

Aglomerados de galáxias

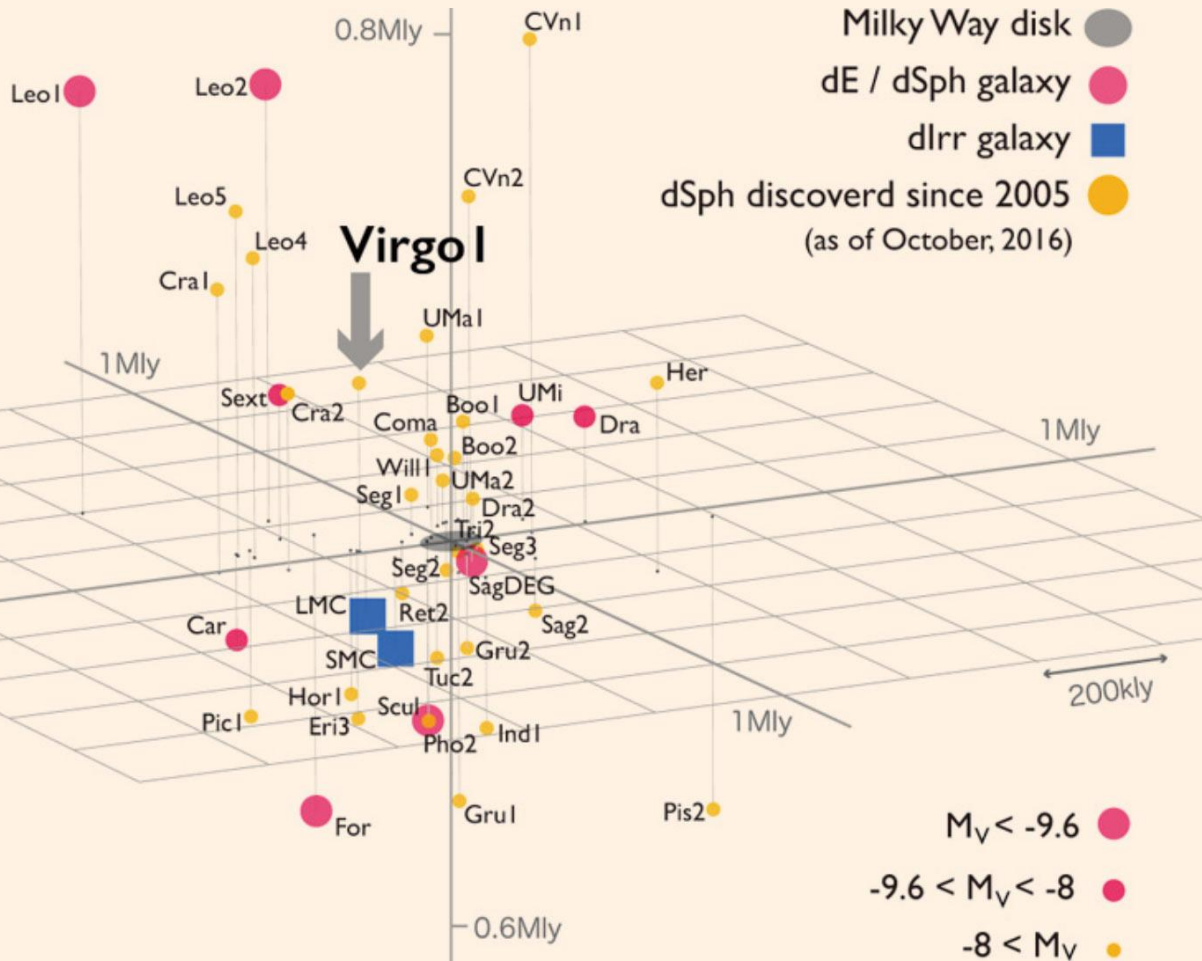
Professor Allan Schnorr Müller

IF/UFRGS

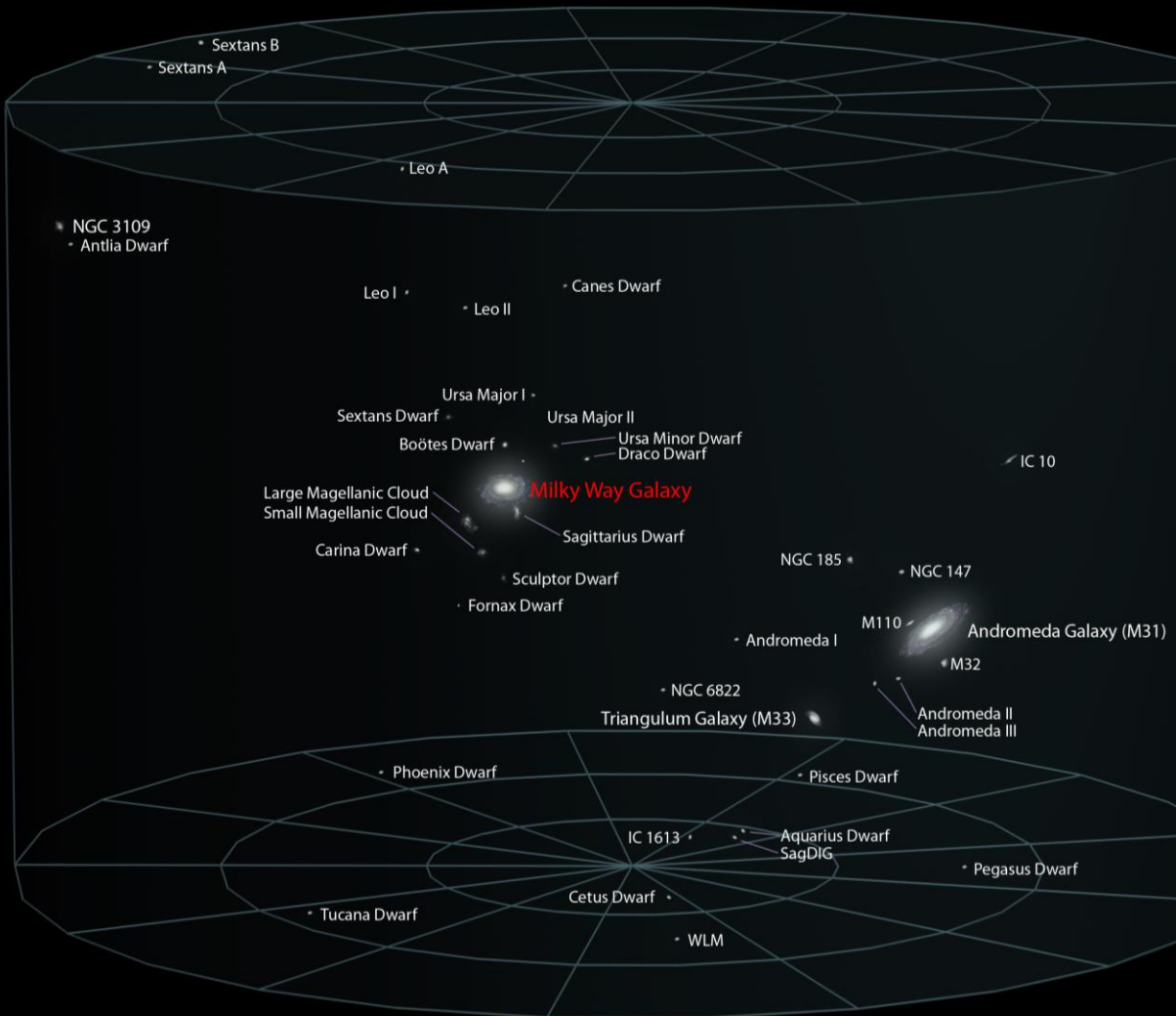
A Via-Láctea é uma galáxia solitária?



A Via-Láctea é uma galáxia solitária?



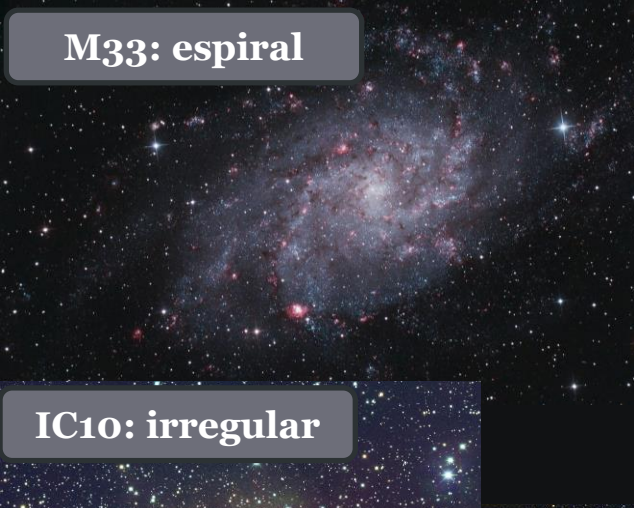
- **Resposta:** não!
- A Via Láctea possui um sistema de galáxias satélites anãs que a orbitam devido à sua interação gravitacional;
- Entre as galáxias satélites da Via Láctea estão a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães, visíveis no hemisfério sul.



O Grupo Local

- O Grupo Local é formado por mais de 50 galáxias;
- O Grupo Local possui ≈ 10 milhões de anos luz (≈ 3 Mpc) de diâmetro;
- As 3 galáxias mais luminosas são M31 (Andrômeda), Via Láctea e M33 (galáxia do Triângulo);
- M31 e a Via Láctea possuem um sistema de galáxias satélites próprio;
- 3 galáxias são espirais: Via Láctea, M31 e M33;
- 14 galáxias são irregulares de diferentes tamanhos
- As demais são galáxias anãs elípticas ou anãs esferoidais.

M33: espiral



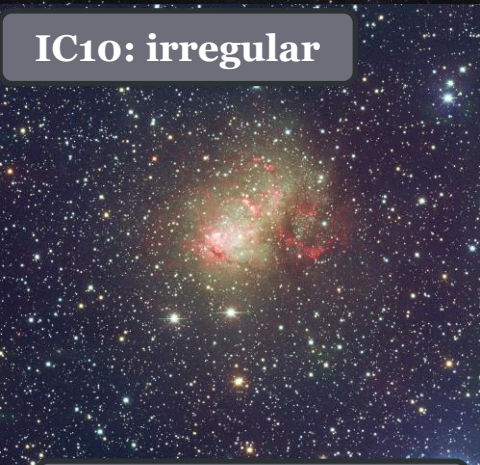
M110: anã elíptica



Andrômeda (M31): espiral



IC10: irregular



NGC3109: irregular



M32: anã elíptica



Anã de Antlia: anã esferoidal



NGC0147: anã esferoidal





Sistemas de galáxias

- Galáxias não estão distribuídas uniformemente no espaço, mas tendem a se concentrar em sistemas de todos os tamanhos, onde se encontram ligadas gravitacionalmente;
- Esses sistemas são classificados em duas categorias: grupos e aglomerados;
- **Grupos:** dezenas de galáxias;
- **Aglomerados:** centenas a milhares de galáxias.



