



Laurea triennale in Fisica  
a.a. 2010 - 2011

# CORSO DI ASTRONOMIA

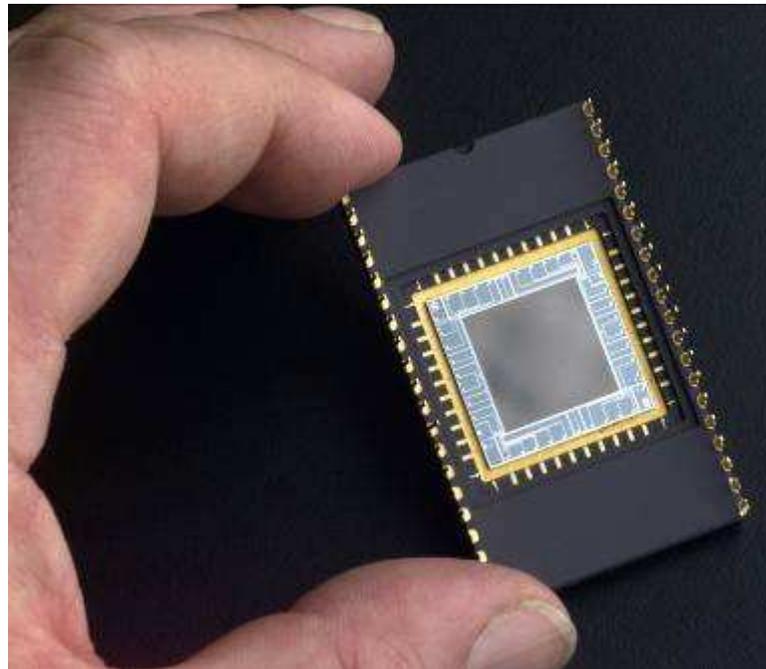
LEZIONE 10\_1 – 17 maggio 2011

Prof. Angelo Angeletti

# Introduzione

Verso la fine dello scorso millennio si è avuto uno eccezionale sviluppo dell'elettronica e ciò ha portato ad un forte abbattimento dei costi e alla diffusione di dispositivi sempre più potenti.

Tra questi ci sono i sensori CDD.



# Introduzione

CDD = Charge-Coupled Device, in italiano *dispositivo a carica accoppiata*

Consiste in un circuito integrato formato da una griglia di elementi semiconduttori (pixel) in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce.

Questi elementi sono accoppiati in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente.

Inviando al dispositivo una sequenza temporizzata d'impulsi, si ottiene in uscita un segnale elettrico grazie al quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso.

# Introduzione

Il CCD fu ideato ai Bell Laboratories da Willard S. Boyle e George E. Smith nel 1969.

L'anno seguente venne realizzato un prototipo funzionante. Per questa scoperta Boyle e Smith hanno ricevuto il Premio Nobel per la fisica nel 2009.

Nel 1975 fu realizzata la prima videocamera con CCD con una qualità dell'immagine sufficiente per le riprese televisive.

Oggi il CCD è il cuore delle moderne macchine fotografiche e videocamere digitali, ma anche dei fax e degli scanner.

La ricerca attuale è volta anche ad ottimizzare la forma del singolo pixel e la sua posizione.

# Introduzione

Sin dalla sua nascita il CCD ha avuto largo uso in campo astronomico, dimostrando subito le enormi potenzialità rispetto alla fotografia tradizionale.

L'abbattimento dei costi, inizialmente molto alti, ha permesso negli ultimi anni la diffusione dei CCD anche in campo amatoriale.

Il CCD per uso astronomico, deve avere, causa le lunghe esposizioni, il minimo rumore di fondo e quindi deve avere una elettronica progettata appositamente per tale scopo e la possibilità di potersi interfacciare ad un dispositivo di raffreddamento (normalmente è una cella di Peltier), che consente di mantenere il dispositivo ad una temperatura molto bassa.

# Introduzione

Negli ultimi anni si è venuta ad affermare un'altra tecnica di utilizzo del CCD in astronomia per oggetti non troppo deboli, come la Luna ed i pianeti. Questa tecnica prevede di eseguire una lunga serie di riprese del soggetto, e successivamente, con appositi software, sommare tali riprese in modo che il rumore di fondo vada a scomparire (in quanto casuale) e venga esaltata l'immagine del corpo celeste ripreso.

