

Grupo Local
Grupos de galáxias e grupos compactos
Aglomerados de galáxias
Super-aglomerados
Filamentos e vazios
Grande atrator/Laniakea
Lentes gravitacionais

Estrutura do Universo

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

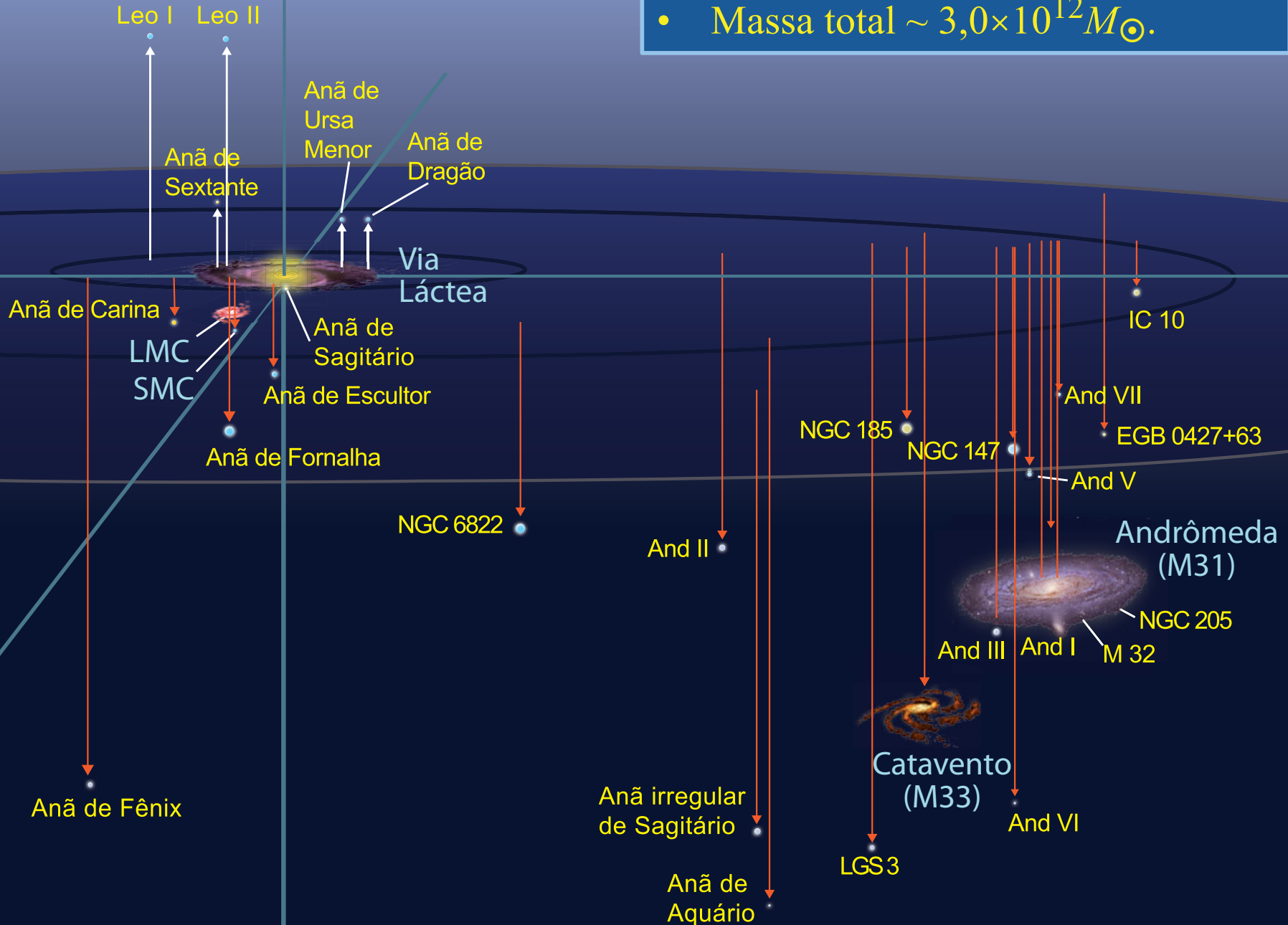
edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=110630

Estrutura do Universo

- **Distribuição da matéria pelo Universo.**
- **Usamos as galáxias para estimar a distribuição da matéria, já que podemos observá-las a grandes distâncias.**
- **Tópico que fica na intersecção entre galáxias e cosmologia.**
- **Veremos como as galáxias se distribuem, das menores para as maiores estruturas.**

Grupo Local

- ~60 galáxias conhecidas
- Diâmetro de ~2,4 Mpc
- Massa total $\sim 3,0 \times 10^{12} M_{\odot}$.



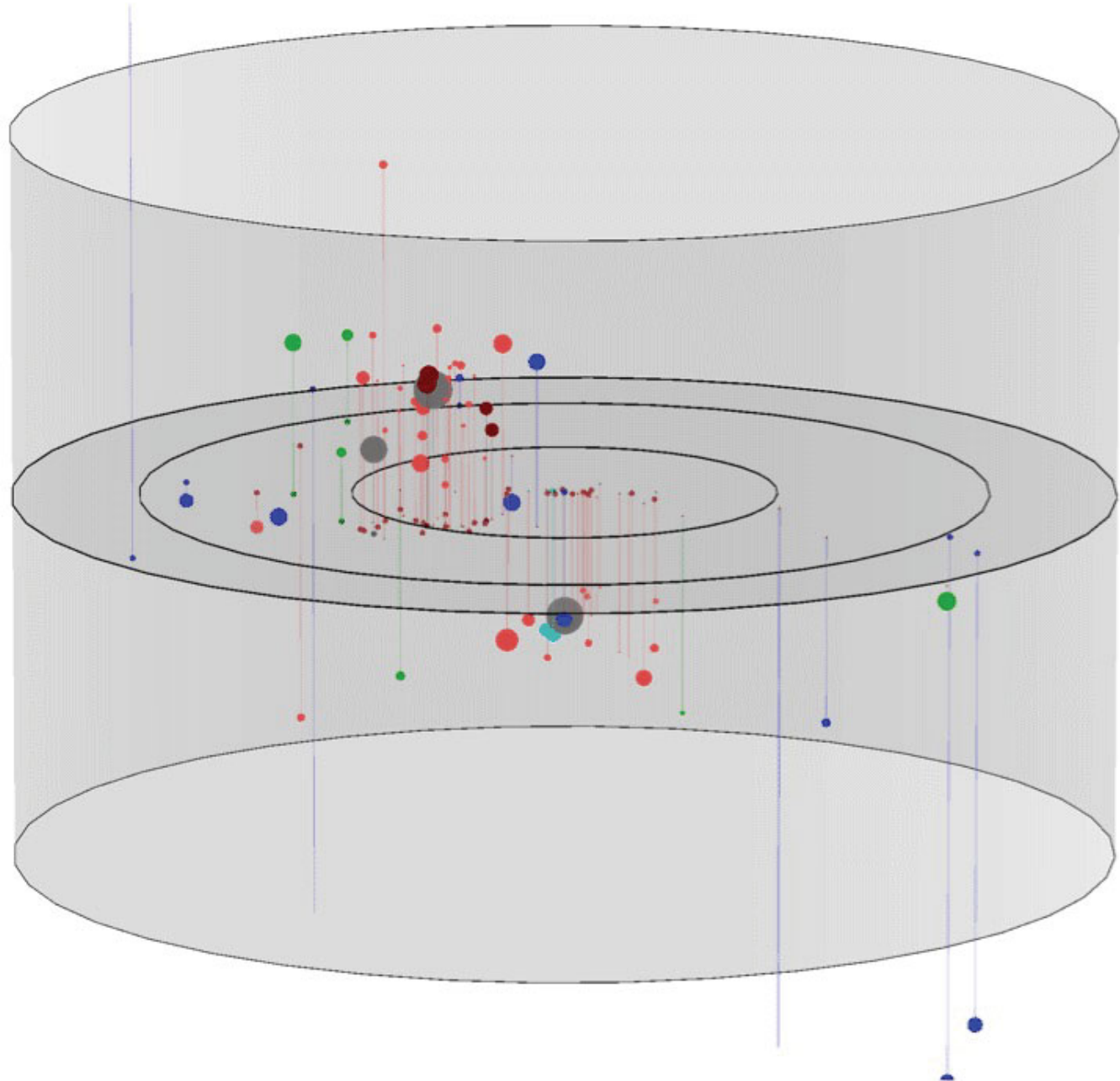
Grupo Local em 3D

Duas subestruturas:

- subgrupo da Via Láctea (centro da fig.).
- subgrupo de M31 (acima na fig.).
- poucas galáxias “soltas” pelo Grupo Local.

Obs.: a rotação é para visualizarmos em 3D.
O Grupo Local não gira desta forma

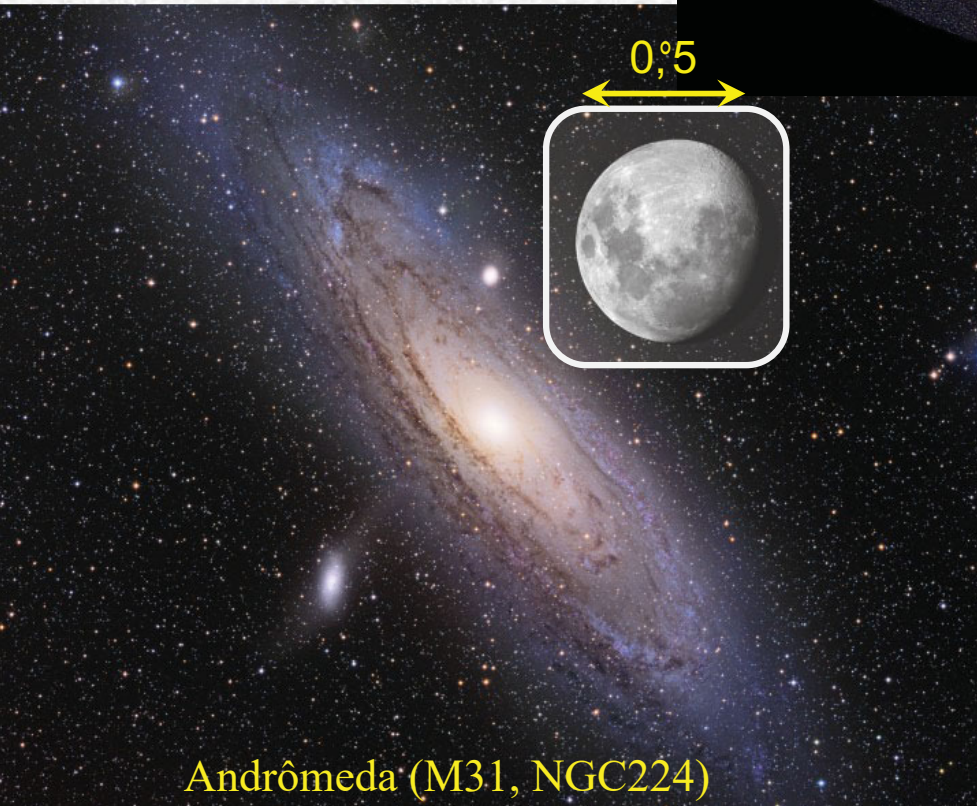
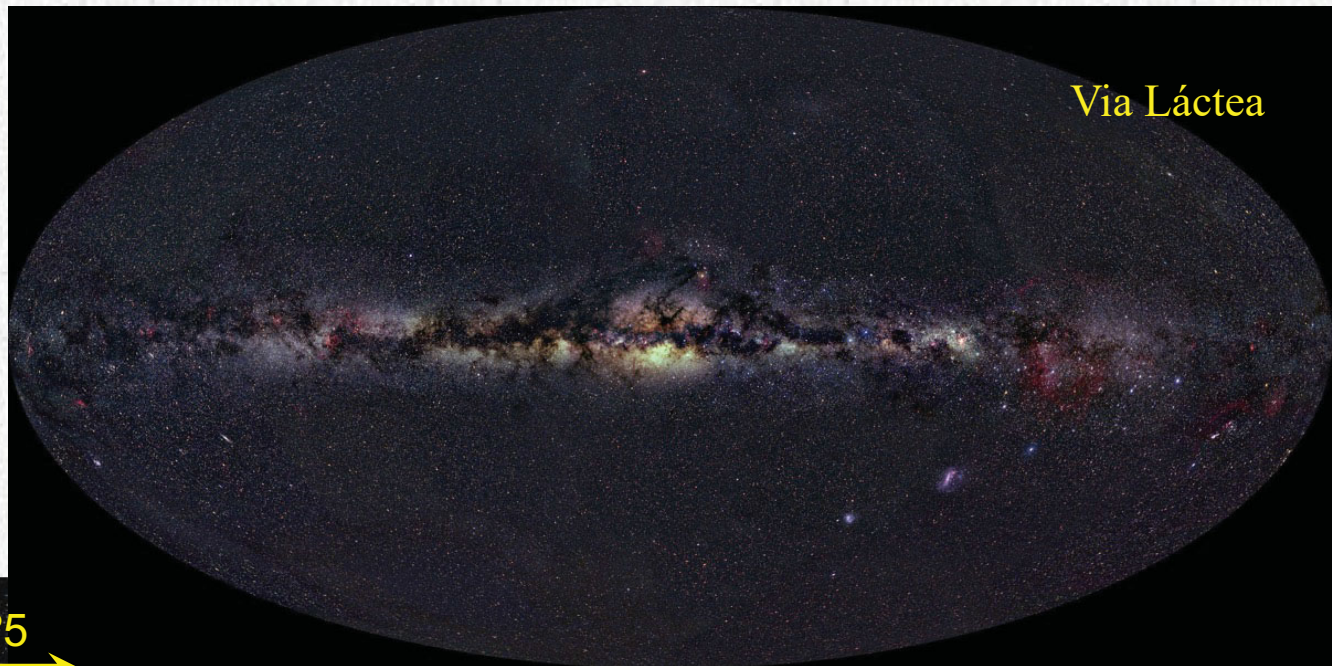
cinza: espirais
vermelho: dE
verde: dlrr
azul: dSph



Grupo Local

- 3 galáxias espirais.

(a Lua está aqui para dar uma ideia do tamanho aparente de M31 no céu)



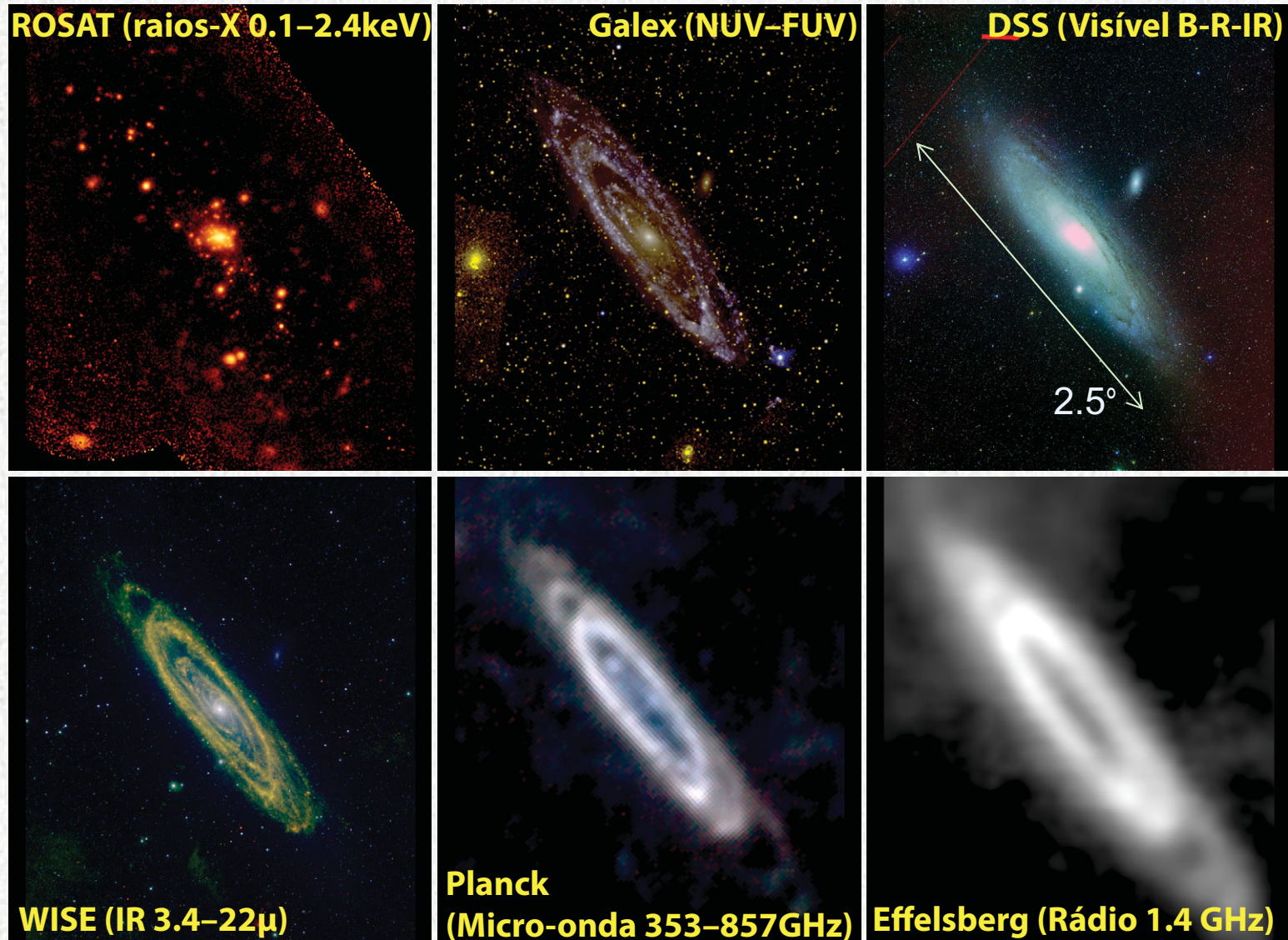
Andrômeda (M31, NGC224)

M33 © IAC/IRGO/Mal'in
Photo from Isaac Newton Telescope plates by David Malin



Triângulo (M33, NGC589)

Grupo Local: M31



- M31, galáxia de Andrômeda, em vários comprimentos de onda.
- Tipo morfológico Sb.
- Distante 780 kpc.

Grupo Local

- 3 galáxias espirais.
- A Galáxia e M31 juntas têm um pouco mais de $10^{12}M_{\odot}$.
- A Galáxia e M31 têm aproximadamente a mesma massa.
 - M31 parece ser um pouco mais luminosa.
- M33, a 3^a mais massiva, tem $\sim 5 \times 10^{10}M_{\odot}$.
- A soma de todas as outras galáxias juntas dá $\sim 5 \times 10^{10}M_{\odot}$.

