

Dr. Mauro Focardi

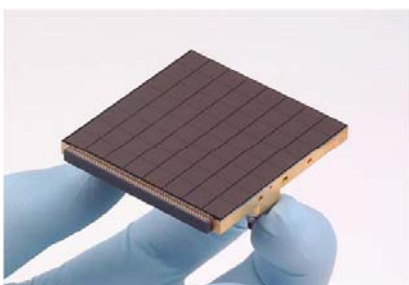
Dip. Astronomia e Scienza dello Spazio

Università di Firenze

E-mail: mauro@arcetri.astro.it

Tel: 055 2307 762

web: <http://www.arcetri.astro.it/~mauro/>



1.4 Gpixel CCD

Il rumore nei rivelatori CCD e nell'elettronica di una camera CCD

<http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/>

Corso di TECNOLOGIE SPAZIALI

Polo Scientifico di Sesto F.no, 14 febbraio 2008

Il CCD come matrice di pixels fotosensibili

CCD Photodiode Array Integrated Circuit

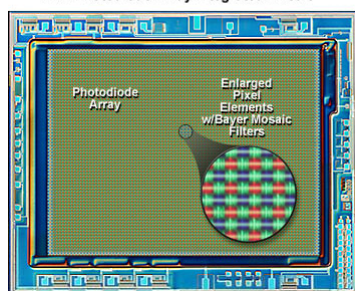
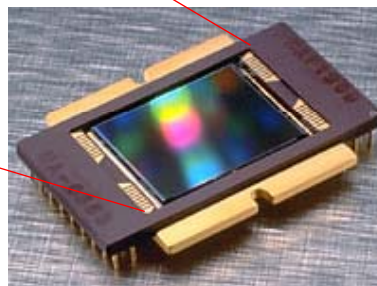


Figure 2

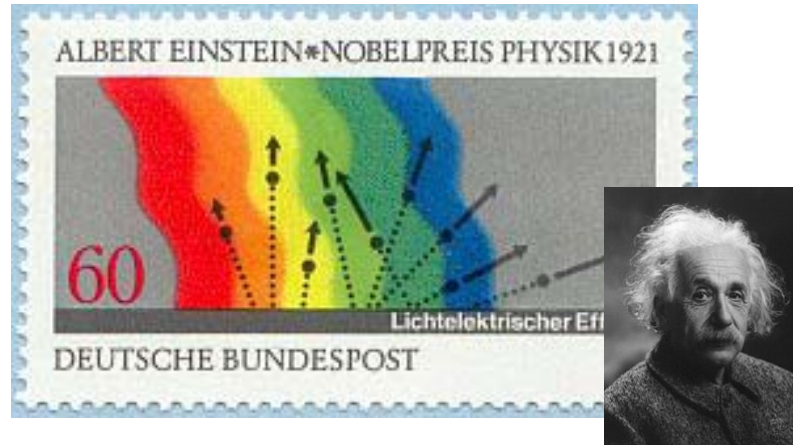
Inventati all'inizio degli anni '70 come dispositivi di memoria a stato solido, poi trasferiti al settore dell'immagine.



CCDs: charge coupled devices

Pixel: picture element

L'effetto fotoelettrico...



By treating light as **packets** with energy given by $E_\gamma = h\nu$, Einstein was able to explain the **photoelectric effect**.

La lettura del segnale

Filmato lettura



Full-Frame CCD Architecture

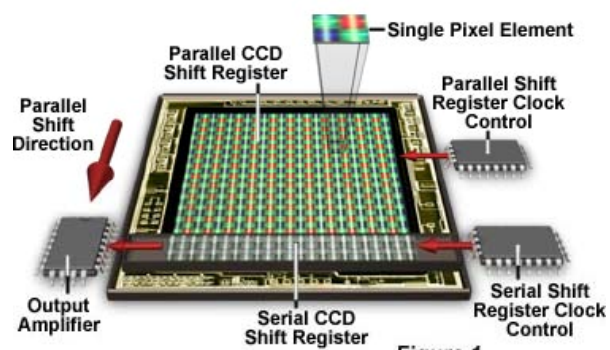
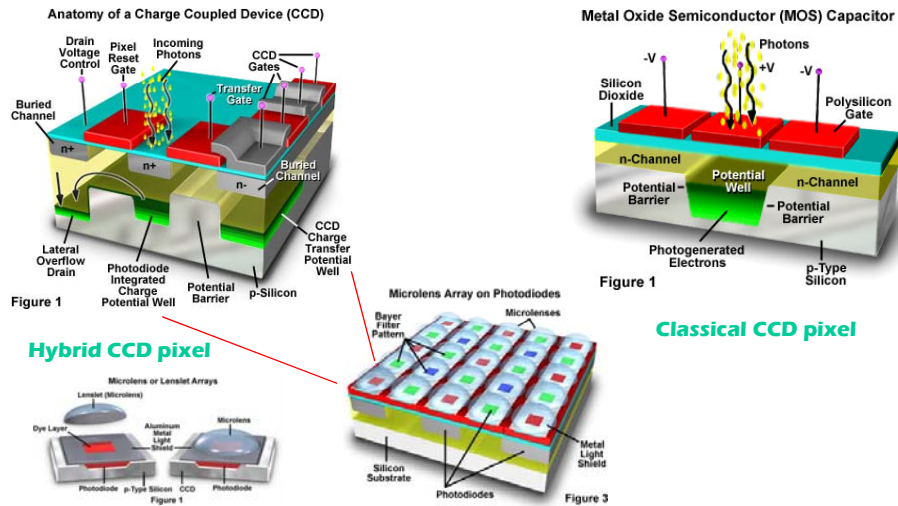
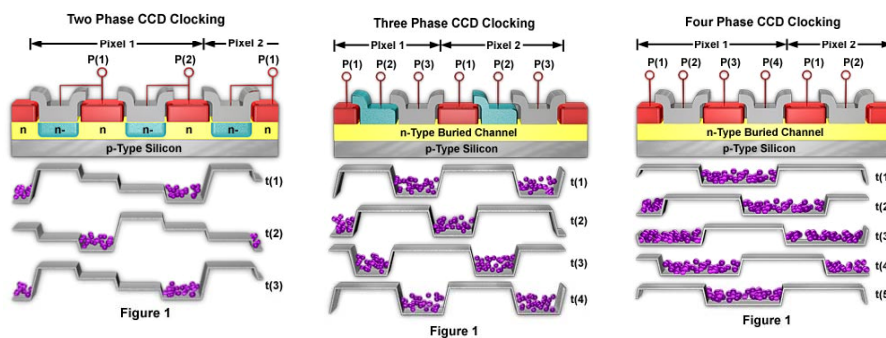


