



Kandidaatintutkielma
Tähtitiede

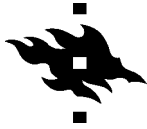
Ellipsigalaksien rakenne, synty ja kehitys

Vili Oja
2018

Ohjaaja: Peter Johansson
Tarkastaja: Peter Johansson

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto



Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Laitos – Institution– Department Fysiikan laitos
Tekijä – Författare – Author Vili Oja		
Työn nimi – Arbetets titel – Title Ellipsigalaksien rakenne, synty ja kehitys		
Oppiaine – Läroämne – Subject Tähtitiede		
Työn laji – Arbetets art – Level Kandidaatintutkielma	Aika – Datum – Month and year heinäkuu 2018	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 27
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Maailmankaikkeuden galaksit voidaan karkeasti jakaa kahteen pääluokkaan: ellipseihin ja spiraaleihin. Ellipsigalaksit ovat paljon monimuotoisempia systeemeitä kuin voisi aluksi luulla. Kaksi pääluokkaa isoille ellipsigalakseille ovat jättiläismäiset ellipsit ja keskiuuret ellipsit. Ellipsien koko ja kirkkaus korreloivat moniin eri ominaisuuksiin.</p> <p>Kirkkaat jättiläisellipsit ovat universumin kirkkaimpia kohteita, ne ovat hyvin hitaasti pyöriviä ja niiden rakennetta tukee lähinnä tähtien satunnaisliike, ei niinkään rotaatio. Nämä galaksit ovat muodoltaan lähinnä triaksiaalisia, ja niiden isofootit ovat laatikkomaisia. Niillä on myös yleensä melko pieni elliptisyys. Kirkkaiden ellipsien keskustat ovat melko laakeita, ja niiden keskuskirkkaus muuttuukin yleensä liki vakioiksi jollain säteellä. Näitä kutsutaan tämän takia core-ellipseiksi.</p> <p>Keski-kirkkailla ellipseilla on huomattavaa pyörimistä verrattuna niiden kirkkaampiin tovereihin. Tämän tyyppiset galaksit muistuttavat muodoltaan enemmän litteitä pyörähdysellipsoideja, ja niillä on kiekkomaiset isofootit. Elliptisyys vaihtelee paljon enemmän kuin kirkkaimmissa ellipseissa. Keskustat tämänkaltaisissa galakseissa ovat melko tiiviitä, ja niiden kirkkaus näyttää nousevan aina sisemmäs mentäessä. Tämän takia ne ovat saaneet nimeksi cusp-ellipsi.</p> <p>Ellipsigalaksien havaittu elliptisyys määrää niiden tyyppin Hubblen luokittelussa. Tämä vaihtelee melkein täysin pyöreistä E0 galakseista hyvin litteisiin E7 galakseihin. Ellipseissa on yleisesti melko vähän kylmää kaasua, mutta hyvin paljon kuumaa kaasua. Tämän takia niissä ei ole juuri tähtienmuodostusta. Suurin osa ellipsigalaksien valosta tuleekin punaisista jättiläisistä, ja niissä on vain vähän nuoria tähtiä. Ellipsigalakseissa on havaittu olevan pimeää ainetta ja mustia aukkoja, aivan kuten spiraaleissakin.</p> <p>Syntyteorioita ellipseille on historiallisesti ollut kaksi erilaista: massiivinen romahdus ja kahden spiraaligalaksin yhdistyminen. Nykyään massiivinen romahdus on melkein kokonaan suljettu pois, mutta pelkät spiraalien törmäykset eivät pysty yksin selittämään kaikkia havaittuja ellipseja. Todennäköisintä onkin, että osa ellipseista on syntynyt usean erilaisen törmäyksen kautta.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords tähtitiede, galaksit, ellipsigalaksit, galaksien kehitys, galaksien synty, galaksien rakenne		
Ohjaaja tai ohjaajat –Handledare – Supervisor or supervisors Peter Johansson		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Ellipsigalaksien rakenne	3
2.1	Yleisrakenne	3
2.2	Relaatiot	4
2.3	Isofoottien muotoja	5
2.4	Pimeä aine	7
2.5	Mustat aukot	10
3	Ellipsigalaksien syventävä teoria	12
3.1	Ehdotettuja syntyteorioita	12
3.1.1	Monoliittinen romahdus	13
3.1.2	Mergerit	15
3.2	Baryonisia prosesseja	19
4	Loppupäätelmät	21
	Viitteet	22

1 Johdanto

Galaksit ovat dynaamisesti sidottuja järjestelmiä, jotka koostuvat tähdistä, tähtien jäänteistä, kaasusta ja pölystä, ja jotka sijaitsevat pimeän aineen halojen keskellä. Ne ovat maailmankaikkeuden peruspalikoita, muodostaen galaksiryhmiä ja -joukkoja, universumin suurimpia näkyvän aineen rakenteita. Myös iso osa universumin tähtien muodostus tapahtuu niissä. Vallitseva tapa galaksien luokitteluun perustuu vanhaan Edwin Hubbleen esittämään ”äänirautamalliin”, jossa galaksit jaoteltiin varhaisen (ellipsit) ja myöhäisen (spiraalit) tyyppin galakseihin puhtaasti niiden optisen morfologian perusteella. Nimitykset ovat hieman harhaanjohtavia, sillä niillä ei ole mitään tekemistä galaksien todellisten muodostumisaikojen kanssa. Galaksit jaetaan siis elliptisiin, linssimäisiin, spiraaleihin sekä epäsäännöllisiin galakseihin.

Iso osa galaksitutkimuksesta on keskittynyt spiraaligalakseihin, kuten oma Linnuntamme, mutta myös ellipsigalaksit ovat hyvin kiehtovia kohteita. Vaikka ne saattavat näyttää yksinkertaisilta, sitä ne eivät todellisuudessa ole. Ne ovat hyvin monipuolisia: nämä galaksit voivat olla litteitä pyörähdysellipsoideja tai sitten triaksiaalisia kappaleita. Triaksiaalisissa galakseissa on nimensä mukaisesti kolme riippumatonta akselia joiden ympäri tähdet voiva pyöriä. Osa ellipseistä pyörii jonkin verran kun osa ei taas pyöri juuri yhtään. Täytyy kuitenkin huomioida, että kaikki ellipsigalaksit pyörivät paljon hitaammin kuin spiraalit. Spiraaligalakseissa pyörimisnopeuden ja nopeusdispersion suhde on tyypillisesti kokoluokkaa $v_{\text{rot}}/\sigma \sim 10 - 20$, kun taas suhteellisen nopeasti pyörivissä ellipseissä se on suuruusluokkaa $v_{\text{rot}}/\sigma \sim 1$, ja erittäin hitaasti pyörivissä ellipseissä vain $v_{\text{rot}}/\sigma \lesssim 0.1$. Nopeusdispersiolla tarkoitetaan jonkin joukon kappaleiden (kuten galaksin tähtien) nopeuksien tilastollista hajontaa niiden nopeuksien keskiarvon ympärillä.

Ellipsigalaksit ovat myös kirkkaudessaan universumin ääripäitä: kirkkaat jättiläisellipsit ovat maailmankaikkeuden valovoimaisimpia galakseja, kun taas kääpiöellipsoidit ovat erittäin himmeitä. Yhteistä näille on vain suurpiirteinen muoto ja se, että niissä ei ole juuri lainkaan viileää kaasua ja vain vähän nuoria tähtiä. Ellipsigalakseissa on suhteellisesti erittäin vähän kylmää kaasua, minkä takia uusien tähtien muodostusta ei juuri ole. Kuumaa ionisoitunutta kaasua on puolestaan suhteessa paljon enemmän.

Yleisesti voidaan sanoa, että ellipsigalaksit ovat lievästi litteitä, soikeita systeemejä joita tukee tähtien satunnaisliike. Kaikissa galakseissa tähdet liikkuvat omilla radoillaan, mikä tukee järjestelmää, estäen sitä romahtamasta kasaan. Spiraaligalakseissa tähdet liiku-

vat pääosin samaan suuntaan toistensa kanssa kiekon tasossa, joten voidaan sanoa, että tähtien rotaatio tukee niitä. Ellipsigalakseissa puolestaan tähdet eivät liiku mihinkään yhteen tiettyyn suuntaan, vaan ne voivat olla hyvinkin erisuuntaisilla radoilla matkalla ympäri galaksia. Täten sanotaan, että tähtien satunnaisliike tukee ellipsigalakseja.

Voimme määrittää galaksin elliptisyyden pintakirkkauden tasokäyrän eli isofootin isoakselin puolikkaan a ja pikkuakselin puolikkaan b suhteesta, kaavalla $\varepsilon = 1 - b/a$. Elliptisyys pysyy keskimäärin vakiona galaksin halki, joten galakseja voi luokitella Hubblen tyypeiksi En , missä $n = 10\varepsilon$. Tämä Hubblen tyyppi riippuu kuitenkin katselukulmasta, sillä osa ellipseistä on meitä kohti reuna edellä, kun taas osa näyttää litteän puolensa.

Kinematikan ja fotometrian perusteella ellipsigalakset voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: kirkkaat jättiläismäiset ellipsit, keskikokoiset ellipsit, ja kääpiöellipsit. Kun ellipsistä tiedetään sen kirkkaus, muut ominaisuudet voidaan saada selville melko helposti, sillä nämä ominaisuudet riippuvat kirkkaudesta.

Kirkkaille ellipseille ($M_B \lesssim -20.5$) tyypillistä ovat vähäinen pyöriminen, laatikkomaiset isofootit, pieni elliptisyys ($\varepsilon \lesssim 0.3$) ja suhteellisen loivat keskustan kirkkausprofiilit. Keskikirkkailla ellipseillä ($-20.5 \lesssim M_B \lesssim -18$) puolestaan pyöriminen tukee niiden rakennetta merkittävästi, niillä on kiekkomaisia isofootteja, elliptisyys vaihtelee enemmän ($\varepsilon \lesssim 0.7$) ja keskustan kirkkausprofileissa on jyrkkiä keskuspiikkejä. Himmeämmässä päässä ($M_B \gtrsim -18$) on kääpiöellipsejä ja kääpiösferoidaaleja. Niillä ei näytä olevan juurikaan pyörimistä ja niiden kirkkauskäyrät ovat kutakuinkin eksponentiaalisia. Massojen selville saamiseksi voimme hyödyntää viriaalteoreemaa. Se kertoo miten keskimäärin kiineellinen ja potentiaali-energia ovat tasapainossa. Mikäli galaksi on tasapainossa, voimme laskea tämän teoreeman avulla arvion massalle, kun tiedämme tähtien nopeudet.

Kun tutkailemme lähemmin galaksien keskusalueita, voimme huomata, että ellipsigalakseissa nopeusdispersio nousee keskelle mentäessä, ja tämän on yleisesti käsitetty johtuvan siitä, että keskustassa on supermassiivinen musta aukko, joka vaikuttaa voimakkaasti keskusalueen havaittaviin tähtiin. Ja kuten spiraaligalakseissa, myös ellipseissä on havaittu merkkejä pimeän aineen haloista. Epäsymmetriat ellipsigalaksien pinkakirkkauksissa antavat vihiä siitä, että ne ovat olleet osallisia galaksien törmäyksissä. Tämä kertoo mahdollisesta syntymekanismista.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään ensin yleisesti ellipsigalaksien rakennetta; ja ominaisuuksia, ja sitten syvemmin erinäisiä teorioita ellipsien synnylle.

