

Compreendendo o Universo através das galáxias

Marcio A.G. Maia



Observatório
Nacional



DES-Brazil
Dark Energy Survey



61ª Reunião Anual da SBPC
12 a 17 de julho de 2009
Amazônia Ciência e Cultura
Universidade Federal do Amazonas, UFAM | Manaus, AM

REALIZAÇÃO



Índice dos tópicos abordados

Histórico da astronomia

Descobertas que mudaram nossa concepção do universo

Galáxias e suas propriedades

Radiogaláxias, quasares, buracos negros supermassivos

Estimadores de distâncias

Tamanhos de alguns objetos cósmicos

Aglomerados de galáxias e o meio intra-aglomerado

Lentes gravitacionais

Estrutura em grande escala

Linha de tempo do universo

Observações cosmológicas

Simulações e o futuro do universo

A energia escura

Capítulo 1

Breve (e incompleta) história da astronomia.

Descobertas que mudaram nossa concepção do universo.

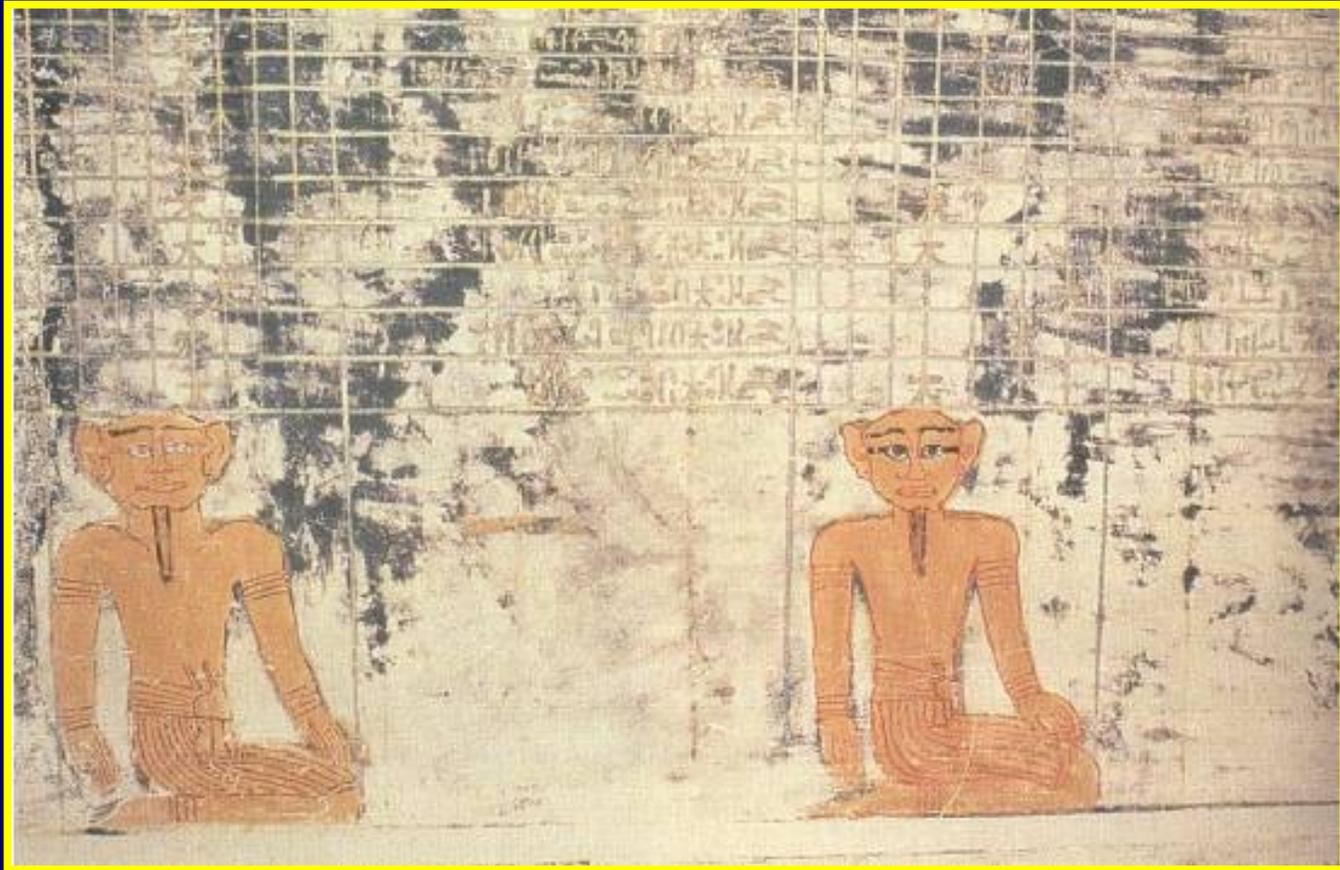
O que são galáxias?

Propriedades das galáxias.

Massa, luminosidade e conteúdo estelar das galáxias.

Começando com um pouco de História ...

Astrônomo - Profissão Perigo



Tampa de caixão de um Faraó egípcio mostrando dois astrônomos assistentes (2000-1500 AC). Hieróglifos listam estrelas, cujo nascer indicam o início de cada hora da noite.

Astronomia e Química começaram caminhando juntas

- Primeiros químicos: Mulheres preparando perfumes na Babilônia (Tapputi - a perfumista).
 - Leucipo e Demócrito: A natureza da matéria -> Átomo
 - Aristóteles: Terra, Água, Ar, Fogo. Estrelas e planetas -> Éter (quinto elemento).
 - Khemeia (química) praticada pelos egípcios, com seus conhecimentos secretos transmitidos às mulheres por anjos caídos "em tentação".
- Processos químicos usados em embalsamamentos.
Sua evolução levou a confecção do vidro, tinturas, e metalurgia.

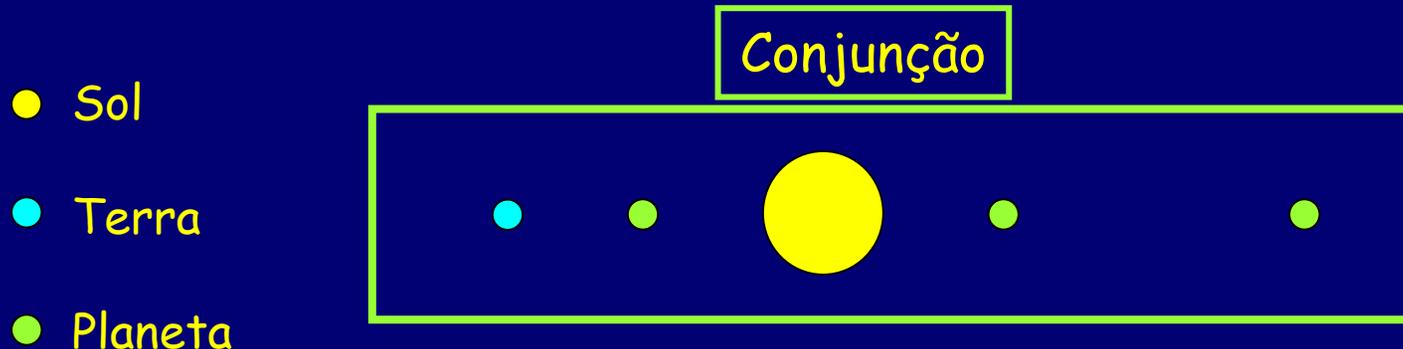
Astronomia e Química começaram caminhando juntas



Astronomia e Química começaram caminhando juntas

Da mesma forma que a **Astrologia** tentava desvendar os segredos do Universo, a **Khemeia** achava que podia fazer isso mostrando como a Terra se relacionava com o Cosmo.

A conexão *Astrologia-Khemeia* era tão forte a ponto de "feiticeiros e magos" usarem termos de astronomia para esconder segredos do ofício. Ex.: Ligar dois metais --> **Conjunção** entre Vênus (cobre) e Júpiter (estanho).



Astronomia e Química começaram caminhando juntas

Ao longo da história, Alquimia e Astrologia estiveram juntas, uma vez que seus praticantes estavam sempre interessados nestas duas "disciplinas".

Com o tempo a Química surgiu como ciência originária da Alquimia e a Astronomia livrou-se das crendices da Astrologia.

Hoje ninguém tenta transformar outros metais em ouro.

Como é que alguém pode creditar que os astros exercem alguma influência sobre nossos destinos ?

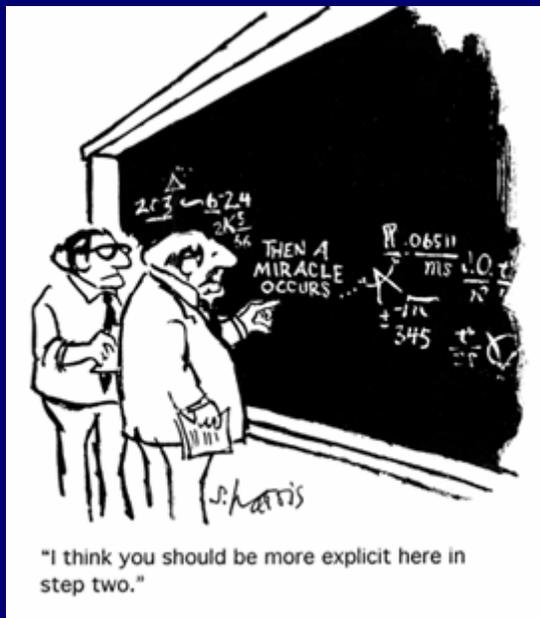
Se alguém acredita na "eficácia" das previsões astrológicas, veja artigo de Carlos Wuensche na Revista Ciência Hoje 256 (fevereiro de 2009).

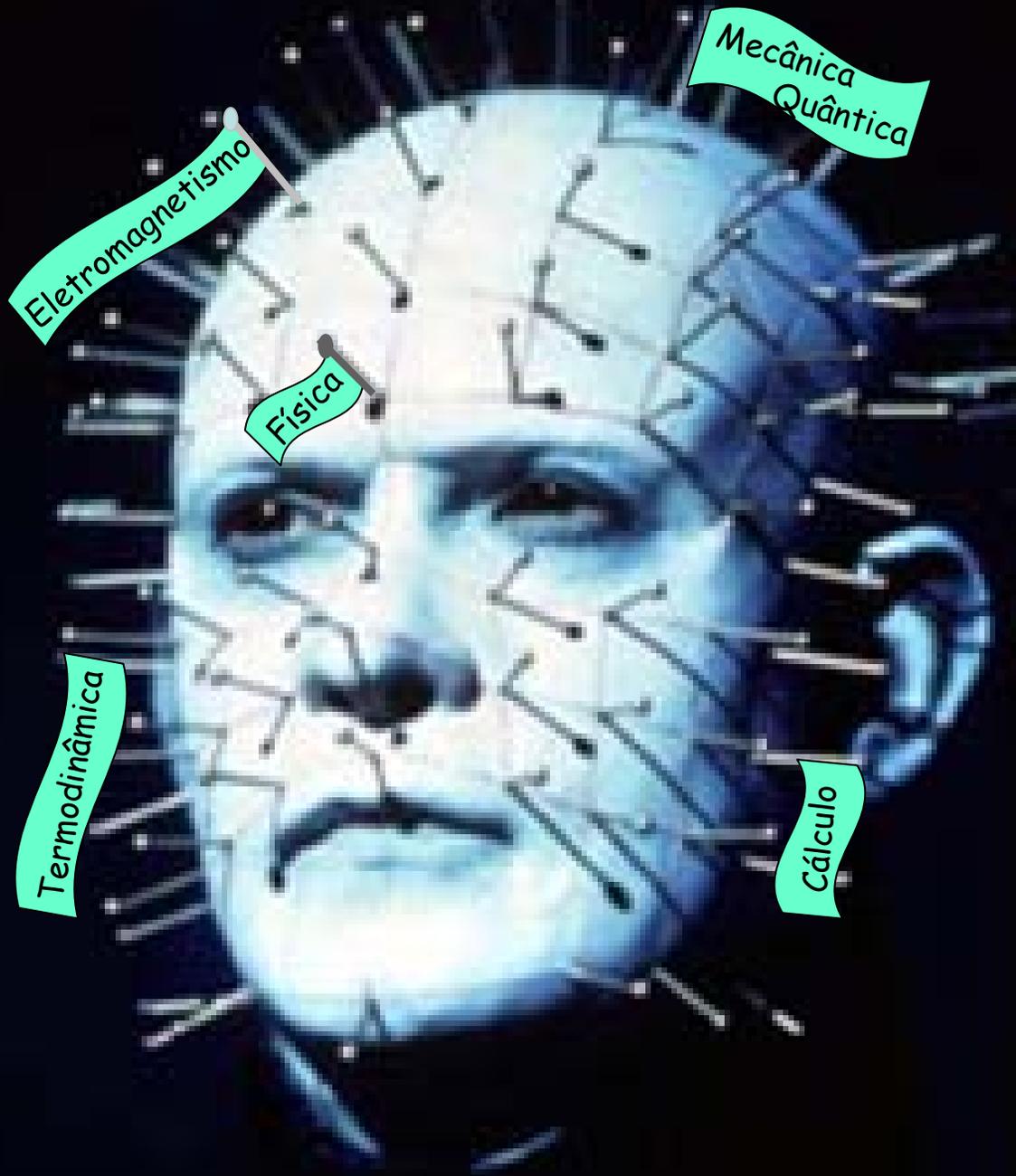
Astrologia X Astronomia



Qual a diferença entre elas ?

Física e Matemática, muuuiiita Física e Matemática !!!





Astronomia "Filosófica"

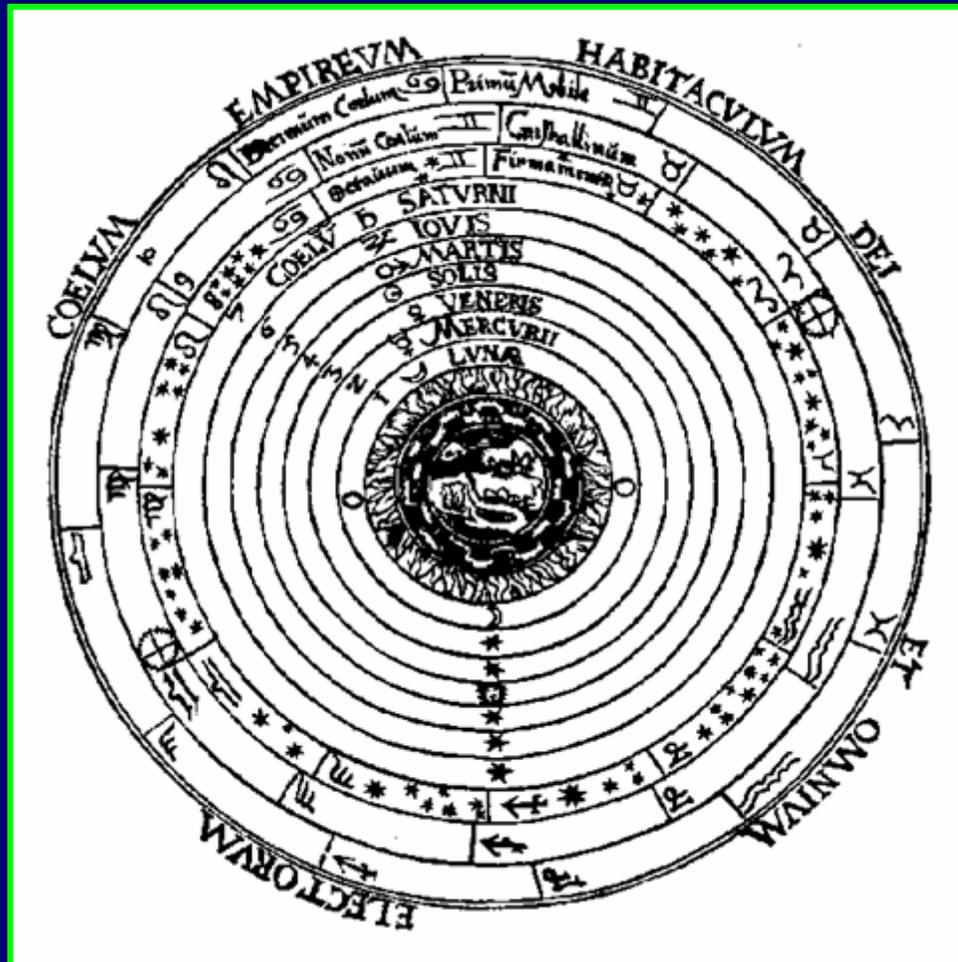
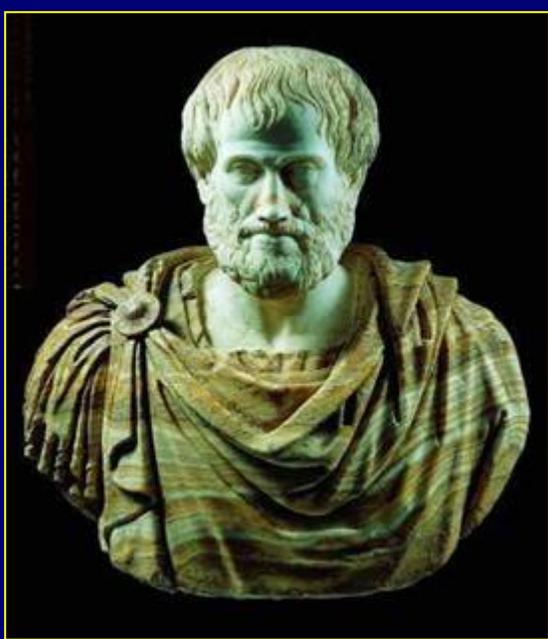
No início, a astronomia mesmo sendo o resultado de observações do céu, sofreu a influência de correntes filosóficas de época para a explicação dos fenômenos e na definição de modelos de universo.

Estas influências eram fortes, pois ainda não estavam estabelecidas as ciências de suporte (física, matemática) e nem a tecnologia necessária (telescópios e detectores) que permitissem uma compreensão dos fenômenos celestes dentro de bases científicas. Mesmo com estas limitações, surgiram algumas idéias interessantes.

Veremos a seguir, "instantâneos" de alguns conceitos astronômicos ao longo dos últimos dois milênios e a evolução da astronomia para um patamar de ciência.

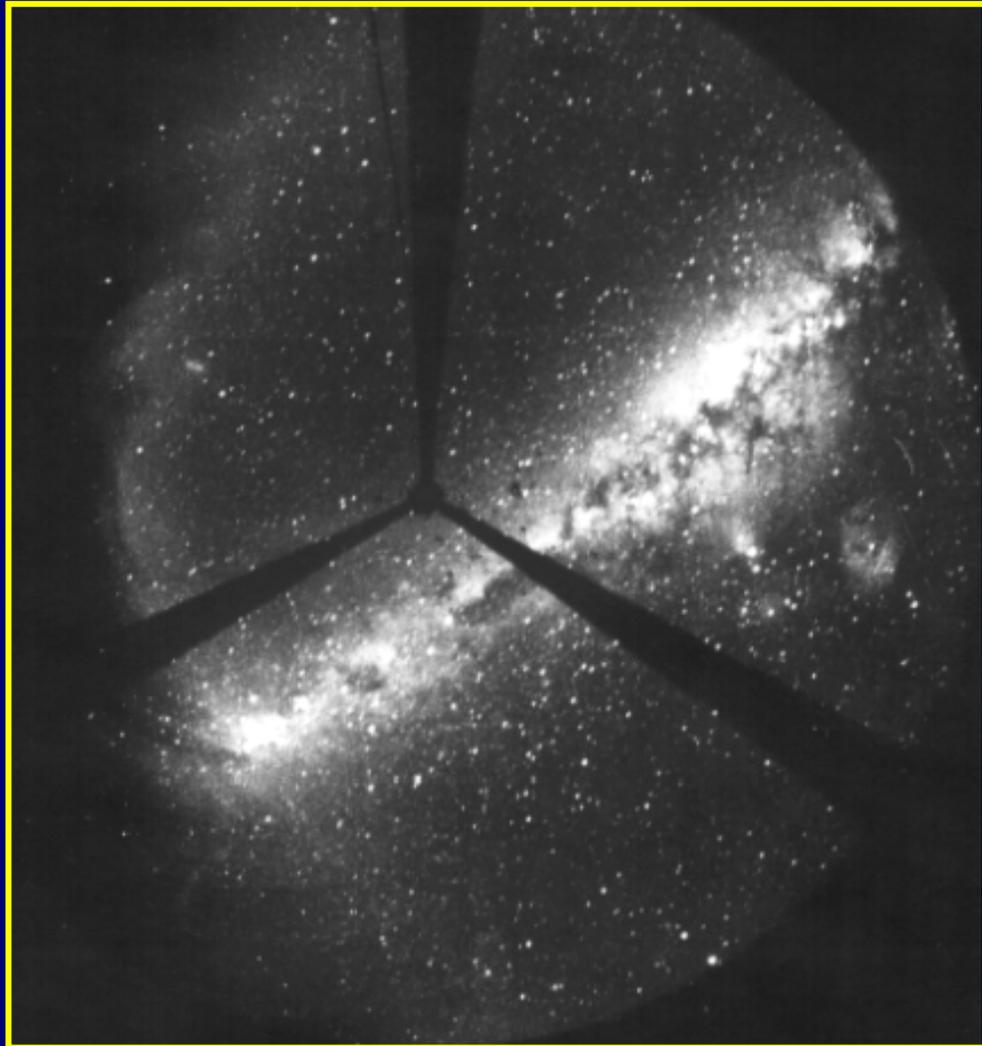
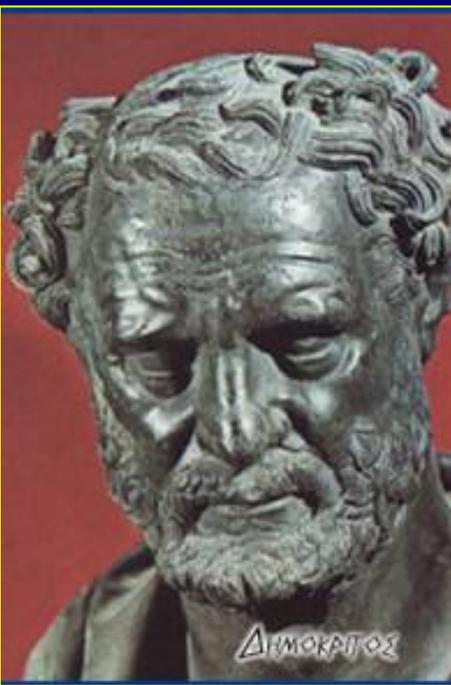
Aristóteles (350 A.C.)

Defende idéia de Platão na qual a Terra seria o centro do Universo, com o Sol, planetas e as estrelas girando em torno dela, fixadas em esferas cristalinas.



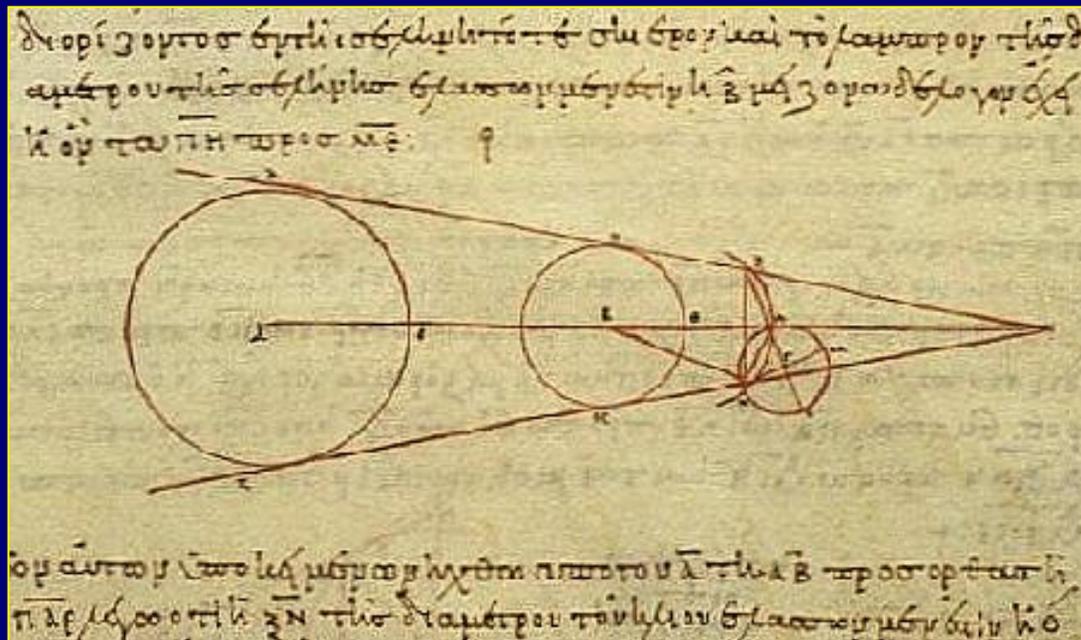
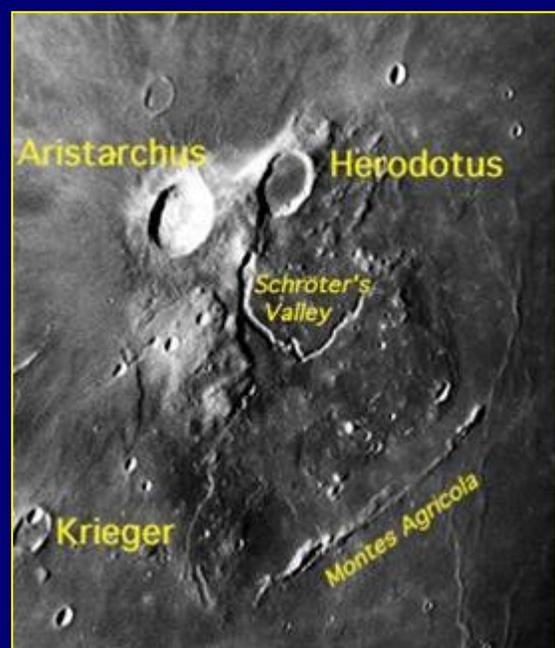
Demócrito (400 A.C.)

Atribui a estrelas não resolvidas, o brilho da banda luminosa cortando o céu noturno. Mais tarde viria a ser chamada de Via Láctea.



Aristarco de Samos (~250 A.C.)

O primeiro a propor o sistema Heliocêntrico.



ARISTARCHI
DE MAGNITVDINIBVS,
ET DISTANTIIS SOLIS,
ET LVNAE, LIBER

CVM PAPPI ALEXANDRINI
explicationibus quibusdam.

A FEDERICO COMMANDINO
Vrbinate in latinum conuersus, ac
commentarijs illustratus.

Cum Priuilegio Pont. Max. In annos X.



PISAVRI, Apud Camillum Franciscinum.
M D LXXII.

Nicolau de Cusa (~1440)

Propôs conjunto de idéias avançadas na época. Ele acreditava que a Terra girava em torno do seu eixo e que ela deveria girar em torno do Sol.

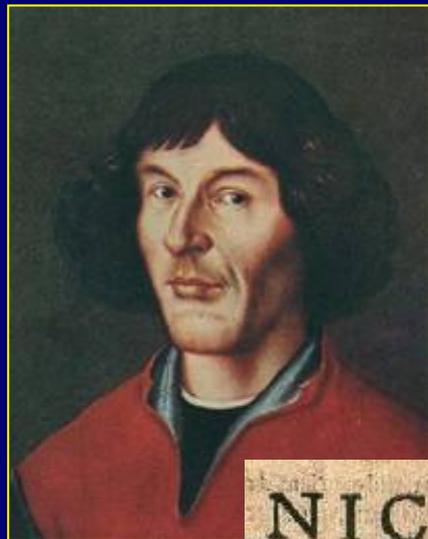
Propôs que as estrelas eram similares ao nosso Sol, e que elas deveriam ser orbitadas por mundos habitados.

Especulou que o Universo deveria ser infinito. Como não possuía um ponto central, os conceitos de "em cima" e "em baixo" eram conceitos inúteis no espaço.

No entanto, suas idéias estavam permeadas de teologia, uma influência de sua vida eclesiástica e não possuíam uma base observacional de suporte.

Nicolau Copérnico (1543)

Em seu livro *De Revolutionibus* apresenta a teoria Heliocêntrica. Explica as estações do ano. No entanto, não havia base experimental.



NICOLAI COPERNICI TORINENSIS
DE REVOLUTIONIBUS ORBIUM
CAELI, Libri VI.

Habes in hoc opere iam recens nato, & edito, studiose lector, Motus Stellarum, tam fixarum, quam erraticarum, cum ex veteribus, tum etiam ex recentibus observationibus restitutos: & novis insuper ac admirabilibus hypothesebus ornatos. Habes etiam Tabulas expeditissimas, ex quibus eosdem ad quodvis tempus quam facillime calculare poteris. Igitur tunc, lege, frue.

Exemplum huius libri.

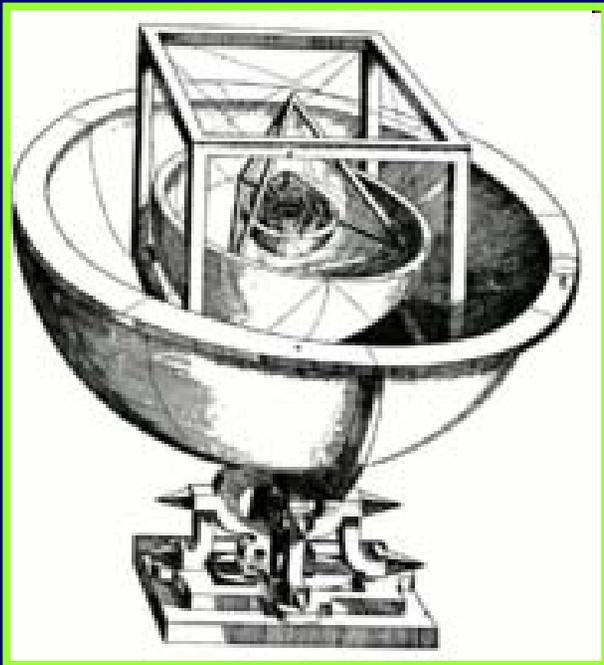
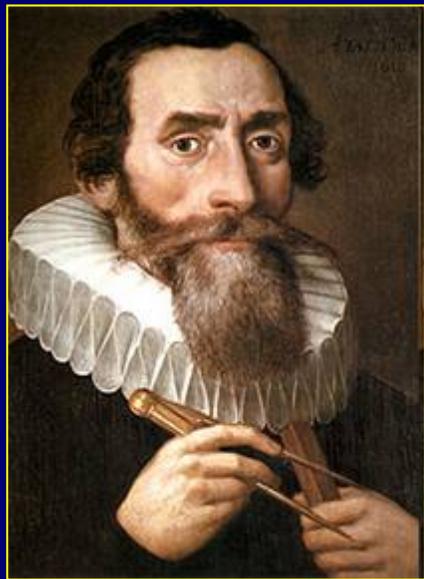
Norimbergae apud Ioh. Petreum,
Anno M. D. XLIII.

NICOLAI COPERNICI
net, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducit. Sextum denique locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circumcurrens, in medio vero omnium residet Sol. Quis enim in hoc



Johannes Kepler (~1605)

Matemático, astrônomo e astrólogo. Utilizou observações de Tycho Brahe e propôs órbitas elípticas para planetas. Suas leis sobre movimento planetário influenciaram Newton sobre a gravitação.



Modelo platônico do sistema solar construído por Kepler.