➔ o Grupo local é dominado pela Galáxia e por M31

Anã esferoidal Cetus

SDSS g, r, i

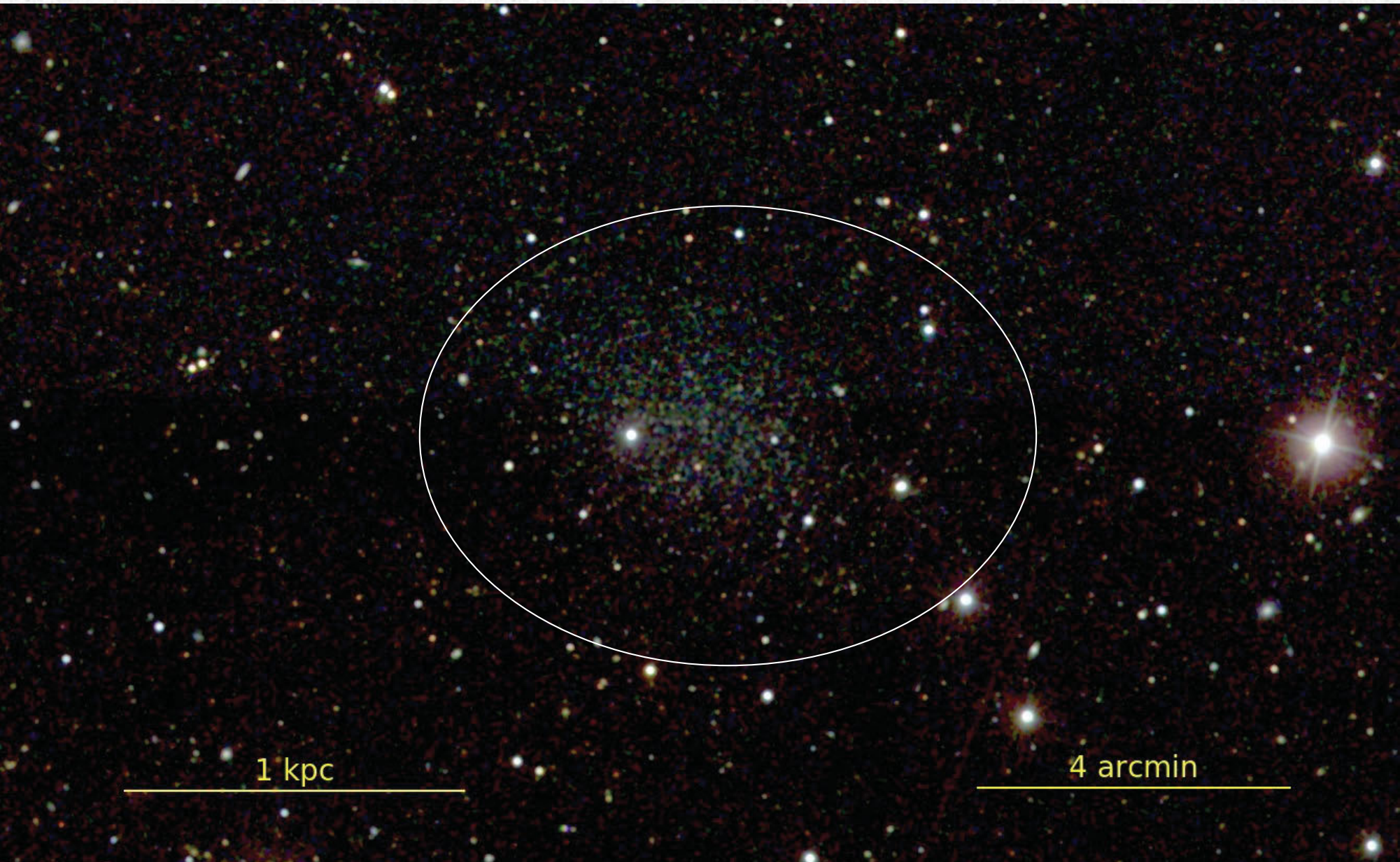


2 kpc

8 arcmin

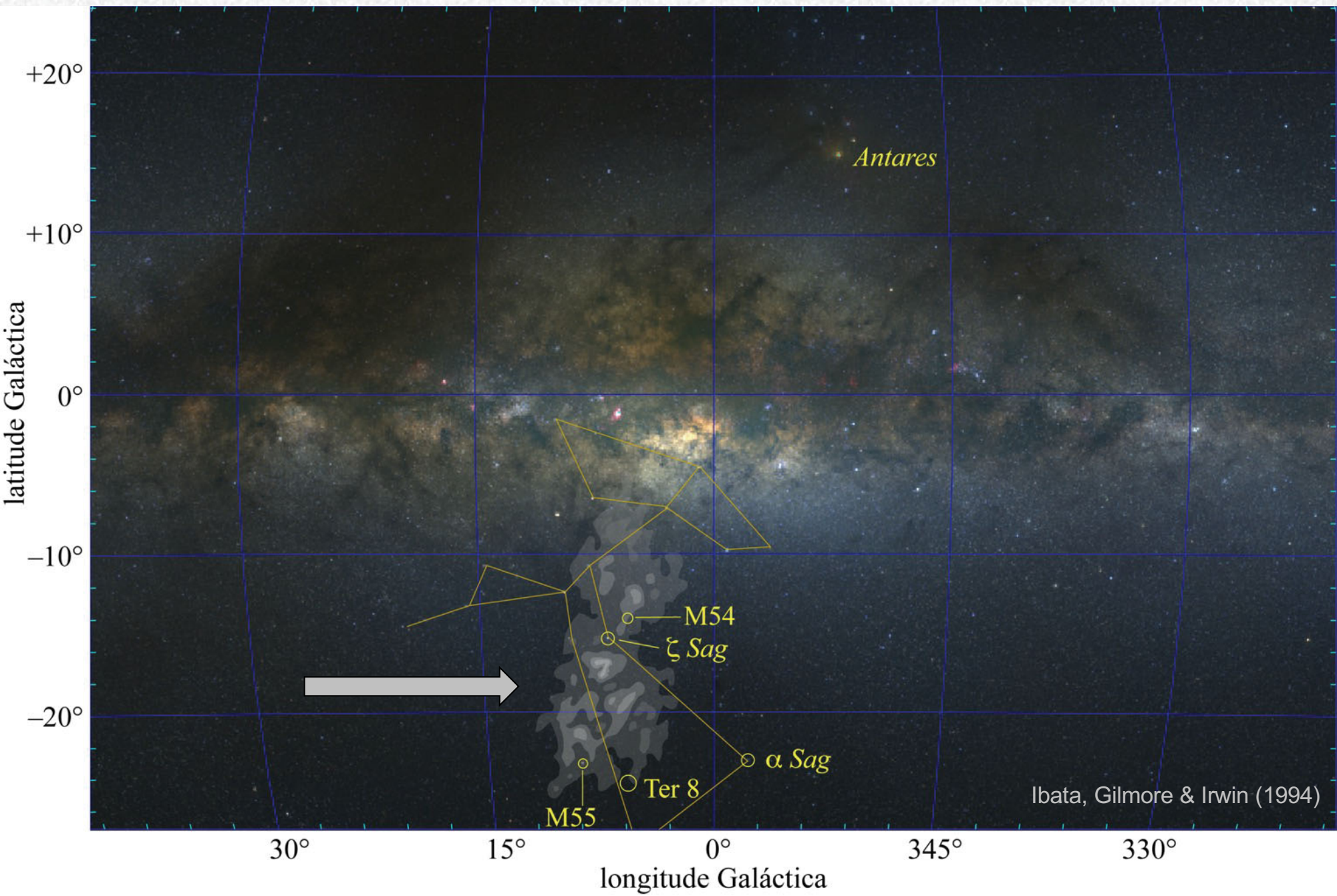
- Imagem SDSS

Anã esferoidal Cetus



- Imagem SDSS

Galáxia elíptica anã de Sagitário.



Grupo Local

- Hoje conhecemos cerca de 55 galáxias anãs no Grupo Local.
- Possivelmente existem muito mais.
- Em 1944 só eram conhecidos 11 membros.
- A maioria das galáxias foi descoberta após 2003; 8 em 2015.
- O modelo cosmológico atual prevê a existência de várias centenas de galáxias anãs no Grupo Local:
 - Será que existe tantas assim escondidas?? (veremos no final da aula)

Galáxia anã esferoidal
de Sculptor



Sagitário DEG
(anã elíptica)

Grupos de galáxias

- Maior parte das galáxias se encontram em grupos.
- Alguns grupos são “soltos” como o Grupo Local.
- Outros são extremamente compactos.
 - As galáxias se tocam.



Grupos de galáxias

- Maior parte das galáxias se encontram em grupos.
- Alguns grupos são “soltos” como o Grupo Local.
- Outros são extremamente compactos.
 - As galáxias se tocam.

Grupo Canes II. A galáxia mais brilhante é M106.



Imagem: Fabian Neyer

Sexteto de Seyfert. Apenas 4 fazem parte do sexteto.

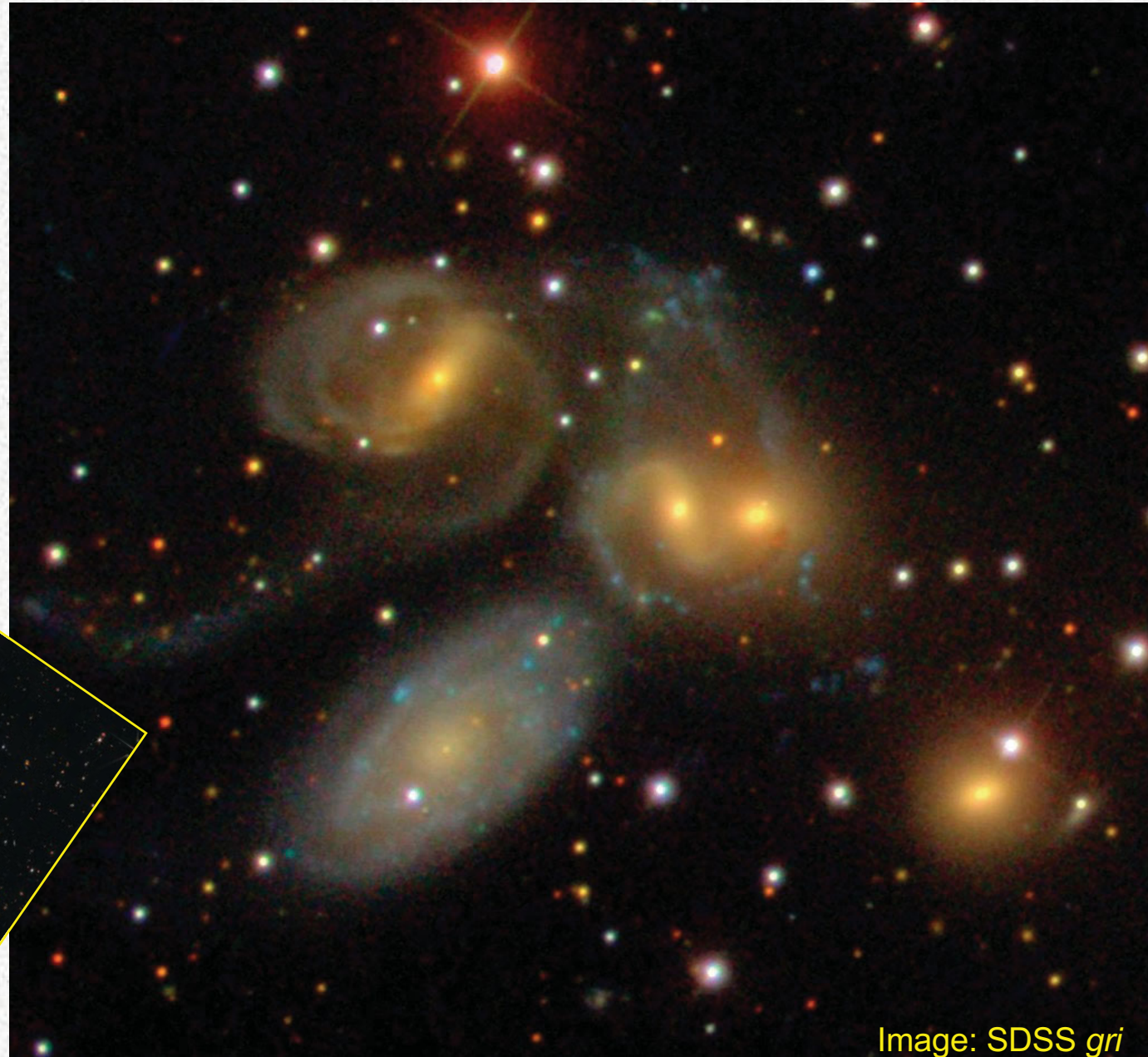
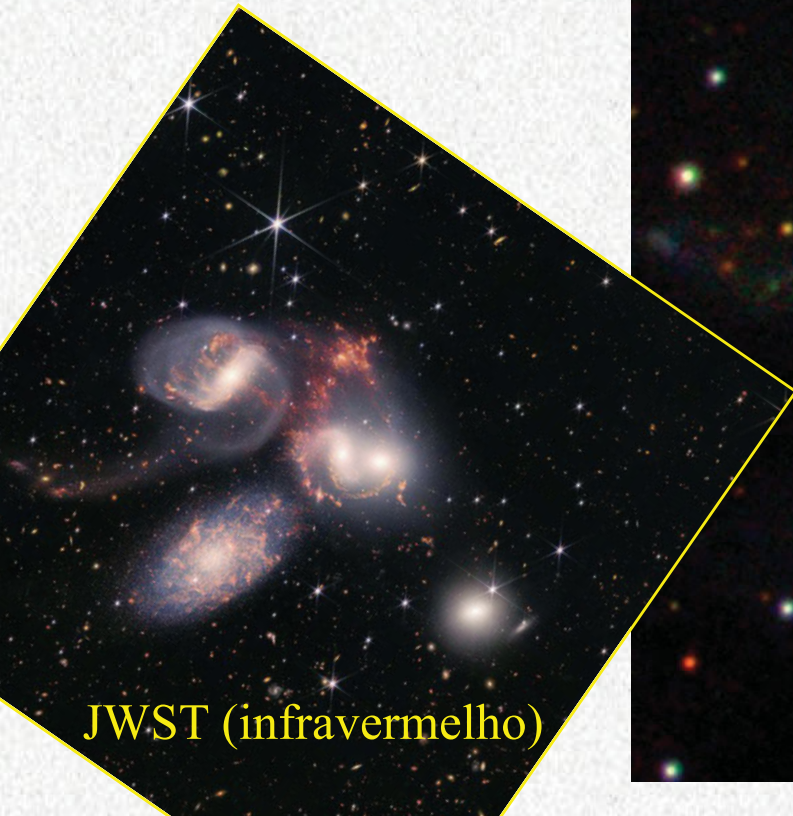


Imagem: HST Legacy/ Judy Schmidt

Grupos de galáxias

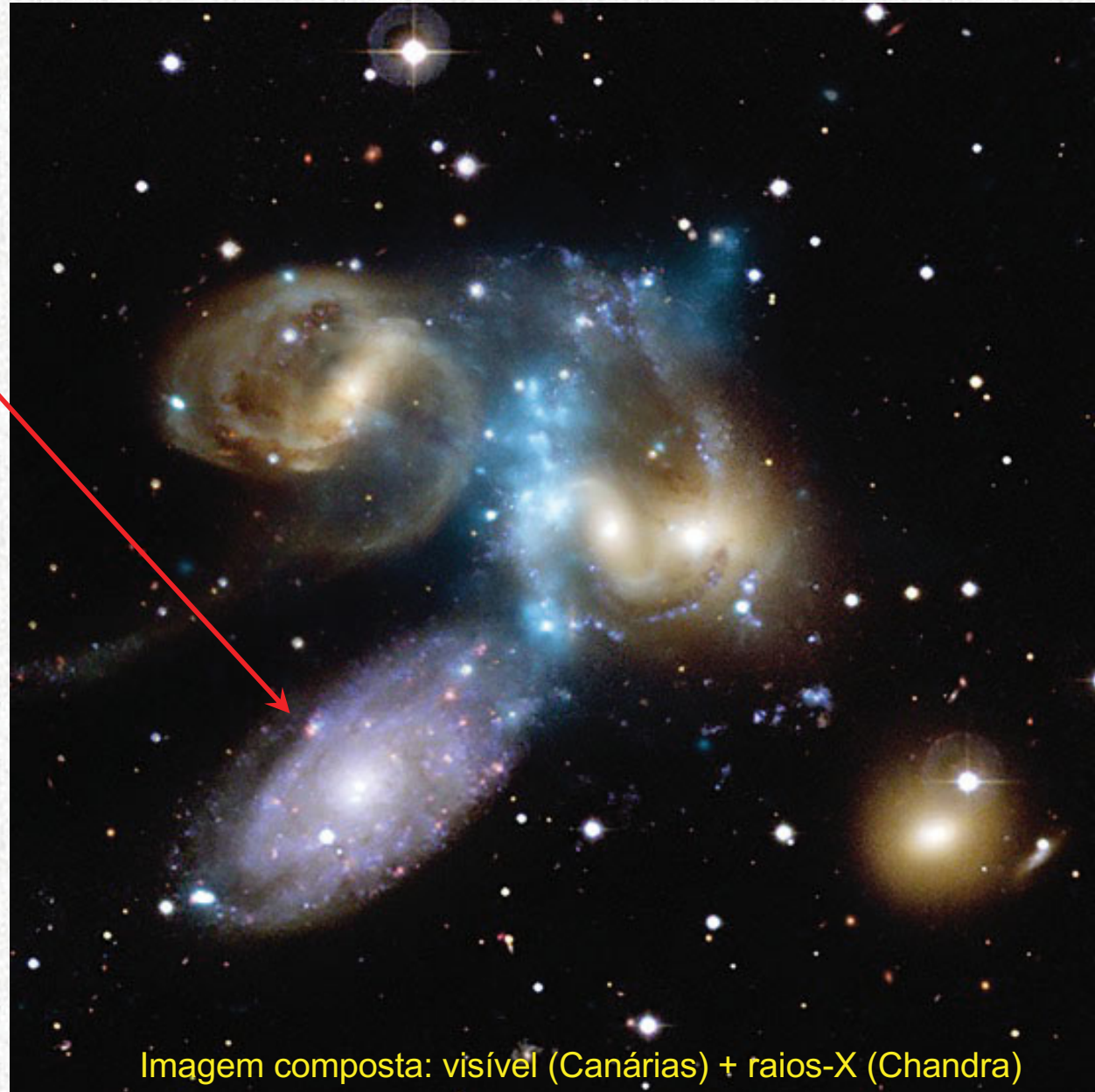
- Quinteto de Stephan:

- mas só 4 galáxias fazem parte.



