

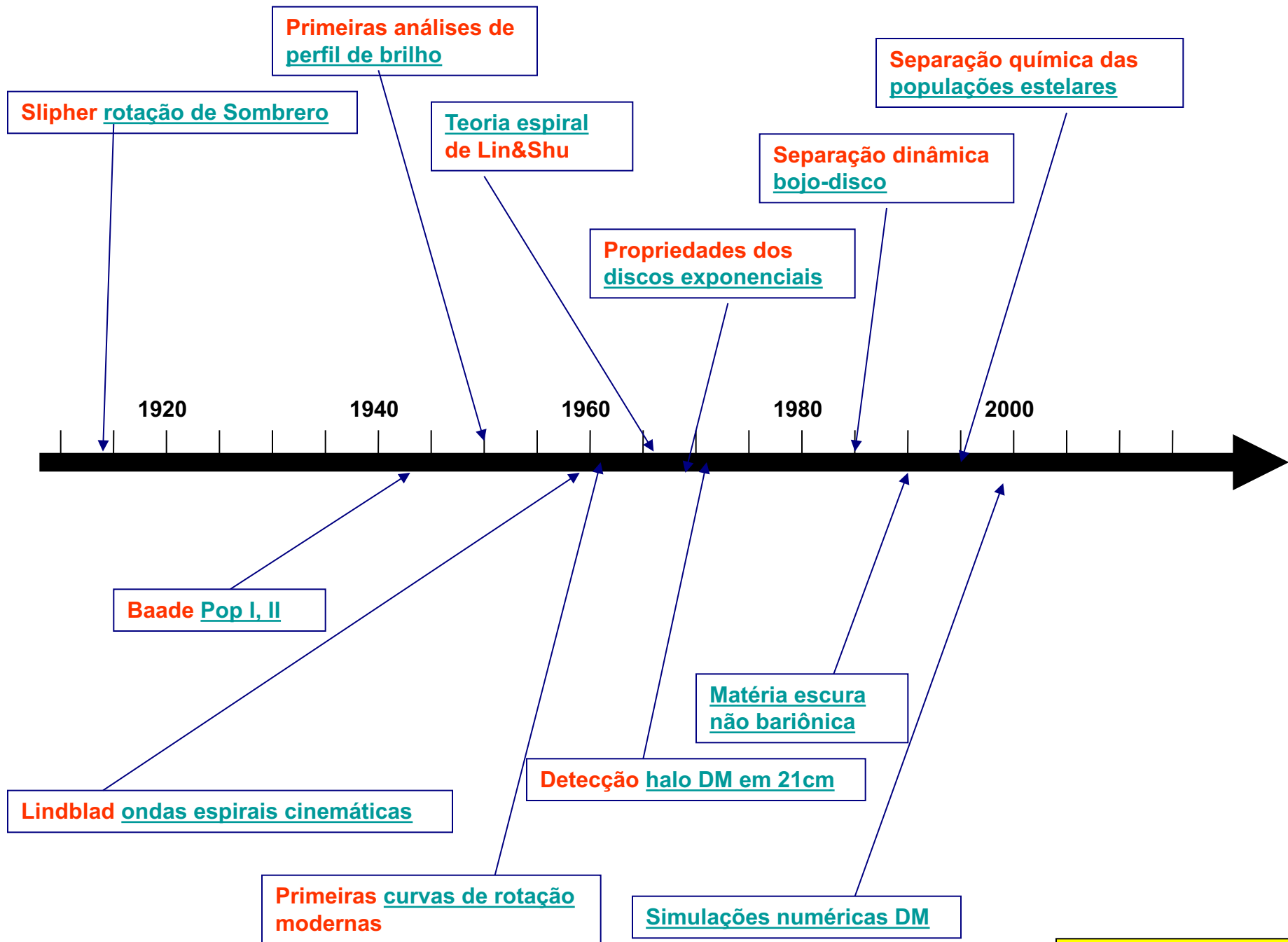


AGA 299 – IAG/USP
Ronaldo E. de Souza
Maio, 2024

4. Galáxias Espirais e S0



As galáxias espirais e S0 apresentam uma estrutura com duas componentes estelares bem definidas: o disco e o bojo. Esta característica confere a esta classe de objetos algumas propriedades bastante específicas.

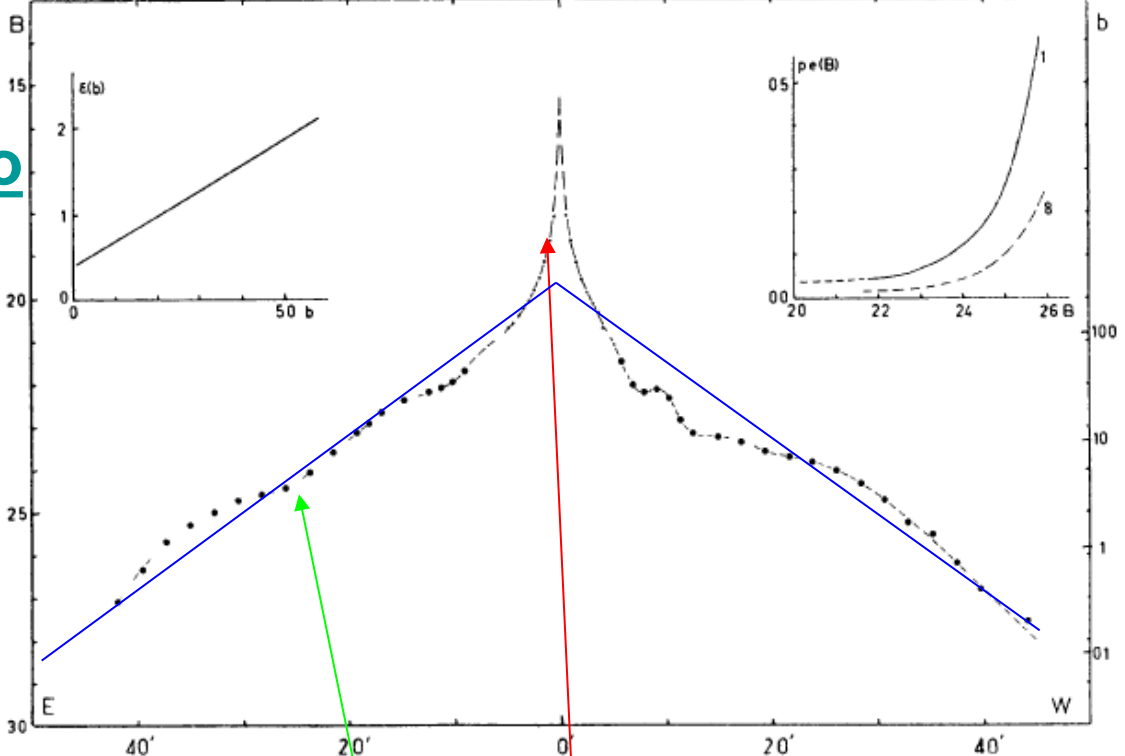
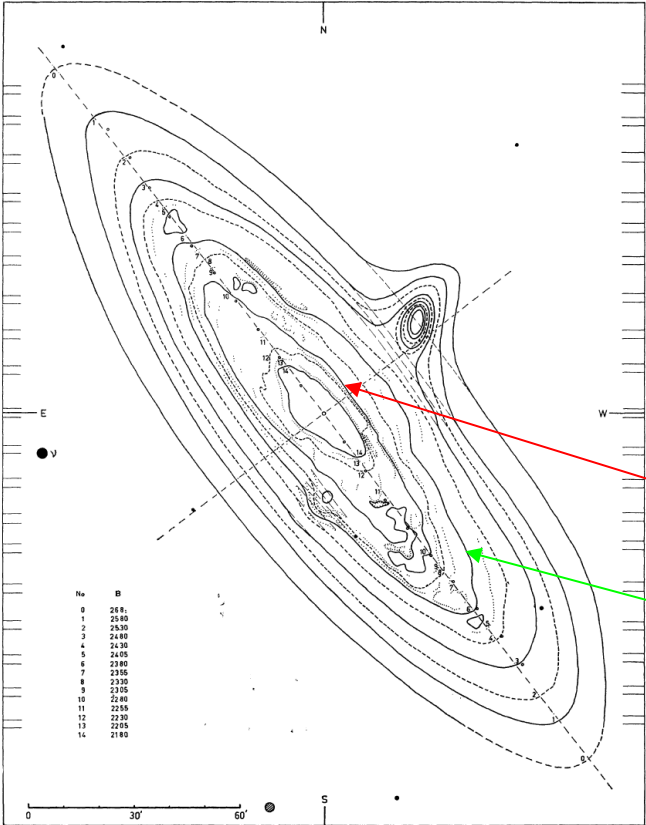


Tópicos

- 4.1 Distribuição de Brilho
- 4.2 Curva de Rotação
- 4.3 Matéria escura
- 4.4 Estrutura Espiral
- 4.5 Torções no Disco
- 4.6 Problemas

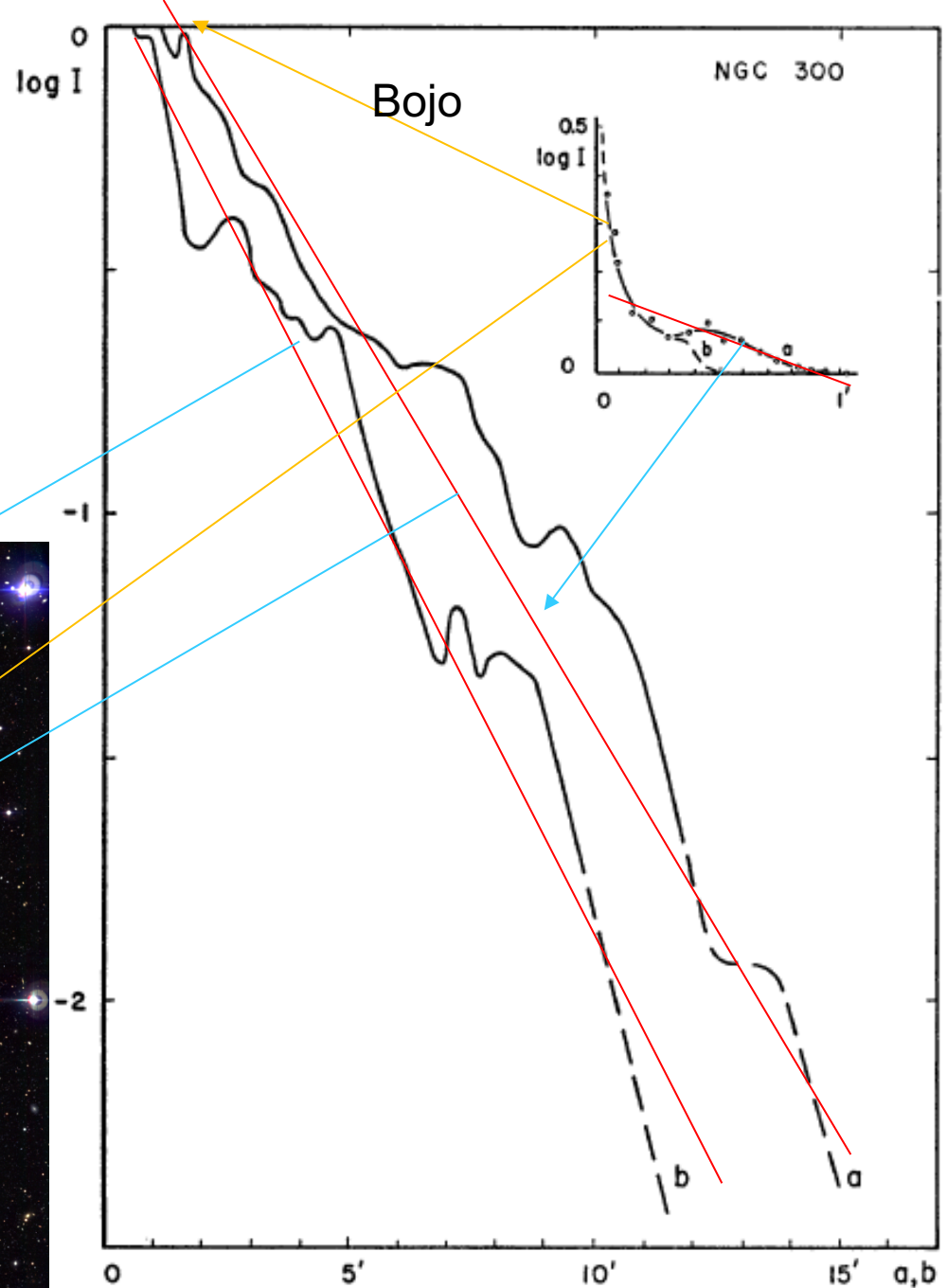
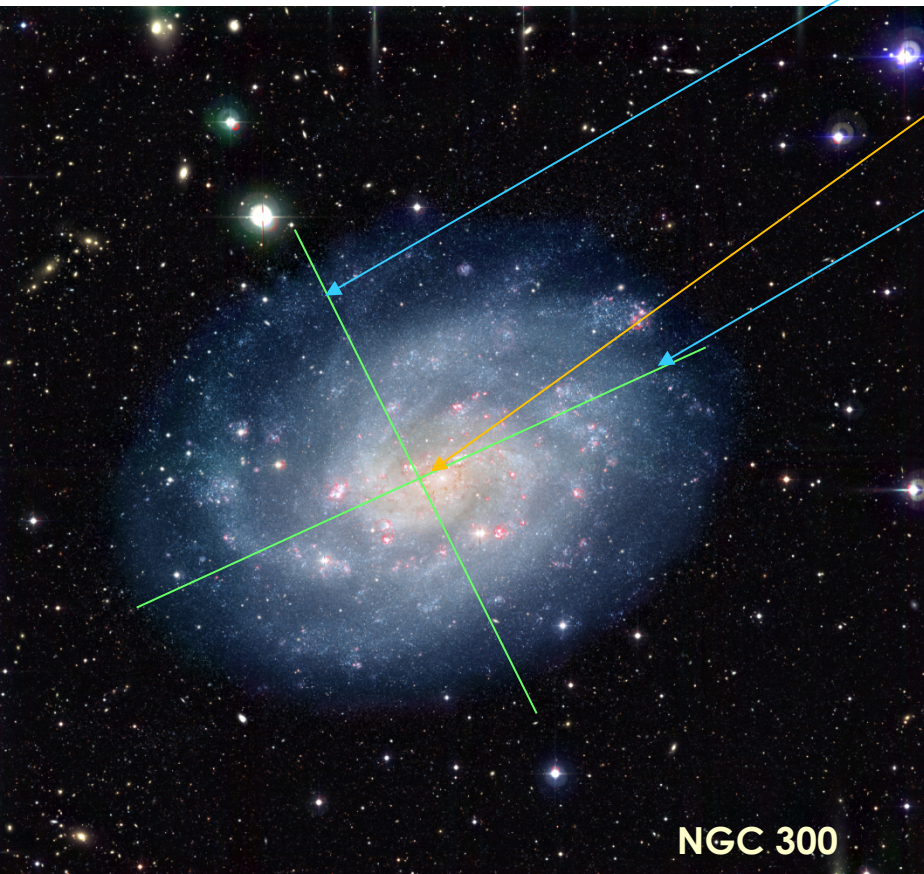
4.1 Distribuição de Brilho

À semelhança do que ocorre com a Via Láctea as galáxias espirais mostram claramente a presença de pelo menos duas componentes fotométricas importantes: disco e bojo. A detecção do halo estelar, mais difuso e tênue, é mais difícil.



As primeiras tentativas de entender a distribuição de brilho das galáxias utilizando-se estas duas componentes foram feitas nos anos de 1950 através de técnicas fotográficas e fotoelétricas. O exemplo ao lado (de Vaucouleurs, [1958, ApJ, 128,465](#)) contém uma análise de fotometria fotoelétrica da galáxia M31 onde podemos claramente ver a componente central associada ao bojo e a componente externa difusa do disco exponencial.

Gradualmente foi possível perceber que a importância relativa das componentes disco e bojo variavam drasticamente para cada objeto. Em NGC 300, por exemplo, podemos verificar que a componente do disco exponencial é largamente dominante, exceto na região bem próxima ao centro.



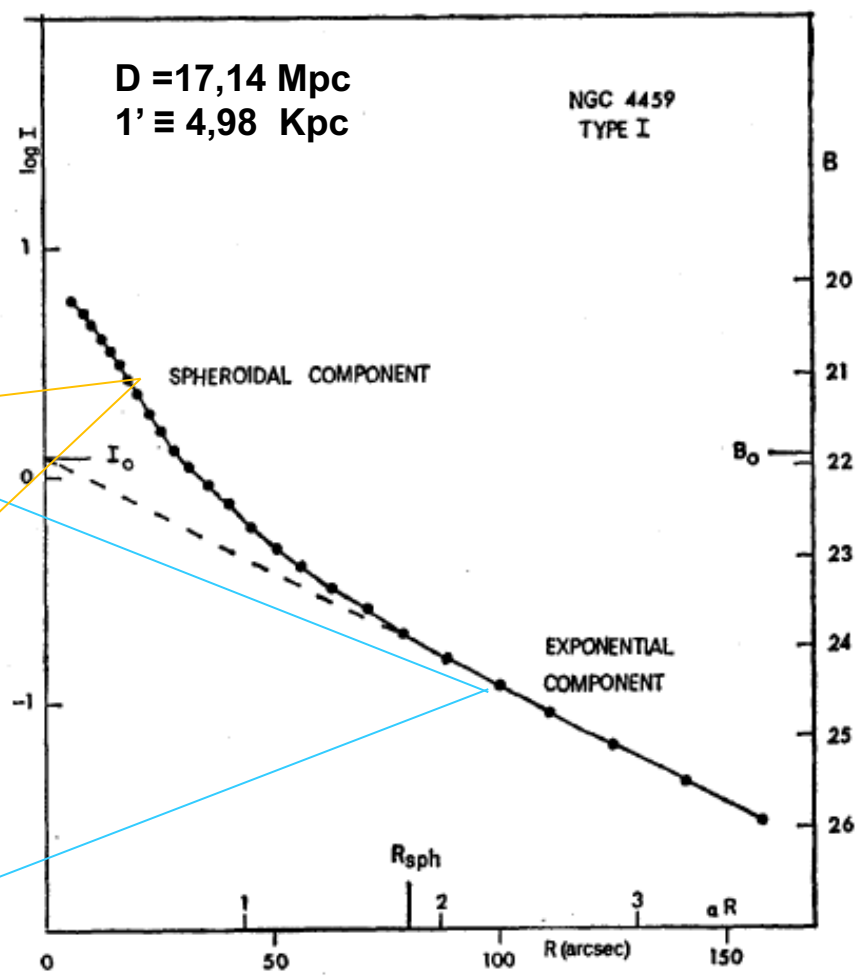
Em geral o disco das galáxias espirais, tal qual na via Láctea, apresenta um perfil de brilho que decresce exponencialmente com o raio

$I_d(r) = I_{d0} \exp(-r/r_d)$

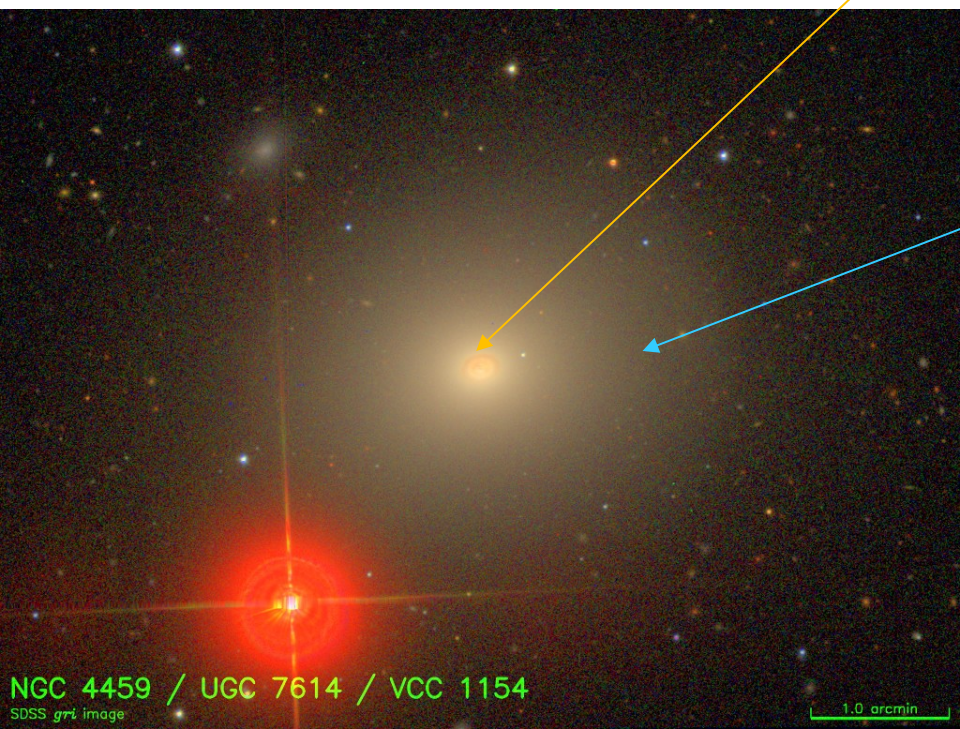
onde r_d determina dimensiona a escala do disco. O bojo segue a expressão

$I_b(r)=I_{b0} \exp[-(r/r_b)^{1/4}]$

proposta inicialmente por de Vaucouleurs onde r_b dimensiona a sua escala de tamanho.

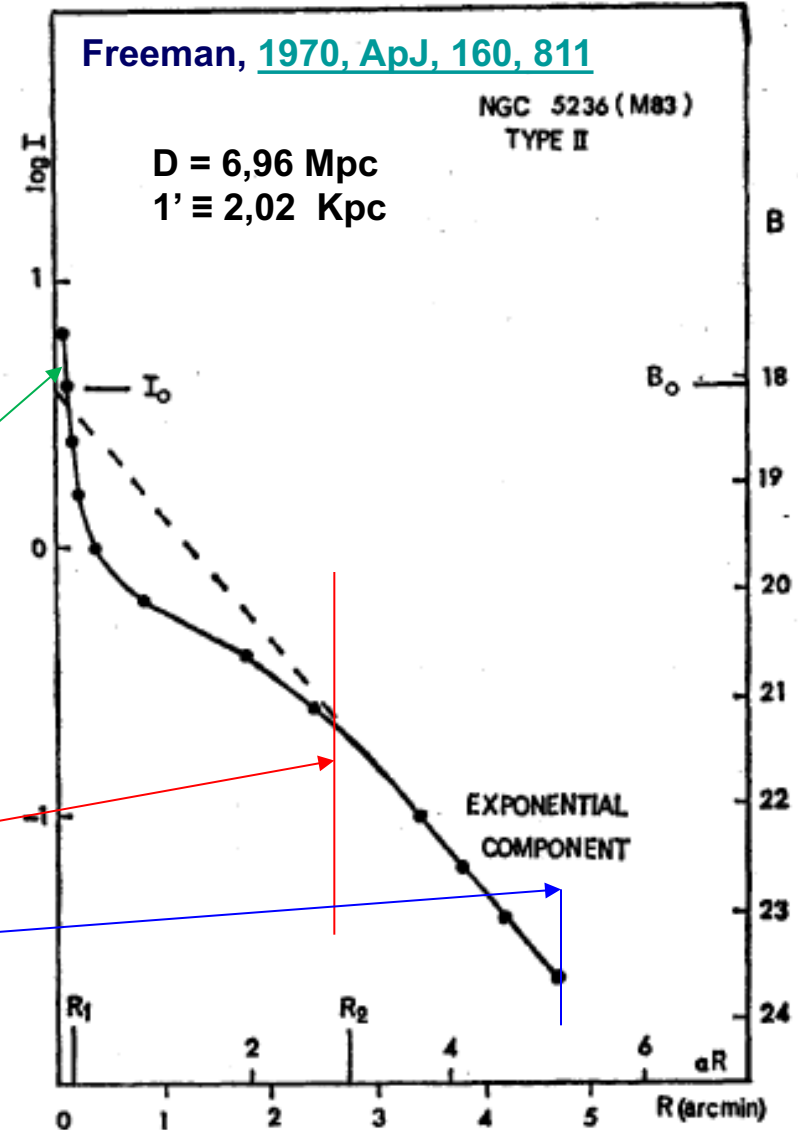
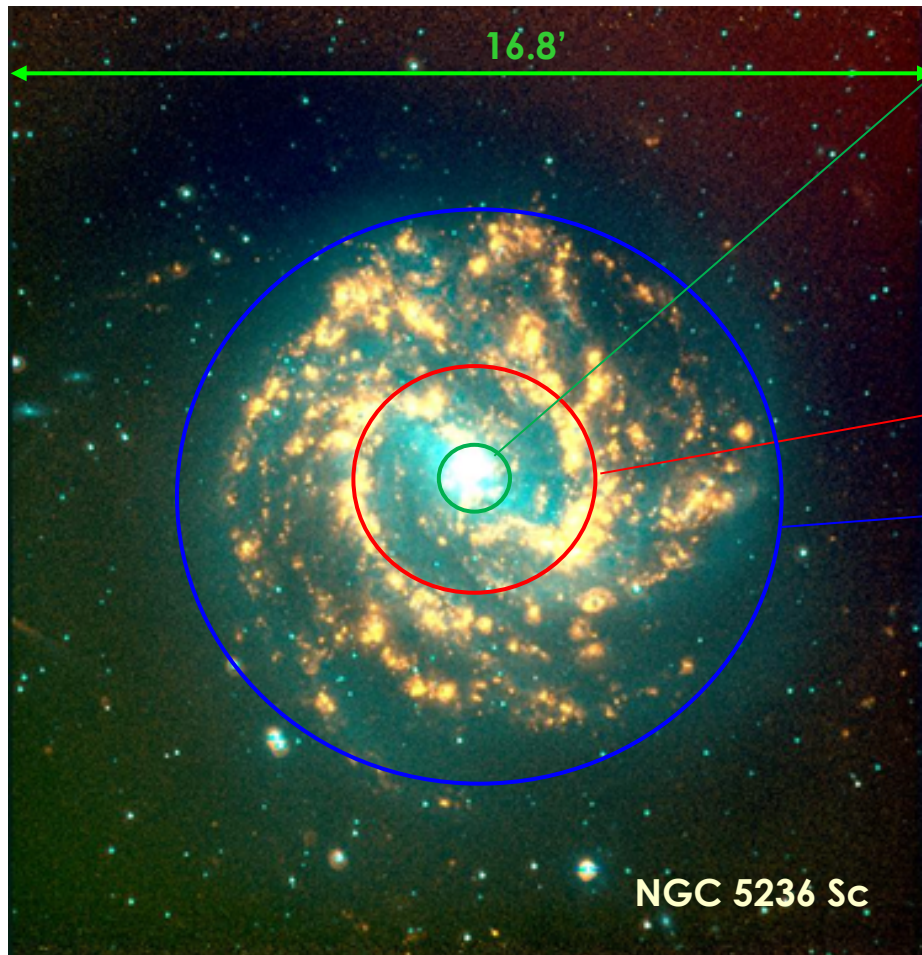


Freeman, 1970, ApJ, 160, 811



Quantas escalas de distâncias precisamos percorrer no disco para que o brilho superficial varie de uma magnitude? E no bojo? Como você classificaria morfologicamente este objeto? Porque?

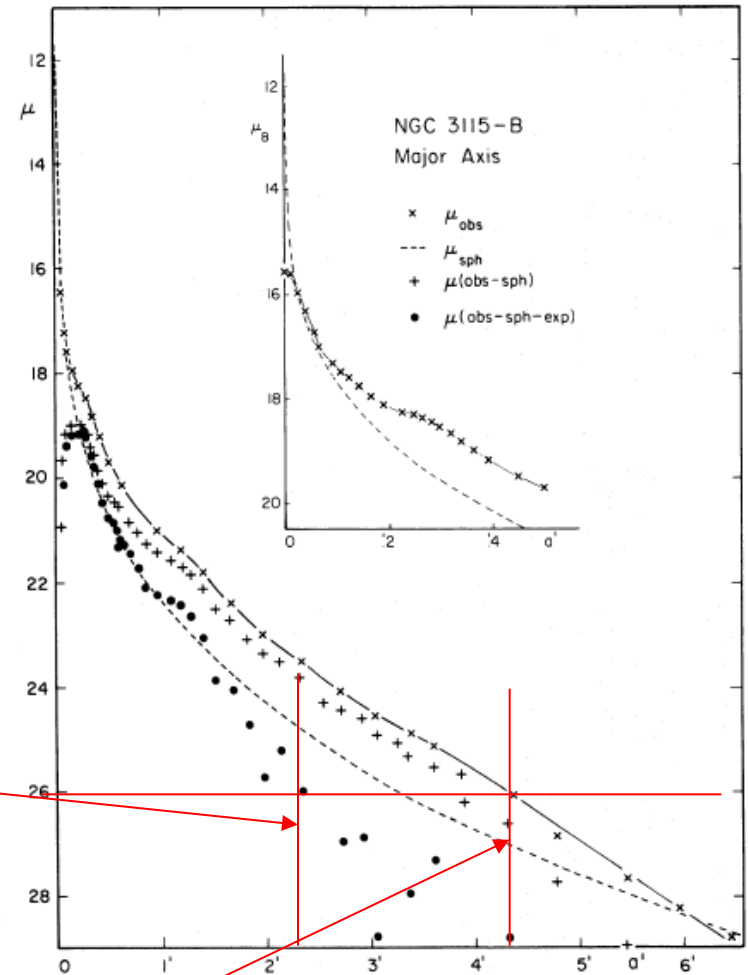
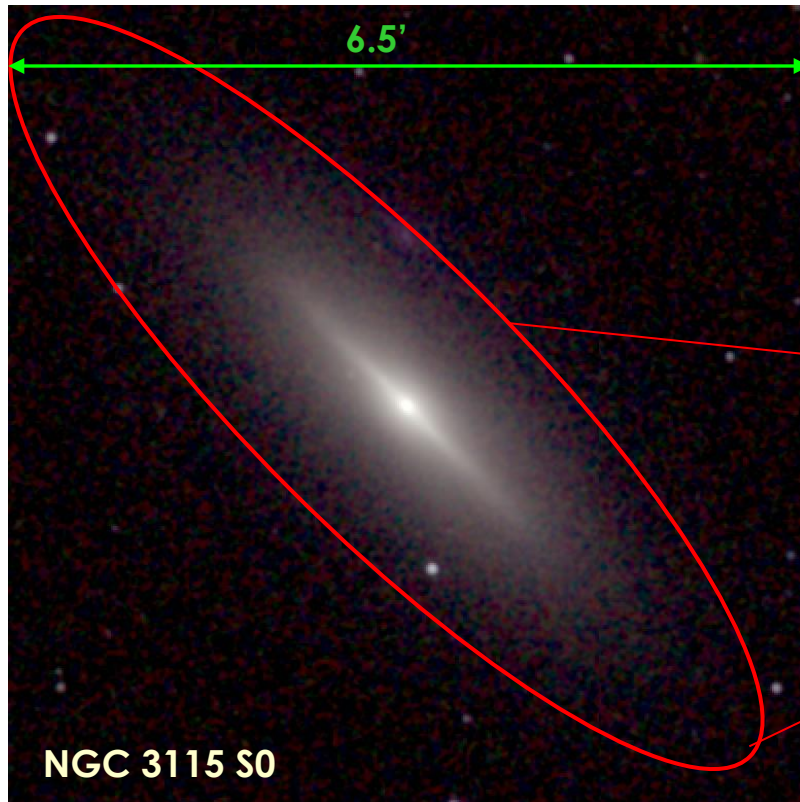
Em alguns casos observa-se que o perfil de brilho do disco parece ser truncado na região interna sugerindo que a estrutura da componente exponencial adotada, pelo menos em alguns casos, pode não se prolongar até a região central!?



Suponha que alguém afirme que o material que falta no disco migrou para a região interna. Como você poderia testar a consistência desta hipótese?

Quando se observa objetos vistos de perfil fica evidenciado em muitos casos que a estrutura exponencial do disco não é perfeitamente suave. Em NGC 3115, por exemplo, parece existir uma componente adicional, chamada de lente, que está superposta ao disco. Esta componente pode estar associada com a depressão que se observa no perfil de alguns objetos.

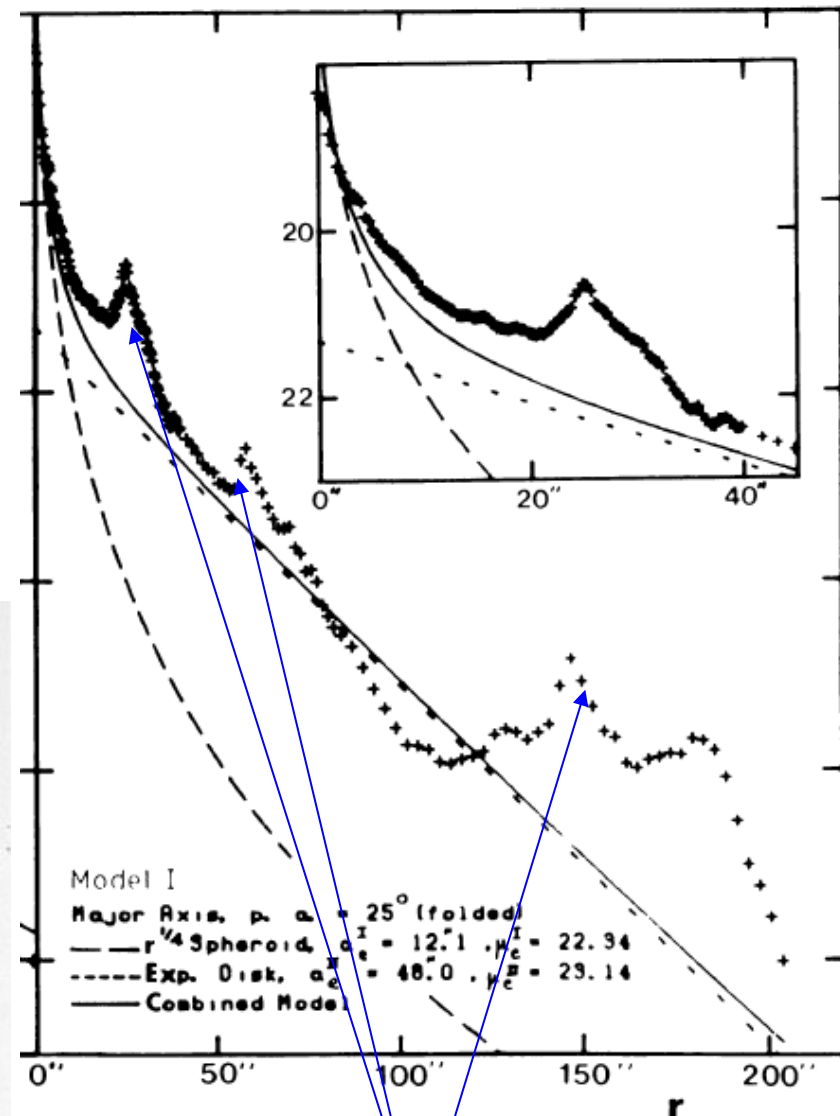
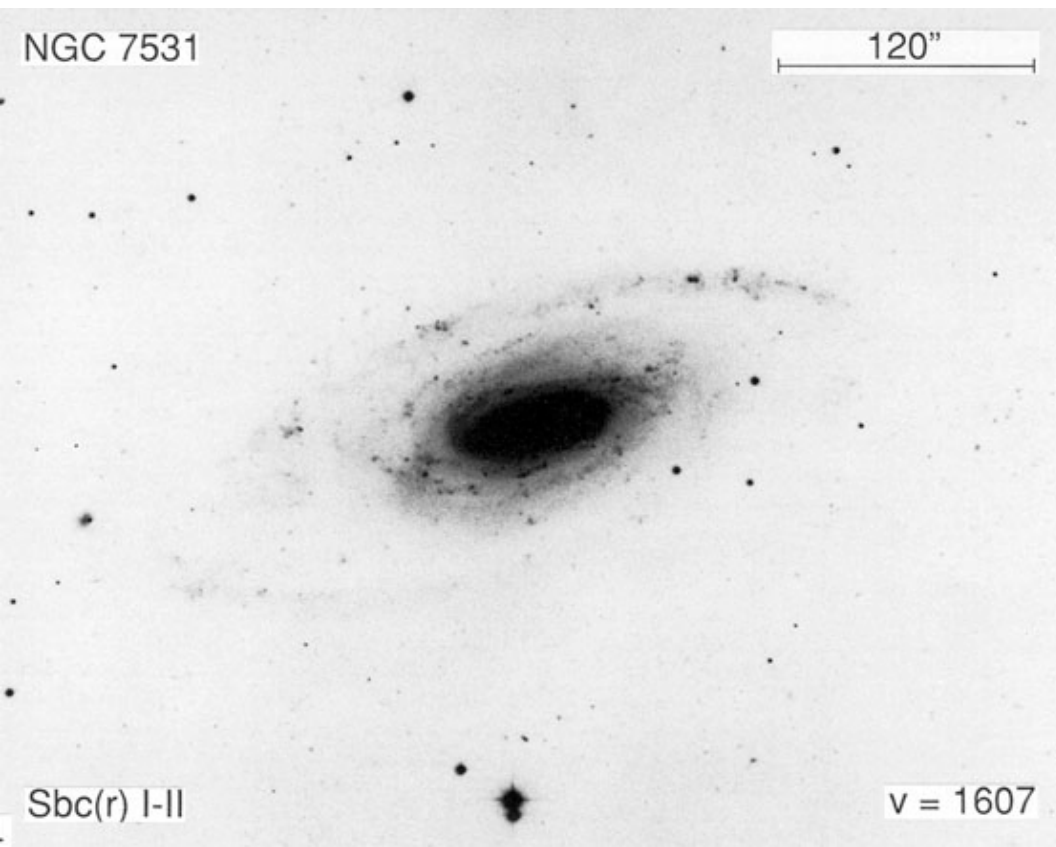
$D = 10,172 \text{ Mpc}$
 $1' \equiv 2,96 \text{ Kpc}$



Tsikoudi, [1979, ApJ, 234, 842](#)

Meça a razão axial nas isofotas 26, 24 e 22 mag/arcsec². É possível imaginar que seja um elipsóide oblato de razão axial constante?

