

Galáxias

FIS02009 – Explorando o Universo

Professor Allan Schnorr Müller

IF/UFRGS

Um pouco de História....

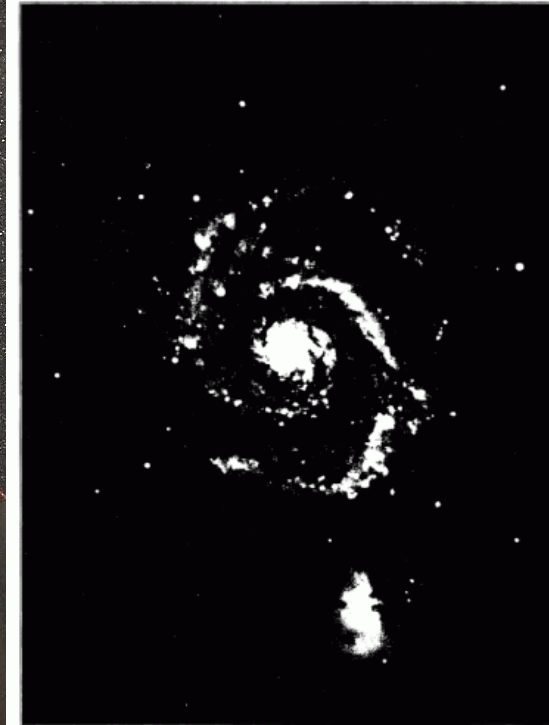
- O filósofo grego Demócrito (450–370 A.C.) foi o primeiro a propor que a brilhante faixa de estrelas no céu noturno, conhecida como Via Láctea, era composta por estrelas distantes;
- Prova da composição da Via-Láctea somente foi obtida em 1610, quando Galileo a observou com um telescópio e verificou que era formada por várias estrelas tênues;
- Em 1750 o astrônomo inglês Thomas Wright especulou que a galáxia era um corpo em rotação formado por inúmeras estrelas ligadas pela força gravitacional. A brilhante faixa no céu seria o disco de estrelas;
- Em 1755, Immanuel Kant escreveu um estudo baseado nas ideias de Wright;
- Hipótese dos “universos-ilha”: Via-Láctea é apenas uma galáxia a mais em um vasto universo cheio de galáxias.

Um pouco de História....

- Até 1908, cerca de 15.000 nebulosas (objetos em forma de “nuvens”) haviam sido catalogadas e descritas;
- Algumas haviam sido corretamente identificadas como aglomerados estelares, e outras como nebulosas gasosas. A maioria, porém, permanecia com natureza inexplicada.
- Principal pergunta: qual a distância das nebulosas espirais?
- Shapley e Curtis (1920): O grande debate - O que são as “nebulosas espirais” (Academia Nacional de Ciências - EUA)
- Harlow Shapley: defendeu a hipótese nebular convencional: são objetos da nossa Galáxia.
- Heber Curtis: defendeu a hipótese dos universos-ilha: são outras galáxias como a nossa.
- Debate inconclusivo!



M51 em Observação de 1910



SPIRAL NEBULA Messier 51 Canum Venaticorum
Photographed with 60-Inch Reflector on Seed 23 plate, February 7 and 8, 1910
Exposure 3^h 55^m. Enlargement from negative 6.4 diameters. Scale: 1 mm=4.7^o

Medidas de distância

Velas padrão

- Estrelas do tipo Cefeida são estrelas gigantes ou supergigantes variáveis, em que a luminosidade varia de 0,1 a 2 magnitudes (M) em um período (P) bem definido;

$$M_v = -2,76 \log(P) - 1,4$$

- Ou seja, medindo o período da variação, podemos calcular a magnitude absoluta. Observando a estrela da Terra, medimos sua magnitude aparente. Comparando a magnitude Absoluta (calculada) com a aparente (observada), estimamos a distância à estrela (aula anterior):

$$M_x = m_x - 5 \log_{10}(a) + 5$$

- Objetos que possuem uma magnitude absoluta bem definida, e assim permitem calcular a distância até eles, são chamados de velas padrão.



Um pouco de História....

- Edwin Hubble (1923): usa o novo telescópio de 2,5 m de Monte Wilson e encontra Cefeídas em Andrômeda;
- Determina suas distâncias através da relação período-luminosidade: 2,2 milhões de anos-luz;
- Essa distância é muito maior do que o tamanho de qualquer componente da Via Láctea, logo as nebulosas espirais devem ser outras galáxias;
- Em 1926, Hubble criou um esquema para classificar galáxias baseado em sua morfologia. Esse esquema é, até hoje, o mais usado para classificar galáxias em Astronomia.

Anatomia de uma galáxia genérica

1. **Estrelas:** 10 milhões (galáxias anãs), 100 bilhões (Via Láctea), 100 trilhões (a maior conhecida);
 2. **Gás e poeira:** o material para a formação estelar;
 3. **Buraco negro supermassivo central:** 100 mil a 1 bilhão de massas do sol;
 4. **Halo de matéria escura:** invisível, porém a parte mais massiva da galáxia, 10 vezes mais massivo do que as componentes visíveis;
- Existem \approx 100 bilhões de galáxias no Universo observável.



3



4

Radio

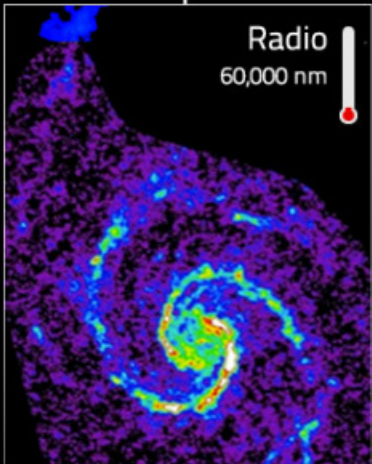
Microwave

Infrared

UV

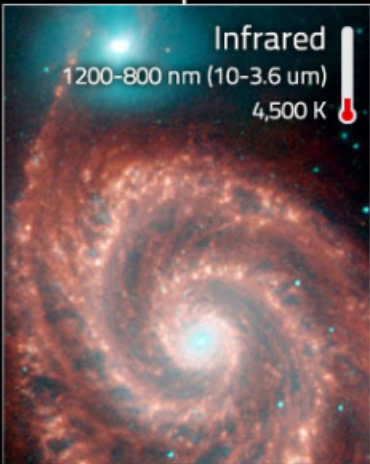
X-Ray

Gamma Ray



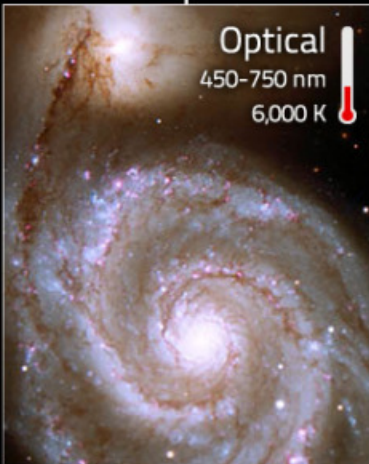
Radio

60,000 nm



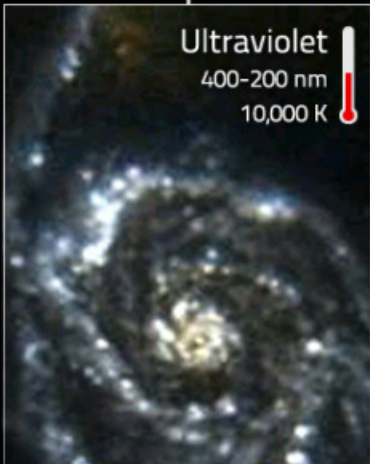
Infrared

1200-800 nm (10-3.6 um)
4,500 K



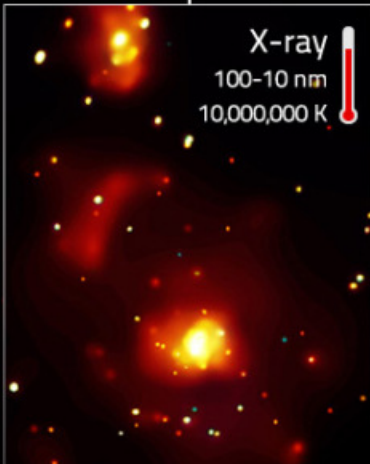
Optical

450-750 nm
6,000 K



Ultraviolet

400-200 nm
10,000 K



X-ray

100-10 nm
10,000,000 K

Multiwavelength Whirlpool Galaxy

COLD GAS: Radio waves reveal regions of gas cool enough for CO₂ molecules to exist.

COOL STARS: Infrared shows smaller cool red stars that make up most of the galaxy.

SOLAR STARS: Optical light comes from stars around the size of the Sun.

HOT STARS: Ultraviolet shows the larger hot blue stars that are less frequent in galaxies.

HOT GAS: X-rays are emitted from the hottest regions of gas where atoms are ionized.

← COOL LOW ENERGY RADIATION ———— VISIBLE LIGHT ———— HOT HIGH ENERGY RADIATION →

Estrelas Frias + Poeira



Visible light - La Silla



Infrared - Spitzer

Poeira Fria e moléculas

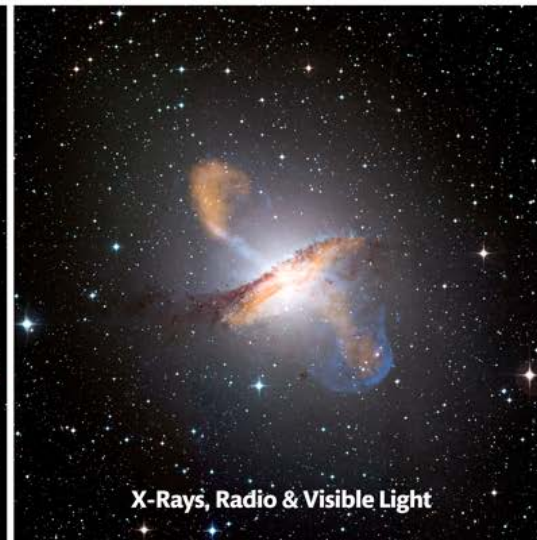


Mm/submm & Visible light - ALMA

Radiação Síncrotron



Radio - VLA



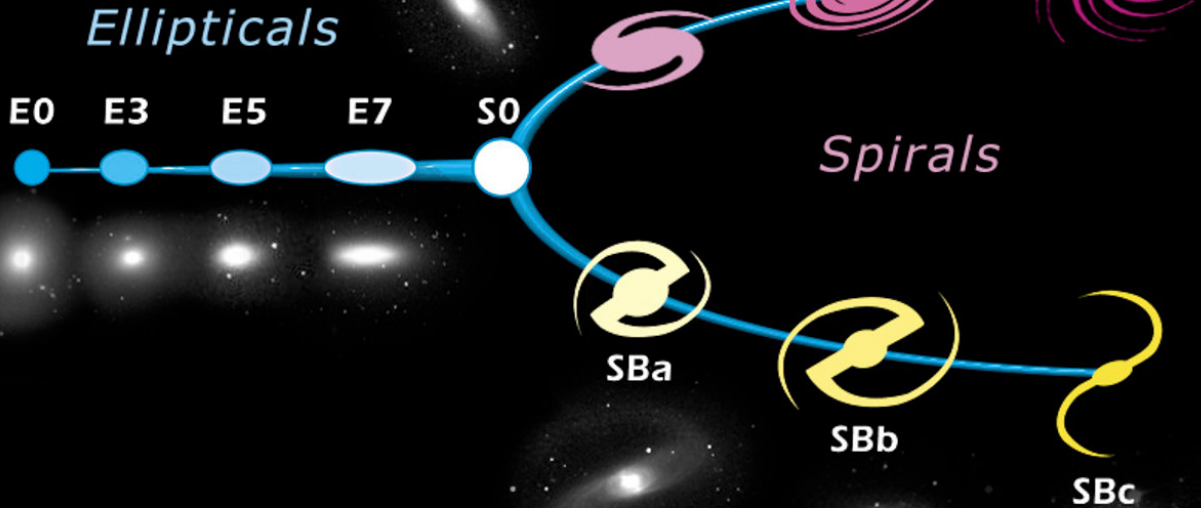
X-Rays, Radio & Visible Light

Gás altamente ionizado



X-Rays - Chandra

Edwin Hubble's Classification Scheme



O diagrama de Hubble

- Primeiro passo de uma ciência empírica é a procura por padrões e então tentar entender quais leis físicas os geram;
- O esquema proposto por Edwin Hubble em 1926 tem sido refinado desde então;
- Atualmente procuramos definir famílias de galáxias através de suas propriedades físicas e correlações fundamentais — que refletem suas histórias de formação e evolução;
- Procuramos por propriedades de subsistemas dentro das galáxias (disco/halo/bojo) e deduzimos suas origens e evolução.

