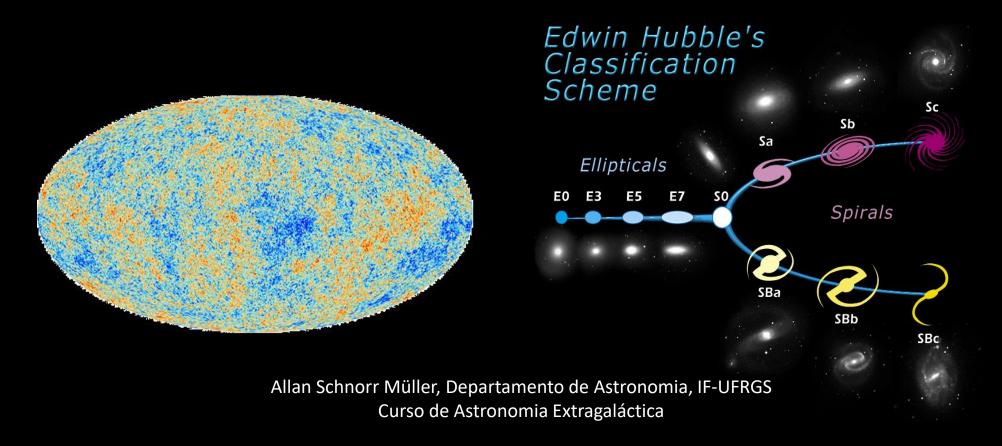
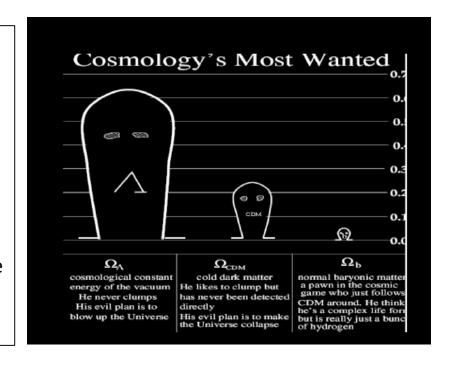
# Formação de galáxias

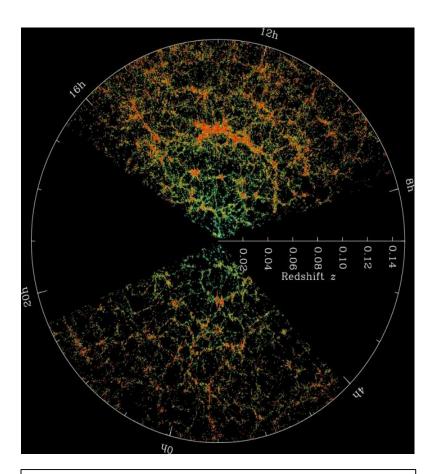


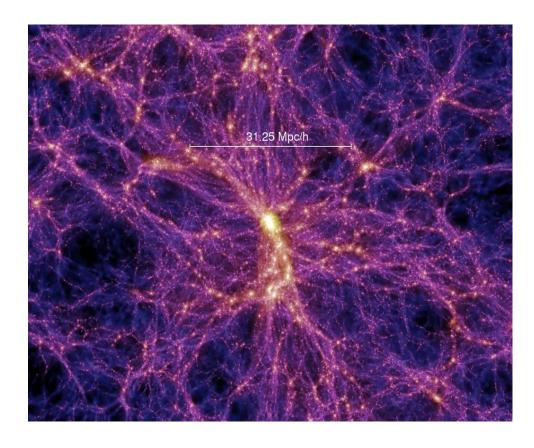
#### Modelo padrão λCDM

- Em grande escala o universo é homogêneo e isotrópico;
- Geometria do universo é plana (inflação);
- Parâmetro de densidade da matéria bariônica =0.0486±0.0010;
- Parâmetro de densidade da matéria escura = 0.2589±0.0057;
- Parâmetro de densidade da energia escura = 0.6911±0.0062;
- Matéria escura é fria (velocidades aleatórias durante desacoplamento de ≈50km/s) e não colisional;
- Flutuações de densidade iniciais eram pequenas ( $|\delta \rho/\rho_{crit}|$ <<1) e descritas por um campo randômico gaussiano;



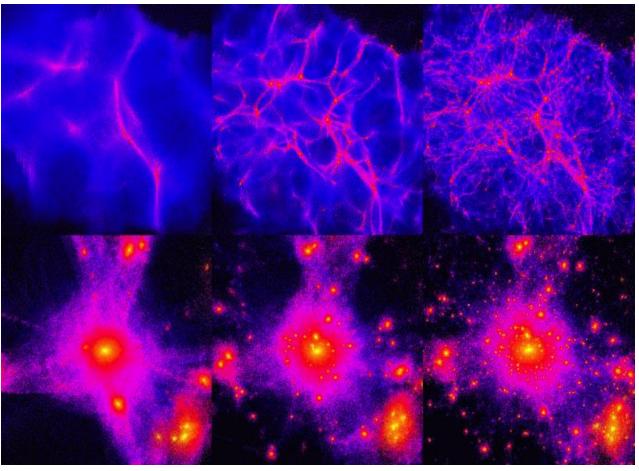
## Modelo padrão λCDM





Estrutura em grande escala: SDSS. Astronomia Extragaláctica, Junho 2017 em grande escala: simulações.