Figure 1

Tipologie di pixel

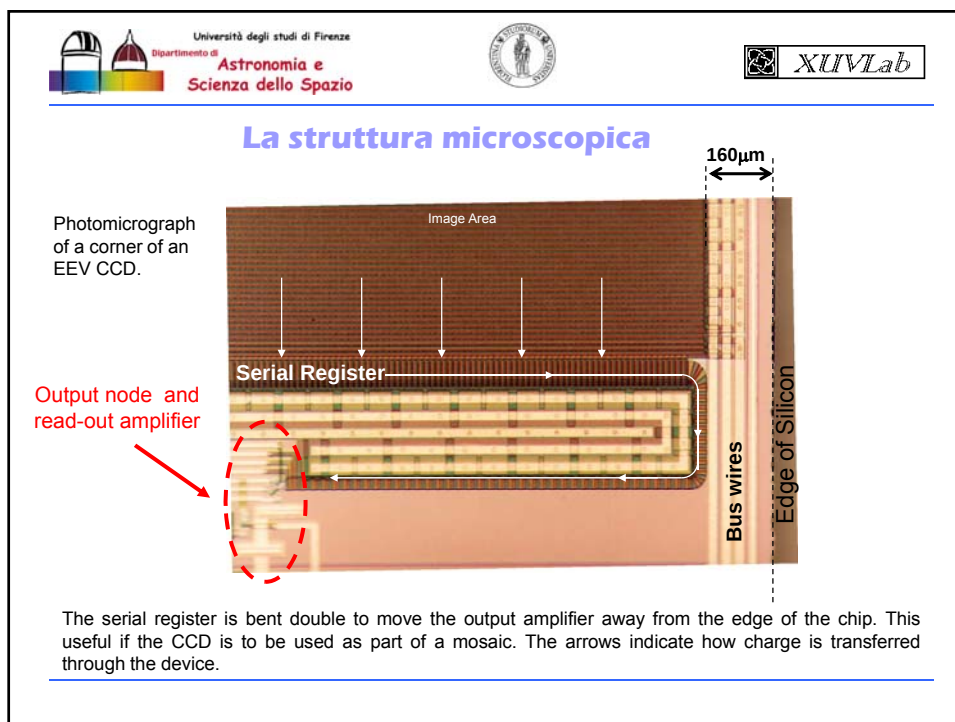
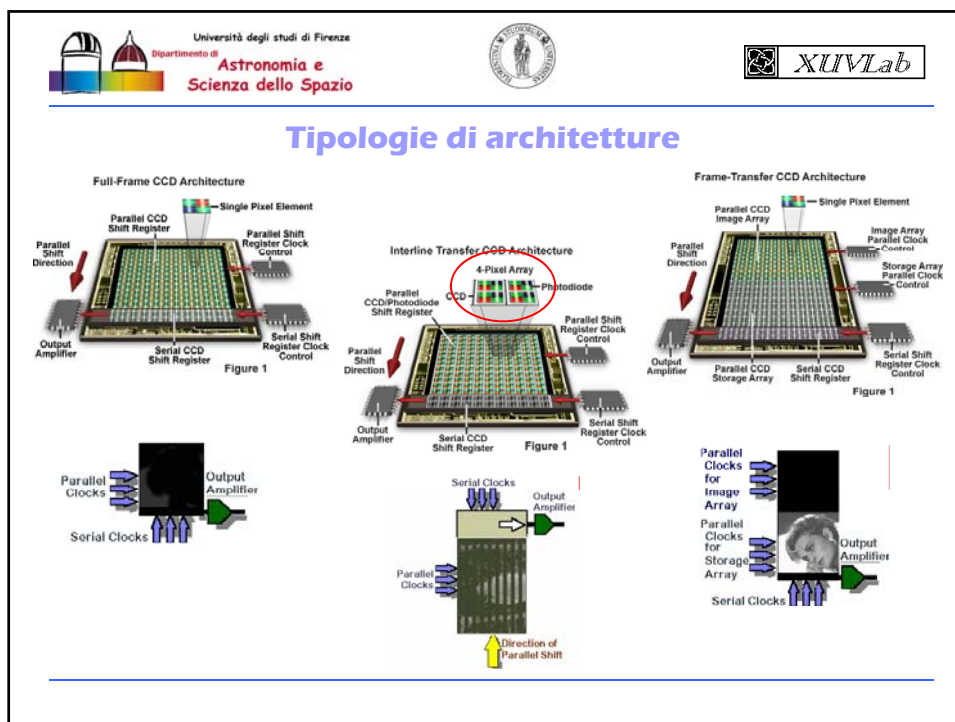


Pixel clocking - temporizzazioni



Filmato fasi





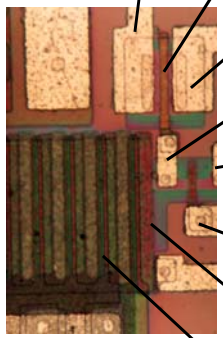


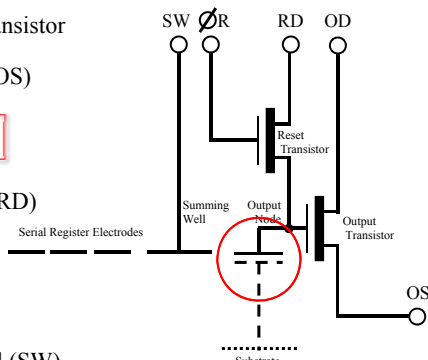
Università degli studi di Firenze
Dipartimento di
**Astronomia e
Scienza dello Spazio**





Il nodo di lettura della carica fotogenerata





$$V_{out} = V_{segnale} - V_{ref} = en_e \frac{G}{C_0}$$

$$S_v = \frac{eG}{C_0} = \frac{V_{out}}{n_e} \quad [\mu V/e^-]$$



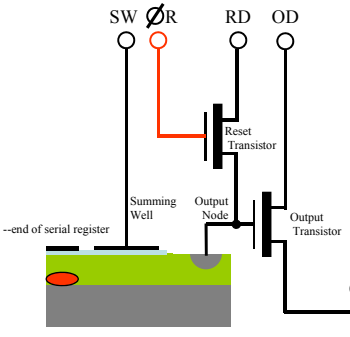
Università degli studi di Firenze
Dipartimento di
**Astronomia e
Scienza dello Spazio**

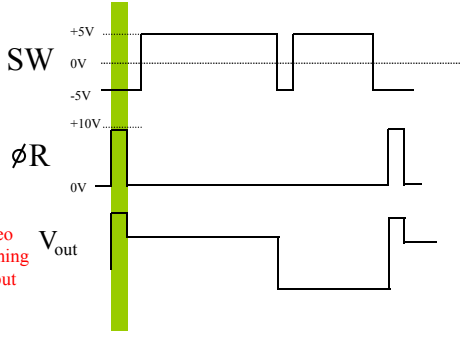




The on-chip amplifier **measures** each **charge packet** as it pops out the end of the serial register.

