

# Onde estamos no curso ?

---

## ✓ **Intro**

- ✓ Conceitos de Evolução Estelar, diagramas HR e CMD
- ✓ Evolução Histórica do Conceito de Galáxia(s)

## ✓ **Nossa Galáxia**

- ✓ Conceitos: sistema de coordenadas, Funções de Luminosidade e de Massa
- ✓ Evolução Química e Populações Estelares
- ✓ Componentes da Galáxia
- ✓ Modelos de Formação da Galáxia
  - Rotação Galáctica
  - Meio Interestelar

## • **Extragaláctica**

- Conceitos
- O Grupo Local
- Galáxias Espirais e Lenticulares
- Galáxias Elípticas
- Grupos e Aglomerados
- Galáxias de Núcleo Ativo

# Onde estamos no curso ?

---

## ✓ **Intro**

- ✓ Conceitos de Evolução Estelar, diagramas HR e CMD
- ✓ Evolução Histórica do Conceito de Galáxia(s)

## ✓ **Nossa Galáxia**

- ✓ Conceitos: sistema de coordenadas, Funções de Luminosidade e de Massa
- ✓ Evolução Química e Populações Estelares
- ✓ Componentes da Galáxia
- ✓ Modelos de Formação da Galáxia
  - Rotação Galáctica
  - Meio Interestelar

## • **Extragaláctica**

- Conceitos
- Galáxias Elípticas
- Galáxias Espirais e Lenticulares
- O Grupo Local
- Grupos e Aglomerados
- Galáxias de Núcleo Ativo

# Outras galáxias, conceitos gerais

---

Seção 1.3 do livro-texto (Sparke & Gallagher)  
Mo, den Bosch, White 2010, Cap. 1

# A diversidade na população de galáxias

---

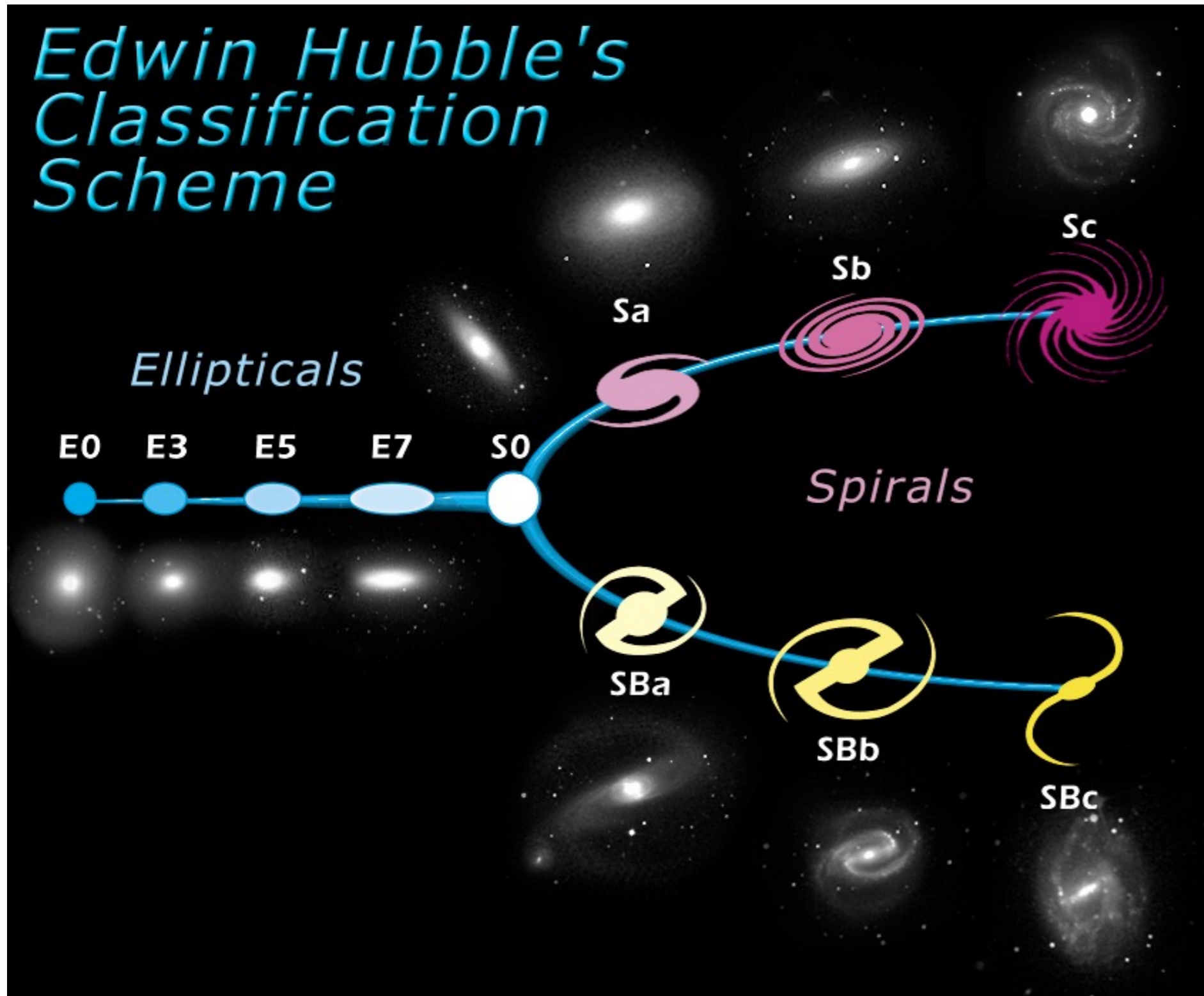
Um grande número de parâmetros é necessário para caracterizar uma dada galáxia:

- Morfologia
- Redshift
- Luminosidade e massa estelar (de  $1E3 L_{\text{sun}}$  (Willman I, 2007) a  $\sim 1E12 L_{\text{sun}}$ )
- Cor (reflete população estelar)
- Tamanho e brilho superficial (como definir o "tamanho" de uma galáxia?)

- Fração da massa de gás frio (relacionado a formação estelar)
- Ambiente
- Atividade Nuclear

Vários desses parâmetros estão relacionados uns com os outros e uma boa teoria de formação de galáxias deve ser capaz de reproduzir essas relações

# Classificação morfológica de galáxias



Esquema de classificação proposto por Hubble em 1936.

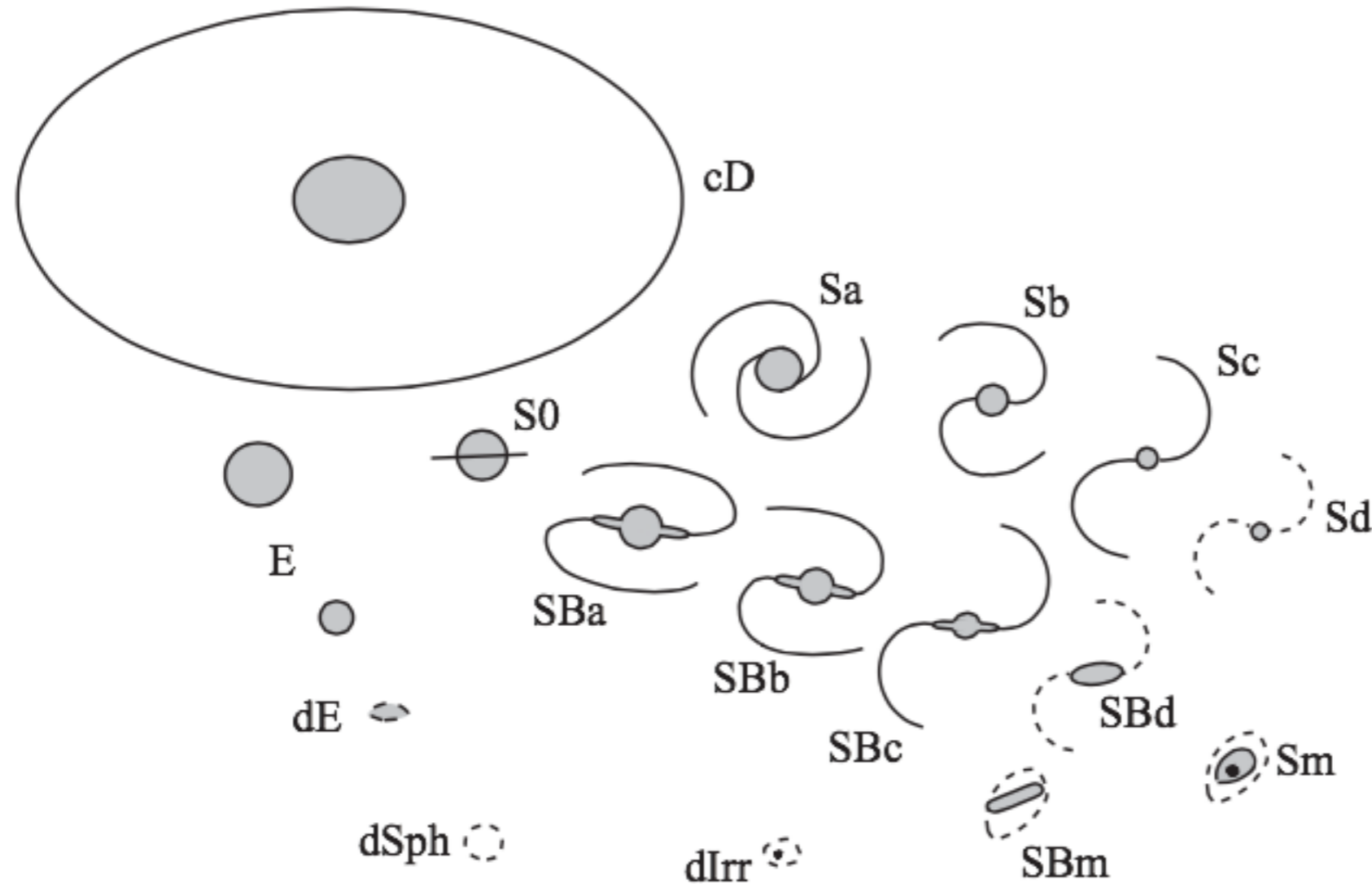
Originalmente acreditava-se que era uma escala evolutiva.

Galáxias que não se encaixavam nesse esquema eram classificadas genericamente como irregulares.

A maioria das galáxias é uma combinação de disco e esferóide.



