

Descoberta das galáxias
Classificação morfológica
Galáxias elípticas
Galáxias espirais
Galáxias irregulares

Outras galáxias

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=110630

Histórico: observação de objetos difusos

- Antiguidade, Hemisfério Sul:
 - Observação a olho nu das Nuvens de Magalhães;
- Em 964, al-Sufi na Pérsia registra a Grande Nuvem de Magalhães (observável em Novembro e Dezembro no extremo Sul da península arábica).
- Registro histórico em 1519 por Fernão de Magalhães.

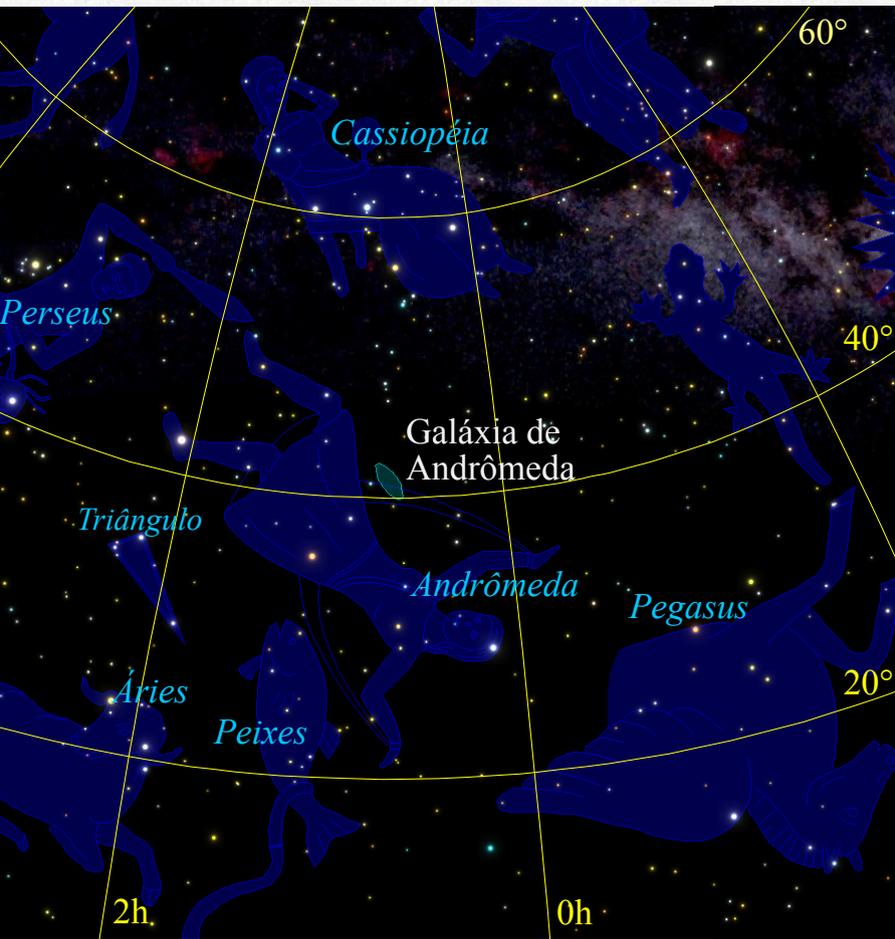


Histórico

- Pequena e Grande Nuvens de Magalhães visíveis do observatório de Cerro Tololo, Chile, ao lado do telescópio Blanco de 4m de diâmetro.



Histórico



- 964 – Abd-al-Rahman al-Sufi, na Pérsia: Observação da “nebulosa” de Andrômeda – uma “pequena nuvem”.
- 1612 – Primeira observação de Andrômeda com telescópio por Simon Mayr.

Histórico

Observações até o final do século XIX

Observations

Of the Star, called Nebulosa, in the Girdle of Andromeda; and of the Wondrous Star in the Neck of the Whale: made and communicated by Monsieur Bullialdus.

A *Nno 1667. in January, when the Cloudy and Misty weather, which had continued for a good while, did permit us to observe, the Star Nebulosa, in the Girdle of Andromeda (which may well enough be seen by the bare Eye) appeared much obscurer than the Year before. In the Months of February and March I did not see it.*

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

For the Months of *Jan. Febr. and March 1716.*

The CONTENTS.

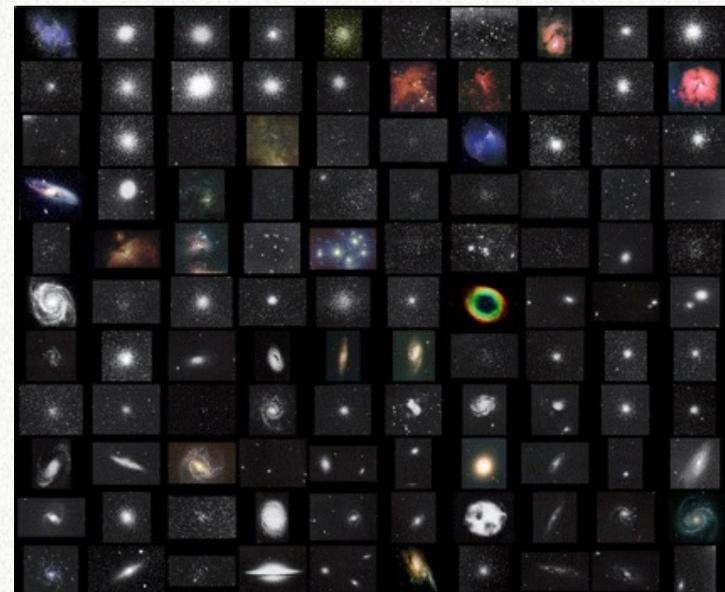
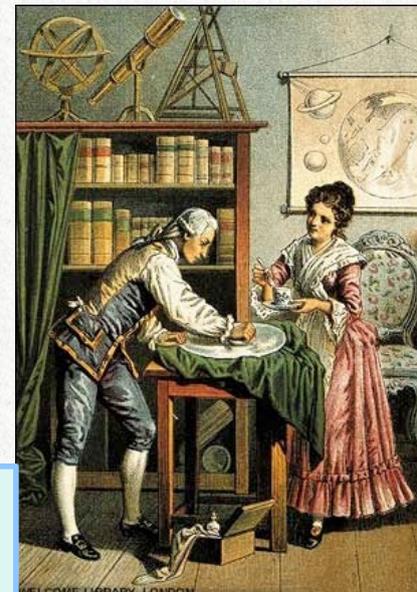
- An Account of several Nebulæ or lucid Spots like Clouds lately discovered among the Fixt Stars by help of the Telescope.*

1650–1750: Hodierna, Bullialdus, Hevelius, Halley discutem a natureza das “estrelas nebulosas” e começam a catalogá-las.

1781 – Catálogo de mais de 100 “nebulosas” de Charles Messier.

1786/1802 – Catálogo de William e Caroline (irmã) Herschel e expandido por John Herschel (filho).

Origem do catálogo NGC (consolidado em 1888 por John Dreyer)



Histórico

Durante a década de 1840, William Parson (Lord Rosse) construiu, na Irlanda, o que foi o maior telescópio do mundo por mais de meio século, com 1,83 metros de diâmetro.

Assim, ele pôde pela primeira vez distinguir os braços espirais em algumas nebulosas.

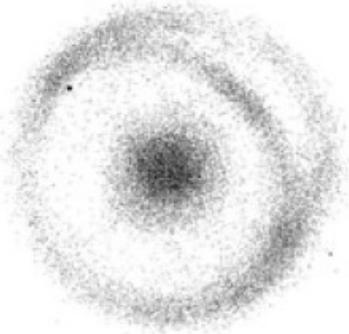


Foto de Anna e Don York, 2011.



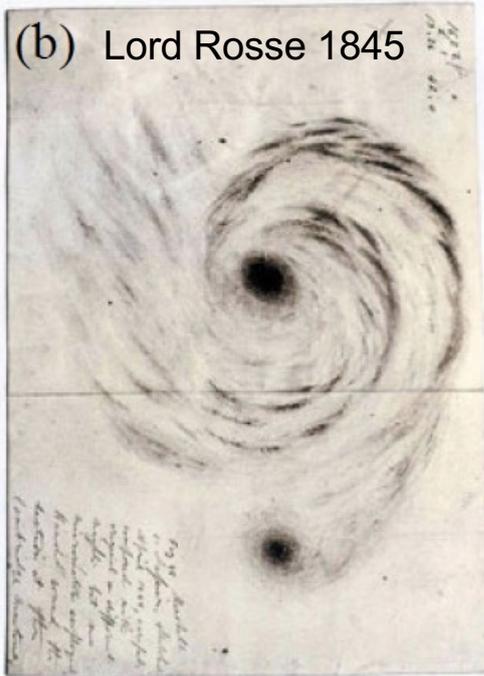
Lord Rosse
1800 -1867

(a) J. Herschel 1833



M51 ↑

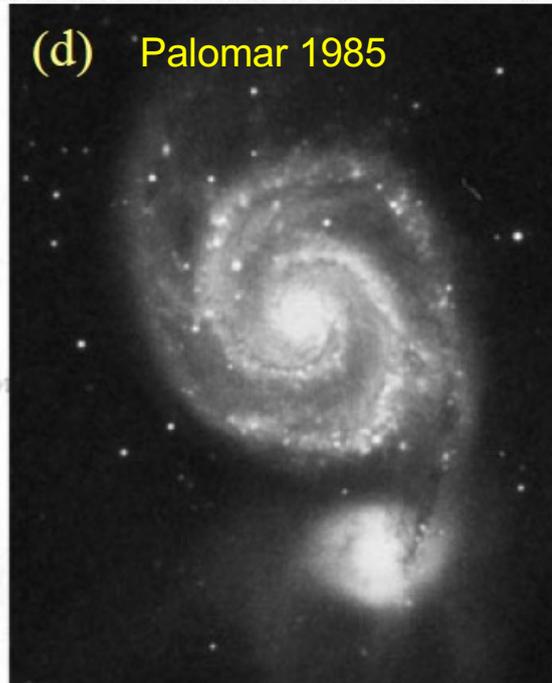
(b) Lord Rosse 1845



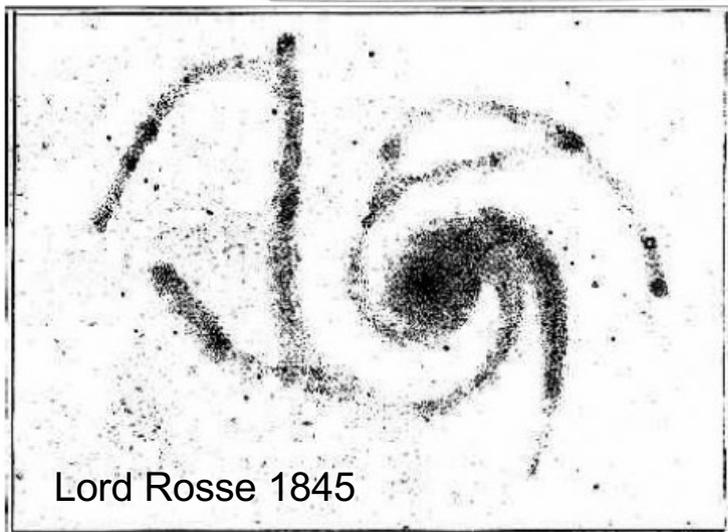
(c) J. Chacornac 1862



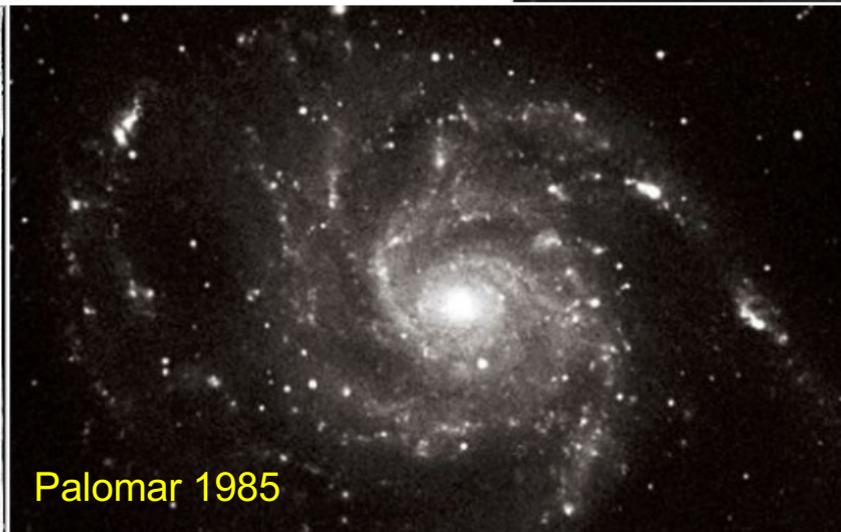
(d) Palomar 1985



M101 →



Lord Rosse 1845



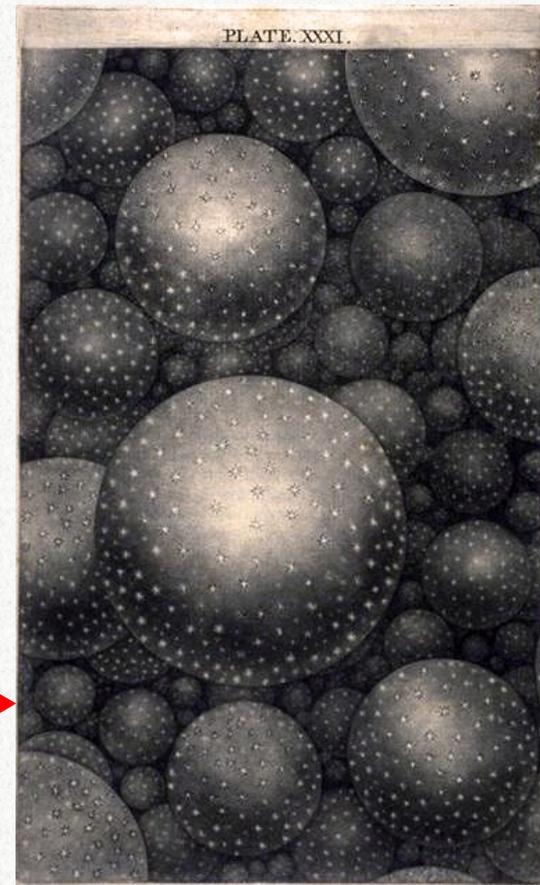
Palomar 1985

- A medida que os telescópios vão se aprimorando, as imagens das nebulosas se tornam mais nítidas e bem definidas.
- 1845 – Lord Rosse descobre a **estrutura espiral** de algumas “nebulosas”;

Histórico

Qual é a natureza das nebulosas?
(final do século XIX e início do século XX)

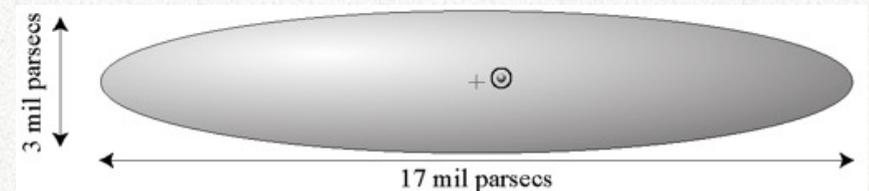
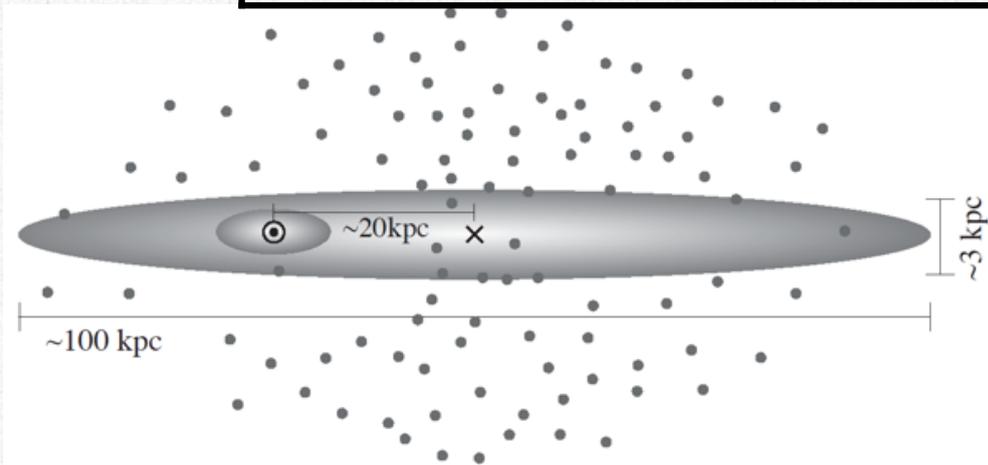
- Estrelas individuais não eram observadas em nebulosas em geral, mesmo com os maiores telescópios.
- O espectro da maioria das nebulosas espirais e das elípticas eram de tipo estelar (pouca ou nenhuma linha de emissão).
- Algumas apresentavam uma estrutura espiral, como se estivessem girando.
- Hipótese 1: Nuvens em rotação, possivelmente progenitores de sistemas planetários.
- Hipótese 2: “Universos-Ilha,” (em alemão, *Weltinsein*) semelhantes à Via Láctea (*Immanuel Kant, Thomas Wright em 1750*).



