

Astrofísica Observacional (FIS-639)

Mestrado e Doutorado em Física e Astronomia



– Aula 4 –

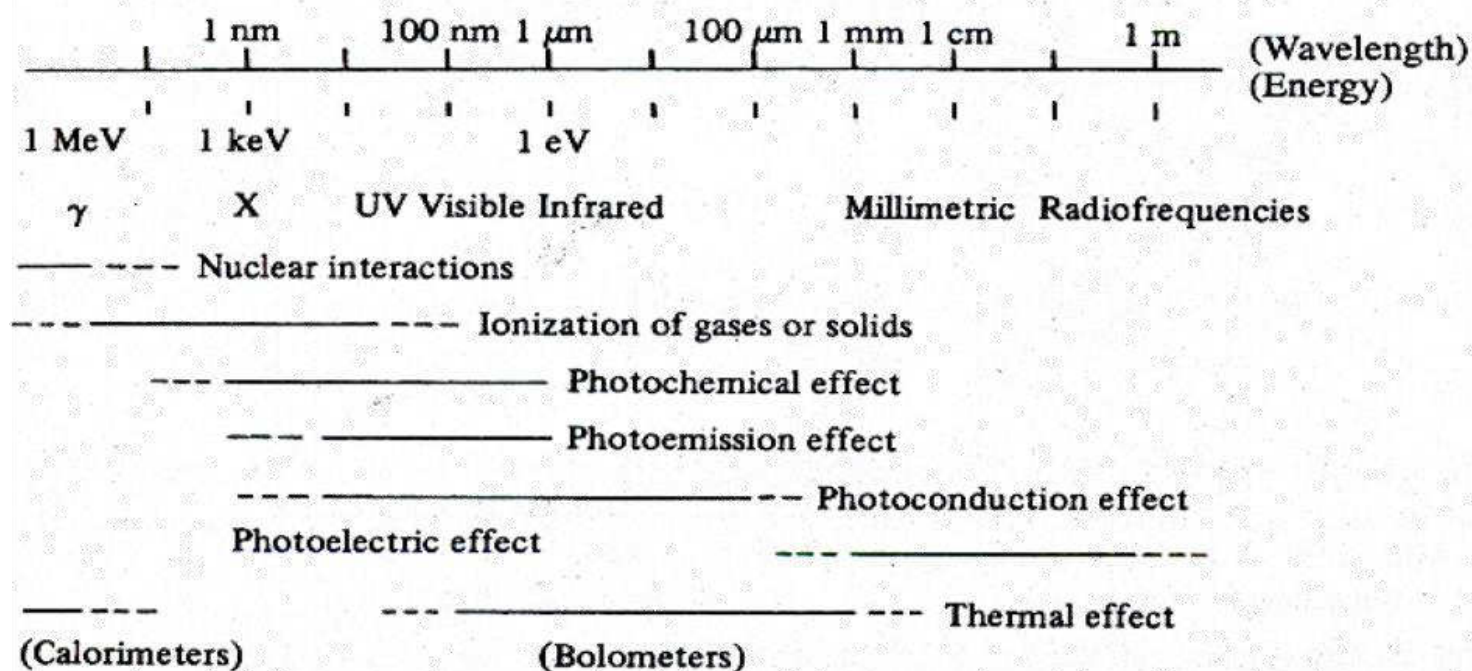
Detectores: no óptico, em rádio e em altas energias.

Prof. Dr. Sergio Pilling

sergiopilling@yahoo.com.br

<http://www1.univap.br/spilling>

Table 7.2. Physical interactions and detection of radiation



Detetores quadráticos e de amplitude

- Um detetor 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

Propriedades gerais de detetores

- A transformação da radiação eletromagnética em um sinal no detetor pode ser expressa como:

$$x(t) = x_0(t) + f \left\{ \int_{\Delta \nu} \int_{\Delta \omega} I(\theta, \nu, t) P(\theta) \Phi(\nu) d\theta d\nu \right\}$$

- onde:
 - θ é a direção angular
 - $I(\theta, \nu, t)$ é a intensidade específica da radiação incidente
 - $P(\theta)$ é a resposta angular do detector
 - $\Phi(\nu)$ é a resposta espectral do detector
 - $x_0(t)$ é o sinal de escuro (ruído aditivo)
 - f é a função que relaciona entrada e saída do detector

Characterizando um detetor

298 7. Detectors

Table 7.1. Detector characteristics

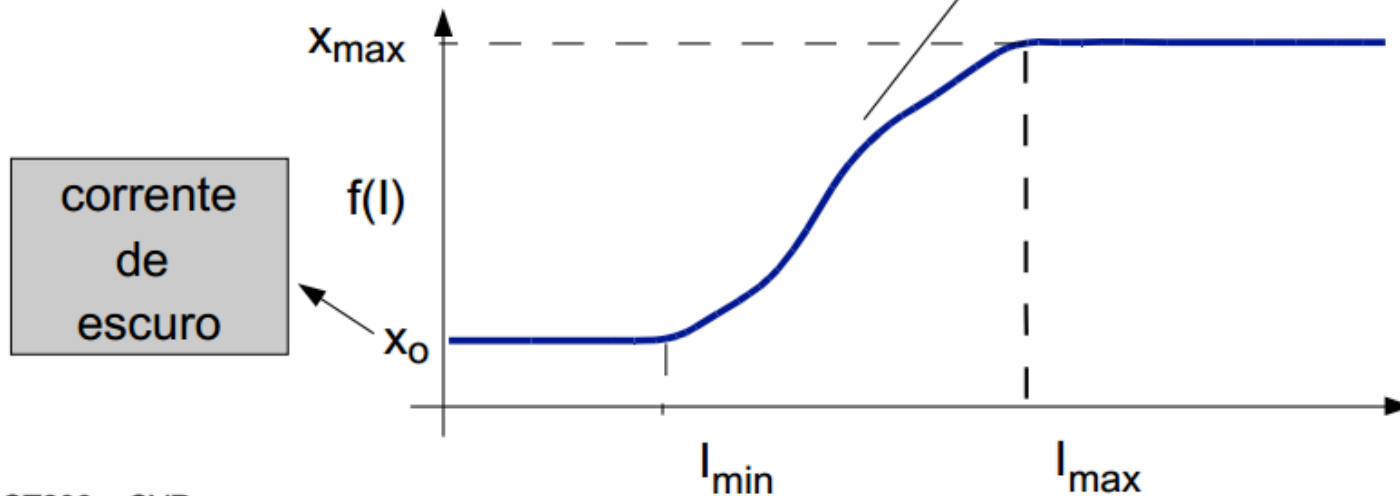
Dynamic range	Sensitivity threshold
	Domain of linearity
	Saturation level
Spectral properties	Quantum efficiency η
	Domain of sensitivity $\Delta\nu$ (or $\Delta\lambda$, or ΔE)
	Spectral response $\eta(\nu)$
	Spectral resolution $\bar{\nu}/\Delta\nu$
Temporal response	Impulsive response $H(t)$
	Response 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

Léna

Intervalo dinâmico de um detetor

- Limite de detecção, I_{\min}
 - ◊ $f(I) = 0$, se $I < I_{\min}$
- Saturação, I_{\max}
 - ◊ $f(I) = \text{constante}$, se $I > I_{\max}$
- Intervalo dinâmico: x_{\max}/x_0

Idealmente, a resposta deveria ser linear.



Resposta espacial de um detetor

- Detetores unidimensionais
 - ✧ Um detetor pode ter apenas um canal. Nesse caso, o sinal representa um ângulo sólido do céu e um intervalo de comprimento de onda
 - ✧ uma imagem (ou espectro) da fonte é obtida por varredura. Esse procedimento tem a vantagem de que todos os pontos foram obtidos com o mesmo detetor (portanto com exatamente a mesma transformação)
- Detetores multicanais
 - ✧ cada canal (pixel = picture element) recebe um ângulo sólido ou intervalo de comprimento de onda
 - ✧ cada canal pode possuir características diferentes, o que impõe cuidados na redução de dados

Eficiência quântica

- A eficiência quântica, η , é definida como:

$$\eta = \frac{\text{número médio de fótons detectados}}{\text{número médio de fótons incidentes no detector}}$$

- A eficiência quântica de um detector, δ (DQE), é o quadrado da razão entre o sinal/ruído de saída e o sinal/ruído de entrada

$$\delta = \text{DQE} = \frac{\left(\frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\langle \bar{N}^2 \rangle} \right)_{\text{detetor ideal}}}{\left(\frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\langle \bar{N}^2 \rangle} \right)_{\text{detetor real}}}$$

No Léna, a expressão acima está invertida.

Pode ser mostrado que $\delta = \eta$, no caso em que a única flutuação do sinal é a de Poisson, isto é, quando o detetor não acrescenta outras flutuações à medida.

Ruído de amplificação (ruído multiplicativo)

- É bastante comum que o processo de detecção inclua uma amplificação do sinal = ganho
- Podemos estimá-lo por sua média e desvio padrão:
 - ◊ \bar{g} e σ_g
→ assim, o sinal observado, S , é: $S = \bar{g}\bar{N} = \bar{g}N\eta$
- Nesse caso, temos que:

- ◊
$$DQE = \eta \frac{1}{1 + \eta N \frac{\sigma_g^2}{\bar{g}^2}}$$

em CCDs, o ganho é menor que 1

Ruído de leitura (ruído aditivo)

- O ruído de leitura é associado a uma flutuação adicional no processo de mensuração do sinal
- Assim, ele não altera o valor médio da medida (o valor médio do ruído de leitura é nulo), mas apenas aumenta sua flutuação. Pode, portanto, ser descrito apenas por seu desvio padrão:

$$\diamond \sigma_R$$

- Considerando apenas essa contribuição, a DQE é dada por:

$$DQE = \delta = \eta \left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\eta \bar{N}} \right)^{-1}$$

- No caso dos dois ruídos existirem, temos:

$$\delta = \eta \left[1 + \eta \bar{N} \frac{\sigma_g^2}{\bar{g}^2} + \frac{\sigma_R^2}{\bar{g}^2 \eta \bar{N}} \right]^{-1}$$

As expressões de DQE não me parecem corretas. Eu utilizo a formulação do MacLean p. 319.

- Como levar δ a η ?
 - ◇ aumentando o ganho OU
 - ◇ diminuindo ruído

Detectores no ótico.

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

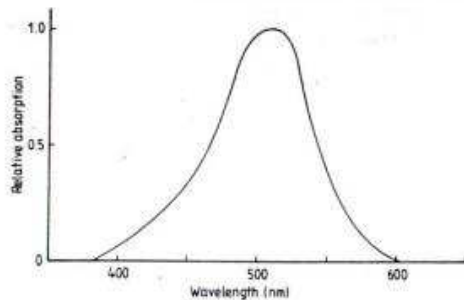


Figure 1.1.3 Rhodopsin absorption curve.

Bastonetes: visão noturna

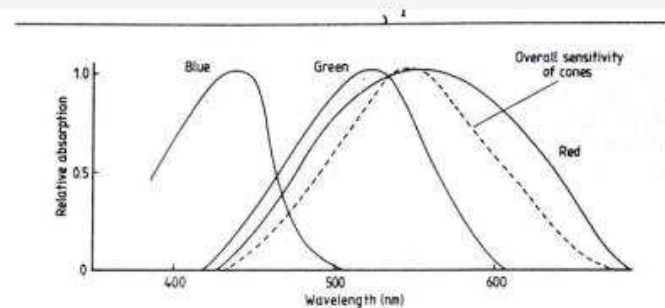


Figure 1.1.5 Absorption curves of pigments involved in cone vision.