Nas galáxias espirais mais tardias as estruturas associadas aos braços, barras e anéis se superpõem ao substrato do disco exponencial dificultando a sua detecção. A concepção atual é que os braços espirais são perturbações ondulatórias que redistribuem localmente a densidade de estrelas durante a sua passagem pelo disco. Dependendo da importância dos braços espirais a detecção do disco se torna portanto muito incerta.

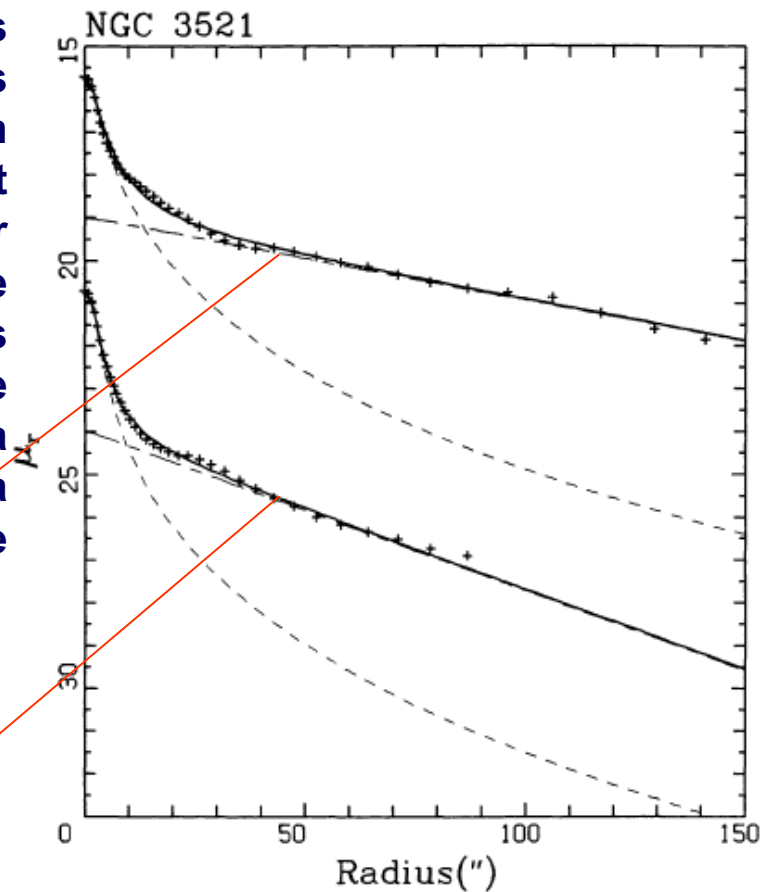
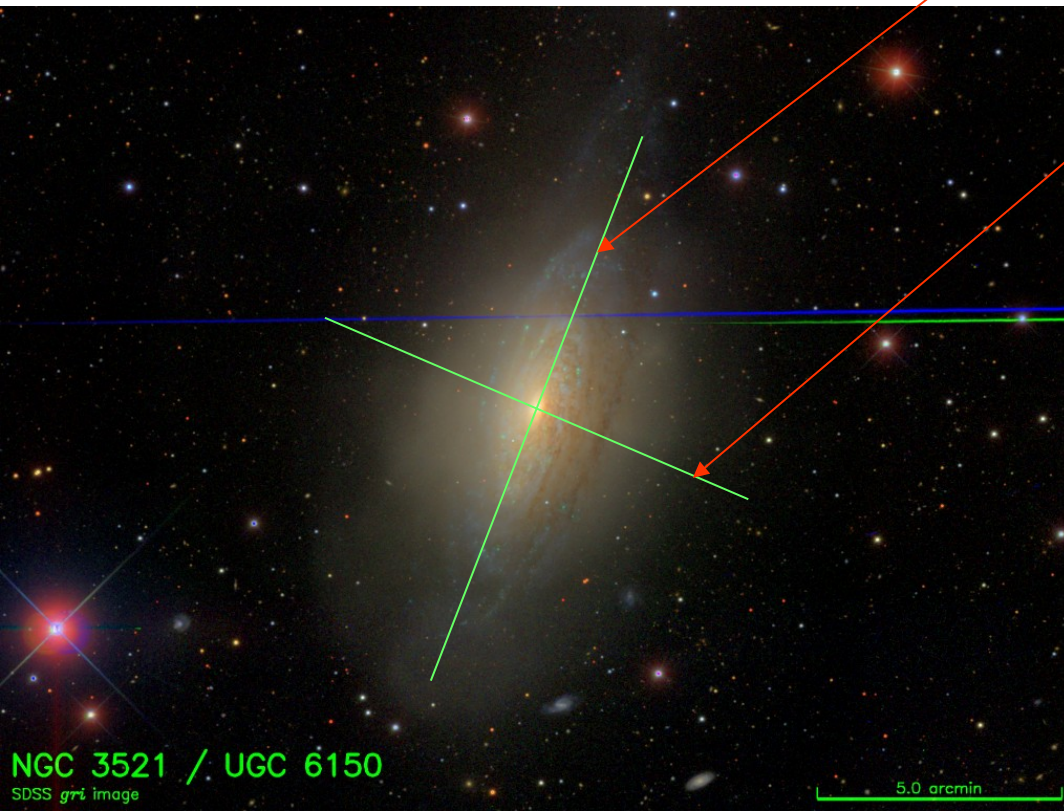


Buta, [1987, ApJS, 64,1](#)

Identifique estes picos na imagem.

D = 22,788 Mpc
 $1' \equiv 6,63$ Kpc

Um problema sempre presente nas galáxias espirais consiste em separar as contribuições individuais das duas principais componentes a partir da imagem observada. O método mais usado nos anos 80 (Kent 1985, ApJS, 59,115) consistia em ajustar simultaneamente os perfis ao longo dos eixos maior e menor e determinar as constantes estruturais envolvidas. No caso de NGC 3521, por exemplo, esse método funciona bem e observa-se que a componente bojo domina na região central e sua importância relativa ao disco decresce gradualmente com a distância ao centro.



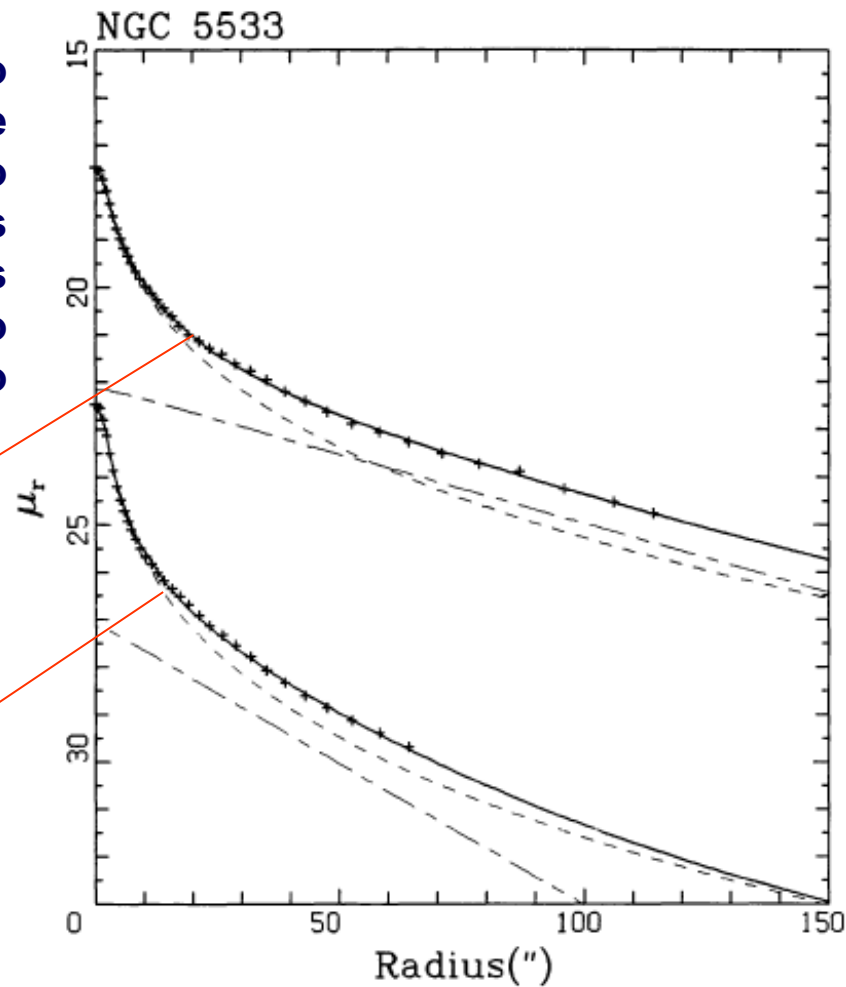
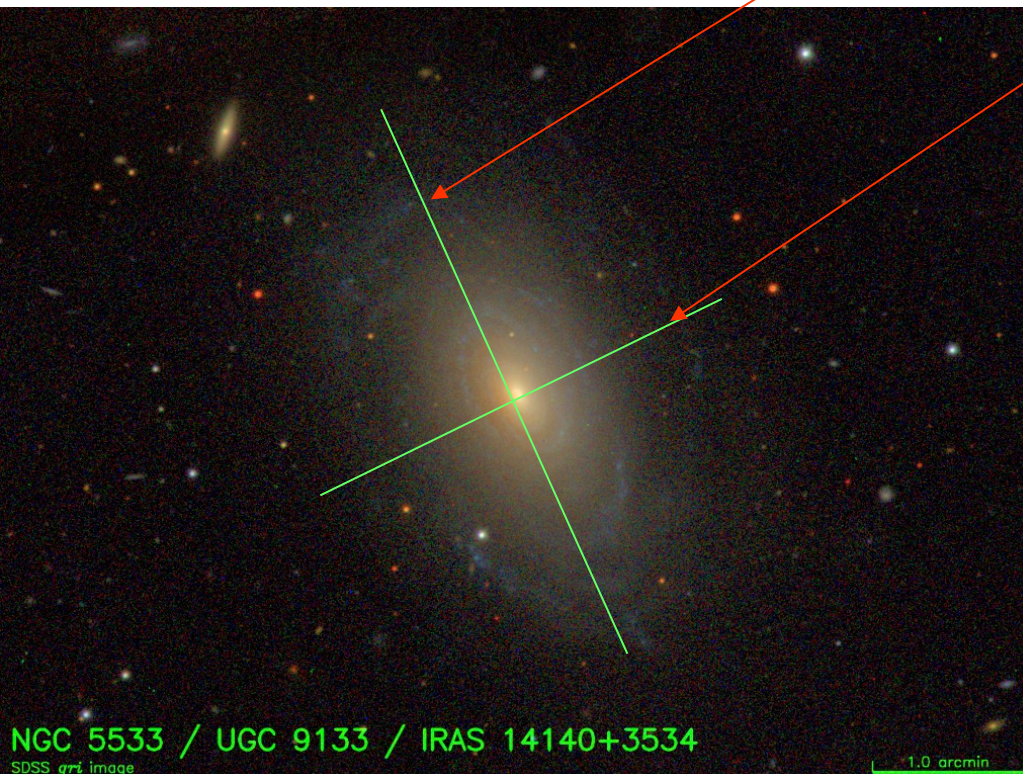
Kent, [1985, ApJS, 59, 115](#)

$D = 12,078$ Mpc

$1' \equiv 3,51$ Kpc

Observe como a razão $SBR_b(r)/SBR_d(r)$ muda ao longo do eixo maior visto no painel superior. Estime esta razão a uma distância de $150''$ do centro.

Já em objetos como NGC 5533 percebe-se que o disco e o bojo apresentam contribuições bastante comparáveis mesmo a grandes distâncias do centro. De alguma forma estas galáxias espirais conseguiram desenvolver bojos muito mais importantes. Será que nesses casos a solução encontrada para as componentes é de fato realista?

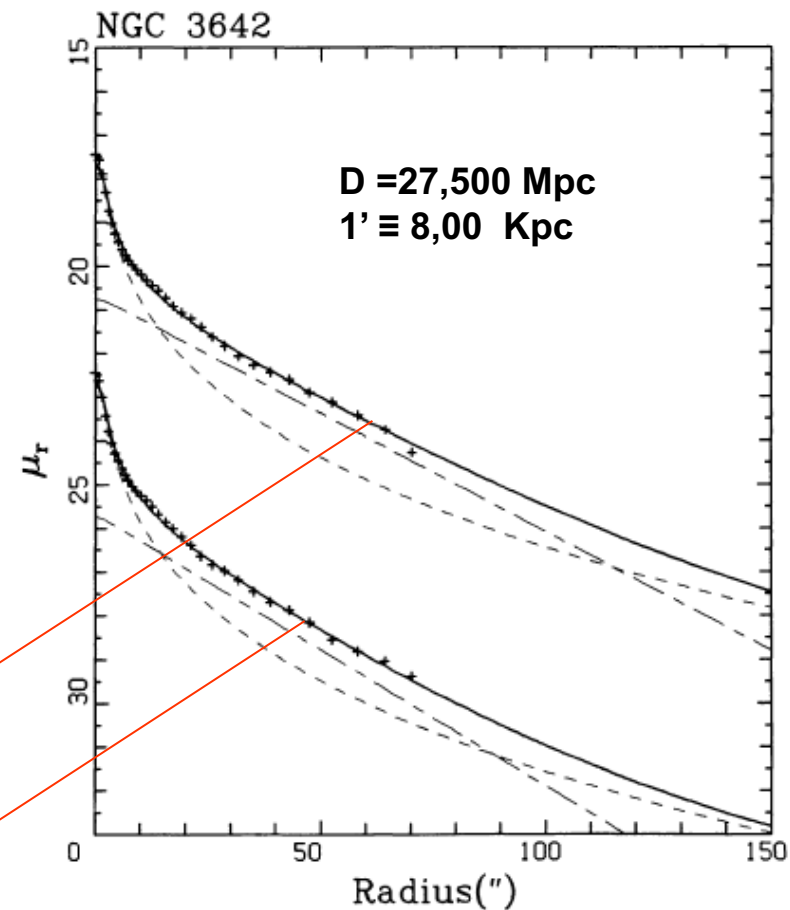
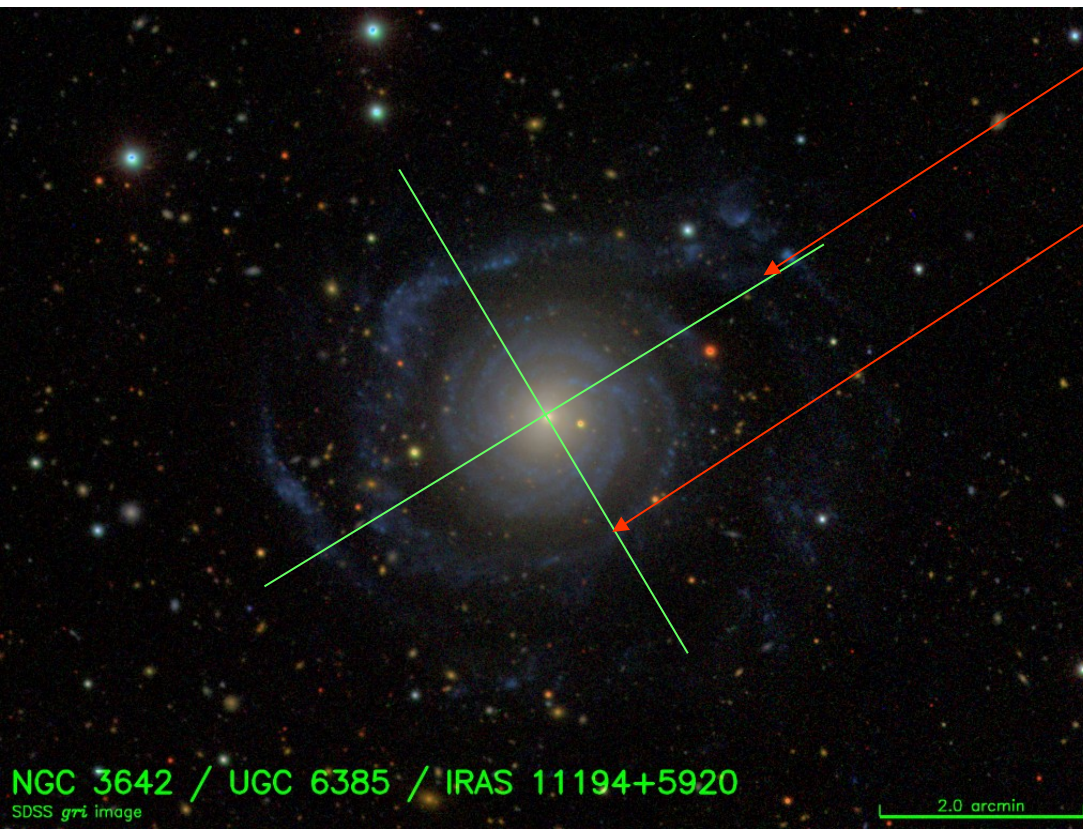


D = 51,220 Mpc
 $1' \equiv 14,9$ Kpc

Observe que a grandes distâncias do centro a estrutura associada ao bojo tem o mesmo comportamento do disco.

Em objetos como NGC 3642 parece que o bojo domina na região interna, cede importância ao disco na região intermediária e depois domina de novo na região externa.

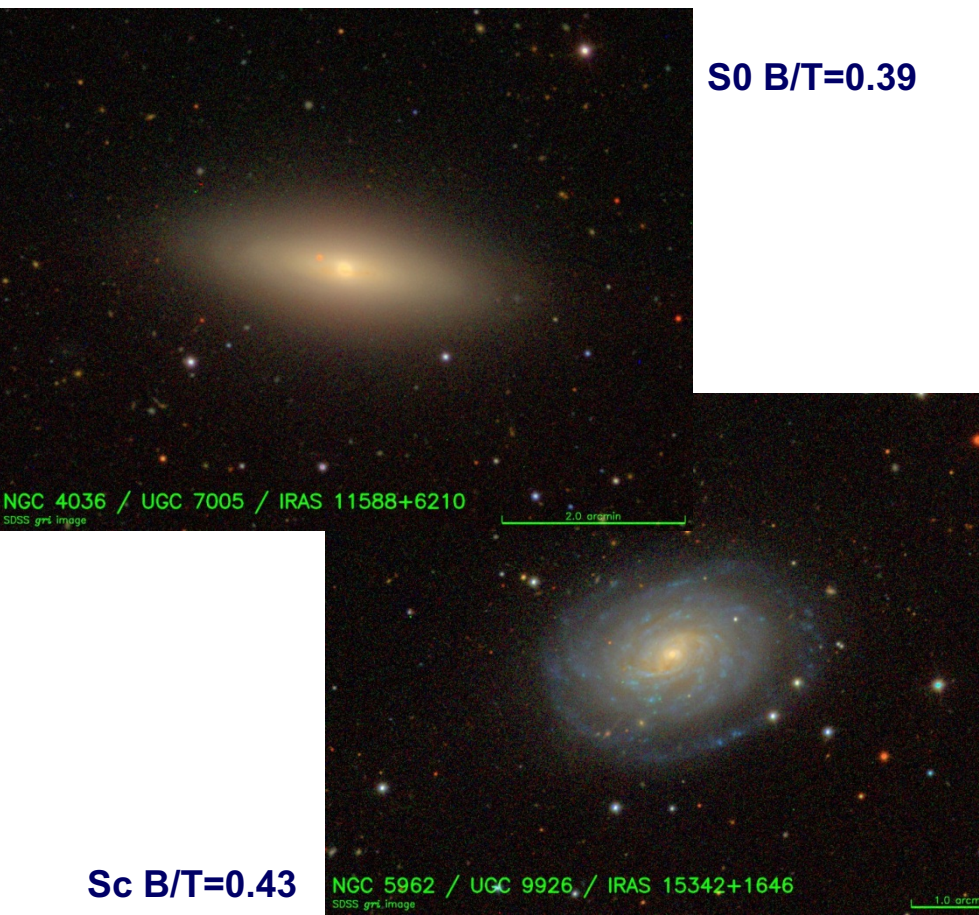
Observe que em grande medida esta conclusão é bastante dependente das premissas assumidas na construção do modelo.



Kent, 1985, ApJS, 59, 115

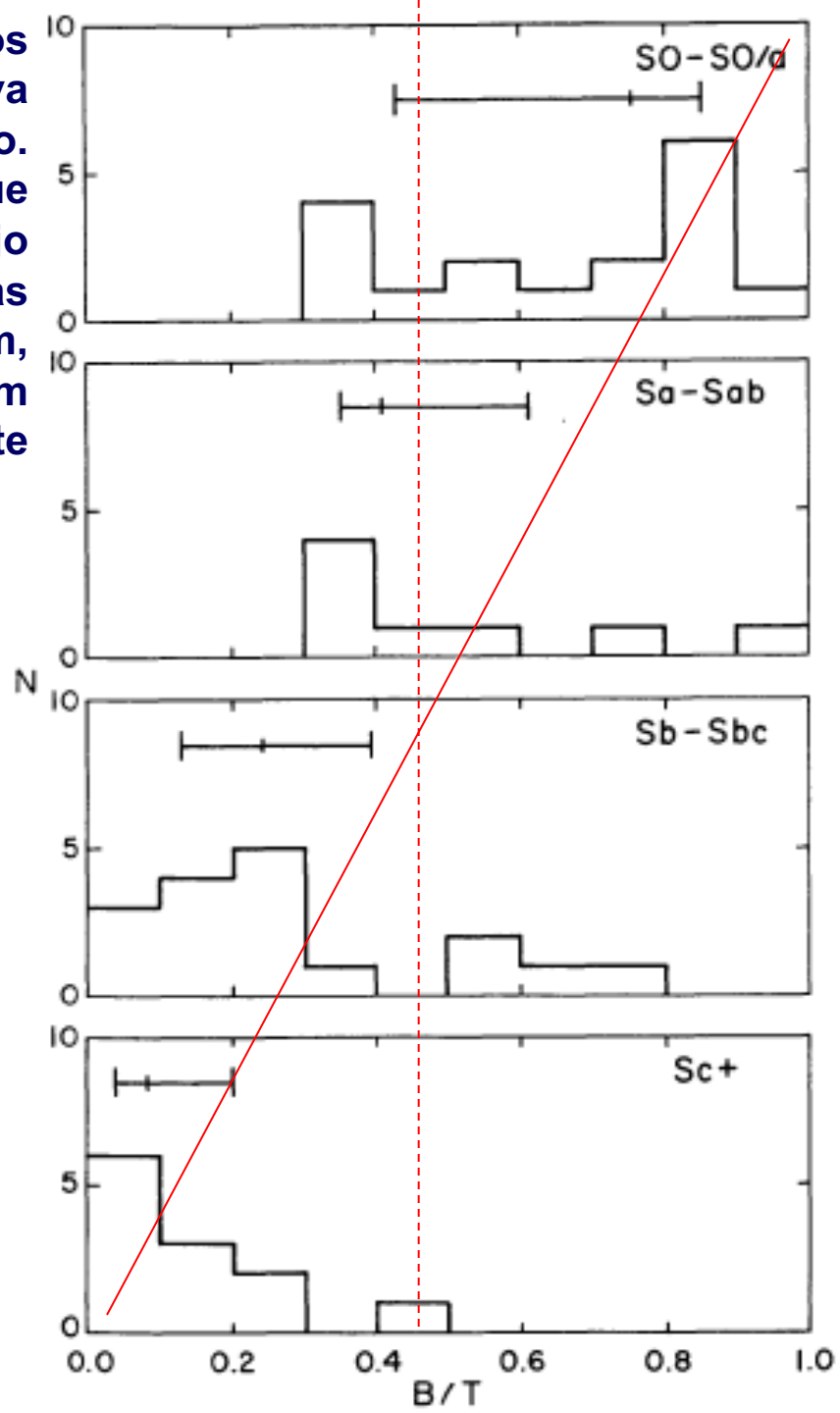
Observe que a grandes distâncias do centro a estrutura associada ao bojo tem o mesmo comportamento do disco.

De qualquer forma a análise fotométrica dos perfis possibilita pelo menos uma estimativa acurada das luminosidades do bojo e do disco. No histograma ao lado podemos observar que dentro dessa descrição a luminosidade do bojo perde importância à medida que passamos das S0's para as Sc's. No entanto, mesmo assim, ainda é possível encontrar galáxias S0's com pequenos bojos e Sc's com bojos relativamente grandes.



S0 B/T=0.39

Sc B/T=0.43



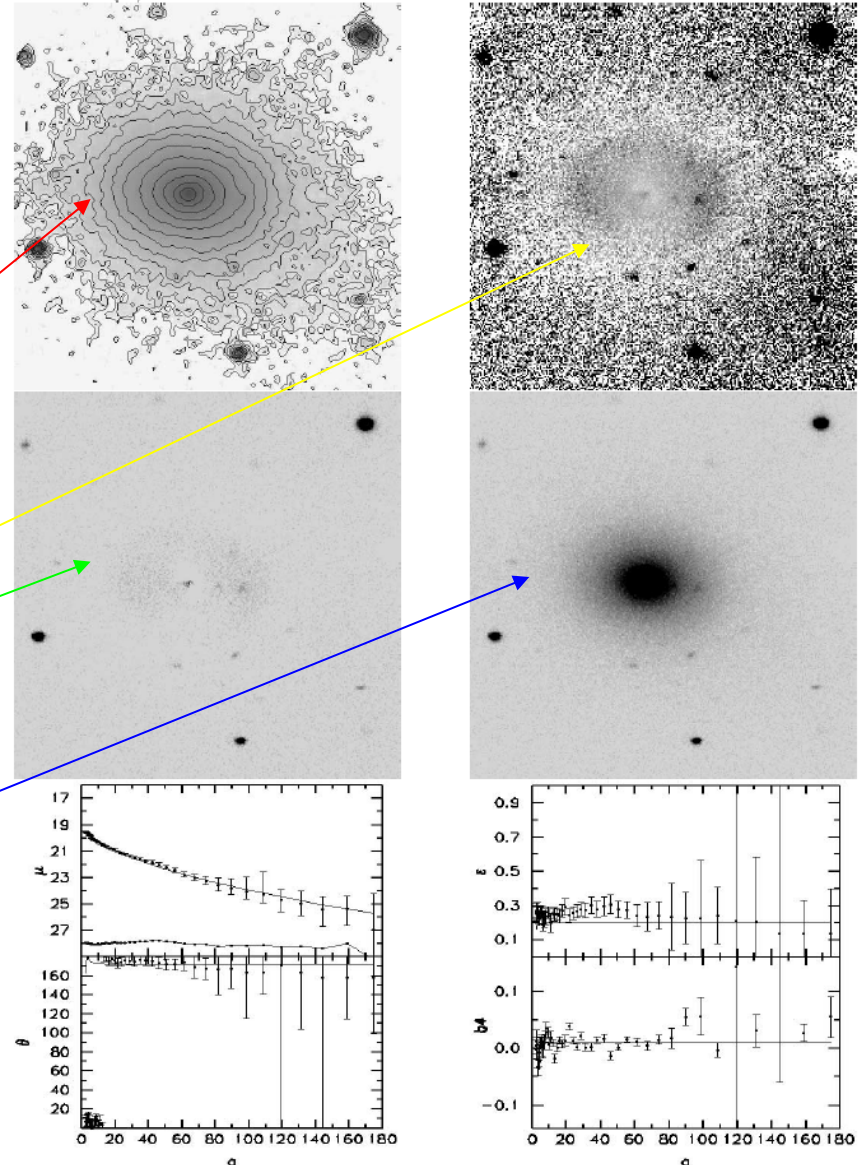
Mais recentemente a tendência é de considerar que os bojos sejam descritos por perfil fotométrico seguindo a expressão de Sérsic

$$\text{SBR}_b(r) = \text{SBR}_{b0} \exp[-(r/r_b)^{1/n}]$$

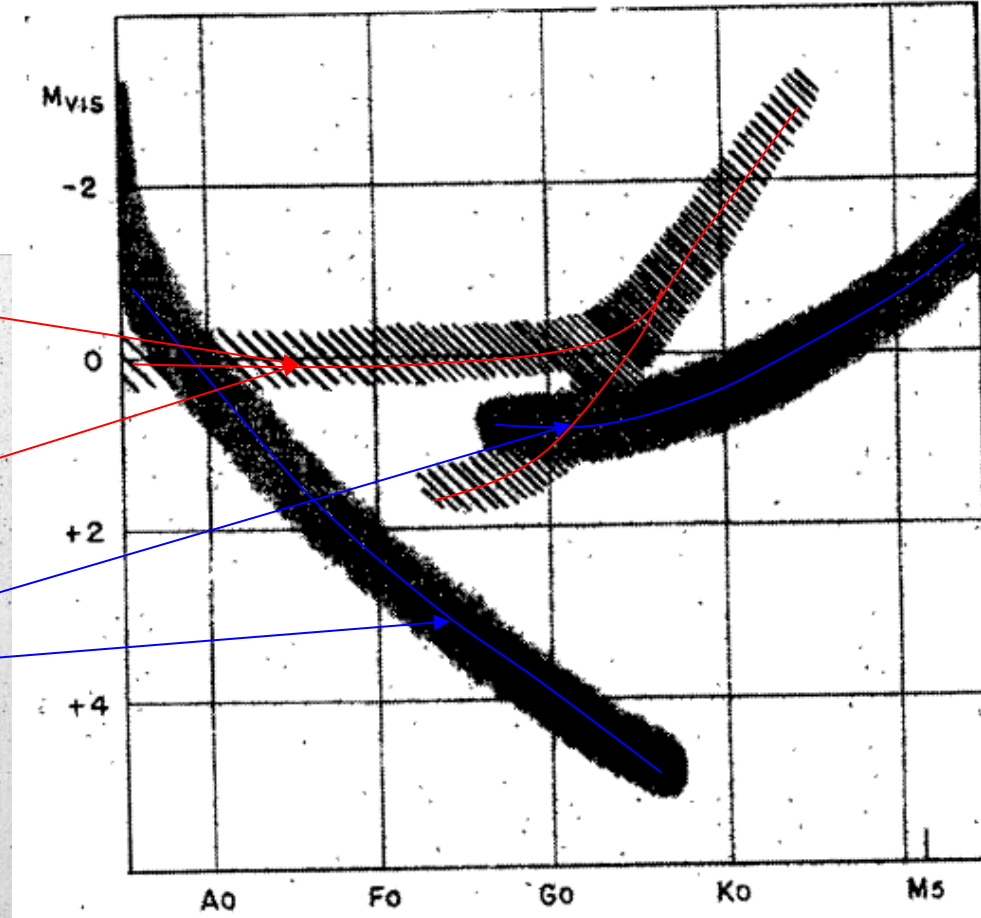
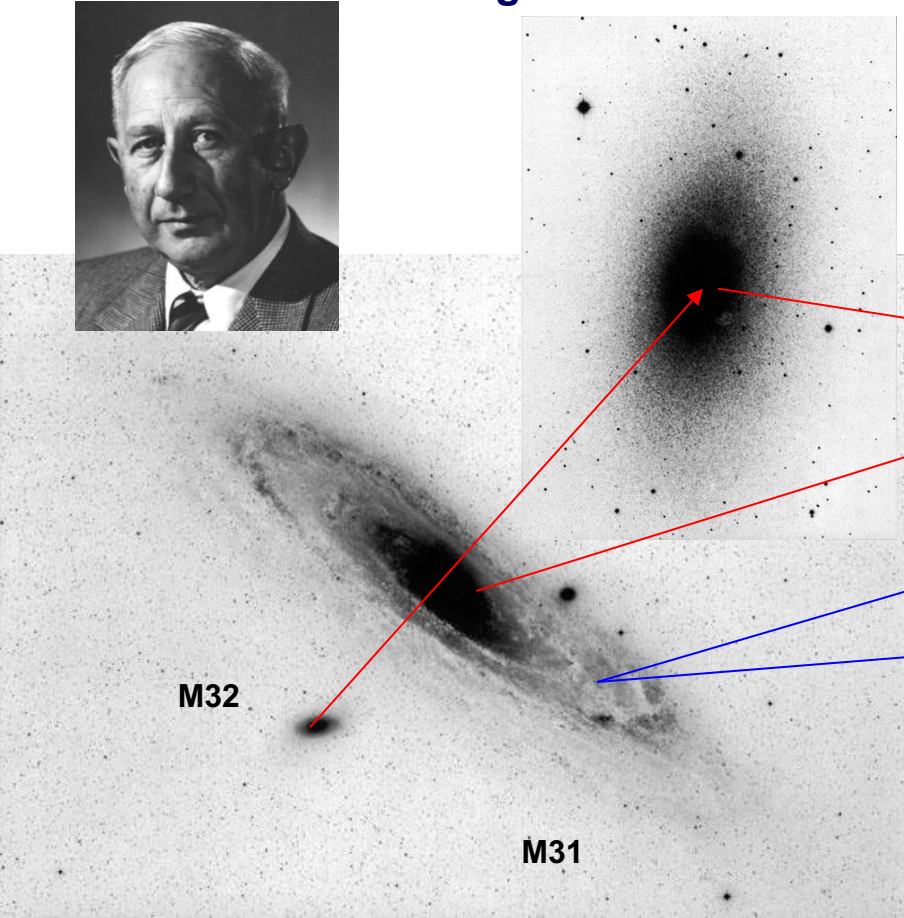
onde o índice n de Sérsic é uma generalização que incorpora tanto o perfil do disco ($n=1$) quanto o perfil de de Vaucouleurs ($n=4$).

Através de um processo de subtração da imagem modelada à imagem observada é possível construir uma imagem do disco e bojo modelados e uma imagem residual. Desta forma é possível verificar se existem ou não componentes fotométricas adicionais em cada objeto.

