

Workshop de Astronomia e Instrumentação

25 horas

Prof. Doutor Pedro Augusto

GRUPO DE ASTRONOMIA
UNIVERSIDADE DA MADEIRA



AGÊNCIA NACIONAL
PARA A CULTURA
CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

O FORMADOR

- Licenciado em Física/Matemática Aplicada (ramo de Astronomia), Univ. Porto, 1993
- Doutorado em Rádio Astronomia, Univ. Manchester (UK), 1996
- Agregado em Física, Univ. Madeira, 2007
- Prof. Auxiliar com Agregação, Univ. Madeira, desde 1998
- Presidente do Grupo de Astronomia, Univ. Madeira, desde 2000
- Director de Curso da Licenciatura em Eng^a de Instrumentação e Electrónica (ramo de Astronomia)

O GRUPO DE ASTRONOMIA (www.uma.pt/astro)

- Investigação em Astronomia e Astrofísica (dezenas de artigos publicados)
- Projecto de instalação de dois observatórios na RAM: óptico e rádio
- Divulgação da Astronomia na RAM: palestras, cursos de formação, sessões de observação, etc.
- Iniciativa anual “Semana da Astronomia”

PROGRAMA GERAL

Introdução à Astronomia (8 horas)

- 0 – Noções gerais
- 1 – O Sistema Solar
- 2 – Estrelas
- 3 – Enxames de estrelas
- 4 – A Nossa Galáxia
- 5 – Astronomia Extragaláctica
- 6 – Cosmologia

Telescópios e Instrumentação (4 + 4 horas) prática

- 1 – Óptica geométrica
- 2 – Telescópios
- 3 – Montagens
- 4 – Detectores
- 5 – Ópticas activa e adaptativa
- 6 – Medidores de espectro

Galileo Teacher Training Programme (8 horas) prática

Avaliação
(1 hora)

Introdução à Astronomia

Workshop de Astronomia e Instrumentação

Parte I

Prof. Doutor Pedro Augusto

GRUPO DE ASTRONOMIA
UNIVERSIDADE DA MADEIRA



AGÊNCIA NACIONAL
PARA A CULTURA
CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

PROGRAMA

0 – Noções gerais

1 – O Sistema Solar

2 – Estrelas

2.1 O Sol

2.2 Espectros, luminosidades e massas

2.3 Origem, evolução e morte

3 – Exames de estrelas

4 – A Nossa Galáxia

4.1 O meio interestelar

4.2 Estrutura geral

5 – Astronomia Extragaláctica

5.1 Galáxias: classificação e estrutura

5.2 Associações de galáxias

5.3 Galáxias activas

5.4 Distâncias e constante de Hubble

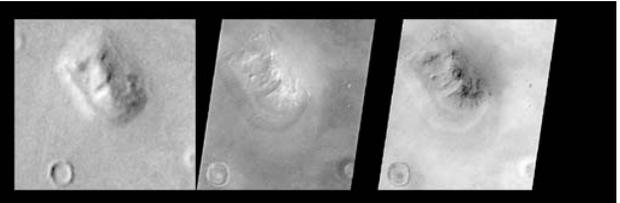
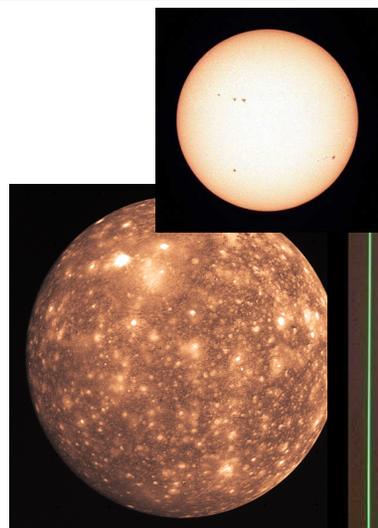
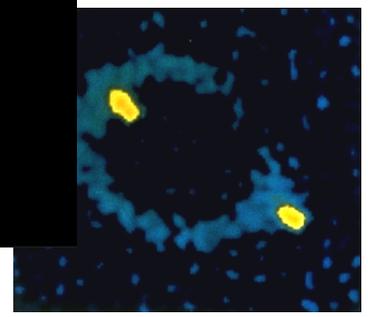
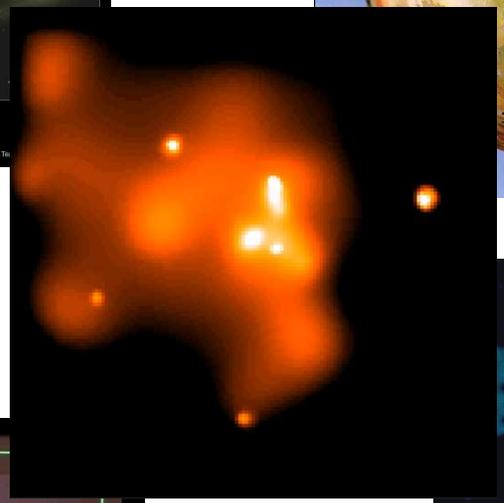
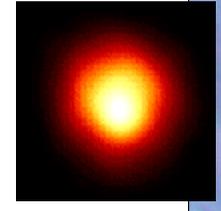
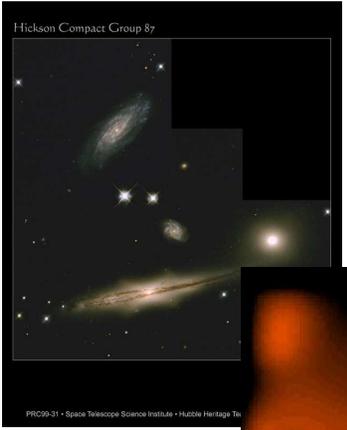
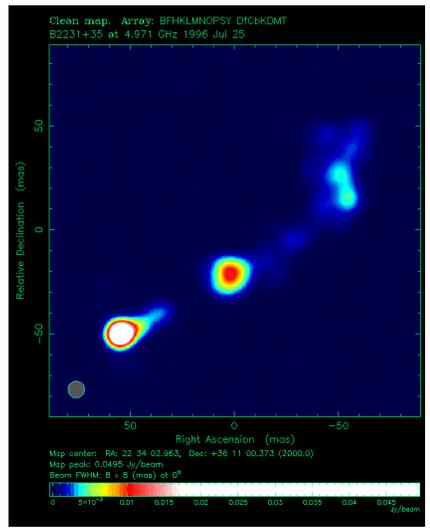
5.5 Evolução

6 – Cosmologia

BIBLIOGRAFIA

- “Astronomy – a physical perspective” (2003), 2nd ed; Kutner, M.L.; Cambridge University Press
- “The New Cosmos” (2002), Unsold, A., Baschek, B.; Springer
- “Astronomy – the evolving Universe” (2002), Zeilik, M.; Cambridge University Press
- “Astrophysics I” + “Astrophysics II” (1984), Bowers, R., Deeming, T.; Jones & Bartlett
- “The Physical Universe” (1982), Shu, F.H.; Un. Science Books

- “Astronomia Extragaláctica” (1998), Augusto, P.; UMa
- “Instrumentação em Astronomia” (2007), Augusto, P.; UMa



**“...all observation must be for or against
some view if it is to be of any service!”**

Charles Darwin

Unidades

1 pc \approx 3.3 anos-luz \approx 3.1×10^{16} m

1 U.A. \approx 1.50×10^{11} m (unidade astronómica)

$c \approx$ 300 000 km/s (velocidade da luz)

1 $M_{\odot} \approx$ 2.0×10^{30} Kg (massa solar)

1 $R_{\odot} \approx$ 7.0×10^8 m (raio solar)

Sistema de grandezas

$m \equiv$ grandeza aparente

(gregos) estrela $m=1 \rightarrow$ 100 vezes **mais** brilhante
(mais distante? mais **lumino**)

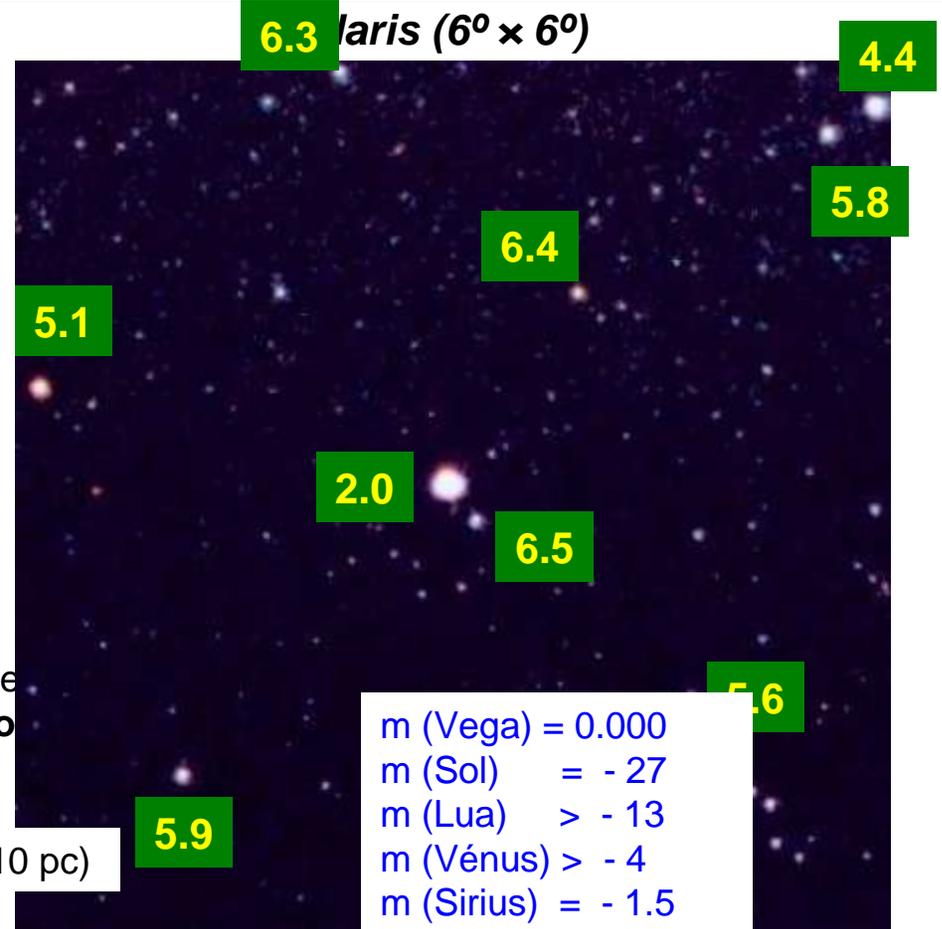
$$m_1 - m_2 = -2.5 \log (b_1/b_2)$$

$M \equiv$ grandeza absoluta (=m à distância padrão de 10 pc)

$$M - m = 5 - 5 \log d(\text{pc}) \quad (\text{módulo de distância})$$

$L \equiv$ luminosidade, potência ou brilho intrínseco = $4\pi d^2 b$

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log (L_1/L_2)$$



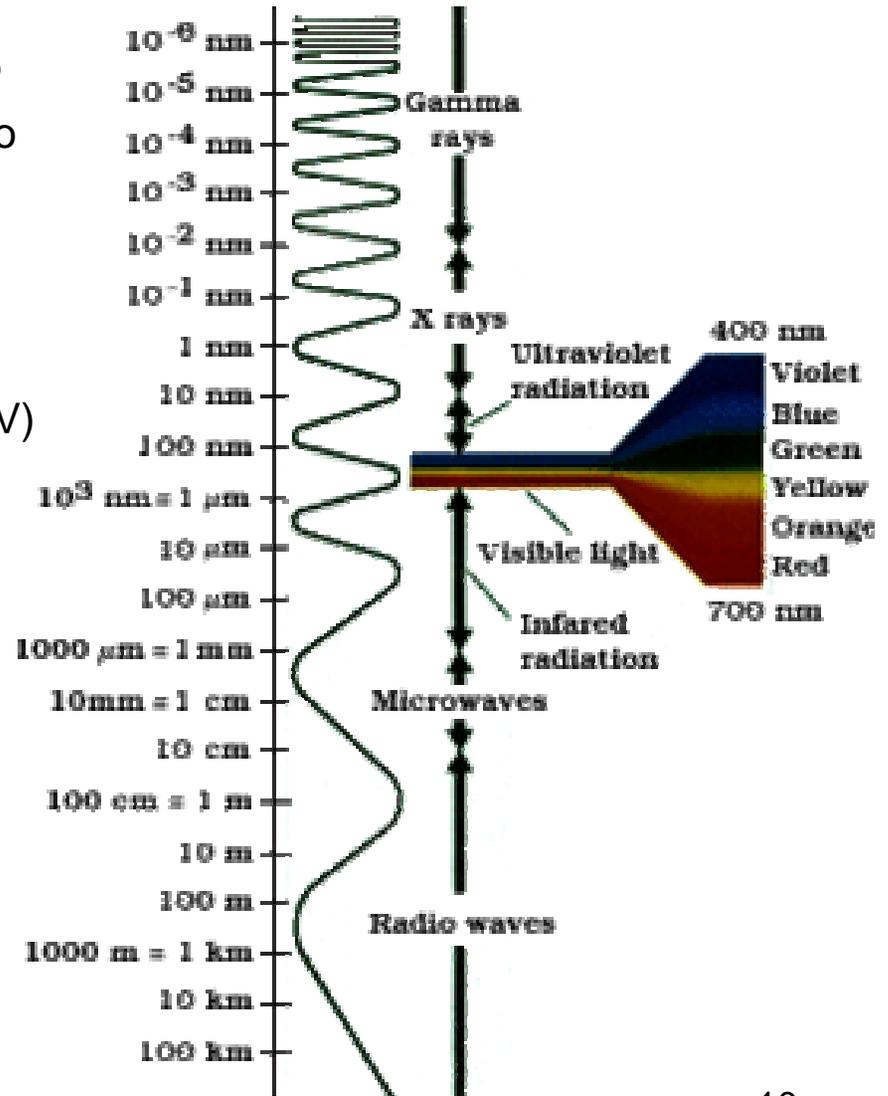
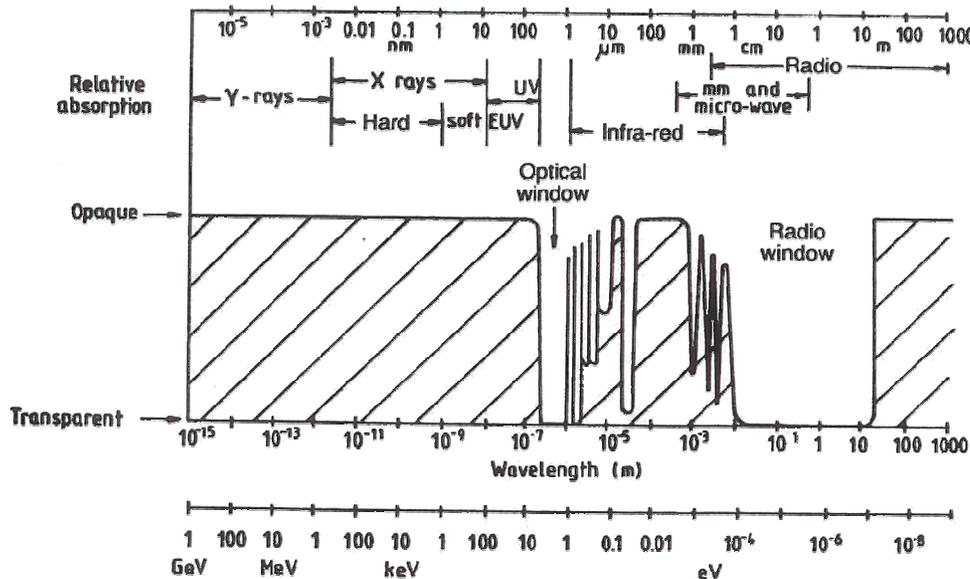
m (Vega)	= 0.000
m (Sol)	= -27
m (Lua)	> -13
m (Vénus)	> -4
m (Sirius)	= -1.5
m_{lim} (olho)	= +6.5
m_{lim} (HST)	= +31

M (Sol)	= +4.7
M (Lua)	> +32
M (Vénus)	> +30
M (Sirius)	= +1.4

O espectro electromagnético

A luz visível é apenas uma pequena porção do espectro electromagnético. Precisamos de todo o espectro!

A atmosfera da Terra bloqueia a maioria da radiação (excepto óptico, rádio e “janelas” no IV)



1 – O SISTEMA SOLAR

Nova(s) definição(ões) de planeta!