Cones: visão diurna

Kitchin

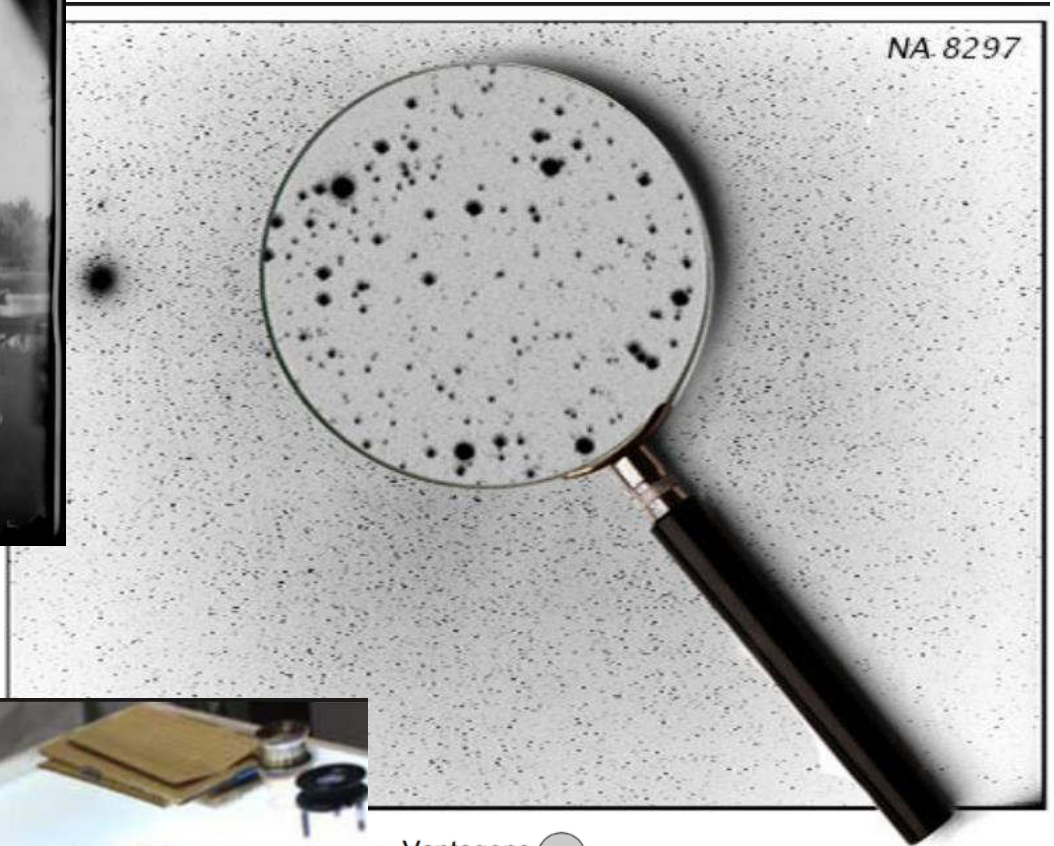
Placas fotográficas

- 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



- 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

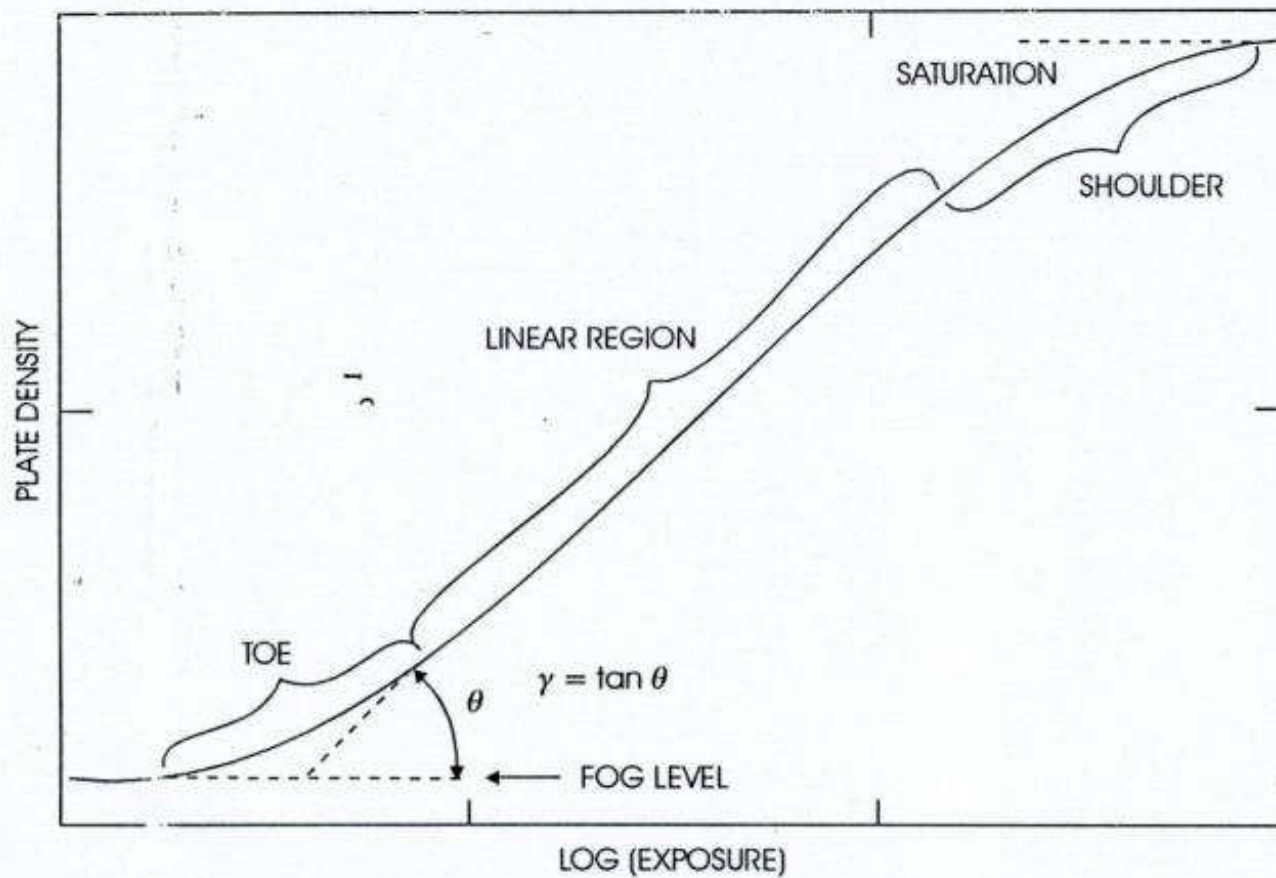


Fig. 1.4. The characteristic curve of a photographic plate is a plot of density versus exposure. The plate is linear over a limited range of exposure.

Fotomultiplicadoras



Photomultiplier



Dynodes inside a photomultiplier tube

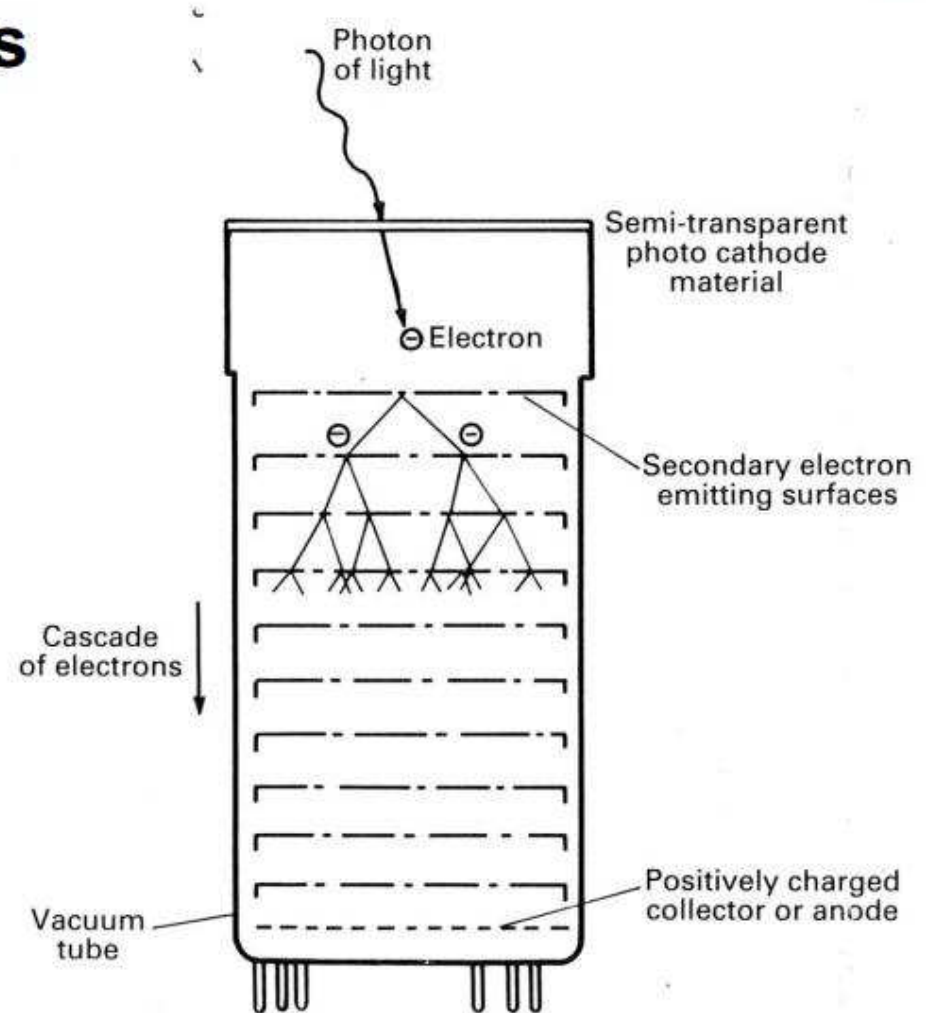
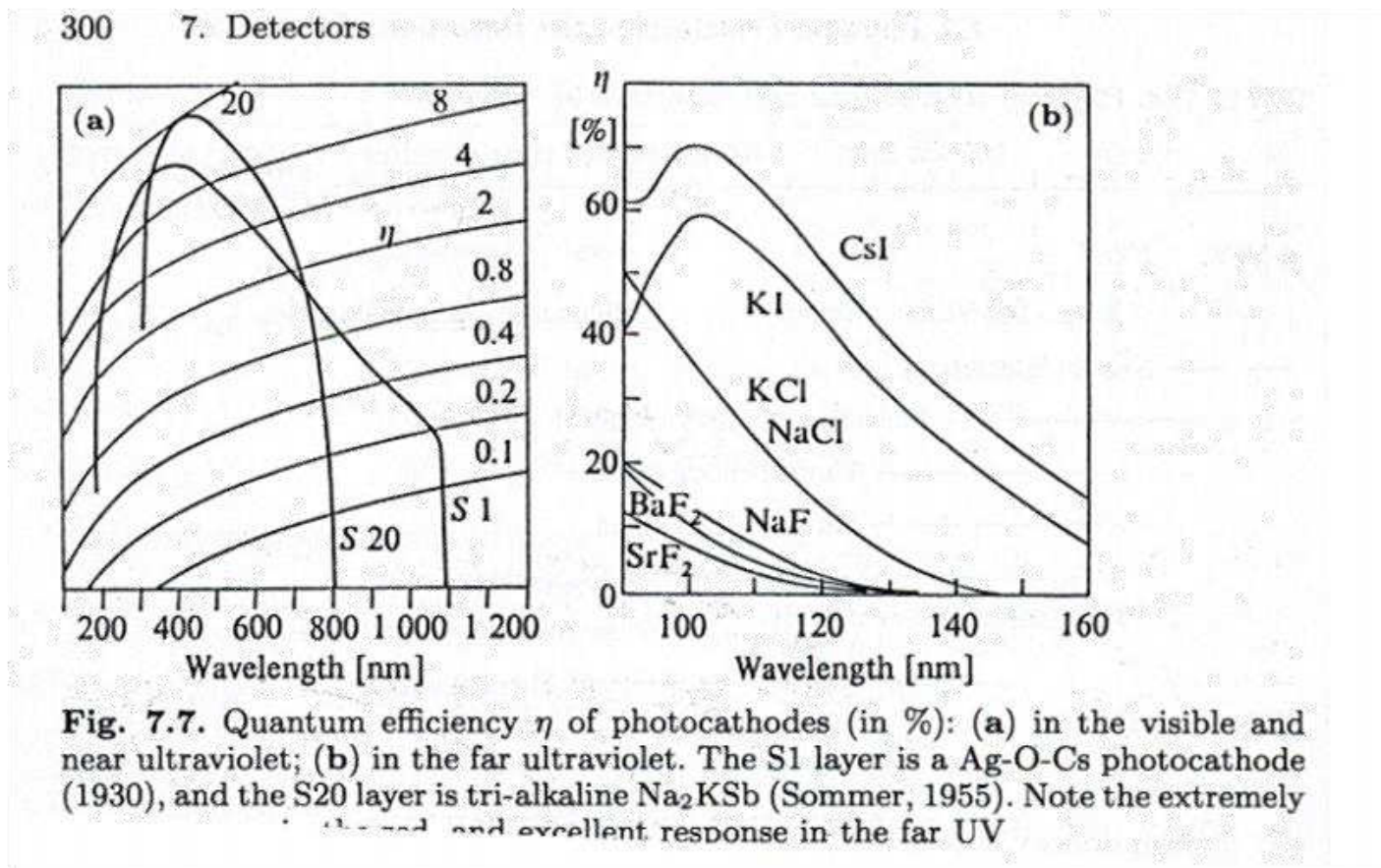


Fig. 1.5. The photomultiplier tube produces a large cascade of electrical current when illuminated with faint light. It employs the photoelectric effect in which very thin slabs of certain materials emit a negatively charged electron when bombarded by a photon of sufficient energy. The electrons are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

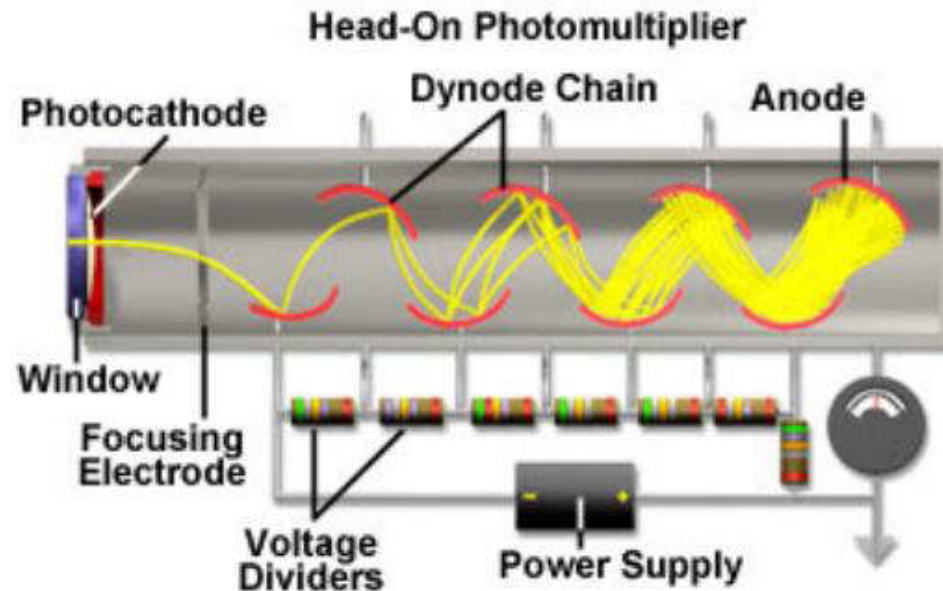
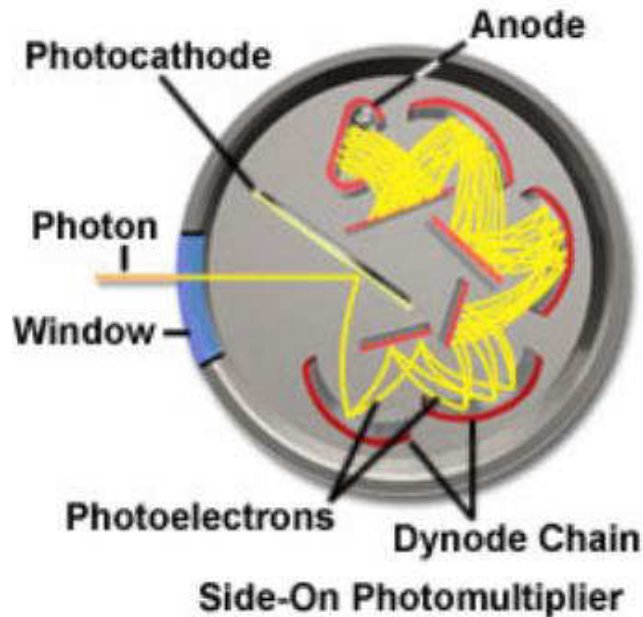
McLean

- Processo físico de detecção

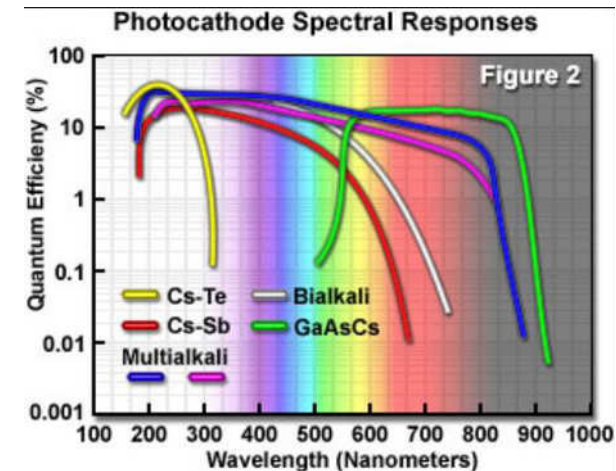
⇒ Efeito fotoelétrico: elétron criado a partir da absorção de fóton no fotocátodo



Common Photomultiplier Dynode Chain Configurations

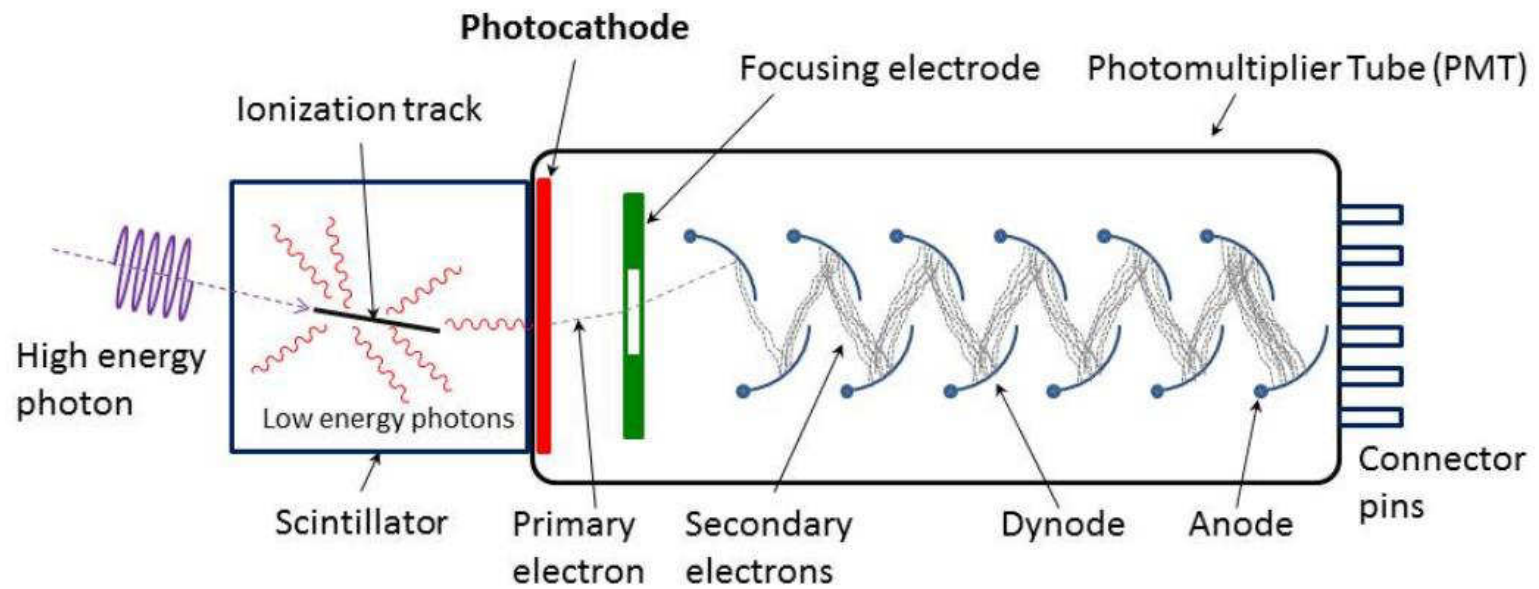


- Mecanismo de multiplicação
 - ◊ $g \rightarrow$ foto e⁻ no fotocátodo
 - ◊ \rightarrow acelerado até o 1o. dinodo
 - ◊ \rightarrow multiplicados
 - ◊ \rightarrow acelerado até o 2o. dinodo
 - ◊ \rightarrow multiplicados
 - ◊ ...
 - ◊ \rightarrow cargas coletadas no anodo (positivo)
- Dinodo: material/superfície fotoemissiva
 - ◊ ~ 10 dinodos
 - ◊ ddp entre dinodos: 100-150V
 - ◊ ddp total entre 1000 e 1500V

