

AST-203-4 | 2026.2
Técnicas Observacionais

Aula 8

Detectores



Links úteis



Site do Curso
2026.2 (bloco 2)



Descrição
do curso



Calendário de
aulas e atividades

			Qua	Qui	Sex	Sab
Julho			1	2 Aula 6	3	4
Dom	Seg	Ter	5	6	7 Prova #1	8
9	10	11	12	13	14 Aula 7	15
16	17	18	19	20	21 Aula 9	22
23	24	25	26	27	28 Aula 11	29
30	31					



Bloco 2 - Ted

- ☐ **Aula 7** - 14/07
Telescópios
- ☐ **Aula 8** - 16/07
Detecores
- ☐ **Aula 9** - 21/07
Imageamento e fotometria
- ☐ **Aula 10** - 23/07
Espectroscopia
- ☐ **Aula 11** - 28/07
Processamento de dados
- ☐ **Aula 12** - 30/07
Pedido de tempo
- ☐ **Atividade #2**
Disponibilizada: 28/07
Data de Entrega: 10/08
- ☐ **Prova #2** - 04/08

Agosto

						Sab
1	2	3	4 Prova #2	5	6 Aula 13	7
8	9	10	11 Aula 14	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

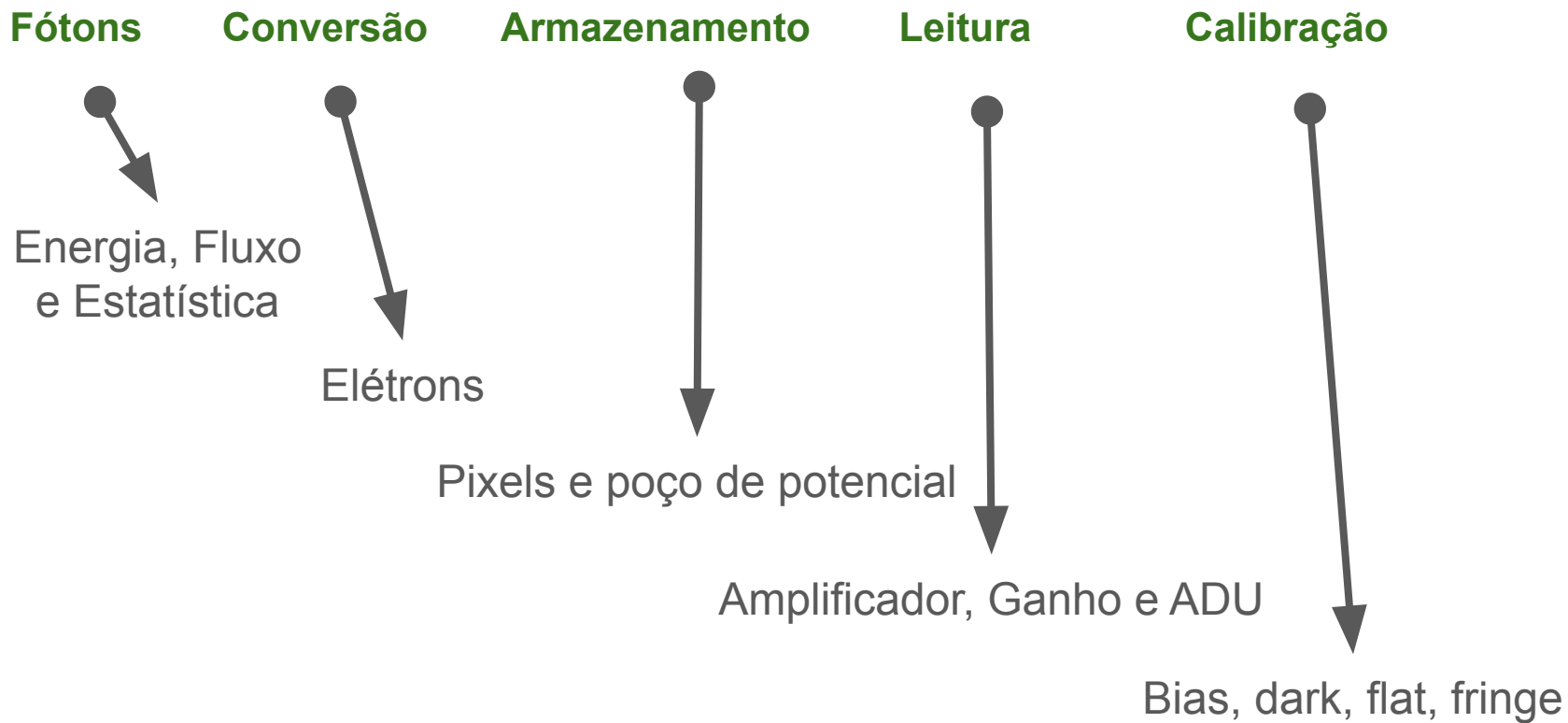
Deteciores

Sugestão de leitura:

