

Astrofísica Observacional

Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica
Julho de 2009



Francisco Jablonski

chico@das.inpe.br



Astrofísica Observacional

- O espectro eletromagnético
- Os efeitos da atmosfera terrestre
- Telescópios e detectores

O espectro eletromagnético

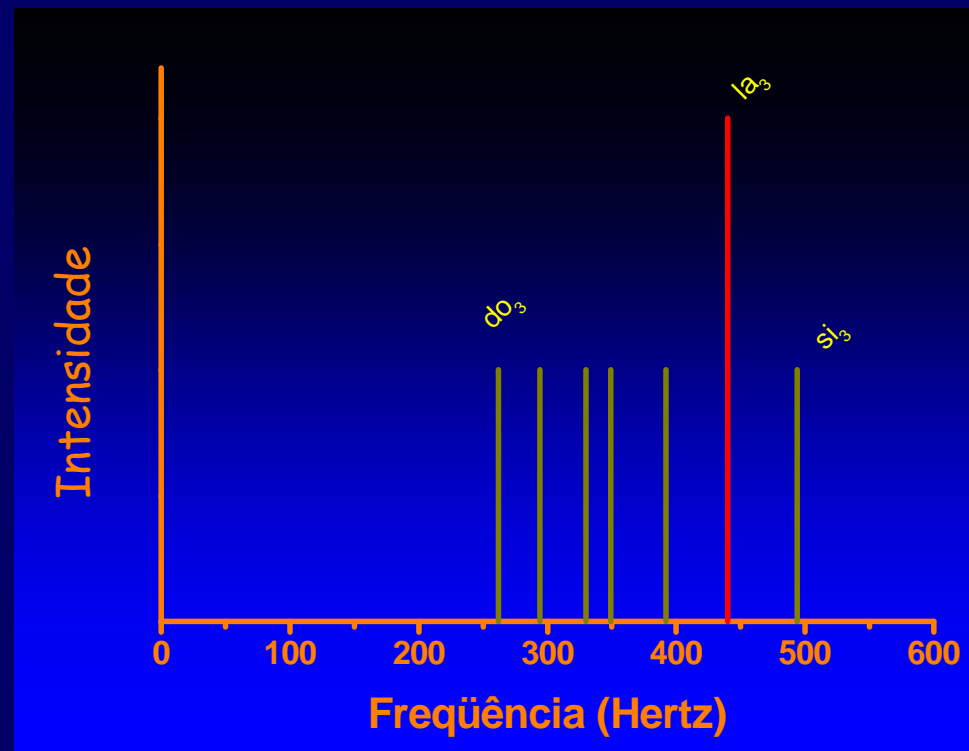


O que tem Hamlet a ver com este curso, e com espectro eletromagnético?

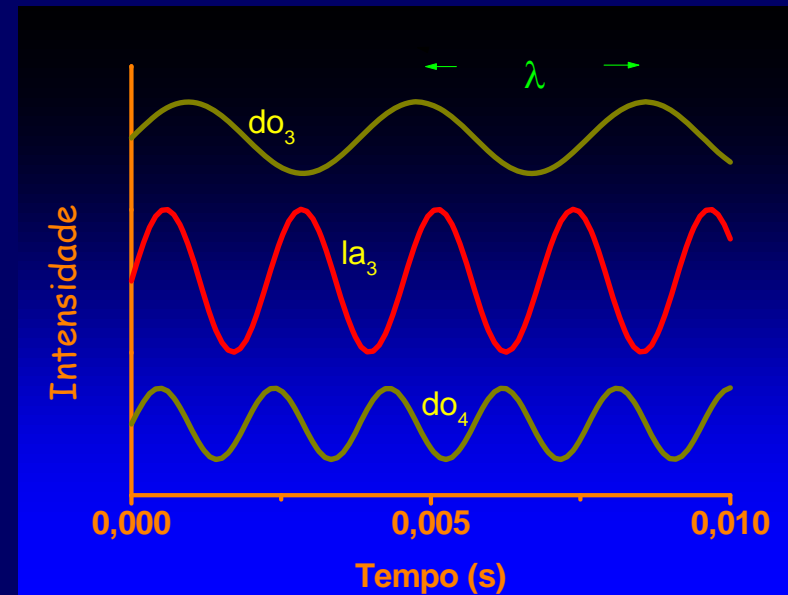
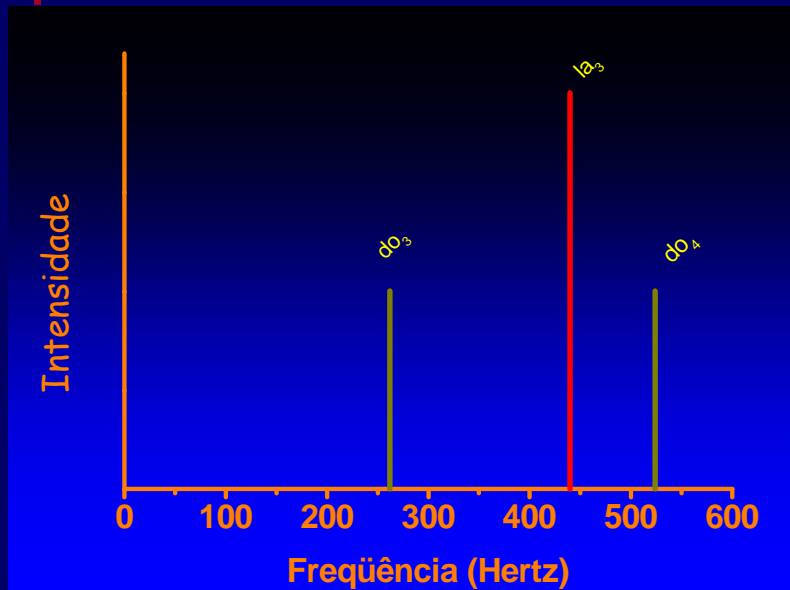
Newton, 1671

O que entendemos por “espectro”?

- Exemplo: Espectro acústico
- Intensidade x frequência
- Piano: 262, 294, 330, 349, 392, 440 e 494 Hz
- Origem: ondas de pressão



Freqüência x comprimento de onda



$$\lambda = \frac{c_s}{\nu}$$

Exercício: Quanto vale λ para uma onda acústica com freqüência igual ao la_3 ?

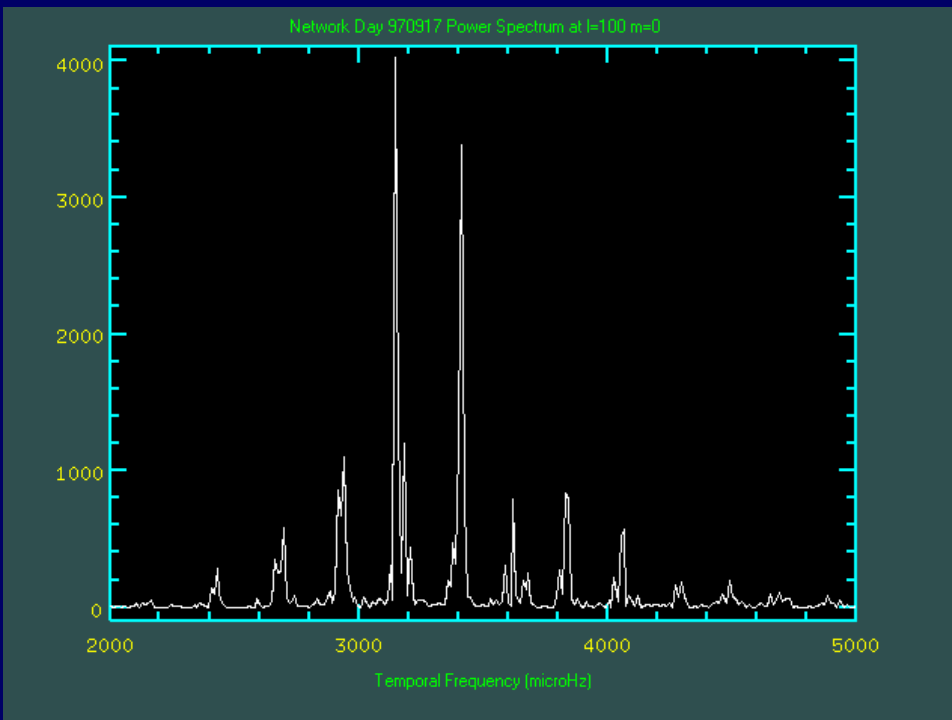
Resposta: $\lambda = 340/440 = 0,77 \text{ m}$

$$f_1(t) = \text{sen}(2\pi \times 262 \times t) + C_1$$

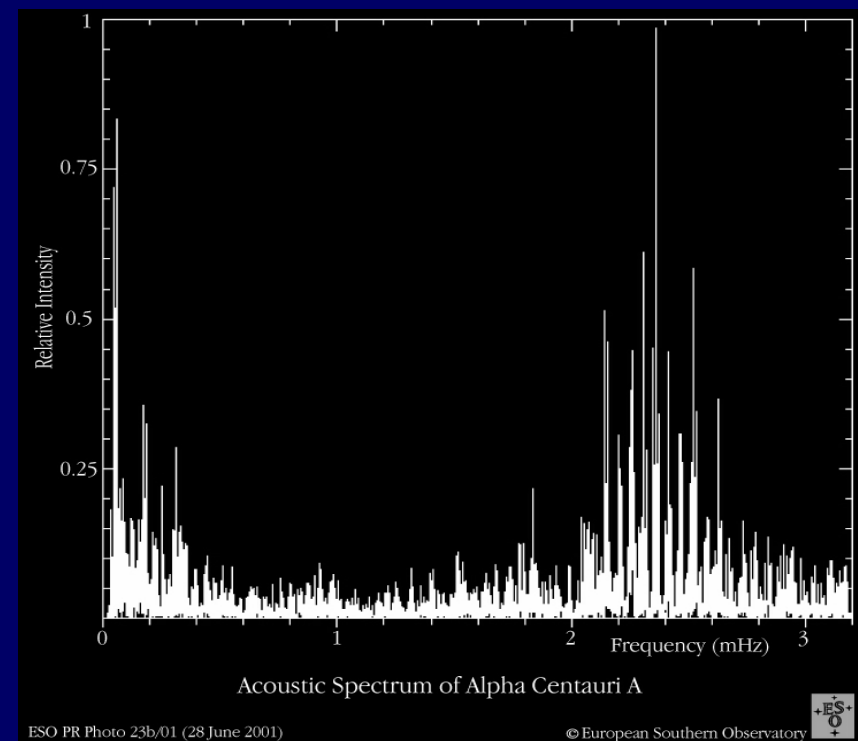
$$f_2(t) = 2 \times \text{sen}(2\pi \times 440 \times t) + C_2$$

$$f_3(t) = \text{sen}(2\pi \times 524 \times t) + C_3$$

Dois exemplos de espectros acústicos em Astrofísica



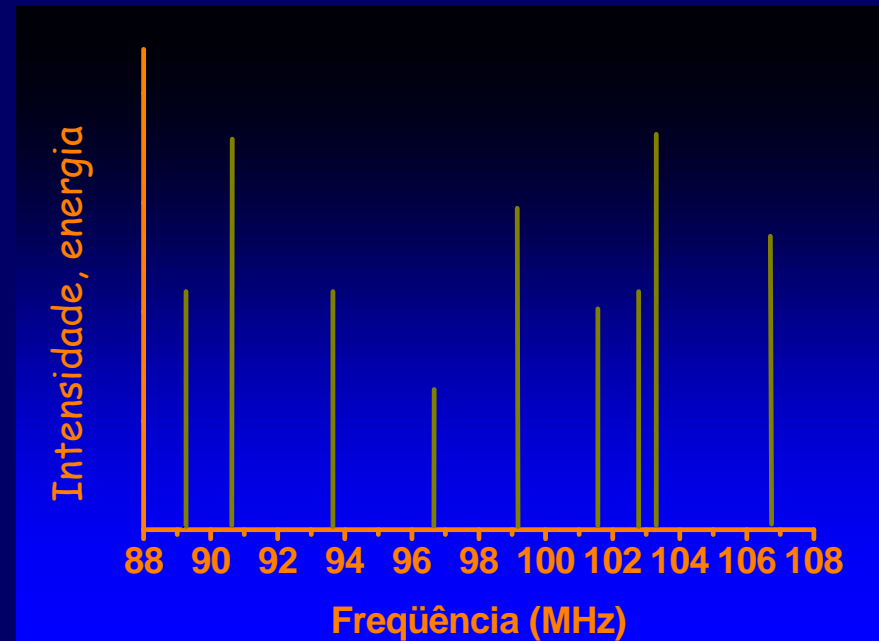
Oscilações acústicas no Sol...



... e em α Centauri

Outro tipo de espectro

- Na região das FM (88-108 MHz)
- Intensidade x frequência
- Ondas eletromagnéticas
- Emissão discreta
- Fenômenos físicos distintos em diferentes partes do espectro eletromagnético!!!



- Partículas
- Ondas

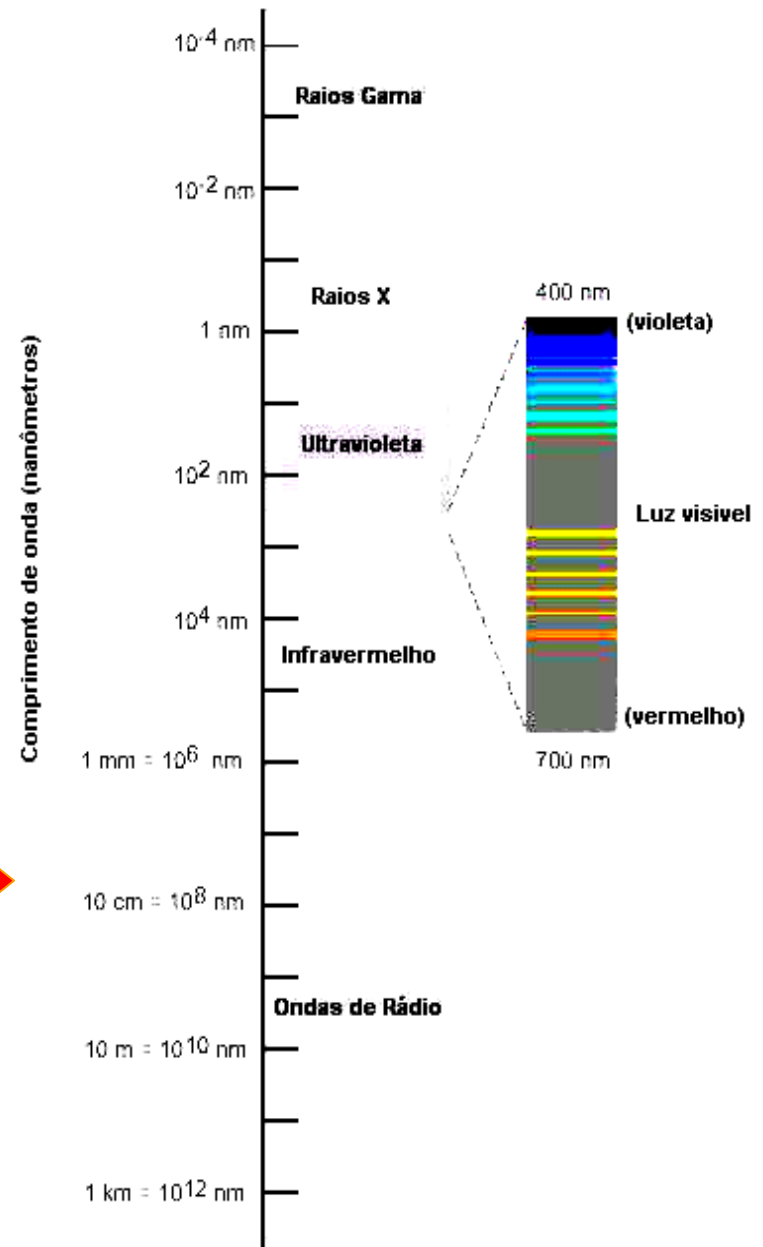
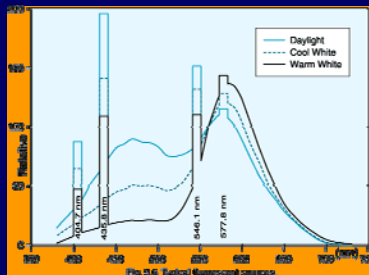
O espectro eletromagnético!

- Lembrar:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

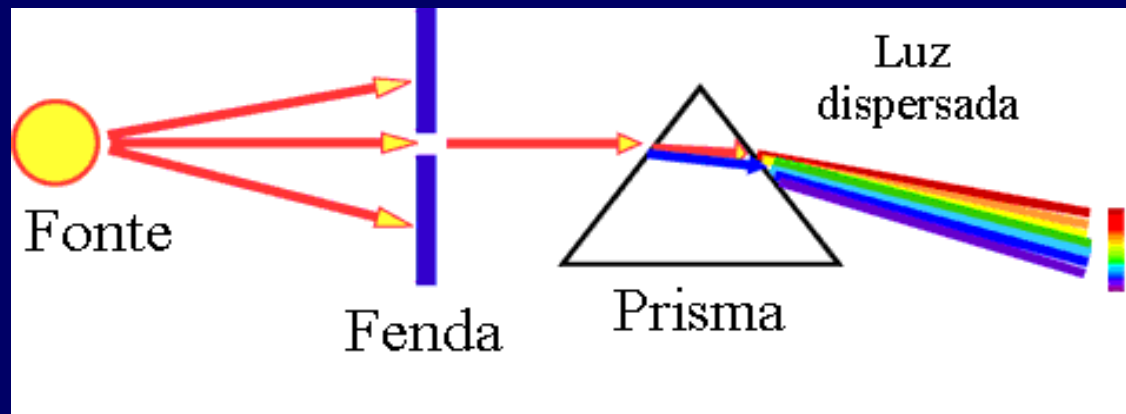
$$E = h\nu$$

- "O" espectro eletromagnético
- "Um" espectro específico



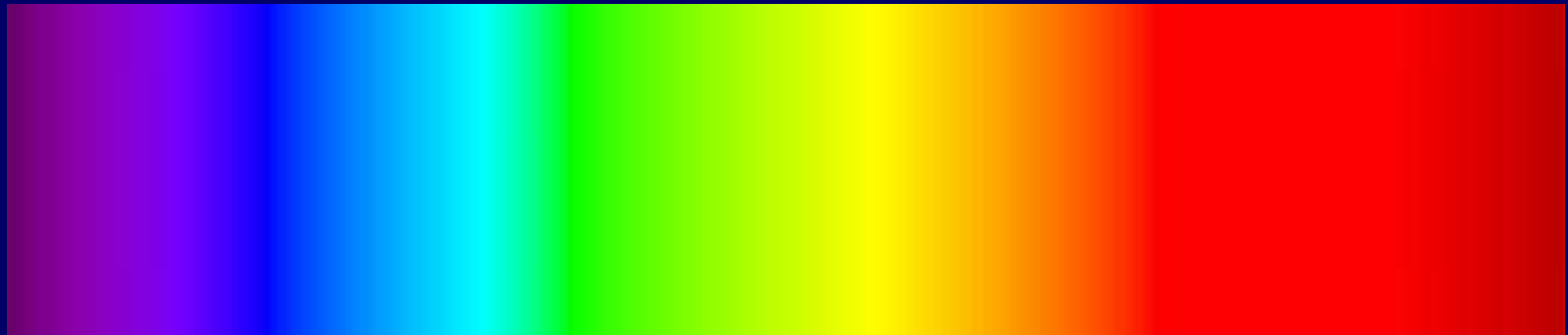
O que é a luz

- A luz visível é parte do espectro eletromagnético
- A luz visível pode ser separada em cores distintas, com o uso de um prisma



- As cores são caracterizadas pelo seu comprimento de onda

Espectro de um objeto muito quente (6000 graus)



0.4 μm

0.5 μm

0.7 μm

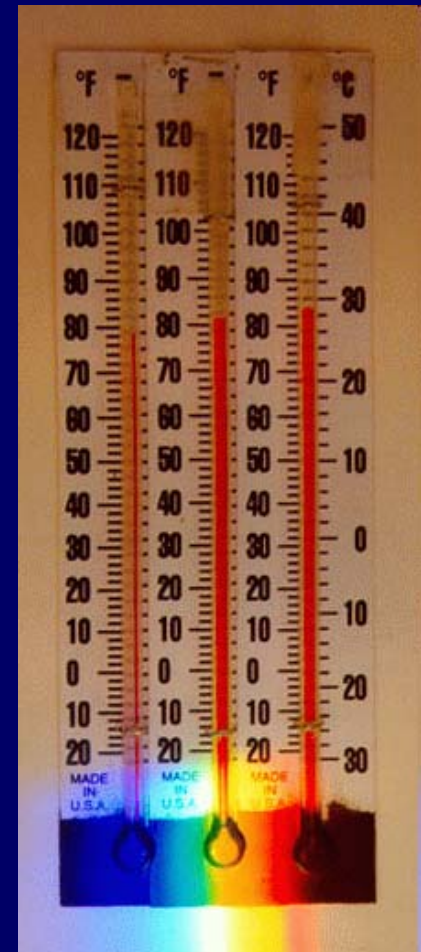
1 milímetro = 0,001 metro \rightarrow 1 mm = 0,001 m
1 micron = 0,001 milímetro \rightarrow 1 μm = 0,001 mm

O infravermelho

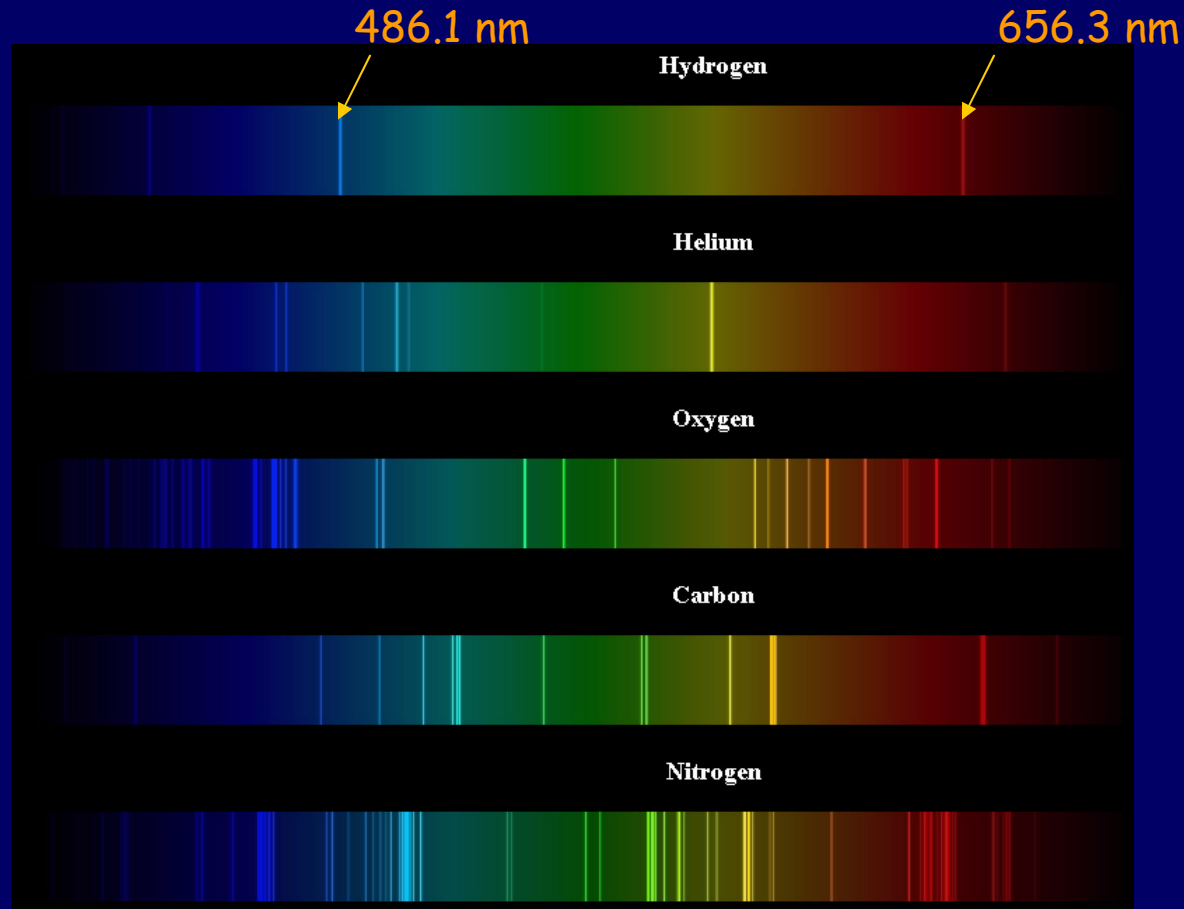
- Frederick William Herschell (1800)
- Uma experiência simples