1 – Equilíbrio hidrostático (forma redonda)

Dependendo da **densidade**, a “fronteira” entre **planeta/planeta anão** e **pequeno objecto** é:

- rochoso-”terrestre” ($\sim 4\text{-}5 \text{ g/cm}^3$): $\sim 800\text{km}$ (**$0.001 M_T$**)
- “rocha com gelo” ($\sim 1\text{-}2 \text{ g/cm}^3$): $\sim 400\text{km}$

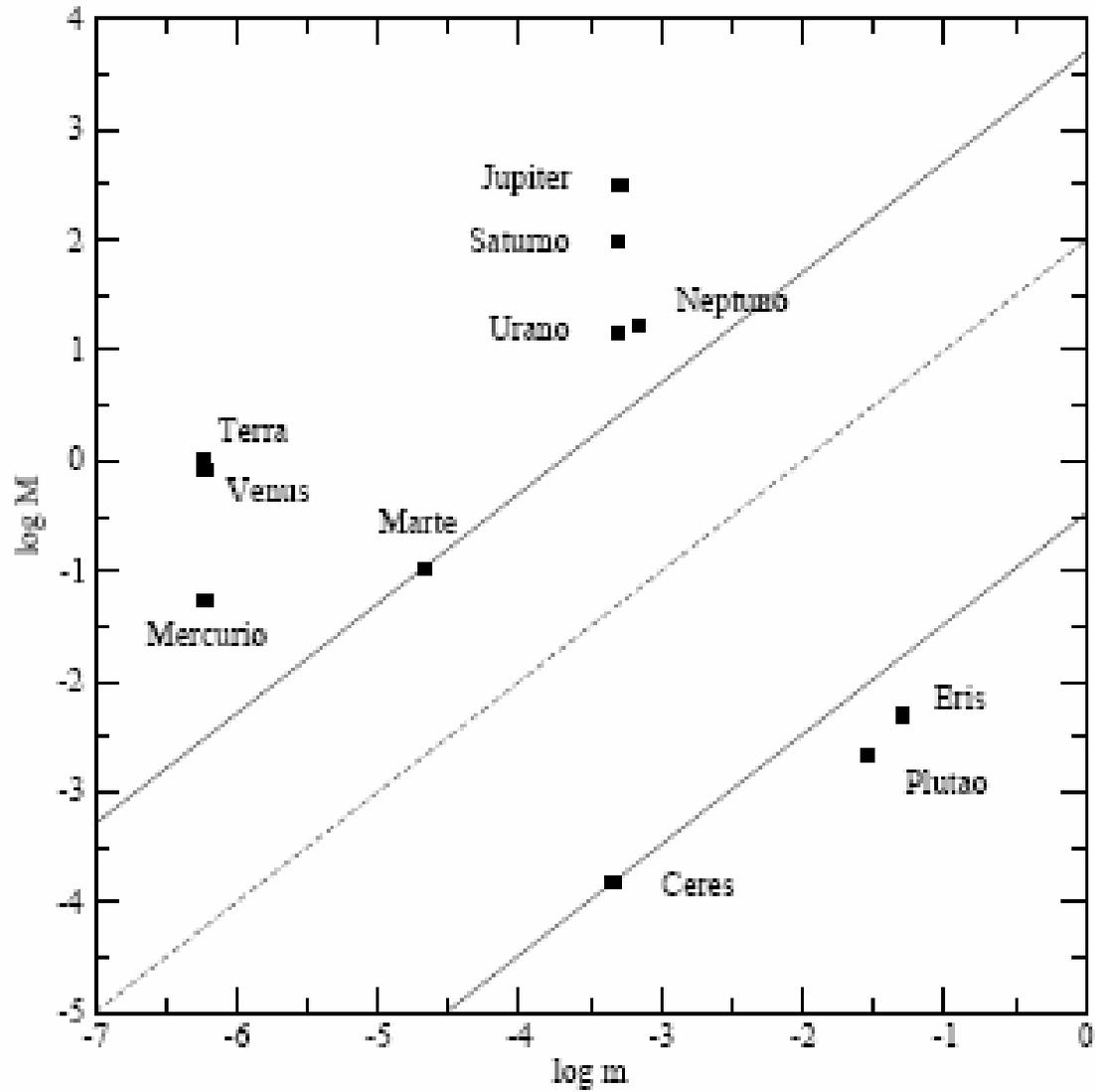
2 – Limpeza da “vizinhança” da órbita

O **único critério** que distingue entre planetas e planetas anões.

Usa-se a **razão** entre a massa total de um planeta/planeta anão (**M**) e a massa acumulada dos restantes objectos que compartilham a mesma região orbital (vizinhança) – **m** .

Um corpo é um **planeta** sempre que $\mu = M / m \geq 100$

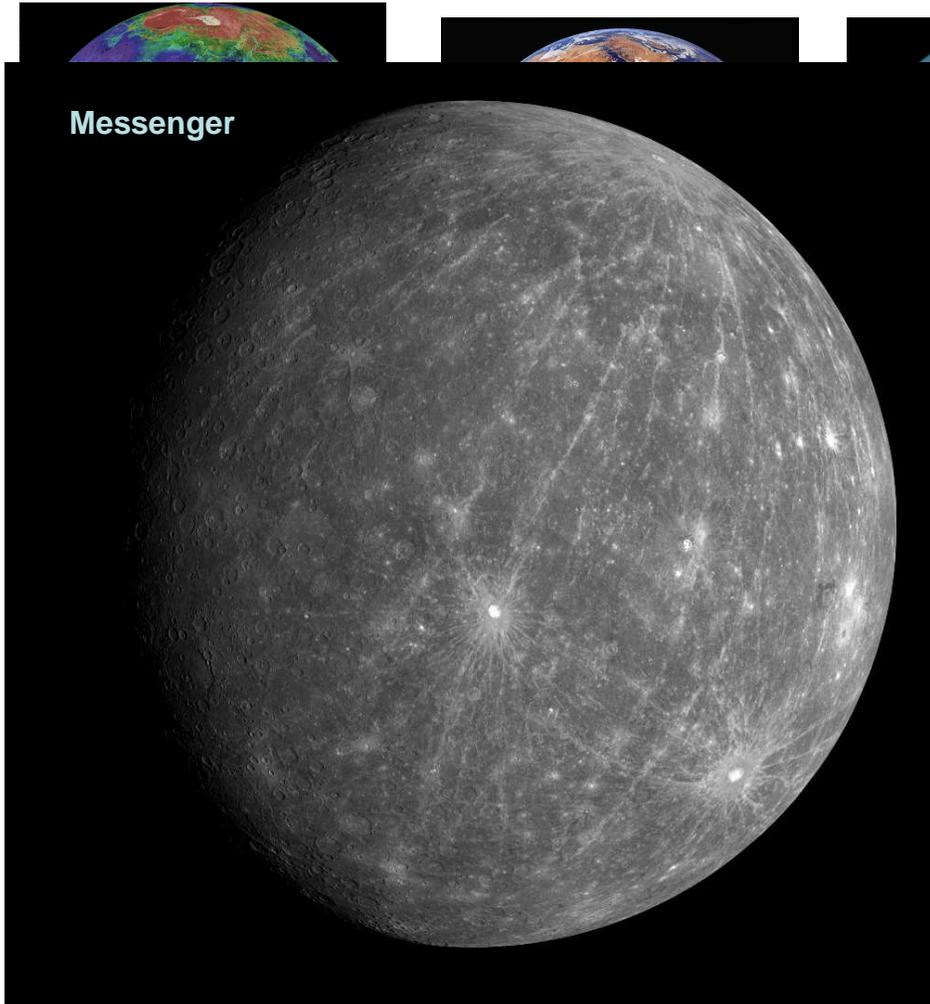
...e é um **planeta anão** quando $\mu < 1$



Planetas rochosos



Mercúrio



Marte
(2 satélites)

Planetas gasosos



Júpiter
(>63 satélites)



Neptuno
(>13 satélites)

Dois sites com informações actualizadas sobre planetas (e não só):

www.nineplanets.org

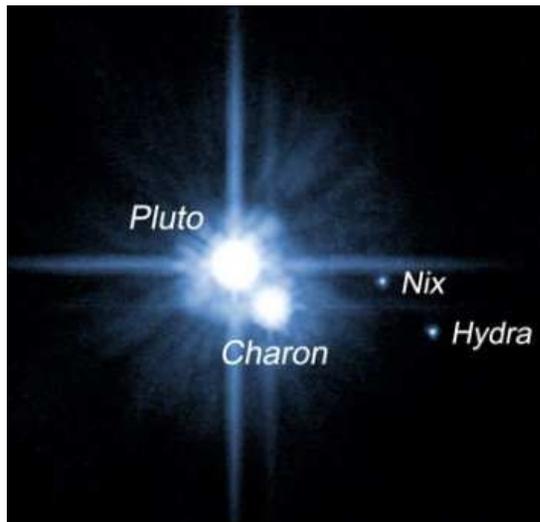
SkyandTelescope.com/planetsats

Planetas anões

Para já são **cinco** os planetas anões: **Ceres**, **Plutão**, **Éris**, **Makémaké** e **Haumea**.



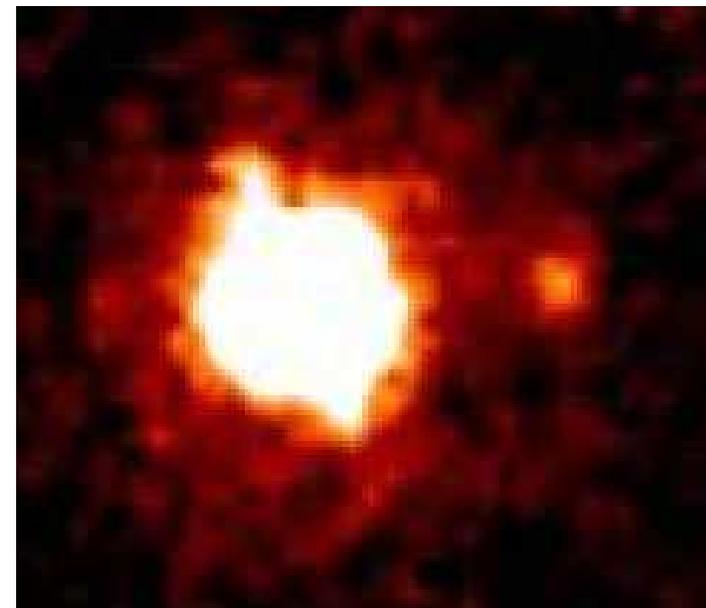
Ceres ($975 \times 909 \text{ km}^2$), o “rei” do Cinturão de Asteróides (Principal).



Plutão (2306km), o seu companheiro (Charon – 1200km) e ainda Nix (88km) e Hydra (72km).



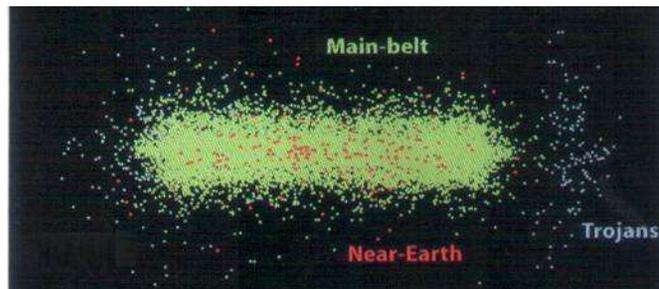
(imagens artísticas)



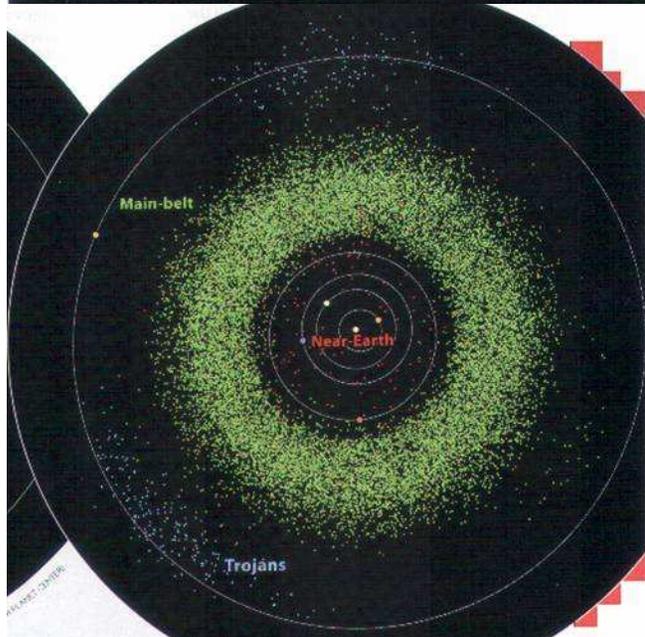
Eris ($2400 \pm 100 \text{ km}$) e Dysnomia (300km). 14

Asteróides (Cinturão Principal)

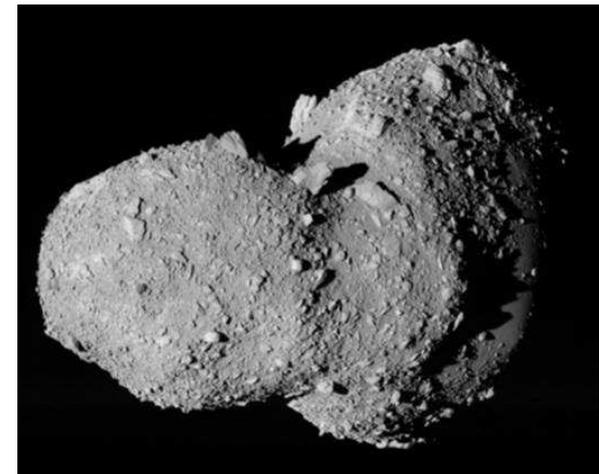
Já com mais de 140 000 “rochas” catalogadas, estima-se o número de asteróides no Cinturão Principal em 1-2 milhões (>1 km).



Ida e Dactyl (satélite).



Itokawa (“monte de detritos”).





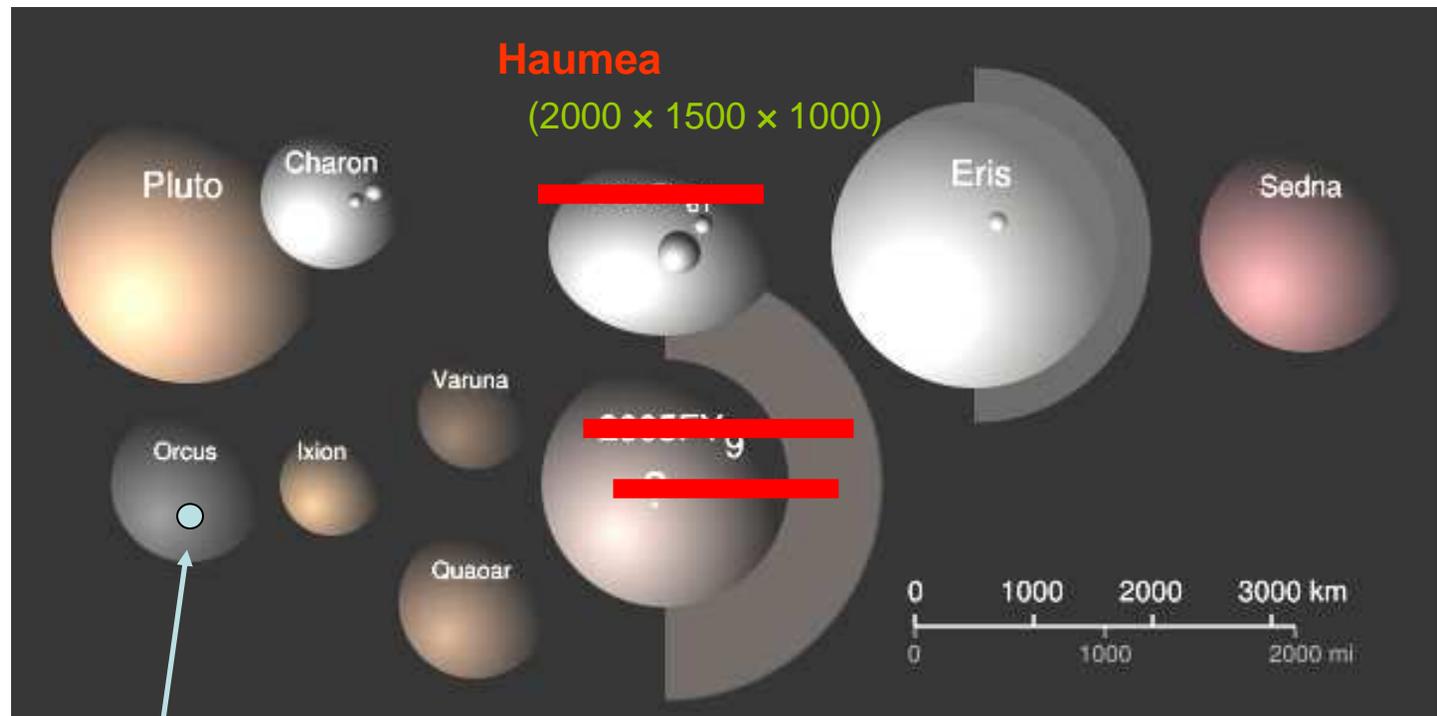
O Cinturão de Edgeworth-Kuiper

Mais de 1000 asteróides **trans-neptunianos** já foram identificados no Cinturão de Edgeworth-Kuiper. Estimam-se ~100 000 asteróides com >100 km.