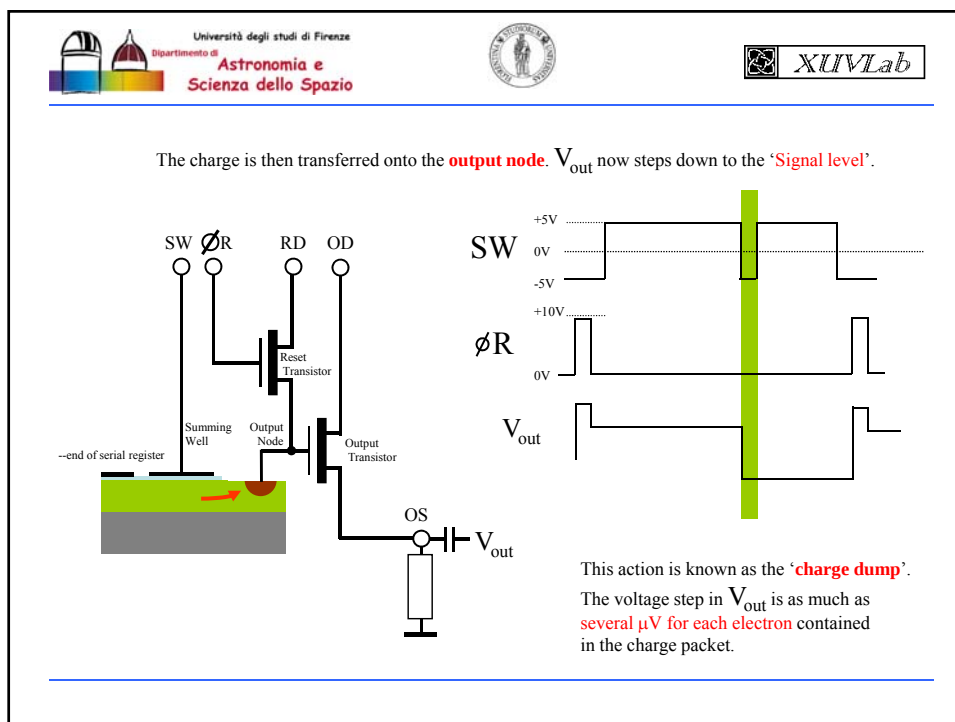
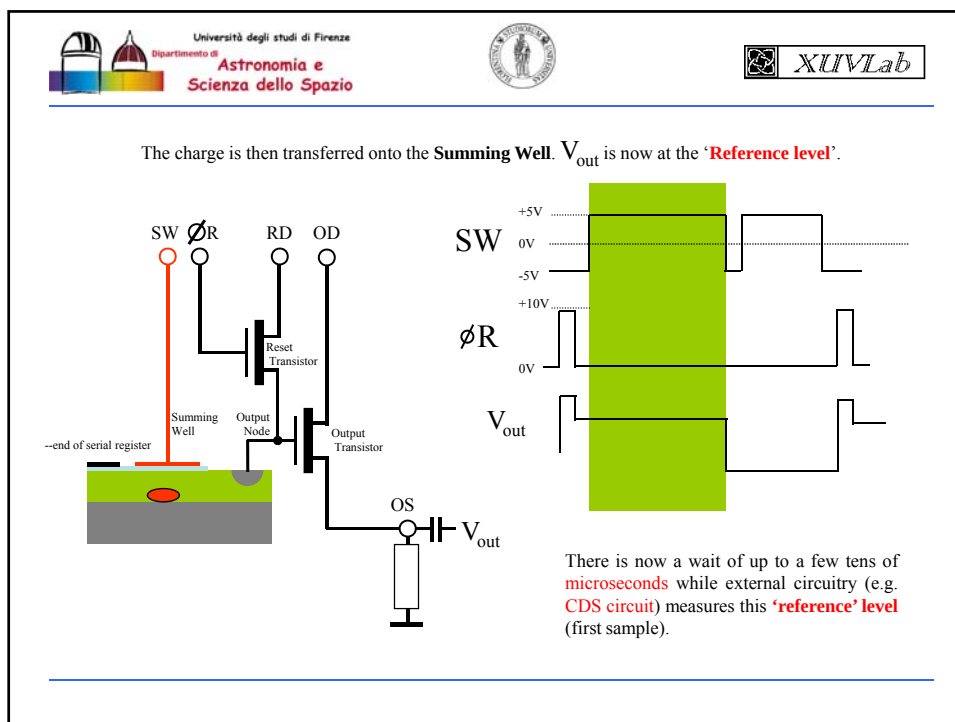
RD and OD are held at constant voltages

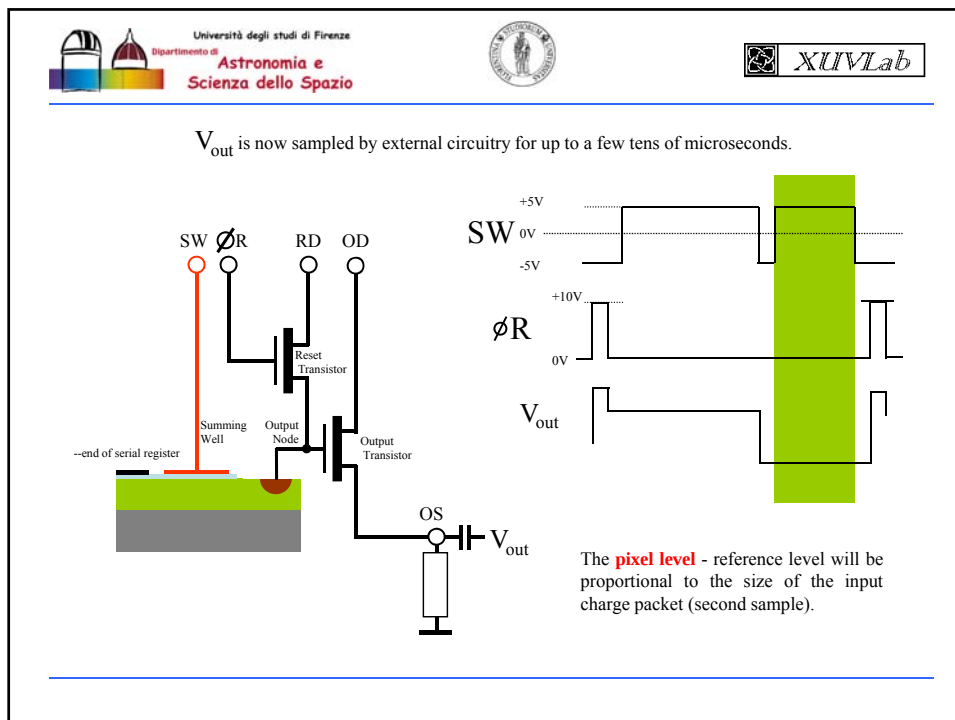




(The graphs above show the signal waveforms)

The measurement process begins with a **reset** of the 'reset node'. This removes the charge remaining from the previous pixel. The reset node is in fact a tiny capacitance (< 0.1pF).





Università degli studi di Firenze
Dipartimento di Astronomia e Scienza dello Spazio

XUVLab

Parametri importanti di un CCD

- Efficienza quantica (Quantum Efficiency - QE)
- Efficienza di raccolta della carica (Charge Collection Efficiency - CCE)
- Efficienza di trasferimento della carica (Charge Transfer Efficiency - CTE)
- Linearità nella risposta (Linearity of response)
- Non uniformità della risposta (Photo Response Non Uniformity - PRNU)
- Intervallo dinamico (Dynamic Range - DR)

Efficienza quantica (QE)

L'**efficienza quantica QE** è definita come il rapporto tra il numero degli **elettroni raccolti** ed il numero di **fotoni incidenti** e si calcola come:

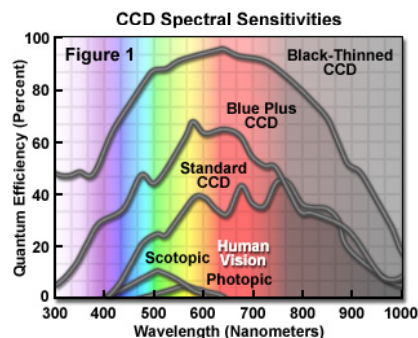
$$QE = QE_i \cdot \eta_E$$

Dove **QE_i** (**efficienza quantica d'interazione**) è il rapporto fra **fotoni interagenti** e **fotoni incidenti** e **η_E** (**quantum yield**) il numero di **elettroni raccolti** per **fotone interagente**:

$$\eta_E = \begin{cases} \leq 1 & \text{per } \lambda > 320 \text{ nm} \\ > 1 & \text{per } \lambda < 320 \text{ nm} \end{cases}$$

I fattori principali che limitano il valore di **QE** sono:

- perdita di fotoni per **riflessione** da parte della superficie di silicio;
- **assorbimento** dei fotoni negli elettrodi o nello strato isolante nel caso di illuminamento frontale;
- perdita di elettroni fotogenerati per **ricombinazione** elettrone-lacuna;
- **intrappolamento** da parte di difetti reticolari o degli strati superficiali.



