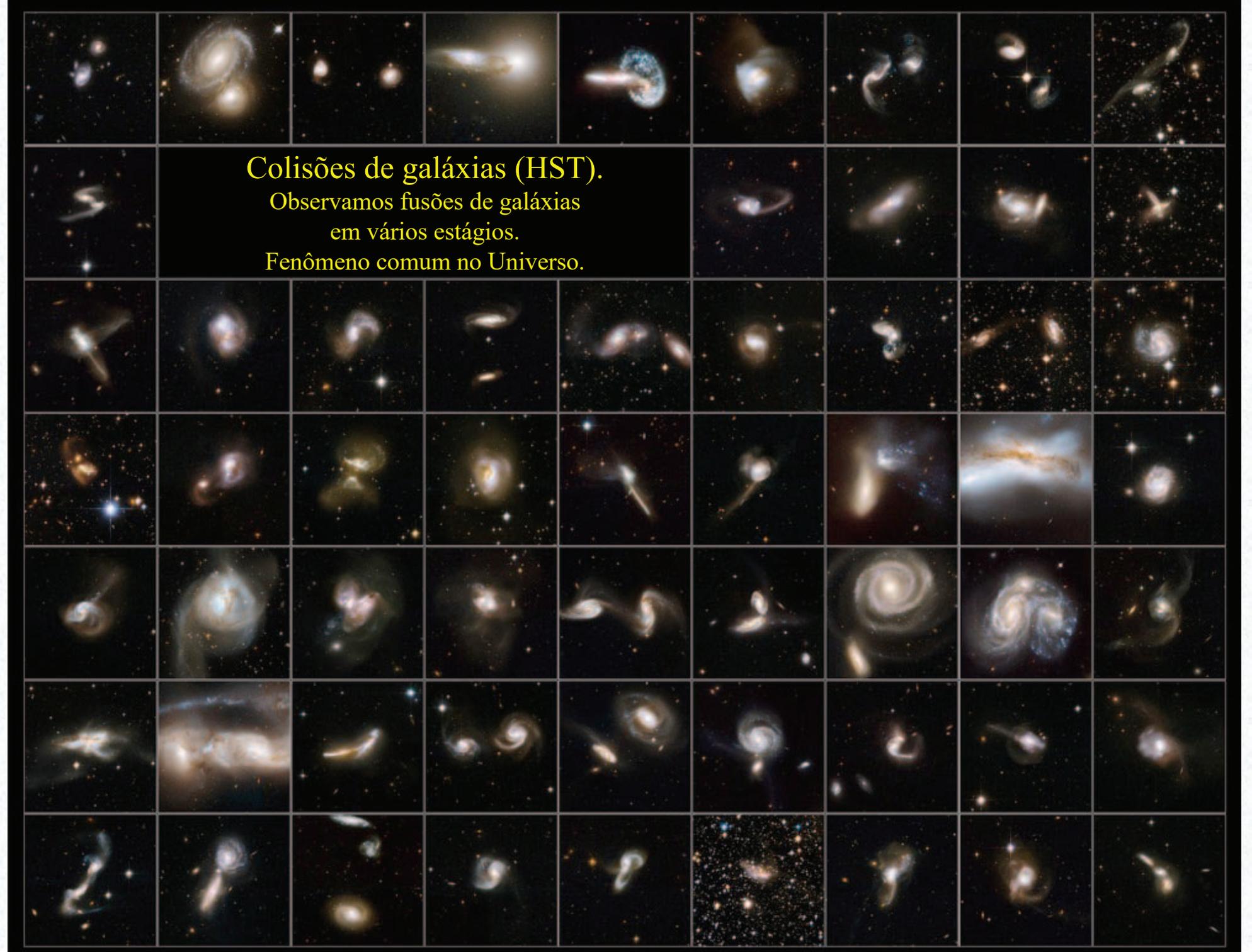


Galáxias distantes
Formação de grandes estruturas
Hidrodinâmica e astrofísica do gás
Cenário Monolítico e formação hierárquica
Matéria escura fria e quente
Formação de galáxias

Formação de galáxias

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

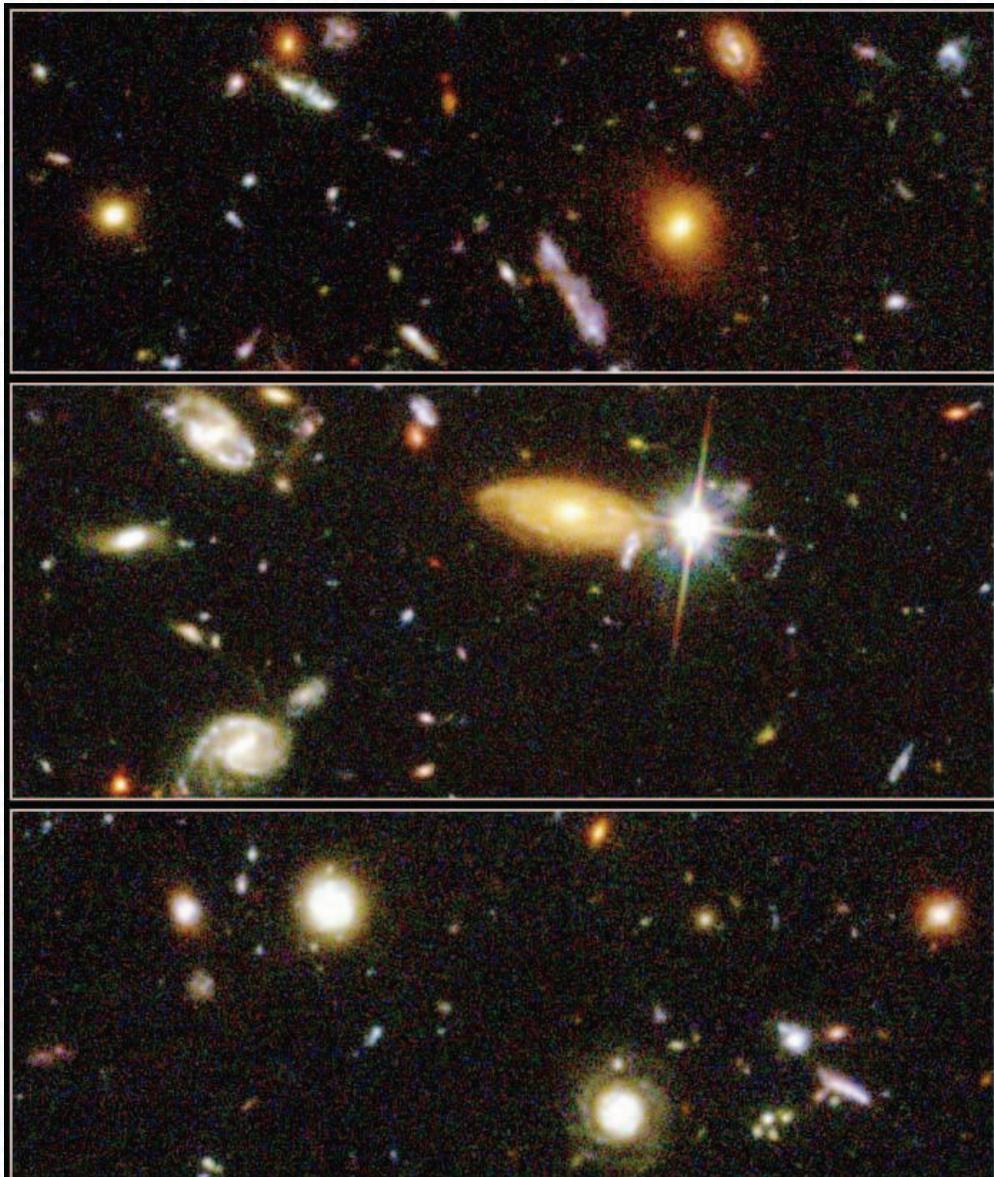
edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=110630