Questa tecnica ha di fatto permesso ai modesti strumenti amatoriali di ottenere riprese di grande qualità, confrontabili, qualche volta, con quelle prodotte dagli strumenti professionali.



HST

Immagine amatoriale (C. Fattinanzi)

# Come è fatto un ccd

Il CCD è un dispositivo caratterizzato da una matrice di fotodiodi di forma quadrata o rettangolare, disposte a scacchiera sulla superficie di un cristallo di silicio, opportunamente trattato e integrato in un microchip.

Tali fotodiodi sono molto sensibili alla luce, vengono chiamati *pixel* (picture elements) e sono ricavati direttamente nel silicio.

Tralasciamo la tecnologia e il modo di funzionare di un moderno CCD.

In questa sede ci limiteremo ad illustrarne le caratteristiche e le proprietà salienti al solo scopo di comprenderne l'uso corretto nelle riprese fatte con strumenti dotati di questi dispositivi.

# Come funziona un ccd

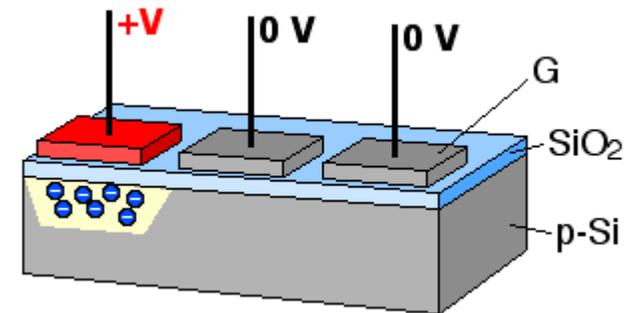
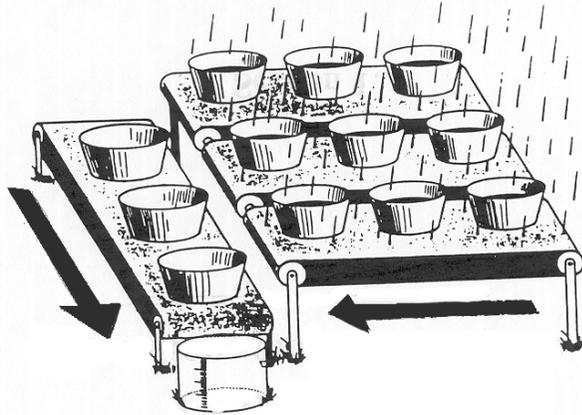
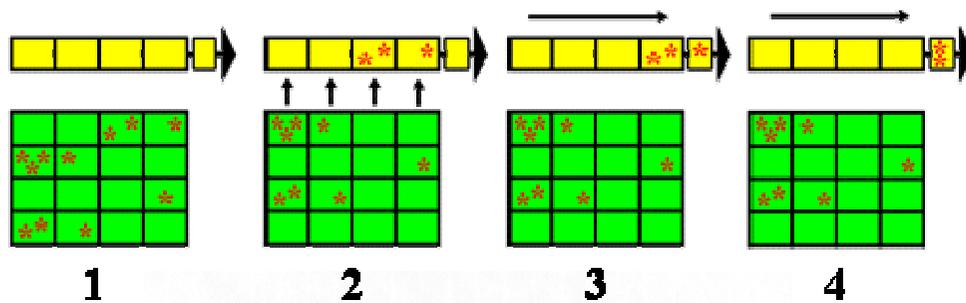
Il ccd va collegato ad un telescopio o ad un obiettivo fotografico.

I fotoni provenienti dall'oggetto inquadrato, vengono catturati dalla superficie del sensore e ciascun pixel raccoglierà una quantità proporzionale alla durata dell'esposizione e all'intensità del flusso luminoso incidente; tali fotoni producono elettroni che vengono immagazzinati in una buca di potenziale (*well*).

Durante l'esposizione (processo di integrazione delle cariche) andrà formandosi sulla superficie del sensore una precisa mappa elettronica dell'immagine dell'oggetto astronomico.

# Come funziona un ccd

Al termine dell'esposizione l'immagine astronomica "impressa" nel substrato del sensore sarà poi trasmessa sotto forma di segnale elettrico ad un circuito integrato, che ne effettuerà il ***campionamento***, ovvero la digitalizzazione, la quale determina mediante un processo fondamentale, la trasformazione del segnale dell'immagine in una ordinata sequenza numerica di bit. L'immagine digitale così ottenuta che prende il nome di ***light frame*** sarà quindi trasferita in un computer e visualizzata sul monitor.



