



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2023

E207 Physicum

Luento 7: Ellipsigalaksit,
16/10/2023



Tällä luennolla käsitellään

1. Ellipsigalaksien fotometria. Mitkä ovat ellipsigalaksien luminositeetit ja pintakirkkaudet?
2. Miten määritellään ellipsigalaksien muoto ja minkälaista fotometristä hienorakennetta niissä esiintyy.
3. Miten tähdet liikkuvat ellipsigalakseissa ja voiko pyörimisliike selittää ellipsigalaksien litistyneisyyden?
4. Minkälaisista tähtipopulaatioista ellipsigalaksit koostuvat, mikä on niiden metalli- ja kaasupitoisuus ja onko ellipsigalakseissa pimeää ainetta ja supermassiivisia mustia aukkoja?
5. Vastaa soveltuvin osin: **S&G**: luvut 6.1-6.4



7.1 Ellipsigalaksien fotometria

- Ellipsigalaksit näyttävät päällisin puolin yksinkertaisilta järjestelmiltä. Niiden säännöllinen ellipsimainen rakenne antaa ymmärtää, että tähdet näissä galakseissa olisivat saavuttaneet hyvin sekoittuneen tasapainotilan, kuten ilmamolekyylit huoneessa, mutta erittäin pitkän relaksaatioajan takia tämä ei pidä paikkansa.
- Todellisuudessa tilanne on siis paljon monimutkaisempi. Ellipsigalaksien luminositeetit vaihtelevat voimakkaasti, osa galakseista pyörivät, kun toiset eivät pyöri käytännössä ollenkaan. Niiden muodot vaihtelevat järjestelmistä jotka ovat navoiltaan litistyneitä, järjestelmiin joissa on kolme eri akselia.
- Relaksaatioaika on hyvin pitkä galakseissa. Suurin osa tähdistä ovat kiertäneet galaksin keskustan ympäri vasta noin ~ 100 kertaa. Ellipsigalaksien tähtien nykyisistä radoista voidaan siis vielä päätellä jotain niiden alkuperäisestä syntyhistoriasta.



Ellipsigalaksien luminositeetit

- Maailmankaikkeuden kirkkaimmat galaksit ovat ellipsejä, mutta myös kaikkien himmeimmät galaksit ovat ellipsejä (niin kutsutut kääpiösferoidaalit, katso luento 10).
- Havaitsemalla galaksin luminositeetin määrittelemme samalla sen perusominaisuudet.
- 1. cD jättiläisellipseillä $L \geq 2-3L^*$, missä $L^* \approx 2 \times 10^{10} L_{\odot}$. Näissä galakseissa on hyvin paljon 'ylimääräistä' valoa galaksin ulkosissa ja ne sijaitsevat tyypillisesti galaksijoukkojen keskustoissa.
- 2. Kirkkailla jättiläisellipseillä: $M_B \approx -20$.
- 3. Keskikokoisilla ellipseillä: $M_B \leq -18$ ($L \geq 3 \times 10^9 L_{\odot}$)
- 4. Kääpiö-ellipseillä $L \leq 3 \times 10^9 L_{\odot}$. Nämä galaksit jaetaan hyvin harvinaisiin kompakteihin ellipsigalakseihin (esim. M32) ja hyvin heikkovaloisiin kääpiösferoidaaleihin (dSph).



Ellipsigalaksien iso-footteja

- Ellipsigalaksien Hubblen luokka riippuu siitä missä kulmassa havaitsemme galaksia.
- Havainnoista saamme vain 2D-valojakauman ja 3D-valojakauma pitää yleensä päätellä teoreettisia malleja käyttäen.
- Luokittelussa E_n , missä $n=10(1-b/a)$ kertoo galaksin näennäisen litistyneisyyden.

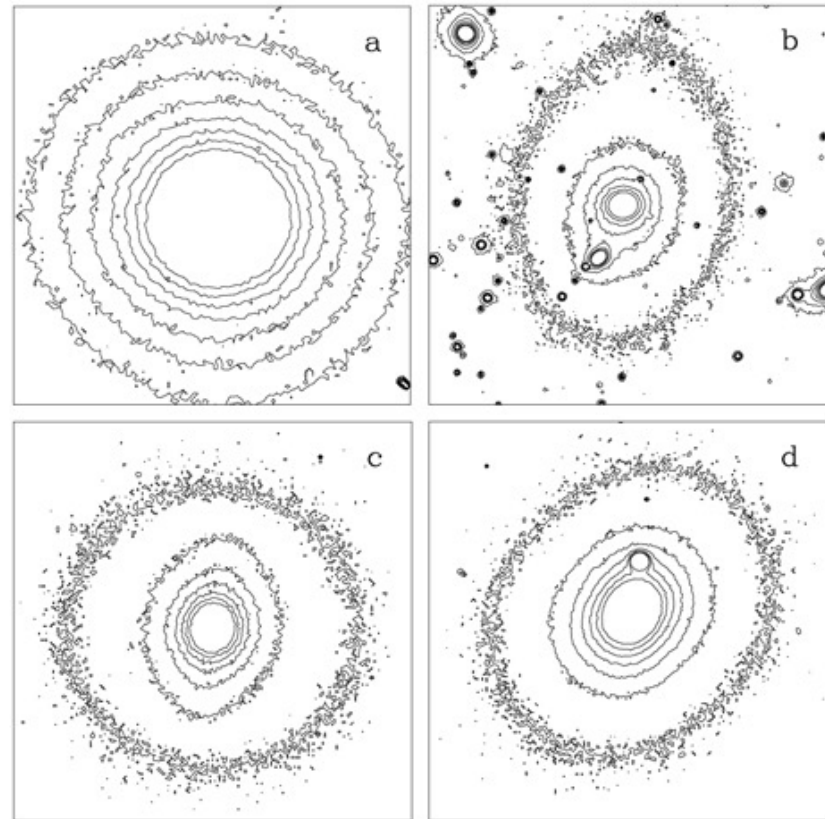


Fig 6.1 (R. de Jong) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Ellipsigalaksien pintakirkkaus-profiilit

- Ellipsigalaksien pintakirkkaus-profiilit voidaan yleisesti sovittaa Sérsic-profiililla:

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

- Vakio k valitaan niin että efektiivisen säteen, r_e :n sisäpuolelle jää puolet galaksin kokonaisvalosta.
- Kun $n > 1$, vakio $k \approx 1.999n - 0.327$.
- Sérsic-profiili toimii hyvin varsinkin kirkkaille ellipsigalakseille. Tyypillisesti kirkkailla ellipsigalakseilla on suuri n , himmeillä on tyypillisesti pienempi n .