Efficienza di raccolta della carica (CCE)

Si definisce **efficienza di raccolta della carica CCE** la **frazione degli elettroni raccolti** nel pacchetto di carica sotto il **pixel** più prossimo al punto di **interazione** a seguito dell'assorbimento del fotone:

$$CCE = \eta_e / \eta_i$$

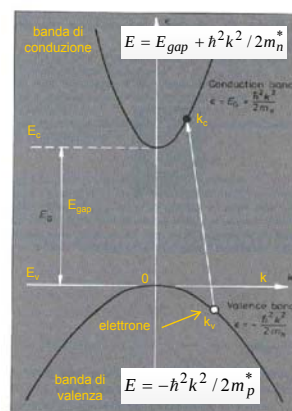
dove **η_i** è il **quantum yield teorico**, calcolato in base alla relazione:

$$\eta_i = E_{\text{fotone}} / 3.65 \text{ eV} ; (E_{\text{gap(Si)}} = 1.12 \text{ eV})$$

Per un **CCD ideale CCE = 1**, ma nel caso reale il suo valore è inferiore a causa della **dispersione di carica** nel substrato e della **perdita di carica**.

Si ha **dispersione di carica** quando gli elettroni vengono raccolti da più **pixel** adiacenti; questo fenomeno avviene perché la carica può essere generata lontano o ai margini della zona di svuotamento.

Si ha **perdita di carica** quando gli elettroni vengono intrappolati da difetti reticolari o si ricombinano con le lacune presenti nel substrato.

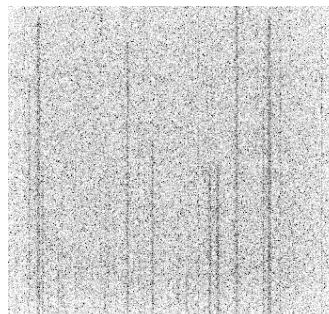


Efficienza di trasferimento della carica (CTE)

L'**efficienza di trasferimento di carica CTE** è un parametro che indica la **capacità di trasferimento del pacchetto di carica da un pixel ad un altro del CCD**; se **k** è il **numero dei trasferimenti** subiti dai pacchetti di carica, la **frazione di elettroni persi** nel trasferimento totale è data da:

$$\Delta n/n = [1-(CTE)^k]$$

Esempio di pessima CTE.



Valori tipici di **CTE** sono intorno a 0.99999, valore che diventa importante per **sensori di grande area**.

Le irregolarità geometriche negli elettrodi, ma soprattutto la **forma dei clocks** (analogici) e la **velocità nelle transizioni di livello**, sono i fattori che maggiormente limitano la **CTE**. Il fenomeno del **riflusso di carica** nel senso inverso al normale senso di scorrimento avviene, ad esempio, quando la transizione da un livello di tensione alto (10 V) ad un livello basso (0 V) è **troppo rapida**.

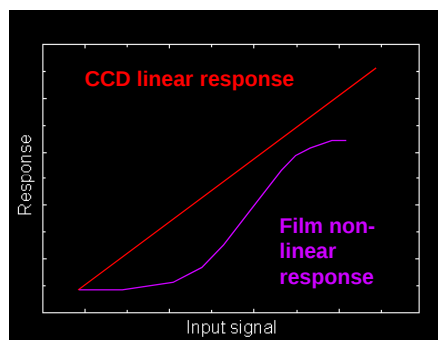
La CTE è un parametro importante perché, oltre a limitare le prestazioni ideali di un CCD, determina le **massime dimensioni utili** del sensore.

Linearità della risposta

La **linearità** è la capacità di un rivelatore di fornire sempre un segnale di risposta **direttamente proporzionale all'intensità della radiazione incidente**. Per misurarla si espone il sensore ad **illuminamenti uniformi di intensità crescente** e si misura la deviazione della risposta dalla linearità. Ad esempio, si supponga di avere una **sorgente di luce costante e stabile**. Variando il **tempo di esposizione** si ottengono diversi livelli di segnale. Si può allora riportare in grafico il valore percentuale della deviazione **L** dalla linearità in funzione del tempo di esposizione:

$$L(\%) = 100 \left[1 - \frac{S T_m}{S_m T} \right]$$

dove **S** è il segnale misurato nel tempo **T** e **S_m** è il segnale misurato in un tempo **T_m**, compreso nell'intervallo dei tempi considerato. Un sensore con una buona linearità ha tipicamente una deviazione massima da **L(%) = 0** pari all'**1%**.



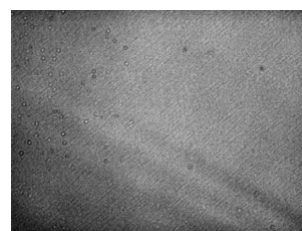
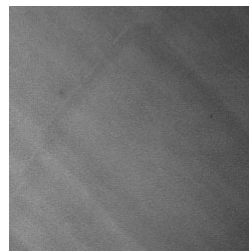
Non uniformità della foto-risposta (PRNU)

La **non uniformità nella foto-risposta** fra pixel e pixel rappresenta la **deviazione della risposta dei singoli pixels da quella teorica, sotto le medesime condizioni di illuminazione**. Nel caso ideale il comportamento dei pixels dovrebbe essere uniforme, ma a causa di variazioni spaziali nel processo di fabbricazione e difetti cosmetici ciò non avviene.

Ciascun pixel è quindi caratterizzato da una **diversa sensibilità al segnale luminoso**, tipicamente dell'ordine dell'1-2% del segnale medio.

La non uniformità può essere ridotta tramite la **calibrazione** dell'immagine grezza con una immagine di **flat field**, utilizzata anche per eliminare gli effetti di vignettatura dell'ottica, del deposito di polvere sulla finestra del sensore e di altre imperfezioni nelle ottiche del sistema di imaging.

Può essere classificata quindi all'interno del cosiddetto **FPN (Fixed Pattern Noise)**.



Intervallo dinamico (DR)

L'**intervallo (o range) dinamico** è definito come il logaritmo in base 10 del **rapporto fra il massimo e il minimo segnale rivelabile** dal sensore. Per un CCD questo coincide con il logaritmo del rapporto della **full-well capacity** del pixel e del **readout noise** in decibels.

Tale rapporto indica quindi il numero di **livelli di grigio** effettivi nella rappresentazione digitale del segnale a valle del convertitore analogico-digitale (ADC).

$$DR(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{full well capacity}}{\text{read noise}} \right)$$

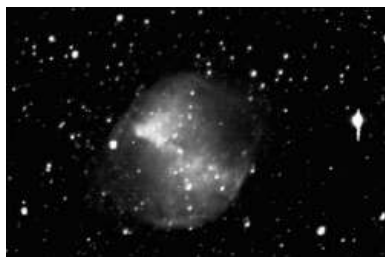


Immagine con dinamica a 16 bit

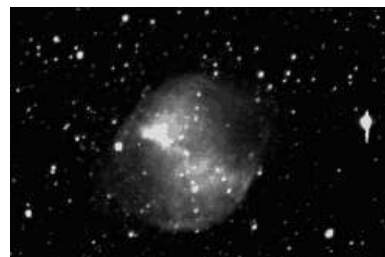


Immagine con dinamica a 8 bit

Sorgenti di rumore nei rivelatori CCD

Rumore nell'array con dipendenza temporale e/o spaziale

- Rumore di bias (bias noise)
- Corrente di buio (dark current) e rumore termico (thermal noise)
- Fixed pattern noise (FPN)
- Luminescenza indotta dall'amplificatore di output

Rumore nello stadio di uscita del CCD

- Rumore shot (*shot current noise*)
- Flicker noise (*pink noise*)
- Rumore termico (*Johnson noise*)
- Rumore di reset (*Johnson noise* nella resistenza del canale del FET di reset)

Rumore nel sistema di controllo e conversione A/D

- Rumore nell'elettronica di trattamento del segnale video e di pilotaggio del sensore
- Rumore di quantizzazione

Rumore nell'array – bias noise

Per come sono costruiti, i CCDs, possiedono intrinsecamente un **rumore elettronico di polarizzazione** che origina **deboli strutture di fondo nell'immagine**. Anche l'amplificatore di uscita del CCD introduce un **livello di bias** alla tensione di output corrispondente tipicamente a **qualche centinaia di elettroni**.

