



Introdução

Carlos Alexandre Wuensche
Processos Radiativos I



GERAÇÃO E EMISSÃO DE ENERGIA NAS ESTRELAS

● CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER GERAL: ENERGIA E COMPOSIÇÃO ESPECTRAL

- determinadas a partir do estudo dos seguintes parâmetros estelares:
 - ❖ condições físicas no interior estelar;
 - ❖ composição química;
 - ❖ estrutura interna (não homogeneidade nas camadas);
 - ❖ escala de tempo (mudanças em a e $b \Rightarrow$ pulsações, explosões).

DADOS OBSERVACIONAIS

- Como não podemos observar o interior das estrelas, a totalidade de nosso conhecimento e a base para os modelos de estrutura e evolução estelar vem dos seguintes parâmetros observáveis:
 - Brilho aparente e distância \Rightarrow luminosidade L total da estrela;
 - Aglomerados estelares \Rightarrow razões de luminosidade L/L' de estrelas em diferentes estados evolutivos sem exigir nenhum conhecimento a priori sobre a distância ao aglomerado;
 - Observação do espectro contínuo \Rightarrow temperatura superficial da estrela T_s . (usando a teoria de emissão de um corpo negro);
 - Temperatura superficial \Rightarrow emissão superficial por unidade de área F_s (lei de Stefan);

DADOS OBSERVACIONAIS

● Mais parâmetros...

- $L/F_s \Rightarrow$ área superficial $\Rightarrow R_0$ (medido a partir de eclipses de estrelas binárias cuja v_{orb} é conhecida);
- Do período de revolução P (estrelas binárias de órbita conhecida) \Rightarrow massa M (usando a 3a. lei de Kepler);
- Estudos teóricos de atmosferas estelares x observações de espectros \Rightarrow gravidade superficial;
- $g, R \Rightarrow$ determinação da massa M (independente de f);
- Estudo quantitativo teórico do espectro de nebulosas, matéria interestelar e atmosferas estelares \Rightarrow composição química de objetos cósmicos e das camadas externas das estrelas;

Fontes de energia

- A estrutura aparentemente estável de uma estrela: delicado equilíbrio entre P_{rad} e P_{grav} . A luminosidade observada é decorrente de dois processos principais:
 - Contração gravitacional (principal fonte durante a formação ou colapso);
 - Reações TERMONucleares (principal fonte durante a "vida adulta").
 - Para que essas reações TERMONucleares ocorram, é necessário que a energia cinética média dos prótons no interior estelar seja da ordem de $3/2$ kT

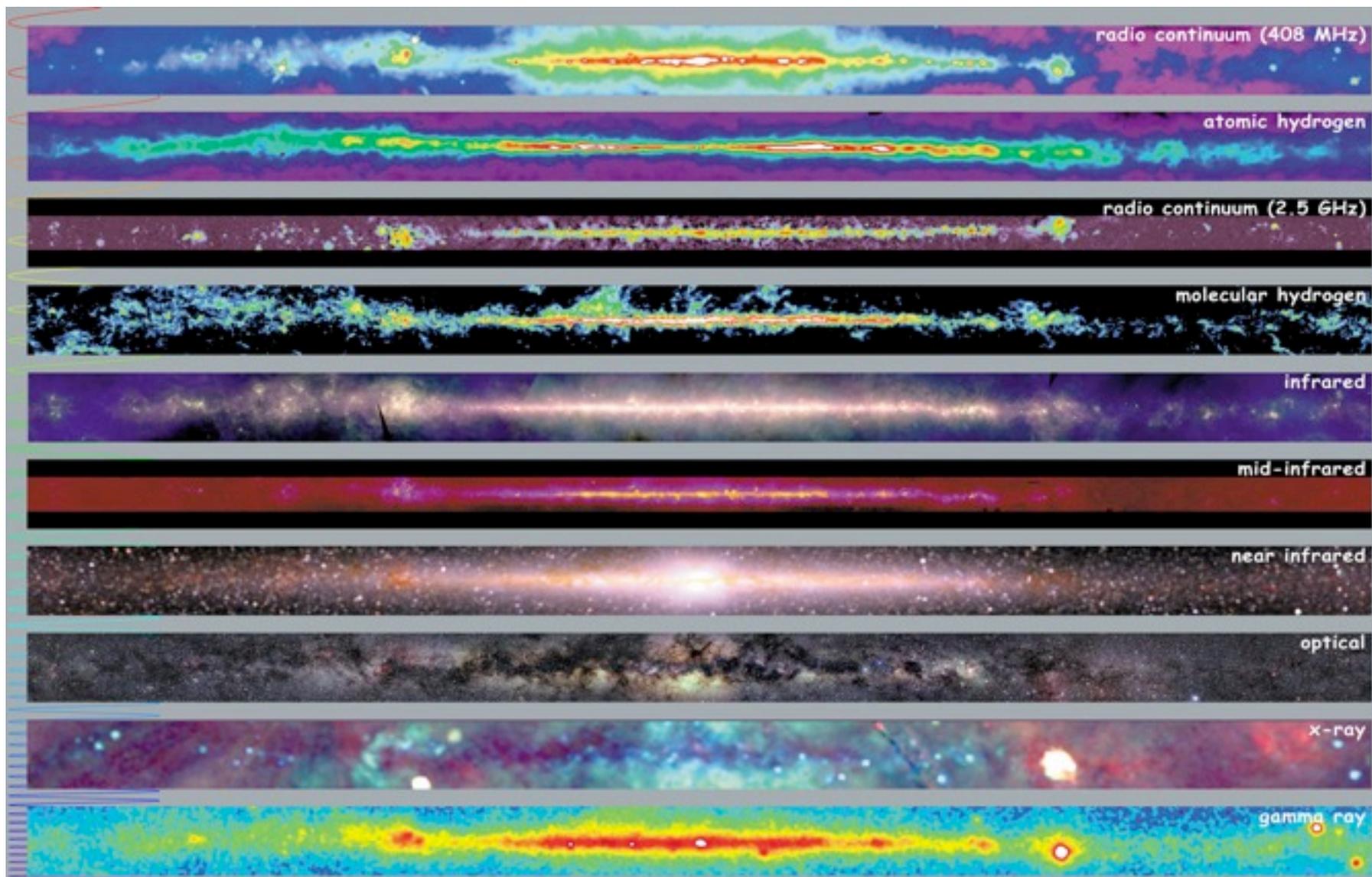


Fontes de energia

- Para superar, efetivamente, a barreira coulombiana entre prótons, a velocidade relativa entre os prótons deve ser da ordem de 20 keV. Para uma distribuição Maxwelliana de velocidades cuja energia cinética média é 2 keV, pode-se mostrar que uma fração suficientemente grande de partículas terá energias ≥ 20 keV, iniciando, assim, o ciclo auto-sustentado de reações TERMO nucleares que governará a vida da estrela até seus últimos estágios!



Astrofísica em diferentes bandas



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way



Cen A - Óptico

Emissão térmica de gás e estrelas, i. e.,
bremsstrahlung, emissão de linhas,
espalhamento por grãos de poeira...