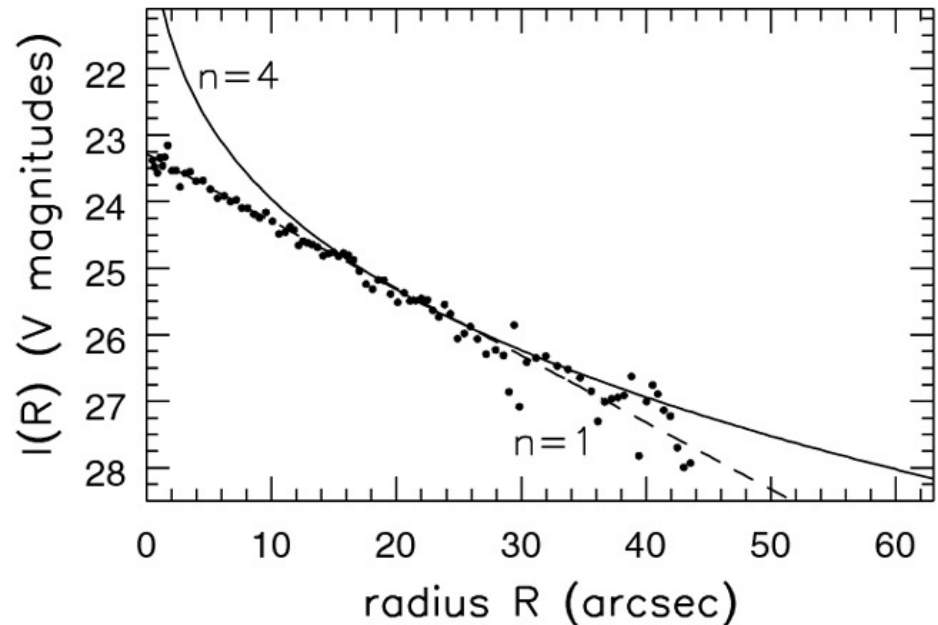


Fig 6.2 (H. Jerjen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Epäsymmetriat pintakirkkaudessa

- Pitkän valotuksen valokuvista voidaan havaita että useiden ellipsigalaksien ulko-osissa on heikkoa kuorimaista rakennetta (eng. shell structure).
- Erilaiset epäsymmetriat pintakirkkaudessa antavat viitteitä siitä, että nämä galaksit ovat olleet osallisina galaksitörmäyksissä.

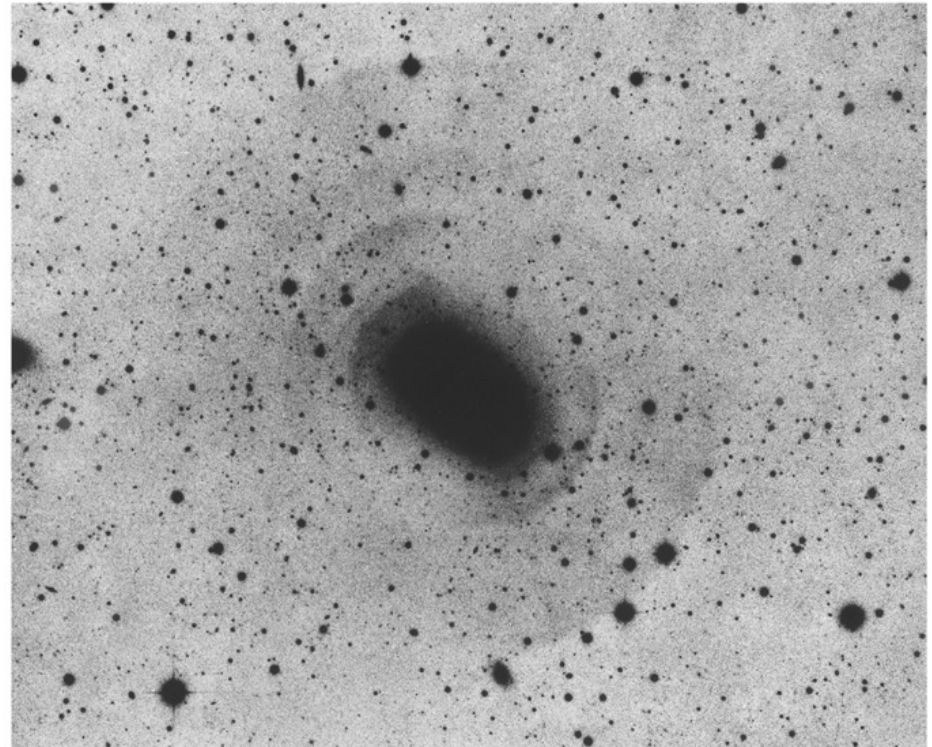


Fig 6.5 (D. Malin) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Ellipsigalaksien ydinalueiden pintakirkkaudet

1. 'Core'-ellipseissä ytimen pintakirkkaus on lähes vakio (puuttuvaa keskusvaloa). Nämä galaksit ovat yleensä hyvin massiivisia ja niiden keskustoissa on massiivinen musta aukko.
2. 'Cusp'-ellipseissä ytimen pintakirkkaus on hyvin suuri (liikaa keskusvaloa). Nämä galaksit ovat yleensä pienimassaisempia ja ne pyörivät core-ellipsejä nopeammin.

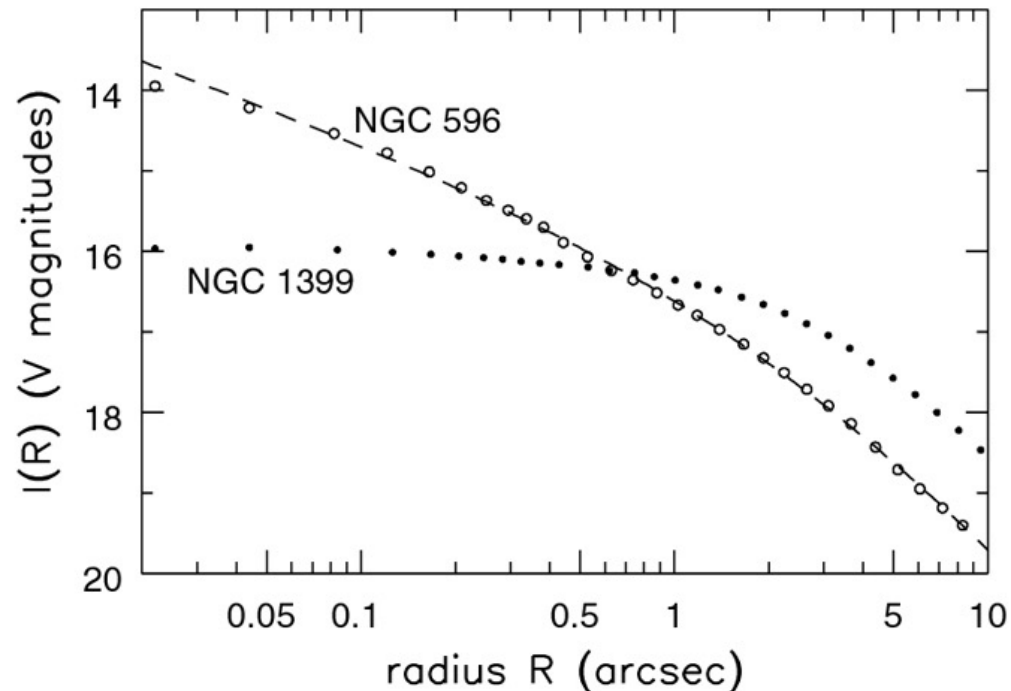


Fig 6.7 (T.Lauer) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Pintakirkkaus-magnitudi-säde relaatio

