



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2023

E207 Physicum

Luento 8: Spiraali- ja S0-galaksit,
30/10/2023



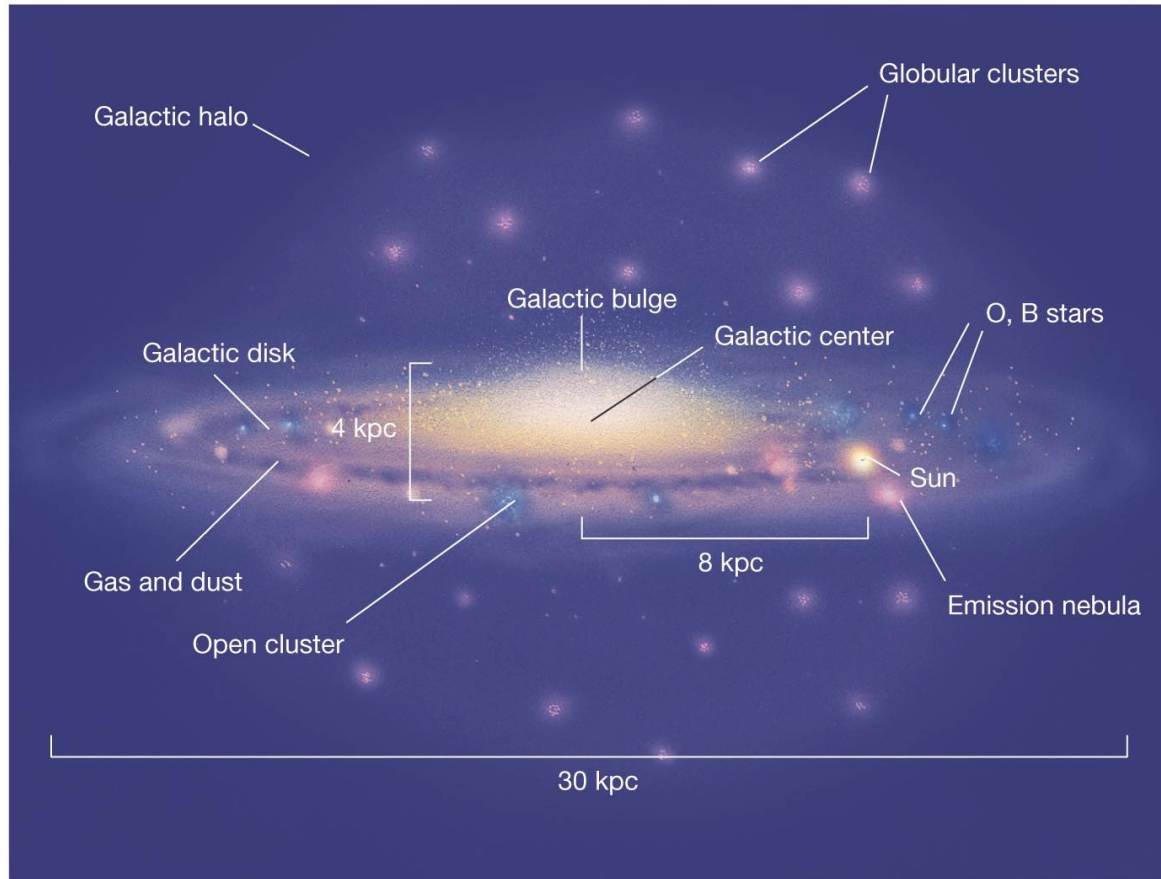
Tällä luennolla käsitellään

1. Spiraaligalaksien fotometria. Mitkä ovat kiekkoagalaksien pintakirkkausprofiilit ja miltä ne näyttävät eri aallonpituusalueilla?
2. Miten atomaarinen ja molekulaarinen vety on jakautunut spiraaligalakseissa?
3. Mitä voimme päätellä spiraaligalaksien pyörimiskäyristä?
4. Miten spiraalirakenne luokitellaan?
5. Minkälaisia teorioita käyttäen voimme selittää spiraalirakenteen synnyn ja kehityksen.
6. Vastaa soveltuvien osien: **S&G:** luvut 5.1-5.5 (kirjan vanha painos)
S&G: luvut 5.1-5.6 (kirjan uusi painos)



8.1 Spiraaligalaksien havaintoja

- Spiraali- ja S0-galakseissa on laaja tähtikiekkko ja suurin osa tähdistä liikkuu lähes ympyräradoilla kiekon keskustan ympäri.
- Suurin osa liike-energiasta on järjestäytyneessä pyörimisliikkeessä ja vain noin $\approx 5\%$ energiasta on satunnaisessa liikkeessä.
- Pienet nopeusdispersiot, eli galaksit ovat ”dynaamisesti kylmiä”.



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.



Kiekkogalaksien pintafotometriaa I

NGC 7331 (Sb)

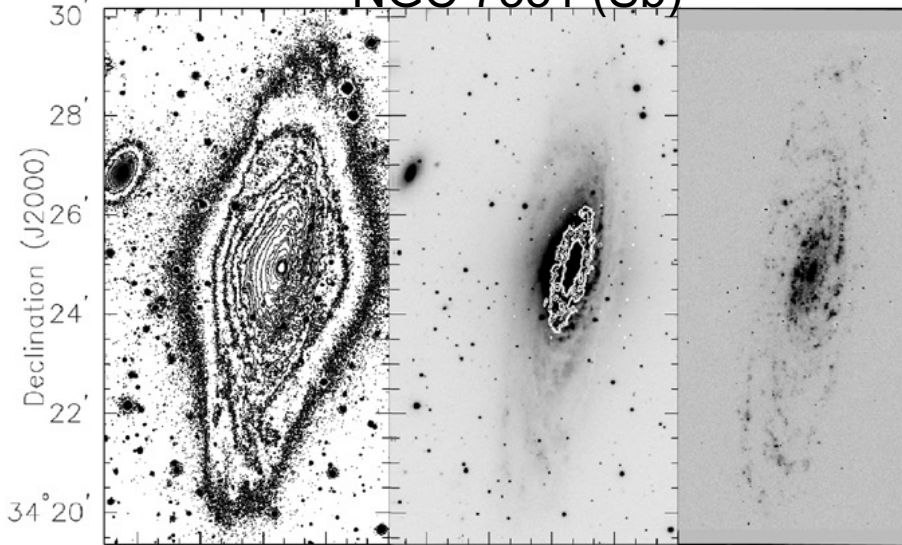


Fig 5.3 (Ferguson, Thornley) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

M104 Sombrero-galaksi (Sa)



Fig 5.5 (WIYN) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Havaittu kokonaiskirkkaus riippuu havaitusta näkösäteestä, jos ei huomioida galaksin pölyä, pintakirkkaus on suurempi kertoimella $(1/\cos i)$ verrattuna tapaukseen, että nähdään galaksi suoraan päältä päin ($i=0^\circ$ ja $\cos i=1$). Keskuspulistuma on pyöreä, kiekko pitkulaisempi.



Kiekkogalaksien pintakirkkaus-profiilit (R)

- Spiraaligalaksien kiekon pintakirkkausprofiili voidaan yleisesti sovittaa eksponentiaali-funktiolla:

$$I(R) = I(0)e^{-R/h_R}$$

- Tekijä h_R on skaalapituus ja se on yleensä välillä:
 $1 \text{ kpc} \leq h_R \leq 10 \text{ kpc}$. Skaalapituus on yleensä eripituinen eri havaintokaistoilla (U,B,V,R,I).
- Eksponentiaali-osuus päättyy usein säteellä $R_{\text{max}} \sim 10\text{-}30 \text{ kpc}$, joka vastaa tyypillisesti $\sim 3\text{-}5 h_R$.