Anatomia de uma galáxia espiral

Bojo

Disco

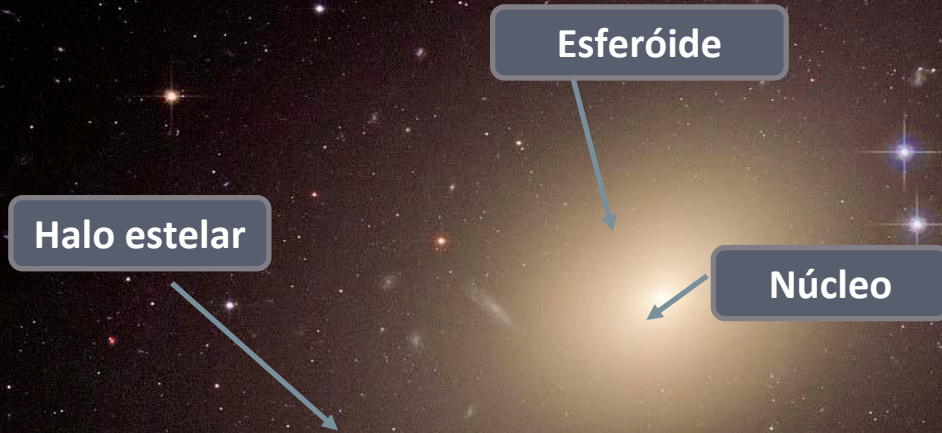
Halo estelar

- Galáxias espirais consistem de um bojo central formado por estrelas majoritariamente velhas, um disco de estrelas, gás e poeira e um halo de estrelas e matéria escura;
- Braços espirais estendem-se do bojo para a parte externa da galáxia;
- No esquema de Hubble, galáxias espirais são do tipo S, seguido por uma letra (a, b, ou c) que indicam o quão enrolado são os braços e qual o tamanho do bojo;
- Braços espirais são locais com muitas estrelas jovens;
- Isso ocorre porque as altas densidades de gás nos braços favorecem a formação de novas estrelas.

Anatomia de uma galáxia espiral



Anatomia de uma galáxia elíptica



- Têm formato elipsoidal e são classificadas de acordo com seu alongamento;
- $En \rightarrow n = 10 \left(1 - \frac{b}{a}\right)$
- Galáxias $E7$ são as mais alongadas, $E0$ são circulares no céu;
- Sua aparência mostra poucas estruturas: um núcleo cercado por uma brilhante esfera de estrelas e um fraco halo estelar externo (possível de ser observado somente nas elípticas mais próximas);
- A maioria das estrelas em galáxias elípticas orbitam o núcleo em direções aleatórias;
- As maiores galáxias são as elípticas gigantes.

Anatomia de uma galáxia lenticular



- Uma galáxia lenticular (S0) é uma galáxia de tipo intermediário entre galáxias espirais e elípticas no esquema de classificação de Hubble;
- Elas contém extensos discos, mas não possuem braços espirais;
- São galáxias com pouco gás e poeira e, consequentemente, pouca formação estelar;
- Por consequência, são formadas principalmente por estrelas velhas (semelhante a galáxias elípticas);
- Apesar de diferir morfológicamente de galáxias elípticas, galáxias lenticulares possuem diversas características em comum com esse tipo de galáxias.

Galáxias espirais vs galáxias elípticas

Galáxias espirais:

- Possuem formação estelar substancial acontecendo;
- Ou seja, ainda possuem estrelas massivas (azuis);
- Formaram suas estrelas gradualmente;
- Ainda possuem muito gás;
- Maioria das estrelas orbitam o núcleo em um plano (disco);

Galáxias elípticas:

- Formaram a maioria das suas estrelas muito rápido;
- Ou seja, maioria das suas estrelas é velha (vermelhas);
- Consumiram quase todo seu gás, não formam novas estrelas;
- Maioria das estrelas orbitam núcleo em direções aleatórias (esferoide);
- Maioria possui um disco, porém muito pequeno.

Tendências na sequência de Galáxias Espirais

Sa



Sb



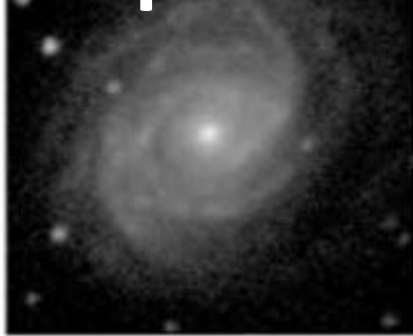
Sc

- Observando a sequência Sa \rightarrow Sc, notamos uma série de diferenças que podem ser usadas para classificação:
 1. Um decréscimo da razão entre as luminosidade do bojo e disco, com $L_{bulge}/L_{disk} \approx 0.3$ para Sa e 0.05 para Sc;
 2. Um aumento do ângulo de abertura dos braços espirais: de $\approx 6^\circ$ para Sa's a 18° para Sc's;
 3. Aumento da “estrutura” nos braços espirais: Sa's têm uma distribuição de luz “suave” ao longo dos braços espirais, enquanto em Sc's os braços são resolvidos em nós brilhantes de estrelas e regiões HII (nuvens de Hidrogênio ionizado em torno de estrelas jovens);

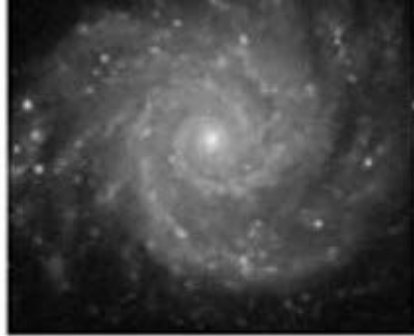
Galáxias Espirais Barradas



Sa



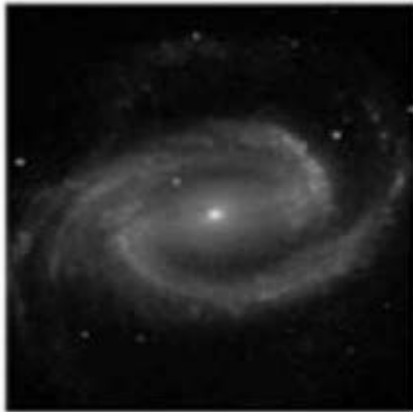
Sb



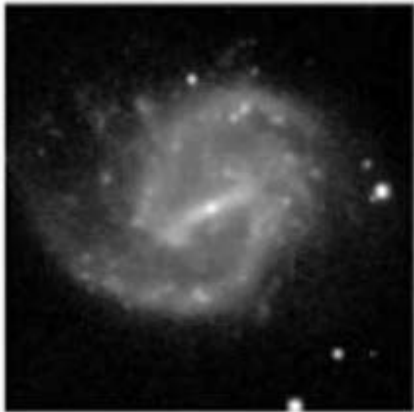
Sc



SBa



SBb



SBc

Estrutura Espiral

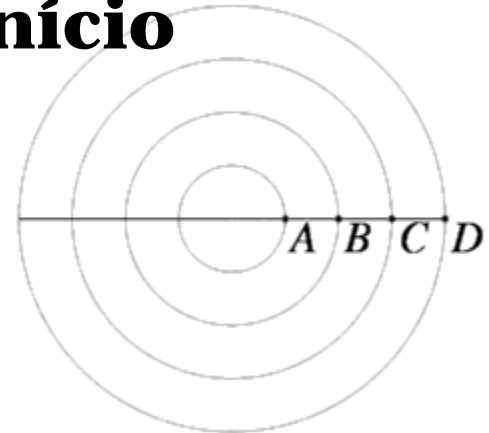


- Braços em espiral são classificados em três tipos:
 1. **Grand-design:** $\approx 10\%$. Dois braços espirais bem definidos;
 2. **Braços Múltiplos:** $\approx 60\%$;
 3. **Espirais flocculentas:** braços mal definidos;
- Braços espirais são locais de intensa formação estelar: neles observamos poeira, regiões HII, estrelas azuis, muito gás;
- De fato, os braços espirais são muito mais proeminentes em luz azul do que vermelha;
- Mas o que eles são? Como eles se formam? Quanto tempo eles duram?

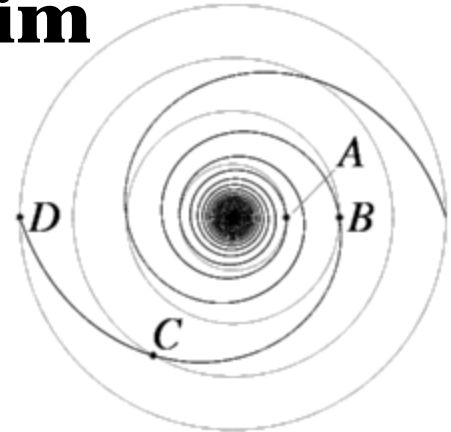
Estrutura Espiral: o problema do enrolamento

- As curvas de rotação em galáxias espirais não são curvas de rotação de "corpo sólido";
- As curvas de rotação espiral são planas para pontos suficientemente distantes do centro: $V_c \approx \text{constante}$;
- Portanto, a taxa de rotação angular segue V_c/r , de modo que a borda externa leva mais tempo para completar uma órbita do que as regiões internas;
- Logo, nenhum braço sólido poderia durar muito tempo – ele seria rapidamente “enrolado”;
- Esse enrolamento acontece muito rápido, em alguns períodos de rotação (menos que um bilhão de anos);
- A idade do Universo é em torno de 13,7 bilhões de anos – nesse caso, todas galáxias espirais teriam seus braços tão bem enrolados que não os veríamos mais como braços espirais!
- Portanto, braços espirais não podem ser objetos físicos. O que mais eles poderiam ser?

Início



Fim



Estrutura Espiral: ondas de densidade

- Imagine dirigir em uma autoestrada em um trecho de ultrapassagem proibida, e um caminhão à 40 km/h bloqueia a passagem. Há um grande engarrafamento atrás dele;
- Você, inicialmente à 100 km/h, se aproxima do caminhão, até alcançar o congestionamento;
- Você diminui para 40 km/h até conseguir ultrapassar o caminhão, quando acelera de volta à 100 km/h. Todos os outros motoristas fazem o mesmo;
- Portanto, temos uma situação em que o engarrafamento se move a 40 km/h, enquanto os carros na autoestrada costumam andar a 100 km/h;
- Este é um exemplo de uma onda de densidade, uma perturbação de densidade que se move a uma velocidade diferente da velocidade dos objetos dentro dela.
- Como isso se aplica a galáxias?



