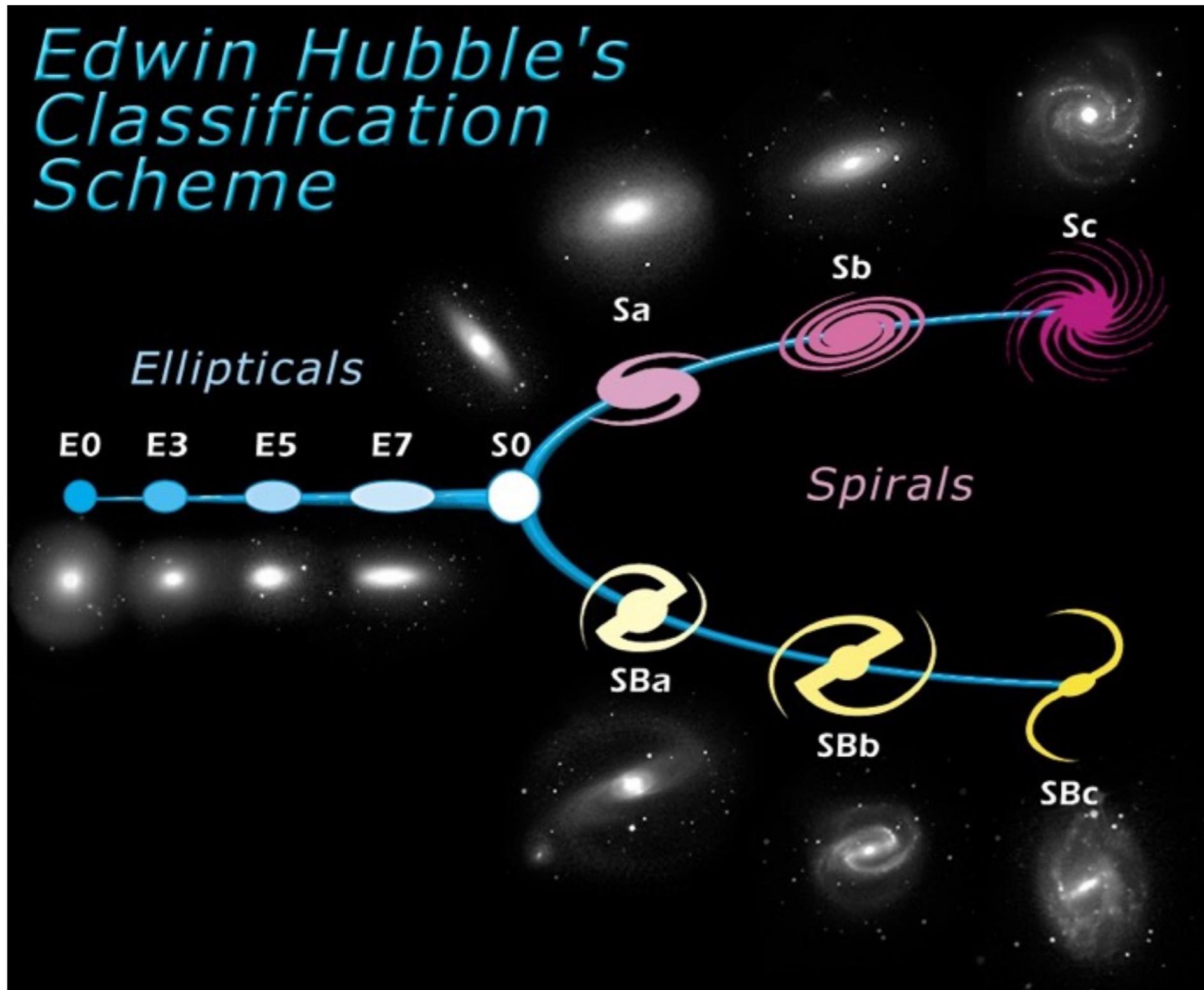


Outras galáxias, conceitos gerais

Capítulo 1.3 do livro-texto.

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.

Classificação morfológica de galáxias

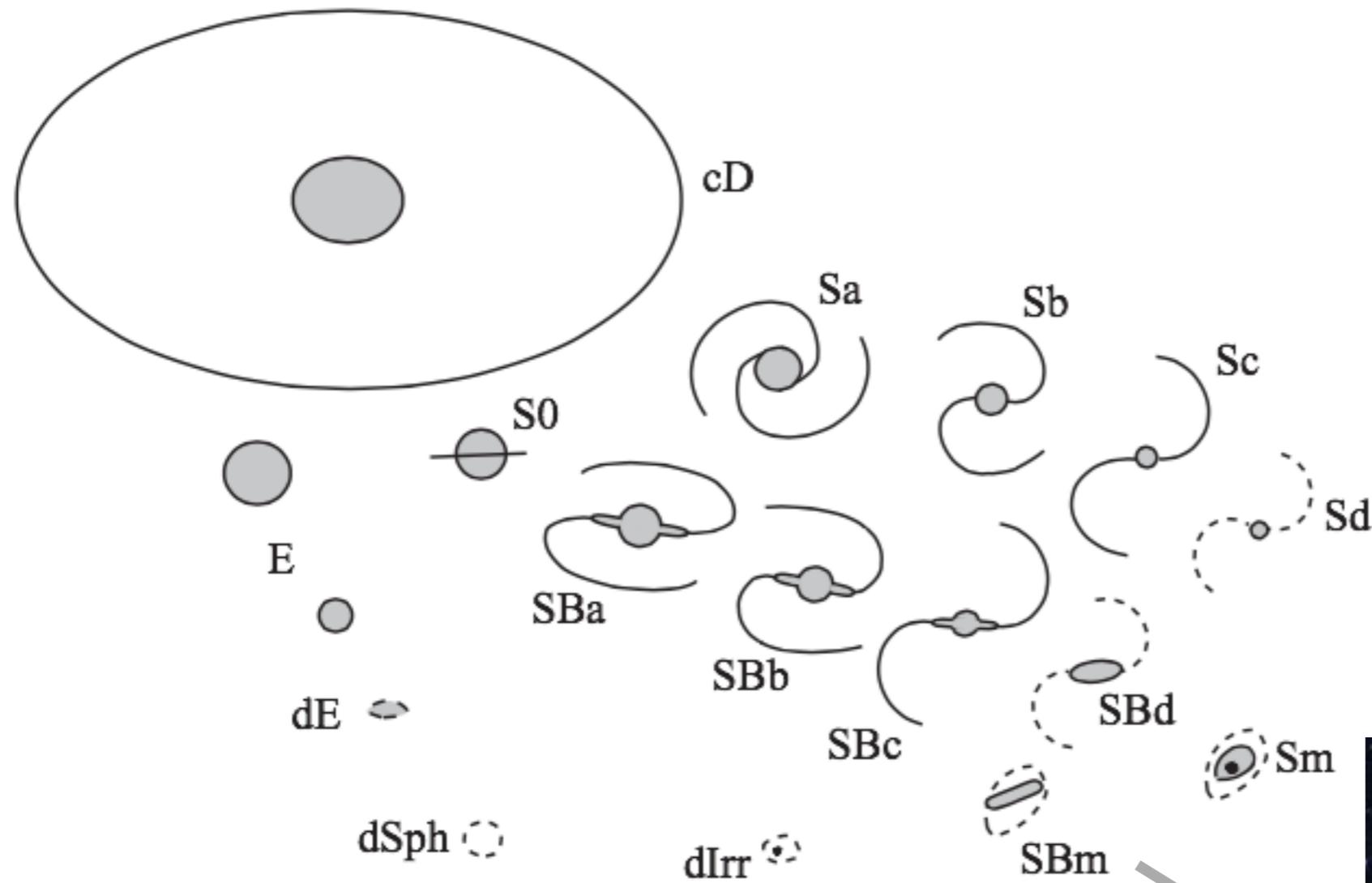


Fig. 1.11. Galaxy classification: a modified form of Hubble's scheme.



Fotometria de galáxias

- **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 $\alpha = D/d$ no céu.
- 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

- I é geralmente dado em 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 $I(x)$ (será discutido nas aulas de Estrutura em Larga Escala)
- 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 , denominada R_{25}
- Para medir a luminosidade total da galáxia, medimos como I cai com o raio e extrapolamos para calcular L total

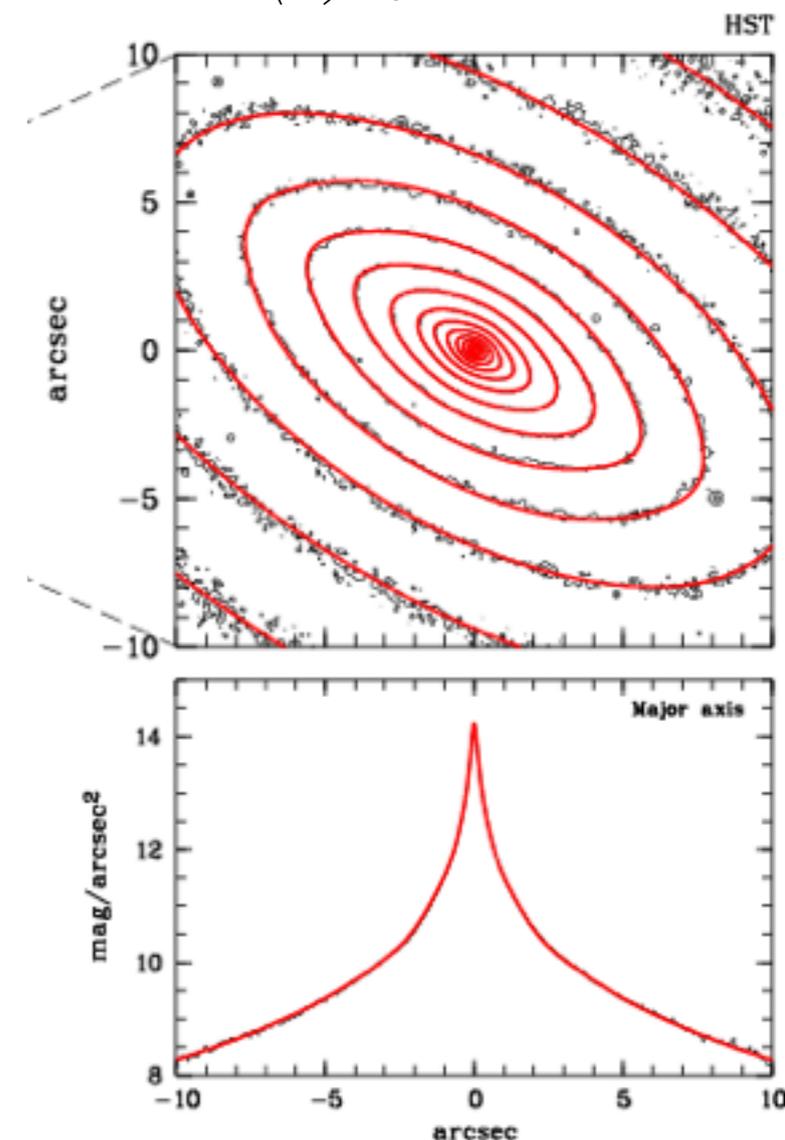


Table 1.9 Average sky brightness in ultraviolet, optical, and infrared wavebands

<i>Band</i>	<i>Wavelength</i>	<i>Full moon</i> (mag arcsec ⁻²)	<i>Dark sky</i> (mag arcsec ⁻²)	<i>From space</i> (mag arcsec ⁻²)
	1500 Å			25.0
	2000 Å			26.0
	2500 Å			25.6
<i>U</i>	3700 Å		22.0	23.2
<i>B</i>	4400 Å	19.4	22.7	23.4
<i>V</i>	5500 Å	19.7	21.8	22.7
<i>R</i>	6400 Å	19.9	20.9	22.2
<i>I</i>	8000 Å	19.2	19.9	22.2
<i>J</i>	1.2 μm	15.0	15.0	20.7
<i>H</i>	1.6 μm	13.7	13.7	20.9
<i>K</i>	2.2 μm	12.5	12.5	21.3
<i>K'</i>	2.2 μm	13.7	13.7	21.3

