

Astronomija i astrofizika II

GALAKSIJE

GALAKSIJE

Immanuel Kant (druga polovica 18. st.) → Mliječni put je konačna nakupina zvijezda u obliku diska → difuzne eliptičke maglice malog sjaja su '**otoci u svemiru**' (*island universes*)

Koja je priroda 'otoka u svemiru'?

Charles Messier (1730-1817)

- **Messierov katalog:** 110 magličasta objekta → većinom maglice M42 – Orionova maglica; M1 – maglica u Rakovici) i zvjezdani skupovi (M45 – Vlašići; M13 – kuglasti skup u Herkulu), ali i galaksije (M31 – Andromedina galaksija)

William i John Herschel (1792-1871)

J. L. E. Dreyer (1852-1926)

- **New General Catalog** (NGC) → izrađen na temelju Herschelovih kataloga, 8000 objekata (M31 je NGC 224 – Andromedina galaksija)

William Parsons (1845.)

- 'Leviathan' → najveći teleskop na svijetu, 1.8 m
- Razlučio po prvi puta spiralnu strukturu u nekim maglicama
- Rotacija spiralnih maglica?

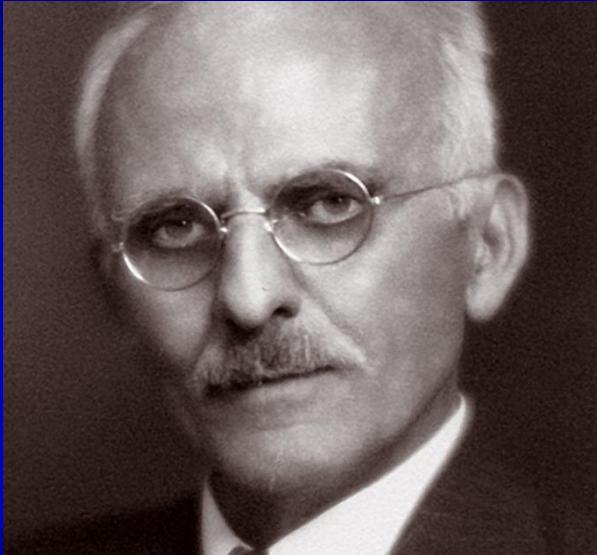
Vesto Slipher (1912.) → izmjeren Dopplerov efekt u spiralnim maglicama



Početak 20. stoljeća → Debata:

- Spiralne maglice nalaze se u Mliječnom putu
- Spiralne maglice su 'otoci u svemiru', daleko izvan Mliječnog puta

Curtis – Shapley debata

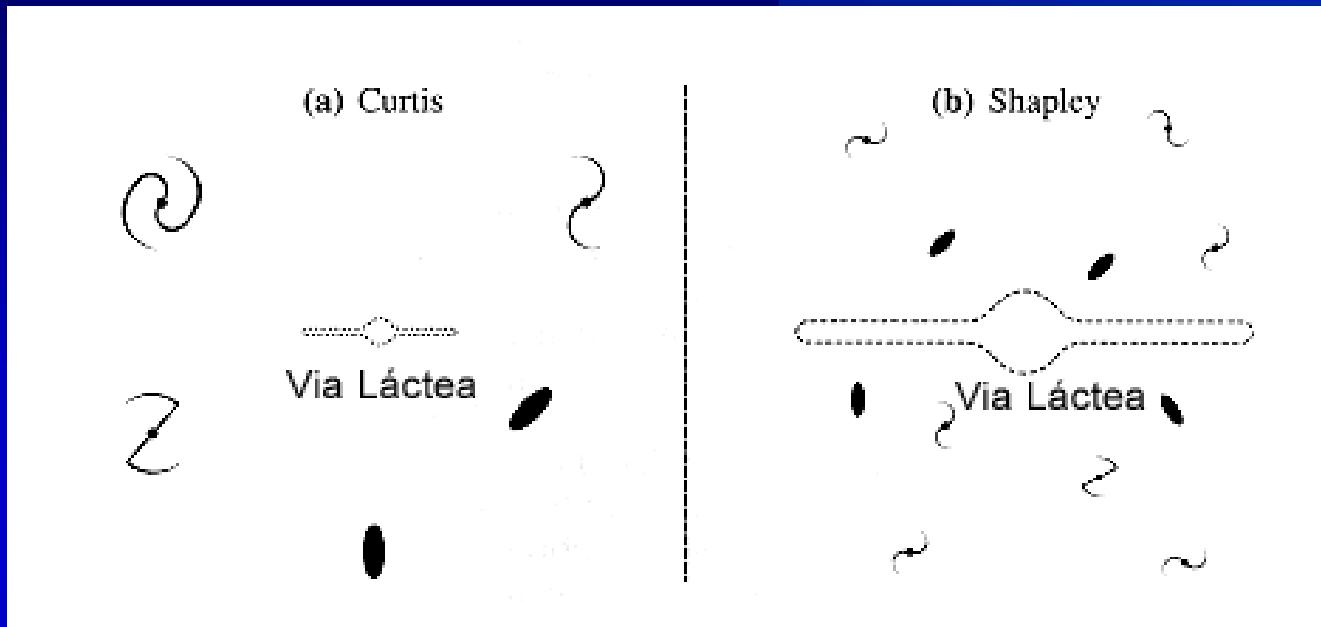


Heber D. Curtis
(1872-1942)
Lick Observatory
Allegheny Observatory



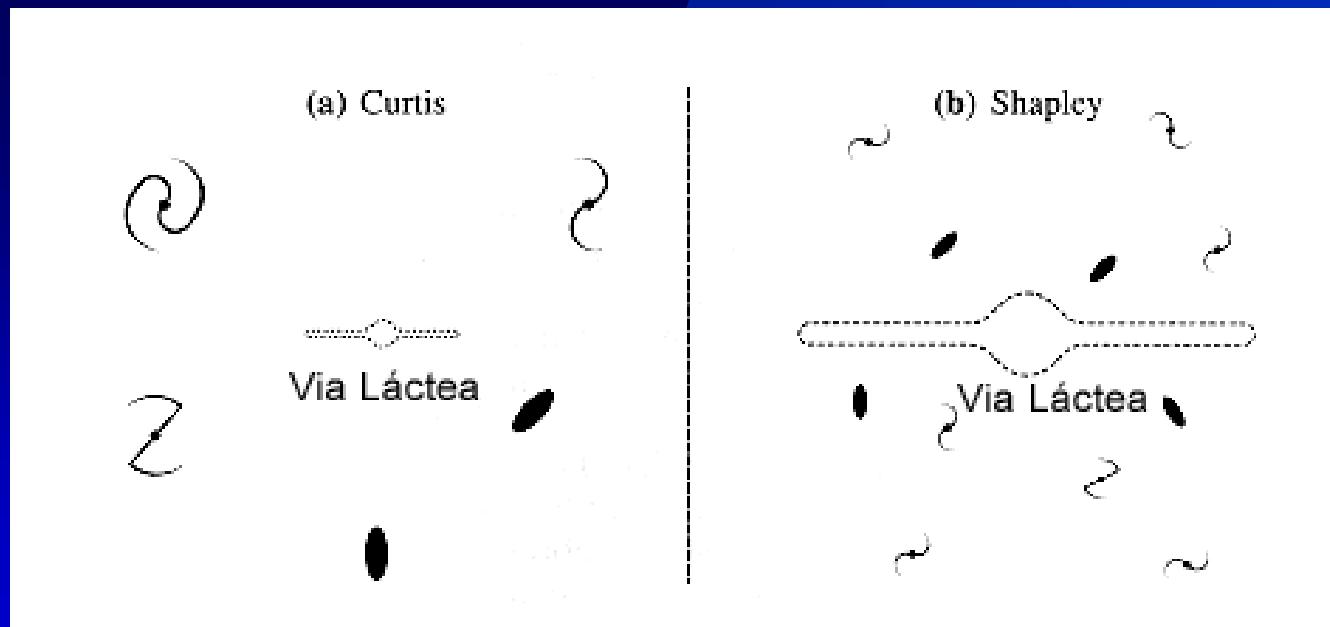
Harlow Shapley
(1885-1972)
Mount Wilson Observatory

Curtis – Shapley debata



Shapley:

- Mliječni put predstavlja cijeli naš svemir, maglice su dio naše galaksije
- Spiralne maglice (Andromedina maglica) nalazi se unutar Mliječnog puta
- Ako je Andromedina galaksija slične veličine kao Mliječni put (100 kpc), njena prividna veličina na nebu značila bi veliku udaljenost od naše galaksije \Rightarrow sjaj nove zvijezde u Andromedinoj maglici bio bi veći od sjaja cjelokupne maglice \rightarrow ne postoji mehanizam koji bi oslobođio toliku količinu energije
- Rotacijske brzine maglice M101 (Van Maanen): maglica mora biti blizu



Curtis:

- Andromedina maglica i druge maglice su odvojene galaksije, 'svemirski otoci', a Mliječni put je tek jedna od njih
- Udaljenosti između maglica veće su od njihovih dimenzija
- Nove opažene u drugim galaksijama morale bi biti udaljene barem 150 kpc ukoliko imaju sjaj sličan sjaju novih u Mliječnom putu
- Znatno veća učestalost pojavljivanje novih zvijezda u Andromedinoj galaksiji nego u drugim dijelovima Mliječnog puta
- Velike radijalne brzine maglica \Rightarrow ne mogu biti gravitacijski vezane u Mliječnom putu
- Ako su maglice u Mliječnom putu, vidljivo bi bilo njihovo vlastito gibanje
- Van Maanen mora biti u krivu!

Curtis – Shapley debata: Rješenje



Edwin P. Hubble
(1889-1953)
Mount Wilson Observatory

1924: Otkriće Cefeida u Andromedinoj maglici

-Opažanjem Cefeida u Andromedinoj maglici odredio udaljenost (285 kpc) i pokazao da se ona nalazi daleko izvan Mliječnog puta, čak i izvan prevelikog Shapleyeveg Mliječnog puta!

Shapley – Curtis debata??

Shapleyeva galaksija je prevelika, a
Curtisova premalena!

Nova paradigma strukture svemira \Rightarrow uvod u otkriće širenja svemira!



Van Maanenova opažanja su bila pogrešna!

Shapley nakon Hubbleovog pisma u kojem otkriva Cefeide u Andromedi:
"Ovo pismo je uništilo moj svemir... Vjerovao sam podacima van
Maanena, ipak on mi je prijatelj..."

KLASIFIKACIJA GALAKSIJA

- Fizička svojstva galaksija → klasificiranje intrinzičnih svojstava

Edwin Hubble (1926.)

- Prva klasifikacija galaksija u tri kategorije prema izgledu

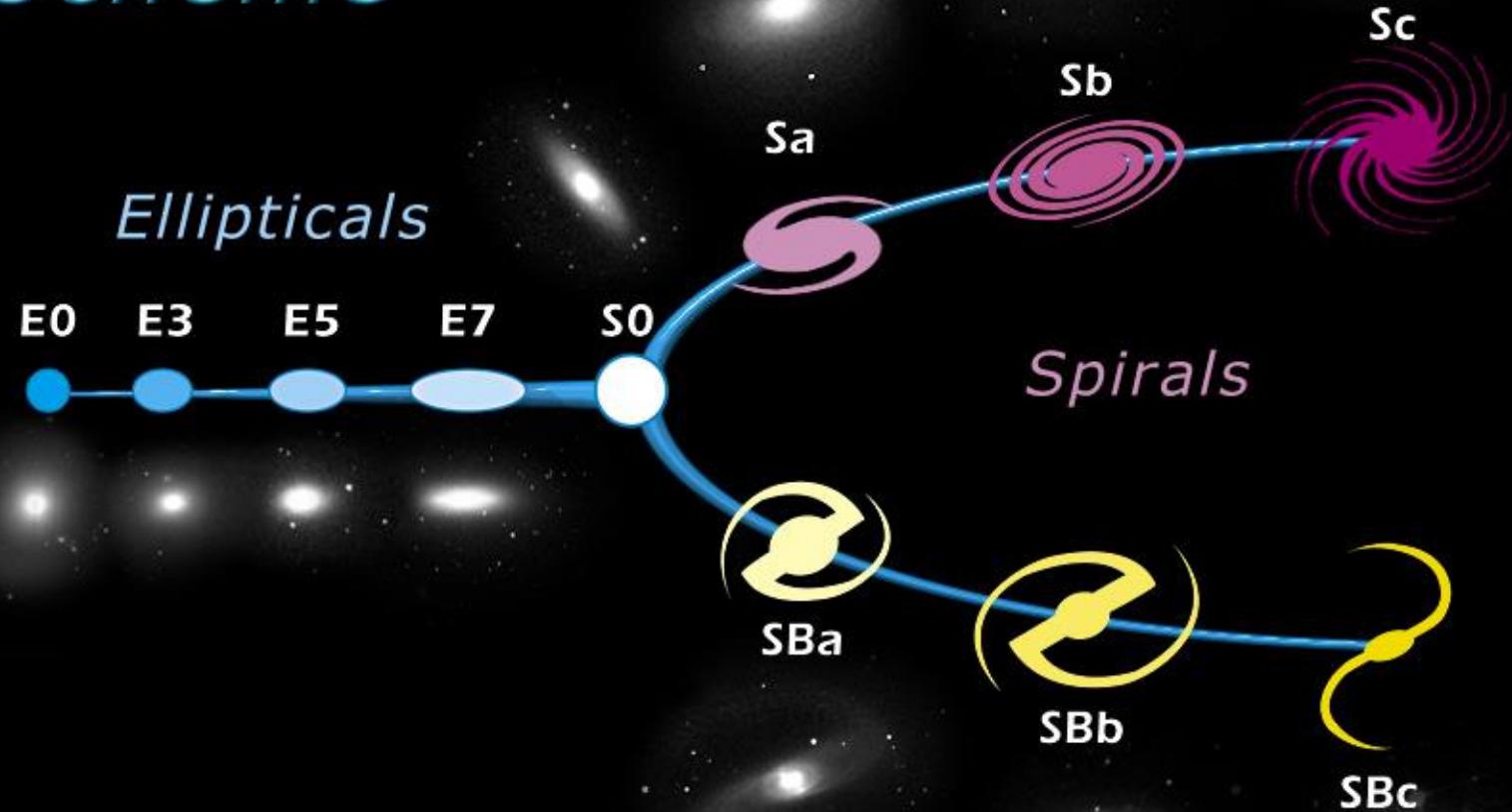
Morfološka klasifikacija galaksija ⇒ Hubbleov niz:

- 1. Eliptičke (E) galaksije**
- 2. Spiralne (S) galaksije**
- 3. Nepravilne (Irr) galaksije**

Podgrupe spiralnih galaksija:

- 1. Normalne spiralne galaksije (S)**
- 2. Spiralne galaksije s prečkom – 'bar' (SB)**

Edwin Hubble's Classification Scheme



Prijelazna grupa galaksija \Rightarrow **lentikularne galaksije:**

- 1. Normalne lentikularne galaksije (S0)**
- 2. Lentikularne galaksije s prečkom (SB0)**

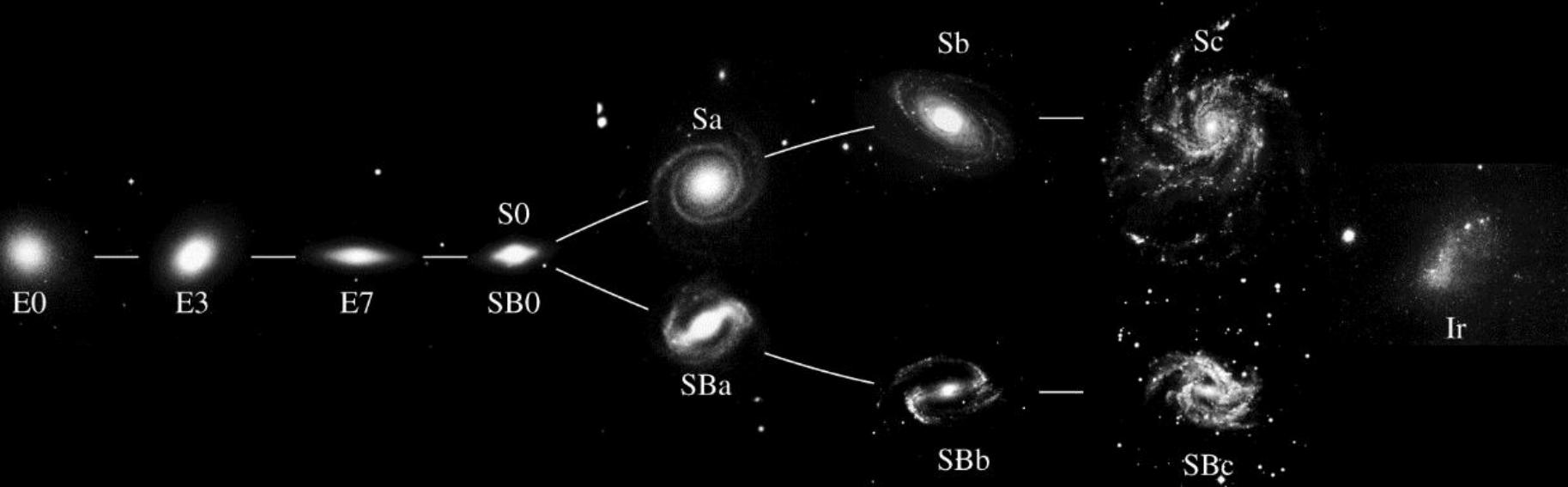
Morfološki niz \Rightarrow **Hubbleova vilica**

