camera viene chiuso e nei vari pixel è conservata una mappa di elettroni che modella la mappa dei fotoni che hanno colpito il sensore stesso nelle sue varie parti.

A questo punto inizia il processo di scaricamento del sensore che ha lo scopo di misurare per ciascun pixel il numero di elettroni che contiene e fornire al Personal Computer (PC) che interfaccia la camera un numero proporzionale a questa misura. Nel PC si verrà così a formare una matrice di numeri in corrispondenza con la mappa degli elettroni pixel-per-pixel già rappresentativa della mappa dei fotoni che hanno inciso sul sensore.

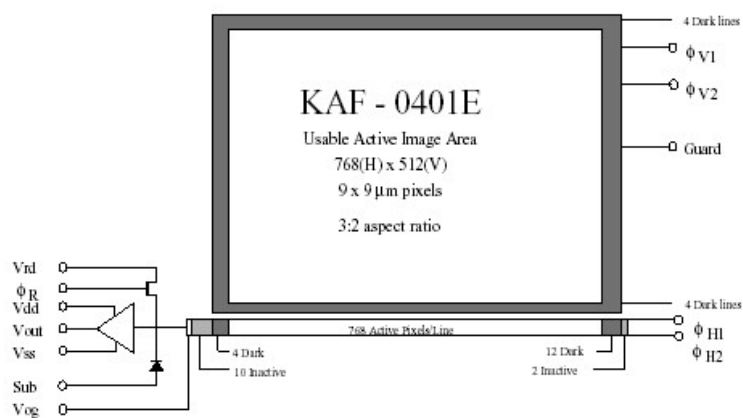


Figure 1. Functional Block Diagram



Eastman Kodak Company - Microelectronics Technology Division - Rochester, NY 14650-2010  
Phone (716) 722-4385 Fax (716) 477-4947

fig. 1.4 Circuito di uscita del sensore KAF0401E  
(dal Datasheet della Kodak)

L'operazione di scaricamento del sensore a CCD viene condotta dall'elettronica della camera che, con opportuni potenziali, comanda l'elettronica integrata nel sensore mostrata in fig. 1.4 per ottenere quanto contenuto nella matrice di pixel.

Le operazioni compiute dall'elettronica della camera, con riferimento allo schema di fig. 1.5, sono le seguenti :

1. si variano i potenziali di riga che confinavano gli elettroni nei pixel, per fare in modo di accelerare quelli dei pixel di ciascuna riga nei pixel corrispondenti della riga inferiore e quelli della prima riga in una serie di registri esterni alla matrice;
2. da questi registri esterni gli elettroni della prima riga di pixel vengono fatti uscire sequenzialmente verso un circuito che provvede a trasformarli in una tensione ad essi proporzionale; per

## Le prime prove sulla mia CCD

- ciascun pixel si avrà una tensione in uscita diversa e proporzionale al gruppo di elettroni che quel pixel conteneva;
3. la tensione della riga, che l'elettronica preleva dal sensore, viene sezionata in varie tensioni di pixel, ciascuna tensione di pixel viene misurata e la misura inviata al PC;
  4. appena finito il processing di una riga si effettua un nuovo spostamento di ciascuna riga verso il basso e dell'attuale prima riga nei registri esterni, eseguendo per questa seconda riga lo stesso processo della prima riga e così via, fino a scaricare e misurare tutti pixel del sensore.