VLT Kueyen+FORIS2, cortesia ESO

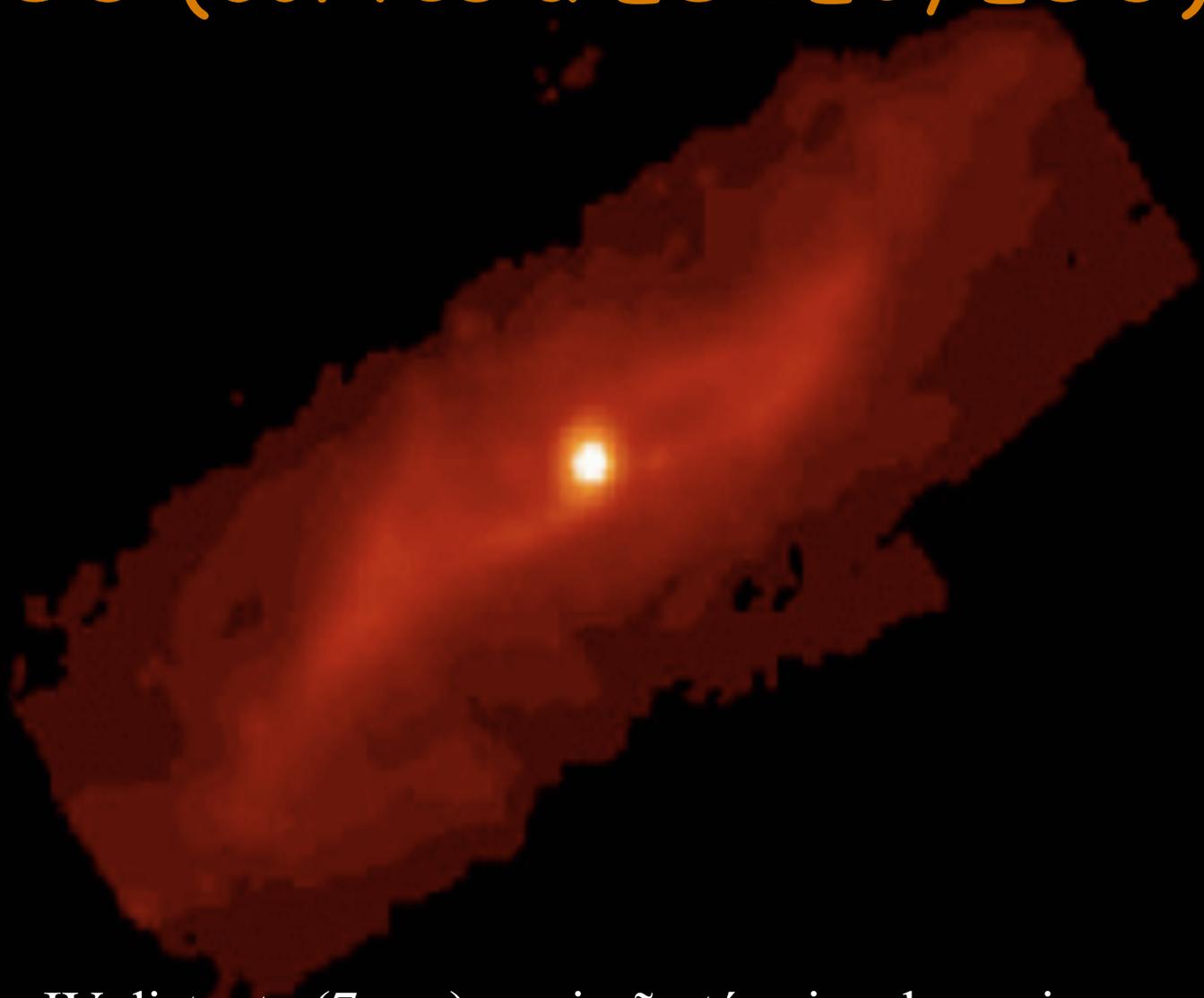


2MASS (IV próximo)

Emissão térmica, principalmente de estrelas,
semelhante ao óptico, mas com a poeira menos aparente
=> Opacidade da poeira no IV é menor.

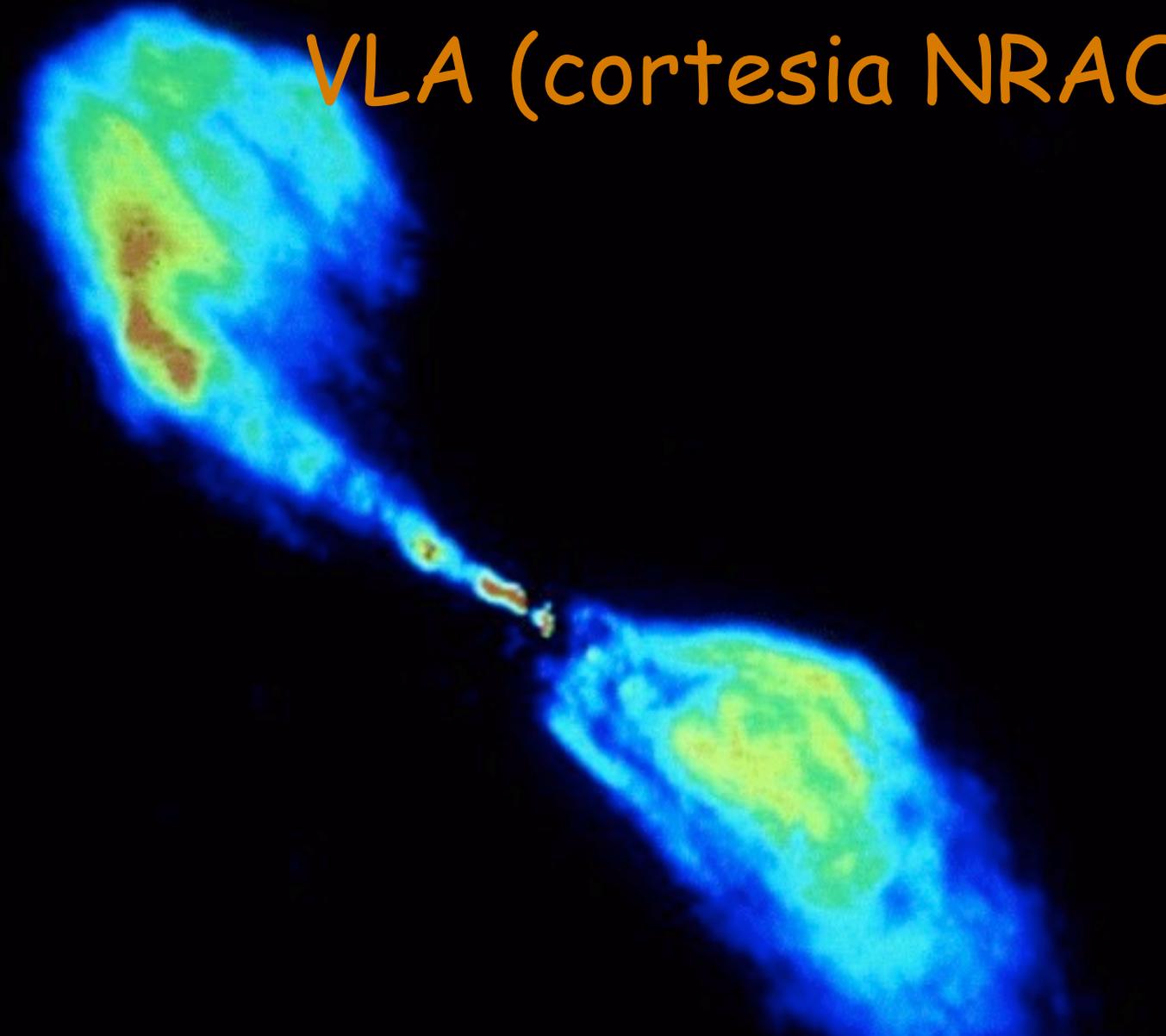
2MASS, courtesy IPAC, Univ. Massachusetts

