

Le stelle vanno a scuola

CCD

M. Ciani, L. Donato, C. Zamberlan

1 Introduzione storica

Nel 1969 presso i laboratori Bell di Murray Hill, New Jersey, già luogo di nascita del transistor, due ricercatori, Bill Boyle e George Smith, mentre erano impegnati nella ricerca di nuovi metodi di acquisizione delle immagini tramite cristalli di silicio, idearono il CCD (Charge-coupled device, ossia dispositivo ad accoppiamento di carica).

Era già noto da tempo il modo di memorizzare le cariche tramite un sottile strato metallico depositato sulla superficie di un cristallo di silicio, ma l'idea innovativa fu quella di raggruppare i domini di accumulo delle cariche e di usare opportune differenze di potenziale elettrico per trasportare le cariche da un dominio all'altro.

Nel giro di poche settimane venne preparato il primo CCD a 6 elementi (pixel) per i test preliminari e l'anno successivo sul Bell System Technical Journal venne pubblicata una relazione dal titolo: "A new semiconductor device concept has been devised which shows promise of having wide application."

La promessa venne mantenuta perché questo nuovo tipo di rivelatore rivoluzionò sia il mercato che il mondo scientifico e in particolare l'astronomia osservativa negli ultimi anni ha conosciuto uno sviluppo notevole proprio grazie all'uso diffuso dei CCD al posto delle vecchie lastre fotografiche.



Figura 1: Chip di un CCD

2 Funzionamento del CCD

Il CCD è un dispositivo caratterizzato da una matrice di microscopiche regioni di forma quadra o rettangolare, disposte a scacchiera sulla superficie di un cristallo di silicio, opportunamente trattato e integrato in un dispositivo (oggi abbastanza complesso) comunemente denominato microchip. Tali regioni, molto sensibili alla luce, denominate pixel (picture elements), sono ricavate direttamente nel silicio, e sono disposte come mattonelle di un pavimento.

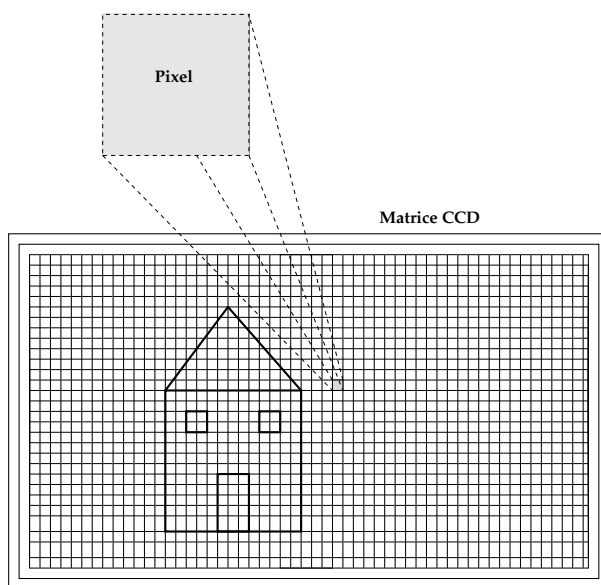


Figura 2: Schema di un sensore CCD

In una macchina fotografica tradizionale, la superficie del film esposta alla luce giace su un piano posto di fronte all'otturatore. Se sostituiamo il film con un sensore CCD la superficie del sensore è paragonabile a quella di un'emulsione fotografica: alla matrice dei pixel corrisponde la grana dell'emulsione.

Vista attraverso il microscopio, la superficie di un'emulsione fotografica è composta da grani di nitrato di argento le cui dimensioni sono generalmente più grandi di quelle del pixel di un CCD. Osservando più attentamente la grana del film, ci si accorge che questa presenta elementi di dimensioni variabili, distribuiti in modo irregolare. I pixel del CCD sono invece tutti identici e sono disposti con assoluta regolarità lungo le colonne e le righe di una matrice quadrata o rettangolare.

I quanti di luce, cioè i fotoni provenienti dall'oggetto inquadrato vanno a incidere sulla superficie del sensore e ciascun pixel ne raccoglie una quantità

proporzionale alla durata dell'esposizione e all'intensità del flusso luminoso in arrivo. Parte dell'energia dei fotoni viene usata all'interno del sensore per liberare elettroni, cioè cariche elettriche, che vengono conservate nei pixel durante l'esposizione per poi essere lette ed elaborate da un calcolatore. Durante l'esposizione sulla superficie del sensore si forma dunque una precisa mappa elettronica dell'immagine dell'oggetto astronomico inquadrato dal telescopio.

