



Spiralne galaksije



- Morfologija / komponente
- Zvezdane populacije / plin / prasina
- Kinematika / Tamna tvar
- Korelacije

Opcenito

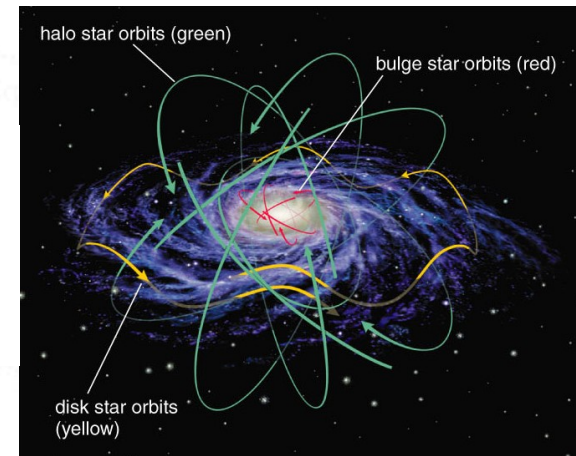
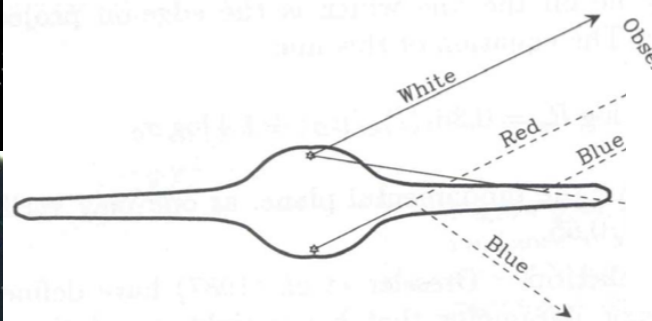
- Postoji korelacija značajki spiralnih galaksija s Hubblovim tipom (Sa, Sb, Sc)
- Npr. Sa vs. Sc:
 - Sa masivnija, ima veću maksimalnu rotacijsku brzinu, manji omjer plina te sadrži veći udio starijih, crvenih zvijezda

	Sa	Sb	Sc
M_B	-17 to -23	-17 to -23	-16 to -22
$M (M_\odot)$	10^9 - 10^{12}	10^9 - 10^{12}	10^9 - 10^{12}
$\langle L_{\text{bulge}}/L_{\text{total}} \rangle_B$	0.3	0.13	0.05
Diameter (D_{25} , kpc)	5-100	5-100	5-100
$\langle M/L_B \rangle (M_\odot/L_\odot)$	6.2 ± 0.6	4.5 ± 0.4	2.6 ± 0.2
$\langle V_{\text{max}} \rangle (\text{km s}^{-1})$	299	222	175
V_{max} range (km s^{-1})	163-367	144-330	99-304
pitch angle	$\sim 6^\circ$	$\sim 12^\circ$	$\sim 18^\circ$
$\langle B - V \rangle$	0.75	0.64	0.52
$\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle$	0.04	0.08	0.16
$\langle M_{\text{H}_2}/M_{\text{H I}} \rangle$	2.2 ± 0.6 (Sab)	1.8 ± 0.3	0.73 ± 0.13
$\langle S_N \rangle$	1.2 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.5 ± 0.2

Morfologija / komponente

Komponente spiralnih galaksija

- **Disk:** zvijezde bogate metalima, velika rotacija, područja nastanka zvijezda, HI, H₂-plin, molekularni oblaci, prašina, vrući plin (zagrijavanje u procesima nastanka zvijezda ili supernova)
- **Zadebljanje:** od zvijezda siromašnih metalima do zvijezda super bogatih metalima, slaba rotacija, koncentracija zvijezda u središnjem dijelu, (prečka?)
- **Zvjezdani halo:** zvijezde siromašne metalima, mala ili nikakva rotacija, velika raznolikost orbita, kuglasti skupovi, plin HI/HII male gustoće
- **Tamni halo:** dominirajuća masa izvan 10 kpc, (možda) malo spljošten
- **Centralna supermasivna crna rupa**



Fotometrija spiralnih galaksija

- Izofote: linije (tj. konture) konstantnog povrinskog sjaja
- Odredjivanje “radijusa” galaksije se svodi na identificiranje određene izofote
 - **Holmbergov radijus:** projicirana duljina poluglavne osi elipsoida s povrinskim sjajem $26.5 \text{ B-mag/arcsec}^2$
 - **Efektivni radijus:** projicirani radijus unutar kojeg isijava polovica svjetlosti galaksije



Profil površinskog sjaja

- **Kompliciran** jer postoji više komponenti (sredisnje zadebljanje, disk, prečka, spiralni krakovi, prstenovi) **te prasina** (znacajna apsorpcija zracenja)

Edge on: $i = 90^\circ$



Face on $i = 0^\circ$



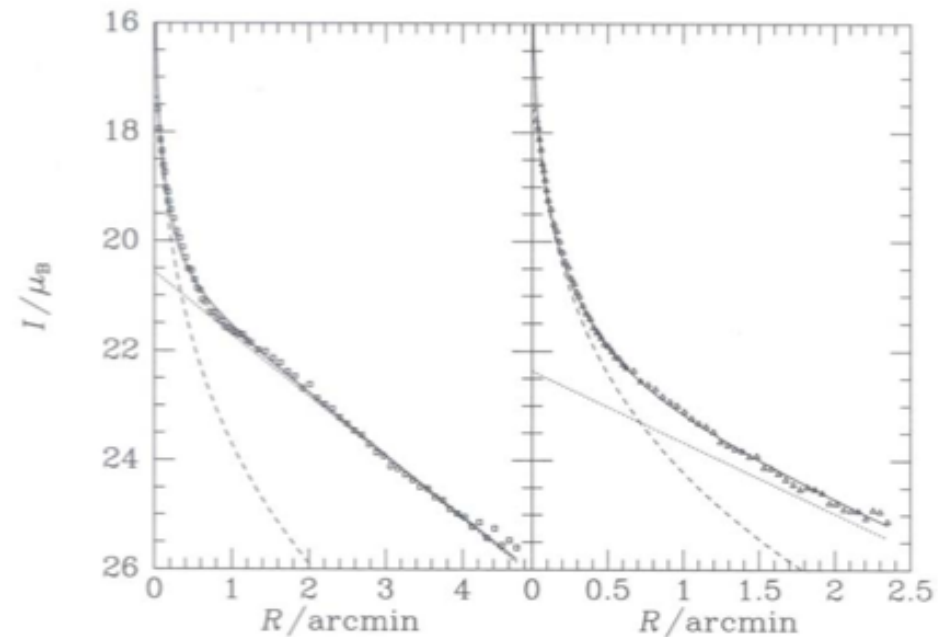
Profil površinskog sjaja

- Disk: eksponencijalan profil u intenzitetu => linearan u mag/area

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.09 \left(\frac{r}{h_r} \right)$$

- Zadebljanje: de Vaucouleur-ov profil (kao kod eliptičnih galaksija),

$$\mu(r) = \mu_{eff} + 8.3268 \left[\left(\frac{r}{r_{eff}} \right)^{1/4} - 1 \right]$$