Existem **seis** candidatos a planeta-anão (incluindo Charon).

[+Hi'iaka (370km) + Namaka (170km?)]

Os dez maiores objectos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper.



Makémaké

Descoberta em
Março 2009

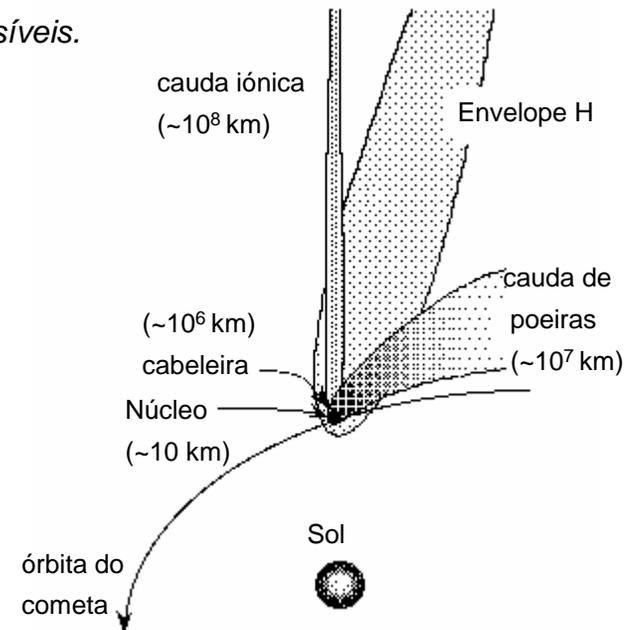
Cometas

Corpos de rocha e gelo com alguns km de diâmetro.

Com a aproximação ao Sol o material mais volátil evapora, dando origem a duas caudas: uma **iónica** (H_2O) e outra de **poeiras**.



O cometa Hale-Bopp com as duas caudas visíveis.



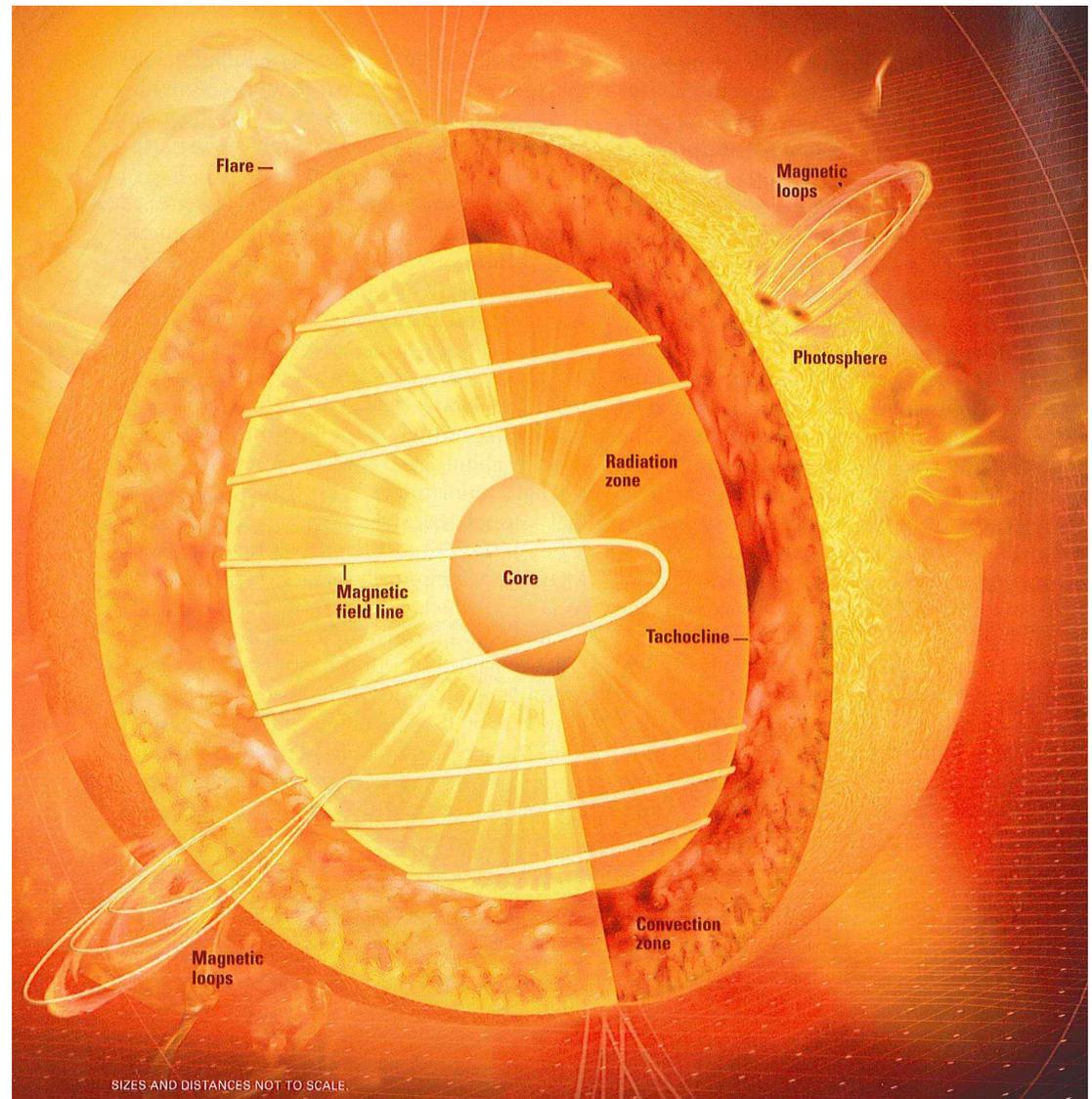
2 – ESTRELAS

2.1 O Sol

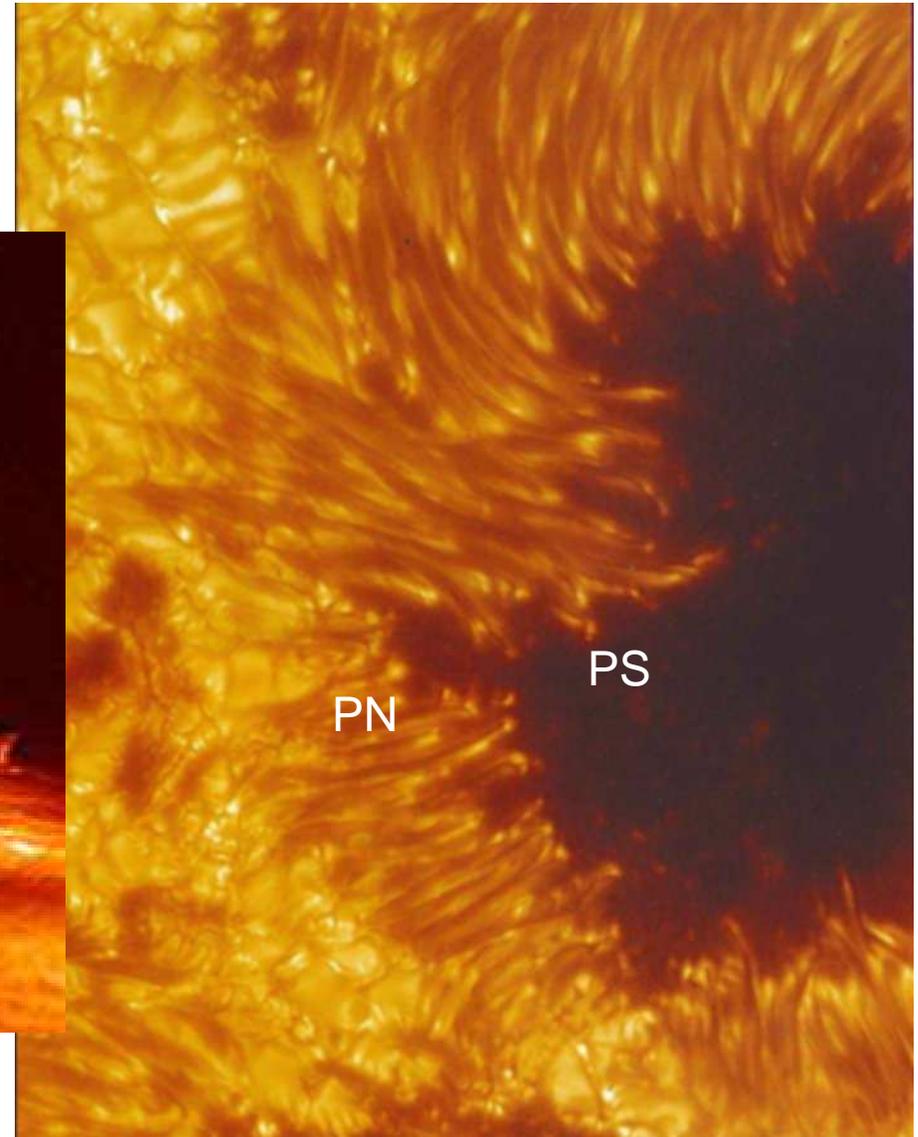
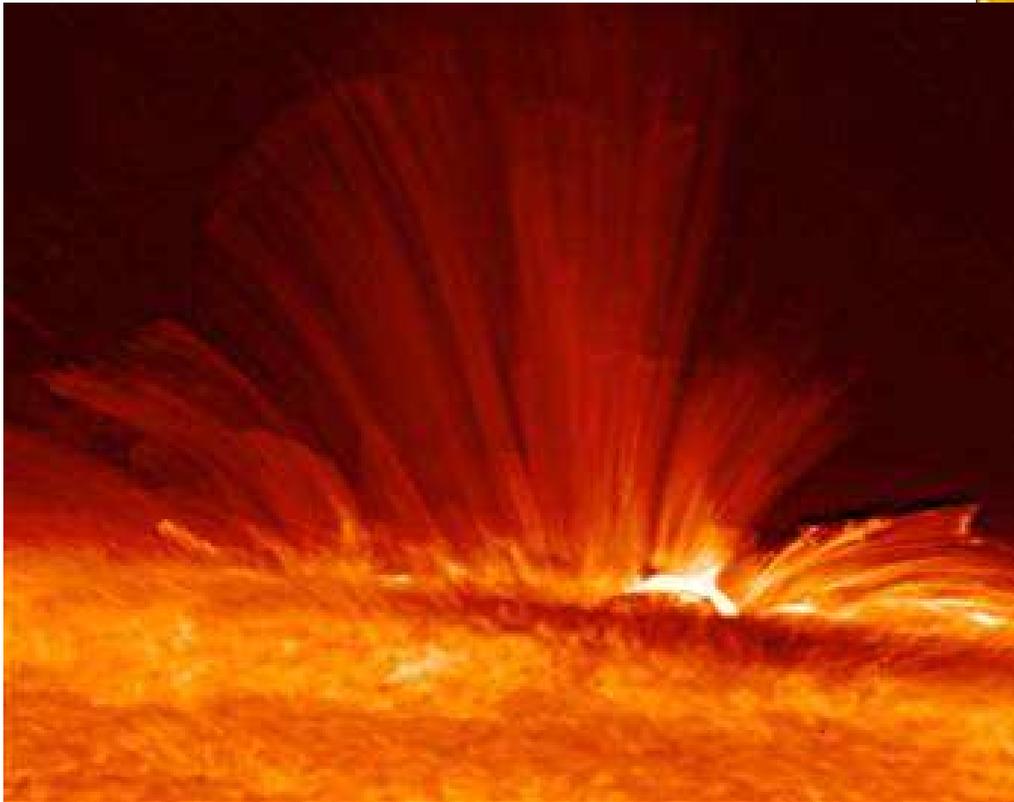
$T_{\text{superfície}} \sim 5500^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{interior}} \sim 15\,000\,000^{\circ}\text{C}$

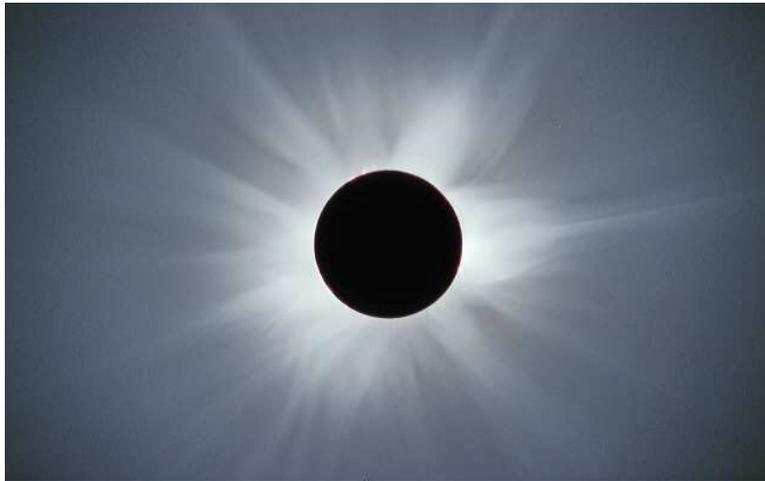
[fusão nuclear:
 $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{He} + \text{energia}$]



O Sol tem regiões de grande concentração magnética.

