

Cosmologia

Como é o universo?
Onde estamos no universo?
Como o universo evolui?

Cosmologia é o estudo do universo em largas escalas.

Ilustração de artista desconhecido usada por Camille Flammarion no livro *L'Atmosphère*. Atualmente é usada como símbolo da curiosidade humana e de que nossas **verdades** estão sujeitas a serem suplantadas por **verdades ainda maiores**.



Um pouco da estória da Cosmologia

Grécia antiga: Modelo Geocêntrico + estrelas fixas na abóbada celeste.
Terra é o centro do universo
Tudo gira em torno da Terra

Paradoxo da noite escura

Cosmas Indicopleustes ~550 A.E.C.

Topographia Christiana:

“The crystal-made sky **sustains the heat** of the Sun, the moon, and the **infinite number of stars**; otherwise, it would have been full of fire, and it could melt or set on fire.” (Wikipedia)

Não reconhece a infinidade de estrelas e o fato da noite ser escura como sendo um paradoxo.

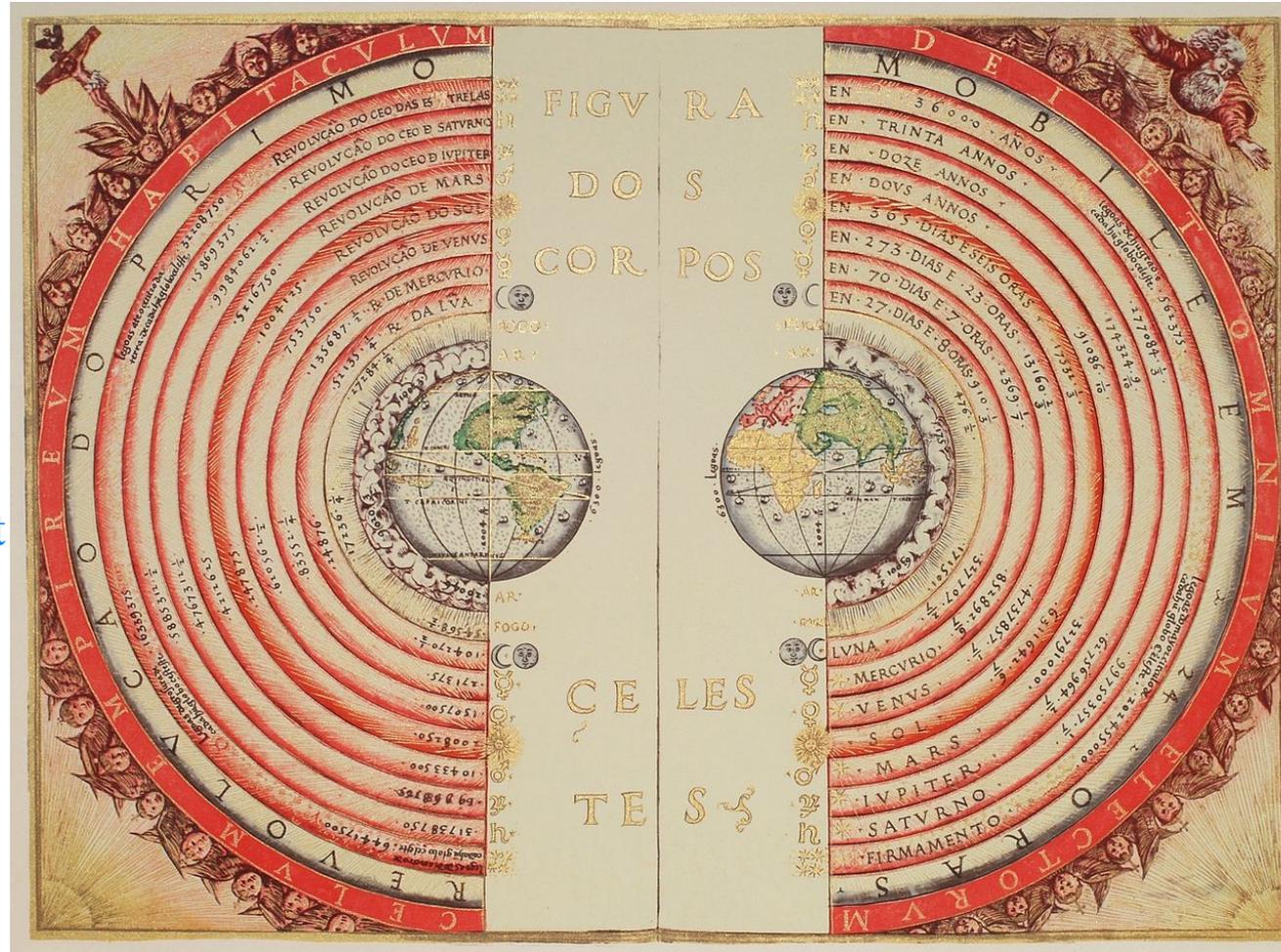


Ilustração de Bartolomeu Velho, 1568

Um pouco da estória da Cosmologia

Renascentismo europeu: Modelo Heliocêntrico + estrelas fixas* na abóbada celeste

Sol é o centro do universo

Tudo gira em torno do Sol

Abóbada celeste não é imutável (supernova)

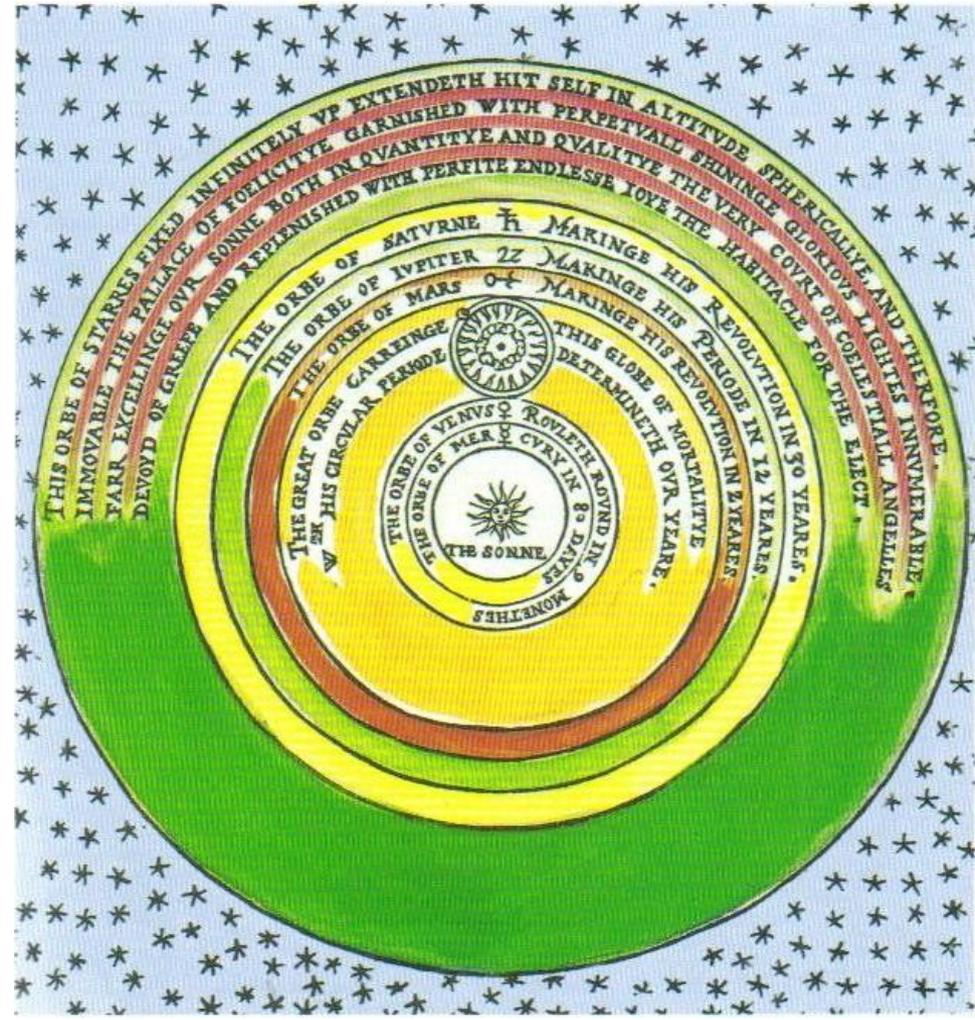
Paradoxo da noite escura

Thomas Digges (1546 – 1595 E.C.): Traduz para o inglês a obra de Copérnico (vide ilustração ao lado).

Postula a existência de **infinitas estrelas** na abóbada celeste estendidas infinitamente em todas as direções.

Kepler em 1610 também reconhece o paradoxo.

* Certamente, como mostrou Newton, os astros estão sempre em movimento, entretanto, são **movimentos locais** aqueles dos átomos em um sólido.



Paradoxo da noite escura

Halley, Cheseaux, e Olbers (em 1823) – paradoxo também é reconhecido.

Paradoxo: **A noite escura e a existência de infinitas estrelas num universo estático e infinito (no tempo e espaço) são fatos conflitantes**

Apesar da luminosidade decair com $1/r^2$, o número de estrelas vistas em um pequeno ângulo sólido a uma certa distância r cresce com r^2 . Logo, o céu deveria ter uma densidade luminosa finita.

Resolução satisfatória:

Lorde Kelvin e Edgar Allan Poe (escritor): o universo é **finito no tempo**.

“Were the succession of stars endless, then the background of the sky would present us a uniform luminosity, like that displayed by the Galaxy – since there could be absolutely no point, in all that background, at which would not exist a star. The only mode, therefore, in which, under such a state of affairs, we could comprehend the voids which our telescopes find in innumerable directions, would be by supposing the distance of the invisible background so immense that no ray from it has yet been able to reach us at all.”

- Poe (1848). “Eureka: A Prose Poem”.

Exercício

A existência de poeira e gases no meio inter-estelar é uma possível solução do paradoxo da noite escura? Explique.

- 1) Sim. A extinção estelar é um fato e um conhecimento que não se tinha antigamente.
- 2) Não. O universo sendo muito antigo teria tido tempo suficiente para aquecer o meio inter-estelar a ponto dele reemitir a radiação absorvida.

Um pouco da história da Cosmologia

1718: Halley observa movimento próprio da estrela Arcturus (1° em relação à medida de Ptolomeu) → mais evidência de que a abóbada celeste é mutável.

1755: Immanuel Kant (filósofo) propõe que a Via Láctea é uma entre muitas galáxias.

1781: Reconhecimento de Urano como planeta por William Herschel.

1838: Primeira paralaxe estelar é medida por Friederich Bessel. 61 Cygni $p=1/3'' \rightarrow d=3 \text{ pc} \rightarrow$ distâncias astronômicas imensas.

1844: Descobre-se que Sirius é um sistema binário.

1908-12: Henrietta Leavitt descobre a relação Período-Luminosidade das estrelas Cefeidas I.

1911-13: Diagrama Hertzsprung-Russell.

1914-22: “Redshift” nos espectros de várias “nebulosas elípticas” por Vesto Slipher.

1917-18: Halow Shapley determina o centro da galáxia, da localização do Sol, e de vários aglomerados globulares.

1918-24: Classificação espectral OBAFGKM das estrelas por Annie Cannon.

1920: O grande debate de Shapley e Curtis.

1922: Alexander Friedmann encontra uma solução de universo em expansão das equações de Einstein.

1924-29: Edwin Hubble determina a distância até M31. Universo em expansão.

1927: Georges Lemaître propõe o Big Bang: a teoria do átomo primordial. Universo em expansão → “redshift” das galáxias.

Um pouco da estória recente

- 1933:** Fritz Zwicky observa que as velocidades das galáxias no aglomerado de Coma é muito alta. A matéria visível não é suficiente para mantê-las acopladas gravitacionalmente.
- 1948:** Ralph Alpher, Hans Bethe e George Gamow predizem a nucleossíntese primordia e, mais tarde Alpher, Robert Herman e Gamow predizem a radiação cósmica de fundo.
- 1965-68:** Arno Penzias e Robert Wilson descobrem a radiação cósmica de fundo.
- 1967:** Descoberta do primeiro pulsar por Jocelyn Bell Burnell e Anthony Hewish.
- 1971-78:** Primeiro buraco negro identificado (Cygnus X-1). Radiação Hawking é proposta.
- 1973-78:** Jerry Ostriker e James Peebles apontam que falta matéria nas galáxias. Vera Rubin e Kent Ford: curvas de rotação de galáxias espirais estão em desacordo com Newton.
- 1980-81:** Alan Guth propõe a fase inflacionária da evolução do universo.
- 1994-97:** Telescópio Hubble revela buraco negro super-massivo no centro da galáxia M87. Existência das anãs-marrons é confirmada.
- 1990-92:** COBE confirma o espectro de corpo negro da radiação cósmica de fundo.
- 1995-2012:** Reinhard Genzel e Andrea Ghez determinam órbitas estelares no centro galáctico SgrA*.
- 1998:** Medidas de supernovas tipo Ia mostram que o universo se expande aceleradamente.
- 2003:** Constante de Hubble = 70 km/s/Mpc.
- 2005:** Via Láctea é uma galáxia espiral com barra central (telescópio Sptizer).
- 2015:** Primeira evidência direta de ondas gravitacionais pelo interferômetro LIGO.



Harlow Shapley

O grande debate de 1920



Heber D. Curtis

Dentre as várias questões abordadas no debate, duas se destacam:

Qual é a dimensão do universo?

Onde estamos no universo?

Shapley – as nebulosas espirais são apenas nuvens de gás na nossa própria (e grande) galáxia onde estrelas e planetas são formados. Há apenas a nossa galáxia no universo inteiro. O nosso sistema solar se encontra longe do centro da galáxia.

Curtis – as nebulosas espirais são outros “universos-ilhas” como a nossa galáxia. Há muitas delas no universo. Nosso sistema solar se encontra no centro da nossa galáxia.

Resolução:

Hubble identificou estrelas **Cefeidas** I em Andrômeda (M31): 2 Mil de distância. O universo tem muitas galáxias.

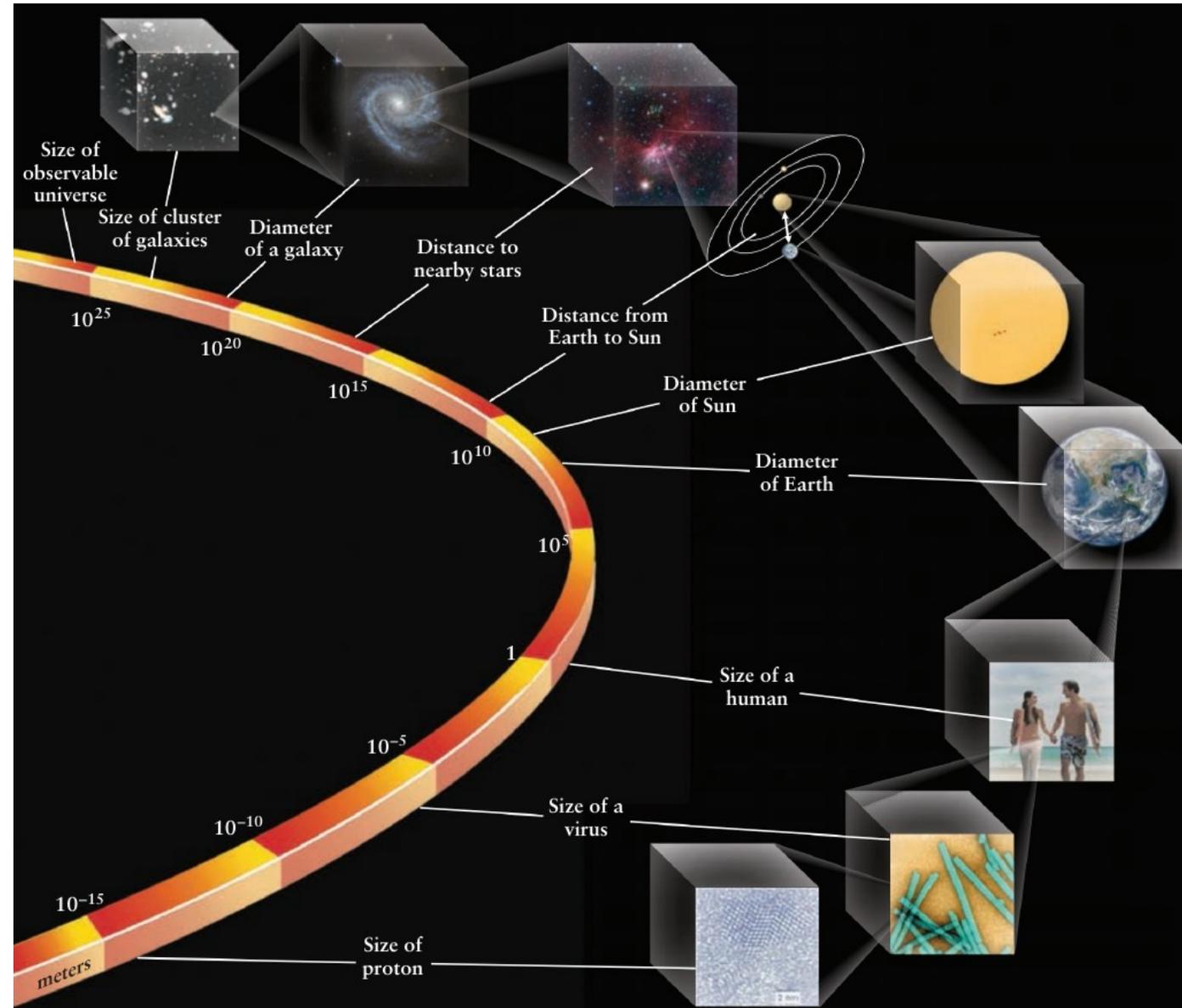
Na década de 1930, entendimento da **extinção estelar** e mapeamento de **aglomerados globulares** permitiu determinar o tamanho da Via Láctea e a localização do sistema solar.

O vazio do universo

<http://sciencenetlinks.com/tools/scale-universe-2/>

<https://www.youtube.com/watch?v=0fKBhvDjuy0>

O universo é um grande vazio onde a matéria se concentra em galáxias. As galáxias não estão distribuídas uniformemente, elas se concentram em aglomerados de galáxias que se concentram em super-aglomerados. (A estrutura formada por esses super-aglomerados é compatível com a presença de matéria escura.)



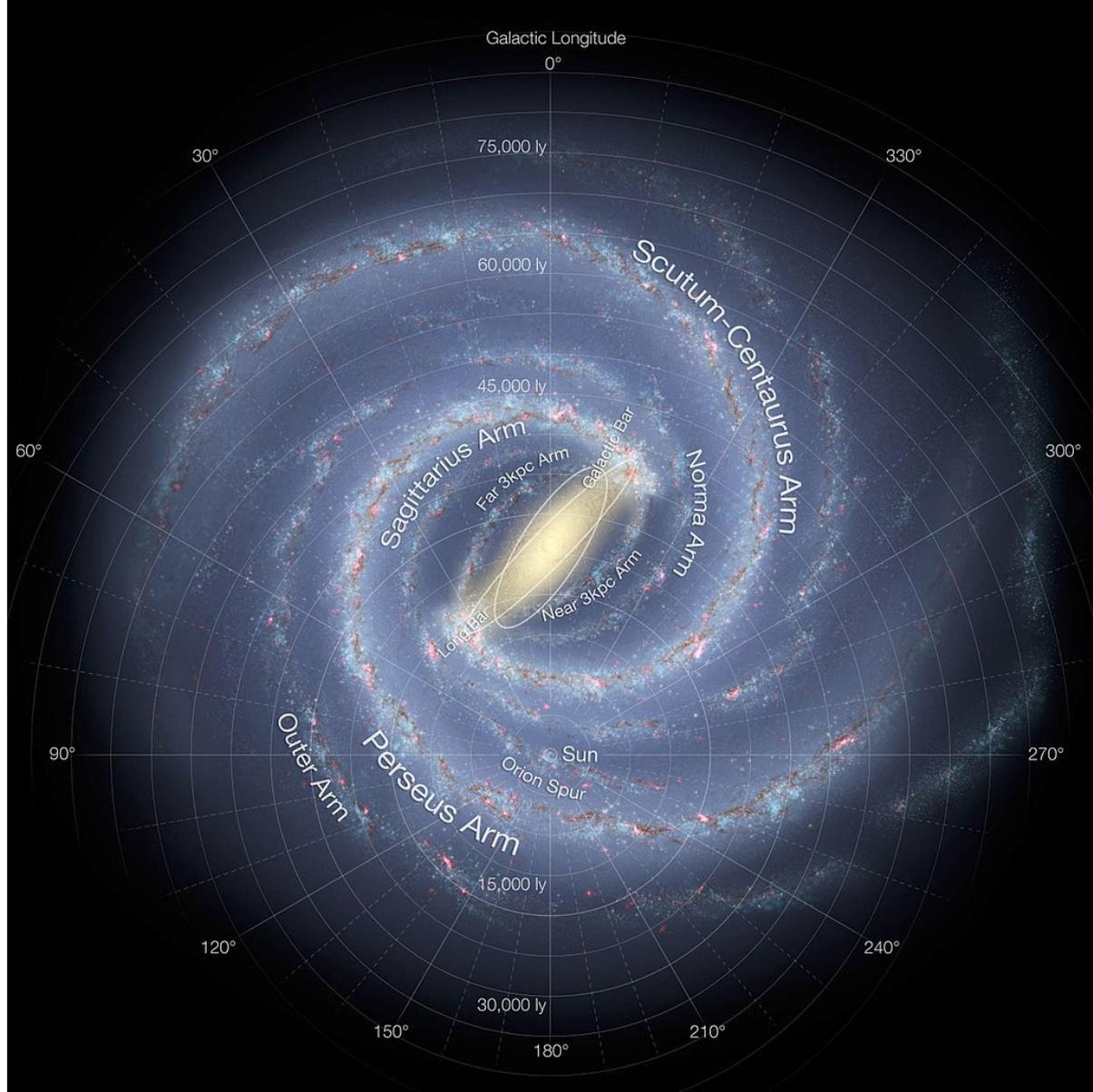
A Via Láctea

Difícil de observar no visível por causa de gás e poeira inter-estelar → ondas de rádio (solo), infravermelho, raios-X e raios gama (fora da atmosfera). **Efeito Doppler** das linhas de emissão/absorção nos fornecem as velocidades. Aglomerados jovens brilhantes com associação OB (**regiões H II**) e **aglomerados globulares** fornecem distâncias.