# Classificação morfológica de galáxias

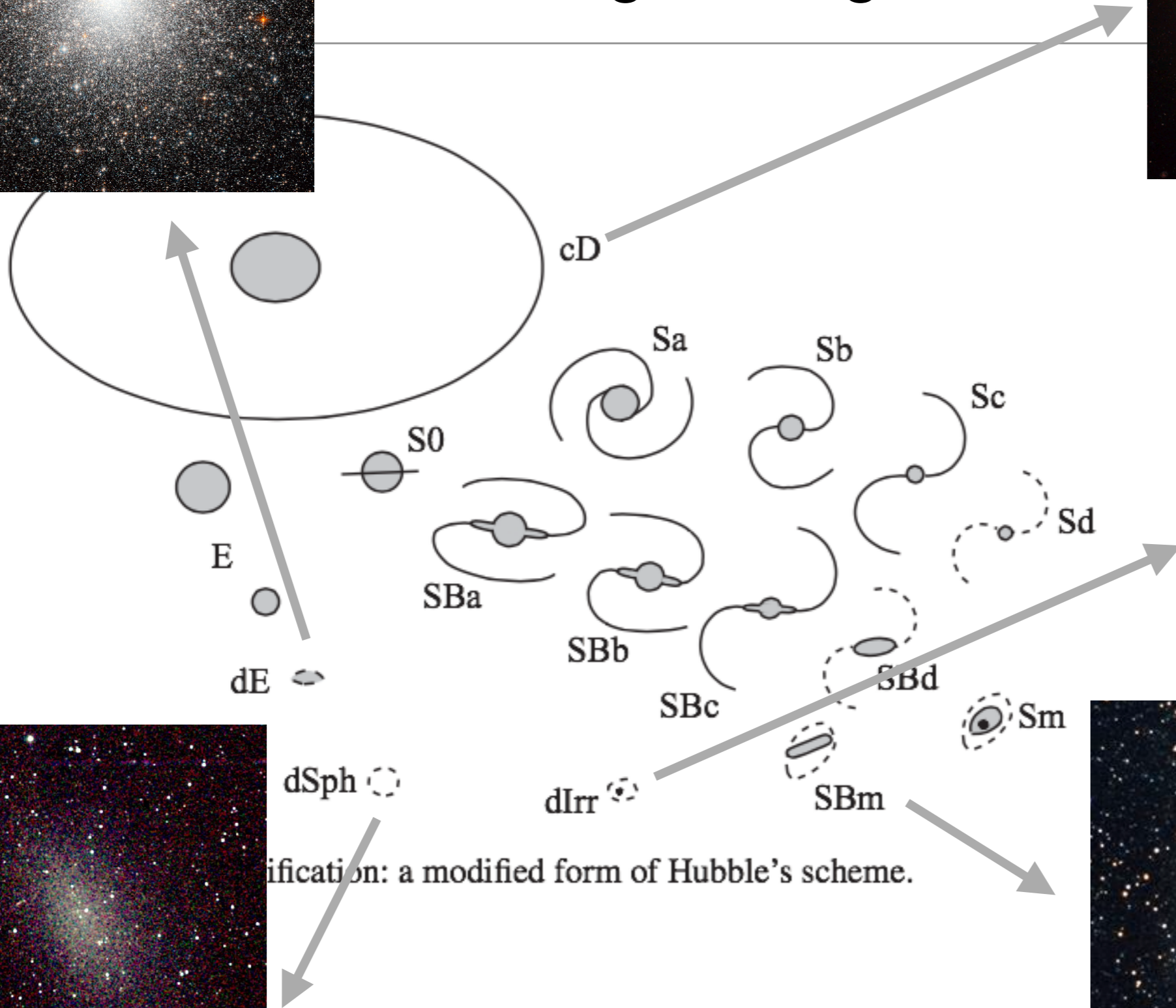


Quais tipos de galáxias indicados aqui são diferentes dos existentes no esquema de Hubble ?

Quais você reconhece?

**Fig. 1.11.** Galaxy classification: a modified form of Hubble's scheme.

# Esquema morfológica de galáxias



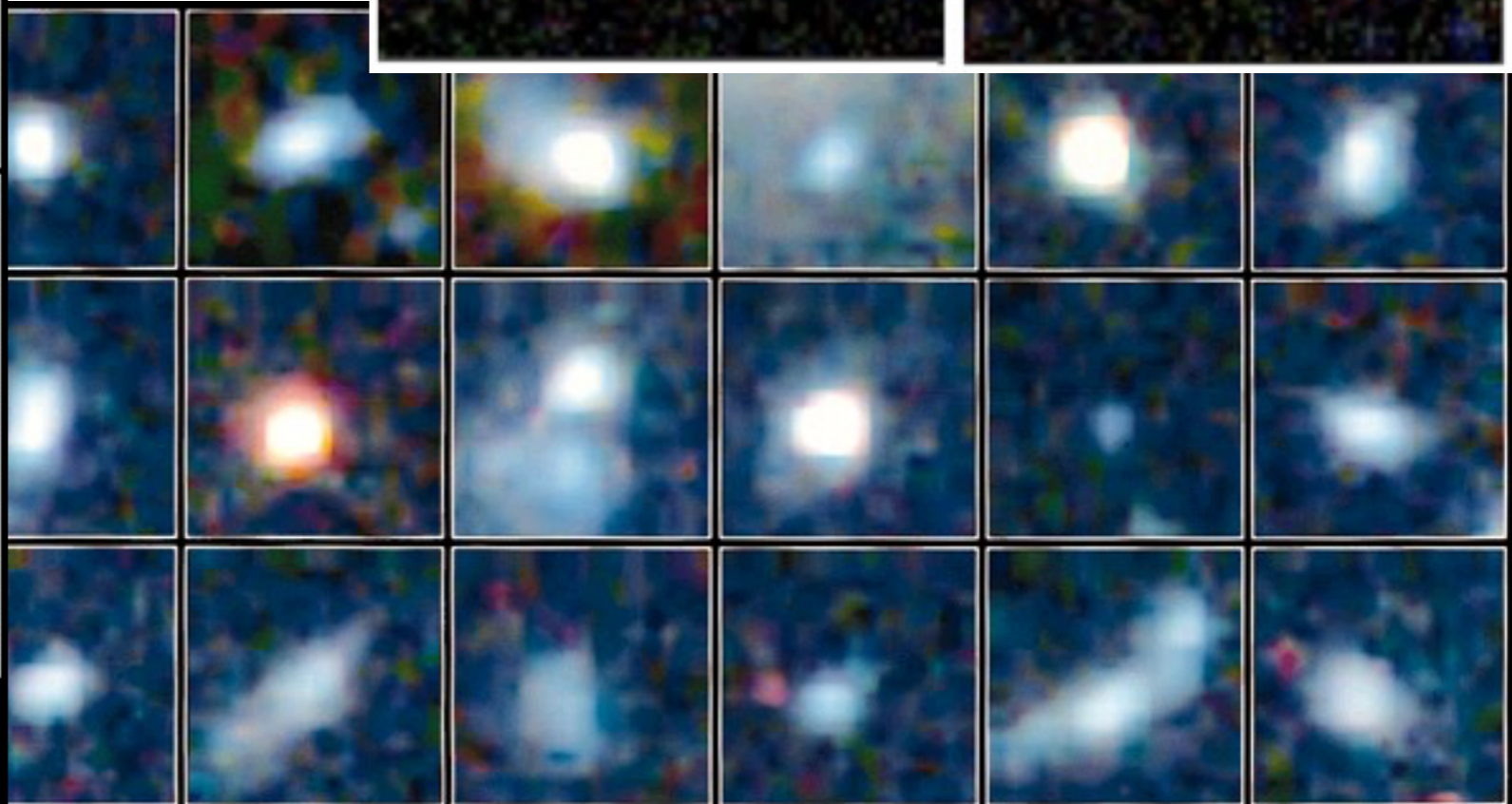
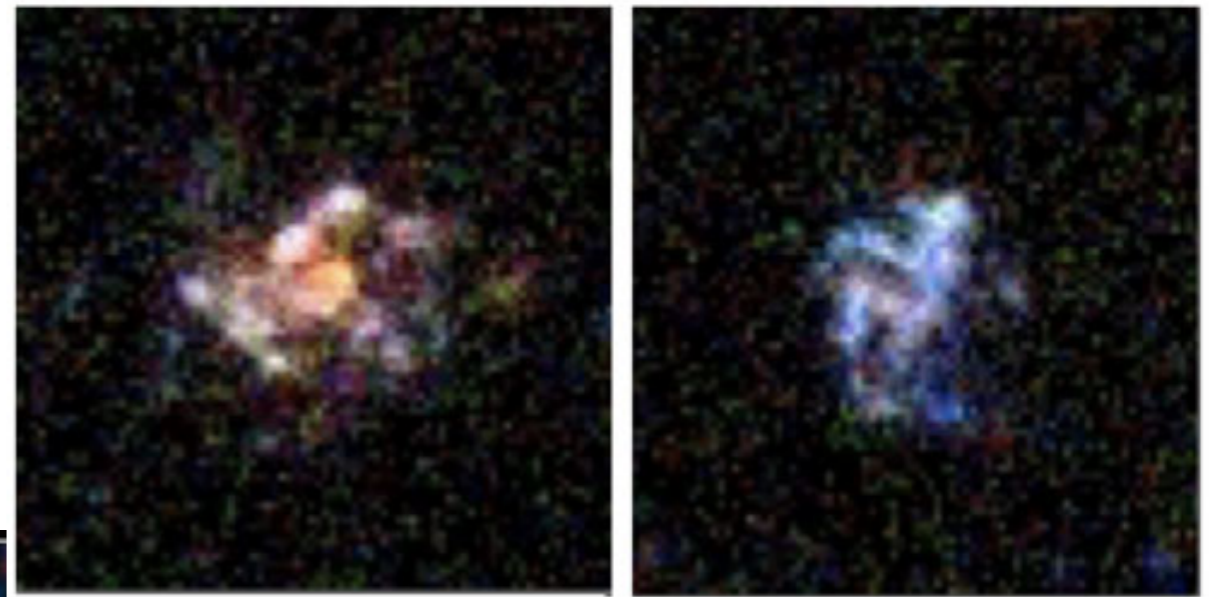
Classification: a modified form of Hubble's scheme.





