

## **CENNI SULLE CAMERE CCD AD USO ASTRONOMICO (confronto con ST-4)**

Un CCD (Charge Copuled Device, “dispositivo a scorrimento di carica”) è un componente elettronico (“Chip”) sensibile alla luce. Quando la luce (che è composta di singoli fotoni) colpisce la superficie del CCD, vengono liberati degli elettroni che si accumulano nei singoli elementi del CCD (i pixel, vedi fig. 1), un tale dispositivo viene anche detto trasduttore optoelettronico. Un CCD consiste normalmente di migliaia di pixels, una matrice con un certo numero di righe e di colonne. Più è brillante il soggetto verso cui il CCD è puntato, più fotoni lo colpiscono, e quindi più

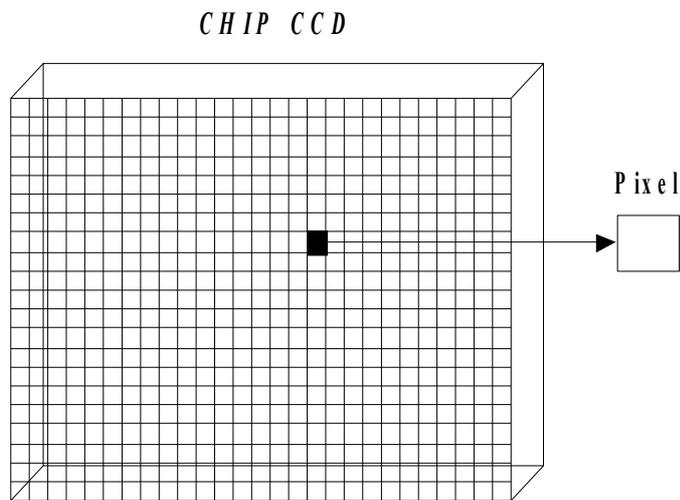


Fig. 1

elettroni si accumulano in ciascun pixel.

I CCD sono fatti di materiali semiconduttori, come il silicio, trattati in modo da essere sensibili alla luce che li colpisce.

In Fig. 2 viene schematizzato un pixel in sezione :

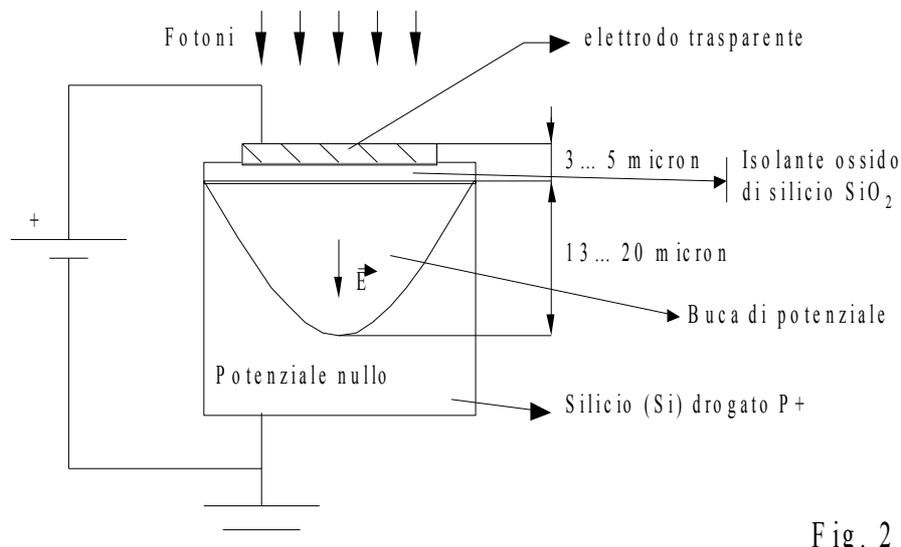


Fig. 2

L'elettrodo trasparente (ai fotoni) è fatto di polisilicati che poggia su un isolante anch'esso trasparente, la struttura sottostante è fatta di silicio drogato con atomi trivalenti (gallio-indio) che mettono a disposizione una lacuna e tre elettroni sulla banda di valenza.

Il campo elettrico  $E$  delimita la buca di potenziale e, cosa più importante, il pixel stesso; la profondità della buca dipende dalla polarizzazione.

L'energia del fotone incidente è direttamente proporzionale alla frequenza (o inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda) ed è esattamente uguale alla costante di Plank per la frequenza (Energia del fotone =  $h\nu$ ).

Gli elettroni nel semiconduttore possono trovarsi in due diversi stati : nella banda di valenza o nella banda di conduzione. Il fotone per essere rilevato deve far passare l'elettrone dalla prima alla seconda banda rispettivamente. La differenza di energia di questi due stati, detta energia di gap  $E_G$  caratterizza il limite superiore di visibilità del CCD. Infatti nel caso del silicio  $E_G = 1.1$  eV (elettronvolt), utilizzando la relazione sopra per l'energia del fotone si ha ( $1.1 = h\nu$ ) e ricordando che la lunghezza d'onda è legata alla frequenza dalla relazione  $\lambda = c/\nu$  ( $c$  = velocità della luce) si può ricavare la lunghezza d'onda al di sopra della quale il fotone non possiede più l'energia necessaria di gap. A conti fatti per il silicio si ha  $\lambda_{MAX} = 11000\text{\AA}$ .