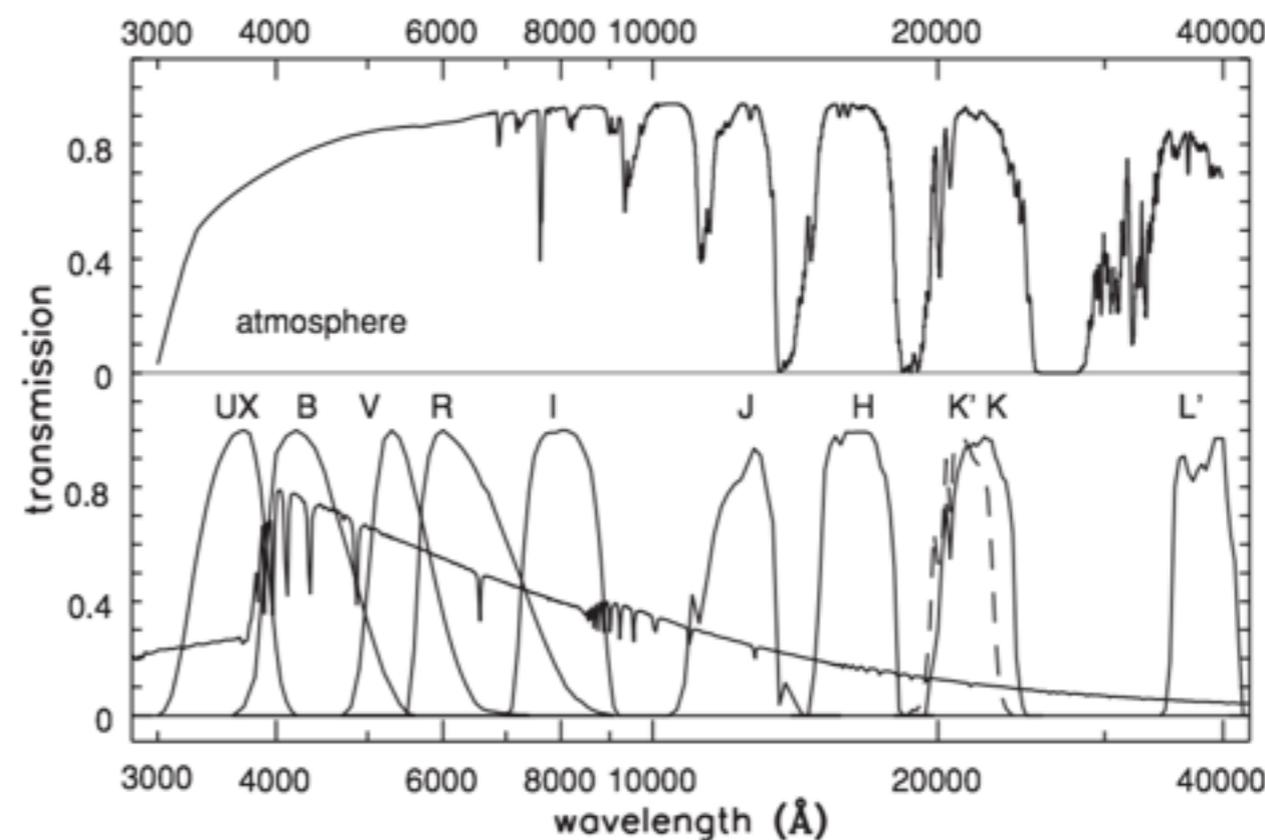
As partes centrais de galáxias
chegam a apenas

$$I_B \approx 18 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

ou

$$I_R \approx 16 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

Em observações a partir do solo, $I(x)$ em bandas infravermelhas é medido a partir da pequena diferença entre céu e galáxia+céu.



Há muito mais galáxias fracas do que galáxias brilhantes

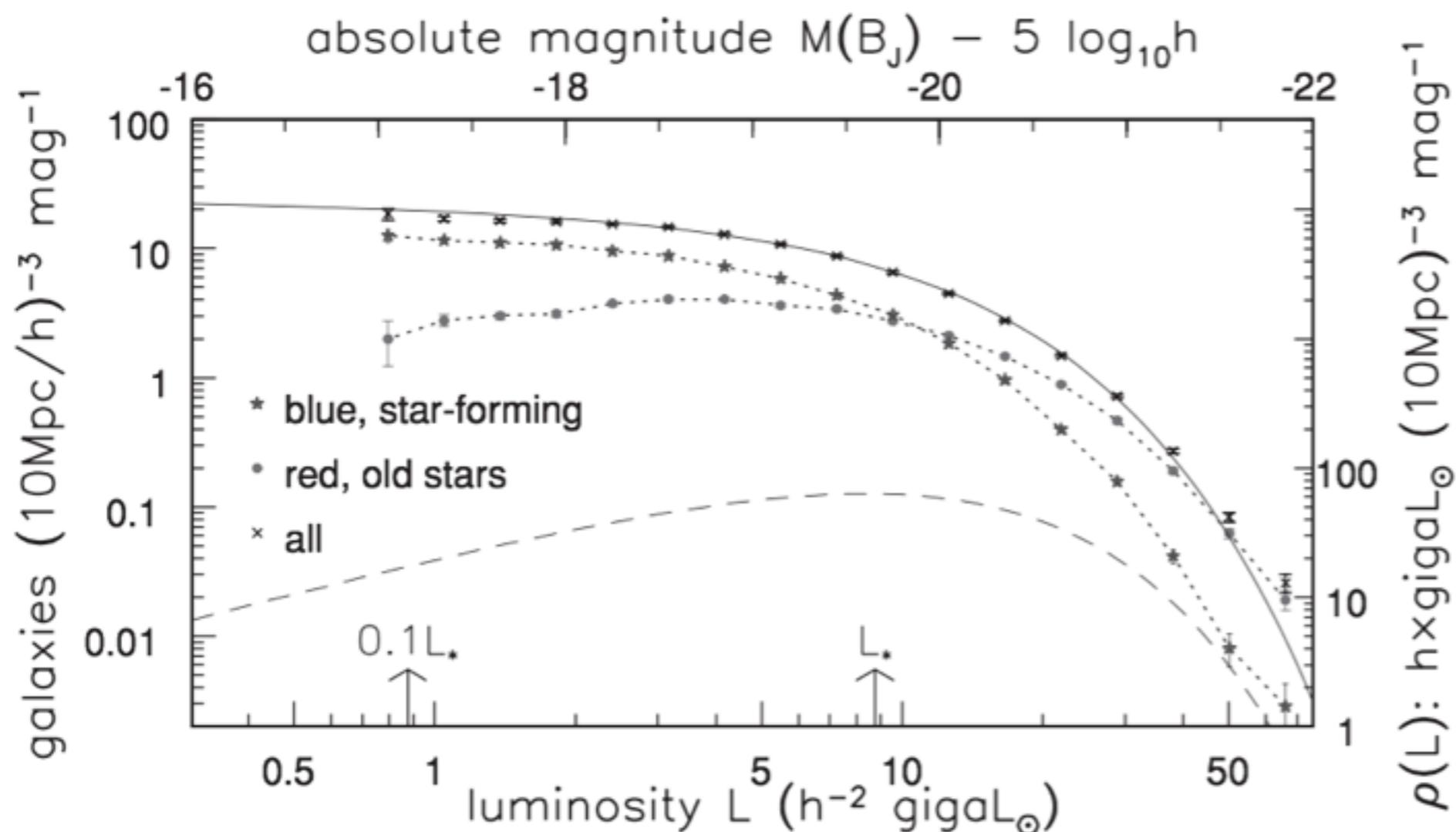
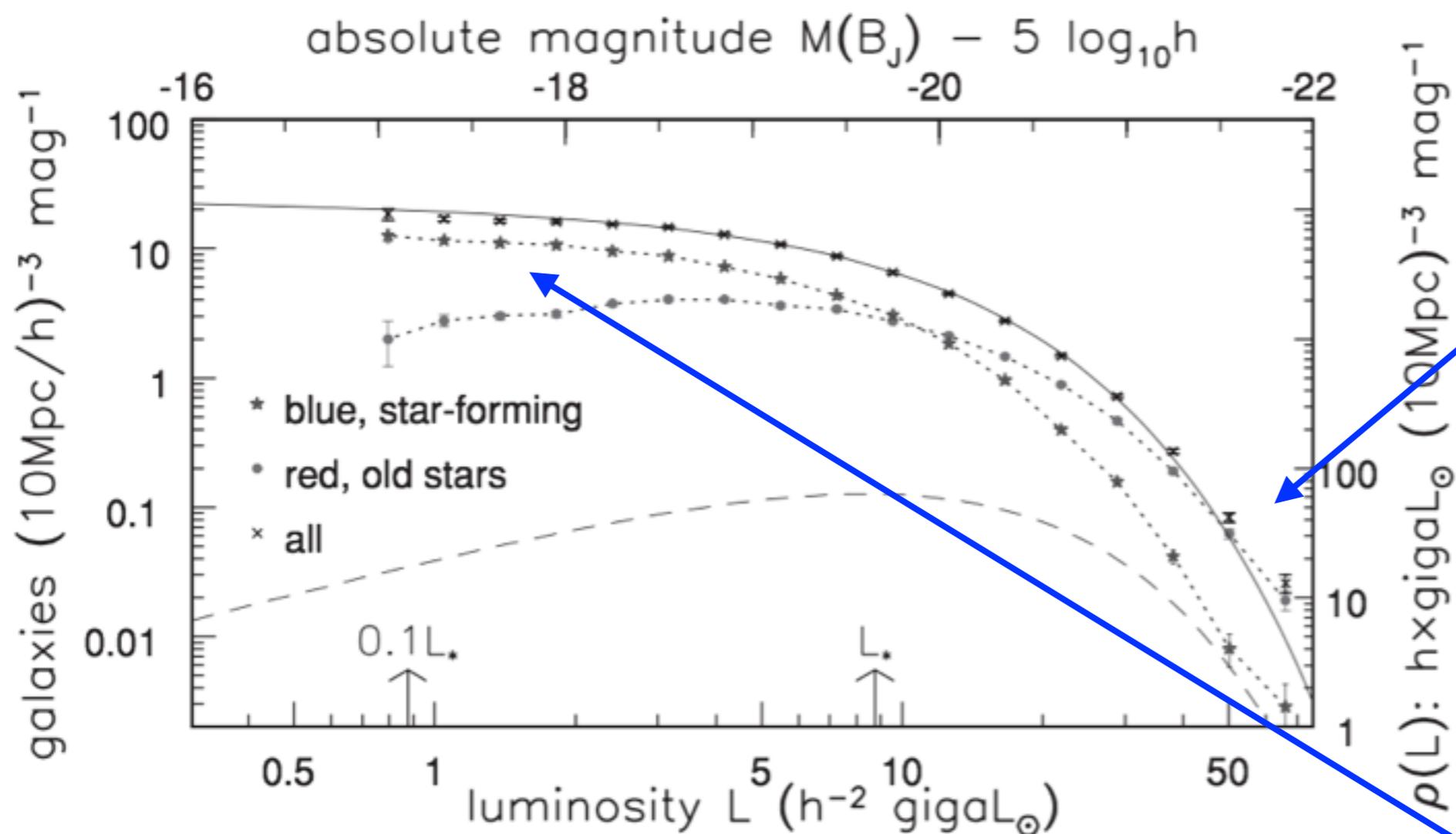


Fig. 1.16. Number of galaxies per 10 Mpc cube between absolute magnitude $M(B_J)$ and $M(B_J) + 1$ (crosses). Dotted lines show numbers of blue (stars) and red (filled dots) galaxies making up this total; vertical bars indicate errors. The solid line shows the luminosity function of Equation 1.24; the 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.

