

Detectores Astronômicos

I. Detectores

- A luz coletada por telescópios deve ser **detectada** e armazenada.
- Todos os detectores transformam a energia da radiação eletromagnética para elétrons (e.g. Ccd), ou outras partículas (e.g. placas fotográficas) e moléculas (e.g. retina)
- Funções mais importantes dos detectores em astronomia:
 - Aumento de sensibilidade
 - Aumento do sinal através de integrações mais longas
 - Resposta linear
 - Capacidade de armazenamento do sinal.
- Nessa aula trataremos apenas de detectores ópticos

Adaptados das notas de aula do Dr. Steven R. Majewski of University of Virginia. (<http://www.astro.virginia.edu/class/majewski/ast511>) e do Dr. C.S.J. Pun da Universidade de Hong-Kong (<http://www.physics.hku.hk/~phys2022>)

II. Características principais dos detectores

➤ **Eficiência quântica (QE):**

$$QE = \frac{\text{No. de fótons detectados}}{\text{No. De fotons incidentes}}$$

Em geral a QE depende do comprimento de onda

➤ **Cobertura espectral:**

Intervalo de comprimentos de onda passíveis de detecção

➤ **Linearidade:**

Se deseja uma resposta diretamente proporcional (linear) ao número de fótons incidentes.

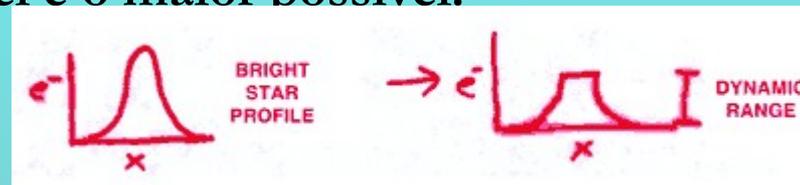
Detectores não lineares: e.g. placas fotográficas

Detectores lineares: e.g. Foto-multiplicadores e CCDs

II. Características principais dos detectores

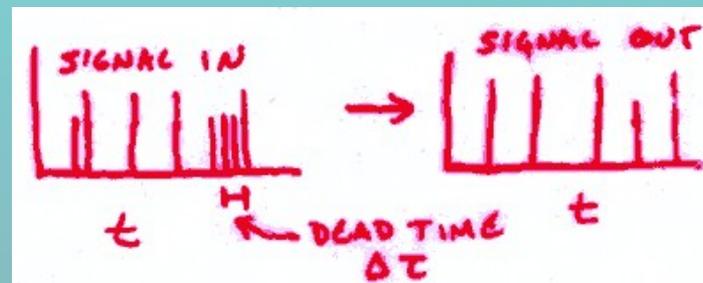
1. Intervalo dinâmico:

- Variação máxima do sinal que o detector é capaz de receber sem perda de sinal.
- O desejável é a maior razão possível entre o menor valor mensurável e o maior possível.



1. Tempo de resposta:

- Intervalo de tempo mínimo para detecção de mudanças no fluxo de fótons (e.g. tempo de leitura de um CCD) .



II. Características principais dos detectores

1. Ruído:

- Idealmente o sinal gerado deve ter uma relação definida com o número de fótons.
- Infelizmente sempre existem incertezas no sinal detectado.
- Fonte de ruído: **estatística de fótons, ruído do céu, ruído de leitura** etc.

1. Resolução espacial:

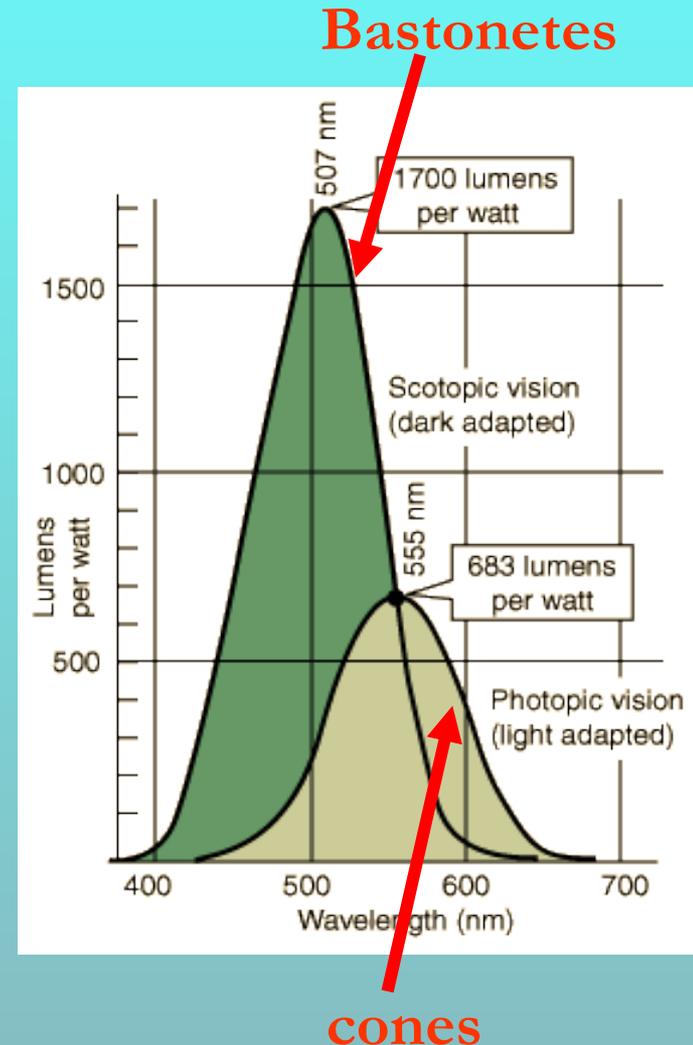
- Determina a mínima distância entre duas fontes que o sistema permite separar.
- Deve ser adequada para cada combinação instrumento+telescópio

1. Capacidade de integração:

- A capacidade de coletar fótons por um período extenso é uma das maiores vantagens de qualquer detetor sobre o olho humano.

III. O olho humano

- Uma lentes convexa fina
- Dist. focal $\sim 14 - 17\text{mm}$
- Abertura $\sim 2 - 7\text{mm}$
- Intervalo dinâmico: $10^5:1$
- Detectores de fótons na retina: **cones** (cores, visão diurna) e **bastonetes** (luminosidade, visão noturna)
- Cones: 6-7 million
- Bastonetes: 100 million
- QE $\sim 3\%$ (cone) – 10% (bast.)



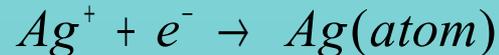
IV. Placas fotográficas

- A fotografia foi inventada na década de 1840s, mas seu uso em astronomia tornou-se popular apenas em ~1900s.
- Uma fina camada de cristais de brometo de prata (tamanho da ordem de microns) suspensos numa emulsão gelatinosa sobre ma lâmina de vidro

- Quanto chega um fóton,

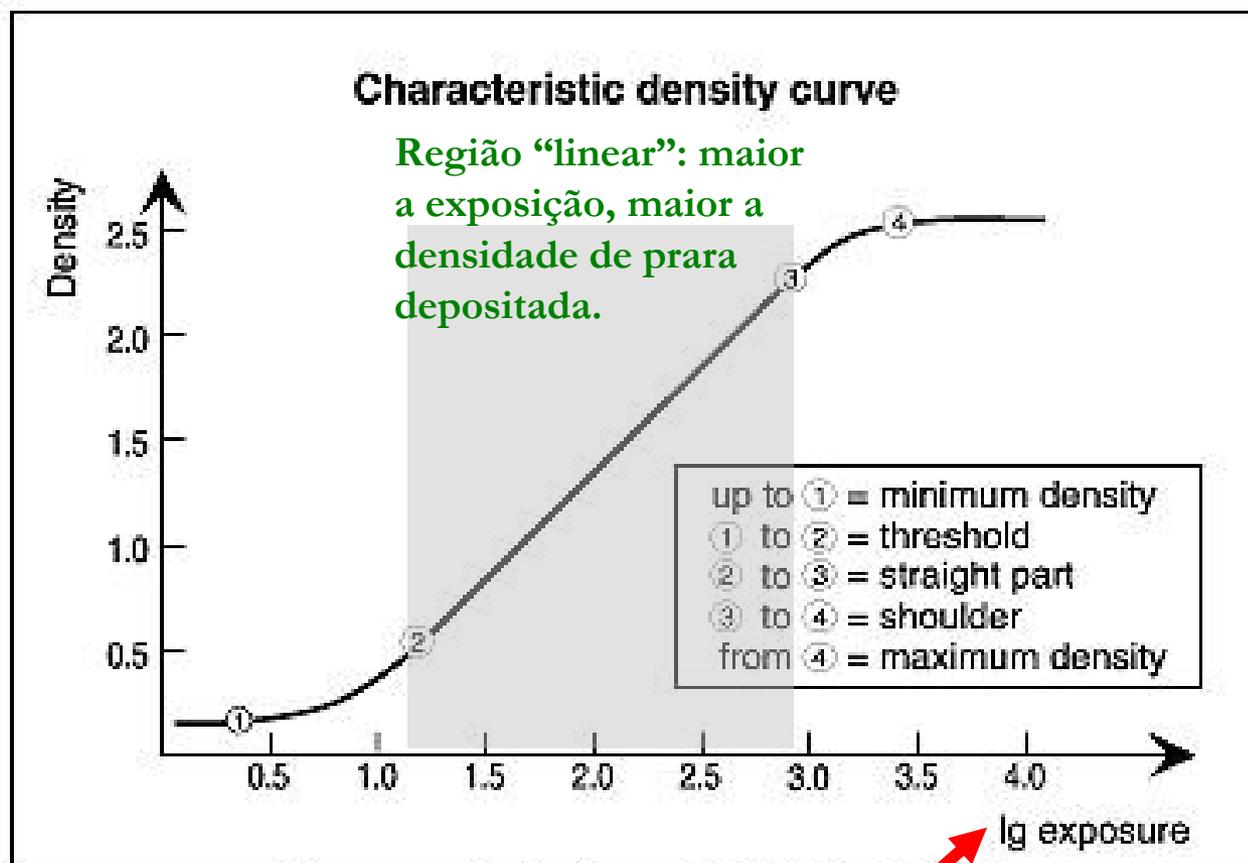


O íon de prata combina-se com um elétron e forma um átomo:



- A prata livre cria a “imagem latente” que posteriormente é amplificada durante a revelação. Os depósitos de prata produzem áreas escuras no filme.
- É um detector **não-linear** de baixa QE (~4%)