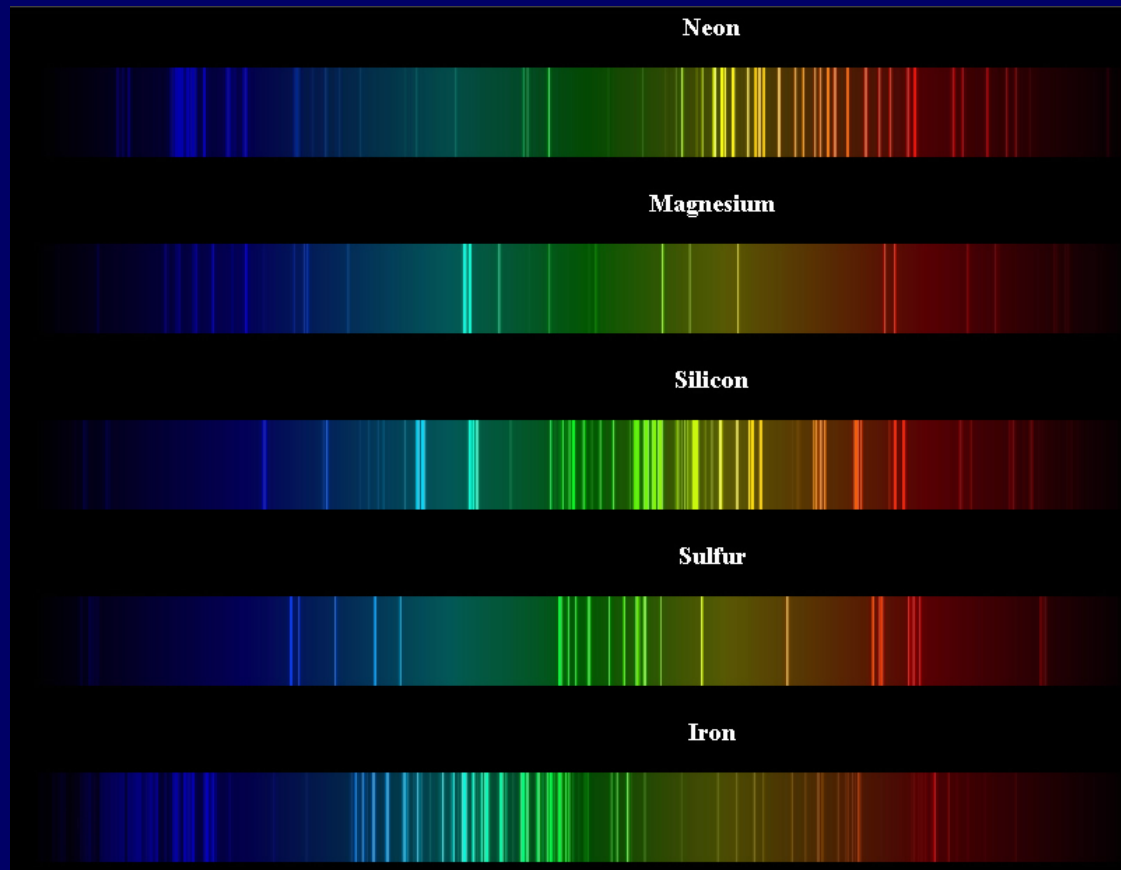
Uma versão moderna, caseira



Como vemos o espectro de gases excitados

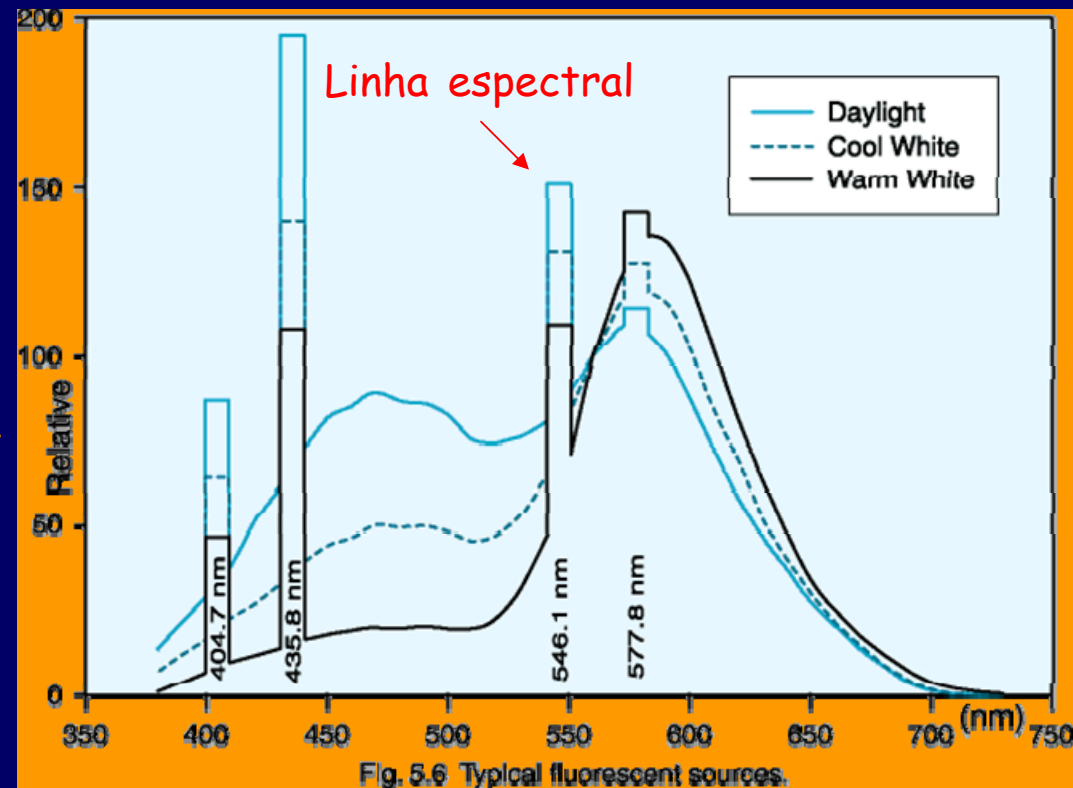


Continuação...

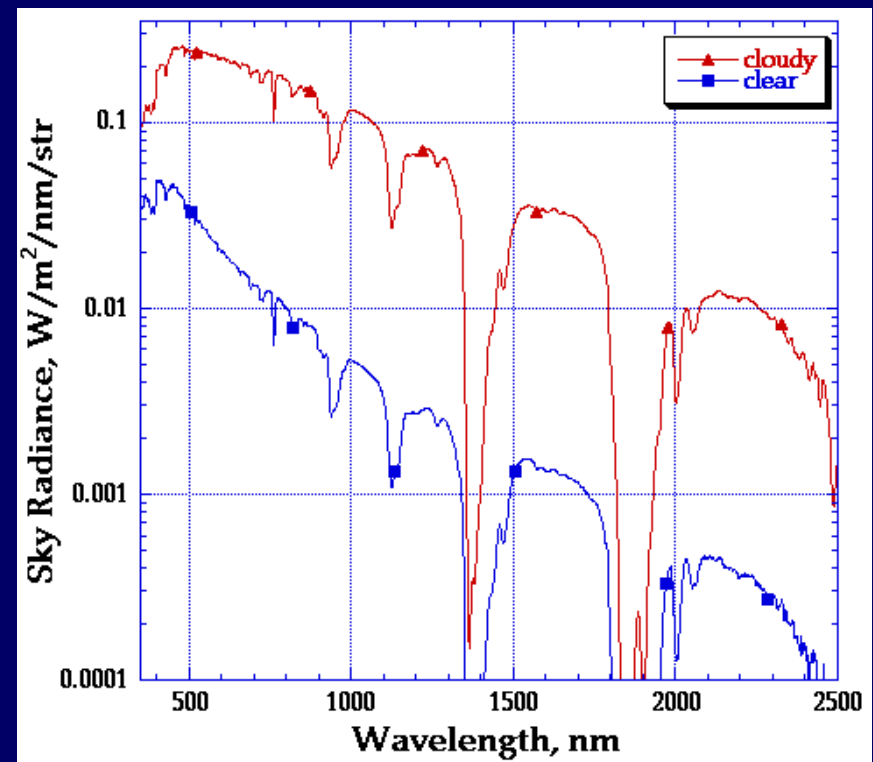
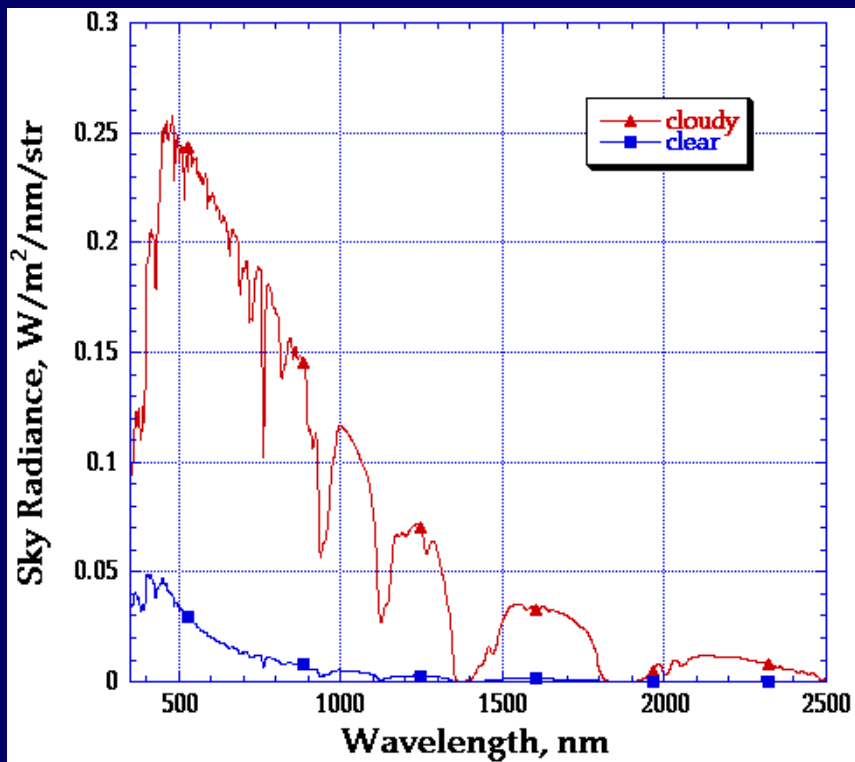


O espectro de lâmpadas fluorescentes

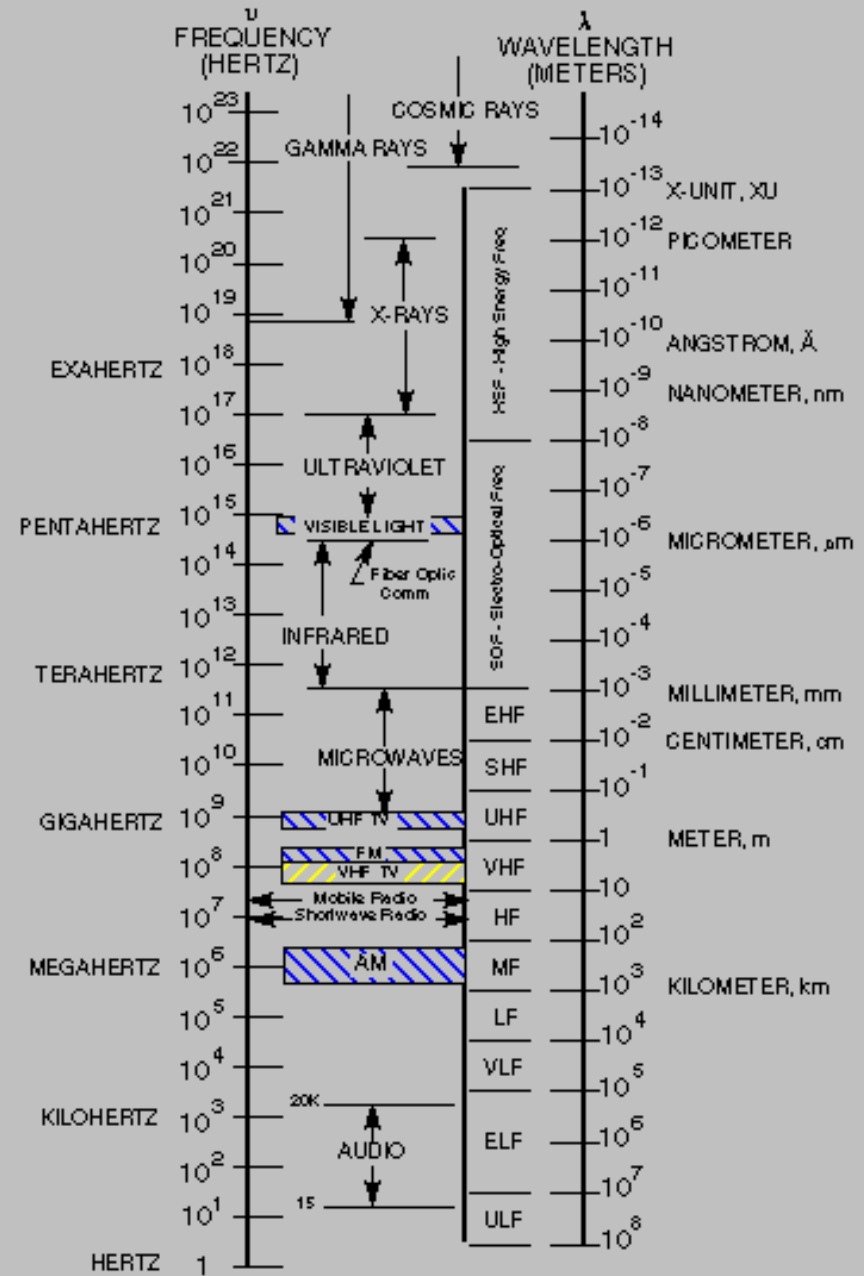
- Luz visível (lâmpadas fluorescentes)
- Unidades:
 $0,55 \mu\text{m} = 550 \text{ nm} = 5500 \text{ \AA}$
- Emissão discreta + contínua



O espectro do céu nublado e do céu azul



Outra visualização do EEM

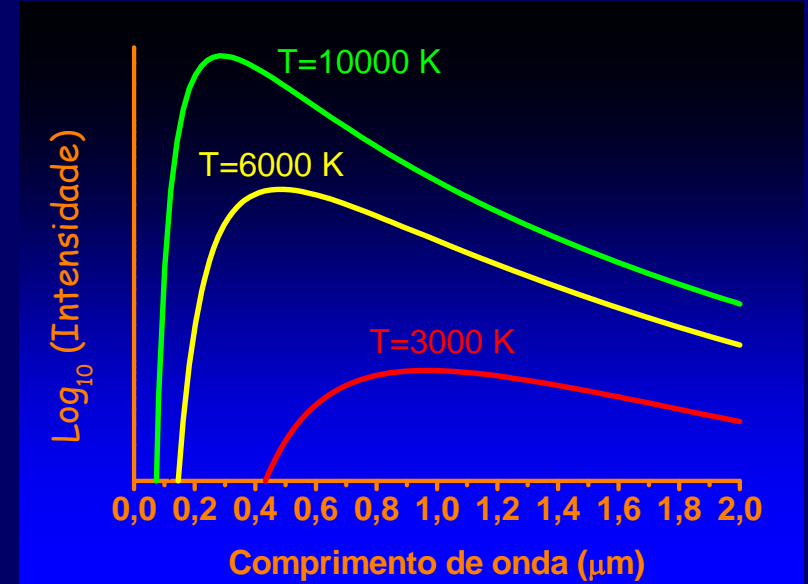
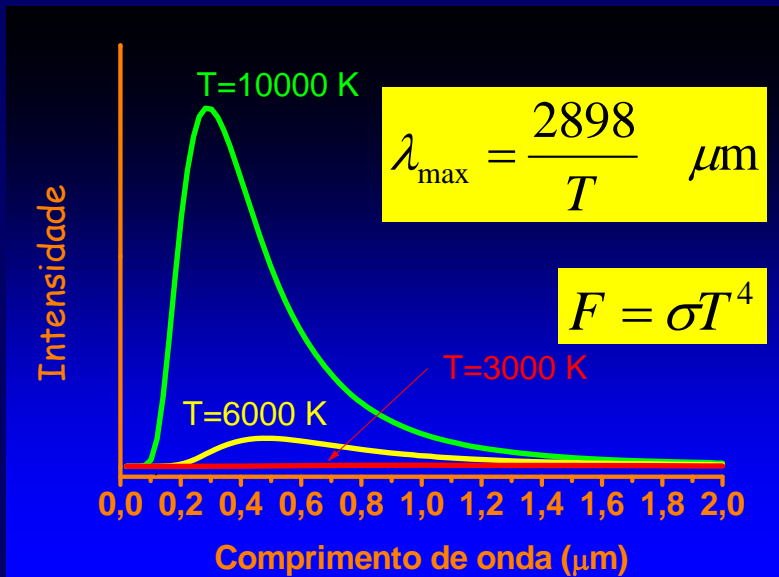


Espectro de corpo negro

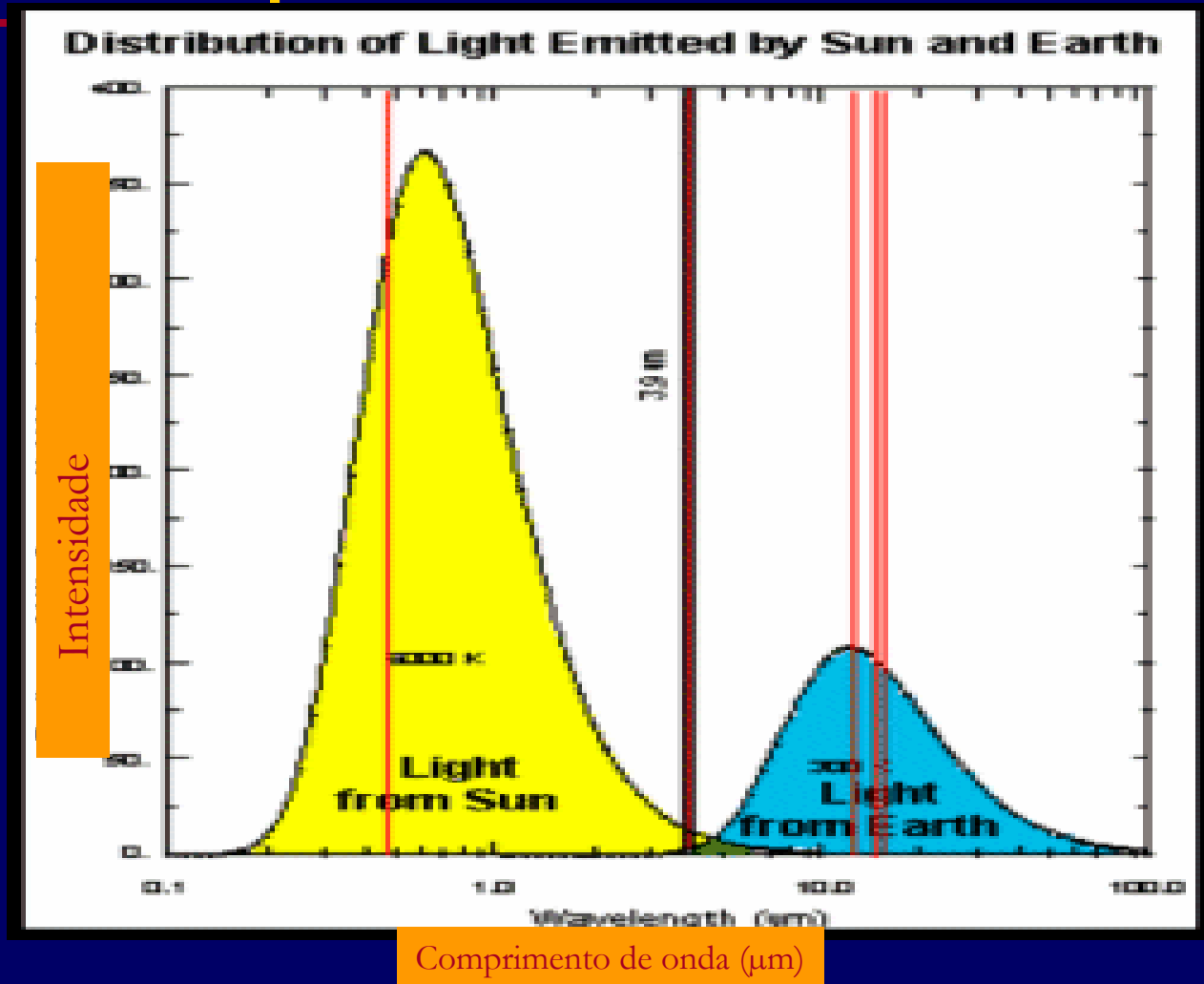
- Lei de Planck (forma da curva)

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

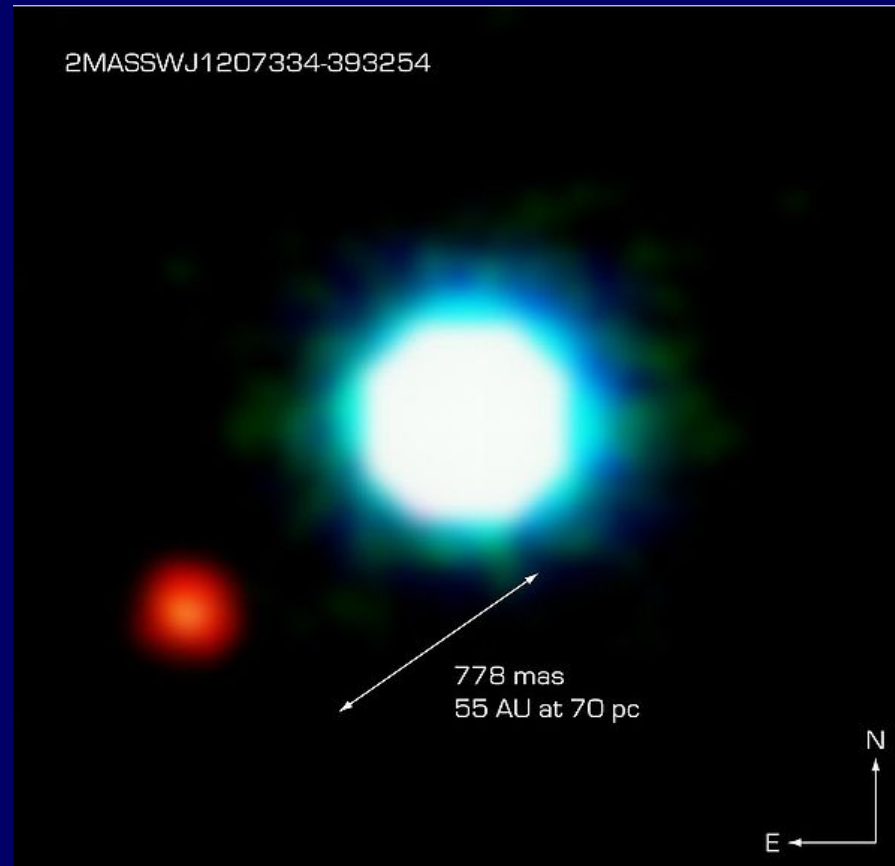
- Lei de Wien (\leftrightarrow máximo)
- Lei de Stefan-Boltzmann (área)