Há muito mais galáxias fracas do que galáxias brilhantes

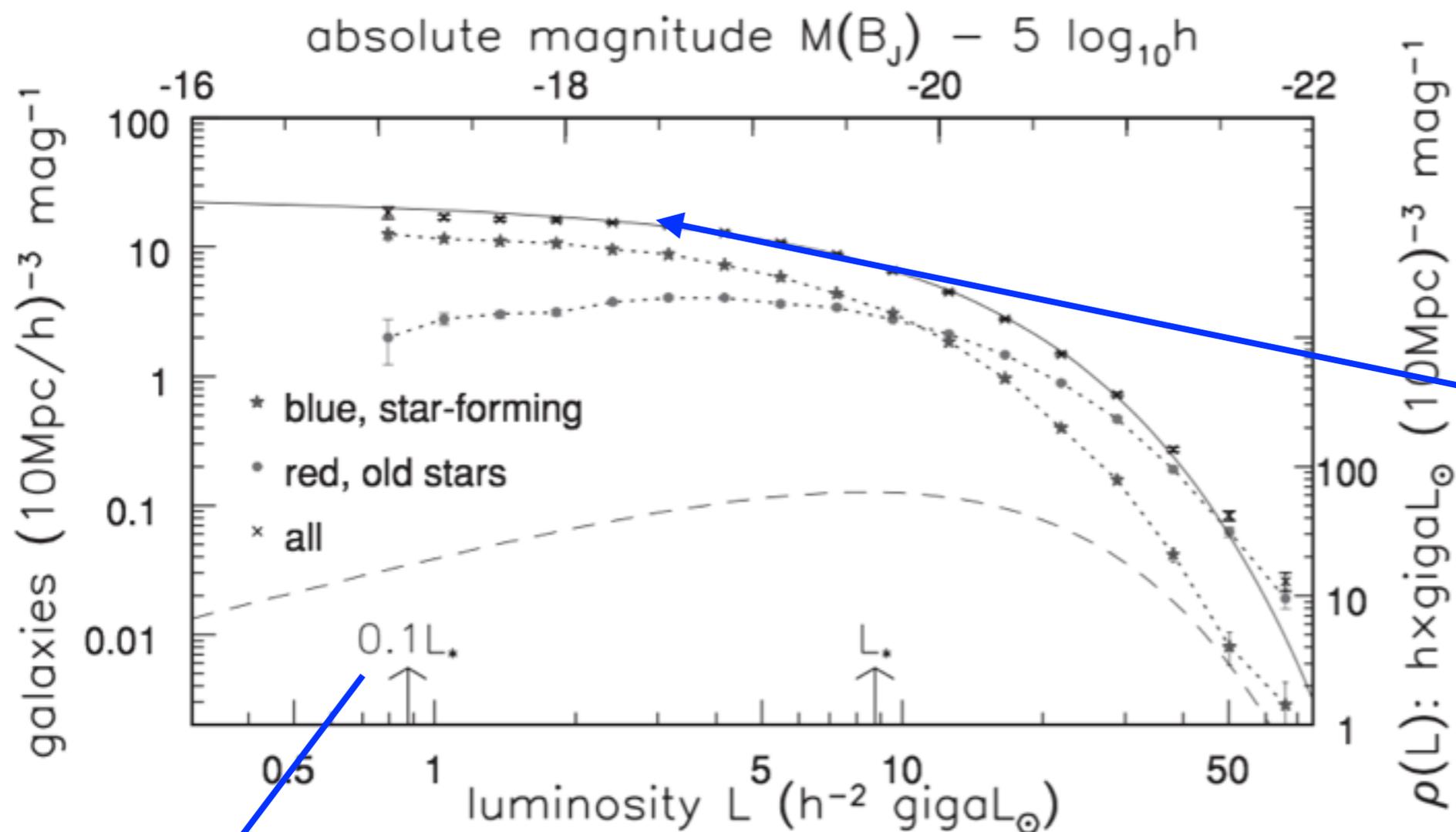


Note que a maior parte de galáxias muito luminosas é vermelha (elípticas e S0), que contém ~ metade da massa em estrelas

Apesar das 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.

Há muito mais galáxias fracas do que galáxias brilhantes



Número de galáxias esperado pela função de Schechter, número de galáxias por 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

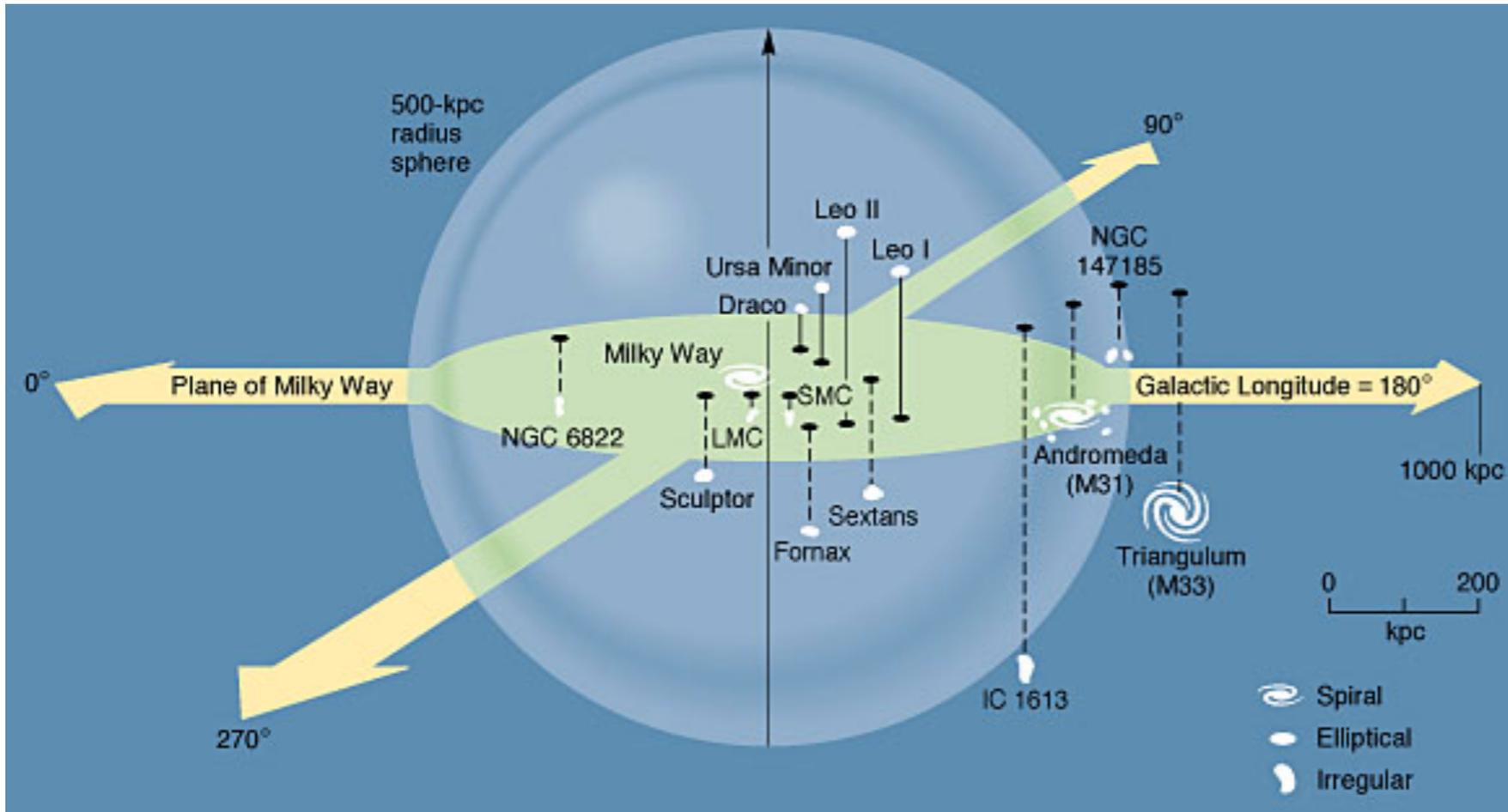
- Em 1974 Press e Schechter calcularam a distribuição de condensações gravitacionais que emergiam de um universo jovem.
- Em 1976, Schechter usou essa função para ajustar a distribuição de luminosidade das galáxias nos aglomerados de Abell, e em um primeiro momento o ajuste era excelente, apesar de não se entender muito bem o motivo.
- Os parâmetros livres n_* (cte de normalização), α (domina a função de luminosidade de galáxias anãs) e L_* (luminosidade característica onde ocorre a “quebra” da função) variam com tipo morfológico e redshift.

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

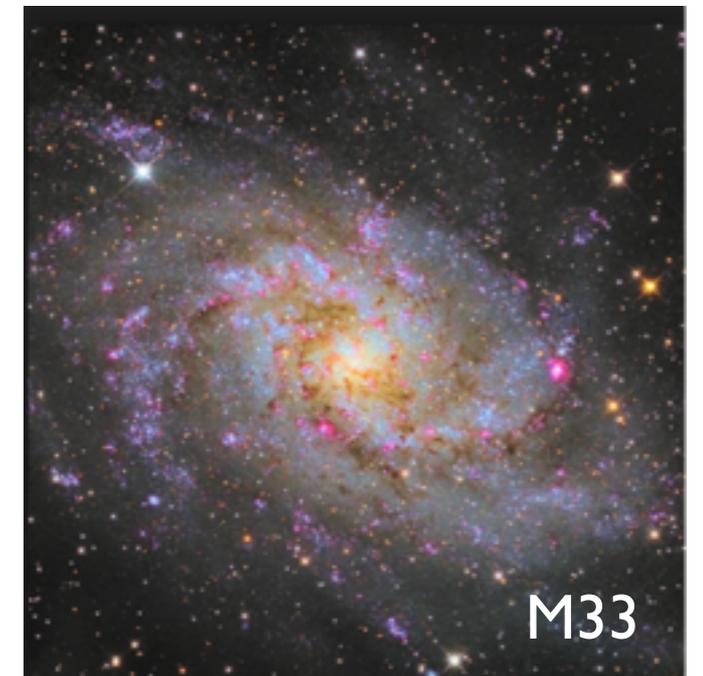
o Grupo Local

Capítulo 4 do livro-texto.