Il processo di integrazione è generalmente lineare ed esente dal cosiddetto difetto di reciprocità presente nelle emulsioni fotografiche. Infatti durante una ripresa fotografica, la sensibilità dell'emulsione non rimane costante durante l'esposizione, ma cala rapidamente nel tempo rendendo necessario un aumento dei tempi di posa. Al contrario, la sensibilità di una camera CCD rimane costante durante l'esposizione permettendo di ottenere immagini di qualità superiore in un tempo decisamente minore.

Di solito la bontà di un sensore viene espressa in termini di efficienza quantica, cioè della percentuale di fotoni catturati, rispetto al totale di quelli incidenti; di norma, negli attuali CCD, questa efficienza è superiore all'80%, contro il 2-3% delle vecchie emulsioni fotografiche.

Al termine dell'esposizione l'immagine astronomica rimasta impressa nel sensore viene trasmessa sotto forma di segnale elettrico ad un circuito integrato che ne effettua il campionamento, ovvero la digitalizzazione, un processo che trasforma il segnale d'immagine in una ordinata sequenza numerica in base binaria. L'immagine così ottenuta viene poi trasferita in un computer e visualizzata sul monitor.

Successive elaborazioni manuali o automatiche trasformano l'immagine originale, fornendo una quantità ed una qualità di informazioni decisamente superiori a quelle ottenibili con la fotografia tradizionale.

3 Prestazioni del CCD

Descriviamo ora brevemente alcuni elementi che di solito vengono utilizzati per descrivere le prestazioni di un CCD.

3.1 Efficienza quantica e densità spettrale

Non tutti i fotoni incidenti sulla superficie di un pixel del CCD producono elettroni. Il rapporto tra i fotoni rivelati e i fotoni incidenti è dunque un numero compreso tra zero e uno che esprime la sensibilità del sensore. Se questo rapporto viene moltiplicato per cento, al posto dell'efficienza relativa otteniamo quella percentuale, detta appunto efficienza quantica.

In realtà le cose sono un po' più complesse, in quanto la luce visibile è un'onda elettromagnetica la cui lunghezza d'onda varia con continuità all'interno di un intervallo con valori tipici che vanno da 350 a 750 nanometri.

I fotoni corrispondenti alle varie lunghezze d'onda vengono catturati in percentuale diversa dal sensore del CCD e se viene misurata l'efficienza quantica in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente si ottiene la curva di sensibilità spettrale, il cui grafico viene di solito usato per esprimere visivamente la bontà di un CCD.

Un buon CCD deve avere una sensibilità spettrale elevata su tutto lo spettro della luce visibile e, a parità di lunghezza d'onda, deve avere la stessa efficienza quantica su tutta la superficie del sensore, in quanto variazioni di sensibilità tra un pixel e l'altro sono causa di rumore e riducono la qualità delle immagini.

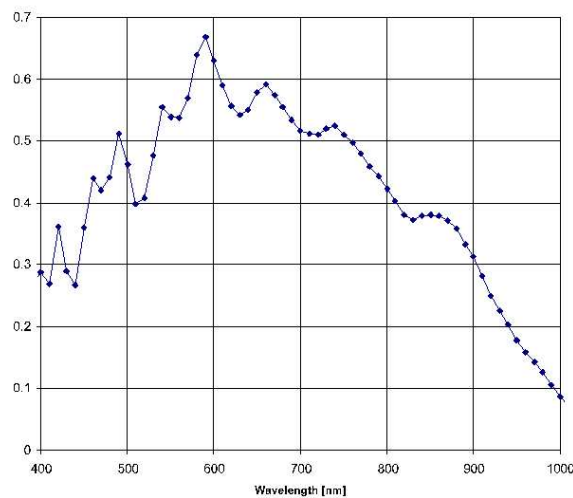


Figura 3: Curva di densità spettrale del CCD AP260EP

3.2 Capacità elettronica per pixel

La capacità di accumulo delle cariche di un pixel è limitata. Il valore massimo di elettroni che un CCD può accumulare in un singolo pixel è una caratteristica propria di ogni sensore.

Ovviamente una maggiore capacità elettronica è molto vantaggiosa in quanto occorrerà un maggior tempo di integrazione per saturare i pixel corrispondenti alle zone maggiormente illuminate.