- Ellipsigalakseissa keskustan pintakirkkaus riippuu käänteisesti galaksin kokonaiskirkkaudesta. Mitä kirkkaampi galaksi sitä pienempi keskustan pintakirkkaus on.
- Galaksien puolivalo-säteet riippuvat myös suoraan keskustan pintakirkkaudesta empiirisen Kormendyn relaation mukaisesti:

$$I_{B,\text{eff}} = 3.02 \log r_{\text{eff}} + 19.74$$

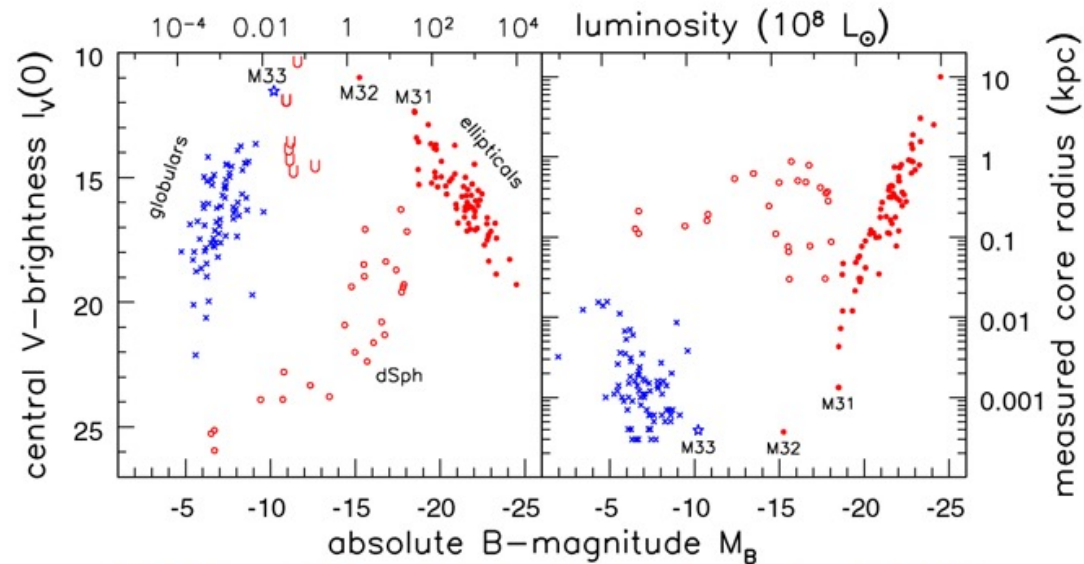


Fig 6.6 (Kormendy, Philipps) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



7.2 Ellipsigalaksien muoto I

- Ellipsigalaksien muoto riippuu katselukulmasta. Oletetaan että ellipsigalaksi on navoilta litistynyt sferoidi (eng. oblate spheroid):

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \quad m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2}$$

- $A \geq B > 0$. Ellipsin tangentti pisteessä $T (-x, z)$:

$$\tan i = dx/dz = -(z/x)(A^2/B^2)$$

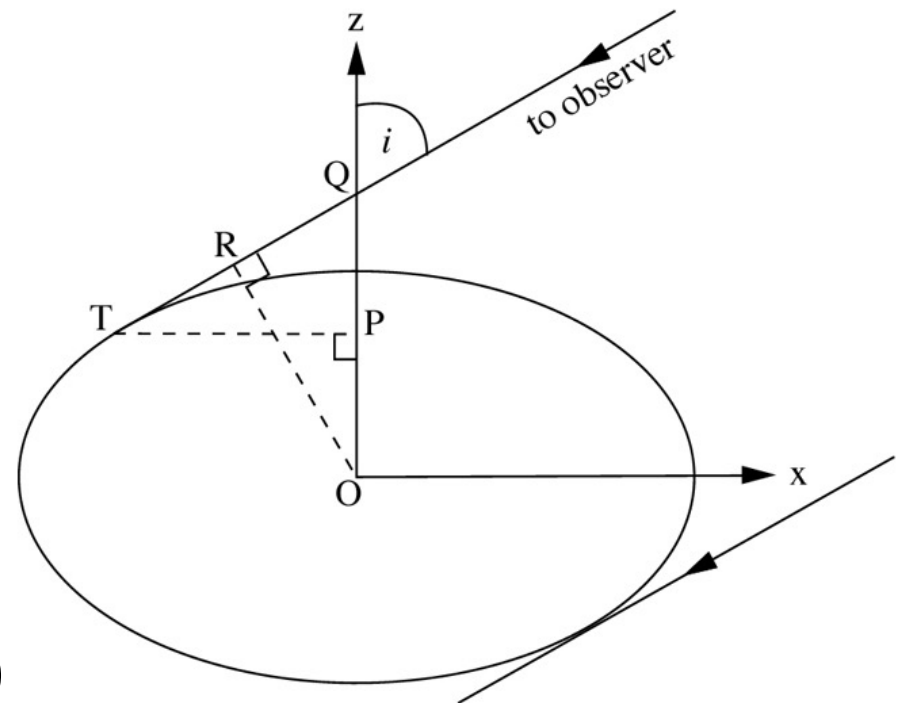


Fig 6.8 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Ellipsigalaksien muoto II

- Elliptisen kuvan isoakseli on $a=mA$ ja pikkuakseli $b=OR=OQ \sin i$:

$$OQ = OP + PQ = z + (-x) \cot i = B^2 m^2 / z$$

- Suhde q havaitun pikku- ja isoakselin välillä on:

$$q_{\text{obl}} = \frac{b}{a} = \frac{OQ \sin i}{mA} = \frac{B^2 m}{zA} \sin i = \left[\frac{B^2}{A^2} + \cot^2 i \right]^{1/2} \sin i$$

- Tässä on käytetty m :n määritelmää ja lopuksi saadaan:

$$q_{\text{obl}}^2 = (b/a)^2 = (B/A)^2 \sin^2 i + \cos^2 i$$

- Havaittu litistyneisyys $q=(b/a)$ ei voi koskaan olla suurempi kuin todellinen litistyneisyys (B/A) . **Huom.** suurilla q :n arvoilla galaksi on vähemmän litistynyt, eli $q=b/a \geq B/A$.



Keskimääräinen litistyneisyys

- Satunnaisesta suunnasta havaitsemalla kulman i ja $i+\Delta i$ välillä havaitaan $\sin i$ kertaa Δi osuus kaikista galakseista. Joten jos kaikki galaksit ovat navoilta litistyneitä ja niiden todellinen akselien suhde on B/A voidaan osuus $f_{\text{obl}}\Delta q$, joiden näennäinen akselien suhde on välillä q ja $q+\Delta q$, laskea kaavasta:

$$f_{\text{obl}}\Delta q = \frac{\sin i \cdot \Delta q}{|dq/di|} = \frac{q\Delta q}{\sqrt{1 - (B/A)^2} \sqrt{q^2 - (B/A)^2}}$$

- Tulokset ovat melko lähellä tasajakaumaa, kaikki arvot $q > B/A$ suunnilleen yhtä todennäköisiä. Havainnoista nähdään että suurin litistyneisyys on E7, joka vastaa $q=0.3$ ja suurimmalla osalla ellipsigalakseista on $q \approx 0.75$, eli $0.55 \leq B/A \leq 0.7$.



