

Superjoukot

Kandidaatin tutkielma
Turun yliopisto
Tähtitiede
2026
LuK Una Berrymen
Tarkastaja:
Dos. Pekka Heinämäki

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Berrymen, Una Superjoukot

Kandidaatin tutkielma, 26 s., 3 liites.
Tähtitiede
Huhtikuu 2026

Superjoukot ovat maailmankaikkeuden suurimpia havaittuja rakenteita, joista kosminen verkko koostuu yhdessä filamenttien ja aukkojen kanssa. Superjoukot eivät ole galaksijoukkojen tavoin virialisoituneita, joka tekee niiden määrittelystä vaikeaa. Muutama menetelmä on kuitenkin vakiintunut superjoukkojen tutkimuksessa.

Jatkuvasti tarkentuvat punasiirtymäkatalogit mahdollistavat superjoukkojen tutkimisen tarkemmin ja kauempaa kuin koskaan. Maailmankaikkeuden suurimpien rakenteiden ominaisuuksien ja niiden vuorovaikutuksen ymmärtäminen suuren mittakaavan ympäristön kanssa voivat antaa vastauksia koko maailmankaikkeuden syntyyn, kehitykseen ja tulevaisuuteen, jonka vuoksi niiden tutkiminen on ajankohtaista ja tärkeää.

Tässä tutkielmassa tutustutaan maailmankaikkeuden suuren mittakaavan rakenteisiin, erityisesti superjoukkoihin. Työssä käydään läpi tyypillisiä tutkimusmenetelmiä, joita superjoukkoihin sovelletaan ja hieman teoriaa, mihin tutkimus perustuu. Työssä käydään läpi myös superjoukkojen ominaisuuksia ja annetaan esimerkkejä löydetyistä superjoukkorakenteista.

Asiasanat: Suuren mittakaavan rakenne, superjoukot, kosminen verkko

Sisällys

Johdanto	1
1 Kosminen verkko	2
1.1 Rakenteet ja niiden synty	3
1.2 Galaksien punasiirtymäkartoitus	7
2 Superjoukkojen määrittäminen	10
2.1 Tiheysraja	11
2.2 Pekuliaarinopeus	13
2.3 Friends of Friends, FoF	15
3 Superjoukkojen ominaisuuksia	18
4 Löydettyjä superjoukkorakenteita	20
5 Yhteenveto	23

Johdanto

Ensimmäisen ajatuksen maailmankaikkeuden verkkomaisesta rakenteesta esitti Jaan Einasto ja Mihkel Jõeveer IAU-kokouksessa vuonna 1977 [1, 2]. Tämä suuri rakenne sitten havaittiin ensimmäisen kerran 1980-luvulla, kun galaksien sijainteja selvitettiin kauempaa ja suuremmissa määrissä kuin koskaan ennen Center for Astrophysics:in (CfA) toisen galaksikatalogin, CfA2:n, tuloksena [3]. Kartoitus paljasti, miten galaksit jakautuvat maailmankaikkeudessa suureen verkkomaiseen rakenteeseen, kosmiseen verkkoon. Aina tarkemmat ja kauemmas ylettyvät kartoitukset 2000-luvulla ovat vahvistaneet kosmisen verkon olemassaolon ja syventäneet ymmärrystä sen rakenteista ja niiden käyttäytymisestä.

Kosminen verkko koostuu tyhjästä aukoista (engl. voids), pitkistä ja kapeista filamenteista ja galaksijoukoista. Superjoukot ovat kosmisen verkon suurimpia rakenteita ns. joukkojen joukkoja, jotka ylettävät jopa $100h^{-1}\text{Mpc}$:in mittakaavoihin. Tutkimukset superjoukoista ja muista kosmisen verkon rakenteista ovat keskittyneet juuri rakenteiden tunnistamiseen ja niiden ympäristössä tapahtuvaan galaksien ja pimeän aineen halojen muodostumiseen [4]. Tutkimusten mukaan suuren mittakaavan ympäristöillä on nimittäin vaikutusta tähtien syntymisen tahdistusta aina galaksien ominaisuuksiin [5].

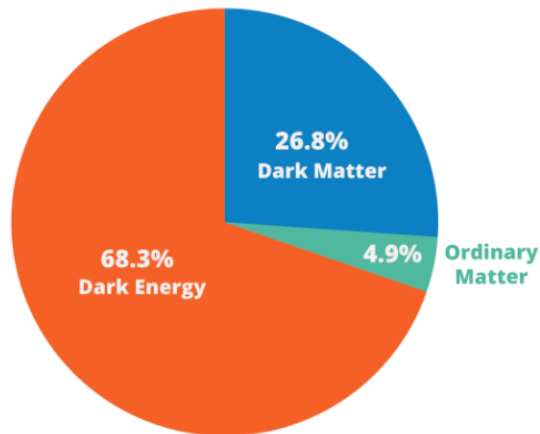
Tutkimukset kosmisesta verkosta ja sen rakenteista voivat vahvistaa teorioita maailmankaikkeuden laajenemisesta, pimeästä aineesta ja kosmologisista malleista, koska rakenteiden evoluutio, rakenne ja dynamiikka ovat vahvasti riippuvaisia pimeästä aineesta ja -energiasta [4]. Suuren mittakaavan rakenteiden tutkiminen on vaikeaa niiden laajuuden ja havaintojen rajallisuuden vuoksi. Tämän takia rakenteiden määritelmät ja niihin sovelletut tutkimusmenetelmät eivät ole vakiintuneita. Tässä tutkielmassa käsittelen kosmisen verkon rakenteita, erityisesti superjoukkoja ja superjoukkojen määrittämistä eri menetelmillä.

1 Kosminen verkko

Kaikki aine maailmankaikkeudessa on jakautunut suurimmassa mahdollisessa mittakaavassa verkkomaiseen rakenteeseen, kosmiseen verkkoon. Havainnot viittaavat siihen, että maailmankaikkeus laajenee jatkuvasti, nykyään jopa kiihtyvällä nopeudella [6], ja että se koostuu baryonisesta aineesta, pimeästä aineesta ja pimeästä energiasta. Universumin kehityksen aikana aine kertyy havaittaviin rakenteisiin pimeän aineen gravitaatiovuorovaikutuksen tuloksena. Pimeä energia ja maailmankaikkeuden laajeneminen puolestaan hidastavat aineen kertymistä rakenteisiin. [3]

Tämän hetken suosituimman kosmologisen mallin, Λ CDM:n, mukaan pimeä aine ja -energia kattaa suurimman osan aineesta, noin 95 prosenttia, kuten kuvasta 1 voi nähdä. Tämä maailmankaikkeuden "pimeä puoli" saa aineen jakautumaan eri rakenteisiin, jotka kokonaisuudessa muodostavat kosmisen verkon. [7] Nykyinen käsitys kosmisen verkon rakenteesta on saatu punasiirtymäkataloigeilla, jotka kartoittivat galaksien ja -joukkojen sijainteja suuressa mittakaavassa. [4]

Galaksit, kaasut ja pimeä aine järjestäytyvät tiheisiin ja harvoihin alueisiin epä-säännöllisesti, mutta kokonaisuus muodostaa systeemin, jonka osat kytkeytyvät toisiinsa. Tämän rakenteen voi nähdä kuvasta 2. Kuvan merkittävin rakenne, Sloan Great Wall (SGW) näkyy selkeästi punaisella ylemmässä sektorissa $z \approx 0.1$ kohdalla. [4] SGW tulkitaan välillä yhdeksi rakenteeksi ja välillä usean superjoukon yhdistelmäksi [8].

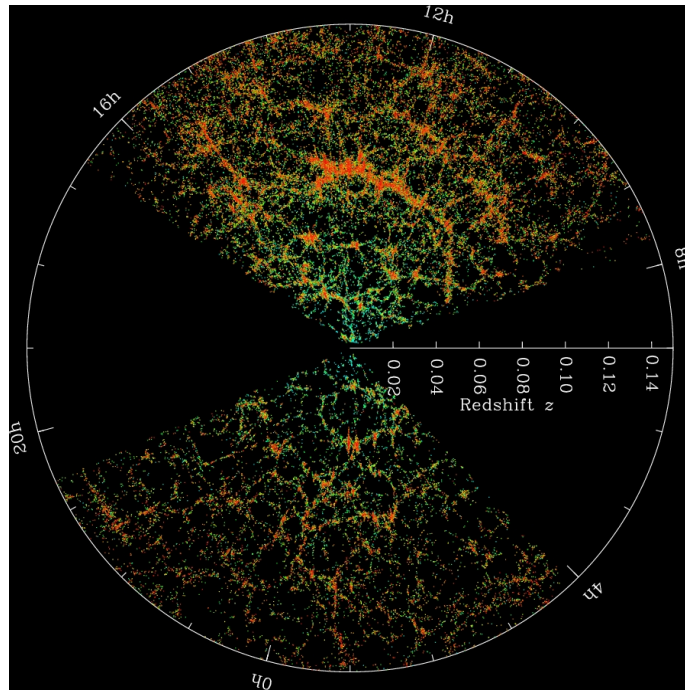


Kuva 1. Arvioitu näkyvän aineen, pimeän aineen ja pimeän energian suhteelliset osuudet maailmankaikkeudessa. Tieto on määritetty Planck Collaborationin tietojen pohjalta. Lähde: ATLAS Experiment, CERN.