2 Ellipsigalaksien rakenne

2.1 Yleisrakenne

Yksi erittäin keskeinen käsite ellipsigalakseista puhuttaessa on efektiivinen säde R_e , joka määritellään säteenä jonka sisällä on puolet galaksin kirkkaudesta. Tämä on hyödyllinen, sillä ellipsien valo jakautuu hyvin laajalle alueelle, joten niille on vaikea määrittää mitään selvää ulkoreunaa. Toinen tähän liittyvä käsite on eksponentiaalinen skaalasäde R_s , jolla intensiteetti putoaa e^{-1} -kertaiseksi. Toisin kuin spiraaleissa, ellipseissä keskustan kirkkaus on tiiviisti linkittynyt kokonaiskirkkauteen. Kirkkaissa ellipseissa pätee, että mitä kirkkaampi galaksi on, sitä matalampi sen keskustan kirkkaus on ja sitä leveämpi sen ydin on.

Voimme käyttää Sérsicin empiiristä kaavaa kuvaamaan galaksin valon jakautumista.

$$I(R) = I(R_e) \exp\{-b[(R/R_e)^{1/n}]\} , \quad (1)$$

missä n on niin sanottu Sérsic indeksi. Muuttuja b valitaan siten että R_e on tosiaankin efektiivinen säde. Jos $n > 1$, $b \approx 1.999n - 0.327$. Jos $n = 1$ on kyseessä yksinkertainen eksponentiaalinen muoto. Jos $n = 4$ on kyseessä niinsanottu de Vaucouleursin laki, joka kehitettiin vartavasten kuvaamaan ellipsigalaksien valokäyriä. Sérsicin yleinen muoto kehitettiin tämän pohjalta. Keskustan ulkopuolella $n = 4$ kuvaa pintakirkkautta melko hyvin kirkkailla, keskisuurilla ellipseilla, kun vertaamme teoriaa havaintoihin. Mikäli havainnointi tapahtuu maapallon pinnalta, ilmakehän epätasaisuuksien aiheuttamat häiriöt eli seeing kuitenkin vaikuttaa voimakkaasti siihen kuinka laadukkaita kuvia voimme saada keskustasta. Avaruudesta havainnoitaessa tätä ongelmaa ei tietenkään ole. Kirkkaimmilla galakseilla keskustojen kirkkaus muuttuu melkolailla vakioiksi jollain etäisyydellä. Himmeäimmissä galakseissa keskustan kirkkaus näyttää nousevan niin pitkälle kuin instrumentit pystyvät sitä seuraamaan. Isoimmille ja kirkkaimmille galakseille sopii paremmin muodot joissa n on isompi. Pienimmille $n \approx 1$ sopii melko hyvin (Sparke and Gallagher III, 2007).

Himmeimmät ellipsit jakaantuvat kahteen ryhmään: kompakteihin ellipseihin sekä kääpiö-ellipseihin ja -sferoidaaleihin. Kompakteilla on jonkin verran pyörimistä, kun taas kääpiö-ellipsit eivät pyöri merkittävästi. Kaikkein himmeimmissä kohteissa aiemmin mainittu

sääntö kirkkauden ja keskustan yhteydestä kääntyy pääläelle: niissä keskustankin kirkkaus on suhteessa erittäin alhainen.

Ellipseissä on paljon tähtienvälistä ainetta, mutta sillä on hyvin erilaiset ominaisuudet kuin spiraaligalakseissa. Kuuma ($\sim 10^7$ K), röntgensäteitä emittoiva kaasu muodostaa suurimman osan tähtienvälistä ainetta. Tämän lisäksi useimmissa ellipsigalakseissa on lämmintä (10^4 K) ionisoitunutta kaasua ja kylmää (< 100 K) kaasua ja pölyä. Kuumaa kaasua on tyypillisesti noin sata kertaa enemmän kuin kylmää kaasua, ja kylmää kaasua on noin sata kertaa enemmän kuin lämmintä kaasua (Schweizer, 1987). Toisin kuin spiraaleissa, pölyn ja kaasun määrät eivät korreloi kirkkauteen.

Litteälle pyörähdysellipsoidille kinemaattinen akseli, eli akseli jonka suuntaisesti havaittu pyörimisnopeus on nolla, osuu yhteen fotometrian pikkuaskelin kanssa. Osalla ellipseistä on kuitenkin havaittu olevan rotaatiota sekä iso- että pikkuakselin suhteen. Niiden kinemaattiset ja fotometriset akselit eivät siis täsmää. Tällainen kinemaattinen epäkohdistus on yleisempää kirkkaammissa ellipseissä joita tukee nopeusdispersio. Tämä johtuu siitä, että triaksiaaliset potentiaalit tukevat tähtien ratoja, joilla on pyörimistä sekä ison että pienen akselin suhteen. Nopeasti pyörivissä ellipseissä sitä ei juuri havaita, mikä sopii yhteen sen käsityksen kanssa, että ne ovat aksisymmetrisiä (Levison, 1987; Statler, 1987).

Noin neljänneksellä ellipseistä on kinemaattisesti irtikytkeytynyt ydin (kinematically decoupled core (KDC)), jonka kulmaliikemäärävektori ei osu yksin koko galaksin kanssa. Äärimmäisissä tapauksissa keskusta voi jopa pyöriä eri suuntaan kuin muu galaksi. Tällaiset ytimet on yleensä selitetty dynaamisesti erillisinä alijärjestelminä, jotka ovat jäämiä yhdistyneistä kumppaneista. Tällainen kinemaattinen vääntymisen voi johtua myös ratojen projisoitumisesta, eikä välttämättä vaadi ydintä, joka on oma erillinen dynaaminen alijärjestelmänsä. Tämän tyyppisten ellipsien fotometria tai nopeusdispersio-profiilit eivät eroa merkittävästi tavallisesta, joten ei ole täysin selvää mikä on oikea syy tähän ilmiöön (Statler, 1991; Forbes et al., 1995; Carollo et al., 1997).

2.2 Relaatiot

Ellipsigalakseilla on tiukka empiirisesti havaittu yhteys keskustan nopeusdispersion, efektiivisen säteen ja efektiivisen säteen sisäisen pintakirkkauden välillä. Tämä on niin sanottu fundamentaalitaso (fundamental plane) (Djorgovski and Davis, 1987; Dressler et al., 1987). Se on yleisesti määritelty kaavalla

$$\log R_e = a \log \sigma_0 + b \log \langle I \rangle_e + \text{vakio} . \quad (2)$$

Muuttujat riippuvat hieman valitusta kaistasta. Tyypillisesti parhaan sovituksen parametrit ovat välillä $a \sim 1.2$ (sinisessä kaistassa) ja $a \sim 1.5$ (lähi-infrapuna kaistassa), ja $b \simeq -0.8$ (ei juuri riippuvuutta fotometrisestä kaistasta). Todellisen galaksin eroavaisuutta näistä parhaan sovituksen arvoista sanotaan fundamentaalitason kallistumaksi. Tämä kallistuma kuvastaa todennäköisesti variaatioita galaksin massa-luminositeetti-suhteessa, mikä voi puolestaan johtua galaksin tähtipopulaation ominaisuuksista ja/tai pimeään aineen halon osuudesta (Cappellari et al., 2006).

Ennen kuin fundamentaalirelaatio havaittiin, Faber & Jackson huomasivat, että ellipsigalaksin luminositeetti korreloi sen keskustan nopeusdispersion kanssa kutakuinkin $L \propto \sigma_0^4$ (Faber and Jackson, 1976). Tämä Faber-Jackson-relaatio on samanlainen kuin Tully-Fisher-relaatio spiraaligalakseille, joka siis on empiirisesti havaittu yhteys massan tai luminositeetin ja kulmanopeuden välillä. Koska $L \propto \langle I \rangle_e R_e^2$, Faber-Jackson-relaatio implikoi fundamentaalitason relaatiota, jossa $a = 2$ ja $b = -1/2$. Nämä arvot ovat melko erilaisia havaitun fundamentaalitason relaation parhaista sovituksista, mikä osoittaa, että Faber-Jackson-relaatio ei aivan täysin vastaa fundamentaalitasoa.

2.3 Isofoottien muotoja

Ellipsigalaksien muoto riippuu katselukulmastamme. Koska näemme galakseja satunnaisista suunista, voimme muodostaa kuvan keskimääräisestä kolmiulotteisesta muodosta käyttämällä hyväksi näennäisten muotojen jakaumaa. Triaksiaalisissa ellipseissä isofoottien, eli pintakirkkauden tasokäyrien, litistyneisyys voi muuttua säteen funktiona, mitä sanotaan isofoottien vääntymiseksi. Ellipsigalaksien isofootit eivät myöskään yleensä ole täysin elliptisiä. Eroavaisuuksia täydellisestä ellipsistä voidaan kuvata seuraavan funktion Fourier'n kertoimilla

$$R_{iso}(\phi) - R_{ell}(\phi) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\phi) + b_n \sin(n\phi)) , \quad (3)$$

missä $R_{iso}(\phi)$ on isofootin säde kulmalla ϕ ja $R_{ell}(\phi)$ on ellipsin säde samalla kulmalla. Yleensä tarkastellaan ellipsiä joka sopii isofoottiin niin hyvin, että kertoimet a_0, a_1, a_2, b_1 ja b_2 ovat kaikki nolla virherajojen sisällä. Erot tästä parhaan sovituksen isofootista ilmaistaan korkeamman asteen Fourier'n kertoimilla, joilla $n \geq 3$. Erityisen mielenkiintoisia ovat kertoimen a_4 arvot, sillä ne kertovat onko isofootti kiekkomainen (disky, $a_4 > 0$) vai laatikkomainen (boxy, $a_4 < 0$) (Bender et al., 1988). Kuvassa 1 on hahmoteltu miltä erilaiset isofootit näyttävät.

Toinen tapa kuvata isofootin eroja täydellisestä ellipsistä on määrittää kuinka paljon

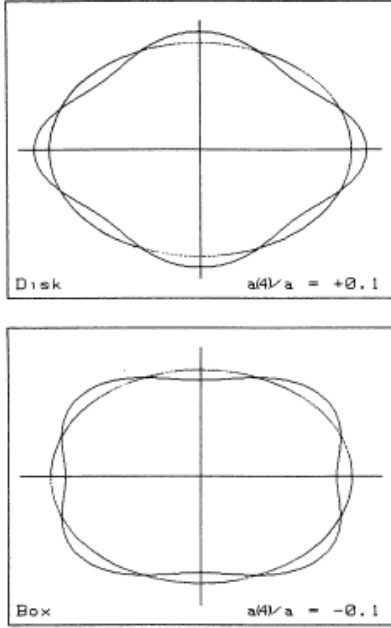


FIGURE 5. — Schematic drawing illustrating isophotes with $a(4)/a = +0.1$ and $a(4)/a = -0.1$.

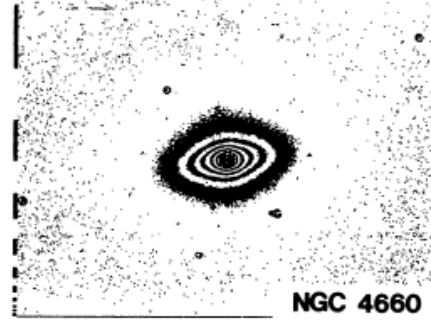


FIGURE 6. — R-image of NGC 4660, an elliptical galaxy with a disk-component in the isophotes ($a(4)/a \sim +0.03$).



FIGURE 7. — R-image of NGC 5322, an elliptical galaxy with box-shaped isophotes ($a(4)/a \sim -0.01$).

Kuva 1: Kuvitus isofoottien eri muodoista, artikkelista Bender et al. (1988). Vasemmalla ylhäällä on kiekkomainen isofootti ja sen alla laatikkomainen. Oikealla on kuvat oikeista galakseista joissa esiintyy näitä muotoja.

intensiteetti vaihtelee parhaan sovituksen ellipsillä

$$I(\phi) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\phi) + B_n \sin(n\phi)) , \quad (4)$$

missä I_0 on parhaan sovituksen ellipsin intensiteetti. Kertoimet A_n ja B_n liittyvät kertoimiin a_n ja b_n seuraavasti:

$$A_n = a_n \left| \frac{dI}{dR} \right| , \quad B_n = b_n \left| \frac{dI}{dR} \right| , \quad (5)$$

missä $R = a\sqrt{1-\varepsilon}$, jossa ε on parhaan sovituksen ellipsin elliptisyys.