O Grupo Local (GL)



- Mais de 50 galáxias
- as 3 mais massivas são espirais (Galáxia, M31 $1.5L^*$ e M33 $0.2L^*$), que correspondem a 90% da L total do GL
- M32 é a única elíptica
- o restante são irregulares, anãs esferoidais e elípticas anãs



Grupo Local

- O centro de massa fica em algum ponto entre M31 e a Galáxia
- Rico em galáxias de tipo tardio e pobre em galáxias de tipo “cedo”: é um padrão em grupos de galáxia, ao contrário de aglomerados
- no GL, atração gravitacional mútua é forte o suficiente para superar a expansão do Universo => a Galáxia e M31 estão se aproximando a cerca de 120 km/s
- As galáxias tendem a se alinhar no *plano supergaláctico*, aproximadamente perpendicular ao plano galáctico
- Aglomerados de galáxias como Virgo e Coma parecem fazer parte de estruturas maiores
- GL faz parte do Superaglomerado de Virgo

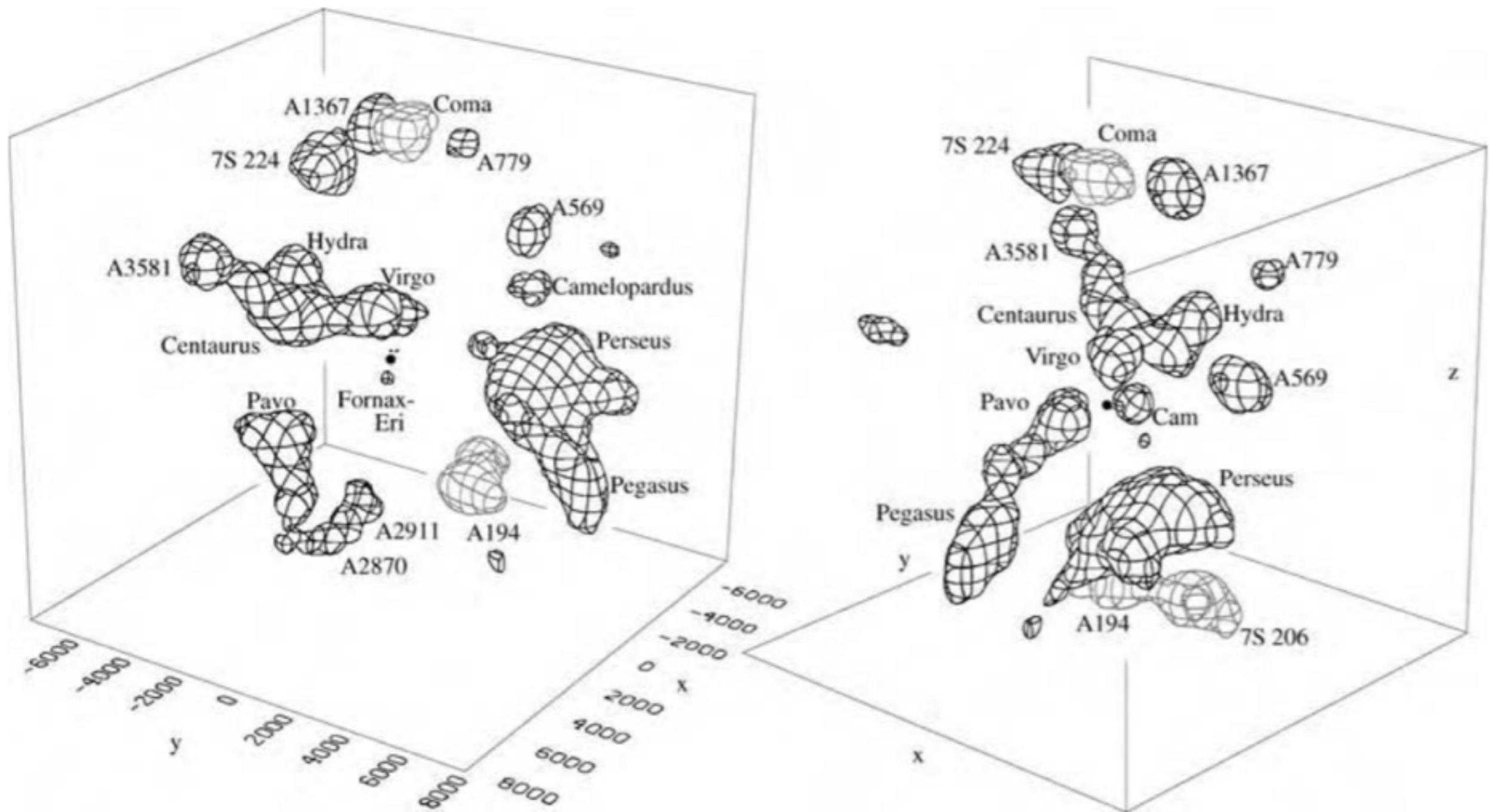
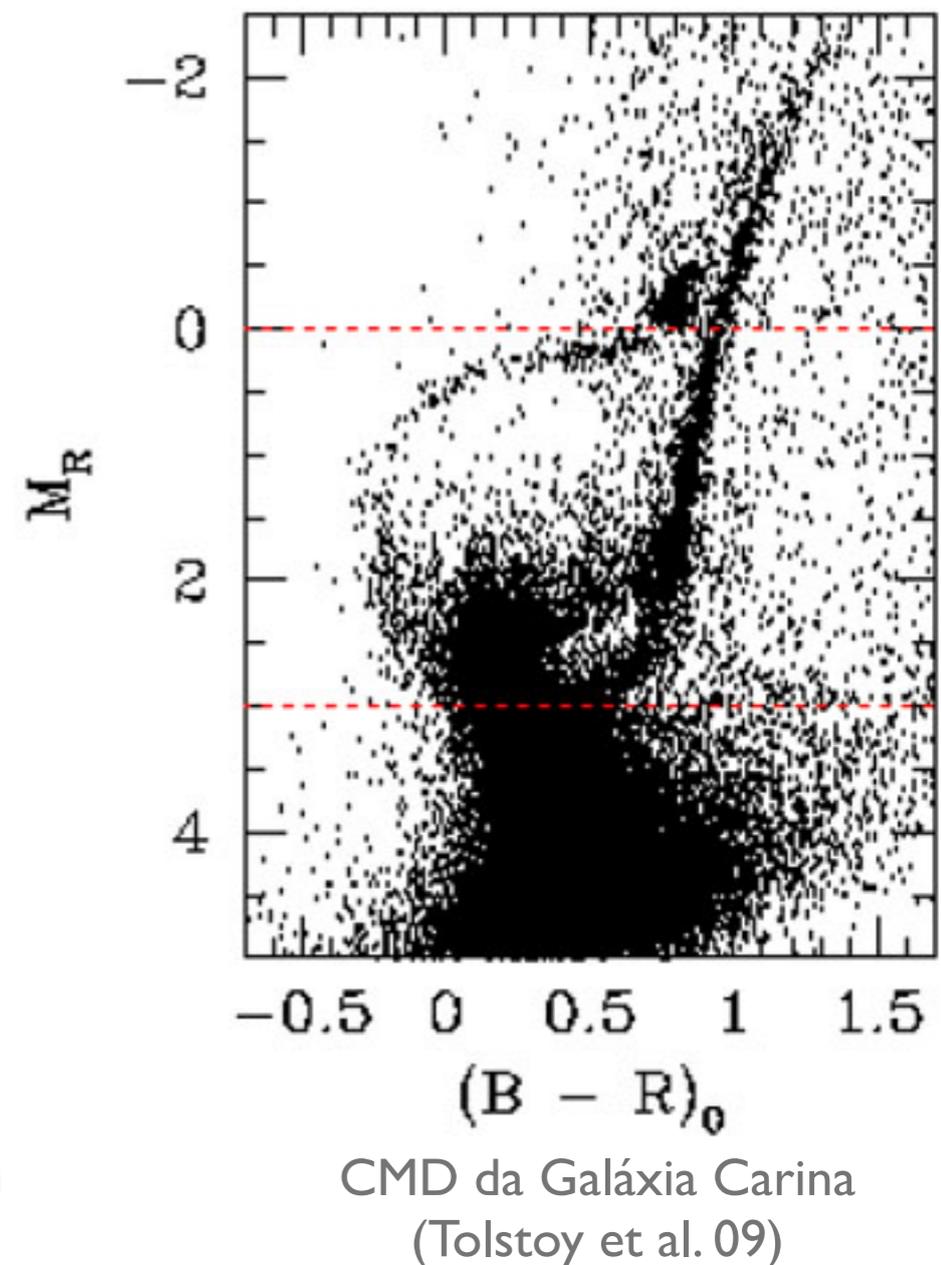
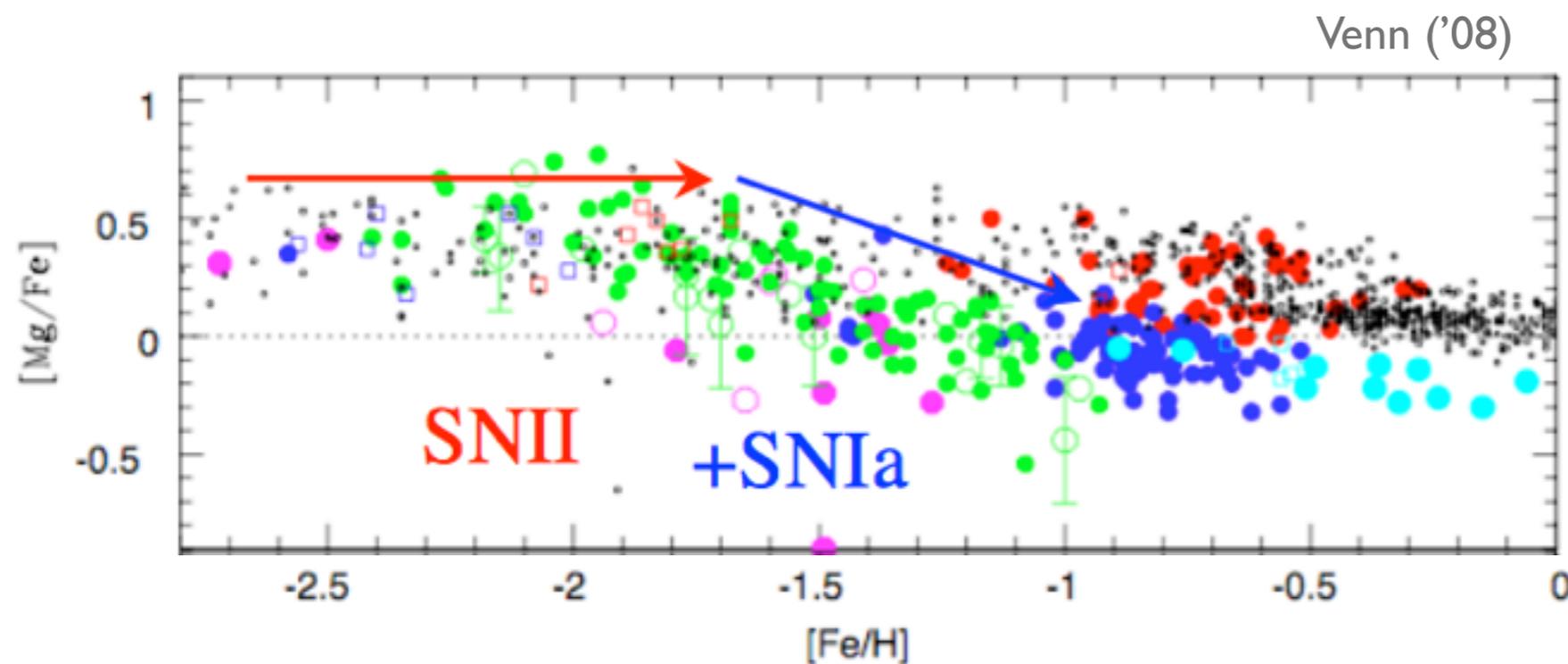


Fig. 4.3. Galaxy concentrations within $80h^{-1}$ Mpc of the Local Group: the ‘mesh’ encloses regions where the density is $\gtrsim 50\%$ above average. The filled dot gives our position at the origin, and axes x, y, z are as in Figure 4.2. Distance d to each galaxy is calculated from Hubble’s law: axes show H_0d in km s^{-1} . Objects from Abell’s catalogue of galaxy clusters are denoted A. Left, view from $(l, b) = 35^\circ, 25^\circ$, perpendicular to the supergalactic X – Y plane; right, view from $(l, b) = 125^\circ, 25^\circ$, looking nearly along that plane – M. Hudson 1993 *MNRAS* **265**, 43.