Questo è importante perchè una volta raggiunta la saturazione, gli elettroni in eccesso si spargono sui pixel adiacenti (preferibilmente lungo le colonne) dando luogo al noto fenomeno del blooming in cui viene peggiorata la qualità dell'immagine.

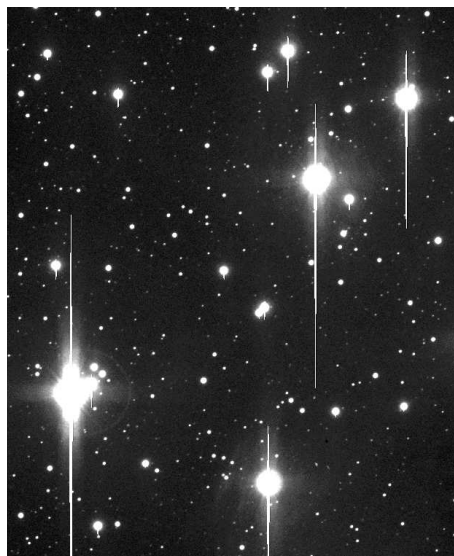


Figura 4: Tipica immagine con blooming

3.3 Linearità

Quando si dice che il CCD è un rivelatore lineare si intende che il numero di elettroni generati da ogni singolo pixel è direttamente proporzionale alla quantità di fotoni incidenti. Questa caratteristica rappresenta un notevole vantaggio rispetto alla fotografia tradizionale in quanto un CCD mantiene la stessa efficienza quantica indipendentemente dalla durata dell'esposizione. La linearità inoltre consente di effettuare misure dirette e quindi molto precise della luminosità degli oggetti astronomici.

3.4 Dark Current

Tutti i sensori CCD hanno la capacità di produrre e accumulare spontaneamente elettroni, anche quando la loro superficie viene schermata dalla luce incidente. A riposo vengono dunque prodotti elettroni fino a saturare completamente i livelli di capacità dei pixel e prima di iniziare una nuova esposizione è necessario rimuovere queste cariche indesiderate. La produzione spontanea di elettroni prosegue però anche durante l'esposizione e questo significa che nei pixel vengono accumulati sia elettroni prodotti dalla luce incidente sia elettroni prodotti spontaneamente, ed è impossibile distinguere gli uni dagli altri.

Fortunatamente però la produzione spontanea di elettroni, detta Dark Current (corrente di buio), ha caratteristiche tali da poter essere eliminata quasi completamente. Infatti in identiche condizioni di temperatura e di durata di una esposizione, un dato sensore genera sempre lo stesso numero

di elettroni a meno di un fattore di dispersione statistica (Rumore Termico). La dark current prodotta dipende fortemente dalla temperatura del sensore e quindi raffreddando il sensore di qualche decina di gradi rispetto alla temperatura ambiente la si può ridurre di molto.

Inoltre prima di effettuare una ripresa di un oggetto astronomico si fa un'esposizione di durata uguale con il CCD schermato dalla luce (shutter chiuso) per ottenere il cosiddetto Dark Frame.

L'immagine definitiva viene poi ottenuta durante la fase di elaborazione al computer, in cui all'immagine grezza dell'oggetto astronomico viene sottratta quella del Dark Frame con un software opportuno.

3.5 Rumore di lettura

Un altro fattore che va ad incidere sulle prestazioni di un CCD è il cosiddetto rumore di lettura, cioè un rumore elettronico legato alla procedura con cui l'elettronica della camera trasporta e quantifica le cariche prodotte in ogni singolo pixel durante l'esposizione. Per eliminare questo disturbo viene eseguita una posa particolare detta Bias, a otturatore chiuso e con durata minore possibile (in teoria sarebbe una posa a zero secondi, ovviamente irrealizzabile...). Siccome il rumore di lettura è presente in ogni esposizione sarà opportuno sottrarlo elettronicamente da ogni immagine ottenuta con un CCD.

