Il CCD (Charge-Coupled Device)

M. Monaci[1]★
[1]*Osservatorio Astronomico di Punta Falcone, Piombino*

17 January 2019

ABSTRACT
In questa nota introdurremo il CCD (*Charge-Coupled Device, Dispositivo ad Accoppiamento di Carica*), ovvero un sistema di ripresa estremamente sensibile che fa le veci del nostro occhio. I CCD sono strumenti di ripresa che hanno una elevata sensibilità, ed inoltre permettono di effettuare pose arbitrariamente lunghe, accumulando la luce che arriva dagli oggetti celesti. Il vantaggio indiscusso rispetto all'occhio umano, oltre alla sensibilità, è dato dal fatto che fornisce misure *oggettive* non dipendenti dall'osservatore. I sistemi CCD sono facili da utilizzare, tuttavia per ottenere immagini valide sono necessarie una serie di accortezze che spiegeremo nel prosieguo di questa nota.

Key words: CCD – sistemi di ripresa

1 INTRODUZIONE

Prima degli anni '80 del secolo scorso registrare le immagini astronomiche non era cosa affatto semplice. Il nostro occhio non è *progettato* per lavorare in condizioni di scarsa illuminazione, esattamente le condizioni che troviamo in astronomia. Ne consegue quindi che le osservazioni ad occhio nudo non erano affatto affidabili, ed inoltre erano *soggettive*. La situazione migliorò con l'introduzione delle emulsioni fotografiche, ma anche qui non mancavano i problemi. La sensibilità era sì superiore all'occhio umano, ma comunque occorrevano pose di molte ore per ottenere dati accettabili. Inoltre l'impossibilità di vedere il risultato la notte stessa (infatti era necessario sviluppare le lastre) poteva facilmente compromettere una intera nottata di osservazioni (si pensi per esempio ad una messa a fuoco errata o un puntamento non preciso); basti immaginare i problemi che ha la fotografia a pellicola tradizionale, moltiplicati nel caso delle pose astronomiche. Ultimo problema, ma non per questo meno annoso: le lastre su cui era depositata l'emuslione erano di vetro, e di solito erano estremamente fragili. Un colpo alla valigetta che le conteneva e le osservazioni di mesi potevano essere compromesse. Fortunatamente a cavallo degli anni '70 e '80 iniziarono ad entrare nel mondo astronomico i CCD, ovvero sistemi di ripresa digitale estremamente sensibili. I vantaggi sono ben evidenti: la sensibilità enormemente più alta permette di abbattere i tempi di esposizione, inoltre vedendo immediatamente il risultato dopo l'esposizione permette di risparmiare moltissimo tempo, in quanto è facile vedere se ci sono problemi oppure se le esposizioni sono corrette. Vantaggio non ultimo è il fatto di poter *sommare*, anche su notti diverse, pose effettuate sullo stesso oggetto: in questo modo è possibile ottenere tempi di posa virtualmente infiniti, cosa che permette di osservare oggetti molto deboli. In Fig 1 è possibile vedere un CCD.

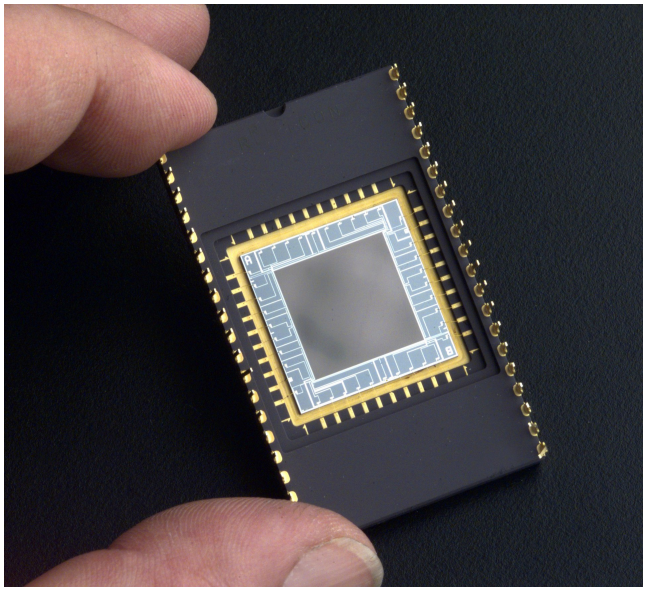

Figure 1. Un CCD. Notare le dimensioni molto ridotte. In questo caso è un CCD per le riprese in ultravioletto.