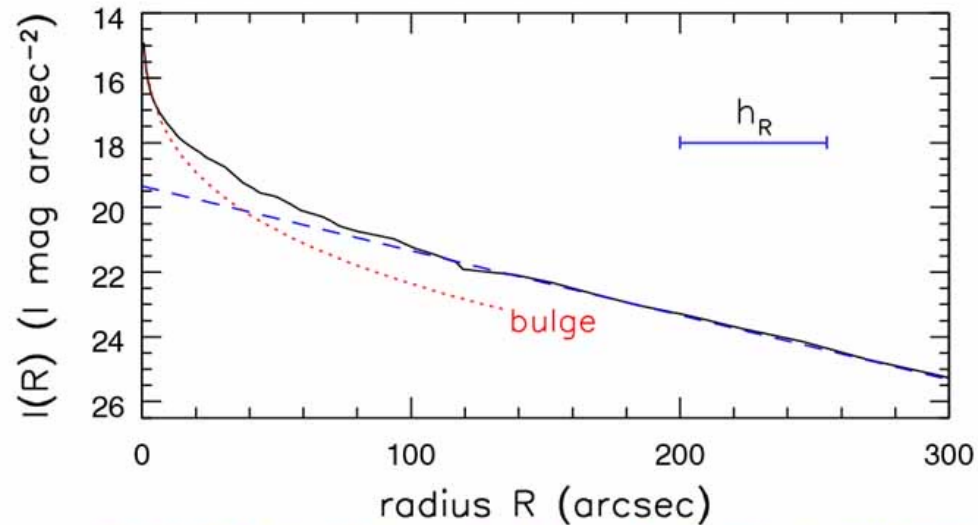


Fig 5.4 (R. Peletier) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Keskuspullistuman valoprofiili on kiekkoa jyrkempi ja sitä voidaan paremmin kuvata Sérsic-profiililla. Kiekkogalaksin kokonaisvaloprofiili on täten eksponentiaali+Sérsic.



Kiekkogalaksien pintakirkkaus-profiilit (z-suunta)

- Galaksien z-suuntainen (vertikaalinen) paksuus vaihtelee hyvin ohuista vähän paksumpiin galakseihin ja myös tätä komponenttia voidaan kuvata eksponentiaalisella funktiolla:
$$I(R, z) = I(R)e^{-|z|/h_z}$$
- Tyypillisesti $h_z \approx 0.1 h_R$, eli galaksien paksuudet ovat tyypillisesti $\approx 10\%$ niiden leveyksistä.
- h_z :n ja h_R :n suhteesta voidaan jo päätellä $\rightarrow \sigma_z \ll V_{\text{rot}}$.

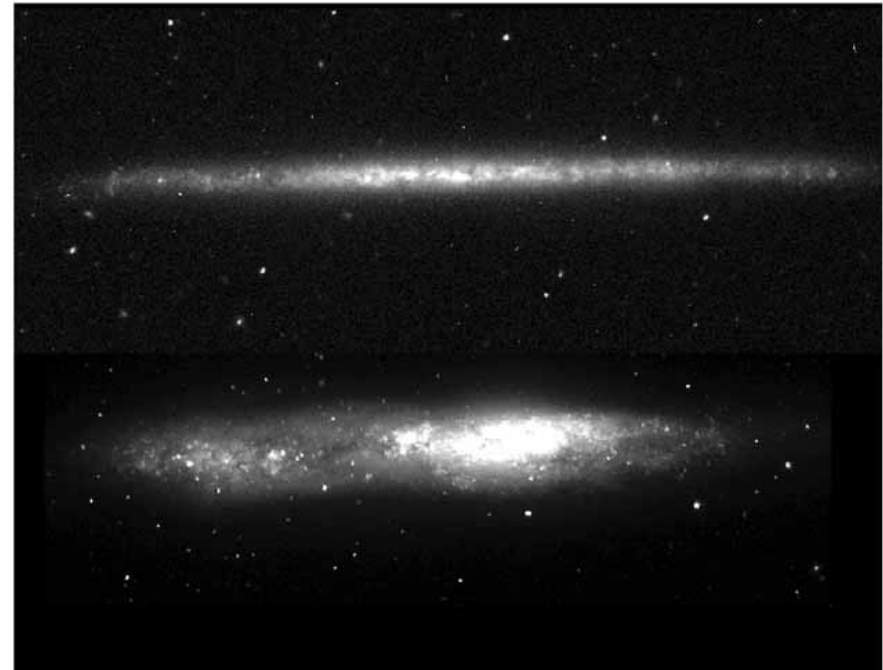


Fig 5.7 (Matthews, Ferguson)'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

$$I(R, z) = I(0)e^{-R/h_R}e^{-|z|/h_z}$$



Magnitudi-väri diagramma

- Varhaisen tyypin kiekkogalaksit (~S0-Sb) ovat keskimäärin kirkkaampia ja myös punaisempia.
- Mutta myös suurta vaihtelua esiintyy, esim. Sc-galaksien luminositeetit voivat vaihdella kertoimella ~100-200.

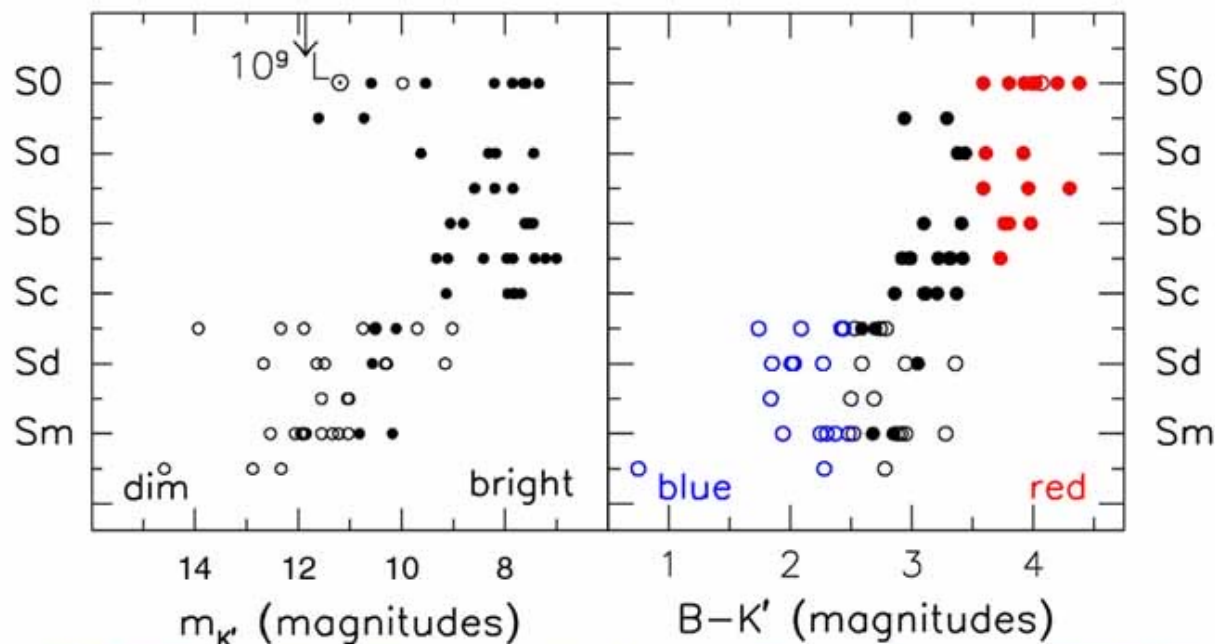


Fig 5.6 (M. Verheijen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Kiekkogalakseilla galaksin tyyppi ei yksiselitteisesti määrää sen massaa ja luminositeettia, toisin kuin ellipsigalakseilla.



Magnitudi- neutraali vety diagramma

- Kirkkaissa galakseissa on tehokasta tähtien syntyä, heikkovaloisissa galakseissa tähtien synty on tehotonta ja täten jäljellä on vielä paljon HI-kaasua.
- Kiekkogalaksien keskustoissa tyypilliset pintakirkkaudet:
 $I_B(0) \approx 22 \text{ mag arcsec}^{-2}$,
 $I_K(0) \approx 18 \text{ mag arcsec}^{-2}$.
- Hyvin matalan pinta-kirkkauden galakseissa $I_B(0) \approx 25.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ja skaalasäde voi olla jopa $h_R \approx 55 \text{ kpc}$!

