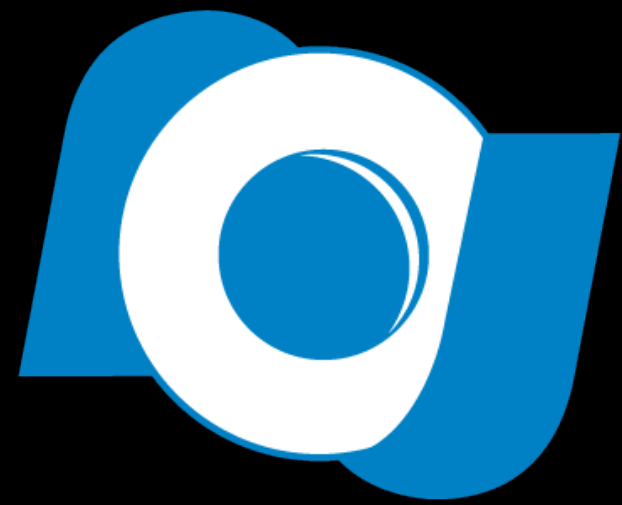




Observatório
Nacional

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

Introdução ao Universo em Larga Escala

Rio de Janeiro, 20 de julho de 2026

Aula 01

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

- As escalas do cosmos
- A receita de um aglomerado
- Como detectar um aglomerado?

As Escalas do cosmos ou O que Significa Larga Escala?

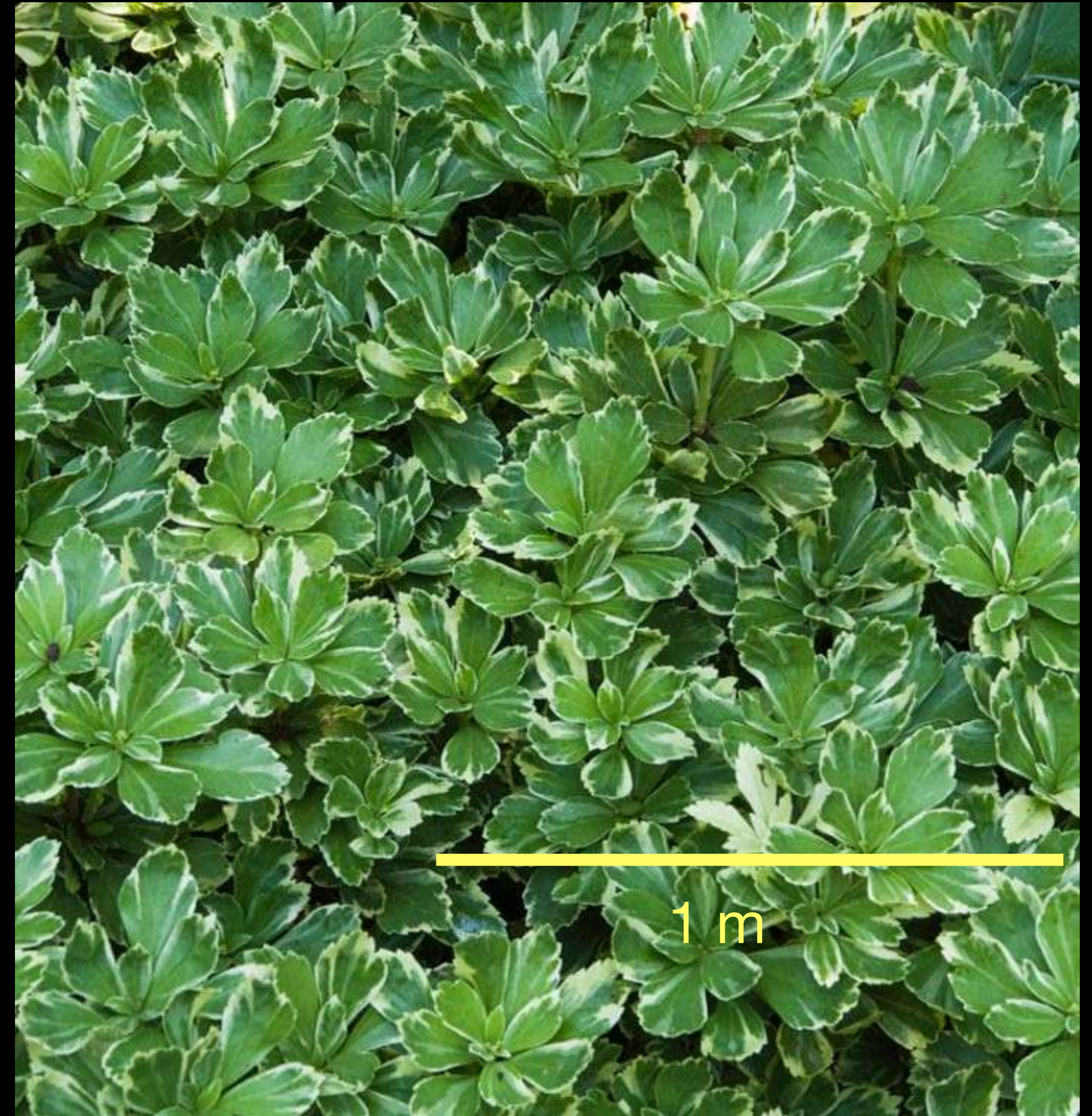
10 centímetros
 10^{-1} m

Pode-se tocar nas folhas
de uma planta



1 metro
10⁰ m

Distância de um braço
esticado



10 metros
 10^1 m

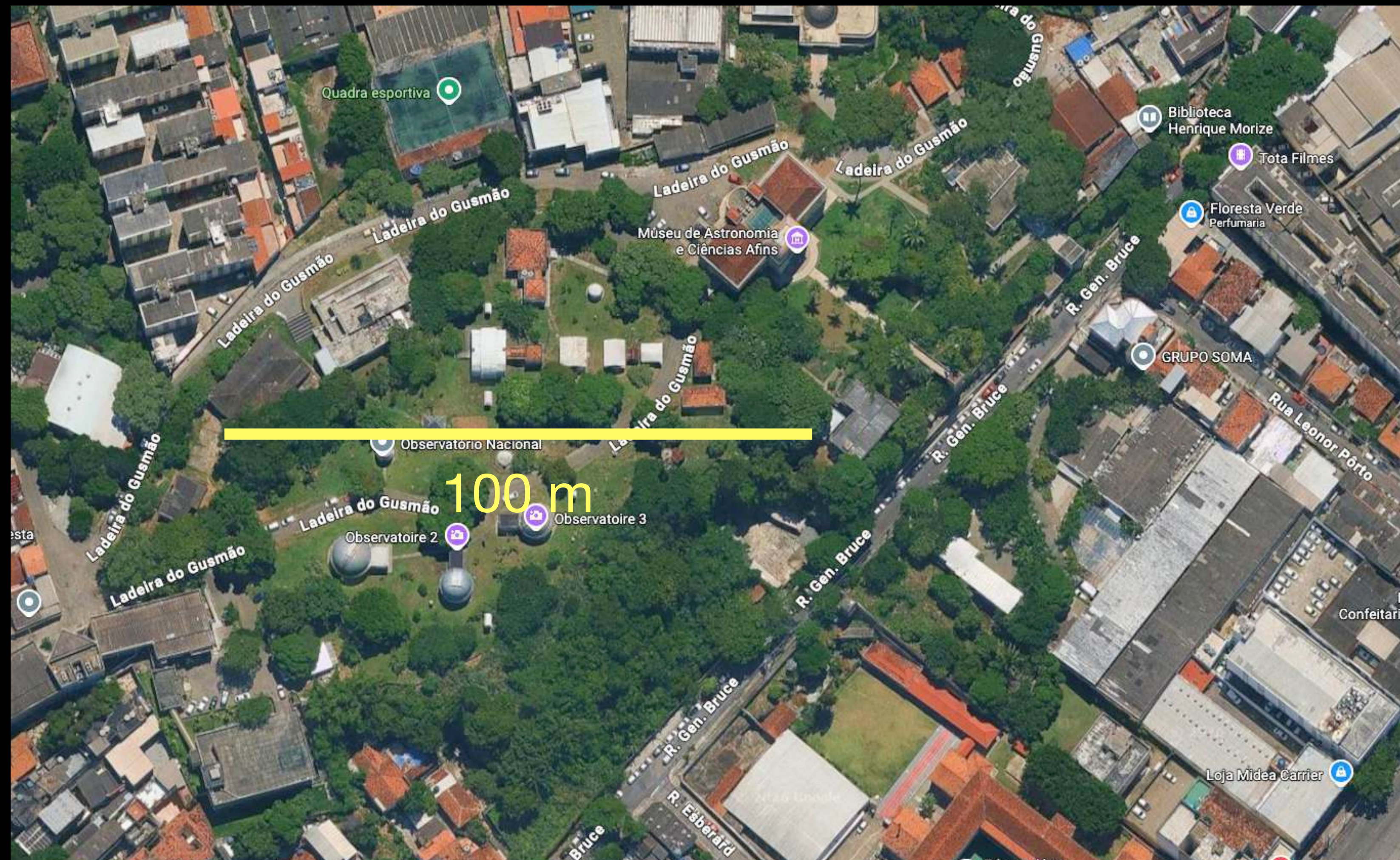
Equivalente a 2.5 carros de
passeio



https://pt.123rf.com/photo_112581758_vista-a%C3%A9rea-de-cima-para-baixo-da-copa-da-%C3%A1rvore-da-densa-floresta-tropical-prim%C3%A1ria.html

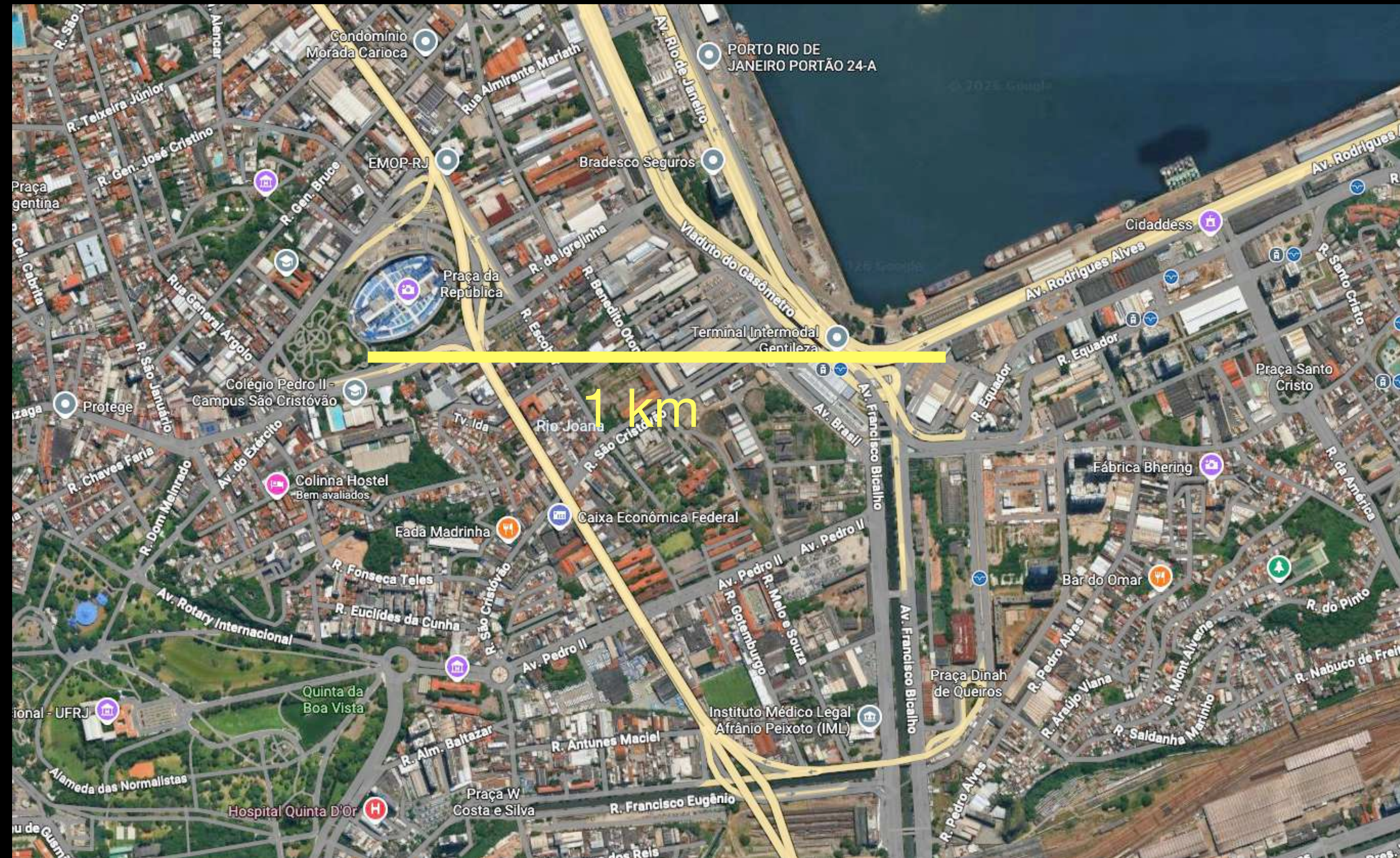
100 metros
 10^2 m

Vista típica de um
helicóptero



Google Maps (julho 2026)

1 quilômetro
 10^3 m



Distância em linha reta entre a
Feira de São Cristóvão e a
Rodoviária Novo Rio

Google Maps (julho 2026)

10 quilômetros
 10^4 m



Distância aproximada entre as extremidades da Ponte Rio-Niterói

Google Maps (julho 2026)

100 quilômetros
10⁵ m



Distância em linha reta entre
Angra dos Reis e a cidade do
Rio de Janeiro

Google Maps (julho 2026)

1000 quilômetros
 10^6 m



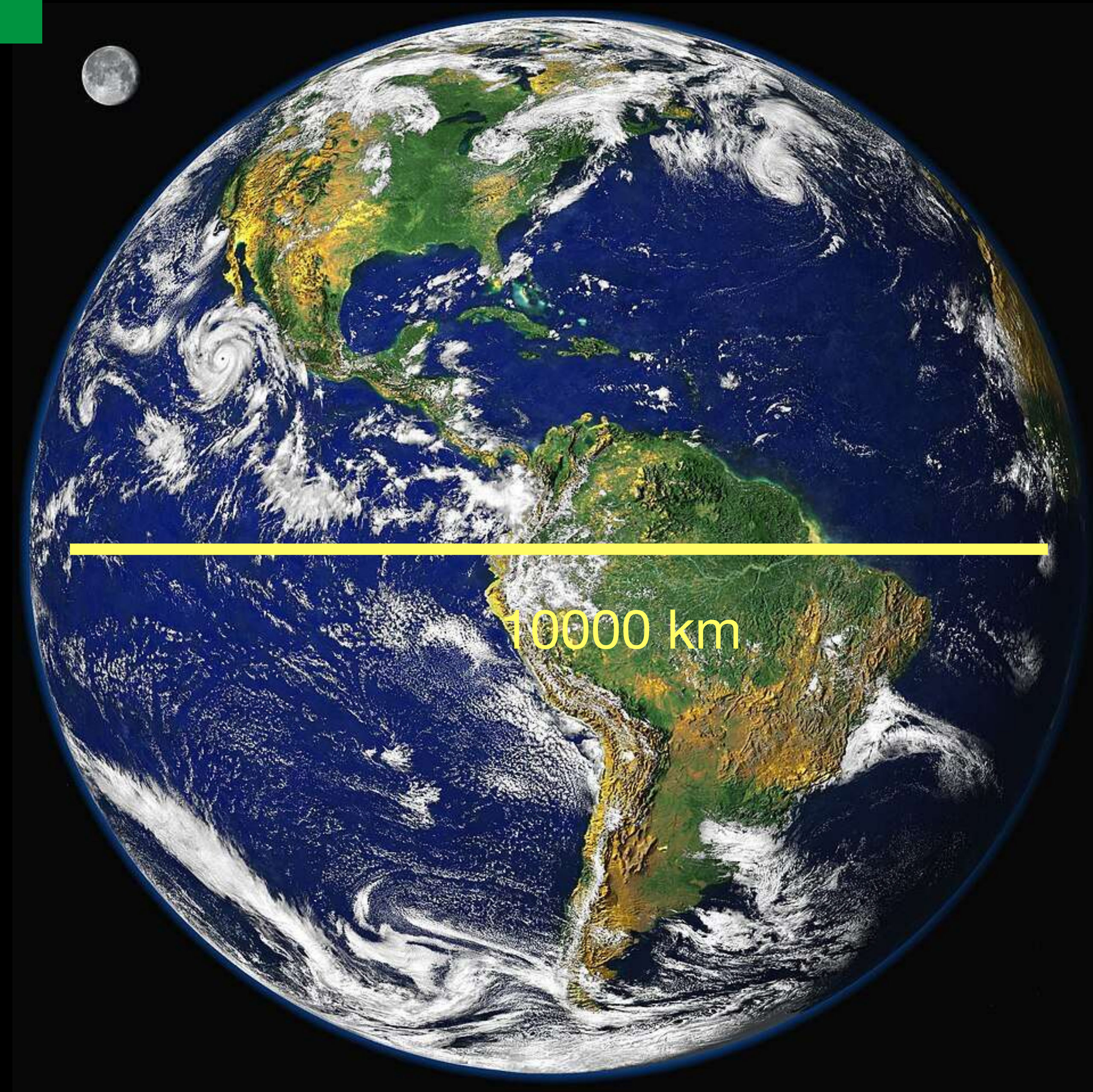
Distância em linha reta entre a cidade do Rio de Janeiro e o extremo oeste do estado de São Paulo

Google Maps (julho 2026)

10 000 quilômetros

10^7 m

Aproximadamente o diâmetro da
Terra (o valor exato é ~12.7 km)