Galáxia espiral **com barra** central de estrelas. Há **2 braços principais** e vários outros menores.

~100 mil al de diâmetro (visível) e, em média, 2 mil al de espessura.

~ 200 bilhões de estrelas e massa $\sim 1,5 \times 10^{12}$ Msol (total). Massa das estrelas $\sim 5 \times 10^{10}$ Msol, massa do gás (poeira) inter-estelar ~15% (1%) da massa das estrelas.



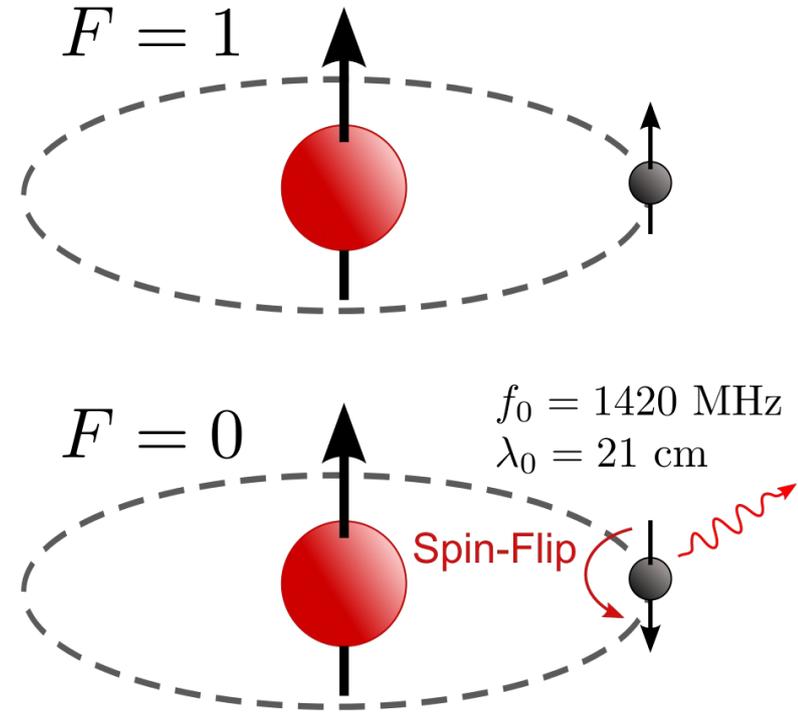
Linha H I: fótons de rádio de 21 cm

Ondas de rádio são muito úteis porque são fracamente absorvidas e espalhadas pelo meio inter-estelar.

Particularmente importante para a astronomia, são os fótons de rádio 21 cm emitidos pelos átomos de Hidrogênio ([linha H I](#)) quando da transição entre os dois estados hiperfinos de estado fundamental 1s:

$$f = \frac{\Delta E}{h} \approx \frac{5.87433 \times 10^{-6} \text{eV}}{4.1357 \times 10^{-15} \text{eV/Hz}} \approx 1420.4 \text{ MHz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx 21.1 \text{ cm}$$



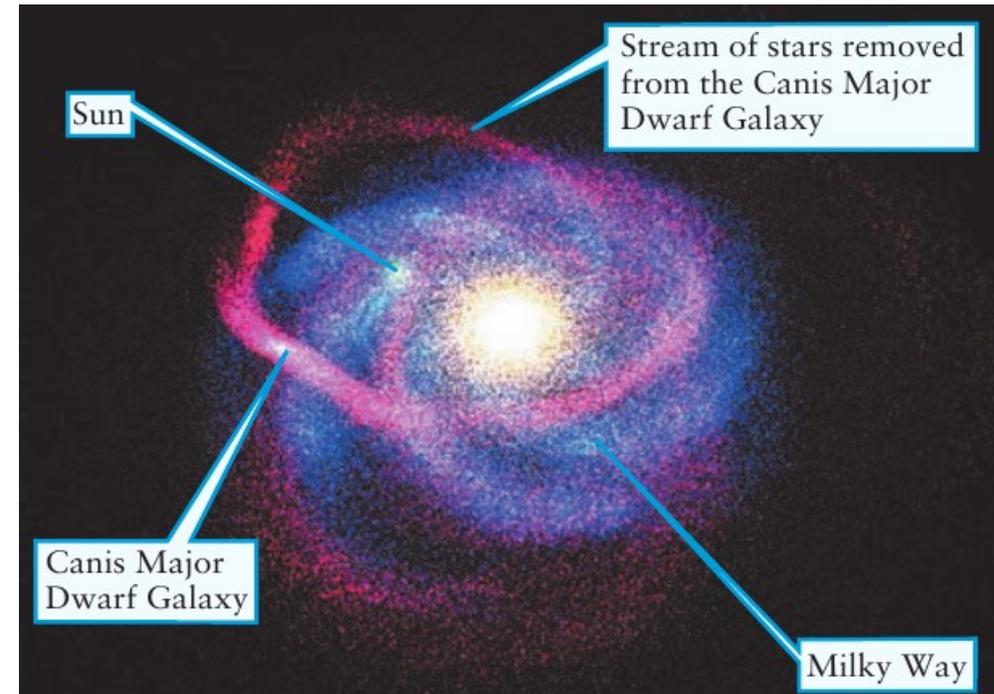
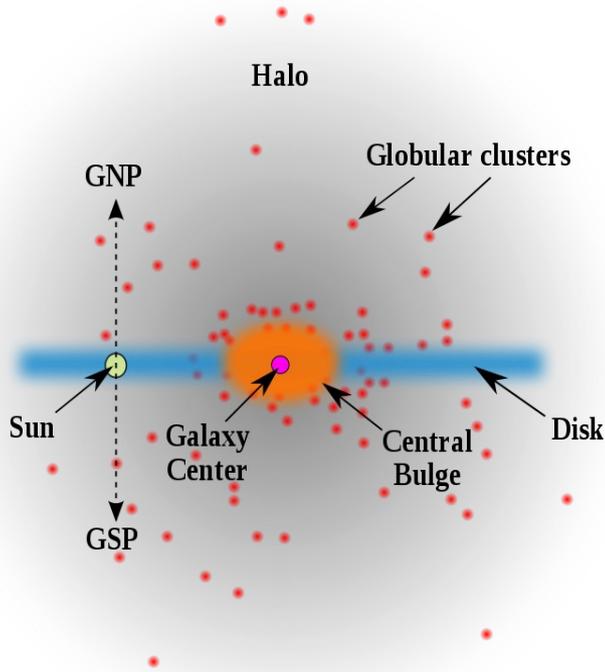
A Via Láctea

Halo contém estrelas antigas e aglomerados globulares (~150). Raio ~2x raio galáctico visível.

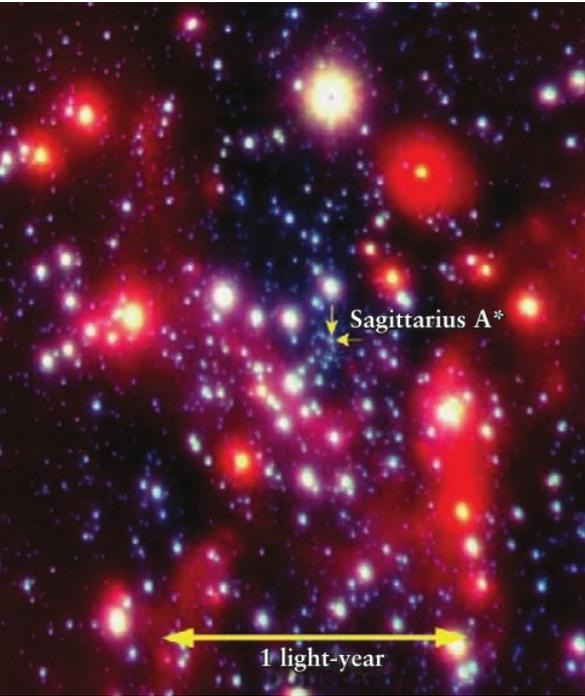
~99% das estrelas no Halo não estão nos aglomerados. Acredita-se que a maioria é resto de galáxias “**canibalizadas**”. Há estruturas no Halo estelar (correntes de estrelas) que indicam recente “colisão” (coalescência). Há **24 galáxias satélites** orbitando a região mais exterior do Halo.

~40% dos aglomerados globulares tem órbita **retrógrada**. A grande maioria desses se encontra nas zonas mais afastadas do Halo.

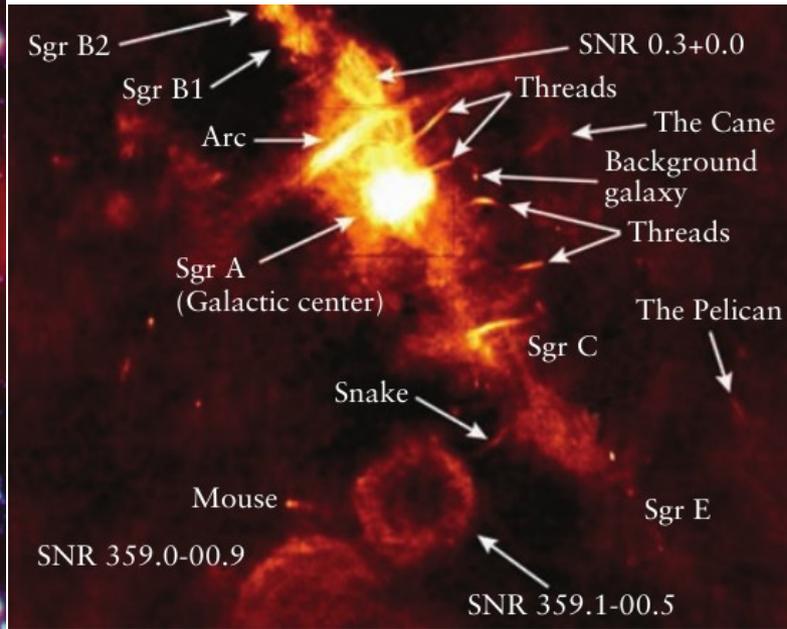
Alguns aglomerados contém **buracos negros de massa intermediária**.



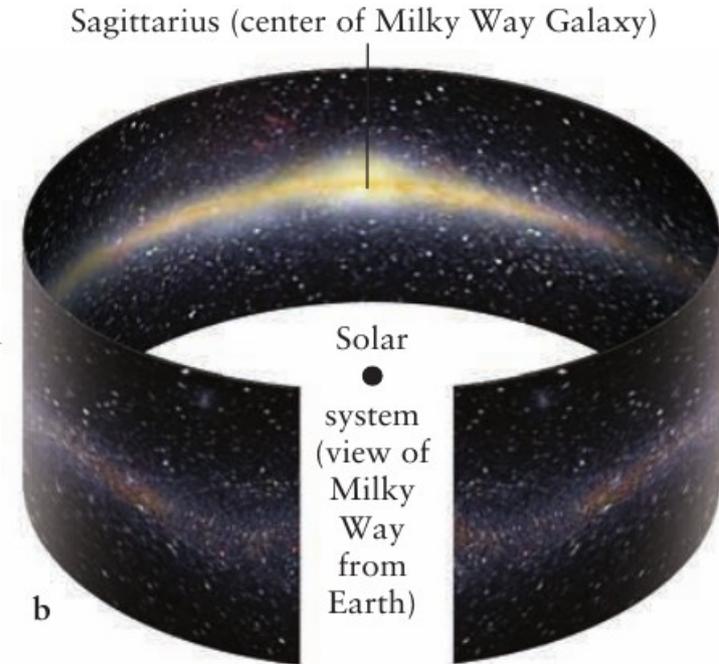
A Via Láctea



Centro galáctico em infravermelho



Centro galáctico em rádio
área ~ 8 Luas



Via Láctea em infravermelho

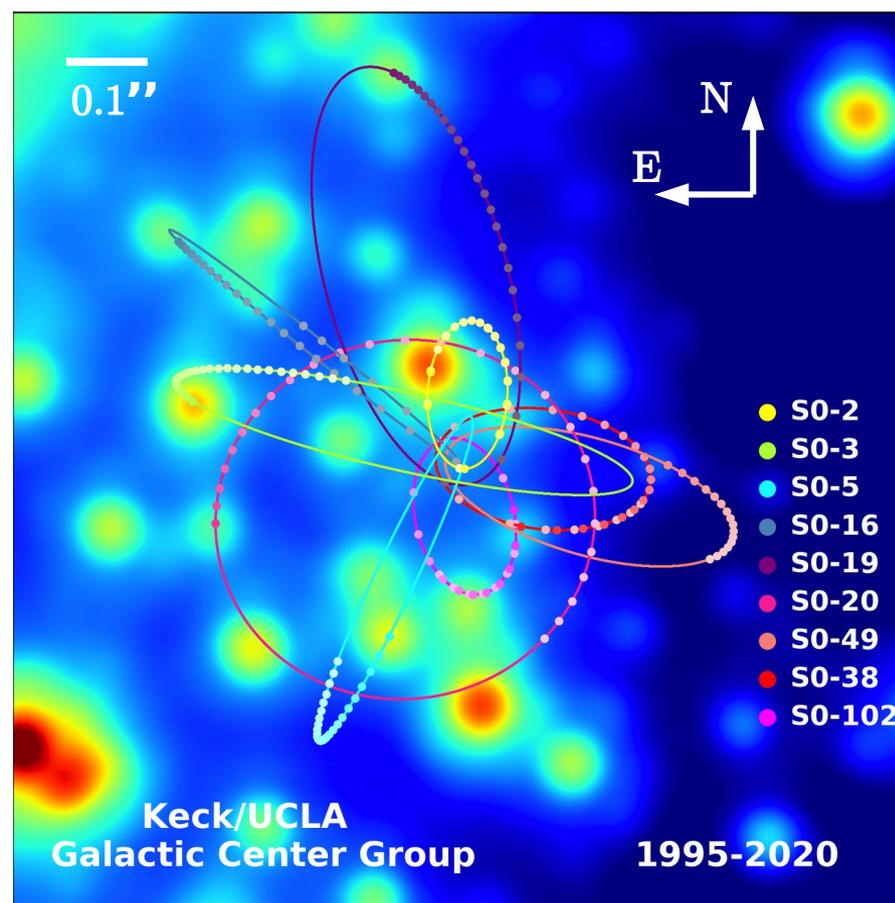
O centro da galáxia é muito denso. Há muitas estrelas, emissores de ondas de rádio e remanescente de super-novas. Observações modelos recentes indicam intensa **formação estelar** (Longmore et al., MNRAS, 433, L15 (2013), Kruijssen et al., MNRAS, 484, 5734 (2019), <https://arxiv.org/abs/1712.01453>)

Como localizar?

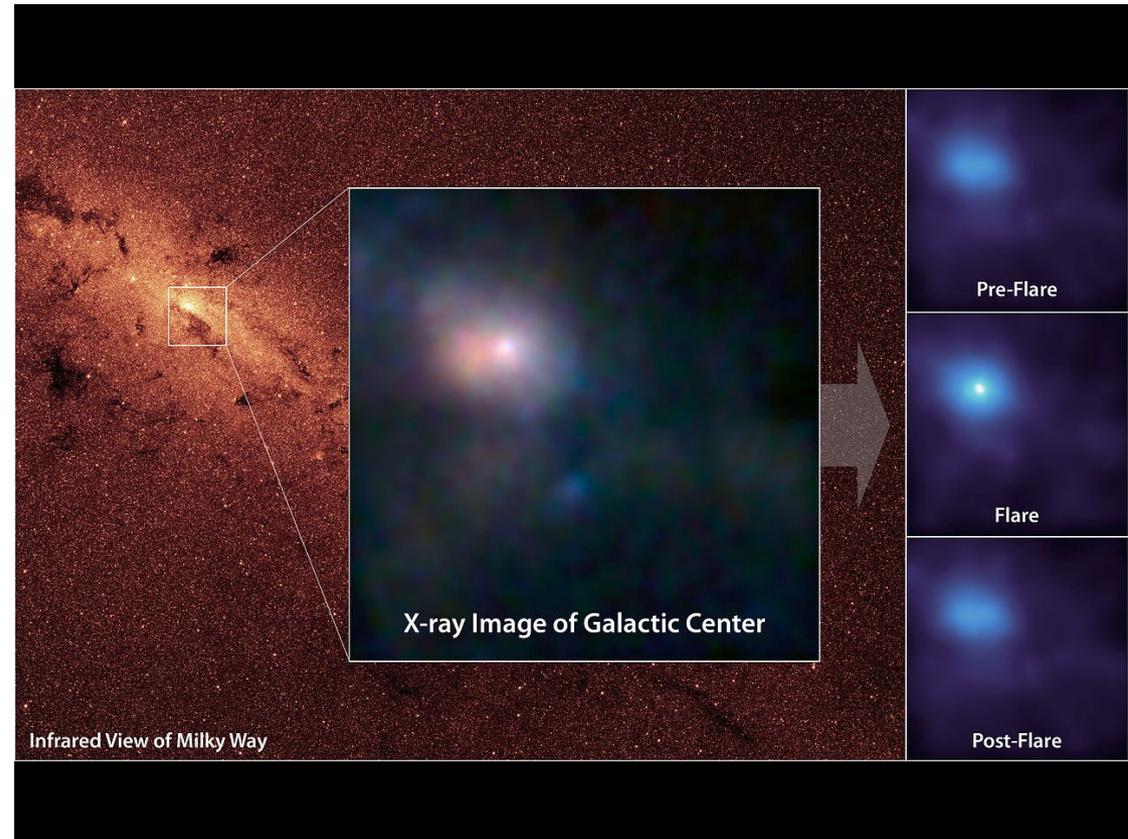
- 1) Era pré-infravermelho: mapeando a velocidade dos aglomerados globulares. Eles orbitam o centro da galáxia.
- 2) Era pós-infravermelho: Imagens em infravermelho mapeiam o disco e o bojo da galáxia.

A Via Láctea

Órbitas das estrelas ao redor de Sgr A* obtidas em infra-vermelho com **óptica ativa e adaptativa**.



O centro abriga um **buraco negro super-massivo** de 4,3 milhões de Msol. Este buraco negro muito provavelmente é responsável por **emissões de raios-X**.