2 STRUTTURA E FUNZIONAMENTO

Possiamo definire il CCD come un dispositivo in grado di trasformare i fotoni (ovvero la radiazione elettromagnetica) in elettroni (ovvero corrente elettrica), accoppiato con un amplificatore che con-

★ E-mail: monaci93@gmail.com

sente di aumentare questa corrente in maniera lineare per risalire all'intensità della radiazione incidente.

Il funzionamento del CCD a livello fisico è molto complesso ed esula dagli scopi di queste dispense. Descriviamo quindi brevemente il funzionamento e la sua struttura, in maniera un po' *naive* ma immediata.

Dobbiamo immaginare il CCD come una superficie sensibile alla radiazione elettromagnetica: tale superficie di fatto è una griglia composta da milioni di pixel, che poi andranno a costruire l'immagine finale. Per fissare le idee immaginiamo un CCD composto da una griglia di dimensioni 3060 x 2040 pixel, esattamente come la camera principale usata presso l'Osservatorio di Piombino. Il numero totale di pixel sarà all'incirca 6 milioni, quindi il CCD preso in considerazione fornirà immagini da 6 Megapixel.

Le dimensioni dei singoli pixel sono molto ridotte, di solito sono dell'ordine del micron, ovvero un milionesimo di metro. La griglia sensibile alla radiazione elettromagnetica avrà quindi dimensioni fisiche di qualche centimentro, per la nostra camera abbiamo in particolare 27.5 mm x 18.4 mm. In generale i CCD per uso amatoriale hanno dimensioni di qualche centimetro. Per i telescopi professionali di solito si usano *array* di CCD, ovvero molti CCD sono sistemati in una griglia più ampia che può avere anche dimensioni di diverse decine di centimetri.

Abbiamo quindi il nostro CCD pronto per essere esposto. A livello teorico tutti i pixel hanno valore iniziale pari a 0, in quanto non sono esposti a nessuna radiazione elettromagnetica (non è esattamente così, ma questo lo vedremo dopo).

Ora esponiamo il nostro CCD, esattamente come se fosse una pellicola fotografica. Sulla sua superficie verrà focalizzata la parte di cielo puntata dal telescopio, dove quindi ci sono stelle e zone invece più scure.

Ciascun pixel inizia quindi ad accumulare radiazione trasformandola in elettroni: chiaramente dove c'è maggiore radiazione (come per esempio stelle) il CCD produce più elettroni. Ecco il segreto intimo del suo funzionamento: *ad una maggiore radiazione incidente coincide una maggiore produzione di elettroni*.

Alla fine dell'esposizione abbiamo un *array* di pixel che contengono più o meno elettroni, in base alla radiazione che hanno osservato. Sappiamo che gli elettroni generano una corrente, e quindi possono essere facilmente misurati da un circuito integrato. Tuttavia come facciamo a *svuotare* tutti i pixel e contare gli elettroni?

Ed ecco l'idea geniale del CCD. Alla base della griglia sensibile c'è una ulteriore riga di pixel, chiamata *shift register*. Nel nostro caso immaginiamo che sia posta sul lato più lungo, ovvero sia una striscia di pixel lunga 3060 pixel. A questo punto il CCD produce una potenziale elettrico che genera una sorta di "scivolo" per gli elettroni: Chiaramente gli elettroni (che sono negativi) si muoveranno dove il potenziale è positivo. In questo modo posso spostare tutta la matrice di una riga. In altre parole la prima riga finirà sullo *shift register*, la seconda riga, finisce sulla prima riga e così via, fino alla 3060-esima riga che finisce sulla 3059-esima riga. A questo punto la 3060-esima riga sarà vuota.

Ho quindi lo *shift register* pieno: applico lo stesso procedimento, però solo sullo *shift register* sposto il primo pixel sull'amplificatore e conto gli elettroni, poi sposto il secondo sul primo e così via, fino a svuotare lo *shift register*. A questo punto riapplico il potenziale a "scivolo" sul CCD e continuo in questo modo fino a quando avrò svuotato tutto il CCD.

Fatto questo, avrò un elenco di pixel con il numero di elettroni contenuti, che traduco in intensità luminosa. A questo punto è facile ricostruire l'immagine definitiva. In Fig 2 è possibile vedere uno schema di funzionamento di un CCD.

