



# **Galaksit ja kosmologia**

## **FYS2052, 5 op, syksy 2023**

E207 Physicum

### **Luento 2: Galaksien luokittelu, 11/09/2023**



# Tällä luennolla käsitellään

---

1. Galaksin määritelmä.
2. Galaksien luokittelu, klassinen Hubble'n diagramma ja sen laajennus.
3. Miten voidaan mallintaa eri galaksien pintakirkkausprofiileja.
4. Miten galaksien morfologia riippuu niiden ympäristöstä ja miten morfologia muuttuu punasiirtymän funktiona.
5. Tutkimuspoinniti: Galaxy Zoo-projekti.
6. Vastaa soveltuvin osin: **S&G**: luvut 1.3-1.4, sekä 2.2.  
**CBMB**: sivut 5-30

# 2.1 Galaksin rakenneosat ja määritelmä

Koko galaksi sijaitsee suuren **pimeän aineen halon sisällä** joka on ~100-200 kpc kokoinen (galaksi ~10 kpc) ja jonka massa on tyypillisesti noin 20-40 kertaa suurempi kuin galaksin yhteenlaskettu näkyvä tähti- ja kaasumassa.

**Galaksin määritelmä:** Suuri tähdistä, kaasusta ja pölystä muodostunut järjestelmä joka sijaitsee pimeän aineen halossa.

Galaksin keskeltä löytyy yleensä **keskuspullistuma** joka koostuu tyypillisesti **vanhoista tähdistä**.

Galaksin **kiekko** on litteä rakennelma, jossa on **kaasua ja nuoria tähtiä**.

Galaksin **halossa** on hyvin **vanhoja tähtiä** sekä pallomaisia tähti-joukkoja.

Galaksin **ytimessä** on yleensä **supermassiivien musta aukko**.

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



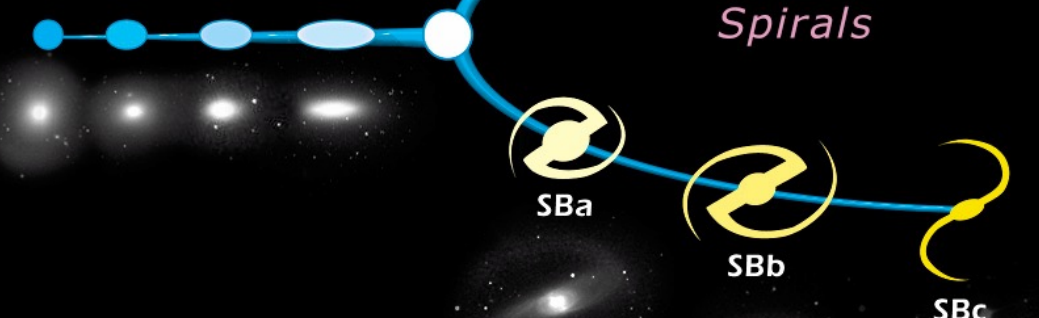
## 2.2 Hubblen klassinen galaksiluokittelu

### Edwin Hubble's Classification Scheme

Ellipticals

E0 E3 E5 E7 S0

Spirals



Varhaisen tyypin ja myöhäisen tyypin galaksit.

- Alkuperäinen Hubblen luokittelu perustuu puhtaasti galaksien havaittuun optiseen morfologiaan.
- Galaksit jaetaan elliptisiin (E), linssimäisiin (S0), spiraaleihin (normaalit S sekä sauvaspiraalit SB) sekä epäsäännöllisiin (Irr) galakseihin.
- Luokittelu toimii hyvin kirkkaille galakseille.



# Ellipsigalaksien luokittelu



M87 tyyppi E0



M49 tyyppi E4

- Ellipsigalaksit ovat projisoituneet taivaalle enemmän tai vähemmän litistyneinä ellipseinä,  $E_\epsilon$  missä  $\epsilon=10x(a-b)/a$ , a ja b ovat ellipsin puoliakseleita.



# Linssimäisten galaksien luokittelu

- Linssimäisissä galakseissa on massiivinen keskuspullistuma ja kiekkomainen tähtirakenne, mutta ei kaasua tai spiraalihaaroja ja täten yleisesti ottaen hyvin vähän tähtien syntyaktiivisuutta.
- Nämä galaksit ovat ellipsi- ja spiraaligalaksien välimuotoja ja sijaitsevat usein galaksijoukoissa, erityisesti niiden laitamilla.



NGC 5866 tyyppi S0



# Spiraaligalaksien luokittelu I



M81 tyyppi Sa



M101 tyyppi Scd

- Spiraaligalaksit jaetaan varhaisen tyyppin (Sa) ja myöhäisen tyyppin spiraaleihin (Sc), myöhemmin luokittelua on jatkettu vielä myöhäsimpiin luokkiin (Sd) ja (Sm=magellanic).



# Spiraaligalaksien luokittelu II

---



NGC 1300 tyyppi SBbc



M95 tyyppi SBb

- Spiraaligalaksit jaetaan myös normaaleihin spiraaleihin (spiraalihaarat lähtevät galaksin ytimestä) ja sauvaspiraaleihin (spiraalihaarat lähtevät galaksin ytimen läpi kulkevan sauvan päistä).





# Spiraaligalaksien luokittelun perusteet

---

- Hubblen luokittelu  $Sa \rightarrow Sb \rightarrow Sc \rightarrow Sd$  muodostuu seuraavasti:
  1. Keskuspullistuman suhteellinen merkitys kiekkoon nähden pienenee kun siirrytään  $Sa \rightarrow Sd$ .
  2. Spiraalihaarojen näkyvyys ja voimakkuus kasvaa ( $Sa \rightarrow Sd$ ).
  3. Kaasun, pölyn, HII-alueiden (ionisoitunut vety), sekä nuorten tähtien syntyalueiden määrä kasvaa ( $Sa \rightarrow Sd$ ).
  4. Spiraalihaarojen avautumiskulma kasvaa, eli spiraalihaarat ovat avoimempia ( $Sa \rightarrow Sd$ ).
  5. Kokonaisluminositeetti tyypillisesti laskee ( $Sa \rightarrow Sd$ ).