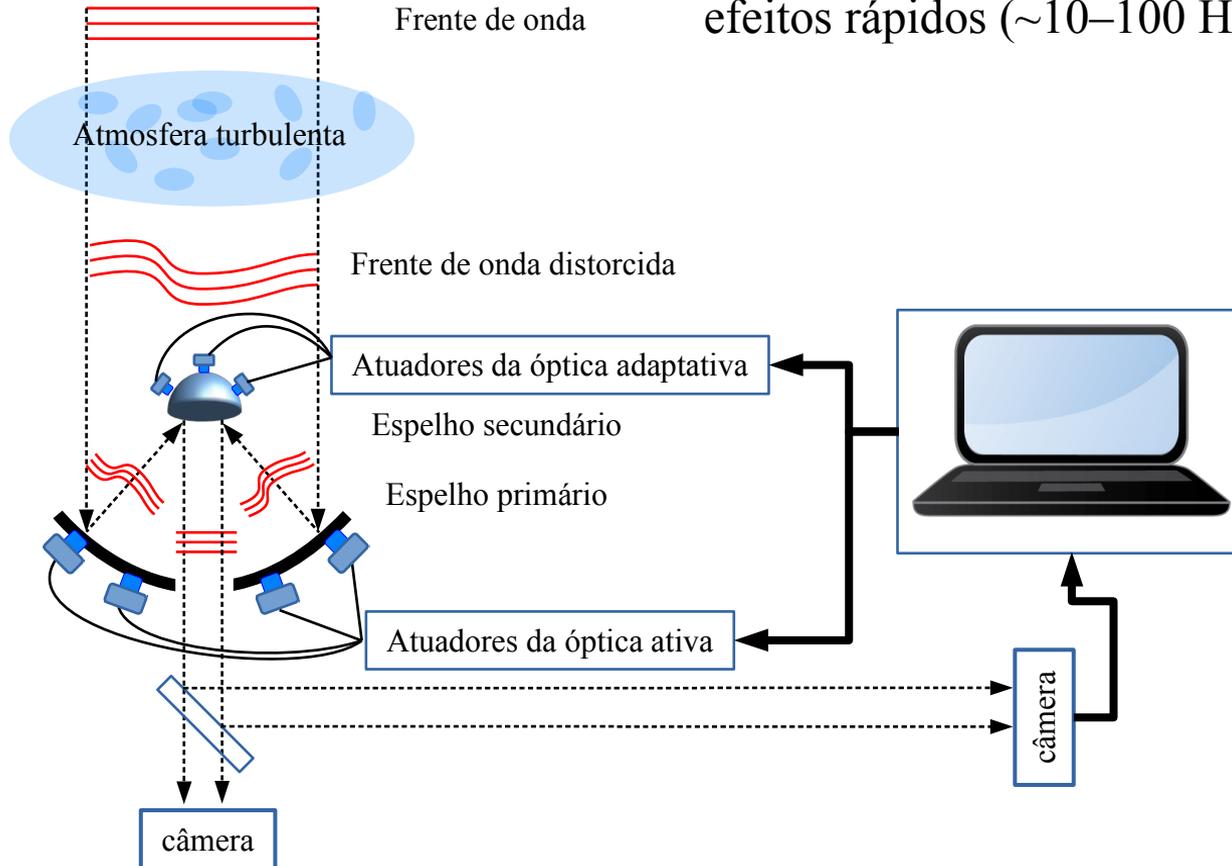
<http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/animations.html>,

<https://www.youtube.com/watch?v=rxJgebvqzXA>, <https://www.eso.org/public/videos/eso0846i/>, <https://www.eso.org/public/videos/eso1825c/>

Óptica ativa e adaptativa



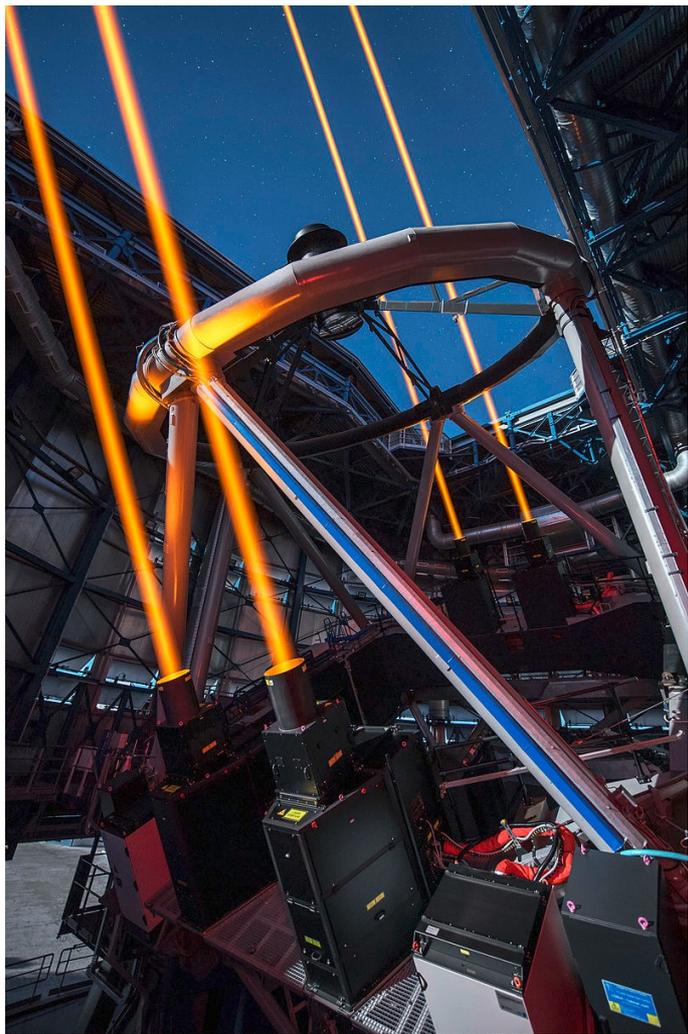
Atuadores deformam os espelhos para compensarem os efeitos lentos (~ 1 Hz) de (a) vento, temperatura e tensão mecânica e os efeitos rápidos (~ 10 – 100 Hz) de (b) distorções atmosféricas.



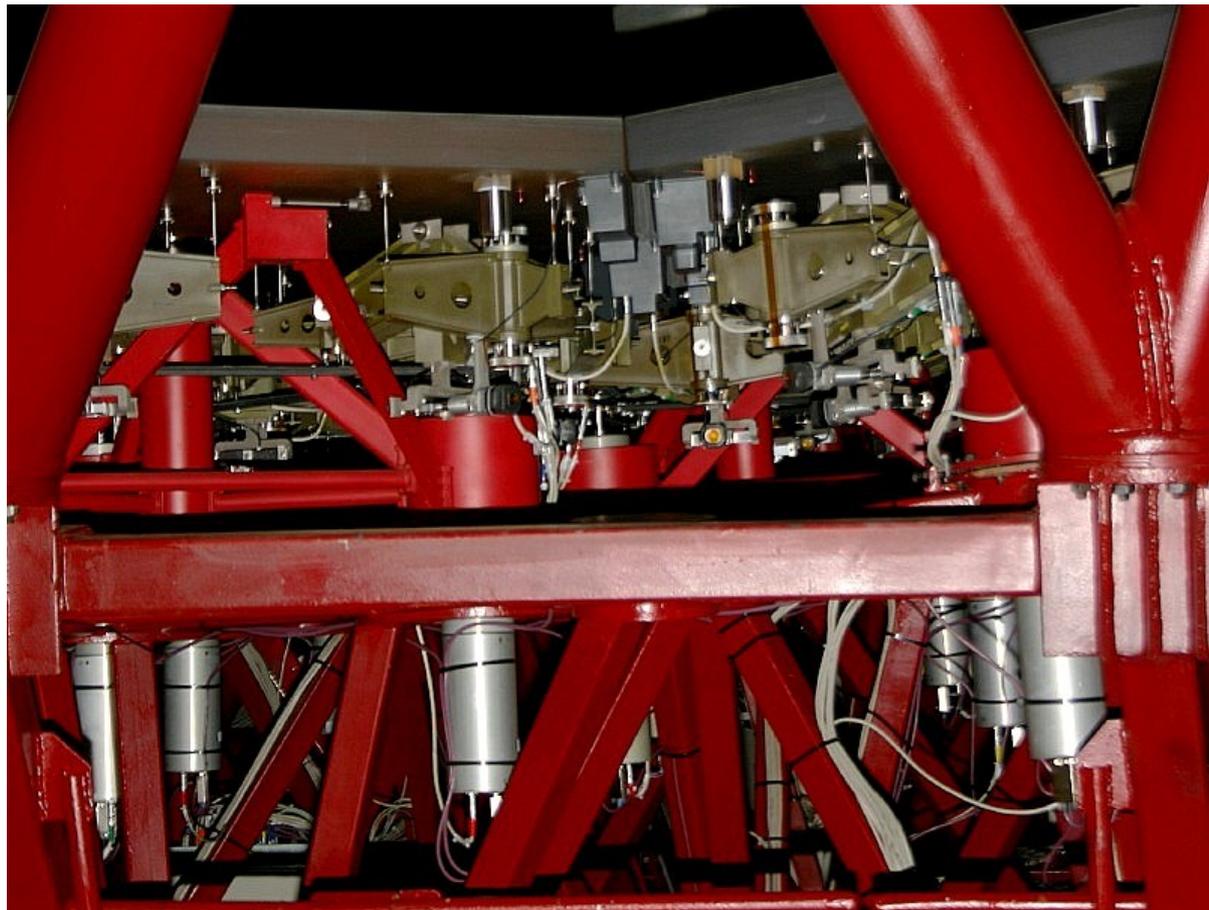
Óptica ativa – corrige os efeitos lentos no espelho primário. São efeitos inerentes a espelhos grande.

Óptica adaptativa – corrige os efeitos rápidos no espelho secundário (ou em algum outro espelho no caminho óptico até a câmera). Estrelas guias são necessárias. Quando possível, usa-se estrelas brilhantes conhecidas. Caso contrário, usa-se laser de 589.2 nm para excitar átomos na camada de sódio da mesosfera (~ 90 km de altura)

Óptica ativa e adaptativa



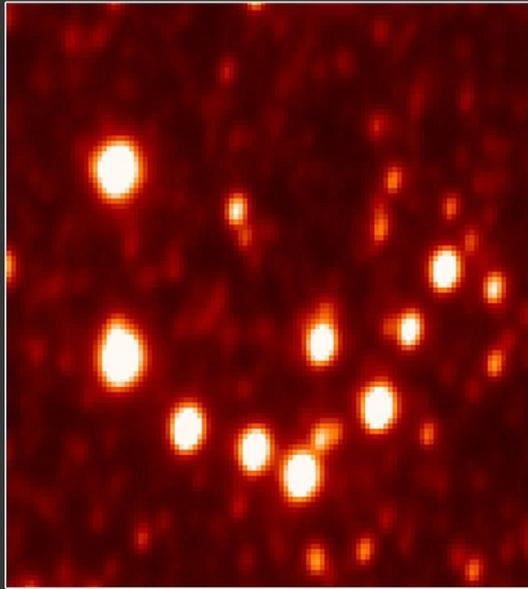
Lasers (22 W e 30 cm de diâmetro) do sistema de estrela guia do observatório Paranal.



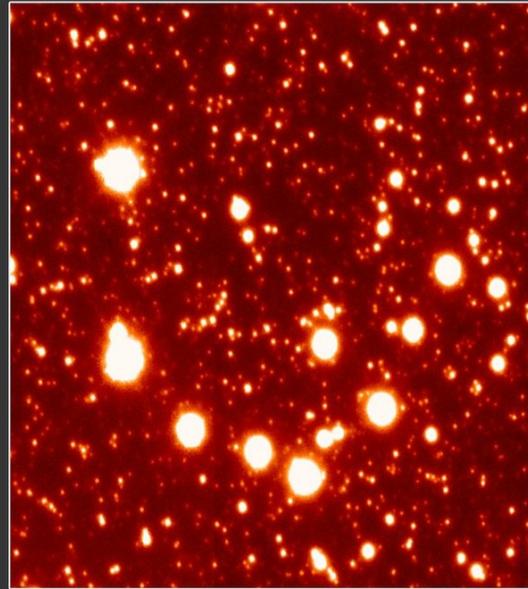
Atuadores da óptica ativa do Gran Telescopio Canarias.

Óptica ativa e adaptativa

Imagens do VLT (very large telescope)

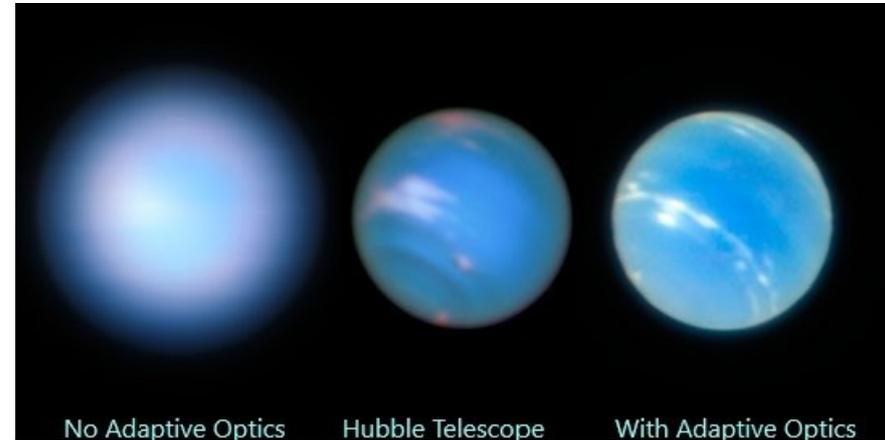


Without Adaptive Optics



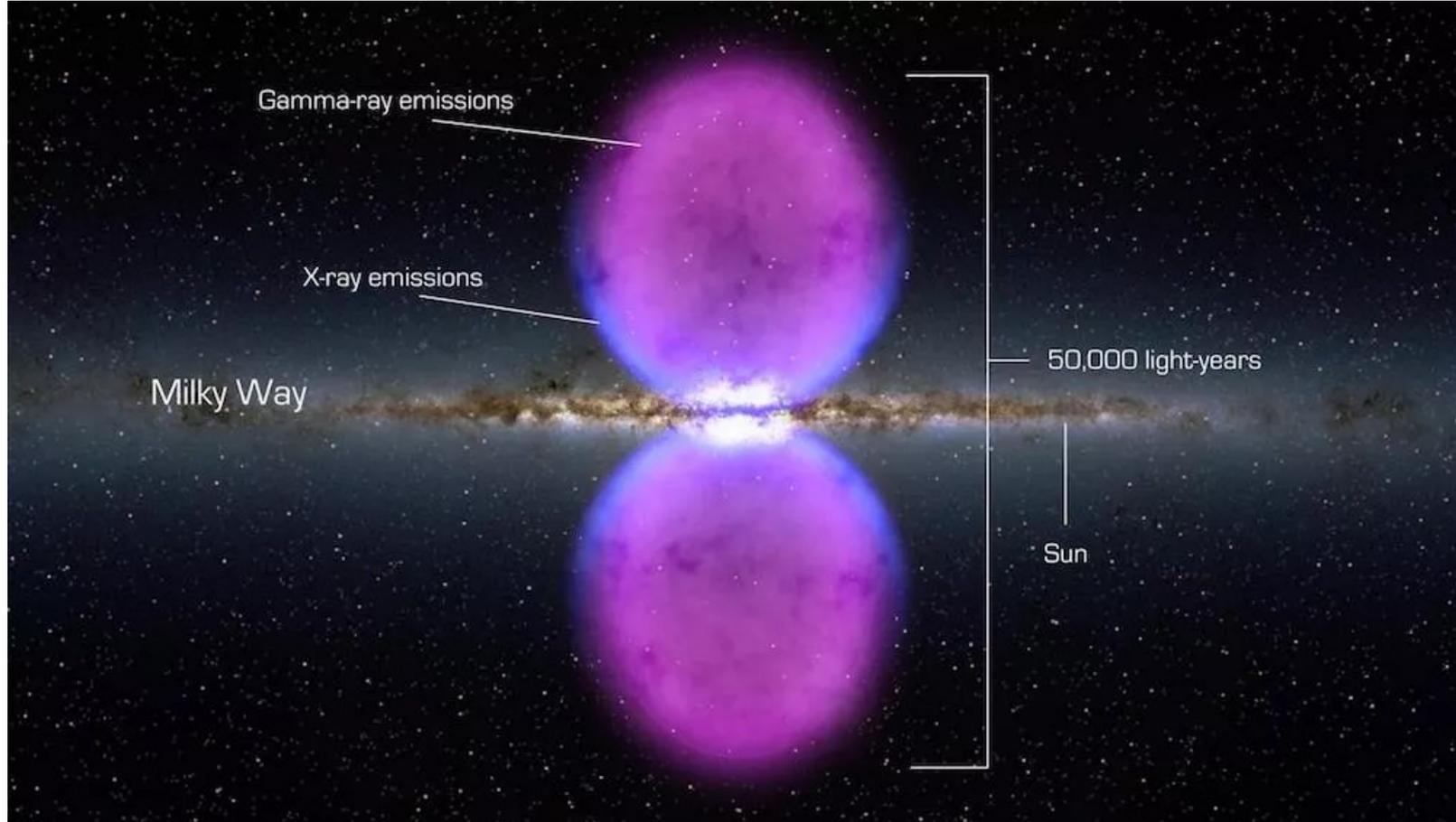
With Adaptive Optics with MAD

Centro galáctico



Netuno

A Via Láctea



Enormes bolhas onde raios-X e raios gama são emitidos foram recentemente descobertas. Muito provavelmente, essa radiação é produzida pela aniquilamento de pósitrons com elétrons.

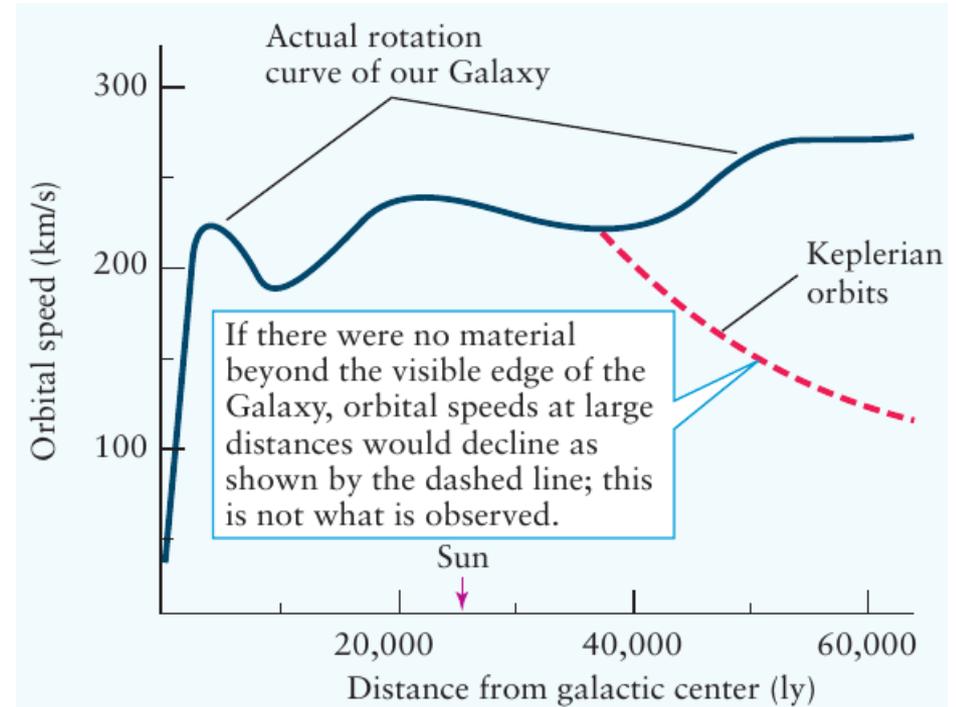
A Via Láctea

As estrelas na galáxia não giram com mesma velocidade angular (como num corpo rígido). O Sol descreve uma órbita quase circular em torno do centro: $v \sim 878$ mil km/h e período de ~ 230 milhões de anos.

Esse resultado é obtido da combinação do mapeamento da velocidade das estrelas próximas e dos aglomerados globulares (cuja velocidade média deve ser nula em relação ao centro galáctico). Essa combinação também nos permite medir a velocidade das estrelas na galáxia.

Falta matéria **visível** para segurar as estrelas nessas velocidades \rightarrow “**matéria escura**”.

Candidatos: neutrinos, anãs-brancas, halo gasoso, MACHOs (anãs-marrons, objetos tipo Júpiter, buracos negros), WIMPs, algo mais exótico



Órbitas Keplerianas (longe do bojo):

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \Rightarrow v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Galáxias: Classificação morfológica de Hubble

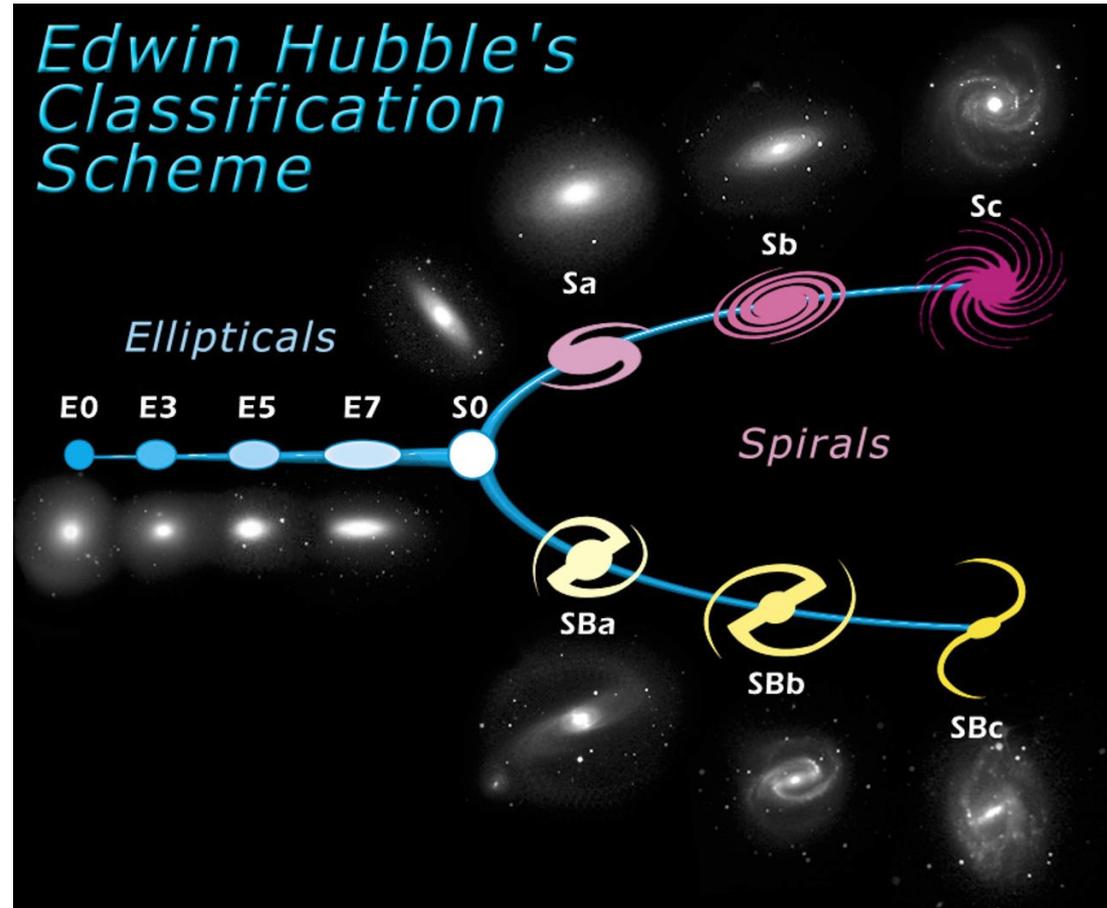
Elípticas: E0 são as mais esféricas enquanto E7 são as mais elípticas.