Hubbleov tip galaksije u Hubbleovom nizu

- Hubbleov niz ujedno i **evolucijski niz** u razvoju galaksija?? \Rightarrow **NETOČNO!!**
- Povijesni razlozi: galaksije s lijeve strane niza nazivaju se *galaksije ranog tipa*, a sa desne strane *galaksije kasnog tipa*

Podtipovi eliptičnih galaksija: **E0 do E7** na osnovu parametra **eliptičnosti** (α i β su **prividne** velike i male osi elipse projicirane na nebeski svod)

$$\epsilon \equiv 1 - \beta/\alpha$$

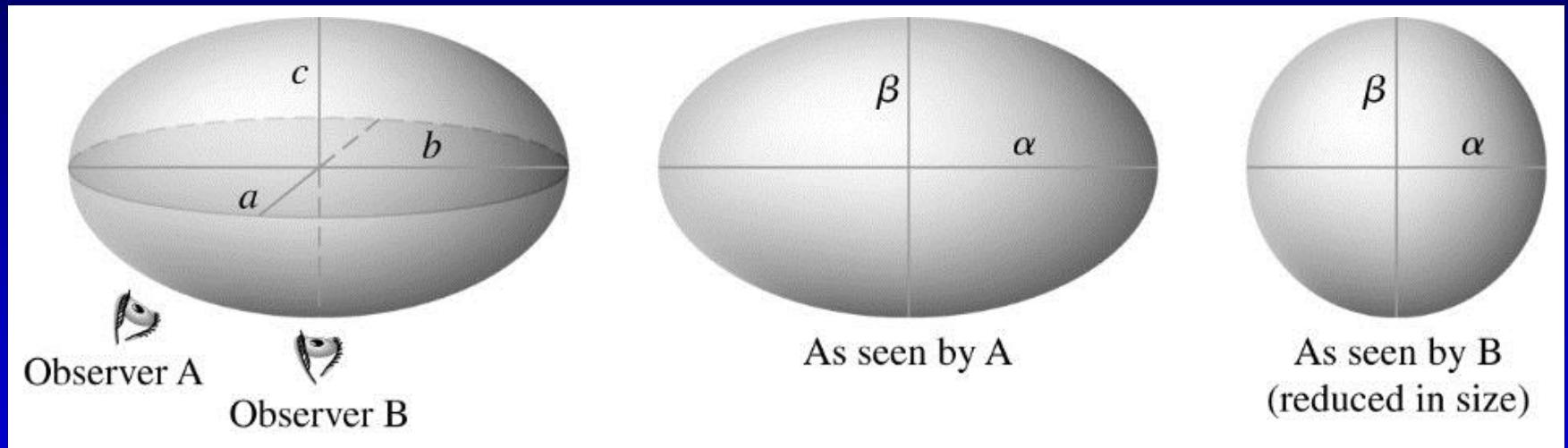


Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

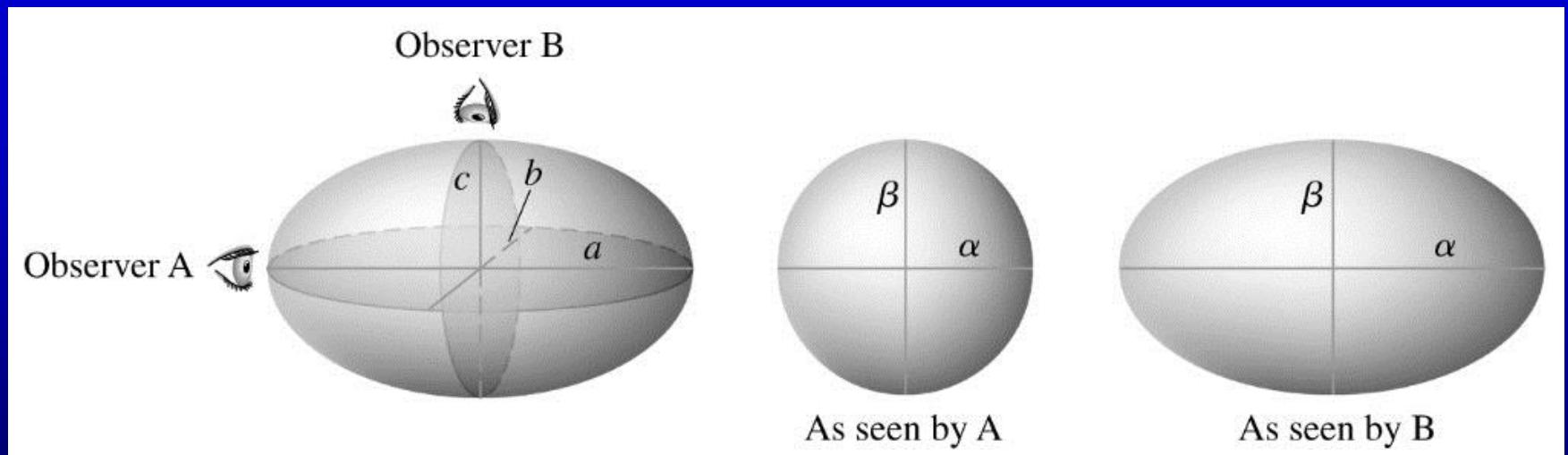
Hubbleov tip je određen kao $10\epsilon \Rightarrow$ eliptična galaksija s $\epsilon = 0.42$ je tipa E4

- Sferno-simetrična raspodjela zvijezda u eliptičnoj galaksiji \Rightarrow E0
- Spljoštena raspodjela zvijezda u eliptičnoj galaksiji \Rightarrow E7
- Nisu opažene galaksije s intrinzičnom eliptičnošću $\epsilon > 0.7$
- Prividna eliptičnost **ne mora odgovarati** stvarnoj eliptičnosti!! \Rightarrow ovisnost o orijentaciji sferoida u odnosu na smjer doglednice
- Zbog orijentacije sferoida spljoštena raspodjela prividno može izgledati kao sferno-simetrična!
- Tro-osni (triaksijalni) sferoidni sustav za opis eliptičnih galaksija ($a \geq b \geq c$):
 - Spljošteni sferoid (na polovima)
 - Izduženi sferoid
 - Sfera ($a = b = c$)

Spljošteni sferoid (na polovima): $a = b$



Izduženi sferoid: $b = c$



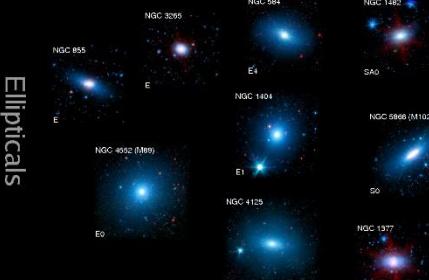
The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The designation of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

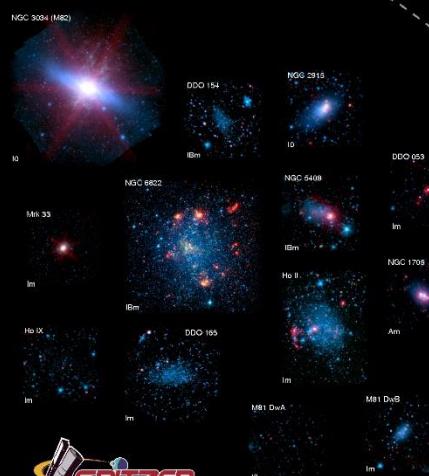
The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>

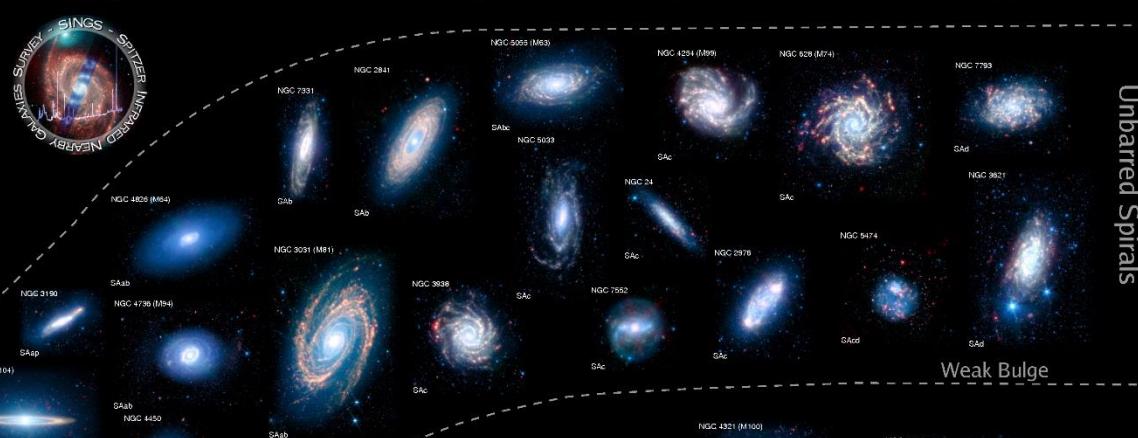
Ellipticals



Irregulars

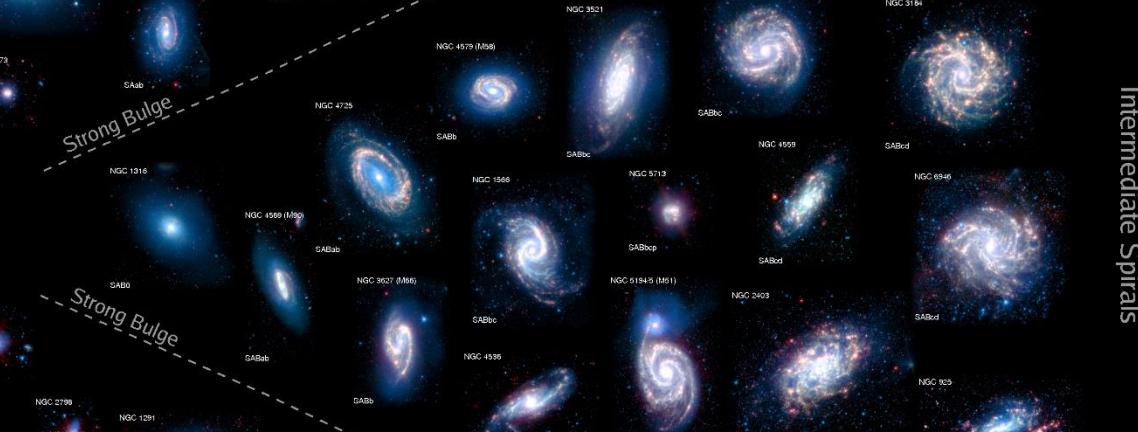


Unbarred Spirals



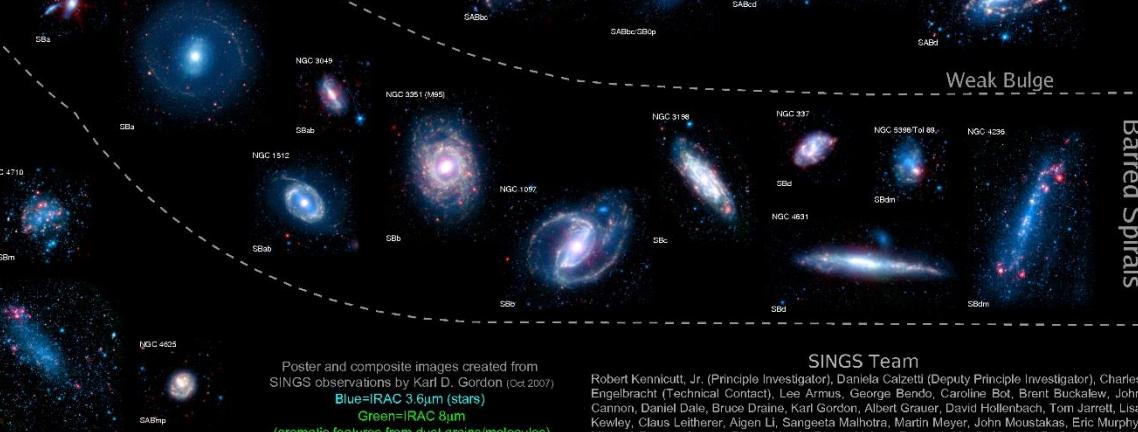
Weak Bulge

Intermediate Spirals



Weak Bulge

Barred Spirals



Poster and composite images created from SINGS observations by Karl D. Gordon (Oct. 2007)
 Blue=IRAC 3.6 μm (stars)
 Green=IRAC 8 μm
 (aromatic features from dust grains/molecules)
 Red=MIPS 24 μm (warm dust)

SINGS Team

Robert Kennicutt, Jr. (Principle Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principle Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Lee Armus, George Bendo, Caroline Bot, Brent Buckalew, John Cannon, Daniel Dale, Bruce Draine, Karl Gordon, Albert Grauer, David Hollenbach, Tom Jarrett, Lisa Kewley, Claus Leitherer, Algren Li, Sangita Malhotra, Marin Meyer, John Moustakas, Eric Murphy, Michael Regan, George Rieke, Marcia Rieke, Helene Roussel, Kartik Sheth, J.D. Smith, Michele Thornley, Fabian Walter & George Helou



Fizička svojstva galaksija

Eliptične galaksije

- Izrazito velike razlike u fizičkim svojstvima eliptičnih galaksija:
 - Apsolutni sjaj u B pojasu od vrlo malog sjaja od samo -8 mag do vrlo sjajnih galaksija -23 mag
 - Mase od 10^7 do čak $10^{23} M_{\text{Sun}}$
 - Veličine galaksije od ~ 0.1 kpc do stotina kpc
- Divovske eliptične galaksije su najveći objekti u svemiru, najmanje patuljaste galaksije su veličine kuglastog skupa
- Lentikularne galaksije imaju sjaj i masu sličnu većim eliptičnim galaksijama
- Patuljaste galaksije su najbrojnije u svemiru
- Eliptične galaksije E0 – E7 + prijelazni oblik (lentikularne galaksije) S0 i SB0



IC 4296 (E0)



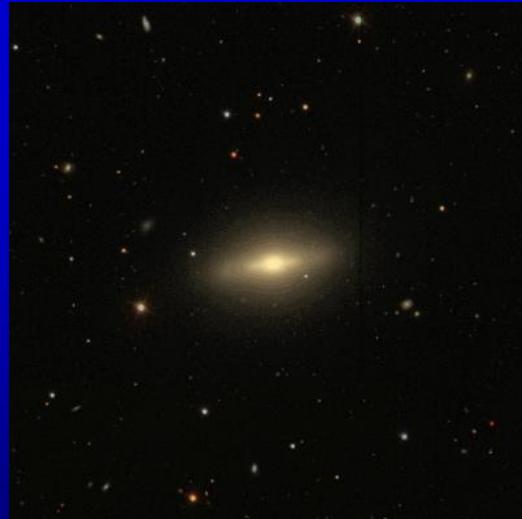
NGC 4365 (E3)



NGC 4564 (E6)



NGC 4623 (E7)



NGC 4251 (S0)



NGC 4340 (RSB0)

Spiralne galaksije:

- Bez prečke: **Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc**
- Sa prečkom: **SBa, SBab, SBb, SBbc, SBc**
- Galaksije s najizraženijim središnjim ispupčenjem (najveći omjer luminoziteta ispupčenja i diska: $L_{\text{ispupčenje}}/L_{\text{disk}} \sim 0.3$), najčvršće namotani krakovi ($\sim 6^\circ$), ravnomjerna raspodjela zvijezda u krakovima → **Sa ili SBa**
- Galaksije s najmanjim omjerom luminoziteta ispupčenja i diska: $L_{\text{ispupčenje}}/L_{\text{disk}} \sim 0.05$, slabije namotani krakovi ($\sim 18^\circ$), krakovi s nakupinama zvijezda i HII područje → **Sc ili SBc**
- Spiralne galaksije manje se međusobno razlikuju u fizičkim karakteristikama nego eliptične galaksije
- Spiralne galaksije su također među najvećim galaksijama u svemiru
- Apsolutni sjaj u B pojasu od -16 mag do -23 mag



M81/NGC 3031
(Sb(r)I-II)



NGC 7096 (Sa(r)I)



M104/NGC
4594 (Sa/Sb)



M101/NGC
5457 (Sc(s)I)

- Masa spiralnih galaksija od 10^9 do $10^{12} M_{\text{Sun}}$
- Veličina diska galaksije od 5 do 100 kpc

Nepravilne galaksije

- Nepravilne galaksije s nekom organiziranom strukturom → **Irr I**
- Potpuno nepravilne galaksije bez ikakve strukture → **Irr II**
- Vrlo različita svojstva
- Nepravilne galaksije su uglavnom manje
- Apsolutni sjaj u B pojasu od -13 do -20
- Masa nepravilnih galaksija od 10^8 do $10^{10} M_{\text{Sun}}$

Dodatna klasifikacija nepravilnih galaksija → Gerard de Vaucouleurs:

- Umjesto Irr I i II ⇒ dodatne morfološke klase nakon Sc (SBc): Sd (SBd), Sm (SBm) i Im (m označava Magellanov tip galaksije); Ir potpuno nepravilne galaksije