# Epäsäännöllisten galaksien luokittelu

- Epäsäännölliset galaksit eivät sovi yleiseen luokitteluun. Niillä ei ole hyvin määriteltyä rakennetta, ei hyvin määriteltyä ydintä, ei kiekkoa, eikä spiraalihaaroja, mutta usein paljon kaasua ja tähtien syntyä.
- Kaoottinen täplämäinen rakenne johtuu usein HII-alueiden suuresta määrästä.



Suuri Magellanin (LMC, oikealla ylhäällä) ja Pieni Magellanin pilvi (SMC, vasemmalla alhaalla).  
Tyyppi Irr, joskus myös SBm (m=Magellanic).



# Laajennettu Hubble'n luokittelu

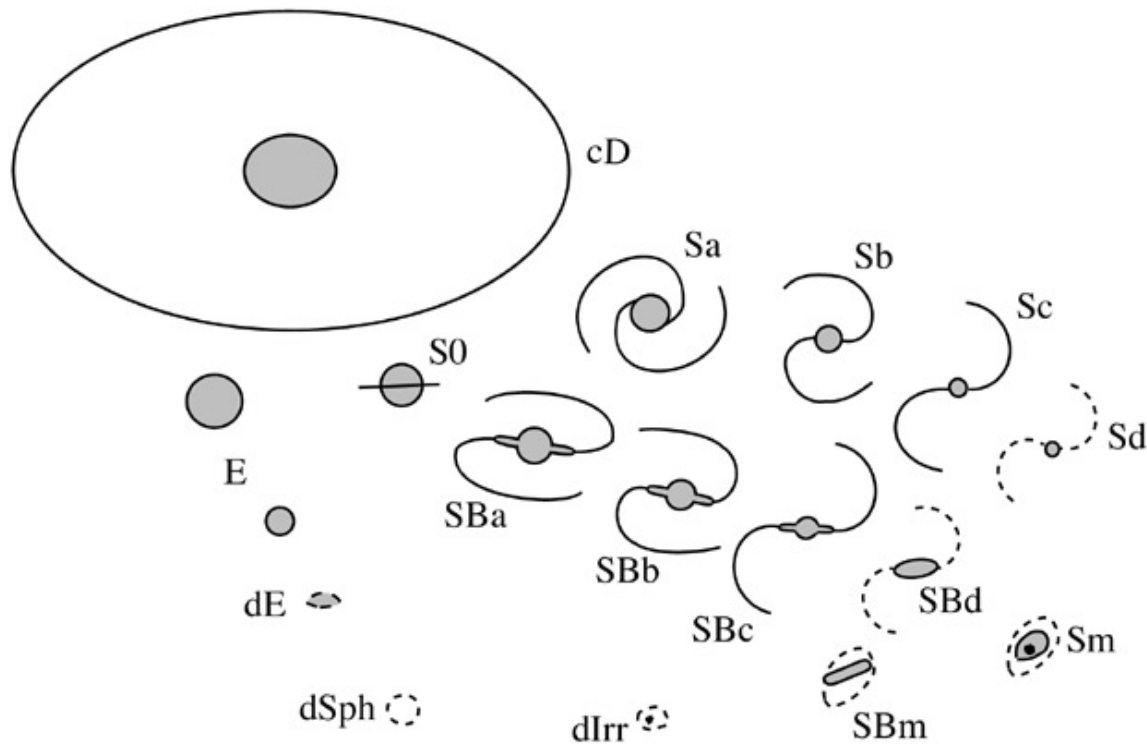
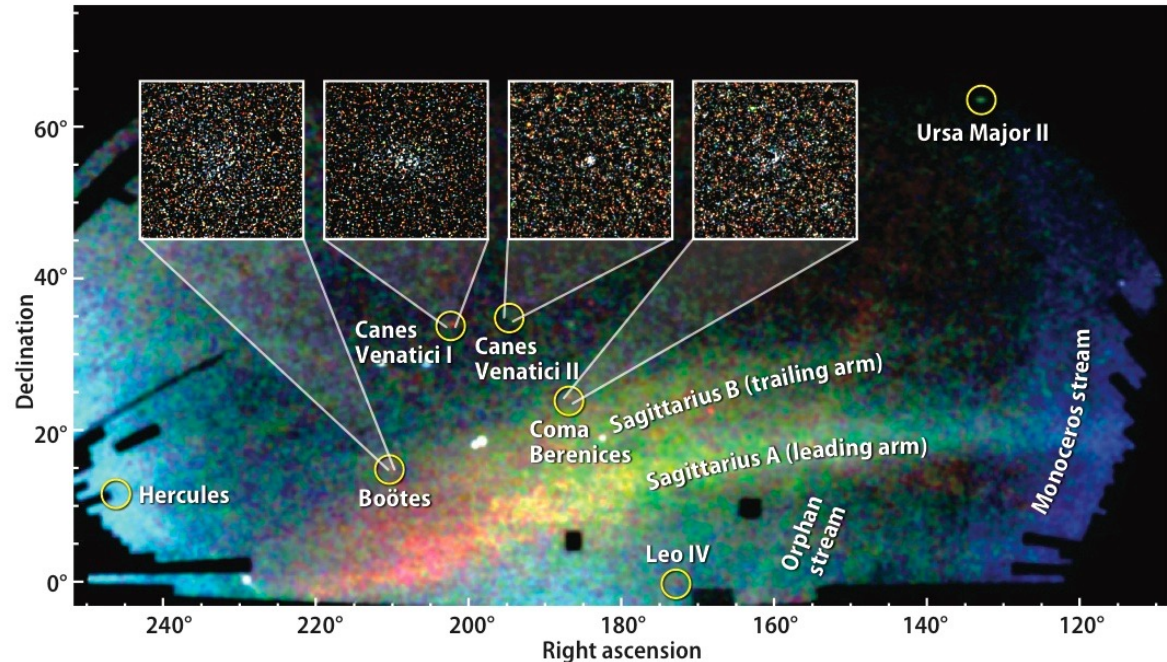