Estrutura Espiral: ondas de densidade

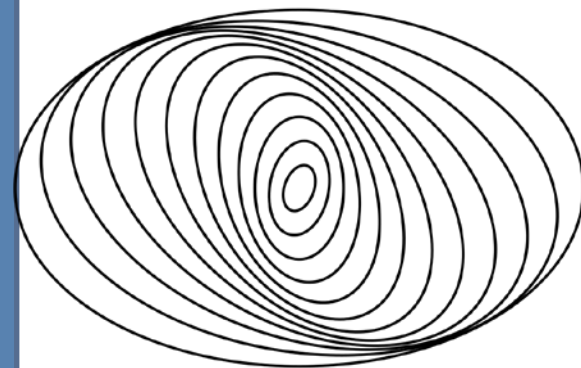
- Imagine que o padrão espiral é uma onda de densidade;
- Ele gira através da galáxia a uma velocidade angular fixa, a *pattern speed*;
- Nas partes internas das galáxias, as estrelas estão se movendo mais rápido que a *pattern speed* e ultrapassam a onda de densidade;
- Nas partes externas das galáxias, as estrelas se movem mais lentamente do que a *pattern speed* e os braços espirais ultrapassam as estrelas.
- O que acontece quando uma estrela encontra a onda de densidade?
- À medida que se aproxima da onda, acelera em direção à onda de densidade;
- Depois de passar pela onda, diminui a velocidade e sai muito lentamente;
- Assim, a estrela passa mais tempo em torno da onda de densidade do que o normal. Vemos isso como uma densidade aumentada de estrelas - um braço espiral!



Estrutura Espiral: ondas de densidade

- Por que há muito mais formação de estrelas nos braços espirais?
- Conforme as nuvens de gás se aproximam da onda de densidade, a densidade de massa local aumenta. Uma densidade maior aumenta a probabilidade de as nuvens colapsarem e formarem estrelas;
- À medida que as nuvens são varridas pelos braços espirais, elas colidem umas com as outras e provocam ondas de choque através do gás, o que, por sua vez, faz com que o gás entre em colapso e forme estrelas;
- Mas o que causa a onda de densidade? Algo precisa "semear" essa perturbação. Uma vez semeada, a auto-gravidade do disco amplifica a perturbação e a faz crescer;
- Possibilidade: assimetria inicial no disco e/ou halo de matéria escura;
- Nem todos braços espirais se originam como ondas de densidade: forças de maré em interações também os geram.

Órbitas em braços espirais



Estrutura Espiral: braços espirais de maré



Galáxias Espirais: Barras

- Cerca de 60% das galáxias espirais possuem barras;
- Barras se formam a partir de instabilidade gravitacional no disco: processo complexo e estudado através de simulações;
- Simulações indicam que aparecem mais facilmente em discos finos e com pouco gás;
- Pode levar gás para as regiões centrais.



Galáxias Espirais: Dois Tipos de Bojo

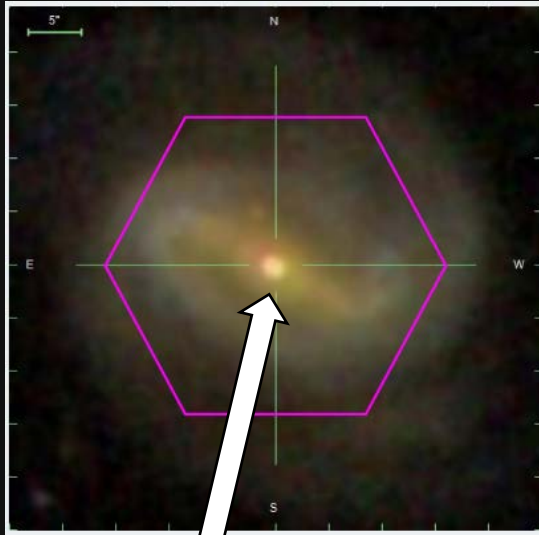
Bojo Clássico
Formato Elipsoidal

Pseudobojo “*Boxy*”
Formato de Caixa

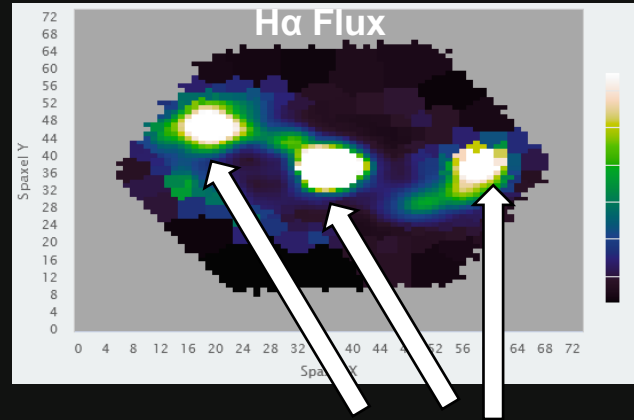
Pseudobojo “*X-Shaped*”
Em Forma de X



Galáxias Espirais: Barras e Pseudobojos

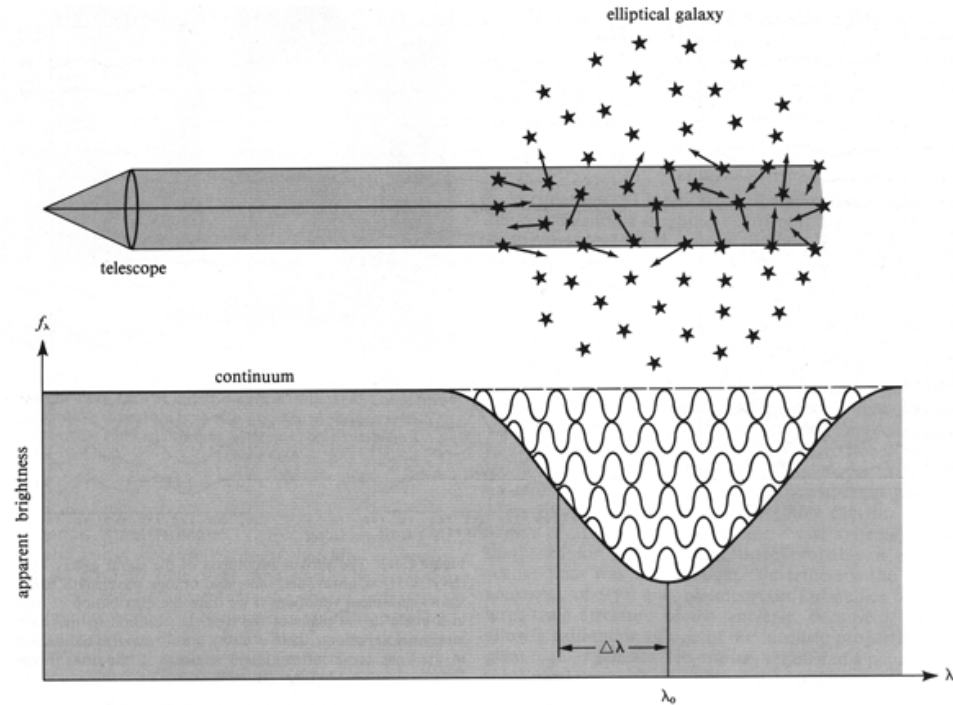
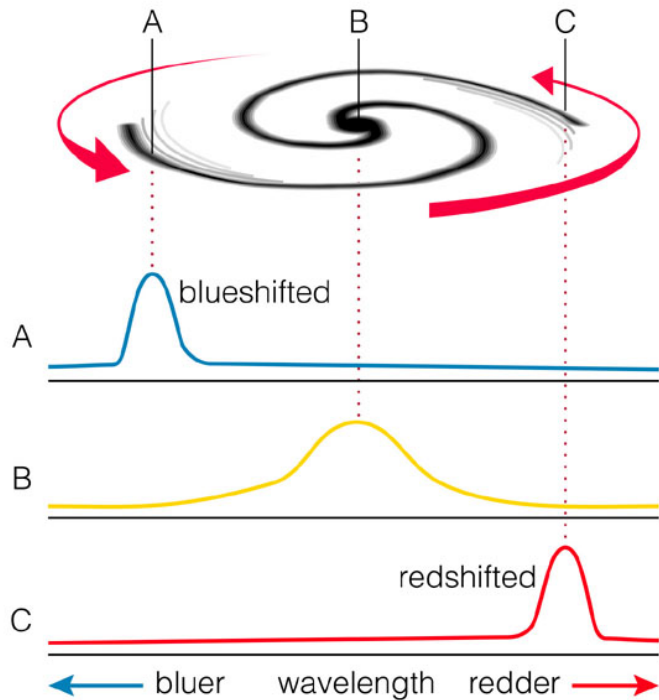


Gás é levado para o centro das galáxias pela barra, onde formará estrelas que criam um “pseudobojo”.



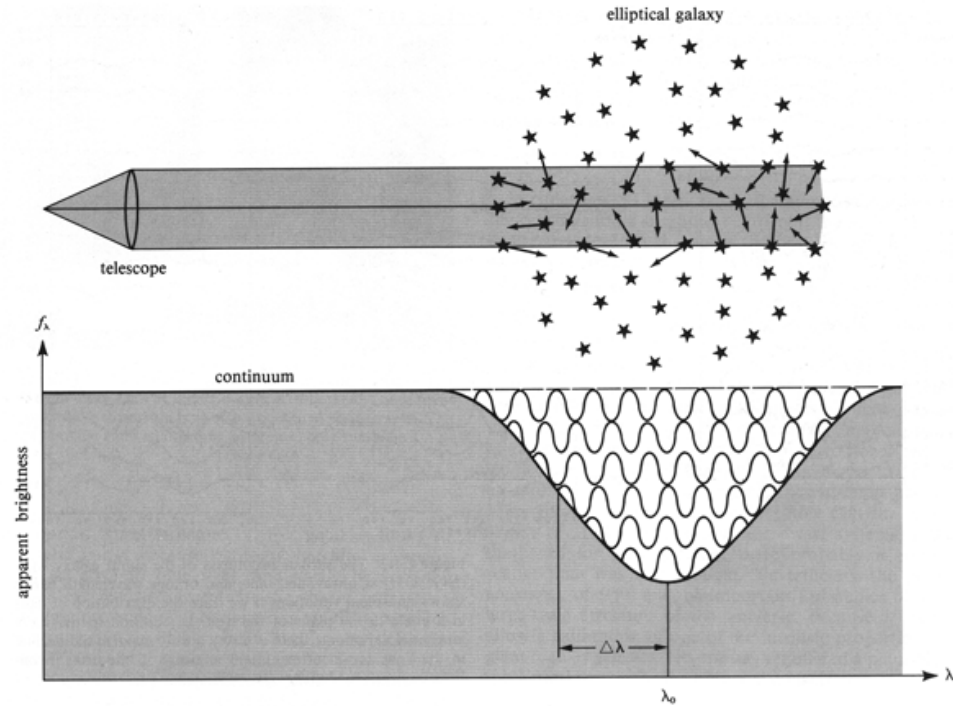
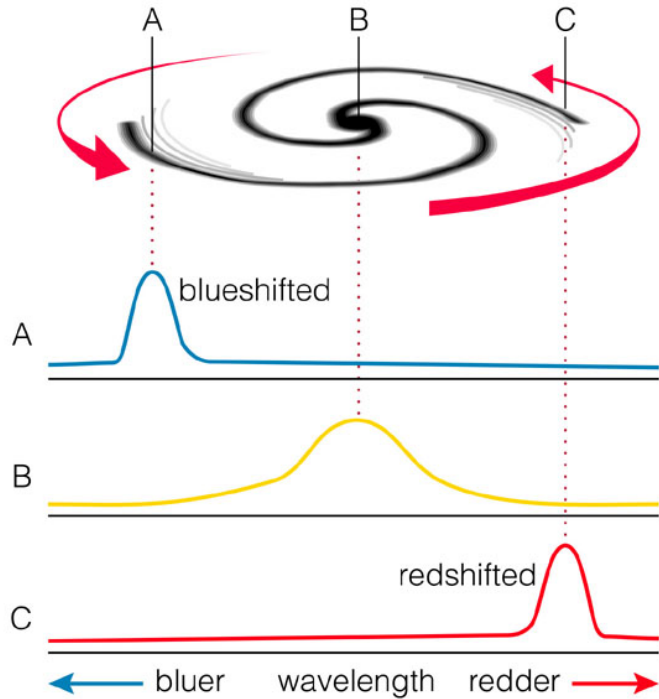
Regiões com intensa emissão de luz por átomos de Hidrogênio ionizados por estrelas jovens. Barras estimulam formação de estrelas no centro da galáxia e nas pontas da barra.