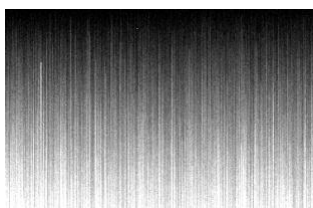
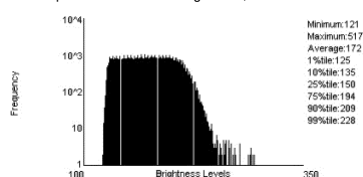
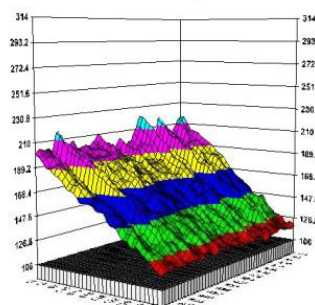


Immagine di bias ottenuta con il minimo tempo di esposizione e relativo istogramma; $T = -30^\circ\text{C}$.



Plot 3D dell'immagine di bias



Rappresentazione 3D delle strutture di rumore di fondo nell'immagine, corrispondenti alle colonne dell'array CCD.

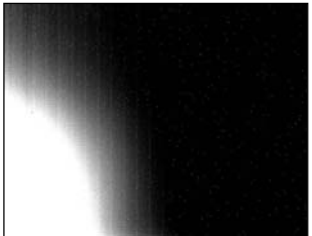


Università degli studi di Firenze
Dipartimento di
**Astronomia e
Scienza dello Spazio**



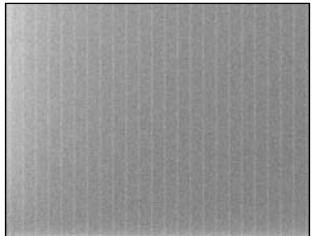


Correzione del bias



Amplifier glow

-



Struttura di readout dell'array
(BIAS frame)

=





Università degli studi di Firenze
Dipartimento di
**Astronomia e
Scienza dello Spazio**





Rumore nell'array – corrente di buio (dark current)

Anche in **assenza di illuminazione**, ad una certa temperatura, l'**energia termica** del dispositivo può essere sufficiente a far transire uno o più elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione; questo fenomeno è detto **corrente di buio (dark current)** e l'equazione che lo descrive è:

$$D(T) = CT^{3/2} e^{-E_g/2KT}$$

dove $D(T)$ è la **corrente media generata** ed è espressa in [$e^- \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$], T è la temperatura in *Kelvin*, K è la costante di *Boltzmann* e C è una costante di proporzionalità data da:

$$C = \frac{N_{DC}}{qT_{rm}^{3/2} e^{-E_g/(2kT_{rm})}}$$

N_{DC} è la corrente di buio a temperatura ambiente (nA/cm^2), q è la carica dell'elettrone ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) e T_{rm} è la temperatura ambiente.

Correzione della corrente di buio – dark frame

Il valore di $D(T)$ è tipicamente dell'ordine di $20 + 100 \text{ pA/cm}^2$ ad una temperatura $T = 293 \text{ K}$. A questa corrente è associato un rumore **shot**; per questo motivo, nei casi in cui il segnale da rilevare sia molto debole, come ad esempio in astronomia, un **sistema di raffreddamento del sensore** è fondamentale, infatti **minimizzando la corrente di buio**, non solo **si aumenta la dinamica del segnale** misurabile ma si **minimizza anche il rumore shot** ad essa associato.



Dark Frame



Cella Peltier a 3 stadi

Rumore nell'array – Fixed pattern noise (FPN)

Il **rumore FPN** è dovuto alla **variazione spaziale** dei parametri geometrici dei *pixel* (dimensioni, sovrapposizioni con altri *pixel*, difetti nei contatti elettrici, ecc.) causata da imperfezioni del reticolo cristallino o da difetti nella fabbricazione del sensore; il rumore prodotto da questa non uniformità dei *pixel* è **proporzionale al segnale**.

È possibile eliminare il FPN mediante un **processo di calibrazione** detto **flat field** per correggere le non uniformità. Si espone il sensore ad un'**illuminazione uniforme** e l'immagine ottenuta viene utilizzata per **normalizzare** tutte le successive.

Il valore della carica ottenuto sull'*i*-esimo *pixel* si calcola come:

$$Q_i = \mu_c \frac{b_i}{a_i}$$

dove μ_c e a_i sono rispettivamente il valore medio e il valore dell'*i*-esimo *pixel* dell'immagine di *flat field*, mentre b_i è il valore letto dal *pixel* dell'immagine "vera". L'immagine risultante contiene soltanto la componente stocastica del rumore presente sia nell'immagine di calibrazione che in quella "vera"; il rumore risultante σ_{Q_i} è dato da:

$$\sigma_{Q_i} = \left[\sigma_{b_i}^2 + \left(\frac{b_i}{a_i} \sigma_{a_i} \right)^2 + \sigma_R^2 \right]^{1/2}$$

dove σ_{a_i} e σ_{b_i} sono le incertezze sul *pixel* calibrato e su quello originale, σ_R è il rumore dovuto allo stadio di uscita del CCD e dai successivi stadi di amplificazione.



Università degli studi di Firenze
Dipartimento di
**Astronomia e
Scienza dello Spazio**

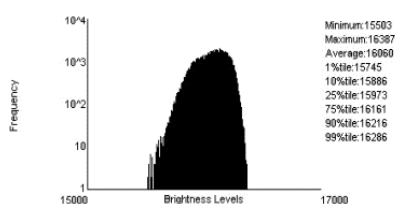


XUVLab

Correzione del FPN – flat field frame



Immagine di flat-field e relativo istogramma



La **diversa risposta da pixel a pixel (PRNU)** e la non-uniformità di campo introdotta dal sistema ottico può essere corretta da una immagine di flat-field.