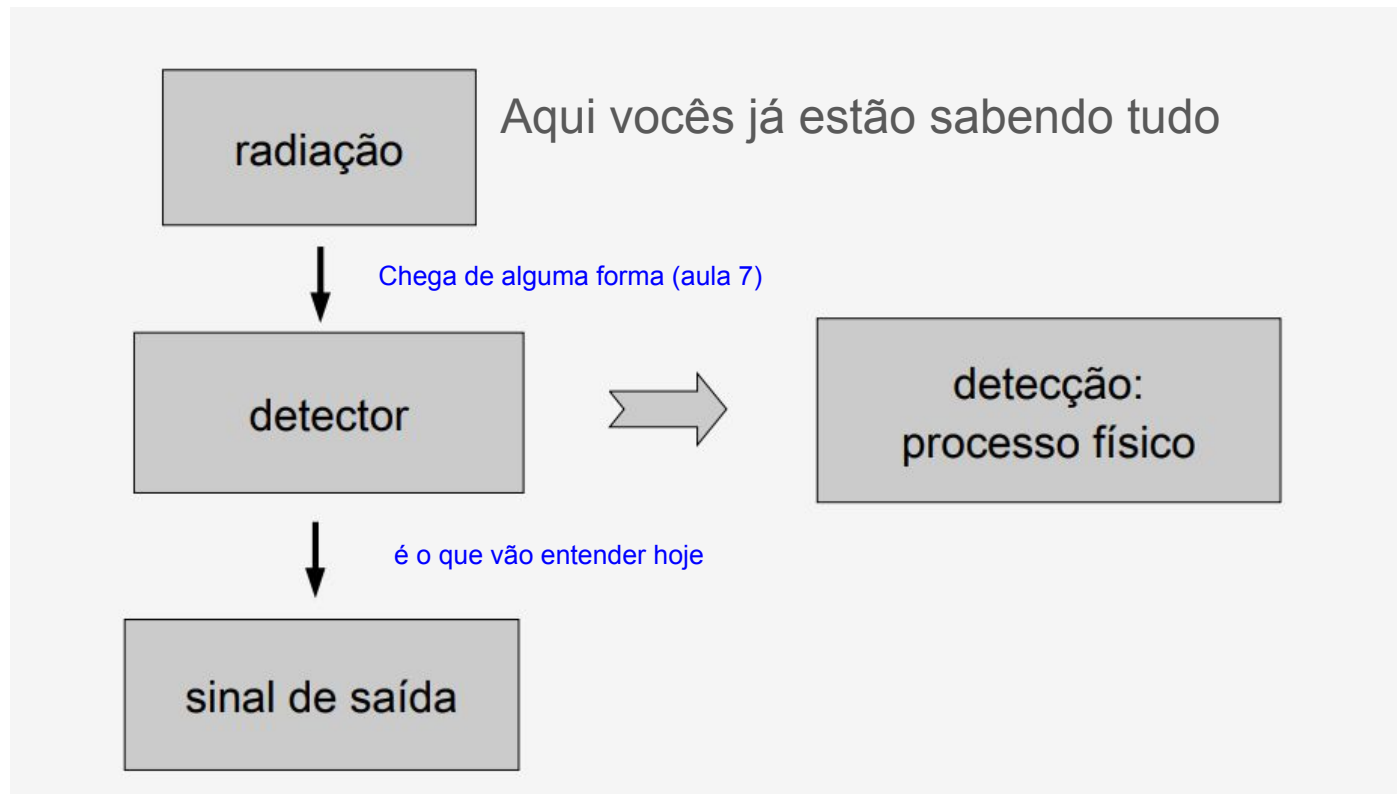
Léna – Cap. 5 (1 ed.) e Cap. 7 (2 ed.)

Kepler - <https://astro.if.ufrgs.br/telesc/receptores.htm>

Howell, S. - Handbook of CCD Astronomy, 2006 Cambridge Univ. Press



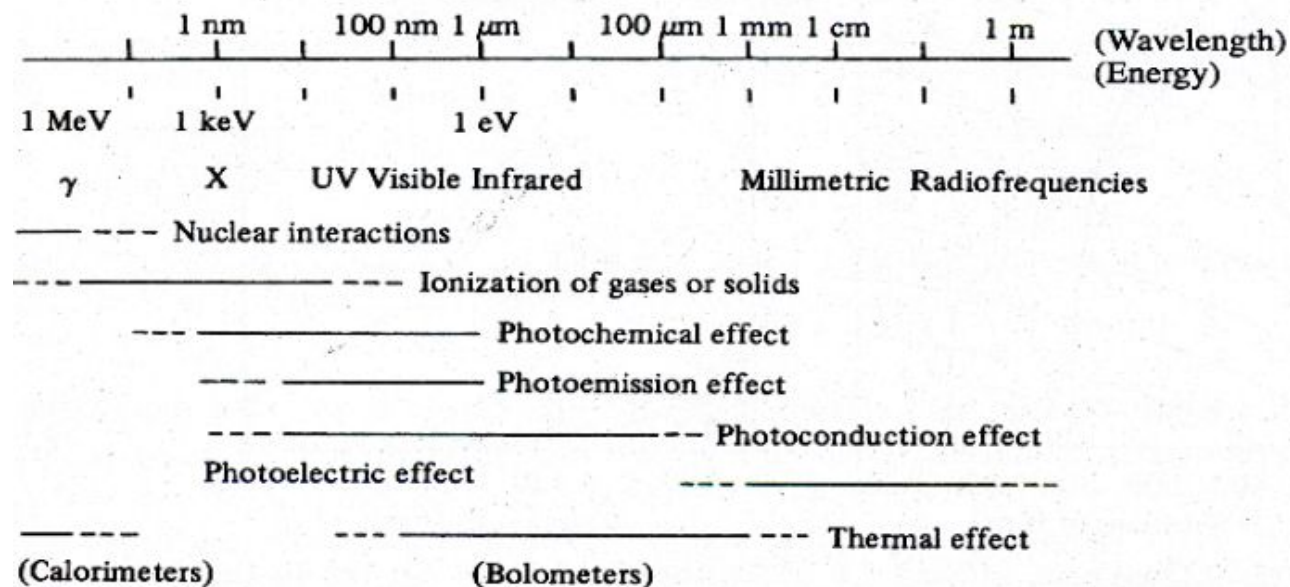
Qualé que é disso tudo:



Qualé que é disso tudo:

7.2 Physical Principles of the Detection of Radiation 299

Table 7.2. Physical interactions and detection of radiation



Deteciores quadráticos e de amplitude

Um detector pode responder de modo linear à **amplitude** ou à **potência** (energia). Pode ser, então, classificado como:

⇒ **de amplitude = coerente**

→ sinal proporcional à amplitude. Sinal pode conter a fase

* frequências baixas: rádio ($\sim \lambda > 200 \mu\text{m}$)

⇒ **quadrático = incoerente**

→ sinal proporcional à potência

* infravermelho, óptico e altas energias

→ quânticos ou térmicos

→ se o sinal é na forma de contagens, segue estatística de Poisson

O que de fato o detector mede?



$$x(t) = x_0(t) + f \left[\int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \int_{\Omega_{\det}} I_{\nu}(\boldsymbol{\Omega}, \nu, t) P(\boldsymbol{\Omega}) \Phi(\nu) d\Omega d\nu \right]$$

Brilho da fonte + céu: Depende da posição, frequência e do tempo

$$I_{\nu} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}]$$

Resposta angular do detector

$$P(\boldsymbol{\Omega}) = \begin{cases} 1, & \text{dentro da região aceita,} \\ 0, & \text{fora da região aceita.} \end{cases}$$

Resposta espectral total

$$\Phi(\nu) = T_{\text{atmosfera}}(\nu) T_{\text{óptica}}(\nu) T_{\text{filtro}}(\nu) \eta(\nu)$$

$x_0(t)$ é o sinal escuro (aditivo)

f é a função que relaciona a entrada e saída do detector

O que de fato o detector mede?