Havaittu litistyneisyys

- Kirkkaimmat ellipsigalaksit ovat tyypillisesti pyöreämpiä $q \approx 0.85$, mutta suurin osa niistä on todennäköisesti triaksaalisia:

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \quad m^2 = \frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} + \frac{z^2}{C^2}$$

- Triaksaalisessa galaksissa on kolme eri riippumatonta akselia A, B, C, jonka ympäri tähdet voivat liikkua.

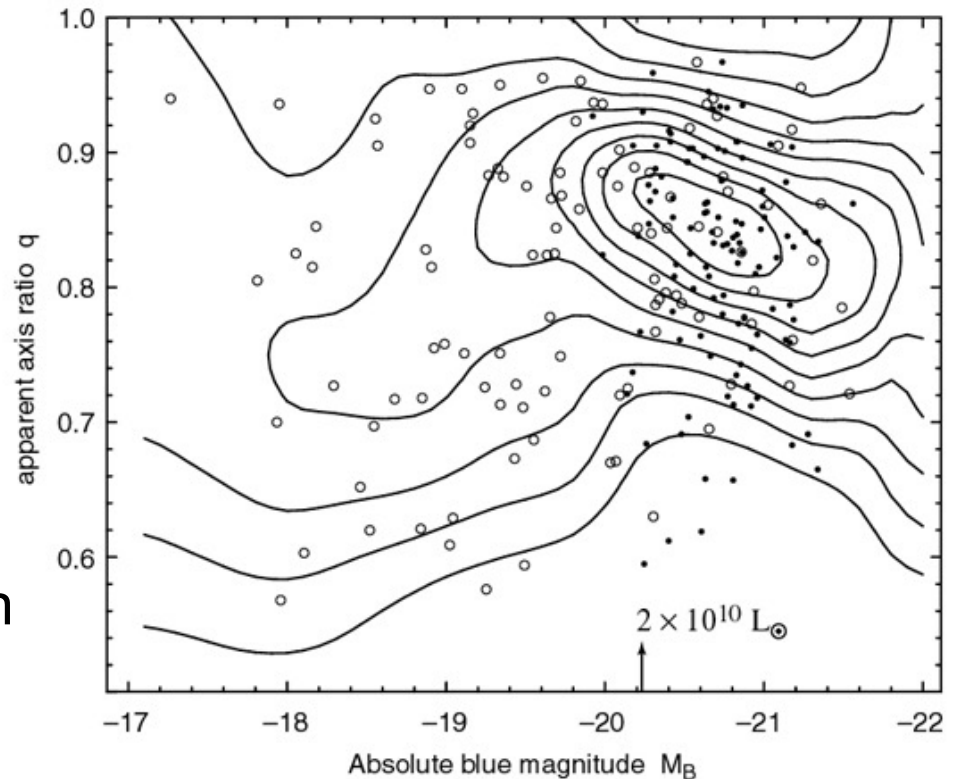


Fig 6.9 (Tremblay & Merritt) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Fotometrinen hienorakenne I

- Elliptisten galaksien sisällä iso-foottien litistyneisyys voi vaihdella säteen funktiona (isophotal twist) ja tällaisessa tapauksessa galaksi ei voi olla puhdas pyörähdysellipsoidi, vaan sillä täytyy olla triaksaalinen muoto.
- Yleinen tapa tarkastella poikkeamia ellipsimuodosta on sovittaa funktio joka kuvaa etäisyyseroa $\Delta r(t)$ isofoottien ja täydellisen ellipsin välillä:

$$\Delta r(t) = \sum_{k \geq 3} a_k \cos kt + b_k \sin kt$$

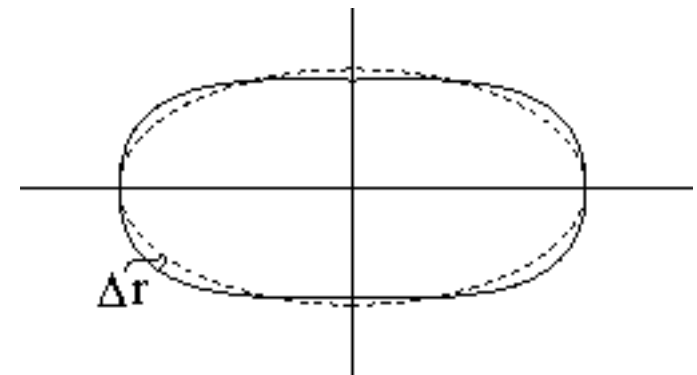
- Sarjan termit $k=0, 1, 2$ kaikki katoavat koska olemme valinneet parhaan ellipsisovituksen, myös a_3, b_3 ja b_4 ovat pieniä mutta a_4 tekijä ei ole pieni.



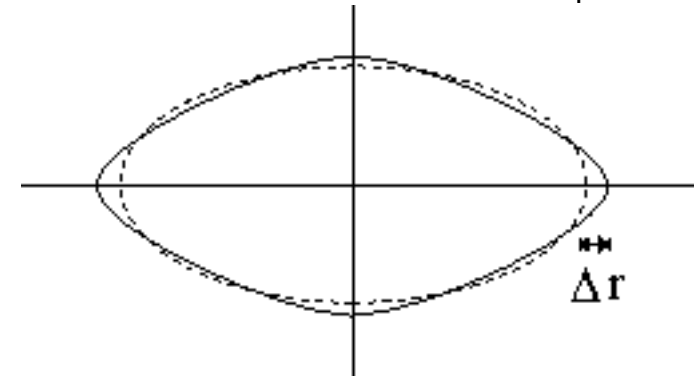
Fotometrinen hienorakenne II

1. Galaksia jolla $a_4 < 0$ kutsutaan laatikkomaiseksi (eng. boxy). Nämä galaksit ovat tyypillisesti hyvin kirkkaita ja niissä litistyneisyys voi vaihdella säteen funktiona. Nämä galaksit pyörivät usein hitaasti ja niissä esiintyy usein voimakasta röntgen- ja radioemissiota.
2. Galaksia jolla $a_4 > 0$ kutsutaan kiekkomaiseksi (eng. disky). Nämä galaksit pyörivät usein verrattain nopeasti ja ne ovat yleensä keskikokoisia. Niissä esiintyy myös vähemmän röntgenemissiota.

'Laatikkomainen' $a_4 < 0$



'Kiekkomainen' $a_4 > 0$





7.3 Tähtien liike ellipsigalakseissa

- Ellipsigalakseissa tähdet eivät tyypillisesti noudata järjestäytyntä rotaatio-liikettä.
- Ellipsigalakseissa $v_{\text{rot}}/\sigma \leq 1$, kun se on spiraaligalakseissa $v_{\text{rot}}/\sigma \geq 10$.
- Suurin osa valosta tulee G- ja K-tyypin jättiläistähdistä ja tutkimalla E-galaksin spektriviivoja, voimme tehdä päätelmiä tähtien liikkeistä niissä.