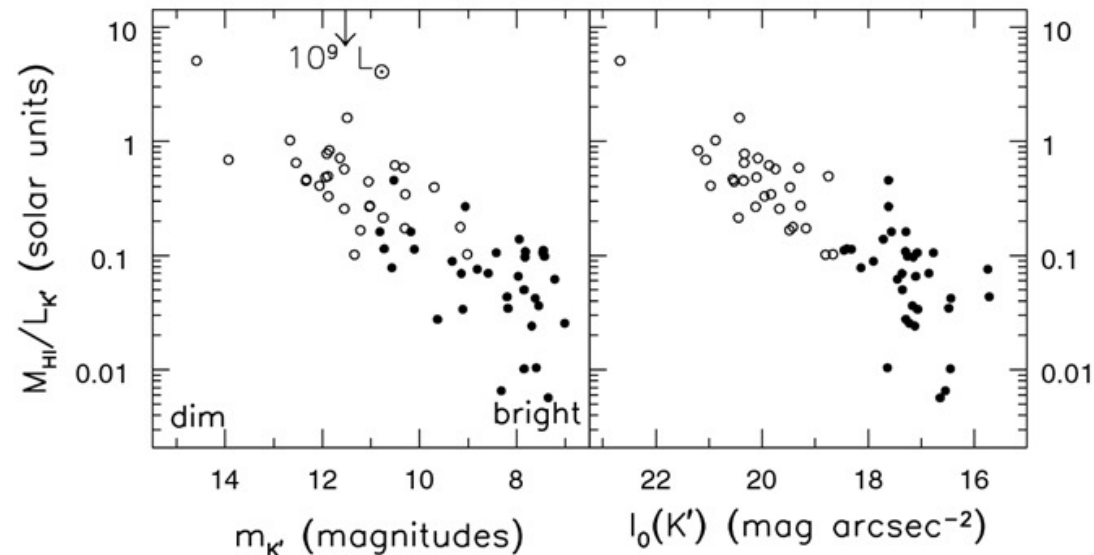


Fig 5.8 (M. Verheijen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Himmeimmissä galakseissa on tyypillisesti enemmän vetykaasua jäljellä.



Kiekkogalaksit eri aallonpituuksilla

Infrapuna

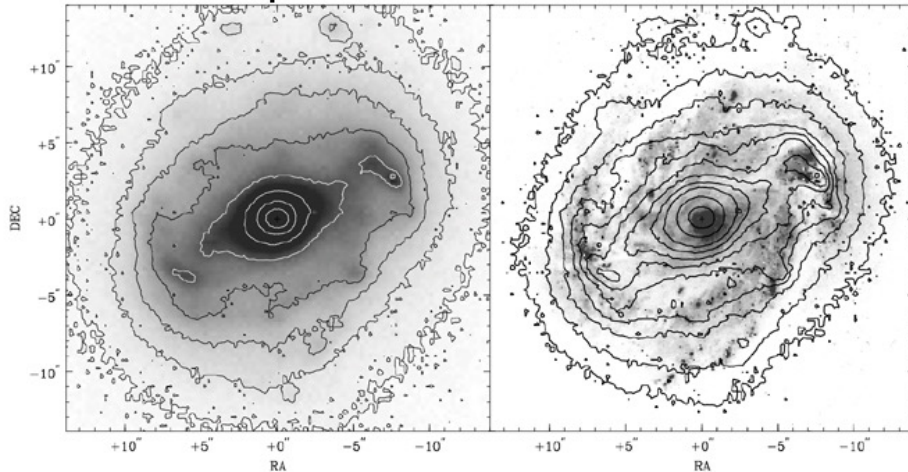


Fig 5.9 (J. Knapen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

H α (näkyvä)

UV

Näkyvä

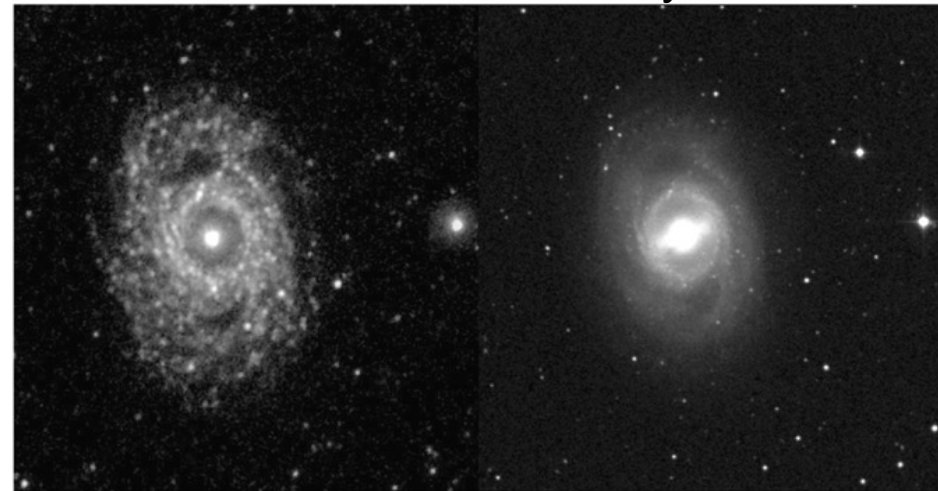


Fig 5.10 (Galex) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Infrapuna-valossa vanhempi tähtipopulaatio erottuu paremmin ja spiraalirakenne on tasaisempaa ja vähemmän näyttävää. UV-alueella näemme nuorten tähtien syntyalueita, spiraalihaarat loistavat hyvin kirkkaina ja rakenne on epäsäännöllisen täplämäinen.



8.2 Kaasu ja pimeä aine kiekkogalakseissa

- Suurin osa spiraaligalaksien kaasusta löytyy kiekosta. Atomaarinen (HI) ja erityisesti molekulaarinen (H_2) vety muodostavat tähtiensynnyn raaka-aineen.
- Atomaarista vetyä voidaan parhaiten havaita radio-alueella ($\lambda=21$ cm, hyperhienosiirtymä: $\uparrow p + \uparrow e \rightarrow \uparrow p + \downarrow e$).
- Molekulaarinen vety (H_2) on symmetrinen molekyyli ja täten vaikeasti havaittavissa \rightarrow CO:ta (hiilimonoksidi) käytetään H_2 :n kartoittamiseen.

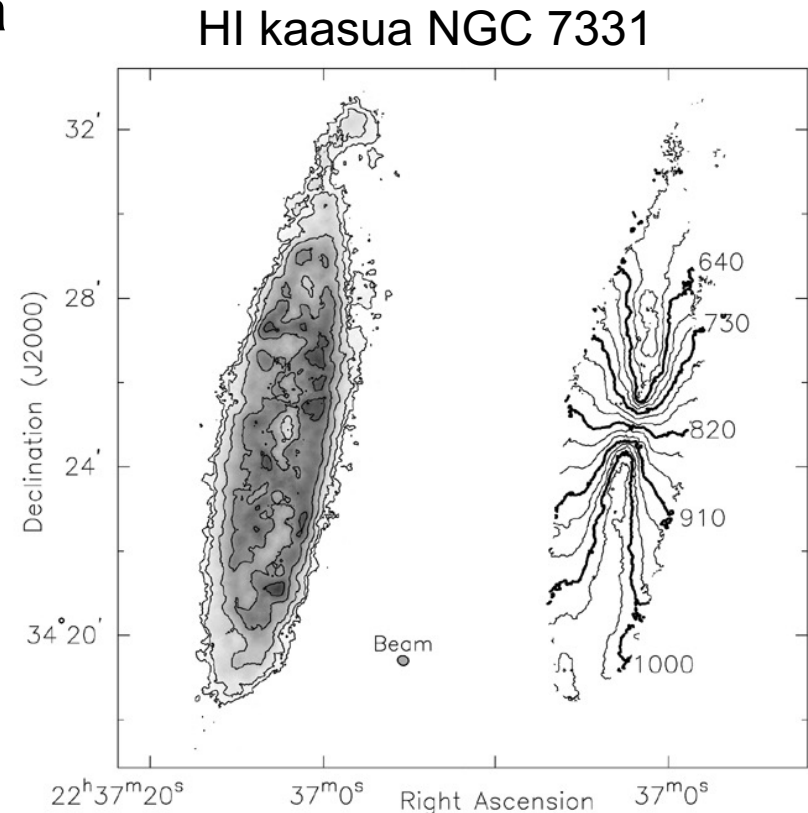


Fig 5.13 (Thornley & Bammic) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



HI-kiekkojen koko

- HI kaasun jakauma säteen funktiona on tasaisempaa kuin tähtien jakauma, joka noudattaa: $\Sigma_{\star} \propto e^{-r/h}$
- HI kiekko ulottuu selvästi suurimmille säteille kuin näkyvä tähtikiikko. Tyypillisesti $R_{\text{HI}} = 2 \times R_{25}$ (missä $R_{25} = R$ -kaistassa 25 mag arcsec⁻² pintakirkkautta vastaava säde).
- Keskimäärin pintatiheys on $\approx 4 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$. Tällä tiheydellä UV-säteily absorboituu ja HI-kiekon keskelle voi muodostua tiheämpiä H₂-alueita.