Intensidade específica da radiação incidente:

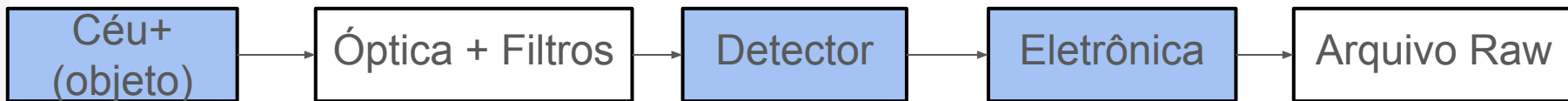
$$I_\nu \quad [\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}]$$

Ela informa quanta energia chega:

- por unidade de área;
- por unidade de frequência;
- por unidade de ângulo sólido;
- em um determinado instante.

A dependência angular indica que diferentes regiões do céu podem ter brilhos diferentes. A dependência em frequência representa o espectro da fonte.

O que de fato o detector mede?



Resposta angular do sistema.

Indica o peso com que a radiação proveniente de cada direção contribui para o sinal. Em um caso idealizado,

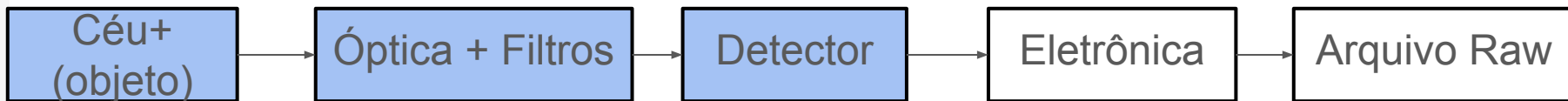
$$P(\Omega) = \begin{cases} 1, & \text{dentro da região aceita,} \\ 0, & \text{fora da região aceita.} \end{cases}$$

Em um instrumento real, essa função pode incluir:

- a PSF do telescópio;
- a resposta espacial de um pixel;
- a transmissão de uma fenda;
- variações de sensibilidade no campo;
- vignetting;
- perdas causadas pelo seeing.

Para uma estrela pontual, **P** determina qual fração da PSF cai dentro do pixel ou da abertura fotométrica.

O que de fato o detector mede?



Resposta espectral total do sistema.

Pode representar a combinação:

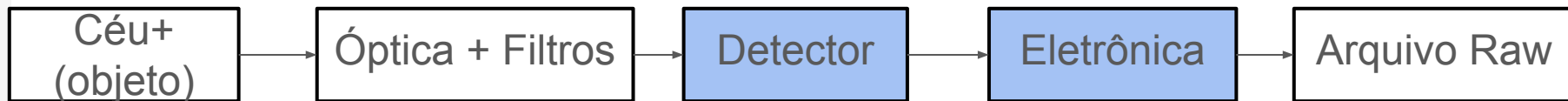
$$\Phi(\nu) = T_{\text{atmosfera}}(\nu) T_{\text{óptica}}(\nu) T_{\text{filtro}}(\nu) \eta(\nu)$$

onde:

- $T_{\text{atmosfera}}$: transmissão atmosférica;
- T_{optica} : transmissão ou refletividade do instrumento;
- T_{filtro} : curva de transmissão do filtro;
- η : eficiência quântica do detector.

Portanto, dois fótons de frequências diferentes não necessariamente possuem a mesma probabilidade de produzir um elétron no detector.

O que de fato o detector mede?



Sinal escuro

$$x_0(t)$$

Sinal registrado mesmo na ausência de radiação do objeto. Pode incluir:

- nível de bias;
- corrente de escuro;
- offsets eletrônicos;
- componentes aditivas do sistema de leitura.

É importante separar esse termo da radiação do céu. No infravermelho, por exemplo, o fundo térmico é radiação real e normalmente entra em I_v , enquanto a corrente de escuro é gerada internamente no detector e entra nesse x_0 .

O que de fato o detector mede?



$f[...]$ Função que transforma a radiação integrada no sinal final.

Em um detector aproximadamente linear, podemos escrever:

$$f(Q) = GQ$$

de maneira que:

$$x(t) = x_0(t) + GQ(t)$$

onde **Q** é a quantidade de radiação efetivamente recebida e **G** representa a conversão para carga, tensão ou ADU.

Em um detector não linear, **f** pode apresentar:

- região de baixa sensibilidade;
- resposta aproximadamente linear;
- não linearidade próxima do full well;
- saturação.

Intervalo dinâmico

O **intervalo dinâmico** descreve a capacidade de um detetor de registrar, na mesma configuração, sinais muito fracos e muito intensos.

$$I_{\min} < I < I_{\max}$$

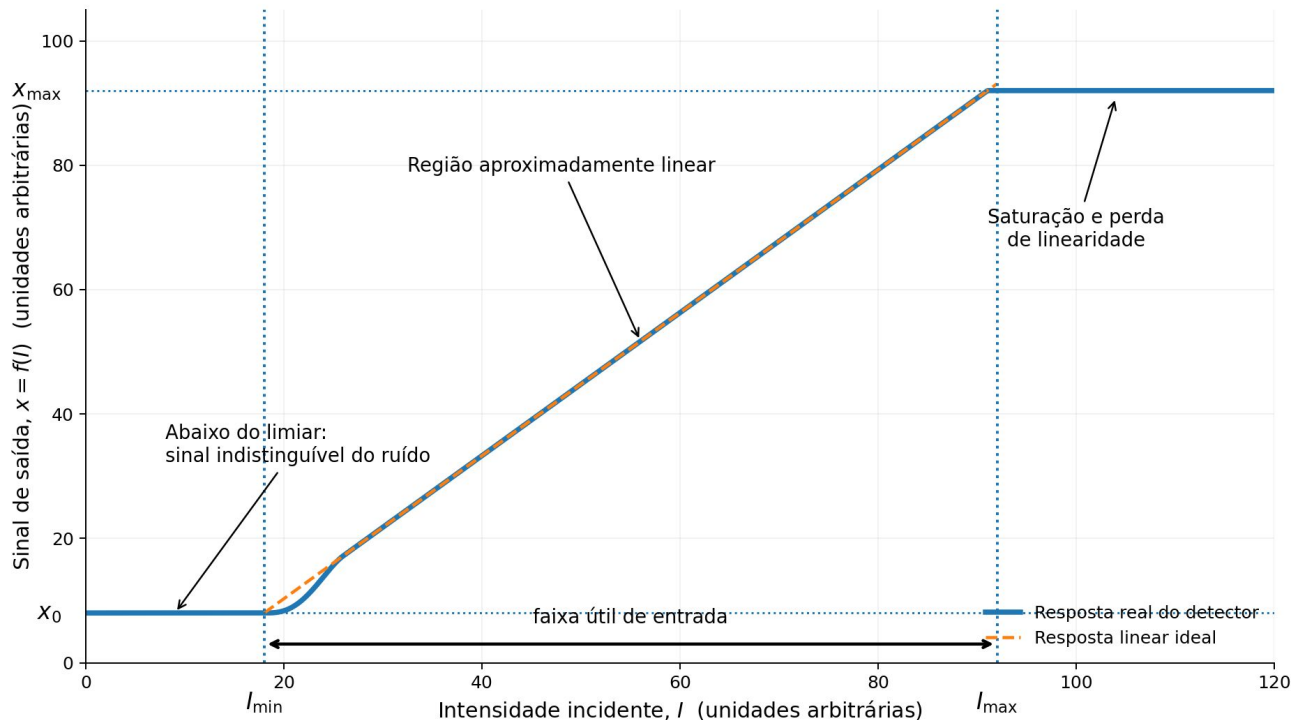
- $I_{\min}$ é a menor intensidade que pode ser distinguida do ruído.
- $I_{\max}$ é a maior intensidade que ainda pode ser medida sem saturação ou não linearidade excessiva