Não-linearidade da placa fotográfica

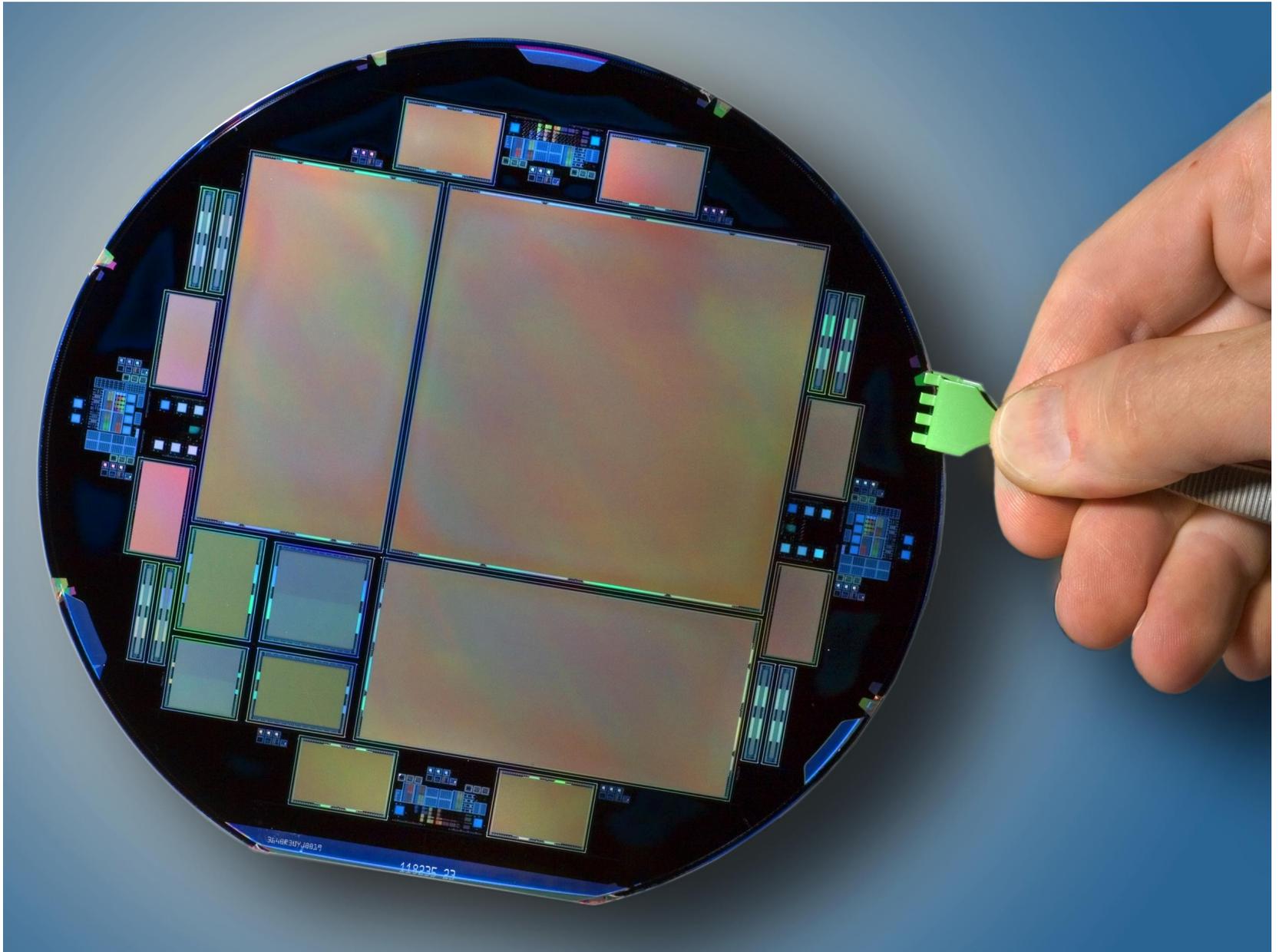


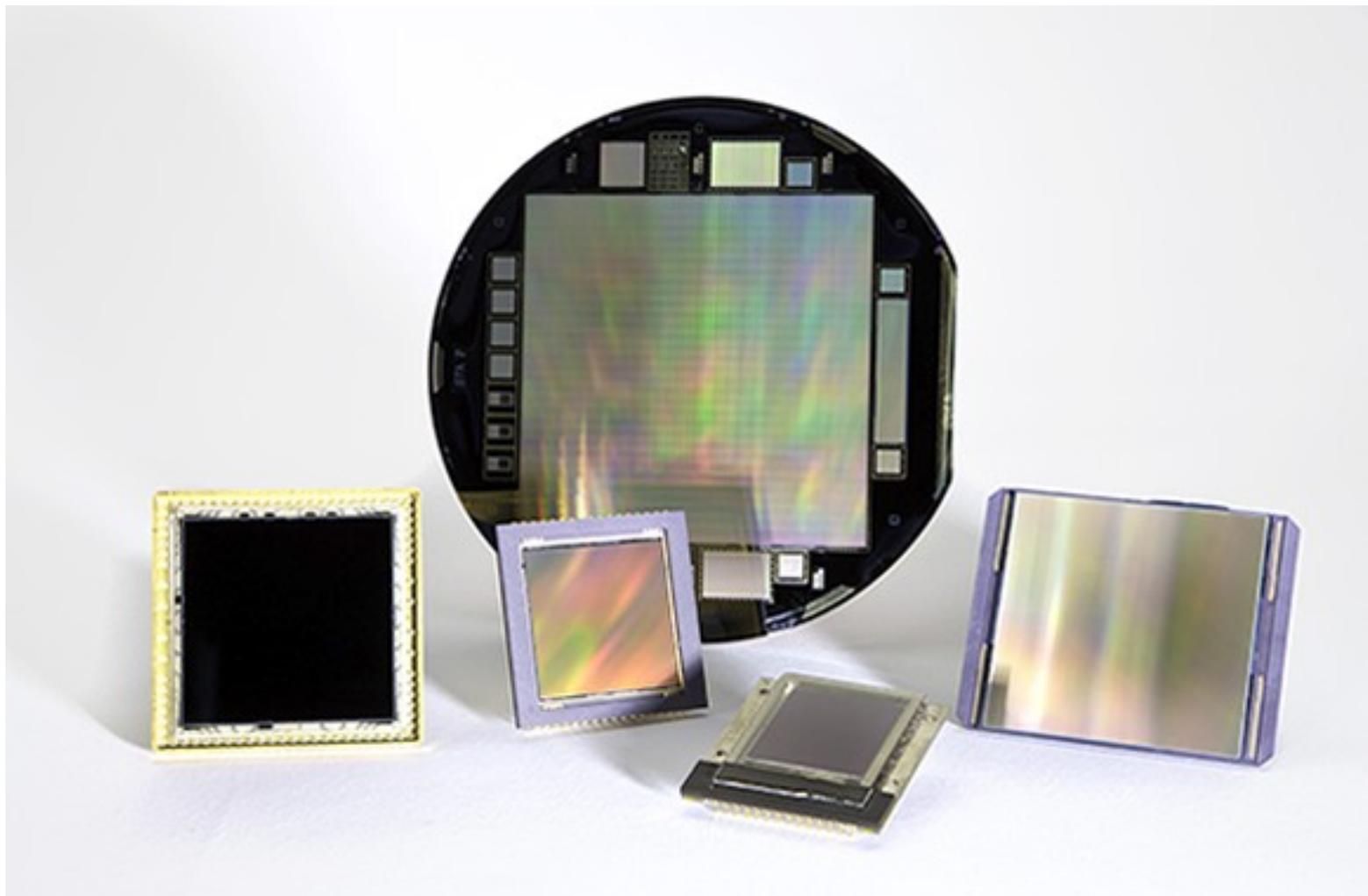
Characteristic Curve © AGFA (1999)

Nota: Escala logarítmica, não-linear.

V. Charge-Coupled Device (CCD)

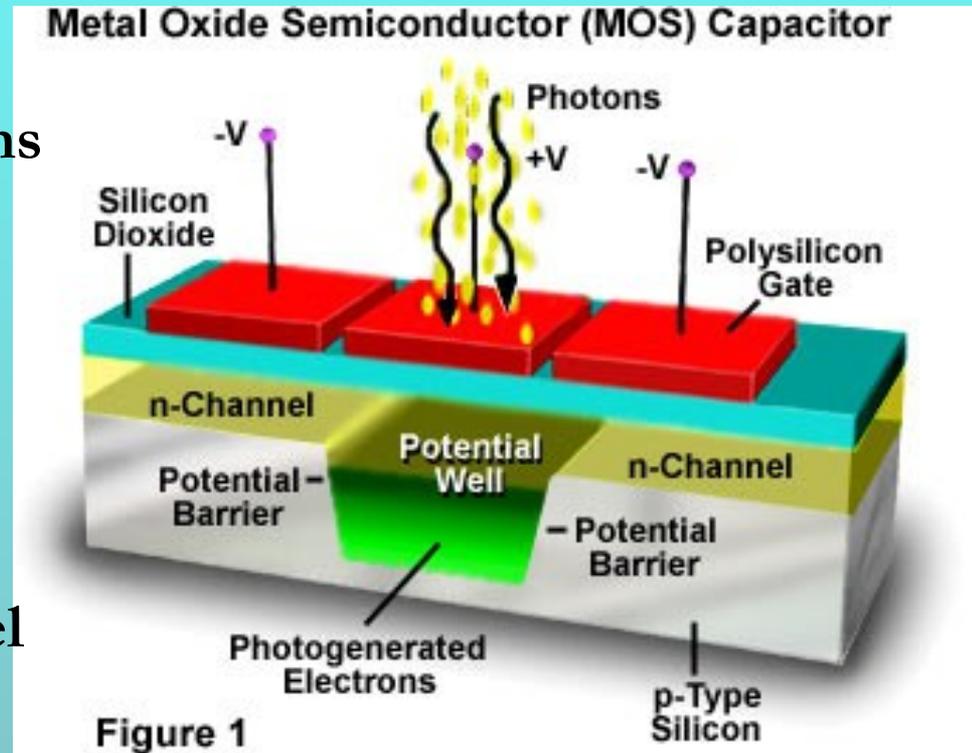
- CCDs são circuitos integrados baseados em silício e consistem de uma matriz de foto-diodos que convertem fótons em carga elétrica.
- Criado na década de 1960, **revolucionou a astronomia moderna a partir da década de 1970.**
- **Vantagens:** alta sensibilidade, baixo ruído linearidade, intervalo dinâmico razoável (10^4 to 1), intervalo espectral grande, produz dados digitais
- **Desvantagens :** Pequeno campo de visão (situação que melhora rapidamente devido ao aumento dos chips e dos mosaicos de CCDs)