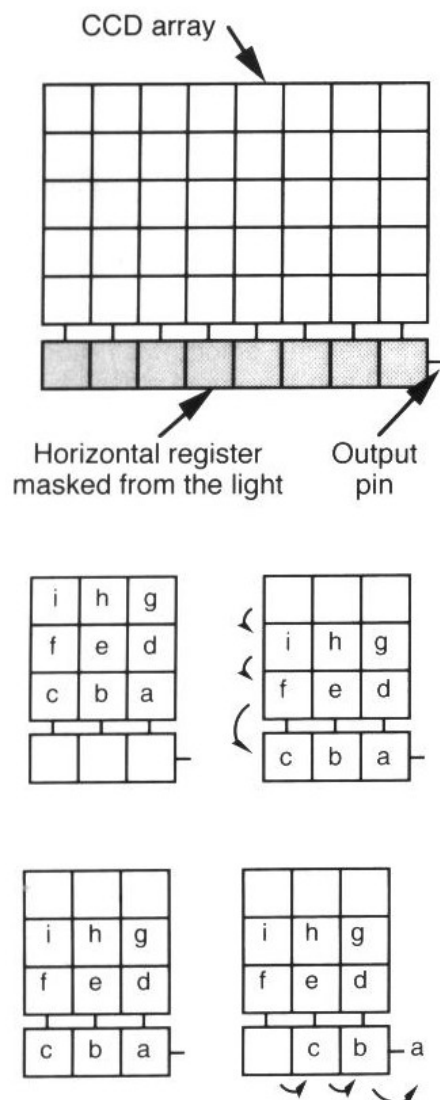


fig. 1.5 Scaricamento del sensore

La tensione di una riga è la sequenza delle tensioni dei vari pixel di cui essa è costituita e rappresenta un segnale analogico che deve essere misurato. Dopo averlo amplificato, si sottopone questo segnale ad un Convertitore Analogico/Digitale (A/D Converter), che è un circuito

integrato in grado di misurarne il valore pixel per pixel, fornendo per ciascuna lettura una misura binaria che potrà essere a 8, 16 o 32 bit a secondo delle scelte del progetto elettronico del costruttore.

I valori forniti da un convertitore A/D sono in un'unità di misura relativa, detta ADU (Analogic to Digital Unit), che dipende dal numero di bit in cui il convertitore A/D codifica il segnale misurato. Attualmente è molto diffusa la conversione a 16 bit e, facendo ad essa riferimento, si potranno misurare per ciascun pixel valori che vanno da 0 a  $2^{16}=65.536$  ADU.

Siamo quindi arrivati ad avere per ciascun pixel del sensore un numero ad **n bit**, che l'elettronica della camera invierà al PC tramite la sua porta parallela o USB.

Nel PC un programma riceve ordinatamente questi numeri, riga per riga, e li ricompone in una matrice di valori, l'immagine, conservandoli per i programmi che sanno visualizzarla sul monitor del PC ed elaborarla per scopi fotometrici, astrometrici e vari.

### 1.4 I parametri di una camera a CCD

Oltre ai parametri caratteristici del sensore con cui sono equipaggiate, le camere a CCD hanno propri parametri caratteristici, legati alle scelte del progetto dell'elettronica; inoltre ogni camera a CCD ha qualità specifiche diverse a secondo degli scopi per cui viene progettata.

Dal nostro punto di vista è possibile descrivere succintamente le caratteristiche di una camera a CCD mediante i seguenti parametri.

#### Readout noise

E' il valore del rumore che l'elettronica introduce per effettuare lo scaricamento del sensore e la conversione Analogico/Digitale. Non dipende dalla durata dell'esposizione dell'immagine e viene espressa in elettroni/pixel.

#### Gain

E' il guadagno in tensione dell'amplificatore che tratta la tensione di riga proveniente dal sensore. Il Gain, per quella camera, fissa la pendenza della caratteristica ingresso-uscita della camera a CCD (si veda oltre), cioè il rapporto tra il numero di elettroni presenti nel pixel (INGRESSO) ed il valore binario che misura questa quantità all'uscita dal convertitore A/D (USCITA). Questo parametro è una caratteristica del progetto elettronico e si misura in elettroni/ADU.

### 1.5 Raffreddamento del sensore

I rumori presenti nella camera a CCD, principalmente dovuti al suo sensore, sono fortemente dipendenti dalla temperatura a cui esso opera. Per abbattere il valore di questi rumori, si porta la temperatura del sensore qualche decina di gradi sotto la temperatura ambiente solitamente mediante una o più **Celle Peltier**.

Questi ultimi sono dispositivi lamellari a stato solido inseriti termicamente tra il chip che contiene il sensore ed un radiatore solidale con il corpo della camera (Fig. 1.6).

Facendo attraversare questi dispositivi da una corrente continua di opportuna intensità, essi si comportano come una pompa di calore sottraendo calore dalla superficie collegata al sensore ed espellendola attraverso la superficie collegata al radiatore.