Grupo de galáxias

- Contém até cinquenta galáxias luminosas (luminosidade semelhante à Via Láctea);
- Massas da ordem de $10^{13}M_{\text{sol}}$ em um diâmetro de 1Mpc ($\approx 10^{22}\text{m}$);
- Galáxias orbitam o centro do grupo com velocidades da ordem de 150km/s;
- São a estrutura de galáxias mais comum do universo, por volta de 50% das galáxias do universo local estão em grupos.

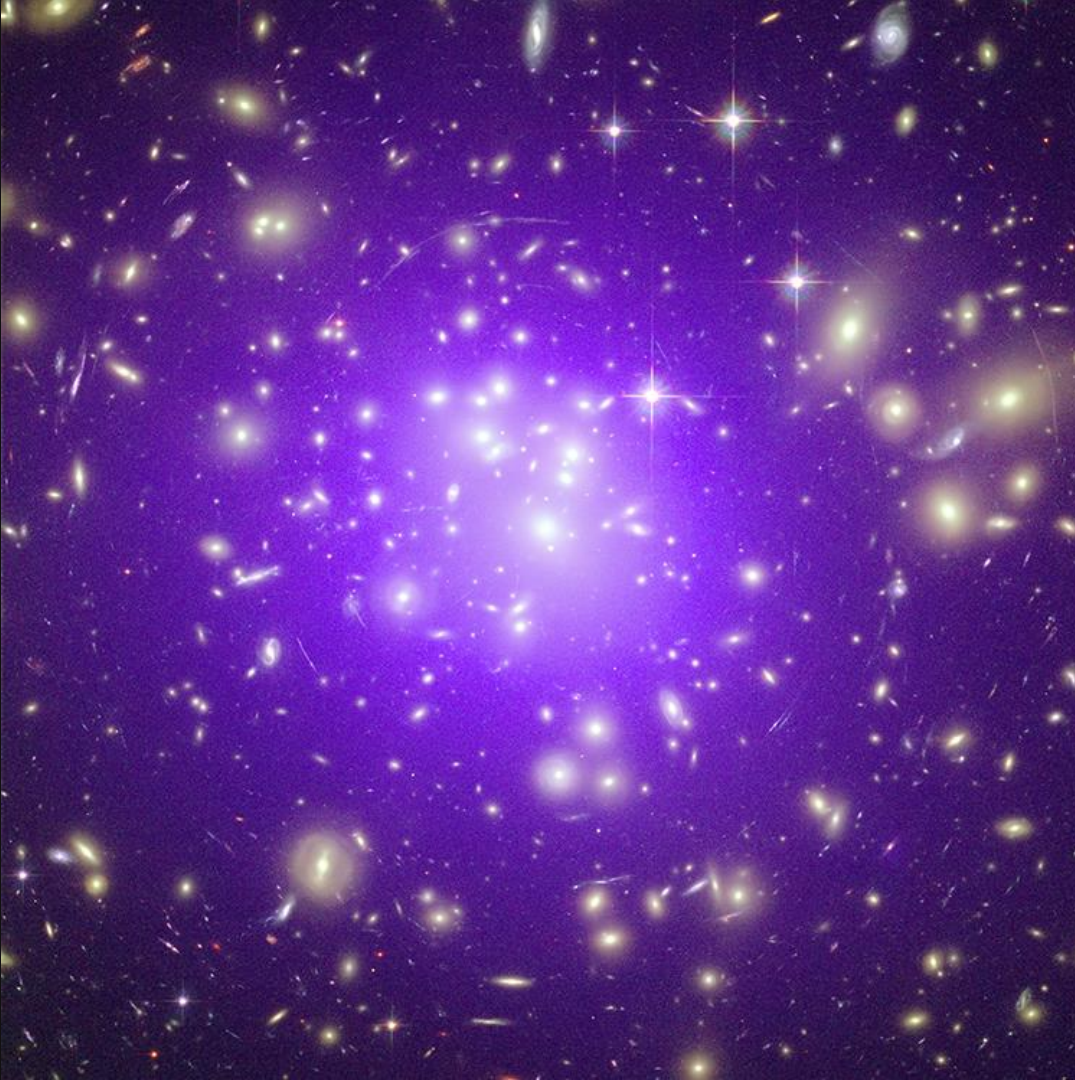


Aglomerados de galáxias

- Contém de centenas a milhares de galáxias luminosas;
- Massas da ordem de 10^{14} - $10^{15}M_{\text{sol}}$ em uma região de diâmetro de mais de 2Mpc;
- Galáxias orbitam o centro do aglomerado com enormes velocidades, da ordem de 1000km/s;
- No centro de aglomerados se encontram galáxias elípticas gigantes
- São as maiores estruturas gravitacionalmente ligadas do universo;
- Por volta de 20% das galáxias do universo local estão em aglomerados.

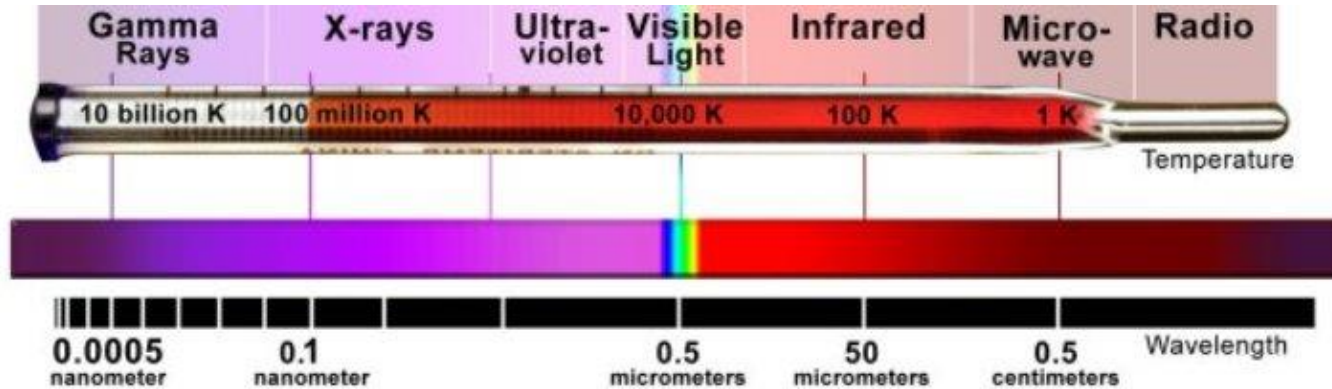
Aglomerado de Virgem

- É o aglomerado de galáxias mais próximo do Grupo Local, a ≈ 50 milhões de anos luz de distância ($\approx 18\text{Mpc}$);
- Contém cerca de 2500 galáxias (na maioria galáxias anãs);
- Possui três galáxias elípticas gigantes: M87, M86 e M84;
- Massa: $\approx 10^{14}M_{\text{sol}}$;
- O grupo local se move em direção ao aglomerado de Virgem a 250km/s .



Aglomerados de galáxias

- No início dos anos 1970, foi descoberto que os aglomerados de galáxias são fontes poderosas de raios-X;
- Essa emissão em raios-X não provém das galáxias, mas sim de um gás tênue que se encontra entre as galáxias e permeia todo o aglomerado;
- Esse gás é chamado de meio intra-aglomerado;
- O meio intra-aglomerado é composto de gás primordial (maioria) e de gás ejetado das galáxias devido às explosões de supernovas;
- **Gás primordial:** material que sobrou durante a fase de formação das galáxias, composto de Hidrogênio e Hélio sintetizados logo após o Big Bang;
- **Gás expulso:** rico em elementos pesados como Silício, Níquel, Cálcio e Ferro.

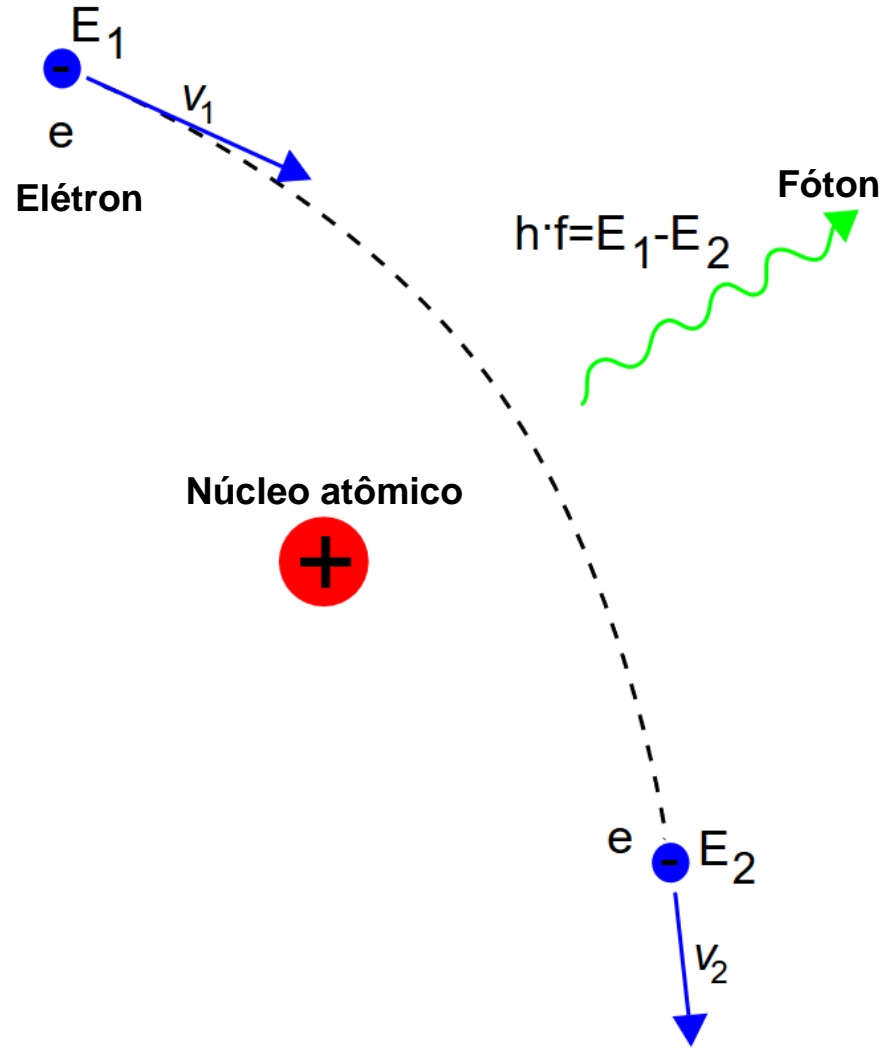


O gás intra-aglomerado

- Relação entre comprimento de onda da luz emitida e temperatura do objeto emissor: raios-X são provenientes de objetos muito quentes;
- Gás do meio intra-aglomerado tem temperaturas típicas da ordem de 10^7K , podendo chegar a 10^8K nos aglomerados mais massivos;
- Nessas temperaturas, o gás está completamente ionizado, isto é, os elétrons não estão ligados aos núcleos dos átomos.