Cinemática de Galáxias Espirais



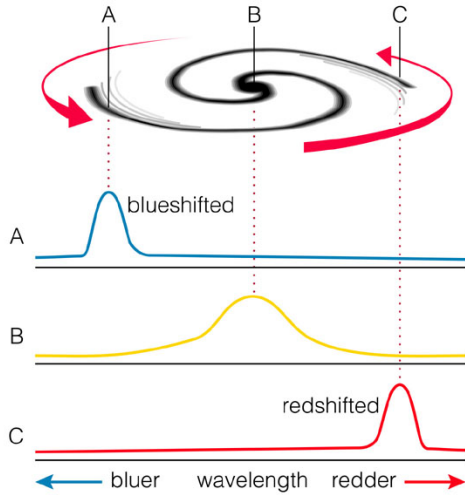
- Velocidade de Rotação (V): medida do movimento ordenado. Determinada a partir do deslocamento da linha de absorção/emissão em relação ao valor no centro da galáxia (velocidade sistêmica/de repouso);
- Dispersão de velocidades (σ): medida do movimento desordenado. Determinada a partir da largura das linhas de emissão/absorção em um determinado ponto da galáxia.

Cinemática de Galáxias Espirais

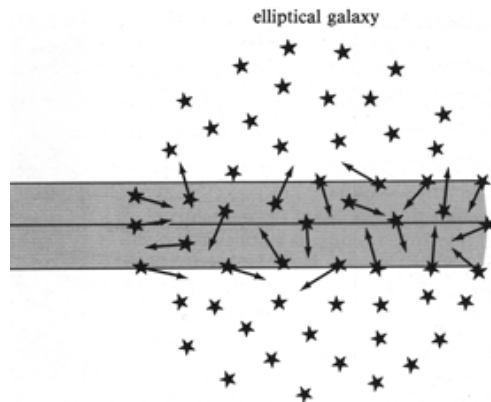
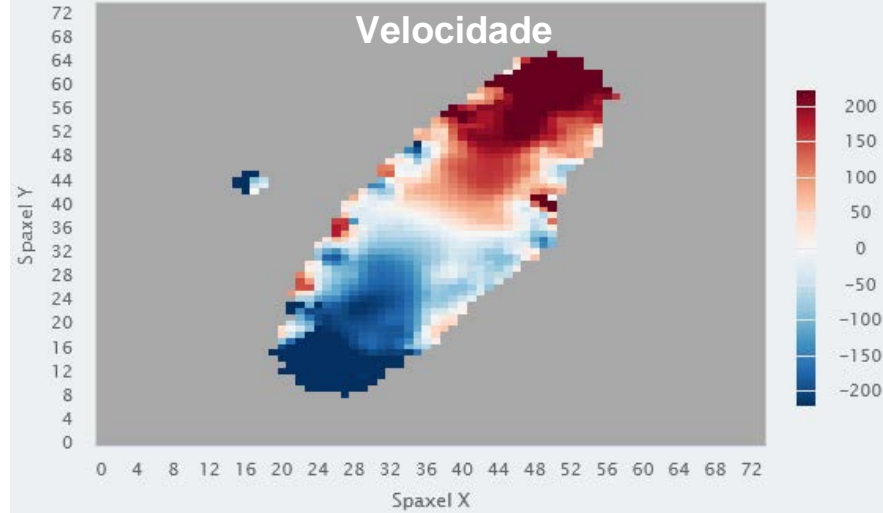
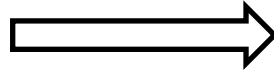


- Para o disco da Via Láctea, $V_{max} \approx 220 \text{ km/s}$ e $\sigma \approx 30 \text{ km/s}$, logo $V_{max}/\sigma \approx 7$. Isso significa que o disco da Via Láctea é cinematicamente "frio";
- Discos de galáxias espirais possuem $V_{max}/\sigma > 1$, galáxias elípticas possuem $0 < V_{max}/\sigma < 1$;

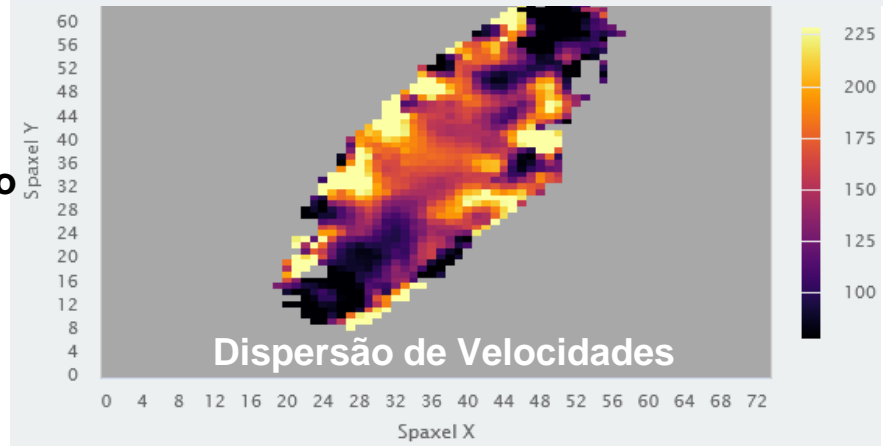
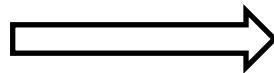
Cinemática de Galáxias Espirais



Movimento Ordenado



Movimento Desordenado



Cinemática de Galáxias Espirais: Curvas de Rotação

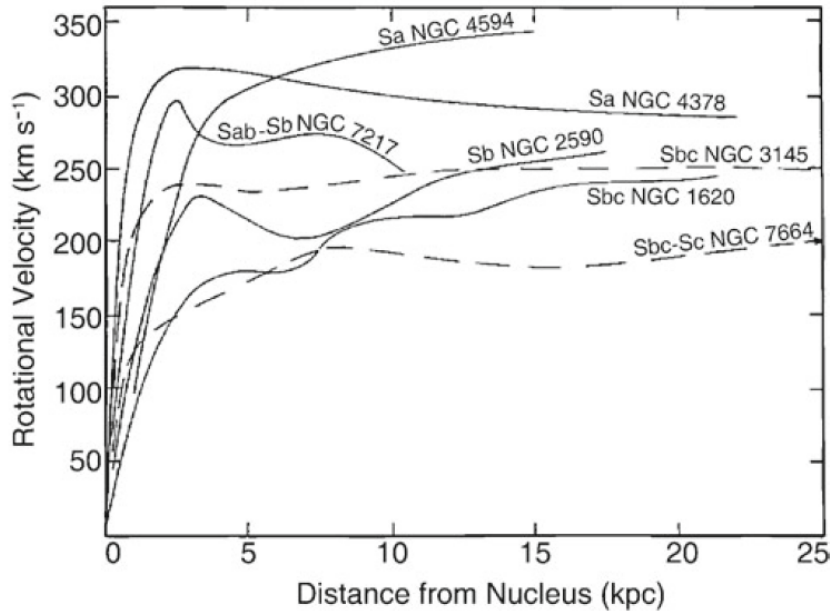


Fig. 3.22 Examples of rotation curves of spiral galaxies. They are all flat in the outer region and do not behave as expected from Kepler's law if the galaxy consisted only of luminous matter. Also striking is the fact that the amplitude of the rotation curve is higher for early-type than for late-type spirals. Source: V. Rubin et al. 1978, *Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV—Systematic dynamical properties, SA through SC*, ApJ 225, L107, p. L109, Fig. 3. ©AAS. Reproduced with permission

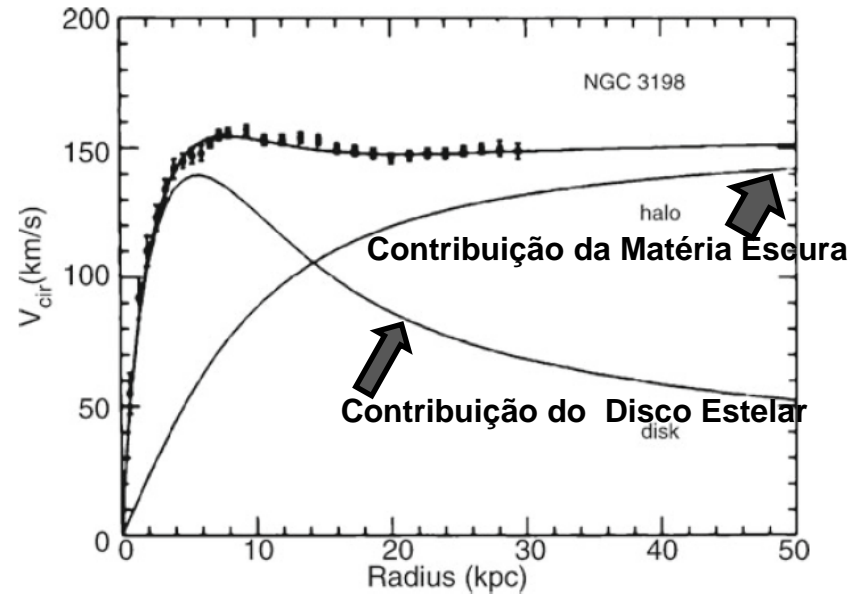
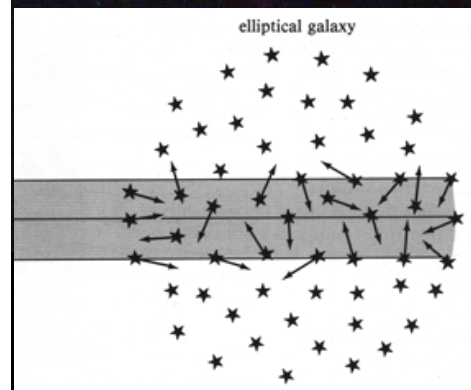
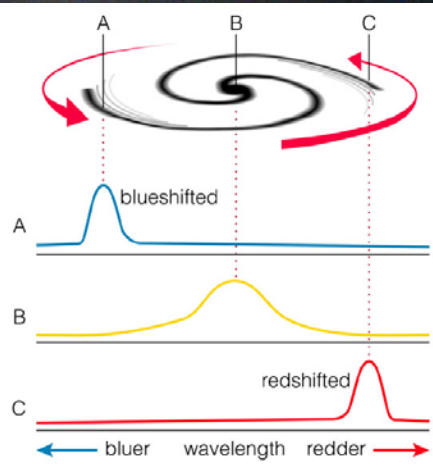
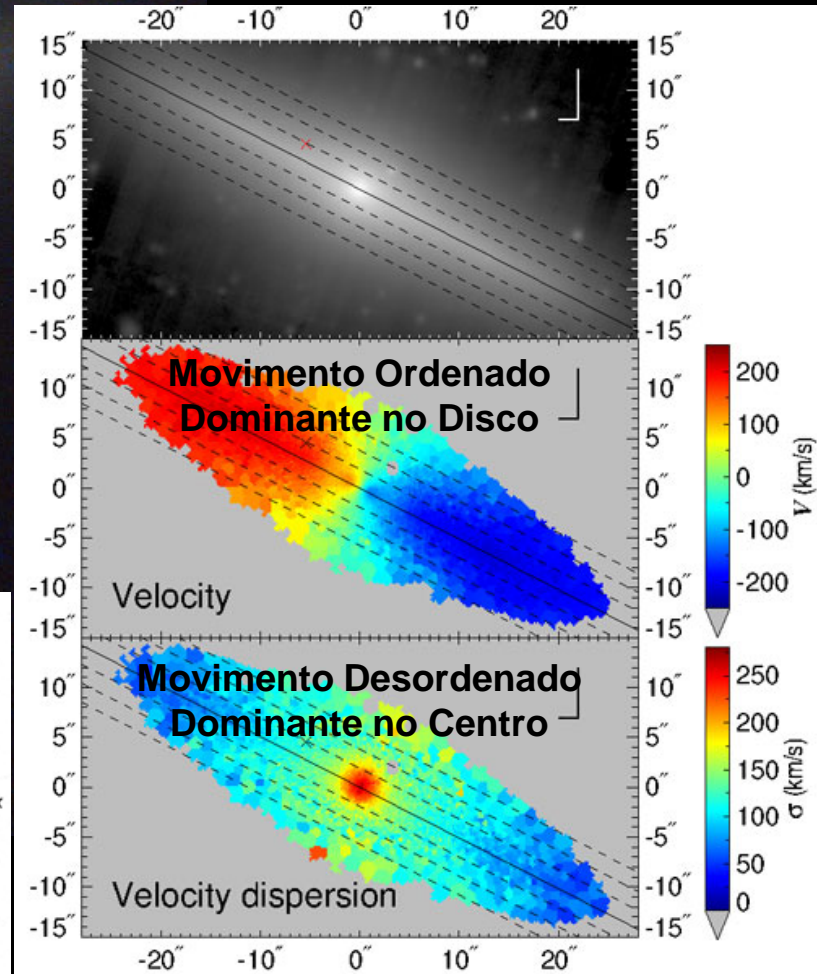