Erotus kiekkomaiden ja laatikkomaiden ellipsien välillä on tärkeä, sillä niissä löytyy systemaattisia eroja. Laatikkomaisissa on usein isofoottien vääntymistä. Tämä on mahdollista aksisymmetrisille systeemeille, mutta tapahtuu luontaisesti jos galaksi on triakiaalinen. Tämän takia kirkkaiden ellipsien usein ajatellaan olevan triakiaalisia. Ne pyörivät hitaasti ja niissä on keskivertoa voimakkaampia radio- ja röntgenemissioita.

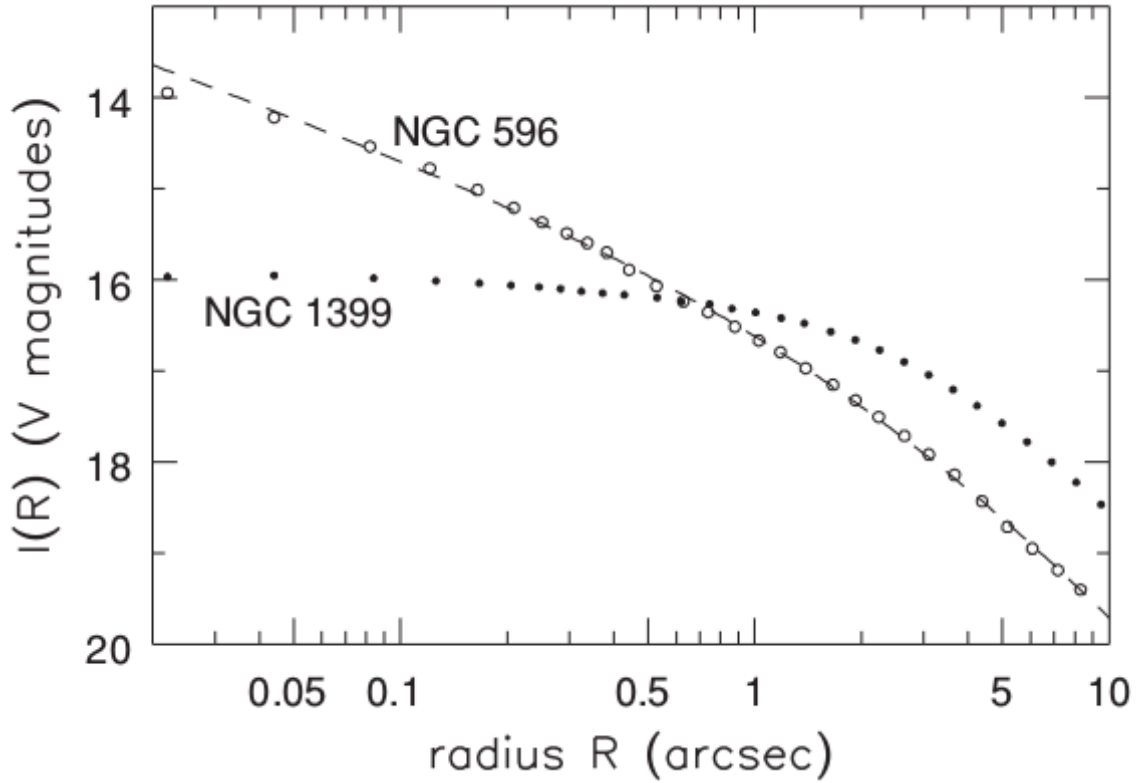
Kiekkomaiset ovat himmeämpiä, niissä on suhteellisesti paljon pyörimistä ja vähän tai ei

ollenkaan radio- tai röntgenemissioita. Nämä ovat yleensä keskikokoisia. Kiekkomaisilla ellipseillä taas ei puolestaan näy isofoottien vääntymistä juuri koskaan, mikä sopii yhteen käsityksen kanssa että ne ovat aksisymmetrisiä.

Isofootin muoto myös korreloi ytimen ominaisuuksien kanssa, ja ellipsit voidaankin jakaa ytimen pintakirkkauden perusteella core-ellipseihin ja cusp-ellipseihin. Core-ellipseissa ytimen pintakirkkaus on melkein vakio, eli niiden keskustasta “puuttuu valoa” verrattuna tyypilliseen Sérsic profiiliin. Nämä galaksit ovat tyypillisesti isoja ja niiden keskustassa on massiivinen musta aukko. Nämä ovat laatikkomaisia. Cusp-ellipseissa puolestaan ytimen pintakirkkaus on hyvin suuri, eli niiden keskustassa on “liikaa valoa” verrattuna tyypilliseen Sérsic profiiliin. Nämä ovat yleensä pienimassaisempia ja pyörivät core-ellipsejä nopeammin. Nämä ovat tyypillisesti kiekkomaisia. Kuvassa 2 näkyy kahden oikean galaksin keskusalueen pintakirkkauksia, joissa tämän kaksijakoisuuden voi nähdä. Todennäköisin syy tähän ilmiöön löytyy keskustojen supermassiivisista mustista aukoista. Kuten kapaleessa 3.1.2 tullaan tarkemmin toteamaan, massiiviset ellipsit syntyvät melko varmasti pienempien ellipsien yhteentörmäyksissä. Törmäyksissä mustat aukot uppoavat uuden galaksin keskellä, ja niiden dynaamiset vuorovaikutukset keskustan tähtien kanssa voivat levittää nämä tähdet laajalle alueelle, saaden aikaan odotetunlaisen core-ellipsin (Rantala et al., 2018).

2.4 Pimeä aine

Spiraaligalakseissa neutraalin vedyn rotaatiokäyrät ovat vahva todiste pimeän aineen olemassaololle. Ellipsigalakseissa pimeän aineen tutkiminen on kuitenkin haastavampaa, sillä niissä ei ole yhtä hyviä ja helposti tulkittavia indikaattoreita isoilla säteillä. Yksi keino on käyttää hyväksi tähtien kinematiikkaa, jota saadaan integroidun valon absorptiospektroskopiasta. Ellipsien pintakirkkaus tippuu nopeasti säteen kasvaessa, joten tämä keino ei toimi kovin hyvin pitkillä etäisyyksillä. Mittauksia onkin pystytty tekemään enintään ~ 2 efektiivisen säteen päähän. Tällä tavalla mitatut kinematiikat ovat näyttäneet, että tyypillisesti näkösäteen suuntainen nopeusdispersioprofiili on kutakuinkin vakio yhdestä efektiivisestä säteestä ulospäin. Tämä vastaa massa-valo-suhdeprofiilia joka kasvaa ulospäin, jollainen on odotettavissa mikäli systeemin ympärillä on pimeän aineen halo. Säteen suhteen vakiona pysyvä nopeusdispersio voi toisaalta olla myös merkki siitä, että nopeusdispersioanisotropia muuttuu enemmän tangentialiseksi säteen kasvaessa (van der Marel and Franx, 1993). Ellipsigalakseen keskusalueiden massa-valo-suhteiden perusteella voidaan sanoa, että yhden efektiivisen säteen sisällä keskimäärin 30% massasta on pimeää ainetta (Gerhard et al., 2001; Cappellari et al., 2006).



Kuva 2: Kuvassa on kahden eri galaksin pintakirkkaudet V-kaistassa säteen funktiona. Jättiläismäisellä ellipsillä NGC 1399 ($M_V = -21.7$) näkyy selkeä keskusalue, jossa luminositeetti pysyy miltei vakiona (core-ellipsi). Puolet himmeämpi galaksi NGC 596 ($M_V = -20.9$) omaa puolestaan keskustaa kohti kasvavan pintakirkkauden (cusp-ellipsi). (Kuva 6.7. kirjasta Sparke and Gallagher III (2007).)

Yksi keino rajata massajakauma kinemaattisista havainnoista on ratkaista Jeansin yhtälöitä. Nämä ovat yhtälöitä, jotka kuvaavat tähtien liikettä gravitaatiokentässä. Näille ei kuitenkaan yleisesti löydy yksiselitteisiä ratkaisuja, ja täytyykin tehdä joitain oletuksia ratkaisujen saamiseksi. Esimerkkinä voidaan tarkastella pallosymmetristä tilannetta, jossa olemme havainneet pintakirkkausprofiilin $I(R)$ ja projisoituneen nopeusdispersioprofiilin $\sigma_p(R)$, missä R on projisoitunut säde. Tässä pallosymmetrisessä tilanteessa ainoa epätriviaali Jeansin yhtälö on

$$\frac{1}{\rho} \frac{d(\rho \langle v_r^2 \rangle)}{dr} + 2\beta \frac{\langle v_r^2 \rangle}{dr} = -\frac{d\Phi}{dr}, \quad (6)$$

missä ρ on massatiheys, Φ on potentiaali ja β on anisotropiaparametri, joka määritellään kaavalla

$$\beta(r) \equiv 1 - \langle v_\theta^2 \rangle / \langle v_r^2 \rangle. \quad (7)$$

Tämä siis kuvaa tangentialisten nopeuksien suhdetta radiaalisiin nopeuksiin, eli kuinka anisotrooppista tähtien liike on.

Koska $d\Phi/dr = GM_{\text{tot}}(r)/r^2$, missä M_{tot} on säteen r sisään jäävä kokonaismassa, voimme kirjoittaa Jeansin yhtälön muodossa

$$M_{\text{tot}}(r) = -\frac{\langle v_r^2 \rangle r}{G} \left[\frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln \langle v_r^2 \rangle}{d \ln r} + 2\beta \right]. \quad (8)$$

Massaprofili riippuu siis sekä nopeuden keskiarvosta $\langle v_r^2 \rangle(r)$ ja anisotropiaprofilista $\beta(r)$. Koska näkösäteen suuntainen nopeus saadaan kaavalla $v_{\text{los}} = v_r \cos \alpha - v_\theta \sin \alpha$, missä $\cos \alpha = R/r$, voimme kirjoittaa

$$\sigma_p^2(R) = \frac{2}{I(R)} \int_R^\infty \left(1 - \beta \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{\rho r \langle v_r^2 \rangle}{\sqrt{r^2 - R^2}} dr. \quad (9)$$

Havaittava näkösäteen suuntainen nopeusdispersio $\sigma_p^2(R)$ täten riippuu molemmista muuttujista $\langle v_r^2 \rangle(r)$ ja $\beta(r)$, eikä kokonaismassalle $M_{\text{tot}}(r)$ ole uniikkia ratkaisua. Tämä ratkaisujen puuttuminen, jota kutsutaan usein massa-anisotropia degeneraatioksi, haittaa massa-valo-suhdeprofiilien määrittämistä (Mo et al., 2010). Tätä degeneraatiota voi kuitenkin ainakin osittain rikkoa ottamalla huomioon systeemistä havainnoituja korkeamman asteen nopeusmomentteja (van der Marel and Franx, 1993).

Toinen tapa massajakumien tutkimiseen suurilla säteillä on käyttää hyväksi diskreettejä dynaamisia tracereitä, kuten pallomaisia tähtijoukkoja, planetaarisia sumuja tai satelliittigalakseja. Tracereitä voi seurata suurillekin säteille, mutta niiden säteittäisnopeuksien dynaaminen mallintaminen on hankalaa, sillä säteittäisnopeuksien mallintaminen kärsii samasta massa-anisotropia degeneraatiosta kuin integroitujen valomittausten tulkitseminen. Lisäksi sopivia tracereitä on melko harvassa, joten tarkkojen tulosten saaminen on haastavaa.