Horóscopo feito por Kepler para o general Wallenstein

Nem sempre é fácil explicar as coisas...



Galileo Galilei (1610)

Eppur si muove!

Utilizando uma luneta, por ele (re)inventada, confirma que a Via Láctea é formada por estrelas. Além disso, vê satélites de Júpiter o que reforça a teoria heliocêntrica.



"A Galáxia não é nada mais do que uma massa de inumeráveis estrelas plantadas juntas em aglomerações. Para qualquer parte que você dirija o telescópio, imediatamente uma vasta multidão de estrelas apresenta-se a vista."

Galileo (1610)

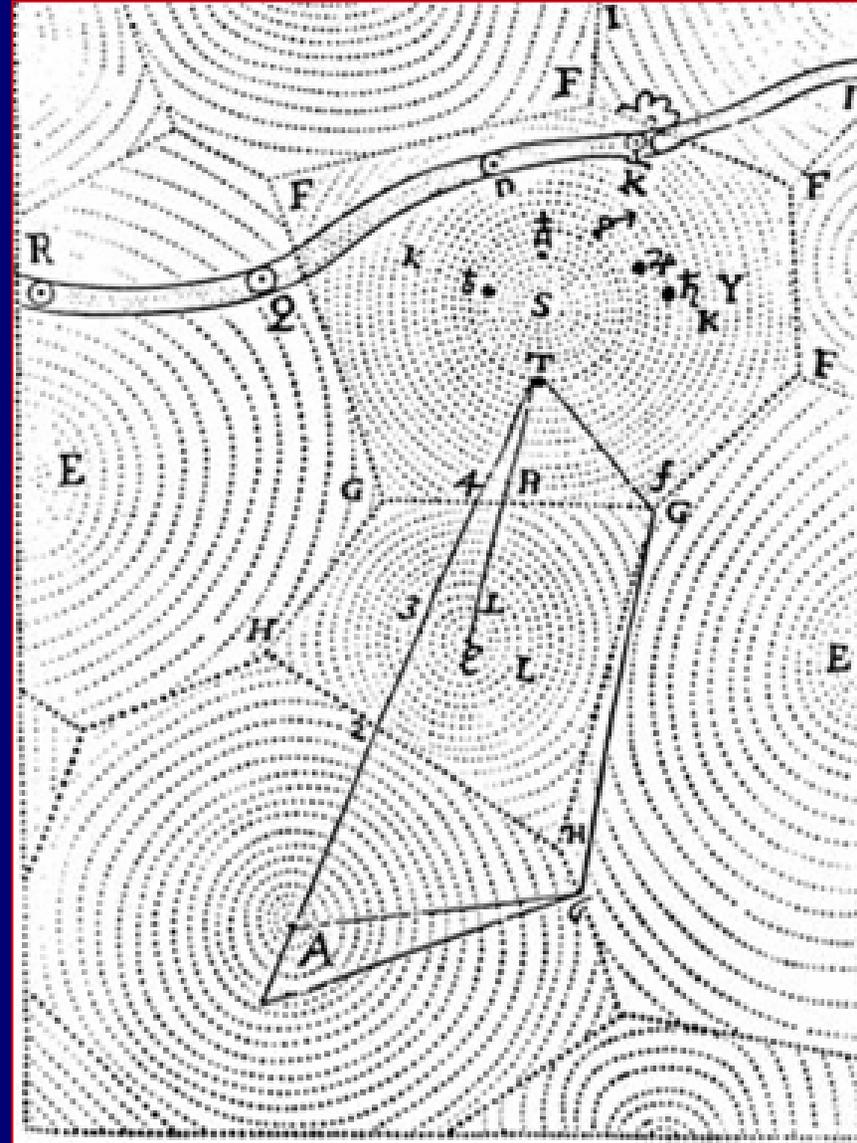


René Descartes (1633)

Cogito ergo sum

Em **O Mundo**, Descartes propõe a idéia de que o Universo é formado por um número indefinido de *vórtices*.

A matéria que preencheria o Universo seria coletada nos vórtices, que possuiriam uma estrela no seu centro. Eles apresentariam, com frequência, planetas orbitantes.

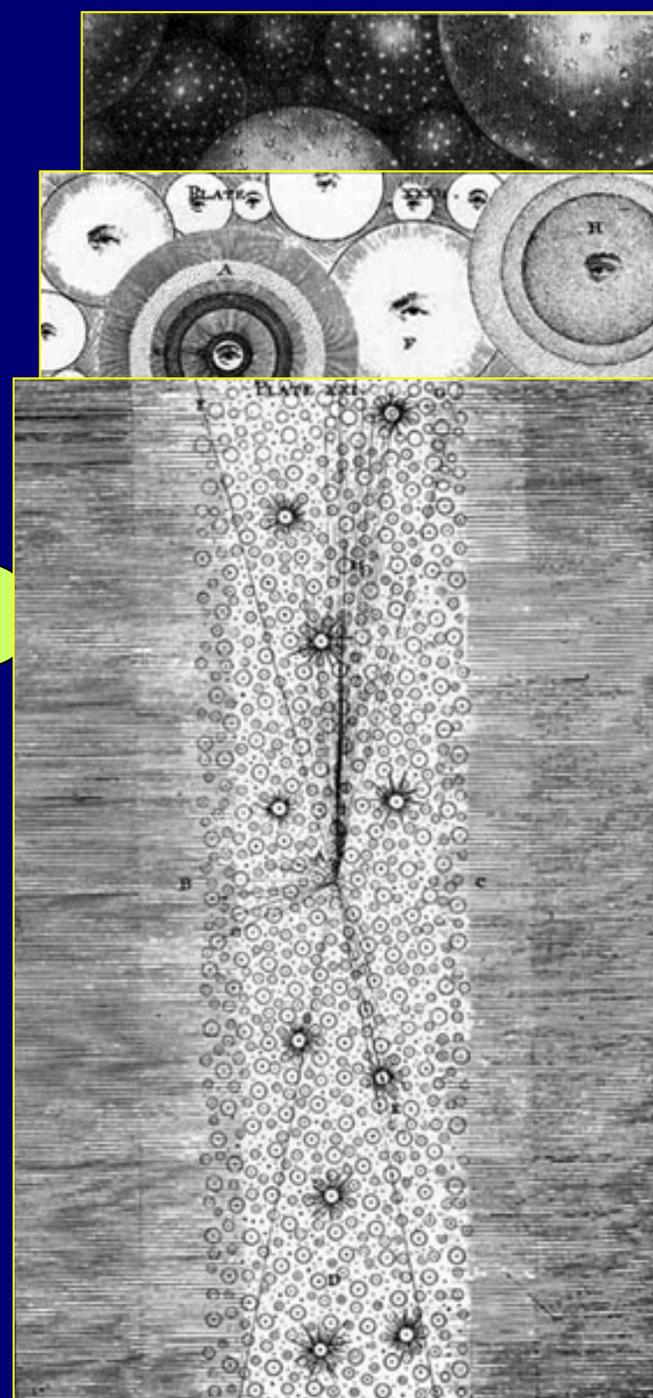


Thomas Wright (of Durham) 1750

Foi o primeiro a propor idéias de um Universo organizado na forma de sistemas estelares em sua obra *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*.

... that as the visible Creation is supposed to be full of sidereal Systems and planetary Worlds, so on, in like similar Manner, the endless Immensity is an unlimited Plenum of Creations not unlike the known Universe. See Plate XXXI, which you may if you please, call a partial View of Immensity, or without much Impropriety perhaps, a finite View of Infinity ...

That this in all probability may be the real Case, is in some Degree made evident by the many cloudy Spots, just perceivable by us, as far without our starry Regions, in which tho' visibly luminous Spaces no one Star or particular constituent Body can possibly be distinguished; those in all likelihood may be external Creation, bordering upon the known one, too remote for even our Telescopes to reach.



Immanuel Kant (1755)

Em seu livro *História Natural Universal e Teoria do Céu*, sugere: *"de maneira similar ao Sistema Solar, existiriam outros sistemas, de ordem maior, que se assemelhariam à distribuição de estrelas da Via Láctea ..."*

Suas idéias são basicamente as de Thomas Wright, incluindo considerações sobre a existência de um Universo infinito onde todas as estruturas de mundo se relacionariam, possuindo um ponto central. Mais tarde estes outros sistemas se chamariam **Universos-Ilhas**.

Universal Natural History and Theory of Heaven

To the most serene, the mightiest king and master
Frederick
King of Prussia
Margrave of Brandenburg
Lord Chamberlain and Elector of the Holy Roman Empire
Sovereign and Highest Lord of Silesia, etc. etc.

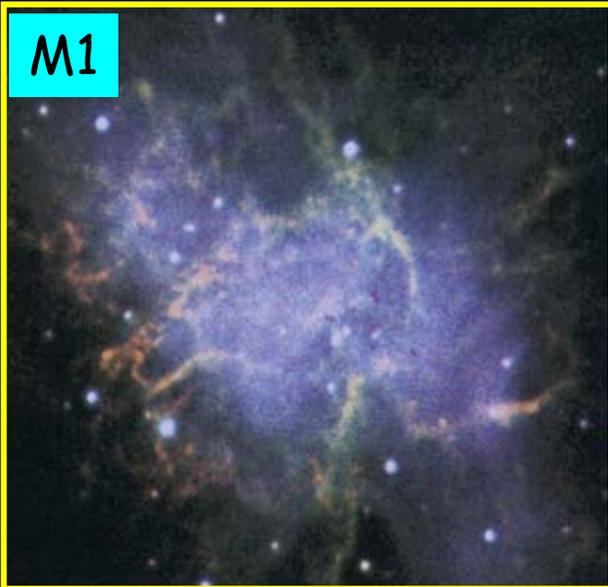
My all honored King and Master,
Most serene and mighty king,
All honored King and Master...

Dedicatória para Frederico II da Prússia na Introdução da obra

Charles Messier (1784)

Compilou o Catalogue des nébuleuses et des amas d'étoiles que l'on découvre parmi les étoiles fixes, sur l'horizon de Paris. Nele estão as primeiras referências aos aglomerados de galáxias. Messier listou 103 nebulæ, 30 das quais são galáxias.

M1



Nebulosa do caranguejeiro

M101

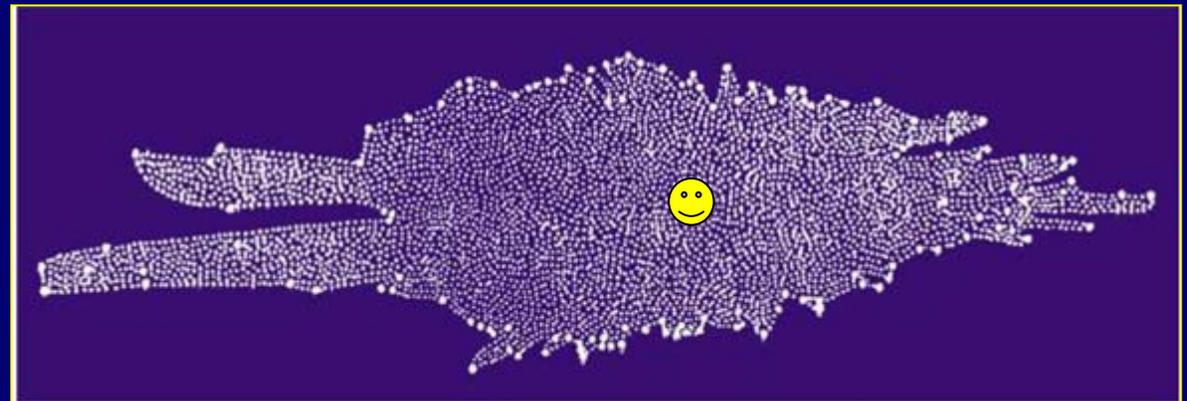
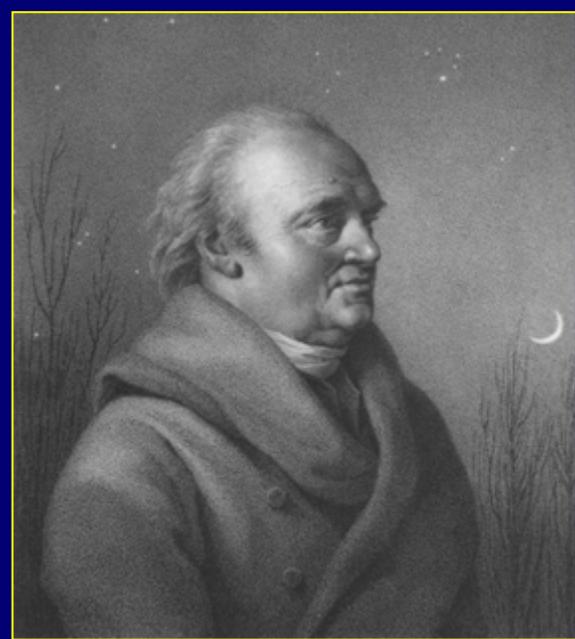


Galáxia do "Cata-vento"³

Wilhelm Herschel (1785)

As descobertas com o telescópio construído por ele, fizeram com que o rei da Inglaterra financiasse a construção do maior telescópio da época, com 1.47m de abertura.

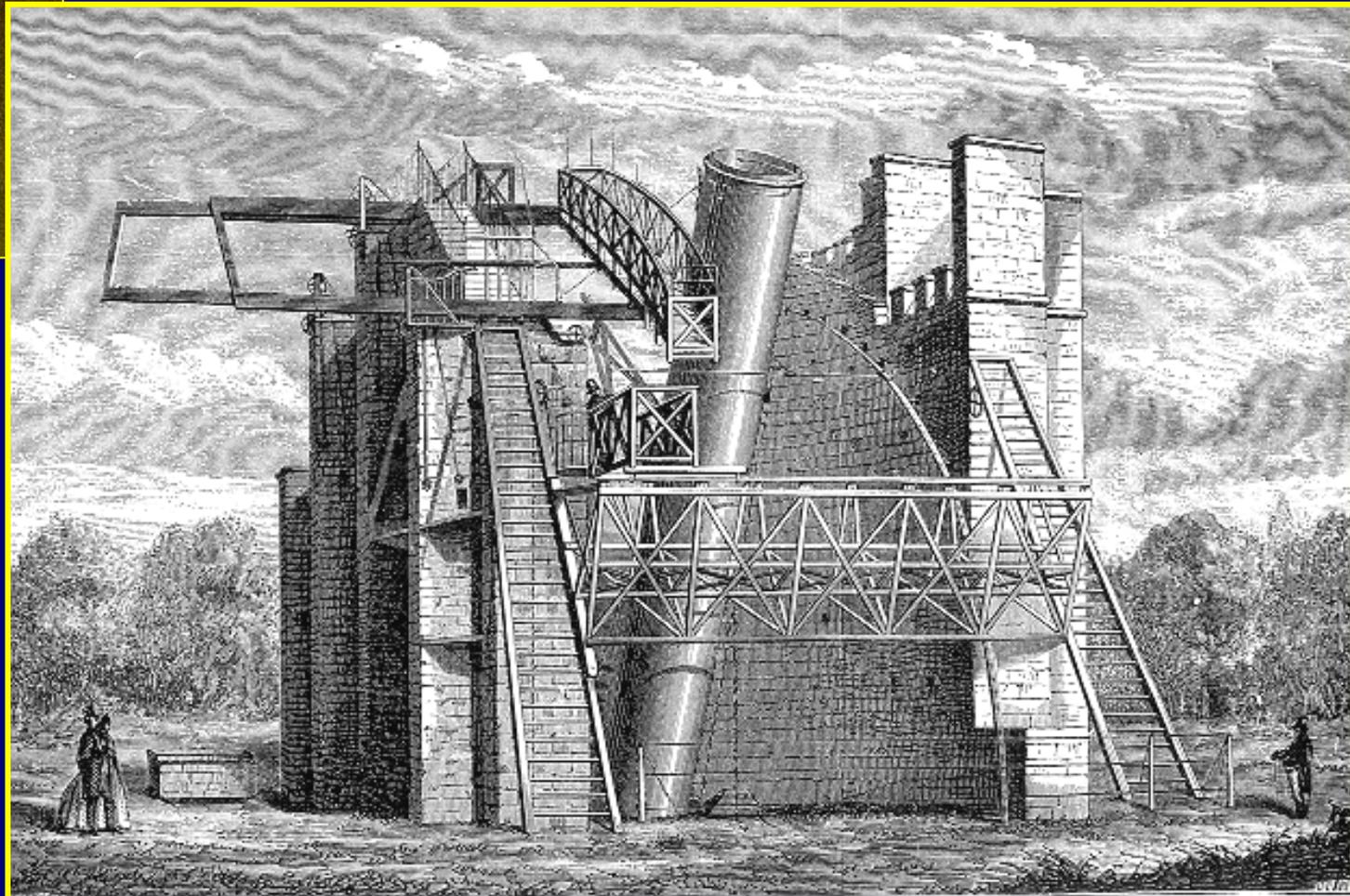
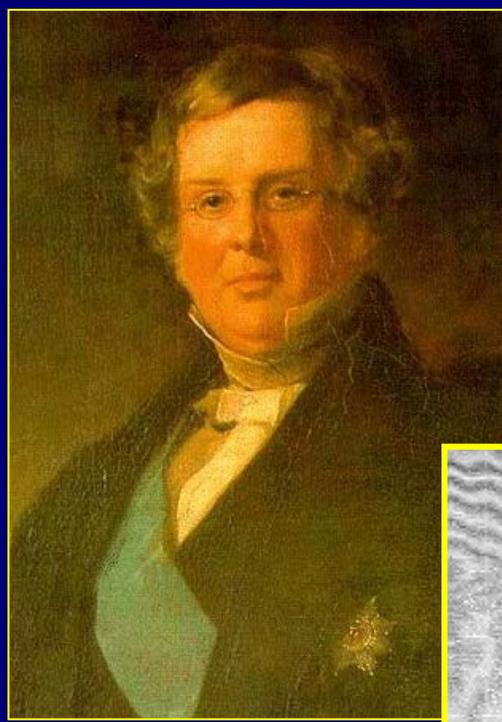
Em 1785 ele publicou *On the Construction of the Heavens*, sugerindo que "o sistema sideral que habitamos" é uma nebulosa comum em aparência a muitas outras e devem ser externas à nossa.



Descrição de Herschel para a Via Láctea

William Parsons (Lorde Rosse) 1845

Constrói um telescópio de 1.80m de diâmetro e descobre que algumas nebulosas possuíam formato espiralado.



Desenhos de Parsons mostrando que algumas "nebulosas" apresentam uma estrutura espiral.



M51



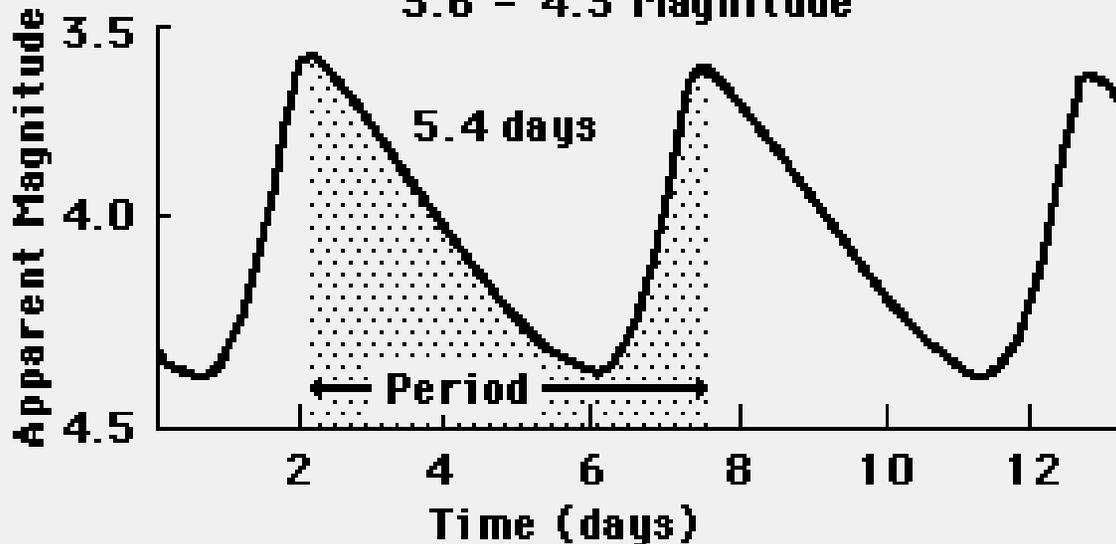
M101

Henrietta Leavitt (1912)

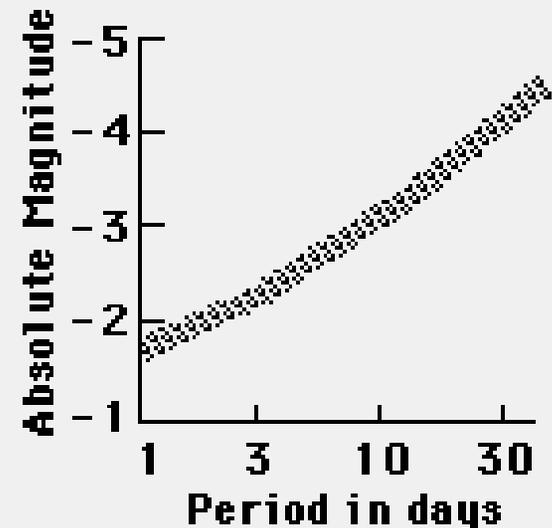
Descobre para a classe de estrelas chamadas de **Cefeidas**, uma relação entre o período de variação de seu brilho e sua luminosidade intrínseca. Com isso, é possível medir-se distâncias dentro e fora de nossa galáxia.



Brightness variation of δ -Cephei
3.6 - 4.3 Magnitude



The period-luminosity relation for Cepheid variables.

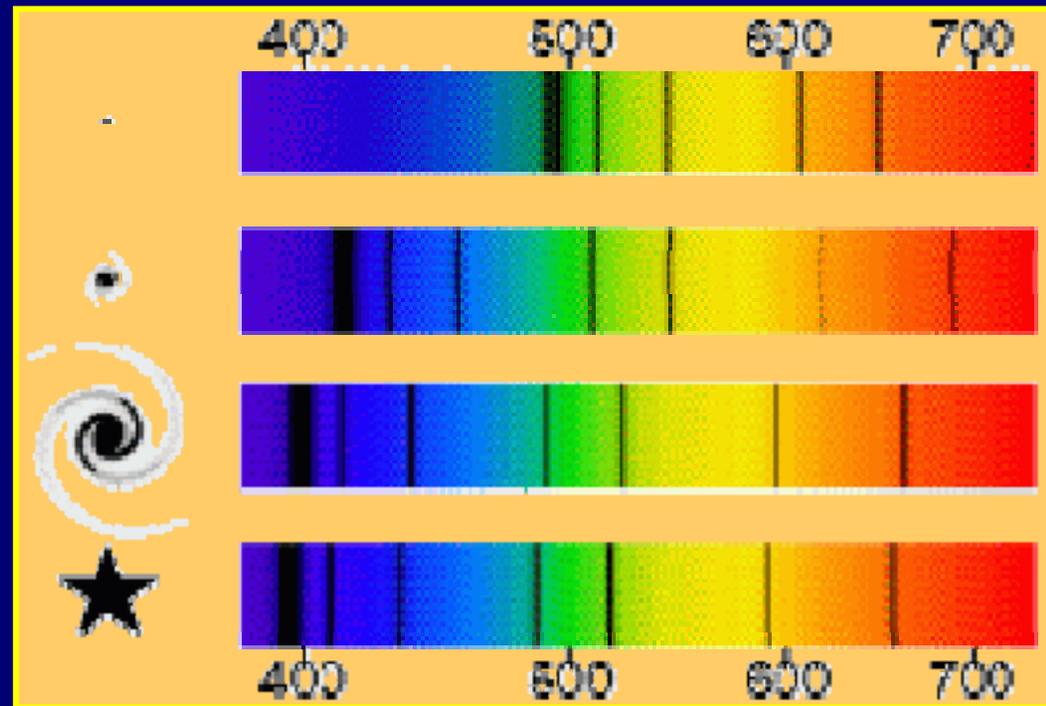


Vesto Slipher (1917)

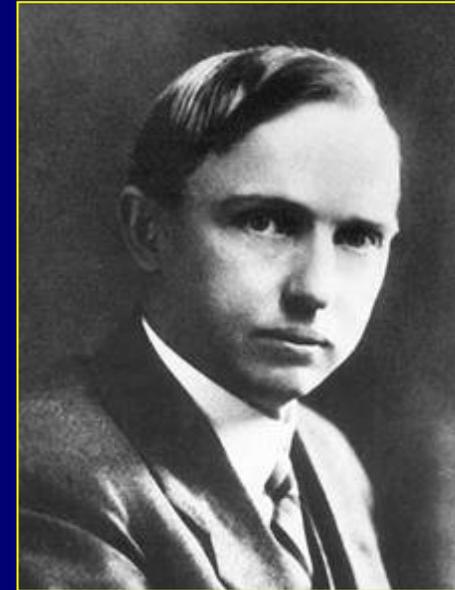
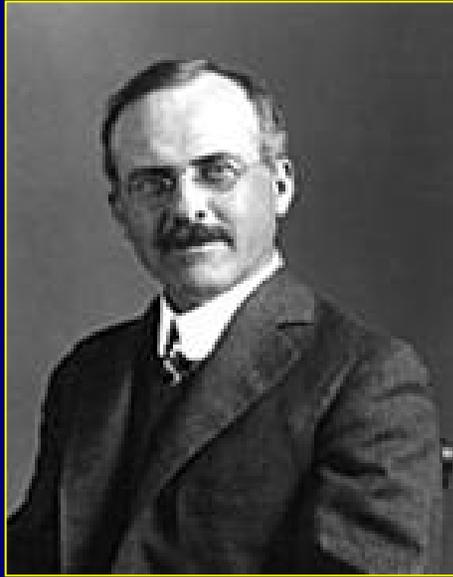
Coleta espectro para 15 "nebulosas". 13 delas apresentam as linhas do espectro deslocadas para o vermelho, as primeiras evidência de que as galáxias apresentam movimento de recessão. Como elas ainda não eram consideradas objetos "extragalácticos", o trabalho dele sofre severas críticas.

Desvio para o vermelho:

Quanto mais distante a galáxia, maior o deslocamento de suas linhas espectrais visíveis para o lado vermelho do espectro.



Herber G. Curtis & Harlow Shapley



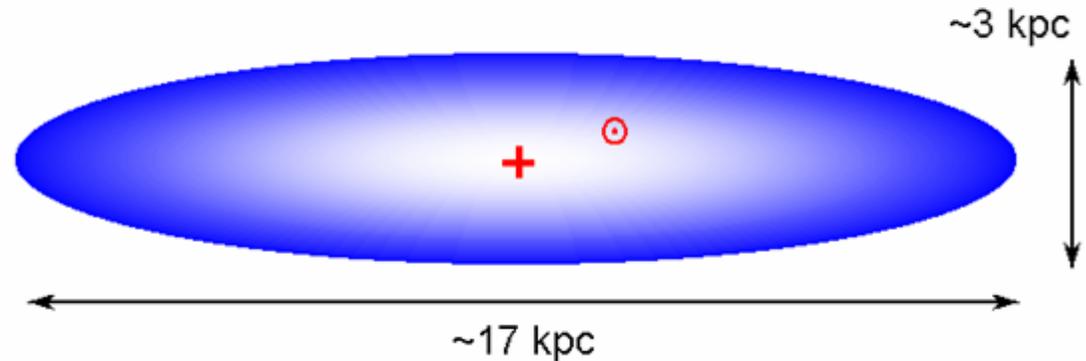
Em 1920 um grande debate foi estabelecido entre **Herber Curtis** e **Harlow Shapley** a respeito da natureza extragaláctica das galáxias. Curtis defendia a idéia de que elas eram exteriores a Via Láctea, enquanto Shapley advogava a idéia de que elas eram objetos internos de nossa galáxia. Neste debate, nenhum saiu vitorioso, e os detalhes das idéias de ambos estavam incorretos. Somente mais tarde foi possível estabelecer a natureza extragaláctica destas "nebulosas". Curtis tenta difundir o nome **Universos-Ilhas** para galáxias.

No site abaixo está a transcrição do *Grande Debate*
http://antwrrp.gsfc.nasa.gov/htmltest/gifcity/cs_nrc.html

Jacobus Cornelius Kapteyn (1922)

Realiza um grande esforço com a colaboração internacional para determinar a estrutura da Galáxia através da contagem de estrelas. No entanto, a sua proposta ainda apresentava-se incorreta.

Kapteyn Model (1922)



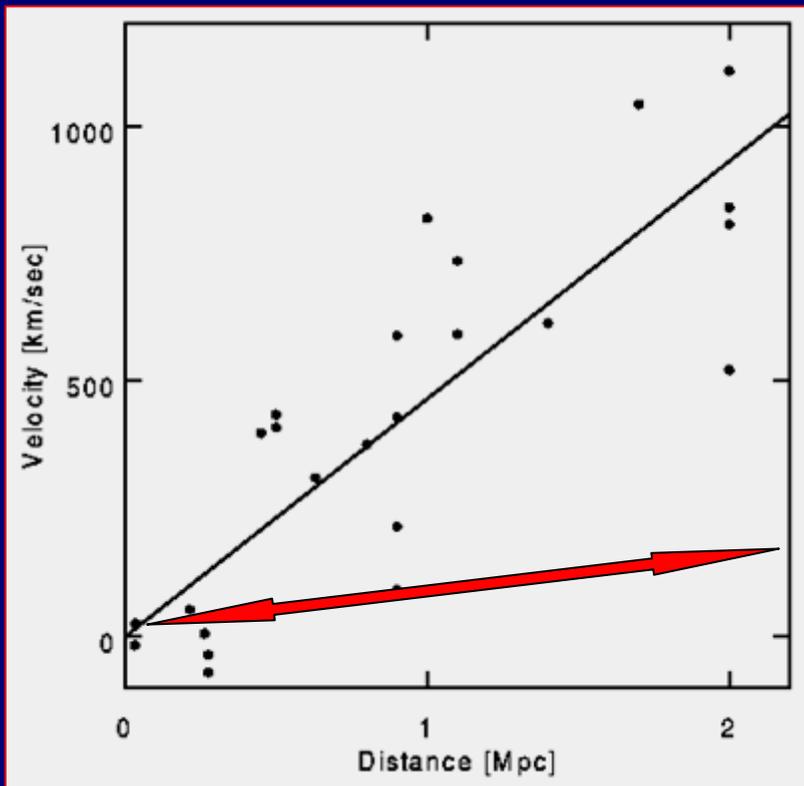
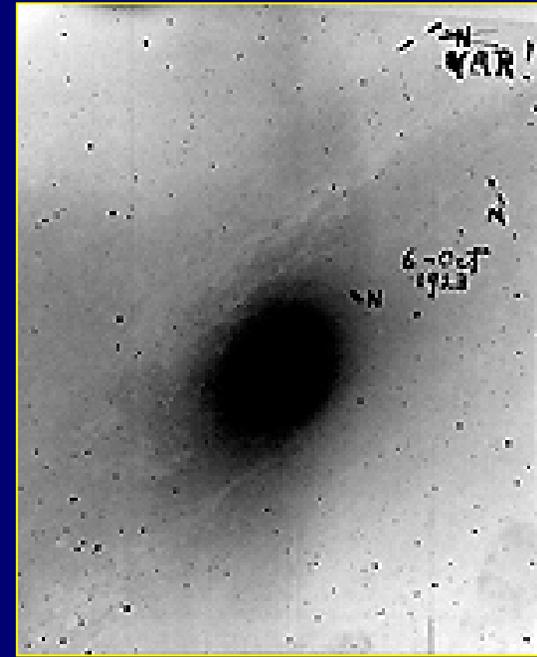
kpc = kiloparsec = 1000 pc

Modelo atual

Modelo de Kapteyn

Edwin Hubble (1923-1929)

Determina a distância de uma "nebulosa" na constelação de Andrômeda, usando, para isso, uma estrela cefeida (1923). Estava demonstrado que elas tinham natureza extragaláctica.