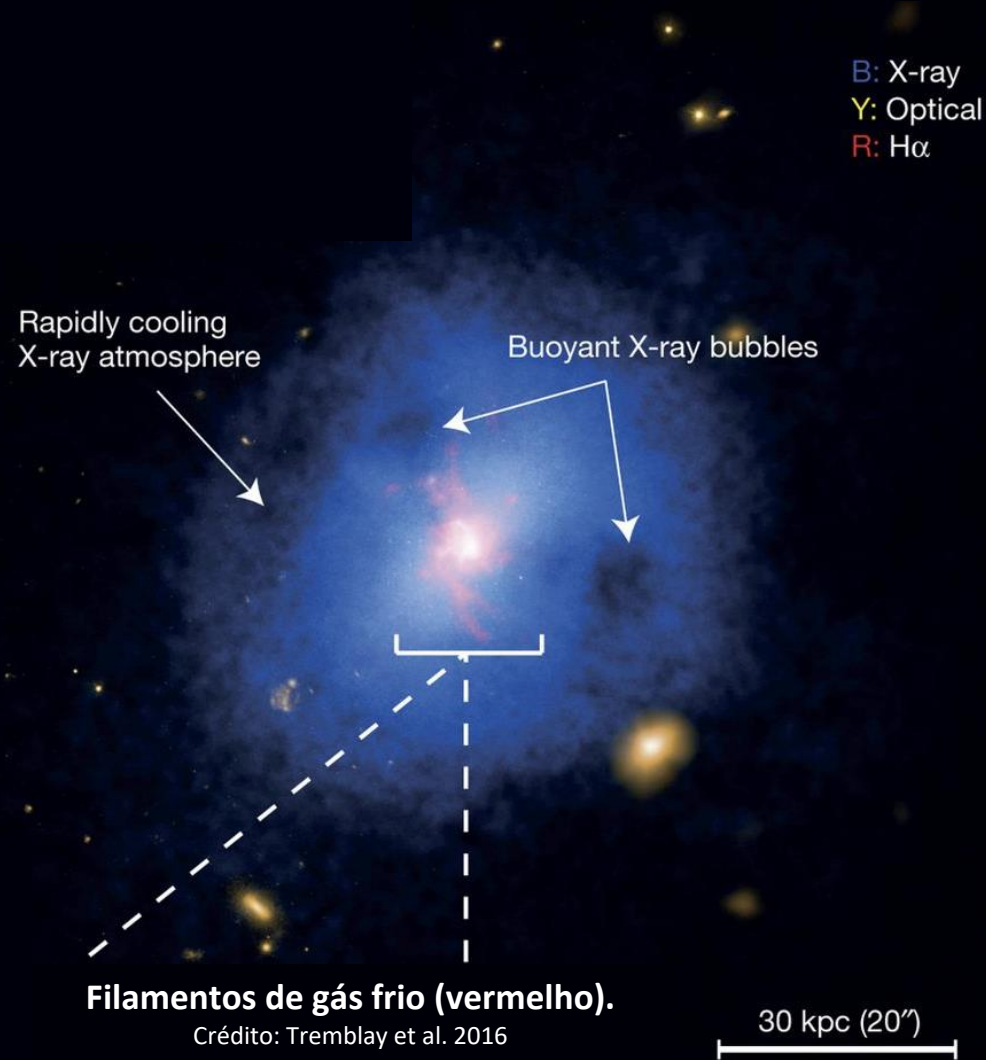
O gás intra-aglomerado

- Qual o mecanismo que origina a emissão em raios-x? É o processo *bremsstrahlung*;
- **Bremsstrahlung**: radiação de freamento. Um elétron (carga negativa), ao passar próximo a um núcleo atômico (carga positiva) é freado pela atração eletromagnética. O elétron perde energia cinética via emissão de um fóton;
- Como o fóton escapa do aglomerado, o gás quente perde energia toda vez que um fóton é emitido;
- Ou seja, o gás quente está esfriando via emissão de raios-x!
- **Expectativa**: o gás esfria mais rápido onde o gás é mais denso (maior densidade => encontros mais frequentes entre elétrons e núcleos atômicos);
- Onde o gás quente é mais denso? No centro dos aglomerados!



Corrente de Resfriamento

- O gás quente esfria mais rapidamente onde é mais denso (centro de aglomerados);
- **Gás ideal:** um conjunto de átomos que estão em movimento constante e aleatório, cujas velocidades médias estão relacionadas com a temperatura - quanto maior a temperatura, maior a velocidade média;
- Então: resfriamento do gás => velocidade média menor;
- Velocidade média de um gás a 10^7K : alta o suficiente para átomos resistirem à atração gravitacional das galáxias;
- Porém, conforme o gás no centro do aglomerado esfria, a velocidade média cai e em um dado momento os átomos não conseguirão mais resistir à atração gravitacional;
- **Corrente de resfriamento:** fluxo de gás em queda livre em direção à galáxia central do aglomerado.



B: X-ray
Y: Optical
R: H α

Corrente de Resfriamento

- **Problema:** correntes de resfriamento são observadas em alguns poucos aglomerados, porém deveriam ser comuns;
- Algo deve estar esquentando o gás. O que poderia ser?

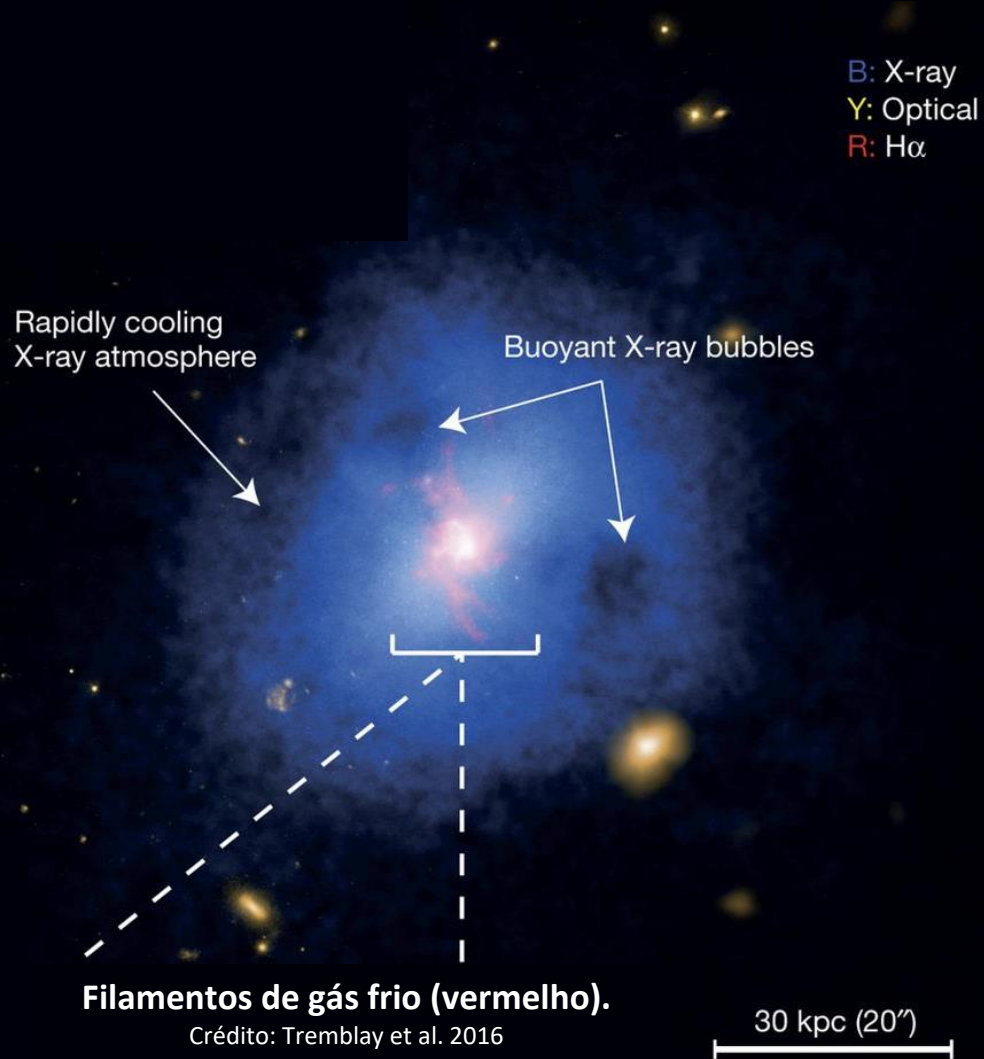
Rapidly cooling
X-ray atmosphere

Buoyant X-ray bubbles

Filamentos de gás frio (vermelho).

