

Jumalan sormet -ilmiö

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Tähtitiede
2022
Eerika Kivinen
Tarkastaja:
Dos. P.H.

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Kivinen, Eerika Jumalan sormet -ilmiö

LuK-tutkielma, 17 s.

Tähtitiede

Lokakuu 2022

Maailmankaikkeuden laajenemisen johdosta galaksien lähettämä valo on punasiirtynyt. Spektroskooppiset havainnot osoittavat, että mitä kauempana galaksi meistä sijaitsee, sitä punasiirtyneempää sen lähettämä valo on. Tämän lisäksi galakseilla on galaksijoukoissa huomattavan suuria pekuliaarisia nopeuksia toistensa suhteen, jotka aiheuttavat vääristymiä punasiirtymistä mitatuista etäisyyksissä. Yhtä tällaista muotovääristymää kutsutaan Jumalan sormet -ilmiöksi. Ilmiössä näkösäteen suunnassa joukko näyttäytyy venyneeltä punasiirtymäavaruudessa.

Yhdistämällä galaksijoukoista saatuja havintoja pyritään Jumalan sormet -ilmiöstä johtuvaa vääristymää korjaamaan. Ilman korjauksia havainnot eivät vastaa todellisuutta ja haittaavat näin ollen päätelmiä galaksien paikoista galaksijoukoissa. Korjaus toimii sitä paremmin, mitä suuremmalle joukolle galakseja se tehdään.

Asiasanat: galaksijoukot, havainnot, punasiirtymäavaruus, pekuliaarinopeus

Sisällys

Johdanto	1
1 Havainnot	2
1.1 Galaksien havainnointi ja kartoitus	2
1.2 2dFGRS	3
1.3 SDSS	4
1.4 Punasiirtymä	5
2 Galaksijoukot ja -ryhmät	8
2.1 Galaksien synty ja kehitys	8
2.2 Galaksijärjestelmät	10
3 Jumalan sormet -ilmiö	11
3.1 Punasiirtymäavaruus ja todellinen avaruus	11
3.2 Korjaukset havaintoihin	12
4 Yhteenveto	15
Viitteet	16

Johdanto

Galaksit ovat maailmankaikkeuden rakenneosia, ne muodostavat yhdessä tunnetun avaruuden suurimmat rakenteet. Galaksien ominaisuuksia, paikkoja ja liikettä tutkimalla saadaan tietoa avaruuden rakenteiden kehittymisestä. Ne ovat tähtien kehittymispaikkoja ja tähtien luoman valon avulla tekevät rakenteiden havaitsemisen mahdolliseksi.

Maailmankaikkeuden laajenemisen johdosta kaukaisimpien galaksien valo on punasiirtynyt. Laajenemisen lisäksi galaksien oma pekuliaarinen nopeus vaikuttaa havaittuun punasiirtymään. Nämä aiheuttavat havaintoihin vääristymiä. Vääristymiä havaitaan erityisesti galaksijoukoissa, joiden gravitaatiokentässä galaksien nopeudet ovat suuria. Yksi tunnetuimpia vääristymiä on Jumalan sormet -ilmiö, jota tässä tutkielmassa käsitellään. Galaksijoukkoja voidaan tutkia kattavien punasiirtymätutkimuksien avulla, joiden tieto on kaikkien saatavilla. Ensimmäiset systemaattiset punasiirtymähavainnot aloitettiin 1970-luvulla ja tekniikan kehityksen myötä niitä on jatkettu tähän päivään saakka. Uusimpana James Webb -teleskooppi, joka laukaistiin kiertoradallensa vuonna 2021.