Fig 1.11 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



# Kääpiöellipsit ja kääpiösferoidaalit

- Heikkovaloiset ellipsit ( $L < 1/10 L_{MW}$ ) jaetaan harvinaisiin kompak-teihin ellipsigalakseihin (M32), heikko-valoisiin kääpiöellipseihin (dE) sekä vielä heikko-valoisimpiin kääpiösferoidaaleihin (dSph).
- dSph-galakseissa ei järjestäytynyttä liikettä, ehkä Irr-galakseja ilman kaasua?

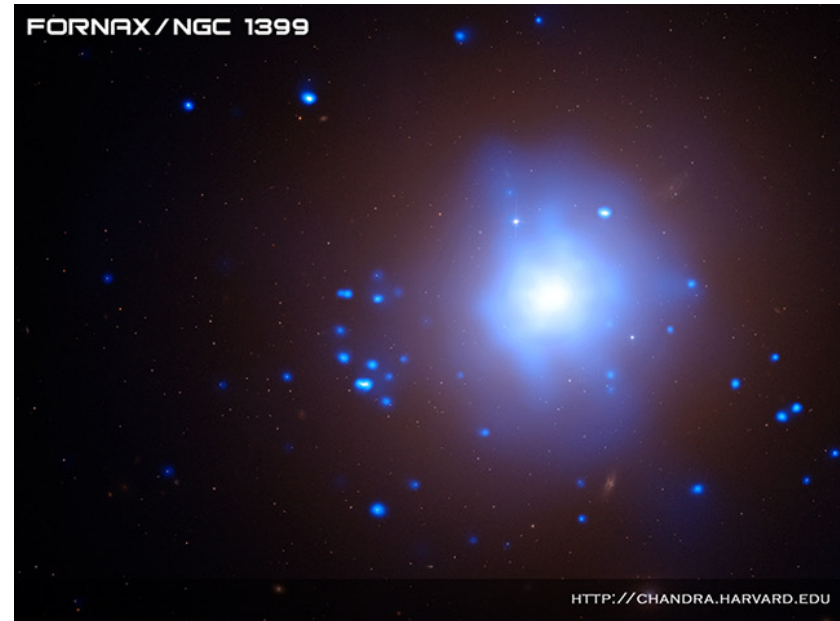


Hyvin heikkovaloisia dSph-galakseja paikallisessa galaksiryhmässä, joiden absoluuttinen magnitudi on vain noin  $M \sim -5$ .



# cD-jättiläisgalaksit

- cD:t ovat jättimäisen suuria ( $r > 100$  kpc) ja valovoimaisia ( $L \sim 100 L_{MW}$ ) galakseja, jotka sijaitsevat galaksijoukkojen ytimissä.
- Monella cD-galaksilla on useita galaksiytimiä ja ne ovat kasvaneet näin suuriksi galaksitörmäysten kautta.
- Tyypillisesti näissä galaksijoukoissa on vähemmän muita kirkkaita galakseja, koska ne ovat sulautuneet cD-galaksiin.

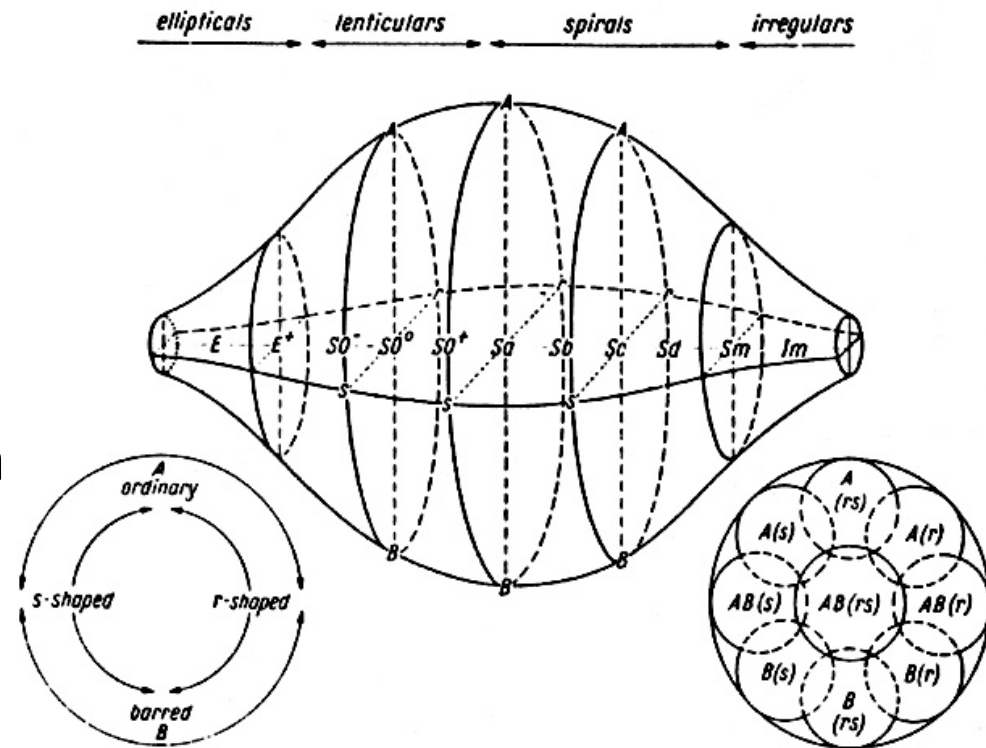


NGC 1399, cD (c=superjättiläinen D=diffuusi, Yerkes luokittelu). ”Muisti-Sääntö”, cD=Central Dominant galaxy



# De Vaucouleursin luokittelu

1. Lisäsi heikot sauvamaiset galaksit SAB, S ja SB galaksien väliin.
2. Luokitteli galaksit joilla on rengas ytimen ympärillä S(r) ja erotti ne galakseista joissa galaksihaarat lähtevät suoraan ytimestä S(s).
3. Joillakin galakseilla on ulkoinen rengas (lähinnä Sa-tyyppillä) -> RSB(r)a.