Lenticulares (ou S0): transição entre as elípticas e as espirais: discos sem braços.

Espirais normais: faixas arqueadas de nuvens e estrelas (braços) em volta do bojo central. Sa têm os braços mais envoltos do bojo enquanto Sc são aquelas com braços mais abertos.

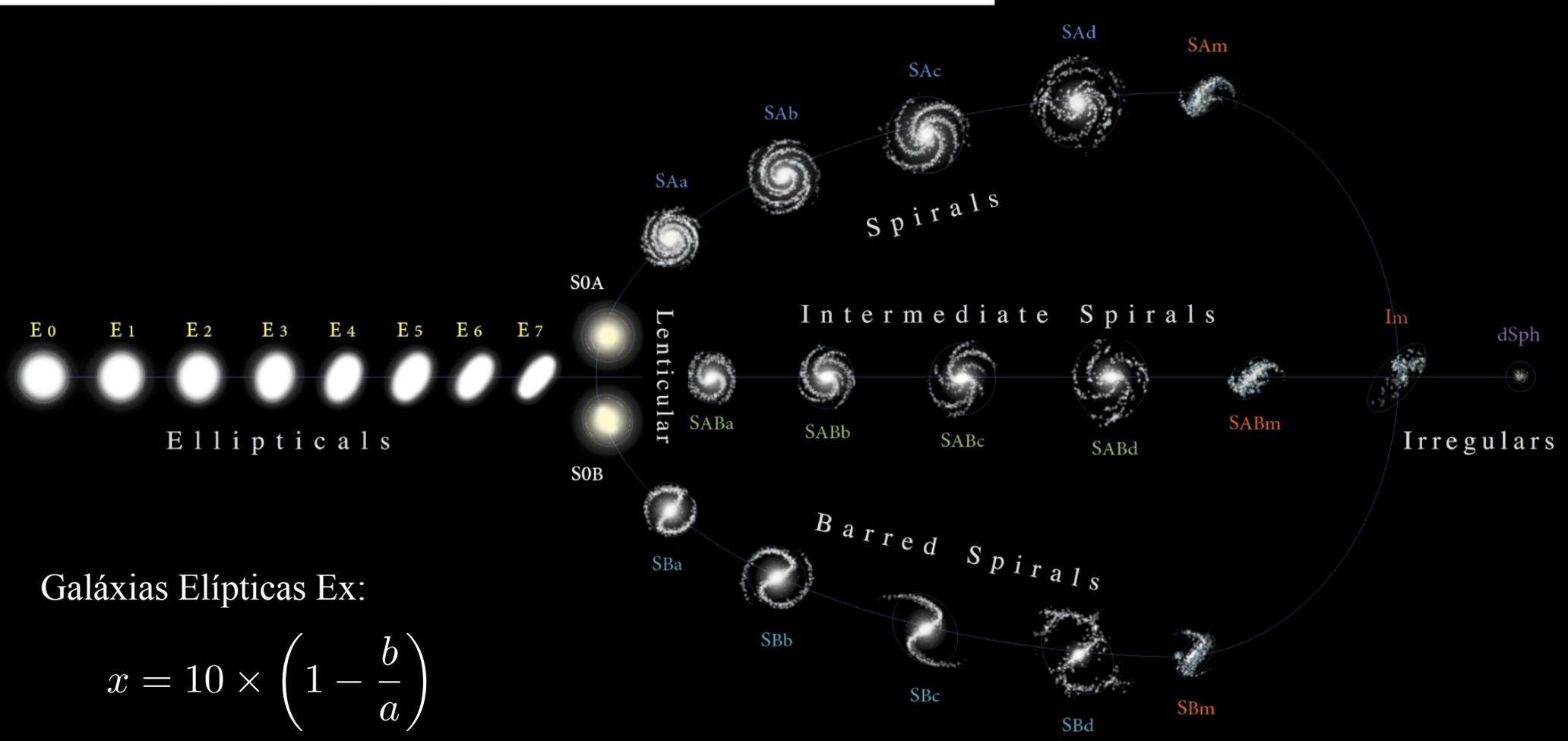
Espirais barradas (ou com barra): análogas às espirais normais porém com uma barra de estrelas atravessando o bojo. Os braços partem do da barra, não do bojo.

Irregulares: que não se encaixam nas definições acima (muitas galáxias-satélite).



OBS: Atualmente, há uma classe intermediária e outras subclasses.

Diagrama de Hubble-de Vaucouleurs



Galáxias Elípticas Ex:

$$x = 10 \times \left(1 - \frac{b}{a} \right)$$

Galáxias espirais normais

Tipicamente contém ~ 100 bilhões de estrelas e diâmetro visível ~ 10^5 al.

Sa: bojo enorme e massivo, braços grandes, enrolados e bem definidos (“grand-design arms”)

Sb: bojo intermediário

Sc: bojo pequeno, braços abertos flocculantes

Há uma relação entre o brilho do bojo e o tipo de espiral



em Eridanus

a Sa (NGC 1357)

R I V U X G



Galáxia de Bode em Ursa Maior

b Sb (M81)

R I V U X G



Galáxia do Cata-Vento
em Ursa Maior

c Sc (M101)

R I V U X G

Ondas de densidade e os grandes braços

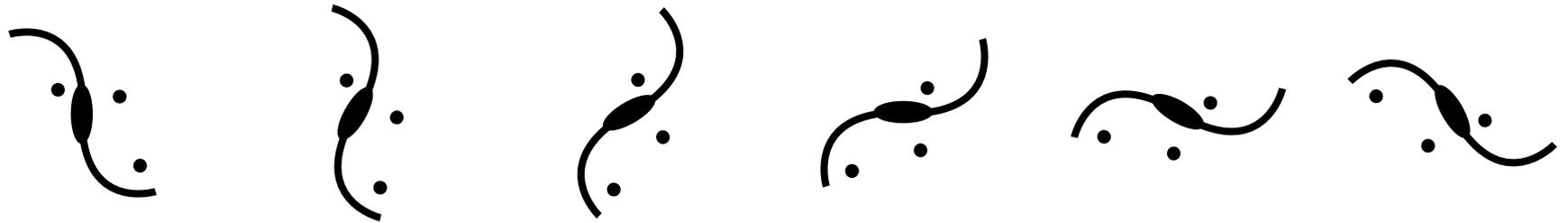
Os braços das galáxias espirais não rotacionam. São estruturas “**rígidas**” e densas onde estrelas e gases entram e saem (vide https://en.wikipedia.org/wiki/Density_wave_theory). Fortes indícios experimentais e modelos teóricos.

Consequência: Gases comprimidos → instabilidade de Jeans → formação estelar.

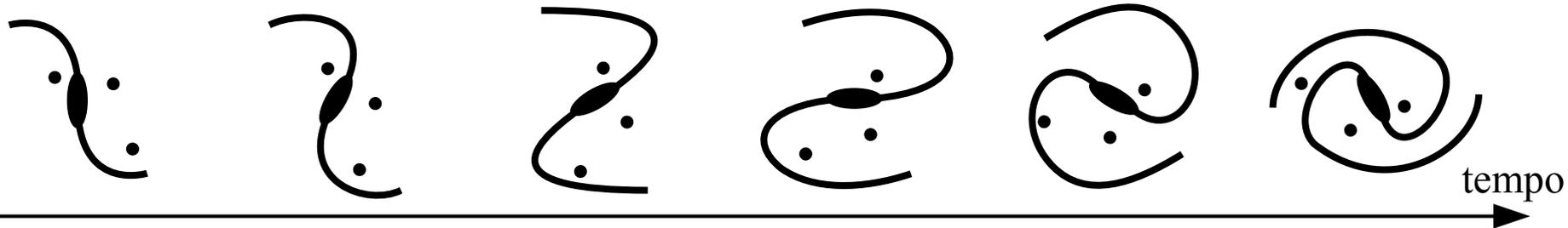
Causa: Ondas de densidade causadas por perturbações externas (outra galáxia) ou pela barra de estrelas.

O que **NÃO** acontece:

Rotação
rígida:



Rotação
abraçante:



tempo

Simulação mostrando como uma galáxia anã é “canibalizada” por uma maior. Note a formação de braços. Neste sentido, a galáxia maior transicionou de S0 (lenticular) → S (espiral).



0 years



400 million years



800 million years



1.2 billion years



1.6 billion years

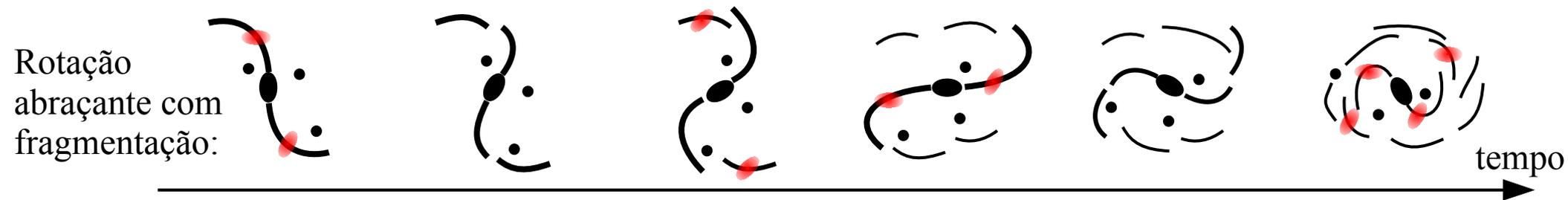
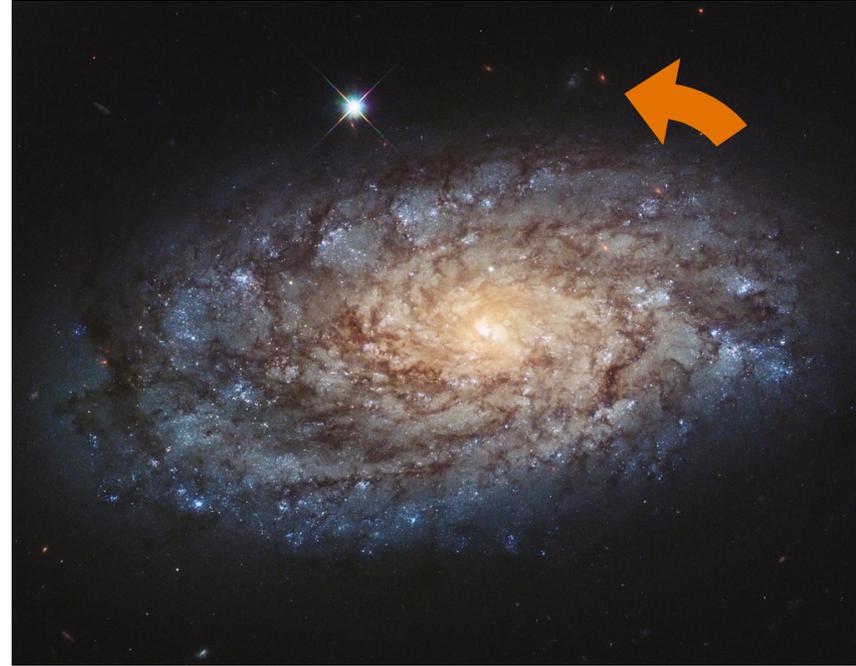


2.0 billion years

Associações OB e braços flocculantes

Todas as estrelas, gases e poeira no disco giram no mesmo sentido (anti-horário no caso ao lado).

Onda de densidade é distinta com relação às espirais “grand-design” → rotação abraçante (fácil de fragmentar). Nas regiões de associação OB → intensas ondas de choque → “rompem” o braço que pode formar outros novos fragmentados (em **flocos**). Como resultado final → braços pouco definidos e caóticos. Quando os braços ficam caóticos, como aparecem as zonas de formação estelar? (Tema ainda **controverso** e em pesquisa.)



Galáxias espirais com barra

Barra de estrelas: estrelas que desenvolvem órbitas mais elípticas em torno do centro.

70% das galáxias espirais próximas possuem barra. 20% das galáxias espirais distantes possuem barra. Então o número de galáxias espirais com barra está crescendo no tempo.

Como nas espirais normais, [há uma correlação entre o tamanho do bojo e os braços](#).



a M58: an SBa galaxy

R I V U X G



b M83: an SBb galaxy

R I V U X G



c NGC 1365: an SBc galaxy

R I V U X G

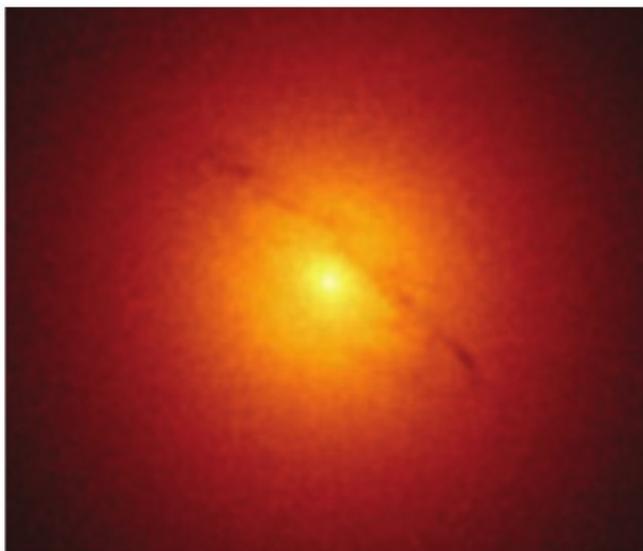
Galáxias elípticas

Variam muito em massa e tamanho (desde as menores até as maiores dentre todos os tipos de galáxias), e densidade (desde aquelas que se podem ver através do centro até as galáxias ultra-compactas).

Contém pouco material (gás e poeira) inter-estelar → praticamente **sem formação estelar**.

Maioria das estrelas é velha e da **população II** (pobre em metais).

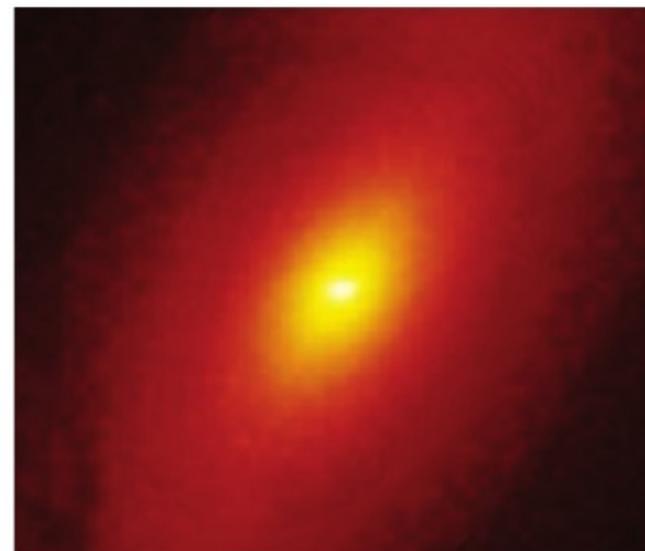
Há registro de remanescente de super-novas em várias dessas galáxias.



a E0 (M105)



b E3 (NGC 4406)



c E6 (NGC 3377)

Galáxias irregulares

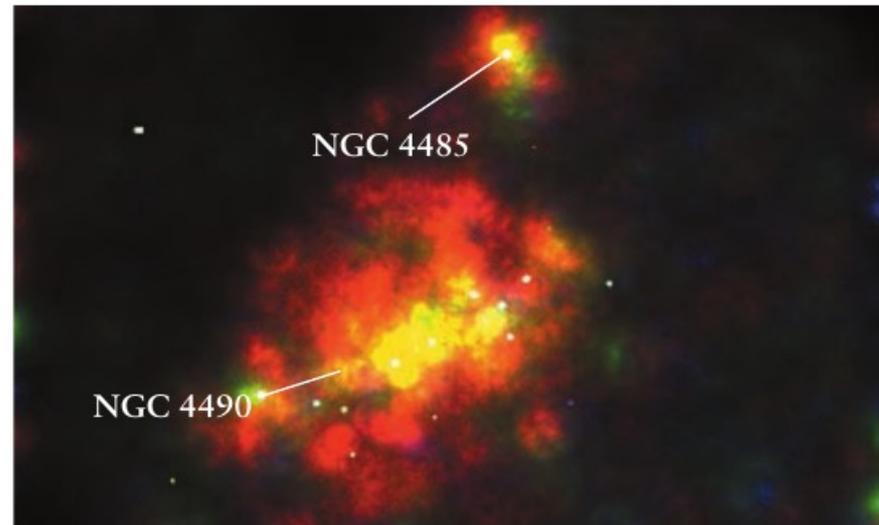
Sem estrutura evidente.

Tipicamente menores e menos massivas que as galáxias espirais.

Geralmente ricas em gás e poeira inter-estelar, e estrelas jovens e velhas.



a Large Magellanic Cloud, an Irr I galaxy



b NGC 4485 (Irr II) and NGC 4490 (Sc) galaxies

Resumo morfológico das galáxias

	Galáxias S e SB	Galáxias E	Galáxias Irr
Massa (M_{sol})	$10^9 - 5 \times 10^{11}$	$10^7 - 10^{13}$	$10^8 - 3 \times 10^{10}$
Luminosidade (L_{sol})	$10^8 - 2 \times 10^{10}$	$3 \times 10^5 - 10^{11}$	$10^7 - 10^9$
Diâmetro (al)	$1,6 \times 10^4 - 8 \times 10^5$	$3 \times 10^3 - 6,5 \times 10^5$	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$
População estelar	Disco: jovens da população I; Bojo e Halo: população II e velhas da população I	Velhas da população I e população II	Majoritariamente da população I
% das galáxias observadas	77%	20% (não inclui as elípticas anãs que são difíceis de detectar)	3%

As galáxias “colidem” e mudam de morfologia e tamanho ao longo do tempo. (Colisões entre duas ou mais galáxias S e/ou SB podem resultar numa galáxia E).

Acredita-se que há pelo menos 1 buraco negro super-massivo no centro das galáxias E, S, SB e S0. Buracos negros e “matéria escura” são importantes para a evolução e morfologia (atuando como sementes para a formação das galáxias). Estima-se que BNs “menos” massivos e menor conteúdo de matéria escura favorecem a formação de galáxias SB.

AGN (“active galactic nuclei”)

1937: Grote Reber construiu o 1º rádio telescópio no quintal de sua casa. Dentre os objetos estudados, um ficou sem classificação: Cygnus A.

Com o desenvolvimento da rádio-astronomia nos anos 1940’s, inúmeras fontes poderosas de rádio foram descobertas.

Uma galáxia dita ativa quando exhibe uma ou mais das seguintes características: (i) atipicamente muito luminosa; (ii) núcleo muito brilhante semelhante a uma estrela; (iii) espectro com evidentes linhas de emissão (principalmente do hidrogênio); (iv) as variações na luminosidade são de tempos curtos; (v) jatos e/ou feixes de partículas e radiação emanando do núcleo.

AGN incluem quasares (“quasi-estellar radio source”), galáxias Seyfert, rádio galáxias, objetos BL Lacertae e fontes duplas de rádio, entre outros.

Atualmente, a teoria mais aceita para esses objetos é “unificante”: São **buracos negros super-massivos em acreção** de muita matéria vistos de diferentes ângulos. Isso implica que a fonte primária de energia desses objetos é gravitacional.