Histórico

- “Grande Debate” de 1920:

Harlow Shapley	Heber D. Curtis
Via Láctea muito grande Sol a 15 kpc do centro Nebulosas fazem parte da galáxia	Via Láctea pequena Sol está no centro Nebulosas são “universos ilhas”



modelo de Kapteyn (1901)

- O grande problema era a determinação de **distâncias** das nebulosas.
- Em 1926, a natureza da Galáxia fica estabelecida definitivamente quando Edwin Hubble mostra que as “nebulosas” espirais estão muito além da Via Láctea.
- Hubble utilizou a relação **Período-Luminosidade das Cefeidas** (Henrietta Leavitt 1908, 1912) como indicador de distância.
- Assim ficou definida a natureza das galáxias como objetos **extragalácticos**.

Histórico

- Em 1926, a natureza da Galáxia fica estabelecida definitivamente quando Edwin Hubble mostra que as “nebulosas” espirais estão muito além da Via Láctea.
- Hubble utilizou a relação Período-Luminosidade das Cefeidas (Henrietta Leavitt) como indicador de distância.
- Observações feitas no telescópio Hooker de 2,5m, no Monte Wilson, Califórnia.

N.G.C. 6822, A REMOTE STELLAR SYSTEM¹

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

A study of N.G.C. 6822.—The object is a very faint cluster of stars and nebulae, about $20' \times 10'$, resembling the Magellanic Clouds. Detailed investigations confirm the similarity and show that it extends to many structural features of these systems. Familiar relations such as those connecting periods and luminosities of Cepheids, luminosities of brightest stars involved in diffuse nebulae, and frequencies of the most luminous stars in the systems are consistent when applied to N.G.C. 6822, the first object definitely assigned to a region outside the galactic system.

A SPIRAL NEBULA AS A STELLAR SYSTEM

MESSIER 33¹

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

The spiral nebula Messier 33.—This object is the fainter of the two naked-eye spirals. Its great angular diameter and high degree of resolution, suggesting that it is one of the nearest objects of its kind, offer exceptional opportunities for detailed investigation.

EXTRA-GALACTIC NEBULAE¹

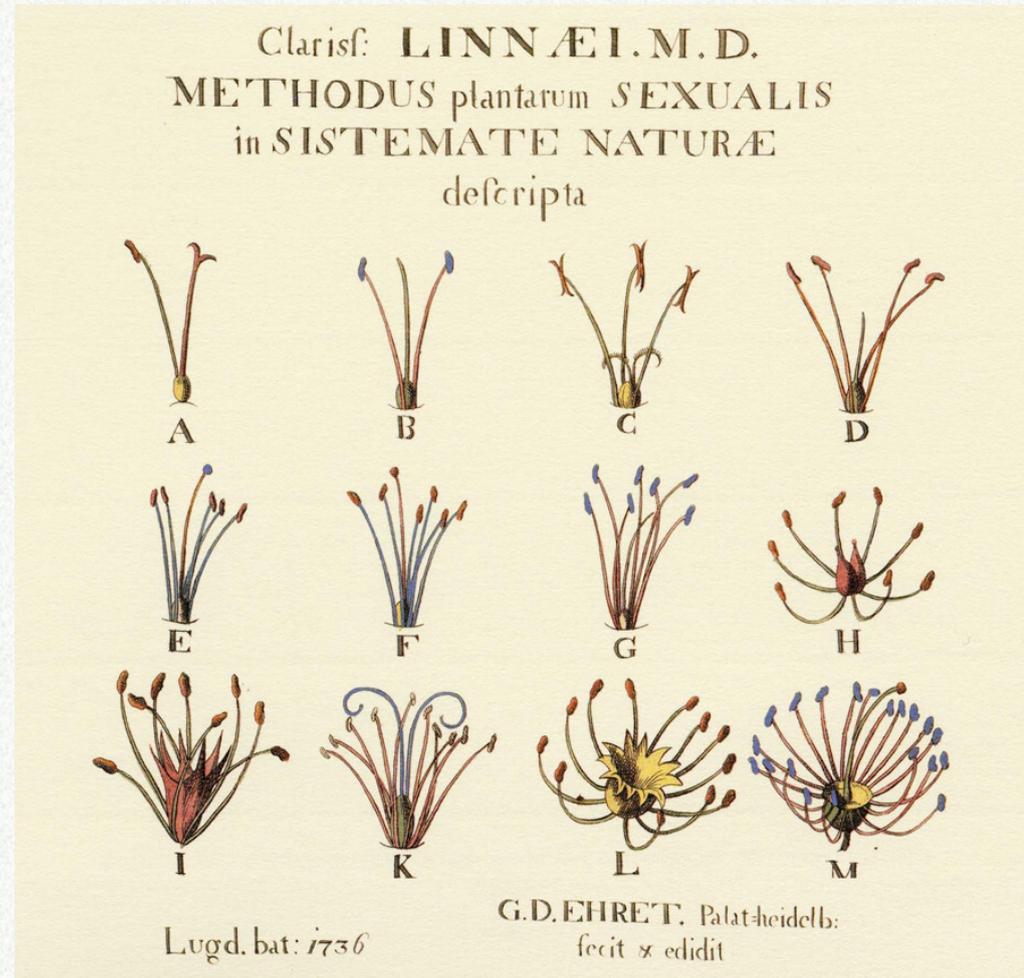
By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

This contribution gives the results of a statistical investigation of 400 extra-galactic nebulae for which Holetschek has determined total visual magnitudes. The list is complete for the brighter nebulae in the northern sky and is representative to 12.5 mag. or fainter.

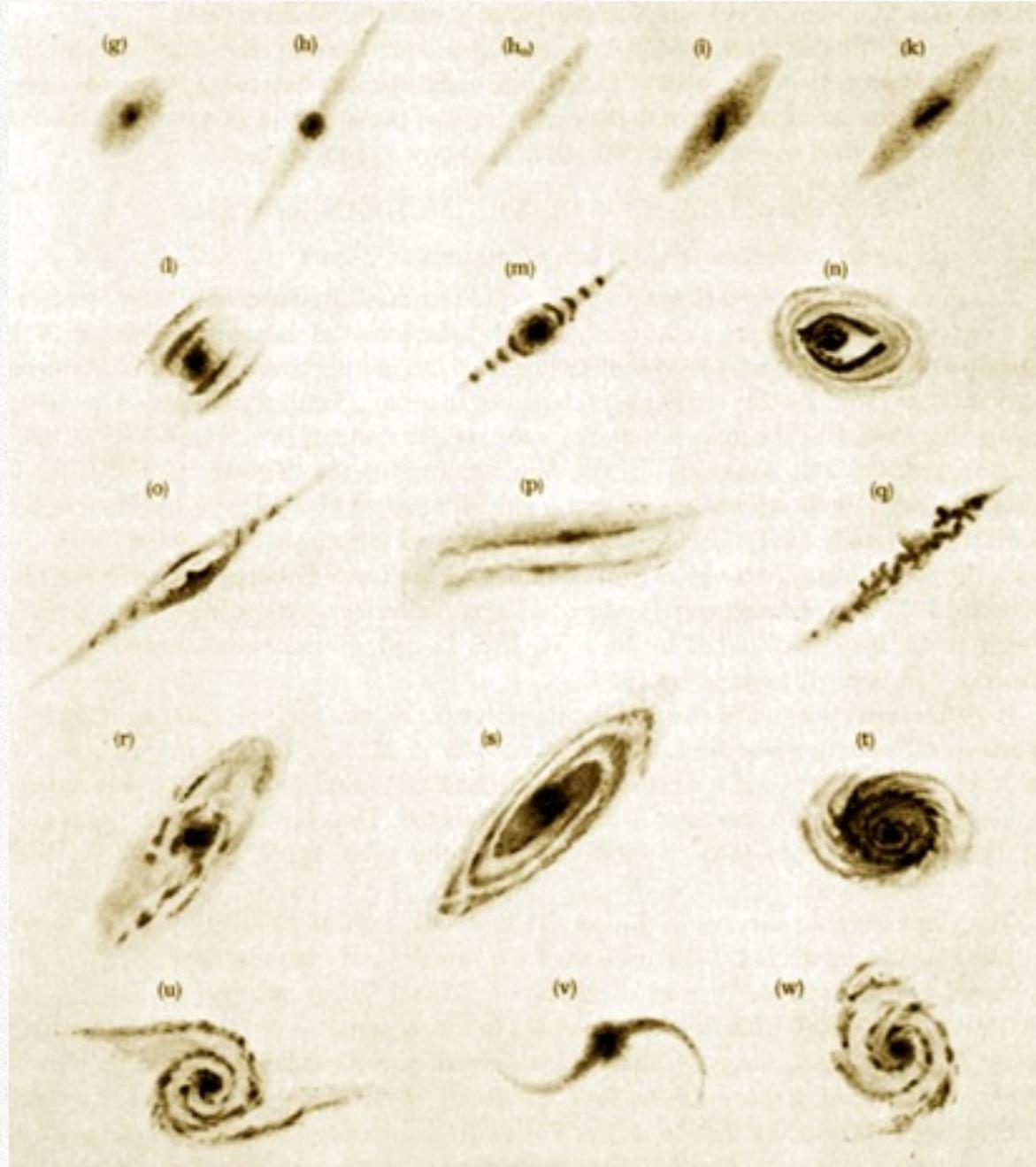
Classificação morfológica

- Sistema de classificação das propriedades observacionais
 - ⇒ compreensão da física, origem e processos evolutivos.
 - ⇒ semelhante à classificação de sistemas biológicos (ex., classificação de Lineu no séc. XVIII).
- Morfologia (forma) obtida pelas imagens das “nebulosas”.



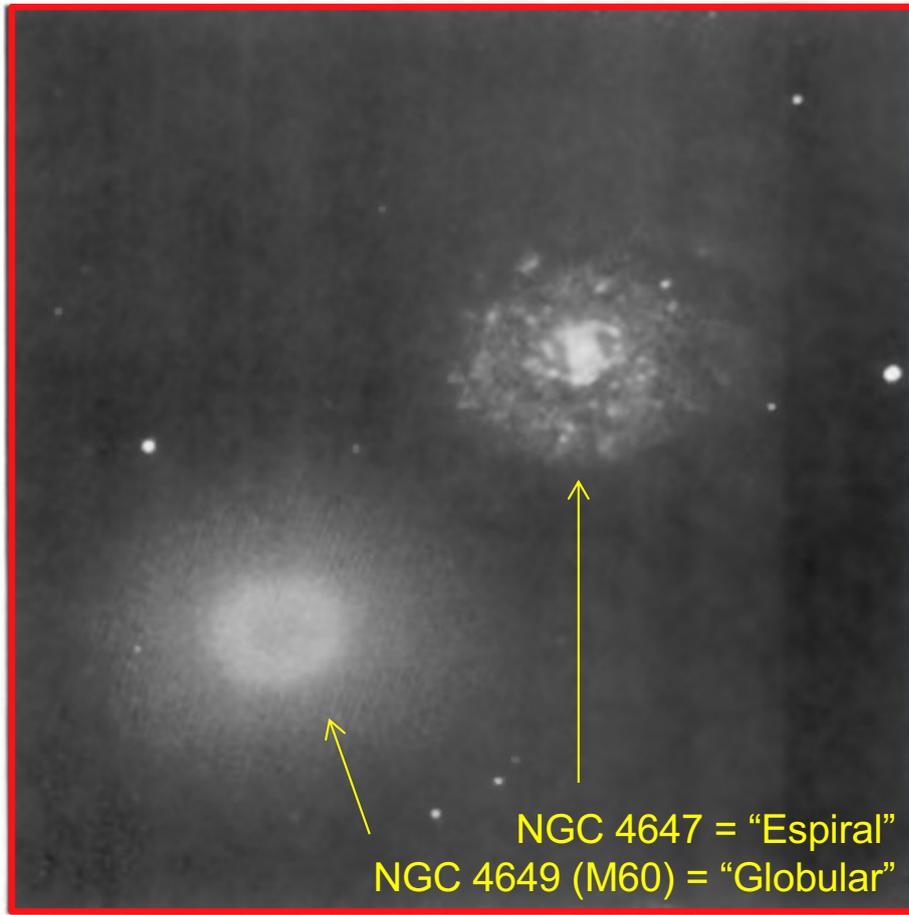
Classificação morfológica

- Wolf (1908) propõe um dos primeiros sistemas de classificação antes mesmo de compreender a natureza extragaláctica das galáxias.
- Posteriormente Joseph Reynolds definiu apenas 7 classes morfológicas de acordo com a importância da concentração local de luz em relação ao restante do objeto.
- Apesar de muito detalhado, o sistema de Wolf é abandonado quando compreendemos melhor a natureza das galáxias.



Classificação morfológica

- Observação de Hubble, publicada em 1922. Classificação antes do reconhecimento da natureza das Nebulosas.



Fotografia com telescópio Hooker de 2,54m (ApJ 56, 162)

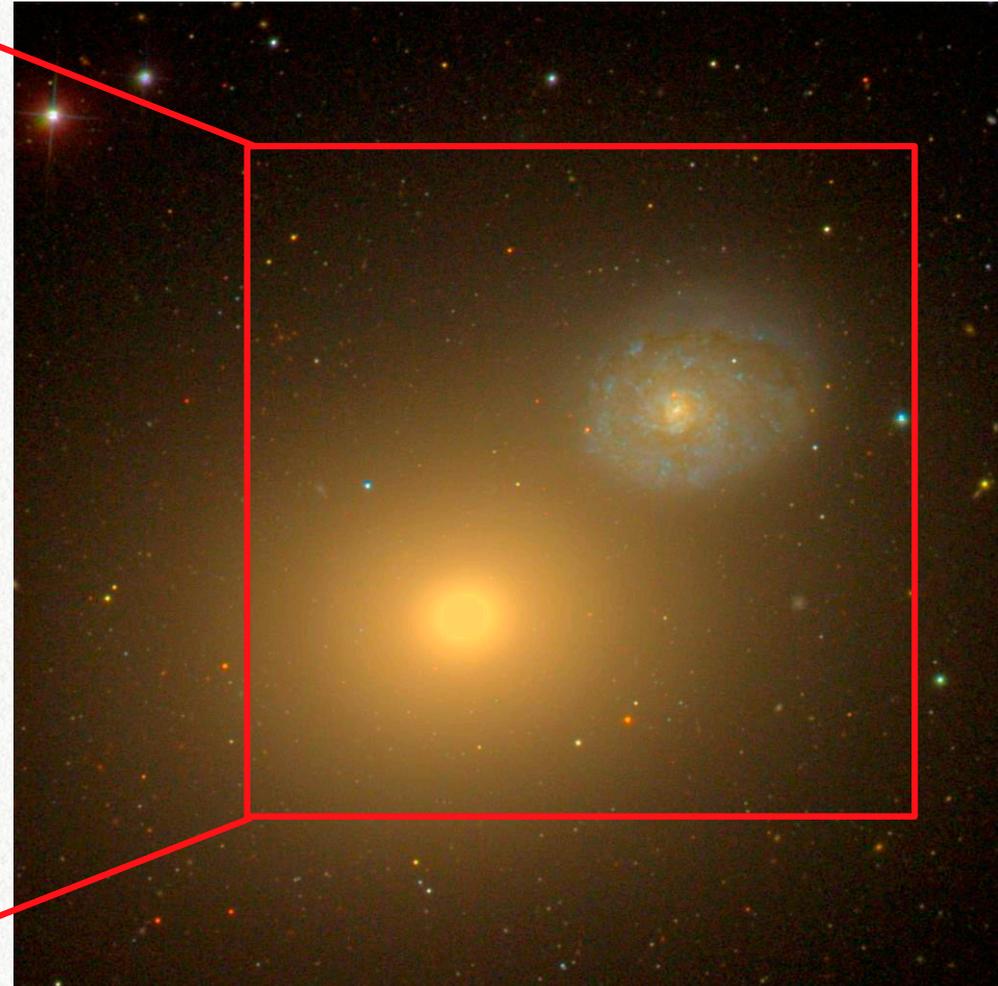
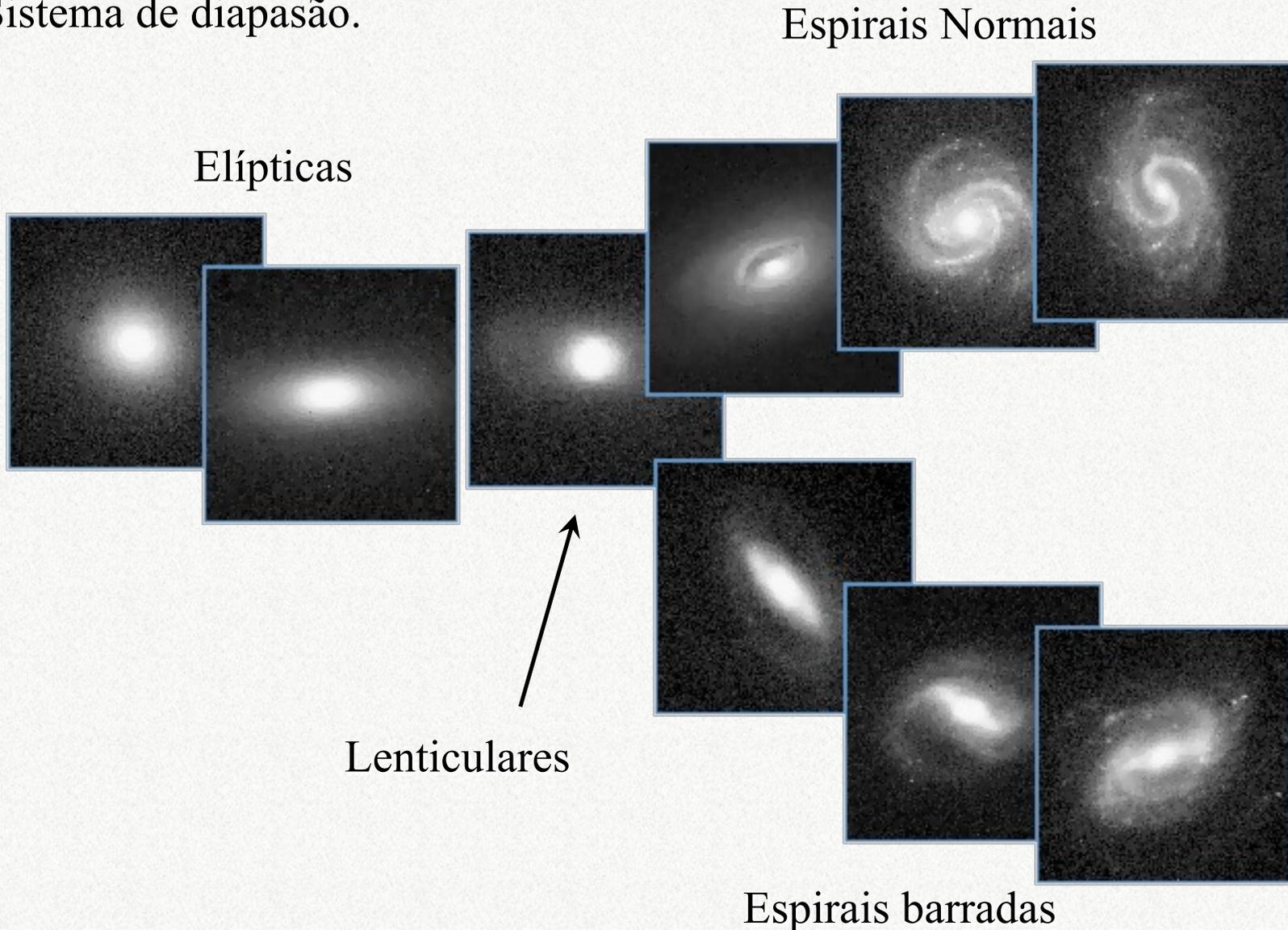