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth-BlueMarble-1997.jpg>

100 000 quilômetros

10^8 m

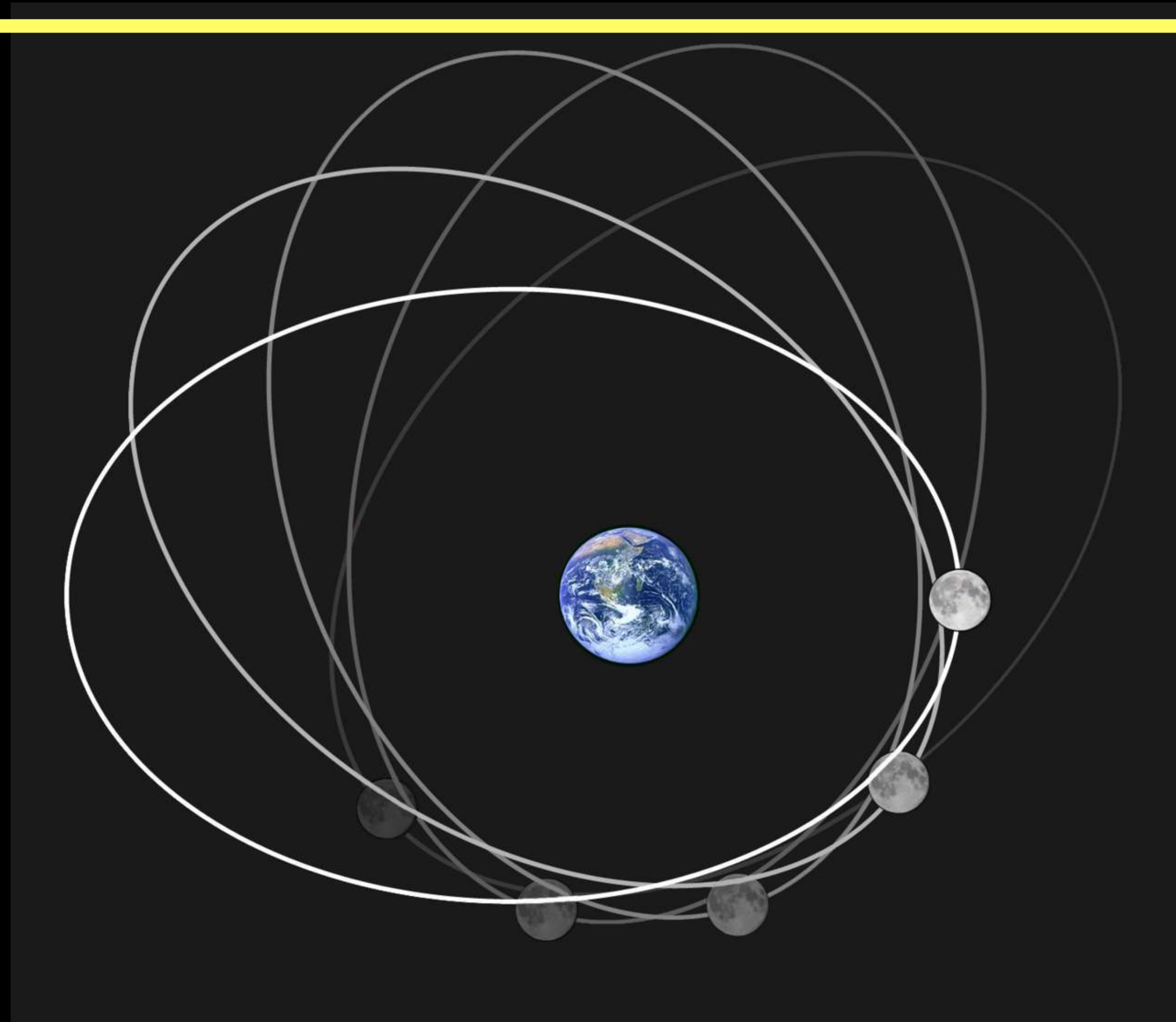


A Terra percorre essa distância
em 1 hora

1 milhão de quilômetros

10^9 m

1 milhão km



A órbita da Lua já pode ser vista

https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93rbita_da_Lua#/media/Ficheiro:Moon_apsidal_precession.png

10 milhões de quilômetros

10^{10} m

View of EARTH from PIONEER-11
2006 MAY 23 00:00:00 UTC
1.0° field of view

10.000.000 km

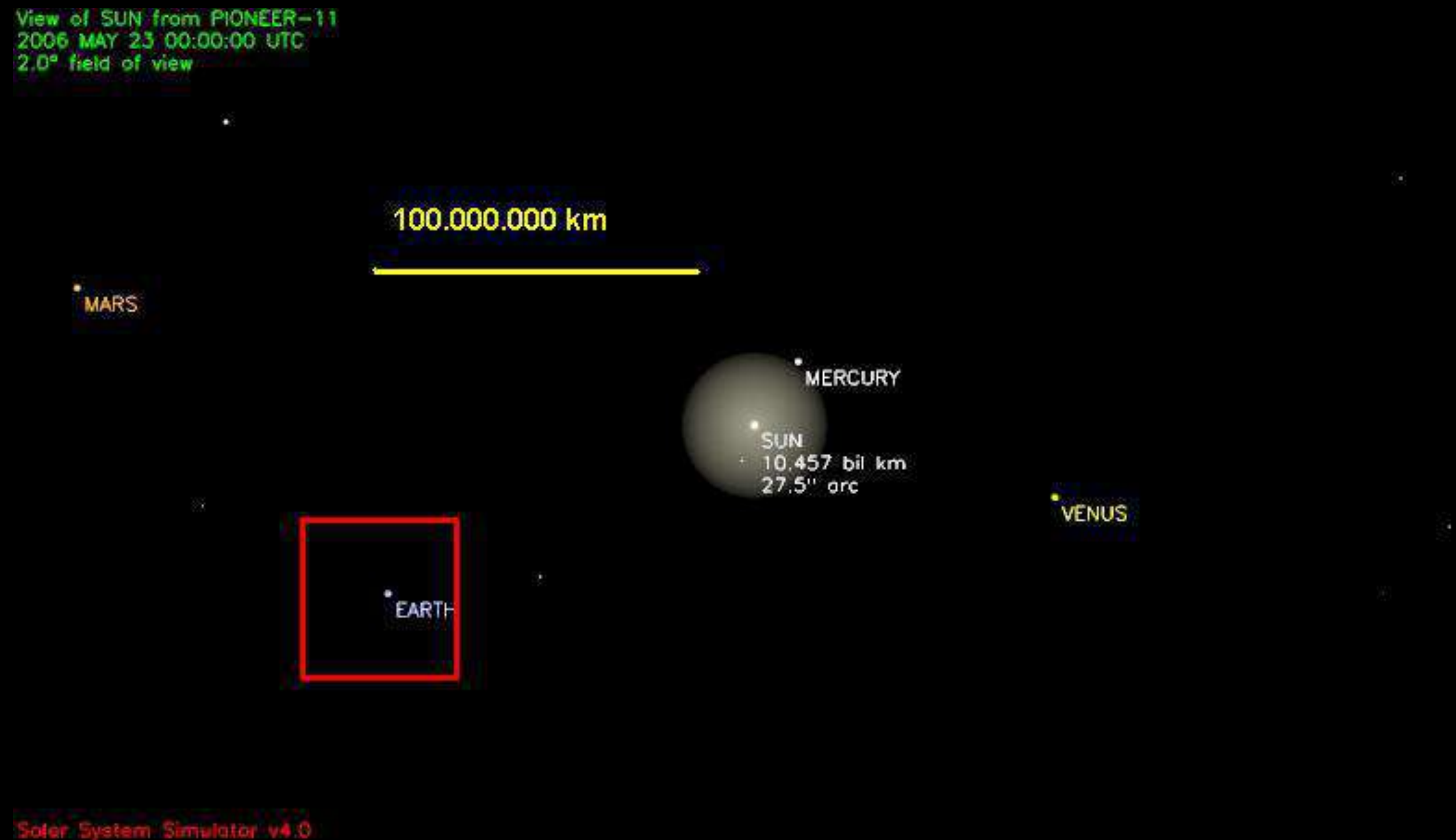
EARTH
10.342 bil km
0.3" arc
139.0° phase

Solar System Simulator v4.0

Parte da órbita da Terra em torno
do Sol já é visível

100 milhões de quilômetros

10^{11} m

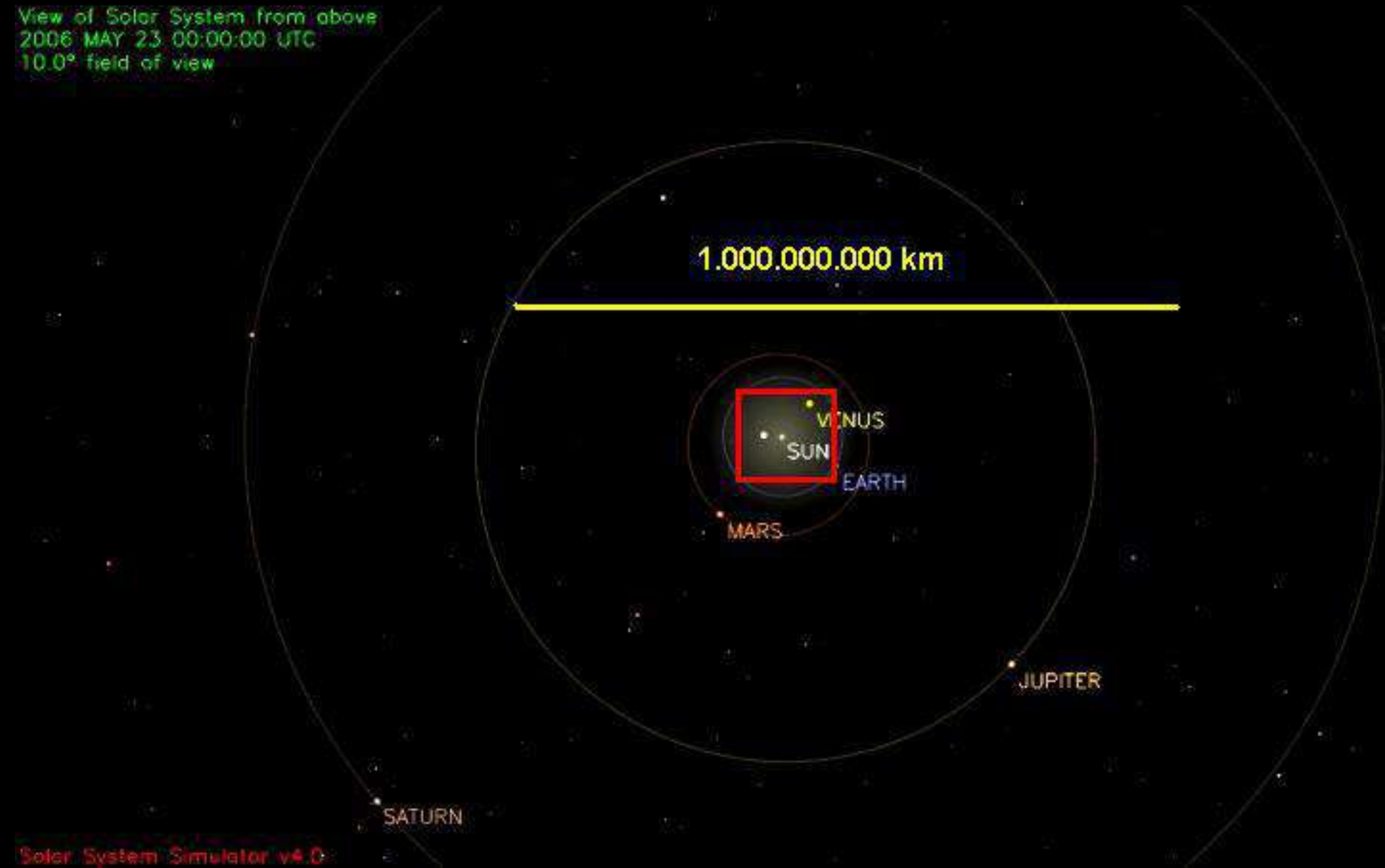


Já são visíveis as orbitas de
Terra, Marte e Vênus

1 bilhão de quilômetros

10^{12} m

View of Solar System from above
2006 MAY 23 00:00:00 UTC
10.0° field of view

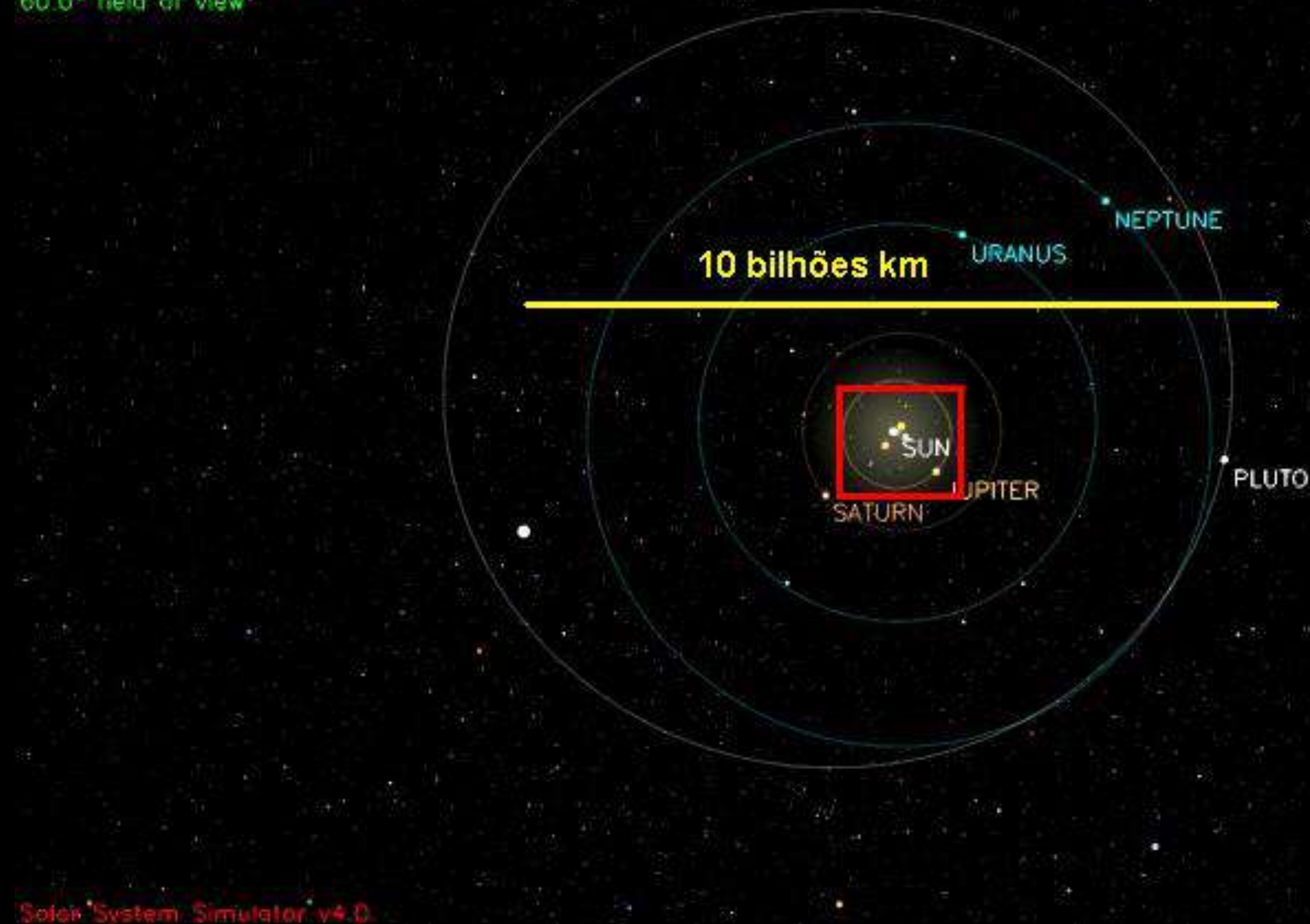


Visíveis as órbitas de Mercúrio,
Vênus, Terra, Marte e Júpiter

10 bilhões de quilômetros

10^{13} m

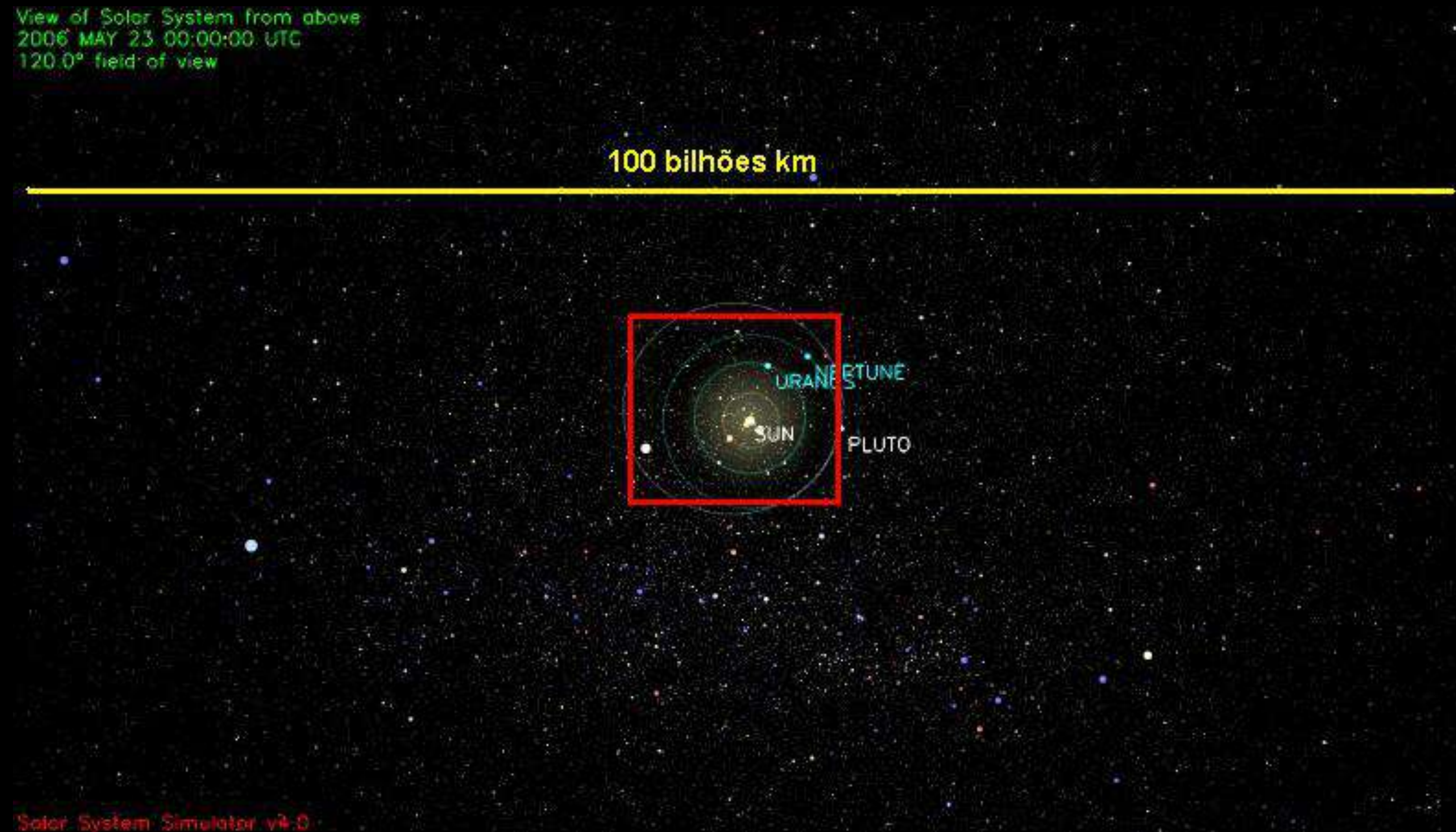
View of Solar System from above
2006 MAY 23 00:00:00 UTC
60.0° field of view