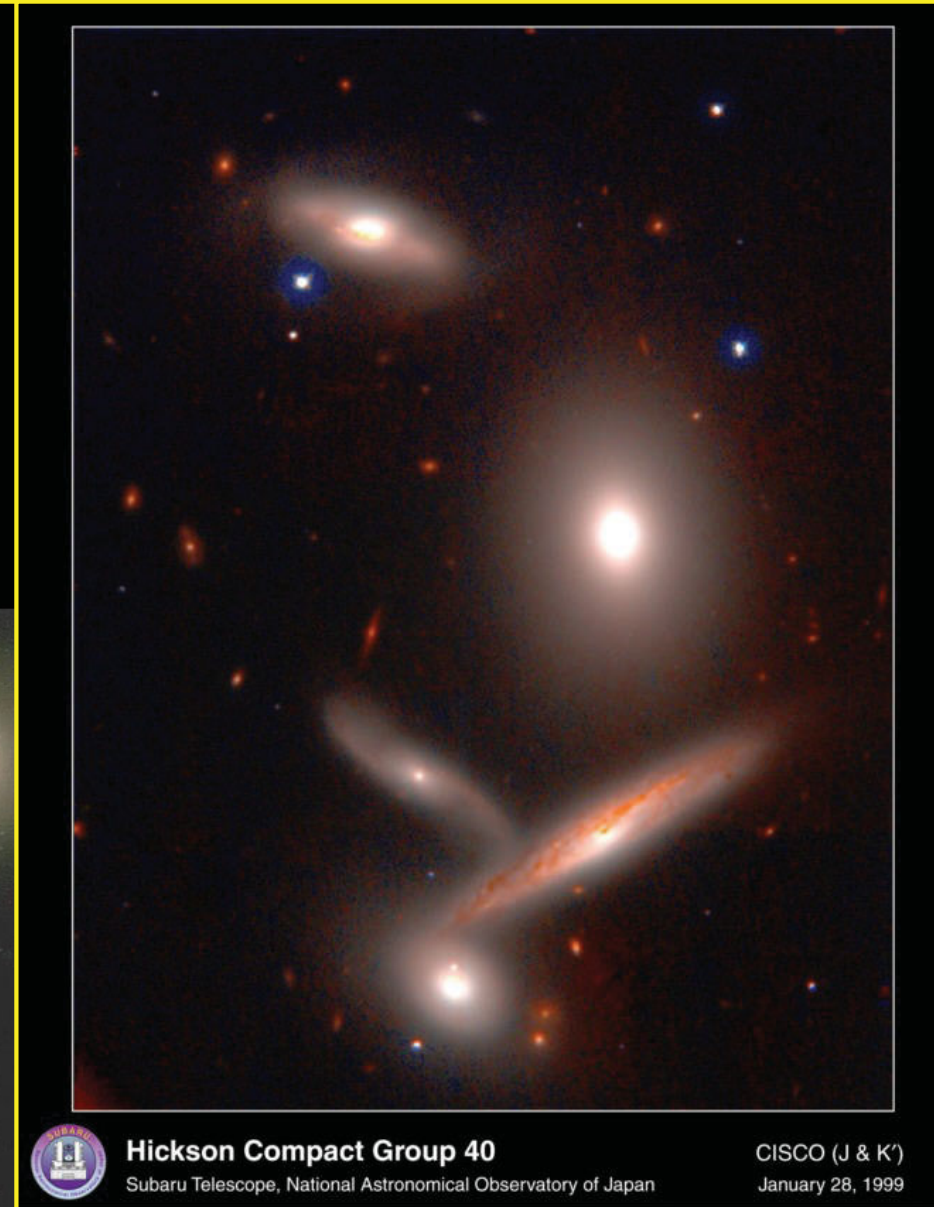
Grupos de galáxias

- Quinteto de Stephan:
 - mas só 4 galáxias fazem parte.
 - A espiral abaixo está na frente, distante do grupo.
- Choque entre as galáxias provoca aquecimento do gás entre as galáxias (em azul claro) observado em raios-X.
- Também conhecido como HCG 92 (grupo compacto de Hickson).



Grupos de galáxias

- Grupos têm entre $10^{12} M_{\odot}$ (poucas galáxias) e $10^{14} M_{\odot}$ (muitas dezenas de galáxias).




Aglomerados de Galáxias

- Massa entre $10^{14} M_{\odot}$ e $10^{15} M_{\odot}$.
- Diâmetro ~ 3 até 5 Mpc.
- Contêm entre centenas a milhares de galáxias.
 - Mas apenas $\sim 7\%$ das galáxias do universo estão em aglomerados.

Aglomerado de Coma Berenice, distância ~ 100 Mpc
Um dos maiores e mais estudado aglomerado do Universo local

15 arcmin



Aglomerados de galáxias

- Composição em massa de aglomerados ricos

~ 2% galáxias

(a maioria delas são elípticas)

~ 13% gás

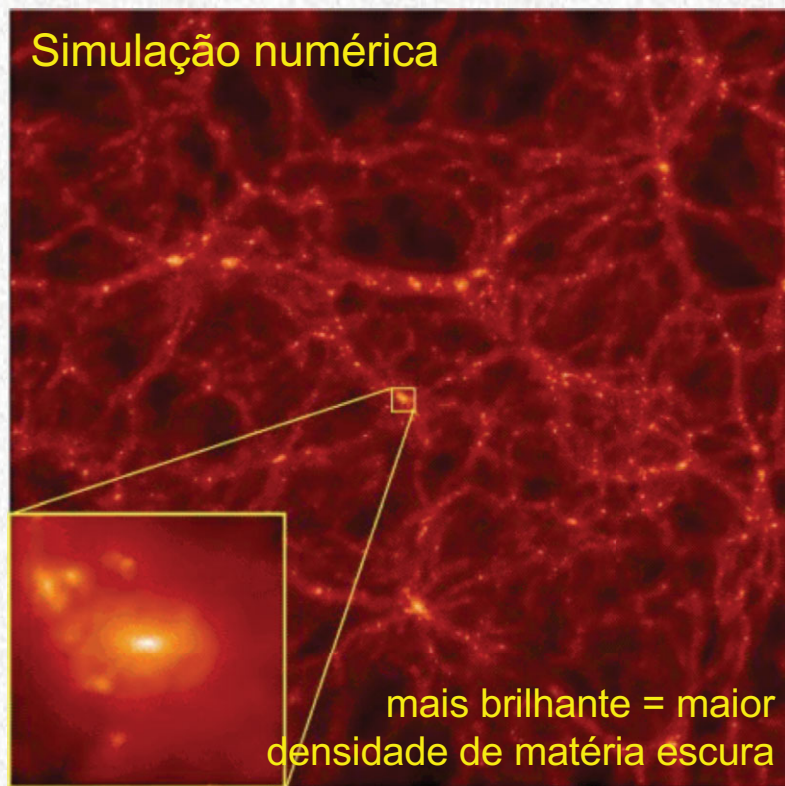
~ 85% matéria escura

imagem no visível



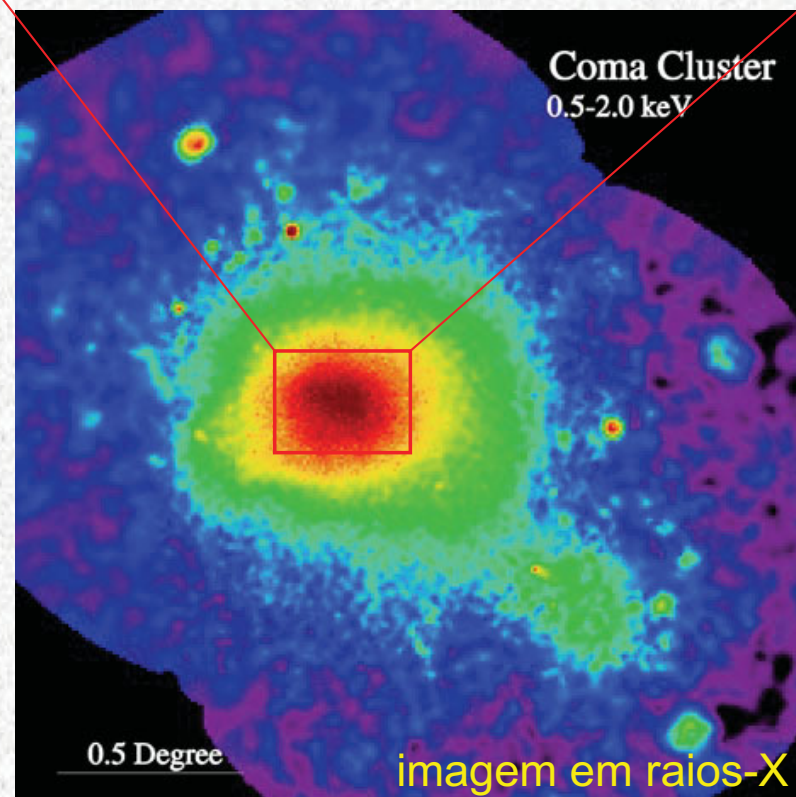
Aglomerado de Coma

Simulação numérica



mais brilhante = maior densidade de matéria escura

$4.3 h^{-1} \text{ Mpc}$



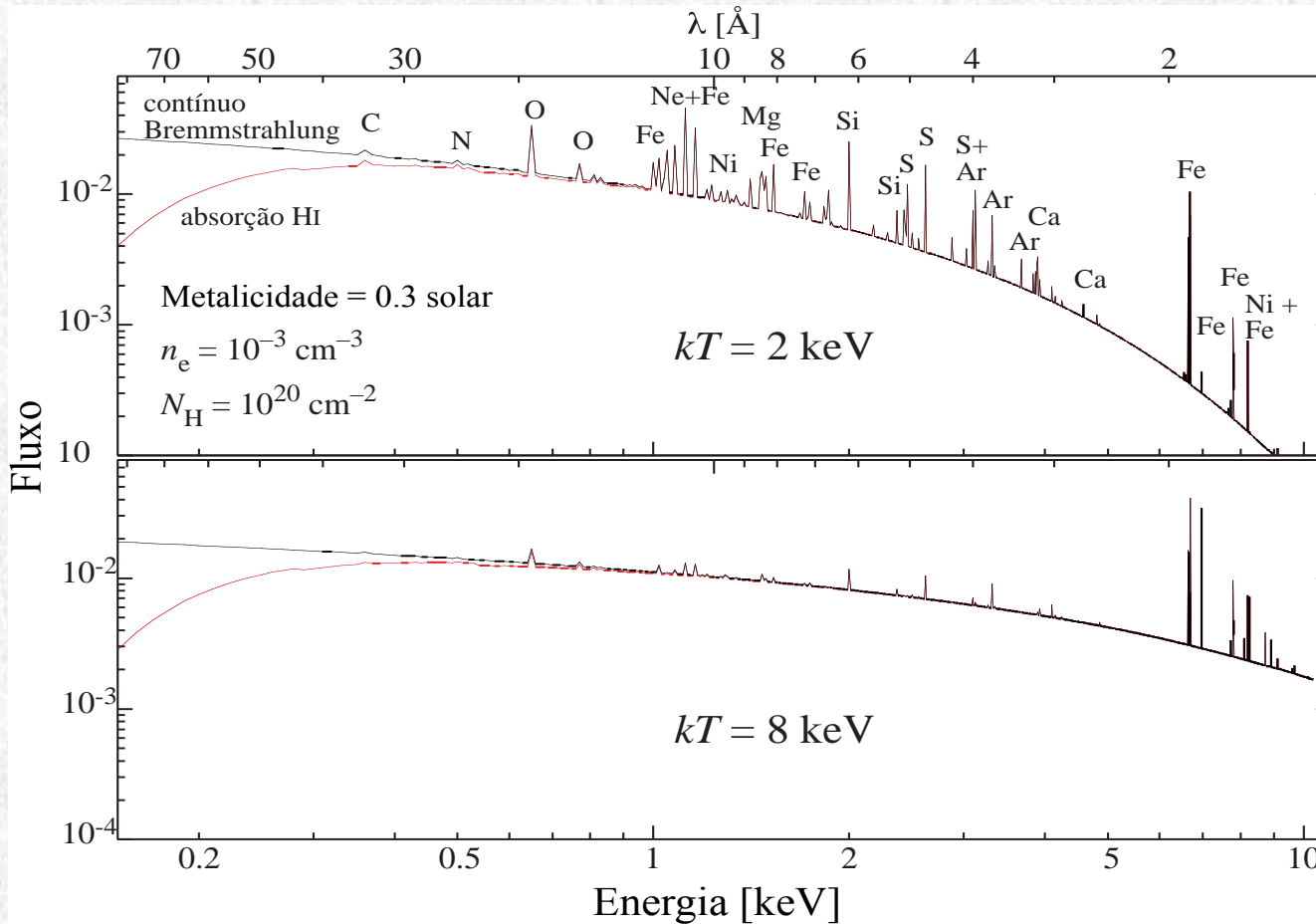
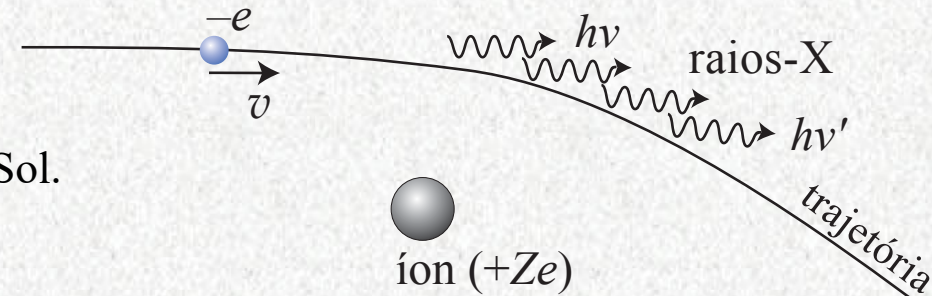
Coma Cluster
0.5-2.0 keV

0.5 Degree

imagem em raios-X

Gás em aglomerados de galáxias

- 6 vezes mais gás do que estrelas.
- Muito quente: entre 10^7 K e 10^8 K.
 - cerca de 10 vezes mais quente que o núcleo do Sol.
- Muito rarefeito: ~ 1 átomo / litro.
 - um litro de atmosfera em S.P. $\sim 2 \times 10^{22}$ moléculas.
 - um litro de meio interestelar $\sim 1.000\text{--}100.000$ átomos.



Espectro em raios-X com várias linhas de emissão do Ferro, Níquel, Cálcio, Silício, etc...

O contínuo não é de corpo negro.

Aglomerados de galáxias

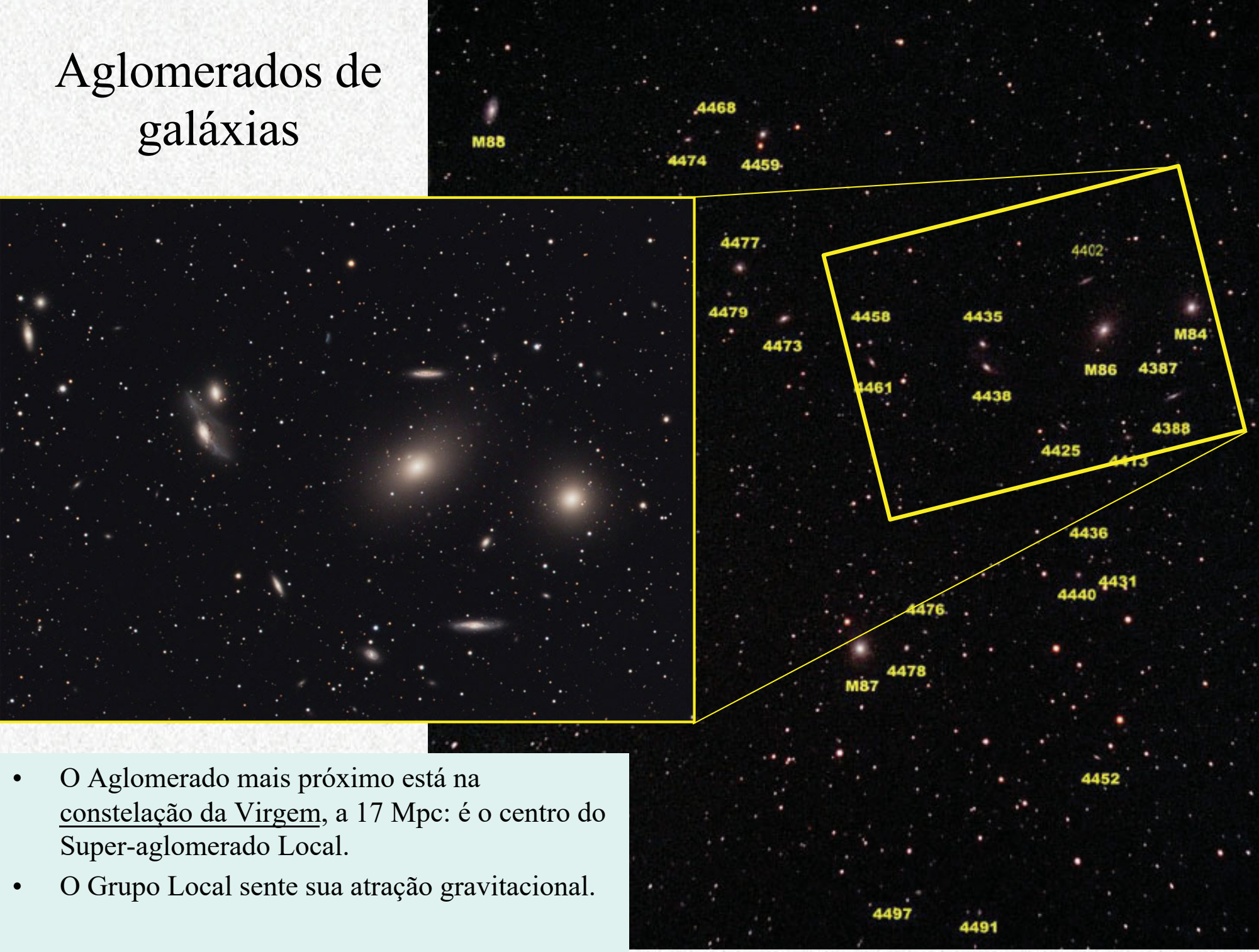


um aglomerado muito rico: Abell 1689

Telescópio
Espacial
Hubble

- Entre 1958 e 1989, George Abell fez um catálogo de mais de 4000 aglomerados ricos analisando placas fotográficas.
- Hoje os catálogos são feitos por métodos automáticos com imagens digitais.