imagem em 3 bandas, telescópio Sloan 2,5m

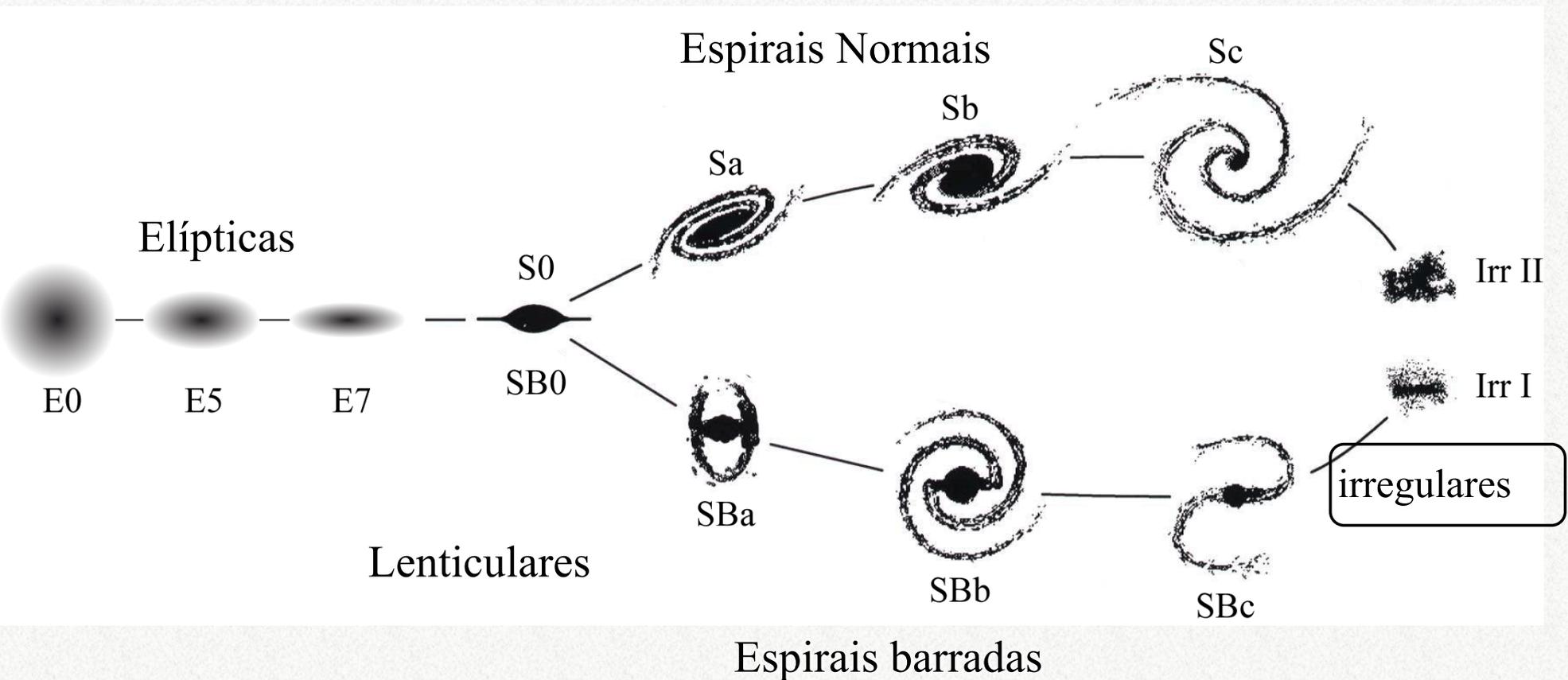
Classificação morfológica

- Sequência de Hubble (1926, 1936).
- Sistema de diapasão.



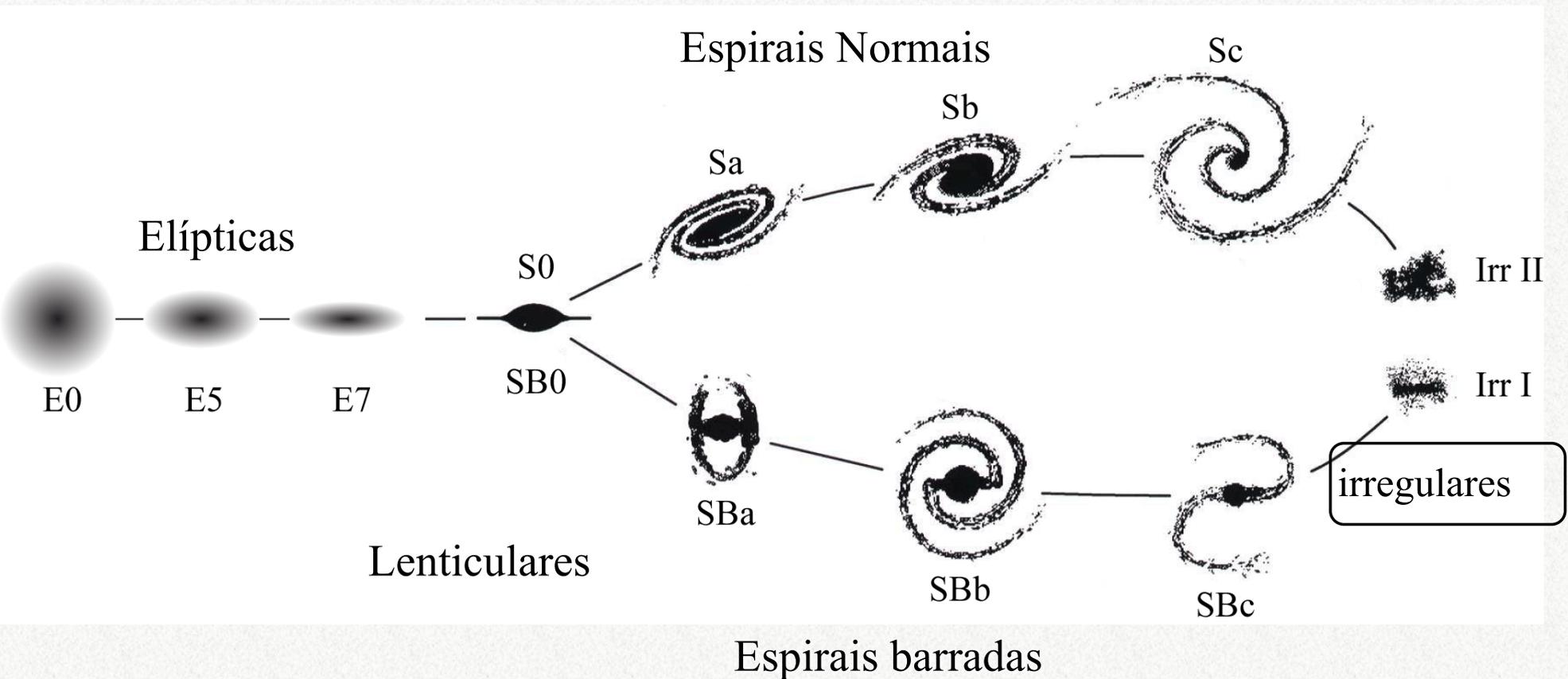
Classificação morfológica

- Sequência de Hubble, revista por Alan Sandage [1926–2010] em 1961.
 - Inclui irregulares;
 - Inclui Lenticulares barradas.

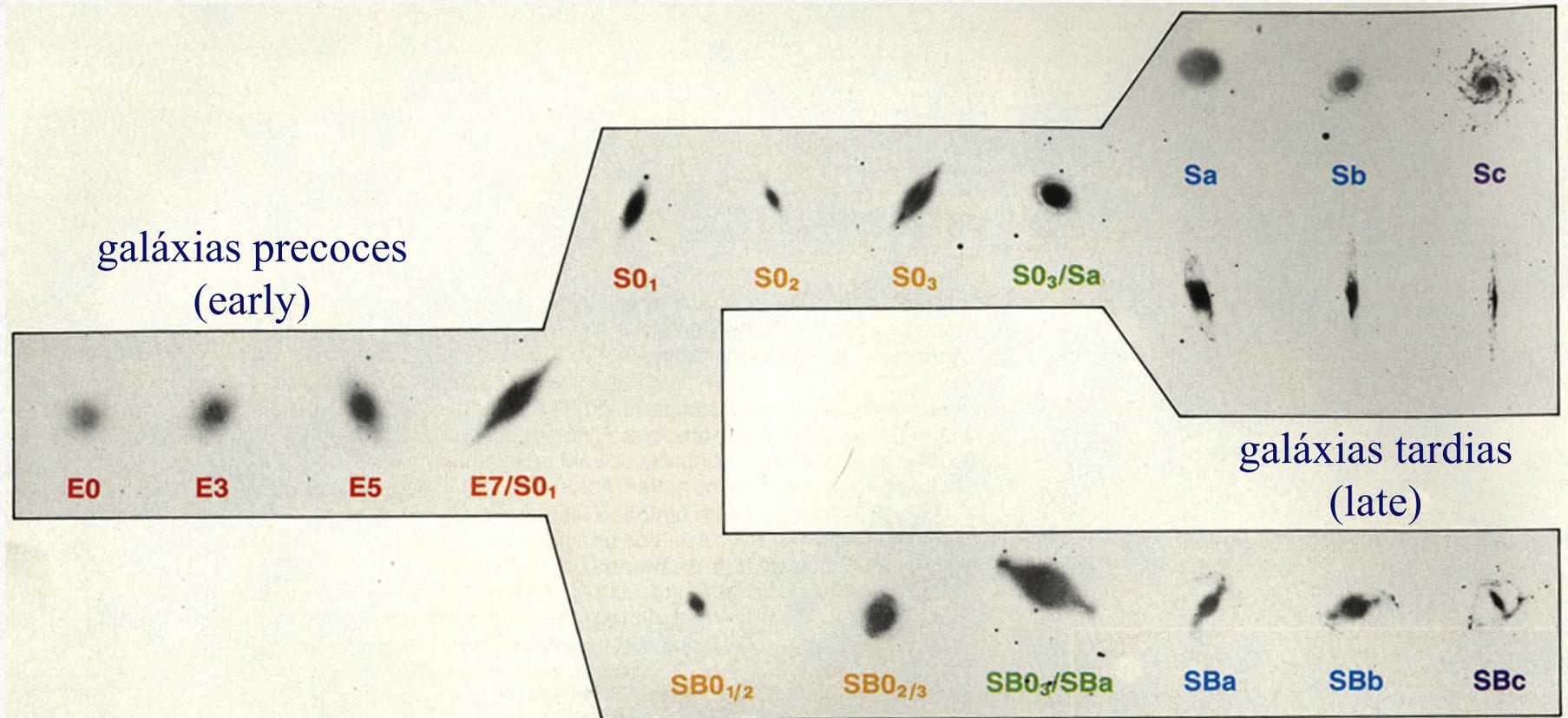


Classificação morfológica

- Em analogia com a nomenclatura da classificação estelar:
 - galáxias elípticas e lenticulares foram chamadas por Hubble de "tipo precoce" (em inglês, *early type*);
 - galáxias espirais e irregulares são de "tipo tardio" (em inglês, *late type*).