# Campionamento

L'immagine che il telescopio produce sul piano focale è continua, mentre il sensore è costituito da un numero finito di pixel separati tra di loro e quindi si ha una perdita di informazione.

Il criterio di campionamento enunciato da Nyquist asserisce che: se viene effettuato un numero sufficiente di campionamenti, è possibile ricostruire fedelmente tutta l'informazione contenuta in un segnale continuo ma registrato in forma discreta.

Per ottenere questo è necessario che i campionamenti non siano più grandi della metà del più piccolo dettaglio visibile.

Nel caso di CCD il criterio stabilisce che il più piccolo dettaglio che il telescopio è in grado di mostrare (= al potere risolutivo) deve essere registrato in almeno due pixel.

Una formula per calcolare la focale ottimale è data da:

$$F (\text{mm}) = p (\mu\text{m}) \times D (\text{mm}) \times 3,438$$

# Campionamento

Se la focale del telescopio è inferiore a quella di campionamento, si dice che l'immagine è sottocampionata, cioè non viene sfruttata al massimo il potere risolutivo del telescopio.

Ma questo dipende molto dal seeing.

Le stelle vengono quadrate (*pixelate*)

Se la focale impiegata è maggiore di quella ottimale, le immagini saranno sovracampionate.

In genere non c'è motivo per sovracampionare se non in casi di particolari tipi di ccd o in caso di ottimi seeing e altrettanto ottime ottiche.

# Come funziona un ccd

I CCD maggiormente utilizzati nelle camere CCD sono caratterizzati da una schiera ordinata di fotoelementi disposti per righe e colonne a formare una matrice di  $m \times n$  pixel, organizzata in maniera diversa in funzione dello schema di trasferimento di carica adottato:

Interline Transfer,

Frame Transfer,

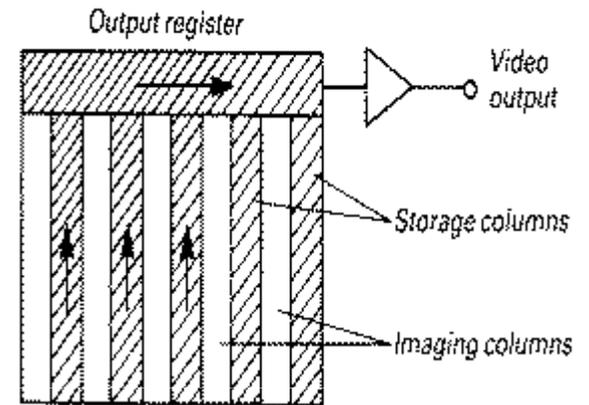
Full Frame Transfer.

# Come funziona un ccd

## Interline Transfer

Sono caratterizzati dalla particolare disposizione verticale dei registri di shift delle cariche elettriche accumulate durante il processo di integrazione. Ad ogni colonna di elementi fotosensibili è associata una colonna adiacente di elementi che godono in generale delle stesse proprietà.

Alla fine del processo di integrazione, le cariche accumulate negli elementi fotosensibili sono trasferite nei registri verticali per poi essere trasferite, riga per riga, nel registro orizzontale di lettura del segnale di uscita del CCD.



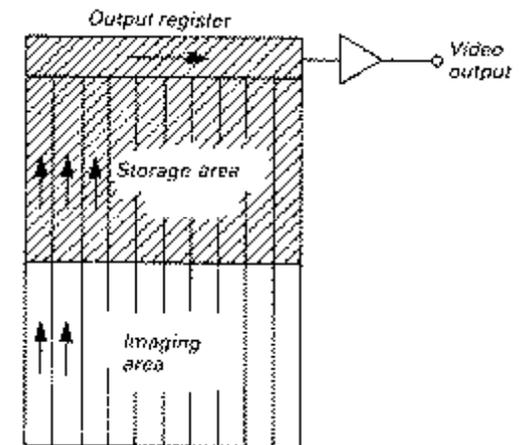
Lo shift delle cariche dai pixel ai registri verticali di lettura dura poco più di un milionesimo di secondo. Le camere dotate di CCD Interline Transfer non hanno pertanto bisogno di otturatori elettromeccanici in quanto di per sé dotate di velocissimi otturatori elettronici.