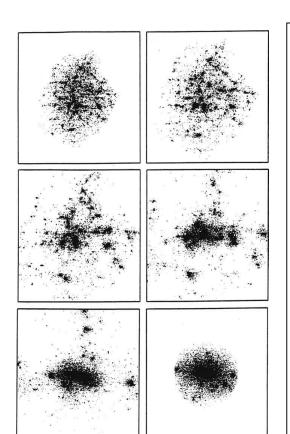
# Modelo padrão λCDM



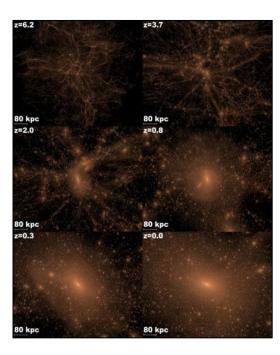
Estrutura em grande escala: hot, warm e cold dark matter.

Allan Schnorr Müller, Astronomia Extragalactica, Junho 2017

## Formação de estruturas: matéria escura



- Instabilidade gravitacional: regiões mais densas atraem mais matéria, regiões menos densas se tornam cada vez mais rarefeitas;
- Colapso Gravitacional: Se δρ/ρ<sub>crit</sub> << 1, região expande em conjunto com universo. Se δρ/ρ<sub>crit</sub> ≈ 1, região se separa da expansão do universo e começa a colapsar.
- Formação de halos de matéria escura:
   flutuações de densidade não são esféricas nem
   homogêneas. Inomogeneidades e efeitos de
   maré de flutuações vizinhas levam a
   fragmentação em sub-unidades que atingem
   equilíbrio virial após relaxamento violento.



# Formação de estruturas: protogaláxias

- Para formar estrelas, gás precisa cair no halo de matéria escura e ser capaz de esfriar até condensar nuvens, onde estrelas se formarão;
- Porém, forças de pressão podem impedir queda;
- Qual a condição para o gás ser capturado pelo halo? Critério de instabilidade de Jeans:

Pelo teorema virial: 2K+W=0

Energia gravitacional:  $\approx$  -3GM<sub>gas</sub>M/5R<sub>cl</sub>

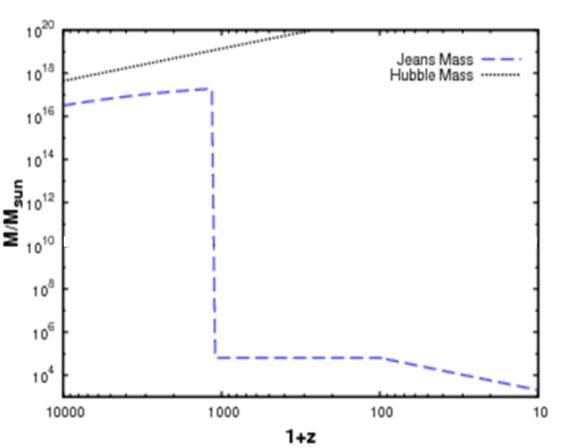
Energia Térmica:  $\approx 3 M_{gas} k_B T / 2 \mu m_p$ 

 $\mathbf{M_j} = (3/)^{1/2} (5f_{gas}k_BT/\mu m_pG)^{3/2}, f_{gas} = M_{gas}/M$ 

$$T_{virial} = \mu m_p GM/5k_B R_{cl}$$

- M > Mj: sistema contrai por ação da gravidade;
- Gás em equilíbrio hidroestático no com T = T<sub>virial</sub>.