$$DR_{\text{entrada}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad DR_{\text{saída}} = \frac{x_{\max}}{x_{\min}}$$

$$DR = \frac{S_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

$S_{\max}$ é o maior sinal útil antes da saturação

$\sigma_{\min}$ é o ruído efetivo no regime de baixo sinal



Intervalo dinâmico: Abaixo do limite

Para intensidades muito pequenas,

$$I < I_{\min}$$

o detector pode até receber alguns fótons, mas o sinal produzido não pode ser distinguido das flutuações do bias, da corrente de escuro, do fundo do céu e do ruído de leitura.

Não significa necessariamente que o detector produza exatamente zero elétrons. Significa que a medida não é **estatisticamente significativa**.

Um critério comum é definir a detecção por: $S \geq q\sigma$ em que esse q é o nível de significância que você quer.

O limite inferior depende não apenas do detector, mas também de:

- tempo de exposição;
- brilho do céu;
- temperatura do detector;
- número de pixels usados na medida;
- ruído de leitura;
- eficiência quântica;
- abertura do telescópio.

Intervalo dinâmico: Região aproximadamente linear

Na região central do plot, idealmente:

$$x(I) = x_0 + aI$$

onde a é a sensibilidade ou responsividade do detector.

Depois de subtrair o nível de fundo x_0 ,

$$x - x_0 = aI$$

Essa é a região mais importante para fotometria quantitativa, pois dobrar o fluxo incidente deve dobrar o sinal registrado:

$$I_2 = 2I_1 \quad \Rightarrow \quad x_2 - x_0 = 2(x_1 - x_0)$$

Uma pequena perda de linearidade já pode introduzir erros sistemáticos em medidas fotométricas precisas. Por exemplo, suponha que uma estrela produza idealmente 50000 elétrons, mas o detector apresente uma não linearidade de 2%. O erro sistemático pode ser:

$$0,02 \times 50\,000 = 1000 \text{ e}^-$$

Isso pode ser muito maior que o ruído de leitura.

Intervalo dinâmico: Região de saturação

$$I > I_{\max}$$

A resposta deixa de crescer proporcionalmente à iluminação.

Em um CCD, isso geralmente ocorre quando o pixel atinge sua capacidade máxima de armazenamento, chamada **full well capacity**:

$$N_{\text{FW}} \sim 10^4 - 10^5 e^-$$

para muitos detectores astronômicos, embora o valor dependa fortemente da arquitetura e do tamanho do pixel.

Quando o poço satura:

$$N_e \geq N_{\text{FW}}$$

elétrons adicionais não são medidos corretamente. Em alguns CCDs, eles podem transbordar para pixels vizinhos, produzindo o chamado **blooming**.



Intervalo dinâmico: Região de saturação

É importante notar que a região problemática pode começar antes da saturação absoluta. Um detector pode ter:

- saturação eletrônica;
- saturação do conversor analógico-digital;
- não linearidade próxima do full well;
- saturação do amplificador de saída.

Assim, o limite científico útil costuma ser menor que a saturação formal. Por exemplo, pode-se decidir não ultrapassar 80% do full well:

$$N_{\text{max,útil}} \approx 0,8N_{\text{FW}}$$

Intervalo dinâmico de um CCD

Para um CCD, uma aproximação útil é:

$$\text{DR} \approx \frac{N_{\text{FW}}}{\sigma_R}$$

onde:

- N_{FW} é o full well, em elétrons
- σ_R o ruído de leitura, em elétrons por pixel

Considere:

$$N_{\text{FW}} = 100\,000 \text{ e}^- \quad \text{e} \quad \sigma_R = 5 \text{ e}^-$$

Então:

$$\text{DR} = \frac{100\,000}{5} = 20\,000$$

Isso significa que o detector consegue, idealmente, representar sinais em uma faixa de aproximadamente 20000:1.

Intervalo dinâmico de um CCD

Em número equivalente de bits:

$$n_{\text{bits}} = \log_2(\text{DR})$$

resultando em:

$$n_{\text{bits}} = \log_2(20\,000) \approx 14,3$$

Isso não significa necessariamente que uma câmera com conversor de 16 bits tenha 16 bits efetivos. O detector pode ser limitado pelo ruído antes de utilizar toda a resolução do conversor.

Intervalo dinâmico e o conversor ADU

Depois da leitura do detector, o número de elétrons é convertido em ADU:

$$\text{ADU} = B + \frac{N_e}{g}$$

onde:

- B é o nível de bias ou offset aplicado;
- G é o ganho em e⁻/ADU.

Para um conversor de n bits, o maior valor digital possível é:

$$\text{ADU}_{\text{max}} = 2^n - 1$$

Para 16 bits:

$$\text{ADU}_{\text{max}} = 65\,535$$

Conversão para ADU

Se o ganho for:

$$g = 2 \text{ e}^- \text{ ADU}^{-1}$$

o conversor pode representar até aproximadamente:

$$65\,535 \times 2 \approx 131\,070 \text{ e}^-$$

Se o full well for apenas 100.000e^- , quem limita a medida é o pixel. Se o full well for $200\,000 \text{ e}^-$ o conversor irá saturar antes do pixel.

Portanto:

$$N_{\text{max}} = \min(N_{\text{FW}}, g \text{ ADU}_{\text{max}}, N_{\text{sat,eletrônica}})$$

Estatística de Poisson

A distribuição de probabilidades de Poisson (discreta) rege eventos que ocorrem a uma dada **taxa temporal média** que é **independente do tempo** decorrido desde o último evento. Ela fornece a probabilidade de que ocorra um dado número de eventos em um intervalo fixo de tempo.