Kolmas tapa on röntgenkartoituksen avulla. Kirkkaita ellipsejä ympäröi usein leveä korona kuumaa röntgensäteitä emittoivaa kaasua. Kaasu on tähdistä irronnutta kaasua jota supernovat ovat kuumentaneet. Kaasu jäähtyy hiljalleen jarrutussäteily kautta, emittoiden röntgensäteitä (Binney and Tremaine, 2008). Mikäli oletamme, että kaasu on hydrostaattisessa tasapainossa, säteen r sisään jäävä kokonaismassa saadaan kaavasta

$$M_{\text{tot}}(r) = -\frac{k_B T(r) r}{\mu m_p G} \left[\frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right], \quad (10)$$

missä k_B on Boltzmannin vakio, $\mu = \rho/(nm_p)$ on kaasun keskimääräinen molekyylimassa, m_p on protonin massa, ρ on massatiheys ja n on hiukkasten numerotiheys (Mo et al., 2010). Oletus tasapainosta ei pidä täysin paikkaansa. röntgenhalon sisäosat jäähtyvät tehokkaammin kuin ulko-osat, sillä jäähtyminen riippuu elektronitiheydestä (Binney and

Tremaine, 2008). Tämän takia sisäosissa onkin odotettavissa virtauksia, ja niitä on havaittu (Mushotzky et al., 1994). Oletus tasapainosta pitää silti melko hyvin paikkansa, joten sitä silti käytetään.

Vertaamalla tätä kaavaan 8, voimme nähdä, että tämä hydrostaattinen yhtälö on hyvin samanlainen dynaamiseen yhtälöön. Tässä on nopeuksien sijasta kaasun lämpötila, ja anisotropiakerroin on nolla. Joillekin ellipseille sekä lämpötila että kaasun tiheys voidaan ratkaista, joilloin voidaan saada tulos kokonaismassalle. Tällä tavalla saadut massa-valo-suhteet ovat kokoluokkaa $\sim 100M_{\odot}/L_{\odot}$ satojen kiloparsekkien skaaloilla, mikä on vahvaa näyttöä pimeän aineen olemassaololle (Forman et al., 1985; Mushotzky et al., 1994). Röntgenkartoitus ei myöskään kärsi samasta massa-anisotropia degeneraatiosta kuin kinemaattiset mallinnukset.

2.5 Mustat aukot

Nykyään on yleisesti hyväksytty, että lähes jokaisessa jättimäisessä ja keskikirkkaassa ellipsigalaksissa on supermassiivinen musta aukko sen keskellä (Kormendy and Richstone, 1995; Ferrarese and Ford, 2005). Voimme havaita mustia aukkoja epäsuorasti katsomalla keskustassa olevien tähtien liikkeitä. Mikäli keskustan tähtien nopeusdispersiot ovat paljon suurempia kuin muualla niiden ympäristössä, voimme päätellä, että keskellä täytyy olla jokin hyvin massiivinen kohde. Tämä ilmiö on huomattu spiraaligalakseissa, ja havainnot näyttävät sen pätevän myös ellipsigalakseissa, mikä antaisi olettaa, että niissäkin on keskustassa massiivinen musta aukko. Isoimmat keskusmassat on löydetty galakseista joissa on isoimmat nopeusdispersiot. Musta aukko vuorovaikuttaa ympäröivän materian kanssa merkittävästi vain suhteellisen pienellä säteellä, joka voidaan määrittää kaavalla

$$r_{\text{BH}} = \frac{GM_{\text{BH}}}{\sigma^2} = 10.8\text{pc} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\sigma}{200\text{km/s}} \right)^{-2}, \quad (11)$$

missä σ on galaksin keskustan tähtien karakteristinen nopeusdispersio. Tämän takia mustien aukkojen tutkiminen vaatiikin erittäin tarkkoja havaintoja, jotta näin tarkka resoluutio voidaan saavuttaa (Mo et al., 2010).

Mustia aukkoja on etsitty paljon läheisistä galakseista kinemaattisten tutkimusten avulla. Erityisesti yritetään löytää näyttöä massa-valo-suhteen kasvusta galaksien keskustassa mitä ei voida selittää tavallisilla tähtipopulaatioilla. Tämä voi osoittaa supermassiivisen mustan aukon olemassaolosta, mutta se voi johtua myös isosta määrästä himmeitä kohteita, kuten ruskeita kääpiöitä tai tähtien jäänteitä. Kuitenkin jos havaittu massa-valo-suhde on tarpeeksi iso ja rajoittuu tarpeeksi pienelle alueelle, voidaan nämä muut vaihtoehdot

rajata pois sillä perusteella, että niillä olisi paljon galaksin ikää pienemmät eliniät (Maoz, 1998). Tämä johtuu siitä, että pienelle alueelle keskittynyt monen kappaleen järjestelmä lopulta hajoaa joko kappaleiden poistuessa järjestelmästä gravitaatiovuorovaikutusten takia, tai kappaleiden hajotessa fyysisten törmäysten seurauksena. Tähtien kinematiikan lisäksi mustia aukkoja voi joissain tapauksissa havaita myös aukkoja ympäröivän ionisoituneen kaasun kiekkoista. Vaikka kaasun pyörimisnopeudesta voi saada periaatteessa hyvin tarkkoja rajoja sen sisällä olevalle massalle, kaasu on kuitenkin herkkää muillekin voimille kuin pelkälle gravitaatiolle, joten havaintojen tulkitseminen ei ole helppoa (Harms et al., 1994; van der Marel and van den Bosch, 1998).

Kuten aiemmin mainittiin, monilla ellipsigalakseilla on nopeusdispersioprofiilit, jotka nousevat jyrkästi keskustaa kohti. Yksinkertaisten isotrooppisten mallien sovittaminen osoittaa massa-valo-suhteen kasvua keskustassa, mikä sopii yhteen supermassiivisen mustan aukon olemassaolon kanssa. Tämä ei ole kuitenkaan yksiselitteistä, sillä sama massa-anisotropia joka on ongelmana halojen tutkimisessa haittaa myös tätä työtä. Keskustan nopeusdispersio voi olla suuri myös systeemissä, jossa ei ole suurta mustaa aukkoa jos keskusta on säteittäisesti anisotrooppinen. Tämä epäselvyys voidaan kuitenkin melko hyvin poistaa mittaamalla koko galaksin näkösäteen suuntainen nopeusjakauma (line-of-sight velocity distribution, LOSVD). Tämä tarkempi data yhdistettynä kehittyneisiin malleihin on antanut vahvaa näyttöä supermassiivisille mustille aukkoille muutamassa tusinassa läheisessä ellipsigalakseissa.

Kun havaintodatan määrä mustista aukkoista on kasvanut, on voitu alkaa tehdä johtopäätöksiä korrelaatioista mustan aukon massan ja galaksin muiden ominaisuuksien välillä. Mustan aukon koko korreloi esimerkiksi sferoidin luminositeetin kanssa. Vielä tiukempi yhteys löytyy mustan aukon massan ja sferoidin nopeusdispersion välillä, joka määritellään kaavalla

$$M_{\text{BH}} = (1.3 \pm 0.2) \times 10^8 M_{\odot} \left(\frac{\sigma_e}{200 \text{ km/s}} \right)^{\gamma}, \quad (12)$$

missä tekijä γ on välillä 3.75 ja 4.8, riippuen käytetystä datasta ja siitä, kuinka isolta alueelta nopeusdispersio on mitattu (Gebhardt et al., 2000; Ferrarese and Merritt, 2000). Yhtä tiukkoja relaatioita on havaittu myös mustan aukon massan ja ellipsin kokonaismassan välillä, sekä mustan aukon massan (Häring and Rix, 2004) ja galaksiin sopivan Sérsic indeksin välillä (Graham et al., 2001). Nämä korrelaatiot antavat viitteitä siitä, että mustan aukon muodostus on hyvin kytkeytynyt itse galaksin sferoidaaliosan muodostumiseen.

3 Ellipsigalaksien syventävä teoria

Tämä kappale keskittyy syvemmin ellipsigalaksien erilaisiin syntyteorioihin ja niihin vai-
kuttaviin havaintoihin. Vaikka teorioita galaksien muodostumiselle testataan simulaatioil-
la, on kaikki saamamme tieto kuitenkin pohjimmiltaan lähtöisin havainnoista. Katsomalla
taivaalle voimme mitata sekä galaksien ominaisuuksia että nähdä menneisyyteen, miltä
tilanne näytti kun maailmankaikkeus oli nuorempi.

3.1 Ehdotettuja syntyteorioita

Ellipsigalaksien dynaaminen rakenne on paljon vähemmän järjestäytynyt kuin kiekko-
maisten galaksien, mikä antaa viitteitä siitä, että niiden muodostuminen oli paljon ra-
jumpaa. Kaikki ellipsigalaksien muodostumisteoriat olettavatkin, että rajulla relaksa-
tiolla (violent relaxation) oli tärkeä osa jossain vaiheessa muodostumisprosessia. Rajulla
relaksaatiolla tarkoitetaan muutosta yksittäisten kappaleiden energioissa gravitaatiopo-
tentiaalin vaihtelujen takia.

Kun tähti liikkuu vakioisessa potentiaalissa Φ , sen energia $E = \frac{1}{2}v^2 + \Phi$ ei muutu. Mutta
mikäli potentiaali $\Phi(\mathbf{x}, t)$ muuttuu paikan ja ajan funktiona, energia ei ole vakio, vaan
muuttuu kaavan 13 mukaisesti (Binney and Tremaine, 2008).

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (13)$$

Kuten kaavasta nähdään, tämä relaksaatio ei riipu kappaleen massasta, joten raju re-
laksaatio ei erottele kappaleita systeemissä niiden massan perusteella. Aikaskaala rajulle
relaksaatiolle on samaa luokkaa vapaan pudotuksen aikaskaalan kanssa (Lynden-Bell,
1967), joka on aika, joka systeemiltä kuluisi romahtaa jos siihen vaikuttaisi vain sen
oma gravitaatio. Raju relaksaatio tapahtuu siis suhteellisen nopeasti, mistä sen nimikin
on peräisin. Simulaatiot ovat kuitenkin osoittaneet, että raju relaksaatio ei yleisesti ot-
taen ole koskaan “valmis”, vaan hiukkasten loppuenergiat korreloivat niiden alkuarvojen
kanssa, ja systeemin lopullisen muodon perusteella voi tehdä päätelmiä sen alkutilasta
(Aarseth and Binney, 1978; White, 1978; van Albada, 1982; May and van Albada, 1984).

Käytännössä tämä siis tarkoittaa, että galaksin eri osat sekoittuvat lähes kokonaan kes-

kenään. On havaittu, että raju relaksaatio joko kylmän ja epäsymmetrisen alkutilan romahtamisen aikana tai kahden suunnilleen samanmassaisen kohteen yhdistymisen jälkeen tuottaa ellipsoidimaisia systeemejä, joiden tiheysprofiilit täsmäävät ellipsigalakseja.

Ellipsigalaksien muodostumiselle onkin historiallisesti ollut kaksi kilpailevaa teoriaa: massiivinen romahdus ja kahden galaksin yhdistyminen (Mo et al., 2010). Ensimmäisessä mallissa galaksi muodostuu lyhyehköllä aikaskaalalla kun sen tarkemmin määrittelemätön alkutilanne romahtaa ja virialisoituu. Tässä tähdet muodostuvat samaan aikaan kuin itse lopullinen galaksikin. Jälkimmäisessä mallissa ellipsigalaksi muodostuu kun kaksi kiekomaista galaksia törmää ja yhdistyy. Tässä tapauksessa tähtien synty ei tapahdu samanaikaisesti itse ellipsin muodostumisen kanssa. Kuvassa 3 on havainnollistettu eroja eri skenaarioiden aikaskaalojen välillä.