# Formação de estruturas: protogaláxias



- Densidade média:  $\rho_{gas}(z) = \rho_0(1+z)^3$
- Entre z ≈ 1000 a z ≈ 100, há uma pequena quantidade de e⁻ livres que interage com fótons via espalhamento compton: temperatura de bários e fótons está acoplada:

$$T_b \approx T_0(1+z)^2$$
;  $M_i$ =cte  $\approx 10^5 M_{sun}$ 

• Após z ≈ 100, bárions esfriam adiabaticamente devido a expansão do universo:  $T_b \approx \rho_{gas}^{2/3} \approx (1+z)^2$ :

$$M_J \approx 5.7 \times 10^3 M_{Sun}[(1+z)/10]^{3/2}$$

#### As primeiras estrelas: resfriamento

 Critério de Jeans é condição para formação de protogaláxias, mas gás é pouco denso para formar estrelas;

$$\mathbf{M_j} = (3/)^{1/2} (5f_{gas}k_BT/\mu m_pG)^{3/2}$$

- Para formar estrelas, gás precisa dissipar energia cinética via emissão de radiação: resfriamento;
- Problema: primeiro estado excitado de H tem alta energia (Lyα ≈ 10.2ev), resfriamento somente é eficiente para T ≥ 10<sup>4</sup>K;
- Solução: resfriamento por Hidrogênio molecular (eficiente até T ≈ 3000K);

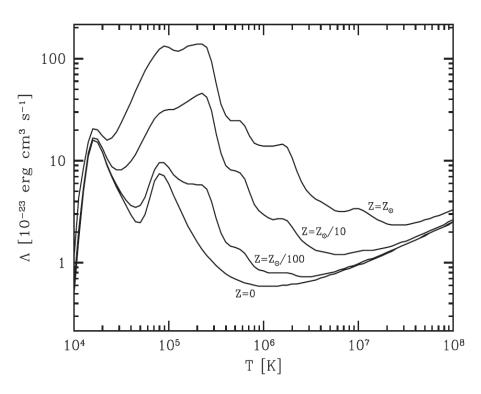
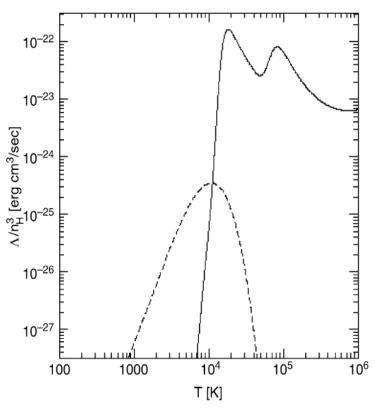
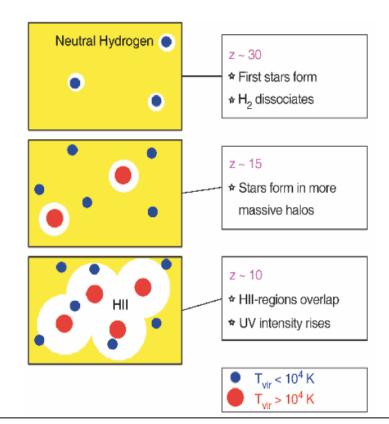


Fig. 8.1. Cooling functions for primordial (Z=0) gas (assuming  $n_{\rm He}/n_{\rm H}=1/12$ ), and for gases with metallicities  $Z/Z_{\odot}=0.01$ , 0.1 and 1.0, as indicated. [Based on data published in Sutherland & Dopita (1993)]

#### As primeiras estrelas: resfriamento



**Fig. 9.29.** Cooling rate as a function of the temperature for a gas consisting of atomic and molecular hydrogen (with 0.1% abundance) and of helium. The solid curve describes the cooling by atomic gas, the dashed curve that by molecular hydrogen; thus, the latter is extremely important at temperatures below  $\sim 10^4$  K. At considerably lower temperatures the gas cannot cool, hence no star formation with take place.



- Primeiras estrelas se formam em halos menos massivos;
- Radiação emitida por Pop III destrói H<sub>2</sub> e cessa formação estelar;
- Supernovas enriquecem meio com metais: resfriamento ia Extrigais eficiente, restrelas Pop II se formam.

## Os primeiros buracos negros supermassivos

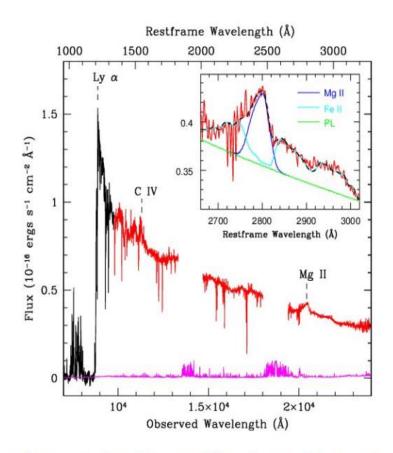


Figure 2. Combined optical/near-infrared spectrum of J0100+2802. Based on the Mg II Full Width at Half Maximum (FWHM=5130  $\pm$  150 km s<sup>-1</sup>), and the continuum luminosity at the rest-frame wavelength of 3000 Å  $(3.15 \pm 0.47 \times 10^{47} \text{ergs s}^{-1})$ , Wu et al.  $(2015)_{\text{A}}$  mate a black hole mass  $(1.24 \pm 0.19) \times 10^{10} M_{\odot}$  for this source.

