

# Introdução à Astronomia

**Acção de formação de 6 horas (teóricas) + 2 horas**

Prof. Pedro Augusto

GRUPO DE ASTRONOMIA

UNIVERSIDADE DA MADEIRA



- Apresentação
- Programa
- Bibliografia

## O FORMADOR

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

## O GRUPO DE ASTRONOMIA ([www.uma.pt/astro](http://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”

## OS FORMANDOS

## PROGRAMA

### 1 – Introdução

- 1.1 Sistemas de coordenadas
- 1.2 Telescópios e detectores

### 2 – Sistemas planetários

- 2.1 O Sistema Solar
- 2.2 Os exoplanetas

### 3 – Estrelas

- 3.1 O Sol
- 3.2 Espectros, luminosidades e massas
- 3.3 Origem, evolução e morte
- 3.4 As reacções nucleares

### 4 – Enxames de estrelas

- 4.1 Enxames abertos
- 4.2 Enxames globulares

### 5 – A Nossa Galáxia

- 5.1 O meio interestelar
- 5.2 Estrutura geral

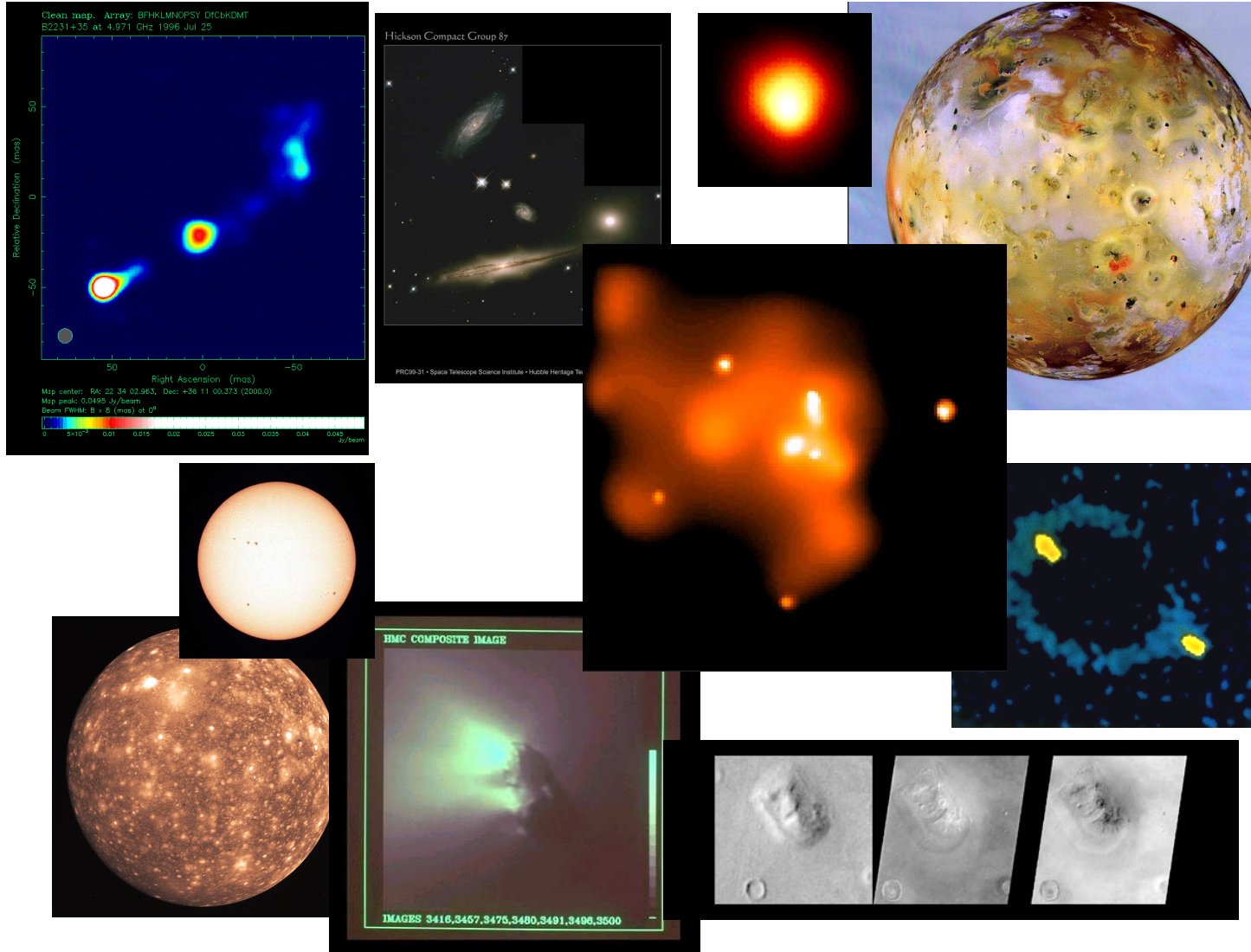
### 6 – Astronomia Extragaláctica

- 6.1 Galáxias: classificação e estrutura
- 6.2 Associações de galáxias
- 6.3 Galáxias activas
- 6.4 Distâncias e constante de Hubble
- 6.5 Evolução

### 7 – 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



## Mas afinal o que é a Astronomia?

- A mais antiga das Ciências (c.f. Astrologia)
- Uma Ciência multidisciplinar por excelência:
  - pequena percentagem de “linguagem própria”
  - 90% Astrofísica
  - e ainda

Astronomia do Sistema Solar e Planetária	Astrogeologia Astrobiologia
Astronomia Estelar e Galáctica	Astroquímica
Astronomia Instrumental	Engenharia
Astronomia de Posição	Referenciais/Geodesia
Astroarqueologia	História



## Unidades

$$1 \text{ pc} \approx 3 \text{ anos-luz} \approx 3 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ U.A.} \approx 1.5 \times 10^8 \text{ m (unidade astronómica)}$$

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s (velocidade da luz)}$$

$$1 M_{\odot} \approx 2 \times 10^{30} \text{ Kg (massa solar)}$$

$$1 R_{\odot} \approx 7 \times 10^8 \text{ m (raio solar)}$$

## Sistema de grandezas

$m \equiv$  grandeza aparente

(gregos) estrela  $m=1 \rightarrow$  100 vezes **mais** brilhante que estrela  $m=6$   
(mais distante? mais **luminosa**?)

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

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

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

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

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

$$m (\text{Sol}) = -27$$

$$m (\text{Lua}) = -13$$

$$m (\text{Vénus}) > -4$$

$$m (\text{Sirius}) = -1.5$$

$$m_{\text{lim}} (\text{olho}) = +6.5$$

$$m_{\text{lim}} (\text{HST}) = +31$$

$$M (\text{Sol}) = +4.7$$

$$M (\text{Lua}) = +32$$

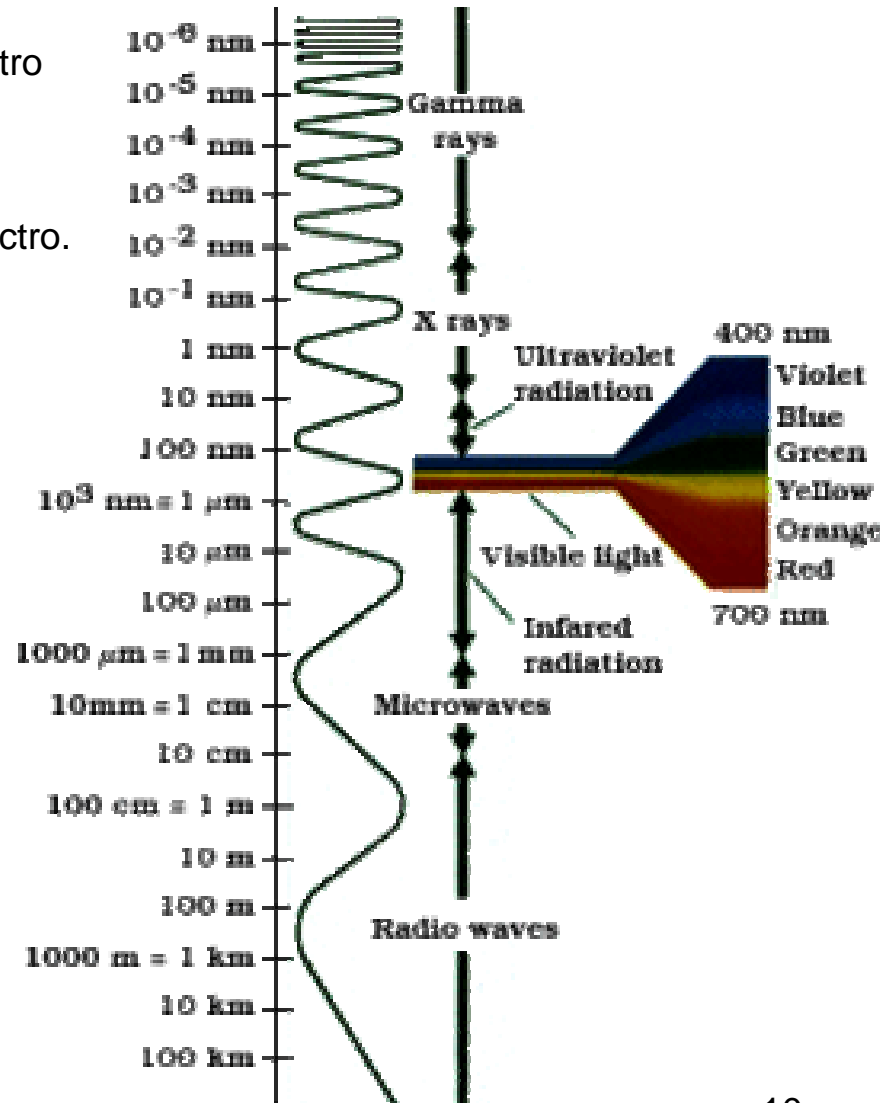
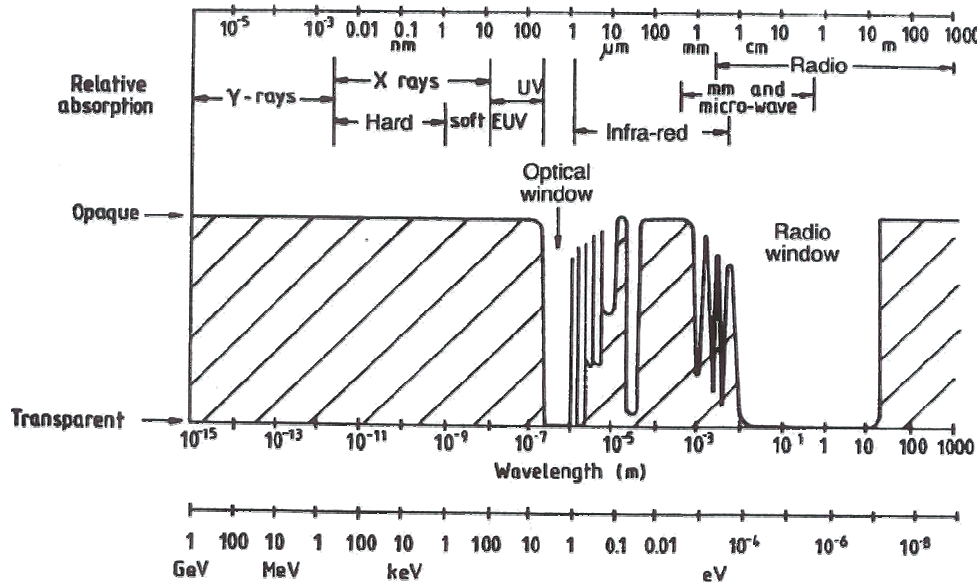
$$M (\text{Vénus}) > +30$$

$$M (\text{Sirius}) = +1.4$$

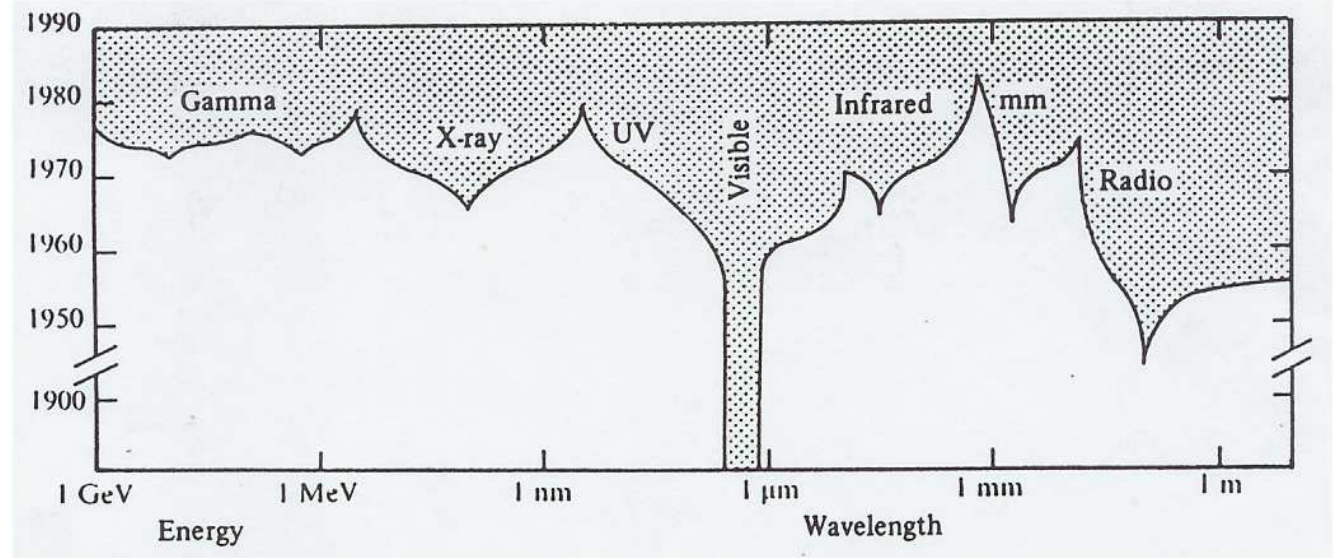
## O espectro electromagnético

A luz visível é apenas uma pequena porção do espectro electromagnético. O estudo de qualquer objecto astronómico não fica completo sem se conhecer informação sobre o mesmo em outras partes do espectro.

(In)felizmente, contudo, a atmosfera da Terra bloqueia a maioria da radiação. Só o óptico e rádio chegam com facilidade, havendo também algumas “janelas” no IV e micro-ondas...



...Daí só há relativamente poucos anos termos conquistado todo o espectro para a Astronomia.

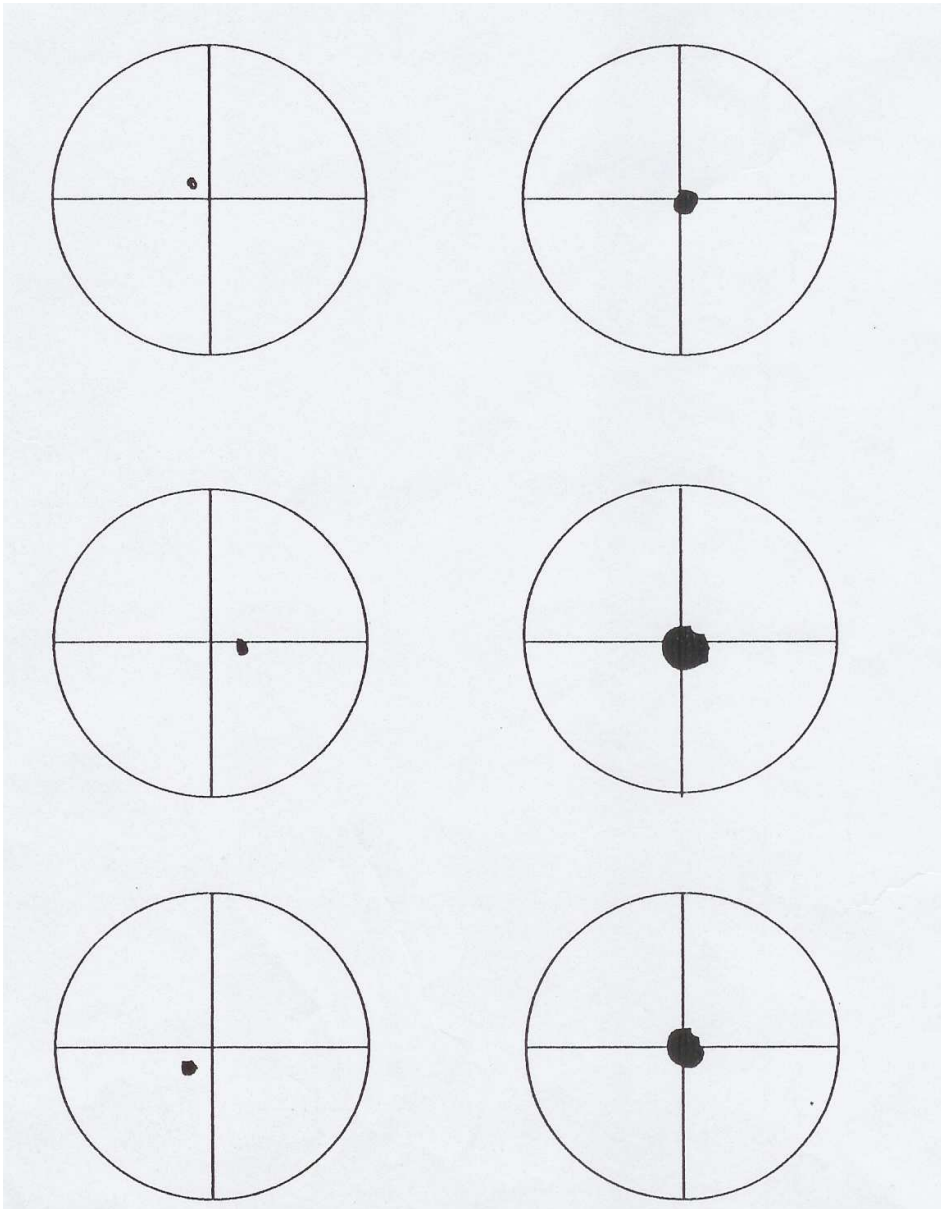


Por definição, para um telescópio de diâmetro  $D$  e comprimento de onda  $\lambda$ :

$$\text{Resolução} \propto D / \lambda.$$

A atmosfera faz bem pior à Astronomia do que simplesmente bloquear bandas: gera efeitos perturbadores das observações. No caso do óptico, tais efeitos produzem o disco de “seeing” efectivamente limitando a resolução das observações a 0.5-2”, independentemente do diâmetro do telescópio utilizado.

Na página seguinte dão-se exemplos desses nefastos efeitos.



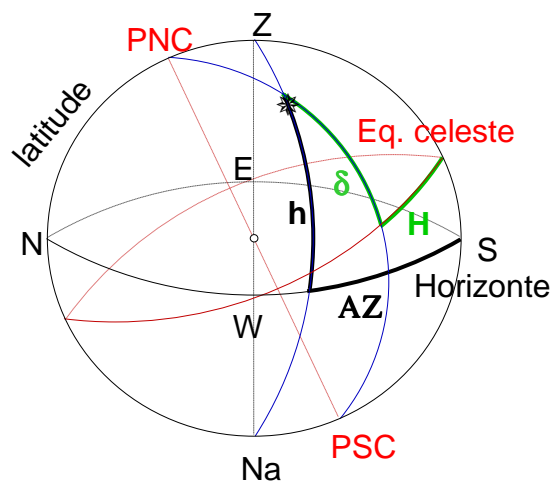
Os típicos efeitos do “seeing” num telescópio pequeno (coluna da esquerda) e num grande. Note-se que não só a *forma* da estrela observada é constantemente alterada pelo seeing como também a sua *posição*. Quando o telescópio é grande a distorção mantém-se mas a posição não se altera tanto.

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Sistemas de coordenadas

Devido ao movimento de rotação da Terra, todos os astros do Universo têm movimentos aparentes circulares em torno do prolongamento do eixo terrestre (que passa nos pólos).

Definimos, então, a **esfera celeste**. Na intersecção do eixo de rotação da Terra com a esfera celeste temos o **pólo sul celeste** (PSC) e o **pólo norte celeste** (PNC); o **equador celeste** é o conjunto de todos os pontos à mesma distância dos PNC e PSC. Todos os astros se deslocam paralelamente ao equador celeste (coordenadas **ângulo horário(H)/declinação( $\delta$ )** no **Sistema Equatorial Celeste**).



O **sistema de coordenadas horizontal local** define um **horizonte**, o **zénite** (ponto mais alto no céu) e o **nadir** (“pólos”). As coordenadas são o **azimute (AZ)** e a **altura (h)**.

É a **latitude** do lugar que relaciona os dois sistemas.

## 1.2 Telescópios e detectores

Longe vai o tempo em que o astrónomo “clássico” usava o velhinho modelo de telescópio **refractor** (no caso mais simples com apenas duas lentes). Hoje em dia o telescópio **reflector** é o utilizado quase 100% das vezes. Principais vantagens: o peso e a inexistência de aberrações.



*O telescópio de Yerkes, o maior refractor do mundo (1m de diâmetro).*

*Um típico telescópio reflector profissional (Cerro Tololo 4m).*



*O VLT, considerado o melhor (conjunto) telescópio do mundo: Quatro telescópios reflectores de 8m de diâmetro + vários de 2m.*

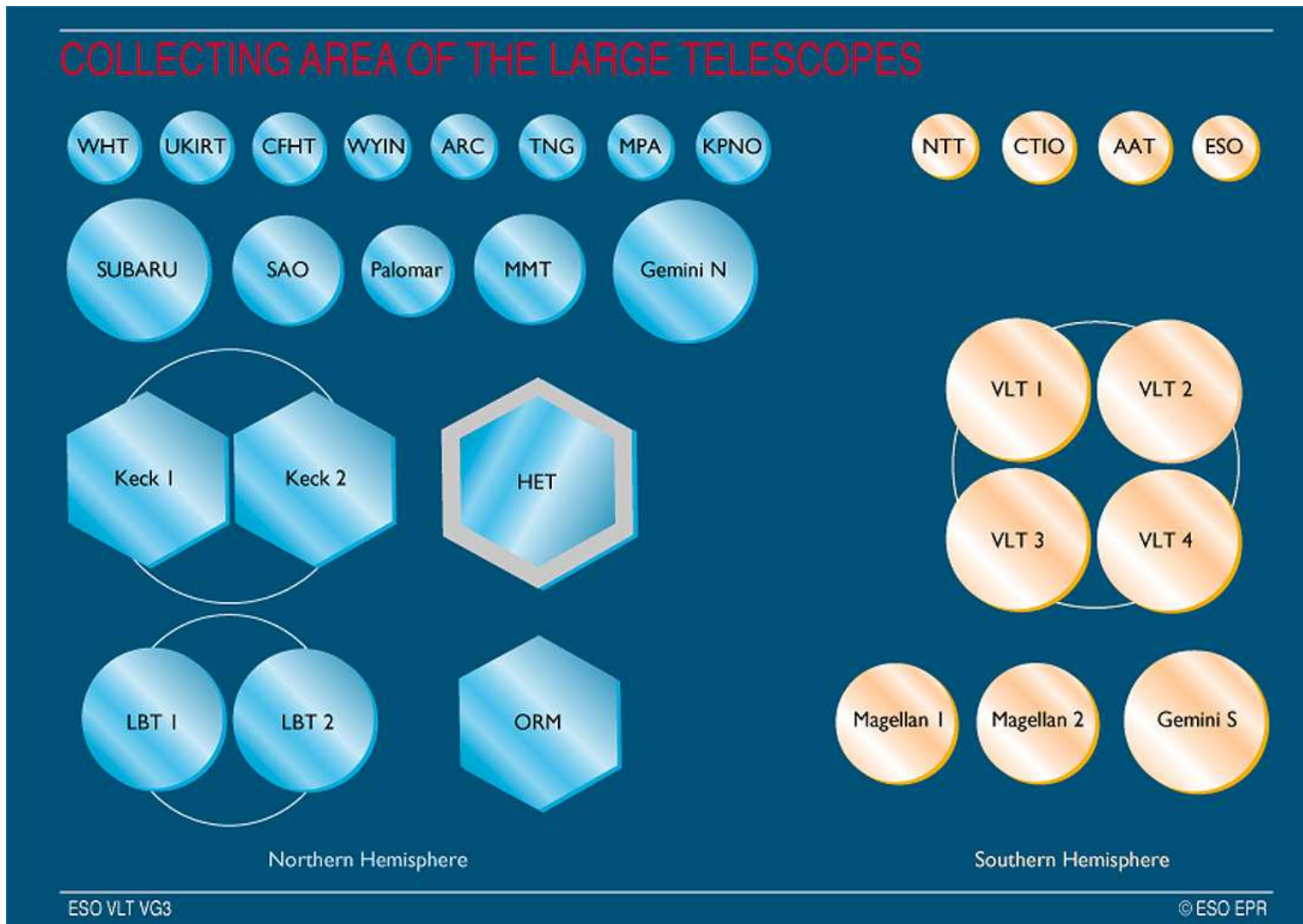


VLT at Paranal

*O Keck, o melhor telescópio do mundo? Dois telescópios reflectores de 10m de diâmetro.*



*O diâmetro dos espelhos dos maiores telescópios reflectores do mundo. Da antiga “classe dos 4m” já estamos na “classe dos 8-10m”.*



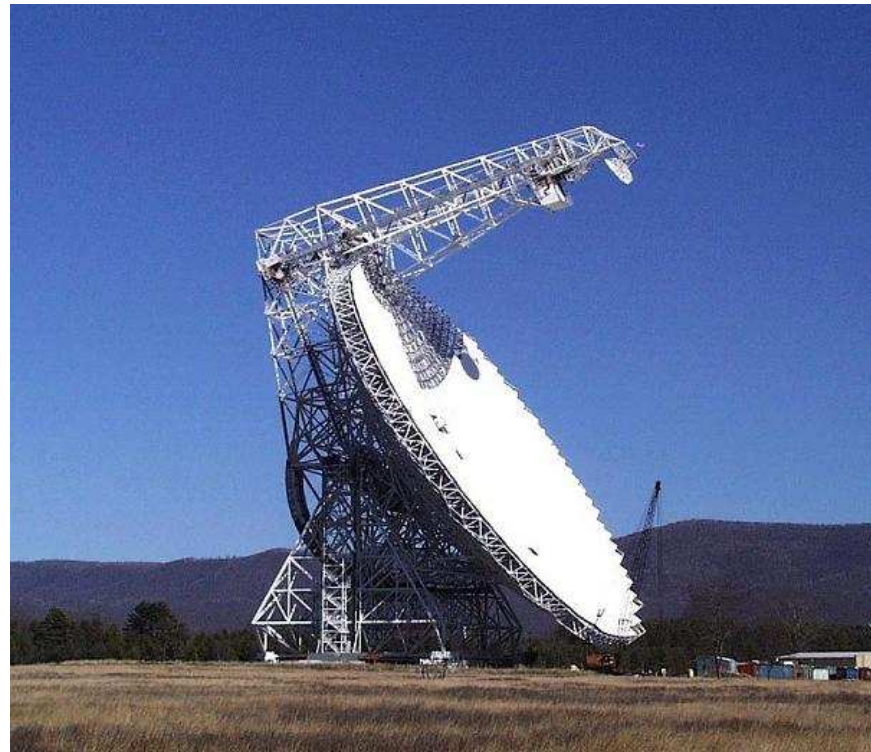


Desde há décadas que a Rádio Astronomia entrou em acção, com seus **Rádio Telescópios**, muitos bem diferentes de um telescópio óptico.