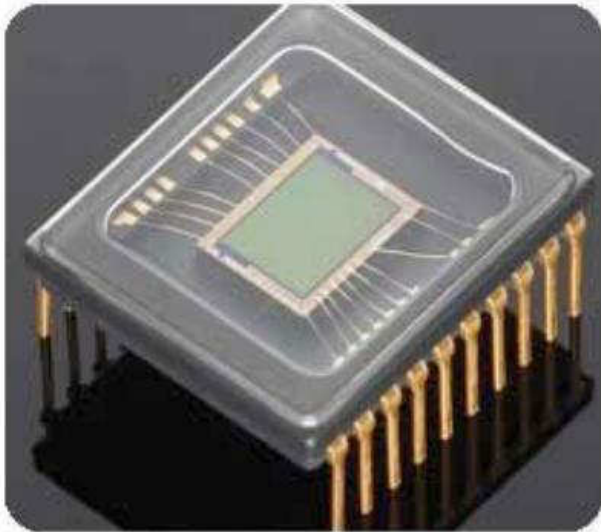


- surgimento: final da década de 1940
- Dois modos de detecção
 - ↳ analógico: medida da tensão
 - ↳ contagem de fótons = detecção de bursts
 - discriminador: elimina bursts espúrios
 - estatística de Poisson: $\sigma = N^{1/2}$
- Características
 - ↳ ganho: $10^5 - 10^6$
 - ↳ não existe limite mínimo de detecção – threshold
 - ↳ linear
 - ↳ sensível entre 20nm e 1200nm
 - ↳ tempo de resposta: alguns ns
 - ↳ sensibilidade praticamente constante com λ
 - ↳ se temperatura não nula possui corrente de escuro
 - elétrons térmicos emitidos no fotocátodo ou dinodo
 - ↳ resposta não-uniforme
 - existe diferença entre instrumentos nominalmente iguais
 - diferença na sensibilidade de acordo com a região de incidência
- vantagem com relação a placa fotográfica
 - ↳ mais precisa
 - ↳ mais sensível
 - ↳ resposta mais uniforme
- problema (enorme)
 - ↳ é um detetor unidimensional

É também utilizada para detectar fótons de energias mais altas!!!

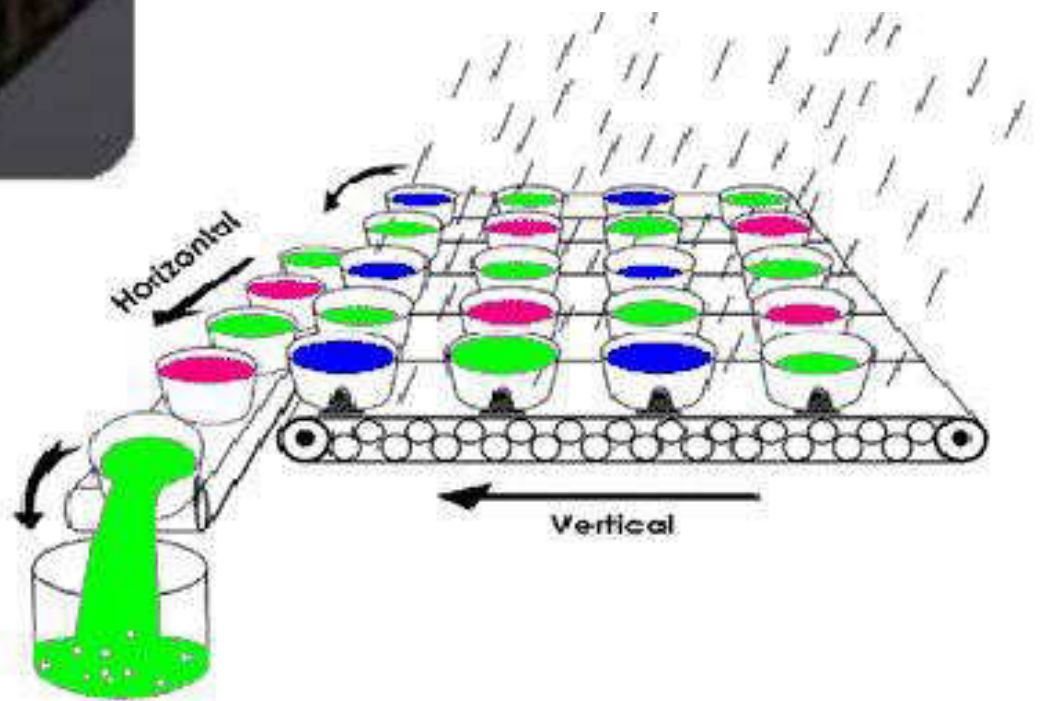
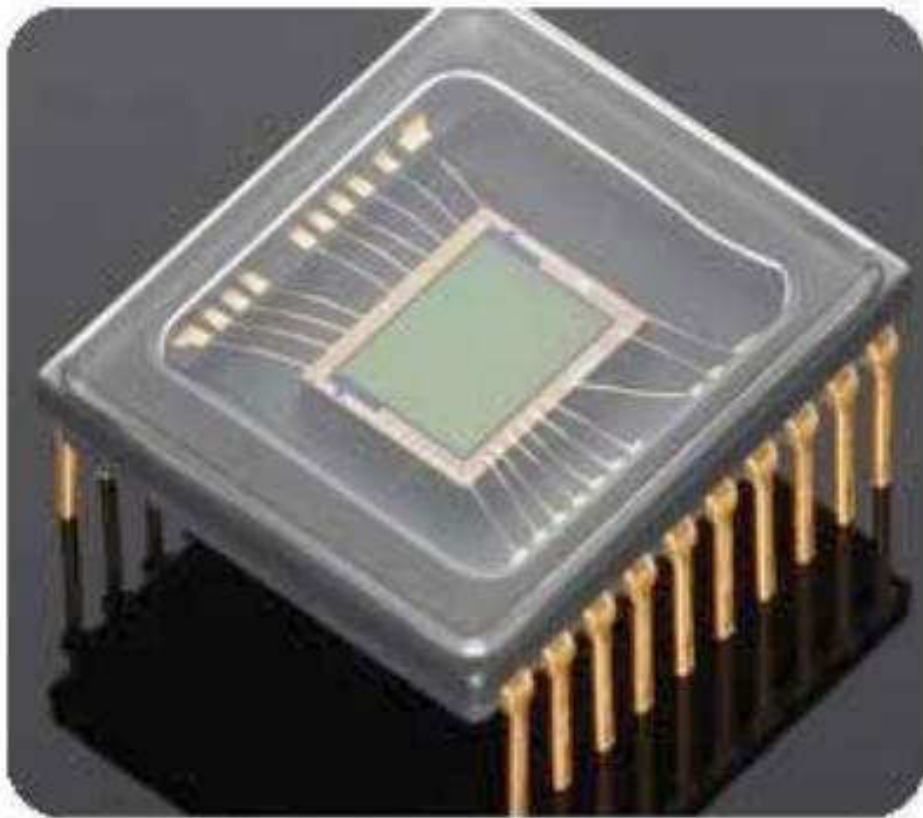


CCD – Charge-coupled display



CCD Megapixel Camera Module <LZOP3721>





- Princípio físico de detecção
 - ↳ produção de carga em um semiconductor a partir da incidência de fótons ($\eta > 0.5$, tipicamente 0,9)
- As cargas produzidas em uma dada região do semiconductor ficam confinadas durante o tempo de integração (armazenamento)
- Com o final da integração, as cargas são transportadas (charge transfer = charge coupling)
- registro das cargas: pacotes individuais são convertidos a uma ddp e digitalizados em um (ou poucos) ponto(s) de leitura

Níveis de energia em um sólido

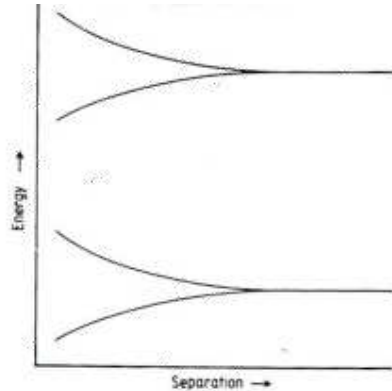


Figure 1.1.6 Schematic diagram of the splitting of two of the energy levels of an atom due to its proximity to another similar atom.

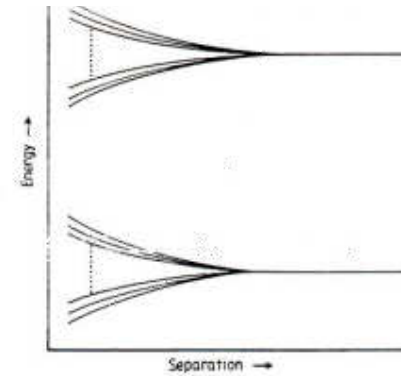


Figure 1.1.7 Schematic diagram of the splitting of two of the energy levels of an atom due to its proximity to many similar atoms.

Kitchin

Níveis de energia de um átomo transformam-se em bandas em um sólido

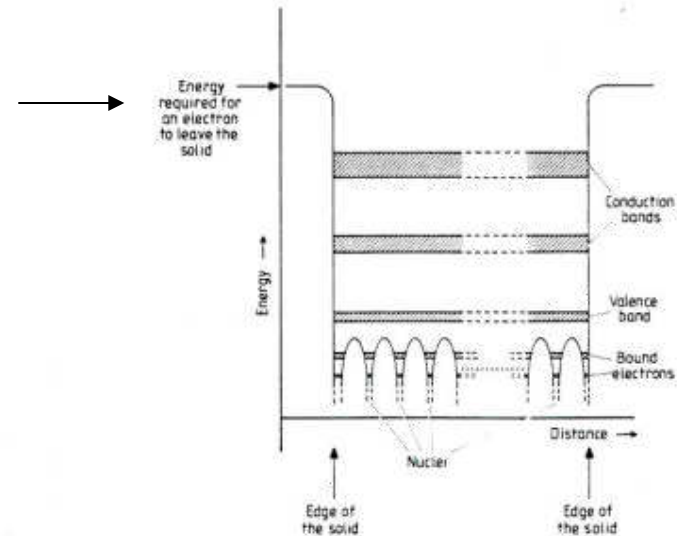


Figure 1.1.8 Schematic energy level diagram of a solid.

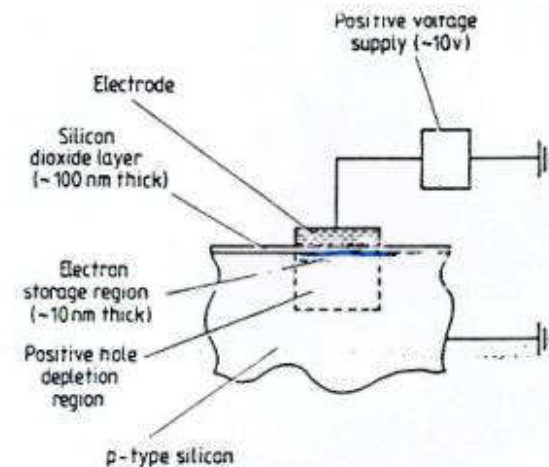


Figure 1.1.11 Basic unit of a CCD.

- Um CCD é uma matriz de
 - ◊ MIS (metal insulator semiconductor capacitor) ou
 - ◊ MOS (metal oxide semiconductor)
- Componentes de cada capacitor
 - ◊ eletrodos (=portões, *gates*)
 - placas de metal que submetem o cristal a uma tensão
 - ◊ os eletrodos são separados do semiconductor por uma camada isolante (óxido)
 - ◊ semiconductor (onde o fóton é convertido em elétron)

- Linhas de um CCD são separados por material isolante (channel stops)

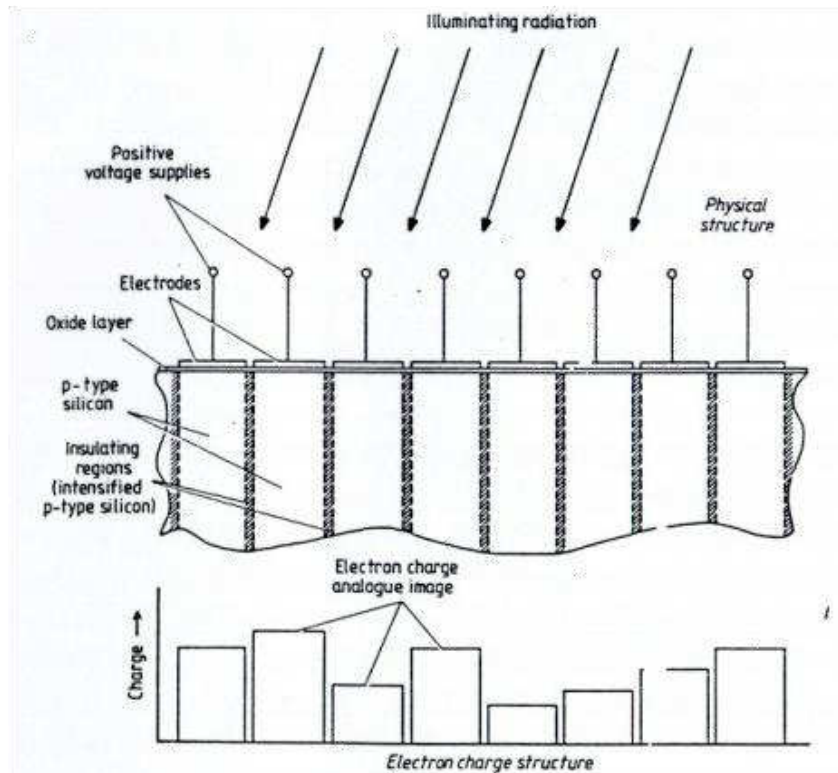


Figure 1.1.12 Array of CCD basic units.

Kitchin

Desse modo os fótons que incidem em uma dada linha produzem elétrons que ficam aprisionados nessa linha.