ISO (cortesia ESTEC, ESO)



IV distante ($7 \mu\text{m}$): emissão térmica de poeira.

VLA (cortesia NRAO)

A radio emission map showing two bright, elongated lobes of radiation connected by a narrow bridge. The lobes are colored in shades of blue, green, and yellow, indicating intensity. The background is black. The lobes are oriented diagonally from the top-left to the bottom-right.

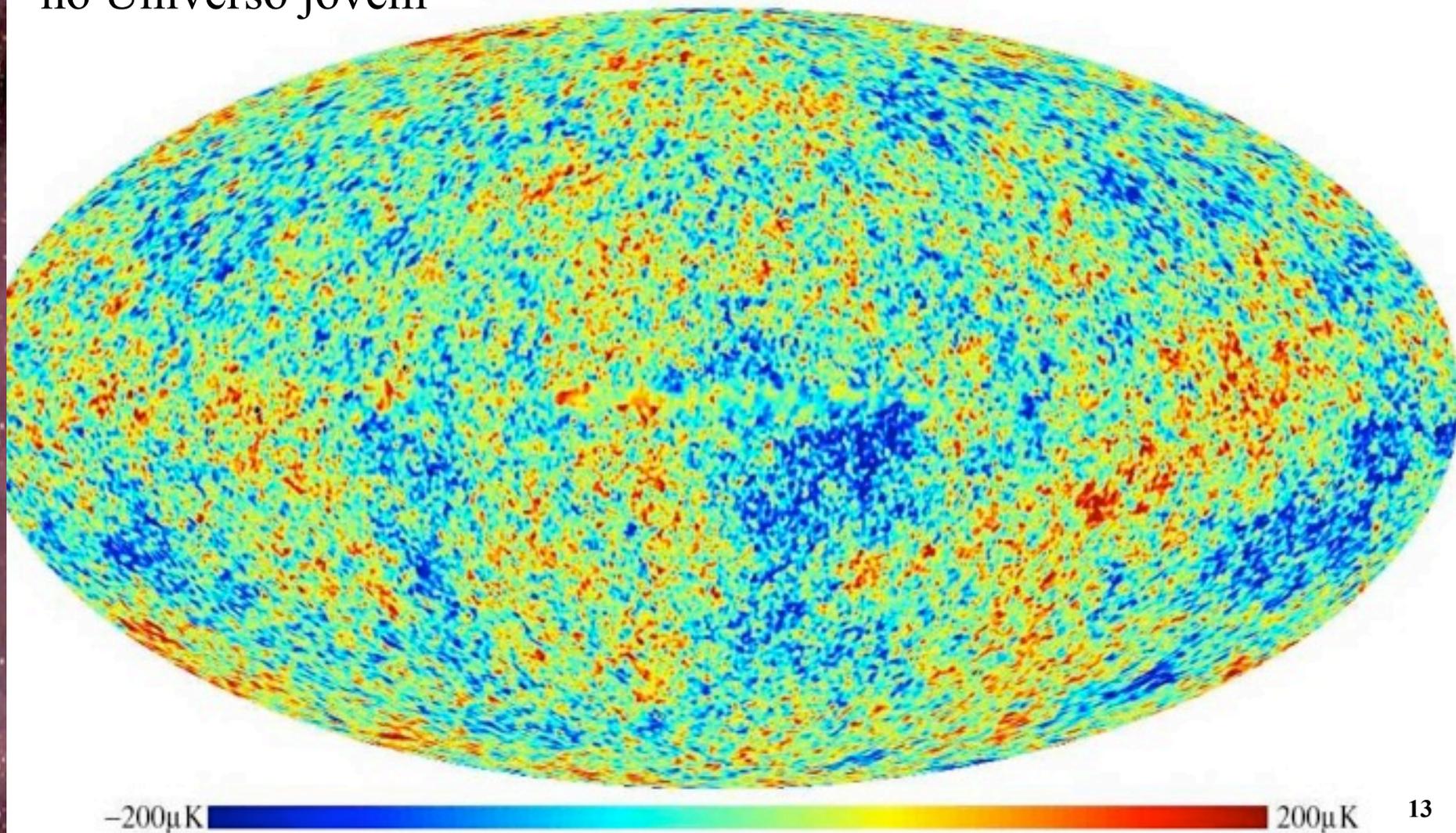
Rádio (6 cm): radiação sincrotron de jatos de galáxias e buracos negros.

Chandra (cortesia CXC)

Raios X (2–10 keV): radiação sincrotron de jatos, fótons “comptonizados” de buracos negros, radiação térmica de estrelas.