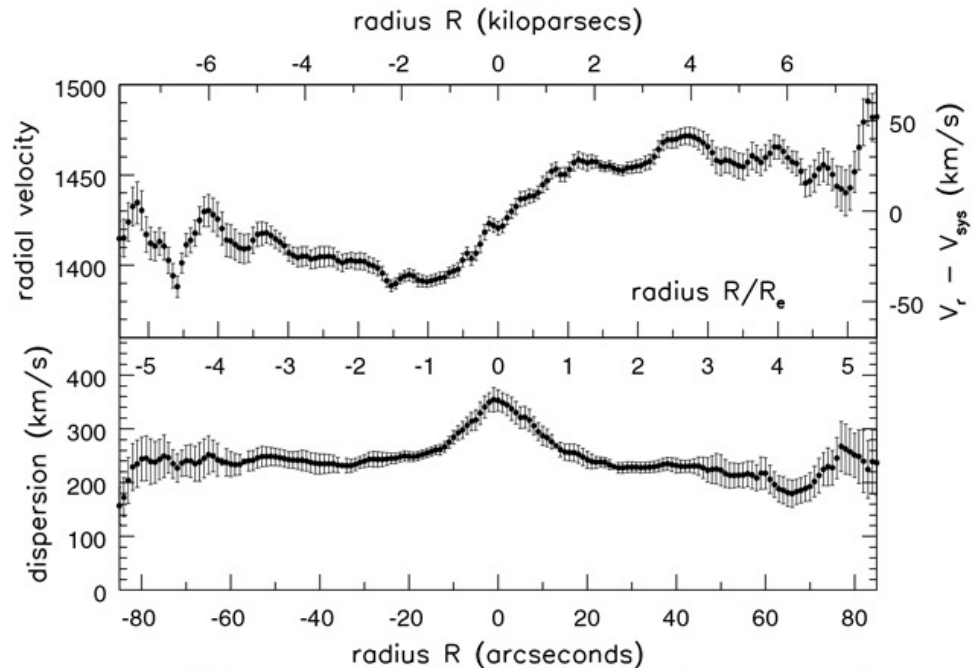


Fig 6.12 (A. Graham) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Havaitut säteen suuntaiset radiaali-nopeudet (ylhäällä) ja nopeusdispersio (alhaalla) galaksille NGC 1399.



Tensoriviriaali-teoreema

- Skalaariviriaali-teoreeman lisäksi, joka johdettiin luennolla 3, voimme johtaa tensoriviriaali-teoreeman.

$$\frac{d}{dt}(m_\alpha \mathbf{v}_\alpha) = - \sum_{\beta, \alpha \neq \beta} \frac{Gm_\alpha m_\beta}{|\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta|^3} (\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta)$$

- Kerrotaan tämän yhtälön z-komponentti z_α koordinaatilla ja sitten vastaavasti z_β koordinaatilla -> viriaalteoreema z-suunnassa:

$$\sum_{\alpha} \frac{d}{dt}(m_\alpha v_{z,\alpha}) z_\alpha = - \sum_{\alpha, \beta, \alpha \neq \beta} \frac{Gm_\alpha m_\beta}{|\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta|^3} (z_\alpha - z_\beta) z_\alpha$$

$$\sum_{\beta} \frac{d}{dt}(m_\beta v_{z,\beta}) z_\beta = - \sum_{\alpha, \beta, \alpha \neq \beta} \frac{Gm_\alpha m_\beta}{|\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta|^3} (z_\beta - z_\alpha) z_\beta$$

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I_{zz}}{dt^2} = 2E_{k,zz} + E_{p,zz} \Rightarrow 2\langle E_{k,zz} \rangle + \langle E_{p,zz} \rangle = 0$$



Ellipsigalaksien pyörimisnopeus I

- Tensoriviriaali-teoreeman mukaan kokonais-potentiaali ja kineettisen energian lisäksi, myös x-, y- ja z-akselin suuntainen kineettinen ja potentiaali-energia tulee olla erikseen tasapainossa.
- Tarkastellaan aksisymmetristä ellipsigalaksia joka pyörii z-akselin ympäri. Olettamalla että pyörimisnopeus V_{rot} , sekä nopeusdispersiot σ_x ja σ_z ovat vakioita galaksissa saadaan:

$$\frac{\langle E_{p,zz} \rangle}{\langle E_{p,xx} \rangle} = \frac{\langle E_{k,zz} \rangle}{\langle E_{k,xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2}V_{\text{rot}}^2 + \sigma_x^2}$$

- Voidaan osoittaa, että potentiaali-energioiden x-z suuntainen suhde riippuu vain galaksin elliptisyydestä: $\frac{\langle E_{p,zz} \rangle}{\langle E_{p,xx} \rangle} \approx (B/A)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}$



Ellipsigalaksien pyörimisnopeus II

- Todellinen pyörimisnopeus V on suurempi kuin mitattu maksiminopeus (V_{\max}), koska tähdet liikkuvat myös sivuttaissuunnassa, $V_{\max} \approx \pi V/4$.
- Mikäli E-galaksien litistyneisyys johtuisi pyörimisestä galaksien tulisi sijaita lähellä katkoviivaa.
- Isotrooppiselle nopeusjakaumalle saadaan:

$$\left(\frac{V_{\max, \text{rot}}}{\sigma} \right) = \left(\frac{V_{\text{rot}}}{\sigma} \right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \approx \sqrt{\epsilon/(1 - \epsilon)}$$

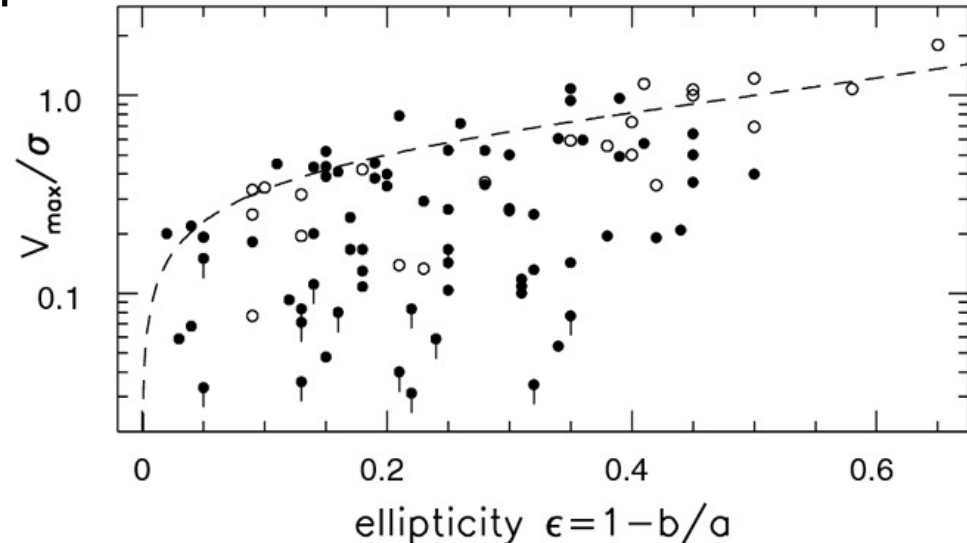


Fig 6.14 (R. Bender) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Pyörimisnopeuden yhteys fotometriaan

- Kiekkomaiset ellipsigalaksit pyörivät suhteellisen nopeasti ja niiden litistynyt muoto voi olla osittain pyörimisestä johtuvaa.
- Laatikkomaiset ellipsigalaksit ovat hyvin kirkkaita ja pyörivät hyvin hitaasti. Havaittu litistyneisyys ei voi johtua pyörimisestä vaan sen sijaan sen on seurausta nopeus-anisotropiasta.