1 Havainnot

1.1 Galaksien havainnointi ja kartoitus

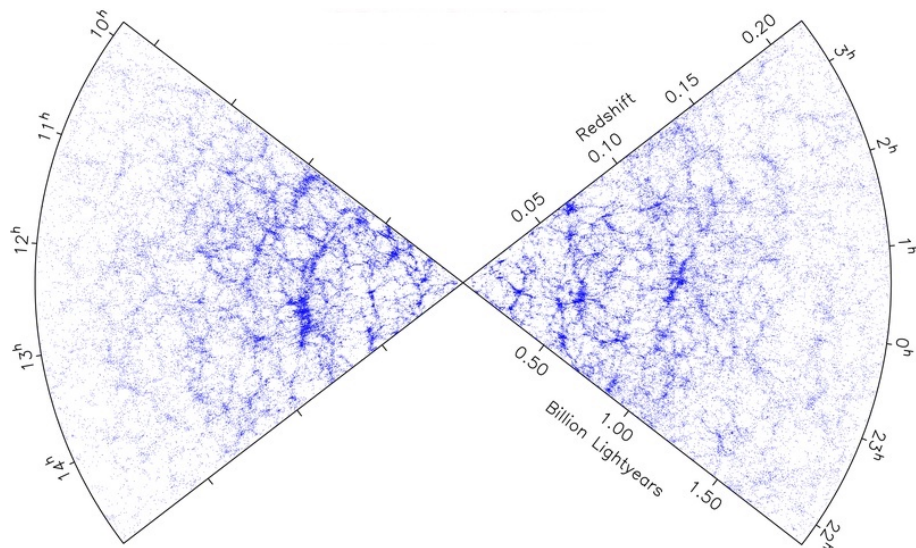
Galaksit koostuvat tähdistä, kaasu- ja pölypilvistä sekä pimeästä aineesta. Koko järjestelmää pitää kasassa painovoima. Galaksit muodostavat avaruuteen galaksi-joukkoja ja joukot filamentteja, jotka muodostavat havaitun avaruuden suurimmat verkkomaiset rakenteet. [1] Suurin osa galaksien massasta koostuu pimeästä aineesta, joten galaksien kartoitus ja niiden jakautumisen tutkiminen kertoo myös aineen jakautumisesta avaruudessa. [2]

Galaksien kaksikulotteinen havainnointi antaa kuvan galaksien jakautumisesta, kehityksestä ja alkuperästä, mutta ennen spektrometrejä ja punasiirtymäkartoitusta galaksien etäisyyksien mittaaminen oli työlästä. Kohteiden etäisyyksiä määritetään kosmologisen etäisyyssitokapuun avulla, jossa käytetään etäisyyden kasvaessa asteittain useita menetelmiä. Näiden tuloksia verrataan keskenään virheiden ja hajonnan vähentämiseksi. Etäisyyssitokapuut ovat etäisyyden funktiona: parallaksi mittaukset, kefeidien periodi-luminositeetti-relaatio, supernovien luminositeetti ja punasiirtymämittaukset. Esimerkiksi supernovien luminositeettiin perustuvat standardikynttilät ovat yleinen tapa määrittää etäisyys. Ia-tyyppiset supernovat ovat lähes aina yhtä kirkkaita, jolloin niiden absoluuttinen magnitudi tunnetaan. Näennäisen (havaitun) ja absoluuttisen magnitudin avulla saadaan sen galaksin etäisyys, jossa räjähtänyt tähti sijaitsee. [3]

Punasiirtymätutkimus on kehittynyt havaintolaitteiden kehityksen myötä. Kehittyneiden spektrografien tulon myötä pystytään mittaamaan tarkasti kohteiden etäisyyksiä, mutta myös useita kohteita samaan aikaan. Kattavilla galaksien spektroskooppisilla havainto-ohjelmilla saadaan selville galaksien kolmiulotteinen avaruusjakauma laajoilta taivaan alueilta. Punasiirtymätutkimuksia on tehty useita, kattavimpia niistä ovat 2dFGRS ja SDSS.[2]