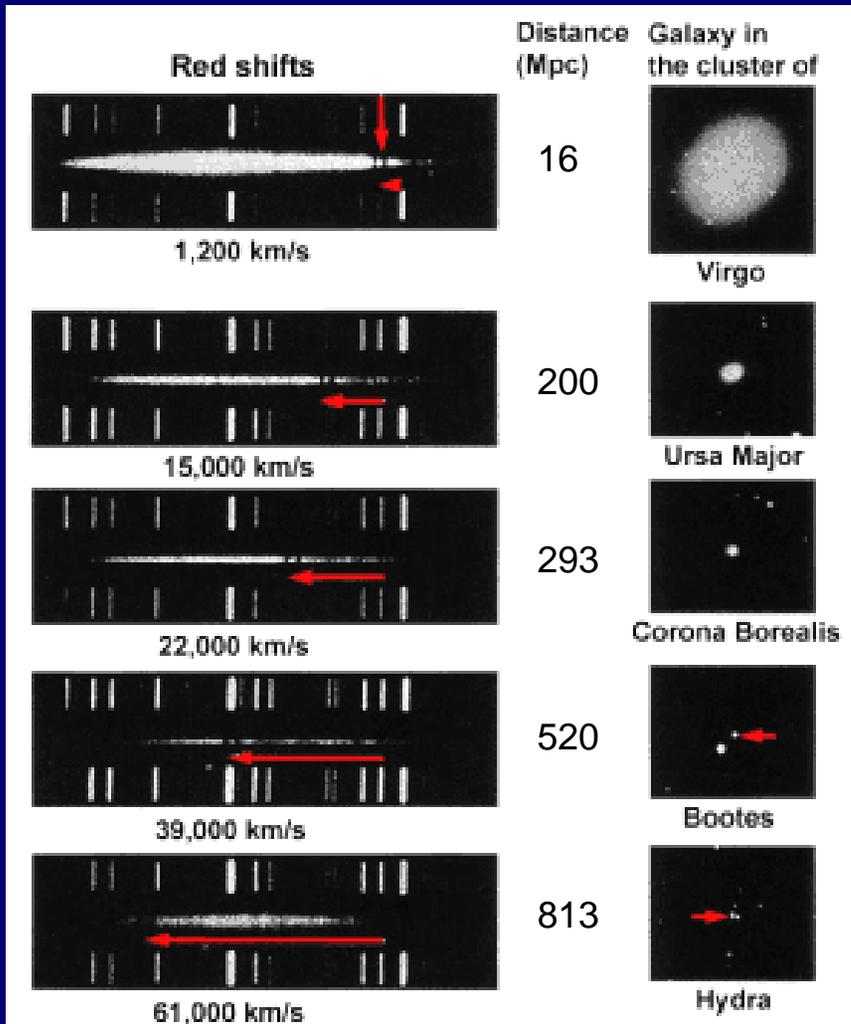


Observando mais galáxias, e adicionando os dados de Slipher, Hubble concluiu que: *elas se afastam mais rapidamente quanto mais longe estão de nós* (1929).

$$H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$$

Desvio para o vermelho - REDSHIFT - z

O fato de galáxias estarem "ancoradas" ao Universo, o qual se apresenta em expansão, faz com que vejamos a maioria das galáxias se afastando de nós. Esta velocidade de afastamento (positiva) é dada pela "constante" de Hubble - H_0 . O redshift é dado pela expressão:



$$z = \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1$$

A velocidade de recessão de uma galáxia é dada por:

$$\frac{v}{c} = \frac{(z + 1)^2 - 1}{(z + 1)^2 + 1}$$

$$V = CZ$$

↑
Para baixos z

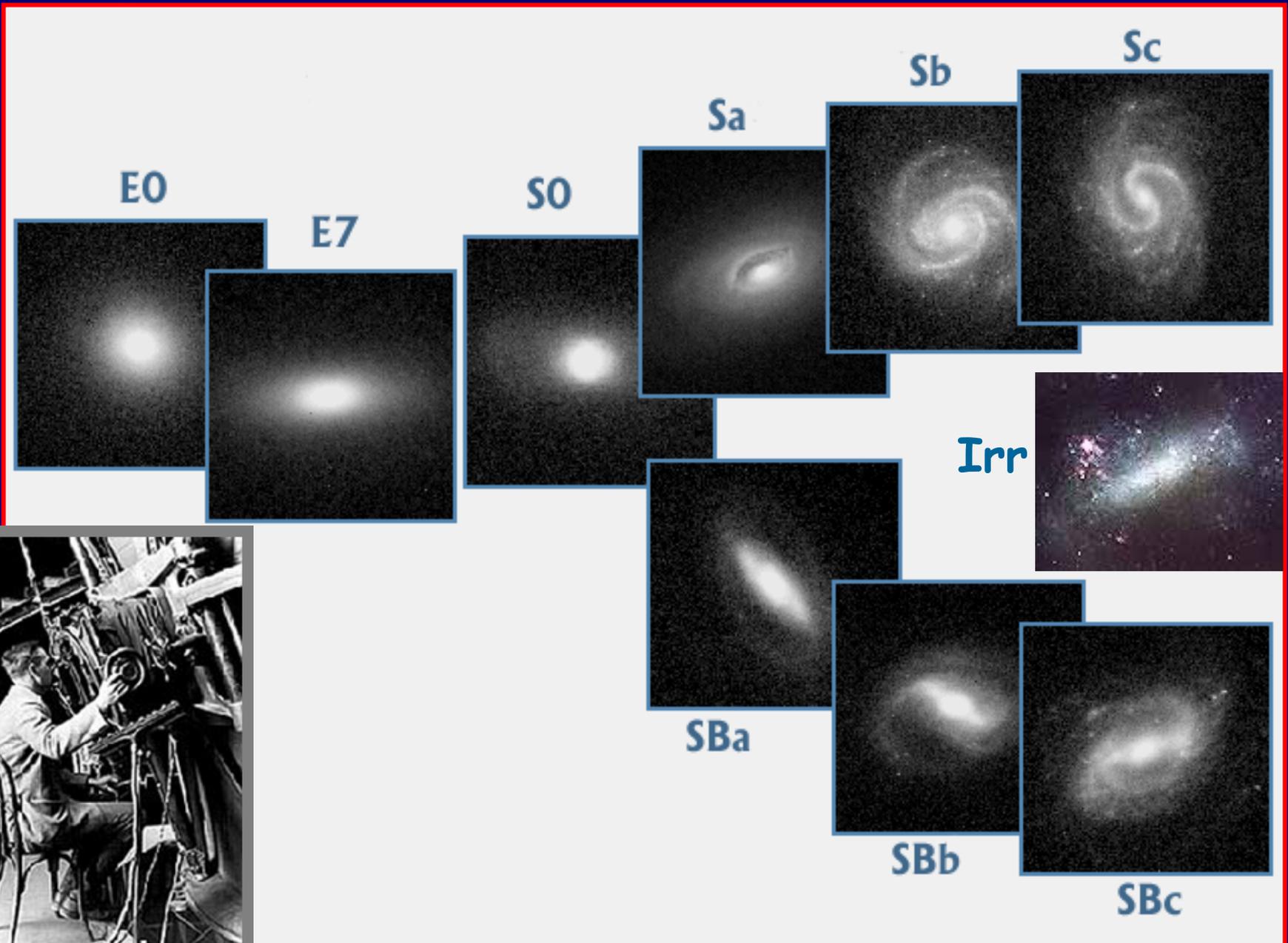
A sua distância é obtida através de:

$$D = \frac{v}{H_0} \quad (\text{Mpc})$$

Desvio para o vermelho - REDSHIFT - z

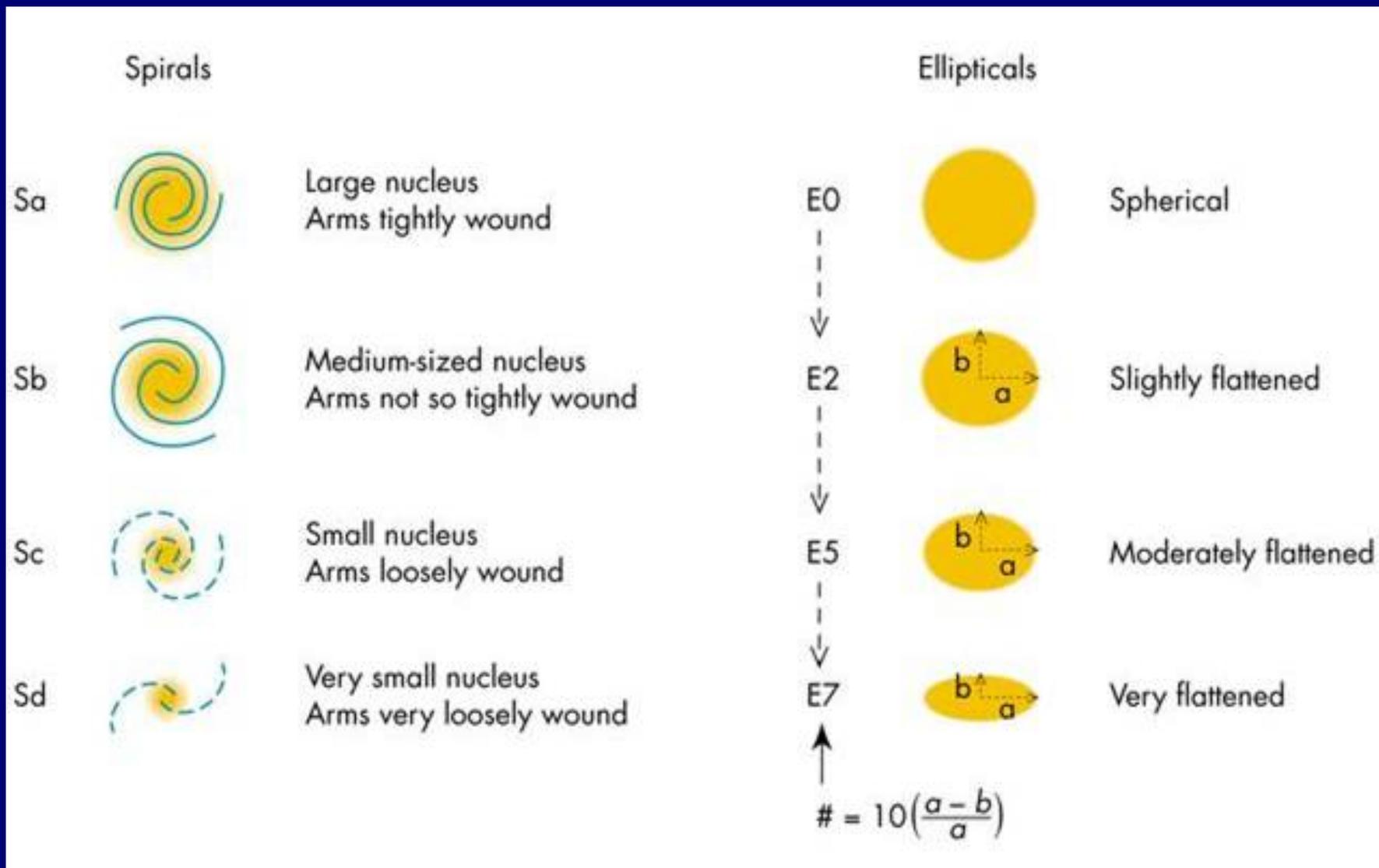


Diagrama de Hubble - Classificação morfológica



Esquema de classificação mostrando detalhes da morfologia

A classificação de Hubble-Sandage é baseada nos seguintes elementos:
Razão bojo/disco; abertura dos braços espirais, e existência de barra.



Esquema de classificação morfológica

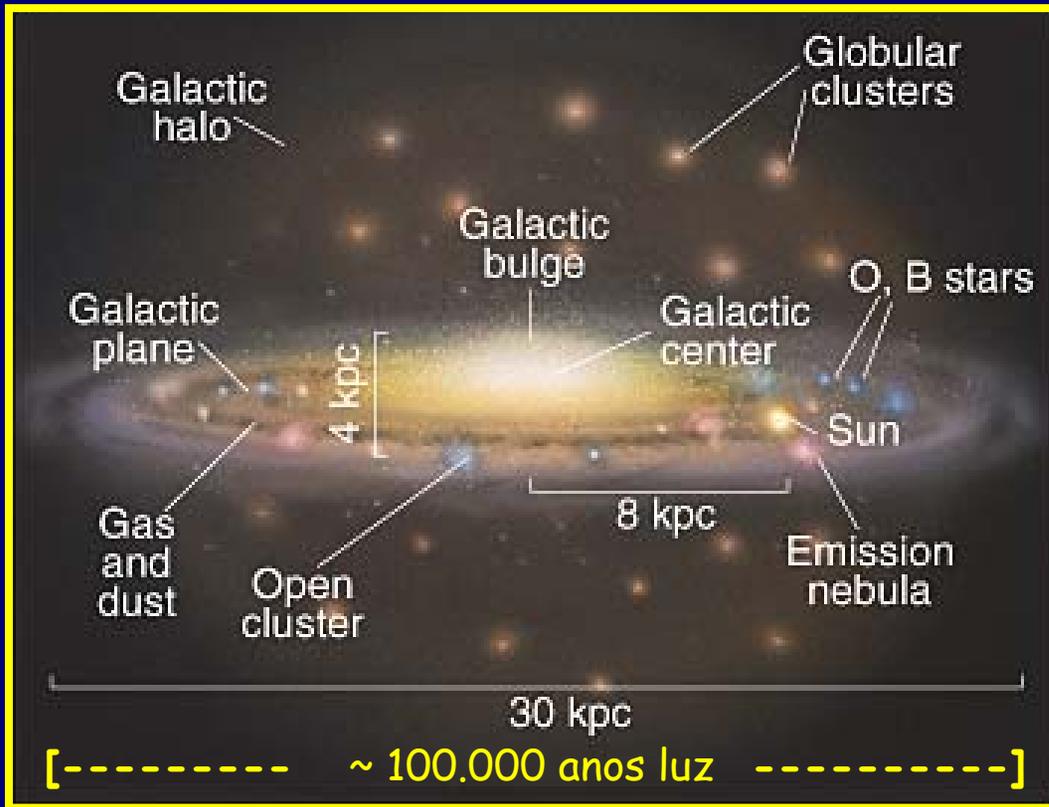
- AVISO AOS NAVEGANTES -

O processo de classificação morfológica de galáxias não é simples, pois nem sempre ele é único ou bem definido, dependendo de um certo grau de subjetividade do "classificador". Ela se baseia em imagens, normalmente na faixa óptica (banda azul), onde os grandes levantamentos em placas fotográficas foram efetuados. O processo de classificação possui vários vieses, como efeitos de luminosidade das galáxias, brilho superficial, banda espectral usada.

No entanto, a classificação morfológica é útil na determinação de propriedades coletivas destes objetos, cuja determinação de suas propriedades fundamentais possam vir a fundamentar o estudo da formação e evolução destes objetos.

O diagrama de Hubble não representa uma seqüência evolutiva, no sentido de que as galáxias evoluiriam passivamente de um tipo para o outro. Veremos mais adiante, que galáxias até podem sofrer mudanças na sua morfologia ao longo de sua existência, mas este processo envolve interações entre galáxias.

Via Láctea - a nossa galáxia



Desenho esquemático da Via Láctea

1 kpc = 1000 pc = 3300 a.l.

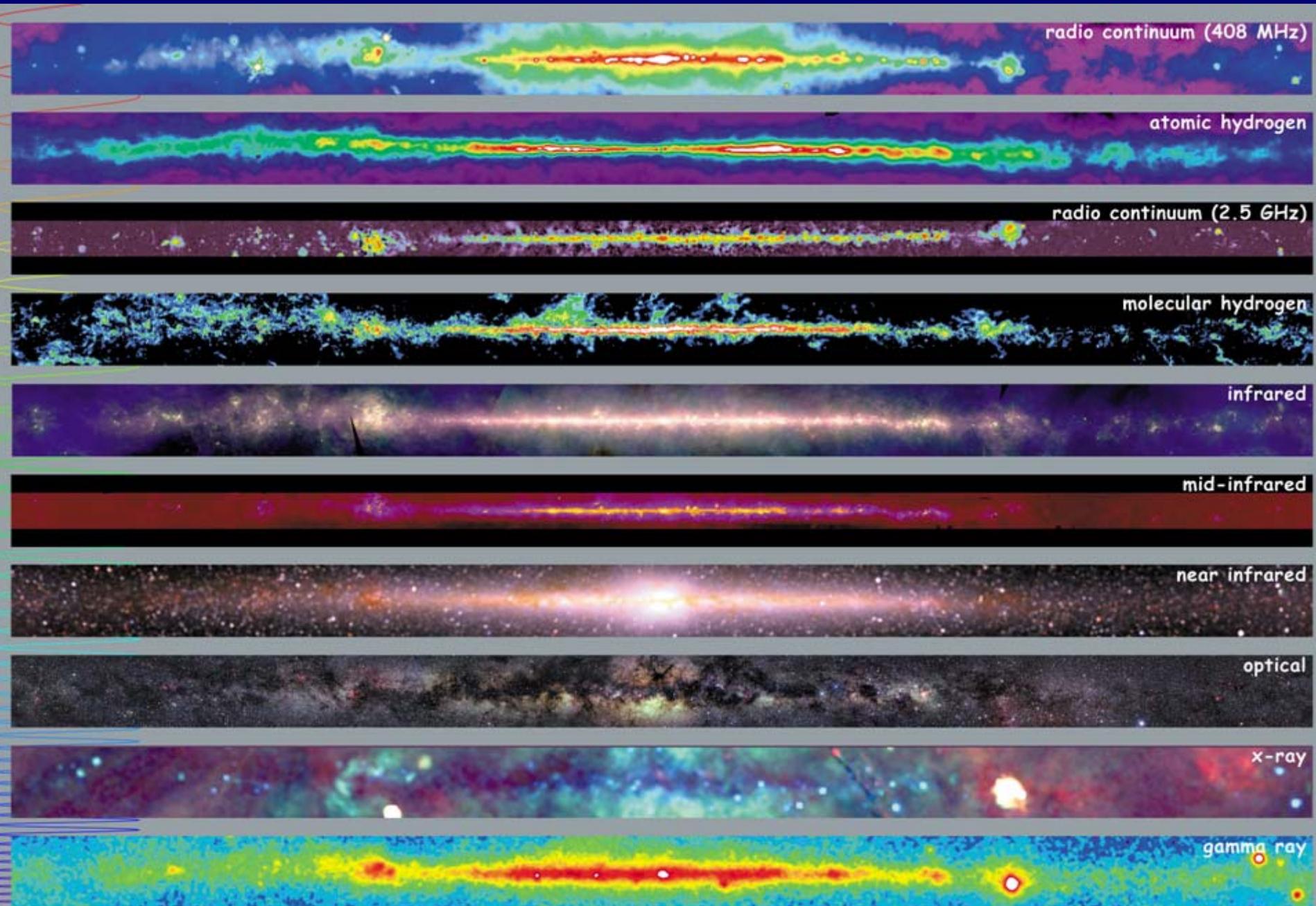
Galáxia de Andrômeda, bastante similar à nossa

Via Láctea

a nossa galáxia vista de dentro dela mesma



Via Láctea vista com "outros olhos"



Galáxias Elípticas

Galáxia elíptica gigante situada no centro de um aglomerado de galáxias. Ela é 40 vezes mais massada do que a Via Láctea.

0 -----

O que parecem ser estrelas, são na verdade aglomerados globulares.