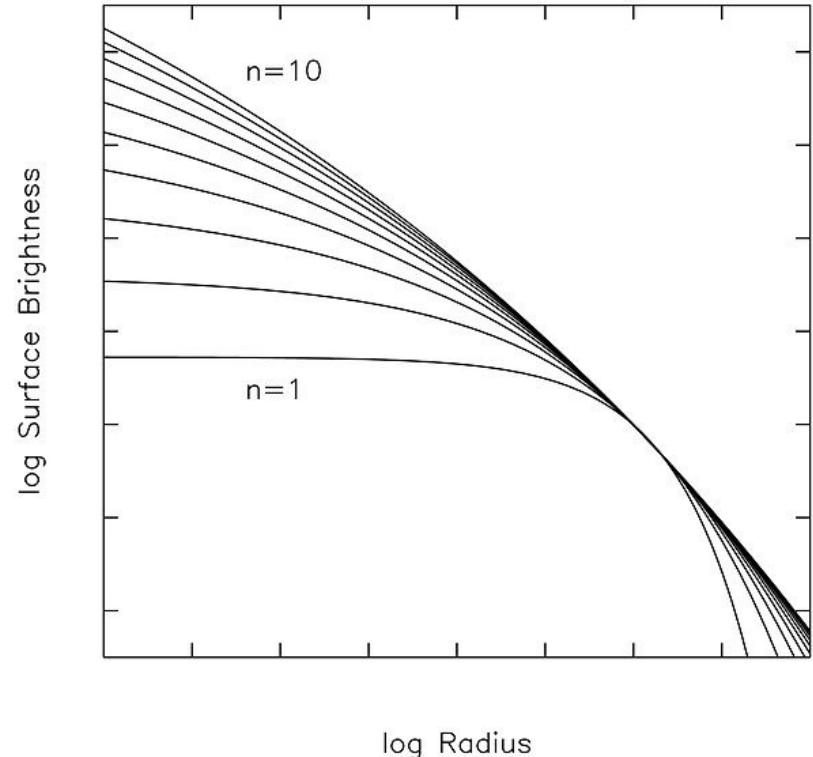
## 2.3 Ellipsigalaksien pintakirkkausprofiili

- Klassisesti ellipsigalaksien pintakirkkausprofiilit on sovitettu empirisellä de Vaucouleurs -profiililla ( $r^{1/4}$  laki):

$$\log(I/I_e) = -3.33[(r/r_e)^{1/4} - 1]$$

- Nykyisin käytetään usein yleistettyä Sérsic-profiilia, missä  $n$  on vapaa parametri ja  $k$  valitaan niin, että efektiivinen säde  $r_e$  sisältää puolet galaksin valosta.  $n=1$  eksponentiaalinen ja  $n=4$  de Vaucouleurs profiili:

$$\log(I/I_e) = k[(r/r_e)^{1/n} - 1]$$

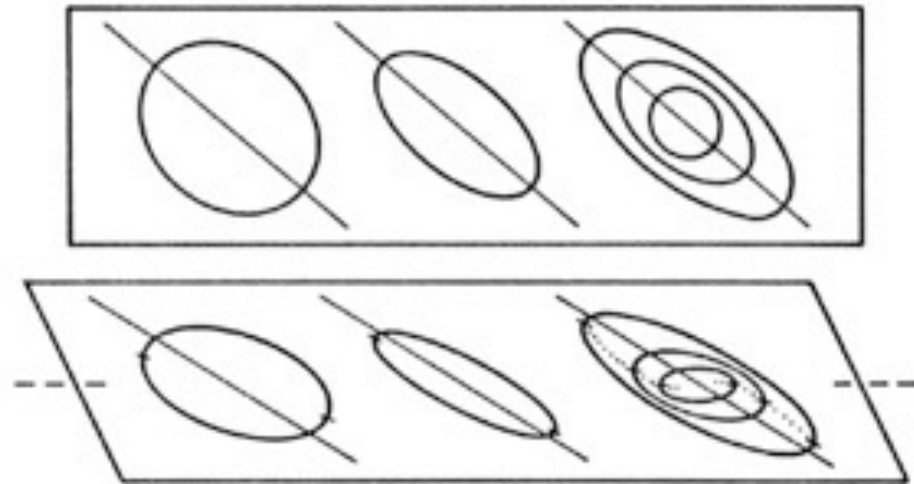


'Core'-ellipseissa puuttuu keskusvalo ja 'Cusp'-ellipseissa sitä on liikaa verrattuna Sérsic-profiiliin.



# Projektion vaikutus pintakirkkauteen

- Näemme vain 2D-projektion todellisesta kirkkausjakaumasta. Usein vaikea päätellä mikä on galaksin todellinen 3D-luminositeettiprofiili.
- Pintakirkkauden tasokäyrät (eng. isophotes) ovat elliptisiä, mutta niiden elliptisyys voi muuttua säteen funktiona.
- Havaintoja ja malleja yhdistämällä voimme arvioida ellipsigalaksin 3D-kirkkausjakaumaa.



