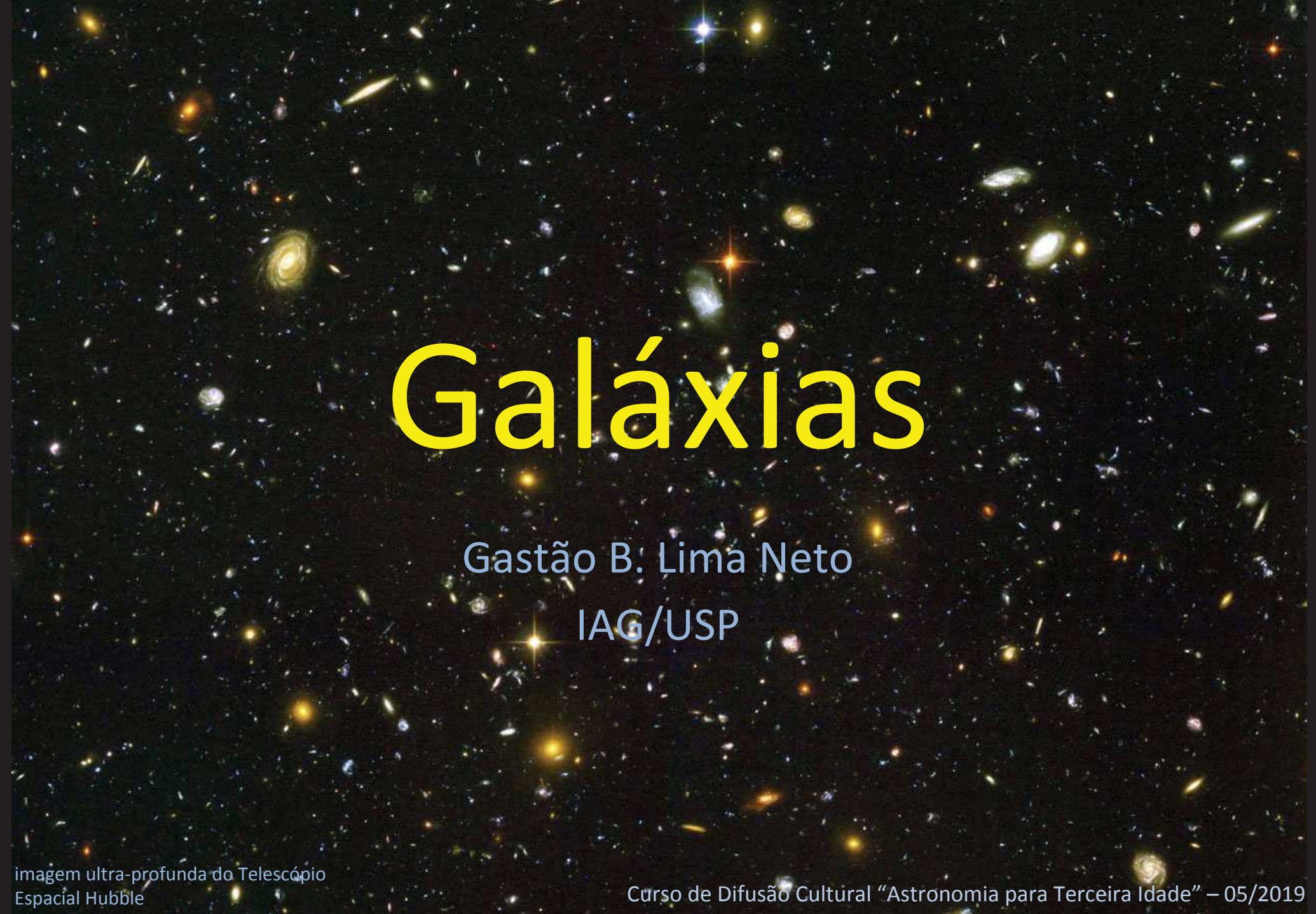


The background of the slide is a deep-field astronomical image from the Hubble Space Telescope, showing a vast field of galaxies. The galaxies are of various shapes and sizes, including spirals, ellipticals, and irregulars, scattered across a dark cosmic background. The colors range from bright yellow and orange to deep blues and purples, representing different wavelengths of light captured by the telescope.

Galáxias

Gastão B. Lima Neto
IAG/USP

Tópicos

- Descoberta das nebulosas e galáxias
- A Via Láctea
- Outras galáxias
- Distribuição de galáxias no Universo
- Galáxias ativas
- Colisões de galáxias
- Formação de galáxias

Universo geocêntrico x heliocêntrico

- **Copérnico, Kepler e Galileu** mostram que os planetas, inclusive a Terra, giram em torno do Sol entre 1543 e 1610.
 - Após 18 séculos, o **modelo heliocêntrico** é adotado no lugar do geocentrismo.
- O universo é relativamente **bem simples**:
 - Sistema Solar;
 - as estrelas “fixas”;
 - e algumas coisas intrigantes...

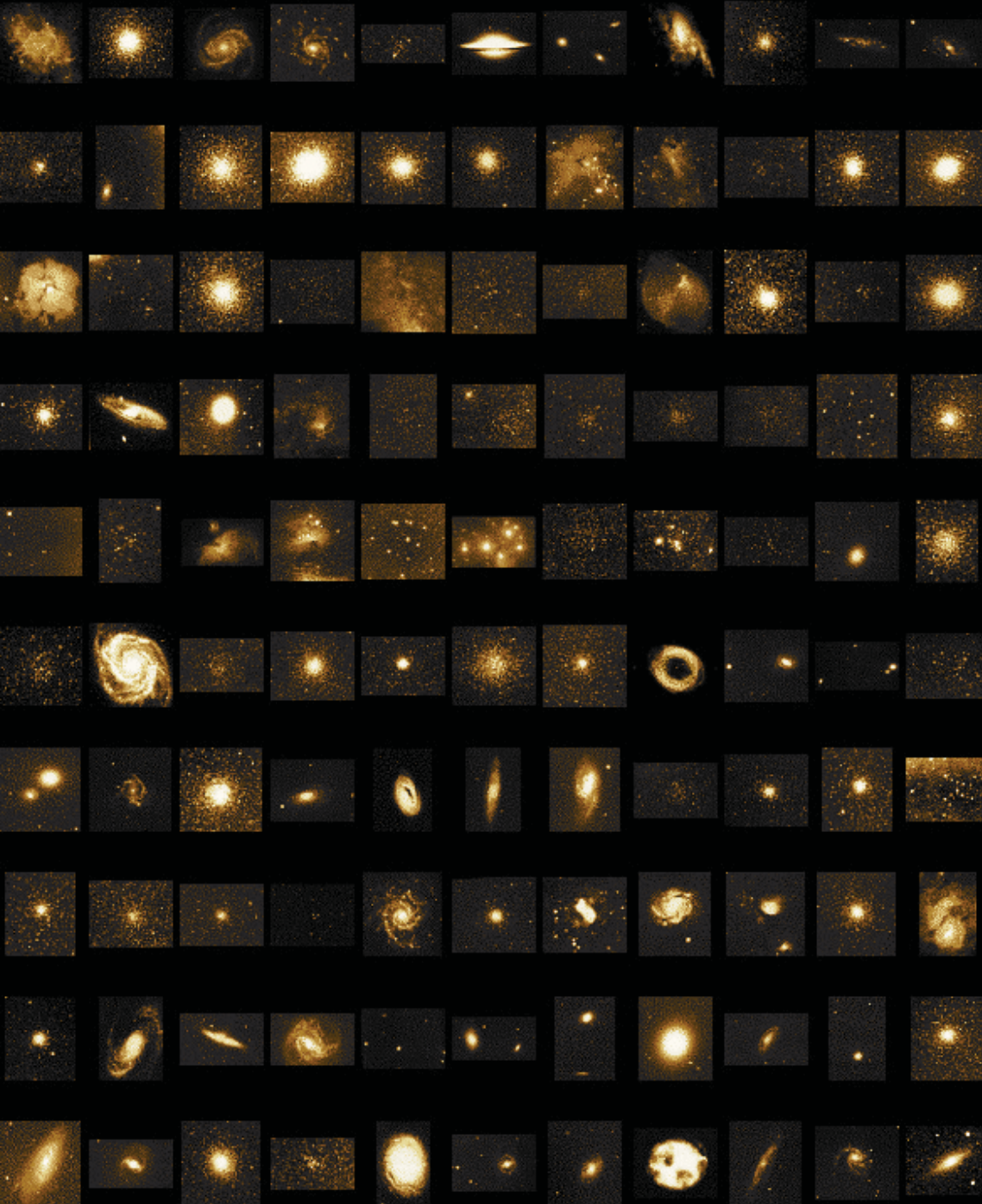


Nem tudo são estrelas

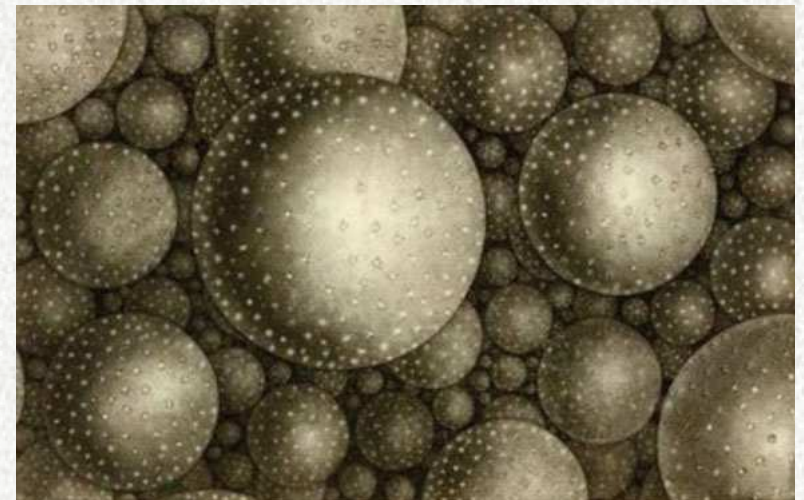
- A Via Láctea, uma faixa de aparência leitosa
— do latim, “Caminho de Leite”; em grego, “*galáxia*”
- As Nuvens de Magalhães, visíveis no hemisfério Sul

Galileu aponta o telescópio para a Via Láctea

- Em 1609, Galileu descobre que a Via Láctea é feita de “um vasto número de estrelas fracas”.
- A aparência leitosa ou **nebulosa** é porque não conseguimos ver as estrelas da Via Láctea individualmente.



- Entre 1758 e 1780, **Charles Messier** observa e cataloga 110 “nebulosas”.
- **Nebulosa** = objeto de aparência difusa, como uma nuvem, diferente das estrelas e planetas.
- Entre 1786 e 1802, **William Herschel** e família catalogam milhares de “nebulosas”.
- Será que estas nebulosas são os “**universos-ilhas**” de Kant e Wright, proposto em 1750?



- Lord Rosse, na Irlanda, descobre a estrutura espiral de algumas nebulosas em 1845 com o seu telescópio de 1,83m de diâmetro.
- Estas nebulosas fazem ou não parte da Via Láctea?

desenhos de Lord Rosse

imagens feitas no telescópio de 1,2m do Palomar



Estrutura do observatório
de Lord Rosse



Foto de Anna e Don York,
2011, Irlanda.

Grande debate de 1920

Harlow Shapley	Heber D. Curtis
• Via Láctea muito grande • Sol distante do centro • Nebulosas fazem parte da galáxia; a Via Láctea corresponde a todo o universo.	• Via Láctea pequena • Sol está no centro • Nebulosas são “universos ilhas”; a Via Láctea é também um “universo ilha”.
Universo de estrelas X Universo de galáxias	

- Grande dificuldade: medir distâncias.
- Em 1926, Edwin Hubble mostra que muitas das nebulosas estão distantes da Via Láctea.



telescópio de 2,5 m na Califórnia usado por Hubble

Nossa Galáxia

A nossa Galáxia: uma espiral



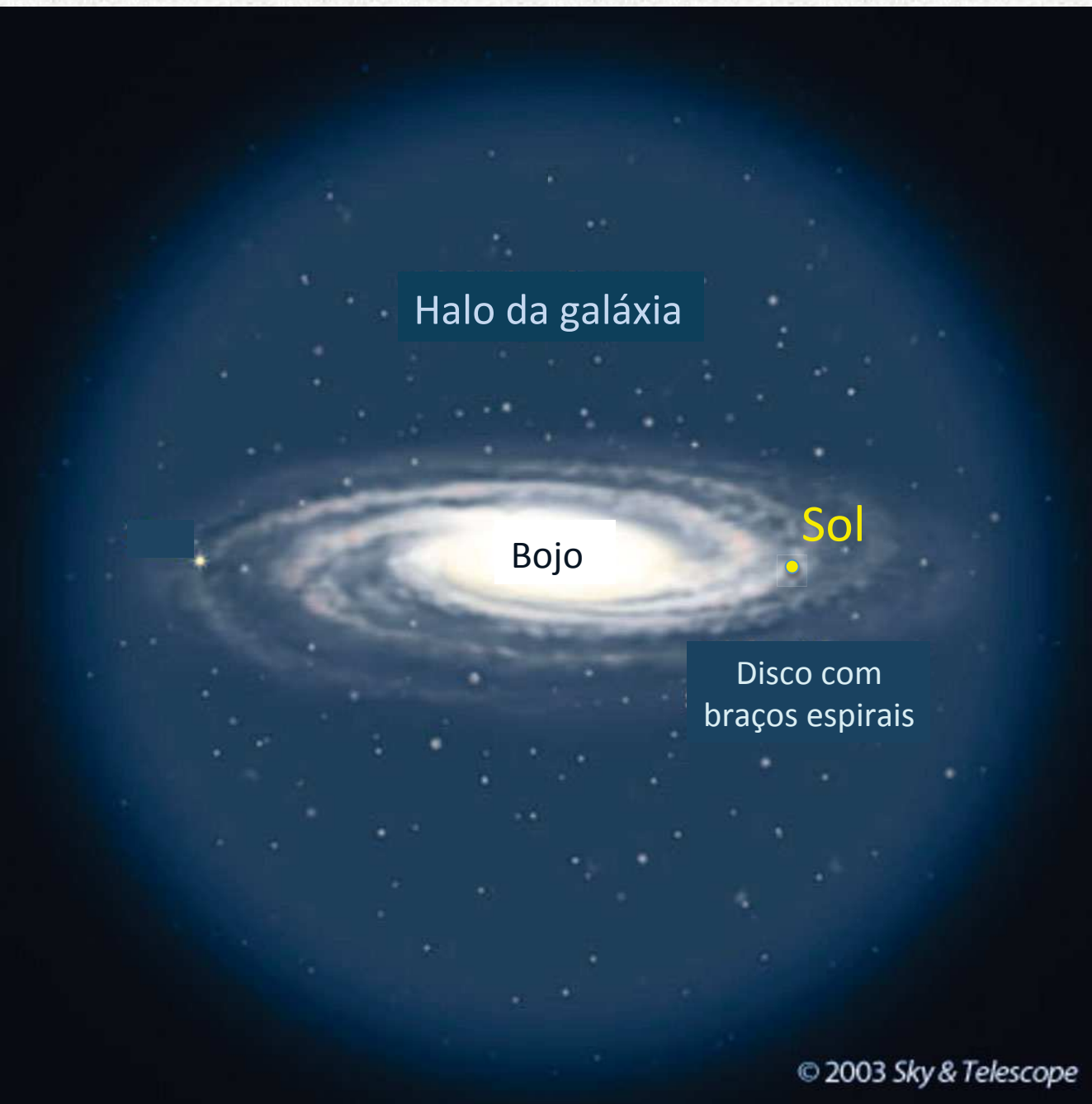
As principais componentes da Galáxia.

© Mark A. Garlick / space-art.co.uk

A Via Láctea tem cerca de 200 bilhões de estrelas.