# Morfologia longe do Universo local?

---

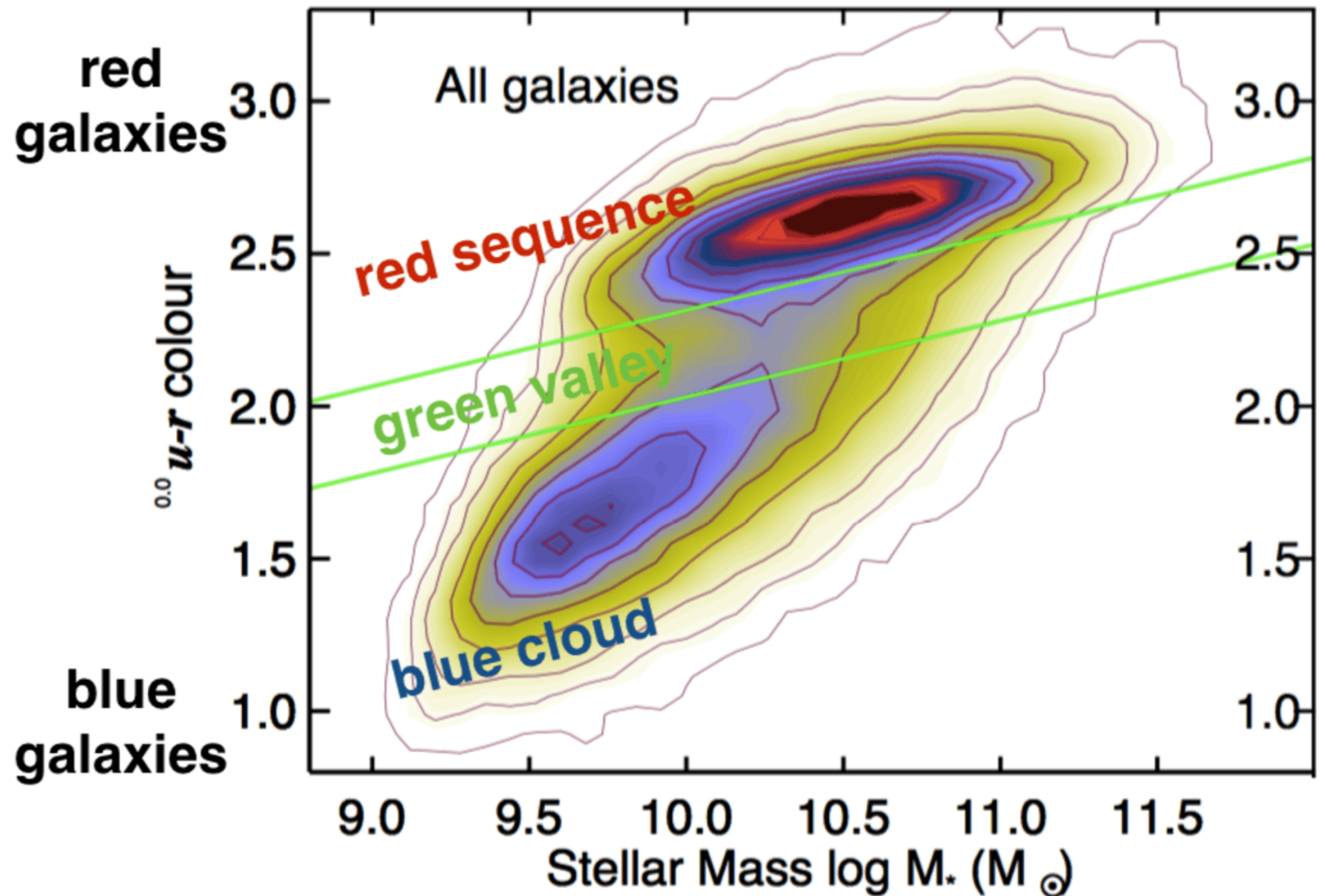


**Medium Deep Survey**

**HST · WFPC2**

PRC94-39b · ST ScI OPO · R. Griffiths (JHU), NASA

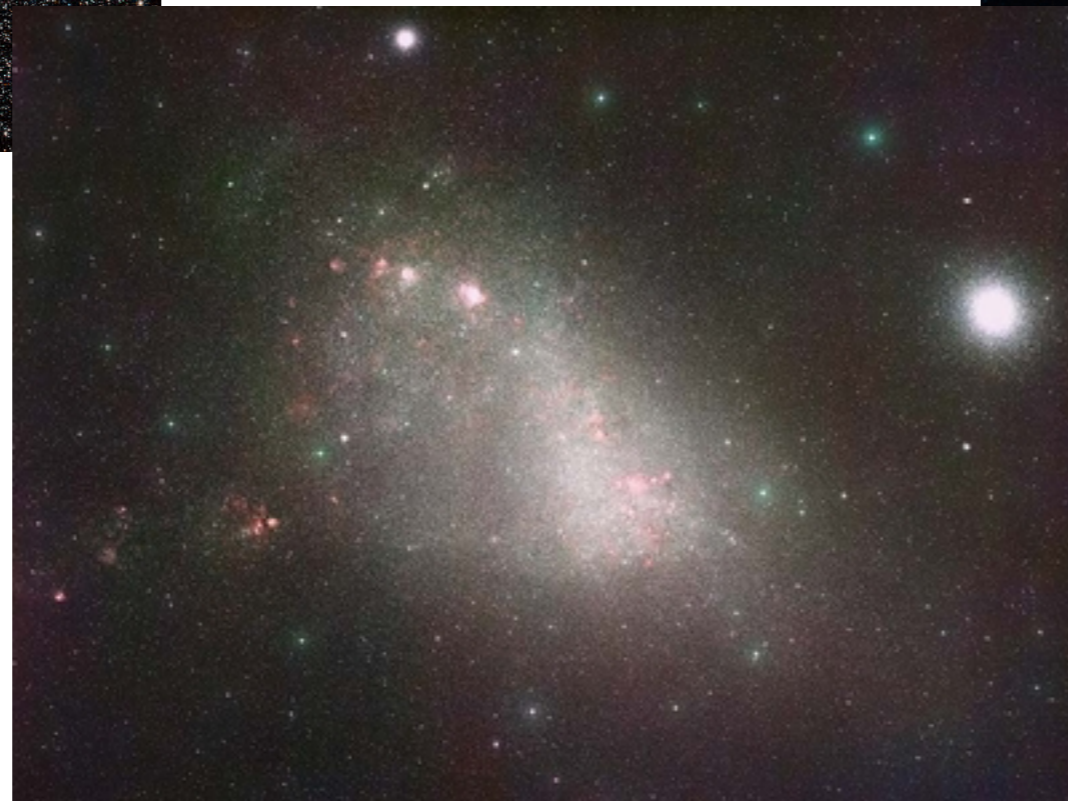
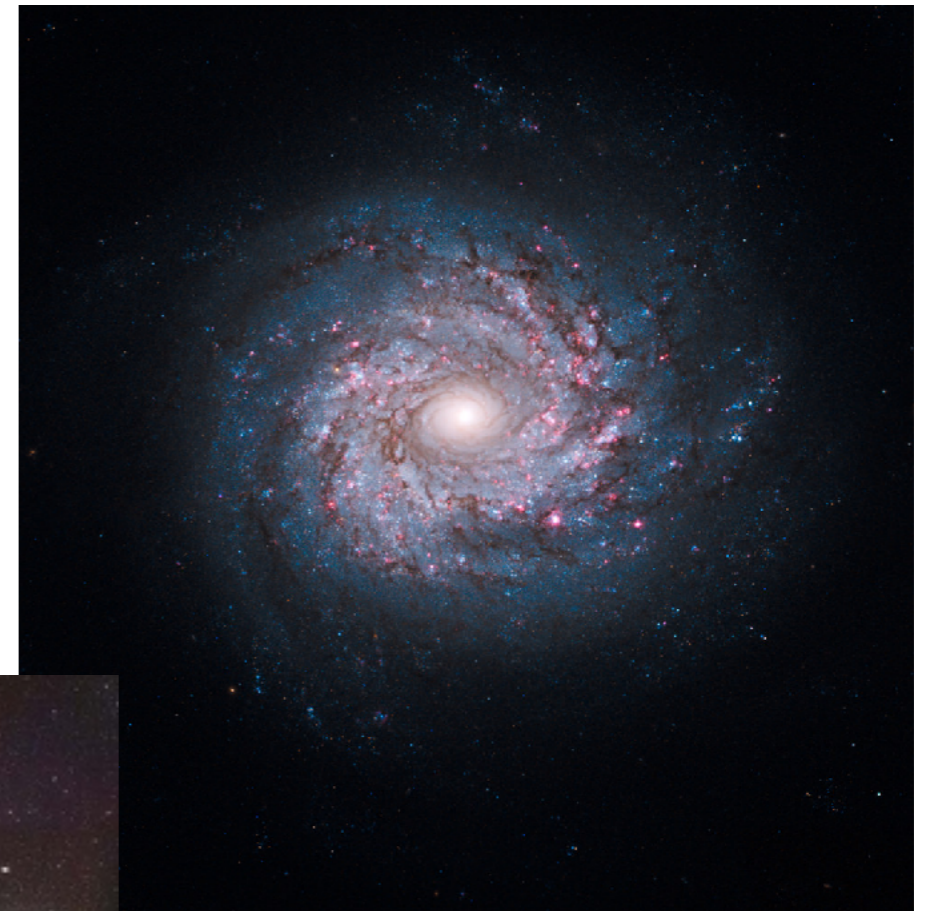
# Diagrama cor-magnitude de galáxias



Onde você acha que a Via Láctea e Andrômeda se situam?

# Fotometria de galáxias: qual o tamanho da galáxia? Como determinar magnitude?

---



# Fotometria de galáxias - Brilho superficial

---

- **Brilho superficial** de uma galáxia  $I(x)$  é a quantidade de luz por segundo de arco quadrado em um ponto em particular  $x$  na imagem.
- Considere uma pequena região quadrada no céu  $D$  em uma galáxia que está a uma distância  $d$ , de modo que é vista sob um ângulo no céu.

$$\alpha = D/d$$

- Sendo  $L$  a luminosidade integrada de todas as estrelas nessa região, seu brilho aparente  $F$  é dado por

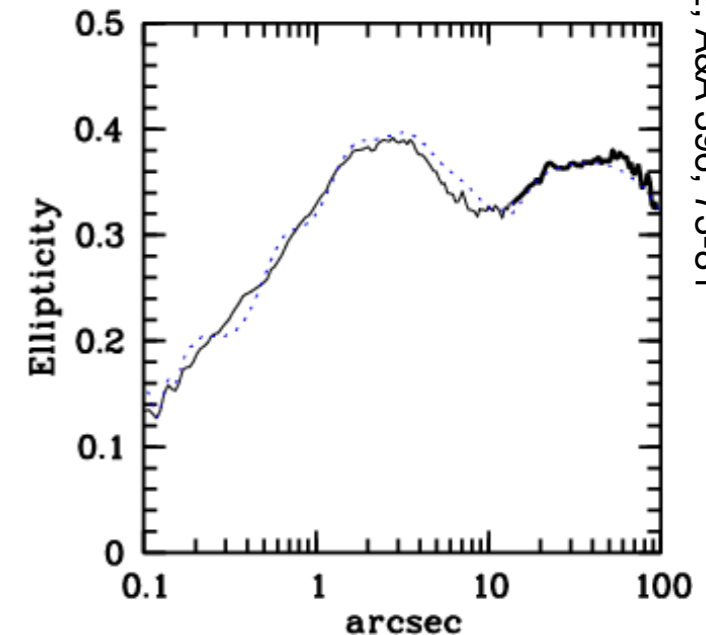
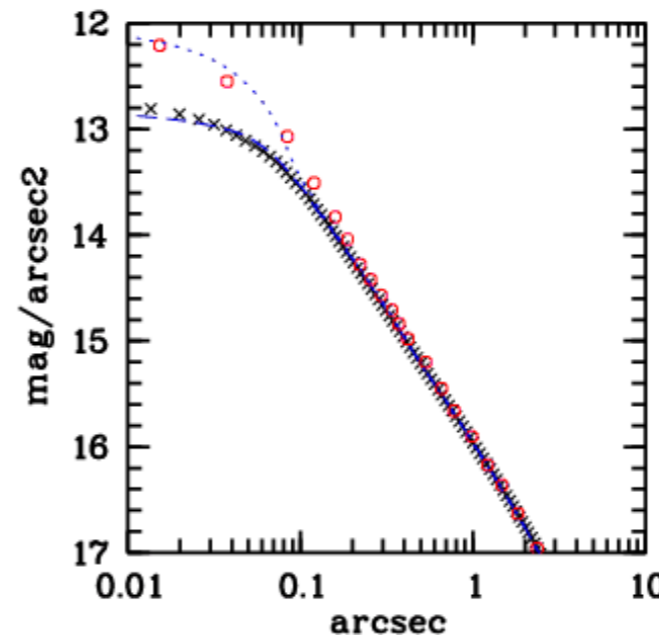
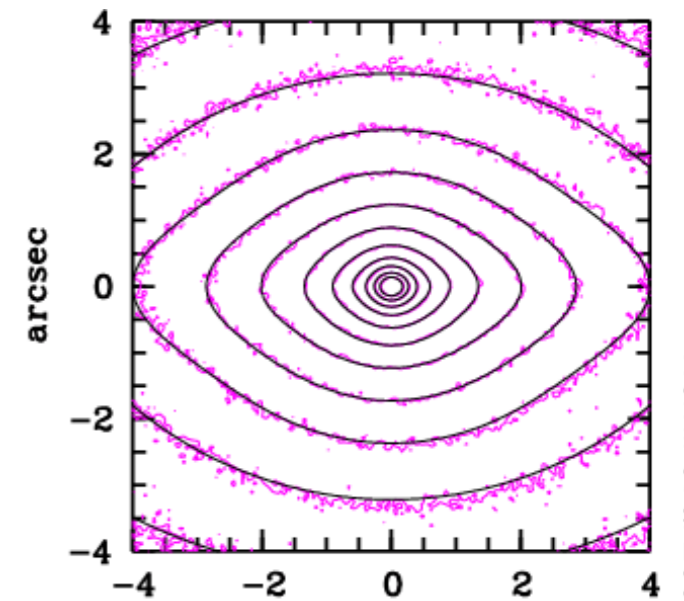
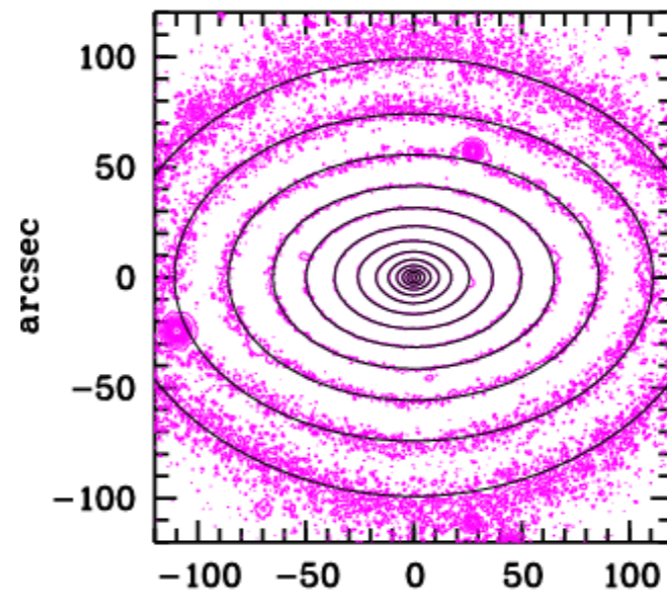
$$F = \frac{L}{4\pi d^2}. \quad (1.1)$$