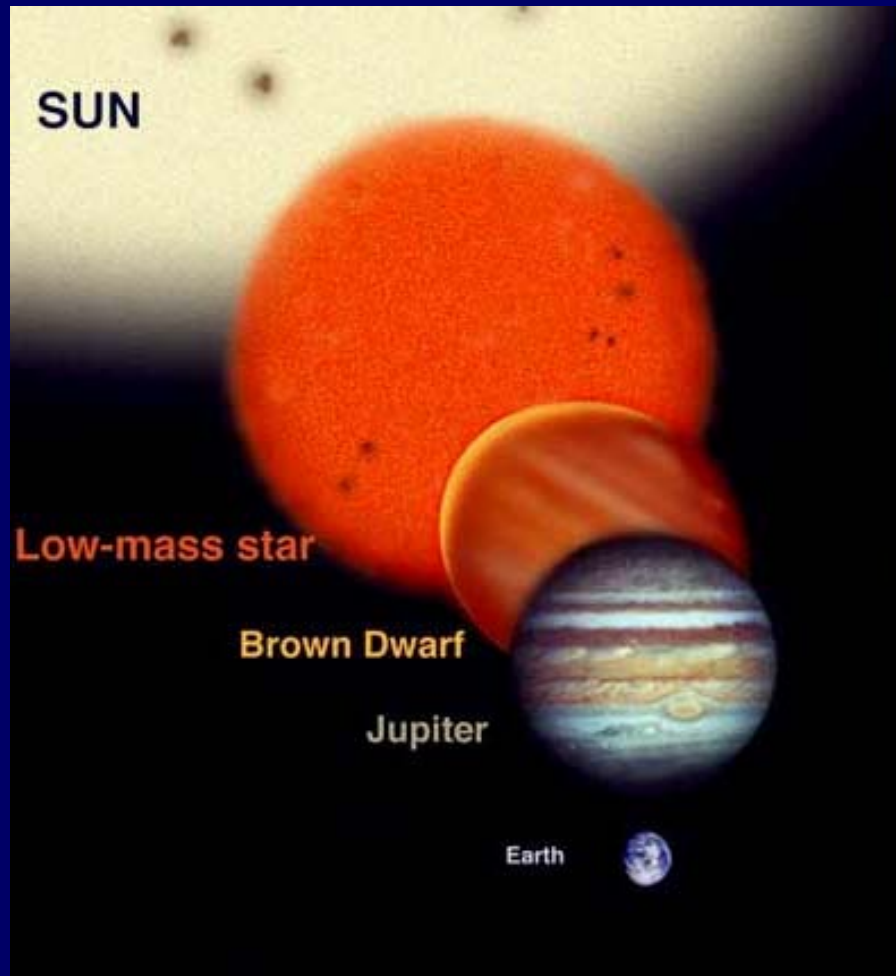
Os espectros do Sol e da Terra

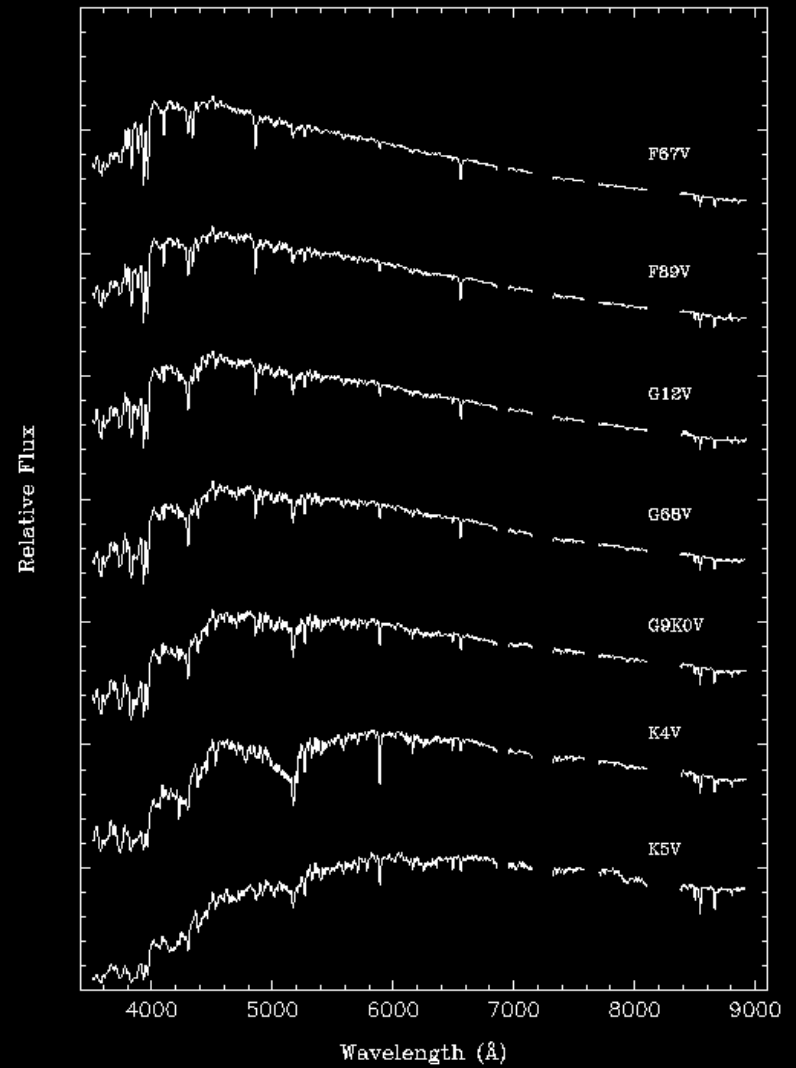
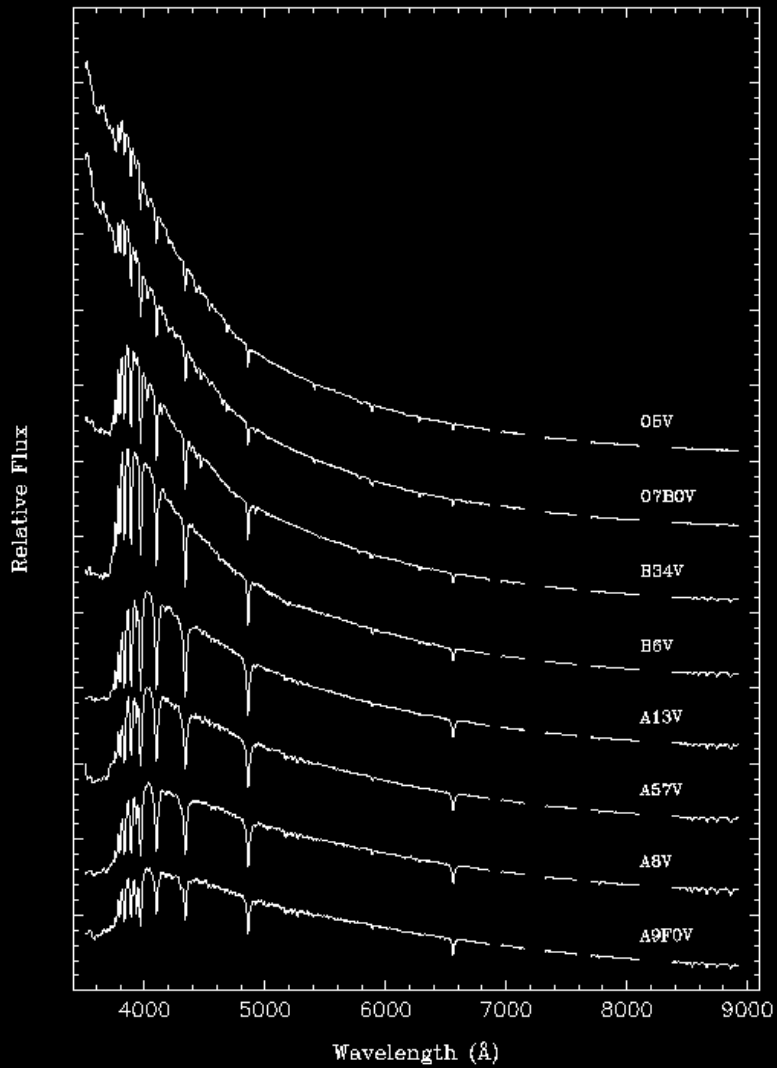


Uma anã marron e um exoplaneta



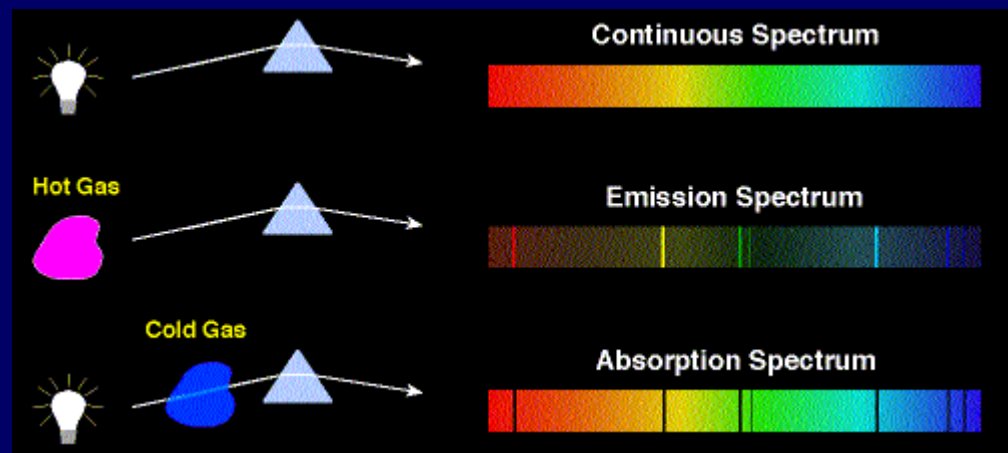
Anãs marrons





Espectro: contínuo, emissão, absorção

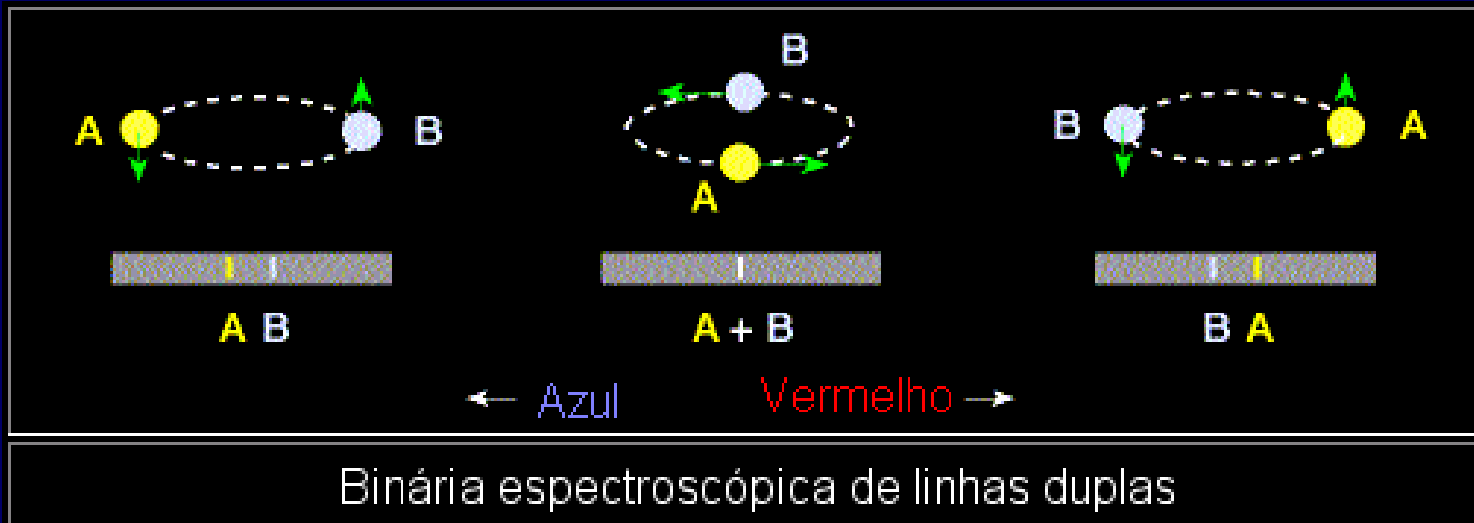
- A aproximação de corpo negro é boa para o espectro contínuo de muitas estrelas
- Linhas de emissão indicam a presença de gás tênue excitado e/ou ionizado
- Linhas de absorção indicam a presença de gás mais frio entre a região emissora e o observador
- Linhas de emissão ou absorção podem ser utilizadas para determinar a velocidade radial da fonte!



$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

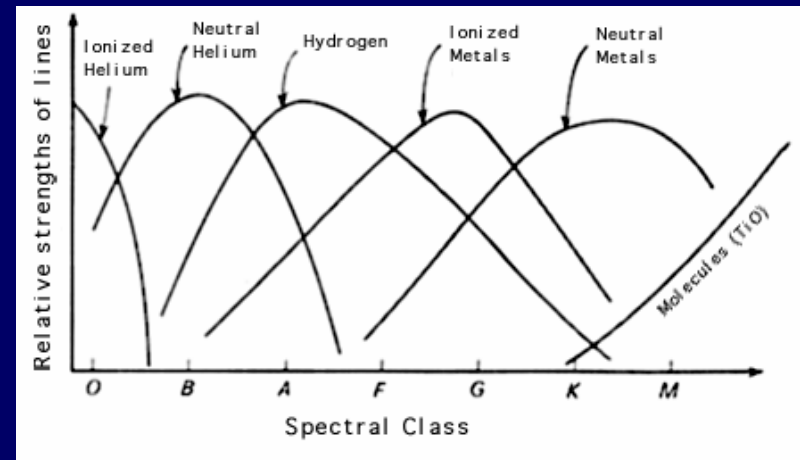
→ Rotação
→ Período orbital
→ Redshift

Velocidade radial de um sistema binário



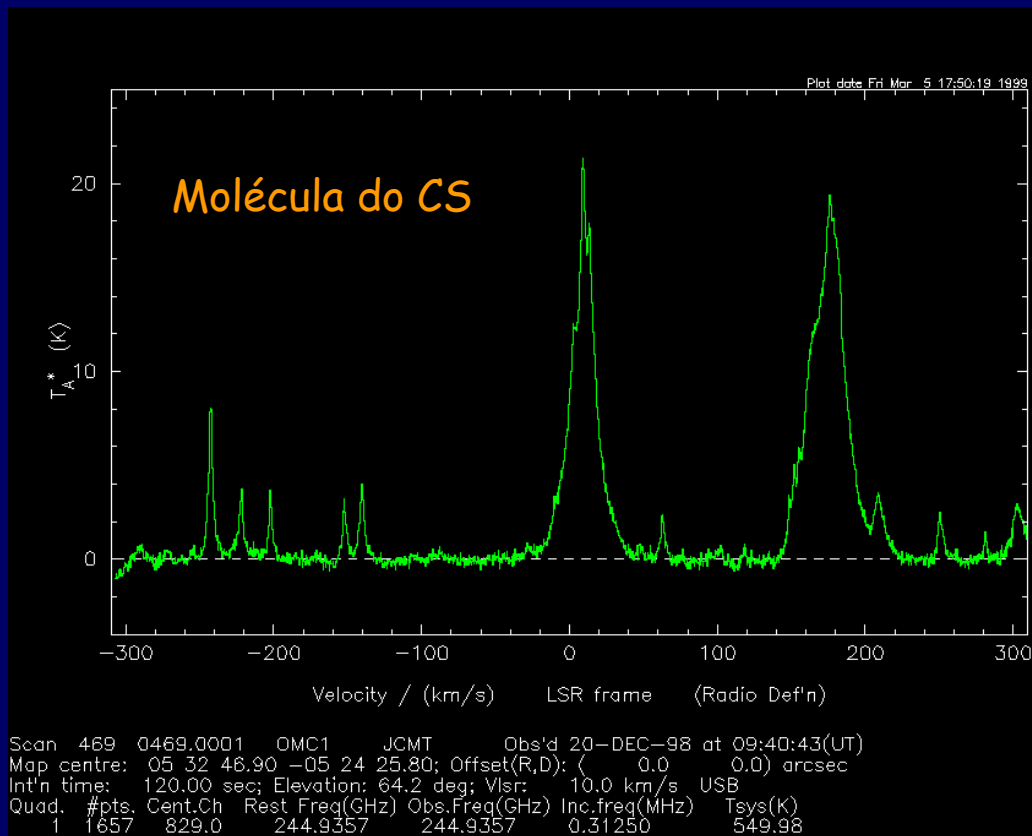
Classificação espectral (estrelas)

- Diferentes elementos químicos apresentam diferentes intensidades de linhas de absorção, conforme a temperatura da atmosfera. →
- A classificação espectral numa sequência de temperaturas é denotada pelas letras **O, B, A, F, G, K, M**
- A classificação numa sequência de gravidades superficiais é denotada por algarismos romanos. →
- O Sol é uma estrela tipo **G2 V**
Aldebaran é uma **K5 III**



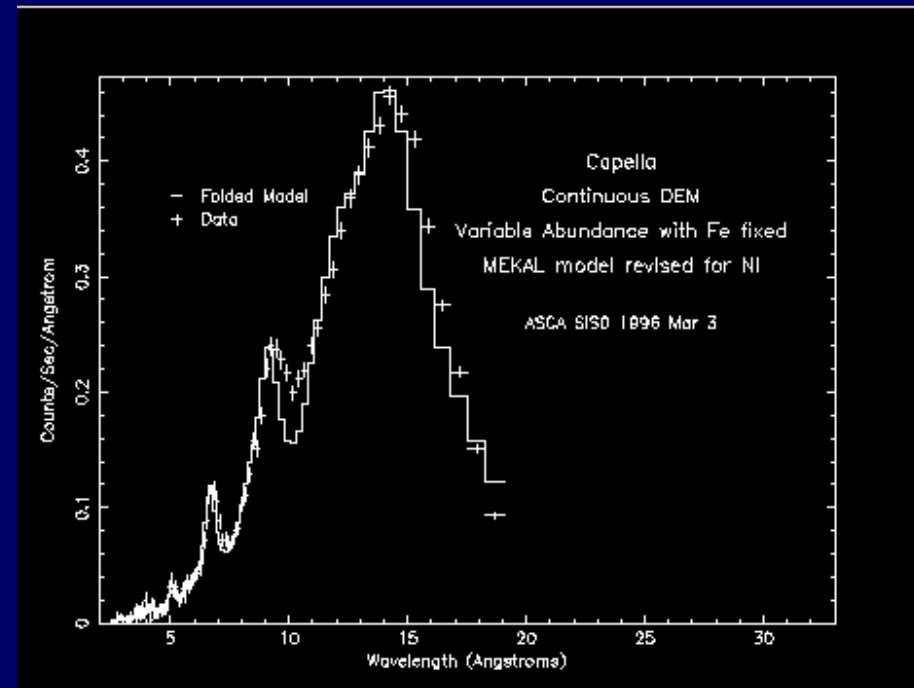
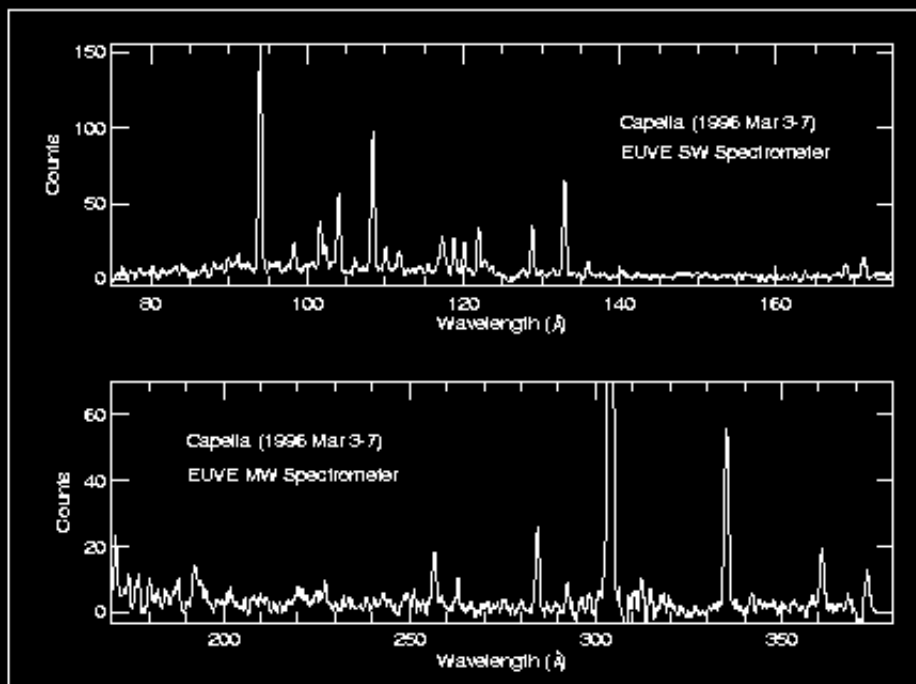
Ia	Supergigantes mais luminosas
Ib	Supergigantes menos luminosas
II	Gigantes luminosas
III	Gigantes normais
IV	Subgigantes
V	Anãs (da sequência principal)

Um espectro na faixa rádio



- Eixo X:
Como $\Delta\lambda/\lambda = \Delta v/v = \Delta v/c$
o eixo X pode ser expresso
em termos de velocidade:
 $\Delta v = c \times (v-244.94)/244.94$
- Eixo Y: lembrar que na lei
de Planck, para $\lambda \gg \lambda_{\max}$
 $B_\lambda \propto T$

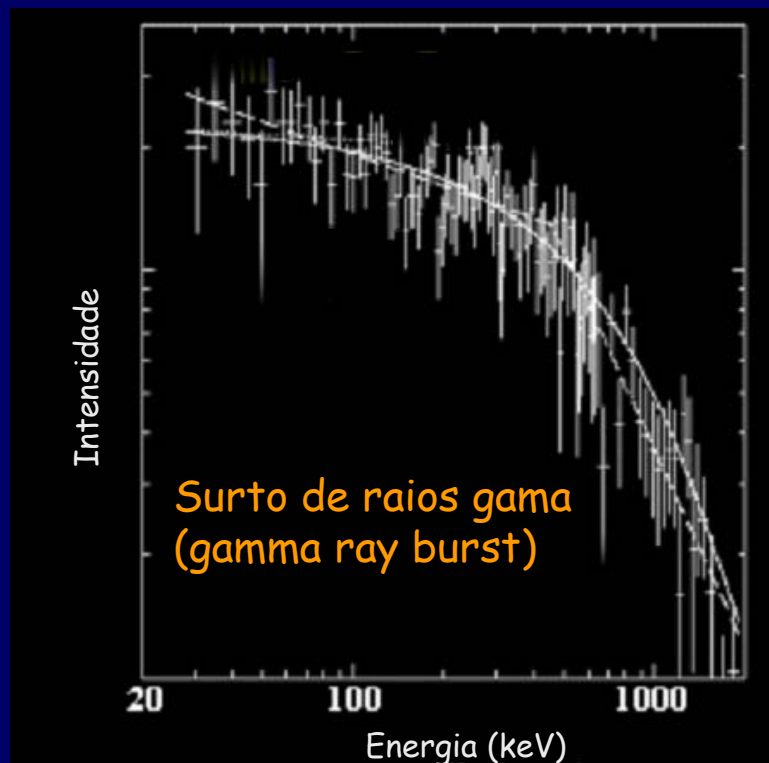
Outras regiões do EEM



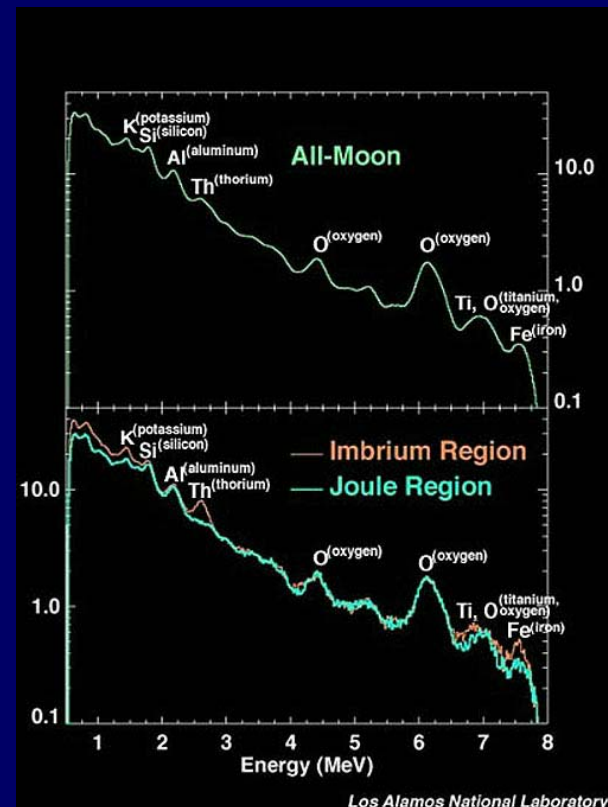
• Ultravioleta extremo

• Raios X

Em altas energias (raios γ)



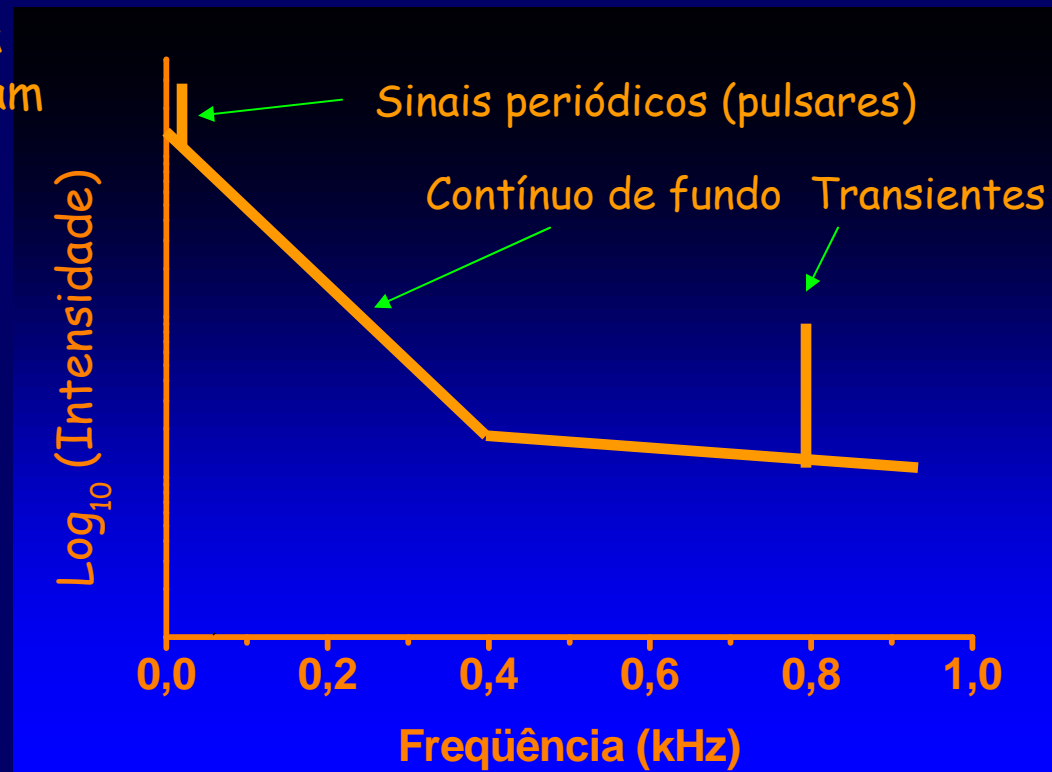
- Note o eixo X mostrado em termos de energia ($E=h\nu$)