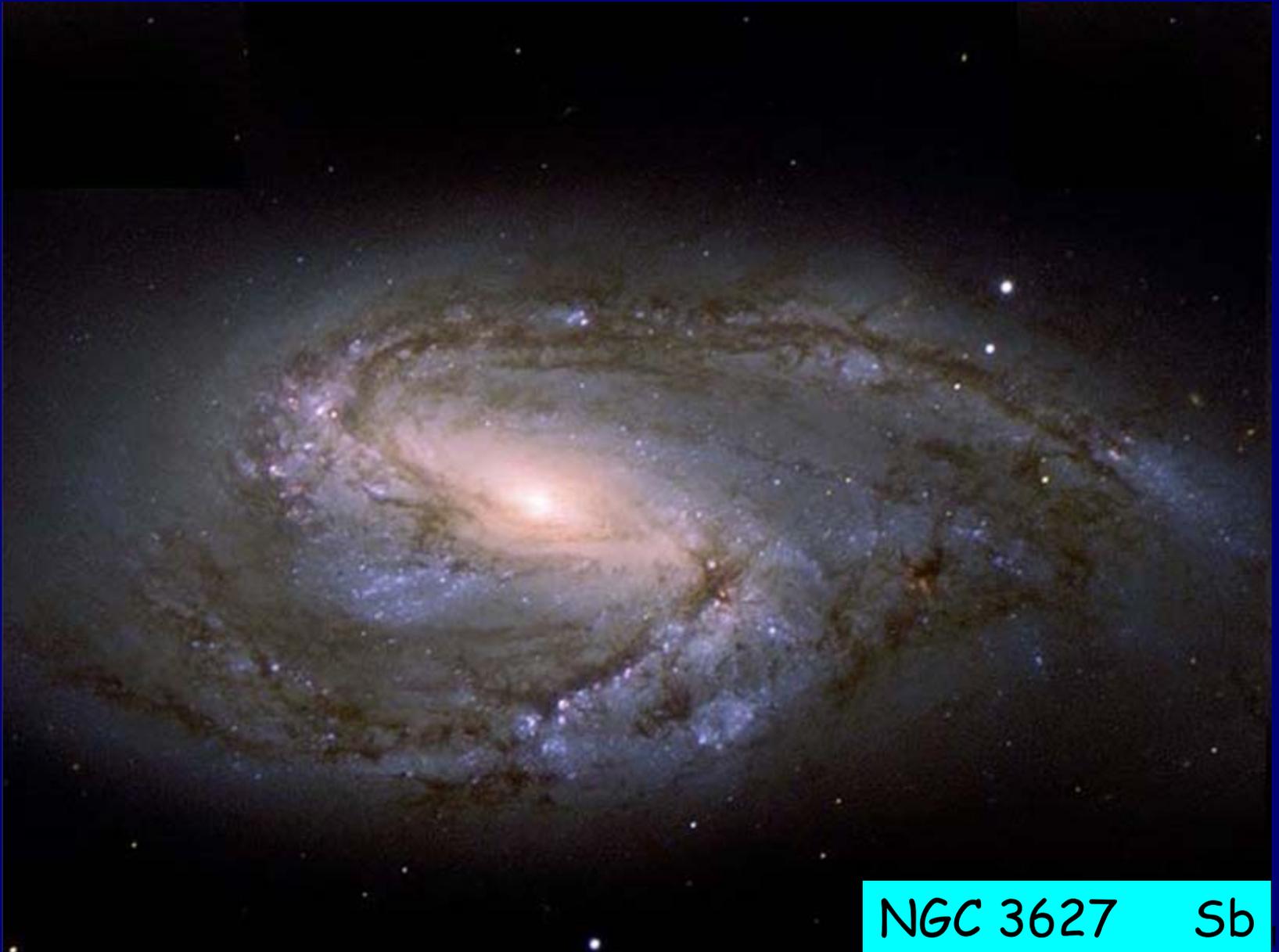
M87 - NGC 4486 - Virgo

Elípticidade

E0 - E7

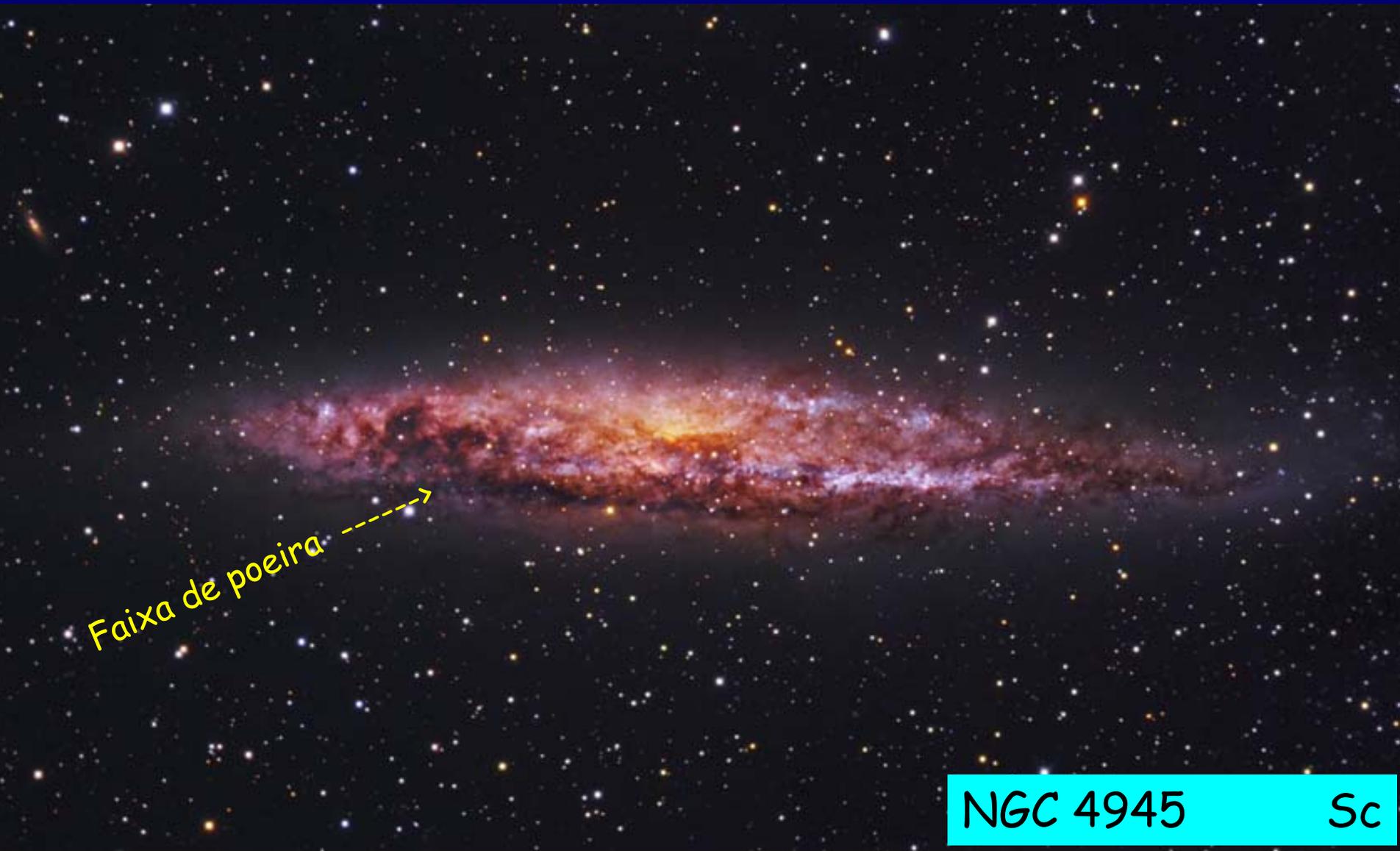
$N = 10 \times (1 - b/a)$

Galáxias Espirais



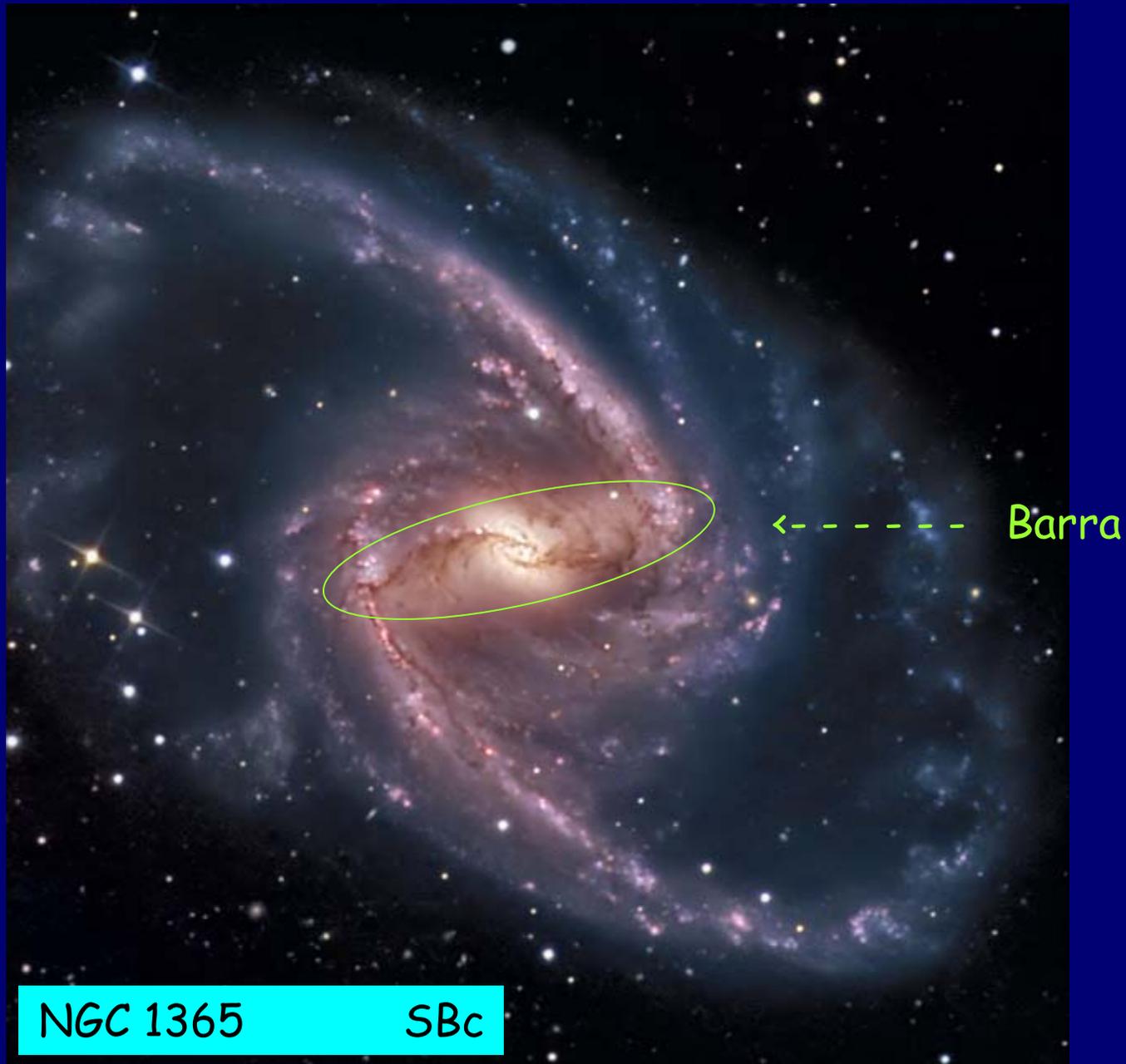
NGC 3627 Sb

Galáxias Espirais



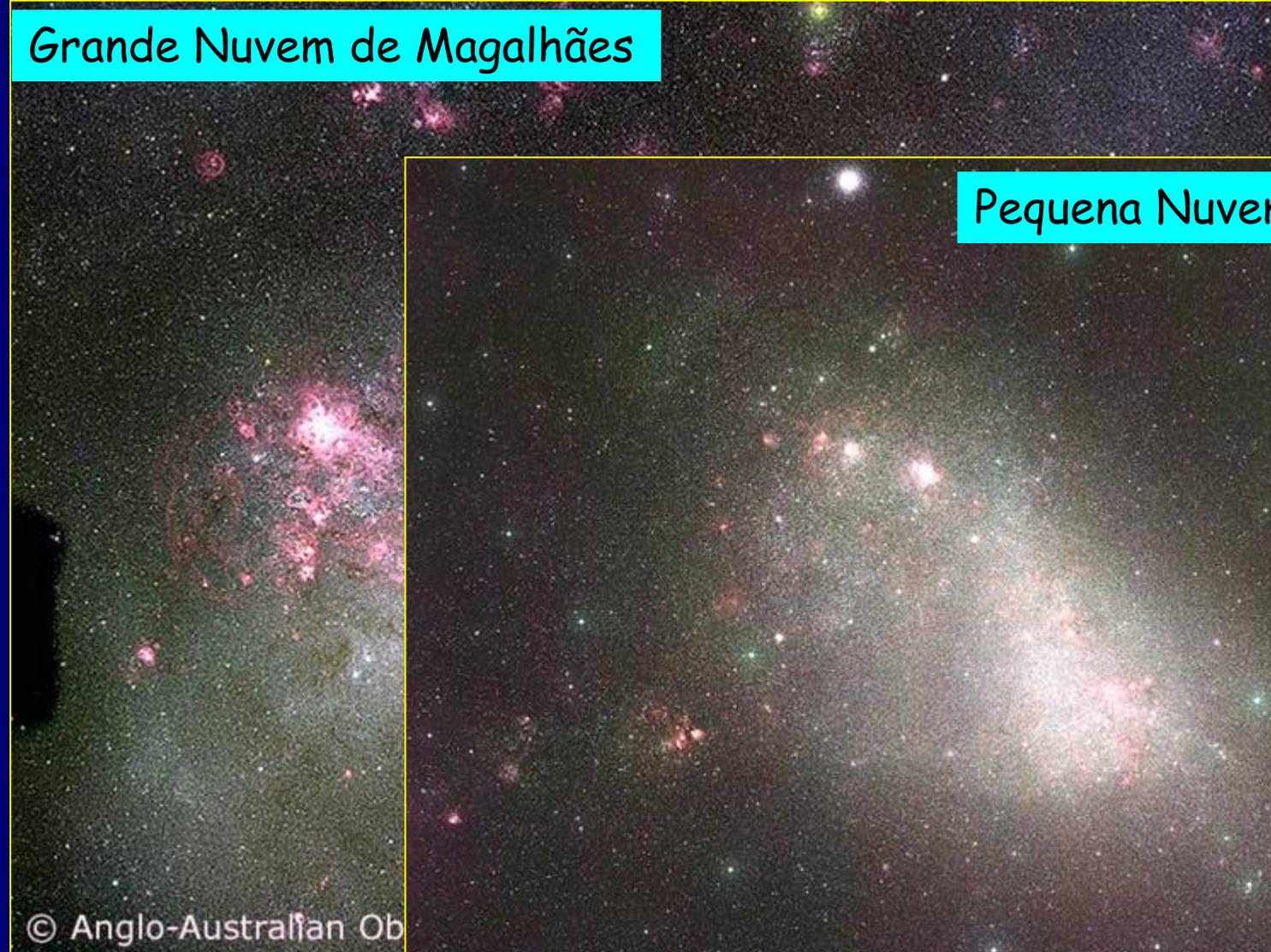
NGC 4945 Sc

Galáxias Espirais



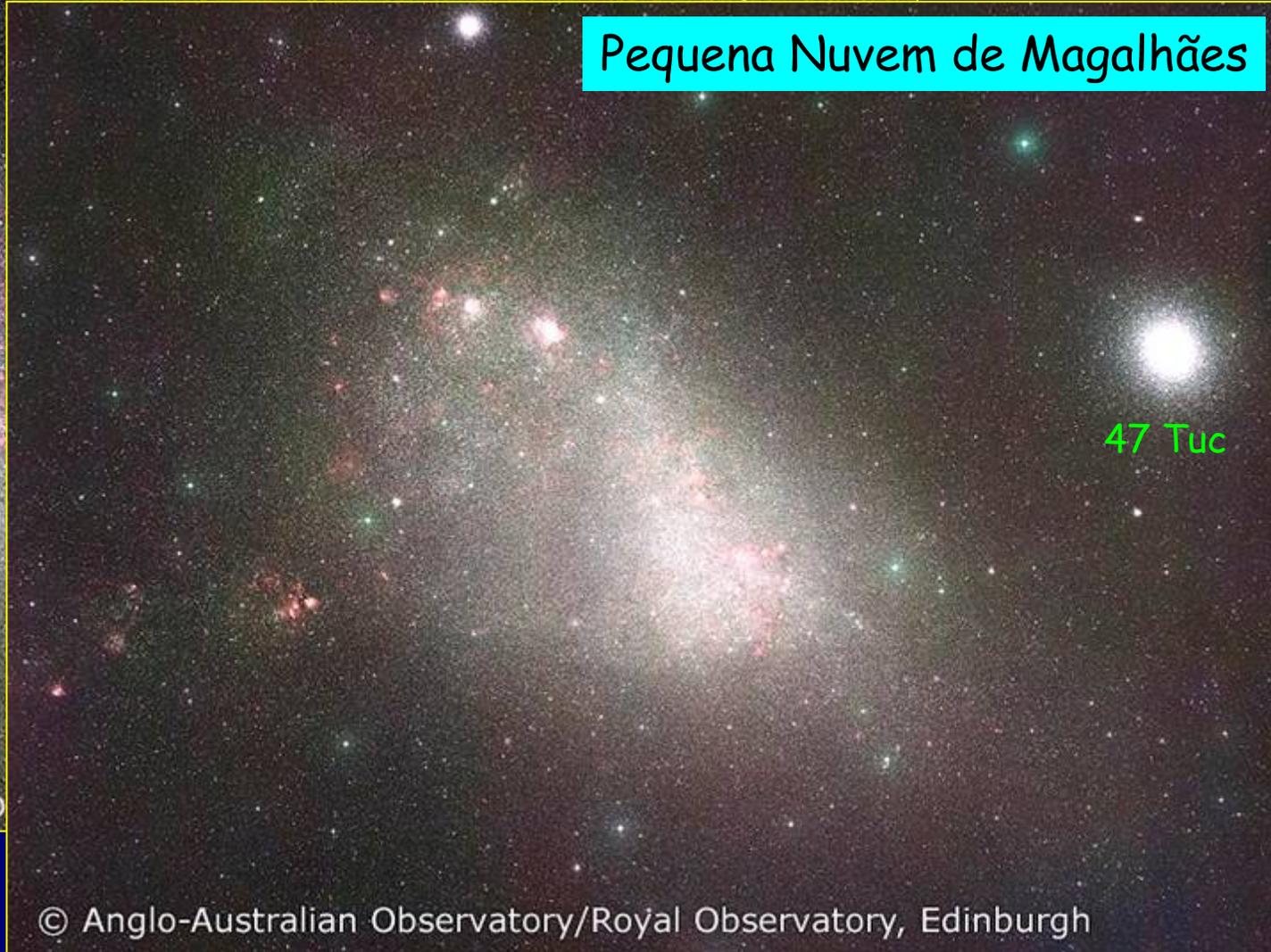
Galáxias Irregulares

Grande Nuvem de Magalhães



© Anglo-Australian Ob

Pequena Nuvem de Magalhães



© Anglo-Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh

Paisagem Noturna - 1

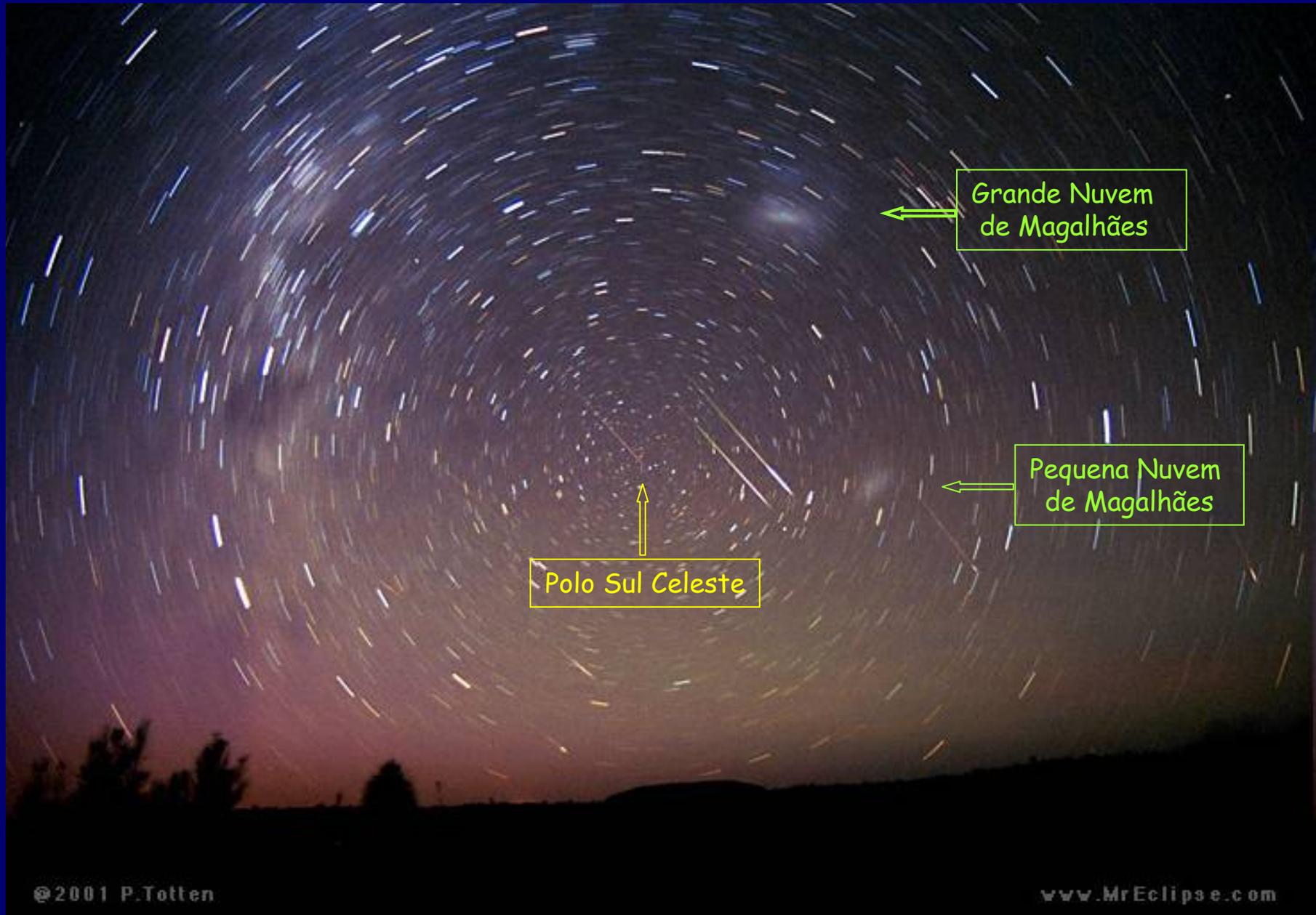


Grande Nuvem de Magalhães

Pequena Nuvem de Magalhães

Cometa McNaught

Paisagem Noturna -2



Galáxias Irregulares



UGC 6456 - Galáxia Irregular anã (cores reais)

Galáxias Peculiares

A photograph of two galaxies in the process of colliding. The galaxies are shown as bright, glowing structures with distinct spiral arms, set against a dark background filled with numerous stars. The galaxies are positioned horizontally, with their cores facing each other. The surrounding space is filled with a dense field of stars, some of which are bright and prominent, while others are smaller and fainter. The overall scene captures a dramatic moment in the evolution of galaxies.

Colisão entre duas galáxias onde atuam potentes forças de maré.

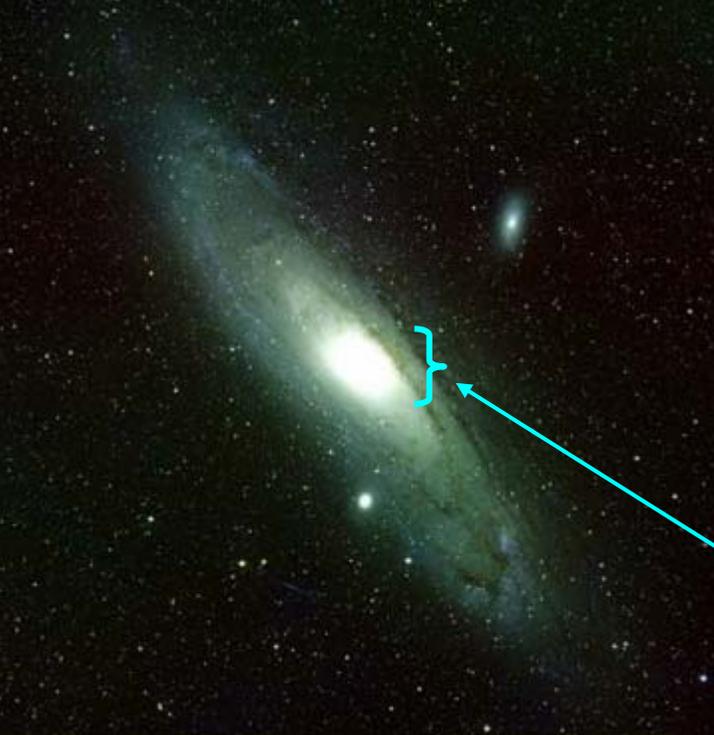
Estamos livres do perigo ????

Andrômeda x Galáxia



Esta simulação mostra os efeitos da colisão entre a Via Láctea e Andrômeda. A fusão das duas deve ocorrer daqui a 5 bilhões de anos. No processo as órbitas das estrelas serão rearranjadas e no final, deveremos ter um objeto de forma esferoidal. Não se espera colisões de estrelas devido as grandes separações entre estas.

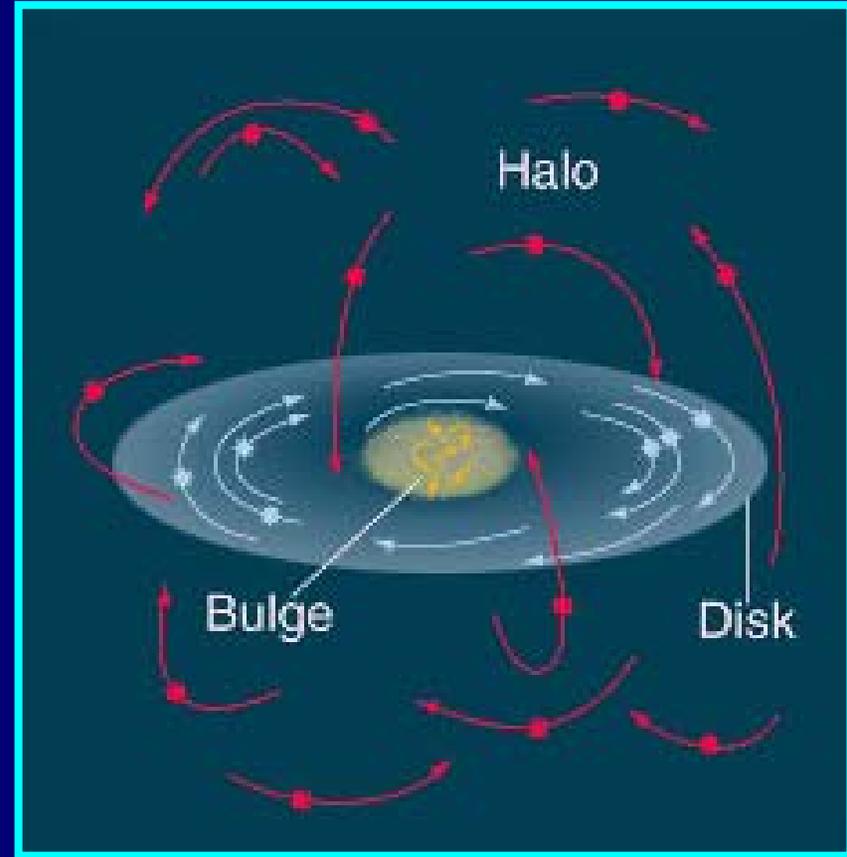
Estruturas de uma Galáxia Espiral



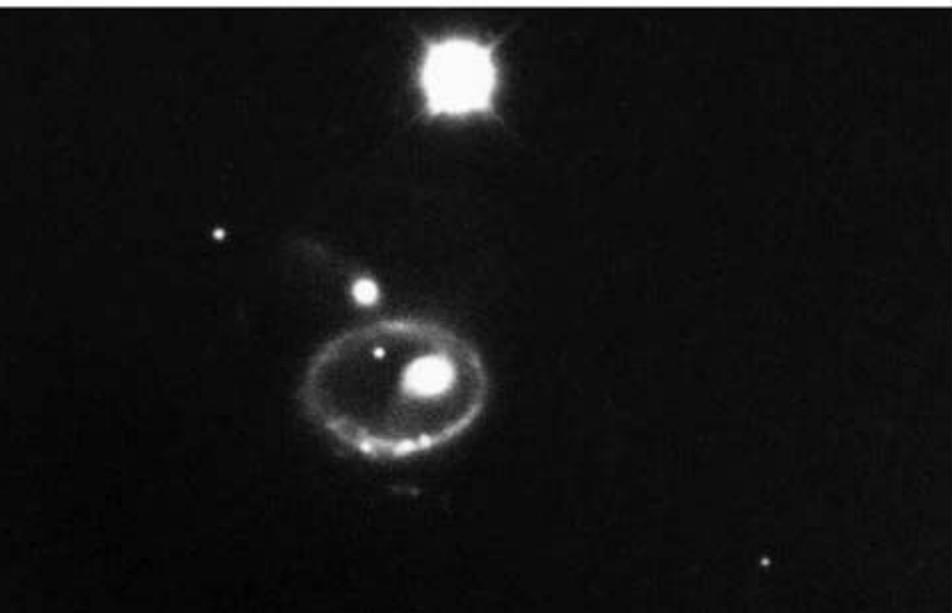
Bojo



Barra



Galáxias Aneladas



São o resultado de ressonâncias ou colisão com uma companheira.

Resumo das Características das Galáxias

<u>Propriedade</u>	<u>Espirais</u>	<u>Elípticas</u>	<u>Irregulares</u>
Forma e estrutura	Disco achatado de gás e estrelas, braços espirais, bojo e halo.	Sem disco, com estrelas distribuídas em um elipsóide.	Sem estrutura. Algumas com aparência explosiva
Conteúdo de estrelas	Disco: jovens e velhas. Halo: só velhas.	Só estrelas velhas.	Velhas e novas.
Gás e poeira	Disco: muito. Halo: pouco.	Pouco ou nenhum.	Muito
Formação estelar	Ainda produzindo	Insignificante	Grande
Movimento estelar	Gás e estrelas no disco: órbitas circulares; no bojo: mov. aleatório.	Órbitas aleatórias.	Estrelas e gás têm órbitas irregulares.

Dando nome aos bois ...

O batismo de galáxias com nomes comuns que refletem alguma propriedade específica (ex.: semelhança com alguma coisa), não é válido para a grande maioria delas. Os seus nomes normalmente estão associados a catálogos resultantes de levantamentos sistemáticos.

Os catálogos são importantes por conterem informações sobre os objetos (posição, magnitude, tipo morfológico, velocidade radial, etc). Algumas galáxias possuem diversos nomes, por participarem de vários catálogos.

Ver mais sobre nomenclatura e alguns catálogos famosos no
Apêndice

Contando galáxias ...



Contando galáxias ...

A fotografia foi importante para produzir os primeiros mapeamentos do céu.

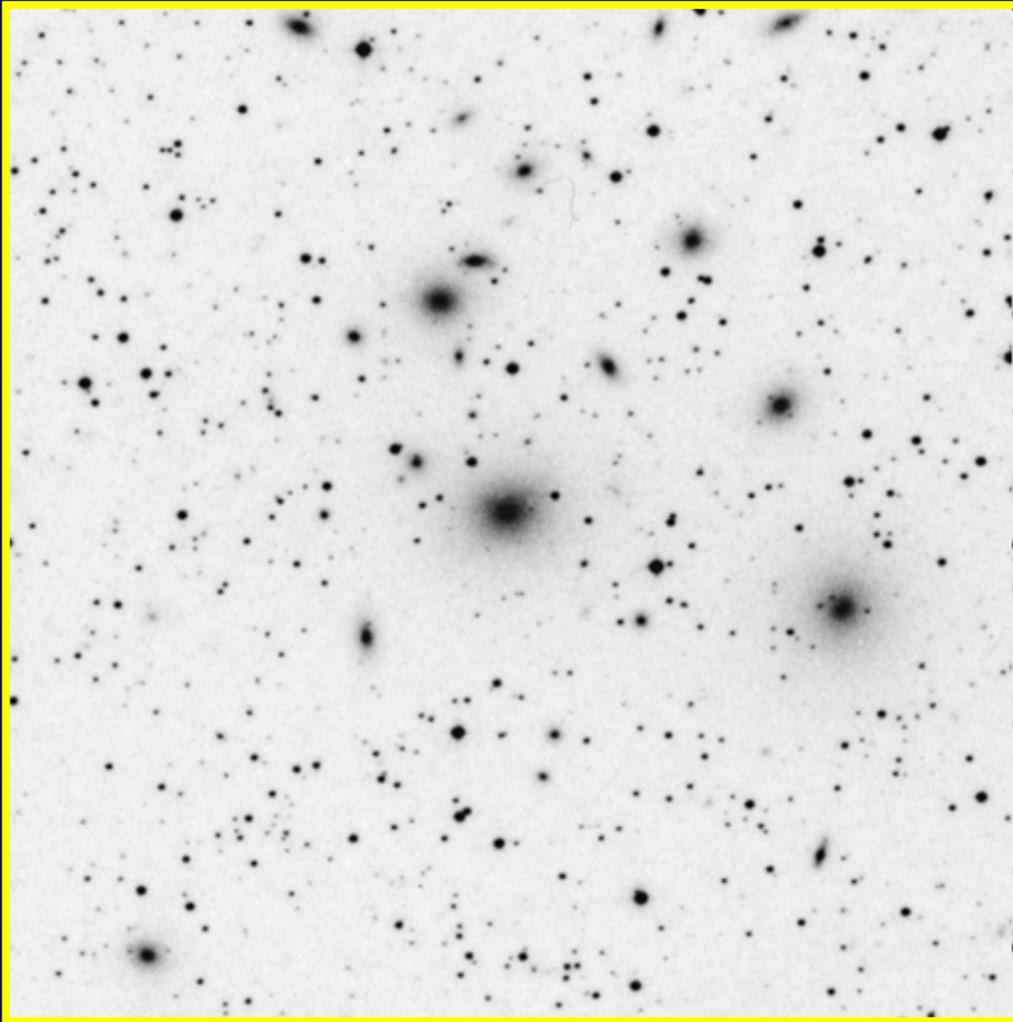
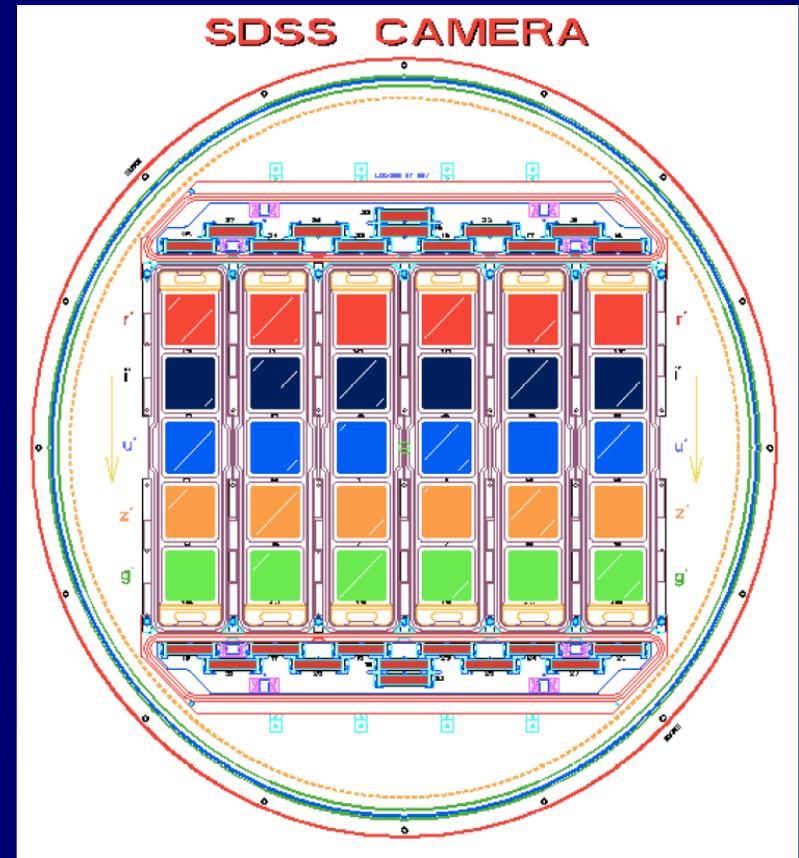


Imagem obtida do Palomar
Observatory Sky Survey 55

Contando galáxias ...

Os mapeamentos modernos, usam câmeras sofisticadas com CCDs, que são muito mais eficientes.



Sloan Digital Sky Survey



930 mil galáxias com fotometria ($r' < 18.15$)
200 mil com espectroscopia

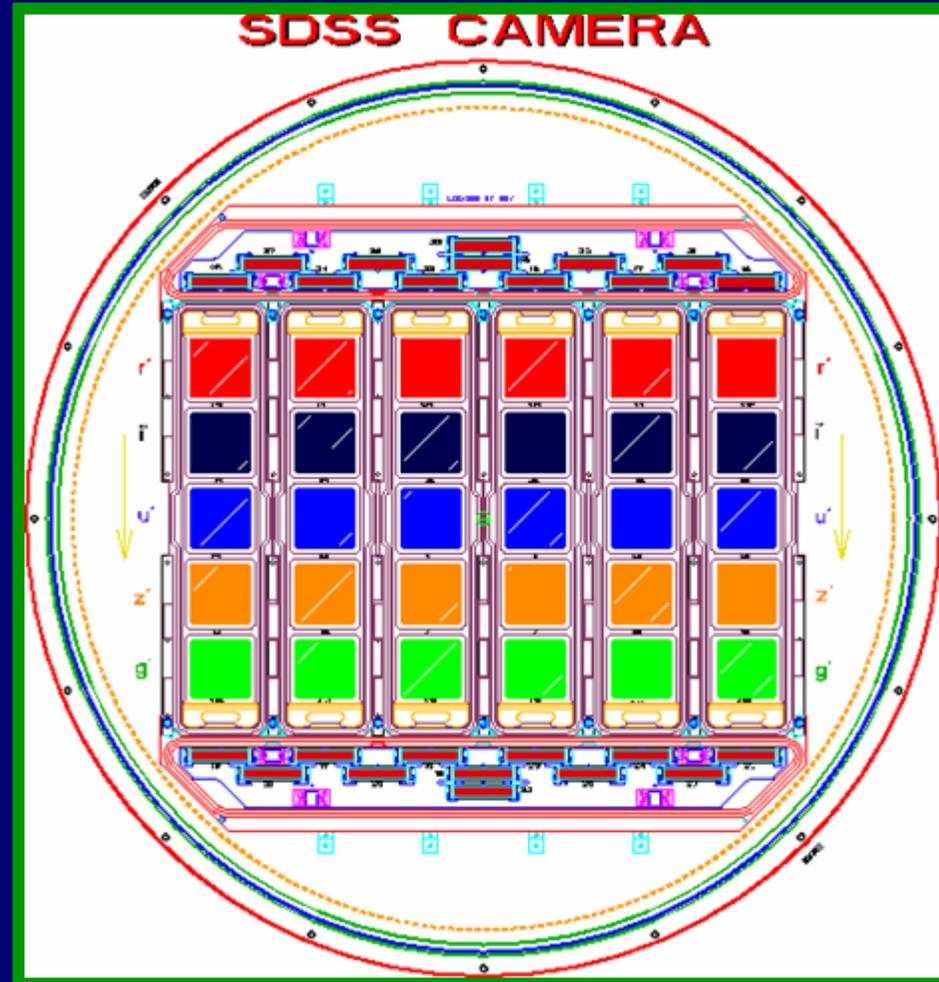
Telescópio de 2.5m dedicado ao projeto
localizado em Apache Point, NM.