AGN (“active galactic nuclei”)

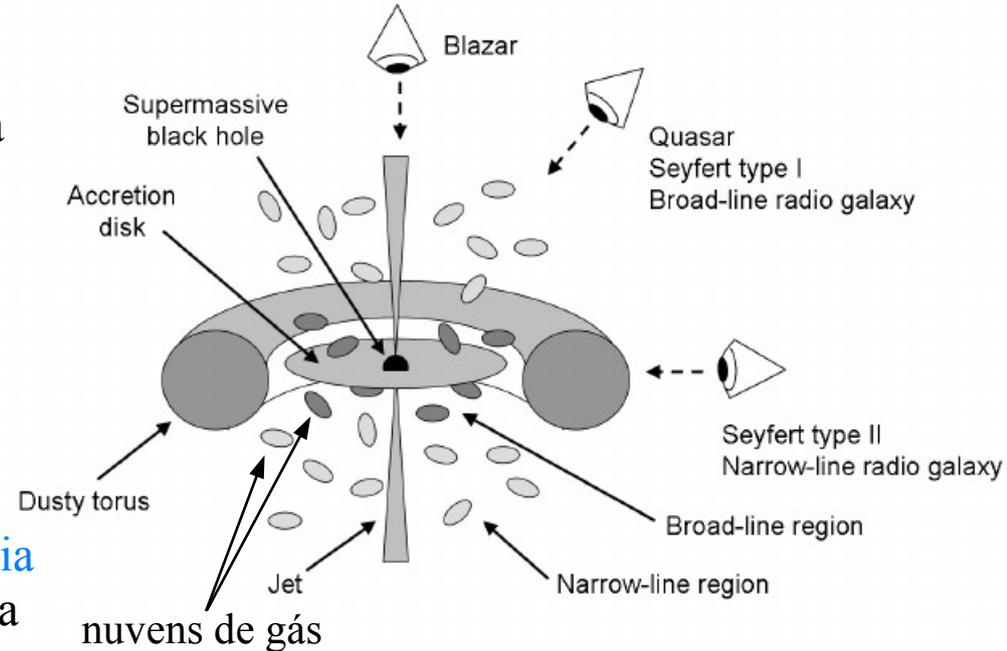
As diferentes luminosidades desses objetos é simples de ser entendida.

De acordo com o modelo, o jato de radiação concentra uma boa parte da energia liberada. Logo, dependendo da **linha de visada**, diferentes luminosidades e diferentes aspectos no espectro são observados.

De onde vem tamanha luminosidade?

Acreção de matéria por um buraco negro é um dos processos mais eficientes de conversão de matéria em energia. Dependendo das condições, até **40% da energia de repouso é emitida**: $0,4 mc^2$. (Compare com fusão da cadeia pp: $0,007 mc^2$.)

A variedade de brilho dos AGNs é devida às diversas condições de massa, densidade, etc, do disco de acreção e do buraco negro.



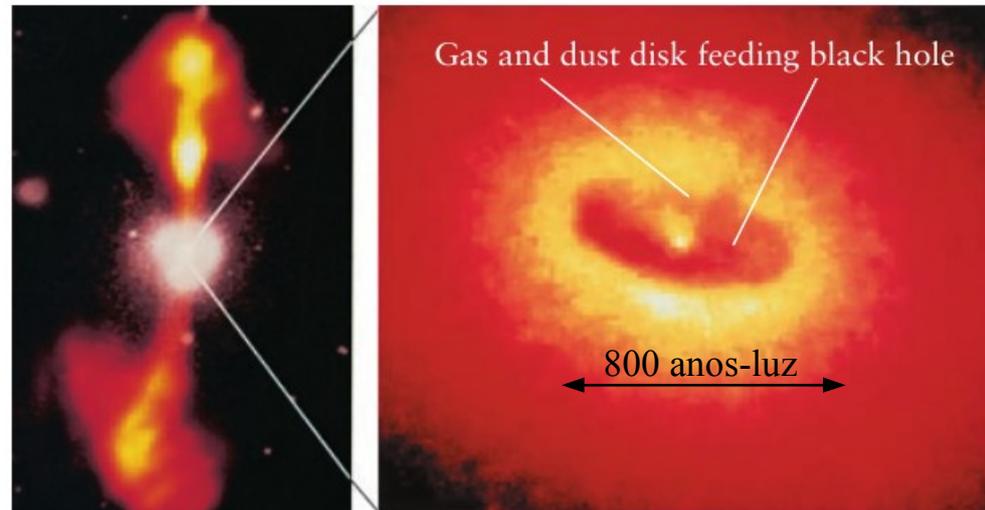
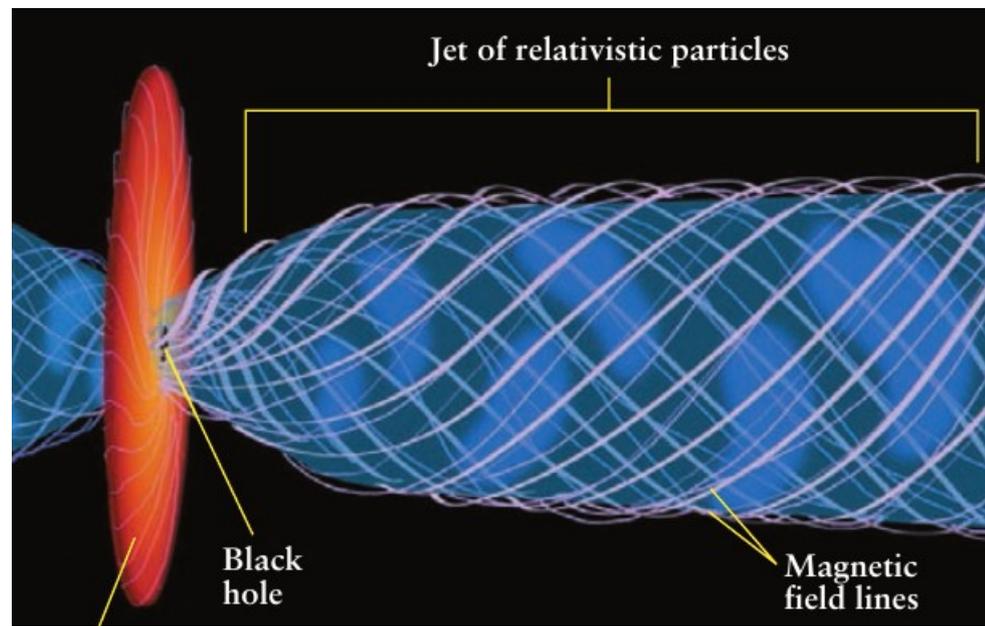
AGN (“active galactic nuclei”)

A velocidade da órbita dos gases mais internos no disco de acreção é maior → fricção com as camadas mais externas → gás aquece até 10 MK → emitem UV e raios-X.

(Processo idêntico ocorre em BNs estelares.)

Gás aquecido → expansão. O próprio disco de acreção guia a expansão para os pólos → **jatos**. Os altos **campos magnéticos** gerados pelos íons em alta velocidade colimam ainda mais os jatos → luz síncrotron.

Galáxia elíptica gigante NGC 4261
a 100 Mal de distância



b

R I V U X G

R I V U X G

AGNs

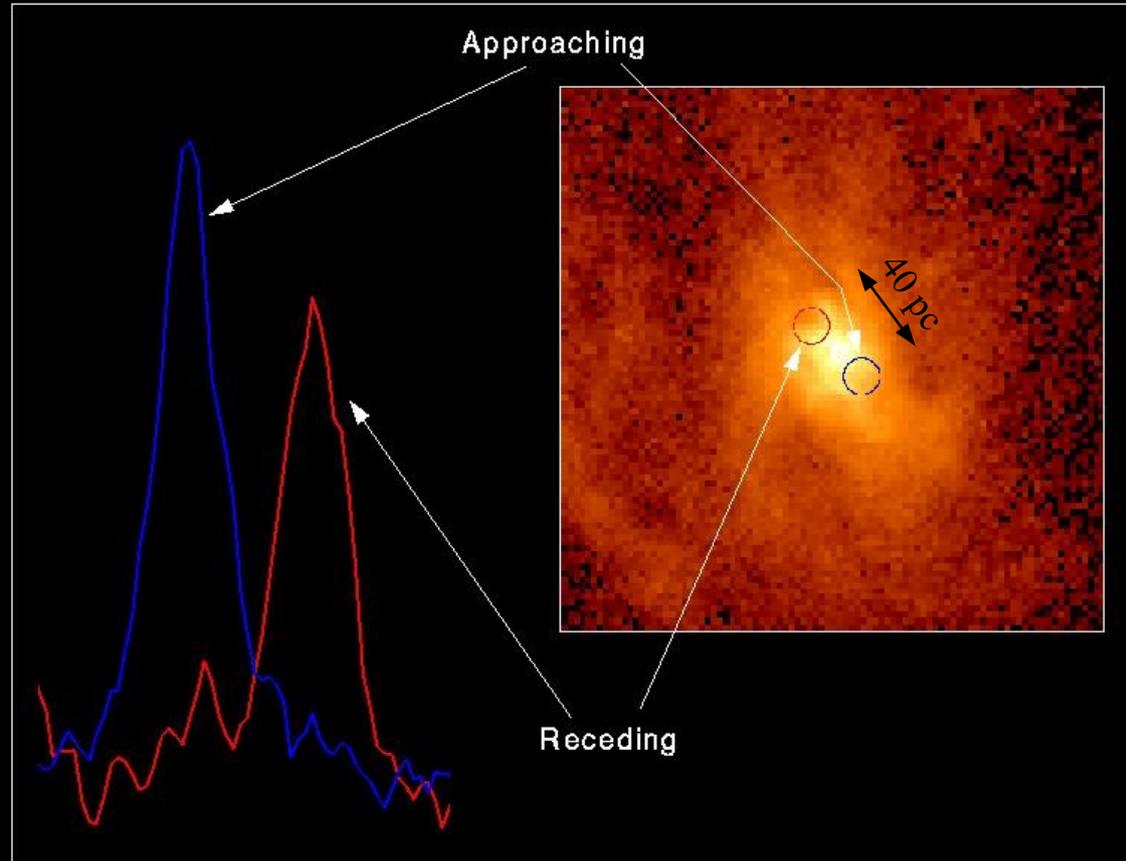
Ao lado, temos evidência experimental de que o AGN de M87 é um objeto compacto (Hoje sabe-se que há um BNSM de 5 bilhões de M_{sol} – Horizon telescope)

Doppler: $v \sim 550$ km/s

3ª lei de Kepler: $M = a^3/P^2 \sim 10^9 M_{\text{sol}}$

AGN \rightarrow gases aquecidos \rightarrow improvável instabilidade de Jeans \rightarrow galáxia pobre em formação estelar (quando comparadas com galáxias sem núcleo ativo). Em acordo com a observação experimental.

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph

Interferometria

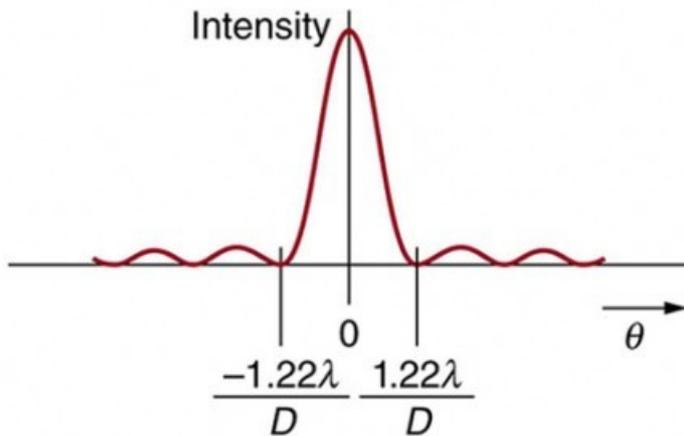
Qual o limite de difração do HST (cujo espelho primário é de $D = 2,4$ m) operando com luz de $\lambda = 500$ nm?

$$\theta_{\min} = \frac{1.22\lambda}{D} = 2.5 \times 10^{-7} \text{ rad} = 0.05''$$

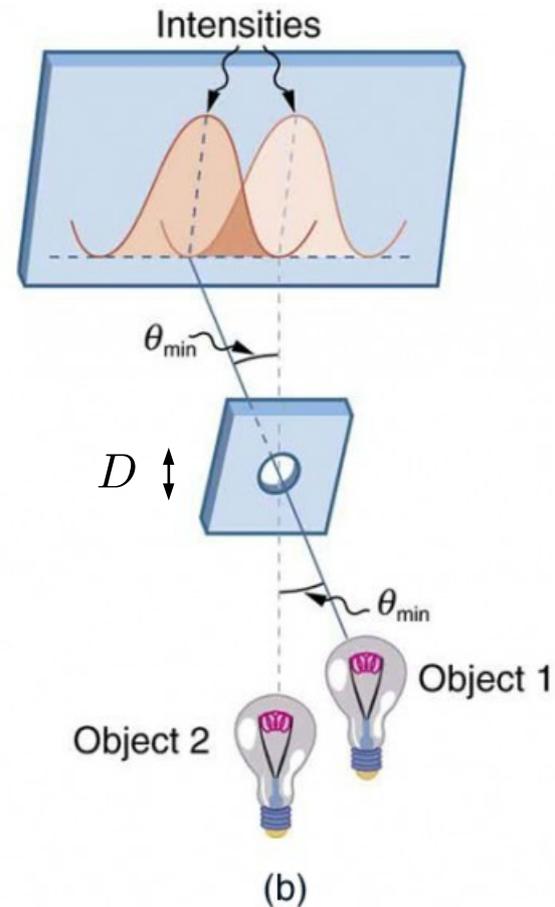
As imagens do HST têm resolução de $0,1''$, e são ditas de estarem próximas do limite de difração.

Telescópios operando no infravermelho e no rádio (comprimentos de onda \sim milímetros), mesmo tendo $D \sim 10$ m, não tem a resolução necessária para imagear as estrelas no centro galáctico (resolução melhor que $0.1''$). Como o imageamento foi feito?

Técnica de [interferometria astronômica](#).



(a)



(b)

Interferometria

Usando dois telescópios e superpondo (interferindo) a luz coletada pelos mesmos, o diâmetro efetivo do telescópio é igual à “base line”: distância entre os telescópios.

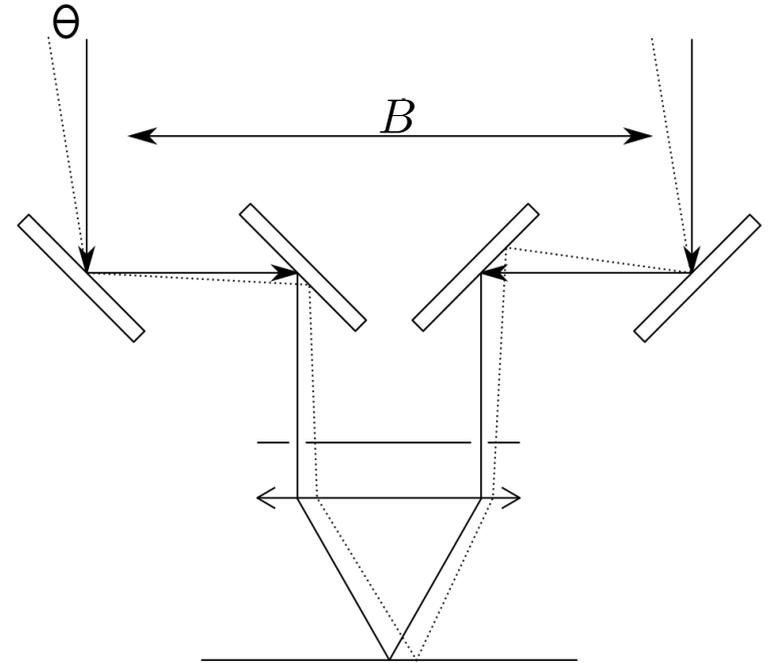
$$\theta_{\min} = \frac{1.22\lambda}{B}$$

Efetivamente, é como ter um telescópio de espelho primário de diâmetro B .

Evidentemente, a luz coletada não é a de um espelho dessa dimensão.

Vantagem é ter melhor resolução angular.

Construir espelhos com mais de 10 m de diâmetro é caro e complicado por causa das deformações de seu próprio peso (corrigidas por óptica ativa nos espelhos atuais).



Desenho esquemático do interferômetro estelar de Michelson, utilizado para medir o diâmetro de diversas estrelas, entre elas, Betelgeuse.

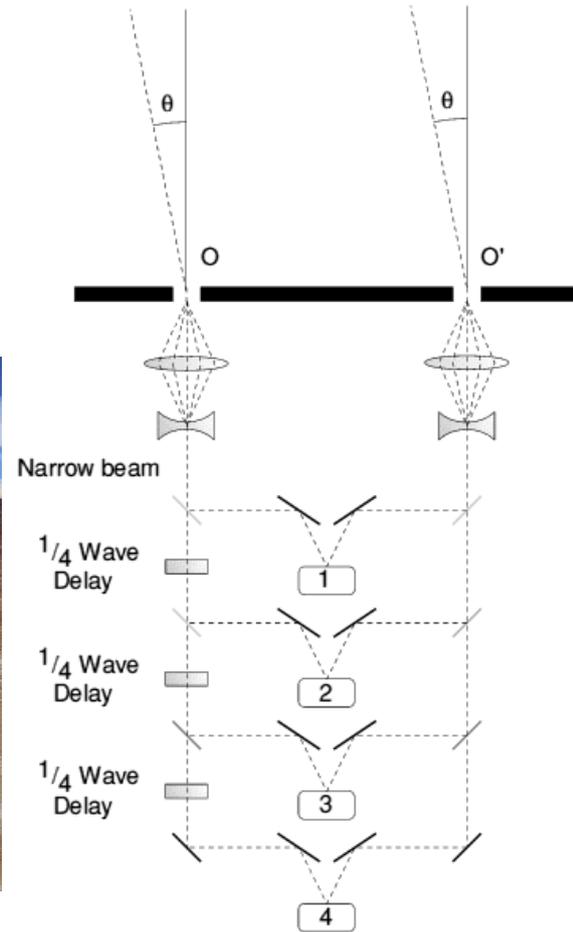
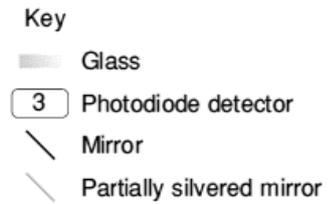
Interferometria

Por que parar em apenas dois telescópios?

Atualmente, a técnica usa vários telescópios espalhados pelo mundo inteiro.

Como fazer interferência entre a luz dos diversos telescópios?

Usa-se um “correlator”: um computador para correlacionar dos dados de **frequência**, **amplitude** e **fase** da luz captada pelos telescópios. Além disso, é importante medir com precisão o **instante de tempo** em que a luz é captada.



ALMA e seu correlator

AGNs: vendo o passado

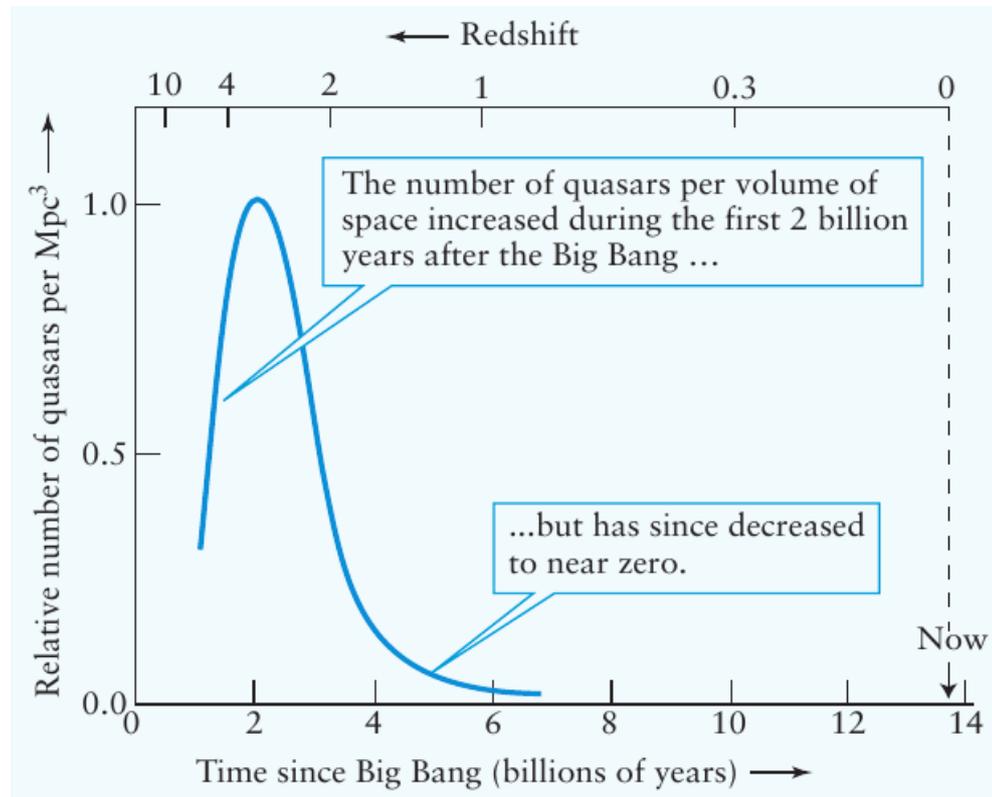
Observações mostram que o **número de AGNs não é constante** ao longo da evolução do universo.

Quando o disco de acreção é **exaurido** (seja pela captura ou pela ejeção), o mecanismo de AGN cessa. (Passando de blazar/quasar para os menos luminosos galáxia Seyfert/radiogaláxia.)

Perguntas em aberto:

AGN é uma etapa comum na evolução das galáxias? A nossa já teve um AGN?