# Come è fatto un ccd

## Frame Transfer

I CCD Frame Transfer presentano due aree strutturalmente identiche sulla superficie del sensore. Una, sensibile alla luce dove si accumulano le cariche durante la posa; l'altra, schermata con una lamina metallica, è la memoria dove al termine del processo di integrazione sarà parcheggiata l'immagine dopo un trasferimento dall'area sensibile, di brevissima durata, generalmente 1-2 millesimi di secondo.

Per questa ragione, anche se l'area attiva del sensore, al termine della posa, continua a rimanere esposta al flusso dei fotoni, l'immagine salvata nella memoria schermata adiacente sarà letta e trasferita intatta nel computer. Le camere dotate di CCD Frame Transfer non hanno pertanto bisogno di essere equipaggiate con otturatori elettromeccanici.



# Come è fatto un ccd

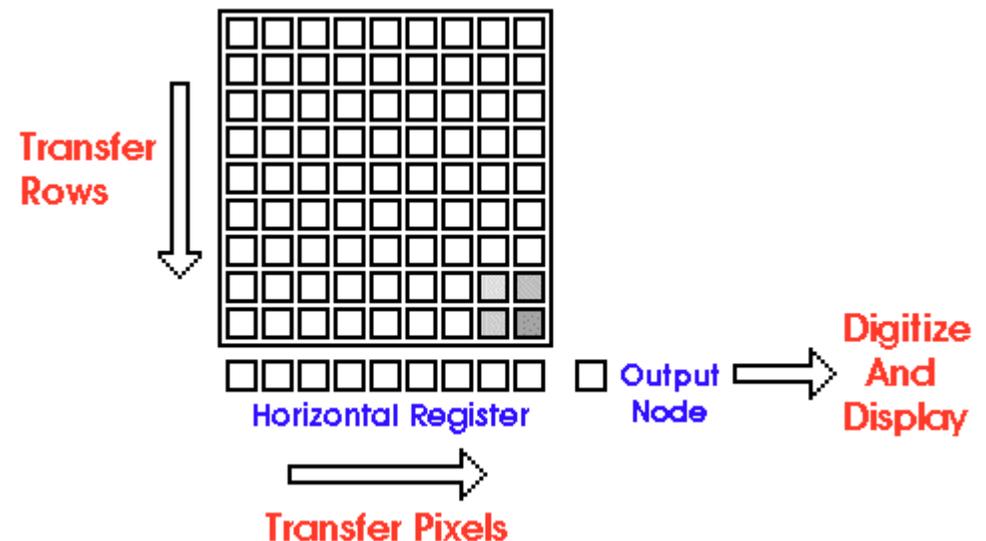
## Full Frame Transfer

I CCD Full Frame Transfer hanno solamente l'area attiva.

La lettura dell'immagine, al termine dell'esposizione, avviene mediante trasferimento progressivo verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore dalla prima riga all'ultima, dalla quale il segnale è prelevato e campionato numericamente.

Questo processo dura in genere alcuni secondi. Se l'area del sensore non è protetta dal flusso incidente dei fotoni, l'immagine finale sarà affetta da smearing, ossia da un alone provocato dal continuo assorbimento di energia luminosa.

Tale inconveniente viene eliminato equipaggiando queste camere CCD con otturatori elettromeccanici in grado di schermare opportunamente l'area attiva del sensore durante il processo di lettura e campionamento dell'immagine.