1.2 2dFGRS

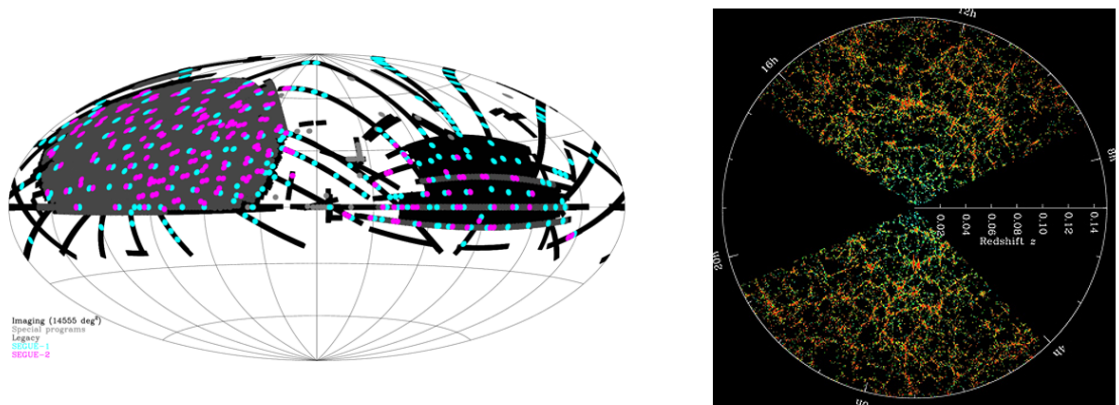
2dFGRS eli two degree Field Galaxy Redshift Survey on tehty vuosina 1997–2002. Kartoitukseen käytettiin 3.9 m Anglo-Australian teleskooppia (AAT). Tutkimuksessa kartoitettiin universumin laajamittaisia rakenteita kahdelta yhteensä noin 1500 neliöasteen suuruiselta taivaanalalta. Kaukaisimmat galaksit havaittiin punasiirtymällä 0,2. Näiden galaksien valo on lähtenyt matkaan noin 2,5 miljardia vuotta sitten. Kuvasta 1 nähdään, kuinka tutkimuksen myötä paljastui aineen yhtenäinen vaahtomainen rakenne. Rakenteessa on aukkoja, joiden halkaisija on 10 megaparsekin (Mpc) luokkaa, aine ja aukot yhdessä muodostavat yhtenäisen kolmiulotteisen rakenteen. Galaksijoukot keskittyvät rakenteen solmukohtiin ja niiden koko on 1–3 Mpc. Kartoituksen myötä löytyi suuri yhtenäinen rakenne, jotka kutsutaan "Sloanin suureksi seinämäksi". Se on avaruuden suurimpia tunnettuja rakenteita. Rakenne on nähtävissä kuvassa vasemmalla noin punasiirtymän 0,07 kohdalla. [4]



Kuva 1. Two degree Field Galaxy Redshift Survey.[5]

1.3 SDSS

SDSS eli The Sloan Digital Sky Survey kartoitus aloitettiin vuonna 2000 ja tällä hetkellä on menossa viides vaihe SDSS-V, joka aloitettiin vuonna 2020. Julkaisuja on tullut tähän mennessä 17 (DR17). Kuluneen kahdenkymmenen vuoden aikana on mitattu tähän asti kattavin tietokanta galaksien ja kvasaarien spektreistä, tutkittu Linnunradan rakennetta ja tähtiä. Kartoitus kattaa tällä hetkellä kolmanneksen koko taivaanpallosta, noin 14 500 neliöastetta. Kuvassa 2 vasemmalla nähdään taivaanpallo galaktisissa koordinaateissa. Mustalla nähdään DR12 kattama alue ja kirkkaampia alueet, jotka ovat olleet osatutkimuksien kohteena. Oikealla kuvassa viipale kartoitetusta taivaasta, kuvassa jokainen piste on galaksi. Kaiken kaikkiaan SDSS on kartoittanut 4 miljoonaa galaksia. [6]



Kuva 2. Vasemmalla SDSS DR12 spektroskooppiset havainnot. Oikealla 2,5 asteen projektio kuva galaksien jakautumisesta punasiirtymäfunktiona [6].

Ensimmäisessä vaiheessa, 2000-2005, kuvattiin noin 8000 neliöastetta taivaasta ja kerättiin tietokantaa galaksien ja kvasaarien spektreistä. Toisessa vaiheessa tutkimuksia laajennettiin havaitsemaan Linnunradan ja tähtien rakennetta. Tässä vaiheessa tutkimuksia oli kolme, jotka keskittyivät eri osa-alueisiin. Sloan Legacy Survey, jota jatkoi ensimmäisen vaiheen kartoitusta ja näiden tulokset yhdessä mahdollistivat avaruuden laajamittaisen tutkimisen. SEGUE-tutkimus keskittyi Linnun-

radan tähtien kartoittamiseen luodakseen yksityiskohtaisen kolmiulotteisen kartan omasta galaksistamme. Sloan Supernova -tutkimus keskittyi nimensä mukaisesti supernovien havaitsemiseen.[6]