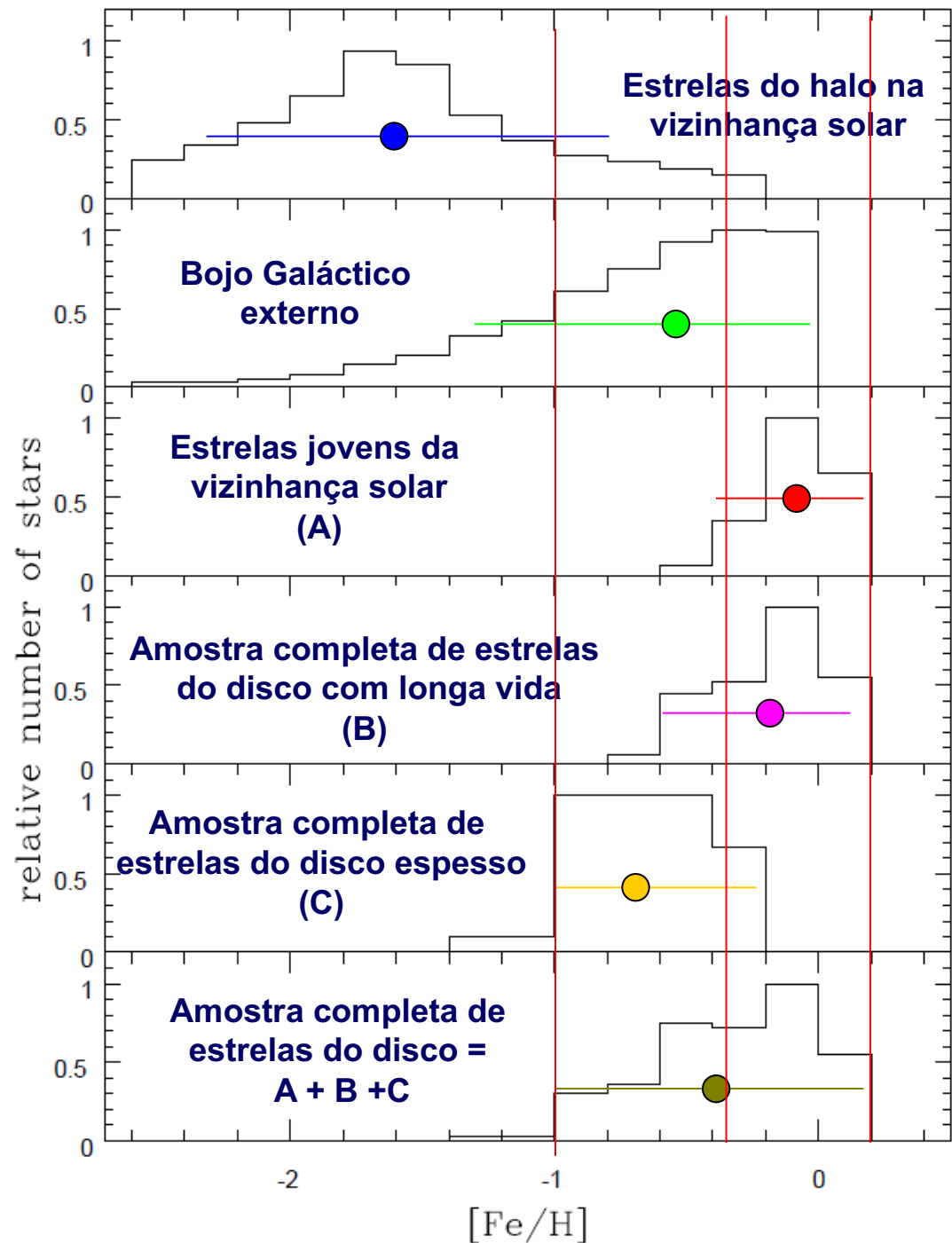
II1919 - S0(rs) - 154"



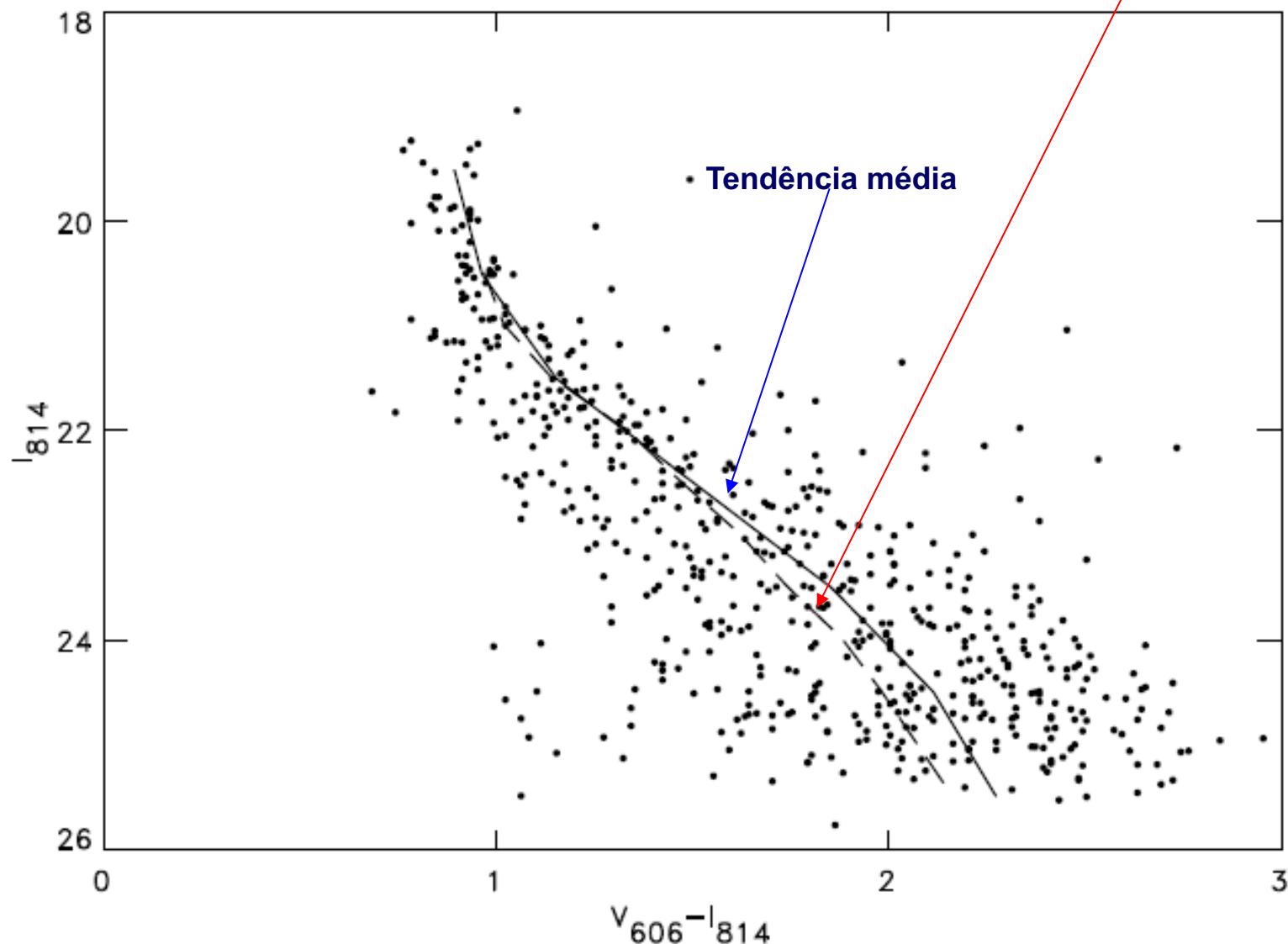
É importante salientar que, apesar dos problemas dos critérios de separação bojo/disco, o bojo não é simplesmente uma simples saliência perceptível através do perfil de brilho. Trata-se de uma região realmente distinta do disco. A população estelar do bojo, conforme salientado por Walter Baade ([1944, ApJ, 100, 137](#)) é diferente da observada no disco. Por isso, ao estudar a população estelar de M31 e M32, ele introduziu a nomenclatura de Pop I para o disco, com uma população estelar do tipo jovem, e Pop II para a região esferoidal mais o halo galáctico, com uma população estelar mais semelhante à dos aglomerados globulares. O bojo certamente teve uma história de formação distinta do disco e por isso é preciso compreender esta distinção para entender como se formaram as galáxias.



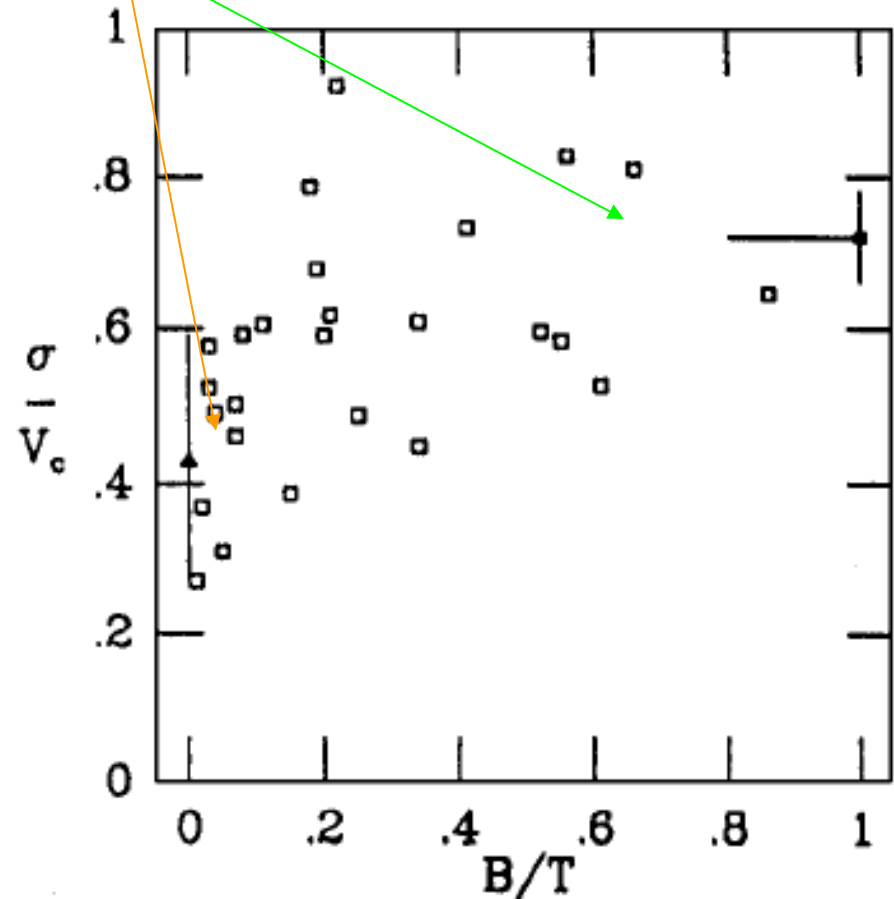
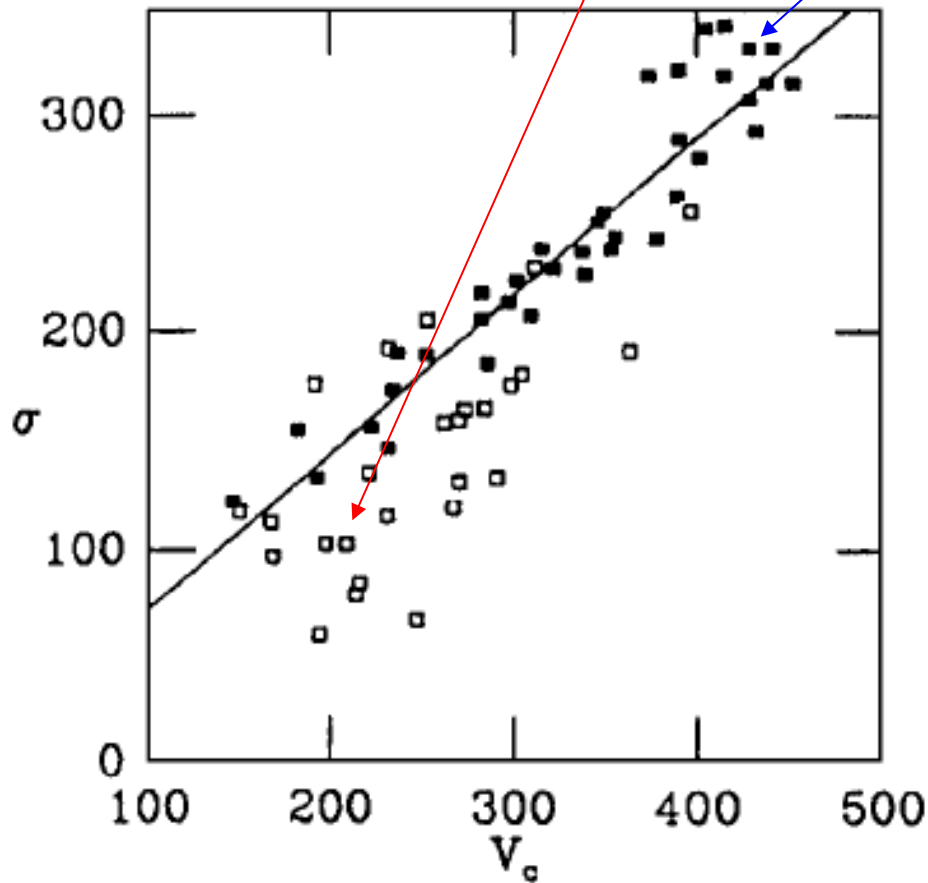
Atualmente acredita-se que a distinção, em termos de população estelar, entre bojo, disco e halo é bem mais complexa do que acreditava Baade. O exemplo mais patente desta complexidade é a própria Via Láctea (Wise et al, [1997, ARAA, 35, 637](#)). É correto que as estrelas jovens do disco sejam bem mais ricas em metais que a média das estrelas do halo, que no entanto apresentam uma dispersão bem maior contendo algumas estrelas que se comparam aquelas do disco. Esta distinção se torna ainda mais confusa quando comparamos o disco jovem com o bojo. Mesmo no caso do disco seria um equívoco considerá-lo como uma população homogênea única. O que vemos é o resultado final de uma evolução que ocorreu com um certo grau de interdependência nestas componentes da Galáxia.



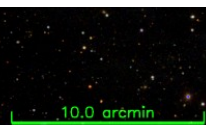
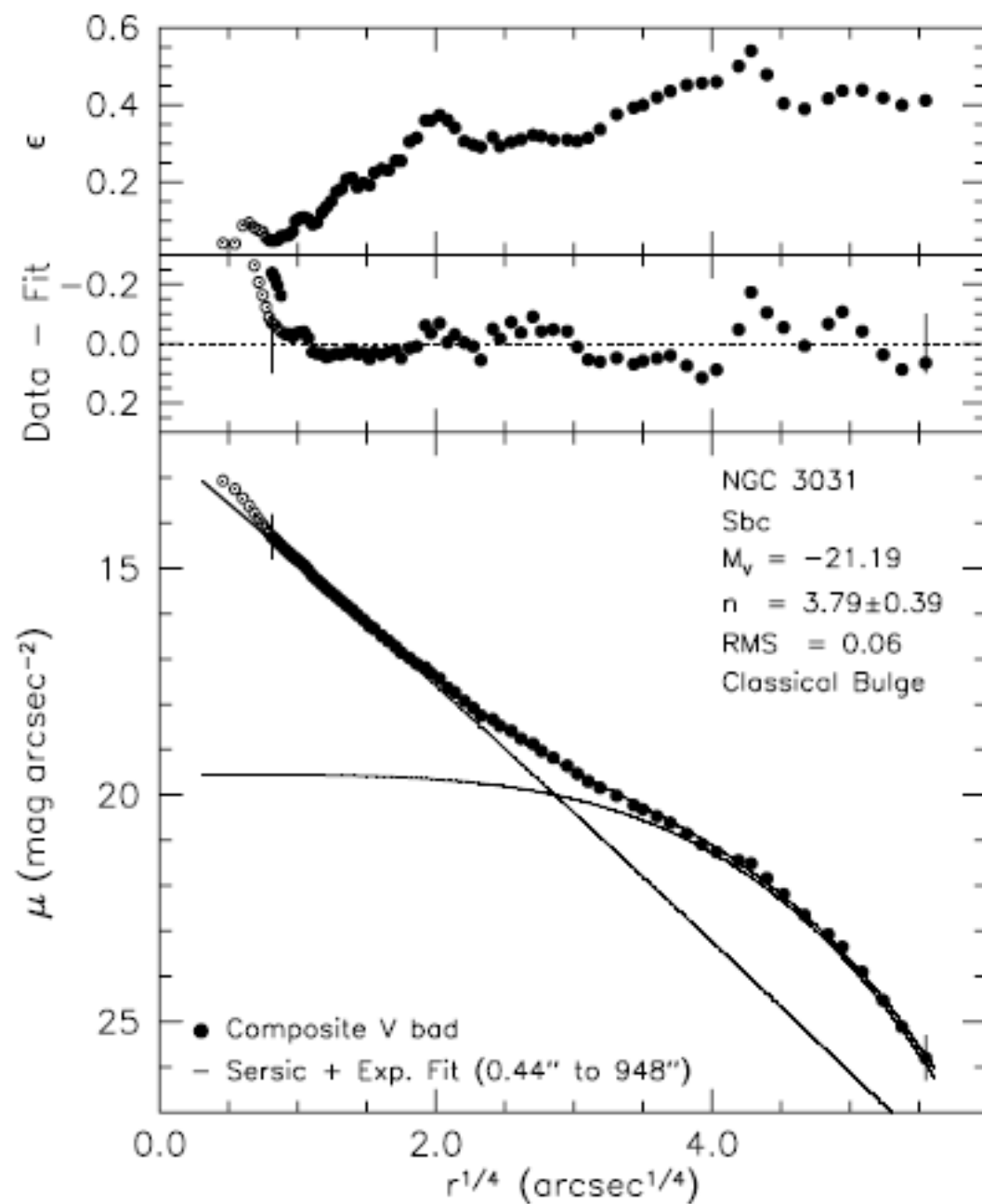
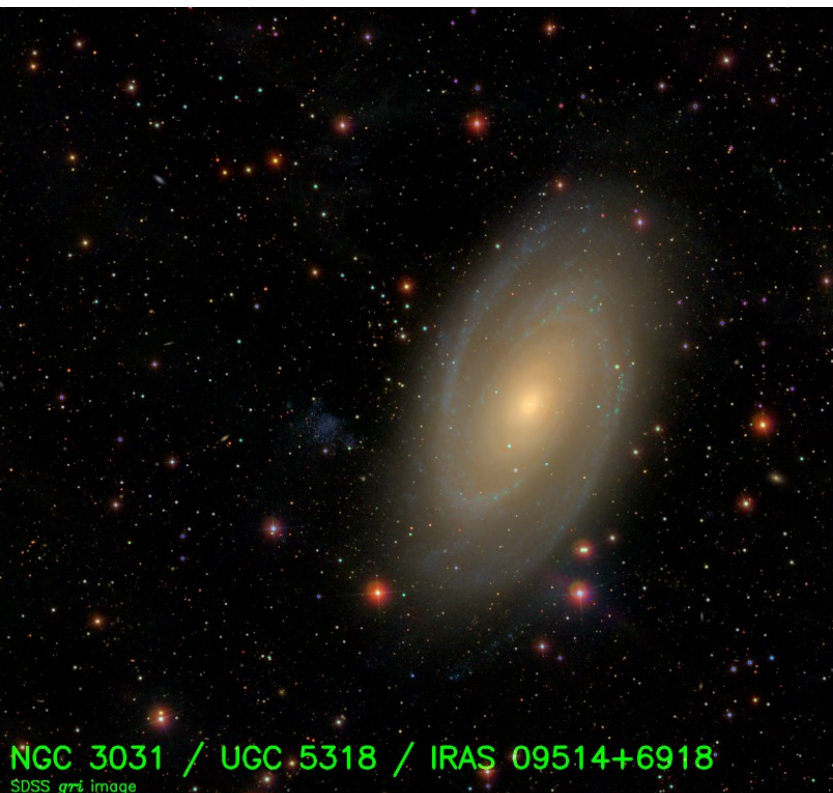
Do ponto de vista evolutivo o diagrama HR das estrelas do bojo é semelhante àquele do aglomerado 47Tuc mas a dispersão é enorme sendo provavelmente afetada pela dispersão em idade e avermelhamento interestelar na direção observada do bojo. Uma estimativa grosseira da idade seria algo em torno de 12 Ganos ($z \sim 3.7 \Lambda\text{CDM}$).



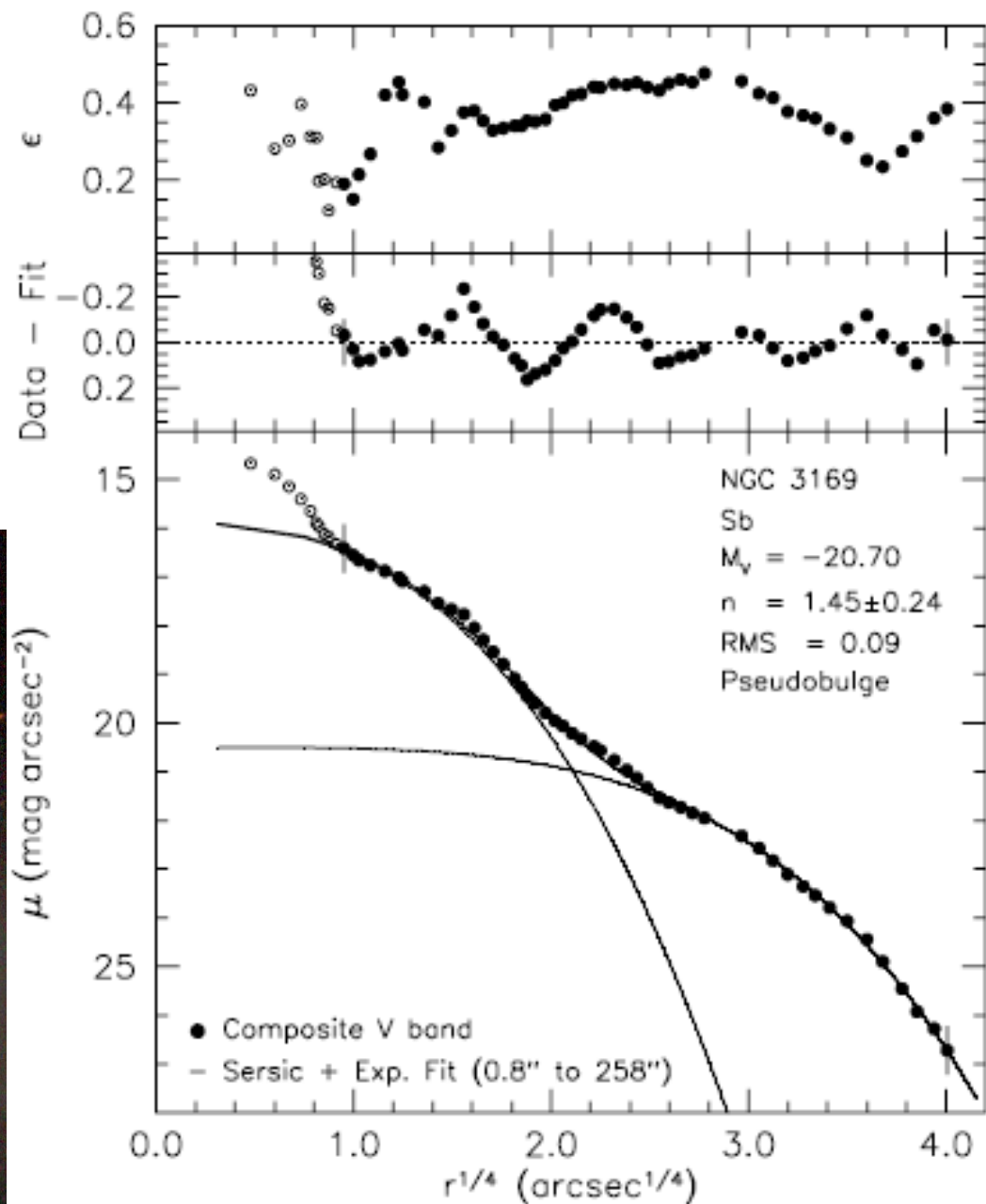
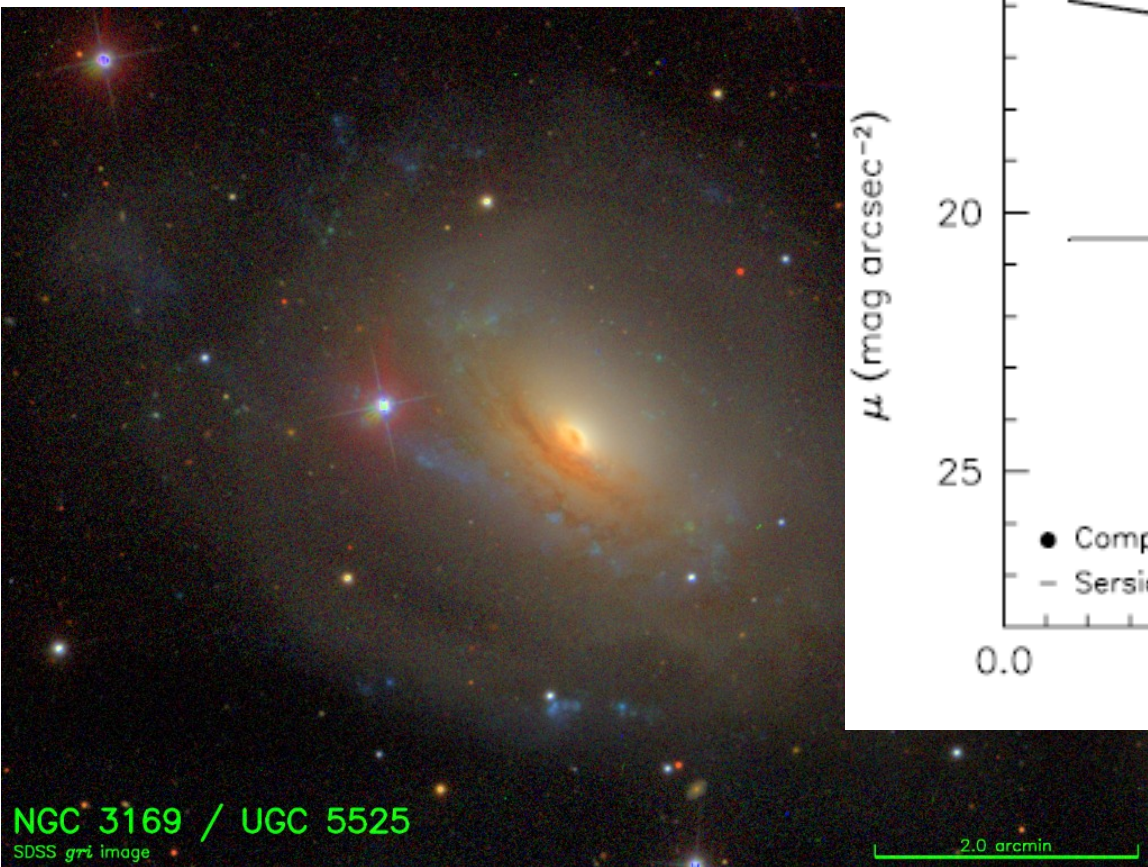
No caso das galáxias mais afastadas as informações disponíveis são bem menos detalhadas mas ainda assim algumas tendências podem ser percebidas. A relação da dispersão de velocidades dos bojos com a velocidade circular máxima dos halos de matéria escura é distinta daquela observada nas galáxias elípticas (Franx, 1993, [IAU, 153, 243](#)). Por um lado os grandes bojos apresentam um maior suporte devido à dispersão de velocidades. Já os pequenos bojos apresentam um suporte dinâmico parecido com os discos.



Mais recentemente percebeu-se que provavelmente os bojos não podem ser incluídos em uma única categoria geral. Existem aqueles bojos cujo perfil de brilho se assemelha mais ao de uma galáxia elíptica ($n \sim 2-4$) e que são chamados de Bojos Clássicos. Um exemplo desta classe de bojo é representado pelo objeto NGC 3031 ([Fisher & Dory, 2008, AJ, 136, 773](#)).



E existem os Pseudo-Bojos cujo perfil de brilho se assemelha mais aos discos ($n \sim 1-2$). Possivelmente estas estruturas foram sendo gradualmente construídas a partir do fluxo de material para a região central dos objetos. Os bojos clássicos ao contrário devem ter sido formado no colapso inicial da protogaláxia.

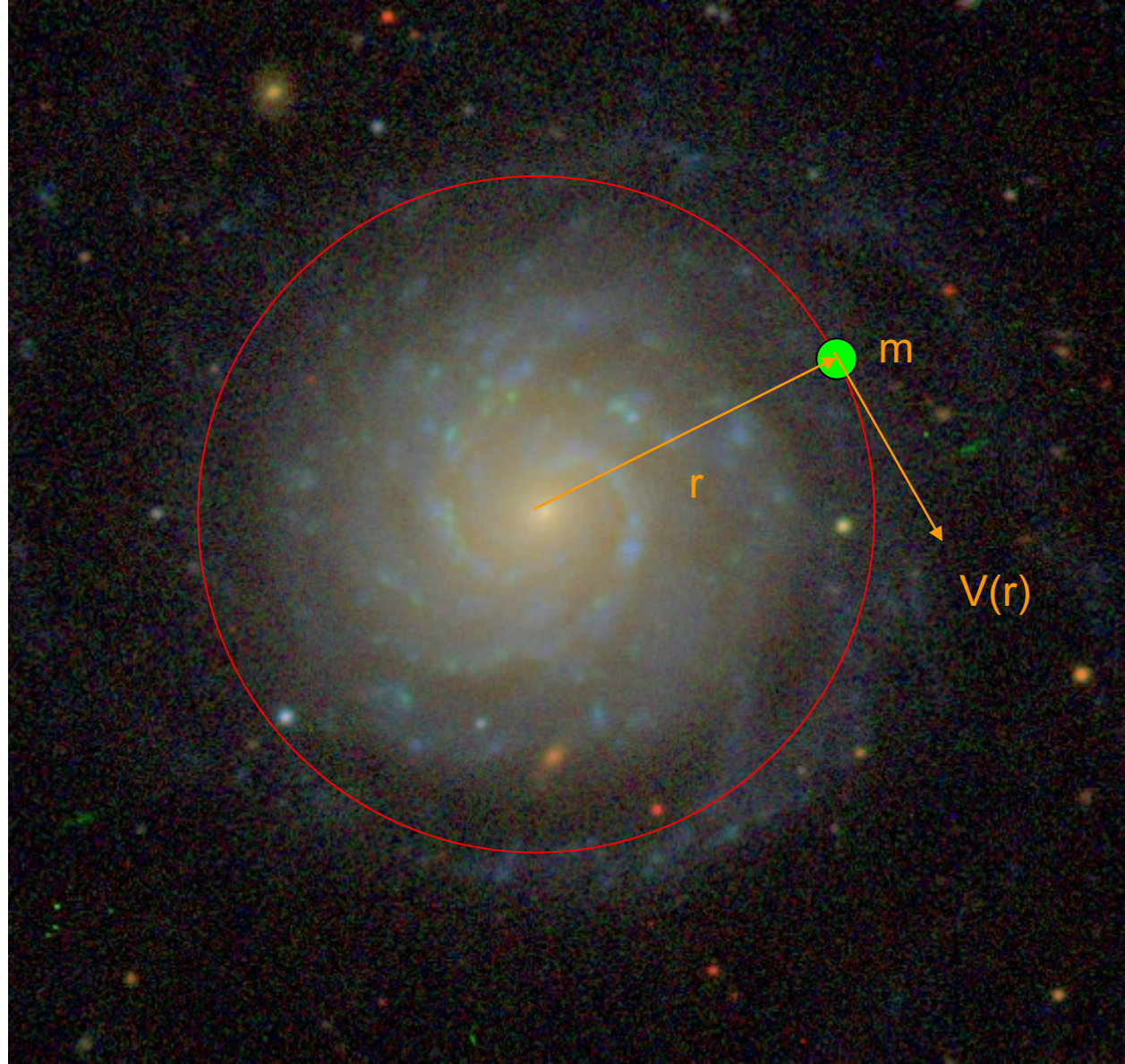


4.2 Curva de Rotação

A análise da curva de rotação das galáxias espirais é uma das ferramentas mais importantes para compreendermos o comportamento da distribuição de massa nesses objetos. O fundamento é que o disco apresenta uma simetria bastante próxima de circular e o gás, tendo um comportamento colisional, é compelido a seguir uma órbita muito próxima da órbita circular permitida pelo equilíbrio newtoniano,

$$V^2(r) = GM(r)/r$$

sendo $M(r)$ a massa total interior ao raio r .



Historicamente a aproximação newtoniana foi desenvolvida a partir da análise do sistema solar, mas na sua validade tem sido verificada estar correta mesmo em escalas bem maiores. No sistema solar, por exemplo, basta conhecer a velocidade circular orbital e a distância ao Sol. Utilizando-se a condição de equilíbrio dinâmico

$$V(r)^2 = GM_{\odot}/r$$

Considerando-se que praticamente toda a massa esteja concentrada no Sol obtemos a conhecida lei de Kepler segundo a qual a velocidade orbital decresce com o inverso da raiz quadrada da distância.

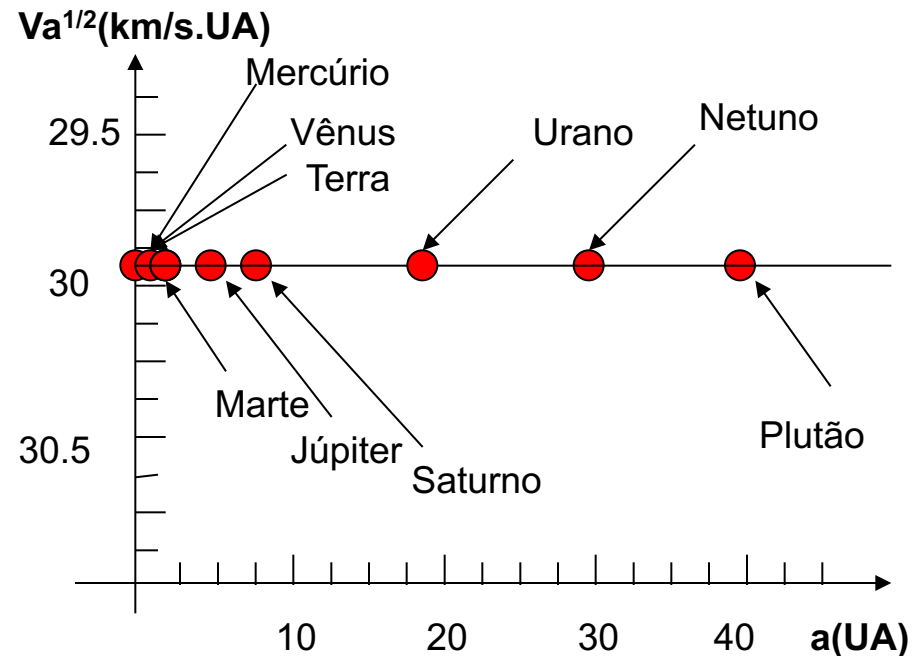
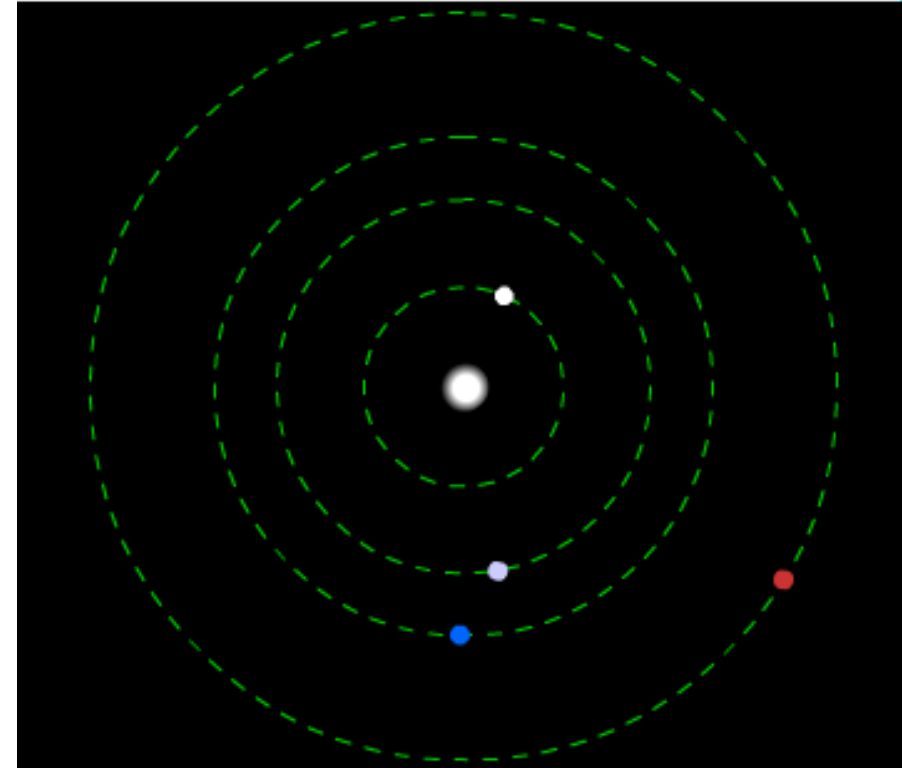
Use os dados planetários abaixo para comprovar a exatidão desta fórmula.

