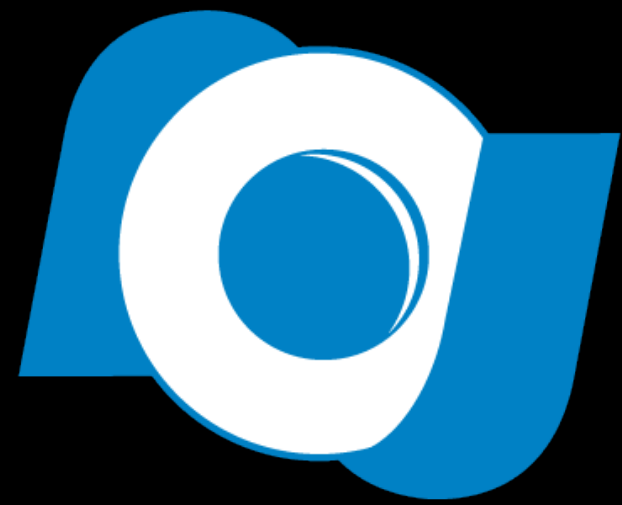




Observatório
Nacional

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



Escola de Inverno em Astrofísica 2026 | Astrofísica Extragaláctica

Aglomerados de Galáxias: As Maiores Estruturas do Universo

Rogério Monteiro-Oliveira, Ph.D. (孟羅傑)

rmo@on.br | monteiro-oliveira.com

Crescimento e Evolução dos Aglomerados

Rio de Janeiro, 22 de julho de 2026

Aula 02

Neste minicurso

- Aula 01: Introdução ao Universo em Larga Escala (Seg, 21/07 14:00 - 15:15)
- Aula 02: Crescimento e Evolução dos Aglomerados (Qua, 22/07 11:00 - 12:15)
- Aula 03: O Universo Através das Lentes Gravitacionais (Sex, 24/07 9:15 – 10:30)

Hoje:

- Como se formam os aglomerados?
- Como as galáxias evoluem em aglomerados?
- O que há no centro dos aglomerados?

Como se Formam os Aglomerados?*

*e todas as estruturas em larga escala

Fatos cosmológicos

(sem a devida demonstração)

- O Universo se expande de maneira acelerada.
- Atualmente, o Universo é homogêneo e isotrópico apenas em escalas $\gtrsim 100$ Mpc.

Parâmetro de Contraste de Densidade

The diagram illustrates the formula for the density contrast parameter $\delta(x, t)$. It features two colored boxes with arrows pointing to parts of the equation:

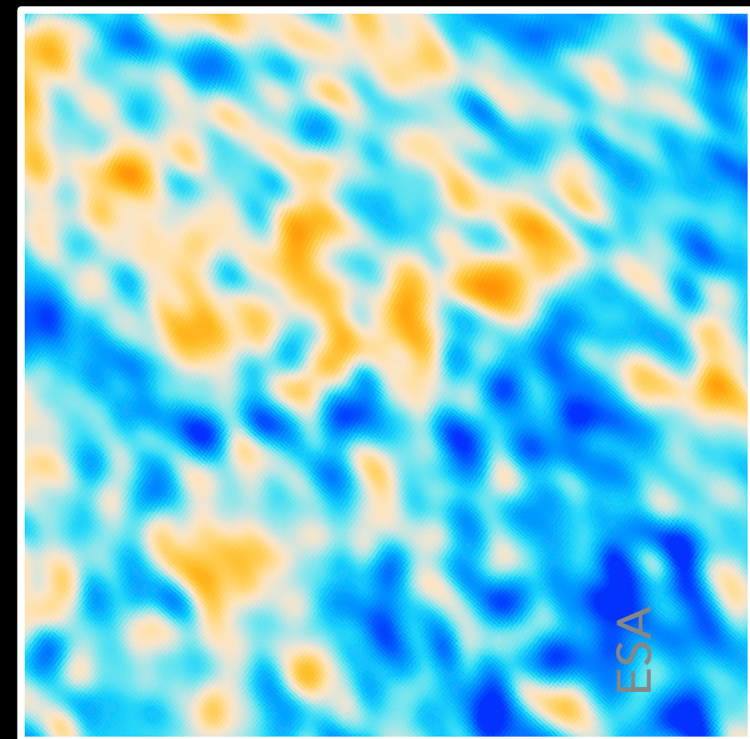
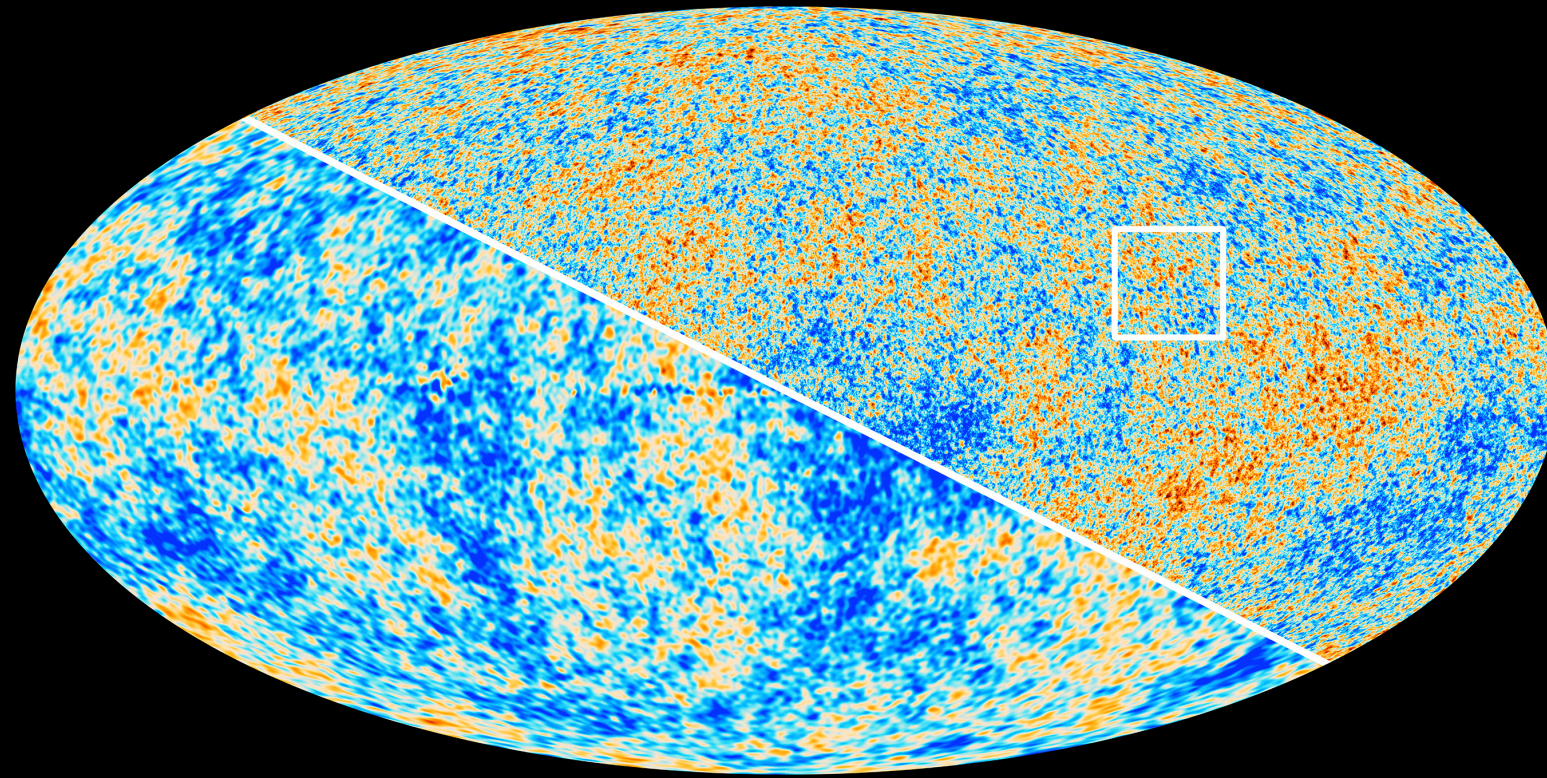
- An orange box labeled "densidade de matéria num dado ponto e época" points to the $\rho(x, t)$ term in the numerator.
- A purple box labeled "densidade média global do Universo naquela mesma época cósmica" has two arrows: one pointing to the $\bar{\rho}$ term in the numerator and another pointing to the $\bar{\rho}$ term in the denominator.

$$\delta(x, t) = \frac{\rho(x, t) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$$

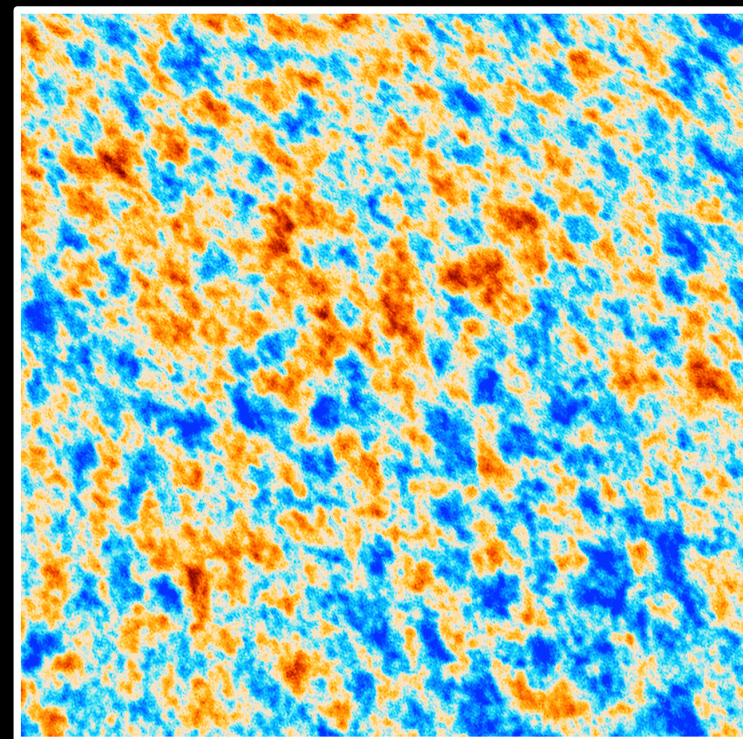
$\delta > 0$ (**sobredensidades**): massa acima da média. Essas “sementes” de sobredensidade exercem uma atração gravitacional extra, atraindo a matéria ao redor. Com o tempo, a gravidade vence a expansão do espaço nestas regiões, colapsando-as

$\delta < 0$ (**subdensidades**): Massa abaixo da média. Perdem matéria para o entorno, expandindo-se em vazios cósmicos.