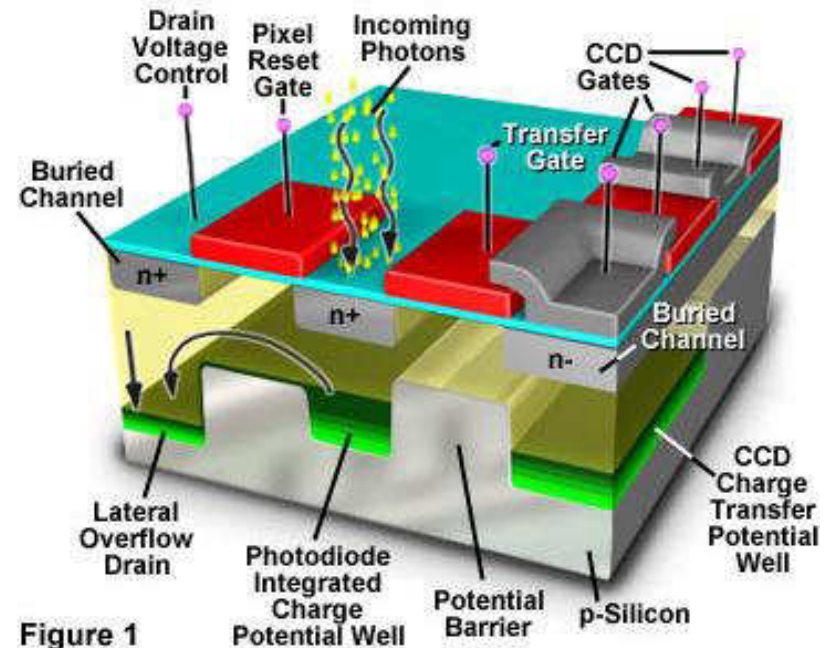


Figure 1

- Os CCDs possuem um mecanismo de aprisionamento de cargas através da aplicação de diferentes tensões em eletrodos adjacentes

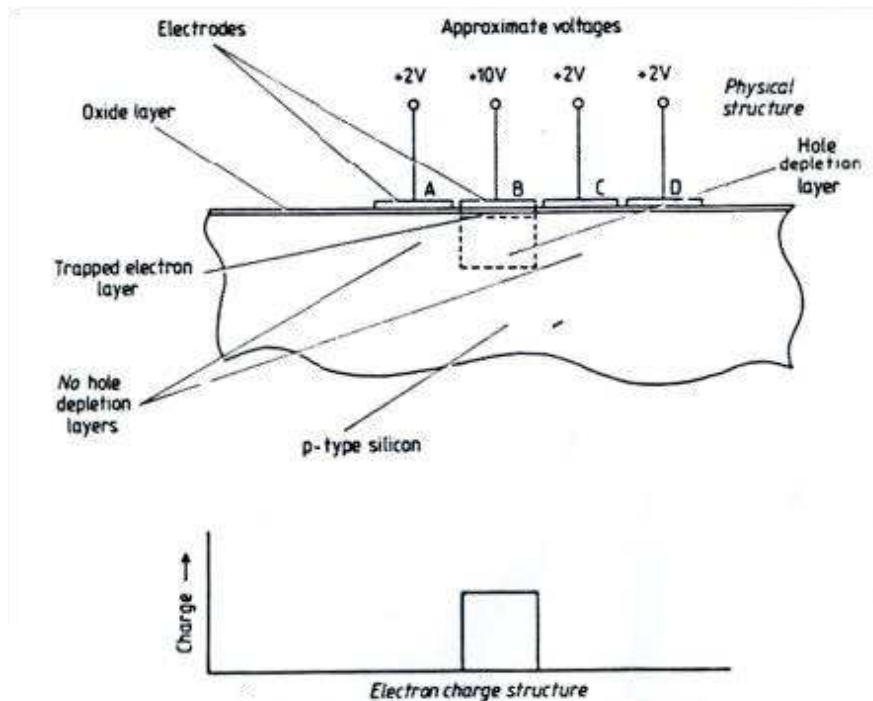


Figure 1.1.13 Active electron charge trapping in CCD.

Atenção!

Em uma direção os elétrons são confinados por uma camada isolante, na outra, através do processo ao lado.

Kitchin

Transferência de carga em um CCD

Eficiência de transferência de carga (CTE): fração de elétrons transportados em cada mudança de eletrodo. Valor típico: > 99.9999%

Eficiência total

pixels/CTE	0.99999	0.98
100	0.9990	0.13
1000	0.9900	$2 \cdot 10^{-9}$

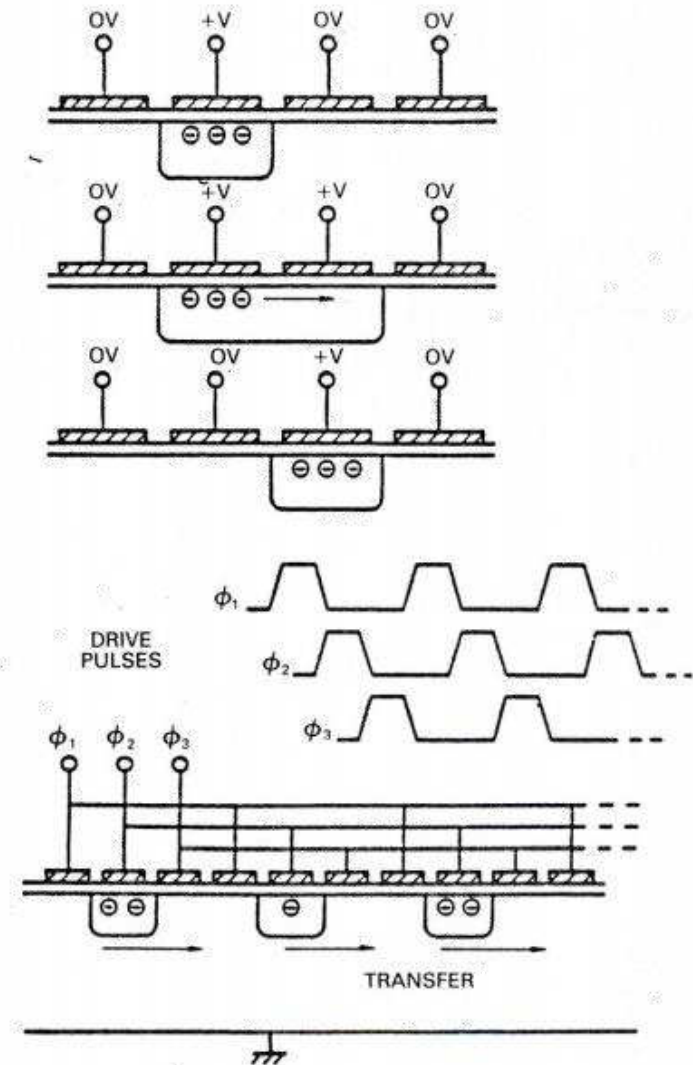


Fig. 6.9. Charge-coupling in a three-phase CCD and the associated timing waveform or clock pattern. In practice the degree of overlap between one electrode and the next depends on the CCD design.

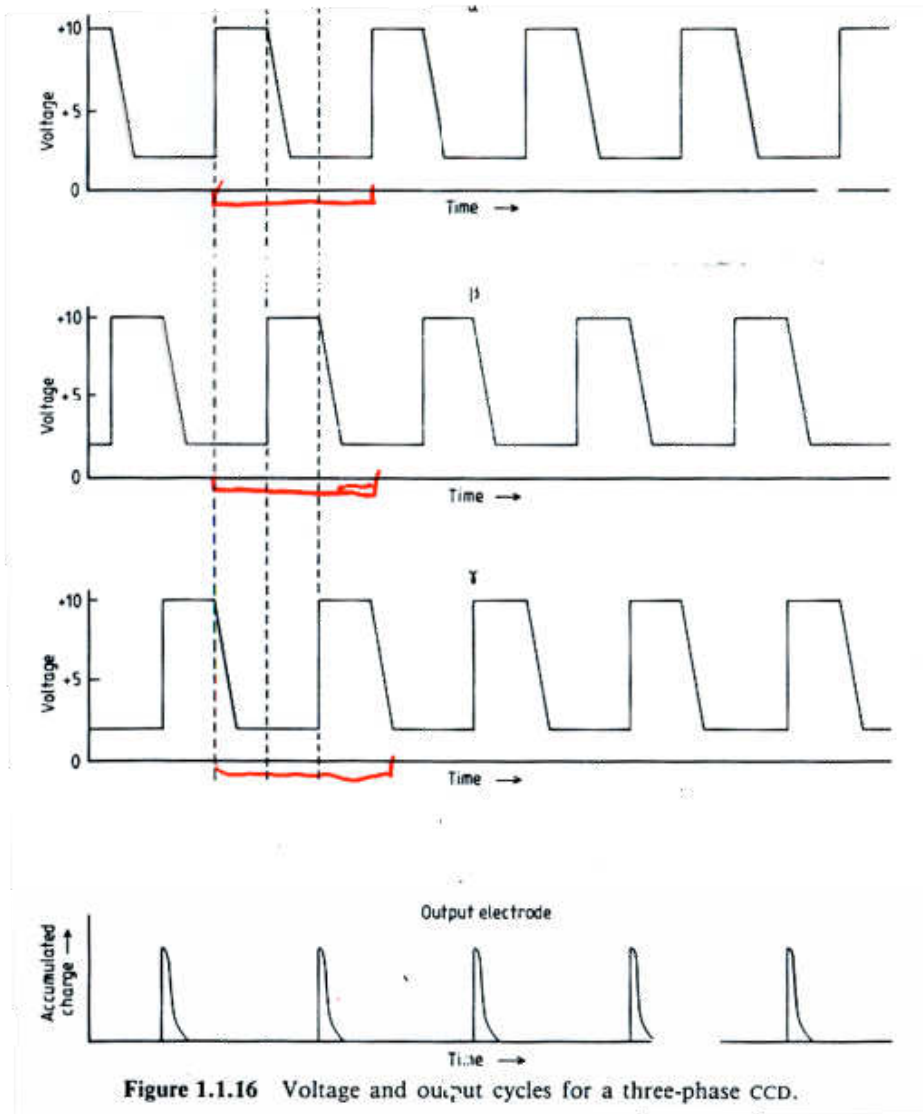
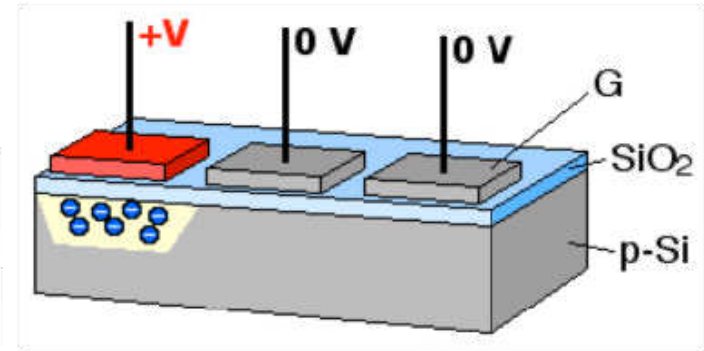


Figure 1.1.16 Voltage and output cycles for a three-phase CCD.

Kitchin

Wikipedia



Vertical Overflow Drain Structure

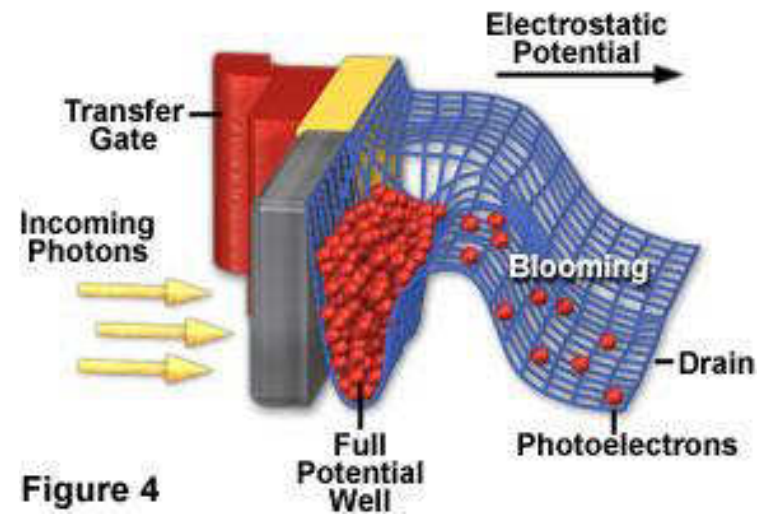


Figure 4

Leitura das cargas

- A última linha no sentido da transferência de cargas não incide luz
- Nessa linha, a transferência ocorre na direção contrária ao região que coleta fótons
- No final dessa linha encontra-se o dispositivo de leitura. Assim, cada pacote de cargas correspondente a cada pixel do CCD é lido nesse ponto
- O processo de leitura de um CCD é da ordem de dezenas de segundos (tempo morto importante para integrações curtas)

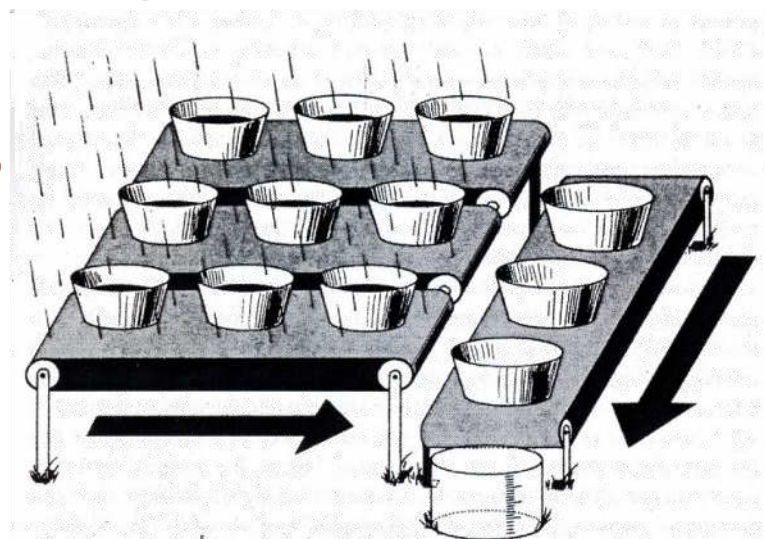


Fig. 2.1. CCDs can be likened to an array of buckets that are placed in a field and collect water during a rainstorm. After the storm, each bucket is moved along conveyor belts until it reaches a metering station. The water collected in each field bucket is then emptied into the metering bucket within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