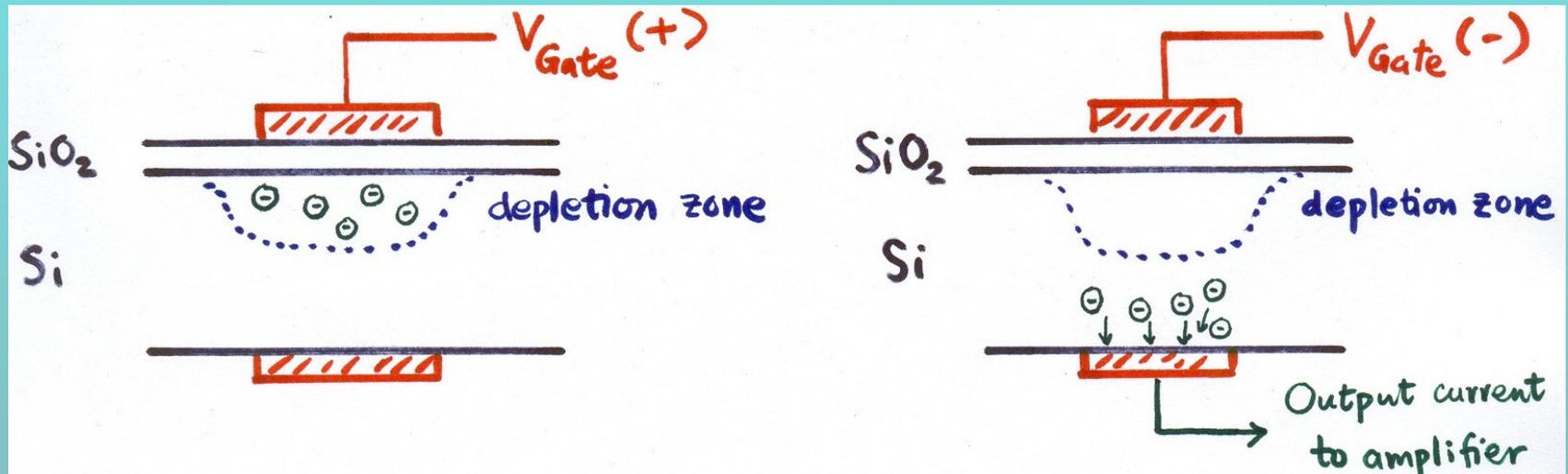
Pixels como um poço de potencial

- Dentro do semi condutor, a região de depleção pode ser vista como um **poço de potencial** onde os foto-eletrons podem ser armazenados.
- Sua capacidade (i.e., quantos eletron pode guardar) é proporcional à voltagem aplicada (**voltagem de bias**)
- A carga máximo que um pixel pode segurar é chamado de capacidade/profundidade ($\sim 100k - 300k e^-/\text{pixel}$). Isso afeta o intervalo dinâmico do CCD.



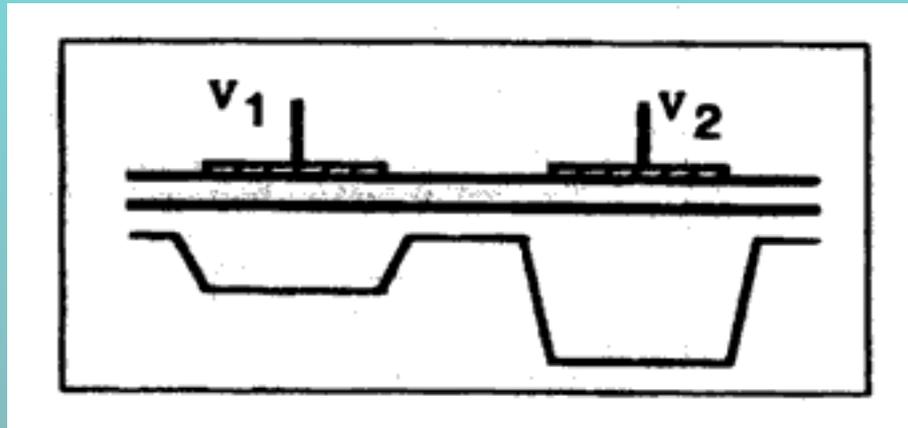
Coleta de carga em cada pixel

- 1. **Charge Injection Device:** A voltagem da entrada (gate) é negativa, de modo que os elétrons repelidos são coletados na camada de silício, onde pode ser medidos como corrente elétrica.



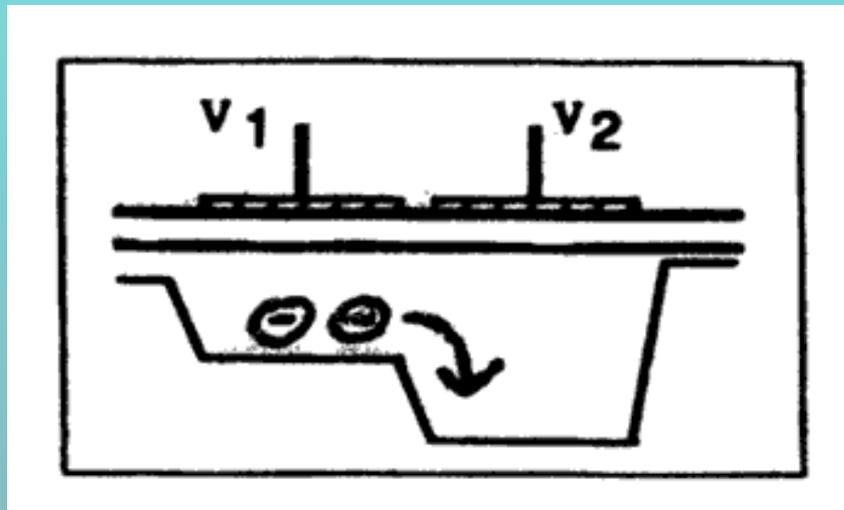
Coleta de carga em cada pixel

- 2. **Charge coupling**: o princípio do CCD
 - Criando-se múltiplos “gates” num peça de Si pode-se gera um série de zonas de depleção.
 - Se os “gates” estão distantes o suficiente ($> 1\mu\text{m}$), então os poços de potencial serão independentes uns dos outros..



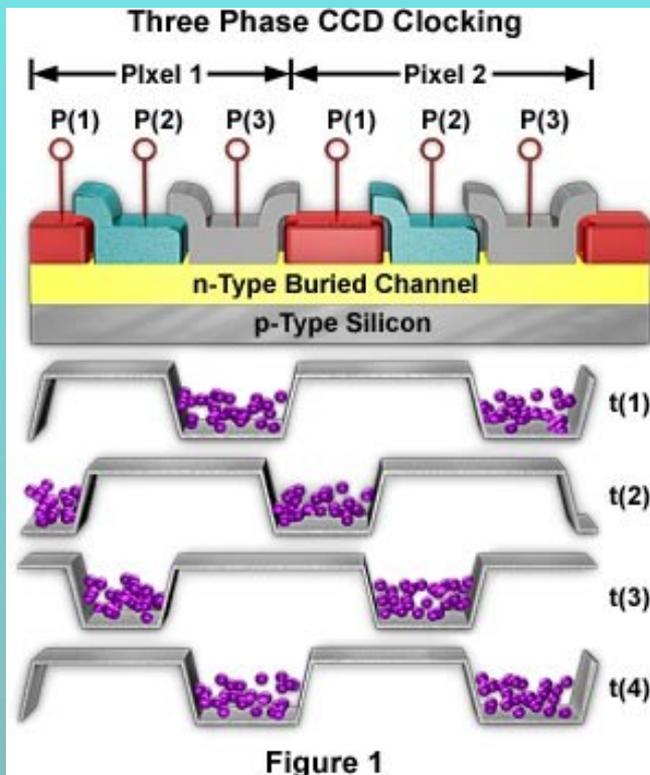
Coleta de carga em cada pixel

- 2. **Charge coupling**: the principle behind CCD
 - Ajustando-se as voltagens é possível transferir cargas de uma zona para a outra, pois os eletrons buscam o poço mais profundo.
 - Assim é possível mover cargas no Si ao longo de linhas ou colunas.

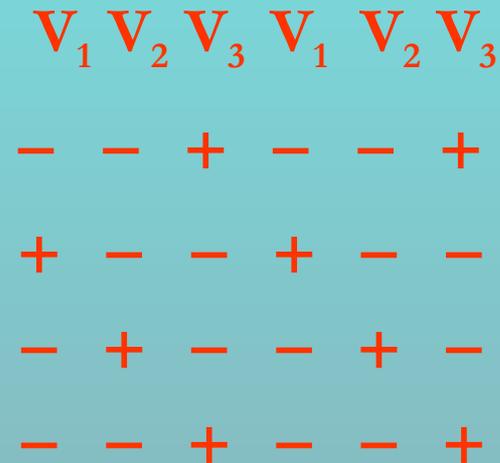


Transferência de cargas num CCD

- Um grupo de “gates” ligados eletricamente é denominado de fase.
- Cada pixel tem um “gate”.
- Cda fase altera sua voltagem com um padrão repetitivos de estados “altos” (abre o poço) e “baixos” (fecha o poço)
- Necessita uma sequencia muito bem **sincronizada**.