Quando il fotone ha energia sufficiente, si forma una coppia elettrone-lacuna, in tal caso l'elettrone si trova nella banda di conduzione, libero da legami viene sospinto dal campo elettrico verso la placchetta di isolante dove viene trattenuto. Durante l'acquisizione di un'immagine tale processo si ripete migliaia di volte, alla fine della ripresa ogni pixel presenta un certo accumulo di elettroni.

Il numero di elettroni massimo accumulabile in ogni pixel dipende dalle dimensioni del pixel stesso e dall'elettronica (presenza o meno di antiblooming). E' immediato capire ora come l'agitazione termica dia fastidio, perché può generare coppie elettroni-lacune indesiderate (non prodotte da fotoni), quindi è necessario raffreddare il CCD (vedi dopo).

Faccio notare che se un fotone cade della regione di semiconduttore dove il potenziale è nullo (fuori dalla buca di potenziale), anche se fa passare l'elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione, non c'è nessuna forza che possa sospingerlo fino alla placchetta isolante, in quanto il campo elettrico fuori dalla buca di potenziale è nullo, pertanto il fotone "muore" lì.

Quando si accende il CCD e si polarizza il semiconduttore, ci sono degli elettroni residui sotto la placchetta di isolante; per eliminare tale presenza indesiderata si esegue la cosiddetta immagine di "bias" , cioè si fa una foto a tempo di posa nullo e la si sottrae successivamente.

I principali fattori che contribuiscono alla "bontà" di una camera CCD sono numerosi;

1- **dimensioni del chip** (più grande è la superficie sensibile, più grande è il campo inquadrabile. Nel caso dell'ST-4 il chip è quadrato di lato 2.64mm , ed ha 192 righe e 165 colonne)

2- **dimensioni del pixel** (più piccoli sono i pixels, migliore sarà la risoluzione dell'immagine. I pixels dell' ST-4 non sono quadrati e misurano 13.75 micron x 16 micron)

3- **la capacità di carica** (ossia il numero di elettroni che possono accumularsi in un singolo pixel prima che questo si saturi)

4- **il fill factor** ("fattore di riempimento", ossia la percentuale della superficie del CCD effettivamente sensibile alla luce)

5- **l'efficienza quantica** (cioè quanti fotoni che colpiscono il CCD danno effettivamente un elettrone)

6- **Il sistema di raffreddamento**

7- **La conversione analogico / digitale**

8- **Il rumore di lettura RON (Readout Noise)**

L'EFFICIENZA QUANTICA (EQ)

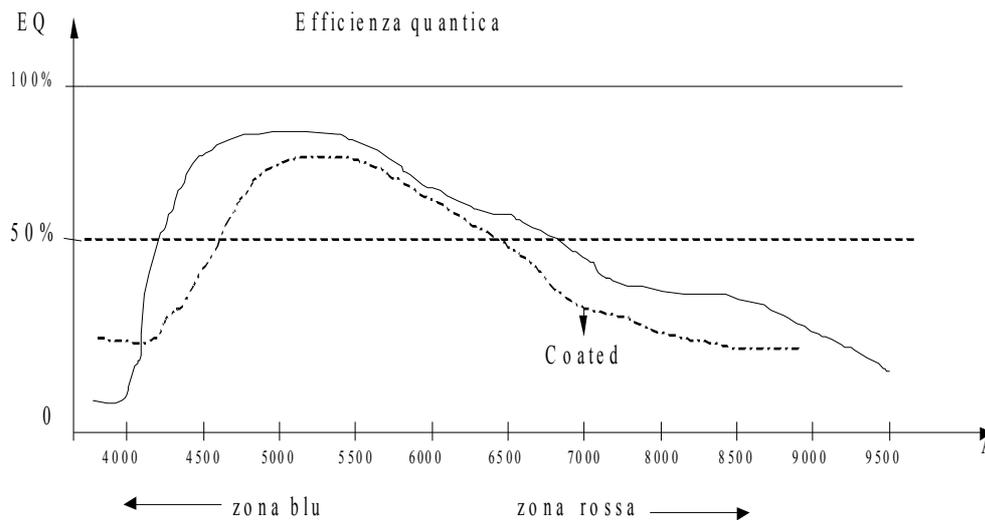
Si definisce efficienza quantica (EQ) di un pixel ad un ben precisa lunghezza d'onda, il rapporto tra il numero di elettroni liberati e il numero di fotoni che lo hanno colpito. Ad esempio se dieci fotoni (a 5500A) liberano cinque elettroni, l'efficienza quantica (a 5500A) vale  $\frac{1}{2}$ , cioè è del 50% . Al caso ideale corrisponde una EQ pari a 1 (100%), ad ogni fotone corrisponde un elettrone; mentre nel caso peggiore l'EQ vale zero. Non tutti i pixel hanno la stessa EQ , perciò si ricorre alla correzione di flat field (vedi dopo).