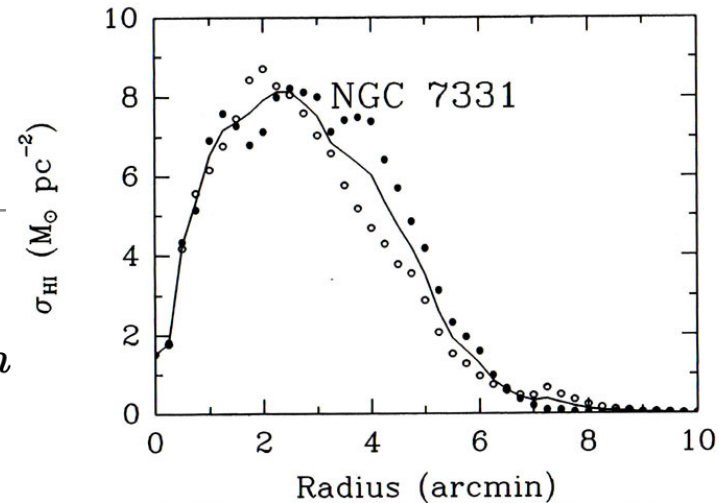


Fig 5.14 (K. Begeman) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

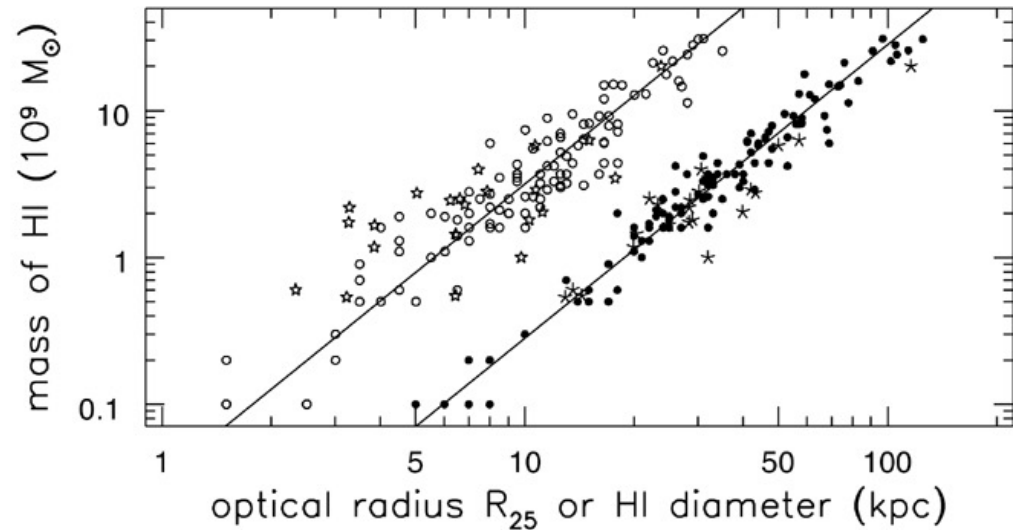


Fig 5.15 (Broeils & de Blok) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



H α -alueet ja molekulaarinen vety

- Ionisoituneen vedyn H α -alueet keskittyvät pääosin kiekkoon, mutta lisäksi on myös diffuusia emissiota kiekon ylä- ja alapuolella -> kaasun rakenne on 'klumppimainen'.
- CO havainnosta ($n_{\text{CO}} \approx 6 \times 10^{-5} \times n_{\text{H}_2}$) havaitaan että H $_2$ emissio on tyypillisesti suurin galaksin ytimessä ja että joissakin galakseissa on H $_2$ rengas ytimen ympärillä. Toisin kun HI:tä, H $_2$:ta ei yleensä löydy optisen säteen ulkopuolelta.

Esimerkkinä NGC 891 (Sc-galaksi)

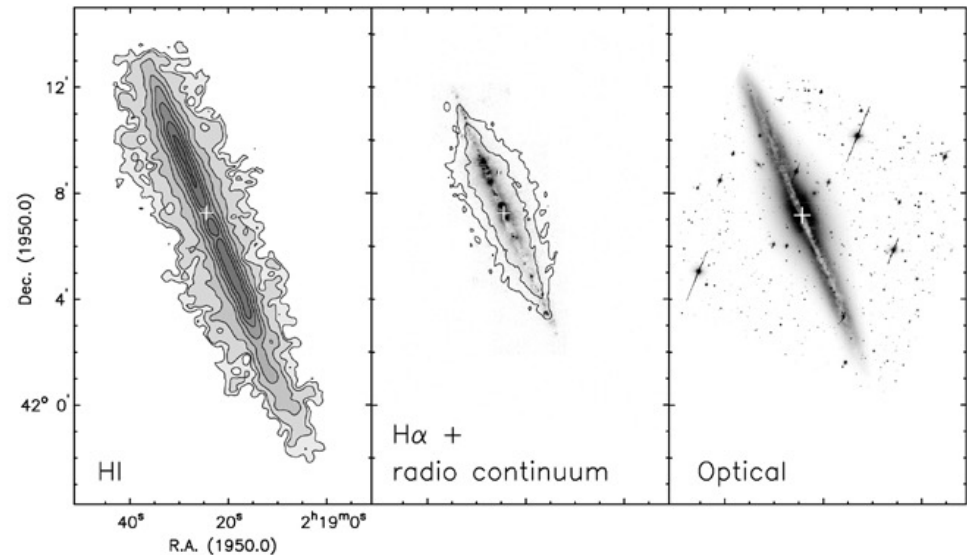


Fig 5.16 (Swaters & Rand) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Kaasu S0-galakseissa

- S0-galakseissa on tyypillisesti erittäin vähän kylmää kaasua, niin vähän että se on tuskin havaittavissa.
- Niissä harvoissa tapauksissa jossa on kaasua, kaasu ei löydy yleensä kiekon tasosta vaan esim. polaarikiekossa kuten kuvassa. Lisäksi kaasun liike voi jossain tapauksissa olla retrogradista tähtien suhteen.
- Joissakin S0-galakseissa ($\leq 1\%$ havaituista S0-galakseista) myös osa tähdistä voivat pyöriä keskenään eri suuntaan.

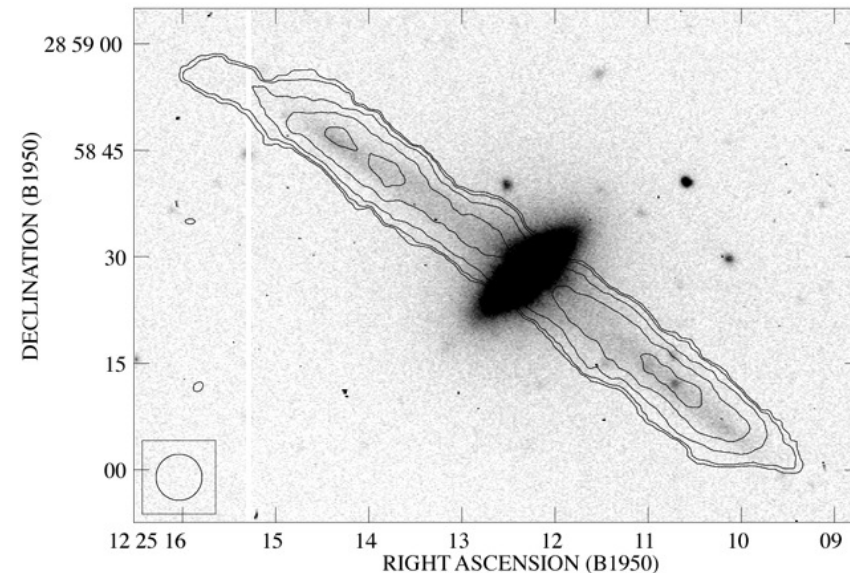


Fig 5.17 (A. Cox) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

UGC 7567 V-kaistassa ja radio-
kontuurihavainnoissa.