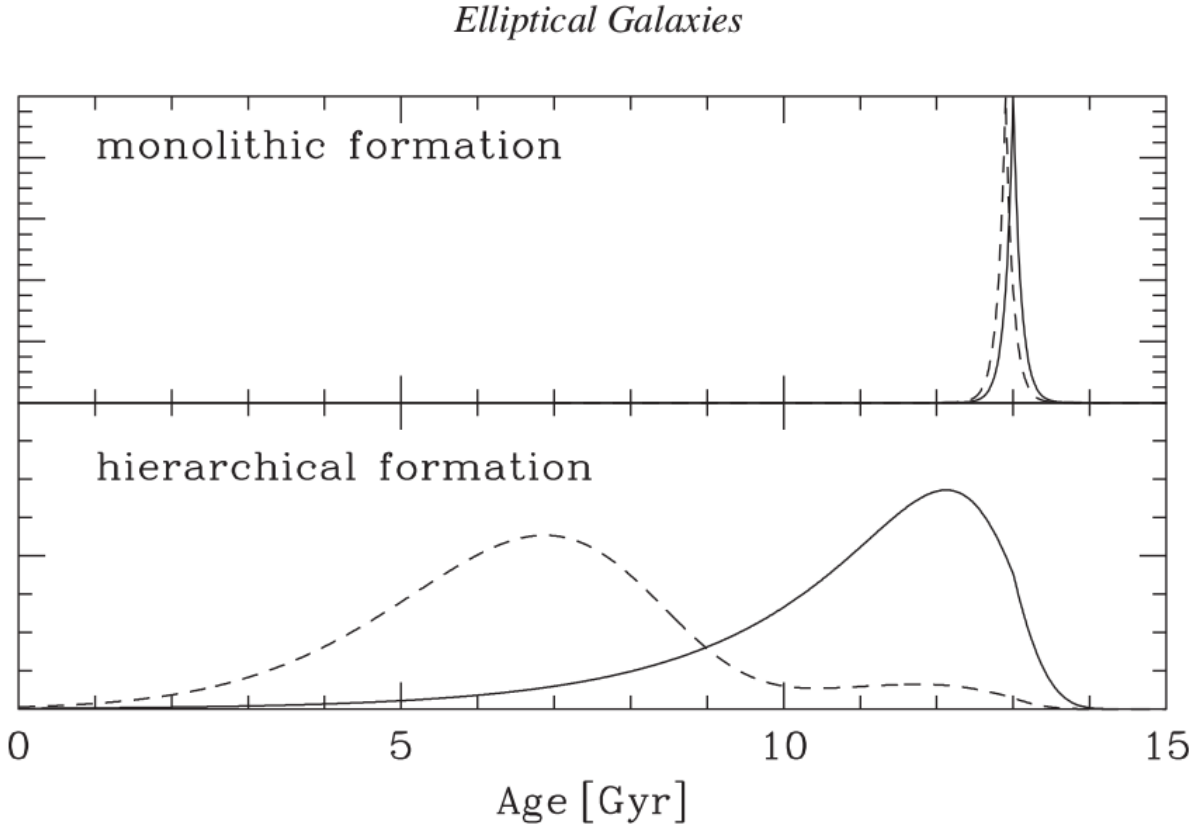
Kumpikaan näistä skenaarioista ei täysin yksin vastaa nykyistä käsitystä ellipsigalaksien muodostumiselle. On kuitenkin hyvä käydä läpi mikä niissä toimii ja mikä ei, millaisia lopputuloksia nämä kaksi eri tapaa antavat ja miten ne sopivat yhteen nykykäsityksen kanssa.

3.1.1 Monoliittinen romahdus

Massiivisessa tai ‘monoliittisessä’ romahduksessa ellipsigalaksi syntyy korkealla punasiirtymällä yhdessä intensiivisessä purskauksessa tähtienmuodostusta. Tätä seuraa galaksin tähtipopulaation passiivinen kehitys nykypäivään saakka, eli galaksit eivät koe massiivisia törmäyksiä, ja niiden tähdet kehittyvät eteenpäin ilman sen erikoisempia tapahtumia (Partridge and Peebles, 1967; Larson, 1975). Motiivina tälle selitykselle oli, että ellipsigalaksit näyttävät hyvin homogeenisiltä ja niillä on hyvin yhtenäiset tähtipopulaatiot. Tämänlaisen ellipsin lopullinen muoto riippuu siitä, miten paljon se säteilee energiaa pois romahduksessaan, eli kuinka dissipatiivinen romahdus on.

Mikäli systeemissä ei tapahdu juuri ollenkaan dissipaatiota, käytännössä kaikki kaasu voi muuttua tähdiksi romahduksen aikana tai hyvin pian sen jälkeen. Mallit pallomaiselle romahdukselle antavat tässä tapauksessa tulokseksi, että ellipsien olisi täytynyt muodostua yli punasiirtymillä $z = 20$, mikä sotii voimakkaasti nykykäsitystä vastaan, että vain pieni osa tähtiä syntyi ennen punasiirtymää $z = 6$. Eräs toinen seikka energiahäviöttömässä mallissa on se, että raju relaksaatio ei tee eroa pimeään aineen ja tähtien välillä, joten se ei voi erottaa niitä. Tämä ei sovi yhteen havaintojen kanssa, joiden mukaan pimeä aine on keskittynyt galaksien ulko-osiin, ja keskempänä on vain tähtiä (Mo et al., 2010).

Koko tilanne on kuitenkin erilainen mikäli systeemi on dissipatiivinen romahtaessaan.



Kuva 3: Kuvassa näkyy erot monoliittisen romahduksen (ylempi ruutu) ja mergerin (alempi ruutu) ellipsigalaksipopulaation muodostumisen välillä. Kiinteä viiva kuvaa keskimääräistä tähtienmuodostushistoriaa, kun taas katkoviiva näyttää baryonisen massan keskimääräisen kasvunopeuden suurimmassa galaksin edeltäjässä. Romahdusskenaariossa tähtien oletetaan muodostuvan lyhyessä kertarysäyksessä ja muodostovan galakseja samanaikaisesti tai piakkoin tämän jälkeen. Galaksien yhdistymisskenaariossa tähdet muodostuvat pidemmällä aikajaksolla useammassa jo olemassaolevassa galaksissa, ja ne yhdistyvät vasta paljon myöhemmin nykyään havaittaviksi ellipseiksi. (Kuva 13.4. kirjasta Mo et al. (2010).)

Tällöin tähdet muodostuvat aikaskaalalla, joka on pidempi kuin romahtamisen aikaskaala. Kaasu ja pimeä aine voivat paremmin erottua, jolloin vältetään edellä mainitulta ongelmalta jossa olemme havainneet pimeää ainetta vain galaksien ulko-osissa. Koska tähtien muodostus on levinnyt paljon pidemmälle aikavälille, myöhemmin syntyvät tähdet ovat metallirikkaampia kuin ensimmäisinä syntyneet. Tästä voi seurata samanlaisia metallisuuden gradientteja kuin todellisissa ellipseissa on havaittu (Larson, 1974).

Vaikka tämä näyttää paremmalta kuin ensimmäinen malli, on siinäkin omat ongelman-
sa. Mikäli ellipsit olisivat syntyneet romahduksessa, mikä erottaa ne spiraaligalakseista? Miksi toisessa tapauksessa kaasun pyöriminen jää tukemaan galaksin rakennetta mutta toisessa ei? Tämä vaatisi joko että ellipseiden protogalakseilla on paljon pienemmät kulmaliikemäärät, tai sitten että ellipseissa baryonisen aineen kulmaliikemäärä siirtyy paljon tehokkaammin pimeään aineeseen. Simulaatiot osoittavat, ettei ole kuitenkaan aivan

mahdotonta, että ellipseillä liikemäärän siirtyminen olisi tehokkaampaa (Katz and Gunn, 1991; Katz, 1992).

Isoin ongelma suoralle romahtamiselle on kuitenkin oletus siitä, että itse galaksin muodostus tapahtuisi samalla kun iso osa tähdistä syntyy melko lyhyessä ajassa. Suurimmalla osalla normaaleista ellipseistä näyttää olevan hyvin vanhat tähtipopulaatiot joiden keskimääräinen ikä on 10 miljardin vuoden paikkeilla. Tämä tarkoittaisi, että muodostumisen olisi täytynyt tapahtua kun $z \gtrsim 2$ ja galaksit olisivat varttuneet passiivisesti sen jälkeen. On kuitenkin havaittu, että punasiirtymän $z \sim 1$ kohdalla suhteellisen massiiviset, passiivisesti kehittyvät galaksit olivat 3-4 kertaa tiheämpiä kuin nykypäivänä (Bell et al., 2004; Brown et al., 2007; Faber et al., 2007; Taylor et al., 2009). Eli isoin osa ellipsigalakseista muodosti tähtiä tai ei ollut vielä kasautunut lopulliseen muotoonsa punasiirtymän $z = 1$ kohdalla. Myös ellipsien koko oli noihin aikoihin paljon pienempi kuin samanmassaisilla galakseilla nykyään (Daddi et al., 2005; Trujillo et al., 2006; van Dokkum et al., 2008; van der Wel et al., 2008). Tämä käytännössä sulkee monoliittisen romahtamisen kokonaan pois ainoana syntymekanismina. Tähän liittyy myös termi galaktinen supistuminen eli downsizing, joka viittaa antikorrelaatioon galaksin massan ja tähtien muodostumisiensa välillä. Massiivisimmissa galakseissa on vanhempia tähtiä kuin pienemmissä galakseissa (Johansson et al., 2012).

3.1.2 Mergerit

Galaksien yhdistymiset eli mergerit ovat toinen ehdotus ellipsien synnylle. Äärimmäisessä tapauksessa tämä hypoteesi olettaa, että lähes kaikki tähtienmuodostus tapahtuu galaksien kiekkoissa, ja että aivan kaikki ellipsit syntyvät kiekkogalaksien yhdistymisistä. Ensimmäinen väite on mahdollinen, sillä läheisen maailmankaikkeuden tähtienmuodostus on rajoittunut pääasiallisesti galaksien kiekkoihin sekä tähtipurkausgalakseihin (starburst-galaxy). Tähtipurkausgalaksit ovat nimensä mukaisesti galakseja, joissa on merkittävää tähtienmuodostusta. Omassa Linnunradassamme syntyy tähtiä noin $3 M_{\odot}/\text{yr}$, kun taas tähtipurkausgalakseissa tähtiä voi muodostua jopa 100 kertaa nopeammin (Schneider, 2006). Esimerkiksi juuri galaksien törmäyksissä syntyy tähtipurkausgalakseja.

Jälkimmäinen pointti, että kaikki ellipsit muodostuisivat törmäyksissä, ei välttämättä kuitenkaan sovi yhteen havaintojen kanssa. Selvää kuitenkin on, että mergereitä tapahtuu. Ongelmana on, että voiko oikeiden havaittujen galaksien muodostumisesta syntyä galakseja jotka muistuttavat nykypäivän ellipsejä, ja voiko yhdistymisiä tapahtua tarpeeksi paljon ja oikeanlaisissa ympäristöissä, jotta saamme samanlaisen ellipsipopulaation kuin mitä nykyään havaitaan. Kuvassa 4 näkyy ehkä tunnetuin mergeri ja tähtipurkausgalaksi, Antennigalaksit.



Kuva 4: Hubblen ottama kuva Antennigalakseista. Galaksit NGC 4038 (vasemmalla) ja NGC 4039 (oikealla) ovat noin 20 megaparsekin päässä meistä, ja ne törmäsivät toisiinsa ensimmäistä kertaa noin 500 miljoonaa vuotta sitten. Niiden ydinten on arvioitu yhdistyvän noin 80 miljoonan vuoden kuluttua (Lahén et al., 2018). Galaksissa on nähtävissä voimakasta tähtienmuodostusta, kuten on odotettavissa kun kaksi kaasurikasta kiekkoalaksia törmäävät toisiinsa. Myös galaksien morfologia on hyvin ainutlaatuinen törmäyksen seurauksena. (Kuva: NASA/ESA)

Aikaisimmissa simulaatioissa tutkittiin tähtikiekkoja pienimassaisten pimeän aineen halojen sisällä, minkä seurauksena syntyneet galaksit pyörivät aivan liian nopeasti verrattuna havaintoihin (Gerhard, 1981; Farouki and Shapiro, 1982; Negroponte and White, 1983). Kun halojen kokoa ja massaa kasvatettiin, huomattiin, että lopulliset galaksit pyörivät hitaammin (Barnes, 1988). Syy tälle löytyy dynaamisesta kitkasta.