Galáxias no Universo

- Cerca de metade das galáxias se encontra em aglomerados ou grupos
- A outra metade se encontra aproximadamente isolada ou associações menos ligadas ao longo de filamentos
- o GL é um ambiente galáctico típico
- Observações atuais podem resolver estrelas em galáxias do GL



As satélites da Galáxia

Nossas galáxias satélites

- As duas mais proeminentes são as Nuvens de Magalhães
- As satélites esferoidais (dSph) são bastante difusas



LMC, apod/ap130528.html



Galáxia de Carina
wiki/Carina_Dwarf_Spheroidal_Galaxy



SMC, apod/ap100903.html

Grande Nuvem de Magalhães

- LMC é o protótipo das “espirais Magalhânicas”, Sm
- Disco + forte barra + 1 braço espiral curto
- Estrelas do disco orbitam um ponto $\sim 1\text{kpc}$ ao NO da região mais brilhante



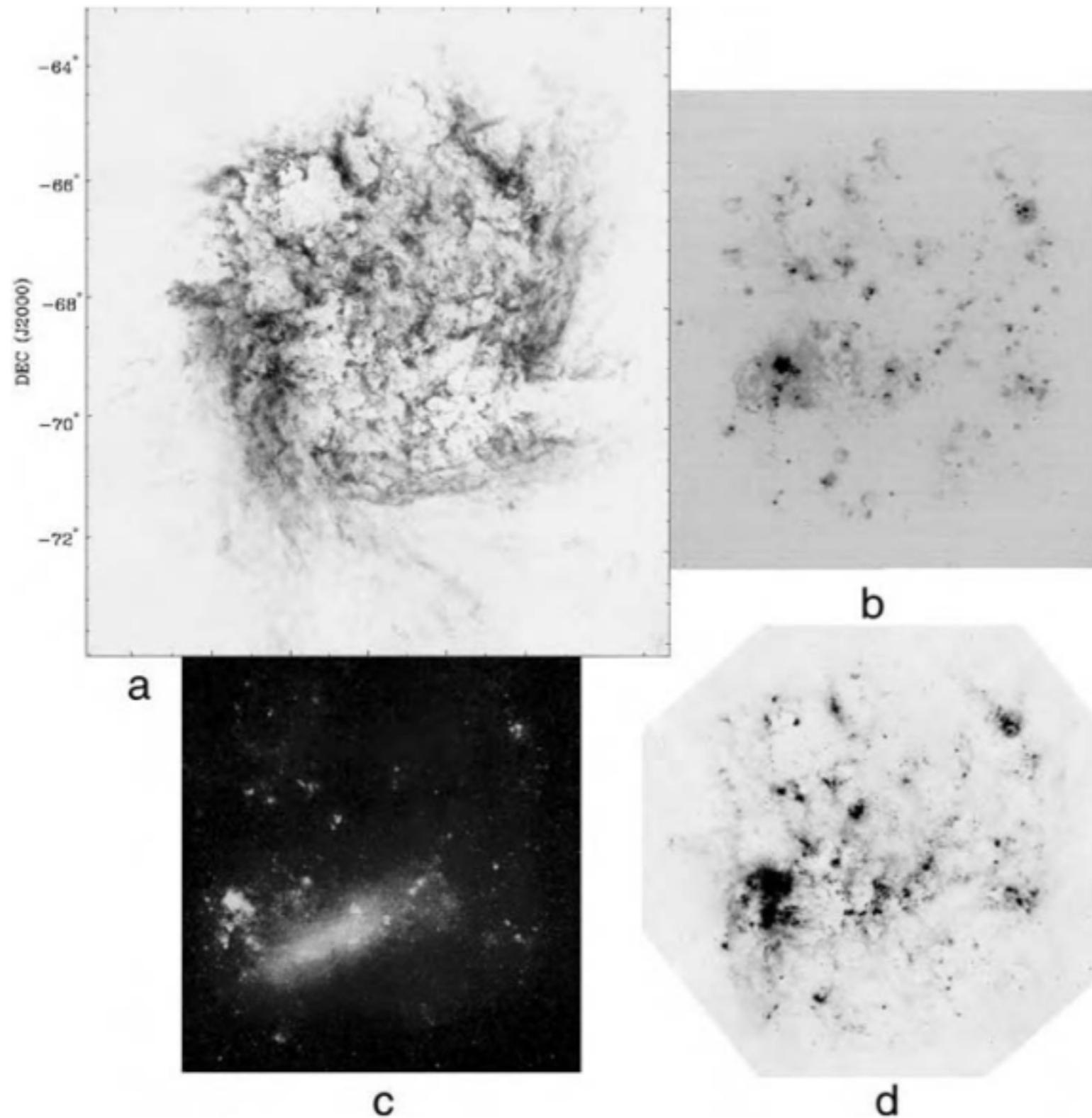
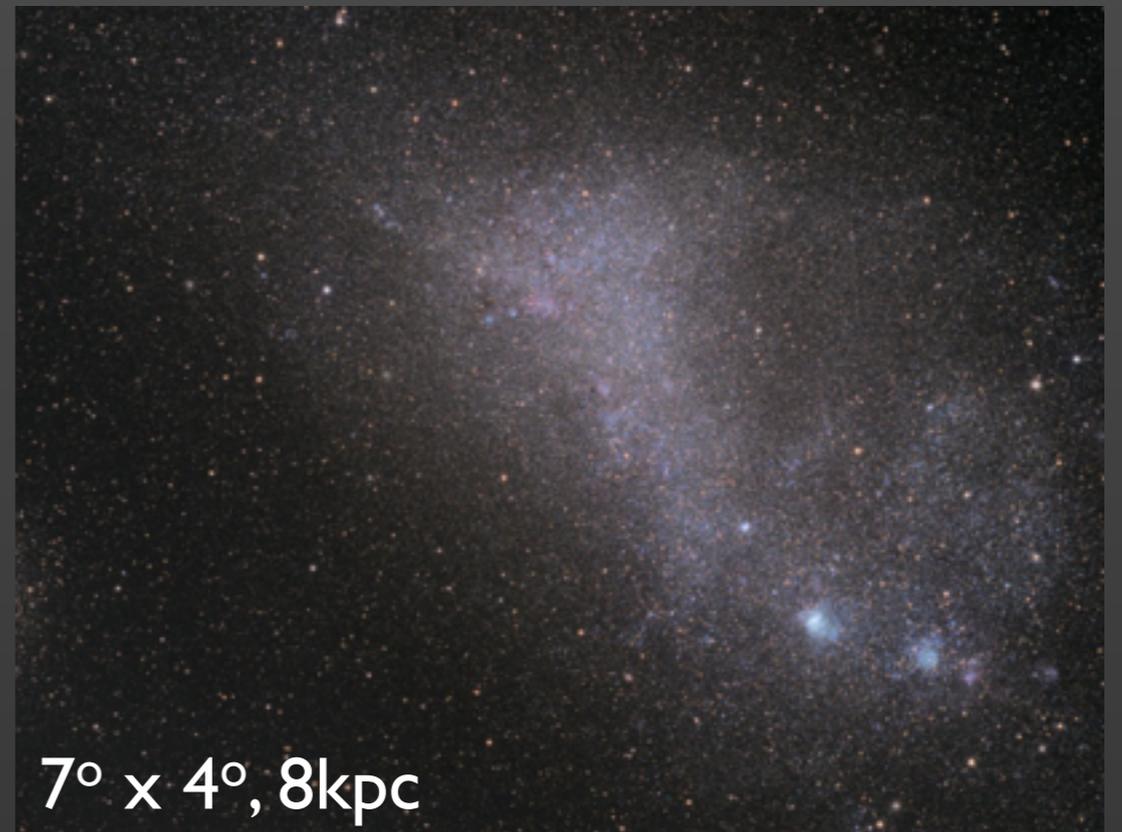


Fig. 4.4. The Large Magellanic Cloud: (a) the extended and fairly symmetric disk of HI gas; (b) in H α we see hot gas around young massive stars, with 30 Doradus the most prominent bright region; (c) an optical image shows the dense stellar bar and clumps of young stars, with 30 Doradus near the end of the bar, above and to the left; and (d) infrared light at 24 μ m shows dust heated by young stars. The HI map is 10 $^\circ$ across, or \sim 8.5 kpc; others are 7 $^\circ$ – S. Kim and L. Staveley-Smith; K. Henize (courtesy of the Observatories of the Carnegie Institution of Washington); Spitzer.

Pequena Nuvem de Magalhães

- Estrutura alongada vista quase “end-on”, com profundidade de cerca de 15kpc ao longo da linha de visada
- As estrelas não apresentam movimento organizado