Morfologia e propriedades integradas

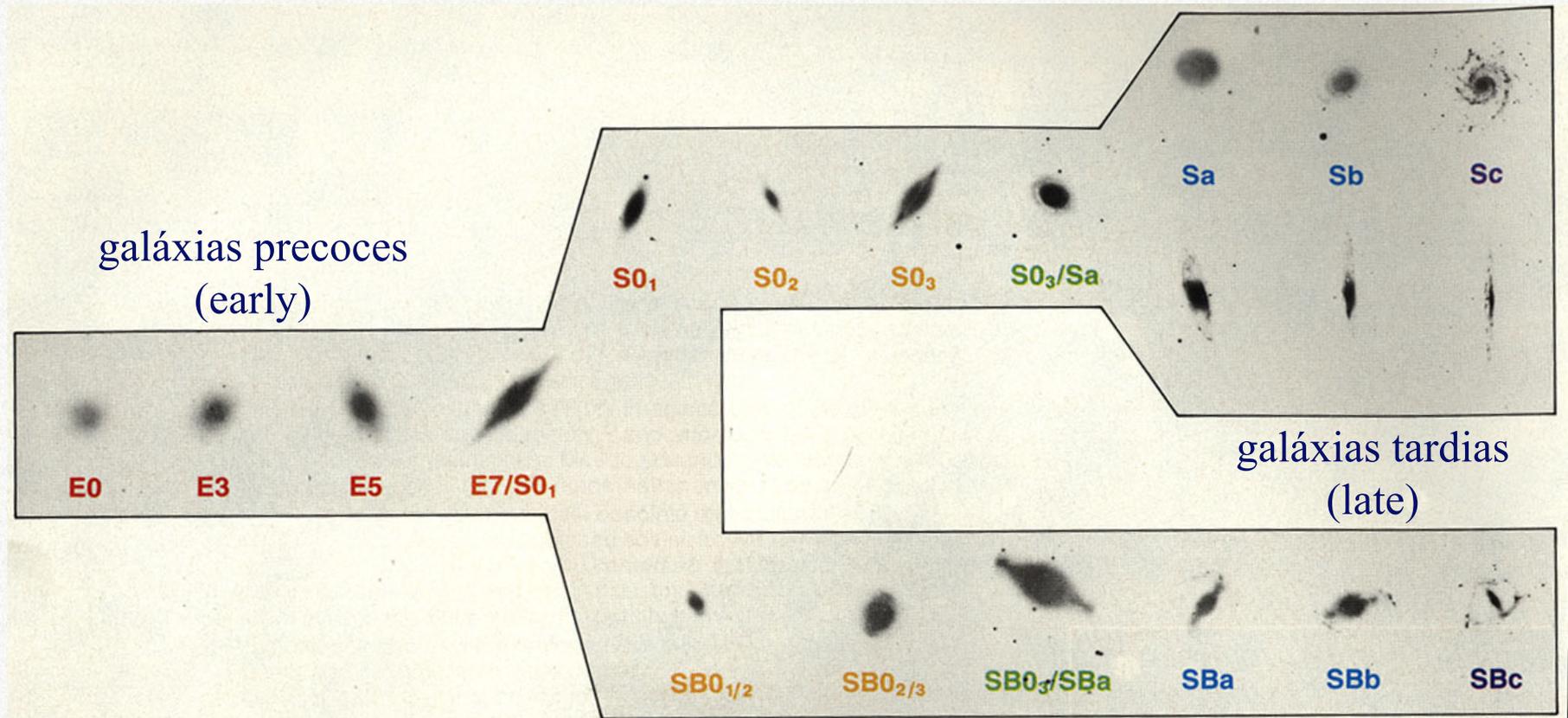


galáxias são mais azuis →

razão disco/bojo aumenta →

mais gás e mais poeira →

Morfologia e propriedades integradas



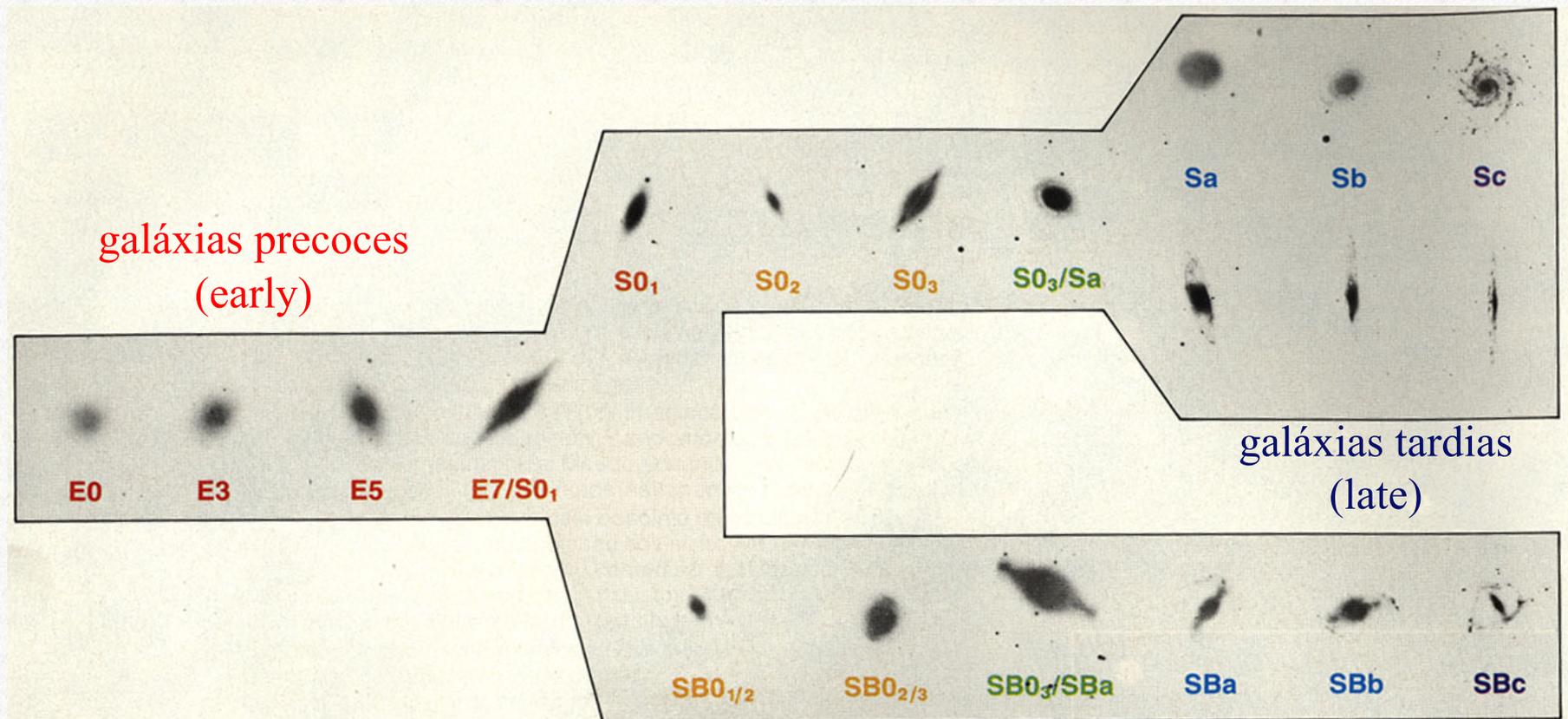
Aumenta taxa de formação estelar →

Diminui a massa do buraco negro central →

Aumenta momento angular específico (rotação/massa) →

Morfologia e propriedades integradas

- No início, alguns astrônomos interpretaram a sequência de Hubble como uma evolução de **tipo precoce** para **tipo tardio**.
- Hoje entendemos que isto não é possível. Contudo a terminologia continua a ser usada.



Classificação Morfológica e Relação Cor–Magnitude

- Baseada no óptico (banda B ou V).
- Galáxias brilhantes.
- Galáxias relativamente próximas.
- Em nossa vizinhança, ~2 bilhões de anos-luz temos:
 - 70% Espirais;
 - 14% Lenticulares;
 - 10% Elípticas;
 - 6% Irregulares.
- A grande maioria das galáxias são anãs.
- Forma (morfologia) depende do filtro de observação.

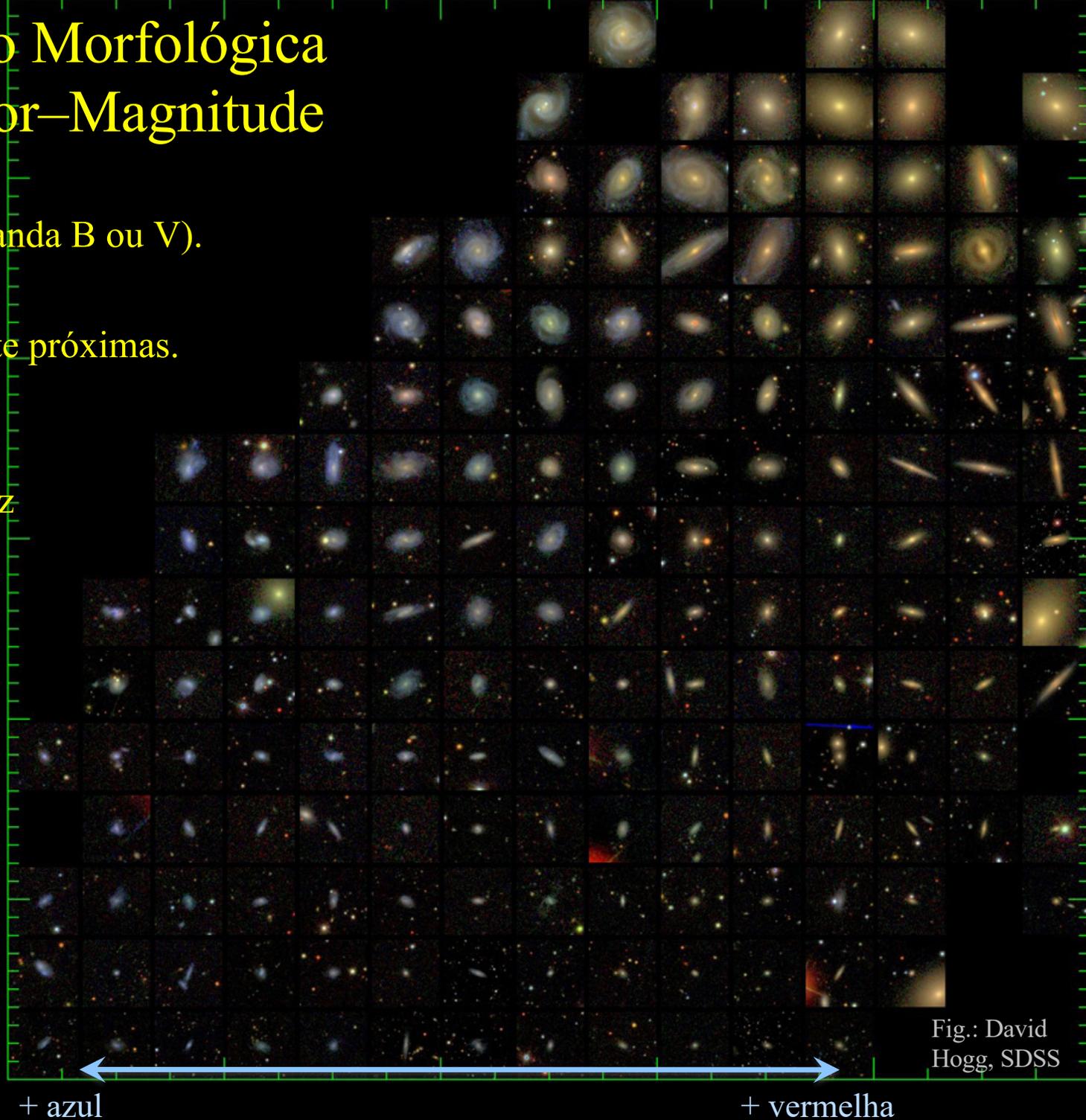
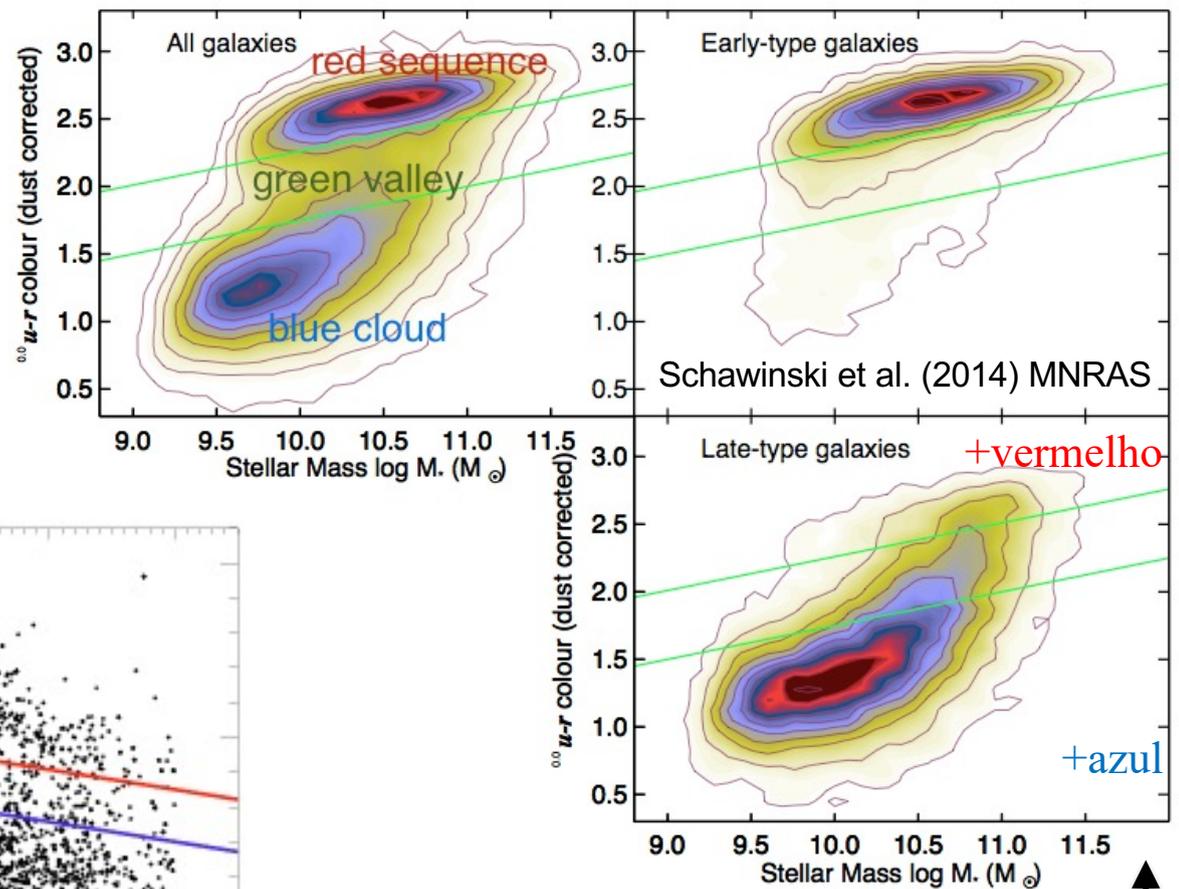


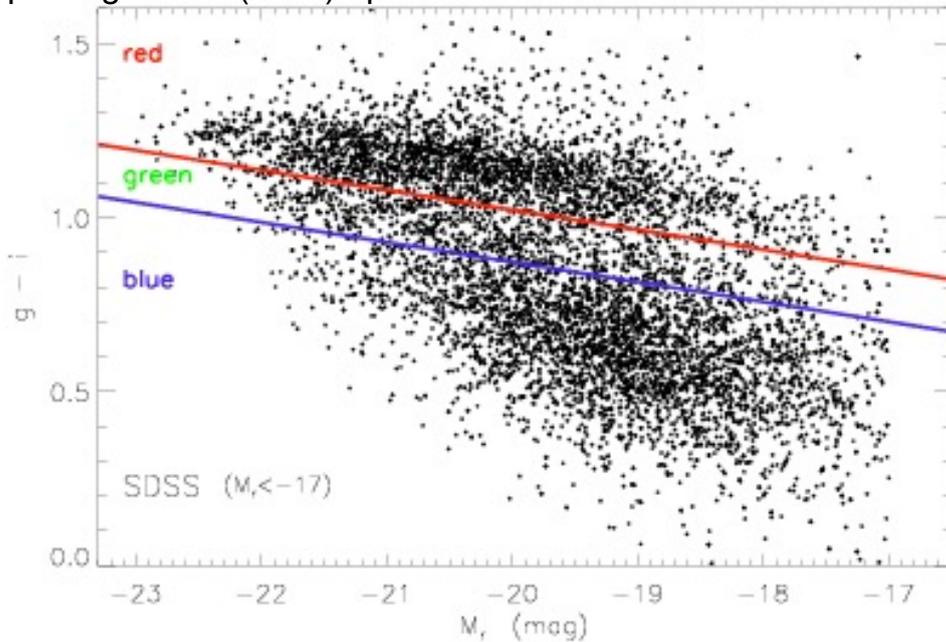
Fig.: David Hogg, SDSS

Relações cor–magnitude e cor–massa



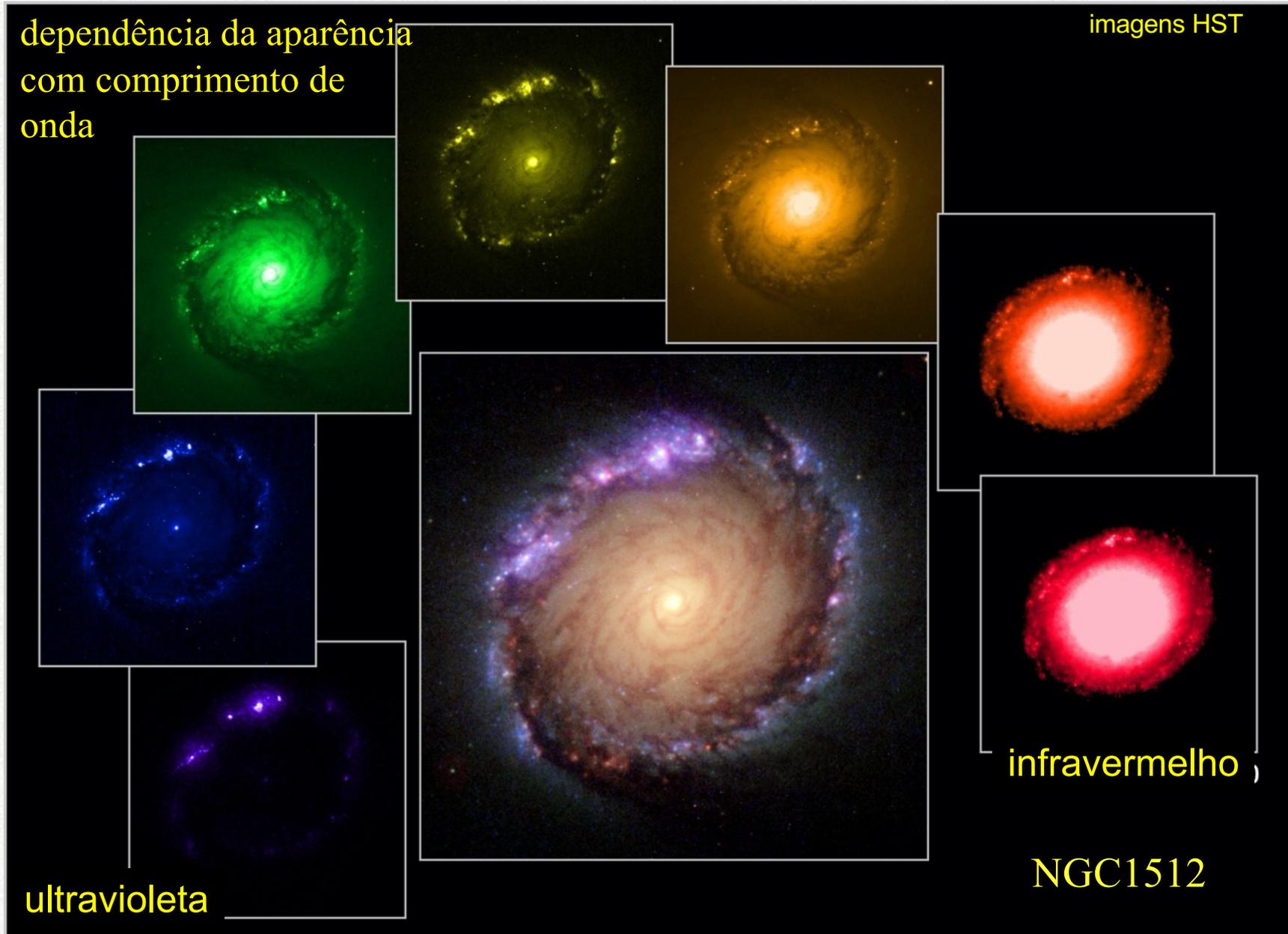
separação por
classe morfológica

Papastergis et al. (2013) ApJ 776



- Distribuição observada:
 - “*Red Sequence*”, principalmente elípticas e lenticulares
 - “*Blue cloud*”, principalmente espirais e irregulares
 - “*Green valley*”, galáxias de transição(?), bem menos frequentes.