- Segue-se que o brilho superficial é

$$I(\mathbf{x}) \equiv \frac{F}{\alpha^2} = \frac{L/(4\pi d^2)}{D^2/d^2} = \frac{L}{4\pi D^2}. \quad (1.23)$$

# Fotometria de galáxias - Isofotas

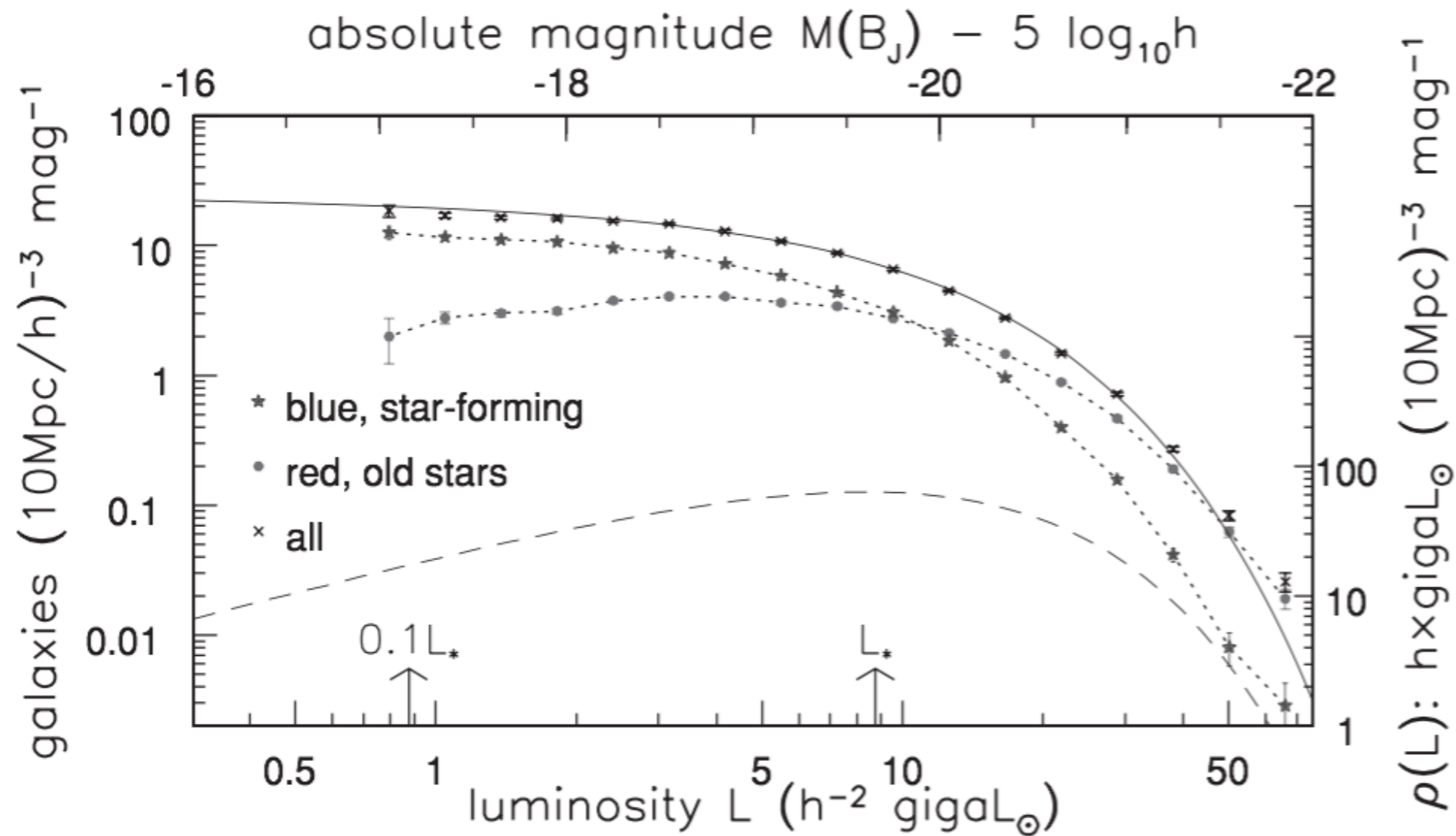
- $I$  é geralmente dado em  $\text{mag arcsec}^{-2}$  ou  $L_{\odot} \text{pc}^{-2}$
- Note que  $I$  não depende da distância  $d$ , a menos que a distância seja tão grande que a expansão do Universo cause um efeito reduzindo  $I(x)$
- Contornos de brilho superficial constante em uma imagem de galáxia são chamados de **isofotas**
- Geralmente medimos o brilho superficial em uma banda fotométrica em particular, como no caso de fotometria estelar
- Uma escolha popular é a isofota de magnitude 25 na banda  $B$ ,  $R_{25}$
- Para medir a luminosidade total da galáxia, medimos como  $I$  cai com o raio e extrapolamos para calcular  $L$  total



Função de luminosidade de galáxias

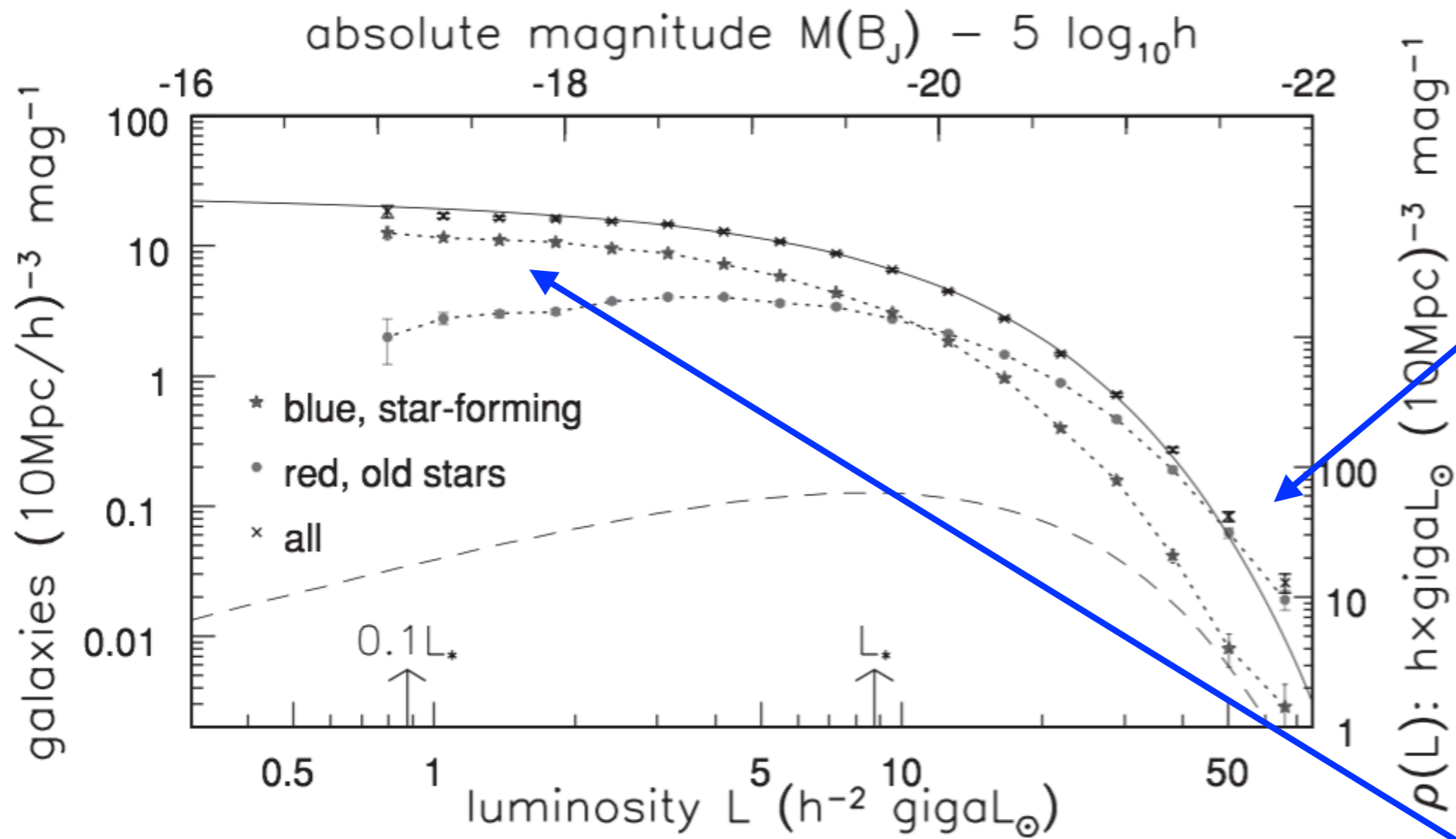
# Função de luminosidade para galáxias

Uma importante estatística da população de galáxias



**Fig. 1.16.** Number of galaxies per 10 Mpc cube between absolute magnitude  $M(B_J)$  and  $M(B_J) + 1$  (crosses). Dotted lines show numbers of blue (stars) and red (filled dots) galaxies making up this total; vertical bars indicate errors. The solid line shows the luminosity function of Equation 1.24; the dashed line gives  $\Phi(M) \times L/L_{\star}$ , the light from galaxies in each interval of absolute magnitude. The blue bandpass  $B_J$  is matched to the photographic plates used to select the galaxies – 2dF survey, D. Croton.