Generalizirani Sersicov profil

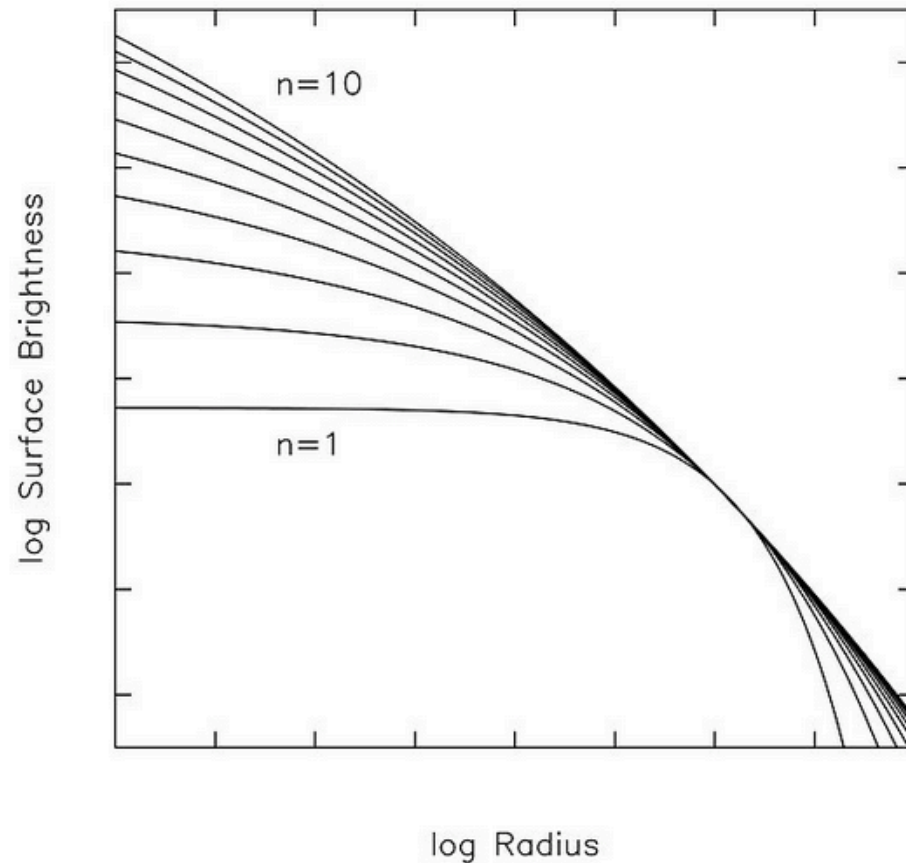
$$I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}$$

I_e = intenzitet za $r=r_{\text{eff}}$

n = Sersicov indeks

- kontrolira stupanj zakrivljenosti krivulje
- $n=1$ eksponencijalni profil
- $n=4$ de Vaucouleur-ov profil

b_n = solobodni parametar koji ovisi o n



Spiralna struktura



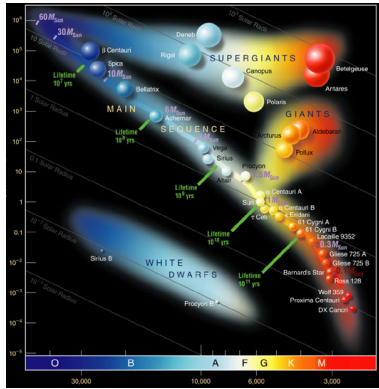
Grand-design spiral
M51 ili
Whirlpool galaxy

Vise krakova; M101



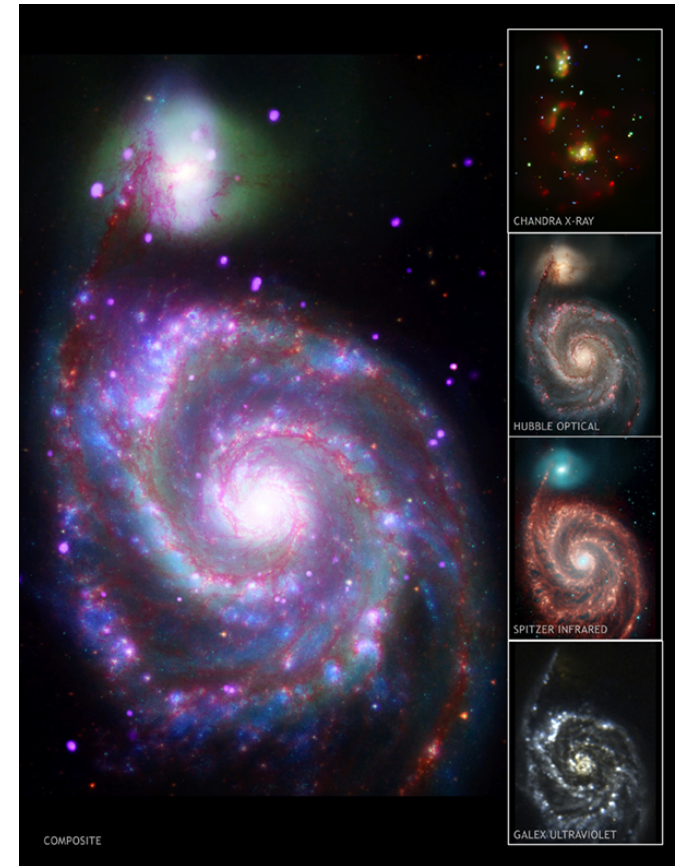
Flocculent spiral
NGC 2841

- 1) “**Grand-design**” ili spiralne galaksije velicanstvenog dizajna (2 simetricna i lijepo definirana spiralna kraka); $\sim 10\%$ SG-a
- 2) Spiralne galaksije s **vise spiralnih krakova**, $\sim 60\%$
- 3) “**Flocculent**” ili spiralne galaksije paperjastog/vunenong izgleda, $\sim 30\%$

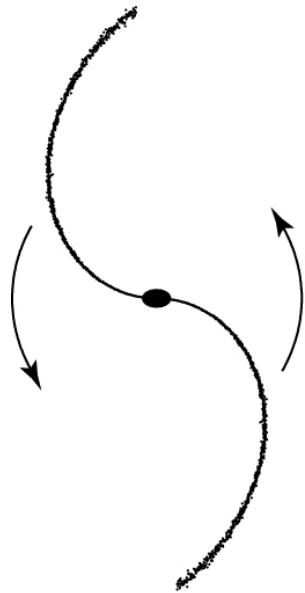


Struktura spiralnih krakova

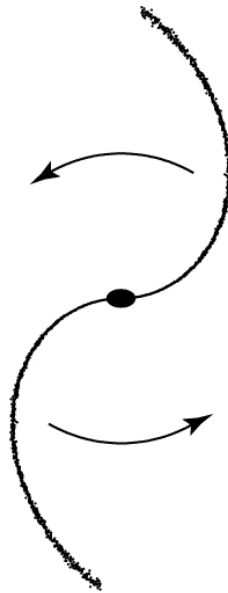
- UV/Opticke slike SG-a dominirane krakovima jer su sjajne O i B zvijezde s glavnog niza te HII podrucja u krakovima
- OB zvijezde zive kratko (u odnosu na karakteristican rotacijski period galaksije) => **spiralni krakovi su podrucja aktivnog stvaranja zvijezda**
- U krakovima postoje i pojasevi prasine (IR) => nalaze se na unutarnjoj (konkavnoj) strani krakova (isto kao i oblaci plina –HI)



Vodeci i vučeni krakovi



Trailing structure



Leading structure

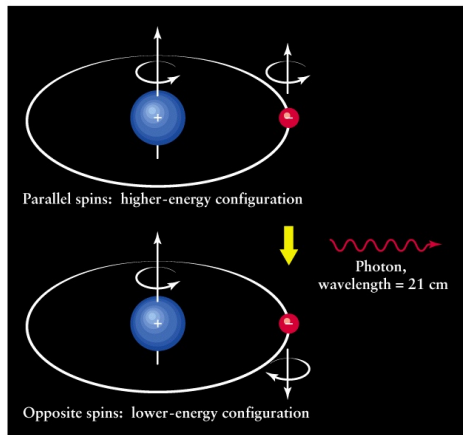
- U većini slučajeva “trailing” (vučen krak)
- Pojedini slučajevi s “leading” arm (NGC4622- 3 kraka od kojih 1 ide u suprotnom smjeru, M31- jedan vodeći krak) => **vjerojatan uzrok vodećeg kraka jest plimni susret s drugom galaksijom**

Disk

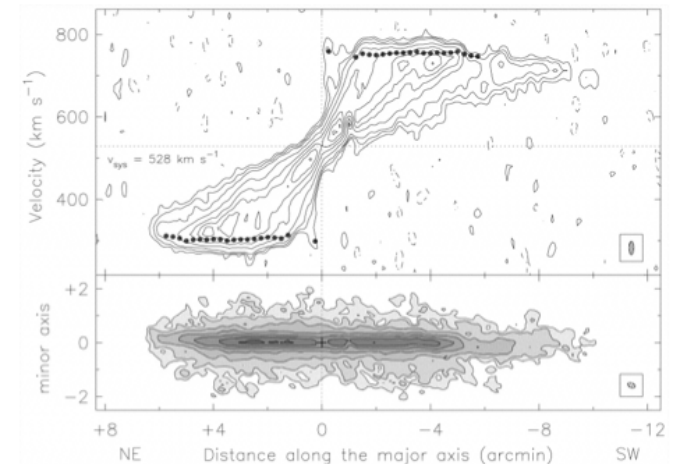
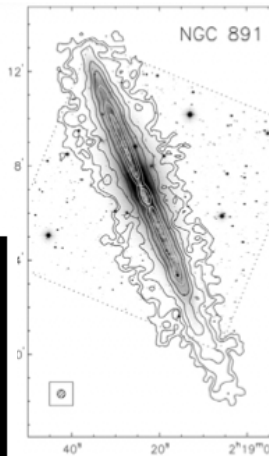
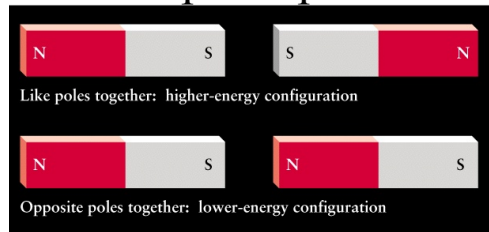
- zvijezde bogate metalima
- visoka rotacijska brzina
- područja nastanka zvijezda
- H_I, H₂-plin, molekularni oblaci, prašina, vrući plin (zagrijavanje u procesima nastanka zvijezda ili supernova)