300 000 anos após o Big Bang



WMAP



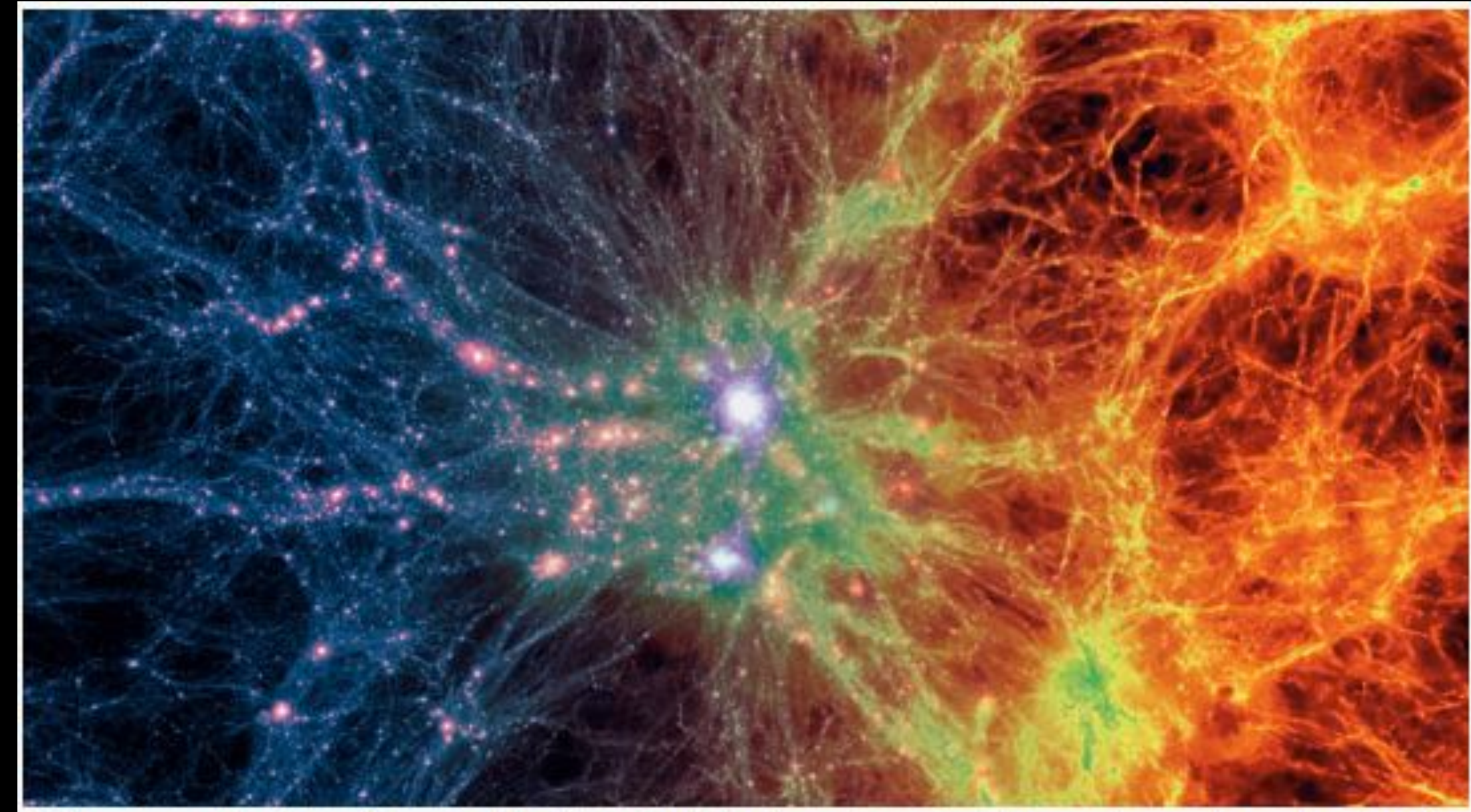
Planck

$$\delta = 10^{-5}$$



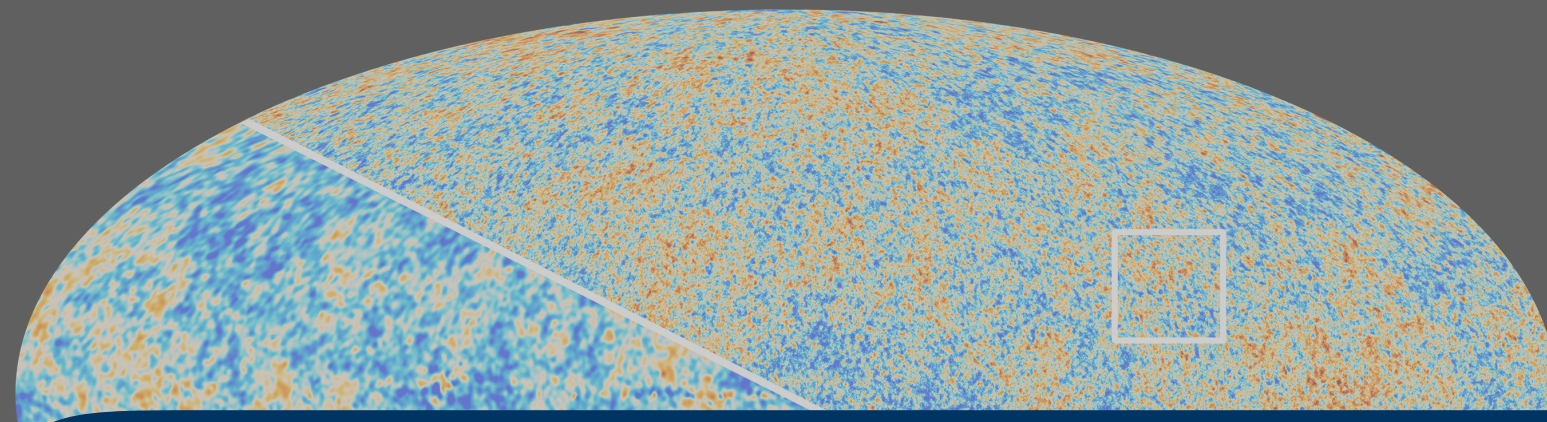
Ilustres project

13.8 bilhões de anos após o Big Bang (hoje)



para uma galáxia: $\delta \sim 10^5 - 10^6$
para um aglomerado: $\delta \sim 100$
para um superaglomerado: $\delta \sim 1$

300 000 anos após o Big Bang



13.8 bilhões de anos após o Big Bang (hoje)



matéria escura fria (CDM)