Algumas propriedades dos CCDs

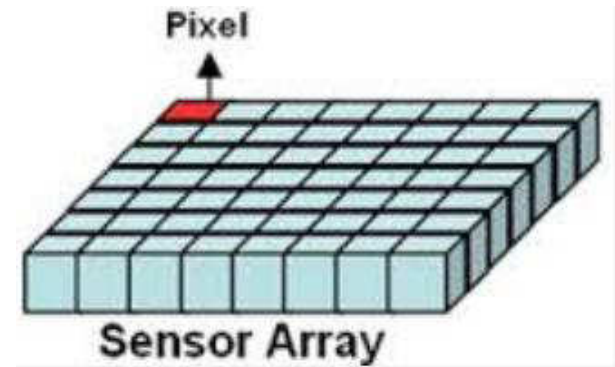
Tamanhos

- Pixel

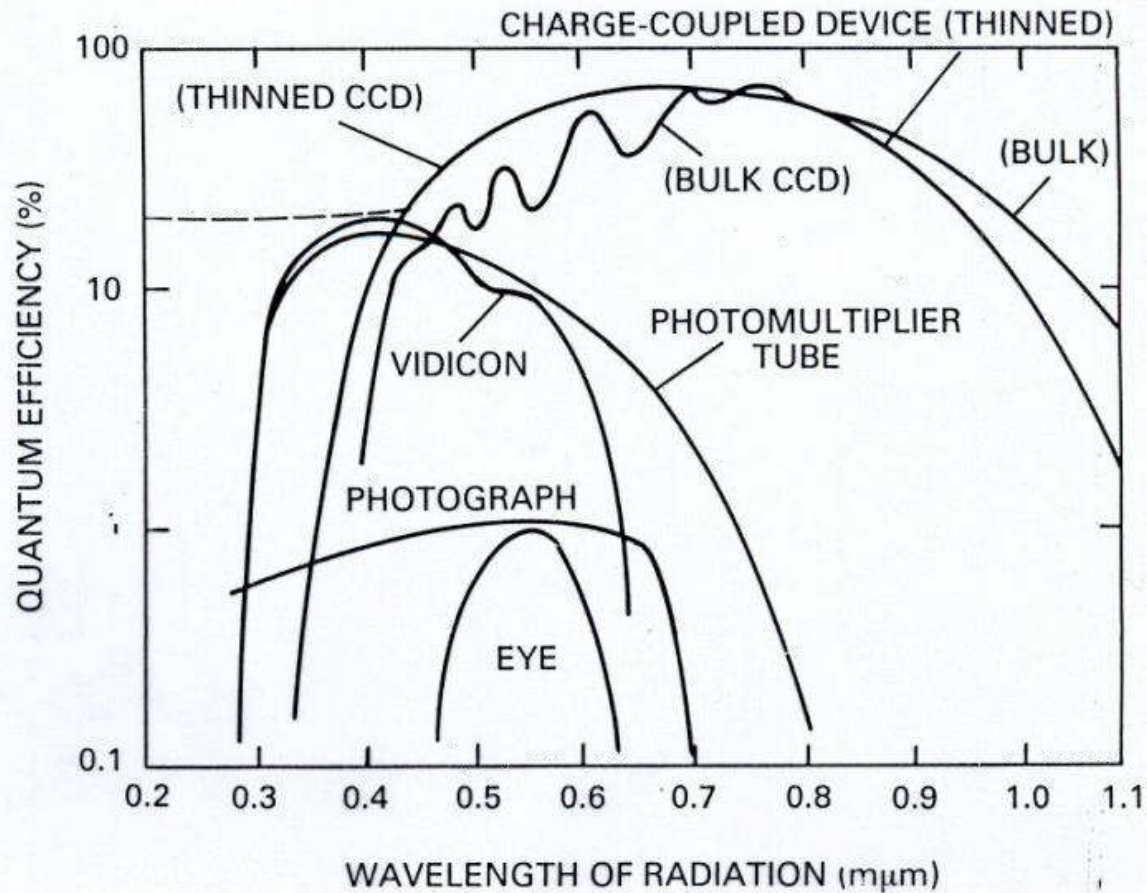
- ↳ valores típicos: 20 μm
- ↳ valores mínimos: 2 - 10 μm

- CCD

- ↳ valores típico: 2000 x 2000 pixels
- ↳ tamanhos máximos: 5000 x 10000, 7200 x 9200
 - grandes CCD podem possuir mais de um ponto de leitura
- ↳ mosaicos



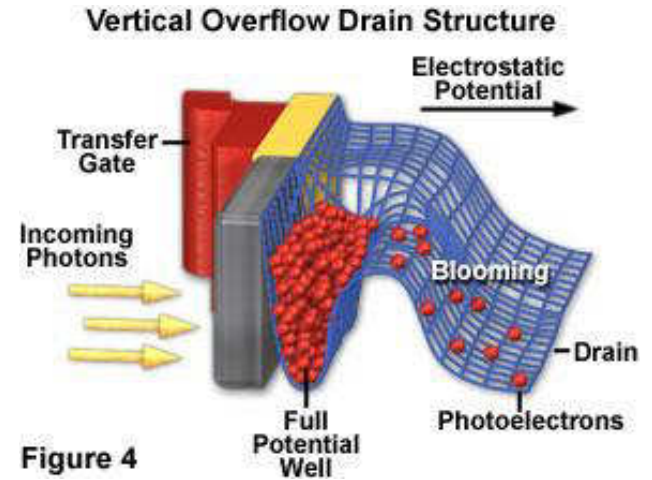
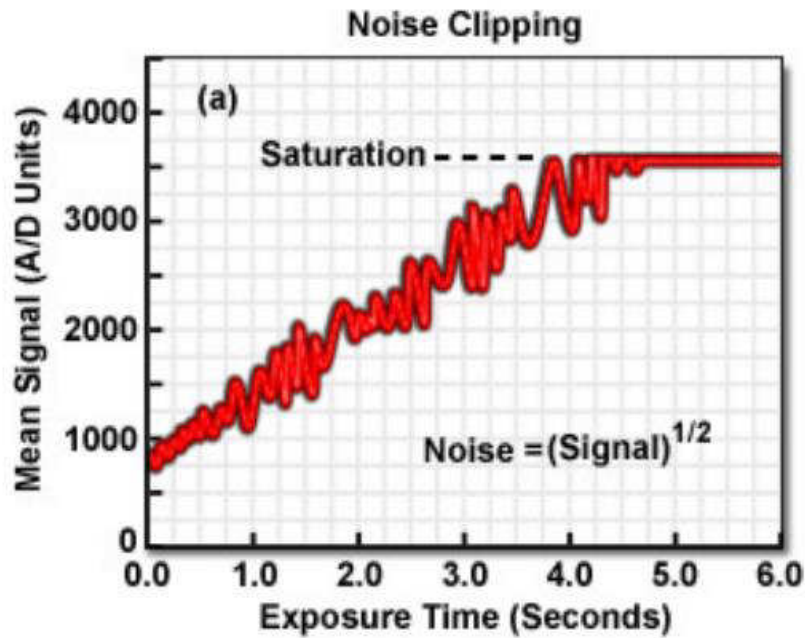
Eficiência quântica



(b)

Fig. 1.9. (a) Comparing the sizes of a CCD chip, a photomultiplier tube and a large (black tube) image intensifier. The ruler is 12 inches long. (b) The sensitivity or quantum efficiency of certain CCDs to light of different wavelengths compared to other forms of light detectors. Note that the scale on the left increases by factors of ten! One of the CCD's main attributes is its extensive range in wavelength coverage.

Saturação do CCD



Blooming and Streaking Artifacts in CCD Images

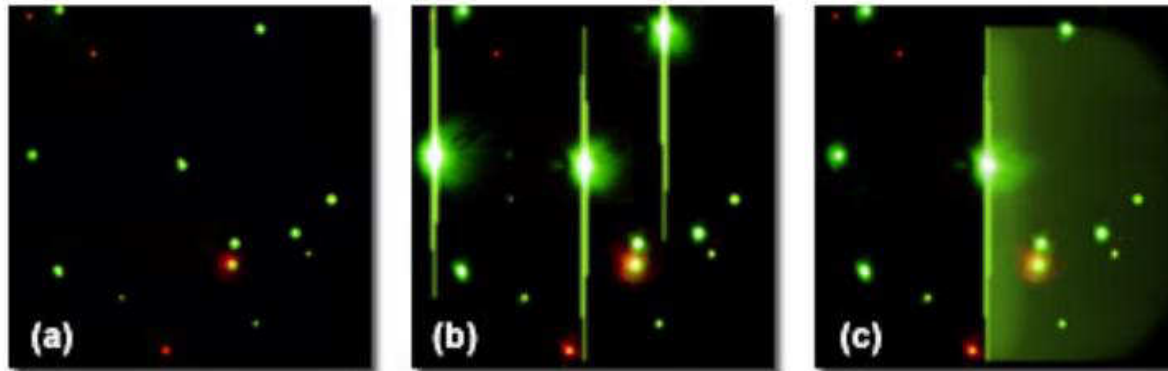
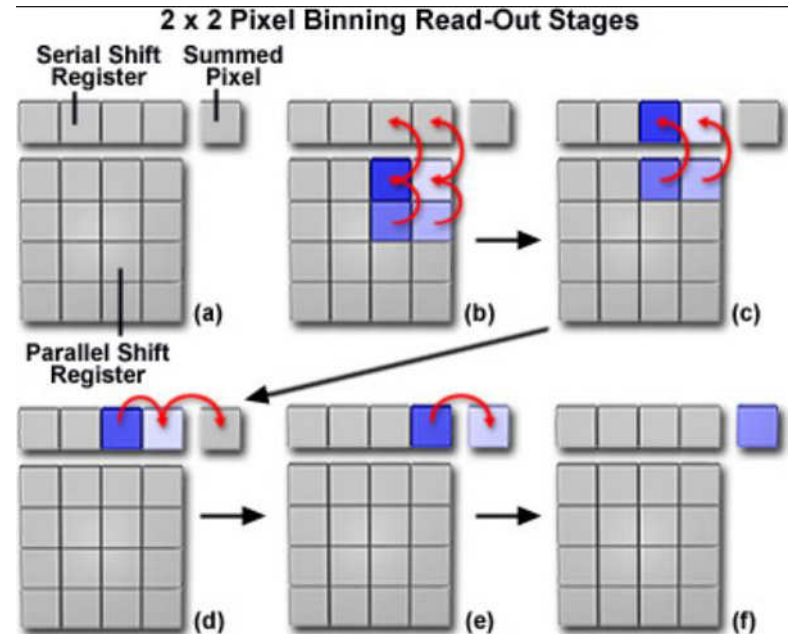
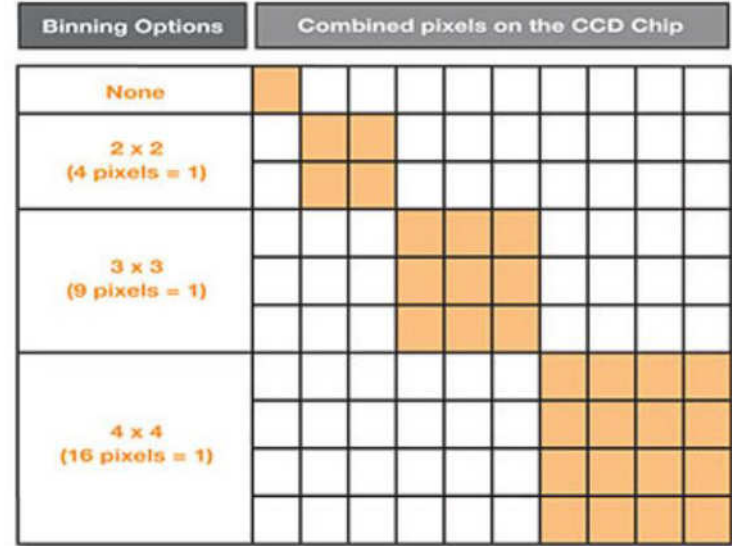
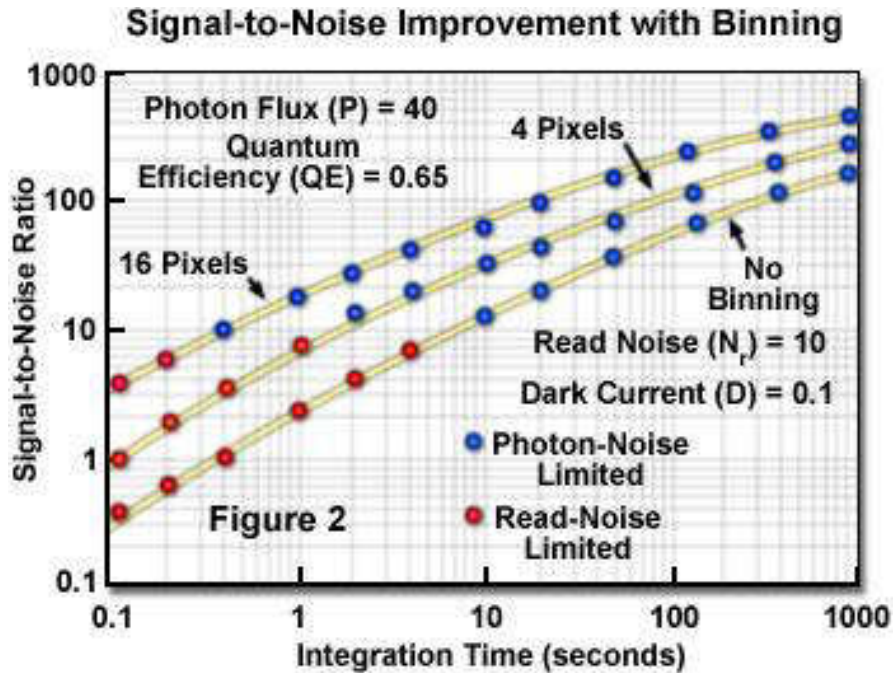


Figure 1

CCD Binning (melhora o sinal/ruído)

- via software
- Bom para fontes fracas
- Perde resolução espacial

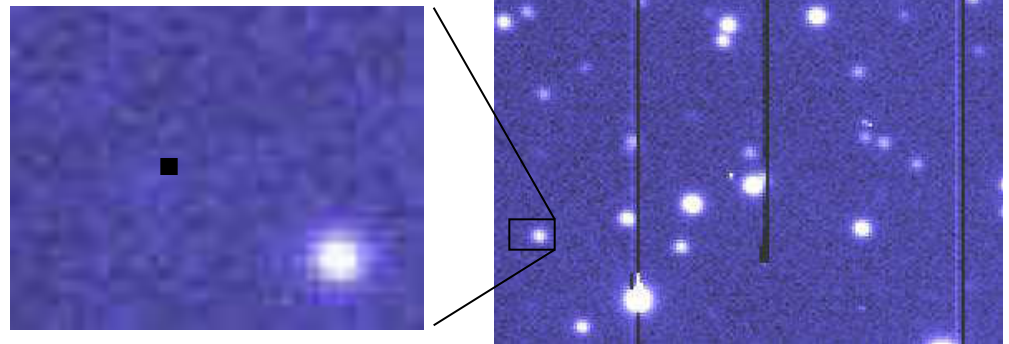


Eficiência quântica x comprimento de onda

- *front-illuminated x back-illuminated*
 - ↳ Os primeiros CCD possuíam os eletrodos na superfície que recebe luz (iluminados pela frente). Nesse caso, parte da luz, principalmente a azul, é refletida, o que diminui η nessa faixa
 - ↳ Artifício: iluminar o CCD por trás (back-illuminated). Nesse caso, é necessário diminuir a espessura do semicondutor e, apesar da eficiência aumentar no azul, diminui no vermelho
 - fringing no vermelho
- Cobertura
 - ↳ CCDs podem ser recobertos de material fosforescente que converte o comprimento de onda da radiação incidente para um que seja detectado pelo CCD

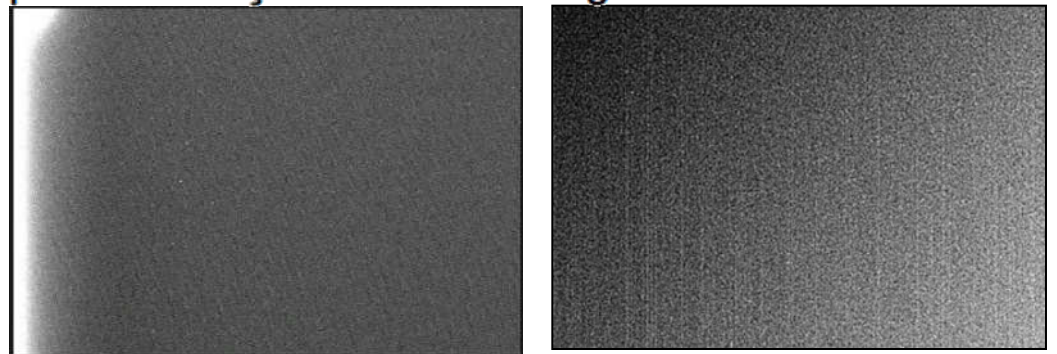
Correção básica de imagens CCD

- Bias
 - ↳ ruído de leitura
 - ↳ nível de pedestal
- Flat-field
 - ↳ diferença de sensibilidade entre pixels devido a inhomogeneidade e também a iluminação não-uniforme
- Dark
 - ↳ contagens devida a elétrons térmicos
- Pixels ruins
 - ↳ defeitos...