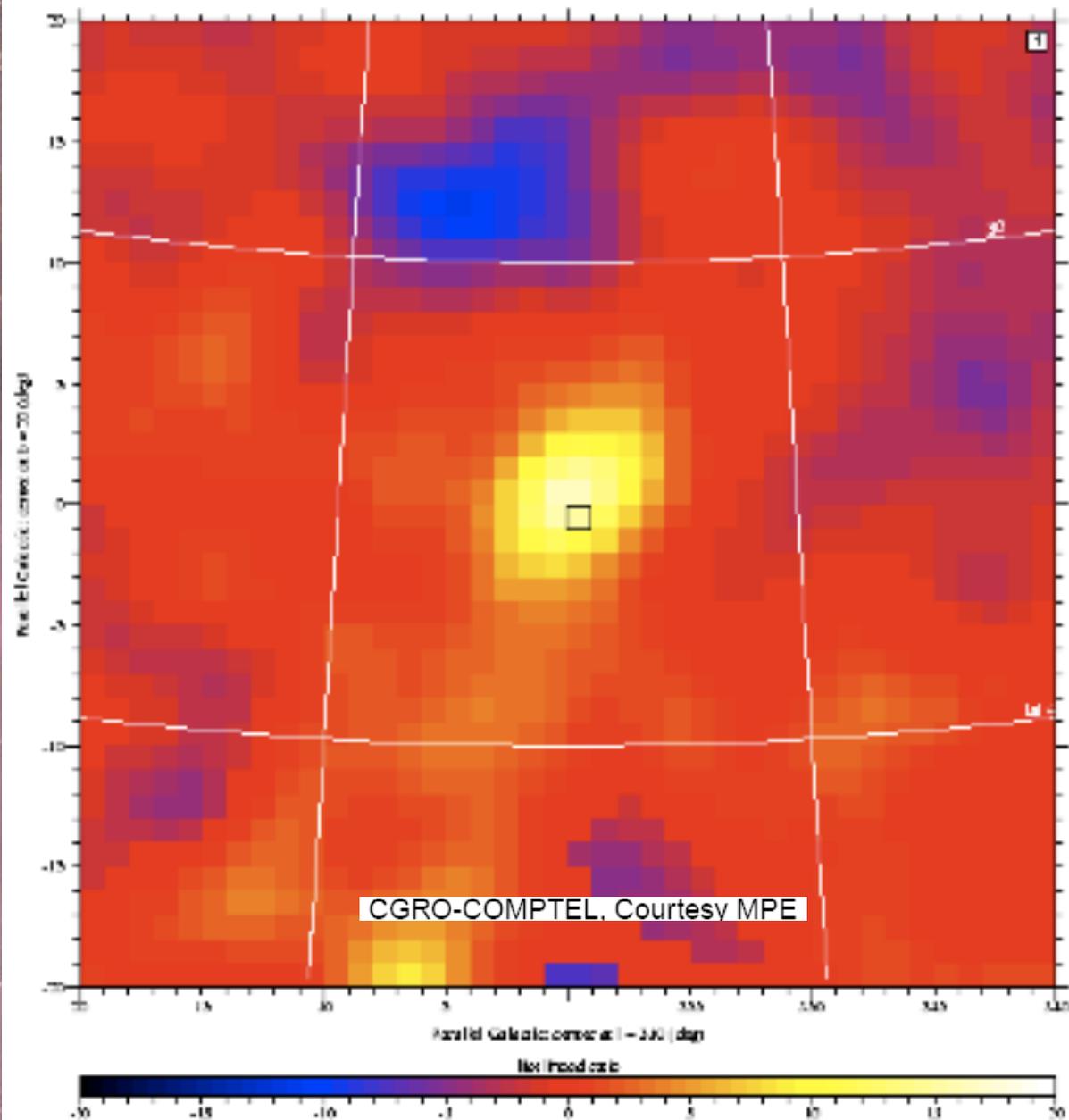
WMAP (Cortesia LAMBDA)

Microondas: radiação termalizada devido a interação Compton no Universo jovem





Cen A Region: All Phase I+II+III+IV/Cycle 4; 1 - 30 MeV



Raios gama (1–30MeV):
emissão sincrotron
“Comptonizada”, emissão
sincrotron de jatos e/ou
buracos negros.



Astrofísica em ordens de grandeza

- Astrofísica: aplicação das leis da Física para entender o comportamento de enormes sistemas macroscópicos e prever novos fenômenos
- Semelhante, em muitos aspectos, ao estudo de fenômenos em matéria condensada, exceto pelas
 - enorme variedade do espaço de parâmetros,
 - falta de controle sobre os objetos de estudo,
 - dificuldade de estudá-los em todo o espectro eletromagnético...

Uma abordagem integrada para o estudo de diferentes objetos

- Compreensão dos diferentes estados em que a matéria pode existir e da dinâmica da matéria governada por diferentes equações de estado
- Compreensão dos diferentes processos radiativos que levam à emissão de fótons (carregadores primários de informação em astrofísica)



Escalas de energia

- Energia de repouso (proporcional a NAm_p)

$$m_e c^2 \approx 0,5 MeV, \quad m_p c^2 \approx 1 GeV$$

- Energia de ligação atômica (acoplamento EM), em que L é a dimensão típica de um átomo

$$E_{min} \approx \frac{Z^2}{L}$$

Escalas de energia

- Energia de ligação molecular (acoplamento residual eletrostático, mínimo em $r \approx a_0$). Além disso...

$$E_{vib} = h\omega_{vib}/2\pi \approx 0,25eV$$

$$E_{rot} \approx \left(\frac{J^2}{\mu a_0^2}\right) \approx 10^{-2} eV$$

- Energia de ligação nuclear

$$\epsilon_{nucl} \approx (\alpha/2\pi)m_p c^2 \approx 1 MeV$$

$$\alpha \equiv \left(\frac{q^2}{\hbar c}\right)$$

Escalas de energia

● Energia de ligação gravitacional

❖ Se E_{grav} é da ordem de E_{rest} , \Leftrightarrow Efeitos relativísticos ($M \sim 10^{33}$ g, $R \sim 1$ km) !!!

$$E_{grav} \approx \frac{GM^2}{R} \approx \left(\frac{Gm_p^2}{R}\right)N^2$$

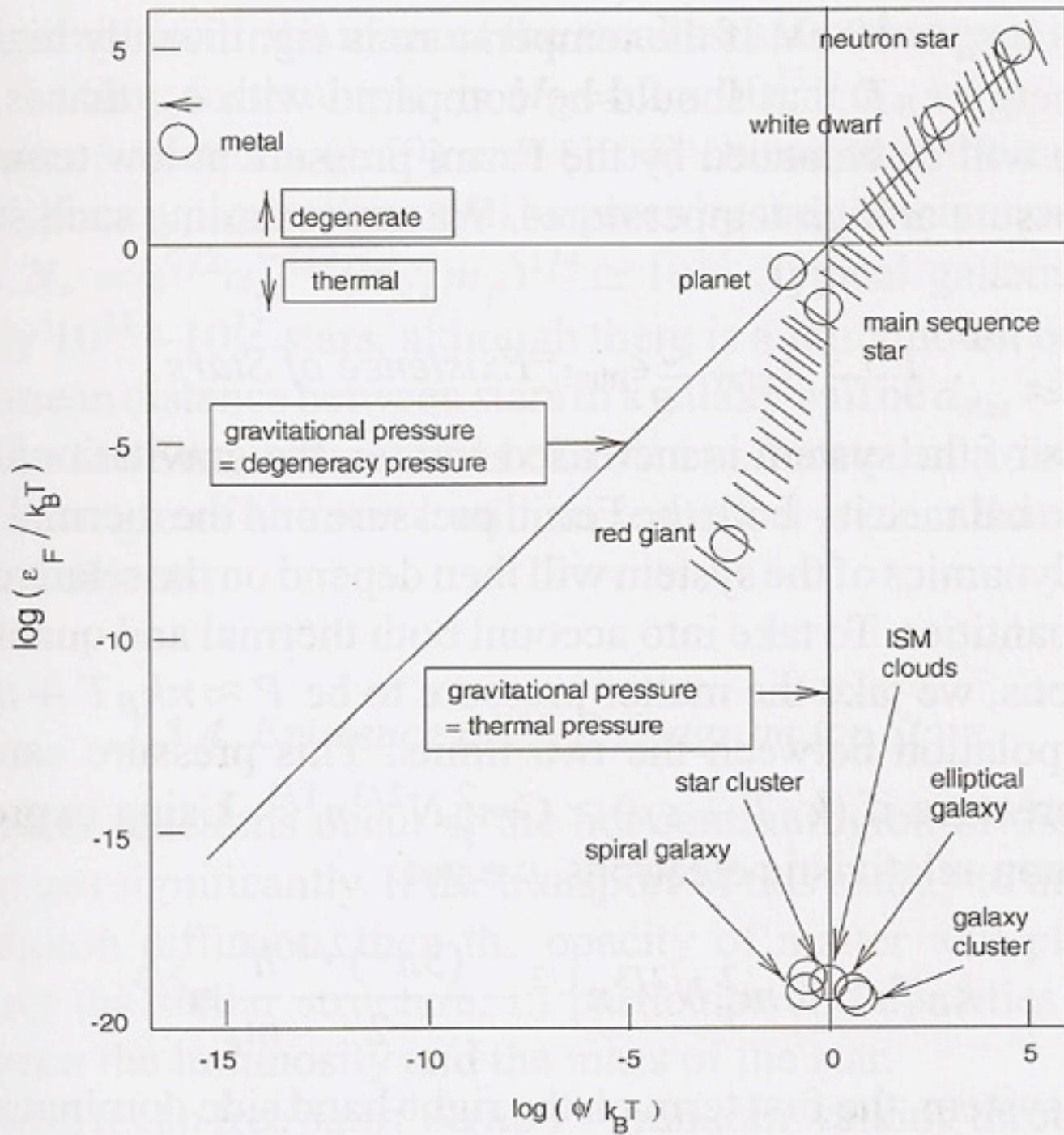
● Energia térmica e degenerada das partículas