- SMBHs com massas de ≈ 10<sup>10</sup>M<sub>sun</sub> observados ≈ 1Gyr após Big Bang. Dilema: ou SMBHs acretou matéria acima da taxa de Eddington por maior parte de sua existência, ou sementes tem massa de 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup>M<sub>sun</sub>;
- Dois caminhos possíveis para criar sementes com essas massas:
- 1. Colapso direto: radiação de estrelas Pop III em halo vizinho injetam energia e impedem que nuvem de gás em halo massivo colapse. Nuvem cresce até atingir massas de 10<sup>4</sup>- 10<sup>5</sup>M<sub>sun</sub> e colapsa diretamente em um buraco negro.
- 2. Aglomerado de estrelas Pop III: semelhante ao colapso direto, com a diferença que a nuvem se fragmenta em estrelas em vez de formar um buraco negro.

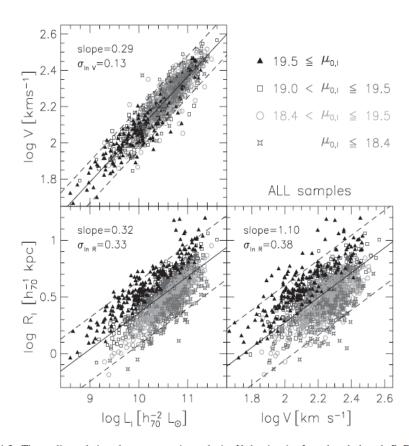
3000 Å  $(3.15 \pm 0.47 \times 10^{47} {\rm ergs~s^{-1}})$ , Wu et al.  $(2015)_{\rm A}$  first Schnorr Müller, Astronomia Extragaláctica, Junho 2017 mate a black hole mass  $(1.24 \pm 0.19) \times 10^{10} M_{\odot}$  for this source.

## Formação de galáxias disco

- Desvios de simetria esférica e efeitos de maré de flutuações vizinhas geram torques: halos em rotação (alguns poucos km/s);
- Conservação de momentum angular: gás dissipa energia e colapsa em direção ao centro do halo, emissão de radiação é isotrópica, então momentum angular é conservado. Gás forma disco.

Simulação de formação de uma galáxia disco: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=RBv">https://www.youtube.com/watch?v=RBv</a> GUd2rJQ

# Galáxias disco: origem das relações de escala



Relação de Tully Fisher na Banda I:

$$L_{\rm d} = 2.9 \times 10^{10} h^{-2} \, \rm L_{\odot} \left( \frac{V_{\rm obs}}{200 \, \rm km \, s^{-1}} \right)^{3.44}$$

Fig. 11.2. The scaling relations between rotation velocity V, luminosity L, and scale length R. Different symbols represent different bins in central surface brightness, as indicated (all photometry is in the I band). Solid lines show the best-fit linear relations between  $\log V$ ,  $\log L$  and  $\log R$ . The  $2\sigma$  observed scatter is indicated by the dashed lines, and the slope and scatter are listed in each panel scatter from Courteau nomia Extragaláctica, Junho 2017 et al. (2007) by permission of AAS]

# Galáxias disco: origem das relações de escala

• Assumindo que o halo é uma esfera isotérmica, a densidade é dada por:

$$\rho(r) = V_{\rm vir}^2/(4\pi Gr^2)$$

onde  $V_{vir}$  é velocidade circular em  $r_{vir}$  definido como sendo o raio onde densidade do halo é  $\Delta_{vir}\rho_{crit}(z)$ .

$$\rho_{\rm crit} = 3H^2(z)/(8\pi G)$$

 $ho_{\rm crit} = 3H^2(z)/(8\pi G)$ • A partir do Leorema do Virial oblem-se:

$$r_{
m vir} = \sqrt{rac{2}{\Delta_{
m vir}(z)}} rac{V_{
m vir}}{H(z)} M_{
m vir} = \sqrt{rac{2}{\Delta_{
m vir}(z)}} rac{V_{
m vir}^3}{GH(z)}$$
 aba no disco, a massa do disco é:

$$M_{\rm d} \approx 1.3 \times 10^{11} h^{-1} \,\mathrm{M}_{\odot} \left(\frac{m_{\rm d}}{0.05}\right) \left(\frac{V_{\rm vir}}{200 \,\mathrm{km \, s^{-1}}}\right)^3 \mathcal{Q}^{-1}(z), \quad \mathcal{Q}(z) \equiv \left[\frac{\Delta_{\rm vir}(z)}{100}\right]^{1/2} \left[\frac{H(z)}{H_0}\right]$$