Mali Magellanov oblak – SMC
(Irr I/ImIV-V)



Veliki Magellanov oblak – LMC
(Irr I/SBmIII)



M82/NGC 3034
(Irr II/Ir/Amorphous)

Stéphane Guisard; L. Comolli, L. Fontana, G. Ghioldi & E. Sordini; NASA, ESA, The Hubble Heritage Team, (STScI/AURA)

- Ir se nazivaju i **amorfne** galaksije jer nemaju nikakvu organiziranu strukturu (Sandage & Brucato)
- Spiralne galaksije tipa Sd i kasnije znatno su manje od galaksija ranijeg tipa → **patuljaste spiralne galaksije**

Naglašenija razlika između spiralnih galaksija bez i sa prečkom (de Vaucouleurs):

- Normalne spiralne galaksije bez prečke: SA
- Spiralne galaksije sa slabom prečkom: SAB
- Spiralne galaksije s izraženom prečkom: SB

Podgrupe lenticularnih galaksija:

- Bez prašine u disku: S0₁
- Značajna količina prašine u disku: S0₃
- Slično lenticularne galaksije s prečkom: SB0₁ i SB0₃

Moderni Hubbleov niz od eliptičkih galaksija ranog tipa do normalnih galaksija kasnog tipa:

E0, E1, ..., E7, S0₁, S0₂, S0₃, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd, Sd,
Sm, Im, Ir

Slično i za Hubbleov niz od eliptičkih galaksija ranog tipa do galaksija s prečkom kasnog tipa:

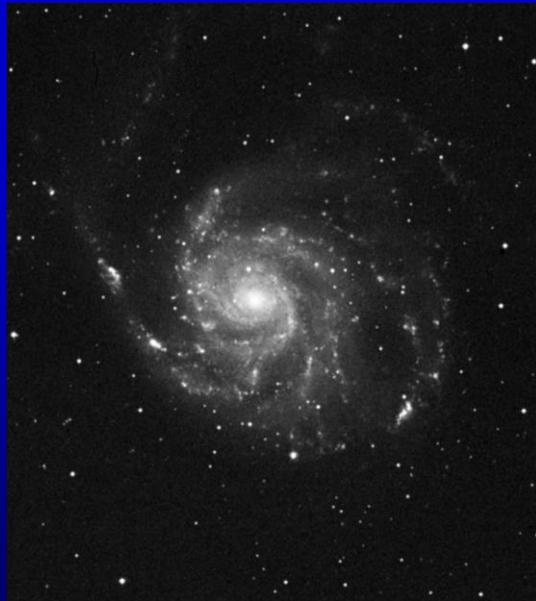
E0, E1, ..., E7, SB0₁, SB0₂, SB0₃, SBa, SBab, SBb, SBbc, SBc,
SBcd, SBd, SBm, Im, Ir

Klase luminoziteta spiralnih galaksija

(Sidney van den Bergh)

- Klase od I do V → klasa I: dobro definirani krakovi; klasa V: krakovi se ne vide
- M31/Andromedina maglica (SbI-II); Mliječni put (SBbcI-II); M101 (ScI); LMC (SBmIII); SMC (ImIV-V)
- Mliječni put i M31 su među najvećim spiralnim galaksijama u svemiru

- Klasa luminoziteta ne odgovara absolutnom sjaju galaksije!!
- Kompleksna struktura spiralnih galaksija (uz spiralne krakove)
- Spiralni krakovi se mogu protezati do središta galaksije (s) ili do prstena oko središta galaksije (r) \Rightarrow M101 je Sc(s)I; NGC 7096 je Sa(r)I; M81 je Sb(r)I-II
- Galaksije mogu imati i vanjski prsten (R) \Rightarrow NGC 4340 je RSB0



M101/NGC 5457 (Sc(s)I)



NGC 7096 (Sa(r)I)



M81/NGC 3031 (Sb(r)I-II)



NGC 4340 (RSB0)

SPIRALNE I NEPRAVILNE GALAKSIJE

- Omjer luminoziteta diska i ispučenja, namotanost krakova i izraženost krakova koreliraju s Hubbleovim tipovima galaksija kasnijeg tipa
- Ostale fizikalne karakteristike također dobro koreliraju s Hubbleovim tipovima galaksija kasnijeg tipa

K – korekcija

- Problem određivanja absolutnog sjaja galaksija → korekcija uslijed ekstinkcije u Mliječnom putu i u samoj opaženoj galaksiji
- Velike udaljenosti galaksija ⇒ značajan Dopplerov pomak ⇒ zračenje galaksije je pomaknuto prema dužim valnim duljinama (crveni pomak)
- K – korekcija je korekcija spektra na crveni pomak uslijed Dopplerovog efekta

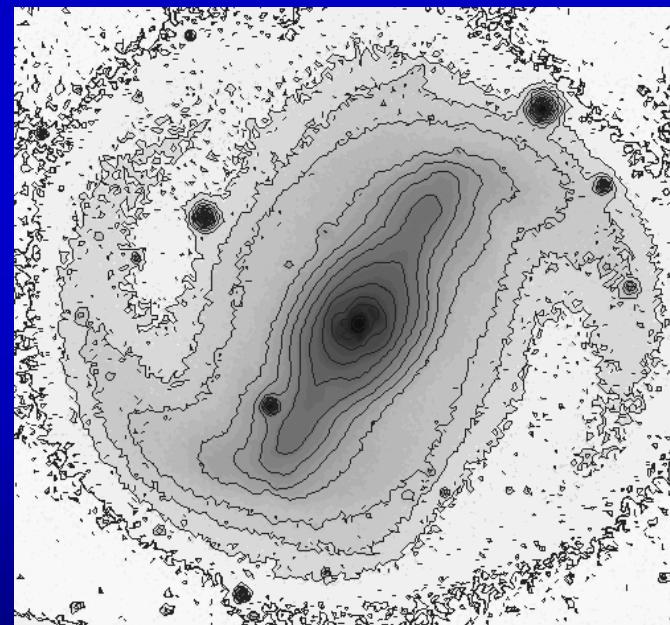
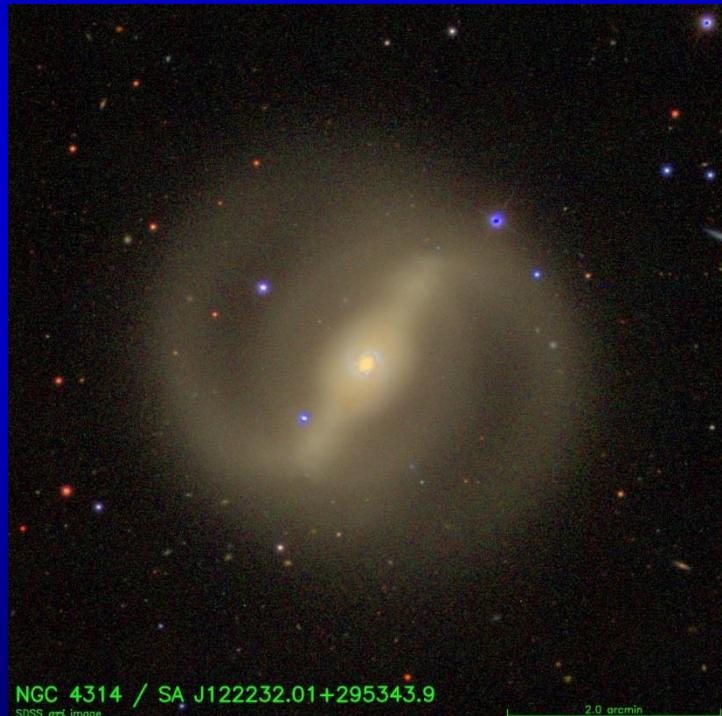
Sjaj nebeske pozadine

- Problem mjerjenja sjaja vanjskih dijelova galaksije
- Vanjski dijelovi galaksije su slabog sjaja i stapaju se s nebeskom pozadinom
- Sjaj nebeske pozadine (svjetlosno onečišćenje, fotokemijske reakcije u atmosferi, nerazlučene zvijezde i galaksije)
- Pozadinski nebeski sjaj oduzima se od slike galaksije

Izofote i de Vaucouleursov profil

- Izofote: linije konstantnog broja fotona → konture konstantnog površinskog sjaja

NGC 4314



BUDDA
(<http://www.sc.eso.org/~dgadotti/budda/brief.html>)

SDSS

- Galaksije nemaju jasno određen polumjer \Rightarrow radi usporedbe galaksija potrebno je odrediti izofotu koja će definirati 'polumjer' galaksije
- **Holmbergov polumjer** \Rightarrow projicirana duljina velike poluosi elipsoida koja ima izofotni površinski sjaj $\mu_H = 26.5 \text{ B-mag/arcsec}^2$
- Efektivni polumjer $r_e \Rightarrow$ projicirani polumjer galaksije unutar kojeg je izračeno polovica svjetlosti galaksije
- Površinski sjaj μ_e na efektivnom polumjeru r_e ovisi o raspodjeli sjaja u ovisnosti o udaljenosti od središta galaksije

De Vaucouleursov profil raspodjele površinskog sjaja u ovisnosti o udaljenosti od središta → površinski sjaj velikih eliptičnih galaksija i ispupčenja spiralnih galaksija $\propto r^{1/4}$:

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

- Gornja jednadžba je izražena u jedinicama mag/arcsec²

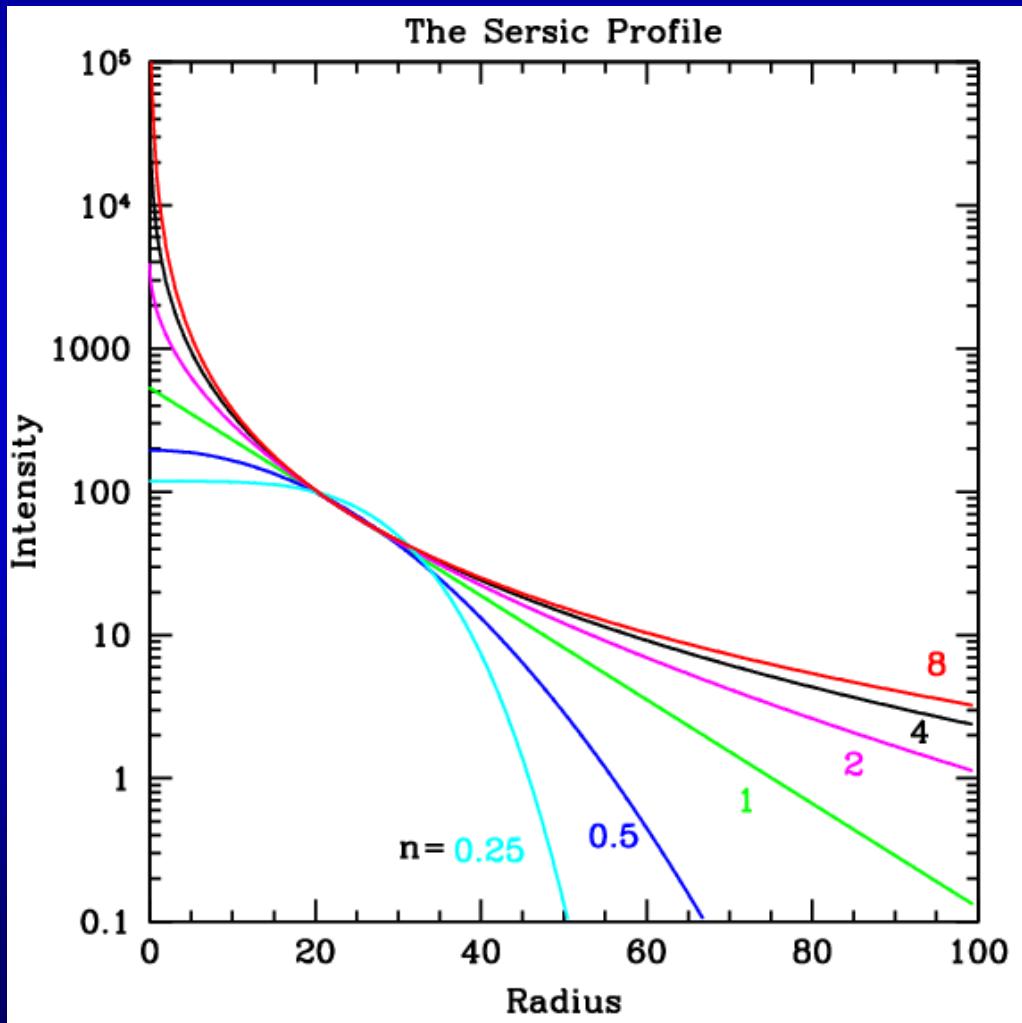
Sjaj diska najčešće slijedi eksponencijalnu ovisnost (h je karakteristična skala duljine diska uzduž njegove ravnine):

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

Umjesto $r^{1/4}$ moguće je uvesti općenitiju ovisnost $r^{1/n} \Rightarrow$ **generalizirani de Vaucouleursov profil ili Sersicov profil:**

$$\mu(r) = \mu_e + 8.3268 \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right]$$

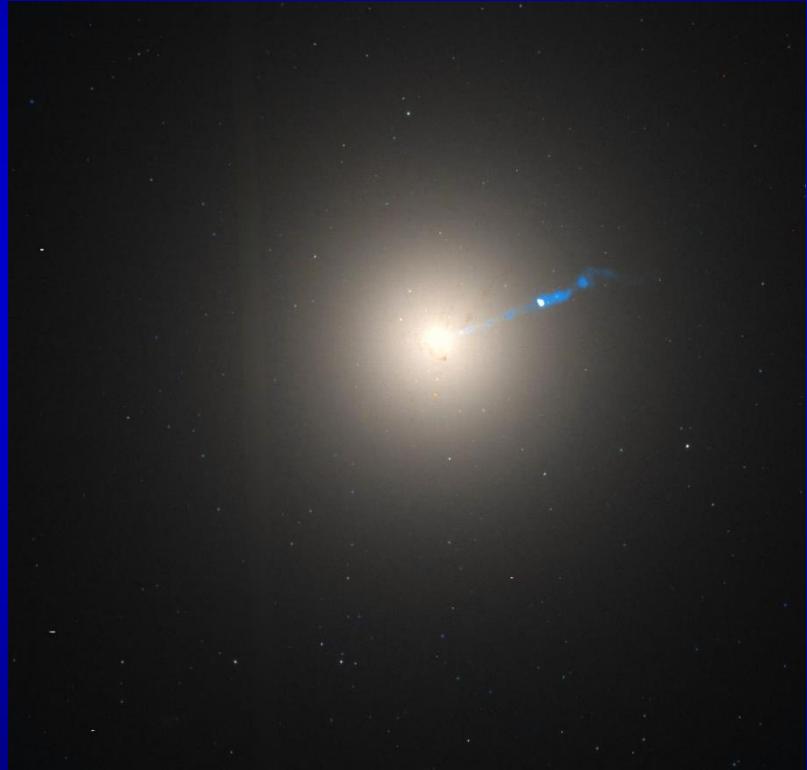
- Prilagodba gornjeg profila opaženom profilu površinskog sjaja sve dok se ne dobiju optimalne vrijednosti parametara μ_e , r_e i n



Peng et al., 2010, *Astron. J.*,
139, 2097

Velike eliptične galaksije
⇒ veliki indeks n

M87 ($n = 4$)