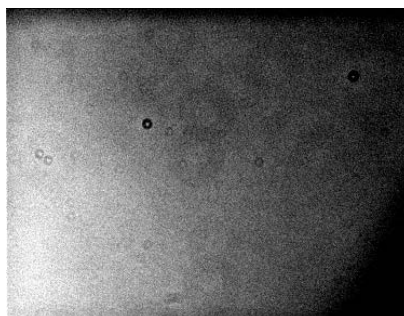


Immagine di flat-field

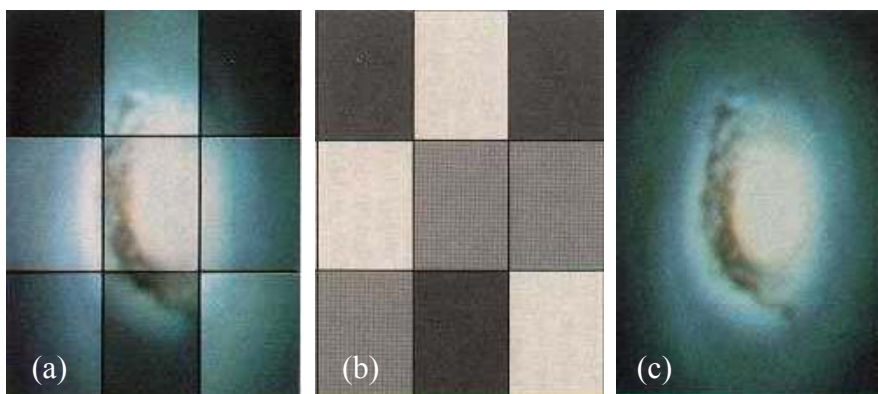


Università degli studi di Firenze
Dipartimento di
**Astronomia e
Scienza dello Spazio**



XUVLab

Correzione del FPN – flat field frame



Calibrazione con immagine di flat-field: si divide a) per b) in modo da ottenere c)

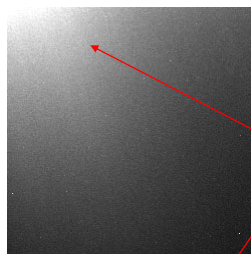
Fotoluminescenza dell'amplificatore

CCD's operate using the property of silicon to convert light to electrons, but this also operates in reverse, **silicon circuits can emit light when operating**.

At the corner of the CCD array is a high gain amplifier that converts electrons to a voltage that can be measured by the A/D converter. **During the exposure this amplifier can emit enough light that it can be seen as a glow in the corner of the frame in long exposures.**

The glow is typically in the upper left, but light sources can appear anywhere along the periphery depending on the location of the amplifier and any other structures of the CCD.

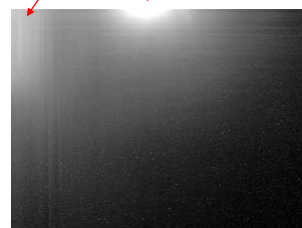
The usual solution to this glow is to power down this amplifier during the exposure, this feature must be designed into the camera and is usually not under user control.



Amplifier glow in the corner of the array showing in a dark frame taken with an E2V CCD87 Back.

Amplifier glow

Diode protection glow



Amplifier and protection diode glow in the corner and along the top edge of the array showing in a long dark frame taken with a Sony ICX205.

Calibrazione di una immagine

Calibrare un'immagine significa **rimuovere tutti i difetti** intrinseci caratteristici di un frame grezzo (raw-image) quali hot pixels, biases, dark current, non-uniformità nel sistema ottico, ombreggiature da polvere ecc...

Si fa uso quindi dei cosiddetti **"MASTER CALIBRATION FRAMES"** (Bias, Dark, Flat Field frames) ottenuti da un set di immagini acquisite tramite la camera CCD.

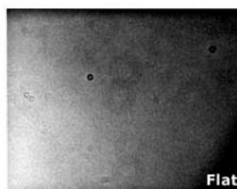
In tal modo l'immagine calibrata $CCD[x,y]$, si ottiene da quella grezza $CCD_{raw}[x,y]$ attraverso la seguente sequenza di operazioni:



Raw



Dark



Flat



Calibrated

$$\text{Calibrated} = (\text{Raw} - \text{Bias} - \text{Thermal}) / \text{Flat} = (\text{Raw} - \text{Dark}) / \text{Flat}$$

$$CCD[x,y] = (CCD_{raw}[x,y] - \text{Dark}[x,y] * t_{exp} - \text{Bias}[x,y]) / \text{FlatField}[x,y]$$

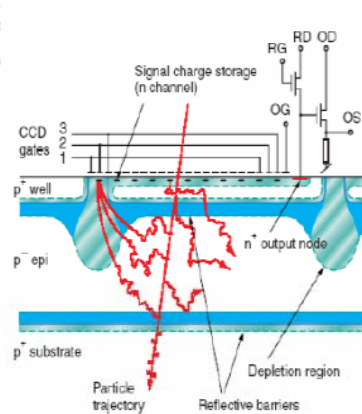
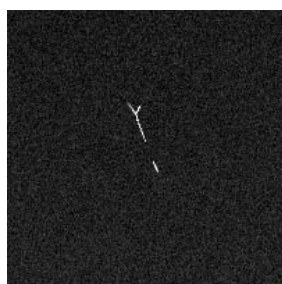
Calibrazione di una immagine – altri difetti

Cosmic rays and high-energy particles

I sensori CCD sono buoni rivelatori di **raggi cosmici**; spesso ne troviamo traccia nelle immagini a lunga esposizione.

Per correggere le immagini affette dalla presenza di raggi cosmici si devono effettuare almeno tre riprese dell'oggetto desiderato e combinarle con un **filtro mediano**.

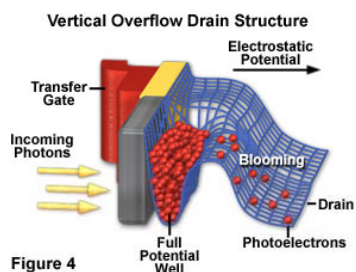
Particle hit on a Sony ICX285 with a secondary event or decay, the frame is dark subtracted.



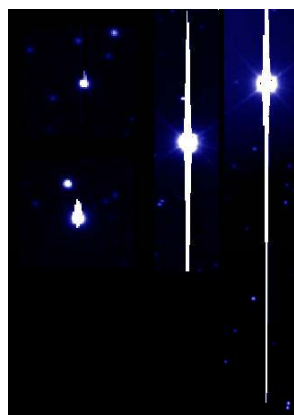
Calibrazione di una immagine – altri difetti

I pixels saturano quando le corrispondenti buche di potenziale sono colme. Gli elettroni quindi traboccano da pixel a pixel e la risposta diventa **non-lineare**, facendo saturare il segnale in ingresso all'ADC.

Saturazione e blooming

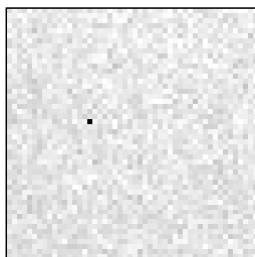


Il risultato di ciò si manifesta nel tipico artefatto di **blooming** ("sanguinamento") lungo una o più colonne dell'array.

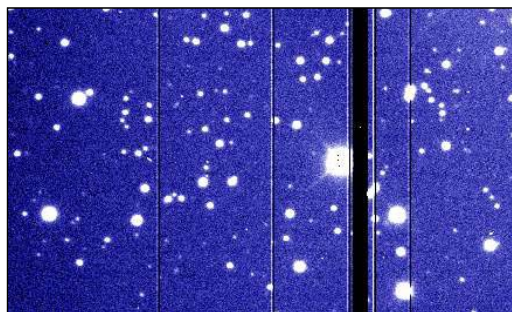


Calibrazione di una immagine – altri difetti

Difetti cosmetici



Bad pixels (hot pixels, cold pixels)



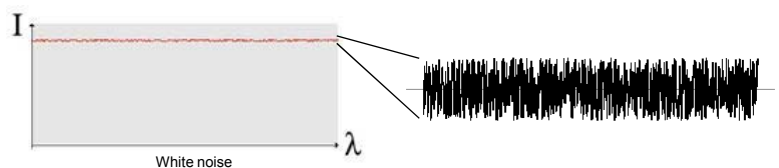
Bad columns

Rumore nello stadio di uscita – shot current noise

Questo rumore è associato alla **natura “granulare” o discreta della corrente**; esso risulta essere sempre presente quando in un ramo di un circuito circola una corrente costituita dal moto dei portatori di carica con tempi di transito completamente casuali, ovvero con una distribuzione uniforme nel tempo. La **finitezza della carica** si manifesta in **fluttuazioni statistiche della corrente**, di ampiezza:

$$I_N = \sqrt{2eI_{dc}B}$$

dove e è la carica dell'elettrone, I_{dc} è la corrente media trasportata dagli elettroni e B la banda passante. Questo è un **rumore bianco**, caratterizzato da una distribuzione in frequenza costante in tutta la banda passante B ed una distribuzione in ampiezza di tipo **gaussiano**.



