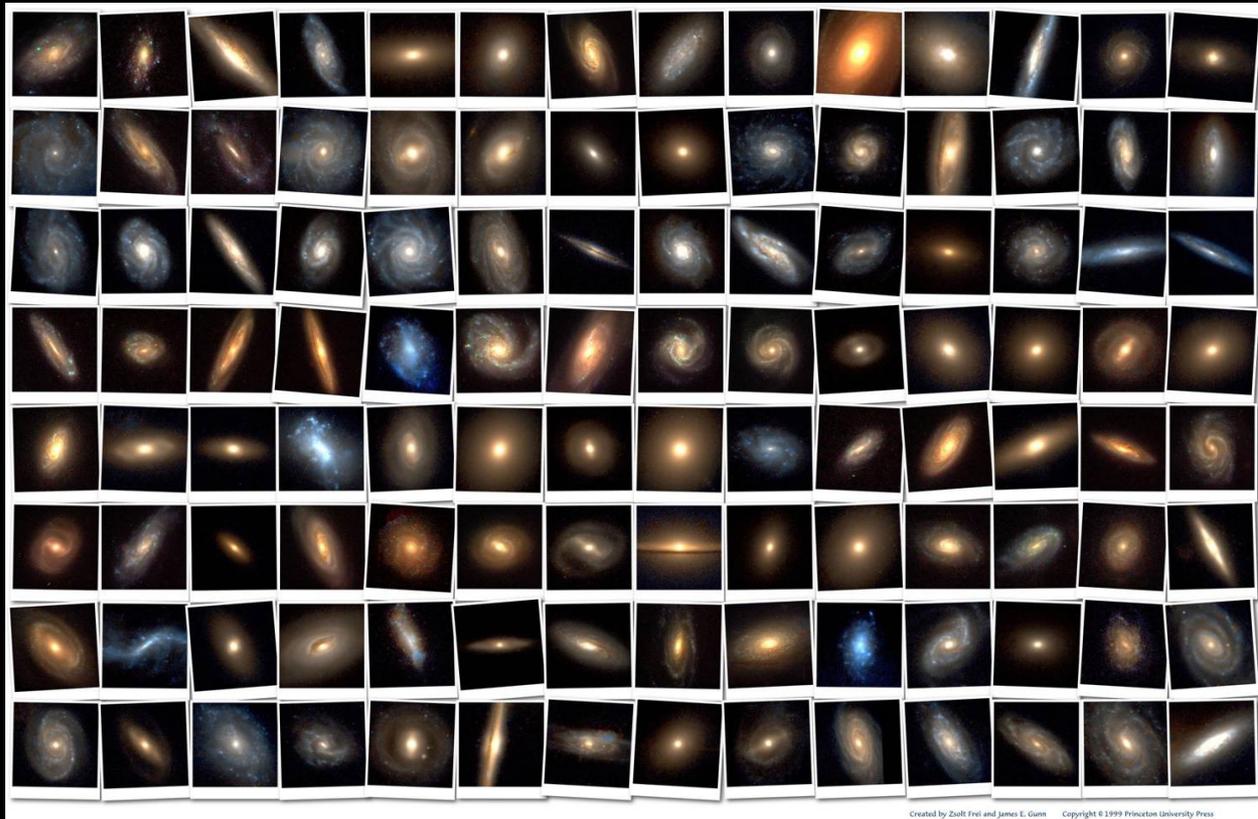


Aula 24

Astronomia Extragaláctica

...da Via-Láctea à diversidade de tipos morfológicos



Created by Zolt Frit and James E. Gunn Copyright © 1999 Princeton University Press

Sandra dos Anjos
IAG/USP - 2022

Outras Galáxias

- Sistema de Classificação de Hubble – SCH (SO, Irr)
- Limitações do SCH
- O papel da Cinemática nos Discos de Galáxias
 - Curva de Rotação
 - Matéria Escura
 - Braços Espirais – Teoria de Ondas de Densidade
- Galáxias Ativas: radiogaláxias, seyferts e quasares

As 3 grandes contribuições de Hubble...

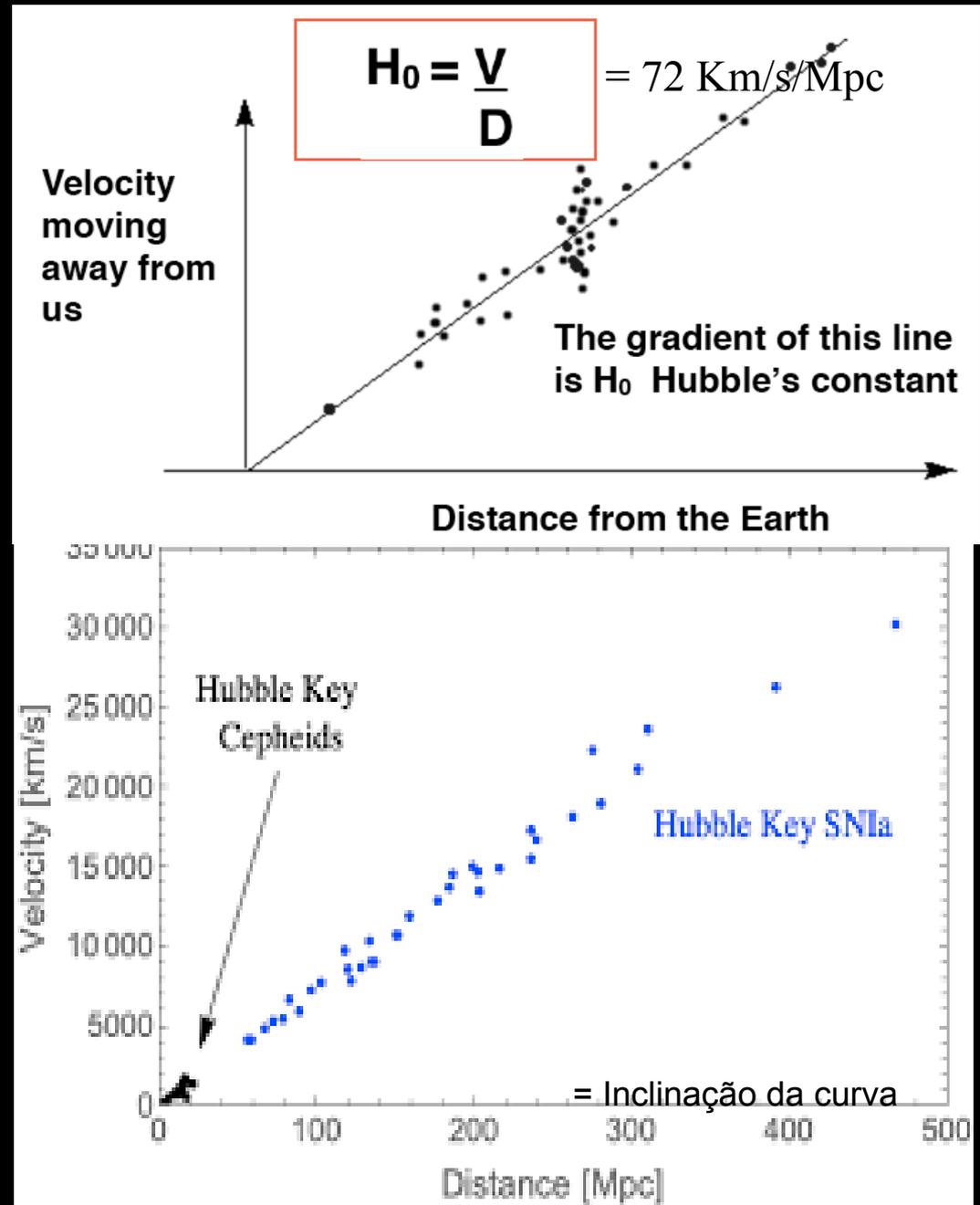
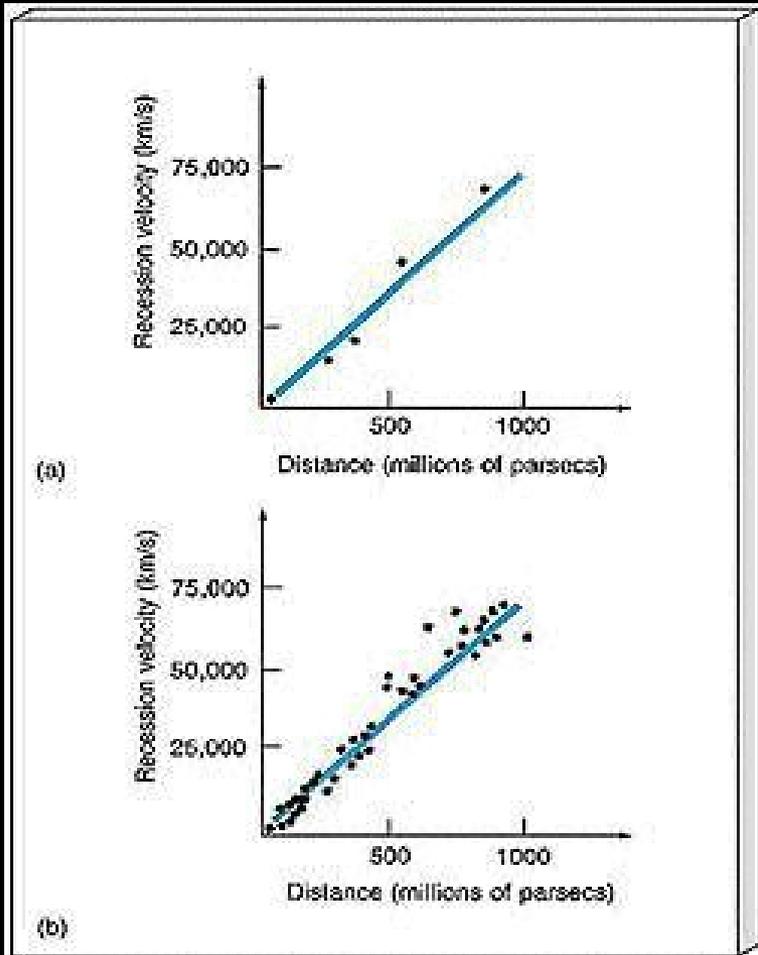
1a- Astronomia Extragaláctica (Relação-PL)

2a- Expansão do Universo - Lei de Hubble: $V=H_0 \times D$)

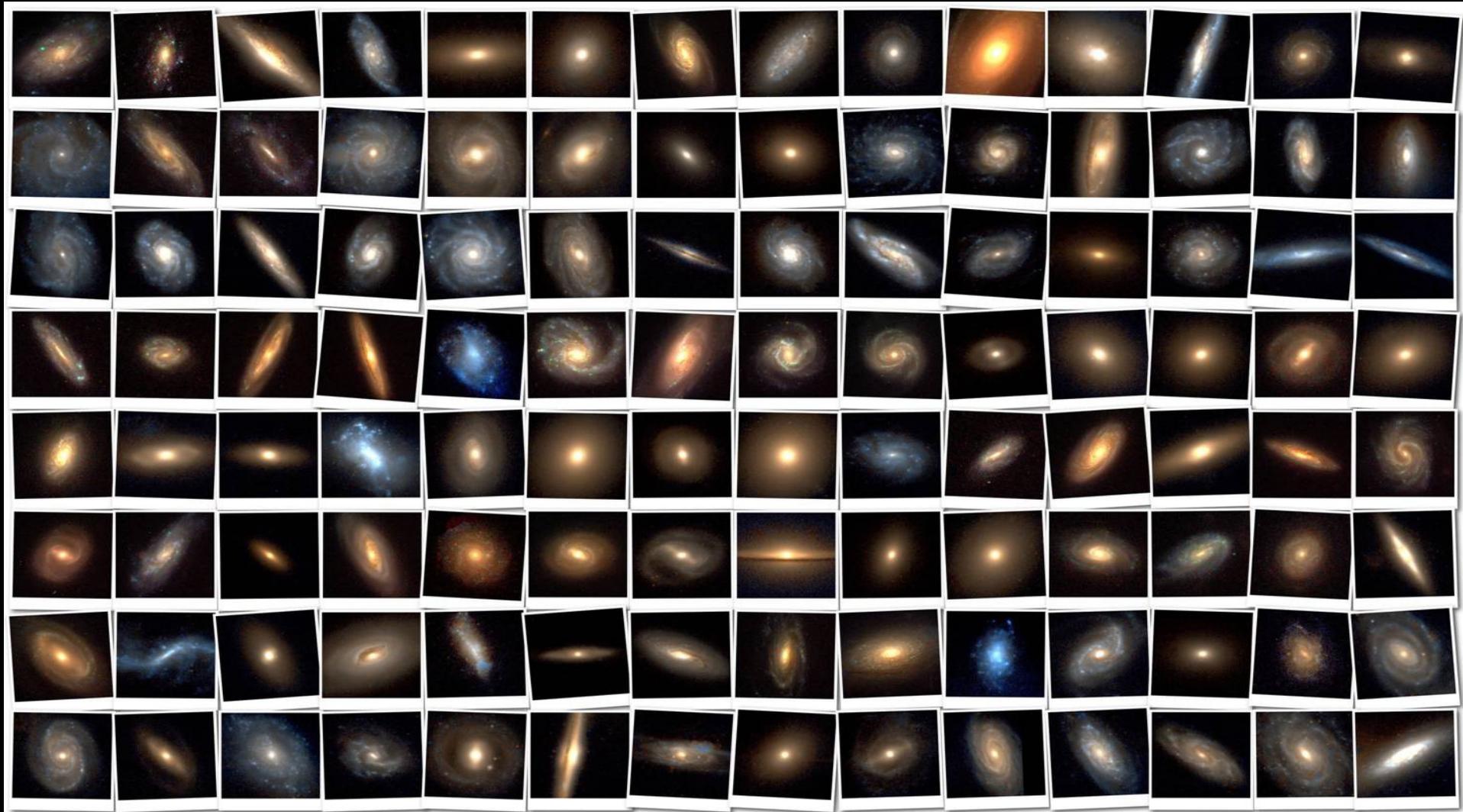
3a- Sistema de Classificação de Galáxias - SCH

Lei de Hubble

Idade do Universo



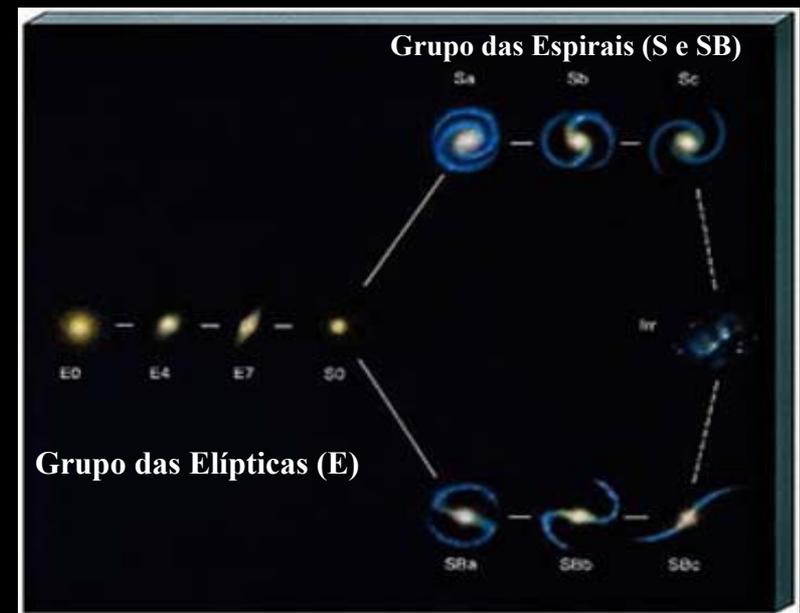
Hubble observou uma enorme diversidade morfológica entre galáxias próximas e brilhantes



Edwin Hubble - 3ª grande contribuição

Hubble (1926-1936) propõe um Sistema de Classificação Morfológica, esquematizado na figura abaixo, conhecido também como Diagrama em Diapasão (D-TF)

Agrupar diferentes morfologias em diferentes classes, como as Elípticas (E), Lenticulares (SO), as Espirais (S e SB) e as Irregulares (Irr)



As **E** apresentam uma única estrutura que varia desde a forma esférica até as mais achatadas, com luminosidade suave, e de **coloração mais avermelhada**.

As **S** apresentam 2 famílias, muitas sub-estruturas (**bojo, disco, barras, halo**) e cor mais azulada.

Quase 1 década após a proposta do Sistema de Classificação de Hubble...



Walter Baade

...introduz o conceito de “populações estelares”

M^{te} Wilson Observatory

1944: Conferência no Vaticano mostra que **diferentes componentes das galáxias**, abrigam **diferentes populações estelares** sugerindo o conceito de População Estelar.

População estelar de componentes esferoidais (bojo e halo) é relativamente **mais velha** que a de **discos**.

São estrelas com abundâncias muito **baixas em elementos químicos pesados**, ou seja, **pobre em metais**, como o C, O, N, Si, Mg, Fe, e conseqüentemente mais avermelhadas.

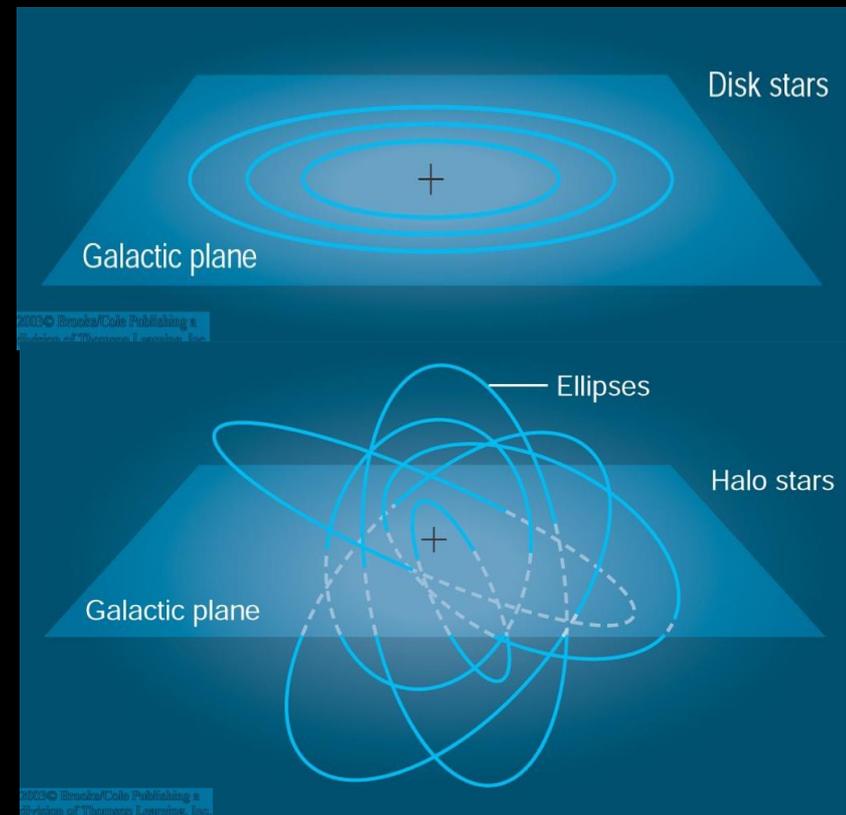
População do disco achatado é **mais jovem**, mais azulada, com **proporções maiores de elementos pesados** e, portanto, **ricas em metais**.



Outros pesquisadores verificam que as diferentes populações estelares tem **comportamento cinemático diferentes...**

População jovem = população I:
assentada no disco, estrelas azuladas
possuem predominantemente rotação

População velha = população II:
depositada nas componentes
elipsoidais/esferoidais (halo e bojo),
estrelas avermelhadas e pobres em
metais, possuem predominantemente
dispersão de velocidades

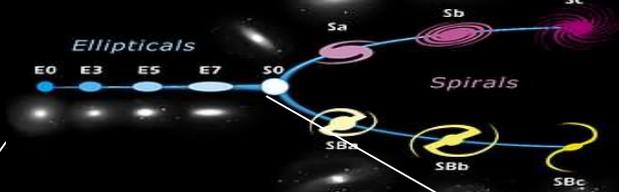


O conjunto destas propriedades, ou seja, da estrutura, da população estelar e da cinemática, para cada uma das classes identificadas por Hubble, nos leva a ter o seguinte cenário...