Allan Schnorr Müller, Astronomia Extragaláctica, Junho 2017

# Galáxias disco: origem das relações de escala

Como massa e luminosidade estão relacionados:

$$L_{\rm d} = A \left( \frac{V_{\rm obs}}{200 \,\rm km \, s^{-1}} \right)^3$$

onde

 $A\approx 1.3\times 10^{11}h^{-1}\,\mathrm{L_{\odot}}\left(\frac{m_\mathrm{d}}{0.05}\right)\left(\frac{\Upsilon_\mathrm{d}}{\mathrm{M_{\odot}}/\mathrm{L_{\odot}}}\right)^{-1}\mathcal{Q}^{-1}(z)$  essa relação se igua

$$\left(\frac{m_{\rm d}}{\Upsilon_{\rm d}}\right) \simeq 0.016 \left(\frac{V_{\rm obs}}{200\,{\rm km\,s^{-1}}}\right)^{0.44}$$

- Formação de estruturas no modelo λCDM é hierarquica: menores estruturas se formam primeiro;
- Estruturas menores se fundem para formar galáxias, grupos, aglomerados e superaglomerados de galáxias;
- Em média, um halo em z=0 sofreu 3 major mergers (razão entre massas ≤ 4) desde que adquiriu 1% de sua massa;
- Questão: qual impacto dessas interações na morfologia de galáxias?

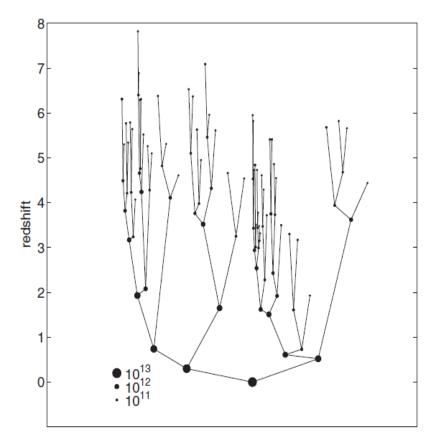
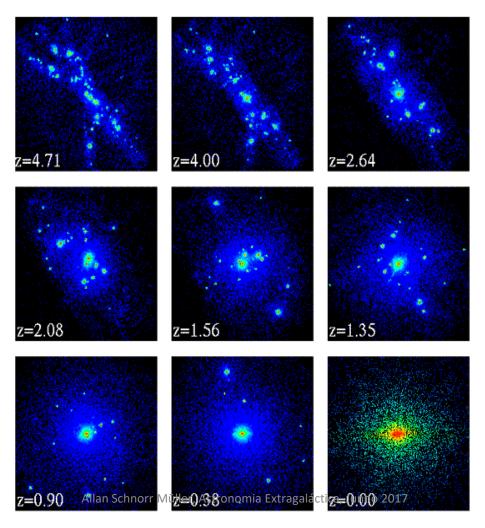


Figure 9.2. The merger tree: The merging history of a medium-size halo, with mass of  $10^{13}~M_{\odot}$  at z=0. Larger and larger dark matter halos assemble as the Allan Schnorr Müller, Astropomia that age of the universe increases (courtesy of Irina Dvorkin).



- Após fusão de halos, perda de energia via fricção dinâmica causa queda de galáxias em direção ao centro e fusão;
- Discos são frágeis e facilmente destruídos durante fusões;
- Gás é colisional e pode dissipar energia, diferente de estrelas e matéria escura. Morfologia da galáxia resultante depende da quantidade de gás (wet mergers e dry mergers);
- Wet mergers: gás e estrelas respondem de modo diferente a interação, gás perde momentum angular e flui em grandes quantidades em direção ao centro: starburst e atividade nuclear;
- Wet mergers: estrelas são redistribuidas em estrutura esferoidal. Se maioria do gás for consumido, galáxia resultante será elíptica. Se não, gás forma novo disco e galáxia resultante é espiral com bojo clássico.

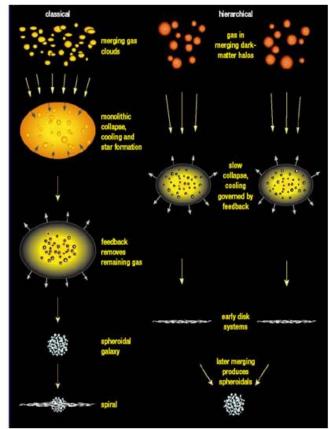


Figure 1: The two competing models of galaxy formation and evolution that could produce the galaxies we observe today. The classical top down'to model is shown on the left. This involves the collapse of a large cloud over time. The hierarchical or 'bottom up'.