Rumore nello stadio di uscita – flicker noise

Al rumore complessivo contribuisce anche il **rumore flicker** (o **pink noise**) associato ai **FETs nell'amplificatore di uscita integrato nel CCD**, la cui distribuzione spettrale segue un andamento del tipo $1/f$, di conseguenza questo rumore limita le prestazioni del CCD a **basse frequenze**. L'espressione analitica che riassume i contributi dovuti al **rumore bianco** (*Johnson noise*) e al flicker al rumore totale dello stadio di uscita è:

$$\sigma^2_{CCD}(f) = \sigma^2(f) \left[1 + \left(\frac{f_c}{f} \right)^m \right]$$

dove $\sigma(f)$ è la **densità spettrale del rumore bianco** (in $\text{V/Hz}^{1/2}$) e f_c è detta **frequenza d'angolo**, per la quale la densità di potenza del rumore flicker è uguale a quella del rumore bianco, cioè quando:

$$\sigma^2_{CCD}(f_c) = 2\sigma^2(f_c)$$

La costante m varia nell'intervallo $1 < m < 2$, in funzione del potenziale del *drain* del FET di uscita.

Rumore nello stadio di uscita – Johnson noise

Qualsiasi **resistore** genera una tensione di rumore attraverso i suoi terminali noto come **rumore Johnson**. Questo rumore è prodotto dal **moto casuale dei portatori di carica dovuto alla loro energia termica** ad una certa temperatura T . Il valore quadratico medio della varianza totale di rumore, generata da una resistenza R alla temperatura T , è data da:

$$\sigma_J = \sqrt{4KTRB} \quad [\text{V rms}]$$

dove K è la costante di *Boltzman* ($K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) e T è espressa in *Kelvin*. Come il rumore *shot*, anche questo tipo di rumore è **bianco**.

In un CCD il rumore termico che viene generato dalla **resistenza R_c del canale** che si forma tra il *drain* e il *source* sotto il *gate* del **FET di reset**, è noto come "**rumore KTC**" e determina un **livello casuale di offset** che si aggiunge al livello di segnale in ciascun *pixel*; poiché la banda passante B può essere scritta come:

$$B = \frac{\pi}{2} f_t = \frac{\pi}{2} \frac{1}{2\pi R_c C_0}$$

dove f_t è la frequenza di taglio, sostituendo questa espressione nella precedente, si ottiene:

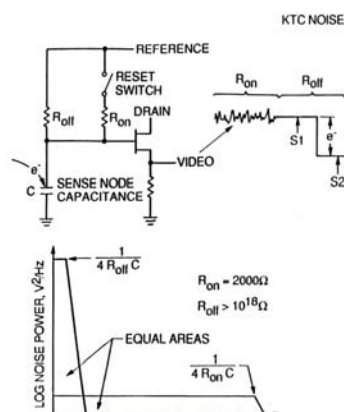
$$\sigma_J = \sqrt{\frac{KT}{C_0}} \quad [\text{V rms}]$$

Rumore nello stadio di uscita – rumore di reset

Può essere utile tradurre quest'ultima espressione in termini di **numero di elettroni rms**, tenendo conto che al nodo di lettura si ha $V/n_e = e/C_0$. Si ottiene così:

$$\sigma_J = \sqrt{\frac{KTC_0}{e^2}} \quad [e^- \text{ rms}]$$

L'ampiezza di questo rumore **non dipende da R_r** . Essa vale circa 2 k Ω quando il *FET* è in conduzione ed è maggiore di $10^{18} \Omega$ quando è in interdizione; nei due casi si ha rispettivamente **banda passante larga e piccola costante di tempo**, **banda passante stretta e grande costante di tempo**. Quest'ultima situazione ha l'effetto di fissare l'ampiezza del rumore all'ultimo valore di tensione prima dell'interdizione del *FET* di reset e tale livello viene mantenuto durante i 0.2-20 μs tipici della lettura del *pixel*. Dunque il **livello del rumore varia da pixel a pixel** ma per ciascuno di essi è **costante** sul riferimento e sul valore del pixel, in tensione o in carica.



Il rumore di reset può essere rimosso tramite un circuito di doppio campionamento correlato (CDS)

Sorgenti di rumore nell'elettronica di trattamento del segnale video di una camera CCD

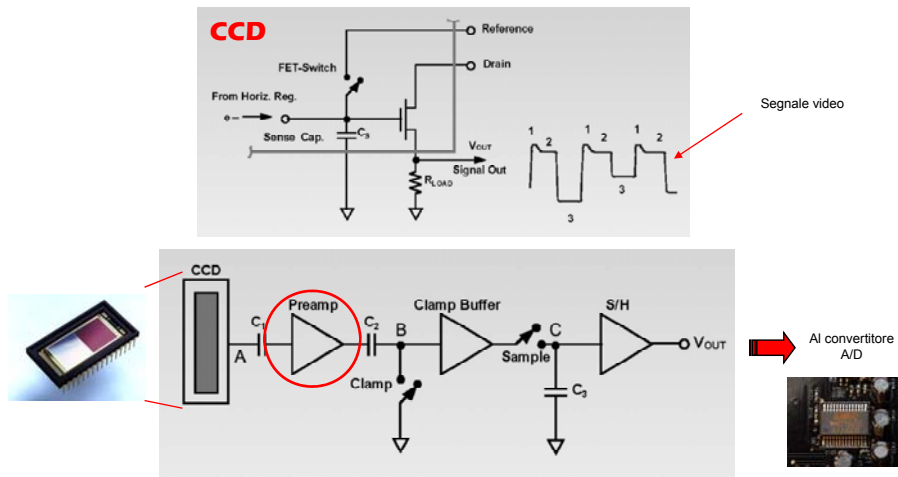
- Rumore nel preamplificatore
- Rumore negli stadi di campionamento del segnale
- Rumore di quantizzazione



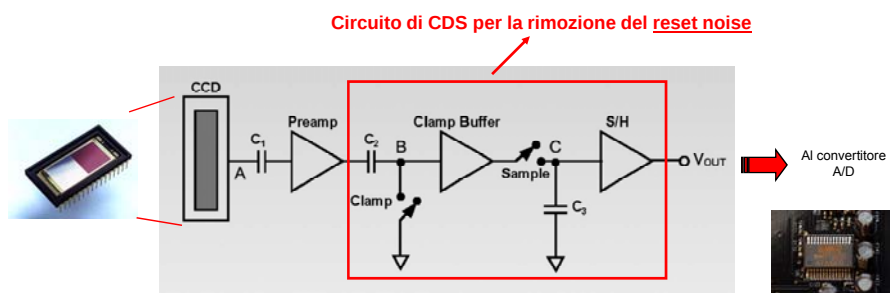
HiVeCam

XUVLab CCD Camera Head

Rumore nel preamplificatore



Rumore negli stadi di campionamento del segnale video



- rumore a carattere prevalentemente **analogico**;
- rumore a carattere **digitale** (segnali di controllo *clamp*, *sample*, *start convert*);
- fenomeni di **cross-talk**.