Classificação morfológica

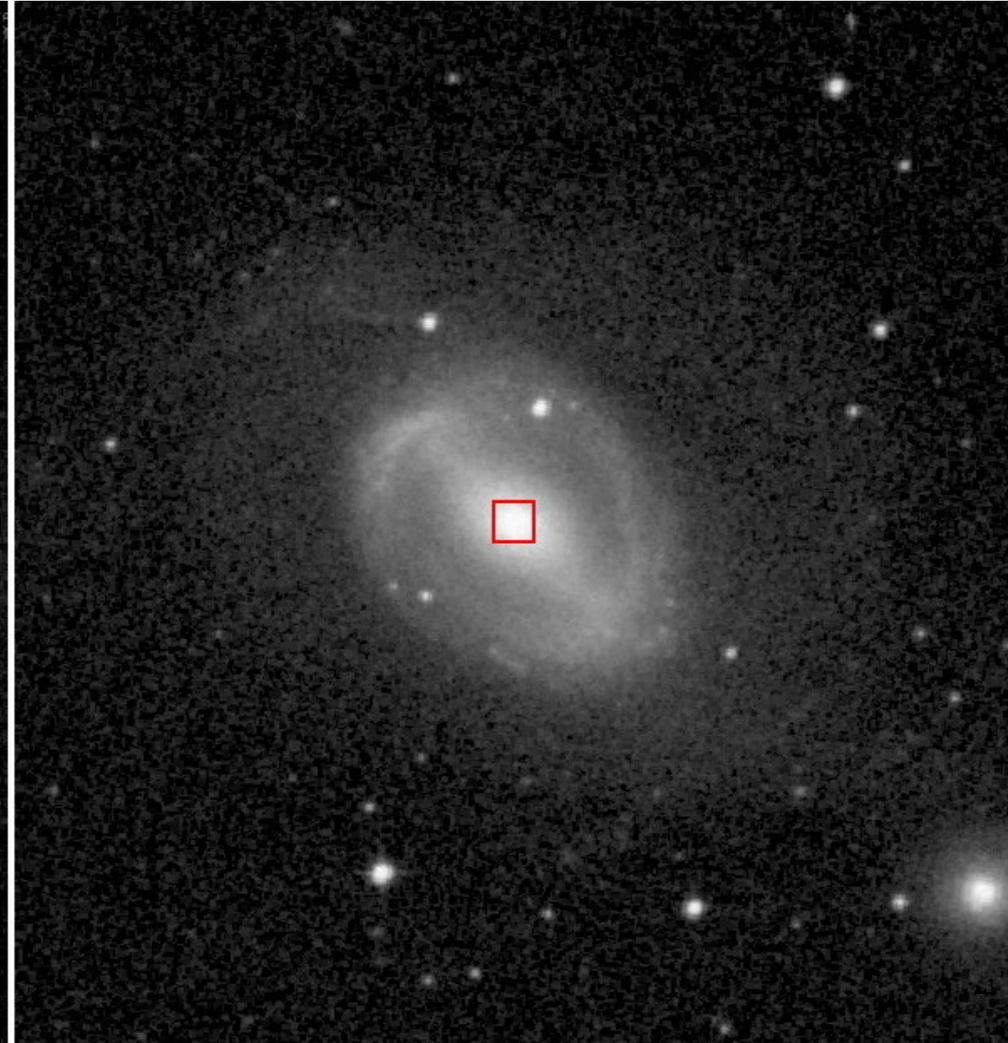
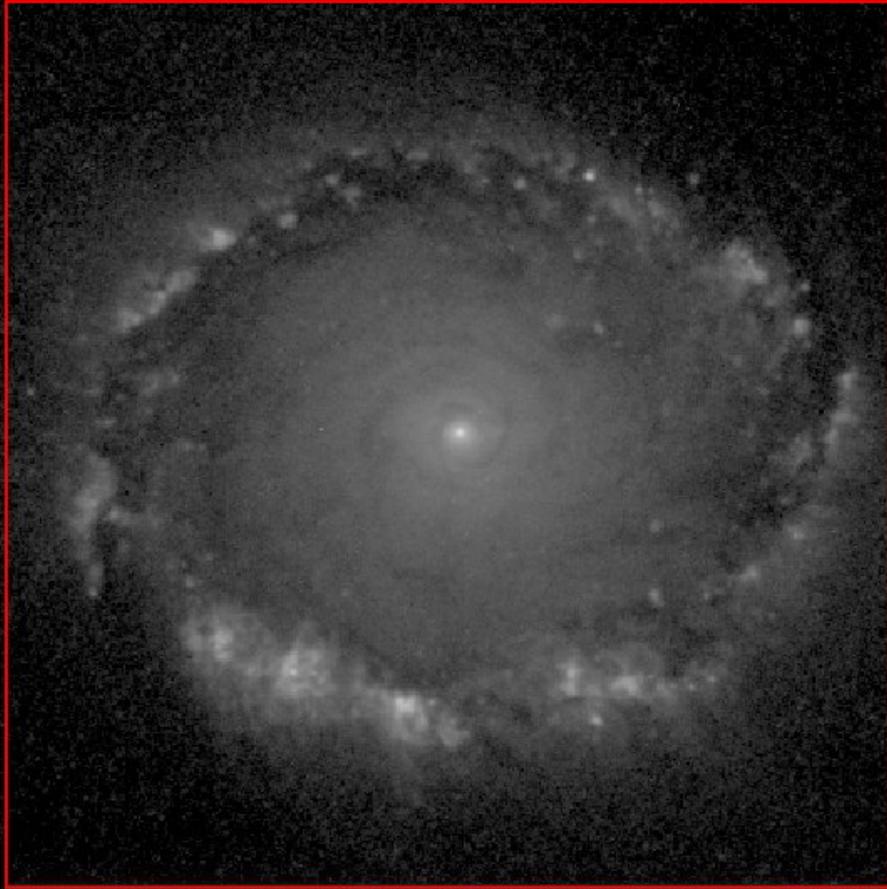


- No ultravioleta: estrutura irregular.

- No infravermelho: estrutura mais simétrica.

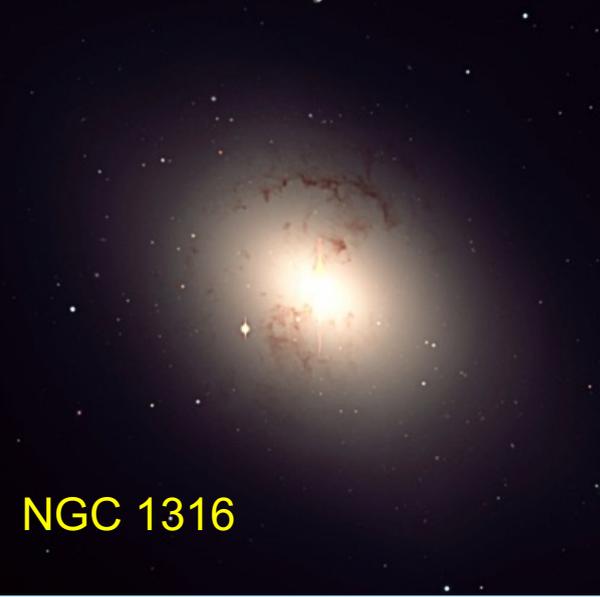
- No visível: poeira mais aparente.

Classificação morfológica



- NGC 1512: SBa
- A imagem da esquerda é do HST da região central, dentro do bojo.
- A imagem da direita é do DSS (Digital Sky Survey) de toda a galáxia.

Galáxias Elípticas



Esferoides de estrelas com pouco gás e poeira, sem estruturas notáveis.

Galáxias Elípticas

Classificação segundo o grau de achatamento aparente

NGC 1379



E0
(esférico)

NGC 3193



E2

NGC 5322



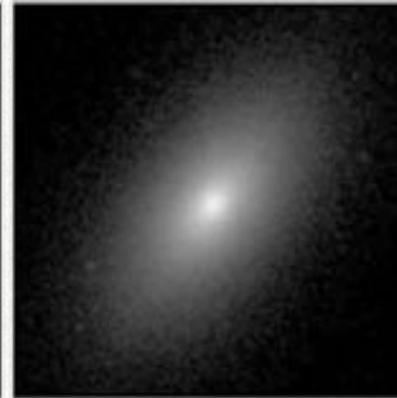
E3

NGC 1426

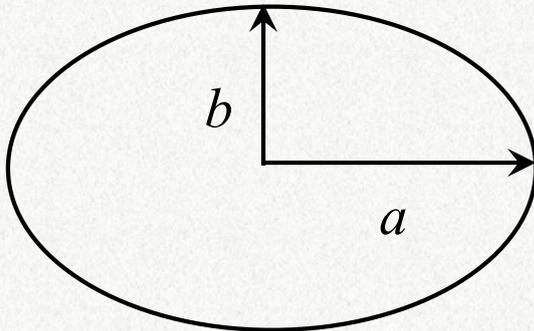


E4

NGC 720



E5

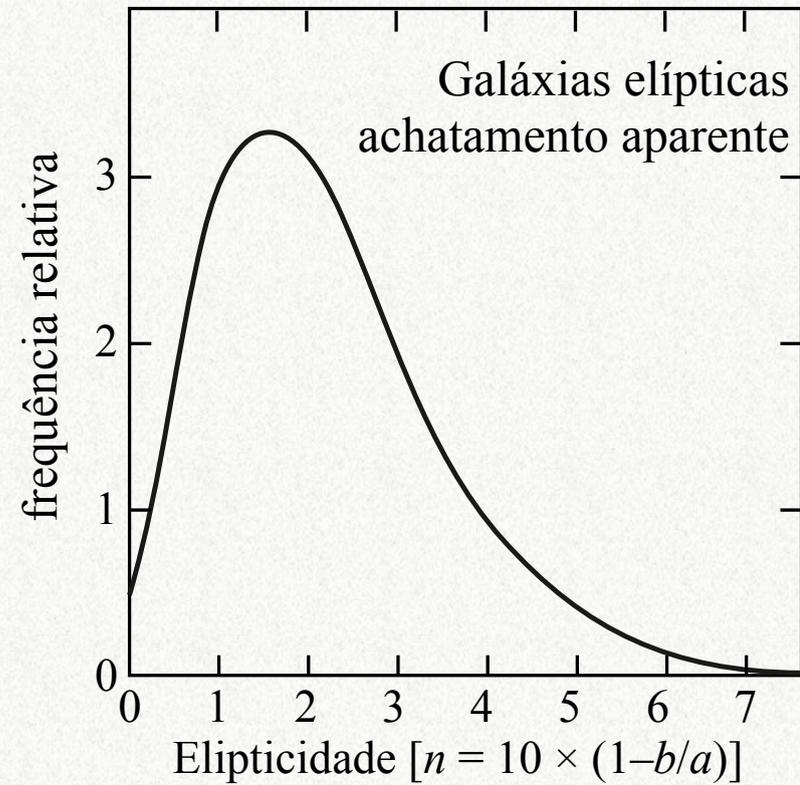
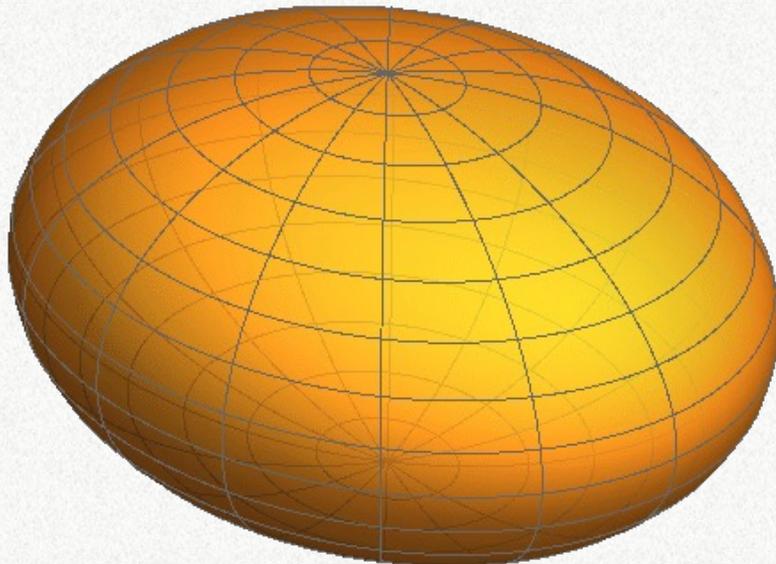


$$n = 10 \times (1 - b/a) \quad \longrightarrow \quad E_n$$

- Por exemplo, se $a=1$ e $b=0,8$
 $\rightarrow n = 10 \times (1 - 0,8/1) \rightarrow E2$
- Por exemplo, se $a=1$ e $b=0,5$
 $\rightarrow n = 10 \times (1 - 0,5/1) \rightarrow E5$

Galáxias Elípticas

- A maioria das galáxias elípticas são E1 e E2.
- É difícil determinar a forma intrínseca, em 3 dimensões das elípticas.
- Possivelmente elas são elipsoides triaxiais, isto é, têm três eixos diferentes: $A > B > C$



Fasano & Vio, 1991, MNRAS

Razões axiais intrínsecas:

$B/A \sim 0,9$

$C/A \sim 0,6$

(Méndez-Abreu, 2015)

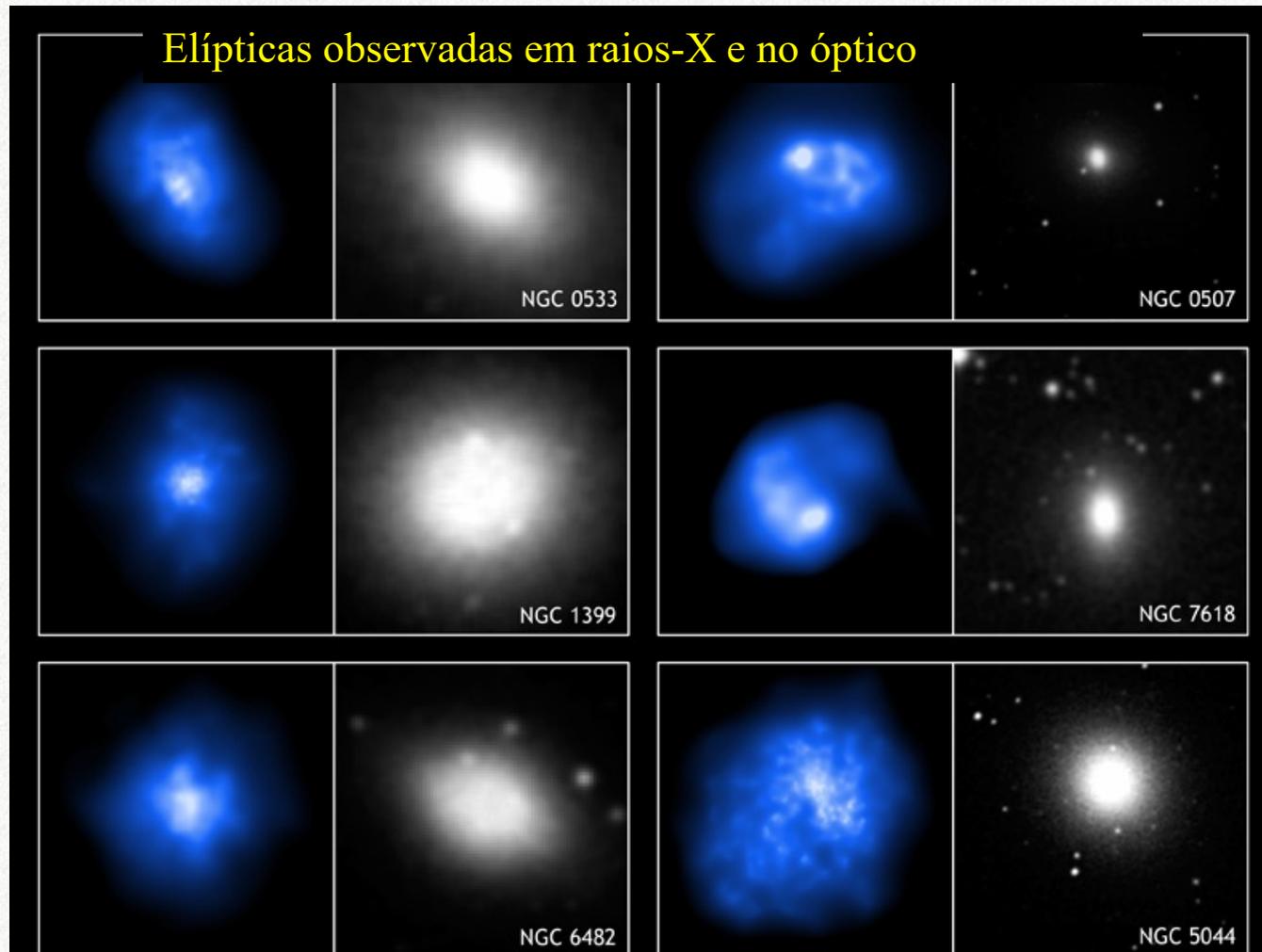
Galáxias Elípticas

- Galáxias sem estruturas aparentes.
- Não se observa galáxias elípticas mais achatadas do que E7:
 - Dinamicamente instáveis e muito raras.
- As mais brilhantes apresentam pouca ou nenhuma rotação:
 - Equilíbrio devido à dispersão das velocidades das estrelas (isto é, “pressão” e não rotação).
 - Órbitas das estrelas com direções aleatórias.
- As elípticas também têm um buraco negro supermassivo central.