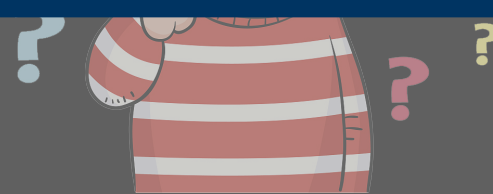


WMAP



Planck

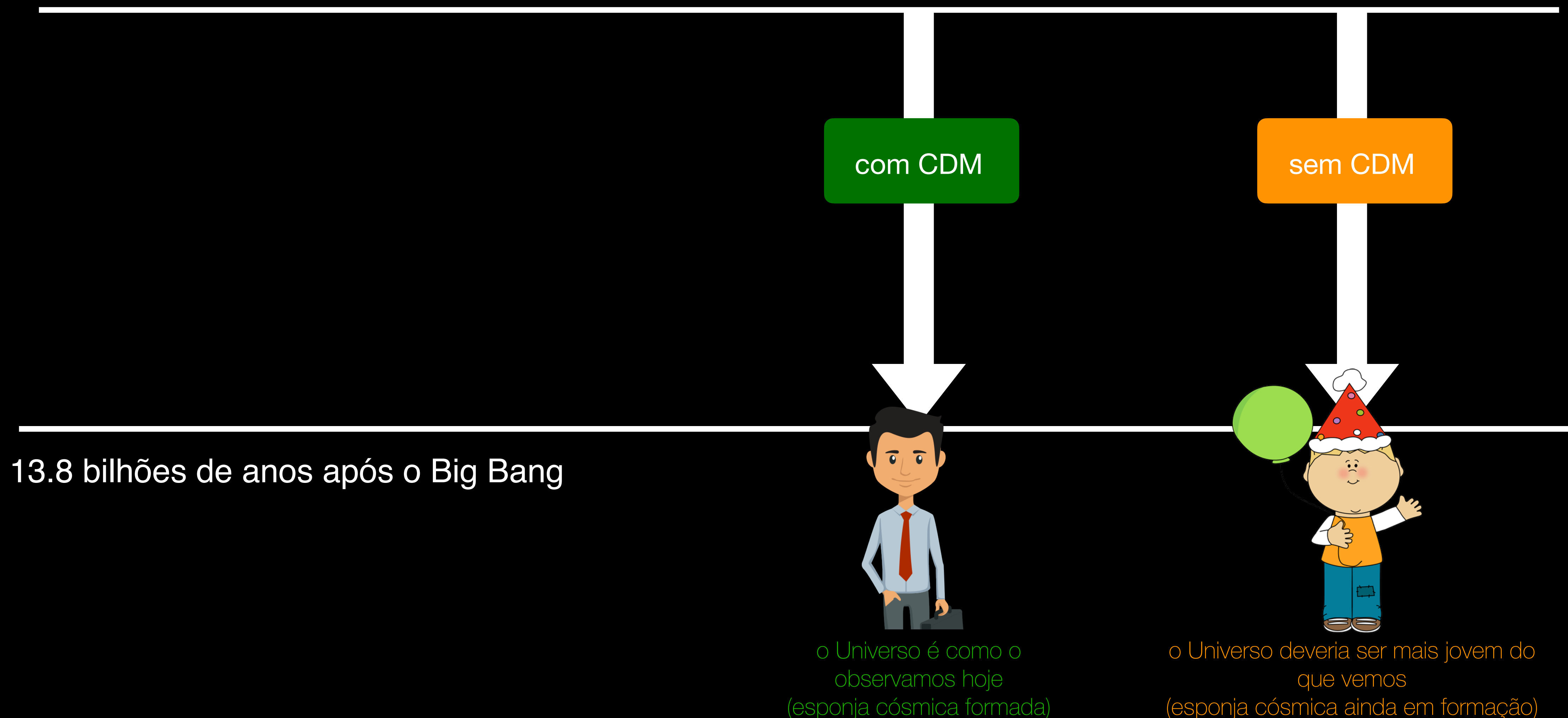
$$\delta = 10^{-5}$$



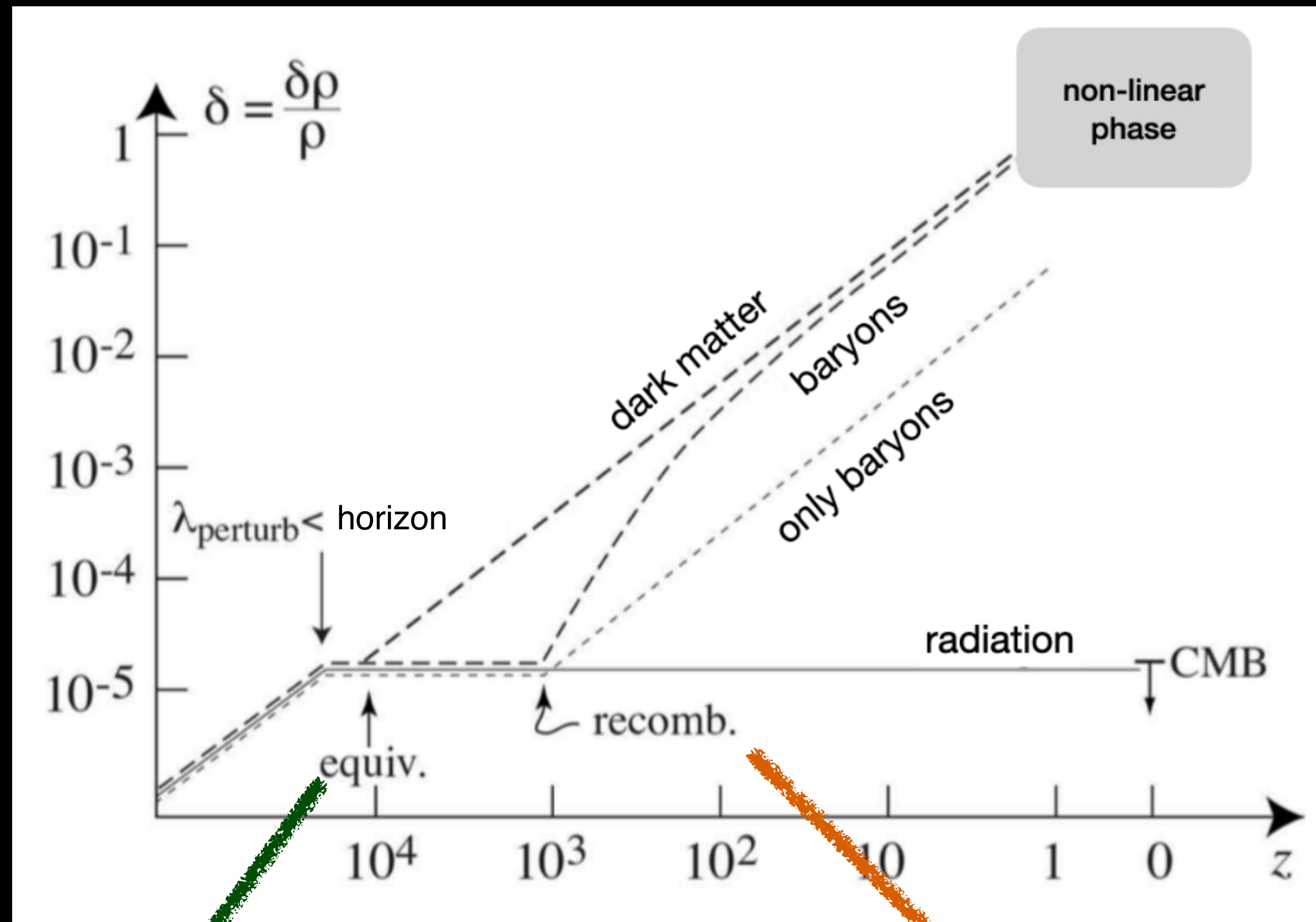
para uma galáxia: $\delta \sim 10^5 - 10^6$
para um aglomerado: $\delta \sim 100$
para um superaglomerado: $\delta \sim 1$

Por que a presença da CDM é tão importante?

300 000 anos após o Big Bang

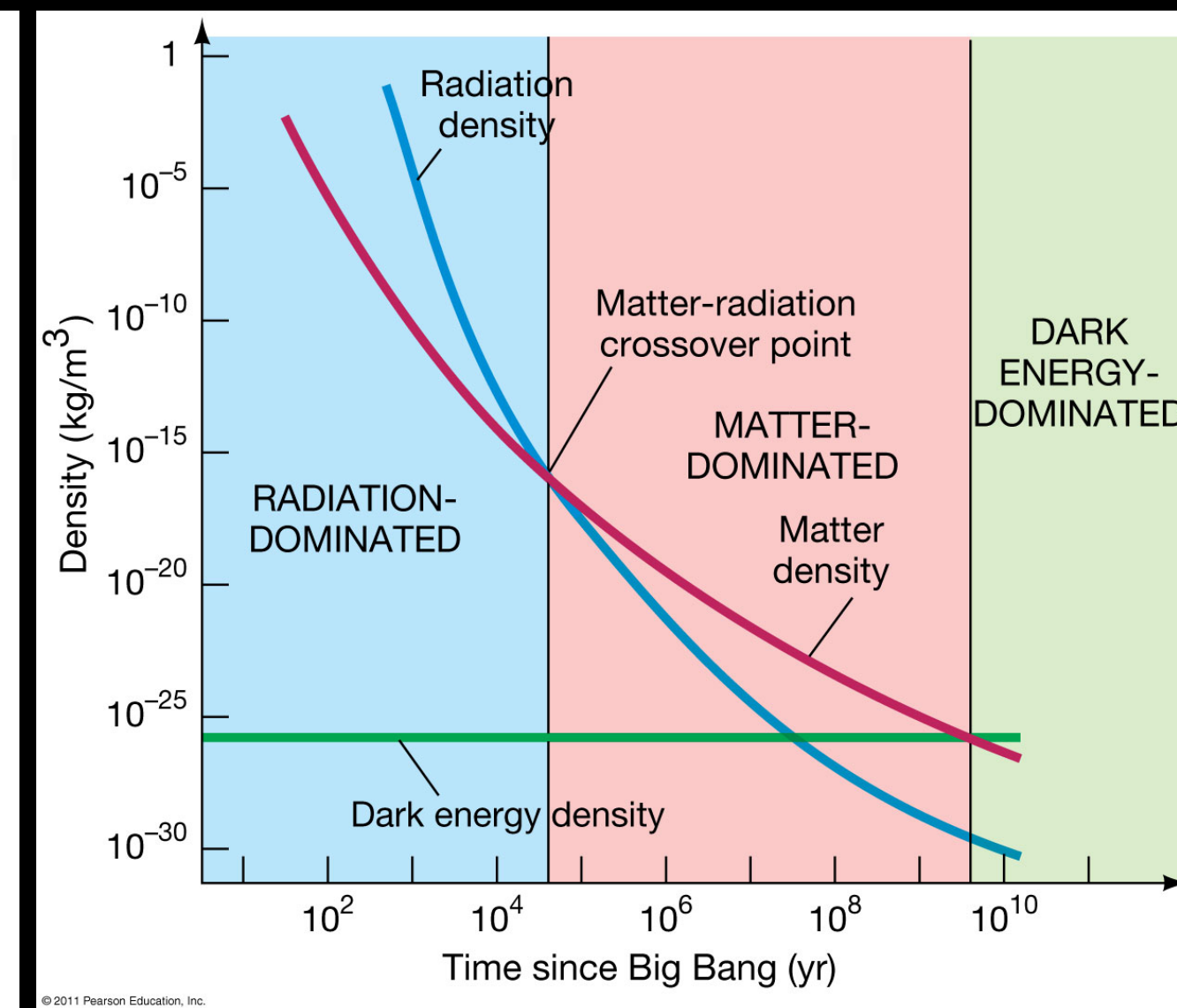


Evolução das perturbações de densidade iniciais



equivalencia matéria-radiação
(~50 000 anos após B.B.)

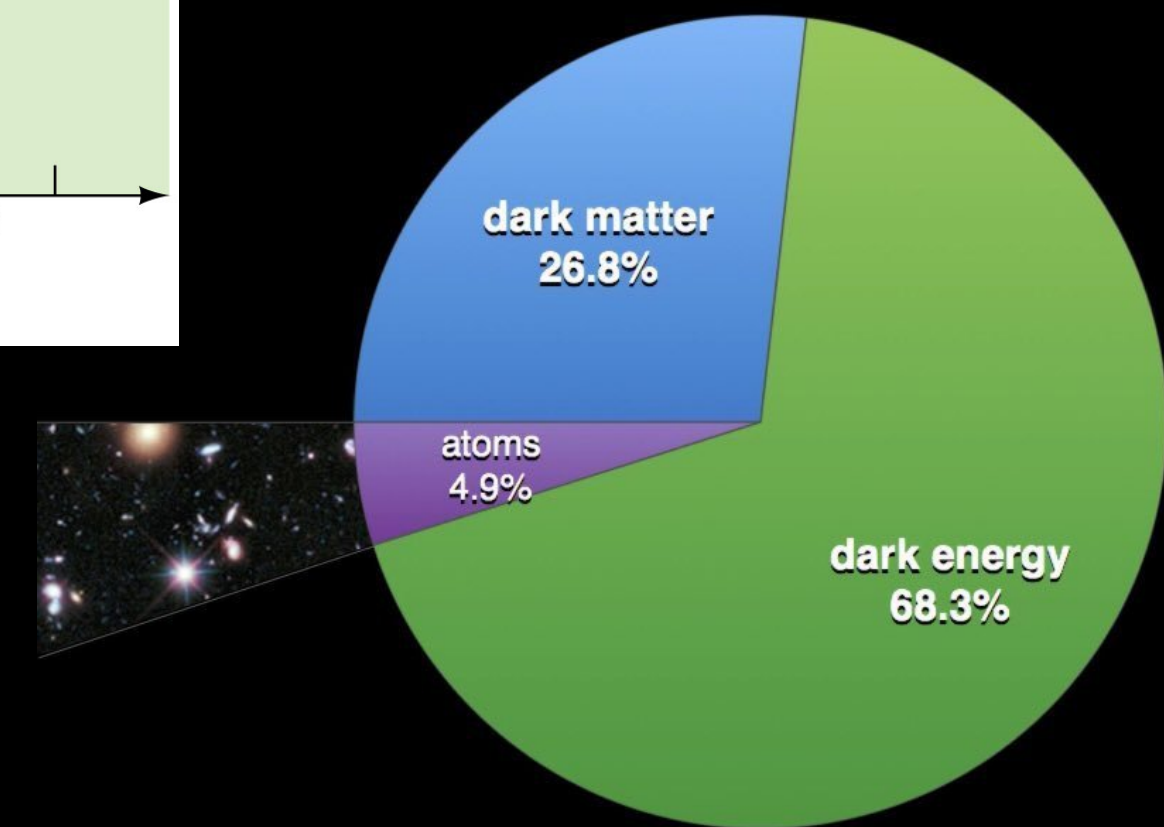
recombinação
(300 000 anos após B.B.)