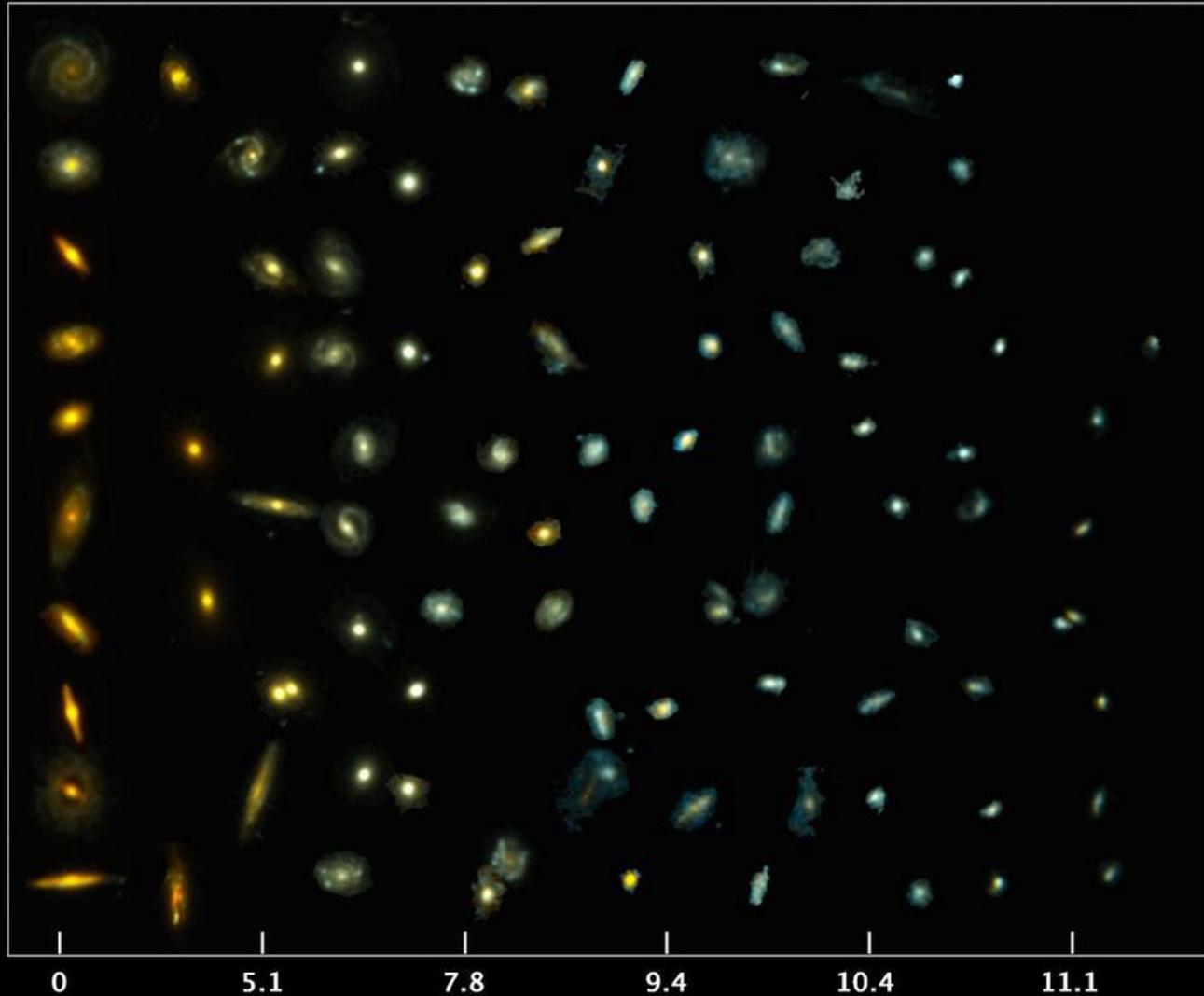
Como BNs super-massivos se formaram tão rapidamente (universo ainda jovem)?



AGNs: vendo o passado

Assim como o número de AGNs não é constante no tempo, a morfologia das galáxias também não é.

Esta é mais uma evidência de que as propriedades do universo não são constantes no tempo.



Um pouco de estória...

Cyg A é uma (rádio)galáxia de pouco brilho aparente e redshift 14 mil km/s \rightarrow 635 Mal (de acordo com a lei de Hubble).

Outras fontes poderosas de rádio foram catalogadas/descobertas ao longo dos anos, aumentando o mistério sobre a natureza desses objetos.

Muitos astrônomos achavam que esses objetos eram estrelas estranhas de nossa galáxia.

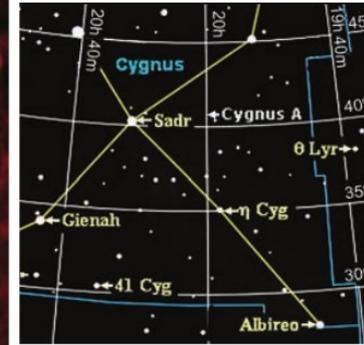
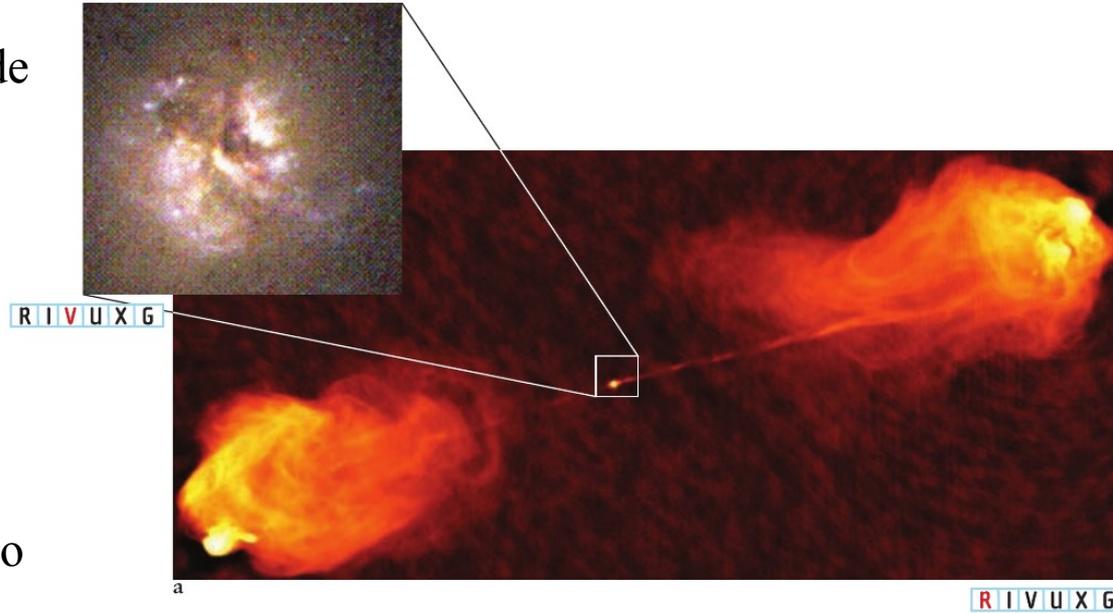
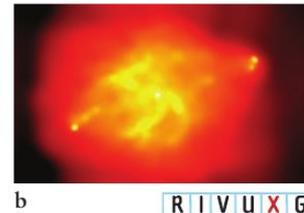


FIGURE 17-1 Cygnus A (3C 405) (a) Radio image produced from observations made at the Very Large Array. Most of the radio emissions from Cygnus A come from the radio lobes located on either side of the peculiar galaxy seen in the inset, a Hubble Space Telescope image. Each of the two radio lobes extend about 160,000 ly from the optical galaxy and contain a brilliant, condensed region of radio emission. Inset: At the heart of this system of gas lies a strange-looking galaxy that has a redshift that corresponds to a recessional speed of 5% of the speed of light. According to the Hubble law, Cygnus A is therefore 635 million ly from Earth. Because Cygnus A is one of the brightest radio sources in the sky, this remote galaxy's energy output must be enormous. (b) An X-ray image of Cygnus A taken by the Chandra X-ray Observatory showing that some of the jet particles from the central source have spread throughout the galaxy and, striking other gas and dust, caused this debris to heat and emit X-rays. (a: NRAO/AUI/NSF/Science Photo Library; inset: William C. Keel,



... e do mistério

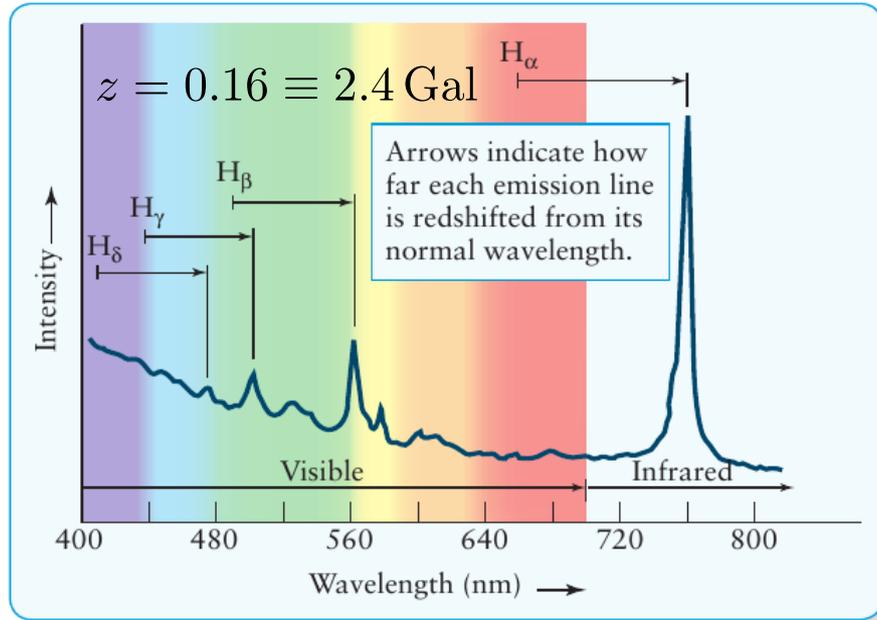


FIGURE 17-4 **Spectra of 3C 273** The visible and infrared spectra of 3C 273 are dominated by four bright emission lines caused by hydrogen. This radiation is redshifted nearly 16% from its rest wavelengths.

A diversidade de “redshifts” dificultava a identificação das linhas espectrais e classificação desses objetos.

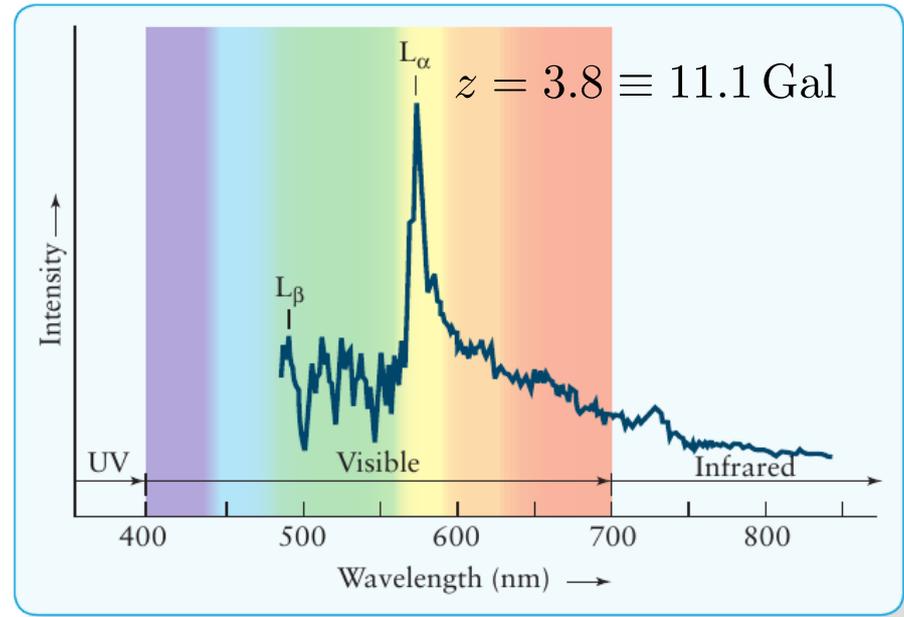


FIGURE 17-5 **Spectrum of a High-Redshift Quasar** The light from this quasar, known as PKS 2000-330, is so highly redshifted that spectral emission lines normally found in the far-ultraviolet (L α and L β) are seen at visible wavelengths. Note the many deep absorption lines on the short-wavelength side of L α . These lines, collectively called the Lyman-alpha forest, are believed to be created by remote clouds of gas along our line of sight to the quasar. Hydrogen in these clouds absorbs photons from the quasar at wavelengths less redshifted than the quasar's L α emission line.

Galáxias Seyfert

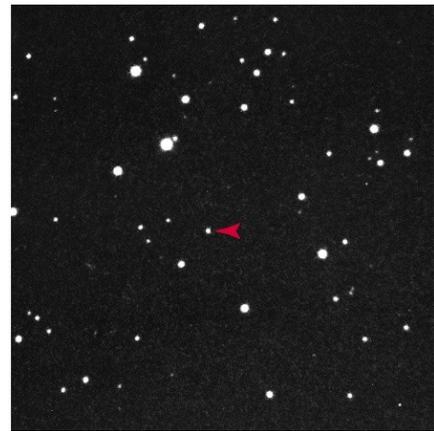
Galáxias **espirais** cujos núcleos são atipicamente brilhantes e “pontuais”. (Estima-se que 1% de todas as galáxias espirais são Seyfert.)

Galáxias Seyfert são **análogas a quasares** de mais baixa luminosidade onde a galáxia anfitriã se torna visível. (Quasares geralmente são mais distante e luminosos, por isso a galáxia anfitriã geralmente não é visível; mas ocorrem em ambas galáxias elípticas e espirais.)

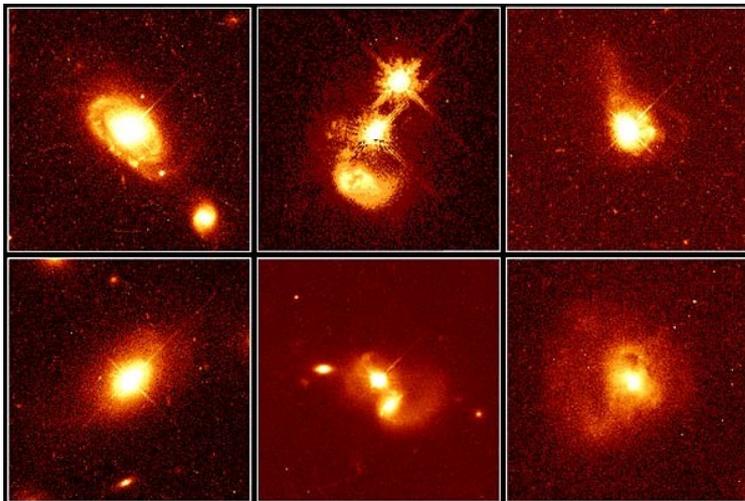


R I V U X G

FIGURE 17-8 Seyfert Galaxy NGC 1566 This Sc galaxy is a Seyfert galaxy some 50 Mly (16 Mpc) from Earth in the southern constellation Dorado (the Goldfish). The nucleus of this galaxy is a strong source of radiation whose spectrum shows emission lines of highly ionized atoms. (NASA/JPL-Caltech/R. Kennicutt [University of Arizona] and the SINGS Team)



Quasares aparentam compactos (como estrelas).



Quasar Host Galaxies

HST • WFPC2

PRC96-35a • ST ScI OPO • November 19, 1996
J. Bahcall (Institute for Advanced Study), M. Disney (University of Wales) and NASA

Radiogaláxias

São galáxias com intensa emissão em rádio (10^{36} a 10^{38} W). Observadas no ótico, geralmente têm a aparência de uma galáxia elíptica grande, mas, observadas em rádio, apresentam uma estrutura dupla, com dois lóbulos emissores em rádio. Outra característica das radiogaláxias é a presença de um jato de matéria saindo da fonte central, localizada no núcleo da galáxia.

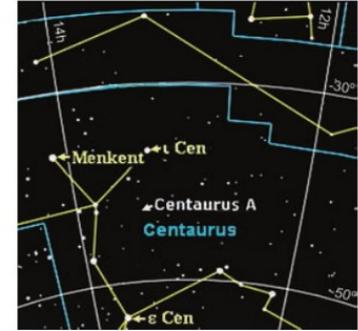
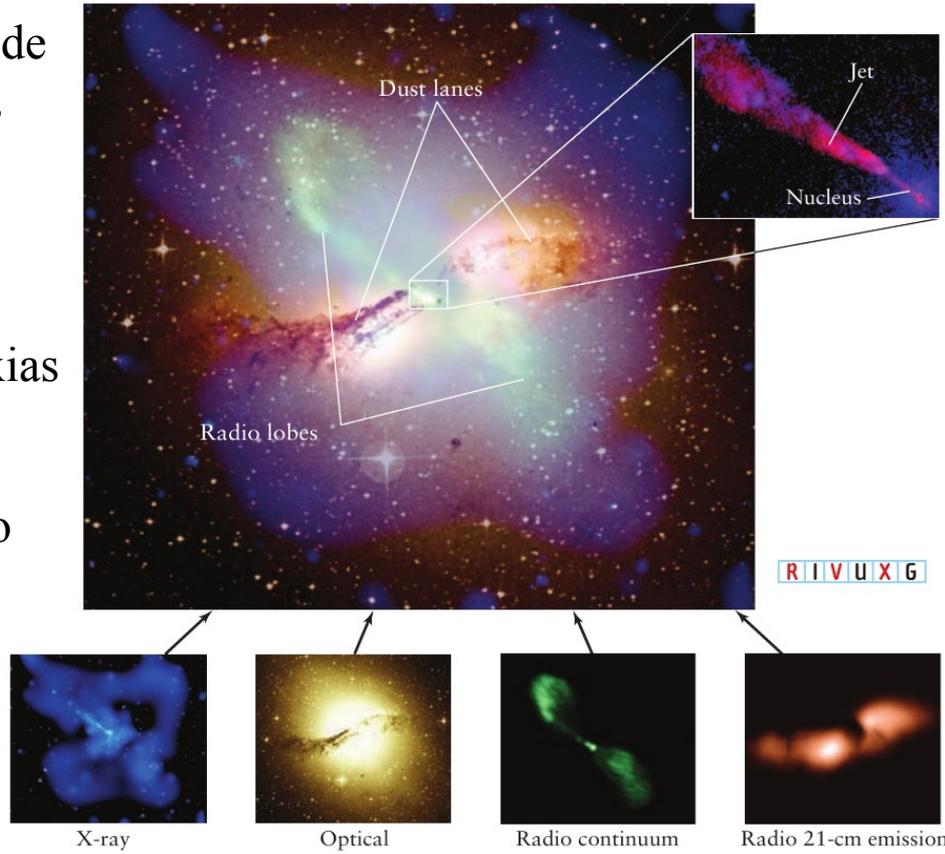


FIGURE 17-9 Peculiar Galaxy NGC 5128 (Centaurus A)
This extraordinary radio galaxy is located in the constellation Centaurus, 11 million light-years from Earth. At visible wavelengths a dust lane crosses the face of the galaxy. Superimposed on this visible image is a false-color radio image (green) showing that vast quantities of radio radiation pour from matter ejected from the galaxy perpendicular to the dust lane, along with radio emission (rose-colored) along the dust lane, and X-ray emission (blue) detected by NASA's Chandra X-ray Observatory. The X-rays may be from material ejected by the black hole or from the collision of Centaurus A with a smaller galaxy. Inset: This X-ray image from the Einstein Observatory shows that NGC 5128 has a bright X-ray nucleus. An X-ray jet protrudes from the nucleus along a direction perpendicular to the galaxy's dust lane. (X-ray: NASA/CXC/M. Karovska et al.; radio 21-cm: NRAO/VLA/J. Van Gorkom/Schminovich et al.; radio continuum: NRAO/VLA/J. Condon et al.; optical: Digitized Sky Survey U.K. Schmidt Image/STScI; inset: X-ray: NASA)

BL Lacertae

"Twinkle, twinkle quasi-star
Biggest puzzle from afar
How unlike the other ones
Brighter than a billion suns
Twinkle, twinkle, quasi-star
How I wonder what you are."
- George Gamow, "Quasar" 1964.

Tão ou mais luminosos que quasares, são fontes de **raios gama**.

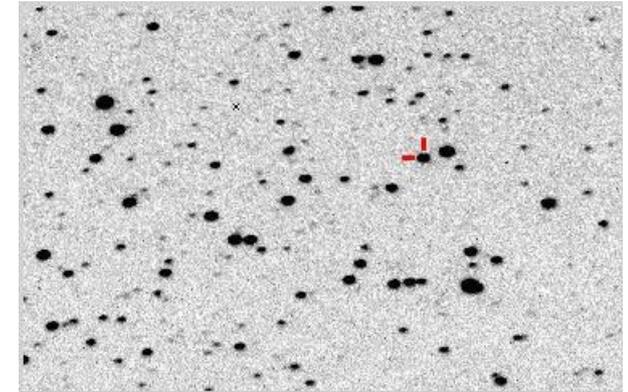
Conjunto fraco de linhas espectrais (difícil identificar).

Luz **polarizada** no visível e no rádio, característica de emissão de **luz síncrotron** de jatos relativísticos.