Com'è noto i fotoni hanno una loro lunghezza d'onda, alla luce gialla corrisponde una lunghezza d'onda di circa 5500 A (A=Amstrong, 1A = 0.0000000001 metri), quella rossa invece 6500A, lo stesso vale per i restanti infiniti colori, ad ognuno corrisponde una lunghezza d'onda.

L'occhio umano percepisce luce con lunghezza d'onda che va da 4500A a 7000A (circa), al di fuori di tale intervallo l'uomo è cieco; mentre non lo sono le apparecchiature che egli utilizza, come le antenne, telescopi X, CCD, ecc.

Per motivi di costruzione l'efficienza quantica dipende dalla lunghezza d'onda, cioè ad ogni lunghezza d'onda (colore) corrisponde un rapporto sopra definito.

La figura seguente rappresenta delle EQ tipiche :

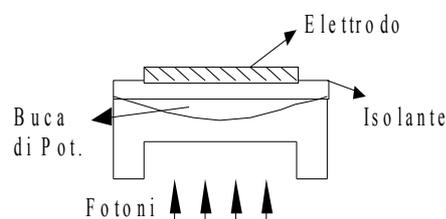


Spesso l'EQ si mantiene elevata anche oltre i 10000A.

Il calo brusco di EQ verso la zona blu (a 3500A...4000A) è dato in primo luogo dai polisilicati (vetro) sul pixel e in secondo luogo dal taglio atmosferico (strato di ozono a circa 30Km di quota). Mentre nel rosso l'EQ cala più lentamente perché segue la distribuzione di probabilità di far saltare l'elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione.

I miglioramenti adottati per estendere la risposta spettrale del CCD sono i seguenti :

- 1) Verso il rosso : Si usa come materiale semiconduttore il germanio che ha una energia di gap più bassa (circa 0.72 eV) e da quanto visto prima si può ricavare la lunghezza d'onda massima (maggiore della precedente).
- 2) Verso l'UV ci sono due soluzioni :
  - Coated : Si vernicia l'elettrodo di una sostanza fosforescente, il fotone ultravioletto viene assorbito dalla vernice e riemesso nel visibile. La risposta va sotto i 4000A e cresce l'EQ.
  - Thinned (back illuminated = retro illuminato) : Si fanno arrivare i fotoni da dietro, dove non c'è l'elettrodo fatto di polisilicati (responsabile del taglio nell' UV), bisogna però diminuire lo spessore che il fotone deve superare



per arrivare alla buca di potenziale. Le EQ di questi CCD sono eccezionali (ovviamente i costi crescono).

L'elettronica in realtà è molto complicata, comunque a grandi linee segue quanto detto.

L'efficienza quantica del CCD ST-4 è mostrata in fig. 2, solo attorno ai 5500A essa supera il 50% (cioè un fotone su due viene "catturato"), mentre altrove è minore fino a diventare cieco oltre i 9500A e sotto i 4200A. I CCD professionali superano il 90% in certe zone spettrali. Voglio far notare che le emulsioni fotografiche di norma hanno una EQ del 5%, cioè 5 fotoni su cento agiscono sui grani di alogenuro.