$$\epsilon_{Fermi} = \sqrt{p_F^2 c^2 + m^2 c^4} - mc^2$$

\nearrow $p_F^2/2m$ - Clássico
 \searrow $p_F c$ - Relativístico

$\epsilon_F \ll k_B T$ (Teoria clássica, matéria não-degenerada)

$\epsilon_F \geq k_B T$ (Efeitos quânticos dominantes, matéria degenerada)



Processos Físicos Relevantes

- 🌐 Janelas de observação:
 - 🌐 Eletromagnetismo \Rightarrow radiação
 - 🌐 Quântica/Fís. Nuclear \Rightarrow matéria (bárions)
 - 🌐 Relatividade Geral \Rightarrow Ondas gravitacionais
 - 🌐 Física de partículas \Rightarrow neutrinos

Processos Físicos Relevantes

🌐 Janelas de observação:

🌐 Eletromagnetismo \Rightarrow radiação

🌐 Quântica/Fís. Nuclear \Rightarrow matéria (bárions)



🌐 Física de partículas \Rightarrow neutrinos



Processos radiativos clássicos

● Emissão sincrotron → campos magnéticos)

● Emissão livre-livre (bremsstrahlung) →
campos elétricos



Processos radiativos quânticos

- Transições fina e hiperfina
- Regras de transição e seções de choque
- Radiação térmica
- Opacidade na matéria



Variedades de estruturas astrofísicas

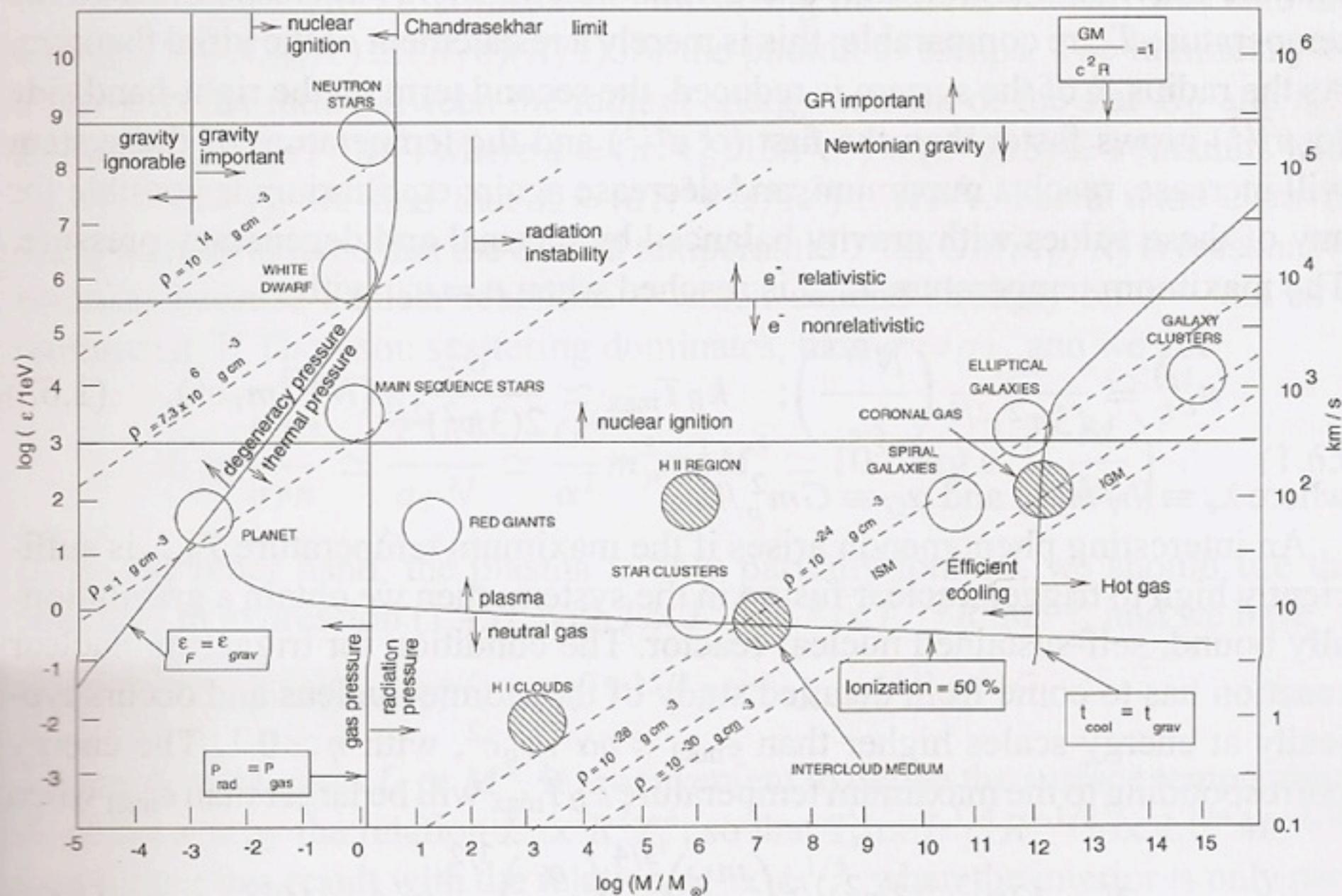
● Galáxias ($t_{\text{grav}} < t_{\text{cool}}$)