Hladan plin u disku (HI)

- ❑ U disku i rotira s diskom => Dopplerov pomak
- ❑ HI (21cm) nije osjetljiv na prasinu (nema apsorpcije) => masa plina proporcionalna intenzitetu zracenja
- ❑ Cesto distribuiran ravnomjernije od zvijezda
- ❑ Cesto na vecim skalama od zvijezdanog diska & iskrivljen na krajevima
- ❑ $M(\text{HI})/L_B$ se cesto koristi kao mjera kolicine plina:
 - ❑ $S_0/S_a : 0.05-0.1 (M/L_B)_{\text{Sun}}$
 - ❑ $S_c/S_d : \sim 10$ puta vise



21cm - spin flip

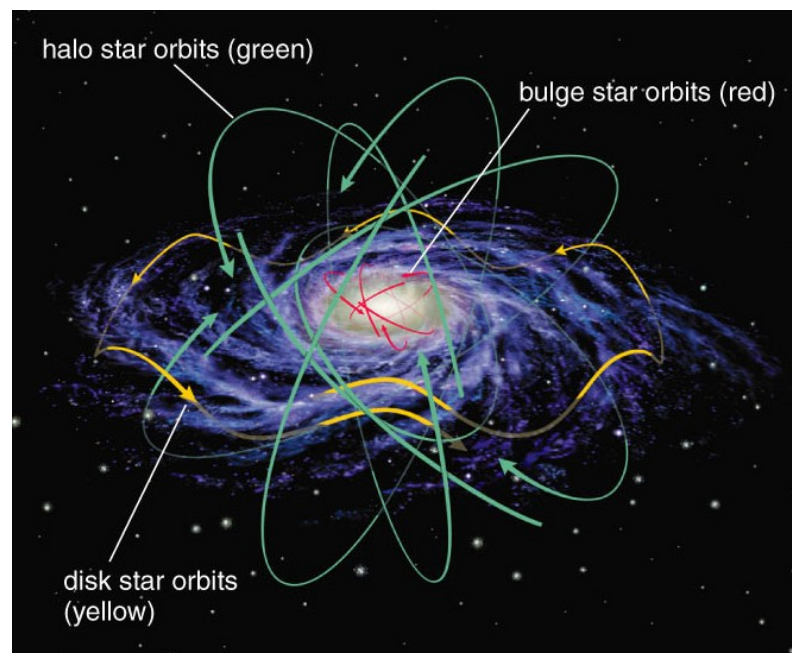


“Bulge” ili centralno zadebljanje

- Nije ekstenzija diska nego nezavisna komponenta
- Elipsoidni oblik
- U nekima postoji sredisnja precka, u nekima ne
- Crveniji i mnogo gusca koncentracija zvijezda nego u disku
- Svakavi metaliciteti
- Skoro sve zvijezde (u zadebljanju Mlječnog Puta-a i M31) su stare (Ggod)
- Zvijezde u zadebljanju rotiraju (u istom smjeru), ali imaju zncajne nasumicne brzine; rotaciono podrzana struktura (kao u malim elipticnim galaksijama)
- Zadebljanja u S0 gal. stvaraju veci udio zracenja nego u Sb, Sc gals., dok u Sd gals. zadebljanja skoro niti nema

Zvezdani halo

- zvijezde siromašne metalima
- mala ili nikakva rotacija
- velika raznolikost orbita
- kuglasti skupovi
- plin HI/HII male gustoće

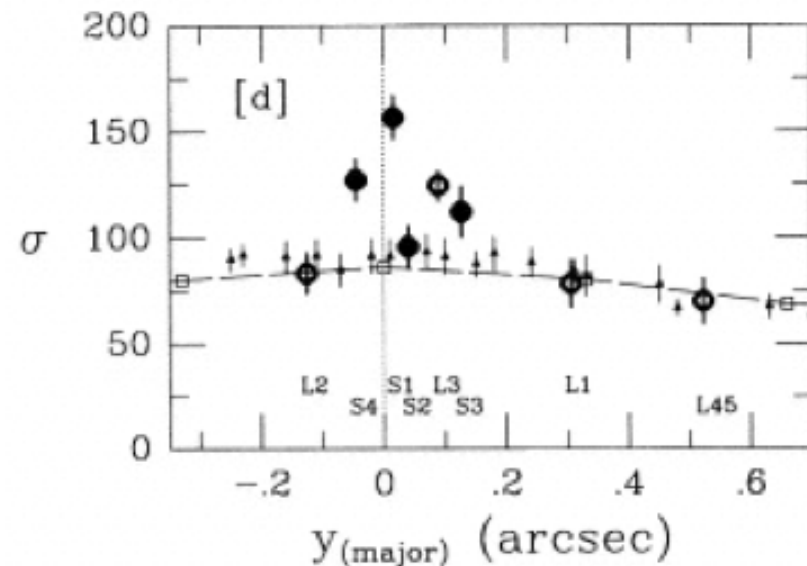
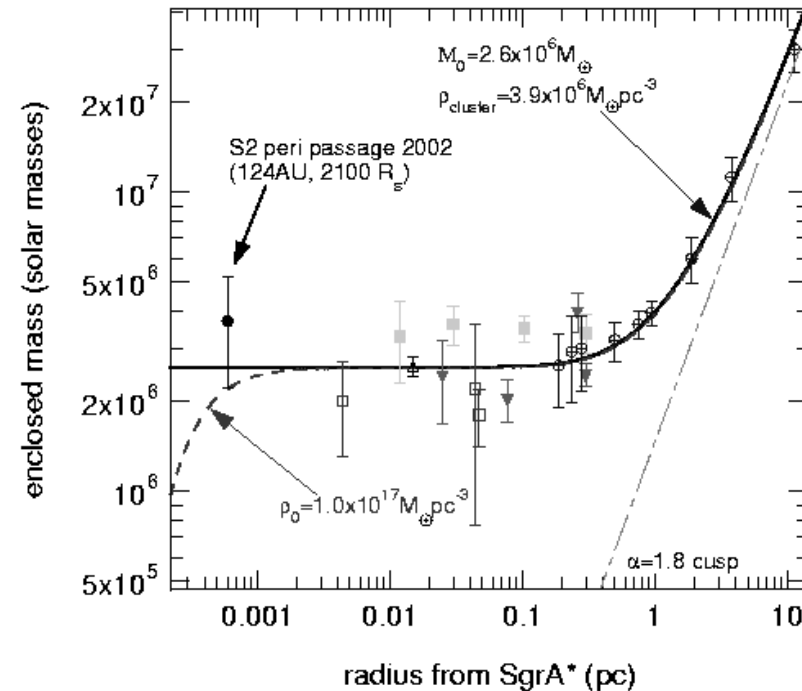


Sredisnje supermasivne crne rupe

(Supermassive black holes; SMBHs)