*O maior do mundo (300m) - Arecibo*



*O maior do mundo amovível (110x100m) –  
Green Bank (Virginia)*



*Um clássico (76m, Jodrell Bank)*



*Uma antena VLBI (32m, Cambridge)*



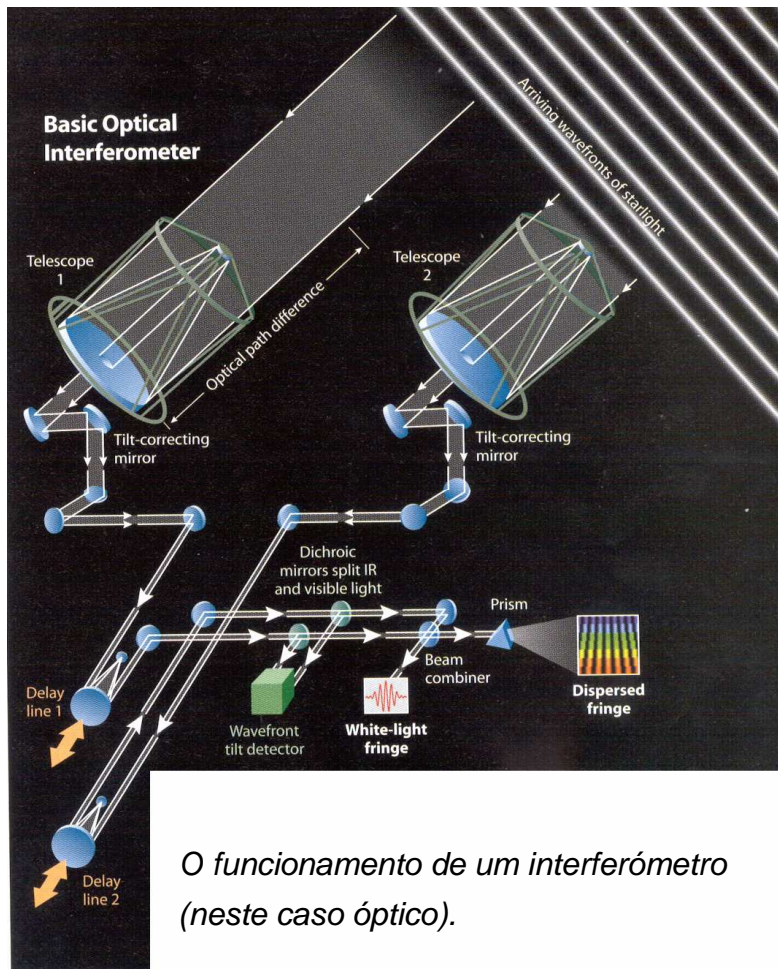
*Rede de dipolos BSA (Puschino, Rússia). 70000m<sup>2</sup>.*



*Rede de dipolos em forma parabólica (MOST, Austrália). 18000m<sup>2</sup>.*



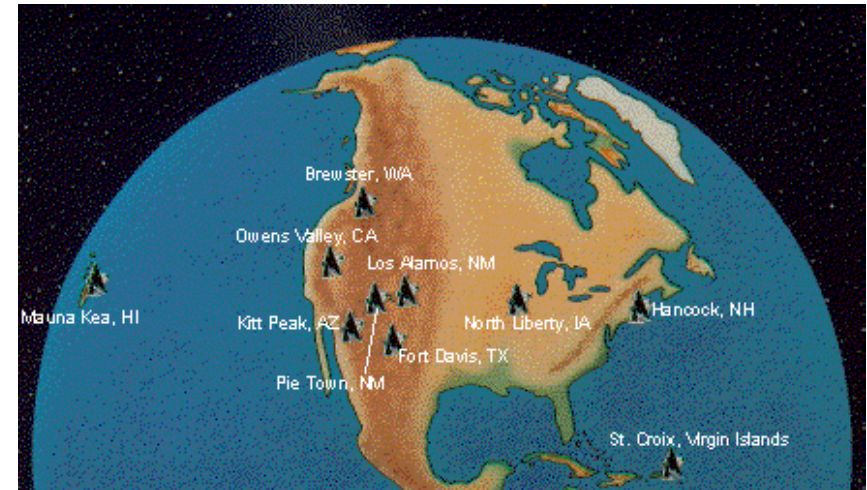
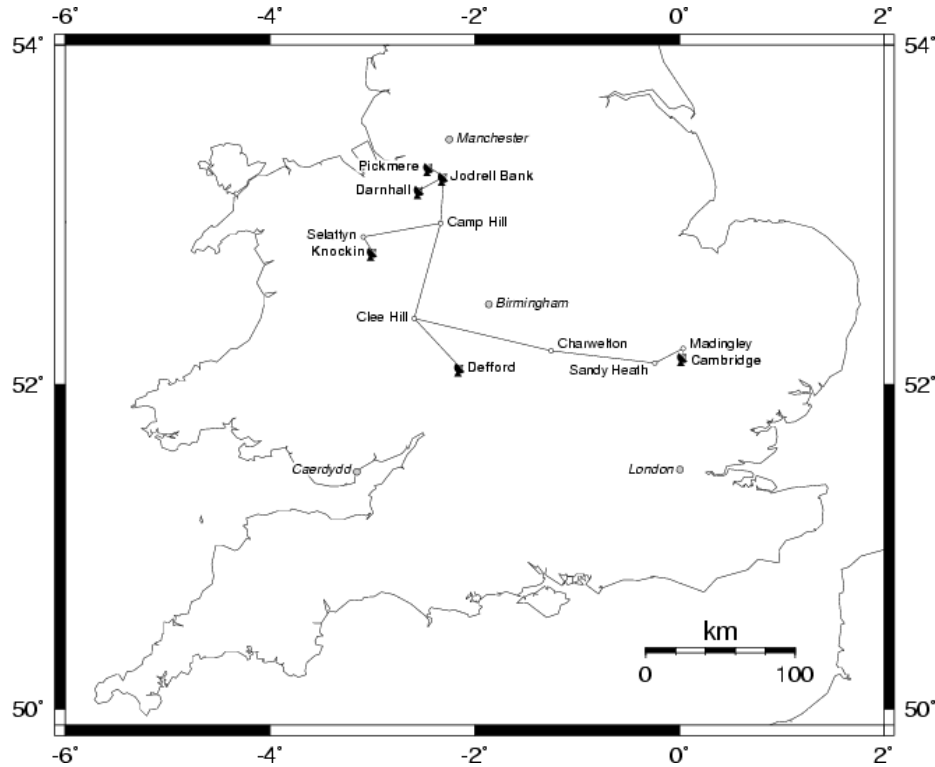
Mas a principal revolução que a Rádio Astronomia trouxe, só em 2001 concretizada no óptico (VLT e Keck), foi a técnica da **interferometria**. A ideia é colocar vários rádio telescópios a observar o mesmo objecto (ao mesmo tempo) e combinar o sinal. Na prática obtém-se o equivalente a um rádio telescópio com o diâmetro da **distância máxima** entre antenas (em termos de resolução).



O VLA, o interferómetro mais sensível (e famoso) do mundo. Tem flexibilidade o suficiente para ter quatro comprimentos máximos: 1, 3.6, 10 e 36 km.

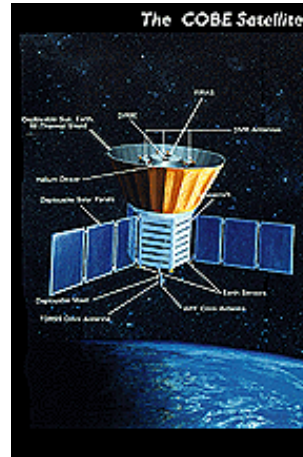
O VLBI junta o EVN e o VLBA para chegar ao diâmetro da Terra.

O MERLIN (Inglaterra) tem um comprimento máximo de 230 km.

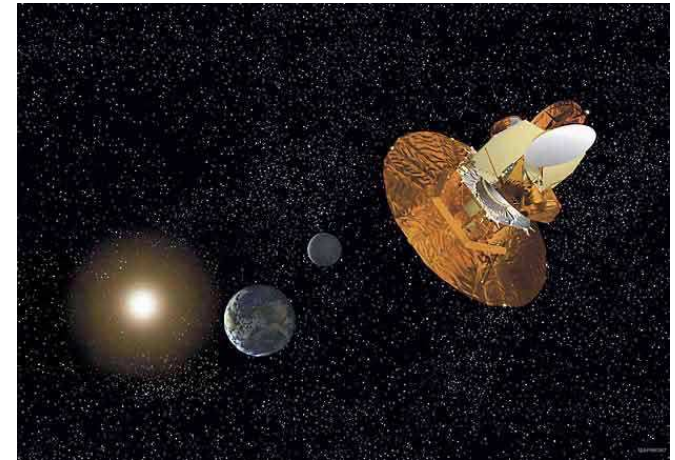


Bem mais recente (20 anos) foi o início sério da exploração do resto do espectro electromagnético: Astronomia de raios X, de raios  $\gamma$ , IV, UV, microondas. O recurso aos satélites é essencial.

Microondas:

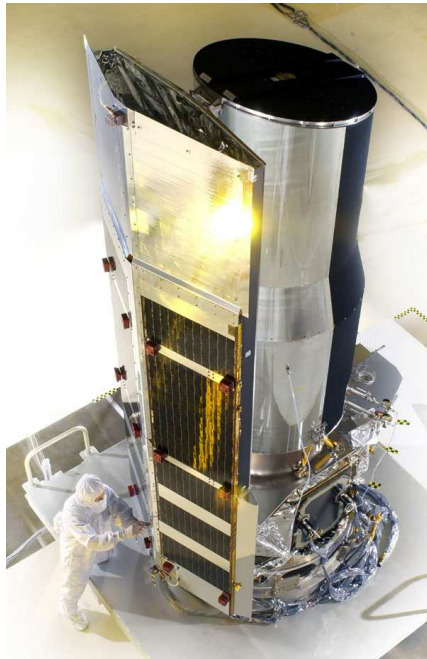


COBE



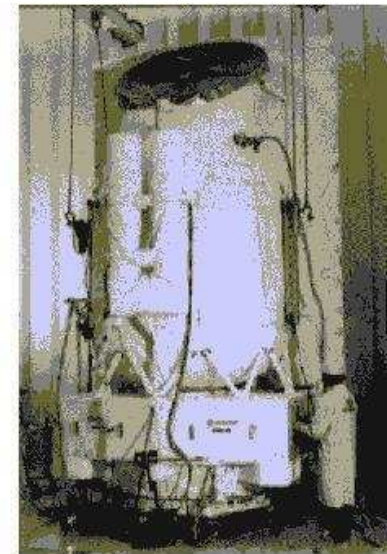
WMAP

Spitzer



IV:

ISO



IRAS



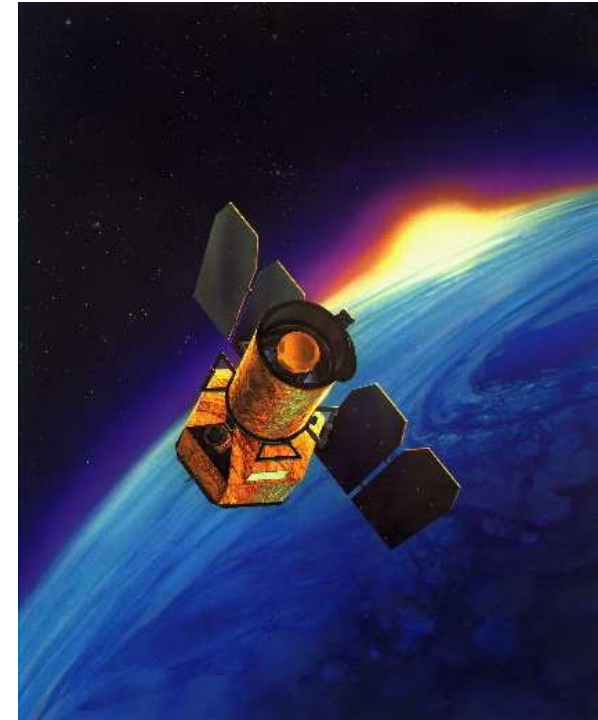
UV:



IUE



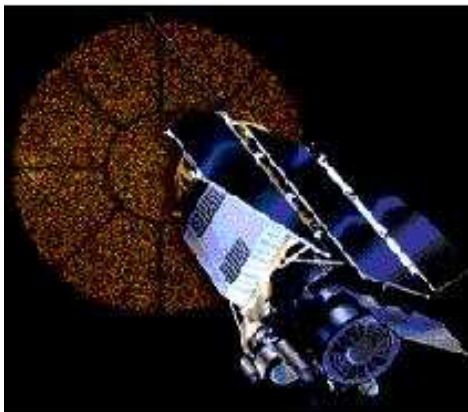
FUSE



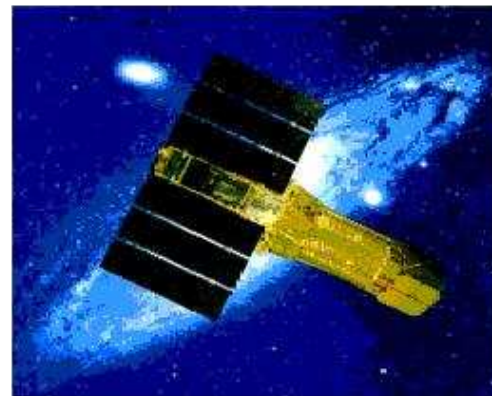
GALEX

Raios X:

ROSAT



ASCA



**Chandra**

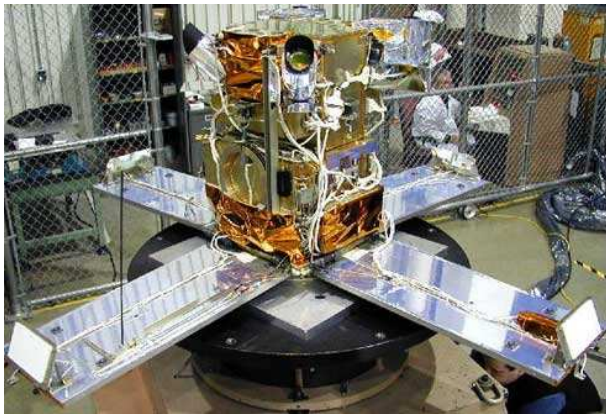


**XMM-Newton**

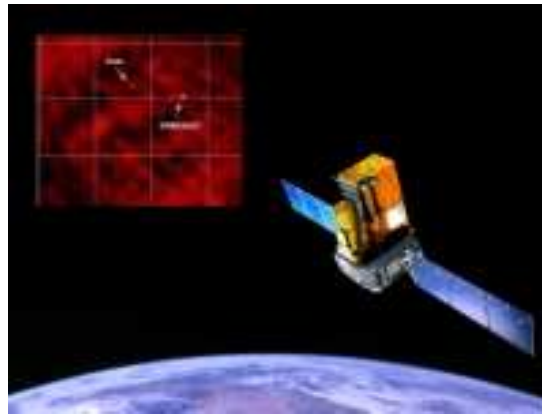


**Beppo-SAX**

Raios  $\gamma$ :



**HETE-2**



**Integral**



**CGRO**



## 2 – SISTEMAS PLANETÁRIOS

### 2.1 O Sistema Solar

É claro que temos de começar esta Secção pela(s) nova(s) definição(ões) de planeta. Comentários:

*(b) Equilíbrio hidrostático – forma redonda*

Dependendo da **densidade**, podemos dar uma ideia dos tamanhos típicos que servem de “fronteira” entre as definições de planeta/planeta anão e a de **pequeno corpo** do Sistema Solar:

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

**Nota:** Quando se conhecerem melhor todos os maiores objectos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper é provável que se incluam como planetas anões muitos deles pelo segundo tamanho.



### RESOLUTION 5

#### Definition of a Planet in the Solar System

Contemporary observations are changing our understanding of planetary systems, and it is important that our nomenclature for objects reflect our current understanding. This applies, in particular, to the designation "planets". The word "planet" originally described "wanderers" that were known only as moving lights in the sky. Recent discoveries lead us to create a new definition, which we can make using currently available scientific information.

The IAU therefore resolves that planets and other bodies, except satellites, in our Solar System be defined into three distinct categories in the following way:

- (1) A planet<sup>1</sup> is a celestial body that
  - (a) is in orbit around the Sun,
  - (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape, and
  - (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.
- (2) A "dwarf planet" is a celestial body that
  - (a) is in orbit around the Sun,
  - (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape<sup>2</sup>,
  - (c) has not cleared the neighbourhood around its orbit, and
  - (d) is not a satellite.
- (3) All other objects<sup>3</sup>, except satellites, orbiting the Sun shall be referred to collectively as "Small Solar System Bodies".

---

1. The eight planets are: Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune.  
2. An IAU process will be established to assign borderline objects into either dwarf planet and other categories.  
3. These currently include most of the Solar System asteroids, most Trans-Neptunian Objects (TNOs), comets, and other small bodies.

### (c) Limpeza da “vizinhança” da órbita

Este é o **único critério** que distingue entre planetas e planetas anões. Assim, é importante quantificá-lo de uma forma mais científica (sempre **operacional** e eventualmente sujeito a alterações no futuro). Usa-se, então, 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) –  $m$ . Temos que um corpo é um **planeta** sempre que

$$\mu = M / m \geq 100$$

E é um **planeta anão** quando

$$\mu < 1$$

Estas noções ficam bem explícitas no comunicado de duas páginas da Sociedade Portuguesa de Astronomia. Baseiam-se, essencialmente, no artigo recentemente publicado:

Soter (2006), *The Astronomical Journal*, vol. 132, p. 2513-2519.

## RECOMENDAÇÃO

A Direcção da Sociedade Portuguesa de Astronomia recomenda, de acordo com a resolução recentemente aprovada na XXVI Assembleia Geral da União Internacional de Astronomia, aos docentes, autores e editores de manuais escolares a adopção das seguintes definições relativas ao Sistema solar:

1. O Sistema Solar é constituído por planetas (Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno), planetas anões (Ceres, Plutão e Éris, para já), satélites e pequenos corpos celestes.



Figura 1: Imagem do Sistema Solar divulgada pela IAU.

2. Definição de planeta: corpo que orbita em torno do Sol com gravidade suficiente para ter uma geometria quase esférica e capaz de "limpar" a sua órbita de outros objectos.
3. Definição de planeta anão: corpo que orbita em torno do Sol com gravidade suficiente para ter uma geometria quase esférica, mas incapaz de limpar a sua órbita de outros objectos e não é satélite.
4. Definição de pequenos corpos celestes: todos os objectos celestes que orbitam em torno do Sol e não são planetas, planetas anões ou satélites. Ex., cometas, asteróides, objectos trans-neptunianos e outros pequenos corpos.

Nota: A diferença entre planetas e planetas anões resulta, entre outros parâmetros, da razão entre a massa do corpo (planeta ou planeta anão) e a massa acumulada dos restantes objectos que compartilham a mesma região orbital (vizinhança). Esta razão de massas,  $\mu$ , varia entre 5.100 e 1.700.000 para os planetas (Tabela 1 e Figura 2). No caso dos planetas anões esta razão é inferior a 1. Um corpo é um planeta desde que  $\mu \geq 100$ . Fonte: Soter, S. 2006, "What is a Planet?", The Astronomical Journal.

Corpo	M ( $M_{\oplus}$ )	m ( $M_{\oplus}$ )	$\mu$
Mercúrio	0.055	$6.044 \times 10^{-7}$	$9.1 \times 10^4$
Vénus	0.815	$6.037 \times 10^{-7}$	$1.35 \times 10^6$
Terra	1.000	$5.88 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^6$
Marte	0.107	$2.098 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^3$
Ceres	0.00015	$4.545 \times 10^{-4}$	0.33
Júpiter	317.7	$5.083 \times 10^{-4}$	$6.25 \times 10^5$
Saturno	95.2	$5.01 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^5$
Urano	14.5	$5 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^4$
Neptuno	17.1	$7.125 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^4$
Plutão	0.0022	0.0286	0.077
Éris	0.005	0.05	0.1

Tabela 1: Coluna 2: Massa (M) dos planetas e planetas anões em unidades da massa da Terra ( $M_{\oplus}$ ). Coluna 3: Massa acumulada (m) dos restantes corpos que compartilham a vizinhança das suas órbitas em unidades de massa da Terra ( $M_{\oplus}$ ). Coluna 4: Razão ( $\mu$ ) entre M e m. (Fonte: Soter 2006)

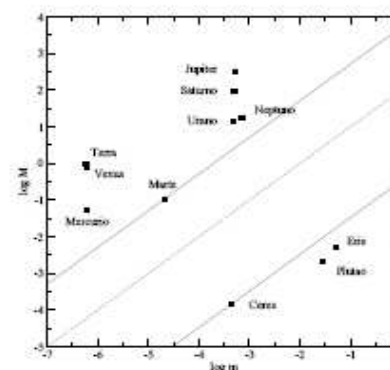
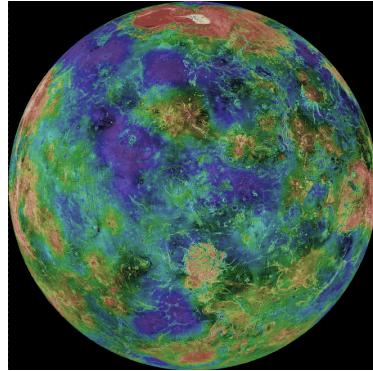


Figura 2: Gráfico, em escala logarítmica, das massas, M, dos planetas e planetas anões em função da massa acumulada, m, dos restantes corpos que compartilham a vizinhança das suas órbitas. A linha a tracejado representa  $\mu = 100$ . M e m são medidas em unidades de massa da Terra ( $M_{\oplus}$ ).

## Planetas rochosos



**Merúrio**



**Vénus**



**Terra**

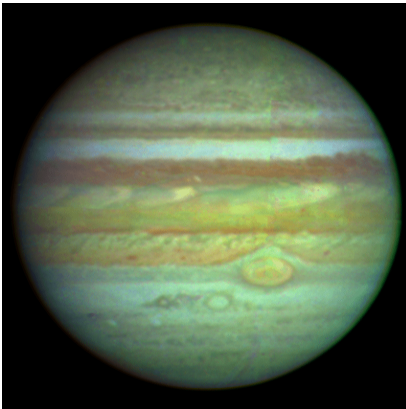
(1 satélite)



**Marte**

(2 satélites)

## Planetas gasosos



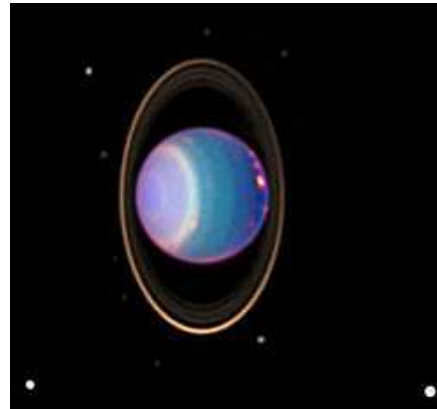
**Júpiter**

(>63 satélites)



**Saturno**

(>56 satélites)



**Urano**

(>27 satélites)



**Neptuno**

(>13 satélites)

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

[www.nineplanets.org](http://www.nineplanets.org)

[www.cfa.hawaii.edu/%7Esheppard/satellites](http://www.cfa.hawaii.edu/%7Esheppard/satellites)

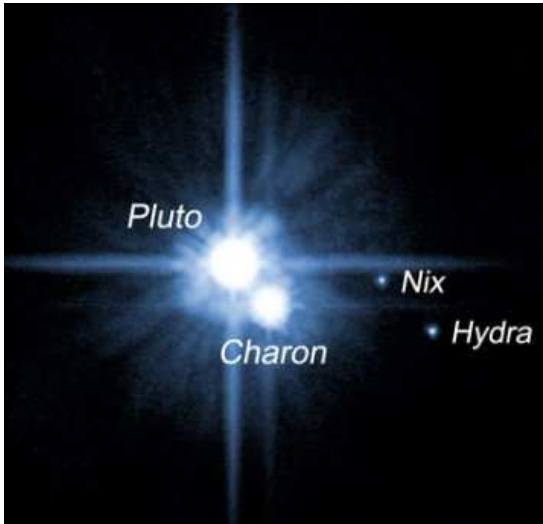
Segue-se um sumário dos satélites mais importantes dos planetas principais.

Planeta	Satélite	Raio médio da órbita (km)	Translação (dias)	Diâmetro (km)
Terra	Lua	$384 \times 10^3$	27.3	3476
Marte	Fobos	$9 \times 10^3$	0.3	28×22×18
	Deimos	$23 \times 10^3$	1.3	16×12×10
Júpiter	Io	$422 \times 10^3$	1.8	3652
	Europa	$671 \times 10^3$	3.6	3138
	Ganimede	$1070 \times 10^3$	7.2	5262
	Calisto	$1883 \times 10^3$	16.7	4860
Saturno	Titã	$1222 \times 10^3$	16.0	5150
Neptuno	Tritão	$355 \times 10^3$	5.9	3500

## Planetas anões

Para já são **três** os planetas anões: **Ceres**, **Plutão** e **Éris**.

No entanto, há vários candidatos pendentes no Cinturão de Edgeworth-Kuiper.