- Essa estatística rege a detecção de fótons
- É uma distribuição de eventos discretos

Se o número médio esperado de fótons detectados for λ , a probabilidade de detectar exatamente k fótons é:

$$P(k|\lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

onde:

- $k=0,1,2,\dots$
- λ é o número médio de eventos esperados.

Em uma distribuição de Poisson: $\text{Var}(k) = \lambda$ então o desvio padrão é $\sigma_k = \sqrt{\lambda}$

Se observamos N fotoelétrons, estimamos o ruído de Poisson como: $\sigma_{\text{Poisson}} = \sqrt{N}$

O caso Ideal

Em um mundo encantado da imaginação, só teríamos o ruído da própria fonte (e unicórnios e ping 2):

$$\text{SNR} = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}$$

Por exemplo, para: $N = 100 \text{ e}^-$

temos: $\sigma = \sqrt{100} = 10 \text{ e}^-$ e $\text{SNR} = 10$

Para: $N = 10\,000 \text{ e}^-$

temos: $\sigma = 100 \text{ e}^-$ e $\text{SNR} = 100$

A **incerteza absoluta aumenta com o sinal**, mas a **incerteza relativa diminui**:

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Isso explica por que fontes mais brilhantes permitem fotometria relativa mais precisa (desde que não saturem).

A realidade (quase)

O universo não é um moranguinho com açúcar não. Em uma imagem real, a variância total é a soma das variâncias das componentes independentes.

Para uma medida realizada sobre n_{pix} (pixels):

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = N_{\star} + n_{\text{pix}}N_{\text{sky}} + n_{\text{pix}}N_{\text{dark}} + n_{\text{pix}}\sigma_R^2$$

- $N_{\star}$ é o número de elétrons da fonte;
- N_{sky} é o número de elétrons de céu por pixel;
- N_{dark} é a carga térmica por pixel;
- σ_R é o ruído de leitura por pixel.

A realidade (quase)

$$\text{SNR} = \frac{N_{\star}}{\sqrt{N_{\star} + n_{\text{pix}} (N_{\text{sky}} + N_{\text{dark}} + \sigma_R^2)}}$$

Essa equação mostra que I_{min} não é um valor fixo e universal do detector.

Se o céu estiver muito brilhante, como ocorre frequentemente no infravermelho, o termo dominante pode ser:

$$n_{\text{pix}} N_{\text{sky}}$$

Nesse caso, mesmo um detector com ruído de leitura muito baixo terá um limite inferior determinado pelo fundo do céu.

Relação entre Poisson e o limite inferior

Suponha que uma fonte produza $N_{\star}$ elétrons e que o ruído de fundo total, sem incluir a fonte, seja σ_{fundo}

Para exigir uma detecção de 5σ , aproximadamente:

$$N_{\star} \gtrsim 5\sigma_{\text{fundo}}$$

Entretanto, como a própria fonte também possui ruído de Poisson, a equação mais correta é:

$$\frac{N_{\star}}{\sqrt{N_{\star} + \sigma_{\text{fundo}}^2}} \geq 5$$

Elevando ao quadrado:

$$N_{\star}^2 \geq 25 (N_{\star} + \sigma_{\text{fundo}}^2)$$

Portanto, o limite de detecção é definido estatisticamente, não por uma fronteira física abrupta.

A curva lá do plot deve ser entendida como uma representação esquemática: abaixo de I_{min} , a resposta não desaparece necessariamente, mas fica indistinguível das flutuações.

Como melhorar o Intervalo Dinâmico real

Mesmo que o detector tenha um intervalo dinâmico limitado, a estratégia observacional pode ampliar a faixa de fluxos mensuráveis.

Uma técnica comum é combinar:

- exposições curtas para as fontes brilhantes;
- exposições longas para as fontes fracas.

As exposições curtas evitam saturação:

$$N_{\text{brilhante}} < N_{\text{max}}$$

enquanto as exposições longas aumentam o número de fótons das fontes fracas e, conseqüentemente, sua SNR.

Esse procedimento é uma forma de **high dynamic range**, embora na astronomia normalmente seja tratado como combinação de exposições de diferentes tempos.

Importante sobre o ruído de leitura

No plot lá atrás, x_0 representa o nível de saída quando a iluminação é muito baixa. Esse nível pode incluir corrente de escuro ou um offset eletrônico. Mas devemos distinguir:

Nível médio de fundo é diferente de ruído de fundo

Um bias de 1000 ADU pode ser subtraído com facilidade. O que limita a detecção é a flutuação em torno dessa média, por exemplo:

$$1000 \pm 3 \text{ ADU}$$

Nesse caso, o limite inferior relevante está relacionado aos 3 ADU de dispersão, não aos 1000 ADU do bias em si.

Por isso, a melhor definição para o DR acaba sendo:

$$\text{DR} = \frac{S_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ruído}}}$$

é geralmente mais informativa do que:

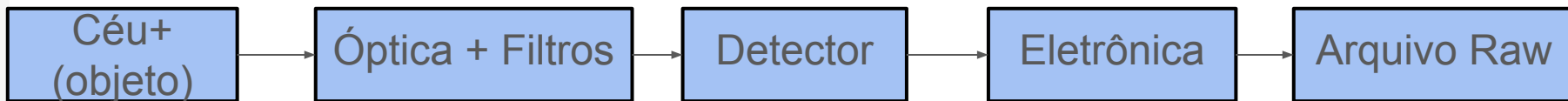
$$\frac{x_{\text{max}}}{x_0}$$

O resumo da ópera

Existe uma faixa intermediária na qual o detector é simultaneamente sensível, linear e não saturado.

É aí que queremos operar

Equação completa real (+-)



Forma mais física para CCDs e detectores infravermelhos

CCDs e arrays infravermelhos não medem diretamente watts. Eles produzem elétrons a partir dos fótons incidentes. A energia de um fóton é:

$$E_{\gamma} = h\nu$$

Assim, o fluxo de fótons associado a uma intensidade I_{ν} é proporcional a:

$$\frac{I_{\nu}}{h\nu}$$

O número esperado de foto elétrons durante uma exposição entre t_0 e t_0+T é:

$$N_e = A_{\text{efetiva}} \int_{t_0}^{t_0+T} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \int_{\Omega_{\text{det}}} \frac{I_{\nu}(\boldsymbol{\Omega}, \nu, t)}{h\nu} P(\boldsymbol{\Omega}) T_{\text{sistema}}(\nu) \eta(\nu) d\Omega d\nu dt$$

Essa é uma forma **mais completa e fisicamente útil** para detectores astronômicos.