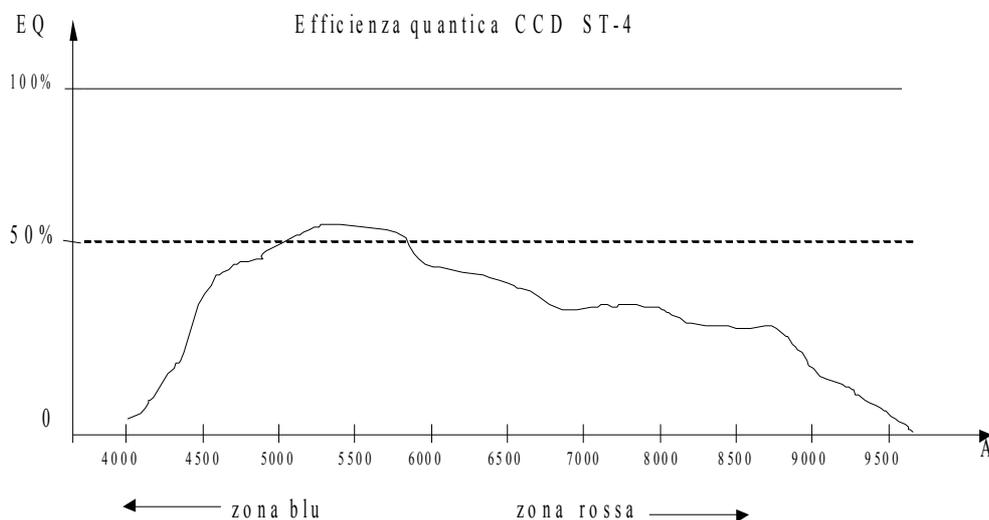


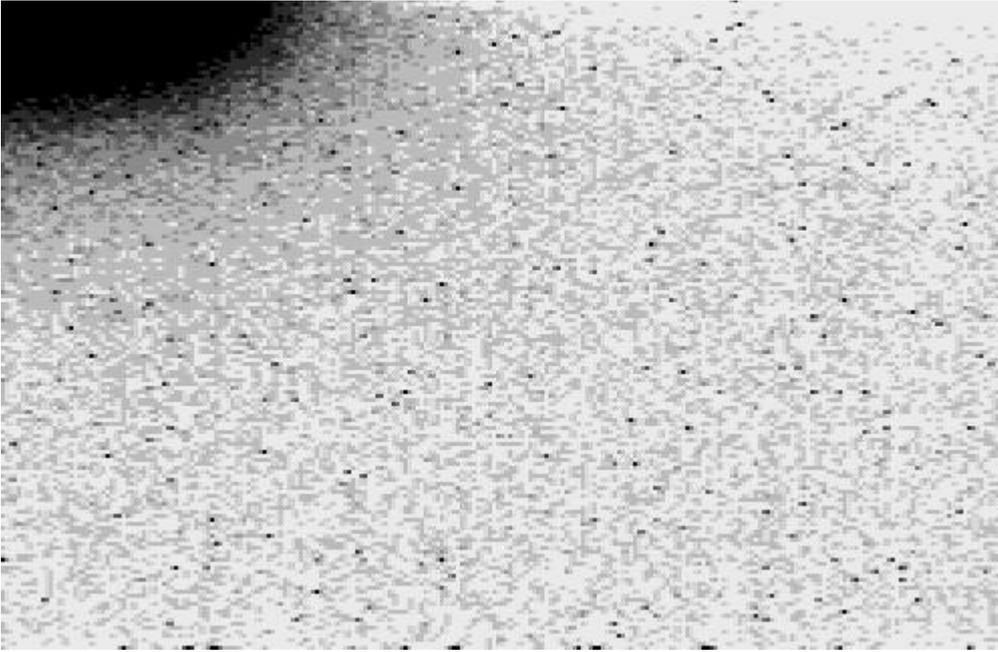
Fig. 2

Si noti inoltre che la EQ dell'ST-4 è maggiore nella zona rossa, caratteristica comune alla maggioranza dei CCD. Le emulsioni fotografiche, invece sono più sensibili alla zona blu.

### LA CORRENTE DI BUIO

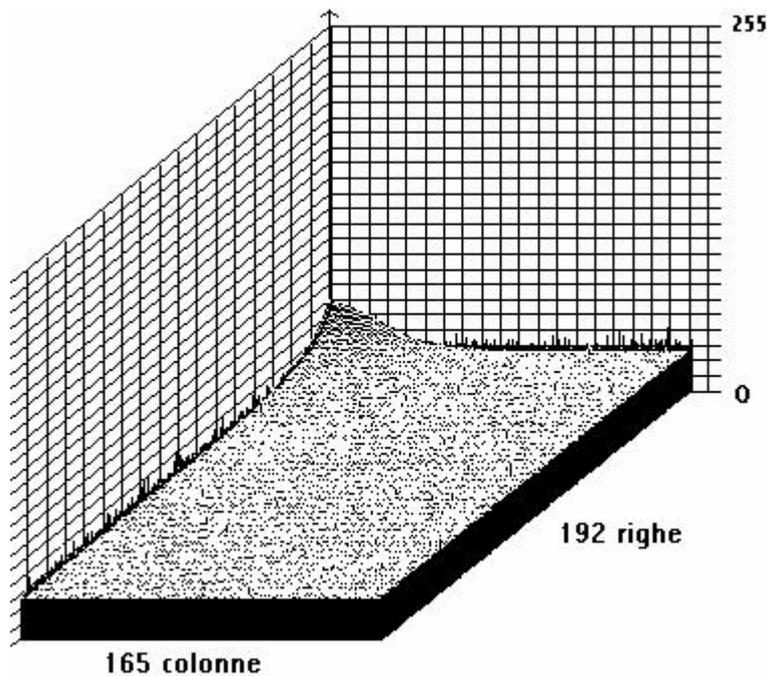
In ogni pixel vengono accumulati anche elettroni "indesiderati", che non sono il risultato di luce che abbia colpito il CCD. Alcuni di questi elettroni derivano dal rumore termico, un effetto casuale dovuto alla interazione del calore con il materiale semiconduttore di cui è fatto il sensore. La carica elettrica di questi elettroni non voluti - che si generano nel pixel anche se questo è nella più totale oscurità - è chiamata corrente di buio. L'effetto della corrente di buio, oltre ad inquinare l'immagine, è di limitare la durata pratica massima di una posa CCD: dopo molto tempo, infatti, la corrente di buio saturerebbe del tutto il pixel, e non vi si potrebbero più accumulare elettroni generati dalla luce incidente. Perciò, più bassa è la corrente di buio, più 'pulite' sono le immagini e più lunghe sono le pose eseguibili con un determinato CCD.

Anche se la corrente di buio è un rumore casuale, è altamente prevedibile. Infatti prendendo una immagine CCD (frame) dello stesso tempo di posa dell'immagine con il soggetto, ma con il telescopio tappato, così che non vi sia segnale generato dalla luce, è possibile misurare la corrente di buio e sottrarla all'immagine con il soggetto.