Imagens de 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



Imagens de 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

Resumo das características

- intervalo dinâmico: da ordem de 10^5
- ganho: da ordem de 1
- ruído de leitura: 4-5 e-/pixel
- sensibilidade não-uniforme (correção por flat-fielding)
- curva característica linear
- eficiência quântica próxima de 1
- sensível em um grande intervalo de frequência
- corrente de escuro pequena (corrigida pelas imagens de dark)

Detetores na faixa rádio

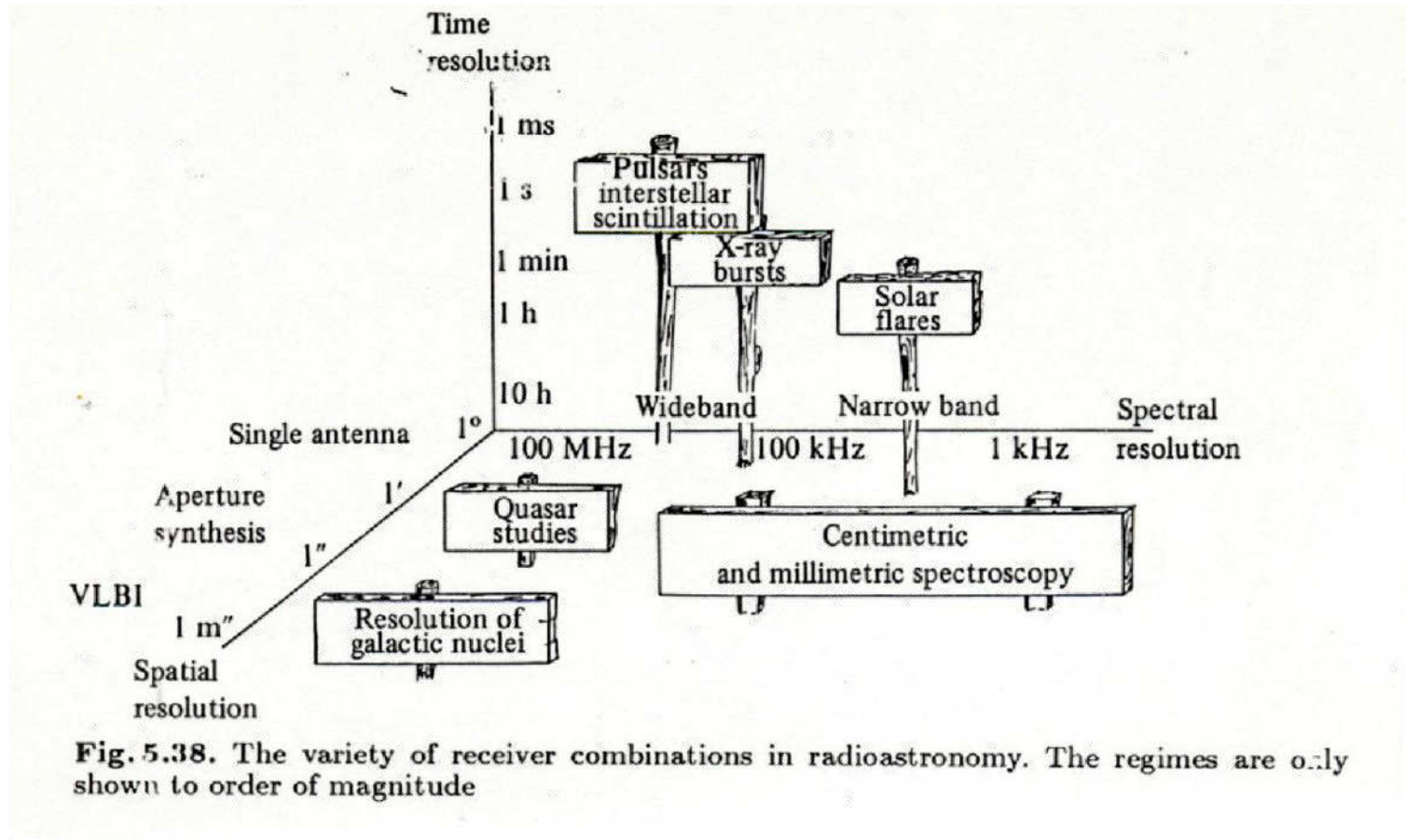
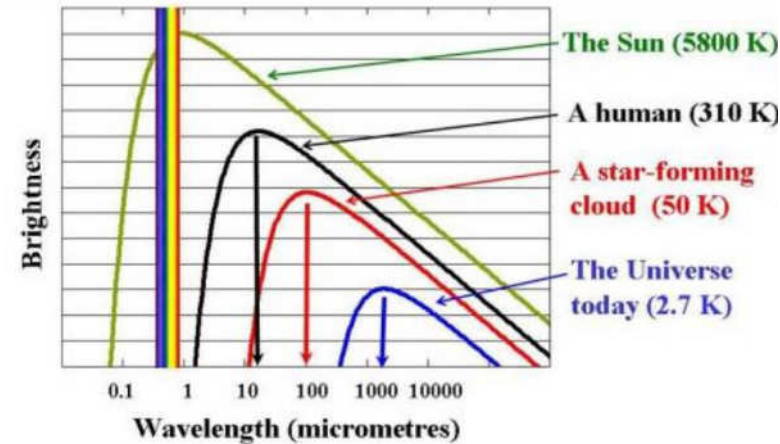


Fig. 5.38. The variety of receiver combinations in radioastronomy. The regimes are only shown to order of magnitude

- dependência espectral dos processos radiativos mais comuns

⇒ térmica

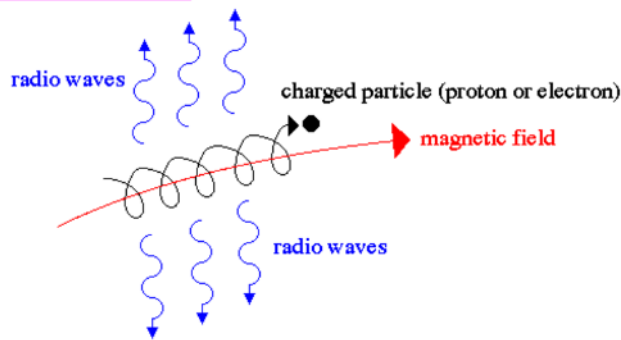
$$F_{\nu} = \frac{2\pi k}{c^2} T \nu^2$$



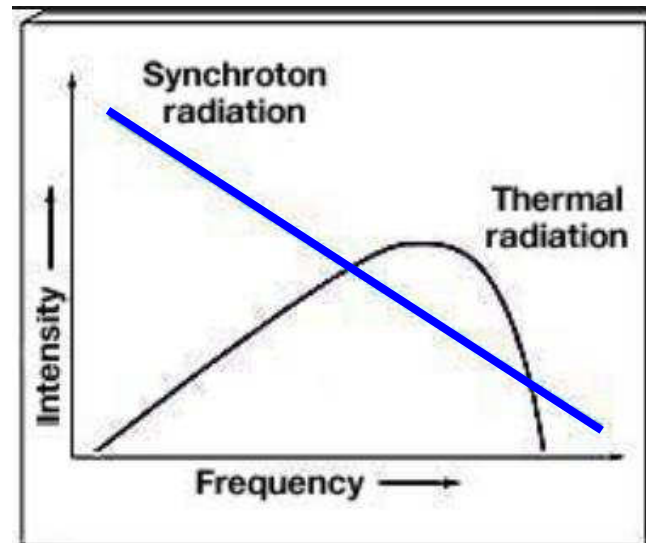
⇒ síncrotron

$$F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}, \text{ onde } 0,2 \leq \alpha \leq 1,2$$

Synchrotron radiation



synchrotron radiation occurs when a charged particle encounters a strong magnetic field – the particle is accelerated along a spiral path following the magnetic field and emitting radio waves in the process – the result is a distinct radio signature that reveals the strength of the magnetic field



Detetores em rádiosfreqüências

- detecção coerente
 - ↳ informação sobre a fase é preservada
- detectores típicos
 - ↳ 1 polarização
 - ↳ intervalos estreitos de freqüências
- detecção em duas fases
 - ↳ conversão da onda em sinal elétrico feita pela antena
 - ↳ medida do sinal elétrico
- unidade de intensidade
 - ↳ Jansky: $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
- fluxo das fontes típicas
 - ↳ $F_{\nu} < 1 \text{ Jy}$ (o que é pequeno!)
 - ↳ algumas fontes apenas tem fluxo maior que 1 Jy

Karl Guthe Jansky



Born October 22, 1905
Territory of Oklahoma, U.S.

Died February 14, 1950 (aged 44)
Red Bank, New Jersey, U.S.

Nationality American

Fields Physics
Radio astronomy

Potência recebida. Sinal da antena.

- Considerando um espectro de corpo negro e $h\nu \ll kT$, a intensidade de uma fonte é dada por:

$$B_\nu = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

- Pode ser mostrado que o tamanho do feixe é proporcional a λ^2 (Léna), assim o fluxo é proporcional a

$$F_\nu = 2kT$$

- Assim, podemos associar ao fluxo observado uma temperatura de antena – o que é comumente feito em radioastronomia
- Essa temperatura pode estar relacionada à fonte se
 - ◇ ela é opticamente espessa e está em equilíbrio termodinâmico
 - ◇ preenche o campo angular do telescópio

Ruído

- baixo sinal das fontes astronômicas implica em necessidade de instrumentação com baixo ruído
- ruído térmico
 - ◇ potência do ruído - *noise* (dedução devida a Nyquist)
 - ◇ $p_n = k T_n$
 - se $T_n = 300 \text{ K}$, $p_n = 4 \cdot 10^5 \text{ Jy}$ (compara com sinal típico)
 - ◇ assim, sistemas resfriados podem ser adequados em radioastronomia
 - ◇ se ruído térmico é constante, pode ser estimado e subtraído do sinal

Temperatura de ruído

- Fontes de flutuações

- atmosfera, T_{atm}

- solo, T_{solo} (atinge o sistema via lóbulos laterais)

- detector, T_s (temperatura do sistema)

⇨ Assim, a temperatura de ruído total, T_n , pode ser expressa como:

$$\rightarrow T_n = T_{atm} + T_{solo} + T_s$$

soma é possível, pois sinais são incoerentes

Como medir T_n ?

medida da fonte: $M = T_n + T_{fonte}$

medida do céu: T_n

$$T_{fonte} = M - T_n$$

- amplificação

- ◇ todos os detetores em rádio, possuem um estágio onde o sinal astronômico é amplificado (ganho: G)
- ◇ enquanto T_n pode ser controlado e mantido constante, o mesmo não se aplica a G – principalmente em altas frequências
- ◇ supondo que T_a é o sinal da fonte e T_n é o ruído, e que ΔG é a variação de G entre a medida na direção da fonte e do fundo a variação do sinal da fonte ΔT_a é dada por:

→ medida total: $G(T_a + T_n)$

→ fundo (ruído): $G T_n$

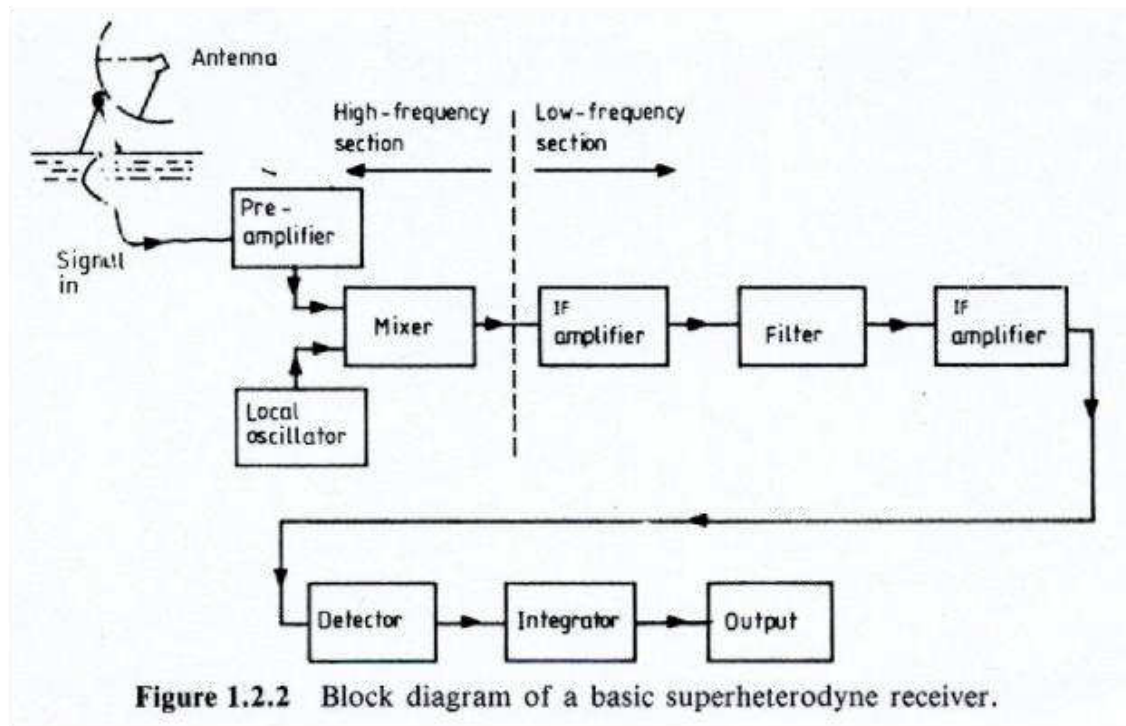
$$G \Delta T_a = \Delta G (T_a + T_n)$$

quanto menor o sinal da fonte, maior o erro

$$\frac{\Delta T_a}{T_a} = \frac{\Delta G}{G} \left(1 + \frac{T_n}{T_a} \right)$$

Receptor superheteródino

- uma das possíveis configurações de um detetor em rádio
- transformação do sinal de altas para baixas freqüências, onde os amplificadores são mais estáveis



- etapas de recepção

- ↳ pré-amplificador: ganho entre 100 e 1000

- ↳ misturador

- mistura o sinal de entrada de frequência ν_{in} com sinal de um oscilador local de frequência ν_{loc}

- batimento entre os sinais produz um sinal de frequência ν_{if} , onde $\nu_{in} = \nu_{loc} \pm \nu_{if}$

- potência de saída do misturador é diretamente proporcional ao sinal de entrada

- ↳ amplificador: ganho de $10^6 - 10^9$

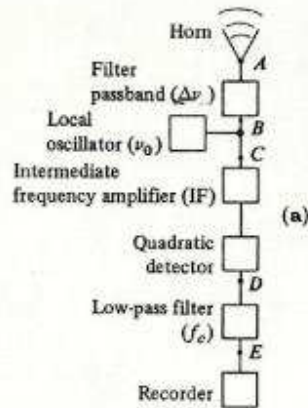
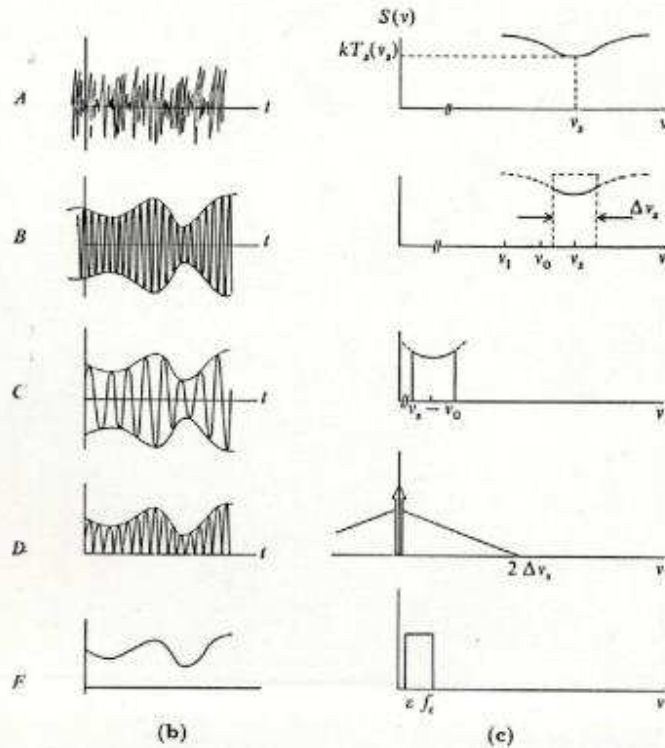


Fig. 5.40a-c. Successive stages of a single-sideband superheterodyne receiver (SSB). (a) Sub-systems. (b) The time-dependent signal. (c) Spectral density of the signals. Note the image frequency ν_1 eliminated by the filter $\Delta\nu$.



$$g = T_n/T_a$$

where T_a is the noise temperature before the amplifier, and T_n the noise temperature of the detector.