1.1 Rakenteet ja niiden synty

Kosmisen verkon rakenteet voidaan jakaa seuraavasti: solmukohtat eli superjoukot, jotka sisältävät useita galaksiryhmiä ja -joukkoja; superjoukkoja yhdistävät pitkät ja kapeat "sillat" eli filamentit ja suuret harvat alueet eli aukot (engl. voids). [4] Superjoukkoja voi myös ympäröidä seinämät (engl. sheets tai walls), joihin filamentit yhdistyvät [1]. Kyseiset rakenteet eivät ole virialisoituneita, mutta niitä voidaan kuitenkin tutkia omina systeeminään [7]. Virialisoituminen tarkoittaa yleisesti sitä, että yksittäinen dynaaminen systeemi on stationaarisessa tasapainotilassa. Esimerkiksi galaksit ovat virialisoituneita, jolloin ne eivät enää laajene tai romahda. [9]

Superjoukot ovat siis filamenttien yhdistämiä alueita, joiden galaksitiheydet ovat universumin keskitiheyttä suurempia, ja koostuvat galakseista ja galaksijoukoista, ja ne voivat sisältää myös filamentteja. Superjoukkoihin sisältyy maailmankaikkeuden rikkaimmat galaksijoukot ja kirkkaimmat galaksit. Galaksijoukkojen rikkaudella tarkoitetaan sen sisältämien galaksien lukumäärää. Suurin osa todella vanhoista galakseista sijoittuvat superjoukkojen keskusten alueille ja siellä sijaitseviin rikkaisiin galaksijoukkoihin. Nuoremmat galaksit sijoittuvat enemmän superjoukkojen ulko-

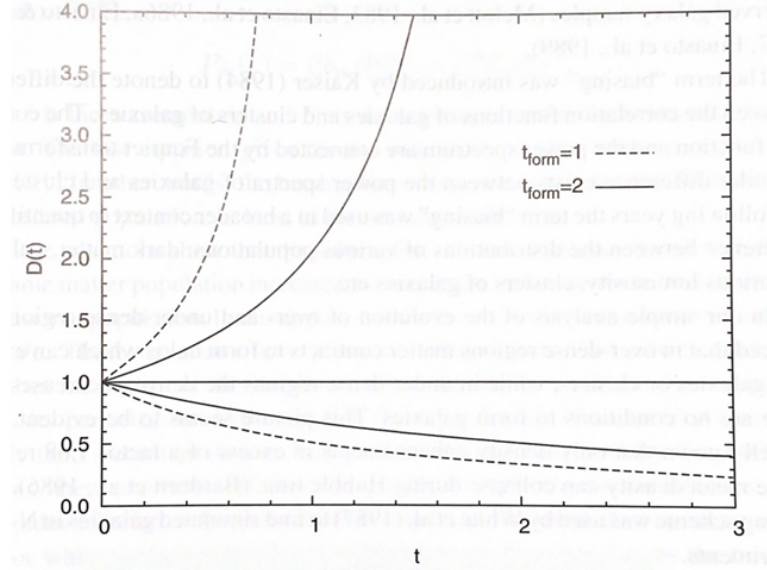


Kuva 2. Sloan digital sky survey (SDSS) maailmankaikkeuden kartta, mistä voi nähdä kosmisen verkon rakenteen. Jokainen piste on galaksi ja pisteen väri kertoo paikallisen tiheyden (punaisempi on tiheämpi). Lähde: M. Blanton ja SDSS <https://www.sdss4.org/science>

reunoille ja filamentteihin. [7]

Superjoukot toimivat syvinä potentiaaliukuoppina, mihin pääasiassa pimeä aine kerääntyy vähemmän tiheiltä alueilta. Tämä johtaa kosmisen verkon rakenteiden muuntautumiseen ja kasvavaan vuorovaikutukseen. [7] Ylitiheät alueet jatkavat kasvamistaan, kun alitiheät tyhjenevät. Eksponentiaalista rakenteiden kasvamista kuitenkin hidastaa maailmankaikkeuden laajeneminen [3]. Laajenemisen kiihtyminen alkaa noin punasiirtymällä $z \approx 0.5$, jolloin pimeä energia alkaa dominoida universumin massa-energia tiheyttä [10].

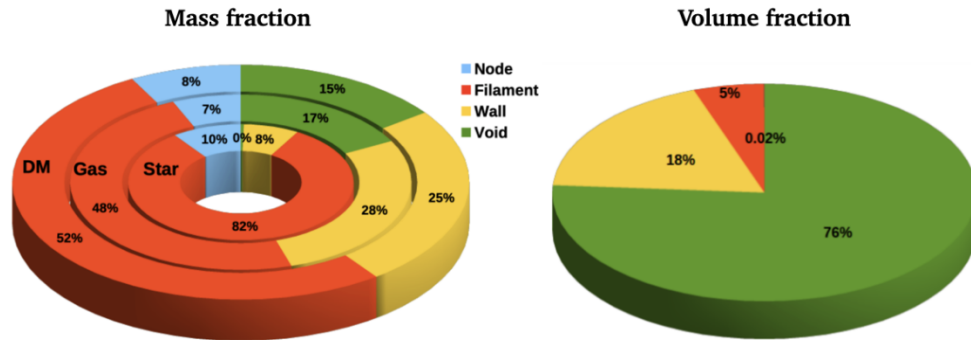
Tämän tiheyden jakautumisen evoluution voi nähdä kuvasta 3, jossa vahvemmin ylitiheät alueet kasvavat ja romahtavat nopeammin, ja vastaavasti vahvemmin alitiheät alueet tyhjenevät nopeammin (vrt. $t_{form} = 1$). Kuva 3 edustaa myös pallomaisen romahduksen mallia (engl. Spherical collapse model), joka kuvaa, miten alueen tiheyden mukaan pimeää ainetta kerääntyy, kunnes se romahtaa virialisoituneeksi



Kuva 3. Pimeän aineen halojen evoluutiota. Yli- ja alitiheyksien kehitykset analyytisestä approksimaatiosta. Aika t on mielivaltaisessa yksikössä ja tiheys D keskitiheyden yksikössä. Voimakkaammin ylitiehat alueet (katkoviiva ylempänä) romahtavat nopeammin kuin heikommin ylitiehat alueet (yhtenäinen viiva ylempänä). Vastavasti vahvemmin alitiehät alueet tyhjenevät nopeammin (katkoviiva alempana) kuin heikommin alitiehät (yhtenäinen viiva alempana). Suora viiva keskellä edustaa kriittistä pistettä, jossa tiheys on tasapainossa eikä se siis kasva tai pienene ajan kuluessa. $t_{form} = 1$ kuvastaa jyrkempiä yli- ja alitiheyksiä keskitiheyteen verrattuna ja $t_{form} = 2$ kuvastaa lievempiä yli- ja alitiheyksiä keskitiheyteen nähden. [1]

rakenteeksi, jossa galakseja voi muodostua. [1, 7]

Kosmisen verkon mittakaavassa superjoukot ovat kuitenkin todella pieniä alueita verrattuna aukkoihin. Ne kattavat vain yhden prosentin maailmankaikkeuden tilavuudesta, kun taas aukot kattavat 70-90 prosenttia [7], joka voidaan nähdä myös kuvan 4 oikeasta diagrammista. Kuvan 4 vasen kuvaaja esittää pimeän aineen, kaasun ja tähtien osuuksia kosmisen verkon rakenteiden massasta [11]. Vasemmasta diagrammista voidaan huomata, että filamentit sisältävät selkeästi eniten kaiken tyyppistä ainetta. Toisin kuin intuitiivisesti voisi ajatella, galaksitiheydeltään suurimmat rakenteet ovat kokonaisuudessaan massallisesti paljon pienempiä kuin filamentit, vaikka ne ovat näkyvämpiä (vrt. node osio kuvassa 4). Superjoukkojen sisällä on myös hienorakenteita, jotka muistuttavat suurta kosmisen verkon rakennetta,



Kuva 4. Kosmisen verkon rakenteiden osuudet maailmankaikkeuden tilavuudesta (oikea). Pimeän aineen, kaasun ja tähtien osuudet kosmisen verkon rakenteen massasta (vasen). [11]

mutta vain miniatyyrinä siitä [7].