● Estrelas ($\epsilon_{\text{grav}} \sim \epsilon_{\text{nucl}}$)

❖ Existência do diagrama H-R ($L \sim M^a$)

● Planetas ($\epsilon_{\text{grav}} \sim \epsilon_{\text{atom}}$)

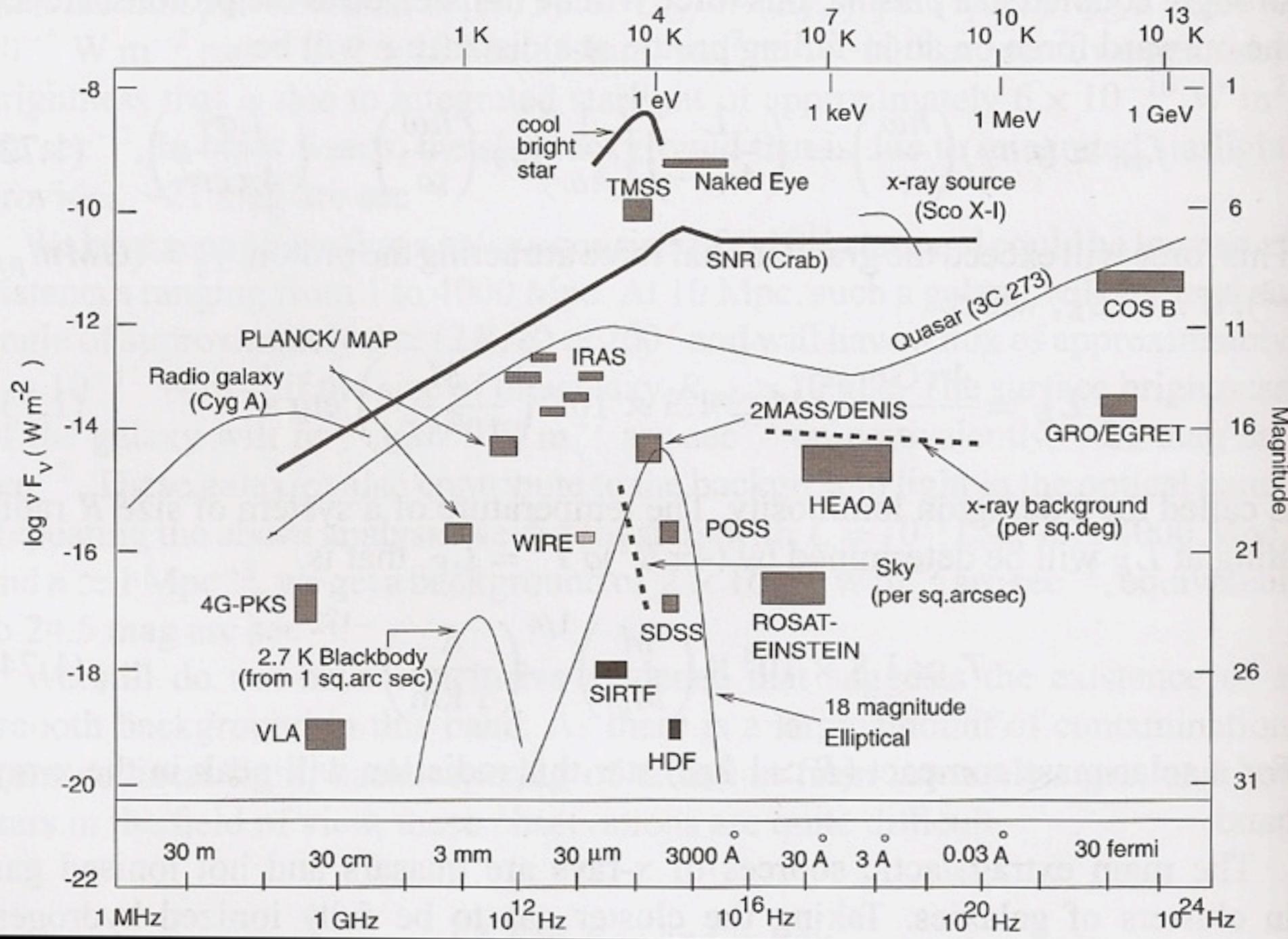
● Existência de objetos compactos ($\epsilon_{\text{grav}} \sim \epsilon_F$)





Detectando os fótons

- Atmosfera: elemento limitante para todos os comprimentos de onda
- Rádio
- Microondas e submilimétrico
- Infravermelho
- Óptico e ultravioleta
- Raios X e Gama

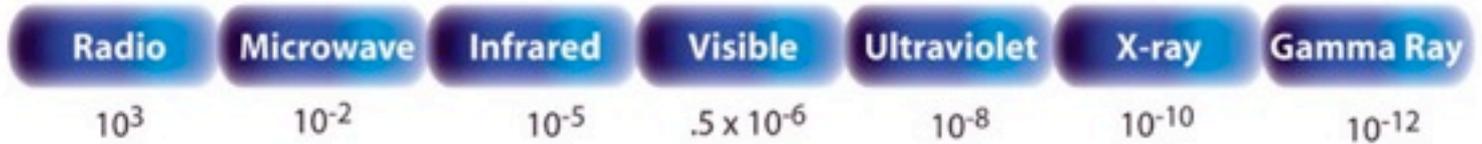


THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

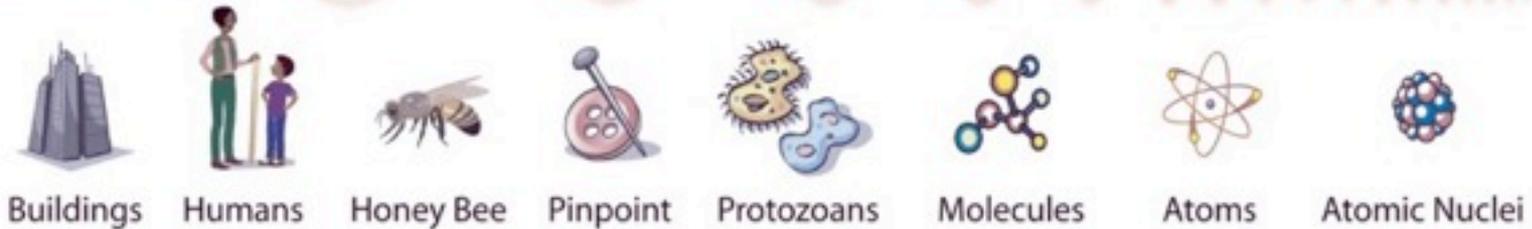
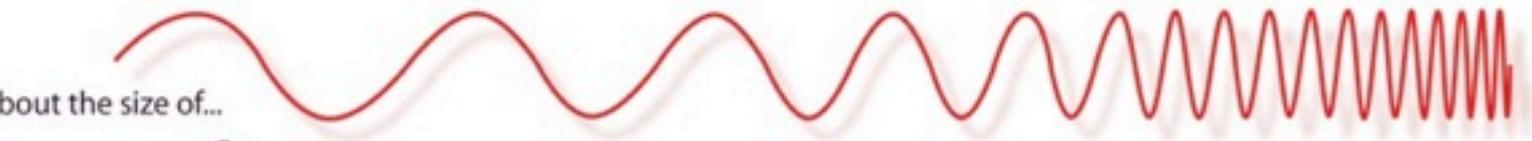
Penetrates Earth Atmosphere?