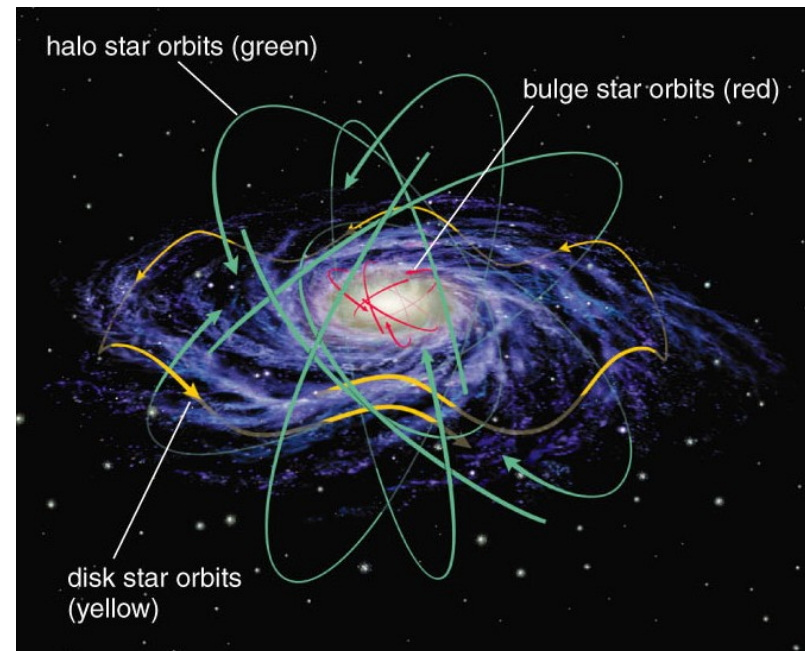
SMBHs

- Prisutnost supermasivnih crnih rupa sugerirana iz
 - opazanja kretanja zvijezda i plina blizu sredista spiralnih galaksija
 - visokog omjera mase i luminoziteta (M/L)
- $\sim 10^6 M_{\text{Sun}}$

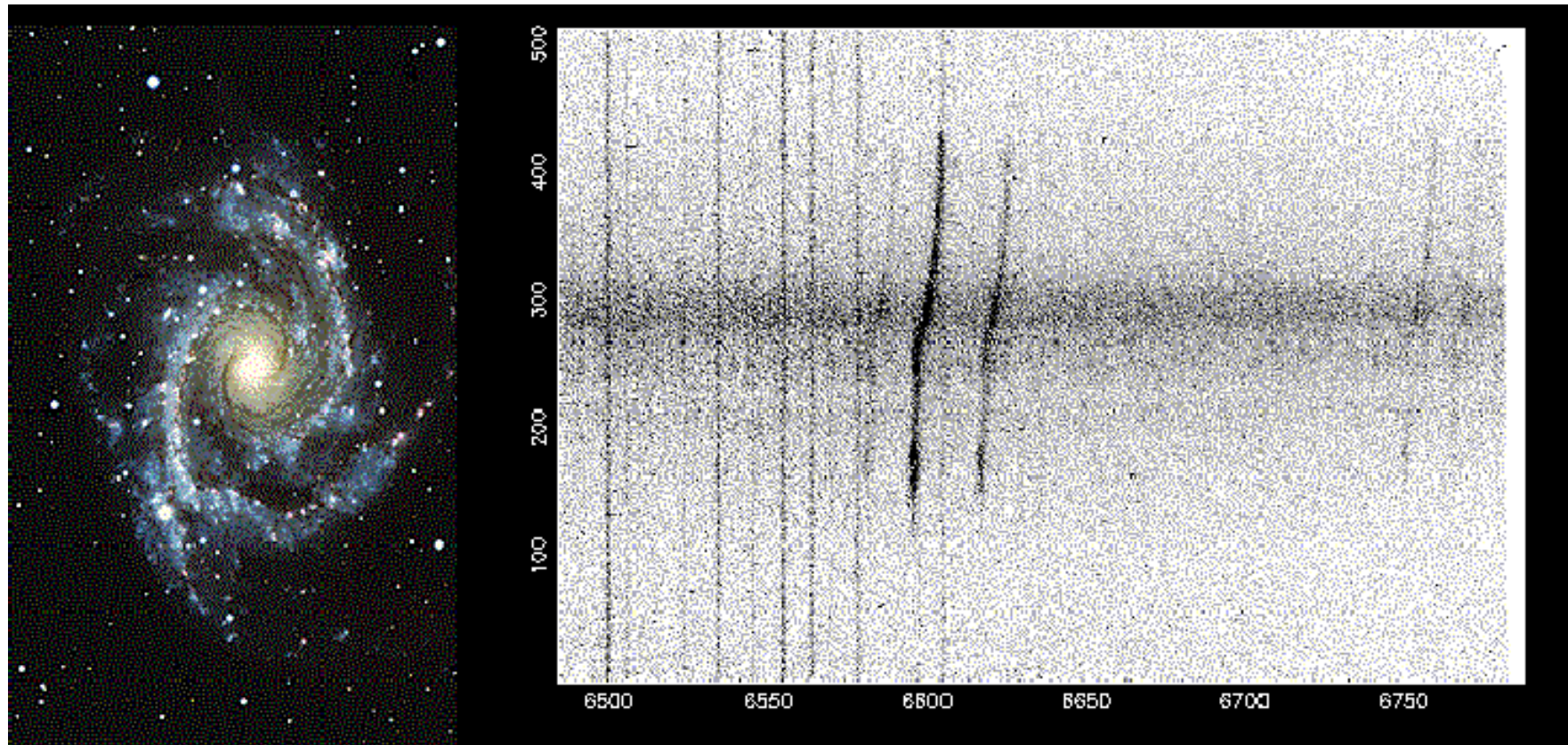


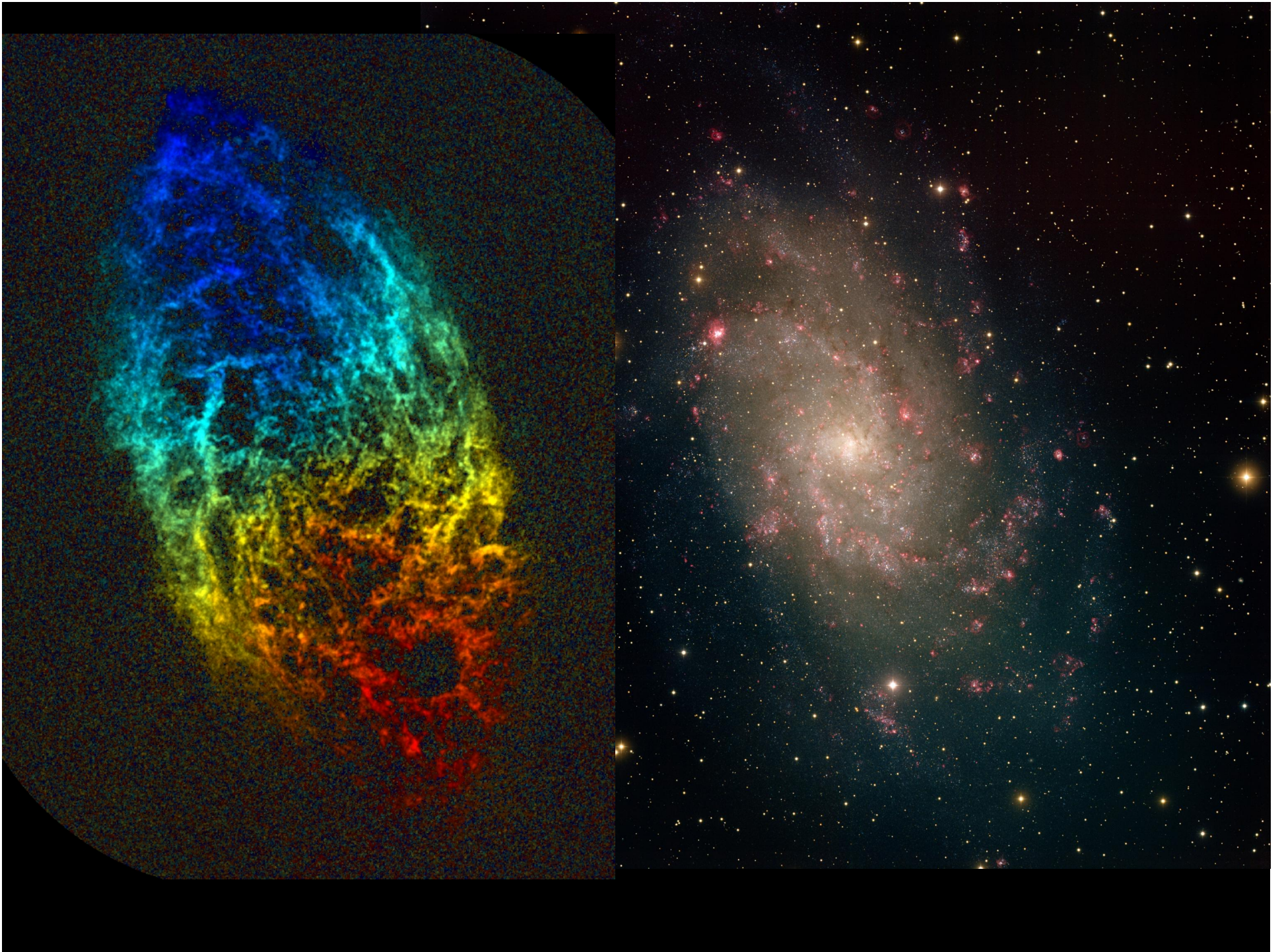
Kinematika & tamna tvar

- Dominantno gibanje u galaksiji je rotacija diska ($V \sim 200$ km/s)
- Nasumično gibanje (HI plina) u disku samo oko 10 km/s
- Zvezdani halo
- Zadebljanje (bulge)