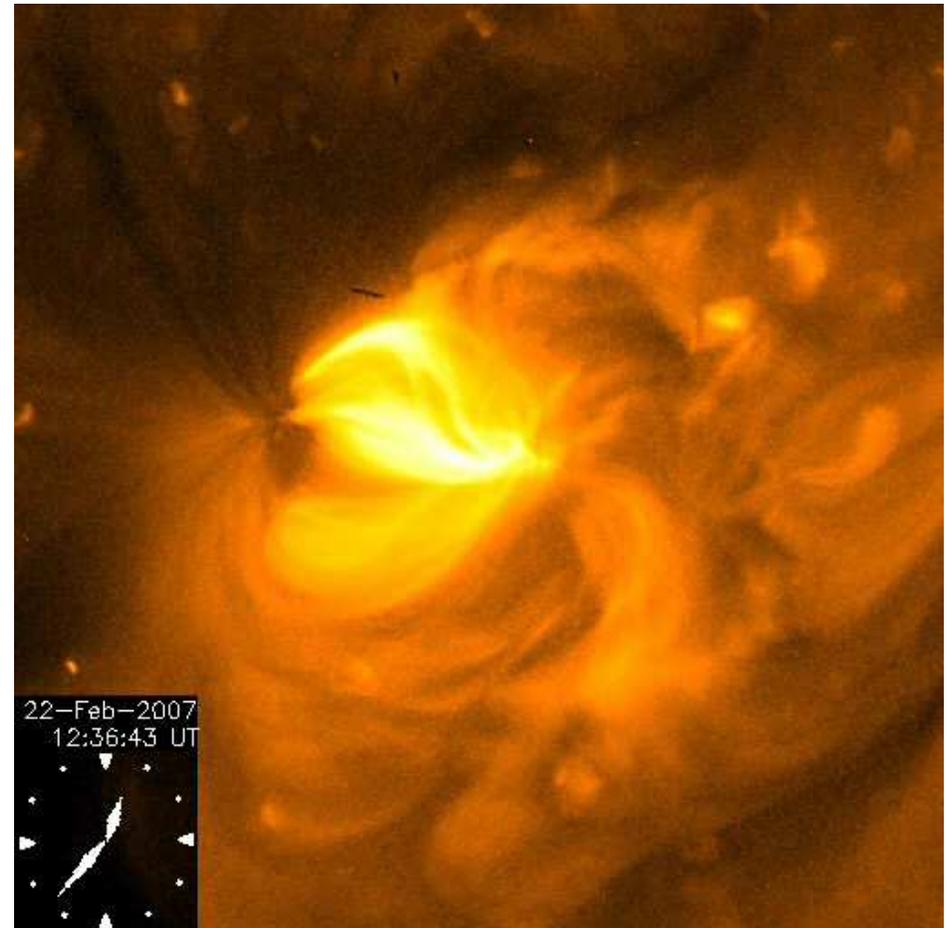


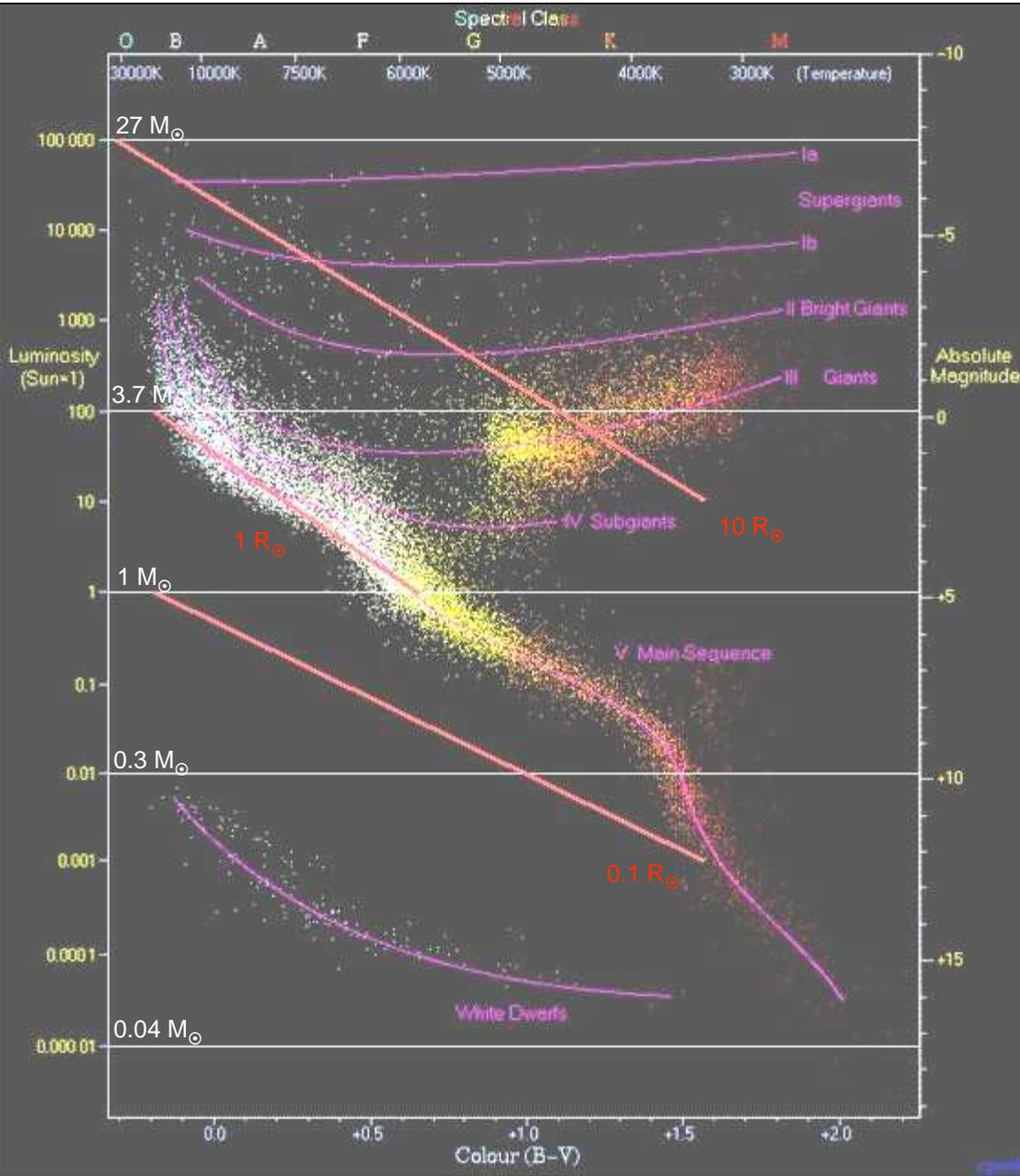
... e um ciclo magnético de 22 anos (de 11 em 11 trocam os pólos).



Chama-se *coroa* às camadas mais exteriores do Sol. É especialmente visível durante eclipses.

O *vento solar* consiste em partículas enviadas da coroa a ~400 km/s.





2.2 Espectros, luminosidades e massas

O diagrama H-R (Hertzsprung-Russell).

Construído à custa da luminosidade (L) de milhares de estrelas e da sua cõr (temperatura – T).

O diagrama H-R

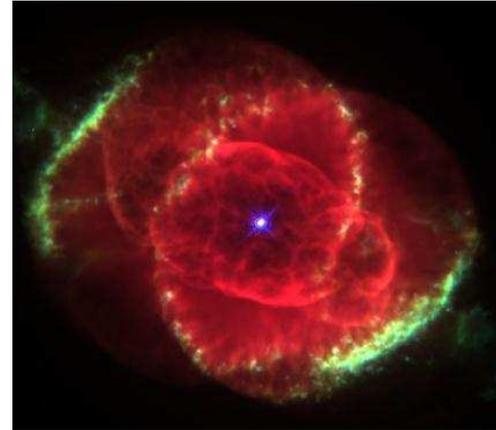
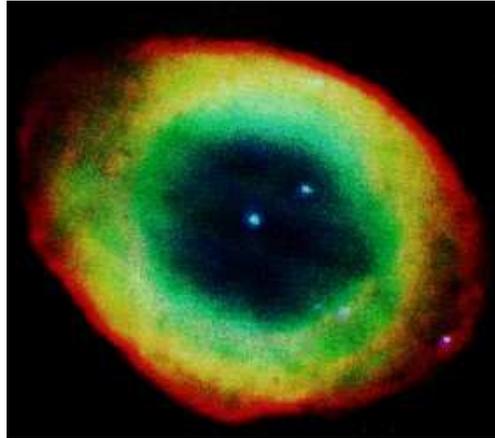
(~22000 estrelas do catálogo do Hipparcus).

A *luminosidade* tem uma relação (empírica) directa com a *massa* de uma estrela.

A *luminosidade* e a *temperatura* de uma estrela relacionam-se com o seu *raio*.



$M < 8 M_{\odot}$



Duas nebulosas planetárias: Anel e Olho de Gato.

$M > 8 M_{\odot}$



Dois Restos de Supernova: Caranguejo e Vela.

3 – ENXAMES DE ESTRELAS

Um enxame de estrelas **aberto** tem centenas a milhares de estrelas.



O enxame aberto das *Pléiades*.



Um enxame de estrelas **globular** tem 10^5 - 10^6 estrelas (forma simétrica).

O enxame globular M3.

4 – A NOSSA GALÁXIA

4.1 O meio interestelar

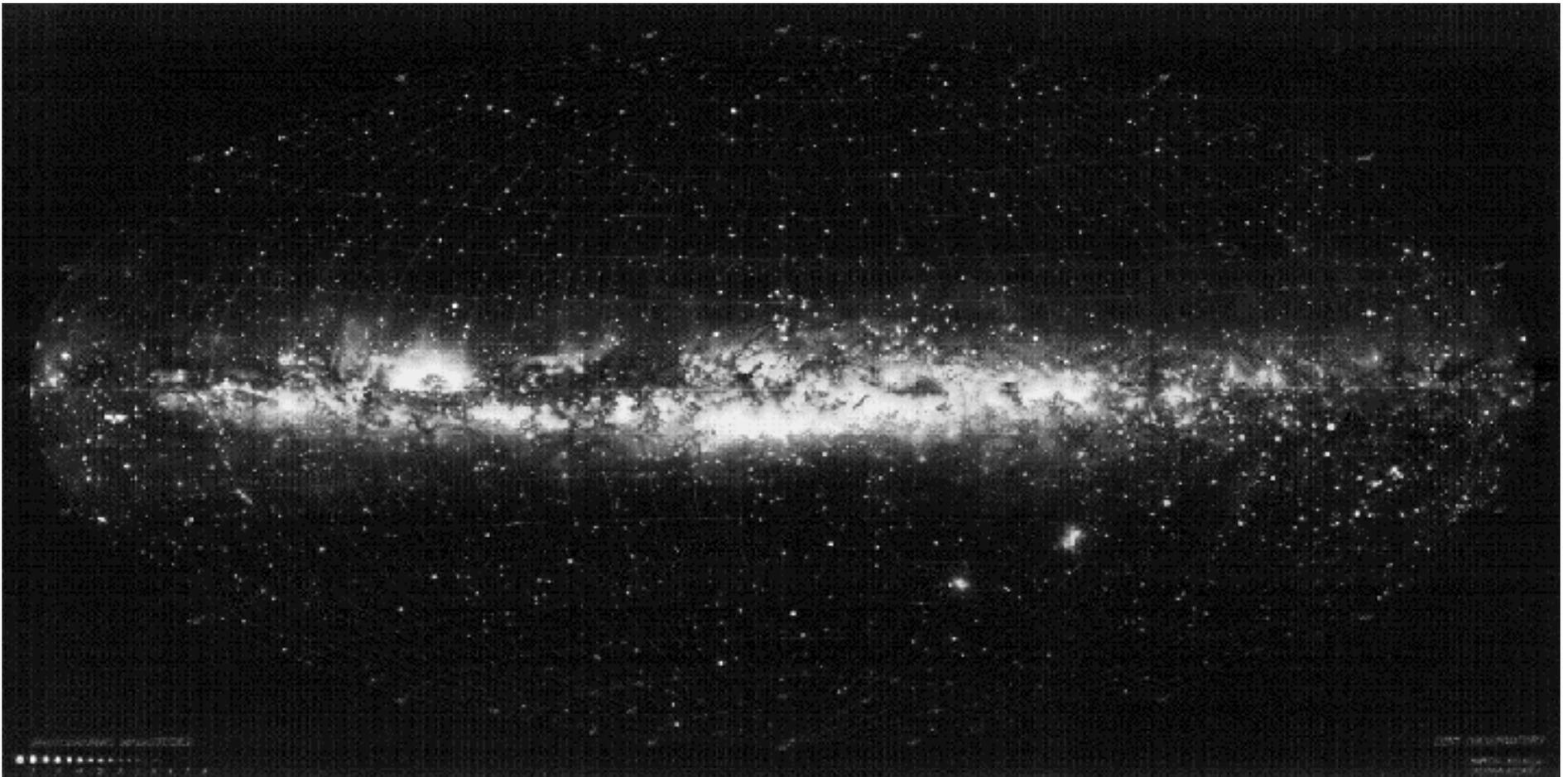
O meio interestelar é “abundante” em gases e poeiras.

Diatomic	Triatomic	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	13 atoms
H ₂	C ₃	c-C ₃ H	C ₅	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ C ₅ N	HC ₉ N	HC ₁₁ N
AlF	C ₂ H	I-C ₃ H	C ₄ H	I-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCN	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₃) ₂ CO		
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O	NH ₂ CH ₂ COOH		
C ₂	C ₂ S	C ₃ O	I-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₅ N	C ₇ H	CH ₃ CH ₂ OH			
CH	CH ₂	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	HCOCH ₃	CH ₂ OHCHO	HC ₇ N			
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂	CH ₂ CN	CH ₃ OH	NH ₂ CH ₃		C ₈ H			
CN	HCO	CH ₂ D ⁺	CH ₄	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O					
CO	HCO ⁺	HCCN	HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺	CH ₂ CHOH					
CO ⁺	HCS ⁺	HCNH ⁺	HC ₂ NC	HC ₂ CHO						
CP	HOC ⁺	HNCO	HCOOH	NH ₂ CHO						
CSi	H ₂ O	HNCS	H ₂ CHN	C ₅ N						
HCl	H ₂ S	HOCO ⁺	H ₂ C ₂ O							
KCl	HNC	H ₂ CO	H ₂ NCN							
NH	HNO	H ₂ CN	HNC ₃							
NO	MgCN	H ₂ CS	SiH ₄							
NS	MgNC	H ₃ O ⁺	H ₂ COH ⁺							
NaCl	N ₂ H ⁺	NH ₃								
OH	N ₂ O	SiC ₃								
PN	NaCN									
SO	OCS									
SO ⁺	SO ₂									
SiN	c-SiC ₂									
SiO	CO ₂									
SiS	NH ₂									
CS	H ₃ ⁺									
HF	SiCN									
SH										

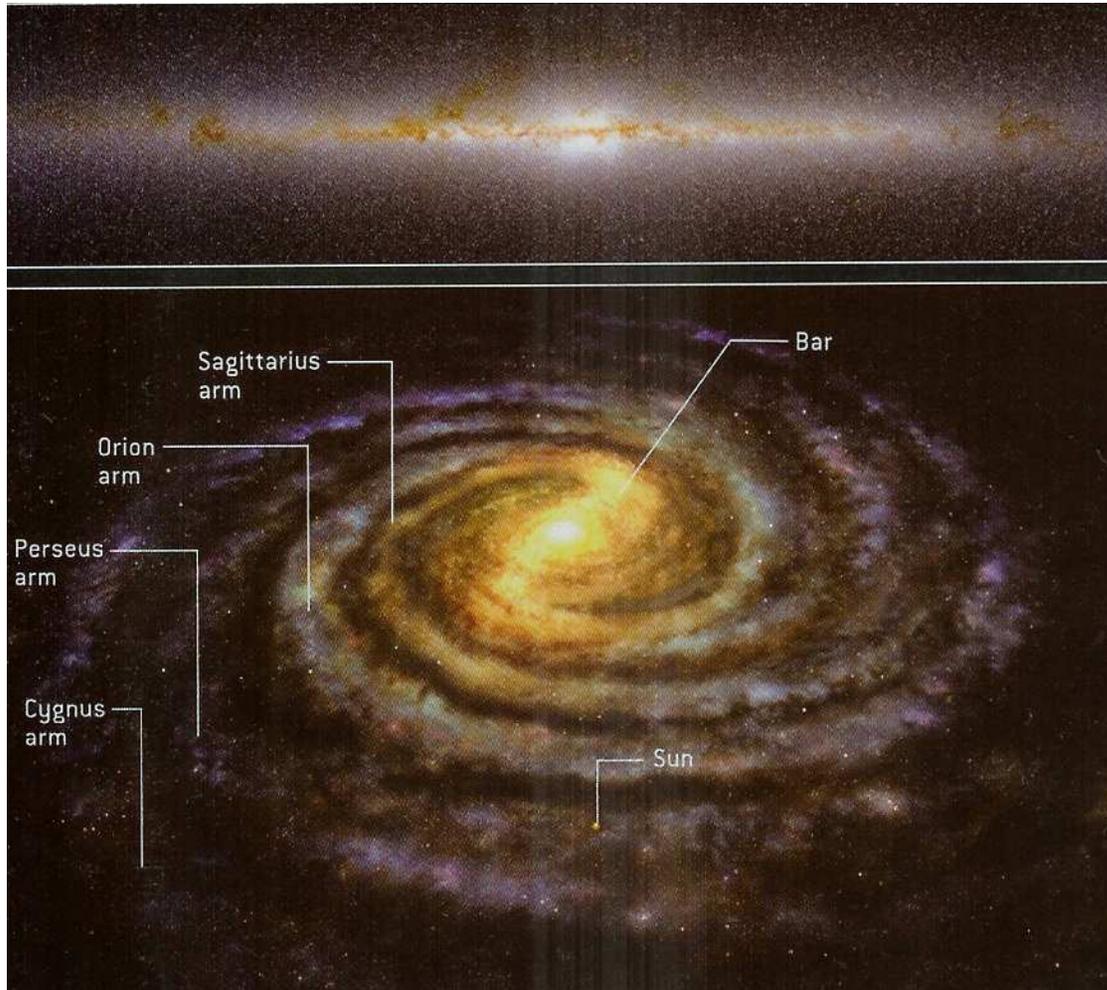
A lista de moléculas já detectadas no meio interestelar. Não se incluem as dezenas de espécies “deuteradas” (H→D).

4.2 Estrutura geral

A nossa galáxia é visível à noite. Qual o seu aspecto?