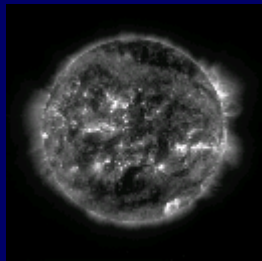
- Composição do solo lunar a partir de espectroscopia de raios gama

O espectro de ondas gravitacionais

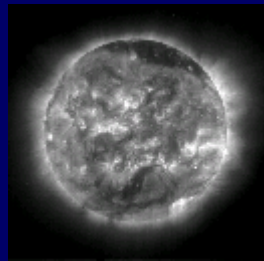
- OG são previstas pela teoria da relatividade geral, mas não foram observadas diretamente ainda
- Massas aceleradas produzem OG de modo parcialmente análogo a cargas aceleradas produzirem ondas eletromagnéticas
- Previsões:



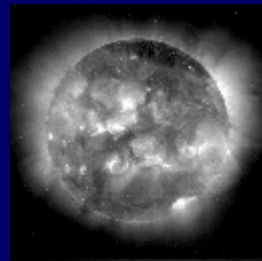
O Sol ao longo do espectro eletromagnético



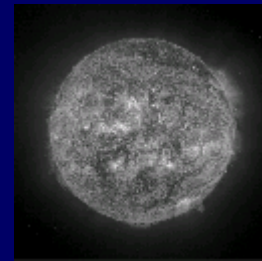
171 nm



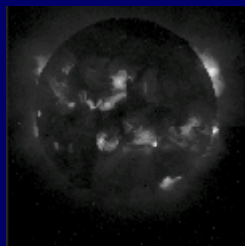
195 nm



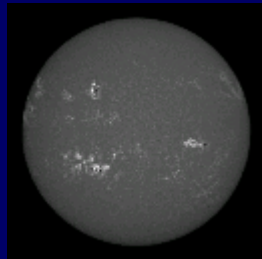
284 nm



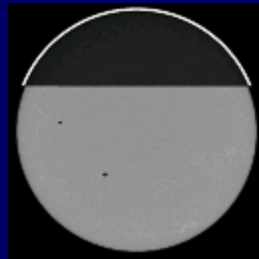
304 nm



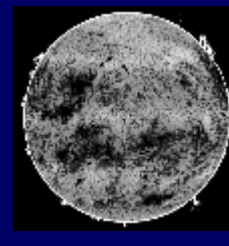
Raios X



393.4 nm

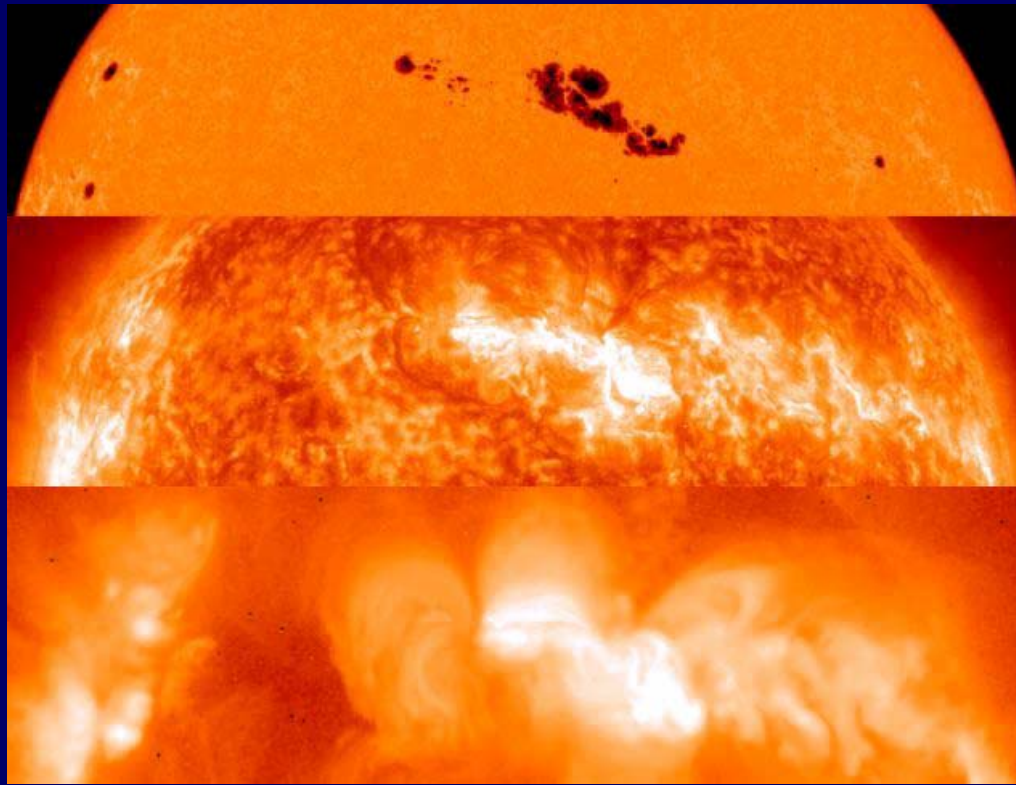


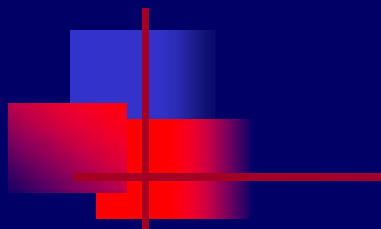
Visível



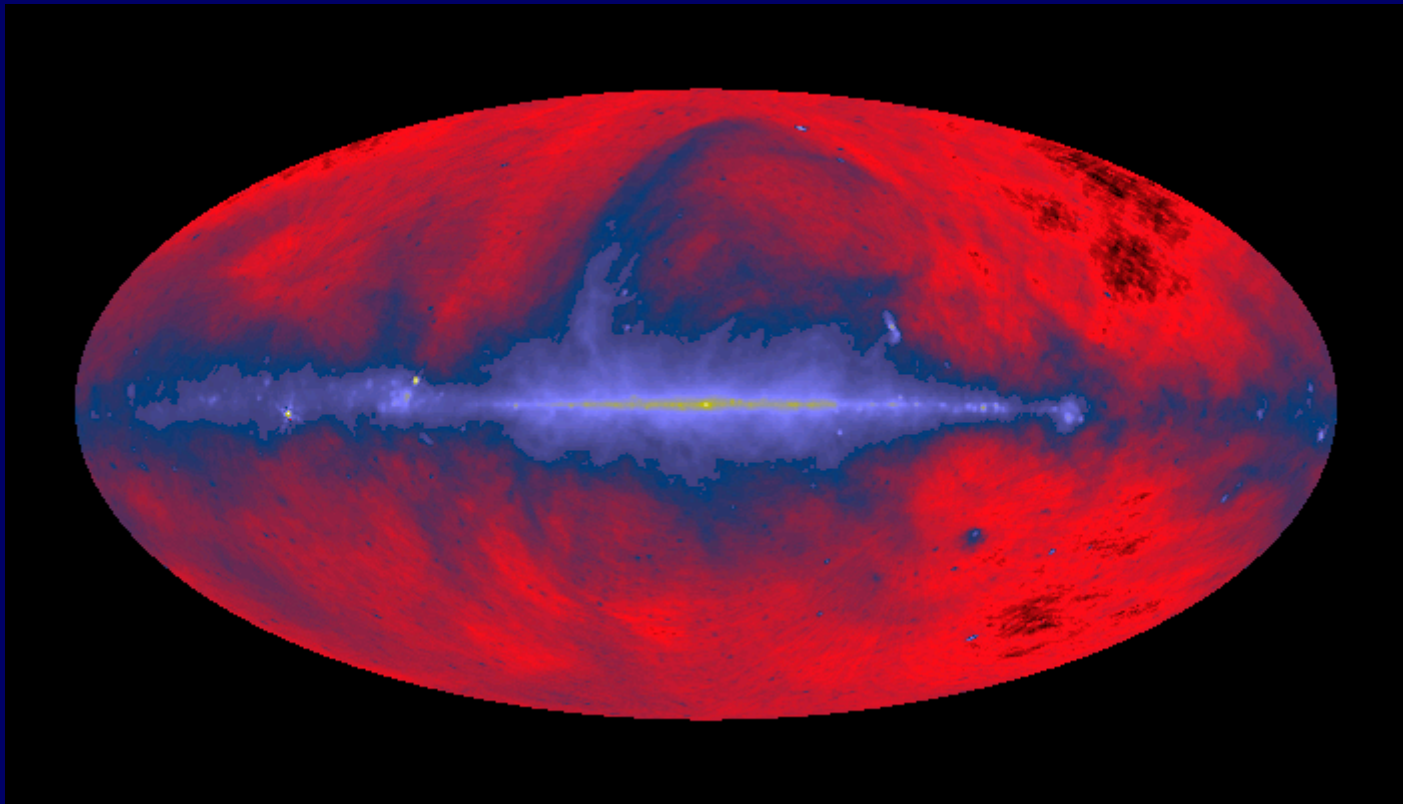
1083 nm

0 Sol...

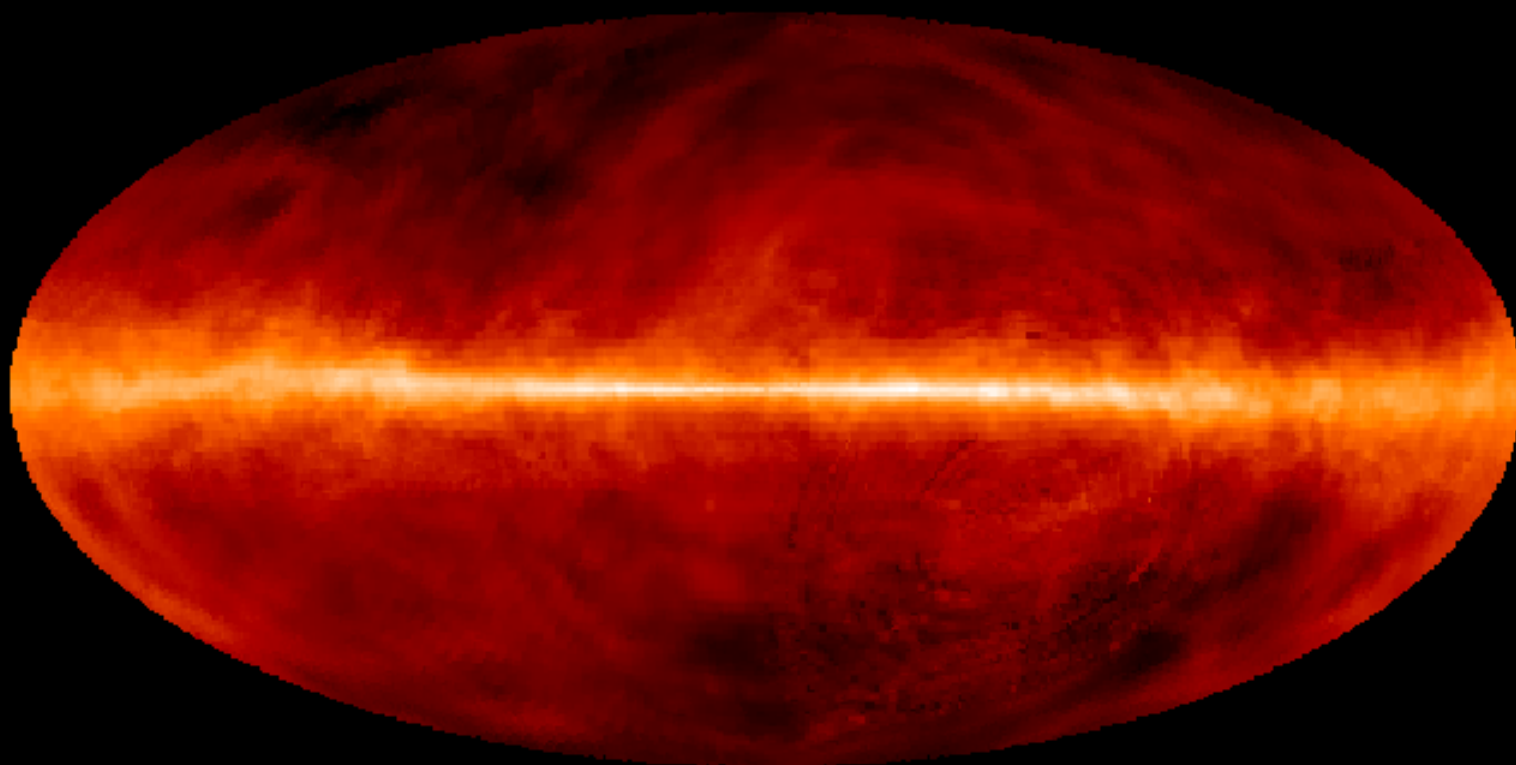




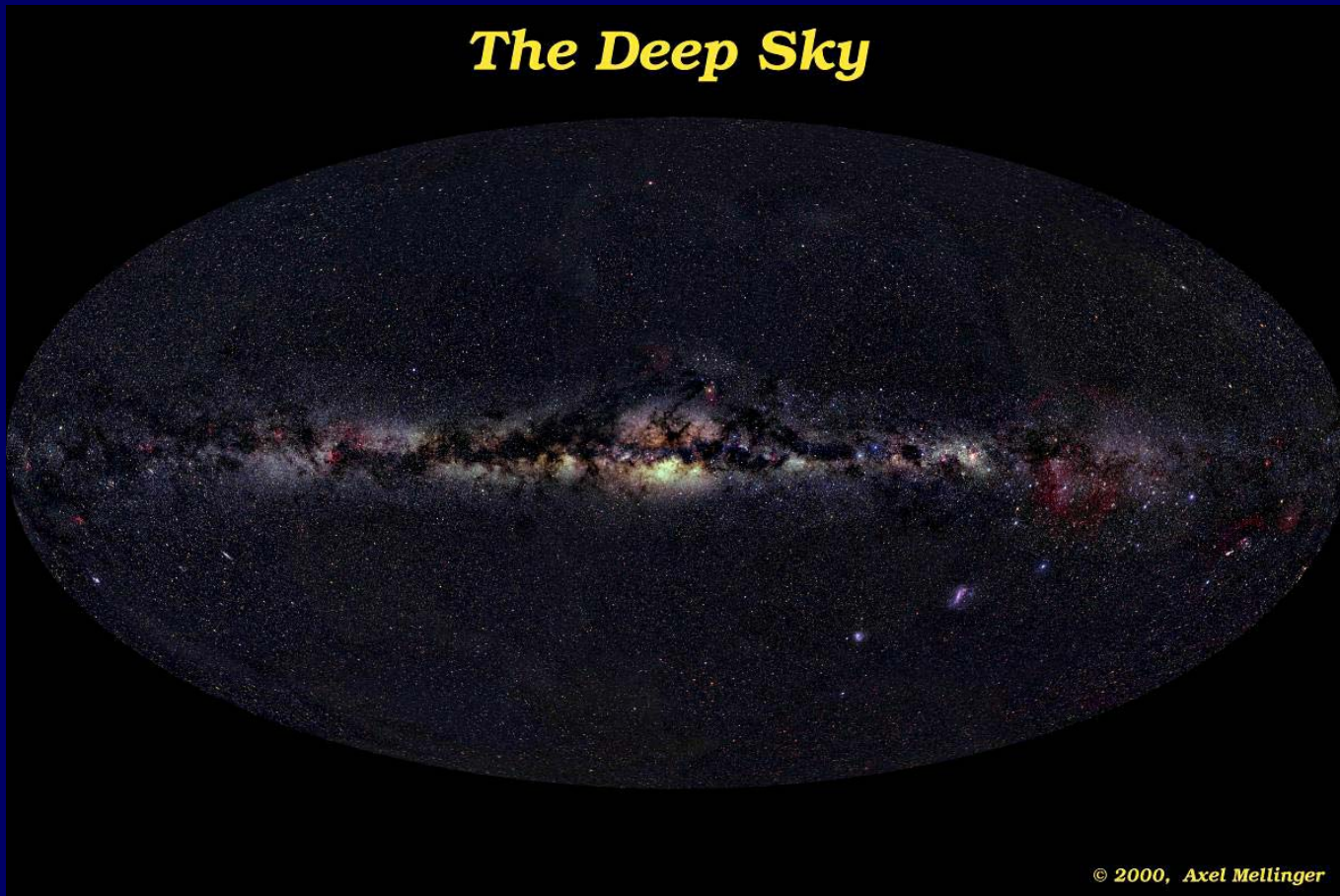
A nossa galáxia em rádio (408 MHz)



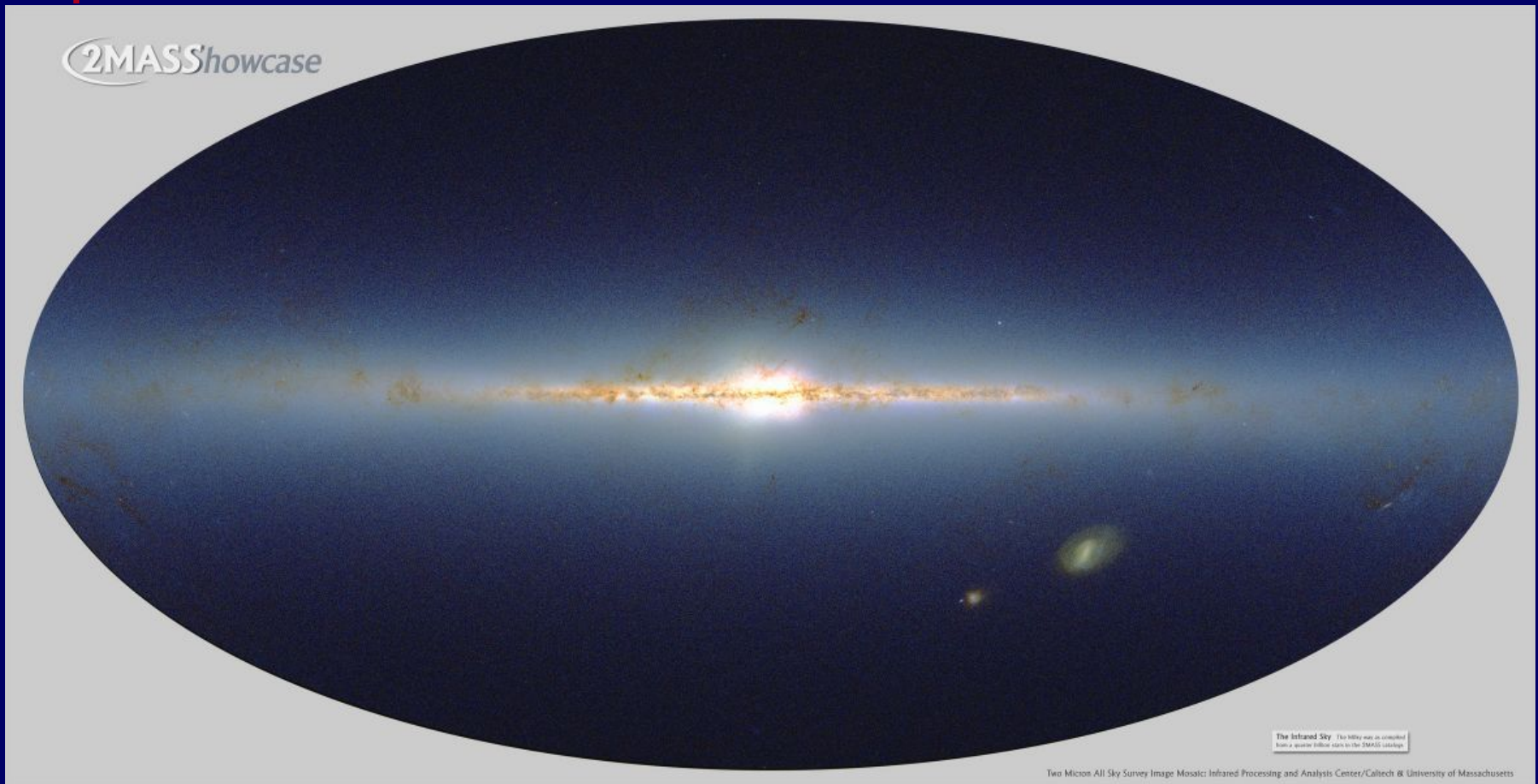
1.42 GHz (rádio)



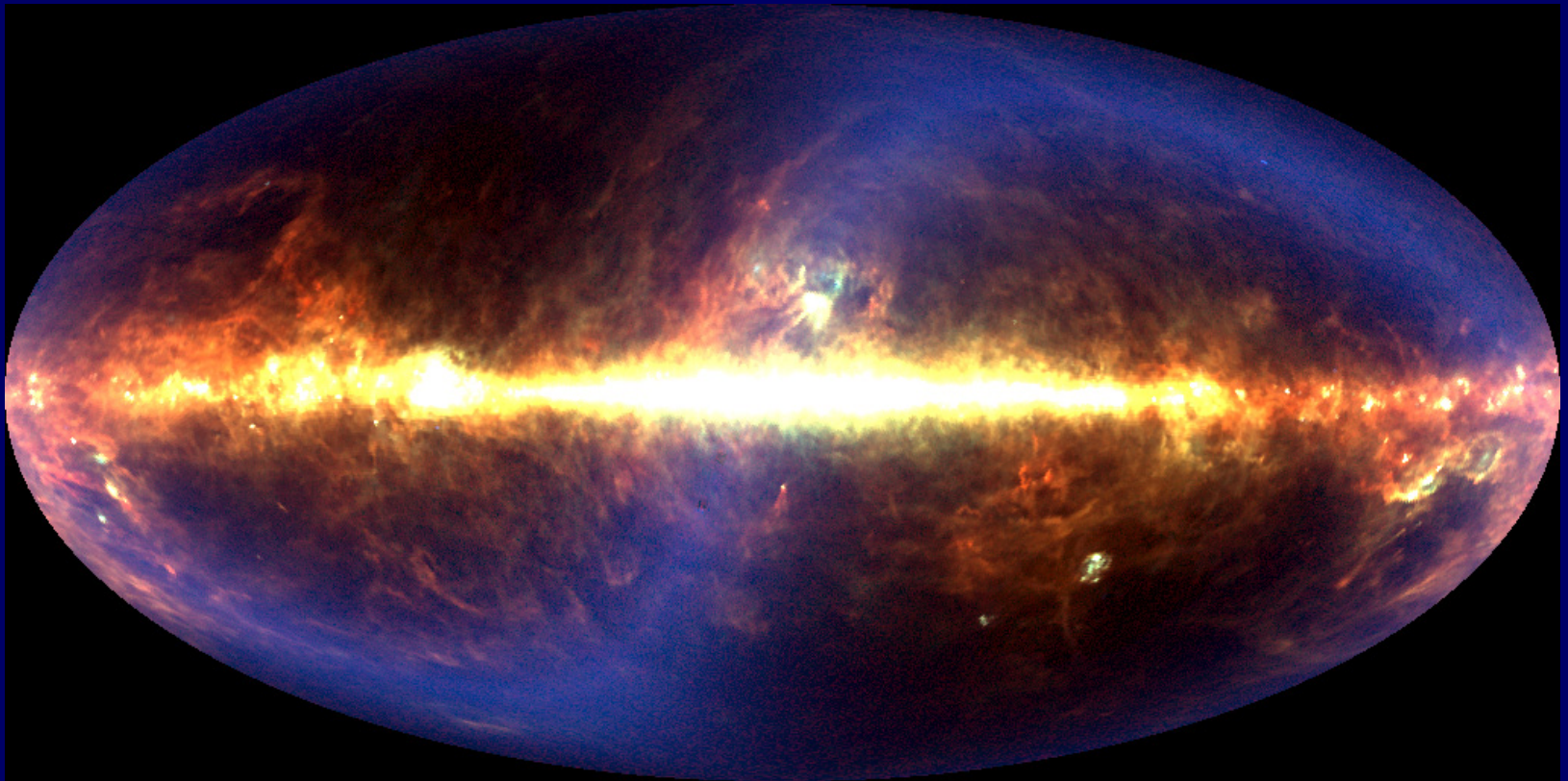
No visível



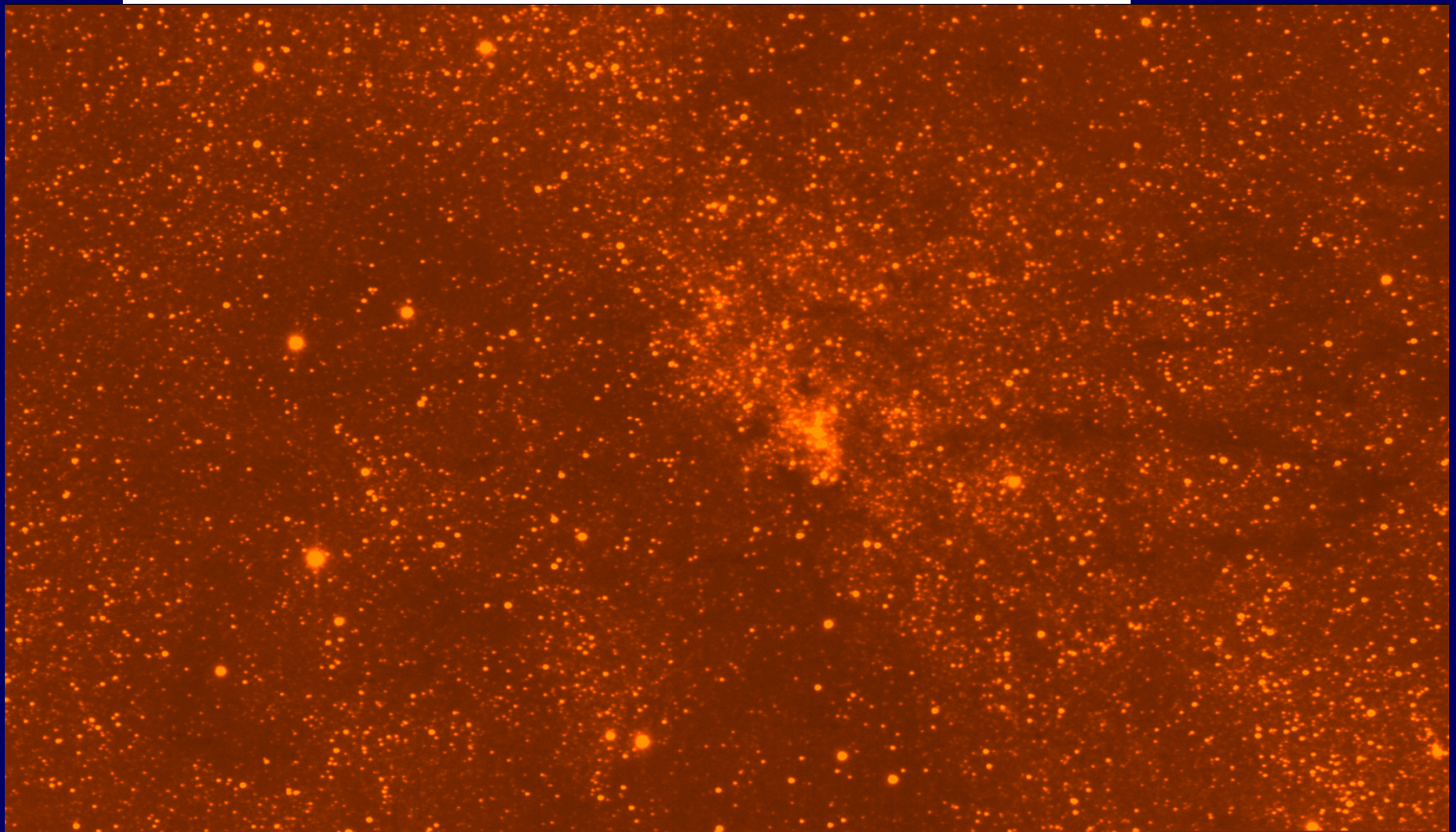
No infravermelho próximo (2MASS, 1-2.5 μm)