Aukot ovat todella laajoja alueita, joissa aineen tiheys on alle universumin keskitiheyden, ja joiden läpi filamentit kulkevat superjoukosta toiseen [7]. Aukot näyttävät olevan tyhjiä, mutta ne kuitenkin sisältävät galakseja ja pimeää ainetta. Galakseja on kosmisen verkon mittasuhteessa lopulta niin vähän, että alueet voidaan katsoa olevan periaatteessa tyhjiä [4]. Aukot ovat yleensä melko ympyrämäisen muotoisia ja ne toimivat ikään kuin koko kosmisen verkon tilan järjestäjinä [4]. Kooltaan useimmat aukot kuten Bootes aukko ja Eridanus superaukot, ylittävät $100h^{-1}\text{Mpc}$. [7]

Vallalla olevan käsityksen mukaan rakenteet ovat kehittyneet hierarkisen kasvun tuloksena nykyiseen muotoonsa. ΛCDM -mallin puitteissa pienemmät pimeän aineen halot romahtavat ja virialisoituvat ensin. Nämä rakenteet puolestaan sulautuvat keskenään yhteen muodostaen suurempia pimeän aineen haloja sitten galakseja ja lopulta galaksijoukkoja. Pienemmät rakenteet luovat perustan suuremmille kasvaen hierarkisesti alhaalta ylös (engl. Bottom up hierarchical structure formation). [3] Maailmankaikkeuden varhaisissa vaiheissa tiheysjakauman piikit kasvoivat tiettyyn kriittiseen pisteeseen, jonka jälkeen ne romahtivat ja muodostivat virialisoituneita rakenteita kuten pimeän aineen haloja, joihin baryoninen aine kerääntyy pallomaisen

romahduksen mallin mukaan. Näin tähtiä pystyi syntymään ja lopulta galakseja. [11] Suurimpien superjoukkojen muodostumisen mahdollistaa noin $100h^{-1}$ Mpc:n mittakaavan pimeän aineen tiheysvaihtelut [7]. Kosmisen verkon rakenteiden syntyä ja evoluutiota gravitaation ja pimeän energian vuorovaikutuksesta voidaan tutkia teoreettisesti vain kosmologisilla simulaatioilla [7].

1.2 Galaksien punasiirtymäkartoitus

Kun galaksien sijainteja tutkitaan, pelkkä fotometrinen mittaus antaa taivaasta kaksiulotteisen kuvan, mutta punasiirtymän avulla kuvaan saadaan mukaan kolmas ulottuvuus, etäisyys havaitsijasta [9]. Punasiirtymä tarkoittaa havaittavaa muutosta emittoitujen säteilyn aallonpituudessa:

$$z_{obs} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad (1)$$

missä z_{obs} on punasiirtymä, λ_{em} on todellinen ja λ_{obs} havaittu aallonpituus. [3]

Merkittävin punasiirtymän aiheuttaja on maailmankaikkeuden laajeneminen. Mitattuun punasiirtymään vaikuttaa myös galaksien liike ja ns. gravitaatiopunasiirtymä. Gravitaation vaikutus on niin pientä, että se voidaan useimmiten jättää huomioidatta näin suurissa mittakaavoissa. Jotta kokonaisvaltainen punasiirtymä saadaan selvitettyä, täytyy ensin erikseen tarkastella kosmisen laajenemisen aiheuttamaa ja galaksien liikkeen, eli pekuliaarinopeuksien, aiheuttamaa punasiirtymää erikseen. Kun erilliset punasiirtymätermit yhdistetään, saadaan selville kokonaispunasiirtymä:

$$1 + z_{obs} = (1 + z_l)(1 + z_c)(1 + z_p) \quad (2)$$

[3] jossa z_l on aallonpituuden muutos johtuen oman galaksimme pekuliaarinopeudesta v . z_p on tutkittavan galaksin pekuliaarinopeudesta v_p johtuva punasiirtymä. z_c on maailmankaikkeuden laajenemisesta johtuva punasiirtymä, joka riippuu $a(t)$:sta

eli skaalatekijästä emission hetkeltä $1 + z_c = \frac{1}{a(t)}$ mukaan. Skaalakerroin a ja punasiirtymä z_c ovat siis verrannollisia $a = \frac{1}{(1+z_c)}$, jolloin nykyhetkellä ($z_c = 0$) a :n arvo on yksi. [3] Punasiirtymä siis ilmaisee, kuinka paljon pienempi skaalakerroin, ja näin myös maailmankaikkeus, oli valon lähtiessä liikkeelle nykyhetkeen verrattuna [12].

Punasiirtymä liittyy etäisyyteen Hubblen lain eli maailmankaikkeuden laajenemisen tulkinnasta. Kohteen fysikaalinen etäisyys voidaan määrittää:

$$\mathbf{r}(t) = a(t)\mathbf{x} \quad (3)$$

missä $\mathbf{r}(t)$ on kohteen paikkavektori eli etäisyys ajanhetkellä t ja \mathbf{x} on ns. mukana liikkuvan koordinaatiston etäisyys. Tämä on etäisyys, joka jättää huomioimatta maailmankaikkeuden laajenemisen eli $\mathbf{x} = r(t_0)$ ja $a(t)$ on skaalatekijä. [9]

Kun otetaan etäisyydestä aikaderivaatta, saadaan nopeus:

$$v = \frac{dr}{dt} = \dot{a}(t)\mathbf{x} \quad (4)$$

Kuten kaavasta (3) nähdään, $\mathbf{x} = \frac{r}{a(t)}$, jonka mukaan voidaan ilmaista nopeus:

$$v = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}r \quad (5)$$

missä $\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ on Hubblen parametri $H(t)$. Tästä päästään Hubblen lakiin, jossa nopeus voidaan siis ilmaista:

$$v = H(t)r \quad (6)$$

Hubblen parametri kuvaa maailmankaikkeuden laajenemisnopeutta halutussa ajassa yksikössä $[\frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}}]$. Hubblen vakio H_0 kuvastaa laajenemisnopeutta tällä hetkellä. Nopeus v voidaan esittää punasiirtymän avulla $v = cz$, missä c on valonnopeus ja z punasiirtymä. Tästä päästään etäisyyden ja punasiirtymän yhteyteen Hubblen laissa:

$$r = \frac{cz}{H_0} \quad (7)$$

Tämä Hubblen lain yksinekertainen malli toimii hyvin lähialueiden tutkimukseen, eli punasiirtymäetäisyyksiin $z \approx 0.1$ asti. [12]

Kun mennään etäisyyksiin, joissa kosmologinen malli ja sen parametrien arvot täytyy ottaa huomioon, etäisyys voidaan määrittää:

$$r = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \quad (8)$$

missä $E(z')$ on funktio, jonka arvo riippuu punasiirtymästä ja kosmologisten parametrien arvoista. [13] Funktio $E(z')$ voidaan kirjoittaa auki:

$$E^2(z) = \Omega_M(1+z)^3 + (1 - \Omega_M - \Omega_\Lambda)(1+z)^2 + \Omega_\Lambda \quad (9)$$

missä $\Omega_M = \frac{\rho}{\rho_c}$ on tiheysparametri, $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}$ on kosmologisen vakion termi, jossa Λ on kosmologinen vakio. Kaavasta (9) nähdään, miten kosmologisen mallin evoluutiota voidaan kuvata ja, miten siitä pystytään ilmaisemaan yhteyksiä havaintoihin punasiirtymästä. [12, 13]

Punasiirtymä saadaan selville spektroskooppisten havaintojen avulla. Alkuaineiden aallonpituudet ovat tiedossa, joten mittaamalla aallonpituuksia kohteelle nähdään, miten paljon aallonpituus poikkeaa havaintosijaan nähden levossa olevaan aallonpituuteen ja punasiirtymä saadaan kaavalla (1). Nämä kartoitukset ovat punasiirtymäkatalogeja. Galaksien sijaintien avaruudellinen esitys, mitä punasiirtymäkatalogit luovat, toteutetaan kiilakaavioilla (engl. wedge diagram). Kiilakaavio edustaa ympyrän sektoria, jossa Linnunrata eli havaintosija on ympyrän keskipisteessä. [9] Kuten kuvasta 2 näkyy, kaaviossa radiaalikomponentti, kuvassa z -koordinaatti, on punasiirtymä eli etäisyys havaintosijasta ja kulmaetäisyys ekvatoriaalisessa koordinaattijärjestelmässä eli rektaskensio on merkitty ympyrän kehälle.