Aglomerados de galáxias

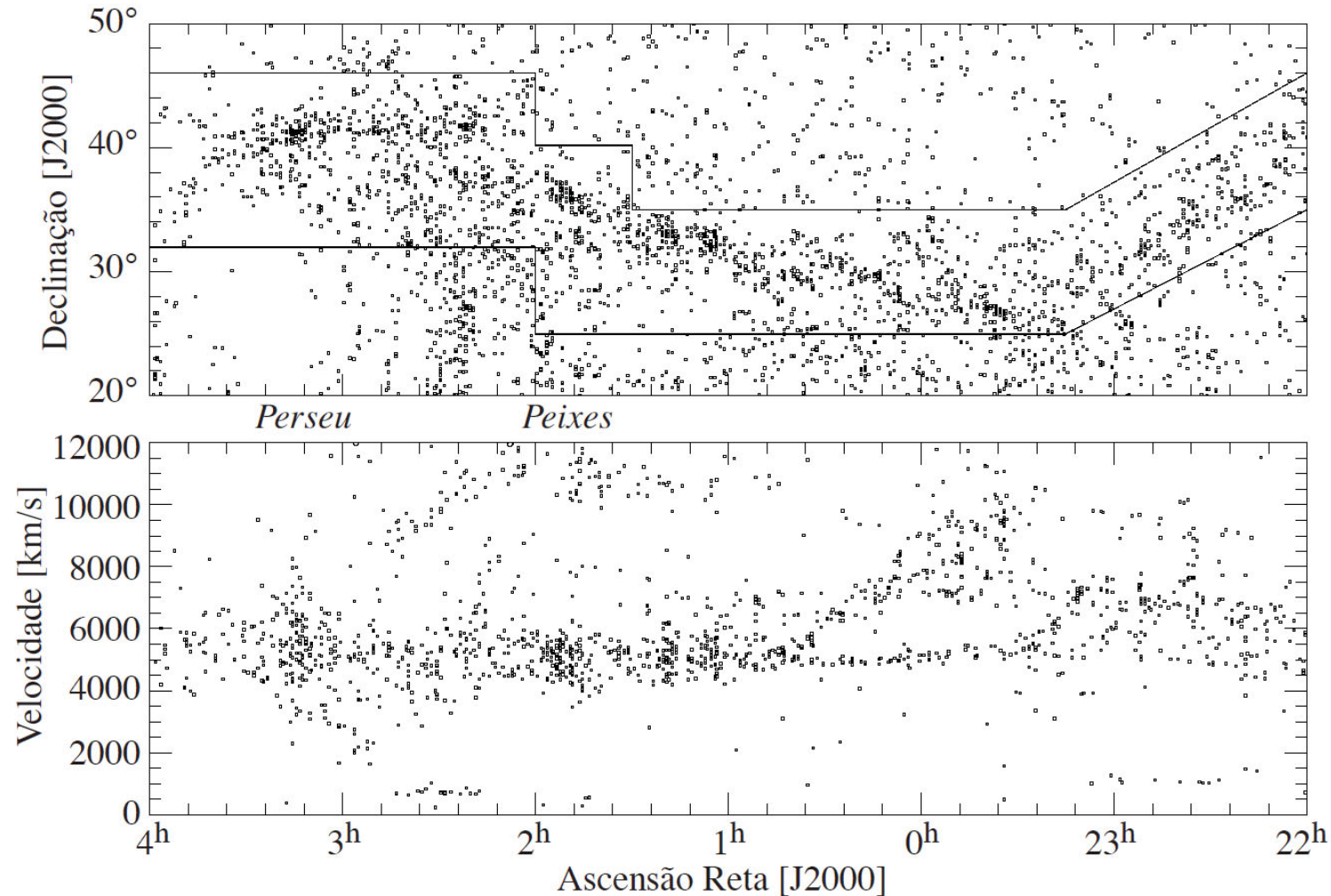


- O Aglomerado mais próximo está na constelação da Virgem, a 17 Mpc: é o centro do Super-aglomerado Local.
- O Grupo Local sente sua atração gravitacional.

Super-aglomerados de galáxias

Maiores estruturas, mas fora de equilíbrio! Estão em processo de formação.

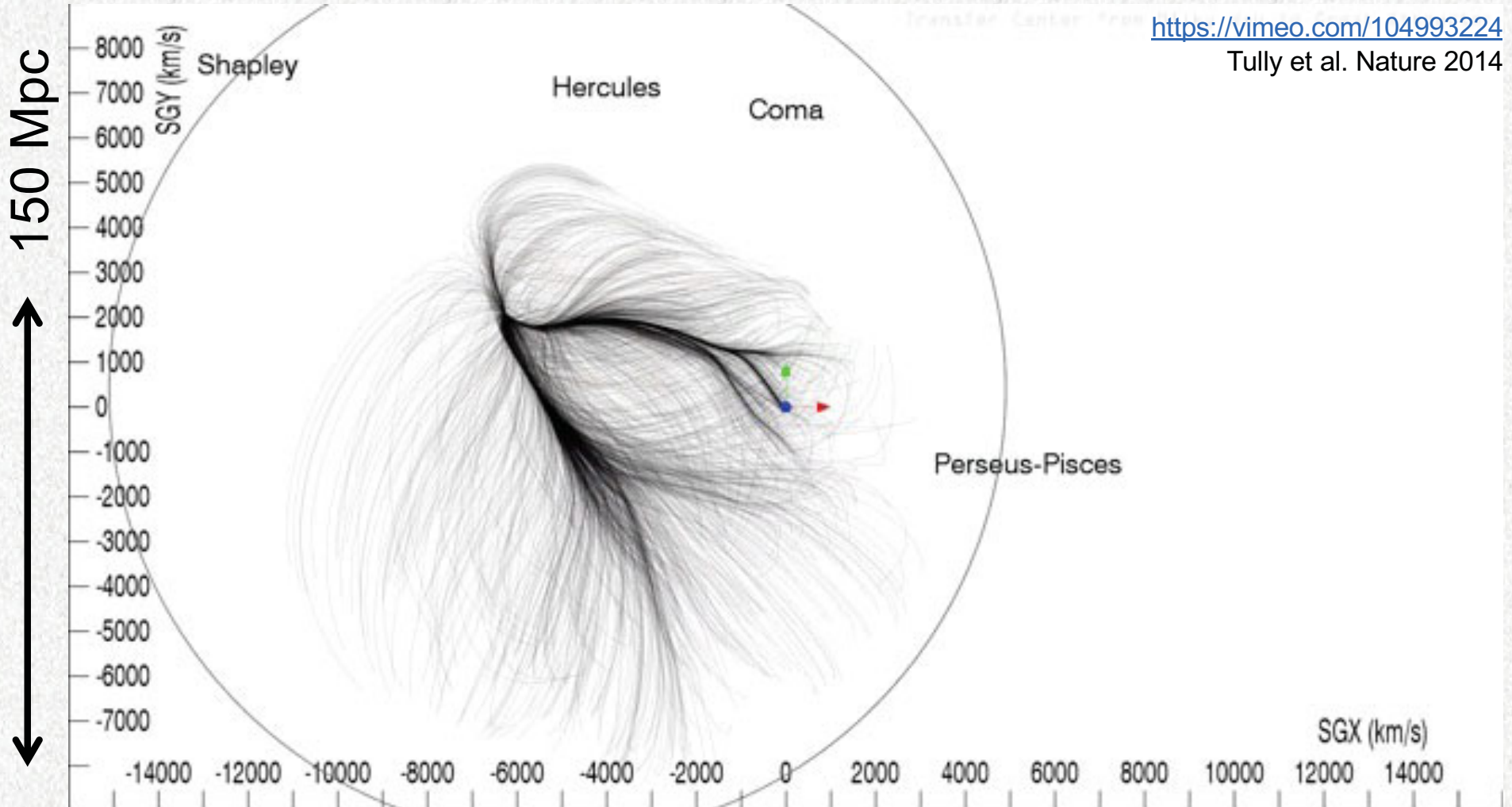
- Dezenas de aglomerados e grupos.
- Dimensão típica ~ 30 Mpc.
- Massa entre 10^{16} e $10^{17} M_{\odot}$.



Laniakea: super-aglomerado local

(céu [lani] imenso [akea] em havaiano)

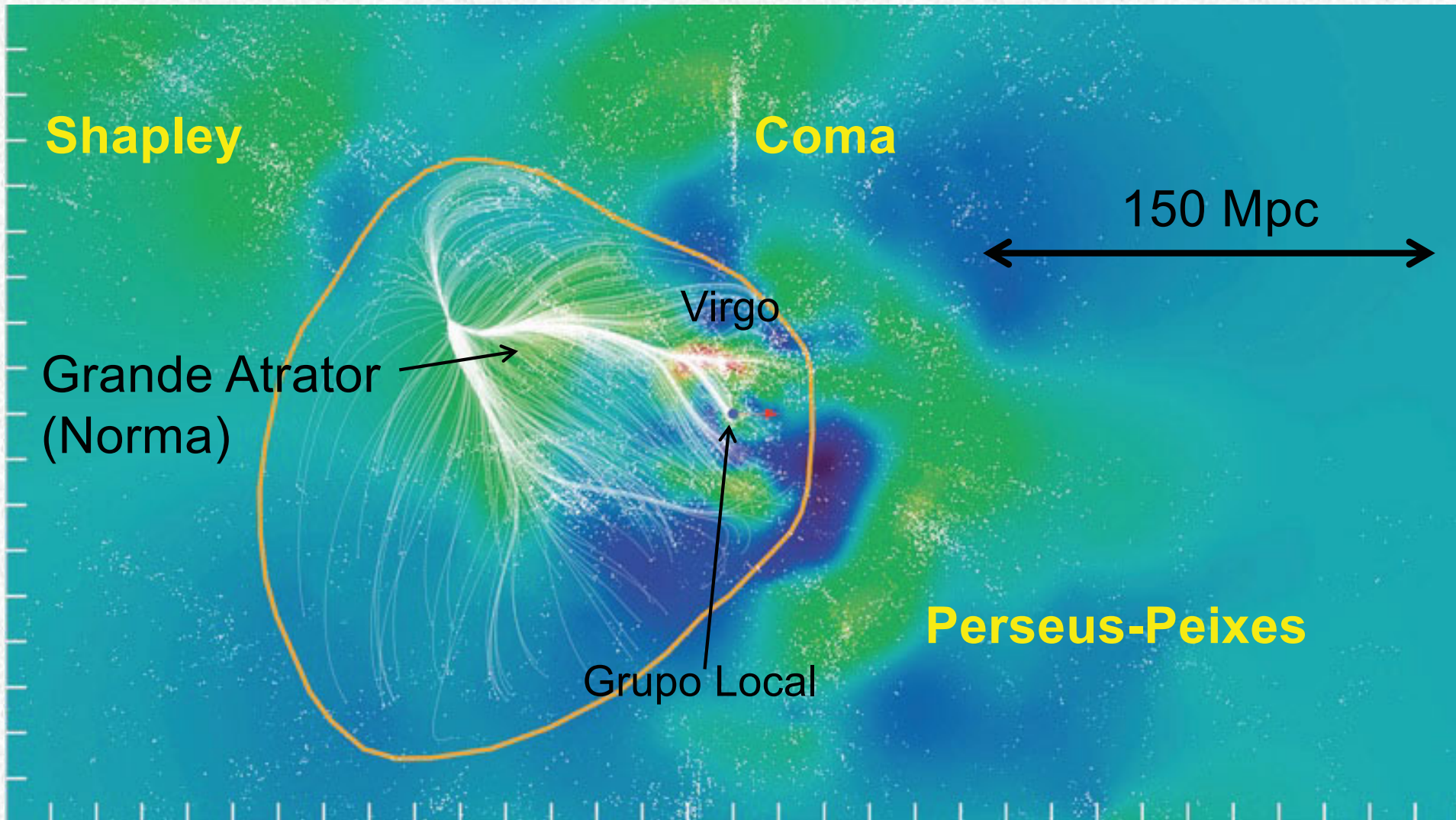
- Detectado através do movimento das galáxias no universo local em 2014.
- As linhas correspondem ao caminho que a matéria tende a fluir, traçando a distribuição de matéria neste volume.



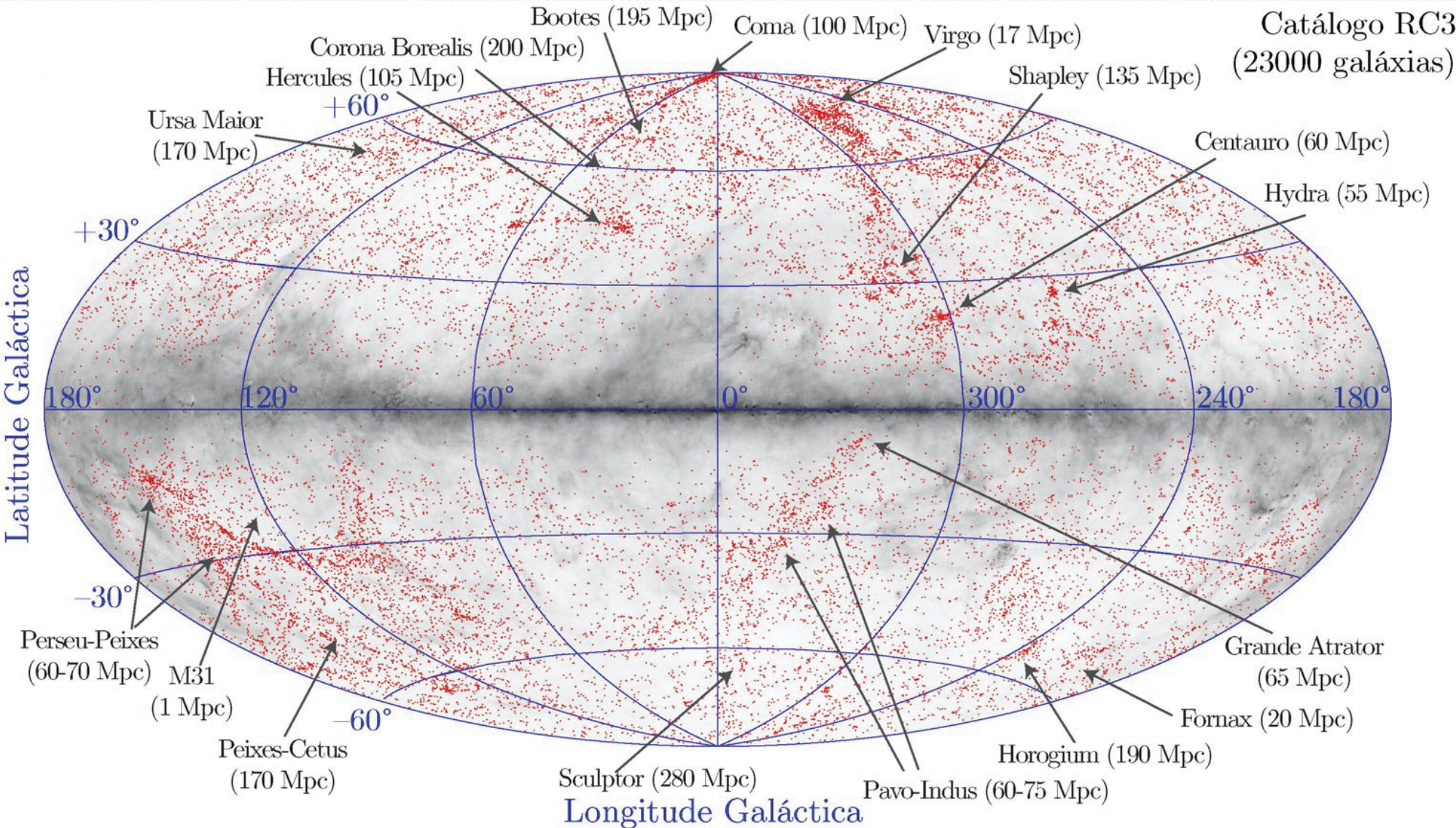
Laniakea: super-aglomerado local

(céu [lani] imenso [akea] em havaiano)

- A região delimitada em laranja marca a fronteira de fluxo: no exterior da curva as galáxia se dirigem a outros super-aglomerados (em amarelo).
- Os tons de verde/laranja a azul escuro correspondem à densidade (do mais denso ao menos denso)