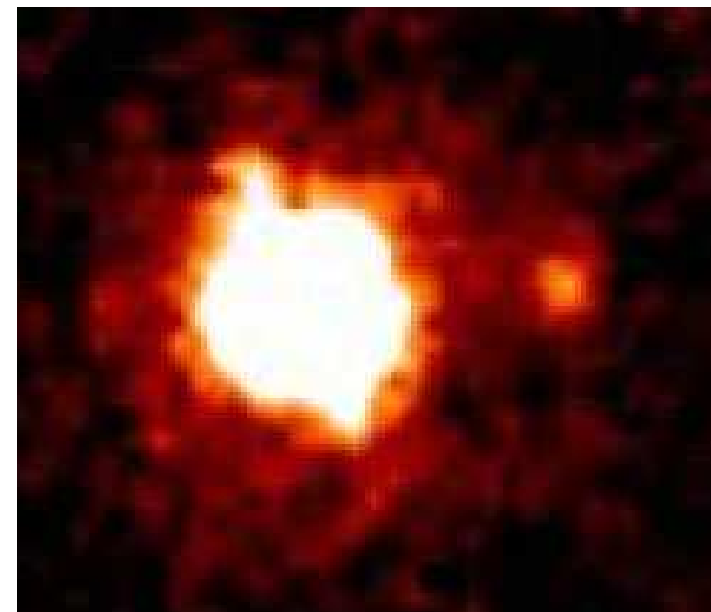
*Plutão, o seu  
companheiro (Charon) e  
ainda Nix e Hydra.*



*Ceres (975 × 909 km<sup>2</sup>), o “rei” do  
Cinturão de Asteróides (Principal).*

Foi a descoberta de Eris em 2003 que levou ao destronar de Plutão do seu já frágil estatuto de planeta (principal).

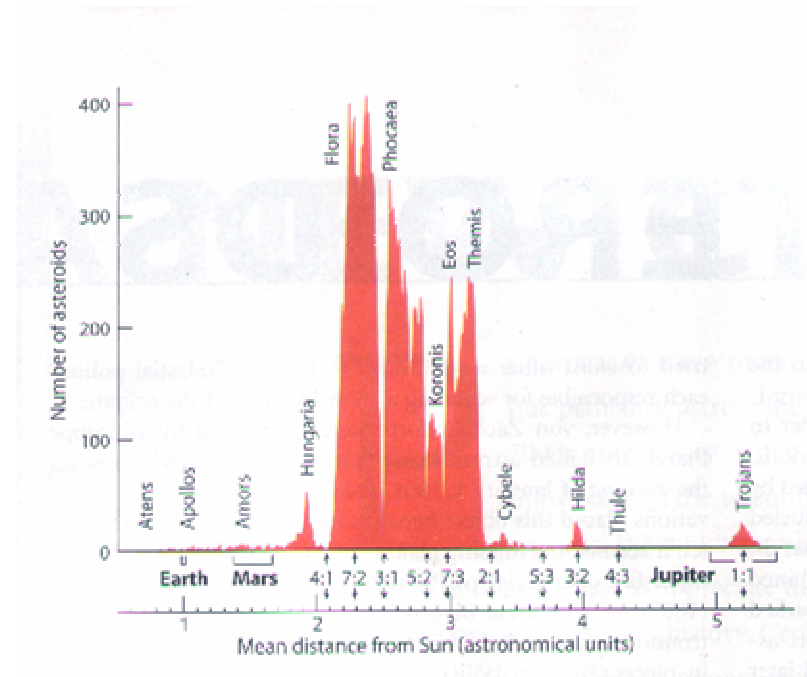
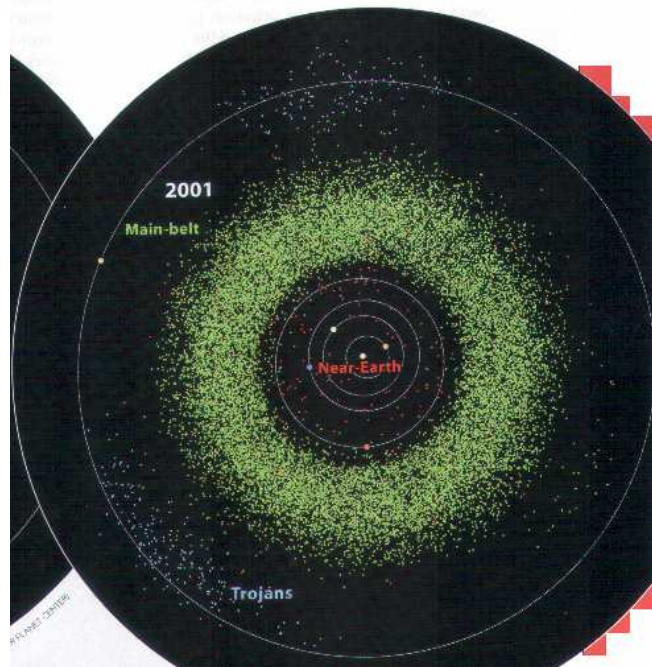
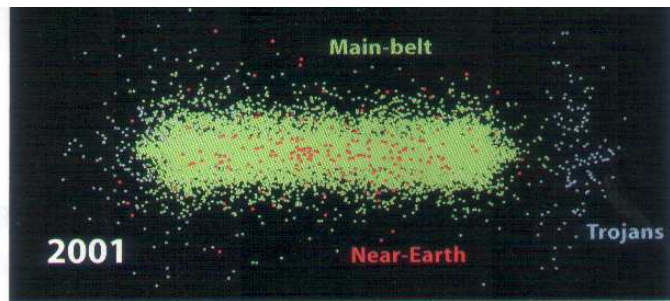
O tamanho de Éris é de  $2400 \pm 100$  km. Isto quer dizer que ainda não está fora de questão ser mais pequeno que Plutão (dentro dos erros), que tem 2306km de diâmetro.



*Eris e Dysnomia (300km de  
diâmetro, a 36000km).*

## Asteróides (Cinturão Principal)

Já com mais de 140 000 objectos catalogados, estima-se o número de asteróides no Cinturão Principal em 1-2 milhões (>1 km). Distribuem-se como um “doughnut”, entre as órbitas de Marte e Júpiter, agrupados por famílias entre órbitas instáveis ressonantes com a de Júpiter.



Os asteróides são “rochas” que circulam no Sistema Solar em órbitas estáveis em torno do Sol.



*Ida e Dactyl (satélite).*



*Matilde.*



*Itokawa (“monte de detritos”).*



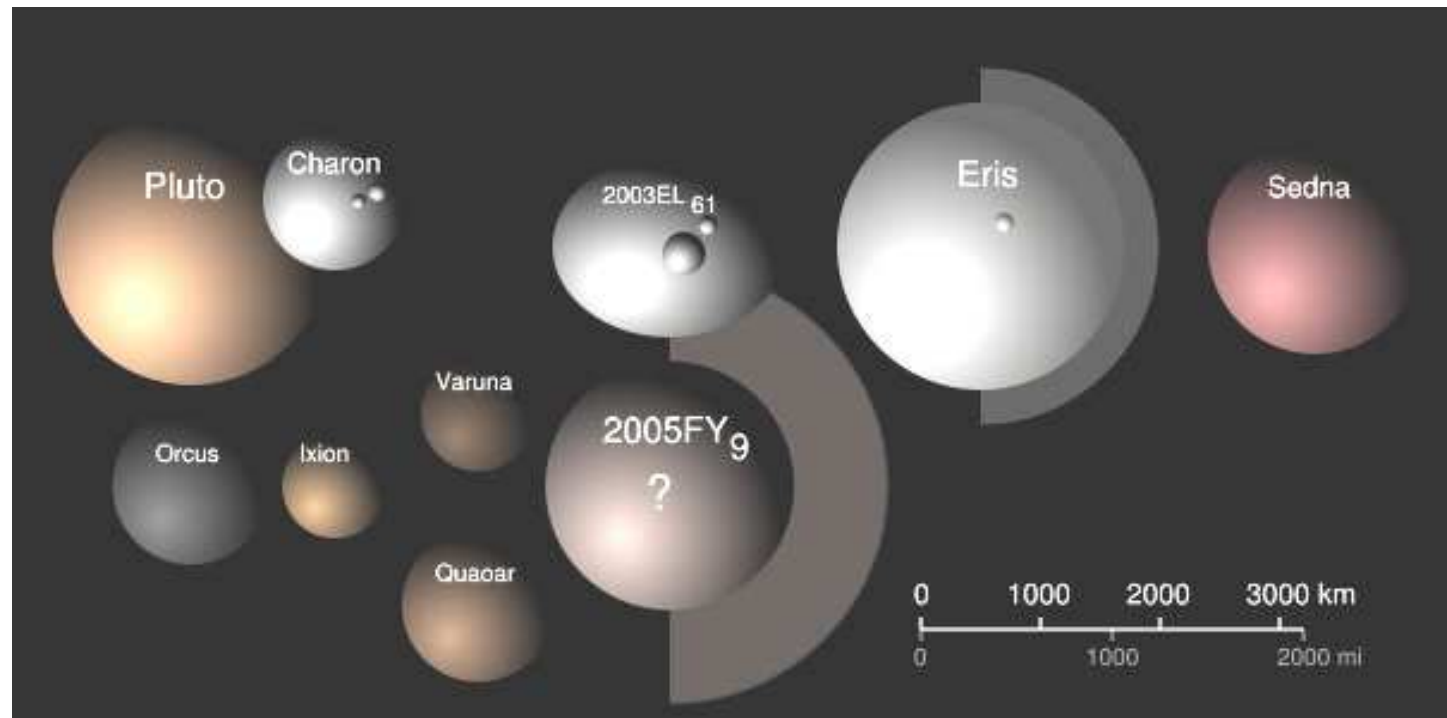


## O Cinturão de Edgeworth-Kuiper

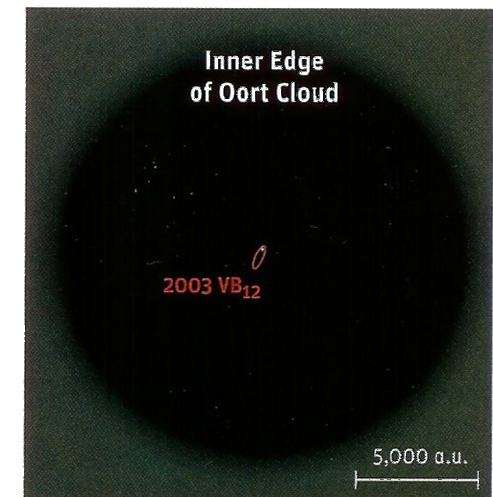
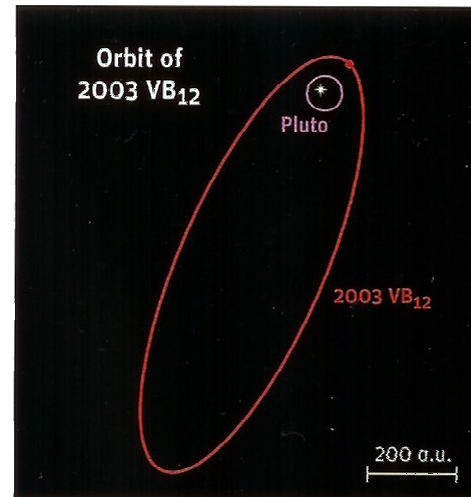
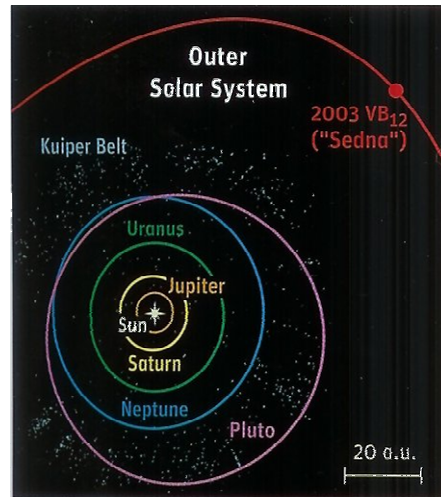
Mais de 1000 asteróides **trans-neptunianos** já foram identificados no Cinturão de Edgeworth-Kuiper. O primeiro foi em 1992. Estimam-se cerca de 100 000 asteróides com >100 km: este cinturão é bem mais massivo que o Cinturão de asteróides Principal.

Além de Éris, que é um planeta-anão confirmado, existem já **sete** outros candidatos a tal, dependendo da informação que se obtiver no futuro sobre os mesmos (equilíbrio hidrostático?).

*Os dez maiores objectos do Cinturão de Edgeworth-Kuiper (incluídos estão Plutão-Charon e Éris).*



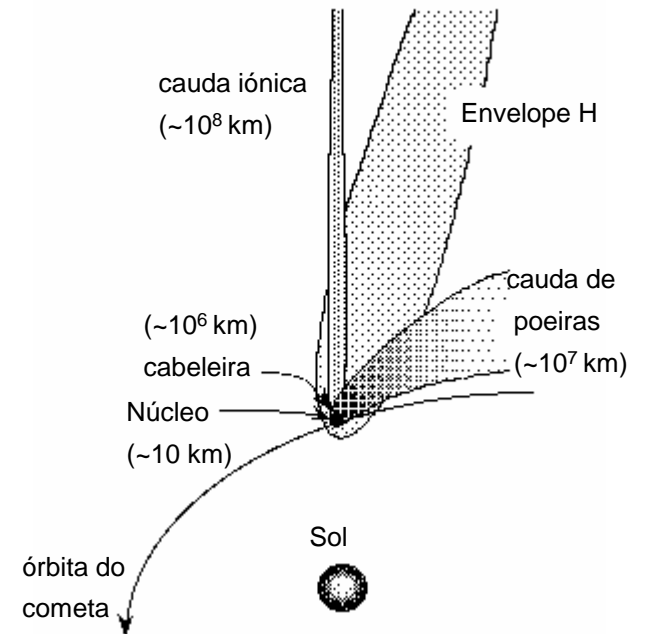
A extremamente excêntrica órbita de Sedna.

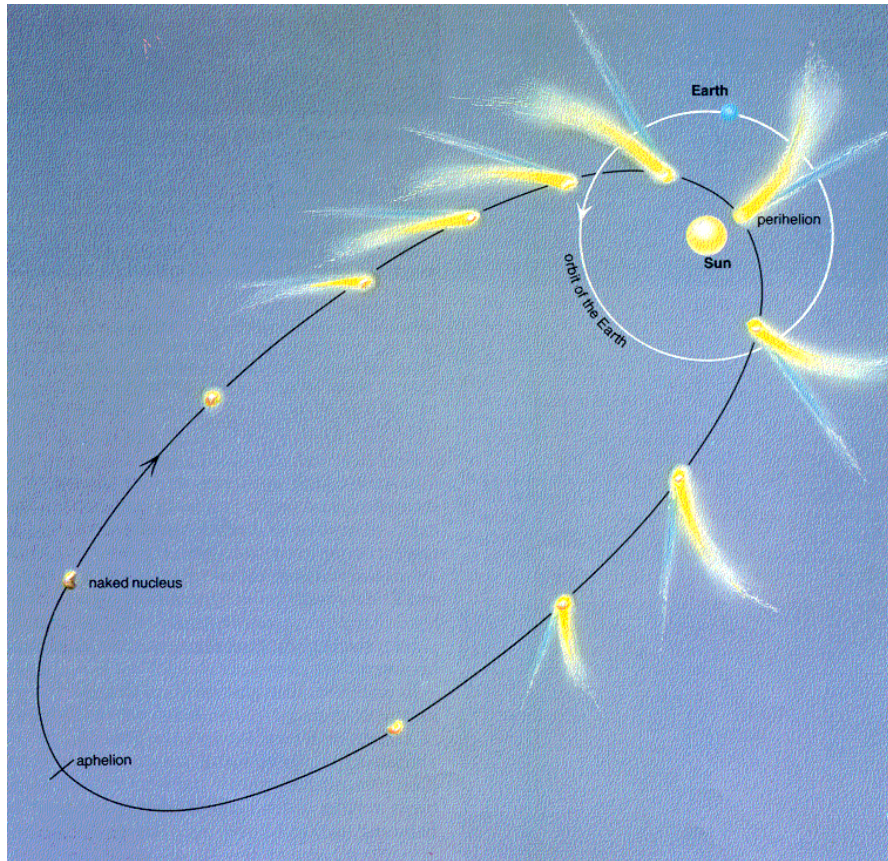


## Cometas

Corpos de rocha e gelo com alguns km de diâmetro, percorrem o Sistema Solar em órbitas muito excêntricas.

Com a aproximação ao Sol o material mais volátil evapora, dando origem a duas caudas: uma iônica ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e outra de poeiras.

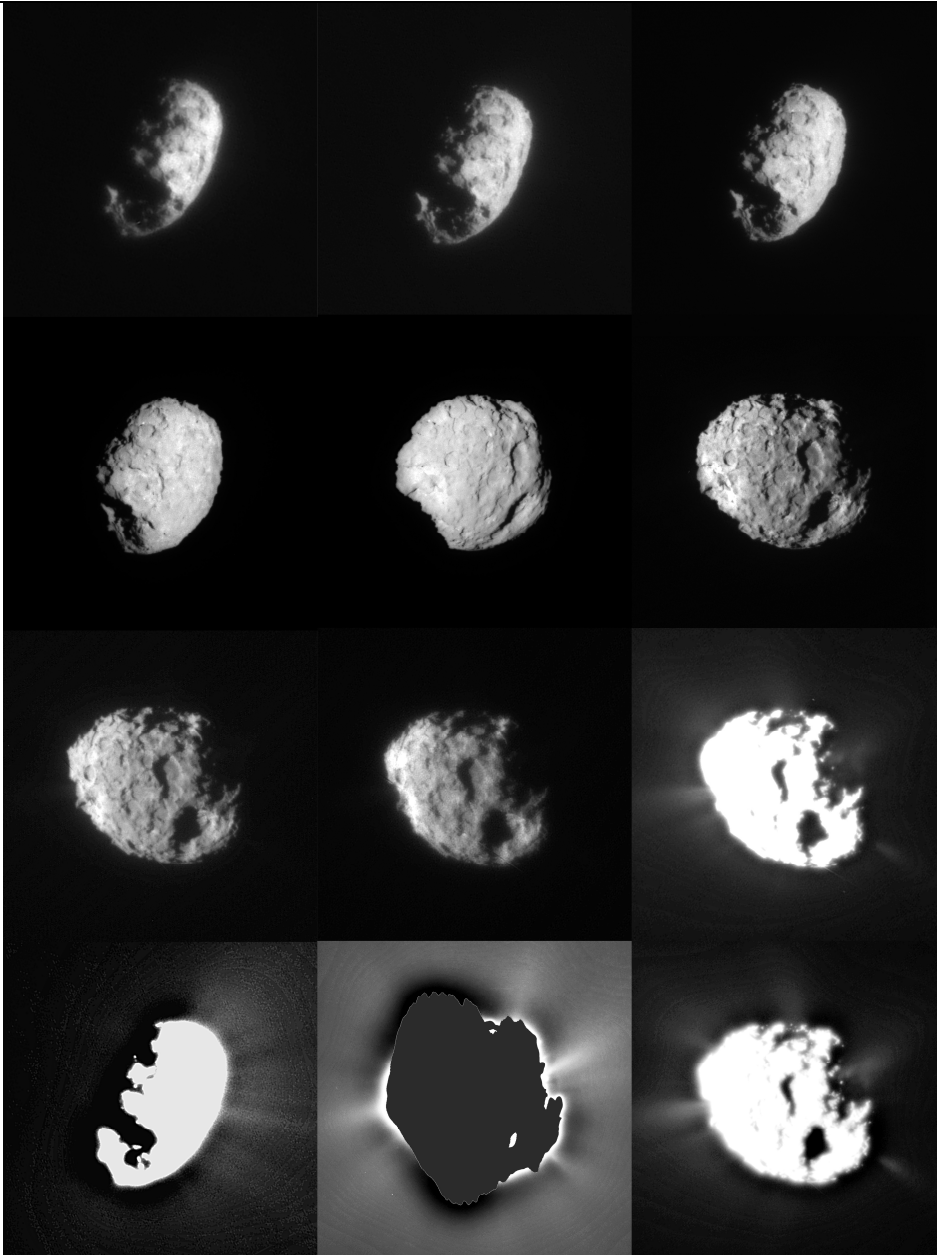




*A cauda iónica opõe-se sempre ao Sol. A de poeiras tem essa tendência mas é influenciada pelo movimento do cometa.*

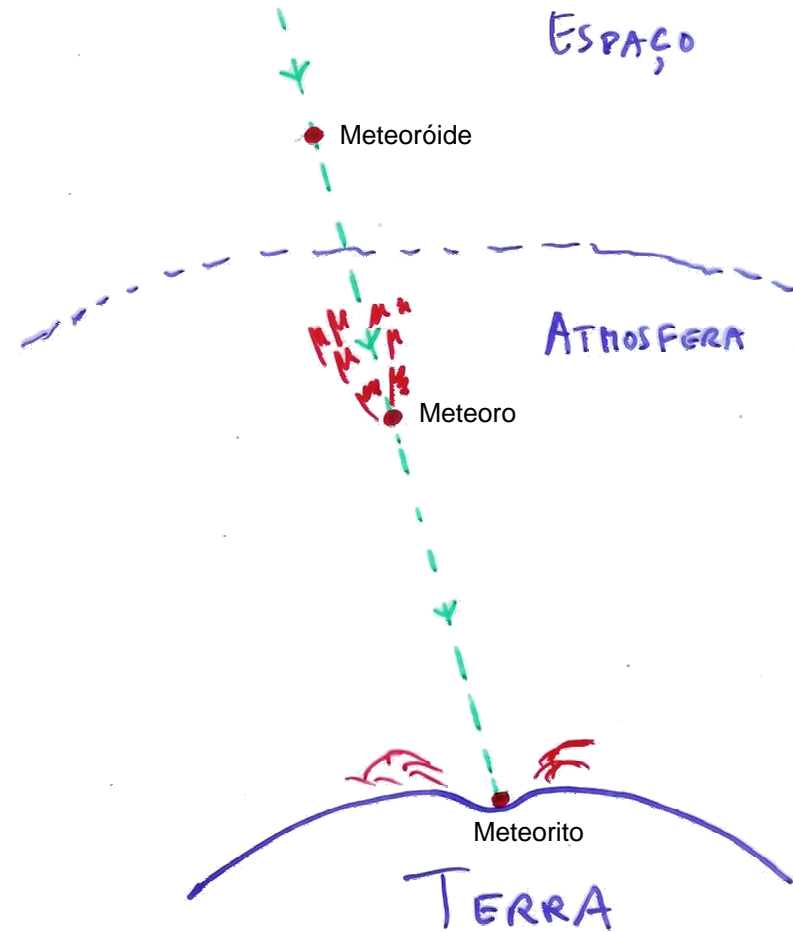


*O cometa Hale-Bopp com as duas caudas bem visíveis.*



O cometa Wild 2 (núcleo) visto pela sonda Stardust.

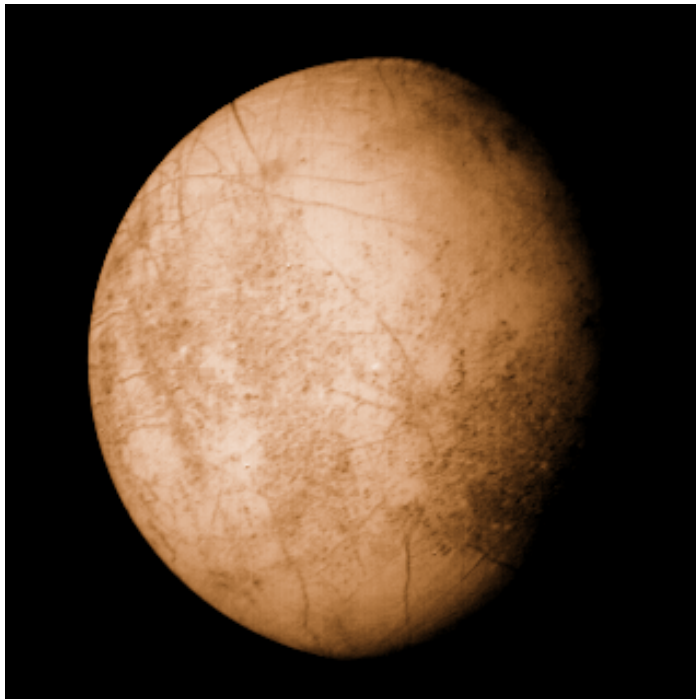
## Meteoróides



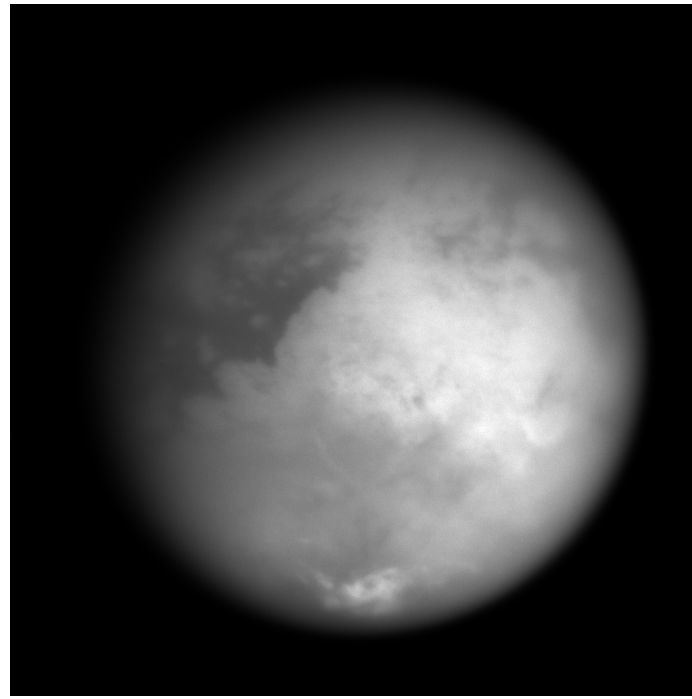
## 2.2 Os exoplanetas

Sem dúvida que o grande fascínio para a procura de planetas tem a ver com a possibilidade de existência de vida nos mesmos.

No Sistema Solar há dois grandes satélites candidatos a terem vida: Europa e Titã. Ambos têm uma densa atmosfera. O primeiro poderá conter um oceano subterrâneo; o segundo tem ciclos meteorológicos com o metano.