Fig. 3.23 The flat rotation curves of spiral galaxies cannot be explained by visible matter alone. The example of NGC 3198 demonstrates the rotation curve which would be expected from the visible matter alone (curve labeled 'disk'). To explain the observed rotation curve, a dark matter component has to be present (curve labeled 'halo'). However, the decomposition into disk and halo mass is not unambiguous because for it to be so it would be necessary to know the mass-to-light ratio of the disk. In the case considered here, a 'maximum disk' was assumed, i.e., it was assumed that the innermost part of the rotation curve is produced solely by the visible matter in the disk.

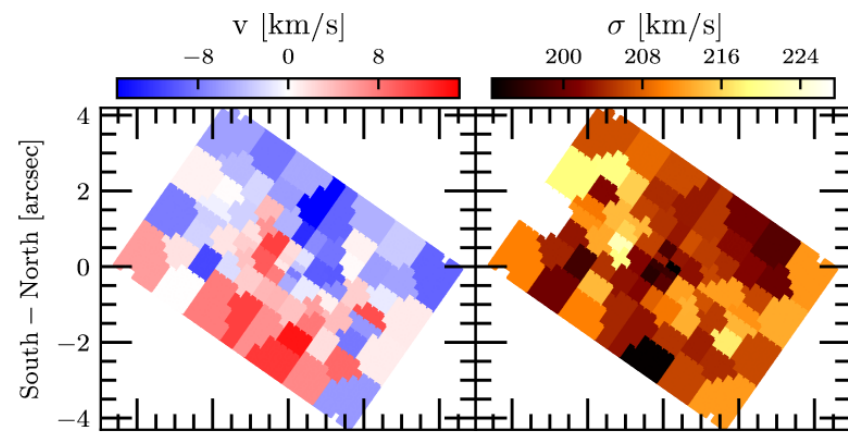
Cinemática de Galáxias Lenticulares

ESO 243-49

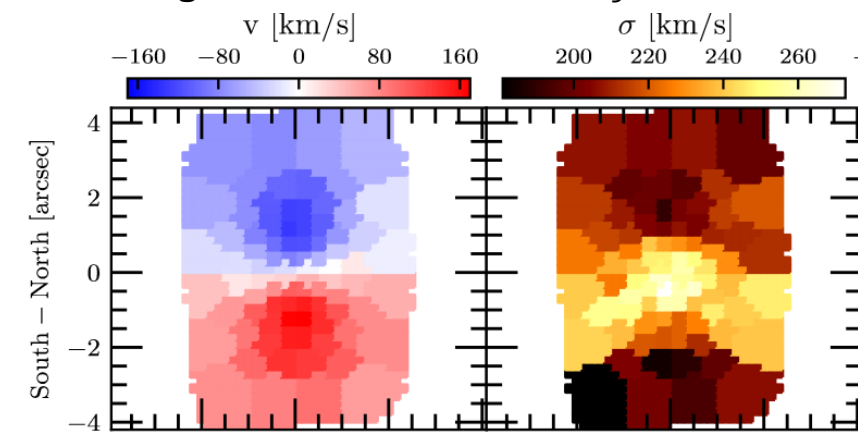
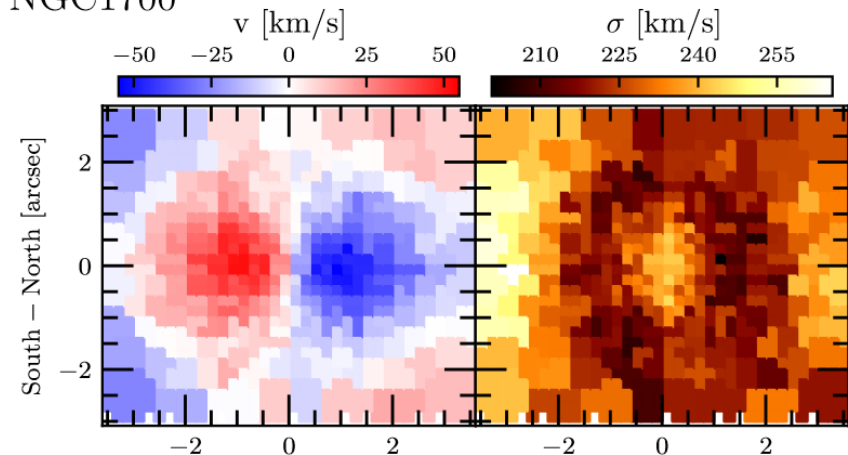


Cinemática de Galáxias Elípticas

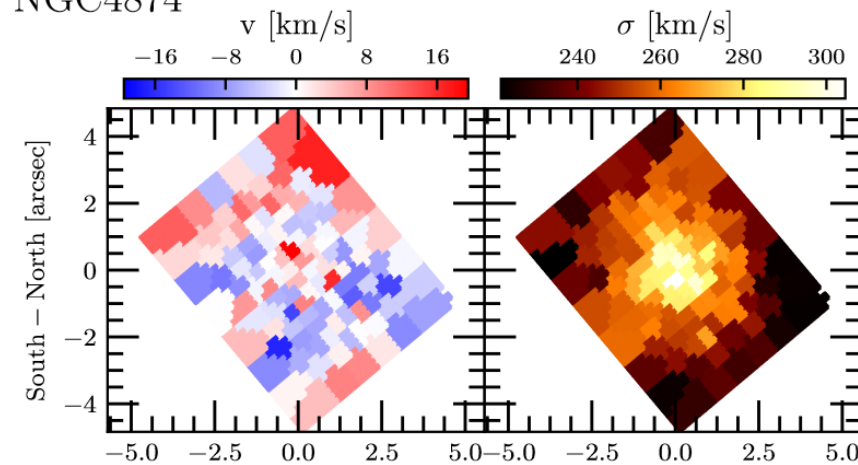
Movimentos desordenados dominam, mesmo em galáxias mostrando rotação



NGC1700



NGC4874



Galáxias Elípticas: Indicadores de uma Evolução Complexa

- Como resultado de colisões e fusões de galáxias, estruturas estelares coerentes, como correntes estelares, são formadas;
- Exemplo: galáxia NGC474, um dos exemplos mais espetaculares encontrados até agora observados;
- A galáxia possui múltiplos “shells” luminosos e uma complexa estrutura de caudas de maré, testemunhas de seu passado “violento”.

Galáxias Elípticas: *Ripples e Shells*



Figure 19. Examples of ETGs with post-major merger signatures: inner dust lanes, strongly perturbed morphology and prominent tidal tails. From left to right, composite true colour images of NGC 5557, NGC 1222 and NGC 2764.

Galáxias Elípticas: *Tidal Tails*



Figure 21. Examples of ETGs currently involved in a tidal interaction with a nearby massive companion and exhibiting prominent tidal tails. Clockwise, composite true colour images of NGC 770, NGC 680, NGC 2698/99, NGC 5507 and NGC 5574/76. The location of the ATLAS^{3D} ETGs is indicated by a cross.

Galáxias Elípticas: *Streams*



Figure 23. Examples of ETGs hosting tidally disrupted satellites, as indicated by the presence of stellar streams around them. Clockwise, true colour images of NGC 2592, NGC 5198, NGC 3414, IC 1024 and NGC 936. Prominent cirrus emission is observed in the field of NGC 2592.

Galáxias Elípticas: Shells

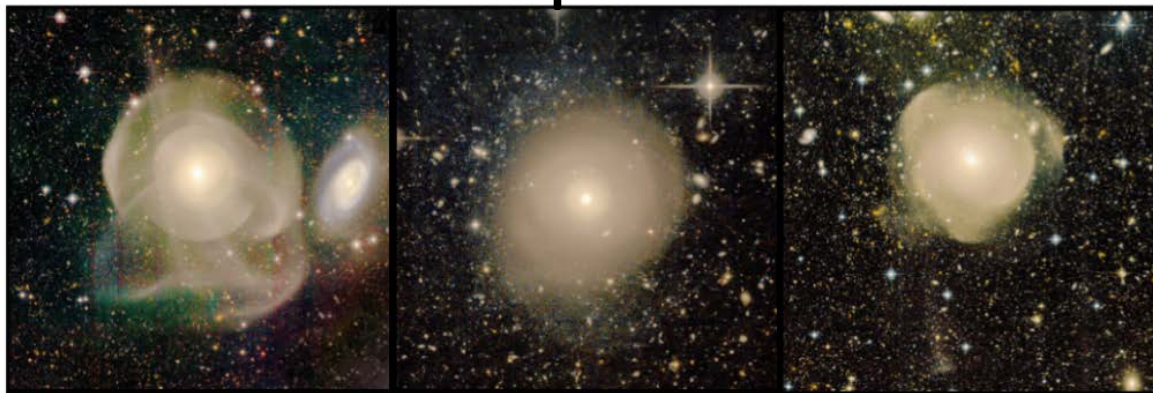


Figure 24. Examples of ETGs exhibiting shells around them. From left to right, true colour images of NGC 474, NGC 502 and NGC 3619.