NASA, STScI

Diskovi spiralnih galaksija
⇒ mali indeks n

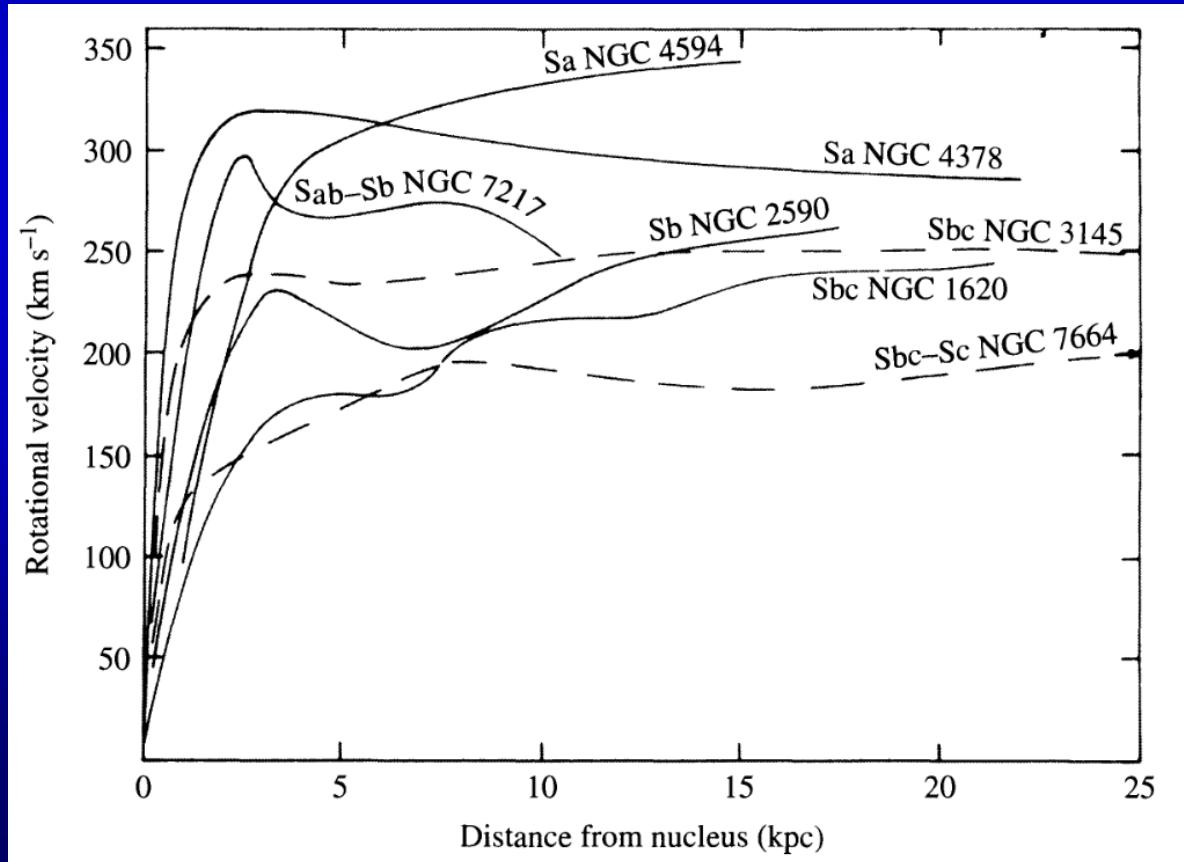
M33



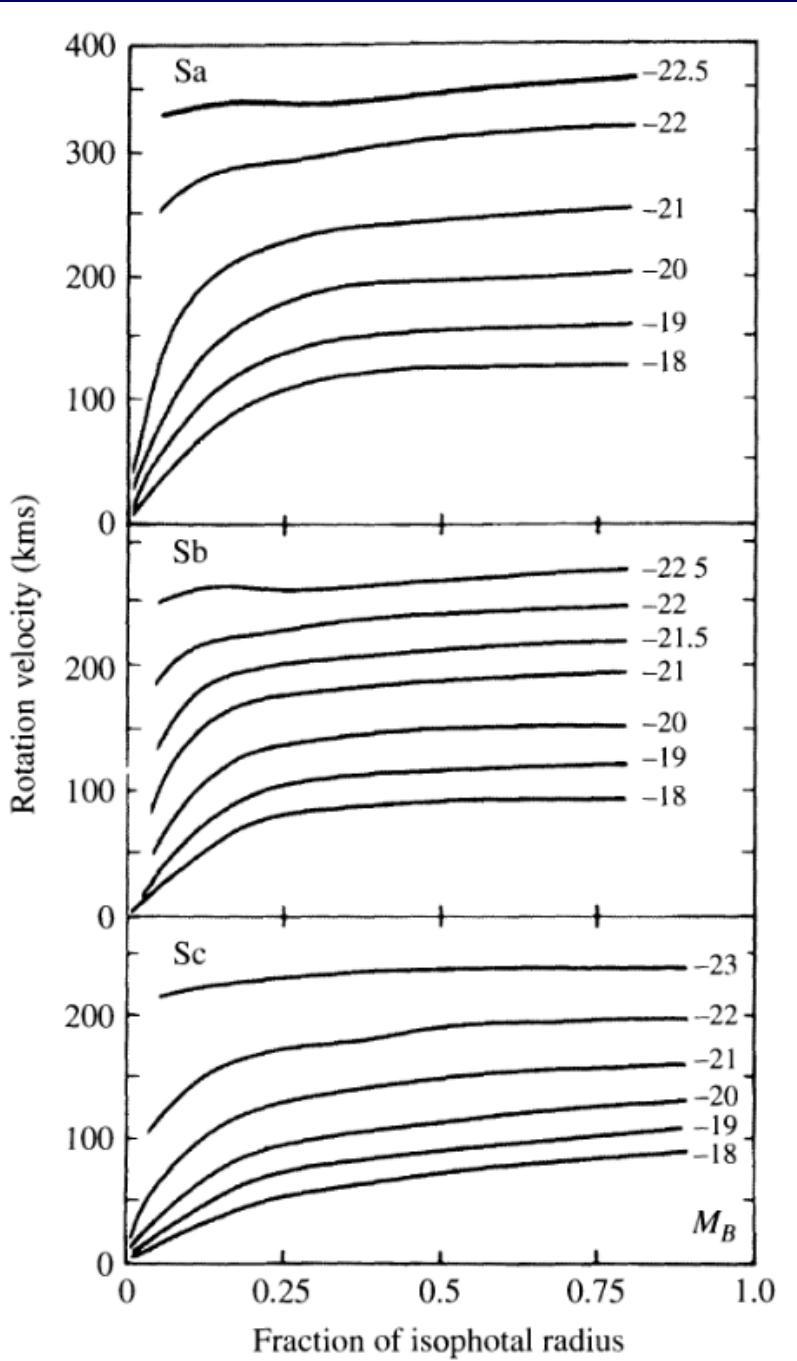
Giovanni Benintende

Rotacijske krivulje galaksija

- Profil površinskog sjaja (Sersicov profil) \Rightarrow određuje samo raspodjelu vidljive mase, ali ne i raspodjelu tamne tvari
- **Galaktičke rotacijske krivulje \Rightarrow izravno određivanje ukupne mase galaksije:** svijetle + tamne materije



(Rubin, Ford & Thonnard, 1978,
Astrophys. J. Lett., 225,
L107)



- Galaksije istog Hubbleovog tipa i luminoziteta (apsolutni sjaj u B pojasu) imaju slične rotacijske krivulje! \Rightarrow **korelacija** između Hubbleovog tipa i luminoziteta te rotacijskih krivulja
- Galaksije većeg luminoziteta imaju veću maksimalnu rotacijsku krivulju, a profil rotacijskih brzina brže raste
- Spiralne galaksije ranijeg tipa, a istog luminoziteta imaju veće maksimalne rotacijske brzine

(Rubin et al., 1985, *Astrophys. J.*, 289, 81)

- Profil rotacijskih krivulja raste nešto brže za ranije tipove spiralnih galaksija koje imaju istu rotacijsku brzinu
- Galaksije različitih Hubbleovih tipova te time i različitih omjera luminoziteta diska i ispuštenja mogu imati sličan profil rotacijskih krivulja \Rightarrow profil gravitacijskog potencijala **ne slijedi raspodjelu vidljive mase** \Rightarrow prisustvo **tamne materije**
- Rotacijske brzine poprimaju vrlo različite vrijednosti unutar istog Hubbleovog tipa:

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

Sb $\rightarrow V_{\max} = 222 \text{ km/s}$ [144 – 300 km/s];

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

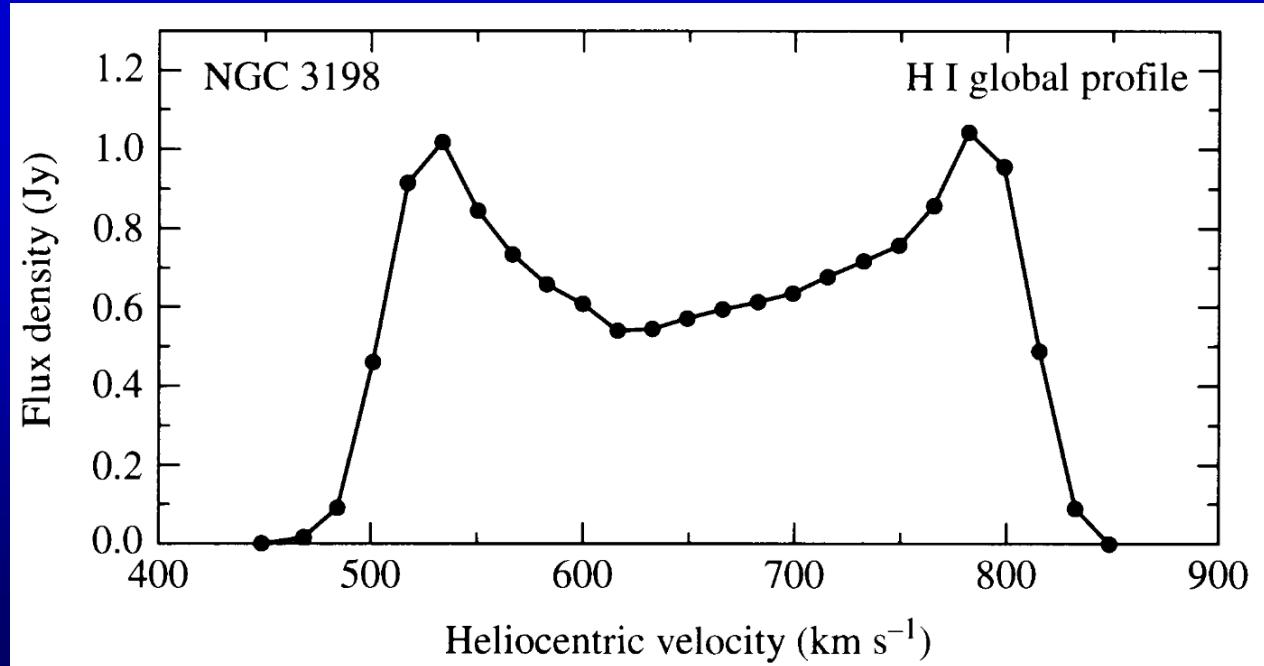
Mliječni put (SBbc) $V_{\max} \approx 250 \text{ km/s}$

- Nepravilne galaksije imaju puno manje rotacijske brzine nego spiralne galaksije ranog tipa $\rightarrow V_{\max} = 50 - 70 \text{ km/s}$
- Minimalna rotacijska brzina nužna za formiranje spiralnih krakova iznosi oko $50 - 100 \text{ km/s}$ \rightarrow kutna količina gibanja nepravilnih galaksija je samo $\approx 10\%$ vrijednosti za spiralne

TULLY – FISHER RELACIJA

- Relacija između luminoziteta spiralne galaksije i najveće rotacijske brzine \Rightarrow **Tully – Fisher relacija**

Brent Tully, Richard Fisher (1977.) \rightarrow mjerjenje proširene emisijske linije neutralnog vodika spiralnih galaksija na 21 cm (radio područje)

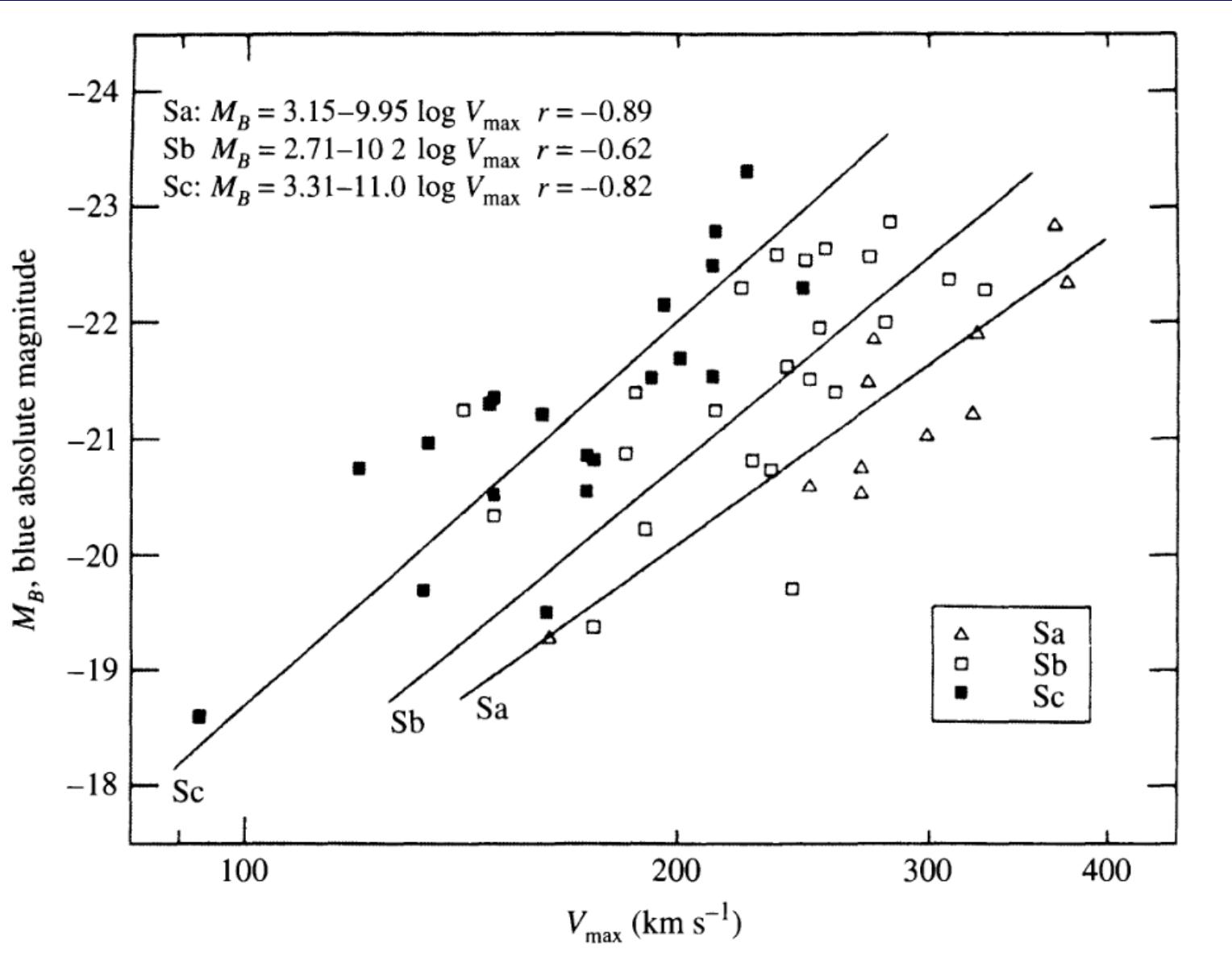


Linija se mjeri preko cijele galaksije, bez razlučivanja \Rightarrow dvostruki maksimum

(Begeman, 1991,
Astron. & Astrophys.,
223, 81)

- Rotacijska krivulja galaksije je većinom ravna, a najveća rotacijska brzina se javlja upravo u ravnom dijelu krivulje
- Većina neutralnog vodika se nalazi u ravnom dijelu rotacijske krivulje (vanjski dijelovi galaksije) gdje je rotacijska brzina najveća \Rightarrow nastanak dvostrukom maksimuma (crveni i plavi pomak suprotnih dijelova galaksije)
- Središte galaksije sporo rotira \rightarrow rotacijska brzina na sredini između vrhova odgovara radijalnoj brzini galaksije
- Pomak valne duljine vrha povezan je s rotacijskom brzinom galaksije (V) i kutom inklinacije / između doglednice i smjera okomitog na galaktičku ravninu:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \simeq \frac{v_r}{c} = \frac{V \sin i}{c}$$



(Rubin et al., 1985, *Astrophys. J.*, 289, 81)

Tully – Fisher relacija \Rightarrow ovisnost apsolutnog sjaja galaksije u B pojasu (M_B) o maksimalnoj rotacijskoj brzini (V_{\max}) za različite Hubbleove tipove spiralnih galaksija (Sa, Sb i Sc)

$$M_B = -9.95 \log_{10} V_{\max} + 3.15 \quad (\text{Sa})$$

$$M_B = -10.2 \log_{10} V_{\max} + 2.71 \quad (\text{Sb})$$

$$M_B = -11.0 \log_{10} V_{\max} + 3.31 \quad (\text{Sc})$$

Opažanja u infrarvenom dijelu spektra:

- Omogućuje opažanje i kroz prašinu te pri visokim ekstinkcijama
- IR zračenje uglavnom dolazi s divova kasnog spektralnog tipa čija raspodjela dobro odgovara raspodjeli mase u galaksiji
- Opažanjima u B pojasu dominiraju mlade vruće zvijezde koje se uglavnom nalaze u područjima nastanka novih zvijezda