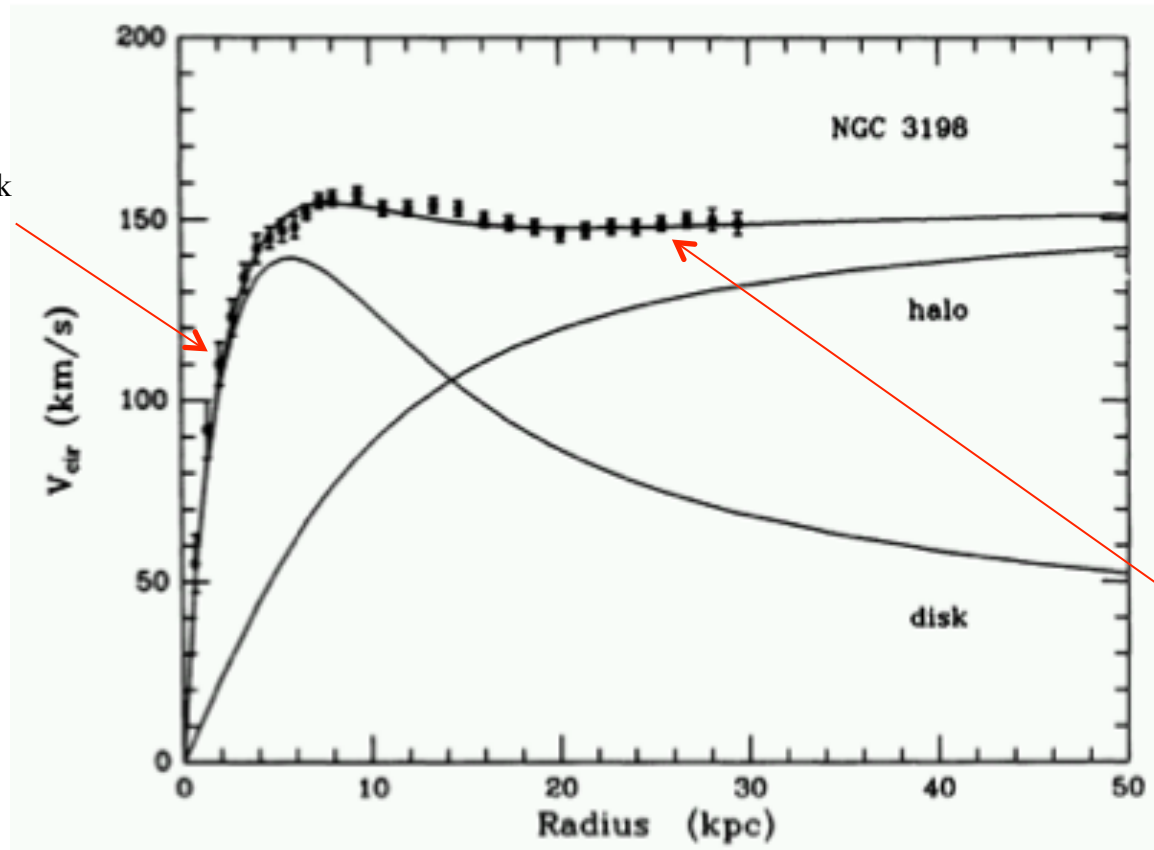
Rotacijske krivulje spiralnih galaksija





Spljostena rotacijska krivulja: dokaz za tamnu tvar

Nekoliko kpc od
centra brz rast
krivulje => rotacija
krutog tijela (sve
zvijezde imaju jednak
orbitalni period oko
centra)
=> Masa je sfericno
raspodijeljena te
gustoca ~konstantna



Spljostena rotacijska
krivulja =>
diferencijalna rotacija
=> Vecina mase u
vanjskim djelovima
je sfericno
raspodijeljena s $\rho \sim r^{-2}$

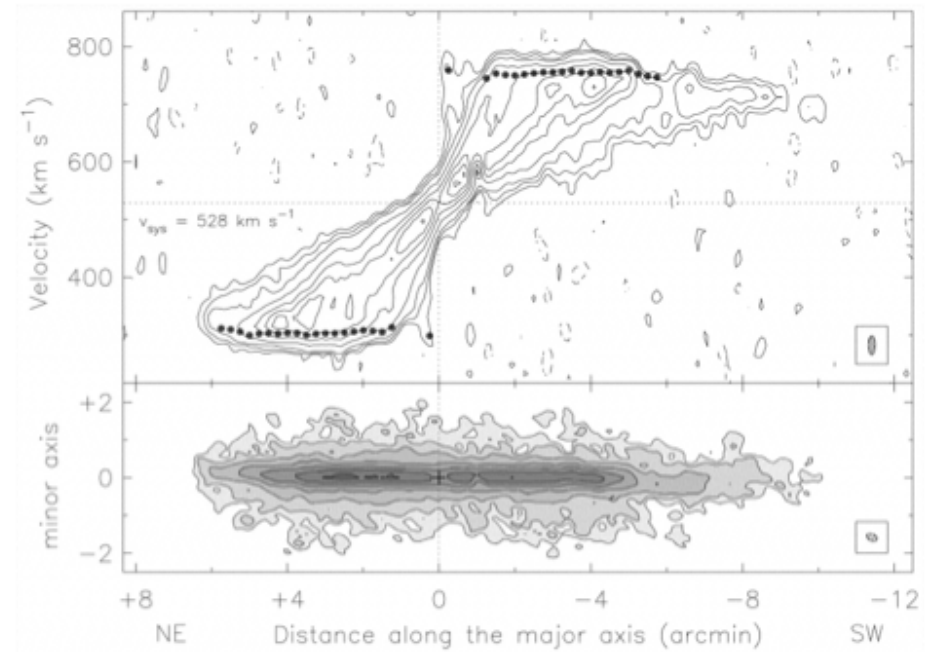
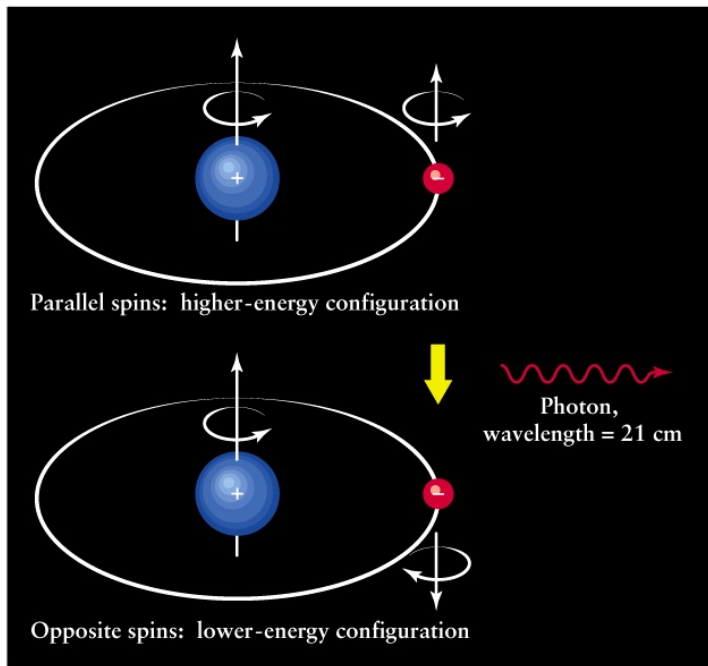
Tamna tvar

- Navarro, Frenk, White profil za gustocu tamne tvori (iz simulacija haloa tamne tvori):