$$\rho_{\text{matéria}} \propto r^{-3}$$

$$\rho_{\text{radiação}} \propto r^{-4}$$

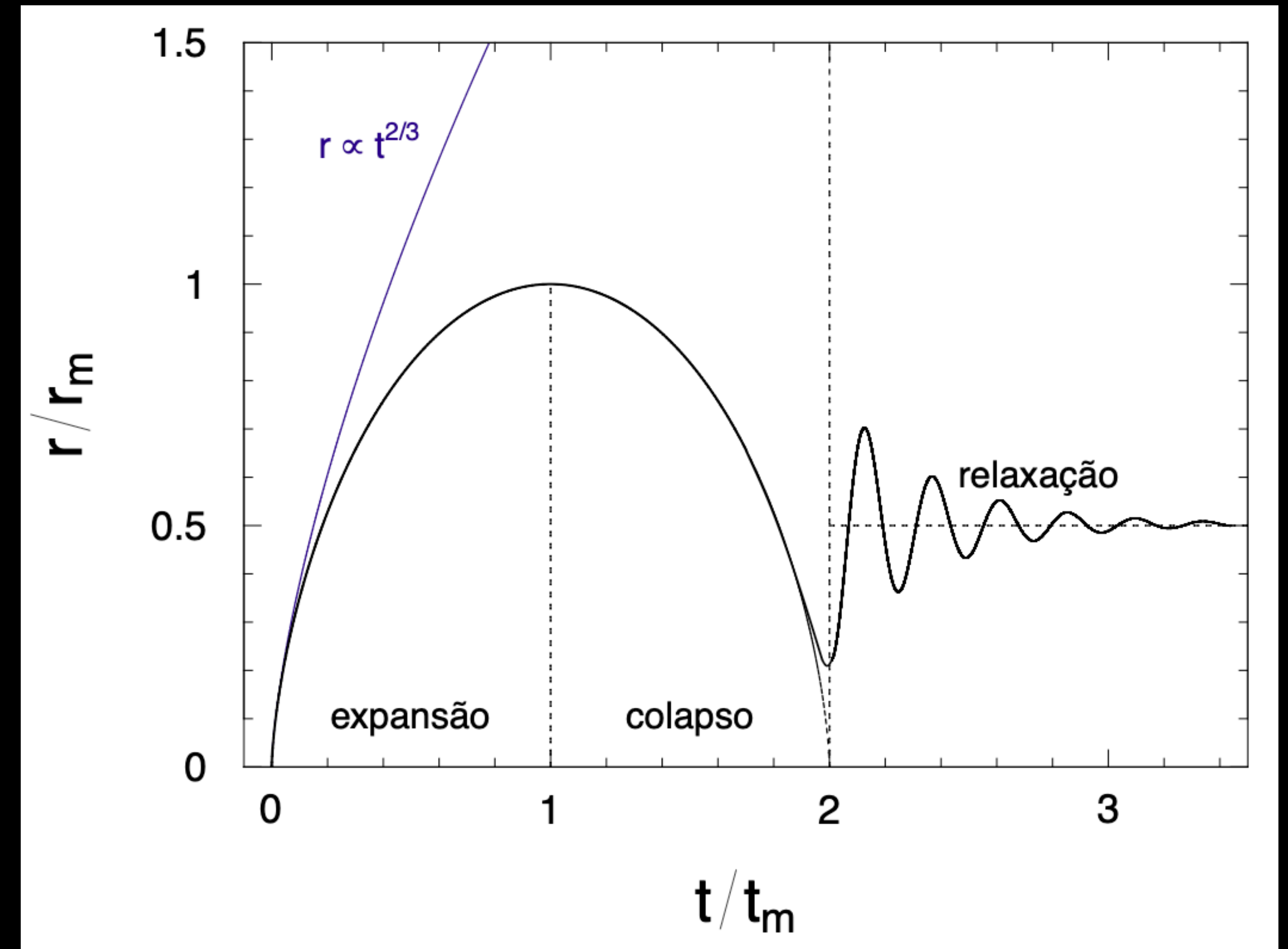
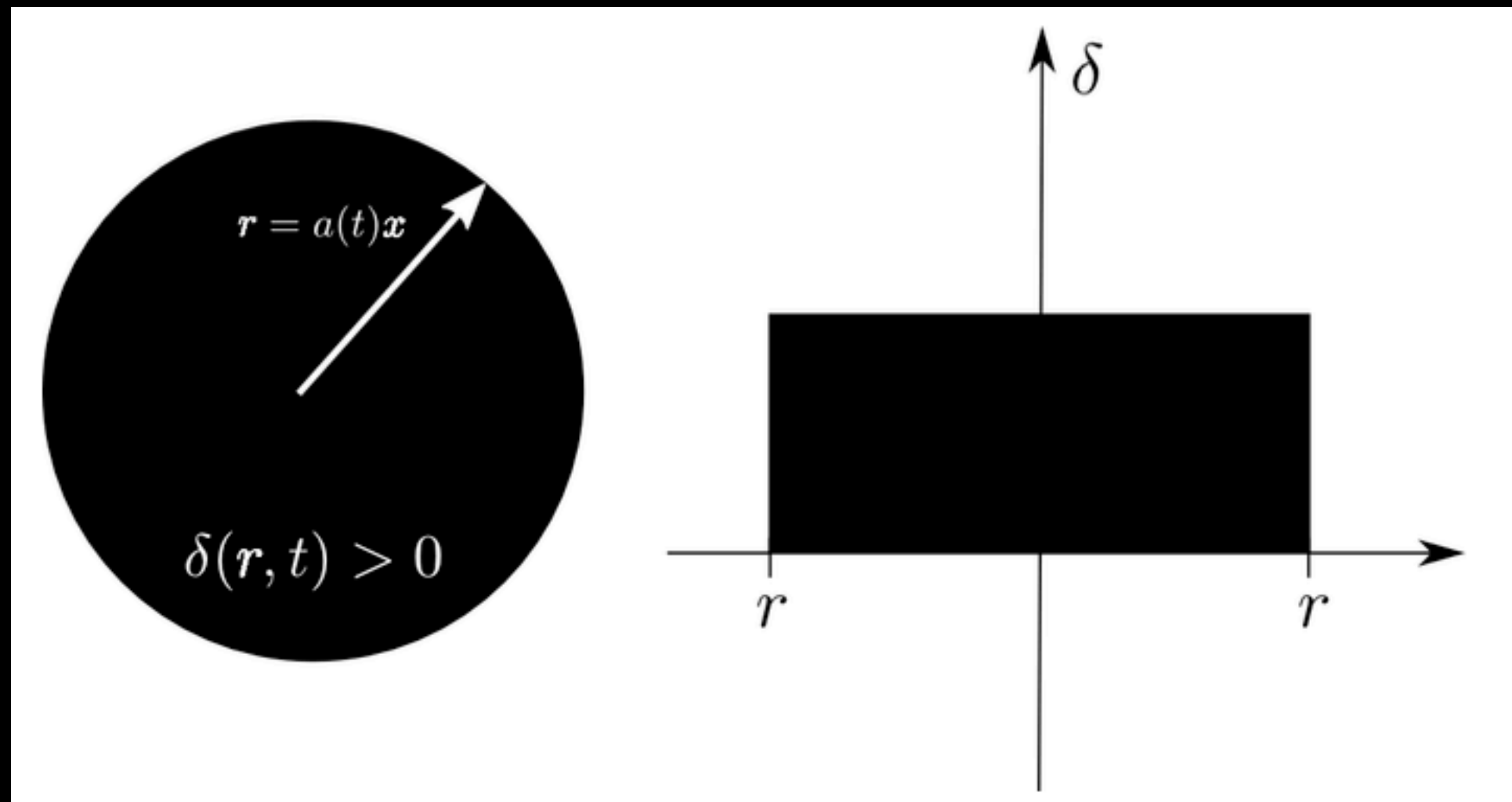
$$\rho_{\text{DE}} \propto \text{cte}$$