Katalogien tärkeimmät ominaisuudet ovat taivaan alueen koko ja syvyys. Galaksien spektrien mittauksessa valotusajan täytyy olla pitkä, jotta signal-to-noise (S/N) ja resoluutio ovat tarpeeksi hyviä. Tämän vuoksi yleensä joko tutkittavien galaksien määrä tai jokaisen kohteen valotusaika kärsii. Kosmisen verkon tutkimisessa tutkitun alueen täytyy olla tilavuudeltaan suuri, jotta alue sisältää tarpeeksi galakseja hahmottamaan suuret rakenteet. [3]

The Center for Astrophysics (CfA) toteutti yhden ensimmäisistä punasiirtymäkatalogeista 1980-luvulla. Katalogia seurasi toinen, CfA2, jonka tuloksena pystyttiin ensimmäisen kerran havaita kosmisen verkon rakenteita. [3] 2000-luvulla tapahtui harppaus punasiirtymäkatalogeissa, kun Sloan Digital Sky Survey:tä (SDSS) aloitettiin toteuttamaan. SDSS on tuottanut yli kolme miljoona punasiirtymää eri vaiheissa, joka on mahdollistanut todella laajan kuvan maailmankaikkeuden rakenteesta. Verrattuna CfA2:een, joka kartoitti noin 10 000 galaksia, SDSS oli suuri edistysaskel. [3]

Nykypäivän harppaus galaksikartoituksissa on Dark Energy Spectroscopic Instrument, DESI. DESI:n tehtävänä on tehdä spektroskooppiset mittaukset noin 30:sta miljoonasta kohteesta viiden vuoden aikana, joista rakennetaan yksityiskohmainen kolmiulotteinen kartta muuttuvasta maailmankaikkeudesta punasiirtymävälillä $z = 0$ ja $z \approx 4$. Katalogi tulee kattamaan noin 14 000 neliöastetta, joka on noin kolmasosa koko taivaan alasta. DESI:n keskeisenä tavoitteena on ymmärtää pimeän energian aiheuttamaa maailmankaikkeuden laajenemista ja tutkia gravitaation jatkuvia vaikutuksia suurissa kosmologisissa mittakaavoissa. [14]

2 Superjoukkojen määrittely

Koska superjoukot eivät ole virialisoituneita rakenteita kuten galaksijoukot, niillä ei ole tarkkaa määritelmää. Määritelmä riippuu käytetystä tutkimusmenetelmästä ja valituista suureiden arvoista. Kirjallisuudessa superjoukkojen määritelmä voidaan jakaa kolmeen ryhmään: 1. gravitaatiolla sidotut alueet 2. gravitaationaalisesti epäsidotut maailmankaikkeuden ylitiheät alueet maailmankaikkeuden keskitiheyteen verrattuna ja 3. pekuliari nopeuskentällä yhdistyvät alueet [8]. Tiedetyt viittaukset superjoukkoihin, kuten kosmisen verkon solmukohtien alueet, ovat yleisesti vakiintuneet. Kuitenkin tarkempi määrittely esimerkiksi siitä, mitkä galaksit ja -joukot kuuluvat superjoukkoon ovat tutkimuskohtaisia.

Superjoukkojen määrittämiseen käytetään sekä havaintoja, että simulaatioita. Simulaatiot auttavat ymmärtämään rakenteiden astrofysikaalista taustaa ja niiden synnyn teoriaa. Simulaatiot antavat myös jatkuvasti parempia viitteitä siitä, miten rakenteet muuttuvat ajan kuluessa.

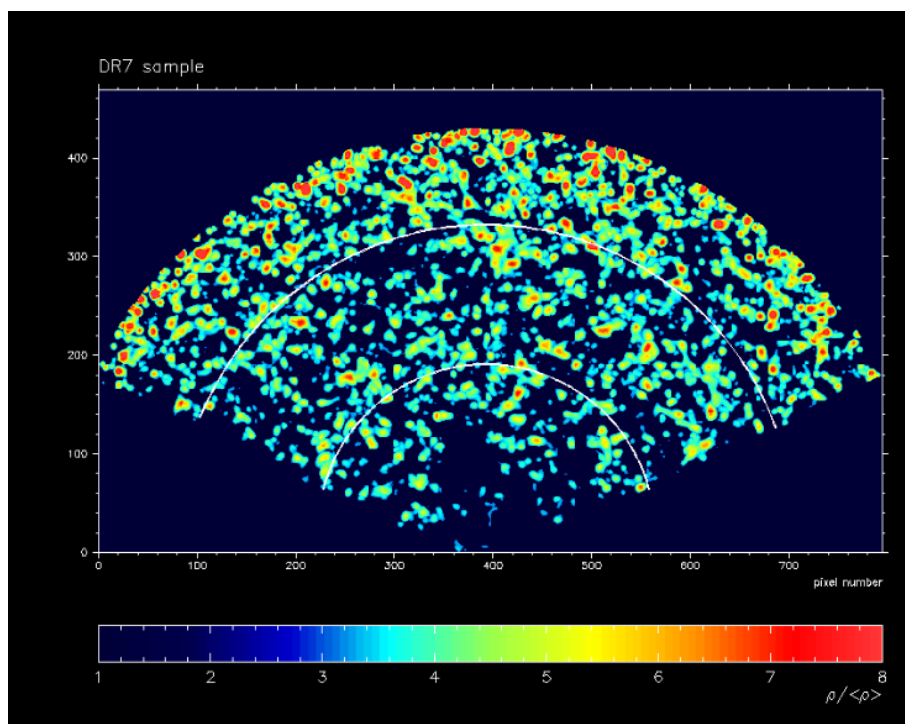
Superjoukkojen löytämiseen ja määrittämiseen on lukuisia menetelmiä riippuen tutkimuksen tarkoituksesta. Kokoan näistä tähän osioon kolme suosituinta tapaa, jotka toimivat yleisinä raameina datan käsittelyyn superjoukkojen määrittämisessä.

2.1 Tiheysraja

Tiheysraja-menetelmässä lasketaan galaksien tiheyskenttä paikkakoordinaattien (rektaskensio, deklinaatio ja punasiirtymä) avulla, jonka perusteella ylitiheistä alueista saadaan määritettyä superjoukkoja. Tiheyskenttä voidaan laskea simulaatioista tai havainnoista. Jos tiheyskenttä lasketaan havainnoista, taivaan koordinaatit täytyy muuttaa karteesisiin koordinaatteihin. Simulaatioissa galaksien koordinaatit ovat esitetty valmiiksi karteesisissa koordinaatistoissa. [3]

Tiheyskenttä lasketaan kolmiulotteisessa karteesisessa hilassa (engl. grid). Hilan alkio on yleensä kooltaan 1Mpc^3 . Tiheys lasketaan jokaisessa hilan alkiossa, jonka jälkeen tiheys pehmennetään (engl. smoothing) yli hilan alkioden käyttäen sopivaa kernelfunktiota, yleensä Gaussian tai Epanechnikov tyyppinen funktio. [3] Tiheyskentän kartoittamisessa täytyy määrittää kernelfunktion koko (engl. smoothing length). Funktion leveys valitaan siten, että se tuo esiin halutun kokoisia rakenteita. Superjoukkojen tapauksessa funktion on hyvä olla selkeästi leveämpi kuin galaksijoukot, jotka ovat muutaman megaparsekin levyisiä. Esimerkiksi $8h^{-1}\text{Mpc}$ on sopivan suuri tähän mittakaavaan ja siksi myös yleinen valinta. Tiheyskenttää laskettaessa tiheyksiä voidaan myös painottaa siellä olevien galaksien luminositeetilla. Tästä syntyy ns. luminositeetti-tiheyskenttä. [3]

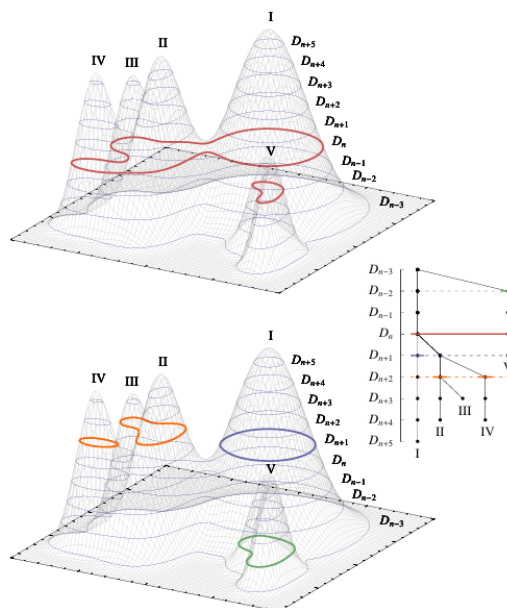
Saatuun tiheyskenttään sovelletaan sopivaa superjoukkoja määrittävää tiheysra-



Kuva 5. LRG:ien (Luminous Red Galaxies) luminositeetti-tiheyskenttä. Yksi pikseli vastaa $3h^{-1}\text{Mpc}$ ja käytetyn kernelfunktion koko on $8h^{-1}\text{Mpc}$. Värijakauma kuvaa galaksitiheyttä (punainen=tiheä, sininen=harva). [5]

jaa. Alueet, jotka ylittävät valitun rajan ovat superjoukkoja. Vaihtoehtona vakio-tiheysrajalle voidaan käyttää adaptiivista luminositeetti-tiheysrajaa. Siinä jokaiselle tiheyskentän piikille määritetään oma tiheysrajan arvo. Arvo saadaan määritettyä nostamalla tiheysrajaa kunnes yksittäinen systeemi ei jakaudu enää pienempiin osiin. Sekä vakio - että adaptiivisen tiheysrajan esitys voidaan nähdä kuvasta 6, jossa rajan ylittävät alueet määrittyisivät superjoukoiksi. Kuvassa on ylempänä esitetty vakio-tiheysrajaan ja alempana adaptiiviseen tiheysrajaan perustuva menetelmä.

Vakio-tiheysrajan arvo on huomioitava, jotta raja määritetään sellaiseksi, että perkolaatiota ei tapahdu ts. rakenteet erottuvat toisistaan eivätkä ne liity toisiinsa [7].



Kuva 6. Tiheyskentästä eroteltuja rakenteita vakio tiheysrajalla D_n (ylempänä) ja adaptiivisesti määritetyillä tiheysrajoilla (alempana) [3].