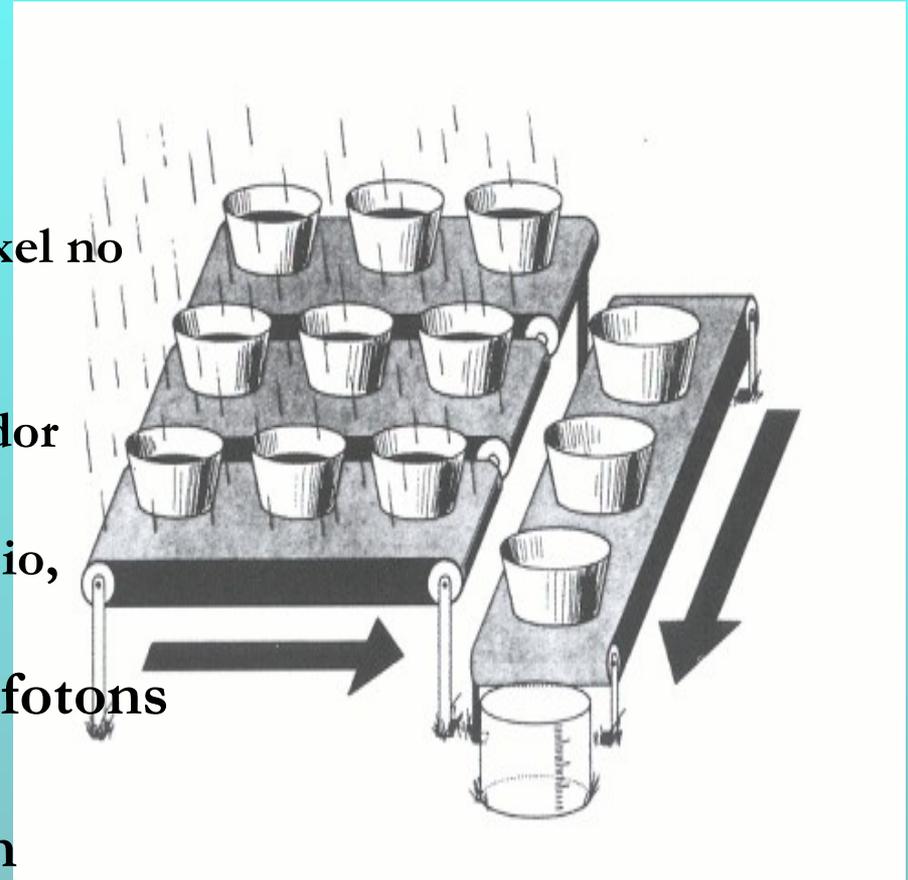


Voltagem de P(1) = V_1 , etc

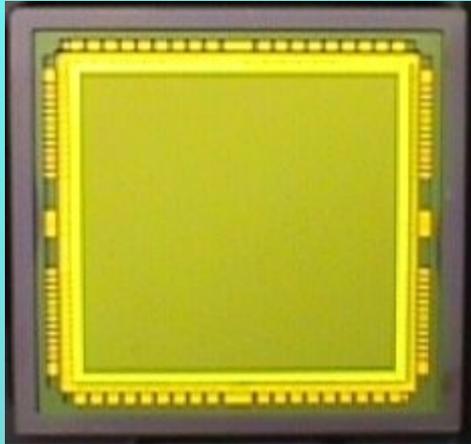


Full Frame Architecture

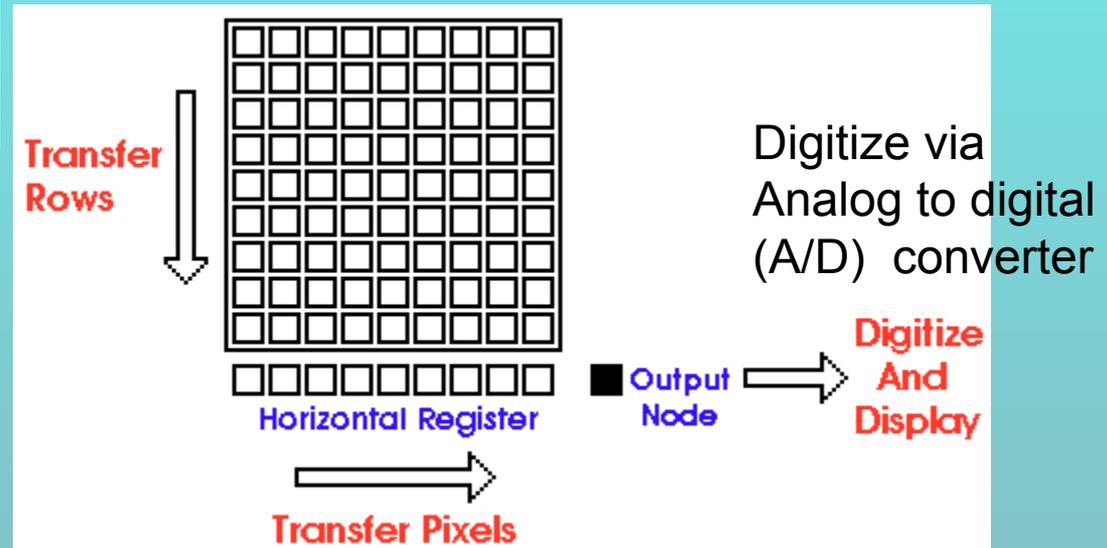
- The A última linha do CCD é chamada de **multiplexador**
- **Leitura de uma linha:**
 1. Move todas as colunas por um pixel no multiplexador
 2. Readout Lê todas os eletrons do multiplexador para um amplificador movendo as cargas.
 3. Quando o multiplexador está vazio, repete 1
- **Problema:** Continua coletando ftons enquanto faz a leitura.
- **Solução:** Cobrir o CCD com um diafragma.



CCD Readout



Thomson
2048 X 2048
CCD



Horizontal register = Serial register

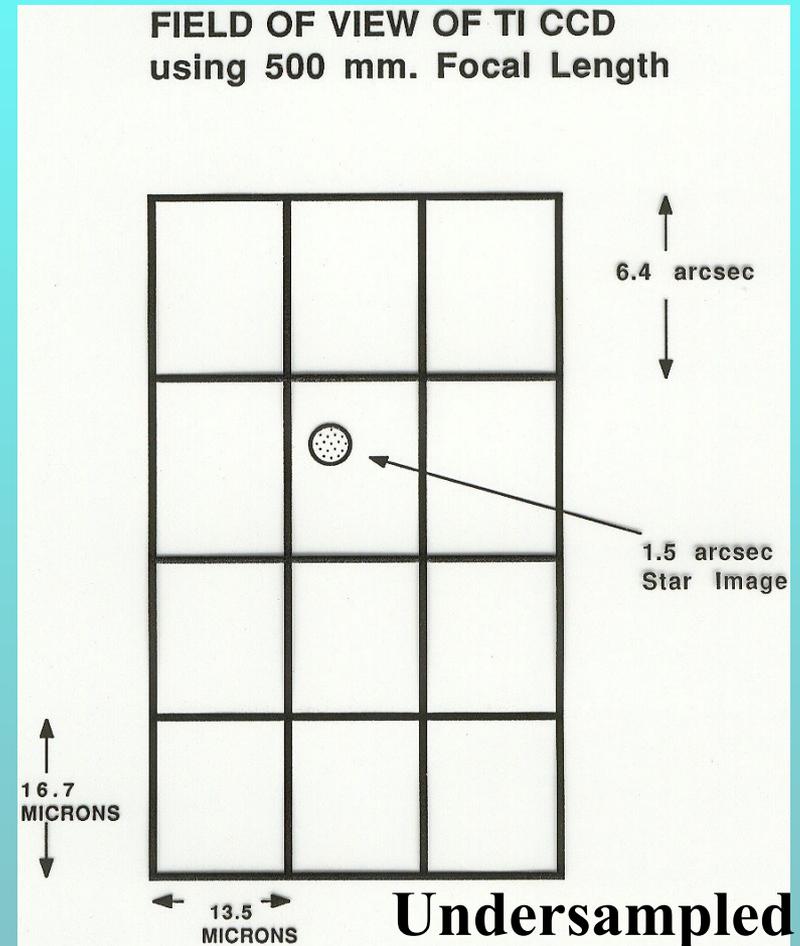
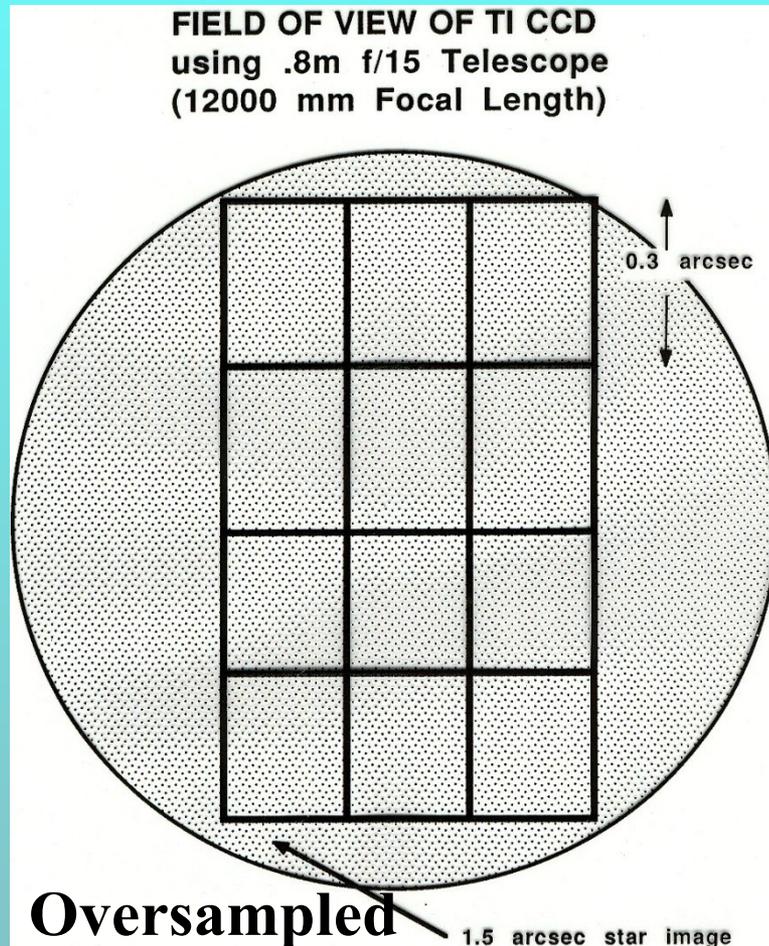


VI. Propriedades do CCD

A. Escala de Placa

- Tamanho do pixel em função da área do céu que é capaz de cobrir.
- Usualmente a **escala de placa** tem unidades de **arcsec/pixel**

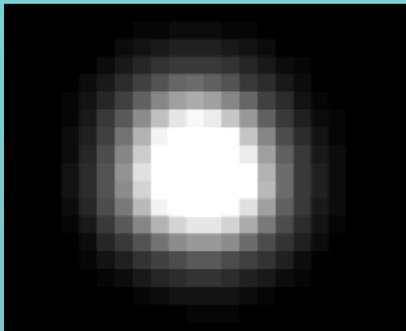
A. Escala de Placa



- O tamanho físico do pixel do CCD é limitado pelo seu desenho.
- Já a **escala de placa** dependen também da óptica do sistema.