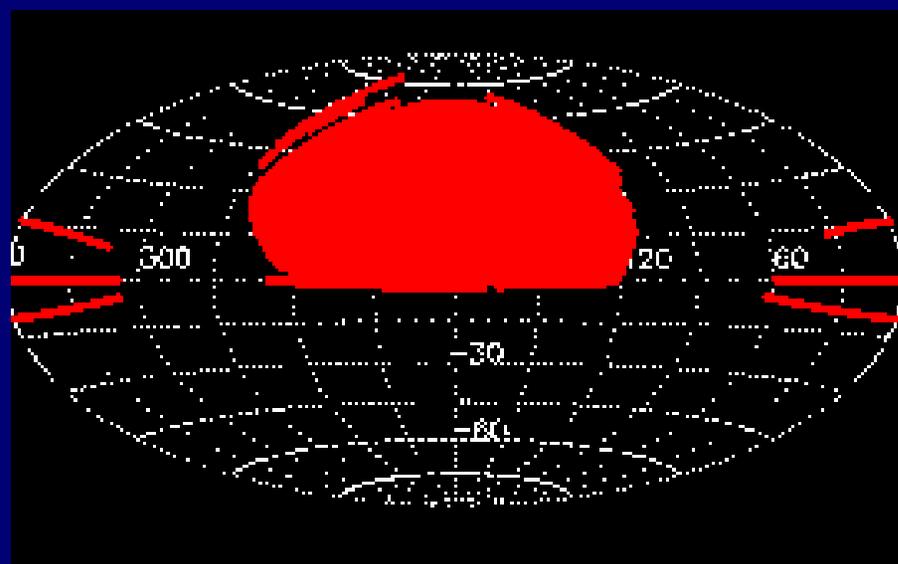
Sloan Digital Sky Survey



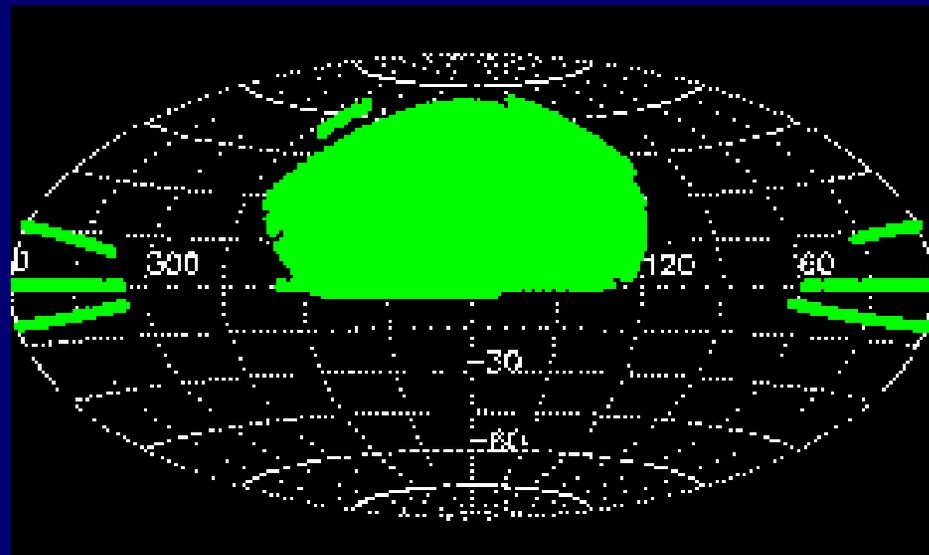
640 fibras para espectroscopia



Câmara com 30 CCDs

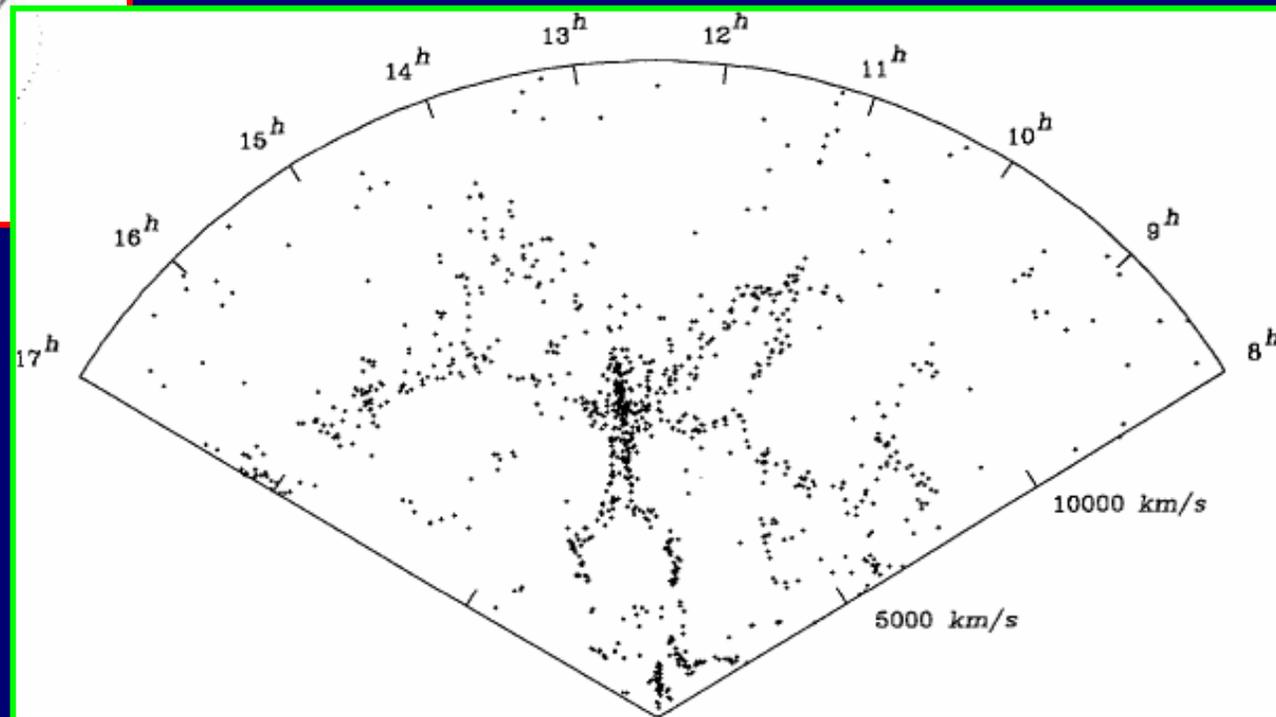
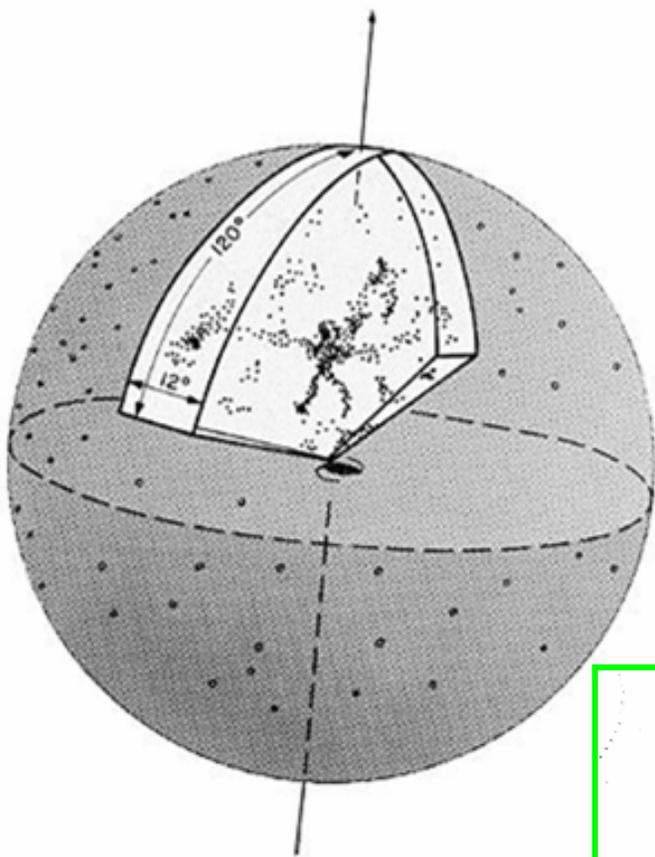


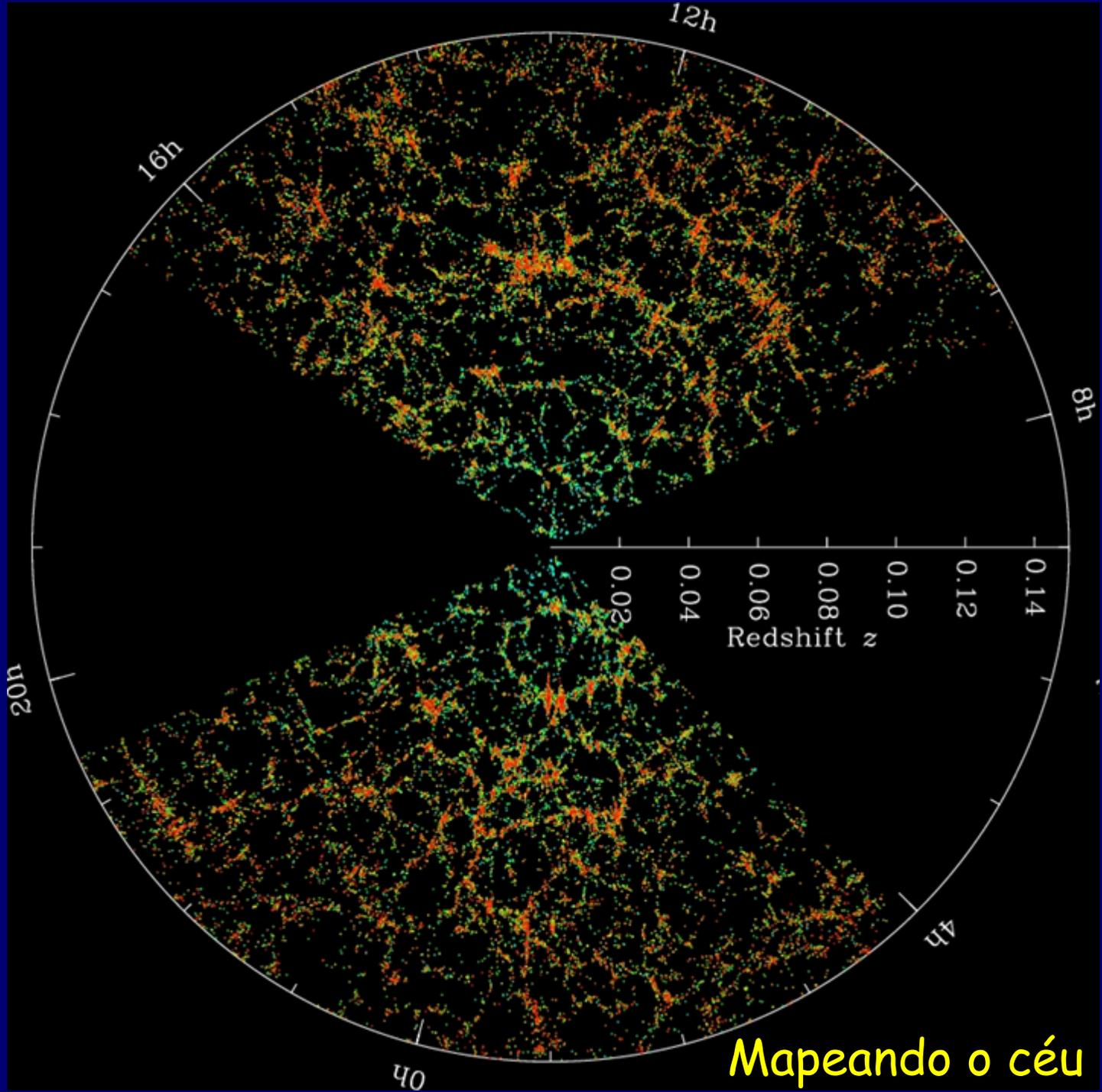
SDSS Sky Coverage (Aitoff projection of Equatorial coord.)



SDSS Spectral Sky Coverage

Utilizando a relação de Hubble, conseguimos determinar as distâncias das galáxias, e desta forma mapear a matéria luminosa do Universo.

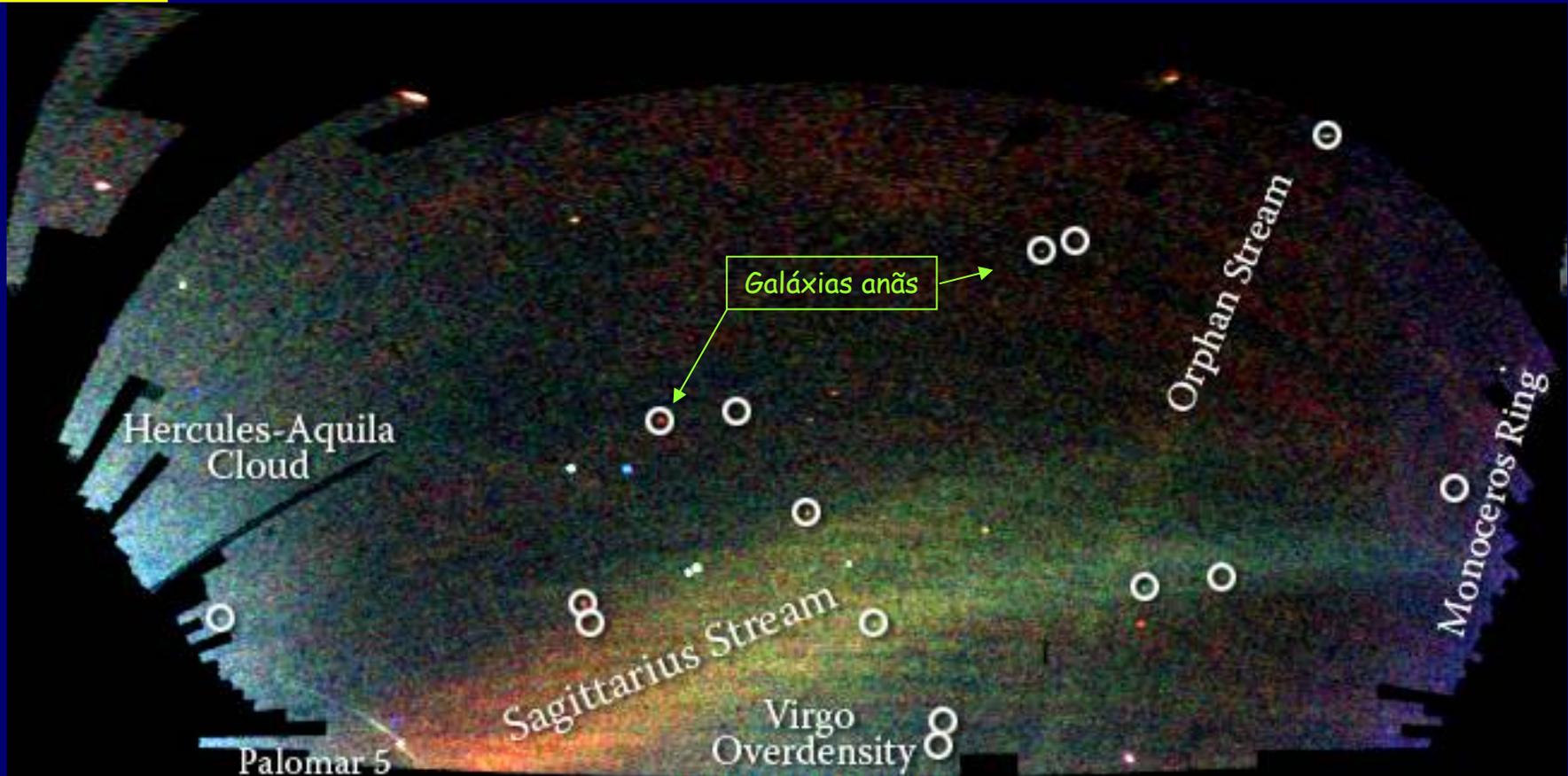




Mapeando o céu



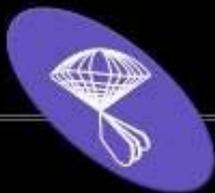
Mapa de estrelas mostrando "rastros" deixados por galáxias anãs que trespassaram a Via Láctea.



As cores indicam diferentes distâncias das estrelas e a intensidade é proporcional ao número destas.



O Brasil participa do SDSS-III



Sloan Digital Sky Survey III

Brazil Participation Group



Objetos de estudo:

Energia Escura, detecção de planetas extra-solares e estudos cinemáticos e químicos da Via Láctea.

<http://www.on.br/sdss3/>

Algumas propriedades das galáxias:

Massa

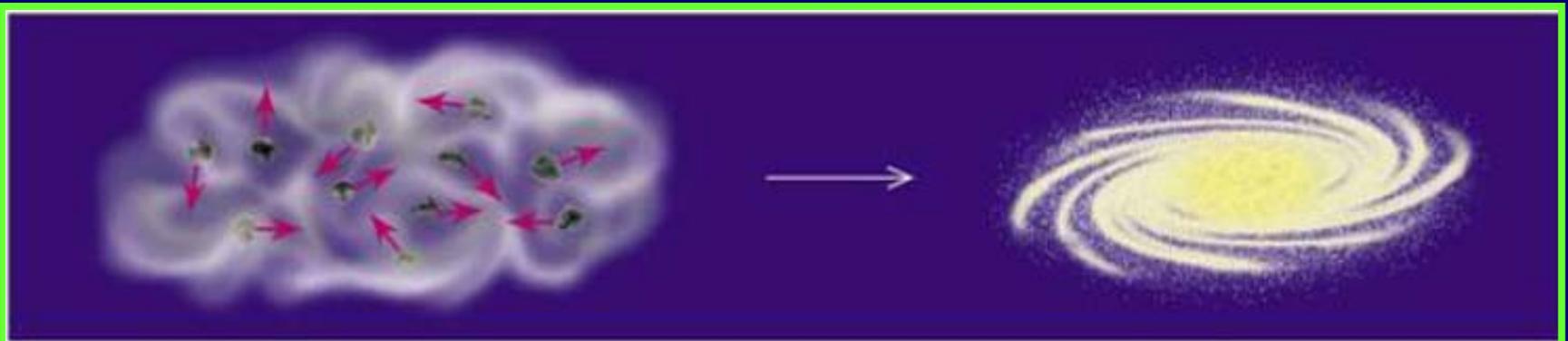
Luminosidade

Conteúdo de Estrelas

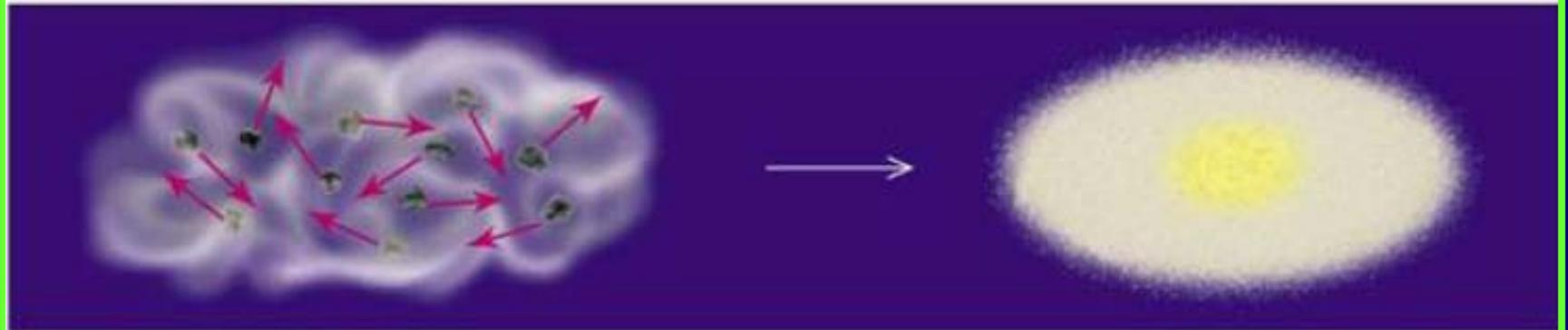
Como as galáxias se sustentam sem desabarem sobre si mesmas sob a força de sua gravidade ?

Espirais: Por rotação (momento angular) do disco.

Elípticas: Por movimentos aleatórios (dispersão de velocidades).

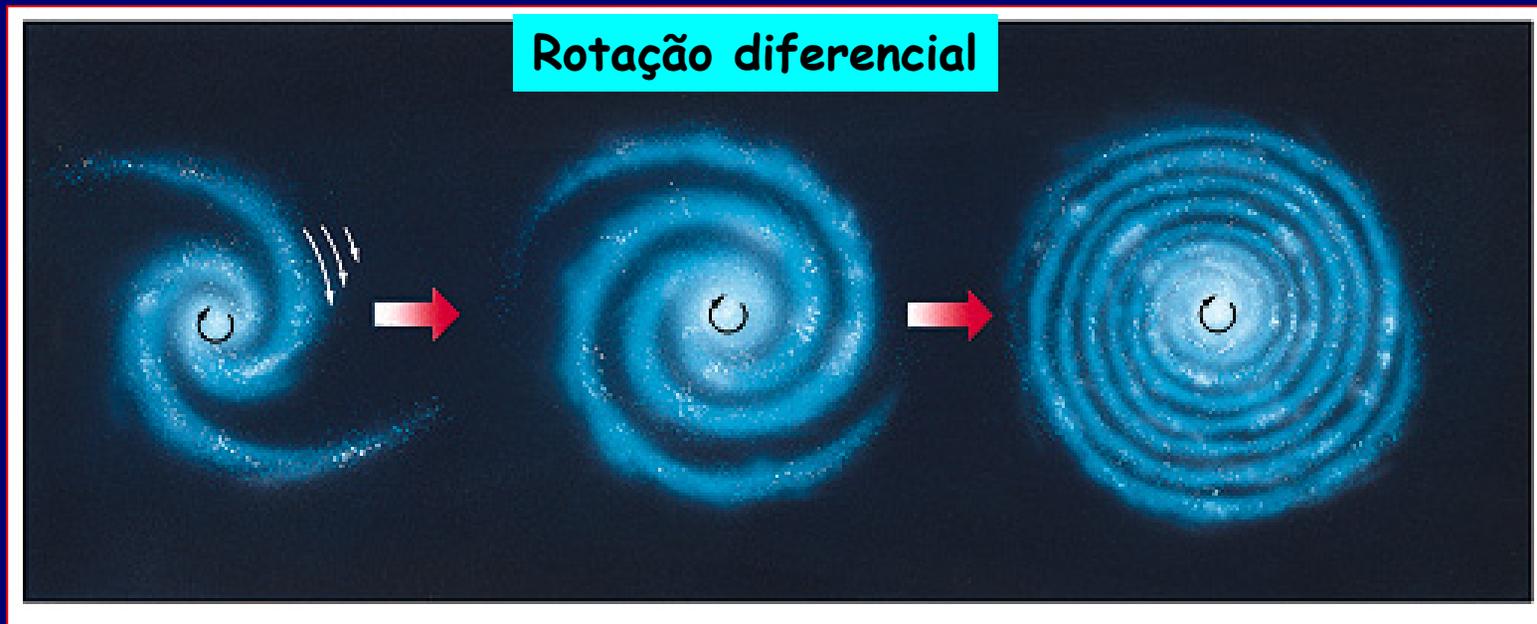


Movimentos aleatórios **pequenos** na nuvem protogaláctica ---> Galáxia Espiral



Movimentos aleatórios **grandes** na nuvem protogaláctica ---> Galáxia Elíptica

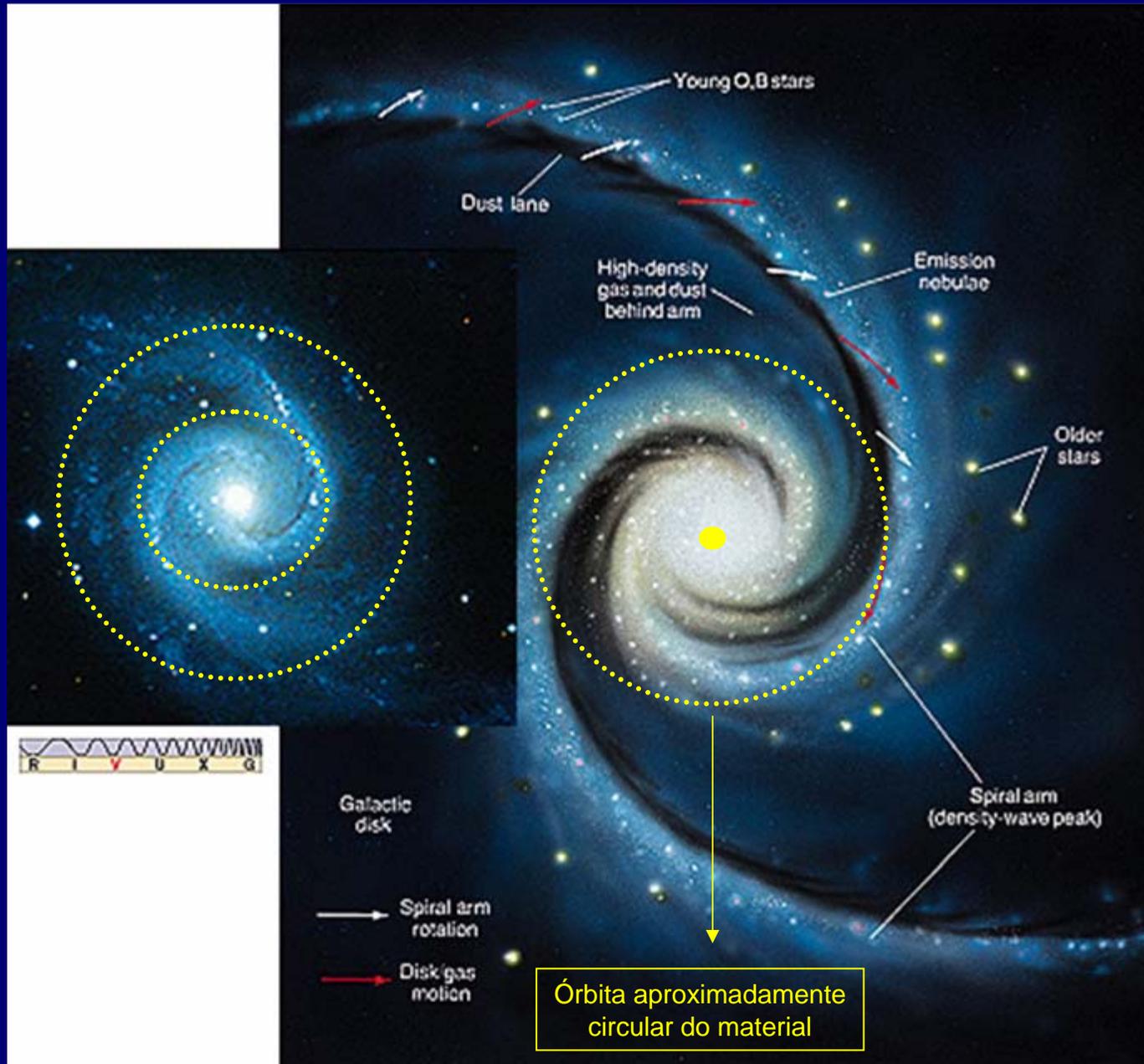
E o padrão espiralado visto em algumas galáxias, é o resultado do quê ?



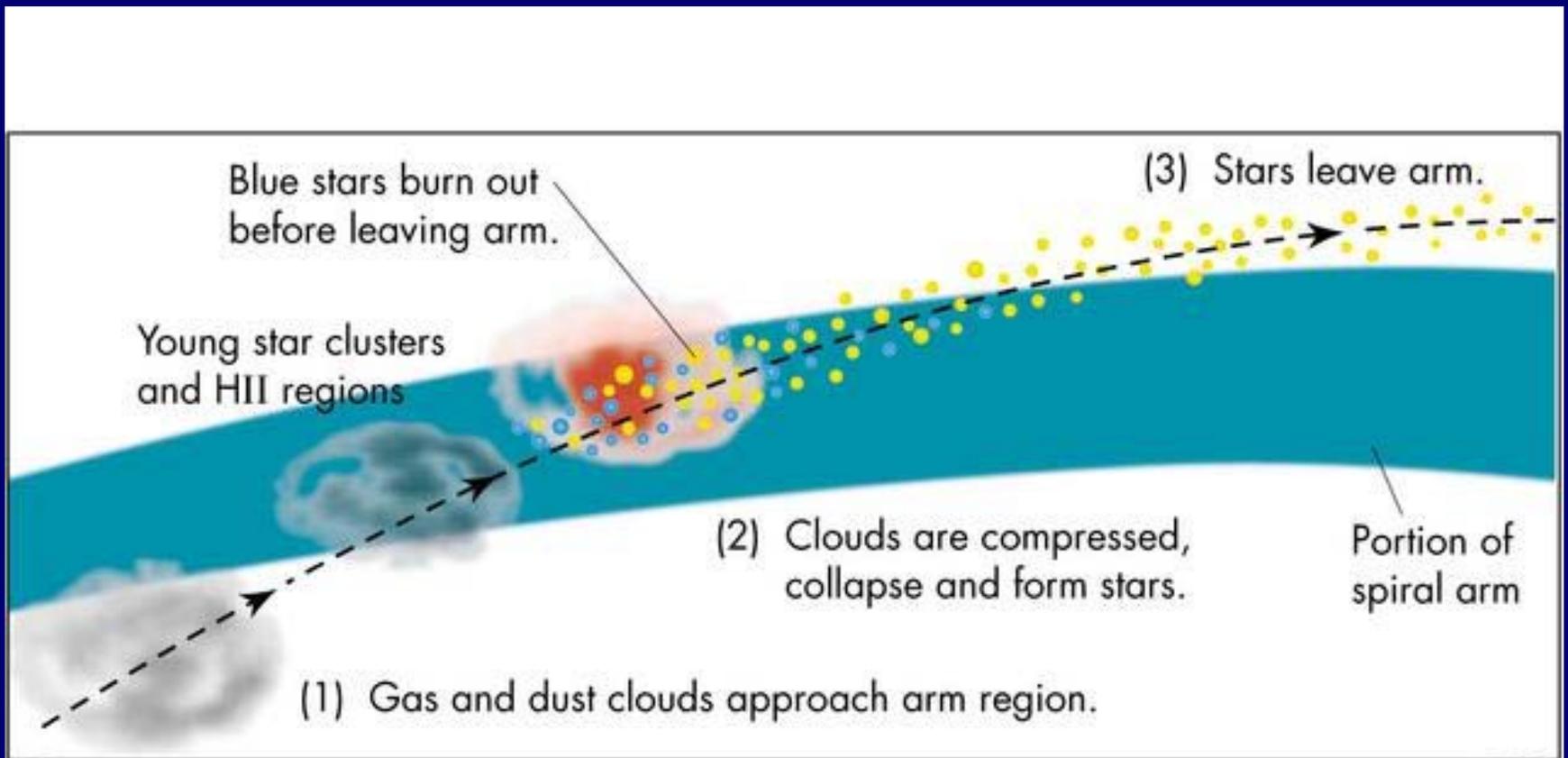
Como as galáxias espirais apresentam movimento de rotação diferencial (giram mais rápido no centro e mais lentamente nas bordas), poderíamos pensar que isto as levaria a produzirem o padrão espiralado observado.

Conseqüência: Como uma destas galáxias demora ~300-500 milhões de anos para efetuar uma revolução, isto significa que elas acabariam enroladas como na imagem mais à direita, na figura acima. Isto não se verifica na prática, logo, precisamos de uma outra teoria ...

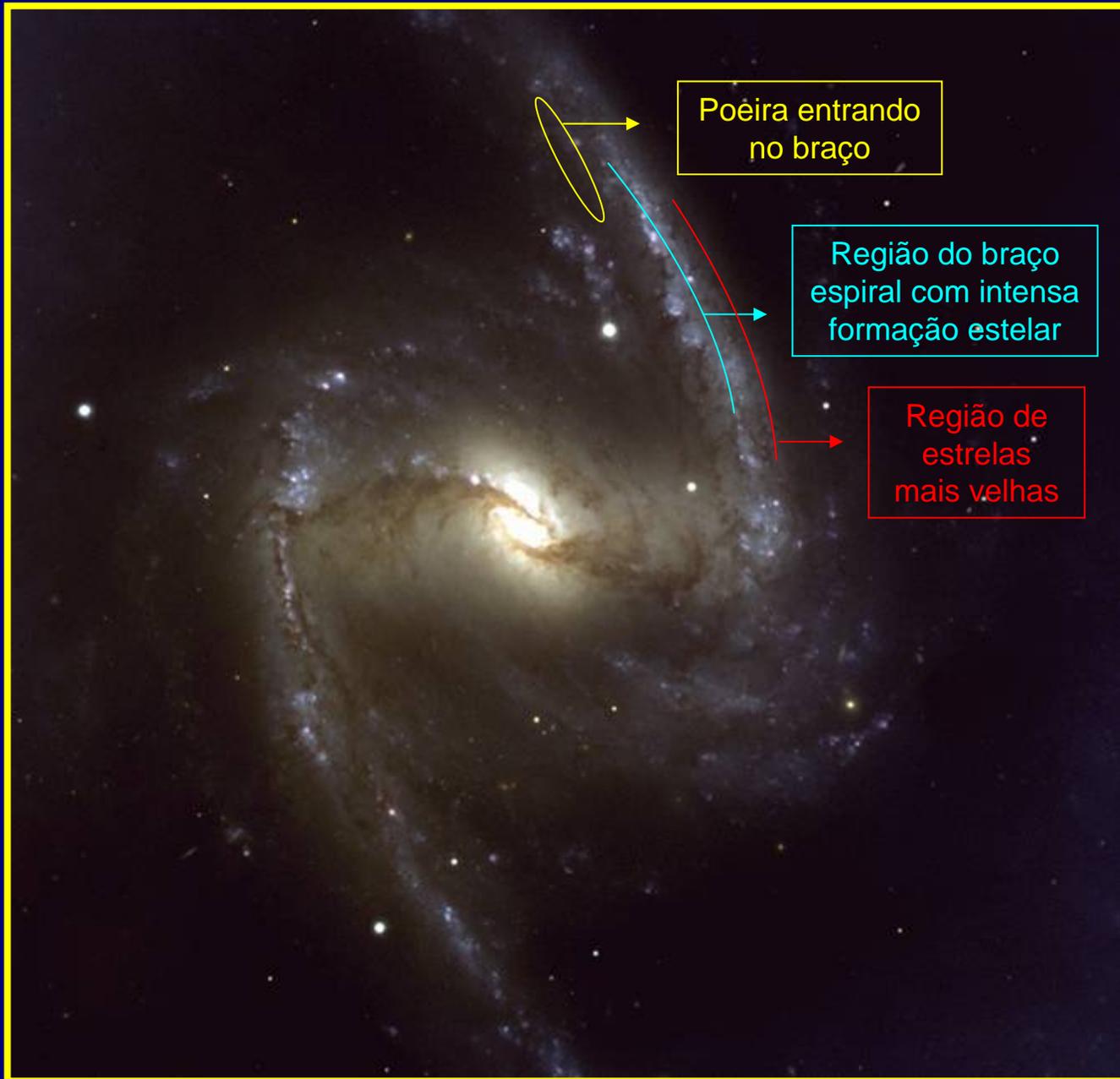
Teoria de ondas de densidade



Esquema de onda de densidade



Esquema de onda de densidade



Teoria de ondas de densidade (linhas gerais)

Nós vemos o padrão espiral como o resultado de uma atividade de formação de estrelas mais acentuada naquela região. As regiões entre os braços, são praticamente tão densas quanto as dos braços. O que acontece é que nas partes mais visíveis (onde temos estrelas se formando), está ocorrendo uma ligeira compressão no gás produzida por uma "perturbação" denominada onda de densidade. Esta compressão desencadeia a formação de estrelas.