8.3 Kiekkogalaksien pyörimiskäyrät I

- Myös litistyneessä kiekkogalaksissa saamme arvion massasta havaitsemalla pyörimiskäyriä.

$$\frac{V^2(R)}{R} = \frac{GM(< R)}{R^2}$$

- Koska satunnaiset liikkeet kiekkogalakseissa ovat pieniä, voimme olettaa että tähdet liikkuvat lähes ympyräradoilla. Säteisnopeudelle saadaan:

$$V_r(R, i) = V_{\text{sys}} + V(R) \sin i \cos \phi$$

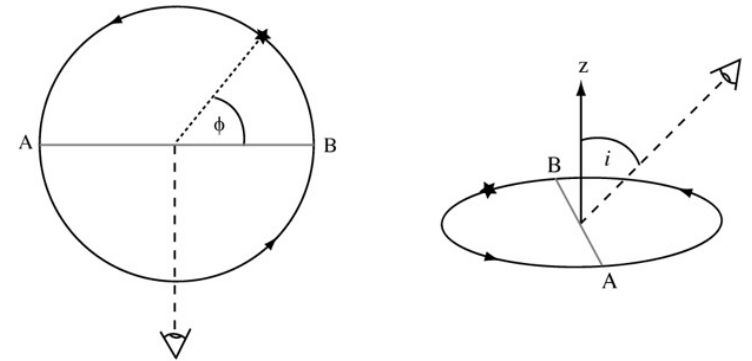


Fig 5.18 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

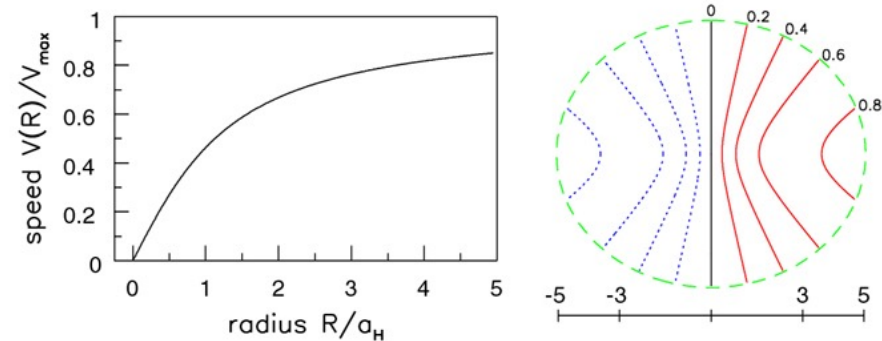


Fig 5.19 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

'Spider-diagramma' osoittaa pyörimisen



Kiekkogalaksien pyörimiskäyrät II

- Havaitut pyörimiskäyrät ovat lähes vakioita suurille säteille R , eli galaksien ulko-osissa on paljon näkymätöntä pimeää ainetta.
- Monissa spiraaligalakseissa kuten myös Linnunradassa kiekon inkliinaatiokulma i muuttuu säteen funktiona. Tämä on merkki siitä että kiekko ei ole suora vaan siinä on vääntymä (eng. warp).
- Koska $V(R)$ vakio, $V(R)/R$ pienenee R :n kasvaessa ja tuloksena on differentiaali-rotaatiota.

NGC 7331 havaittu pyörimiskäyrä

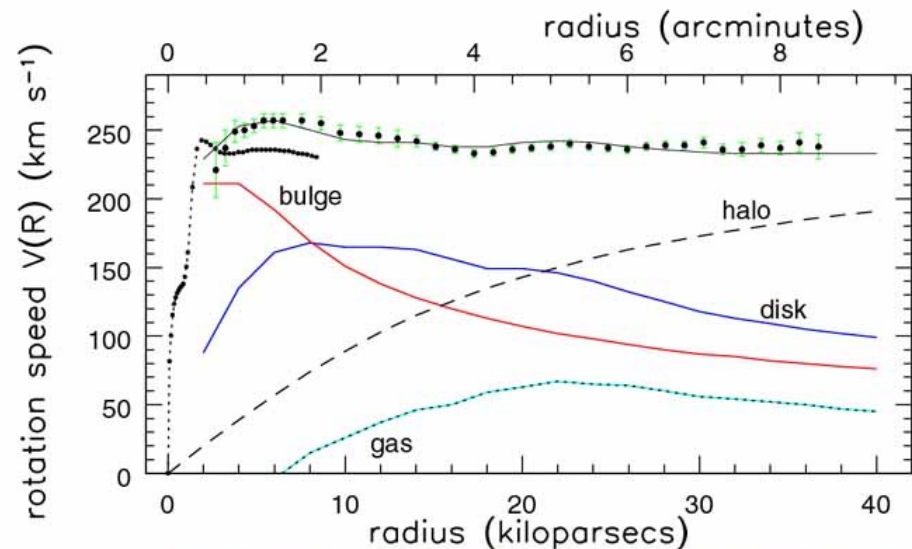


Fig 5.20 (Begeman, Sofue) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Pimeä aine kiekkogalakseissa

- Tyypillisesti spiraaligalaksien havaitut pyörimisnopeudet ovat $V_{\text{rot}} \approx 150\text{-}300$ km/s ja vain harvoissa poikkeustapauksissa ne voivat olla $V_{\text{rot}} \approx 400\text{-}500$ km/s.
- Sa/Sb galakseissa käyrät nousevat pienillä säteillä jyrkästi suuren keskuspullistuman takia, Sc/Sd galakseissa nousu on maltillisempaa.
- Vaaditut pimeän aineen määrät galakseissa havaintoalueella ovat ~50% Sa/Sb ja ~90% Sd/Sm galakseissa.

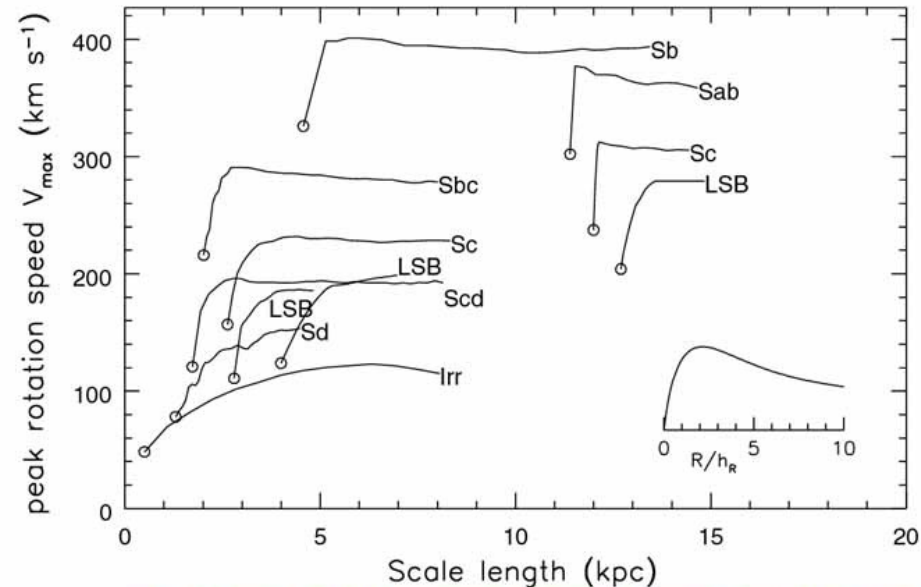


Fig 5.21 (Broeils & de Blok) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Kaikissa galaksityypeissä on laakea pyörimiskäyrä, kun näkyvällä aineella on eksponentiaalisesti laskeva käyrä säteen funktiona.



Empiirinen Tully-Fisher relaatio

- Myös spiraaligalakseilla on luminositeetin ja nopeuden välinen empiirinen relaatio $L \propto v^\alpha$, $\alpha \sim 4$, Tully-Fisher relaatio:

$$\frac{L}{3 \times 10^{10} L_\odot} \approx \left(\frac{V_{\max}}{196 \text{ kms}^{-1}} \right)^{3.8}$$

- Relaation eksponentti riippuu aallonpituudesta, lähi-infrapuna alueella $\alpha \sim 4$, sinisemmässä valossa α on pienempi.
- Eri komponentit dominoivat massaa ja valoa \rightarrow relaation olemassaoloa ei täysin ymmärretä.