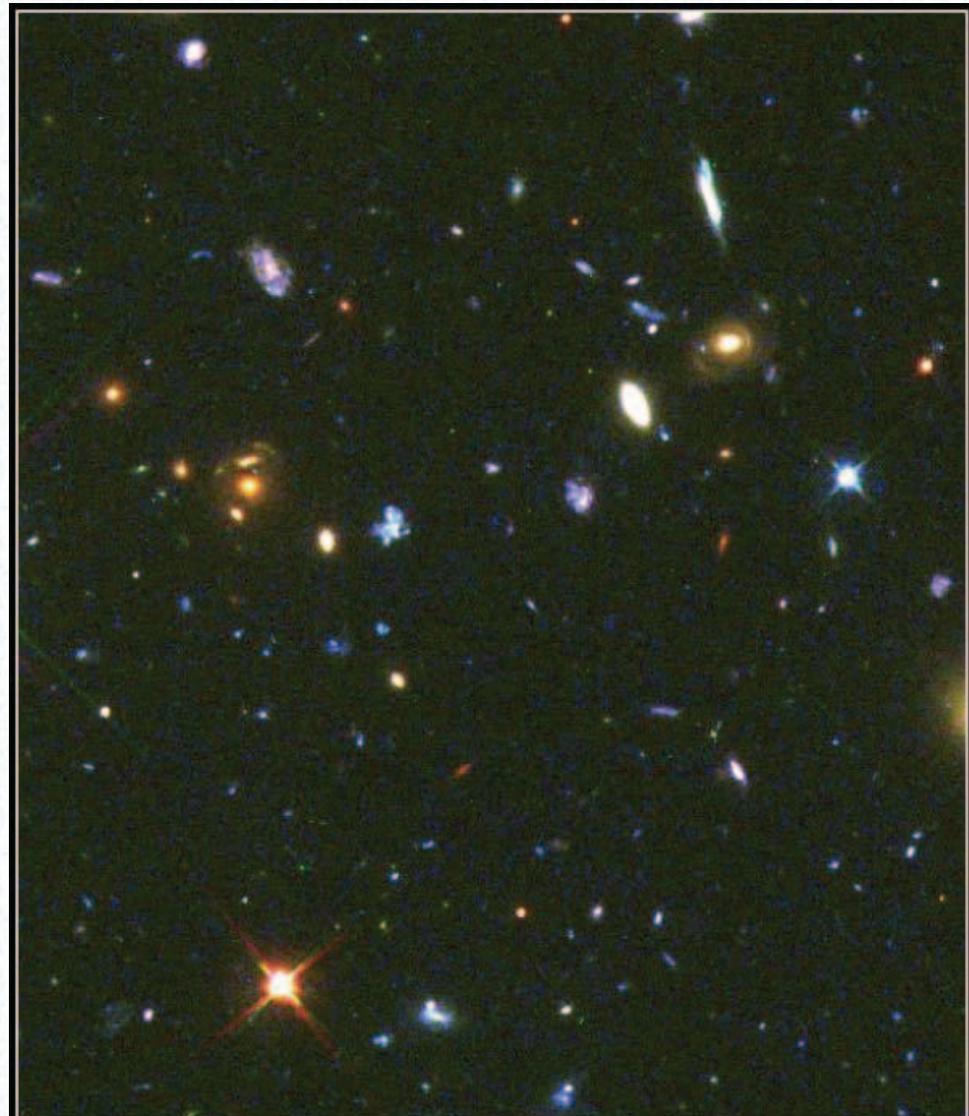
Colisões de galáxias (HST).
Observamos fusões de galáxias
em vários estágios.
Fenômeno comum no Universo.

Galáxias no passado

- Importante para o processo de formação de galáxias.



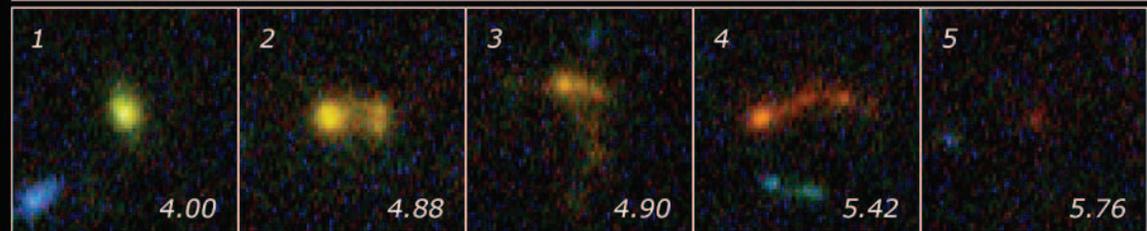
Hubble Deep Field Details HST · WFPC2
PRC96-01b · ST ScI OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST ScI), NASA



Irregular Blue Galaxies HST · WFPC2
PRC95-08b · ST ScI OPO · July 24, 1995
R. Windhorst (AZ State Univ.), NASA

Protogaláxias

Objetos compactos e irregulares, muito menores que a Via Láctea, observados quando o Universo tinha cerca de 1 bilhão de anos.



Galaxy Building Blocks in the Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • ACS/WFC

Primeira imagem profundo do JWST

- Feita no infra-vermelho na região do aglomerado de galáxias SMAC 0723.
- 12,5 h de exposição.
- Note a presença de arcos gravitacionais.
- Divulgada em julho/2022.



Formação de estruturas em grande escala

Simulação numérica mostrando a expansão do universo seguido pelo colapso de uma estrutura comparável a um aglomerado de galáxias.

Aqui só é simulada a **matéria escura** (que é a componente de maior massa).

A formação de objetos no Universo, de estrelas a super-aglomerados de galáxias, decorre da **instabilidade gravitacional**.

Regiões com densidade acima de um valor crítico colapsam.

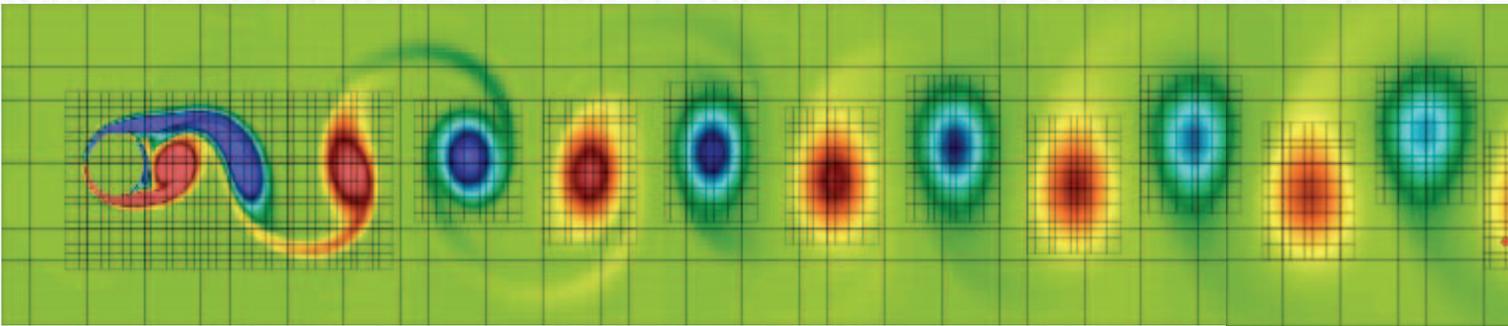
$z=49.000$

(z é como um “relógio”; $z = 0$ é hoje)

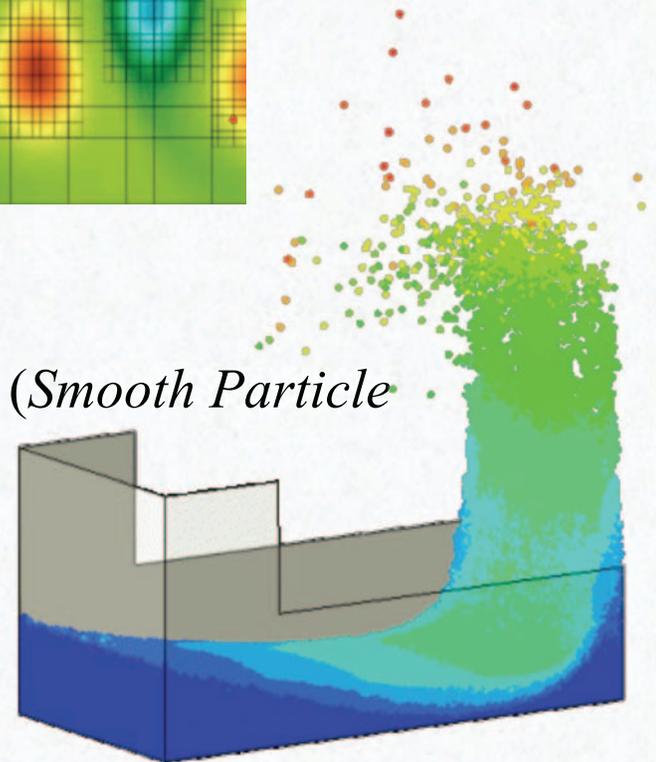


Simulação de fluidos

- Além da gravidade, podemos tratar da **hidrodinâmica do gás**.
- O gás pode ser representado pela densidade, pressão e temperatura em uma malha discreta.