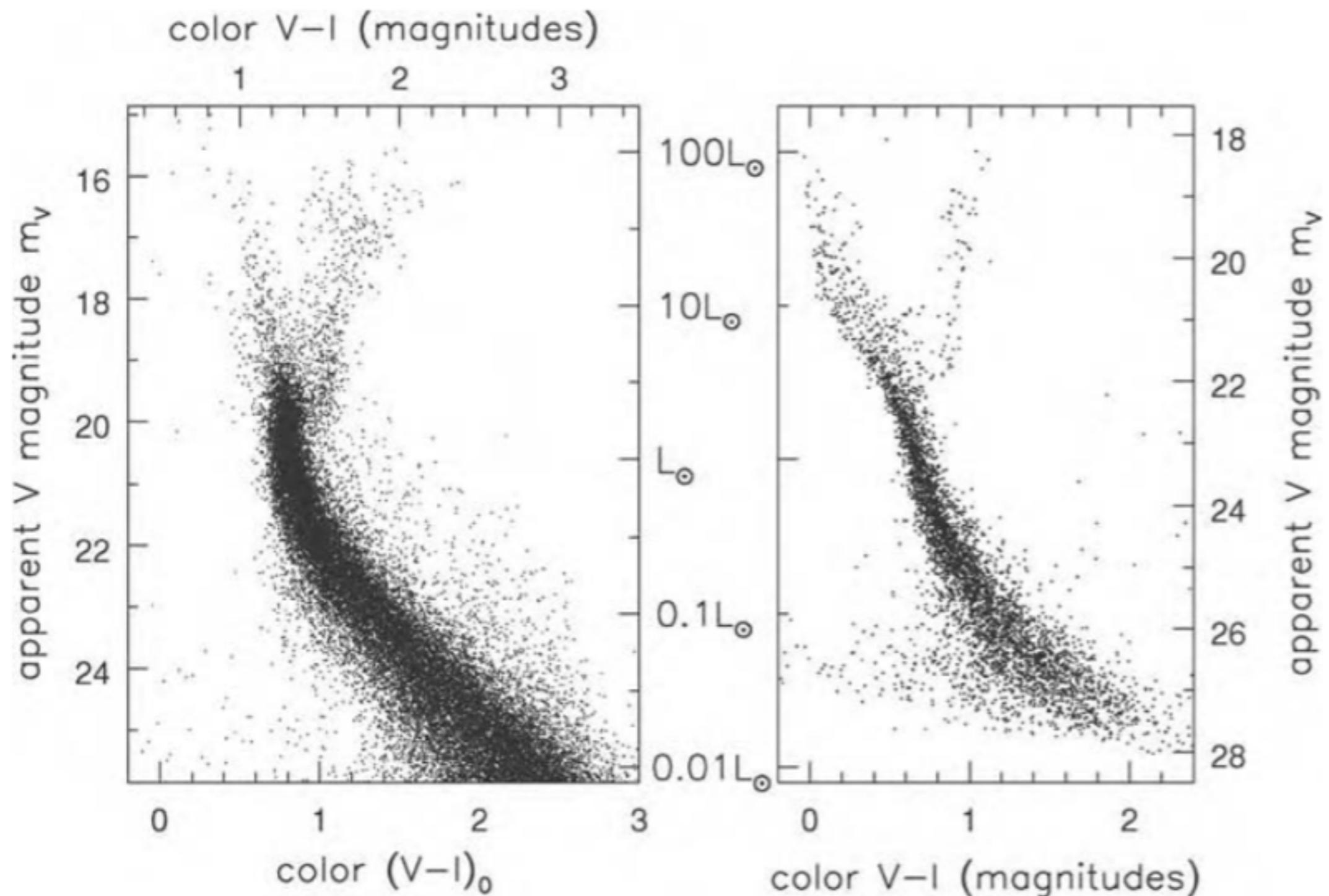
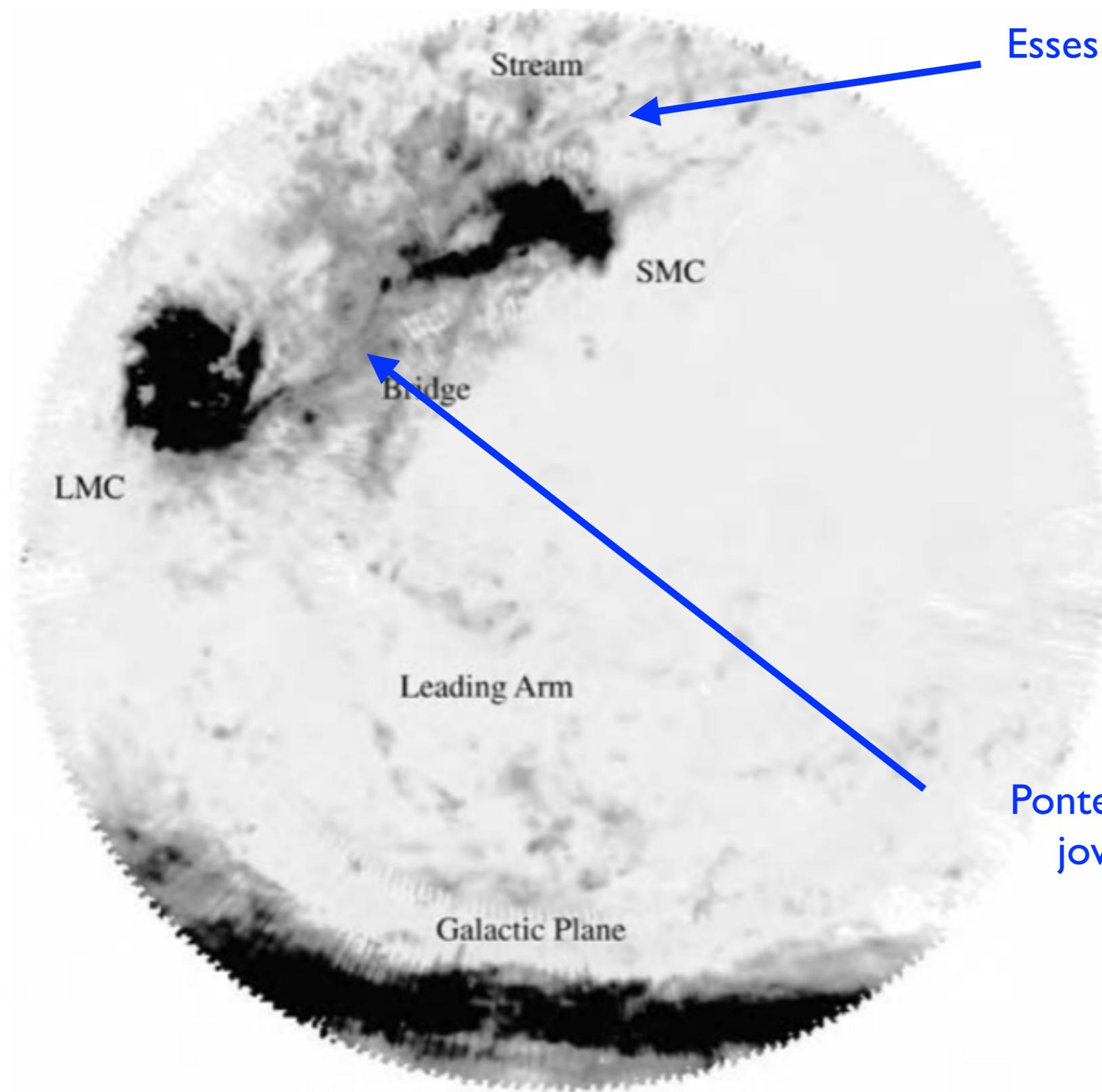


Fig. 4.5. Left, a color–magnitude diagram for stars in the bulge of the Milky Way; the lower scale shows color corrected for the reddening effects of dust. The wide main sequence indicates a range of stellar ages, but no horizontal branch is visible (cf. Figure 2.14). Right, stars in a small patch in the disk of the Large Magellanic Cloud. Note the luminous blue stars; the main sequence is bluer than that in the bulge because the stars are poorer in metals – J. Holtzman.



Esses *streams* se estendem por cerca de um terço do céu.

Ponte de gás contendo aglomerados jovens conecta as duas Nuvens

Fig. 4.6. HI in the Magellanic Clouds and the Magellanic Stream. The map is centred at the south celestial pole, extending to $\delta = -62^\circ$; right ascension 0^h is at the top – reprinted by permission from M. Putman *et al.* 1998 *Nature* **394**, 752; © 1998, Macmillan Magazines Ltd.

As Nuvens de Magalhães

- Orbitam uma a outra e esse sistema orbita a Galáxia com um período de $\sim 2\text{Gyr}$
- É possível que a atração gravitacional combinada da Galáxia e LMC já tenham destruído a SMC enquanto um sistema ligado
- São bastante ricas em aglomerados estelares.
- Na LMC há um gap de aglomerados entre 4 - 10Gyr. Os mais jovens correspondem em idade a última passagem próxima com a SMC.
- Na SMC há aglomerados de várias idades, sem *gap*.



R136 em 30Dor

Distâncias no GL

- RR Lyrae:
 - estrelas de baixa massa queimando He no núcleo
 - $L \approx 50L_{\odot}$
 - períodos em torno de 10h
- Cepheidas:
 - estrelas de alta massa queimando He no núcleo
 - $L \sim 1000L_{\odot}$
 - períodos de 1 - 50 dias
 - relação período-luminosidade identificada pela primeira vez por Henrietta Leavitt em 1912, na LMC

Relação Período-Luminosidade

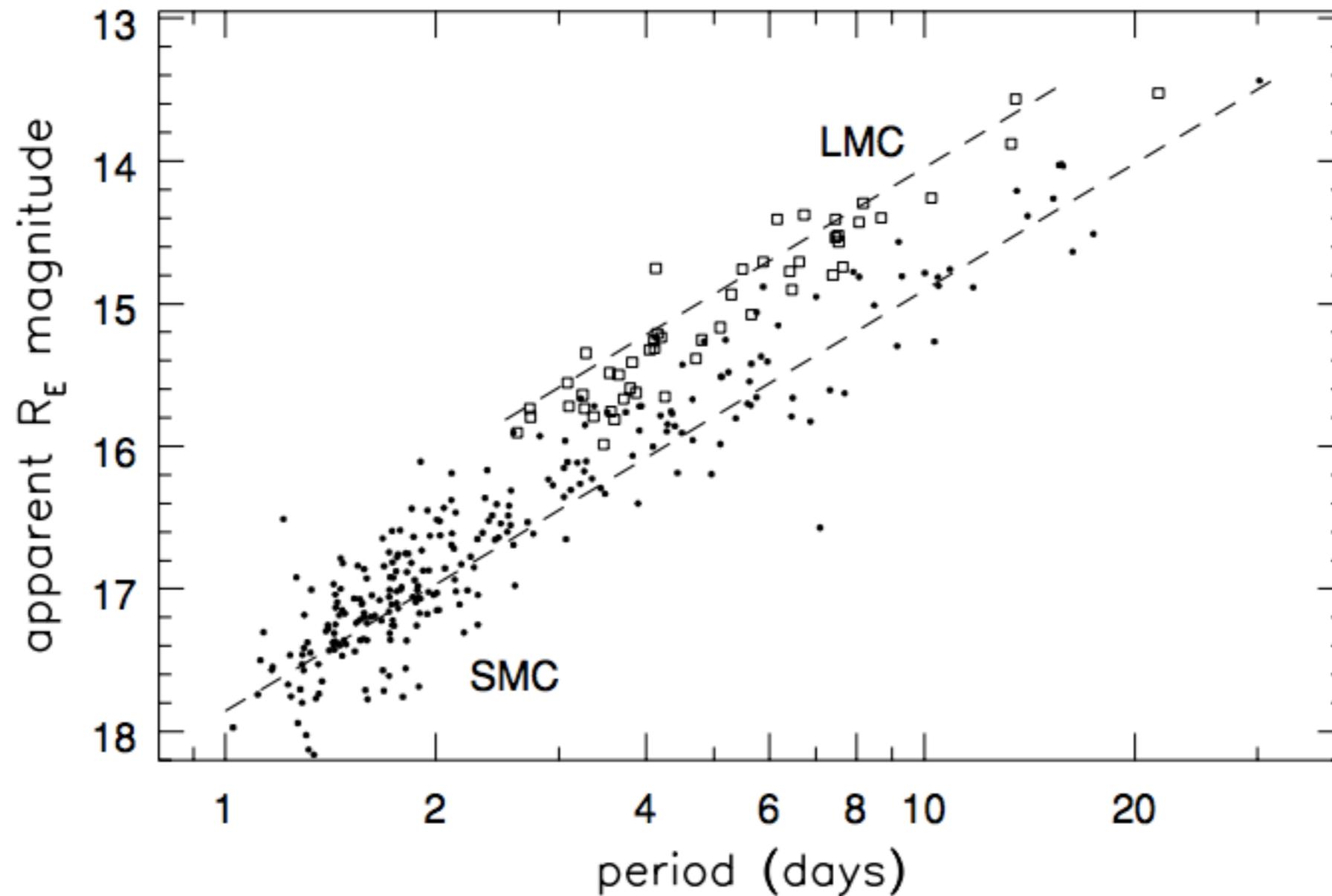


Fig. 4.7. Apparent magnitude and period in days, for Cepheids in the Large Magellanic Cloud (squares) and in the SMC (filled dots); dashed lines show mean period–luminosity relations – J.-P. Beaulieu.

Escala de distâncias

- Distâncias podem ser obtidas pelo módulo de distância
- Efeitos de metalicidade e avermelhamento tem que ser levados em conta
- RR Lyrae são usadas para medir distâncias a galáxias até 3 Mpc,
Cefeidas até 30Mpc

Galáxias esferoidais anãs

- Brilho superficial cerca de 100x menor do que LMC
- Contém pouco gás
- Não tem população jovem
- Todas possuem população velha (RR Lyrae)
- As menos luminosas tem luminosidade da ordem de aglomerados globulares



dSph vs. AG?

- Como sabemos que as dSph não são apenas outro tipo de AGs?

dSph vs. AG?