Júpiter $a = 778 \times 10^6$ km $P = 11.86$ anos

Saturno $a = 1427 \times 10^6$ km $P = 83.75$ anos

Urano $a = 2871 \times 10^6$ km $P = 163.7$ anos

$M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33}$ g



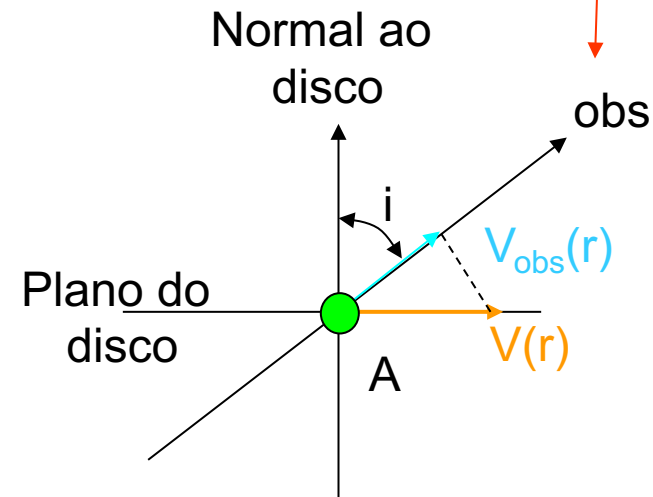
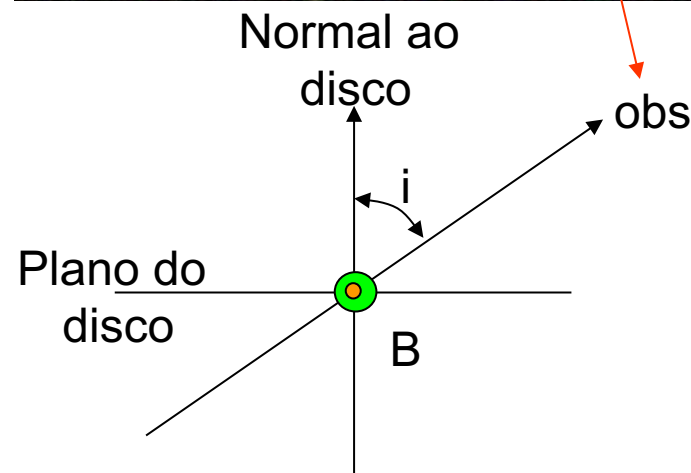
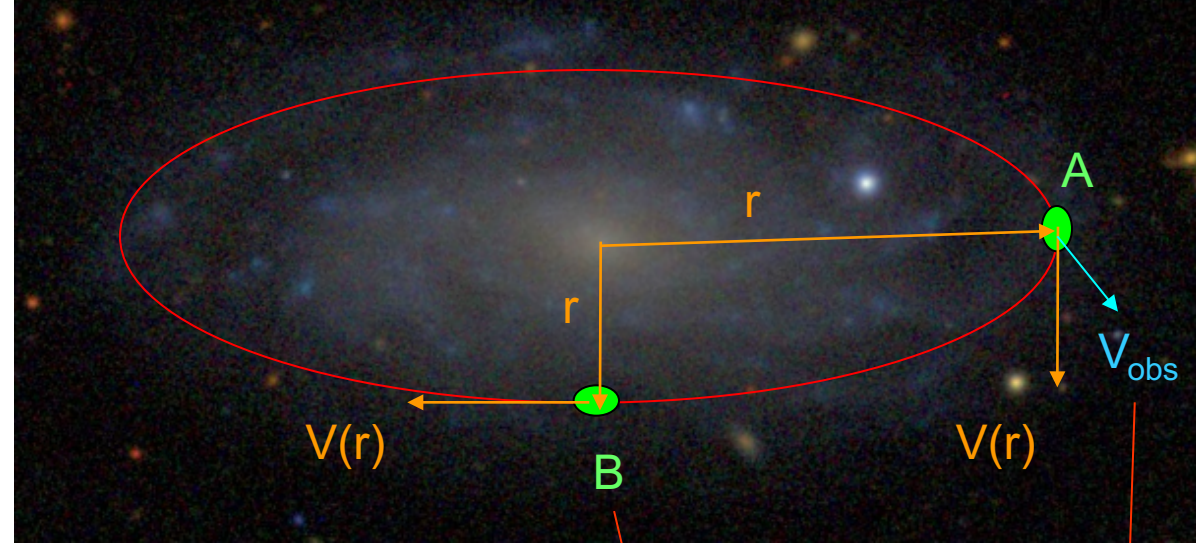
Normalmente os discos são observados ao longo de uma determinada inclinação em relação à linha de visada. Na hipótese de disco fino, vista anteriormente, a razão entre os semi-eixos menor e maior é

$$b/a = \cos i$$

Podemos observar que ao passar pelo ponto A, no semi-eixo maior, a velocidade do gás estará inclinada em relação à linha de visada por um ângulo $90^\circ - i$ e a sua componente na direção do observador será

$$V_{\text{obs}}(r) = V(r) \sin i$$

e ao passar pelo ponto B ao longo do semi-eixo menor o vetor $V(r)$ será ortogonal à linha de visada e $V_{\text{obs}}(r) = 0$. Por esse motivo as observações cinemáticas são realizadas ao longo do semi-eixo maior.



$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 v/c$$

Esquema de um espectrógrafo de fenda longa

Esquema de um espectrógrafo de fenda longa

A cada variação de $1 \text{ \AA}$ em $H\alpha$ qual deve ser o acréscimo em velocidade?

Diagrama de um espectrógrafo de fenda longa. A luz entra por uma fenda no plano focal, passa por um dispersor (prisma) e é projetada na imagem. A fenda tem pontos A, N e B. A imagem mostra as linhas espectrais correspondentes λ_A , λ_N e λ_B . O eixo x indica a direção da dispersão.

Uma das primeiras detecções deste efeito foi realizada por V. Slipher em 1914 ([Loewell Obs. Bull. 62, 66](#)) ao observar a galáxia NGC 4594 também conhecida como a galáxia Sombrero. Mas somente a partir dos anos de 1960 é que espectrógrafos e emulsões fotográficas mais eficientes tornaram este tipo de observação mais comum e preciso.

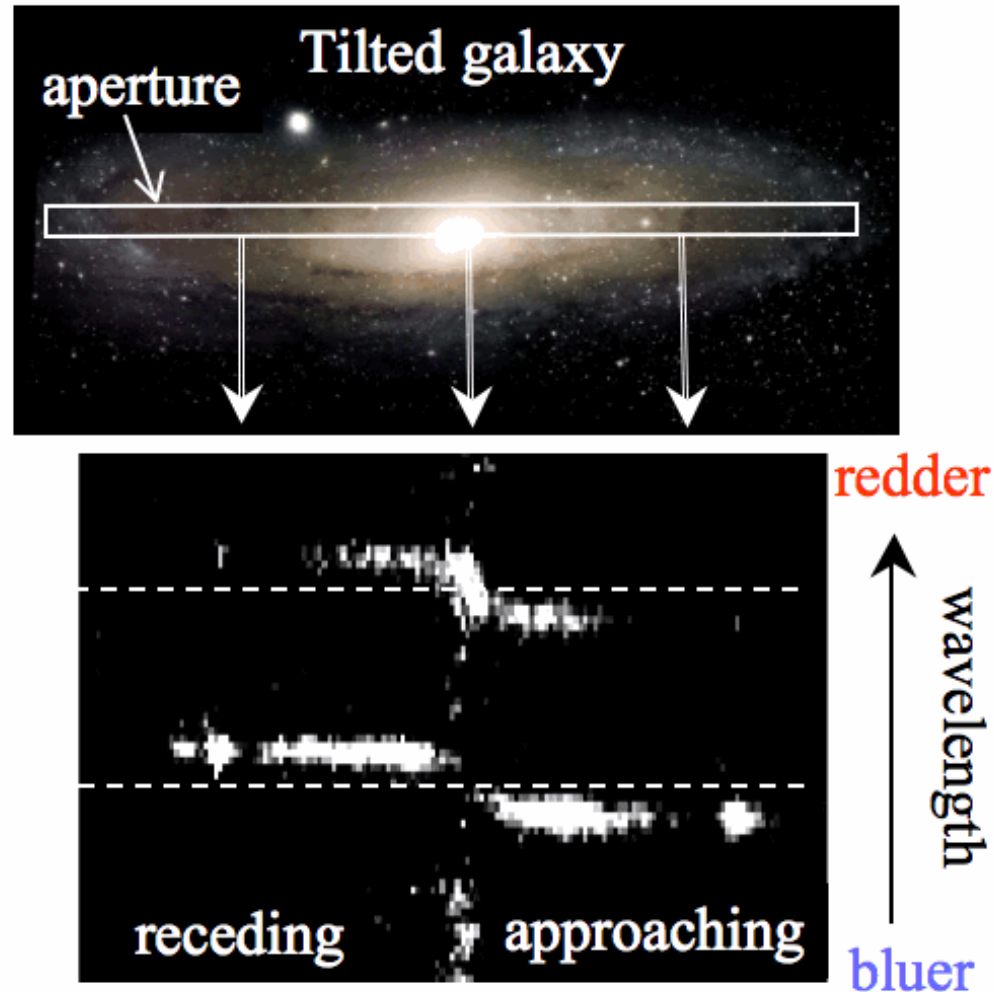
A spectrogram of the Virgo Nebula, N. G. C. 4594, made a year ago showed the nebular lines to be inclined. A second plate was immediately undertaken but failed, through exasperating circumstances, of a sufficient exposure—although it verified as far as it went, the inclination; and I resolved to withhold any announcement until a second satisfactory plate might be obtained. This observation is now available and fully confirms those of a year ago. The inclination of the lines which is analogous to that produced by the diurnal rotation of a planet, is unmistakable and leads one directly to the conclusion that the nebula is rotating about an axis. Although from the time of Laplace it has been thought that nebulae rotate, this actual observation of the rotation is almost as unexpected as was the discovery that they possessed enormously high radial velocities.



Nos anos de 1960-1970 esta técnica de observar o campo de velocidade através de observações espectroscópicas ao longo do semi-eixo maior, na região da linha $H\alpha + HII$ foi utilizada por diversos autores. Graças a espectrógrafos mais eficientes foi possível observar a cinemática do gás em regiões cada vez mais afastadas.



Vera Rubin measuring galaxy rotation curves (~1970)



Resulting spectrum of light within aperture

A expectativa existente na época, baseada nos fundamentos da física newtoniana, é que deveriam ser observadas duas situações limites:

1. Na região próxima ao centro das galáxias a densidade de massa deveria convergir para um valor ρ_0 representativo da densidade de massa central. Portanto, a massa total no interior de um raio r deveria ser

$$M(r) \approx \frac{4}{3}\pi \rho_0 r^3$$

e neste caso o campo de velocidade seria dado pela aproximação

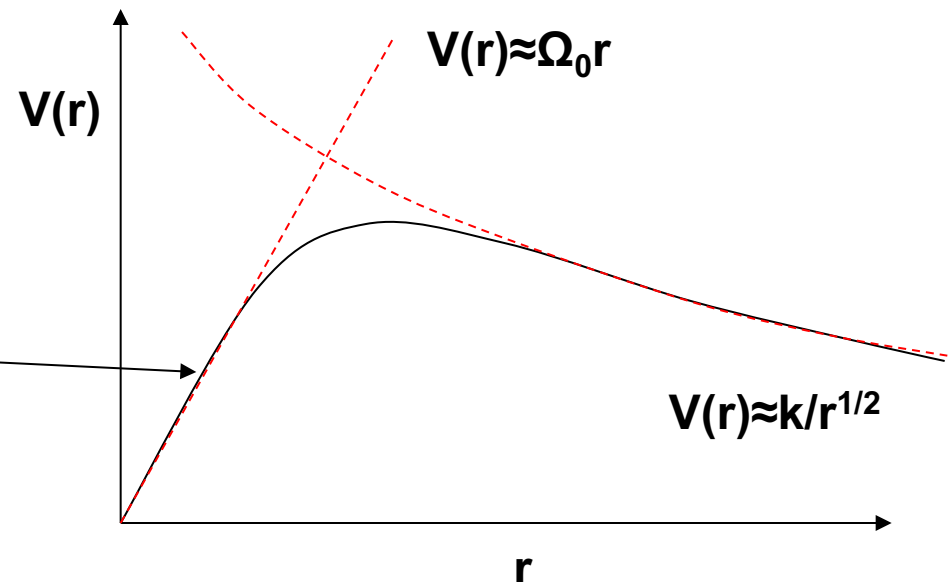
$$V(r) \approx (4\pi/3 G\rho_0)^{1/2} r$$

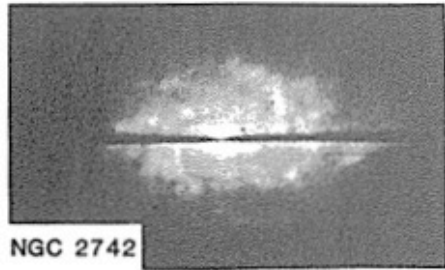
2. Ao nos afastarmos gradualmente da região central atingimos uma região em que praticamente toda a massa já deveria ter sido amostrada e neste caso $M(r) \approx M_{\text{Tot}}$,

$$V(r) \approx (GM_{\text{Tot}})^{1/2} / r^{1/2}$$

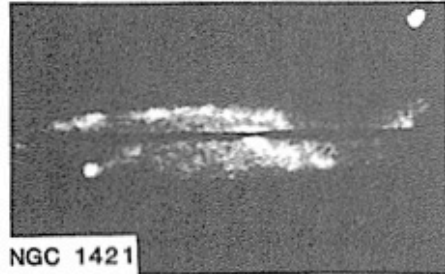
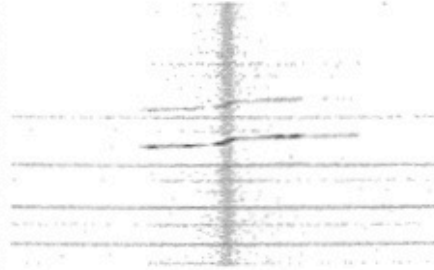
conhecida como a região kepleriana.

Como seria modificada a fórmula da aproximação central pela presença de um buraco negro massivo no núcleo das galáxias? Que tipo de distorção seria observada na curva de rotação?

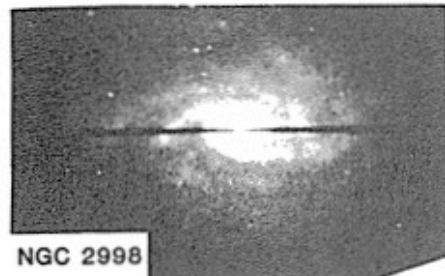
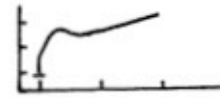
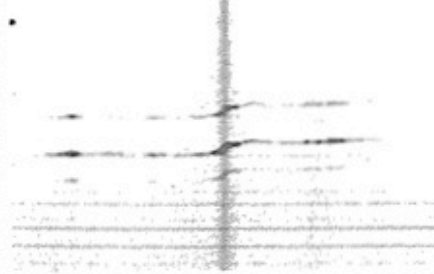




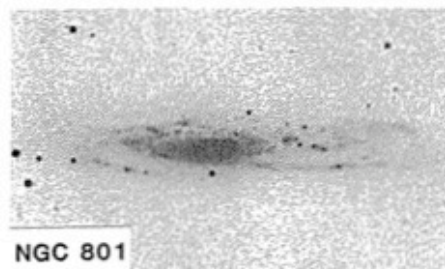
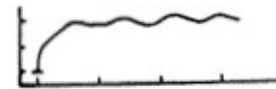
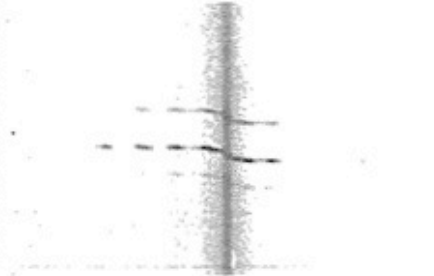
NGC 2742



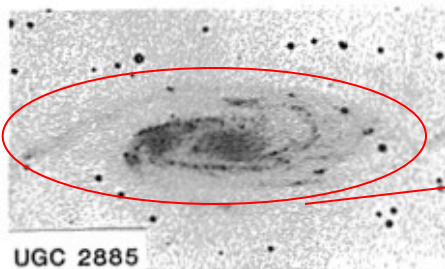
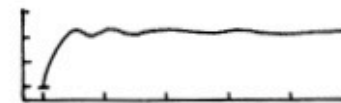
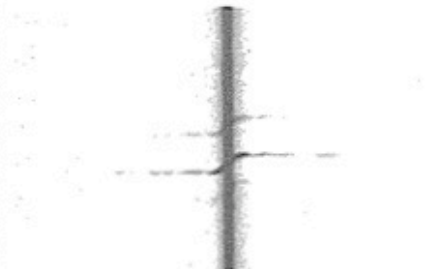
NGC 1421



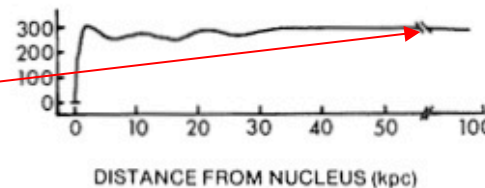
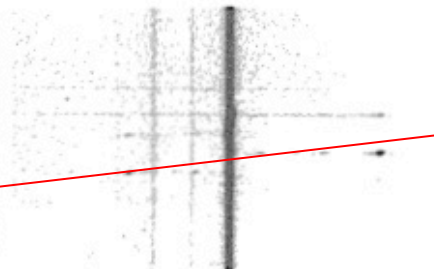
NGC 2998



NGC 801



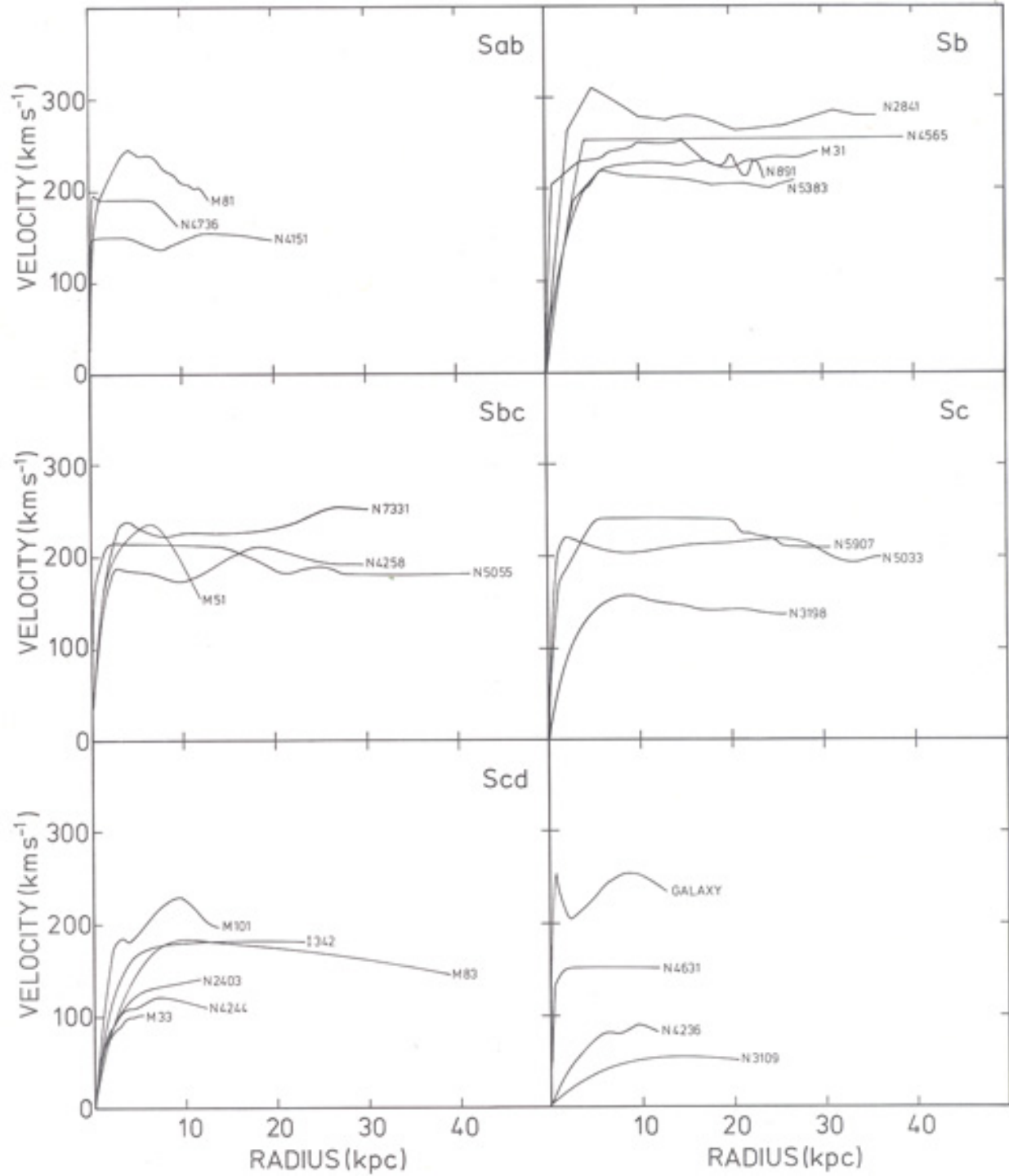
UGC 2885



VELOCITY IN PLANE OF GALAXY (km s^{-1})

Gradualmente, no entanto, os dados foram tratando de desmentir esta expectativa inicial. Realmente na região central a curva de rotação é aproximadamente proporcional ao raio. Mas na região externa a velocidade de rotação se mantém constante teimando em não atingir o limite kepleriano. Este resultado é tanto mais surpreendente se considerarmos que praticamente toda a imagem visível é amostrada nestas observações!

A situação é ainda mais constrangedora se considerarmos que atualmente observam-se objetos em que a curva de rotação se mantém praticamente constante em distância da ordem de 2-3 vezes o seu raio óptico! Isto mostra que mesmo não existindo estrelas nestas regiões mais afastadas ainda deve existir ali algum material contribuindo para a massa total. Veja por exemplo as curvas de rotação ao lado, obtidas por observações na linha de 21cm, extraídas de Bosma (1978, PhD thesis).



4.3 Matéria Escura

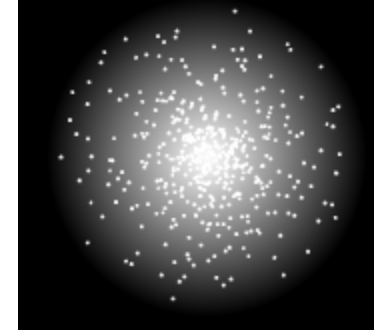
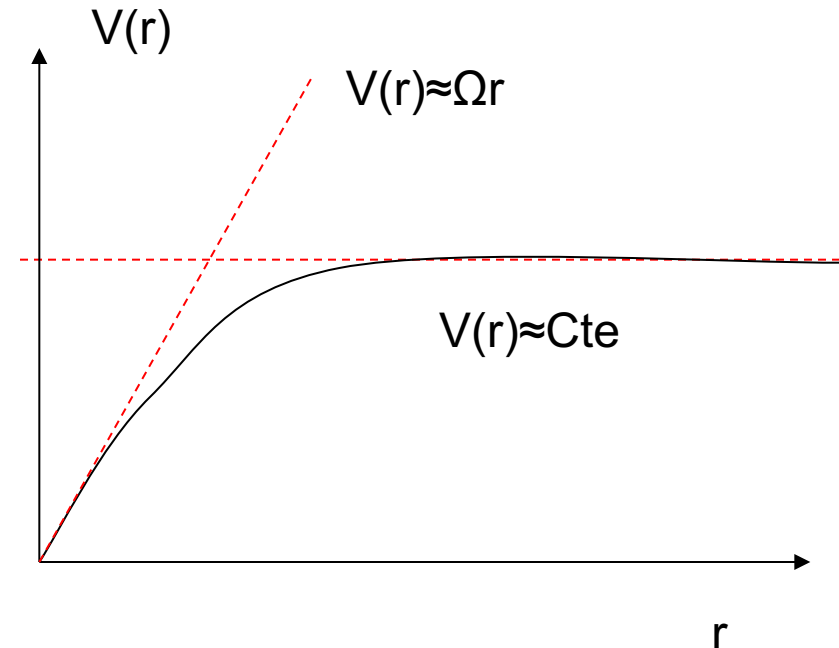
A observação de que a velocidade circular de rotação se mantém constante nos permite inferir que a massa no interior de um dado raio deve necessariamente crescer proporcionalmente ao próprio raio já que

$$M(r) = V^2 r / G$$

ou, dito de outra forma, este resultado implica que a densidade local de massa a uma distância r deve se comportar com uma relação inversamente proporcional ao quadrado do raio

$$\rho(r) = 3/4\pi V^2 / G \cdot 1/r^2 = k/r^2$$

que é conhecido como o perfil isotérmico singular. Pode-se verificar facilmente que a massa de uma estrutura com este perfil de densidade diverge se integrarmos até o infinito. Portanto fica claro que este perfil deve ser truncado até uma distância que ainda não foi detectada claramente no caso das galáxias.



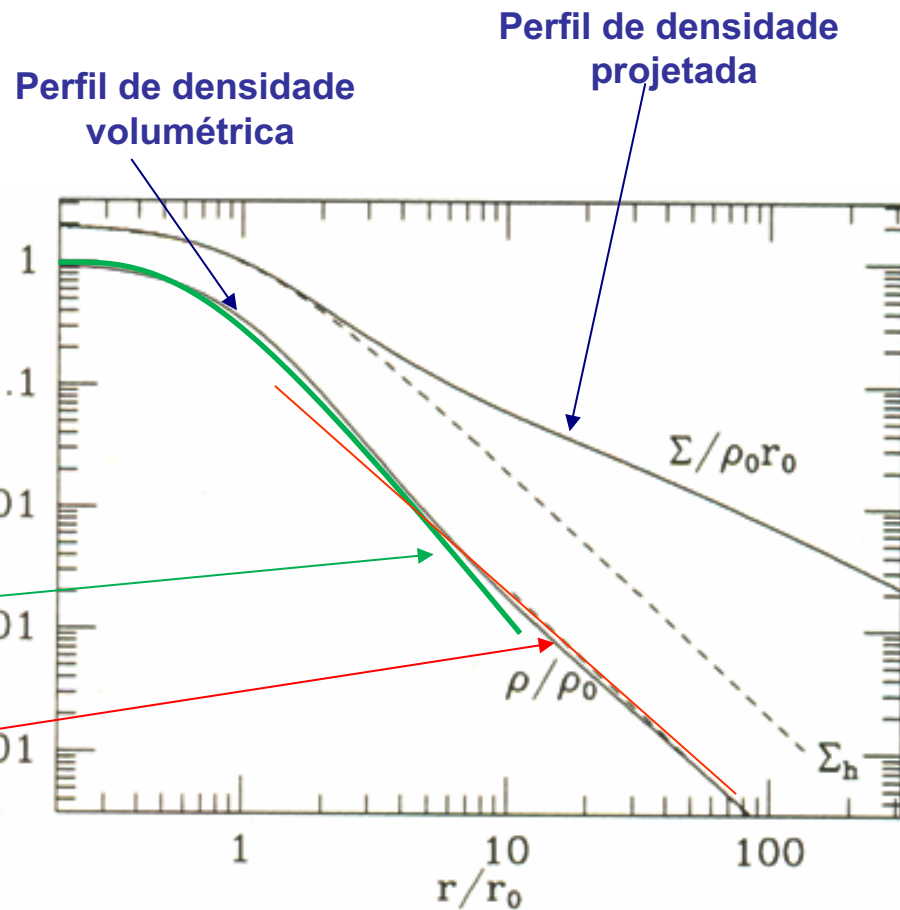
Como é possível limitar aproximadamente a dimensão do halo das galáxias sabendo-se que a densidade de massa do universo no modelo Λ CDM deve ser da ordem $0.92 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3$?

A denominação do perfil isotérmico decorre de ser este o perfil obedecido por uma distribuição de estrelas em que a dispersão interna de velocidades (σ) é constante. Esta distribuição, em equilíbrio hidrostático, obedece ao mesmo perfil de densidade de uma esfera de gás com a temperatura constante. Daí a origem do nome. Na região interna o perfil de densidade de uma esfera isotérmica pode ser aproximado pela expressão

$$\rho(r) = \rho_0 / (1 + r^2/r_0^2)^{3/2}$$

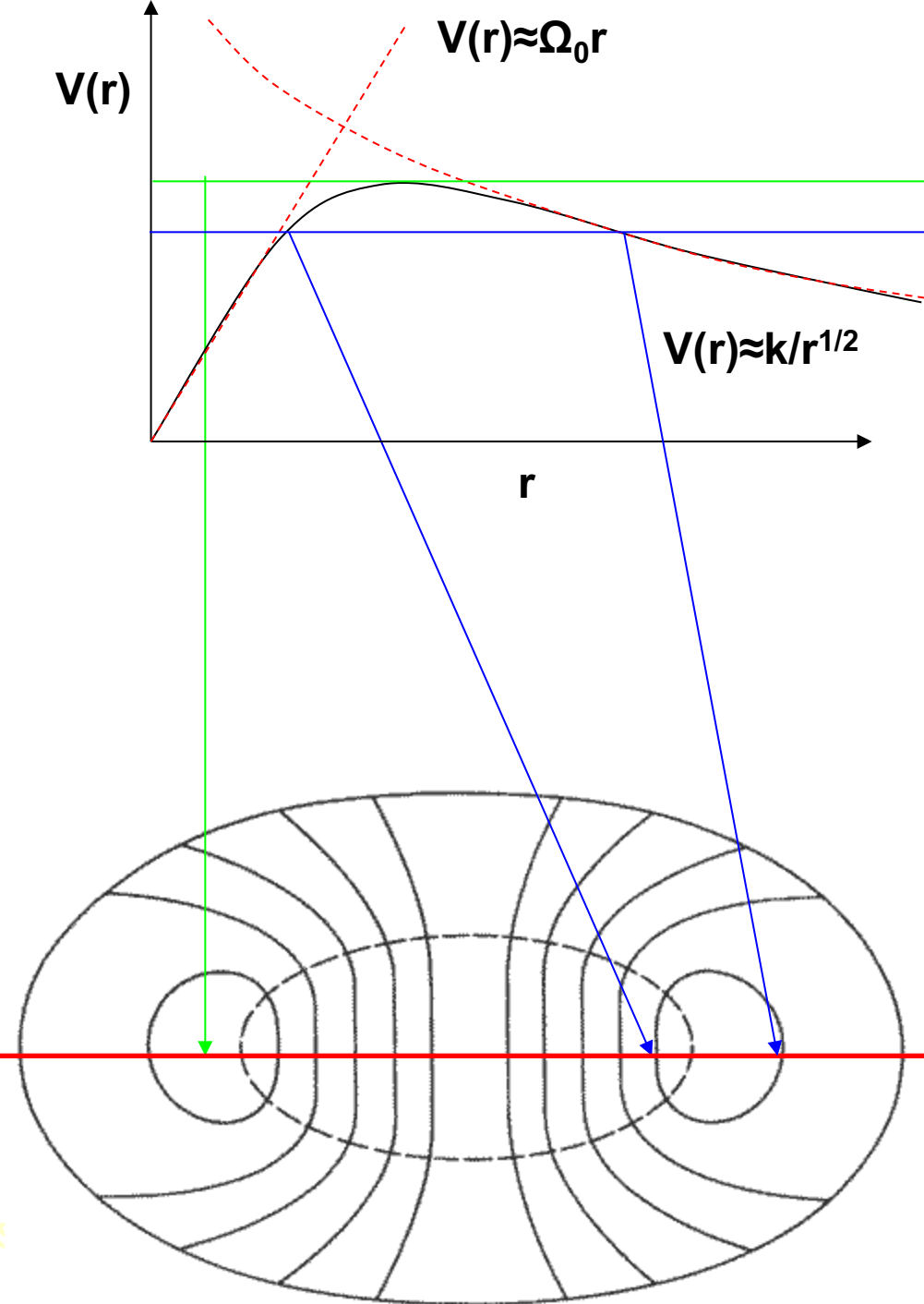
Também conhecido como perfil de Hubble. Na região externa o perfil isotérmico singular é uma representação mais adequada.

Apesar do grande interesse teórico o principal problema do perfil isotérmico é que o mesmo diverge quando integramos a sua massa total. Isto mostra que esta aproximação deve falhar a partir de uma certa distância radial.

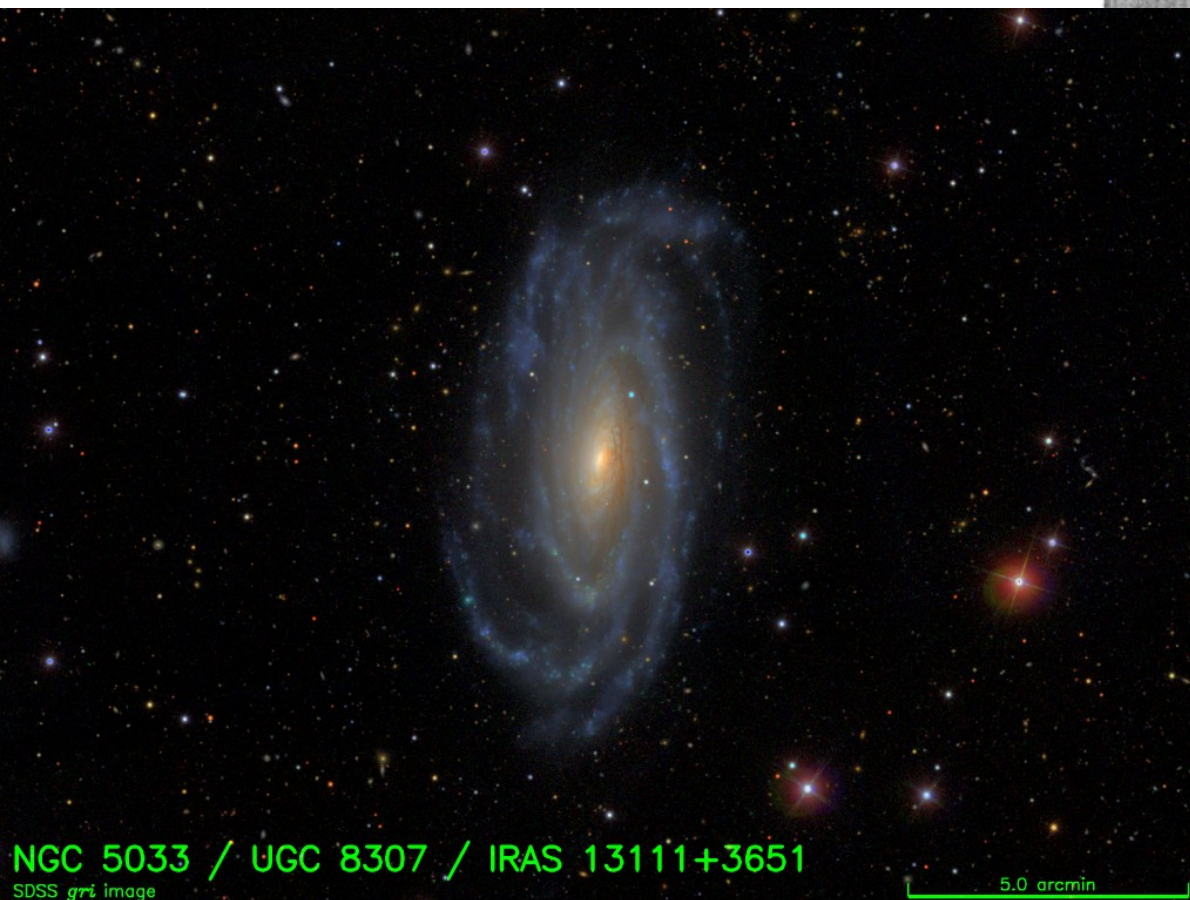
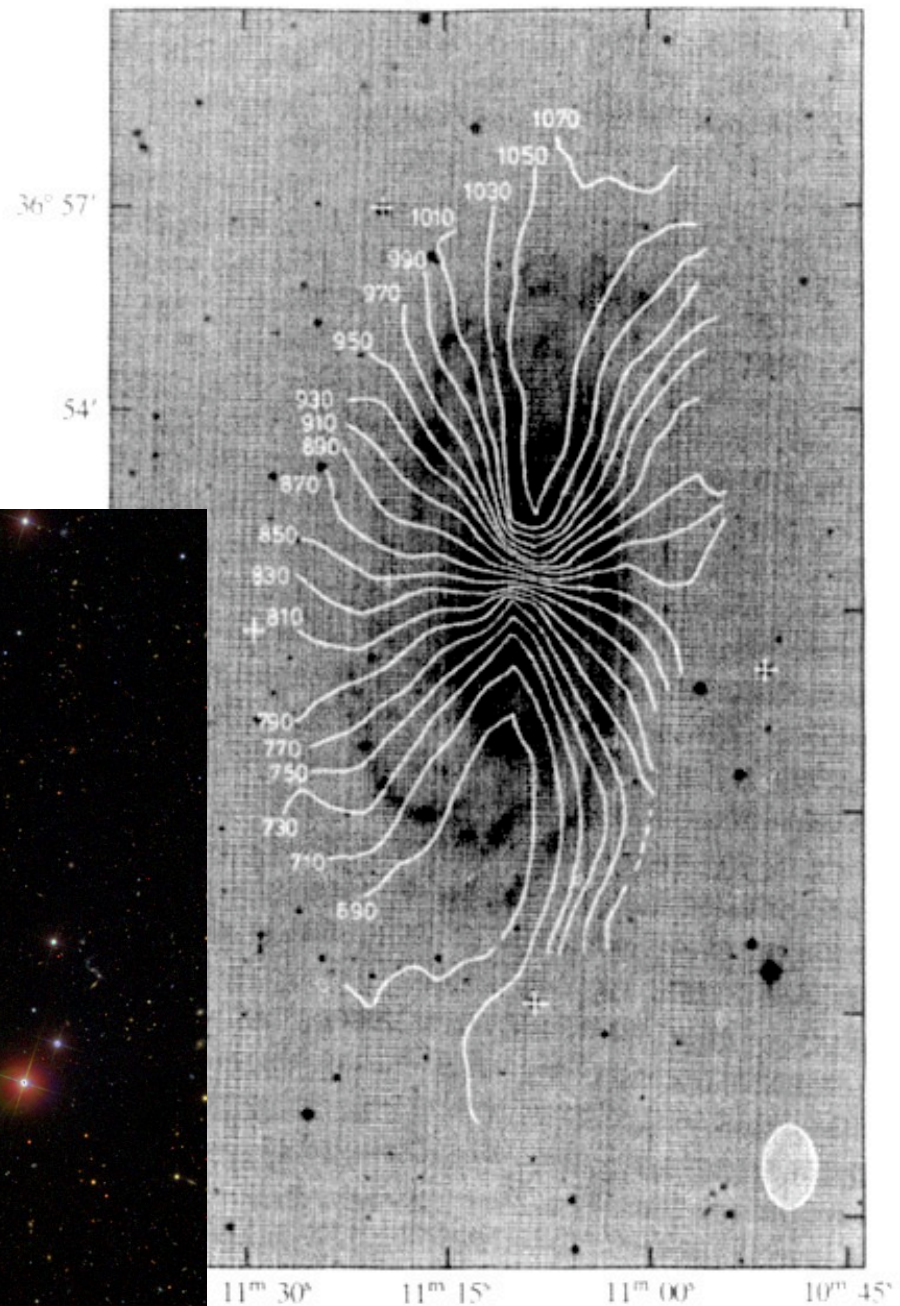


A partir dos anos de 1970 observações panorâmicas realizadas na linha de 21cm do hidrogênio neutro proporcionaram uma grande avanço nas observações cinemáticas. Em primeiro lugar porque a maioria da galáxias espirais mostra a presença de hidrogênio neutro na região externa ao seu raio óptico. Em segundo lugar porque tornou-se possível a observação prática do campo de velocidade fora do semi-eixo maior. Uma generalização do raciocínio apresentado antes mostra que as curvas de isovelocidades devem seguir o chamado diagrama de aranha apresentado na figura ao lado. Em princípio um ajuste destas curvas de isovelocidades nos permite recuperar com grande precisão os dados cinemáticos ao longo do semi-eixo maior. Por este motivo este tipo de observação parece ser o mais adequado para rastrear o halo de matéria escura das galáxias.