Sulla camera a CCD, in corrispondenza del radiatore, può essere anche prevista la presenza di una ventola che migliora ulteriormente lo smaltimento del calore nell'ambiente oppure può essere usato un opportuno circuito idraulico il cui liquido sottrae il calore espellendolo in uno scambiatore esterno alla camera.

Le camere in commercio raggiungono temperature del sensore fino a di 40°C al di sotto della temperatura ambiente.

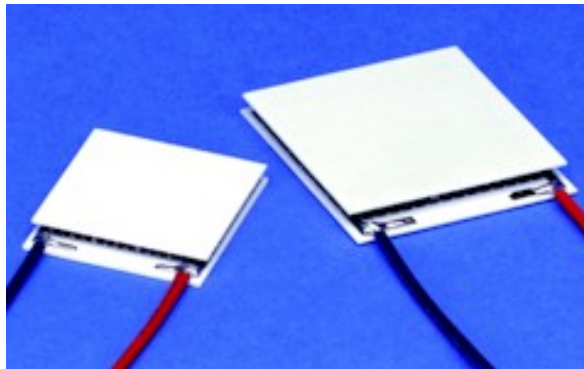


Fig. 1.6 Celle Peltier

## 2. Le misure su una camera a CCD

Come detto nell'introduzione, è intenzione di queste brevi note di mettere in grado il lettore di poter effettuare una serie di semplici misure con un duplice scopo :

- ✓ verificare che i valori dei parametri della propria apparecchiatura siano conformi a quanto dichiarato dal costruttore,
- ✓ caratterizzare la propria camera a CCD con parametri utili per effettuare misure fotometriche o astrometriche in futuro.

Inizieremo analizzando qui di seguito i valori dei principali parametri e dei rumori della camera a CCD, che occupano un interesse fondamentale in ogni attività che faccia uso di questo strumento.

### 2.1 Il Gain

Il Gain di una camera a CCD è il rapporto tra il numero di elettroni presenti in un pixel ed il valore in ADU che quest'ultimo misura per quel pixel inviandolo al PC.

Il Gain si esprime appunto in e-/ADU e corrisponde all'inverso della pendenza della caratteristica ingresso-uscita della camera a CCD.

Per misurare il Gain della nostra camera a CCD agiamo come segue :

1. effettuiamo due riprese di Flat Field della stessa durata, che chiameremo F1 ed F2;
2. misuriamo su F1 ed F2 il valore medio dell'immagine e chiamiamo questi due valori rispettivamente **F1<sub>m</sub>** ed **F2<sub>m</sub>**; facciamo questo ad esempio con Astroart aprendo le immagini e richiedendo per ciascuna Visualizza>Statistiche da cui leggiamo **Media**;
3. effettuiamo due riprese di Bias Frame che chiameremo B1 e B2;
4. misuriamo su B1 ed B2 il valore medio dell'immagine e chiamiamo questi due valori rispettivamente **B1<sub>m</sub>** e **B2<sub>m</sub>**; facciamo questo ad esempio con Astroart aprendo le immagini e richiedendo per ciascuna Visualizza>Statistiche da cui leggiamo **Media**;
5. Creiamo l'immagine F1-2 come differenza pixel a pixel di F1-F2 e su questa misuriamo la deviazione standard e chiamiamola  **$\sigma_{F1-2}$** ; facciamo questo ad esempio con Astroart aprendo l'immagine differenza e richiedendo Visualizza>Statistiche da cui leggiamo **Dev.standard**;
6. Creiamo l'immagine B1-2 come differenza pixel a pixel di B1-B2 e su questa misuriamo la deviazione standard e chiamiamola  **$\sigma_{B1-2}$** ; facciamo questo ad esempio con Astroart aprendo l'immagine differenza e richiedendo Visualizza>Statistiche da cui leggiamo **Dev.standard**;

Usando i 6 valori appena calcolati, possiamo stimare il valore del Gain della nostra camera a CCD con la seguente relazione :

$$GAIN = \frac{(F1_m + F2_m) - (B1_m + B2_m)}{(\sigma_{F1-2})^2 - (\sigma_{B1-2})^2}$$

## 2.2 Readout Noise

Il valore misurato per il Readout Noise (RN) rappresenta lo scarto quadratico medio (s.q.m.) del segnale di rumore prodotto dalla sola elettronica della camera a CCD.