# Come è fatto un ccd

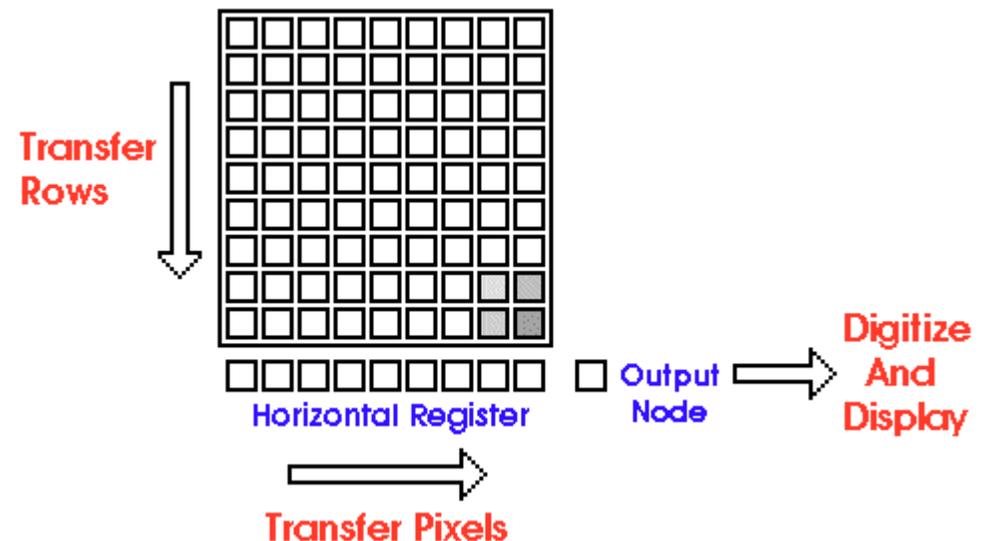
## Full Frame Transfer

I CCD Full Frame Transfer hanno solamente l'area attiva.

La lettura dell'immagine, al termine dell'esposizione, avviene mediante trasferimento progressivo verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore dalla prima riga all'ultima, dalla quale il segnale è prelevato e campionato numericamente.

Questo processo dura in genere alcuni secondi. Se l'area del sensore non è protetta dal flusso incidente dei fotoni, l'immagine finale sarà affetta da smearing, ossia da un alone provocato dal continuo assorbimento di energia luminosa.

Tale inconveniente viene eliminato equipaggiando queste camere CCD con otturatori elettromeccanici in grado di schermare opportunamente l'area attiva del sensore durante il processo di lettura e campionamento dell'immagine.



# Caratteristiche di un ccd

La performance di CCD è tra i fattori più importanti di valutazione di una camera CCD.

Essa è data da un insieme di elementi di natura diversa che caratterizzano il modo di funzionare del CCD.

Gli elementi più importanti sono:

- la *sensibilità*
- l'*efficienza quantica* (Quantum Efficiency = QE) e la *sensibilità spettrale*
- la *Full Well Capacity* (FWC)
- il *guadagno*
- la *linearità*
- la *dark current*

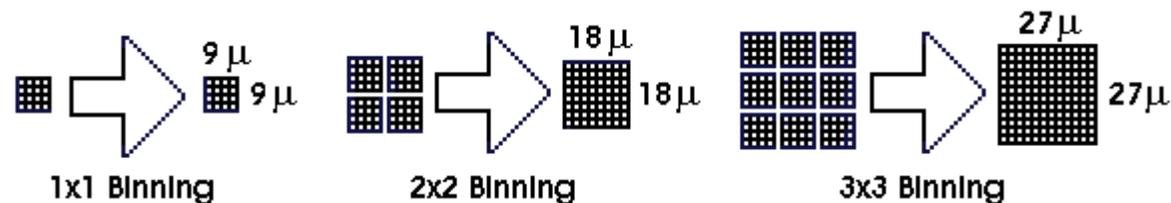
# La sensibilità

La maggior parte dei CCD hanno la capacità di leggere più pixel sia in orizzontale sia in verticale in una singola volta ovvero di leggere un "pixel super".

Questo è indicato come binning. Binning di 1x1 significa che viene letto un singolo pixel alla volta.

Binning 2x2 significa che viene letta una superficie di 4 pixel adiacenti, combinati in un pixel più grande, e così via.

In questo caso la sensibilità alla luce è stata aumentata di 4 volte, ma la risoluzione dell'immagine è stata ridotta alla metà.



# Efficienza quantica

Non tutti i fotoni incidenti sulla superficie di un pixel producono elettroni.