NGC 4459 :



A figura ao lado mostra o campo de velocidade da galáxia NGC 5033 obtida através das observações em 21cm. Observe como as curvas de isovelocidades se estendem além da imagem óptica do objeto. Ademais podemos observar que o diagrama não é perfeitamente simétrico devido às distorções causadas no disco pelo padrão espiral.



NGC 5033 / UGC 8307 / IRAS 13111+3651
SDSS *gr* image

Estime a massa total de NGC 2841 até uma distância radial de 20 Kpc onde a população estelar ainda é dominante. Caso não houvesse o halo de matéria escura qual deveria ser a velocidade de rotação a 35 Kpc de distância da região central?



NGC 2841

120"

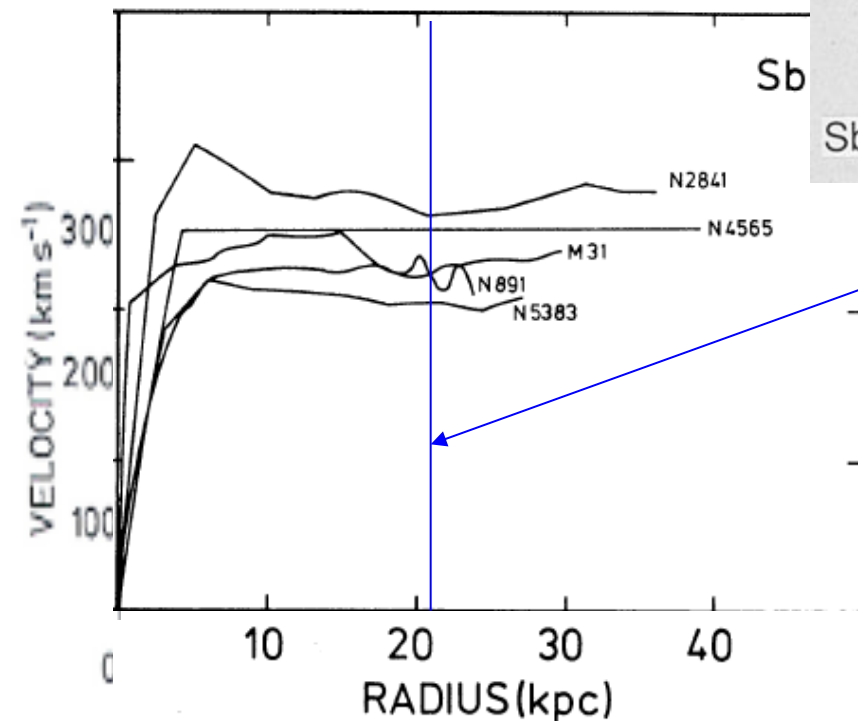
10.4 Kpc

$R_{opt} = 21 \text{ Kpc} \sim R_{21cm}/2$

$V = 714$

Sb

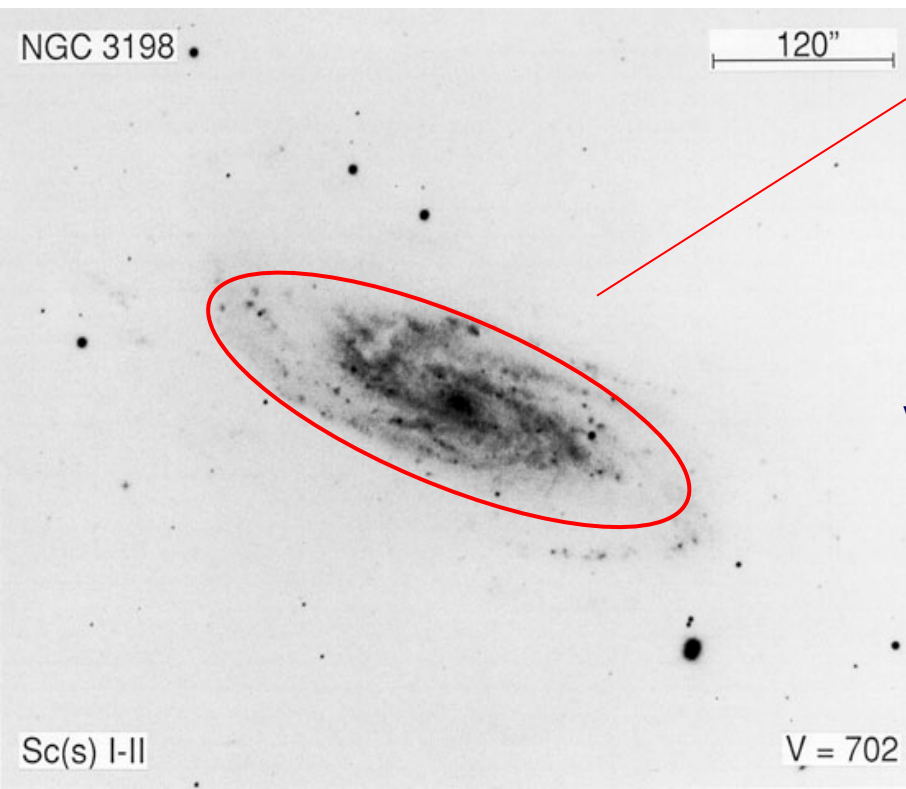
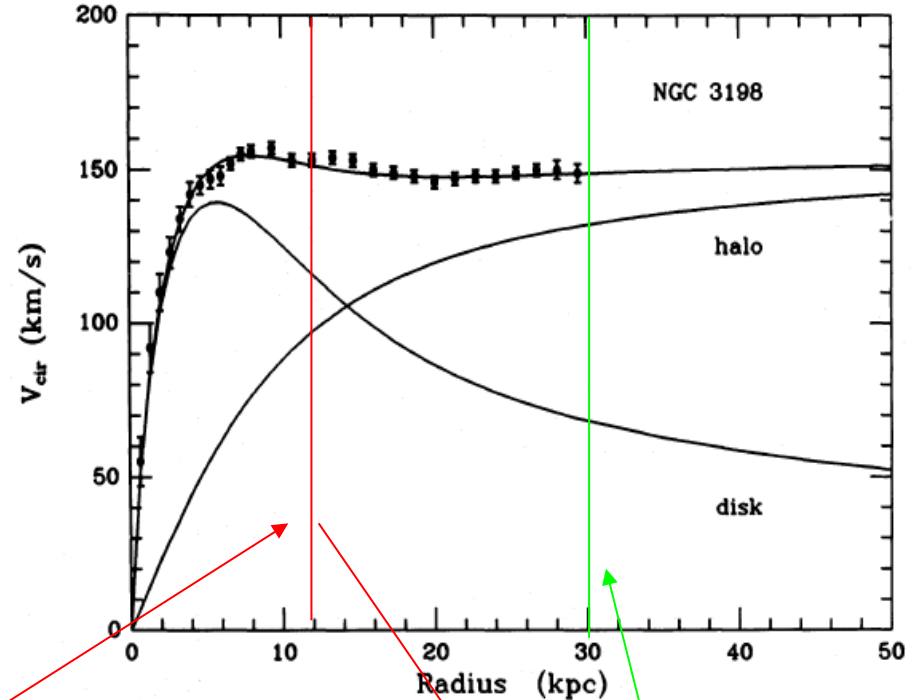
Sb



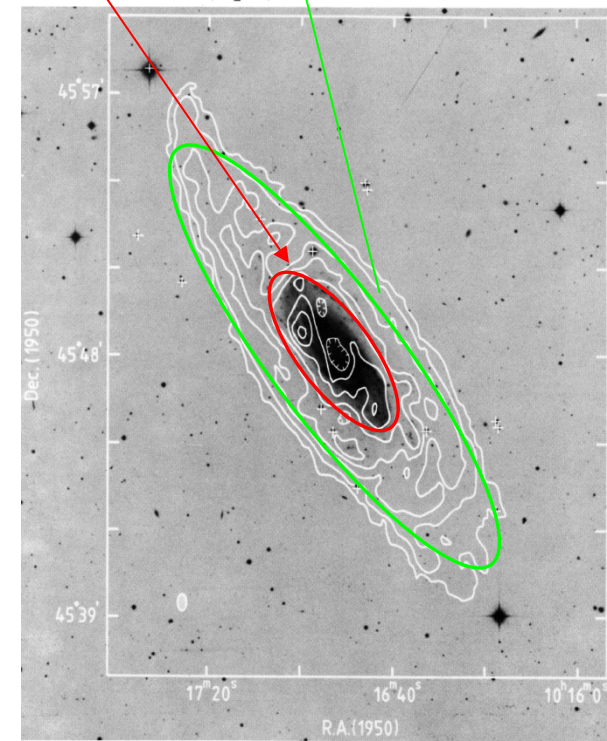
No caso de NGC 2841 a curva de rotação, a partir de observações na linha de 21 cm, se mantém plana até cerca de 40 Kpc do núcleo (Bosma, [1981, AJ, 86, 1825](#)). No entanto o seu diâmetro óptico é da ordem de apenas 20 Kpc!

Em NGC 3198 a população estelar do disco tem $M/L \sim 3,6 M_{\odot}/L_{\odot}$ e a sua massa seria claramente insuficiente para justificar a curva de rotação plana que é observada. Dentro de 30 Kpc infere-se que a quantidade de matéria escura necessária é cerca de 4 vezes superior à quantidade total de matéria bariônica disponível na população estelar.

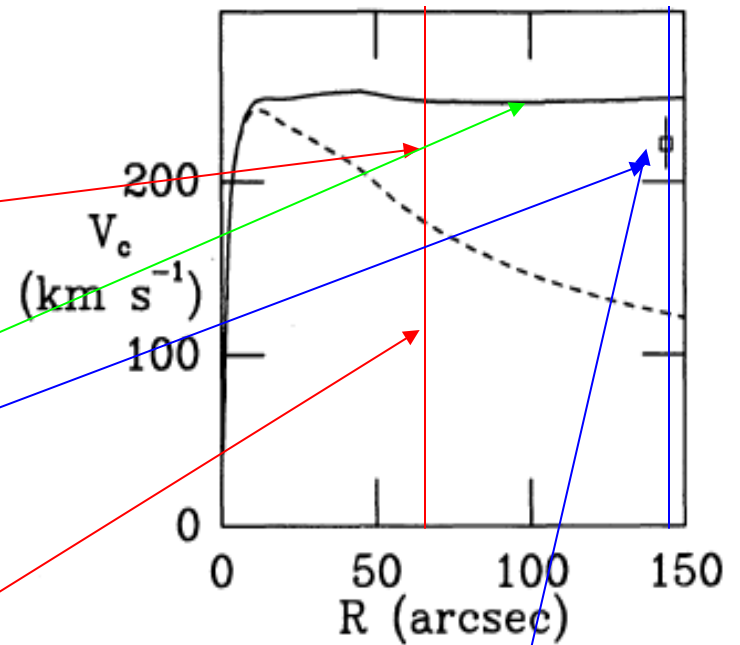
Porque a curva de rotação decresce a partir de 12Kpc? Já seria este o regime kepleriano?



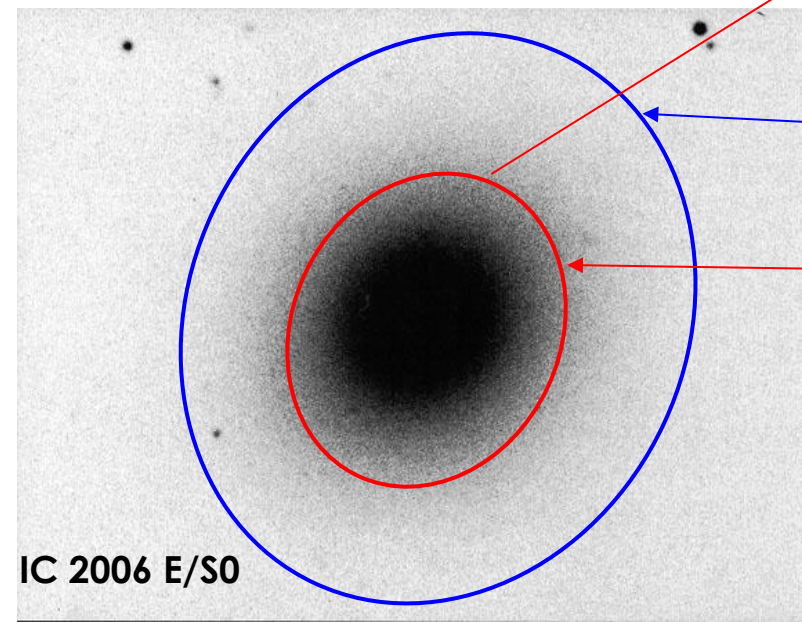
Van Albada et al ,
[1985, ApJ, 295, 305](#)



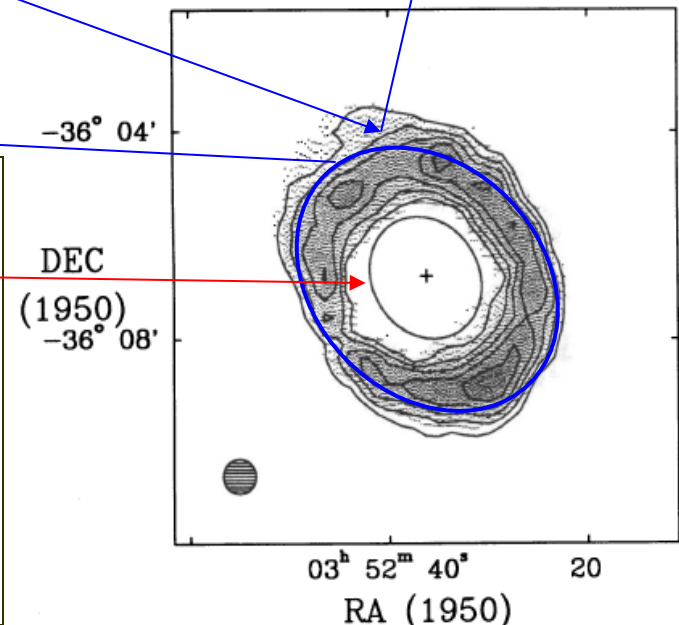
A presença do halo de matéria escura também pode ser detectado nas galáxias Elípticas conforme constatado em IC 2006 que apresenta um anel de HI fora da sua imagem óptica. A curva de rotação deduzida a partir de uma população estelar com $M/L \sim 3,6 \ M_{\odot}/L_{\odot}$ deveria declinar conforme ilustra a figura. No entanto o anel externo apresenta uma velocidade de rotação de 248 km/s que exige a presença de um halo de matéria escura semelhante ao que se observa em galáxias espirais.



Franx et al , [1994, ApJ, 436, 642](#)

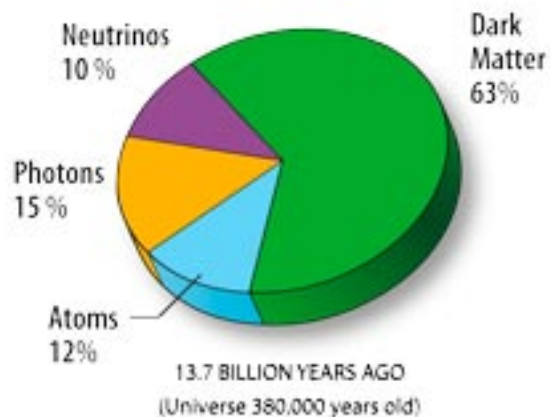
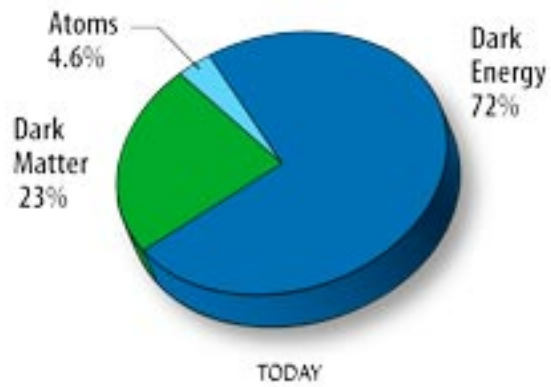


Estime a massa total de NGC IC 2006 até uma distância radial de 150 " (d=1809 Kpc) e compare com a massa dentro da região da imagem óptica.

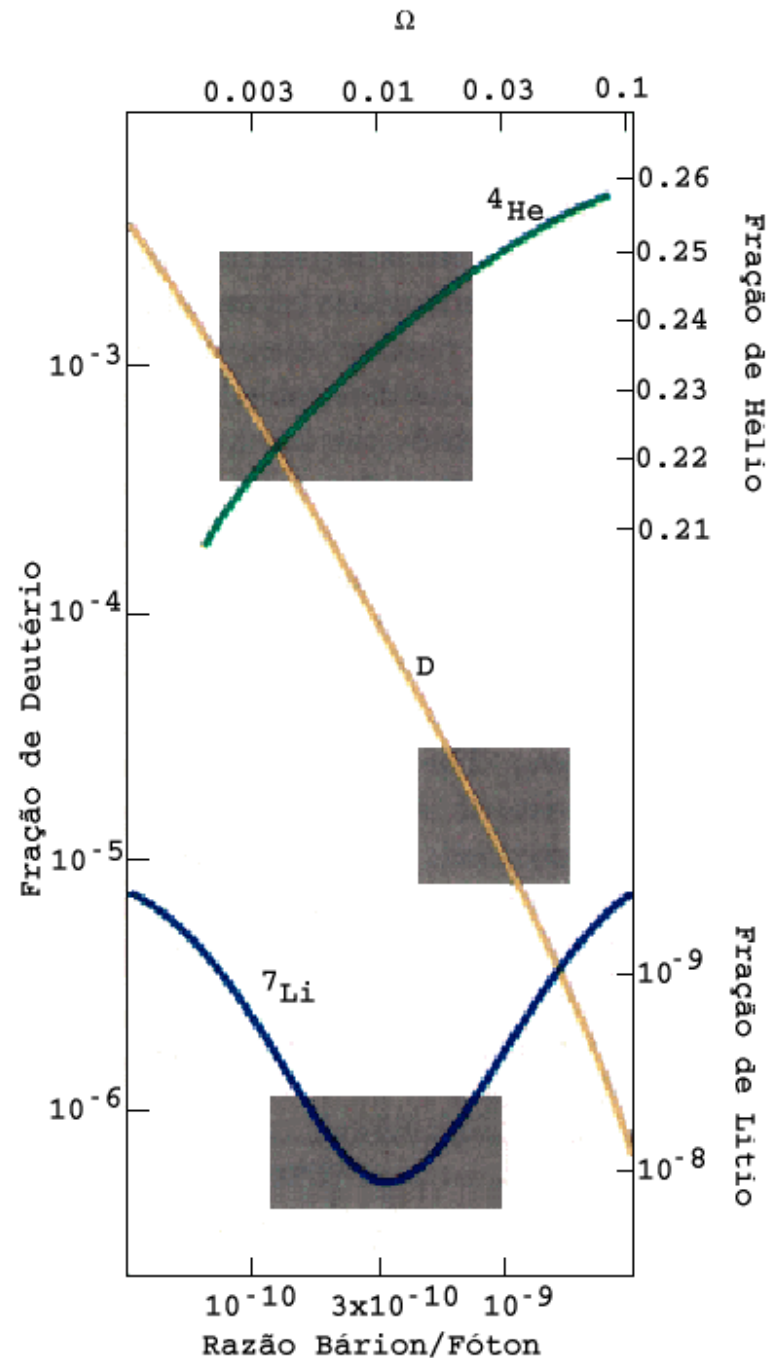


IC 2006 E/S0

Uma questão de grande relevância consiste em saber a natureza da matéria escura. As observações cosmológicas indicam que a proporção desta componente deve variar durante a evolução do Universo. Atualmente a proporção de matéria escura representa um fator quase 5 vezes maior que a componente bariônica representada pelos átomos presentes nas estrelas e gás presentes nas galáxias e aglomerados de galáxias.



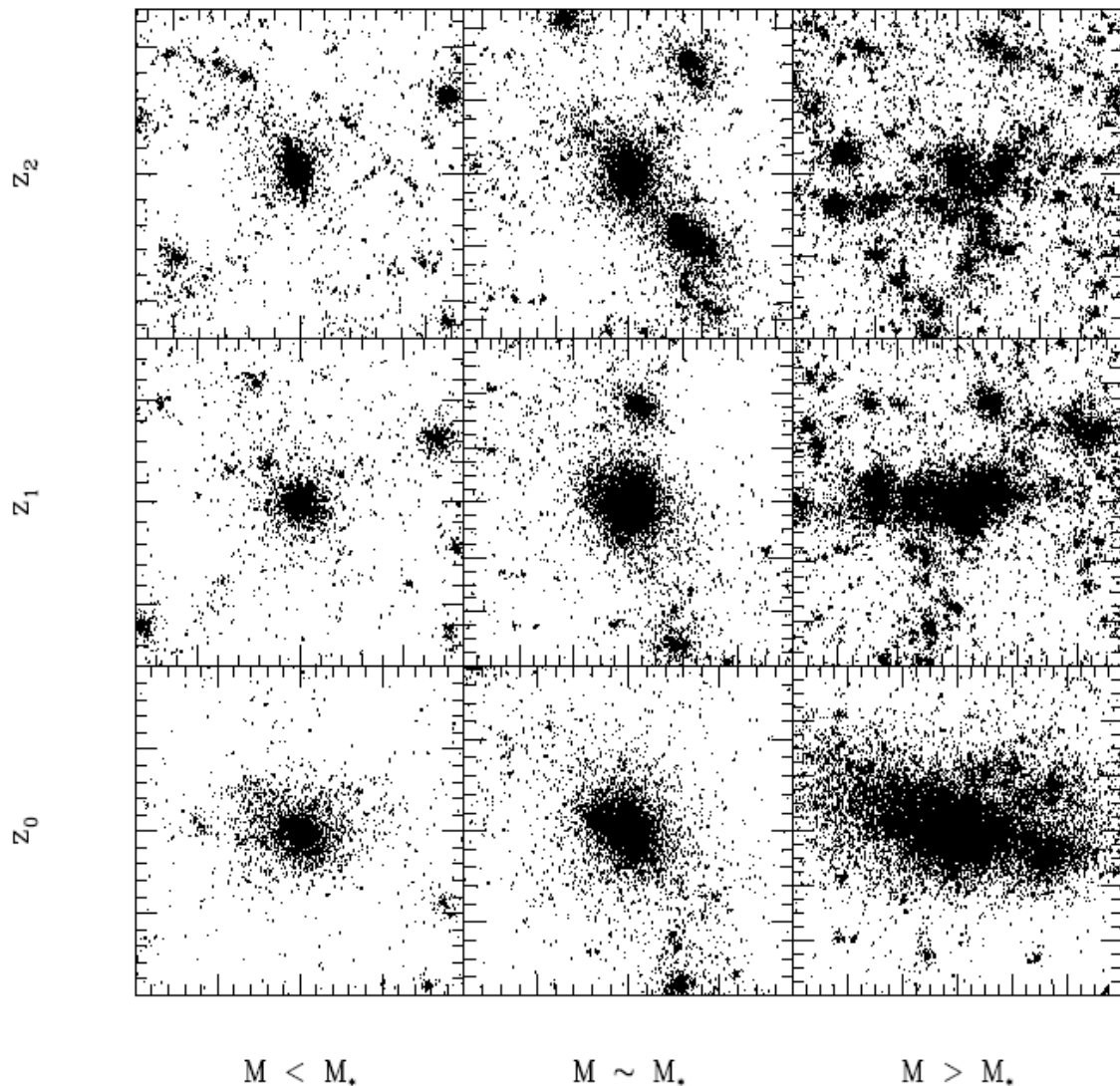
O sucesso da teoria da nucleosíntese primordial em explicar a abundância dos elementos leves no Universo, a partir da fração observada de bárions, indica que a matéria escura deve necessariamente ter uma natureza não bariônica. Este material não emite fótons, ou seja não sofre a interação eletromagnética.



Na impossibilidade de observar diretamente a matéria escura uma alternativa que parece cada vez mais viável atualmente consiste em realizar simulações cosmológicas que acompanhem numericamente a evolução temporal dos halos de matéria escura. O resultado desses experimentos é que o perfil de densidade da matéria escura em $z=0$ pode ser aproximado pela expressão

$$\rho = \rho_{\text{crit}} \delta c / [(r/r_s)(1+r/r_s)^2]$$

conhecido como o perfil de Navarro, Frenk & White. Nesta expressão ρ_{crit} é a densidade crítica do Universo, δc é um fator adimensional que descreve a importância das perturbações primordiais e r_s é um fator de escala que determina o comportamento radial da densidade.



Navarro et al , [1997, ApJ, 490, 493](#)

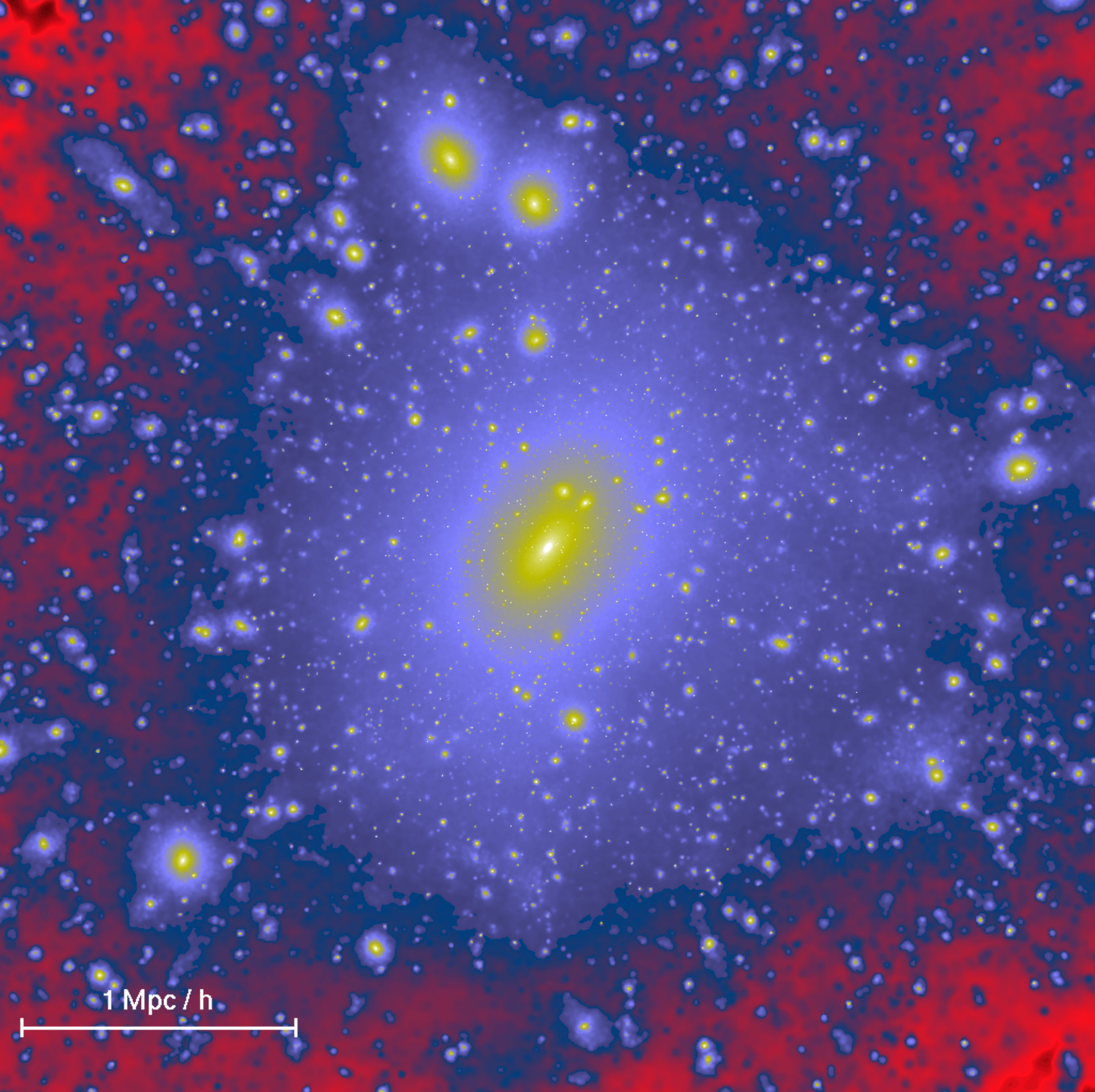
Porque razão as estruturas com massas pequenas ($M < M_*$) evoluem distintamente daquelas com grandes massas ?

Uma das simulações mais recentes foi realizada pelo consórcio Virgo

<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

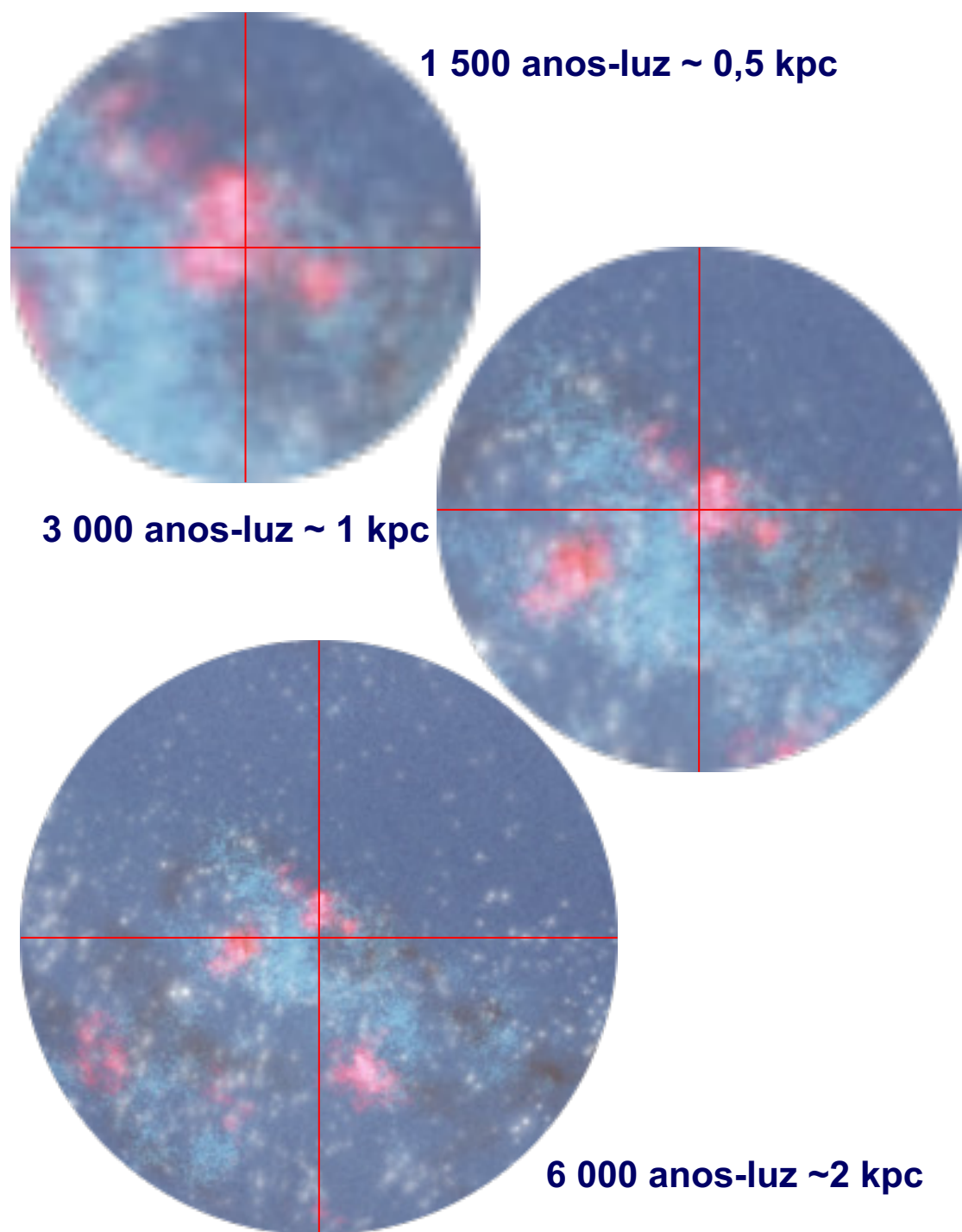
A figura ao lado ilustra o resultado de uma destas simulações mostrando a distribuição esperada da matéria escura na escala de um aglomerado de galáxias.

Será possível caracterizar os halos em torno das galáxias em uma estrutura tão complexa?

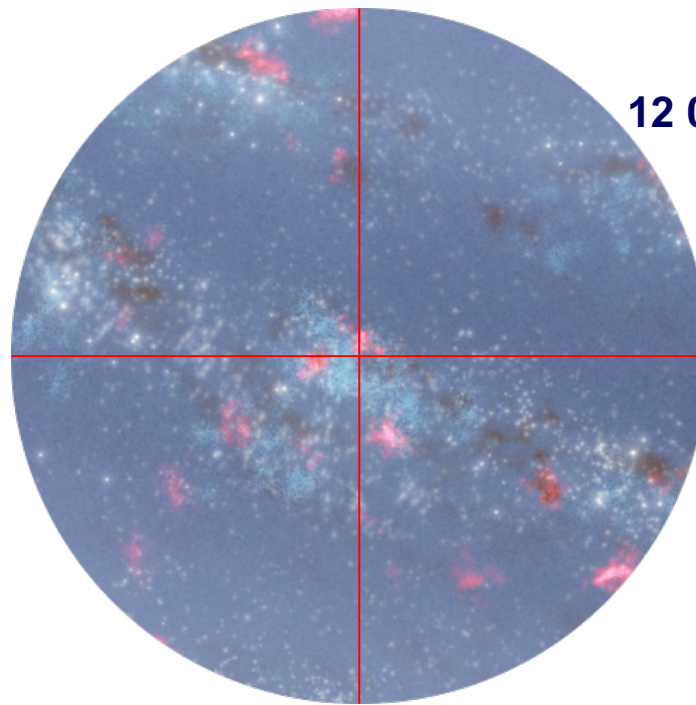


4.3 Estrutura Espiral

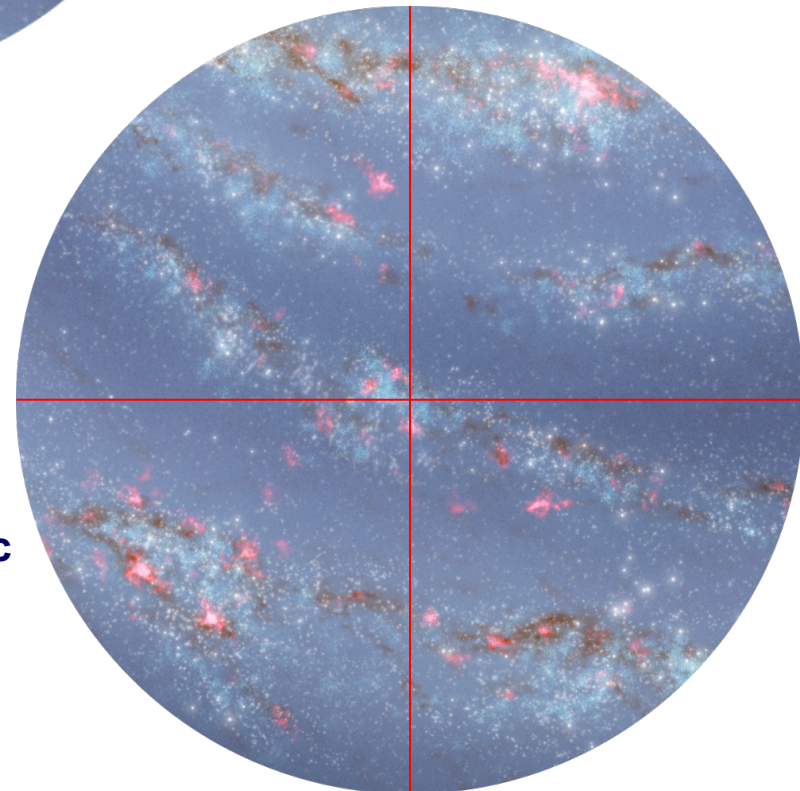
Uma das características mais marcantes das galáxias com discos são os seus braços espirais cuja estrutura e evolução está vinculada às características orbitais das estrelas do disco bem como ao gás e demais componentes dinâmicas. Trata-se de um fenômeno complexo envolvendo todo o material, como podemos concluir por um exame da nossa própria galáxia em várias escalas centradas em torno do Sol. Recentemente o satélite Spitzer completou o levantamento da Via Láctea no infravermelho próximo e que nos permite apreciar como a visão da nossa Galáxia é distinta em diversas escalas. Nas figuras ao lado observe, por exemplo, como em escalas de 0,5kpc até cerca de 2kpc é praticamente impossível identificar os sinais da estrutura espiral.