Elípticas (E)

Galáxias que se encontram no início do SCH e conhecidas como “early-type”

Edwin Hubble's Classification Scheme



1- Estrutura – estudada via fotometria

1 única componente com morfologia elipsoidal e com diferentes graus de achatamento (e):

$$(E_0 \text{ até } E_7) \rightarrow e = 1 - b/a$$

2- Cor - aproximadamente c^{te} e avermelhada...

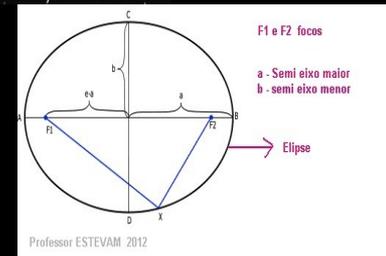
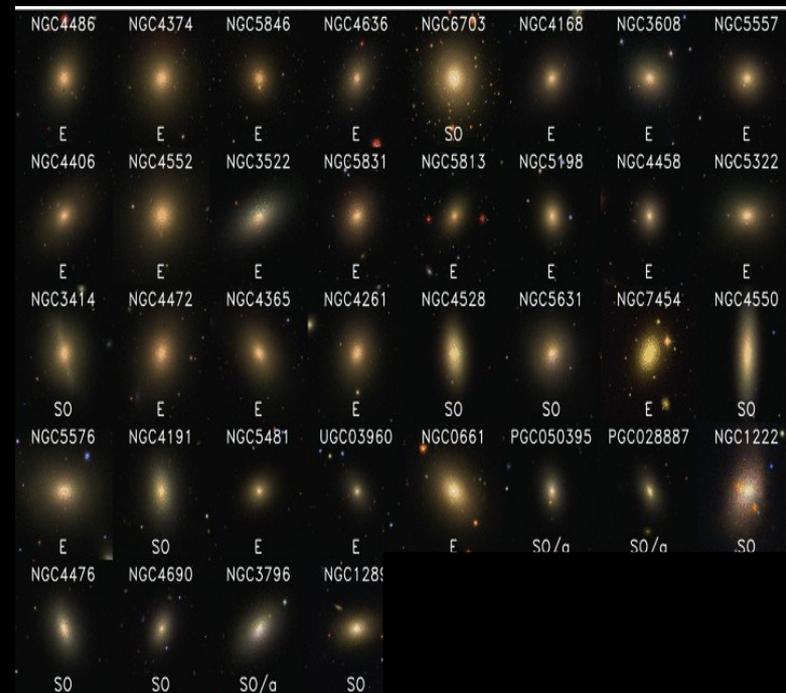
sugerindo 1 única pop. estelar dominante (pop II) velha

3- Cinemática

domínio de velocidade anisotrópica, ou seja, estrelas possuem movimento aleatório, ou seja, “dispersão de velocidades”

4- MIS (gás + poeira)

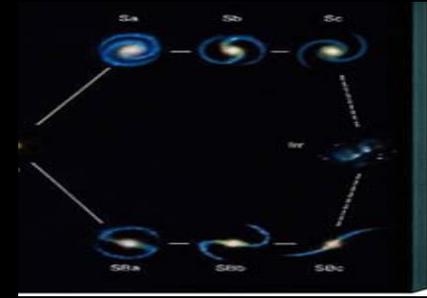
quase desprovidas de gás e poeira



Espirais

2 grupos ou famílias de galáxias:

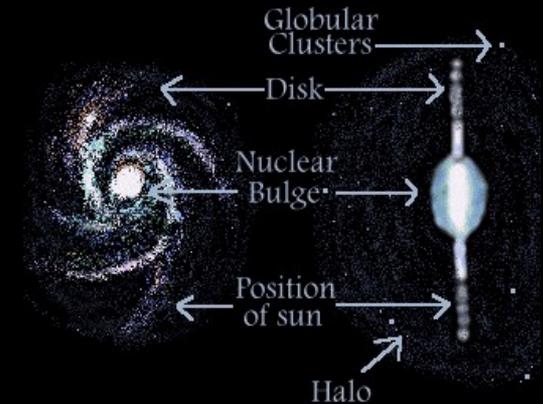
Espirais comuns (**S**) e Espirais barradas (**SB**)



- Estrutura, cor e cinemática

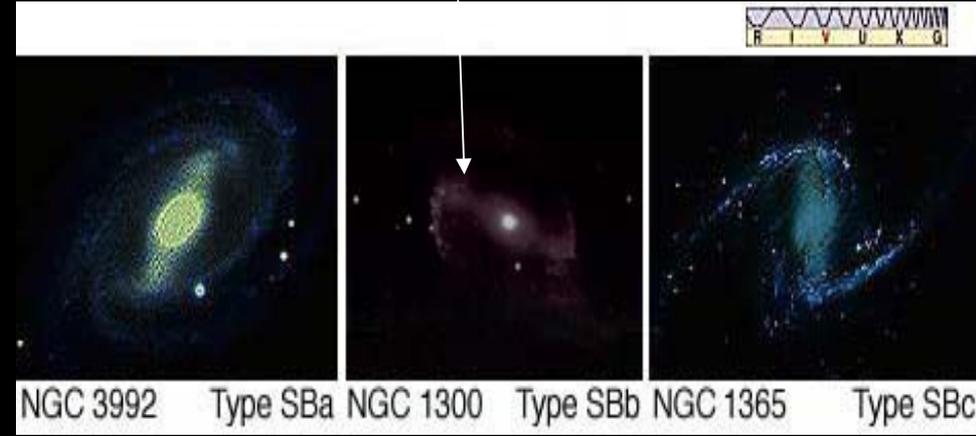
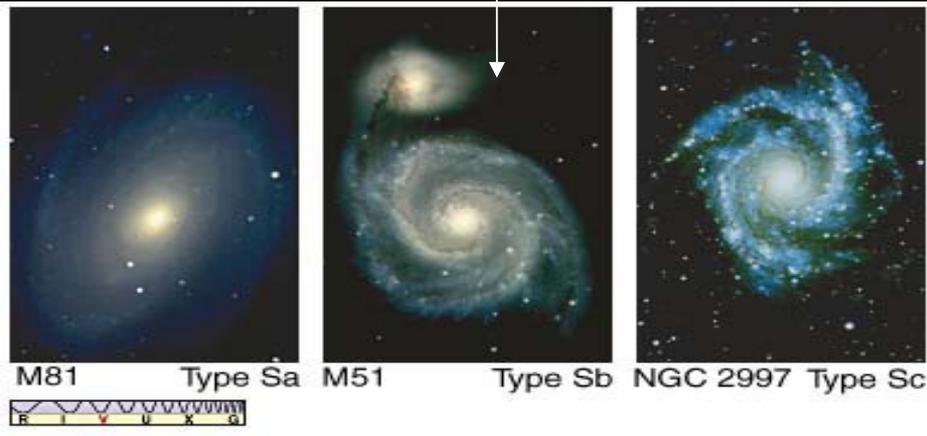
Mais complexa do que as E pq tem várias componentes: bojo, disco, halo (**S**) e algumas vezes, barra (**SB**) e anel (não contempladas no SCH)

- **Bojo e Halo** com morfologia esferoidal, cor avermelhada representando população velha (pop. II) ; **dispersão de velocidade**

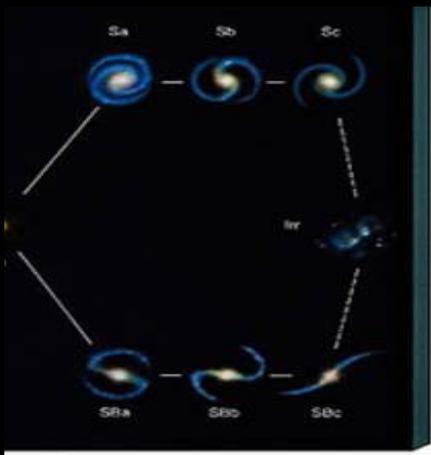


- **Disco** com morfologia achatada contendo braços espirais e algumas vezes barras e/ou anéis, **cor azulada** representando predomínio de população jovem (pop. I); **rotação** é preponderante

(S) ← Espirais → (SB)



Estas famílias de espirais, (S) ou (SB), (Sa-SBa, Sb-SBb, Sc-SBc), podem ser diferenciadas considerando a dimensão relativa do bojo e o grau de enrolamento dos braços. Também conhecidas como **late-type**



Sa --> Sb --> Sc

SBa --> SBb --> SBc



- ...ordem decrescente dos bojos de **a** para **c**
- ...ordem de braços mais desenrolados de **a** para **c**
- ...ordem crescente de gás + poeira das **E** para as **S**

Lenticulares (S0 ou SB0) → propriedades intermediárias entre E e S



1- Estrutura - via fotometria

2 componentes: bojo e disco sem presença de braços. Com morfologia elipsoidal no bojo, semelhante às elípticas e disco achatado semelhante às espirais.

2- Cor - aproximadamente c^{te} e avermelhada, sugerindo 1 única população estelar dominante (pop II) e velha

3- Cinemática

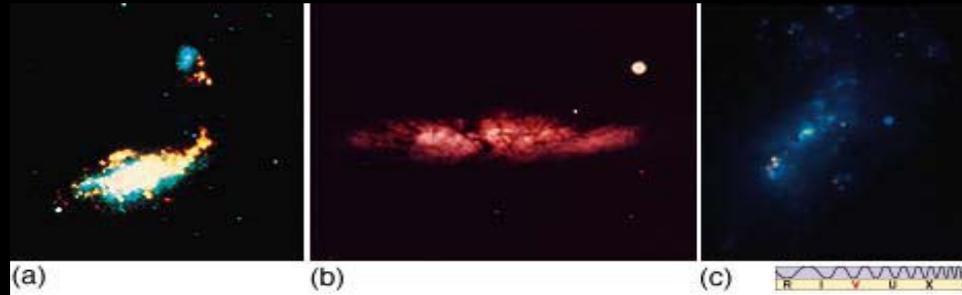
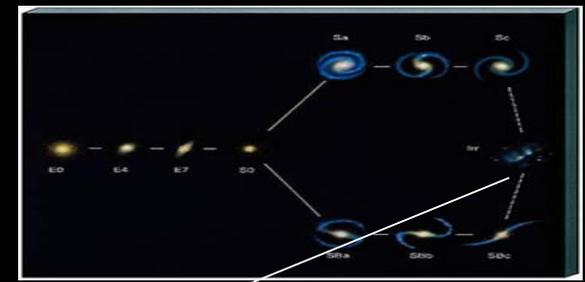
domínio de velocidade isotrópica no disco e anisotrópica (dispersão de velocidade) no bojo.

4- MIS

quase desprovida de gás e poeira

Irregulares (Irr)

Galáxias que se encontram
no fim do SCH



- **Morfologia** sem simetria de rotação
- Mais azuladas → população jovem
- Apresentam gdes quantidades de poeira (da ordem de até 25% da massa total da galáxia)
- **Cinematicamente**, com dispersão de velocidades

Considerações importantes sobre o SCH

Hubble acreditava que diferentes morfologias poderiam estar representando uma sequência evolutiva:

... das **E** para **S** ... ou ... das **S** para **E**...

Entretanto, estas 2 possibilidades são inviáveis pois:

1. Brilho superficial das **E** é muito maior do que o das **S**
2. “Rotação” das **S** muito maior que a das **E**, incompatível com um cenário onde galáxias são formadas como **S** e vão necessariamente se transmutando em **E**...e vice-versa...

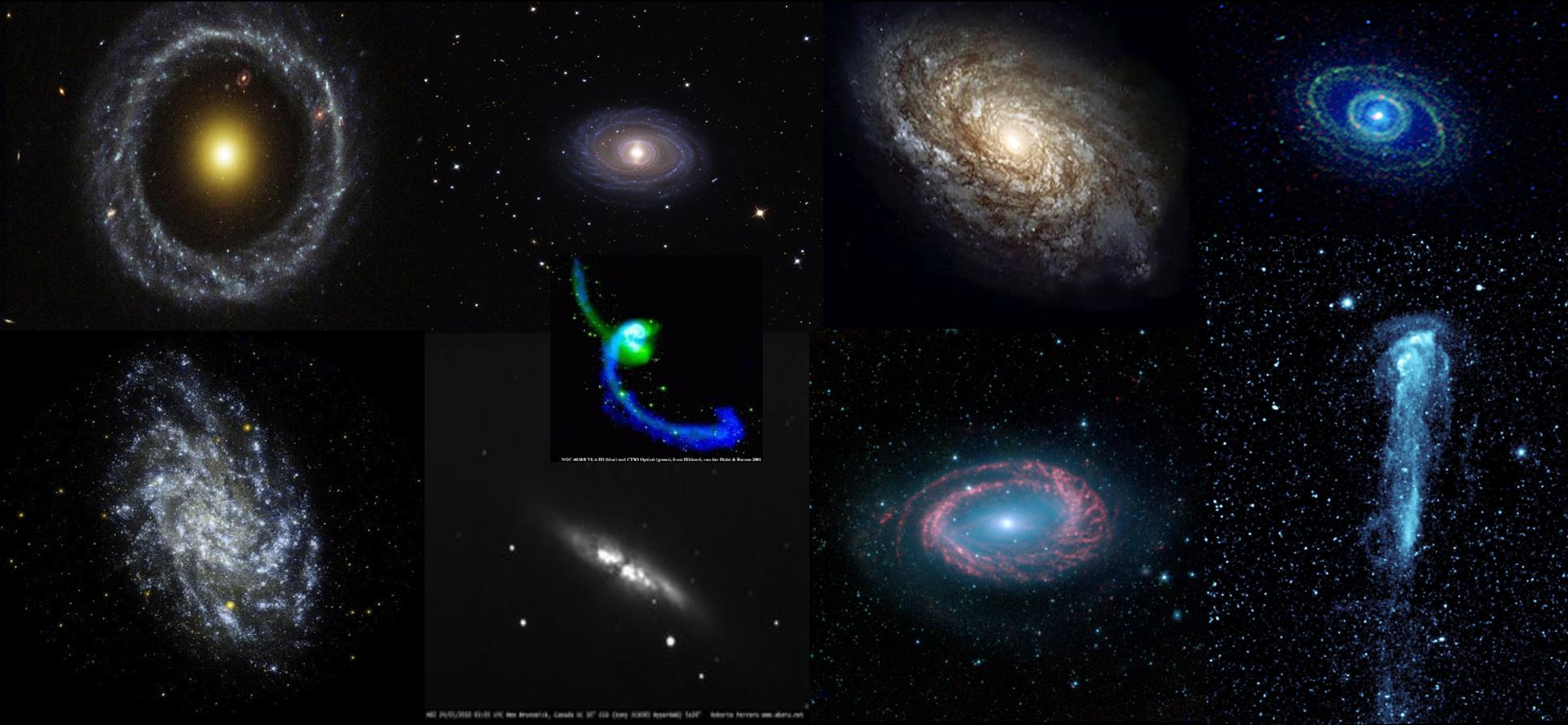
....ou seja, o SCH **NÃO** representa uma sequência evolutiva!

Considerações importantes sobre o SCH

Se aplica bem a galáxias brilhantes

SCH não é representativo de todas as morfologias encontradas em galáxias como por ex: cD's (E supergigantes), anãs de baixo brilho superficial, anelares, peculiares, etc...

SCH não pode ser aplicado, pelo menos isoladamente a galáxias que estão a altos "red-shifts" (z)



Recentes avanços desde a década de 1960, mostram enorme complexidade estrutural e dinâmica.....uma decorrência da combinação de aplicação de melhores tecnologias para observações e técnicas de análise de imagens, além de avanços teóricos, como veremos adiante alguns exemplos

→ **Diversidade** de subestruturas em discos e bojos, como

- Discos: finos e espessos
- Barras: diferentes em galáxias jovens e tardias
- Barras aninhadas
- Anéis: internos e externos
- Faixas de poeira: radiais e paralelas
- Bojos: clássico, retangular, pseudobojos
- **Braços**: flocculentos (FL) → fragmentados, descontínuos, segmentos de forma espiral
grand-design (GD) → contínuos, bem delineados e em forma de espiral

→ **Origem da estrutura em braços espirais e barras....**

Discos de Galáxias Espirais

Já vimos no caso da Galáxia os constituintes do disco. Estes são os mesmos para todas as galáxias de tipo espirais.

Veremos agora, e que complementa as informações de discos de espirais, os aspectos cinemáticos, como **rotação diferencial**, **ondas de densidade** e **rotação diferencial**..

Disco em galáxias espirais possuem

Pop I e II

Braços – população jovem (I) – rica em me

Gás + poeira confinados no disco

Barra (2-3Kpc) – dados recentes, na VL

Vamos ver a seguir fenômenos cinemáticos e dinâmicos que ocorrem no disco que envolvem a presença e interação de gás, poeira e também estrelas.

Duas galáxias semelhantes à nossa

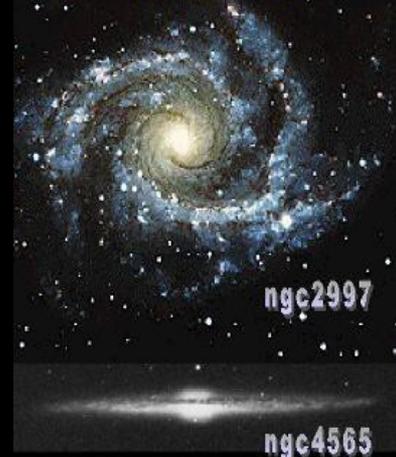
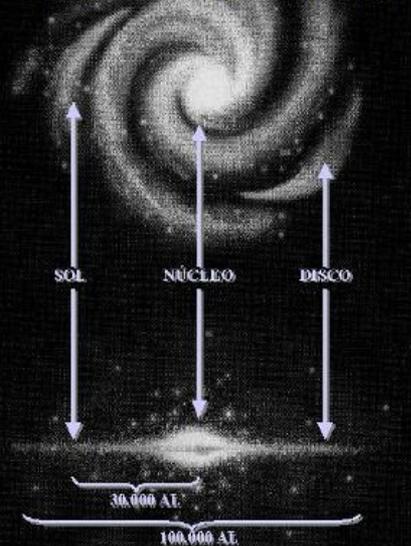
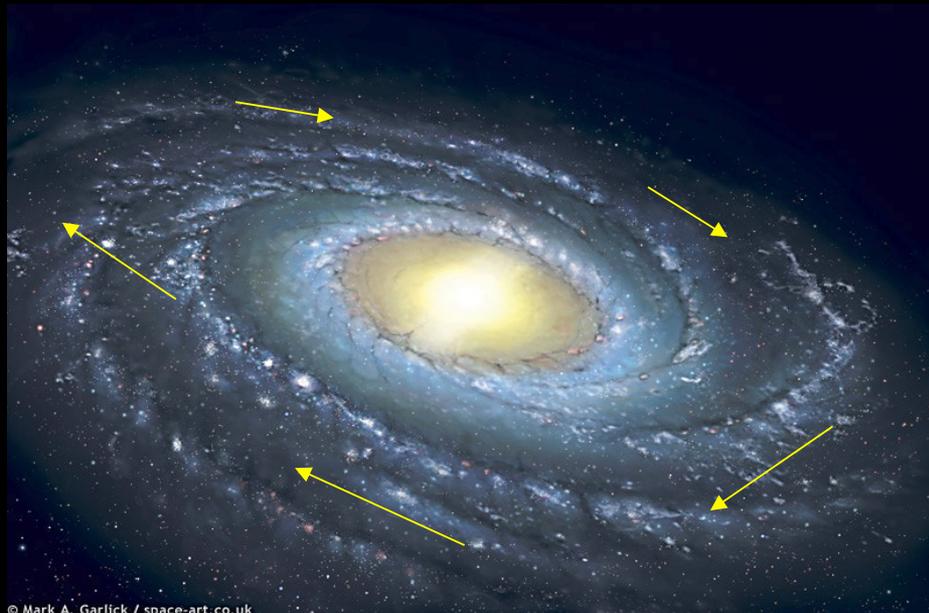


Diagrama: Nossa Galáxia



Discos: a questão da rotação....