A. Escala de Placa

- A escala de placa deve ser ajustada ao tamanho do disco de seeing
- **Super-amostragem** : PSF espalhada em demasiados pixels
 - Reduz o campo total
 - Reduz a sensibilidade para objetos mais fracos.
- **Sub-amostragem**: PDF concentrada em poucos pixels,
 - Incerteza da posição e forma (objetos extensos)
 - Saturação em objetos brilhantes
- Amostragem optima (Nyquist): Seeing FWHM = 2 pixels
- Realisticamente, pode-se escolher $\sim 3-4$ pixels, dependendo da aplicação.

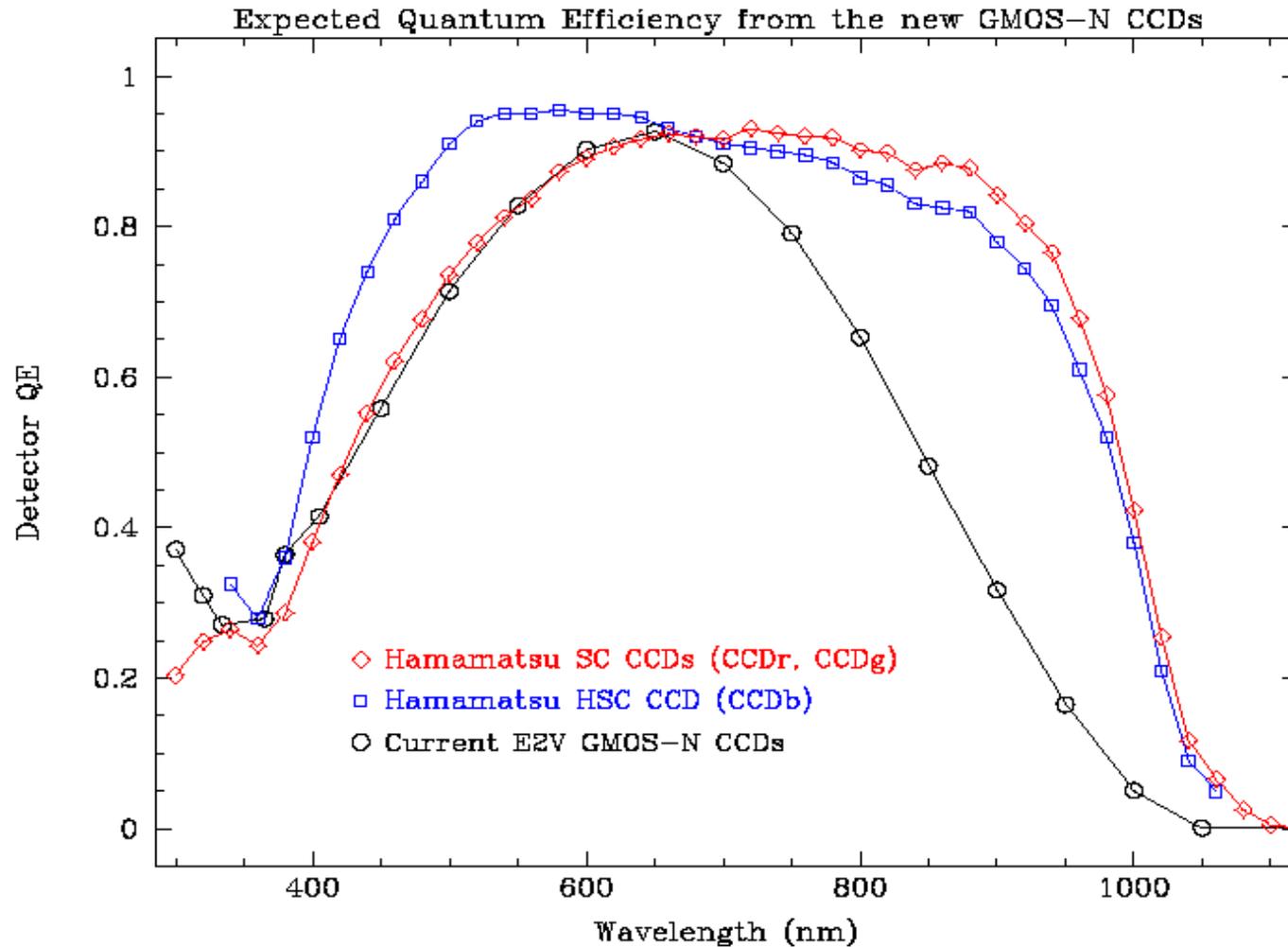


Over-sampled



Under-sampled

B. Eficiência Quântica

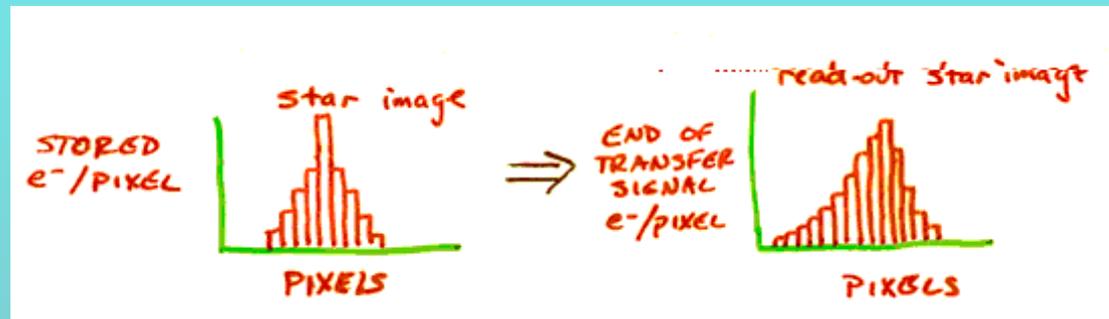


B. Eficiência Quântica

- A QE dos CCDs varia com o comprimento de onda, principalmente devido os diferentes poderes de penetração no Silício do fótons de várias energias.
- O corte em comprimentos de onda longos se deve ao tamanho do “bandgap” do material semiconductor .
- Já o corte no outro extremo é causado pelo baixo poder de penetração, que faz com que vários fótons sejam absorvidos antes de chegar à zona de depleção.

C. Charge Transfer Efficiency (CTE)

- Alguns elétrons são perdidos durante a transferência de um pixel para o outro.
- $CTE = \text{No. cargas transferidas} / \text{No. original de cargas}$



- E.g. Uma CTE of 99.9% é boa o suficiente?
- Considerando um CCD de 1024x1024 pixels com transferência trifásica, ocorrem $3 \times 1024 / 2$ transferências
- Razão de cargas restantes: $(0.999)^{1536} = 0.215!$
- Necessita-se CTE de pelo menos 99.999%

D. Saída do CCD

- Ao final do multiplexor encontra-se com conversor analógico-digital que converte os eletrons num sinal **digital**.
- O **Ganho** (G) is the number of electrons combined to generate one **signal count**, called a **Analog-to-Digital Unit**, or **ADU**. So $\text{ADU} = N_e / G$, where N_e = number of electrons arriving at amplifier
- Normally, G is set as a positive number larger than 1. e.g. for KAF-1602E, $G = 2.3 \text{ e}^- / \text{ADU}$.
- The dynamic range of CCD is limited by the **number of digital bits** of the output, e.g. KAF-1602E produces a maximum 16-bit output (allowing $2^{16} = 65536$ values).
- **Question:** What is the depth of electron well of KAF-1602E?
- **Answer:** Electron well = $65535 \times 2.3 = 151,000 \text{ e}^-$

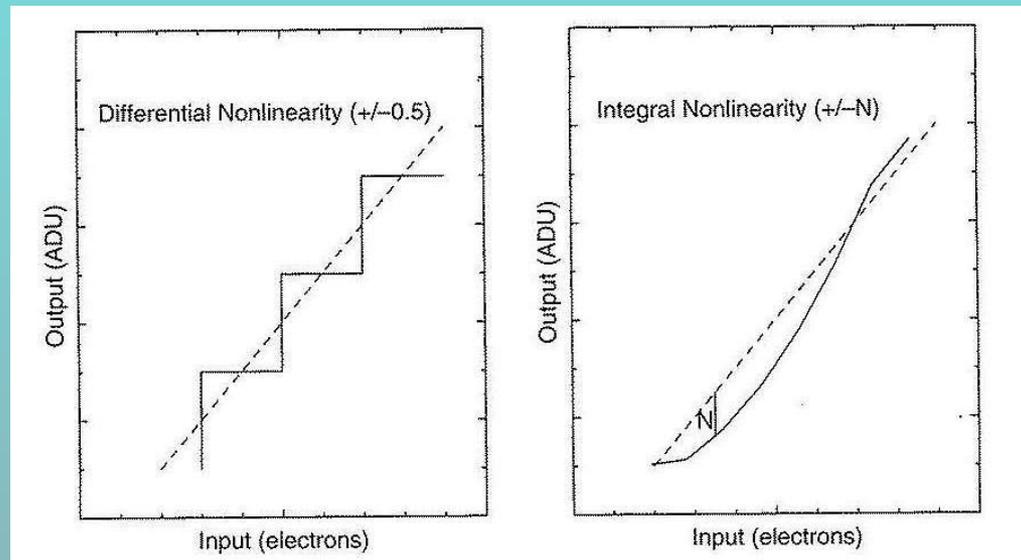
D. Saída do CCD – Ruído de leitura

Ao final do multiplexor encontra-se com conversor analógico-digital que converte os elétrons num sinal **digital**.

O **Ganho** (G) é o número de elétrons combinados para gerar uma contagem chamada **Analog-to-Digital Unit**, or **ADU**. Então $ADU = N_e/G$, onde N_e = número de elétrons que chegam ao amplificador.

O problema maior é a **não-linearidade integral** devida ao comportamento estocástico da eletrônica de leitura, que se afasta da saída desejada em ADU), gerando um desvio máximo de até N ADU, onde N é o máximo erro de saída.

O erro associado a esse processo é chamado de **ruído de leitura** (details associated with the detector electronics).



VIII. Ruído num CCD

- Todas as medidas astronômicas sofrem com ruídos de várias naturezas.
- Grandeza importante: Signal-to-Noise ratio (S/N)
- **(A) Ruído de fótons** ou **Ruído de Poisson noise**. É uma lei da natureza na qual para cada N eventos aleatórios, seu desvio padrão é igual a $N^{1/2}$
- Se existisse apenas ruído de fótons, então $S/N = N_e / N_e^{1/2} = N_e^{1/2}$ (N_e = número de elétrons)
- Esse é o maior S/N possível!