2.2 Pekuliaarinopeus

Galaksin pekuliaarinopeudella (engl. peculiar velocity) tarkoitetaan nopeutta, joka poikkeaa maailmankaikkeuden laajenemisnopeudesta. Tässä menetelmässä superjoukko määritetään yhtyvinä pekuliaarinopeuskentän alueina, joissa galaksien pekuliaarinopeudet osoittavat keskeiseen korkean tiheyden vetovoima-alueeseen (engl. BoA, basin of attraction). Näitä vetovoima-alueita ovat yleensä superjoukon rikkaimmat ja massiivisimmat galaksijoukot. [7] Pekuliaarinopeuksien poikkeama maailmankaikkeuden laajenemisen suunnasta johtuu lähinnä pimeään aineen ainejakauksen aiheuttamasta gravitaatiovoimasta. Tämän vuoksi pekuliaarinopeuksien kartta pystyy myös ilmaisemaan aineen jakautumaa ja tiheyttä kyseisellä alueella. [15] Laskennallisesti tiheyttä esittää nopeuskentän divergenssi [11].

Jos galaksin etäisyys pystytään määrittämään tarkasti, pekuliaarinopeus saadaan vähentämällä kosmisen laajenemisen termi havaitusta kokonaisnopeudesta

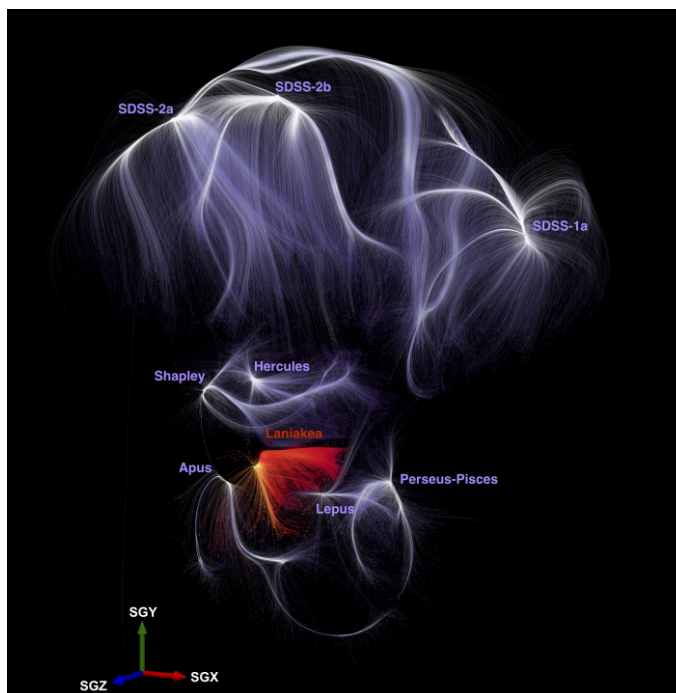
$$v = cz - H_0 D \quad (10)$$

jossa v on nopeus, c valonnopeus, z punasiirtymä, H_0 Hubblen vakio ja D etäisyys [9]. Kosmisen laajenemisen termi on Hubblen vakion ja etäisyyden tulo. Lähimpiä galakseja lukuunottamatta epätarkkuudet etäisyydessä aiheuttavat suoraan epätarkkuuksia pekuliaarinopeuteen, jotka voivat olla jopa suurempia kuin galaksien omat nopeudet [15]. Tämän vuoksi pekuliaarinopeusmenetelmä toimii vain lähiympäristön tutkimiseen. Vetovoima-alueita pystytään tutkia kuitenkin teoreettisesti simulaatioiden avulla kaikilla punasiirtymillä [8].

Pekuliaarinopeudet antavat vain radiaalikomponentin nopeudelle. Mitattu punasiirtymä on superpositio maailmankaikkeuden laajenemisen nopeudelle ja sen pekuliaarinopeudelle. Massiivisissa galaksijoukoissa yksittäisten galaksien pekuliaarinopeudet osoittavat vahvasti galaksijoukon massakeskipisteen suuntaan, jolloin havait-sijaa lähempänä olevien galaksien pekuliaarinopeudet osoittavat havait-sijasta pois-päin galaksijoukon suuntaan ja havait-sijasta kauimpana olevien galaksien nopeudet osoittavat havait-sijan suuntaan. Näin punasiirtymää mitatessa galaksien sijainnit näyttävät olevan joko lähempänä tai kauempana kuin ne todellisuudessa ovat. Tätä kutsutaan Finger of God -ilmiöksi. [9]

Koska suurimmalle osalle galakseista ainoastaan punasiirtymä voidaan määrittää, todellisen etäisyyden selvittäminen vaikeutuu. Superjoukkojen mittakaavassa nopeudet osoittavat edelleen massakeskipistettä kohti muttei yhtä vahvasti. Tämä aiheuttaa ns. litistymistä näkösäteen suunnassa venymisen sijaan, mikä tapahtuu Finger of God -ilmiössä. Sekä litistymisen, että Finger of God:in vaikutuksen punasiirtymäavaruuteen voi nähdä kuvasta 8, jossa vasemmalla on todellinen avaruus ja oikealla punasiirtymäavaruus. Nopeudet saattavat myös kumota toisensa, jolloin punasiirtymäavaruudessa etäisyydet romahtavat samalle viivalle. [9]

Cosmicflows-2 katalogi mittasi etäisyyksiä ja pekuliaarinopeuksia yli 8000 galaksille [16]. Näiden galaksien nopeuksien avulla voitiin kartoittaa tiheys- ja nopeuskentät jopa $150h^{-1}\text{Mpc}$ asti [3]. Galaksien pekuliaaristen nopeuksien tutkimus vaatii

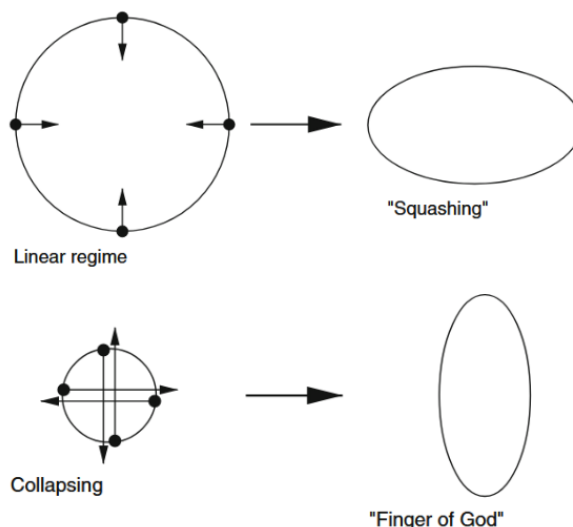


Kuva 7. Superjoukkojen vetovoima-alueet. Vetovoima-alueet ovat määrittetty CosmicFlows-4 (CF4) katalogin nopeuskentällä. Jokainen galaksi CF4 katalogista on merkittynä pisteellä ja sijoitettu sen punasiirtymän perusteella. Laniakean vetovoima-alueeseen kuuluvat galaksit on merkitty punaisella ja loput lilalla. Jokaisesta galaksista lähtee virtaviivat vastaavilla väreillä ja virtaviivojen tiheyttä edustaa värigradiendi (valkoinen on tiheä). Koordinaatisto on supergalaktinen karteellinen koordinaatisto, joissa jokainen nuoli on $50h^{-1}\text{Mpc}$. [17]

tarkkoja punasiirtymästä riippumattomia menetelmiä. Pienetkin virheet etäisyyden määrittämisessä voivat aiheuttaa suuria virheitä lopulliseen pekuliaarinopeuteen, erityisesti suurilla etäisyyksillä. Esimerkiksi tyypin Ia supernovia, eli ns. standardikynttilöitä tai kefeidejä hyödyntäen voidaan selvittää tarkasti galaksien etäisyyksiä, joiden pohjalta pekuliaarinopeudet saadaan selville kaavan (10) mukaan. [15]

2.3 Friends of Friends, FoF

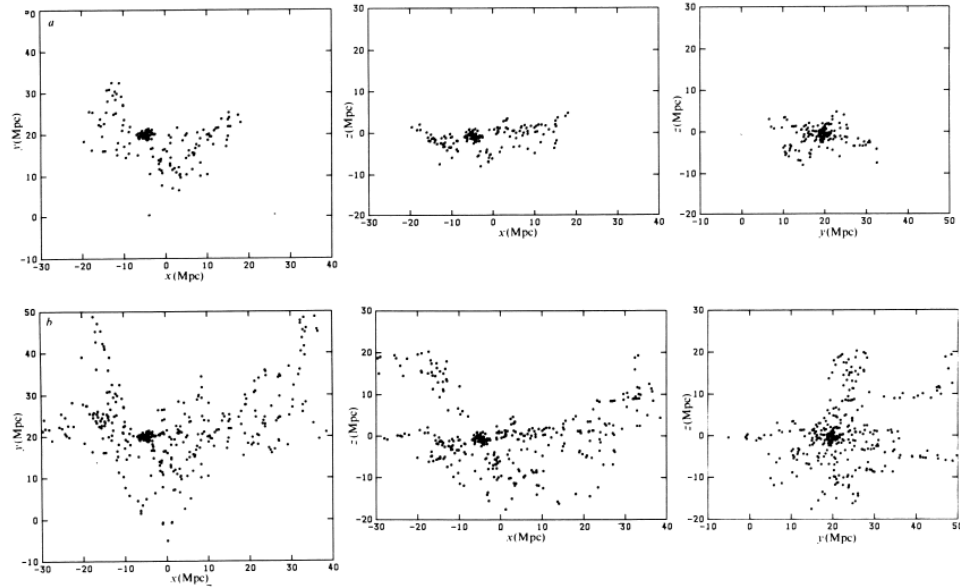
Kuten edellä käsitellyissä tiheyraja- ja pekuliaarinopeus-menetelmissä, Friends of Friends-menetelmä perustuu galaksien sijainteihin. Nyt tiheys-/nopeuskentän sijaan galaksien sijainteja tarkastellaan niiden välisten etäisyyksien perusteella. Friends of Friends -menetelmässä, lyhyemmin FoF, jolla viitataan menetelmään tekstissä tästä