Equação completa real (+-)

$$N_e = A_{\text{efetiva}} \int_{t_0}^{t_0+T} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \int_{\Omega_{\text{det}}} \frac{I_{\nu}(\boldsymbol{\Omega}, \nu, t)}{h\nu} P(\boldsymbol{\Omega}) T_{\text{sistema}}(\nu) \eta(\nu) d\Omega d\nu dt$$

É o número de fotoelétrons somamos todos os fótons que chegam durante a exposição, provenientes da região angular observada e pertencentes à banda espectral do instrumento, ponderando cada fóton pelas transmissões do sistema e pela probabilidade de ele ser detectado

Propriedades comum na caracterização de um detector

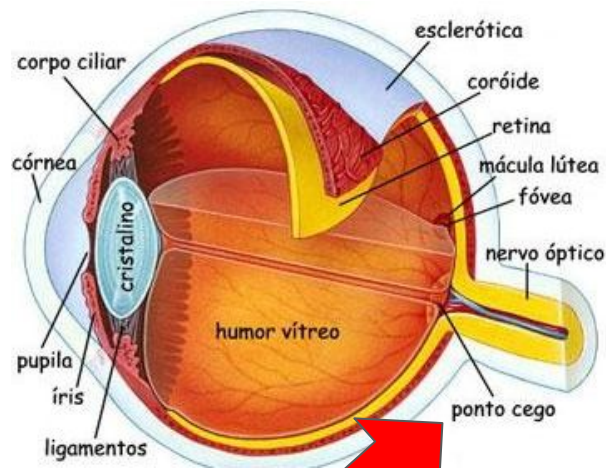
298 7. Detectors

Table 7.1. Detector characteristics

Dynamic range	Sensitivity threshold
	Domain of linearity
	Saturation level
Spectral properties	Quantum efficiency η
	Domain of sensitivity $\Delta\nu$ (or $\Delta\lambda$, or ΔE)
	Spectral response $\eta(\nu)$
	Spectral resolution $\bar{\nu}/\Delta\nu$
Temporal response	Impulsive response $H(t)$
	Response time
	Temporal filter function $\tilde{H}(s)$
Geometrical properties	Geometrical dimensions
	Modulation transfer function $\tilde{G}(w)$
	Homogeneity of spatial properties
	Multichannel: pixel number or format $N \times M$
Noise	Amplifier noise: gain g , fluctuations σ_g
	Readout noise: NEC or σ_R
	Intrinsic noise: NEP or noise temperature
	Spatial noise characteristics: PSD
	Temporal noise characteristics: PSD
	Detector Quantum Efficiency DQE
Polarisation	Polarisation selectivity

Detectores no Óptico

Olho humano



- Primeiro e único detetor astronômico até o século XIX
- não permite o armazenamento de informações
 - ↳ no máximo desenho e anotações
- não permite integrações

Visão noturna: mais sensível,
porém em preto e branco

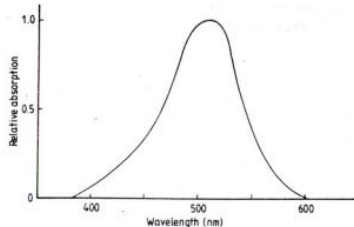


FIGURE 1.1.3 Rhodopsin absorption curve.

Bastonetes: visão noturna

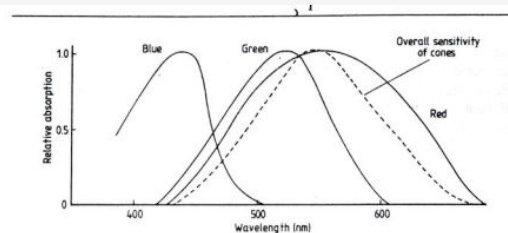


Figure 1.1.5 Absorption curves of pigments involved in cone vision.

Cones: visão diurna

Kitchin

Detectores no Óptico

Placas fotográficas

Sec. 1.3]

From eyes to electronic sensors 9

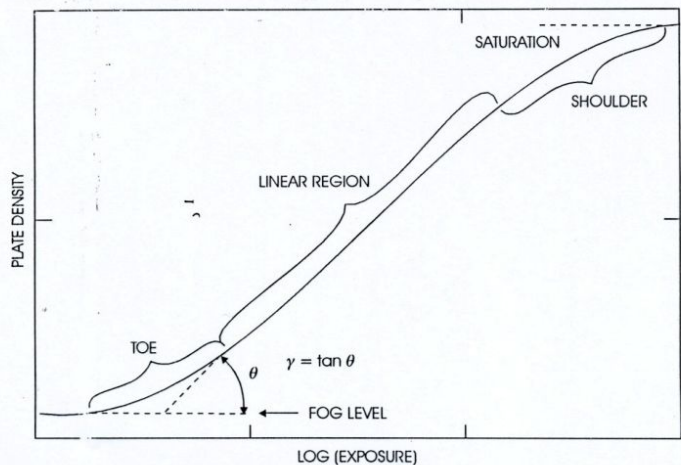


Fig. 1.4. The characteristic curve of a photographic plate is a plot of density versus exposure. The plate is linear over a limited range of exposure.

McLean

- primeiro detector após o olho humano
- aparece na segunda metade do século XIX
- processo fotoquímico de detecção
- uso de microdensitômetro para determinar a densidade, d , que é a medida

$$d = -\log \frac{I}{I_0}$$

↗ I/I_0 : fração da intensidade transmitida por uma placa em um microdensitômetro

Deteciores no Óptico

Placas fotográficas

- Vantagens 
 - ↗ permite integração
 - ↗ armazenamento permanente da informação
 - ↗ grande área e grande número de pixels
- Desvantagens 
 - ↗ intervalo dinâmico pequeno
 - ↗ pouco eficiente/lenta
 - ↗ não uniformidade
 - ↗ falha de reciprocidade
 - mudança de velocidade para um dado nível de iluminância total quando tempo de integração muda

Detectores no Óptico

- surgimento: final da década de 1940

- vantagem com relação a placa fotográfica

- ◊ mais precisa
- ◊ mais sensível
- ◊ resposta mais uniforme

- problema (enorme)

- ◊ é um detetor unidimensional

Fotomultiplicadoras

- Processo físico de detecção

- ◊ Efeito fotoelétrico: elétron criado a partir da absorção de fóton no fotocátodo