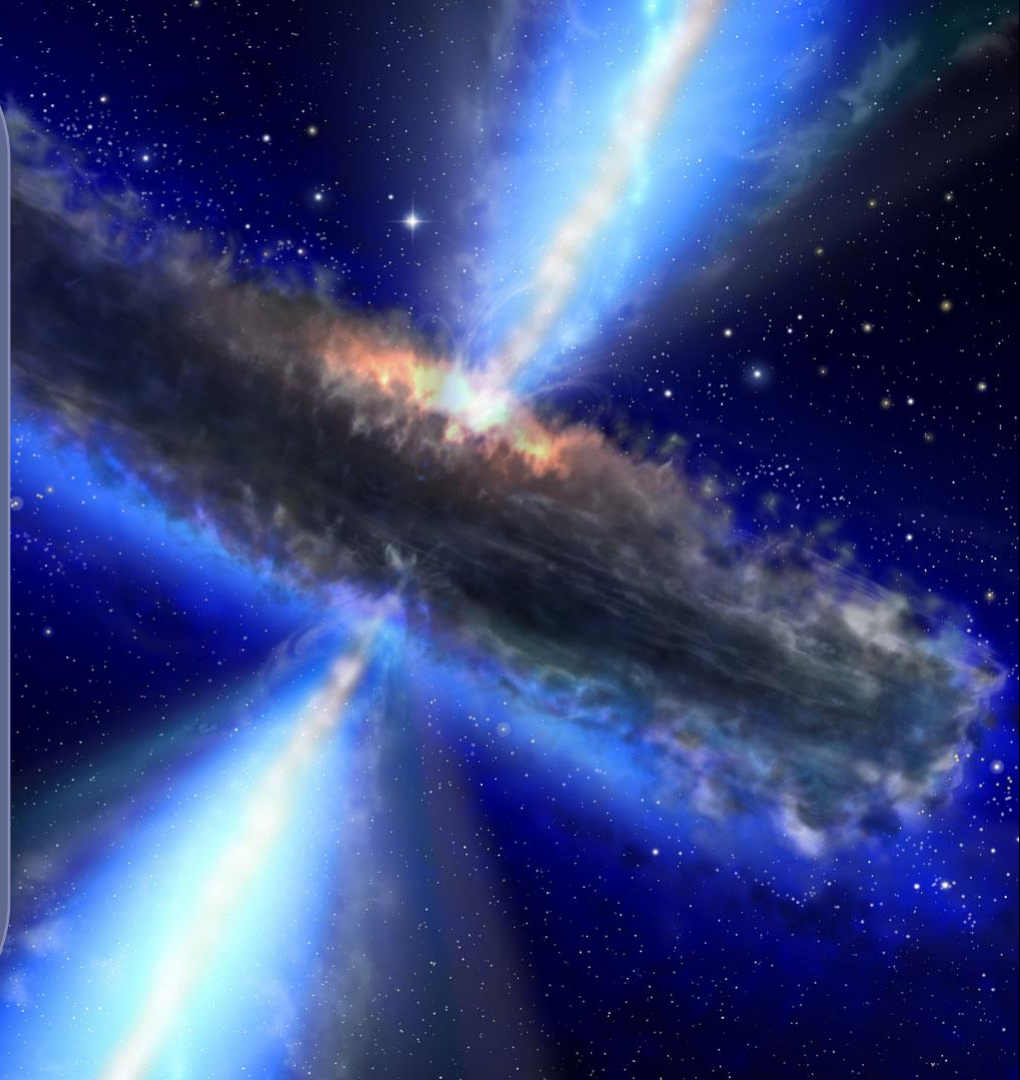
Crédito: Tremblay et al. 2016

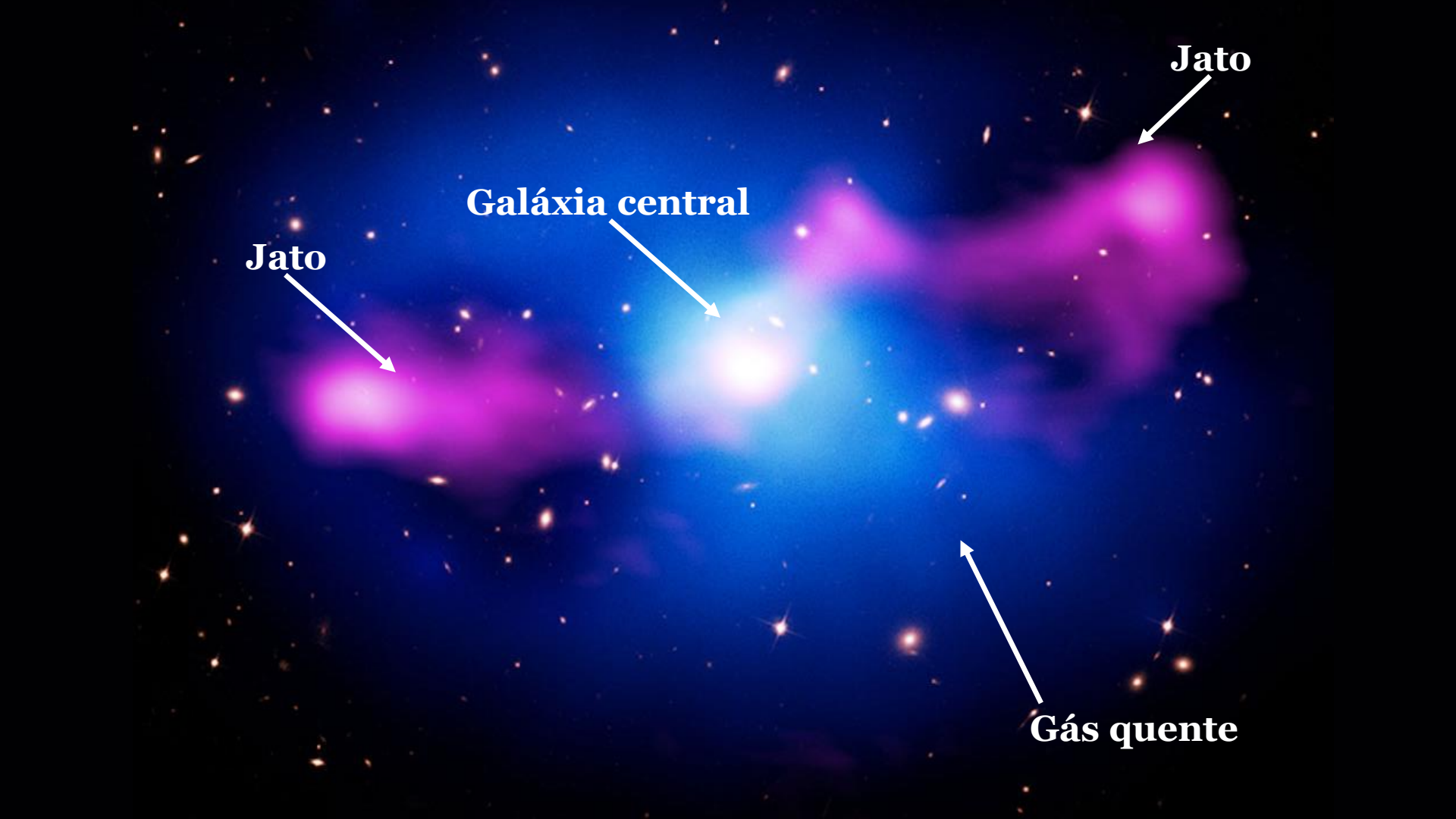
30 kpc (20'')



Núcleos Ativos de Galáxias

- No centro de galáxias massivas existem buracos negros supermassivos, com massas de milhões a bilhões de vezes a massa do sol;
- Quando esses buracos negros estão engolindo grandes quantidades de matéria, a galáxia está em uma fase de núcleo ativo;
- Material caindo em direção ao buraco negro libera enormes quantidades de energia;
- Uma pequena parte das partículas escapa de cair no buraco negro, formando um jato de partículas com velocidades próximas às da luz;
- Esse jato viaja enormes distâncias, inclusive escapando da galáxia onde se origina;
- Poderia esse jato aquecer o gás no centro de aglomerados? Sim!
- Como isso aconteceria? Partículas no jato se chocariam com partículas do gás, acelerando-as (maior velocidade => maior temperatura);
- Esse fenômeno é observado?



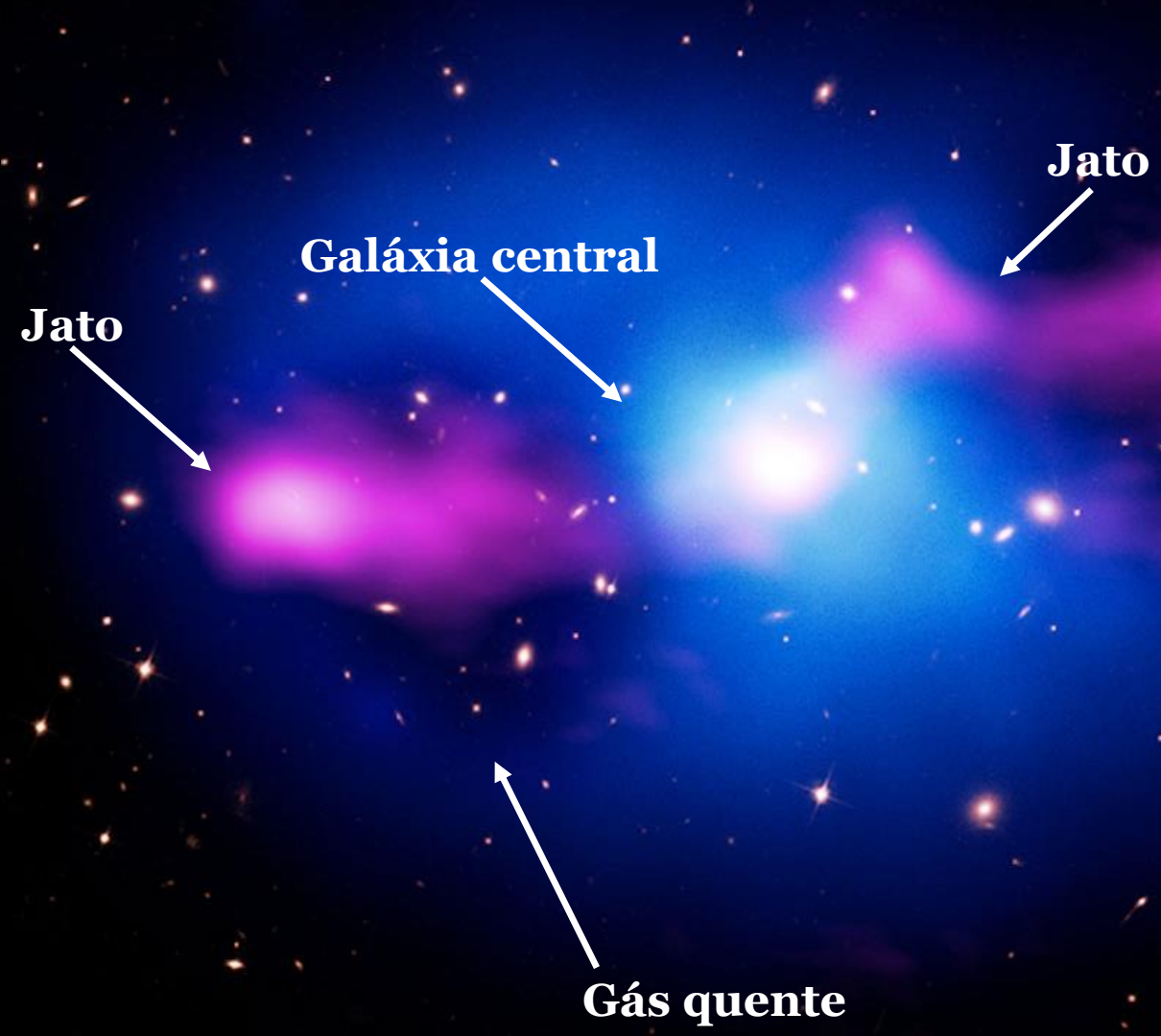


Jato

Galáxia central

Jato

Gás quente



Corrente de Resfriamento

- Núcleos ativos de galáxia explicam porque correntes de resfriamento raramente são observadas;
- Quando corrente de fluxo tem início, gás cai em direção à galáxia central;
- Parte do gás alcança o buraco negro supermassivo da galáxia central;
- Galáxia entra em fase ativa: jato se choca com gás no centro do aglomerado e o aquece, cessando a corrente de resfriamento;
- **Conclusão:** correntes de resfriamento duram pouco tempo, atividade nuclear cessa resfriamento do gás.