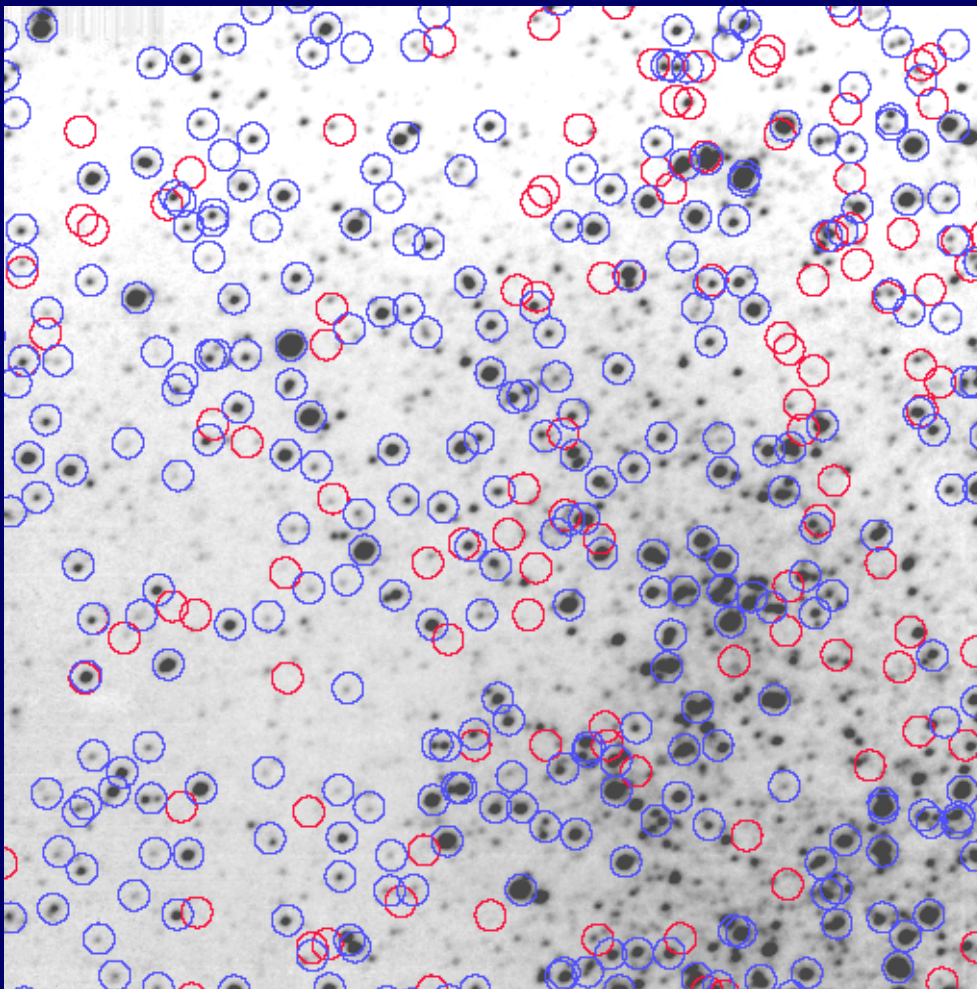
No infravermelho distante (60, 100 e 240 μm)



As vizinhanças do centro galáctico

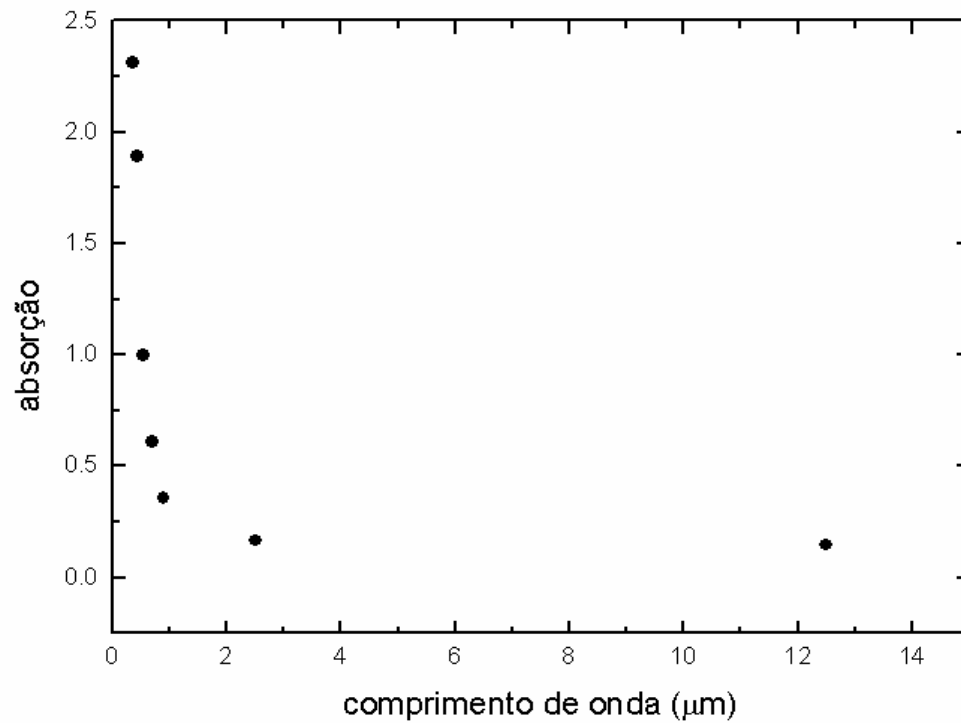


Posições IV e em raios-X



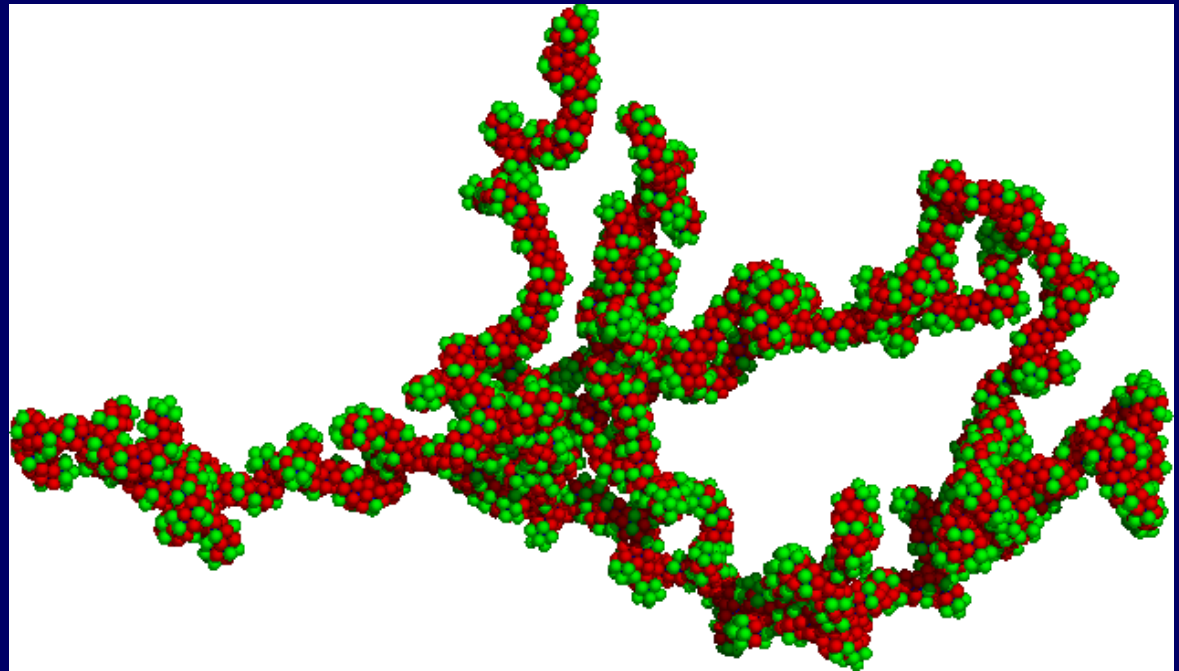
Em azul: IV (2MASS)
Em vermelho: raios-X

A transparência do Universo

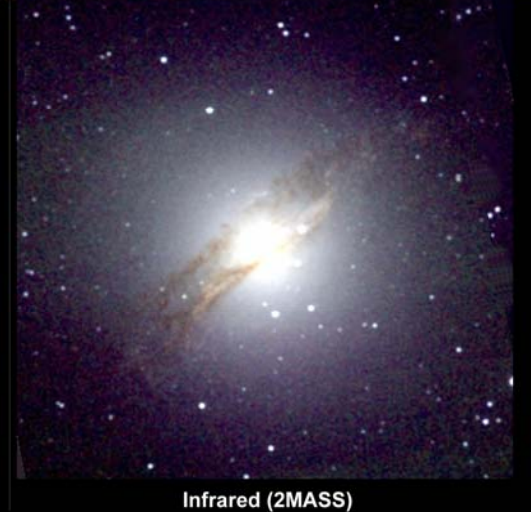
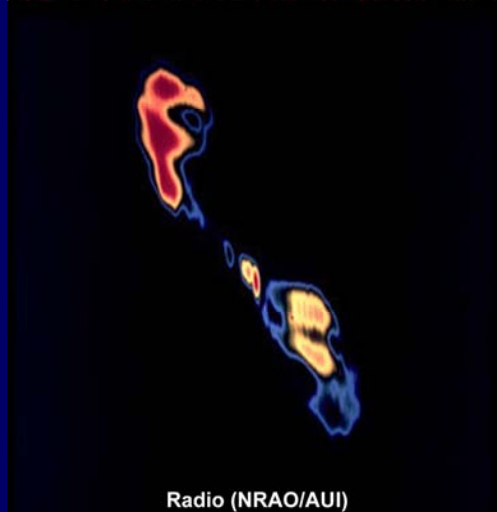
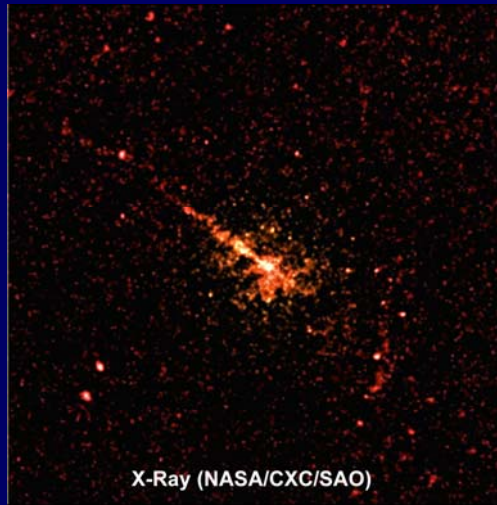


A poeira no meio interestelar

- Carbono, Silício e Oxigênio
- 0.005 a 1 μm de tamanho
- Absorve a radiação eletromagnética
- Produz polarização
- Produz halos em torno de fontes pontuais



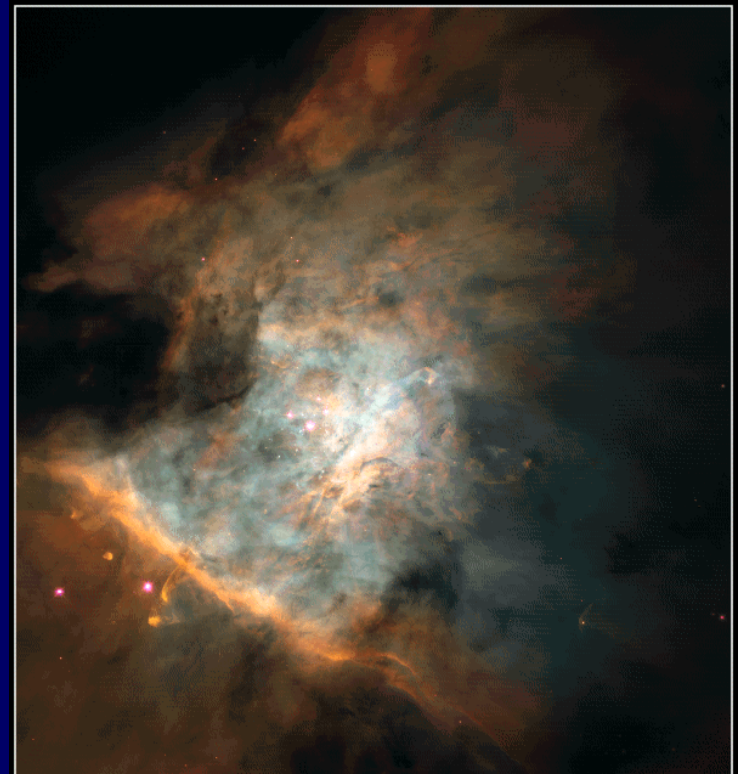
Centaurus A \equiv NGC5128



A Nebulosa de Órion em duas regiões espectrais distintas



• CamIV - LNA (1-2 μm)



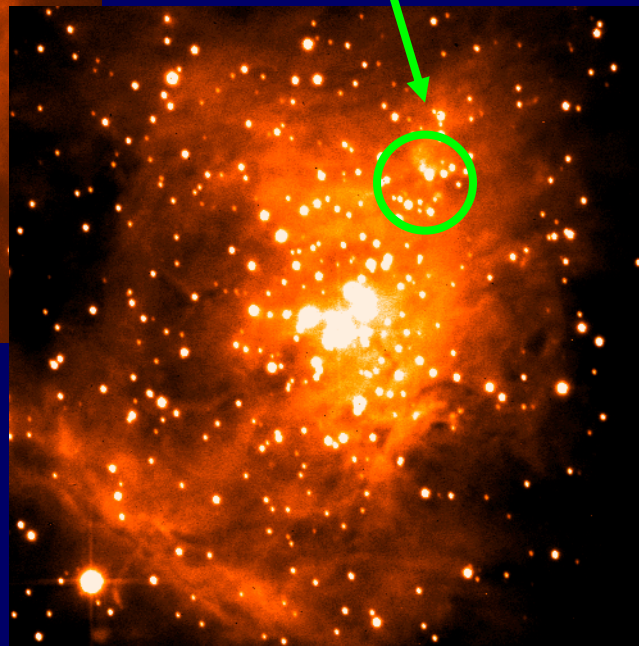
Orion Nebula Mosaic HST · WFPC2
PRC95-45a · ST ScI OPO · November 20, 1995
C. R. O'Dell and S. K. Wong (Rice University), NASA

Nebulosa de Órion...

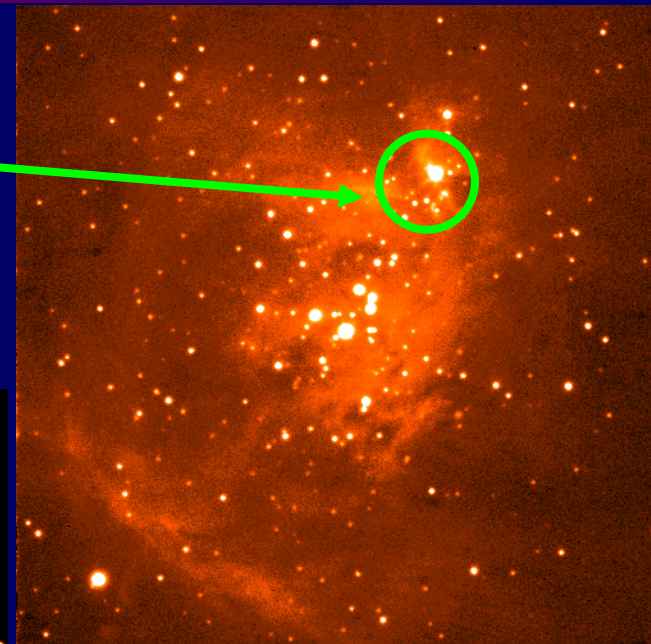
Objeto BN



1,25 μm

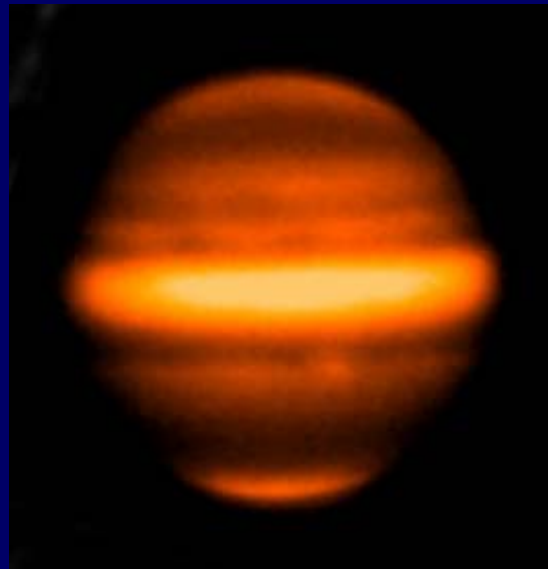
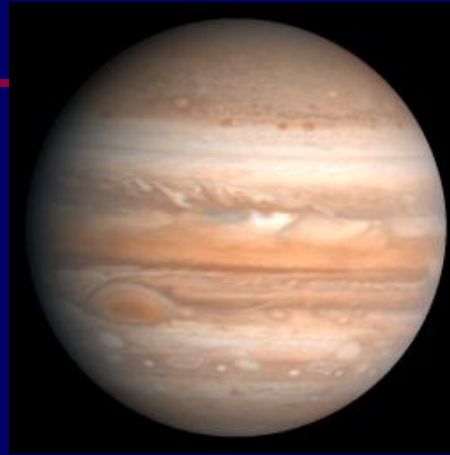


1,65 μm

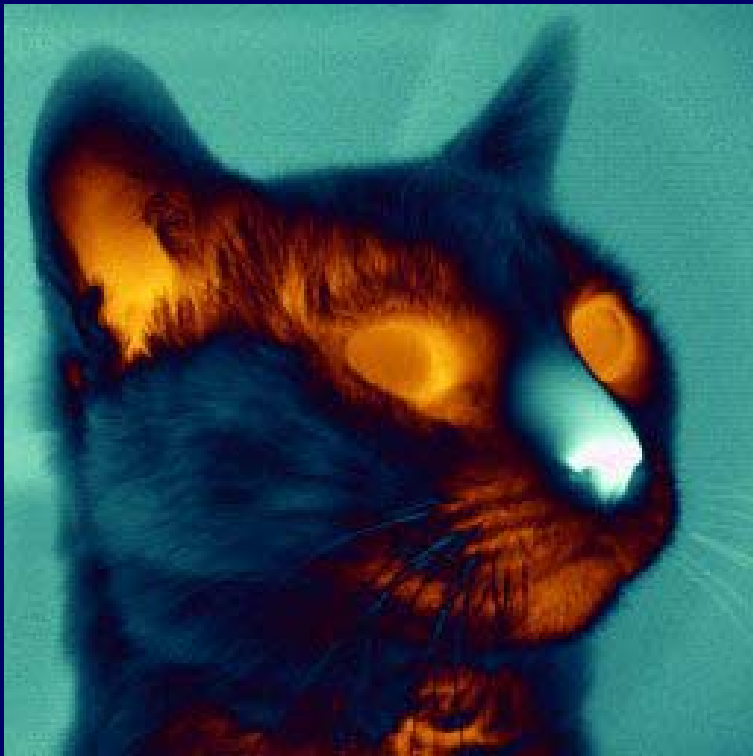


2,15 μm

Júpiter visível e invisível



Criaturas ao longo do espectro eletromagnético...