A nossa Galáxia: um disco



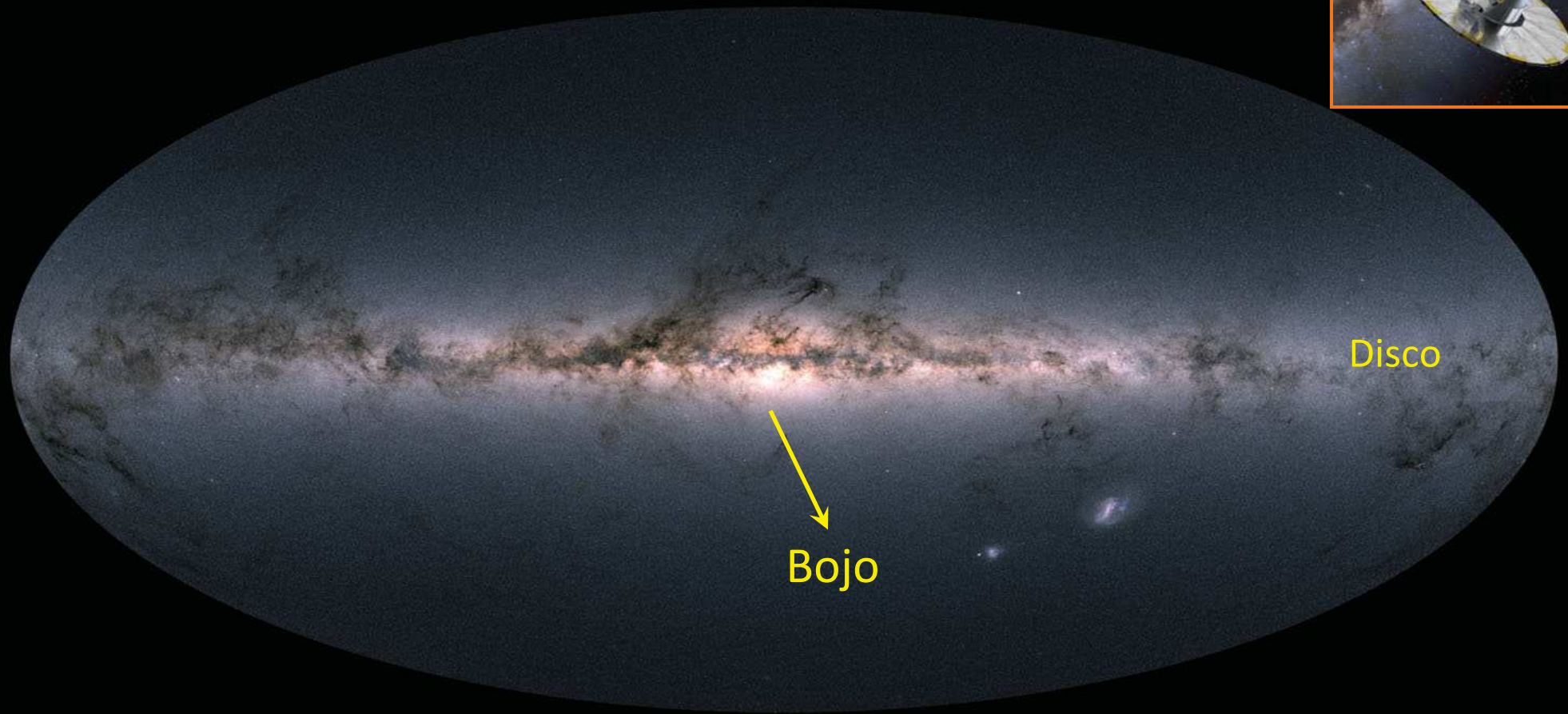


- O **bojo** é mais brilhante porque as estrelas estão mais juntas.
- O **disco** é a parte mais luminosa da Via Láctea, porque contém mais estrelas e estrelas mais jovens.
- O **halo** é onde está a maior parte da massa. Esta massa está em uma forma ainda desconhecida, a chamada “**Matéria Escura**”.
(vamos voltar a isto mais tarde)



A Galáxia vista da Terra

Imagem feita a partir do catálogo DR2 do Gaia/ESA (04/2018)
[não é uma colagem de fotos]



Cerca de 1,7 bilhão de estrelas com magnitude < 21
Note a faixa de poeira no plano do disco.

[Também é possível ver as
Nuvens de Magalhães]

O centro da Galáxia

- Constelações e estrelas mais brilhantes na região do centro Galáctico: facilmente visível no hemisfério Sul no inverno



Estrelas no centro da Via Láctea

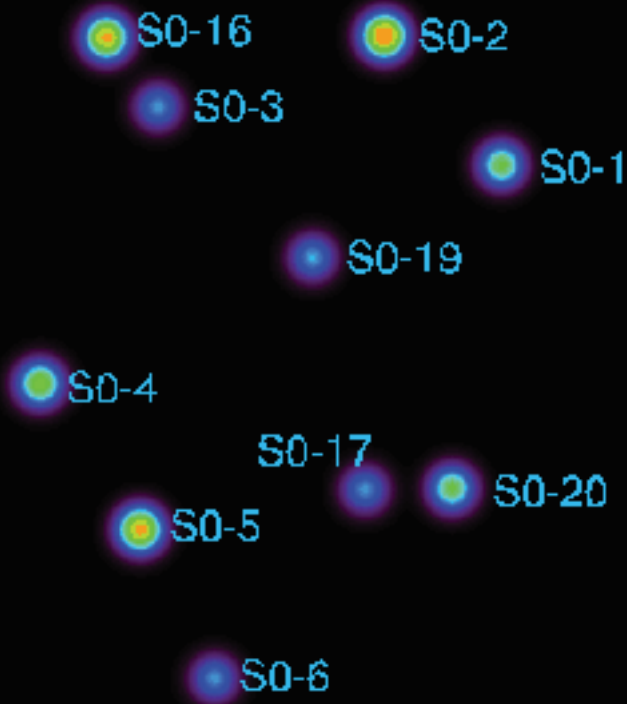


Vídeo: www.eso.org/public/news/eso0846/

- **Órbitas de 28 estrelas** no centro da Via Láctea, observadas desde 1992.

O buraco negro no centro da Galáxia

1995.50

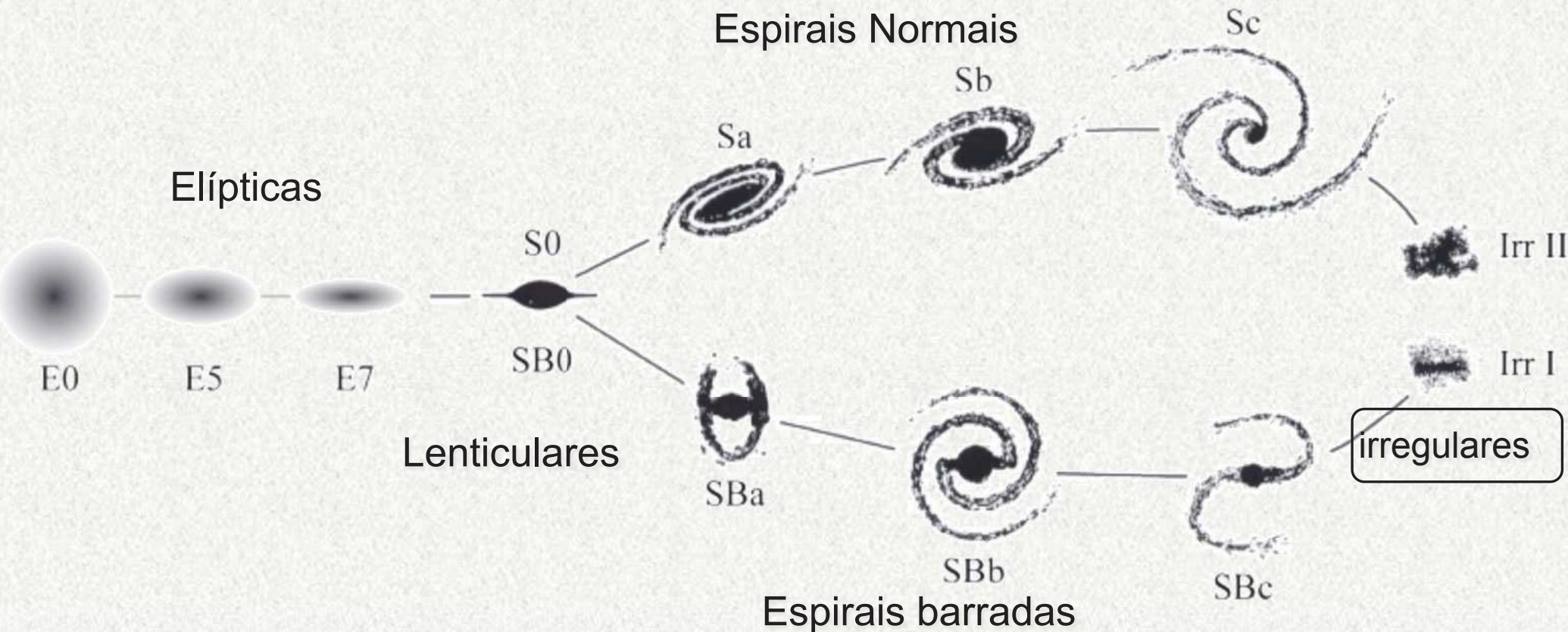


- **Órbitas de 28 estrelas** no centro da Via Láctea, observadas desde 1992.
- Há um objeto invisível no centro, com **3,5 milhões de vezes** a massa do Sol.
- A única coisa que pode ter uma massa tão grande em um volume tão pequeno é um **Buraco Negro Super Massivo**.
- Evidências de BN supermassivos em **todas** as galáxias de grande massa.

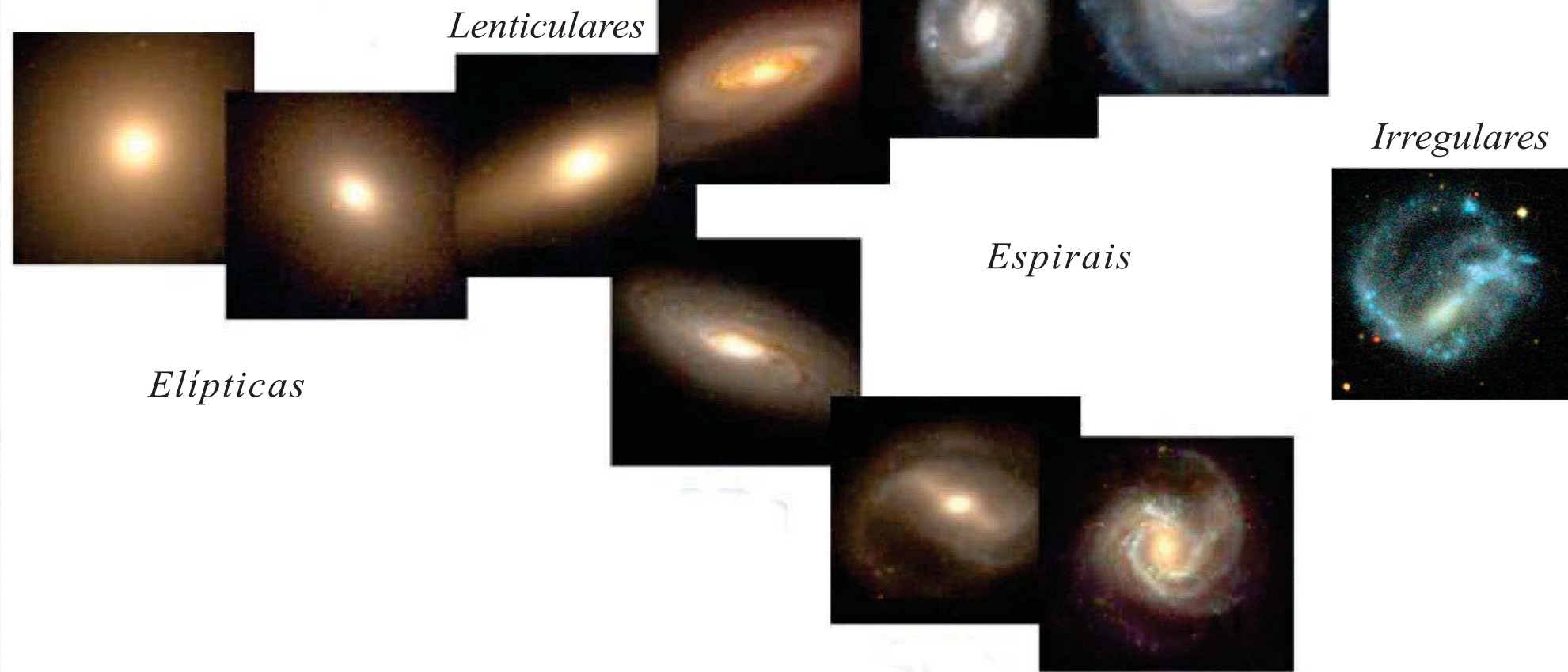
Outras Galáxias

Outras galáxias

- Classificação **morfológica** dos astrônomos Edwin Hubble (em 1926 e 1936) e Alan Sandage (em 1961).



Propriedades globais das galáxias



braços mais abertos →

galáxias mais azuis →

mais gás e poeira →

maior taxa de formação estelar →

maior razão disco/bojo →

Classificação morfológica e cor-luminosidade

- Baseada no óptico (banda B ou V).
- Galáxias brilhantes.
- Galáxias relativamente próximas.
- Em nossa vizinhança, ~2 bilhões de anos-luz temos:
 - 70% Espirais;
 - 14% Lenticulares;
 - 10% Elípticas;
 - 6% Irregulares.
- A grande maioria das galáxias são anãs.
- Forma (morfologia) depende do filtro de observação.

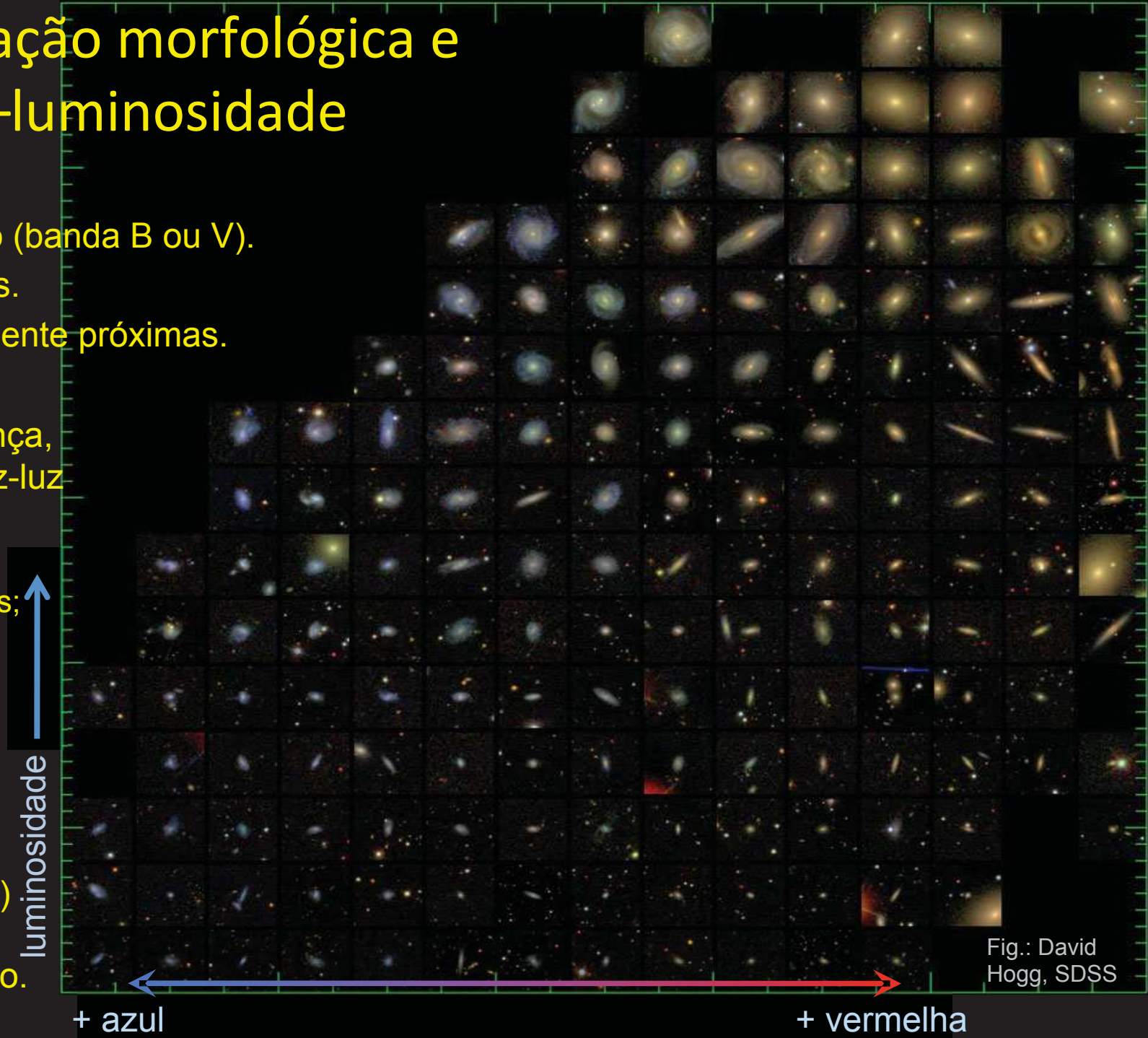


Fig.: David Hogg, SDSS

Galáxias elípticas

Galáxias com aparência de uma esfera achatada sem muitas estruturas visíveis, pouco gás, estrelas velhas e cor avermelhada.