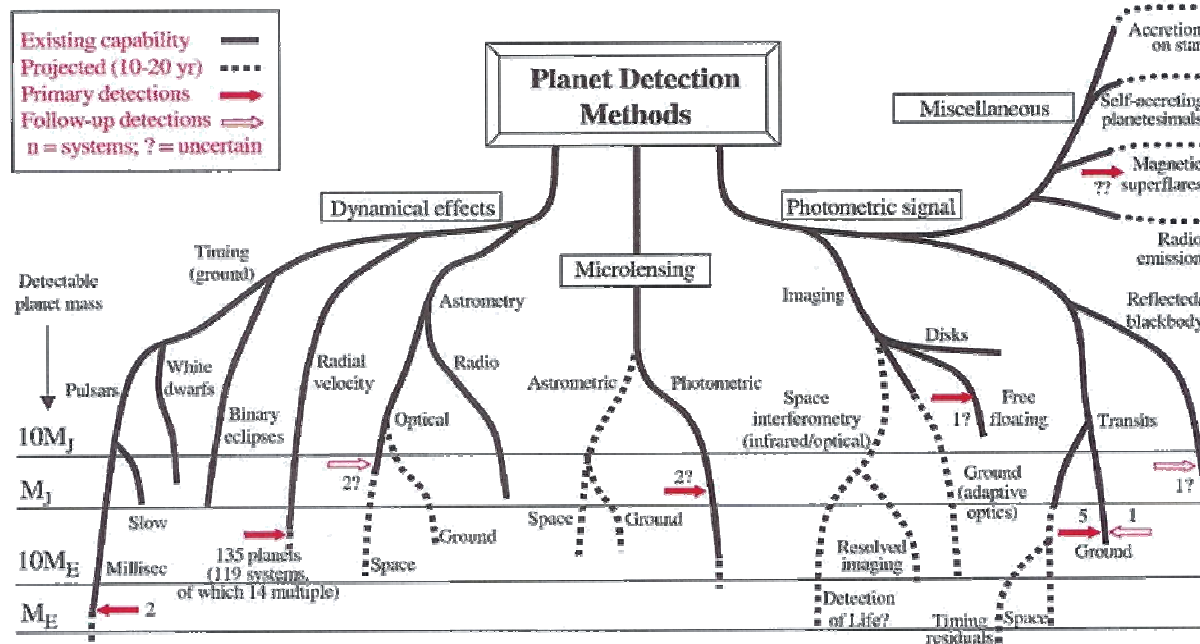
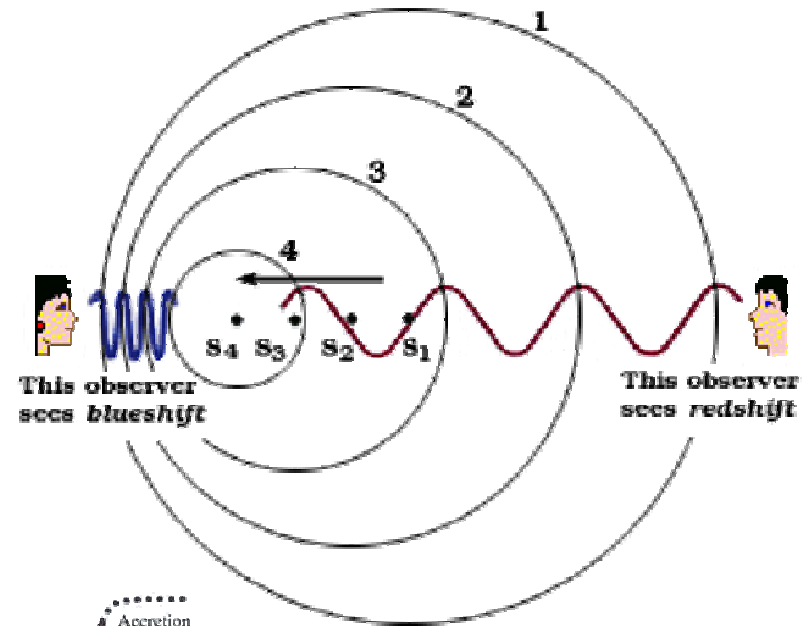
*Europa.*



*Titã.*

Há vários métodos de detecção de exoplanetas. No entanto, aquele que, de longe, foi o mais bem sucedido (para já) recorre à medição do movimento causado na estrela hospedeira pela gravidade de qualquer (ou quaisquer) planeta(s) presente(s).

Este movimento só é detectável na linha-de-visão por efeito Doppler no espectro da estrela.



Uns milhares de estrelas de tipo espectral F/G (como o Sol) já foram estudadas espectroscopicamente num raio de mais de 200 anos-luz. **Ponto de situação** (exclusivamente relativo a este método):

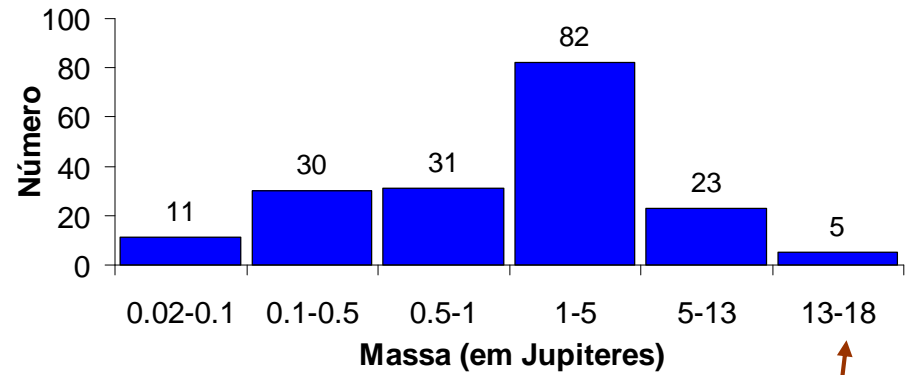
- 188 planetas descobertos em 159 sistemas planetários, 20 dos quais são **mútiplos** (o número recorde é de quatro planetas num sistema); **sete** dos planetas **transitam** a estrela-mãe.
- 56% dos exoplanetas estão a < 1 UA da estrela-mãe (muito **próximos**).
- tipicamente, as suas órbitas são **muito excêntricas** ( $e > 0.1$  para 74%).

- a maioria dos exoplanetas (62%) tem  $M > M_J$  ( $\approx 300M_T$ ), com um mínimo a  $\sim 7M_T$  (Gliese876d).

- os maiores exoplanetas (a grande maioria) deverão ser compostos de **hidrogénio**, como Júpiter.

- os mais pequenos poderão ser “terrestres” (compostos de silicatos) ou “carbónicos”.

- alguns dos sistemas planetários descobertos são **semelhantes ao nosso** (para já; ignorando os nossos planetas “pequenos”). Todos surgem em torno de **estrelas com “metais”** como o Sol.



↑  
**anãs castanhas?**

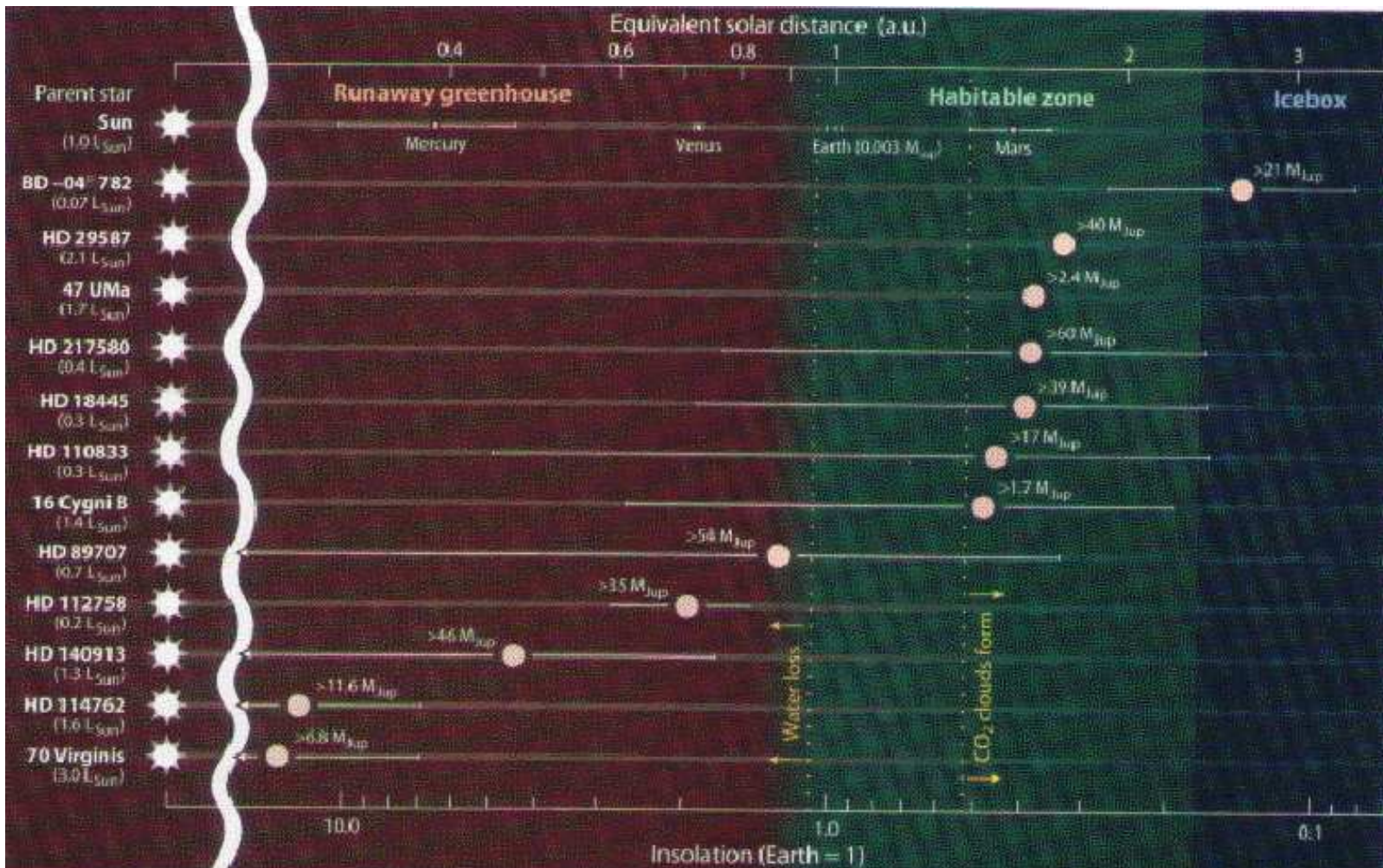
Duas páginas na internet com informação actualizada:

[vo.obspm.fr/exoplanetes/encyclo/encycl.html](http://vo.obspm.fr/exoplanetes/encyclo/encycl.html)

[planetquest1.jpl.nasa.gov/atlas/atlas\\_index.cfm](http://planetquest1.jpl.nasa.gov/atlas/atlas_index.cfm)



A questão da existência de vida ou não está comprometida na maioria pois, aparentemente, pouco dos exoplanetas descobertos estão na **zona habitável**.



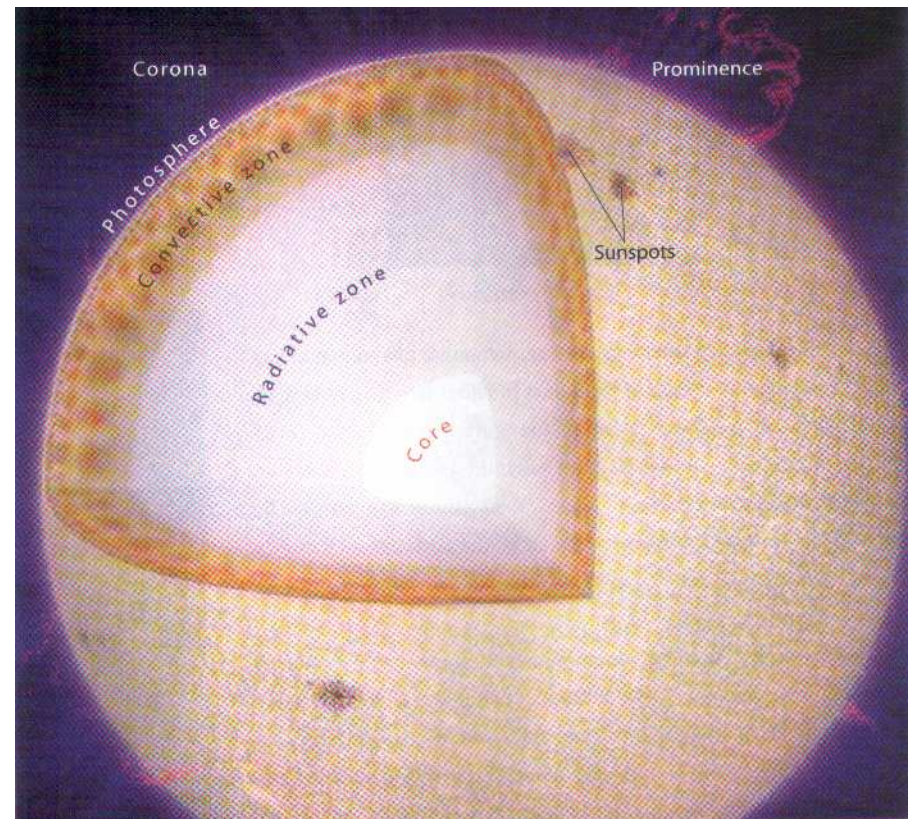
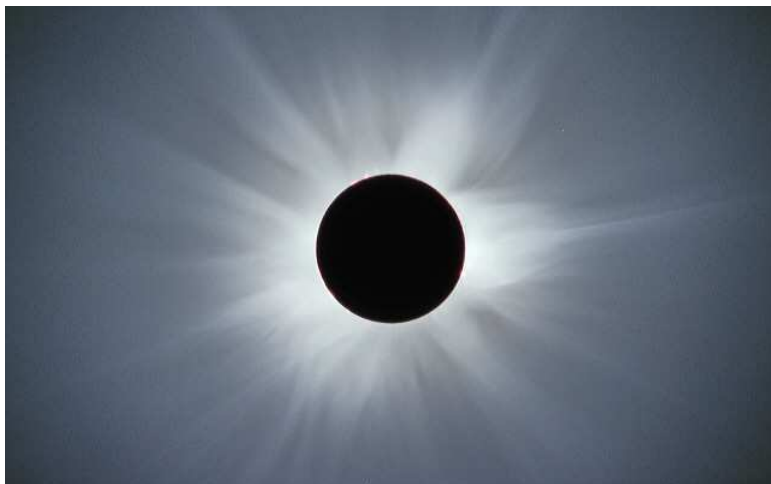
## 3 – ESTRELAS

### 3.1 O Sol

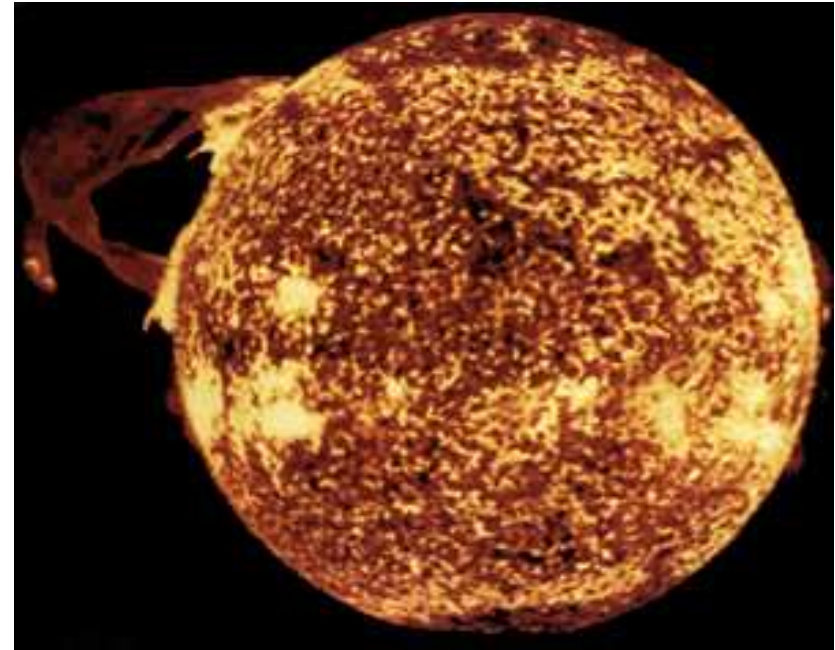
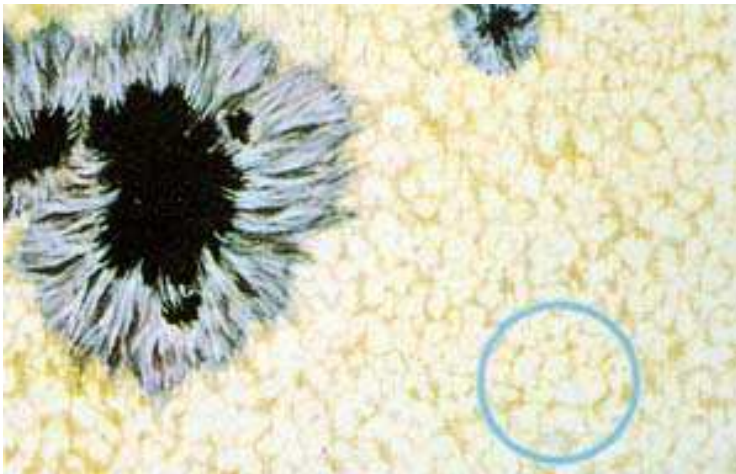
Por ser a estrela mais próxima (de muito longe...) o Sol permite estudos detalhados e “conhecer” outras estrelas.

É composto por várias camadas, desde o interior ( $<10^8$  K) à coroa solar ( $<10^6$  K), passando pela fotosfera ( $\sim 6 \times 10^3$  K) e cromosfera ( $\sim 4 \times 10^3$  K).

É da coroa solar que se “lança” para o espaço o energético vento solar ( $v_{\text{med}} \sim 600$  km/s). Este é constituído por partículas que saem do Sol (prótons, na sua maioria).

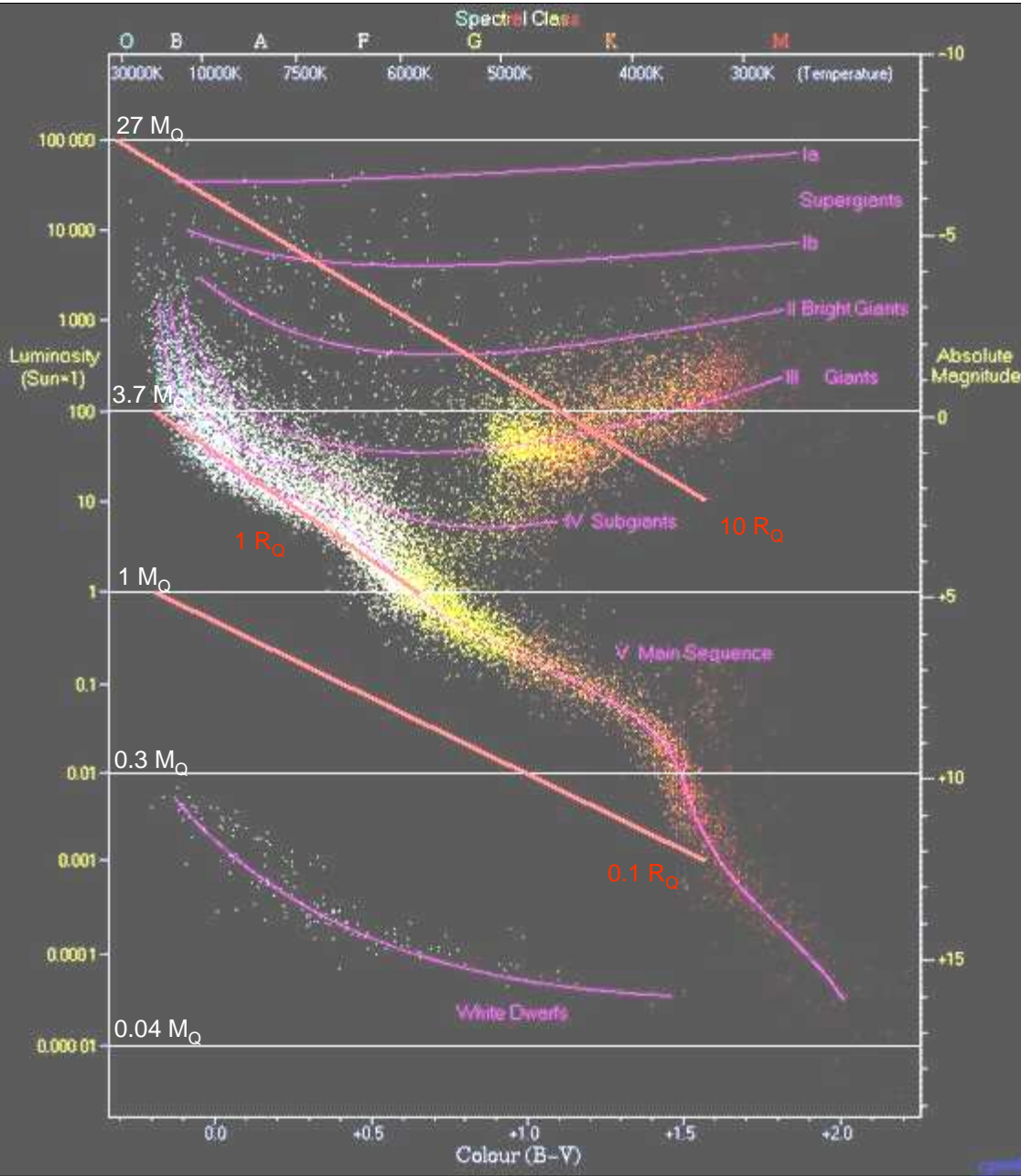


O Sol, pensa-se que à imagem de todas as estrelas, apresenta uma série de fenómenos complexos visíveis na sua superfície (fotosfera/cromosfera) e não só: ex. manchas solares, proeminências.



*Uma proeminência gigante.*

*(à esquerda) Manchas solares e detalhe (incluindo granulos na superfície do Sol).*



## 3.2 Espectros, luminosidades e massas

Conhecendo a distância a milhares de estrelas, conhecemos a sua luminosidade. Recorrendo a espectrómetros obtemos a sua “composição” e temperatura (por ajuste de Curva de Corpo Negro).

Obtém-se, assim, um dos diagramas mais famosos da Astronomia, o de Hertzsprung-Russell (H-R).

O diagrama H-R

(~22000 estrelas do catálogo do Hipparcus).

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

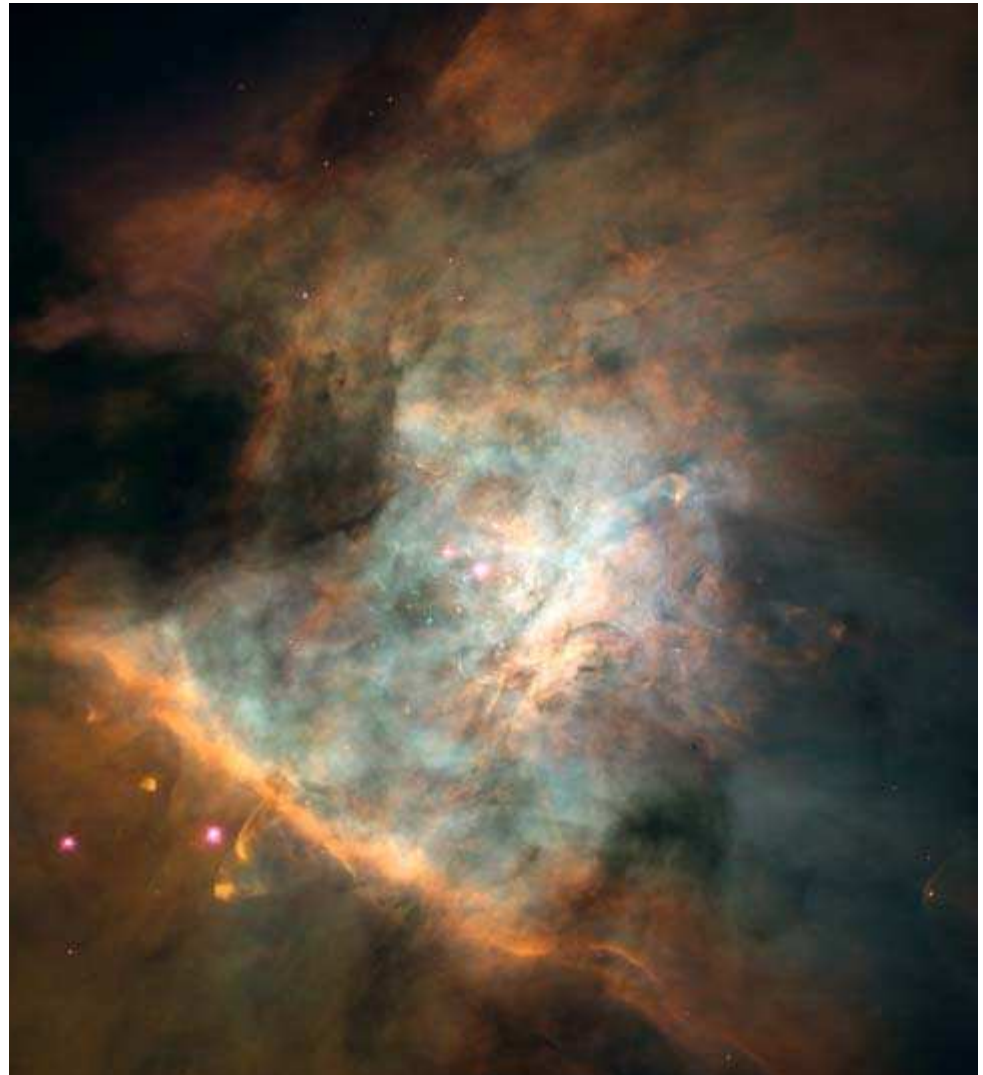
A **luminosidade** e a **temperatura** de uma estrela relacionam-se com o seu **raio**.

### 3.3 Origem, evolução e morte

As estrelas nascem em “berços” gasosos, contendo abundante matéria prima para as formar.



*A nebulosa de Orion ( $d=500$  pc) é uma autêntica maternidade. “Presentemente” tem cerca de 700 estrelas em formação.*



A evolução de uma estrela depende apenas da quantidade de combustível disponível, ou seja, da sua **massa**.