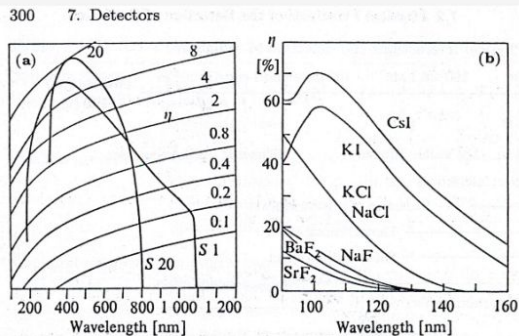


Fig. 7.7. Quantum efficiency η of photocathodes (in %): (a) in the visible and near ultraviolet; (b) in the far ultraviolet. The S1 layer is a Ag-O-Cs photocathode (1930), and the S20 layer is tri-alkaline Na₂KSb (Sommer, 1955). Note the extremely high quantum efficiency and excellent response in the far UV

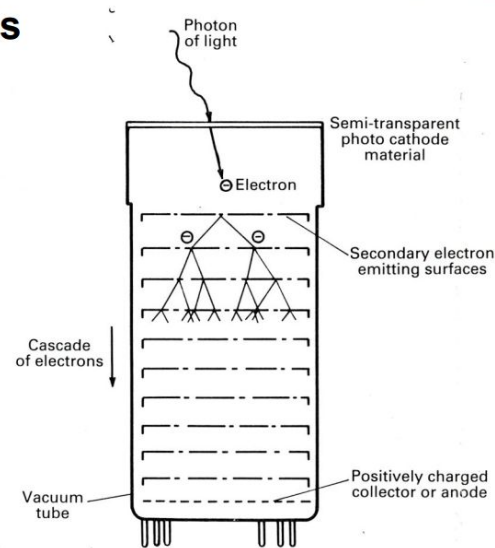


Fig. 1.5 The photomultiplier tube produces a large cascade of electrical current when illuminated with faint light. It employs the photoelectric effect in which very thin slabs of certain materials emit a negatively charged electron when bombarded by a photon of sufficient energy. The electrons are drawn toward the positively charge anode.

McLean

In a Nutshell

Um CCD converte fótons em elétrons, armazena esses elétrons em pixels, transporta os pacotes de carga até um amplificador e, finalmente, converte o sinal analógico em números inteiros, como já vimos, chamados ADU.

CCD

Prêmio Nobel de 2009 (50%)

Willard S. Boyle and George E. Smith

Table 7.3. Intrinsic photoconductivity

Material	Threshold wavelength [μm]	Working temperature [K]	Applications
Germanium Ge	1.88	77	Solar energy
Silicon Si	1.14	300	Astronomical detectors
Cadmium sulphide CdS	0.52	77 to 150	Photography (exposure meters)
Indium antinimide InSb	5.50 (77 K)	4 to 77	Astronomical detectors
Hg _{1-x} Cd _x Te	Varies with x but $\lesssim 20 \mu\text{m}$	20 to 300	Thermal surveillance and astronomical detectors

Silício: de 3000 a 11000 Å

A ideia central de como o CCD coleta e lê a luz (figura ao lado).

Um fóton incidente no silício pode promover um elétron da banda de valência para a banda de condução, produzindo um par elétron-lacuna. O elétron liberado pode então ser coletado pelo campo elétrico do pixel.

Se N_γ fótons atingirem um pixel, o número médio de fotoelétrons produzidos é:

$$N_e = \eta N_\gamma$$

onde η é a eficiência quântica.

Por exemplo, para:

$$N_\gamma = 10\,000 \quad \text{e} \quad \eta = 0,90$$

temos: $N_e = 9000 \text{ e}^-$

O número real não será sempre exatamente 9000, porque a detecção segue estatística de Poisson. Idealmente:

$$\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{N_e}$$

Logo:

$$\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{9000} \approx 95 \text{ e}^-$$

O sinal seria aproximadamente: $9000 \pm 95 \text{ e}^-$

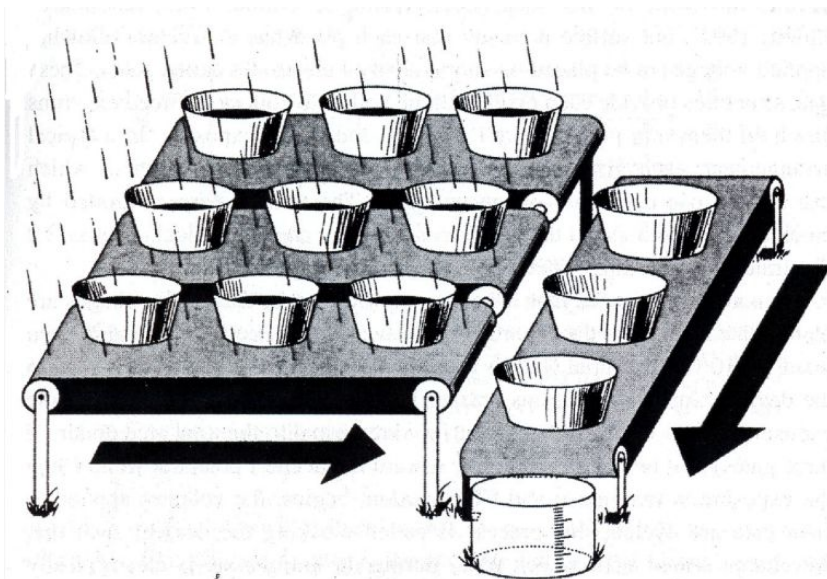


Fig. 2.1. CCDs can be likened to an array of buckets that are placed in a field and collect water during a rainstorm. After the storm, each bucket is moved along conveyor belts until it reaches a metering station. The water collected in each field bucket is then emptied into the metering bucket within which it can be measured. From Janesick & Blouke (1987).

Howell

Essa flutuação é física: ela já existe antes de qualquer amplificador ou conversor digital.

CCD: Conversão Analógico-Digital (ADC)

O ADC recebe uma tensão e a converte em um número inteiro.

Para um ADC de b bits, existem 2^b níveis possíveis, indo de 0 até $ADU_{\max} = 2^b - 1$

Para 16 bits: $ADU_{\max} = 65\,535$

Para 18 bits: $ADU_{\max} = 262\,143$

A sigla ADU significa **Analog-to-Digital Unit**.

O zero eletrônico geralmente não é colocado exatamente em zero ADU. Adiciona-se um pedestal, o **bias**, para evitar que flutuações negativas sejam truncadas.

Assim:

$$ADU = B + \frac{N_e}{g}$$

onde:

- B é o bias em ADU;
- g é o ganho em e^-/ADU .

Essa é a convenção mais comum na astronomia com CCD.