↗ detector: *square law device*



↗ integração

→ diminuição do ruído

→ exclusão de frequências altas

↗ após a integração o sinal está pronto para ser registrado

- Problemas

↗ ruído é alto

→ solução: diminuir temperatura do sistema, principalmente das primeiras fases

↗ ganho é instável

→ solução: monitoramento de fonte de calibração

Brilho mínimo detectável

$$B_{\min} = \frac{2k\nu^2KT_s}{c^2\sqrt{t\Delta\nu}}$$

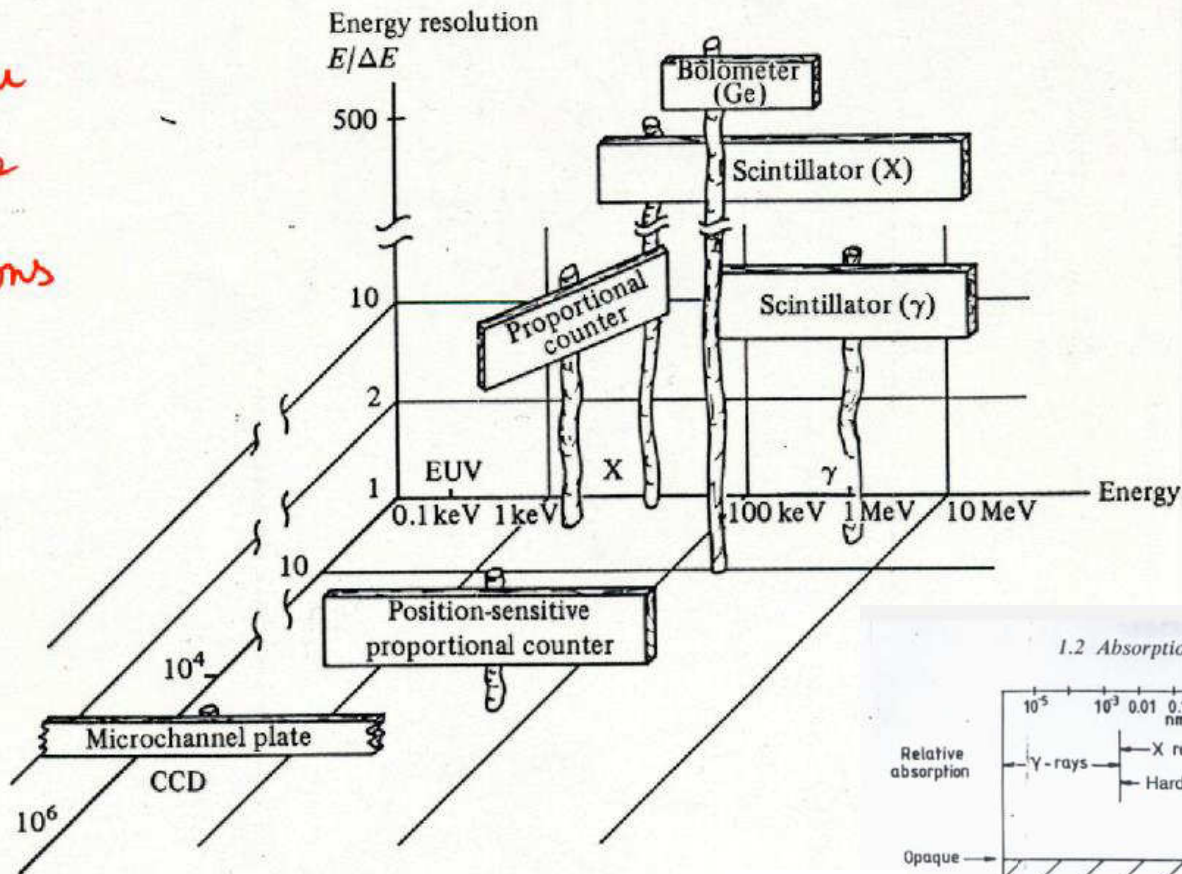
- ◇ T_s : temperatura do sistema
- ◇ t : tempo de integração
- ◇ $\Delta\nu$: largura de banda
- ◇ $K \sim 1$ (constante) – depende do receptor

Contaminação do sinal

- a contaminação dos sinais astronômicos por sinais artificiais (criados por humanos) é um grande problema da astronomia de baixas frequências
- foram definidas bandas de uso exclusivo astronômico, onde não é permitido portanto a transmissão de sinais

Detectors de raios X e raios γ

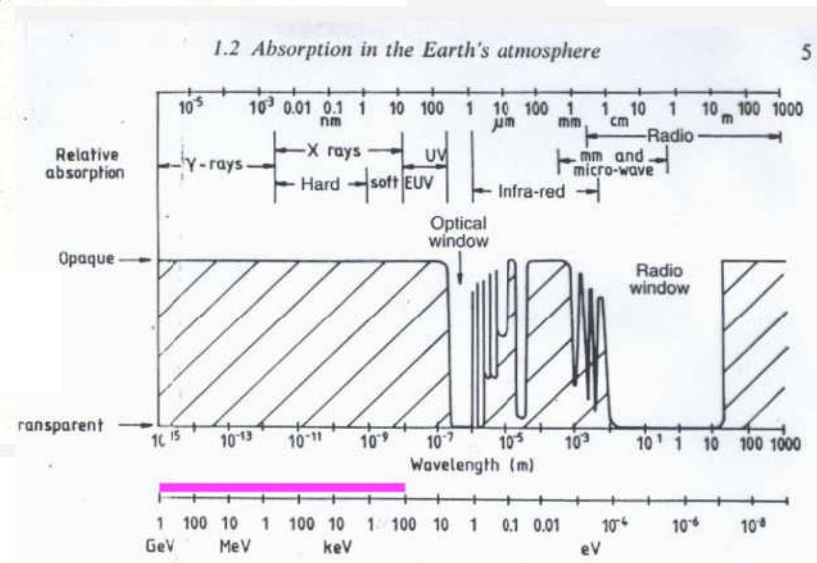
contagem de fótons



Number of pixels

Fig. 5.42. Detectors in the X- and gamma-ray regions.

REF: Léna, Smith



MCP – Microchannel plates (placa de microcanais)

- faixa de energia: 0.1 a 10 keV (UV distante e raios-X moles)
- efeito fotoelétrico

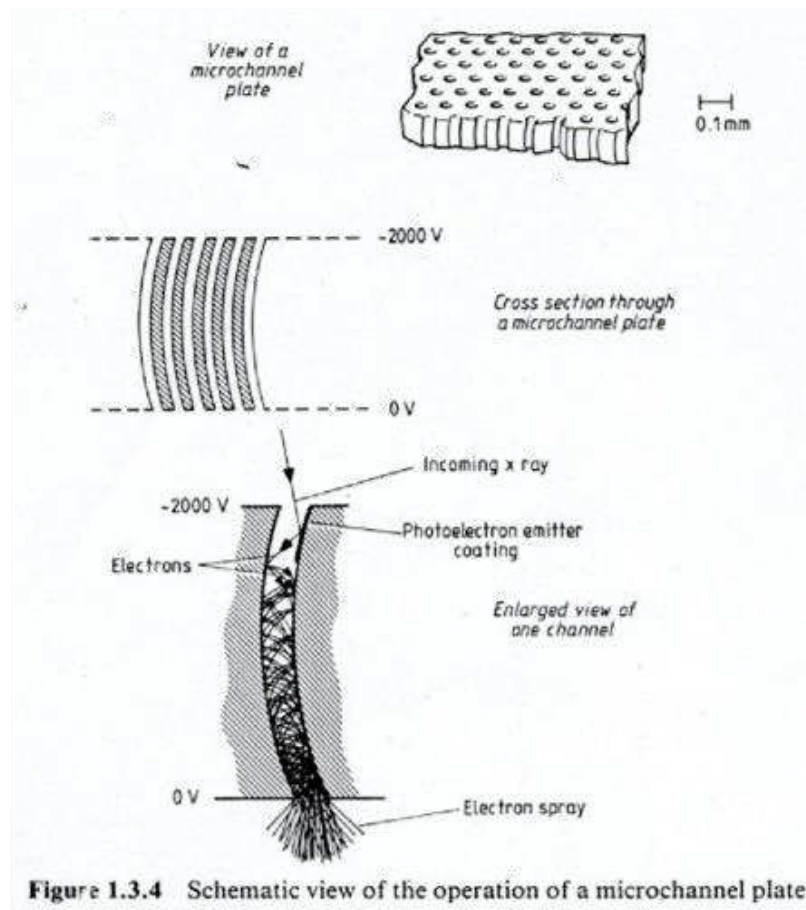
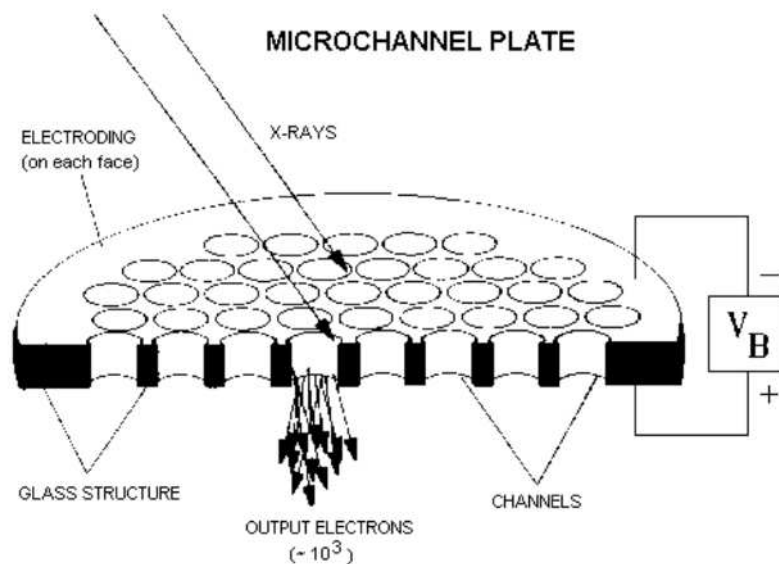
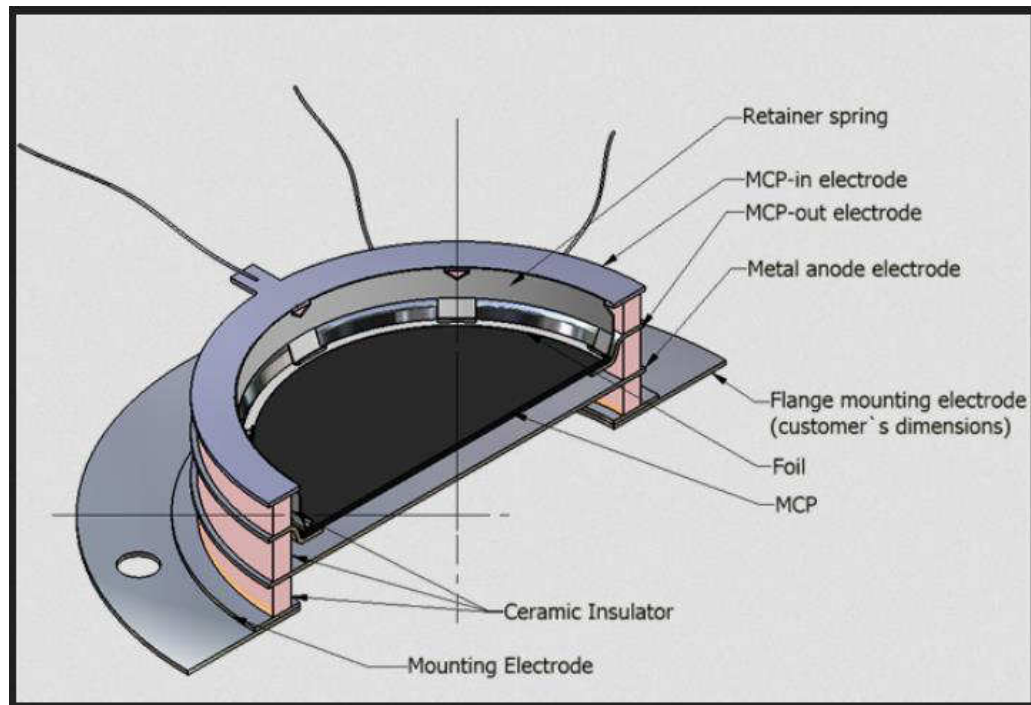
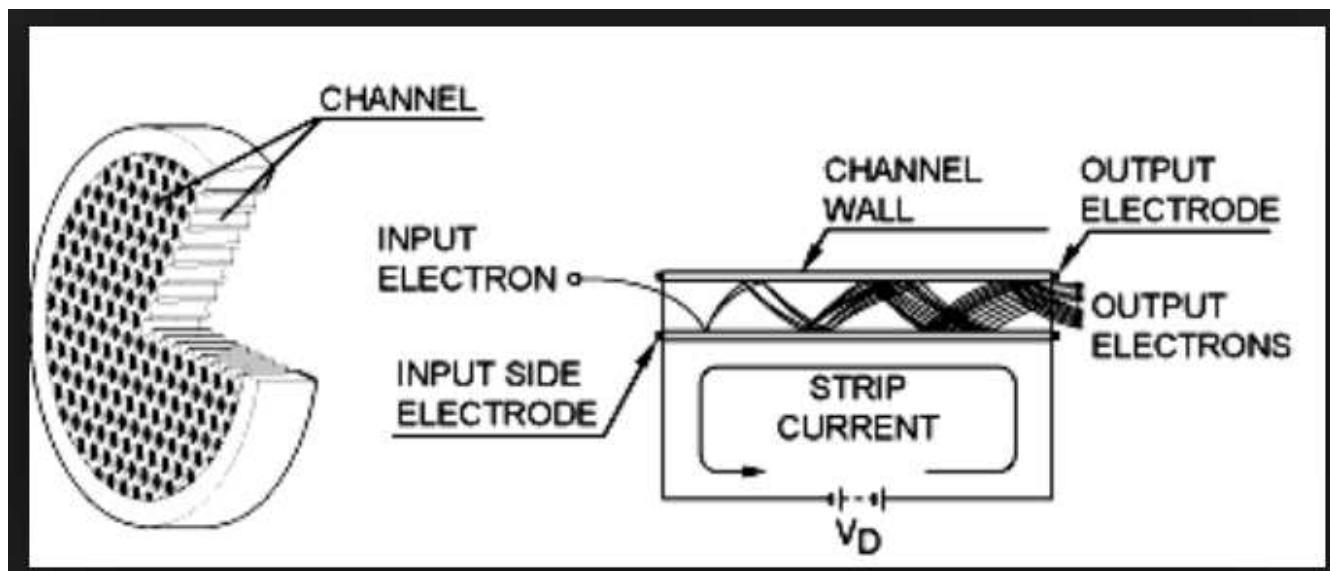


Figure 1.3.4 Schematic view of the operation of a microchannel plate.