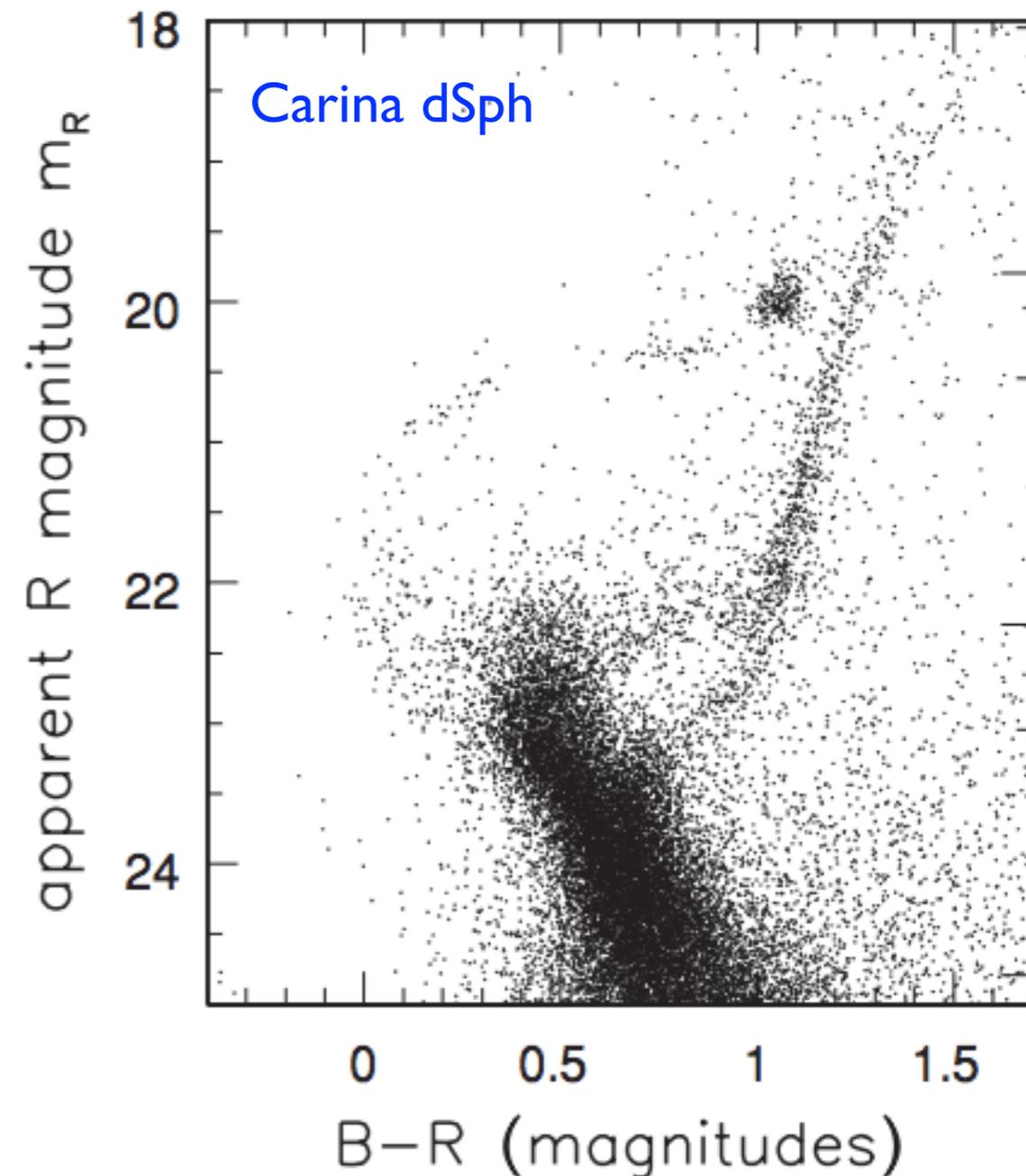
- Como sabemos que as dSph não são apenas outro tipo de AGs?
 - Raios são muito maiores

dSph vs. AG?

- Como sabemos que as dSph não são apenas outro tipo de AGs?
 - Raios são muito maiores
 - População estelar bastante complexa

dSph vs. AG?

- Como sabemos que as dSph não são apenas outro tipo de AGs?
 - Raios são muito maiores
 - População estelar bastante complexa



dSph vs. AG?

- Como sabemos que as dSph não são apenas outro tipo de AGs?
 - Raios são muito maiores
 - População estelar bastante complexa
 - Contém seu próprio sistema de aglomerados globulares
 - Estimativas de massa a partir da dispersão de velocidades indicam razões massa-luminosidade M/L muito maiores do que AGs, ou mesmo da maioria das galáxias espirais

Teorema do Virial

- relaciona a energia cinética média de um sistema de partículas à energia potencial média
- em Astrofísica, considerando-se energia potencial gravitacional:

$$\frac{3GM}{5R} = \frac{3k_B T}{2m_p} = \frac{1}{2}v^2,$$

- M = massa, R = raio, v = velocidade, T = temperatura, G = cte de Newton, k_B = cte de Boltzmann, m_p = massa do próton (os fatores numéricos são geralmente negligenciados).
- Em dinâmica de galáxias, a energia cinética por partícula $K \sim (3/2)\sigma^2$ e $\frac{GM}{R} \approx \sigma^2$ onde R é o raio onde σ é medido, e M é a massa interior a esse raio. O raio e massa do Virial são geralmente definidas onde σ for máxima

dSph vs. AG?

- Como sabemos que as dSph não são apenas outro tipo de AGs?
 - Raios são muito maiores
 - População estelar bastante complexa
 - Contém seu próprio sistema de aglomerados globulares
 - Estimativas de massa a partir da dispersão de velocidades indicam razões massa-luminosidade M/L muito maiores do que AGs, ou mesmo da maioria das galáxias espirais
 - dSph são constituídas em grande parte por matéria escura
 - ou não são sistemas em equilíbrio
- **Em quais condições um aglomerado estelar ou galáxia satélite pode sobreviver à gravidade da Galáxia?**

O limite de maré (tidal limit)

- uma galáxia satélite em órbita de um sistema maior sente a força gravitacional combinada, que varia no tempo.
- o famoso "problema de 3-corpos": muitas das possíveis órbitas são caóticas, uma pequena mudança na posição ou velocidade do satélite tem um efeito imenso no movimento subsequente.
- **SE** o satélite segue uma órbita circular **E** o potencial gravitacional é constante em um sistema de referência que tem rotação uniforme em torno do centro de massa combinada do sistema (**a vaca esférica...**), pode-se definir um potencial efetivo Φ_{eff} e um substituto para a Energia que não se conserva (cte de Jacobi E_J ; páginas 165 a 167 do livro texto)
- estrelas que não ultrapassarem o r_J raio de Jacobi (limite de Roche) irão permanecer ligadas à galáxia satélite
- D = distância, m e M são as massas do satélite e da galáxia maior, respectivamente.

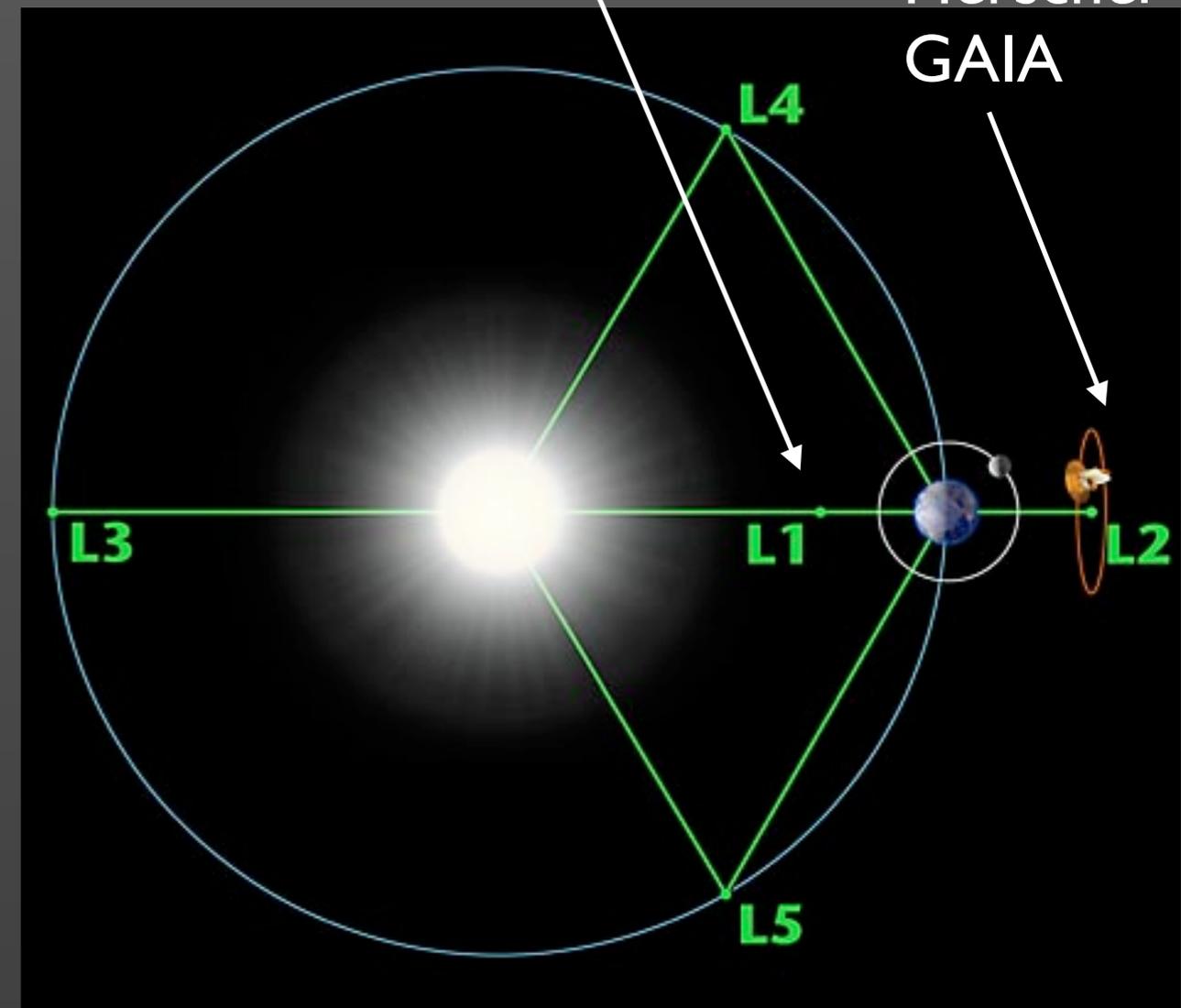
$$r_J = D \left(\frac{m}{3M + m} \right)^{1/3}$$

O limite de maré

- em geral galáxias satélite e aglomerados não seguem órbitas circulares
- espera-se que a força gravitacional no ponto da órbita de maior aproximação determina se as estrelas permanecem ligadas
- raio de truncagem r_t (onde a densidade de estrelas cai a zero) é aproximadamente igual a r_J no pericentro da órbita
- alguns dos aglomerados das Nuvens de Magalhães saíram do limite de Jacobi do raio perigaláctico estimado e portanto não devem mais estar ligados às galáxias-mães (mas devem permanecer próximos por ainda algumas órbitas)

Pontos de Lagrange

- 5 pontos “especiais” em um sistema de 3 corpos onde uma massa pequena pode orbitar duas massas maiores em um padrão constante



Pontos de Lagrange do sistema Terra-Sol.
Crédito: NASA / WMAP Science Team.
(Nota: fora de escala)

Galáxias Espirais do Grupo Local



M31

$$L \sim 1.5L^*$$

$$\text{escala de disco } h_R \sim 2 h_{R^*}$$

$$V(R) \sim 1.3V(R)^*$$

$$\#AG \sim 2\#AG^* \text{ (cerca de 300)}$$

M31

- núcleo duplo, separados por ~ 2 pc: um contém $M_{\text{BH}} \sim 3 \times 10^6 M_{\odot}$, outro pode ser um aglomerado estelar que espiralou para o centro da galáxia
- ao contrário da Galáxia, o núcleo é relativamente livre de gás e poeira
- várias das estrelas alguns kiloparsecs acima do disco são ricas em metais e apresentam rotação, como se o bojo de M31 tivesse "transbordado" para o halo
- um *stream* gigante de estrelas foi encontrado, maior do que 100kpc, provavelmente resultante de um merger com outra galáxia relativamente massiva

M31

- Anel de formação estelar a cerca de 10kpc de raio
- formação estelar menor do que a Galáxia
- padrão espiral é menos demarcado do que na Galáxia
- o disco estelar é *warped* (comum em espirais)
- classificada como Sb



Swift Makes Best-ever Ultraviolet Portrait of Andromeda Galaxy. Credit: NASA/Swift/Stefan Immler (GSFC) and Erin Grand (UMCP).