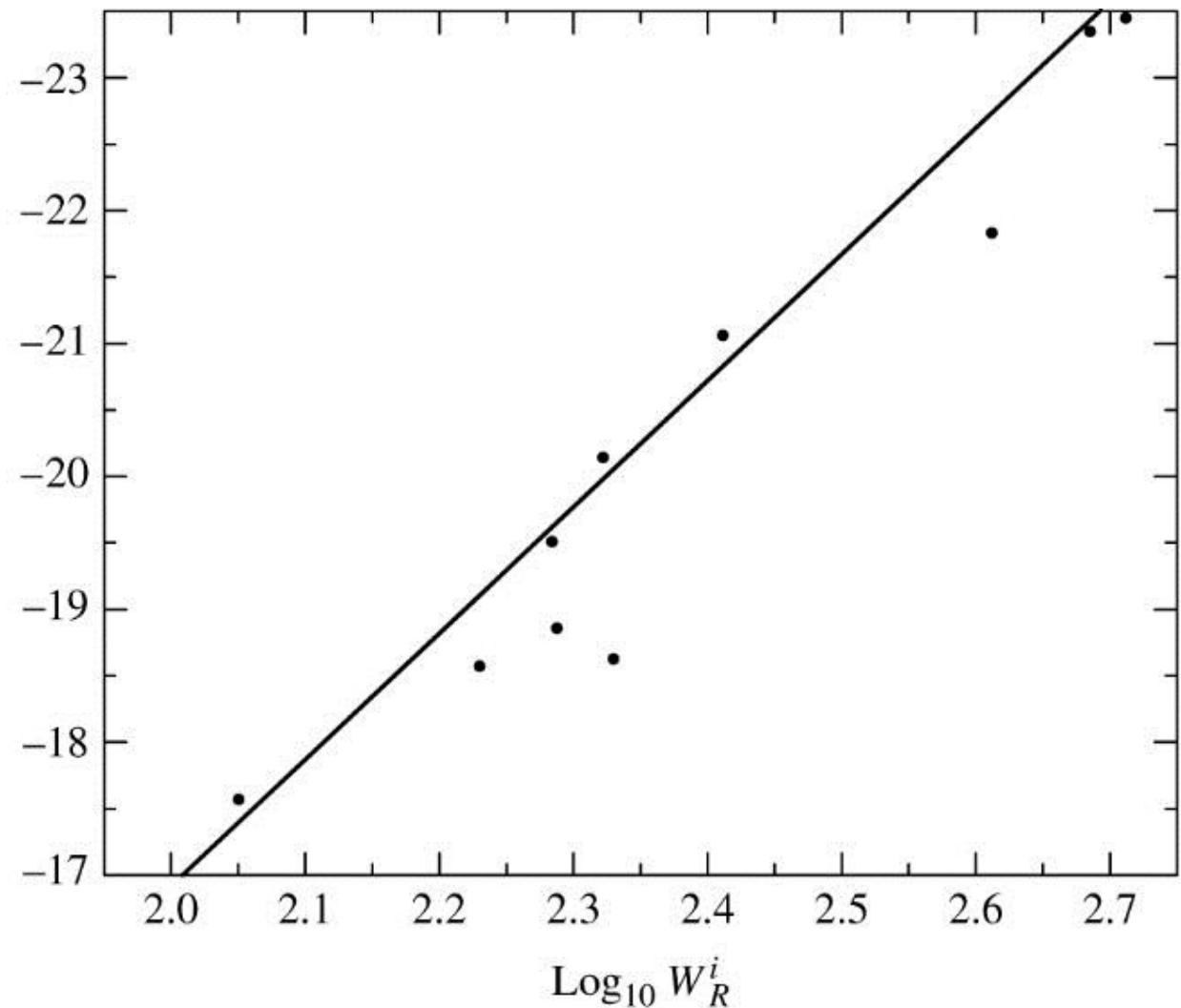
Tully – Fisher relacija u infracrvenom H pojasu:

$$M_H^i = -9.50(\log_{10} W_R^i - 2.50) - 21.67 \pm 0.08$$

W_R^i je mjera rotacijske brzine galaksije:

$$W_R^i = (W_{20} - W_{\text{rand}}) / \sin i$$

W_{20} je razlika brzina između plavog i crvenog pomaka emisijske linije u H pojasu kada je intenzitet emisije 20% maksimalne vrijednosti u plavom i crvenom maksimumu
 W_{rand} je mjera nasumičnih brzina superponiranih na opažene brzine zbog orbitalnih gibanja u galaksiji koja nisu kružna



Tully – Fisher
relacija u H
pojasu

Galaksije u tri
galaktička
skupa (lokalni
skup, Sculptor,
M81)

(Pierce & Tully, 1992, *Astrophys. J.*, 387, 47)

- Tully – Fisher relacija ovisi o raspodjeli mase u galaksiji i omjeru mase i luminoziteta
- Spiralne galaksije imaju gotovo ravne rotacijske krivulje nakon nekoliko kpc → masa unutar radijusa r :

$$M_r = \frac{V^2 r}{G}$$

Za cijelu galaksiju ($r \rightarrow R$; $M_r \rightarrow M$):

$$M = \frac{V_{\max}^2 R}{G}$$

Maksimalna rotacijska brzina odgovara ravnom dijelu rotacijske krivulje

Ako je omjer mase i luminoziteta isti za sve spiralne galaksije ($M/L \equiv 1/C_{ML}$):

$$L = C_{ML} \frac{V_{\max}^2 R}{G}$$

Pretpostavka: sve spiralne galaksije imaju otprilike isti površinski sjaj u svom središtu:

$$\frac{L}{R^2} \equiv C_{\text{SB}} = \text{const.}$$

$$L = \frac{C_{\text{ML}}^2 V_{\text{max}}^4}{C_{\text{SB}} G^2} = C V_{\text{max}}^4$$

$$M = M_{\text{Sun}} - 2.5 \log \left(\frac{L}{L_{\text{Sun}}} \right)$$

$$\begin{aligned} &= M_{\text{Sun}} - 2.5 \log V_{\text{max}}^4 - 2.5 \log C + 2.5 \log L_{\text{Sun}} \\ &\quad = -10 \log V_{\text{max}} + \text{constant} \end{aligned}$$

- Jednostavne pretpostavke dobro opisuju koeficijente i nagib Tully-Fisher relacije za Sa, Sb i Sc tipove

Polumjer – luminozitet relacija

- Spiralne galaksije ranog tipa (Sa – Sc) pokazuju povećanje radijusa galaksije sa luminozitetom bez obzira na Hubbleov tip:

$$\log_{10} R_{25} = -0.249M_B - 4.00$$

R_{25} je radius diska koji odgovara površinskom sjaju od 25 B-mag/arcsec²

Mase i omjeri mase i luminoziteta

Tully-Fisher relacija + polumjer-luminozitet relacija + $M_r = V^2 r / G \Rightarrow$ procjena mase i omjera mase i luminoziteta za spiralne galaksije ranog tipa

- Veliki interval masa galaksija: $10^9 - 10^{12} M_{\text{Sun}}$, ali slaba ovisnost mase galaksije i Hubbleovog tipa jer ne postoji korelacija između Hubbleovog tipa i radijusa te sjaja

- Korelacija između omjera mase i luminoziteta te Hubbleovog tipa:
 - $\langle M/L_B \rangle = 6.2 \pm 0.6$ (Sa)
 - $\langle M/L_B \rangle = 4.5 \pm 0.4$ (Sb)
 - $\langle M/L_B \rangle = 2.6 \pm 0.2$ (Sc)

Boje i zastupljenost plina i prašine

- Omjer M/L_B pokazuje da galaksije tipa Sc imaju veći udio masivnih zvijezda glavnog niza nego spiralne galaksije ranijeg tipa (masivne zvijezde imaju nizak omjer M/L_B)
- Veći broj masivnih vrućih zvijezda \Rightarrow maksimum zračenja je pomaknut prema plavom dijelu spektra \Rightarrow galaksije Sc tipa su plavije nego Sa i Sb

- Indeks boje $B - V$ opada s Hubbleovim tipom:
 - $B - V = 0.75$ (Sa)
 - $B - V = 0.64$ (Sb)
 - $B - V = 0.52$ (Sc)
 - $B - V \approx 0.4$ (Ir)
- Galaksije kasnijeg spektralnog tipa pokazuju veću zastupljenost masivnih, mladih zvijezda glavnog niza
- Nepravilne galaksije imaju najniži indeks boja i najveću zastupljenost masivnih mladih zvijezda
- Nepravilne galaksije su plavije prema središtu (spiralne galaksije su crvenije prema središtu) \Rightarrow nepravilne galaksije još uvijek **stvaraju mlade zvijezde u svojim središtima**
- Plave mlade zvijezde kratko žive \Rightarrow potrebne su zнатне količine plina i prašine za nastanak zvijezda

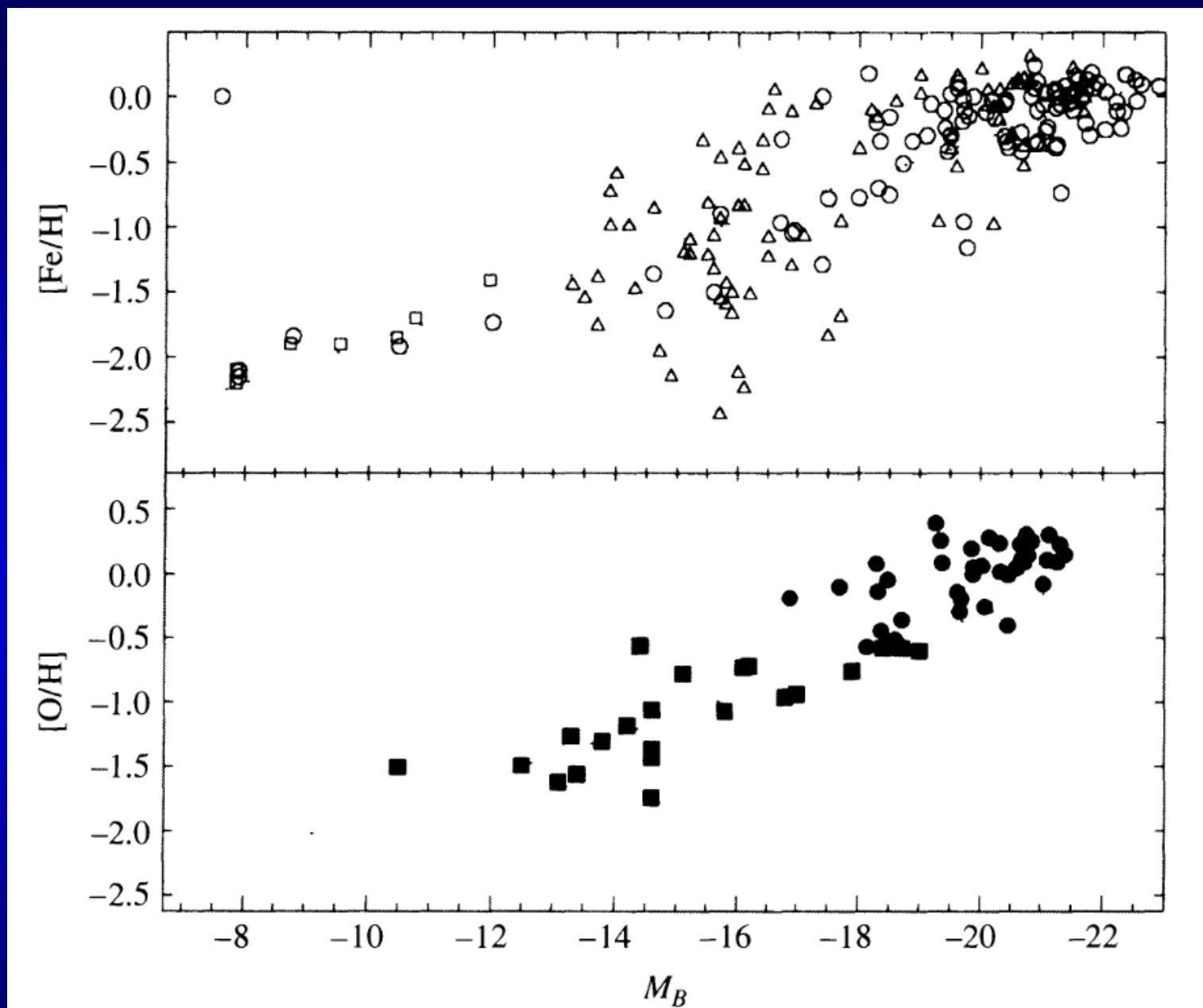
- Korelacija udjela mase plina u ukupnoj masi sa Hubbleovim tipom (opažanja na 21 cm, CO emisija, H α emisija):
 - $\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle = 0.04$ (Sa)
 - $\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle = 0.08$ (Sb)
 - $\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle = 0.16$ (Sc)
 - $\langle M_{\text{gas}}/M_{\text{total}} \rangle = 0.25$ (Scd)
- Relativna količina atomskog i molekulskog vodika također ovisi o Hubbleovom tipu:
 - $\langle M_{\text{H}_2}/M_{\text{H I}} \rangle = 2.2 \pm 0.6$ (Sab)
 - $\langle M_{\text{H}_2}/M_{\text{H I}} \rangle = 1.8 \pm 0.3$ (Sb)
 - $\langle M_{\text{H}_2}/M_{\text{H I}} \rangle = 0.73 \pm 0.13$ (Sc)
 - $\langle M_{\text{H}_2}/M_{\text{H I}} \rangle = 0.29 \pm 0.07$ (Scd)

- Galaksije Sa tipa su kompaktnije i posjeduju dublji gravitacijski potencijal u kojem plin može tvoriti molekule
⇒ u međuzvjezdanoj tvari Sa galaksija prevladava **molekularni plin**, a u međuzvjezdanoj tvari Sc galaksija **atomarni vodik**
- Masa prašine je oko 150 – 600 puta manja nego masa plina
- Prašina je odgovorna za luminozitet galaksija u dalekom infracrvenom (+ sinkrotronsko zračenje i zračenje zvijezda)
- Sc galaksije imaju veći udio infracrvenog zračenja nego Sb i Sa uslijed većeg udjela plina i prašine

Gradijenti metaliciteta i boje u spiralnim galaksijama

- **Gradijent boje** u individualnim spiralnim galaksijama \Rightarrow ispupčenja su crvenija nego diskovi
- **Uzrok gradijenta boje: gradijent metaliciteta i nastanak zvijezda**
- Opacitet je veći u zvijezdama bogatim metalima zbog većeg broja elektrona po atomskoj jezgri u takvim zvijezdama, a opacitet potiče od ionizacije i elektronskih prijelaza
- Svjetlost teže prolazi kroz plin većeg opaciteta \Rightarrow zvijezde se 'napuhnu' i imaju veći radijus pa su crvenije nego iste zvijezde manjeg metaliciteta
- Ispupčenje je **crvenije** \Rightarrow ispupčenje je bogatije zvijezdama bogatim metalom nego disk

- Nastanak zvijezda pokazuje da je disk aktivniji u stvaranju novih zvijezda \Rightarrow ispuštenje sadrži manje plina i prašine pa je aktivnost nastanka zvijezda slabija
- U disku se stvara više mladih plavih zvijezda \Rightarrow disk je plaviji, a ispuštenje crvenije
- Gradijent boje postoji i u samom sferoidu \Rightarrow halo postaje plaviji s povećanjem radijusa \Rightarrow bliže središtu Mliječnog puta nalaze se crveniji kuglasti skupovi bogatiji metalom
- Metalicitet **korelira** s absolutnim sjajem galaksija \Rightarrow sjajnije galaksije pokazuju veći metalicitet \Rightarrow kemijsko obogaćivanje je efikasnije u sjajnijim i većim galaksijama
- Gradijent boje i metaliciteta važan u teorijama evolucije galaksija



(Zaritsky, Kennicutt & Huchra, 1994, *Astrophys. J.*, 420, 87)

Luminozitet u rendgenskom području

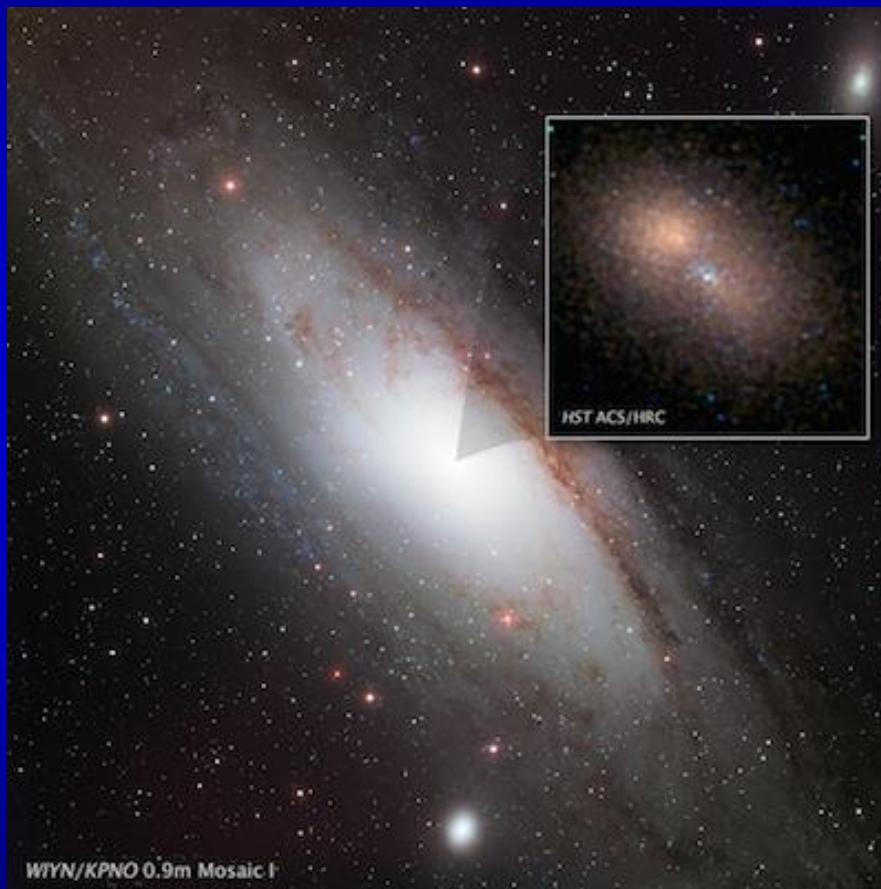
- Korelacija između luminoziteta u rendgenskom području i B pojasu: $L_X/L_B \simeq 10^{-7}$
- Izvori rendgenskog zračenja pripadaju izvorima koji imaju konstantni udio u populaciji u spiralnim galaksijama (vjerojatno dvojne zvijezde)

