

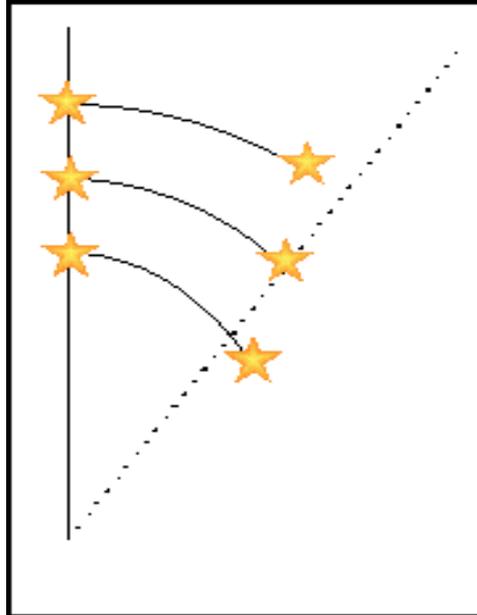
10. Galáxias Espirais

III. A estrutura espiral



Teoria dos epiciclos (Lindblad)

- Consideremos uma estrela no disco em órbita circular no raio r_0
- O que acontece se ela sofre uma pequena perturbação radial?



Teoria dos epiciclos (Lindblad)

- Consideremos uma estrela no disco em órbita circular no raio r_0
- Se ela está em equilíbrio, a aceleração gravitacional é igual à aceleração centrípeta (em coordenadas polares):

$$F(r_0) = g(r_0) = -r_0\dot{\theta}^2$$

$F(r)$: força gravitacional por unidade de massa

- Se ela sofre uma pequena perturbação radial, sua equação de movimento fica:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = F(r)$$

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

- equação de movimento “perturbada”:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = F(r)$$

(aceleração radial – centrípeta = força gravitacional por unidade de massa)

- Momento angular por unidade de massa:

$$h = r^2\dot{\theta}$$

num disco com simetria axial, h é constante

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

- Logo,

$$\ddot{r} - \frac{h^2}{r^3} = F(r)$$

- A solução estacionária, $\ddot{r} = 0$, corresponde a uma órbita circular de raio r_0 tal que

$$\frac{h^2}{r_0^3} = -F(r_0)$$

- e a equação do movimento pode ser reescrita como

$$\ddot{r} + \left(\frac{r_0}{r}\right)^3 F(r_0) = F(r)$$

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

$$\ddot{r} + \left(\frac{r_0}{r}\right)^3 F(r_0) = F(r)$$

- Suponha que a perturbação radial possa ser escrita como $r = r_0 + r'$, com $r' \ll r_0$
- Então, expandindo em séries de Taylor

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^3 \simeq 1 - 3\frac{r'}{r_0} + \dots$$

$$F(r) \simeq F(r_0) + r' \frac{dF}{dr} \Big|_{r=r_0} + \dots$$

(“linearização” da equação do movimento)

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

$$\ddot{r} + \left(\frac{r_0}{r}\right)^3 F(r_0) = F(r)$$

- Então, a equação de movimento fica

$$\ddot{r}' = -k^2 r'$$

onde

$$k = \left(-3 \frac{F(r_0)}{r_0} - \left. \frac{dF}{dr} \right|_{r=r_0} \right)^{1/2}$$

- Essa é a equação de um oscilador harmônico de frequência k

k : *frequência de epiciclo*

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

- equação de movimento:

$$\ddot{r}' = -k^2 r'$$

onde

$$k = \left(-3 \frac{F(r_0)}{r_0} - \left. \frac{dF}{dr} \right|_{r=r_0} \right)^{1/2}$$

- mas,

$$F(r) = -\Omega(r)^2 r$$

e, portanto,

$$k(r) = 2\Omega(r) \left(1 + \frac{r}{2\Omega(r)} \frac{d\Omega}{dr} \right)^{1/2}$$

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

$$k(r) = 2\Omega(r) \left(1 + \frac{r}{2\Omega(r)} \frac{d\Omega}{dr} \right)^{1/2}$$

- Curva de rotação chata:

$$v_c = \text{cte} \text{ e } \Omega(r) = v_c/r$$

- Logo, $d\Omega/dr = -v_c/r^2 = -\Omega/r$ e, portanto,

$$k(r) = \sqrt{2}\Omega(r)$$

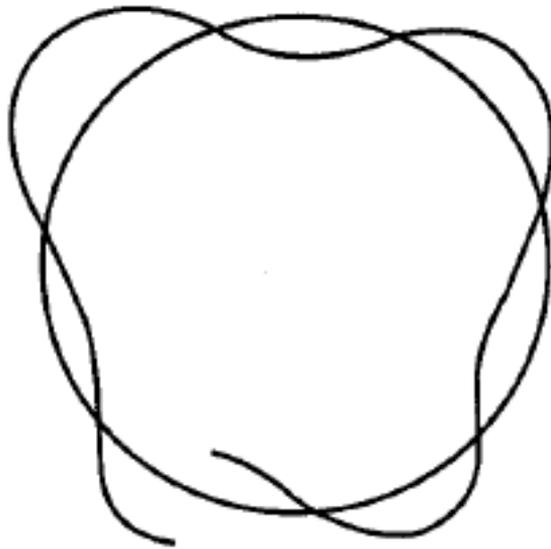
Teoria dos epiciclos (Lindblad)

$$k(r) = \sqrt{2}\Omega(r)$$

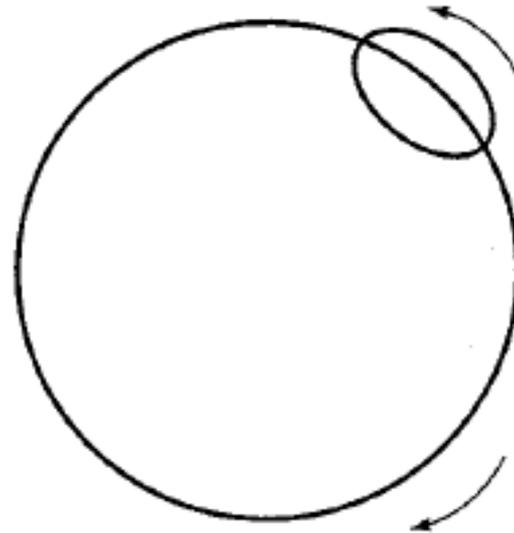
- Período do epiciclo: $P=2\pi/k$
- Período da estrela em torno do centro da galáxia:
 $T=2\pi r/v_c = 2^{1/2}P$
- Logo, T e P são incomensuráveis: o epiciclo não se fecha
- Sol: $v_c = 220$ km/s; $r=8.5$ kpc
período do epiciclo: $P \approx 2 \times 10^8$ anos

Teoria dos epiciclos (Lindblad)