# Função de luminosidade para galáxias



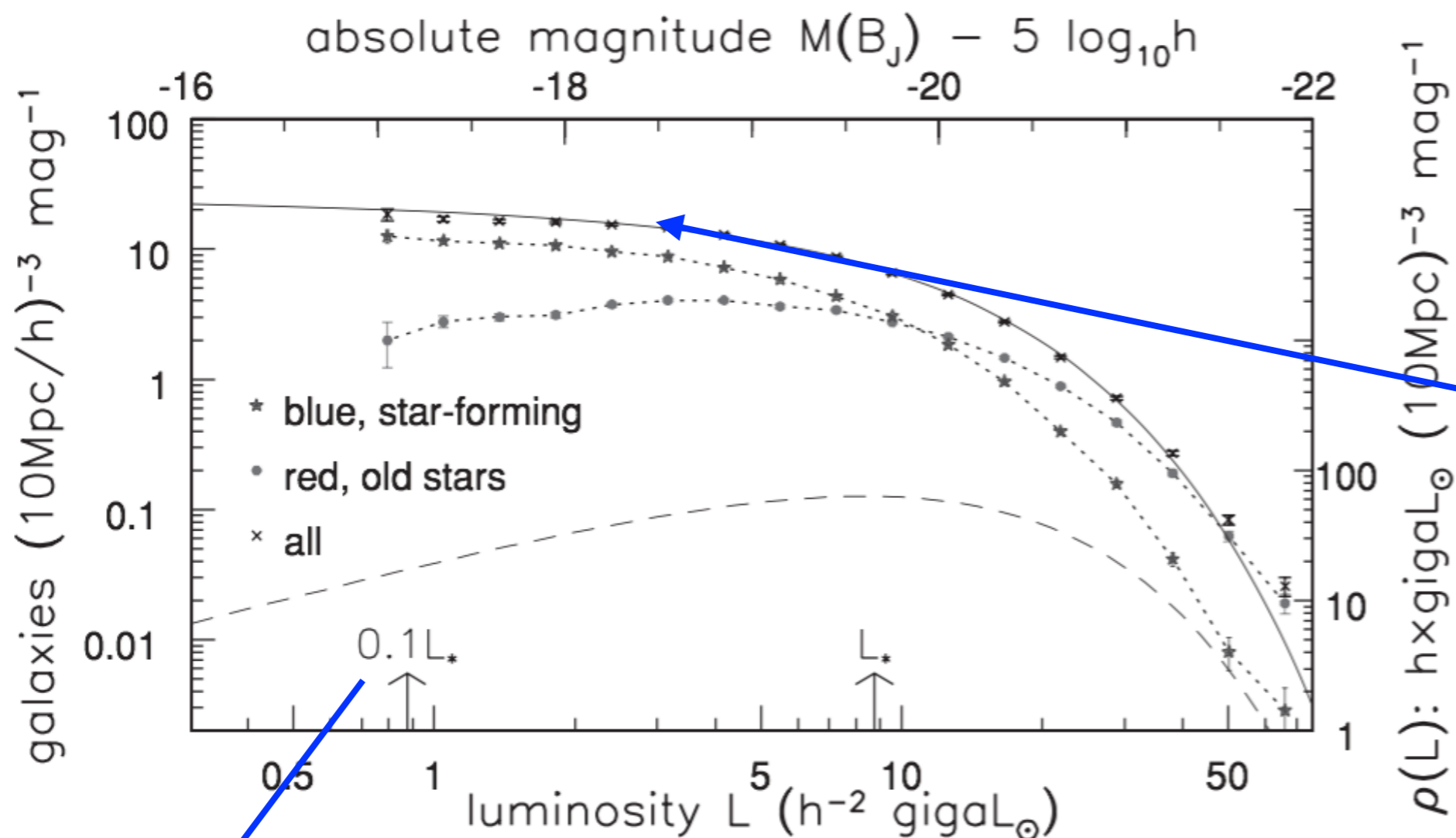
Note que a maior parte de galáxias muito luminosas é vermelha (elípticas e S0), que contém ~ metade da massa em estrelas

Mas as espirais e irregulares serem muito mais numerosas

**Fig. 1.16.** Number of galaxies per 10 Mpc cube between absolute magnitude  $M(B_J)$  and  $M(B_J) + 1$  (crosses). Dotted lines show numbers of blue (stars) and red (filled dots) galaxies making up this total; vertical bars indicate errors. The solid line shows the luminosity function of Equation 1.24; the dashed line gives  $\Phi(M) \times L/L_*$ , the light from galaxies in each interval of absolute magnitude. The blue bandpass  $B_J$  is matched to the photographic plates used to select the galaxies – 2dF survey, D. Croton.



# Função de luminosidade para galáxias



Número de galáxias esperado pela função de Schechter, número de galáxias por  $\text{Mpc}^3$  com luminosidade entre  $L$  e  $L+\Delta L$

Separação típica entre galáxias “brilhantes” ou “gigantes”, em oposição às galáxias “anãs”

$$\Phi(L)\Delta L = n_{\star} \left( \frac{L}{L_{\star}} \right)^{\alpha} \exp\left( -\frac{L}{L_{\star}} \right) \frac{\Delta L}{L_{\star}};$$

# Função de Schechter

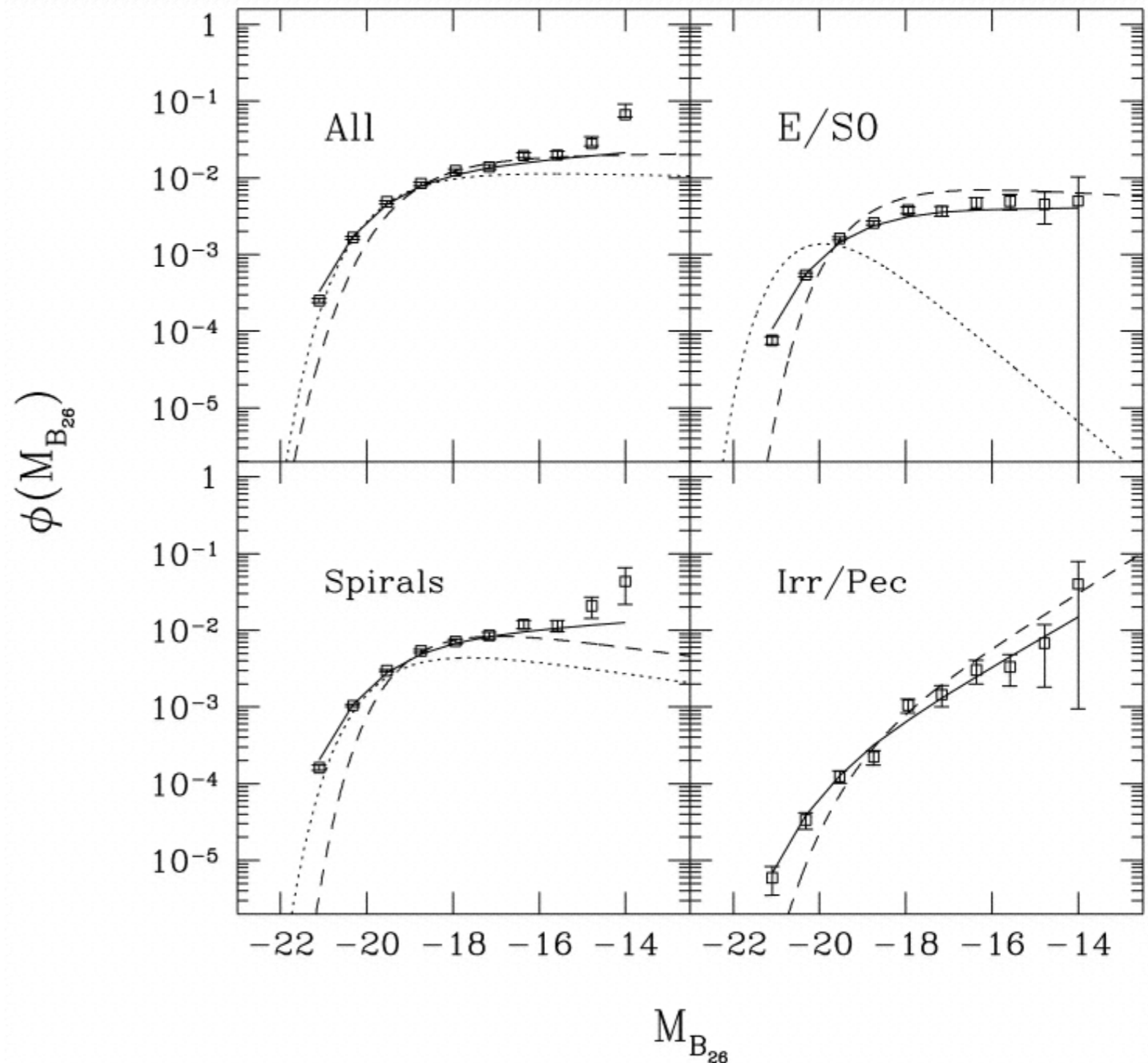
---

- Em 1974 Press e Schechter calcularam a distribuição de condensações gravitacionais que emergiam de um universo jovem.
- Em 1976, Schechter usou essa função para ajustar a distribuição de luminosidade das galáxias nos aglomerados de Abell.
- Os parâmetros livres  $n^*$  (cte de normalização),  $\alpha$  (domina a função de luminosidade de galáxias anãs) e  $L^*$  (luminosidade característica onde ocorre a “quebra” da função) variam com tipo morfológico e redshift.
- A função de Schechter superestima o número de galáxias muito fracas e também o de galáxias muito brilhantes, o que levou ao desenvolvimento dos estudos de *feedback* em galáxias

$$\Phi(L)\Delta L = n_{\star} \left(\frac{L}{L_{\star}}\right)^{\alpha} \exp\left(-\frac{L}{L_{\star}}\right)\frac{\Delta L}{L_{\star}};$$

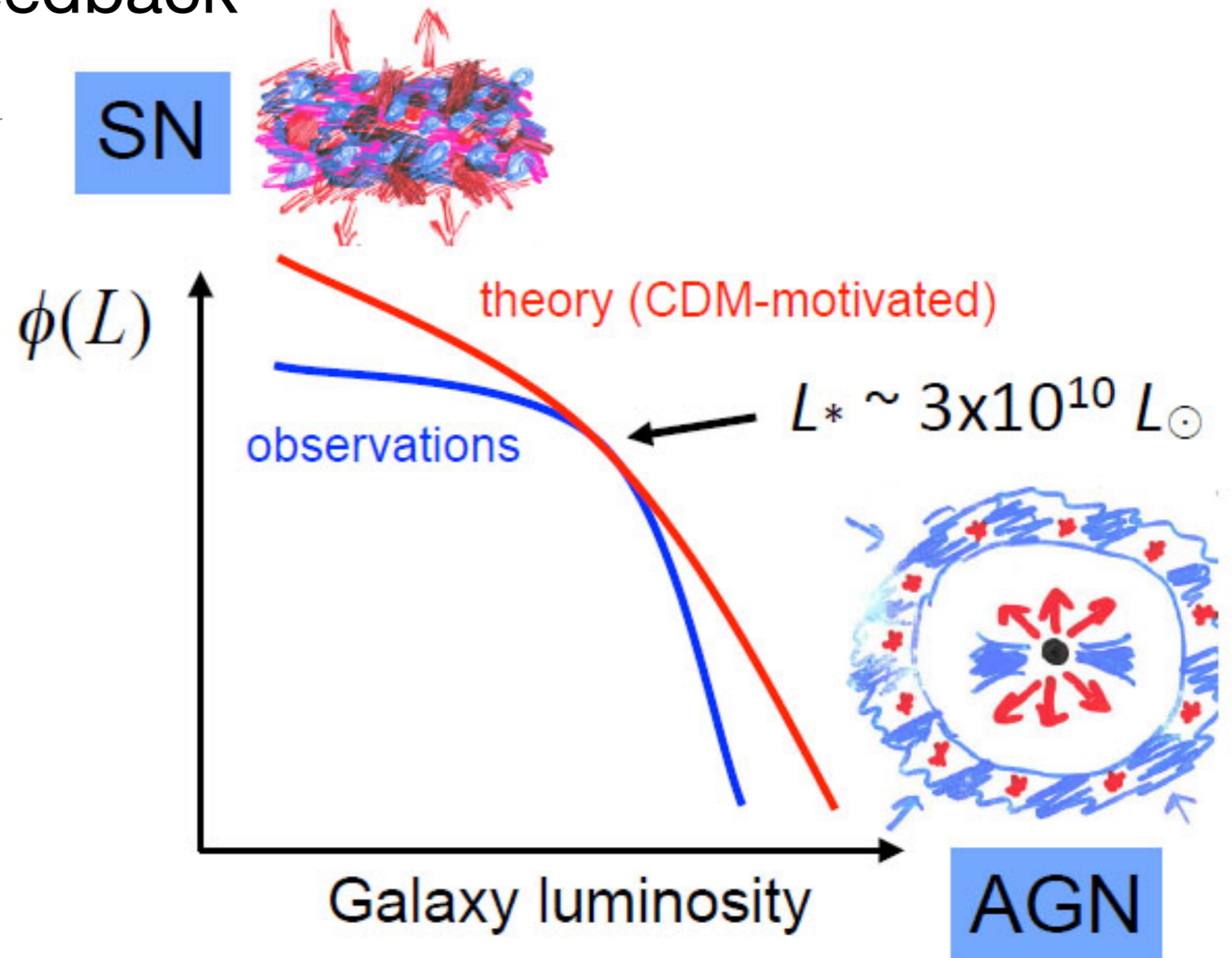
# Propriedades estatísticas da população de galáxias