Essendo un rumore dovuto ai semiconduttori, condensatori e resistenze che costituiscono la circuiteria, esso interviene alla fine dell'esposizione dell'immagine ed a valle del sensore, per cui il suo s.q.m. non dipende dal tempo di esposizione della stessa, ma dalla sola operazione di scaricamento.

Per misurare il RN basta effettuare la ripresa di un'immagine di BIAS (Bias Frame), che è una ripresa con una durata di 0 sec; infatti per tale durata non avremo accumulo nei vari pixel di elettroni dovuti a rumore termico ma, effettuando lo scarico completo dell'immagine, in ciascun pixel troveremo il solo rumore introdotto dall'elettronica che potremo leggere e misurare.

Il valore medio calcolato su tutti i pixel dell'immagine di BIAS ci fornisce il così detto BIAS e cioè il valore in ADU corrispondente allo zoccolo di tensione che polarizza l'ingresso del Convertitore A/D per evitare che a causa di picchi di rumore negativi, questi fornisca in uscita misure negative di ADU.

La deviazione standard calcolata su tutti i pixel dell'immagine di BIAS rappresenta il valore del RN.

Entrambi questi valori si possono ottenere da un programma che fornisca la statistica dell'immagine in questione. Ad esempio usando Astroart si apre l'immagine di BIAS e poi si richiede Visualizza>Statistiche per avere la statistica dell'immagine. Il valore **Media** rappresenta il valore del BIAS in ADU/pix e quello **Dev.standard** il valore del RN in ADU/ pixel.

Per ottenere una stima del RN della nostra camera a CCD, ripetiamo la misura del RN come prima detto su N Bias Frame diversi (con N almeno 10) ed utilizziamo come stima della misura del Readout Noise della camera la media aritmetica degli N valori ottenuti.

## Le prime prove sulla mia CCD

Il valore del RN così ottenuto è in ADU/pixel e può essere trasformato in elettroni/pixel per confrontarlo col valore dichiarato dal costruttore per la nostra camera a CCD con la seguente formula :

$$\text{RN [e-/pix]} = \text{RN [ADU/pix]} * \text{Gain [e-/ADU]}$$

Sempre in Astroart, richiedendo l'istogramma dell'immagine di BIAS mediante Visualizza>Istogramma, questi dovrebbe avere una forma a campana che ricorda la Gaussiana il cui valore centrale (il valor medio della Gaussiana) rappresenta il valore di BIAS in ADU/pix prima citato.

### 2.3 Thermal Noise

Per il fatto che il silicio del sensore si trova ad una certa temperatura, l'agitazione termica del suo livello cristallino genera al suo interno elettroni liberi il cui numero è proporzionale al valore della temperatura stessa.

L'interesse di chi usa una camera a CCD è invece ancorato al fatto che gli elettroni all'interno dei pixel vengano generati solo dai fotoni incidenti. Per questa ragione, gli elettroni generati termicamente sono da considerarsi rumore perché peggiorano l'informazione proveniente dalla trasformazione fotone-elettroni.

Una delle modalità per diminuire il Thermal Noise (TN) consiste nel raffreddare il silicio del sensore, sottraendo l'energia che è alla base di questa generazione di rumore.

Anche alla bassa temperatura a cui viene portato il sensore, resta comunque una generazione di elettroni e questo può essere misurato attraverso una ripresa di Dark Frame.