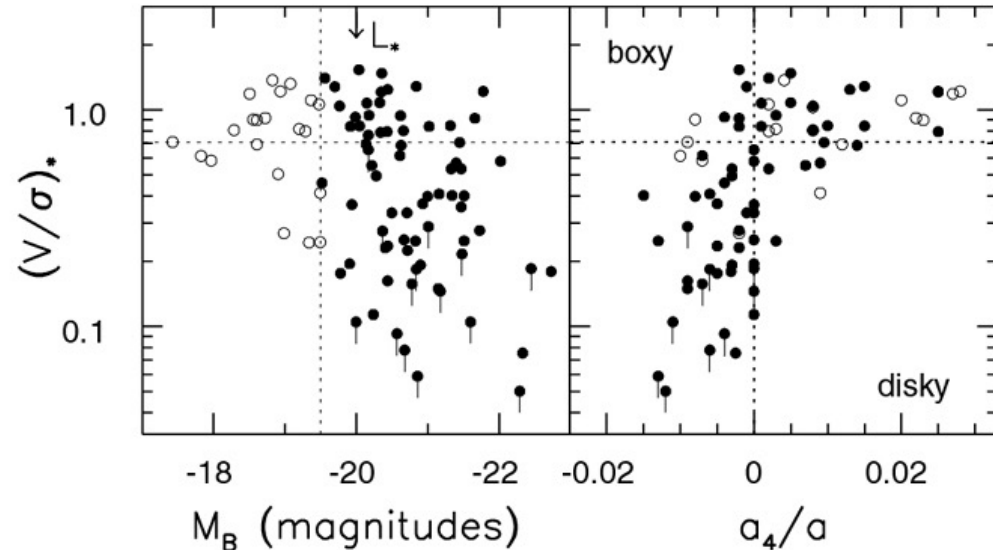


Fig 6.15 (R. Bender) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

$$\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$$



Ratoja triaksiaalisessa potentiaalissa

- Esimerkki triaksiaalisesta potentiaalista

$$\Phi_L(x, y) = \frac{1}{2}v_0^2 \ln \left[R_c^2 + x^2 + \frac{y^2}{q^2} \right]$$

1. Loop-radat muistuttavat spiraaligalaksien tähtien ratoja, L_z rajoittaa liikettä (vasen-ylärivi).
2. Box-radoilla tähdet voivat liikkua galaksin keskustan läpi. (oikea-ylärivi).
3. Kaaottisella radalla, jopa liikkeen suunta voi muuttua vastakkaiseksi (vasen-alarivi).

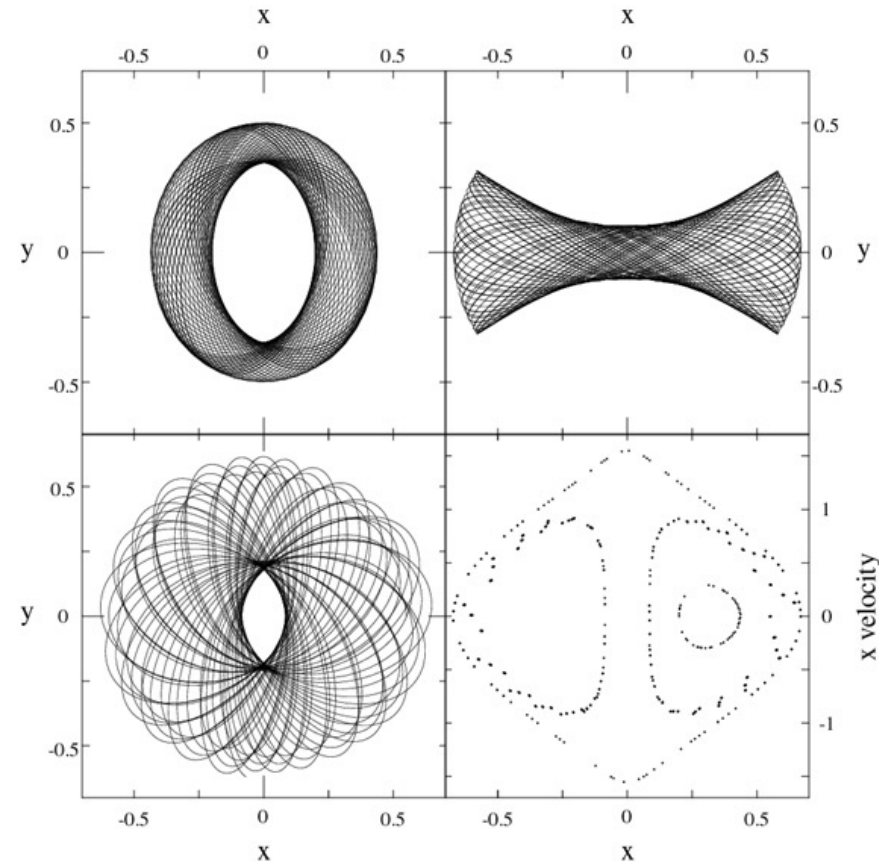


Fig 6.16 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Faber-Jackson ja fundamentaali-relaatiot

1. Faber-Jackson relaatio:

$$\frac{L_V}{2 \times 10^{10} L_\odot} \approx \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4$$

2. Fundamentaali-relaatio joka yhdistää säteen, nopeusdispersion ja pintakirkkauden:

$$R_e \propto \sigma^{1.24} I_e^{-0.82}$$

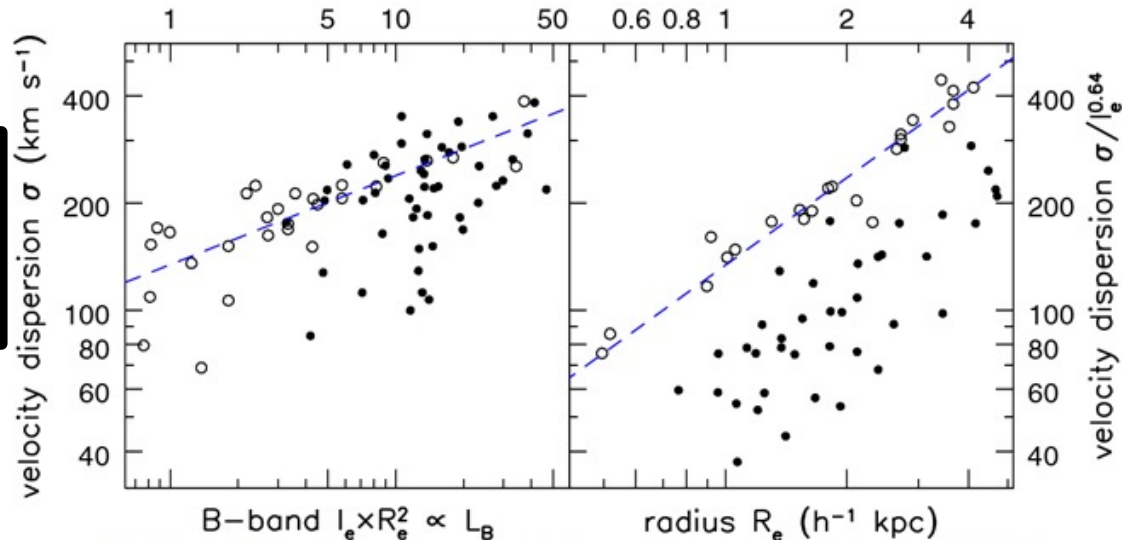


Fig 6.13 (T. Treu) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Empiiriset relaatiot ovat hyvin tärkeitä, koska niitä voidaan käyttää etäisyyssmittauksissa ja ne asettavat reunaehdoja ellipsigalaksien syntyteorioille.