Modelos de evolução precisam ser capazes de explicar as propriedades estatísticas das populações de galáxias



# Processos de feedback

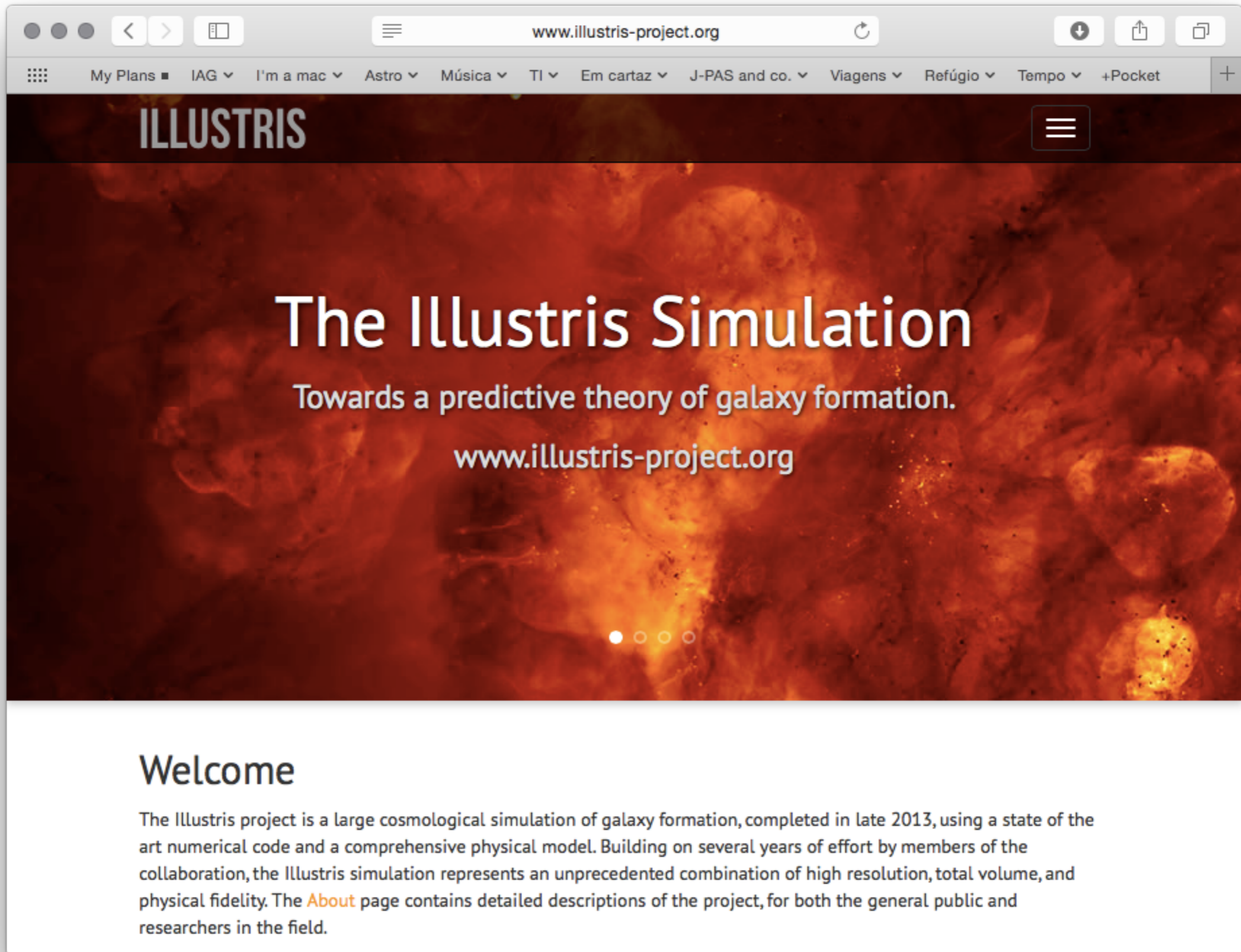
Modelos de evolução precisam ser capazes de explicar as propriedades estatísticas das populações de galáxias



**Figure 10.** The expected (red line) and observed (blue line) galaxy luminosity function. The discrepancies in the low- and high-mass ends is probably due to SN and AGN feedback, respectively. Figure from [49].

# Elementos básicos da formação e evolução de galáxias

Qual o paradigma hoje sobre a formação  
dos diversos tipos de galáxias?



ILLUSTRIS

# The Illustris Simulation

Towards a predictive theory of galaxy formation.

[www.illustris-project.org](http://www.illustris-project.org)

## Welcome

The Illustris project is a large cosmological simulation of galaxy formation, completed in late 2013, using a state of the art numerical code and a comprehensive physical model. Building on several years of effort by members of the collaboration, the Illustris simulation represents an unprecedented combination of high resolution, total volume, and physical fidelity. The [About](#) page contains detailed descriptions of the project, for both the general public and researchers in the field.

# Elementos básicos da formação e evolução de galáxias

---

- **Modelo padrão da cosmologia:**  $\Lambda$ CDM, universo plano, ~ 75% da densidade de energia devido a uma constante cosmológica, ~21% em matéria escura fria, ~4% matéria bariônica
- **Condições iniciais:** perturbações de densidade provindas de flutuações quânticas são as responsáveis pela formação das estruturas que observamos hoje; não é ainda possível prever essas flutuações a partir de “first principles”: conjunto de parâmetros é escolhido para reproduzir observações, e.g., radiação cósmica de fundo
- **Instabilidades gravitacionais e formação de estruturas:** resultam nos halos de matéria escura, que tem um papel vital nas teorias modernas de formação de galáxias

# Elementos básicos da formação e evolução de galáxias

---

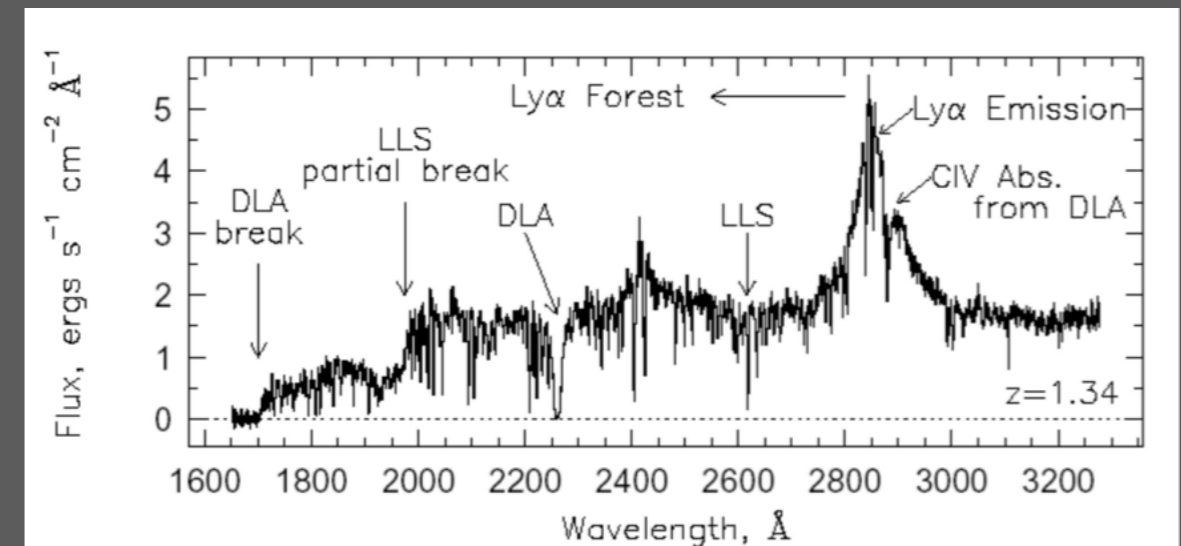
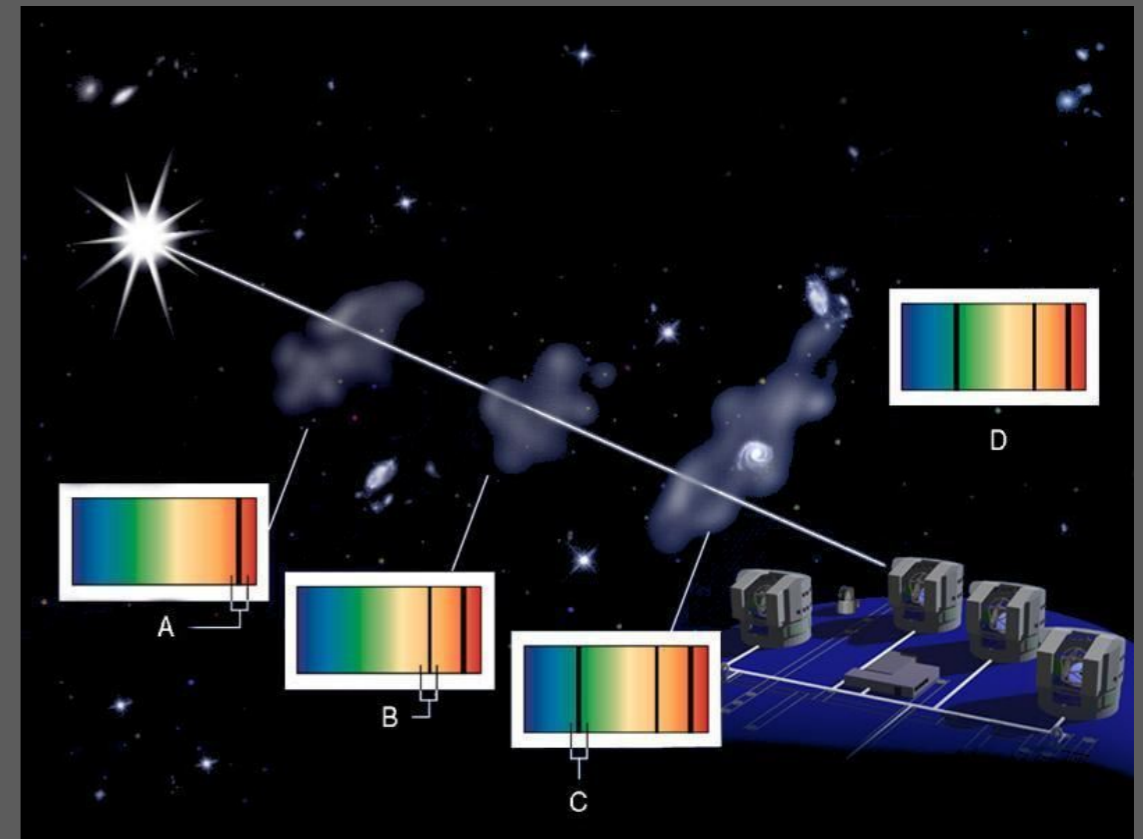
## MATÉRIA BARIÔNICA