Assim, quando uma estrela nasce, já tem a sua vida traçada até à morte.

À parte pormenores de cada geração (Pop.I ou Pop.II), em traços gerais, a evolução é como segue:

$M < 0.5 M_{\odot}$  – ao fim de  $10^{10-11}$  anos (acaba H) a estrela sai da sequência principal e vai, lentamente, regredindo (consome He) até acabar como **anã branca** (constituída por C/O).

Quando esta tem uma companheira, a agregação de material extra leva à sua explosão em Supernova de Tipo Ia (SN Ia).

$0.5 M_{\odot} < M < 1.44 M_{\odot}$  – ao fim de  $10^{10}$  anos (acaba H) a estrela sai da sequência principal e vai consumir He; desta vez, no entanto, as suas camadas exteriores vão expandir-se por pressão de radiação, passando às fases de subgigante e gigante vermelha; o interior da estrela também acaba como anã branca mas o exterior “solta-se” para o espaço transformando-se num anel de material em expansão (**nebulosa planetária**).

$1.44 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$  – ao fim de  $10^9$  anos (acaba H) a estrela tem uma evolução totalmente idêntica ao caso anterior mas mais rápida.

$M > 8 M_{\odot}$  – estas estrelas nascem como supergigantes azuis; ao fim de  $10^{7-8}$  anos (acaba H) passam rapidamente pela fase de supergigante vermelha antes de explodirem em supernova (tipos Ib, Ic e II), devido ao colapso gravitacional do massivo núcleo; caso este tenha  $M < 3 M_{\odot}$ , a estrela colapsa numa **estrela de neutrões**; caso contrário ( $M > 3 M_{\odot}$ ) acaba num **buraco negro**.



$M < 8 M_{\odot}$



*Duas nebulosas planetárias: Anel e Olho de Gato.*

$M > 8 M_{\odot}$



*Dois Restos de Supernova: Caranguejo e Vela.*



## 3.4 As reacções nucleares

No centro das estrelas, as elevadas temperatura, densidade e pressão permitem reacções nucleares de **fusão** em cadeia, geradoras de energia.

A cadeia dominante em estrelas mais frias do que o Sol é denominada **protão-protão** ou **pp** ( $D \equiv {}^2\text{H}^+$ ):

- i)  $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$  (=1.44 MeV) (lenta:  $10^{10}$  anos;  $T \sim 10^{6-7}$  K)
- ii)  $D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$  (=5.49 MeV) (rápida: 6 seg)
- iii)  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p + \gamma$  (=12.85 MeV) ( $10^6$  anos)

Note-se que, embora para chegar a iii) seja preciso fazer i-ii) duas vezes, no final “recuperam-se” dois dos protões e, assim, o balanço global é “ $4\text{H} = 1\text{He}$ ”.

A cadeia dominante em estrelas muito quentes é o **ciclo do carbono**, dito “de catálise” pois o  ${}^{12}\text{C}$  original recupera-se no fim (“ $4\text{H}=1\text{He}$ ”). Em estrelas como o Sol, esta cadeia e a pp são igualmente importantes.

- i)  ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$  (=1.95 MeV) ( $10^7$  anos)
- ii)  ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu$  (=2.22 MeV) (rápida: 7 min)
- iii)  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$  (=7.54 MeV) ( $10^6$  anos)
- iv)  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$  (=7.35 MeV) ( $10^8$  anos)
- v)  ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu$  (=2.71 MeV) (rápida: 82 seg)
- vi)  ${}^{15}\text{N} + p \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} + \gamma$  (=4.96 MeV) ( $10^5$  anos)

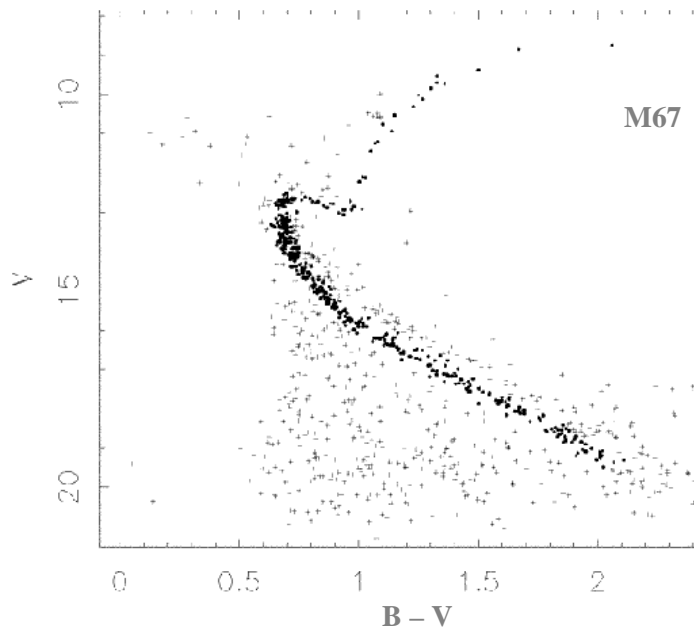
## 4 – ENXAMES DE ESTRELAS

### 4.1 Enxames abertos

Um enxame de estrelas **aberto** tem, tipicamente, centenas a milhares de estrelas, distribuídas de uma forma irregular.

*Os enxames abertos **Presépio** e **Pléiades**.*

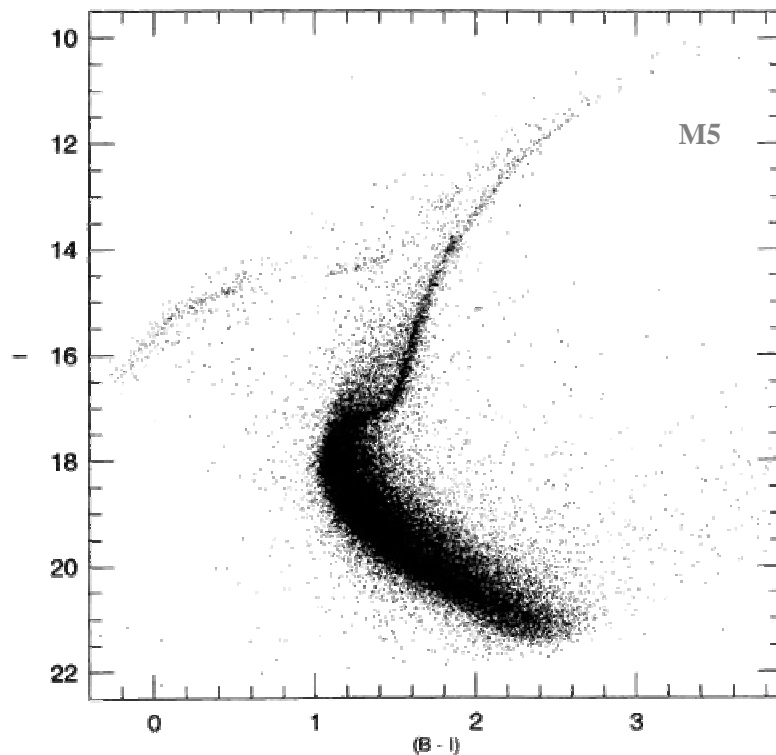
A grande maioria das estrelas é jovem, de Pop.I, encontrando-se, por isso, quase todas na **sequência principal** do diagrama H-R.



## 4.2 Enxames globulares

Um enxame de estrelas **globular** tem, tipicamente,  $10^5$ - $10^6$  estrelas, distribuídas de uma forma simétrica e com elevada concentração central.

*O enxame globular M3.*



A grande maioria das estrelas é velha, de Pop.II, encontrando-se, por isso, muitas delas fora da **sequência principal** no diagrama H-R (na fase de gigante vermelha ou mais avançada, a caminho de anã branca).

## 5 – A NOSSA GALÁXIA

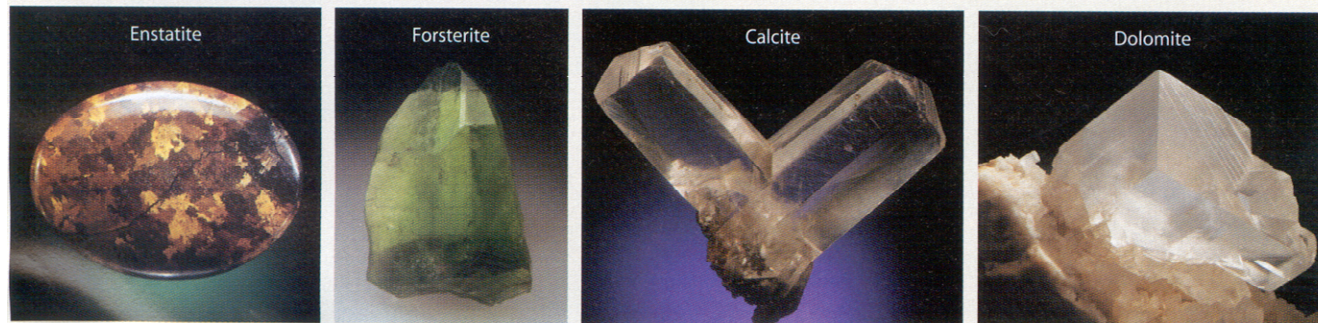
### 5.1 O meio interestelar

O meio interestelar está muito longe de estar vazio ou de ser pouco interessante. De facto, encontra-se muito mais, na forma de gases e poeiras, do que na maioria dos outros locais do Universo.

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

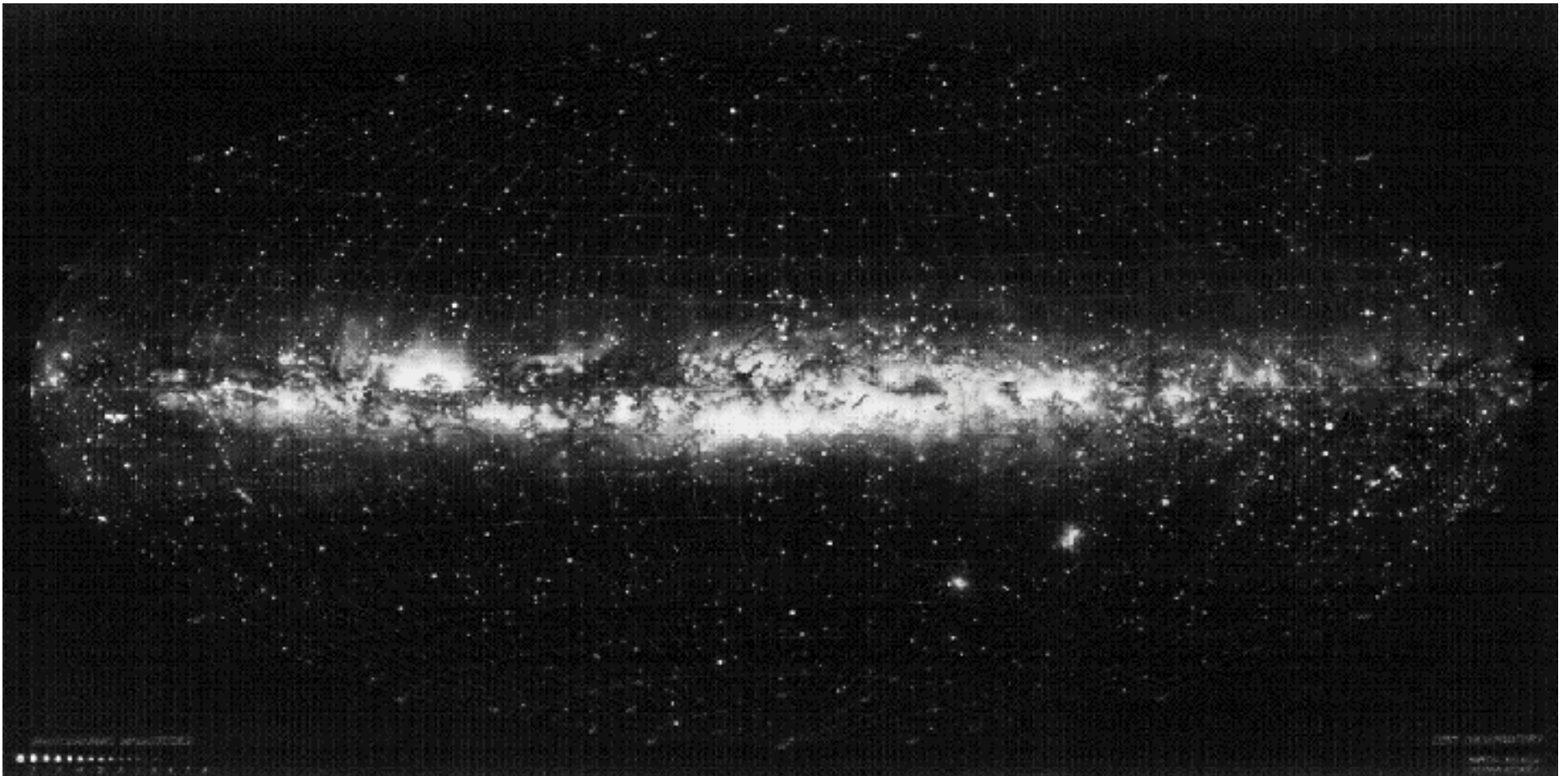
A lista de moléculas já detectadas no meio interestelar. Não se incluem as dezenas de espécies “deuteradas” (H→D).

Já se encontraram em nebulosas planetárias poeiras de cristais bem conhecidos.

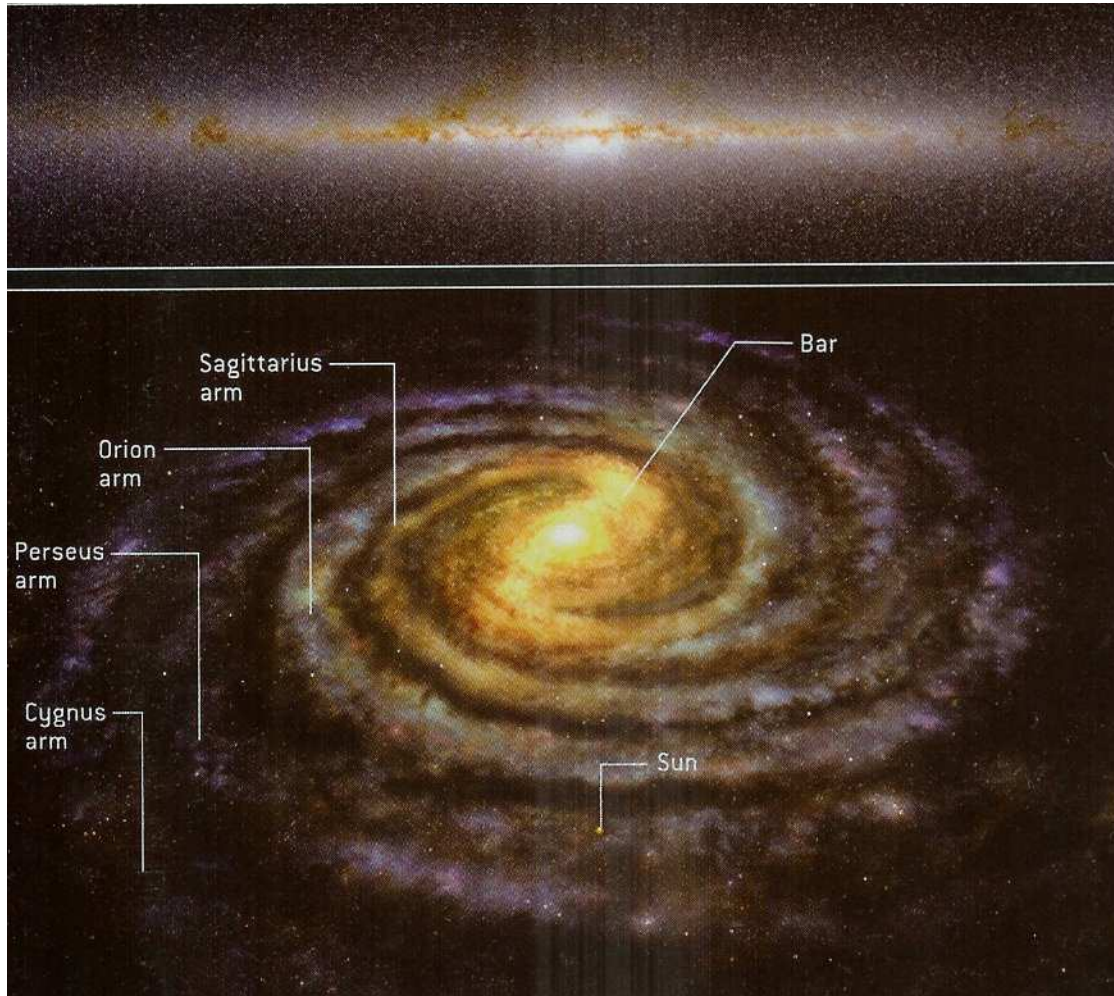


## 5.2 Estrutura geral

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

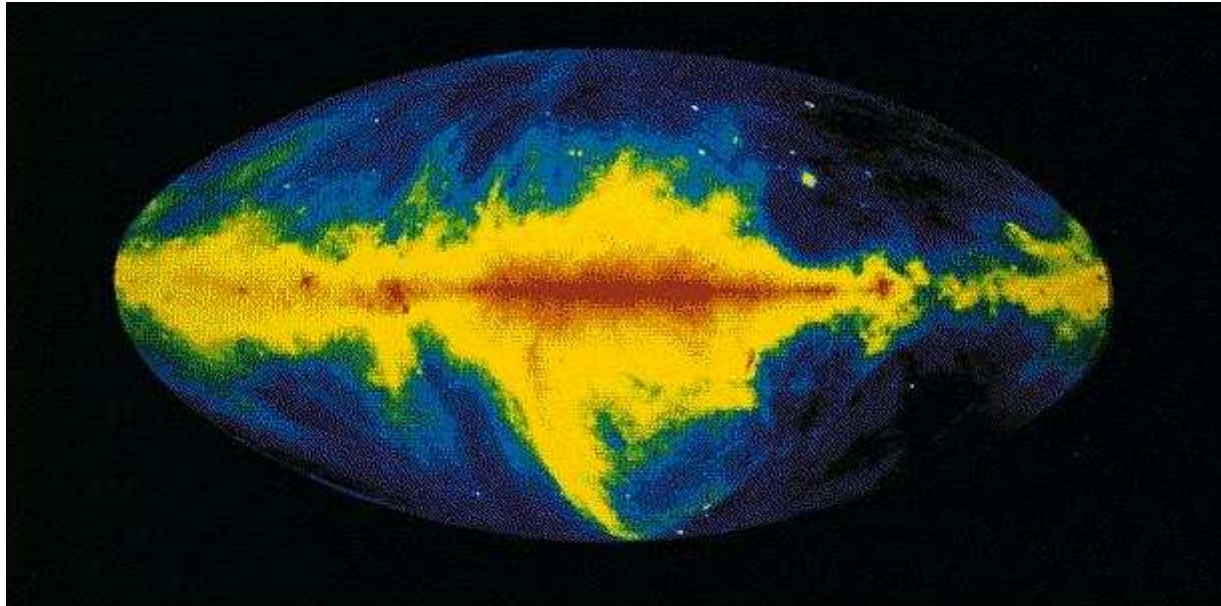


Foi confirmado (pelo Spitzer), não há muito tempo, a existência de uma proeminente barra na nossa galáxia espiral. A classificação segundo Hubble (a ver) é SBb(r).

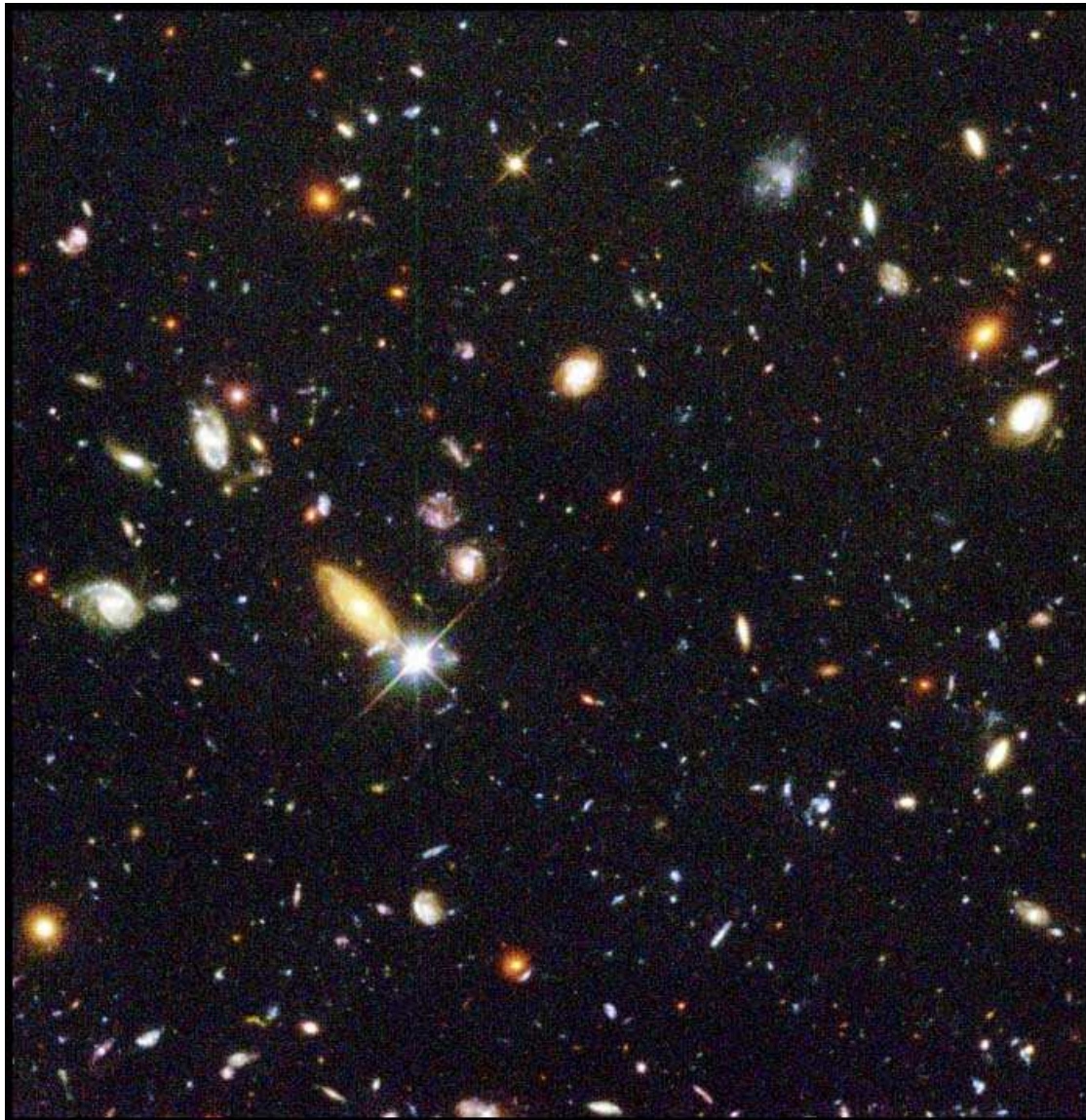


Uma representação realista da Nossa Galáxia a partir de dados do Spitzer (em cima). A **barra** tem um comprimento total de 9 kpc. Isto deve ser comparado com a distância do Sol ao centro da Galáxia (8 kpc). A região central tem um **bolbo**.

O aspecto da Nossa Galáxia (como, de facto, de todos os objectos astronómicos não-estelares) muda radicalmente conforme o comprimento de onda da observação. Assim, por exemplo, no rádio:



## 6 – ASTRONOMIA EXTRAGALÁCTICA



### 6.1 Galáxias: classificação e estrutura

Uma galáxia é um conjunto de muitos

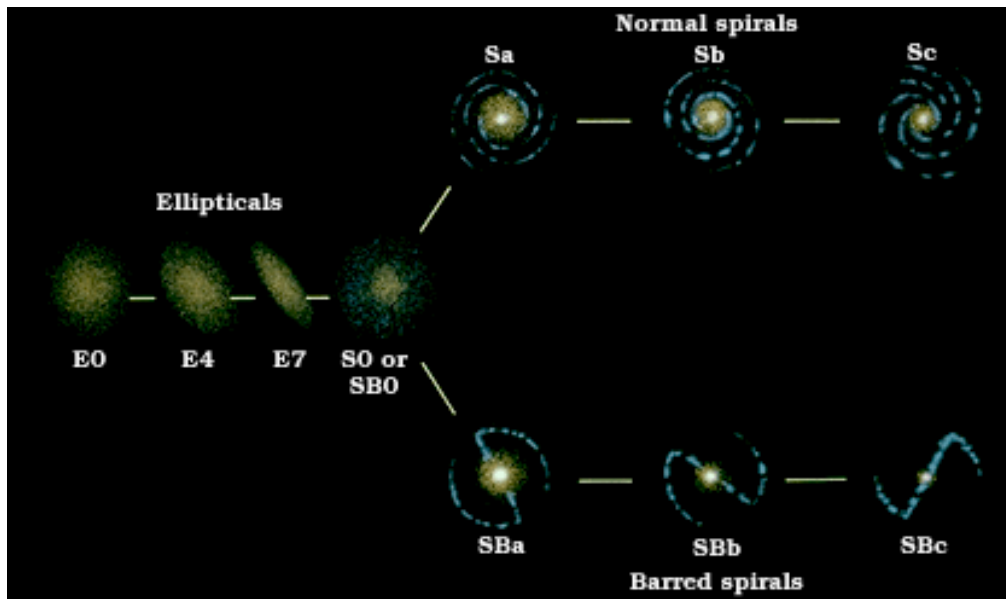


A partir dos “Deep Fields” do Hubble Space Telescope (HST) estimamos o número total de galáxias do Universo em mais de  $10^{11}$ .