L'immagine qui sopra è un "dark" di 100 secondi, ovvero una foto con il telescopio tappato di 100 secondi. L'immagine non ha subito alcuna elaborazione. La distribuzione del rumore sul sensore è evidenziata dalla stessa immagine vista in tre dimensioni (sotto). Essa è pressoché uniforme (i valori oscillano tra 28 e 29 con una media di 28.5), però assume un andamento particolarmente crescente quando ci si avvicina all'angolo in alto a sinistra (dove si arriva a 60) incremento dovuto all'elettronica e al cattivo sistema di raffreddamento; con un dark da 8-10 minuti nella zona dell'angolo si raggiunge la saturazione (255).

Bisogna notare che la qualità del dark dipende da quanto tempo è acceso il CCD, in quanto esso si riscalda progressivamente; un dark da 100 secondi fatto a CCD appena acceso è sensibilmente diverso (migliore) da un dark eseguito dopo un'ora dall'accensione, la diversità dipende fortemente dal sistema di raffreddamento. Per questo motivo il dark va fatto subito dopo l'aver preso l'immagine, in modo da riprodurre in maniera più fedele possibile il rumore termico appena prima registrato. Si notano, inoltre, distribuiti in tutto il sensore (a debita distanza dall'angolo), dei pixel isolati (vedi puntini neri) con valori più elevati della media, che oscillano fra 33 e 38, tali pixel sono detti *hot pixel* (pixel caldi) e non sempre si riescono a togliere con una semplice sottrazione, per tale motivo nei software che accompagnano i moderni CCD è prevista una opzione per ripulire l'immagine da essi. E' possibile che avvenga anche il contrario, ovvero la presenza di *cold pixel* (pixel freddi), prevista ed eliminabile anch'essa.



Dark di 100 secondi CCD ST-4 - visione 3D

Questo procedimento permette quasi di annullare l'effetto della corrente di buio su di un frame, ma non aggira il problema che con pose molto lunghe il CCD finirebbe con il saturarsi comunque di corrente di buio.

Tipicamente a 20°C si generano ventimila miliardi di elettroni al secondo indesiderati. L'unica soluzione a questo ostacolo è di utilizzare chip a basso rumore termico (tecnologia MPP) e raffreddati il più possibile. Infatti nelle tabelle di specifiche dei CCD la **corrente di buio** è sempre indicata ad una certa temperatura. Ci sono vari modi di raffreddare il sensore, uno dei più comuni è il raffreddamento termoelettrico, il quale sfrutta *elementi Peltier*. Sono giunzioni di metalli differenti, con interposto del materiale semiconduttore. Facendo fluire corrente tra i due metalli, la giunzione si raffredda (effetto Peltier), raffreddando il chip che è appunto appoggiato sulla giunzione. L'efficienza di questo processo è aumentata dalle alette di raffreddamento, che fanno da "corpo" a quasi tutti i CCD.

Certi CCD hanno sistemi di raffreddamento più sofisticati, nei quali il raffreddamento è a due stadi, con due o più elementi Peltier in cascata, il che riduce ulteriormente la temperatura (circa -70°C, un elettrone al secondo) e quindi la corrente di buio.

A livello professionale il CCD è in contatto con un vaso Dewar, in quale contiene azoto liquido, che porta il sensore a -120 °C circa, il che equivale ad un elettrone all'ora per pixel.

## CONVERSIONE ANALOGICO DIGITALE

La ripresa di un'immagine mediante un CCD converte un segnale continuo in una serie di valori discreti. Supponiamo, per esempio, che l'immagine di una galassia sia divisa in un grande numero di quadratini (pixels), ciascuno dei quali copra una parte

molto piccola dell'immagine, e che i diversi livelli di luminosità dell'immagine siano rappresentati in ciascun quadratino da un numero, poniamo da 1 a 8, dove "1" rappresenta il nero (fondo del cielo) e "8" il bianco (per esempio il nucleo della galassia); i valori intermedi rappresentano i vari toni di grigio. Con questa rappresentazione "digitale", cioè a variazioni discrete e non continue, la galassia può essere rappresentata con una figura "discreta", fatta dai vari quadratini (pixels) a ciascuno dei quali è associata una certa brillantezza (discreta). Questa immagine somiglia quanto più possibile all'immagine "vera" (continua) della galassia.

Se i pixels utilizzati per "disegnare" l'immagine sono sufficientemente numerosi e abbastanza piccoli, e se il numero di possibili toni di grigio tra il nero e il bianco è grande, l'immagine CCD tende, a tutti gli scopi pratici, ad una immagine continua e "morbida" come una fotografia. Per esempio, il sensore CCD dell'ST-4 (ormai di vecchia generazione), possiede 31680 pixels (192x165) ognuno dei quali riesce a discernere 256 livelli di grigio. Ciò deriva dal fatto che il convertitore analogico digitale è da **8 bit**.

Un bit (binary digit) è il più piccolo elemento digitale, esso può valere 0 o 1.

Se si considerano più bit messi assieme si ottiene una stringa di bit. Per esempio una stringa di tre bit può essere 1 0 1. Ma quante stringhe *diverse* si possono ottenere con tre bit ?

Scriviamole :

000	0
001	1
010	2
011	3
100	4
101	5
110	6
111	7

Si ottengono otto stringhe differenti; è possibile ora associare in modo univoco un numero decimale ad ognuna di esse, partendo da 0 fino a 7 e associare al valore 0 il nero e al 7 il bianco.