Mesmo nas escalas de 4 kpc e 8 kpc podemos apenas começar a apreciar as ondulações que formam a estrutura espiral. Na escala de 4 Kpc é clara a presença de duas faixas que indicam a presença dos braços. Na escala de 8 Kpc certamente podemos identificar as diversas regiões dos braços. Mas mesmo nestas escalas é ainda difícil perceber a extensão e organização do padrão espiral.



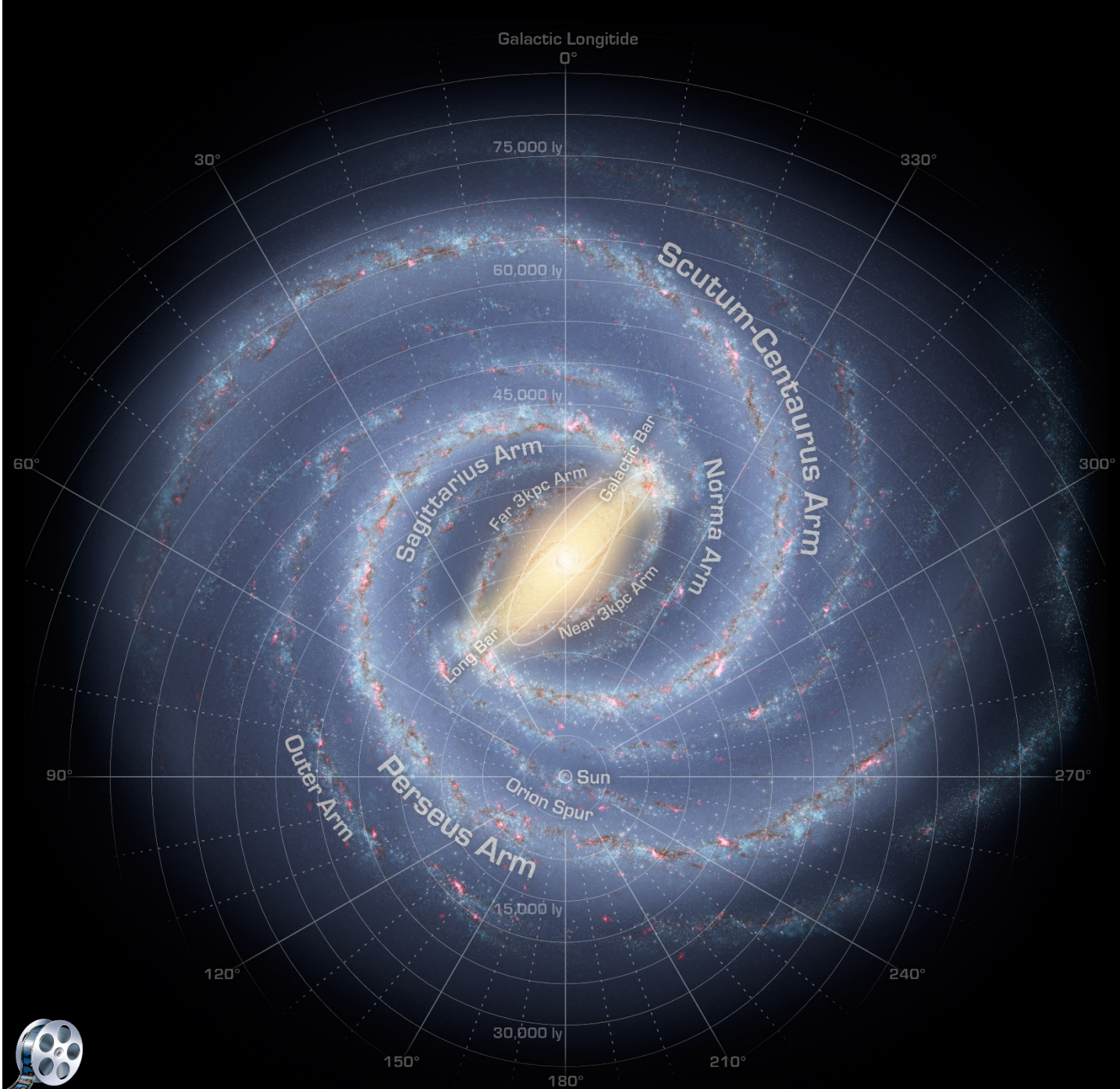
12 000 anos-luz ~ 4 kpc



24 000 anos-luz ~ 8 kpc

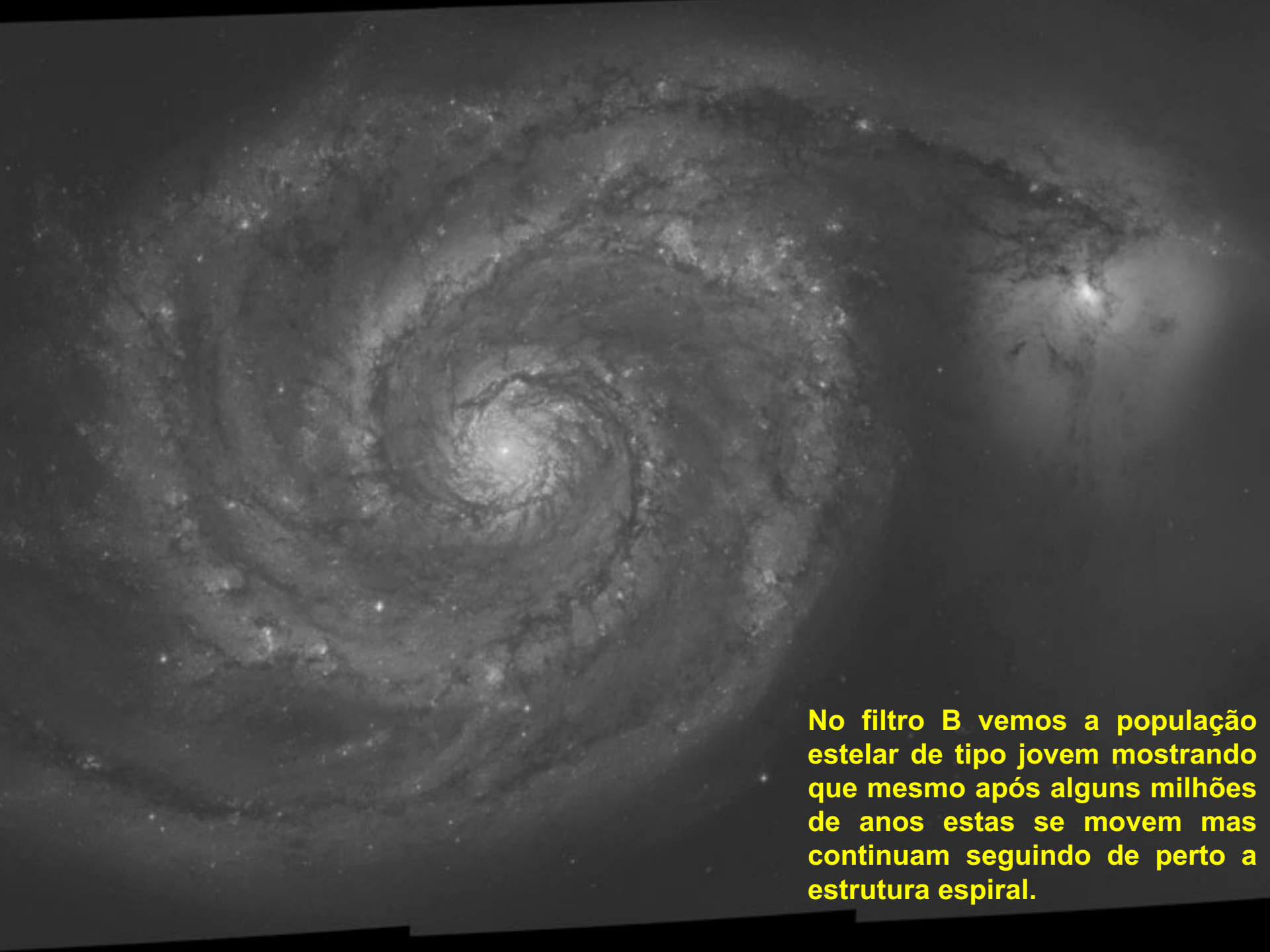
NGC 4459 S0

Somente quando temos acesso a uma visão global da Galáxia é que podemos perceber a real extensão da organização espiral. Aí percebemos que os braços cruzam toda a extensão da Galáxia. Estes se subdividem em algumas regiões e apresentam distorções em outras. Mas ainda assim os braços mantêm uma coerência global em toda a estrutura tal qual podemos observar em outras galáxias mais afastadas.

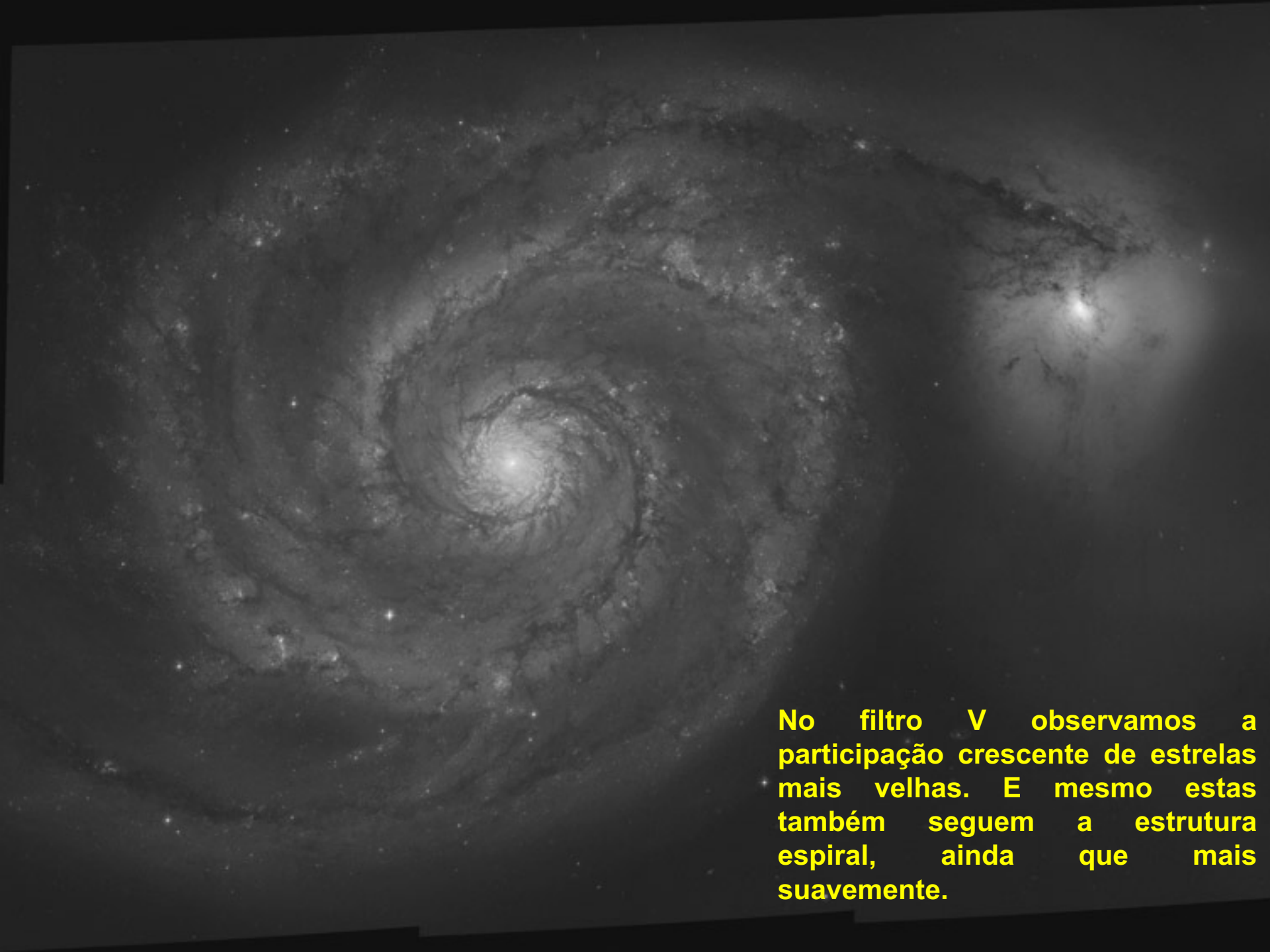




A observação panorâmica dos braços espirais é bem mais simples nas galáxias próximas. Objetos como M51, por exemplo, mostram como a emissão na linha $H\alpha$, proveniente do gás ionizado marca precisamente as regiões de formação estelar recente ao longo dos braços espirais.



No filtro B vemos a população estelar de tipo jovem mostrando que mesmo após alguns milhões de anos estas se movem mas continuam seguindo de perto a estrutura espiral.

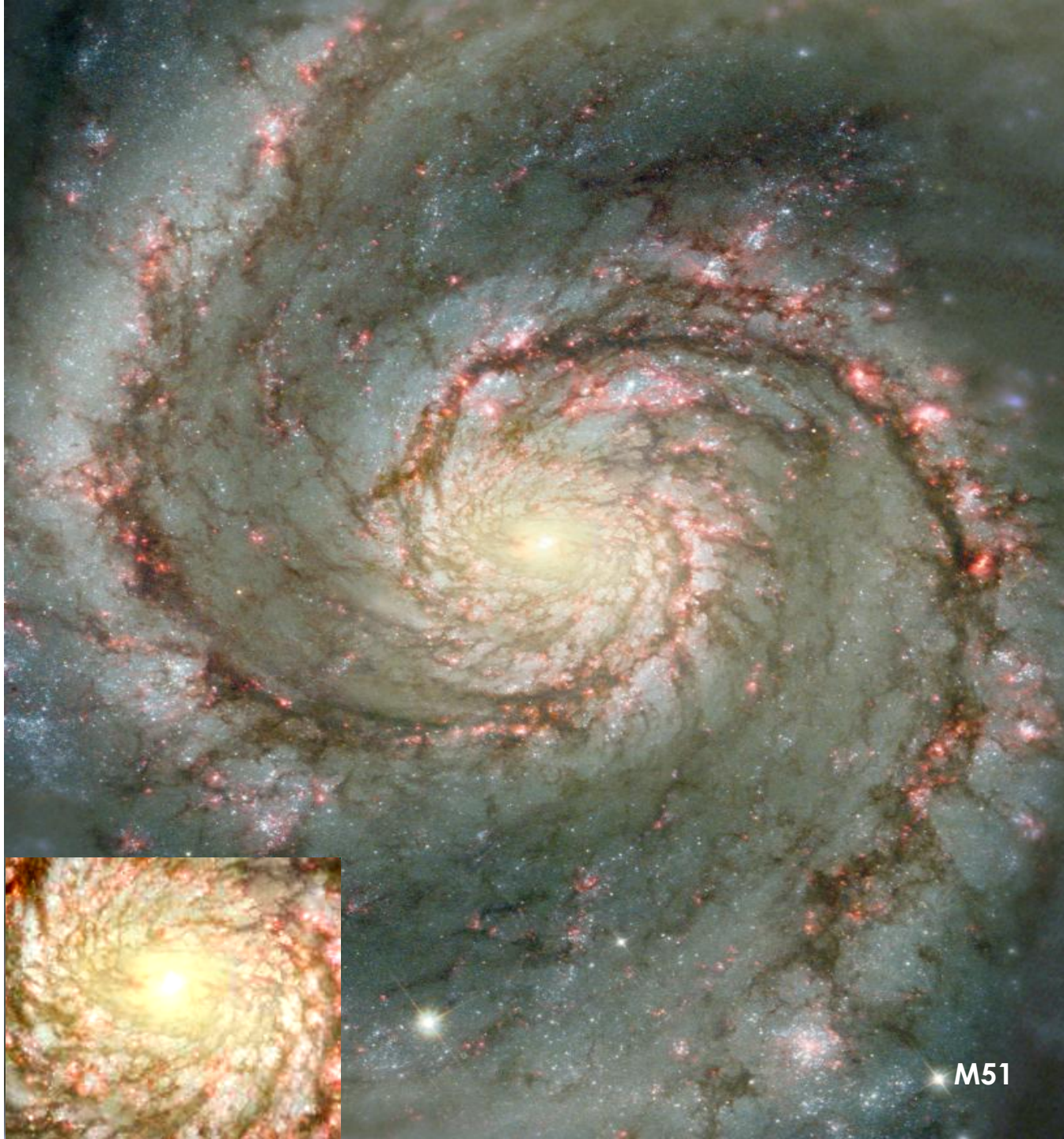


No filtro V observamos a participação crescente de estrelas mais velhas. E mesmo estas também seguem a estrutura espiral, ainda que mais suavemente.



No filtro I observamos uma contribuição dominante de estrelas ainda mais velhas e que, mesmo estando mais homogeneamente distribuídas, também seguem a estrutura espiral demonstrando que os braços espirais afetam toda a estrutura estelar do disco da galáxia.

Esta imagem de M51 em alta resolução realizada com a composição das imagens anteriores do HST mostra todo o grau de complexidade dos braços espirais. Observe como detalhes sutis como a textura das pequenas faixas de absorção interestelar se repetem em praticamente toda a imagem. Ao longo dos braços vemos como a compressão do gás interestelar favorece a formação de novas estrelas. A organização desta estrutura sugere que um fenômeno global envolvendo toda a galáxia é responsável pelos braços espirais desta galáxia.



Em outros casos como NGC 1300 uma destacada estrutura em forma de barra está presente com os braços saindo dos seus extremos. Observe como as estruturas de absorção ao longo da barra mudam de direção ao cruzar a região central.



NGC 1300

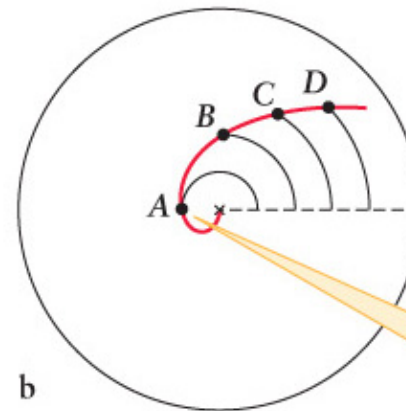
Um aspecto fundamental é que os braços espirais definitivamente não se comportam como uma estrutura material que espirala gradualmente devido à rotação diferencial do disco, tal qual ocorre com o creme em rotação numa xícara de café. Se fosse esse o caso deveríamos observar galáxias com braços extremamente apertados devido ao efeito acumulado de dezenas de revoluções. Mas estes objetos não ocorrem na natureza indicando que esta interpretação é incorreta. Observe que numa galáxia com uma curva de rotação plana temos $\Omega = V/r$ e portanto o período, $T = 2\pi/\Omega = 2\pi r/V$, decresce quando nos aproximamos da região central. Consequentemente seria inevitável observar este efeito de enrolamento progressivo dos braços espirais caso ele existisse.

Disk of the Galaxy
(top view)

Spiral arm
Galactic center
A B C D

Imagine four stars in circular orbits that initially lie along a line extending from the galactic center. The stars have the same linear (straight line) speeds but travel in orbits of different sizes.

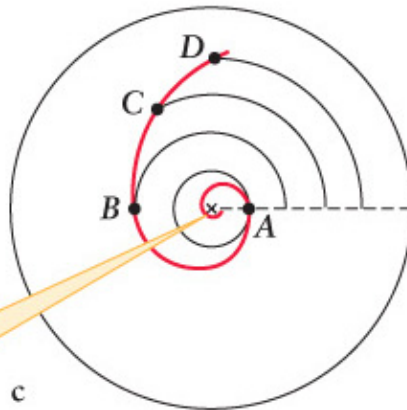
a



b

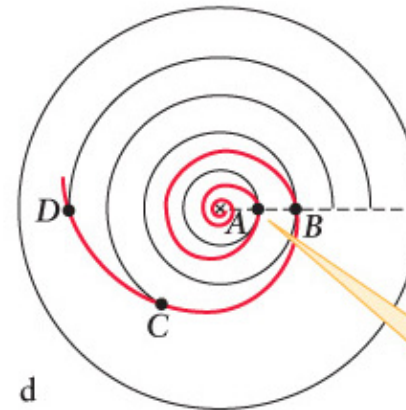
Estime o número de revoluções do disco da Via Láctea durante a idade do Universo.

When star A has completed $1/2$ of an orbit, stars B, C, and D have only completed $1/4$ or less of an orbit.



c

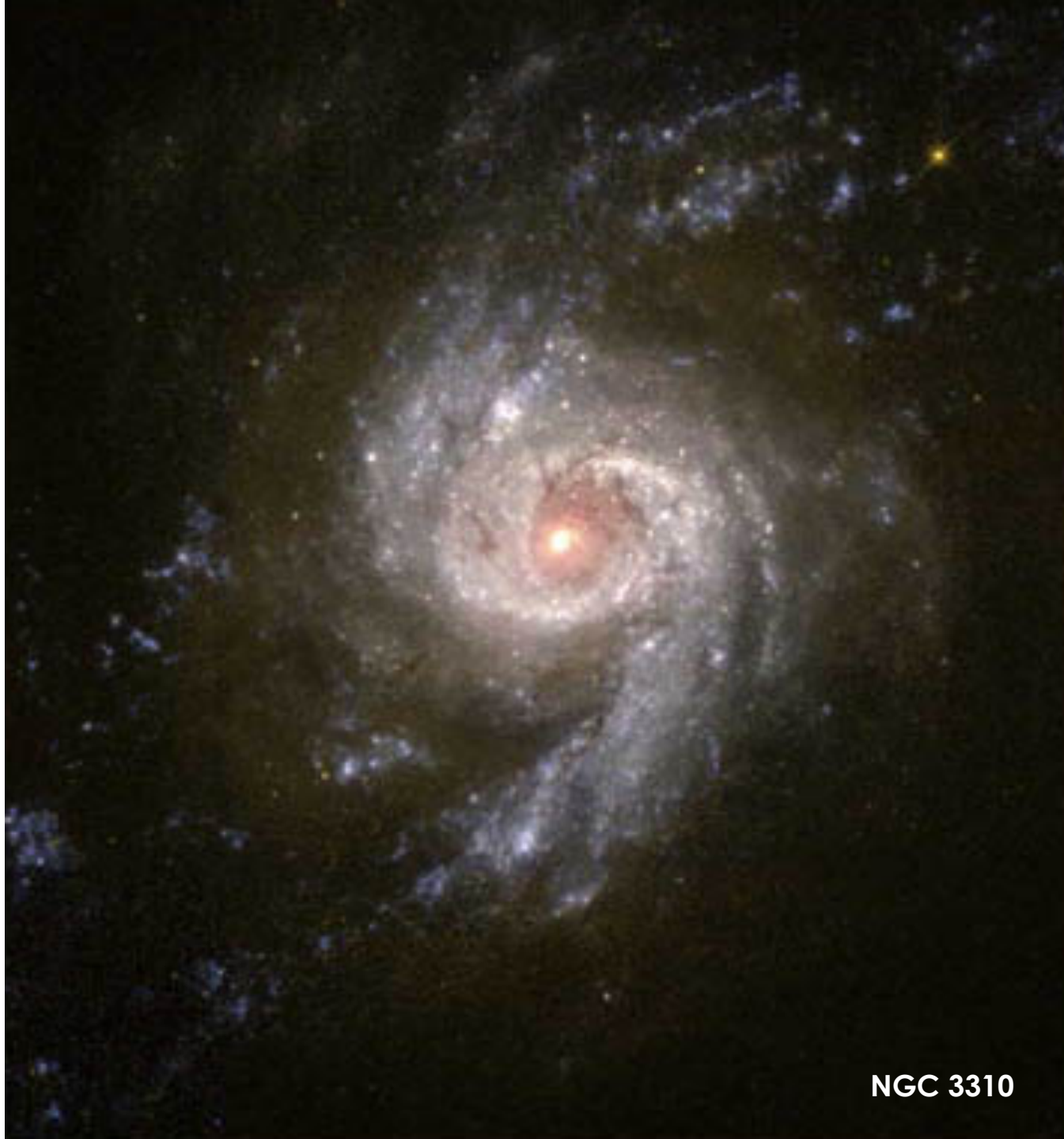
After one orbit of star A, star B has completed only $1/2$ an orbit and stars C and D have fallen farther behind.



d

As star A completes its second orbit, the spiral continues to wind tighter.

Em alguns casos como NGC 3310 parece claro o predomínio de processos locais que afetam algumas regiões de forma bastante distinta de outras. Nestes objetos os braços não parecem tão organizados globalmente quanto nas chamadas galáxias grand design, como M51.



NGC 3310

Em outros casos como NGC 4622 os braços espirais têm uma aparência delgada que se mantém coerente em toda a imagem indicando que o fenômeno que gera a estrutura espiral na região interna também deve agir na região externa.

O grande número destes objetos na natureza indica que o movimento das estrelas do disco deve de alguma forma participar da construção e manutenção da estrutura espiral em intervalos de tempo longos quando comparados com o período de rotação.



NGC 4622

Um aspecto fundamental deste fenômeno é que, ao contrário do gás, as estrelas dos discos das galáxias espirais apresentam órbitas que são ligeiramente diferentes das órbitas circulares. O motivo é que, sendo um sistema não colisional, durante o seu movimento as estrelas do disco devem conservar simultaneamente tanto a energia como o momentum angular relativo ao eixo de rotação da galáxia.

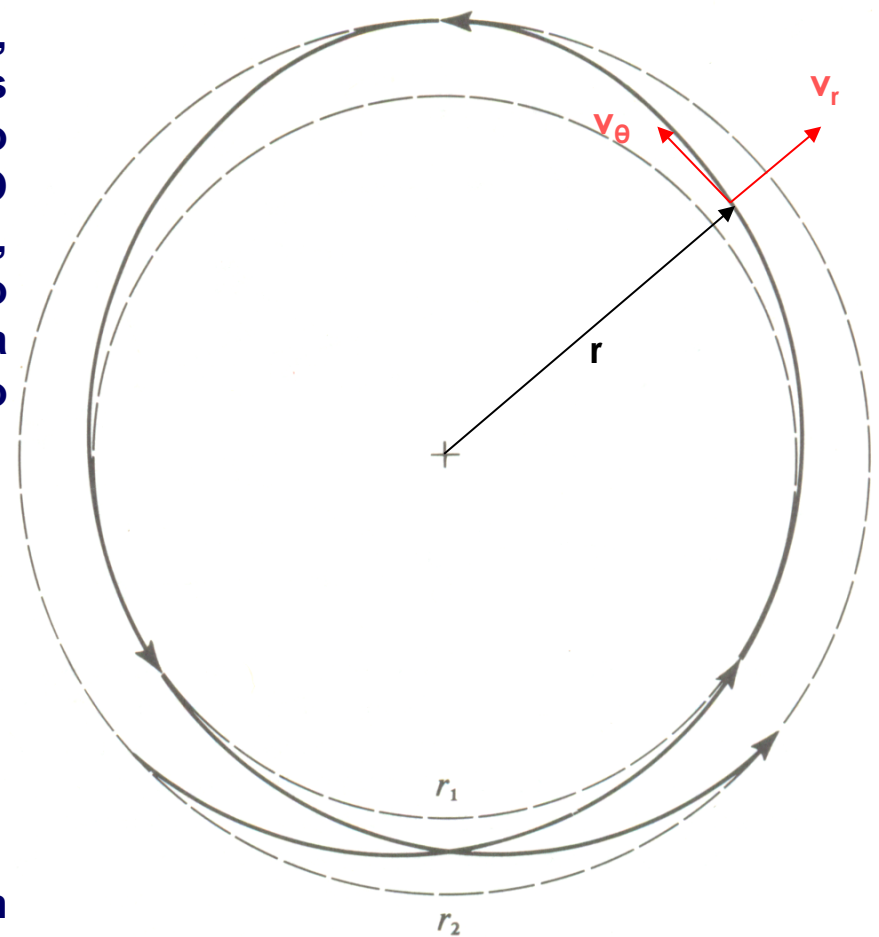
$$\frac{1}{2} v_r^2 + \frac{1}{2} v_\theta^2 - \frac{GM(r)}{r} = E_*$$

$$V_\theta r = L_{*z}$$

Portanto,

$$\frac{1}{2} v_r^2 = E_* + \frac{GM(r)}{r} - \frac{1}{2} \frac{L_{*z}^2}{r^2}$$

A consequência do termo de momentum angular no potencial efetivo é que para $L_{*z} \neq 0$ a estrela não consegue escapar do interior da região entre os raios r_1 e r_2 onde $v_r = 0$. No entanto, normalmente, esta órbita em forma de roseta não é fechada, tal qual ocorre por exemplo nos sistemas planetários onde $M(r) = \text{Cte.}$ Em consequência destas características, gradualmente, a estrela vai percorrendo todo o interior do anel entre r_1 e r_2 .



Suponha que massa vista pelo disco seja tal que $M(r) \sim M(r_0) + b(r - r_0)$, correspondente a uma curva de rotação próxima da plana. Nesta situação mostre que a órbita de uma estrela qualquer do disco deve necessariamente estar contida entre dois raios de um anel. Qual é a velocidade radial quando a estrela tangencia r_1 e r_2 ?

Como o movimento é distinto mas, ainda assim relativamente próximo de uma órbita circular, é possível descrevê-lo como a composição de uma órbita circular à qual superpomos uma órbita de epiciclo girando no sentido oposto ao movimento orbital.

É possível mostrar (veja Binney & Tremaine, 1985) que esta frequência de epiciclo é dada pela expressão

$$k^2 = 2\Omega/r \, d/dr(r^2\Omega)$$

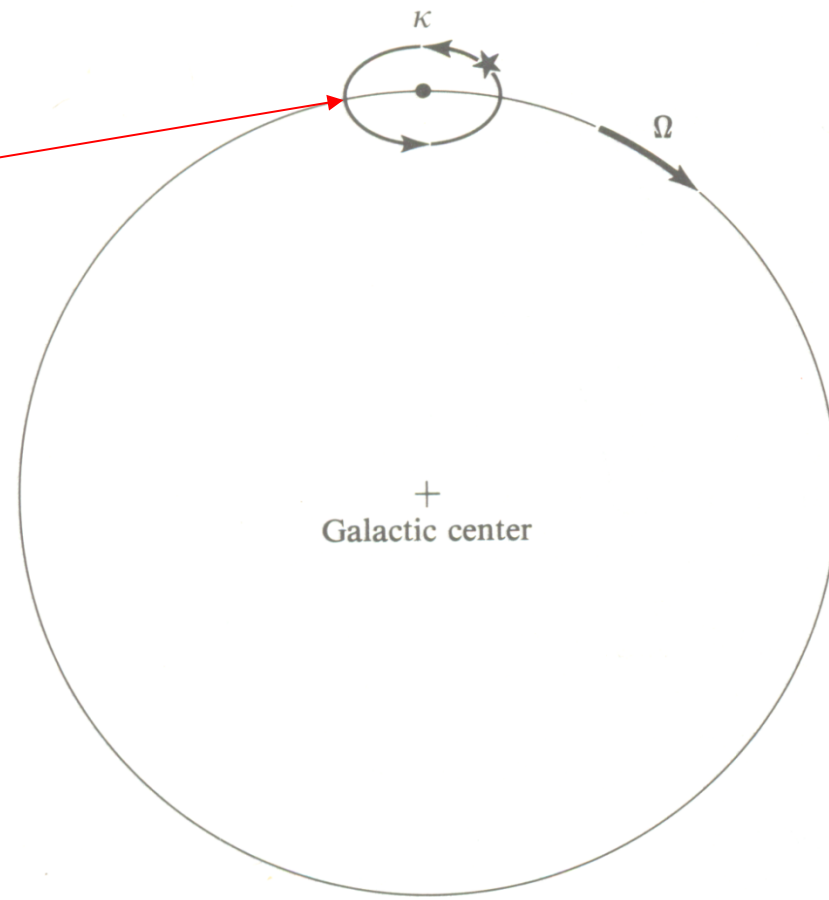
onde Ω representa a frequência angular do movimento circular.

No caso mais comum, observado nas galáxias espirais, temos na região externa uma velocidade circular de rotação aproximadamente constante,

$$V = \Omega r \sim C$$

resultando que

$$k = 2^{1/2} \Omega$$



Estime a frequência de epiciclo na vizinhança solar na aproximação de curva de rotação plana e compare com o valor mais exato encontrado na literatura ($k=37$ km/s/kpc). Quantos epiciclos são completados a cada período orbital?