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



Hubble classificou as galáxias num esquema morfológico que, com pequenas adaptações, ainda hoje é usado. Chama-se a este, por razões óbvias, o Diagrama em Diapasão de Hubble:



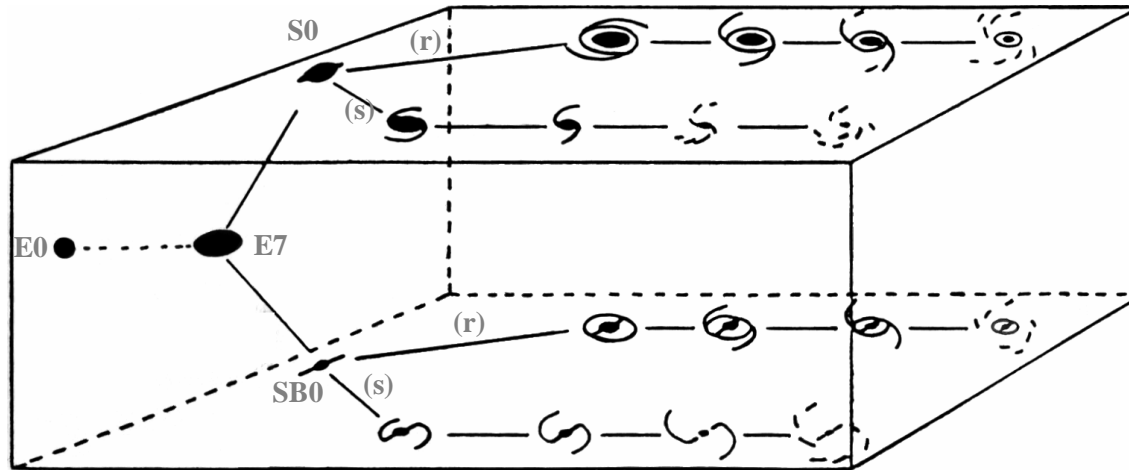
*No diagrama em diapasão de Hubble, a classificação das galáxias elípticas como  $E_n$  usa  $n = 10(1 - b/a)$  com  $a$  e  $b$  os semi-eixos das respectivas elipses (formas projectadas no céu). Não há elípticas com  $b/a < 0.3$ .*

Uma **galáxia espiral** (S/SB) é constituída por estrelas e muito gás e poeiras na forma de um disco. Tem, ainda, muita formação estelar. O conjunto está em rotação diferencial, o que gera braços em espiral.

Uma **galáxia elíptica** (E) é constituída apenas por estrelas velhas. Não há qualquer formação estelar. Tem uma forma elipsoidal, sem movimento conjunto (as estrelas movimentam-se como num enxame estelar).

Uma **galáxia esferóide** (S0/SB0) é constituída por estrelas velhas e pouco gás. Tem um plano principal mas nem rotação nem braços em espiral.

Há um par de décadas o diagrama de Hubble foi actualizado numa forma tridimensional:

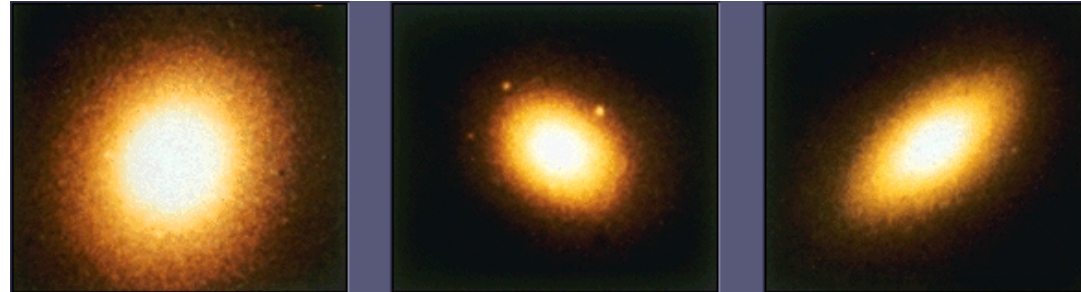


*O Diagrama de Hubble tridimensional: descobriu-se que existem grandes números de galáxias espirais de dois subtipos: direitas (straight – s) e anel (ring – r), consoante os braços em espiral saem directamente do núcleo ou de um anel à sua volta, respectivamente.*

De todos os tipos, a galáxia mais abundante é a espiral (S; 60%) seguindo-se a esferóide (S0/SB0) e elíptica – E (20% e 15%, respectivamente), sobrando apenas 4% de galáxias irregulares (Irr) e 1 % de peculiares (Pec). Estas duas últimas nem sequer constam no diagrama de Hubble.

Em sequência, no que segue apresentam-se imagens de galáxias de vários tipos e subtipos.

Elípticas:

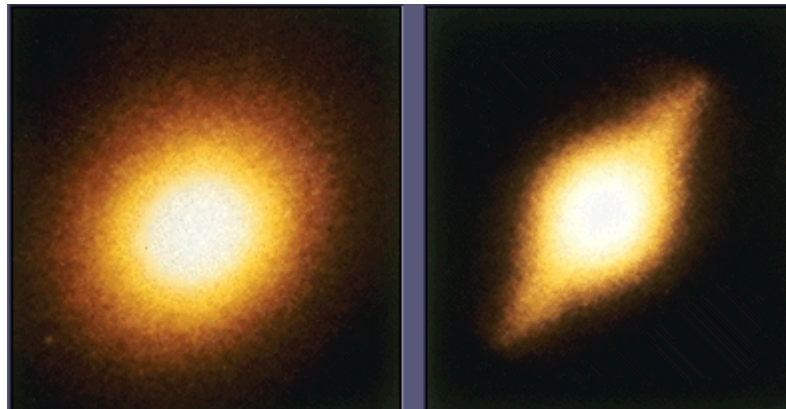


E0

E3

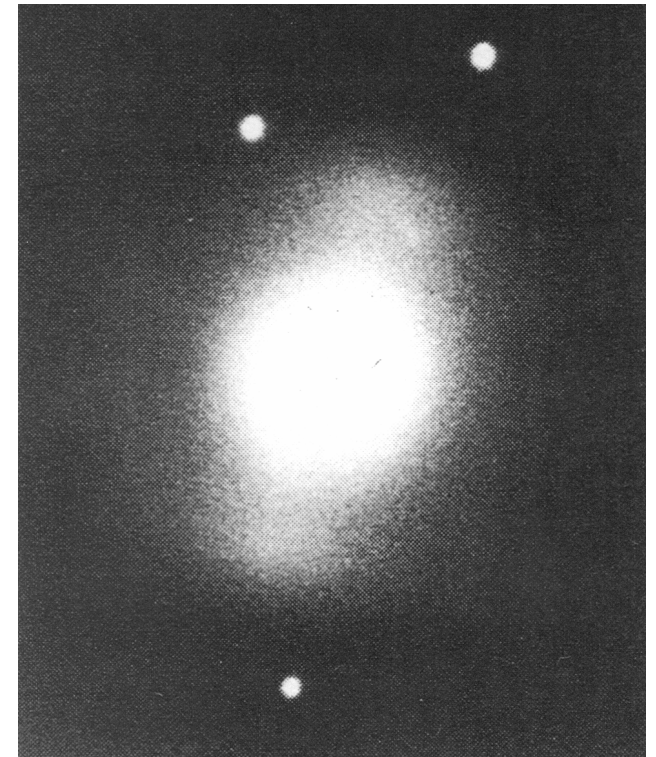
E6

Esferóides:



S0

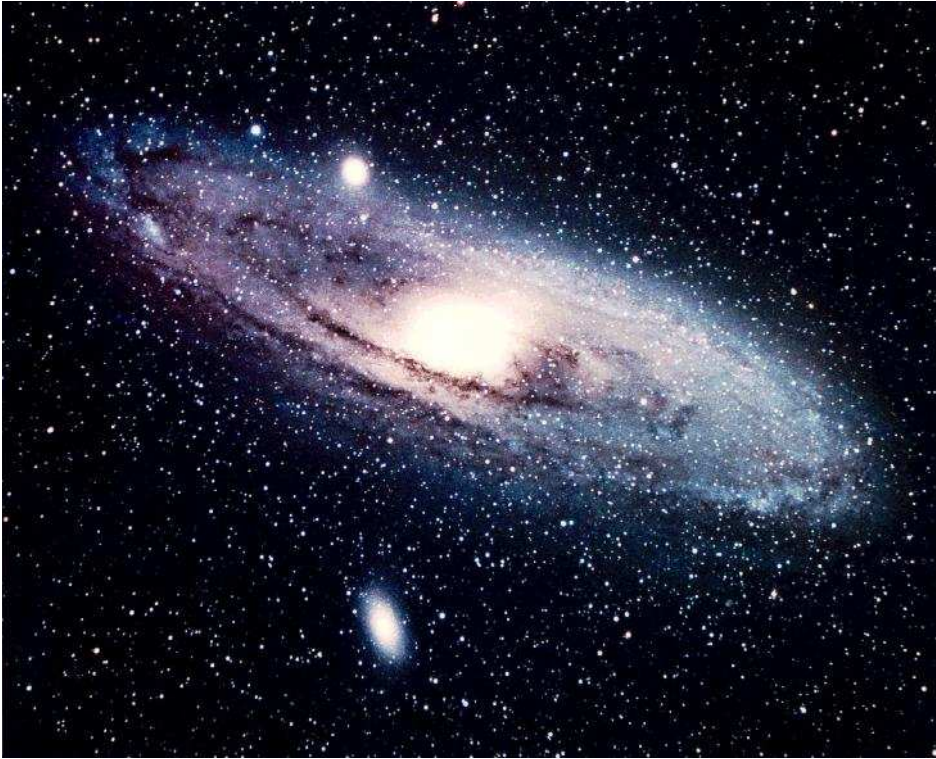
SB0



NGC2859

Espirais normais:

Sa/Sb



**M31 (Andrómeda)**

**M104 (“Sombrero”)**



## Espirais normais:

Sb



NGC891

Sc



NGC2997

## Espirais barradas:

SBa

NGC4650



SBb(s)

NGC1530



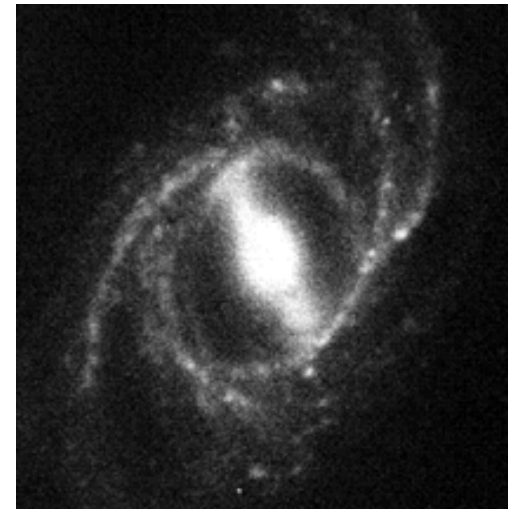
SBc

M109



SBb(r)

NGC2523



## Irregulares:

Grande  
Nuvem de  
Magalhães

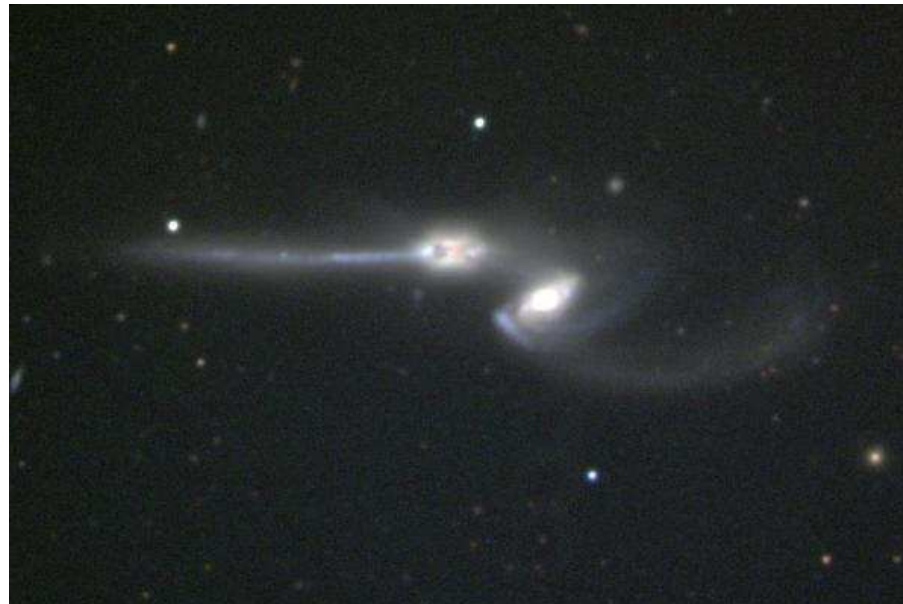


Pequena  
Nuvem de  
Magalhães

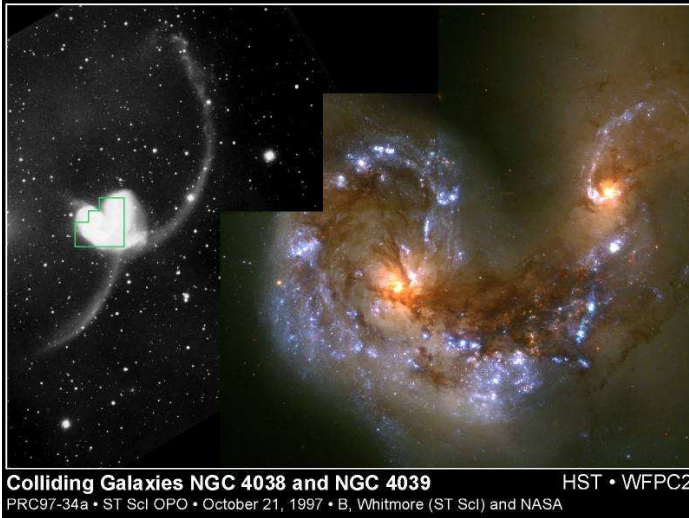


## Peculiares:

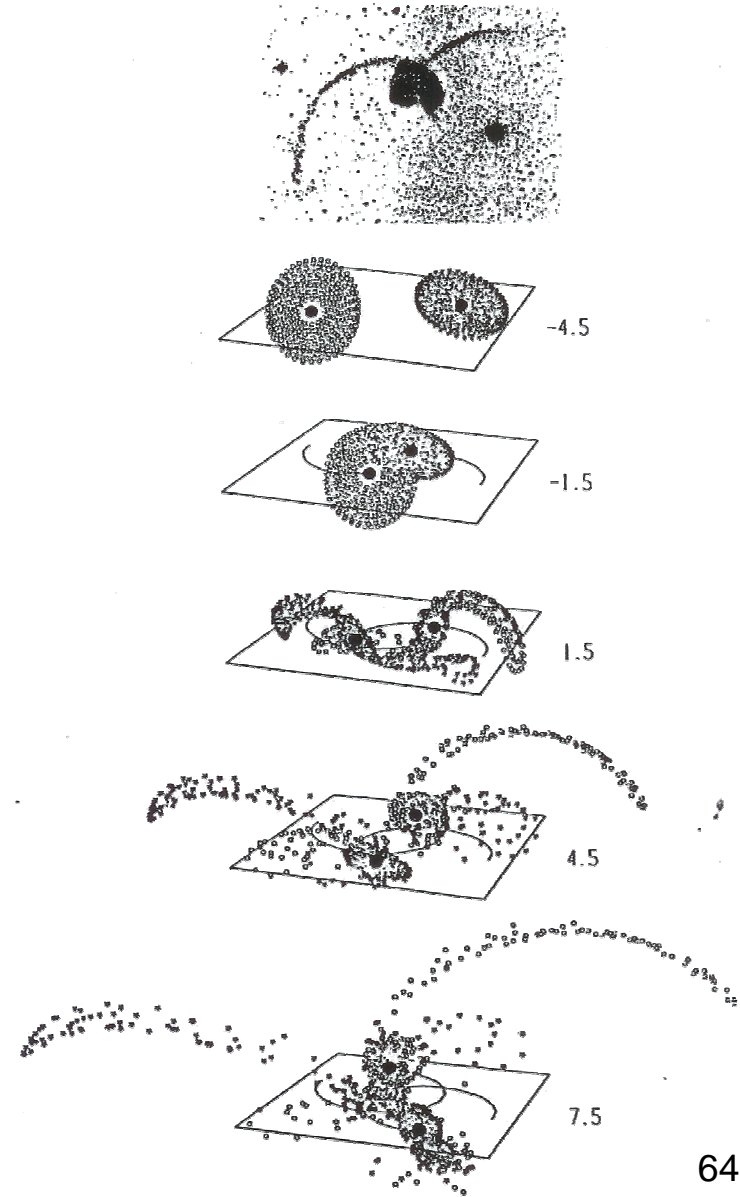
“Ratos”



“Antenas”



“Vórtice”







## Anãs:

cE

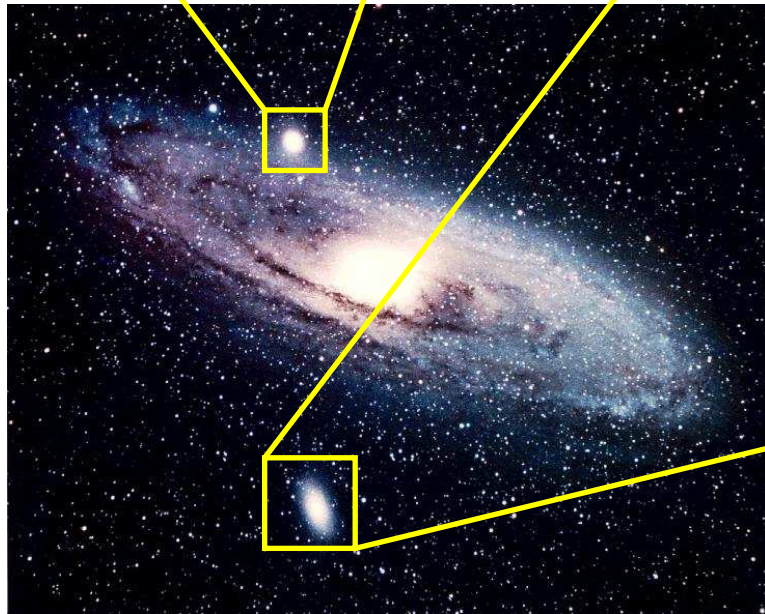


M32

dE5



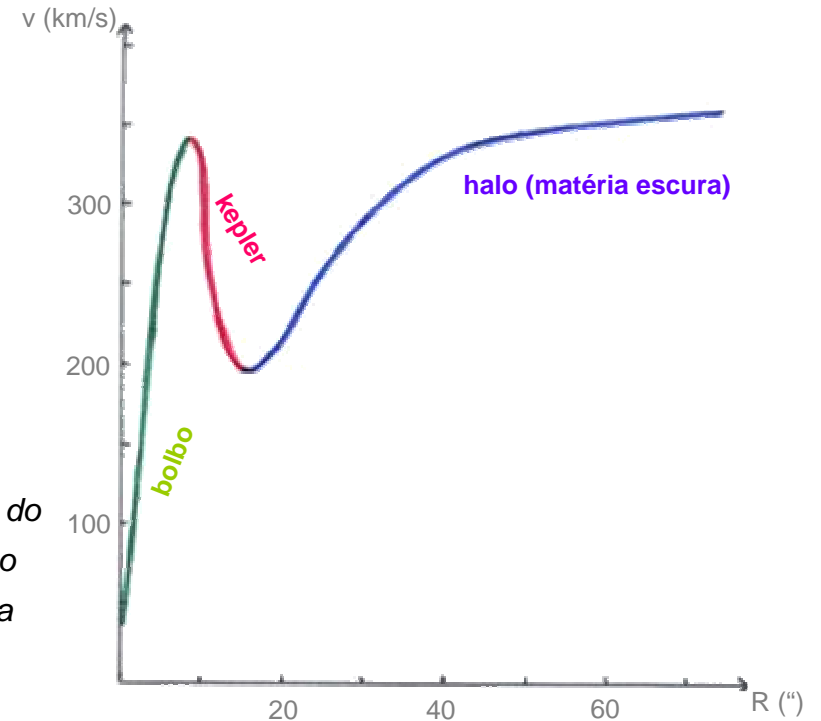
M110



A **medição de massas** em galáxias é feita de forma diferente nas S e nas E/S0.

As Ss têm gás em rotação, pelo que se usa o efeito de Doppler para medir a velocidade de “cada metade” em função da distância ao centro da galáxia. Assim, não só temos acesso à massa total (pelo último ponto medido) mas também informação sobre a **distribuição de massa** a partir de uma **curva de rotação**. Este método só falha para galáxias vistas de topo (muito raras).

*A típica curva de rotação de uma galáxia espiral. A parte do **halo de matéria escura** foi uma surpresa mas é a situação geral que constitui o **problema da matéria escura** (90% da massa do Universo).*

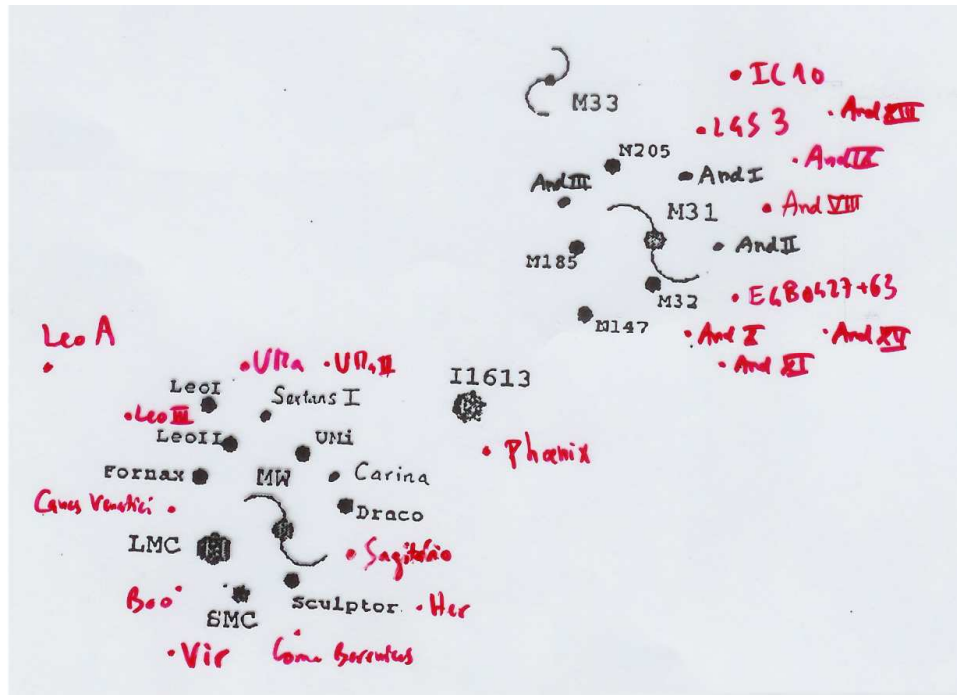


Mede-se a massa de galáxias E/S0 (que não têm nem gás nem rotação) recorrendo ao **Teorema do Virial** (que iguala a energia cinética a metade da energia auto-potencial gravítica). Aproveita-se o movimento das estrelas no poço de potencial como se fossem um **gás** e usa-se a sua **dispersão** em velocidades (como a distribuição maxweliana num gás) para estimar a massa.

## 6.2 Associações de galáxias

Formalmente, temos uma associação de galáxias quando as respectivas estiverem no mesmo local do Universo (à mesma distância de nós) e interagirem durante  $>10^9$  anos.

Um Grupo de galáxias contém entre três e cerca de cem membros. O seu tamanho típico é de 1 a 3 Mpc.



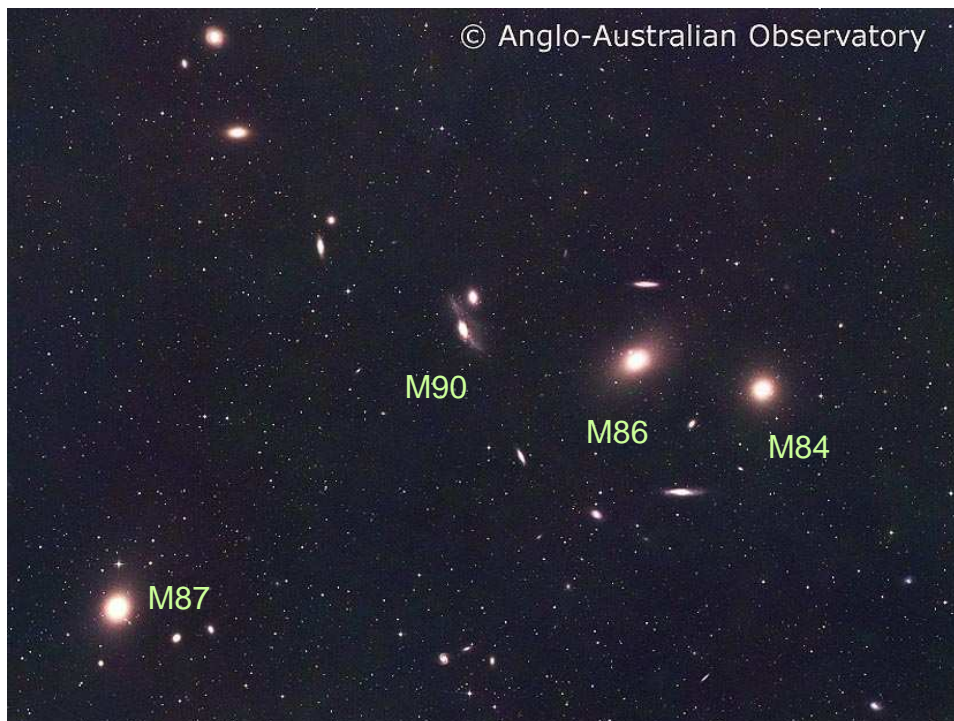
O Grupo Local, com um tamanho de 1 Mpc, é dominado pela Nossa Galáxia e pela de Andrómeda ( $3 \times 10^{12} M_{\odot}$ ; 75% da massa total). As respectivas satélites preenchem-no quase totalmente. São 55 membros e a subir...

Um **Enxame** de galáxias contém entre **cem** e cerca de  **$10^4$**  membros. O seu tamanho típico é de 1 a 10 Mpc.