São visíveis as órbitas de todos os planetas do Sistema Solar e Plutão

100 bilhões de quilômetros

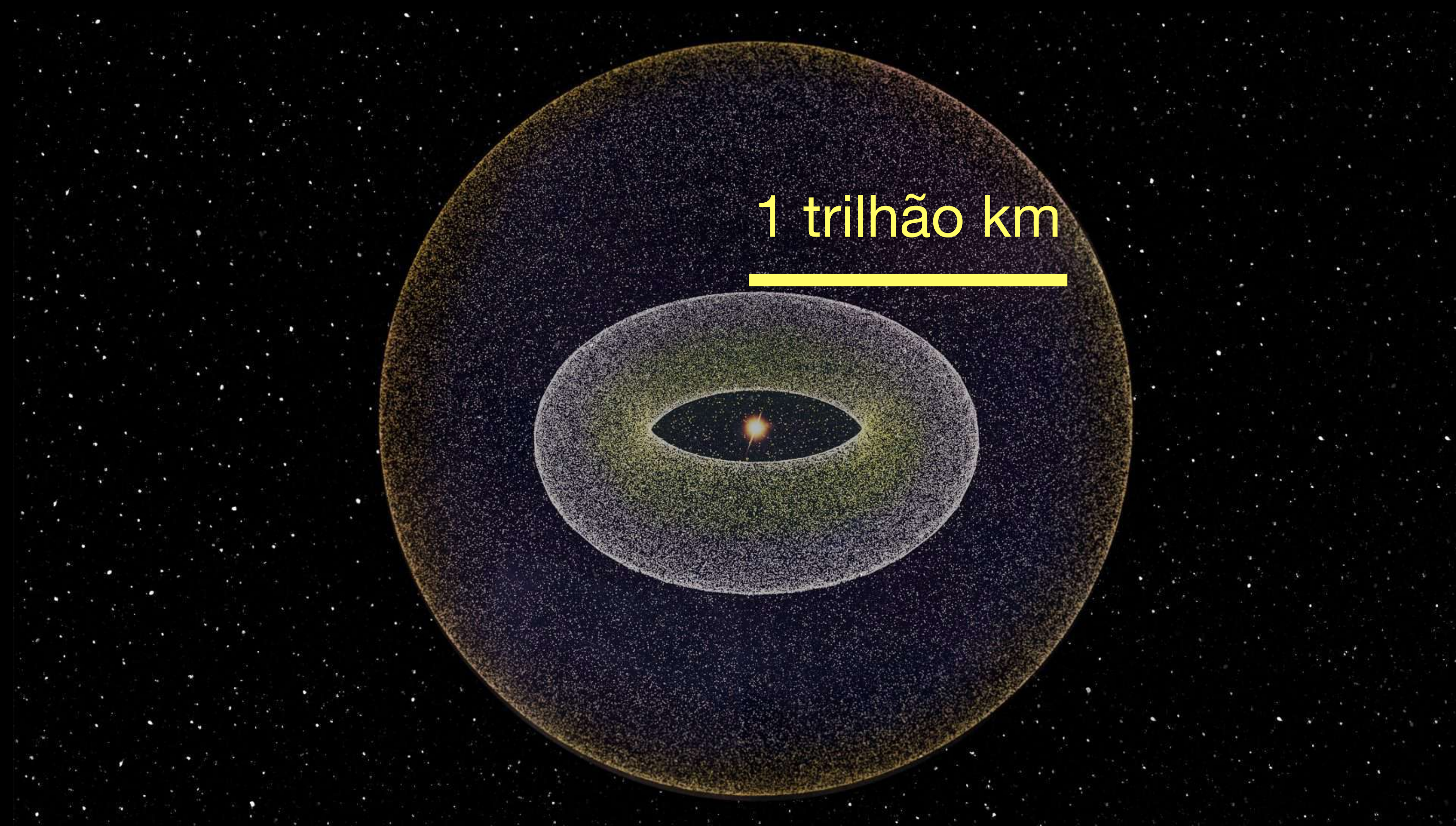
10^{14} m



Os planetas do Sistema Solar ocupam apenas uma pequena parte do campo de visão

1 trilhão de quilômetros

10^{15} m



Partindo do Sol, já estaríamos
dentro da Nuvem de Oort

<https://olhardigital.com.br/2025/04/19/ciencia-e-espaco/o-que-e-a-nuvem-de-oort-veja-o-que-ha-depois-dos-planetes-do-sistema-solar/>

100 trilhões de quilômetros

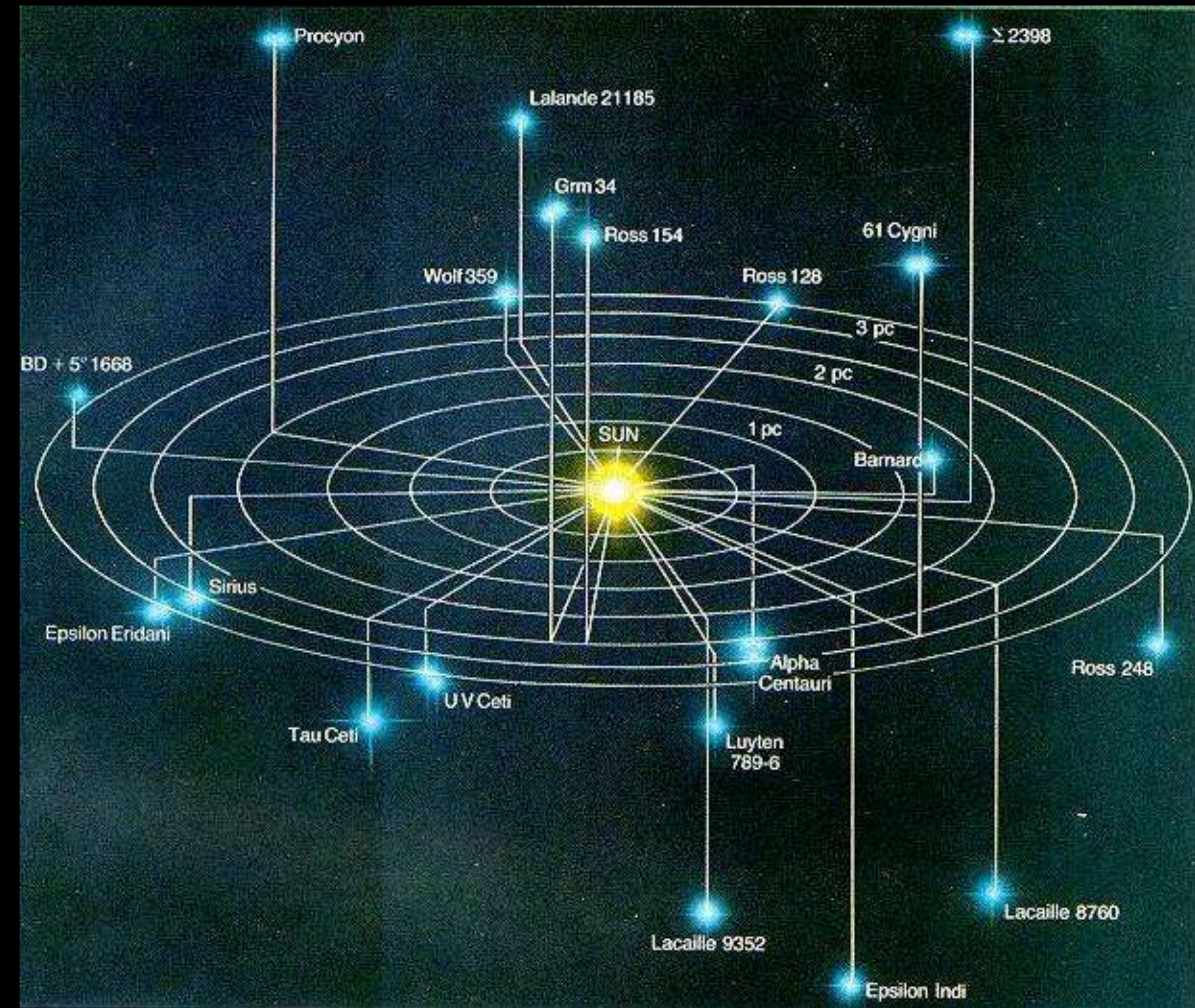
10 anos-luz

10^{17} m

1 ano-luz = 9.461 trilhões de km

Conseguimos ver as estrelas na
vizinhança solar

10 anos-luz

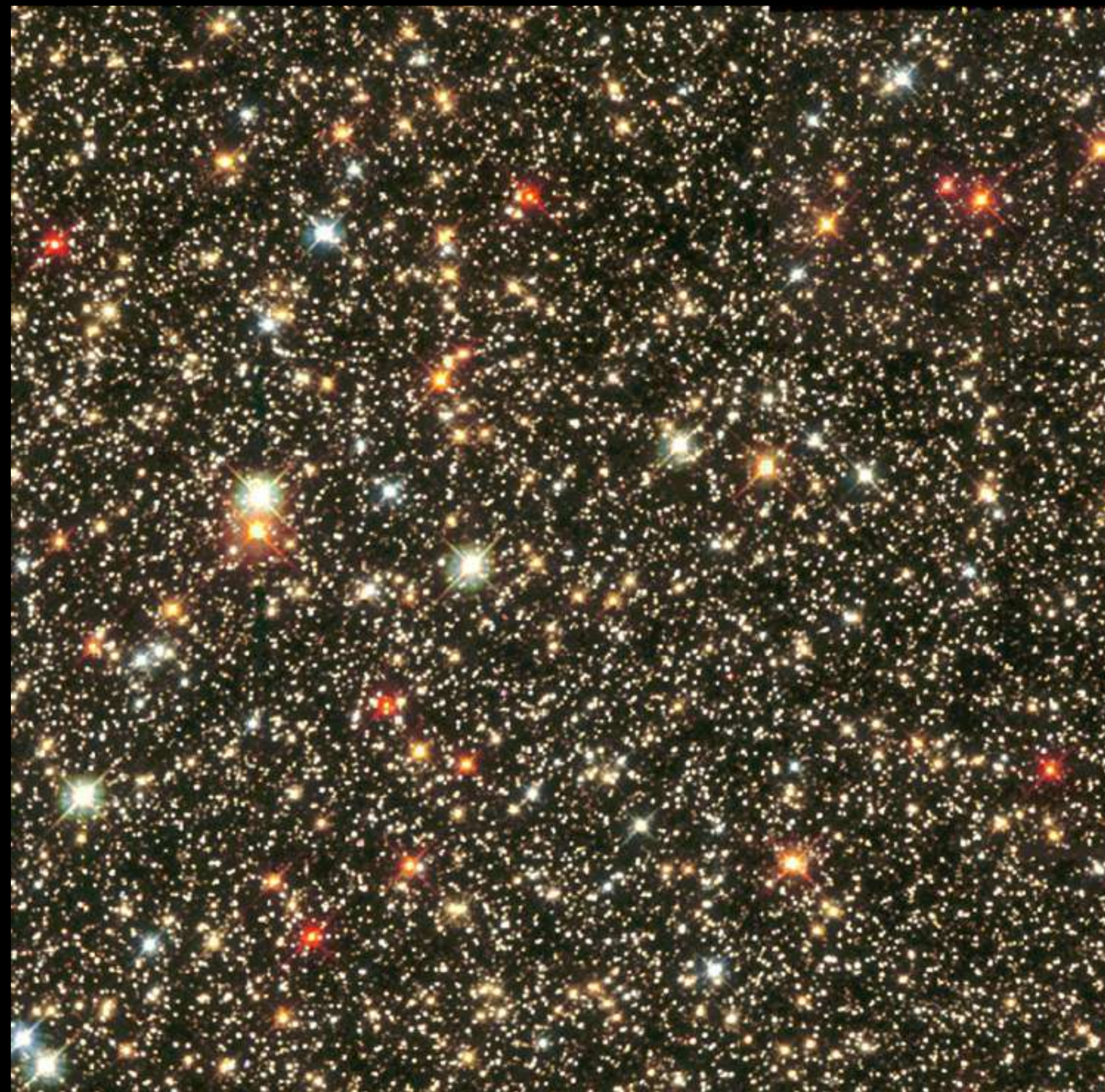


<https://www.if.ufrgs.br/oei/stars/promotion/proper.htm>

100 anos-luz
 $\sim 10^{18}$ m

Agora é possível identificar
sistemas estelares

100 anos-luz

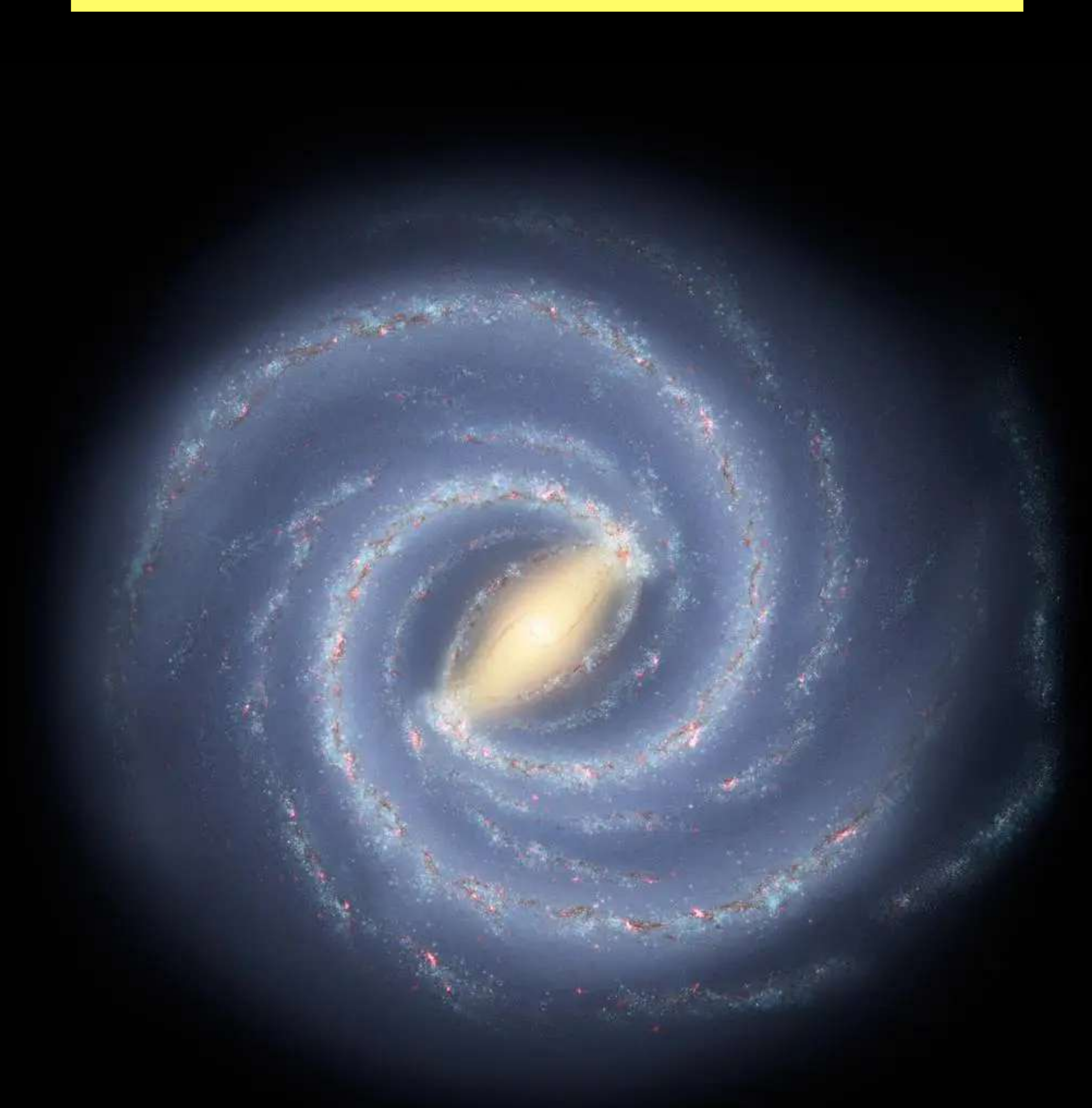


https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Sagittarius_Star_Cloud.jpg