M87

NGC 4476

NGC 4478

NGC 1379

NGC 3193

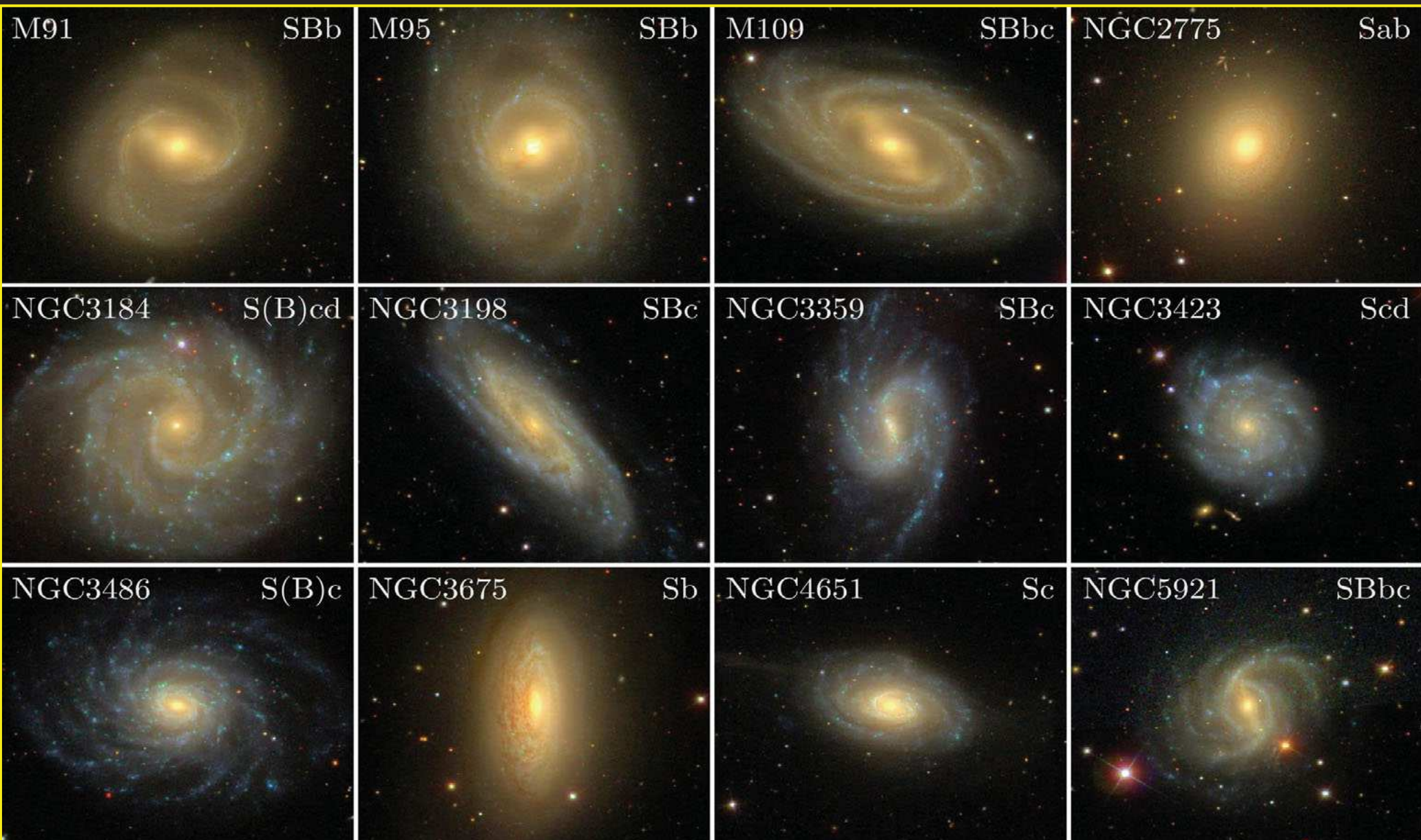
NGC 5322

NGC 1426

NGC 720



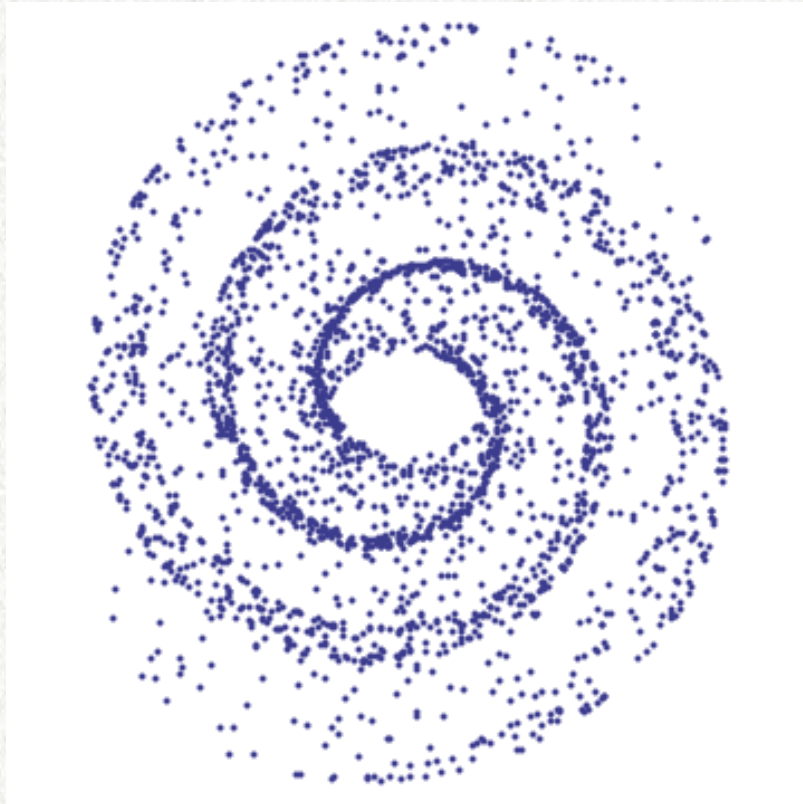
Galáxias Espirais



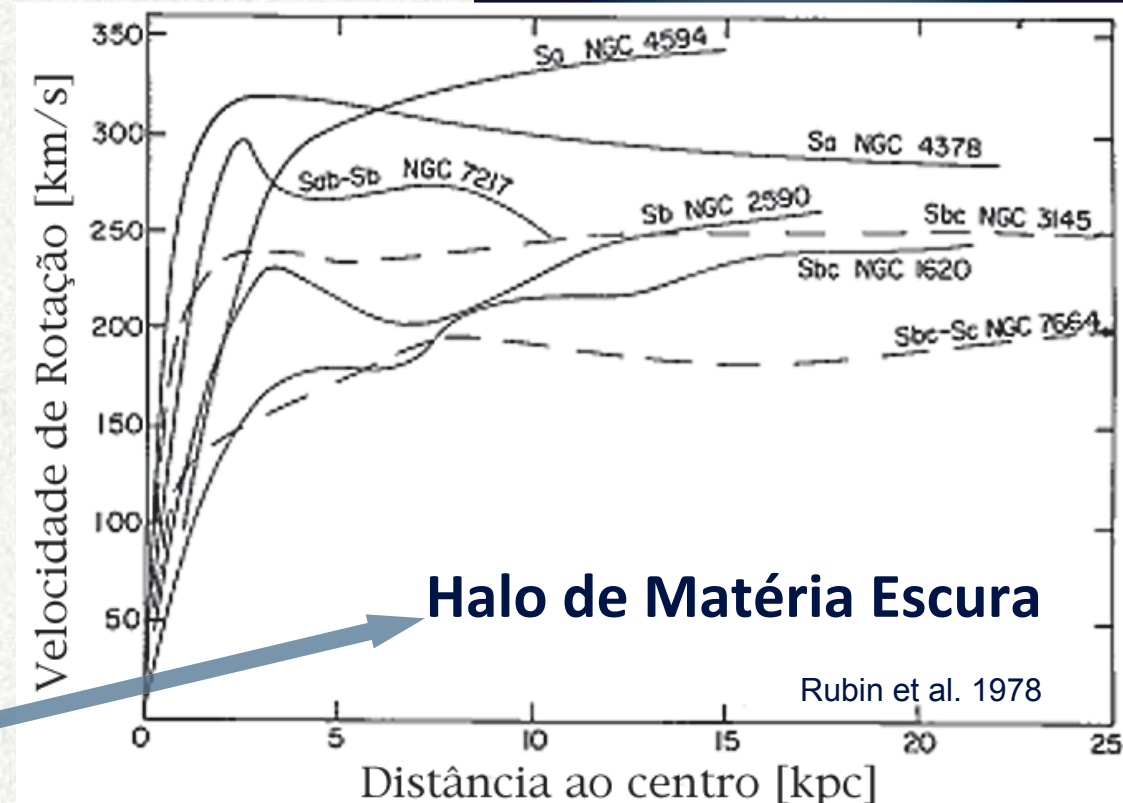
Rotação das galáxias espirais:

Matéria Escura

- Movimento das estrelas reflete a quantidade de massa das galáxias.



Massa aumenta para fora da galáxia, mas a luminosidade diminui.



Matéria Escura

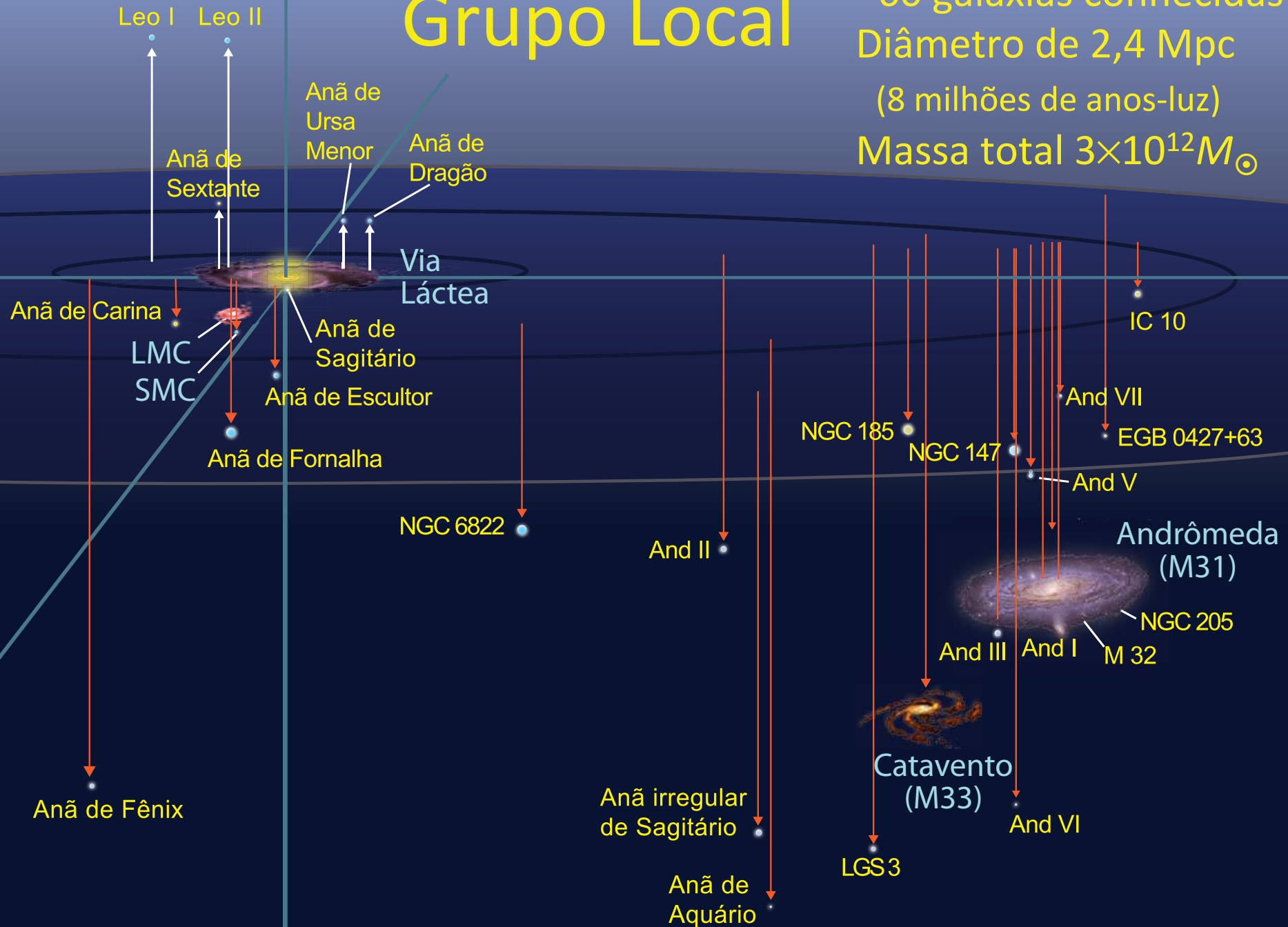
- O que pode ser a matéria escura?
- Gás (atômico ou molecular) que emite tão pouca radiação que não podemos vê-lo?
- Talvez as leis da dinâmica dos corpos (leis de Newton) não sejam válidas?
- Material “exótico” (não é composto de prótons e nêutrons) que interage apenas através da gravitação?



Distribuição de galáxias no Universo

Grupo Local

~60 galáxias conhecidas
Diâmetro de 2,4 Mpc
(8 milhões de anos-luz)
Massa total $3 \times 10^{12} M_{\odot}$



Galáxias vizinhas



- Imagem de 2 galáxias satélites:
A Grande e a Pequena Nuvem de Magalhães

M31, mais conhecida como galáxia de **Andrômeda**, é a maior do Grupo Local. Nesta imagem podemos distinguir 2 de suas satélites, M32 e NGC 205.