CCD: Conversão Analógico-Digital (ADC)

Considere:

$$B = 1000 \text{ ADU}$$

$$g = 2 \text{ e}^- \text{ ADU}^{-1}$$

$$N_e = 20\,000 \text{ e}^-$$

Então:

$$\text{ADU} = 1000 + \frac{20\,000}{2} = 11\,000$$

Para recuperar os elétrons:

$$N_e = g(\text{ADU} - B)$$

Logo:

$$N_e = 2(11\,000 - 1000) = 20\,000 \text{ e}^-$$

CCD: Velocidade de leitura horizontal (MHz)

A velocidade horizontal é normalmente dada em pixels por segundo f_{pix}

Assim:

$$1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ pixels s}^{-1}$$

Isso equivale a aproximadamente

$$1 \mu\text{s/pixel}$$

O tempo mínimo aproximado de leitura é:

$$t_{\text{read}} \approx \frac{N_{\text{pix}}}{n_{\text{out}} f_{\text{pix}}} + t_{\text{vertical}} + t_{\text{overhead}}$$

onde:

- N_{pix} é o número de pixels lidos;
- n_{out} é o número de amplificadores de saída;
- f_{pix} é a frequência por saída;
- t_{vertical} é o tempo das transferências verticais;
- t_{overhead} inclui inicialização, clocks e transferência de dados.

CCD: Velocidade de leitura horizontal (MHz)

Exemplo: CCD 2048×2048

O número de pixels é:

$$N_{\text{pix}} = 2048^2 = 4\,194\,304$$

Com uma única saída:

A 0,05 MHz

$$t_{\text{read}} \approx \frac{4\,194\,304}{50\,000} \approx 83,9 \text{ s}$$

A 1 MHz

$$t_{\text{read}} \approx 4,19 \text{ s}$$

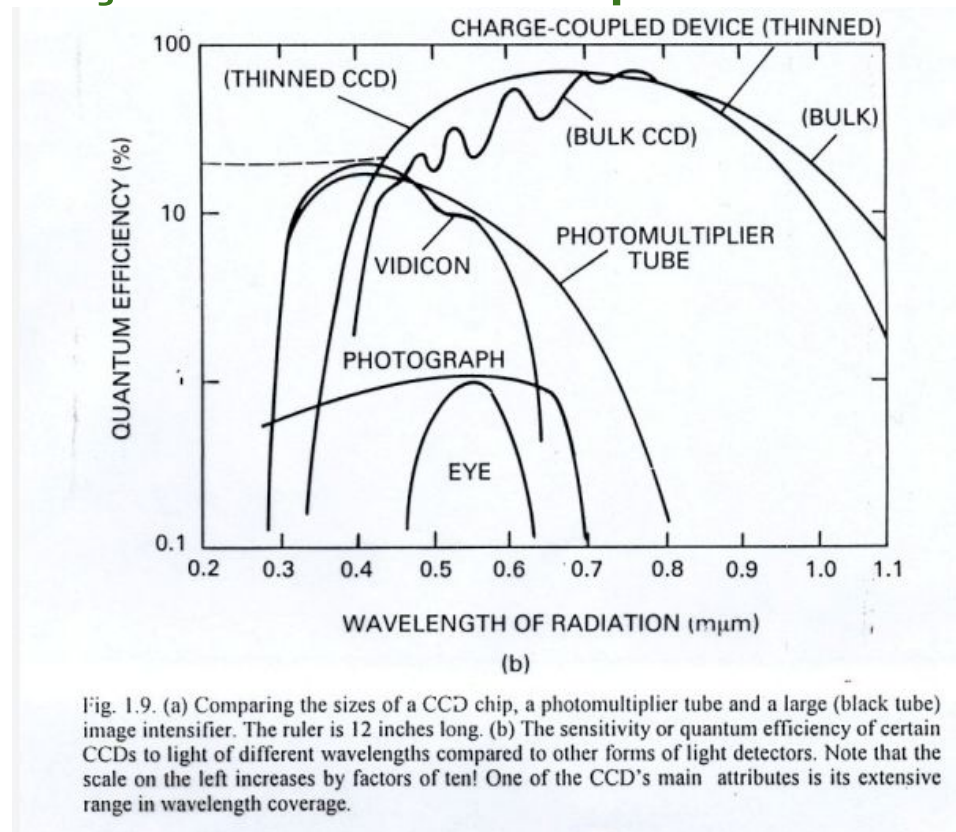
A 5 MHz

$$t_{\text{read}} \approx 0,84 \text{ s}$$

Esses são limites simplificados. Uma câmera real terá tempo adicional devido às transferências verticais e à eletrônica.

Quanto será que é o tempo mínimo na SPARC4 com 1MHz e o CCD inteiro?

Comparação das eficiências quânticas



Brevemente calibração (pois veremos em Processamento de dados)

- Bias
 - ✧ ruído de leitura
 - ✧ nível de pedestal
- Flat-field
 - ✧ diferença de sensibilidade entre pixels devido a inhomogeneidade e também a iluminação não-uniforme
- Fringing
 - ✧ interferência de luz (quase) monocromática no detetor
- Dark
 - ✧ contagens devida a elétrons térmicos
- Pixels ruins
 - ✧ defeitos...

Bias

- Imagens de bias são feitas com obturador fechado e tempo de exposição mínimo
- Imagens de bias contém
 - ✧ Ruído de leitura: número de elétrons adicionado na contagem de um dado pixel
 - duas componentes (inseparáveis)
 - * flutuação na conversão analógico-digital
 - * elétrons espúrios adicionados pela eletrônica nas contagens
 - ruído aditivo e de valor diferente para cada pixel
 - ✧ nível de pedestal adicionado eletronicamente para evitar contagens nulas
- Correção da imagem é feita pela subtração de uma imagem média de bias

Flat

- Imagens de flat são obtidas de um imagem com fluxo uniforme no espaço (=flat).
 - ✧ tela branca uniformemente iluminada
 - ✧ céu no amanhecer ou crepúsculo
- Contagens em todos os pixels deveriam ser exatamente iguais. Mas, não são...
 - ✧ diferença de resposta dos pixels (caso ideal)
 - ✧ diferença de iluminação dos pixels
- Correção é feita dividindo imagens pelo flat normalizado

Dark

- Imagens de dark são realizadas com obturador fechado e com tempo de exposição igual as imagens de ciência
- Registram as contagens devido aos elétrons térmicos
- Representam um ruído aditivo
- O dark é um ruído desprezível em muitos casos. Exemplos
 - ↳ tempos de exposição curtos
 - ↳ medidas diferenciais