Quindi un CCD a tre bit, distinguerebbe 8 livelli di grigio (cioè ogni pixel avrebbe a disposizione tre bit per contare i livelli di grigio), dispositivo abbastanza scarso.

La formula per ottenere i livelli di grigio partendo dal numero di bit ( n ) è la seguente : Livelli di grigio =  $2^n$ . Nell'esempio sopra  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$ .

Nel caso dell'ST-4, il numero di bit è otto (una stringa di otto bit si chiama byte, una di sedici bit due byte e così via), quindi  $2^8 = 256$  livelli di grigio. Risulta evidente che maggiore è il numero di bit, meglio è, in quanto aumenta la sensibilità alle variazioni di luminosità, in altre parole una eventuale fotometria diviene più accurata.

Un modo per elaborare, in questo senso, un CCD, è quello di aumentare il numero di bit, cioè utilizzare un convertitore analogico/digitale migliore. Ad esempio, già dopo un anno dall'uscita dell'ST-4 (sei anni fa), uscì l'ST-4X leggermente più potente;

esso non era altro che un ST-4 con un convertitore da 14 bit e quindi  $2^{14} = 16384$  livelli di grigio.

Quando una immagine è digitalizzata, un'immensa quantità di elaborazioni (chiamate collettivamente *image processing*, ossia "elaborazione dell'immagine") diviene possibile. Questa elaborazione è possibile anche partendo dalle classiche pellicole chimiche, ma ciò che è possibile fare con un'immagine CCD va al di là di ogni immaginazione anche del più bravo fotografo "tradizionale". Perfino immagini scarsamente contrastate, di oggetti celesti appena discernibili possono, con le opportune elaborazioni, trasformarsi in favolose riprese ricche di dettagli. In termini un po' più corretti, l'elaborazione dell'immagine permette di estrarre anche un modesto segnale da un forte rumore di fondo.

Dato che il CCD è enormemente sensibile alla luce, i tempi di posa sono grandemente ridotti; una posa CCD di due minuti, a parità di strumento, è sempre molto migliore di una ottima foto da 30 minuti di posa. Inoltre le pellicole fotografiche soffrono del cosiddetto "difetto di reciprocità", ossia la loro sensibilità decade rapidamente con l'aumentare della posa. Ciò non vale per il CCD, la cui risposta è lineare : raddoppiando la posa, si registrano stelle due volte più deboli. Comunque, la fotografia con pellicola chimica è ancora avvantaggiata nelle riprese a largo campo, e dove non sia possibile portare energia o il computer.

Il sensore CCD dell'ST-4 misura 2.64mm x 2.64mm , molto piccolo rispetto le dimensioni 24mm x 36mm della pellicola. Moderni CCD arrivano a dimensioni di 10mm x 10mm , bisogna però fare attenzione alla dimensione dei pixel, cioè al numero di righe e colonne.

Ci sono dei programmi che permettono di incollare più immagini, come una sorta di mosaico.

Comunque nel prossimo futuro, anche i CCD non professionali copriranno degnamente tali dimensioni.

E' in costruzione, a livello professionale, un CCD 16000x16000 pixels, un'immagine di tale strumento occupa 0.5 Gbyte !!

## CORREZIONE DEL FLAT FIELD

Per motivi intimamente legati al metodo di fabbricazione del chip, non tutti i pixel del CCD hanno la stessa sensibilità; vi sono minime variazioni da un pixel all'altro. Inoltre, per quanto minimo, qualunque sistema ottico produce un piccolo effetto di vignettatura e attenuazione differenziata della luce (vedi filtri, grani di polvere ...). In totale, da un punto all'altro del chip ci possono essere differenze dal 5% al 10%, quantità che potrebbe risultare fastidiosa quando si effettuano riprese molto accurate. Per minimizzare questo effetto, quasi tutti i CCD, prevedono un'opportuna procedura, che permette di "normalizzare" (dividere) l'immagine ripresa con un'immagine standard, detta appunto *flat field* (campo uniforme). L'immagine di flat field consiste nel fotografare una sorgente luminosa (che copra l'intera apertura del telescopio) più *uniforme* possibile. Tale immagine dipende dalla lunghezza d'onda,

quindi occorrono tanti flat field quanti sono i filtri utilizzati. L'operazione comunque non è banale e verrà sicuramente chiarita nel momento in cui verrà eseguita.

## IL BLOOMING

Le immagini CCD di oggetti molto brillanti, come una stella di prima magnitudine, mostrano talvolta l'effetto del blooming. Questo effetto si traduce in una "striscia" luminosa che parte dai pixels più brillanti, simile ai "baffi" di luce che si vedono in fotografie astronomiche riprese con telescopi Newton. E' dovuto al "travaso" di elettroni in eccesso dai pixels saturati verso quelli adiacenti (l'isolante del pixel non è più in grado di trattenere gli elettroni). Molti CCD in commercio comprendono circuiteria antiblooming, che riduce di molto questo effetto, a discapito però (in certi casi) dell'EQ.