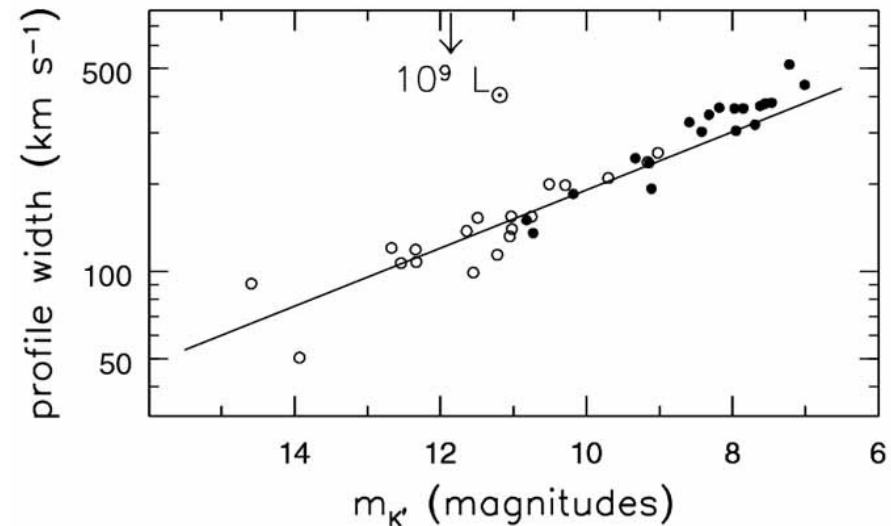


Fig 5.23 (M. Verheijen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Tully-Fisher relaatiota voidaan käyttää etäisyysmittauksissa ja täten osana kosmista etäisyys-tikapuu-järjestelmää.



Yhteenveto spiraaligalaksien ominaisuuksista

- Varhaisen tyypin spiraalit ovat keskimäärin kirkkaampia kuin myöhäisen tyypin, mutta ei aina!
- Toisin kuin ellipseissä, spiraaligalaksien morfologia ei yksiselitteisesti määrää niiden luminositeettia.

Table 5.1 The sequence of luminous disk galaxies

<i>Characteristic</i>	<i>S0–Sa</i>	<i>Sb–Sc</i>	<i>Sd–Sm</i>
Spiral arms	Absent or tight		Open spiral
Color	Red: late G star	Early G star	Blue: late F star
^a <i>B</i> – <i>V</i>	0.7–0.9	0.6–0.9	0.4–0.8
^a <i>u</i> – <i>r</i>	2.5–3	1–3	1.5–2.5
Young stars	Few		Relatively many
HII regions	Few, small		More, brighter
Gas	Little gas		Much gas
$\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$	$\lesssim 0.05$ –0.1		~ 0.25 to >1
L_B	Luminous (1–4) $\times 10^{10} L_\odot$		Less luminous (<0.1 –2) $\times 10^{10} L_\odot$
<i>I</i> (0)	High central brightness		Low central brightness
$\mathcal{M}(<R)$	Massive (0.5–3) $\times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$		Less massive (<0.2 –1) $\times 10^{11} \mathcal{M}_\odot$
Rotation	Fast-rising <i>V</i> (<i>R</i>)		Slowly rising <i>V</i> (<i>R</i>)

^aSee Tables 1.2 and 1.3 for definitions of these wavelength bands.



8.4 Spiraalihaarat ja galaktiset sauvat

- Melkein kaikissa suurissa kiekko-galakseissa on spiraalirakennetta. Spiraalirakenteen synty vaatii:
 - 1) differentiaalirotaatiota sekä
 - 2) riittävän suuren massan niin, että kiekon oma gravitaatio on merkittävä (eng. self-gravity).
- Lisäksi vaaditaan myös 3) kaasua spiraali-rakenteen syntyyn, toisin kuin sauvarakenteen synty, joka voi muodostua myös pelkissä tähtijärjestelmissä (esim. S0-galaksit).

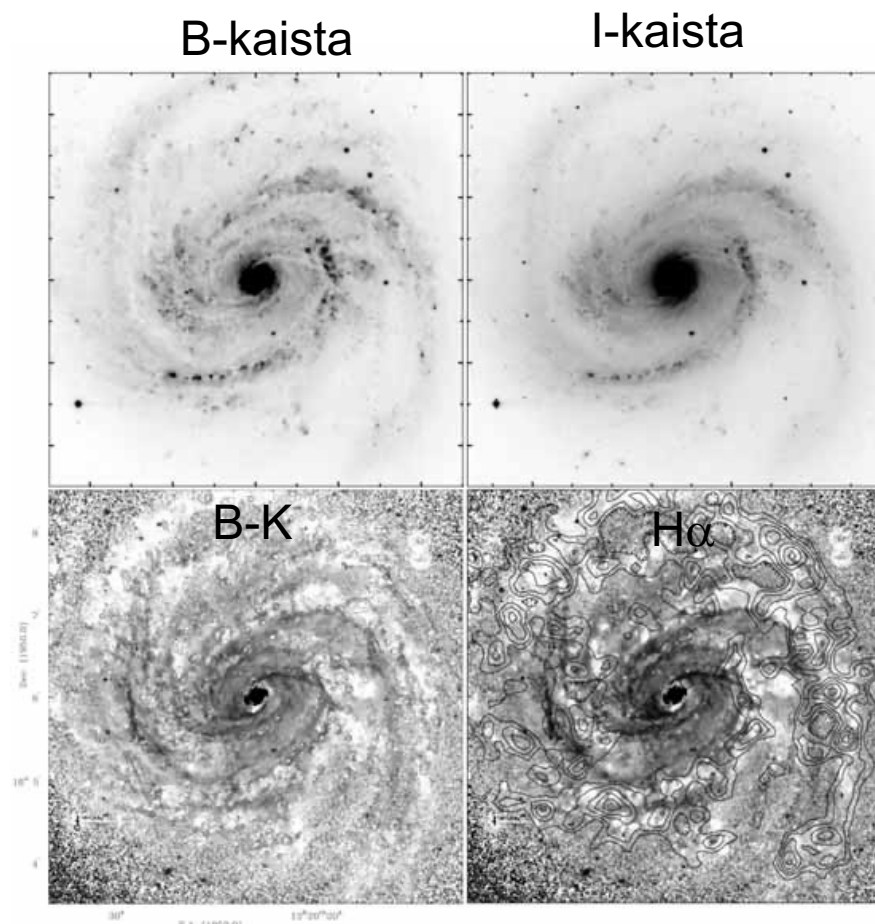


Fig 5.26 (J. Knapen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Spiraalirakenteen luokittelu I

1. Näyttävimmät suuren mittakaavan spiraalit (grand-design) ovat todennäköisesti syntyneet globaalissa vuorovaikutus-prosessissa. Näissä galakseissa on melkein aina kaksi spiraalihaaraa ja haarat ovat hyvin pitkiä, jatkuvia ja symmetrisiä.
2. Keskikokoisissa (intermediate) spiraaleissa rakenne on näkyvissä suurimmassa osassa galaksia, mutta ei välttämättä koko galaksissa. Spiraalihaaroja voi olla useampia ja ne saattavat hajota kesken haaran useampaan pienempään haaraan.
3. Epäsäännöllisissä (flocculent) spiraaleissa rakenne on täplämäistä (uusien tähtisyntyalueiden kautta) ja se on näkyvissä vain paikallisessa osassa galaksia. Spiraalirakenteella ei ole mitään globaalia kytkentää vastakkaiselle puolelle galaksia.



Spiraalirakenteen luokittelu II



1. M51 – Suuren mittakaavan spiraali (grand-design).



2. M101 – Keskikokoinen spiraali (intermediate).



3. Epäsäännöllinen spiraali (flocculent).



Spiraalien perusrakenne

- Voimme kuvata m -haaraisen spiraalin rakennetta yhtälöllä, missä R ja ϕ ovat galaksisentrisiä koordinaatteja.