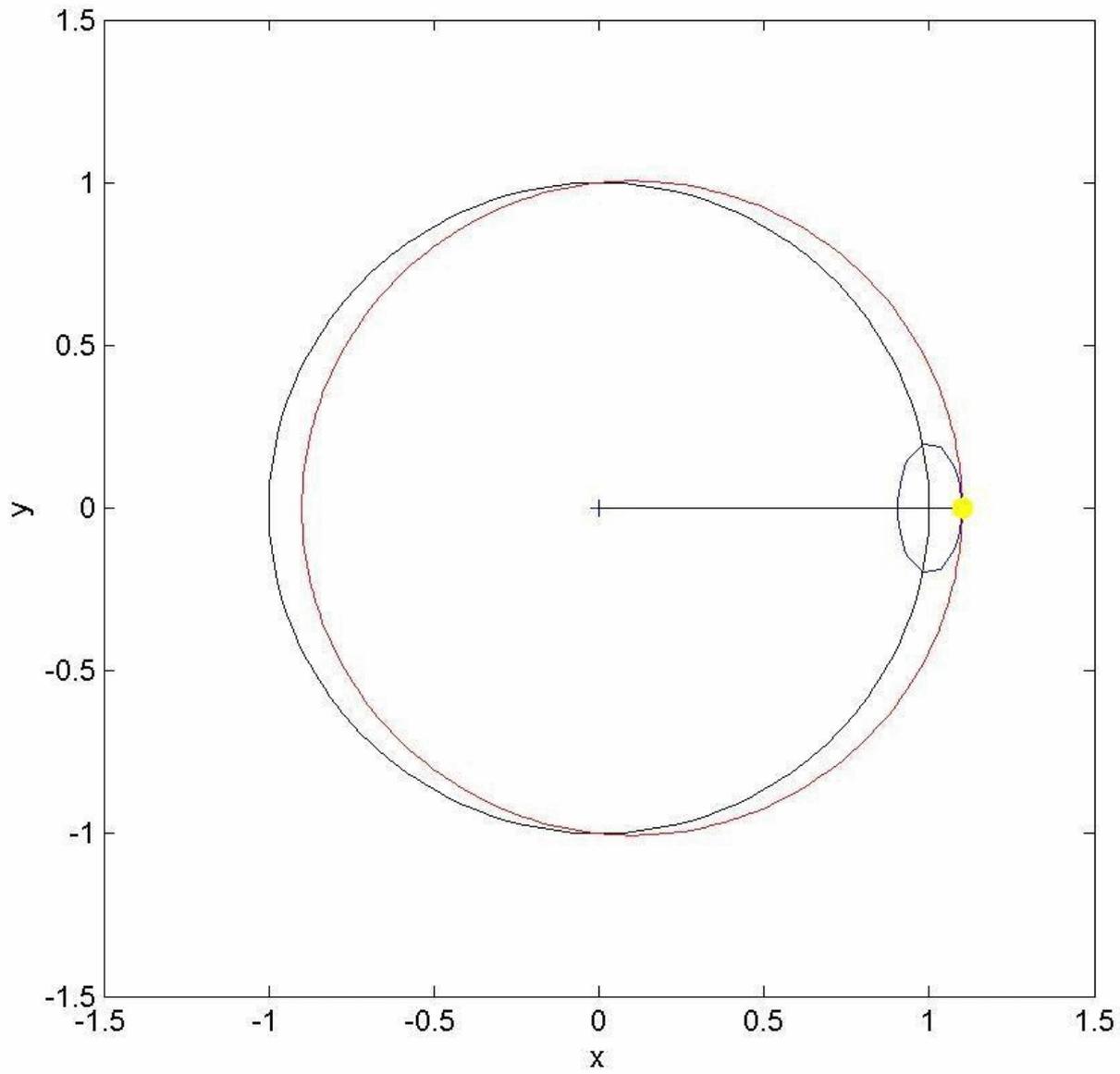
- Epiciclos: rotação de frequência k em torno de um centro que se move ao longo de uma órbita não perturbada
- Note que a direção do movimento em um epiciclo é retrógrada em relação à rotação galáctica



Visão Externa



Visão Comóvel



Estrutura espiral

- Os braços espirais das galáxias *Grand Design* são aproximadamente *espirais logarítmicas*
- Em coordenadas polares:

$$r(\theta) = r_0 \exp(\theta \tan \alpha)$$

onde α é o ângulo de inclinação do braço (*pitch angle*), que é aproximadamente constante

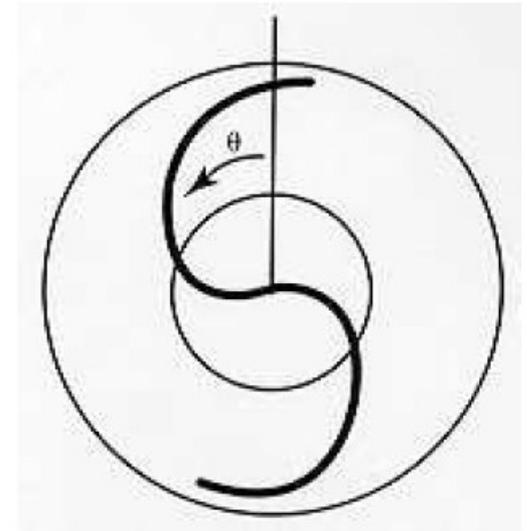


Figura 6.5: Esquema de uma espiral logarítmica.