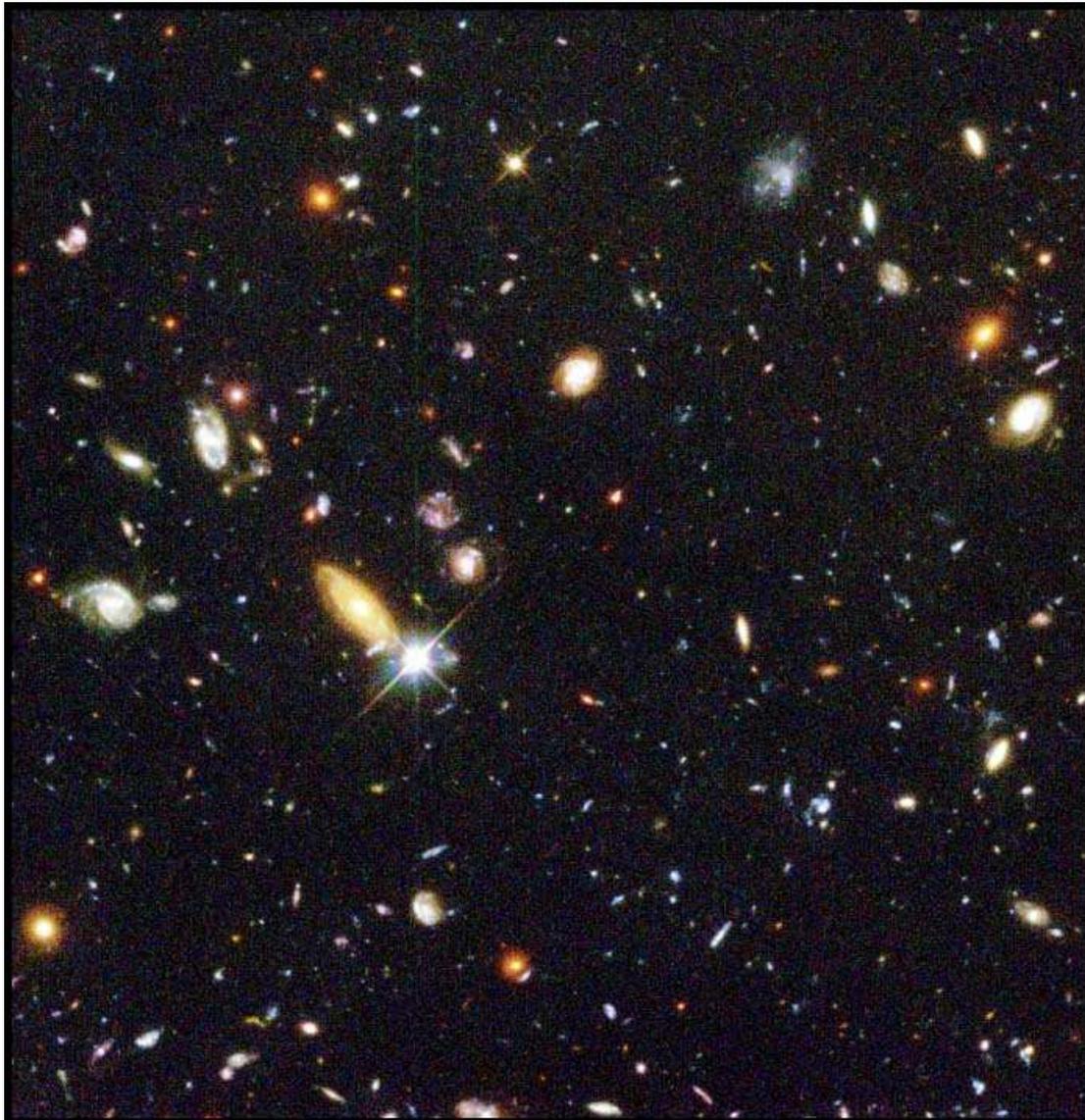


Foi confirmada (pelo Spitzer) a existência de uma proeminente **barra** na nossa galáxia espiral.



Uma representação realista da Nossa Galáxia a partir de dados do Spitzer (em cima). A **barra** tem um comprimento total de 9 kpc. Isto deve ser comparado com a distância do Sol ao centro da Galáxia (8 kpc). A região central tem um **bolbo**.

5 – ASTRONOMIA EXTRAGALÁCTICA



5.1 Galáxias: classificação e estrutura

Galáxia: conjunto de muitos milhões de estrelas, gás e poeiras.

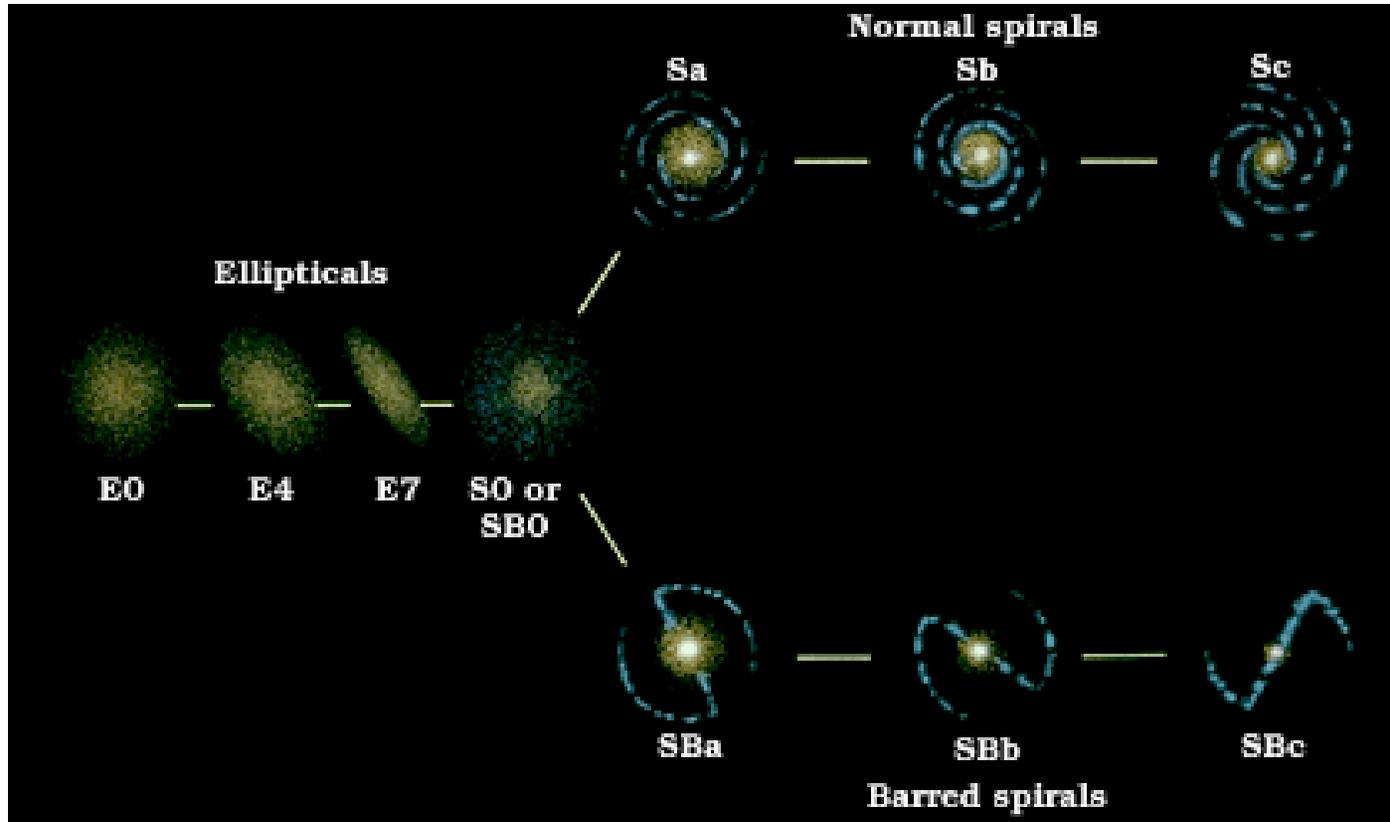
Massas em 10^7 - $10^{12} M_{\odot}$.

Tamanho em 1-50 kpc
(**anãs** e normais).

Estimamos o número total de galáxias do Universo em mais de 10^{11} .

Uma parte do Hubble Deep Field-North (HDF-N).

Diagrama em Diapasão de Hubble:



No diagrama em diapasão de Hubble, a classificação das galáxias elípticas como E_n usa $n = 10(1 - b/a)$ com a e b os semi-eixos das respectivas elipses (formas projectadas no céu). Não há elípticas com $b/a < 0.3$.

Galáxia espiral (S/SB): constituída por estrelas, muito gás e poeiras; forma de disco; muita formação estelar. Em rotação diferencial, o que gera braços em espiral.

Galáxia elíptica (E): apenas estrelas velhas; não há formação estelar. Não há movimento conjunto (as estrelas movimentam-se como num enxame estelar).

Galáxia esferóide (S0/SB0): estrelas velhas e pouco gás; tem plano principal. Não tem rotação nem braços em espiral.

Temos (abundância):

- espirais (60%)
- esferóides (20%)
- elípticas (15%)
- irregulares (Irr) – 4%
- peculiares (Pec) – 1%

Elípticas:

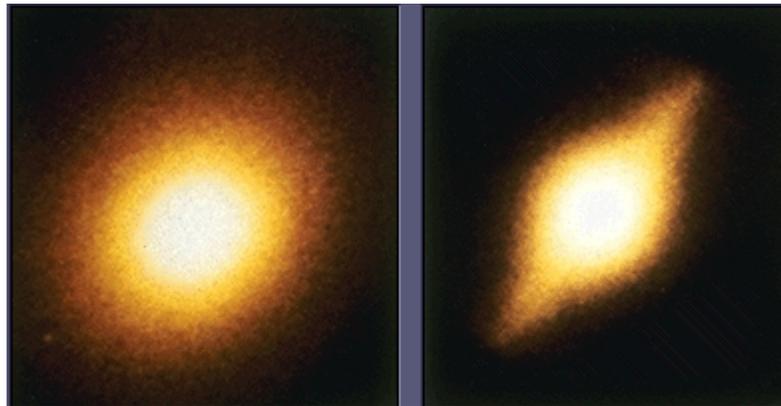


E0

E3

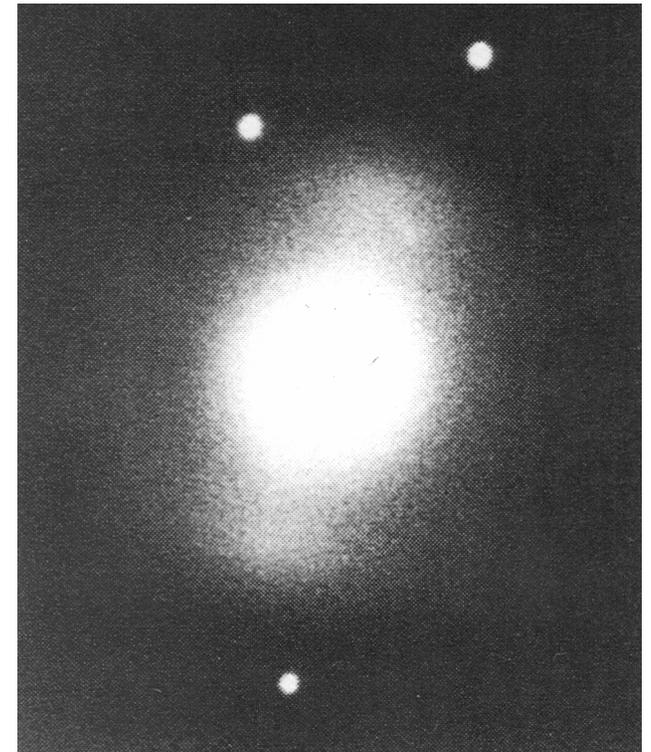
E6

Esferóides:



S0

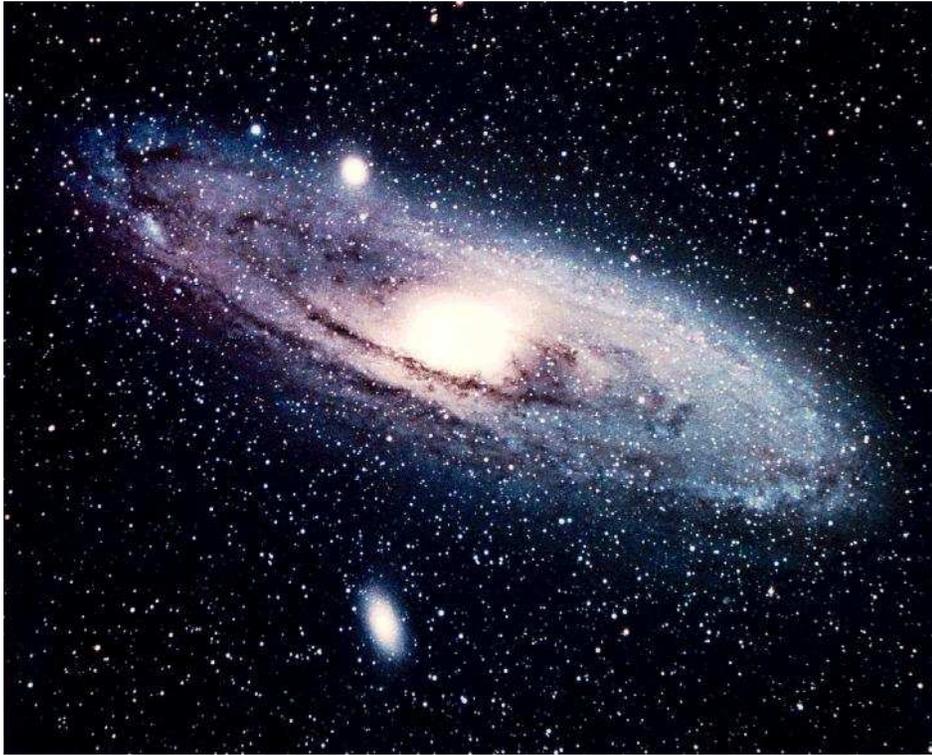
SB0



NGC2859

Espirais normais:

Sa/Sb



M31 (Andrómeda)

M104 (“Sombrero”)



Espirais barradas:

SBa

NGC4650



SBb

NGC1530



Irregulares:

Grande
Nuvem de
Magalhães

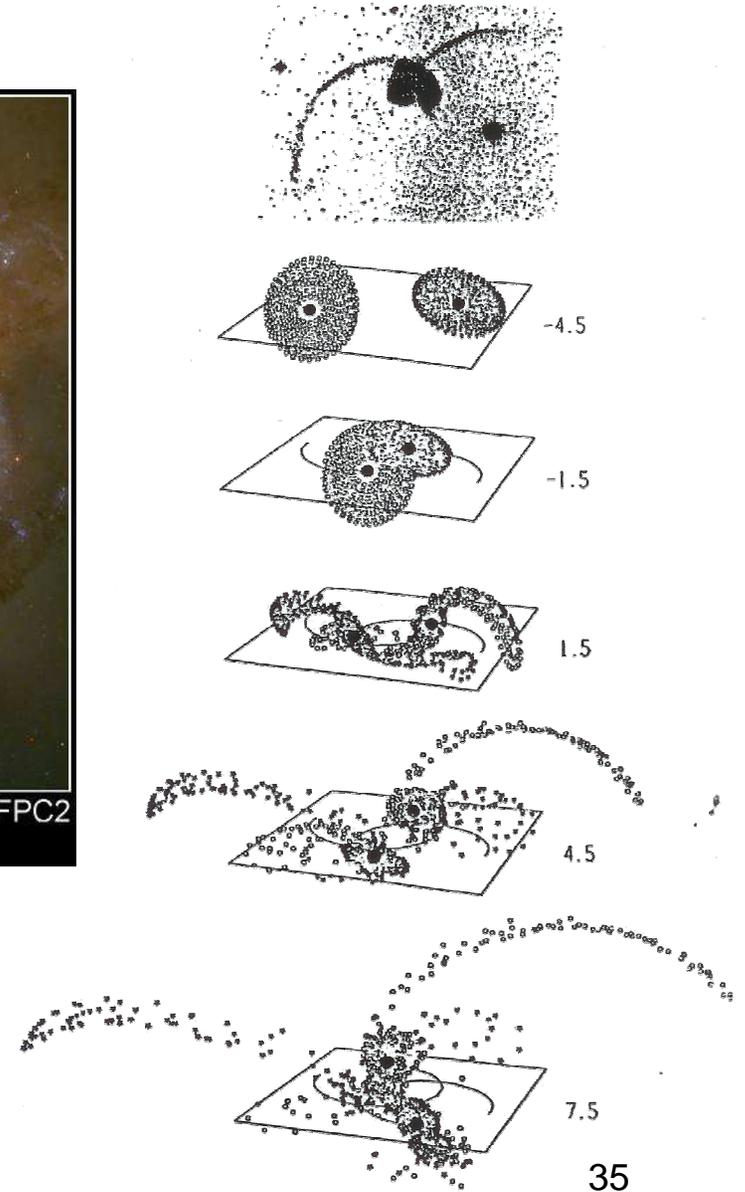
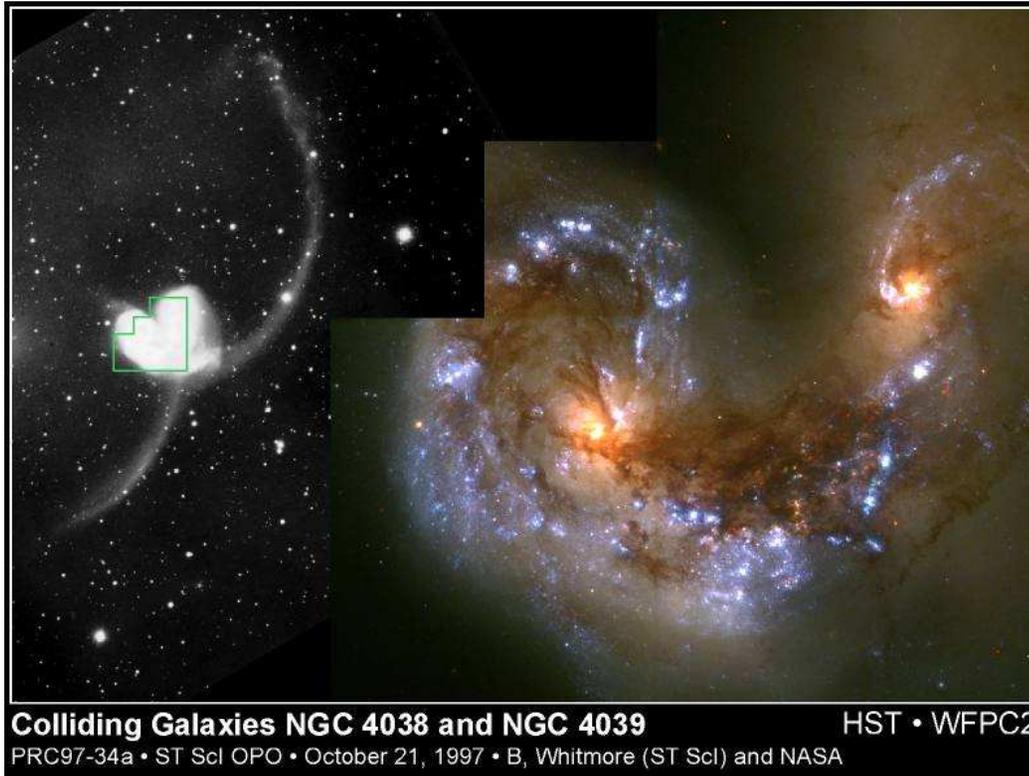