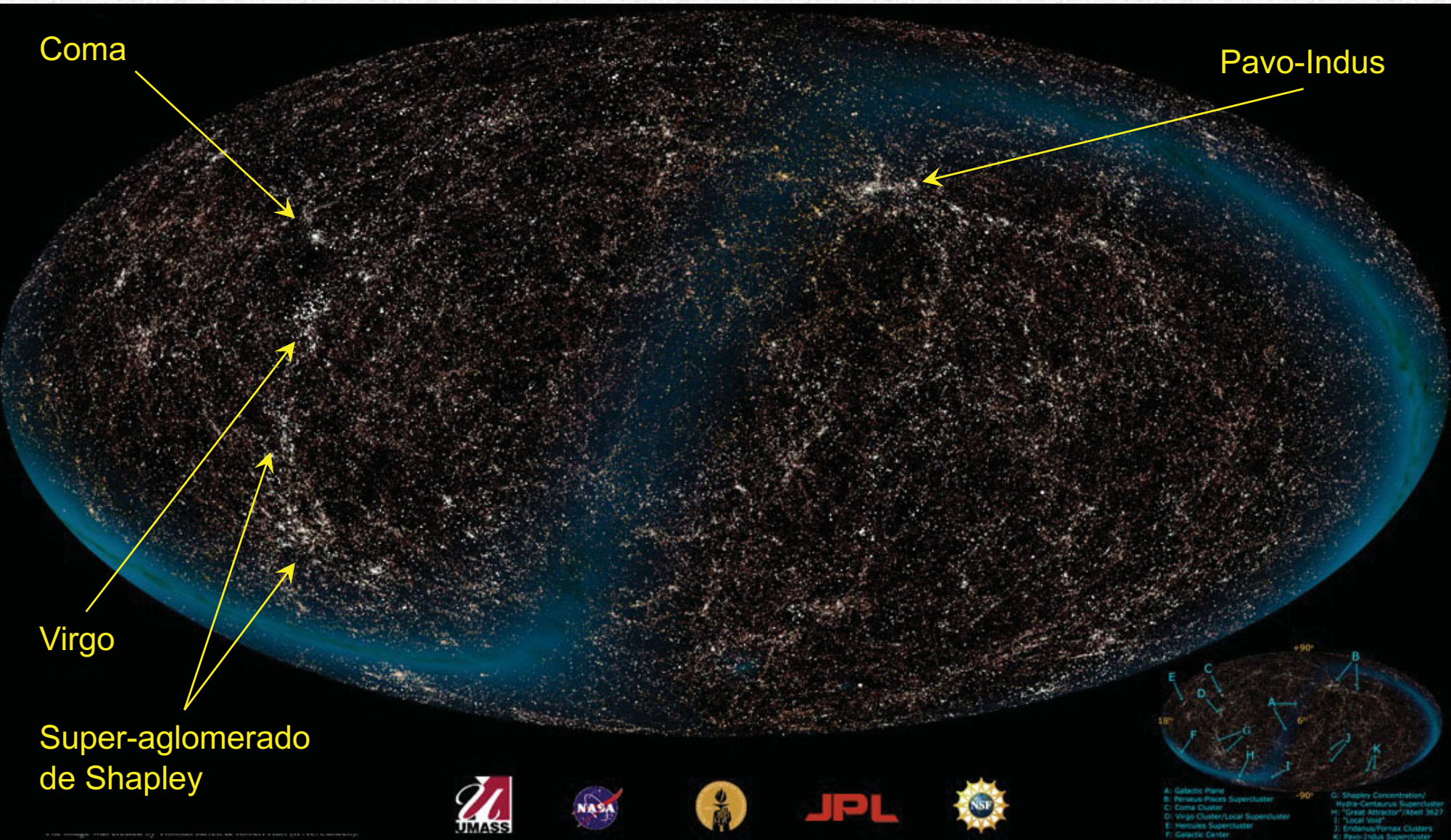


Estrutura em grande escala



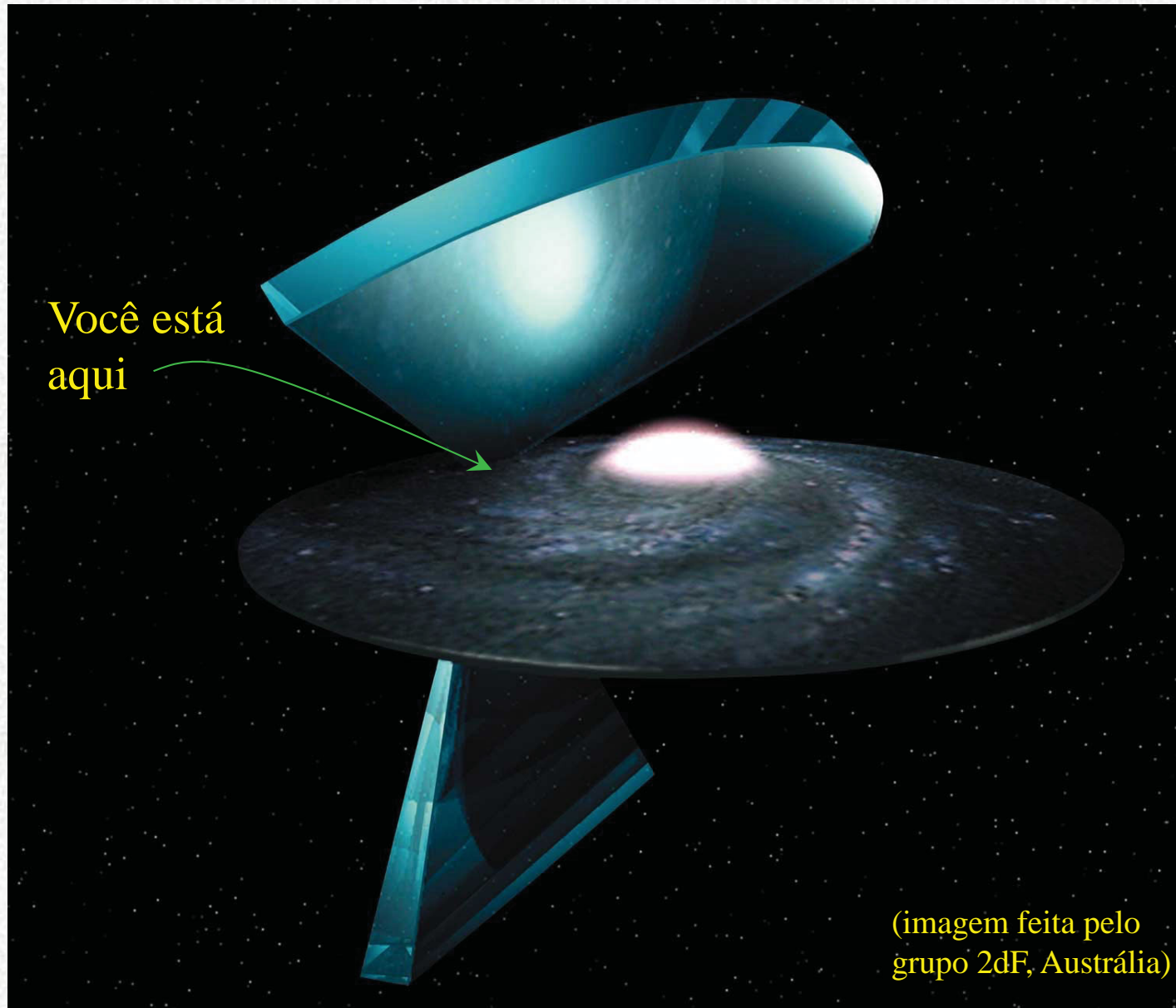
- Galáxias mais brilhantes no óptico, dentro de um raio de 200 Mpc, tiradas do catálogo de Gérard de Vaucouleurs (RC3, 1991).
- Note a região obscurecida pela poeira da Via Láctea e a presença de concentrações de galáxias.

Estrutura em grande escala



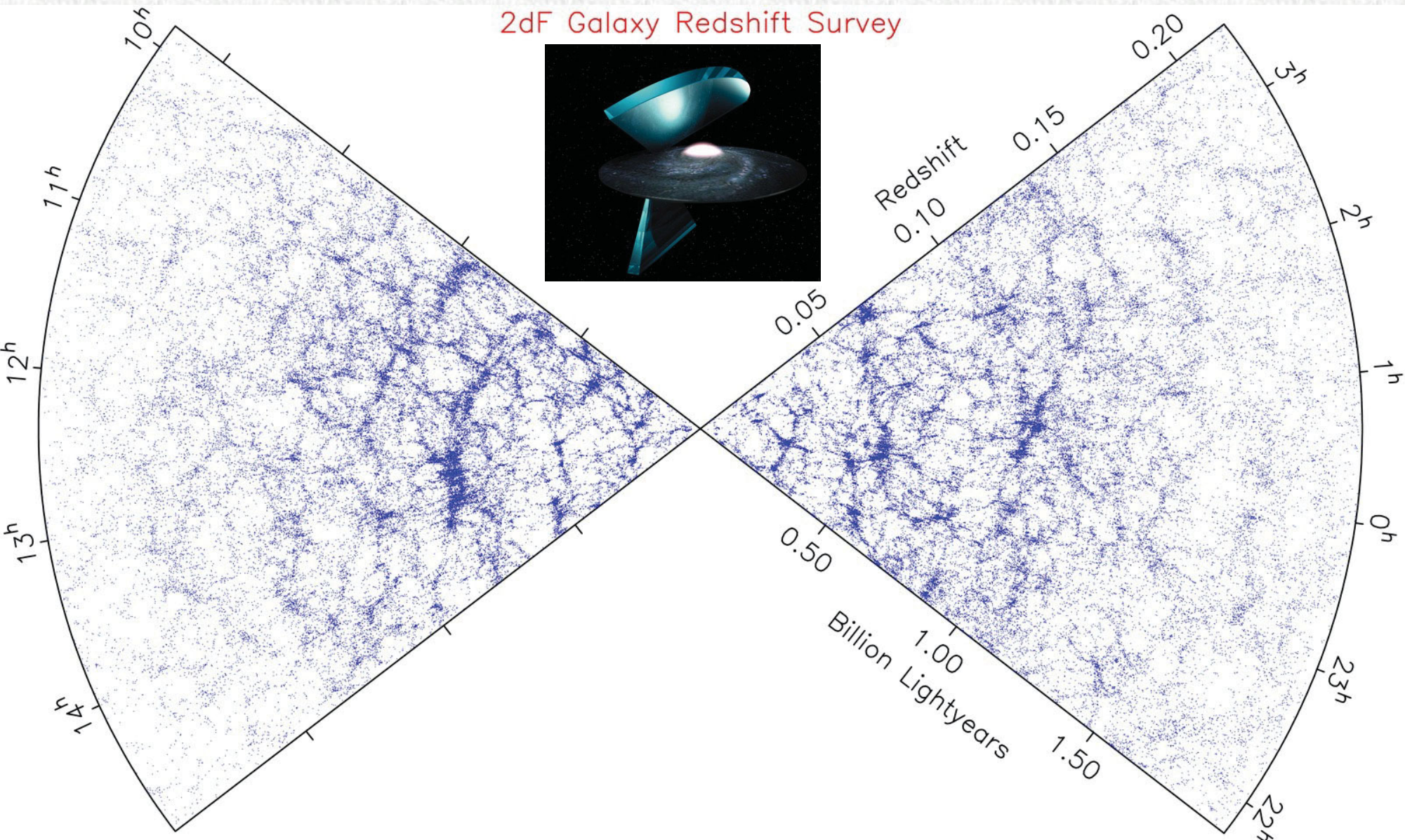
- Galáxias mais brilhantes no infravermelho (menor extinção pela poeira)
 - coordenadas equatoriais.
 - Distribuição **projetada** no plano do céu: 2D.

Mapeamento em 3D



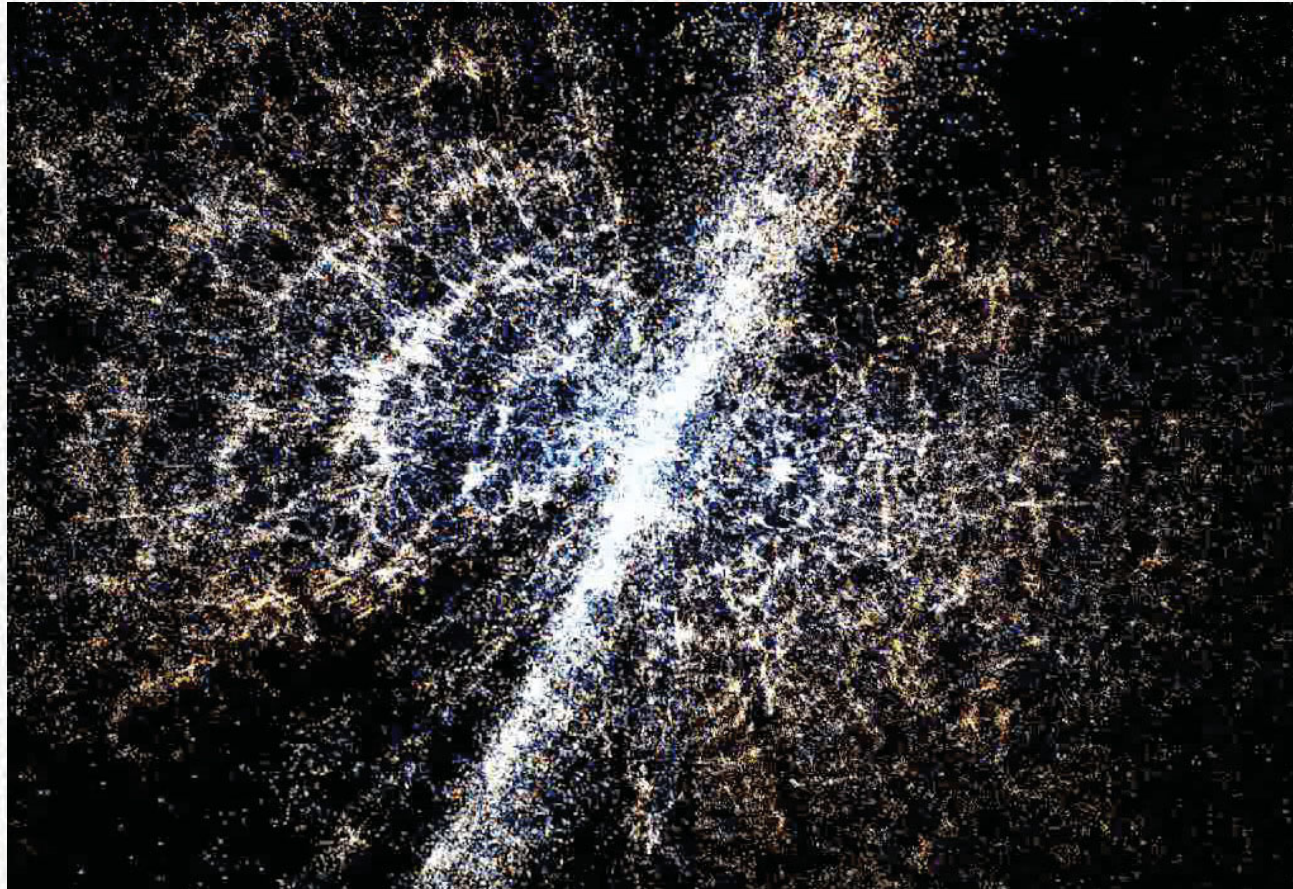
Observar fatias do Universo: é necessário medir distâncias.

Fatia do universo: filamentos e “vazios”



- Distribuição de mais de 100.000 galáxias em duas fatias opostas do Universo. Nós estamos no vértice central dos 2 cones.

Fatias do universo



As galáxias não se distribuem de forma homogênea em todas as escalas.

Em volumes menores do que ~ 1 bilhão de anos-luz, as galáxias tendem a se agrupar:

- Grupos e aglomerados;
- Super-aglomerados;
- Filamentos cósmicos (muros).

Mapeamento SDSS (Sloan Digital Sky Survey, EUA – www.sdss.org)



- Entre os filamentos existem os “vazios” cósmicos com centenas de milhões anos-luz de diâmetro.
- Estrutura em grande escala: semelhante a uma esponja com grandes furos ou a um emaranhado de teias (a “teia cósmica”).

Simulação da estrutura do universo

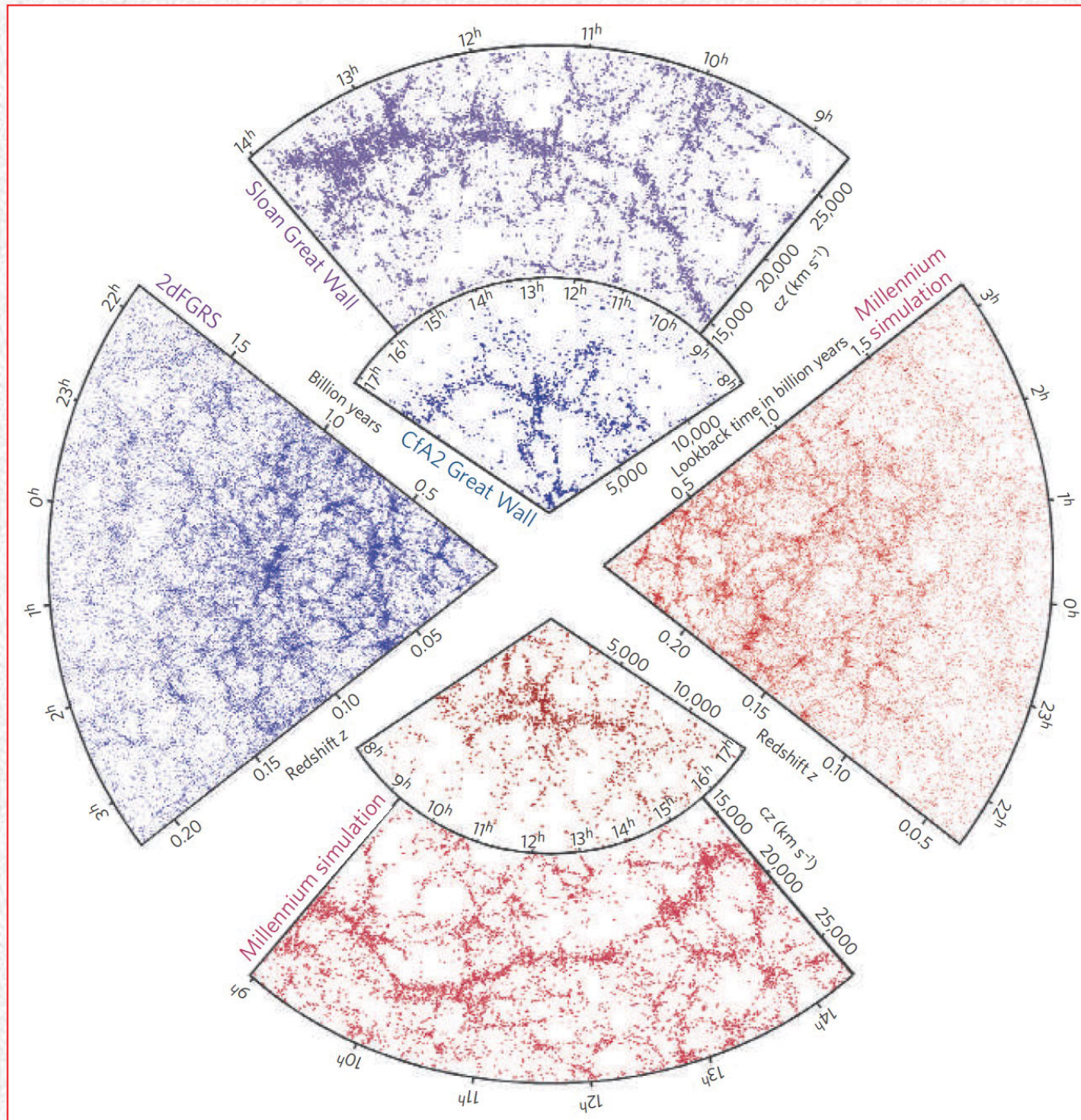


Simulação do Millenium, V. Springel et al. 2005 (www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium)

Simulação com mais de 10 bilhões de partículas, representando um volume do Universo com 2 bilhões de anos-luz de lado. Aqui apenas a matéria escura está representada. As cores representam a densidade.

Estruturas simuladas e observadas

- A distribuição de matéria no universo virtual é muito semelhante à distribuição no universo real.