Estrutura espiral

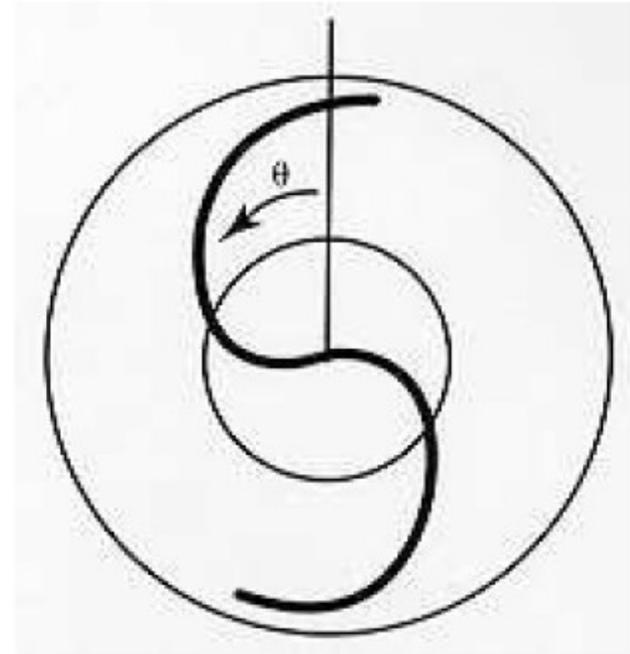
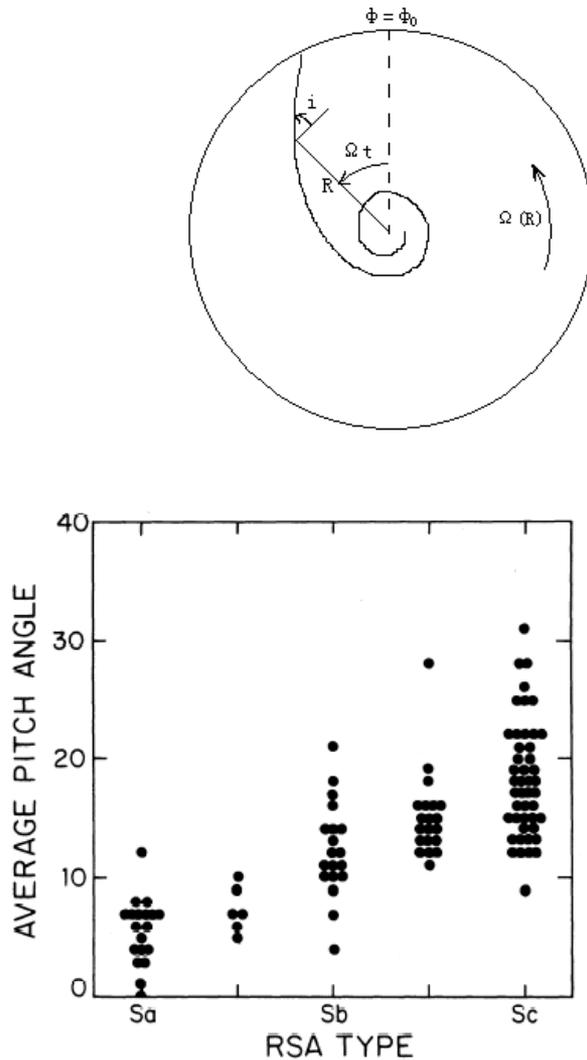


Figura 6.5: Esquema de uma espiral logarítmica.

Estrutura espiral

- Distinguem-se dois tipos de braços espirais: *leading* e *trailing* (condutores e arrastados)
- A maioria dos braços é *trailing*

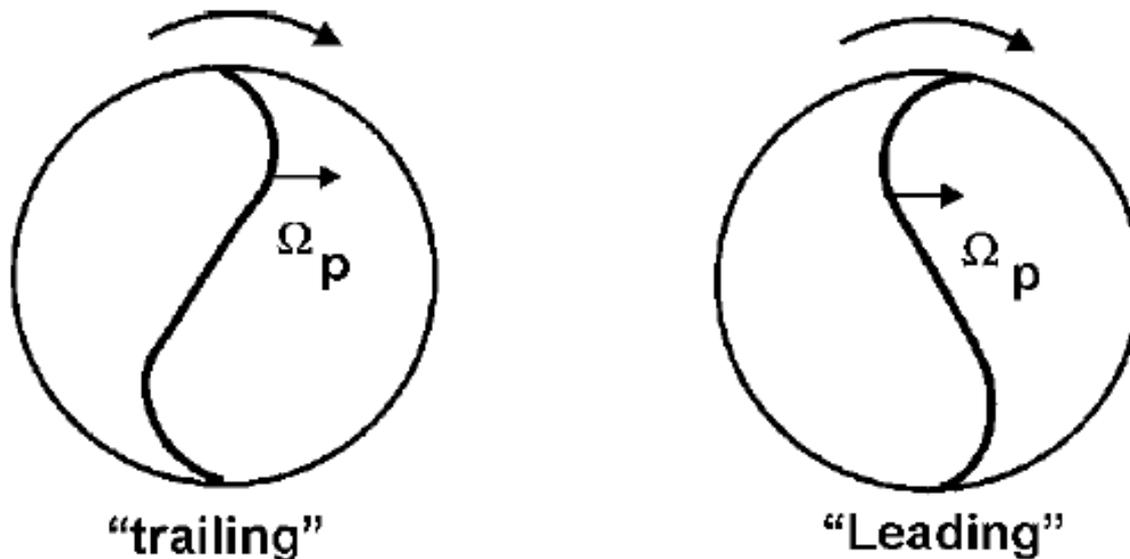


Figura 6.6: Braços *leading* e *trailing*.

Estrutura espiral

- Os braços espirais não são geralmente *braços materiais*, isto é, onde o braço move-se arrastando as estrelas e o gás
- Equação de um braço material:
$$\theta(r) = \theta_0 + \Omega(r) t$$
onde $\Omega(r)$ é a velocidade angular do disco no raio r
- Exemplo: curva de rotação chata:
$$v_c = \Omega(r) r = \text{cte:}$$
$$\theta(r) = \theta_0 + v_c t / r$$

Estrutura espiral

- Exemplo: Sol na Galáxia:

- $r \sim 8.5$ kpc, $v_c = 220$ km/s

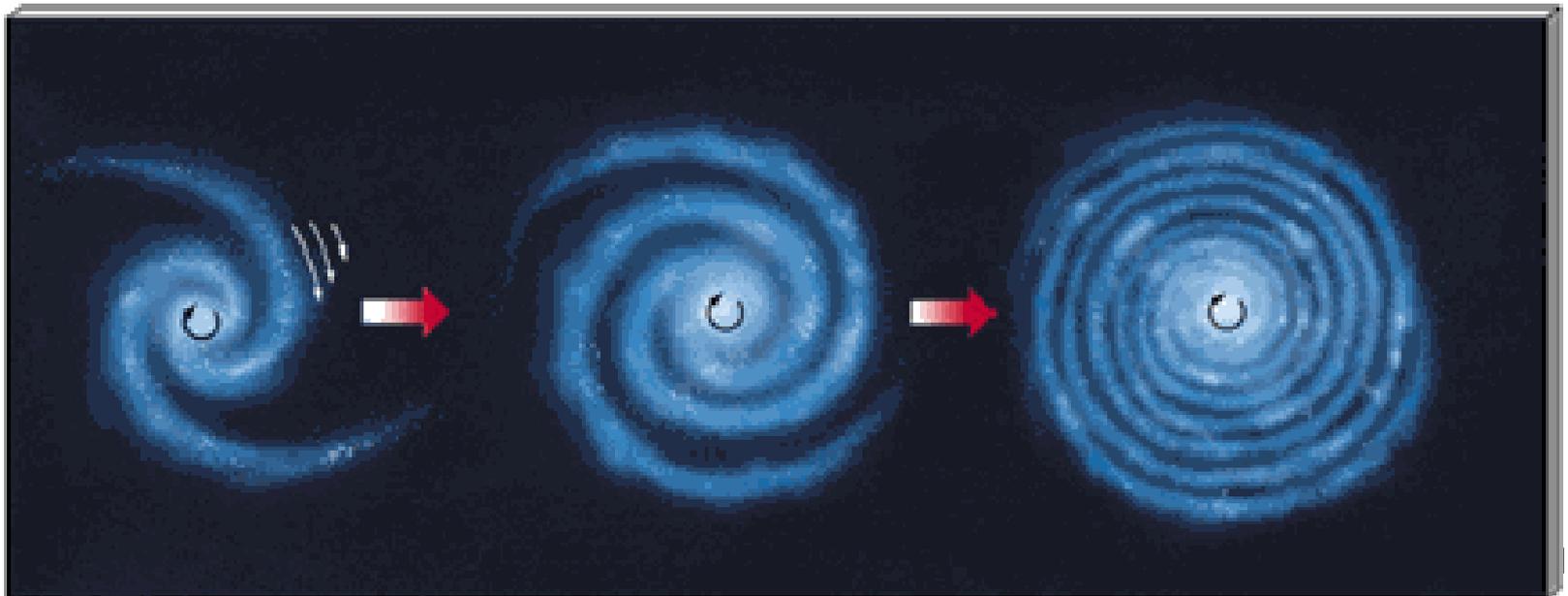
- uma volta completa ($\theta = 2\pi$):