Pequena
Nuvem de
Magalhães



Peculiares:

“Antenas”



Anãs:

cE

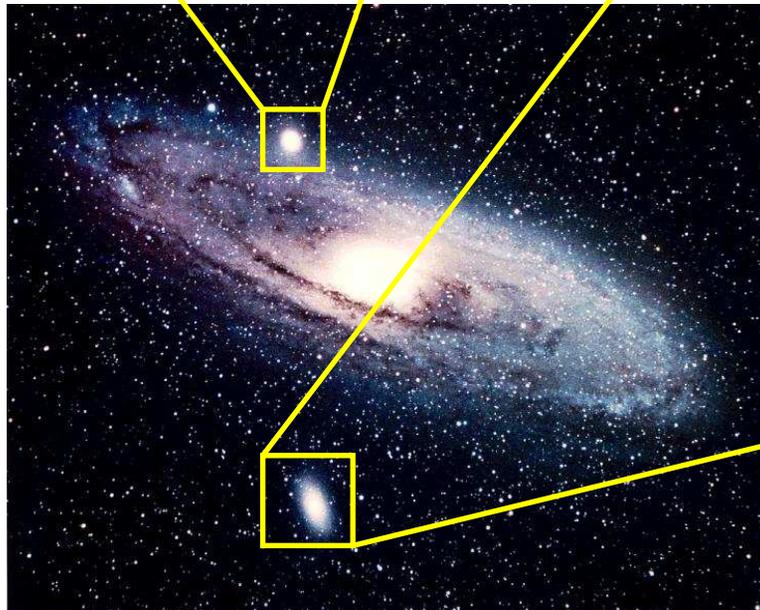


M32

dE5



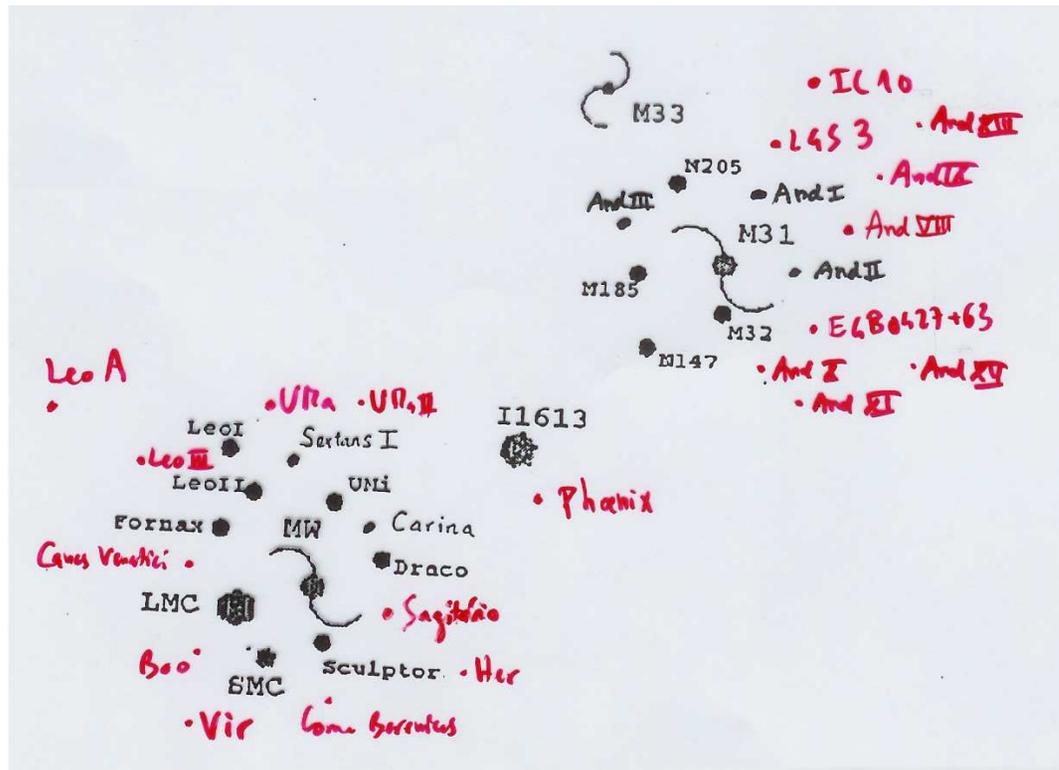
M110



5.2 Associações de galáxias

Um Grupo de galáxias contém entre três e cerca de cem membros.

O seu tamanho típico é de 1 a 3 Mpc.

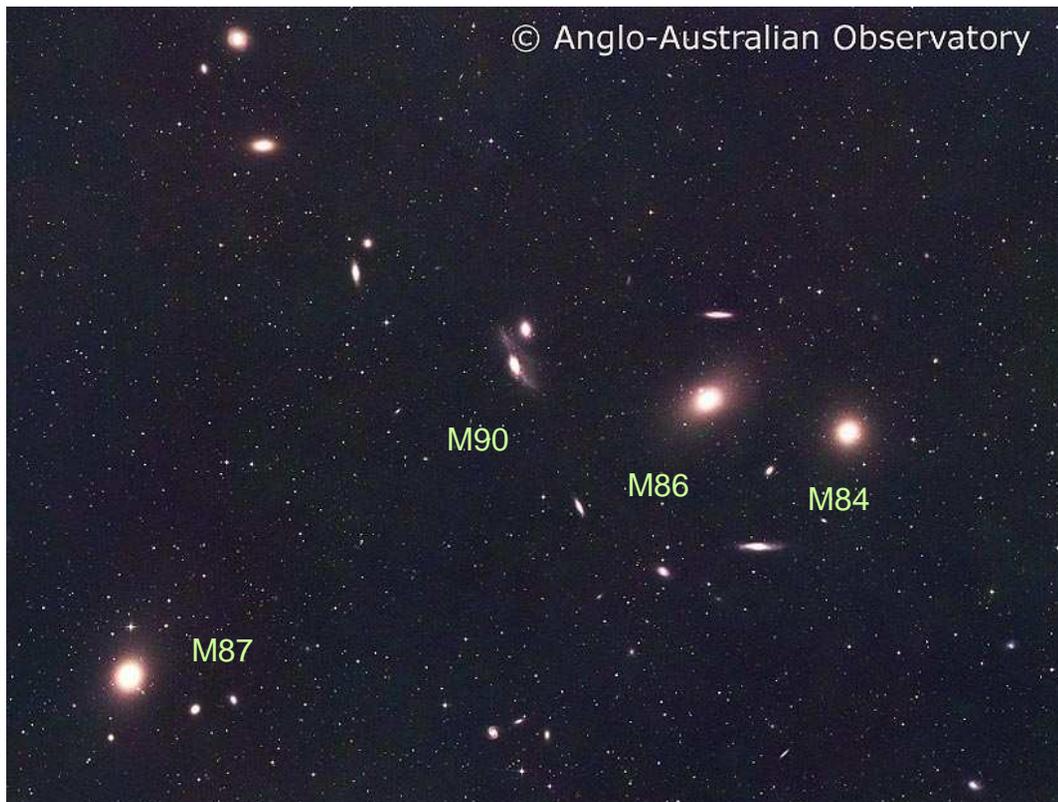


O Grupo Local, com um tamanho de 1 Mpc, é dominado pela Nossa Galáxia e pela de Andrómeda ($3 \times 10^{12} M_{\odot}$; 75% da massa total). As respectivas satélites preenchem-no quase totalmente. São já quase 100 membros...

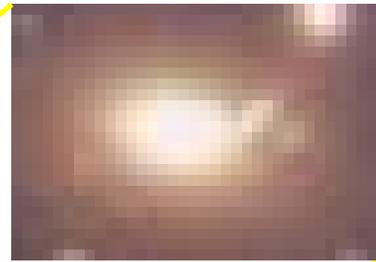
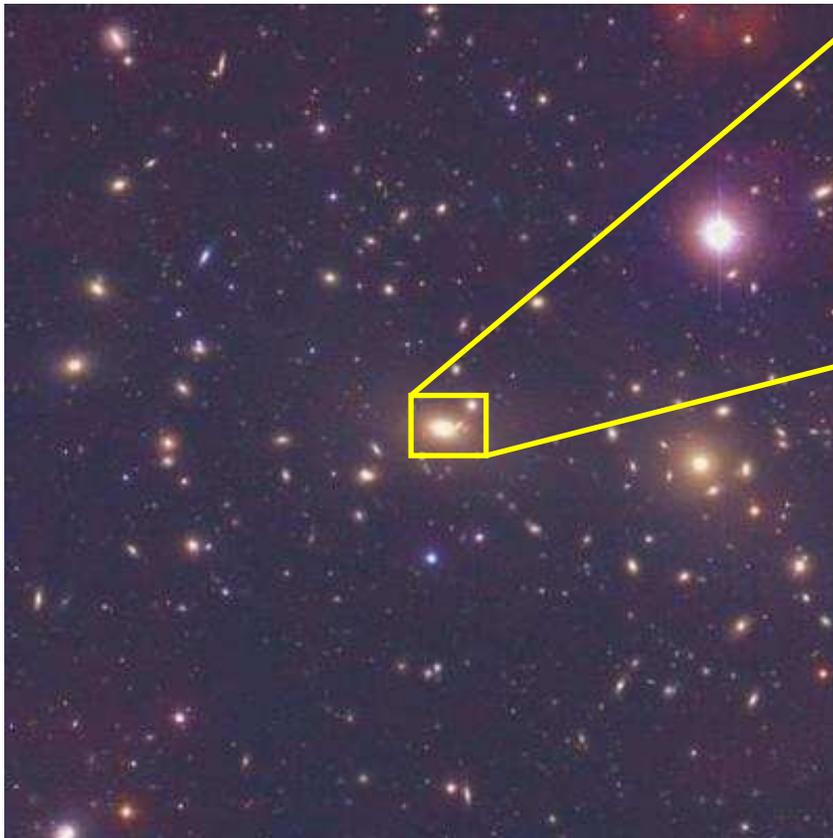
Um **Enxame** de galáxias contém entre **cem** e cerca de 10^4 membros.

O seu tamanho típico é de 1 a 10 Mpc. Dois tipos:

- **Enxame irregular**: 100-1000 galáxias ($M \sim 10^{12}$ - $10^{14} M_{\odot}$) sem simetria.
- **Enxame regular**: 10^3 - 10^4 galáxias ($M \sim 10^{15} M_{\odot}$); compacto, com simetria esférica.



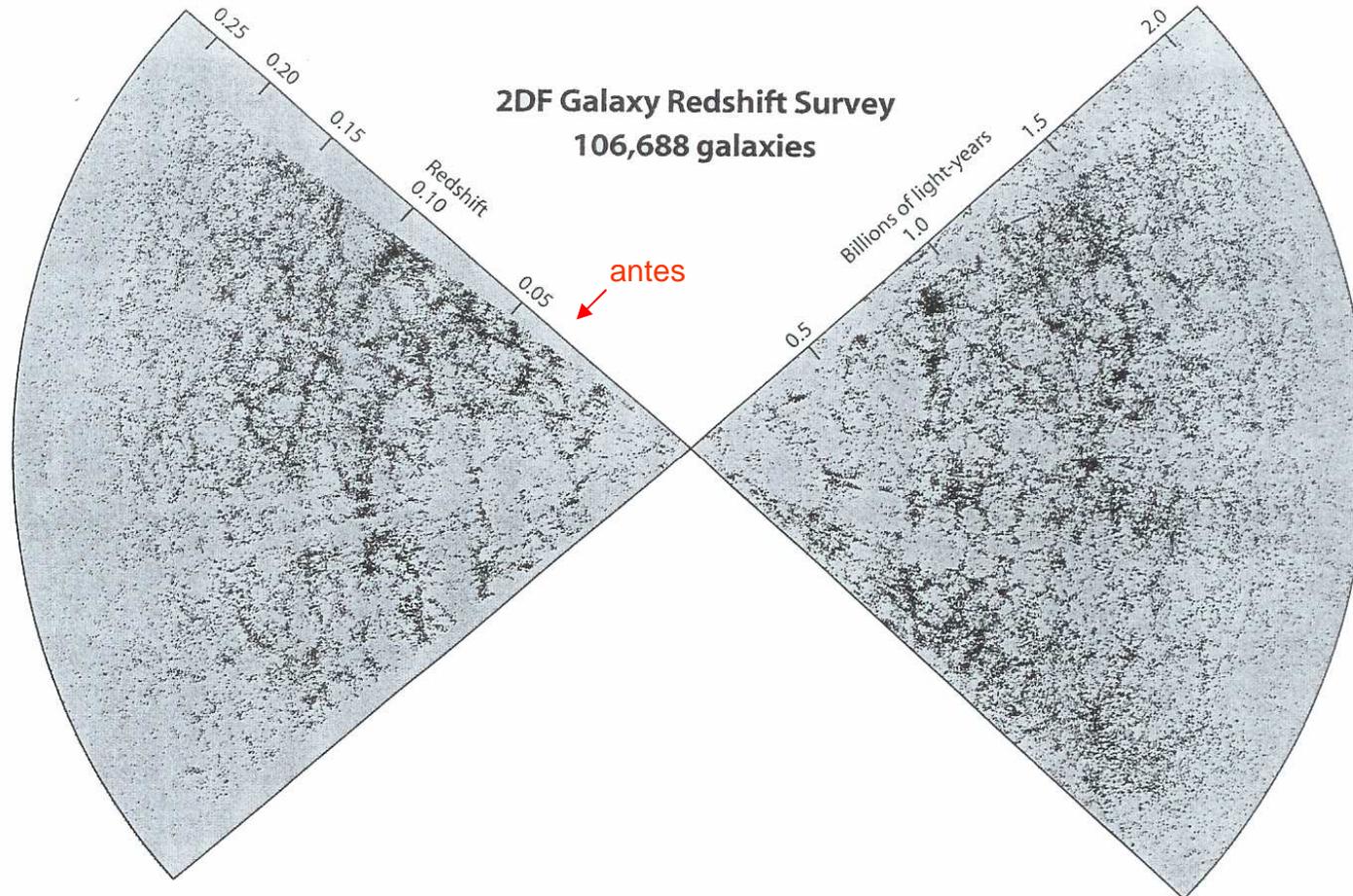
O Enxame da Virgem (irregular). A maioria dos objectos que se vê são estrelas da nossa Galáxia. Notem-se as assinaladas galáxias, dominantes do enxame e não muito longe do seu “centro”.



O Enxame de Coma (regular). Virtualmente todos os “pontos de luz” visíveis são galáxias.

Os enxames regulares têm (pelo menos) uma supergaláxia central (cD de “cluster dominant”) que resulta da agregação (“canibalismo”) de muitas galáxias circundantes. São as galáxias mais massivas do Universo, chegando a $10^{13} M_{\odot}$.

Os **super-enxames** de galáxias contêm entre **cem** e **mil** enxames de galáxias (até 10^7 galáxias!). O seu tamanho é de 10 a 500 Mpc e a massa 10^{15} - $10^{20} M_{\odot}$.



Os super-enxames de galáxias distribuem-se em “filamentos” que delimitam grandes regiões “vazias”.

5.3 Galáxias activas

Emitem mais de **mil vezes** o total de radiação proveniente de estrelas (gás e poeiras).

Constituem 10% de todas as galáxias conhecidas.

O “modelo standard” de **núcleos galácticos activos** (AGN) unifica:

- Seyferts (Sy1, Sy2), incluindo LINERs (Sy3)
- Blazares
- Quasares
- Rádio Galáxias

Seyferts: o primeiro tipo descoberto.