Kuva 8. Litistymisen ja Finger of God -ilmiö. Vasemmalla todellinen fysikaalinen avaruus ja oikealla punasiirtymäavaruus. Pisteet esittävät galakseja ja nuolet näiden pekuliaarinopeuksia. [9]

eteenpäin, määritetään jokin lähtöpiste ja naapurusto- tai yhdistämässäde l (eng. neighbourhood radius, linking length), jonka avulla galaksijakaumasta etsitään yhteenkuuluvia systeemejä. Tämä on yksi yleisimmistä menetelmistä havaita superjoukkoja, mutta tyypillisesti sitä käytetään myös galaksiryhmien tai -joukkojen muodostamiseen. [7] Lähtöpisteeksi määritetään jokin galaksiryhmä tai -joukko. Jos säteen sisällä havaitaan toinen galaksiryhmä tai -joukko, lähtöpisteeksi otetaan uusi havaittu kohde ja sen ympäristöä tutkitaan taas samalla säteellä. Jokainen säteen sisältämä kohde sisältyy superjoukon systeemiin. Tätä menetelmää jatketaan, kunnes säteen sisältä ei enää löydy uusia kohteita. [1] Tämä antaa siis joukkojen systeemin, superjoukon, jossa jokainen jäsen on $\leq l$ etäisyydellä toisistaan [8]. Yhdistämässäde määräytyy usein galaksijoukkojen multiplisiteetin pohjalta. Säteen arvo määritellään jollekin välille, millä superjoukko sisältäisi enemmän kuin yhden, mutta vähemmän kuin 31 galaksijoukkoa. [7] Kuvasta 9 voidaan nähdä, miten määritetty systeemi riippuu säteestä.

Yhdistämässäteen arvo valitaan sellaiseksi, että mahdollisimman monta super-



Kuva 9. Kolme näkymää määritetystä systeemistä Virgo superjoukon ympärillä FoF-menetelmällä. Ylemmät kuvat ovat yhdistämissäteellä $l = 4$ Mpc ja alemmat $l = 5$ Mpc. Ylemmistä kuvista voidaan nähdä, miten superjoukon ympäriltä systeemiin sisältyy kaksi seinää (sheet). Alemmista kuvista nähdään, miten systeemiin sisältyy myös filamentteja eri suuntiin. Etäisyydet ovat määritetty käyttäen Hubblen vakiota $H_0 = 50\text{km/s/Mpc}$. [18]

joukkoa voidaan löytää, joissa on tietty minimimäärä galaksijoukkoja. Galaksijoukkojen minimimäärälle ei ole tiettyjä kriteerejä, koska ne riippuvat tutkimuksen tavoitteesta. Galaksijoukkojen minimimääräksi voidaan valita alhainen arvo, joka pienentää yhdistämissäteen suuruutta. Tämä estää perkolaatiota, mutta antaa tulokseksi pelkkiä superjoukkoehdokkaita, monien kohteiden jäädessä liian pieniksi. [8]

Jos säde on pieni, kaikki havaitut kohteet jäävät omiksi erillisiksi systeemeiksi tai ne muodostavat pareja [7]. Sädetä kasvattamalla saadaan määritettyä suurempia systeemejä. Säteen pituuden kasvaessa tulee vastaan raja, jossa koko havaintoalue sisältyy samaan systeemiin ja tapahtuu perkolaatio. Tätä sädettä kutsutaan perkolaatiosäteeksi (eng. percolation radius). On siis tärkeää löytää säde, jossa ei tapahdu perkolaatiota, mutta joka pystyy erottamaan superjoukot yksittäisistä galaksijoukoista. [1] [7]

3 Superjoukkojen ominaisuuksia

Kuten aiemmissa osioissa on tullut ilmi, superjoukko ei ole yksiselitteinen rakenne. Sen määrittäminen ja määrittämisestä ilmenevät ominaisuudet ovat riippuvaisia tutkimuksesta ja sen tavoitteista. Kosmologisissa aikaskaaloissa superjoukkojen ominaisuudet eivät ole myöskään pysyviä, vaan ajan myötä rakenteet voivat muuttua.

Kun puhutaan superjoukkojen massoista, viitataan tyypillisesti superjoukon sisältämän baryonisen ja pimeän aineen määrään. Koska superjoukko ei ole virialisoitunut rakenne, sen massaa ei pystytä laskemaan suoraan perustuen tavallisiin massan määrittämenetelmiin, jotka olettavat systeemin dynaamisen tai hydrostaattisen tasapainon. Sen sijaan jokaisen virialisoituneen rakenteen (galaksiryhmän tai -joukon) sidotut massat (engl. bound mass) summataan yhteen. Ainetta, kaasua ja pimeää ainetta on kuitenkin superjoukoissa myös galaksijoukkojen välisessä tilassa. Summaan lisätään siksi myös arvio superjoukon sisältämän kaasun massasta, jonka voidaan arvioida olevan noin 10 prosenttia kokonaismassasta. Pimeän aineen massaa on vaikea arvioida, mutta summaan voidaan lisätä myös jokin arvio sen osuudesta kokonaismassassa. Superjoukkojen keskimääräinen massa on noin $5.8 \cdot 10^{15} M_{\odot}$. [7, 8]

Superjoukot ovat todella laajoja rakenteita, joiden koot vaihtelevat $10\text{--}200h^{-1}\text{Mpc}$:iin eivätkä niiden muodot ole symmetrisiä. Yleisesti superjoukon koko, eli halkaisija, määritetään maksimietäisyytenä kahden superjoukon galaksin välillä. [3, 7, 8] Kun mennään kauemmas, himmeimpiä galakseja ei pystytä näkemään, mutta kirkkaampien galaksien, jotka ovat tyypillisesti galaksiryhmien ja -joukkojen päägalakseja, perusteella pystytään usein tarpeeksi hyvin määrittämään superjoukon alue [3]. Superjoukkojen keskimääräinen koko on noin 65 Mpc [8]. Etäisyydet rikkaiden superjoukkojen välillä ovat yleensä $120\text{--}140h^{-1}\text{Mpc}$ [7].

Superjoukon rikkaus tarkoittaa kaikkien galaksien lukumäärää superjoukon sisällä. Superjoukon sisällä olevat galaksijoukot määritetään erikseen käyttämällä tyypillisesti Friends of Friends -menetelmää. [3, 7]

Superjoukon kokonaisluminositeetti voidaan arvioida summaamalla luminositeetti-tiheyksiä hilan solujen huippukohdissa superjoukon sisällä [3]. Luminositeetti voidaan myös määrittää summaamalla superjoukon galaksien luminositeetit. Tuloksesta saadaan tarkempi painottamalla luminositeetteja etäisyydellä. [3] Luminositeetistä voidaan myös selvittää superjoukon massa käyttäen massa-luminositeetti-suhdetta. Tällä tavoin pimeä aine myös otetaan huomioon massan laskemisessa.