Supermasivne crne rupe

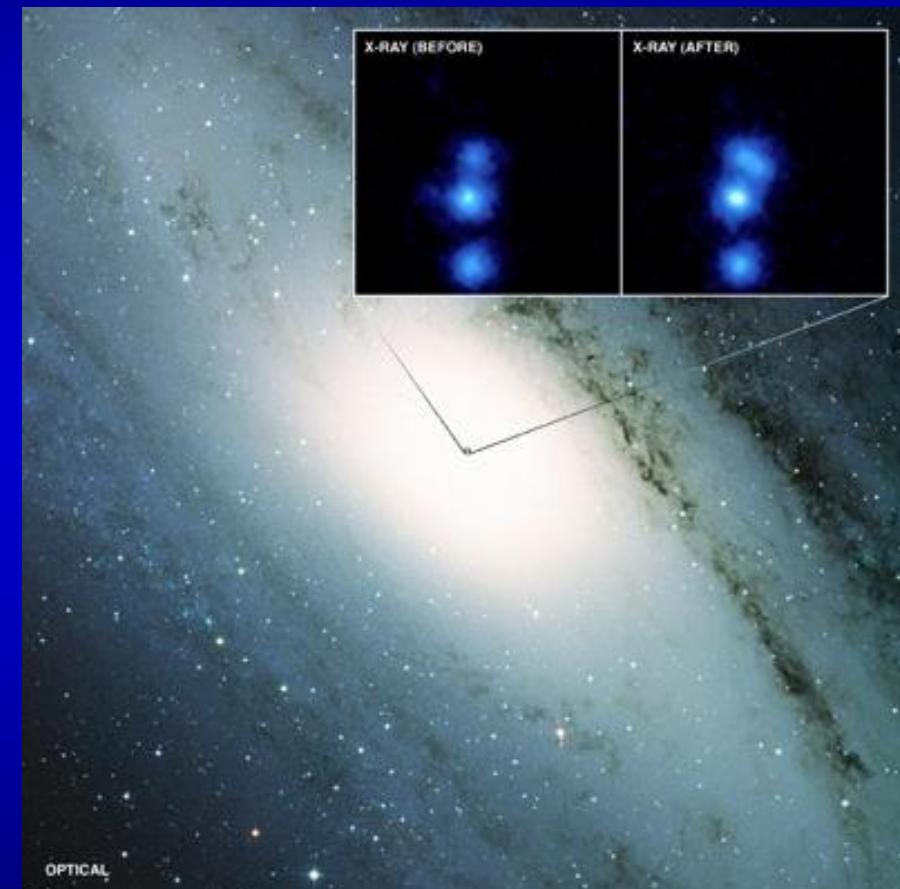
- Gibanje zvijezda i plina u blizini središta spiralnih galaksija
⇒ prisustvo **supermasivnih crnih rupa**
- U blizini središta M31 (Andromeda): $M/L > 35 \text{ M}_{\text{Sun}}/\text{L}_{\text{Sun}}$
⇒ prisustvo velike količine nevidljive materije u vrlo malom području
- Opažanja rotacijskih brzina ⇒ određivanje dinamičke mase središnje crne rupe: $M_{\text{SBH}} = 1.4^{+0.9}_{-0.3} \cdot 10^8 \text{ M}_{\text{Sun}}$
- Masu središnje supermasivne crne rupe moguće je odrediti iz disperzija brzina pomoću virijalnog teorema
- Usrednjene vrijednosti kinetičkih i potencijalnih energija zvijezda u središtu galaksije:

$$\frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle - 2\langle K \rangle = \langle U \rangle$$

M31 (Andromedina galaksija)



WIYN/KPNO; NASA/ESA/T. Lauer (NOAO)



NASA/CXC/SAO/Li et al/DSS

I je moment inercije središnjeg područja \Rightarrow u ravnoteži $\langle d^2I/dt^2 \rangle = 0$:

$$-2\langle K \rangle = \langle U \rangle$$

Za veliki broj zvijezda (N) središnje ispupčenje izgleda statistički uvijek isto bez obzira na trenutak opažanja:

$$-2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 = U$$

- Pretpostavka: sferno-simetrični skup radijusa R s N zvijezda i masom $M = Nm$ gdje je m masa pojedine zvijezde:

$$-\frac{m}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2 = \frac{U}{N}$$

- Za statistički veliki broj zvijezda, svi smjerovi su jednakopravni:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_r^2 \rangle + \langle v_\theta^2 \rangle + \langle v_\phi^2 \rangle = 3\langle v_r^2 \rangle$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2 = \langle v^2 \rangle = 3\langle v_r^2 \rangle = 3\sigma_r^2$$

σ_r je disperzija radijalnih brzina

Potencijalna energija sferno-simetrične raspodjele mase M i polumjera R :

$$U \approx -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$-3m\sigma_r^2 \approx -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{NR}$$

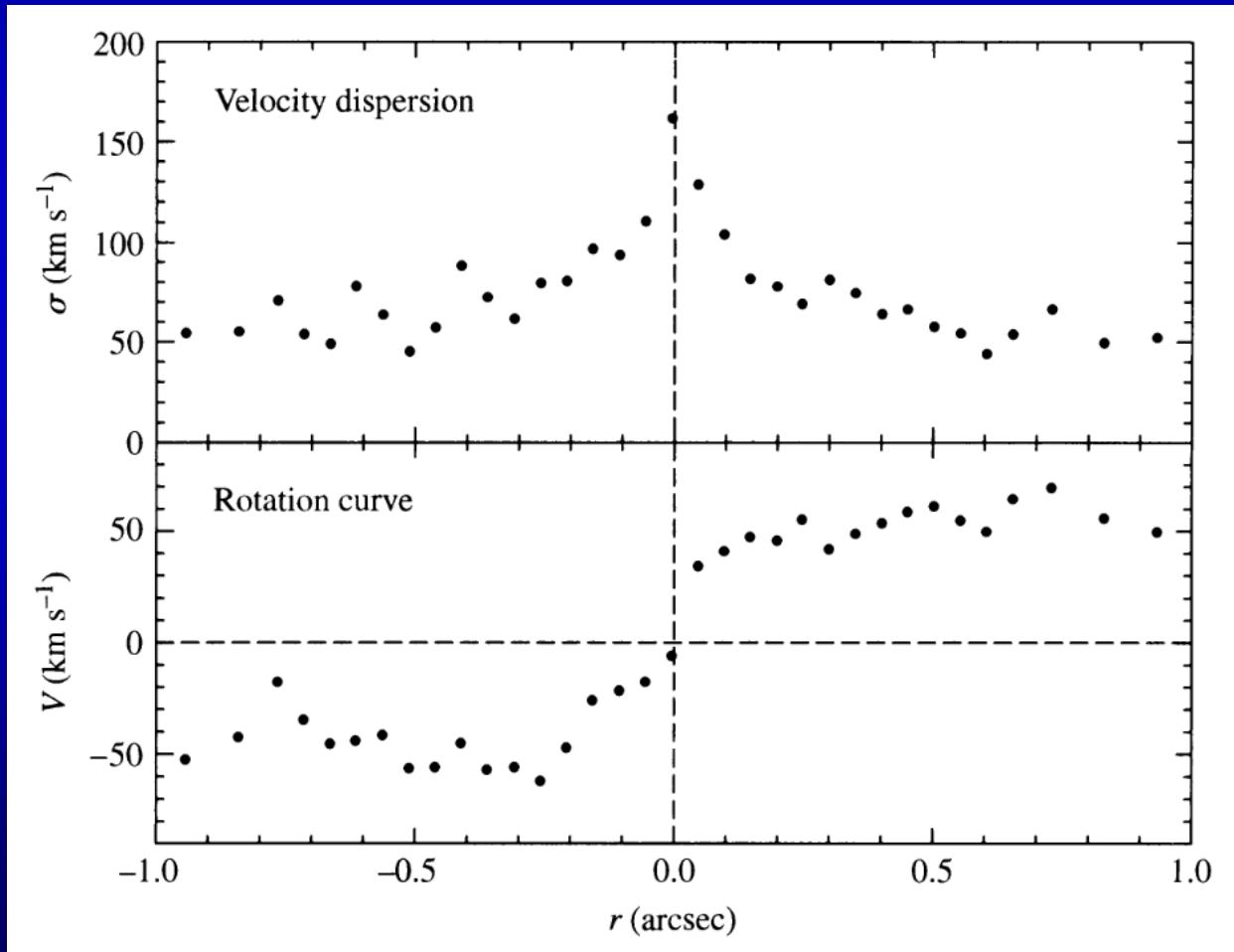
Virijalna masa:

$$M_{virial} \approx \frac{5R\sigma_r^2}{G}$$

- R treba odabratи tako da obuhvaćа područje utjecaja crne rupe

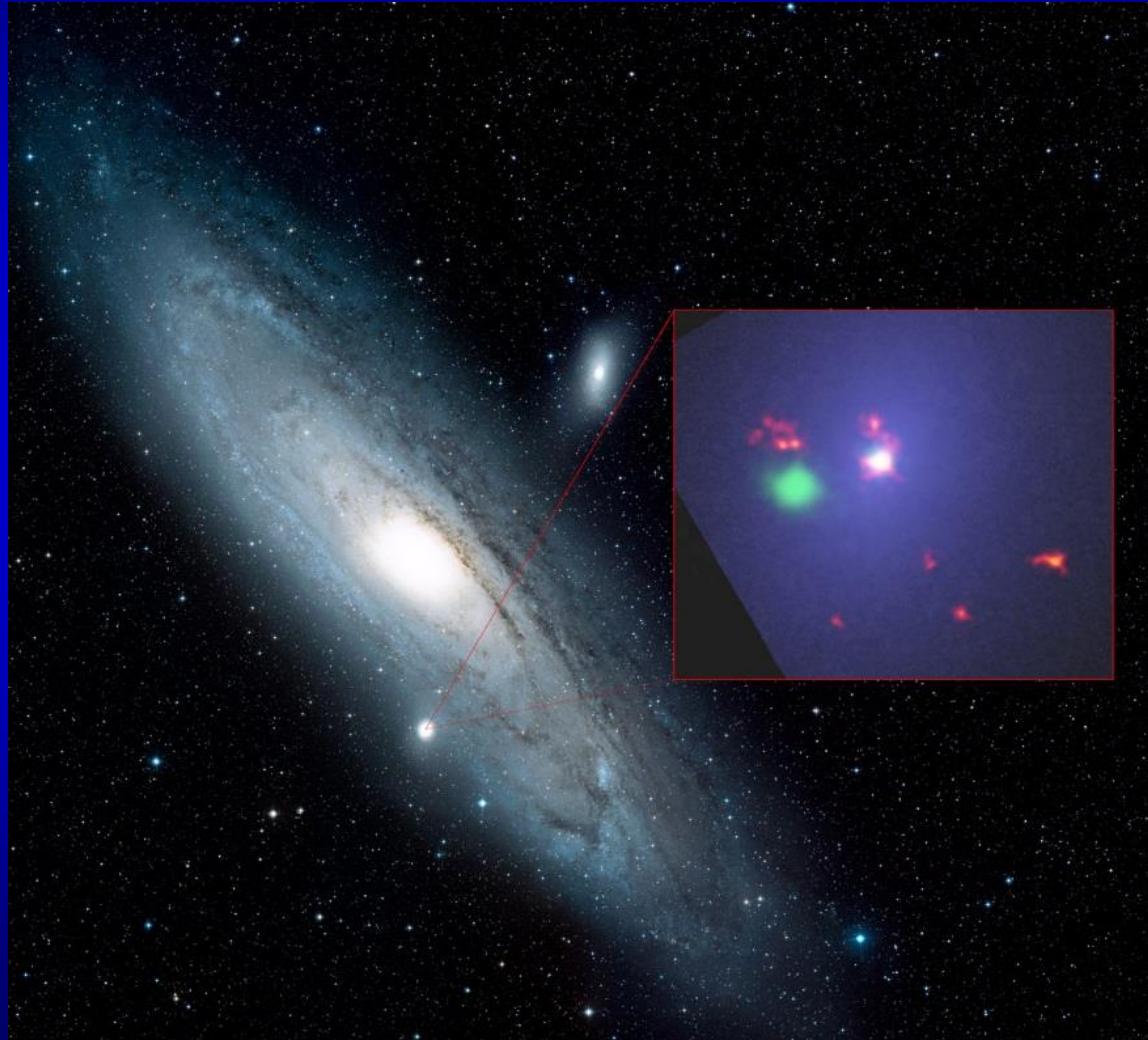
Primjer: Virijalna masa središnje crne rupe galaksije M32, satelitske galaksije Andromedinoj maglici

- sa slike se odredi disperzija radikalne brzine u središtu $\approx 162 \text{ km/s}$



Joseph et al., 2001,
Astrophys. J., 550, 668

M32 (satelit Andromedine galaksije) → vrlo slabo aktivna središnja supermasivna crna rupa



VLA – radio emisija

Bill Saxton,
NRAO/AUI/NSF; Yang et
al .; NASA, ESA,
Digitized Sky Survey 2;
Davide Demartin

- Unutar 0.1 arcsec (oko 0.4 pc) oko središta galaksije nalazi se ukupna masa:

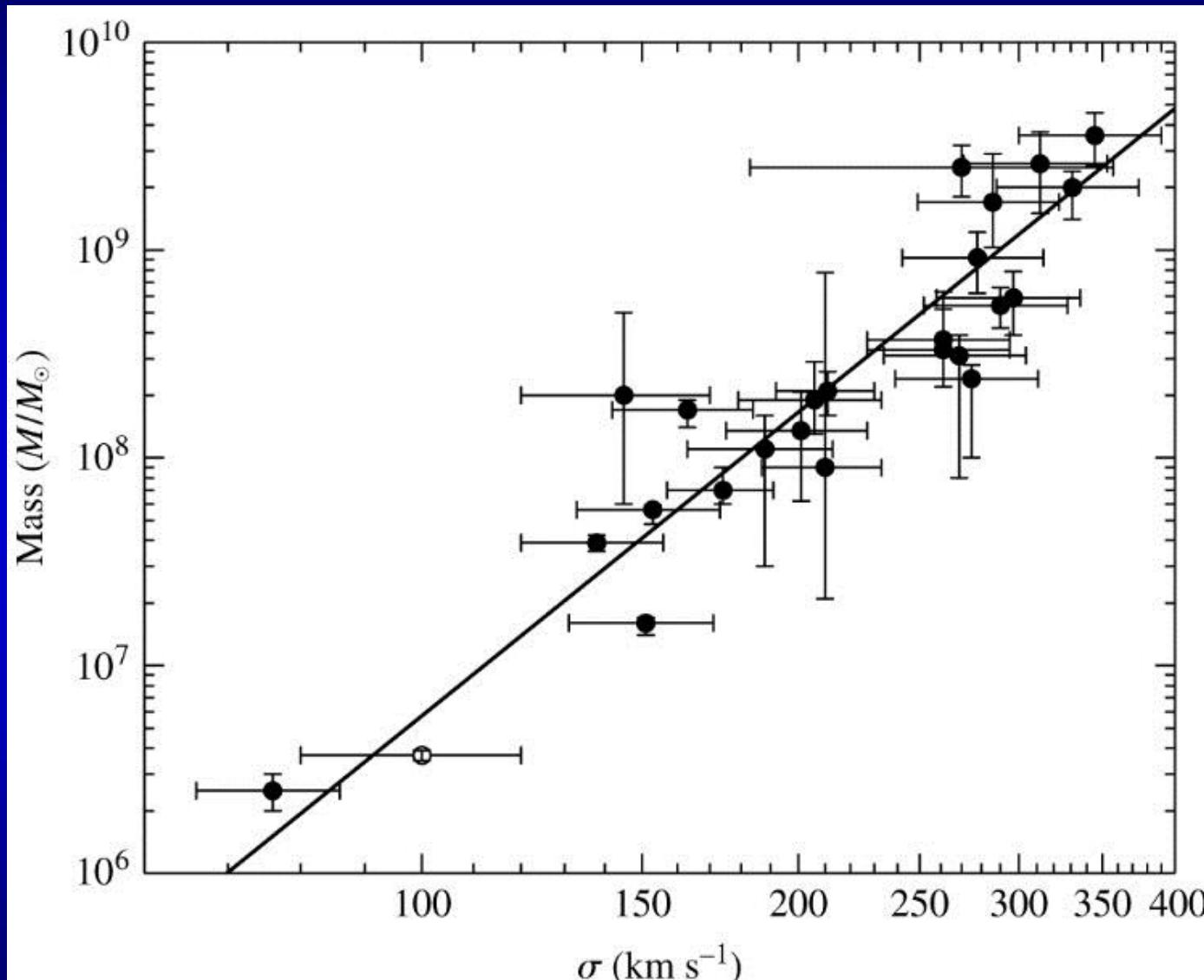
$$M_{\text{virial}} \sim 1 \cdot 10^7 M_{\text{Sun}}$$