$$t = 2\pi r / v_c = 2.4 \times 10^8 \text{ anos}$$

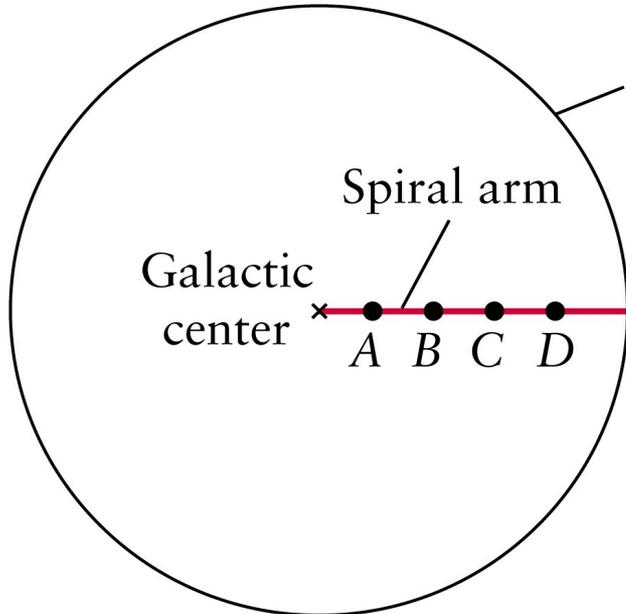
- se a Galáxia tem $\sim 10^{10}$ anos e os braços espirais fossem braços materiais que acompanhassem a rotação diferencial das galáxias, eles já teriam se enrolado completamente!

Origin of Spiral Arms [1]: The Winding Problem

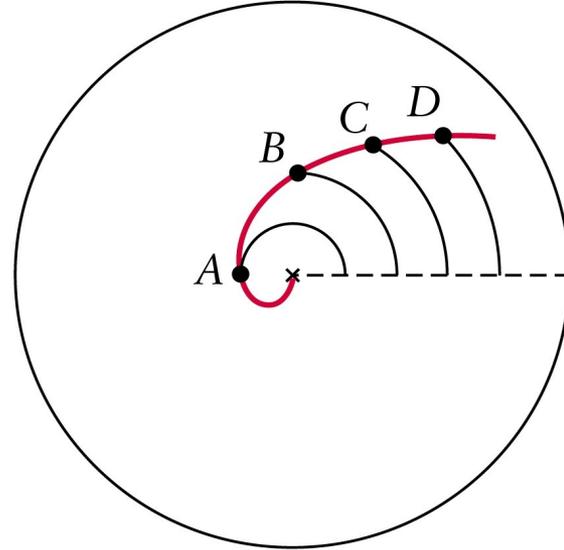
- MW \sim 12 billion years old
- orbital period \sim 1/4 billion years
- arms should be tightly wound after 50 orbits



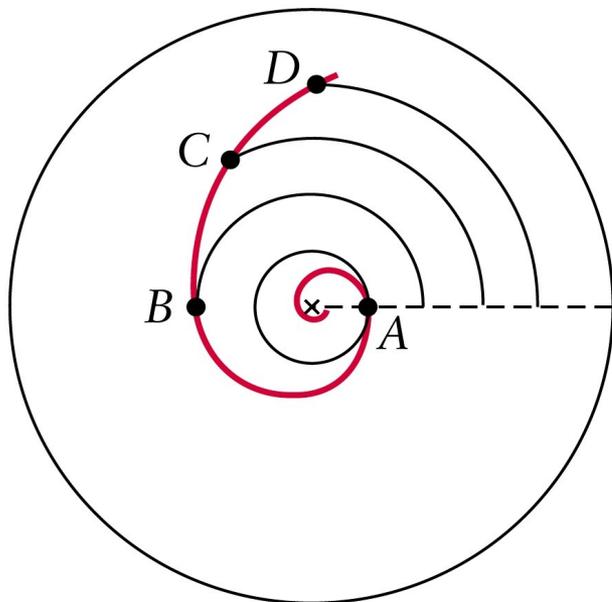
Disk of the Galaxy
(top view)



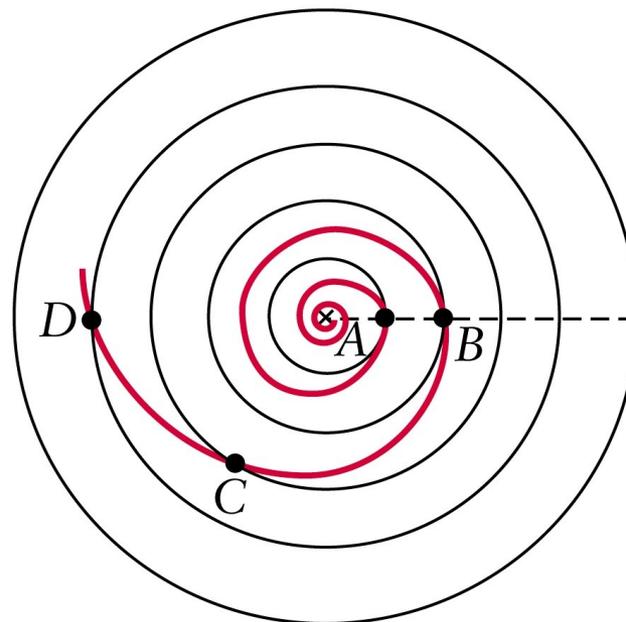
a



b After $\frac{1}{2}$ orbit of star A



c After one orbit of star A



d After two orbits of star A

Ondas de densidade

- Lindblad (1963): os braços espirais seriam um padrão (ondas de densidade) girando como um *corpo rígido* no disco com velocidade angular Ω_p
- Lin & Shu (1964): estudo da propagação de ondas em um disco estelar- os braços espirais seriam *ondas de densidade* que se propagam no disco com velocidade angular $\Omega_p = \text{cte.}$
- *Ondas de densidade (como as ondas no mar): elas se propagam no disco mas não arrastam as estrelas e o gás*
- As barras também seriam ondas de densidade