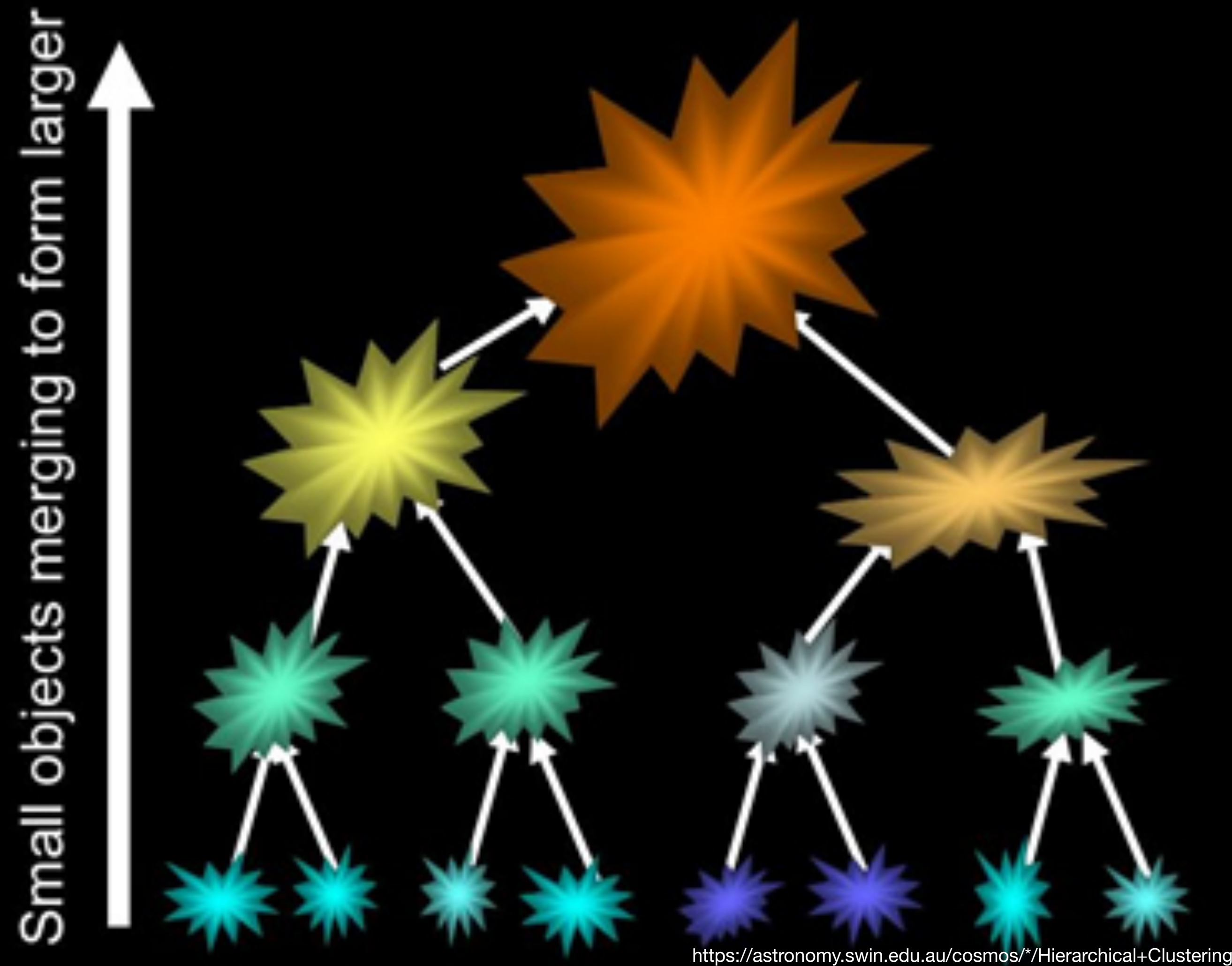
modelo Λ CDM

Fase não linear: o modelo de colapso esférico

Monteiro-Oliveira 2016 (tese de doutorado)



Cenário Hierárquico



Por que os Aglomerados são as Maiores Estruturas?

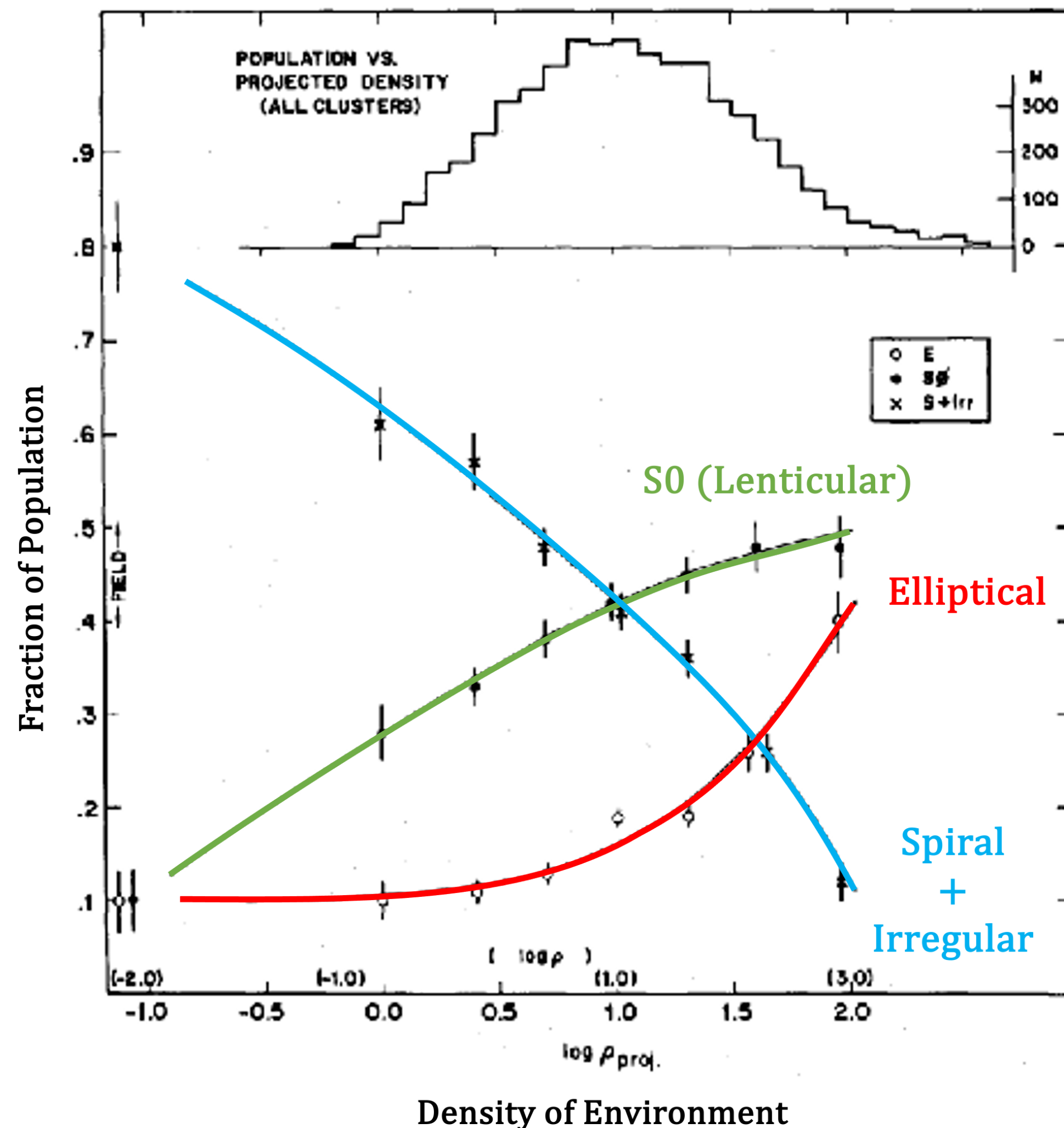
- Estar no espaço não significa estar preso. Uma estrutura é considerada **ligada pela gravidade** quando sua atração interna é forte o suficiente para vencer a expansão do Universo (o fluxo de Hubble) e virializar.
- Virialização é o estado de equilíbrio dinâmico alcançado por um sistema autogravitante após o seu colapso. Matematicamente, o sistema obedece ao Teorema do Virial: $2K + U = 0$

Por que os Aglomerados são as Maiores Estruturas?

- Superaglomerados e filamentos são fisicamente maiores, mas **eles não estão ligados**. Eles ainda podem ser “esticados” e desfeitos pela expansão cósmica.
- Os aglomerados de galáxias são as maiores estruturas do cosmos que tiveram tempo hábil (dentro dos 13,8 bilhões de anos do Universo) para colapsar, desacoplar da expansão e atingir o equilíbrio dinâmico (virialização).

Como as galáxias evoluem em
aglomerados?

Relembrando: Relação Morfologia-Densidade



Quanto maior a densidade,
maior a substituição de
espirais (azuis) por sistemas
early-type (vermelhas)

O Aglomerado como um Ecossistema

- Galáxias em aglomerados não evoluem de forma isolada (como no campo).
- Elas estão mergulhadas em um “banho térmico” de plasma quente.
- **Interação Hidrodinâmica:** O ICM exerce pressão e arrasto sobre o gás interestelar.
- **Interação Gravitacional:** A densidade local de galáxias favorece encontros de maré.
- **Laboratório Evolutivo:** O ambiente acelera o ciclo de vida das galáxias, forçando uma transição morfológica precoce.

Pré-Processamento Cósmico



Antes do Virial

A evolução ambiental começa **muito antes** da galáxia atingir o raio virial do aglomerado principal.



Grupos *Infall*

Galáxias caem em grupos menores. Nestes grupos, a baixa dispersão de velocidade favorece **fusões (mergers)**.



Mudança Estrutural

Ao chegar no aglomerado, a galáxia já teve seu estoque de gás reduzido e sua morfologia perturbada.