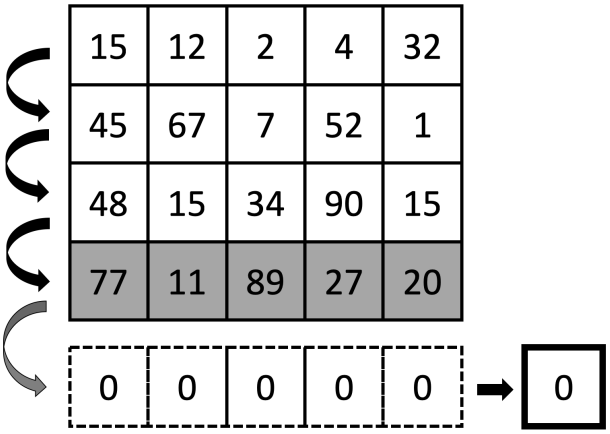

Figure 2. Principio di funzionamento del CCD. La griglia principale è il CCD, la linea di pixel tratteggiata è lo *shift register*, il singolo pixel con il bordo spesso è l'amplificatore. I numeri all'interno dei sigoli pixel rappresentano schematicamente il numero di elettroni raccolti. Nel caso di CCD esposto, come in questo caso, la prima cosa che viene fatta è spostare la prima riga (evidenziata in grigio) sullo *shift register*, e successivamente svuotare lo *shift register* sull'amplificatore, un pixel alla volta. In questo modo la prima parte della sequenza di numeri sarà: 20, 27, 89, 11, 77, 15, 90, 34, 15, 48... e così via.

2.1 Il CCD registra i colori?

Come magari si è intuito dalla descrizione del funzionamento del CCD, esso è in grado solo di registrare la *quantità* di radiazione, senza dirci niente sulle caratteristiche di questa radiazione. In modo molto *naive*, possiamo dire che un "fotone blu" conta quanto un "fotono rosso".

Per ottenere i colori nelle immagini astronomiche, cosa che fra l'altro non ha molto senso, in quanto i processi fisici che producono la luce non possono essere associati facilmente ad un colore, si rendono necessari i filtri, che saranno trattati in una prossima dispensa.

Per ora basti sapere che il CCD è rigorosamente in bianco e nero, ed inoltre tali CCD sono gli unici che possono essere utilizzati proficuamente per le ricerche astronomiche, in quanto con quelli a colori non è possibile controllare il "filtraggio" della luce. Infine, i sensori in bianco e nero sono più sensibili, in quanto il CCD è direttamente esposto alla radiazione. Nei CCD a colori invece sono necessari dei filtri, che comunque riducono la radiazione incidente, rendendoli di fatto meno sensibili. Se questo problema non si pone con le fotocamere che usiamo tutti i giorni (che sono comunque CCD) in quanto la luce è abbondante, lo stesso non si può dire per osservazioni notturne, dove ottenere la massima sensibilità rappresenta la priorità.

3 CARATTERISTICHE PRINCIPALI

Entriamo più nel dettaglio riguardo alle caratteristiche principali del CCD. Abbiamo già avuto modo di accennare ai pixel che compongono la matrice sensibile: chiaramente più grande è tale matrice, e maggiore sarà il campo inquadrato. Tuttavia anche la grandezza del singolo pixel è importante.

Altre caratteristiche che descriveremo sono l'*efficienza quantica*, la *risposta in frequenza* ed infine esporremo il problema della *saturazione*.

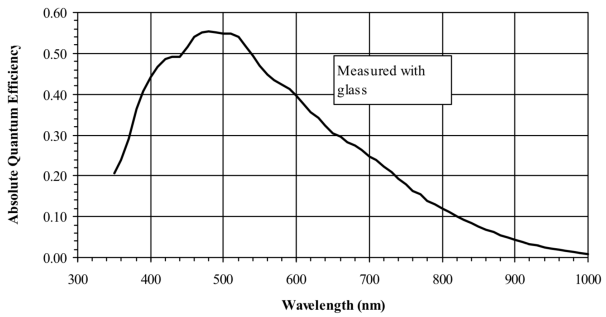

Figure 3. Efficienza Quantica del sensore utilizzato presso l'Osservatorio di Piombino. Notare come abbia un picco verso i 500 nanometri, ovvero la luce verde, mentre scenda rapidamente a zero quando ci si sposta verso l'ultravioletto (sotto i 350 nanometri) oppure quando ci si sposta verso l'infrarosso (ovvero oltre gli 800 nanometri). Notare comunque come in generale sia più sensibile di un occhio umano, in quanto noi arriviamo a circa 700 nanometri, dopo i quali il nostro occhio non è più sensibile.