A medida da **velocidade orbital** do “material ” do disco a diferentes distâncias do centro de galáxias define o que chamamos de “**Curva de Rotação**”



Algumas observações em relação ao movimento do material do disco:

- 1- As estrelas não rotacionam de forma semelhante ao longo do disco
- 2- É preciso considerar o movimento do Sol em relação as medidas

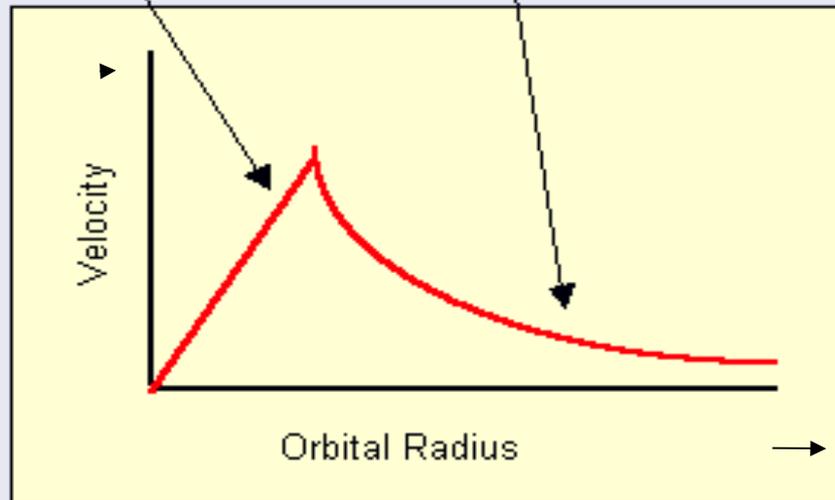
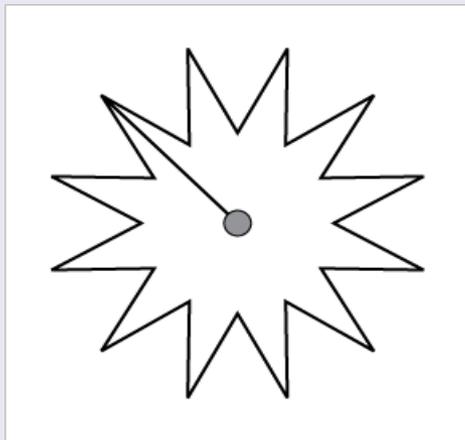
Comportamento da Curva de Rotação Galáctica “esperada” (teórico)

...2 regimes de comportamento



1º-Rotação rígida no bojo

2º- Rotação kepleriana no disco



rotação de corpo sólido

No caso da rotação rígida, ou de corpo sólido, todos os objetos deslocam-se à mesma **velocidade angular**, e a **velocidade de rotação aumenta linearmente com a distância galactocêntrica** (exemplo disco compacto ou DVD). Esse caso aplica-se de maneira aproximada às regiões mais internas da Galáxia.

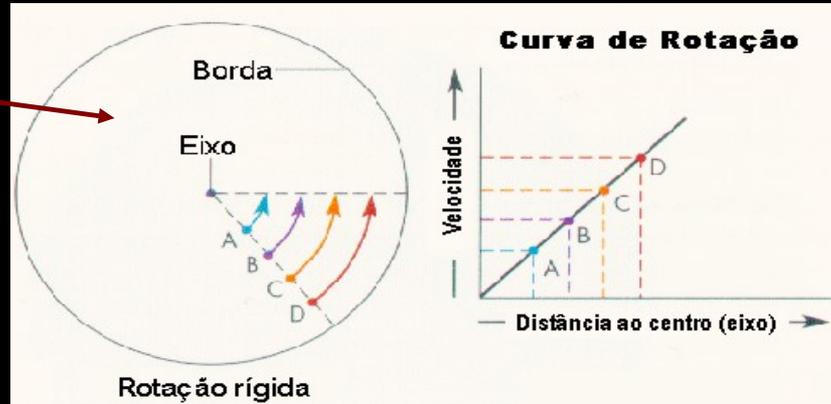
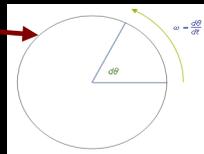
Órbita das estrelas ou Material do Disco

Rotação Rígida x Rotação Kepleriana

No caso da **rotação rígida**, todos os objetos deslocam-se à mesma

velocidade angular (ω) -

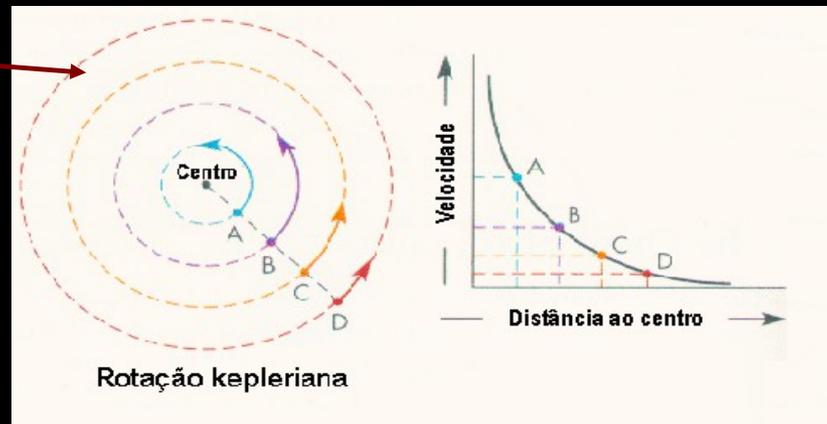
$$\omega = V_{\text{linear}} / \text{Raio),}$$



e a velocidade de rotação aumenta linearmente com a distância galactocêntrica.

No caso da **rotação diferencial**, objetos mais distantes

viajam com velocidade angular menor do que os mais próximos ao bojo



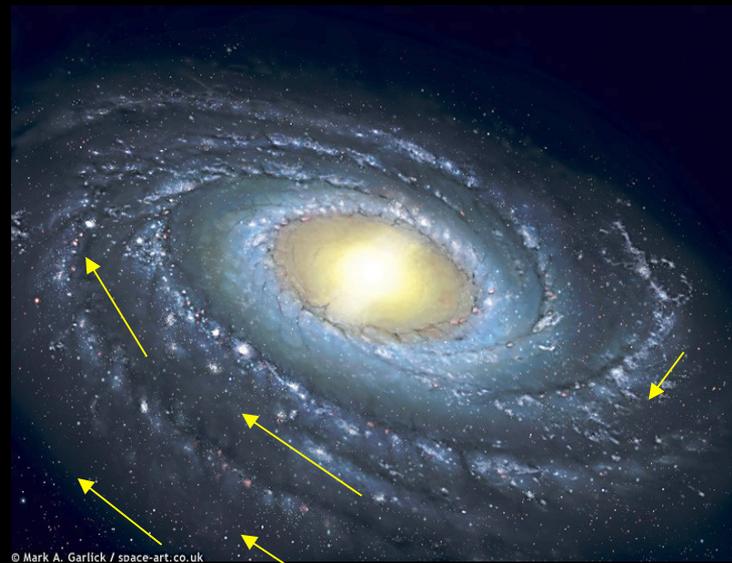
e a velocidade de rotação diminui com a distância galactocêntrica.

Medindo a Rotação - Via-Láctea

Difícil, pois estamos dentro do disco da Galáxia.
As flechas (vetores) indicam a velocidade orbital.

Curva de Rotação é obtida em 2 etapas:
Até ≈ 15 kpc: usa-se como traçadores regiões HII, estrelas O e B (visível, IV, rádio)- objs brilhantes) (Fig 1)

Além de ≈ 15 kpc: HI (rádio, 21cm) – (Fig 2)
e nuvens moleculares



© Mark A. Garlick / space-art.co.uk

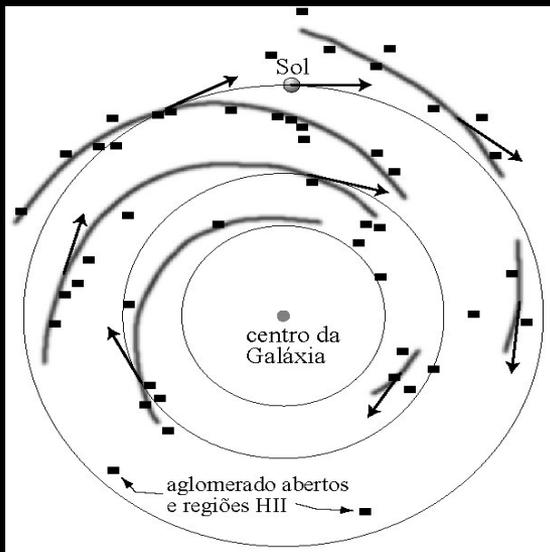


Fig 1

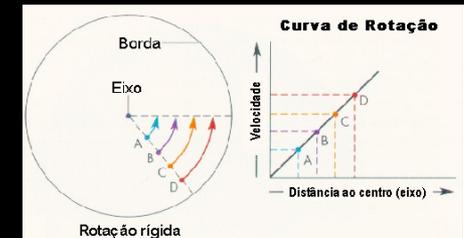
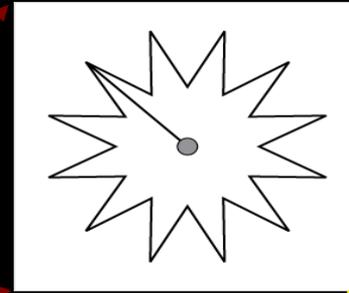
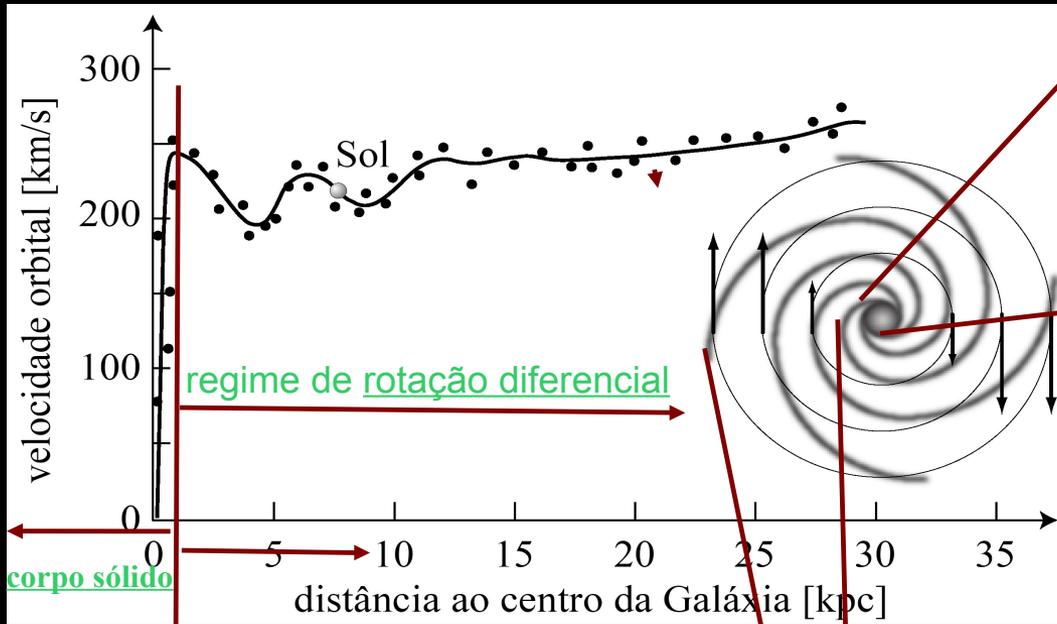
Mapa feito com observações em rádio do hidrogênio neutro (HI)



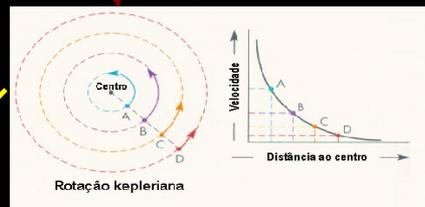
Fig 2 - Para medir a velocidade de rotação precisamos levar em conta o movimento do Sol.

Curva de Rotação observada da Via-Láctea

2 regimes de rotação: corpo sólido e diferencial



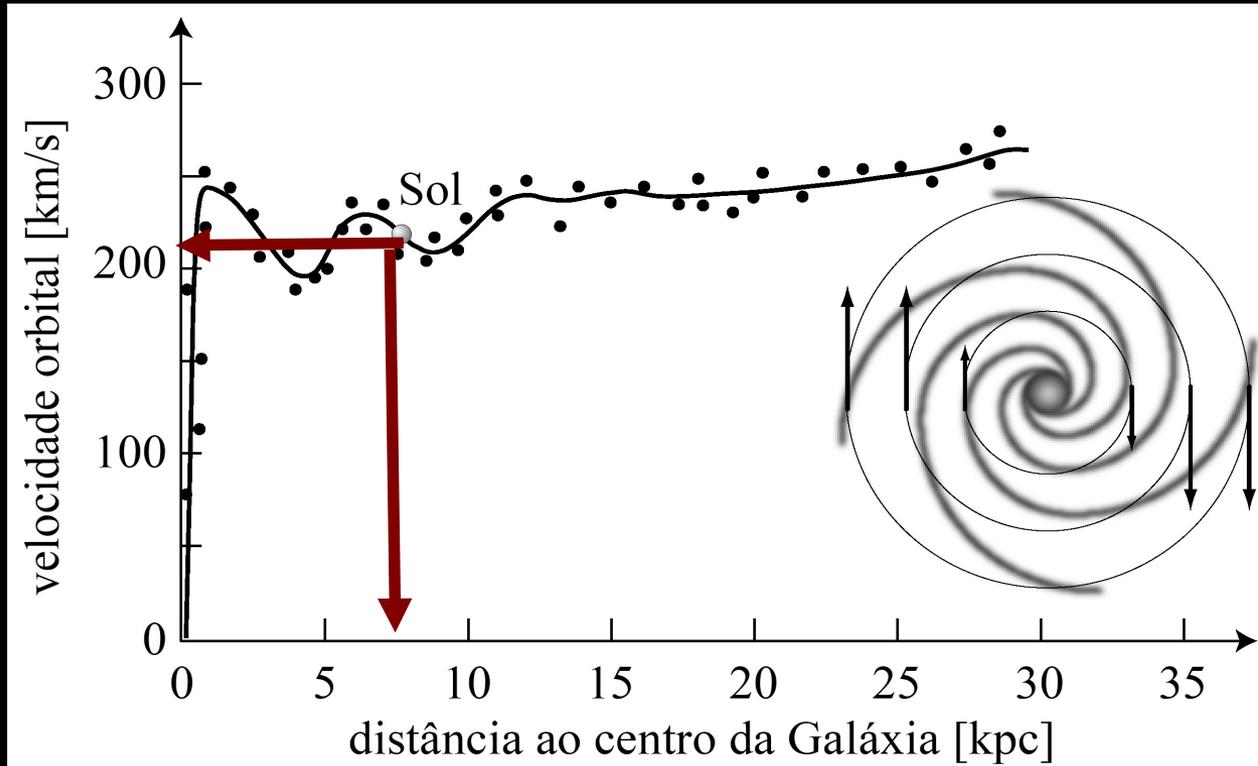
Regime de rotação diferencial, onde a velocidade de rotação diminui com a distância galactocêntrica.



Regime de rotação de corpo sólido, onde os objetos levam o mesmo tempo para dar uma volta completa e a velocidade angular aumenta com a distância.

Reparem que objetos que estão menos distantes do centro do que o Sol podem estar também em rotação diferencial, e levam menos tempo para dar uma volta completa. Ver simulação desta situação adiante..

O Sol neste panorama.....



A partir do gráfico, observamos que o Sol se move com cerca de 200--220 km/s.

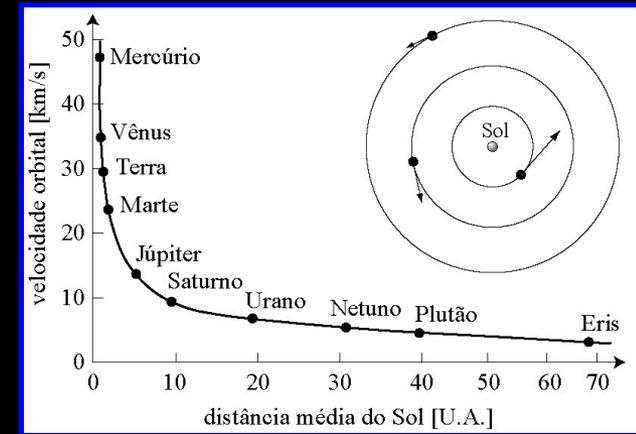
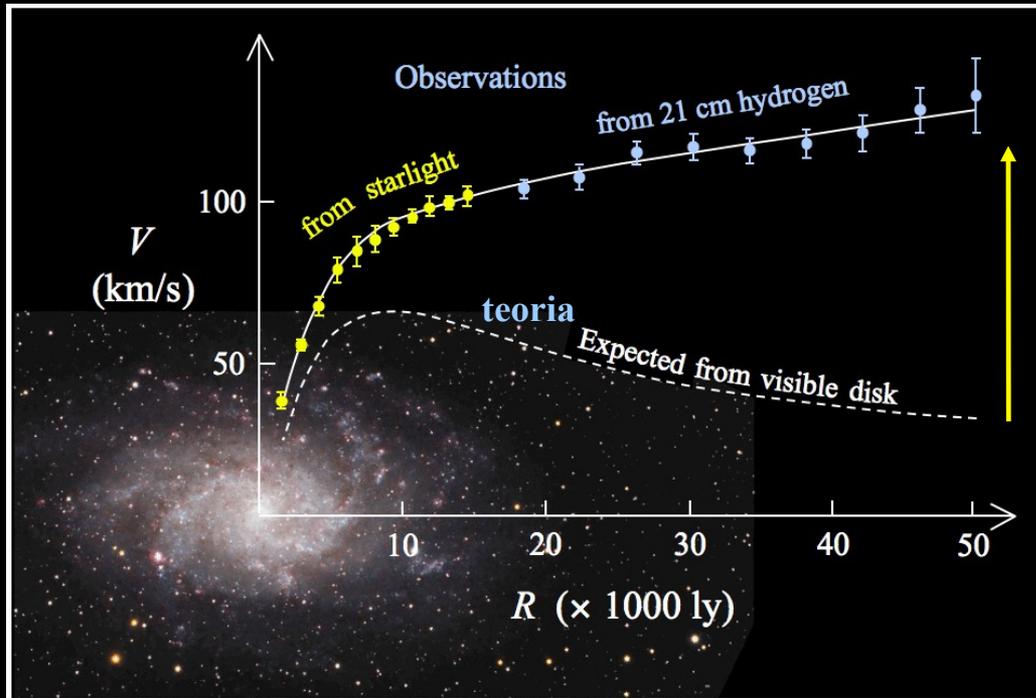
O Sol está a cerca de 7,5--8,0 kpc do centro da Galáxia.

Logo, uma volta do Sol leva de 210--225 milhões de anos.

No último “ano Galáctico” a Terra estava no Triássico.