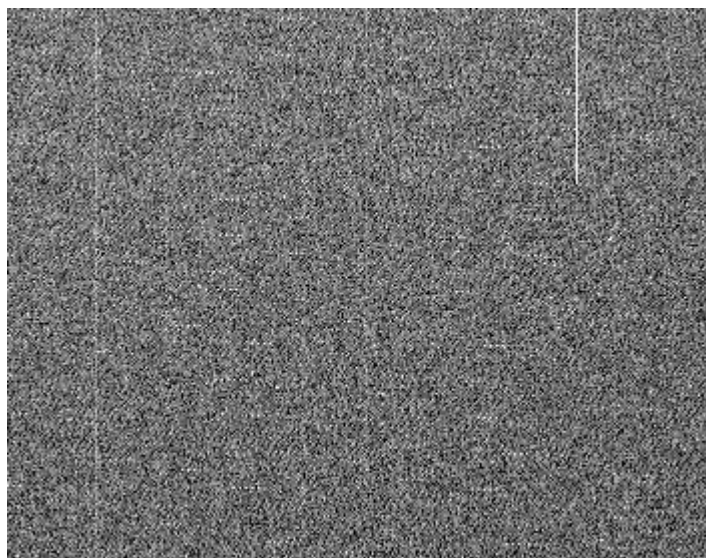


Fig. 2.1 ripresa di Dark Frame

## Le prime prove sulla mia CCD

Il Dark Frame è una ripresa con durata di K secondi effettuata con l'otturatore chiuso. A causa della mancanza dei fotoni incidenti, tutti gli elettroni registrati nei pixel sono dovuti alla somma del rumore termico (TN) ed elettronico (RN).

Per conoscere il valore del TN, ancora una volta ad esempio usando Astroart, si apre l'immagine di Dark Frame e poi attivando la funzione che dà la statistica dell'immagine, si legge il valore **Dev.standard** che rappresenta il valore del Dark Noise in ADU/pixel. Sottraendo dal Dark Noise il valore del Readout Noise, calcolato in precedenza da un'immagine di Bias, si ottiene il Thermal Noise :

$$TN [ADU/pix] = DN [ADU/pix] - RN [ADU/pix]$$

Ancora una volta è possibile ricavare una stima del rumore termico in N.elettroni/pix/sec dalla nostra camera a CCD e confrontarlo con la Dark Current dichiarata dal costruttore a 0°C. Operiamo come segue :

- riprendiamo più Dark Frame (almeno 10) alla temperatura di 0°C ciascuno con durata ad esempio di 20 sec;
- su ciascuno dei 10 Dark Frame leggiamo, per esempio con Astroart (Visualizza>Statistica), il valore della **Dev.standard** che costituisce una stima del Dark Noise e che, diviso per 20 sec, ci darà 10 valori di Dark Noise in ADU/pixel/sec;
- sottraendo da ciascun valore di Dark Noise il Readout Noise della camera in ADU/pix, avremo 10 valori del Termal Noise di cui faremo la media aritmetica ottenendo un valore stimato finale del Termal Noise in ADU/pix/sec;
- effettuiamo la trasformazione :

$$TN [e-/pix/sec] = TN [ADU/pix/sec] * Gain [e-/(ADU)]$$

ottenendo il valore confrontabile con quello dichiarato dal costruttore.

Ritornando al Dark Frame visibile in Fig. 2.1, notiamo la presenza di alcune colonne verticali di pixel particolarmente "caldi" e quindi con un QE superiore al valore medio degli altri. Questi difetti di composizione della matrice di pixel sono strutturali e si ritrovano in sensori con basso grado cosmetico, che sono anche i più economici.

Essi non possono partecipare alla composizione dell'immagine quando effettuiamo le normali riprese su oggetti astronomici, poiché generano difetti nella ripresa; è però possibile eliminare questi artefatti mediante l'operazione di sottrazione del Dark Frame.

## 2.4 Caratteristica Thermal Noise-Temperatura

E' possibile verificare come varia il Thermal Noise in funzione della temperatura, effettuando misure su riprese di Dark Frame a temperatura diversa e realizzando il grafico **TN** ⇔ **Temperatura**.

La legge che lega queste due grandezze per un sensore a CCD è esprimibile nella relazione :

$$TN = A T^{3/2} \cdot e^{-B/T}$$

dove **A** è una costante che dipende dalle unità di misura usate, **B** è una costante dipendente dalle caratteristiche fisiche del sensore e **T** è la temperatura in °K.

Per verificare se la nostra camera a CCD segue un andamento simile a quello della relazione citata, effettuiamo riprese di diversi Dark Frame con lo stesso tempo di esposizione (ad esempio 5 sec) ma a diverse temperature del sensore. Ricaviamo da queste riprese il valore in ADU/pix/sec del TN come detto nel paragrafo precedente e riportiamo i valori ottenuti in un grafico in funzione della temperatura.

In Fig. 2.2 vengono riportate le misure effettuate sulla mia Audine del TN in funzione della temperatura tra -4 e 25 °C, per esposizioni da 5 sec l'una. Come si vede l'andamento è di tipo esponenziale, simile a quello della relazione sopra citata.