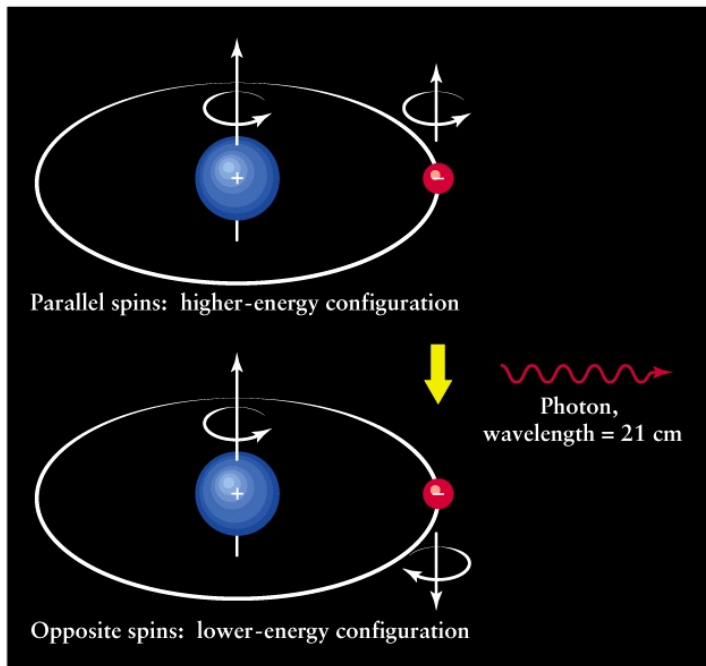
$$\rho_{NFW} = \frac{\rho_0}{\frac{r}{a} \cdot \left(1 + \frac{r}{a}\right)^2}$$

- NB! Masa divergira za $r \gg a$

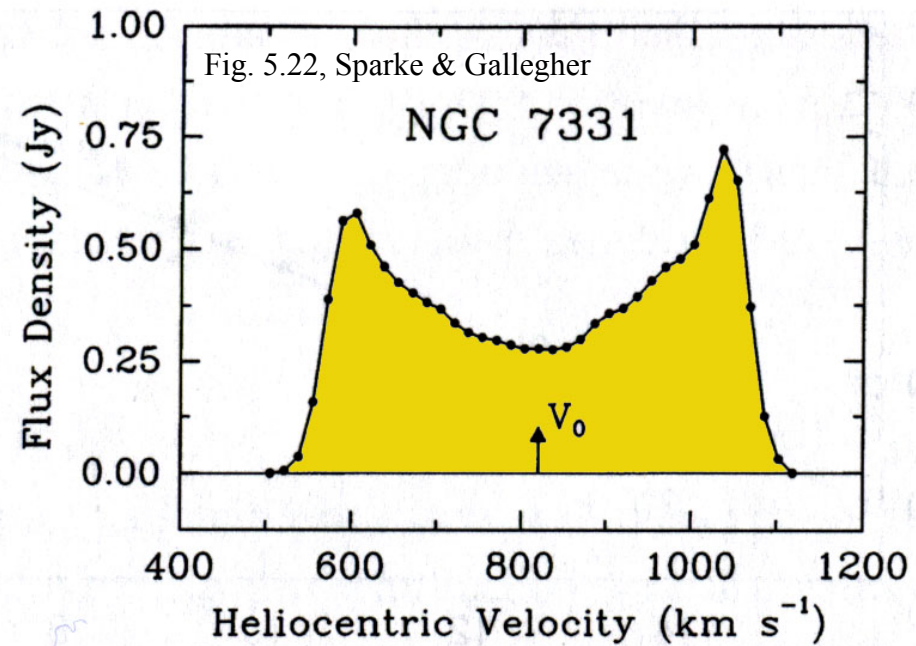
Mjrenje V_{\max} brzine



Mjrenje V_{\max} brzine



b



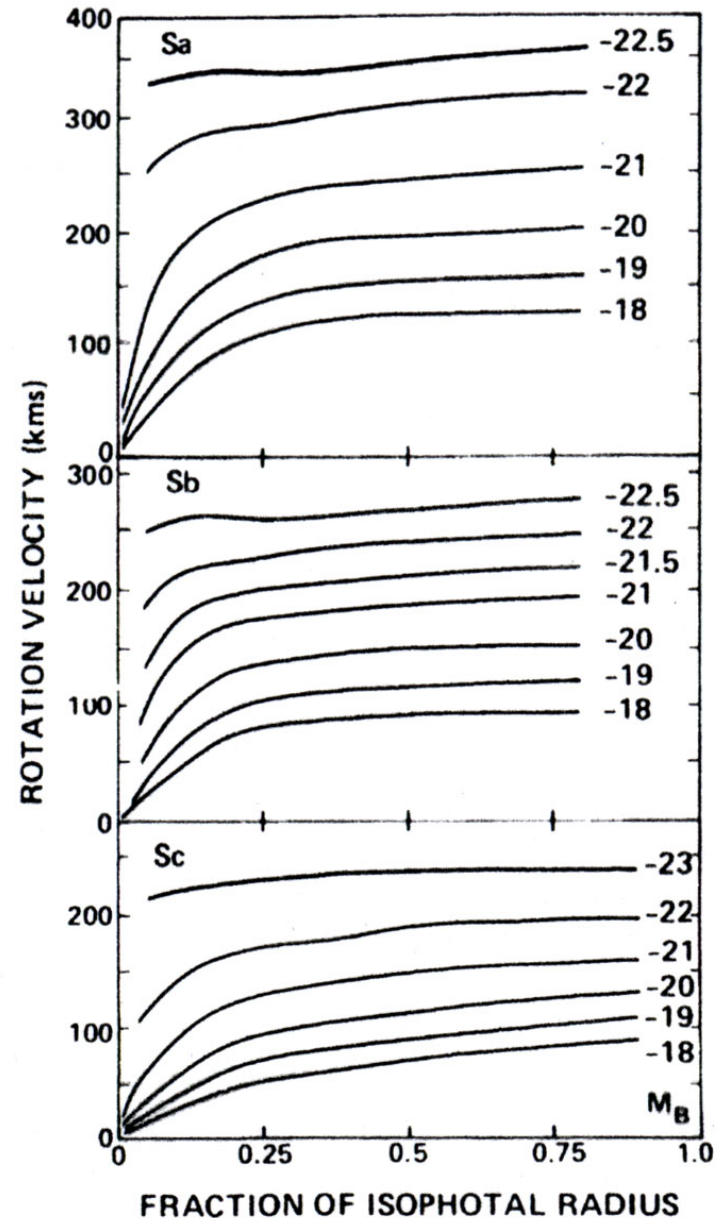
$$W \sim 2 V_{\max} \sin i$$

Rotacijske krivulje spiralnih galaksija

Promjene u usrednjenim rotacijskim krivuljama Sa, Sb i Sc galaksija za različite vrijednosti apsolutnog sjaja u B pojasu (Rubin et al. 1985)

Postoji više korelacija:

- ✓ rotacijske krivulje rastu brže i dosežu veće vrijednosti brzina (V_{\max}) s porastom luminoziteta.
- ✓ za isti Hubbleov tip galaksije koje su sjajnije imaju veći V_{\max}
- ✓ za dani V_{\max} rotacijske krivulje rastu brže s polumjerom za galaksije ranijeg tipa



Tipicne rotacijske brzine galaksija:

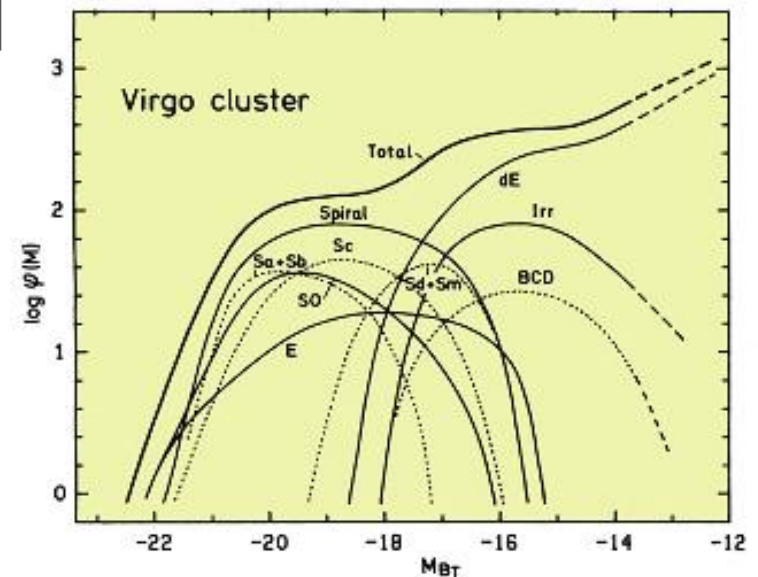
Sa $V_{\max} = 299 \text{ km/s}$ [163 – 367 km/s]