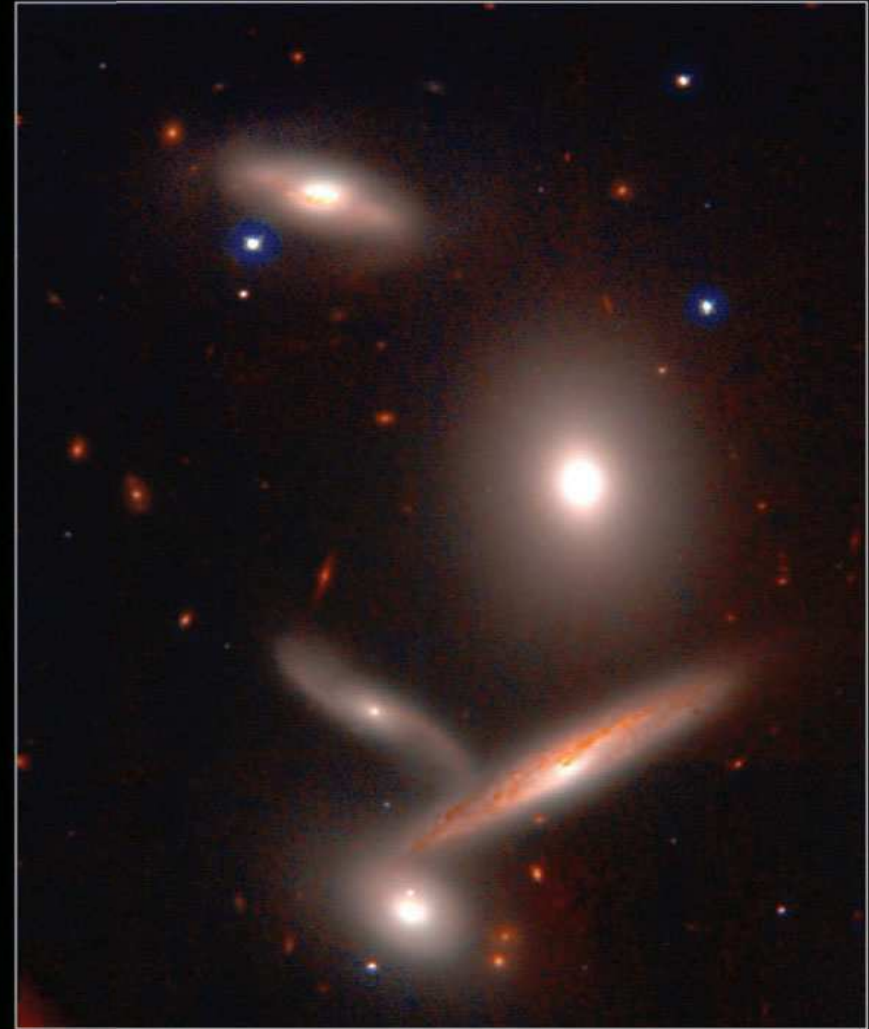
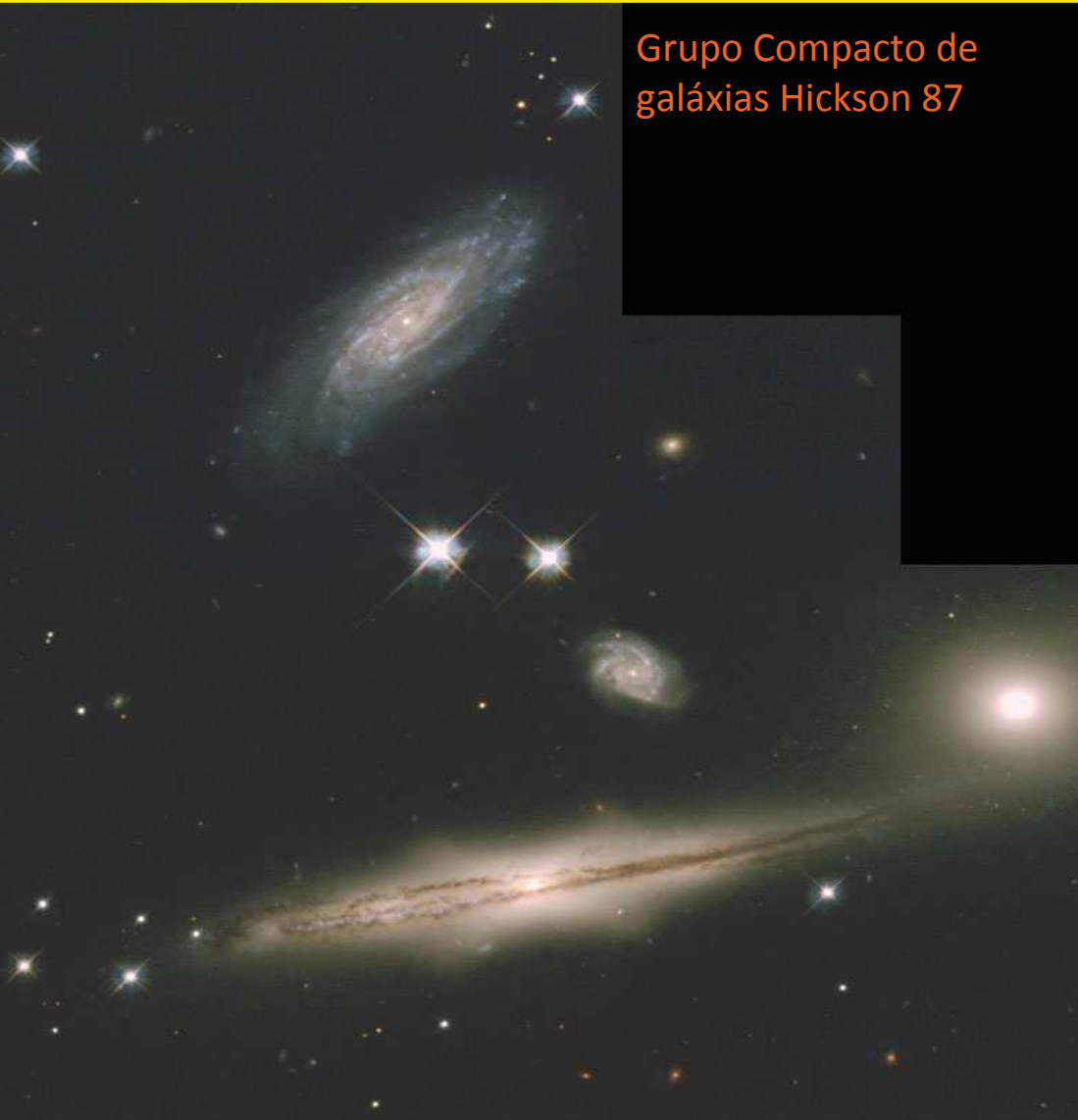
M31 está a 2,4 milhões de anos-luz da Via Láctea e se aproxima a 120 km/s



M33, conhecida como “Catavento”, é uma galáxia espiral na constelação do **Triângulo**. M33 é uma galáxia satélite de Andrômeda.

Grupos de galáxias

- A maior parte das galáxias estão em grupos.
- 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 de 10 até 16 milhões de anos-luz.
- Contêm entre centenas a milhares de galáxias.
 - Mas apenas cerca de 7% das galáxias do universo estão em aglomerados.

Imagem do aglomerado de Coma
Berenice, distância ~100 Mpc

Composição de um Aglomerado de galáxias

~ 2% de estrelas (nas galáxias e no meio intra-aglomerado [luz difusa]);

~ 13% de plasma quente (gás intra-aglomerado);

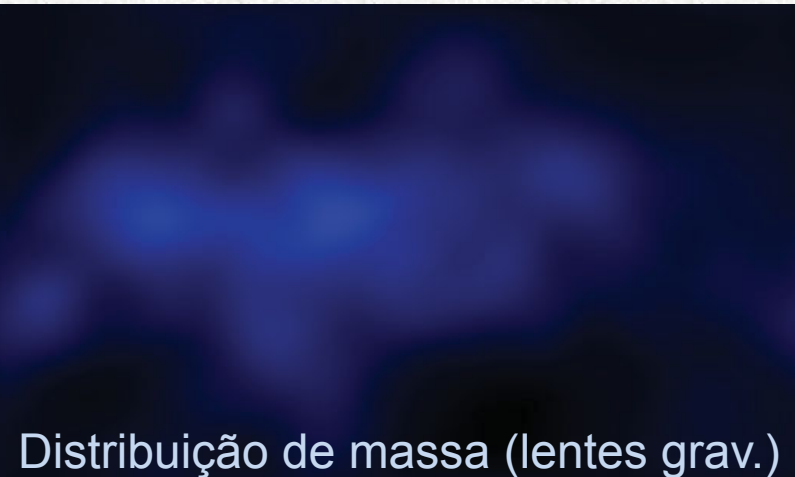
~ 85% de matéria escura



Imagem óptica (CFHT)



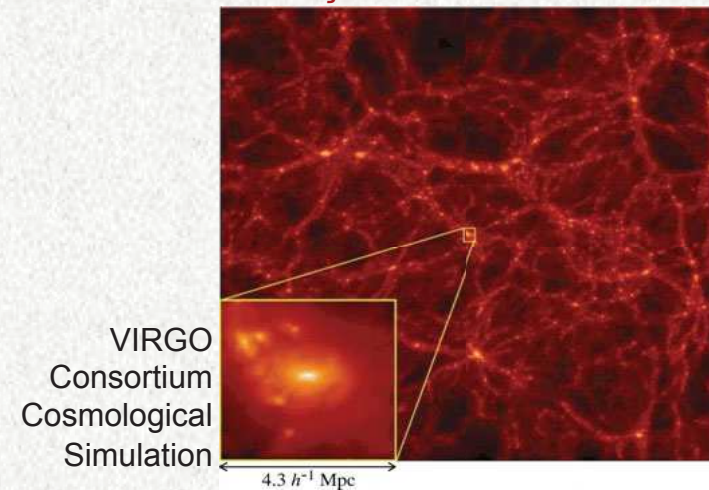
Gás (imagem em raios-X; Chandra)



Distribuição de massa (lentes grav.)

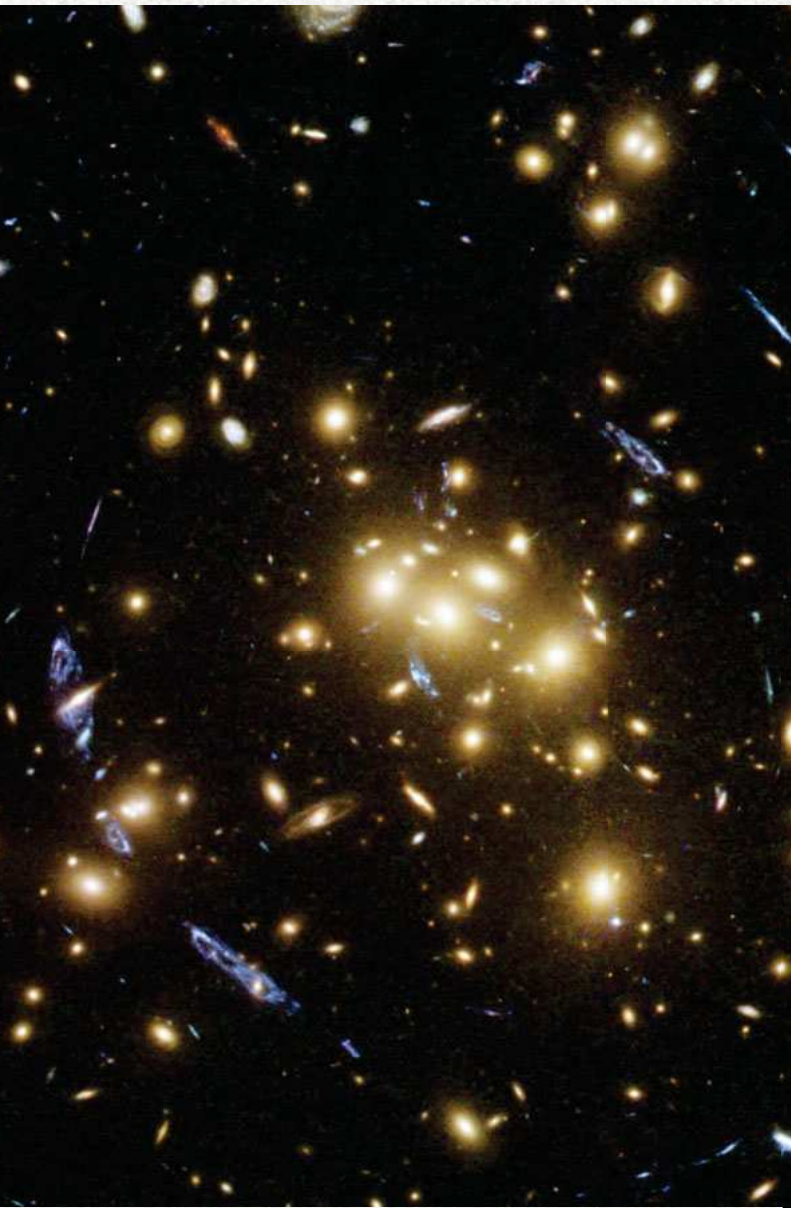
Abell 520
(Aglomerado “*Train Wreck*”):
NASA, ESA, CFHT, CXO,
Jee M.J. & Mahdavi A.