- **Resfriamento do gás:** o efeito final do resfriamento é segregar a matéria bariônica da matéria escura, acumulando gás denso e frio em uma proto-galáxia, no centro do halo de matéria escura
- **Formação Estelar:** na presença de resfriamento, o gás colapsa e pode fragmentar em regiões de alta densidade que formarão estrelas, dando forma a uma galáxia como visualizamos.
- **Processos de feedback:** para reproduzir observações, foi necessário incluir nas simulações processos que previnem o gás de se resfriar muito rapidamente, ou que reaquecem o gás.
- **Meio Intergaláctico:** material bariônico que reside entre galáxias; é o componente bariônico dominante do Universo, e de onde as galáxias são formadas.



# Meio intergaláctico

- IGM é o material bariônico que reside entre galáxias
- é o componente bariônico dominante do Universo, e de onde as galáxias são formadas
- pode nos indicar as propriedades do material “pré-galáctico”
- mas também interage com a evolução das galáxias através de inflows e outflows
- é observado principalmente através do espectro de absorção de quasares



# Síntese de populações estelares

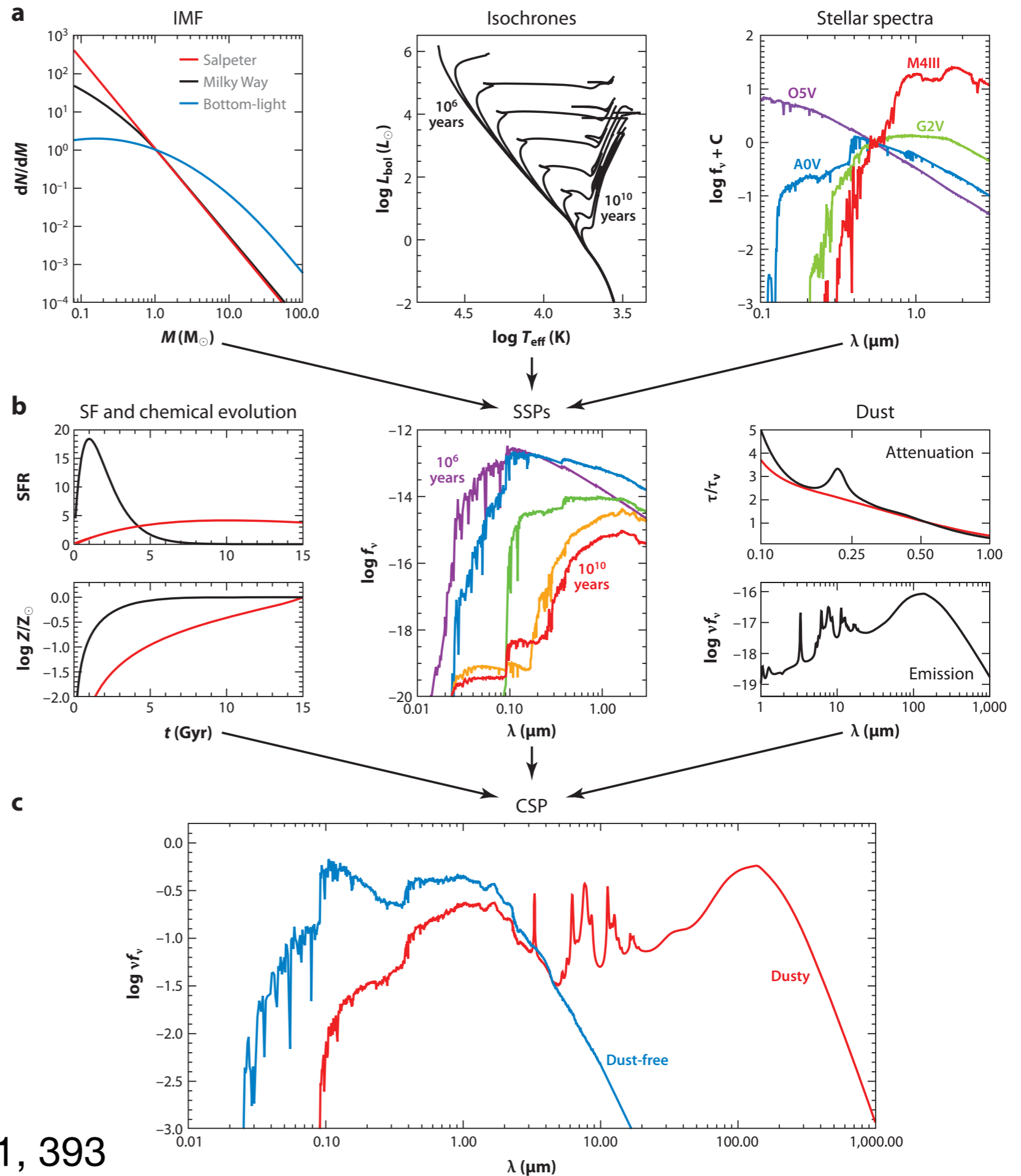


Fig. 1 em Conroy 2013, A&ARA 51, 393

# Elementos básicos da formação e evolução de galáxias

---

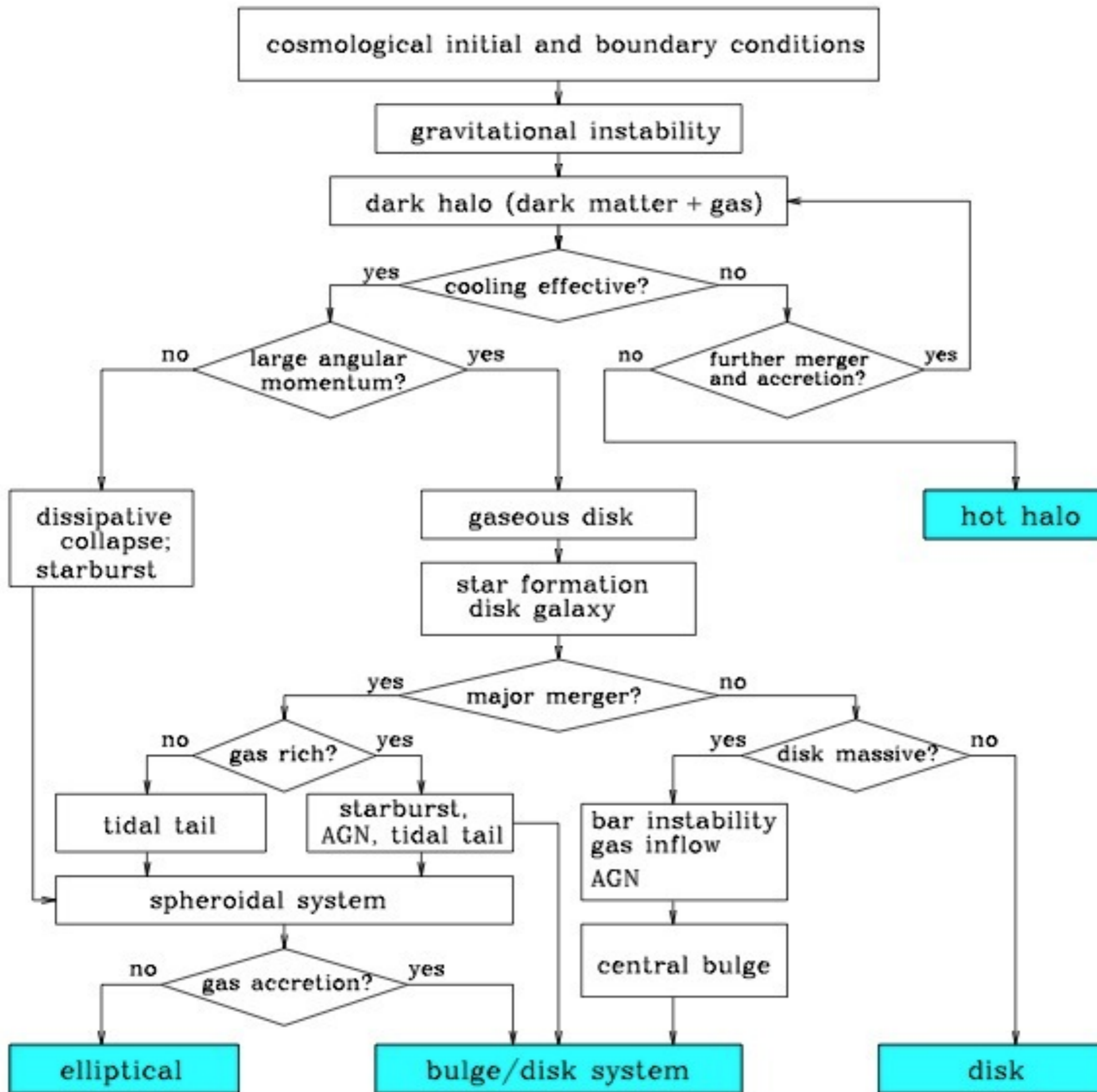
## ESTRELAS

- **Evolução Química:** primordial, estelar e cosmogênica; quando as estrelas perdem massa (ventos estelares, explosões em supernova), liberam no meio interestelar parte do material processado no seu interior, enriquecendo o meio interestelar; tem impacto nos observáveis (espectros, cores, luminosidades) de populações estelares, na taxa de resfriamento de gás, produzem a poeira do meio interestelar.
- **Síntese de Populações Estelares:** a luz emitida de galáxias é dominada pela somatória das estrelas que a compõem; SPE modela a evolução temporal das SED de galáxias e permite a interpretação das observações; fortemente baseada nas teorias de evolução estelar; a SED de uma galáxia é dominada por estrelas no UV e Visível e por poeira no IV; outras fontes de radiação como AGN podem ter que ser incluídas.