Projektio kääntää tasokäyrää sitä enemmän, mitä pyöreämpi tasokäyrä on.



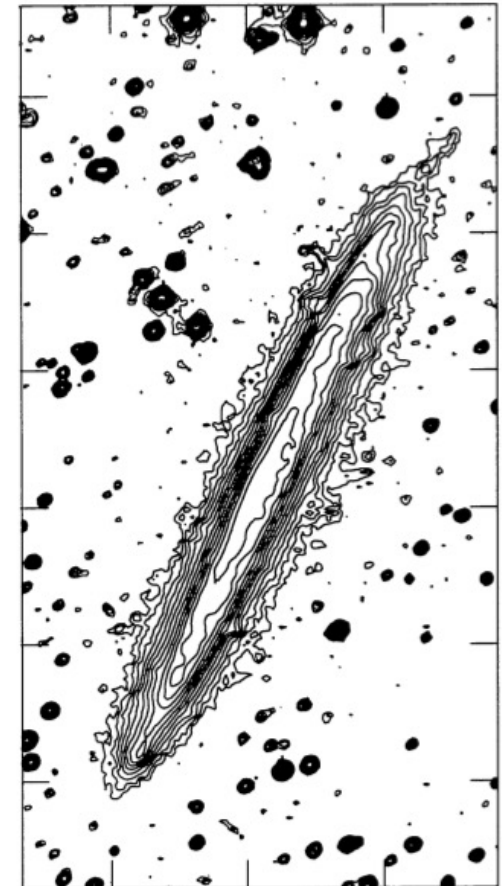
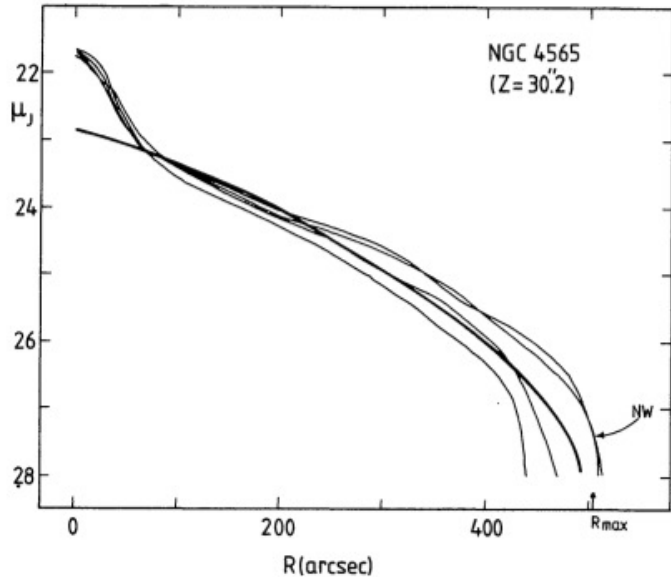


# Spiraaligalaksien keskuspullistuma

---

- Spiraaligalaksien keskuspullistumat muistuttavat 'mini'-ellipsigalakseja: morfologiat, pintakirkkausprofiilit ja värit ovat samanlaisia, mutta erojakin löytyy:
  1. Keskuspullistumat tyypillisesti pyörivät nopeammin kuin E-galaksit.
  2. Pintakirkkausprofiilit seuraavat hyvin  $r^{1/4}$  lakia isoakselin suhteen, mutta ei lyhyemmän akselin suhteen.
  3. Keskuspullistumat eivät ole yhtä tiheitä kuin ellipsigalaksit. Samalla luminositeetilla, niillä on pienempi pintakirkkaus ja suurempi säde.
  4. Keskuspullistumat ovat keskimäärin enemmän litistyneitä kuin ellipsigalaksit.

## 2.4 Spiraaligalaksin pintakirkkausprofiili



- Spiraaligalaksien (eli kiekkoagalaksien) kirkkausprofiili voidaan esittää muodossa:

$$I(r) = I_0 e^{-r/r_D}$$

- Intensiteettijakaumasta voidaan integroimalla saada kokonaisluminositeetti,  $r_D$  on skaalasäde.



# Kiekon vertikaalinen kirkkausprofiili

- Kiekkogalaksien vertikaalista kirkkausprofiilia (z-suunta) voidaan havaita hyvin galakseissa jotka näkyvät meille sivuttain.
- Tähtien voidaan olettaa olevan hydrostaattisessa tasapainossa missä “paine” tulee tähtien liikkeestä ( $P=\rho\sigma^2$ ). Käyttäen Poissonin yhtälöä  $\nabla^2\Phi=4\pi G\rho$  (kts. luento 3) päädytään seuraavaan:

$$\nabla P = -\rho\nabla\Phi \Rightarrow \nabla\left(\frac{\nabla P}{\rho}\right) = -\nabla^2\Phi \Rightarrow \frac{d}{dz}\left(\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dz}\right) = -\frac{4\pi\rho G}{\sigma_z^2}$$

- Ratkaisu isotermisille tapaukselle, eli nopeusdispersio  $\sigma_z$ =vakio:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\cosh^2(z/H)}, \quad H = \left(\frac{\sigma_z^2}{2\pi G\rho_0}\right)^{1/2}$$



# Tähtipopulaatioiden jakauma

- Skaalasäde ( $h_z$ ) ja nopeusdispersio ( $\sigma_z$ ) kasvavat kun mennään nuorimmista tähdistä vanhempiin tähtiin.
- Tähdet syntyvät ohuessa kiekossa jonka jälkeen ne pikkuhiljaa "siroavat" pois tasosta painovoima-  
vuorovaikutusten johdosta.