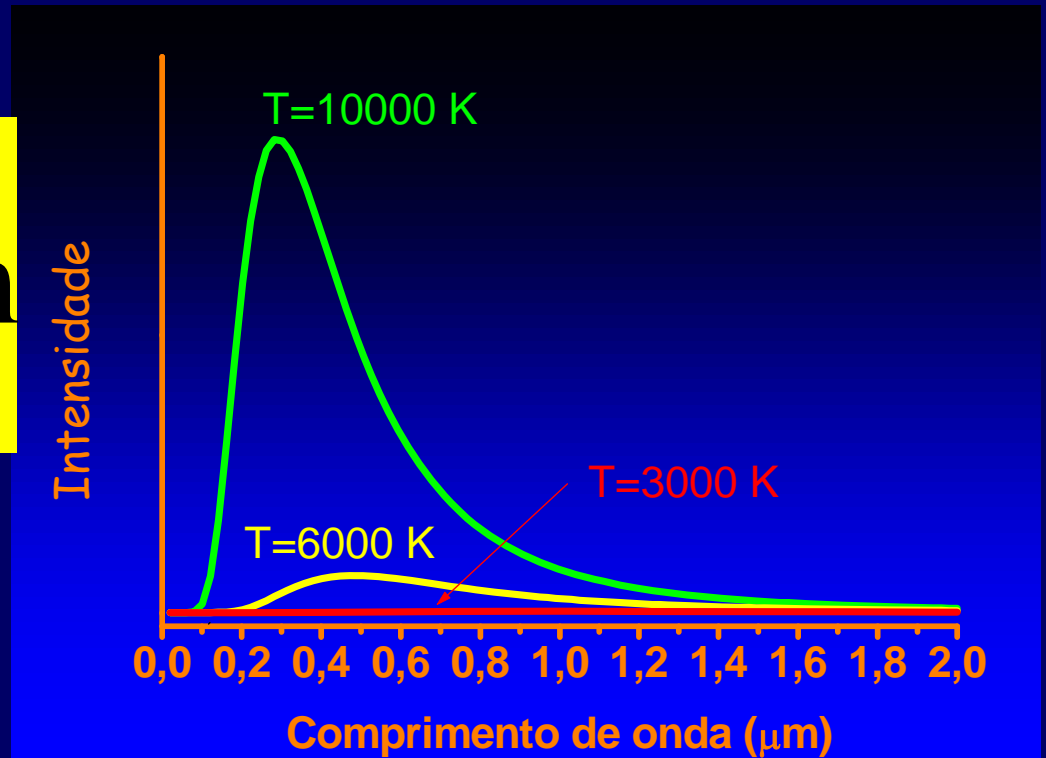


$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$E = h\nu$$

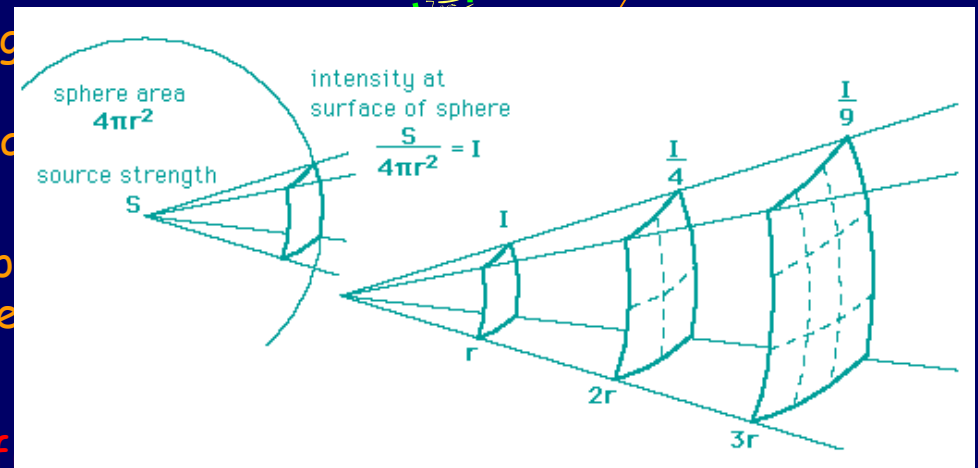
$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \mu\text{m}$$

$$F = \sigma T^4$$



Efeitos de diluição da radiação eletromagnética

- Mesmo fora da atmosfera terrestre, fontes pontuais isotrópicas produzem efeitos progressivamente menores à maiores distâncias
- Se uma quantidade de energia se propaga sob forma de frente de onda num meio bidimensional, a energia transportada é proporcionalmente a $1/r$
- Num meio tridimensional, a energia dispersa (neste caso, por unidade de área) na frente de onda, cai com $1/r^2$
- Na nossa atividade prática, vamos verificar experimentalmente a "lei do inverso do quadrado da distância", para a energia radiante



Efeitos da atmosfera terrestre sobre a radiação eletromagnética

- Absorção
- Espalhamento
- Refração (só muda direção)
 - Sistemas adaptativos!
Telescópios Gemini & SOAR
- Dependem de λ



Extinção pela atmosfera

- Espalhamento

- Rayleigh (o céu azul)
- Mie (névoa seca)
- Não seletivo

- Absorção

- Contínua
- H₂O
- CO₂
- O₃

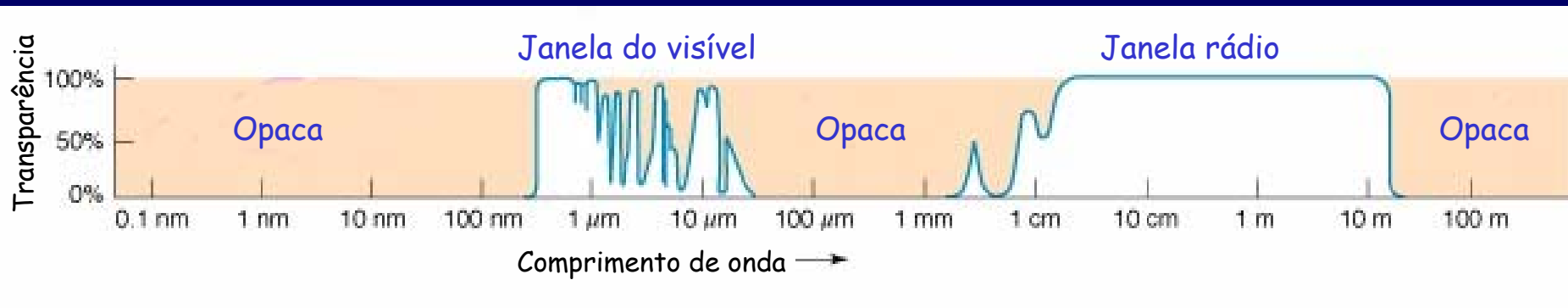
$\propto \lambda^{-4}$

$\propto \lambda^{-1}$

$\propto \lambda^0 = \text{const}$

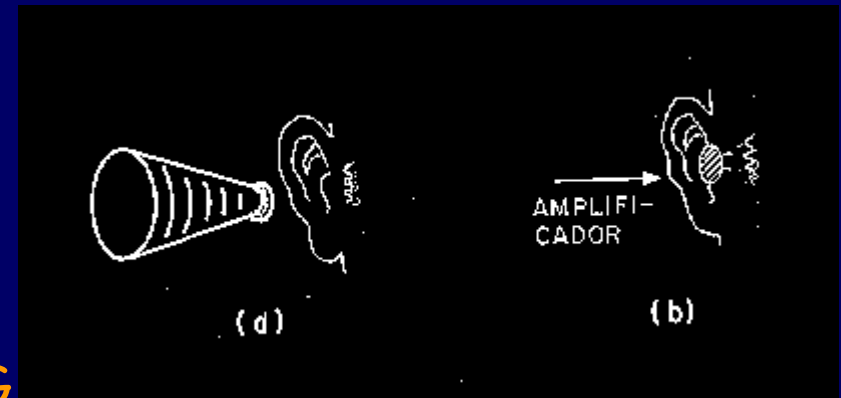
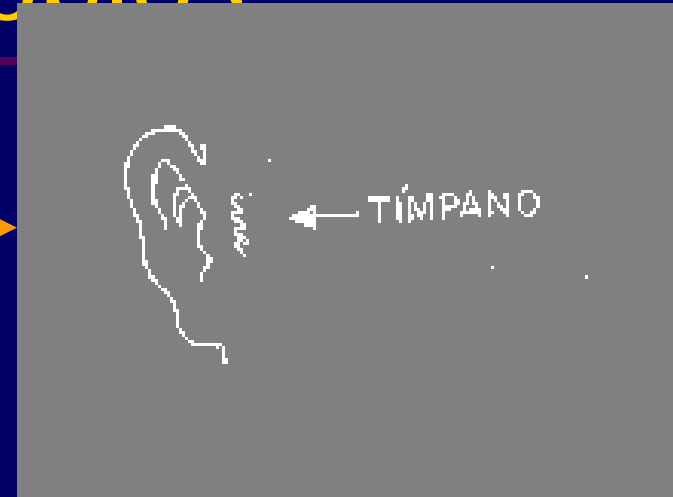
Porque a água do mar é azul-esverdeada?
Porque as nuvens são brancas/cinza?

A transmissão da atmosfera



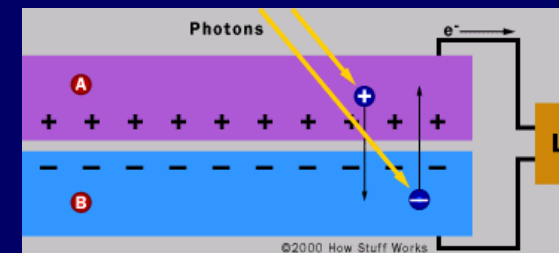
Detetores e Telescópios

- Um detetor de ondas acústicas
- Como funciona?
- Porque dois detetores?
- A sensibilidade
- Analogia com detetores de OG

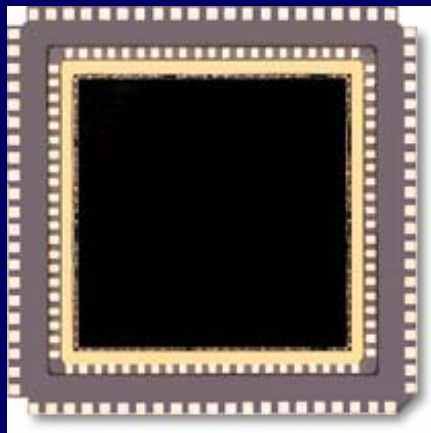


Detetores de radiação eletromagnética

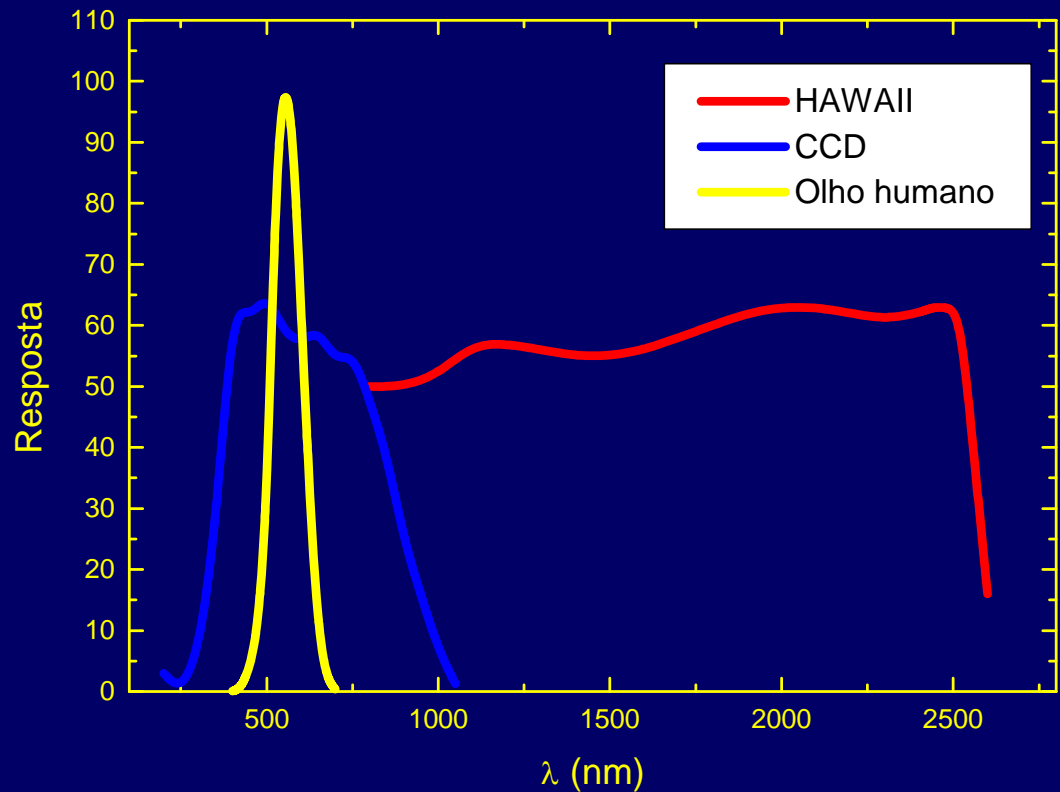
- Na faixa rádio: detetar significa medir a amplitude e fase (às vezes) das ondas eletromagnéticas (métodos coerentes)
- Para energias mais altas (do infravermelho aos raios gama): métodos incoerentes. Mudança de propriedades nos materiais, em geral relacionadas com efeitos sobre os elétrons e seus níveis de energia



Exemplo prático

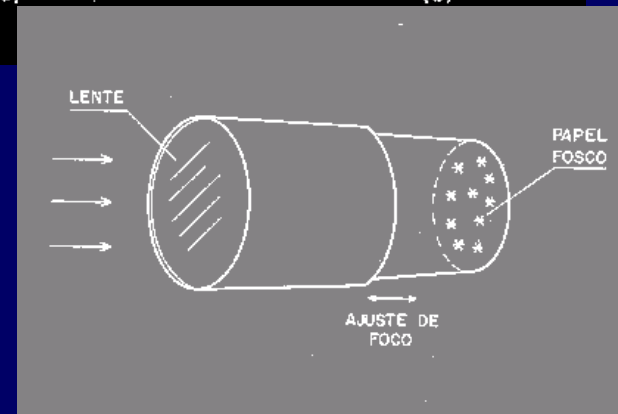
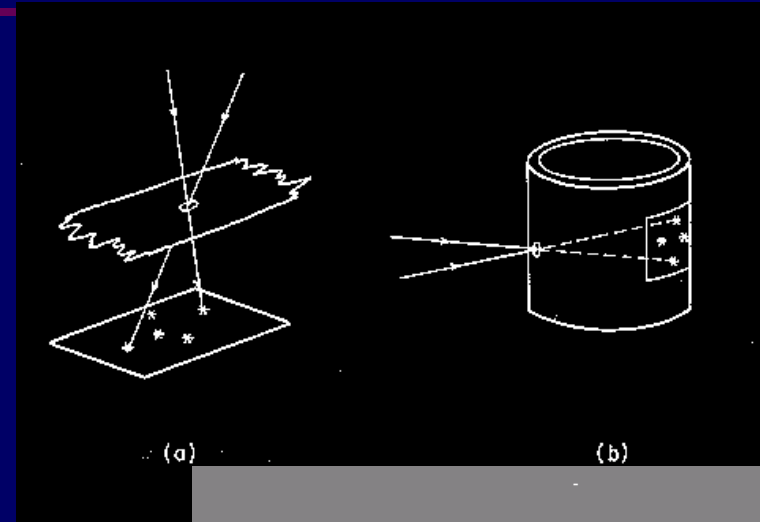


Arranjo HAWAII
1024 x 1024 pixels
Sensível no IV próximo



Telescópios, para quê, mesmo?

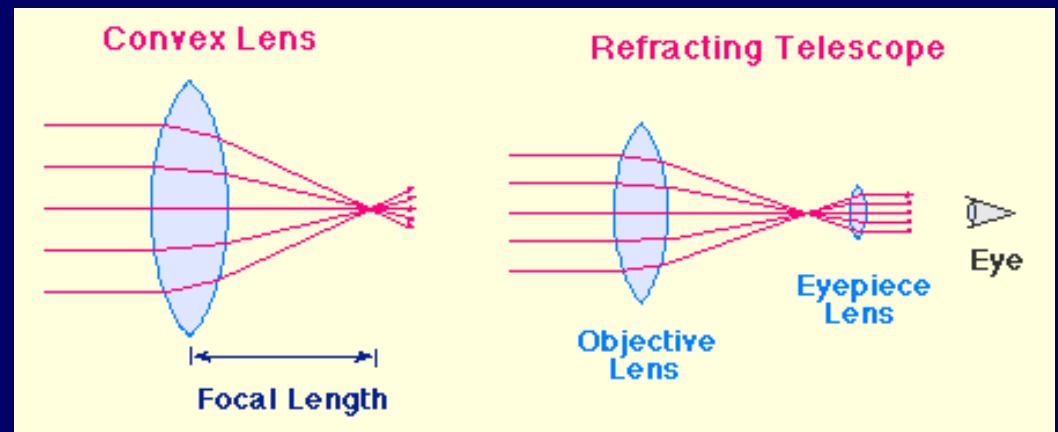
- 1) Determinar a direção da qual provém a informação
- 2) Captar a maior quantidade possível de informação



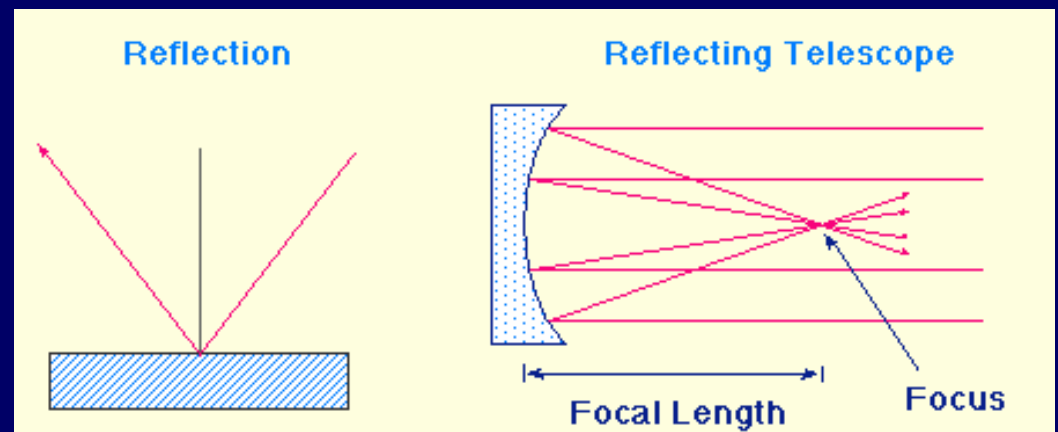
Telescópios: o básico

- Refratores

Cromatismo
Deformações

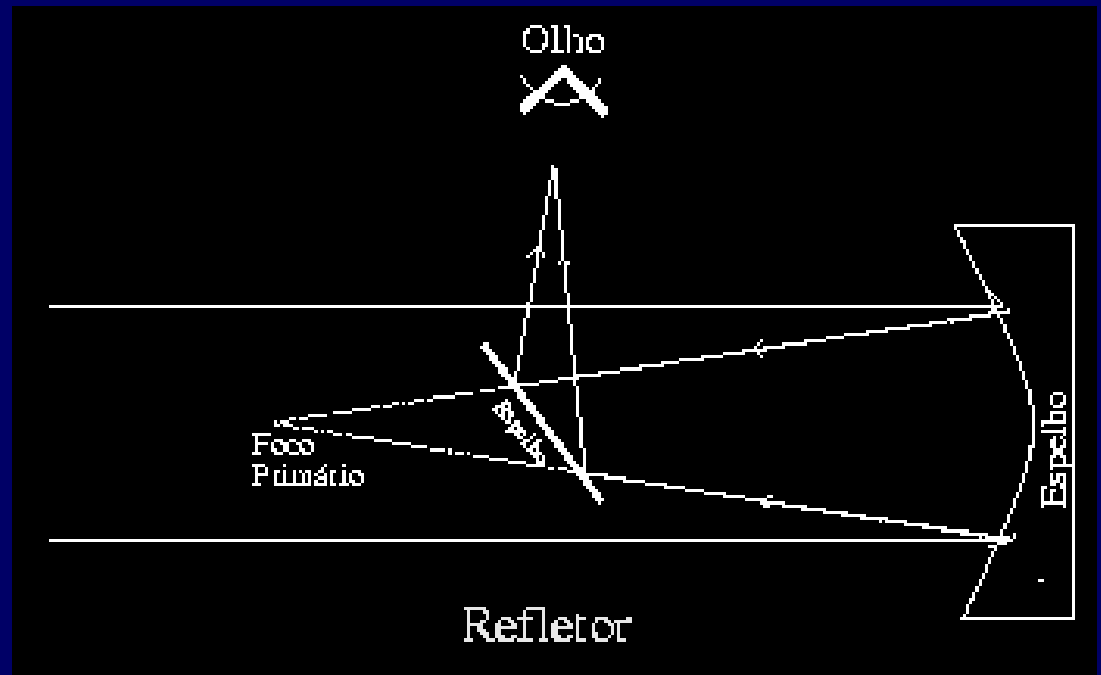


- Refletores



Refletores...

- Newton 1668

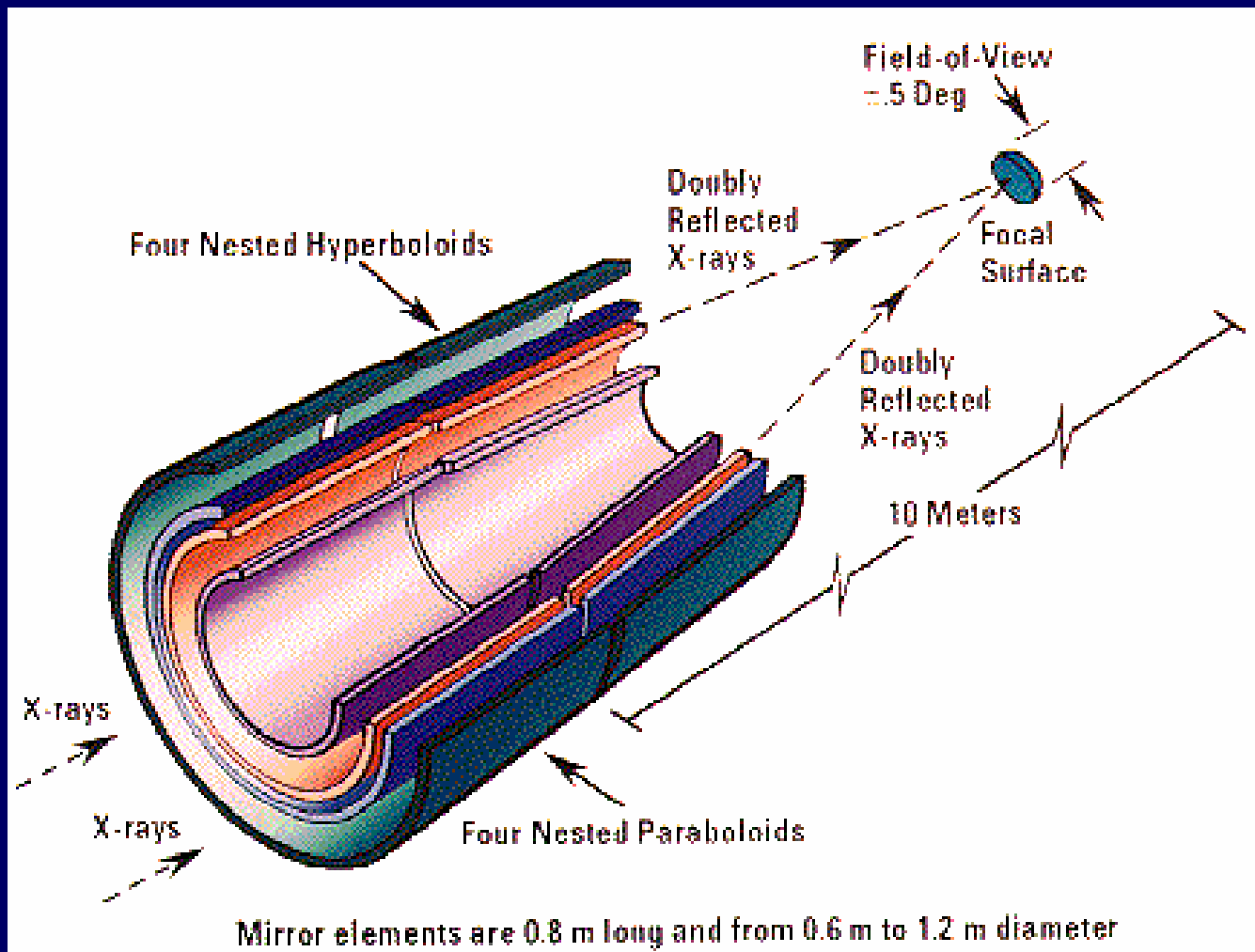




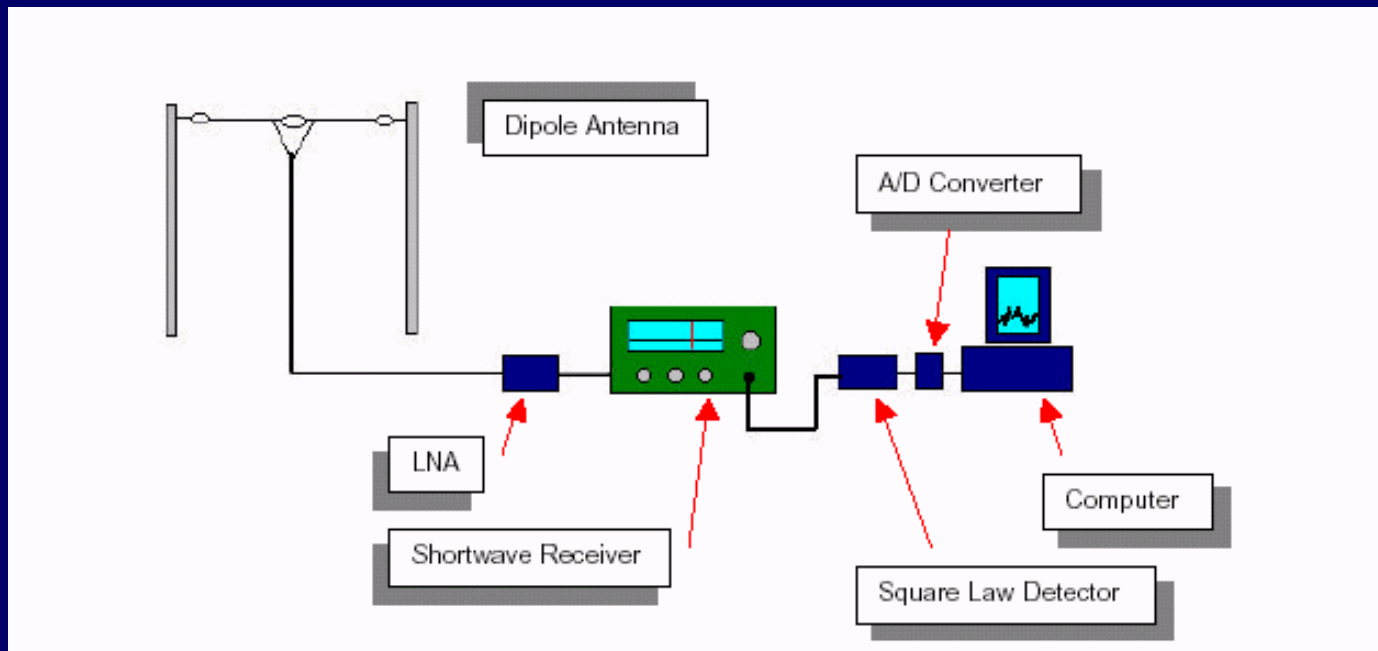
Foco fixo (Coudé)