Galáxias em transformação: o papel do ambiente



Galáxias espirais vs galáxias elípticas

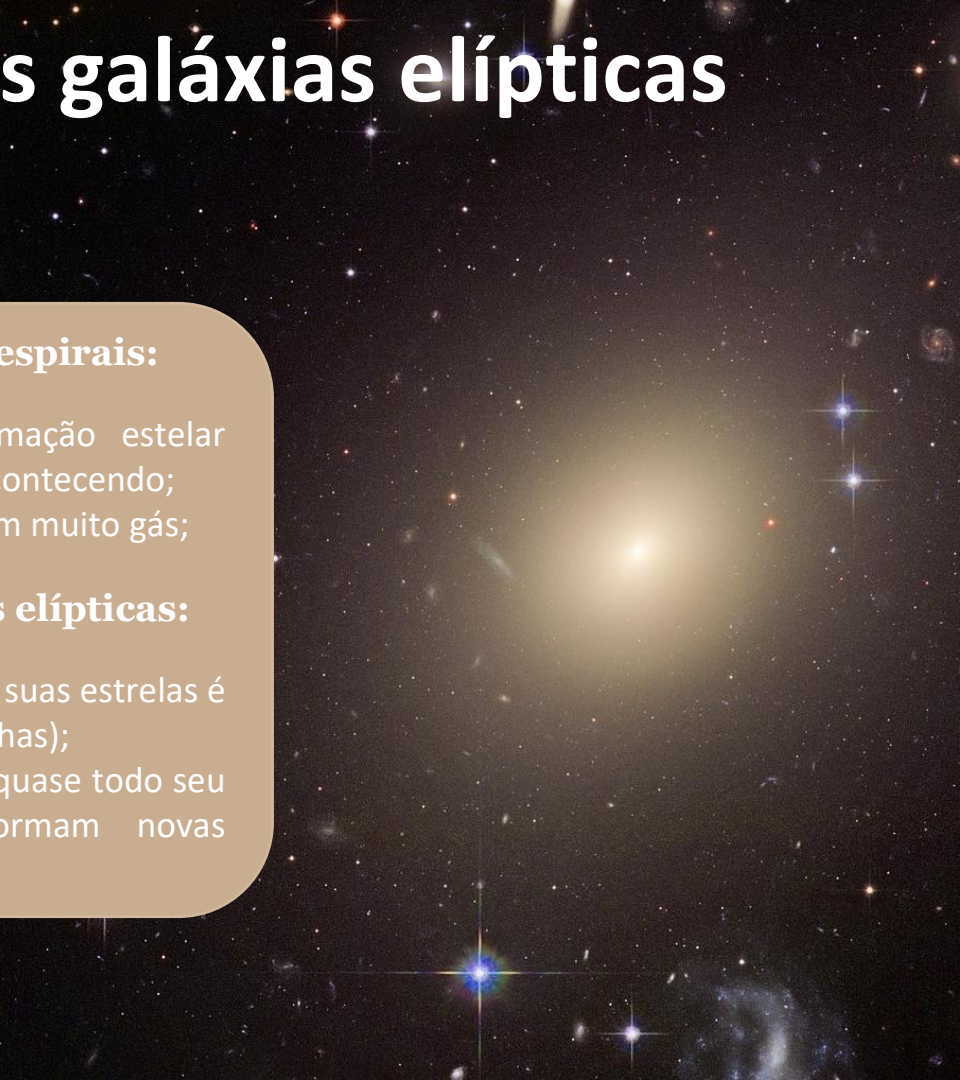


Galáxias espirais:

- Possuem formação estelar substancial acontecendo;
- Ainda possuem muito gás;

Galáxias elípticas:

- A maioria das suas estrelas é velha (vermelhas);
- Consumiram quase todo seu gás, não formam novas estrelas.



Anatomia de uma galáxia lenticular

Bojo

Disco

- Tipo intermediário entre galáxias espirais e elípticas no esquema de classificação de Hubble;
- São galáxias com pouco gás e poeira e, conseqüentemente, pouca formação estelar;
- Por conseqüência, são formadas principalmente por estrelas velhas (semelhante a galáxias elípticas).

Galáxia isolada

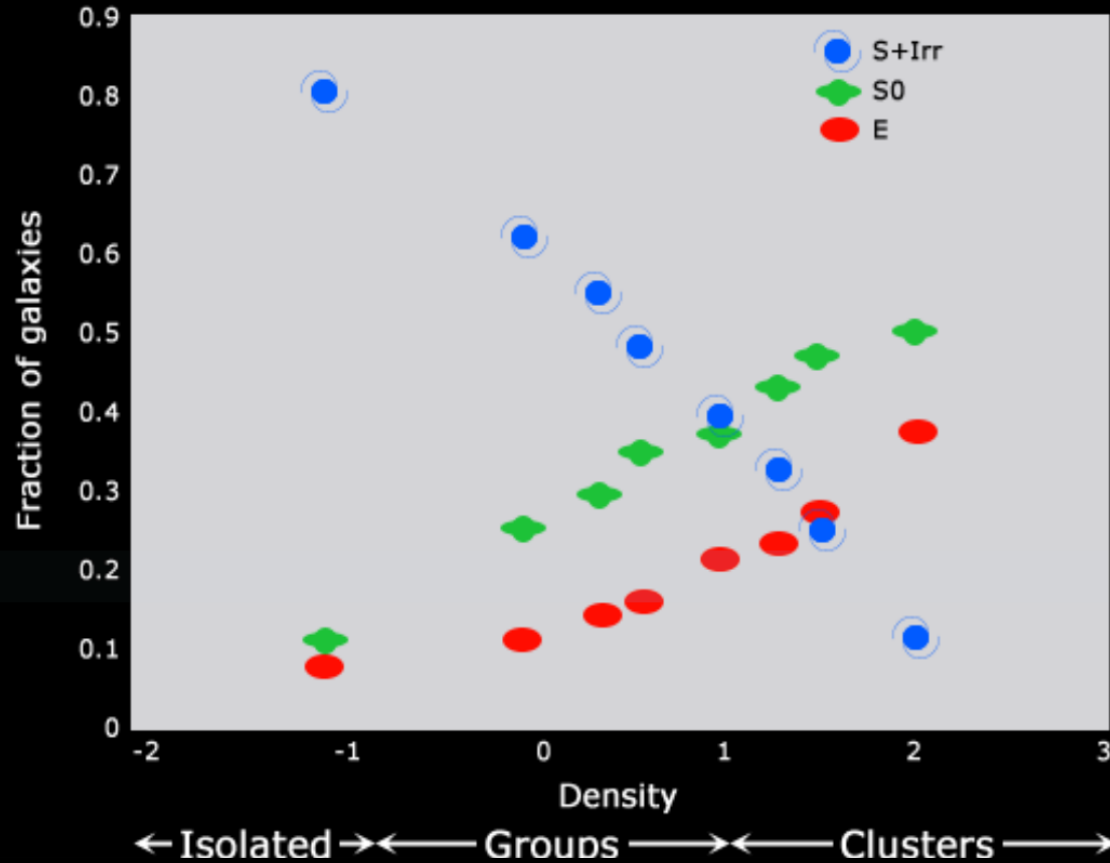


Grupo de galáxias



Aglomerado de galáxias



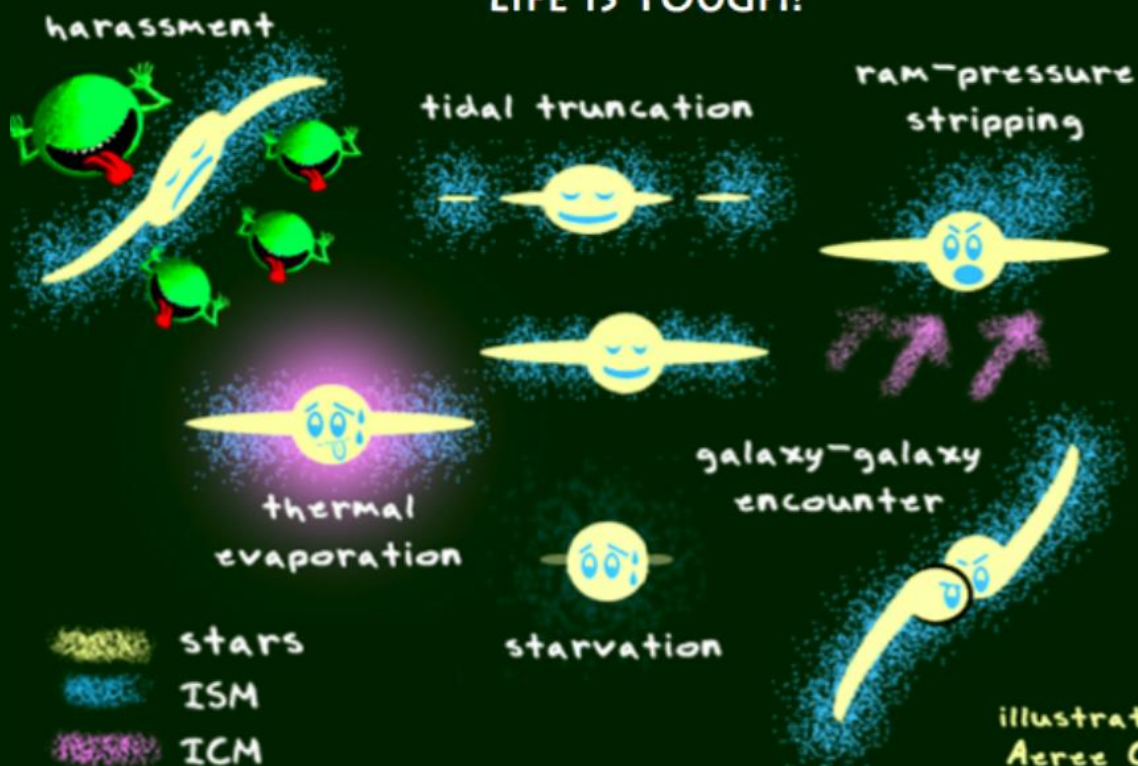


Morfologia e ambiente

- **Relação morfologia ambiente:** fração de espirais cai conforme aumenta densidade do ambiente;
- Espirais são comuns em ambientes de baixa densidade como grupos e entre galáxias isoladas;
- Lenticulares são comuns em grupos e dominantes em aglomerados;
- A fração de elípticas cresce substancialmente em aglomerados de galáxias;
- **Conclusão:** morfologia está relacionada a densidade;
- Ambientes densos transformam discos em esferas?
- Ambientes densos causam perda de gás?