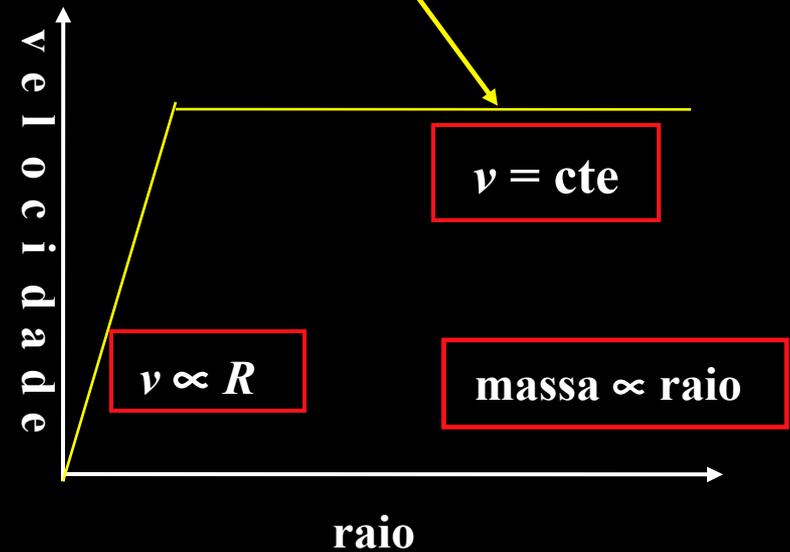
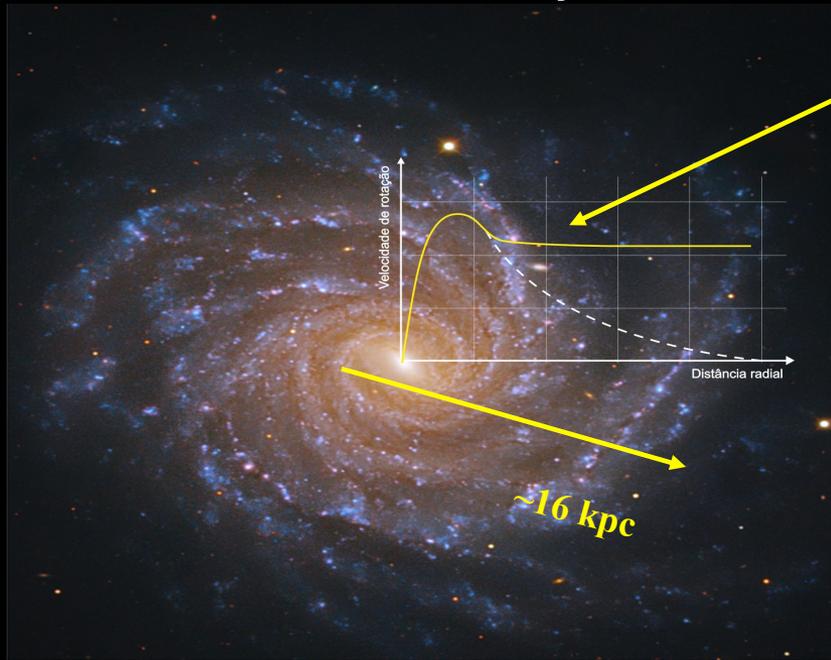
Comparação da Curva de Rotação (CR) observada e prevista pela teoria de Kepler (3ª Lei)



--> não observamos objetos que possam traçar a CR além de 50 ($\times 1000$ ly).

Como interpretar esta diferença ?

Curva de rotação da Galáxia esperada x observada



O que “segura” as estrelas, o gás e a poeira em órbita é a massa da Galáxia contida dentro da distância R .

Se não observamos mais estrelas a distâncias maiores que 16 Kpc (50 mil anos luz), e pouco gás a distâncias maiores que 30Kpc, “**não haveria**” mais massa, então a **velocidade orbital deveria diminuir** com a distância.....mas **não é o que se observa...!**

Se a CR continua crescendo, isto implica em que existe massa, mas não observamos....!!!!

→ Conclui-se que ela existe, porém de natureza invisível → **Matéria Escura**

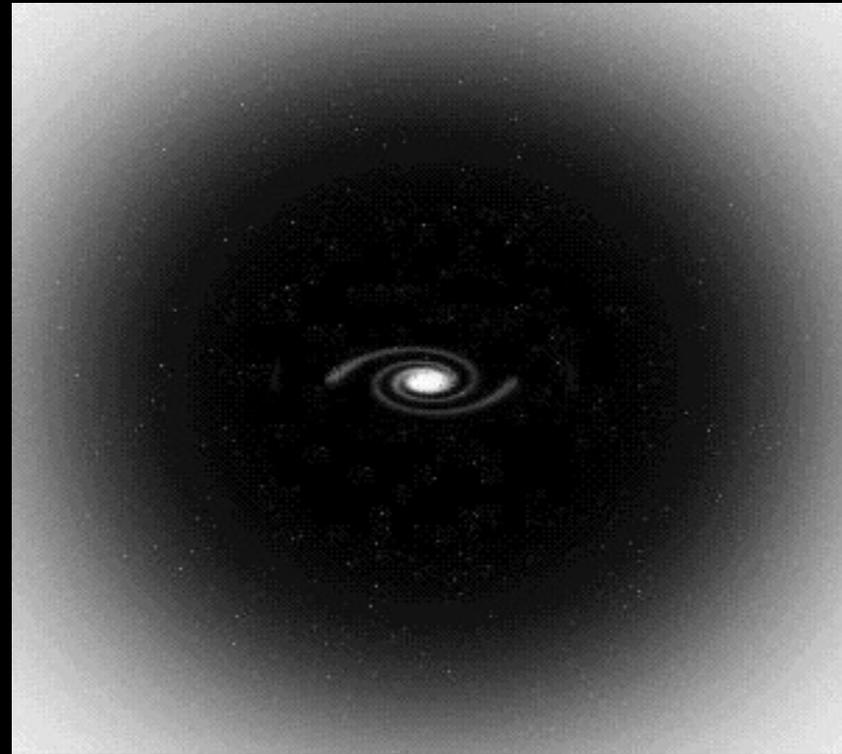
Halo de Matéria Escura

O que pode ser a matéria escura?

Gás (atômico ou molecular) que emite tão pouca radiação que não podemos vê-lo?

Talvez as leis da dinâmica dos corpos (leis de Newton) não sejam válidas?

Material “exótico” que interage apenas através da gravitação?



Créditos: Jose Wudka

7 Matéria Escura

- principal evidência de matéria escura nas galáxias S: curvas de rotação
- o que constitui a matéria escura? barions? partículas exóticas?
- candidatos bariônicos:
 - > – “rochas” (cometas, asteróides, planetas...)
são corpos com alta abundância de metais; se constituírem boa parte da matéria escura, esta deve apresentar alta abundância de metais
isso está em contradição com as teorias de evolução química das galáxias
 - > – restos de evolução estelar (anãs brancas, estrelas de neutrons, buracos negros)
 - * estudo de pulsares sugerem que 1 estrela de neutrons é formada a cada ~ 30 anos na Galáxia
 - * se a idade da Galáxia é $t_G \sim 1.5 \times 10^{10}$ anos e as estrelas de neutrons são produzidas a uma taxa constante, ν , o número esperado delas na Galáxia é $t_G \nu \sim 5 \times 10^8$
 - * número esperado de anãs brancas: $\sim 5 \times 10^9$
 - * número esperado de buracos negros: menor que o de estrelas de neutrons
 - * \rightarrow não existem anãs brancas, estrelas de neutrons e buracos negros em número suficiente para explicar a matéria escura
 - > – anãs marrons (júpiteres): $M \lesssim 0.1M_\odot$
limites ao número de anãs marrons impostos pela emissão infravermelha e efeitos de microlensing: também parecem não existir em número suficiente
 - > – nuvens frias de HI?
- candidatos não bariônicos: neutrinos massivos, axions...
- se a matéria escura distribui-se em um halo escuro esferoidal, ela deve ser muito menos dissipativa que a matéria bariônica (senão formaria um disco)

Outra questão relevante que surgiu recentemente uma boa explicação....é a dos **braços espirais**.

A explicação a esta questão resulta em um dos maiores avanços sobre a transmutação morfológica de galáxias...e questões que podem estar relacionadas com o abastecimento de buracos negros, entre outras....

Observamos, assentados no disco, braços espirais....

São delineados por estrelas jovens, regiões HII, nuvens moleculares e poeira.

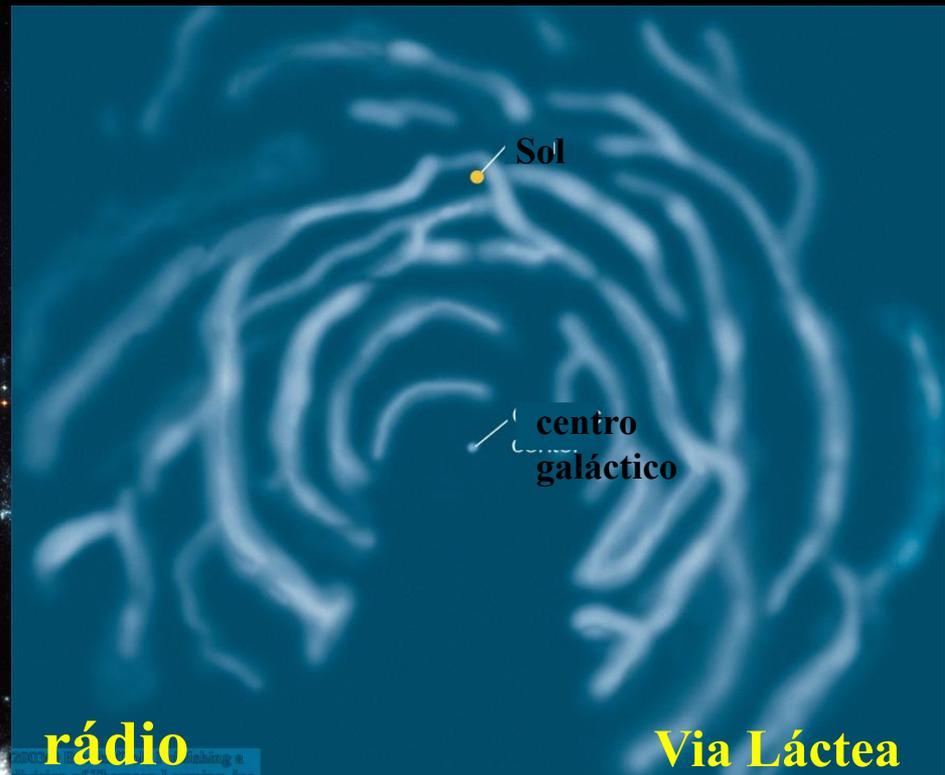
A Galáxia é uma espiral com 3 braços.

Mal definidos pelas estrelas velhas.

Muito mais fáceis de se identificar em outras galáxias.

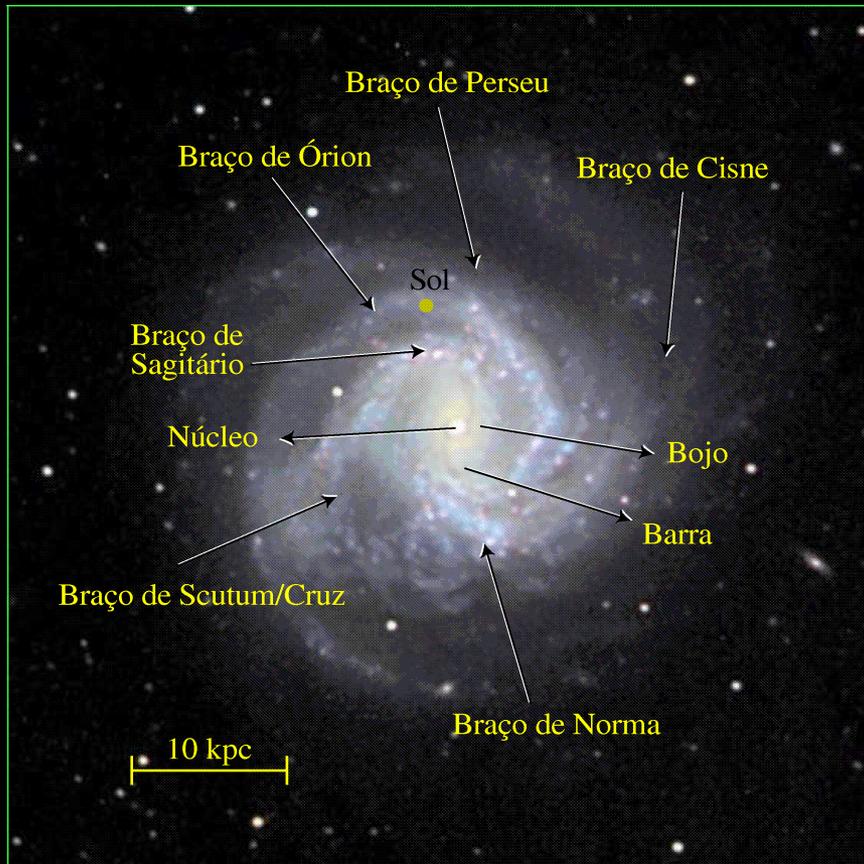


M101

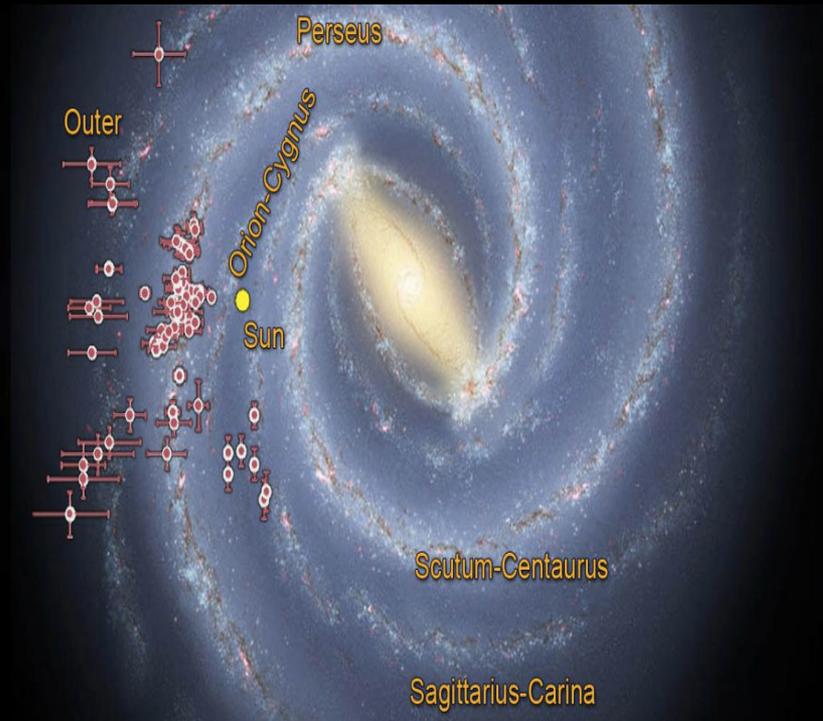


visível rádio

Via Láctea



Vários braços espirais no disco Galáctico

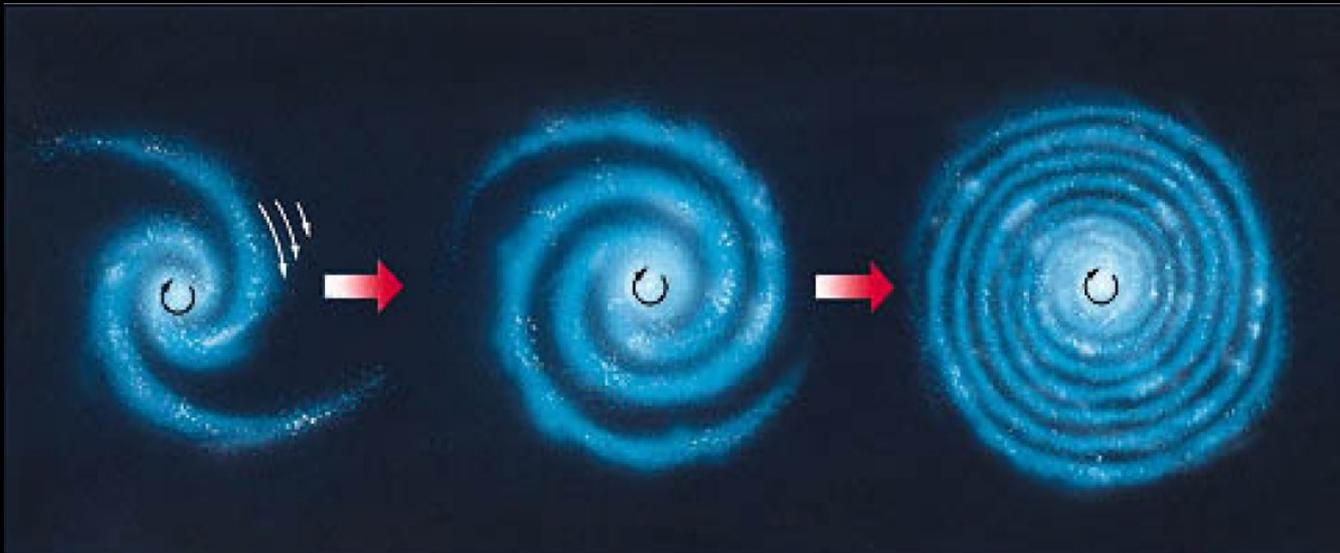


S.Solar localizado entre 2 braços – zona neutra

Como eles se formam?

...seriam eles formados pelo material que gira no disco?
braços de espirais materiais...?

...ou seja, formados pelo acúmulo de material do disco que se encontra em rotação?

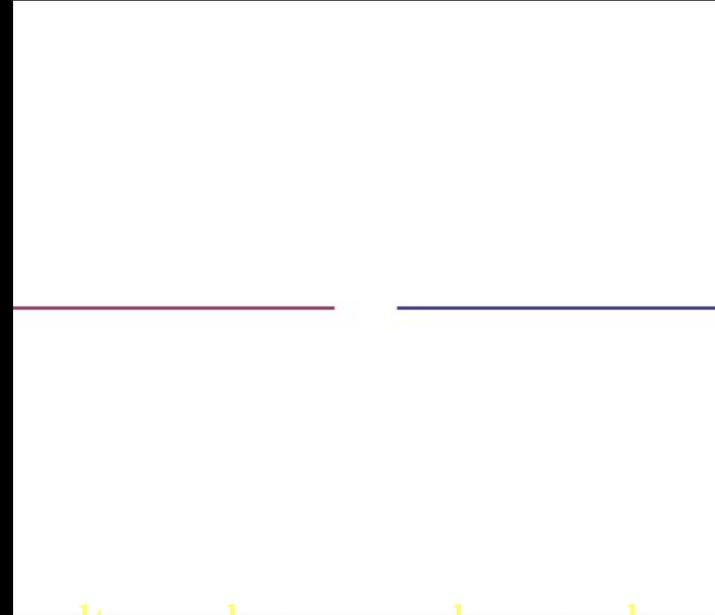
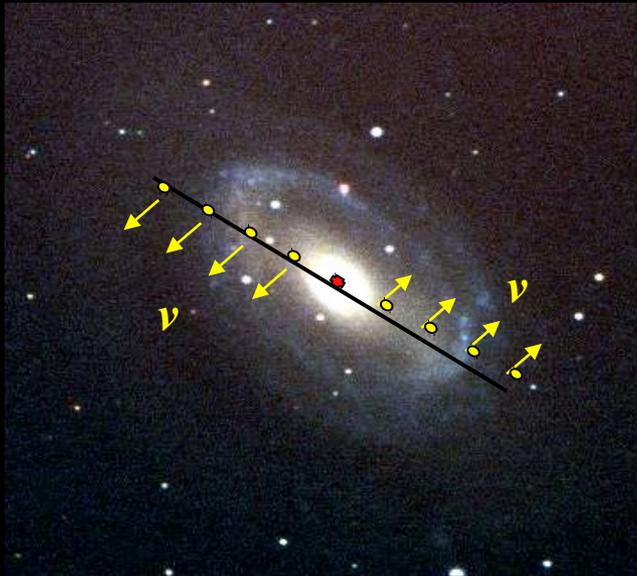


Se assim o fosse, seriam desfeitos depois de um certo número de rotações.

Fato: observamos eles até hoje !

Vamos examinar mais detalhadamente esta possibilidade...

1ª possibilidade: Braços espirais são materiais ?
Resultam da rotação diferencial?