Simulação de Matéria Escura

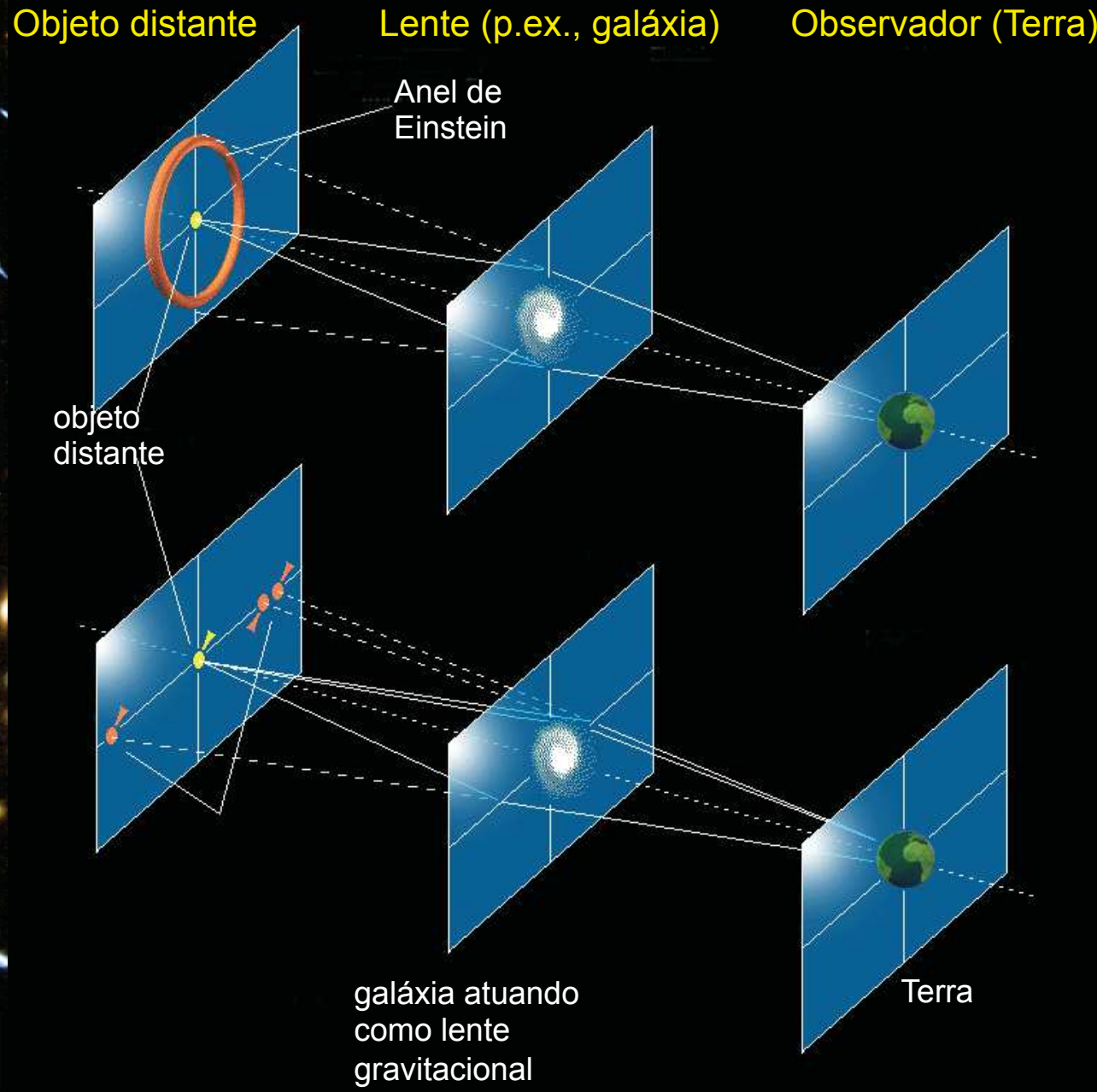


VIRGO
Consortium
Cosmological
Simulation

Lentes Gravitacionais



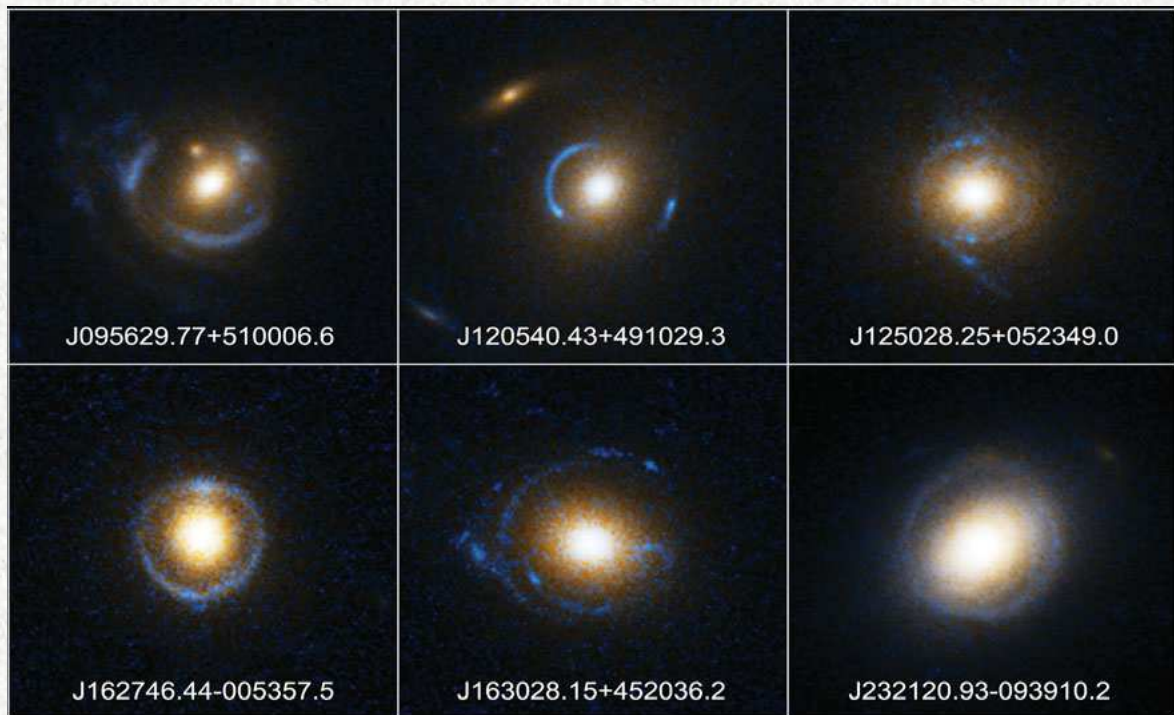
Aglomerado CL0024+1654, imagem do HST,
H. Lee & H. Ford (Johns Hopkins U.)



Anel de Einstein e imagens múltiplas



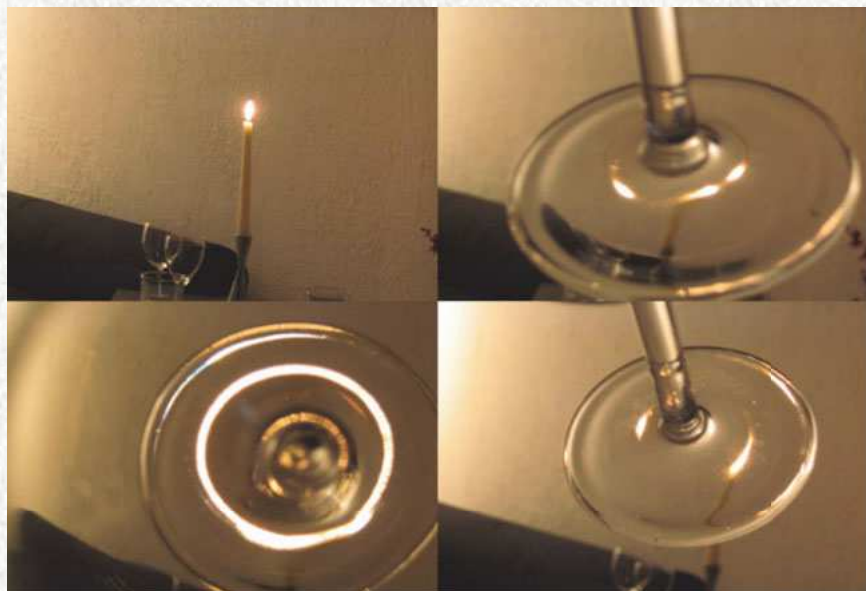
ESA/Hubble & NASA



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.

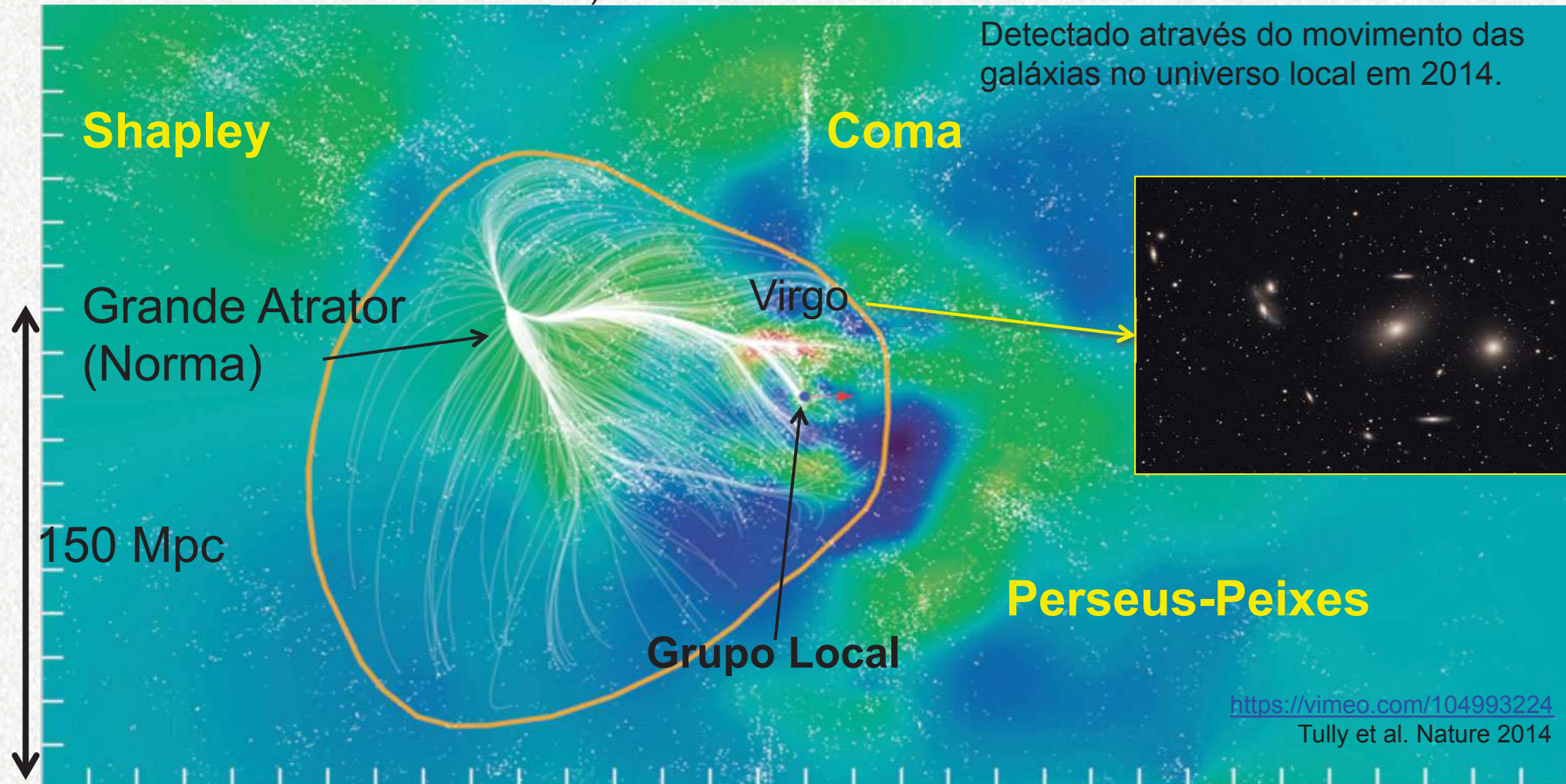
“Modelo” de lente usando uma taça e uma vela.



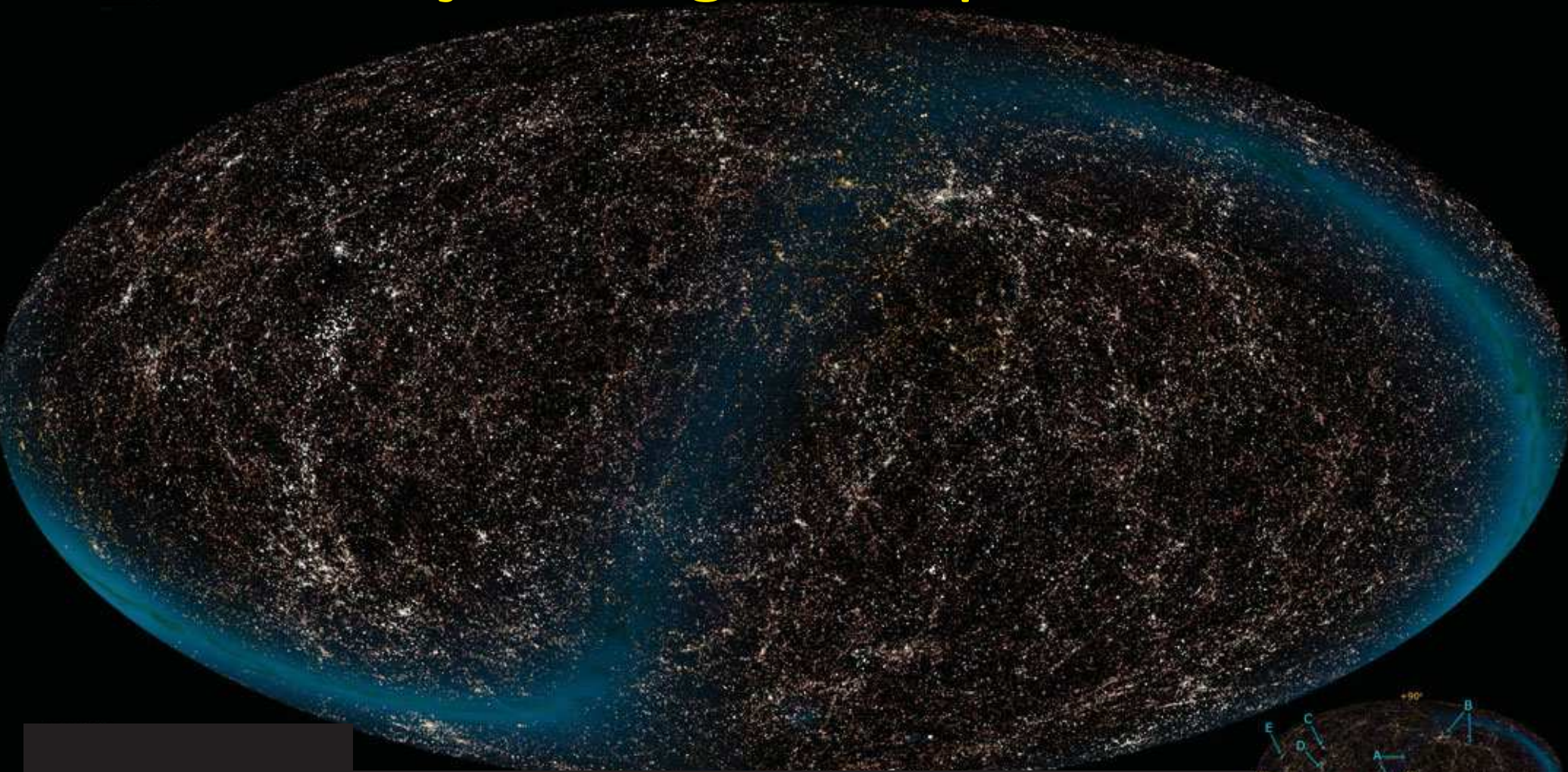
Laniakea: super-aglomerado local

(céu imenso 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)



Distribuição de galáxia pelo universo



- Planisfério com a posição de galáxias próximas
- Cada ponto representa uma galáxia
- Distribuição em filamentos



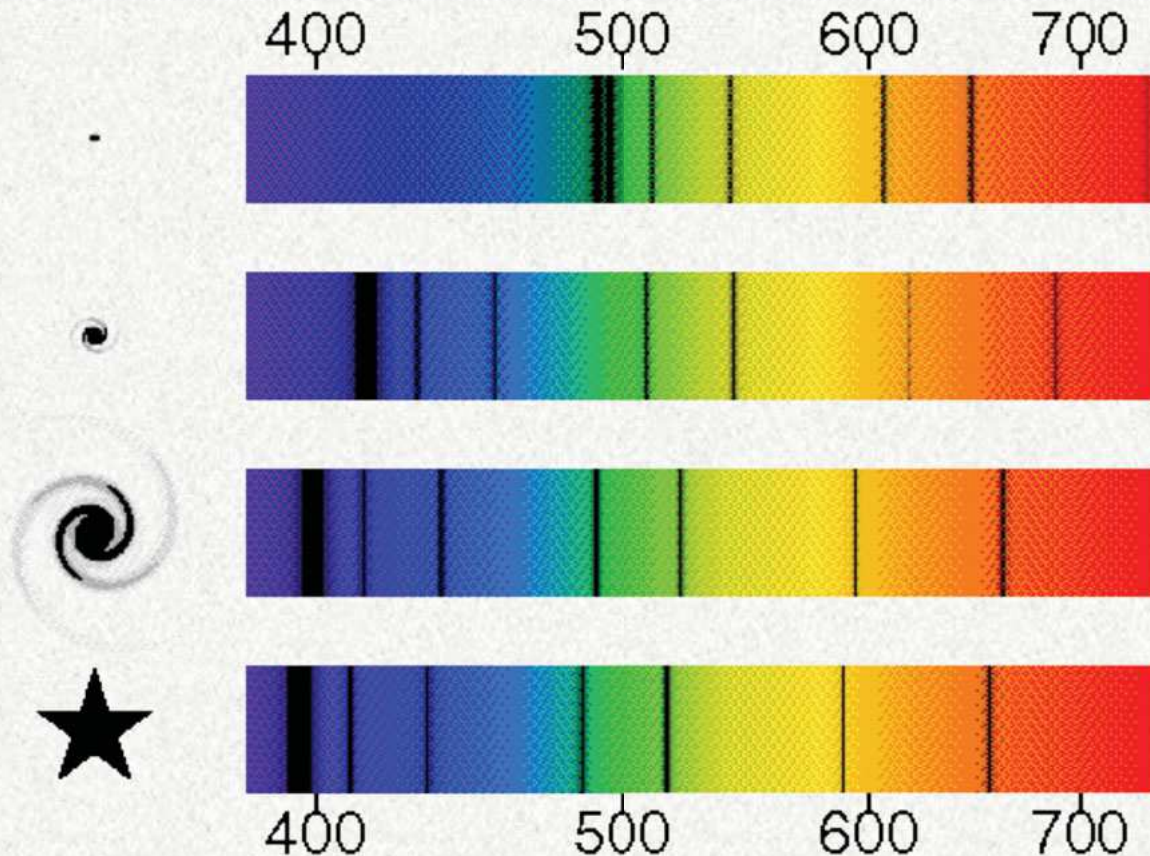
Medindo distâncias extragalácticas

- Lei de Hubble (1929): $V = H_0 \times D$
- Redshift (desvio para o vermelho): $z = \Delta\lambda / \lambda$.
- Para baixa velocidade: $V = c z$; ($z \ll 1$)

- $D[\text{Mpc}] = 4283 \times z$
(c/H_0)

- z medido através da espectroscopia.