Vários fatores poderiam induzir estas ondas de densidade, entre elas: a instabilidade do gás nas proximidades do bojo; efeitos gravitacionais de galáxias satélites; assimetria do bojo.

Veja analogia de ondas de densidade com "engarrafamento de trânsito" no Apêndice 1

'Pesando' a Galáxia

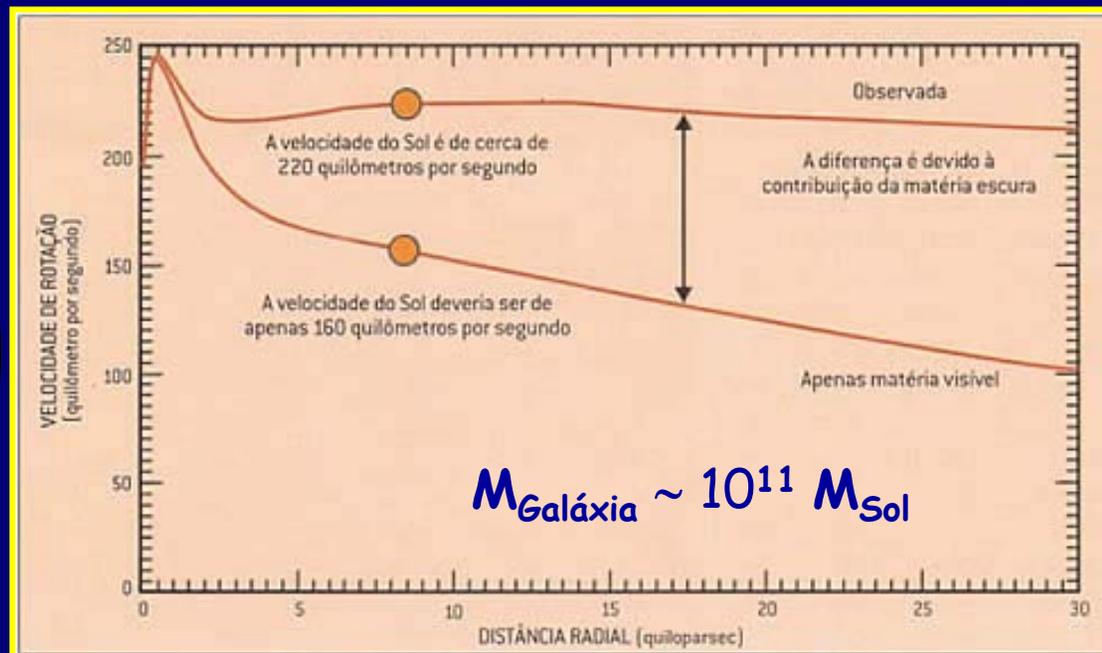
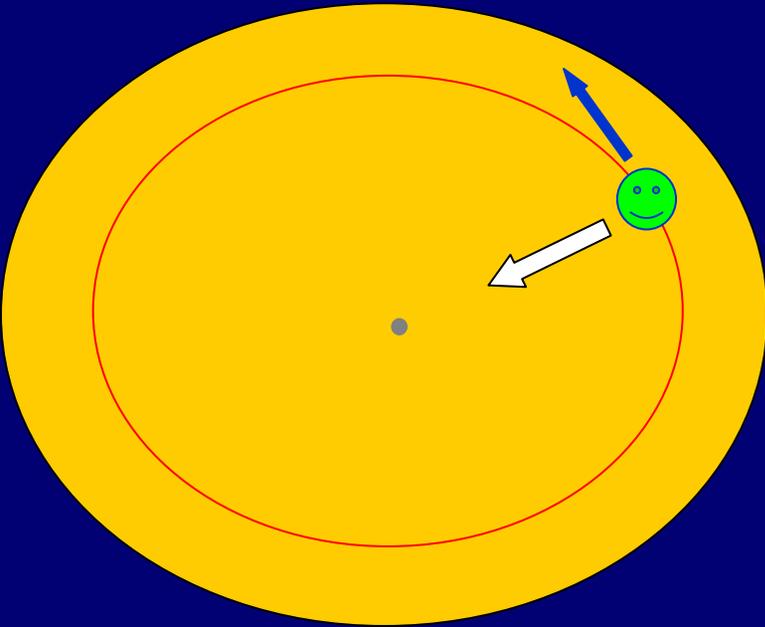
As galáxias não rotam como um corpo rígido. Usando a terceira lei de Kepler que relaciona a *massa, período e tamanho das órbitas*, podemos fazer uma estimativa da massa da nossa galáxia interior à órbita do Sol:

$$\text{Massa total} = (\text{semi-eixo maior})^3 / (\text{período})^2$$

Força centrípeta = Força gravitacional

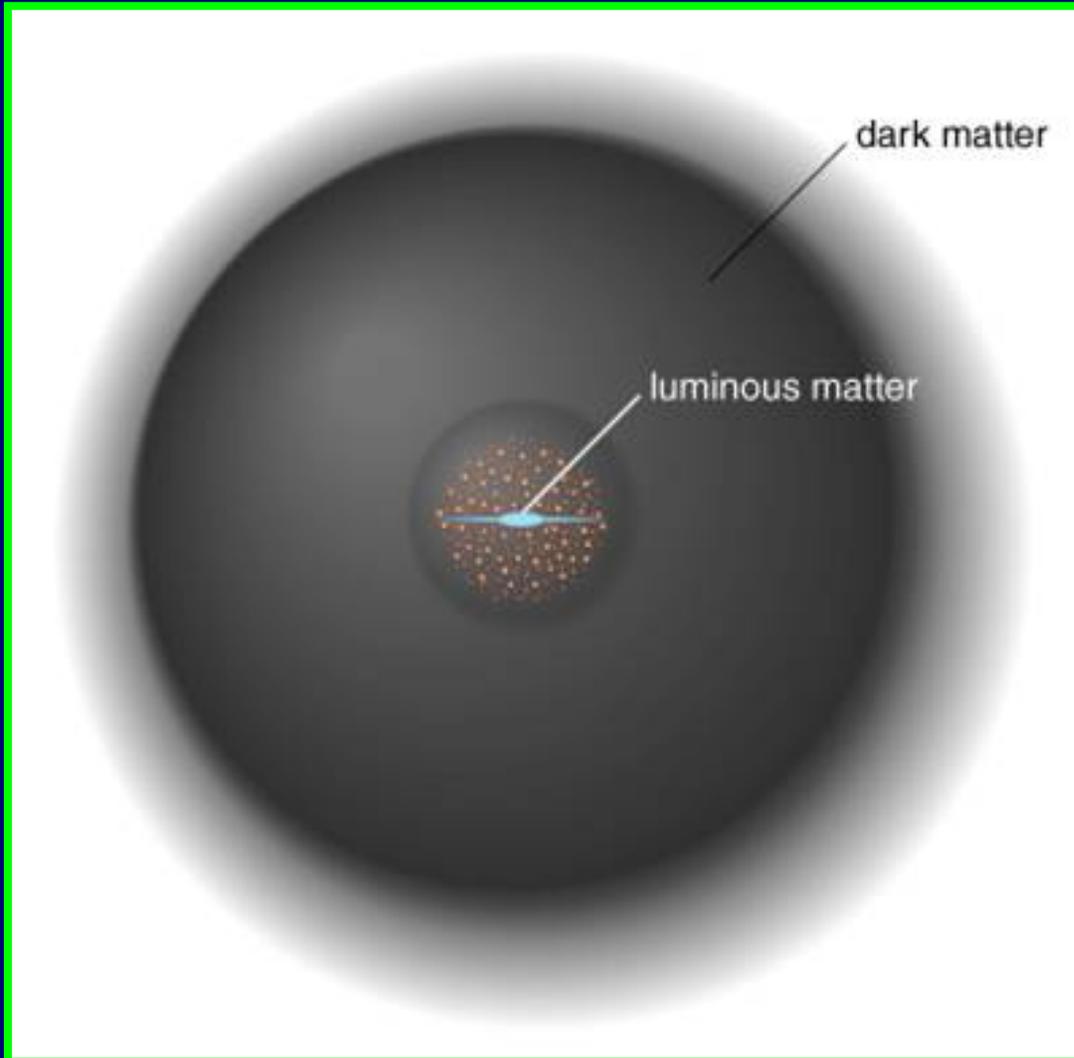
$$m \frac{V^2}{R} = \frac{GMm}{R^2} \rightarrow M = \frac{RV^2}{G}$$

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$



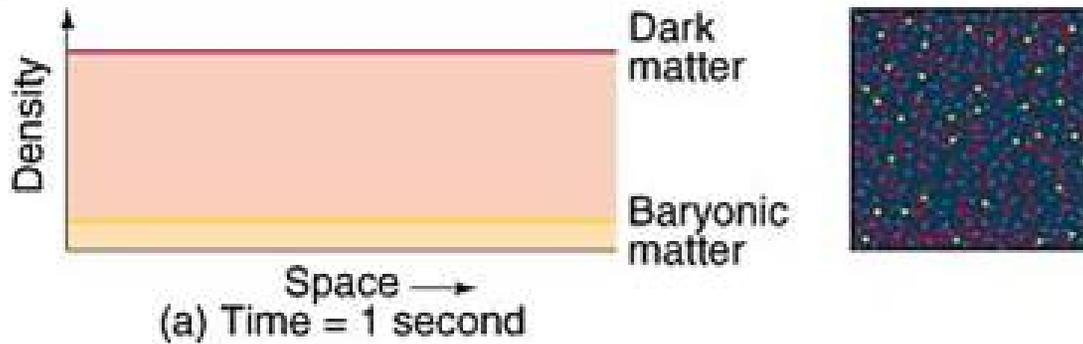
A "brilhante" idéia da Matéria Escura

Para explicar a curva de rotação observada, que contraria a tendência de queda da velocidade de rotação nas suas partes externas, foi sugerida a existência de matéria além dos limites observáveis da galáxia.



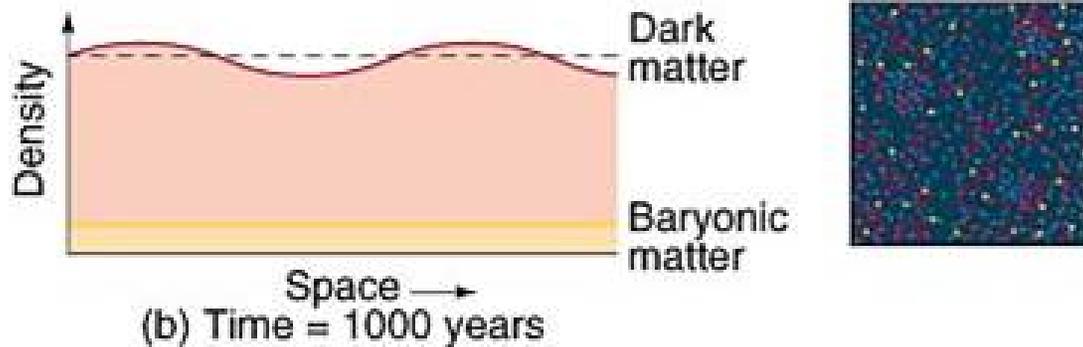
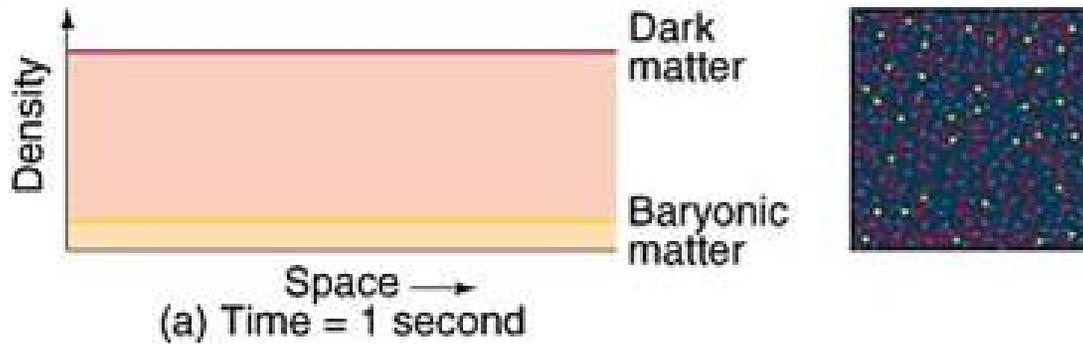
Representação da distribuição de matéria escura em torno de uma galáxia

A "brilhante" idéia da Matéria Escura



No início do Universo, as matérias escura e bariônica estavam homogeneamente distribuídas.

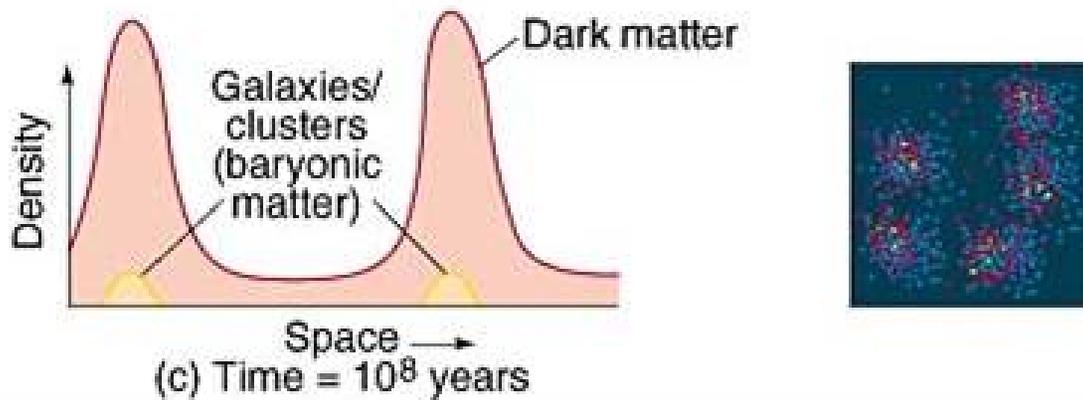
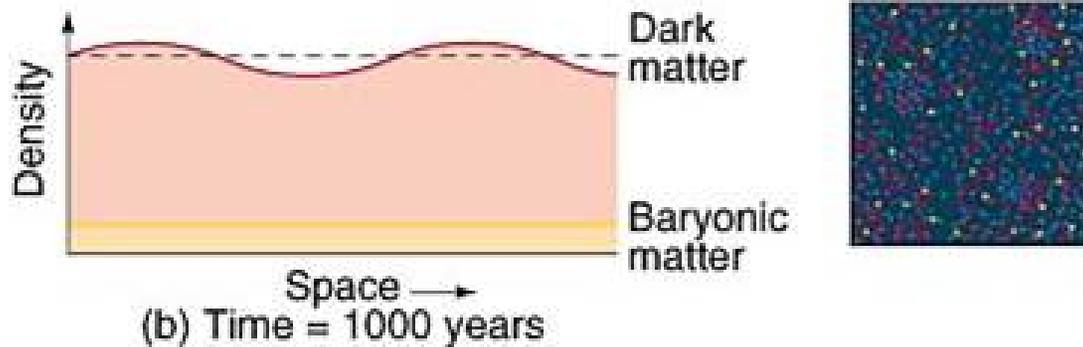
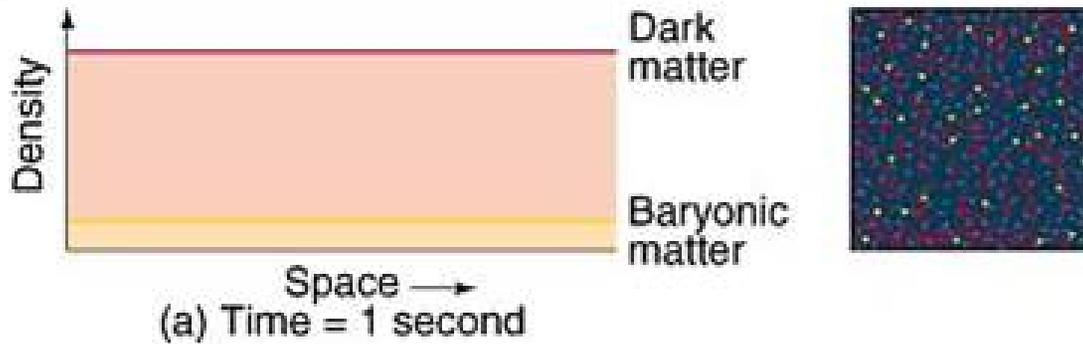
A "brilhante" idéia da Matéria Escura



No início do Universo, as matérias escura e bariônica estavam homogeneamente distribuídas.

Pequenas flutuações de densidade na distribuição de matéria escura fizeram com que esta produzisse certas concentrações deste material.

A "brilhante" idéia da Matéria Escura



No início do Universo, as matérias escura e bariônica estavam homogeneamente distribuídas.

Pequenas flutuações de densidade na distribuição de matéria escura fizeram com que esta produzisse certas concentrações deste material.

Mais tarde quando o Universo estava mais frio, a matéria bariônica começou a ser puxada para estes poços de potenciais.

Como resolver o quebra-cabeça ?



Candidatos a Matéria Escura

Matéria Ordinária

- Gás e poeira (matéria visível é composta de 75% de Hidrogênio)
- MACHOS (Massive Halo Compact Objects, Planetas, anãs marrons,...)

Matéria ou Teoria Exótica

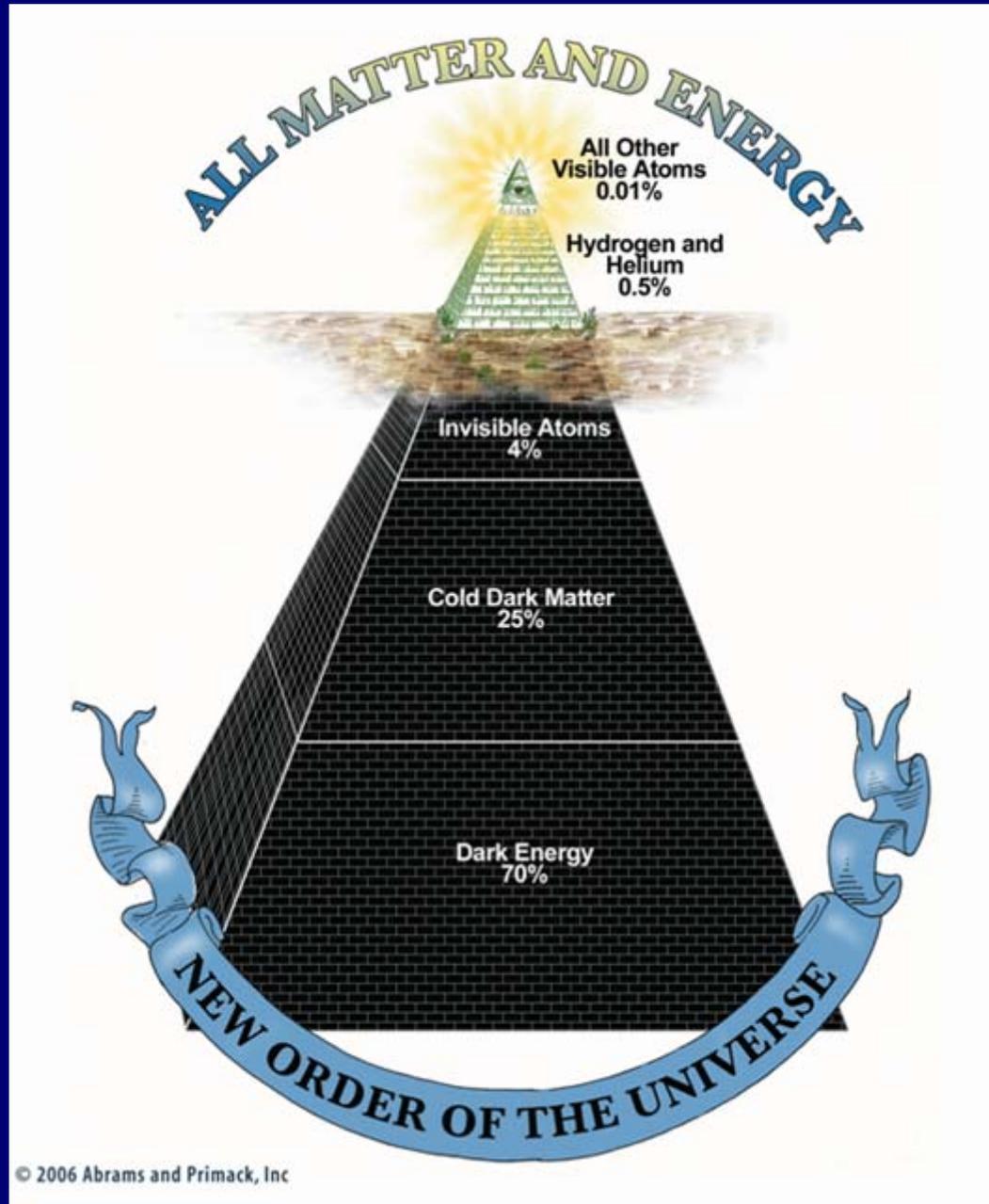
- Neutrinos
- WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles)
- Mudança da Gravidade

A quantidade de matéria escura é 10 vezes maior do que a de matéria convencional (bariônica).

Inventário da matéria visível do universo



Inventário da matéria e energia do universo



Luminosidades e Cores das galáxias

A cor e a luminosidade das galáxias normais é o resultado da soma da luz proveniente de suas estrelas constituintes.

Uma conexão pode ser estabelecida entre o tipo morfológico da galáxia e sua população estelar dominante.

Galáxias Irregulares possuem predominantemente estrelas de População I.

Espirais possuem tanto estrelas de Pop I como de Pop II, seguindo uma seqüência crescente de aumento de luz proveniente de Pop II dos tipos Sc para os Sa.

Lembrando

Pop I - População jovem, estrelas azuis, ricas em elementos pesados.

Pop II - População velha, estrelas vermelhas, ricas em H e He.

Razão Massa / Luminosidade - M/L

Uma forma comum de nos referirmos a luminosidade de um objeto é através da sua medida na banda B (L_B) ou no visual (L_V). Um conceito importante é o da razão entre as quantidades de luz emitida e sua massa, chamada razão massa luminosidade - M/L. Por definição:

$$\frac{M}{L} = 1 \frac{M_{Sol}}{L_{Sol}} \quad (\text{para o Sol})$$

Para as estrelas, é válida a relação:

$$\log \frac{L}{L_{Sol}} \approx 3.8 \log \frac{M}{M_{Sol}}$$

Assim, estrelas com:

$0.5 M_{Sol}$	-->	$M/L \sim 10 M_{Sol}/L_{Sol}$
$2 M_{Sol}$	-->	$M/L \sim 0.1 M_{Sol}/L_{Sol}$

Relação Massa / Luminosidade - M/L (cont.)

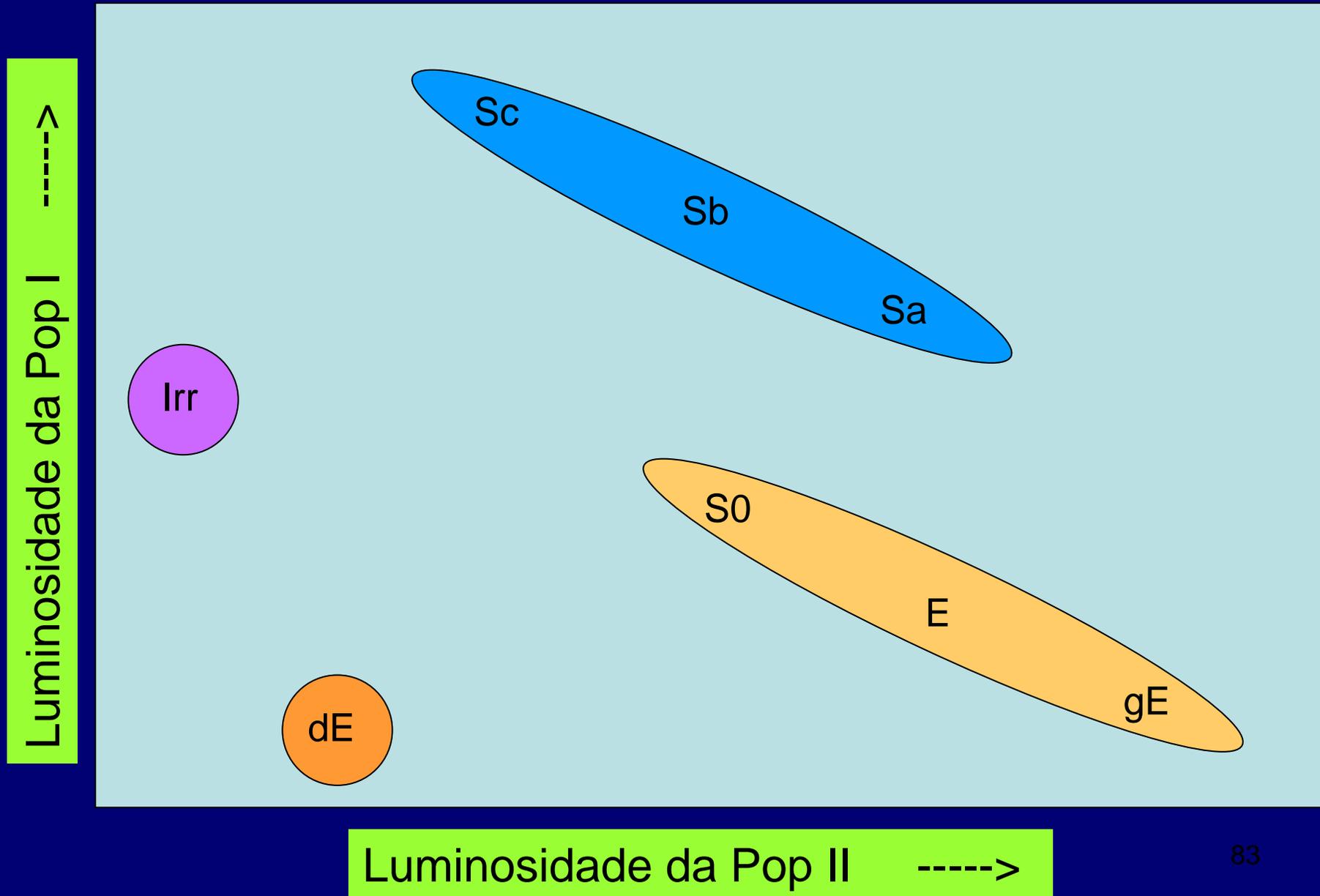
Com base nos números obtidos para M/L nos exemplos do slide anterior, podemos inferir que a luminosidade das galáxias é produzida por estrelas muito massivas, enquanto que sua massa, é devida às estrelas pouco massivas, pois estas possuem longevidade e são em um grande número. Assim, as partes luminosas das galáxias normais apresentam valores médios de M/L:

$$\frac{M}{L} \approx 6 \frac{M_{Sol}}{L_{V,Sol}} \approx 10 \frac{M_{Sol}}{L_{B,Sol}}$$

Table 2 Mass-to-light ratios within the Holmberg radius^a

Type	M/L_B	M/L_V^b	M/L_R^c
S0 ⁻	10: ^f	7.6:	1.4:
S0 ⁺ -Sa	6.2 ± 1.1	5.4	1.1
Sab-bc	6.5 ± 0.5	6.1	1.2
Sbc-Sc	4.7 ± 0.4	5.0	1.1
Scd-Sd	3.9 ± 0.6	4.5	1.4
Sdm-Irr	1.7 ± 0.6	2.0	0.9

Diferentes tipos morfológicos de galáxias representadas em termos de luminosidades derivadas de suas populações estelares.



Quadro com propriedades gerais de galáxias

	Espirais	Elípticas	Irregulares
Massa (M_{Sol})	$10^9 - 10^{12}$	$10^6 - 10^{13}$	$10^8 - 10^{11}$
Luminosidade (L_{Sol})	$10^8 - 10^{11}$	$10^6 - 10^{11}$	$10^8 - 10^{11}$
M/L	2 - 10	5 - 30	1 - 3
Diâmetro (kpc)	5 - 50	1 - 200	1 - 10
Populações estelares	Velha no Halo e Bojo Jovem no Disco	Velha	Jovem e Intermediária
Tipo espectral composto	A (Sc) até K (Sa)	G até K	A até F
Material interestelar	Gás e poeira no Disco	Pouca quantidade de gás e poeira	Muito gás; alguma poeira
Ambiente em grande escala	Em grupos, regiões de baixa densidade de galáxias	Aglomerados ricos	Regiões de baixa densidade de galáxias

Proporção das galáxias entre os diversos tipos morfológicos

A distribuição das galáxias pelos diversos tipos morfológicos é dependente do ambiente. Em regiões ditas "de campo", a fração de espirais é muito grande. Nas regiões centrais de aglomerados, só existem elípticas e lenticulares.