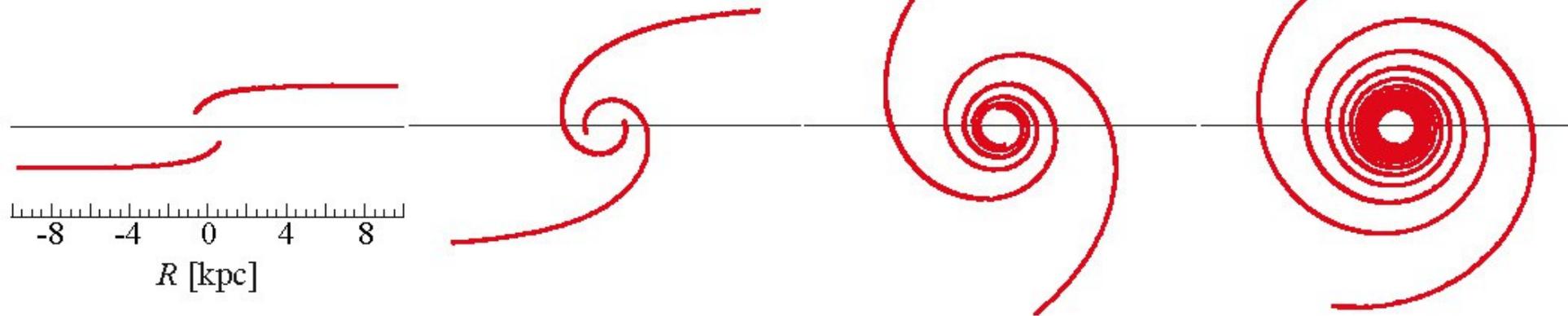
Simulação mostra que após várias voltas os braços se desmancham

t = 25

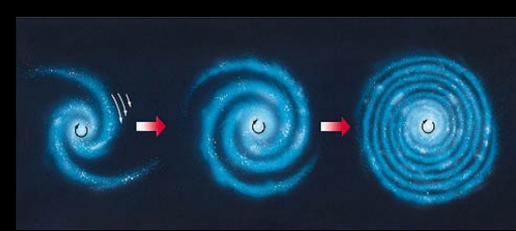
t = 75

t = 200

t = 500

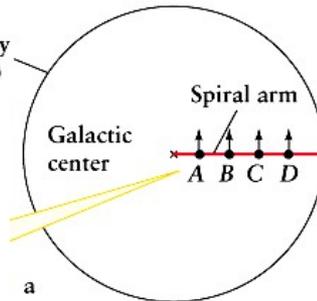


Como compreender melhor esta simulação?

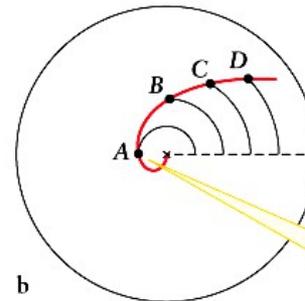


Imagine 4 estrelas em órbitas circulares inicialmente alinhadas ao longo do centro galáctico e com velocidade linear, viajando em órbitas a diferentes distâncias...

Disk of the Galaxy (top view)

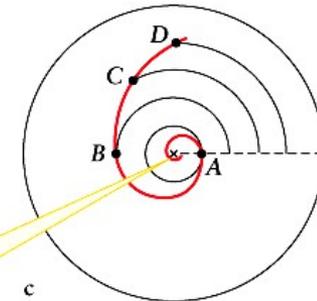


a



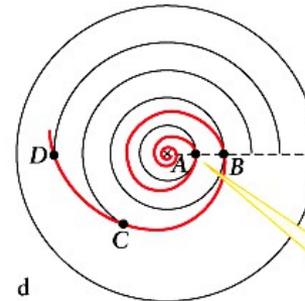
b

Após 1 volta completa da estrela A, a estrela B completou $\frac{1}{2}$ volta e as estrelas C e D a caminho ...



c

Quando a estrela A completou $\frac{1}{2}$ volta, as estrelas B, C e D completaram apenas $\frac{1}{4}$ de volta, ou menos...



d

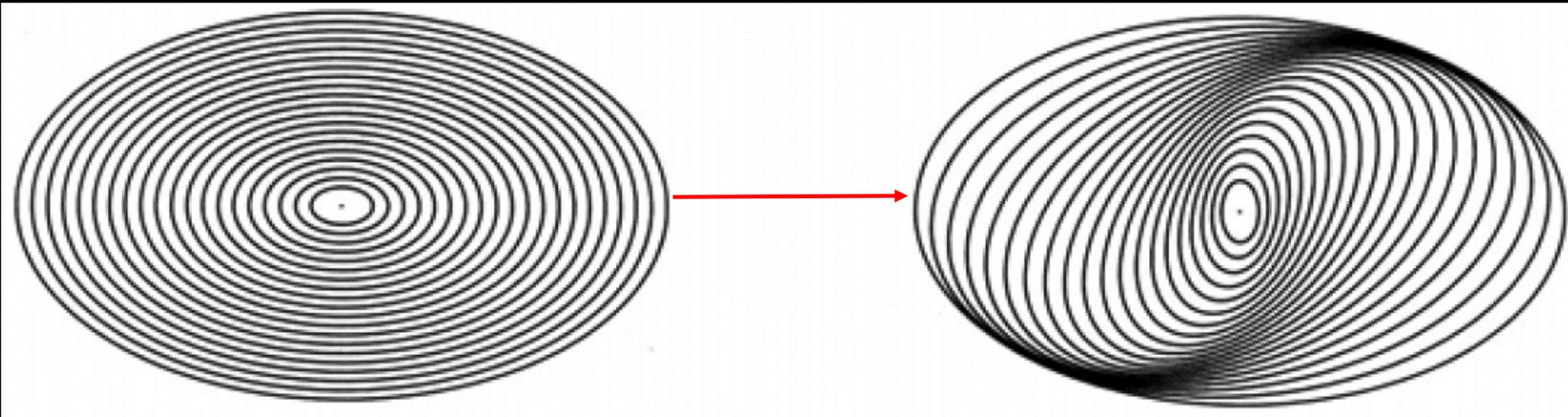
Quando a estrela A completa sua 2ª órbita, a espiral continua a enrolar ainda mais ...

Após várias voltas, observa-se que os braços espirais **não** se comportam como uma **estrutura material**, que se espiralam gradualmente devido à rotação diferencial do disco.

Se fosse esse o caso, deveríamos observar galáxias com braços extremamente apertados devido ao efeito acumulado de dezenas de revoluções de órbitas. Como não se observa objetos com este efeito na natureza....., **ou eles tem vida curta, ou eles não são materiais...**

2ª possibilidade: onda de compressão se propagando pelo disco. Correta!

Teoria de ondas de densidade originalmente proposta por Bertil Lindblad e posteriormente desenvolvida pelo matemático C. C. Lin e o astrônomo chinês Frank H. Shu nos anos 1960.



-> instante inicial $T=0$

órbitas alinhadas

--> Instante qualquer $T=Z$

órbitas desalinhadas devido
ao congestionamento

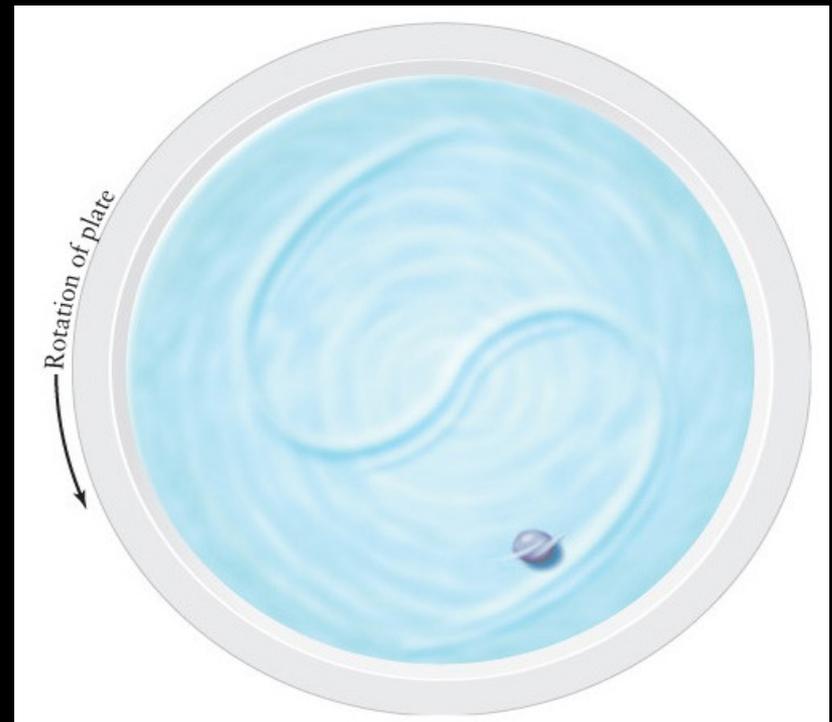
Uma visualização deste processo consiste em imaginar a propagação de ondas em um líquido. Se o mesmo estiver em repouso teremos ondas circulares.

Mas o movimento de rotação faz com que esta estrutura em forma de ondas se modifique criando um padrão espiral.

Em repouso: ondas circulares

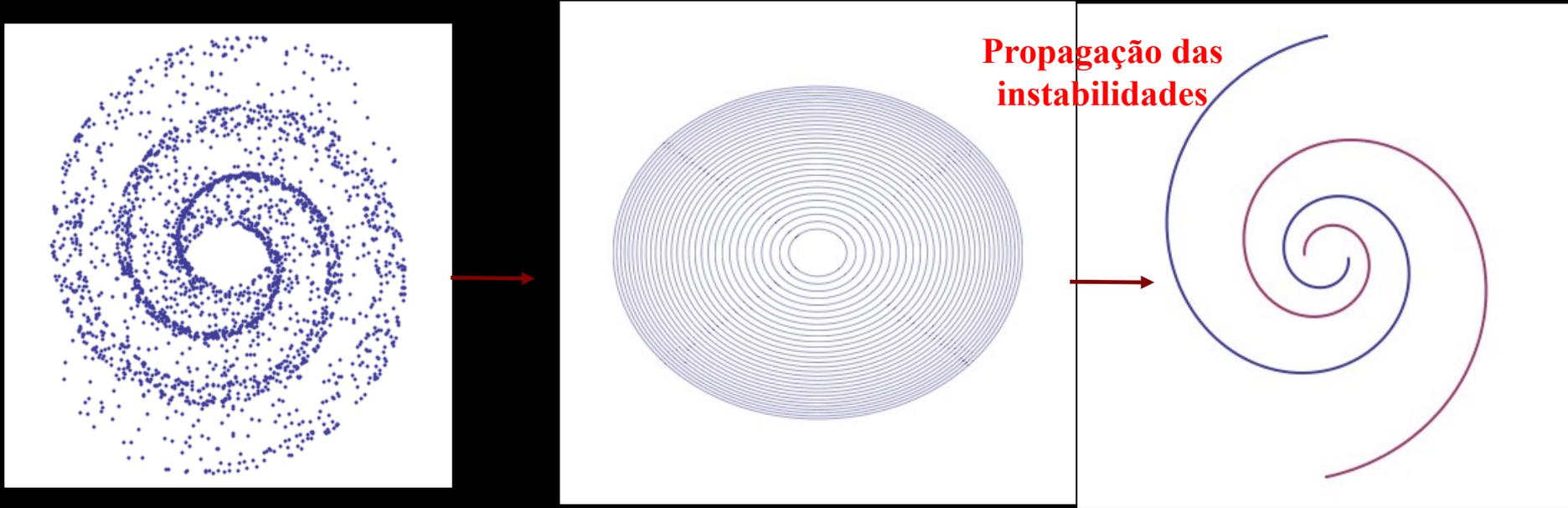


Em rotação: padrão espiral



Órbitas elípticas de estrelas muito próximas entre si geram congestionamento e consequentemente **perturbação no disco**. O congestionamento provoca a compressão do gás e novas estrelas nascem. Provoca também instabilidade que se propaga globalmente, na forma de onda espiral que percorre todo o disco, resultando no padrão espiral observado.

Note que a espiral não é feita pelas mesmas estrelas.



Ver simulação em <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/BracoEspiral/index.html>

As **novas estrelas** vão se formar no padrão espiral...

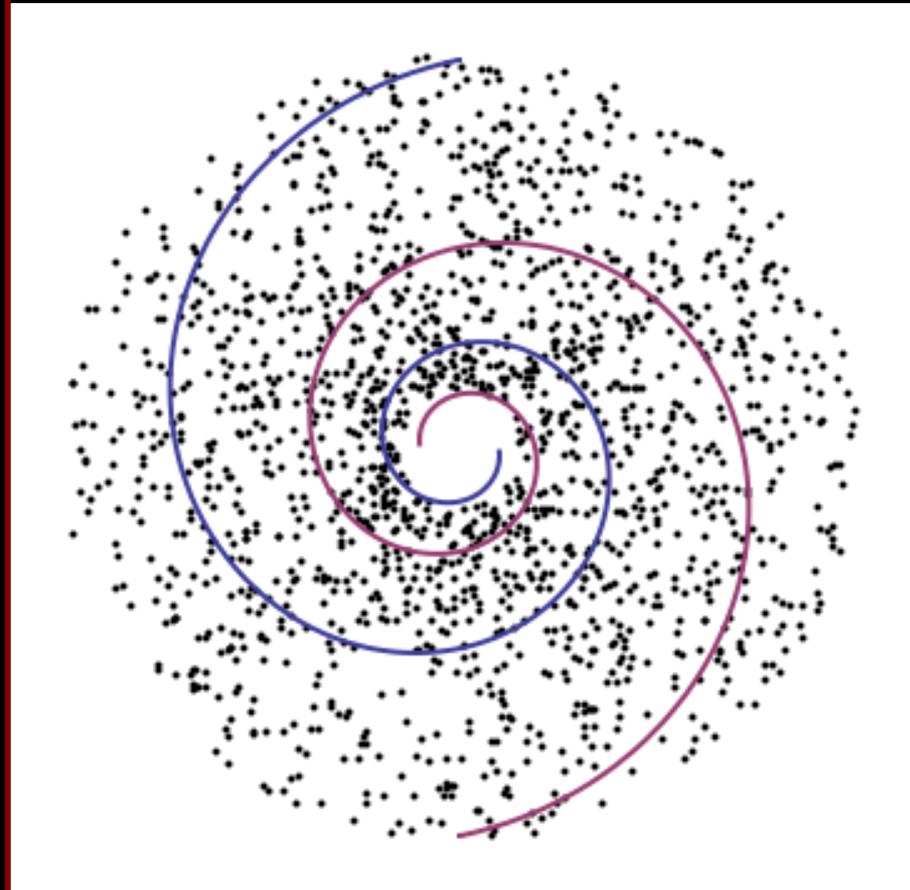
Este padrão ou perturbação está percorrendo o disco em uma **velocidade diferente das estrelas e do material do disco (gás e poeira)**.

Simulação mostrando a rotação da onda de densidade (espirais azul e vermelha) e a rotação das estrelas com o material do disco (pontinhos pretos)

Os braços espirais, resultado da propagação da instabilidade, tem **velocidade angular constante e giram como corpo rígido**. As estrelas do disco têm velocidade diferencial.

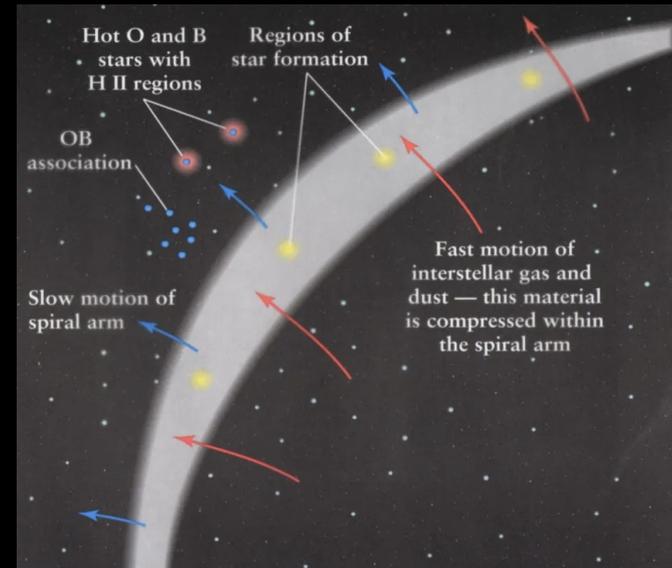
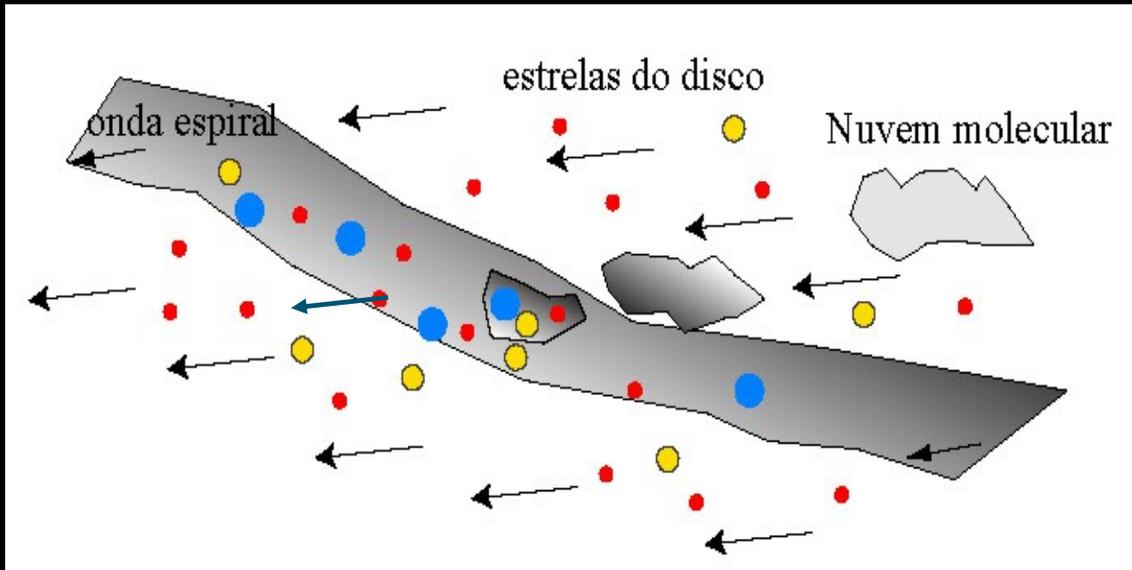
Como resultado da rotação diferencial, na região mais central, as estrelas giram mais rápido do que os braços. Na região mais externa os braços giram mais rápido do que as estrelas.

Existe uma situação onde os braços e as estrelas giram com a mesma velocidade. É o que chamamos de Ressonância de Corrotação



Como a instabilidade se mantêm, vai ocorrer...

"A Persistência dos Braços Espirais"



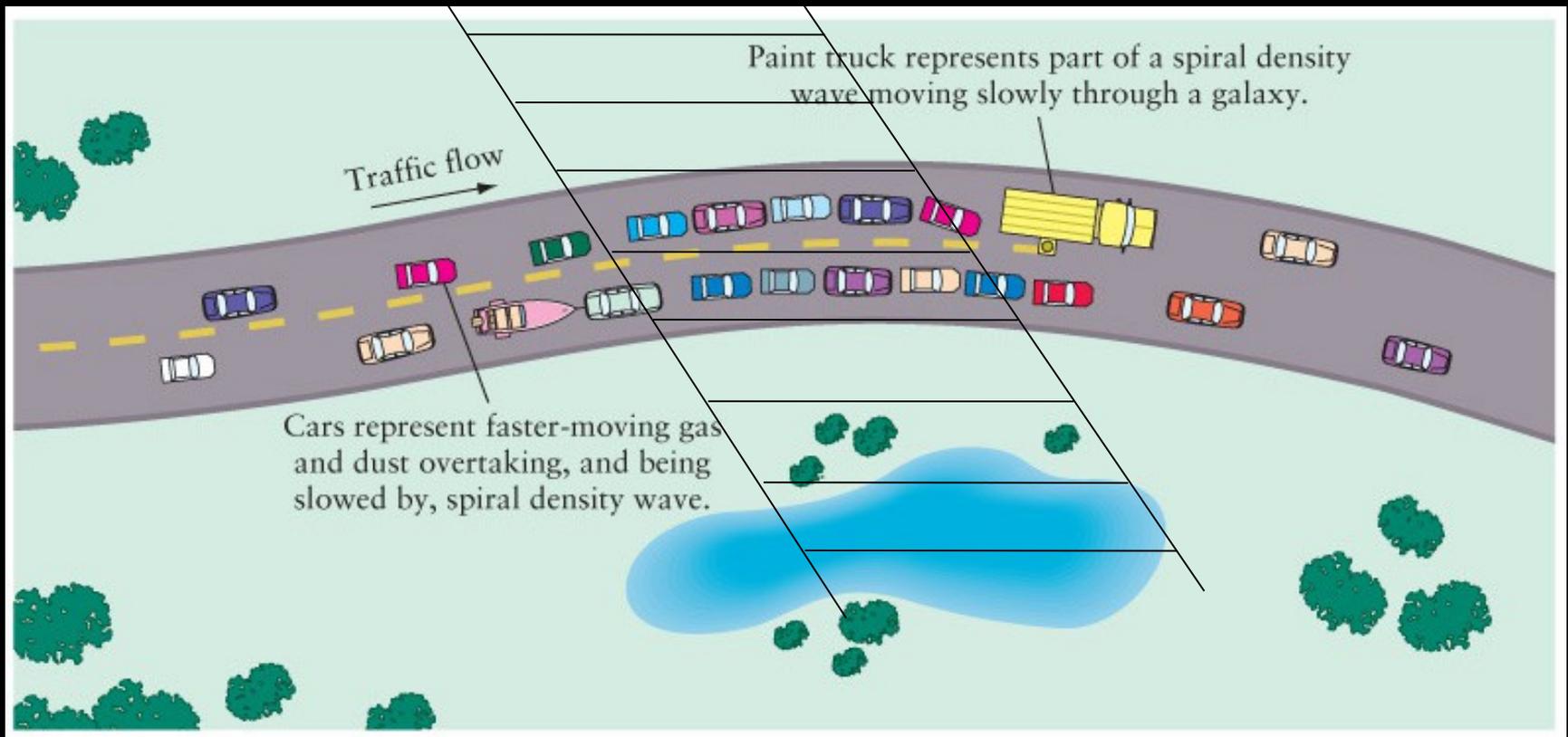
A onda espiral se propaga com velocidade diferente das estrelas e das nuvens moleculares. Ela se propaga como **corpo sólido**....