Allan Schnorr Müller, Astronomia Extragaláctica, Junho

Figure 1: The two competing models of galaxy formation and evolution that could produce the galaxies we observe today. The classical top down't model is shown on the right and involves successive mergers of small-

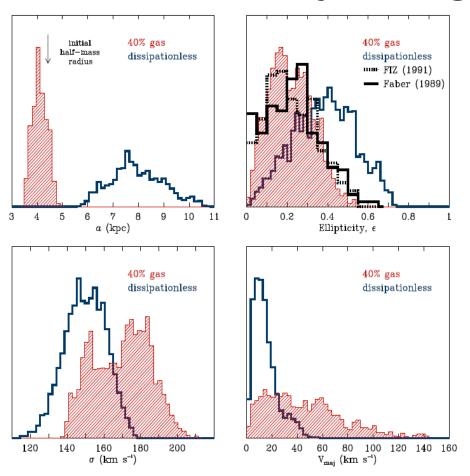


Fig. 3.— Histograms of remnant properties. Shown in (red) cross-hatch are the dissipational remnants, while the open (blue) histogram is for the dissipationless remnants. Histograms show, clockwise from upper-left, the semi-major axis a, the half-mass isophote ellipticity e, the central velocity dispersion  $\sigma$ , and the maximum velocity along the major axis  $V_{maj}$ . Each hategram of the half-mass radius of the properties of all fifteen remnants, viewed from 150 projections. The semi-major axis histogram includes the half-mass radius of the progenitor disk. The ellipticity histogram includes data on observed ellipticities from Faber et all (1989) and Franx et all (1991).

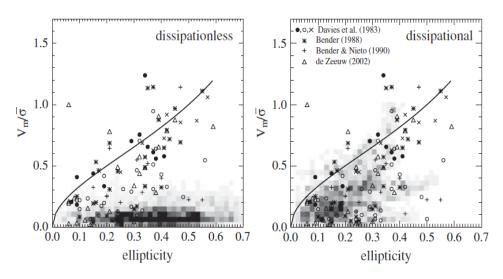


Fig. 13.5. The anisotropy diagram of  $v_m/\overline{\sigma}$  vs. ellipticity for dissipationless (left-hand panel) and dissipational (right-hand panel) merger remnants obtained from a large suite of hydrodynamical simulations (gray scale). Overplotted, with different symbols, are data for observed ellipticals from Davies et al. (1983), Bender (1988), Bender & Nieto (1990), and de Zeeuw et al. (2002). Note that the dissipational simulations yield remnants in much better agreement with these data. The solid line in both plots corresponds to Eq. (13.25), and indicates the expected relation for an oblate isotropic rotator. [Adapted from Cox et al. (2006) by permission of AAS]

Conclusão: wet major mergers explicam várias propriedades observacionais de galáxias elípticas de mais baixa massa (fast-rotators). Galáxias elípticas massivas (slow-rotators) se formamem dry mergers.

# Formação de galáxias elípticas: plano fundamental

- Plano Fundamental  $R_{
  m e} \propto \sigma_0^{1.4} \, \langle I \rangle_{
  m e}^{-0.85}$
- O modelo de formação de galáxias elípticas via mergers é capaz de reproduzir o plano fundamental?
   Sim, mas somente se elípticas forem formadas via wet mergers;
- Porém, dry mergers de galáxias elípticas mantém forma plano fundamental;
- Conclusão: galáxias elípticas massivas (slow rotators) são formadas em dry mergers de galáxias elípticas menos massivas;

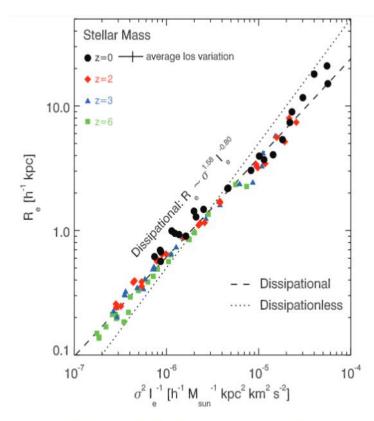


Fig. 3.—FP relation produced by the merging of gas-rich disk galaxies with dark matter halos, star formation and supernova feedback. Shown are remnants produced by mergers appropriate for redshifts z=0 (black circles), z=2 (red diamonds), z=3 (blue triangles), and z=6 (green squares) with nearly radial, parabolic orbits. The dissipational merging of pure disk models produces an FP nearly parallel to the observed infrared FP (Pahre et al. 1998b) and is almost independent of the redshift scalings of the progenitor systems.