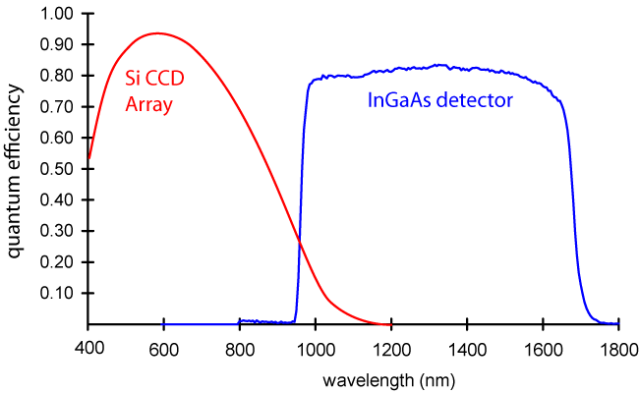

Figure 4. Efficienza Quantica di due diverse tipologie di sensori. Il silicio (Si) è utilizzatissimo in astronomia ottica, in quanto è abbastanza economico e presenta una buona sensibilità per le lunghezze d'onda visibili. Tuttavia come si vede, oltre i 1000 nanometri il sensore diventa cieco. Per osservare nell'infrarosso si usano sensori all'arseniuro di indio e gallio (InGaAs), che per ironia della sorte invece non sono sensibili alla luce visibile.

3.1 Efficienza quantica

Sotto tale astruso nome viene indicata una caratteristica molto semplice ma cruciale, che possiamo definire come una sorta di **efficienza di rilevazione**. Prima siamo sorvolati piuttosto rapidamente sul fatto che quando un fotone colpisce la superficie del CCD viene trasformato in un elettrone. Ma questo è sempre vero? La risposta è no.

L'efficienza quantica, che viene espressa tramite una percentuale, mi indica quanti *fotoni vengono effettivamente rilevati.* Facciamo un esempio: immaginiamo che il mio rilevatore sia colpito da 100 fotoni, tuttavia ne riesco a individuare e registrare solo 80. L'efficienza quantica del mio CCD sarà quindi pari all' 80%.

I CCD di solito hanno una efficienza quantica (*Quantum Efficiency* - QE) superiore al 50%, e possono raggiungere anche il 90%. Per rendere idea della rivoluzione che ha fatto il CCD in astronomia, una comune emulsione fotografica ha una efficienza quantica di circa il 10%, mentre l'occhio umano ha una QE di appena l' 1%. E' quindi chiaro che i tempi di esposizione si abbassano notevolmente.

Una caratteristica interessante della QE è che dipende dalla lunghezza d'onda della luce osservata: sarebbe bello un mondo dove un CCD fosse sensibile a *tutta* la radiazione elettromagnetica, dal radio ai raggi gamma! Di solito l'efficienza quantica di un CCD ottico è alta nel visibile, mentre decresce sensibilmente verso l'ultravioletto o verso l'infrarosso. Oltre certi limiti anche un CCD diventa completamente cieco, ovvero la QE tende rapidamente a 0%. In Fig 3 è riportata la QE del CCD utilizzato presso l'Osservatorio di Piombino.

ESPERIMENTO. Il led che si trova davanti ai telecomandi ha una lunghezza d'onda di circa 800 nanometri. Premendo un tasto qualunque del telecomando, il led si accende, ma voi non vedrete nulla, in quanto il vostro occhio non è sensibile agli infrarossi. Provate ora ad inquadrare il led con la camera di un telefonino (non iPhone): vedrete il led che si accende e si spegne. Infatti le camere dei telefonini sono comunque dei CCD che sono in parte sensibili agli infrarossi. Esperimento che vale più di mille parole per descrivere l'efficienza quantica e la risposta in frequenza!