Foco Cassegrain

Refletores em raios X

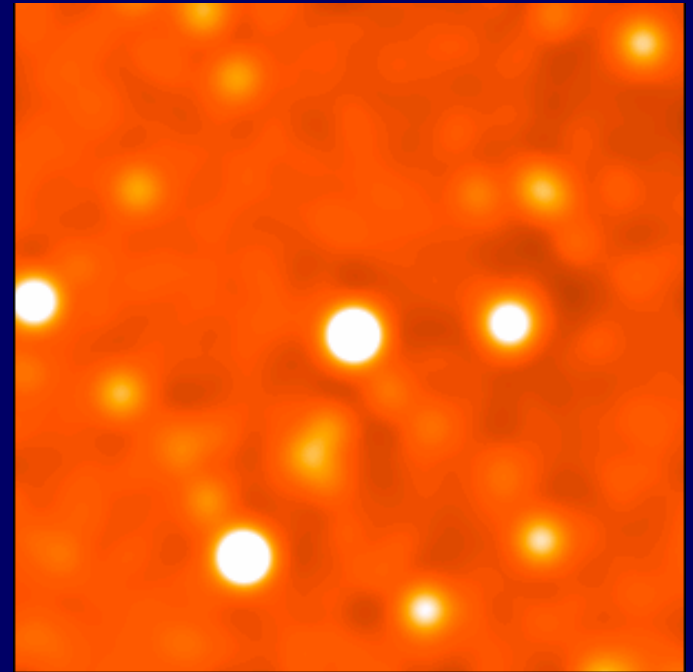
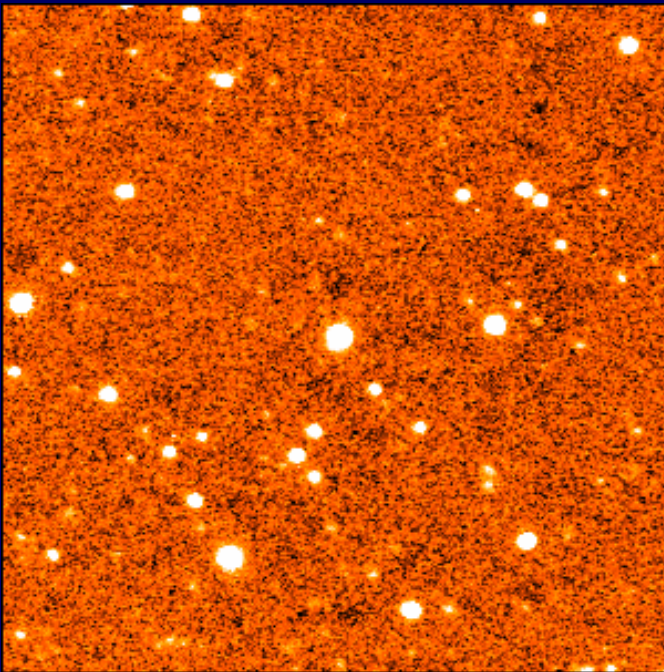


Na região rádio



Efeitos sobre a trajetória da radiação eletromagnética

- Cintilação atmosférica



- Métodos adaptativos!!! (Telescópios Gemini e & SOAR)



Telescópios órbita x solo



Vácuo

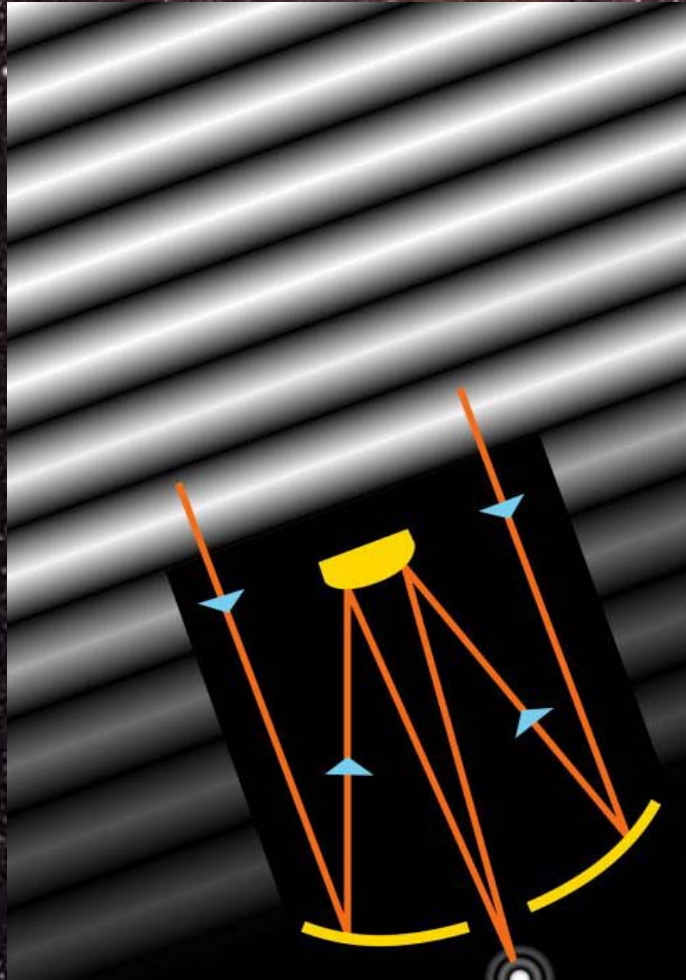
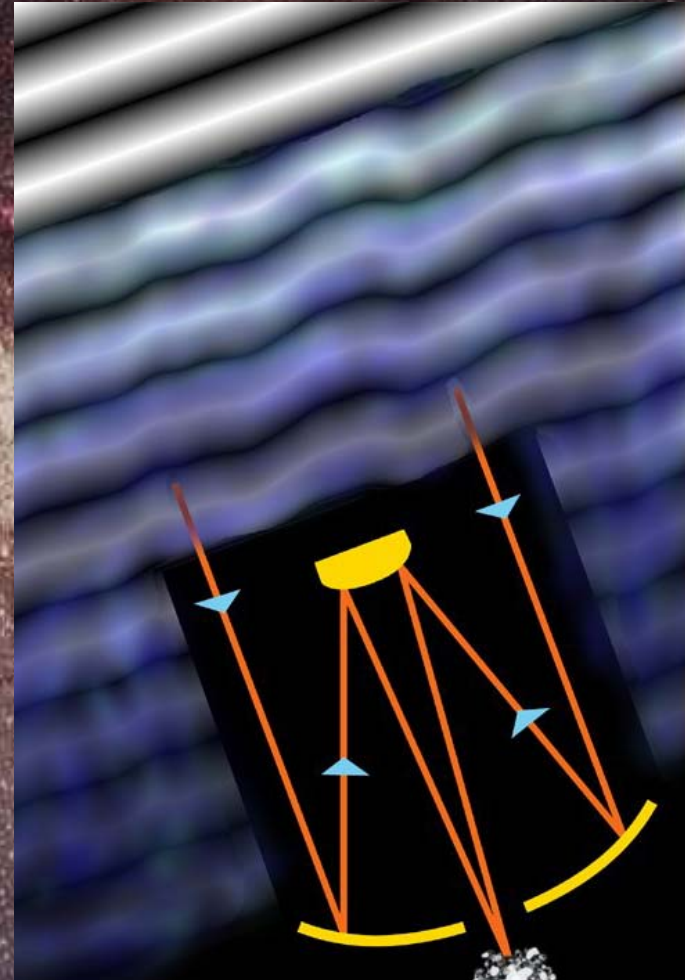


Imagem limitada pela: **optica** X

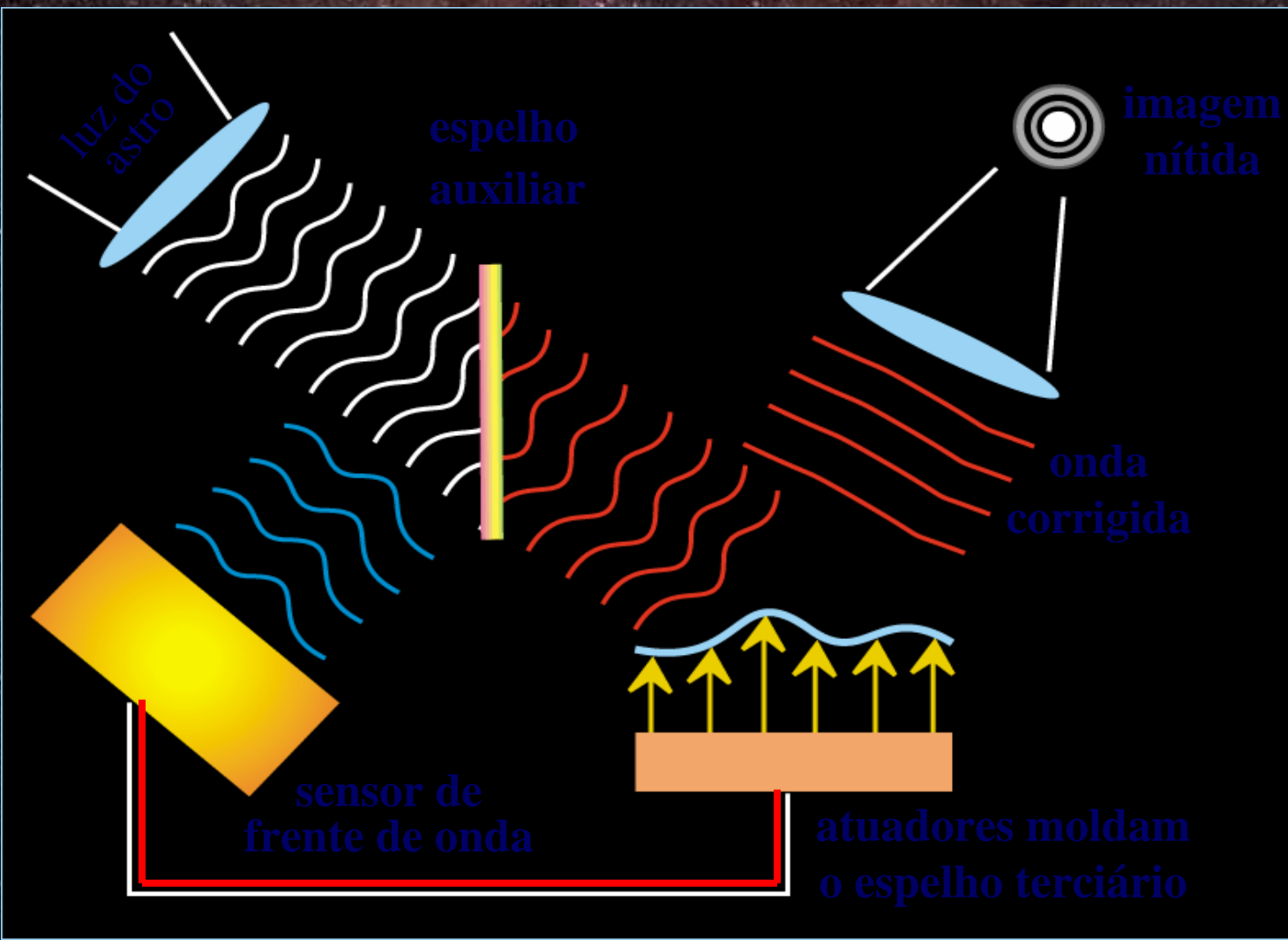


atmosfera

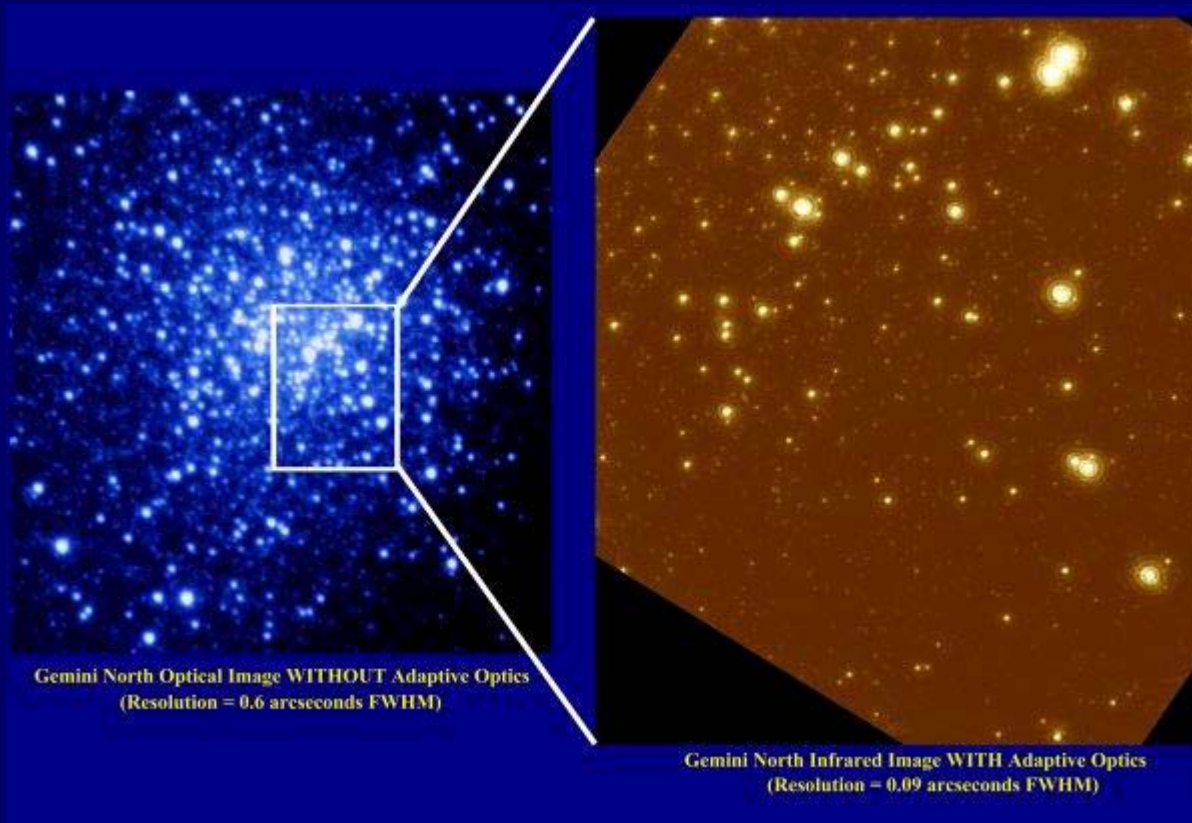
Atmosfera



Óptica Adaptativa: alisando as ondas luminosas

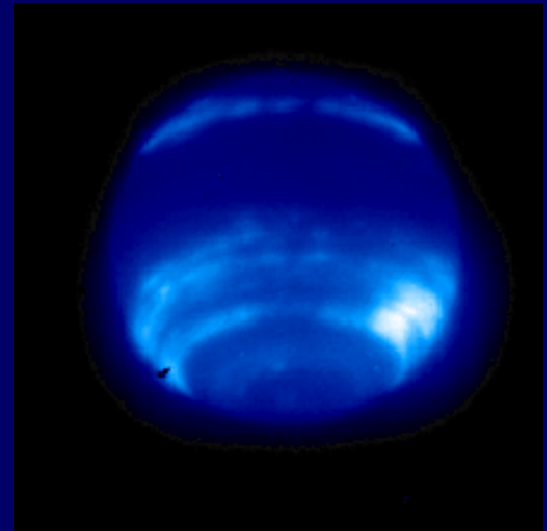
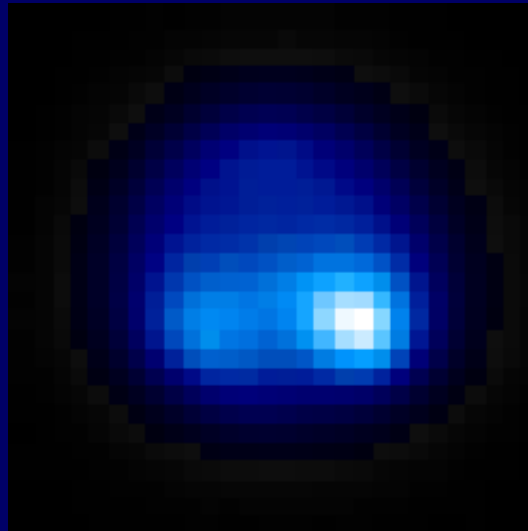


Exemplo de Óptica Adaptativa



...Óptica adaptativa

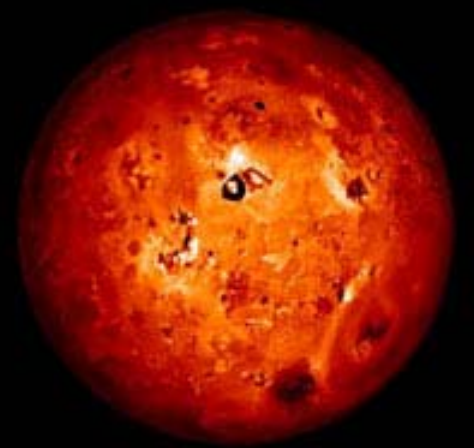
- Netuno
- Telescópio Keck (10m)
- Banda H



...Óptica adaptativa

Voyager

OA (banda K) -->



OA (banda L) -->

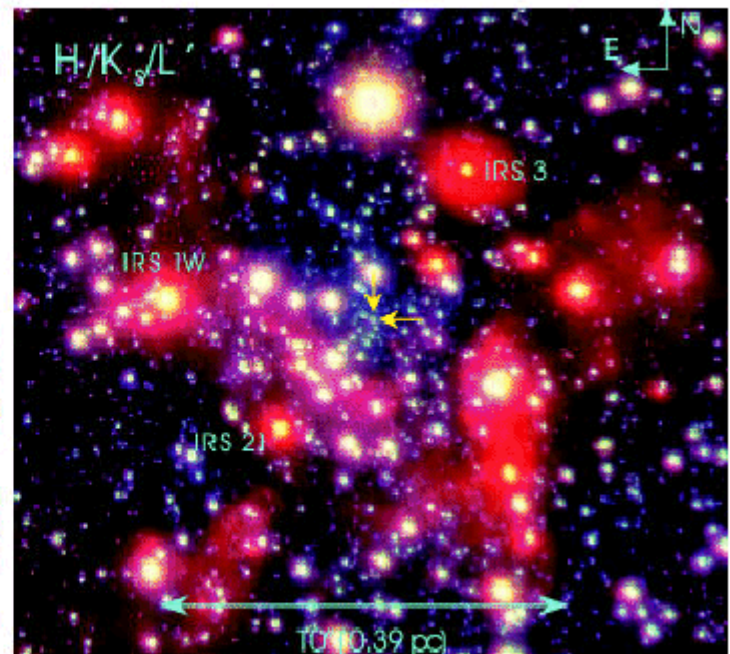
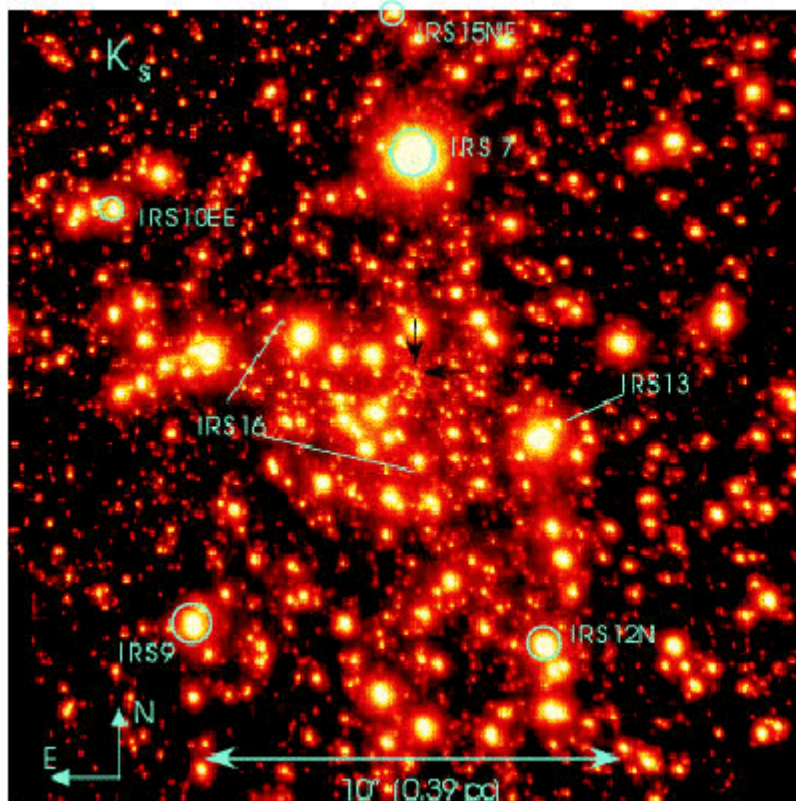


Sem OA

Júpiter no IV com Gemini

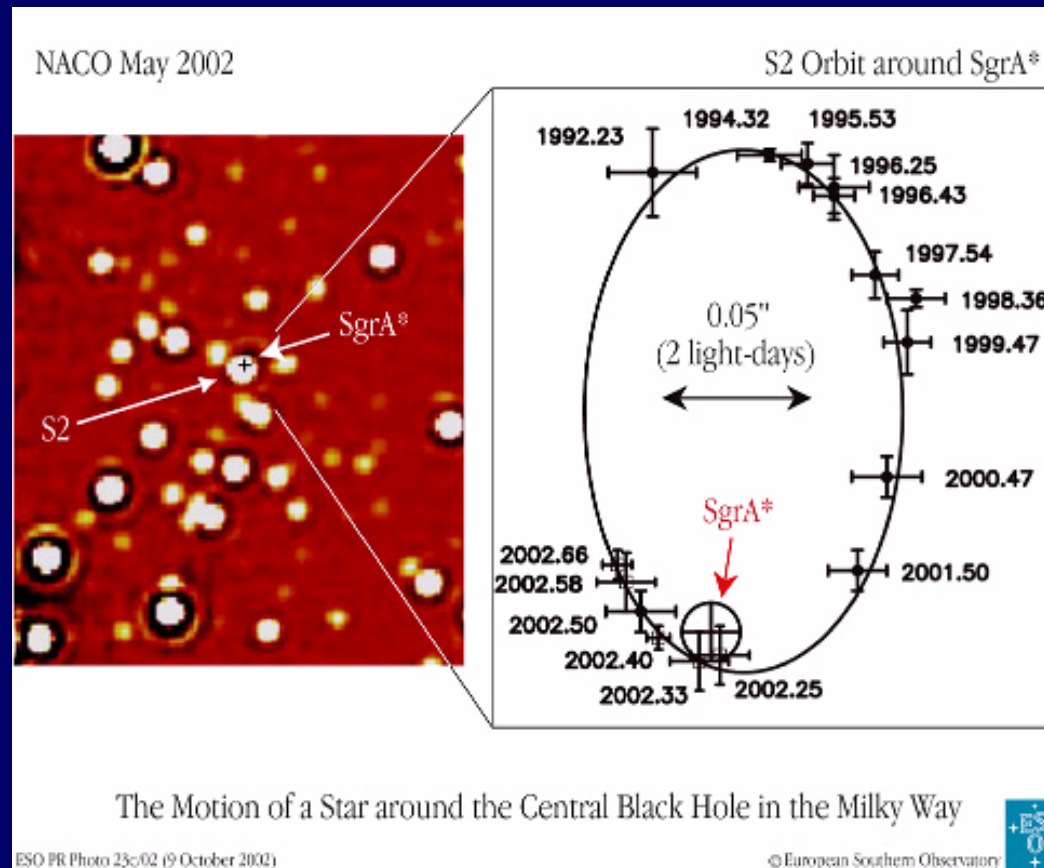


A região próxima ao centro galáctico



Gentzel et al. (2003)