#### Formação de galáxias elípticas massivas

Formação de uma galáxia elíptica + efeitos de feedback no gás:

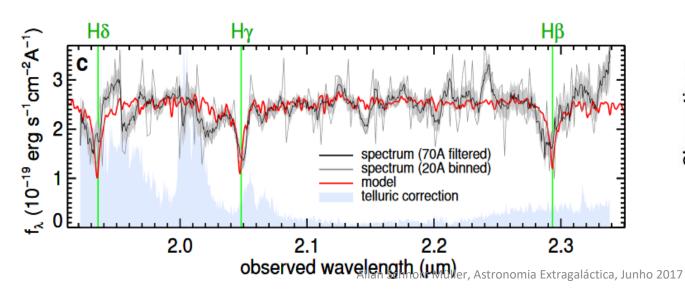
http://www.illustris-project.org/movies/illustris movie elliptical formation 1pMpc.mp4

#### A massive, quiescent galaxy at redshift of z=3.717

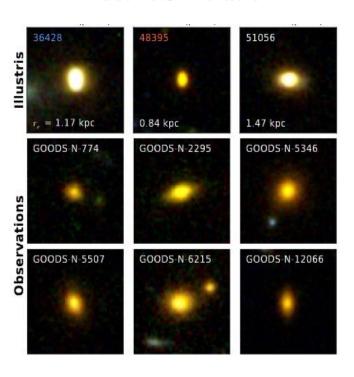
Karl Glazebrook<sup>1</sup>, Corentin Schreiber<sup>2</sup>, Ivo Labbé<sup>2</sup>, Themiya Nanayakkara<sup>1</sup>,

Glenn G. Kacprzak<sup>1</sup> Pascal A. Oesch<sup>3</sup>, Casey Papovich<sup>4</sup>,

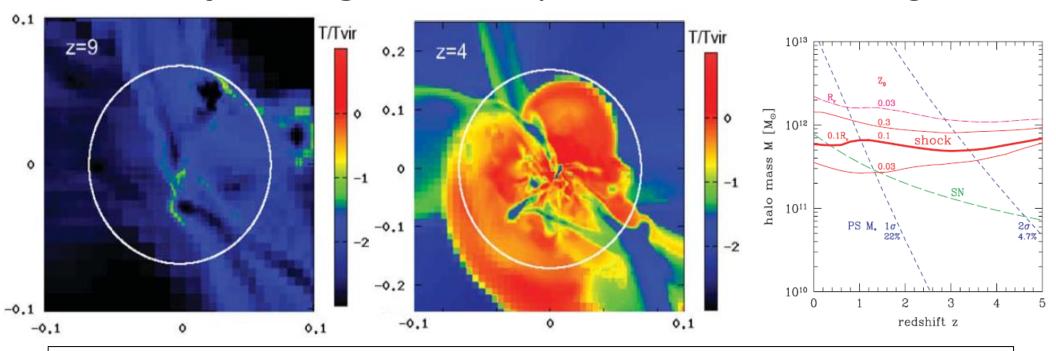
Lee R Spitler<sup>5,6</sup>, Caroline M. S. Straatman<sup>7</sup>, Kim-Vy H. Tran<sup>4</sup>, Tiantian Yuan<sup>8</sup>



# Compact Galaxies at z = 2 in the Illustris Simulation



## Formação de galáxias elípticas: shock heating



- Gás que não é denso suficiente para resfriar eficientemente está em equilíbrio no halo, T<sub>gás</sub>=T<sub>vir</sub>;
- Se halo massivo (curva magenta na figura a direita) um choque se forma próximo ao raio virial. Gás caindo no halo é aquecido a T<sub>vir</sub> pelo choque, entra em equilíbrio no halo, não alcançando o disco. Formação estelar cessa.
- Galáxias quiescentes em altos redshifts: se formaram na regiões mais densas, atingindo M ≈ 10<sup>12</sup>M<sub>sun</sub> rápido.
   Allan Schnorr Müller, Astronomia Extragaláctica, Junho 2017

## Formação de galáxias elípticas: shock heating

Formação de choques no raio virial e aquecimento do gás (shock heating): <a href="http://www.illustris-project.org/movies/illustris-movie-sb0-shocks.mp4">http://www.illustris-project.org/movies/illustris-movie-sb0-shocks.mp4</a>