A distribuição de galáxias conforme diferentes graus de aglomeração no Levantamento de Galáxias do Hemisfério Sul - SSRS2, que caracteriza a população de galáxias no Universo local (dentro de um raio $R \sim 150\text{Mpc}$) é mostrada abaixo:

Grupos ($N > 3$): 24%

Tripletos: 8 %

Binárias: 18%

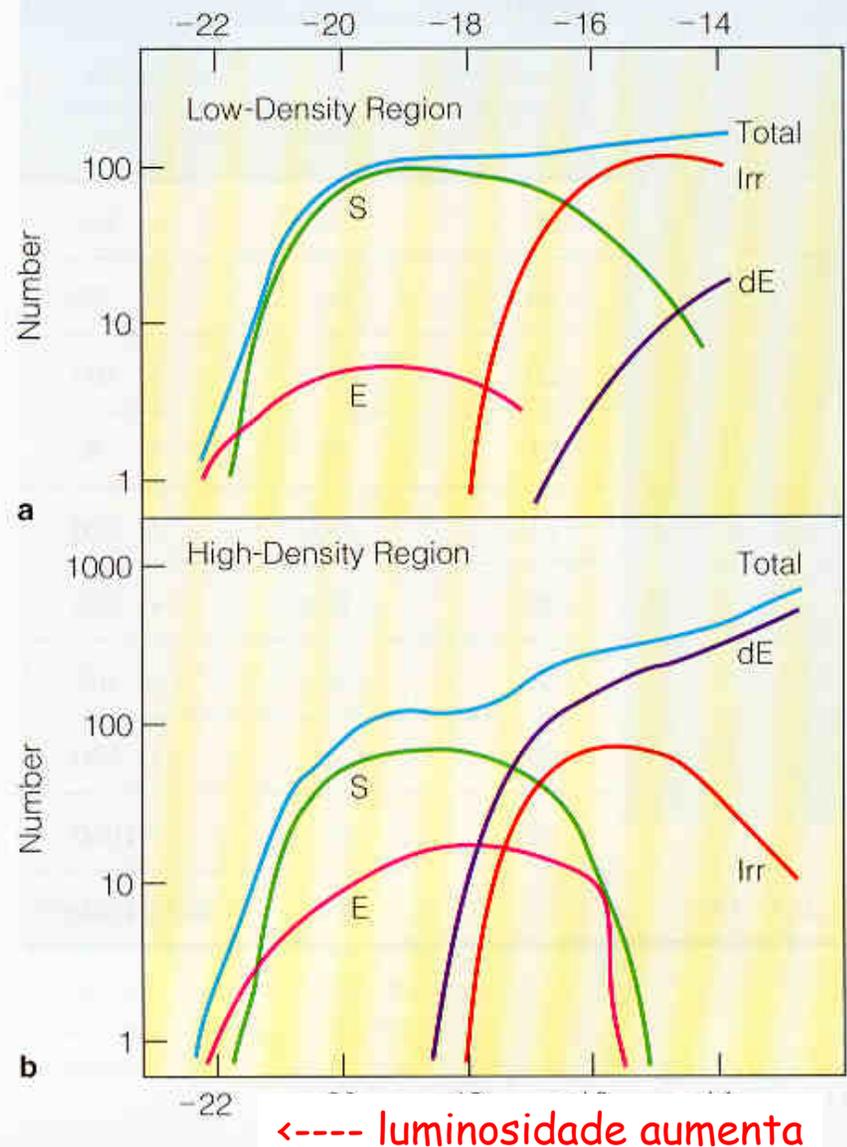
Isoladas: 50%

Função de Luminosidade de galáxias

É a função que descreve a quantidade de galáxias em um dado volume do espaço como uma função da luminosidade (magnitude).

Esta distribuição depende do ambiente em que estão as galáxias.

Ver mais detalhes no Apêndice 1



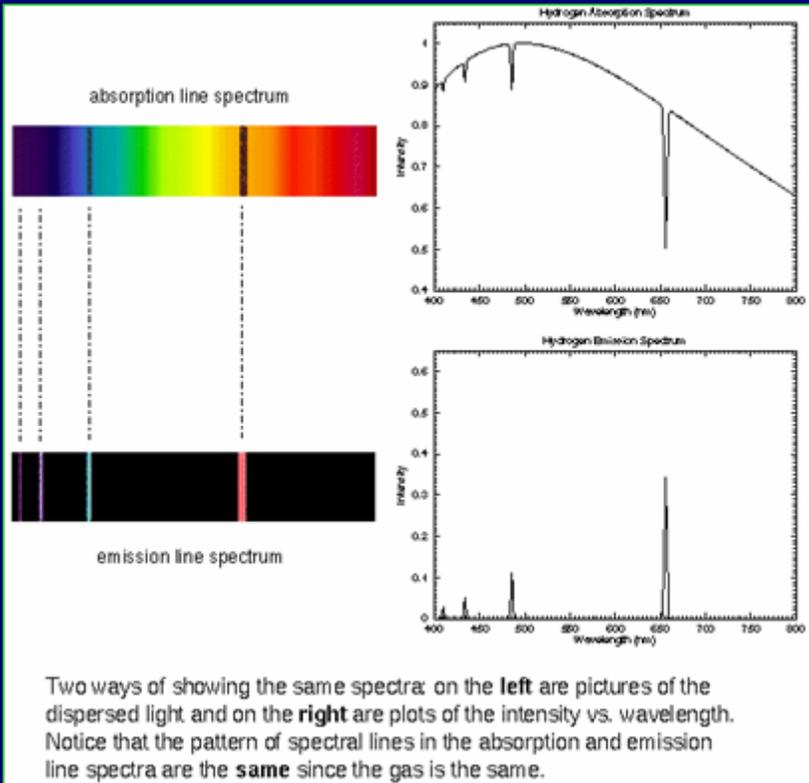
Mensageiros das galáxias

Como saber sobre a estrutura física, composição química, proporção de estrelas, de gás e de poeira em uma galáxia ?

Resposta: Através da luz emitida por elas, depois de viajar distâncias incomensuráveis.

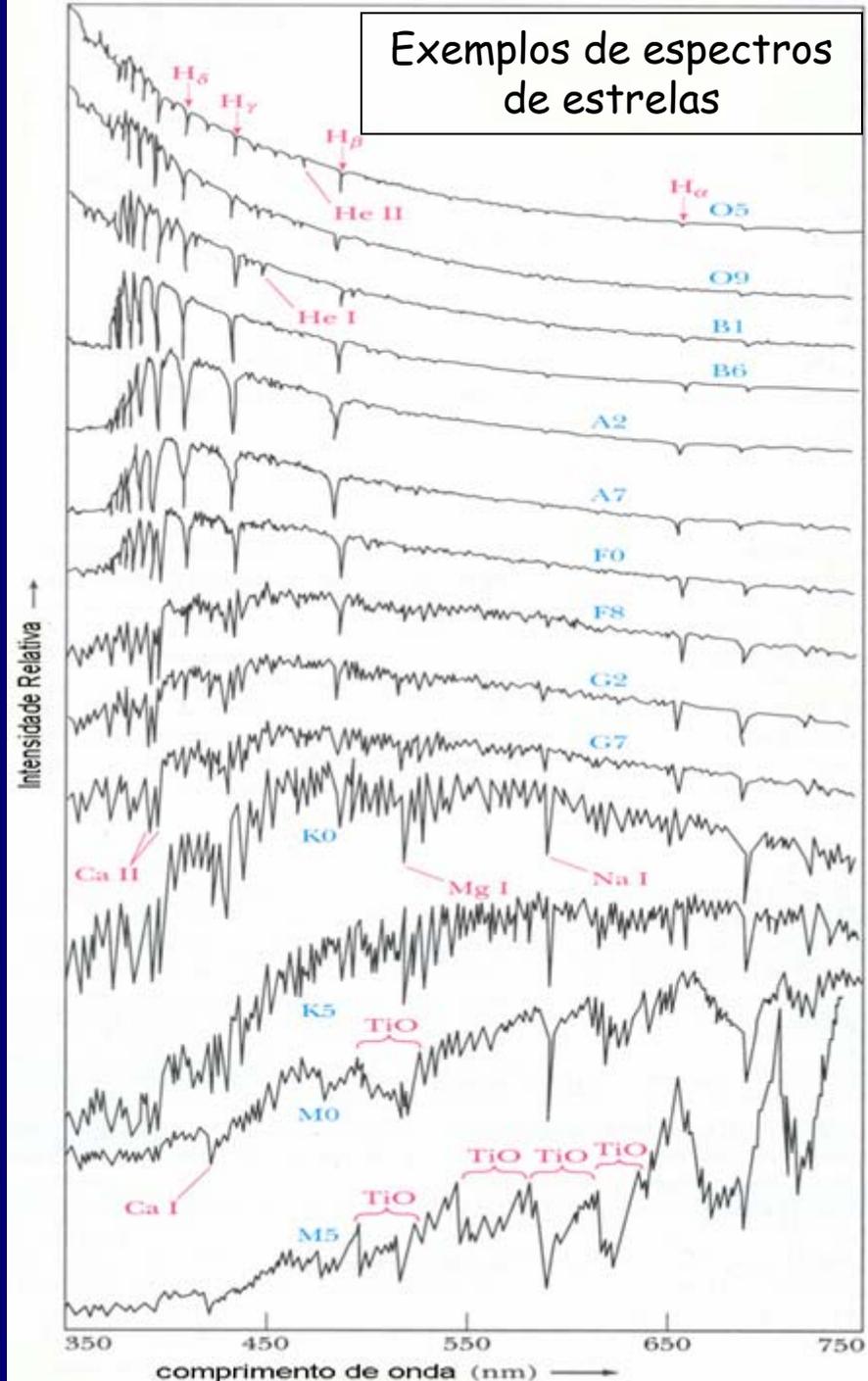
Como extrair estas informações, veremos a seguir.

Como se parecem as galáxias "vistas" espectroscopicamente ?



Espectros contendo linhas do Hidrogênio em absorção e emissão

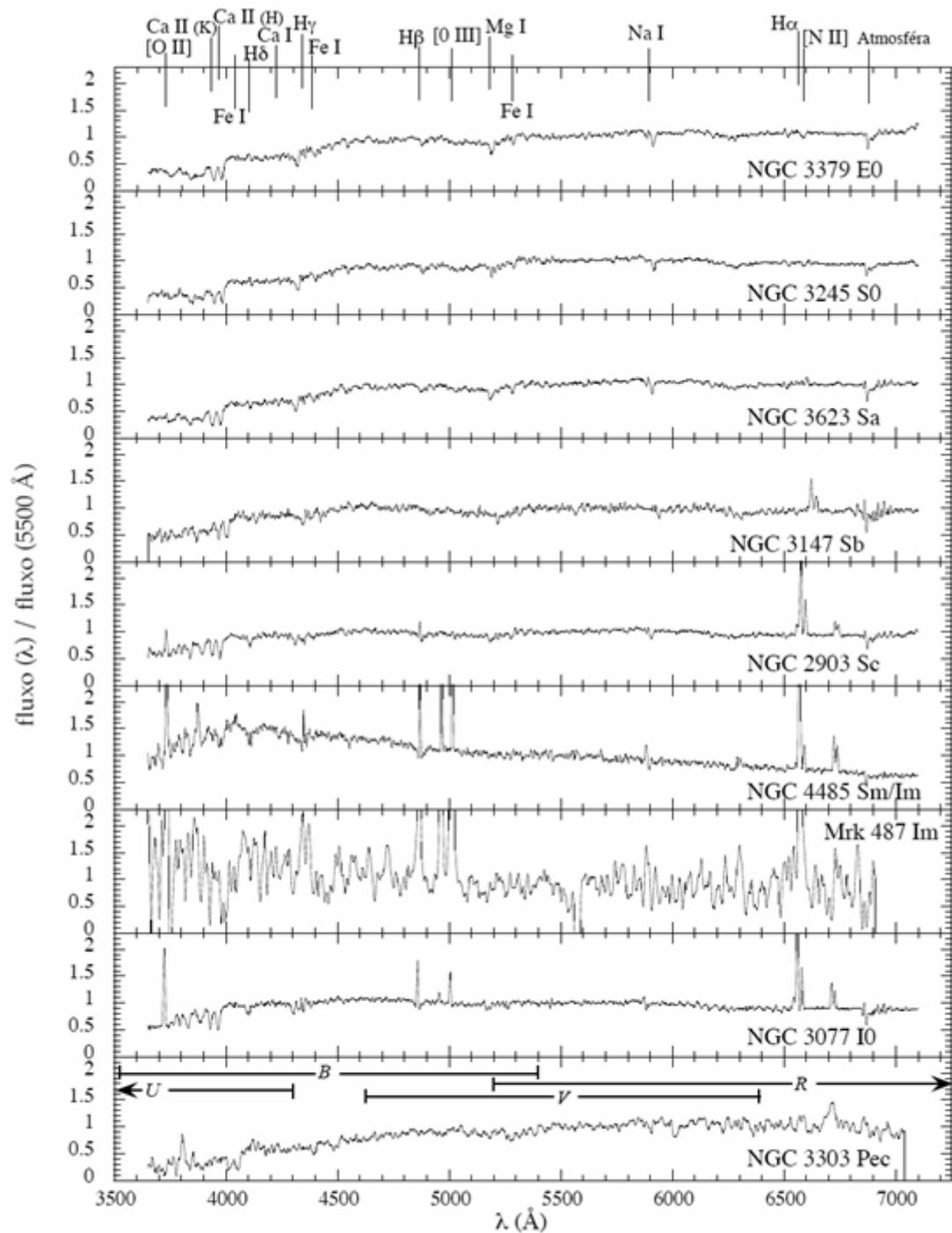
Exemplos de espectros de estrelas



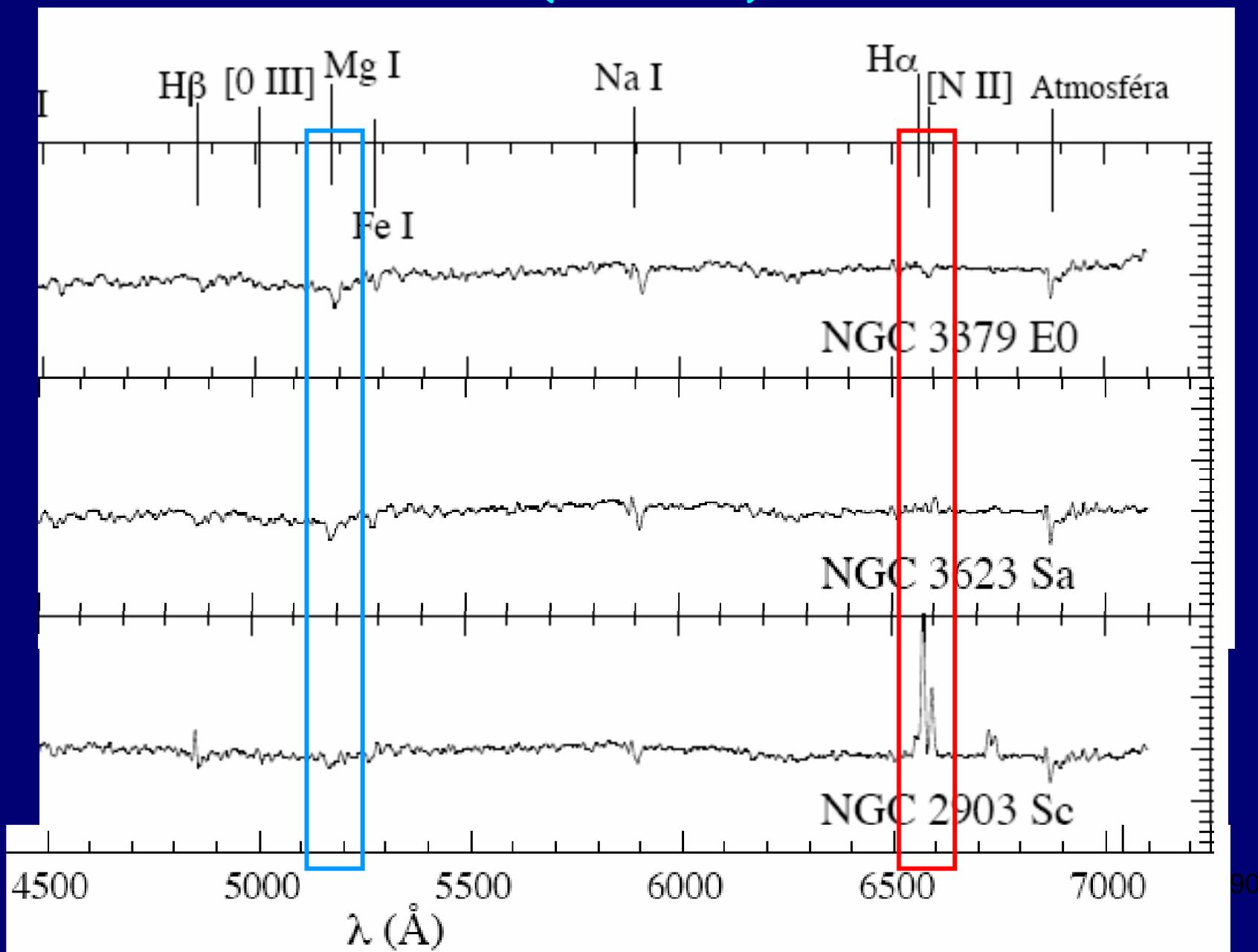
Como se parecem as galáxias "vistas" espectroscopicamente ?

Os espectros das galáxias resultam da soma da luz individual de suas estrelas (~50 bilhões), mais nuvens moleculares e regiões com formação estelar.

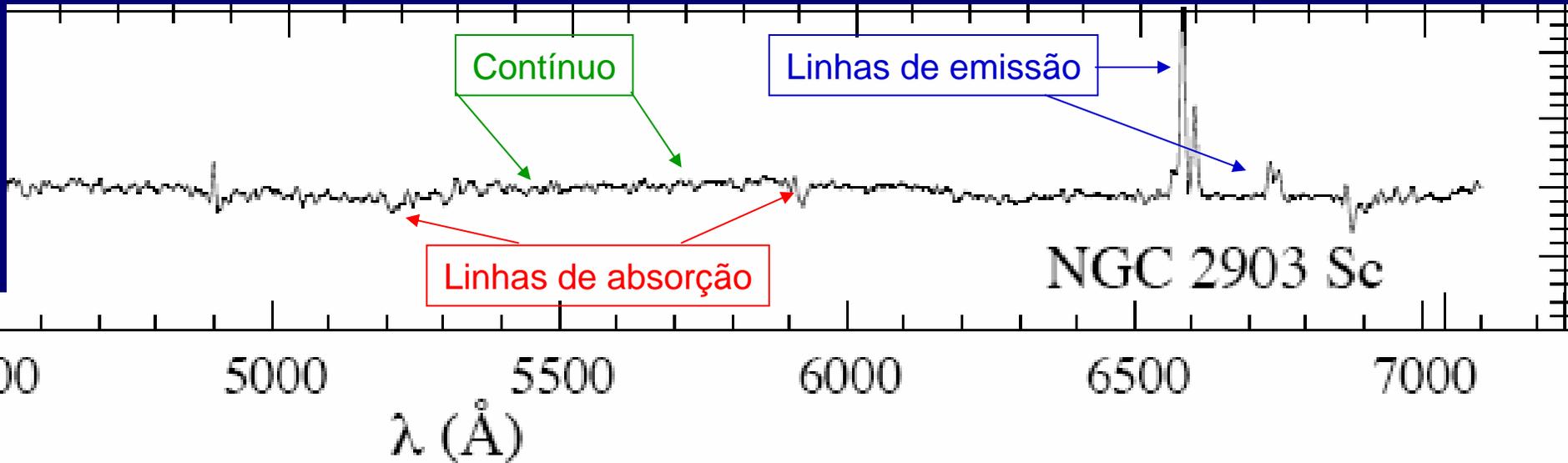
Espectros de galáxias de diferentes tipos morfológicos.



Como se parecem as galáxias vistas espectroscopicamente? (detalhes)



Como se parecem as galáxias vistas espectroscopicamente ? (aspectos típicos dos espectros)



Linhas de absorção: necessitam de metais nas atmosferas estelares ou de gás frio no meio interestelar. Implica na existência de populações estelares velhas. Estão presentes em elípticas e bojos de espirais.

Linhas de emissão: requerem gás quente ou estrelas dos tipos O e B. Implica em estrelas recém formadas ou em formação. São produzidas em discos de espirais e em Irregulares.

Endereços famosos (linhas)

Alguns comprimentos de onda de características típicas (*features*) nos espectros são importantes para o estudo de determinadas propriedades, pois estão relacionados com processos físicos bem estabelecidos. Eles permitem o diagnóstico das propriedades físicas da região proveniente tais como temperaturas, densidades, composição química, etc.

Typical Spectral features

Absorption

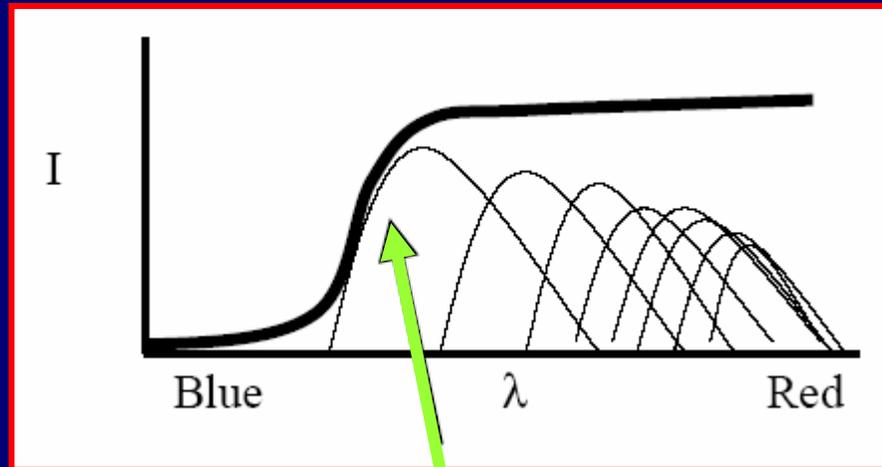
- Ca(H) = 3933.7A
- Ca(K) = 3968.5A
- G-band = 4304.4A
- Mg = 5175.3A
- Na = 5894.0 A

• Emission

- O[II] = 3727.3A
- H δ = 4102.8A
- H γ = 4340.0A
- H β = 4861.3A
- O[III] = 4959.0A
- O[III] = 5006.8A
- H α = 6562.8A
- S2 = 6716.0A

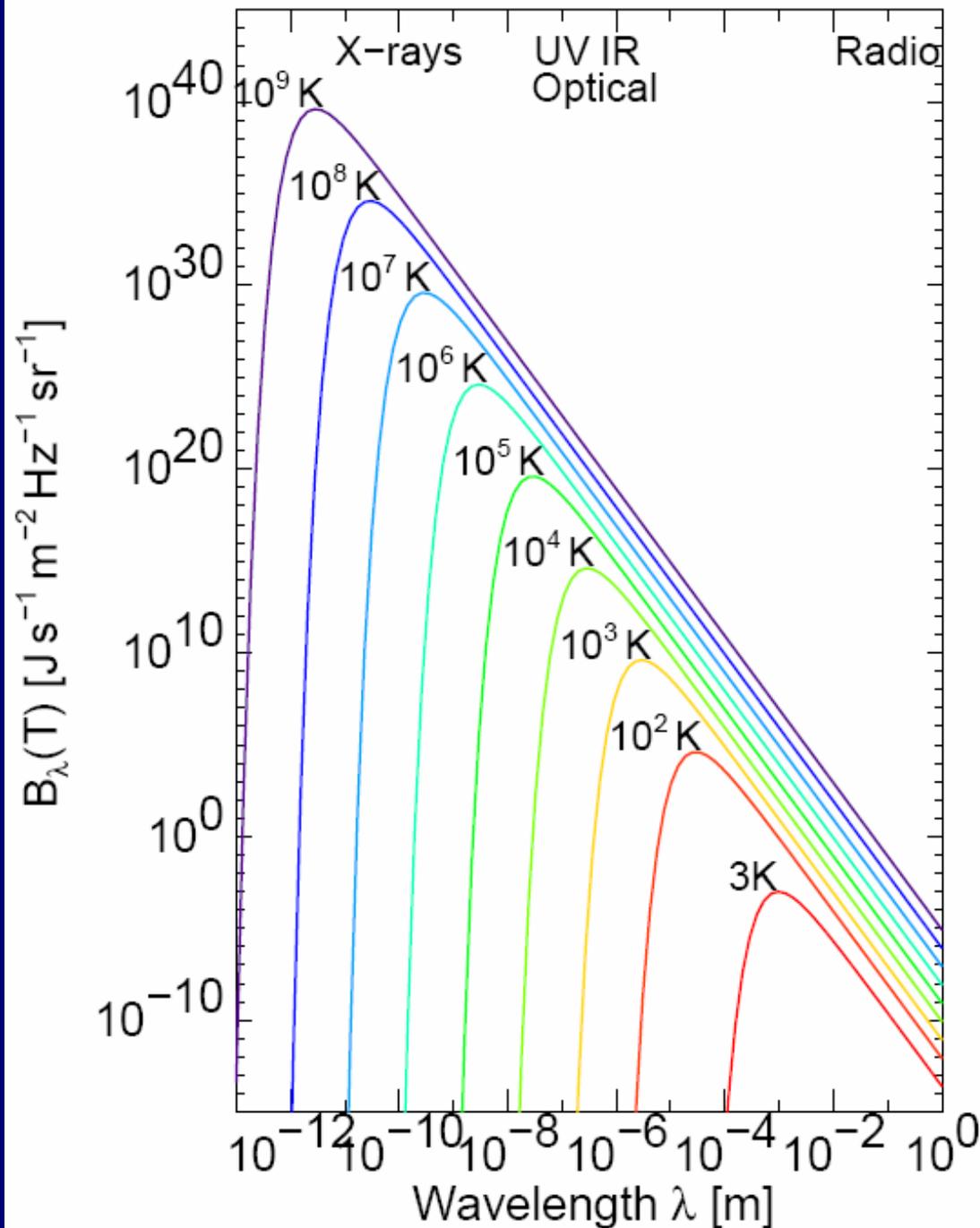
Famosos sem endereço (o contínuo)

A combinação de muitos espectros de corpo negro de diferentes temperaturas (ver próximo slide) gera uma distribuição de energia um tanto plana e sem características espectrais (linhas). Este é o substrato no qual percebemos as linhas de emissão e absorção.



Quebra em 4000 Å

Quebra em 4000 Å: é produzida pela absorção de radiação de alta energia por metais nas atmosferas estelares ou pela falta de estrelas azuis. Logo esta característica é forte em galáxias elípticas, fraco nas espirais e praticamente inexistente nas Irregulares.

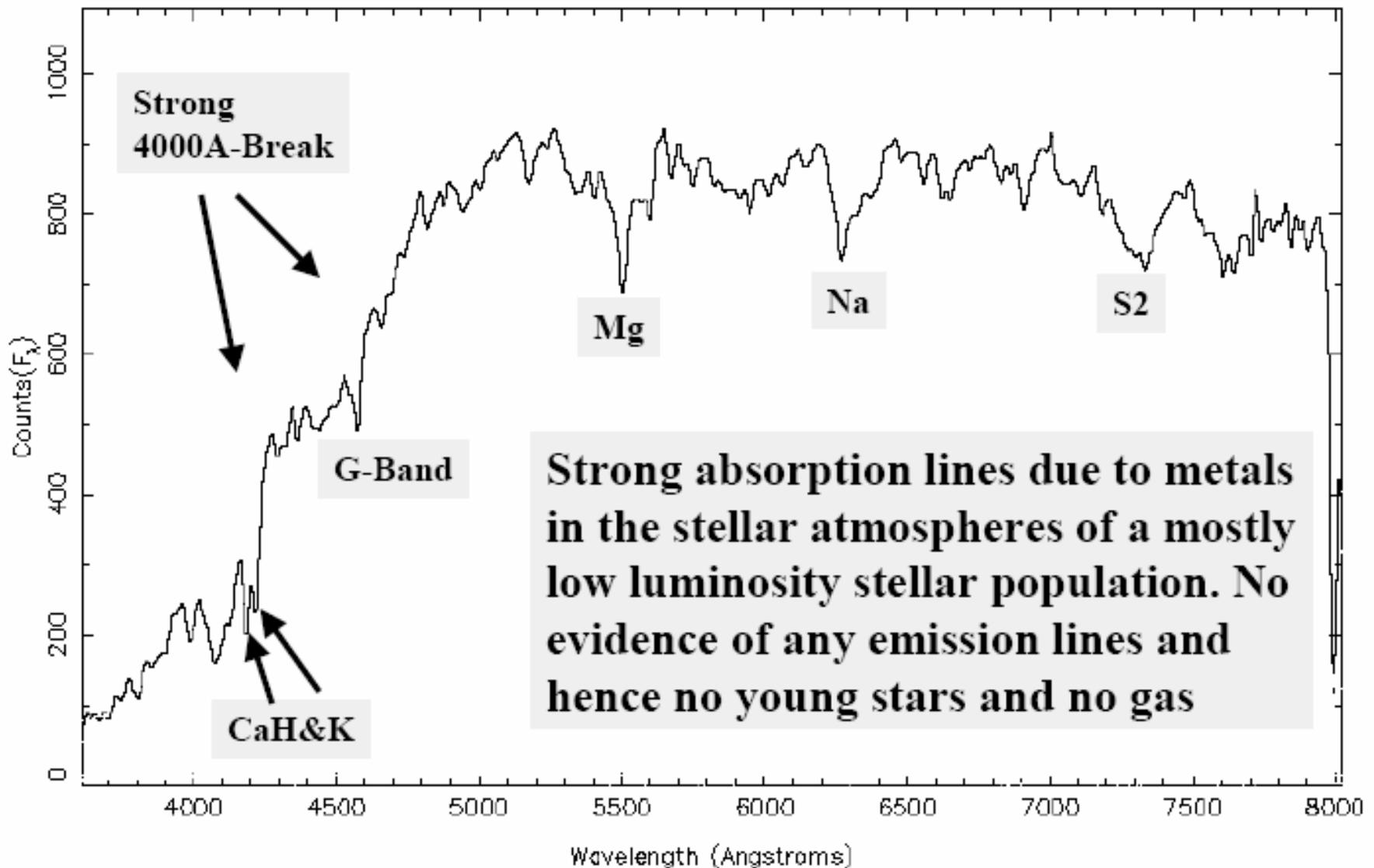


Curvas de corpo negro para diferentes temperaturas.