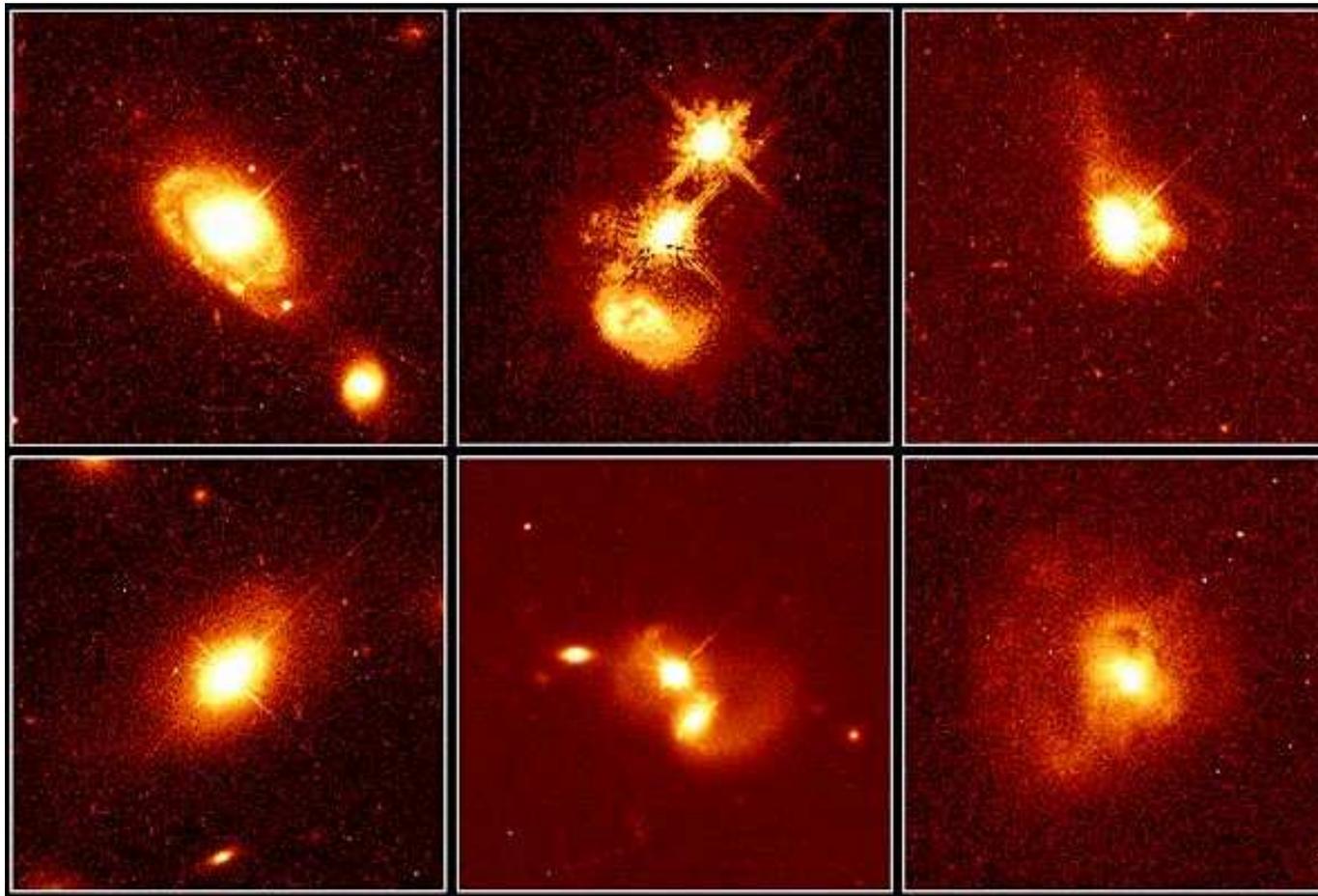
Há >14 mil catalogadas (90% Ss + 10% Es).

Uma Seyfert (como a NGC7742) tem por característica principal, além do espectro, um ponto brilhante de luz central, que pode ser comparável em brilho total ao resto da galáxia.



Blazares: já >1200; têm emissão muito variável (minutos a dias).
Ainda, movimentos **superluminais** (recorde: 40c).

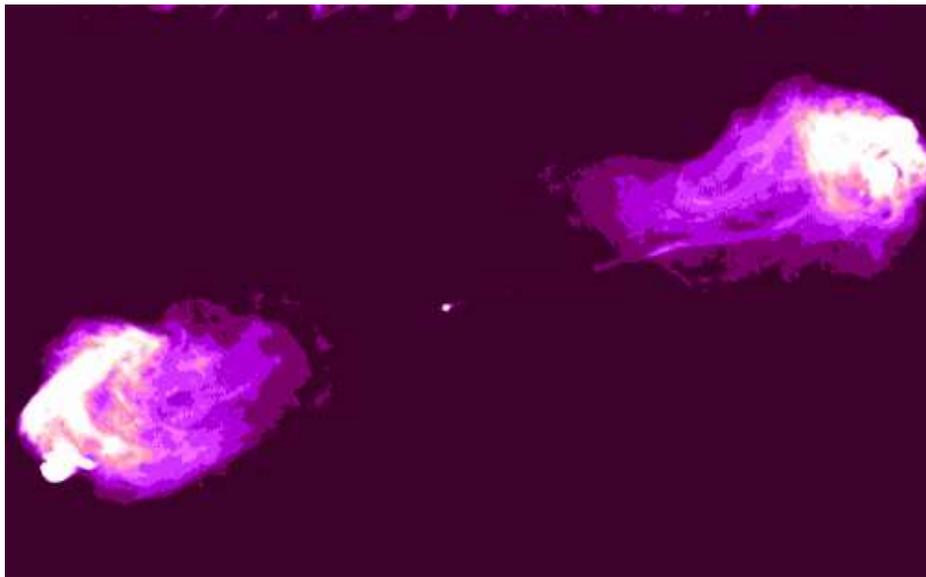
Quasares: o tipo mais famoso e abundante (>84 000).



O HST confirmou os quasares como residentes em galáxias. A surpresa veio de quase sempre estas serem peculiares (estão em interacção).

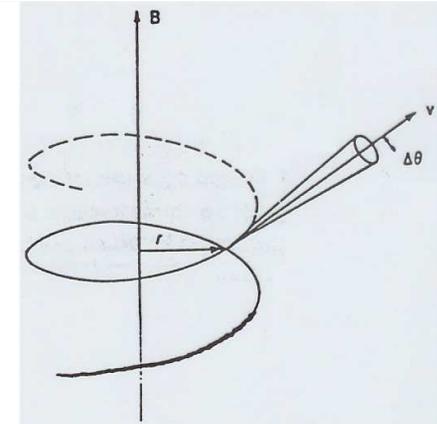
Rádio Galáxias: emissão sincrotrónica.

Conhecem-se milhares (em Es).

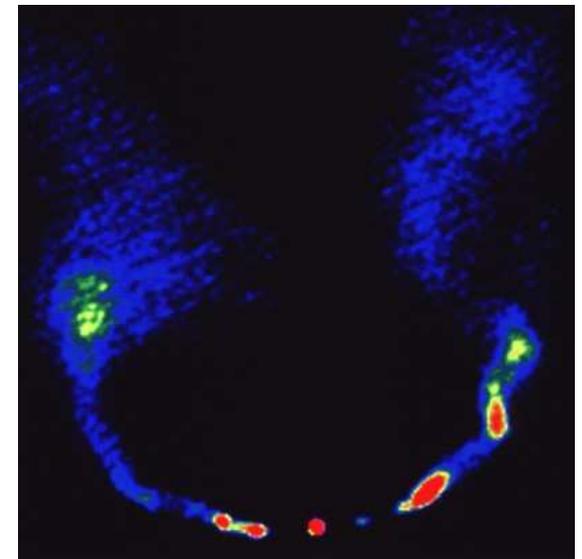


Cygnus A, o protótipo de uma rádio galáxia Fanaroff-Riley tipo II (FR II). Os jactos opostos são supersónicos e, por isso, não se vêem. Há choques violentos nos lobos. Os jactos chegam a distâncias de 1 Mpc, bem maiores que o tamanho da galáxia hospedeira.

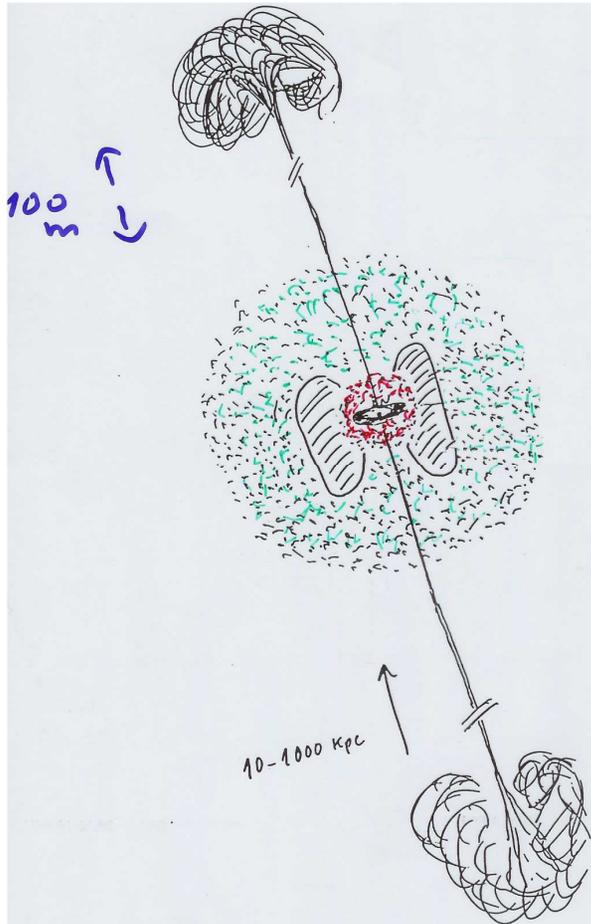
Uma rádio galáxia de tipo FRI, neste caso no centro de um enxame (numa cD). Note-se que os jactos, mais lentos, se vêem perfeitamente.



A emissão sincrotrónica surge do movimento em sincrotrão de electrões relativistas num campo magnético.



Para o “modelo standard” de AGN: **toro molecular**.
HST confirmou existência.



O toro molecular de poeiras da Sy3 NGC4261.

O modelo standard de AGN. Um **buraco negro supermassivo** (10^6 - $10^9 M_{\odot}$) central em rotação, agrega massa do ambiente através de um **disco de acreção** (a preto). Segue-se a **região de emissão de riscas largas** com um tamanho de 0.1-1 pc. O **toro molecular** é visto em secção (tracejado), usualmente a 100 K, enquanto se segue a **região de emissão de riscas estreitas** (NLR; a verde) com um tamanho de 0.01-1 kpc. Finalmente dois energéticos **jactos** opostos, que saem directamente do buraco negro, podem chegar a distâncias colossais.

Buraco negro (BN): surge sempre que a matéria tem uma densidade superior a um valor crítico

(quando a velocidade de escape de Schwarzschild é maior que a velocidade da luz).

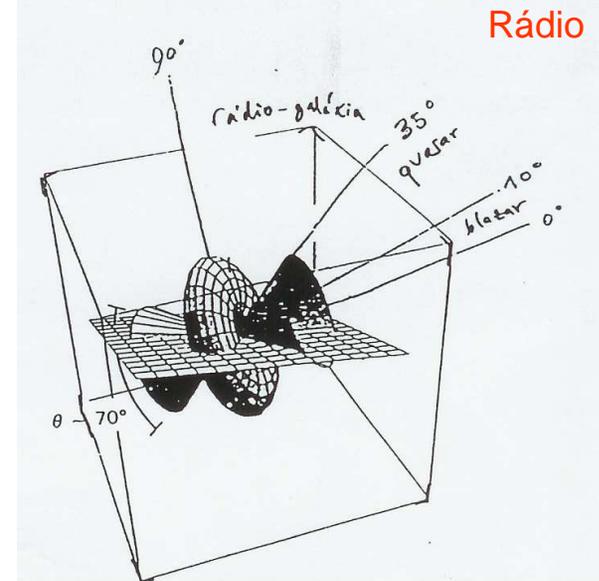
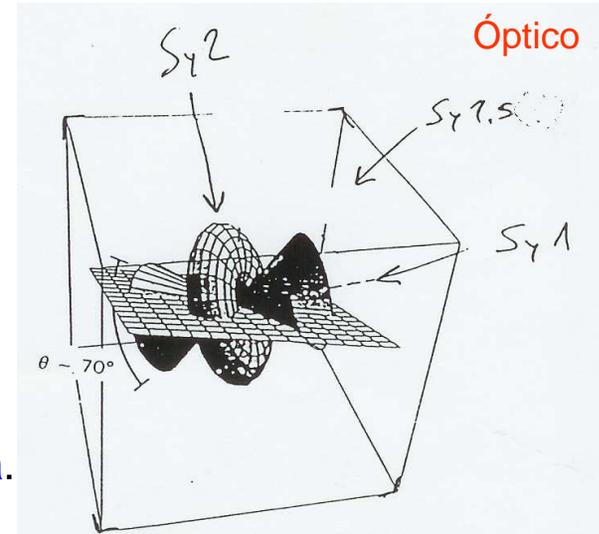
BN tem um momento angular muito grande.



eléctrica.

Unificação de AGN: orientação geométrica do mesmo modelo standard.

O toro molecular é o elemento fundamental para a teoria da unificação de AGN. Aliado a uma abertura típica do cone de emissão de radiação de 70° , explica as abundâncias e propriedades dos vários tipos de AGN.



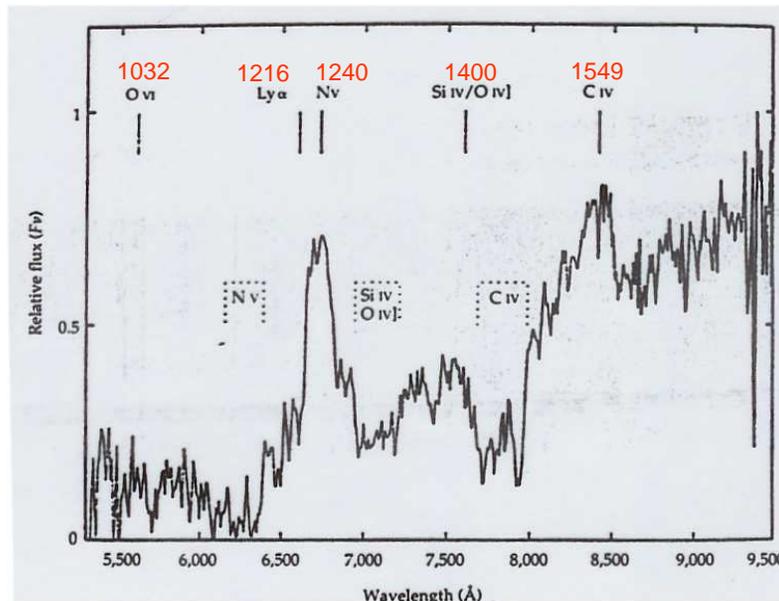
5.4 Distâncias e a constante de Hubble

Em Astronomia Extragaláctica é muito difícil medir distâncias. Usa-se uma “**escada de distâncias**”, da nossa vizinhança solar até aos confins do Universo (com erros).

(Slipher &) Hubble, em 1914-29, descobriram a expansão do Universo – quanto mais longe uma galáxia se encontra de nós mais depressa “foge” ($v_{\text{rec}} = H_0 D$).