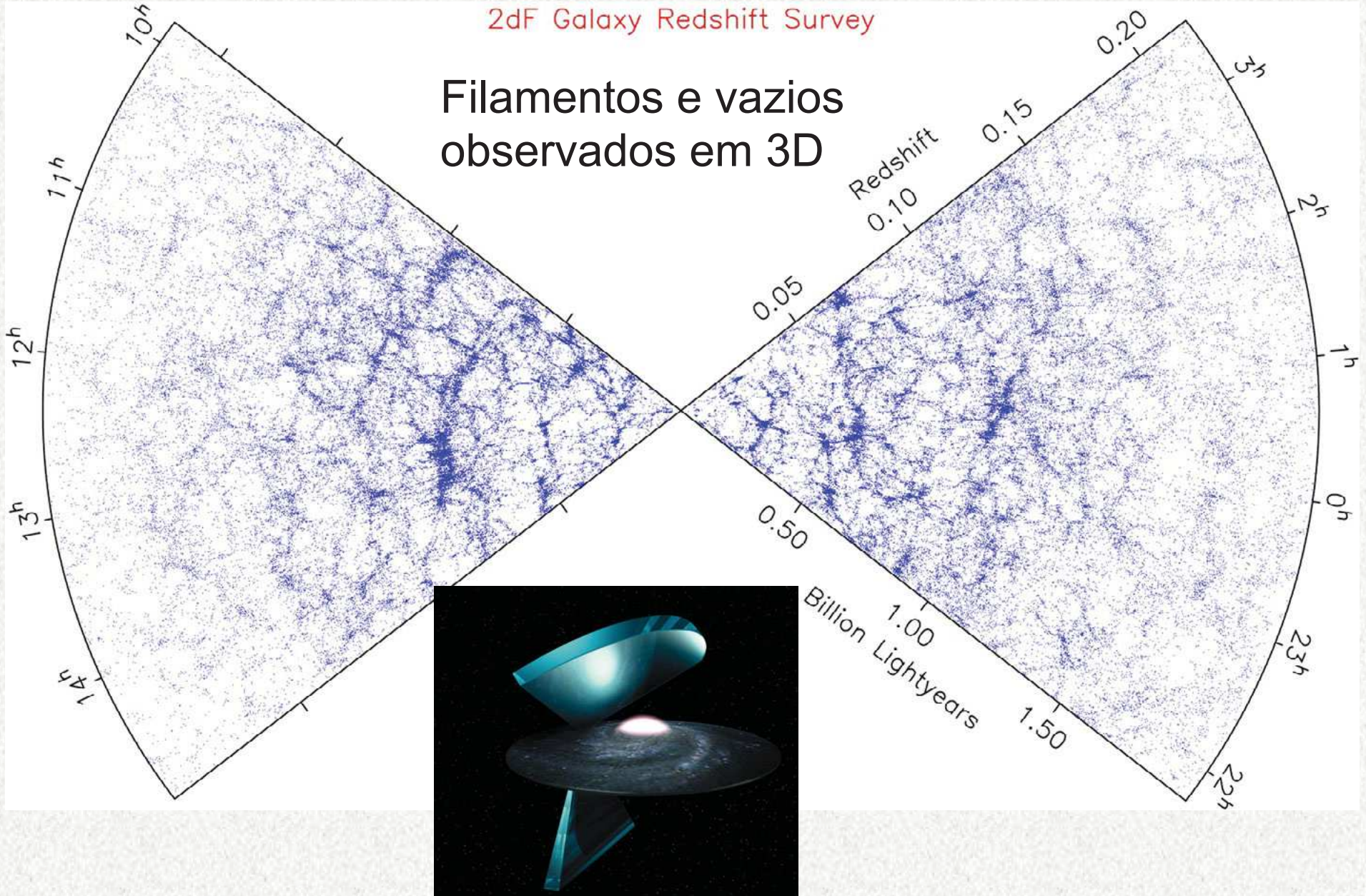
(1 Mpc = 10^6 pc
1 pc = 3,26 anos-luz)



Distribuição de galáxia pelo universo

2dF Galaxy Redshift Survey

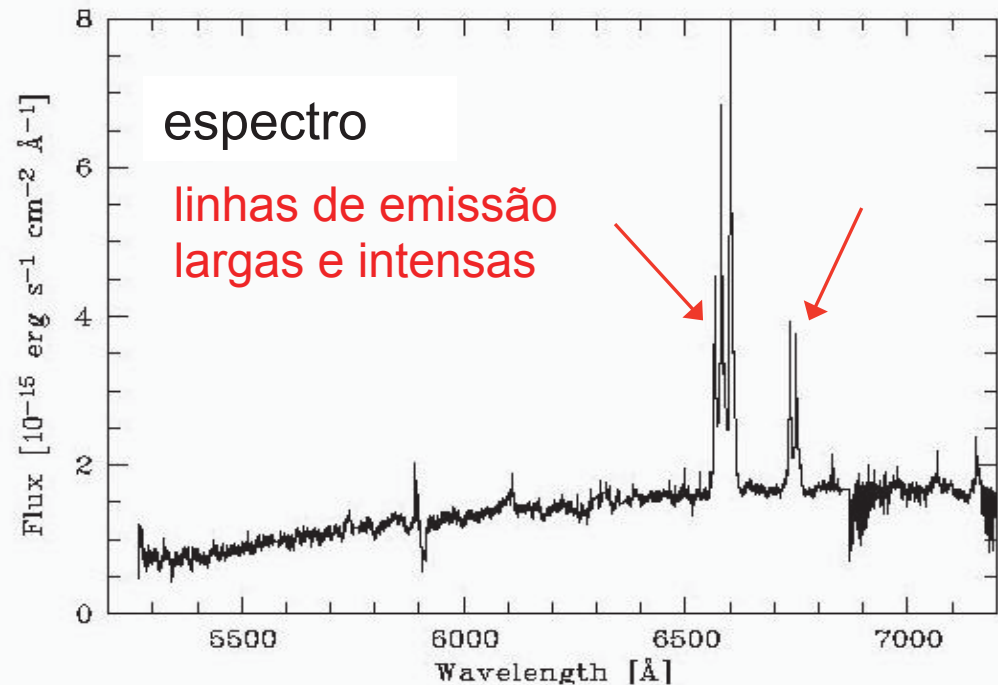
Filamentos e vazios observados em 3D



Galáxias com núcleo ativo

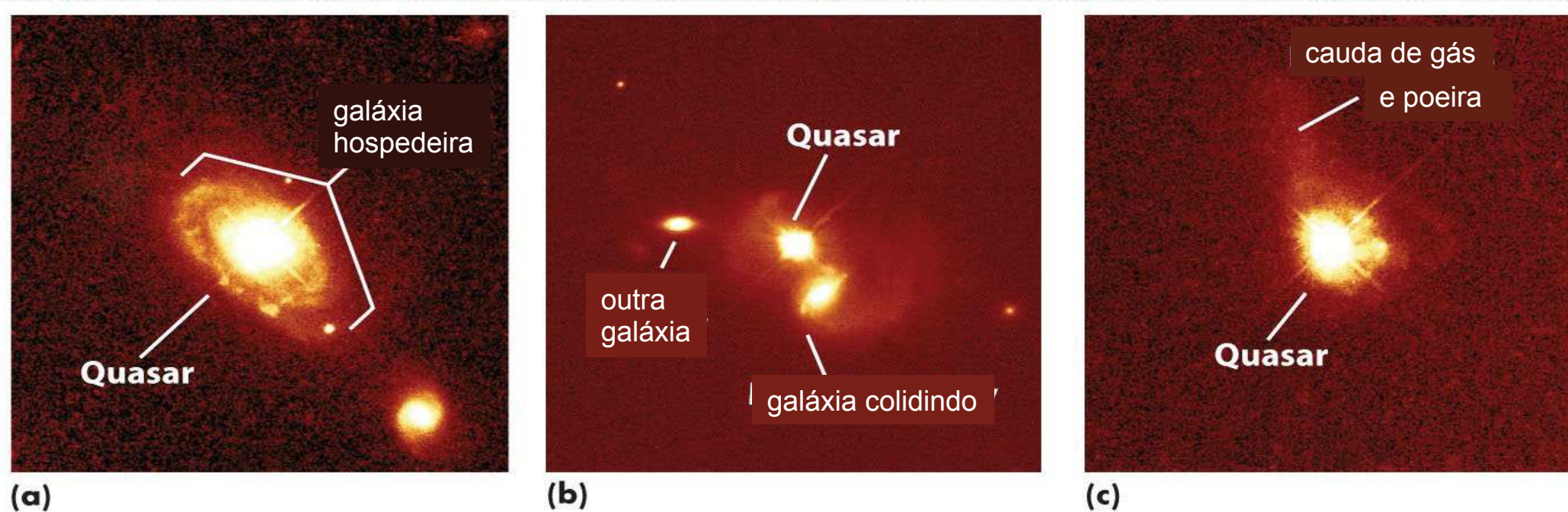
Aparência normal, espectro peculiar

(mas a aparência também pode ser peculiar)



- Mesmo com espectro peculiar, a galáxia pode apresentar uma morfologia normal.
 - apenas o núcleo é mais brilhante que o normal.

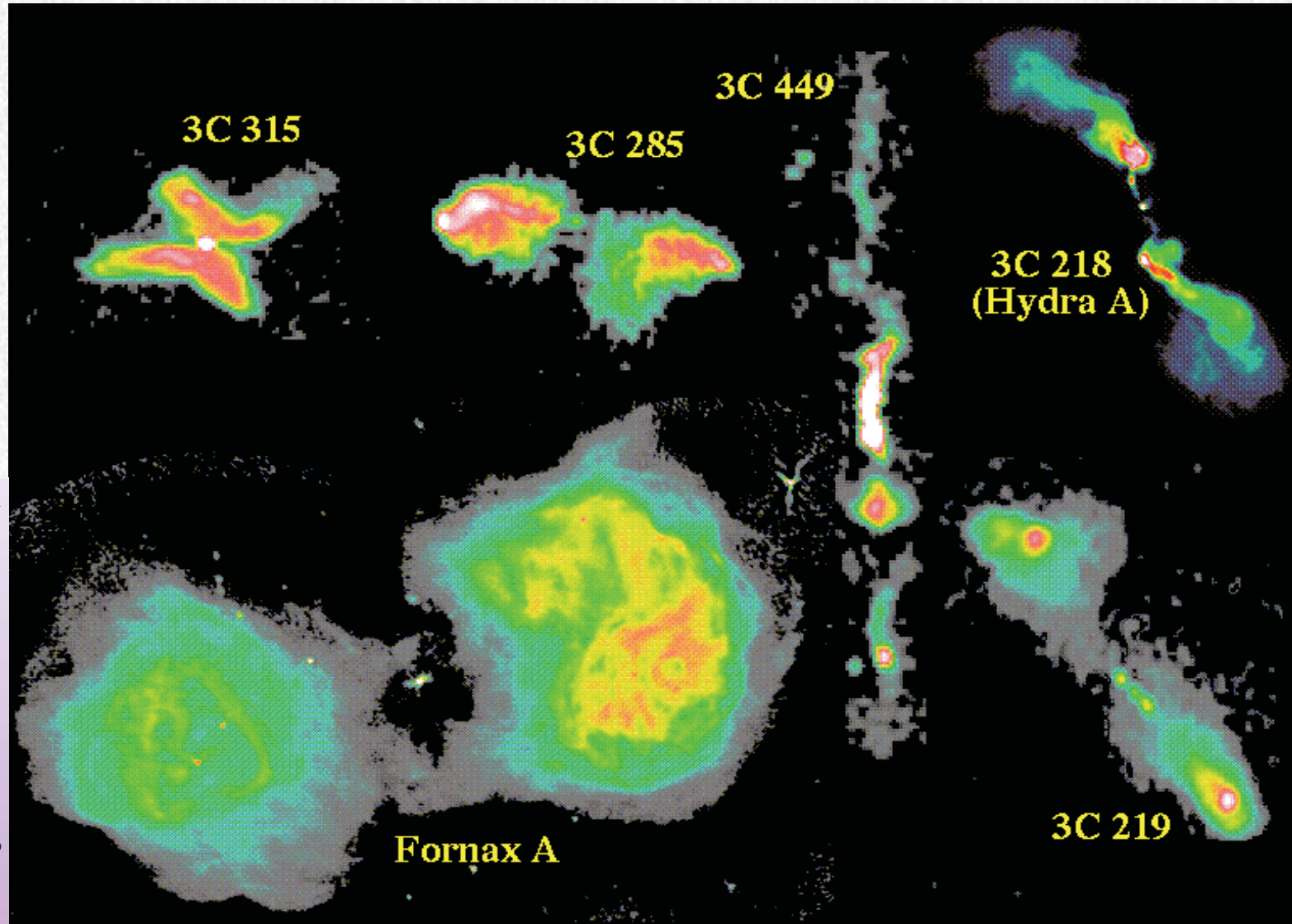
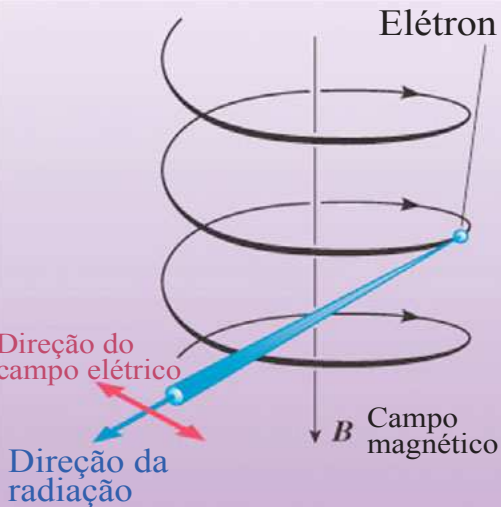
Quasar ou QSO (*Quasi Stellar Object*)



- Natureza dos Quasares muito discutida até as primeiras imagens do telescópio espacial Hubble a partir de 1994.
- Apenas com ótima qualidade de imagem podemos distinguir a galáxia que hospeda o núcleo ativo (isto é, um Quasar).
- A luminosidade do núcleo é maior ou igual que todo o resto da galáxia: a galáxia fica ofuscada.

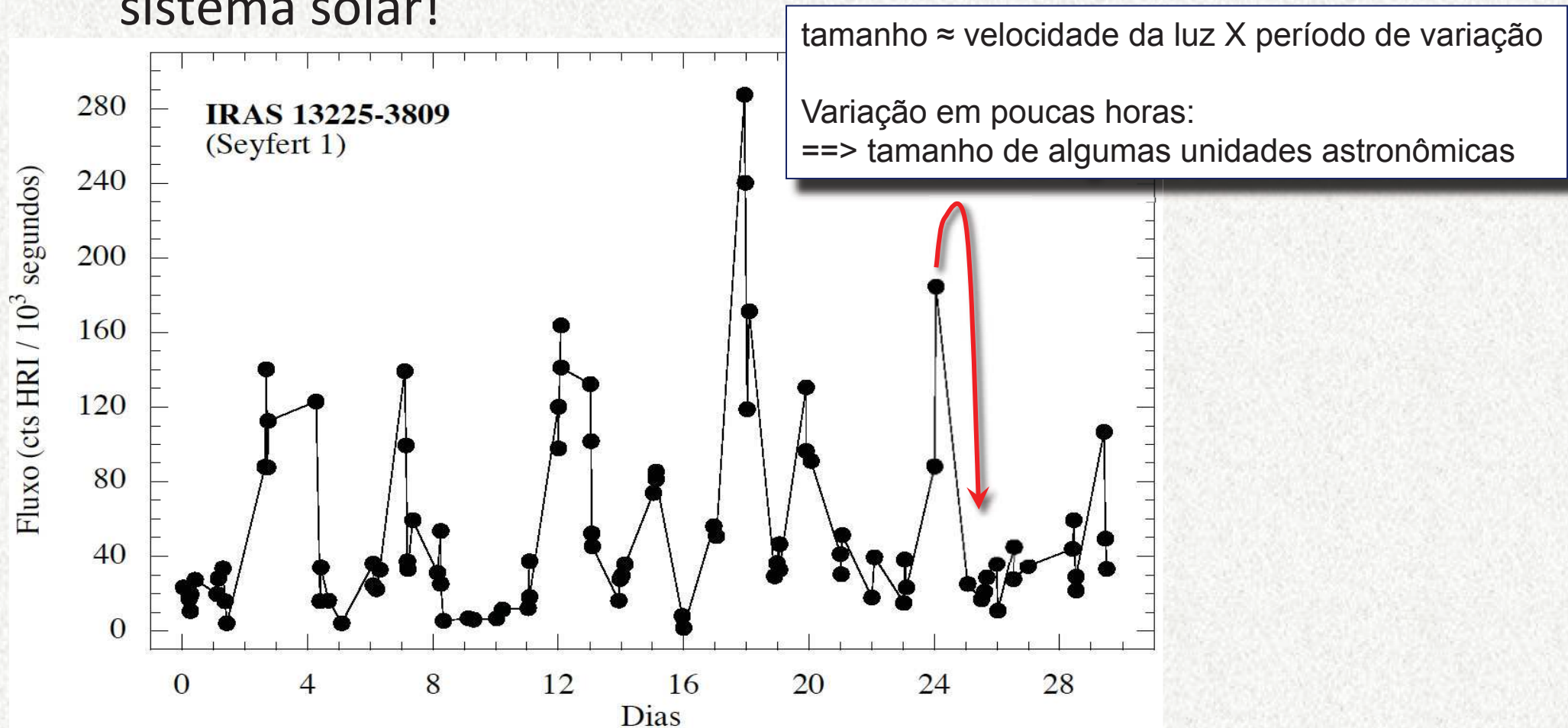
Radiogaláxias

- Estão associadas às galáxias elípticas gigantes.
- A emissão rádio apresenta diversas morfologias.
- Fonte de energia está no núcleo.
- Emissão por mecanismo Síncrotron.