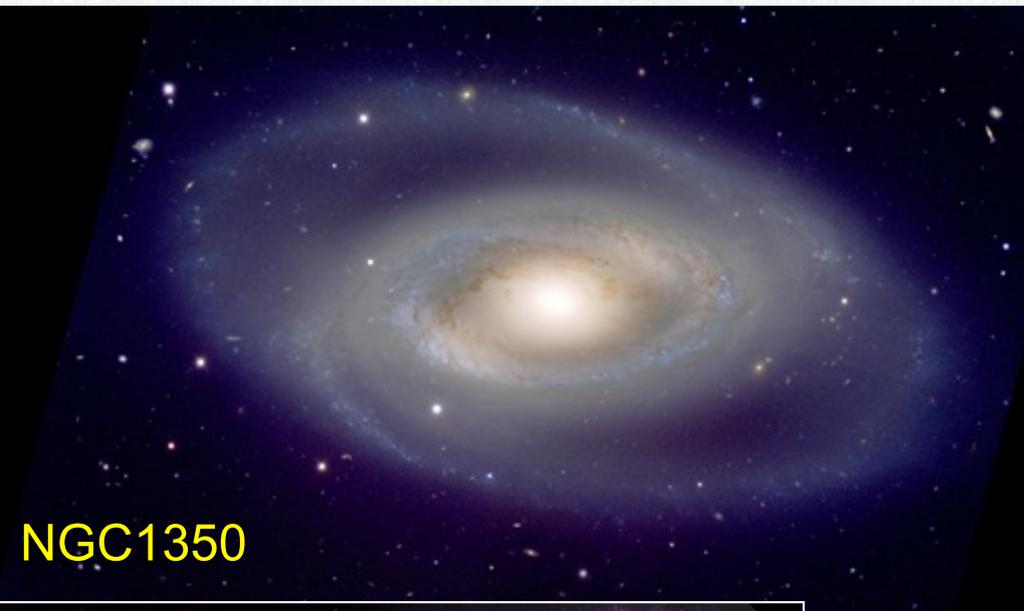


Galáxias Elípticas

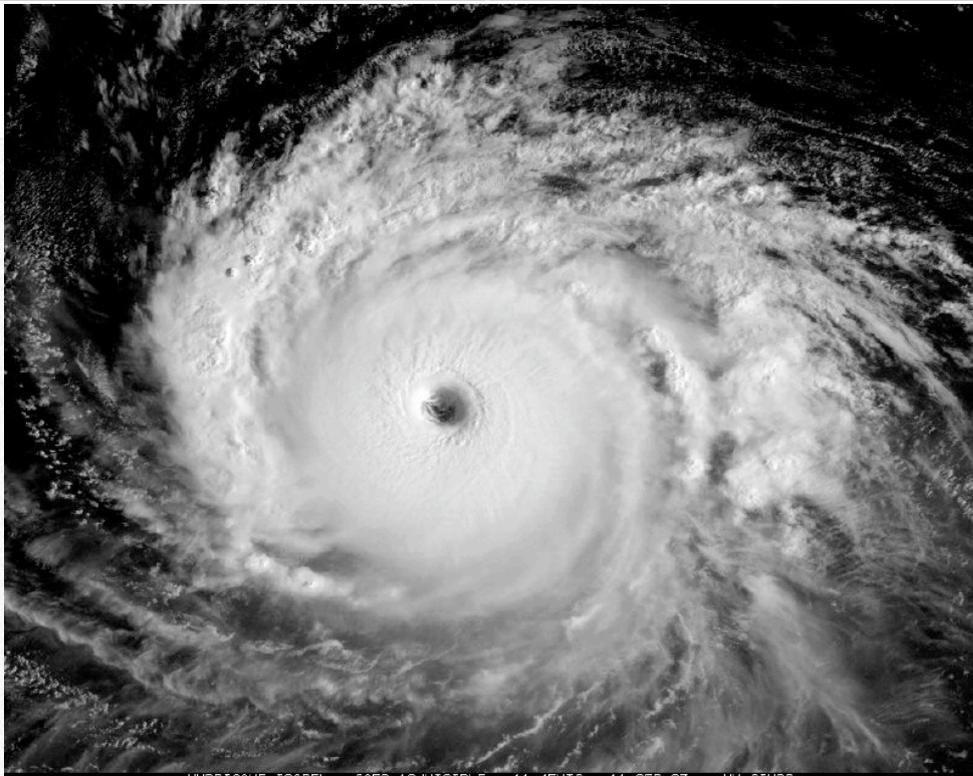
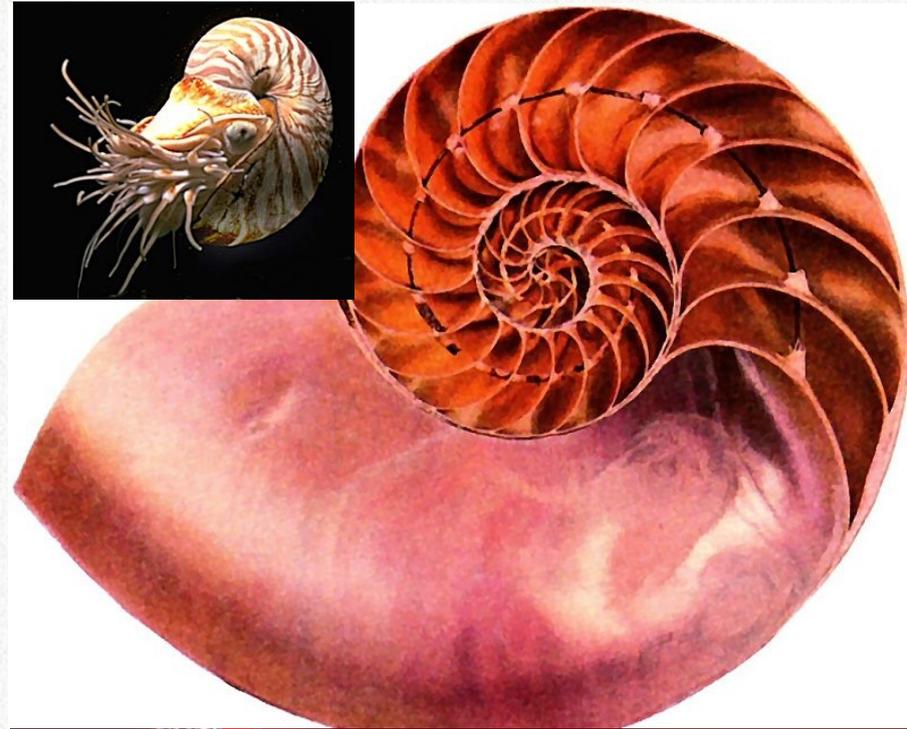
- Galáxias vermelhas ($B - V \approx 0,9$ (típico de estrelas tipo K).
- População estelar de estrelas velhas e pouquíssimo gás e poeira.
 - algumas das mais massivas apresentam halo de gás quente (observado em raios-X).
 - outras um pouco “peculiares” apresentam mais poeira e/ou gás.
- Praticamente não forma estrelas. Último grande evento de formação estelar ocorreu há mais de 10 bilhões de anos.
- As elípticas anãs podem chegar a ter uma massa de $10^7 M_{\odot}$. As gigantes chegam a $10^{13} M_{\odot}$.
- Possuem também um halo de matéria escura
- Diâmetro: de 1 a 1000 kpc.



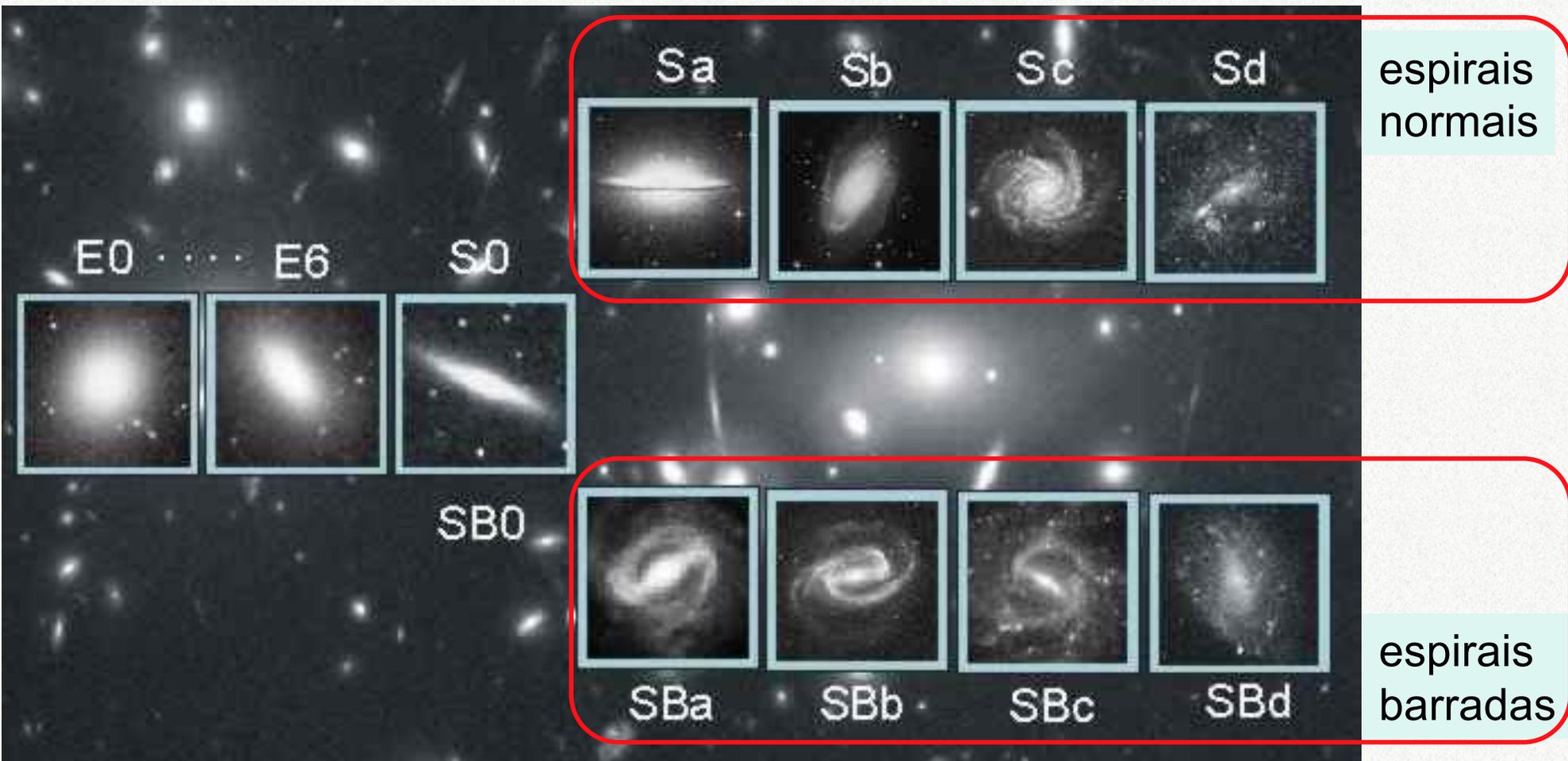
Galáxias Espirais



Algumas espirais na natureza



Galáxias Espirais



- Espirais no diagrama de Hubble.
- Dois ramos principais: barradas e não-barradas

Galáxias Espirais

- 3 componentes principais
 - Disco [$\Sigma \propto \exp(-R/R_d)$]
 - Bojo [elipsoide]
 - Halo [esférico?]
- (Σ = brilho superficial;
 R_d = escala do disco)

- Razão Bojo / Disco:

$$\frac{\text{luminosidade do bojo}}{\text{luminosidade do disco}}$$

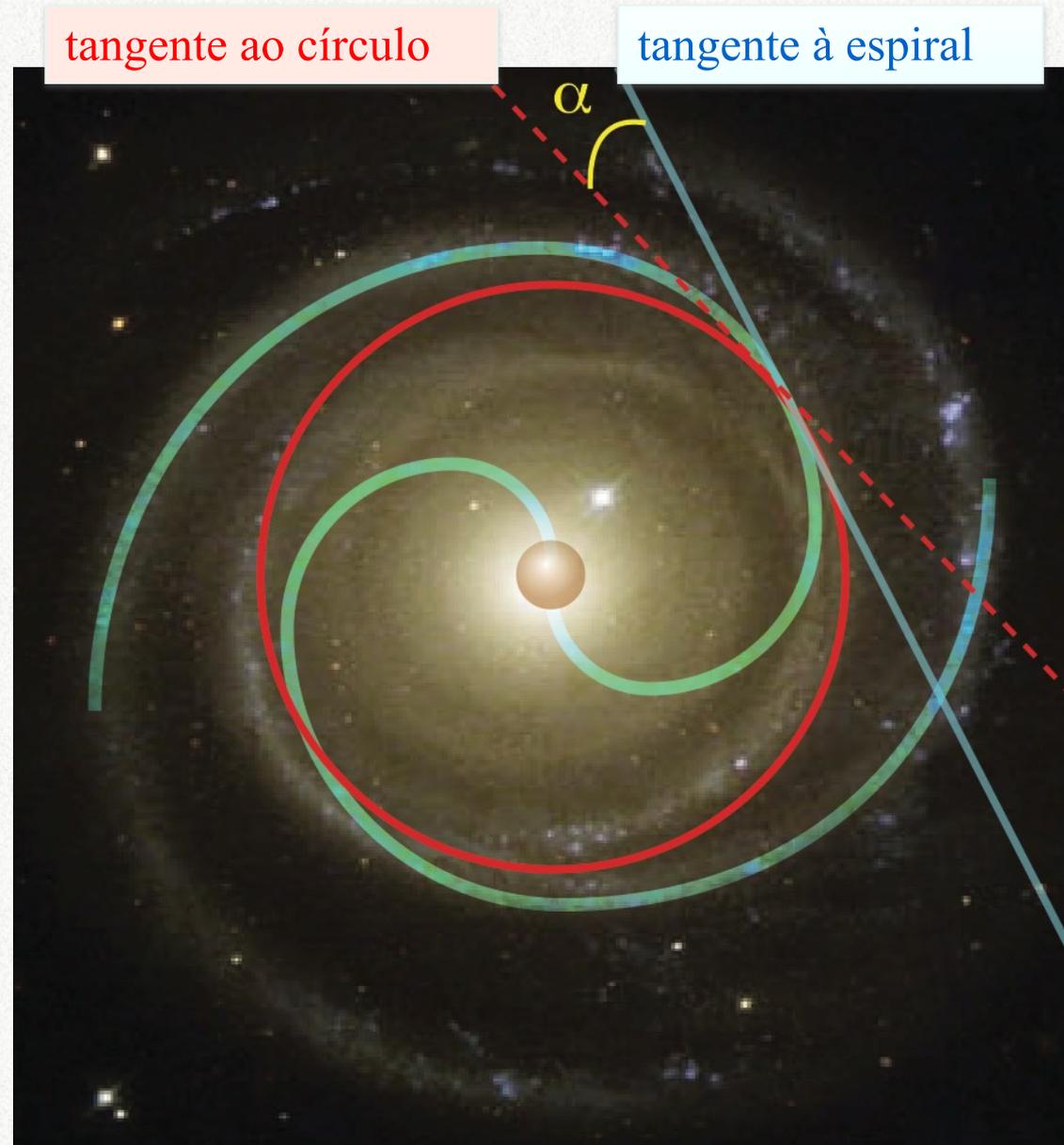
diminui de Sa \rightarrow Sd

- Sa $> 0,5$
- Sb $\approx 0,45$
- Sbc $\approx 0,32$
- Sc $\approx 0,15$
- Sd $\approx 0,10$