Em espectros ópticos vêem-se desvios-para-o-vermelho (**redshift** z ; $z \ll 1$; D euclidiana):

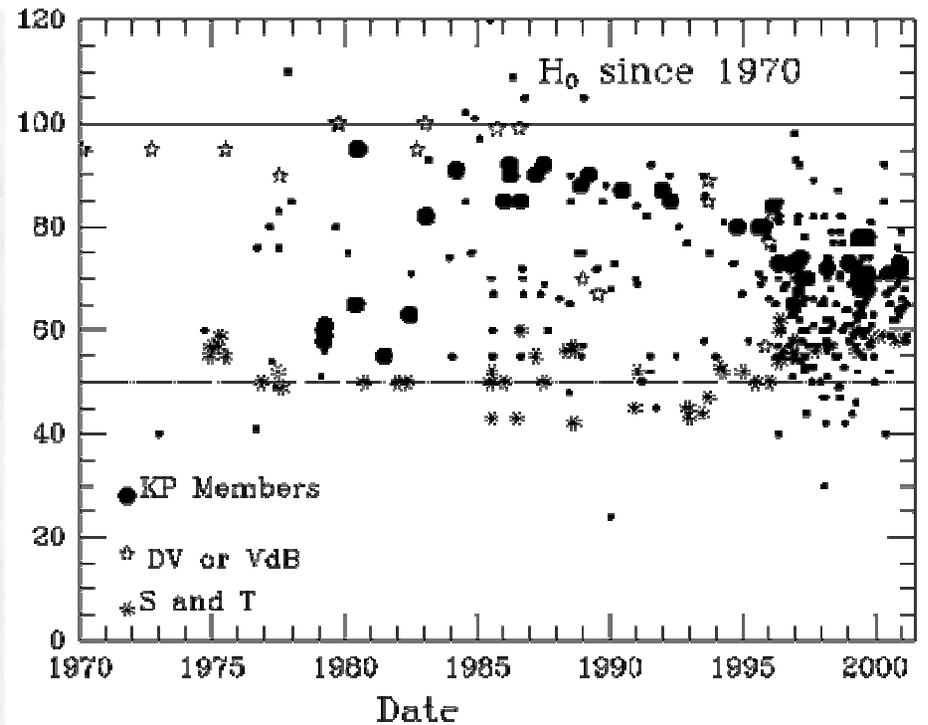
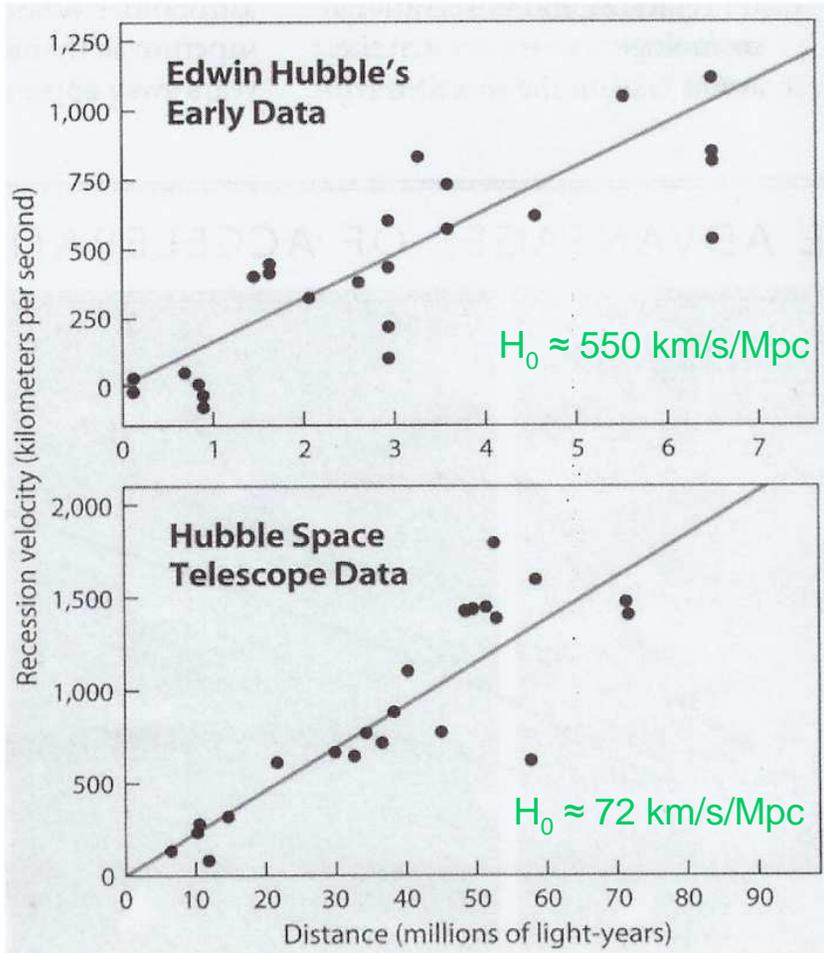
$$z = \Delta\lambda/\lambda_0 = v_{\text{rec}}/c = H_0 D/c$$



*Espectro óptico de um quasar. A gama de comprimentos de onda **observados** é dada em baixo. A identificação de cinco riscas é dada em cima, junto com os seus λ_0 (laboratório). Calcula-se então, para cada uma, o valor de $z = \Delta\lambda/\lambda_0$. Faz-se a média e obtém-se $z \approx 4.4$.*

O redshift z é uma forma não ambígua de medir distâncias no Universo.

A constante de Hubble H_0 tem sido “variável”.

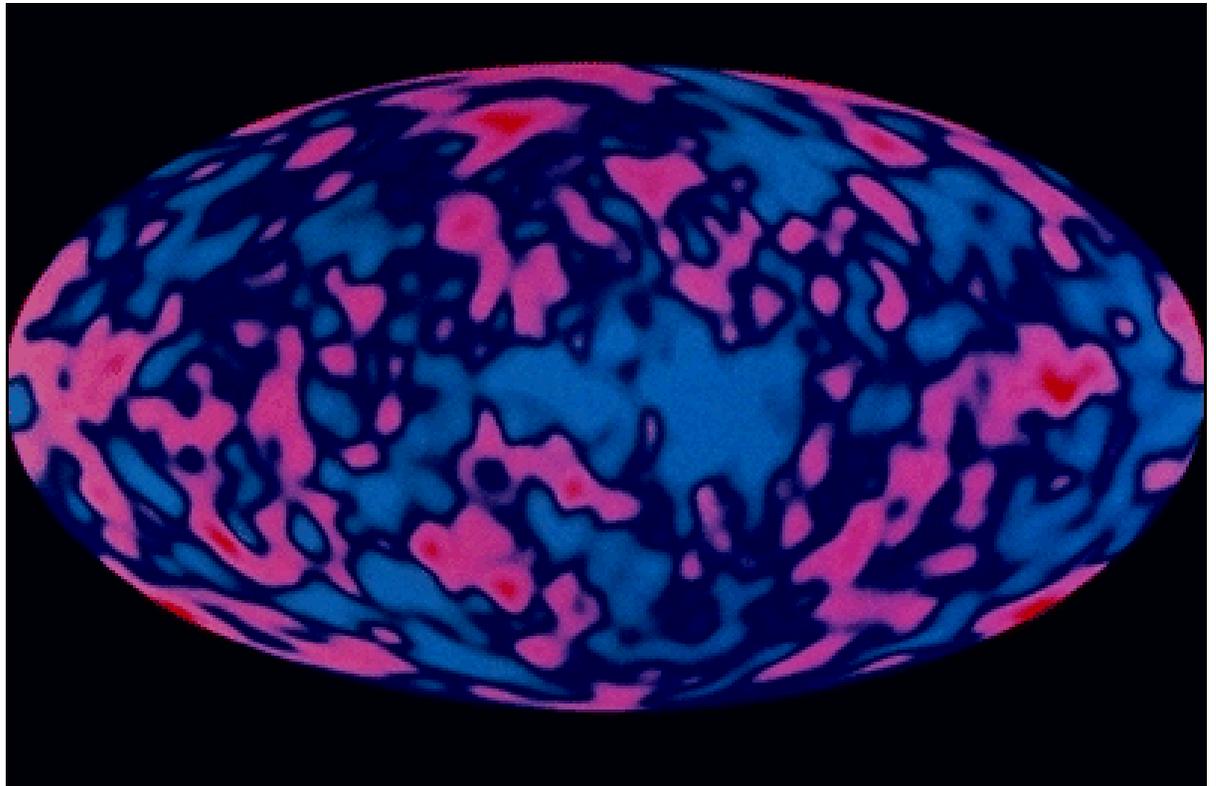


$H_0 \approx 67-71 \text{ km/s/Mpc}$

5.5 Evolução

O universo “visível” surge apenas ~400 000 anos depois ($z=1100$) do Big Bang: ruído cósmico de fundo (CMB).

O CMB é muito homogéneo (até $1:10^4$ –
– flutuações térmicas).



Evolução (galáxias normais):

$z \sim 1100$, $t_U \sim 400\,000$ anos – Estruturas primordiais (nuvens de gás)

$z \sim 25$, $t_U \sim 120 \times 10^6$ anos – Proto-galáxias (proto-E: formação estelar usa **todo** o gás)
Pop.III? (proto-S: colapso do gás num disco)

$z \sim 15$, $t_U \sim 260 \times 10^6$ anos – Galáxias; formação estelar em Ss (e continua hoje – $z=0$)

$z \sim 11.5$, $t_U \sim 400 \times 10^6$ anos – Reionização do Universo pelas estrelas

$z = 6.96$ – 1ª Galáxia conhecida

$z \sim 1-5$, $t_U \sim 1-5 \times 10^9$ anos – Tamanho das galáxias aumenta (agregação);
(duas vezes mais formação estelar: pico a $z \sim 0.5$)

$z \sim 0-1$, $t_U \sim 5-14 \times 10^9$ anos – Classificação de Hubble funciona

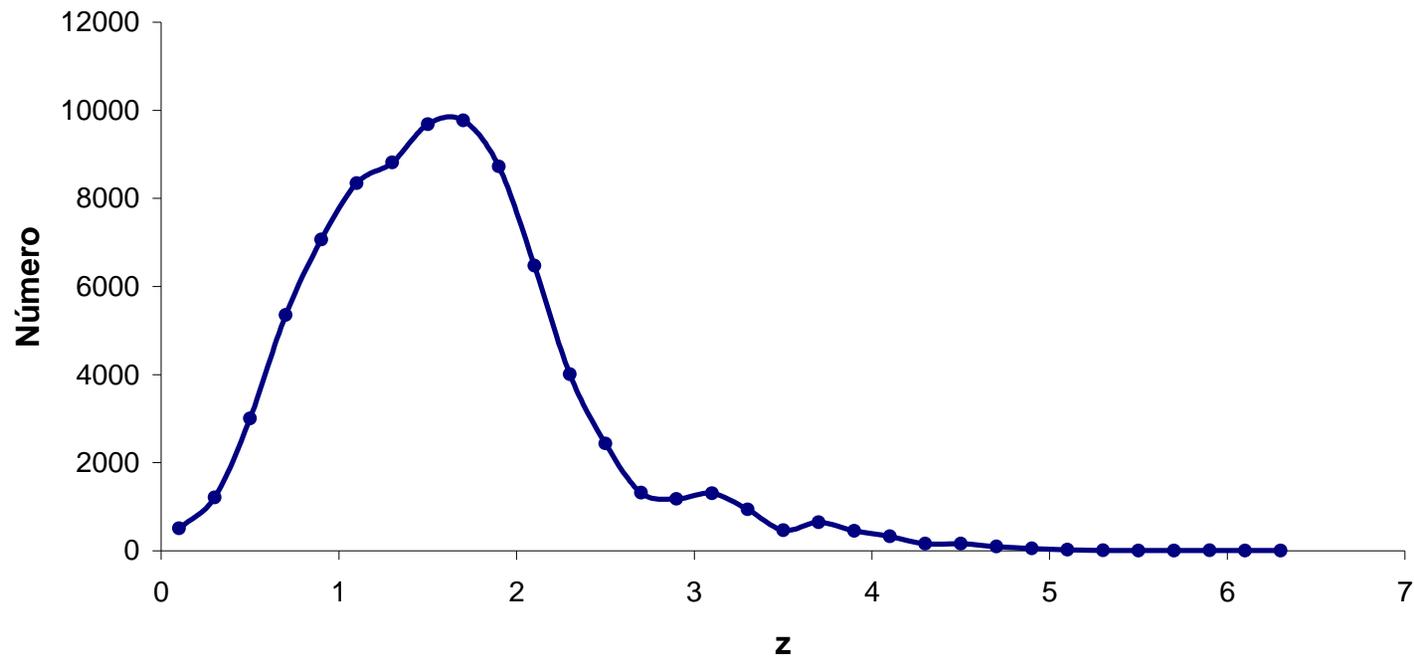
$z < 0.01$ – Formação estelar quase cessa (1/10 da do início)

Evolução (galáxias activas):

Todas as galáxias foram AGN 10% do tempo (e.g. BNs adormecidos).

Quasares são a sonda para todos os AGNs.

Distribuição para 82554 QSOs (Véron12th - 2006)



$z \sim 10$, $t_U \sim 500 \times 10^6$ anos – Colisões de galáxias: formação de BNs ($10^{6-9} M_{\odot}$)

$z = 6.43$ – 1^o Quasar conhecido

$z \sim 5$, $t_U \sim 1 \times 10^9$ anos – AGNs “acendem-se” em muitas galáxias

$z \sim 1.5$, $t_U \sim 4 \times 10^9$ anos – Pico de actividade (quase todas as galáxias activas)

$z \sim 1$, $t_U \sim 5 \times 10^9$ anos – AGNs “apagam-se” em quase todas as galáxias activas

$z \sim 0$, $t_U \sim 14 \times 10^9$ anos – Galáxias normais com BNs adormecidos no centro

6 – COSMOLOGIA

Modelo standard (Big Bang):

Explosão

Universo em expansão desde então (balão 4D)
Origem das leis da Física e *quatro* forças

Inflação

$t_U \sim 10^{-35} - 10^{-32} \text{ s}$ $T_U \sim 10^{27} \text{ K}$ expansão (cresce 10^{50} vezes) – *inflação*

Nucleossíntese

$t_U \sim 14 \text{ s}$ $T_U \sim 3 \times 10^9 \text{ K}$ $p+n$ (começa a formação de nucleões)

$t_U \sim 100 \text{ s}$

forma-se ${}^2\text{H}_1$ ($\equiv \text{D}$)

$t_U \sim 3 \text{ min}$

$T_U \sim 10^9 \text{ K}$

$\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^3\text{He}_2 + \text{n}$

$\text{D} + {}^3\text{He}_2 \rightarrow {}^4\text{He}_2 + \text{n} + \text{e}^+$

${}^3\text{H}_1$, Li, Be; Universo: $\sim 75\%$ H e 25% He

Recombinação

$t_U \sim 400 \text{ mil anos}$ $T_U \sim 3000 \text{ K}$

matéria dissocia-se da radiação;
Universo deixa de ser opaco (CMB)

($z \sim 1100$)

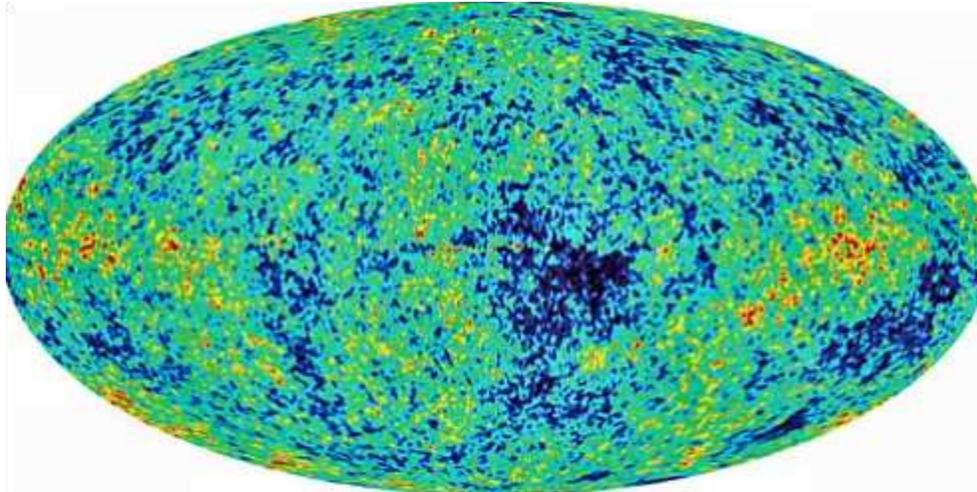
$T/z \sim 3000 \text{ K} / 1100 \sim 2.7 \text{ K}$

MATÉRIA RADIÇÃO

WMAP (em 2003) veio trazer mais resolução aos mapas do CMB.

Deu-nos a idade mais precisa para o Universo desde sempre:

13.7×10^9 anos ($\pm 1\%$)



O CMB visto pelo WMAP

O **parâmetro de densidade do Universo**, Ω_0 , é dado em função de uma **densidade de massa crítica** (ρ_c). Na prática, esta é a densidade limite (onde $\Omega_0=1$) para que o Universo recolapse no futuro ($\Omega_0>1$) ou expanda para sempre ($\Omega_0<1$).

A massa bem somada de superenxames de galáxias dá:

$$\Omega_0 \approx 0.3$$

A Teoria da Inflação exige um Universo de geometria plana (a **constante cosmológica** é Λ) :

$$\Omega_0 + \Lambda = 1$$

Extraordinariamente, há não muitos anos, amostras de supernovas distantes e o WMAP revelaram que temos:

$$\Lambda \approx 0.7$$

O Universo, afinal, não só está em expansão como esta é **acelerada**.

Um alívio para todos!...

... OU TALVEZ NÃO!

Agora temos:

100% do Universo:

- ~ 70% Energia Escura
- ~ 27% Matéria Escura
- ~ 3% Matéria “conhecida”

QUANTO MAIS O CONHECEMOS...

... MENOS DELE SABEMOS!