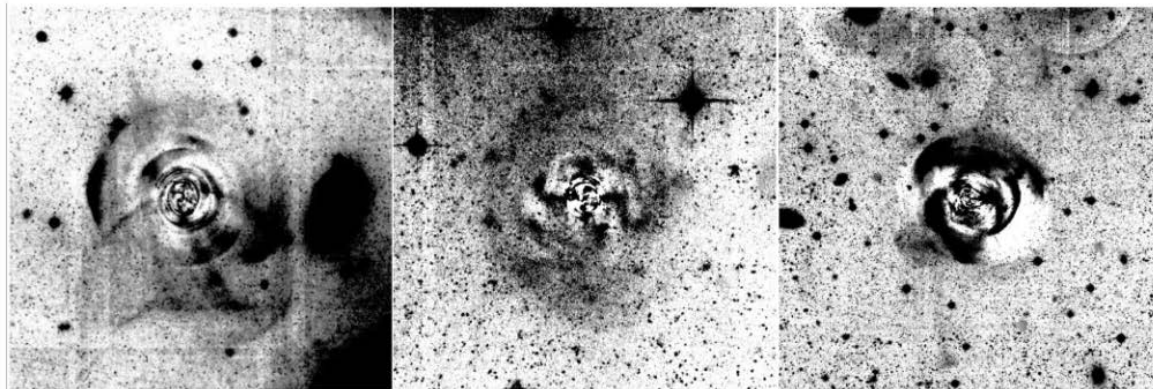
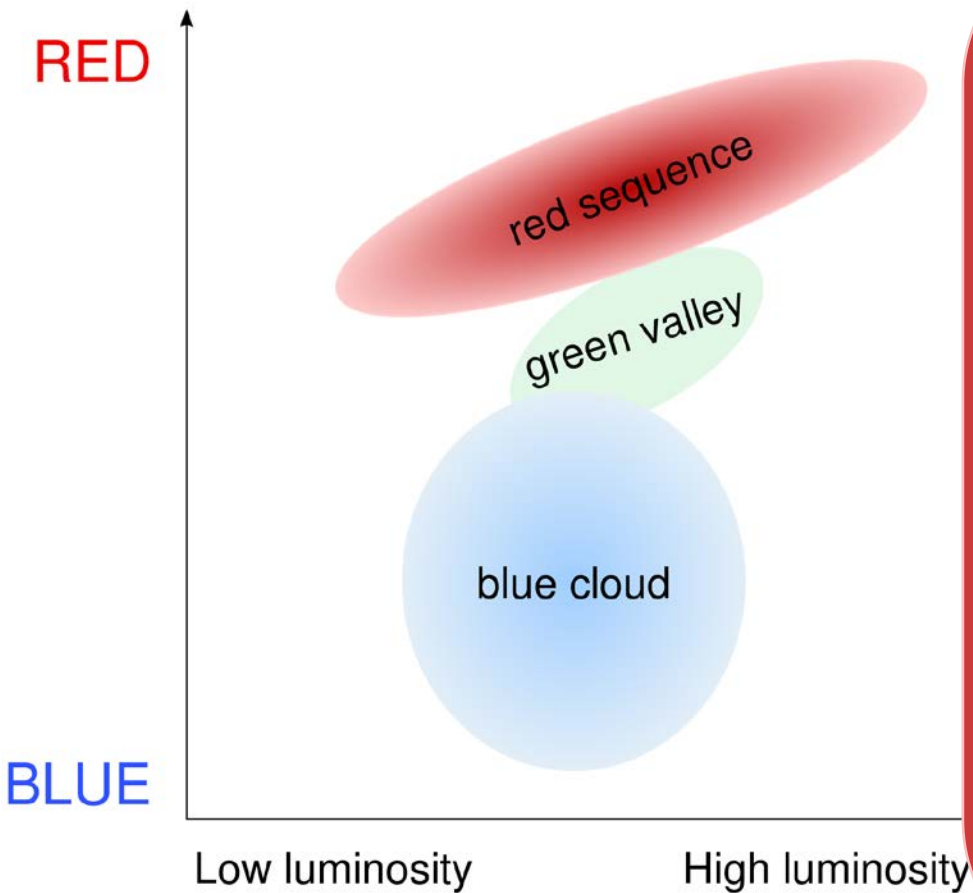


Figure 25. Shells disclosed by subtracting a galaxy model with ellipse fitting. From left to right, residual *g*-band images of NGC 474, NGC 502 and NGC 3619. Note also the presence of radial structures, formed either together with the shells during the merger of the companion (likely the case for NGC 474) or during a previous or late independent accretion event (NGC 3619).

Galáxias Elípticas: Objetos Relaxados



Figure 20. Examples of ETGs which appear totally relaxed/regular even on the deep MegaCam images, and do not show any fine structure in their vicinity. From left to right, composite true colour images of NGC 3457, NGC 3599 and PGC 050395. The high image quality of the MegaCam survey is illustrated by these images showing the globular cluster population around the galaxies and background distant clusters of galaxies.

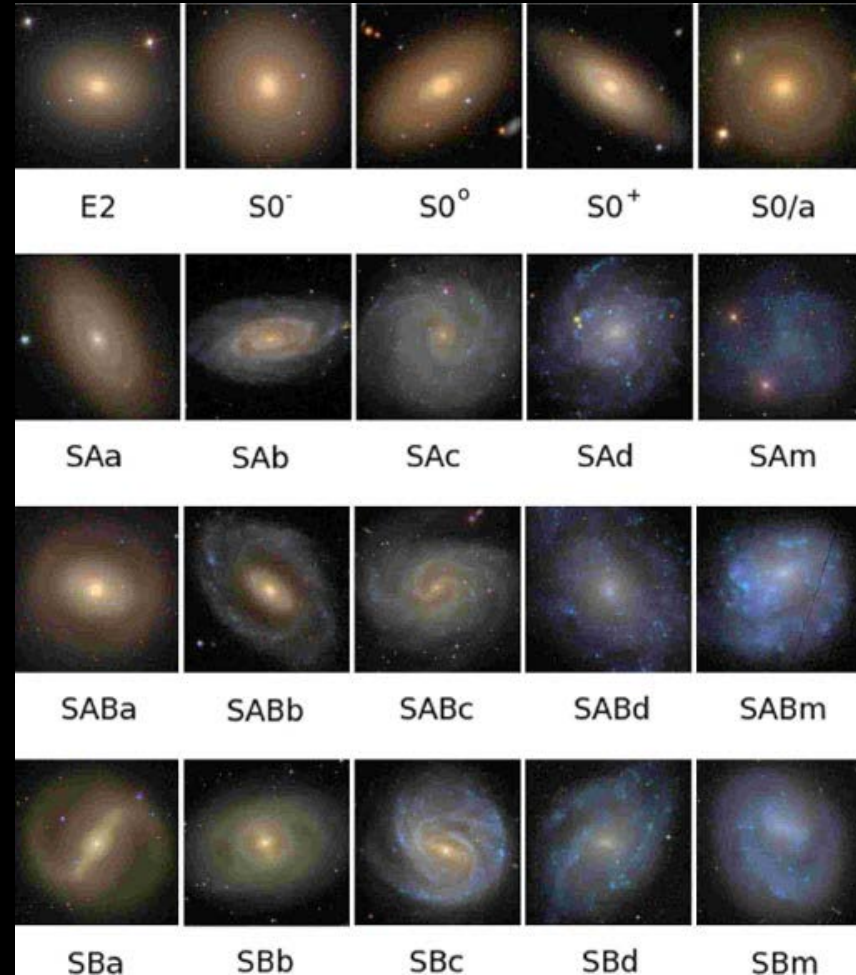


A cor das galáxias

- Estrelas massivas (azuis) são muito brilhantes. Como têm curto tempo de vida, são observadas somente em galáxias formando grandes quantidades de novas estrelas;
- Ou seja: galáxias que não formam mais estrelas têm cor vermelha;
- Galáxias com formação estelar substancial tem cor azulada;
- Em um gráfico cor X luminosidade (ou massa, pois massa maior => luminosidade maior), maioria das galáxias se concentram em duas regiões: sequência vermelha e nuvem azul;
- Poucas galáxias entre essas duas regiões (vale verde);
- Note que galáxias no vale verde não possuem cor verde!
- **Vale verde:** galáxias que pararam de formar estrelas há pouco tempo (estrelas azuis O e B já morreram, mas ainda existem estrelas azuis A) ou galáxias que formam menos estrelas que o normal.
- **Conclusão:** a cessação da formação estelar deve ser rápida. Se fosse gradual, galáxias passariam muito tempo no vale verde e deveríamos ver um número maior de galáxias nessa região.

A Relação Cor-Morfologia

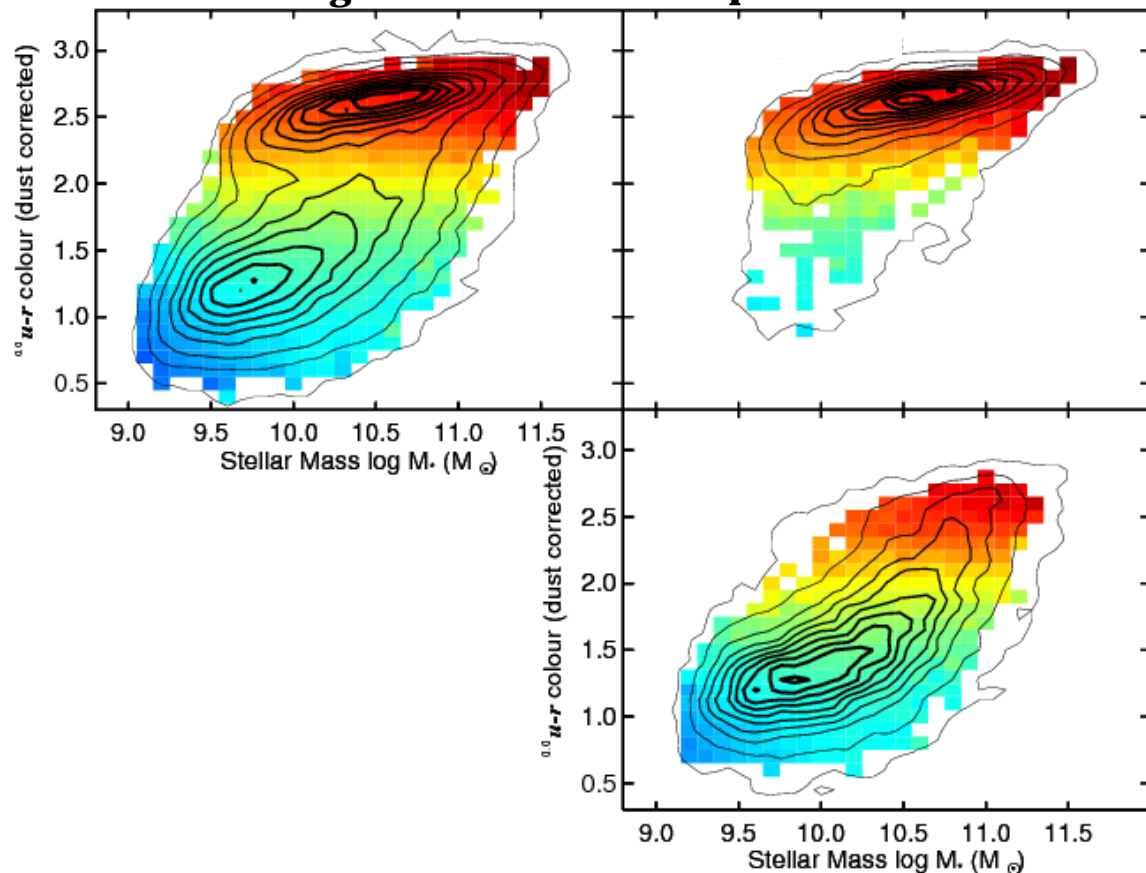
- Ao longo da sequência do Hubble, encontramos uma relação entre a cor e o tipo de galáxia;
- As galáxias E e S0 têm cores vermelhas, e as cores ficam progressivamente mais azuis para os tipos tardios (*late type*) de galáxias;
- Quando observamos galáxias, só podemos resolver estrelas individuais nas galáxias mais próximas (Andrômeda e algumas outras);
- Geralmente, estudamos populações estelares de galáxias usando cores ou espectros integrados;
- Podemos usar síntese de população estelar (combinação linear de espectros sintéticos de populações estelares de diferentes idades/metalicidade) para estudar como os espectros e cores de uma população de estrelas evoluem com o tempo, sob diferentes históricos de formação estelar;
- Então galáxias vermelhas têm estrelas que, em média, são mais velhas, enquanto galáxias mais azuis têm estrelas mais jovens.