- O gás pode ser representado por partículas “moles” (*Smooth Particle Hydrodynamics*, ou SPH)

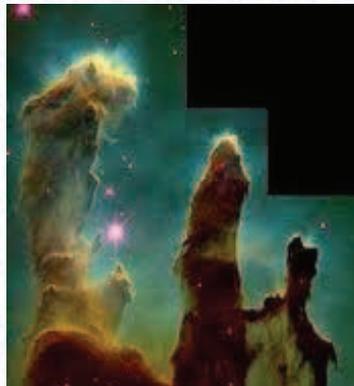


“Gastrofísica” (astrofísica do gás)

- Além da hidrodinâmica, os bárions tem **interações complexas** nos meios intra e extra-galácticos:
 - Formação e evolução estelar.
 - Estrelas massivas ou em duplas cerradas terminam a vida em eventos de supernovas → energia e “metais” voltam a componente de gás difuso.
 - Acréscimo de gás em buracos negros supermassivos e “feedback” de AGNs (jatos de partículas relativísticas).
 - Íons e elétrons interagem com campo magnético (não é modelado em SPH).
 - Física de turbulência e choque nem sempre são bem reproduzida em SPH.



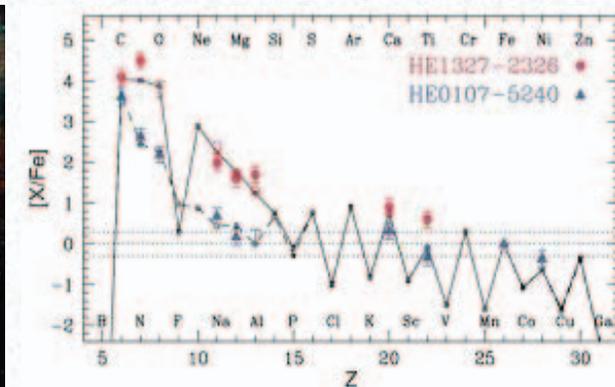
AGN



Formação estelar



Supernovas



Química

(10 Mpc de lado)

evolução da distribuição de matéria

→ formação da “teia cósmica”

→ formação de galáxias em halos de matéria escura

evolução da temperatura do gás

→ aquecimento do gás em

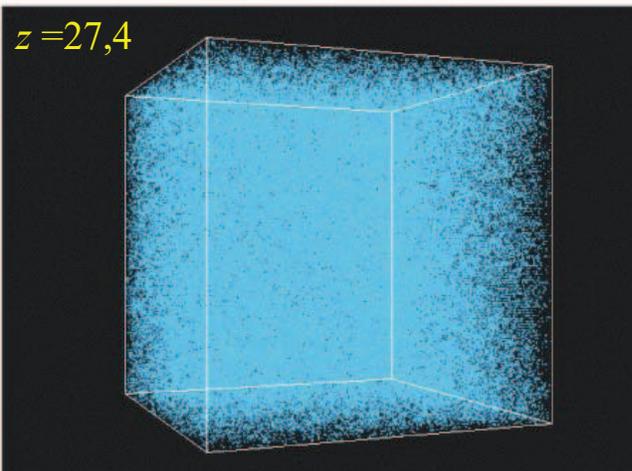
aglomerados de galáxias

→ aquecimento por “feed-back” de núcleos ativos e supernovas.

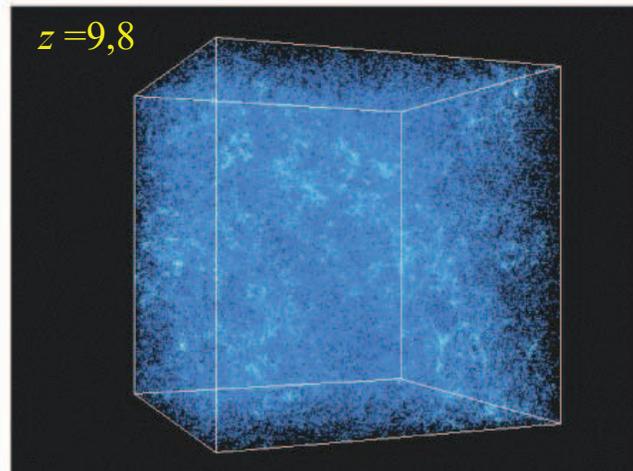
Simulação em uma “caixa” que expande junto com o Universo.

Illustris Simulation (www.illustris-project.org/media/). Springel +2014: rodando em 8192 cores durante 14 semanas