100 000 anos-luz

$\sim 10^{21}$ m

100 000 anos-luz



É o diâmetro aproximado da Via-
Láctea

<https://www.nasa.gov/image-article/symphony-blue/>

1 milhão de anos-luz

$\sim 10^{22}$ m

1 milhão anos-luz



Grupos de galáxias são já são visíveis

https://en.wikipedia.org/wiki/HCG_87#/media/File:HCG_87.png

10 milhões de anos-luz

3 Mpc

$\sim 10^{23}$ m

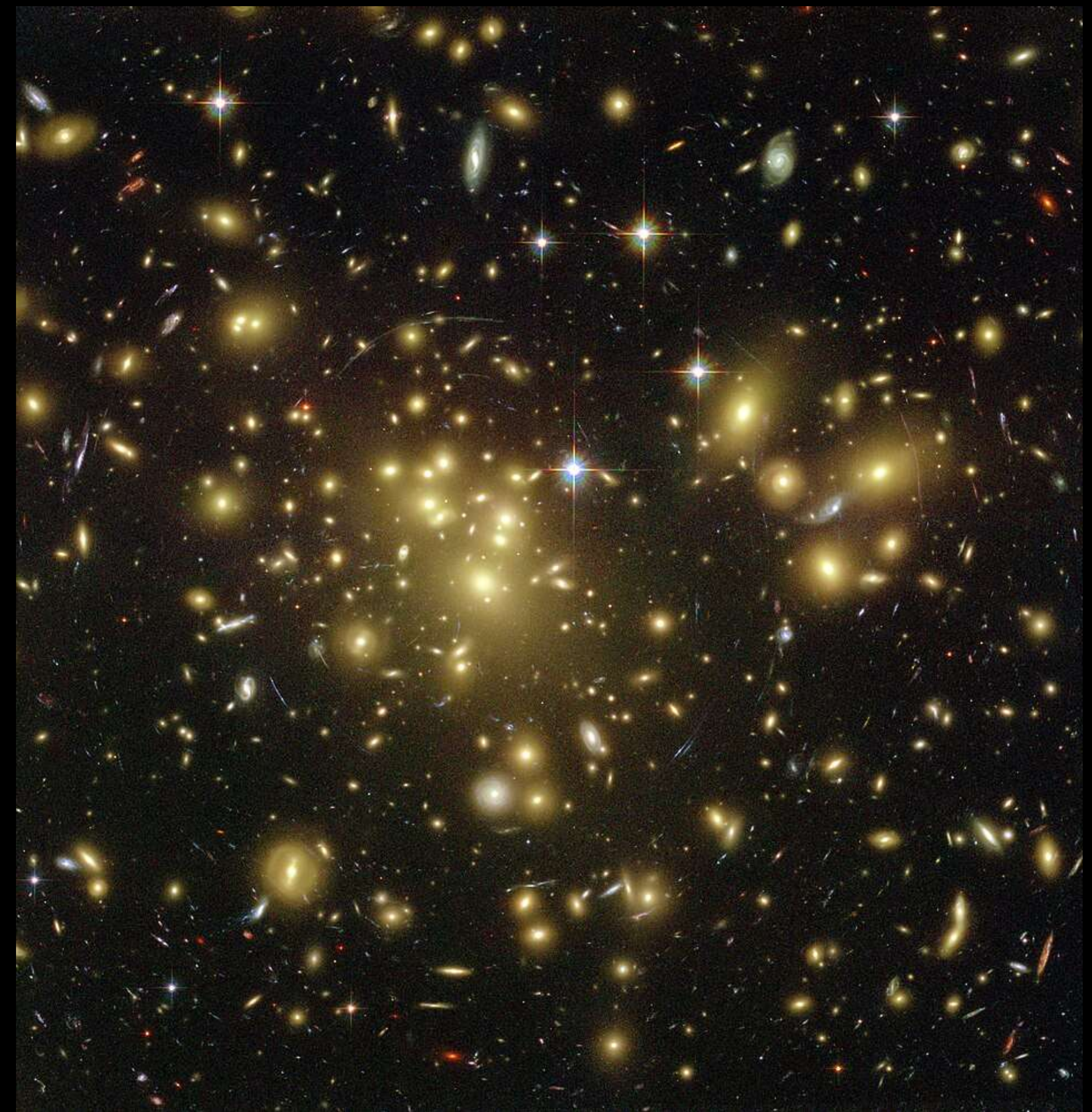
1 parsec (pc) = 3.26 anos-luz

1 kpc = 1000 pc = 3260 anos-luz

1 Mpc = 1000 kpc = 3.26 milhões de anos-luz

Já é possível identificar aglomerados de galáxias

3 Mpc



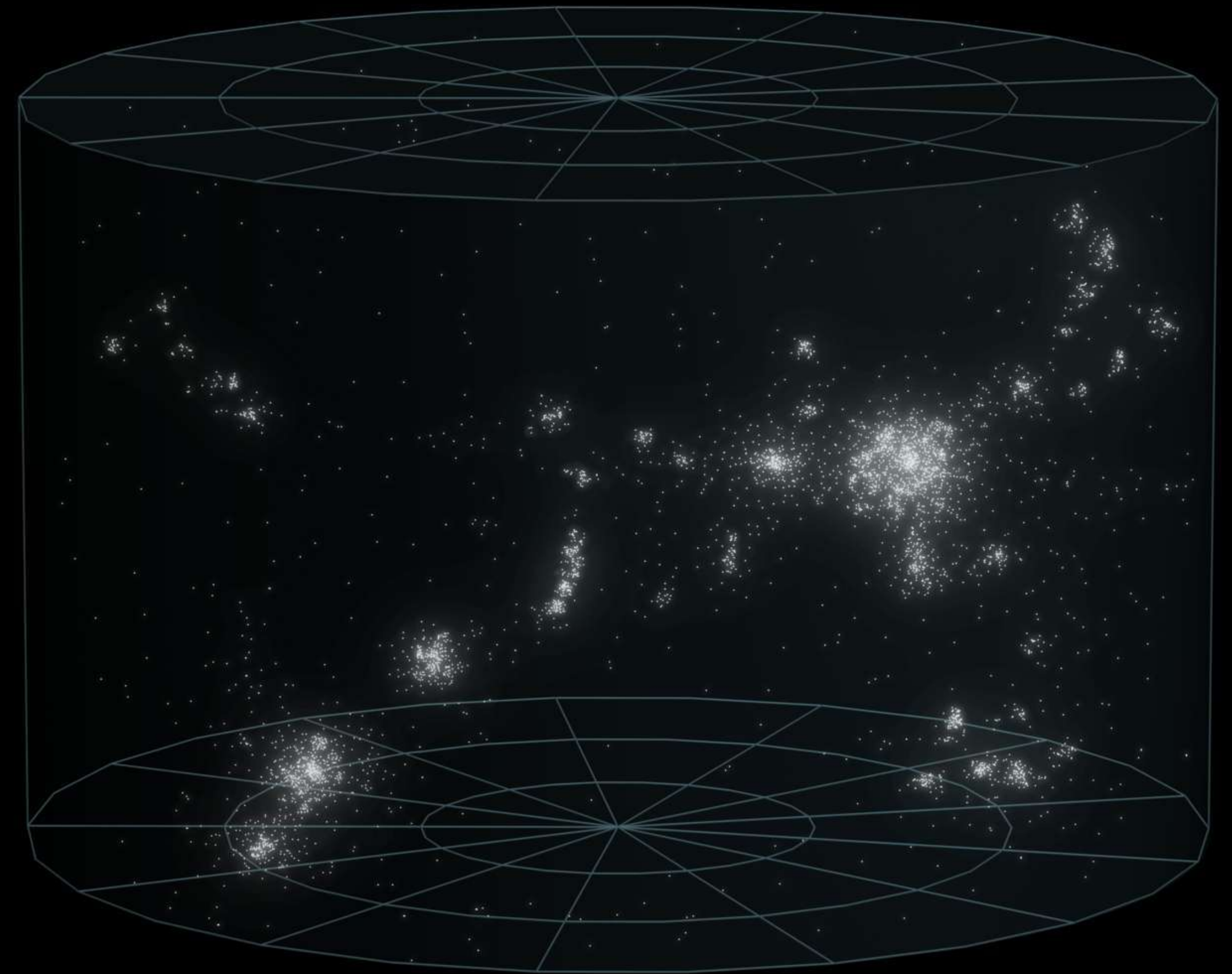
https://pt.wikipedia.org/wiki/Abell_1689#/media/Ficheiro:Gravitationell-lins-4.jpg

50 Mpc

$\sim 10^{24}$ m

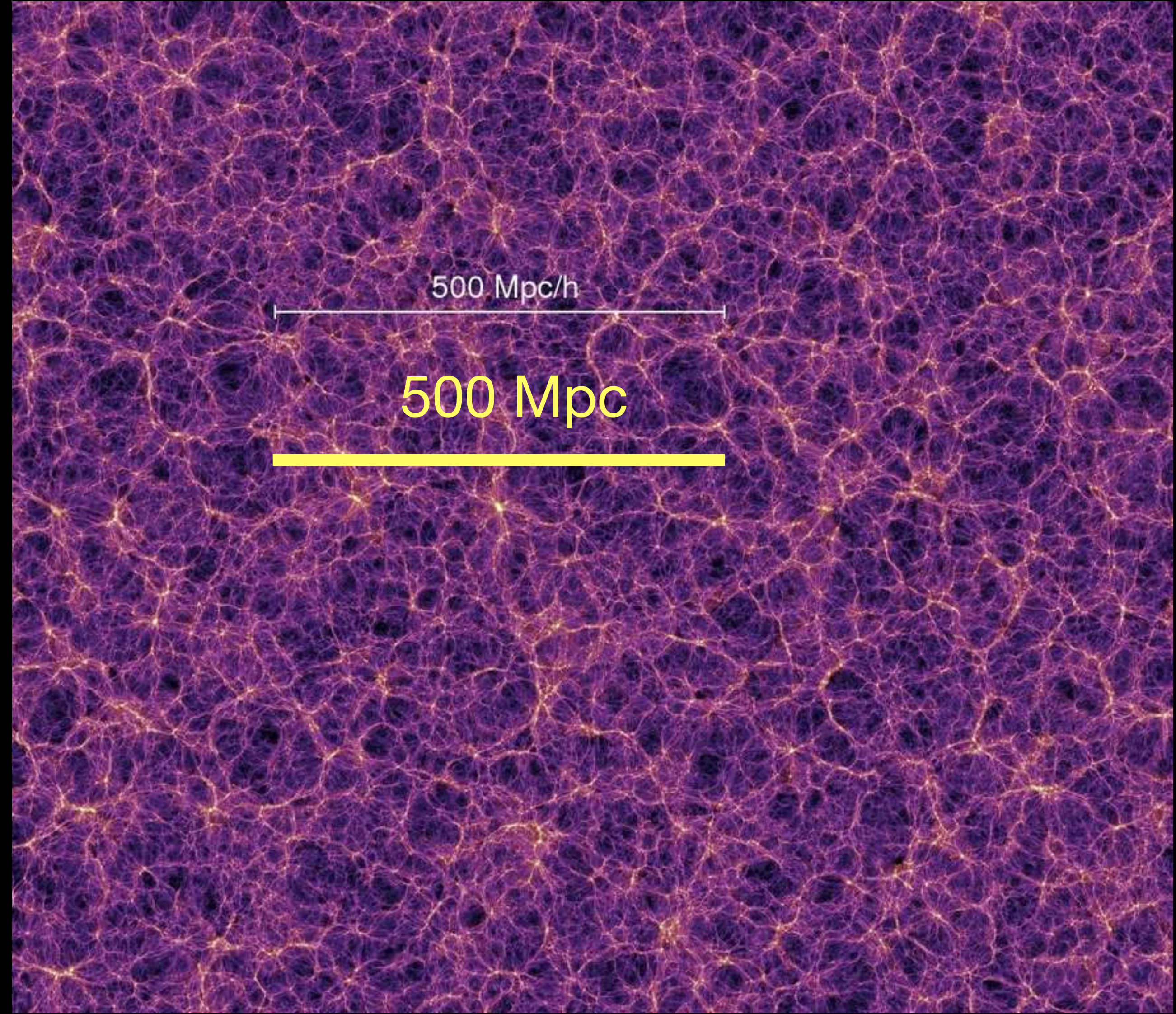
Já conseguimos identificar superaglomerados de galáxias

50 Mpc



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ce/6_Virgo_Supercluster_%28ELitU%29-blank.png/1280px-6_Virgo_Supercluster_%28ELitU%29-blank.png

500 Mpc
 $\sim 10^{25}$ m



A distribuição de matéria no Universo se torna homogênea (nós, filamentos e vazios)

https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/seqB_063a_half.jpg

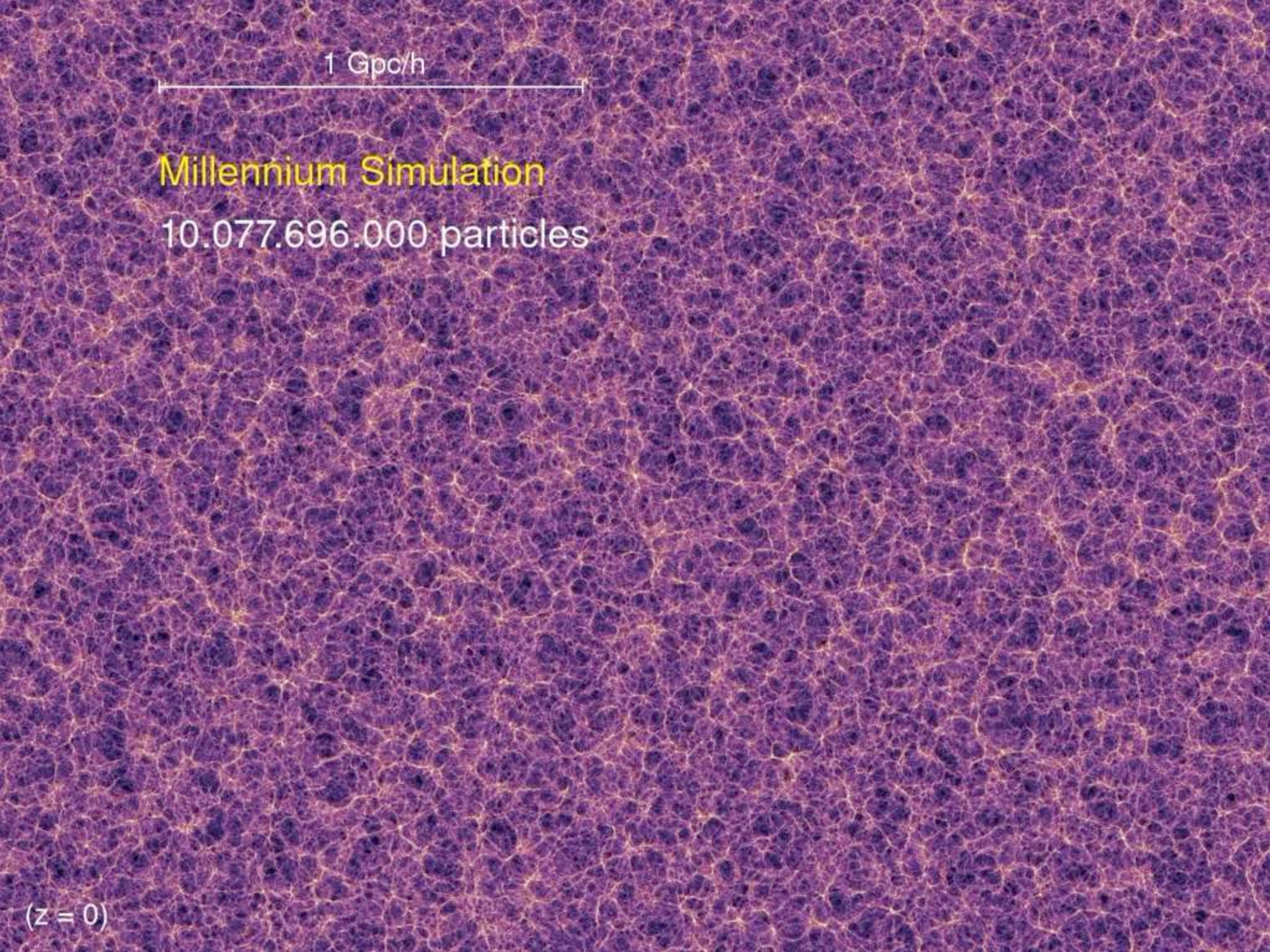
The Millennium Simulation Project

($z = 0$)

1 Gpc/h

Millennium Simulation

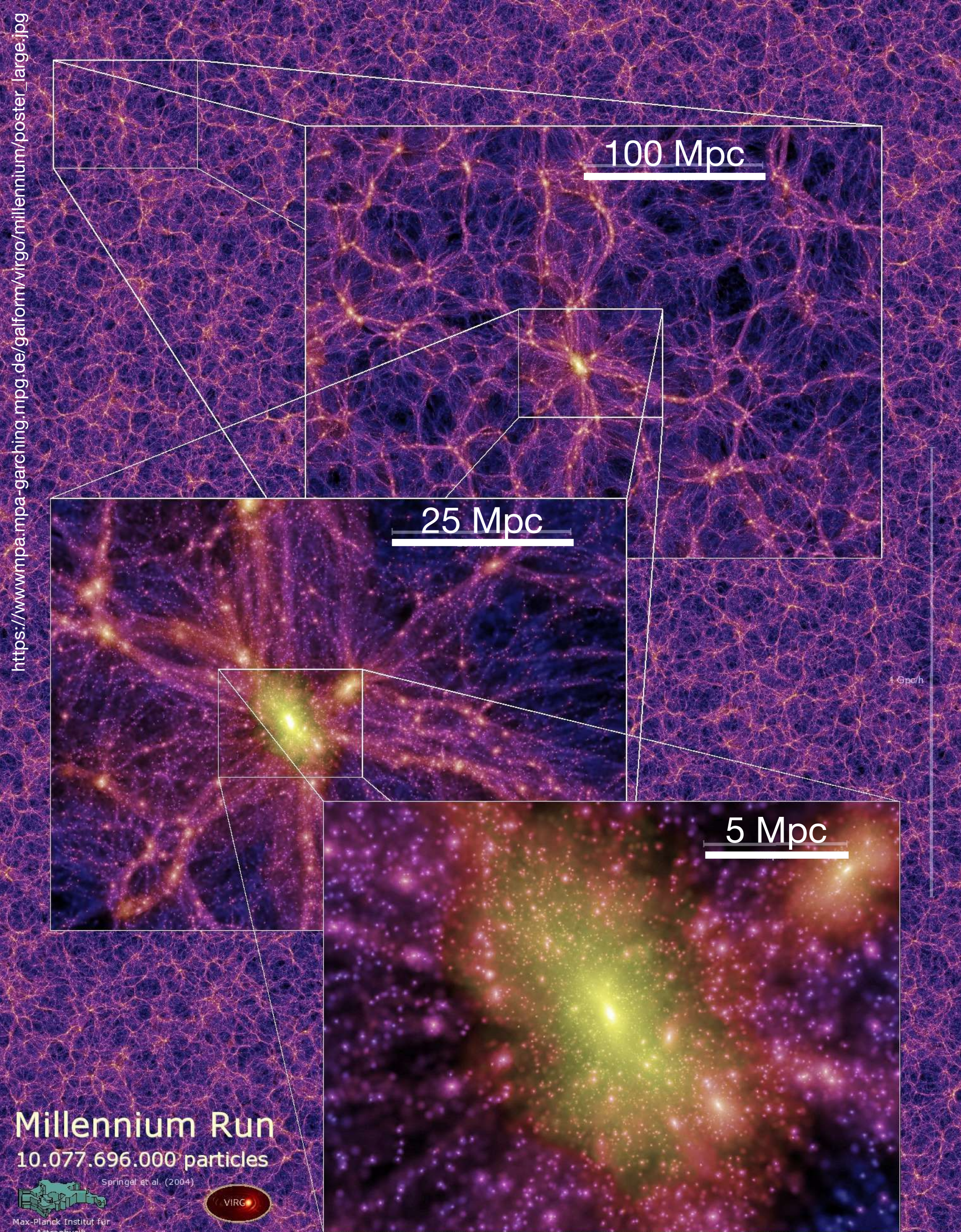
10.077.696.000 particles



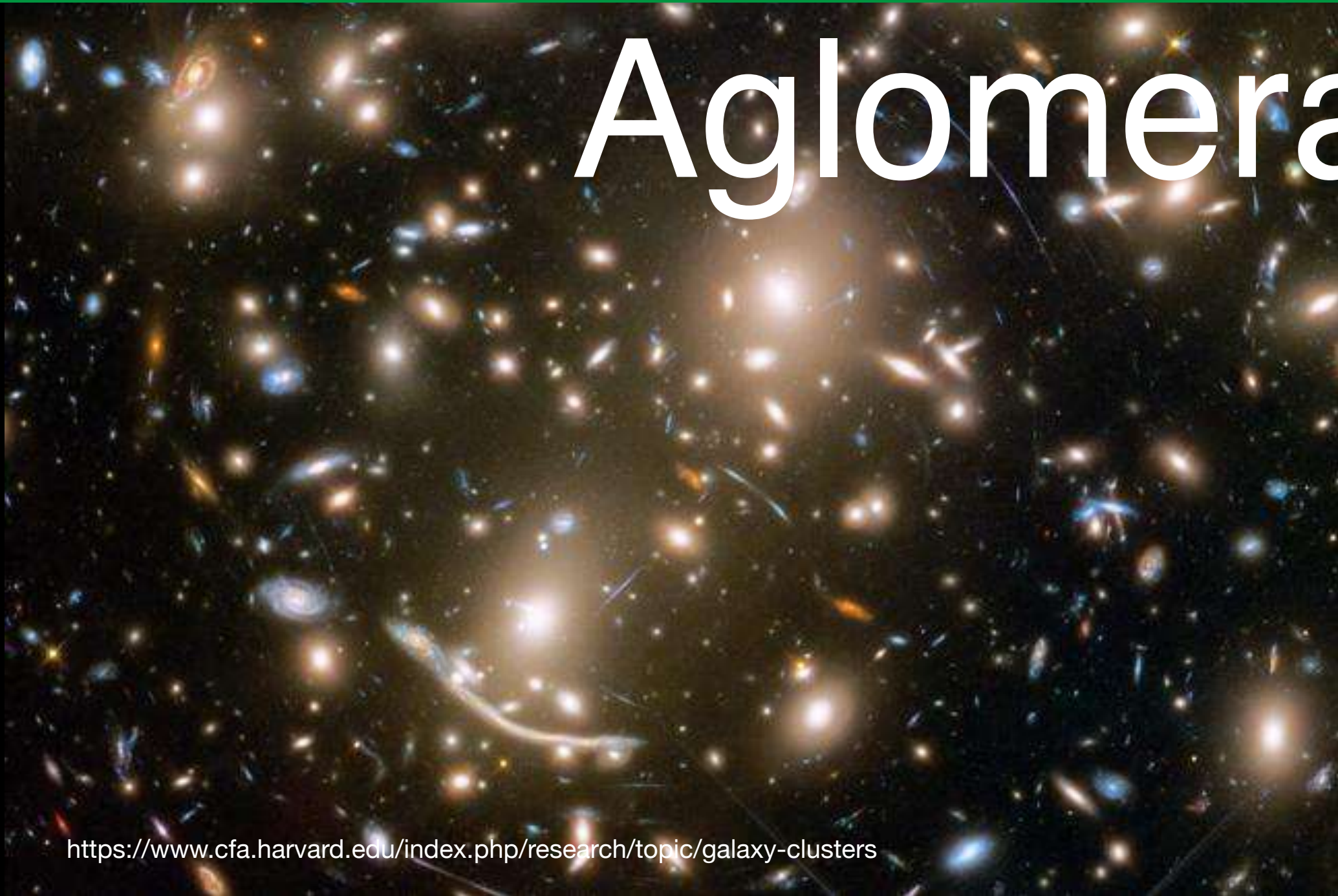
<https://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