Simulação do Grupo Local

Matéria escura

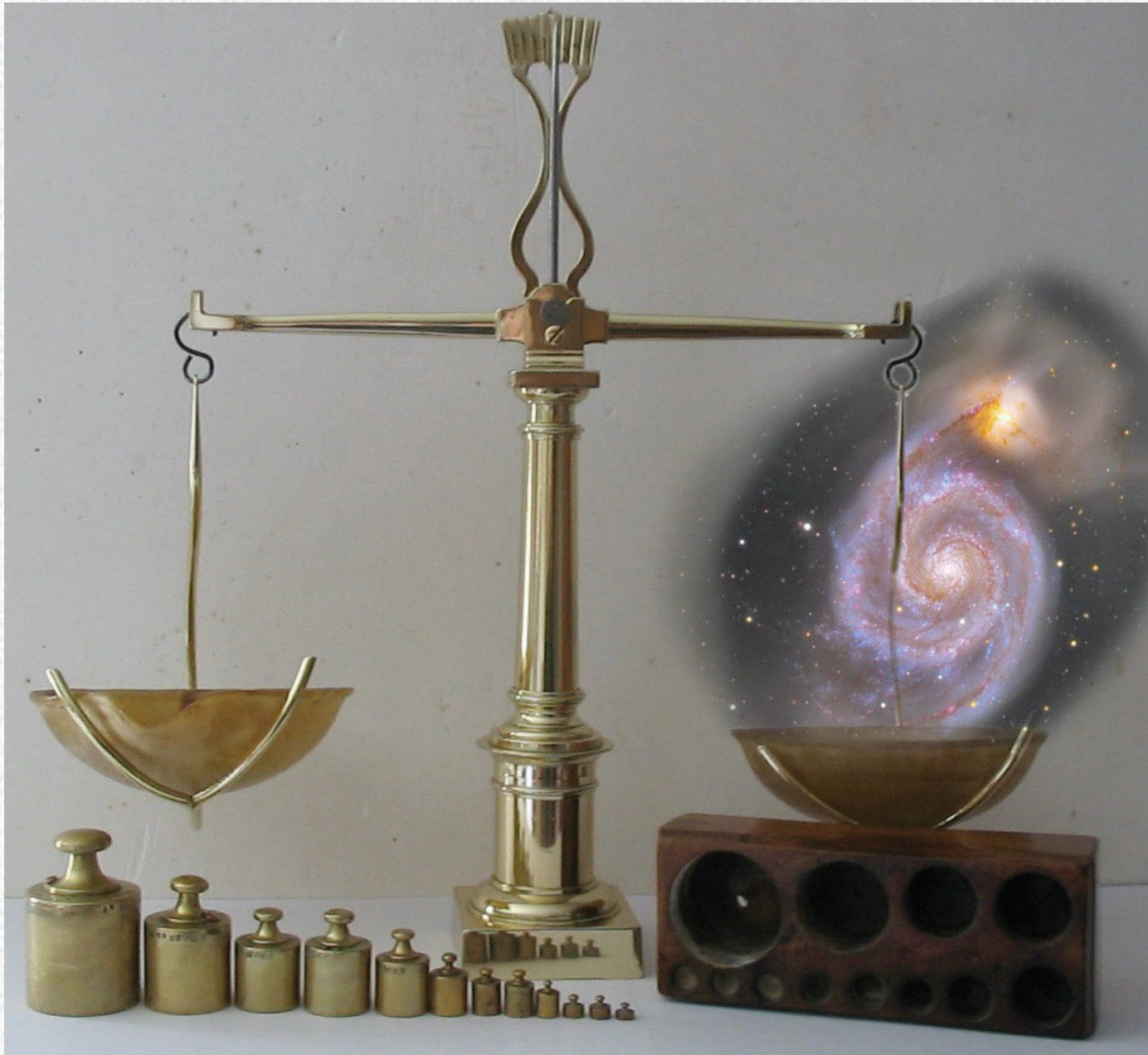
Luz das estrelas nas galáxias

2 Mpc

Sawala et al. (2014)

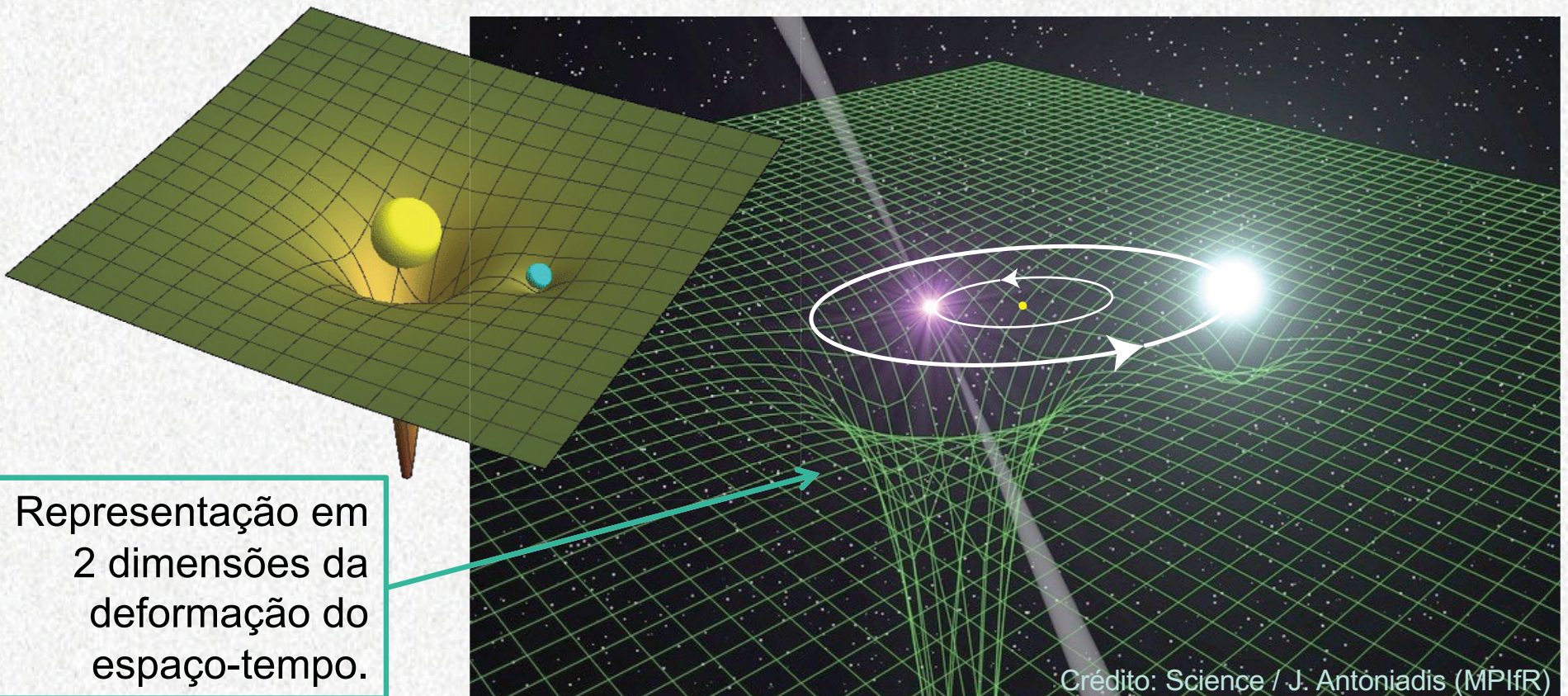
- Grupo simulado, semelhante ao Grupo Local.
- Na simulação, observa-se muitos halos de matéria escura de baixa massa, mas não são em todos que encontramos estrelas.

Como medir a massa de uma galáxia ou aglomerado.



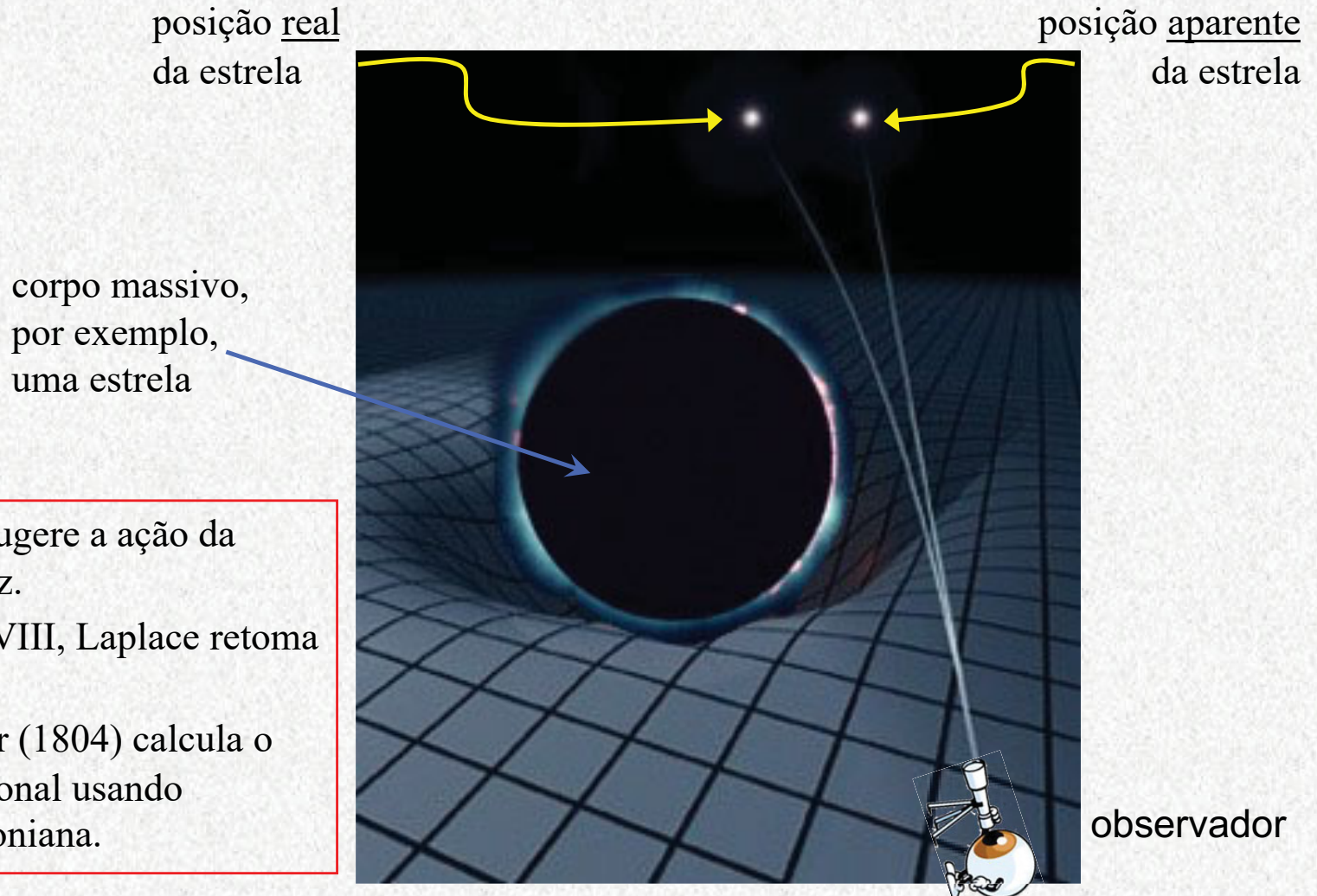
Gravitação em relatividade geral

- 1915: Relatividade Geral de Albert Einstein:
 - Matéria e energia deformam o espaço-tempo
 - Espaço-tempo determina a trajetória da matéria e radiação.
- Órbita de 2 corpos massivos (p. ex., uma estrela e um pulsar [estrela de nêutrons] ou uma estrela e um planeta):



Desvio gravitacional da luz

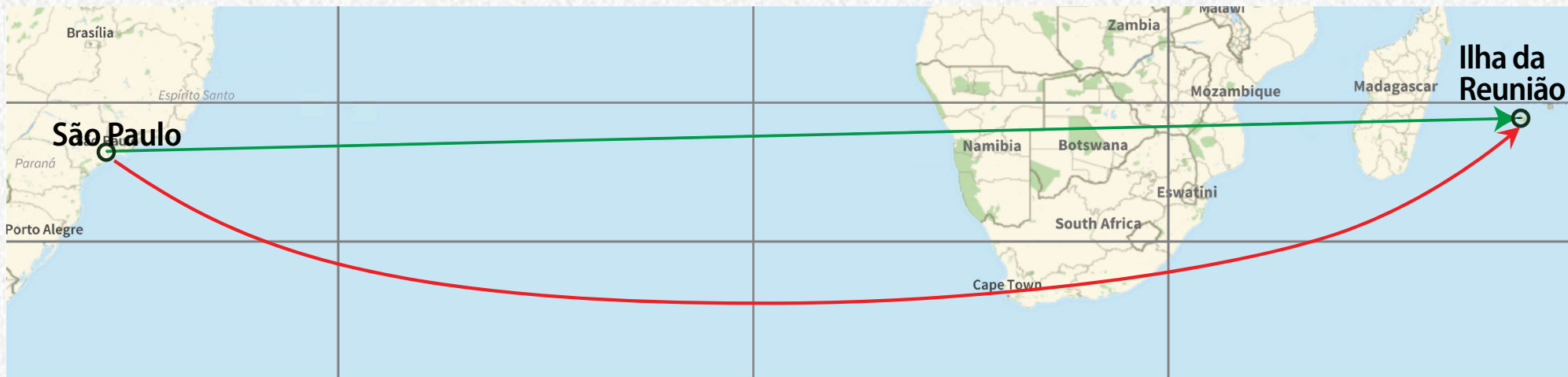
- Previsão da Relatividade Geral: a trajetória da luz é afetada pela presença de corpos maciços.



- 1704: Newton sugere a ação da gravitação na luz.
- Final do Séc. XVIII, Laplace retoma esta sugestão.
- J.G. von Soldner (1804) calcula o desvio gravitacional usando mecânica Newtoniana.

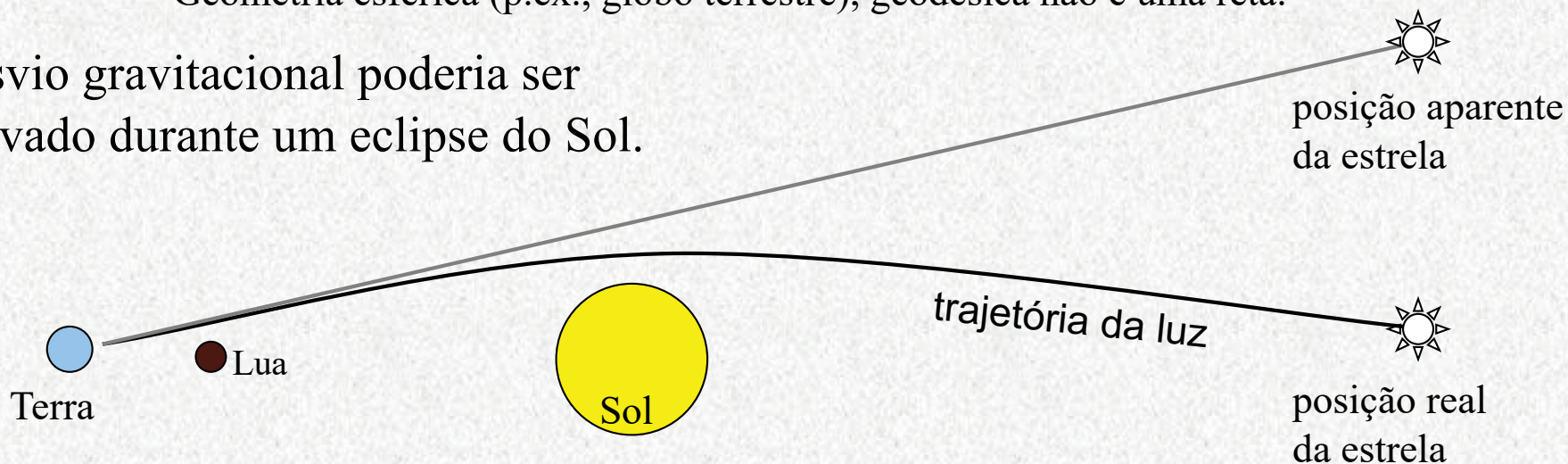
Trajeto da luz no espaço curvo

Exemplo de um espaço curvo: a superfície da Terra



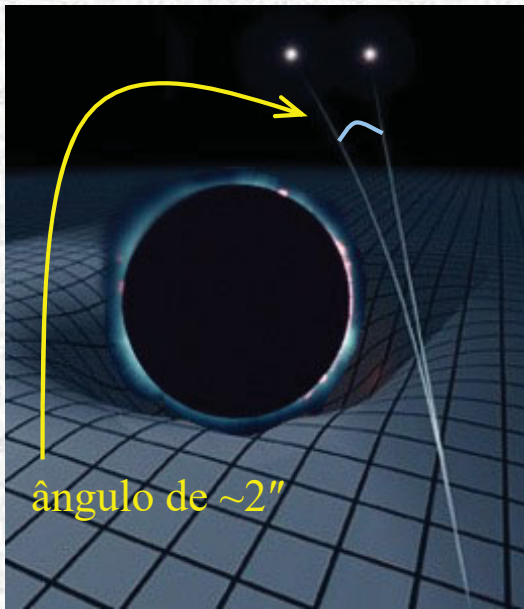
- Caminho mais curto entre SP e a Ilha da Reunião passa pela Namíbia?
- Não, passa pela África do Sul.
- Caminho mais curto: geodésica.
- Geometria esférica (p.ex., globo terrestre), geodésica não é uma reta.

O desvio gravitacional poderia ser observado durante um eclipse do Sol.



Desvio gravitacional da luz

- Trajetória do eclipse do Sol de 29/maio/1919.
- Desvio da posição real de uma estrela é observado de acordo com a previsão da relatividade geral.
- O efeito é muito pequeno, ~ 2 arcsec para estrelas atrás da borda do Sol.