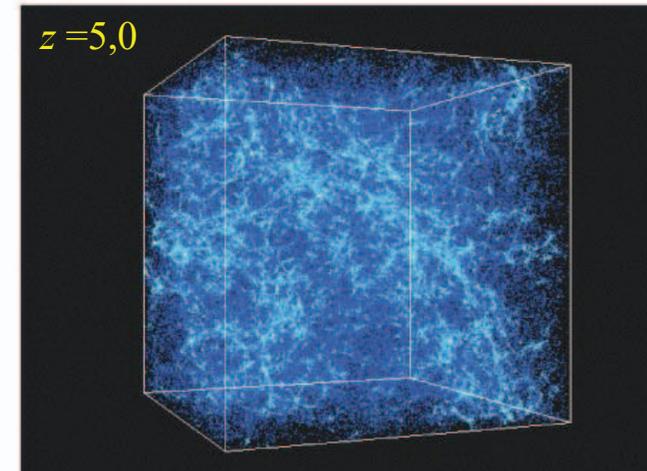
Formação de galáxias



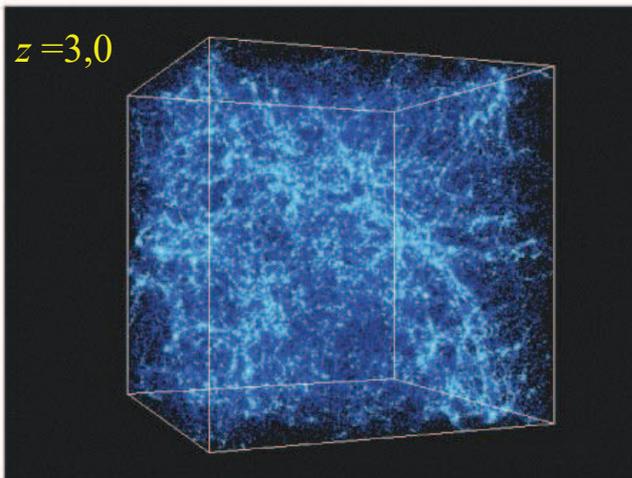
- 120 milhões de anos



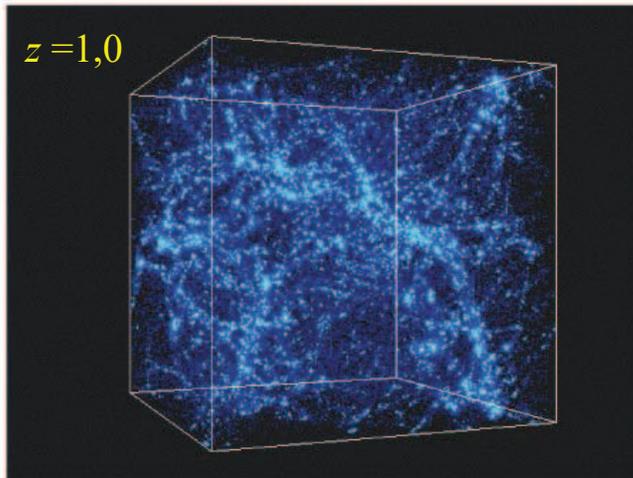
- 490 milhões de anos



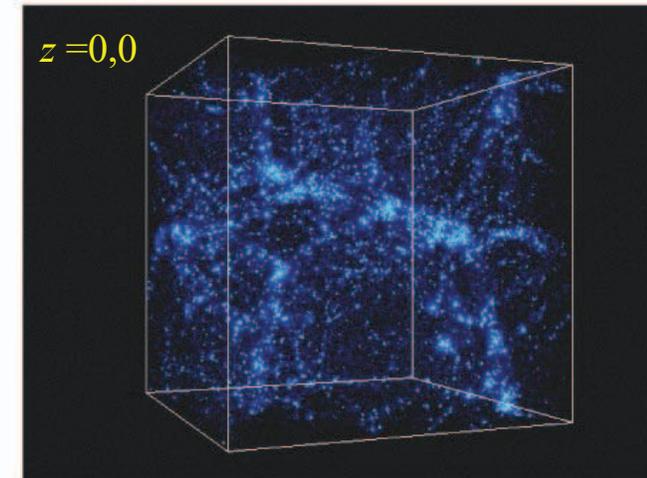
- 1,2 bilhões de anos



- 2,2 bilhões de anos



- 6 bilhões de anos

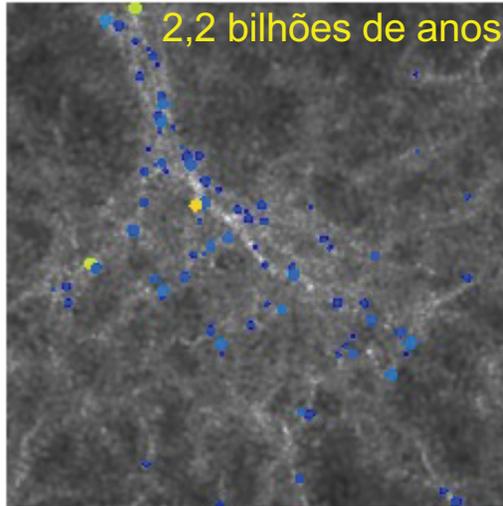


- 13,7 bilhões de anos

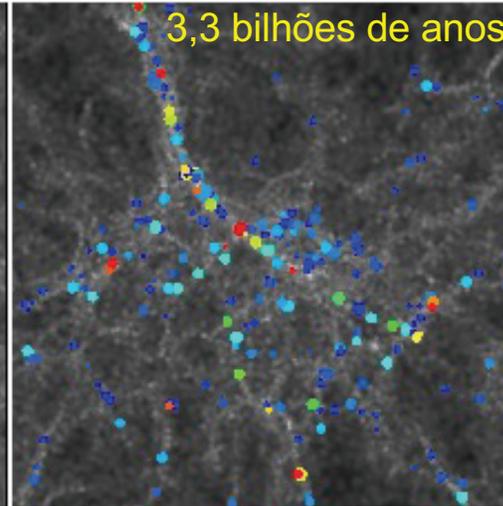
Formação de estruturas em grande escala: “teia cósmica”

Formação de galáxias

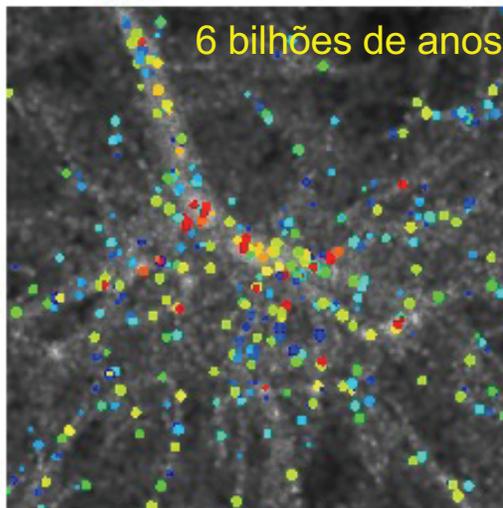
$z=3$



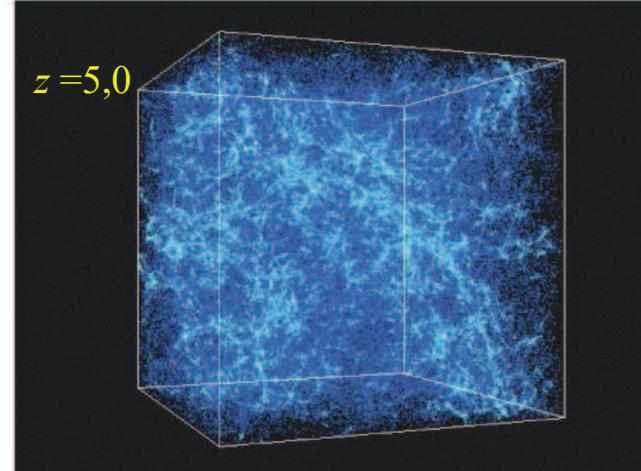
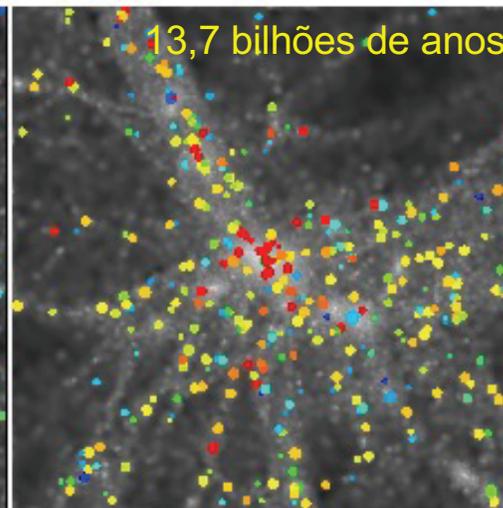
$z=2$