Ressonâncias

- Várias características morfológicas das galáxias estão associadas a ressonâncias entre Ω_p e a frequência de epiciclo k
- Velocidade angular das estrelas no referencial da onda espiral:
$$\Omega' = \Omega - \Omega_p$$
- Ressonâncias com a frequência de epiciclo:
$$\Omega' = k/m,$$
 com m inteiro (1,2,3...) e igual ao número de braços espirais
- Logo,
$$\Omega - \Omega_p = \pm k/m$$

numa ressonância um braço encontra uma estrela sempre na mesma posição no epiciclo

Ressonâncias

- Espirais com 2 braços ($m=2$) podem apresentar 3 tipos de ressonância:
 - * $\Omega = \Omega_p$: corotação
 - * $\Omega = \Omega_p - k/2$: ressonância externa de Lindblad (OLR)
 - * $\Omega = \Omega_p + k/2$: ressonância interna de Lindblad (ILR)
- uma galáxia pode ter 0, 1 ou 2 ILRs

Ressonâncias

- Curva de rotação simplificada

– velocidade de rotação :

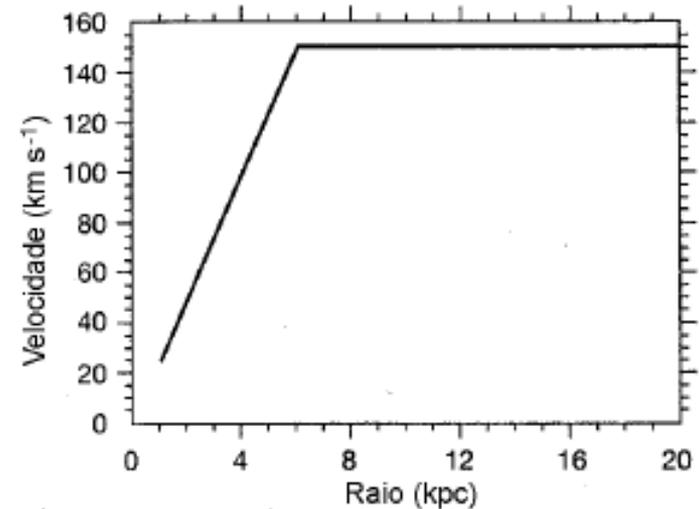
$$v = \begin{cases} v_c \frac{r}{r_0} & (r \leq r_0) \\ v_c & (r > r_0) \end{cases}$$

– velocidade angular:

$$\Omega = \frac{v}{r} = \begin{cases} \Omega_0 = \frac{v_c}{r_0} & (r \leq r_0) \\ \Omega_0 \frac{r_0}{r} & (r > r_0) \end{cases}$$

– frequência de epiciclo:

$$k = \begin{cases} 2\Omega_0 & (r \leq r_0) \\ \sqrt{2}\Omega & (r > r_0) \end{cases}$$



Ressonâncias

- Curva de rotação simplificada

- Exemplo:

$$v_c = 150 \text{ km/s}$$

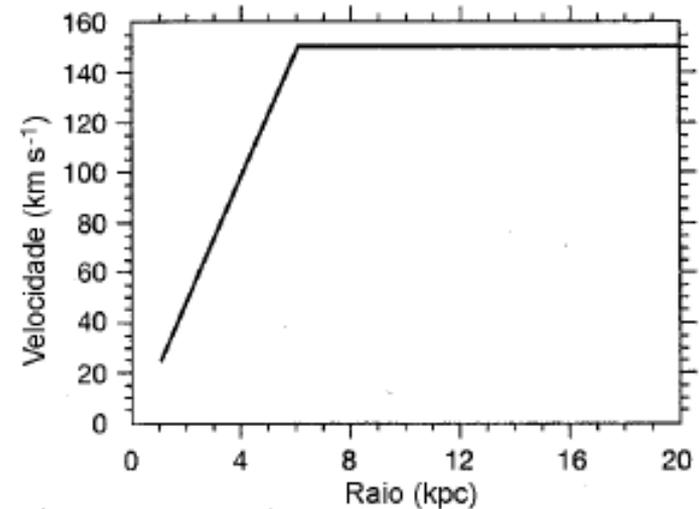
$$r_0 = 6 \text{ kpc}$$

$$\Omega_p = 15 \text{ km/s/kpc}$$

corotação: $r = 10 \text{ kpc}$

OLR: $r = 17 \text{ kpc}$

ILR: não tem



Ressonâncias

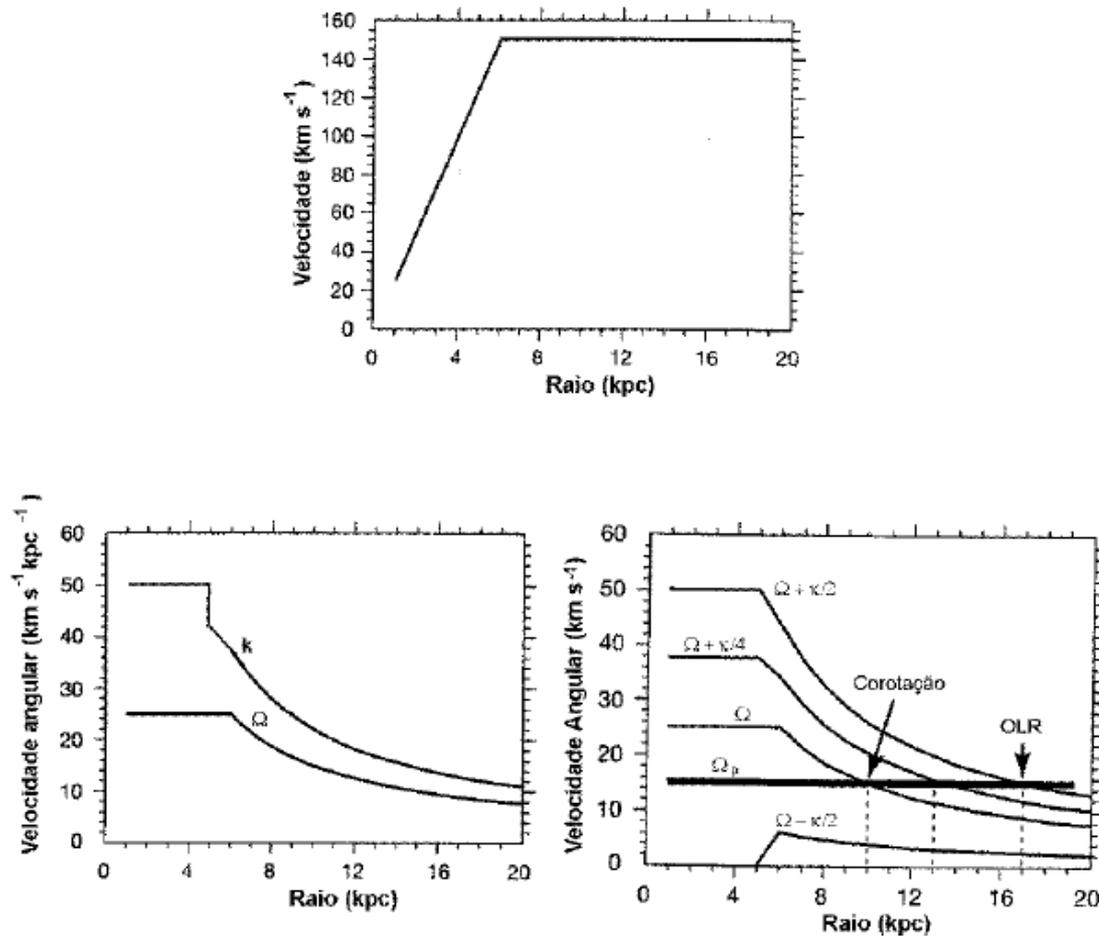
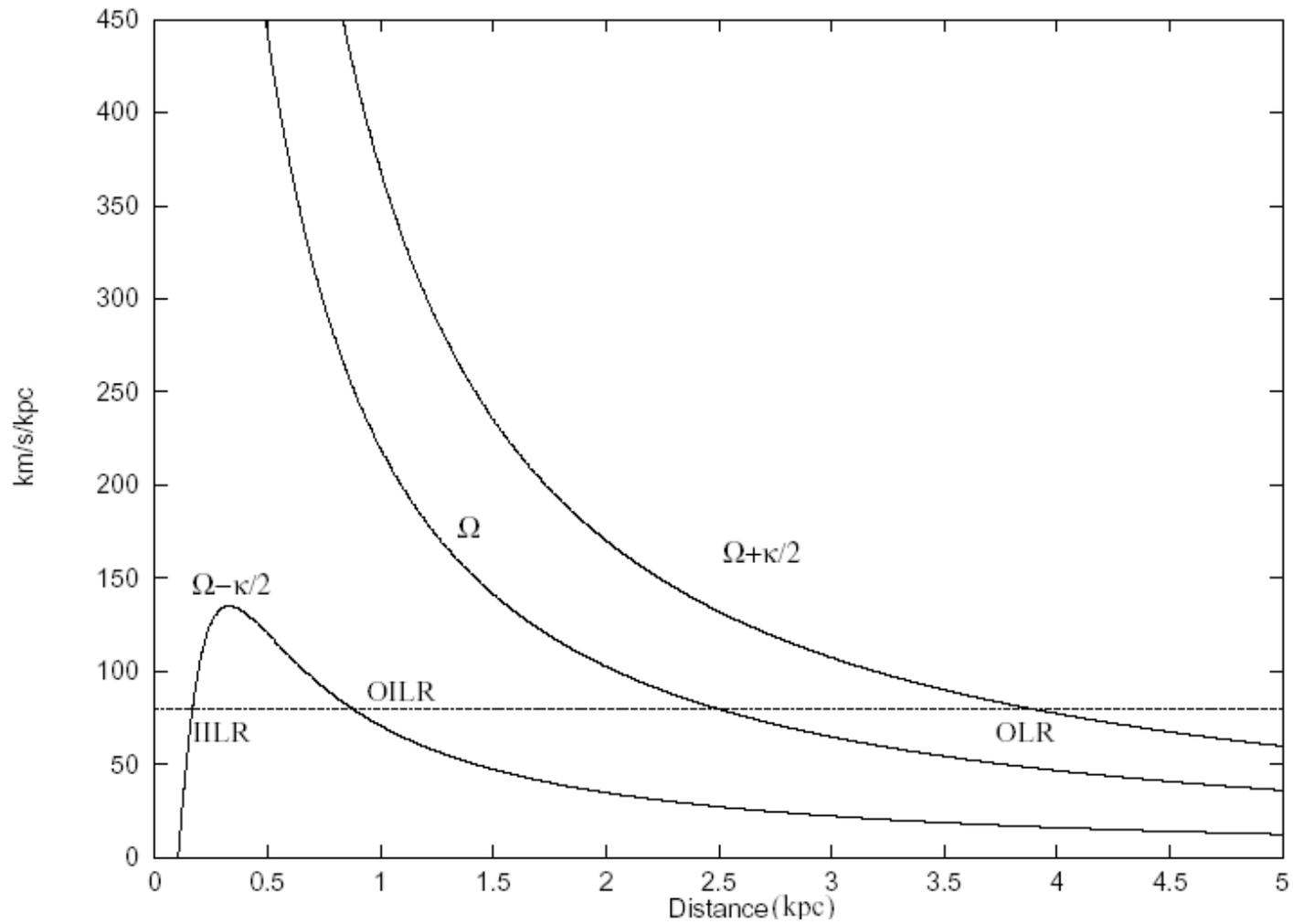


Figura 6.10: Velocidade de rotação , velocidade angular e frequência de epiciclo para uma galáxia com $v_c = 150 \text{ km s}^{-1}$, $r_0 = 6 \text{ kpc}$ e $\Omega_p = 20 \text{ km s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$.



(Yuan & Kuo 1997)

Características observacionais das ressonâncias

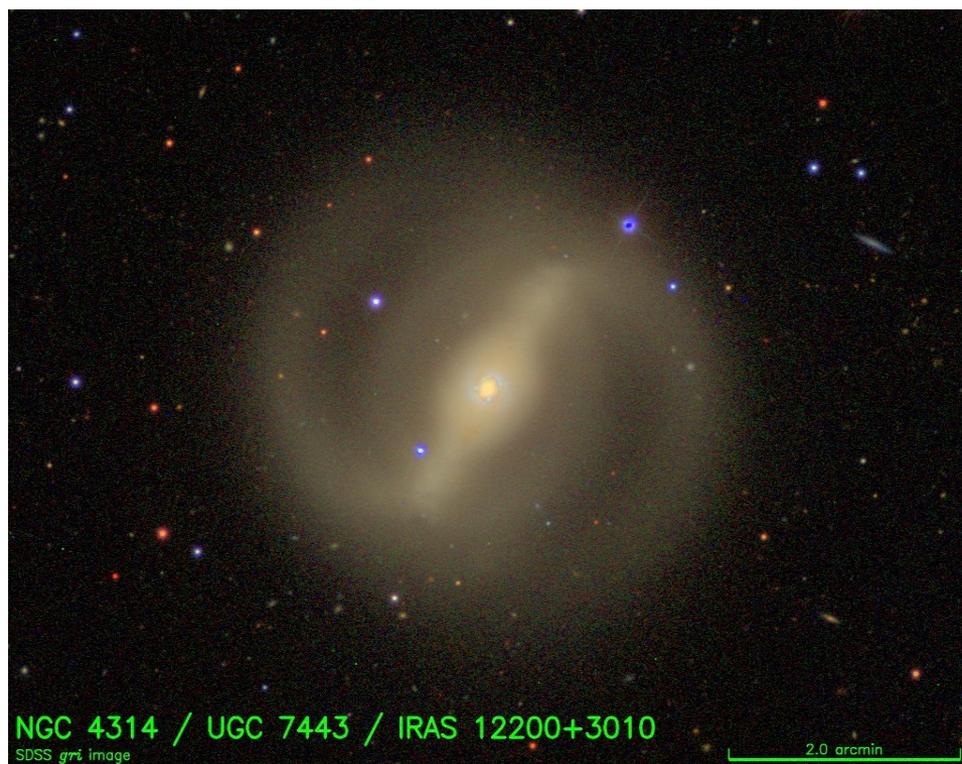
- Os braços espirais terminam na OLR
- Muitas S têm braços proeminentes até o raio de co-
rotação; a partir daí eles se bifurcam ou ficam mais
fracos