A teia cósmica

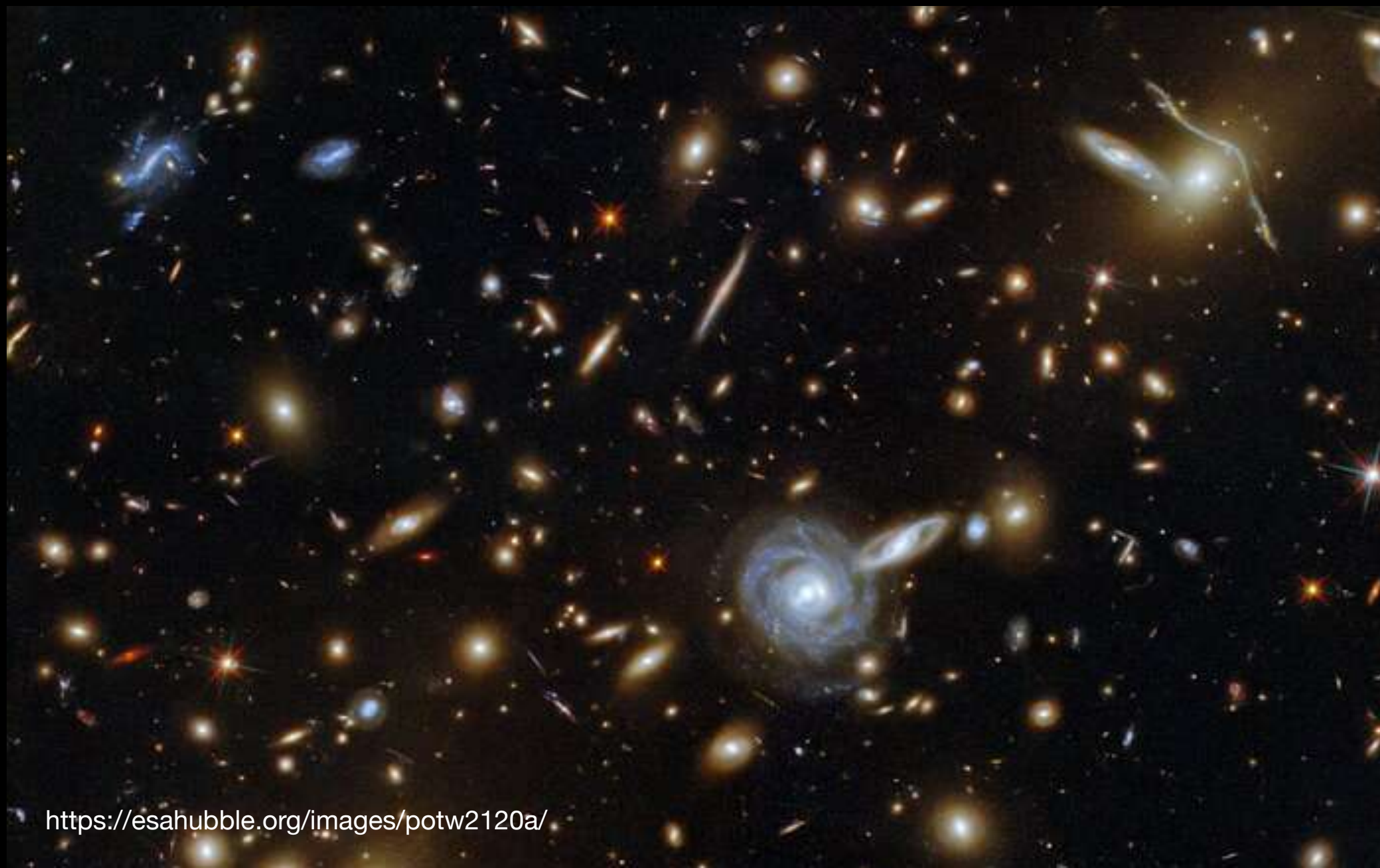
- **Vazios (Voids):** Ocupam a maior parte do volume, mas contêm pouca massa.
- **Filamentos:** Pontes conectando regiões de maior densidade de matéria.
- **Nós:** Os pontos de intersecção da teia. O fundo do poço de potencial gravitacional e o habitat dos aglomerados de galáxias.



Aglomerados de galáxias



<https://www.cfa.harvard.edu/index.php/research/topic/galaxy-clusters>



<https://esahubble.org/images/potw2120a/>





Neste minicurso

aglomerado = aglomerado de galáxias

≠

aglomerado estelar

O que é um aglomerado de galáxias?

- Sistemas que já **colapsaram** e estão **virializados**.
- Possuem massas totais de 10^{14} a $10^{15} M_{\odot}$ dentro de um raio virial (R_{200})

Observação: massa englobada em relação à densidade crítica do Universo,

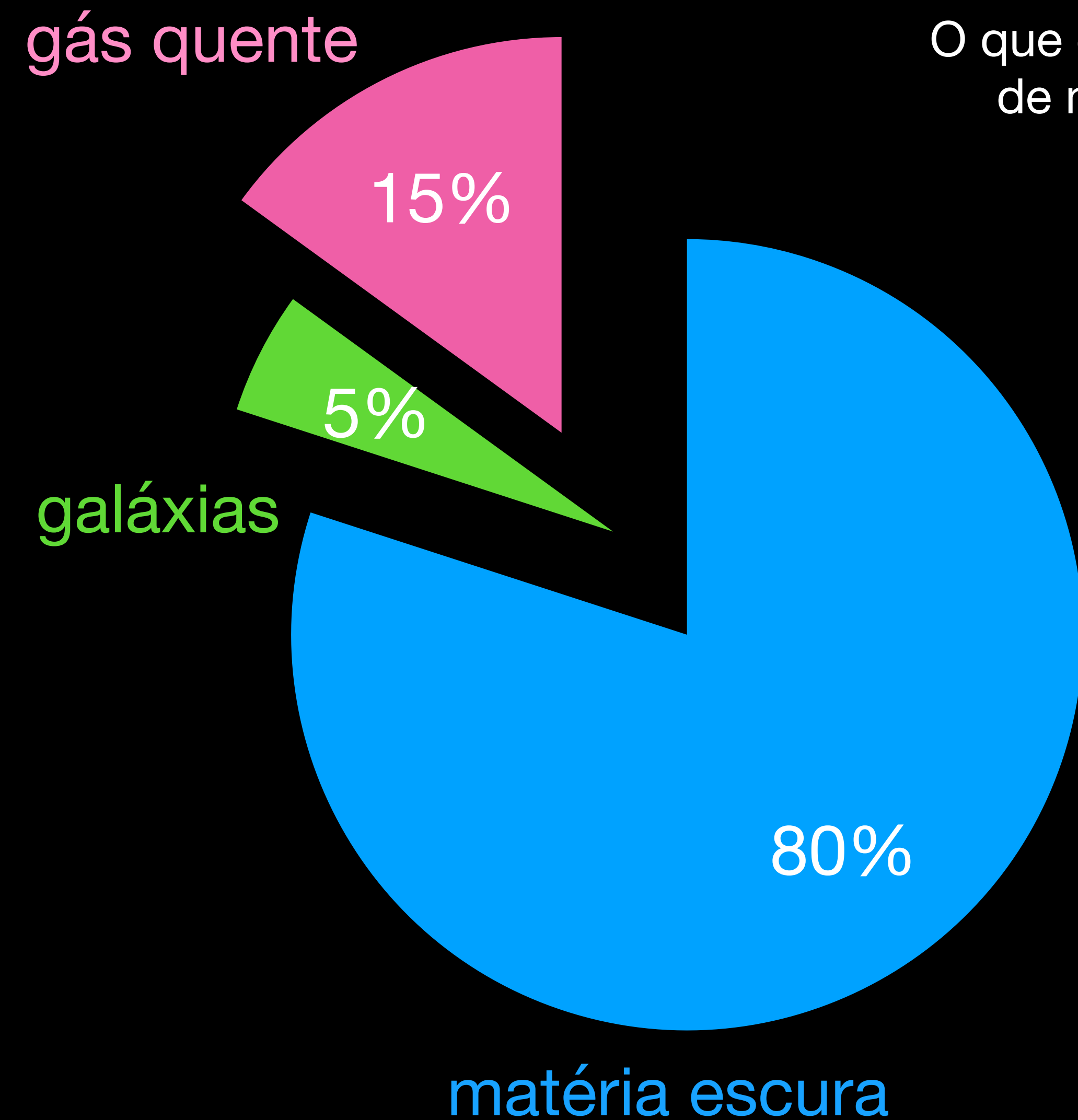
$$M_{200} = \frac{4\pi}{3} R_{200}^3 (200\rho_c)$$

$$\rho_c(t) = \frac{3H^2(t)}{8\pi G}$$

A Receita de um Aglomerado

O Balanço de Massa

O que chamamos de **aglomerado de galáxias** é essencialmente uma mistura de matéria escura e gás, onde **galáxias** são o **componente minoritário**.



<https://chandra.harvard.edu/photo/2015/dark/more.html>

Um pequeno parêntesis...

DISPERSÃO DE VELOCIDADES EM AGLOMERADOS DE GALÁXIAS (σ_v)

O QUE É?

Uma medida de quão diferentes são as velocidades das galáxias em relação à velocidade média do aglomerado, quantificando o espalhamento ao longo da linha de visada.

BAIXA DISPERSÃO (σ_v Pequeno)

ALTA DISPERSÃO (σ_v Grande)

Analogia Físico

Analogia Físico (Abelhas)



- Muitas abelhas voando na mesma velocidade e direção

MEDINDO A DISPERSÃO DE VELOCIDADES



Analogia Físico (Abelhas)



- Abelhas voando de forma caótica, com velocidades e direções aleatórias

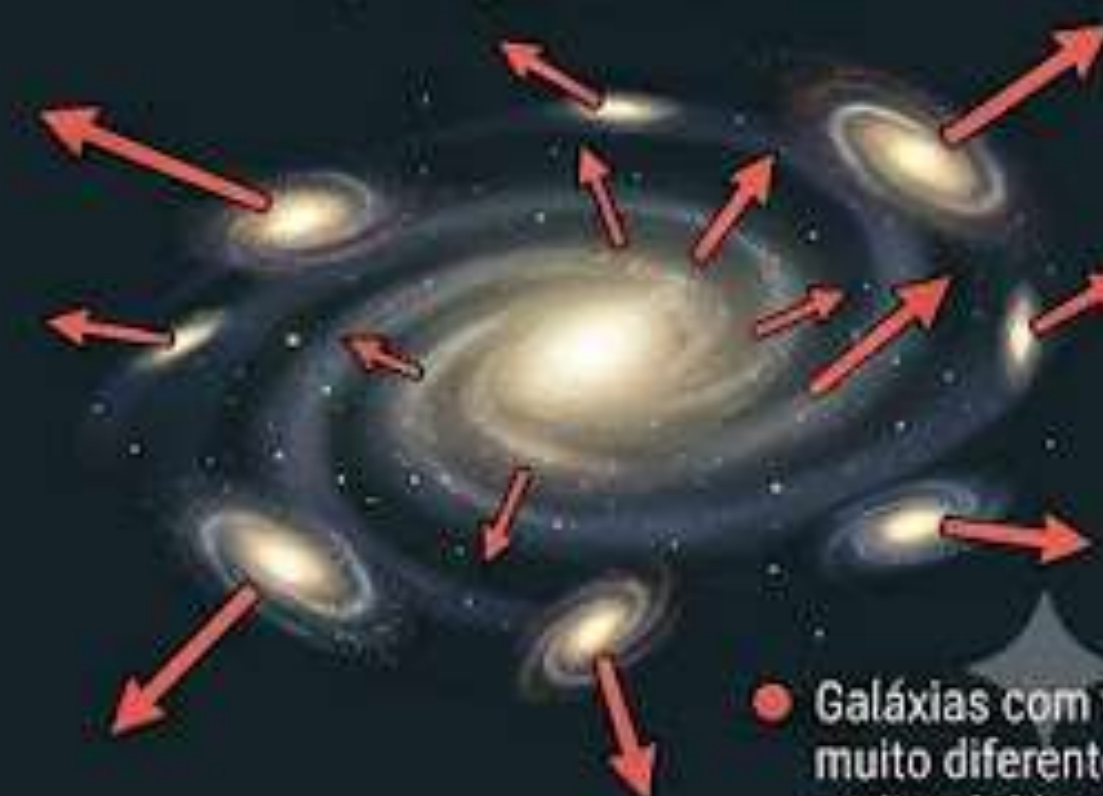
Aplicação em Galáxias

Aplicação em Galáxias



- Galáxias com velocidades próximas à média do aglomerado

Aplicação em Galáxias

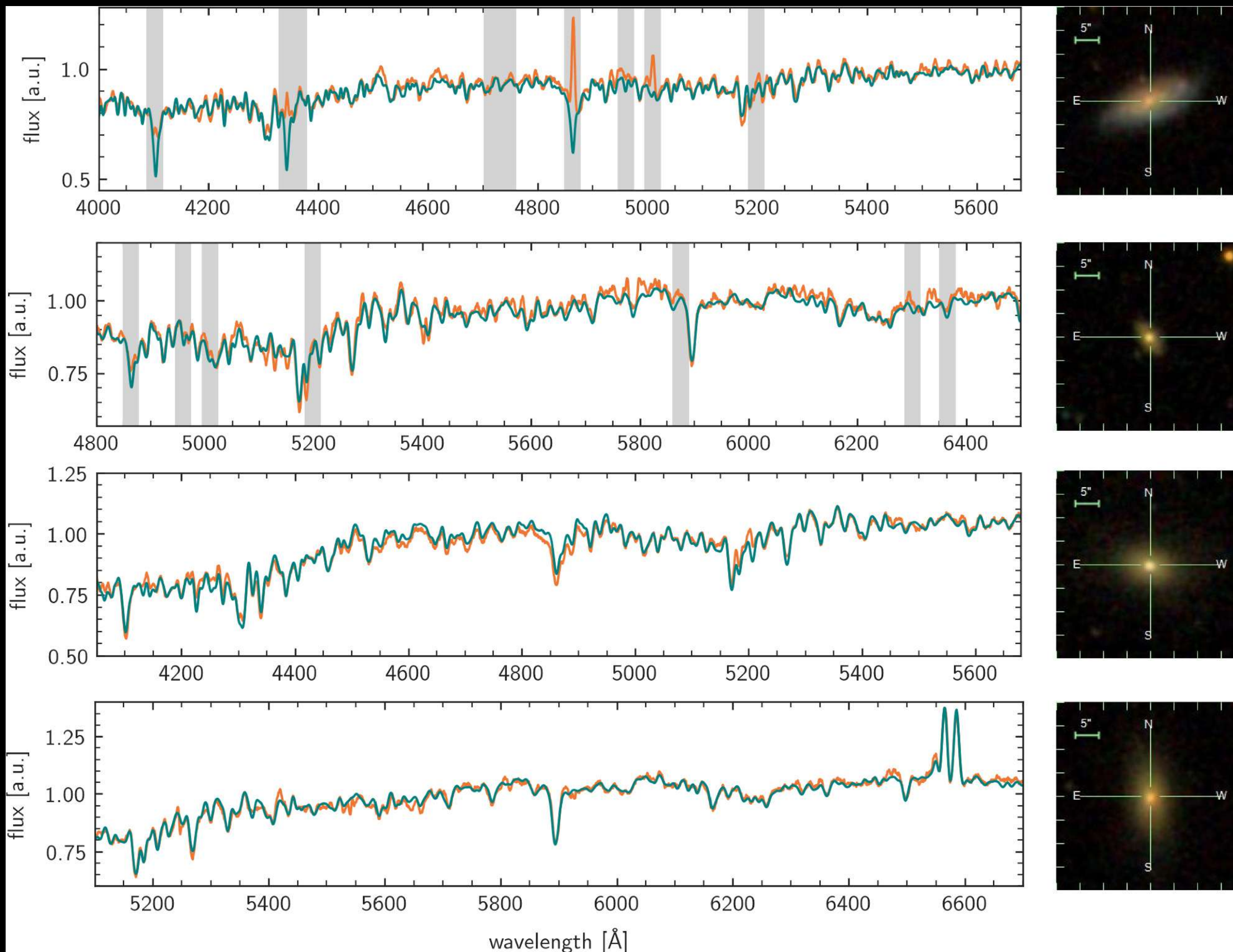


- Galáxias com velocidades muito diferentes, algumas muito rápidas, outras lentas

DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES (v)



IMPORTÂNCIA: A dispersão de velocidades (σ_v) é usada para medir a massa total do aglomerado através do Teorema do Virial, fornecendo uma estimativa precisa da quantidade de matéria total.