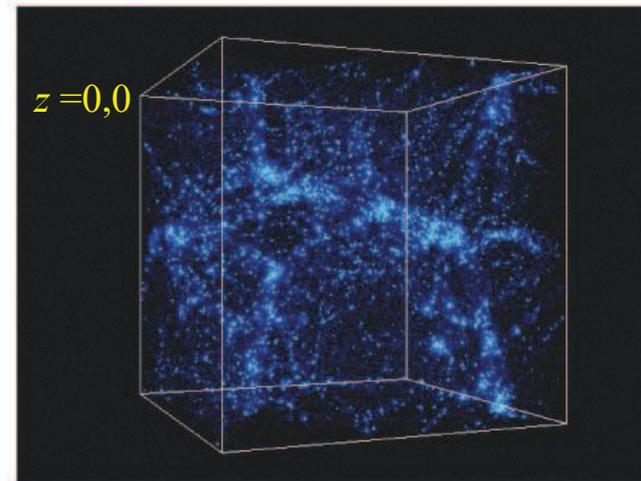
$z=1$



$z=0$



- 1,2 bilhões de anos



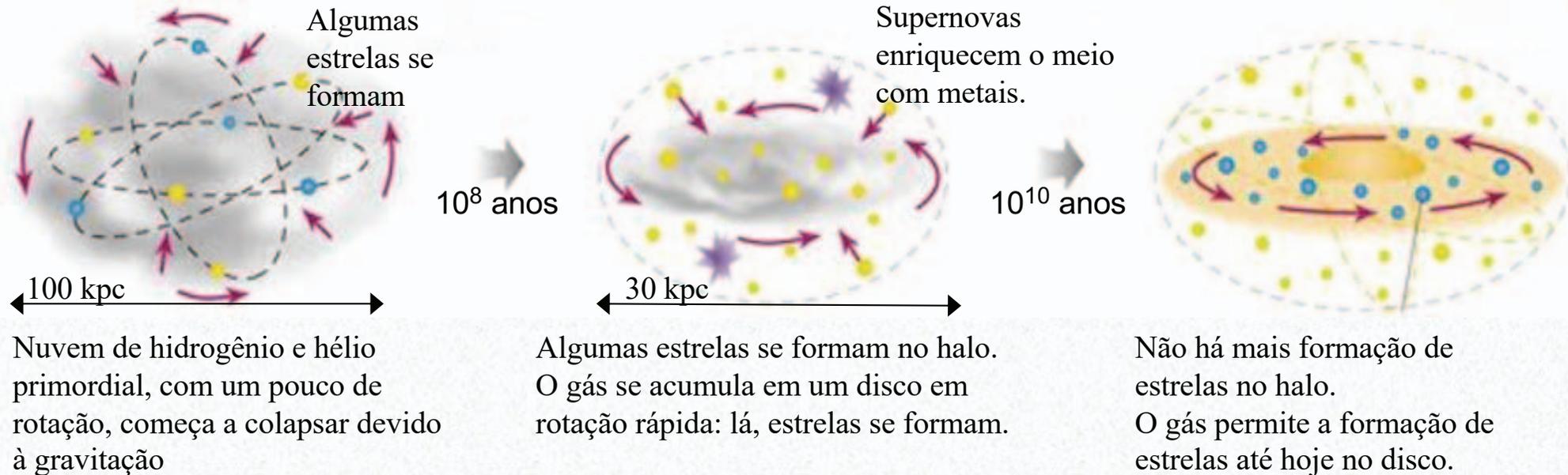
- 13,7 bilhões de anos

Resultados de
simulações
numéricas

- Vermelho estrelas velhas; azul estrelas jovens.
- Galáxias mais vermelhas estão nas regiões mais densas do Universo (aglomerados).
- As galáxias mais azuis, com formação estelar contínua (como a Via Láctea) estão nos filamentos e nos grupos.

Cenário colapso monolítico

- Cenário proposto para formação da Via Láctea em 1962 por Ollin Eggen, Donald Lynden-Bell e Allan Sandage. As galáxias se formariam a partir do colapso de uma grande massa de gás.



- Previsões:

- Estrelas do disco têm movimento circular e se formam gradualmente;
- Estrelas do halo e aglomerados globulares têm movimento radial e se formam rapidamente.

- Problemas do cenário monolítico:

- Existem aglomerados relativamente ricos em metais;
- Muitas estrelas do halo giram no sentido inverso do disco (observado na Via Láctea e M31)

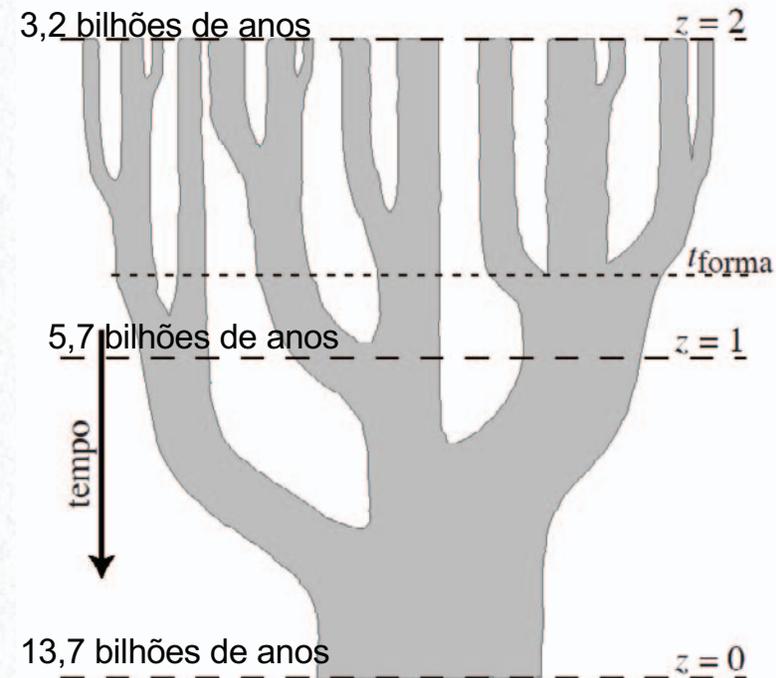
Cenário hierárquico:

“bottom–up scenario”

- Modelo proposto em 1978 por Leonard Searle e Robert J. Zinn e desenvolvido por White & Rees (1978), Blumenthal et al. (1984) e White & Frenk (1991)
- Pequenas galáxias (massa $\lesssim 10^6 M_{\odot}$) se formam por colapso.
- Fusão de pequenas galáxias, gradualmente até formação de galáxias gigantes.



“árvore de fusões”
(*merging tree*)



Matéria escura fria vs. quente

- Matéria escura quente: relativística quando desacopla.
 - Baixa massa (menor que a massa do elétron).
 - Melhor candidato: Neutrinos
- Matéria escura fria: não-relativística quando desacopla.
 - Geralmente, alta massa > 10 GeV (maior que a massa do próton).
 - Melhor candidato: partículas supersimétricas [SUSY] que interagem muito fracamente [WIMP] (???)
 - Supersimetria: extensão do modelo padrão, que prediz a existência de uma partícula associada a cada partícula do modelo padrão.

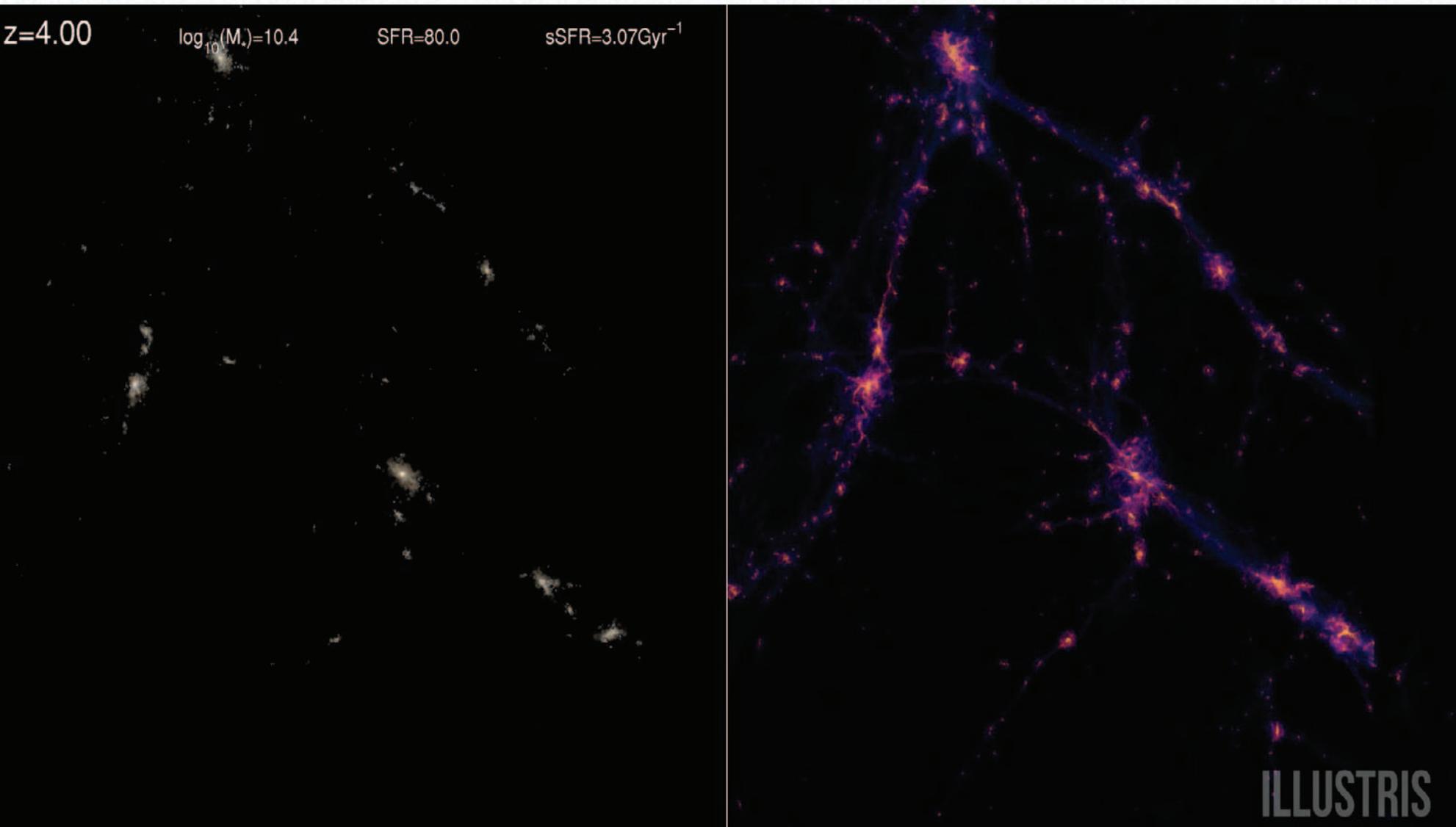
- **Cold Dark Matter (CDM)**
- Colapso de pequenas estruturas (Massa $\sim 10^6 M_{\odot}$)
- Formação hierárquica por fusões sucessivas.