NGC 5248

Características observacionais das ressonâncias

- As barras terminam no raio de corotação



Características observacionais das ressonâncias

- Frequentemente se observam pontas, extensões ou pequenos braços dispostos simetricamente em relação aos dois braços principais
- Estas estruturas geralmente ocorrem na ressonância 4:1
 $\Omega = \Omega_p \pm k/4$ (m=4)



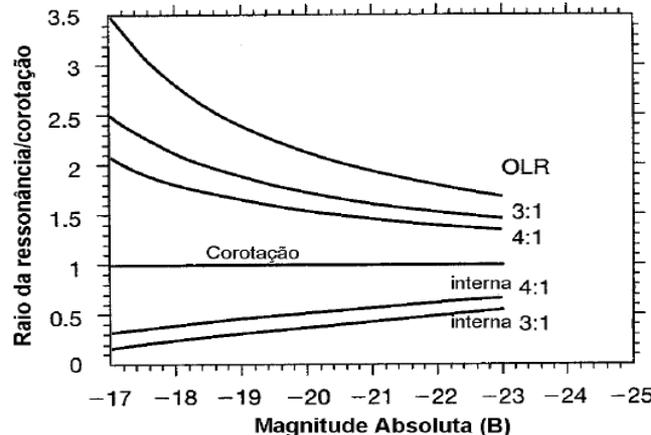
M74



M101

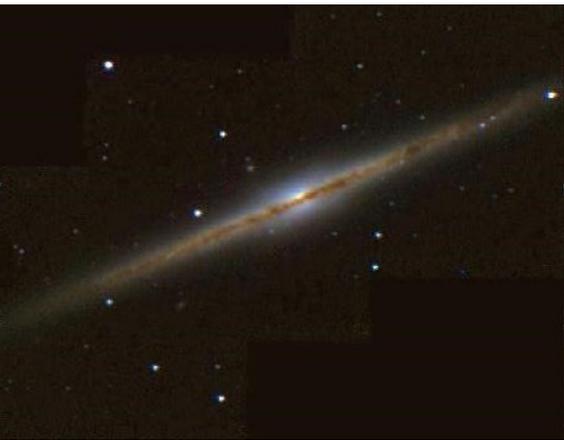
Características observacionais das ressonâncias

- Anéis externos estão associados à OLR
 - Anéis internos estão associados à co-rotação
 - Anéis nucleares estão associados à ILR
-
- Galáxias menos luminosas têm ressonâncias relativamente mais separadas que as mais luminosas (porque a inclinação média das curvas de rotação diminui com a luminosidade)

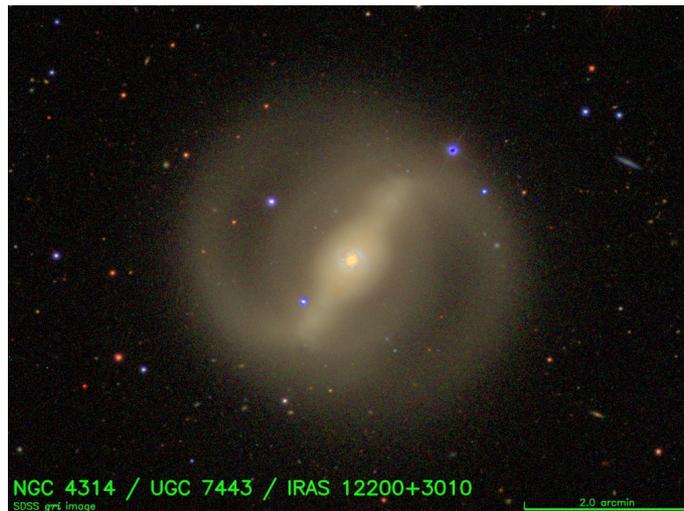


Barras

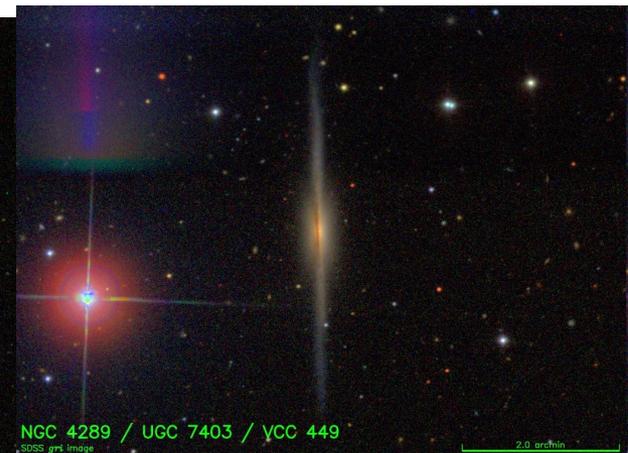
- São ondas de densidade quase-estacionárias
- Simulações numéricas indicam que a barra é a instabilidade predominante nos discos (e que um halo massivo ajuda a preveni-las)
- Ocorrem entre a ressonância 4:1 e a co-rotação
- As órbitas das estrelas são fortemente perturbadas pela barra
- O torque provocado pela barra arrasta o gás até a ILR e o dispõe num anel
- Pode haver barras dentro de barras (uma perpendicular a outra)
- As barras são verticalmente “gordas”, devido à ressonância de Ω_p com a componente vertical do movimento das estrelas