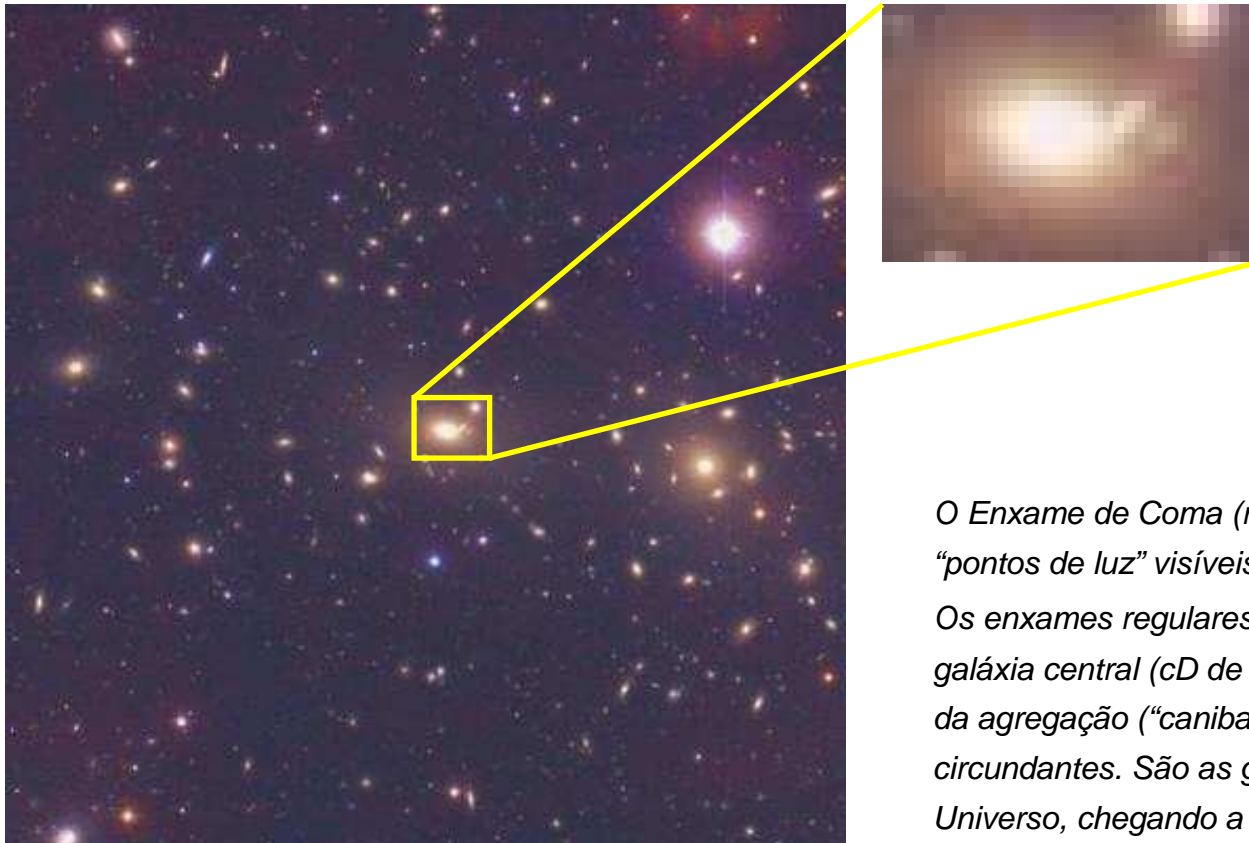
O número elevado de constituintes permite que se trate um enxame de galáxias como um enxame de estrelas.

Há dois tipos principais de enxame:

- **Enxame irregular**: contém 100-1000 galáxias ( $M \sim 10^{12}-10^{14} M_{\odot}$ ); não tem simetria.
- **Enxame regular**: contém  $10^3-10^4$  galáxias ( $M \sim 10^{15} M_{\odot}$ ); é compacto, com simetria esférica e uma elevada concentração central de galáxias (c.f. enxames globulares).



*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”.*

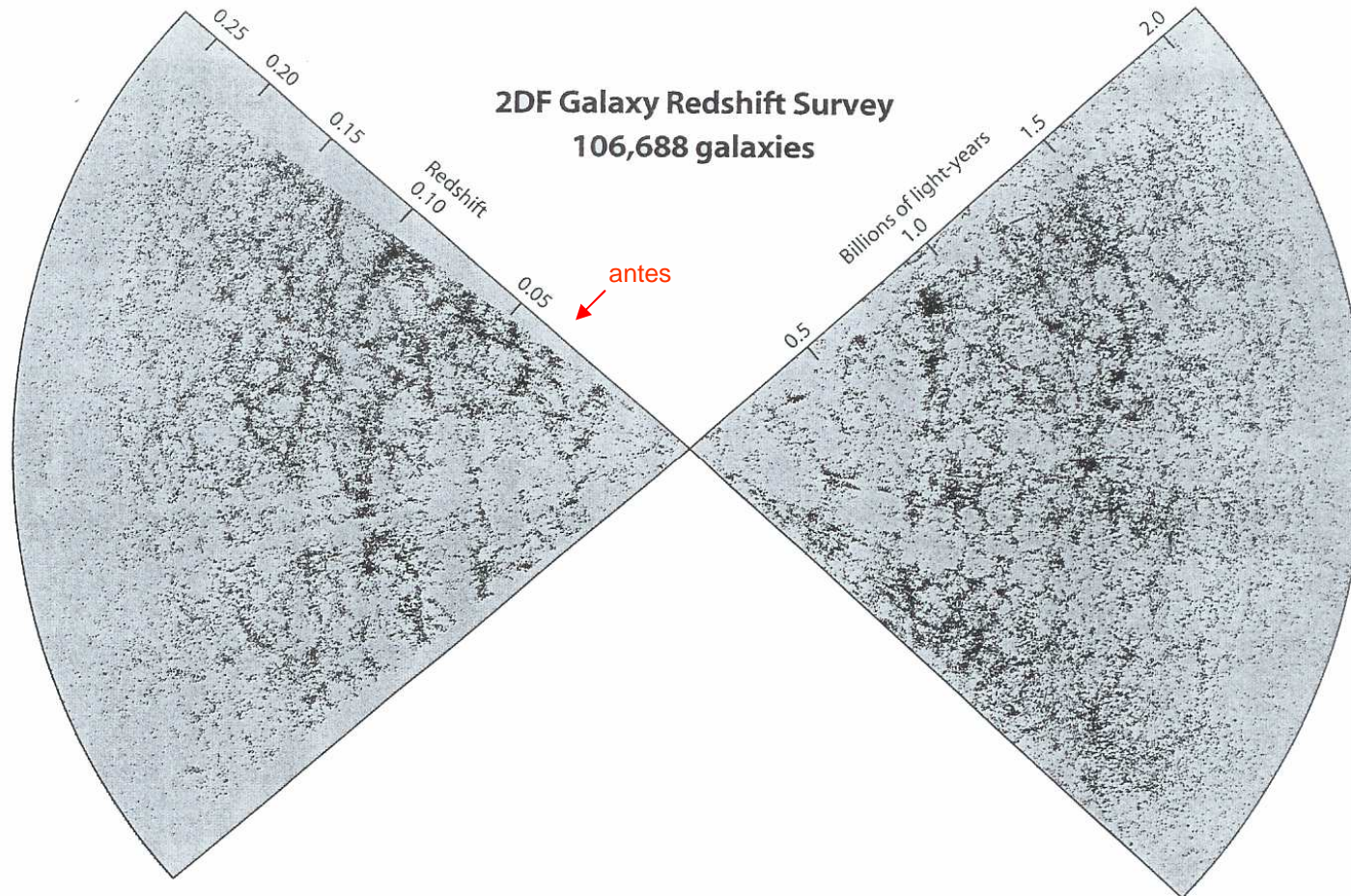


*O Enxame de Coma (regular). Virtualmente todos os “pontos de luz” visíveis são galáxias.*

*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  $10^{13} M_{\odot}$ .*

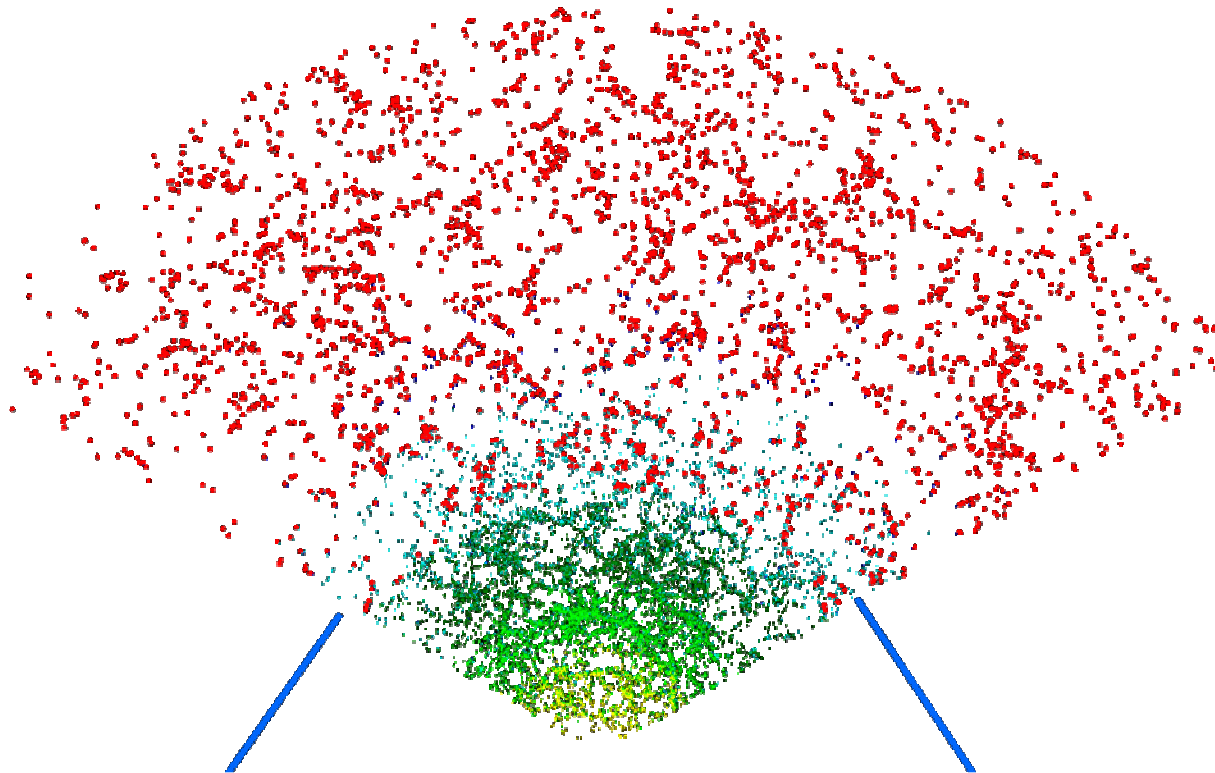
As estruturas maiores do Universo, no entanto, são os **super-enxames** de galáxias. Contêm entre **cem** e **mil** enxames de galáxias (até  $10^7$  galáxias!). O seu tamanho é de 10 a 500 Mpc e a massa  $10^{15}$ - $10^{20} M_{\odot}$ .

O super-enxame local, dominado pelo Enxame da Virgem, tem um tamanho de 10 Mpc e massa  $10^{15}$ - $10^{20} M_{\odot}$ .



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

Usando só elípticas luminosas (cerca de 60 000), com a Sloan Digital Sky Survey chegamos **três vezes** mais longe (até cerca de  $6 \times 10^9$  anos-luz). Na Figura abaixo apresenta-se a distribuição “compactada” das elípticas (a vermelho) e ainda as galáxias vistas até à mesma escala da 2DF (limites marcados com traços azuis).





## 6.3 Galáxias activas

Por definição, são galáxias que 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) diz que as seguintes “bestas” são, de facto, exactamente o mesmo fenómeno:

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

As **Seyferts** foram o primeiro tipo de AGN descoberto. Há 14 240 catalogadas, das quais 90% Ss (10% Es).

Existem no Universo próximo. Há ~9000 Sy1, ~4500 Sy2 e ~250 Sy3. A diferença entre Sy1 e Sy2 é apenas no espectro óptico: Sy1 têm riscas largas e estreitas e Sy2 apenas estreitas.

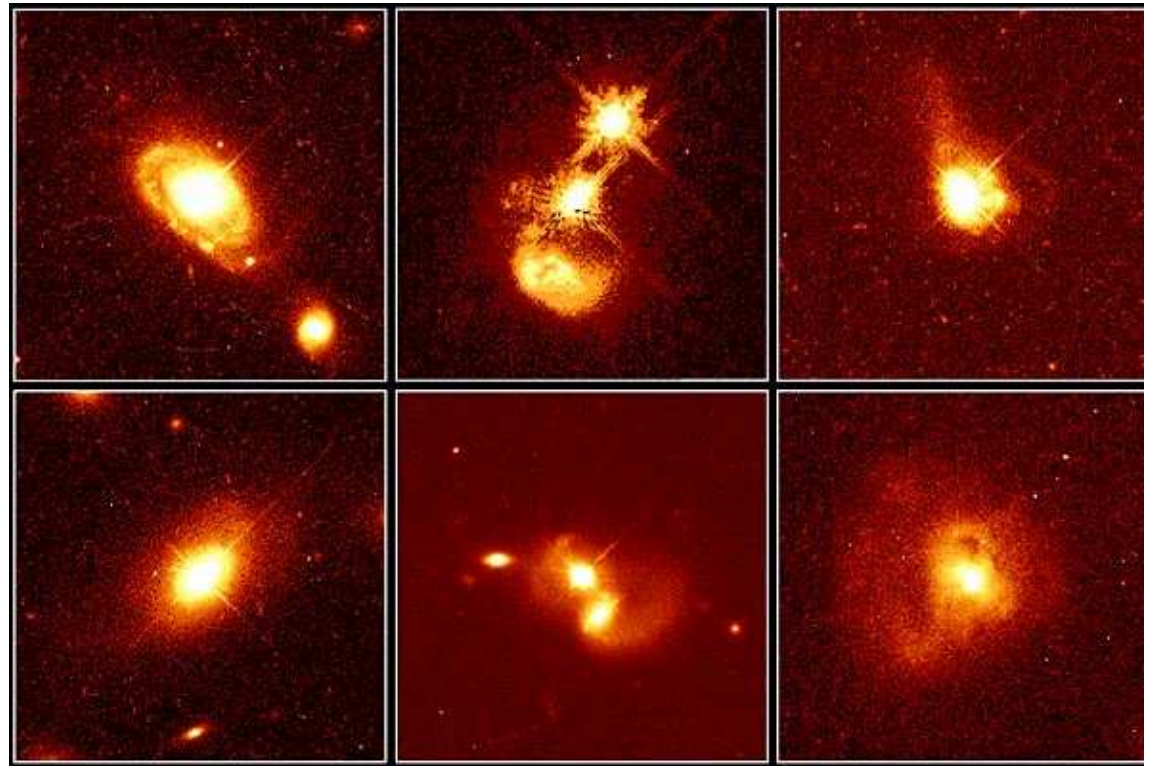
*Uma Seyfert (como a NGC7742) tem por característica principal, além do espectro, um ponto brilhante de luz central, que pode ser comparável em brilho total ao resto da galáxia.*



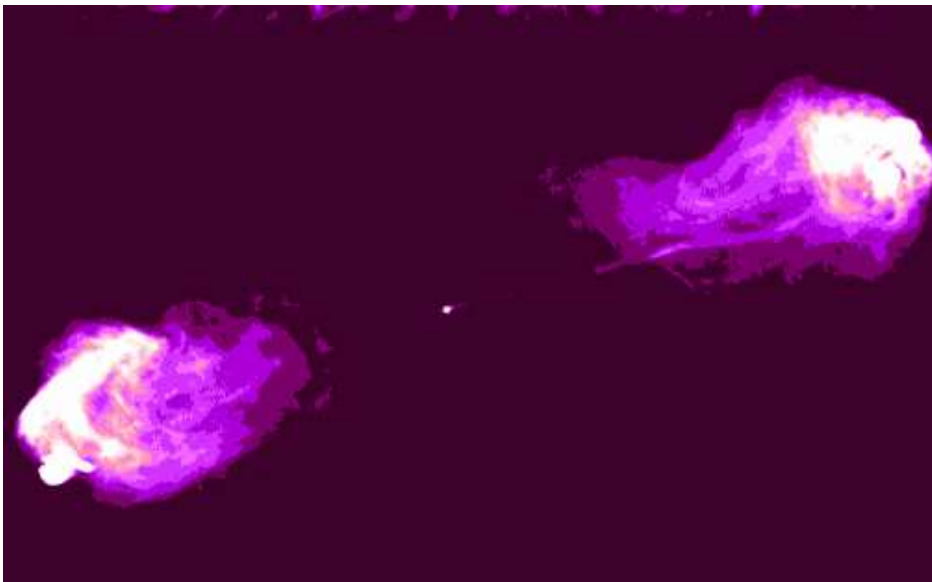
Já se conhecem 1200 **blazares**, AGN com emissão muito variável (minutos a dias). Têm, frequentemente, movimentos **superluminais** (recorde: 40c). Todos residem no Universo próximo.

Os **quasares** são o tipo mais famoso e também o mais abundante. Já se contam mais de 84 000. O seu nome revela o que são: como estrelas mas com a luminosidade de uma galáxia. Espalham-se por todo o Universo.

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

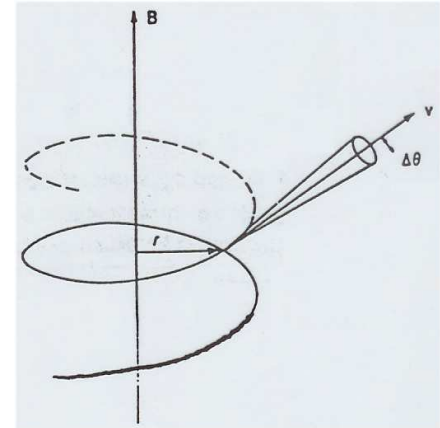


As **rádio galáxias** emitem fundamentalmente emissão contínua **sincrotrónica**. Conhecem-se milhares e residem em Es. A sua morfologia consiste em dois jactos de plasma opostos a sair de um núcleo central e a terminar em lobos.

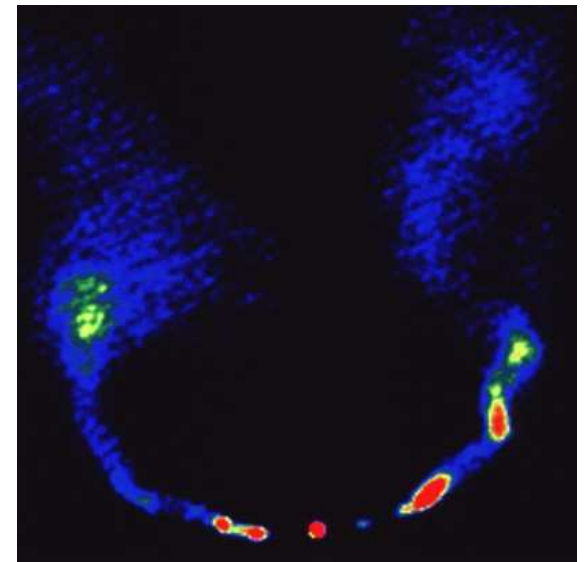


*Cygnus A, o protótipo de uma rádio galáxia Fanaroff-Riley tipo II (FR II). Os jactos opostos são supersónicos e, por isso, não se vêem. Há choques violentos nos lobos. Os jactos chegam a distâncias de 1 Mpc, bem maiores que o tamanho da galáxia hospedeira.*

*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.*



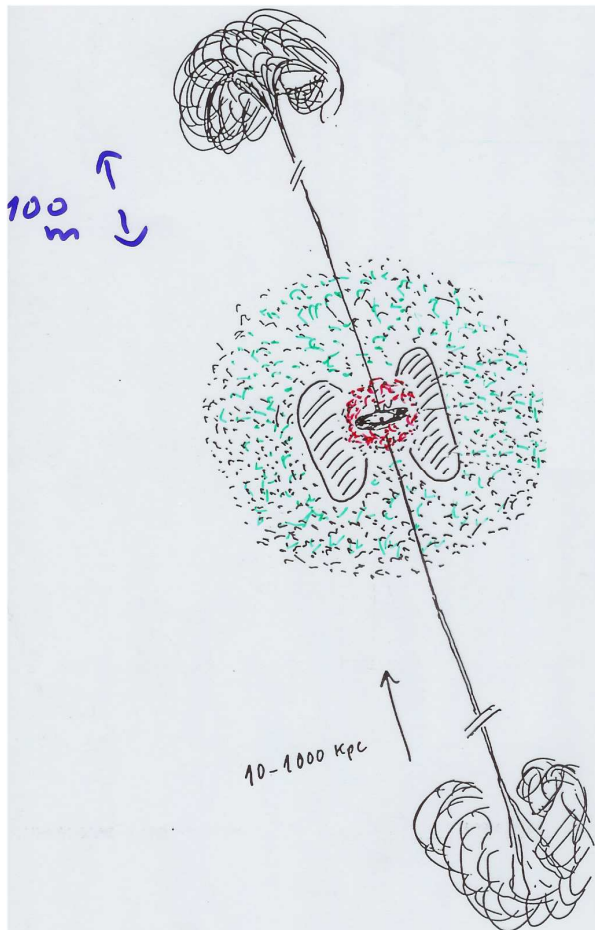
*A emissão sincrotrónica surge do movimento de sincrotrão de electrões relativistas num campo magnético.*



Uma das “peças” fundamentais do “modelo standard” de AGN que unifica todas estas bestas é um **toro molecular** que permite que, apenas por geometria, possamos “ver” este ou aquele tipo. Assim, a confirmação com o HST da sua existência, foi uma importante vitória para este modelo.



O toro molecular de poeiras do LINER 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 agregação** (a preto). Segue-se a **região de emissão de riscas largas** (BLR; a vermelho) com um tamanho de 0.1-1 pc, massa  $10^2$ - $10^4 M_{\odot}$  e temperatura  $10^4$  K. 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 e massa  $10^9 M_{\odot}$ . Finalmente dois energéticos **jectos** opostos, que saem directamente do buraco negro, podem chegar a distâncias colossais.

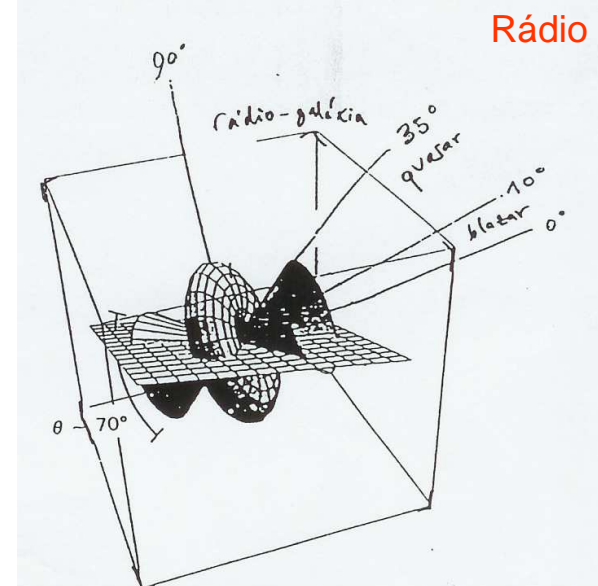
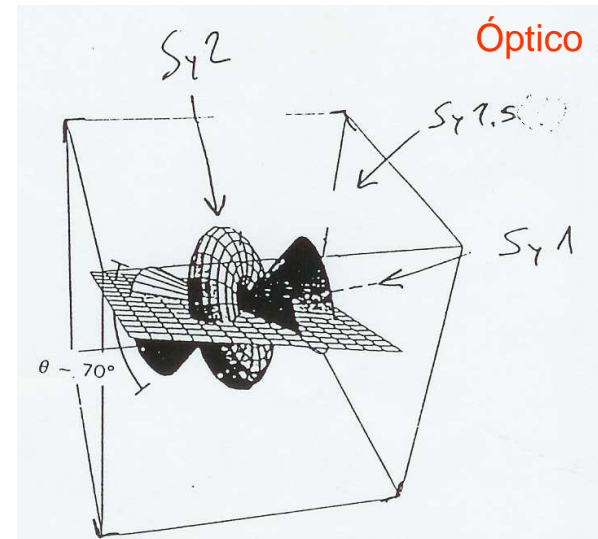
O **buraco negro** é um enigmático objecto que surge sempre que a matéria tem uma densidade superior a um valor crítico. Passa, então, a ter gravidade suficiente para nem a luz deixar escapar. O seu “raio” (dito de Schwarzschild) é dado por:

$$R_S = 2GM/c^2$$

O BN é descrito por apenas três propriedades: **momento angular**, **potencial gravítico** e **carga eléctrica**. Quando em rotação e carregado surge um campo magnético.

A unificação de AGN é feita por simples **orientação geométrica**. Conforme o ângulo de visão e o comprimento de onda da observação, veremos o mesmo modelo standard como “bestas” diferentes.

*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.*



### 6.4 Distâncias e a constante de Hubble

O grande problema da Astronomia Extragaláctica é a dificuldade em medir distâncias e, logo, a de conhecer a escala do Universo. Usa-se uma “[escada de distâncias](#)” em que vários métodos são utilizados em sucessão, de forma a sairmos da nossa vizinhança solar até chegar aos confins do Universo. O problema é o elevado erro no resultado final, acumulado de tantos métodos.

Hubble, em 1929, foi o primeiro a constatar a expansão do Universo e ainda a descobrir que quanto mais longe uma galáxia se encontra de nós mais depressa “foge”. Conhecendo a razão desta expansão ([constante de Hubble](#),  $H_0$ ) relacionamos directamente a velocidade (medida) de expansão com a distância da galáxia ( $v_{rec} = H_0 D$ ). O problema está em que a constante de Hubble ainda não é conhecida com elevada precisão...