3.2 Risposta in frequenza

Parlando dell'efficienza quantica abbiamo accennato anche alla risposta in frequenza. Come tutti gli strumenti, anche il CCD non è sensibile a tutte le tipologie di radiazione elettromagnetica. Quindi per osservare nell'ottico dovremmo costruire un sensore sensibile alla luce visibile, mentre se vogliamo costruire un sensore infrarosso dovremo cambiare completamente schema di costruzione (e soprattutto il materiale semiconduttore con cui sono costruite le griglie fotosensibili).

In Fig 4 è possibile vedere due grafici di efficienze quantiche relative ad un sensore visibile e ad un sensore infrarosso. Risulta quindi evidente che per osservazioni in diverse lunghezze d'onda siano necessari differenti CCD.

3.3 Saturazione

Ora ci poniamo il seguente problema: immaginiamo di osservare una sorgente particolarmente forte, che quindi produce moltissimi elettroni sulla superficie del CCD. I singoli pixel avranno chiaramente una capacità limitata, superata la quale si parla di **saturazione.** In altre parole i singoli pixel *non possono più ospitare altri elettroni*, in quanto hanno raggiunto la capacità massima.

La saturazione va evitata come la peste, non perché rovini lo strumento (a meno di non sovraesporre in maniera esasperata) ma perché da una immagine saturata non è più possibile risalire alla corretta quantità di radiazione ricevuta. In altre parole si perde la *linearità* fra il tempo di esposizione e il numero di elettroni creati.

Immaginiamo di osservare un oggetto che produce 100 fotoni al secondo: se lo osserviamo un singolo secondo abbiamo 100 elettroni, dopo due secondi abbiamo 200 elettroni e così via. Ma se siamo in saturazione, per fissare le idee immaginiamo 1000 elettroni come limite, dopo un secondo ne contiamo sempre 1000, in quanto non ne possiamo accogliere altri.

La saturazione in una immagine astronomica è facilmente riconoscibile in quanto attorno all'oggetto luminoso si creano delle strisce altrettanto luminose, in quanto gli elettroni creati "strabordano" dal pixel incriminato e vanno a riempire i pixel accanto. Ne consegue quindi che un oggetto sovraesposto rovina buona parte dell'immagine.

Tipicamente i CCD sono oggetti che lavorano a 16 bit. La saturazione viene quindi raggiunta a:

$$2^{16} = 65536 \; conteggi \tag{1}$$

Per comodità i conteggi vengono chiamati ADU (*Analog to Digital Units*). A noi basta semplicemente sapere che dobbiamo tenerci ben lontani dalla soglia di 65000 ADU circa. Gli ADU sono facilmente calcolabili perché rappresentano proprio il numero contenuto nel singolo pixel, come si vede in Fig 2. Qualunque software astronomico permette di *sondare* l'immagine e controllare il numero di ADU sui singoli pixel.

4 CALIBRAZIONE DEL CCD

Finora abbiamo descritto il comportamento teorico del CCD, tuttavia il mondo reale è ben lontano dalla teoria. Purtroppo una immagine astronomica da sola è pressoché inutilizzabile, in quanto è necessario *calibrarla*, ovvero eliminare il più possibile le risposte strumentali e i difetti di fabbricazione del CCD, in modo da rendere ciascuna immagine *indipendente* dal CCD usato per l'acquisizione.

Per fare questo, sono necessarie tre tipologie particolari di esposizione, che poi andranno ad essere sottratte (e divise) all'immagine scientifica che vogliamo calibrare: tali *frame* di calibrazione si chiamano **bias**, **dark**, **flat**. Vediamo come si ottengono e quali "difetti" correggono.

4.1 Bias

Abbiamo detto che in generale un CCD, quando non è esposto, presenta tutti i pixel settati a 0, in quanto non c'è radiazione incidente. Questo effettivamente non è vero, in quanto in *qualunque* condizione il CCD registra *comunque qualcosa*. In generale qualunque strumento elettronico fotosensibile è percorso da una corrente, chiamata *dark current*, ovvero corrente di buio, in qualunque situazione. Tale corrente è indipendente dal tempo di esposizione. Ciascun pixel quindi registrerà un valore basso, ma comunque non zero. Il frame che si ottiene considerando solo la corrente di buio viene chiamato **bias**.

Il bias può essere ottenuto esponendo per un tempo pari a zero (o un tempo piccolissimo) il sensore, con il tappo chiuso. In linea teorica dovremmo ottenere una immagine completamente buia, ma questo effettivamente non avviene. Quello che otteniamo è qualcosa di simile alla Fig 5.