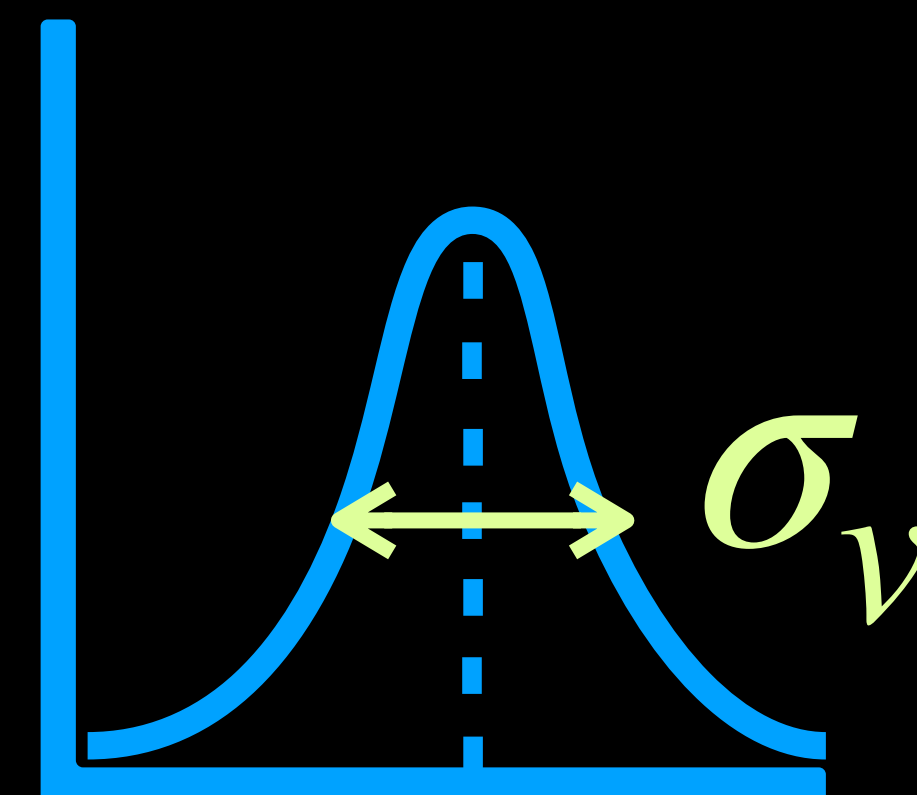


$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

redshift da galáxia
(determinado a partir do espectro)

$$v_r = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

velocidade radial da galáxia
(calculada a partir do redshift)



dispersão de
velocidades
radiais do
aglomerado

O Teorema do Virial

- Num sistema gravitacionalmente ligado e em equilíbrio dinâmico (virializado), a energia cinética total K e a energia potencial gravitacional U obedecem à relação: $2K + U = 0$
- $K \approx \frac{1}{2}M\sigma_v^2$ depende da massa total e de quão rápido as galáxias se movem.
- $U \approx -\frac{GM^2}{R}$ depende do tamanho do poço de potencial

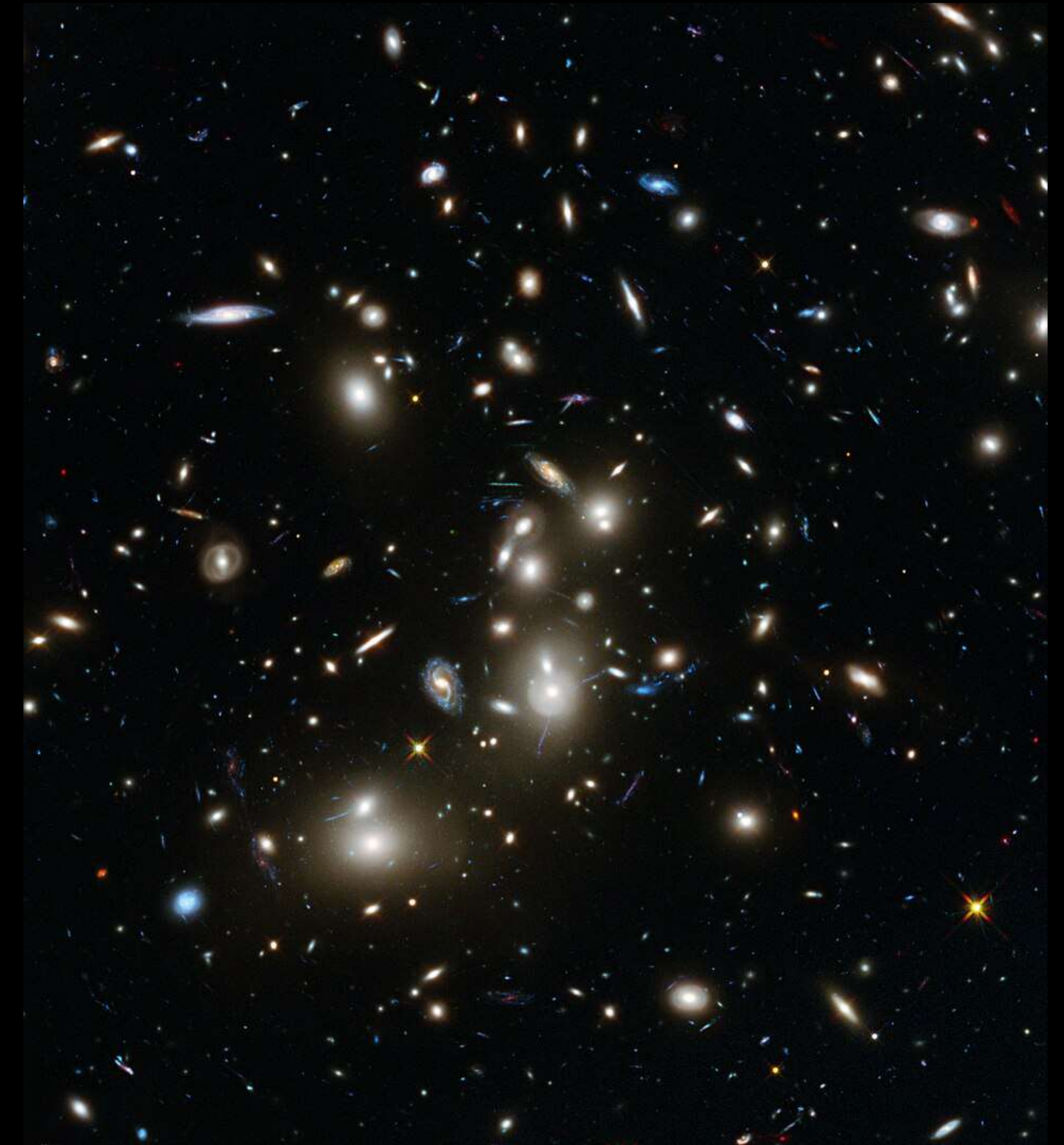
$$2K + U = 0$$



$$M_{din} \approx \frac{R\sigma_v^2}{G}$$

Estimando a Massa Luminosa

- **Luminosidade total L_{tot}** : soma da luz emitida por todas as galáxias membros do aglomerado.
- **Razão Massa-Luminosidade (Υ ou M/L)**: taxa de conversão entre a luz observada e a massa estelar que a produziu.
- **Massa total luminosa: $M_{lum} = \Upsilon \times L_{tot}$**



https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_galaxy_groups_and_clusters#/media/File:Heic1401a-Abell2744-20140107.jpg

Se a luz é um traçador direto e fiel da massa, a massa exigida pela gravidade deve ser igual à massa que podemos ver brilhando

$$M_{din} \approx M_{lum}$$

E agora de volta à programação normal.

A Matéria Escura

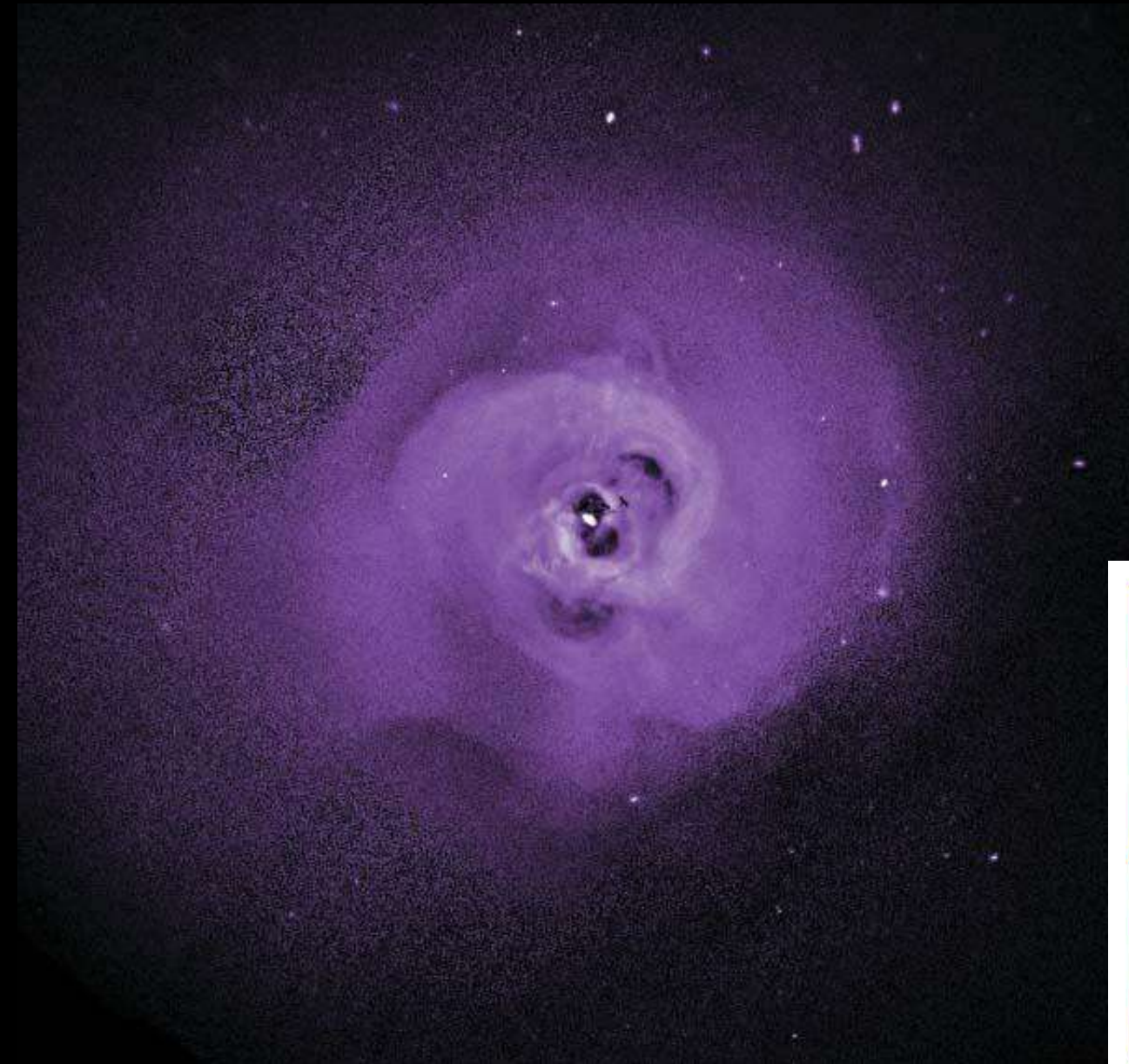
- Contexto histórico: Fritz Zwicky medindo a massa do aglomerado de Coma em 1933.
- Dispersão de velocidades das galáxias de Coma: $\sigma_v \sim 1000 \text{ km/s}$.
- O resultado de Zwicky: A massa dinâmica medida em Coma era cerca de 400 vezes maior que a massa luminosa ($M_{din} \approx 400 \times M_{lum}$).
- Conclusão: matéria não visível era a responsável pela discrepância.
- Atualmente a ME é detectada através de lentes gravitacionais.



<https://nmspaceumuseum.org/inductee/fritz-zwicky/>

O Meio Intra-Aglomerado (ICM)

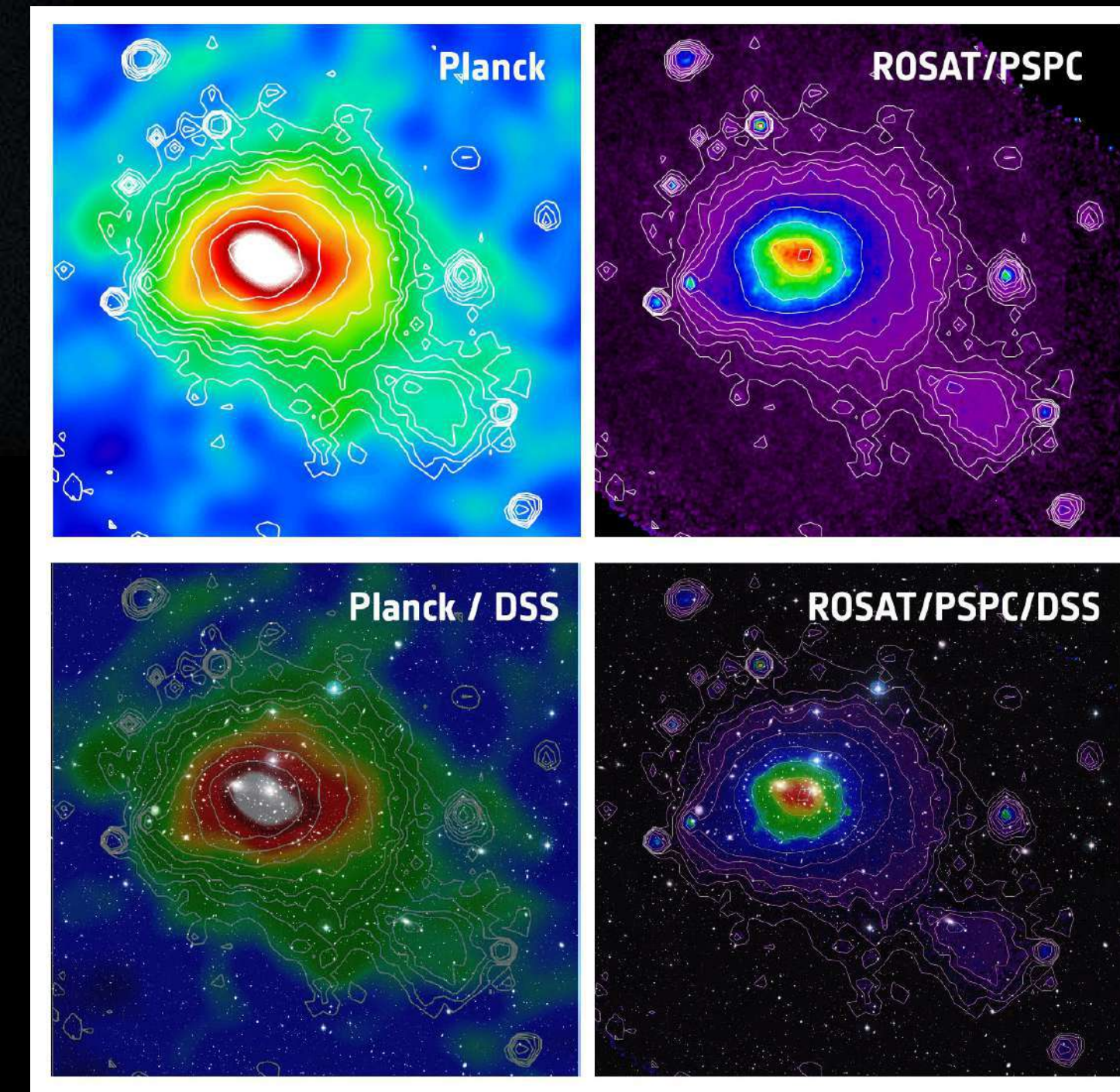
- Densidade extremamente baixa ($n_e \sim 10^{-3}$ partículas/cm³), mas temperaturas altíssimas ($T \sim 10^7 - 10^8$ K, ou 1 – 10 keV).
- Gás primordial que caiu no poço de potencial + material enriquecido processado por supernovas nas galáxias.
- Forte emissor em raios-X.



<https://www.cfa.harvard.edu/news/quiet-intracluster-medium-core-perseus-cluster>



Veja a palestra da Dra. Rebeca Batalha
quinta-feira (23/07) às 15:45



https://plancksatellite.org.uk/wp-content/uploads/sites/2/2020/05/Planck_ROSAT_Coma.jpg

A Física do ICM: Equilíbrio Hidrostático

- O gás não entra em colapso total porque a **pressão térmica compensa a atração gravitacional**: $\frac{dP}{dr} = -\rho_{gas}(r)\frac{GM(<r)}{r^2}$.