7.4 Tähtipopulaatiot, kaasuu ja pimeä aine

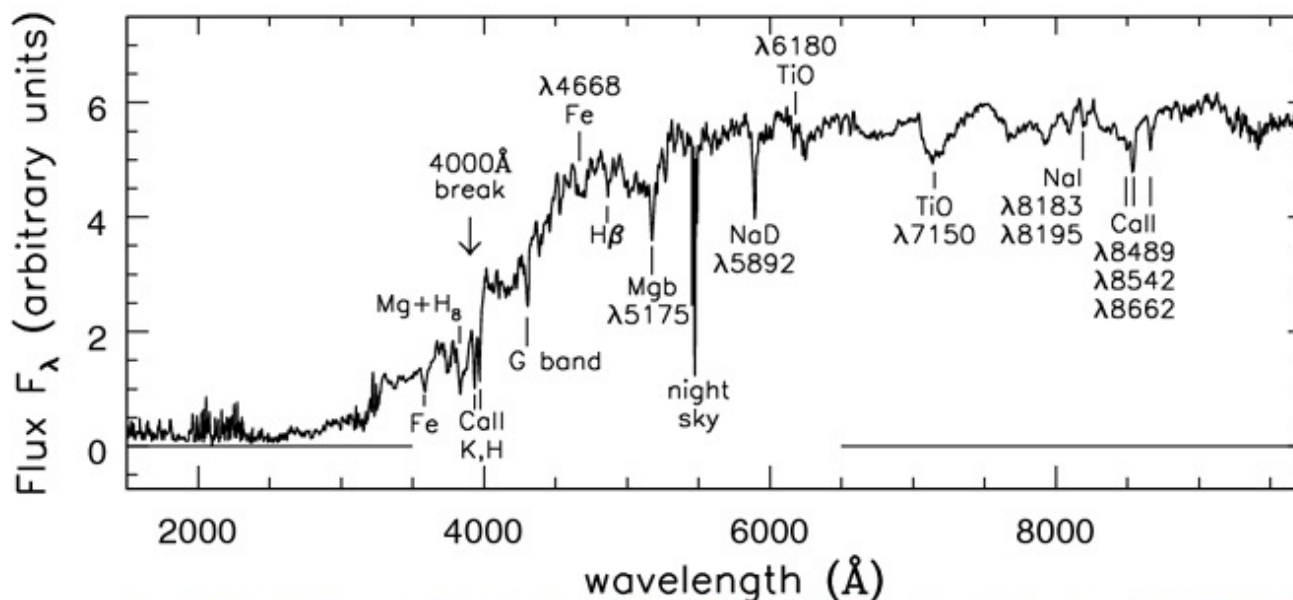


Fig 6.17 (A. Kinney) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Ellipsigalakseissa ei ole käytännössä ollenkaan nuoria massiivisia sinisiä tähtiä. Valoa dominoi K- ja M-tyypin punaiset jättiläistähdet ja tästä seurauksena on vahvat ja selkeät absorptioviivat.



Väri-magnitudi diagrammat

- Kirkkaammat E-galaksit ovat punaisempia kuin himmeämmät galaksit.
- E-galaksien metallipitoisuus on myös verrattain korkea (vastaa tyypillisesti 1-2x Auringon pitoisuutta).
- Kirkkaimmissa galakseissa metallipitoisuus on korkeampi ja ytimen metallipitoisuus on ulko-osia korkeampi.

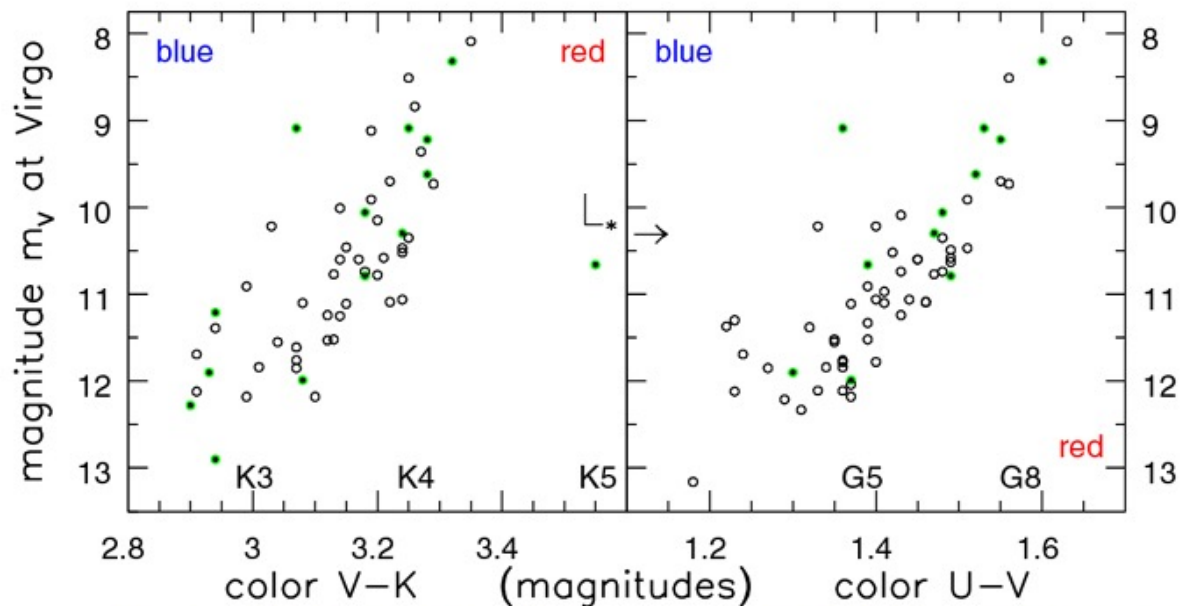


Fig 6.19 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Keskimääräiset tähtipopulaatiot ovat hyvin vanhoja, vähintään noin 10 miljardia vuoden ikäisiä.



Ellipsigalaksien kaasupitoisuus

- Ellipsigalakseissa on tyypillisesti hyvin vähän kylmää kaasua, $\sim 10^8$ - $10^9 M_{\odot}$ ja täten hyvin vähän tähtien syntyä.
- Sen sijaan ellipsigalakseissa on paljon hyvin kuumaa ionisoitunutta kaasua 10^9 - $10^{11} M_{\odot}$, joka on karannut jättiläistähtien atmosfääreistä.