Sb $V_{\max} = 222 \text{ km/s}$ [144 – 330 km/s]

Sc $V_{\max} = 175 \text{ km/s}$ [99 – 304 km/s]

MWG $V_{\max} = 250 \text{ km/s}$

Nepravilne galaksije: [50 – 70 km/s]
=> sugerira $V_{\text{rot}} > 50\text{-}100 \text{ km/s}$ da bi se stvorila lijepo organizirana spiralna struktura



Tully-Fisherova relacija

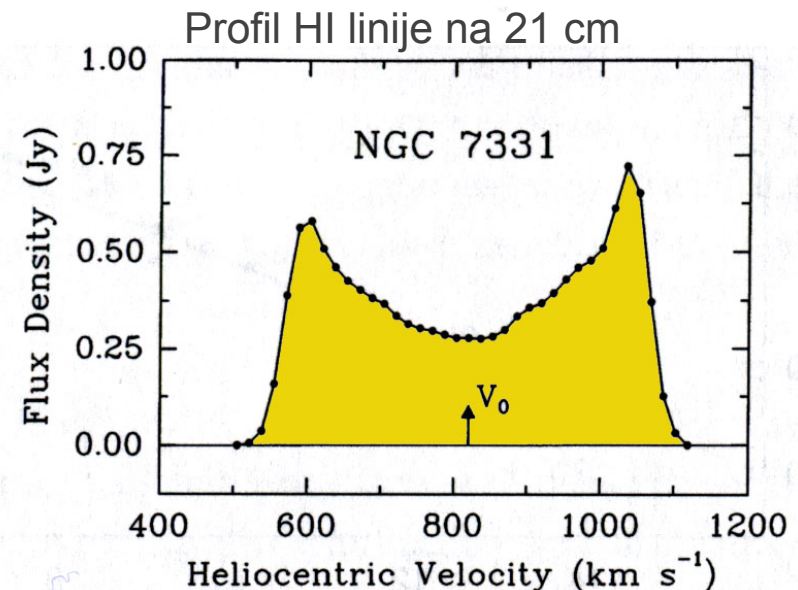
Korelacija između luminoziteta spiralnih galaksija i njihovih maksimalnih rotacijskih brzina.

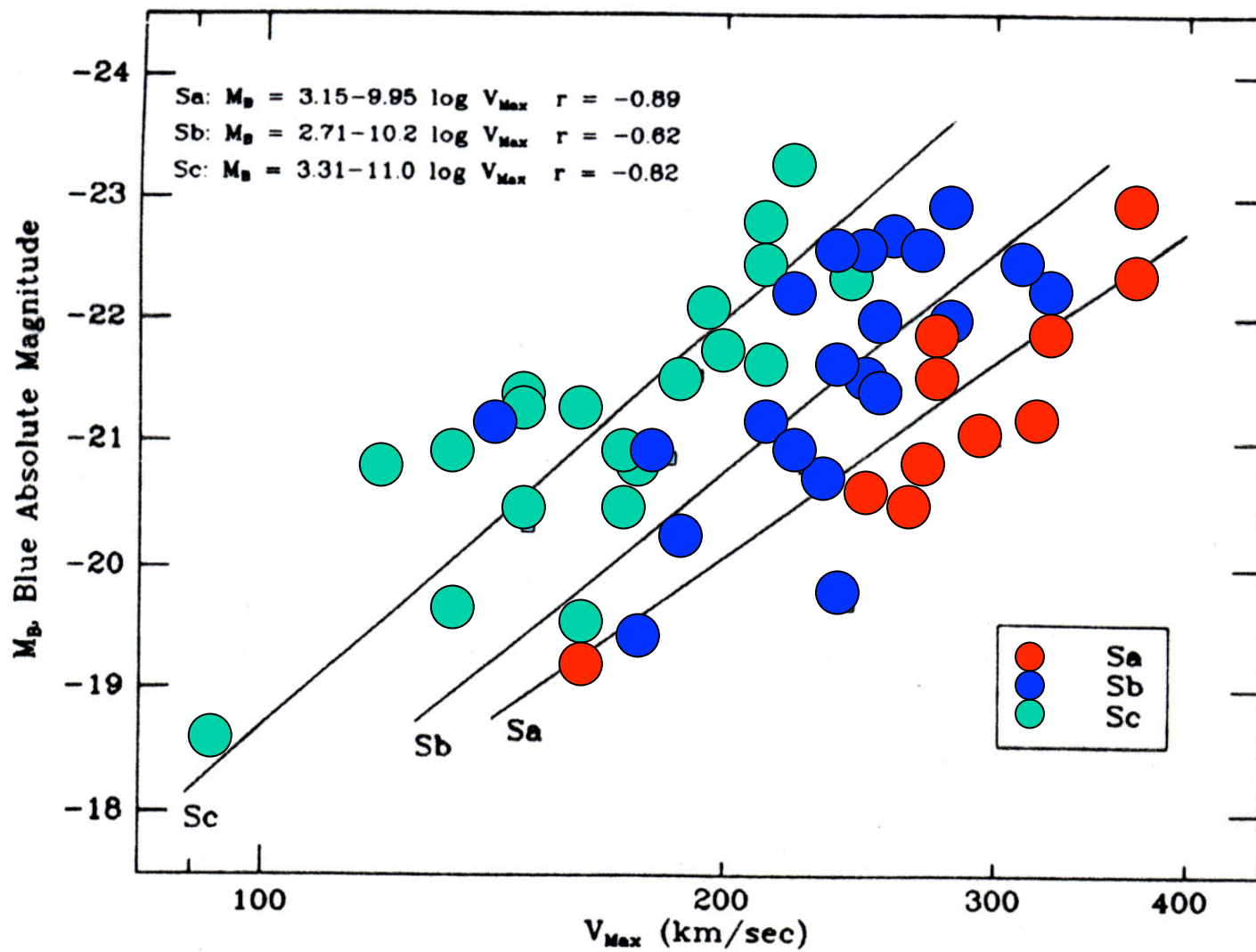
R. Brent Tully & J. Richard Fisher (1977) mjerili su dopplerovski proširenu liniju na 21 cm radio zračenja neutralnog vodika u uzorku spiralnih galaksija.

$$M_B = -9.95 \log V_{\max} + 3.15$$

$$M_B = -10.2 \log V_{\max} + 2.71$$

$$M_B = -11.0 \log V_{\max} + 3.31$$

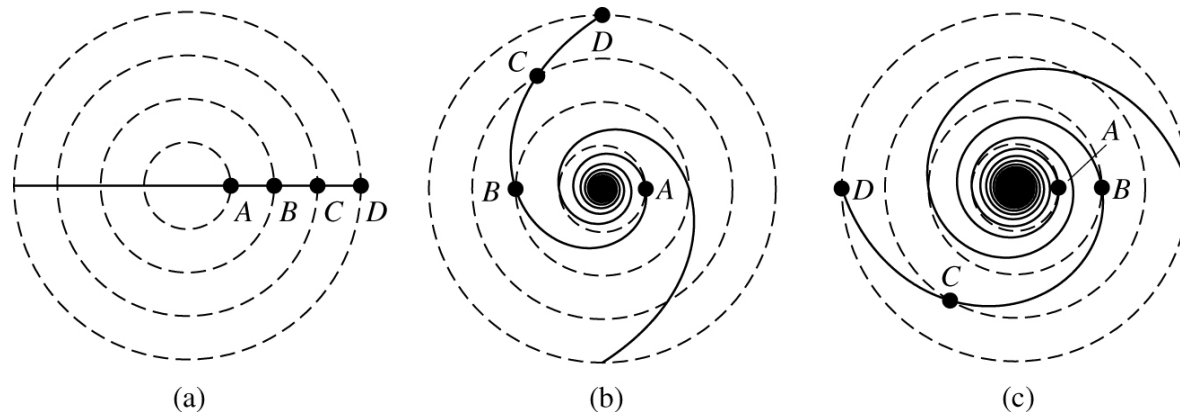




Spiralna struktura

Nastanak krakova: The winding problem (problem omotavanja)