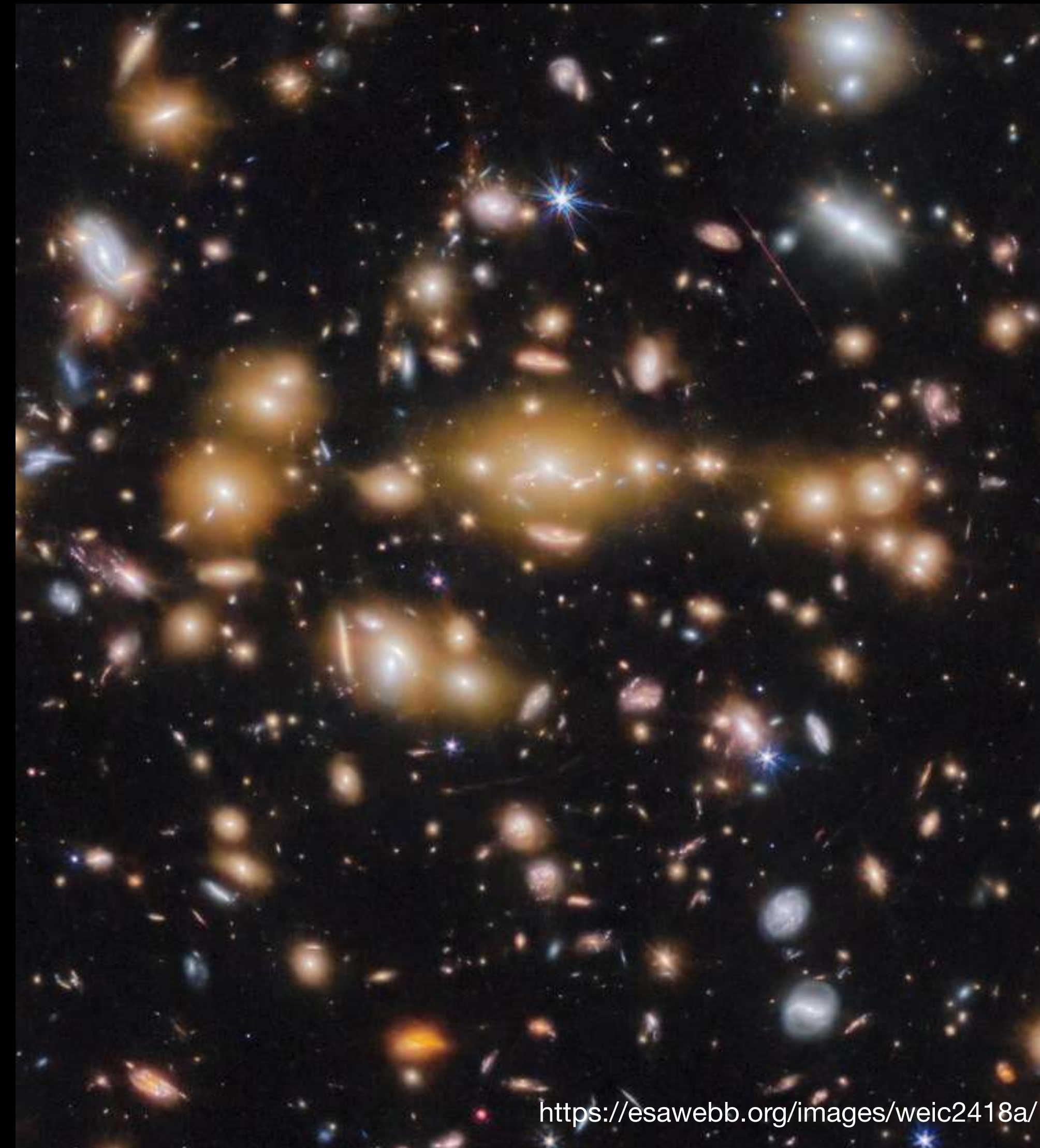
- Assumindo a Lei dos Gases Ideais $P = \frac{\rho k_B T}{\mu m_p}$, podemos reescrever a

equação para isolar a massa contida dentro de um raio r :

$$M(<r) = -\frac{k_B T(r) r}{G \mu m_p} \left[\frac{d \ln \rho_{gas}(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln T(r)}{d \ln r} \right]$$

As Galáxias

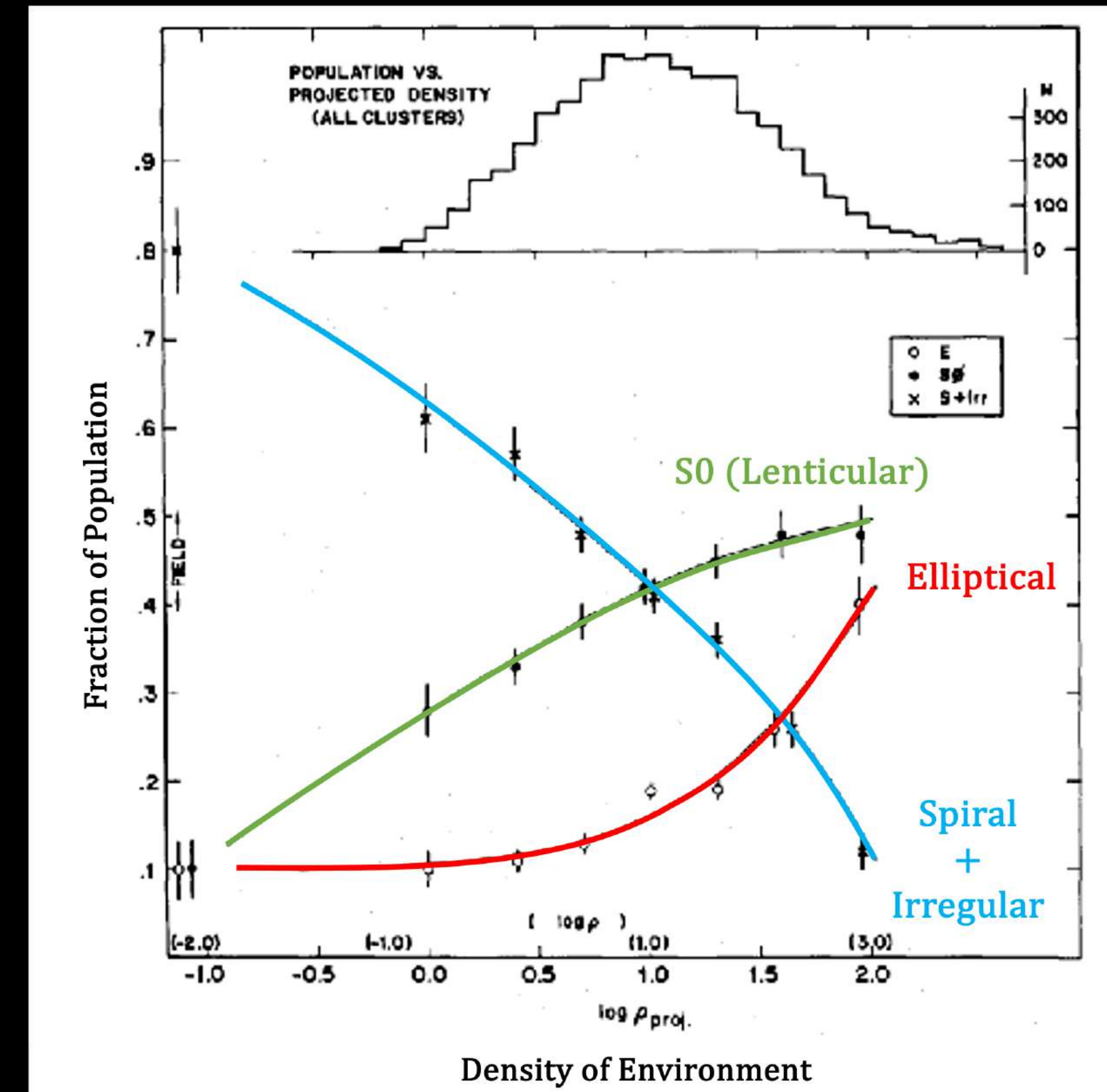
- Único componente **visível no óptico**, mas representam apenas entre **2% e 5%** da massa total do aglomerado.
- O **destino e a forma** de uma galáxia dependem fortemente da densidade do **ambiente** onde ela está inserida.
- Galáxias em ambientes densos (centros de aglomerados) evoluem de forma muito diferente daquelas em regiões isoladas (campo).



<https://esawebb.org/images/weic2418a/>

Relação Morfologia-Densidade

- **Centro do aglomerado:**
 - Galáxias Elípticas (E) e Lenticulares (S0).
 - Populações estelares velhas (*red and dead*).
 - Ausência de reservas de gás frio, impossibilitando a formação de novas estrelas.
- **Regiões afastadas e campo:**
 - Galáxias Espirais (S) e Irregulares (Irr).
 - Populações estelares jovens e braços espirais azuis.
 - Ambientes ricos em gás frio e poeira, com altas taxas de formação estelar ativa.

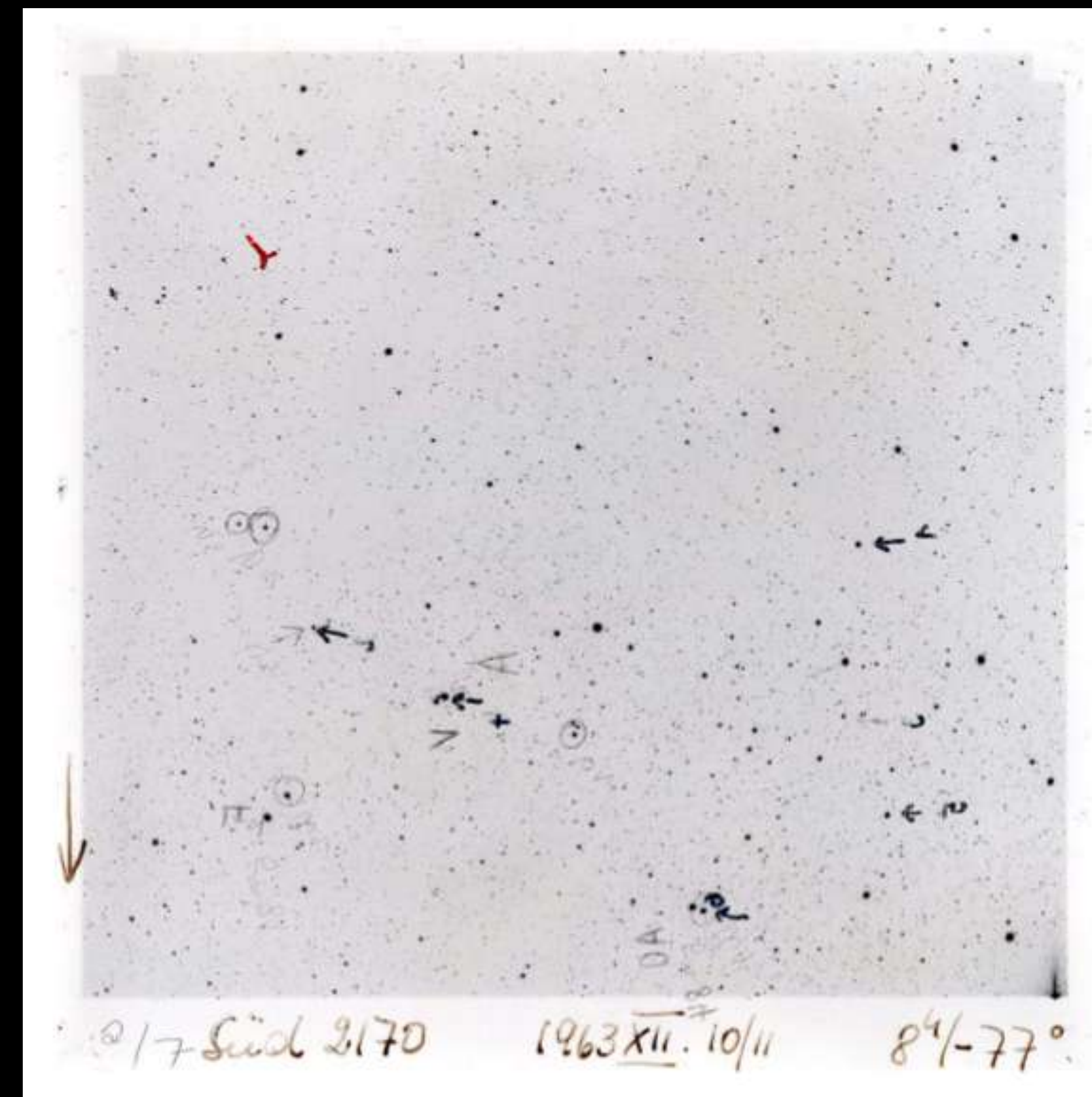


<https://publish.obsidian.md/astrowiki/G.+Galaxies/Q%26A/Question+107>

Como Detectar um Aglomerado?

O Domínio Óptico

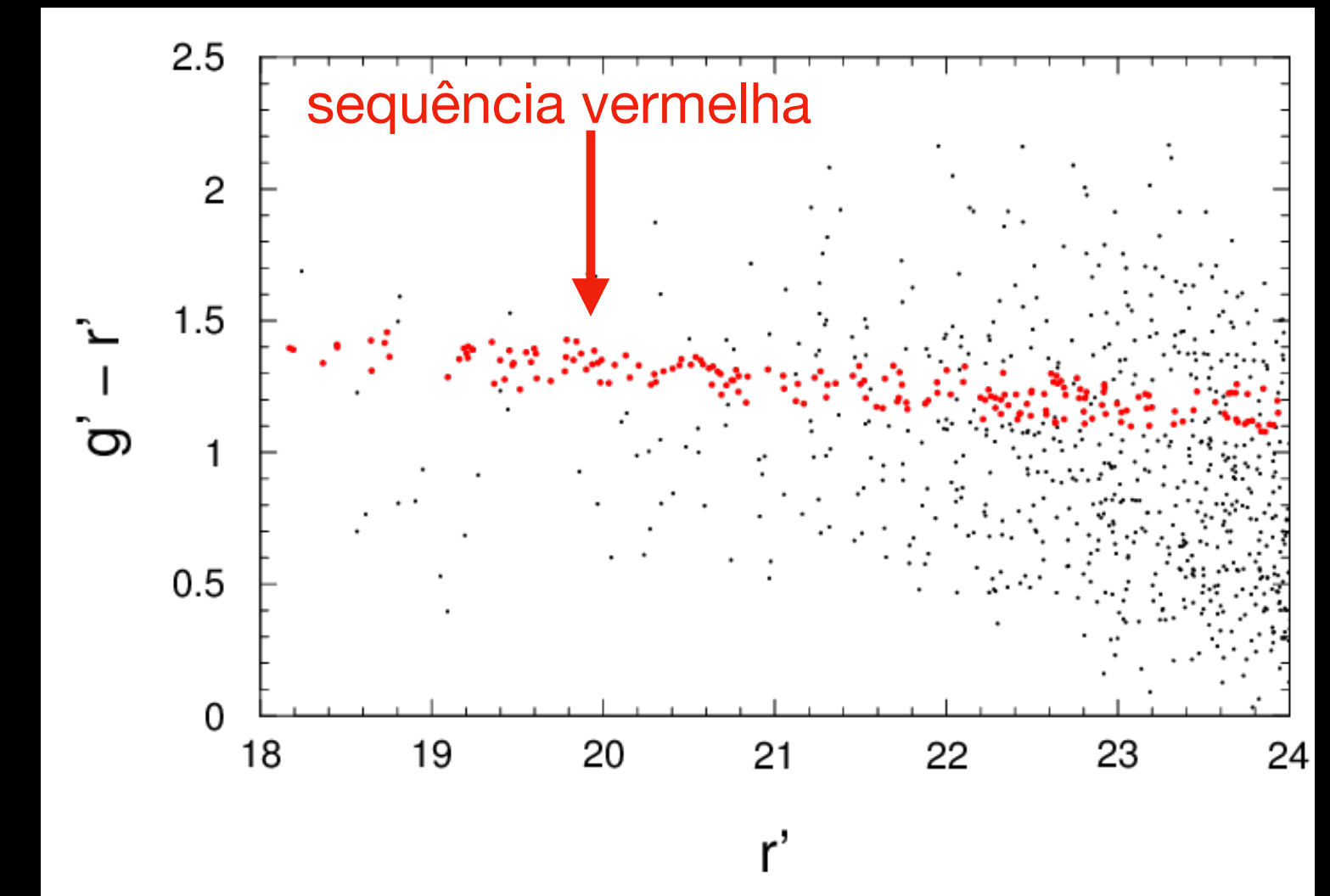
- Historicamente, aglomerados são identificados como **superdensidades projetadas de galáxias** na esfera celeste (análise 2D).
- Algoritmos de busca contam o número de galáxias por unidade de área e procuram por desvios estatísticos significativos em relação à densidade média do campo.
- Como saber quais pertencem ao aglomerado e quais estão apenas na mesma linha de visada?



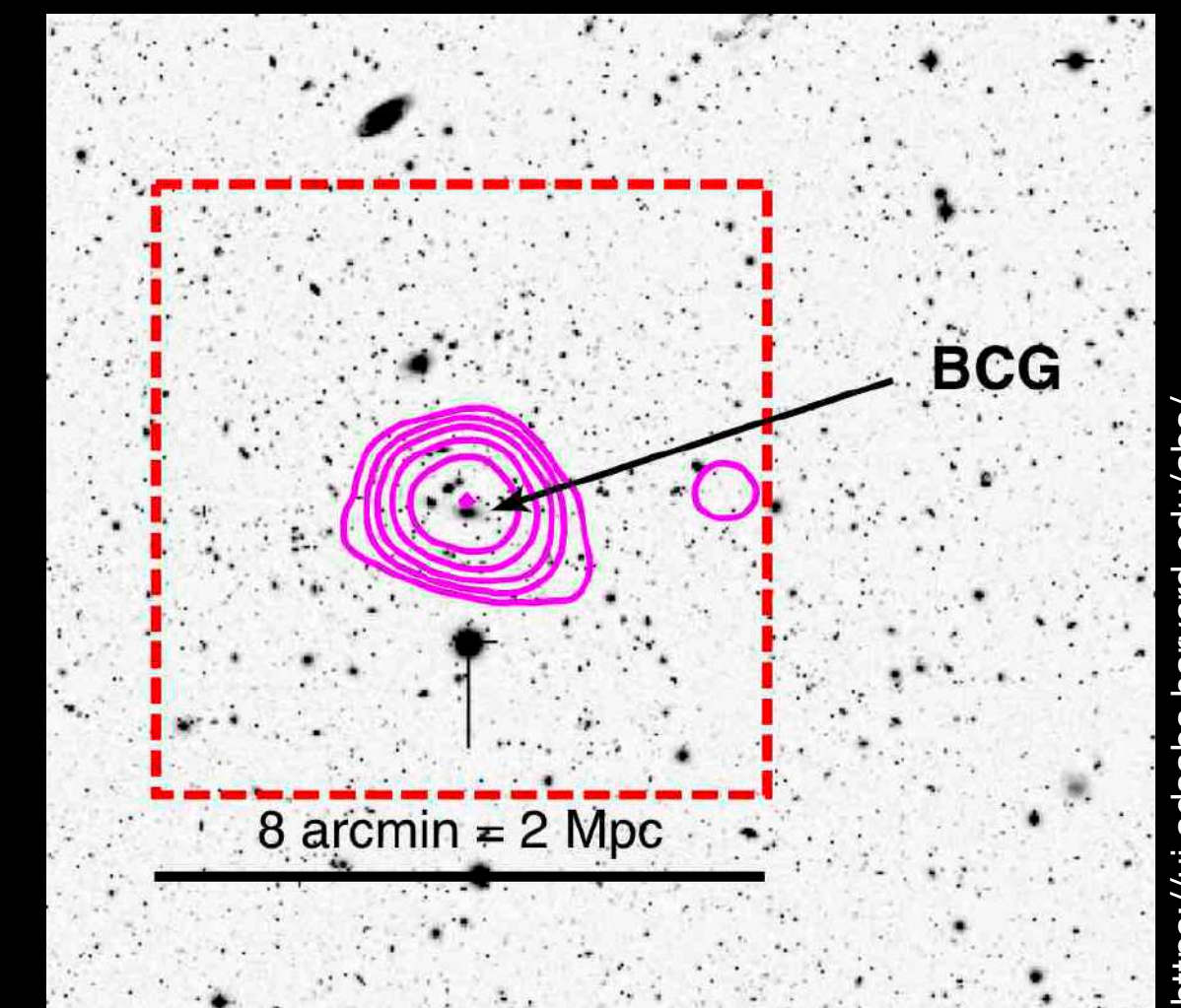
<https://www.plate-archive.org/cms/home/>

A Sequência Vermelha

- Uma **reta estreita** no espaço cor-magnitude formada pelas **galáxias elípticas** do aglomerado.
- Por que são tão vermelhas?
 - **Idade Avançada**: Como essas galáxias perderam seu gás há bilhões de anos, as grandes estrelas azuis (tipo OB, de vida muito curta) já morreram.
 - **Sobrevivência**: O que domina a luz da galáxia hoje são estrelas de baixa massa e vida longa (gigantes e anãs vermelhas).
 - **Metalicidade**: Essas galáxias são ricas em elementos pesados, o que absorve a luz azul e avermelha ainda mais o espectro que observamos.