Rotacijske krivulje daju masu $1.5 - 5 \cdot 10^6 M_{\text{Sun}}$

- Središnje supermasivne crne rupe ne nalaze se samo u spiralnim galaksijama \Rightarrow eliptičke galaksije također posjeduju središnju supermasivnu crnu rupu
- Divovska eliptična galaksija M87: supermasivna crna rupa mase $3.2 \pm 0.9 \cdot 10^9 M_{\text{Sun}}$ (HST)
- Supermasivna crna rupa u M87 pokreće relativistički mlaz
- Korelacijske između svojstava supermasivnih crnih rupa i galaksija \Rightarrow ovisnost mase središnje supermasivne crne rupe i disperzije brzina zvijezda:

$$M_{SBH} = \alpha (\sigma / \sigma_0)^\beta$$

Podaci uključuju eliptičke, spiralne i lenticularne galaksije



Ferrarese & Ford, 2005, *Space Science Review*, 620, 744

σ je disperzija brzina; $\alpha = (1.66 \pm 0.24) \cdot 10^8 M_{\text{Sun}}$; $\beta = 4.86 \pm 0.43$; $\sigma_0 = 200$ km/s

- Druge korelacije također postoje → ovisnost luminoziteta ispupčenja i mase supermasivne crne rupe

Fundamentalna veza između nastanka supermasivne crne rupe u središtu i nastanka same galaksije

ELIPTIČNE GALAKSIJE

- Hubbleova klasifikacija galaksija ranog tipa temelji se na njihovom obliku \Rightarrow korelacije Hubbleovog tipa za eliptične galaksije sa drugim karakteristikama su **vrlo slabe**
- Vrlo različiti i kompleksni objekti, vrlo razvijena okolina: plimna međudjelovanja i stapanja više galaksija

Morfološke klase eliptičnih galaksija

cD galaksije

- Ogromne rijetke galaksije promjera i do 1 Mpc, često u središtimu velikih galaktičkih skupova
- Mase $10^{13} - 10^{14} M_{\text{Sun}}$, absolutni sjaj u B pojasu od -22 mag do -25 mag
- Središta imaju visok površinski sjaj, vrlo proširene i difuzne ovojnica ovih galaksija
- Velika količina tamne materije i visok omjer mase i luminoziteta: $\sim 750 M_{\text{Sun}}/L_{\text{Sun}}$
- Prisustvo na desetke tisuća kuglastih skupova

Normalne eliptične galaksije

- Relativno visok površinski sjaj u središtu
- Apsolutni sjaj u B pojasu od -15 mag do -23 mag, mase od 10^8 do $10^{13} M_{\text{Sun}}$
- Promjer galaksije <1 kpc do 200 kpc, omjer mase i luminoziteta $7 - 100 M_{\text{Sun}}/L_{\text{Sun}}$
- Uključuju divovske eliptične galaksije (gE), eliptične galaksije srednjeg sjaja (E) i kompaktne eliptične galaksije (cE)

Patuljaste eliptične galaksije (dE)

- Znatno manji površinski sjaj
- Mase $10^7 - 10^9$, apsolutni sjaj u B pojasu od -13 do -19 mag
- Promjer galaksija 1 – 10 kpc, niži metalicitet nego normalne eliptične galaksije

Patuljaste sferoidne galaksije (dSph)

- Izrazito nizak površinski sjaj
- Mase $10^7 - 10^8 M_{\text{Sun}}$, absolutni sjaj u B pojasu od -8 do -15 mag, promjer galaksija 0.1 – 0.5 kpc

Plave kompaktne patuljaste galaksije (BCD)

- Male plave galaksije $\rightarrow \langle B - V \rangle = 0.0 - 0.3$
- Izrazito naglašen nastanak zvijezda
- Velika količina plina $\rightarrow 15\text{-}20\% \text{ ukupne mase galaksije} \rightarrow M_{HI} = 10^8 M_{\text{Sun}}; M_{HII} = 10^6 M_{\text{Sun}}$
- Izrazito mali omjer mase i luminoziteta $\rightarrow M/L_B = 0.1$
- Mase oko $10^9 M_{\text{Sun}}$, absolutni sjaj u B pojasu od -14 do -17 mag, promjer galaksija <3 kpc

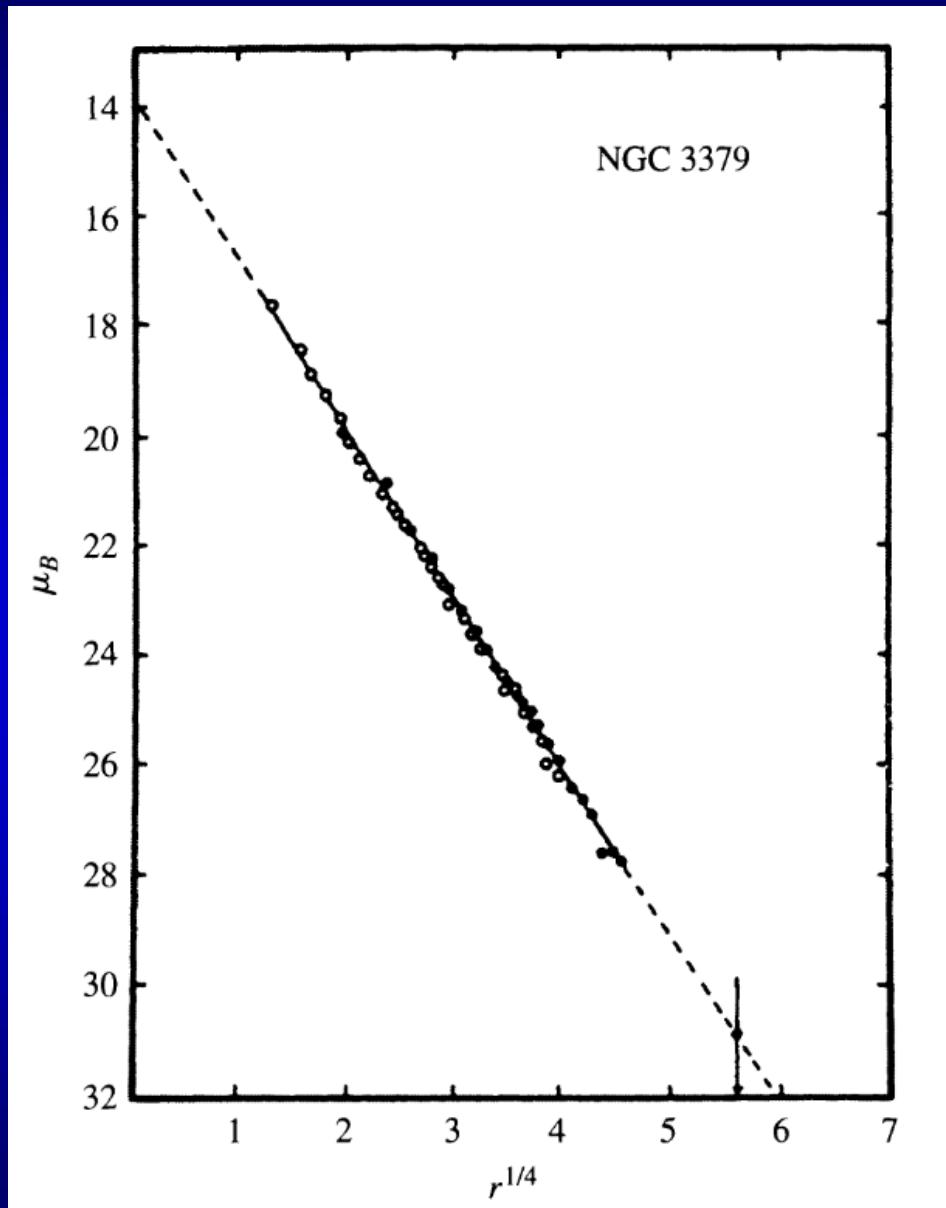
	cD	E	S0/SB0
M_B	-22 to -25	-15 to -23	-17 to -22
M (M_\odot)	10^{13} – 10^{14}	10^8 – 10^{13}	10^{10} – 10^{12}
Diameter (D_{25} , kpc)	300–1000	1–200	10–100
$\langle M/L_B \rangle$ (M_\odot/L_\odot)	> 100	10–100	~ 10
$\langle S_N \rangle$	~ 15	~ 5	~ 5

	dE	dSph	BCD
M_B	-13 to -19	-8 to -15	-14 to -17
M (M_\odot)	10^7 – 10^9	10^7 – 10^8	$\sim 10^9$
Diameter (D_{25} , kpc)	1–10	0.1–0.5	< 3
$\langle M/L_B \rangle$ (M_\odot/L_\odot)	~ 10	5–100	0.1–10
$\langle S_N \rangle$	4.8 ± 1.0	—	—

Profil površinskog sjaja

- cD i normalne eliptične galaksije imaju profil površinskog sjaja koji opada sa $\propto 1/r^{1/4}$
- Za velike udaljenosti od središta, površinski sjaj opada eksponencijalno (dE i dSph)

De Vaucouleurs & Capaccioli, 1979,
Astrophys. J. Suppl., 40, 699



Plin i prašina u eliptičnim galaksijama

- Patuljaste eliptične galaksije dE i dSph imaju vrlo nizak gravitacijski potencijal i gravitacijsku energiju vezanja \Rightarrow **galaksije siromašne plinom**
- dSph pokazuju odsustvo bilo kakve količine plina \Rightarrow dE i dSph galaksije ne stvaraju nove zvijezde
- Većina plinova je izgubljena kroz supernove i zbog utjecaja **pramčanog tlaka** prilikom prolaska galaksije kroz plin u galaktičkim skupovima
- dE i dSph imaju vrlo nizak metalicitet, sličan onome u kuglastim skupovima
- Većina eliptičnih galaksija posjeduje **male količine plina** \Rightarrow vrlo efikasni procesi nastanka novih zvijezda u ranoj povijesti ovih galaksija
- Većina plina u E/S0 galaksijama je u obliku **vrućeg plina** zagrijanog na 10^7 K \Rightarrow zračenje u rendgenskom području

- $10^8 - 10^{10} M_{\text{Sun}}$ vrućeg plina na $\sim 10^7$ K, $10^4 - 10^5 M_{\text{Sun}}$ toplog plina na $\sim 10^4$ K (H II područja, H α emisija), $10^7 - 10^9 M_{\text{Sun}}$ hladnog plina na ~ 100 K (H I područja, 21-cm emisija), $10^7 - 10^9 M_{\text{Sun}}$ molekulskog vodika (CO emisija)
- Oko 50% eliptičnih galaksija pokazuje prisustvo prašine
→ $10^5 - 10^6 M_{\text{Sun}}$
- Većina prašine je dobivena međudjelovanjima nakon početnog nastanka galaksije
- Prašina može rotirati suprotno od smjera rotacije galaksije, pojava nasumično orijentiranih traka prašine

Gradijenti metaliciteta i indeksa boje

- Metalicitet eliptičnih galaksija snažno ovisi o njihovom sjaju \Rightarrow **sjajnije eliptične galaksije imaju veći metalicitet**
- Postojanje gradijenta metaliciteta i indeksa boje u eliptičnim galaksijama \Rightarrow središnja područja su crvenija i bogatija metalima
- Slično se ponašaju i lenticularne galaksije
- Diskovi S0 galaksija su plaviji nego ispupčenja (kao i kod spiralnih galaksija)

Faber-Jacksonova relacija

- Ovisnost disperzije radijalnih brzina u središtu galaksije o apsolutnom sjaju u B pojasu (vrijedi za dE, dSph, normalne E i ispučenja spiralnih galaksija)

Virijalni teorem za disperziju radijalnih brzina u središtu sferno simetrične raspodjele mase:

$$M_{virial} \approx \frac{5R\sigma_r^2}{G}$$

Prepostavka: masa M je ravnomjerno raspoređena unutar volumena polumjera R

Prepostavka: omjer mase i luminoziteta je otprilike konstantan za sve galaksije + srednji površinski sjajevi galaksija su jednaki:

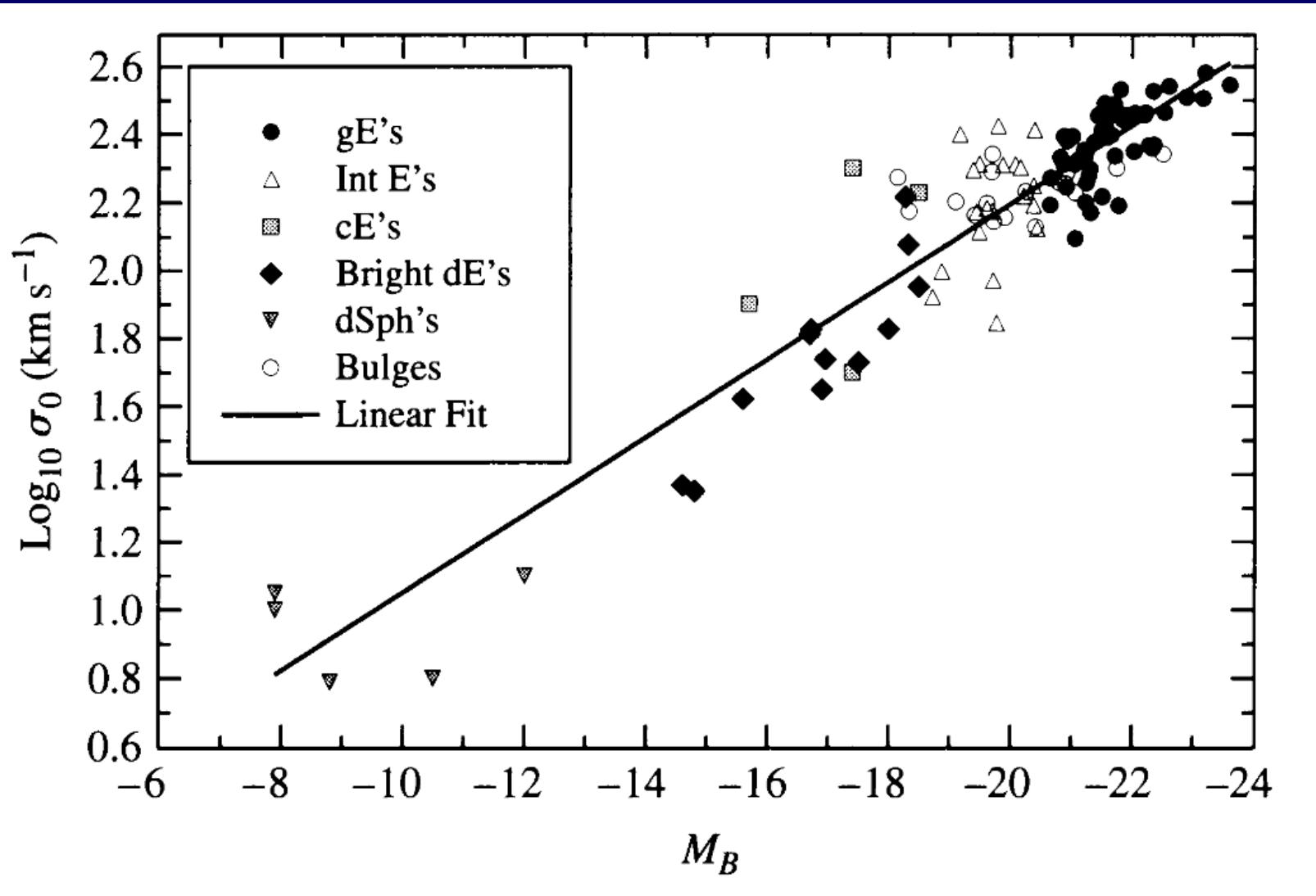
$$L \propto \sigma_0^4$$

σ_0 je disperzija radijalnih brzina u središtu galaksije

Sandra Faber & Robert Jackson \Rightarrow **Faber-Jacksonova relacija**

- Luminozitet u Sunčevim jedinicama + veza luminoziteta i absolutnog sjaja \Rightarrow

$$\log_{10} \sigma_0 = -0.1M_B + \text{const.}$$



Bender et al., 1992, *Astrophys. J.*, 399, 462

Fundamentalna ravnina

- Faber-Jacksonova relacija pokazuje znatno rasipanje mjerena $\rightarrow L \propto \sigma_0^\alpha$, $3 < \alpha < 5$
- Relacija s manje rasipanja \Rightarrow uvođenje dodatnog parametra \rightarrow **efektivni radijus:**
$$L \propto \sigma_0^{2.65} r_e^{0.65}$$
- Galaksije se nalaze na 2D površini u 3D prostoru (L , σ_0 i r_e)
- **Fundamentalna ravnina** \rightarrow povezuje gravitacijski potencijal galaksije s polumjerom i luminozitetom
- Može se zapisati i kao (I_e je efektivni površinski sjaj>):
$$r_e \propto \sigma_0^{1.24} I_e^{-0.82}$$

Rotacija eliptičnih galaksija

- Što uzrokuje eliptični oblik ovih galaksija?
- Eliptične galaksije nisu rotatori sa dvije, već sa tri osi → ne postoji preferirana os rotacije!
- Dokaz nepostojanja preferirane osi rotacije: pojava traka prašine u nasumičnim smjerovima (50% galaksija), u 25% eliptičnih galaksija javljaju se središta koja rotiraju u suprotnim smjerovima od ostatka galaksije
- Rješenje: uhvat plina, prašine, kuglastih skupova ili patuljastih galaksija nakon formiranja eliptične galaksije
- Sjajnije eliptične galaksije imaju srednju rotacijsku brzinu **manju** od disperzije brzine \Rightarrow **oblik ovih galaksija ne proizlazi iz rotacije!**
- Uzrok: anizotropna disperzija brzina zvijezda!