Anel de Einstein e imagens múltiplas

Objeto distante

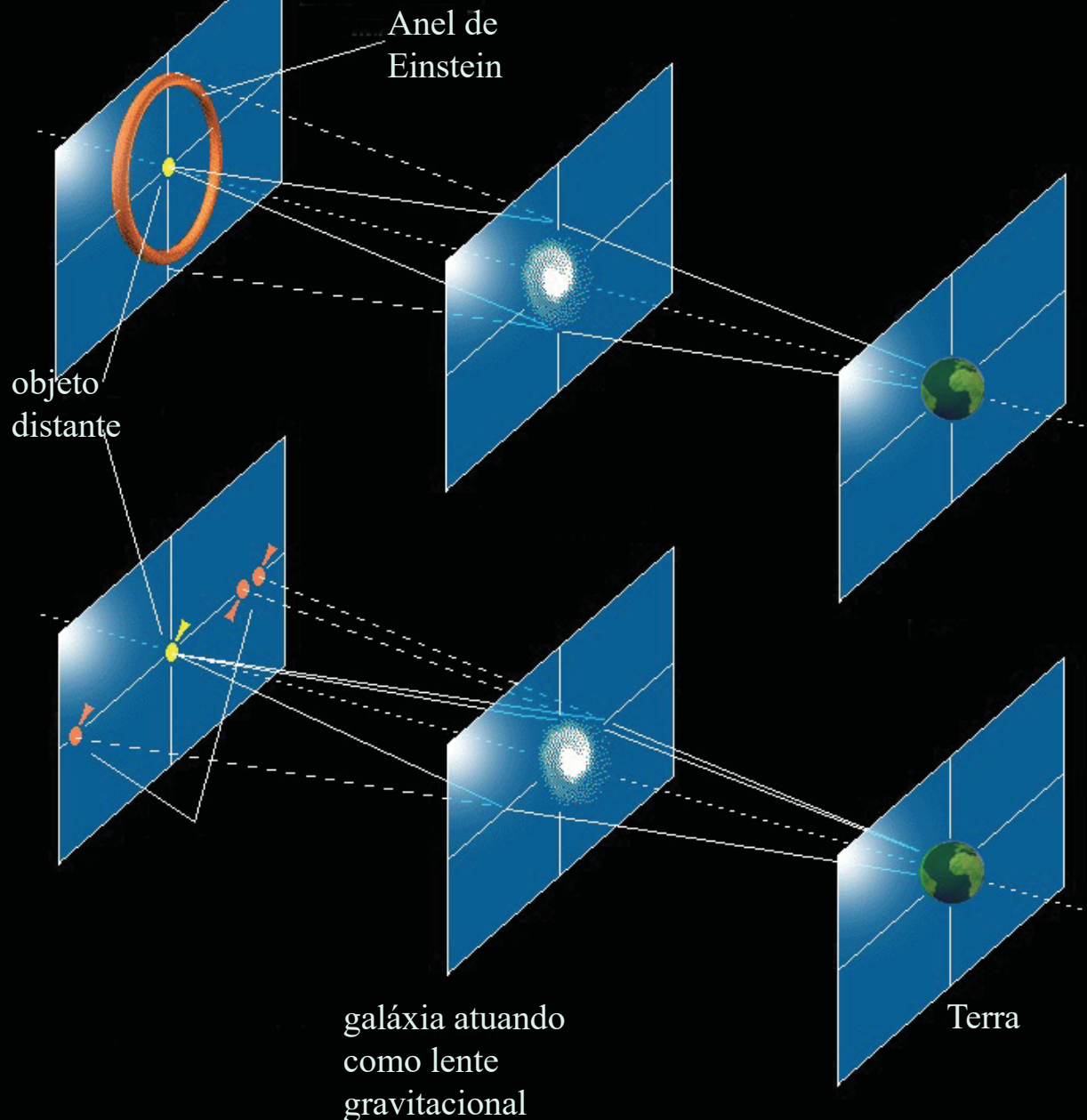
Lente (p.ex., galáxia)

Observador (Terra)

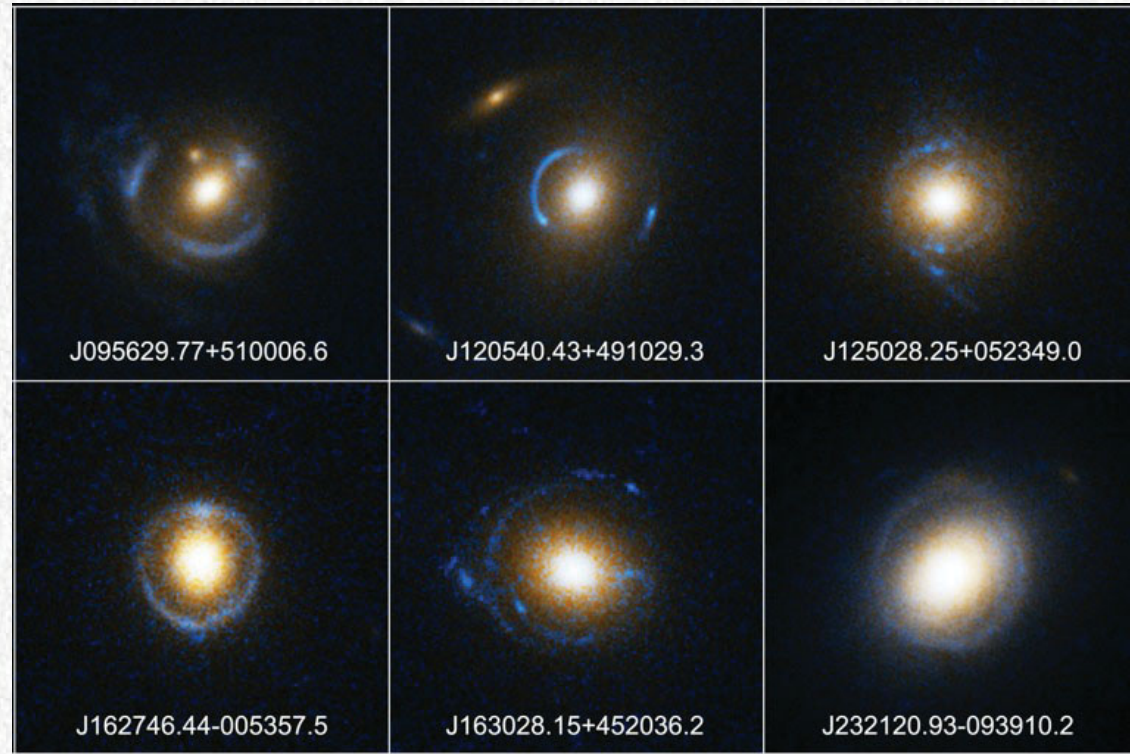
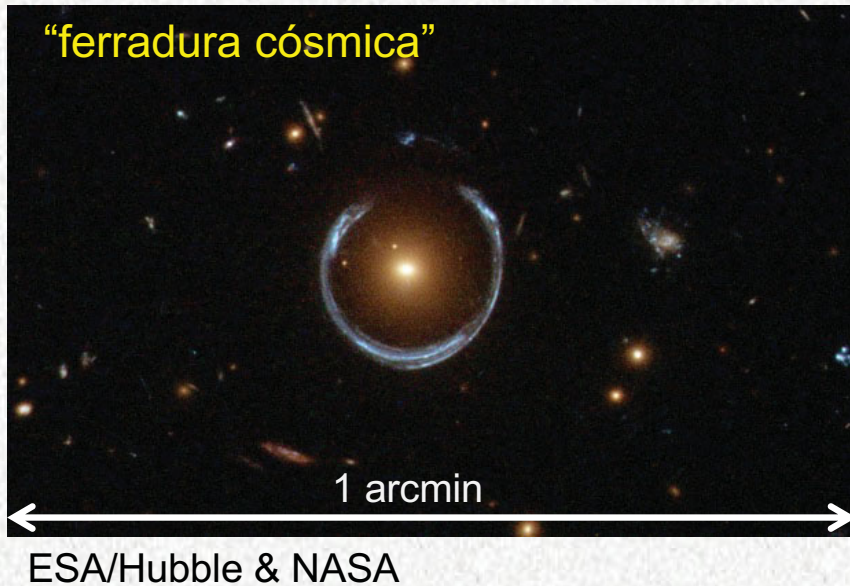
- Alinhamento é perfeito, temos anel de Einstein.

- Alinhamento não é perfeito, temos imagens múltiplas.

- Analisando as imagens formadas pela lente gravitacional, podemos deduzir a massa da lente.



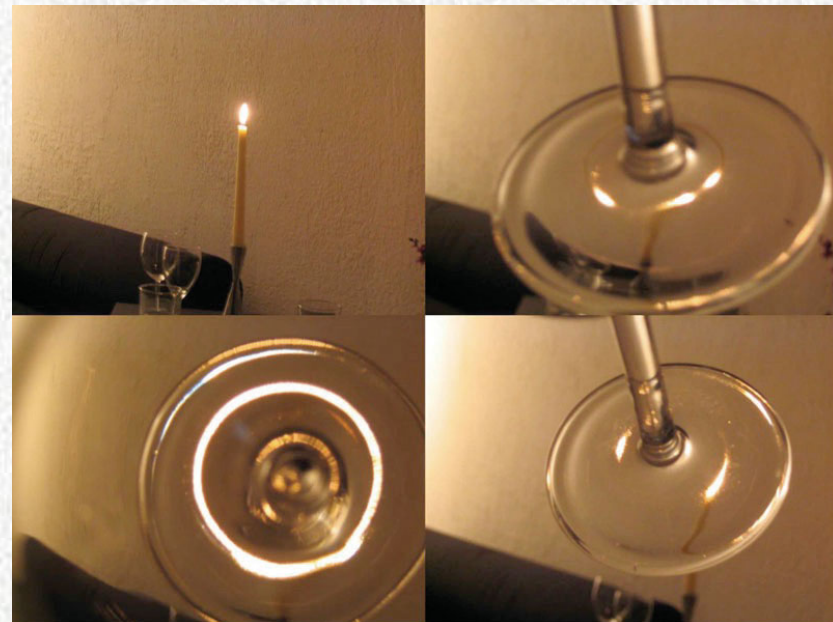
Anel de Einstein e imagens múltiplas



NASA/ESA, A. Bolton (CfA) e SLACS

- Exemplo de imagens de galáxias distantes (anel de Einstein ou imagens múltiplas), distorcidas pelo efeito de lente gravitacional de uma galáxia mais próxima.

“Modelo” de lente usando uma taça e uma vela.



Imagens múltiplas

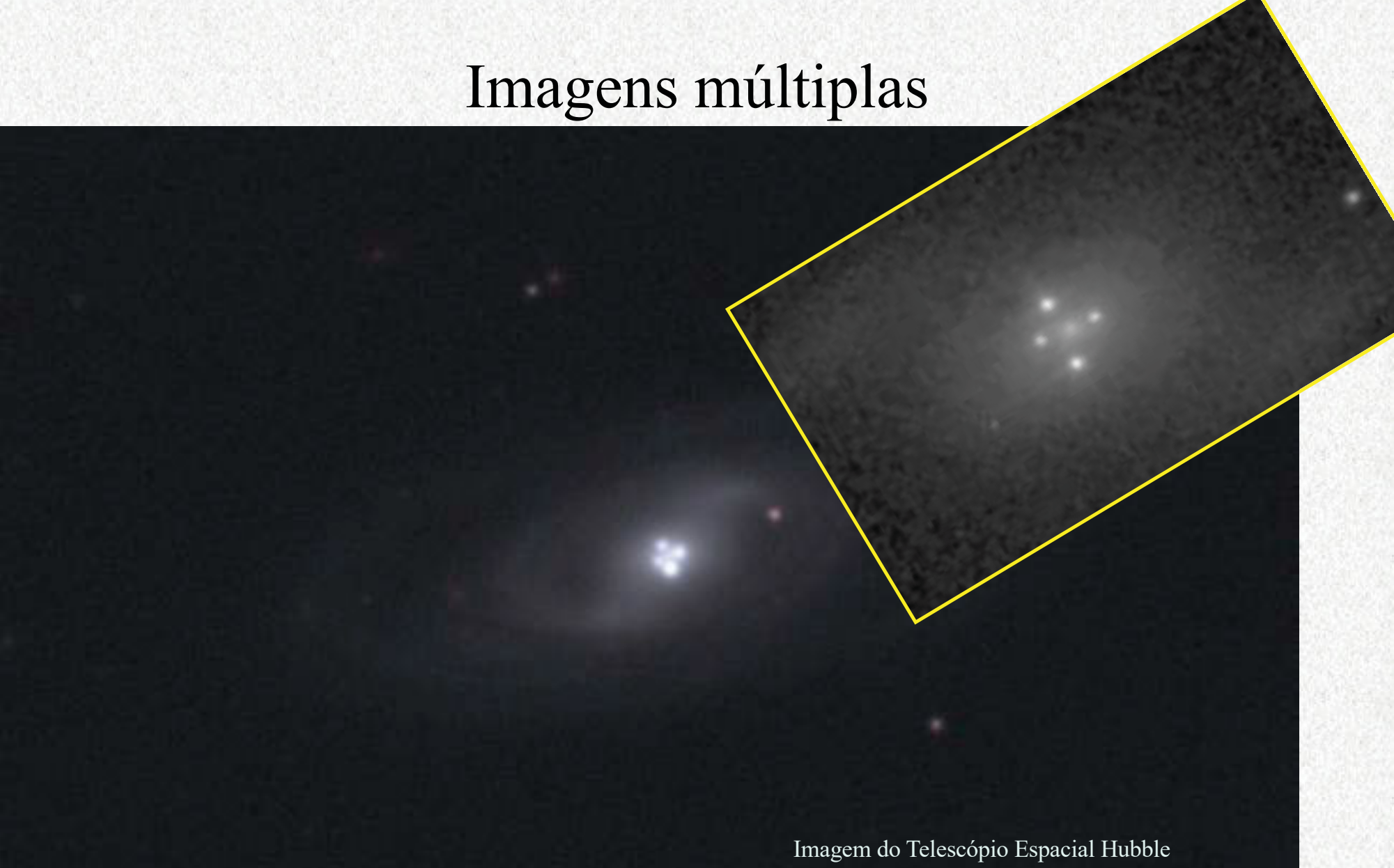
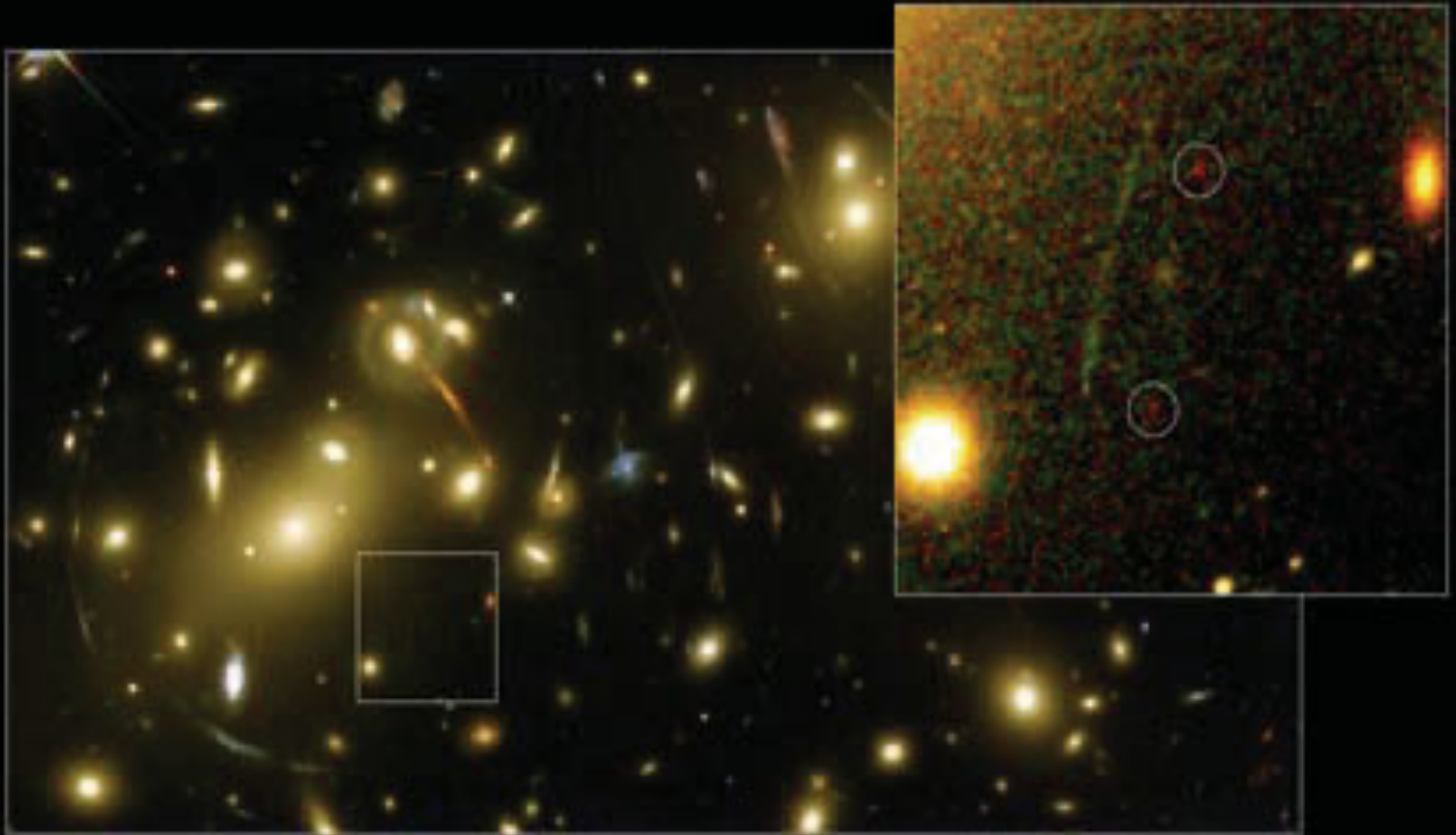


Imagem do Telescópio Espacial Hubble

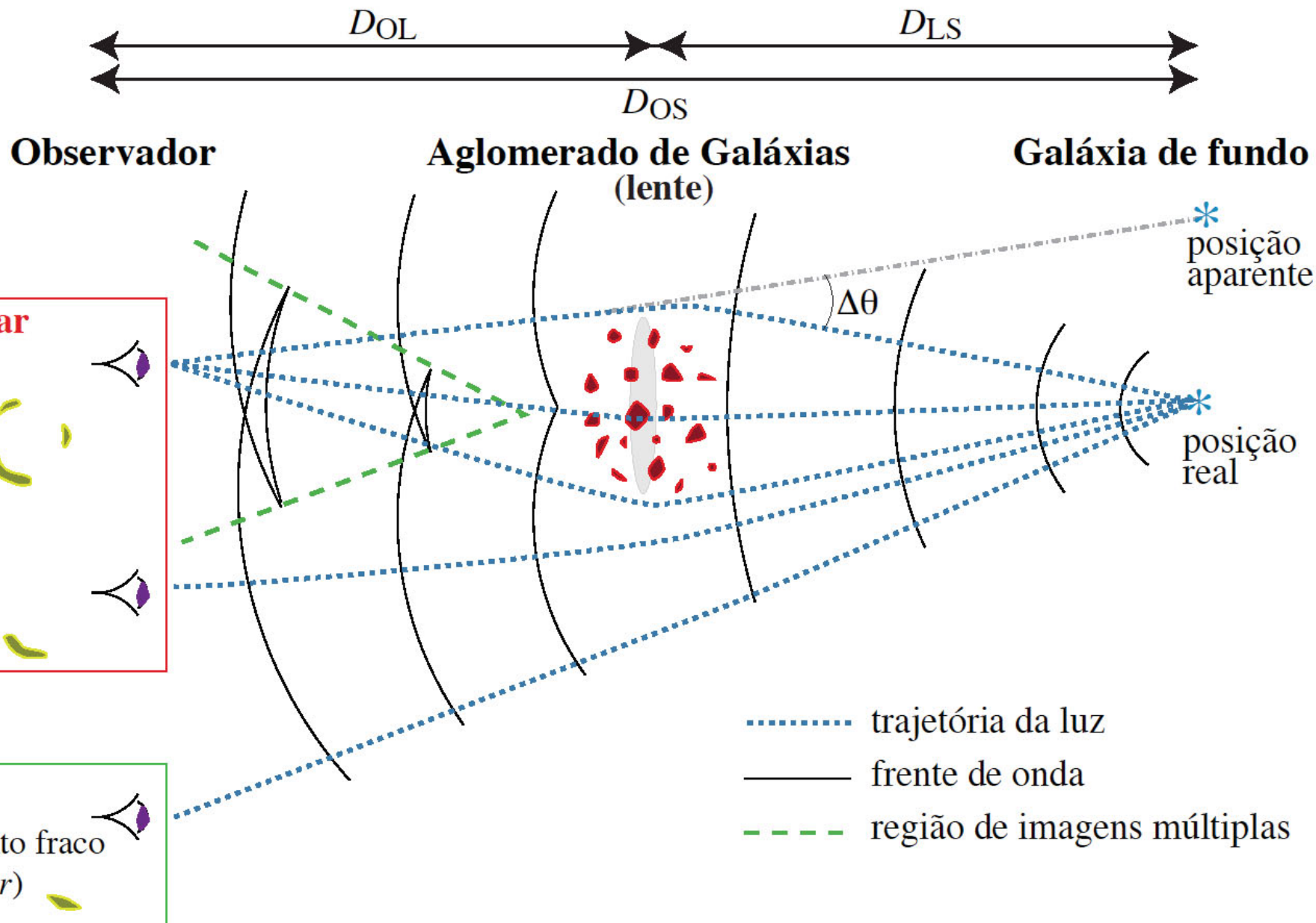
- 4 imagens de um Quasar distante (“cruz de Einstein”).
A lente é uma galáxia espiral próxima.