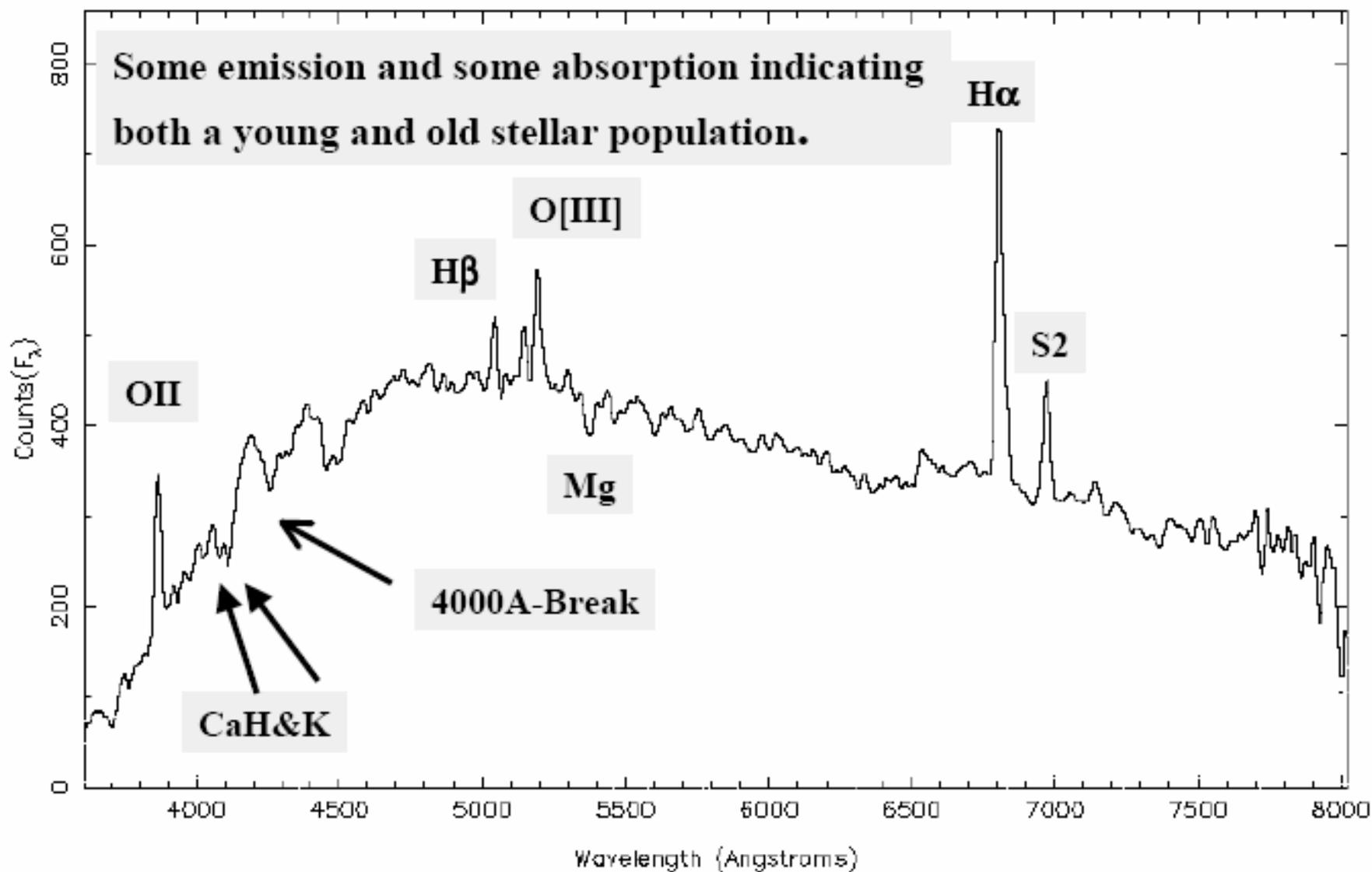
Este conjunto permite visualizar o intervalo de comprimentos de onda que uma determinada estrela emite predominantemente. Isto é feito usando-se a Temperatura efetiva da estrela.

Ex.: O5 --> T_{eff} 40.000K
 G5 --> T_{eff} 5.500K
 M5 --> T_{eff} 2.500K

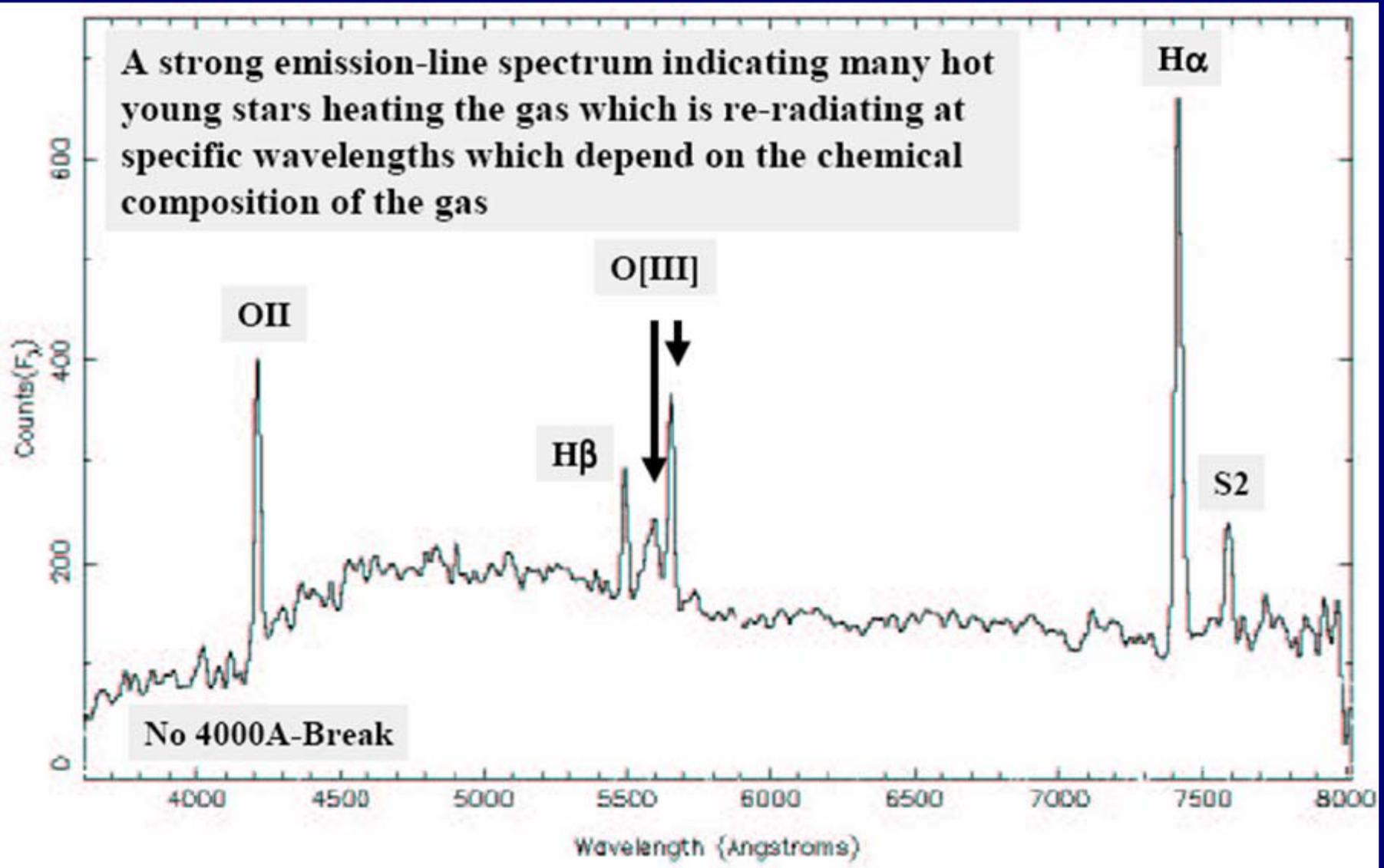
Exemplo de um espectro de galáxia elíptica



Exemplo de um espectro de galáxia espiral

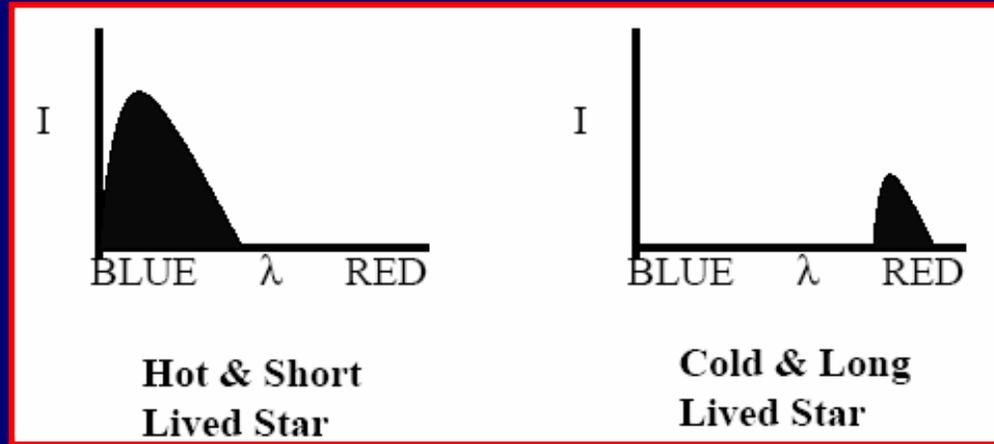


Exemplo de um espectro de galáxia irregular

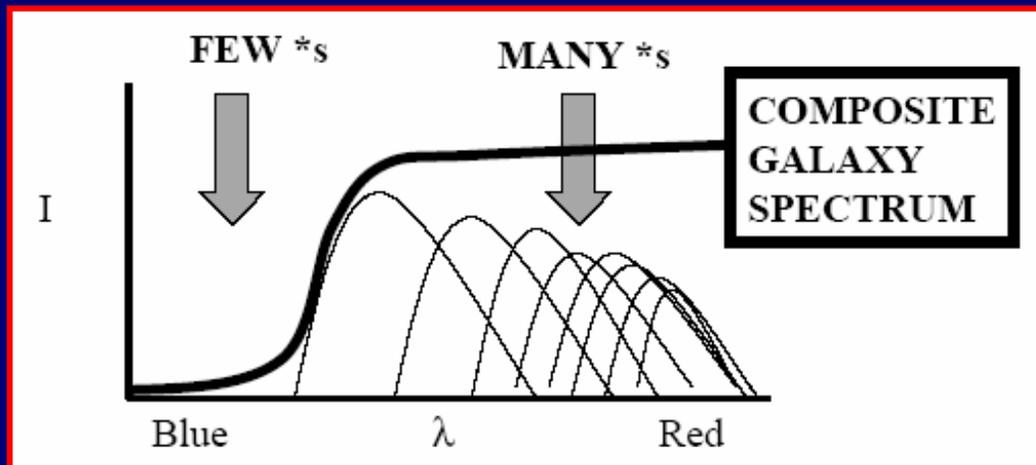


Por que galáxias elípticas são avermelhadas ?

A luz de uma galáxia é dominada pela luz de suas estrelas constituintes. Estas por sua vez são aproximadamente o de um "Corpo Negro" ($L \propto T^4$).



O espectro global da galáxia vai parecer avermelhado se tiver pouca contribuição de estrelas azuis.



Apêndice

Colocamos a seguir alguns slides com material complementar para quem quiser se aprofundar em alguns detalhes

Bibliografia

Astronomia e Astrofísica - Kepler S.O. Filho & Maria de Fátima O. Saraiva - aquivo .pdf no site <http://astro.if.ufrgs.br>

Panorama Visto do Centro do Universo - Joel Primack & Nancy Abrahams - Cia das Letras - 2008

À Luz das Estrelas - Lilia I. Arany-Prado - DP&A Editora - 2006

Novas Janelas para o Universo - Maria C.B. Abdalla & Thyrso Villela - Editora UNESP - 2006

An Introduction to Modern Astrophysics - B.W. Carrol & D.A. Ostlie - Addison-Wesley Publishing Company, Inc - 1996.

Galaxies and Galactic Structure - Debra M. Elmegreen - Prentice Hall - 1998.

Fundamental Astronomy - H. Karttunen et al. - Springer Verlag - 1996.

Astronomy Today - E. Chaison & S. McMillan - Prentice Hall - 1999.

Links

<http://funk.on.br/maia/> - Material deste mini curso e outras palestras.

<http://www.on.br/> - Portal do Observatório Nacional onde existe material de divulgação.

<http://www.das.inpe.br/curso/index.php> - Diretório com cursos de extensão da Divisão de Astrofísica do INPE.

<http://www.stsci.edu> - Telescópio espacial Hubble.

http://astro.princeton.edu/~frei/galaxy_catalog.html - Catálogo de imagens de galáxias nos filtros Azul e Vermelho.

Tabela de constantes

Unidade astronômica \rightarrow a.u. = 1.5×10^8 km (distância média Terra-Sol)

Ano luz \rightarrow a.l. = 9.5×10^{12} km $\sim 10^{13}$ km

Parsec \rightarrow pc = 3.0×10^{13} km ~ 3.26 a.l.

Velocidade da luz \rightarrow c = 3.0×10^5 km/s

Massa da Terra \rightarrow $M_{\text{Terra}} = 5.9 \times 10^{24}$ kg

Raio da Terra \rightarrow $R_{\text{Terra}} = 6378$ km

Massa do Sol \rightarrow $M_{\text{Sol}} = 2.0 \times 10^{30}$ kg

Raio do Sol \rightarrow $R_{\text{Sol}} = 7.0 \times 10^5$ km

Massa do Próton \rightarrow $m_p = 1.7 \times 10^{-27}$ kg

Massa do Elétron \rightarrow $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg

$$10^{-2} = 0.01$$

$$10^2 = 100$$

$$\text{kilo} = k = 10^3$$

$$10^{-1} = 0.1$$

$$10^1 = 10$$

$$\text{mega} = M = 10^6$$

$$10^0 = 1$$

$$\text{giga} = G = 10^9$$

Medindo distâncias usando Cefeidas

Para usar cefeidas como determinadoras de distâncias, precisamos calibrar a relação Período-Luminosidade através de uma estrela do grupo ou aglomerado para o qual se conheça a distância.

Por exemplo: isto pode ser feito para as Hyades onde a distância é conhecida por paralaxe.

$$\log_{10} P + 0.394M_V = -0.657 \quad \text{p/ as Hyades}$$

Uma vez que a equação seja calibrada como acima, ela pode ser aplicada a qualquer outro conjunto destas estrelas. A estratégia na prática é:

- Encontrar uma cefeida através de curvas de luz;
- Mede-se a mag aparente no pico da curva de luz;
- Calcula-se mag absoluta;
- Calcula-se a distância usando: $m = M + 5\log_{10}(d) - 5$

Trena extragaláctica

Em Astronomia Extragaláctica tratamos com escalas de distâncias muito grandes. A medida usual é o megaparsec (Mpc). $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$. Lembrando das equações:

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \quad \text{e} \quad m_1 - m_2 = -2.5 \log L_1 / L_2$$

podemos escrever:

$$m = M + 5 \log_{10}(d) - 5 \quad (d \text{ em pc})$$

se quisermos usar d em Mpc, fazemos como abaixo:

$$m = M + 5 \log_{10}(d \cdot 10^6) - 5$$

$$m = M + 5 \log_{10}(d) + 5 \log_{10}(10^6) - 5$$

$$m = M + 5 \log_{10}(d) + 25 \quad (d \text{ em Mpc})$$

isolando d na equação acima, teremos:

$$d = 10^{0.2[m-M-25]} \quad (\text{Mpc})$$

($m - M$) é denominado de módulo de distância

Dando nome aos bois ...

O batismo de galáxias com nomes comuns que refletem alguma propriedade específica (ex.: semelhança com alguma coisa), não é válido para a grande maioria delas. Os seus nomes normalmente estão associados a catálogos que foram o resultado de levantamentos sistemáticos. Os catálogos são importantes por conterem informações sobre os objetos (posição, magnitude, tipo morfológico, velocidade radial, etc). Algumas galáxias possuem diversos nomes, por participarem de vários catálogos. Entre os muitos catálogos existentes, descreveremos alguns, cujos nomes de seus objetos recebem a utilização mais freqüente hoje em dia.

Catálogo de Messier (1784) - *Catalogue des nébuleuses et des amas d'étoiles que l'on découvre parmi les étoiles fixes, sur l'horizon de Paris* - Este é um dos primeiros catálogos de "nebulosas", que foi elaborado, antes mesmo de se saber da natureza extragaláctica das galáxias. Messier estava preocupado em catalogar objetos que poderiam ser confundidos com cometas, seu principal assunto de estudo. Dos 109 objetos, só uns 30 são efetivamente galáxias. Os objetos receberam a designação **M**. Ex: Andrômeda = M31.

Dando nome aos bois ...

New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars - J.L.E. Dreyer (1888) - As galáxias levam o prefixo NGC.

Ex.: Andrômeda = NGC 224

Index Catalogue of Nebulae Found in the Years 1888 to 1894, (Dreyer 1895) (IC I);

Second Index Catalogue of Nebulae Found in the Years 1895 to 1907, (Dreyer 1908) (IC II). As galáxias recebem o prefixo IC.

Ex.: IC 11 = NGC 281

ATENÇÃO : Tanto o NGC como o IC catalogam nebulosas galácticas.

Links para páginas com objetos NGC e IC

<http://www.seds.org/messier/xtra/ngc/ngc.html>

<http://www.ngcic.com/ngciccat.html>

J.L.E. Dreyer, 1888. *New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars. Mem. Roy. Astron. Soc.* 49, Part I (reprinted 1953, London: Royal Astronomical Society).

J.L.E. Dreyer, 1895. *Index Catalogue of Nebulae Found in the Years 1888 to 1894, with Notes and Corrections to the New General Catalogue. Mem. Roy. Astron. Soc.* 51, 185 (reprinted 1953, London: Royal Astronomical Society).

J.L.E. Dreyer, 1908. *Second Index Catalogue of Nebulae Found in the Years 1895 to 1907; with Notes and Corrections to the New General Catalogue and to the Index Catalogue for 1888 to 1894. Mem. Roy. Astron. Soc.* 59, Part 2, 105 (reprinted 1953, London: Royal Astronomical Society).

Dando nome aos bois ...

A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies - Sandage & Tamman (1981) - com 1246 galáxias mais brilhantes do que $m_{pg}=13.2$.

RC3: Third Reference Catalogue of Bright Galaxies - Catálogo com 23.000 galáxias. Este e outros catálogos podem ser obtidos eletronicamente em:

<http://cdsarc.u-strasbg.fr/>

de Vaucouleur, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H.G., Buta, R.J., Paturel, G., Fouque, P.: Third reference catalogue of bright galaxies, 1991, Springer-Verlag New York, Inc.

Catálogo ESO - ESO e ESO-LV: 1989 European Southern Observatory - Uppsala Galaxy Surface Photometry Catalog - Versão com fotometria de placas fotográficas do United Kingdom Sky Survey - UKSS- obtidas com o telescópio Schmidt de 1m do Anglo Australian Observatory. Esta placas de vidro foram digitalizadas. O catálogo fotométrico contém 15457 galáxias entre $-90 < Dec < -17$.

Ex.: Fornax A = ESO 357 - G 022

1989 ESO-Uppsala Galaxy Surface Photometry Catalog by Andris Lauberts and Edwin A. Valentijn

Dando nome aos bois ...

Catálogo Zwicky - Catálogo contendo 27957 objetos baseado na identificação de galáxias feita em placas do Observatório do Monte Palomar. Limitado em $m=15.7$. As magnitudes foram estimadas "a olho".
Ex.: Virgo A = CGCG 070-139

ZWICKY, F., HERZOG, E., WILD, P. "CATALOGUE OF GALAXIES AND OF CLUSTERS OF GALAXIES", 1961, PASADENA: CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY - vols. 1-6

Levantamentos modernos

Os levantamentos mais modernos envolvem telescópios dedicados para fazer a fotometria e espectroscopia dos objetos, efetuando a varredura de grandes regiões do céu. O caso mais relevante é o levantamento denominado Sloan Digital Sky Survey - SDSS (Ver mais detalhes nos próximos slides).

Teoria de ondas de densidade

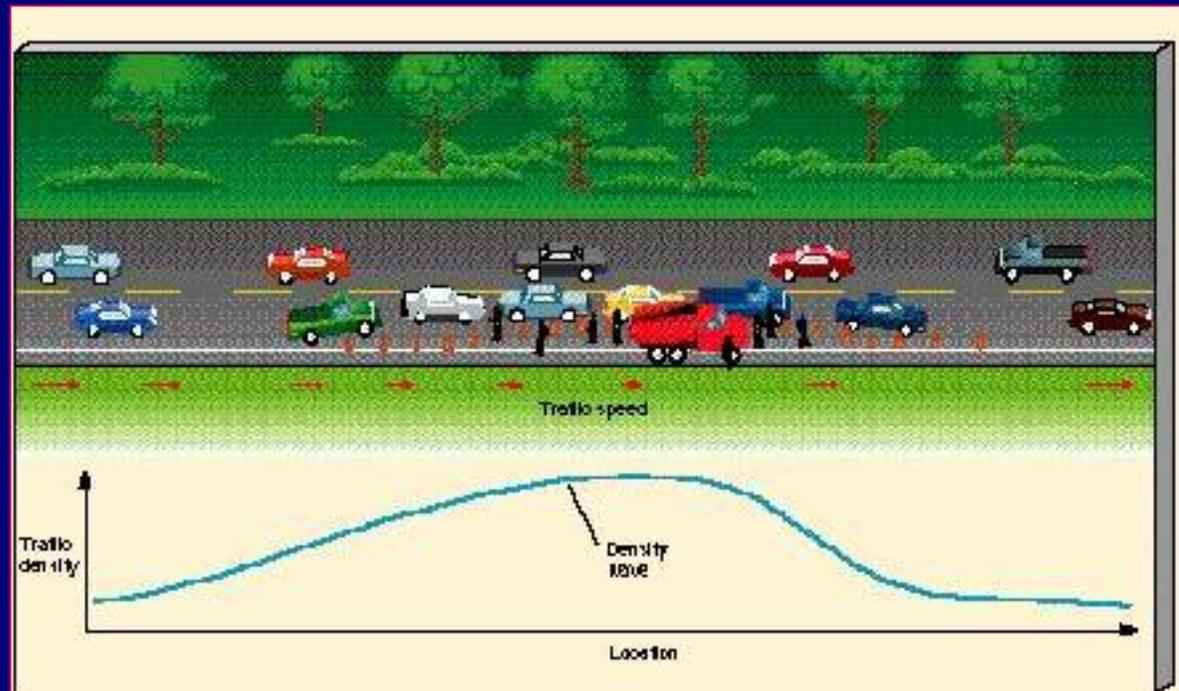
Os braços espirais não devem se vistos como um conjunto de estrelas, gás e poeira movendo-se rígido pelo disco da galáxia, e sim como o resultado de uma onda de compressão e rarefação que no momento está varrendo aquela parte da galáxia, e tornando a região levemente mais densa que a média. Uma visão familiar de uma destas ondas, pode ser obtida com auxílio da figura abaixo, que mostra um corriqueiro engarrafamento de trânsito.

Um bloqueio em parte da rodovia, produz um acúmulo de veículos, por redução da velocidade dos mesmos. Um observador fora da rodovia, vê carros diferentes a cada momento, movendo-se mais lentamente no local do engarrafamento, e depois acelerando.

No braço da galáxia, ocorre algo similar, estrelas e gás entram no mesmo, diminuindo sua velocidade, e aumentando a densidade na região. A onda se move mais lentamente e independentemente do fluxo de material do disco da galáxia.

Na analogia do trânsito, teríamos que, mesmo liberando o bloqueio, após o conserto da rodovia, persistiriam os efeitos do engarrafamento por algum tempo.

Na galáxia também a perturbação se move pelo disco, mesmo depois que a sua causa tenha desaparecido.



Função de Luminosidade

A maneira de descrevermos a distribuição das galáxias em função de suas luminosidades é através da Função de Luminosidade, uma expressão empírica que possui a seguinte parametrização:

$$\Phi(L)dL = \Phi^* (L/L^*)^\alpha \exp(-L/L^*)dL/L^*$$

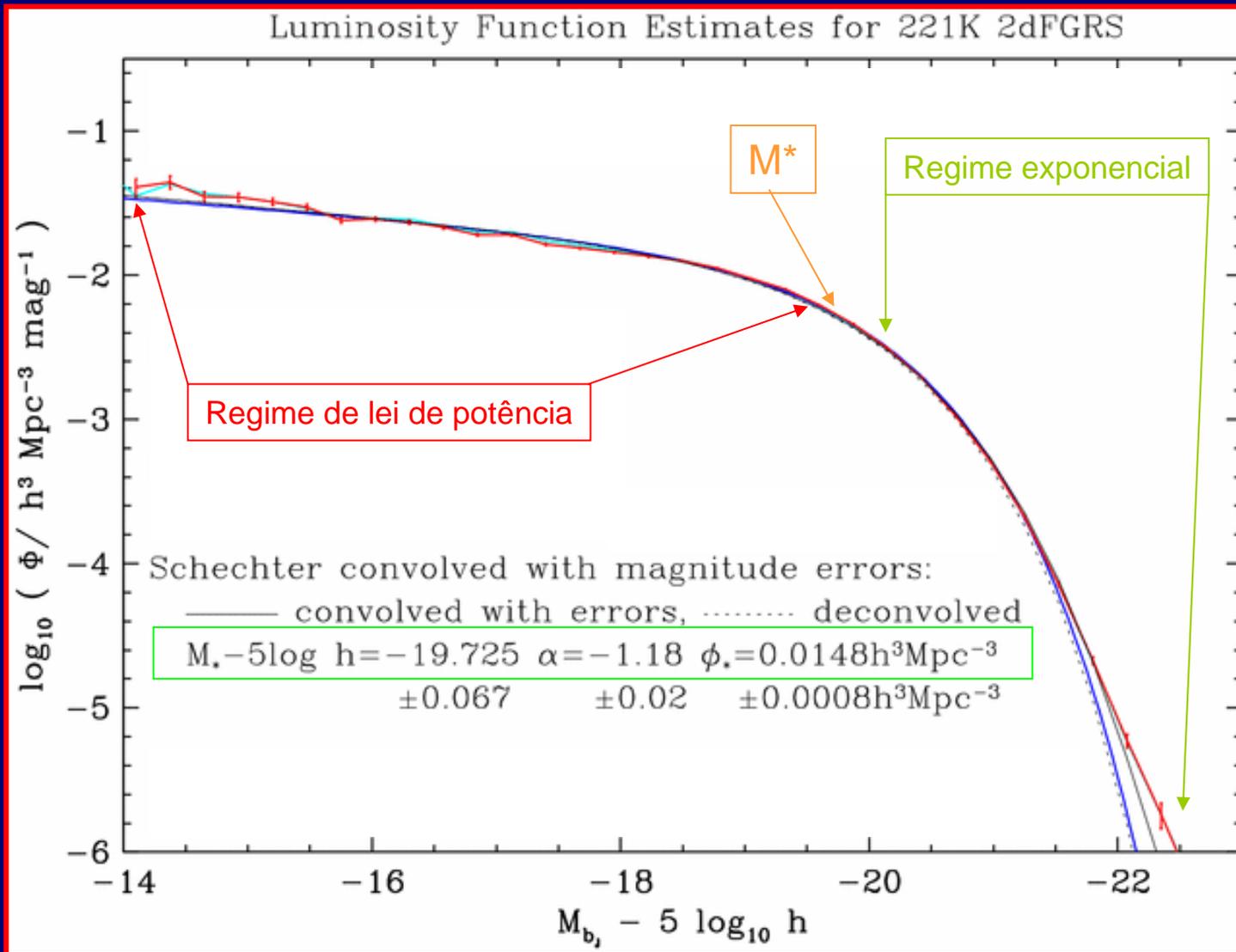
onde $\Phi(L)dL$ é o número de galáxias por Mpc^3 , dentro do intervalo L e $L+dL$. Os parâmetros Φ^* , L^* e α , são ajustáveis aos dados observacionais. A função tem uma parte dominada por um regime de lei de potência (parte mais fraca), e outra pelo regime exponencial (parte de maiores luminosidades). O parâmetro L^* determina a região de transição de um regime para outro.

Schechter P. (1976) *ApJ*, 203, 297

Ela também pode ser expressa em termos de magnitudes absolutas, possuindo a forma abaixo:

$$\Phi(M) = (0.4 \ln 10) \Phi^* 10^{0.4(\alpha+1)(M^*-M)} \exp(-10^{0.4(M^*-M)})$$

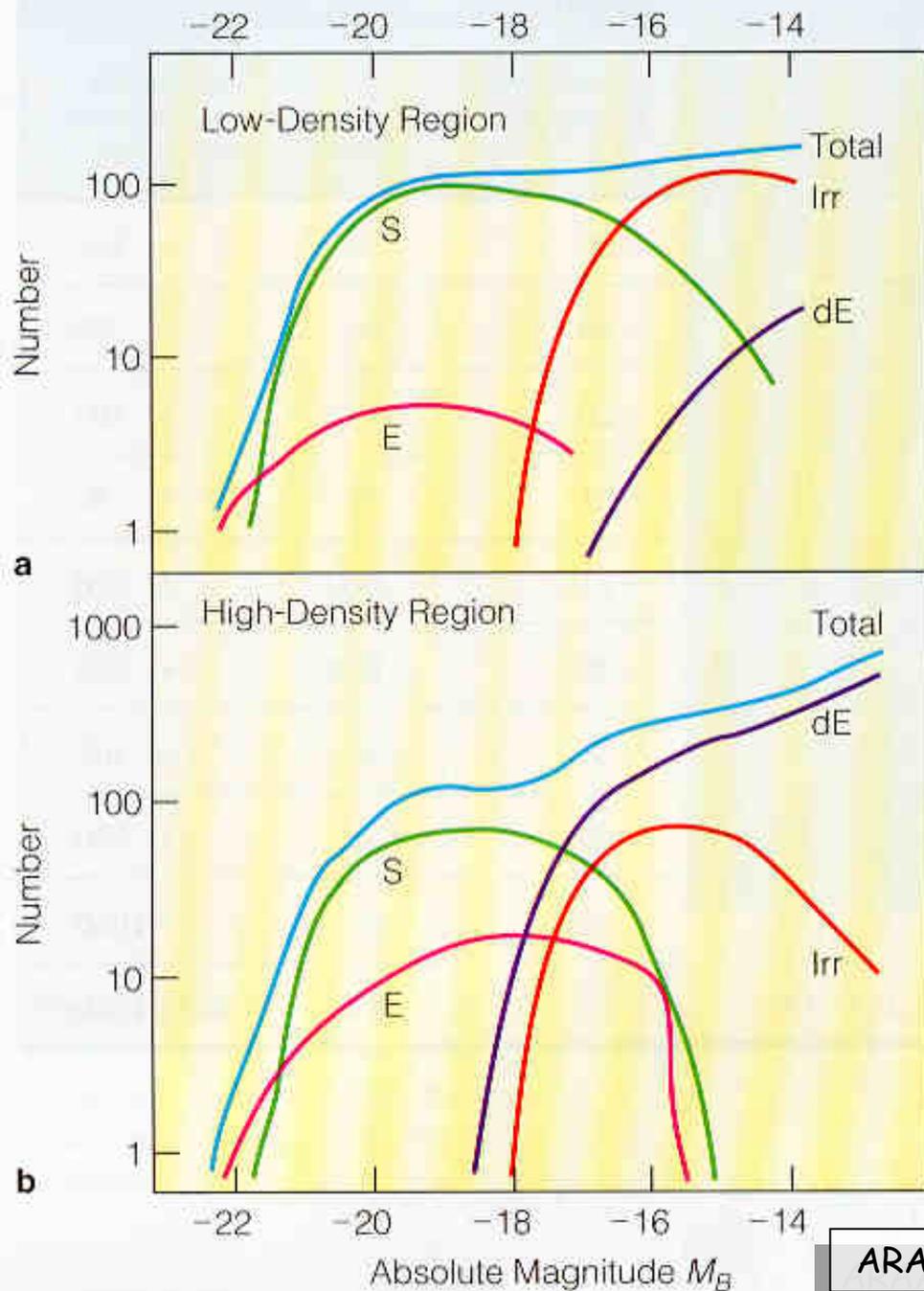
Função de Luminosidade para uma amostra de 221.000 galáxias do levantamento denominado 2dFGRS (Two Degree Field Galaxy Redshift Survey).



$h \rightarrow$ Fator de escala que deixa explícito o valor da constante de Hubble utilizado



$$h_{70} = \frac{H_0}{70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}}$$



Funções de Luminosidade total e individuais por tipos morfológicos para galáxias em duas regiões distintas (alta e baixa densidade de galáxias). As funções totais, são mais ou menos parecidas.

As individuais para cada tipo morfológico dependem do regime de densidade no local, e não seguem, necessariamente, a parametrização de Schechter.