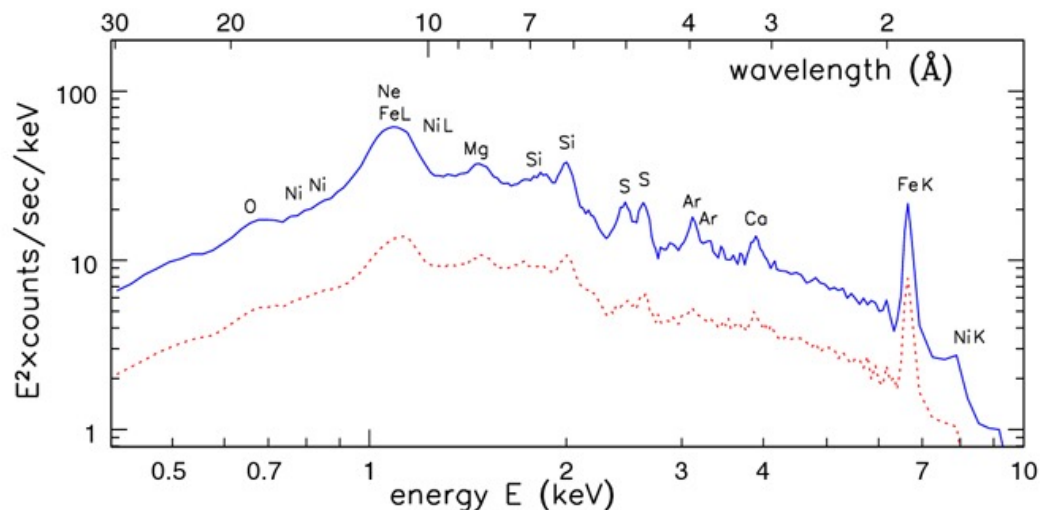


Fig 6.21 (K. Matsushita) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Ellipsigalaksien kuuma kaasu ($T \approx 1$ - 3×10^7 K) voidaan havaita röntgen-alueella. Vähäisen kylmän kaasun takia tähtiensyntyaktiivisuus on tyypillisesti hyvin vähäistä.



Ellipsigalaksien pimeä aine

- Ellipsigalaksien tähtipopulaatioiden perusteella massa-valo suhteen tulisi olla noin $3 \leq M/L \leq 5$, eli tällöin tähtien kokonaismassa olisi $10^9 M_{\odot} \leq M_* \leq 10^{12} M_{\odot}$.
- 1. Pimeää ainetta voidaan havaita tutkimalla kylmän kaasun liikettä niissä muutamassa E-galaksissa jossa kylmää kaasua on -> $M/L \approx 10-20$.
- 2. Planetaaristen sumujen liikkeitä suurilla etäisyyksillä voidaan tutkia -> $M/L \approx 80$.
- 3. Tutkitaan suoraan kuumaa kaasua joka lähettää röntgen-säteilyä olettamalla että kaasu on hydrostaattisessa tasapainossa -> $M/L \approx 100$. -> Ellipsigalakseissa on hyvin paljon pimeää ainetta!



Mustat aukot Ellipsigalakseissa

- Tutkimalla tähtien liikettä hyvin lähellä galaksien ytimiä huomataan että useimmat galaksit vaativat ylimääräistä massaa noin 20 pc sisäpuolella.
- Käytännössä kaikissa hyvin tutkituissa ellipsigalaksien keskustoissa on supermassiivinen musta aukko.

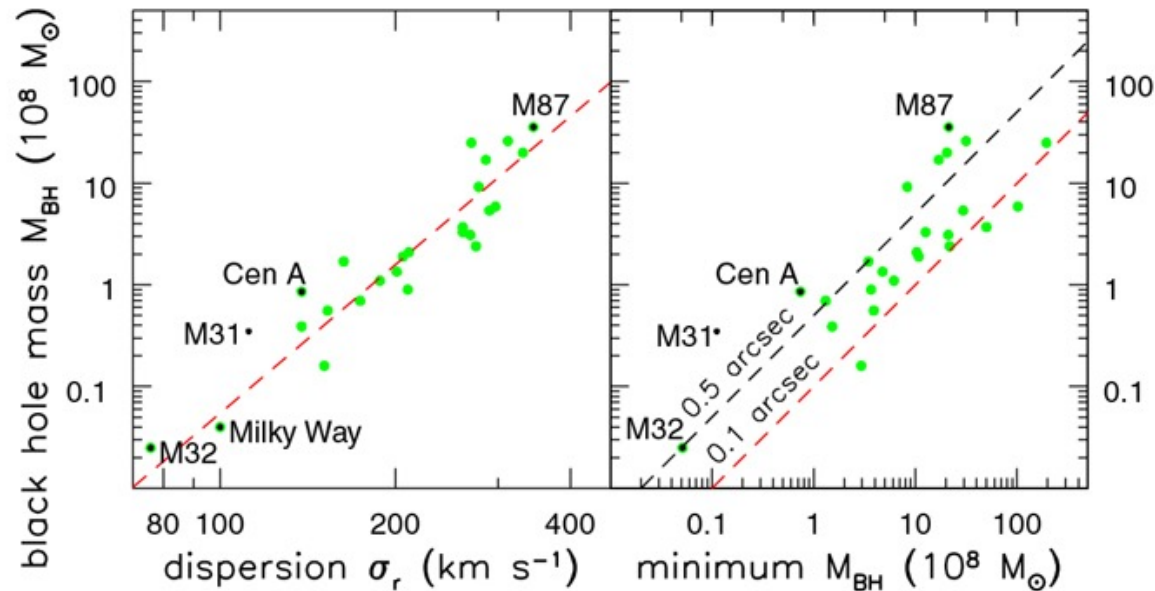


Fig 6.23 (L. Ferrarese) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Mustan aukon massa on verrannollinen keskuspullistuman massaan (eli nopeusdispersioon vasemmassa plotissa), mitä massiivisempi galaksi sitä massiivisempi musta aukko.



Mitä opimme?

1. Ellipsigalaksien pintakirkkausprofiili voidaan sovittaa Sérsic-profiililla ja mitä kirkkaampi ellipsigalaksi sitä pienempi sen keskustan pintakirkkaus on.
2. Ellipsigalaksit ovat joko navoilta litistyneitä sferoideja (oblate, keski-kirkkaat) tai triaksiaalisia systeemejä (kirkkaimmat ellipsigalaksit).
3. Kiekkomaiset ellipsigalaksit pyörivät suhteellisen nopeasti ja pyöriminen voi osittain selittää niiden litistyneisyyden. Laatikkomaiset ellipsigalaksit pyörivät hyvin hitaasti ja niiden litistyneisyys voidaan selittää vain anisotrooppisella nopeusjakaumalla.
4. Ellipsigalaksien tähtipopulaatiot ovat keskimäärin hyvin vanhoja (10 Gyr) ja valoa dominoi K- ja M-tyypin punaiset jättiläistähdet. Ellipsigalaksien tähtiensyntyaktiivisuus on hyvin vähäistä.