O motor dos núcleos ativos

- Núcleos ativos apresentam variabilidade na luminosidade.
 - período da variação → dimensão da fonte.
- Variação de horas corresponde a uma fonte do tamanho do sistema solar!



O motor dos núcleos ativos

- Luminosidade de Quasares está entre 10^{10} a 10^{13} luminosidades solares.
- Esta energia é produzida em um volume menor do que o sistema solar.

- Queda de matéria em um buraco negro supermassivo.

- O acréscimo de 1 massa solar/ano gera 10^{39} W ($\sim 10^{12}$ luminosidades solares).

– A luminosidade total da Galáxia é $\sim 3,5 \times 10^{10} L_{\odot}$.

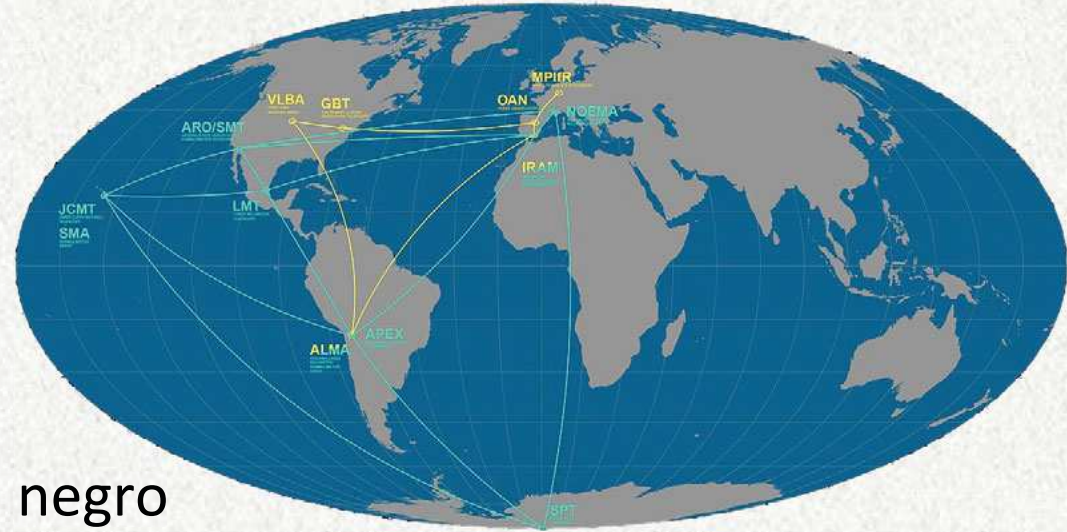
A fonte é a energia potencial gravitacional da matéria que cai no buraco negro.

Muito mais eficiente que reações nucleares.

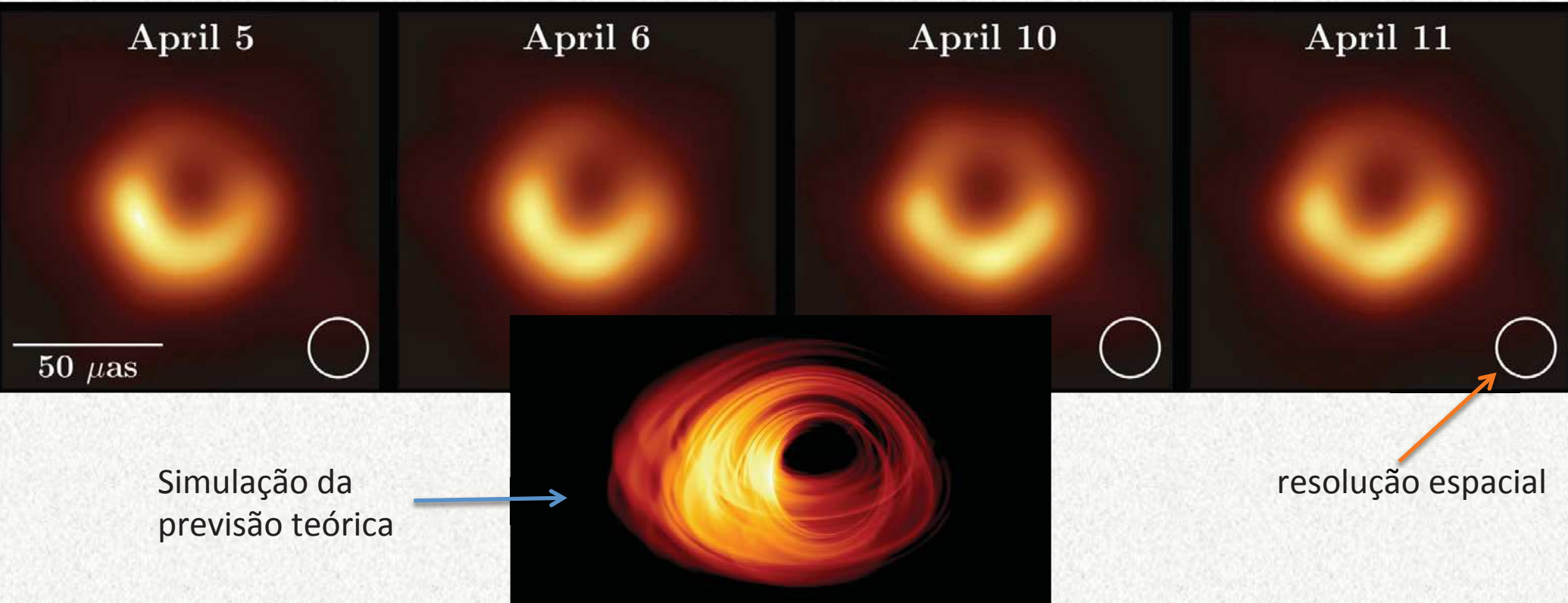


Buracos negros supermassivos

- Massa $> 10^6$ massas solares.
- Primeira imagem obtida com **Event Horizon Telescope (EHT)** do buraco negro de M87 ($6,5 \times 10^9 M_{\odot}$):

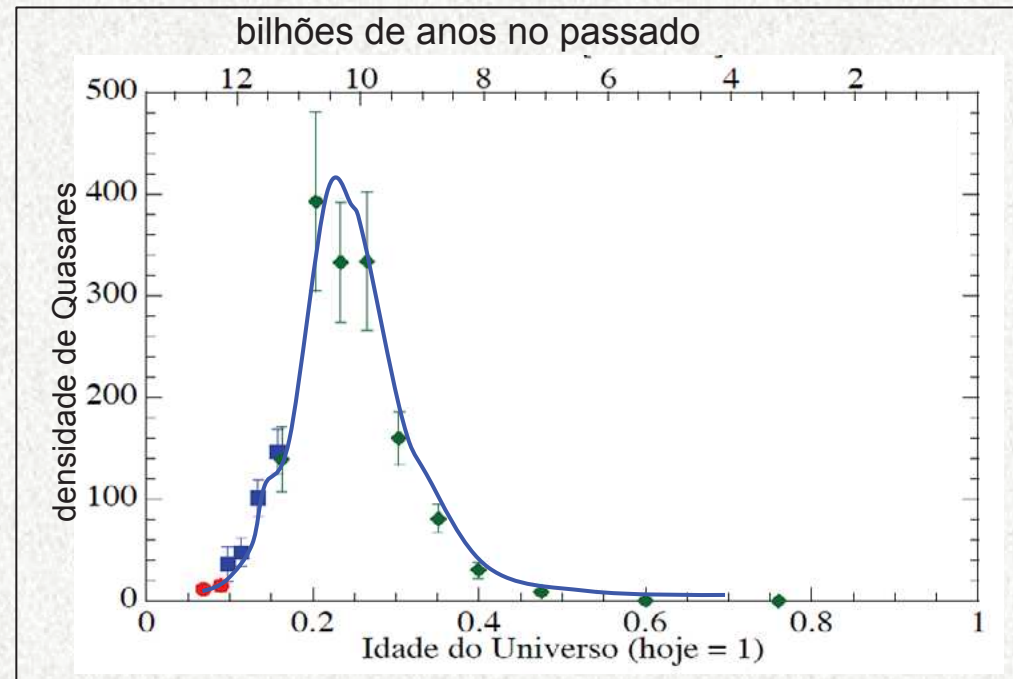
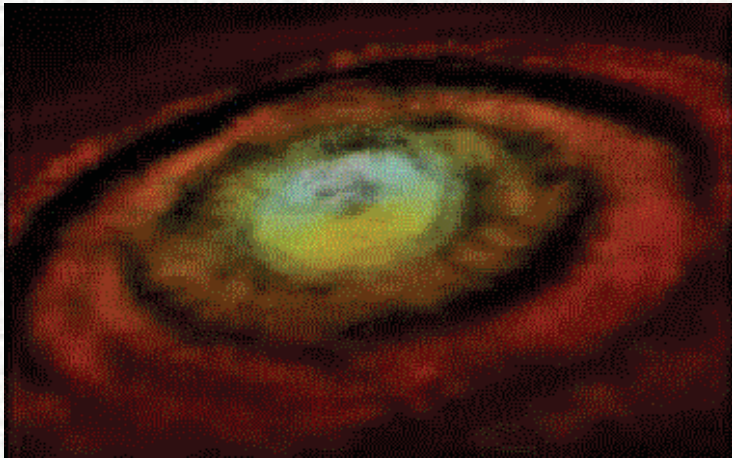


<https://eventhorizontelescope.org>



Tempo de vida de núcleos ativos

- Com o tempo, esgota-se o combustível do núcleo ativo.
 - A galáxia deixa de ter um núcleo ativo.
 - Duração $\sim 10^8$ anos.



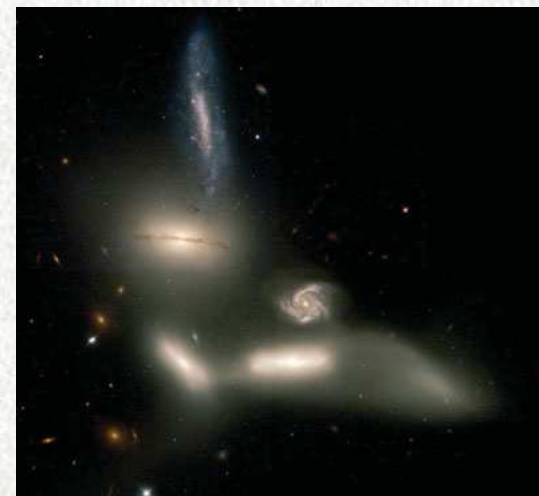
- Na Via Láctea há um buraco negro supermassivo no centro.
 - possivelmente já passou por uma fase de núcleo ativo.
- Uma galáxia pode voltar a ter um Quasar no núcleo quando “canibaliza” uma outra galáxia rica em gás ➔ **colisões entre galáxias.**

Galáxias em colisão



Dificuldades teóricas e observacionais

- Sistema gravitacional de muitos corpos.
- Tratamento do gás (hidrodinâmica).
- Formação estelar e explosões de Supernovas.
- Observamos apenas uma projeção.
- Observamos apenas um “instantâneo” do evento.



alphacrucis: 2304 processadores

alphacrucis: 2304 processadores

Super computador para cálculo numérico no IAG



fotos: Paulo Parizade

Simulação de uma colisão de galáxias



NGC 2326

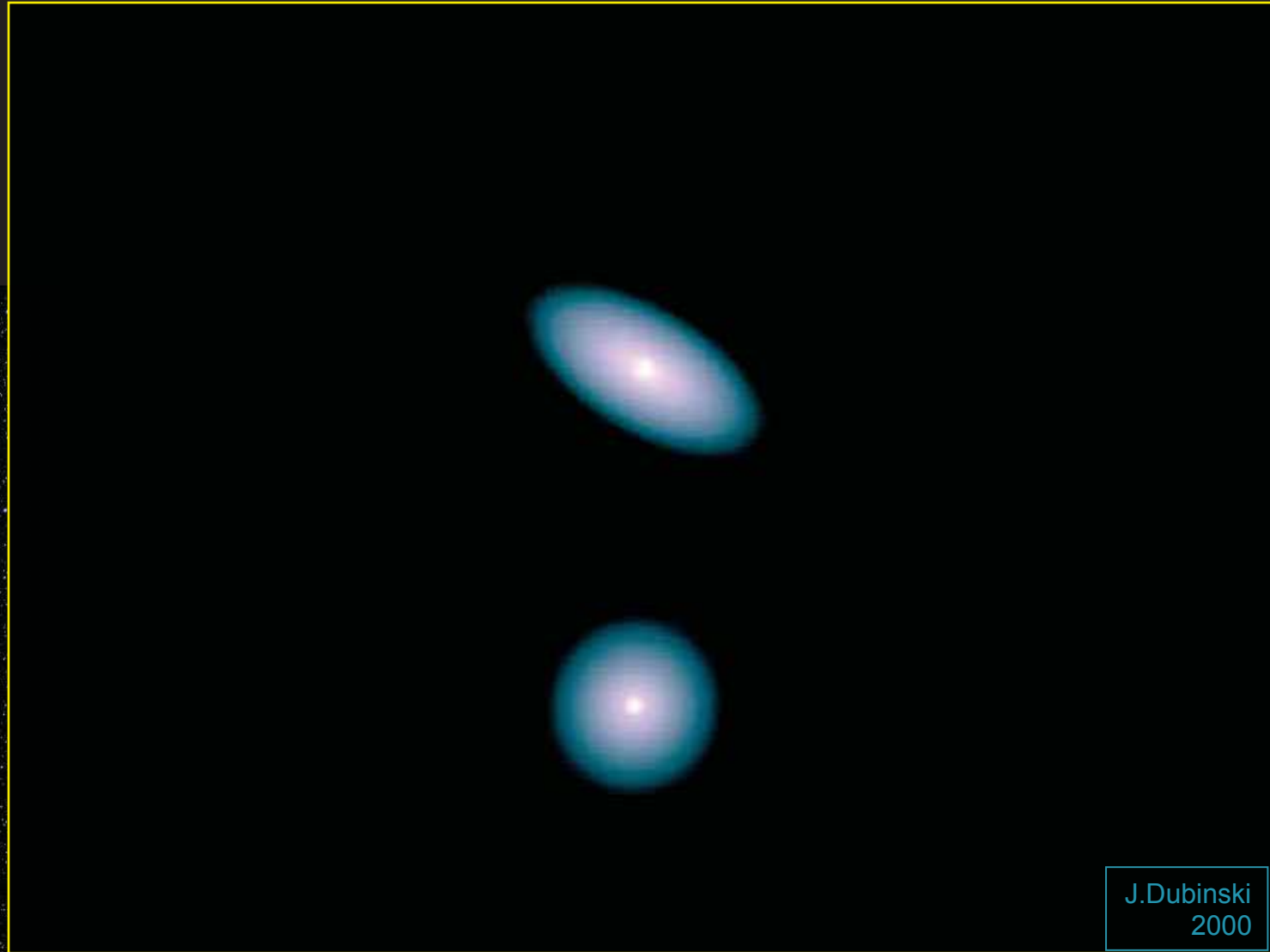


Simulação de Volker Springel, MPE, Alemanha

Via Láctea e M31: uma colisão no futuro

Entre 3 a 4 bilhões de anos no futuro, nossa Galáxia deve colidir com a galáxia de Andrômeda.