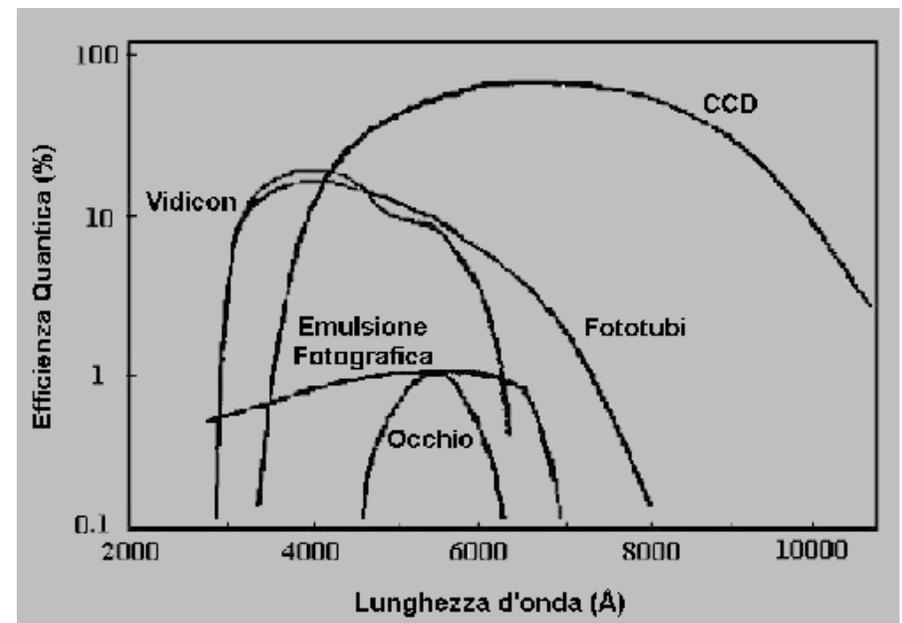
$$QE = \frac{\text{numero di elettroni prodotti}}{\text{numero di fotoni incidenti}}$$

Tale rapporto, per secondo e per singolo pixel, è un numero inferiore all'unità ed è solitamente espresso in percentuale ed indica la sensibilità teorica di un CCD.

La reale sensibilità è inferiore in funzione della qualità della camera CCD.

La sensibilità tipica di una camera CCD non professionale varia tra lo 0 e il 60%, in base alla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti.

Misurando l'efficienza quantica per ogni valore di lunghezza d'onda in cui dividiamo lo spettro della luce incidente, possiamo costruire la curva di sensibilità spettrale di ogni sensore.



# Sensibilità spettrale

La curva di sensibilità spettrale è uno dei dati importanti della patente di un sensore.

Supponiamo di voler usare un CCD per riprendere un oggetto astronomico che emette radiazione luminosa nella banda del blu o del violetto: dobbiamo conoscerne la sensibilità in quella banda, ossia l'efficienza quantica relativa alla lunghezza d'onda del blu o del violetto.

Un valore troppo basso della sensibilità spettrale ci costringerà ad effettuare lunghe esposizioni, tipiche della fotografia tradizionale, che impiega emulsioni di sensibilità equivalente non superiore al 4%, nel migliore dei casi.

Un buon CCD deve possedere una curva spettrale abbastanza efficiente per lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nm, con valori limite di efficienza quantica non inferiori al 50% del valore di picco. I CCD che hanno curve spettrali con picco a 530-550 nm danno generalmente ottimi risultati.

Altro fattore importante è l'uniformità dell'efficienza quantica su tutta la superficie del sensore. Variazioni di sensibilità tra pixel e pixel, a parità di lunghezza d'onda, sono causa di rumore e riducono la qualità delle immagini.

# Full Well Capacity

La capacità di accumulo delle cariche di un pixel non è illimitata.

Il valore massimo di fotoelettroni che un CCD può accumulare in un singolo pixel è una caratteristica propria di ogni sensore e viene detta Full Well Capacity.

Grandi valori di capacità elettronica di un pixel esprimono un maggior range dinamico del sensore a parità di rumore complessivo presente nel segnale.

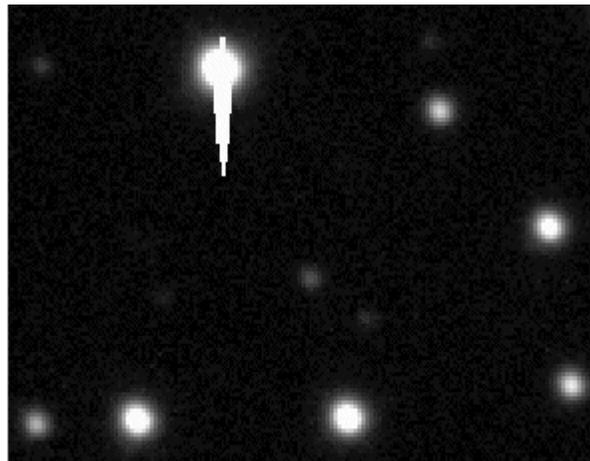
Maggiore è la capacità elettronica per pixel di un CCD, minore è l'impatto del rumore fotonico con conseguente beneficio per le immagini planetarie.