Primjer: NGC 1600 $\rightarrow V_{\text{rot}} = 1.9 \pm 2.3 \text{ km/s}$; $V_{\text{rot}}/\sigma < 0.013$

Ukoliko eliptičnost galaksije potječe od njene rotacije kao idealnog rotatora s izotropnom raspodjelom brzina zvijezda:

$$\left(\frac{V_{\text{rot}}}{\sigma}\right)_{\text{izotropno}} \approx \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)^{1/2}$$

NGC 1600 ima eliptičnost $\epsilon = 0.4 \Rightarrow$ ukoliko oblik galaksije potječe isključivo od rotacije $\rightarrow \frac{V_{\text{rot}}}{\sigma} = 0.8$

Rotacijski parametar (V/σ)^{*}:

$$(V_{\text{rot}}/\sigma)^* \equiv \frac{(V_{\text{rot}}/\sigma)_{\text{opaženo}}}{(V_{\text{rot}}/\sigma)_{\text{izotropno}}}$$

NGC 1600 (V/σ)^{*} < 0.016!

- Galaksija ima oblik uslijed rotacije ako je $(V/\sigma)^* > 0.7$

- Sjajne normalne i divovske galaksije E i gE imaju $(V/\sigma)^* \approx 0.4$ \Rightarrow oblik ovih galaksije je određen **nasumičnim gibanjima zvijezda**
- Difuzne patuljaste eliptične galaksije tipa E slabog sjaja također imaju oblik određen nasumičnim gibanjima zvijezda
- Galaksije sjaja u B pojasu od -18 do -20.5 mag imaju $(V/\sigma)^* \approx 0.9$ i njihov je oblik određen **rotacijom** (kao i kod ispupčenja spiralnih galaksija)

Oblik izofotnih površina sjaja (*boxiness* ili *diskiness*)

Ralf Bender, Jean-Luc Nieto (1988.) → *boxiness/diskiness* eliptičnih galaksija i korelacija s drugim svojstvima

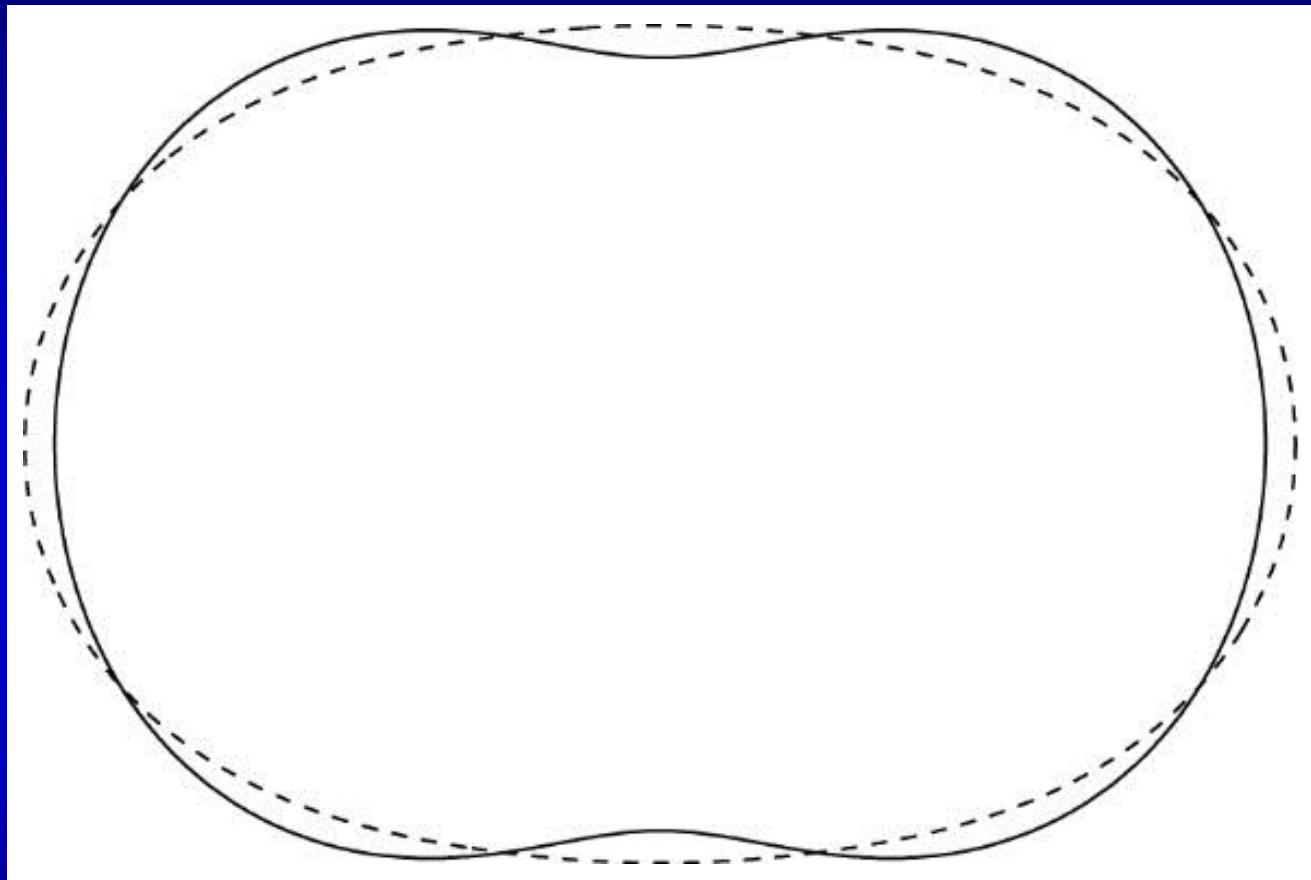
- Mjera odstupanja oblika izofotnih površina sjaja od eliptičnog oblika → oblik izofotne konture u polarnim koordinatama zapisan kao Fourierov red:

$$a(\theta) = a_0 + a_2 \cos(2\theta) + a_4 \cos(4\theta) + \dots$$

a je polumjer izofotne konture, θ je kut u polarnom sustavu mјeren od velike poluosi elipsoida

- Prvi član → oblik savršenog kruga
- Drugi član → mjera eliptičnosti
- Treći član → mjera 'kvadratičnosti' (*boxiness*)
- Za $a_4 < 0$ → oblik izofotnih kontura je 'kvadratičan'
- Za $a_4 > 0$ → oblik izofotnih kontura je 'diskast'

Tipična vrijednost: $|a_4/a_0| \sim 0.01$

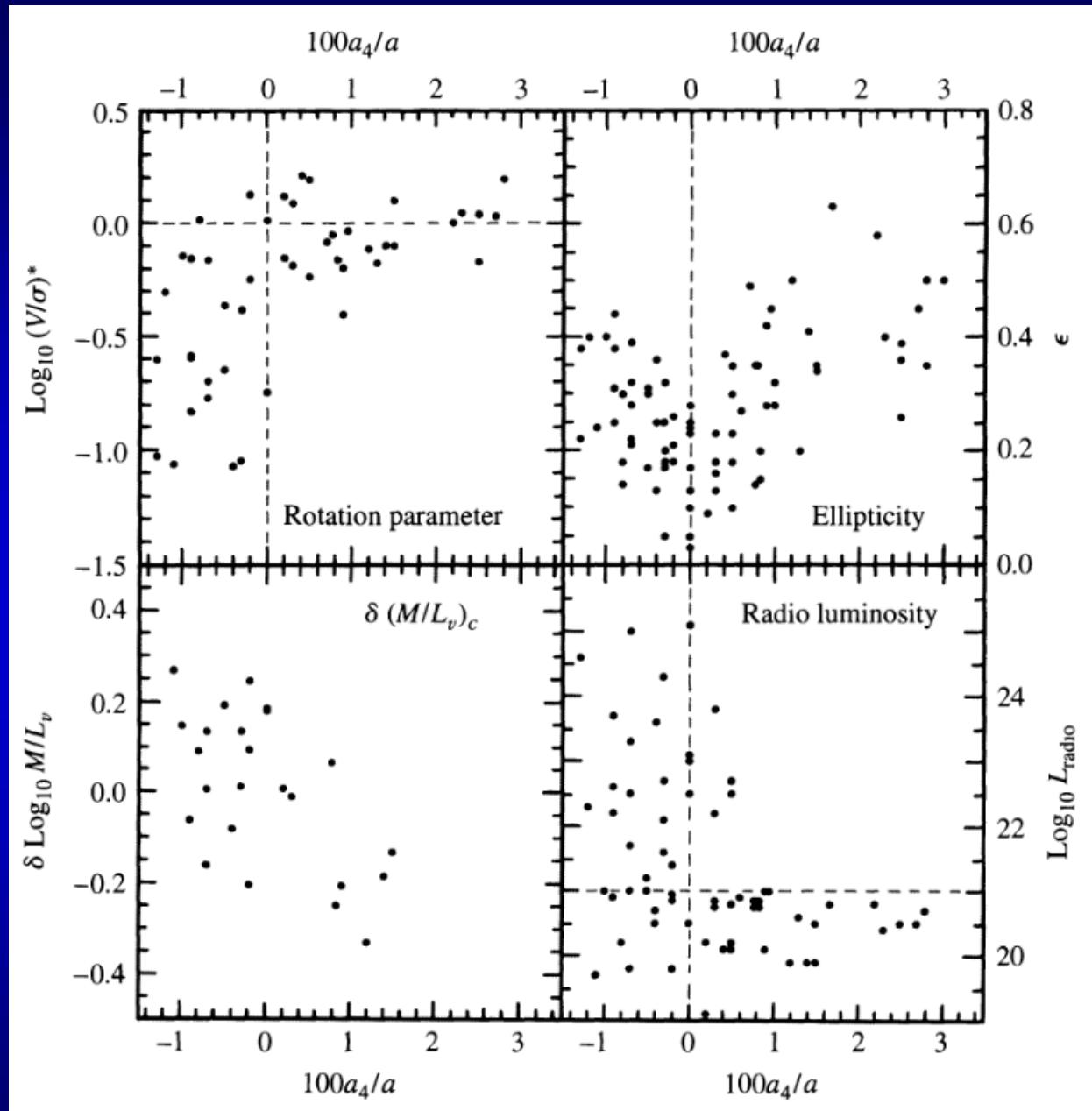


Slika:

$$\epsilon = 0.4$$

$$|a_4/a_0| = 0.03$$

Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson



Kormendy & Djorgovski, 1989, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 27, 235

- 'Diskaste' galaksije poprimaju svoj oblik uslijed rotacije (veće vrijednosti $(V/\sigma)^*$)
- 'Kvadrataste' galaksije poprimaju oblik uslijed nasumičnog gibanja zvijezda
- Odstupanje omjera mase i luminoziteta u središtu galaksije od srednje vrijednosti → 'kvadrataste' galaksije imaju omjer mase i luminoziteta u središtu veći, a 'diskaste' galaksije manji od srednje vrijednosti
- 'Kvadrataste' galaksije su sjajnije u radio području
- Puno manje rasipanje radio luminoziteta za 'diskaste' galaksije
- Za 'diskaste' galaksije izvori rendgenskog zračenja su kompaktni, za 'kvadrataste' galaksije izvori su difurni (vrući plin)
- Eliptičnost (Hubbleov tip) opada s povećanjem absolutne vrijednosti parametra a_4

- 'Diskaste' galaksije s oblikom nastalim zbog rotacije imaju veliki omjer kutne količine gibanja i mase, 'kvadrataste' galaksije s oblikom nastalim zbog nasumičnog gibanja zvijezdi imaju taj omjer vrlo malen
- 'Kvadrataste' galaksije → česta jezgra koja rotira suprotno od ostatka galaksije
- Oko 90% eliptičnih galaksija su 'diskaste'

Relativan broj galaksija različitih Hubbleovih tipova

Funkcija luminoziteta $\phi(M)dM \rightarrow$ broj galaksija u uzorku s absolutnim sjajem između M i $M + dM$

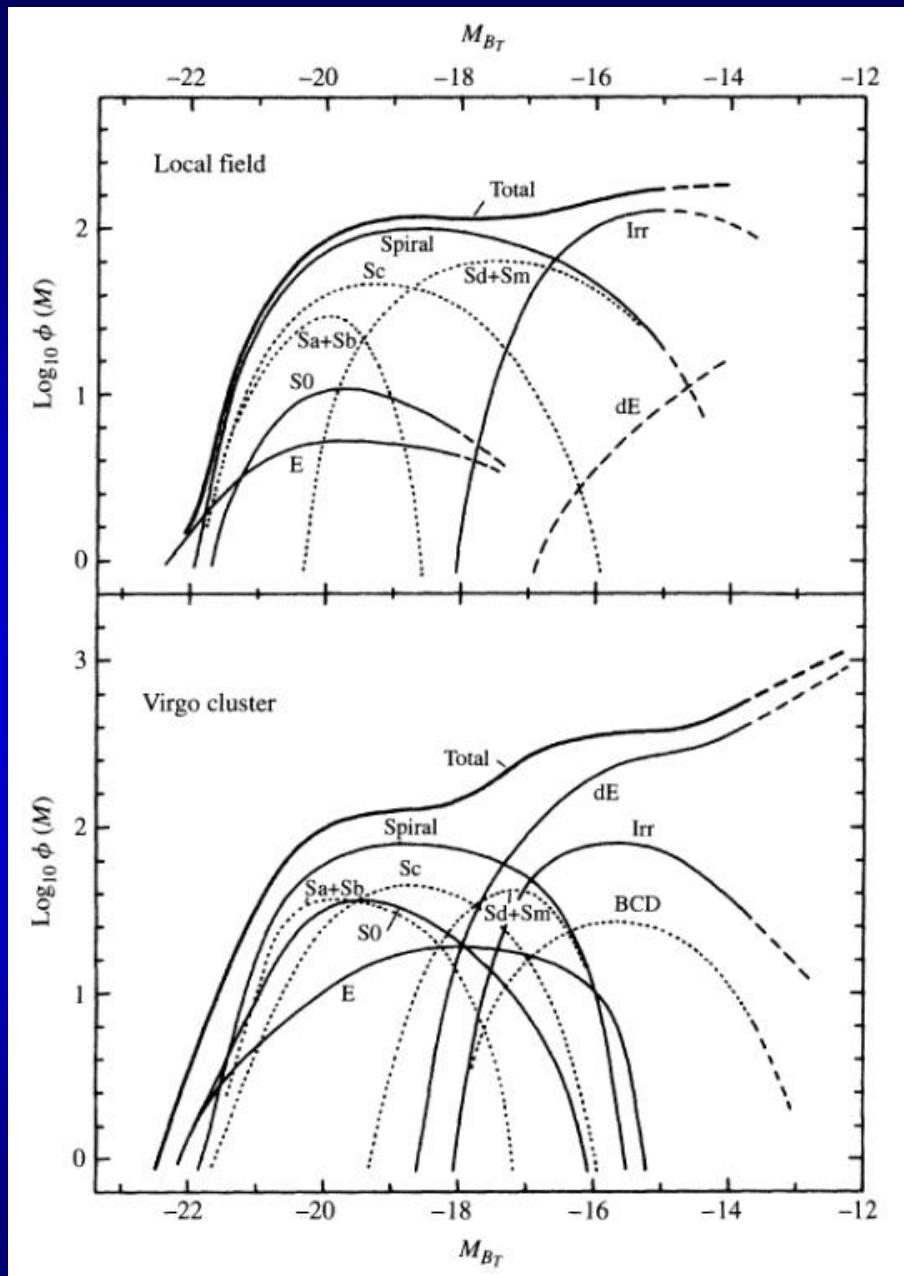
Paul Schechter \rightarrow opći analitički oblik funkcije luminoziteta:

$$\phi(L)dL \sim L^\alpha e^{-L/L^*} dL$$

$$\phi(M)dM \sim 10^{-0.4(\alpha+1)M} e^{-10^{0.4(M^*-M)}} dM$$

α i L^* (M^*) su slobodni parametri u prilagodbi

- Tipične vrijednosti: $\alpha = -1.0$; $M_B^* = -21$ za galaksije u okolini Mliječnog puta, $\alpha = -1.24 \pm 0.02$; $M_B^* = -21 \pm 0.7$ za galaktički skup u Djevici
- Ne postoji jedinstvena funkcija luminoziteta za sve galaksije \rightarrow funkcija luminoziteta ovisi o **okolini galaksija**



- Patuljaste galaksije (dE i patuljaste nepravilne galaksije) najzastupljenije su u svemiru
- S i E galaksije imaju značajan luminozitet i masu ali ih nema onoliko koliko ima patuljastih galaksija
- Skup u Djevici sadrži veći udio eliptičnih galaksija nego okolina Mliječnog puta (lokalni skup galaksija)
- Gušći skup galaksiji u Comi → relativni broj eliptičnih i spiralnih galaksija je znatno drugačiji nego u skupu u Djevici:
 - Skup u Djevici: 12% E, 26% S0, 62% S+Ir
 - Skup u Comi: 44% E, 49% S0, 7% S+Ir
- Znatan utjecaj galaktičke okoline na formiranje galaksija!!