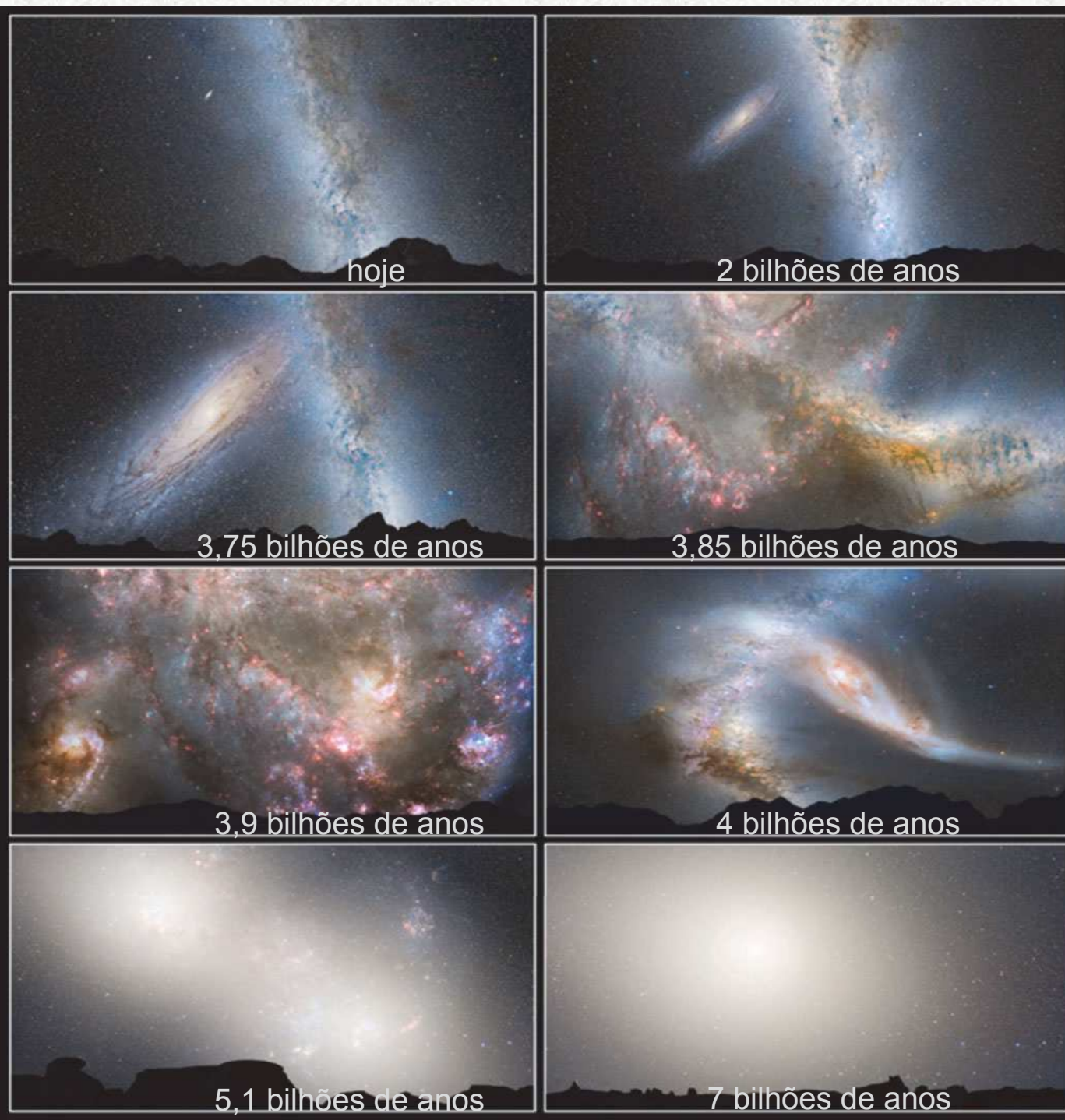
Provavelmente nenhuma estrela baterá em outra, mas novas estrelas surgirão e o resultado final será uma galáxia elíptica gigante



Via Láctea e M31: uma colisão no futuro?

- Como a colisão entre a Via Láctea e M31 poderia ser vista da Terra.
- Estas imagens são extremamente especulativas, provavelmente a Terra não vai mais existir nas etapas finais da fusão entre estas 2 galáxias.
- Além disto, a trajetória do Sol é imprevisível em um intervalo de tempo tão grande.

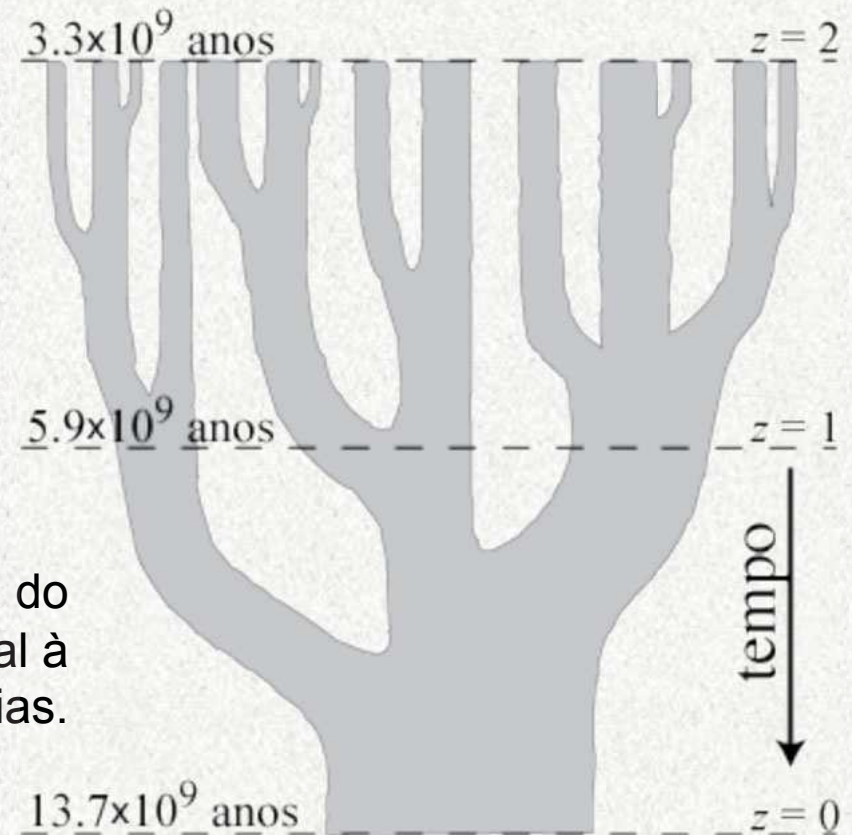
www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/milky-way-collide.html
(ESA; Z. Levay, R. van der Marel, STScI; T. Hallas, A. Mellinger)



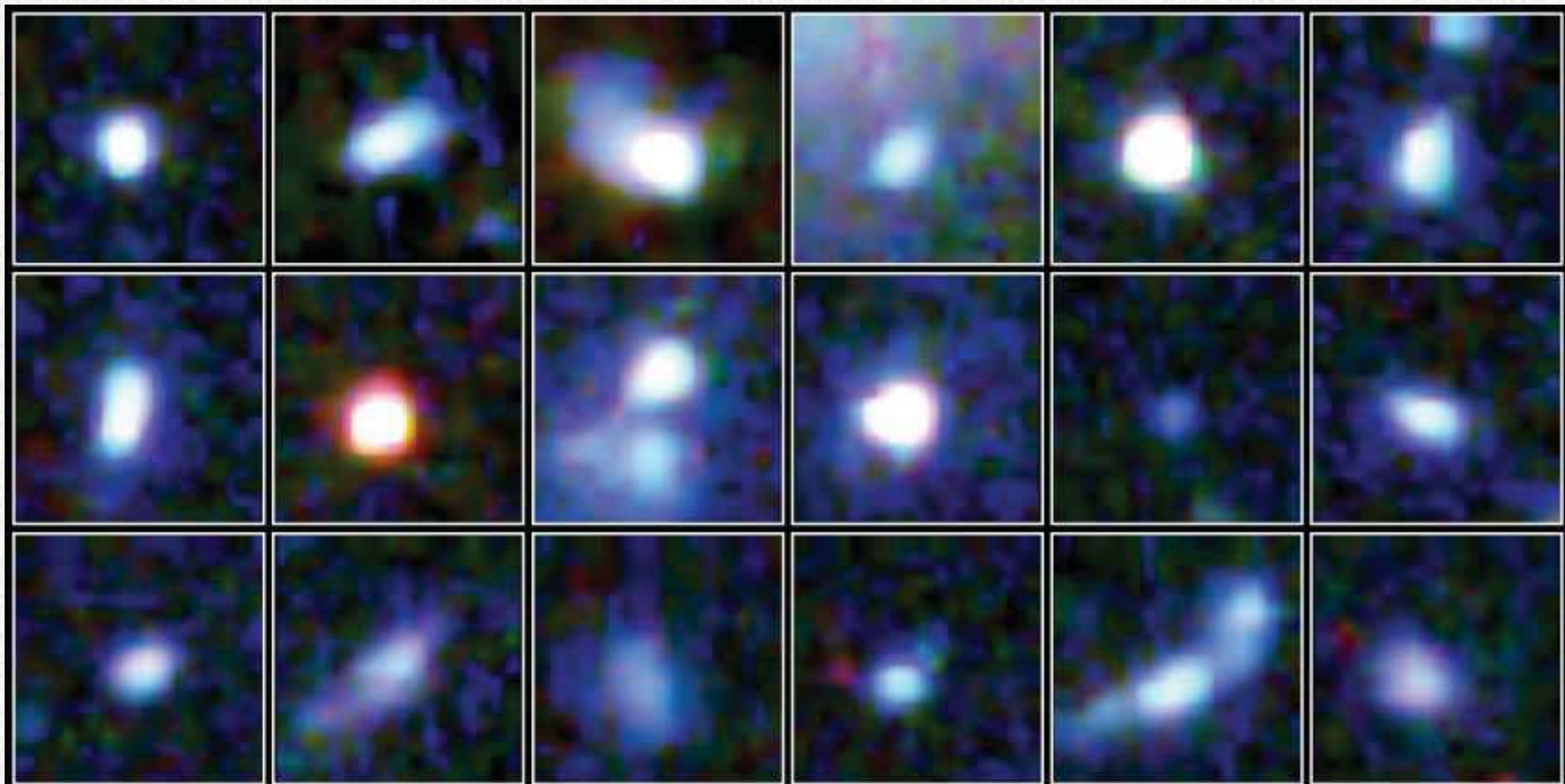
Formação de galáxias

- Cenário hierárquico: grandes estruturas se formam pela fusão de objetos menores.
- Via Láctea ainda está canibalizando galáxias menores.

“árvore de fusões”: largura do tronco e galhos é proporcional à massa das galáxias.



Formação de galáxias



Galaxy Building Blocks

HST • WFPC2

PRC96-29b • ST ScI OPO • September 4, 1996 • R. Windhorst (Arizona State University), NASA

(10 Mpc de lado)

evolução da distribuição de matéria

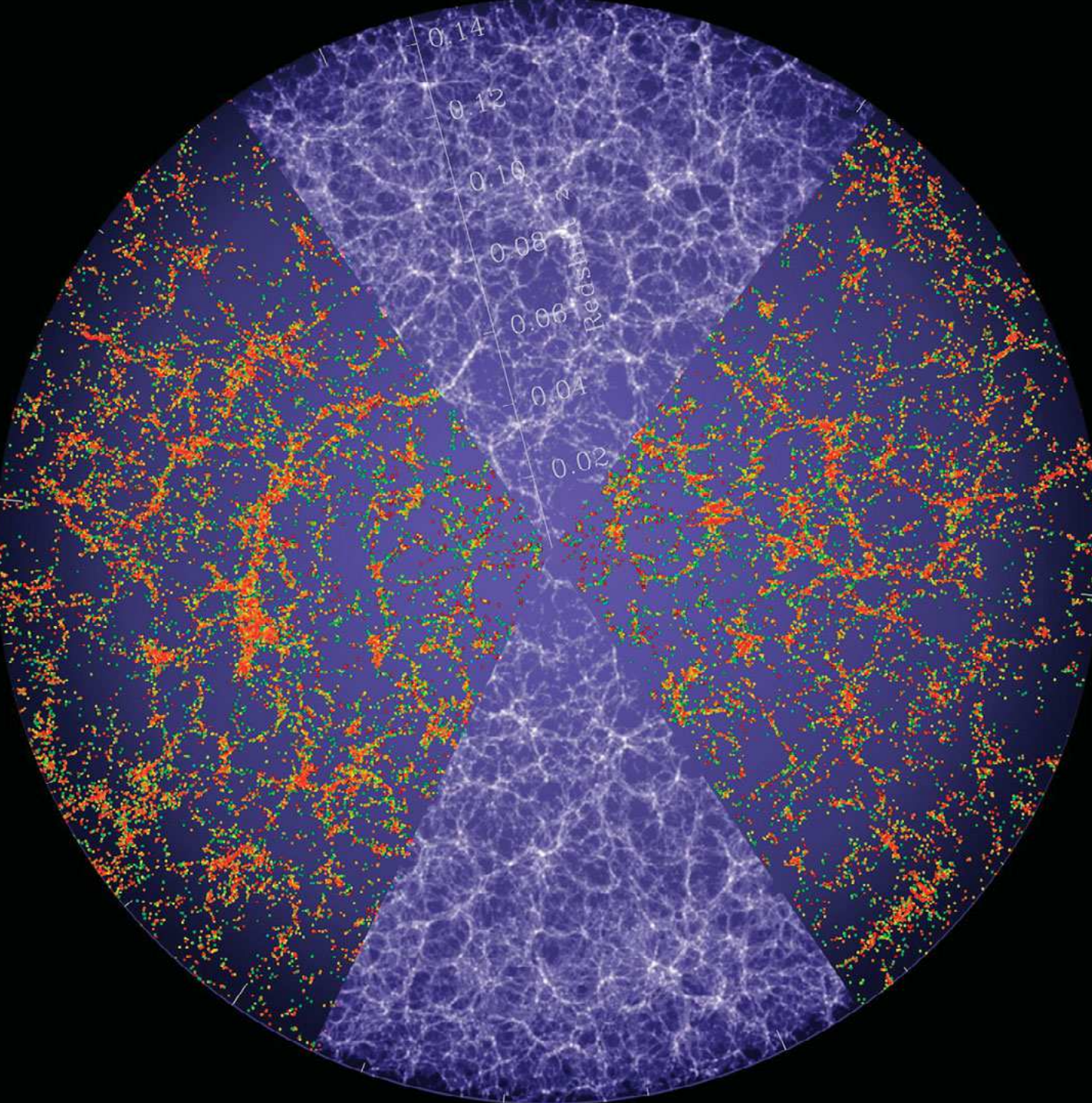
- formação da “teia cósmica”
- formação de galáxias em halos de matéria escura

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



- Bom acordo entre modelo e observações na distribuição de matéria em grande escala.
- Alguns problemas em escalas galácticas (satélites da do Grupo Local, distribuição radial de matéria escura)
- Natureza da matéria escura? Provavelmente não-bariônica, interação muito fraca.
- Natureza da energia escura???

The background of the slide is a deep field image from the Hubble Space Telescope, showing a vast number of galaxies and stars in deep space. The galaxies are of various shapes and sizes, some appearing as bright, glowing clouds, while others are more distant and faint. The stars are scattered throughout the field, some appearing as sharp points of light and others as blurred streaks.

obrigado



Campo Ultra Profundo feito com o Telescópio Espacial Hubble
(800 exposições de 21 minutos → 11,5 dias observando o mesmo lugar no céu.
Para observar todo o céu desta forma seria preciso 1 milhão de anos neste ritmo).