<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018MNRAS.477.3279S/abstract>



<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021MNRAS.501..756M/abstract>

O Problema da Projeção

- O Universo é 3D, mas as imagens dos telescópios são fotografias 2D projetadas na esfera celeste.
- Galáxias de fundo e de frente podem se alinhar fortuitamente pela nossa linha de visada, simulando um aglomerado que não existe gravitacionalmente.
- Solução: Espectroscopia.
- Para confirmar se o aglomerado é real, precisamos medir o *redshift* individual de cada galáxia para descobrir se fazem parte ou não da mesma estrutura.

O Gás Quente: emissor de raios-X

- A maior parte da massa bariônica do aglomerado não está nas estrelas, mas sim em um plasma quente espalhado entre as galáxias.
- Elétrons livres são desacelerados e desviados por íons positivos no plasma quente ($T \sim 10^7$ a 10^8 K), emitindo a energia cinética perdida na forma de fótons de raios-X (bremsstrahlung térmico).
- A taxa de emissão de energia desse processo obedece à proporção:
 $\epsilon_X \propto n_e^2 \sqrt{T}$ (n_e é a densidade de elétrons e T é a temperatura do gás).

Por que raios-X são ferramentas poderosas?

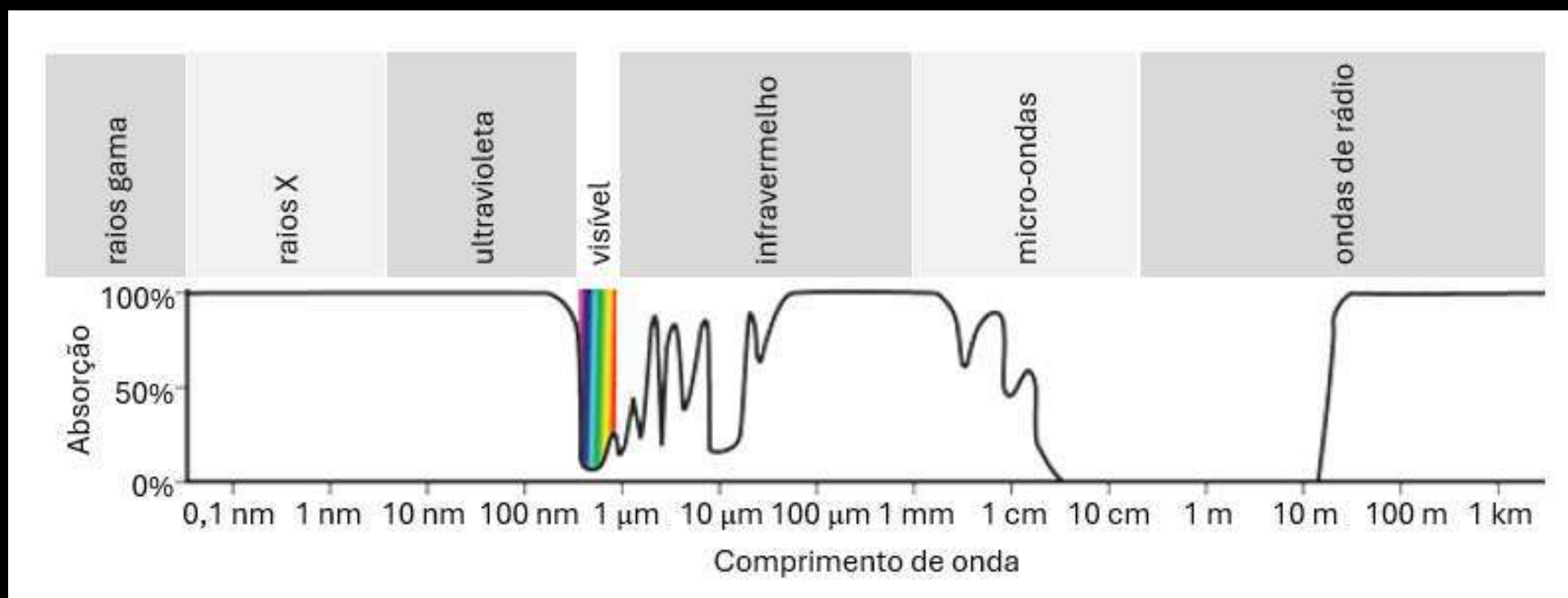
- Devido à dependência com a densidade ao quadrado (n_e^2), a emissão de raios-X é fortemente concentrada no núcleo do aglomerado.
- Diferente da sobreposição no óptico (que pode ser acidental), o gás só emite raios-X se estiver confinado em um poço de potencial gravitacional real, profundo e tridimensional.
- Isso resolve o problema de projeção do óptico: observar um pico estendido de raios-X garante que você encontrou um poço de potencial real e 3D, não uma sobreposição fortuita.

Observatórios de raios-X

Solução: observar do espaço

Problema:

A atmosfera é opaca aos raios-X

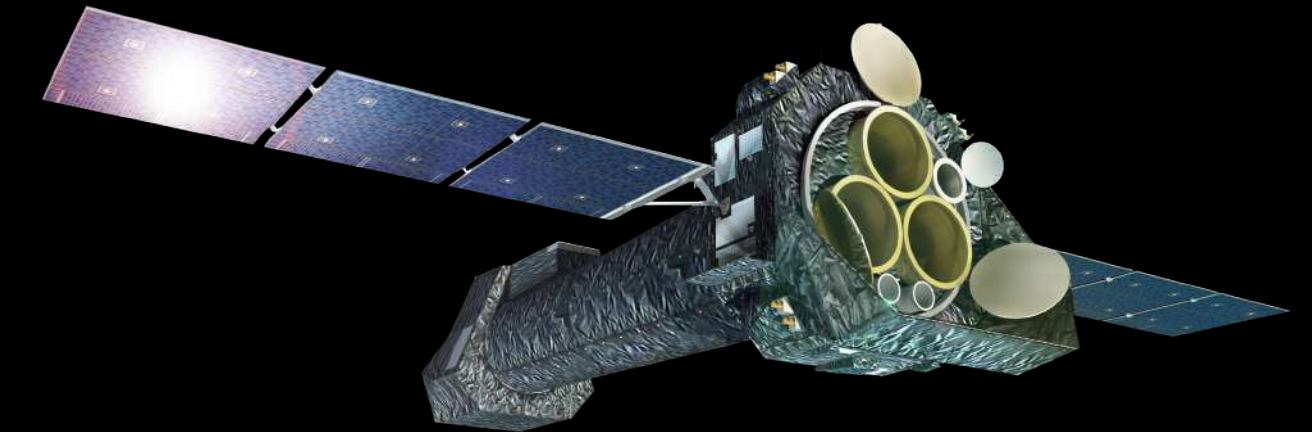


<https://fq.pt/images/atmosfera/absorcao-da-radiacao.png>



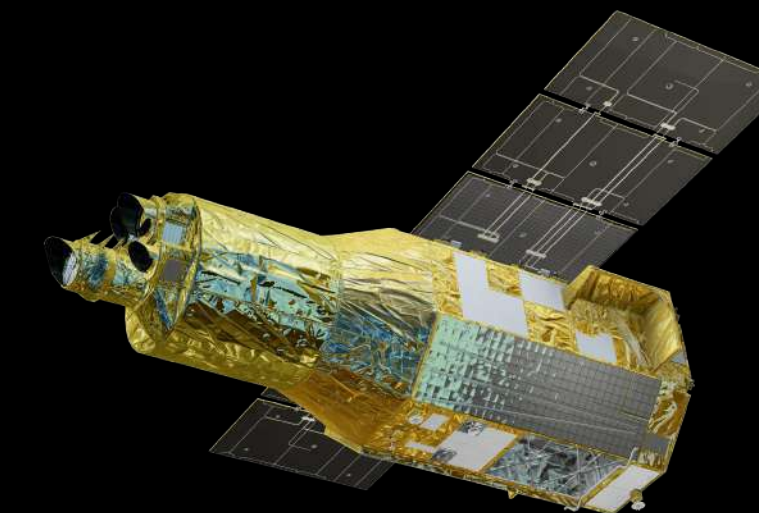
https://www.pngfind.com/download/xoohow_chandra-x-ray-observatory-spacecraft-model-chandra-x/

Chandra X-ray Observatory



https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:XMM-Newton_spacecraft_model.png

XMM Newton



<https://www.xrism.jaxa.jp/img/img-xrism.webp>

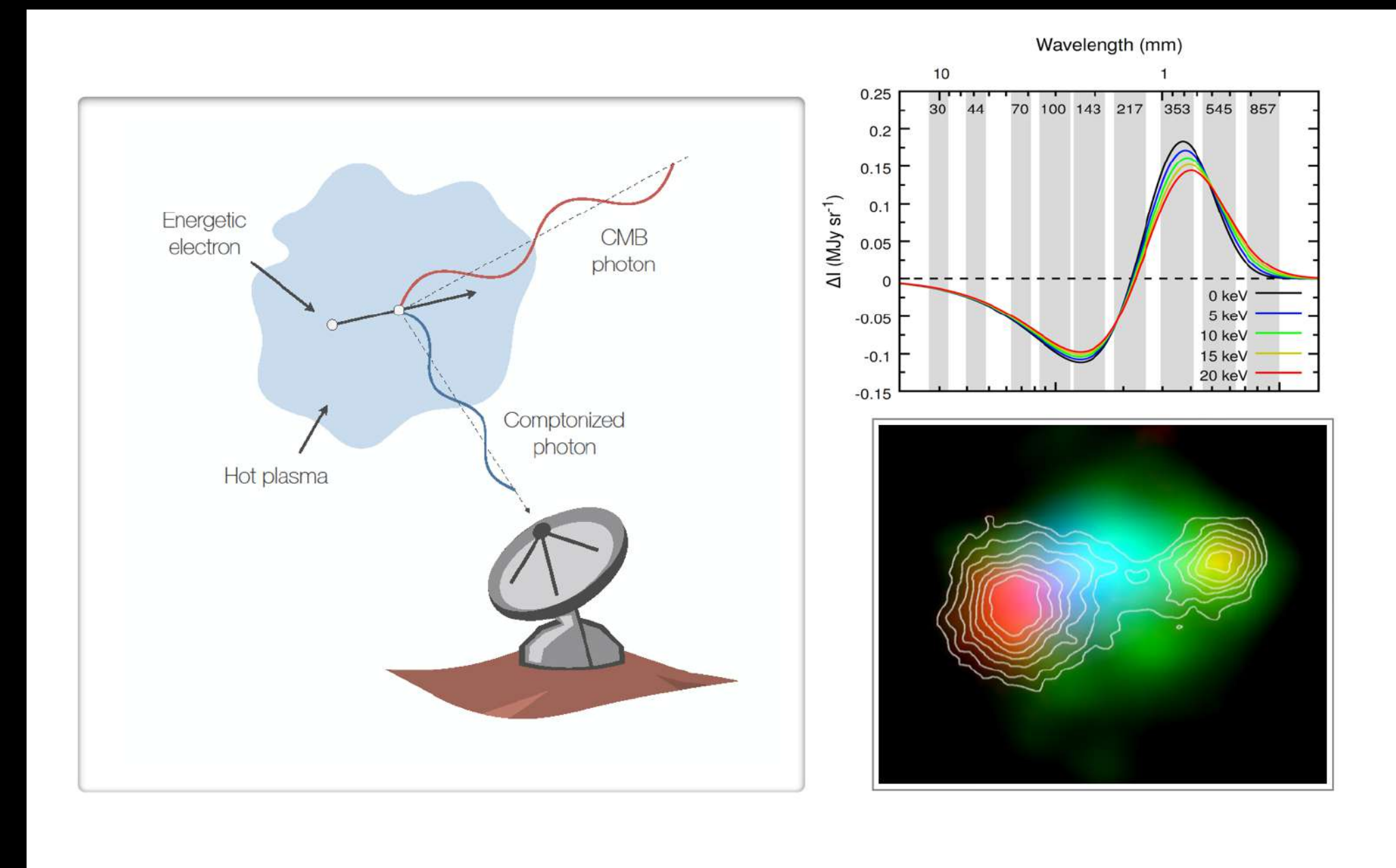
XRISM

O Domínio de Micro-ondas: Efeito Sunyaev-Zel'dovich (SZ)

- A **Radiação Cósmica de Fundo** (CMB) é uma espécie de eco luminoso do Big Bang e atua como uma enorme **luz de fundo que ilumina todo o Universo**.
- Fótons gelados da CMB ($T \sim 2.7$ K) **viajam pelo espaço e precisam atravessar o gás fervente do ICM** ($T \sim 10^8$ K) de um aglomerado.
- Quando um fóton de baixa energia da CMB **colide** com um elétron altamente energético do ICM, **o elétron transfere um pouco de sua energia para o fóton** (espalhamento Compton inverso).
- Embora apenas cerca de **1%** dos fótons da CMB sofram esse efeito, isso é suficiente para deixar uma assinatura detectável (**efeito Sunyaev-Zel'dovich**).

A Distorção do Espectro de Planck

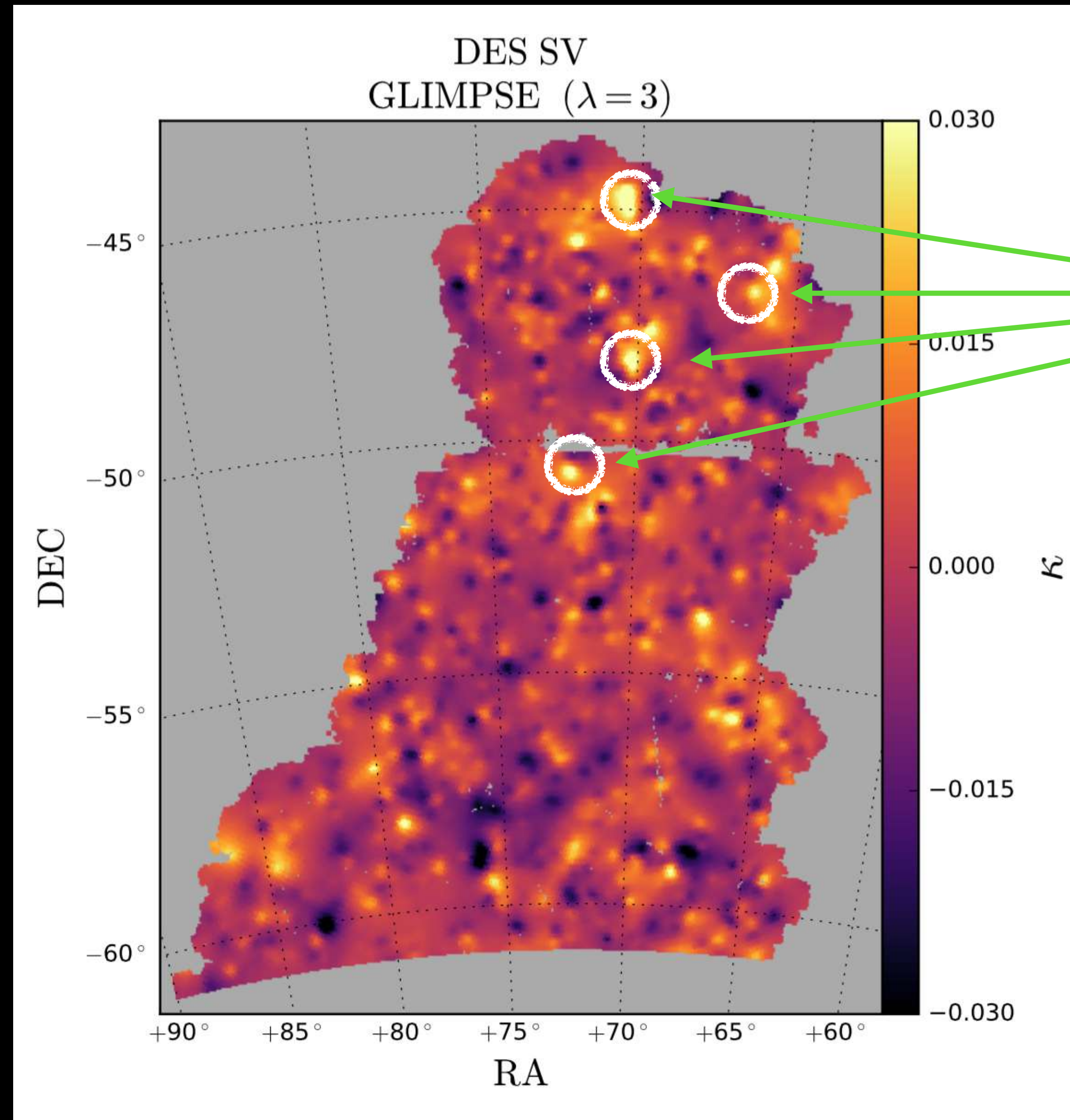
- A grande vantagem do efeito SZ: A intensidade do sinal ($\Delta T/T$) é independente do redshift.
- Ao contrário da luz óptica e dos raios-X, que ficam mais fracos à medida que a distância aumenta, o efeito SZ permite detectar aglomerados massivos mais distantes com a mesma facilidade que detectamos aglomerados próximos.



<https://astro.uni-bonn.de/de/forschung/mm-submm-astronomy/projects-1/sz-effect-and-cosmology>

O Domínio Gravitacional: Lentes Fracas

- Lentes gravitacionais mapeiam a massa total (essencialmente a matéria escura) de forma independente do gás ou das estrelas.
- A gravidade do aglomerado atua como uma lente, causando uma distorção minúscula (cerca de 1%) na elipticidade das galáxias de fundo.
- Como o efeito é sutil, a distorção não é vista em uma única galáxia; é detectada através do “alongamento” estatístico de milhares de galáxias de fundo.
- Detecção: buscamos por picos estatísticos em mapas de convergência $\kappa = \frac{\Sigma}{\Sigma_{crit}}$
- Vivemos na era dos surveys (mapeamentos em larga escala) como DES, Euclid e LSST).



sobredensidades
candidatas a serem
aglomerados de galáxias

<https://www.cosmostat.org/research-topics/weak-lensing>

Na próxima aula...

Se os superaglomerados são muito maiores, por que chamamos os aglomerados de galáxias como “as maiores estruturas do Universo”?

**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)
mo@on.br | monteiro-oliveira.com

Introdução ao Universo em Larga Escala

Rio de Janeiro, 21 de julho de 2026

Aula 01

Síntese da aula

- **Vimos** as diversas escalas do cosmos, desde a Terra até onde o Universo pode ser considerado homogêneo e isotrópico.
- **Aprendemos** que um aglomerado é fundamentalmente um enorme halo de matéria escura que aprisiona um plasma a milhões de graus (ICM), no qual as galáxias representam menos de 5% da massa total.
- A **confirmação** de um aglomerado “real” exige cruzar dados de múltiplos regimes: mapeamos a luz estelar no óptico, a emissão térmica do gás em raios-X e micro-ondas, e a massa total através de lentes gravitacionais