Medidas diretas de orbitas estelares em torno do centro galáctico



Massa do objeto central

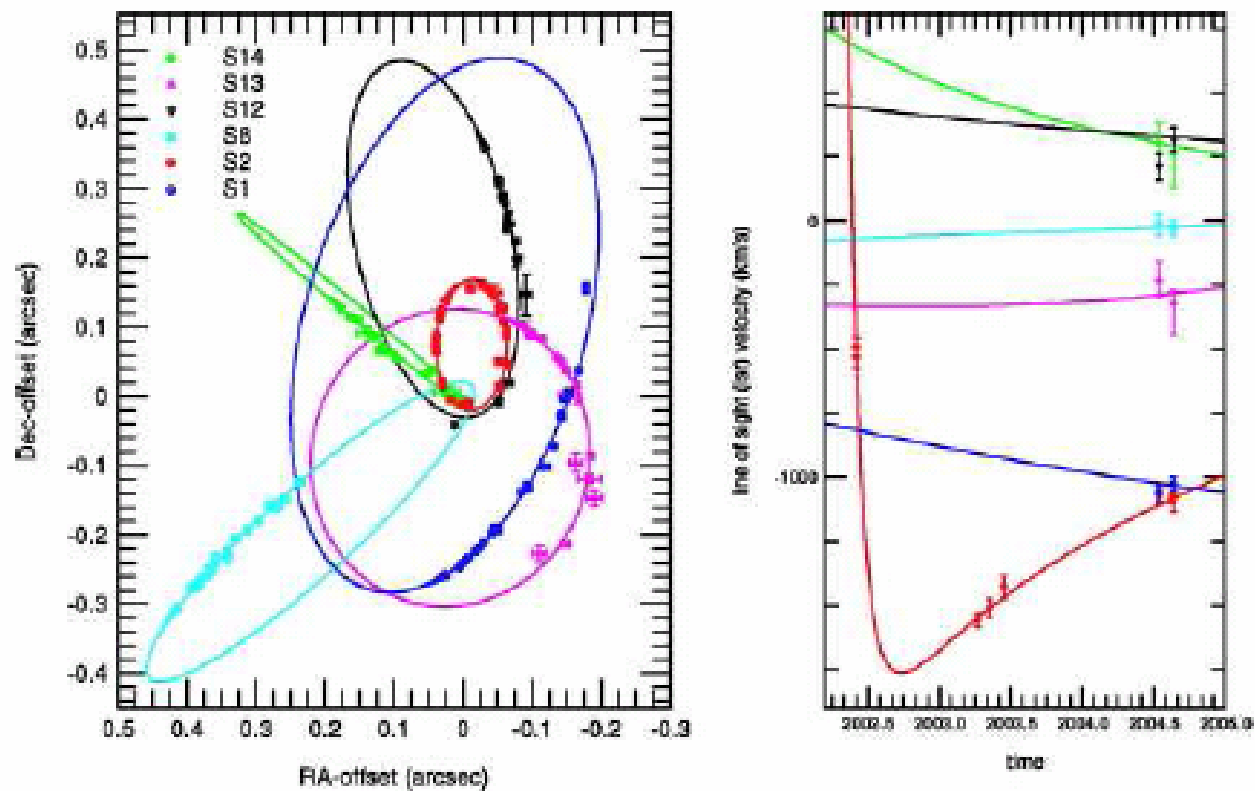
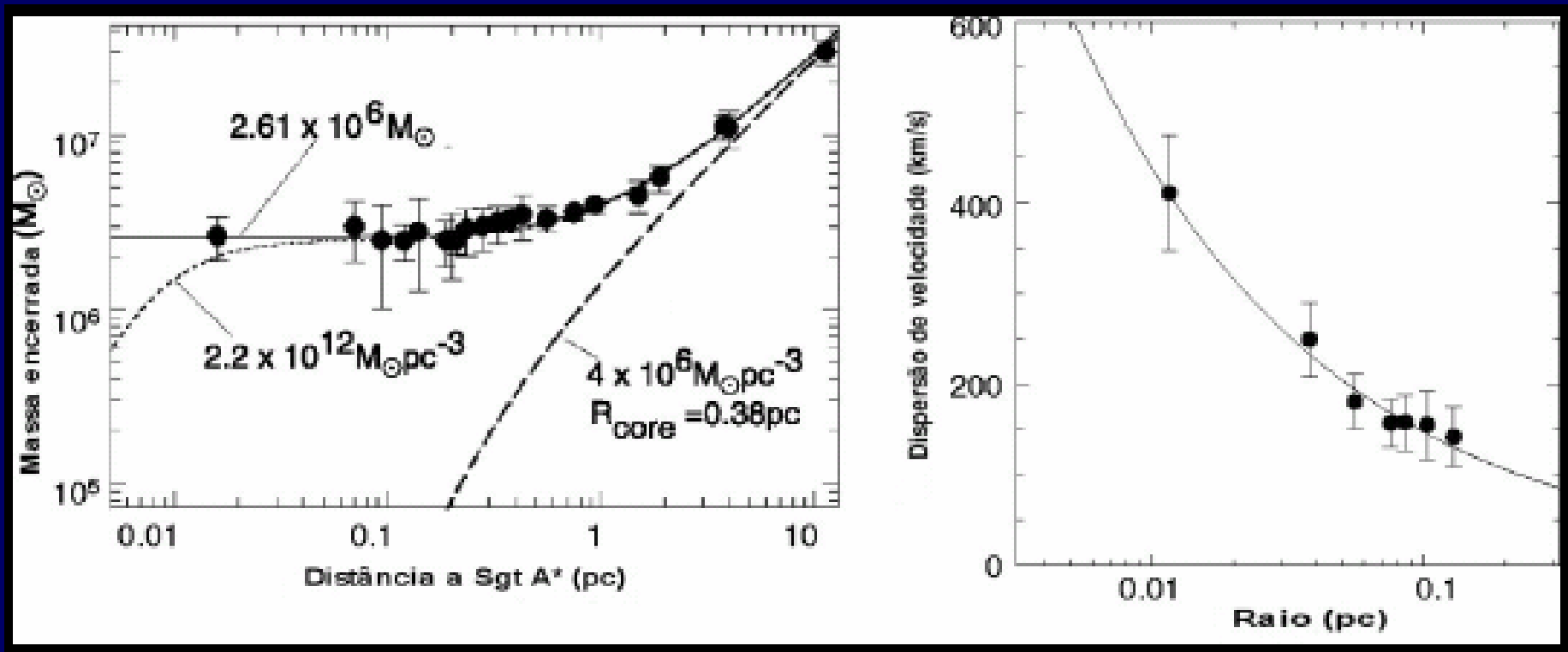


Figure 4.4: The projected orbits (left) and the radial velocity curve (right) of the 6 S-stars used by Eisenhauer et al. (2005) to solve for the mass, position and distance of the MBH. The points with error bars are the observed astrometric and spectroscopic data and the solid curves are the best fit multi-orbit solutions. (Reprinted with permission from the *Astrophysical Journal*).

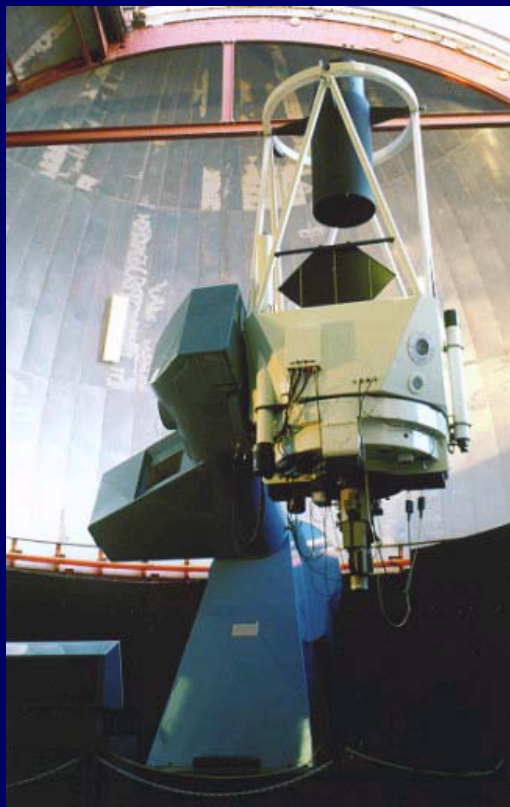
Alexander (2005)

Massa do objeto central

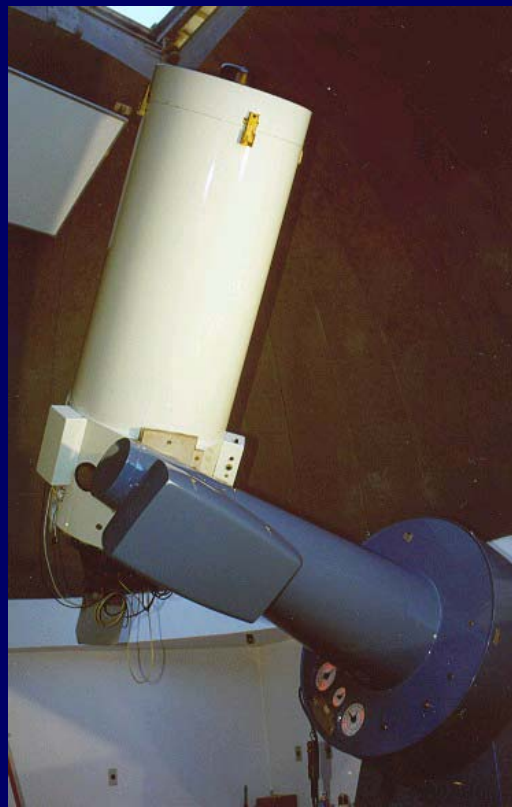


$R_S \sim 3 (M/M_{\odot}) \text{ km} \rightarrow 8 \mu\text{arcsec} @ 8 \text{ kpc}$

Telescópios no LNA/CNPq (www.lna.br)



1,6 m



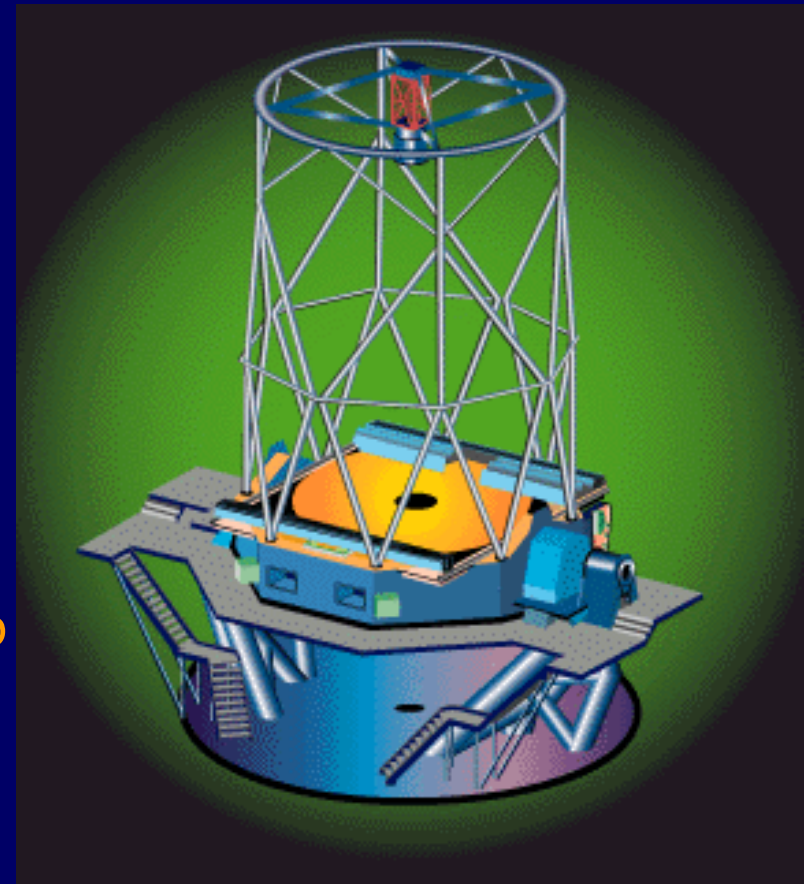
0,6 m



0,6 m

Telescópio(s) Gemini

- 8 metros de diâmetro
- Óptica ativa e adaptativa (imagens melhores que do telescópio espacial, no IV)
- Otimizado para o infravermelho
- 2,5% do capital é brasileiro!



Gemini (NS) – 8m



© 2002 Brooks Cole Publishing - a division of Thomson Learning



Conceito de Cúpula: controle térmico



50% da taxa de ventilação para o controle térmico da cúpula



Espelho Primário: peça chave do telescópio



Diâmetro: 8.1 m

**capta tanta luz
quanto 2.5 milhões
de olhos humanos**

Rugosidade:

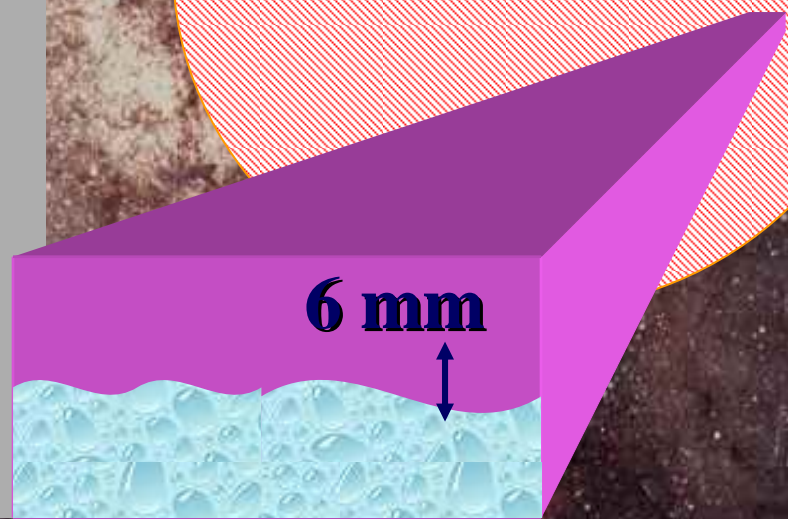
Espessura: 20 cm
16nm = $\lambda/40$
16 milionésimos mm
rápida com o ar

Peso: 23 tons





Espelho Primário: qualidade da superfície

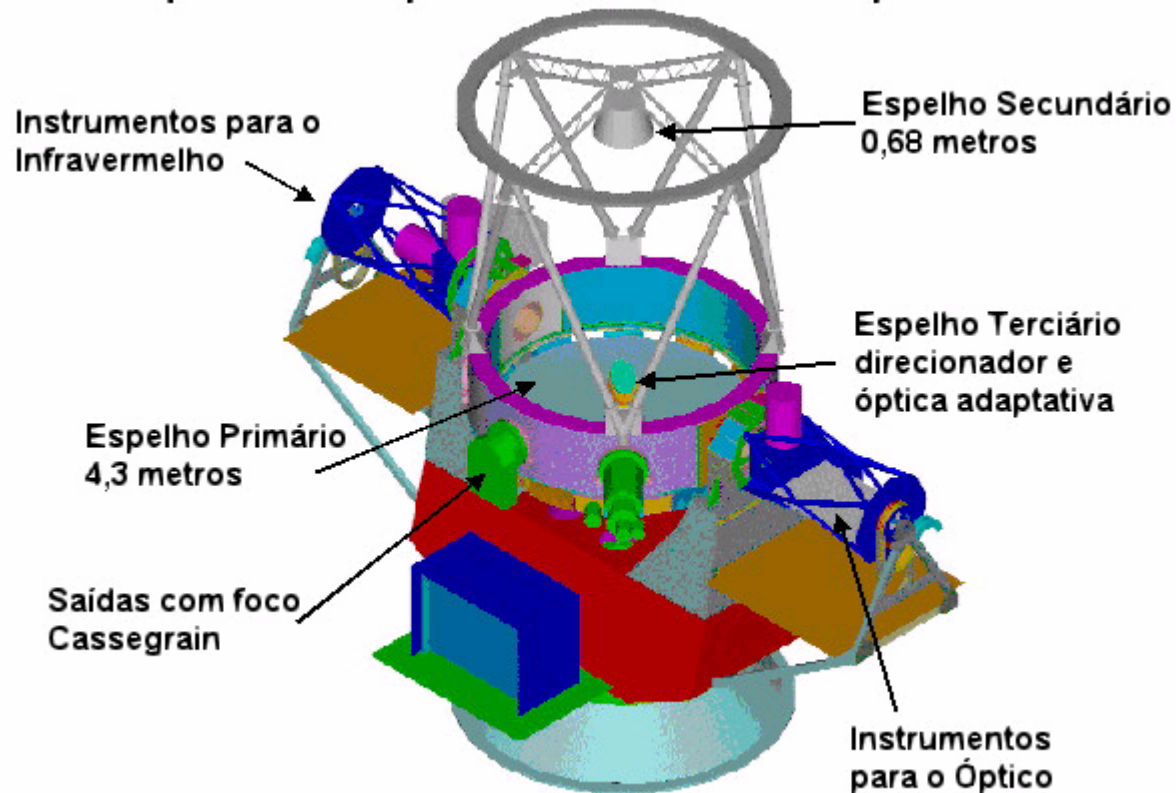


Ampliando o espelho ao tamanho do Brasil, a rugosidade seria 6 mm

Telescópio SOAR

- 4,1 m de diâmetro
- 50% do capital brasileiro!!!
- 100 noites para nós por ano
- 17/04/2004
- Participação INPE

Esquema Simplificado do Telescópio SOAR



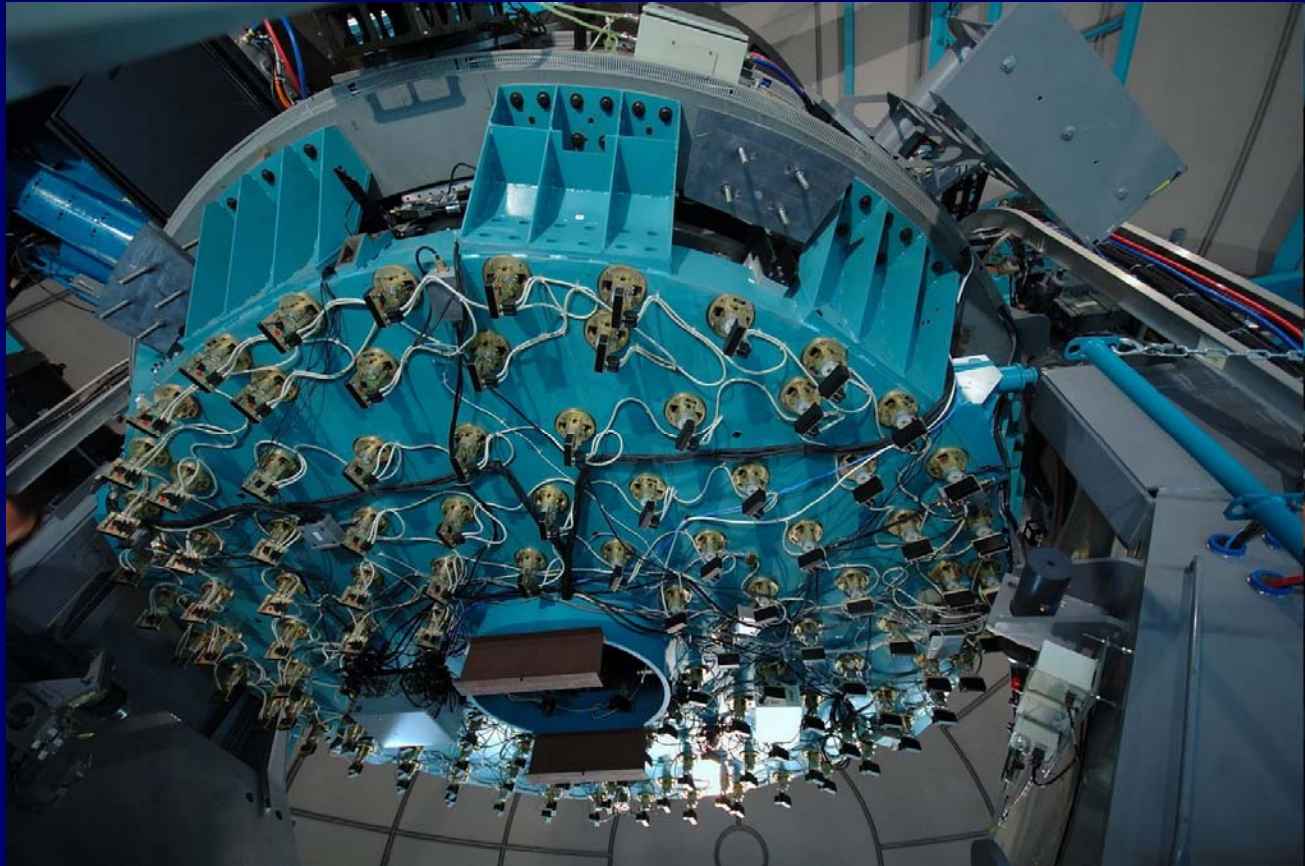
Telescópio SOAR



Telescópio SOAR



SOAR: sistema de apoio do M1



Telescópio SOAR





Considerações importantes:

- O tamanho das imagens produzidas por um telescópio é proporcional a λ/D
- A "concentração" de energia é proporcional a $1/D^2$
- A capacidade coletora é proporcional a D^2

Consequências:

- Grandes aberturas (Gemini, Keck, Subaru, VLT)
- Métodos de "driblar" os efeitos da atmosfera terrestre (óptica adaptativa, como nos telescópios Gemini e SOAR)



Referências on-line

<http://astro.if.ufrgs.br/>

<http://www.lna.br>

<http://www.astro.iag.usp.br/>

<http://zebu.uoregon.edu/spectra.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/isq.html>

<http://xte.mit.edu/>

<http://apod.nasa.gov/apod/>



Medidas da radiação luminosa

- Medir o quê?

A energia radiante emitida por uma fonte em função da distância

- Prá quê?

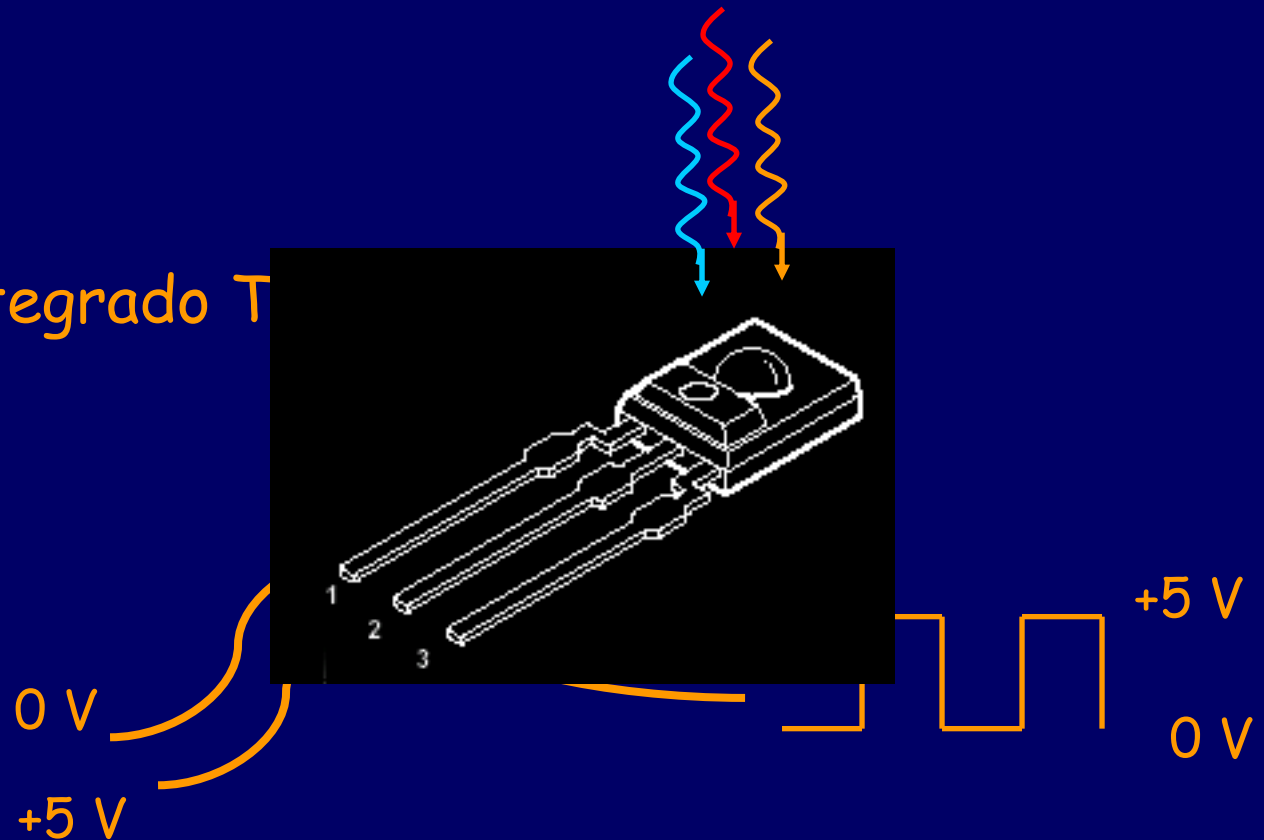
Verificar a " lei do $1/r^2$ "

Aprender um pouco sobre medidas experimentais

Medidas da radiação luminosa

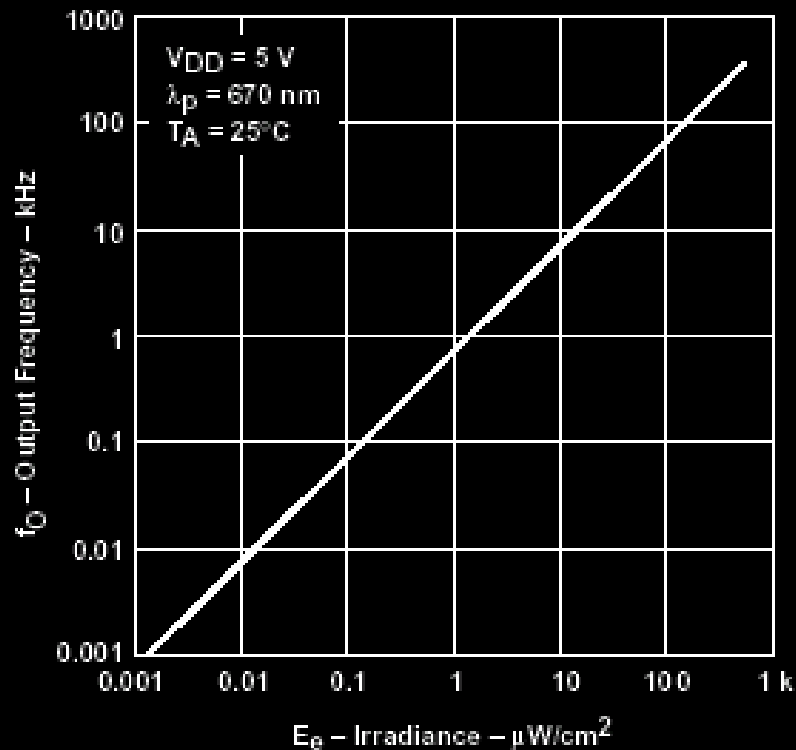
- Como?

Circuito integrado T



Características

OUTPUT FREQUENCY
VS
IRRADIANCE



PHOTODIODE SPECTRAL RESPONSIVITY