# Elementos básicos da formação e evolução de galáxias

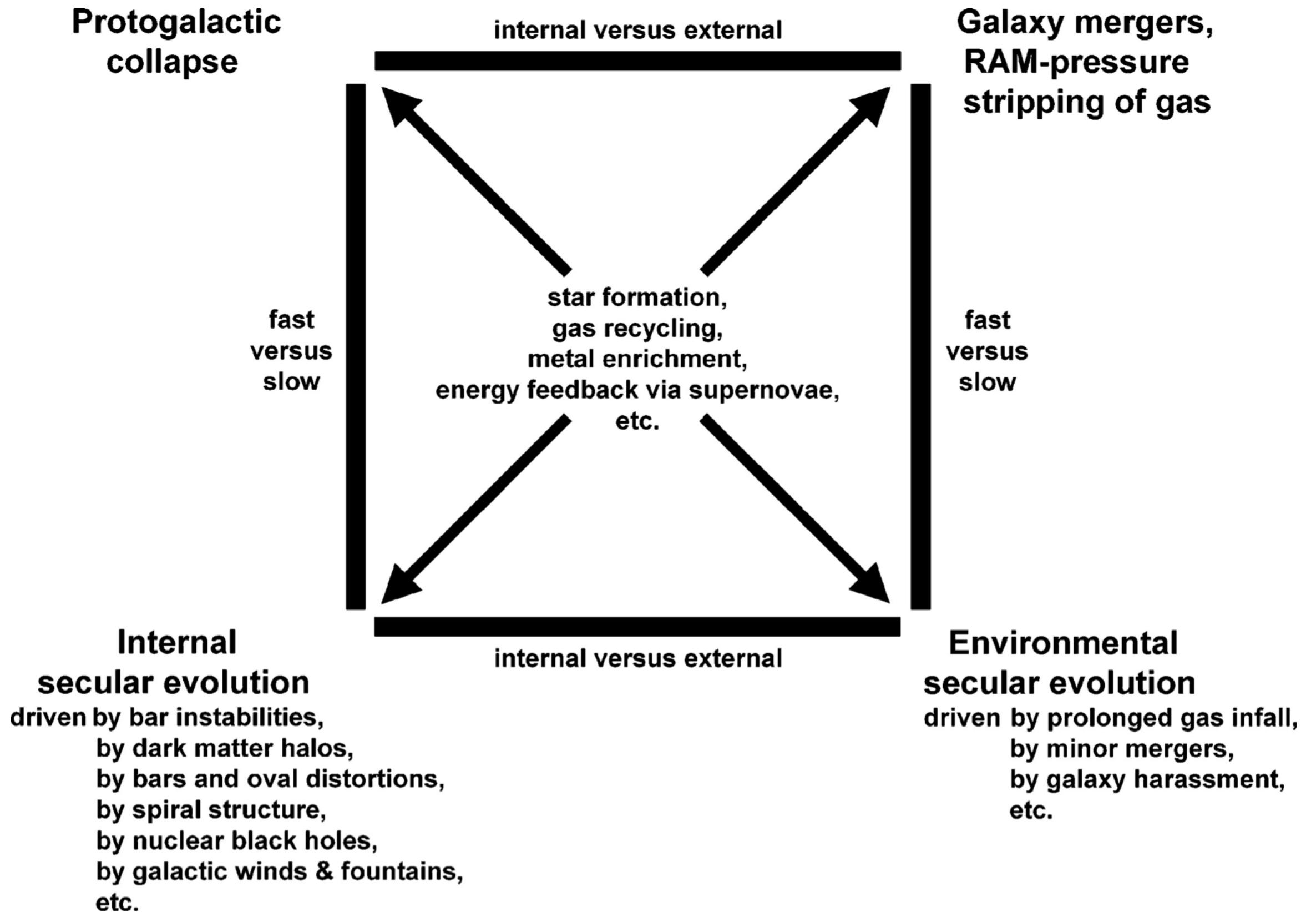
---

- **Mergers:** no paradigma cosmológico atual, halos de matéria escura crescem hierarquicamente (cenário “bottom up”); mergers tem um papel importante na evolução da morfologia
- **Evolução Dinâmica:** acredita-se que processos dinâmicos tenham um papel importante em determinar a evolução de galáxias dentro de um cluster e podem explicar a dependência da morfologia das galáxias com o ambiente; processos dinâmicos internos à galáxia também podem determinar sua morfologia, exemplo, as instabilidades causadas por uma barra em galáxias disco (evolução secular).

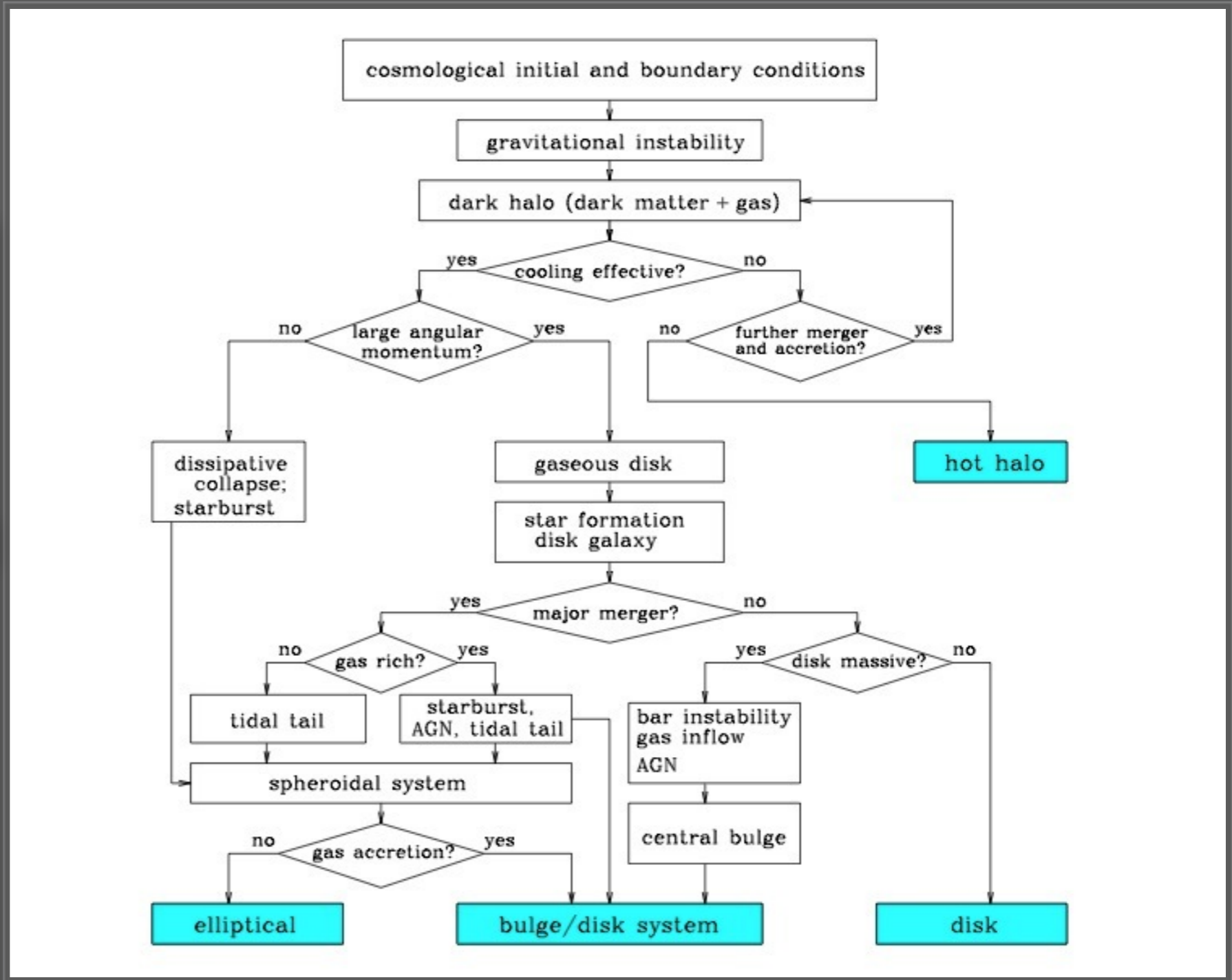
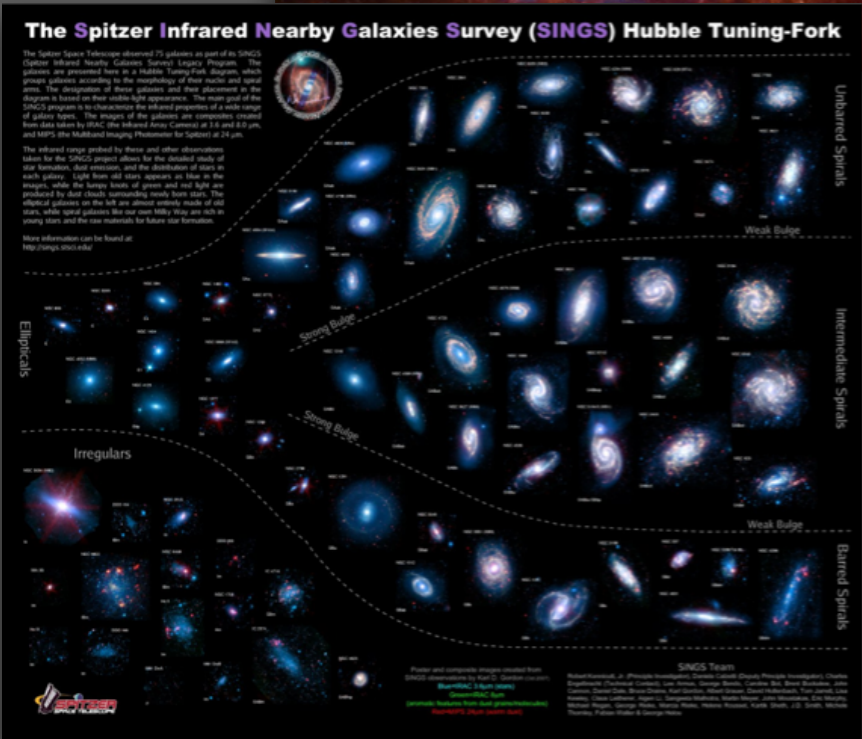
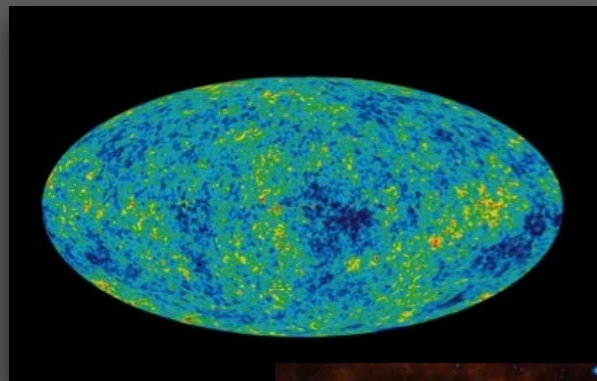


Um flow-chart de formação de galáxias. As condições iniciais são dadas pela cosmologia adotada. Os caminhos levando a formação das diversas galáxias são mostrados com os principais processos físicos envolvidos. Crédito: Fig. 1.1 em Mo, den Bosch, White

Reflete nossa atual, e certamente incompleta, visão de formação de galáxias



**Kormendy & Kennicutt (2004) Figure 1.** Morphological box of processes of galactic evolution. Processes are divided vertically into fast (*top*) and slow (*bottom*). Fast evolution happens on a free-fall ("dynamical") timescale,  $t_{\text{dyn}} \sim (G\rho)^{-1/2}$ , where  $\rho$  is the density of the object produced and  $G$  is the gravitational constant. Slow means many galaxy rotation periods. Processes are divided horizontally into ones that happen purely internally in one galaxy (*left*) and ones that are driven by environmental effects such as galaxy interactions (*right*). The processes at center are aspects of all types of galaxy evolution.



# Panorama geral da formação das galáxias

Um flow-chart de formação de galáxias. Os caminhos levando a formação das diversas galáxias são mostrados com os principais processos físicos envolvidos. Crédito: Mo, den Bosch, White

## Sobre modelos e simulações...

---

**“All models are wrong, but some models are useful”**

**George Box, estatístico**

**“A model cannot be better than its ingredients”**

**Gustavo Bruzual, astrofísico**