I vantaggi di una maggiore capacità elettronica sono ancor più evidenti ove si pensi che occorrerà un maggior tempo di integrazione per saturare i pixel esposti alla luce di maggior intensità incidente.

# Full Well Capacity

Una volta raggiunta la saturazione, i fotoelettroni in eccesso si spargeranno sui pixel adiacenti (preferibilmente lungo le colonne) dando luogo al noto fenomeno del *blooming*.

Molti CCD sono oggi dotati di *anti-blooming*, un dispositivo in grado di effettuare il drenaggio automatico delle cariche in eccesso, impedendo a quest'ultime di raggiungere i pixel adiacenti.



# Il guadagno

L'elettronica del CCD restituisce un numero **DN** (= *data number*), si definisce guadagno il rapporto

$$\text{guadagno} = \frac{\text{numero di elettroni prodotti}}{\text{DN}}$$

Il DN si misura in ADU (*Analog-to-Digital Unit*)

Il CCD che utilizzeremo ha  $2.2e^- / \text{ADU}$

# Linearità

Il CCD è un rivelatore lineare (la linearità è di solito migliore dello 0.01%).

In pratica ciò significa che il numero di elettroni generati in un pixel è direttamente proporzionale alla quantità di luce incidente.

Ne derivano numerosi vantaggi rispetto alla fotografia tradizionale:

- La soglia minima di rivelazione è data dal rumore medio complessivo presente nell'immagine. Se il rumore è molto basso il CCD sarà in grado di rivelare dettagli estremamente deboli.
- Il CCD manterrà la stessa sensibilità ed efficienza quantica indipendentemente dalla durata dell'esposizione.
- La linearità consente di effettuare misure dirette di luminosità degli oggetti (fotometria di precisione).

# Dark current

I sensori CCD hanno la proprietà di produrre e accumulare spontaneamente elettroni, anche quando la loro superficie è schermata dalla luce incidente.

A riposo il sensore continua a produrre elettroni fino a saturare completamente i livelli di capacità dei pixel. È pertanto necessario azzerare le cariche prodotte spontaneamente dal sensore prima di iniziare una nuova esposizione.

La produzione spontanea di elettroni continua però anche durante l'esposizione. Ciò significa che nei pixel si accumuleranno sia fotoelettroni prodotti dalla luce incidente sia elettroni prodottisi spontaneamente.

È impossibile distinguere gli uni dagli altri.

Gli elettroni prodotti spontaneamente hanno caratteristiche tali da permettere di eliminare quasi interamente il loro effetto negativo.

# Dark current

Il fenomeno della Dark Current è perfettamente riproducibile.

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), variabile a seconda del tipo di sensore impiegato.

La quantità di cariche elettriche generate è quasi proporzionale al tempo di integrazione.

La Dark Current prodotta dipende fortemente dalla temperatura del sensore: la sua intensità diminuisce in genere di un fattore 2 per ogni 6°C in meno di temperatura del sensore.

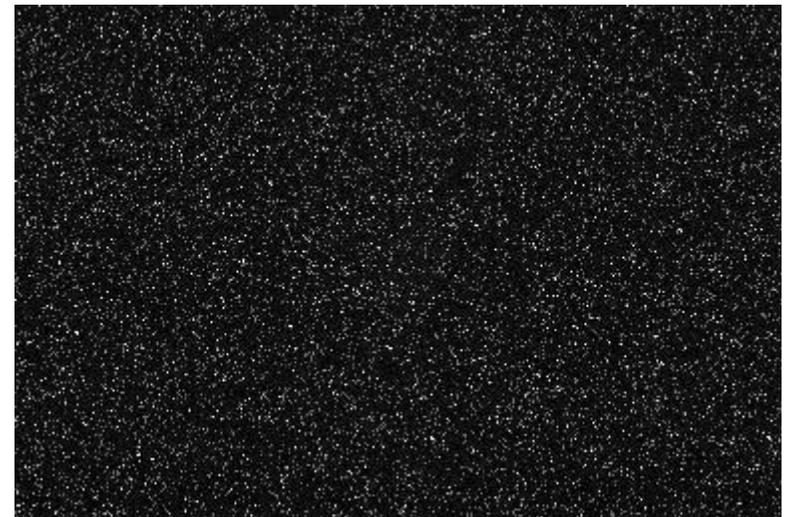
Per questa ragione essa viene anche chiamata Corrente Termica (*Thermal Current*) e le cariche prodotte si chiamano Cariche Termiche (*Thermal Charges*).