Quando a onda espiral atravessa o material do disco que contém gás, poeira, nuvens moleculares, ela comprime o gás, gerando a **formação de novas estrelas**.

Estrelas massivas então nascem, “acendem” os braços espirais, mas evoluem rápido, vivem pouco e se apagam...

Mas, conforme a onda espiral se propaga, ela vai **“acendendo” novas estrelas**....

Este efeito de passagem das estrelas pelos braços espirais é semelhante ao que ocorre em um engarrafamento de carros em uma rodovia. Para quem observa a partir de um helicóptero existe ali um excesso de veículos. Mas em cada instante a composição desta região se altera com a evolução gradual do tráfego, ou seja, não são sempre os mesmos carros que provocam congestionamento.



Persistência dos Braços Espirais

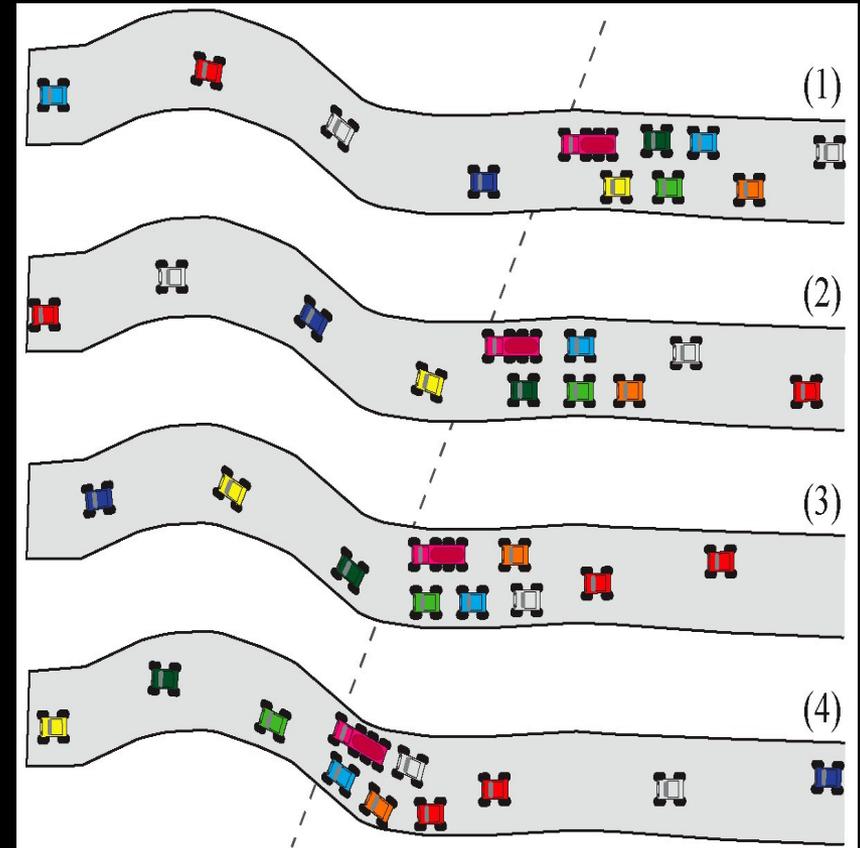
...um exemplo do dia-a-dia...

Congestionamento na estrada provoca perturbação....

Esta perturbação se propaga na estrada e não são sempre os mesmos carros que são responsáveis pelo congestionamento.

Nesta analogia, os braços espirais seriam gerados como consequência das perturbações geradas pelo congestionamento de órbitas das estrelas. A propagação da onda de densidade por um disco constituído de estrelas, gás e poeira, comprime o gás, gerando assim novas estrelas.

Como a forma da perturbação em grande escala é espiral, as estrelas que nascem vão traçar a mesma forma...gerando os braços espirais que observamos nas galáxias espirais.



Em síntese:

Perturbações causadas pelas órbitas das estrelas (cinemática) geram instabilidades globais que se propagam no disco, provocando um efeito de **empilhar o material (gás e poeira)** do disco na crista da onda. Como consequência deste empilhamento o gás e poeira são comprimidos e **novas estrelas temporariamente formadas**.

Uma vez formadas vão então **traçar temporariamente os braços**. Como esta instabilidade se propaga continuamente, os **braços são persistentes** e **novas estrelas nascem continuamente** enquanto existir o gás para alimentar este processo. O tempo que o material leva para passar pelo braço espiral é da ordem de 10^7 anos

Existem vários tipos de instabilidades de órbitas de estrelas que geram perturbações

Barras também são produzidas por perturbações

O padrão de onda espiral (perturbação), bem como as barras, giram com uma velocidade angular constante.



Entre as galáxias que apresentam morfologia comum, associadas aquelas definidas na Classificação Morfológica de Hubble (SCH), existem algumas que possuem um fenômeno de extrema importância relacionado com a energia gerada em galáxias, que não aquela produzida pela luminosidade das estrelas, nem a luminosidade atribuída ao gás e poeira, e que divide estes objetos em 2 grandes grupos:

- galáxias comuns (acabamos de ver...)
- e
- galáxias ativas

Galáxias Ativas

...Pode-se dizer, essencialmente, que as galáxias ocorrem em 2 estados:
fundamental (1) e **excitado** (2)

(1)- **Fundamental**, ou comum, onde a amplitude de energia gerada pela galáxia encontra-se entre os limites abaixo:

$$\sim 10^{38} < L < 10^{40} \text{ ergs.s}^{-1} \quad \text{ou, em termos de luminosidade solar - } L_{\odot}$$
$$\sim 10^5 < L < 10^{12} L_{\odot}$$

lembrando que... ($L_{\odot} \sim 10^{33} \text{ ergs.s}^{-1}$), e que esta L é de **origem térmica**, ou seja, produzida pela luz das estrelas, pela emissão radiotérmica do gás (gás quente) e emissão infra-vermelho (IR) da poeira aquecida do MIS

(2)- **Excitado**, onde os valores medidos variam de

$$\sim 10^{43} < L < 10^{48} \text{ ergs.s}^{-1} \quad \text{ou, em termos de luminosidade solar - } L_{\odot}$$
$$\sim 10^{23} < L < 10^{38} L_{\odot}$$

De onde vem o adicional de energia...! ?

Porque algumas emitem mais e outras menos nesta classe de excitadas

As classes de Galáxias Ativas

...o percentual de cada classe e a distribuição por volume...

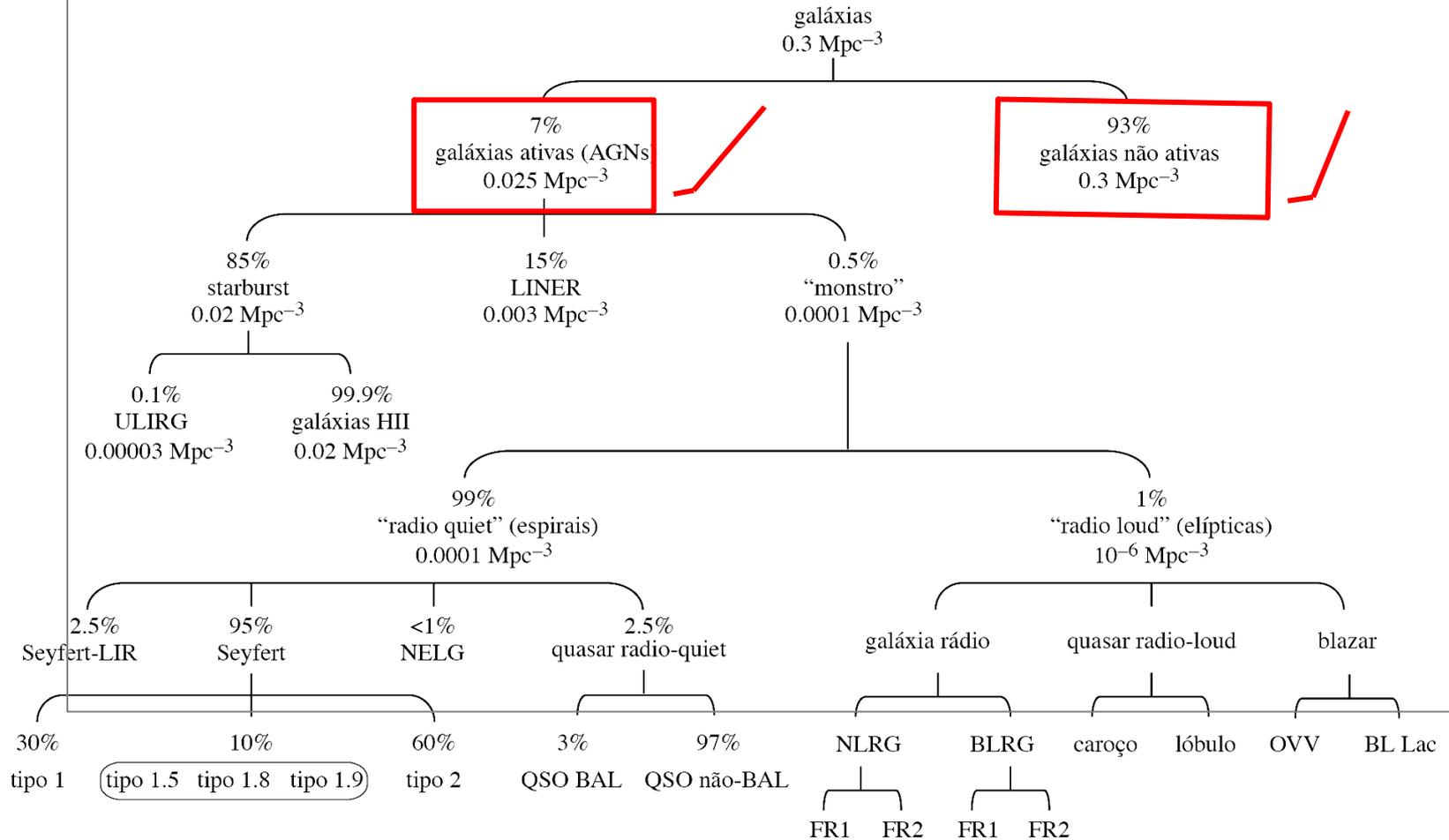
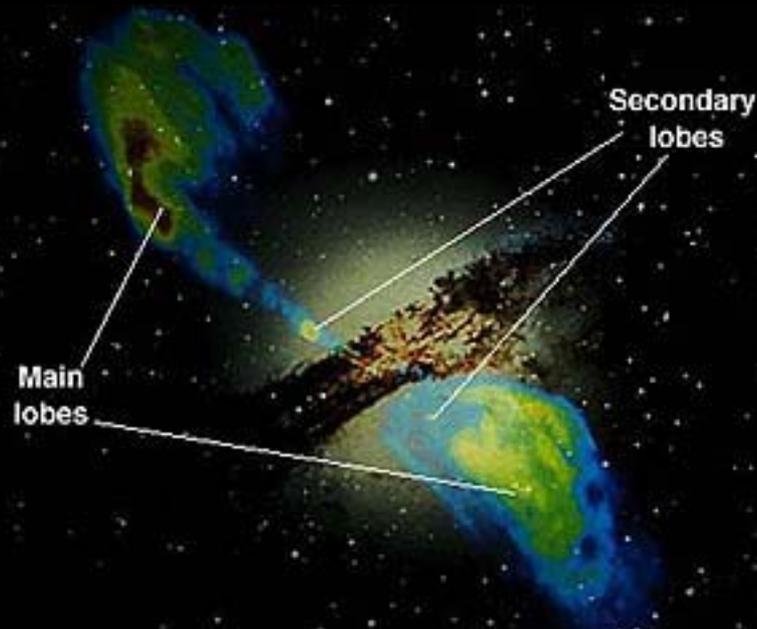
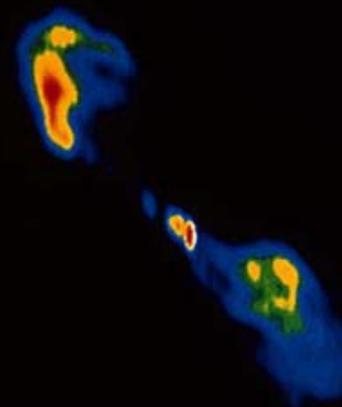
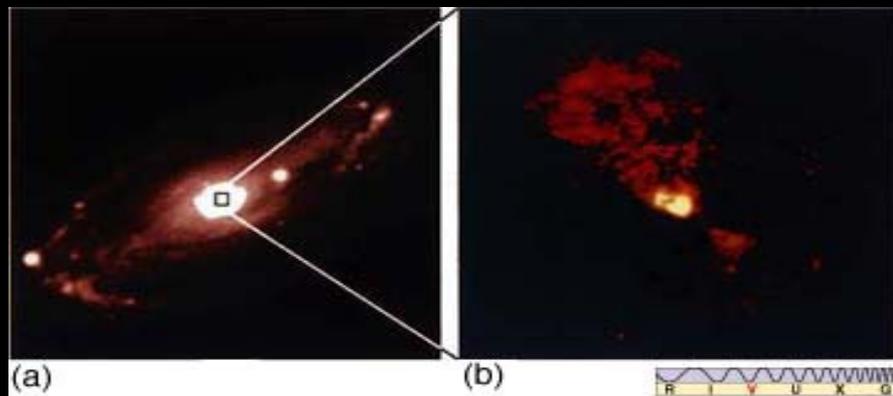
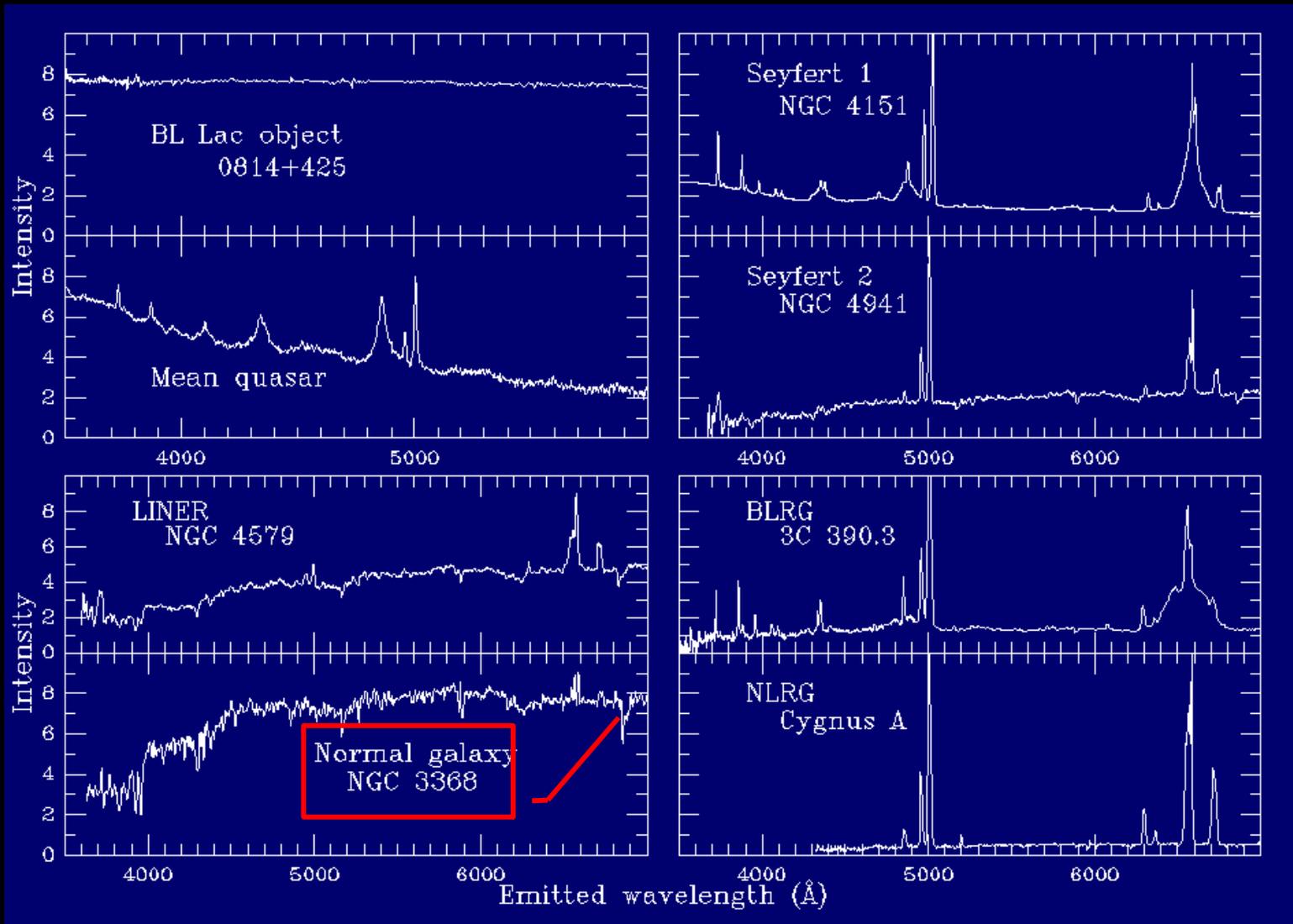


Figura 150: Demografia de galáxias com atividade (AGNs e formação estelar intensa). As porcentagens e densidades são aproximadas. “LIR” significa luminoso no infravermelho; “BAL” linha de absorção larga; “FR” Fanaroff-Riley (veja seção 10.5.2); “NLEG” galáxia com linha de emissão estreita. Tirado de Roy (1994).