# Formação de galáxias elípticas: red but not dead

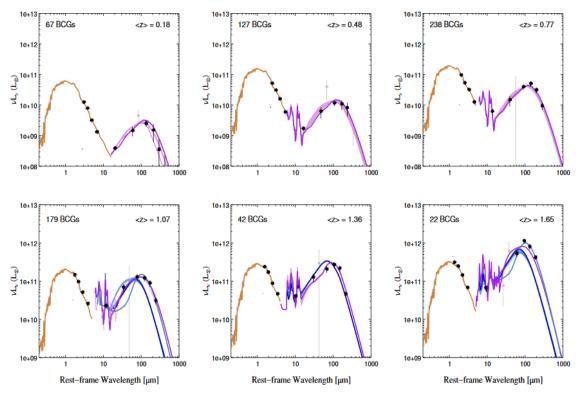


Figure 6. Stacked  $\nu L_{\nu}$  BCG SEDs fitted with a stellar model component in gold, a 'warm' star-forming component in light and dark blue, 'cold' cirrus dust emission in teal (green/blue), and a 'warm plus cold' star-forming component in light and dark pink/purple, customised to each data bin according to the description in Section 5.2.3. The 'warm' and 'cold' blackbody components are considered to be those with a peak wavelength shortward and equal to or longward of 100  $\mu$ m, respectively, while the broader 'warm plus cold' component includes clear contributions from both a warm and cold component, with an effective peak wavelength at  $\sim 100 \mu$ m. Stacked fluxes with S/N < 3 appear as grey data points, and the non-detections with stacked fluxes  $\sim 0 \mu$ Jy do not appear. The top 5-20 CE01 star-forming models with the highest likelihoods of truly representing the data appear in light blue for the warm component and pink for the warm-plus-cool component, and the single star-forming model (either from the CE01 or Polletta template library, or Kirkpatrick et al. 2012) which best matches the significant (S) and the points is tracellary a darker, thicker fine  $\frac{1}{2}$ 0.17

# Formação de galáxias elípticas: core/cusp

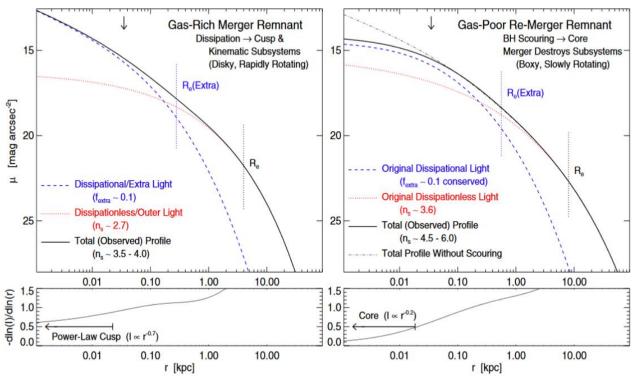


Figure 5. Summary of the physical properties of spheroid profile shapes (here for a typical  $\sim L_*$  elliptical), as formed in a major, gas-rich merger (left) and then modified by a major gas-poor, spheroid-spheroid re-merger (right). Lower panels show the logarithmic derivative of the total (observed) profile. In the original merger, stars from the premerger disks are violently relaxed into an extended Sersic-like envelope  $(n_s \sim 2.7)$ . Conservation of phase-space density prevents this component alone from reaching the high densities of the observed ellipticals. Gas dissipation, however, yields a nuclear starburst, leaving a dense "extra-light" component on top of the outer component, dominating the profile at  $r \leq 0.5$ -1 kpc. The nuclear "cusp" is the inward continuation of this dissipational component. Together this yields a global profile with typical  $n_s \sim 4$  and densities of the observed ellipticals (much higher than their progenitor spirals). In a re-merger, both components are "puffed up" by a factor of  $\sim 2$ , and scattering of stars broadens the original dissipationless/envelope component (to  $n_s \sim 3.6$ ). There is no new dissipation, but the remnant of the original dissipational component continues to dominate the profile within  $\sim 1$  kpc and is (in principle) separable. Black hole "scouring" scatters stars from the nuclear cusp/extra light—excusing  $\sim M_{\rm BH}$  worth of stars and flattening the central profile to form a nuclear "core." Although the apparent effects on the extra-light profile can be large, the total mass in the "scoured" region leave (the "impsing mass") is only in the extra light and outer components, but insufficient to simultaneously resolve the transformation of cusps into cores).

# Formação de galáxias: feedback

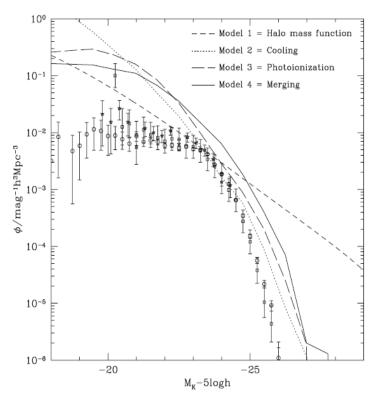


Figure 9.3. Computed (continuous curves) and observed (individual points) K-band z < 0.1 galaxy LFs (from Benson et al., 2003; reproduced by permission of the AAS). Model 1 (dashed line) shows the result of converting the dark matter halo mass function into a galaxy luminosity function by assuming a fixed mass-to-light ratio chosen to match the knee of the luminosity function. Model 2 (dotted line) shows the result when no feedback, photoionization suppression, galaxy merging, or conduction are included. Models 3 and 4 (long dashed and solid lines, respectively) show the effects of adding photoionization and then galaxy merging.

- Simulações produzem mais galáxias anãs e galáxias massivas do que o observado. Solução: feedback;
- Explosões de supernovas expulsam o gás de halos pouco massivos, impedindo formação de galáxia;
- Feedback de AGNs impede que gás aquecido por choques esfrie. Jatos rádio injentam energia no gás intergaláctico