Image from Wide-field Infrared Survey Explorer, or WISE. Image credit: NASA/JPL-Caltech/UCLA.



apod/ap121220.html

M33

Sc ou Scd

M33

- mais rica em gás do que M31 ou a Galáxia
- $h_R \approx 1.7 \text{ kpc}$,
- $V(R)$ sobe a 120 km s^{-1}
- disco de HI muito extenso, medido até 30kpc (está a $\sim 200\text{kpc}$ de M31)
- aglomerado estelar nuclear, mais luminoso do que qualquer AG da Galáxia $L_V \approx 2.5 \times 10^6 L_\odot$, bastante denso $10^7 L_\odot \text{ pc}^{-3}$
- não há evidências de um buraco negro central, mas seu núcleo é a fonte em raio-X mais brilhante do GL

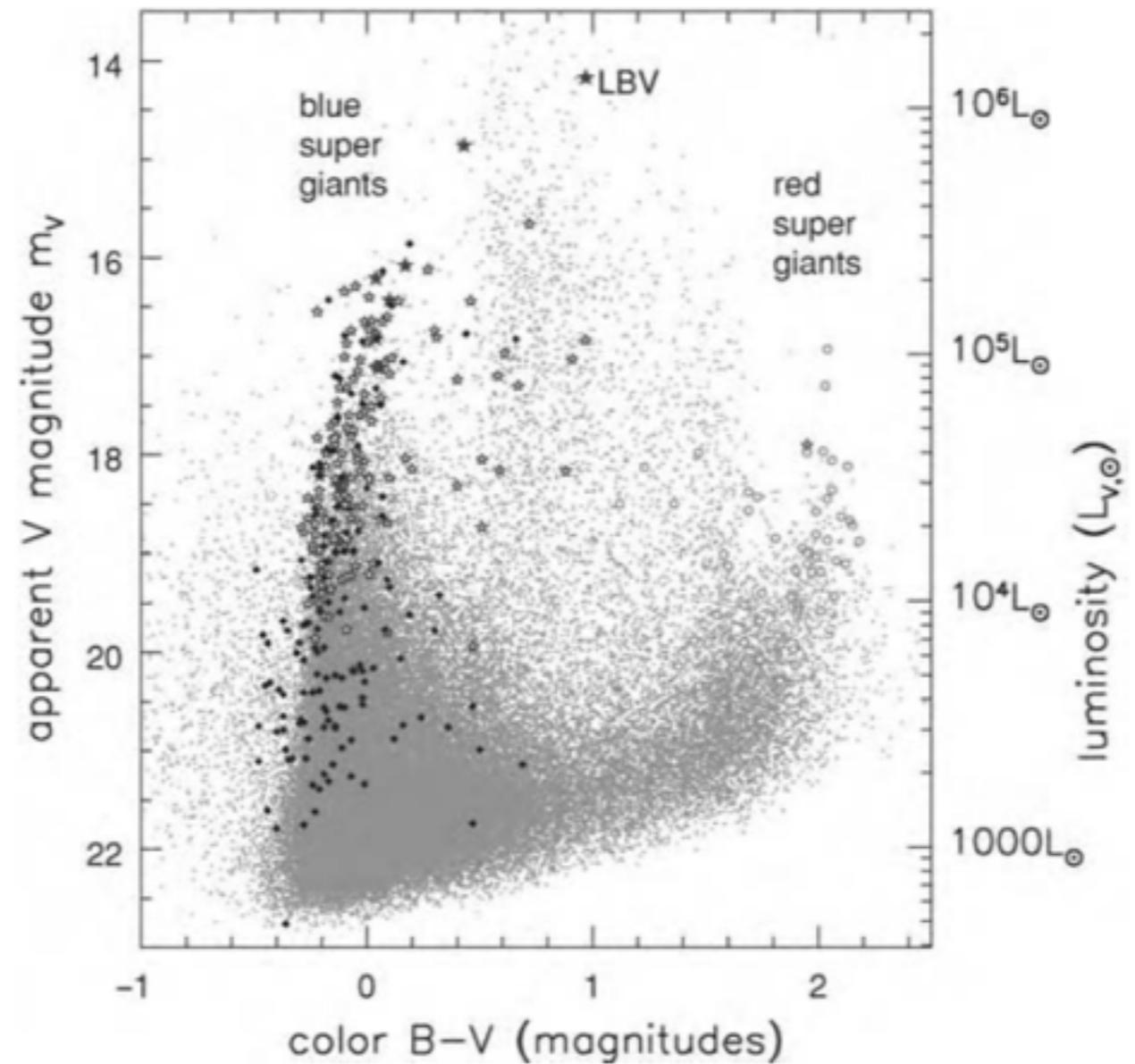


Fig.4.20. CMD for a galaxy in vigorous starbirth: M33. Larger symbols show stars classified by their spectra. Open star-shapes show blue supergiants; filled stars are luminous blue variables; filled diamonds are Wolf–Rayet stars; and open circles indicate red supergiants. Most points between the vertical ‘plumes’ of blue and red supergiants represent fore-ground stars in our Milky Way. For an irregular galaxy like the SMC this diagram would look similar, but with fewer stars of each type – P. Massey.

Outras galáxias anãs do Grupo Local

Outras galáxias anãs

- as anãs esferoidais dSph da M31 não parecem ser diferentes das nossas
- M31 tem três anãs elípticas dE



- População estelar predominantemente velha, exceto nas partes centrais onde há uma pequena evidência de população jovem (exceto NGC 147)

Galáxias irregulares anãs

- contém gás e formação estelar recente
- pobres em metais (10% de Z_{sun})
- LMC representa uma classe de transição entre espirais e anãs irregulares



M32

- brilho superficial dos mais altos já medidos para qualquer galáxia, talvez a remanescente central de uma galáxia muito maior?
- cinemática intermediária entre o disco da Galáxia e o halo pobre em metais, com $V/\sigma \sim 1$ (V = velocidade de rotação, σ = dispersão de velocidades).

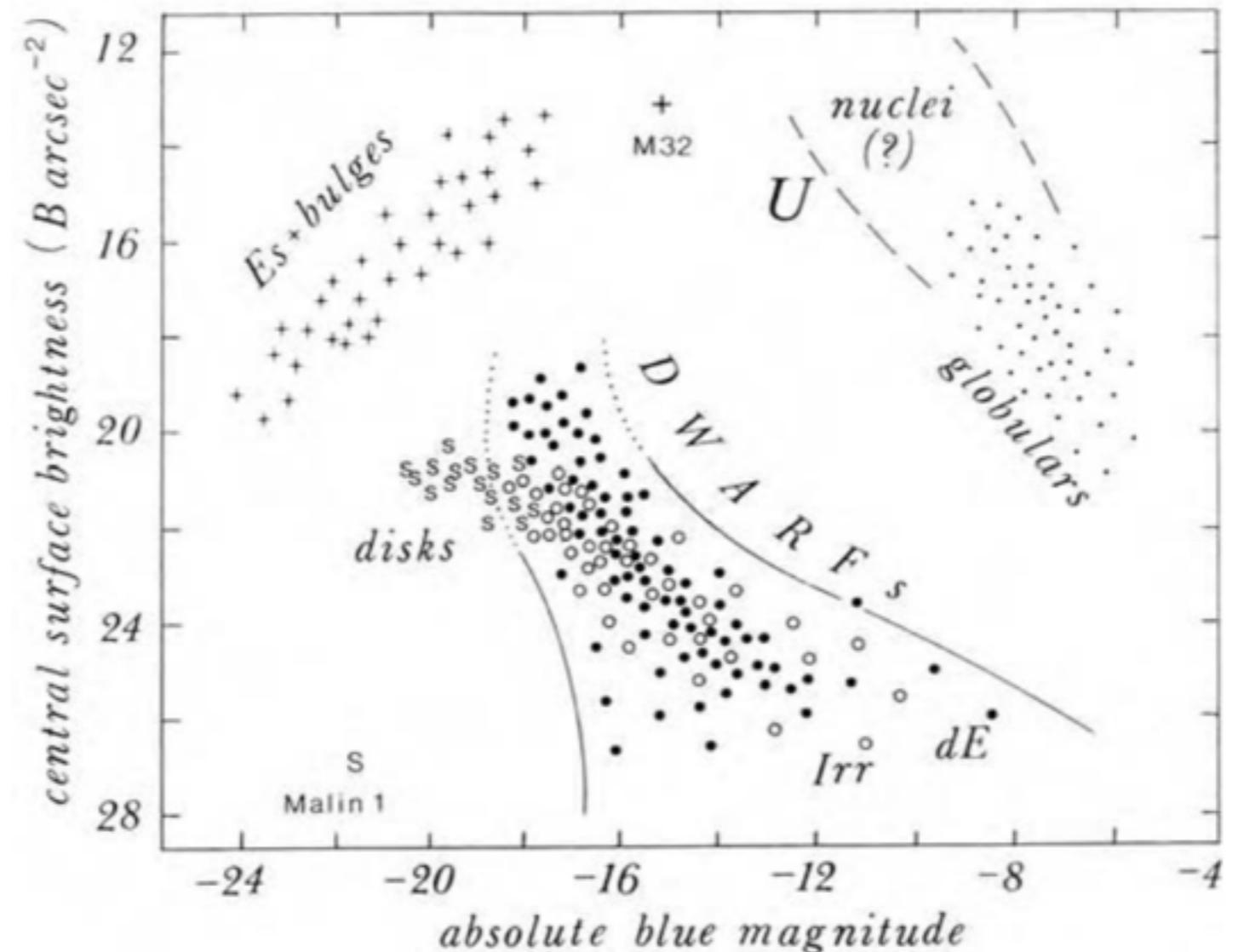


Fig 4.18 no livro-texto: galáxias anãs e gigantes ocupam regiões diferentes no plano brilho superficial vs. magnitude absoluta.

Futuro do Grupo Local

- temos cerca de 3 a 4 Gyr até o próximo pericentro entre M31 e a Galáxia, o que deve resultar em uma colisão quase frontal
- M31 e a Galáxia devem fundir e formar uma nova galáxia, provavelmente elíptica



<https://www.youtube.com/watch?v=4disyKG7XtU>

Futuro do Grupo Local

- temos cerca de 3 a 4 Gyr até o próximo pericentro entre M31 e a Galáxia, o que deve resultar em uma colisão quase frontal
- M31 e a Galáxia devem fundir e formar uma nova galáxia, provavelmente elíptica



<https://www.youtube.com/watch?v=4disyKG7XtU>