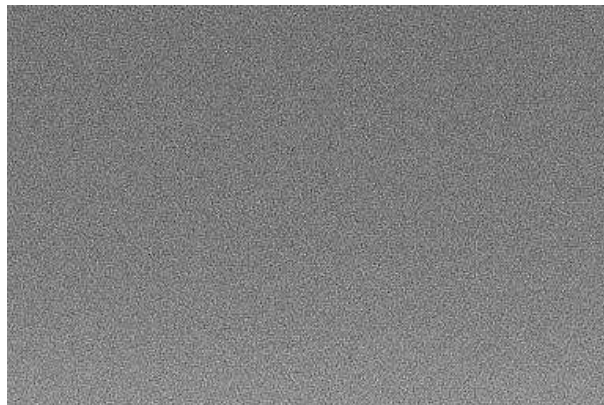


Figura 5: Tipica immagine di Bias

4 Correzioni

Abbiamo appena visto che un'immagine raccolta con un CCD deve essere elaborata al computer prima di essere utilizzata. In realtà la corrente di buio non è l'unico elemento che rende scadente la qualità dell'immagine grezza

ottenuta in un primo momento. Infatti se noi riprendiamo una zona di cielo dopo il tramonto, quando il Sole è già tramontato, ma il cielo è ancora azzurro, vediamo che il campo inquadrato ha una luminosità uniforme e ci aspetteremmo un'immagine anch'essa uniforme e priva di dettagli. In realtà vediamo apparire numerose irregolarità che sono tutte dovute a imperfezioni della strumentazione usata.

Quelle più evidenti si presentano come delle chiazze e sono delle impurità presenti sulla superficie del sensore, come granellini di polvere. Lo sfondo presenta poi delle zone con luminosità diversa a causa del fatto che zone diverse del sensore CCD hanno una sensibilità diversa e che anche il sistema ottico del telescopio può presentare dei difetti di allineamento. Durante una ripresa astronomica le immagini da noi ottenute presenteranno tutti questi difetti, ma nella maggior parte dei casi passano inosservati, anche se contribuiscono sensibilmente a peggiorare la qualità dell'immagine.

Per eliminare questo effetto è sufficiente, durante la fase di elaborazione al computer, utilizzare un'immagine ottenuta riprendendo un campo di vista con luminosità uniforme, detta Flat Field, la quale si può ottenere, come già visto, riprendendo il cielo durante crepuscolo, ma anche usando uno schermo bianco uniformemente illuminato da anteporre al telescopio.

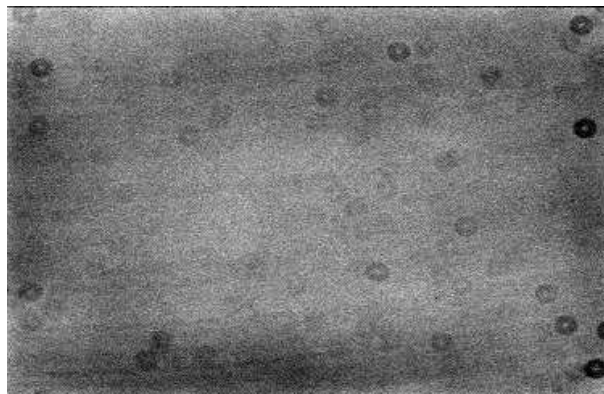


Figura 6: Flat Field con in evidenza la presenza di granelli di polvere

Riassunto quanto detto finora, l'immagine di un oggetto astronomico fornita da un sensore CCD in realtà è un'immagine grezza che va rielaborata al computer usando le immagini ausiliarie del Dark Frame e del Flat Field, come si evince dallo schema in figura 6.