In questo modo sistemiamo parte della risposta strumentale.

4.2 Dark

Gli elementi fotosensibili non sono sensibili solo alla luce, ma sono sensibili anche alla radiazione termica (comunque composta sono fotoni). Quindi anche solo il fatto di avere uno strumento che ha una certa temperatura ed è in un certo ambiente, produce un segnale dipendente dal tempo di esposizione (infatti più espongo e più fotoni termici raccolgo) che non ha nulla a che vedere con l'oggetto che si sta osservando. Per di più ci saranno pixel che sono estremamente più sensibili di altri (*hot pixels*), e che quindi diventano più luminosi più rapidamente. Ci saranno anche pixel meno sensibili, o addirittura morti (*dead pixels*).

Per sistemare tutti questi problemi, si può procedere in due modi (solitamente si usano entrambi):

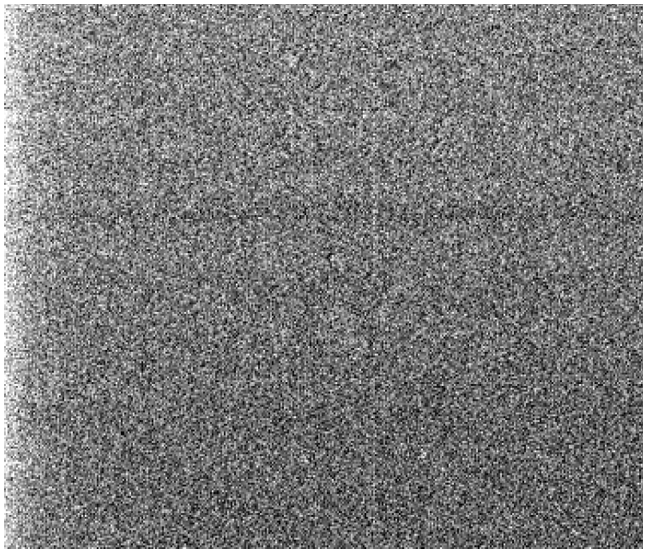

Figure 5. Bias frame. Notare come l'immagine sia fondamentalmente uniforme, tuttavia sia presente una sorta di rumore sui singoli pixel, che presentano valori differenti in ADU.

- **Raffreddamento.** Raffreddare la camera CCD sembra un'ottima idea, in quanto si riduce la temperatura e conseguentemente si riduce l'irraggiamento termico. Per fare questo i CCD amatoriali sfruttano un raffreddamento elettronico a *cella di Peltier* che permette di ridurre la temperatura di una trentina di gradi. Per CCD professionali vengono utilizzati sistemi di raffreddamento a base di azoto liquido, che porta la temperatura del CCD a -196 gradi centigradi.
- **Dark Frame.** Il Dark Frame permette di viasualizzare i pixel caldi e in generale il rumore termico. Si espone il CCD con il tappo chiuso per un tempo di esposizione pari al tempo di esposizione dell'immagine astronomica. Solitamente il dark frame non è necessario se il raffreddamento è all'azoto liquido, in quanto in questa condizione il rumore termico è completamente trascurabile.

Nel nostro caso il CCD è raffreddato fino a circa -30 gradi centigradi, il che implica la creazione di un dark frame per eliminare del tutto il rumore termico.

In Fig 6 possiamo vedere un esempio di dark frame con una esposizione di 300 secondi.

4.3 Flat

Passiamo quindi all'ultimo frame di calibrazione. Immaginiamo di illuminare con una sorgente perfettamente uniforme il nostro CCD. Poiché tutti i pixel ricevono la stessa quantità di radiazione, dovranno avere tutti lo stesso valore in ADU. Anche in questo caso il mondo reale è diverso da quello che crediamo: l'immagine che otteniamo non è assolutamente uniforme, in quanto ci sono intere zone del CCD che sono meno sensibili (hanno meno guadagno) o altre che sono maggiormente sensibili. Di solito il centro del CCD è sistematicamente più sensibile, mentre i bordi del CCD sono meno sensibili. Inoltre ci possono essere ombre create da granelli di polvere o imperfezioni sul treno ottico, che si riflettono sulle immagini finali. Tutte queste differenze nel guadagno (intrinseche, dovute esplicitamente ai pixel, o estrinseche, dovute per esempio a zone d'ombra per imperfezioni sul treno ottico) si correggono esponendo il CCD per un tempo di qualche secondo inquadrando