NGC 891



NGC 4314 / UGC 7443 / IRAS 12200+3010
SDSS gr1 image



NGC 4289 / UGC 7403 / VCC 449
SDSS gr1 image

Teorias da estrutura espiral

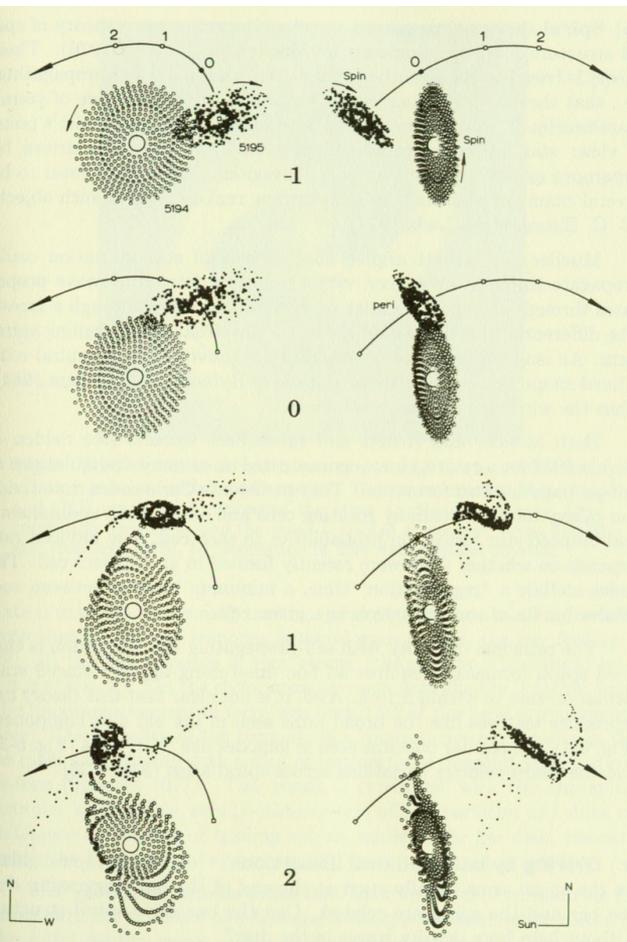
- Lin & Shu (1963)

a estrutura espiral é constituída por *ondas de densidade quase-estacionárias*

problema: a propagação dos braços espirais dissipa energia (via formação de estrelas, por exemplo), de modo que para as ondas serem quase estacionárias deve haver uma fonte de energia

Teorias da estrutura espiral

- Toomre & Toomre (1971)
a estrutura espiral é constituída por ondas de densidade induzidas por *forças de maré* de uma galáxia companheira



Teorias da estrutura espiral

- Goldreich & Lynden-Bell (1965)
pedaços de braços são formados e destruídos o tempo todo, produzindo a aparência floclulenta de algumas galáxias (a maioria das espirais!)



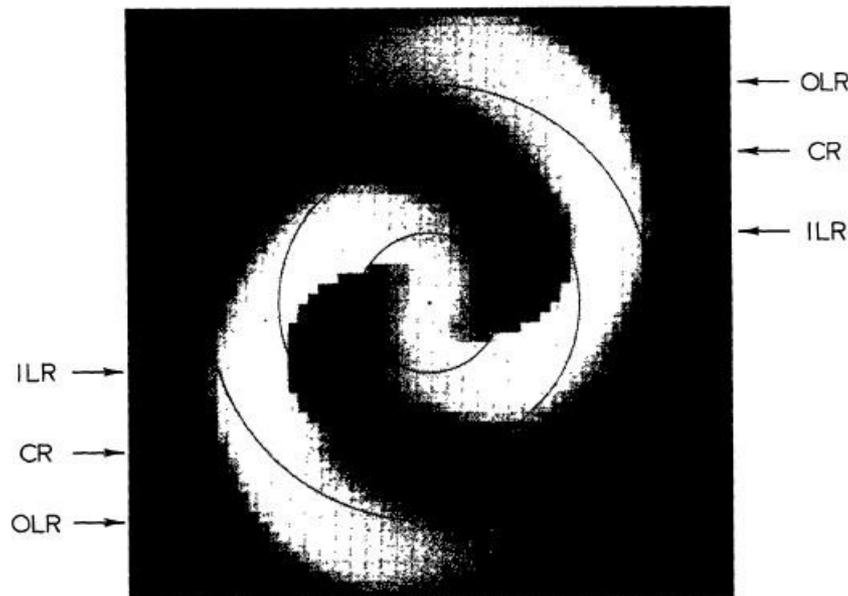
NGC 2841



NGC 4414

Teorias da estrutura espiral

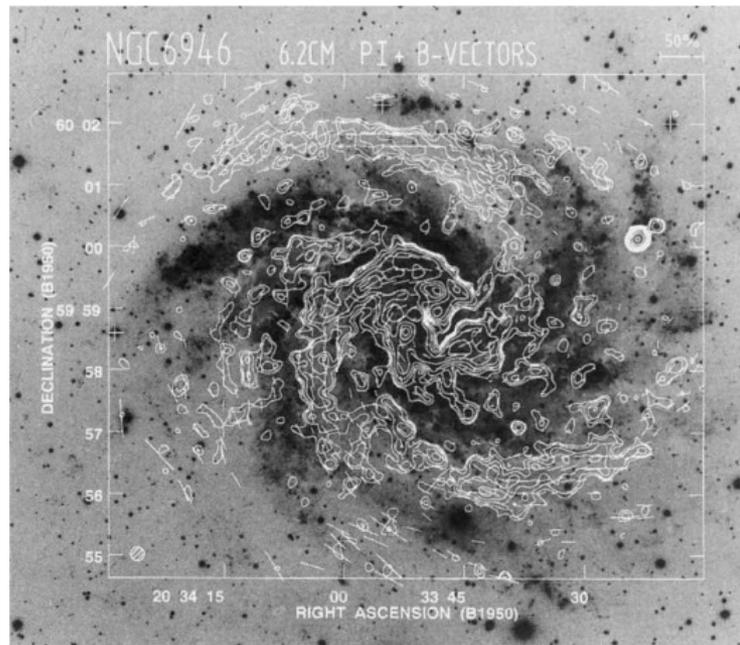
- Sanders & Huntley (1976)
os braços são produzidos por ação de barras ou estruturas (anéis) ovais



Spiral structure driven by a central bar in a differential rotating gas disk with no self-gravity. (Sanders & Huntley 1976)

Teorias da estrutura espiral

- Teorias *magneto-hidrodinâmicas*: o campo magnético das galáxias produziria os braços
- Pouco provável já que a energia magnética ($B \sim 1 \mu\text{Gauss}$) é pequena
- Mas o inverso não é verdadeiro! Os braços podem produzir campos magnéticos



Beck & Hoernes 1996

Teorias da estrutura espiral

- Em resumo:
 - muitas espirais parecem ter braços espirais que são ondas de densidade
 - mas não há muitas evidências de que o padrão espiral seja *estacionário* (isto é, que manteria a mesma aparência por, digamos, 10^9 anos)
 - algumas espirais (as floculentas) parecem ter braços materiais, mas de vida curta

Exercícios

1. Determine a frequência de epiciclo em $R=10$ kpc para uma galáxia com curva de rotação chata, cuja velocidade circular máxima de 250 km/s é atingida em $R=2.5$ kpc. Se o raio de co-rotação é em $R=5$ kpc, qual seria a velocidade do padrão espiral dessa galáxia?
2. Se o raio de co-rotação de uma galáxia com curva de rotação chata está em $R=6$ kpc, onde estará a ressonância 3:1 interna?