Dynaamisella kitkalla tarkoitetaan ilmiötä, jossa jokin hiukkaskentässä liikkuva kappale

vetää puoleensa ympäröiviä hiukkasia. Gravitaation takia nämä hiukkaset muodostavat massatihentymän liikkuvan kappaleen perään, vetäen sitä enemmän puoleensa ja siten hidastaen sen liikettä. Kuvassa 5 on havainnollistus ilmiöstä. Dynaamisen kitkan voimakkuus galaksien yhdistymisessä on verrannollinen galaksien massatiheyteen. Chandrasekharin kaava dynaamiselle kitkalle on

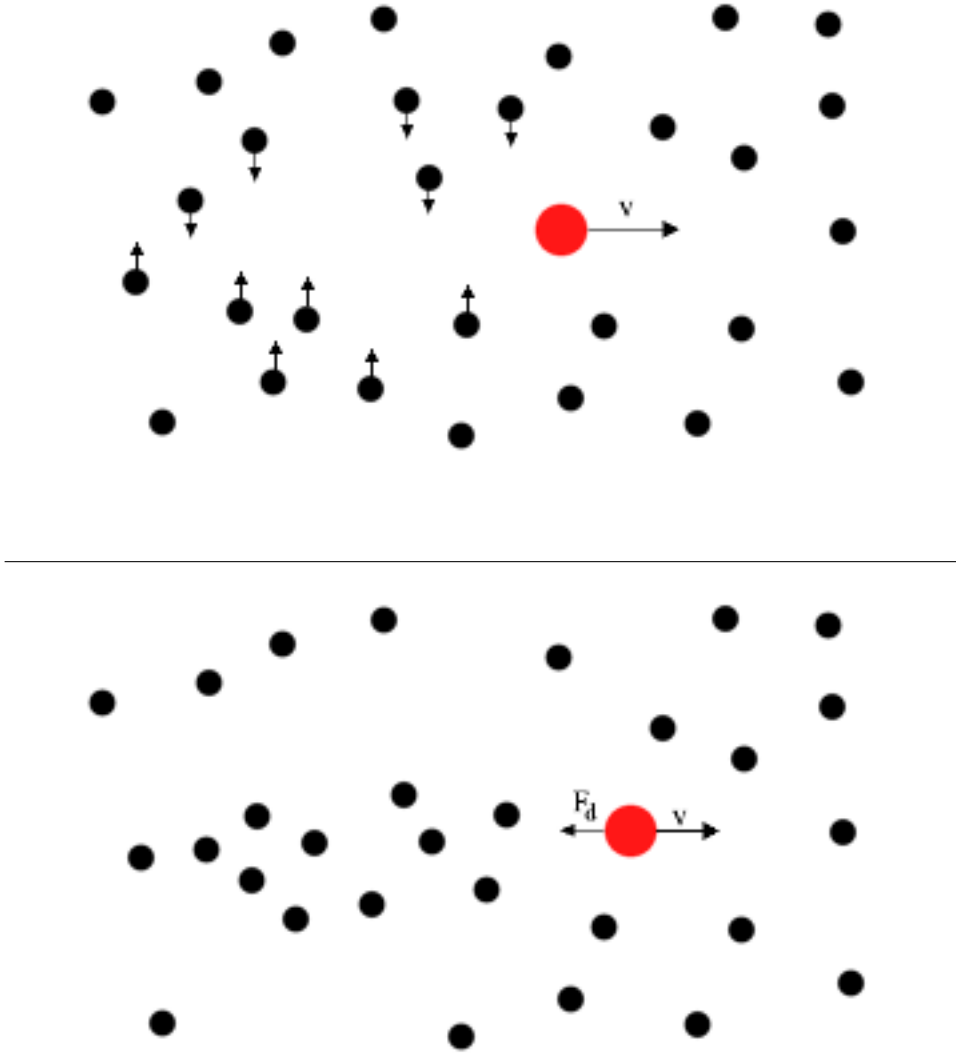
$$F_{\text{df}} = -4\pi \left(\frac{GM_S}{v_S} \right)^2 \ln \Lambda \rho(< v_S) \frac{\mathbf{v}_S}{v_S}, \quad (14)$$

missä $\rho(< v_S)$ tiheyskenttä kappaleille joilla on pienempi nopeus kuin v_S (Mo et al., 2010). Toisin kuin raju relaksaatio, dynaaminen kitka siirtää energiaa massiivisemmilta kappaleilta kevyemmille taustakappaleille, aiheuttaen massasegregaatiota, eli massiivisemmat kohteet joutuvat syvemmälle potentiaalikuoppaan kun niiden radat pienenevät.

Dynaaminen kitka on galaksien yhdistymisen pääasiallinen voima, sillä fyysiset törmäykset ovat erittäin harvinaisia. Kitka kuitenkin hidastaa toisiinsa osuvia galakseja, saaden ne pysymään yhdessä. Yhdistymisessä dynaaminen kitka myös siirtää törmäävien galaksien kiekkojen kulmaliikemäärää heikommin sidottuun pimeään aineen haloon ennen kiekkojen lopullista yhdistymistä. Näin syntyvän ellipsin näkyvä materia pyörii hitaammin. Yhdistymisen jälkeisillä galakseilla näkyy myös laatikkomaisia ja kiekkomaisia isofoottien muotoja, niiden luminositeettiprofileihin sopii de Vaucouleursin laki ja niillä on erilaisia elliptisyyksiä (Hernquist, 1992; Barnes, 1992). Näissä simulaatioissa ei kuitenkaan syntynyt tarpeeksi pienen elliptisyyden galakseja, eikä keskikirkkaita galakseja. Niiden keskustat olivat myös liian laakeita verrattuna havaittuihin kirkkaisiin ellipseihin.

Mallit kuitenkin paranivat kun otettiin huomioon kaasun hydrodynamiikkaa. Yhdistymisissä kaasua keskittyy keskustaan vuorovesihäiriöiden vuoksi. Tämä kaasua voi luoda nopeaa tähtien syntyä galaksien ohittaessa toisensa ensimmäistä kertaa (Mihos and Hernquist, 1996). Tämä sopii hyvin yhteen havaintojen kanssa, sillä galakseilla joissa on voimakasta purskausmaista tähtien syntyä näkyy usein hyvin omituisen muotoisia morfologioita, mikä antaa osviittaa tuoreesta törmäyksestä. Koska monilla kiekkogalakseilla on hyvin paljon kaasua, käy järkeen, että kahden kiekon törmäessä kaasua olisi paljon tarjolla.

Tämänkaltaisen yhdistyminen pystyy simulaatioissa tuottamaan nopeahkosti pyöriviä, kiekkomaisia ellipseja, mikä vastaa havaittuja keskikirkkaita ellipseja. Ongelmana kuitenkin on, että tällä tavalla ei oikein saada aikaan hitaasti pyöriviä, laatikkomaisia ellipseja, jotka vastaavat kaikkein kirkkaimpia havaittuja galakseja. Törmäyksissä mukana oleva dissipatiivinen kaasua aiheuttaa galaksien keskustoihin jyrkkiä huippuja, mikä ei vastaa kirkkaissa ellipseissa havaittuja laakeampia keskusalueita. Lisäksi tämänlaiset hyvin kompaktit ydinalueet myös aktiivisesti haittaavat galaksin tähtien laatikkomaisia ratoja, jotka saisivat aikaan laatikkomaisia isofootteja (Gerhard and Binney, 1985; Merritt and



Kuva 5: Yksinkertaistettu havainnollistus dynaamisesta kitkasta. Massakappale kulkee hiukkasten seassa, vetäen niitä puoleensa. Nämä hiukkaset liikkuvat massan perään, hidastaen massan kulkua niiden yhteisellä gravitaatiolla. Kuvassa voima F_d kuvaa dynaamista kitkaa.

Fridman, 1996).

Simulaatioista on kuitenkin löytynyt mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan. Mikäli törmäävissä galakseissa on vähemmän kaasua, kuten jo yhdistymisen seurauksena syntyneissä ellipseissä, törmäyksissä ei ole juuri dissipaatiota ja ne näyttävät synnyttävän ellipsejä, jotka muistuttavat kookkaimpia ja kirkkaimpia havaittuja galakseja. Tuloksena on siis tyypillisesti hitaasti pyöriviä ja laatikkomaisia ellipsejä (Khochfar and Burkert, 2005; Naab et al., 2006; Cox et al., 2006). Emogalaksien mustien aukkojen yhdistyminen voisi olla syynä leveämpiin ytimiin.

Kuten kappaleessa 2.3 alustavasti todettiin, galaksien yhdistyessä dynaaminen kitka saa

mustat aukot putoamaan mergerin keskelle. Mustien aukkojen tullessa tarpeeksi lähelle toisiaan ne muodostavat sidotun systeemin ja alkavat kiertää toisiaan binäärinä. Mikäli keskustan tähti päätyy lähelle binääriä, se saa kolmen kappaleen vuorovaituksen (3-body interaction) seurauksena paljon energiaa massiiviselta binäärisysteemiltä, ja päätyy paljon ulommalle radalle keskustasta. Tähti voi saada jopa tarpeeksi energiaa ylittääkseen koko galaksin pakonopeuden. Voimakkaan vuorovaikutuksen kokenut tähti poistuu keskustasta nopeudella v_* , joka on keskimäärin verrannollinen binäärin ratanopeuteen (Rantala et al., 2018) :

$$v_* \sim V_{\text{bin}} = \left(\frac{2GM_{\bullet}}{a} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Tämä prosessi siirtää energiaa mustilta aukoilta ympäröivään tähtipopulaatioon, ja tämän seurauksena mustat aukot lähenevät toisiaan. Energian siirto pystyy levittämään keskustan kompaktin alueen laajemmalle säteelle. Keskimäärin binäärin poisheittäminen tähtimassa on kokonaisuutena samaa kokoluokkaa itse binäärin massan kanssa (Gualandris and Merritt, 2007), ja koko tämä prosessi vaikuttaa olevan riittävä yksin selittämään kirkkaiden ellipsien ydinten synnyn (Begelman et al., 1980; Ebisuzaki et al., 1991; Faber et al., 1997; Milosavljević et al., 2002).

Eli vaikka perinteinen, vain kahden kiekkomaisen galaksin yhdistyminen ei pysty tuottamaan kaikenlaisia havaittuja ellipsejä, näyttää siltä, että tällä tavalla usean yhdistymisen ketjuna voi syntyä kaikkia niitä ellipsejä, joita voimme taivaaltakin löytää. Tämä tukee mergereitä pääasiallisena syntytapana ellipsigalakseille.

3.2 Baryonisia prosesseja

Kaavassa 2 mainittu fundamentaalitasorelaatio pätee hyvin kaikille ellipseille. Tämän takia on tärkeää katsoa miten törmäyksissä syntyneiden galaksien ominaisuudet vastaavat havaittujen galaksien ominaisuuksia tältä kantilta. Tutkimalla monia eri simulaatioita on havaittu, että toivotunlaisen kallistuneen fundamentaalitason saamiseksi törmäävissä galakseissa täytyy olla kaasua (Robertson et al., 2006). Tämäkin tukee teoriaa, että alunperin ellipsit ovat syntyneet kaasurikkaiden kiekkomaisten galaksien törmäyksissä.