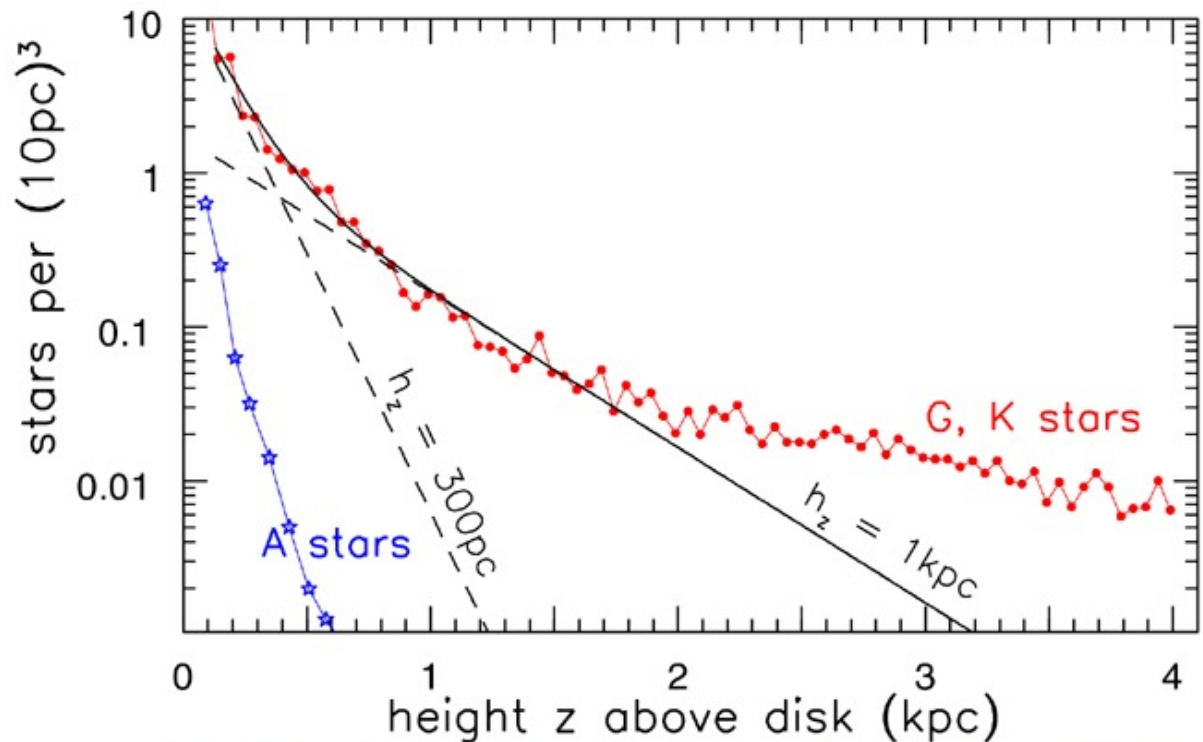
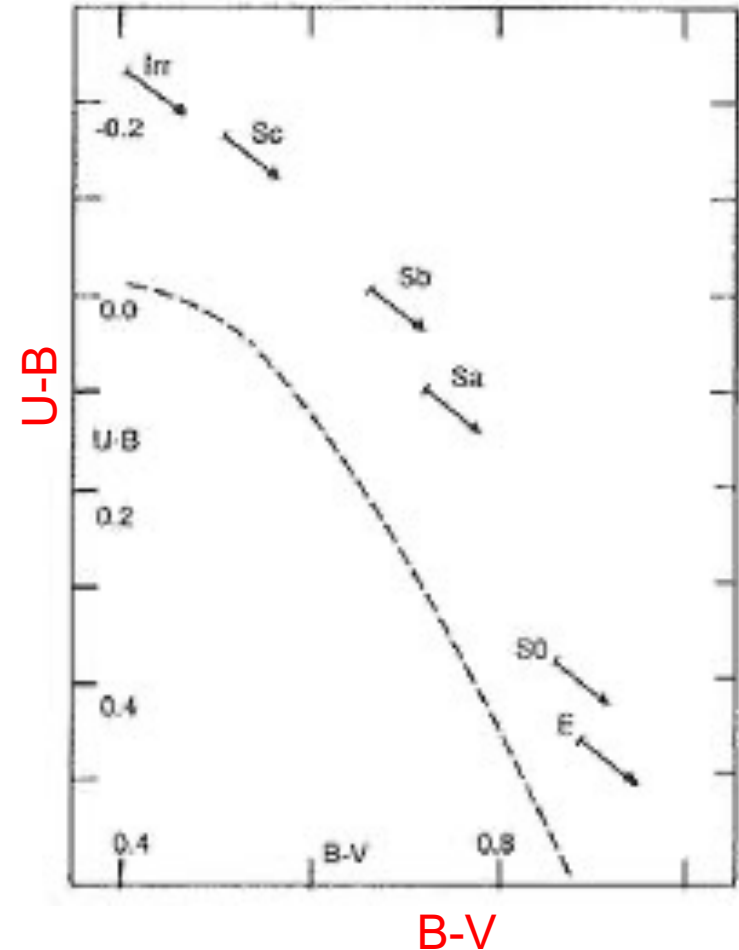


Fig 2.8 (Reid, Knude) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



# Galaksien keskimääräiset värit

- Irr-galaksit ovat sinisimmät ja näissä on jäljellä vielä paljon kaasua kun taas elliptisgalakseissa melkein kaikki kaasu on jo muodostanut vanhoja tähtiä ja galaksit ovat hyvin punaisia.
- Katkoviiva kuvaa pääsarjan tähtien värejä ja galaksin havaittu väri kertoo jo paljon galaksin tyypistä ja sen tähtipopulaation ominaisuuksista.