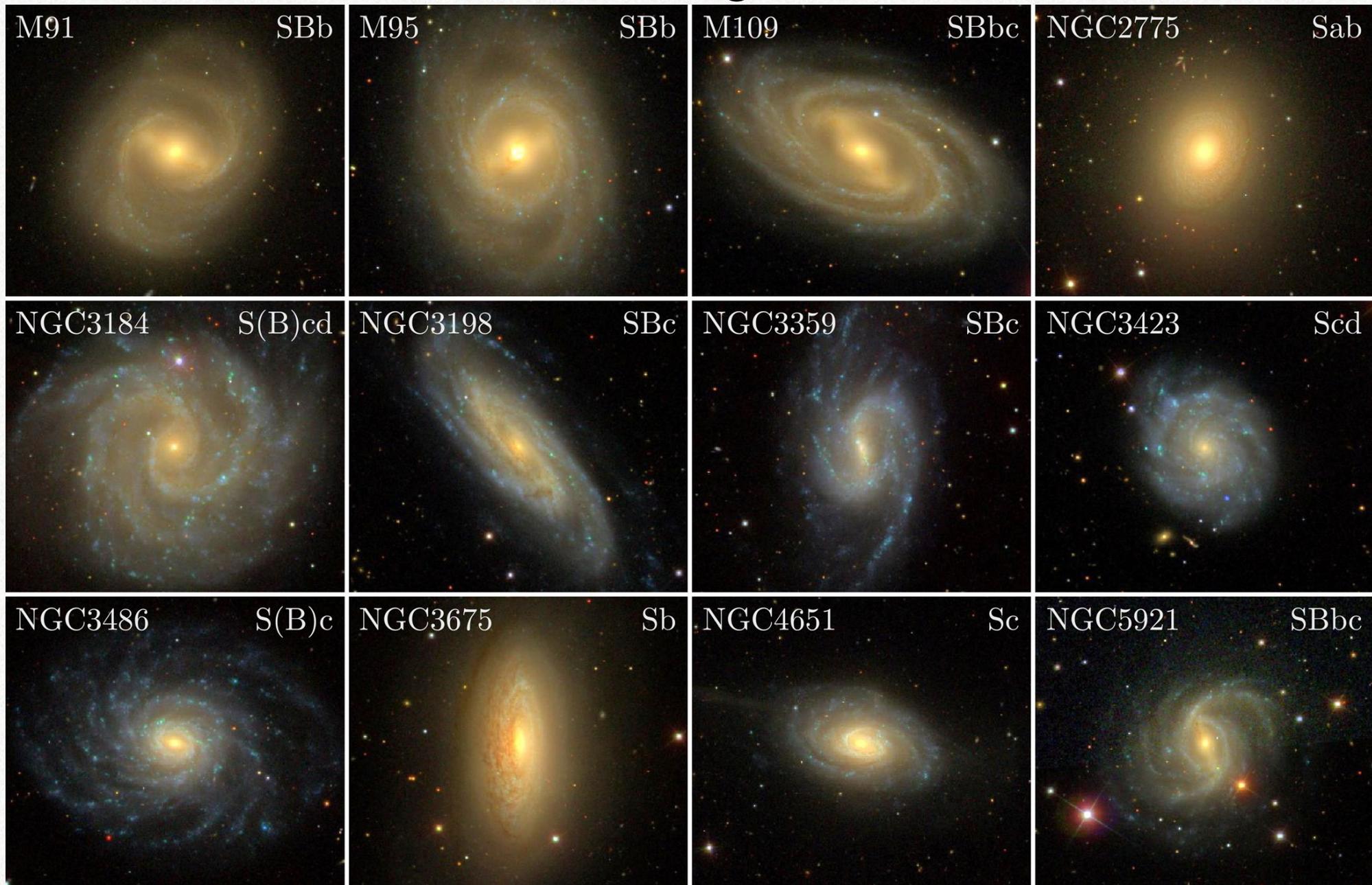


Galáxias Espirais

- Outra forma de classificar as espirais é medindo o **ângulo de abertura** dos braços.
- Ângulo de abertura dos braços (*pitch angle*, α): se α é constante
→ **espiral logarítmica**.
- Este ângulo é formado pelo braço da galáxia e o círculo que passa na mesma distância radial.
- Aumenta de Sa → Sd
 - Sa $\approx 7^\circ$
 - Sb $\approx 13^\circ$
 - Sc $\approx 17^\circ$



Algumas galáxias espirais com sua classificação morfológica.



Galáxias Espirais

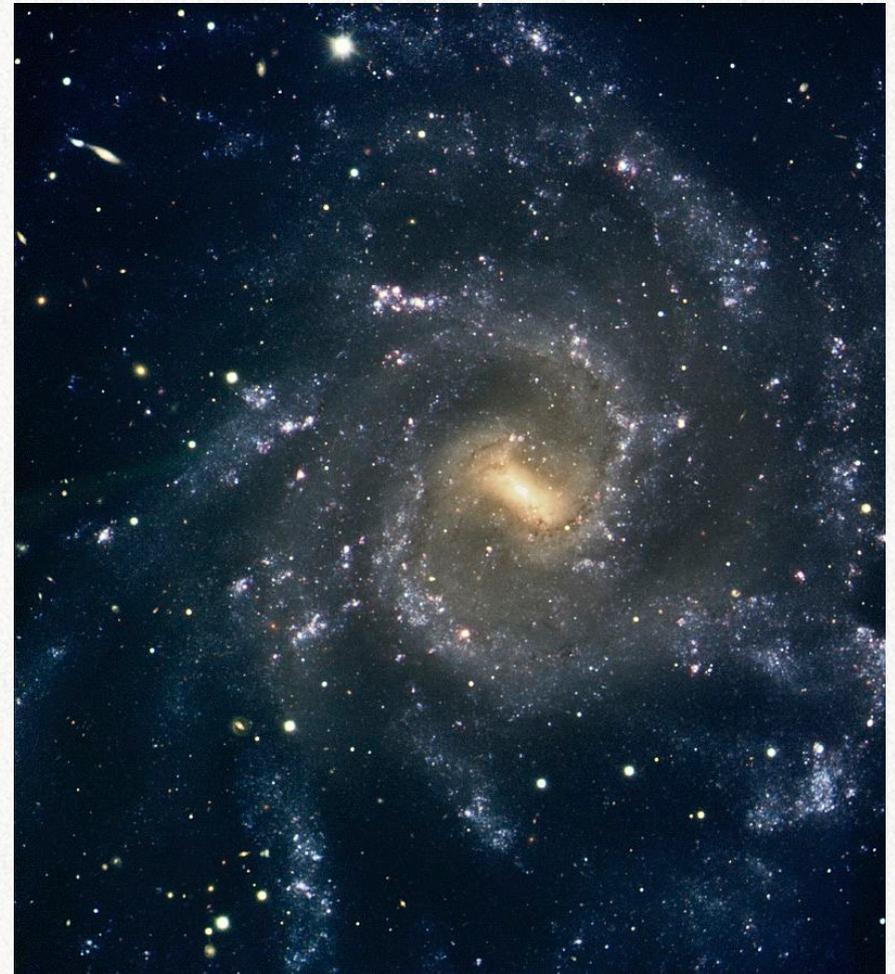
- Grand design

X

Floculentas.



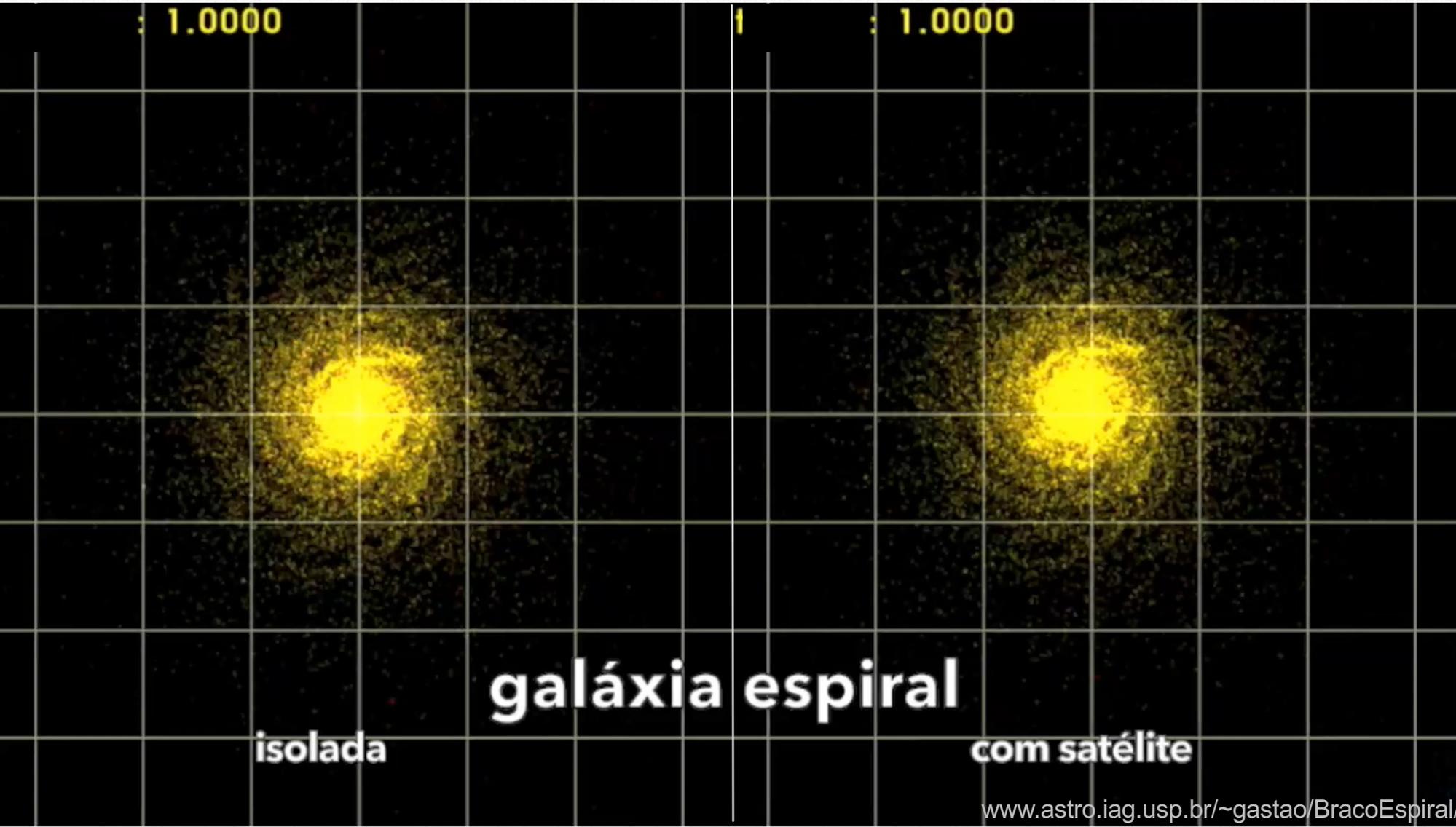
M51 (HST)



NGC 7424 (ESO)

- Galáxias grand design se encontram frequentemente em pares:
 - efeitos gravitacionais da companheira.
- Apenas cerca de 10% das espirais são grand designs.

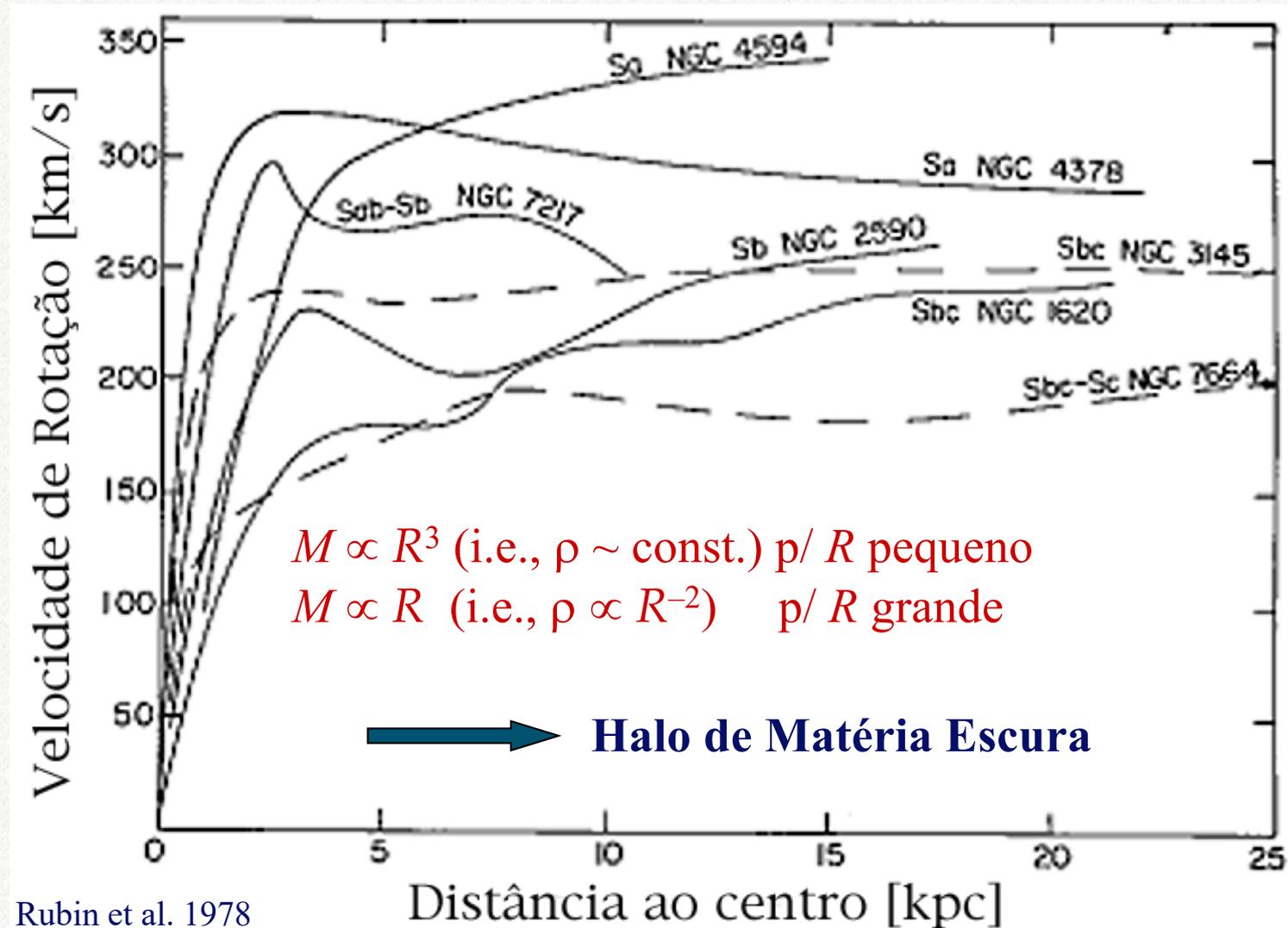
Braços espirais



- A perturbação causada pela passagem de uma galáxia produz braços mais bem definidos.

Curvas de rotação

- Rotação importante (pouca “pressão”).
- Seguem o mesmo padrão: aumenta rapidamente e ficam constantes até onde pode ser observada.



Galáxias espirais



M81, Sa



M51, Sb



NGC2997, Sc

- Disco de estrelas jovens de Pop. I.
- Bojo e halo esferoidais de Pop. II.
- Massa entre 10^9 e $10^{12} M_{\odot}$.
 - entre 5% e 15% na forma de gás no disco.
- Luminosidade entre 10^8 e $10^{11} L_{\odot}$.
- Diâmetro entre 5 e 30 kpc.
- Índice de cor ($B-V$) entre 0,8 e 0,5.

Galáxias Lenticulares – S0

- Um bojo enorme com um disco fraco e sem braços:
 - classe intermediária entre Elíptica e Espiral
- Facilmente confundida com elípticas.
- Pouca ou nenhuma formação estelar.
- Mesma cor das elípticas

Lenticulares ou elípticas?