Superjoukkojen topologiaa, eli muotoa, voidaan tutkia Minkowskin funktioiden (V_0, V_1, V_2, V_3) avulla. Funktioista käytetään yhdistelmiä, joita kutsutaan muotomit-tareiksi (engl. shapefinder). Näitä matemaattisia tulkintoja on kolme pituuden mu-kaan (H_1, H_2, H_3) . Funktioilla saadaan superjoukon pituus, paksuus ja leveys. Li-säksi on kaksi ominaisuutta, K_1 ja K_2 , joilla ei ole ulottuvuutta, mutta joiden suh-de kertoo, onko superjoukko enemmän litteä (pannukakkumainen, engl. oblate) vai venynyt pitkittäisesti (sakarimainen, engl. prolate). [3]

Superjoukkojen ominaisuuksien evoluutiota on vaikea ennustaa, koska superjou-kot eivät ole virialisoituneita rakenteita, mutta niistä saattaa muodostua sellaisia tu-levaisuudessa riippuen keskimääräisestä tiheyden kontrastista. Pallomaisen romah-duksen mallin (engl. spherical collapse model) mukaan rakenteet, joilla on tällä het-kellä tiheyskontrastin arvo $\Delta\rho \approx 13.1$, muodostavat tulevaisuudessa gravitaatiolla yhdistyneitä rakenteita [8]. Malli tutkii siis pallomaisten alueiden evoluutiota, jotka määrittyvät pimeän aineen massasta niiden sisällä ja tiheyskontrastin arvo määri-tetään alueen tiheyden ja keskitiheyden suhteena [7]. Esimerkiksi Sloan Great Wall -alueen superjoukkojen rakenteissa on löydetty monia korkean tiheyden ytimiä. Nä-mä ovat suuria gravitaatiolla yhdistyneitä alueita, joiden gravitaatio vastustaa maa-ilmankaikkeuden laajenemista ja jotka romahtavat tulevaisuudessa [7]. Ajan mit-taan superjoukot tiivistyvät, kun aine kertyy korkean tiheyden alueille, sen massan ja luminositeetin kasvaessa. Superjoukkojen ulkoalueet, jotka ovat tiheydeltään ma-talempia eivät tiivistykään vaan jatkavat laajenemistaan maailmankaikkeuden mu-

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Name	ID	d $h^{-1}\text{Mpc}$	n_{gal}	n_{cl}	$L_{\text{scl,wgal}}$ $10^{10}h^{-2}L_{\odot}$	\mathcal{D} $h^{-1}\text{Mpc}$	V $(h^{-1}\text{Mpc})^3$	D $\dagger \ell_{\text{mean}}$	$V_{3,\text{max}}$	K_1, K_2
239+027+0091	1	263.9	1041	9	1809.6	52.9	8930	5.0	2.5	0.07,0.18
231+030+0117	3	335.8	1364	18	4249.7	75.3	26076	4.2	11.0	0.12,0.29
227+006+0078	7	233.4	1521	6	2069.1	52.9	14238	3.6	3.5	0.09,0.13
139+052+0190	16	547.8	244	29	5306.5	98.6	23689	5.4	18.0	0.17,0.50
*184+003+0077	19	230.5	1498	8	2064.3	56.5	10338	5.2	5.5	0.09,0.15
*202-001+0084	27	255.7	2932	22	4694.7	94.5	22201	5.3	12.5	0.12,0.41
215+034+0193	45	556.7	36	7	959.5	32.1	3540	5.2	4.0	0.12,0.05
227+014+0186	64	540.2	188	18	3869.7	86.4	31231	2.9	13.0	0.17,0.43
163+011+0131	198	383.2	509	6	2327.4	59.3	20483	2.8	12.0	0.20,0.20
172+054+0071	211	206.5	1060	7	1235.9	53.6	4877	5.3	5.0	0.08,0.26
207+028+0077	220	225.7	1159	5	1454.0	58.6	12134	3.3	5.0	0.09,0.22
*210+006+0083	544	250.1	138	1	231.8	17.3	741	5.3	1.5	0.01,0.06

Kuva 10. Superjoukkojen ominaisuuksia. (1) nimi, (2) ID, (3) etäisyys korkeimman tiheyden pisteeseen, (4) galaksien lukumäärä, (5) galaksijoukkojen lukumäärä ($L_{gr} > 30 \cdot 10^{10}h^{-2}L_{\odot}$), (6) painotettujen galaksiluminositeettien summa, (7) halkaisija, (8) tilavuus, (9) adaptiivisesti määritetty tiheysraja, (10) $V_{3,\text{max}}$, (11) Muotomittarit.

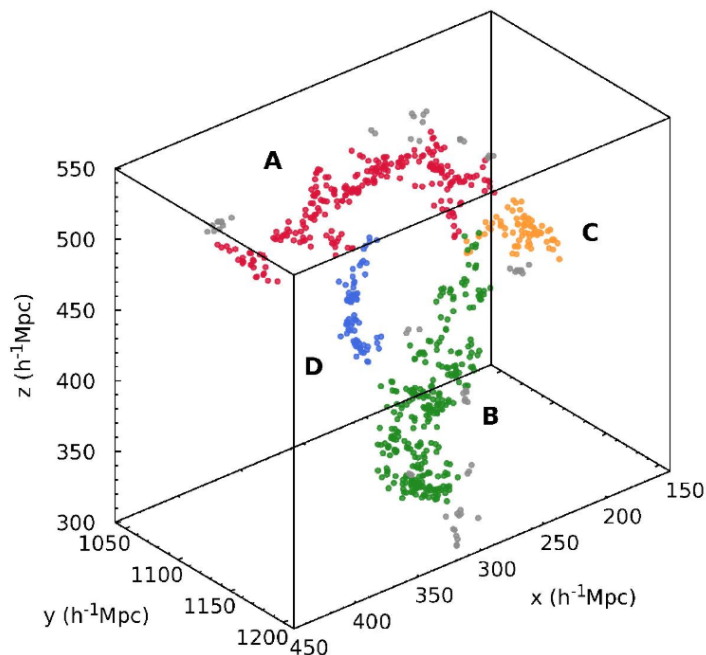
[3]

kana. [7, 8]

Kuvan 10 taulukosta voi nähdä eri superjoukkojen ominaisuuksia koottuna yhteen. Taulukko esittää etäisyyden, galaksien lukumäärän, galaksijoukkojen lukumäärän, etäisyyden korkeimman tiheyden pisteeseen, painotettujen luminositeettien summan, halkaisijan, tilavuuden, adaptiivisen tiheysrajan, V_3 Minkowski funktion maksimiarvon ja muotomittareiden K_1 ja K_2 arvot. V_3 kertoo superjoukon sisäisten erillisten rykelmien ja aukkojen lukumäärien summan, josta vähennetään superjoukon sisäisten filamenttien lukumäärä. [3]

4 Löydettyjä superjoukkorakenteita

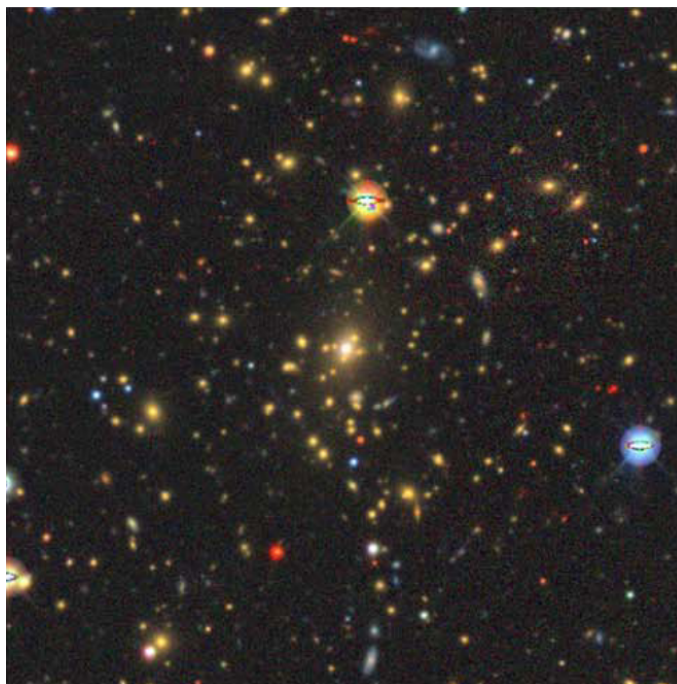
Oma kotisuperjoukkomme Laniakea on identifioitu käyttäen pekuliaarinopeuksia. Tutkimuksessa pyrittiin osoittamaan, että paikallisen superjoukon alueen pekuliaarinopeudet yhtyvät, joka määrittää superjoukon [19]. Katalogi, jolla Laniakea on löydetty on aiemmin mainittu Cosmicflows-2. Uusin versio katalogista on Cosmicflows-



Kuva 11. Galaksit BGW:n superjoukoissa karteesisessa koordinaatistossa. Värit ja vastaavat kirjaimet (A, B, C ja D) osoittavat eri BGW:n sisältämät superjoukot. [20]

4, jonka perusteella kuva 7 on tehty [7]. Laniakean superjoukon voi nähdä kuvasta 7, jossa siihen sisältyvät galaksit ovat punaisella. Laniakean superjoukko on kooltaan noin 160 Mpc ja on massaltaan noin $10^{17}M_{\odot}$. [15]

Luminositeetti-tiheyskentällä löydettiin BOSS Great Wall -rakenne (BGW), joka sijaitsee punasiirtymäetäisyydellä $z \approx 0.47$. BGW koostuu kahdesta suuresta seinämästä (kuvan 11 rakenteet A ja B), joiden halkaisijat ovat 186 ja 173 h^{-1} Mpc ja kahdesta superjoukosta (kuvan 11 rakenteet C ja D), joiden halkaisijat ovat 64 ja 91 h^{-1} Mpc. Rakenne löydettiin käyttämällä luminositeetti-tiheyskenttää, jonka hilan koko oli $3h^{-1}$ Mpc ja joka oli pehmennetty $8h^{-1}$ Mpc:in kokoisella kernelfunktiolla. Kuvasta 11 voi nähdä BGW rakenteen osat karteesisessa koordinaatistossa. [20] BGW on niin suuri rakenne, että sillä on monia korkean tiheyden ytimiä (engl. high-density core). Nämä erilliset ytimet romahtavat tulevaisuudessa ja ovat tarpeeksi kaukana toisistaan, että ne muodostavat erilliset pienemmät superjoukot. [7]