GALAXIES CAN GO THROUGH...

LIFE IS TOUGH!



illustrated by
Aeree Chung



Fusões de galáxias

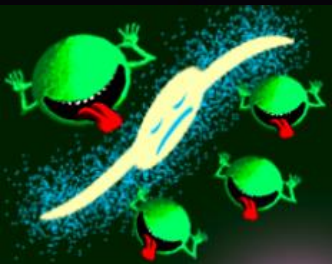
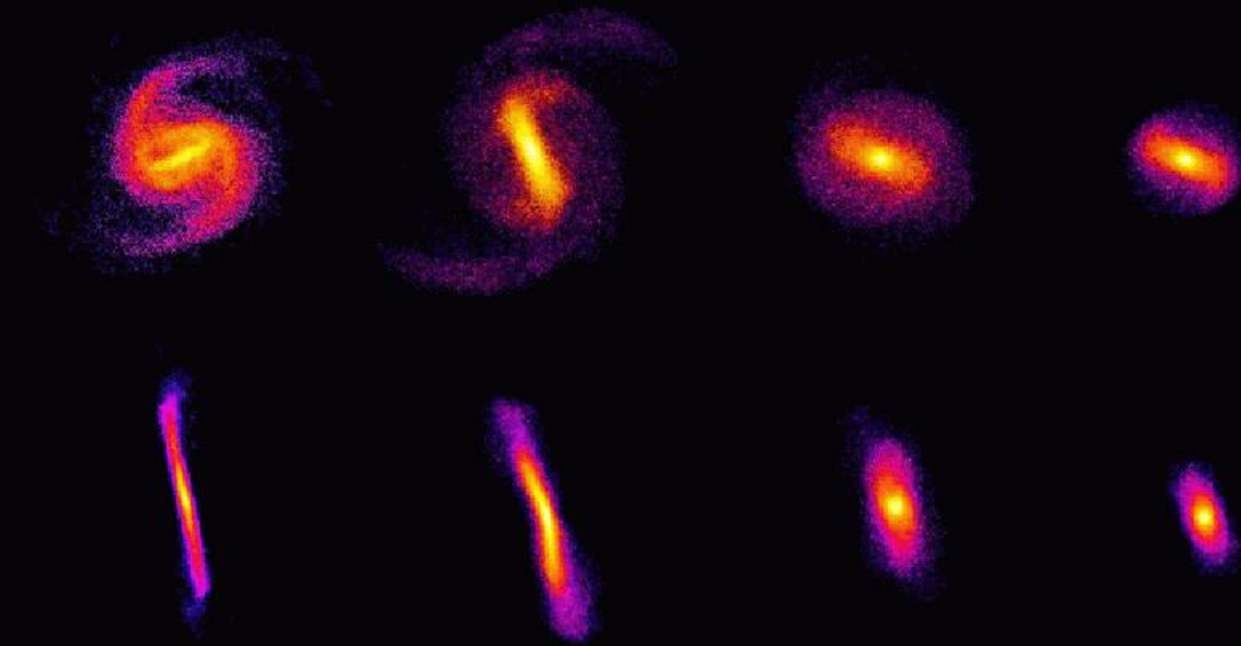
- Fusões podem ser de dois tipos, dependendo da massa das galáxias envolvidas: fusão maior e fusão menor ;
- **Fusão maior:** $M_{\text{maior}}/M_{\text{menor}} < 3$;
- Em uma fusão menor, a galáxia menos massiva é destruída, suas estrelas se misturam com as da galáxia mais massivas;
- Em uma fusão maior, as duas galáxias são completamente destruídas e a galáxia remanescente terá uma forma diferente, a depender da quantidade de gás nas galáxias que se fundiram;
- Onde mais ocorrem: grupos e partes externas de aglomerados.





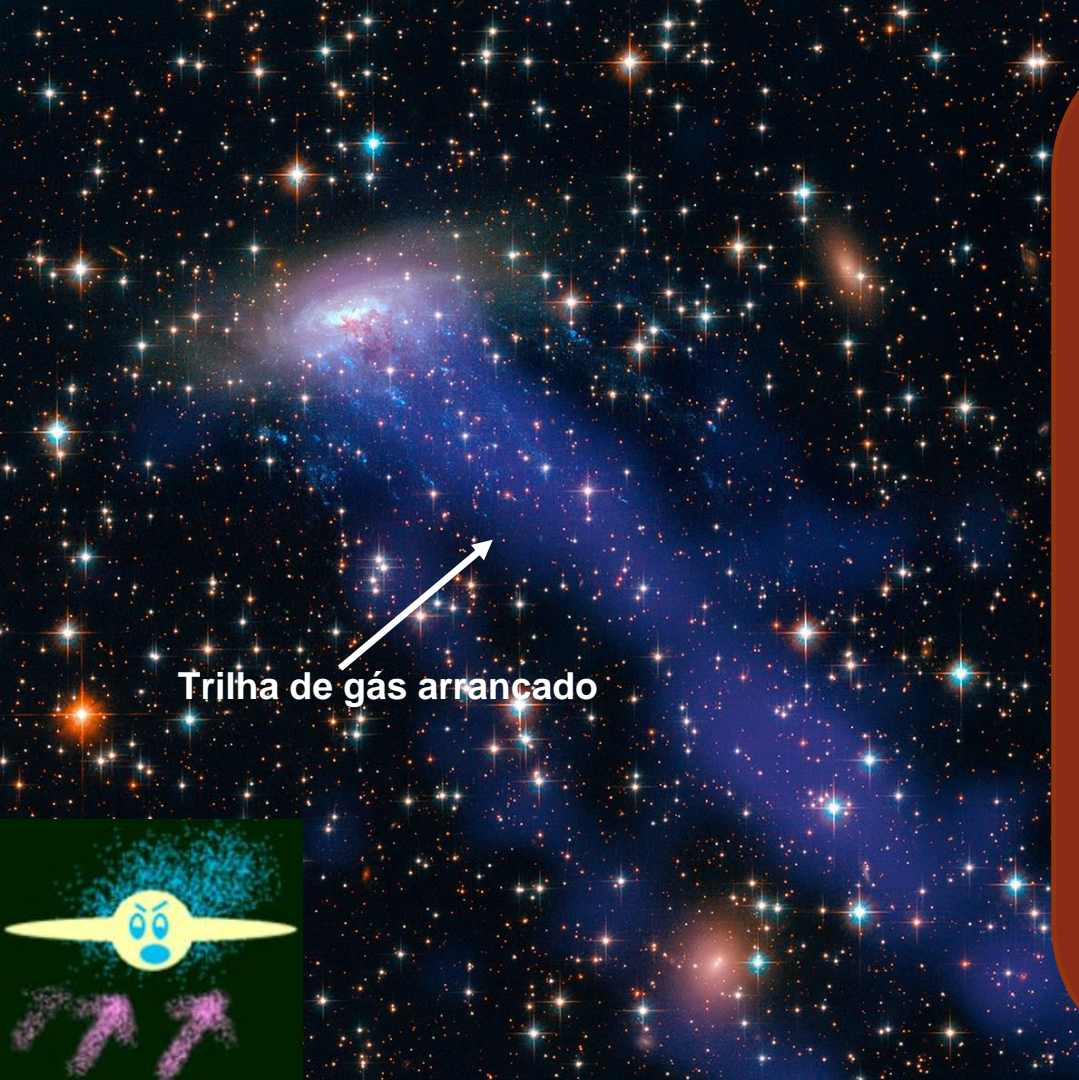
Canibalismo galáctico

- Através da fricção dinâmica, órbita de uma galáxia menor vai “encolhendo” até ela se fundir com uma galáxia maior (tipo de fusão menor);
- Galáxias grandes crescem pela acreção de várias galáxias menores;
- Estrelas da galáxia menor se juntam ao halo da galáxia maior;
- Mecanismo de formação de galáxias elípticas gigantes em centros de aglomerados;
- Onde mais ocorre: centro de grupos e aglomerados.



Assédio galáctico

- Ocorre quando duas galáxias passam próximo uma a outra, mas com velocidades muito altas para que se fundam;
- Galáxias tem suas formas distorcidas e perdem suas estrelas mais externas;
- Ao passar por muitos encontros próximos, uma galáxia pode se tornar anã;
- Onde mais ocorre: centro de aglomerados, onde galáxias orbitam em altas velocidades (por isso fusões são raras).