Aglomerados: “telescópio” gravitacional

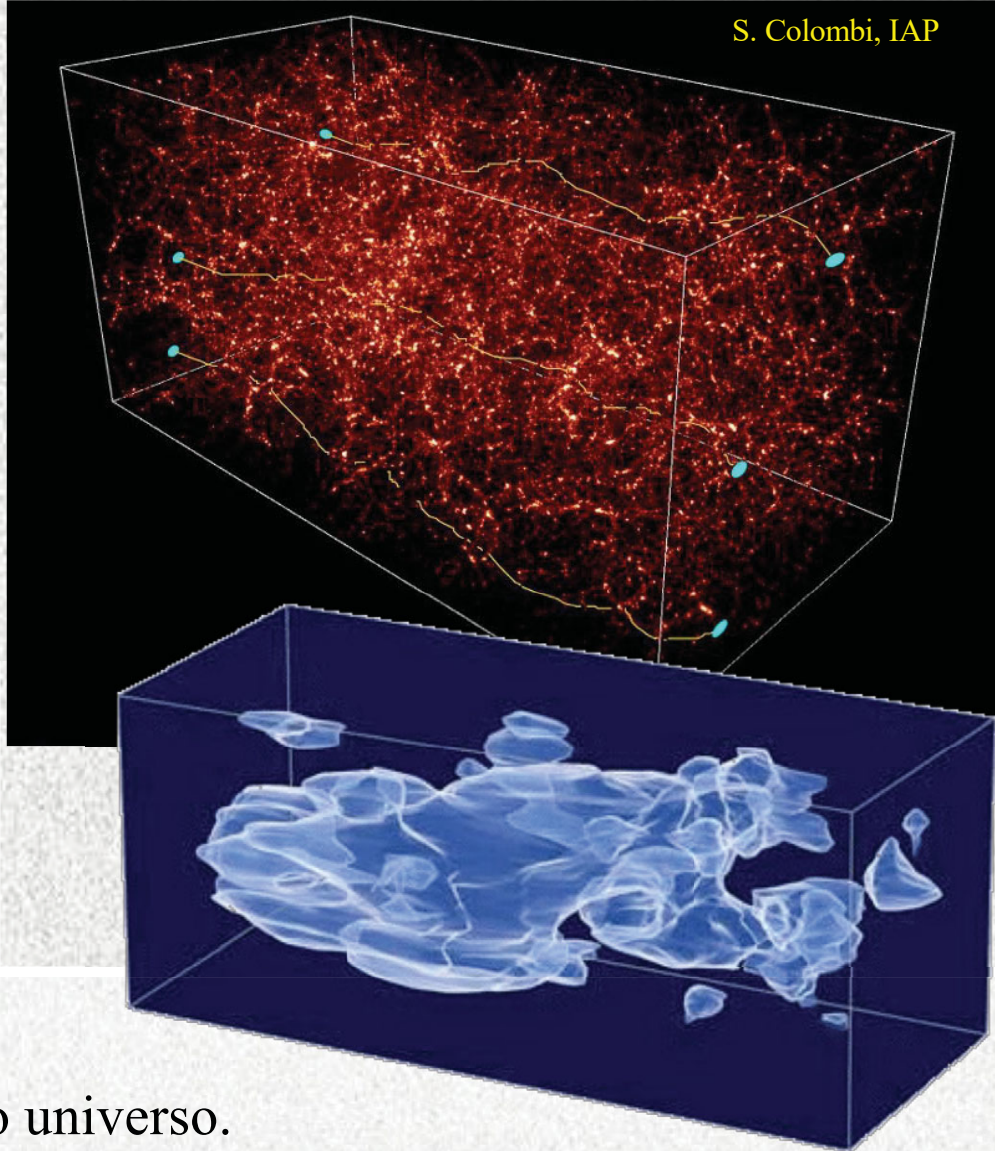
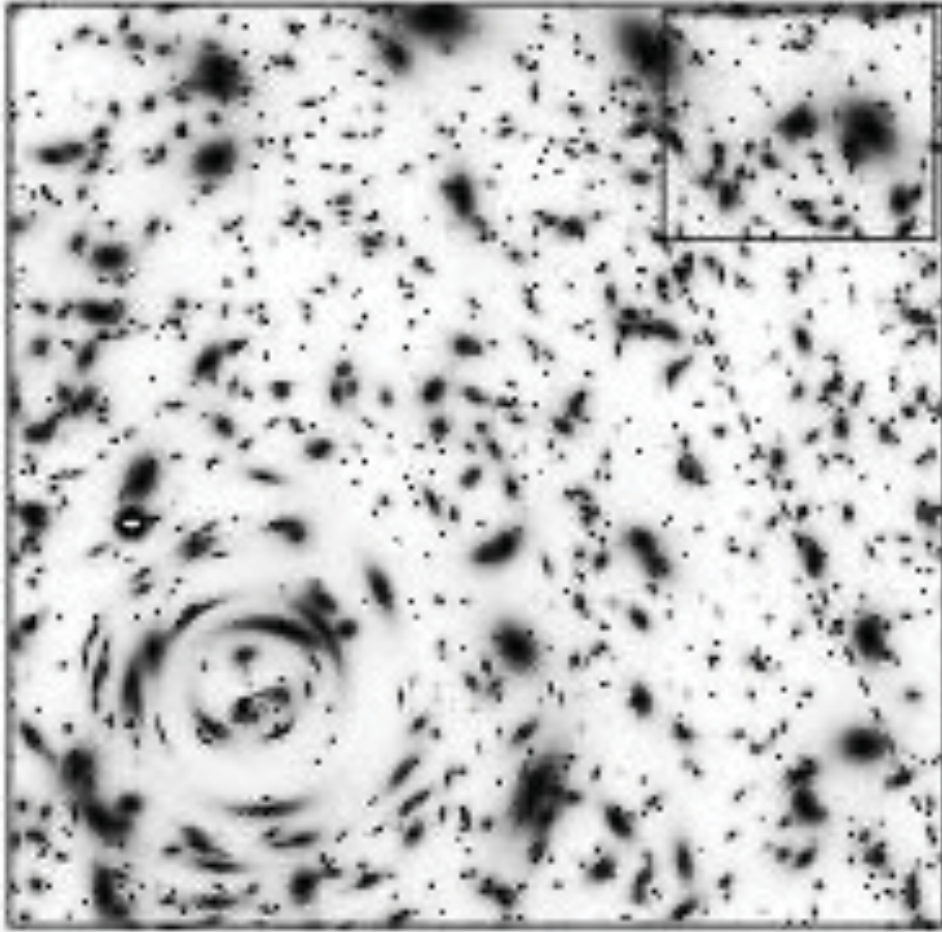


- Com arcos gravitacionais, podemos medir a **massa** de aglomerados de galáxias.
- Lentes gravitacionais amplificam a imagem de objetos distantes.
- Galáxias extremamente distantes foram descobertas

Aglomerados de galáxias como lentes



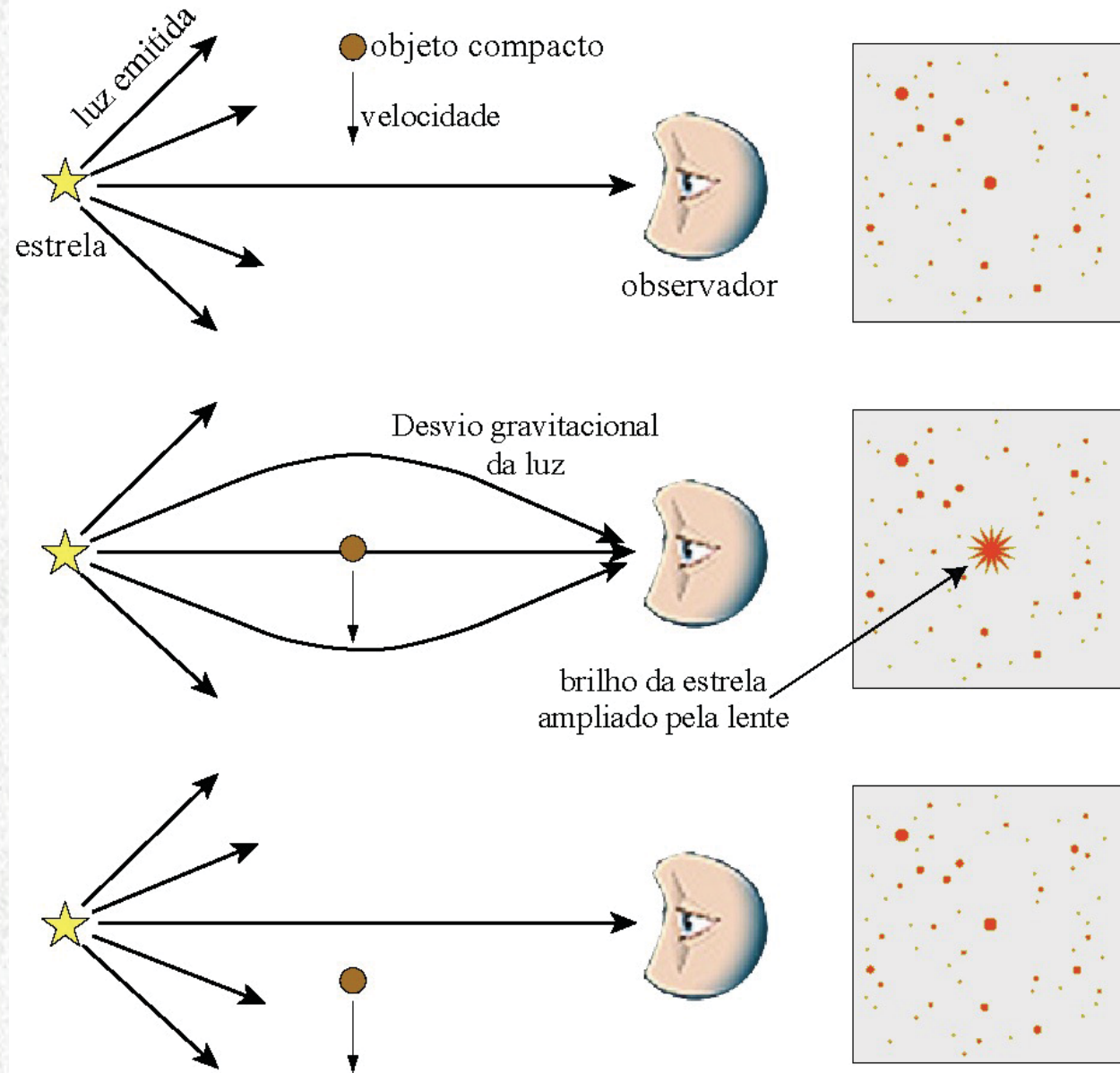
Cisalhamento gravitacional



- Determinar a distribuição de matéria no universo.
- Imagens de galáxias distantes se alinham ao longo do campo gravitacional.

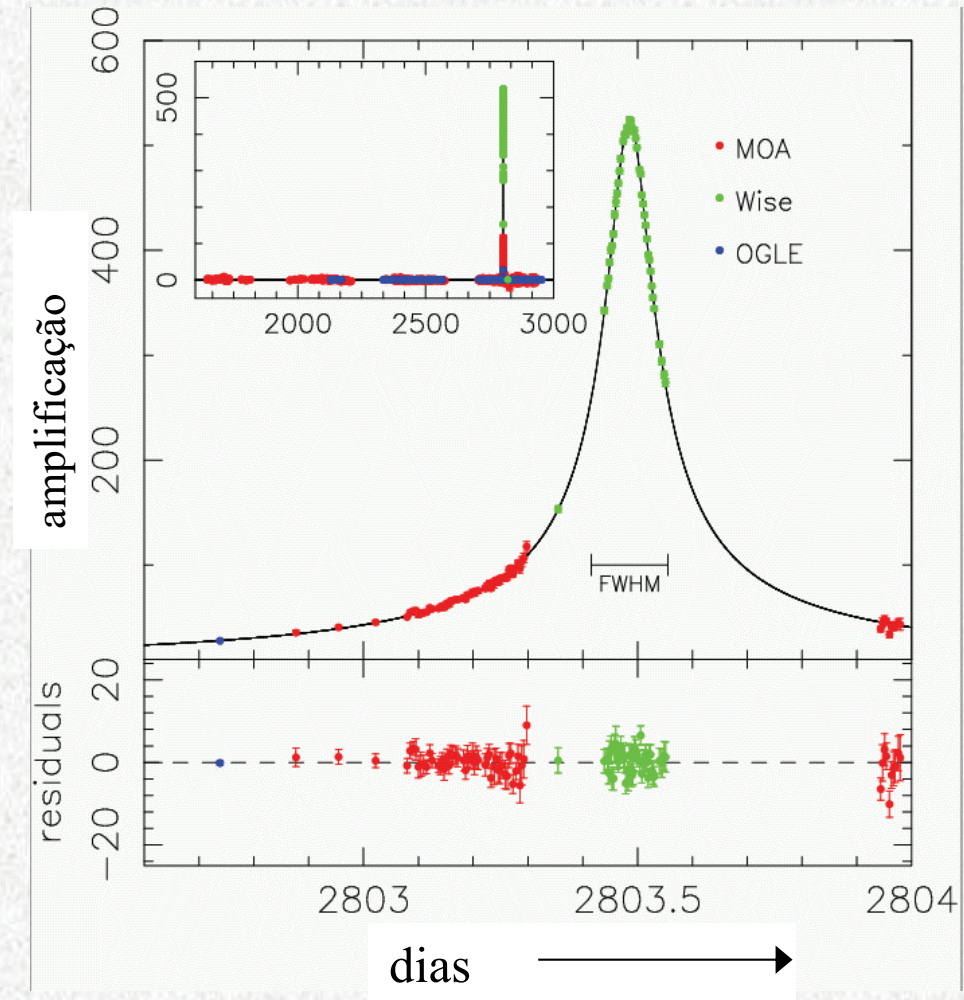
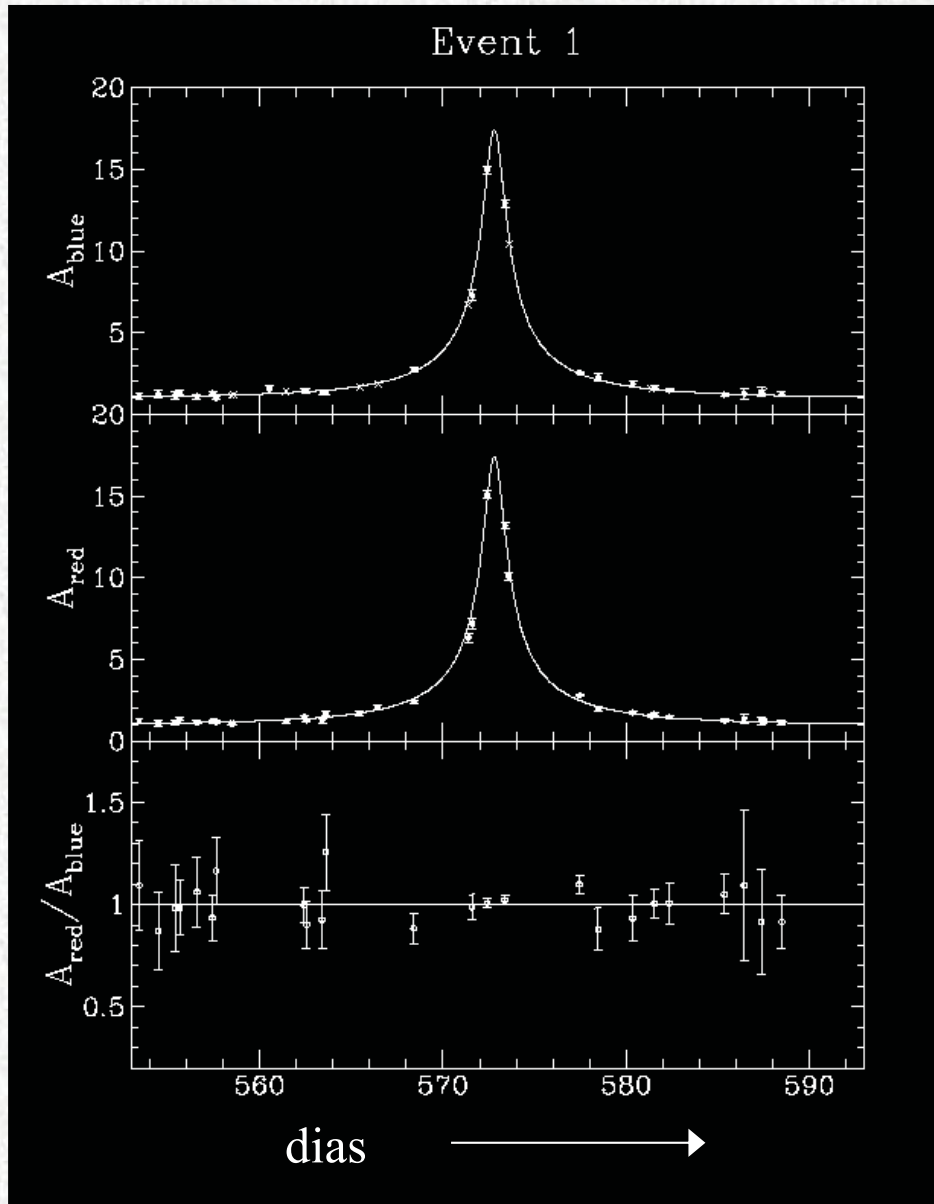
Micro lente gravitacional

- Quando não conseguimos separar (i.e., resolver) as imagens gravitacionais observamos a variação do brilho de uma estrela:
 - curva de luz.
- Objeto compacto pode ser uma anã marrom, uma estrela de nêutrons, um buraco negro, etc...



Micro lente gravitacional

- Curvas de luz.



Micro lentes gravitacionais

- Procura de objetos compactos no halo da galáxia.
 - monitoramento de mais de 10 milhões de estrelas durante anos – projeto MACHOs (MASSive Compact Halo Objects).
- Procura de sistemas planetários.
 - Missão dos satélites Corot (12/2006–06/2014) e Kepler (03/2009–11/2015)
- Dificuldade: o evento de micro lentes só ocorre (se ocorrer...) uma vez — não se repete.

campo na direção da Pequena Nuvem de Magalhães