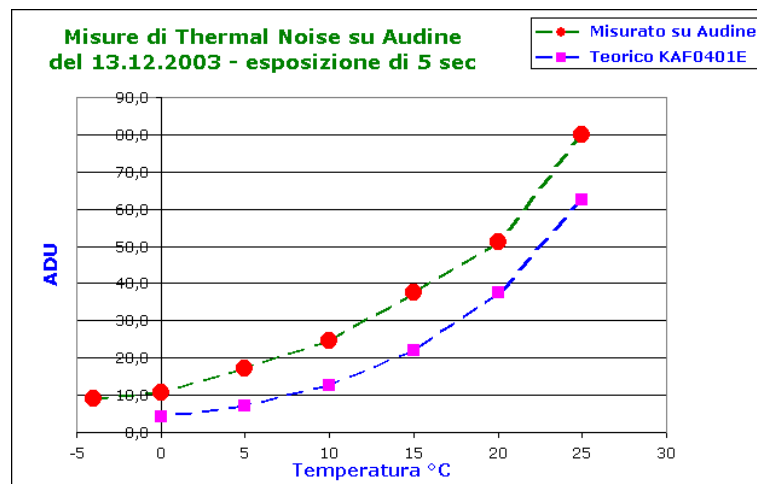


Fig. 2.2 Misure del TN sulla mia Audine

Una delle caratteristiche del TN dei sensori che normalmente equipaggiano le camere a CCD commerciali è che il TN si dimezza ogni calo di circa 7°C della temperatura del sensore.

## 2.5 Caratteristica Termal Noise-Tempo di Esposizione

Un'ulteriore misura che possiamo fare sul nostro sensore a CCD è quella relativa all'andamento del TN in funzione del tempo di esposizione, col sensore tenuto sempre alla stessa temperatura.

Effettuiamo riprese di diversi Dark Frame tutti alla stessa temperatura ma con diverse esposizioni (es.: 5, 10, 15, 30, 45, 60 sec); da queste riprese ricaviamo il valore in ADU/pix/sec del TN come detto nel paragrafo 2.3 e riportiamo i valori ottenuti in un grafico in funzione del tempo di esposizione.

I punti del grafico dovrebbero essere interpolabili da una retta

Nella Fig. 2.3 vengono riportati i valori del TN misurati sulla mia Audine alla temperatura di  $-3.6^{\circ}\text{C}$  con esposizioni da 1 a 20 secondi.

Come si vede dal grafico le misure in ADU tendono a disporsi abbastanza bene lungo una retta.

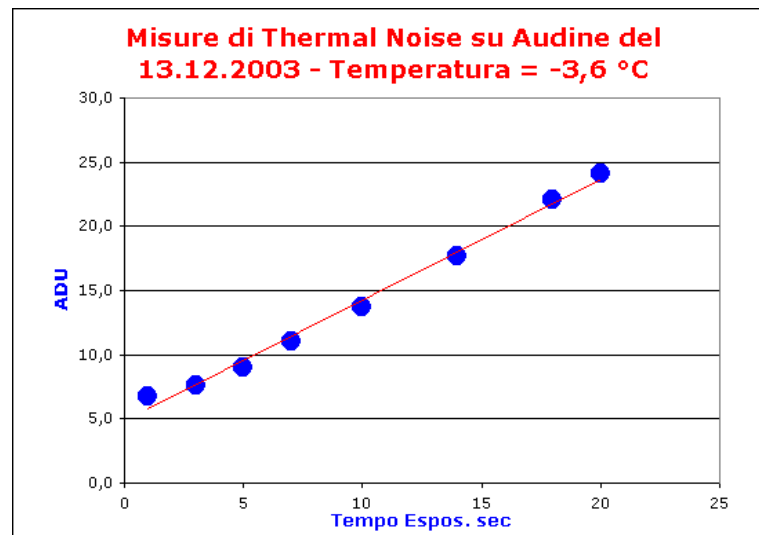


Fig. 2.3 Misure del TN sulla mia Audine

## 2.6 Caratteristica ingresso-uscita del sensore

La linearità del sensore è l'ipotesi base su cui si fonda la capacità da parte di una camera a CCD di comportarsi come strumento di misura della luminosità di un oggetto astronomico.