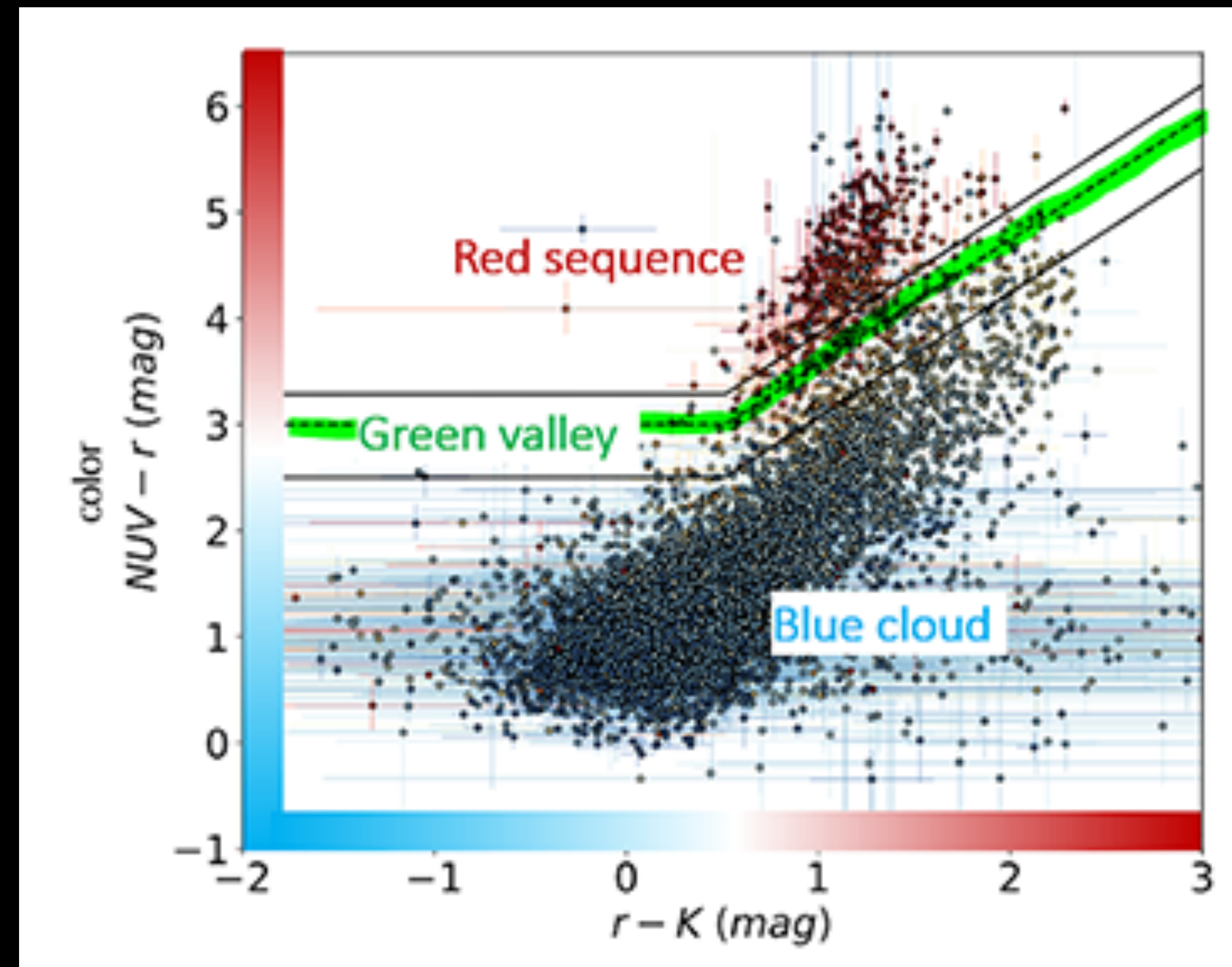
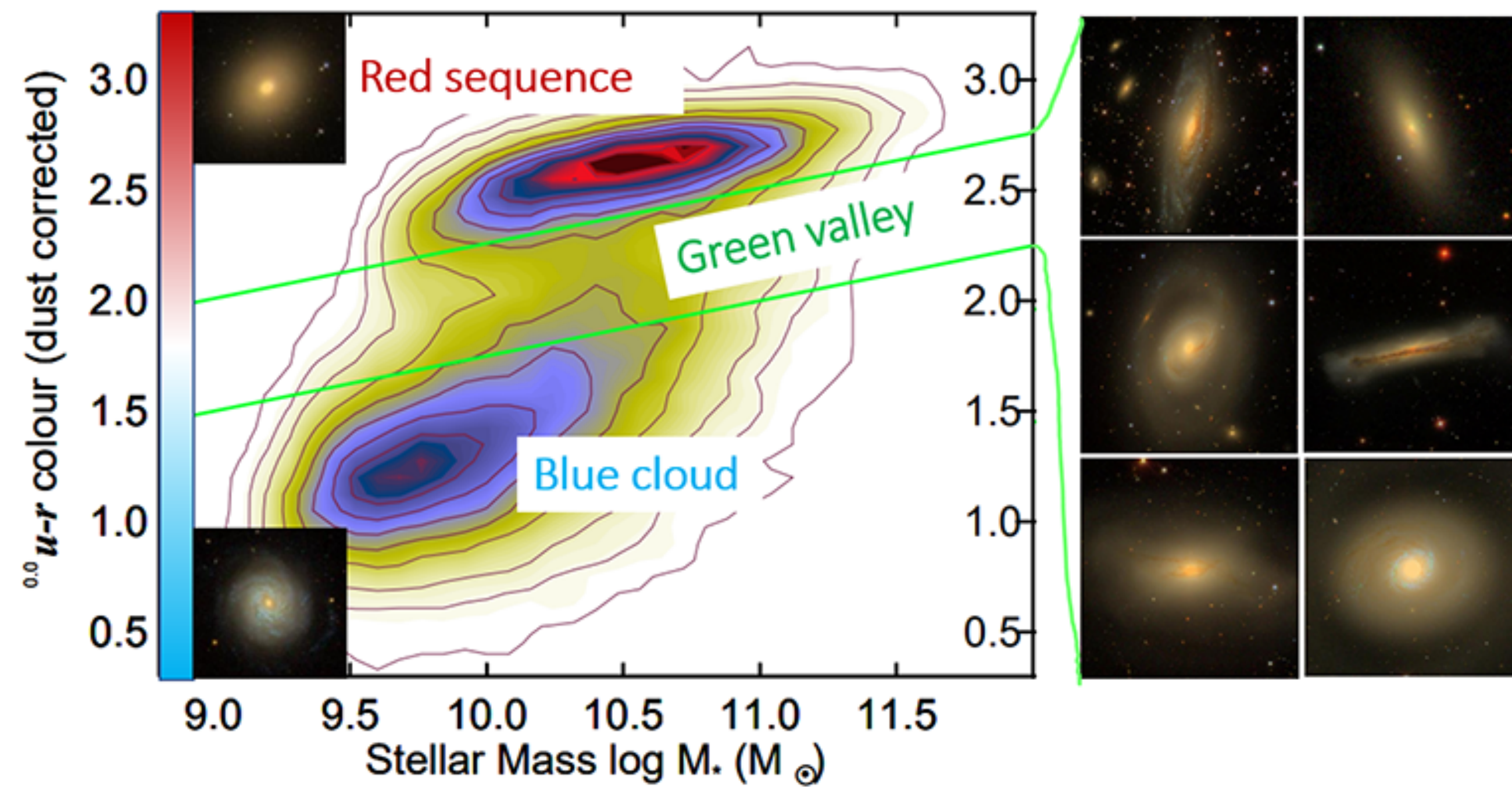
Zoológico de Galáxias

Hubble's Galaxy Classification Scheme



não é uma sequência evolutiva!

<https://itu.physics.uiowa.edu/labs/advanced/classifying-galaxies/part-1-hubbles-tuning-fork>



Pressão de Arraste (*Ram Pressure*)

Ocorre quando a pressão exercida pelo ICM supera a força de “coesão” gravitacional do disco galáctico.

$$P_{\text{ram}} = \rho_{\text{ICM}} v^2$$

Velocidade *Infall*: $v \sim 1000 - 2000$ km/s.

Consequência: Remoção abrupta do gás frio (HI e molecular).

Quenching: Interrupção da formação estelar em timescales curtos (~ 100 milhões de anos).

A condição de Gunn & Gott (1972):

$$\rho_{\text{ICM}} v^2 > 2\pi \Sigma_{\star} \Sigma_{\text{gas}}$$

Σ representa as densidades superficiais de estrelas e gás.

Galáxias Água-Viva (*jellyfish galaxies*)

Hubble (óptico) + *Chandra* (raios-X)



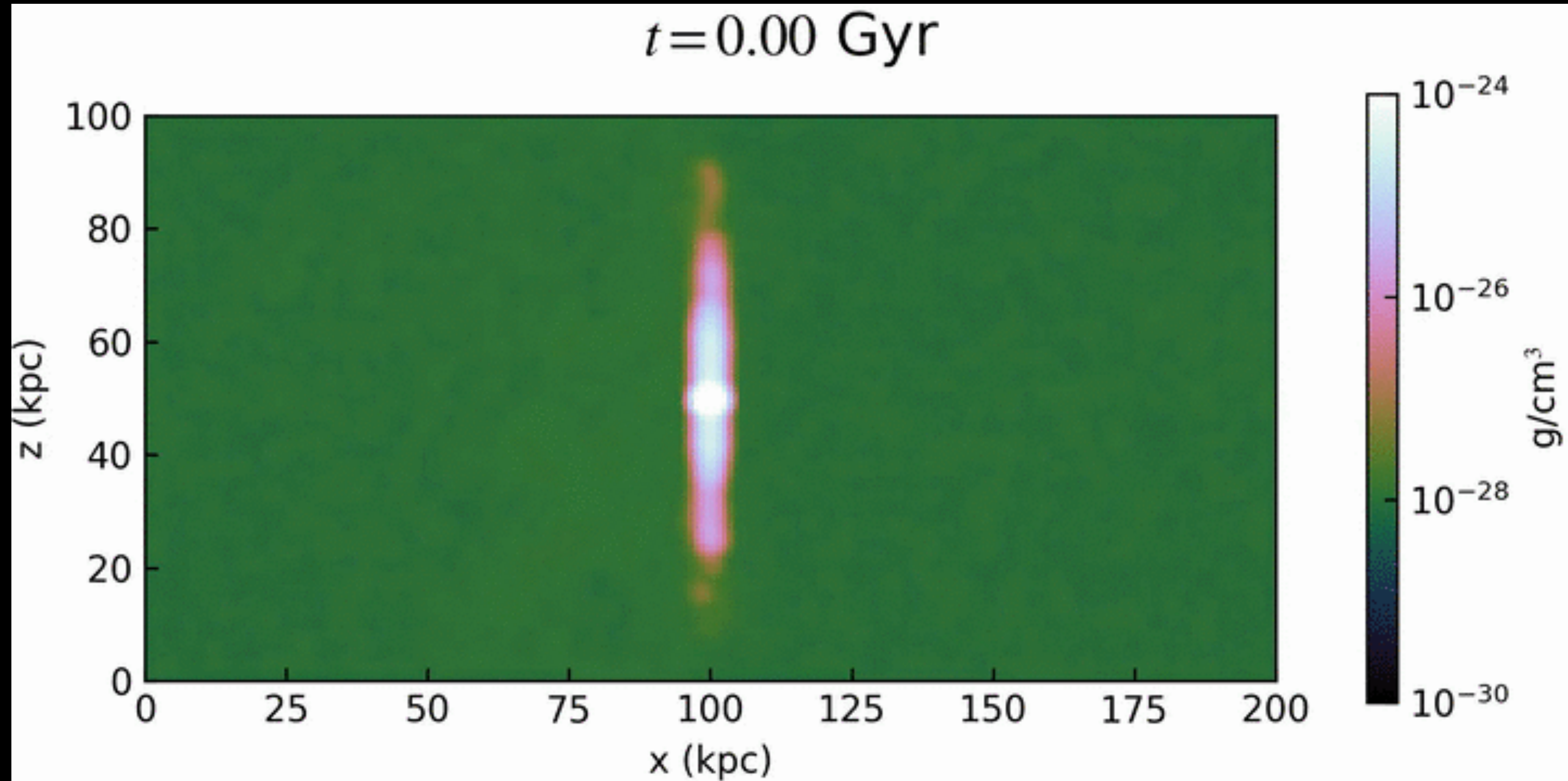
<https://cdn.eso.org/images/wallpaper4/eso1437e.jpg>

Galáxia ESO 137-001

Localizada no Aglomerado Abell 3627 (A3627), esta galáxia ilustra o fenômeno da pressão de arraste em tempo real.