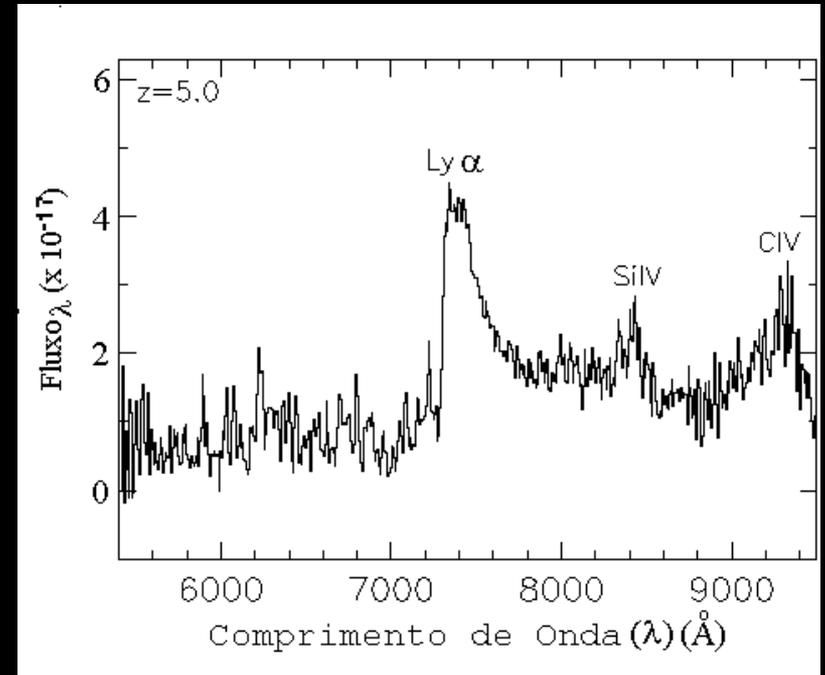
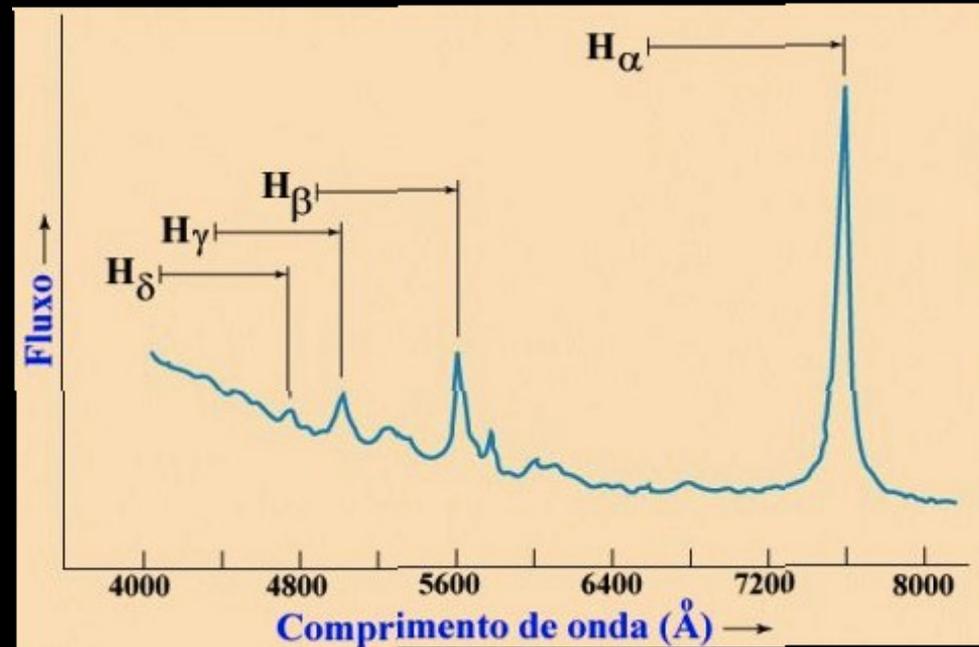
Qual a aparência (em diferentes comprimentos de onda...)
...das Galáxias Ativas ?
...alguns exemplos...



Espectros de diferentes tipos de galáxias ativas comparados com galáxias normais

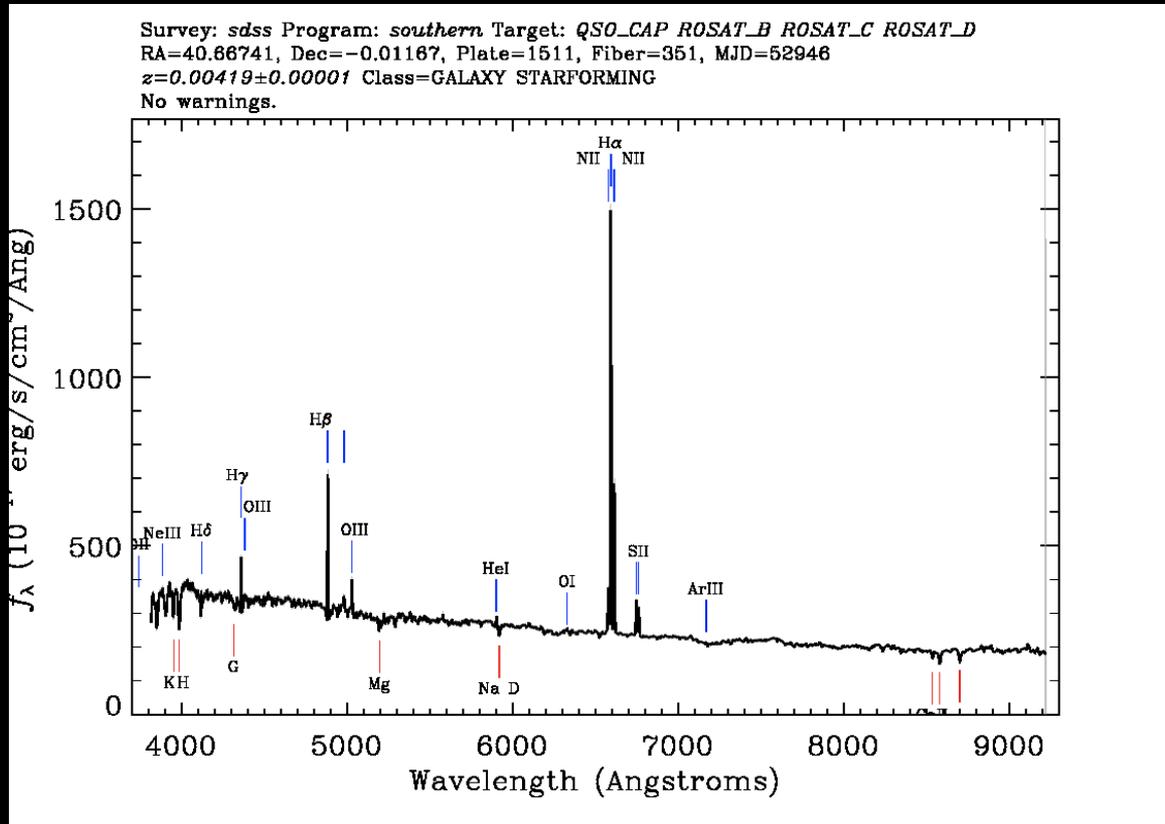


Exemplos de espectros de Quasares



Quasar RD 300 a $z=5,5$
um exemplo dos mais
longínquos

Exemplos de espectros de Seyferts



O espectro visível de uma galáxia de Seyfert típica. As linhas de emissão devidas ao hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O), enxofre (S), entre outros elementos, são evidentes como linhas escuras verticais.

Galáxias Ativas

...algumas propriedades gerais que caracterizam estes objetos...

...a emissão de energia por **processos não-térmicos** pode estar associada a fontes pontuais ou fontes extensas

1- Emissão dominada por processos não-térmicos como Radiação Síncroton, gerada por eletrons relativísticos espiralando em campo magnético

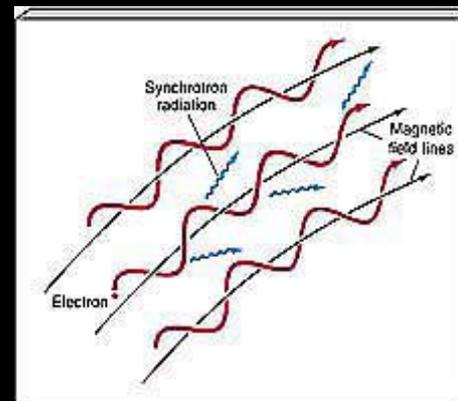
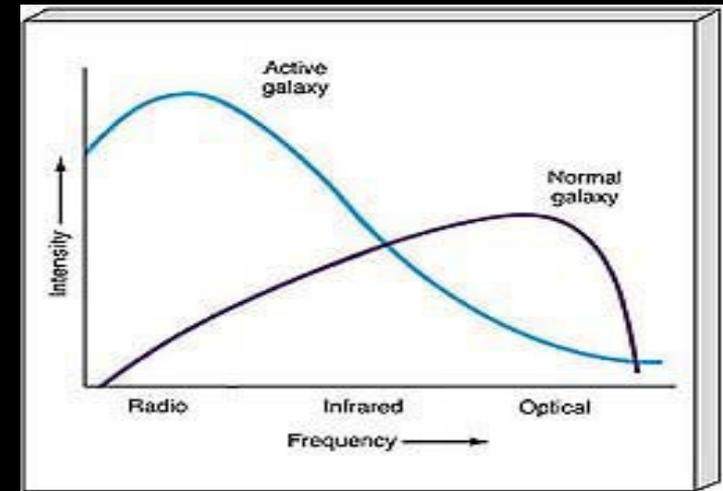
+

Processos térmicos envolvendo energias muito altas

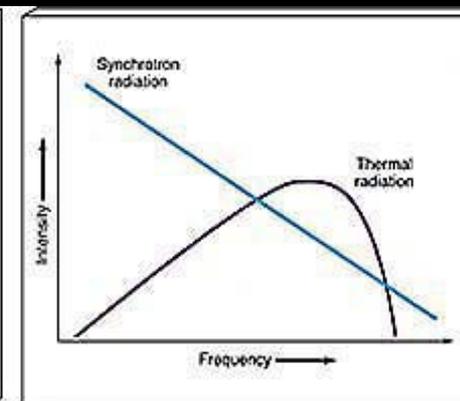
2- Quando associada a fontes pontuais, a energia vem de um núcleo muito pequeno, com diametro angular menor do que $1''$ (1 segundo de arco - alguns parsecs)

3- Variabilidade

4- Em placas fotográficas, alguns destes objetos apresentam aparência estelar, como veremos adiante



(a)



(b)

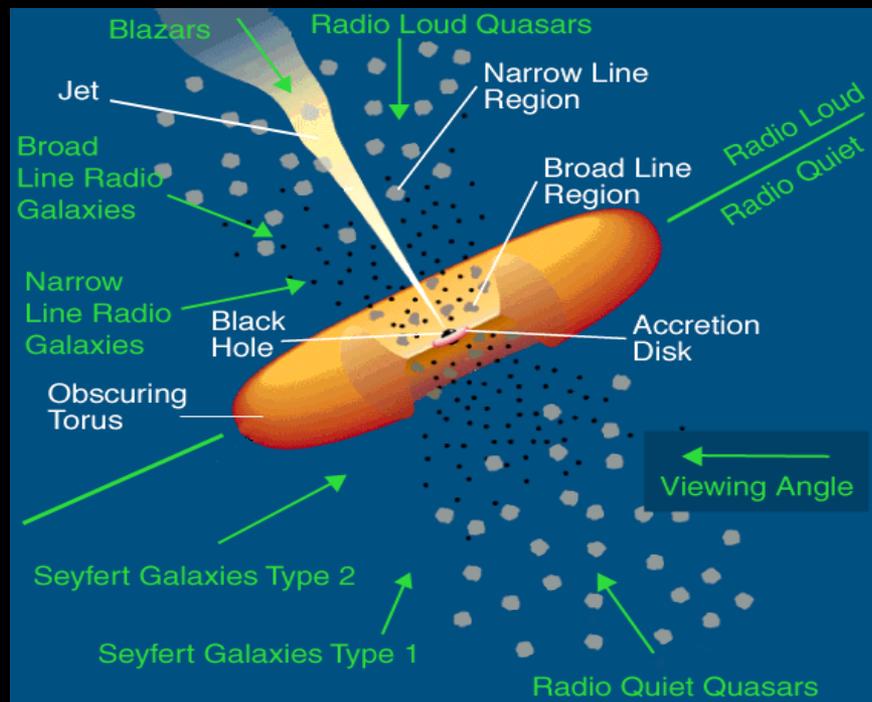
Observação de Seyferts, quasares, radio galáxias e blazares sugere a presença de um buraco negro na região central.

A similaridade entre estes diferentes objetos nos leva a interpretação no sentido de um Modelo Unificado, onde todas são galáxias com disco de acreção central e buracos negros vistos em diferentes ângulos.

Linhas estreitas e linhas largas observadas nos espectros são resultantes de observações em diferentes direções, como ilustra a figura abaixo...

Modelo Padrão:

Região central da galáxia com produção de ftons altamente energéticos que ao atravessarem a galáxia encontram regiões de gás com diferentes densidades, produzindo linhas estreitas permitidas e largas, permitidas e proibidas...

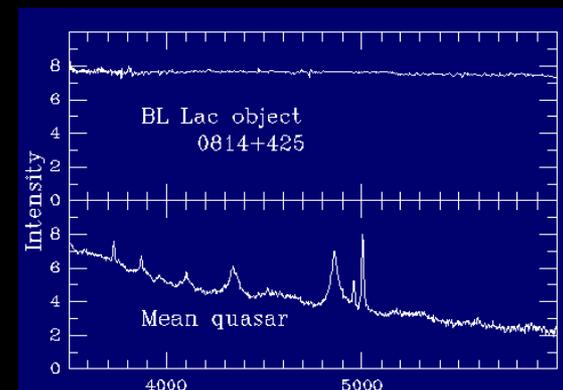
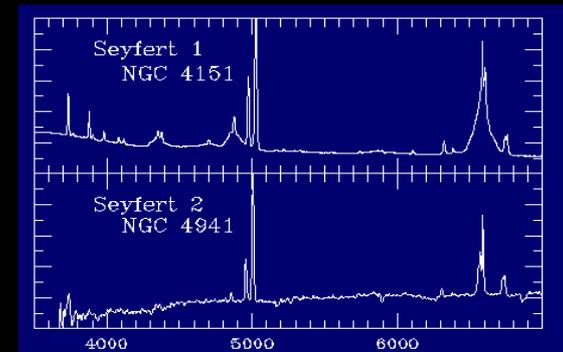
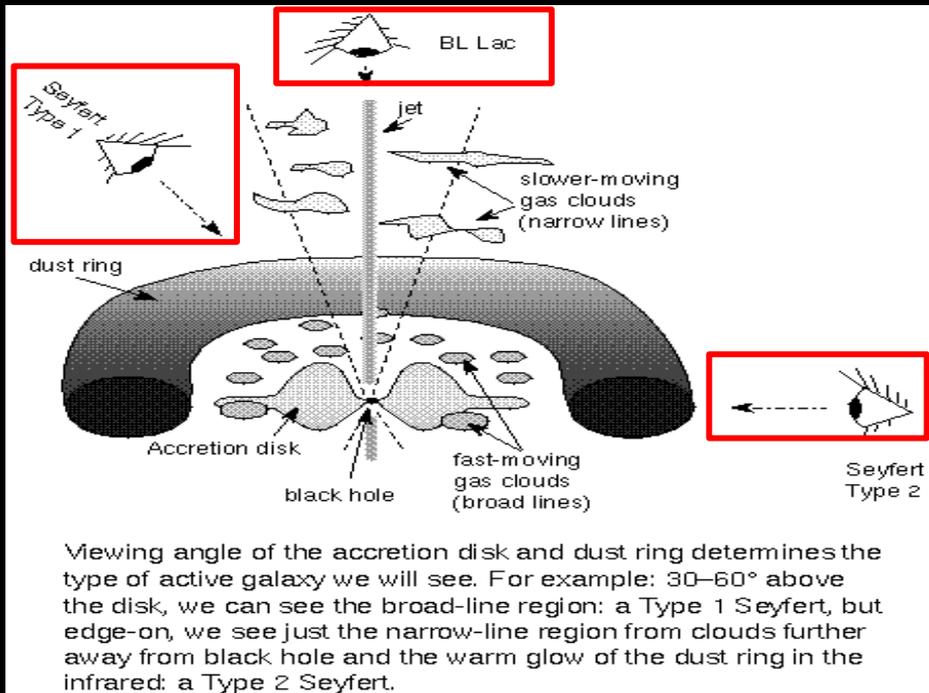


Vamos ver com um pouco mais de detalhes a seguir...

Dependendo do **ângulo que o observador está olhando** o disco de acreção e o anel de poeira (toro) estará observando diferentes classes de galáxias ativas.

Veja figura abaixo.....por exemplo, a observação na direção que faz um ângulo de 30-60° graus acima do disco, resultaria em um espectro de “linhas largas” no espectro, ou seja, estaríamos observando e identificando uma Seyfert 1.

Mas se o observador estiver olhando na direção perpendicular (de perfil) ao longo do toro, onde existem nuvens de poeira e gás quente distantes do Buraco Negro, estaria identificando uma galáxia Seyfert 2. Caso a observação seja “de face”, onde não estaria na direção do observador a presença do Toro, estaríamos observando um BL Lac.

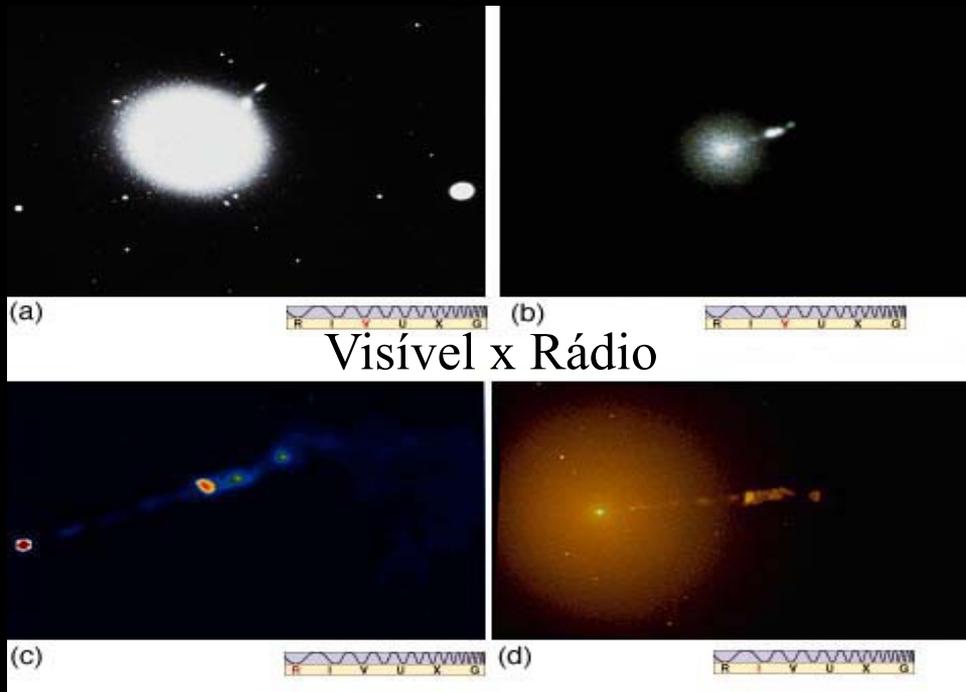


Vamos ver algumas propriedades das galáxias ativas mais conhecidas: Radiogaláxias, Galáxias Seyferts e Quasares

Radiogaláxias

São tipicamente Elípticas, frequentemente elípticas gigantes, encontradas em centros de aglomerados de galáxias ricos.

Geralmente tem aparência peculiar como a presença de jatos (M87) ou um cinturão de gás ionizado e poeira ao longo do disco da galáxia, como Centaurus A (NGC 5128 – Fig. direita).



Radiogaláxias

Parecem ter sido formadas via fusão.