NGC 4459 S0

Na década de 1960 o astrônomo B. Lindblad mostrou que mesmo considerando o movimento em epiciclo a órbita das estrelas do disco pode ser facilmente descrita em um referencial em rotação com a frequência angular

$$\Omega_p = \Omega - \kappa/2$$

O período de rotação deste referencial não inercial é naturalmente

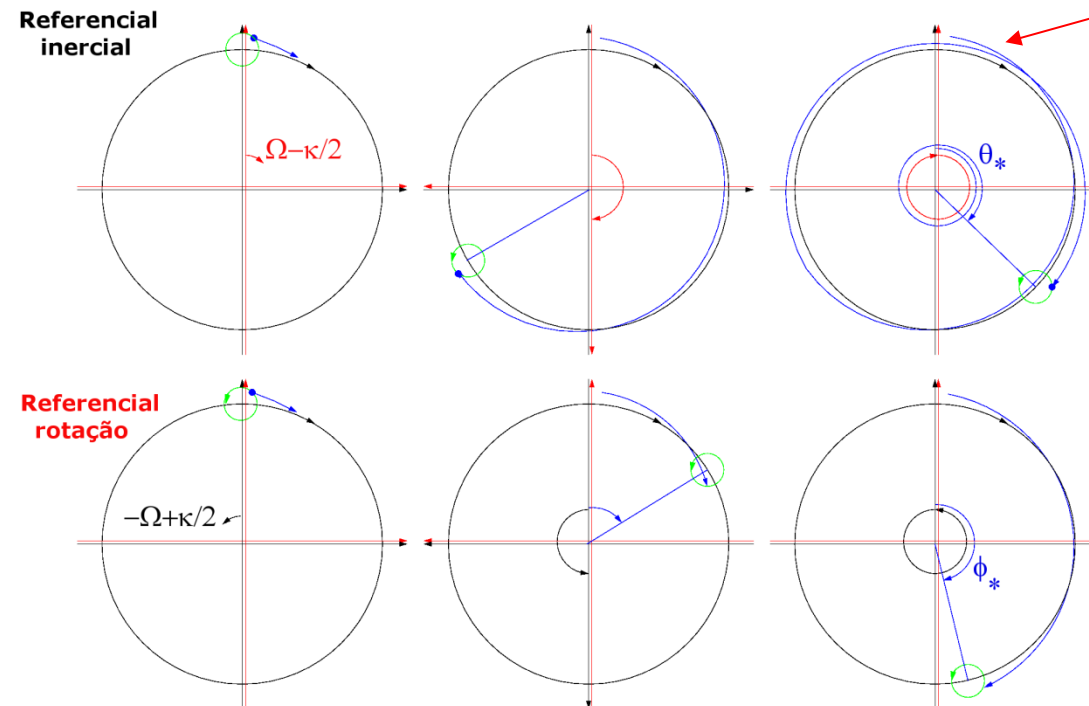
$$T_p = 2\pi/\Omega_p = T_*/(1 - \kappa/2\Omega)$$

onde $T_* = 2\pi/\Omega$ representa o período do movimento circular do centro guia da estrela visto no referencial inercial. Enquanto o referencial não inercial (p) dá uma volta completa o centro guia da estrela deve percorrer, no referencial inercial, um ângulo

$$\theta_* = \Omega T_p = 2\pi/(1 - \kappa/2\Omega)$$

Portanto um observador fixo no referencial p verá que a estrela deve ter percorrido um ângulo $\phi_* = \theta_* - 2\pi = 2\pi(\kappa/2\Omega)/(1 - \kappa/2\Omega)$. Em consequência, através de uma simples regra de três, podemos estimar que o período do centro guia da estrela neste referencial não inercial deve ser

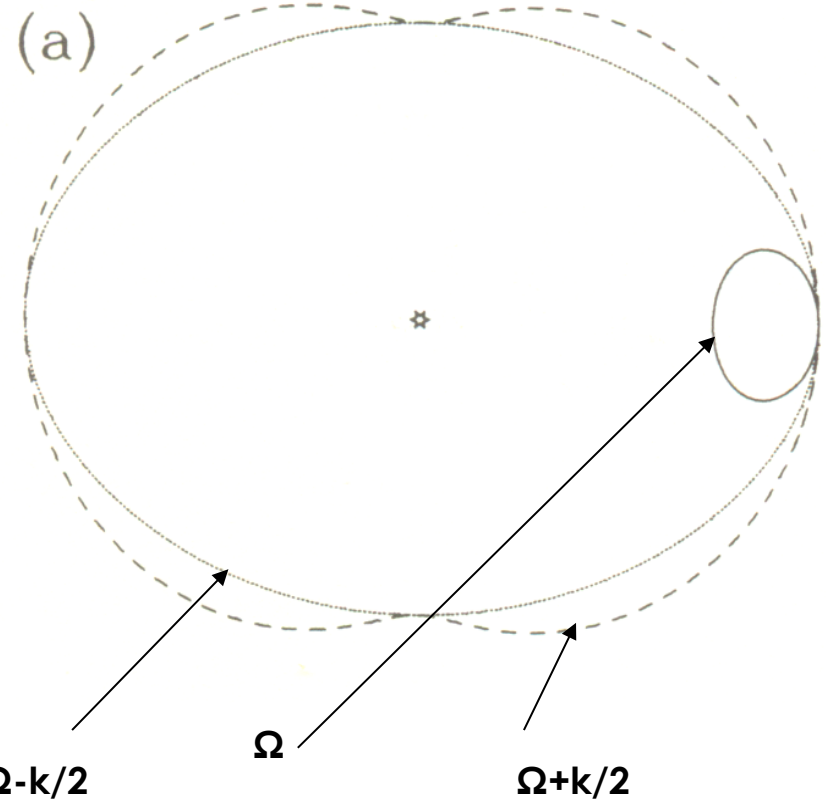
$$T_{*p} = 2\pi / \phi_* \quad T_p = T_*/(\kappa/2\Omega)$$



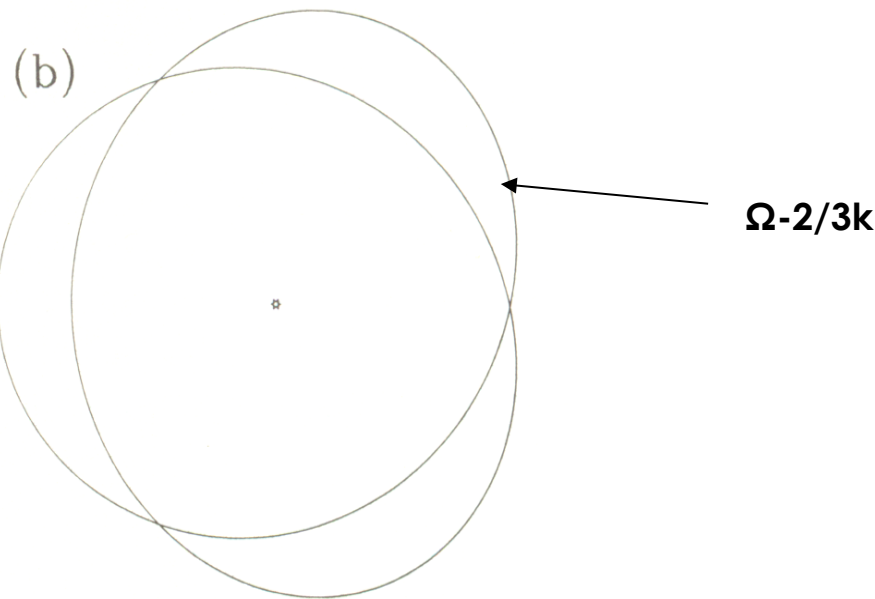
Ocorre que durante uma rotação completa da estrela no referencial não inercial (p) o movimento de epiciclo completou, no referencial inercial, um ângulo

$$\varphi_{*k} = kT_{*p} = kT_{*}/(k/2\Omega) = 2\Omega T_{*} = 2 \times 2\pi$$

Ou seja ocorreram duas voltas exatas no movimento de epiciclo e a estrela voltou portanto ao mesmo ponto em que iniciou o movimento! Este fenômeno de órbitas estelares fechadas ocorre em todos os referenciais ditos em rotação ressonante ($\Omega_p = \Omega - n/mk$), com n e m inteiros, como se vê pelas figuras.



Qual é o significado físico dos números n e m?

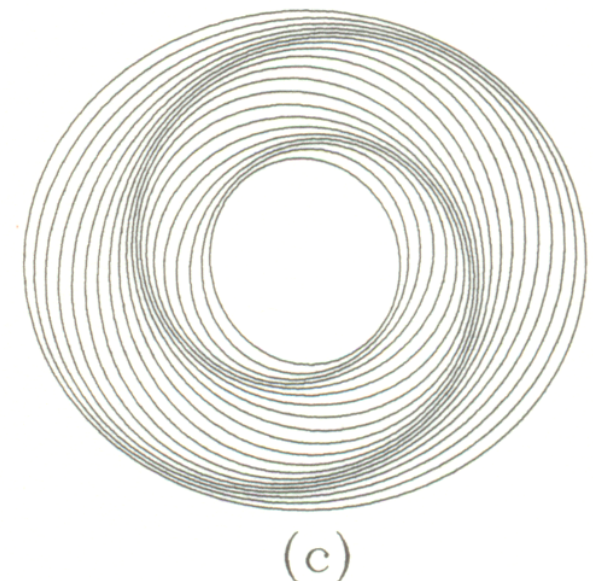
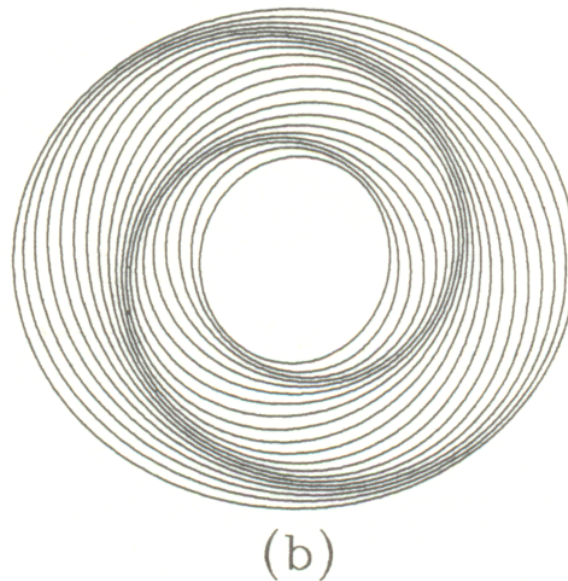
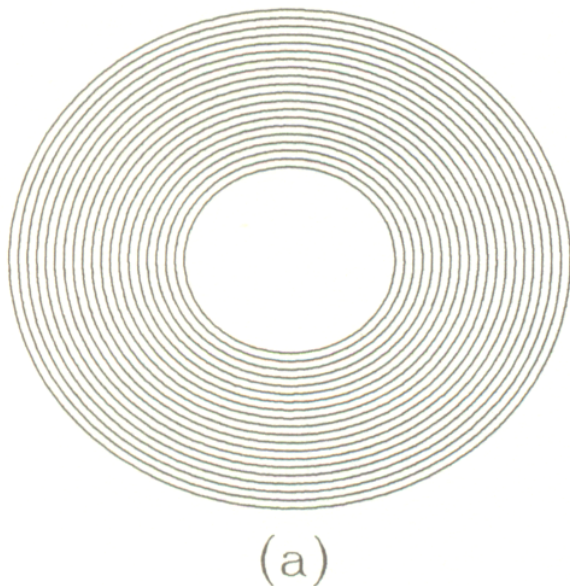


Para construir um sistema de braços espirais usando esta coincidência observada por Lindblad basta então orientar inicialmente as órbitas elípticas no referencial em rotação Ω_p atribuindo adequadamente uma fase inicial a cada uma delas. Neste sistema o padrão espiral de dois braços se mantém estável graças à estrutura ressonante (1:2) dos movimentos de epícclos das órbitas estelares.

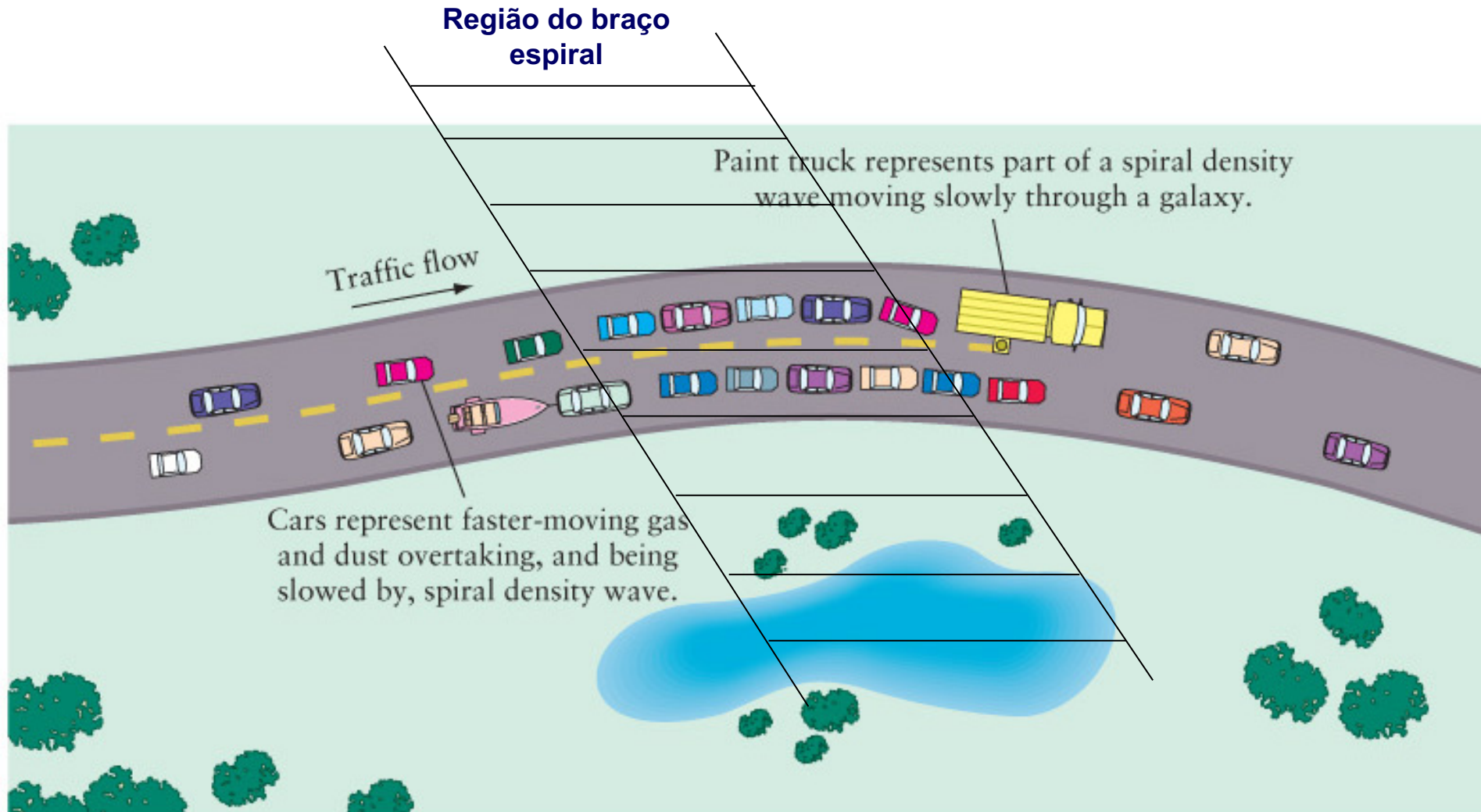
Esta é a explicação cinemática dos braços espirais na concepção de Lindblad!

Observe que o braço espiral está presente porque em cada instante um conjunto de estrelas diferentes se aproximam devido ao seu movimento de epícclo. Quando estas se afastam outras tomam o seu lugar fazendo com o padrão espiral execute uma rotação exatamente idêntica à do referencial ressonante $\Omega_p = \Omega - k/2$.

Claro que existe ainda a dificuldade de explicar porque as órbitas se organizaram no início segundo o padrão espiral.

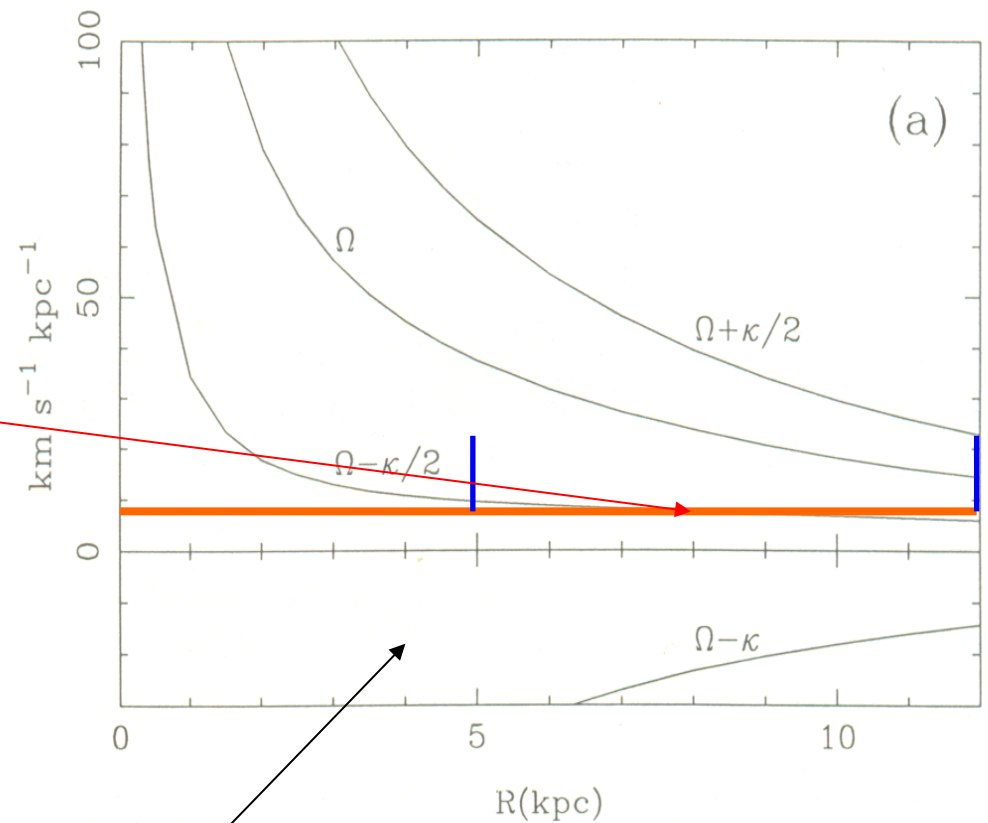


Nesta interpretação o efeito de passagem das estrelas pelos braços espirais é semelhante ao que ocorre em um engarrafamento de carros em uma rodovia. Para quem observa a partir de um helicóptero existe ali um excesso de veículos. Mas em cada instante a composição desta região se altera com a evolução gradual do tráfego.



Ao observar as curvas de rotação das galáxias em geral Lindblad percebeu então que no referencial ressonante $\Omega_p = \Omega - \kappa/2$ o valor de Ω_p é, para alguns valores, praticamente constante sobre uma dimensão radial ~~bastante~~ importante.

Observe por exemplo o caso da Via Láctea em este fenômeno ocorre para $\Omega_p \sim 9 \text{ km/s/Kpc}$ em uma região que se estende desde 5 a cerca de 12 Kpc de distância radial. Esta coincidência é a base da interpretação cinemática dos braços espirais de acordo com Lindblad.



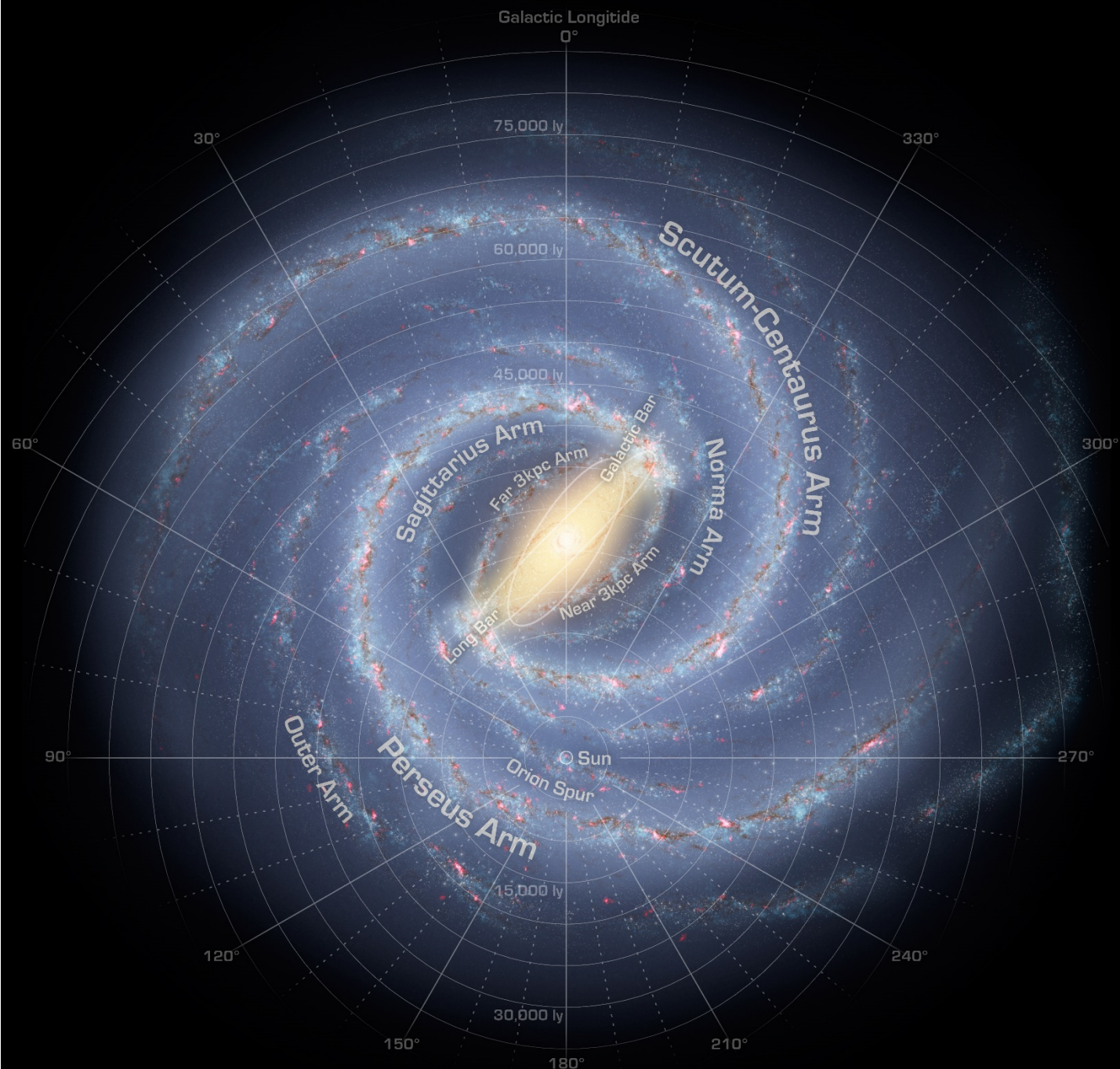
**Modelo de Bahcall-Soneira
para a Via Láctea**

Explique porque no caso da Via Láctea os braços espirais não devem cruzar a região central.

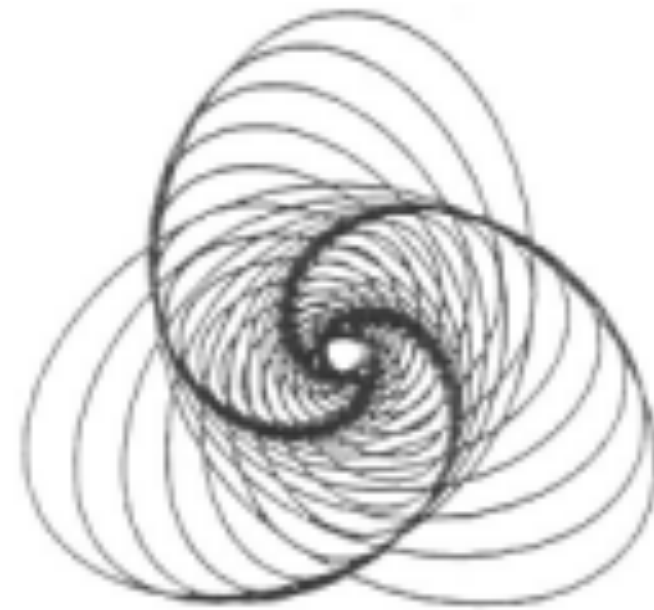
No caso da Via Láctea acredita-se que o padrão espiral apresente uma frequência angular $\Omega_p = 11 \text{ km/s/Kpc}$ com uma estrutura semelhante à da figura ao lado vista anteriormente.

Observe que a velocidade angular do padrão espiral é distinta da velocidade angular do LSR que apresenta $\Omega \sim 28 \text{ km/s/Kpc}$.

O fato da Via Láctea apresentar vários braços espirais é consistente com a interpretação de Lindblad?

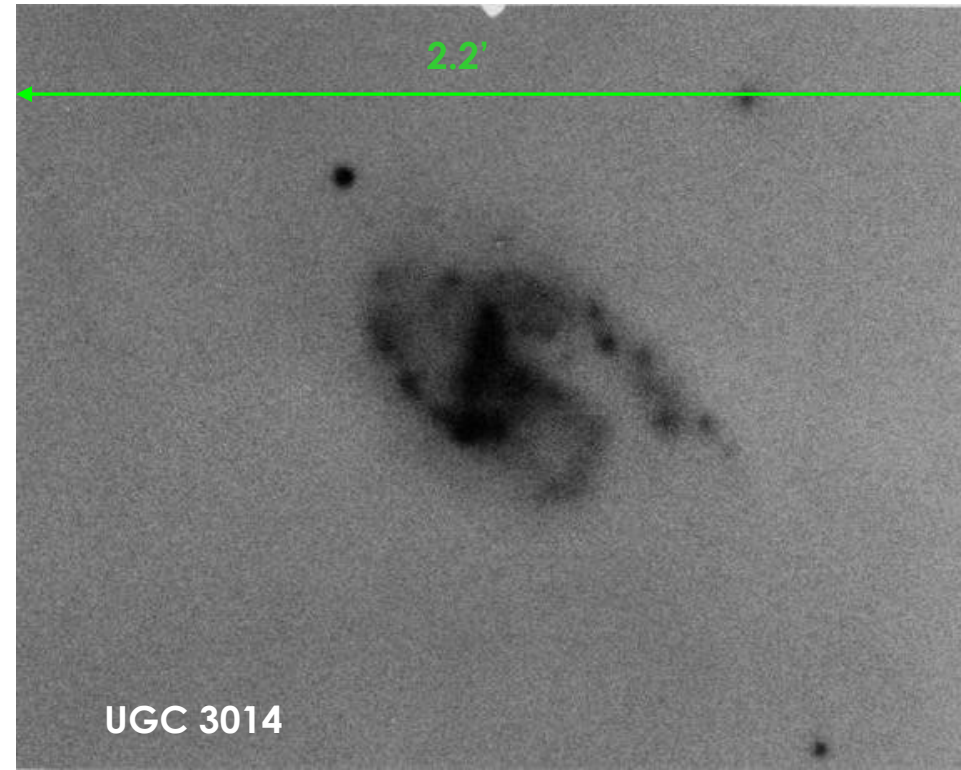
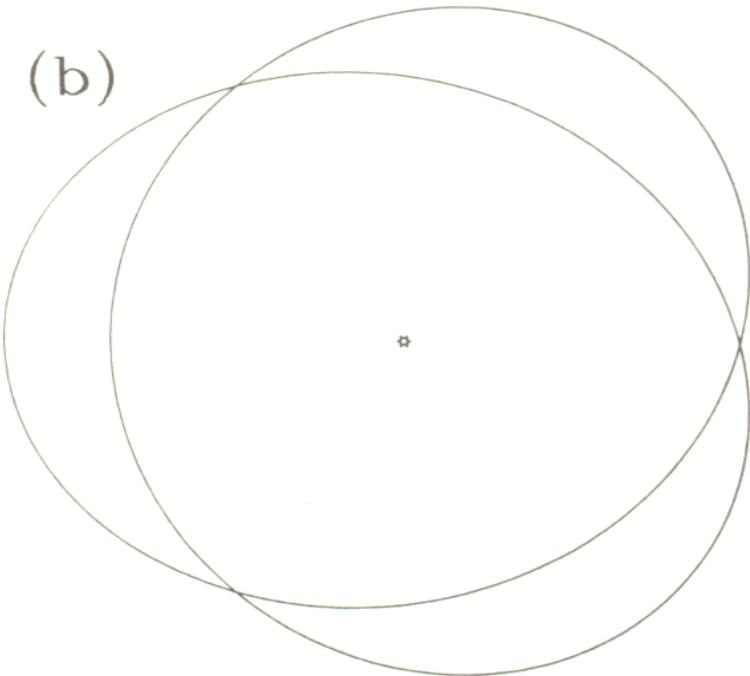


Em princípio seria possível construir estruturas espirais estáveis usando outros referenciais ressonantes, como o 3:2, ilustrado ao lado. O requisito básico é que em todos estes casos a velocidade angular do padrão ($\Omega_p = \Omega - n/m k$) deve se manter constante sobre uma dimensão radial suficientemente extensa para comportar a permanência do mesmo.



$$\Omega - 2/3k$$

(b)



UGC 3014

Nesta interpretação podemos imaginar que quando as órbitas estelares não estão organizadas não observamos qualquer padrão espiral (a). Eventualmente as órbitas se organizam em um padrão do tipo barra (b). Dependendo da extensão do arranjo a estrutura espiral pode ir até as regiões centrais (c). Outra possibilidade é que exista uma barra na região central a partir da qual saiam os braços espirais externos (d).



a. NO WAVE



b. BAR WAVE



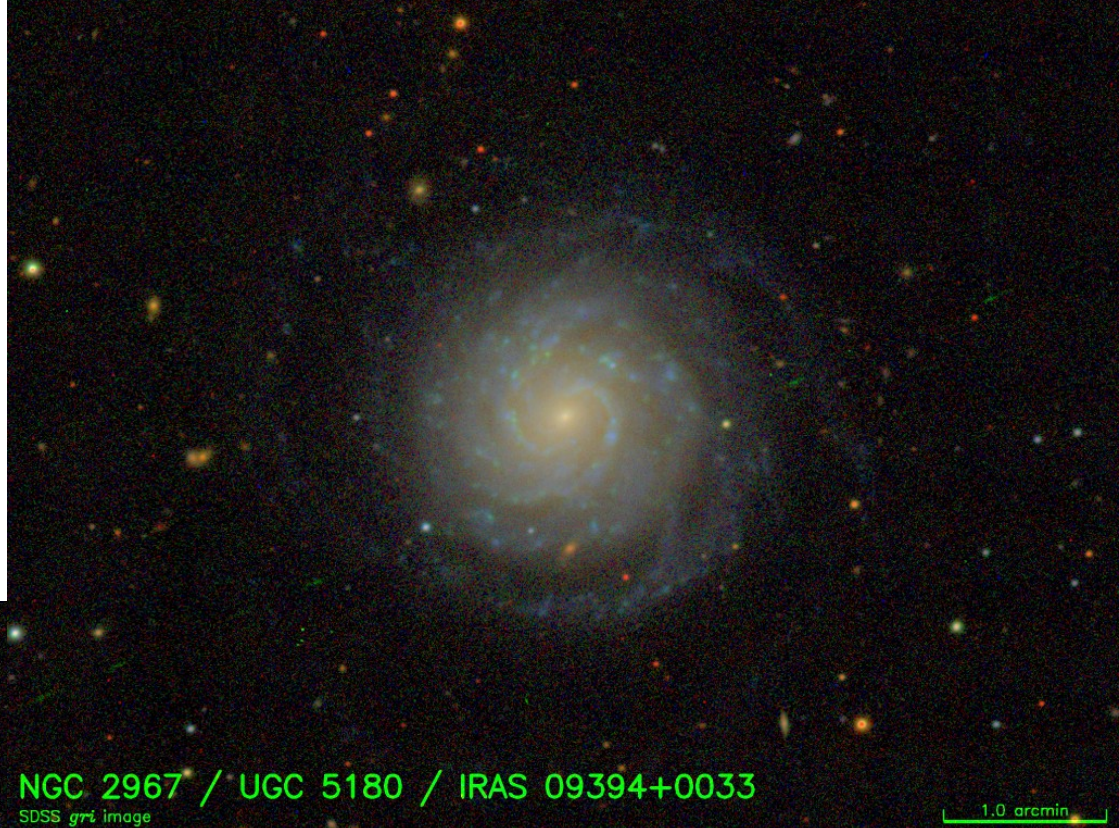
c. SPIRAL WAVE



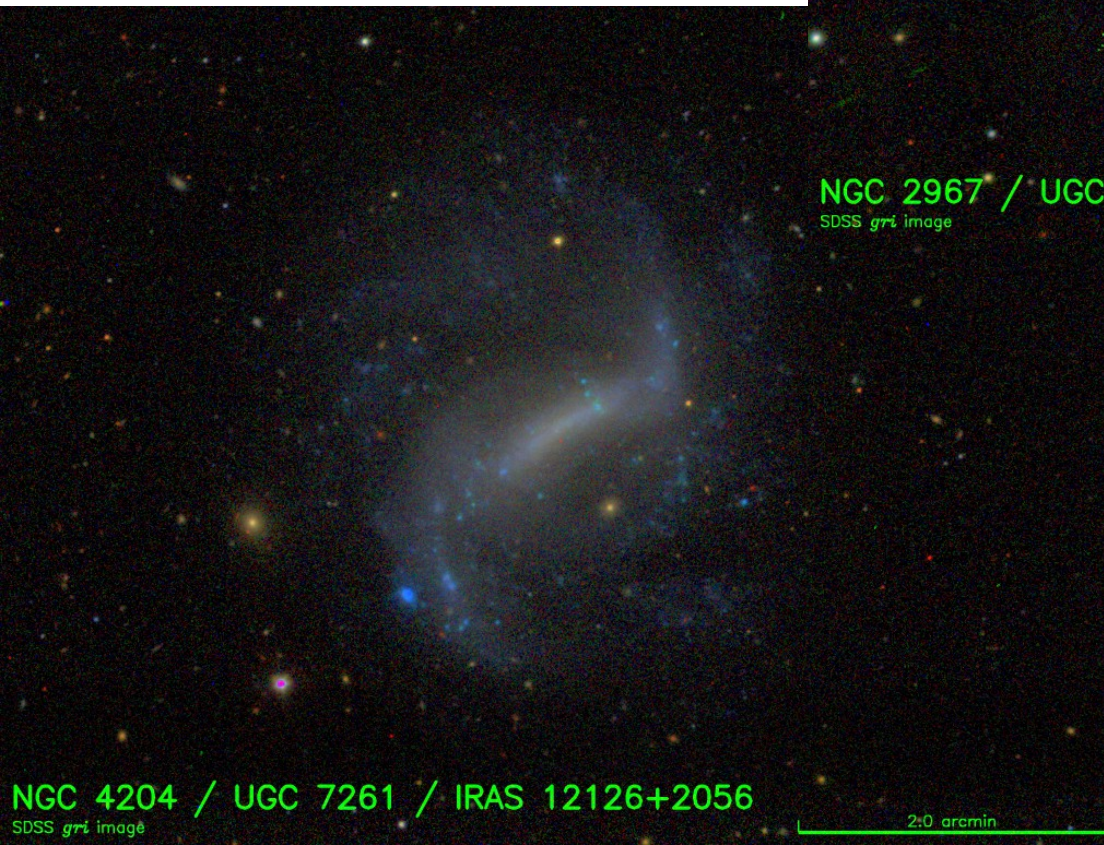
d. BARRED SPIRAL WAVE



Dois exemplos de galáxias
com dois braços bem
definidos, uma não barrada
e a outra barrada.