A Relação Cor-Morfologia

Todas galáxias

Elípticas e lenticulares



Galáxias espirais

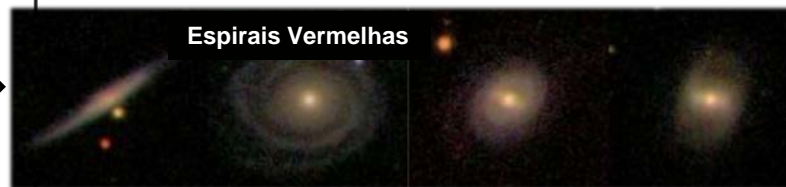
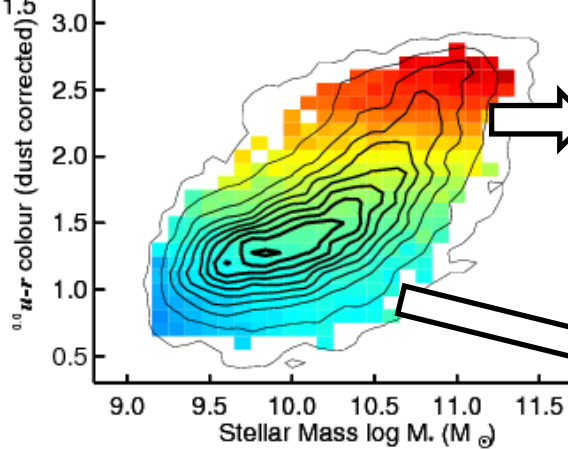
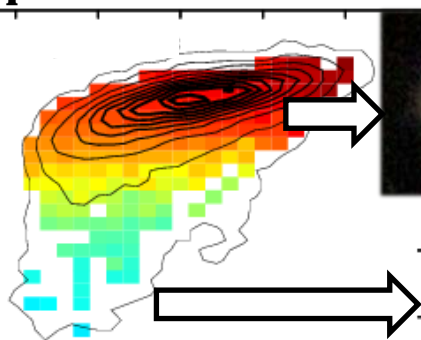
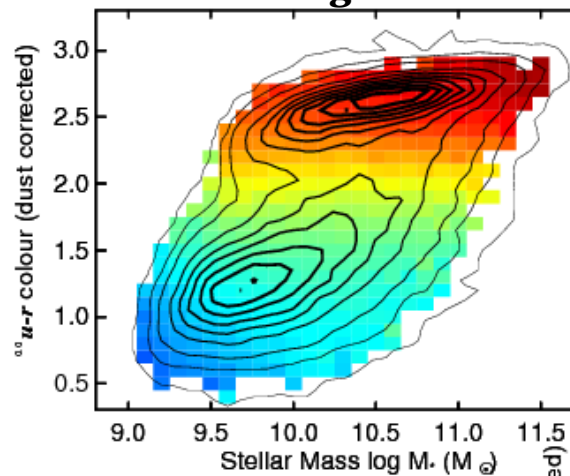
A População de Galáxias é Bimodal

- Galáxias se concentram principalmente em duas regiões;
- Galáxias elípticas e lenticulares se encontram em sua maior parte na sequência vermelha;
- Galáxias espirais se encontram em sua maioria na nuvem azul;

A Relação Cor-Morfologia

Todas galáxias

Elípticas e lenticulares



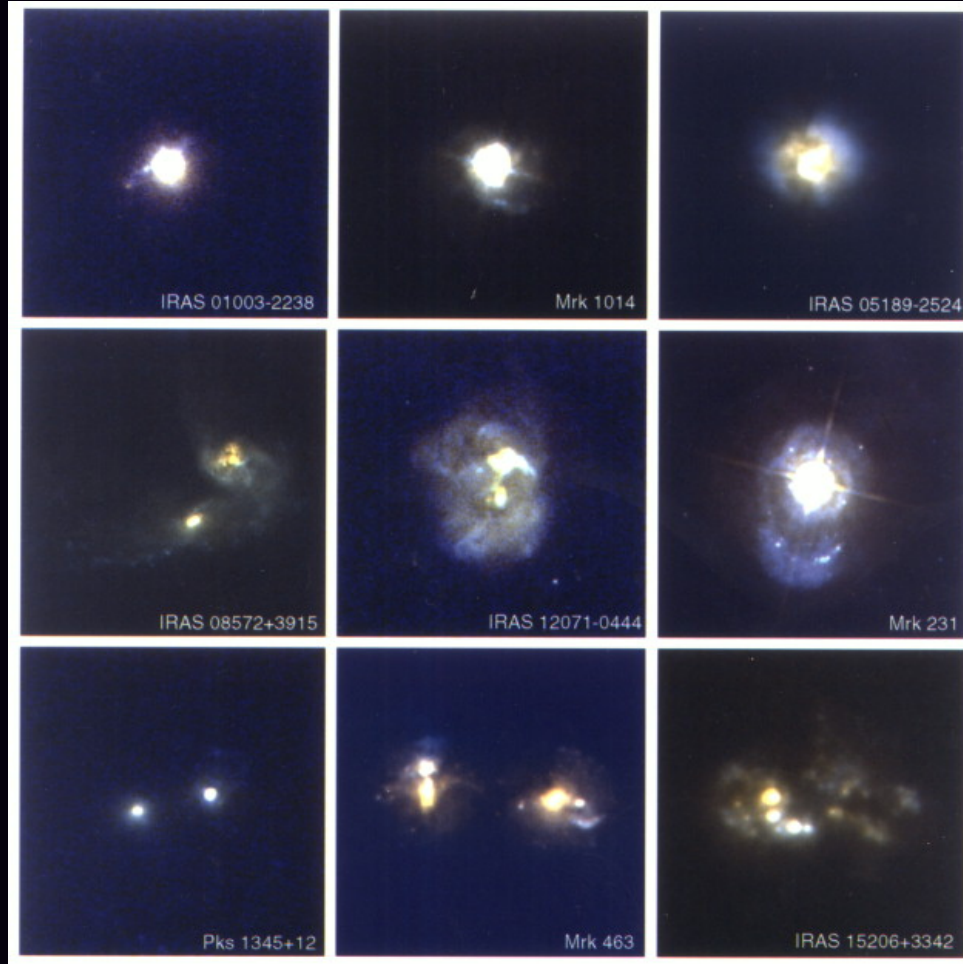
Galáxias espirais

Galáxias peculiares: Galáxias *Starburst*

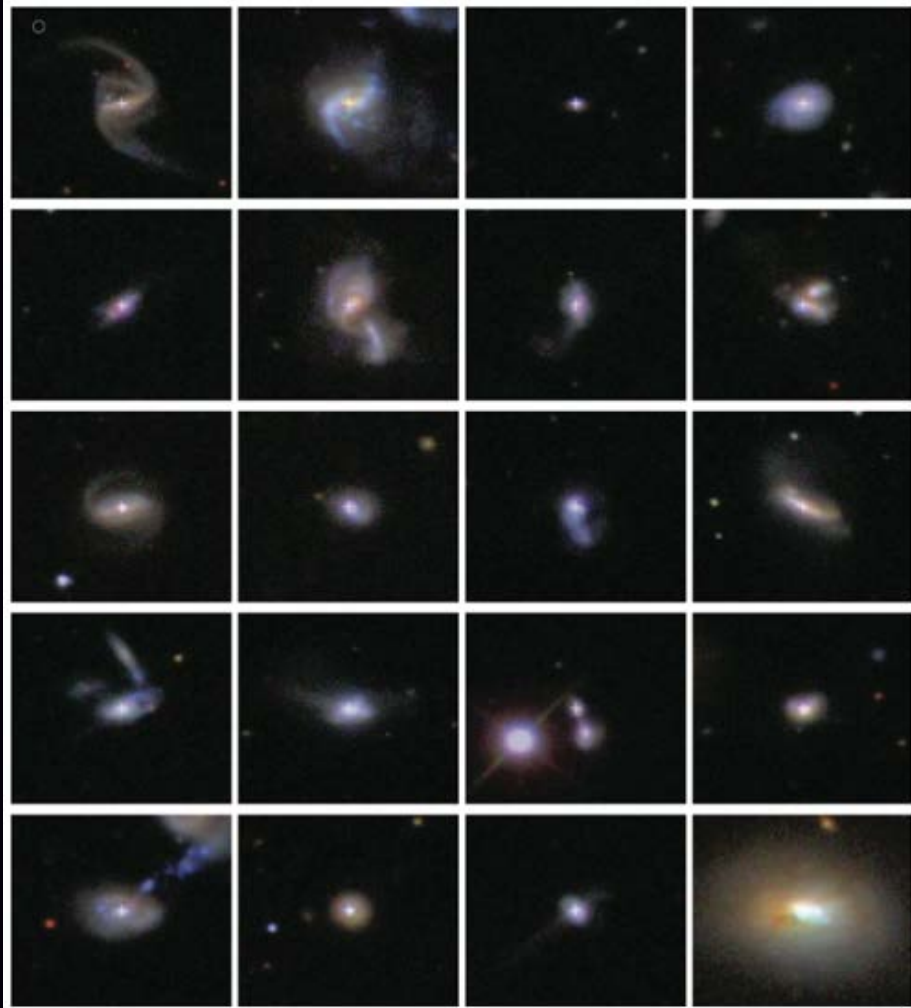


- Galáxias *Starburst* são galáxias que formam estrelas a uma taxa extraordinariamente alta (de dezenas a milhares de vezes maior que em uma galáxia normal);
- Nesses altos níveis de formação estelar, estima-se que o suprimento de gás e poeira dentro da galáxia se esgote dentro de $\approx 10^8$ anos, o que significa que esses episódios de intensa formação estelar devem ter começado relativamente recentemente e terminarão em um futuro não muito distante;
- Áreas de alta atividade podem se espalhar por toda a galáxia, mas tipicamente a maioria das estrelas é formada em uma pequena região ao redor do núcleo;
- Acredita-se que a formação de estrelas seja desencadeada por interações de maré entre galáxias próximas e fusões de galáxias;