## ALTRE FONTI DI RUMORE

In realtà esistono diverse fonti di rumore (elettroni) indesiderati; la conversione analogico digitale stessa, discussa prima, oppure il "rumore di lettura", causato semplicemente dalla lettura dei dati dai pixels e trasferirli al computer.

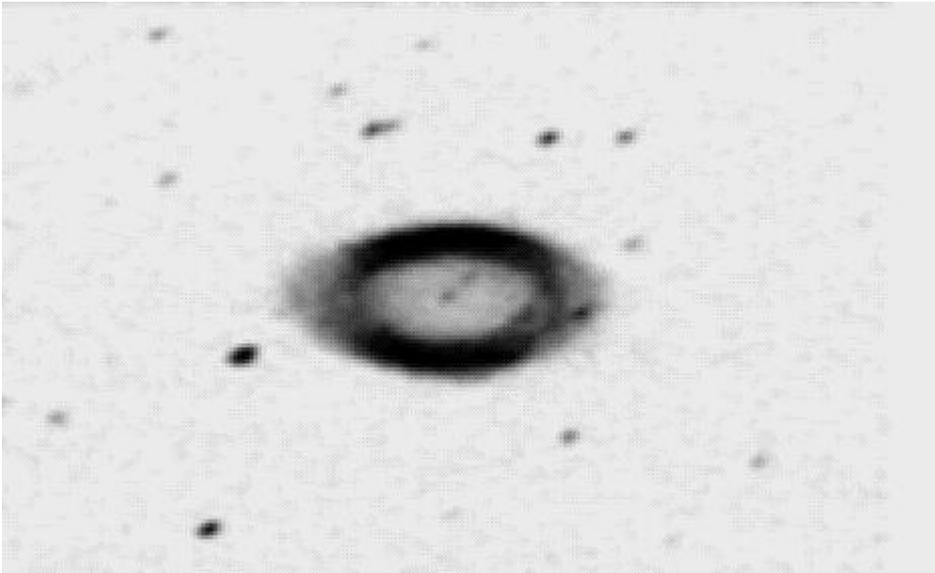
### Rumore di lettura : RON

Una volta acquisita l'immagine bisogna contare il numero di elettroni sotto ogni placchetta isolante di ogni pixel; la tecnica utilizzata è quella di traslare (per ogni riga) in modo ripetuto ogni blocco di elettroni accumulati nel pixel adiacente, mentre l'ultimo blocco va nel registro di lettura, fino a fine riga. Questa operazione di 'shift', che è indipendente dalla posa, introduce del rumore elettronico. Il rumore di lettura (readout noise) è quindi indipendente dal tempo di posa, e disturba la ripresa di immagini di soggetti molto deboli. Tale rumore viene dato direttamente in elettroni. Ci sono altre tecniche di lettura più rapide, comunque non esenti anch'esse da rumore.

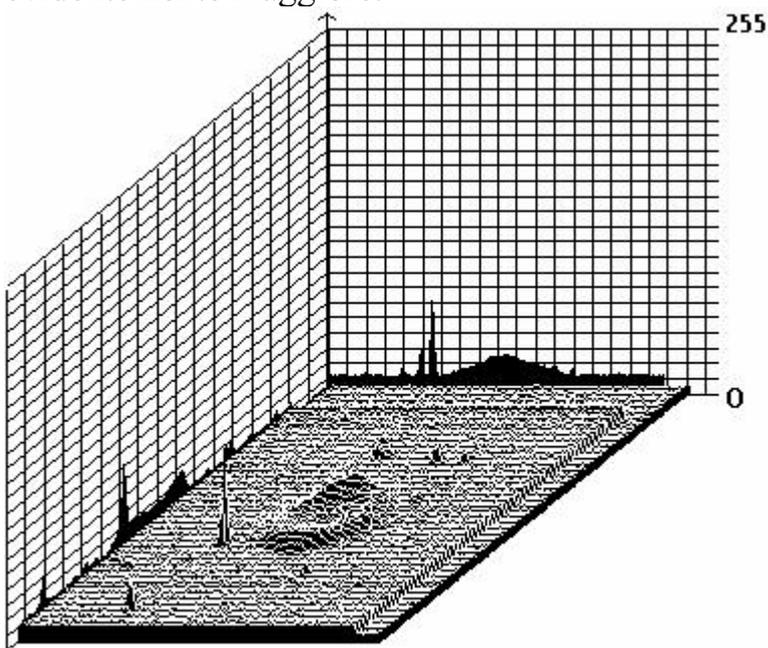
### Il rapporto segnale/rumore (S/N)

Mentre il rumore di lettura è indipendente dal tempo di posa, molte altre sorgenti di disturbo crescono con la radice quadrata del tempo di posa (ovvero raddoppiano se il tempo di posa quadruplica). Invece gli elettroni frutto della radiazione incidente, ovvero quelli "desiderabili", che concorrono alla creazione dell'immagine, crescono direttamente col tempo di posa (cioè raddoppiano al raddoppiare della posa). Tutto ciò equivale a dire che il rapporto segnale/rumore cresce con il tempo di posa. Perciò, pose più lunghe non solo registrano soggetti più deboli, ma anche li registrano sempre meglio, sempre più "staccati" dal fondo del rumore. Ecco perché è così importante il sistema di raffreddamento dei CCD, che consente "lunghe" pose (si tratta sempre di qualche minuto, comunque); esse conducono a risultati intrinsecamente migliori.