On havaittu, että punasiirtymillä $z \lesssim 1$ huomattava osa kirkkaista ellipseista törmäi toisiin ellipseihin (van Dokkum, 2005; Bell et al., 2006; McIntosh et al., 2008). Niinpä onkin tärkeää tutkia, säilyykö fundamentaalitaso tämänlaisissa kaasuköyhissä törmäyksissä. Simulaatiot ovatkin näyttäneet, että sferoidaalisten galaksien väliset törmäykset suunnilleen säilyttävät fundamentaalitason kallistuksen (Nipoti et al., 2003; Boylan-Kolchin et al., 2005; Robertson et al., 2006).

Empiirisesti on havaittu, että elliptiset galaksit löytyvät lähes yksinomaan isoista galaksijoukoista. Ellipsit muodostuvat siis paikkoihin, joissa on galakseja tiheässä, mikä sopii yhteen teorian kanssa, että ne syntyvät törmäyksistä. Enemmän lähellä olevia galakseja, enemmän galaksien törmäyksiä.

Tutkimalla ellipsigalaksien evoluutiota korkeammilla punasiirtymillä, voimme havaita, että joukoissa sijaitsevat ellipsigalaksit muodostivat suurimman osan tähdistään $z > 2$ (Aragon-Salamanca et al., 1993; Rakos and Schombert, 1995; Ellis et al., 1997; Schade et al., 1997; Stanford et al., 1998). Ellipsigalaksien muodostumismallit ennustavat, että massiiviset galaksit muodostuisivat vasta myöhemmin kuin pienemmät, mikä saattaa ensisilmäyksellä sotia sitä vastaan, että isot galaksit sisältävät vanhempia tähtiä. Tämä kuitenkin selittyy sillä, että vaikka massiiviset ellipsit muodostuvat myöhemmin, niiden synnyttäjinä olleet pienemmän massan galaksit syntyivät varhain, ja suurin osa tähtien synnystä olisi siis tapahtunut jo näissä galakseissa.

Yllä on puhuttu kokonaisten galaksien törmäyksistä, mutta merkittävä seikka massiivisten ellipsigalaksien synnyssä on myös pienemmät yhdistymiset. Ellipseihin kertyy tähtiä, jotka ovat muodostuneet itse ellipsin ulkopuolella omissa pienissä alueissaan, jotka ovat syntyneet alkuperäisen törmäyksen aikana. Tämä on merkittävä tekijä ellipsigalaksien kokojen kasvussa punasiirtymältä $z \sim 2$ nykypäivään asti (Naab et al., 2009; Johansson et al., 2012).

Myös galaktiset ulosvirtaukset ovat tärkeä tekijä galaksien muodostuksessa. Galaksien metallit eivät sijoitu vain tähtiensyntyalueille, vaan galakseissa täytyy olla jonkinlaista virtausta joka kuljettaa kuumaa, metallirikasta kaasua muihin galaksin osiin sen syntypaikoilta. Virtaukset myös tekevät galakseista vähemmän tiiviitä ja ne hidastavat tähtienmuodostusta. Tärkeimpiä virtausten lähteitä ovat supernovat, massiivisten tähtien aurinkotuulet ja aktiivisista galaksien ytimistä syntyvät suihkut (Naab and Ostriker, 2017).

4 Loppupäätelmät

Ellipsigalaksit ovat paljon monimuotoisempia systeemeitä kuin voisi aluksi luulla. Kaksi pääluokkaa isoille ellipsigalakseille ovat jättiläismäiset ellipsit ja keskiuuret ellipsit. Kirkkaat jättiläismäiset ellipsit pyörivät hyvin hitaasti, ovat muodoltaan triaksiaalisia, niiden elliptisyys on usein melko pieni, niillä on laatikkomaiset isofootit ja niiden keskustat ovat laakeita. Keskikirkkaat ellipsit pyörivät nopeasti verrattuna kirkkaisiin, niiden muoto on liki litteä pyörähdysellipsoidi, niillä on paljon enemmän vaihtelua elliptisyyksissä kuin kirkkailla ellipseillä, isofootit ovat kiekkomaisia ja keskustat kompakteja ja jyrkkiä.

Tutkimukset ovat osoittaneet, että ellipsit eivät eroa galaktisilta ominaisuuksiltaan liian paljoa spiraaleista. Niitä ympäröi pimeän aineen halot ja niiden keskustoissa lymyää supermassiivisia mustia aukkoja. Monoliittinen romahdus on melko varmasti suljettu pois, ja nykyisin lupaavimmalta näyttävä teoria ellipsigalaksien synnylle ovat mergerit, joko spiraaligalaksien välillä tai sitten kahden ellipsin välillä. Galaksien törmätessä dynaaminen kitka saa galaksit hidastumaan ja uppoamaan yhteen uuden pimeän aineen halon sisään. Keskustan tähtien vuorovaikutukset toisiaan kiertävien mustien aukkojen kanssa muokaa suurten ellipsien keskustoita laakeammiksi. Isojen törmäysten lisäksi myös tähtien kertyminen ellipsien ulko-osiin on isossa roolissa ellipsien kasvuun pienillä punasiitymillä.

Viitteet

- S. J. Aarseth and J. Binney. On the relaxation of galaxies and clusters from aspherical initial conditions. *MNRAS*, 185:227–244, October 1978. doi: 10.1093/mnras/185.2.227.
- A. Aragon-Salamanca, R. S. Ellis, W. J. Couch, and D. Carter. Evidence for systematic evolution in the properties of galaxies in distant clusters. *MNRAS*, 262:764–794, June 1993. doi: 10.1093/mnras/262.3.764.
- J. E. Barnes. Encounters of disk/halo galaxies. *ApJ*, 331:699–717, August 1988. doi: 10.1086/166593.
- J. E. Barnes. Transformations of galaxies. I - Mergers of equal-mass stellar disks. *ApJ*, 393:484–507, July 1992. doi: 10.1086/171522.
- M. C. Begelman, R. D. Blandford, and M. J. Rees. Massive black hole binaries in active galactic nuclei. *Nature*, 287:307–309, September 1980. doi: 10.1038/287307a0.
- E. F. Bell, C. Wolf, K. Meisenheimer, H.-W. Rix, A. Borch, S. Dye, M. Kleinheinrich, L. Wisotzki, and D. H. McIntosh. Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since $z \sim 1$. *ApJ*, 608:752–767, June 2004. doi: 10.1086/420778.
- E. F. Bell, T. Naab, D. H. McIntosh, R. S. Somerville, J. A. R. Caldwell, M. Barden, C. Wolf, H.-W. Rix, S. V. Beckwith, A. Borch, B. Häussler, C. Heymans, K. Jahnke, S. Jogee, S. Koposov, K. Meisenheimer, C. Y. Peng, S. F. Sanchez, and L. Wisotzki. Dry Mergers in GEMS: The Dynamical Evolution of Massive Early-Type Galaxies. *ApJ*, 640:241–251, March 2006. doi: 10.1086/499931.
- R. Bender, S. Doebereiner, and C. Moellenhoff. Isophote shapes of elliptical galaxies. I - The data. *A&AS*, 74:385–426, September 1988.
- J. Binney and S. Tremaine. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, Princeton ; New Jersey, 2008.
- M. Boylan-Kolchin, C.-P. Ma, and E. Quataert. Dissipationless mergers of elliptical galaxies and the evolution of the fundamental plane. *MNRAS*, 362:184–196, September 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09278.x.
- M. J. I. Brown, A. Dey, B. T. Jannuzi, K. Brand, A. J. Benson, M. Brodwin, D. J. Croton, and P. R. Eisenhardt. The Evolving Luminosity Function of Red Galaxies. *ApJ*, 654:858–877, January 2007. doi: 10.1086/509652.

- M. Cappellari, R. Bacon, M. Bureau, M. C. Damen, R. L. Davies, P. T. de Zeeuw, E. Emsellem, J. Falcón-Barroso, D. Krajnović, H. Kuntschner, R. M. McDermid, R. F. Peletier, M. Sarzi, R. C. E. van den Bosch, and G. van de Ven. The SAURON project - IV. The mass-to-light ratio, the virial mass estimator and the Fundamental Plane of elliptical and lenticular galaxies. *MNRAS*, 366:1126–1150, March 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09981.x.
- C. M. Carollo, M. Franx, G. D. Illingworth, and D. A. Forbes. Ellipticals with Kinematically Distinct Cores: V - I Color Images with WPFC2. *ApJ*, 481:710–734, May 1997. doi: 10.1086/304060.
- T. J. Cox, S. N. Dutta, T. Di Matteo, L. Hernquist, P. F. Hopkins, B. Robertson, and V. Springel. The Kinematic Structure of Merger Remnants. *ApJ*, 650:791–811, October 2006. doi: 10.1086/507474.
- E. Daddi, A. Renzini, N. Pirzkal, A. Cimatti, S. Malhotra, M. Stiavelli, C. Xu, A. Pasquali, J. E. Rhoads, M. Brusa, S. di Serego Alighieri, H. C. Ferguson, A. M. Koekemoer, L. A. Moustakas, N. Panagia, and R. A. Windhorst. Passively Evolving Early-Type Galaxies at $1.4 \lesssim z \lesssim 2.5$ in the Hubble Ultra Deep Field. *ApJ*, 626:680–697, June 2005. doi: 10.1086/430104.
- S. Djorgovski and M. Davis. Fundamental properties of elliptical galaxies. *ApJ*, 313:59–68, February 1987. doi: 10.1086/164948.
- A. Dressler, D. Lynden-Bell, D. Burstein, R. L. Davies, S. M. Faber, R. Terlevich, and G. Wegner. Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies. I - A new distance estimator. *ApJ*, 313:42–58, February 1987. doi: 10.1086/164947.
- T. Ebisuzaki, J. Makino, and S. K. Okumura. Merging of two galaxies with central black holes. *Nature*, 354:212–214, November 1991. doi: 10.1038/354212a0.
- R. S. Ellis, I. Smail, A. Dressler, W. J. Couch, A. Oemler, Jr., H. Butcher, and R. M. Sharples. The Homogeneity of Spheroidal Populations in Distant Clusters. *ApJ*, 483:582–596, July 1997. doi: 10.1086/304261.
- S. M. Faber and R. E. Jackson. Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies. *ApJ*, 204:668–683, March 1976. doi: 10.1086/154215.
- S. M. Faber, S. Tremaine, E. A. Ajhar, Y.-I. Byun, A. Dressler, K. Gebhardt, C. Grillmair, J. Kormendy, T. R. Lauer, and D. Richstone. The Centers of Early-Type Galaxies with HST. IV. Central Parameter Relations. *AJ*, 114:1771, November 1997. doi: 10.1086/118606.
- S. M. Faber, C. N. A. Willmer, C. Wolf, D. C. Koo, B. J. Weiner, J. A. Newman, M. Im, A. L. Coil, C. Conroy, M. C. Cooper, M. Davis, D. P. Finkbeiner, B. F. Gerke, K. Gebhardt, E. J. Groth, P. Guhathakurta, J. Harker, N. Kaiser, S. Kassin, M. Kleinheinrich, N. P. Konidakis, R. G. Kron, L. Lin, G. Luppino, D. S. Madgwick, K. Meisenheimer, K. G. Noeske, A. C. Phillips, V. L. Sarajedini, R. P. Schiavon, L. Simard, A. S. Szalay, N. P. Vogt, and R. Yan.