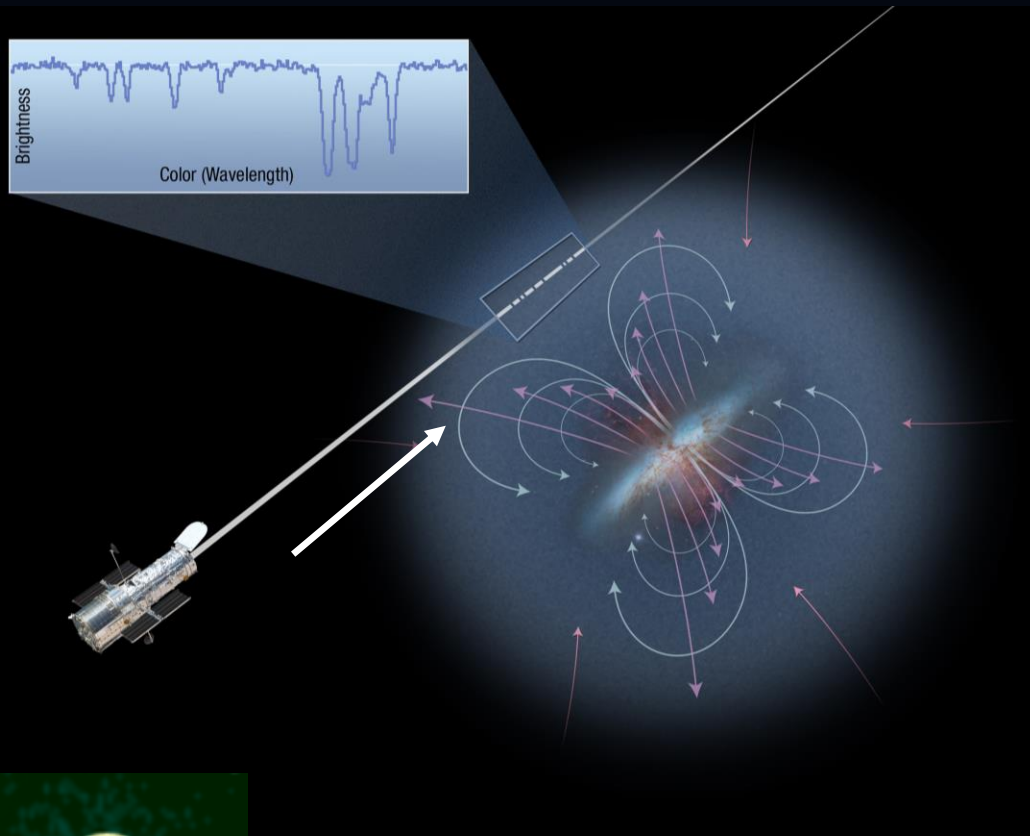


Trilha de gás arrancado



Pressão de arraste

- Conforme uma galáxia se move ao longo de sua órbita no aglomerado, o gás no disco da galáxia sofre uma força de arraste por parte do gás quente do aglomerado;
- Como resultado, galáxia tem seu gás arrancado e para de formar novas estrelas;
- Gás que está sendo arrancado é comprimido e novas estrelas se formam na trilha;
- Conclusão: a pressão de arraste transforma galáxias espirais em lenticulares;
- Explicação para crescimento do número de lenticulares em aglomerados;
- Porém: galáxia muito massivas conseguem resistir à força de arraste;
- Apesar de grandes quantidades de gás quente também existirem entre galáxias de um grupo, esse gás não é denso suficiente para causar força de arraste.



Estrangulamento

- Galáxias isoladas ou em grupos possuem um reservatório de gás quente ao seu redor, no halo;
- Esse reservatório é formado por gás primordial acreta do meio intergaláctico e por gás expelido do disco (supernova, ventos estelares);
- Esse gás aos poucos esfria e cai em direção ao disco (de fato, vemos no halo da Via-Láctea nuvens de gás caindo em direção ao disco!), abastecendo o disco da galáxia com combustível para formar novas estrelas;
- Galáxias em aglomerados, porém, têm esse reservatório arrancado pela força de arraste (mesmo as muito massivas);
- Assim, a galáxia deixa de receber combustível para formar novas estrelas e morrerá uma vez que o gás no disco seja transformado em estrelas.



Aglomerados e matéria escura



Massa de aglomerados

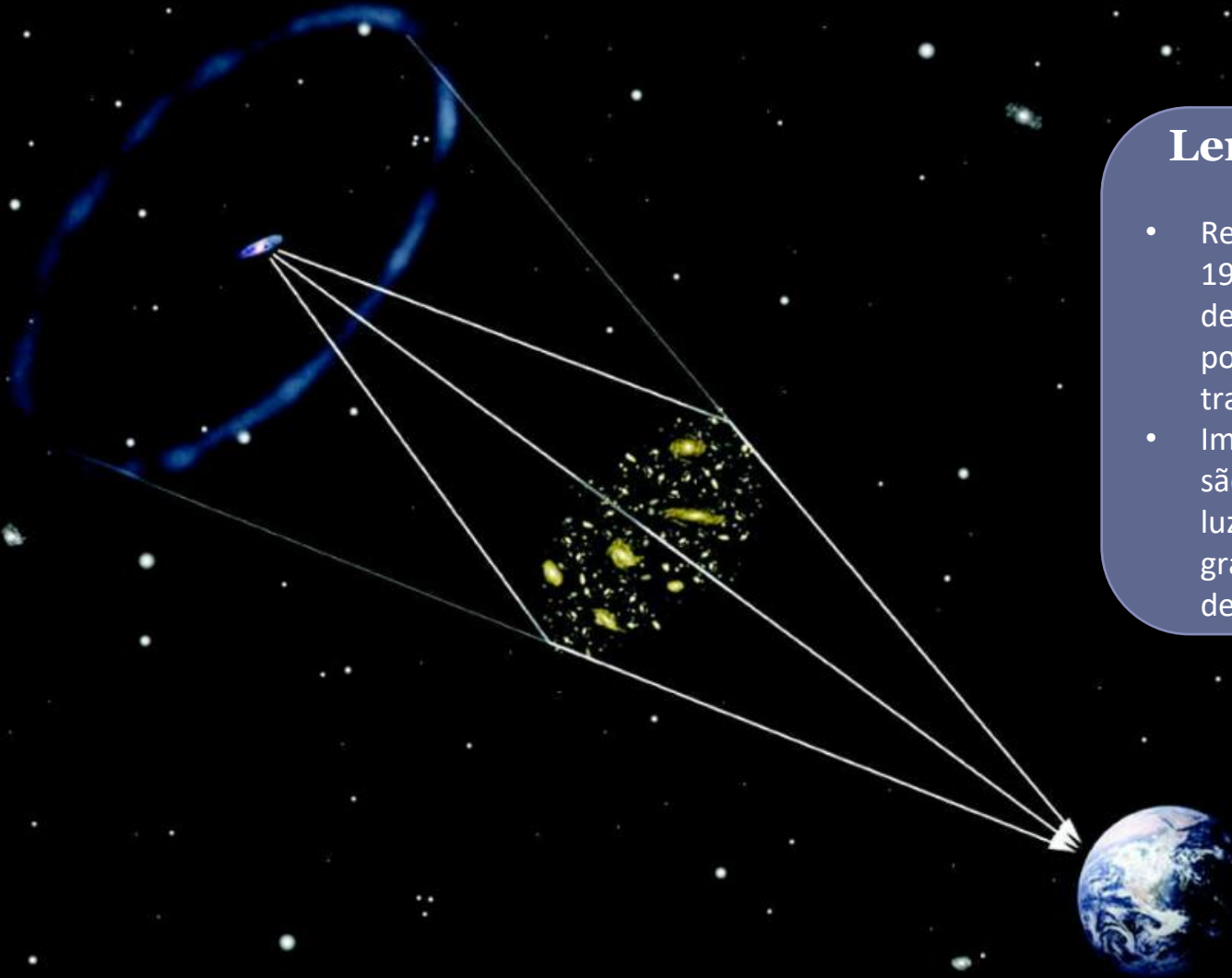
- Como aglomerados estão em equilíbrio, a sua massa pode ser determinada a partir do Teorema do Virial: $2E_{\text{cinética}} + E_{\text{gravitacional}} = 0$;
- Lembrando: galáxias orbitam o centro do aglomerado com enormes velocidades, da ordem de 1000km/s;
- O astrônomo Fritz Zwicky calculou a massa de aglomerados desse modo (1933) e concluiu que os aglomerados tinham ≈ 10 vezes mais massa que a soma das massas das galáxias.
- Tipicamente, 3% da matéria total dos aglomerados está na forma de estrelas em galáxias.

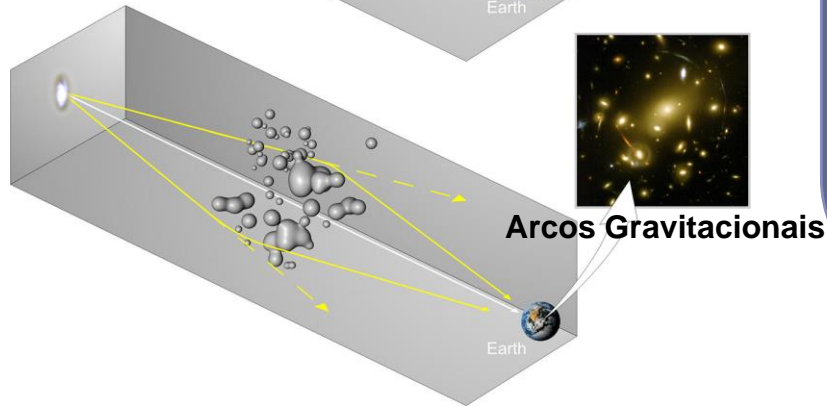
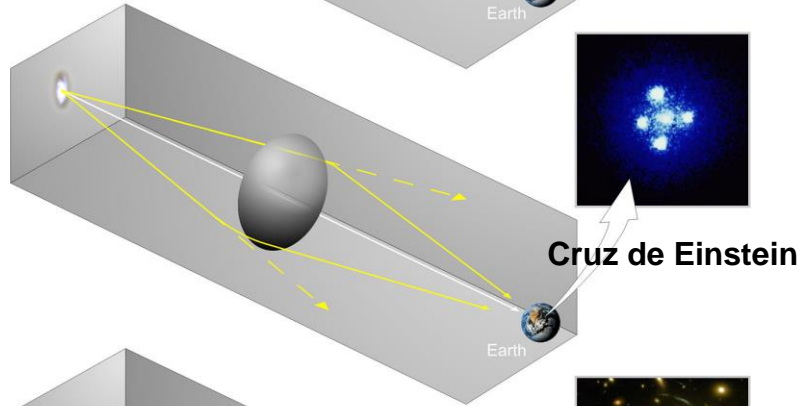
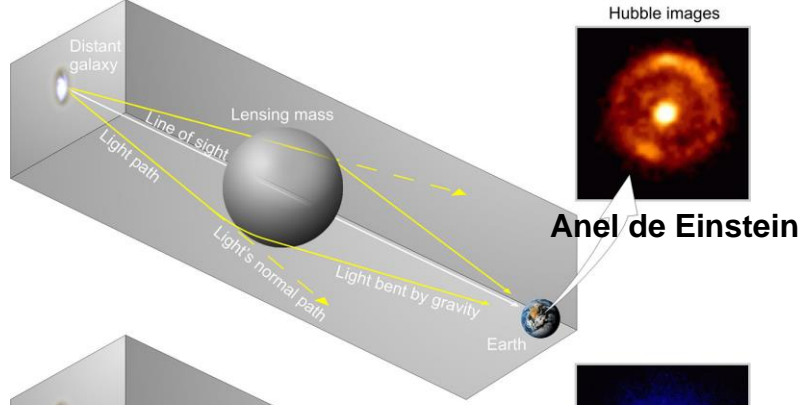
Massa de aglomerados

- A temperatura do gás quente é a temperatura necessária para que o gás esteja em equilíbrio com o potencial gravitacional do aglomerado;
- Se o gás fosse muito mais quente, a velocidade das partículas seria suficiente para escapar do aglomerado; se ele fosse muito mais frio, ele seria capturado pelas galáxias;
- Assim, calculamos qual a energia cinética do gás baseado na sua temperatura e usamos o Teorema do Virial para calcular a massa do aglomerado;
- A massa de gás quente podemos calcular a partir da luminosidade em raios-x do aglomerado;
- Tipicamente, 15% da matéria total dos aglomerados está na forma de gás quente.