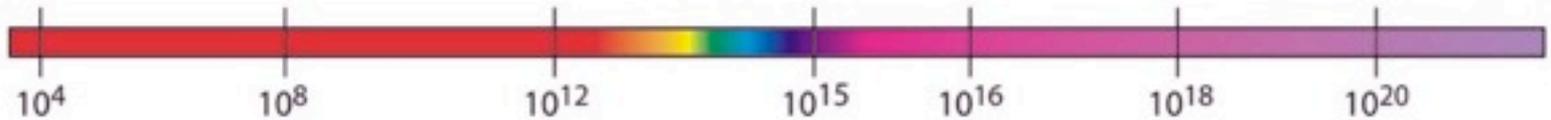
Wavelength (meters)



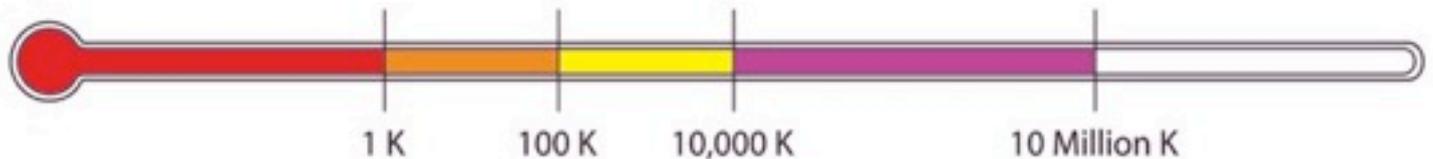
About the size of...



Frequency (Hz)



Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



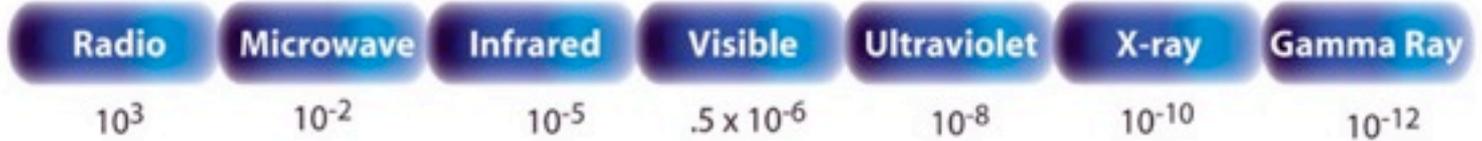
THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Penetrates Earth Atmosphere?



ν (kHz, MHz, GHz)

Wavelength (meters)



10^3

10^{-2}

10^{-5}

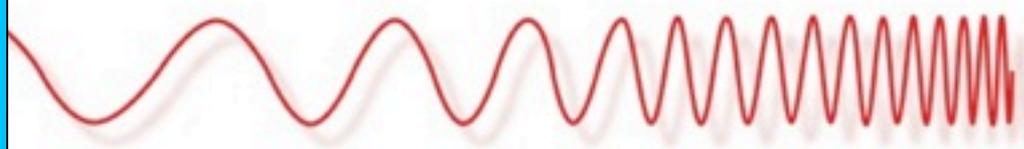
$.5 \times 10^{-6}$

10^{-8}

10^{-10}

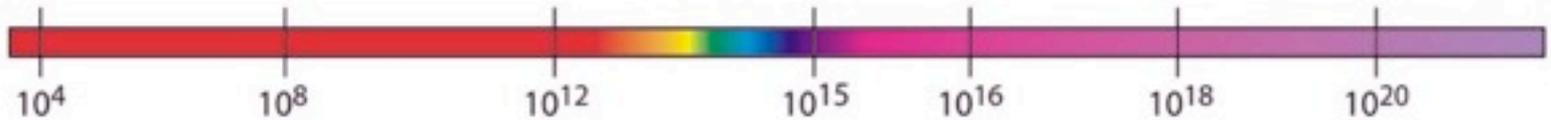
10^{-12}

Abol

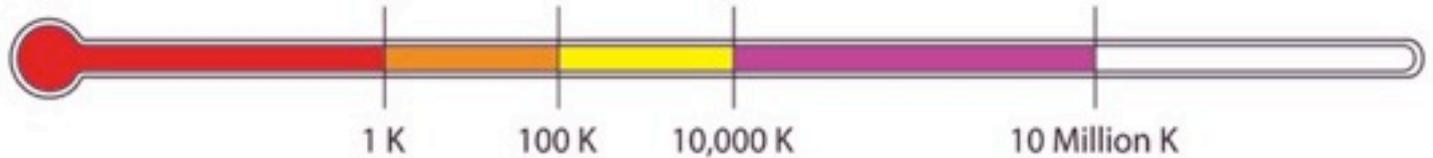


Buildings Humans Honey Bee Pinpoint Protozoans Molecules Atoms Atomic Nuclei

Frequency (Hz)



Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

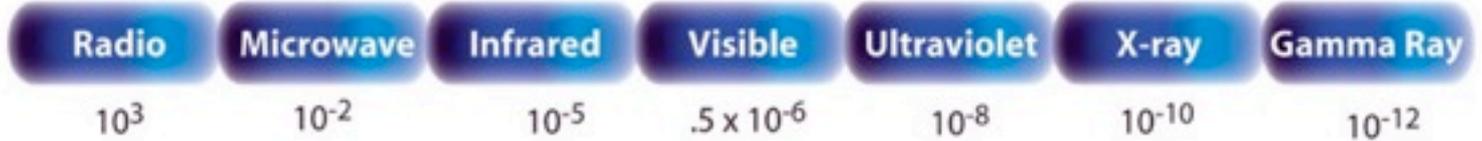
Penetrates Earth Atmosphere?



ν (kHz, MHz, GHz)

λ (nm, Å)

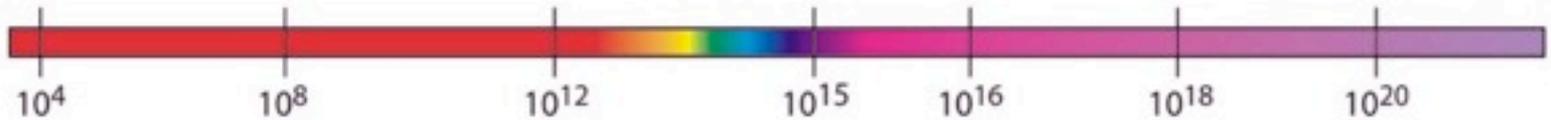
Wavelength (meters)



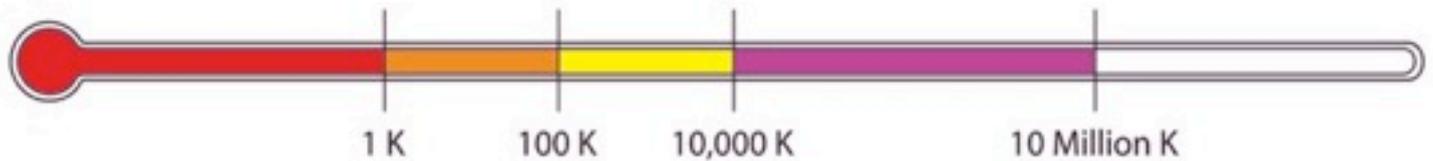
Abol



Frequency (Hz)



Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Penetrates Earth Atmosphere?