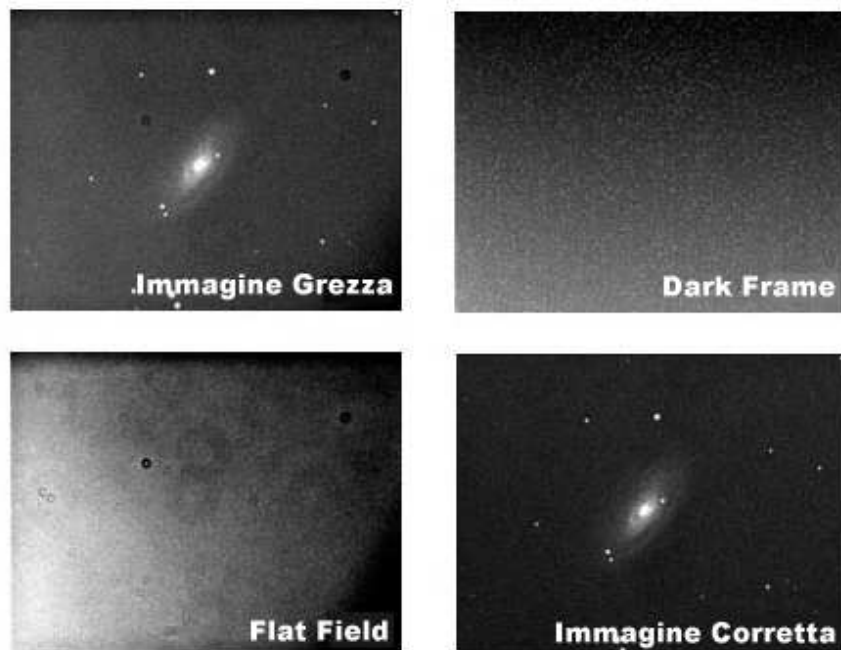


Figura 7: Correzione di un'immagine

5 Immagini a colori

Finora abbiamo visto solamente immagini in bianco e nero perchè i sensori CCD convertono i fotoni incidenti in cariche elettriche e durante un'esposizione queste cariche vengono accumulate in corrispondenza dei singoli pixel. Così facendo viene infatti persa l'informazione riguardo alla lunghezza d'onda dei singoli fotoni poichè la quantità totale di luce raccolta viene rappresentata graficamente usando varie tonalità di grigio.

Per non perdere l'informazione riguardante la lunghezza d'onda della luce in arrivo basta usare dei filtri in grado di selezionare il colore che raggiunge il sensore, detti per questo filtri passabanda. Ad esempio, volendo registrare le informazioni riguardo le emissioni nel rosso dell'oggetto inquadrato, basta anteporre al sensore un filtro dello stesso colore.

Per ottenere un'immagine a colori basta effettuare tre riprese dello stesso campo di vista usando tre filtri corrispondenti ai tre colori primari della luce, cioè il rosso, il verde e il blu, per poi sommarle al calcolatore con la tecnica della tricromia.

Ecco perchè spesso, assieme alle camere CCD, viene usata una ruota porta filtri che permette di effettuare le riprese in tricromia rapidamente senza dover sostituire manualmente di volta in volta i filtri da usare. Le

immagini seguenti mostrano uno schema del funzionamento di una ruota porta filtri e un tipico esempio di ripresa in tricromia.

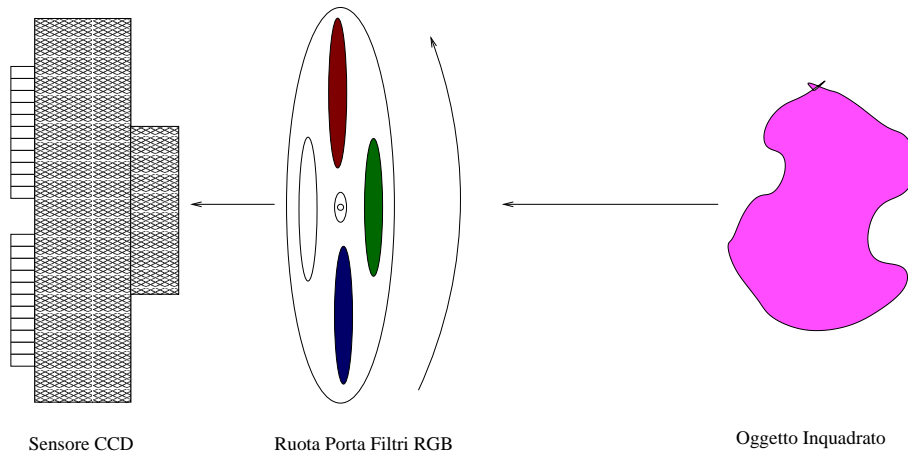


Figura 8: Ruota porta filtri

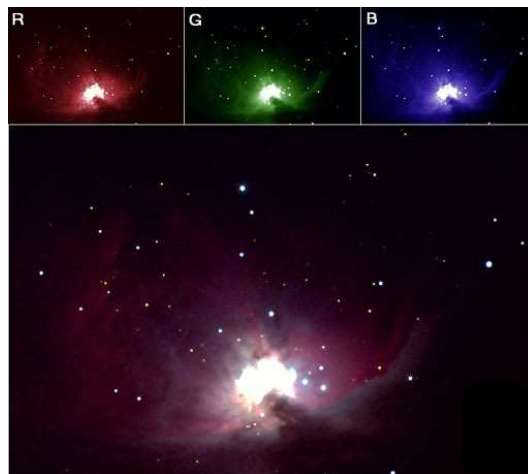


Figura 9: Ripresa in tricromia di M42

Appendice A: Il nostro CCD

- **Modello:** APOGEE AP260EP
- **Sensore:** Kodak KAF-0260
- **Area Sensore:** $10.2mm \times 10.2mm$
- **Numero pixel:** 512×512
- **Dimensione pixel:** $20\mu m$