## 2.5 Morfologian riippuvuus ympäristöstä

- Ympäristön keskitiheys vaikuttaa voimakkaasti galaksien morfologiaan. Suurissa galaksijoukoissa (suuri tiheys) on lähes yksinomaan ellipti- ja S0-galakseja.
- Kiekkogalaksit ja epäsäännölliset galaksit viihtyvät pienissä galaksiryhmissä (pieni tiheys) tai niiden välissä, esim. paikallisesta galaksiryhmästä ei löydy yhtään massiivista E-galaksia.

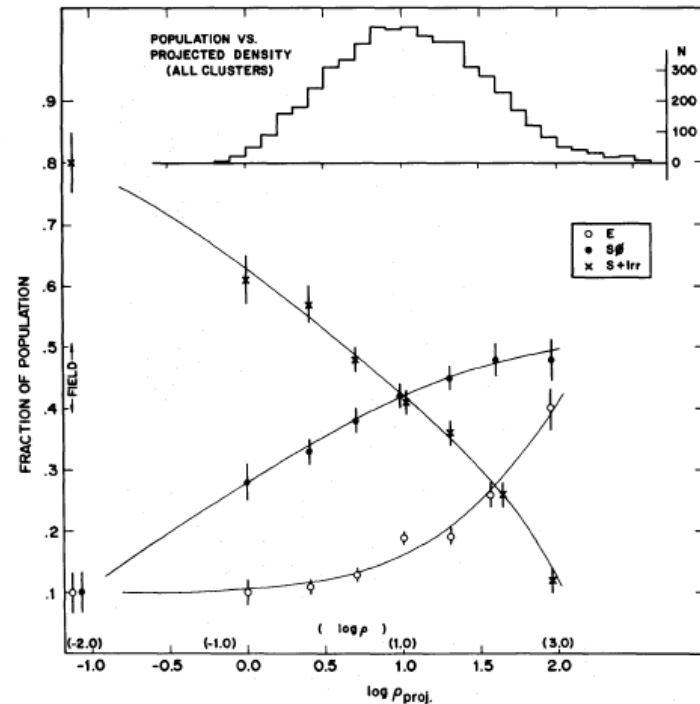


FIG. 4.—The fraction of E, S0, and S+I galaxies as a function of the log of the projected density, in galaxies  $\text{Mpc}^{-2}$ . The data shown are for all cluster galaxies in the sample and for the field. Also shown is an estimated scale of true space density in galaxies  $\text{Mpc}^{-3}$ . The upper histogram shows the number distribution of the galaxies over the bins of projected density.



# Mahdollisia selityksiä morfologia-tiheys relaatiolle

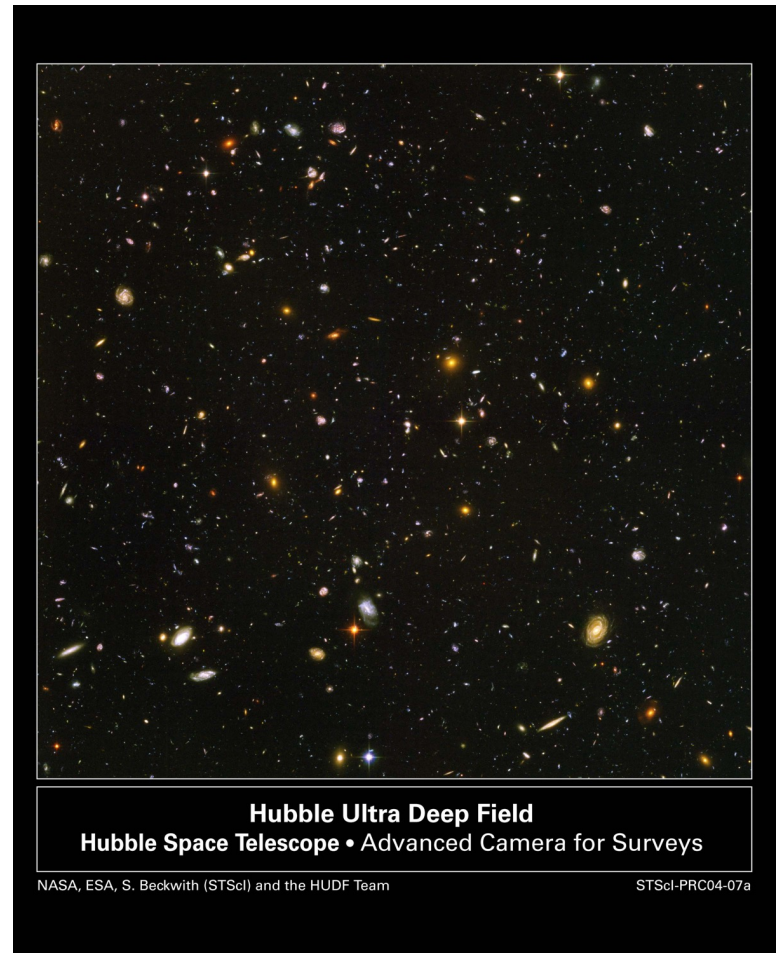
---

- Ellipsigalaksit muodostuivat lyhyessä ajassa alueilla jossa oli suurin mahdollinen tiheys ja ne kasvavat nopeasti törmäysten kautta lyhyessä ajassa.
- Spiraalit muodostuivat hitaammin ja todennäköisesti pienemmän tiheyden alueilla. Epäsäännölliset galaksit ovat vielä tänä päivänäkin 'muodostumassa' entistäkin pienemmän tiheyden alueilla.
- Linssimäiset S0-galaksit saattavat olla entisiä spiraaligalakseja jotka ajautuivat galaksijoukkoihin, joukoissa on paljon hyvin kuumaa kaasua, jonka läpi kulkiessaan galaksit menettävät oman kaasunsa, S->S0.