Kitchin



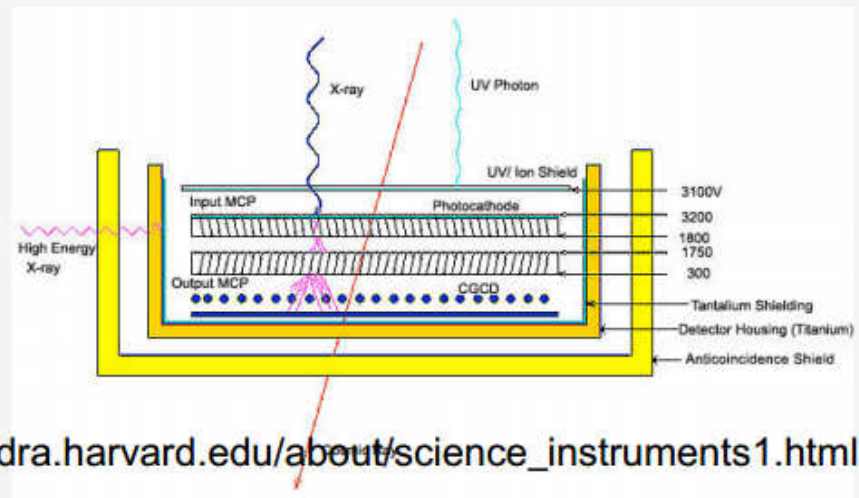
Equivalente a ter um conjunto de fotomultiplicadores miniaturizadas!!!



- ganho: 10^4
- eficiência quântica: 20%
- Usado no High Resolution Camera/Chandra

↳ <http://hea-www.harvard.edu/HRC/mcp/mcp.html>

The primary components of the (HRC) are two Micro-Channel Plates (MCP). They each consist of a 10-cm (4-inch) square cluster of 69 million tiny lead-oxide glass tubes that are about 10 micrometers in diameter (1/8 the thickness of a human hair) and 1.2 millimeters (1/20 an inch) long.



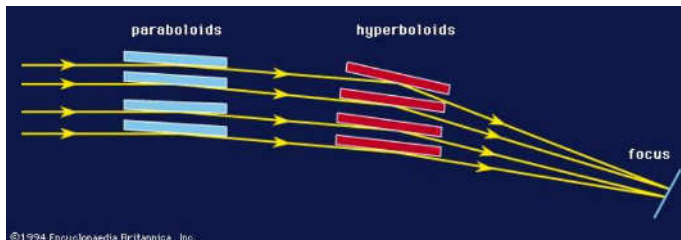
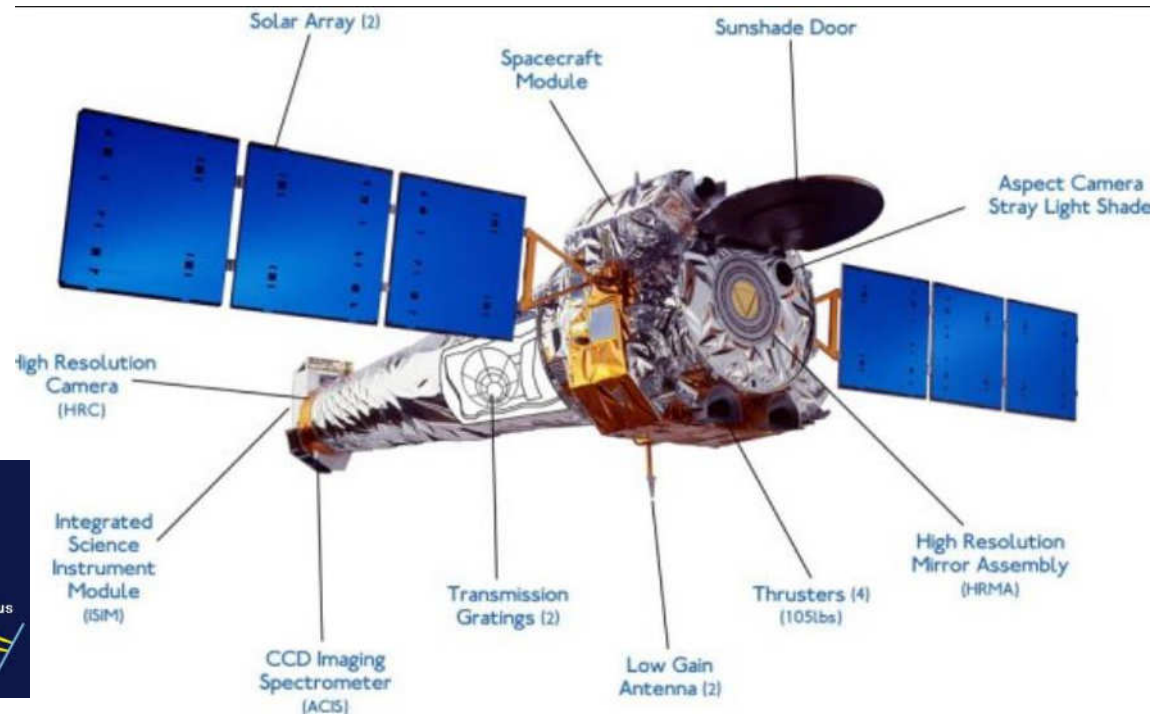
http://chandra.harvard.edu/about/science_instruments1.html

ang. resolution < 0.5 arcsec over field-of-view 31x31 arcmin;
time resolution: 16 micro-sec
sensitivity: 4×10^{-15} ergs-cm⁻² sec⁻¹ in 10⁵ s

Detetores de estado sólido CCD

- faixa de energia: 10 keV – 10 MeV
- fotoionização em semicondutores
- detecção dos e- no anodo
 - ◊ #e- é proporcional à energia com resolução espectral boa
- materiais
 - ◊ germânio: 100 keV – 10 MeV
 - ◊ silício: 0.4 – 4 keV

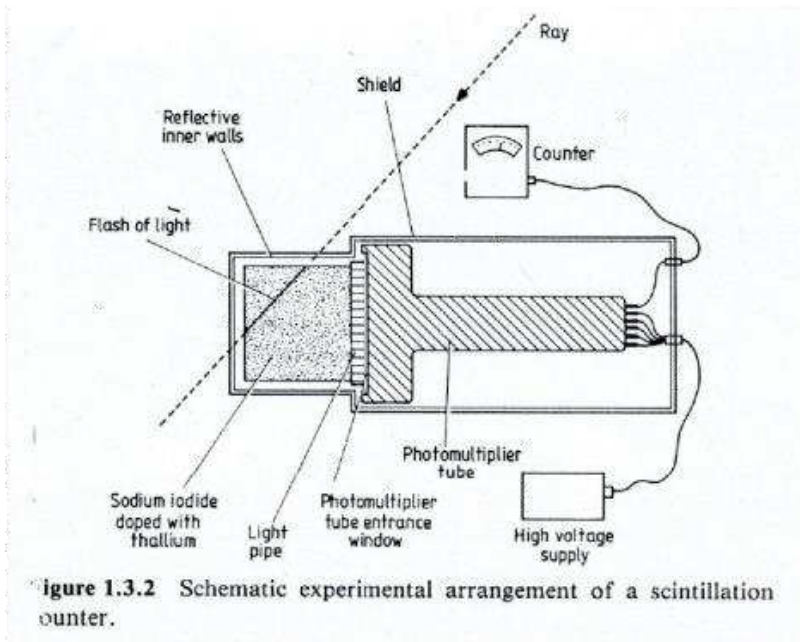
CHANDRA



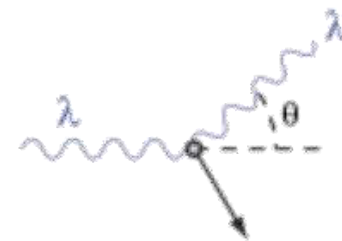
Cintiladores

- faixa de energia: 100 keV a 10 MeV
- espalhamento Compton em um sólido
 - ↳ NaI ou CsI + impurezas (Na ou TI)

$$\lambda' > \lambda$$



Kitchin



Wikipedia

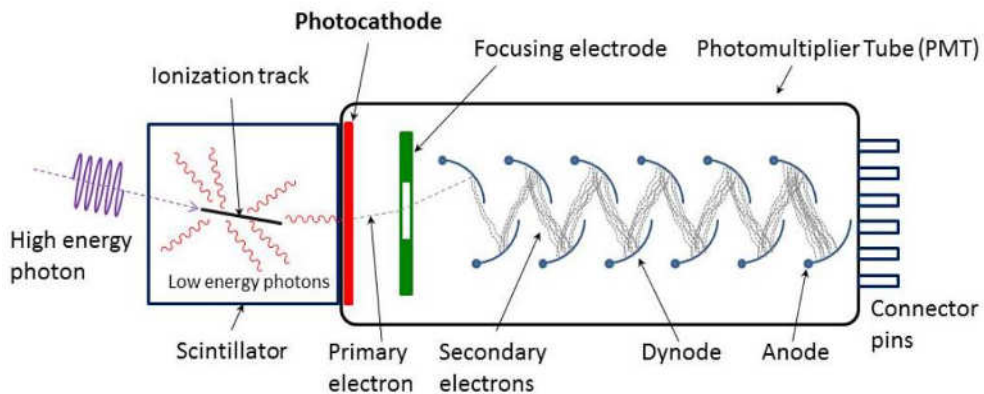
- a energia do fóton é transferida para os átomos de um sólido e excita modos dos fónons
- decaimento radiativo
 - ↳ radiação ultravioleta e visível
 - ↳ se meio é transparente, a detecção pode ser feita por uma fotomultiplicadora
- pulso depende fracamente da energia, mas permite uma modesta resolução em frequência
- eficiência pequena e ruído alto
- raios cósmicos também provocam pulsos, mas que podem ser diferenciados dos provocados pela raios-X

Um dos instrumentos do Fermi é um cintilador: the GLAST Burst Monitor

- ◇ 12 cintiladores de NaI: poucos keV a MeV
- ◇ 2 cintiladores de BGO (germanato de bismuto): 150 keV a 30 MeV



GLAST Burst Monitor
Detetor de NaI



Contadores Geiger

- processo físico
 - ↳ fotoionização de um gás
- câmara com gás confinado e submetido a uma ddp muito próxima do valor de descarga
- cargas produzidas pela radiação disparam a descarga

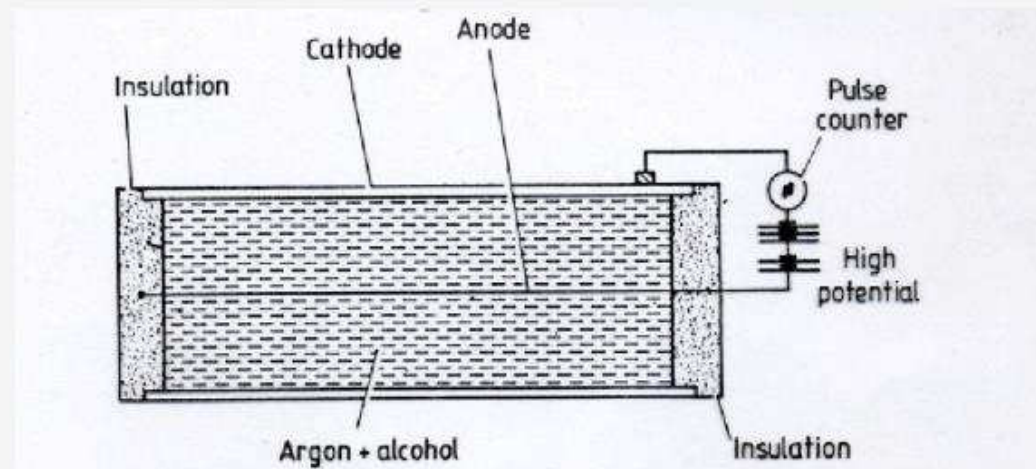


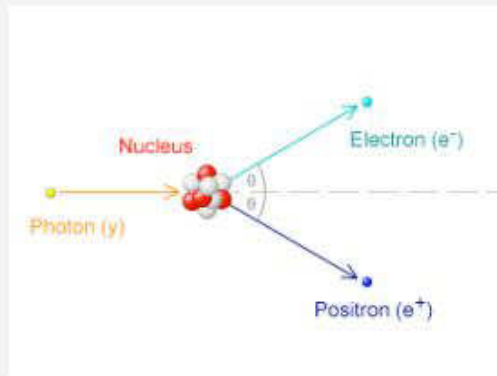
Figure 1.3.1 A typical arrangement for a Geiger counter.

Kitchin

- e- são acelerados pela ddp e causam mais ionizações
 - ↳ ganho 10^8
- composição química
 - ↳ gás nobre
 - ↳ gás orgânico
- tempo morto: 200 μ s
- pulso saturado = sem resolução de energia
- primeira detecção de fonte astronômica (não-solar) em 1962
 - ↳ Sco X-1
 - ↳ experimento em foguete
 - ↳ raios-X moles

Spark chamber

- faixa de energia: $> 20 \text{ MeV}$
- produção de pares: $e^- + e^+$



Wikipedia

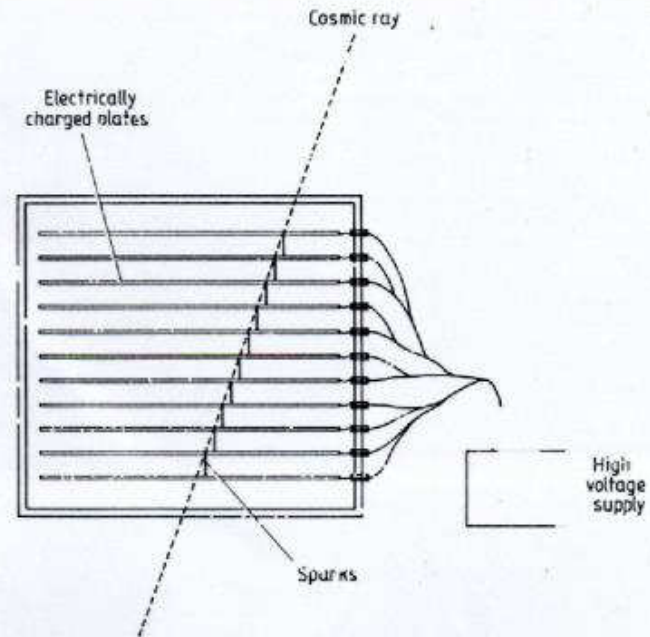


Figure 1.4.3 A spark chamber.

Kitchin

Produção de pares ocorre se energia do fóton é maior que 1.022 MeV ($2 \times$ massa de repouso do elétron)

- câmara com gás néon
 - ↳ série de eletrodos
- pares produzem ionização do gás
- pulsos de raios cósmicos = pulsos de raios-g
 - ↳ utilização de detectores tipo cintilador para diferenciar

- Detecção de raios- γ
 - ↳ premio Nobel de Fisica em 1948: Patrick Blackett

- **Bibliografia e literatura recomendada**

- **Notas de aula da prof. Claudia Rodrigues (INPE)**

<http://www.das.inpe.br/~claudia.rodrigues/ast203/>

- **Notas de aula do Prof. Gabriel Hickel (UNIVEI)**

<https://sites.google.com/site/profgabrielhickel/home/tecobsast>

- **Notas de aula do Prof. Basilio Santiago (UFRGS)**

<http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis02014/>

- Kitchin, C.R., Astrophysical Techniques, 4a. edição, Editora IOP, 2003.
- Lená, P., Lebrun, F., Minard, F., Observational Astrophysics, 2a. Edição, Editora Springer, 1998.
- Smith
- Walker