VIII. Noise Considerations for CCD

- **(B) Read Noise:** also known as readout noise
- For a given CCD circuitry, the read noise is a constant, **independent** of the signal received, expressed in terms of e^- root-mean-square (**e^- RMS**)
- E.g. KAF-1602E has a read noise of 15 e^- RMS
- All sources of noise can be combined in **quadrature**, i.e., total noise $\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Poisson}^2 + \sigma_{RN}^2$
- Effect of binning: Consider 4 pixels and we are interested with the combined signal from the addition of these pixels
- (a) With no binning and readout of 2x2 pixels: there are **four readouts**: $\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Poisson}^2 + 4\sigma_{RN}^2$
- (b) With 2x2 binning of those same pixels, there is only **one readout**: $\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Poisson}^2 + \sigma_{RN}^2$
- S remains the same, but $N \downarrow$. Therefore $S/N \uparrow$

VIII. Noise Considerations for CCD

- **(C) Dark Noise (DN):** also known as dark current
- Due to **thermal emissions** of electrons which cannot be distinguished from the photoelectrons.
- Expressed in terms of (DN) $e^-/\text{pixel}/\text{second}$
- Can be reduced by operating CCD at lower temperature
- For KAF-6303E, dark current at $25^\circ\text{C} = 15 e^-/\text{pixel}/\text{second}$ (quite high)
- Therefore, for a signal taken over a time t , dark current = $DN*t$, therefore dark noise $\sigma_{DN} = (DN*t)^{1/2}$
- Total signal: $N_{tot} = N_e - DN*t$
- Total noise: $\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Poisson}^2 + \sigma_{RN}^2 + \sigma_{DN}^2$
- If photon noise dominates the remaining noise, then we say that the data is **sky limited**. Otherwise, noise limited.

Exemplos de propriedades de CCDs

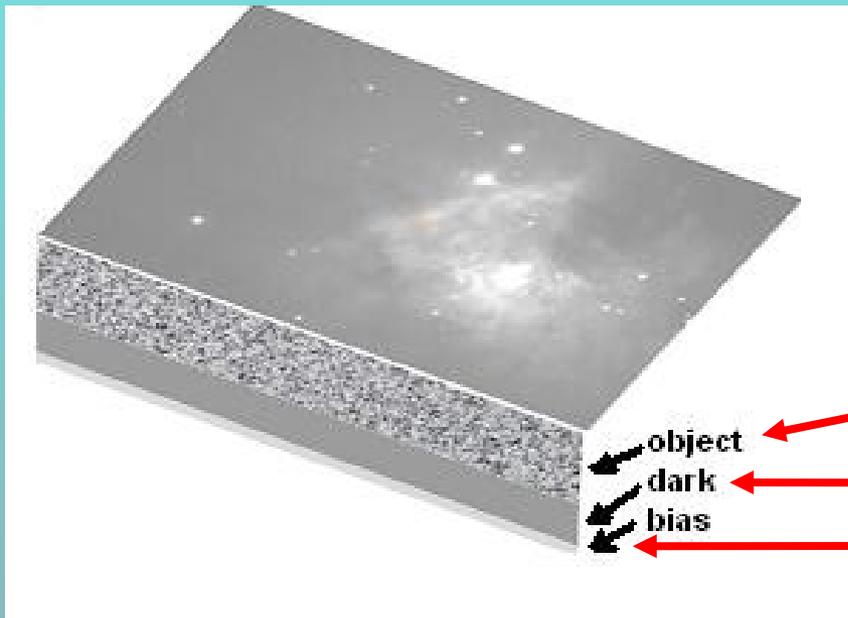
Table 3.2. *Typical Properties of Two Old and Six Modern Example CCDs*

	RCA	TI	Kodak	E2V	SITe	Sarnoff	STA (WIYN)	MIT/LL
Pixel Format	320 × 512	800 × 800	2048 × 2048	2048 × 4608	2048 × 2048	600 × 2400	3840 × 3952 OT	2048 × 4096
Pixel Size (microns)	30	15	9	13	12	13	12	15
Detector Size (mm)	10 × 15	12 × 12	18 × 18	27 × 62	25 × 25	6 × 25	50	31 × 62
Pixel Full Well (e ⁻)	350 000	50 000	100 000	150 000	110 000	> 20 000	> 70 000	> 200 000
Illumination	Front	Back	Front	Back	Back	Back	Back	Back
Peak QE (%) / Wavelength (Å)	70/4500	70/6500	45/6500	90/5000	85/6500	99/6600	96/5500	95/7700
Read Noise (e ⁻)	80	15	15	3	6	6	< 5	2.5
CTE	0.99995	0.999985	0.99998	0.999995	0.99999	0.99999	0.999998	0.999995
Operating Temp (C)	-100	-120	-30	-85	-85	-60	-60	-110
Typical Gain used (e ⁻ /ADU)	13.5	5	5	1.5	3	5	1.5	1.37
	Early CCDs		Modern CCDs					

- Notice increase in CCD chip size, rise in QE, reduction of Read Noise, and increase in CTE for modern CCDs

IX. Redução de dados CCD

- **Objetivo:** Remover efeitos sistemáticos nos dados, introduzidos pelo processo de observação.
- A ideia é remover os **erros sistemáticos** sem introduzir novos erros estatísticos ou aleatórios.
- Usamos imagens de calibração diferentes para isolar o efeito de cada efeito sistemático de forma individual.



“Flatfield” para remover flutuações sistemáticas

Imagens de “dark” para remover a corrente de escuro

Imagem de Bias para remover as contagens de “bias”

1. Bias

- Uma integração do CCD de zero segundos
- O amplificador ADC produz contagens não nulas mesmo na ausência de foto-elétrons. A imagem de “bias” mede o **nível zero**.
- É normal ajustar o bias a um valor não-nulo para não nos preocuparmos com não-linearidades em valores baixos de contagens.
- Usados quando a corrente de escuro é baixa (e.g. CCD resfriado)
- Se uma imagem de dark é tomada em separado, ela inclui ambos dark e bias

2. Dark

- Exposição com o mesmo tempo de integração das observações mas com o diafragma fechado.
- Mede o número de eletrons termiais acumulados em cada pixel.
- Inclui o Bias automaticamente.

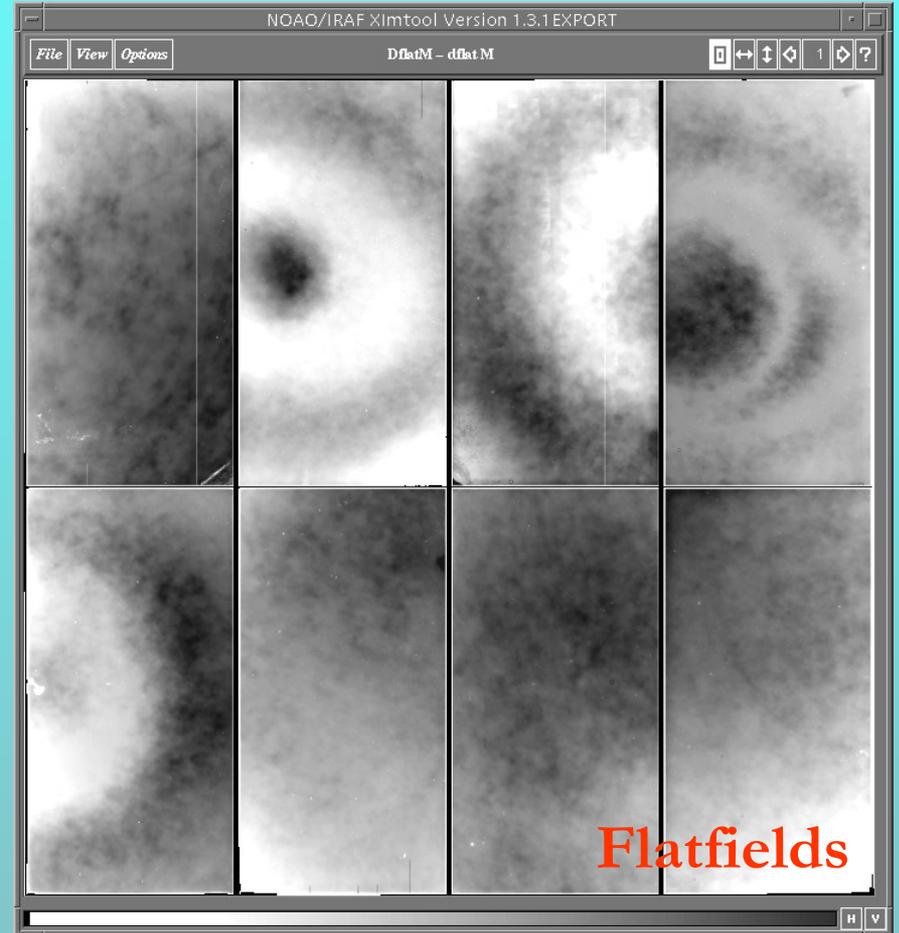
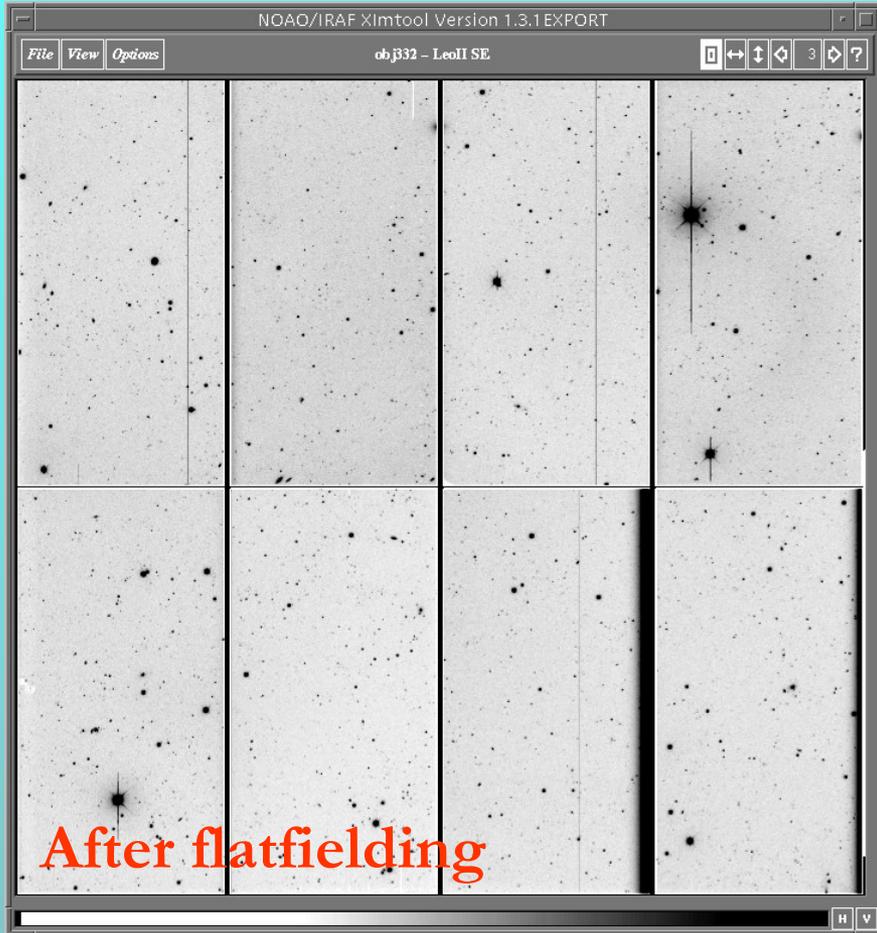
3. Flatfield