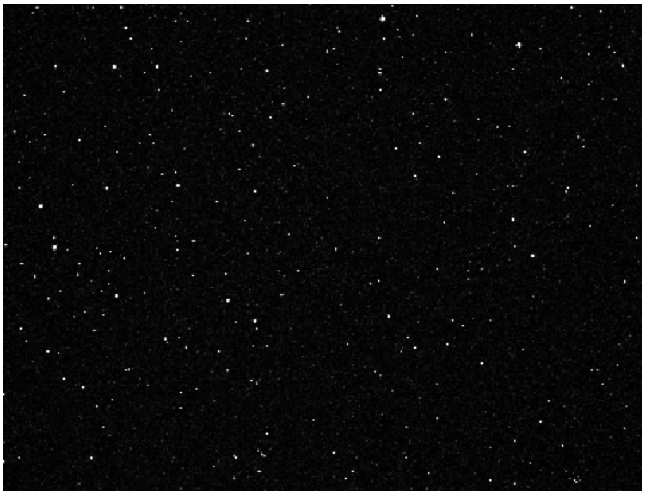

Figure 6. Dark frame. Si notano molto bene gli *hot pixel*, ovvero pixel che sistematicamente appaiono più luminosi nonostante il CCD non sia esposto alla radiazione visibile.

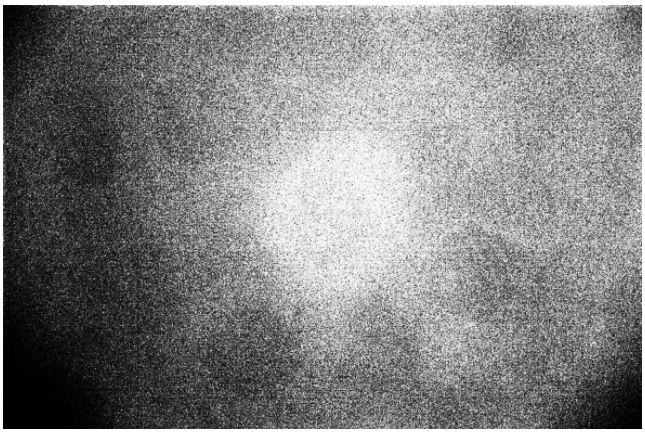

Figure 7. Flat frame. Notare la differenza del guadagno dei bordi rispetto al centro e le ombre circolari causate da granelli di polvere e imperfezioni nel treno ottico.

una sorgente perfettamente uniforme. Il frame di calibrazione che si ottiene è molto simile a quello presentato in Fig 7 .

Si nota molto bene come il CCD non si comporti in modo uniforme, ma per l'appunto i bordi (e soprattutto gli angoli) siano sistematicamente meno sensibili. Poiché inoltre le imperfezioni lungo il treno ottico possono cambiare nel tempo, è necessario riprendere il flat frame ogni volta che si compie una osservazione. Invece per quanto riguarda il dark e il bias questa operazione non è necessaria, in quanto rimangono stabili per diverso tempo.

4.4 Calibrazione

A questo punto disponiamo di quattro immagini:

- Immagine astronomica da calibrare;
- Flat;
- Dark;
- Bias.

Chiamando l'immagine da calibrare *raw*, possiamo scrivere la formula di calibrazione:

$$CALIB = \frac{RAW - DARK}{FLAT - BIAS} \tag{2}$$

In altre parole: *si sottrae all'immagine il dark e si divide per il flat a cui è stato sottratto il bias.* Notare come il bias vada sottratto solo all'immagine raw, infatti il dark frame al suo interno contiene *anche* il bias.

5 CONCLUSIONI

In questa nota abbiamo visto il funzionamento e la calibrazione di un CCD, strumento fondamentale per l'astronomia moderna. Abbiamo inoltre visto le caratteristiche principali, i suoi svantaggi e i suoi punti deboli. L'importante per le osservazioni è eseguire sempre la ripresa dei frame di calibrazione, in modo da rendere indipendente l'immagine dal sistema di ripresa.

Nelle prossime dispense vedremo il funzionamento dei filtri, a cosa servono e gli studi che possono essere eseguiti con essi.