- **Caudas de Raio-X:** O gás arrancado é aquecido e brilha em altas energias.
- **Fireballs:** Formação estelar ocorrendo nas caudas de gás, longe do disco principal.
- **Erosão:** O disco estelar permanece intacto (menos afetado pela pressão hidrodinâmica), enquanto o reservatório de gás é dissipado.

Galáxias Água-Viva (*jellyfish galaxies*)



<https://elvismello.github.io/research.html>

Estrangulamento (*Starvation*)

- Há um corte da linha de suprimento: O ambiente do aglomerado remove o halo de gás quente e difuso da galáxia (o meio circungaláctico - CGM), que é menos ligado gravitacionalmente do que o disco.
- Diferente da *ram pressure*, o disco de gás frio permanece inicialmente intacto. A galáxia continua formando estrelas normalmente.
- **Morte lenta:** Sem o halo quente para resfriar e repor o material do disco, a galáxia esgota seu combustível gradativamente.
- **Escala de tempo:** É um processo de asfixia demorado, levando bilhões de anos ($\sim 1 - 3$ Gyr) para cruzar o *green valley*, resultando em uma galáxia passiva.

Interações Dinâmicas: Assédio Galáctico (*Harassment*)

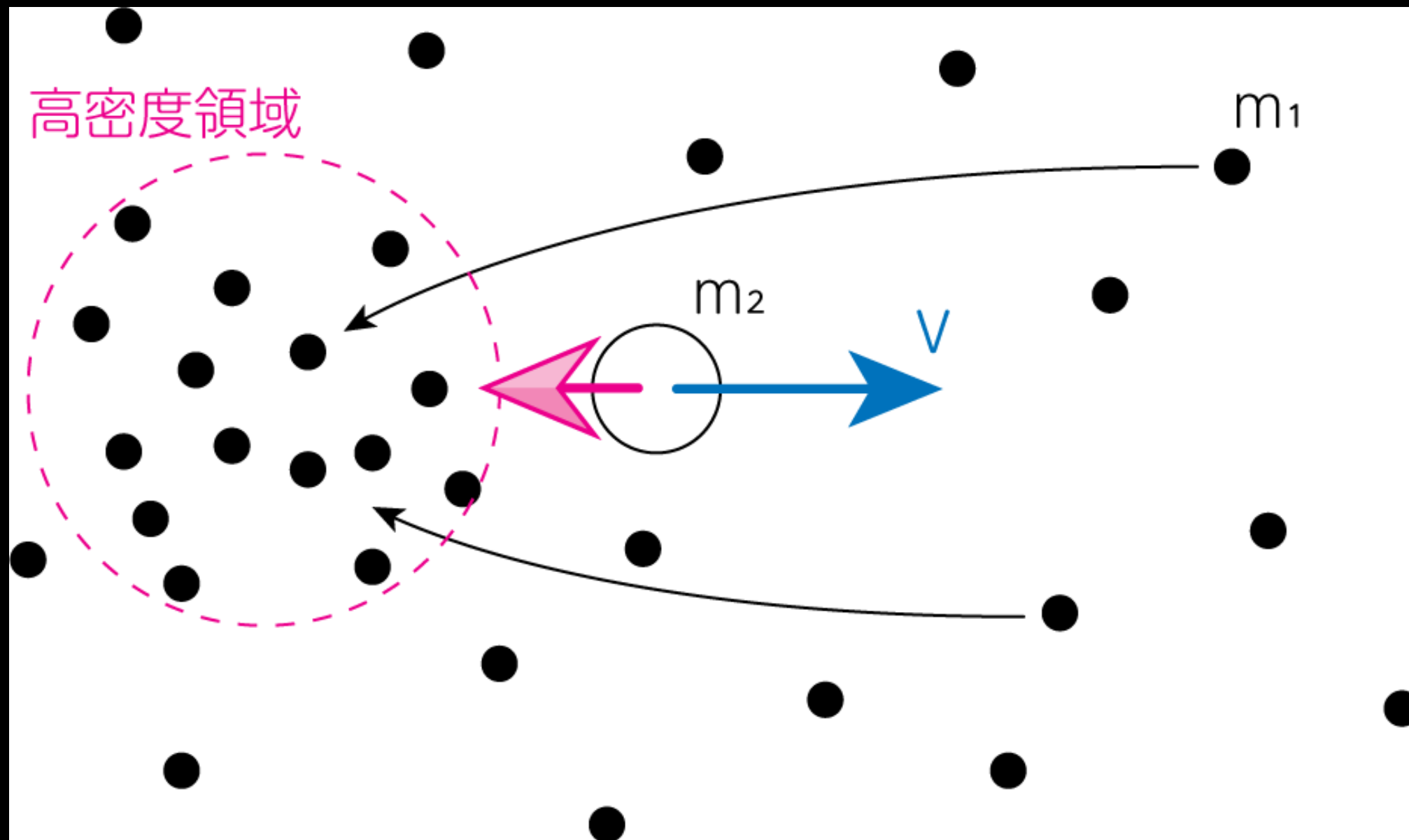
- No aglomerado, a dispersão de velocidades é alta (~ 1000 km/s). As galáxias passam umas pelas outras rápido demais para se fundirem. Ocorrem apenas encontros rasantes.
- Choques de maré: Esses múltiplos encontros rápidos injetam energia cinética abruptamente na dinâmica interna da galáxia.

Interações Dinâmicas: Assédio Galáctico (*Harassment*)

- Truncamento e perda de massa: O halo de matéria escura e as estrelas da borda do disco são “arrancados” gravitacionalmente. Essas estrelas ejetadas passam a flutuar livres, compondo a luz intra-aglomerado (ICL - *IntraCluster Light*).
- A transformação morfológica: A injeção de energia “esquenta” a órbita das estrelas restantes. Discos finos e braços espirais são destruídos.

Fricção Dinâmica

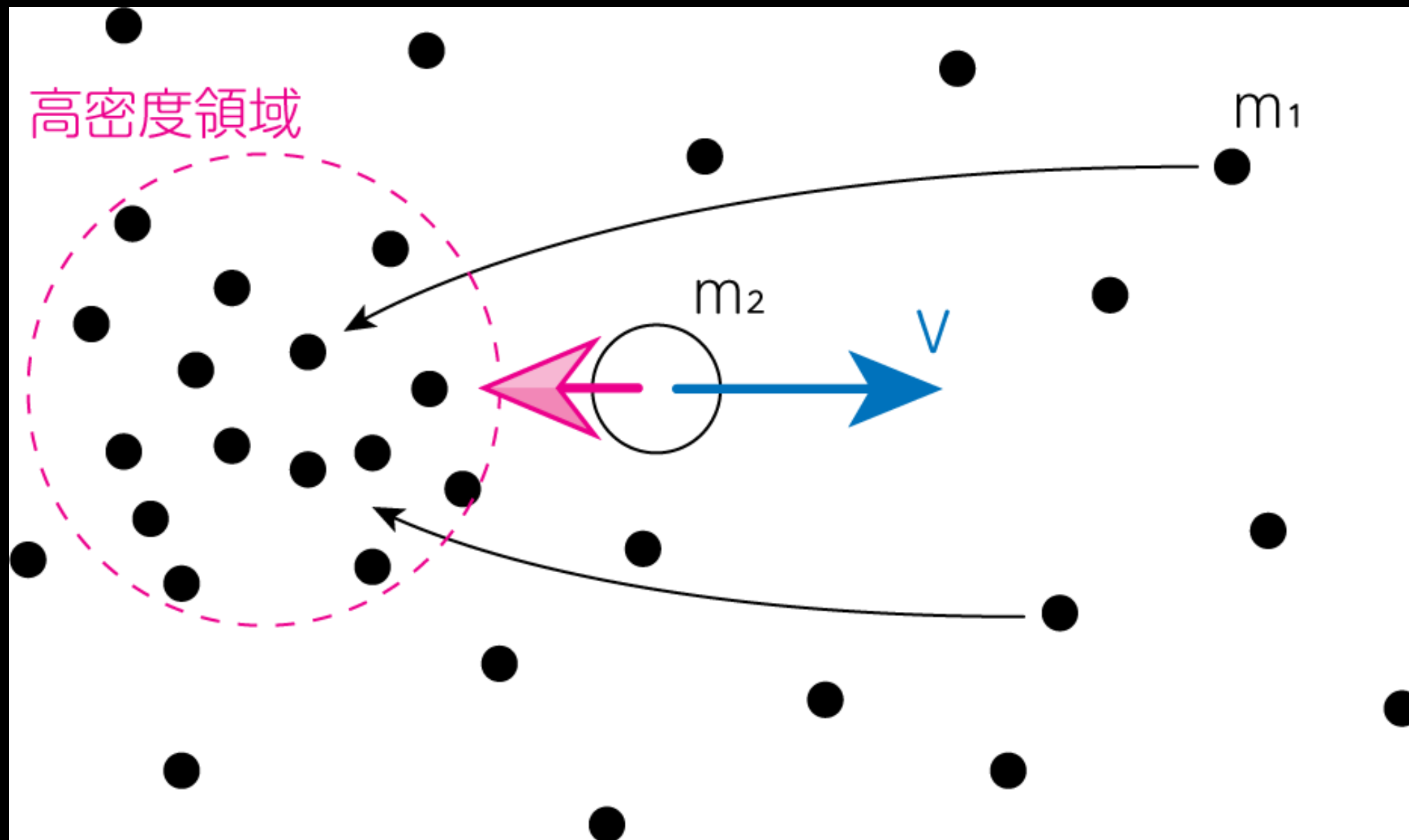
https://github-nakasho.github.io/galady/dynamical_friction



- Ao viajar em **alta velocidade** pelo halo de matéria escura e pelo mar de galáxias menores, uma galáxia massiva **atrai gravitacionalmente essa matéria para trás de si**, criando uma “esteira” de sobredensidade.