- **Hot Dark Matter (HDM)**
- Colapso de grandes estruturas (Massa $\sim 10^{16} M_{\odot}$)
- Formação de galáxias por fragmentação.

Cenário Monolítico × Hierárquico

- Colapso monolítico: formação do bojo e galáxias anãs;
- Acréscimo hierárquico: formação do disco de espirais pelo canibalismo de galáxias anãs ricas em gás. Formação de elípticas por grandes fusões de galáxias.
- Para entendermos as propriedades das galáxias, incluindo a Via Láctea, além do mecanismo de formação é preciso levar em conta a **evolução** desses objetos e o **meio ambiente**.
- ➔ Evolução secular. (escala de tempo maior que o tempo dinâmico)
 - Crescimento do bojo (pseudo-bojo);
 - Formação e destruição de barras em galáxias espirais;
 - Transformação de espirais em lenticulares.
- ➔ Dependência com o meio ambiente
 - Em aglomerados e grupos, observamos principalmente Elípticas e Lenticulares
 - No campo, observamos principalmente Espirais.

Simulação da formação de uma Elíptica gigante



Luz das estrelas

Densidade do gás

Grupo NGC 4104

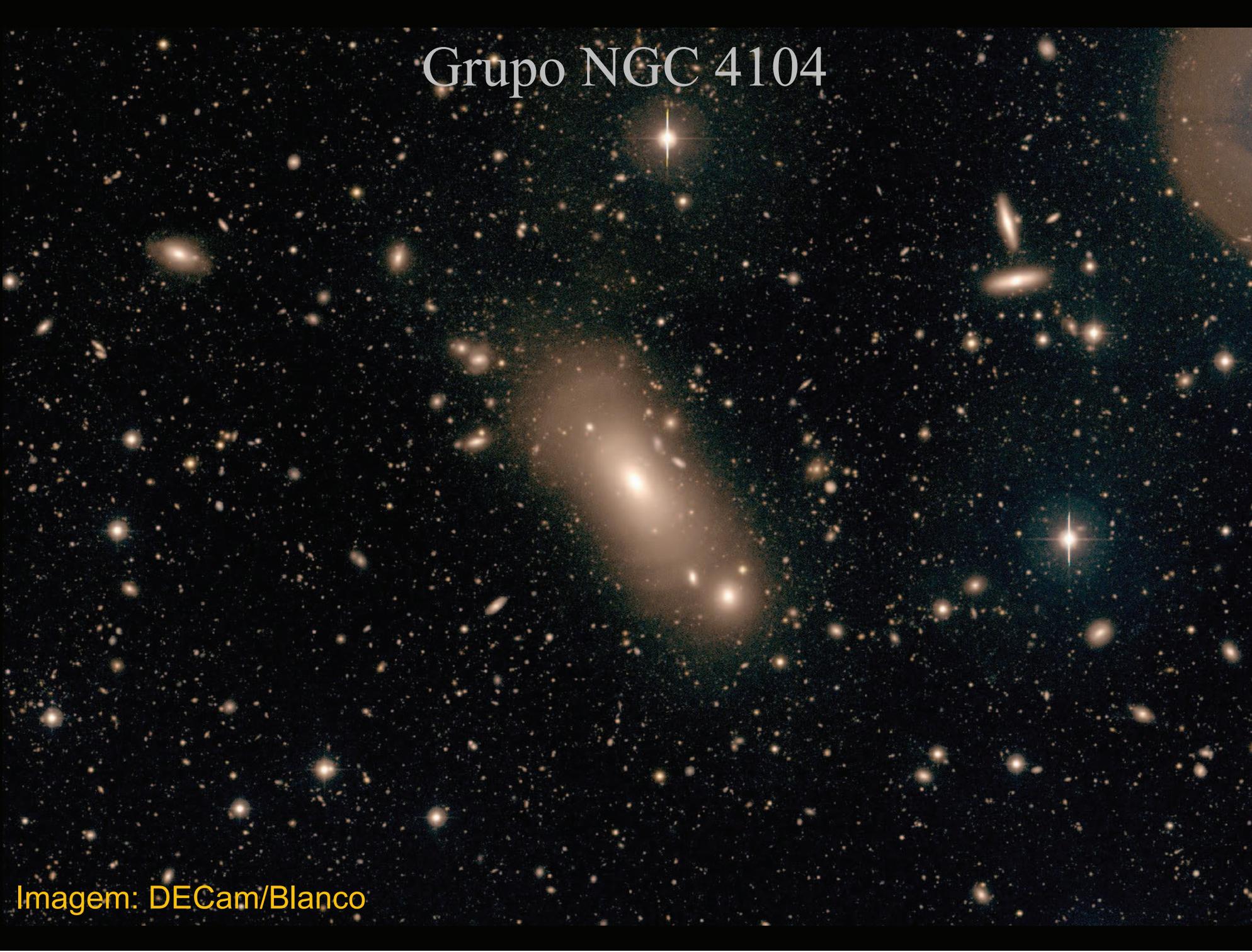
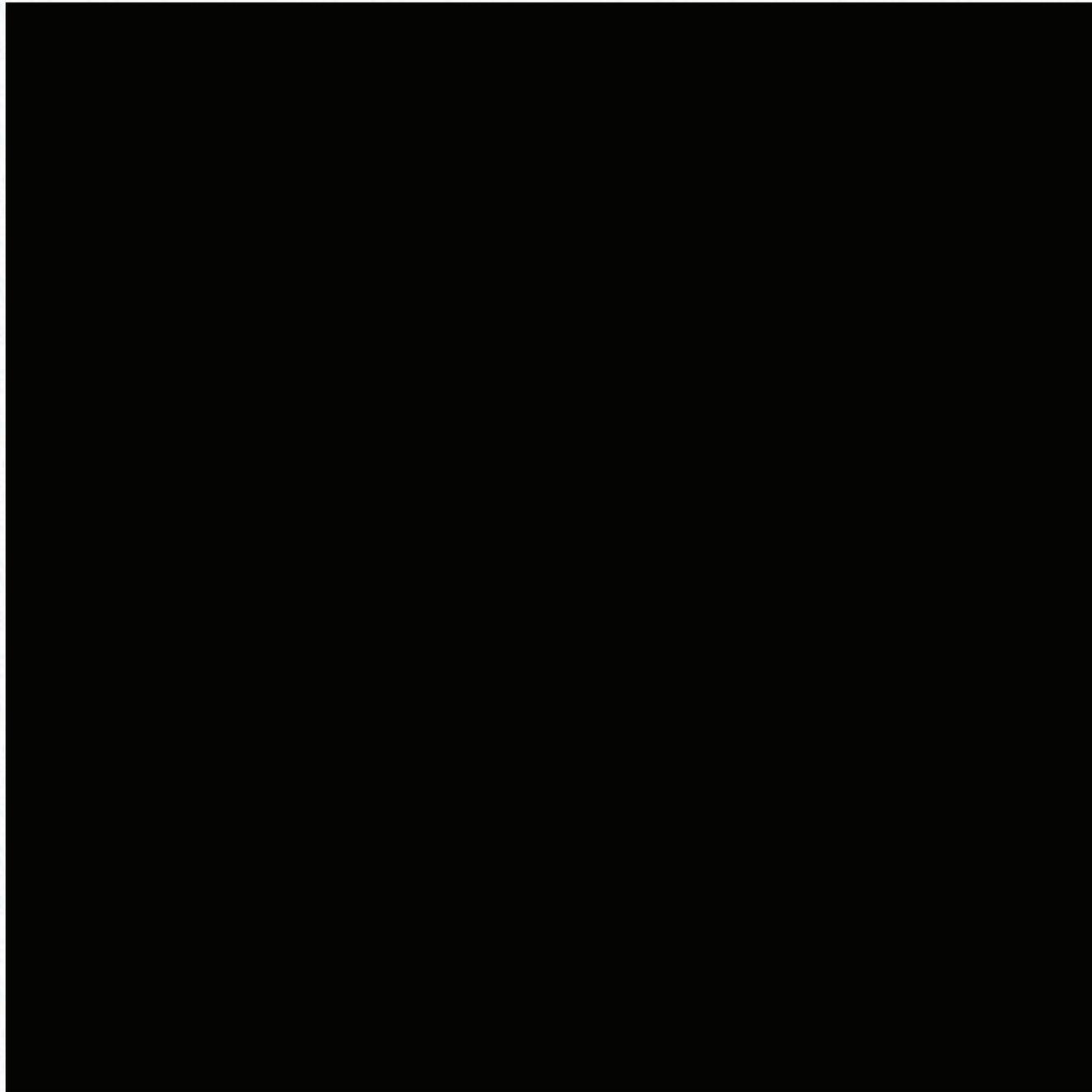