# Galaksimorfologian kehitys

- Pienillä punasiirtymillä ( $z < 1$ ) galaksien morfologiat muistuttavat paikallisia galakseja.
- Suurilla punasiirtymillä ( $z > 2$ ) tilanne muuttuu dramaattisesti ja epäsäännöllisten ja vuorovaikuttavien galaksien määrä kasvaa voimakkaasti.
- Syy tähän on galaksien välisten törmäysten yleisyyden nopea kasvu punasiirtymän funktiona:  
 $\propto (1+z)^m$ ,  $m=3-4$ , koska galaksit olivat aikaisemmin lähempänä toisiaan pienemmässä maailman-kaikkeudessa.

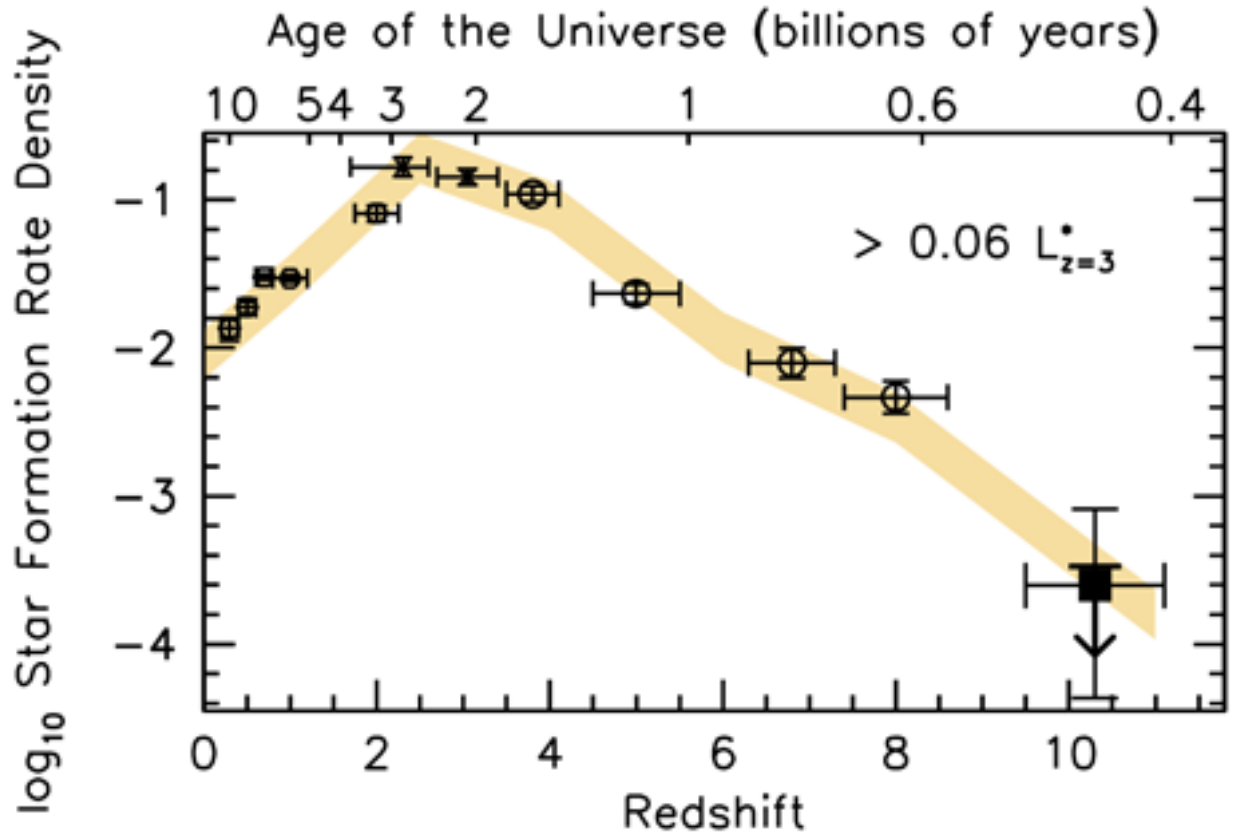






# Maailmankaikkeuden tähtien syntyhistoria

- Tähtien synty-nopeus kasvoi tasaisesti punasiirtymältä  $z=10$  punasiirtymälle  $z=1-2$ , jonka jälkeen se on vähentynyt noin kertoimella 10.
- Huom. Tähtien syntynopeus hyvin suurilla punasiirtymillä on edelleen melko epäselvä.



y-akselin yksikkö on  $M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$



# Tutkimuspointti – Galaxy Zoo

- Suuret taivaan kartoitukset tuottavat kuvia miljoonista galakseista. Ammattitutkijoilla ei ole aikaa luokitella kaikkia galakseja, joten suurta yleisöä on pyydetty apuun.
- Morfologiset luokittelut perustuvat monen kymmenen käyttäjän keskiarvoon, kymmeniä miljoonia galakseja luokiteltu, mutta mukaan ehtii vielä!



- [Invert galaxy image](#)
- [Add to my favourites](#)

## Classify galaxies

Answer the question below using the buttons provided.

Is the galaxy simply smooth and rounded, with no sign of a disk?



Smooth



Features or disk



Star or artifact

<https://www.zooniverse.org/projects/zookeeper/galaxy-zoo/>



# Mitä opimme?

---

1. Galaksin määritelmä: Suuri tähdistä, kaasusta ja pölystä muodostunut järjestelmä joka sijaitsee pimeän aineen halossa.
2. Perinteinen galaksiluokittelu perustuu havaittuun optiseen morfologiaan, tärkeimmät luokat ovat ellipsigalaksit (E), linssimäiset galaksit (S0), spiraaligalaksit (S) sekä epäsäännölliset galaksit (Irr).
3. Ellipsigalaksien pintakirkkaus voidaan mallintaa Sérsic-funktiolla ja kiekkoagalaksien valo eksponenttifunktiolla.
4. Galaksien morfologia muuttuu sekä ympäristön että ajan, eli punasiirtymän funktiona.