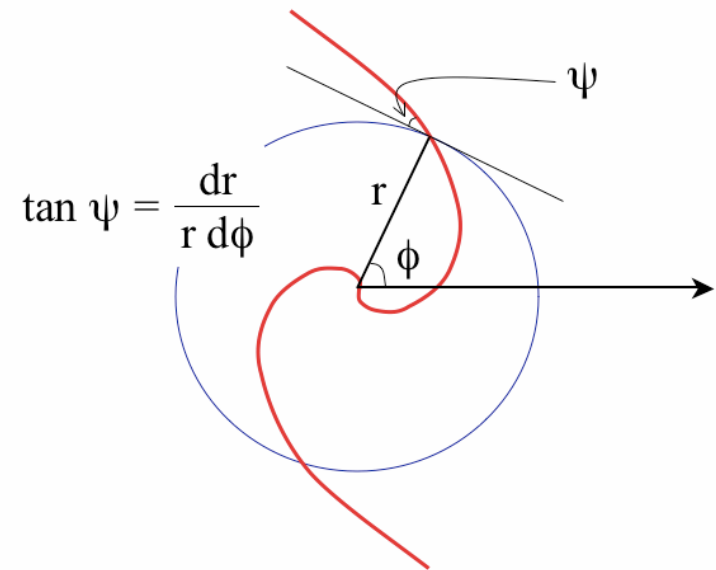
$$\cos[m(\phi + f(R, t))] = 1$$

- Funktio $f(R, t)$ kuvaa kuinka voimakkaasti spiraali on 'rullalla'. Avautumiskulma i

(kuvassa ψ):

$$\frac{1}{\tan i} = \left| R \frac{\partial \phi}{\partial R} \right| = \left| R \frac{\partial f}{\partial R} \right|$$

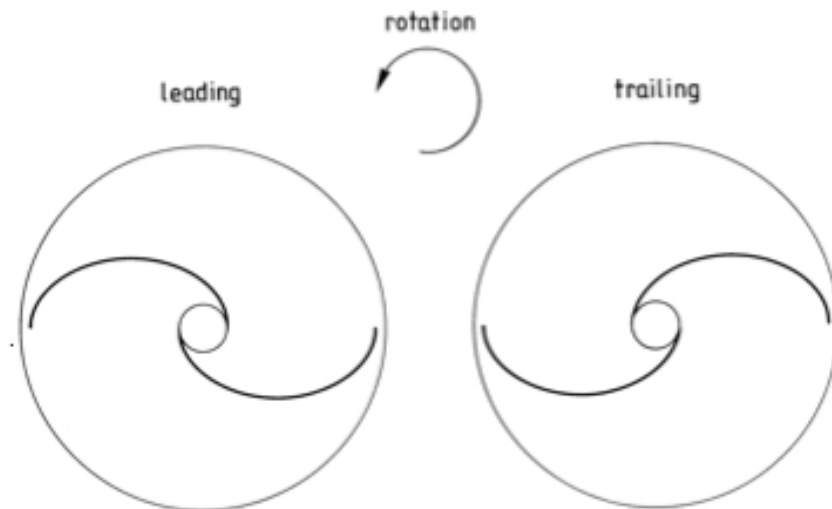
- Sa-spiraaleilla avautumiskulmat ovat keskimäärin $i=5^\circ$ ja Sc galakseissa $10^\circ < i < 30^\circ$. Sauvaspiraaleissa haarat lähtevät usein sauvan päistä.





Spiraalien muoto

- Spiraaleilla voi olla kaksi perusmuotoa, joko ne pyörivät galaksissa kärki menosuuntaan (leading) tai niin että kärki osoittaa vastakkaiseen suuntaan (trailing).
- Havainnot osoittavat että käytännössä kaikissa spiraaleissa rakenne laahaa pyörimisen perässä (trailing). Näissä systeemeissä liikemäärämomenttia siirtyy sisältä ulospäin.



Jotta voisimme määritellä spiraalien geometria meidän pitää havainnoista tietää kumpi puoli galaksia on lähempänä meitä. -> Käytetään pölyvanoja hyväksi, mutta silti tämä määrittely ei ole aina yksiselitteinen.



Differentiaalirotaation vaikutus

- Oletetaan että spiraalihaarat koostuvat aina samoista tähdistä, jotka sijaitsevat aluksi suoralla viivalla. Jokainen tähti liikkuu nopeudella $V(R)$ ja kulmanopeudella $\Omega(R)=V(R)/R$. Ajanhetkellä t ne sijaitsevat spiraalilla: $\phi=\phi_0+\Omega(R)t$, eli $f(R,t)=-\phi_0-\Omega(R)t$. Kulmanopeus $\Omega(R)$ pienenee säteen funktiona joten ϕ täytyy pienentyä. Ajan kuluessa spiraali menee yhä enemmän rullalle, ja avautumiskulma pienenee entisestään.

$$\cot i = R \left| \frac{d\Omega(R)}{dR} \right| t \approx \frac{200}{8} \left(\frac{t}{1 \text{ Gyr}} \right) \rightarrow i \approx 2^\circ \times \left(\frac{1 \text{ Gyr}}{t} \right)$$

- Johtopäätös: Spiraalirakenne on seurausta tiheysaallostasta, joka uusiutuu jatkuvasti.

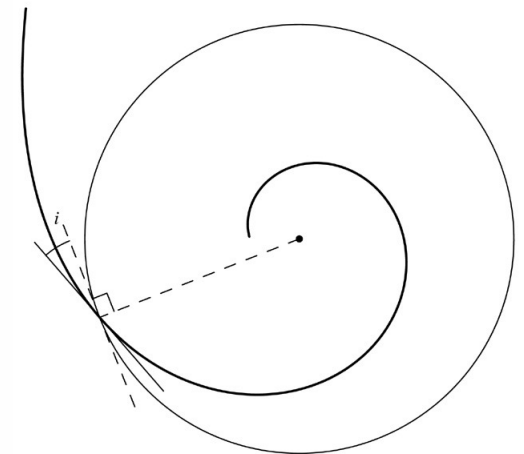


Fig 5.28 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Spiraalirakenteen teorioita

1. Etenevä tähtiensyntymalli: Joissakin epäsäännöllisissä spiraaleissa rakenne voi johtua ketjutetusta tähtiensynnystä, missä tähtiensyntä aiheuttaa supernovia jotka aiheuttavat lisää tähtien syntyä, differentiaalirotaatio sitten venyttää molekyylipilvet ja uudet tähtiensyntyalueet spiraalimuotoon.
2. Kineettinen spiraalimalli: Spiraalirakenne voi säilyä pitempään mikäli tähdet eivät ole täysin ympyräradoilla, vaan hieman eksentrisillä radoilla. Tällöin voidaan määritellä kuvionopeus Ω_p millä spiraalikuvio pyörii ja osoittaa että spiraalirakenteen rullalle meno viivästyy tekijällä Ω_p/Ω_* (≈ 0.3 Linnunradan tapauksessa).
3. Tiheysaalto-malli: Perustuu oletukseen että kaasun ja tähtien yhteenlaskettu painovoima eri säteillä voi pysäyttää kinemaattisen spiraalin taipumuksen mennä rullalle ja saada aikaan pysyvän tiheysaallon joka pyörii nopeudella Ω_p . Tämä on vallitseva teoria!



Lindbladin resonanssit

- Korotaatio-resonanssi on se säde, jolla spiraalikuvion kulmanopeus on sama kuin kiekon tähtien kulmanopeus, $\Omega_p = \Omega(R)$. Kiekon ominaisuudet lähellä tätä resonanssia ovat erityisen tärkeitä tiheysaallon käyttäytymiselle.
- Kaksi muuta tärkeätä resonanssia ovat Lindbladin resonanssit: $\Omega_p = \Omega \pm \kappa/2$, κ =episyklinen taajuus.
- Tiheysaaltoteoriassa osoitetaan että kaksiharainen kuvio voi vain olla olemassa Lindbladin resonanssien välissä.