ν (kHz, MHz, GHz)

λ (nm, Å)

E (eV, keV, MeV)

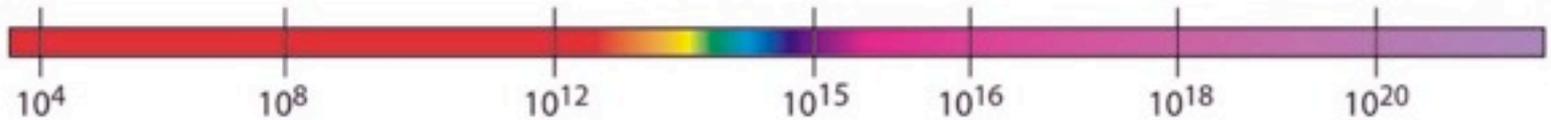
Wavelength (meters)



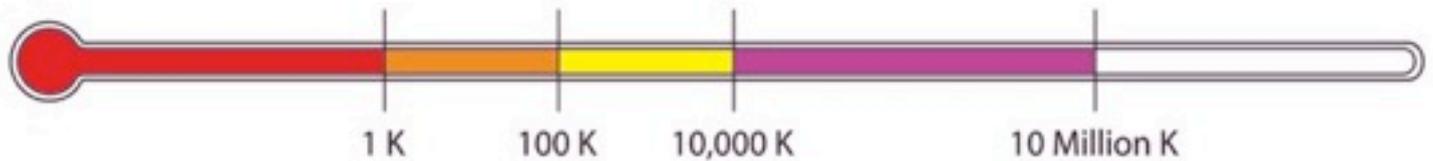
Abol



Frequency (Hz)



Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Penetrates Earth Atmosphere?

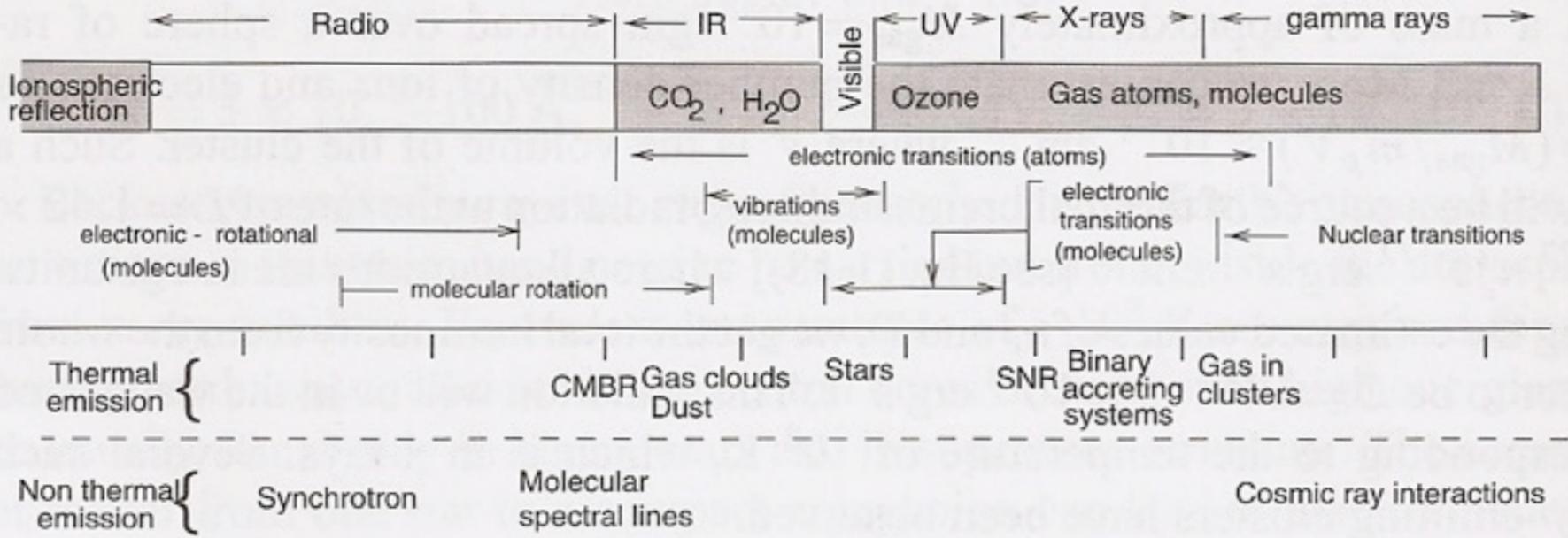


ν (kHz, MHz, GHz)

λ (nm, Å)

E (eV, keV, MeV)

Wavelength (meters)





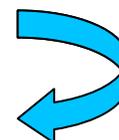
Classificação dos processos de informação astrofísicos

- Sinal coletado e filtrado
- Mesmos processos se repetem em diferentes escalas
- Observações:

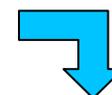
Estratégia de coleta de informações



Ordenação dos parâmetros físicos



Análise otimizada



Ordenação para estudos futuros



Transporte de informação EM

- λ fortemente dependente das condições do objeto emissor (mov. de partículas, gás, grãos, moléculas e átomos), T , P , ρ , presença de B.
- Não há λ privilegiado; mesmos processos ocorrem em diferentes classes de objetos
- Delimitação e nomenclatura por técnica de observação

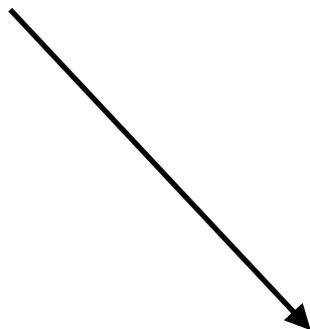


Transporte de informação EM

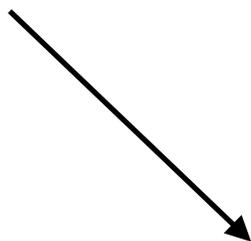
- Propagação da radiação fortemente dependente do meio
- Plasma \Rightarrow absorção, espalhamento
- Espalhamento Compton \Rightarrow transferência



Radiação emitida



Processos intermediários (incluindo o "filtro" da atmosfera)



Radiação recebida (interpretação do que é primário ou secundário)