- Exposição de todo sistema óptico a uma fonte que **ilumine de modo uniforme** todos os pixels.
- A imagem de “flatfield” mede as **flutuações sistemáticas** nos dados CCD devida a: (1) variação da QE pixel-a-pixel; (2) defeitos ópticos; (3) sombras de partículas de poeira nas componentes ópticas etc.
- A imagem de ciência é **dividida** pelo “flat” após a subtração pelo bias e/ou dark.

3. Flatfield

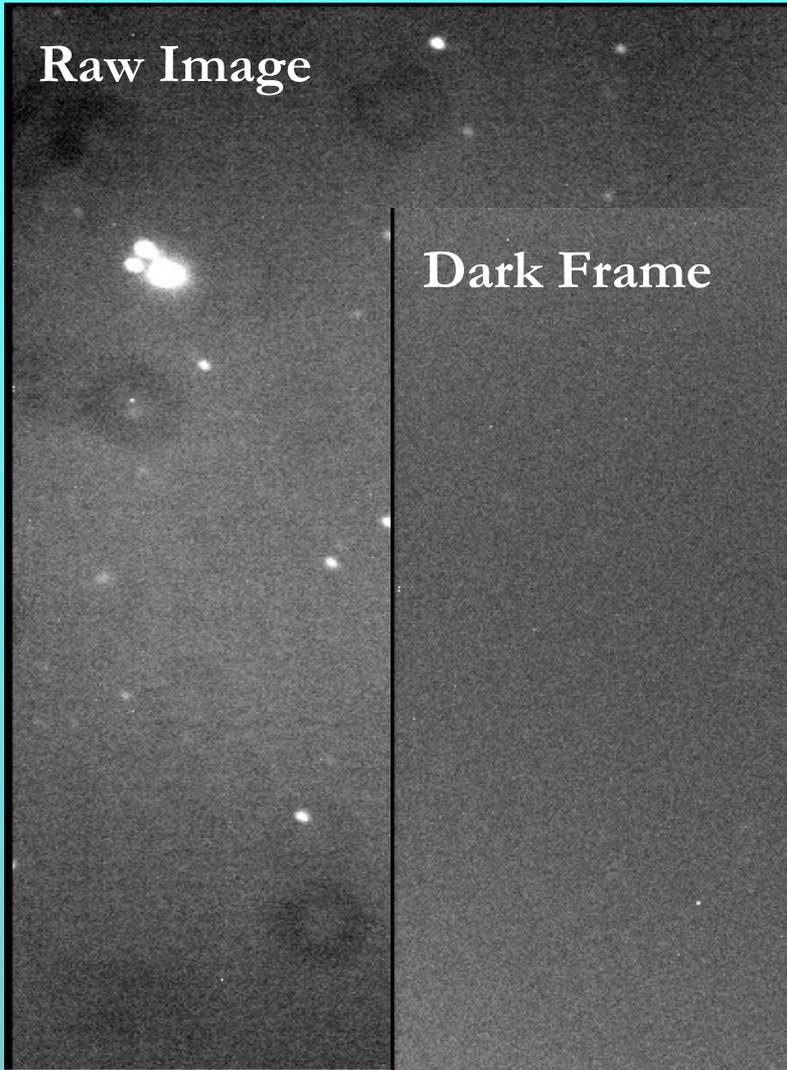
- Tipos de Flatfield: (a) **Domeflat (Flat de cúpula)**: Uma superfície uniforme iluminada dentro da cúpula (b) **Twilight flat**: imagens de uma parte “vazia” do céu tirada ao amanhecer ou anoitecer. c) **Night sky flats**: Combinação das imagens de ciência que elimina os objetos e produz uma imagem do céu.
- O Domeflat tem o melhor S/N e é ideal para remover as variações pixel-a-pixel
- O Twilight e Night sky flats são melhores para corrigir variações de iluminação pois reproduzem melhor o padrão das observações.