Un esempio di quanto detto si vede nelle seguenti foto; la prima (tolto il dark), bidimensionale, evidenzia abbastanza bene la forma ad anello della nebulosa e la nana bianca nel centro. L'oggetto risulta essere ben "staccato" dal rumore di fondo cielo, questo però grazie al carattere digitale dell'immagine ben predisposto all'elaborazione; se si osserva la stessa immagine in tre dimensioni si nota come la nebulosa si erga molto poco dal diffuso rumore di fondo. Infatti dove non ci sono

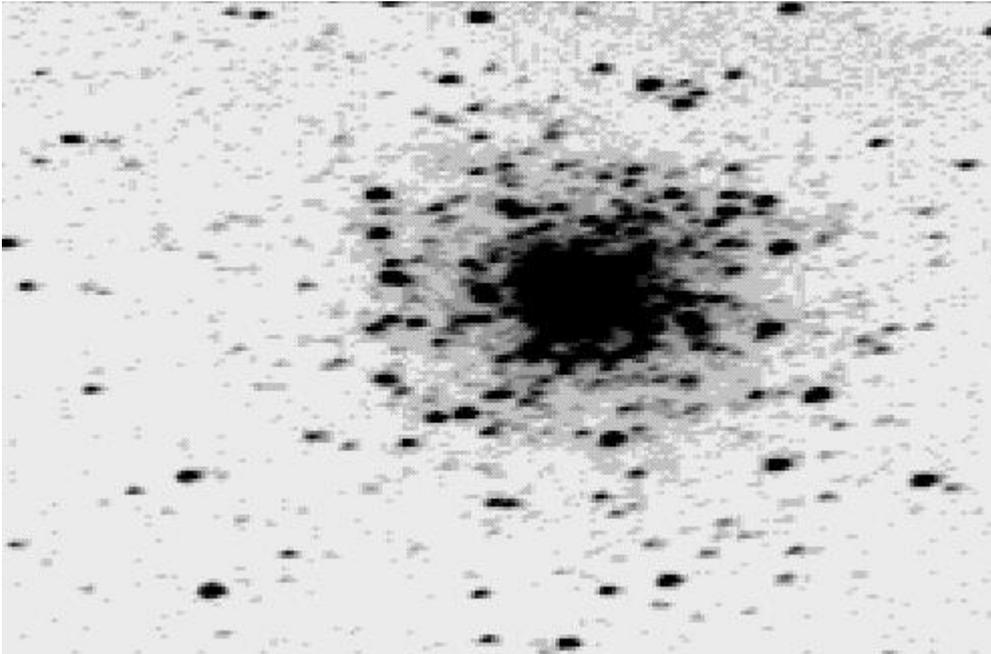


oggetti il valore del fondo cielo oscilla tra 10 e 12, qualche picco di stelle arriva a 60 e il valore più alto che interessa la nebulosa è 27. Ciò significa che il rapporto S/N in tale punto (che è il migliore) vale  $27/11$  cioè 2.45, molto basso se si pensa che per un valore unitario sarebbe impossibile distinguere tra rumore e segnale. Nel caso della stella sotto a sinistra (che raggiunge un picco di 60) tale rapporto è 5.45, il contrasto è evidentemente maggiore.

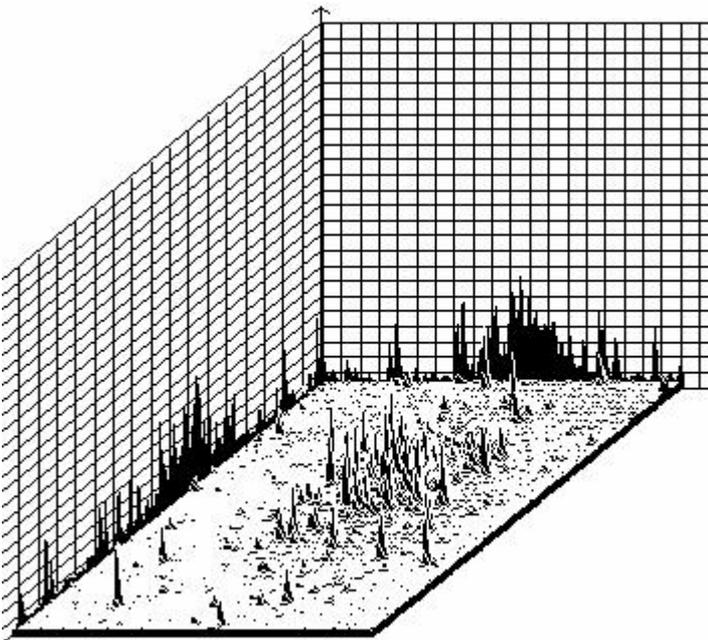


**Visione 3D di M57**

Un altro esempio è l'ammasso globulare M92



La rappresentazione 3D di questa immagine è:



**Visione 3D dell'immagine (corretta) precedente di M92**

*Vanzella Eros*  
A.A.V.V.