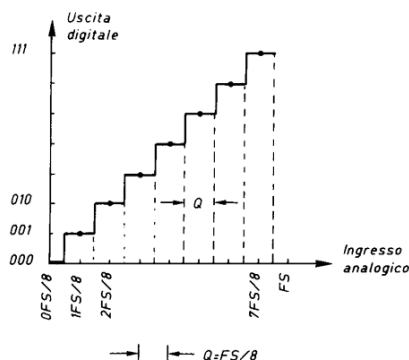
Rumore di quantizzazione dell'ADC

Un'altra componente di rumore del sistema di controllo è quella generata dalla **conversione A/D**. Quando il segnale **analogico** relativo a ciascun *pixel* viene convertito in formato **digitale**, si introduce un'incertezza dovuta al fatto che, al crescere lineare di un segnale analogico, corrisponde una crescita a gradini del segnale digitale il cui passo è:

$$C(N) = \frac{V}{2^N - 1}$$

dove N è il **numero di bit** della conversione. Per variazioni del segnale analogico inferiori a $C(N)$, il segnale digitale resta costante.

A/D
converter



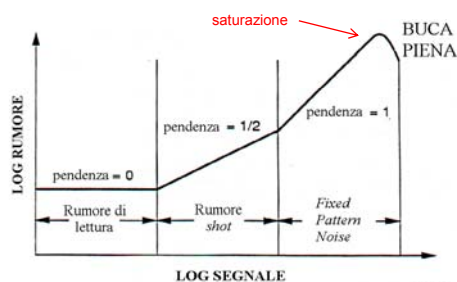
Andamento del rumore in funzione del livello di segnale

In figura è riportato in scala logaritmica l'andamento del rumore di un rivelatore CCD in funzione del livello di segnale medio.

Per **segnali piccoli**, prevale il contributo del **rumore di lettura** (dovuto al CCD e all'elettronica analogica e digitale di controllo), **indipendente dal livello medio di segnale**, per cui si ha un andamento costante della funzione.

A **segnali intermedi** prevale il **rumore shot** che è proporzionale alla radice del segnale stesso, per cui l'andamento del rumore è una retta con pendenza 1/2.

Infine, per **alti valori del segnale**, prossimi alla saturazione o in saturazione, si ha una prevalenza del **fixed pattern noise** e la pendenza diventa unitaria fino alla saturazione.

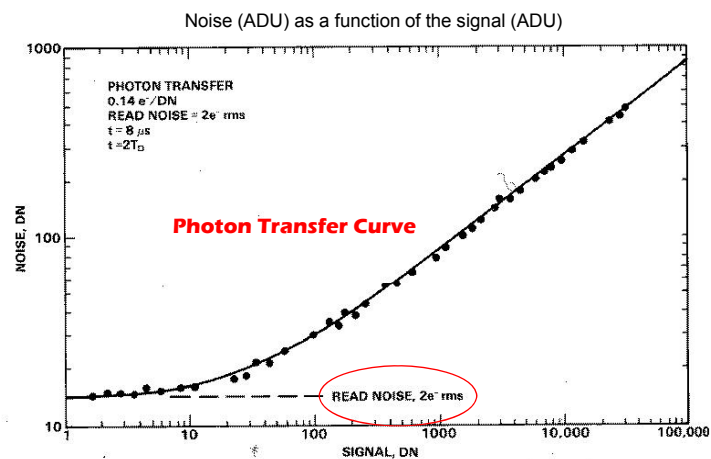


$$\text{Rumore totale} = \left[(\text{Rumore di lettura})^2 + (\text{Rumore shot})^2 + \left(\frac{\text{Fixed Pattern Noise}}{2^{1/2}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\text{Rumore shot} = (\text{segnale})^{1/2}$$

$$\text{Fixed Pattern Noise} = (\text{nonuniformità dei pixel}) (\text{segnale})$$

Andamento del rumore in funzione del livello di segnale



1 s

10 s



M100

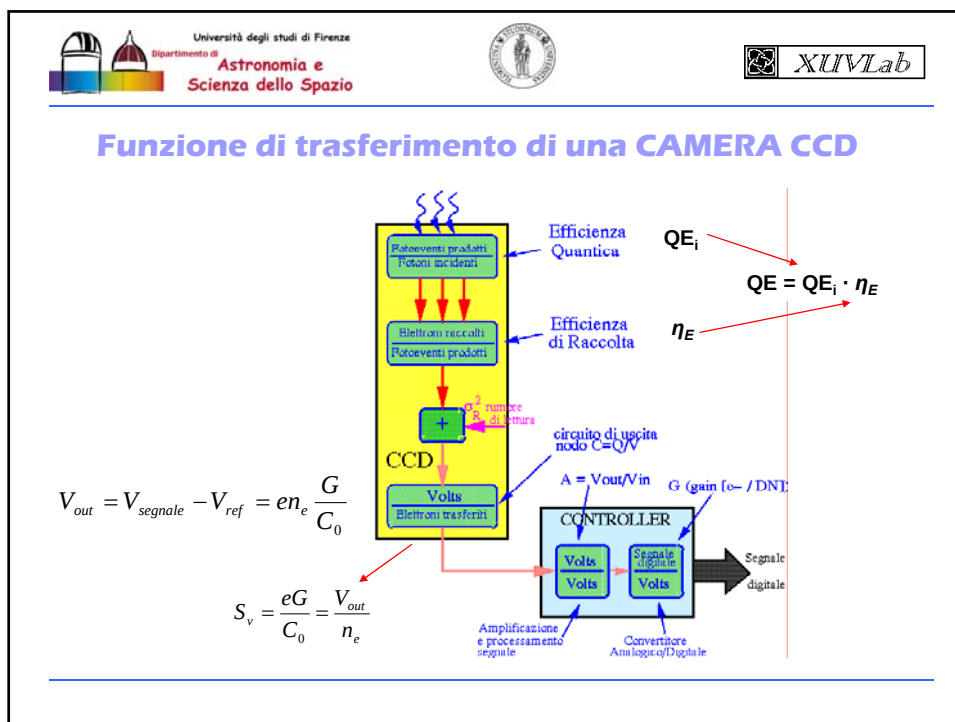


100 s

1000 s



- il rapporto S/N aumenta con il tempo di esposizione;
- il readout noise domina nelle corte esposizioni;
- il photon noise (shot noise) del cielo domina nelle esposizioni più lunghe.



Università degli studi di Firenze
Dipartimento di Astronomia e Scienza dello Spazio

XUVLab

Riferimenti:

- ✓ "Scientific Charge-Coupled Devices", James R. Janesick;
- ✓ "CCD Astronomy", Christian Buil;
- ✓ "Studio dell'elettronica analogica e digitale di trattamento del segnale video per lo sviluppo di una camera CCD basata su circuito integrato", Mauro Focardi (Tesi di Dottorato);
- ✓ "Elettronica di controllo per la camera CCD del canale polarimetrico di Herschel", Alessandro Gherardi (Tesi di Laurea);
- ✓ "Studio e realizzazione dell'elettronica a basso rumore per il campionamento dei segnali video da CCD", Marco Bulgarelli (Tesi di Laurea).