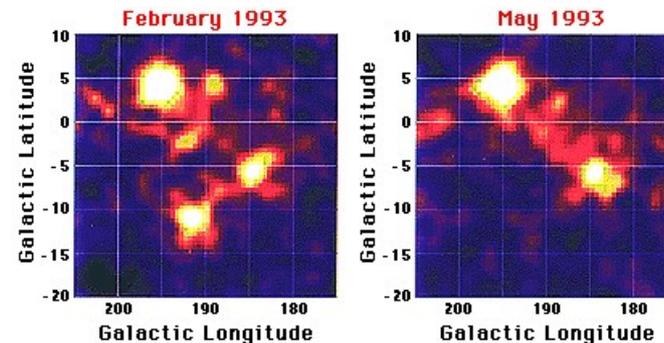
Análogo das galáxias Seyfert, mas em galáxias elípticas.

Luminosidade com **rápidas flutuações temporais** → fontes pequenas. (Quando a flutuação ocorrem em questões de horas ou dias, denomina-se blazar.)

(Em 2004, descobriu-se um blazar de 10 bilhões de M_{sol} a 12,5 Bal de distância. Como tal objeto se formou tão rapidamente?)

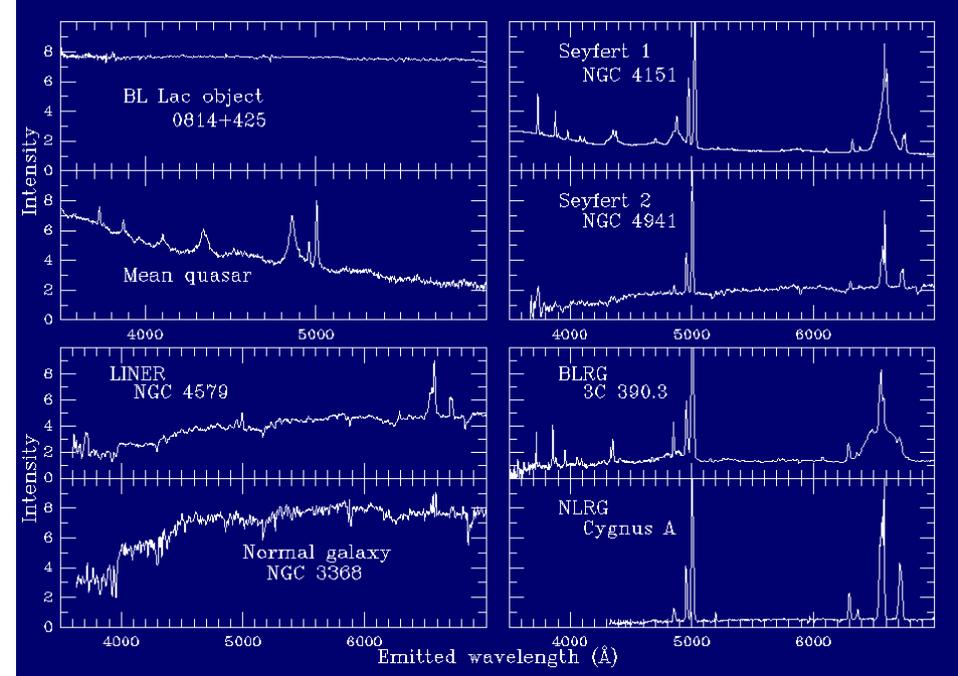
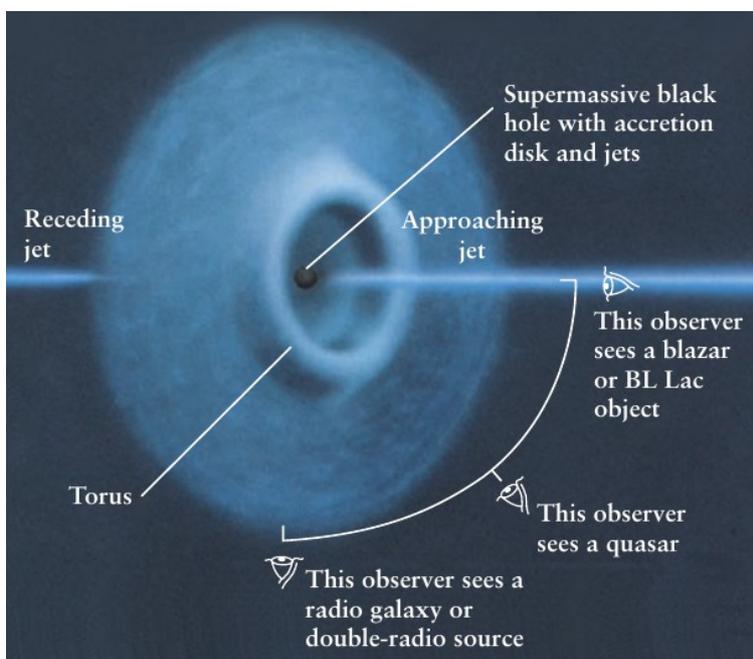


BL Lac



galáxia PKS0528

AGNs



Quadro comparativo de AGNs:

Propriedade	Radiogaláxias	Galáxias Seyfert	Objetos BL Lac	Quasares
Espectro contínuo	não-estelar	não-estelar	não-estelar	não-estelar
Linhas de emissão	largas e estreitas	largas e estreitas	nenhuma ou fraca	largas e estreitas
Forma no óptico	elíptica	espiral	estelar	estelar
Forma no rádio	jatos e lóbulos	emissão fraca	emissão fraca	jatos e lóbulos
Luminosidade (W)	10^{36} a 10^{38}	10^{36} a 10^{38}	10^{38} a 10^{42}	10^{38} a 10^{41}

Luminosidade do Sol: $3,8 \times 10^{26}$ W

Luminosidade da Via Láctea: 10^{37} W

“Colisão” de galáxias

Colisão (ou mais precisamente coalescência) de galáxias é um processo comum na evolução. Geralmente, as galáxias em colisão sofrem um “surto” de formação estelar (“starburst galaxies”).

Enquanto as estrelas atravessam a outra galáxia e deixam um rastro de estrelas no meio intergaláctico (**bridges**), os gases se “chocam” e esquentam a milhões de Kelvin emitindo raios-X.

Se a colisão for “no alvo”, um anel de intensa formação estelar se forma.

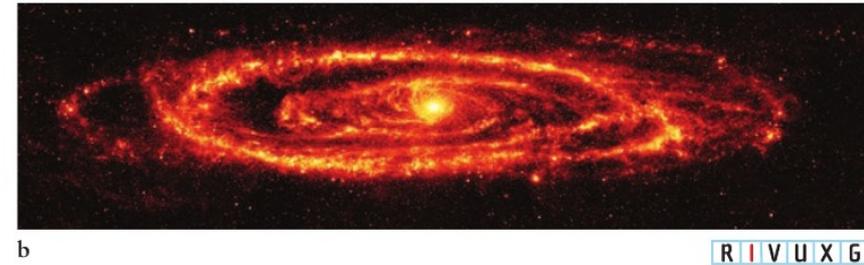
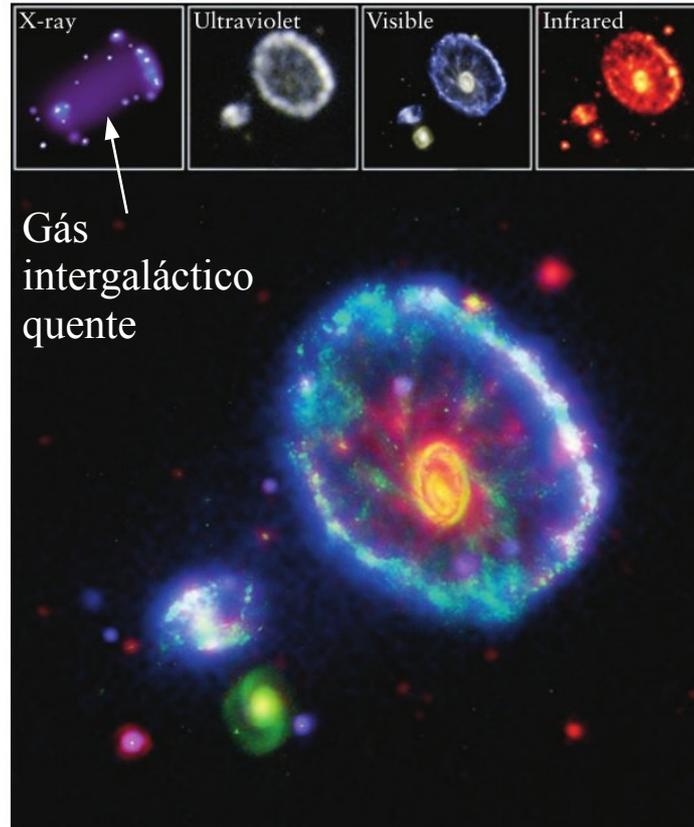
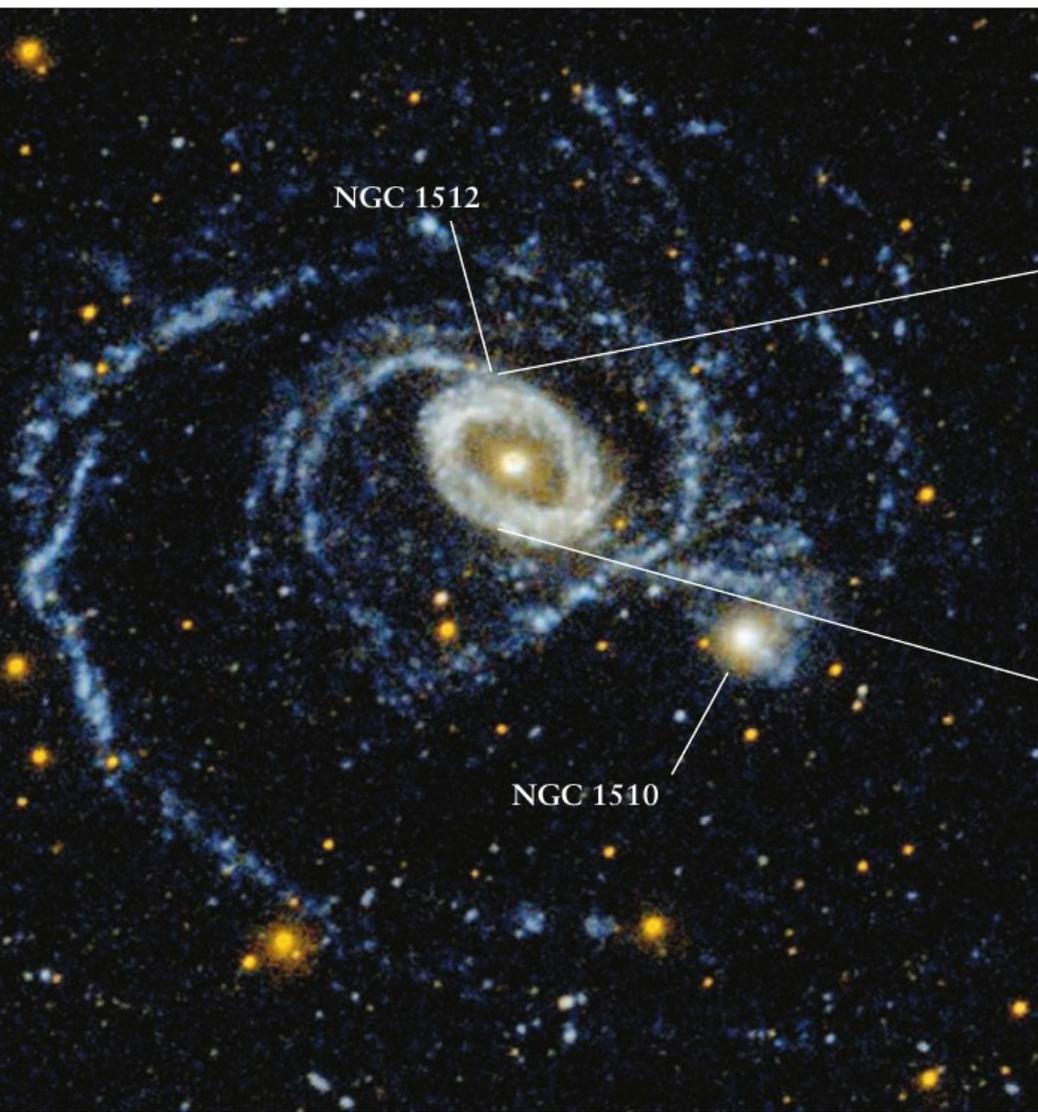


FIGURE 16-22 Galaxies with Rings (a) A composite image of the Cartwheel Galaxy. This ring-shaped assemblage 500 million light-years from Earth is likely the result of one galaxy, probably the blue-white one below it at the eight o'clock position, having passed through the middle of the larger one. Astronomers suspect that the passage created a circular density wave in the Cartwheel, analogous to the ripple created by a rock thrown in a pond. This wave stimulated a burst of star formation, creating many bright blue and white stars. Ultraviolet is in blue, visible light in green, infrared in red, and X-ray in violet. (b) Infrared image of the Andromeda Galaxy. The ring of hot dust indicates star formation, probably caused by the passage of another galaxy through Andromeda. The fact that the ring is disturbed suggests that yet another galaxy had a close interaction with Andromeda. (a: NASA/JPL-Caltech/P. Appleton [SSC/Caltech]; a1: NASA/CXC/A. Wolter & G. Trinchieri et al.; a2–a4: NASA/JPL-Caltech/P. Appleton [SSC/Caltech]; b: NASA/JPL-Caltech/K. Gordon University of Arizona)



Cartwheel Galaxy

R I V U X G

Outro exemplo de formação de anel rico em regiões de formação estelar.



NGC 1512

R I V U X G

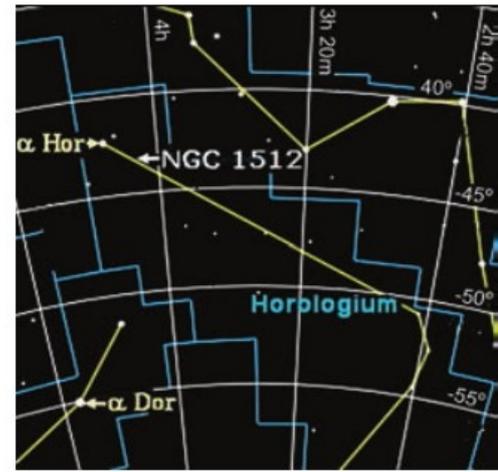
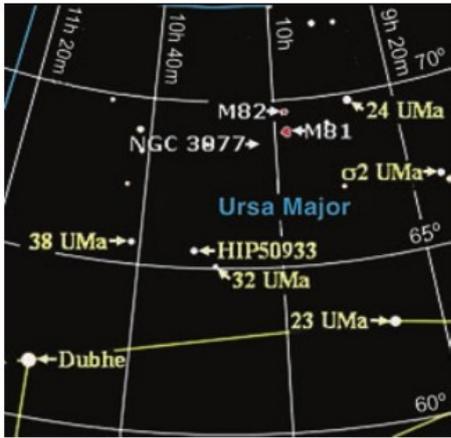


FIGURE 16-23 A Starburst Galaxy NGC 1512, located 30 Mly away in the constellation Horologium, is 70,000 ly across. Inset: A ring of vigorous star formation 2400 light-years wide highlights this ultraviolet, visible light, and infrared composite image of the core of this galaxy. NGC 1512 may have recently passed close to its companion NGC 1510, thereby stimulating the starburst. Such rings of star formation are common in starburst galaxies. (NASA/Caltech-JPL; inset: HST/NASA/ESA)

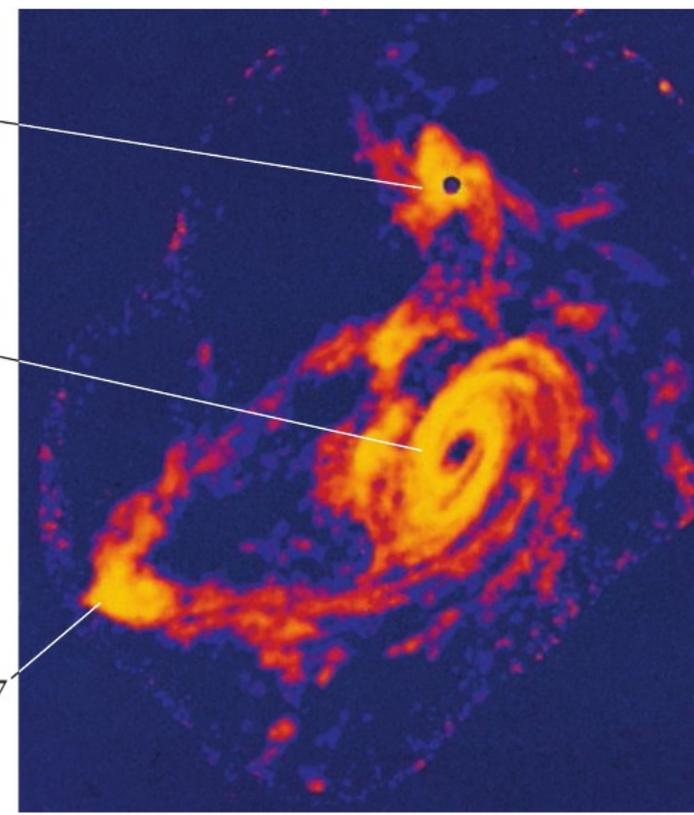


R I V U X G



a

R I V U X G



b

R I V U X G

FIGURE 16-24 The M81 Group

The Irr II starburst galaxy M82 (see also the chapter-opening image) is in a nearby cluster of about a dozen galaxies, including the spectacular spiral M81. Several of the galaxies in this cluster are connected by streamers of hydrogen gas. (a) The three brightest galaxies in the cloud at visual wavelengths. The inset on the left shows large volumes of hydrogen gas, in red, being ejected from M82.

(b) This radio image, created from data taken by the Very Large Array, shows the streamers of hydrogen gas that connect the bright galaxies and also several dim ones, seen as regions of bright orange here. (inset: Mark Westmoquette (University College London),

Gases no meio intergaláctico evidenciam que as galáxias estão interagindo.





Céu em 4 bilhões de anos: após se atravessarem



Céu em 5 bilhões de anos



Céu em 7 bilhões de anos

Simulações e observações

<https://www.youtube.com/watch?v=C0XNyTp5brM>

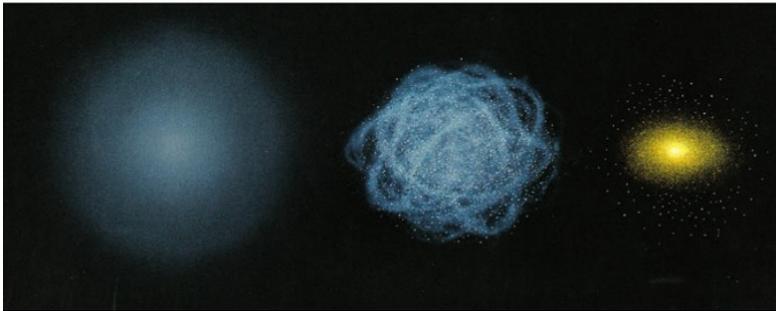
Origem das galáxias

Estima-se que as primeiras galáxias surgiram a 200 – 400 milhões de anos após a origem do universo. Elas se originaram de nuvens de gases sem metais que se colapsaram de maneiras distintas dependendo de suas massas e momento angular. Se as estrelas são formadas rapidamente (antes de um disco se formar), a protogaláxia evolui para uma galáxia elíptica. Caso contrário, lenticular ou espiral. Por que as elípticas não possuem braços, a formação estelar correspondente decai rapidamente no tempo.