Galáxias peculiares: Galáxias *Starburst*

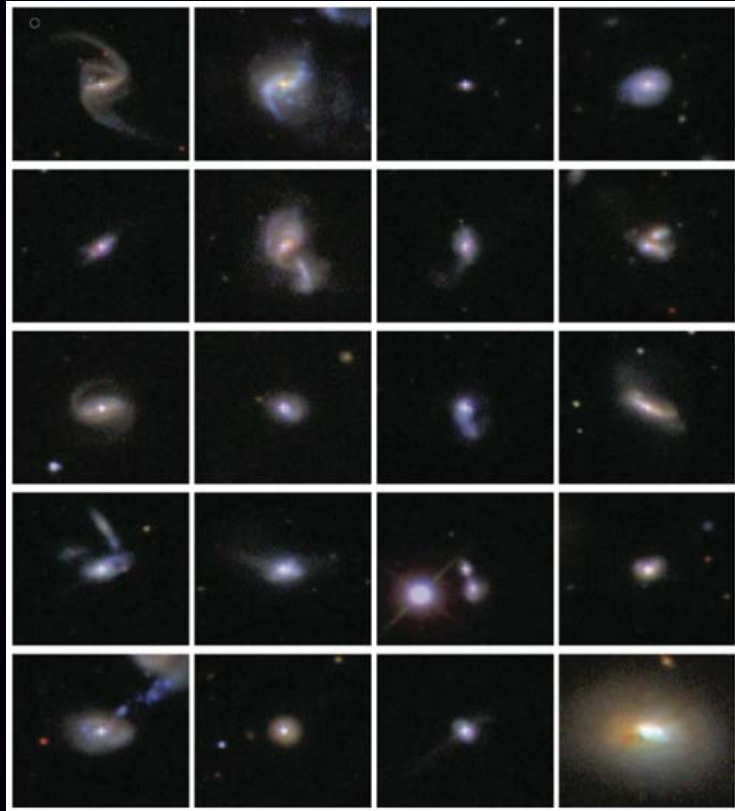


Galáxias peculiares: Galáxias *Post-Starburst*

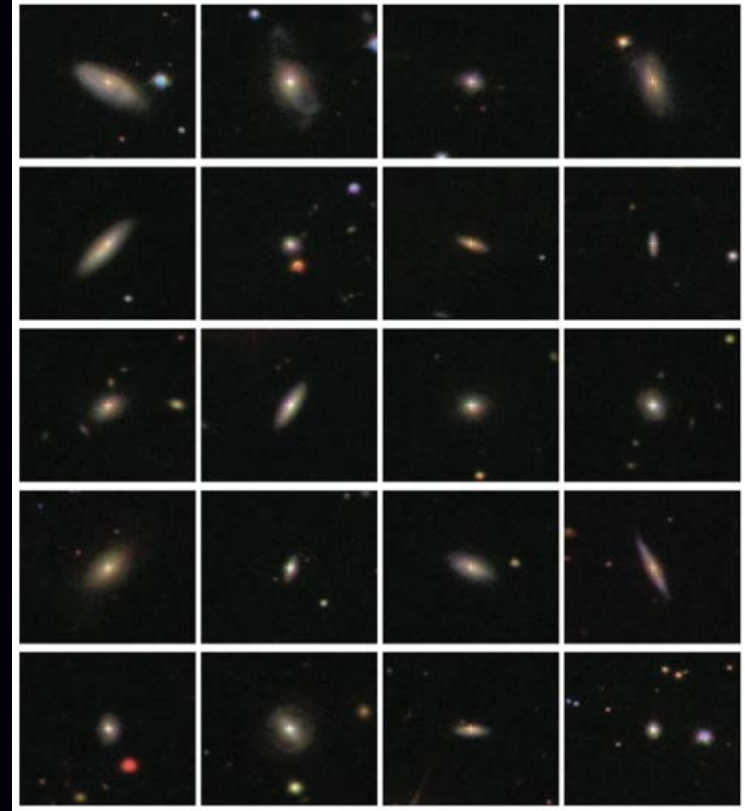


- Galáxias *Post-Starburst* são uma rara classe, com características espectrais incomuns;
- Possuem fortes linhas de absorção da série de Balmer do H, típico de estrelas da classe espectral A;
- Isso é consistente com um surto de formação estelar encerrado recentemente (estrelas O e B já atingiram o fim de sua vida e não dominam mais a emissão no azul);
- Em geral, possuem morfologia perturbada, o que sugere que são prováveis remanescentes de fusões de galáxias ricas em gás;
- No entanto, o surto de formação estelar pode ter sido disparado por outros mecanismos (tema de pesquisa);
- Galáxias *post-starburst* também são consideradas como um possível canal de transição entre as galáxias azuis e galáxias vermelhas;

Galáxias peculiares: Galáxias *Post-Starburst*

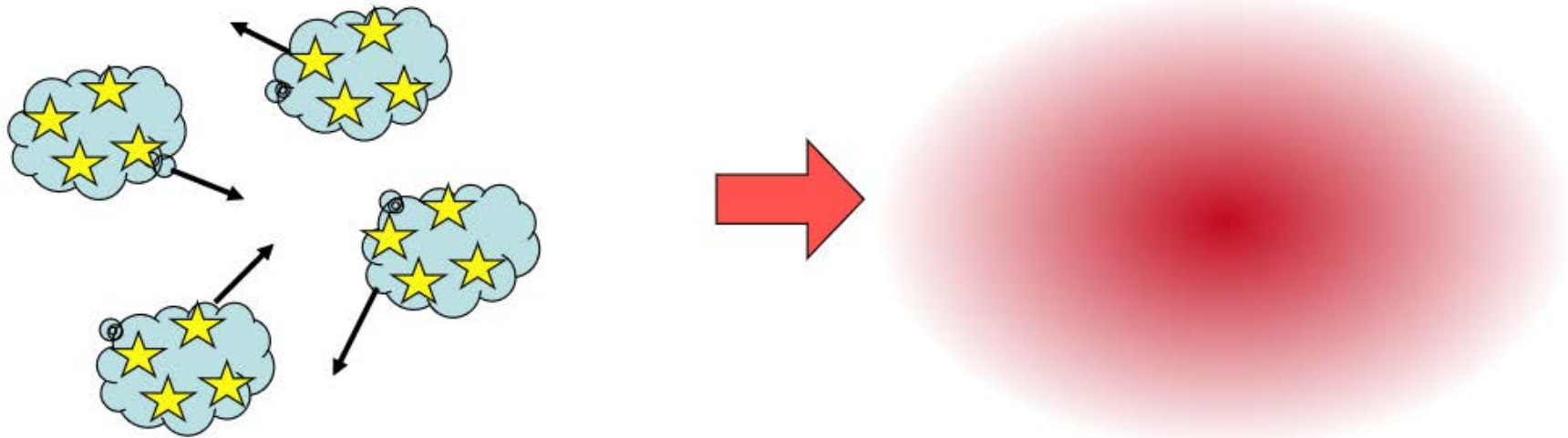


10 milhões de anos após o *burst*.



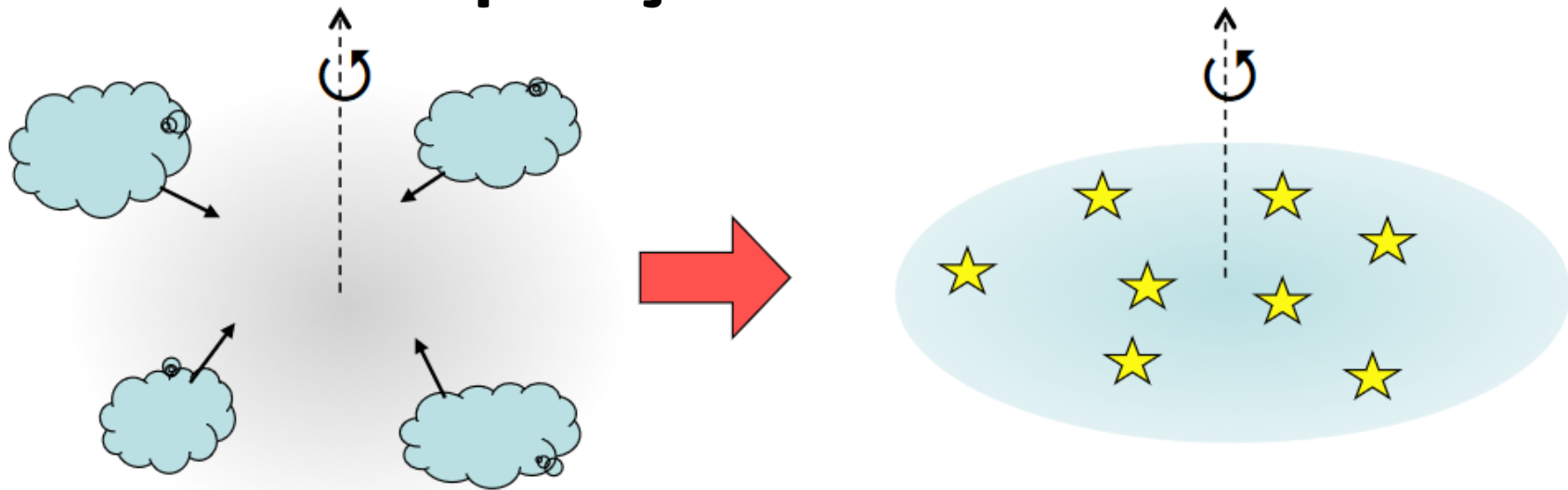
600 milhões de anos após o *burst*.

Formação de Esferoides e Dinâmica de Populações Estelares



- Estrelas “lembram” a dinâmica de suas órbitas no momento da formação, uma vez que a dinâmica dos sistemas estelares é sem dissipação (energia não é emitida);
- Se as estrelas se formaram em diferentes galáxias que vieram a se fundir posteriormente, isso resultará em um sistema dominados por movimentos aleatórios, ou seja, um esferóide (porque o sentido de rotação em cada galáxia é diferente);

Formação de Discos Galácticos e Dinâmica de Populações Estelares

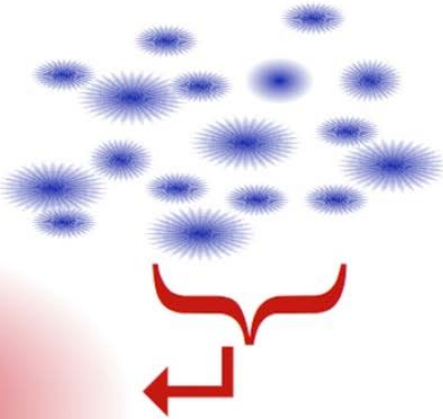
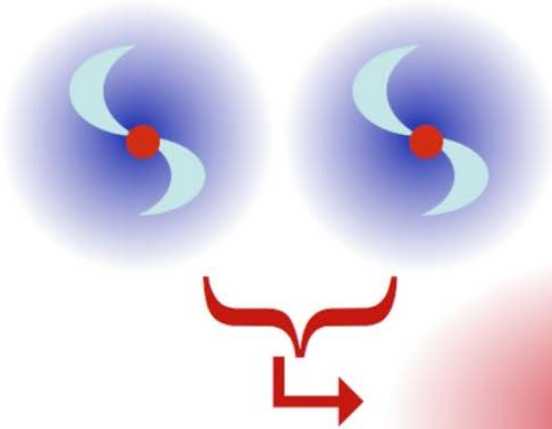


- Se nuvens protogalácticas se fundirem dissipativamente (com perda de energia) em um poço de potencial de um halo de matéria escura, elas formarão um disco fino em rotação: essa é a configuração de mínima energia para um determinado momento angular;
- Se o gás se instala em um disco (dinamicamente frio) antes que as estrelas se formem, as estrelas formado nesse disco herdarão os movimentos do gás (principalmente uma rotação ordenada).

Muitos Caminhos para formar Galáxias Elípticas

Merger of 2 grand-design spirals ...

... or 100's of dwarfs



The same outcome is produced ...

... regardless of the merger history, initial conditions, the amount of dissipation, etc.