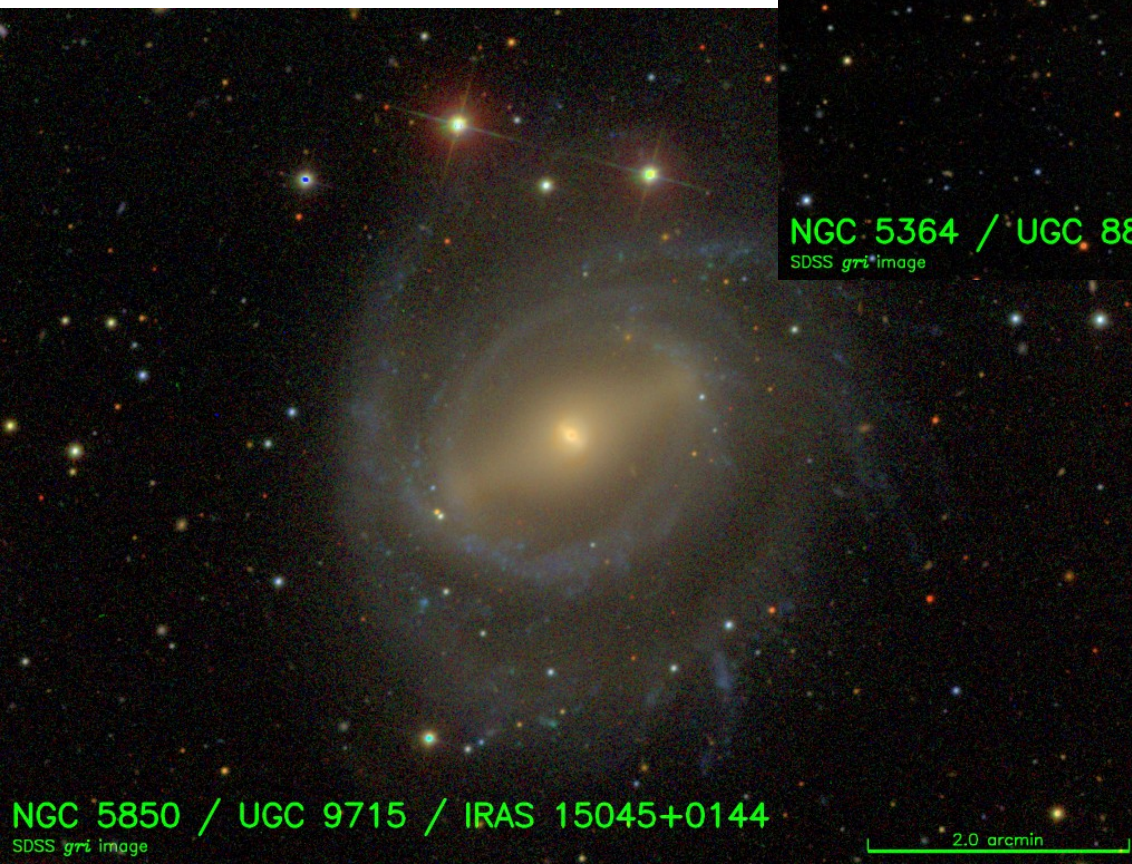
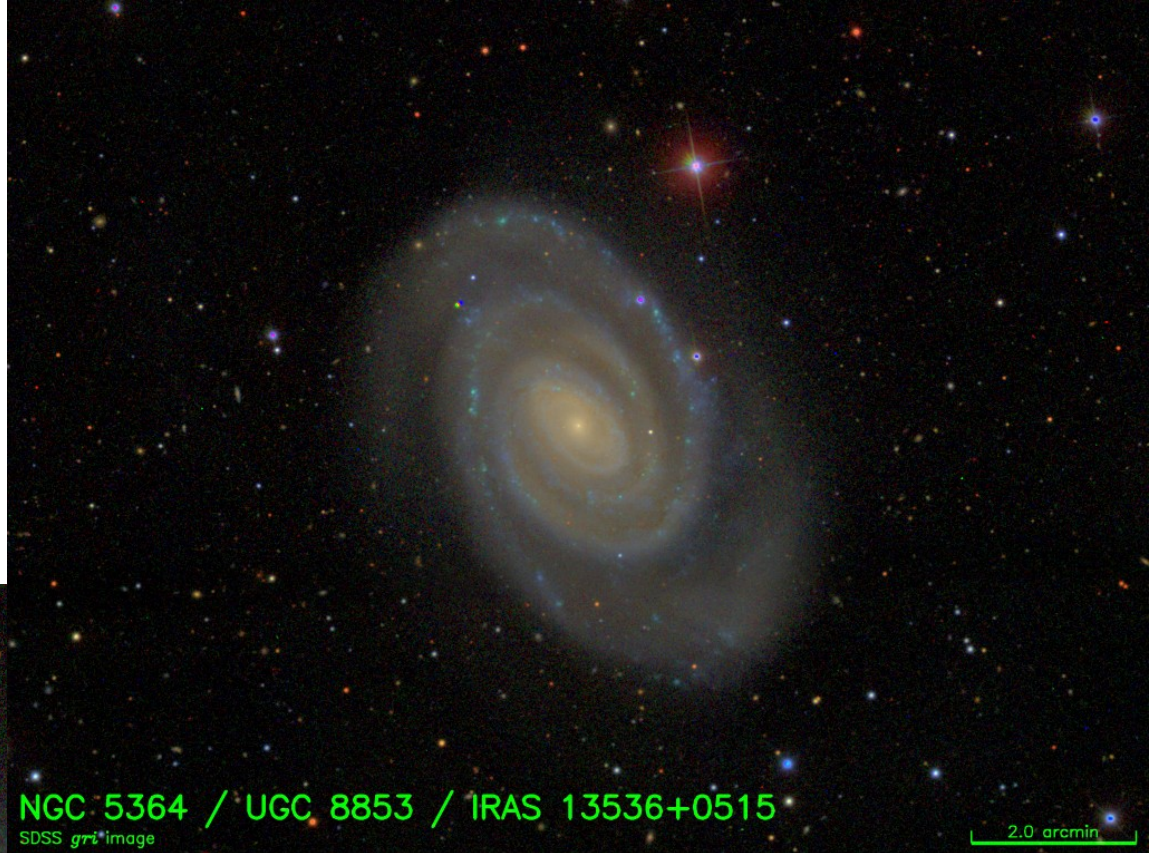


NGC 2967 / UGC 5180 / IRAS 09394+0033
SDSS *gri* image

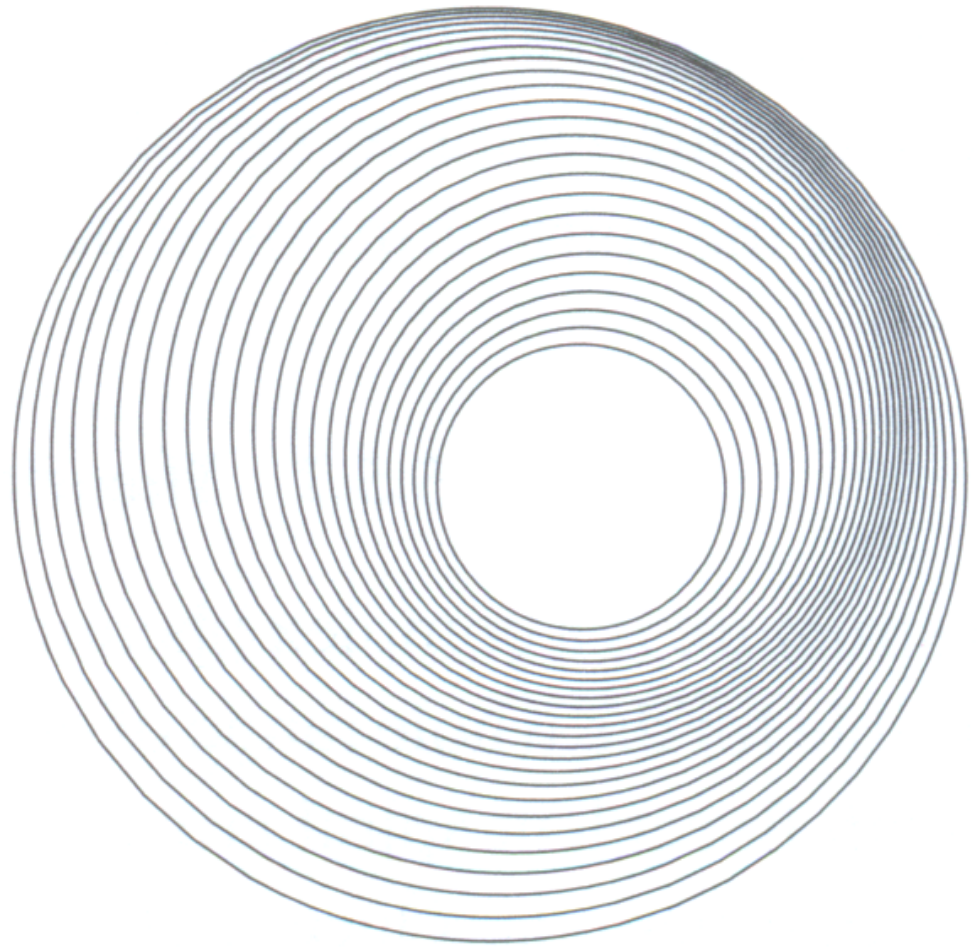
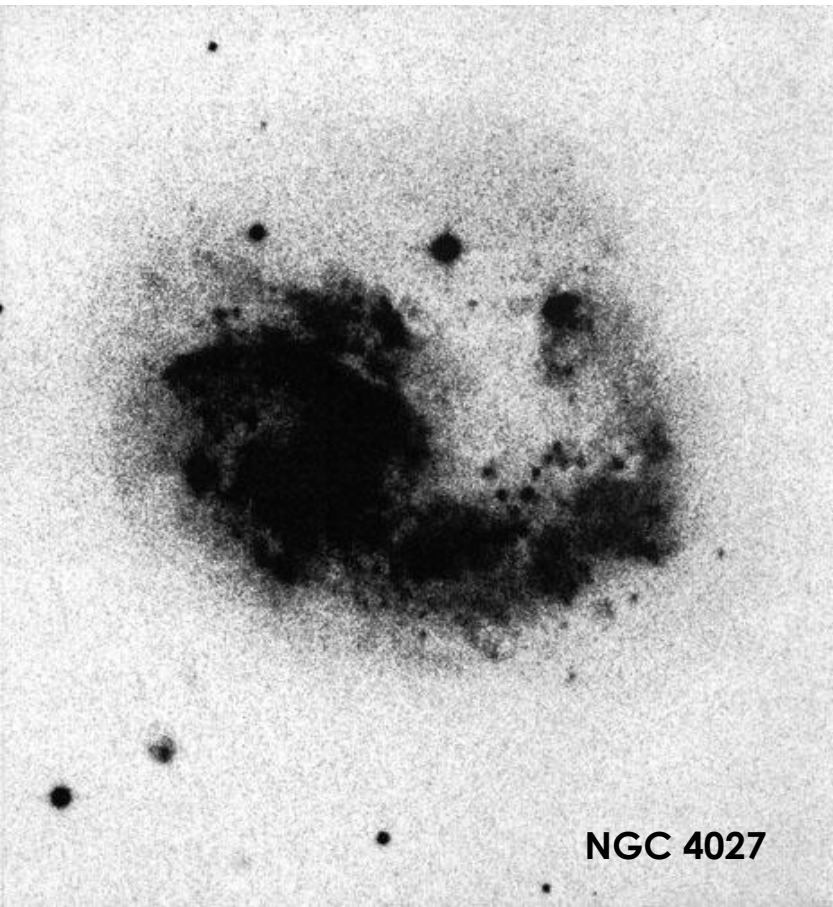


NGC 4204 / UGC 7261 / IRAS 12126+2056
SDSS *gri* image

Em alguns casos, seja nas barradas ou nas não barradas, os braços parecem se originar em um anel interno.



Em princípio, apesar de incomuns, é possível construir casos de galáxias com apenas um único braço espiral. Nesta situação é necessário deslocar o centro das órbitas externas requerendo muito provavelmente a interação com algum outro objeto próximo.



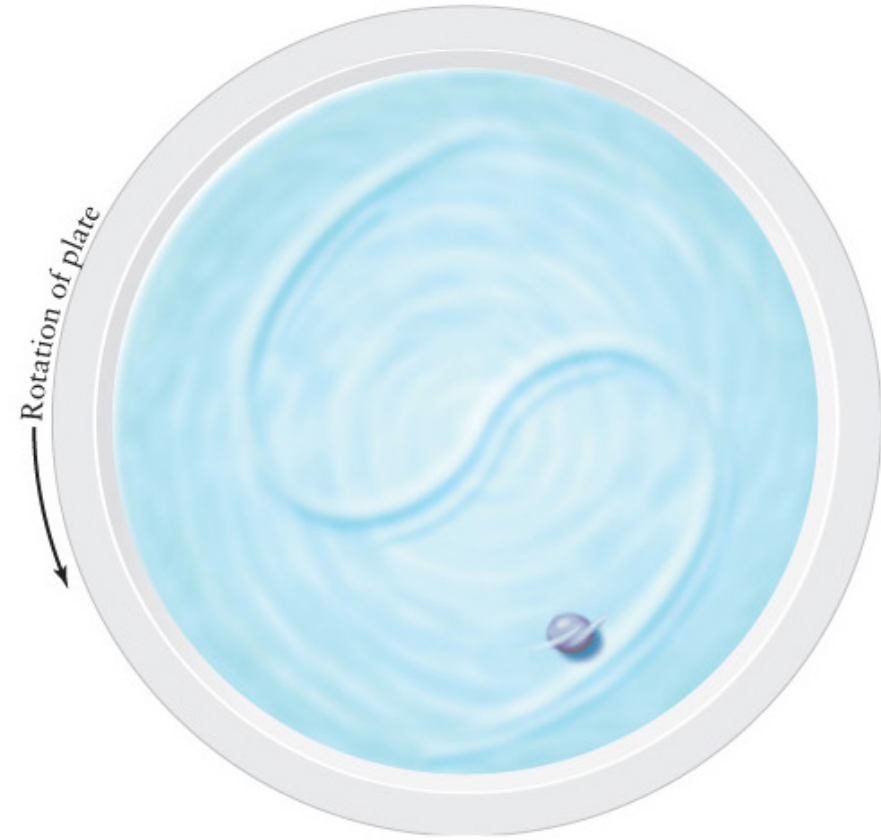
Você seria capaz de imaginar um evento capaz de gerar um sistema de apenas um braço espiral?

A interpretação cinemática de Lindblad é um grande avanço mas não pode ser considerada como uma teoria definitiva. Primeiro porque é possível mostrar que os pequenos desvios de $\Omega - k/2$ em relação a um valor constante destruiriam gradualmente os braços espirais. Em segundo lugar resta ainda justificar porque o padrão espiral se organiza como tal em um dado instante

A interpretação ondulatória de Lin e Shu (1966) mostra que perturbações aleatórias de densidades modificam o potencial gravitacional que por sua vez afeta consistentemente a distribuição de movimento das estrelas mantendo coesa a estrutura dos braços espirais durante longos períodos de tempo.



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 ondulatória se modifique criando um padrão espiral. Portanto esta estrutura se origina e se mantém graças a um fenômeno ondulatório cuja perturbação inicial pode ser inteiramente aleatória.



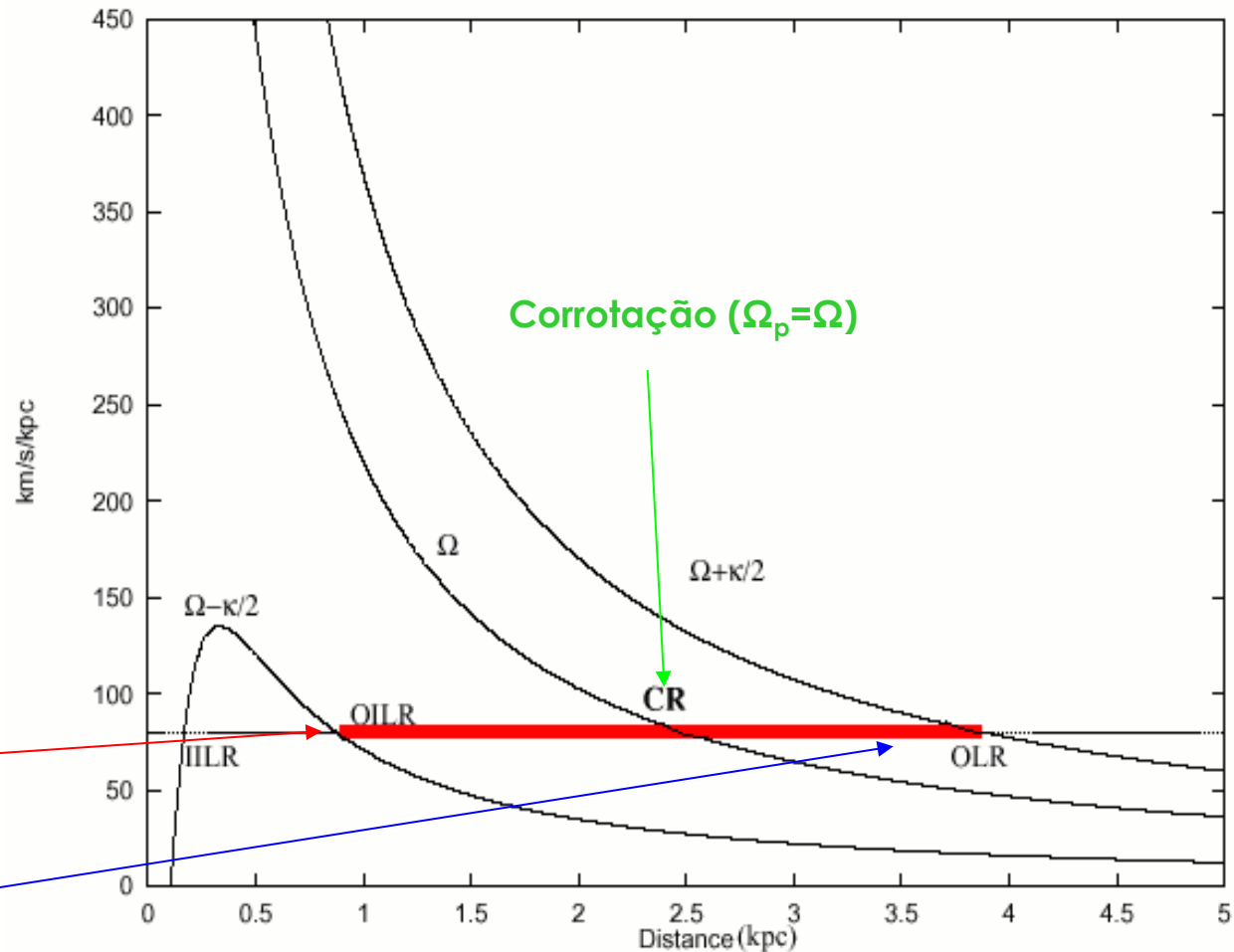
b



a

Na interpretação ondulatória não é estritamente necessário que $\Omega - k/2$ seja perfeitamente constante, mas deve estar próximo desta região. Neste caso é possível mostrar que a onda espiral deve sobreviver apenas no intervalo entre a ressonância interna de Lindblad ($\Omega_p = \Omega - k/2$), **ILR**, e a ressonância externa de Lindblad ($\Omega_p = \Omega + k/2$), **OLR**.

Acredita-se que os anéis internos e externos, vistos em muitos objetos, ocorram na ILR e OLR respectivamente.



Eventualmente o disco pode não apresentar a ILR e neste caso os braços espirais poderiam cruzar toda a região central da galáxia.

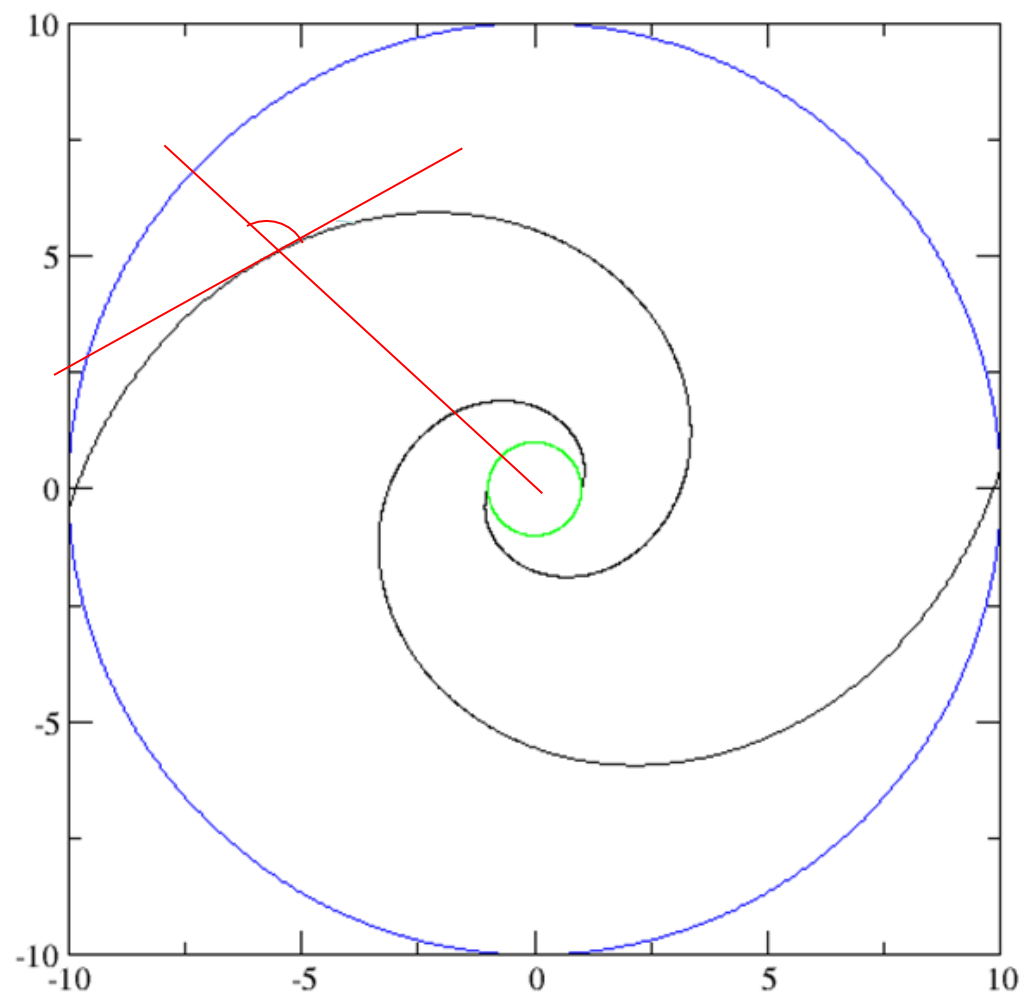
Uma característica interessante relacionada às ondas espirais é que normalmente os braços resultantes podem ser aproximadamente descritos por uma curva denominada espiral logarítmica

$$r=r_0e^{b\psi}$$

onde r e ψ representam as coordenadas radial e azimutal no plano do disco. Esta figura geométrica tem a propriedade de que o ângulo entre a tangente à curva e a direção radial é constante. O complemento deste ângulo é o chamado ângulo de passo (pitch angle) e seu valor é

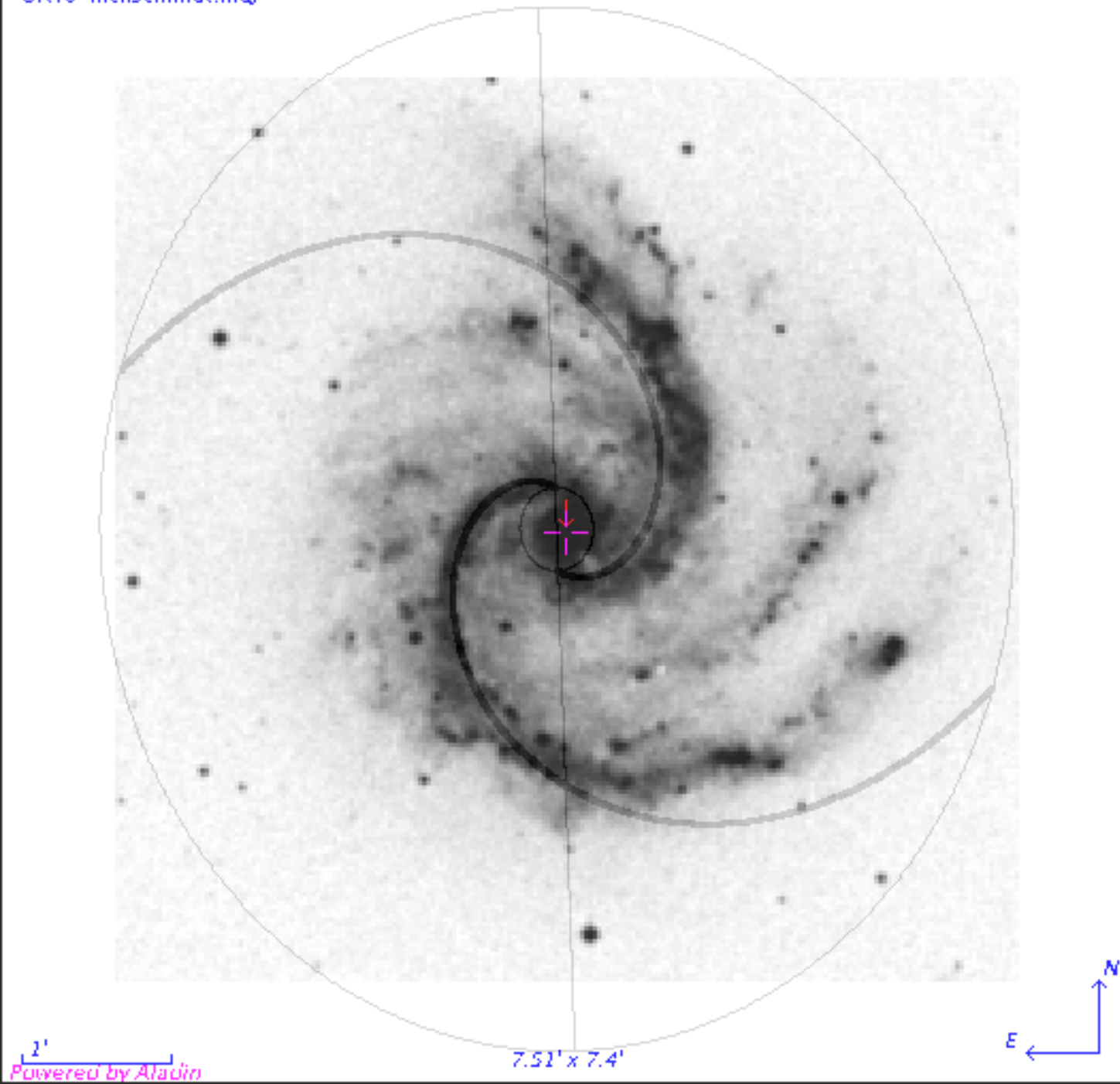
$$p=\pi/2 - \arctan(1/b)$$

indicando que o parâmetro b controla o grau de abertura da espiral logarítmica. Quando b tende ao valor $b=0$ o ângulo de passo tende a zero e a figura da espiral se transforma em um círculo.

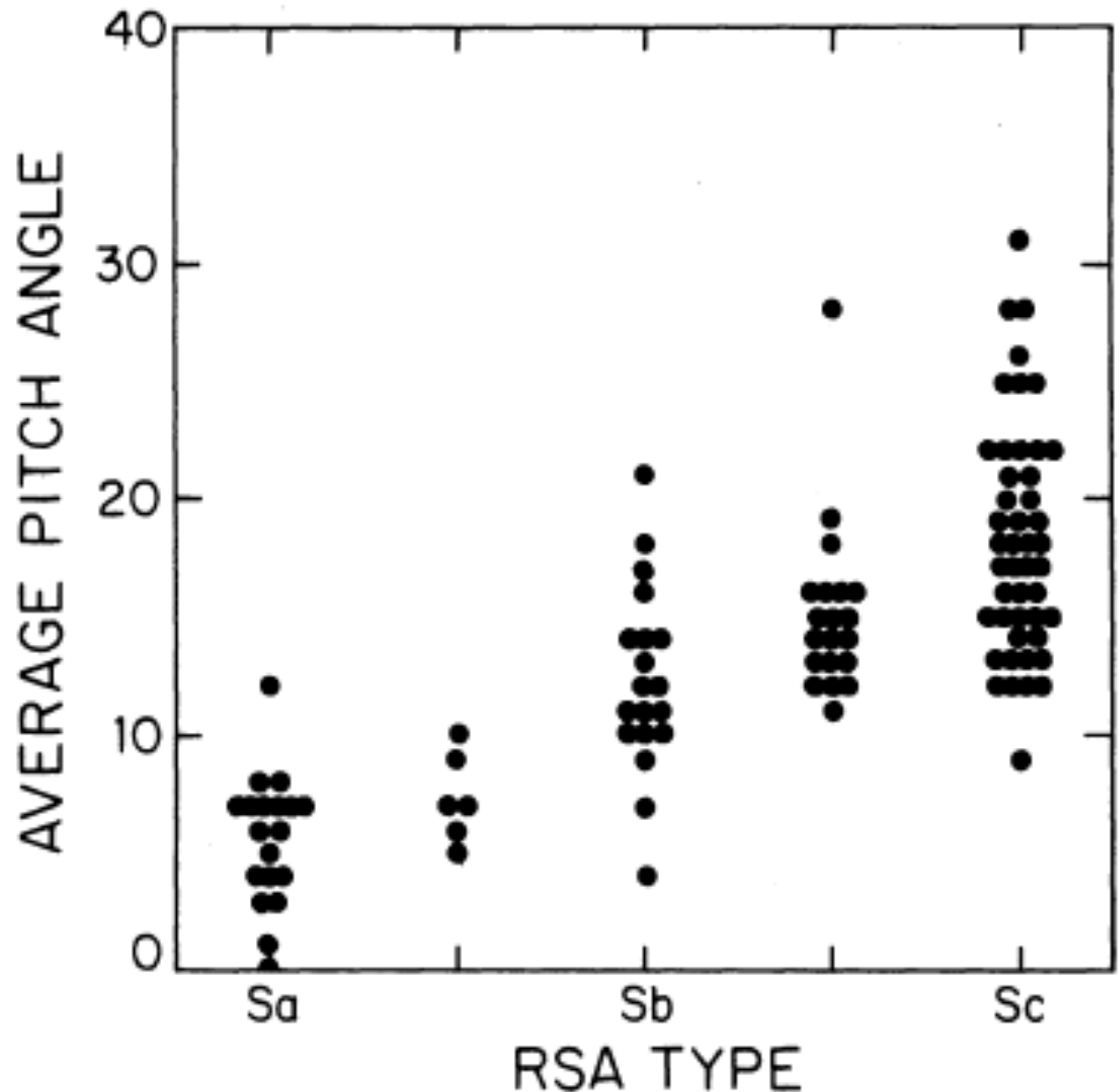


Exemplo de aplicação da espiral logarítmica na imagem de uma galáxia.

UK48-inchSchmidt:IIIaj

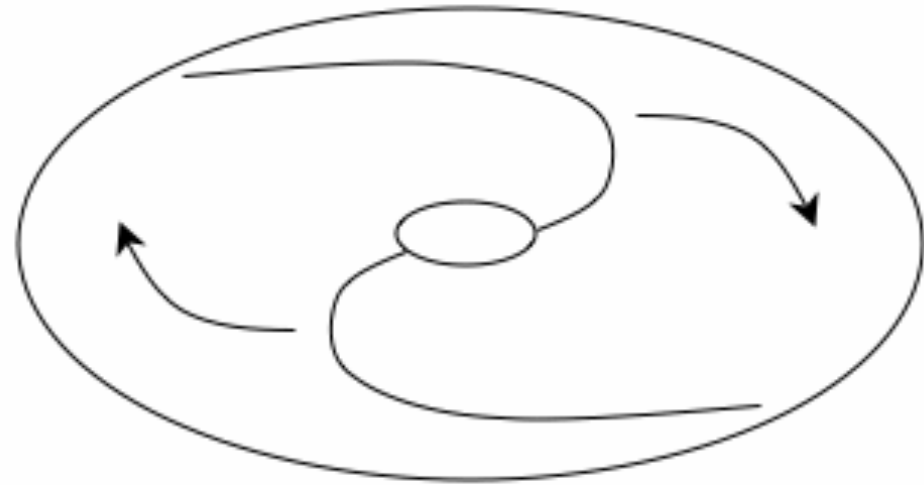


O pitch angle apresenta uma variação sistemática com o tipo morfológico. Este efeito detectado por Kennicutt ([1981, AJ, 86, 1847](#)) indica que na espirais do tipo mais jovem o pitch angle tende a ser menor, indicando uma figura mais fechada. Ao contrário, nas espirais do tipo tardio, o pitch angle é maior, indicando braços espirais mais abertos.

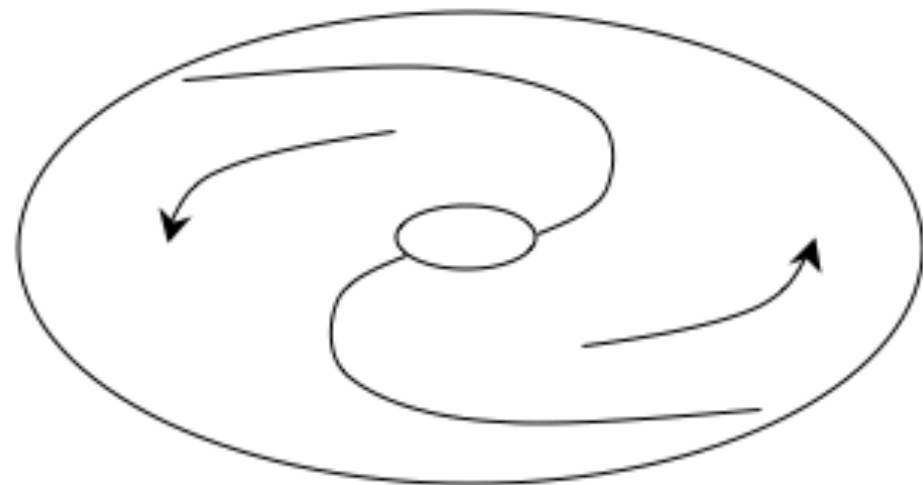


Uma outra discussão interessante consiste em determinar como a curvatura dos braços espirais se comporta em relação ao sentido de rotação do disco. No caso de braços de tipo trailing os extremos dos braços apontam para a direção oposta ao sentido de rotação. Ao contrário nos braços leading os extremos dos braços apontam para a mesma direção de rotação do disco. Em vários casos as indicações são de que os braços espirais são preferencialmente do tipo trailing. Mas existem casos onde se suspeita que os braços podem ser do tipo leading.

Trailing Arms



Leading Arms

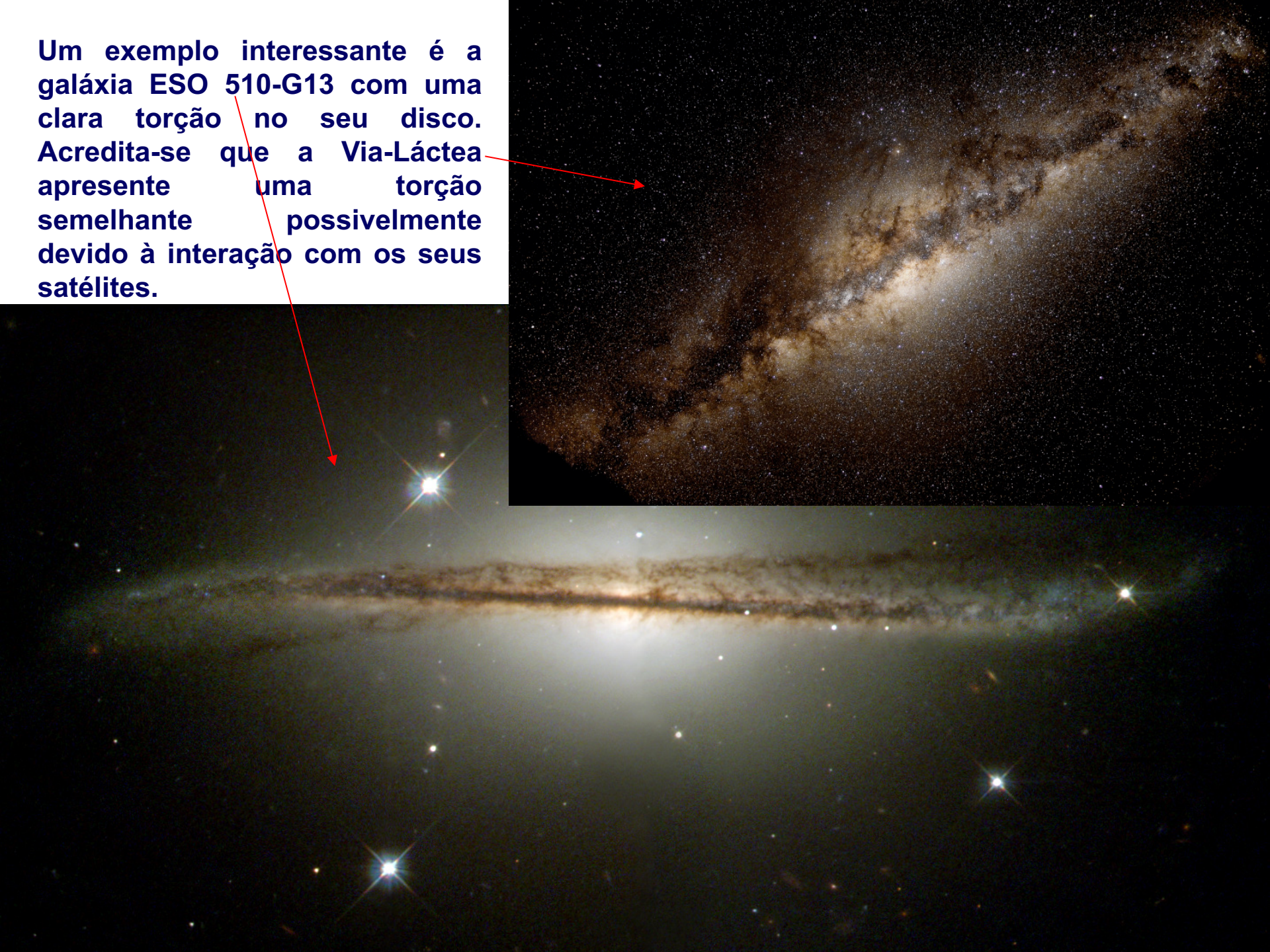


4.5 Torções no Disco

Recentemente descobriu-se que os discos de várias galáxias espirais apresentam o fenômeno do torção. É possível que este efeito resulte de instabilidades não suprimidas pelo halo de matéria escura, ou à presença de companheiras ou ainda devido à captura de material que não está devidamente alinhado com o disco.



Um exemplo interessante é a galáxia ESO 510-G13 com uma clara torção no seu disco. Acredita-se que a Via-Láctea apresente uma torção semelhante possivelmente devido à interação com os seus satélites.



4.6 Problemas

1. Utilizando o perfil de brilho apresentado para NGC 300 estime a escala de dimensão radial do disco (r_d) em minutos de arco. Sabendo que a distância de NGC 300 é igual a 1.981 Mpc estime a escala radial do disco em Kpc. Como ela se compara com a escala do disco da Via Láctea? Qual é a perturbação percentual do disco de NGC 300 devido aos braços espirais?
2. Se considerarmos o ângulo de inclinação, i , como uma variável aleatória qual deveria ser a proporção de galáxias espirais com $b/a > 0.9$?
3. Considere uma distribuição esférica de massa

$$4\pi\rho_H(r)=V_H^2/(r^2+r_H^2)$$

onde V_H e r_H são constantes. Qual é a expressão que descreve a massa contida dentro de uma esfera de raio r ? Mostre que neste modelo a velocidade circular a uma distância r é dada pela expressão

$$V^2(r)=V_H^2[1-r_H/r \operatorname{Atan}(r/r_H)]$$

Faça um gráfico desta função e explique porque esta expressão é usada algumas vezes para representar os halos de matéria escura.

4. Estime a dimensão de M31 na isofota 25 mag/". Sabendo que a distância de M31 é igual a 807 Kpc estime a dimensão métrica do disco de Andrômeda e compare com o diâmetro da Via Láctea. Estime a dimensão linear do bojo de M31.
5. Estime a perturbação percentual em NGC300 devido à presença dos braços espirais.
6. Mostre que a luminosidade integrada de um disco exponencial ($I(r)=I_0\exp(-r/r_d)$) é dada por

$$L_T = \int 2\pi I(r) r dr = 2\pi I_0 r_d^2$$

Estime a luminosidade do disco de M31 e compare com a sua luminosidade total ($B_T \sim 4.36$). Qual seria a razão bojo/disco de M31?

7. Estime a proporção de estrelas pobres em metais ($[Fe/H] < -2$) no halo, no bojo e no disco. Como voce explicaria este resultado?