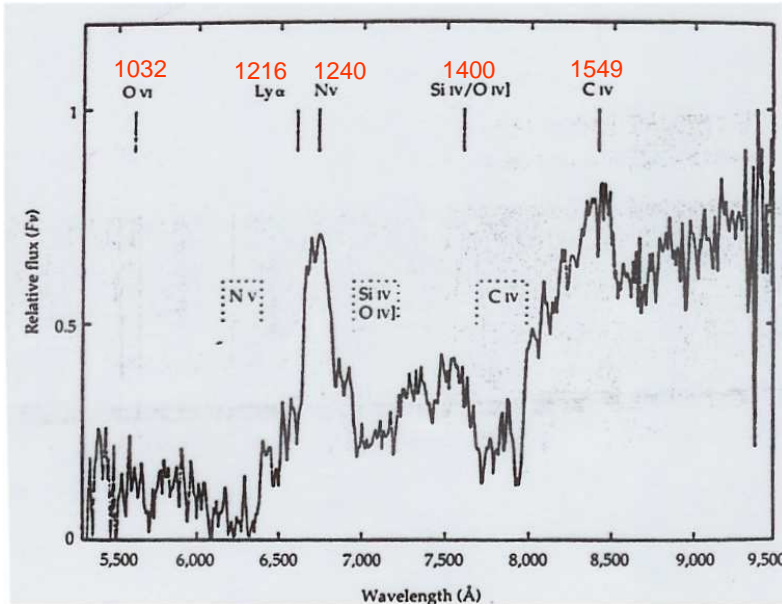
Por efeito de Doppler, a radiação de todas as galáxias no Universo em expansão sofre um desvio para o vermelho ([redshift](#)  $z$ ). Este é observacionalmente dado por:

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

A última igualdade só é válida para  $z \ll 1$ , ou seja, enquanto a velocidade de recessão não é relativista. A partir daí a fórmula que é válida é:

$$v_{rec}/c = [(1+z)^2 - 1] / [(1+z)^2 + 1]$$

Na prática, estimamos  $z$  de uma galáxia (ou quasar, ou outro objecto qualquer) a partir do seu espectro óptico: é fundamental a identificação de várias riscas e depois a determinação do seu desvio para o vermelho em relação ao repouso (laboratório,  $\lambda_0$ ). Como exemplo:



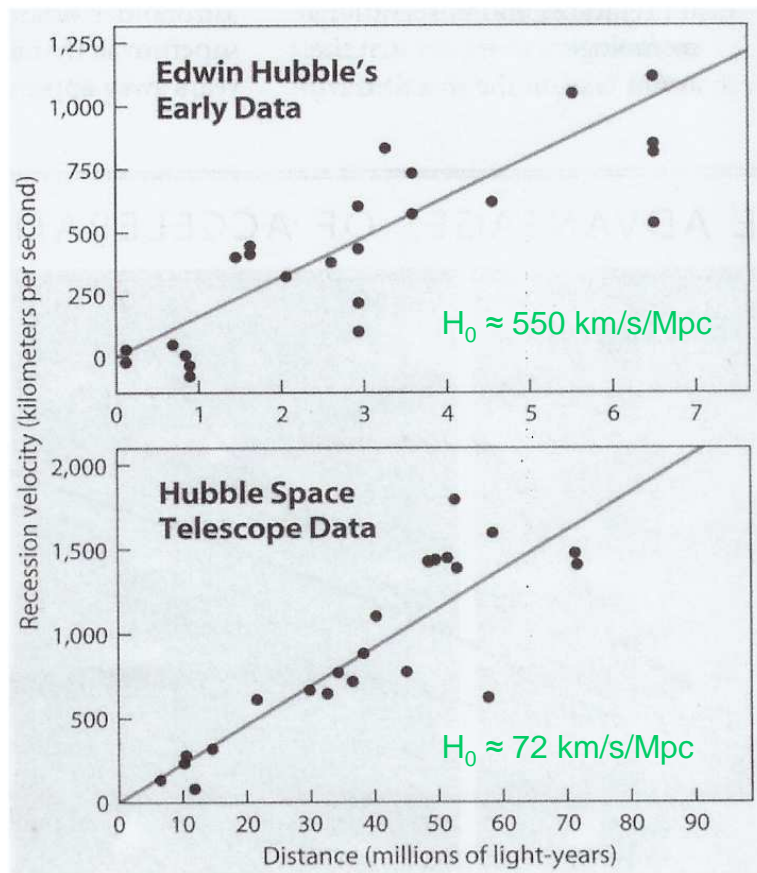
*Espectro óptico de um quasar. A gama de comprimentos de onda **observados** é dada em baixo. A identificação de cinco riscas é dada em cima, junto com os seus  $\lambda_0$  (laboratório). Calcula-se então, para cada uma, o valor de  $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ . Faz-se a média e obtém-se  $z \approx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

A noção de distância, para o Universo longínquo, passa a ser bem diferente da convencional e, de facto, conforme o contexto em que trabalhamos temos três distâncias disponíveis: **própria** (teórica), de **luminosidade** e **angular**. Esta última é a mais utilizada quando fazemos imagens de objectos longínquos. Depende do parâmetro de densidade do Universo,  $\Omega_0$ :

$$D_A = [2c(1 - \Omega_0 - (1 + \Omega_0 z)^{0.5})(1 - (1 + \Omega_0 z)^{0.5})] / [H_0 \Omega_0^2 (1+z)^2]$$

O redshift  $z$  é uma forma não ambígua de medir distâncias no Universo e é, por isso, a maneira usual como se apresentam distâncias a galáxias, AGN, etc.

Abordemos agora a questão da constante de Hubble  $H_0$ . Como vimos, esta é fundamental para passarmos de  $z$  a distância (junto com  $\Omega_0$ , de que falaremos no Capítulo 7). O problema é que, desde a sua introdução por Hubble em 1929, a sua exacta determinação tem-se revelado incrivelmente difícil.



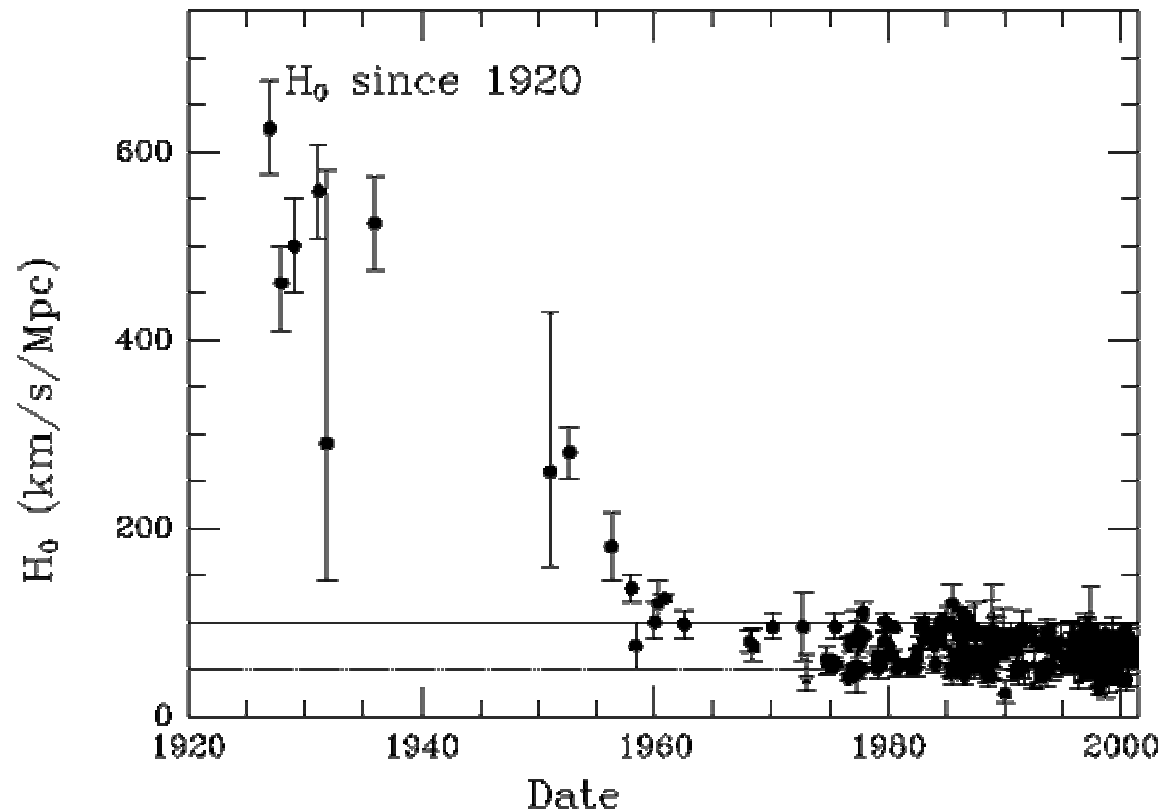
*Como indicador de distância a todas as galáxias da sua amostra (no Grupo Local), Hubble utilizou estrelas variáveis Cefeidas. Mais tarde descobriu-se que estas existem em dois tipos e que Hubble os misturou. Os dados do HST são “apenas” até ao Enxame da Virgem.*



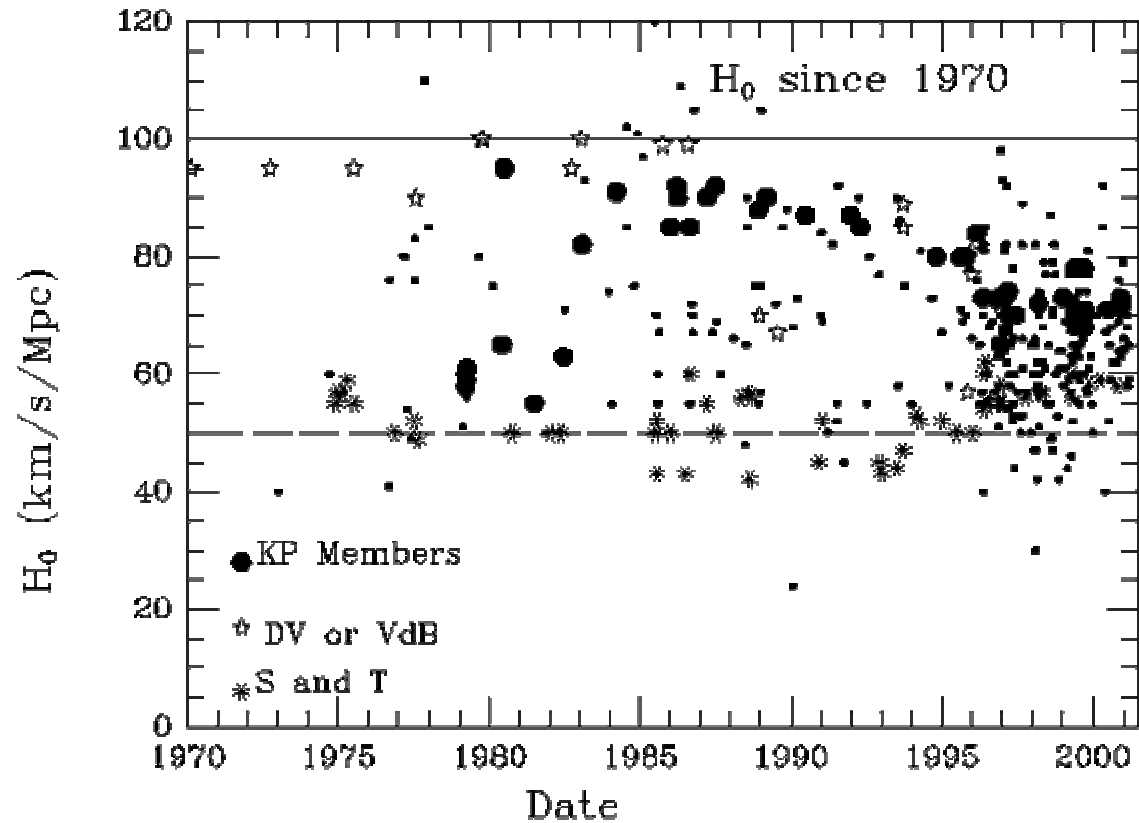
O valor da constante de Hubble no período 1927-2000.

Podemos separar a sua evolução em três períodos:

- i) **1927-1958**, quando desceu de cerca de 600 km/s/Mpc para perto dos 100 km/s/Mpc.
- ii) **1958-1985**, quando o seu valor estabilizou entre 50 e 100 km/s/Mpc mas as medições não eram muitas e os erros eram ainda grandes.
- iii) **1985-hoje**, quando, incrivelmente, apesar do imenso número de medições, ainda temos um intervalo de incerteza (67-71 km/s/Mpc).



*O período 1985-hoje em mais pormenor. Embora com uma tendência para ter mais valores no intervalo 67-71 km/s/Mpc, ainda existem resultados recentes que vão tão baixo quanto 40 km/s/Mpc ou tão alto quanto 92 km/s/Mpc.*



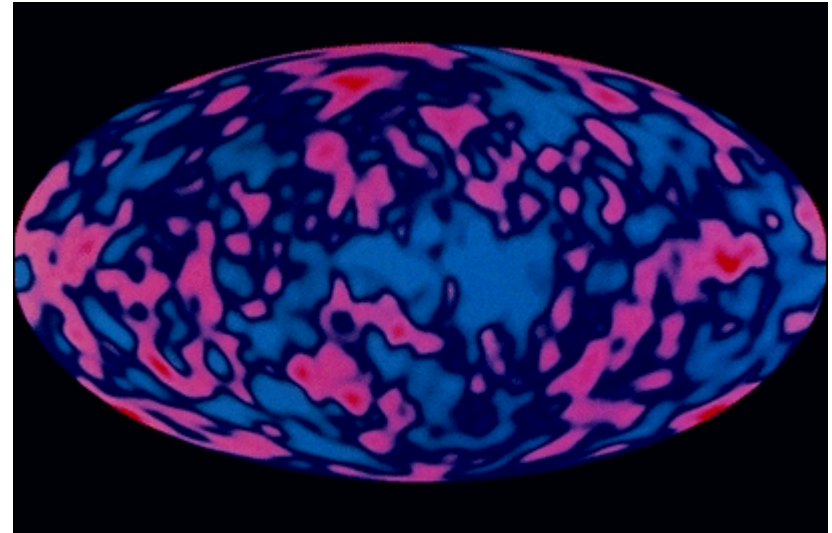
Uma boa forma de tentar fixar um intervalo relativamente pequeno é tomar a mediana (por ex.) das centenas de medições efectuadas recentemente. O intervalo mais consensual é

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

## 6.5 Evolução

Após o Big Bang (modelo apresentado no próximo capítulo) o universo “visível” (nas microondas, de facto, de forma mais proeminente) surge apenas 380 000 anos depois ( $z=1100$ ) no ruído cósmico de fundo (CMB).

*O CMB é muito homogêneo, numa parte em  $10^4$ , que são as flutuações térmicas apresentadas.*



É a partir das flutuações iniciais do CMB que tem lugar a formação, em cadeia, de todas as estruturas do Universo. Pensa-se que a matéria escura dominou essa formação. Em sequência:

$z \sim 1100$ ,  $t_U \sim 380\,000$  anos – Estruturas primordiais (nuvens de gás)

$z \sim 100$ ,  $t_U \sim 15 \times 10^6$  anos – Estruturas menores (nuvens de gás)

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

$z \sim 15$ ,  $t_U \sim 260 \times 10^6$  anos – Galáxias; formação estelar começa em Ss (e continua até 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 continuamente (agregação); formam-se estrelas ainda mais intensamente (duas vezes mais com o pico a  $z \sim 0.5$ )

$z \sim 0-1$ ,  $t_U \sim 5-14 \times 10^9$  anos – Região de validade da classificação de Hubble para as galáxias

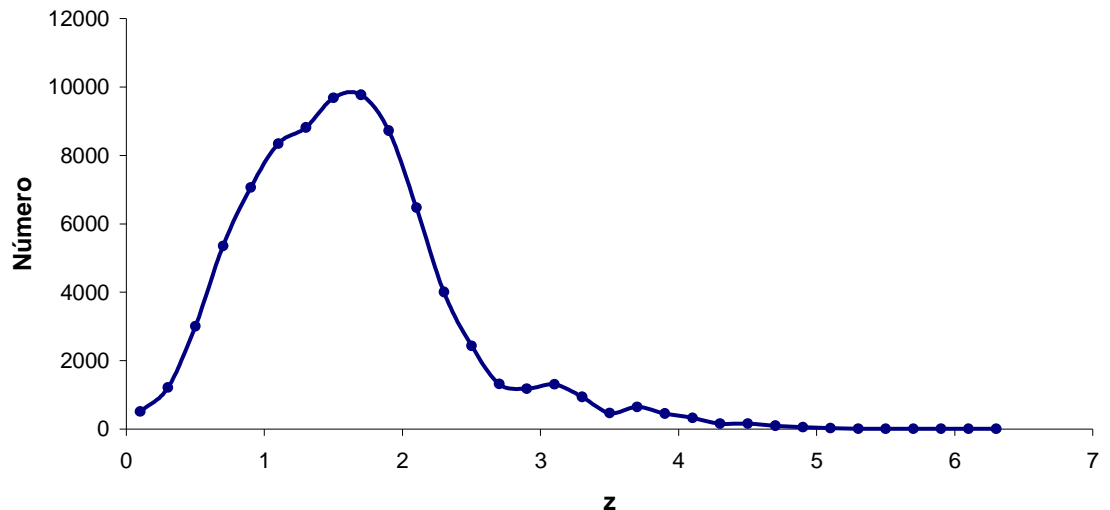
$z < 0.01$  – Formação estelar quase cessa (1/10 da do início)

Qual a evolução de galáxias activas?

A interpretação de 10% de todas as galáxias conterem AGN é a de que **todas** foram AGN 10% do tempo. Por exemplo, no centro da nossa galáxia há um buraco negro supermassivo ( $4 \times 10^6 M_{\odot}$ ) “dormente”.

À luz do modelo standard de AGN os quasares são a sonda utilizada para traçar a evolução de AGNs.

Distribuição para 82554 QSOs (Véron12th - 2006)



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

$z = 6.37$  – 1º 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 são activas nesta altura)

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

$z \sim 0$ ,  $t_U \sim 14 \times 10^9$  anos – Galáxias normais com BN supermassivos “dormentes” no centro

## 7 – COSMOLOGIA

O modelo standard para a formação e evolução do Universo como um todo é o do **Big Bang**.

<i>Estado inicial</i>	$t_U \sim 0s$		<i>singularidade</i> : Universo em $<10^{-22}m$
<i>Explosão</i>			Universo todo em expansão desde então (balão 4D) Origem das leis da Física e <i>quatro</i> forças fotões criam <i>protões</i> e <i>anti-partículas</i>
	$t_U \sim 10^{-43}s$	$T_U \sim 10^{33}K$	
<i>Inflação</i>	$t_U \sim 10^{-35}-10^{-32}s$	$T_U \sim 10^{27}K$	expansão exponencial (cresce $10^{50}$ vezes) – <i>inflatão</i>
	$t_U \sim 10^{-23}-10^{-5}s$	$T_U > 10^{12}K$	criação de $p$ , $n$ , $e$
	$t_U \sim 10^{-4}s$	$T_U \sim 10^{12}K$	“começa” a Relatividade Geral (temperaturas “físicas”)
	$t_U \sim 1s$	$T_U \sim 10^{10}K$	criação de <i>fotões</i> , $e^+$ , $\nu$ , etc.
<i>Nucleossíntese</i>	$t_U \sim 14s$	$T_U \sim 3 \times 10^9 K$	$p+n$ (começa a formação de nucleões)
	$t_U \sim 100s$		forma-se ${}^2H_1$ ( $\equiv D$ )
	$t_U \sim 3min$	$T_U \sim 10^9 K$	$D + D \rightarrow {}^3He_2 + n$ $D + {}^3He_2 \rightarrow {}^4He_2 + n + e^+$
			forma-se ${}^3H_1$ , Li, Be; Universo com $\sim 75\%$ H e $25\%$ He

RADIAÇÃO Leptões Bariões

$t_U \sim 35$  min       $T_U \sim 3 \times 10^8$  K      formação de átomos iniciada

$t_U \sim 6$  meses       $T_U \sim 10^6$  K

$t_U \sim 10^5$  anos

matéria electricamente neutra, fótons iniciam liberdade

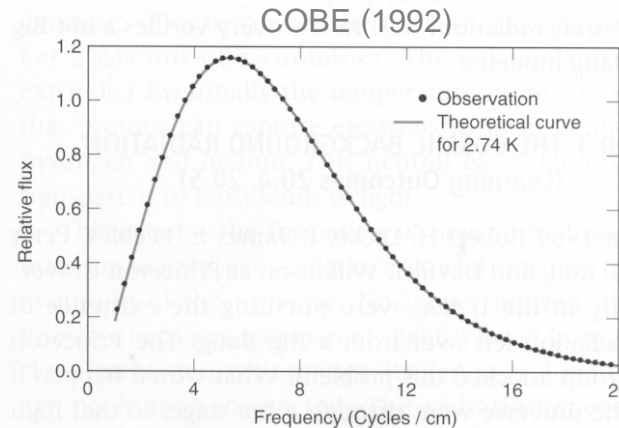
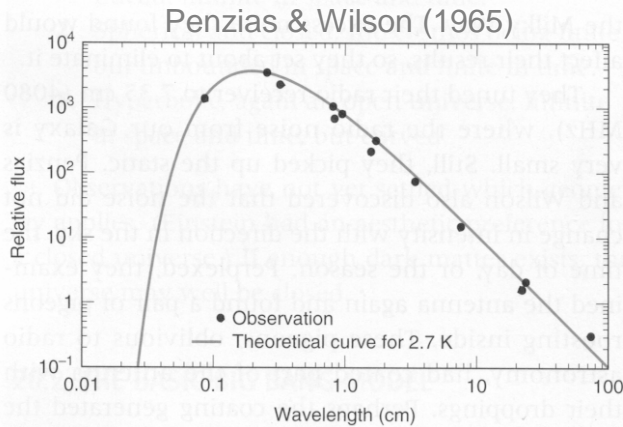
*Recombinação*

$t_U \sim 380\,000$  anos       $T_U \sim 3000$  K  
( $z \sim 1100$ )

matéria dissocia-se da radiação; deixa de ser opaca

Ora, é a partir deste estágio final que o Universo passa a ser transparente e que temos o primeiro acesso electromagnético ao mesmo via CMB (com neutrinos vê-se até  $t_U \sim 1$  min; ondas gravitacionais  $t_U < 1$  min).

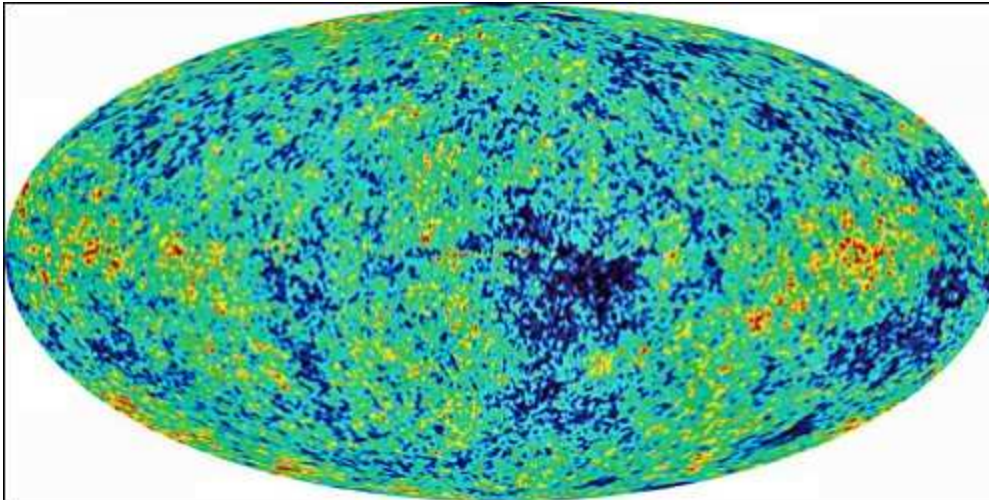
O CMB foi descoberto por acidente por Penzias e Wilson em 1965. A sua temperatura (2.725 K) é exactamente a prevista devido à expansão do Universo ( $T/z \sim 3000$  K / 1100  $\sim$  2.7 K)



Os erros de medição do COBE são  $\sim 0.03\%$ .

O WMAP (lançado em 2003 e ainda no espaço) veio trazer mais resolução aos mapas do CMB. Ainda, pelas implicações em parâmetros cosmológicos, deu a idade mais precisa para o Universo desde sempre:

$$13.7 \times 10^9 \text{ anos } (\pm 1\%)$$



*O CMB visto pelo WMAP*

Uma menção final a mais três constantes cosmológicas fundamentais, para além de  $H_0$ . No fundo, todos os restantes nos dão a **densidade de massa e energia** do Universo.

O **parâmetro de densidade do Universo**,  $\Omega_0$ , é dado em função de uma **densidade de massa crítica** ( $\rho_c$ ). 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 ( $\Omega_0<1$ ). Usando  $\rho_0$  como a densidade local ( $z=0$ ) do Universo:

$$\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c = 8\pi G \rho_0 / (3H_0^2)$$

E temos:  $\rho_c \approx 2 \times 10^{-33} H_0^2 \text{ g/cm}^3$



Durante muitos anos (de facto décadas) acreditou-se que vivíamos num Universo crítico ( $\Omega_0=1$ ) sem qualquer contribuição energética significativa (Universo quase só massa). O parâmetro de densidade de energia (a **constante cosmológica**  $\Lambda$ ) valia zero. Agora sabemos que estávamos errados duas vezes.

Antes da correcção desses dois erros, a definição de um novo parâmetro: o da **desaceleração do Universo** ( $q_0$ ). É dado por:

$$q_0 = \Omega_0/2 - \Lambda$$

Assim, até há uns 15 anos atrás acreditava-se que:  $q_0 = 0.5$ ,  $\Omega_0 = 1$ ,  $\Lambda = 0$  (Universo em desaceleração)

Entretanto, a massa bem somada de superenxames de galáxias (incluindo em 90% matéria escura) nunca dava para chegar sequer perto da densidade crítica. As melhores estimativas colocam (ainda hoje):

$$\Omega_0 = 0.35$$

Ora, mantendo  $\Lambda$  nulo, a nova versão valia:  $q_0 = 0.18$ ,  $\Omega_0 = 0.35$ ,  $\Lambda = 0$  (Universo menos desacelerado)

O problema é que a Teoria da Inflação exige um Universo de geometria plana e este só acontece se:

$$\Omega_0 + \Lambda = 1$$

Após uns anos de discussão e de “dor de barriga” para muitos inflacionistas, a luz fez-se há poucos anos quando amostras de supernovas distantes e o WMAP revelaram que, de facto, temos  $\Lambda \approx 0.65$  (logo  $q_0 \approx -0.5$ ). O Universo, afinal, está em aceleração.

Um alívio para todos!...

... OU TALVEZ NÃO!

Agora temos um Universo que não só tem 90% da sua matéria desconhecida mas, pior, 2/3 de tudo o que o compõe é ainda mais misterioso (energia escura? quintessência? multi-dimensões?). Em resumo:

100% do Universo:

- 65% Energia Escura
- 32% Matéria Escura
- 3% Matéria “conhecida”

*QUANTO MAIS O CONHECEMOS...*

*... MENOS DELE SABEMOS!*