- Problem: “Cvrsti” krakovi (sastavljeni od fiksiranog seta zvijezda i oblaka plina) bi se vrlo brzo “omotali” oko centra usljed diferencijalne rotacije
($V_{\text{rot,A}} = V_{\text{rot,B}} = V_{\text{rot,C}} = V_{\text{rot,D}}$)
 - $t_{\text{orb,A}} < t_{\text{orb,B}} < t_{\text{orb,C}} < t_{\text{orb,D}} \Rightarrow$ u samo nekoliko orbita krak bi se omotao oko centra te ga se više ne bi moglo opaziti
- \Rightarrow Mora postojati drugi mehanizam koji uzrokuje krakove kakve opazamo

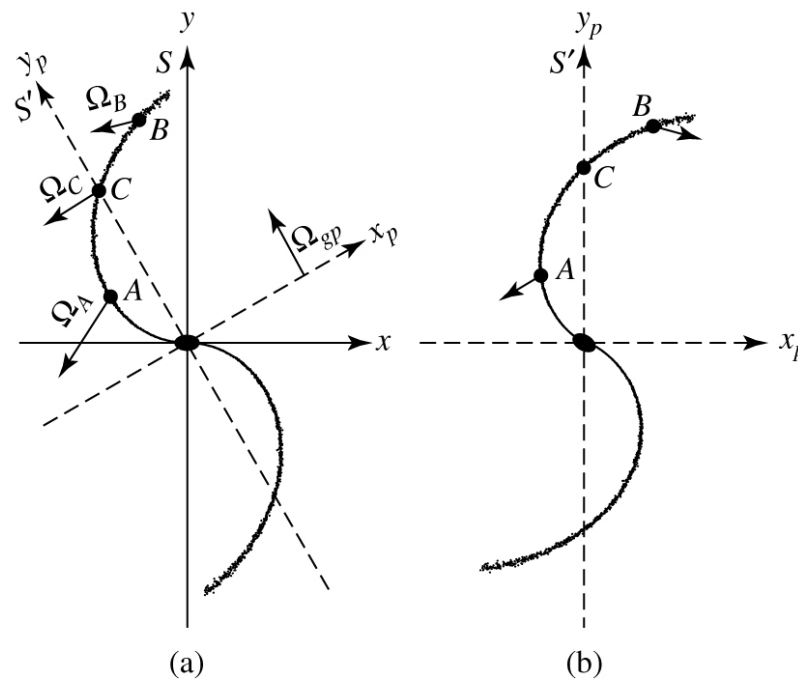


Lin-Shu teorija o valovima gustoće

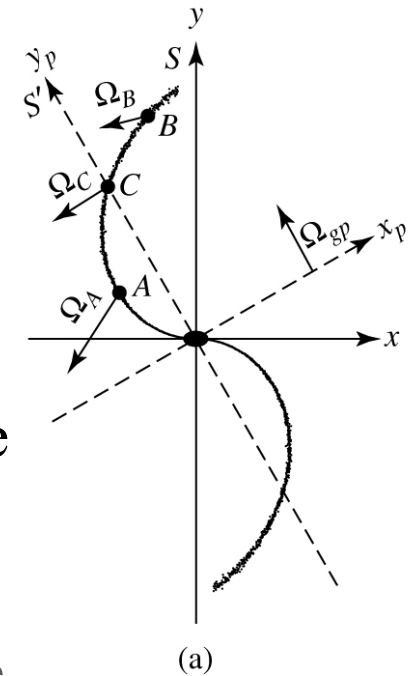
- Spiralna struktura nastaje usljed dugo-zivucih kvazistaticnih valova gustoće (podrucja u disku gdje je gustoca mase 10-20% veca od prosjecne)
 - Zvijezde, prasina i oblaci plina se gibaju kroz ta zgnusnjenja poput autiju u guzvi u prometu
- Ω_{gp} = global pattern speed;
 R_c = korotacijski radijus
- Objasnjava mnoge znacajke grand-design spiralnih galaksija (HI oblaci i prasina s unutarnje strane krakova, mlade masivne zvijezde unutar krakova, stare, crvene zvijezde rasprostrte u disku)

Inercijalan sustav u kojem se kvazistaticni val gustoće giba angularnom brzinom Ω_{gp}
 $\Omega_A > \Omega_{gp}$; $\Omega_B < \Omega_{gp}$; $\Omega_C = \Omega_{gp}$

Neinercijalan sustav koji se giba zajedno s valom gustoće

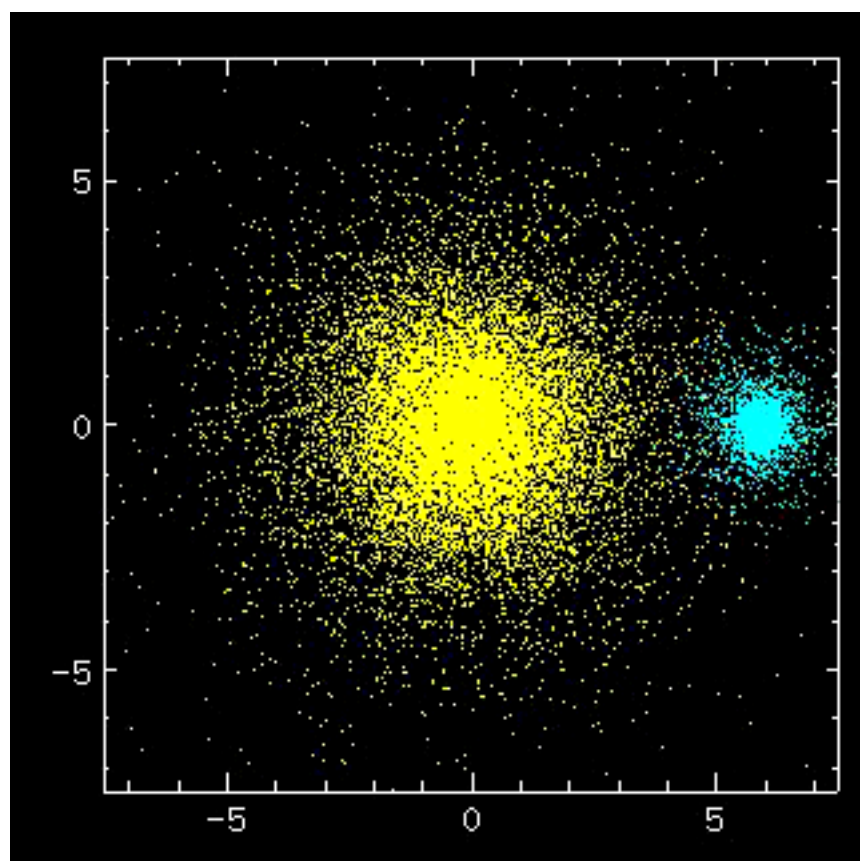


- $R < R_c$: oblaci prasine i plina preticu val gustoce \Rightarrow povecana gustoca mase ih komprimira \Rightarrow Jeansov kriterij kolapsa je zadovoljen i pocinju se stvarati nove zvijezde; proces traje neko vrijeme (10^5 god za $15 M_{\text{Sun}}$) \Rightarrow nove zvijezde ce biti opazene “nizvodno” od oblaka plina i prasine na rubu vala
- Ionizacija medjuzvezdanog materijala od O,B zvijezda ce stvoriti HII podrucja unutar krakova
- Jer masivne zvijezde zive kratko, nestat ce prije nego uspiju izaci iz vala gustoce \Rightarrow manje masivne crvene zvijezde koje zive duze ce se rasprostrjeti kroz disk
- Veca koncentracija crvenih zvijezda u valu gustoce dolazi usljed slijedeceg prolaska zvijezda kroz val \Rightarrow aglomeracija blizu minimuma gravitacijskog potencijala



Sto uzrokuje valove gustoce?

- Nesto mora uzrokovati inicijalnu perturbaciju koja bude amplificirana gravitacijom u disku
- Ideje:
 - Inicijalno odstupanje od aksisimetrije (u procesu formiranja)
 - Susreti s drugim galaksijama



Stochastic, Self-Propagating Star Formation

- Flocculent galaksije
- Spiralna struktura nastaje usljed naglog i masivnog (outburst) stvaranja zvijezda koje propagira kroz disk (poput pozara u sumi gdje se vatra siri s jednog podrucja na drugo) => diferencijalna rotacija stvara spiralnu strukturu