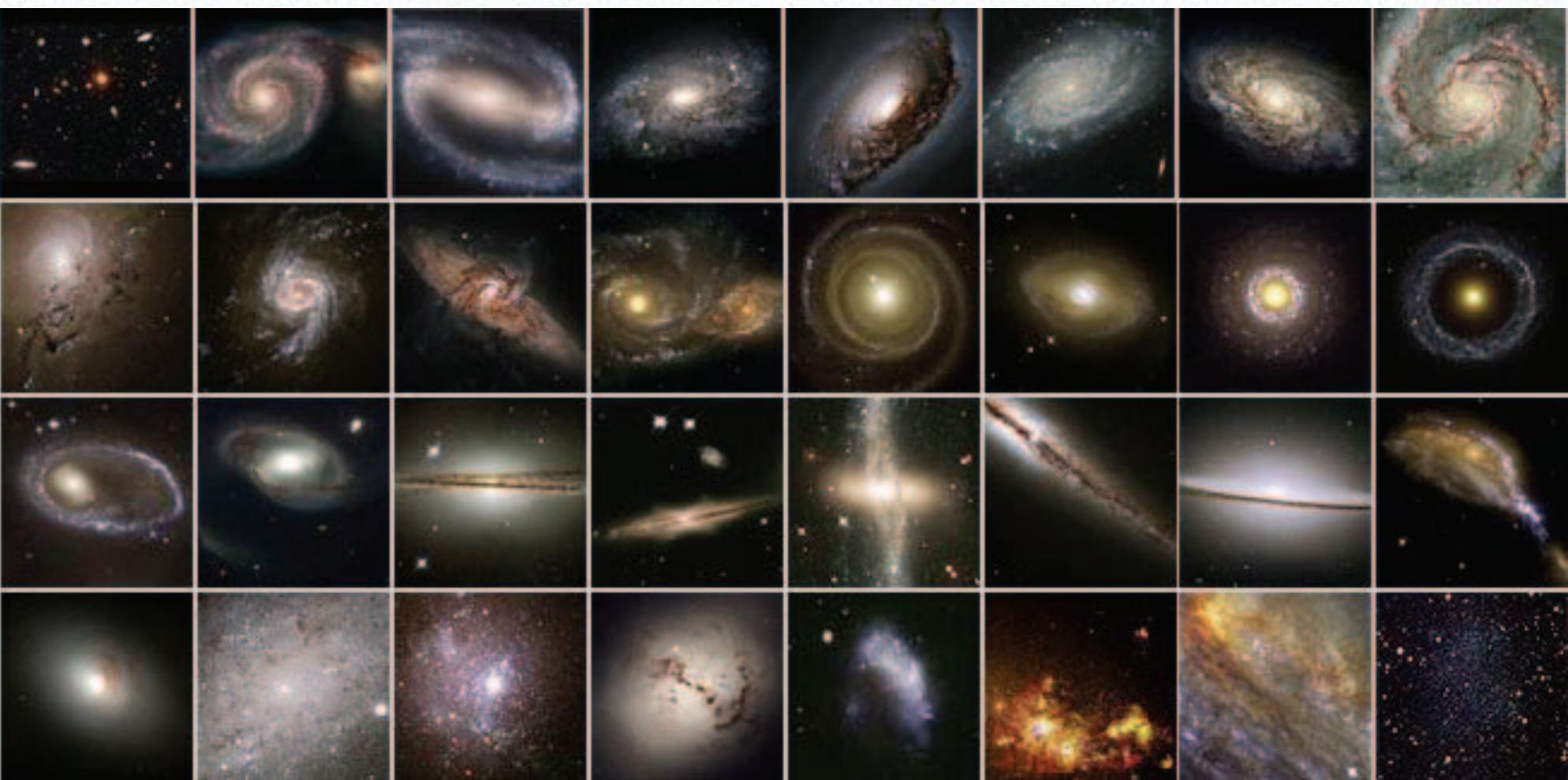
Imagem: DECam/Blanco

Simulação N- corpos/magneto- hidrodinâmica

Formação de uma **galáxia late-type (espiral)** de alta massa. O quadro tem 500 kpc de largura. Note, no final, a passagem de uma galáxia próxima que gera braços bem definidos.