Lentes Gravitacionais


- Relatividade Geral (Einstein - 1915): uma grande concentração de massa “curva o espaço”, a ponto de fazer a luz seguir uma trajetória curva;
- Imagens de galáxias distantes são deformadas quando sua luz atravessa o intenso campo gravitacional de um aglomerado de galáxias.





Lentes Gravitacionais

- O efeito de lentes gravitacionais ocorre em diferentes escalas (lentes podem ser estrelas, galáxias, aglomerados) e diferentes intensidades;
- Como a luz percorre diferentes trajetórias, além das imagens serem distorcidas, elas podem ser múltiplas;
- O efeito depende tanto da massa total da lente quanto de sua distribuição de massa: podemos usar o lenteamento gravitacional para calcular a massa de aglomerados.

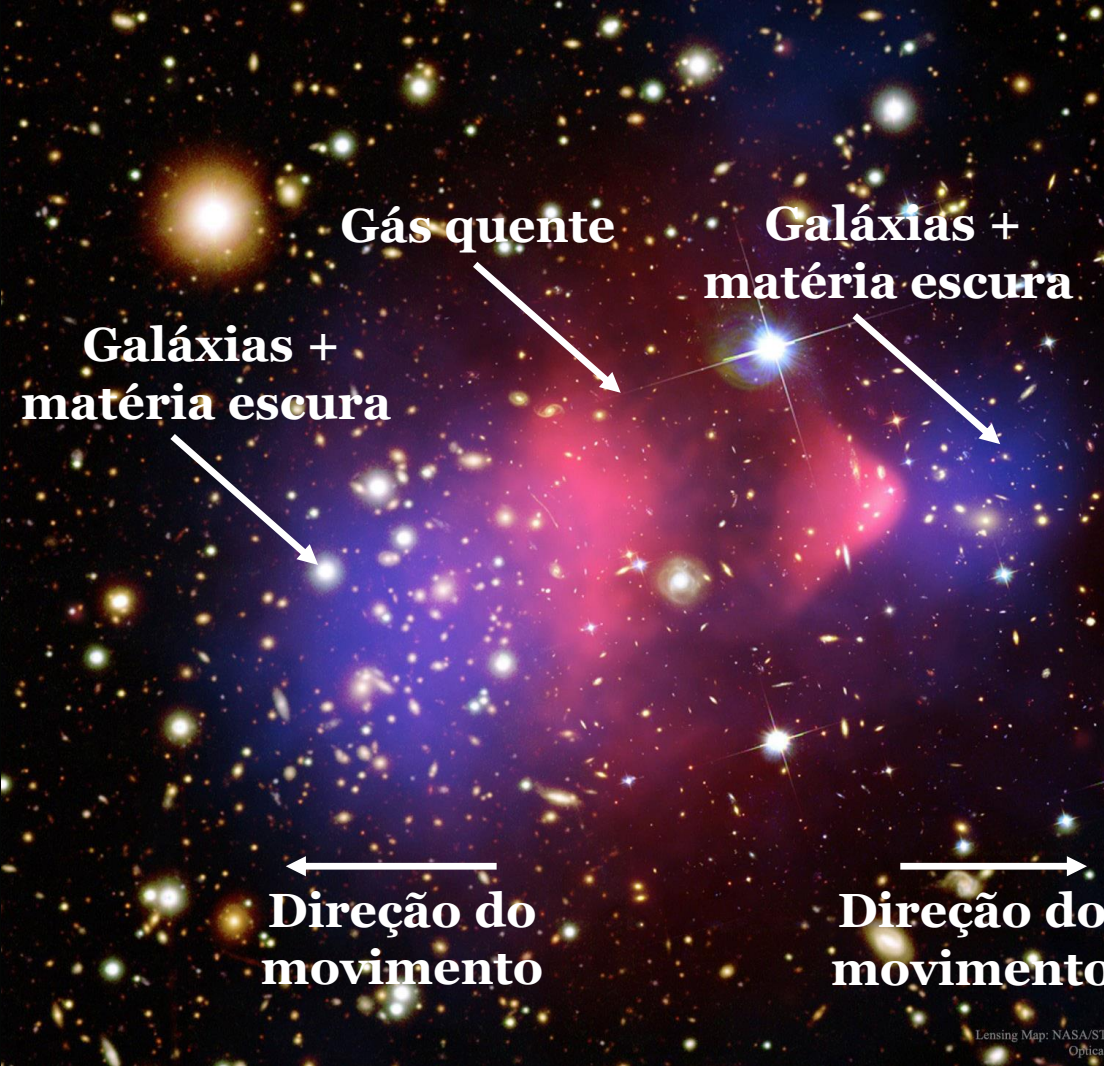


Estimativa de massa de aglomerados pelo lenteamento gravitacional

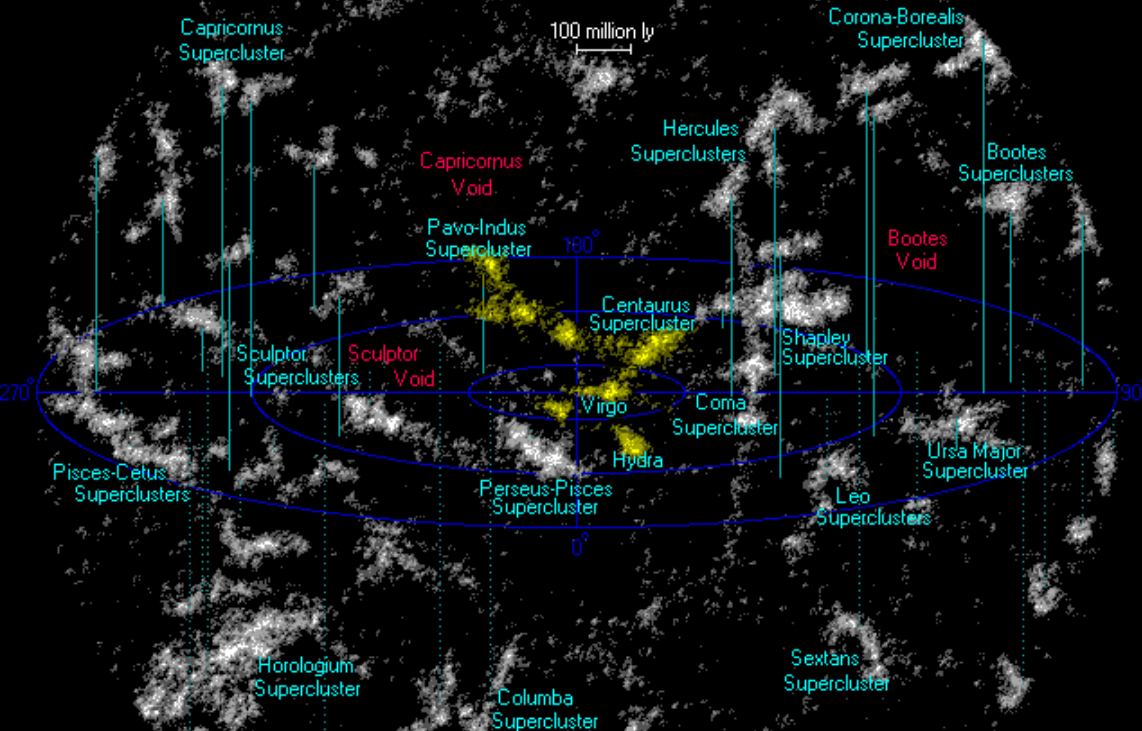
- O fenômeno de lenteamento gravitacional é utilizado para mapear a distribuição total de matéria em galáxias e aglomerados;
- Permitem portanto enxergar a matéria escura, que não interage com a luz e que representa a maior parte da massa desses objetos;
- Quanto maior a distorção nas imagens das galáxias distantes, maior o potencial gravitacional que causou tal distorção e, conseqüentemente, maior a massa do aglomerado;
- Tipicamente, 15% da matéria total dos aglomerados está na forma de gás quente e 3% em estrelas em galáxias;
- Os 82% restantes são matéria escura.

Colisão de aglomerados

- Aglomerado da Bala: colisão entre dois aglomerados;
- Separação entre os componentes: galáxias, gás (rosa, emissão em raios-X), matéria escura (azul, lenteamento gravitacional);
- Permite estudo das propriedades da matéria escura;
- Gás deslocado em relação às galáxias: gás interage via gravidade e forças eletromagnéticas, logo é freado com mais força que as galáxias;
- Como galáxias só interagem via gravidade e a matéria escura segue as galáxias, concluímos que o freamento de ambos é igual (ou muito próximo – diferença imperceptível);
- Logo, se as partículas de matéria escura interagem por outra força que não a gravidade, ela deve ser muito fraca (para causar um freamento mínimo).



Superaglomerados



- Em escalas ainda maiores que aglomerados e grupos de galáxias, o universo se organiza em filamentos e vazios (regiões com poucas galáxias);
- Assim como as galáxias, os aglomerados e grupos não estão distribuídos aleatoriamente no espaço;
- Aglomerados e grupos de galáxias se agrupam em gigantescas estruturas chamadas de superaglomerados;
- O grupo local faz parte do superaglomerado de Laniakea (em amarelo na figura);
- O superaglomerado de Laniakea é formado por 100.000 galáxias se estendendo por mais de 160Mpc (520 milhões de anos luz);
- Sua massa aproximada é de $10^{17}M_{\text{sol}}$.