Aplicando flatfields

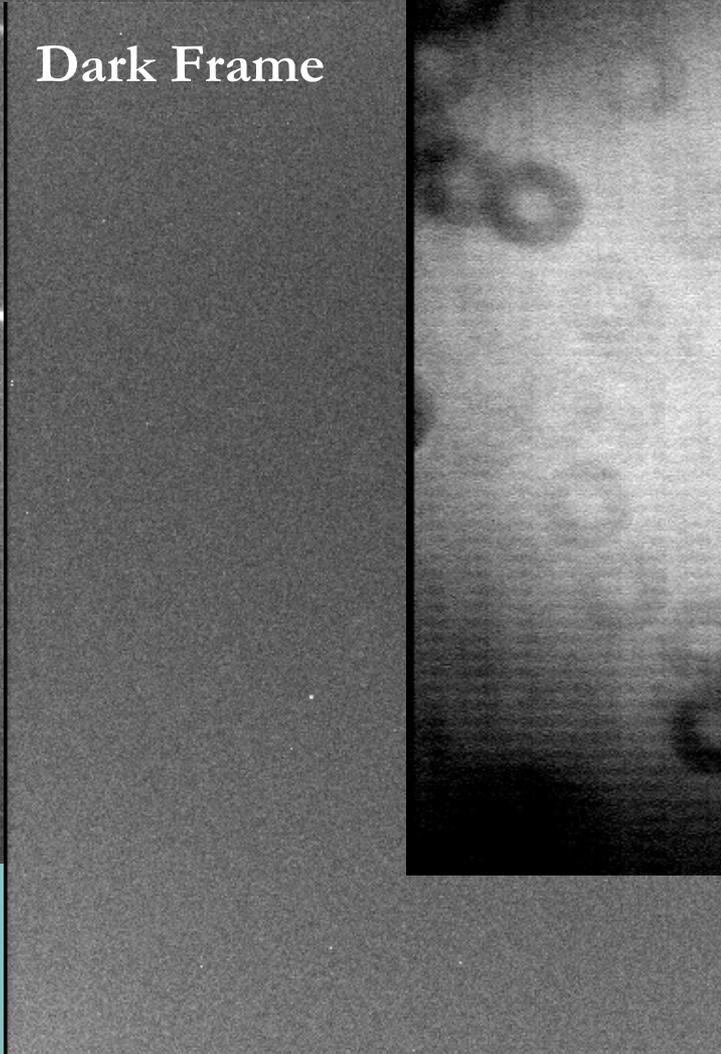


Data: MOSAIC 4x2 CCD array camera at Kitt Peak National Observatory

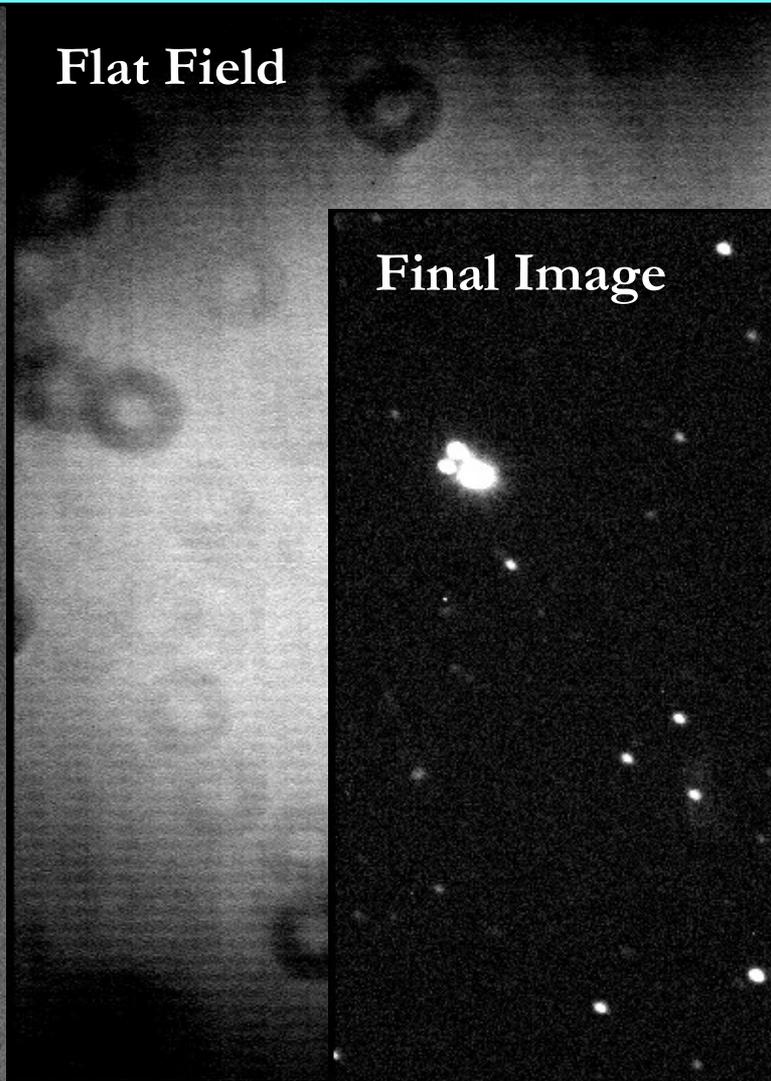
Raw Image



Dark Frame



Flat Field

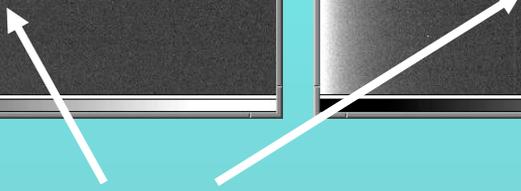
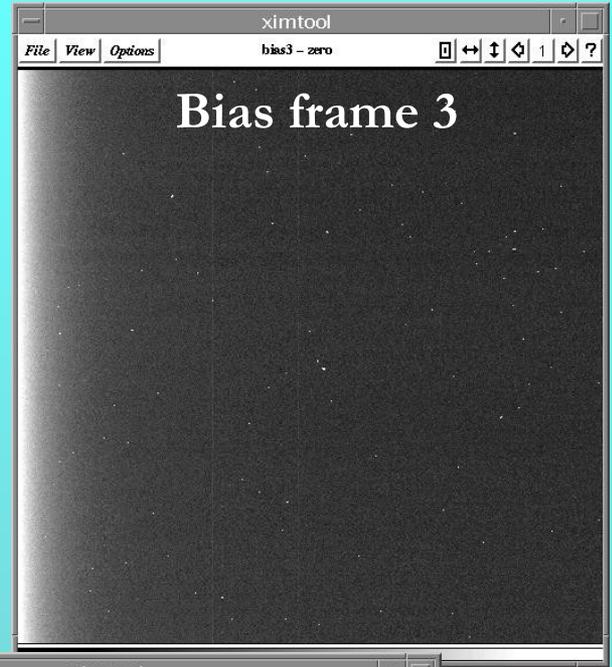
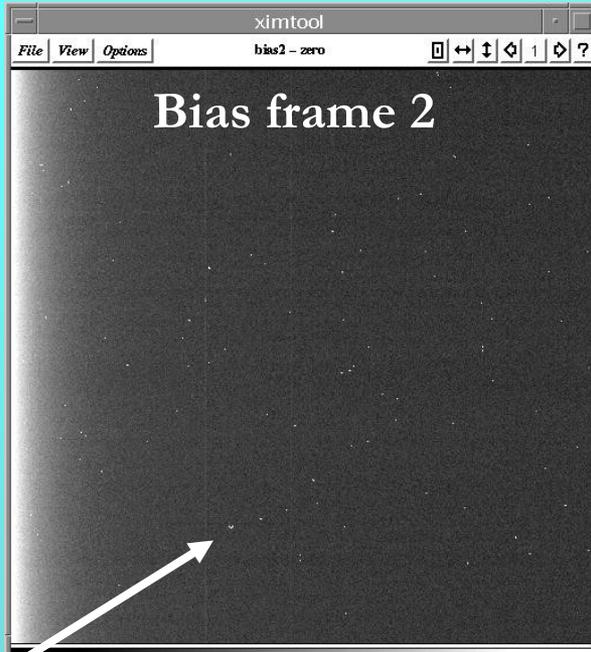
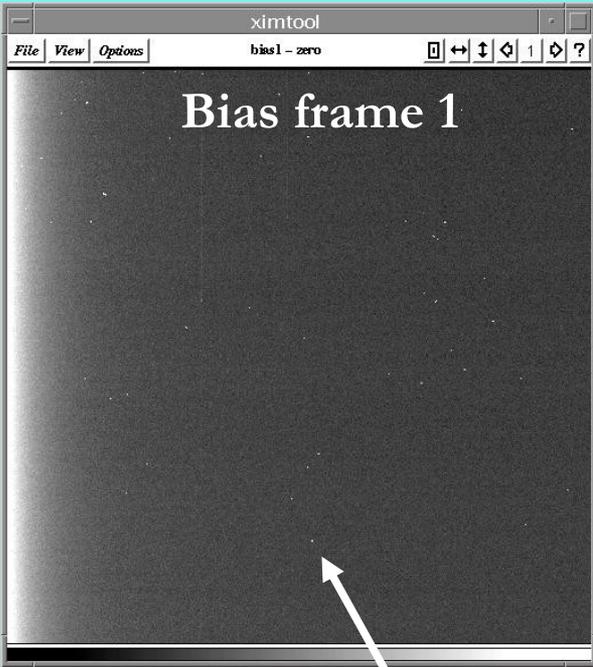


Final Image

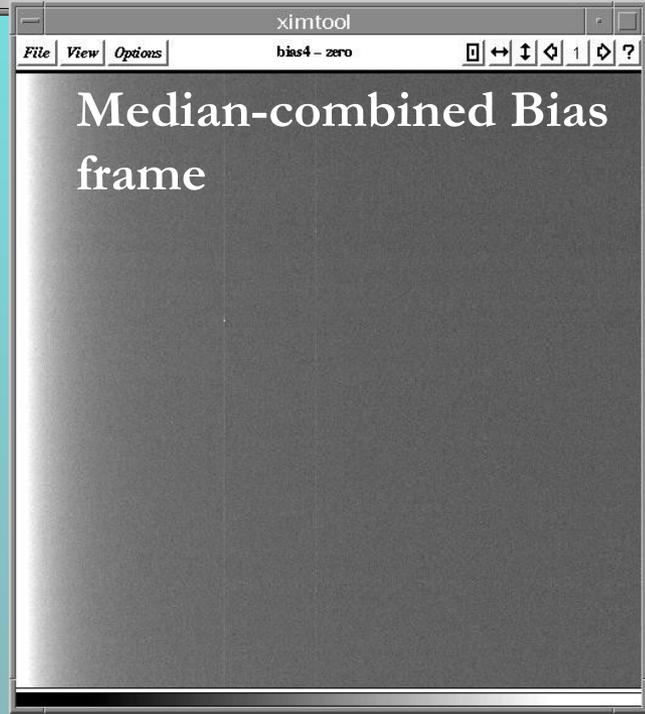


Combinação de imagens

- Queremos imagens de calibração com erros aleatórios pequenos.
- **Combina-se (stack)** imagens para reduzir erros estatísticos.
- Measure Mede-se um sinal N vezes e a média dos resultados combinados tem o ruído reduzido em $N^{1/2}$ (por que?)
- E.g., as imagens de bias/dark feitos pela combinação de 25 imagens bias/dark pode reduzir o erro estatístico por um fator 5
- Método of combinação: **mediana**
- Para pixel (i,j) , toma-se a mediana de $\text{frame}_1(i,j)$, $\text{frame}_2(i,j)$, ..., $\text{frame}_N(i,j)$ como o valor do (i,j) pixel na imagem final
- Menos sensível a **raios cósmicos**



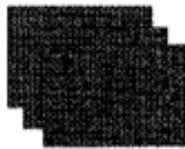
Raios Cosmicos



OVERSCAN SUBTRACT

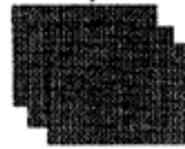
OVERSCAN SUBTRACT

Raw Images

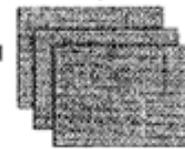


Subtract

Dark Frames
= BIAS + DARK
CURRENT



Dark Subtracted
Images



Divide

Master Flat Field

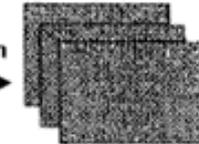


Calibrated images



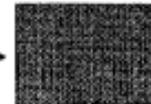
Co-align
images

Co-aligned images

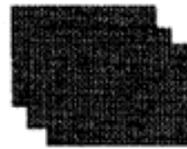


Add

Calibrated Image



Raw Flat Fields

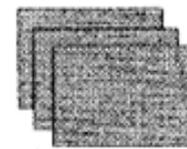


Subtract



Dark Frames
= BIAS + DARK CURRENT

Dark Subtracted
Flats



normalise
& median

"SKY FLAT DIVISION"
IF NEEDED

Comparação dos Detectores (Resumo)

Eficiência Quântica (QE)	<ul style="list-style-type: none">• CCD típicos tem picos de QE de ~50%, CCDs iluminados por trás podem ter QE of >90%• Olho humano (3% cones, 10% bastonetes), placas fotográficas (4%), fotômetros (<30%) todos tem QE menor
Cobertura espectral	<ul style="list-style-type: none">• CCD são bons no intervalo 0.3 - 1.1μm• Foto-multiplicadoras e placas tem respostas mais estrietas, tipicamente mais sensíveis no azul do que no vermelho.
Linearidade	<ul style="list-style-type: none">• Detrctores eletrônicos como CCD e foto-mult., tem um regime linear• O olho humano e placas são altamente não-lineares
Dynamic range	<ul style="list-style-type: none">• O olho humano tem um intervalo dinâmico enorme (10⁹:1), mas precisa de tempo para ajuste. A retina somente tem um intervalo dinâmico ~15000:1• CCD tem: 10⁵:1; mas isso pode ser aumentado tomando-se imagens com exposições diferentes.

Comparação dos Detectores (Resumo)

Resposta temporal	<ul style="list-style-type: none">• CCD ~ 0.01 s (similar ao olho humano)• CCD configurados especialmente (Intensified CCD) and foto-multiplicadoras podem chegar a 10^{-8} s
Ruído	<ul style="list-style-type: none">• A maior vantagem do Ccd e foto-multiplicadora é a habilidade de estimar o ruído de modo preciso
Resolução espacial	<ul style="list-style-type: none">• Placas fotográficas tem os menores elementos sensíveis a luz. O pixel de um CCD tem o tamanho típico de $10\mu\text{m}$.• Ocorre que a resolução não depende apenas do tamanho do menor elemento do detector, mas também da óptica defronte desse (escala de placa)

Comparisons of Detectors

(Summary)

Time response	<ul style="list-style-type: none">• CCD ~ 0.01 sec (similar as human eye)• Specially configured CCD (Intensified CCD) and PMT can have response time of 10^{-8} sec
Noise	<ul style="list-style-type: none">• A major advantage of CCD and PMT is the ability to calculate precisely the noise of a signal
Spatial resolution	<ul style="list-style-type: none">• Photographic plates have the finest light sensitive elements, each pixel of CCD has typical size of about a $10\mu\text{m}$.• However, the overall spatial resolution of the data depends not only on the detector, but also on the optics in front of the detector (plate scale)
Size of detector	<ul style="list-style-type: none">• Photographic plates can be as large as 50cm a side (Palomar Sky Surveys plates are 2 feet a side)• Largest CCD only $\sim 5\text{cm}$ a side, but can be used together in mosaic (30 CCDs used together for the Sloan Digital Sky Survey)