2 tipos:

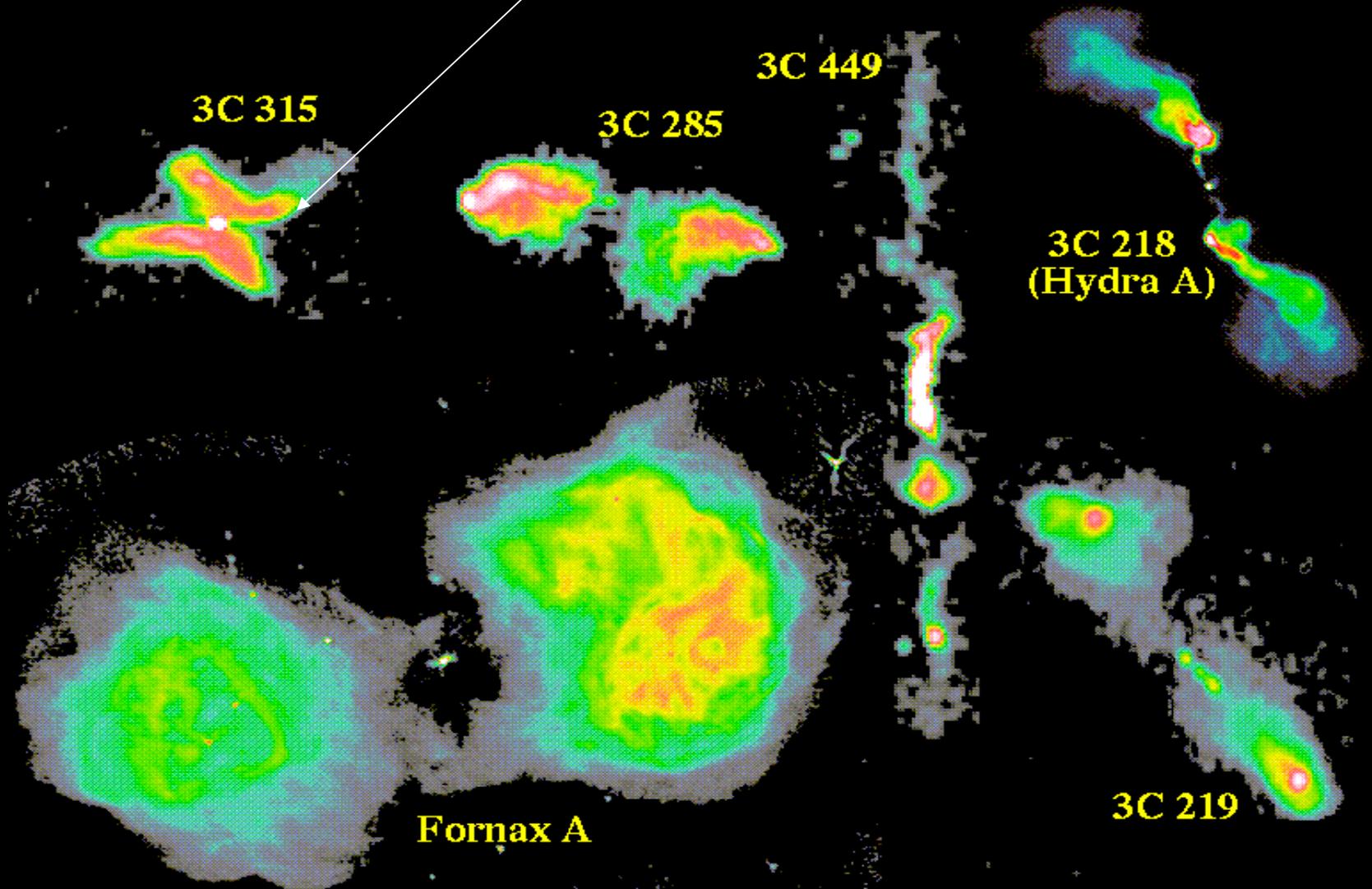
1. **Radiogaláxias compactas** → a emissão vem da região central (gás quente)
2. **Radiogaláxias extensas (75%)** → emissão vem dos 'lobos' e não da galáxia visível

Os **lobos** em geral são muito maiores do que a galáxia visível e consistem de **gás ionizado** que são **ejetados** do centro da galáxia em direções opostas.

Radioemissão é gerada no processo “Synchrotron”, que requer fortes campos magnéticos onde partículas de altas energias, tipicamente elétrons, estão se movendo a velocidades próximas a da luz gerando a radiação.

Exemplos de Radiogaláxias

...reparar nas diferentes formas dos lobos, e que podem denunciar a presença de gás intergaláctico....



Galáxias Seyferts

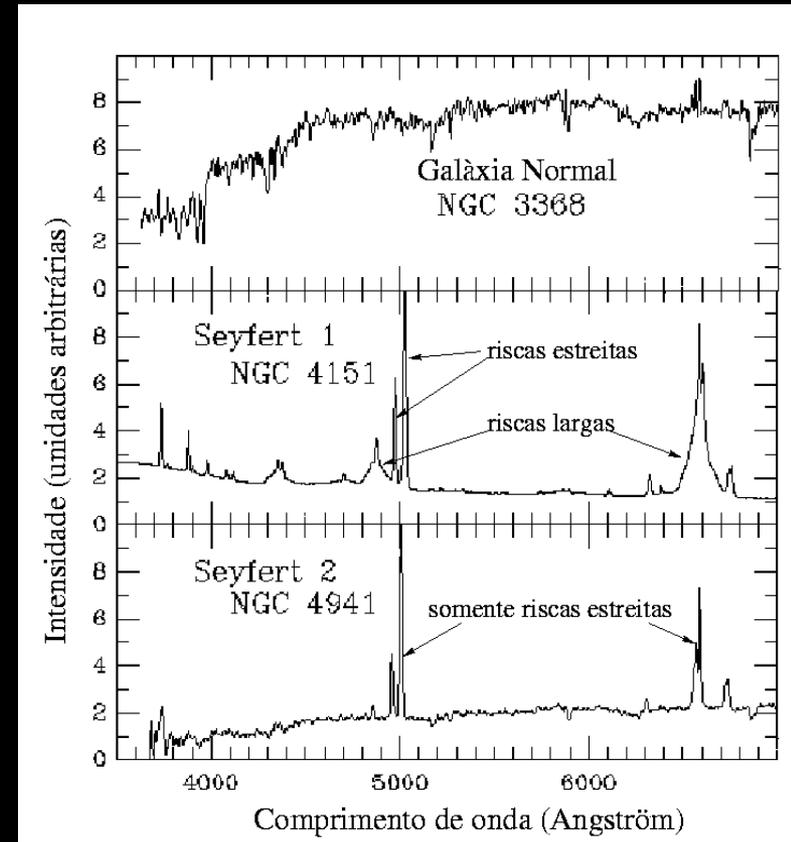
Seyfert em 1930 identifica visualmente 6 galáxias espirais com **núcleo azul muito brilhante**, não usual, cujos espectros apresentavam **linhas de emissão muito alargadas**. Estas linhas alargadas foram interpretadas como sendo devido ao movimento local de gás da ordem de milhares de km/s.

O grau de ionização representado pelas linhas de emissão indicam temperaturas do gás local tão altas quanto 1 milhão de graus Kelvin.

Frequentemente variam o brilho em escalas de tempo curtas, da ordem de dias.

Consequência: tamanho da região emissora deve ser pequeno

Não são, em geral, fontes intensas de rádio ou R-X, mas são **intensas fontes de Infravermelho**.



Galáxias Seyferts

10% das Seyfert são também emissoras de rádio e 1% das Espirais (S) são Seyferts

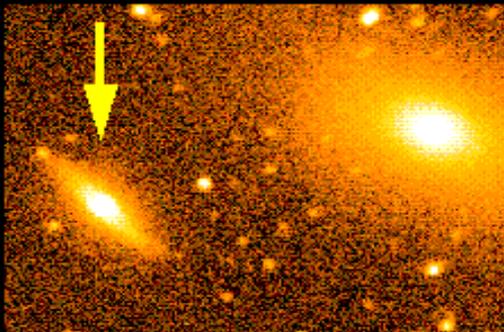
Núcleo destas galáxias são regiões onde imensas quantidades de energia são emitidas a partir de um pequeno volume, sugerindo que **buracos negros** podem ser responsáveis por este efeito

Alguns estudos mostram que as Sey são parte de sistemas binários

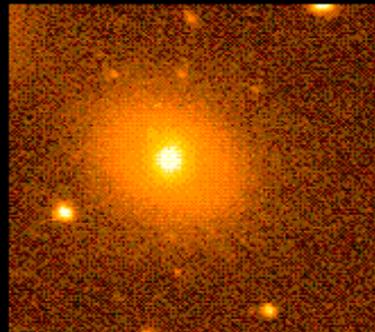
Hoje, milhares conhecidas e encontram-se relativamente próximas $0.003 < z < 0.06$

Seyfert Galaxies

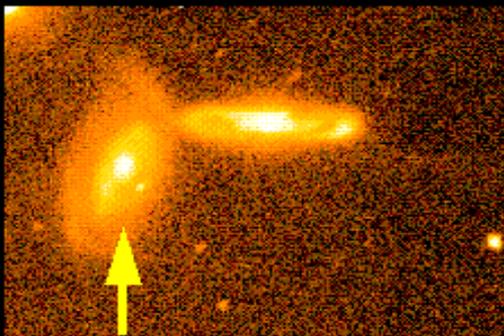
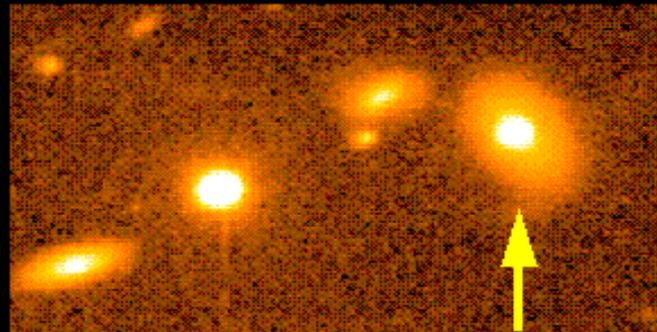
IC 4329A



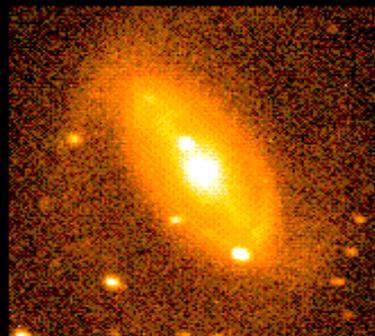
NGC 3516



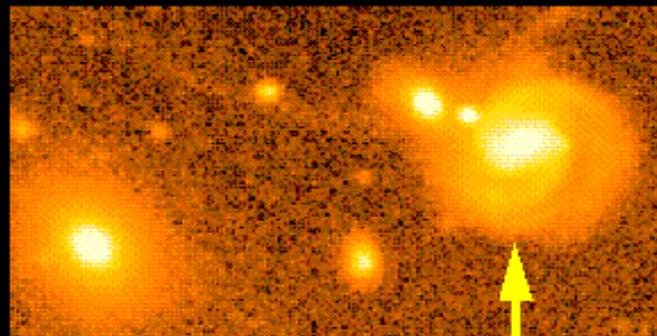
Markarian 279



NGC 3786



NGC 5728



NGC 7674

Quasares - “quasi stellar radio sources”

...a classe das ativas de **L extrema**...

Emitem rádio e com aparência estelar → **Quasi stellar**

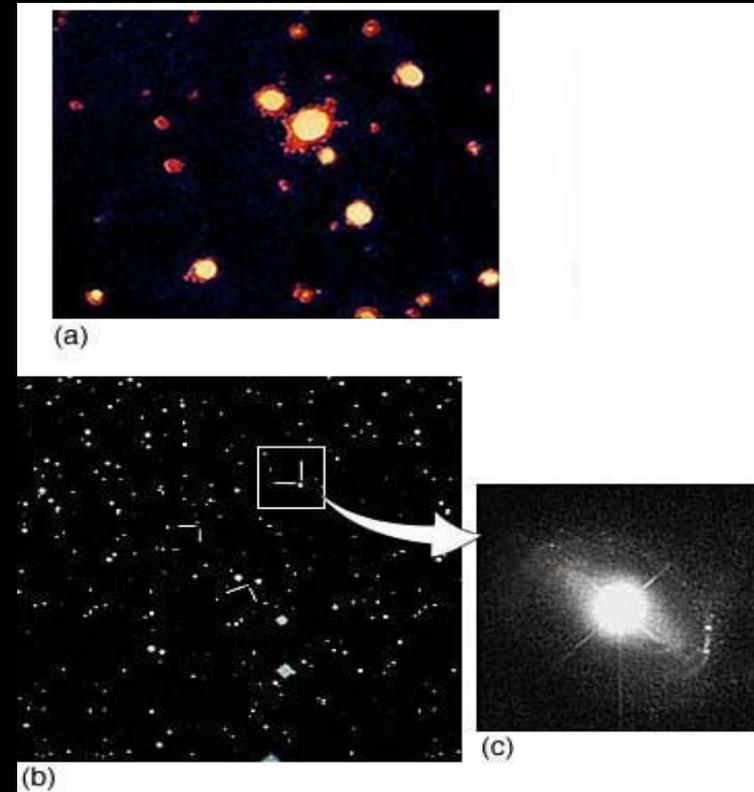
1^{os} descobertos – 3C48 e 3C273 com velocidade de recessão muito grande, de 30% e 15% de **c**, respectivamente.

Os objetos mais luminosos e distantes do Universo com desvios para o vermelho (“redshift”) entre $0.14 < z < 6$

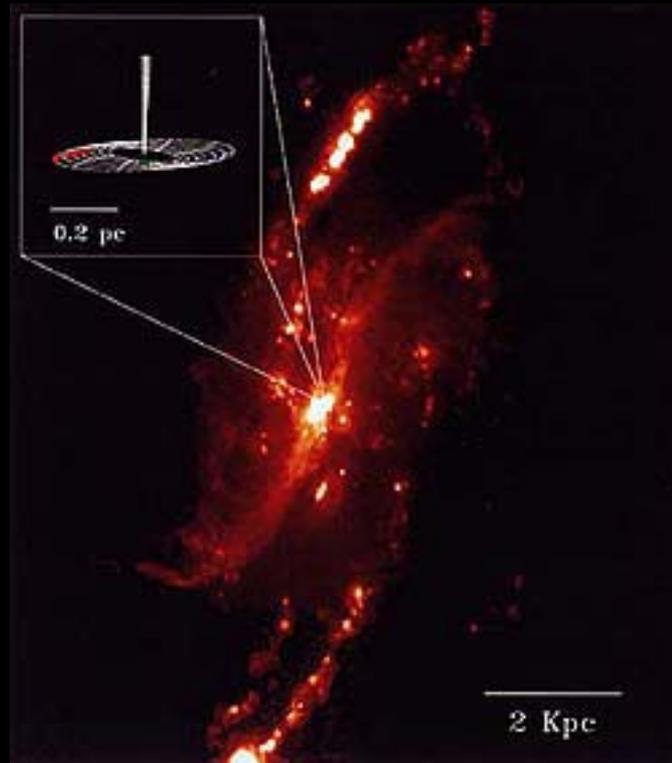
Quando muito distantes a estrutura ao redor da galáxia não é visível, e o que observamos então é o núcleo da galáxia, que tem aparência estelar (**QSOs – quasi stellar objs**)

Quasares são fortes emissores em rádio e emitem em toda faixa do espectro eletromagnético.

Emitem em 1 segundo...o que o Sol emite em 200 anos, ou seja, 100 vezes mais brilhante que a VL



Quem seria responsável por tanta emissão de energia ?
...um modelo que explica as observações



Quem seria responsável por tanta emissão de energia ?

...um modelo que explica as observações

Centro das galáxias espirais parece existir um Buraco Negro (BN) supermassivo com massas entre 1 milhão a 1 bilhão de Msolar

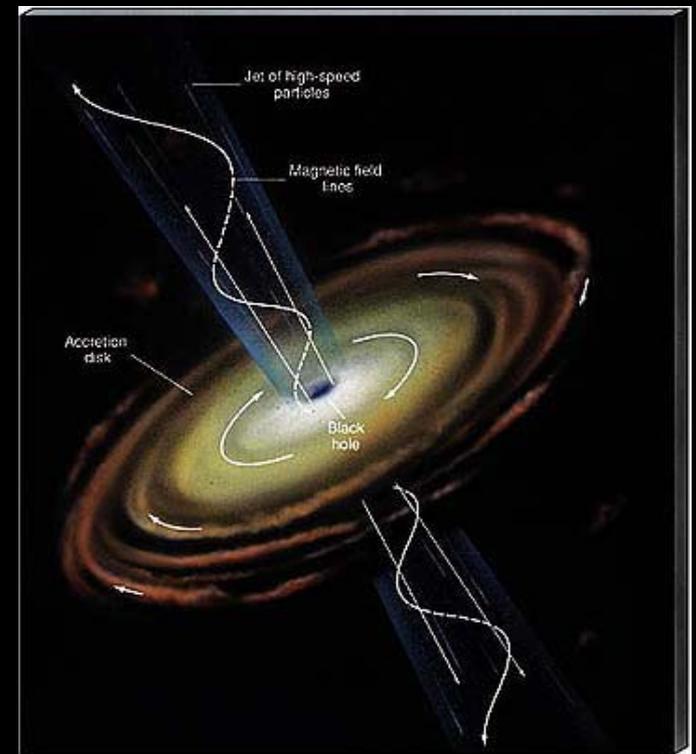
Não sabemos explicar como este BN é formado exatamente

Gás e estrelas estariam sendo capturados por um disco de acreção, com alta viscosidade.

Este disco de acreção se encontra muito próximo do Buraco Negro

A captura de matéria, em alta velocidade, **pelo disco de acreção**, é convertida em imensa produção de energia ($E_{pot} \rightarrow$ Luminosidade)

Eficiência do processo muito maior que a **fusão do H em He...**



Produção dos Jatos

Nem todo material disponível próximo do BN é capturado pelo BN. Parte do material é ejetado, em 2 direções opostas, criando jatos de gás

Os jatos de gás superaquecidos que vêm do núcleo e saem na direção do eixo de rotação do disco de acreção:

- Estes jatos são produzidos por combinação de forças rotacional + magnética
- São constituídos por gás de partículas relativísticas que viajam em campo magnético e que geram radiação Syncroton
- Estes jatos são responsáveis por gerar os lobos radioemissores em galáxias rádio e em BL Lac (um outro tipo de galáxia ativa)

Uma Possível Sequência Evolucionária

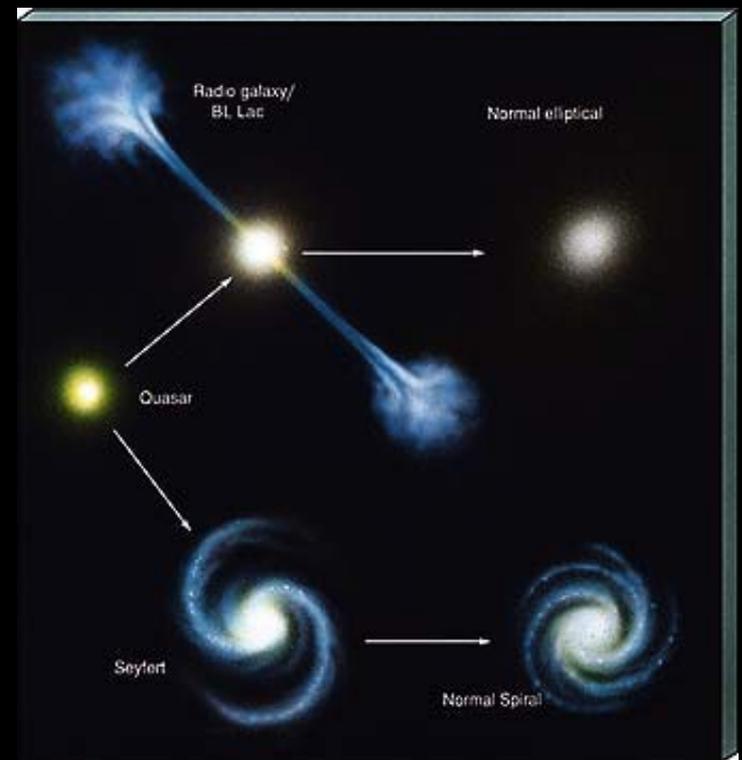
...para explicar as galáxias de hoje

Galáxias observadas hoje e que possuem “núcleo ativo” podem ser descendentes de QSO's

Com o tempo, a atividade central diminuiria devido a quantidade de matéria que cairia no disco de acreção

Uma possível Sequencia Evolutiva dos QSO's seria (ver fig. ao lado):

- QSO'S em Seyfert e em galáxias normais
- QSO's em rádiogaláxias e em galáxias **E**



Consequências

Se estamos observando objetos a profundidades muito grandes, estamos observando objetos que surgiram enquanto o Universo era ainda jovem ..então é possível que eles sejam os núcleos de galáxias jovens, vistas a bilhões de anos atrás...

Algumas evidências sugerem que os QSO's se formaram na fase inicial do Universo, a partir de “mergers” de protogaláxias (galáxias em processo de formação).



- Frequência de colisões e “mergers” entre galáxias muito distantes no início da evolução do Universo era maior.

Dica de Bibliografia Galáxias Ativas

Astronomia & Astrofísica (Kepler & Maria de Fátima)

No Coração das Galáxias (Sueli Maria Marino Viegas)