Pyörimisfrekvenssit Plummer-potentiaalissa

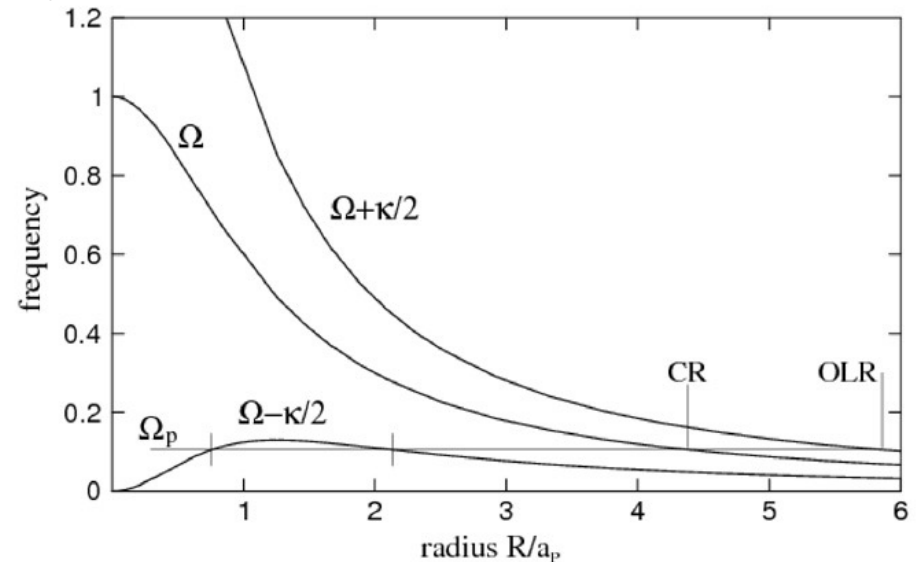


Fig 5.30 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Lindbladin resonansseissa tähti tekee yhden radiaalisen heilahduksen kulkiessaan haarasta toiseen kaksiharaisessa kuviossa.



Toomren Q-parametri

- Kiekon tähdet voivat vahvistaa spiraalirakennetta vain mikäli niiden satunnainen liike on riittävän pieni.
- Kun Toomren Q-parametri on $Q \leq 1.2$ spiraalirakennetta voi kehittyä.

$$Q = \frac{\kappa \sigma_R}{3.36 G \Sigma} \lesssim 1$$

- Osoittajassa on “Nopeuspaine” ja nimittäjässä “Painovoima”. Yleensä $Q \sim 1$, joten kiekot ovat marginaalisen stabiileja ja spiraalirakenne syntyy suhteellisen helposti.

Tietokone-simulaatiota (N-body)

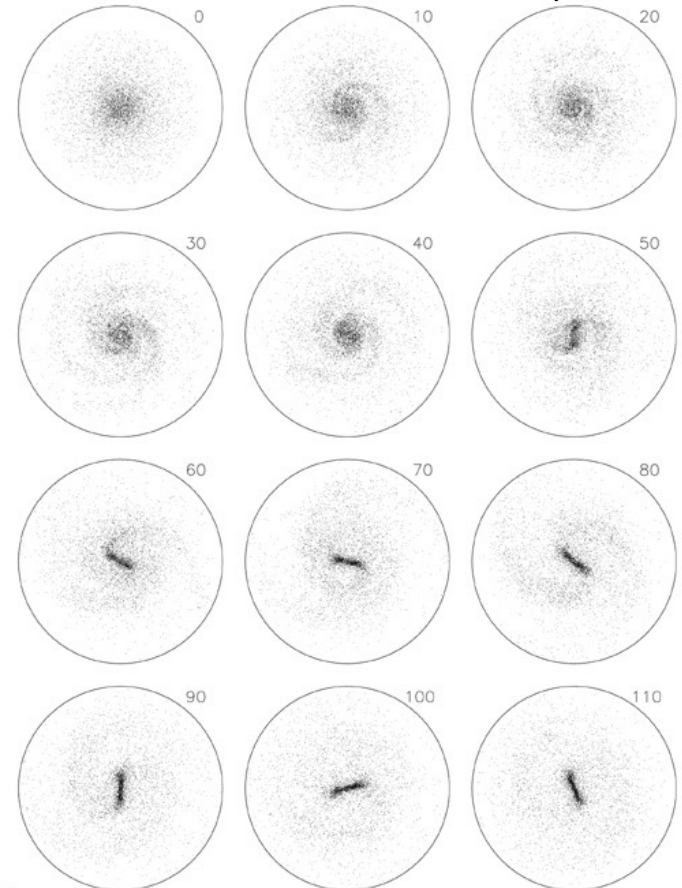


Fig 5.31 (J.Sellwood) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Sauvagalaksit

- Kuten spiraalit, sauvat pyörivät tietyllä kuvio-nopeudella Ω_p , mutta toisin kun spiraalit ne eivät ole tiheysaaltoja!
- Samat tähdet pysyvät sauvarakenteessa ja ne voivat syntyä myös ilman kaasua.
- Sauvoissa esiintyvät asymmetriset häiriöt painovoimassa ajavat tehokkaasti kaasua kohti galaksin keskustaa.

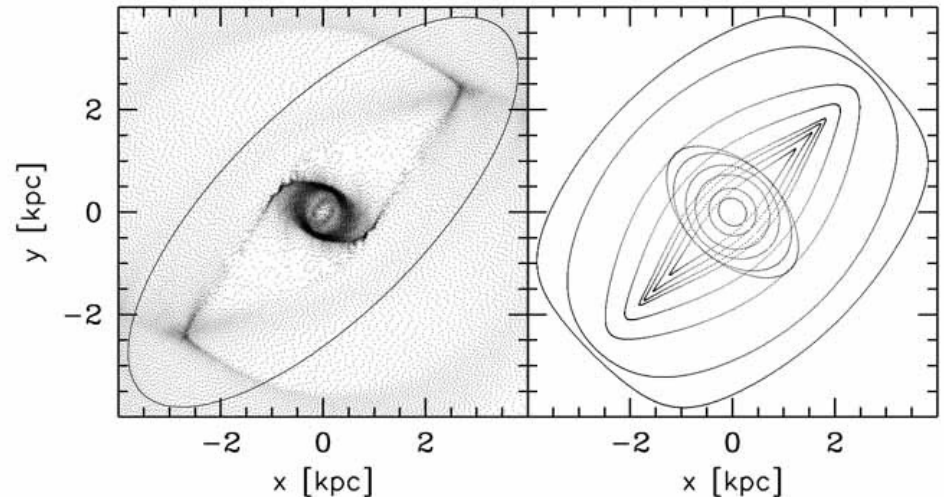


Fig 5.33 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Vasemmalla kaasun liikettä tietokone-simulaatiossa ja oikealla tähtien ratoja sauvassa.



Keskuspullistumat ja mustat aukot

- Kiekkogalaksien keskuspullistumat muistuttavat jossain määrin pieniä elliptisiä galakseja ja niidenkin valoprofiileja voidaan kuvata Sérsic-profiililla.
- Keskuspullistuman tähdet pyörivät verrattain hitaasti $V_{\text{rot}}/\sigma \approx 1$ ja ne ovat tyypillisesti varsin kompakteja, tyypillisesti $R_{\text{e,bulge}}/h_{\text{R}} \approx 0.1$, missä h_{R} on kiekon radiaalinen skaalapituus.
- Keskuspullistumien tähtitiheydet ovat hyvin suuria ja niiden metallipitoisuus on jonkun verran suurempi kuin kiekon.
- Kiekkogalaksien ytimeistä löytyy usein hyvin tiivis ydintähtijoukko (esim. $10^7 M_{\odot}$ muutamien parsekkien sisäpuolella).
- Useasta kiekkogalaksin ytimeistä löytyy myös hyvin massiivinen musta-aukko ($\sim 10^6 - 10^8 M_{\odot}$).



Mitä opimme?

1. Spiraaligalaksien pintakirkkausprofiili voidaan sovittaa eksponentiaalisella funktiolla sekä R :n että z :n suunnassa.
2. Spiraaligalakseissa on paljon laajalle levinnyttä atomaarista kaasua ja enemmän keskittynyttä kylmää molekulaarista kaasua.
3. Spiraalirakenne on seurausta jatkuvasti uudistuvasta tiheysaalosta, eri tähdet ja kaasut ovat eri hetkinä spiraalihaaroissa, jotka yleensä laahaavat perässä pyörimisnopeuden suhteen.
4. Sauvat eivät ole tiheysaaltoja ja niitä voi esiintyä myös järjestelmissä, joissa ei ole lainkaan kaasua (esim. S0-galaksit).