Kuva 12. Einaston superjoukon A1835 galaksijoukko [8]

Tähtitieteilijä ja akateemikko Jaan Einaston mukaan nimetty Einaston superjoukko on löydetty ja määritetty FoF-menetelmällä. Superjoukko sijaitsee punasiirtymäetäisyydellä $z \approx 0.25$, sen massa on noin $2.575 \cdot 10^{16} M_{\odot}$ ja koko on noin 111 Mpc. Einaston superjoukkoa näkyy kuvassa 12. [8]

Corona Borealis -superjoukko (CB) sijaitsee punasiirtymäetäisyydellä $z \approx 0.07$, sen massa on noin $1.3 \cdot 10^{16} M_{\odot}$, koko noin 124 Mpc ja se on yksi rikkaimmista superjoukoista [7, 8, 19]. CB:n tiheyden huippualueet määritettiin luminositeetti-tiheyskentän avulla ja FoF-menetelmää hyödynnettiin määrittämään superjoukkorakenteen sisältämät galaksijoukot. CB:n tutkimuksessa käytettiin SDSS:n galaksi dataa ja siitä valittiin tutkittavaksi rikkaimmat galaksijoukot, jotka voisivat olla mahdollisia vetovoima-alueita. Näiden mahdollisten vetovoima-alueiden pohjalta katsottiin galaksien sijainteja ja dynamiikkaa niiden ympäristössä. Datan avulla voitiin määrittää supejoukon alueita ja pohtia niiden kehitystä tulevaisuudessa. [19]

5 Yhteenveto

Maailmankaikkeuden laajenemisen, punasiirtymän ja etäisyyden yhteyksien ymmärtäminen on mahdollistanut maailmankaikkeuden kartoittamisen laajoilla ja syvillä punasiirtymäkatalogeilla. Katalogien avulla ymmärryksemme maailmankaikkeuden suuresta rakenteesta, ns. kosmisesta verkosta, ja sen ominaisuuksista on parantunut ja tarkentunut.

Maailmankaikkeuden suurimpien rakenteiden, superjoukkojen, tutkimus ja niiden määrittely ei ole triviaalia, koska rakenteet eivät ole virialisoituneita. Tutkimuskohteet ovat myös hyvin suuria ja kaukaisia. Superjoukkojen tutkimuksessa tietyt tutkimusmenetelmät kuten FoF, tiheysraja ja pekuliaarinopeudet ovat yleisiä, mutta näiden sisälläkin on tutkimuskohtaisia eroja. Merkittäviä eroja luo esimerkiksi käytetyt arvot Hubblen vakiolle tai kosmologisen mallin parametreille.

Tällä hetkellä superjoukkoja on löydetty tuhansia eri menetelmiä käyttäen. Eri tutkimuksissa on myös löydetty samoja superjoukkoja, joka on todentanut ja tarkentanut rakenteiden ominaisuuksia. Superjoukkojen mittakaavat vaihtelevat muutamista Mpc:sta reiluun sataan ja galaksijoukkojen määrä superjoukon sisällä vaihtelee kahdesta kymmeneen. Jotkut superjoukkorakenteet koostuvat myös useasta erillisestä superjoukosta ja nämä voivat olla reilusti yli sadan Mpc:n kokoluokkaa.

Kosmisen verkon suurimpien rakenteiden tutkimus auttaa ymmärtämään galaksien, galaksiryhmien ja -joukkojen vuorovaikutusta niitä ympäröivän suuren mittakaavan ympäristön kanssa. Kosmisen verkon synty on taas kytköksissä pimeän aineen ja -energian määrään ja ominaisuuksiin maailmankaikkeudessa. Näiden tutkiminen ja ymmärtäminen voivat antaa vastauksia maailmankaikkeuden syntyyn, kehitykseen ja tulevaisuuteen. Kosminen verkko ja sen rakenteet ovat siis ajankohtaisia ja tärkeitä tutkimuskohteita, joissa uusilla ja tulevilla instrumenteilla yhdessä kosmologisten simulaatioiden kanssa on tärkeä rooli.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielmassa on käytetty OpenAI yhtiön GPT-5 mallia kääntämään yksittäisiä lauseita ja selittämään auki käsitteitä. Mitään tekoälyn tuottamaa ei ole suoraan käytetty tutkielmassa.

Viitteet

- [1] J. Einasto, *Dark Matter and Cosmic Web Story* (WORLD SCIENTIFIC, 2013) [doi:10.1142/8928](https://doi.org/10.1142/8928).
- [2] J. Einasto, G. Hütsi, I. Szapudi ja P. Tenjes, *Spinning the Cosmic Web* (WORLD SCIENTIFIC, 2026) [doi:10.1142/14322](https://doi.org/10.1142/14322).
- [3] L. J. Liivamägi, väitöskirja, University of Tartu, 2017.
- [4] N. I. Libeskind, R. v. d. Weygaert, M. Cautun, B. Falck, E. Tempel, T. Abel, M. Alpaslan, M. A. Aragoon-Calvo, J. E. Forero-Romero, R. Gonzalez, S. Gottloober, O. Hahn, W. A. Hellwing, Y. Hoffman, B. J. T. Jones, F. Kitaura, A. Knebe, S. Manti, M. Neyrinck, S. E. Nuza, N. Padilla, E. Platen, N. Ramachandra, A. Robotham, E. Saar, S. Shandarin, M. Steinmetz, R. S. Stoica, T. Sousbie ja G. Yepes, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **473**, 1195 (2018) [doi:10.1093/mnras/stx1976](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1976).
- [5] H. Lietzen, P. Heinämäki, P. Nurmi, L. Liivamägi, E. Saar, E. Tago, L. Takalo ja M. Einasto, *Astronomy Astrophysics* (2011) [doi:10.1051/0004-6361/201116550](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116550).
- [6] V. Springel, C. S. Frenk ja S. D. M. White, *Nature* **440**, 1137 (2006) [doi:10.1038/nature04805](https://doi.org/10.1038/nature04805).
- [7] M. Einasto, *Universe* **11**, 167 (2025) [doi:10.3390/universe11060167](https://doi.org/10.3390/universe11060167).
- [8] S. Sankhyayan, J. Bagchi, E. Tempel, S. More, M. Einasto, P. Dabhade, S. Raychaudhury, R. Athreya ja P. Heinämäki, *The Astrophysical Journal* **958**, 62 (2023) [doi:10.3847/1538-4357/acfaeb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acfaeb).
- [9] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction* (Springer Berlin Heidelberg Berlin, Heidelberg, 2015) [doi:10.1007/978-3-642-54083-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54083-7).
- [10] J. Frieman, M. Turner ja D. Huterer, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (2008) [doi:10.1146/annurev.astro.46.060407.145243](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145243).
- [11] P. Ganeshiah Veena, väitöskirja, University of Groningen, 2020.
- [12] H. Karttunen, K. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen, *Tähtitieteen perusteet 6. laitos* (Ursa, 2016).
- [13] V. Martinez ja E. Saar, *Statistics of the Galaxy Distribution* (Chapman and Hall/CRC, 2001) [doi:10.1201/9781420036169](https://doi.org/10.1201/9781420036169).
- [14] D. C. et al. (julkaisematon).
- [15] R. B. Tully, H. Courtois, Y. Hoffman ja D. Pomarède, *Nature* **513**, 71 (2014) [doi:10.1038/nature13674](https://doi.org/10.1038/nature13674).

- [16] R. Tully, H. Courtois, A. Dolphin, J. Fisher, P. Heraudeau, B. Jacobs, I. Karachentsev, D. Makarov, L. Makarova, S. Mitronova, L. Rizzi, E. Shaya, J. Sorce ja P.-F. Wu, *The Astronomical Journal* **146**, 86 (2013) [doi:10.1088/0004-6256/146/4/86](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/4/86).
- [17] A. Dupuy ja H. Courtois, *Astronomy & Astrophysics* **678**, (2023) [doi:10.1051/0004-6361/202346802](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346802).
- [18] Y. Zeldovich, J. Einasto ja S. Shandarin, *Nature* **300**, 407 (1982) [doi:10.1038/300407a0](https://doi.org/10.1038/300407a0).
- [19] M. Einasto, R. Kipper, P. Tenjes, H. Lietzen, E. Tempel, L. J. Liivamägi, J. Einasto, A. Tamm, P. Heinämäki ja P. Nurmi, *Astronomy & Astrophysics* **649**, A51 (2021) [doi:10.1051/0004-6361/202040200](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040200).
- [20] H. Lietzen, E. Tempel, L. Liivamägi, A. Montero-Dorta, M. Einasto, A. Streblyanska, C. Maraston, J. Rubiño-Martín ja E. Saar, *Astronomy & Astrophysics* (2016) [doi:10.1051/0004-6361/201628261](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628261).