# Dark current

Possiamo quindi eliminare questo problema se operiamo in un modo appropriato.

Ecco i passi:

- Abbassare la temperatura di esercizio del sensore (i CCD sono normalmente raffreddati termoelettricamente).
- Fare un'esposizione (*Dark Frame*), con il CCD schermato dalla luce, di durata uguale a quella usata per la normale ripresa (Light Frame), avendo cura che la temperatura del sensore sia la stessa.
- Sottrarre il Dark Frame dal Light Frame.



# Rumore termico

La procedura non è completa e non è sufficiente per ottenere un'immagine astronomica esente dal Segnale Termico accumulatosi nei pixel durante l'integrazione.

Abbiamo eliminato il Segnale Termico ma non gli effetti del Rumore Termico associato alla dispersione probabilistica delle cariche termiche, un valore pari alla radice quadrata del numero degli elettroni termici prodotti.

Il Rumore Termico non può essere eliminato.

Il suo effetto principale è quello di rendere impossibile la rivelazione di dettagli astronomici deboli la cui intensità, espressa in numero di fotoelettroni, risulti inferiore al valore del Rumore Termico presente nell'immagine.

Oggi alcuni ccd hanno una produzione di cariche termiche piuttosto bassa anche a temperatura ambiente. Questi CCD, raffreddati a  $-30^{\circ}\text{C}$ , producono meno di un elettrone al secondo, poco più di 200 elettroni in una posa di 5 minuti

Ciò dà luogo a un Rumore Termico di meno di 15 elettroni, più o meno pari al Rumore di Lettura (***Readout Noise***) dovuto all'elettronica della camera CCD, valore piuttosto basso se confrontato con quello esibito da alcuni CCD professionali tuttora in uso.

# Rumore termico

La procedura non è completa e non è sufficiente per ottenere un'immagine astronomica esente dal Segnale Termico accumulatosi nei pixel durante l'integrazione.

Abbiamo eliminato il Segnale Termico ma non gli effetti del Rumore Termico associato alla dispersione probabilistica delle cariche termiche, un valore pari alla radice quadrata del numero degli elettroni termici prodotti.

Il Rumore Termico non può essere eliminato.

Il suo effetto principale è quello di rendere impossibile la rivelazione di dettagli astronomici deboli la cui intensità, espressa in numero di fotoelettroni, risulti inferiore al valore del Rumore Termico presente nell'immagine.

Oggi alcuni ccd hanno una produzione di cariche termiche piuttosto bassa anche a temperatura ambiente. Questi CCD, raffreddati a  $-30^{\circ}\text{C}$ , producono meno di un elettrone al secondo, poco più di 200 elettroni in una posa di 5 minuti

Ciò dà luogo a un Rumore Termico di meno di 15 elettroni, più o meno pari al Rumore di Lettura (*Readout Noise*) dovuto all'elettronica della camera CCD, valore piuttosto basso se confrontato con quello esibito da alcuni CCD professionali tuttora in uso.

# Bias Frame

Se leggiamo il CCD senza fare alcuna integrazione (in altre parole si pensi ad una esposizione con zero secondi di posa), ci sarà un segnale chiamato il segnale di *bias* (o offset = scostamento).

Si può pensare che il bias sia zero, ma ciò non è. Si pensi ad esso come a uno scostamento elettrico o ad un fondo.

Questo segnale deve essere misurato (dipende in un certo modo da cose tipo la temperatura del CCD) e sottratto dalle immagini che registriamo. Poiché c'è rumore di lettura per QUALSIASI lettura del CCD, perfino i bias frame hanno un rumore di lettura associato con essi.

Per ridurre al minimo il rumore quando sottraiamo il bias, dobbiamo riprendere molti bias frame e quindi combinarli tra loro per abbattere il rumore.

# Flat Field

In un CCD non esistono due pixel assolutamente identici.

Applicare un *flat field* ad una immagine significa riscalare la capacità di raccogliere luce di ogni pixel.

Ottenere un flat field significa puntare il telescopio su una sorgente di luce uniforme e ottenere un'immagine al 50% - 70% della possibilità del CCD.

Poiché il flusso di fotoni è uniforme, la disparità di valori letti sarà dovuta alla non uniformità del guadagno di ogni pixel.