Fricção Dinâmica

https://github-nakasho.github.io/galady/dynamical_friction



- A atração gravitacional dessa esteira **puxa a galáxia no sentido oposto** ao seu movimento. É uma “**fricção**” que **não ocorre por contato físico**, mas puramente por gravidade.
- Devido a esse atrito gravitacional constante, as galáxias mais massivas **perdem energia cinética e momento angular**, espiralando em direção ao fundo do poço de potencial do aglomerado.

O Canibalismo Galáctico e Fusões

- Diferente da periferia do aglomerado (onde as velocidades são altas e o *harassment* domina), no núcleo central a fricção dinâmica já freou consideravelmente as galáxias.
- Com velocidades de encontro menores (comparáveis à velocidade de escape das próprias galáxias), elas colidem, perdem ainda mais energia e ficam gravitacionalmente ligadas.
- O núcleo torna-se um ambiente de intenso “canibalismo” galáctico. As fusões sucessivas engolem galáxias inteiras, atuando como o principal motor de construção das colossais galáxias elípticas centrais.

O Canibalismo Galáctico e Fusões

- Diferente da periferia do aglomerado (onde as velocidades são altas e o *harassment* domina), no núcleo central a fricção dinâmica já freou consideravelmente as galáxias.
- Com velocidades de encontro menores (comparáveis à velocidade de escape das próprias galáxias), elas colidem, perdem ainda mais energia e ficam gravitacionalmente ligadas.
- O núcleo torna-se um ambiente de intenso “canibalismo” galáctico. As fusões sucessivas engolem galáxias inteiras, atuando como o principal motor de construção das colossais galáxias elípticas centrais.

A Transformação Morfológica

Espiral Azul

Rica em Gás
Formação Estelar Ativa



Elíptica Vermelha

Sem Gás
População Estelar Velha

O que há no Centro dos Aglomerados?

O Fundo do Poço de Potencial

- O núcleo do aglomerado marca a região de **máxima densidade** do gigantesco **halo de matéria escura** que sustenta a estrutura.
- Por ser o **ponto de menor energia potencial**, o centro geométrico atua como o **destino final para toda matéria bariônica** (gás e estrelas) que perde energia orbital por atrito.
- É nesta região que **ICM** atinge sua densidade e pressão máximas.

A Galáxia Mais Brilhante do Aglomerado (BCG)

- **Galáxia cD (super-elíptica)**: Uma classe exclusiva de galáxias elípticas caracterizada por um **enorme envelope estelar difuso**, que gradualmente se mistura com o fundo do aglomerado.
- Podem atingir trilhões de massas solares, sendo dezenas de vezes **mais massivas e luminosas do que galáxias como a Via Láctea**.
- Diferente das outras galáxias que orbitam o centro a milhares de km/s, a **BCG (brightest cluster galaxy)** repousa praticamente imóvel (velocidade peculiar quase nula) no exato centro de massa e emissão de raios-X.

https://en.wikipedia.org/wiki/Type-cD_galaxy#/media/File:ESO_383-76_Legacy_DR10.png



A Formação das BCGs

- Como está ancorada no fundo do poço, **a BCG é o ralo gravitacional** que absorve as galáxias cujas órbitas decaíram por fricção dinâmica.
- **Fusões Menores (*Minor Mergers*)**: Na fase tardia do Universo, a BCG cresce principalmente engolindo galáxias menores que chegam ao núcleo.
- As fortes forças de maré da BCG estilhaçam as galáxias satélites em aproximação. As estrelas arrancadas compõem a vasta nuvem esférica que forma o envelope da cD.

Fluxo de Resfriamento (*Cooling Flows*)

- O plasma no centro é tão denso que irradia uma quantidade gigantesca de energia térmica em raios-X (através de radiação de frenagem, o *Bremsstrahlung*).
- Essa perda de energia faz com que o tempo de resfriamento do núcleo central seja menor do que a idade do Universo ($t_{cool} \ll t_{Hubble}$).
- Com a queda de temperatura e perda de pressão, estimava-se que o gás devesse cair maciçamente sobre a BCG (centenas de massas solares por ano), induzindo um surto de novas estrelas.

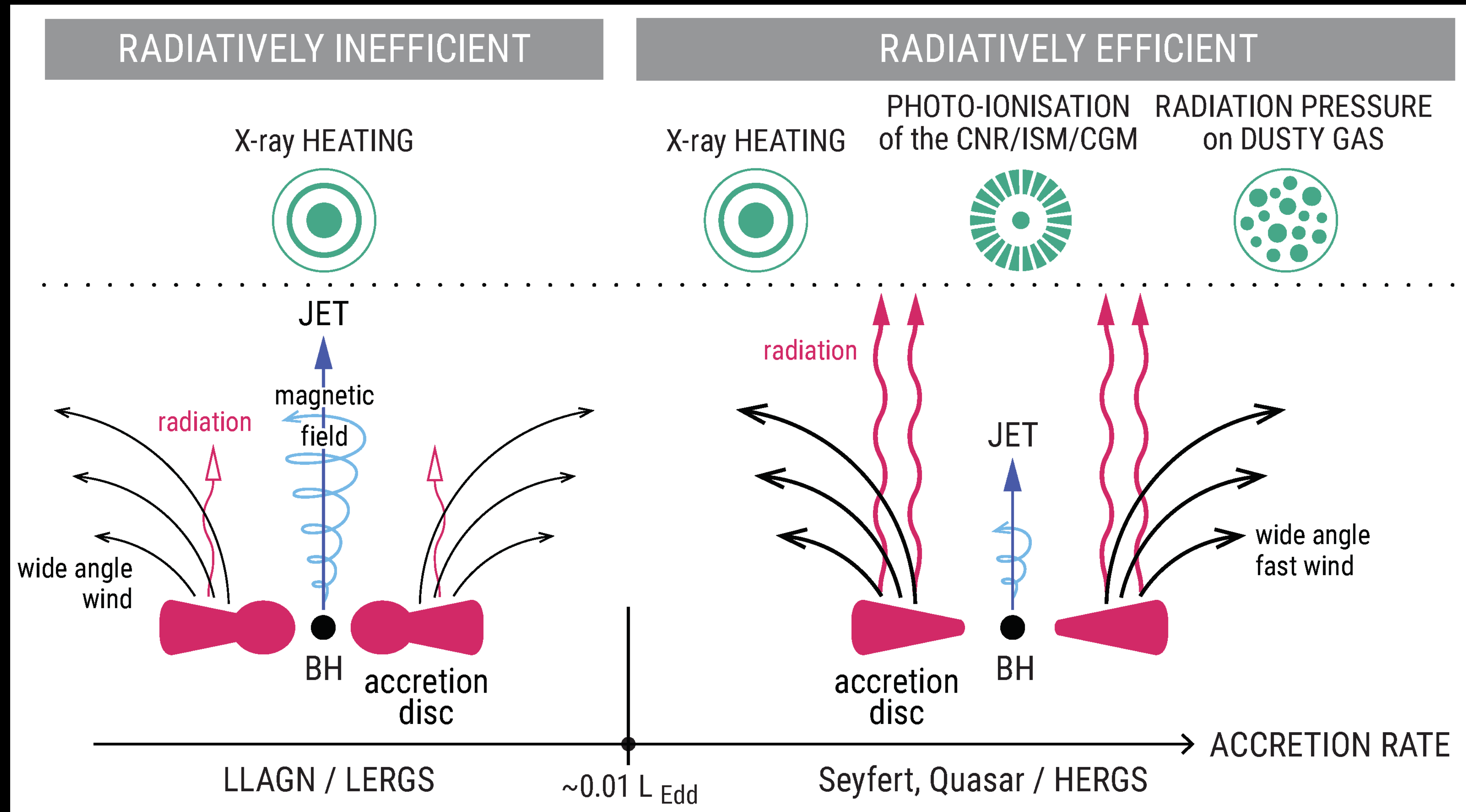
O Paradoxo Observacional

- Telescópios de raios-X revelaram uma aparente contradição: **não há gás resfriando** abaixo de $1/3$ da temperatura virial típica do aglomerado.
- A taxa real de formação de estrelas nas BCGs é **ordens de magnitude menor do que a prevista**.
- **O fluxo de resfriamento foi interrompido!** Qual mecanismo teria força e energia suficientes para reaquecer continuamente o gás em escalas tão grandes?

Núcleo Galáctico Ativo (AGN)

- No centro da BCG, repousa um buraco negro supermassivo (SMBH) com massa equivalente a bilhões de sois.
- À medida que o gás que consegue esfriar cai no disco de acreção, uma imensa fração de sua energia potencial gravitacional é extraída.
- Parte dessa energia, aliada aos potentes campos magnéticos do buraco negro, é disparada para fora na forma de feixes bipolares de plasma movendo-se a frações da velocidade da luz.

Feedback do AGN



https://www.mdpi.com/galaxies/galaxies-12-00017/article_deploy/html/images/galaxies-12-00017-g003.png

No próximo (e último) capítulo...

Vimos que os aglomerados de galáxias são as maiores estruturas unidas pela gravidade. Mas como a colisão entre esses gigantes pode nos revelar propriedades da matéria em escalas subatômicas?

Por que os Aglomerados são as Maiores Estruturas?

- Superaglomerados e filamentos são fisicamente maiores, mas **eles não estão ligados**. Eles ainda podem ser “esticados” e desfeitos pela expansão cósmica.
- Os aglomerados de galáxias são as maiores estruturas do cosmos que tiveram tempo hábil (dentro dos 13,8 bilhões de anos do Universo) para colapsar, desacoplar da expansão e atingir o equilíbrio dinâmico (virialização).

Síntese da aula

- **Vimos** que os aglomerados se formam de maneira hierárquica, crescendo pela atração gravitacional contínua de matéria e pela fusão de estruturas menores que escoam ao longo dos filamentos da teia cósmica.
- **Aprendemos** que o ambiente do aglomerado é implacável com as galáxias: mecanismos hidrodinâmicos (*Ram Pressure*) e gravitacionais (*Harassment*) roubam o gás e destroem os discos, forçando as espirais a cruzarem o vale verde e se transformarem em elípticas “mortas” e vermelhas.
- **Descobrimos** que no exato centro do poço de potencial reside a BCG, uma galáxia colossal esculpida pelo canibalismo via fricção dinâmica, cujo buraco negro supermassivo atua como um termostato cósmico que regula a temperatura e a formação estelar em todo o núcleo do aglomerado.



monteiro-oliveira.com/talks