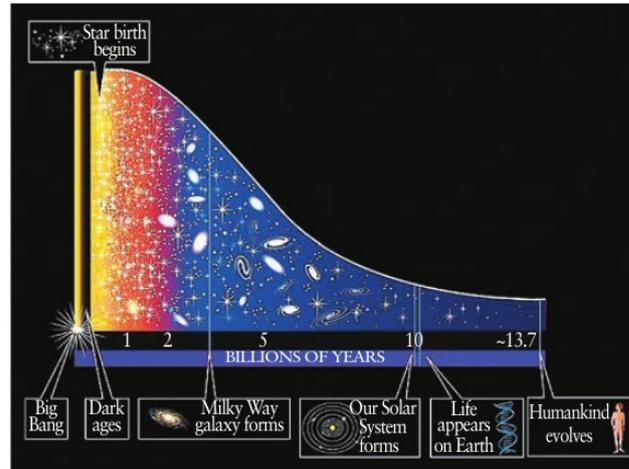
Sequence of events →



a Formation of a disk galaxy

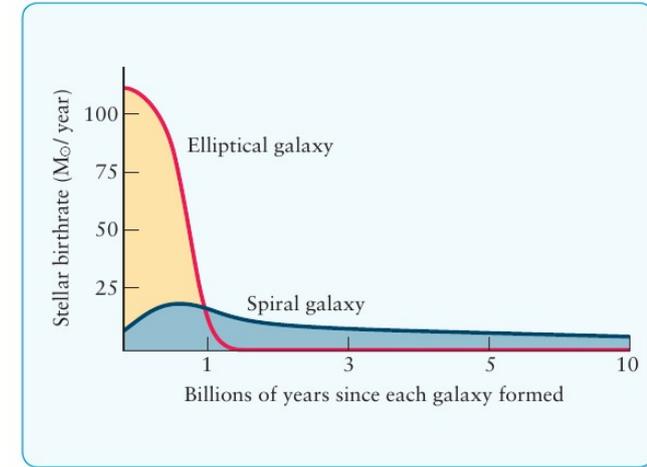


b Formation of an elliptical galaxy



a

FIGURE 18-17 Stellar Birth Rates (a) This figure shows that star formation started quickly in the life of the universe and has been tapering off ever since. (b) Most of the stars in an elliptical

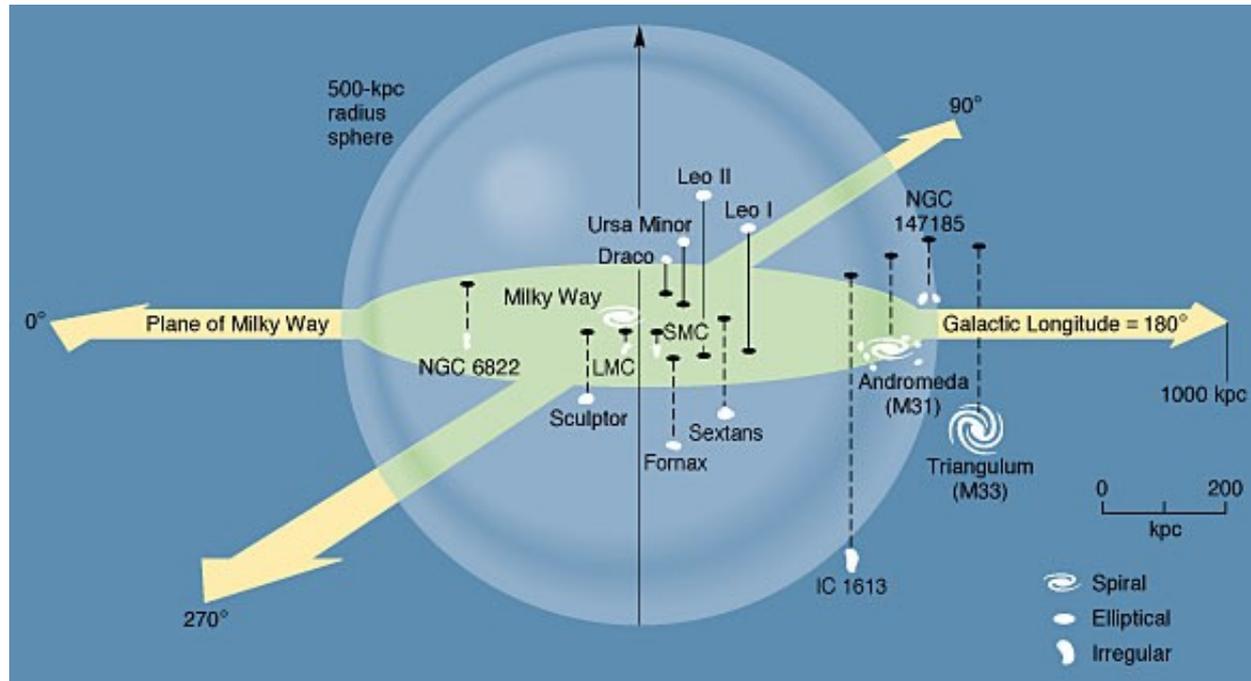


b

galaxy are created in a brief burst of star formation when the galaxy is very young. In spiral galaxies, stars form at a more leisurely pace that extends over billions of years.

Aglomerados e super-aglomerados de galáxias

Galáxias não estão distribuídas uniformemente pelo universo. Se concentram em aglomerados e super-aglomerados (<https://www.eso.org/public/videos/cluesAdler-cylindrical/>). Observações indicam que os super-aglomerados não estão ligados gravitacionalmente e se afastam um dos outros com o tempo. (Universo em expansão.)



Grupo local de galáxias

Aglomerado de galáxias Abell 370 em Cetus.

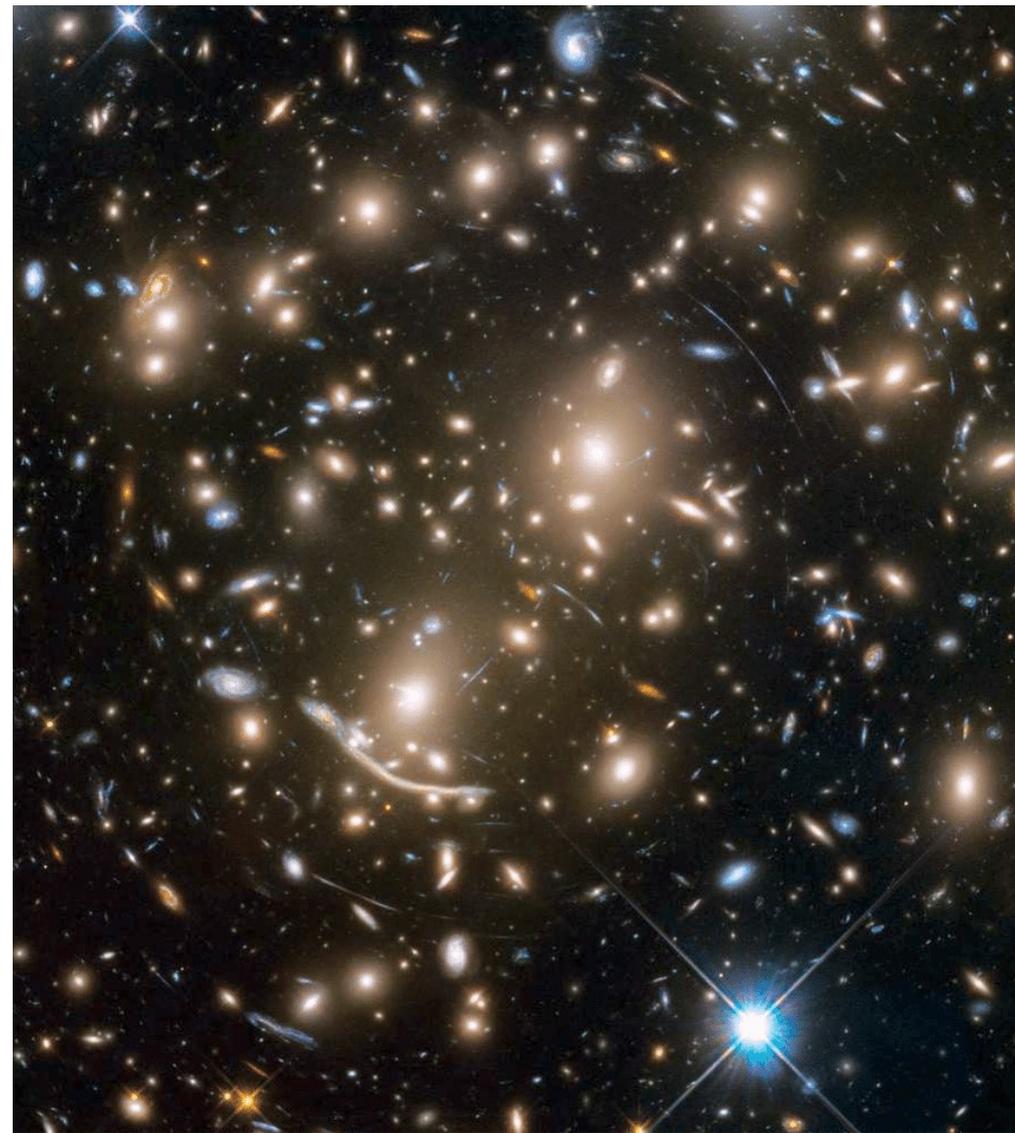
Redshift: $z = 0,375$; 4,7 bilhões de al de distância.

Fortes efeitos de lentes gravitacionais (ache “o dragão”).

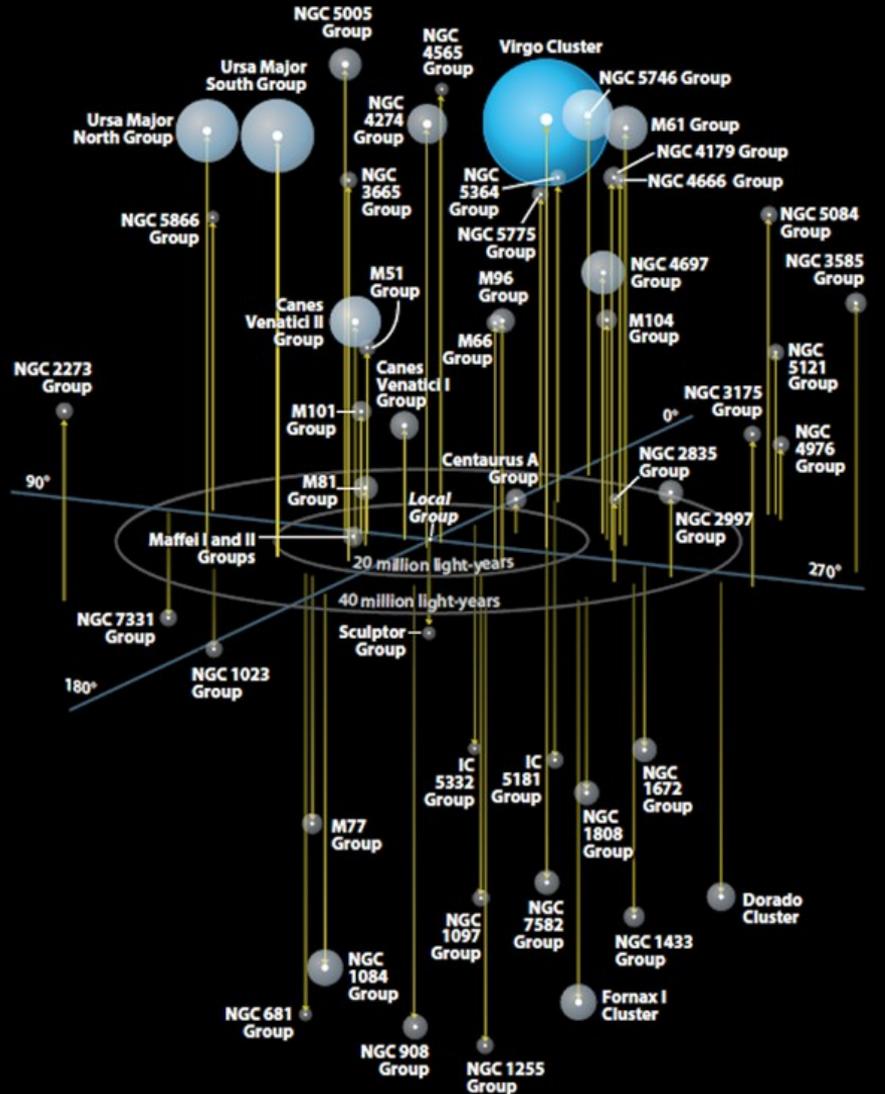
Contem várias centenas de galáxias

Outro exemplo de aglomerado de galáxias é o de Hércules:

<https://www.eso.org/public/videos/eso1211a/>



Mapping the Virgo Supercluster



Aglomerado de Virgem



M87: galáxia do tipo E0 está a ~53 milhões de anos luz da Terra e contém um BN super-massivo de $10^9 M_{\odot}$

Tipicamente, um super-aglomerado contém dezenas de aglomerados em um região $\sim 150 \text{ Mpc}$ e massa $\sim 10^{15} M_{\odot}$. O grupo local de galáxias está em “rota de colisão” com o aglomerado de Virgem.

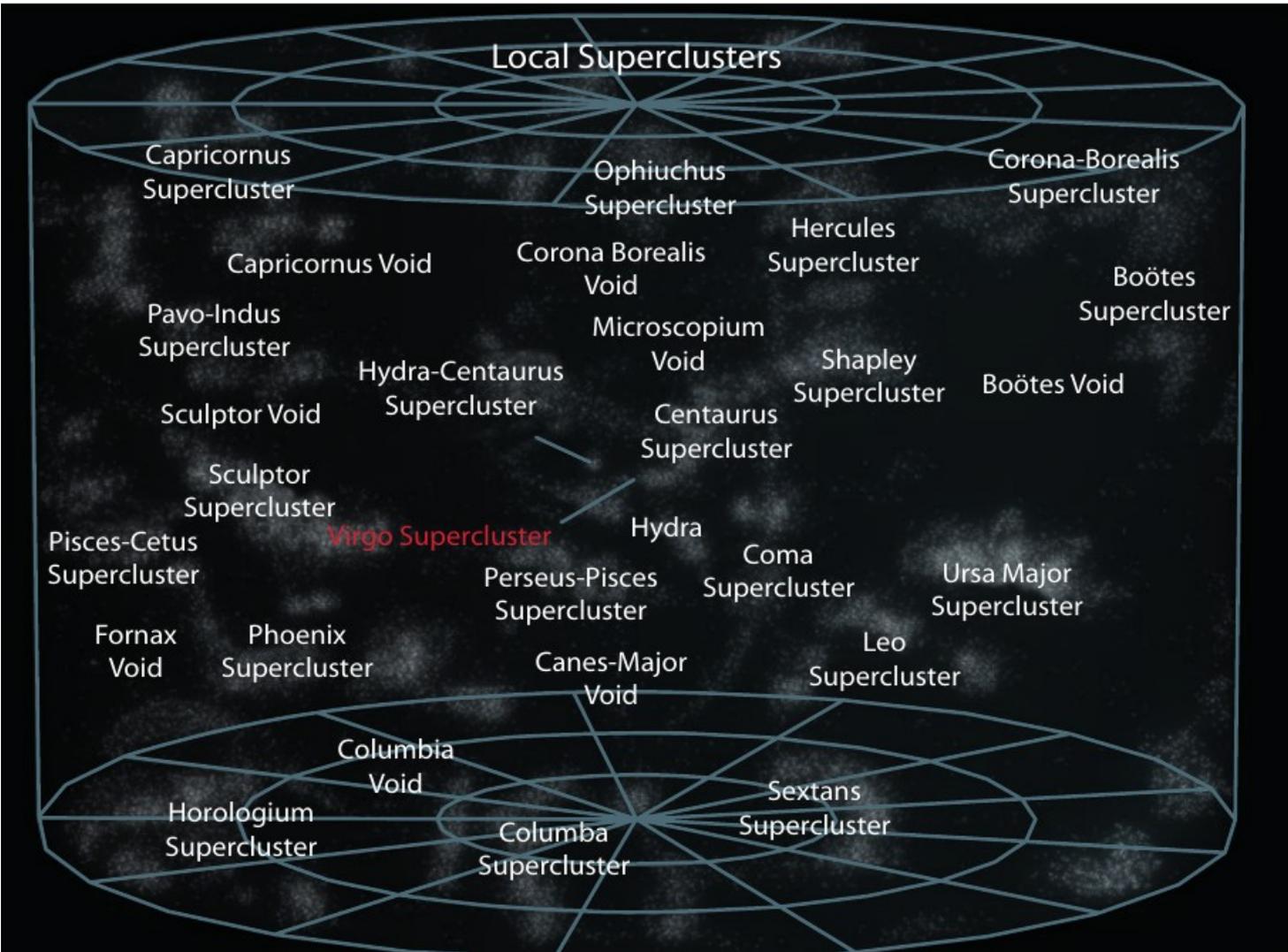


FIGURE 16-16 Superclusters in Our Neighborhood This diagram shows the distances and relative positions of superclusters within 950 million light-years of Earth. Note also the labeling of some of the voids, which are large, relatively empty regions between superclusters. (Andrew Z. Colvin)

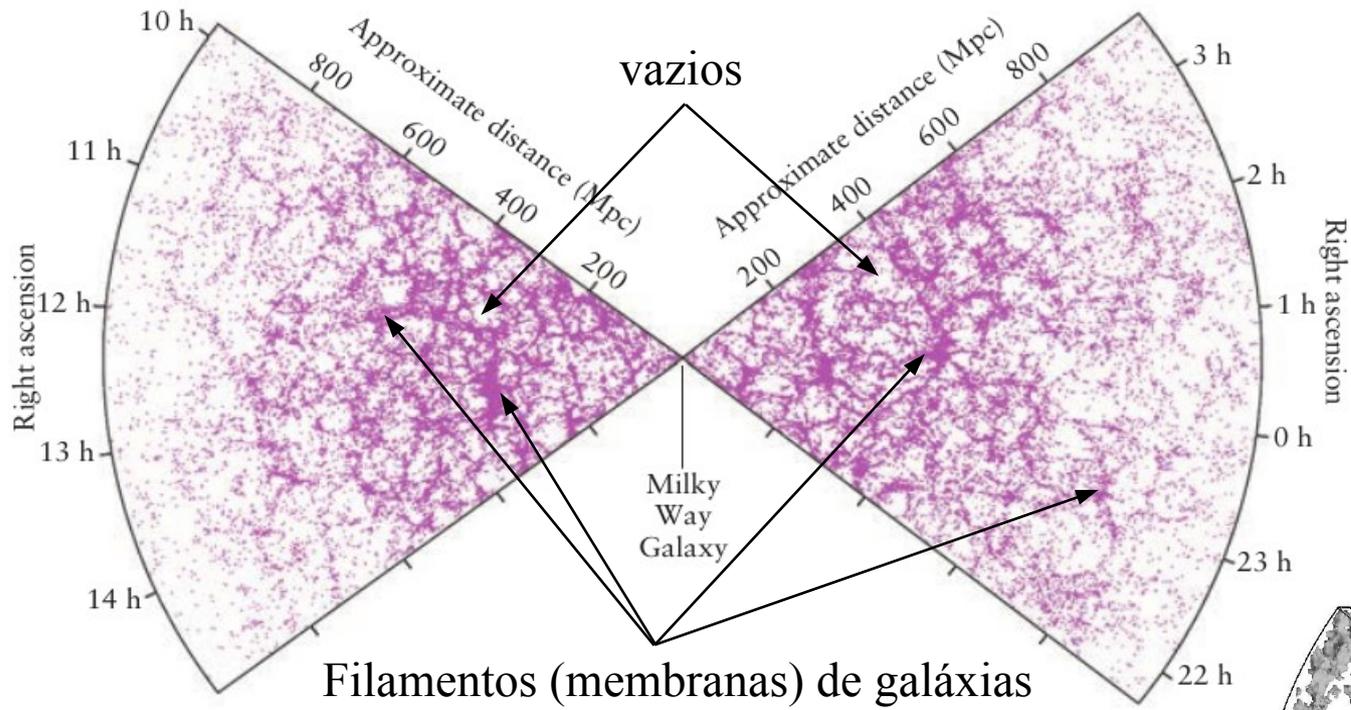
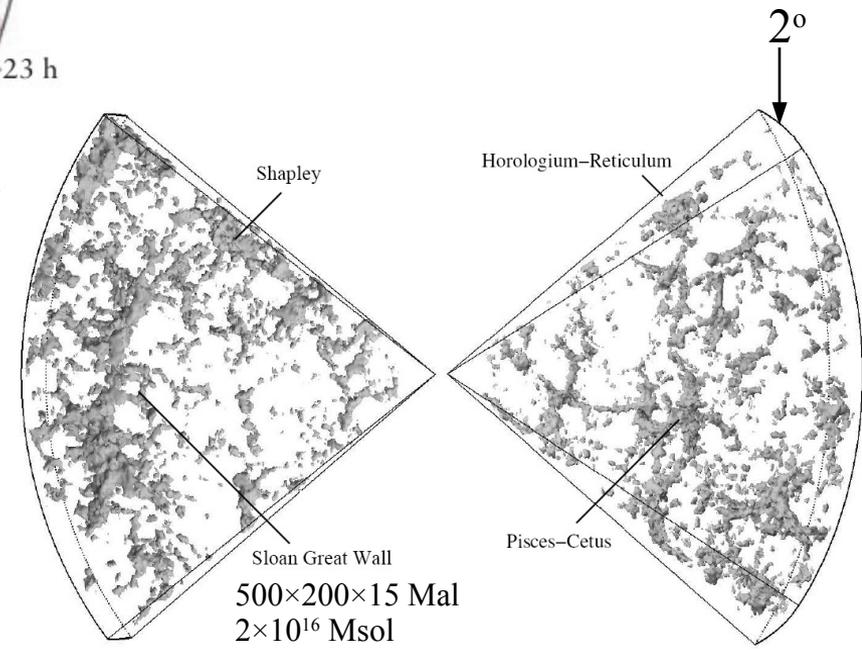


FIGURE 16-17 Structure in the Universe This map shows the distribution of 62,559 galaxies in two wedges extending in opposite directions from Earth out to distances of 3.25 billion light-years. For an explanation of right ascension (r.a.), see Section 1-3. Note the prominent voids surrounded by thin areas full of galaxies. (Courtesy of the 2dF Galaxy Redshift Survey Team)



The 2dF Galaxy Survey

Aglomerados e super-aglomerados de galáxias não se distribuem uniformemente. Eles formam filamentos, membranas e vazios (de 100 – 400 Mal de diâmetro) que formam a **Estrutura de Larga Escala** do universo. Entender a estrutura (tipo esponja ou bolha de sabão) é tema de intensa pesquisa porque nos fornece informações sobre as condições do universo jovem.