Per misurare la linearità della propria camera a CCD e scoprire il limite in ADU a cui questa arriva, dobbiamo misurare la sua caratteristica ingresso-uscita come segue.

Identifichiamo in un campo stellare con stelle luminose una di queste ed effettuiamo riprese con esposizione sempre raddoppiata, ad esempio da 4, 8, 16, 32, 64 sec., partendo dall'esposizione che fornisce già una

## Le prime prove sulla mia CCD

buona immagine della stella in esame e terminando quando essa va in blooming.

Calibriamo le immagini sottraendo il Dark Frame ed applicando il Flat Field e poi effettuiamo la fotometria della stella in esame su ciascuna immagine.

Avendo duplicato il tempo di esposizione ad ogni ripresa, abbiamo mediamente duplicato il numero di fotoni incidenti e quindi, se grafichiamo la somma degli ADU relativi ai fotoni della stella presenti nell'apertura fotometrica (uscita), in funzione del tempo di esposizione (ingresso) dovremmo avere una serie di punti allineati lungo una retta. Valutare la pendenza della retta in questione costituisce un altro metodo per stimare l'inverso del valore del GAIN della camera.

Al di là di un certo valore dell'esposizione, i punti si allontaneranno dalla retta formando un ginocchio e poi un tratto saturato e questo ci indicherà il termine della zona di linearità ingresso-uscita del sensore.

Nella fig. 2.4 viene riportata una tipica caratteristica ingresso-uscita di un sensore a CCD da cui si nota la parte lineare per un certo tratto del valore degli ingressi ed il successivo ginocchio (da Howell 2000).

Dall'analisi "ad occhio" della retta, si vede come la pendenza di quest'ultima sia di circa  $1/5$  ADU/e<sup>-</sup>; quindi il Gain, che è il suo inverso, sarà di  $5$  e<sup>-</sup>/ADU.

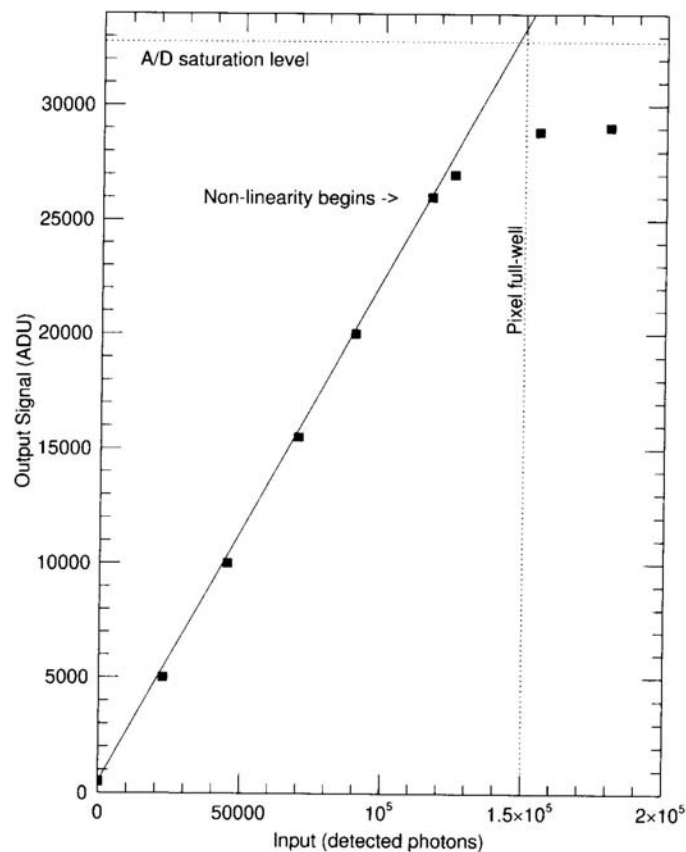


Fig. 2.4 Caratteristica linearità del sensore

**Bibliografia**

C.Buil – 1991 – “CCD Astronomy”, Willman-Bell

S.B.Howell – 2000 – “Handbook of CCD Astronomy”, Cambridge University Press

R. Wodaski – 2200 – “The new CCD Astronomy”, New Astronomy Press