- Galaxy Luminosity Functions to $z \sim 1$ from DEEP2 and COMBO-17: Implications for Red Galaxy Formation. *ApJ*, 665:265–294, August 2007. doi: 10.1086/519294.
- R. T. Farouki and S. L. Shapiro. Simulations of merging disk galaxies. *ApJ*, 259:103–115, August 1982. doi: 10.1086/160151.
- L. Ferrarese and H. Ford. Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present and Future Research. *SSRv*, 116:523–624, February 2005. doi: 10.1007/s11214-005-3947-6.
- L. Ferrarese and D. Merritt. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *ApJ*, 539:L9–L12, August 2000. doi: 10.1086/312838.
- D. A. Forbes, M. Franx, and G. D. Illingworth. Ellipticals with Kinematically Distinct Cores: WFPC1 Imaging of Nearby Ellipticals. *AJ*, 109:1988, May 1995. doi: 10.1086/117425.
- W. Forman, C. Jones, and W. Tucker. Hot coronae around early-type galaxies. *ApJ*, 293:102–119, June 1985. doi: 10.1086/163218.
- K. Gebhardt, R. Bender, G. Bower, A. Dressler, S. M. Faber, A. V. Filippenko, R. Green, C. Grillmair, L. C. Ho, J. Kormendy, T. R. Lauer, J. Magorrian, J. Pinkney, D. Richstone, and S. Tremaine. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *ApJ*, 539:L13–L16, August 2000. doi: 10.1086/312840.
- O. Gerhard, A. Kronawitter, R. P. Saglia, and R. Bender. Dynamical Family Properties and Dark Halo Scaling Relations of Giant Elliptical Galaxies. *AJ*, 121:1936–1951, April 2001. doi: 10.1086/319940.
- O. E. Gerhard. N-body simulations of disc-halo galaxies - Isolated systems, tidal interactions and merging. *MNRAS*, 197:179–208, October 1981. doi: 10.1093/mnras/197.1.179.
- O. E. Gerhard and J. Binney. Triaxial galaxies containing massive black holes or central density cusps. *MNRAS*, 216:467–502, September 1985. doi: 10.1093/mnras/216.2.467.
- A. W. Graham, P. Erwin, N. Caon, and I. Trujillo. A Correlation between Galaxy Light Concentration and Supermassive Black Hole Mass. *ApJ*, 563:L11–L14, December 2001. doi: 10.1086/338500.
- A. Gualandris and D. Merritt. Dynamics around supermassive black holes. *ArXiv e-prints*, August 2007.
- R. J. Harms, H. C. Ford, Z. I. Tsvetanov, G. F. Hartig, L. L. Dressel, G. A. Kriss, R. Bohlin, A. F. Davidsen, B. Margon, and A. K. Kochhar. HST FOS spectroscopy of M87: Evidence for a disk of ionized gas around a massive black hole. *ApJ*, 435:L35–L38, November 1994. doi: 10.1086/187588.
- L. Hernquist. Structure of merger remnants. I - Bulgeless progenitors. *ApJ*, 400:460–475, December 1992. doi: 10.1086/172009.

- N. Häring and H.-W. Rix. On the Black Hole Mass-Bulge Mass Relation. *ApJ*, 604:L89–L92, April 2004. doi: 10.1086/383567.
- P. H. Johansson, T. Naab, and J. P. Ostriker. Forming Early-type Galaxies in Λ CDM Simulations. I. Assembly Histories. *ApJ*, 754:115, August 2012. doi: 10.1088/0004-637X/754/2/115.
- N. Katz. Dissipational galaxy formation. II - Effects of star formation. *ApJ*, 391:502–517, June 1992. doi: 10.1086/171366.
- N. Katz and J. E. Gunn. Dissipational galaxy formation. I - Effects of gasdynamics. *ApJ*, 377:365–381, August 1991. doi: 10.1086/170367.
- S. Khochfar and A. Burkert. On the origin of isophotal shapes in elliptical galaxies. *MNRAS*, 359:1379–1385, June 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.08988.x.
- J. Kormendy and D. Richstone. Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei. *ARA&A*, 33:581, 1995. doi: 10.1146/annurev.aa.33.090195.003053.
- N. Lahén, P. H. Johansson, A. Rantala, T. Naab, and M. Frigo. The fate of the Antennae galaxies. *MNRAS*, 475:3934–3958, April 2018. doi: 10.1093/mnras/sty060-.
- R. B. Larson. Dynamical models for the formation and evolution of spherical galaxies. *MNRAS*, 166:585–616, March 1974. doi: 10.1093/mnras/166.3.585.
- R. B. Larson. Models for the formation of elliptical galaxies. *MNRAS*, 173:671–699, December 1975. doi: 10.1093/mnras/173.3.671.
- H. F. Levison. Observable properties of E0 triaxial galaxies - A test for triaxiality. *ApJ*, 320:L93–L97, September 1987. doi: 10.1086/184982.
- D. Lynden-Bell. Statistical mechanics of violent relaxation in stellar systems. *MNRAS*, 136:101, 1967. doi: 10.1093/mnras/136.1.101.
- E. Maoz. Dynamical Constraints on Alternatives to Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei. *ApJ*, 494:L181–L184, February 1998. doi: 10.1086/311194.
- A. May and T. S. van Albada. Dynamical constraints during violent relaxation and their effects on the final state. *MNRAS*, 209:15–23, July 1984. doi: 10.1093/mnras/209.1.15.
- D. H. McIntosh, Y. Guo, J. Hertzberg, N. Katz, H. J. Mo, F. C. van den Bosch, and X. Yang. Ongoing assembly of massive galaxies by major merging in large groups and clusters from the SDSS. *MNRAS*, 388:1537–1556, August 2008. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13531.x.
- D. Merritt and T. Fridman. Triaxial Galaxies with Cusps. *ApJ*, 460:136, March 1996. doi: 10.1086/176957.
- J. C. Mihos and L. Hernquist. Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers. *ApJ*, 464:641, June 1996. doi: 10.1086/177353.

- M. Milosavljević, D. Merritt, A. Rest, and F. C. van den Bosch. Galaxy cores as relics of black hole mergers. *MNRAS*, 331:L51–L55, April 2002. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05436.x.
- H. Mo, F. van den Bosch, and S. White. *Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 2010.
- R. F. Mushotzky, M. Loewenstein, H. Awaki, K. Makishima, K. Matsushita, and H. Matsumoto. ASCA observation of NGC 4636: Dark matter and metallicity gradient. *ApJ*, 436:L79–L82, November 1994. doi: 10.1086/187637.
- T. Naab and J. P. Ostriker. Theoretical Challenges in Galaxy Formation. *ARA&A*, 55:59–109, August 2017. doi: 10.1146/annurev-astro-081913-040019.
- T. Naab, S. Khochfar, and A. Burkert. Properties of Early-Type, Dry Galaxy Mergers and the Origin of Massive Elliptical Galaxies. *ApJ*, 636:L81–L84, January 2006. doi: 10.1086/500205.
- T. Naab, P. H. Johansson, and J. P. Ostriker. Minor Mergers and the Size Evolution of Elliptical Galaxies. *ApJ*, 699:L178–L182, July 2009. doi: 10.1088/0004-637X/699/2/L178.
- J. Negroponte and S. D. M. White. Simulations of mergers between disc-halo galaxies. *MNRAS*, 205:1009–1029, December 1983. doi: 10.1093/mnras/205.4.1009.
- C. Nipoti, P. Londrillo, and L. Ciotti. Galaxy merging, the fundamental plane of elliptical galaxies and the $M_{BH}-\sigma_0$ relation. *MNRAS*, 342:501–512, June 2003. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06554.x.
- R. B. Partridge and P. J. E. Peebles. Are Young Galaxies Visible? *ApJ*, 147:868, March 1967. doi: 10.1086/149079.
- K. D. Rakos and J. M. Schombert. Color evolution from $Z = 0$ to $Z = 1$. *ApJ*, 439:47–59, January 1995. doi: 10.1086/175150.
- A. Rantala, P. H. Johansson, T. Naab, J. Thomas, and M. Frigo. The formation of extremely diffuse galaxy cores by merging supermassive black holes. *ArXiv e-prints*, May 2018.
- B. Robertson, J. S. Bullock, T. J. Cox, T. Di Matteo, L. Hernquist, V. Springel, and N. Yoshida. A Merger-driven Scenario for Cosmological Disk Galaxy Formation. *ApJ*, 645:986–1000, July 2006. doi: 10.1086/504412.
- D. Schade, L. F. Barrientos, and O. López-Cruz. Evolution of Cluster Ellipticals at $0.2 < z < 1.2$ from Hubble Space Telescope Imaging,. *ApJ*, 477:L17–L20, March 1997. doi: 10.1086/310508.
- P. Schneider. *Extragalactic astronomy and cosmology : an introduction*. Springer, Berlin ; New York, 2006.
- F. Schweizer. Dust and gas - Overview. In *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, volume 127 of *IAU Symposium*, pages 109–122, 1987.

- Linda S. Sparke and John S. Gallagher III. *Galaxies in the Universe : An Introduction*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 2nd edition, 2007. Previous ed.: 2000.
- S. A. Stanford, P. R. Eisenhardt, and M. Dickinson. The Evolution of Early-Type Galaxies in Distant Clusters. *ApJ*, 492:461–479, January 1998. doi: 10.1086/305050.
- T. S. Statler. Self-consistent models of perfect triaxial galaxies. *ApJ*, 321:113–152, October 1987. doi: 10.1086/165619.
- T. S. Statler. On the velocity fields of elliptical galaxies. *AJ*, 102:882–892, September 1991. doi: 10.1086/115919.
- E. N. Taylor, M. Franx, P. G. van Dokkum, E. F. Bell, G. B. Brammer, G. Rudnick, S. Wuyts, E. Gawiser, P. Lira, C. M. Urry, and H.-W. Rix. The Rise of Massive Red Galaxies: The Color-Magnitude and Color-Stellar Mass Diagrams for $z_{\text{phot}} \lesssim 2$ from the Multiwavelength Survey by Yale-Chile. *ApJ*, 694:1171–1199, April 2009. doi: 10.1088/0004-637X/694/2/1171.
- I. Trujillo, G. Feulner, Y. Goranova, U. Hopp, M. Longhetti, P. Saracco, R. Bender, V. Braito, R. Della Ceca, N. Drory, F. Mannucci, and P. Severgnini. Extremely compact massive galaxies at $z \sim 1.4$. *MNRAS*, 373:L36–L40, November 2006. doi: 10.1111/j.1745-3933.2006.00238.x.
- T. S. van Albada. Dissipationless galaxy formation and the R to the 1/4-power law. *MNRAS*, 201:939–955, December 1982. doi: 10.1093/mnras/201.4.939.
- R. P. van der Marel and M. Franx. A new method for the identification of non-Gaussian line profiles in elliptical galaxies. *ApJ*, 407:525–539, April 1993. doi: 10.1086/172534.
- R. P. van der Marel and F. C. van den Bosch. Evidence for a $3 \times 10^8 M_{\odot}$ Black Hole in NGC 7052 from Hubble Space Telescope Observations of the Nuclear Gas Disk. *AJ*, 116:2220–2236, November 1998. doi: 10.1086/300593.
- A. van der Wel, B. P. Holden, A. W. Zirm, M. Franx, A. Rettura, G. D. Illingworth, and H. C. Ford. Recent Structural Evolution of Early-Type Galaxies: Size Growth from $z = 1$ to $z = 0$. *ApJ*, 688:48–58, November 2008. doi: 10.1086/592267.
- P. G. van Dokkum. The Recent and Continuing Assembly of Field Elliptical Galaxies by Red Mergers. *AJ*, 130:2647–2665, December 2005. doi: 10.1086/497593.
- P. G. van Dokkum, M. Franx, M. Kriek, B. Holden, G. D. Illingworth, D. Magee, R. Bouwens, D. Marchesini, R. Quadri, G. Rudnick, E. N. Taylor, and S. Toft. Confirmation of the Remarkable Compactness of Massive Quiescent Galaxies at $z \sim 2.3$: Early-Type Galaxies Did not Form in a Simple Monolithic Collapse. *ApJ*, 677:L5, April 2008. doi: 10.1086/587874.
- S. D. M. White. Simulations of merging galaxies. *MNRAS*, 184:185–203, July 1978. doi: 10.1093/mnras/184.2.185.