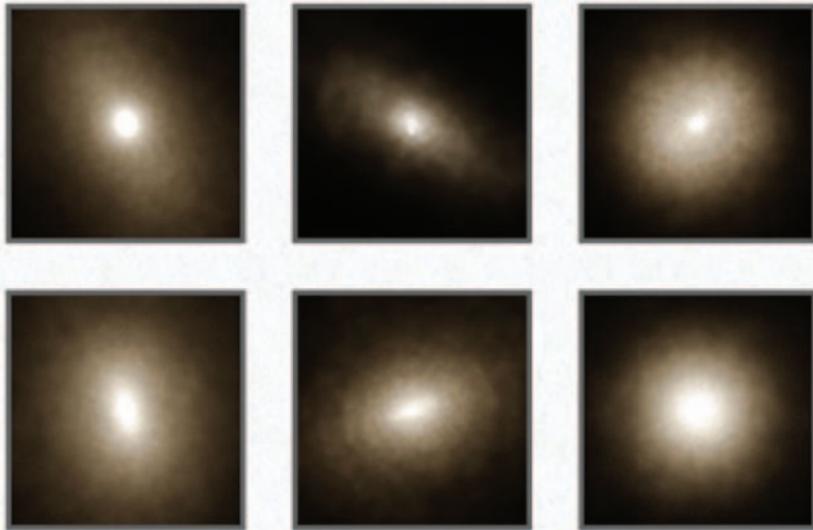


Formação de galáxias

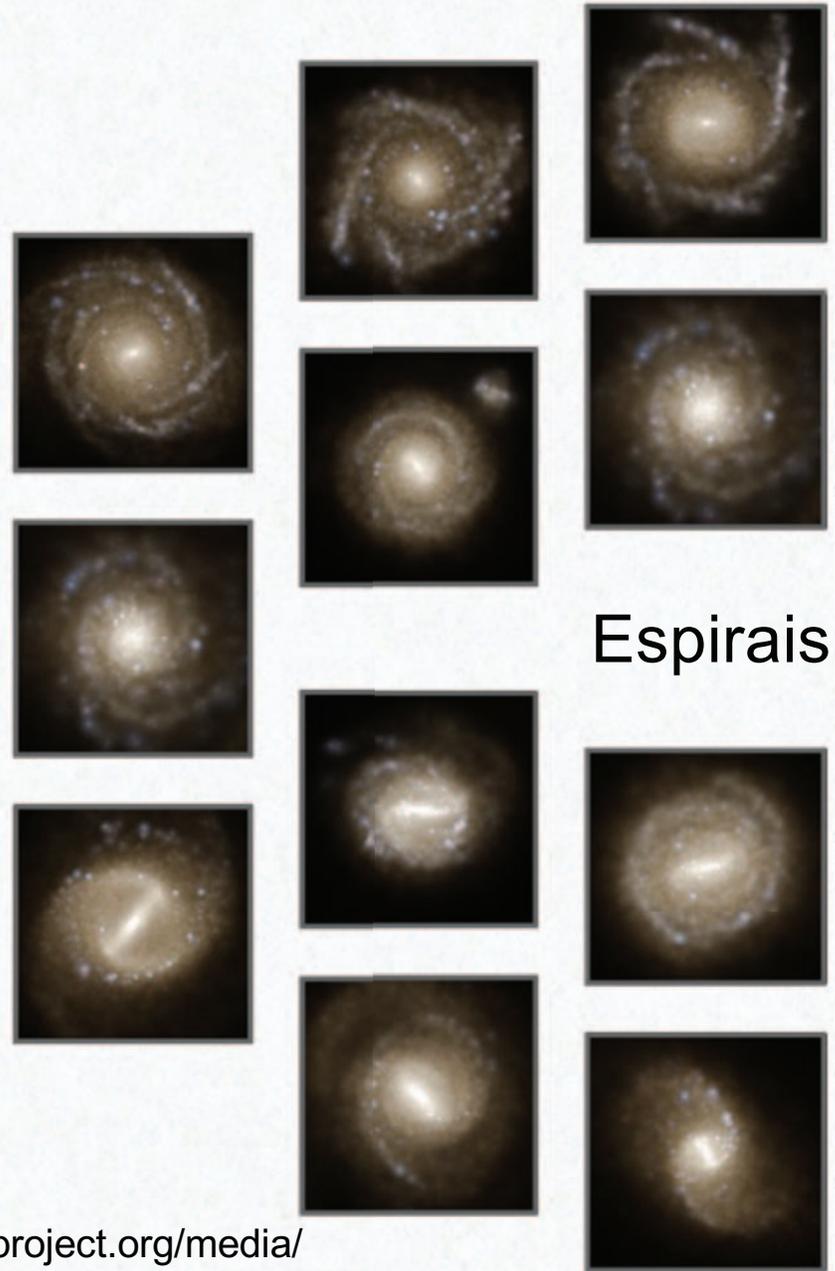


- Conhecemos muito sobre formação de galáxias mas ainda temos a aprender. A maior dificuldade está na interação do gás com supernovas e núcleos ativos de galáxias.

Imagens (*g, r, i*) de galáxias simuladas em $z=0$ (presente).

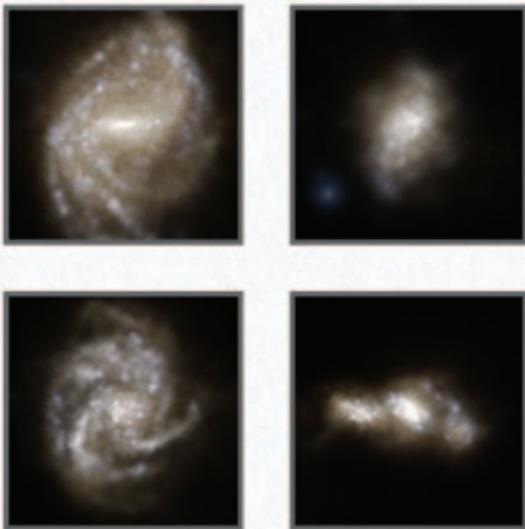


Elípticas



Espirais

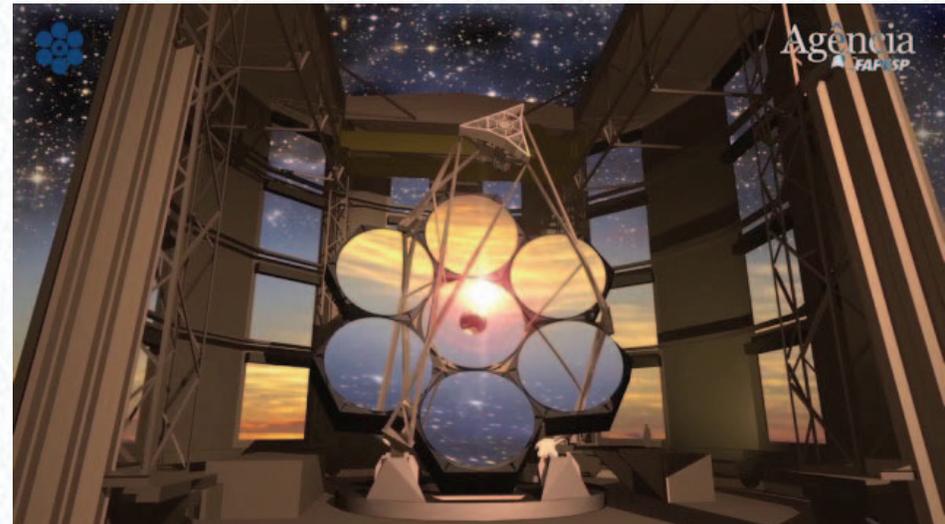
Lenticulares



Próxima geração

- James Webb Space Telescope (JWST)
 - Lançamento 25/12/2021 (Kourou/Guiana Fr)
 - Espelho primário de 6,5 m
 - Infravermelho próximo e médio (0,6–5 μm) e (5–28 μm)
 - <https://jwst.nasa.gov/>

- Giant Magellan Telescope (GMT)
 - Atacama, Chile (2029?)
 - Espelho primário de 7x8,4 m (25,4 m)
 - Visível, Infravermelho próximo (0,32 – 2.5 μm)
 - Participação de SP via FAPESP
 - <https://www.gmto.org/>
 - <https://www.gmt.iag.usp.br/>

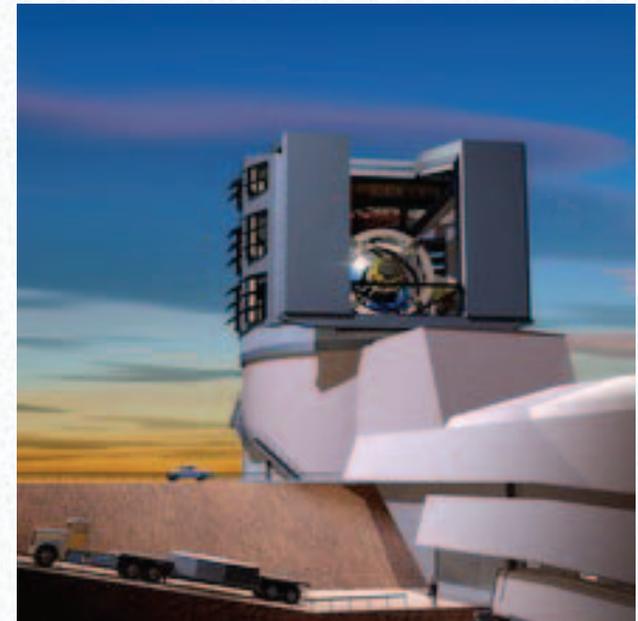


Próxima geração

- Extremely Large Telescope (ELT)
 - Cerro Amazonas, Atacama, Chile (2027?)
 - Espelho primário de 39,3 m
 - Visível e Infravermelho próximo
 - <https://elt.eso.org/>



- Vera Rubin Observatory (ex-LSST)
 - Atacama, Chile (2024)
 - Espelho primário de 8,4 m
 - Visível, Infravermelho próximo (0,32 – 2.5 μm)
 - Observações repetidas: variações temporais
 - <https://www.lsst.org/>



Próxima geração

- Square Kilometer Array (SKA)
 - Austrália e África do Sul (2027)
 - 197 antenas parabólicas e 130 mil antenas tipo árvore.
 - 50 MHz a 14 GHz
 - <https://www.skao.int/>



- Euclid
 - ESA, lançamento em 2023
 - Espelho primário de 1.2m
 - Visível, Infravermelho próximo
 - Survey de 15 mil graus quadrados, 26.5 mag (visível, deep survey)
 - <https://www.euclid-ec.org/>

Já lançado!