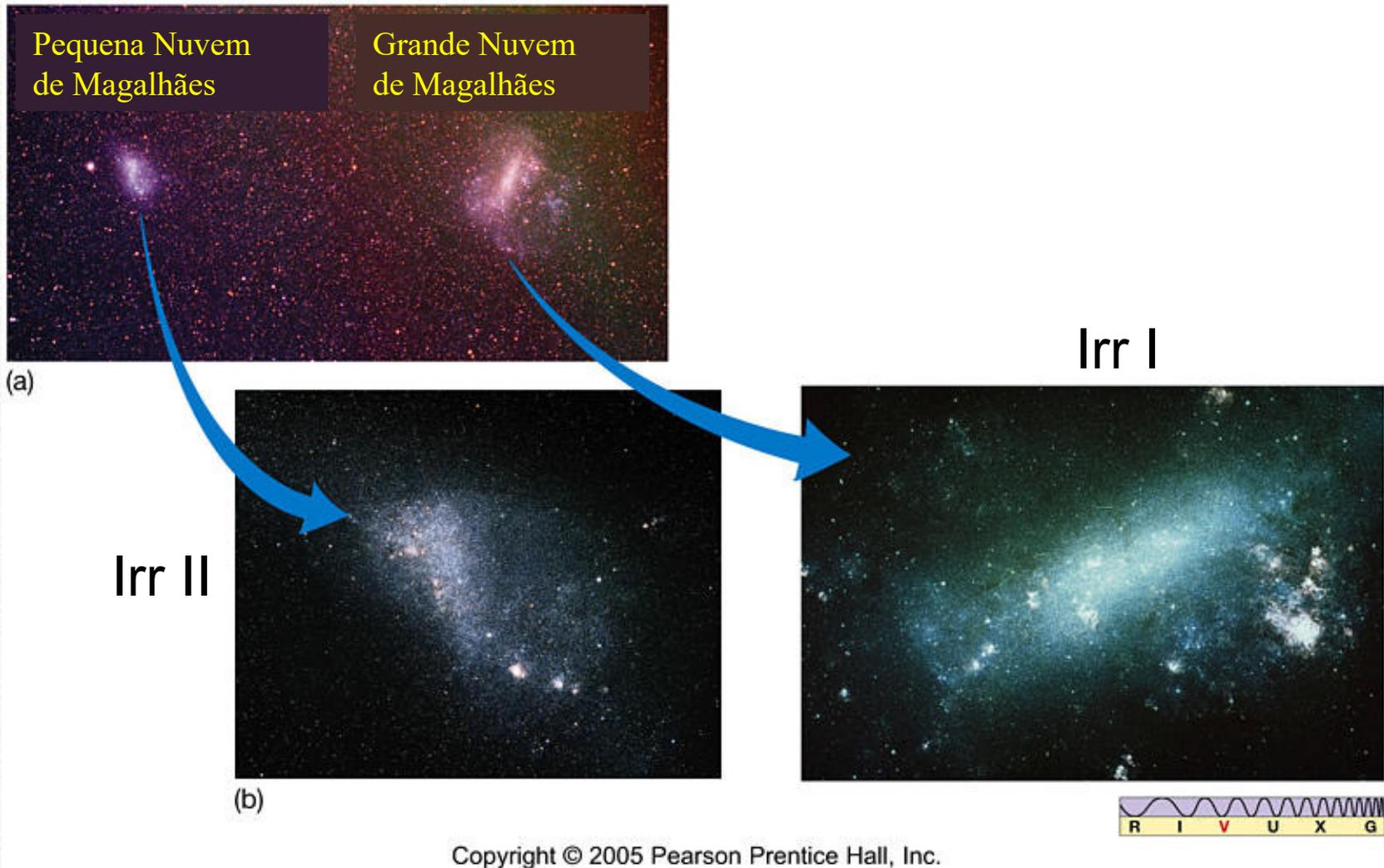
M86 = S0 ou E3?

M84 = S0 ou E1?



NGC 2787, imagem HST
Lenticular barrada (SB0) com poeira.

Galáxias irregulares

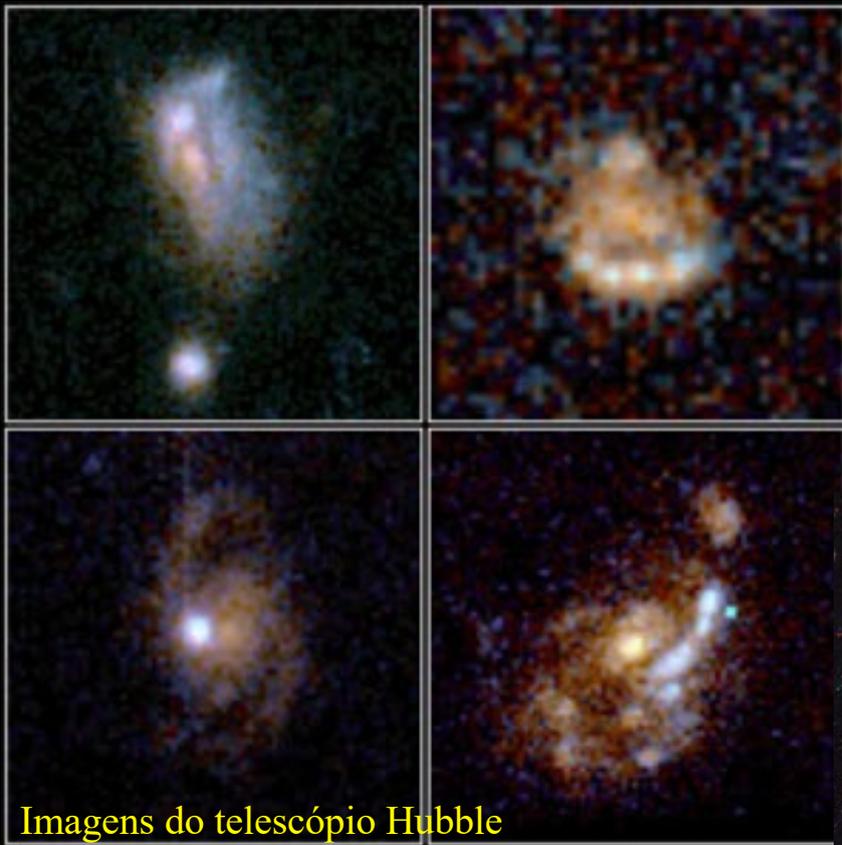


Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

- Principal característica morfológica: sem simetria aparente.
- Subdivididas em tipos Irr I e Irr II: Irr II são mais irregulares.

Galáxias irregulares

- Sem simetria aparente.
- Ricas em gás.
- Pobres em metais.
- Estrelas jovens e velhas.



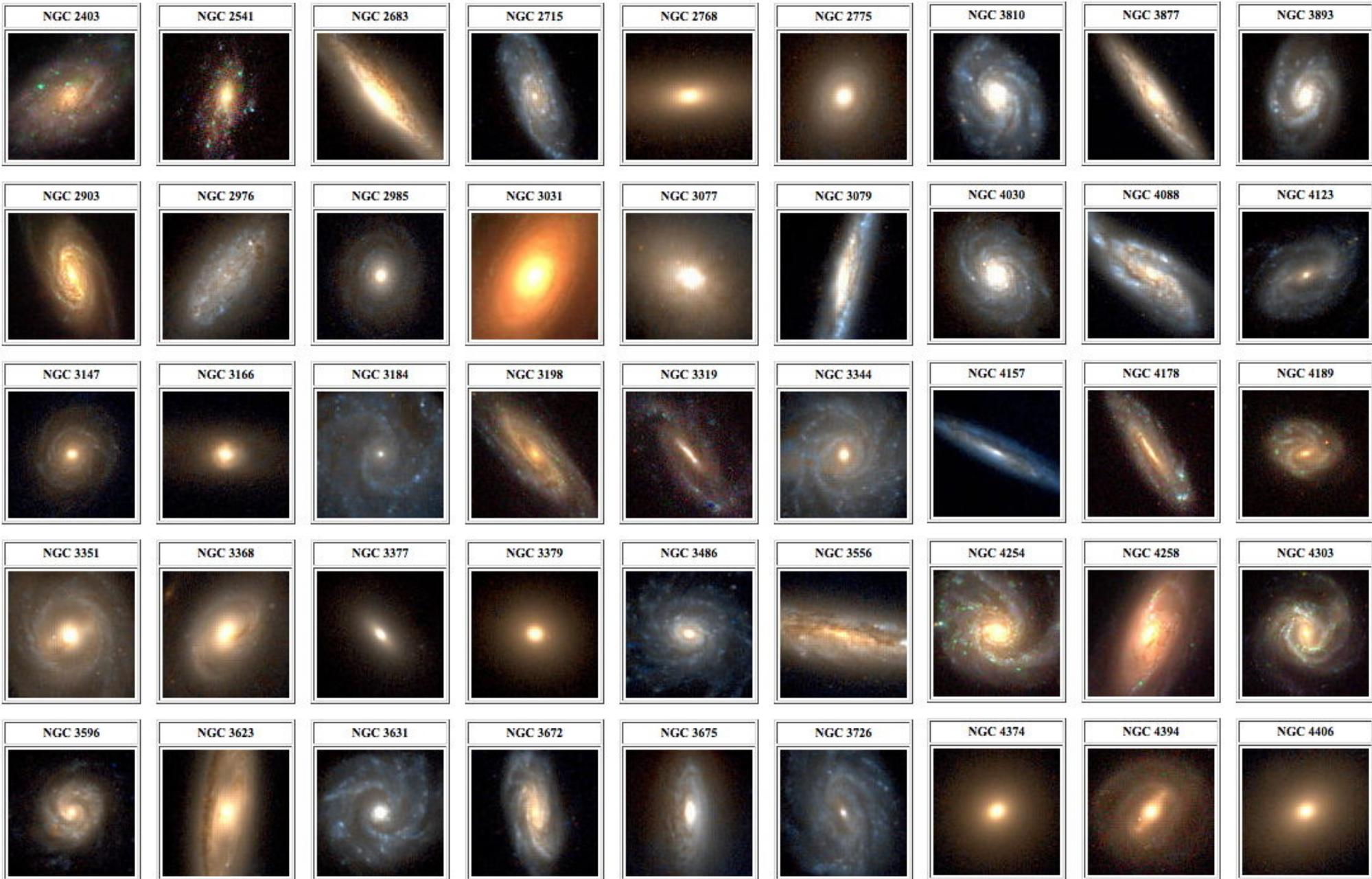
Imagens do telescópio Hubble

- Menores que as espirais, entre 1 a 10 kpc de diâmetro.
- Massa de 10^8 a $10^{11} M_{\odot}$.
- Luminosidade 10^7 a $10^9 L_{\odot}$.
- Geralmente associadas a galáxias maiores.



Anã irregular de Sagitário (SagDIG)

Algumas galáxias próximas do catálogo NGC



Mas, o que são galáxias?

- Definição mais simples de uma galáxia:
 - um halo de matéria escura com estrelas (e eventualmente gás e poeira).
 - Um halo de matéria escura sem estrelas não é uma galáxia.
 - Um grupo de estrelas sem matéria escura não é uma galáxia (pode ser um aglomerado globular ou aglomerado aberto).
- Toda galáxia com uma componente estelar esferoidal (todas as elípticas, lenticulares e as espirais com bojo) tem um buraco negro supermassivo central.

Massa das galáxias: teorema do virial

- Identidade de Lagrange, válido para qualquer sistema onde o potencial segue uma lei de potencia, $\phi \propto r^k$:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T - kU \quad (I = \text{momento de inércia}; T = \text{energia cinética}; U = \text{energia potencial})$$

- Para o potencial gravitacional temos o caso particular, $k = -1$. Logo,

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T + U \quad (\text{caso gravitacional})$$

- Para um sistema em equilíbrio, o momento de inercia não varia com o tempo. Logo, a 1ª e 2ª derivadas são nulas. Assim temos:

$$2T + U = 0 \iff \text{Teorema do virial}$$

(rigorosamente, é a soma dos valores médios que deveríamos usar no teorema do virial).

Galáxias Elípticas

- Massa pode ser obtida pela Teorema do Virial:

$$2T + U = 0$$

- $T = M \sigma^2/2 \rightarrow$ energia cinética
- $U = -\alpha G M^2/R \rightarrow$ energia potencial

$$M = R \sigma^2/\alpha G$$

- Para as mais brilhantes:
 $R \sim 15 \text{ kpc}; \sigma \sim 300 \text{ km/s} \quad M \sim 10^{12} M_{\odot}.$
 $R \sim 5 \text{ kpc}; \sigma \sim 150 \text{ km/s} \quad M \sim 10^{11} M_{\odot}.$
- A elípticas anãs podem chegar a ter uma massa de $10^7 M_{\odot}$. As gigantes chegam a $10^{13} M_{\odot}$.
- Para comparação a massa da Galáxia é $\sim 10^{12} M_{\odot}$.

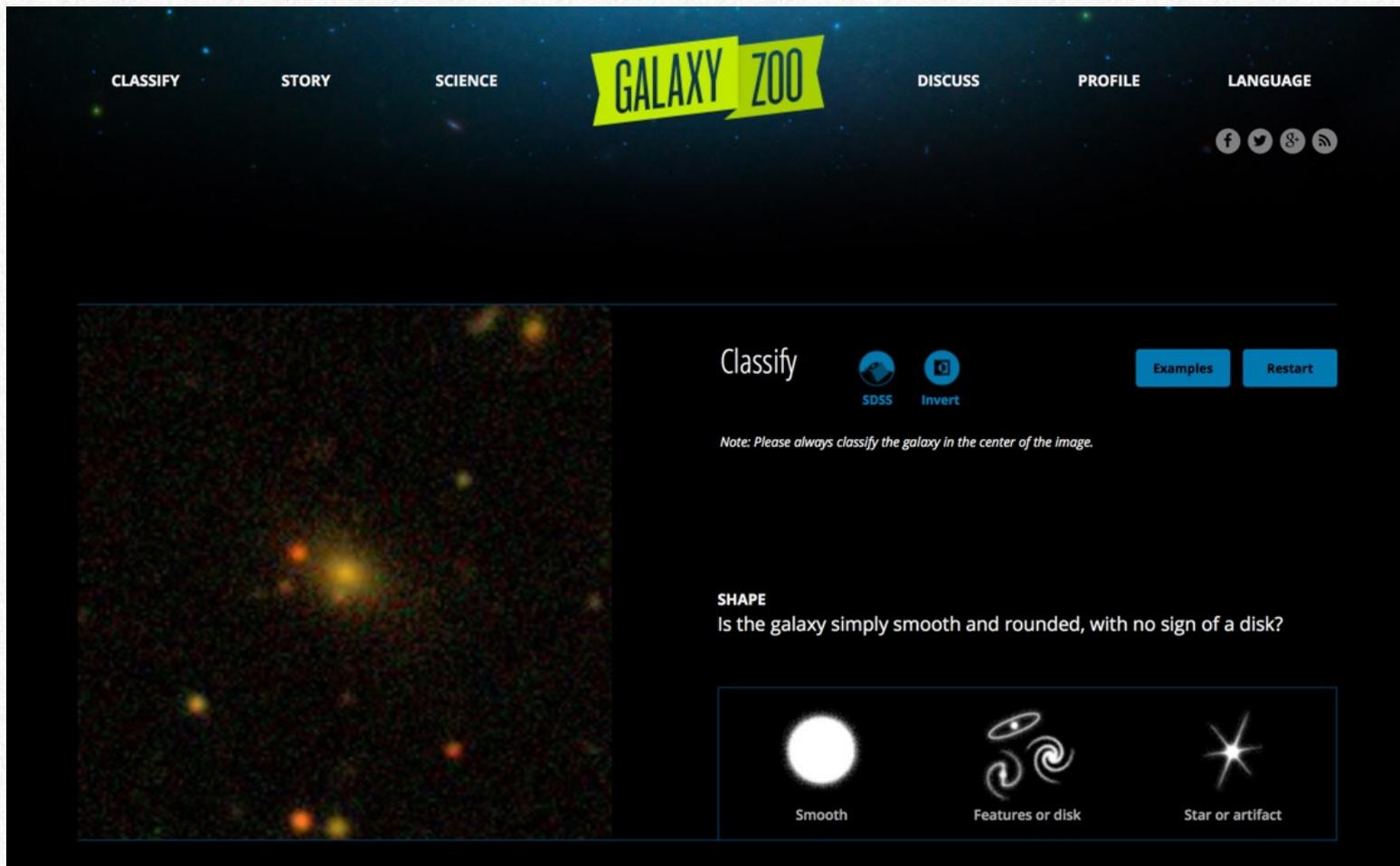
σ é a dispersão da distribuição de velocidades

obtida pela espectroscopia: largura de linhas de absorção

Atividade prática: Galaxy Zoo

www.galaxyzoo.org

- Classificação morfológica de galáxias com imagens do Sloan Digital Sky Survey (SDSS, www.sdss.org) feitas por qualquer pessoa com acesso à Internet (“citizen science”).



The screenshot displays the Galaxy Zoo website interface. At the top, there is a navigation bar with links for CLASSIFY, STORY, SCIENCE, DISCUSS, PROFILE, and LANGUAGE. The 'GALAXY ZOO' logo is prominently displayed in the center. Social media icons for Facebook, Twitter, Google+, and RSS are visible on the right. The main content area features a large image of a galaxy field on the left. To the right of the image, there is a 'Classify' section with 'SDSS' and 'Invert' options, and buttons for 'Examples' and 'Restart'. Below this, a question is posed: 'SHAPE Is the galaxy simply smooth and rounded, with no sign of a disk?'. Three options are provided: 'Smooth' (represented by a white circle), 'Features or disk' (represented by a spiral galaxy icon), and 'Star or artifact' (represented by a star icon).