Vaiheessa kolme 2008-2014, tutkimuksia oli neljä. APOGEE, joka tutki punaisia jättiläistähtiä. BOSS, joka tutki maailmankaikkeuden laajenemisnopeutta, MARVELS tutki jättiläisplaneettoja ja SEGUE-2, joka täydensi jo aiemmin tutkittua Linnunrataa ja kaksinkertaisti jo havaitun otoskoon. Neljännessä vaiheessa 2014-2020, laajennettiin APOGEE- ja BOSS-tutkimuksia sekä aloitettiin MaNGA-tutkimus joka tutki galaksien säteittäisiä nopeuksia sekä tähtien muodostumisalueita. Viides eli nykyinen vaihe tutkii tällä hetkellä Linnunradan kaikäntyyppisiä tähtiä, itse linnunrataa ja sen naapureita sekä kvasaareita. Tutkimustieto on kaikkien käytettävissä ja SDSS tietoja on esimerkiksi käytetty Google Earthin taivaan mallinnuksessa niillä alueilla, joista tietoa on saatavilla. [6].

1.4 Punasiirtymä

Punasiirtymällä tarkoitetaan valon aallonpituuden kasvua, tai venymistä, ja sitä voidaan mitata kahdella tapaa. Fotometrinen punasiirtymä saadaan esim. mittaamalla galaksin kirkkaus usealla aallonpituudella ja vertaamalla tätä samoilla aallonpituuksilla havaittuun galaksiin, jonka etäisyys tunnetaan. Tämä tapa ei kuitenkaan ole kovin luotettava. Spektroskooppisesti määritetty punasiirtymä taas on, koska tässä menetelmässä mitataan galaksin korkearesoluutioinen spektri, jonka avulla määritetään punasiirtymä. Atomit absorboivat ja emittoivat valoa vain tietyillä aallonpituuksilla, jolloin havaittua spektriä verratessa laboratoriossa mitattuihin lepoaallonpituuksiin, saadaan laskettua kaavan 1 avulla punasiirtymä. Spektriviivat, jotka havaitaan alkuperäistä suuremmalla aallonpituudella, ovat siirtyneet kohti spektrin punaista päätä, ts. punasiirtyneet. Galaksien punasiirtymä on avaruuden laajenemisen, galaksien liikkeen ja gravitaation yhteistulos. Jälkimmäinen ilmenee voimak-

kaan gravitaatiokentän (esim. valkoinen kääpiö, neutroni tähti) läheisyydessä missä kentästä pakeneva valo punasiirtyy. Galaksien punasiirtymiä mitattaessa ei kyseistä ilmiötä tarvitse ottaa huomioon. [1]

Kosmologiseksi punasiirtymäksi kutsutaan valoa, joka on punasiirtynyttä maailmankaikkeuden laajenemisen tuloksena. Galaksin valo on lähtenyt matkaan, kun avaruus oli nykyistä nuorempi ja pienempi. Matkalla kohti havaitsijaa valon aallonpituus kasvaa samassa suhteessa kuin avaruuden mittakaava. Punasiirtymä on siis verrannollinen galaksin etäisyyteen meistä. Tätä ilmiötä kutsutaan Hubblen laiksi, punasiirtymä on sitä suurempi mitä kauempana kohteet ovat. Näin ollen mitä kauempana kohde meistä on sitä nopeammin se liikkuu meistä pois päin. [1]

Punasiirtymä z saadaan aallopituuksien suhteesta

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (1)$$

jossa havaittu aallonpituus λ ja emitoitu aallonpituus λ_0 . Kaava voidaan esittää myös Hubblen lain kanssa muodossa

$$z = \frac{H}{c}r, \quad (2)$$

jossa H on Hubblen vakio, c valonnopeus ja r etäisyys. Pienille punasiirtymille $z \ll 1$ pätee $z = \frac{V}{c}$, mutta suuremmille punasiirtymille Hubblen vakio ei enää toimi vaan määrittämiseen joudutaan käyttämään kosmologista teoriaa. Nyt kuitenkin

$$V = Hr, \quad (3)$$

missä V on nopeus. Hubblen vakion arvo tunnetaan, Plankin satelliitin mittauksien mukaan se on 67.4 km/s/Mpc [7]. Etäisyys saadaan laskettua

$$r = \frac{zc}{H}, \quad (4)$$

jossa havaittu punasiirtymä z . [1]

Havaittava punasiirtymä on usean tekijän tulosta. Yksi punasiirtymää aiheuttava mekanismi on havaitsijan oma liike. Havaittu valo ei siis kohtaa levossa olevaa havaintolaitetta. Maapallo kiertää Aurinkoa, joka kiertää Linnunradan keskustaa. Linnunradalla sekä paikallisella galaksiryhmällä on liikettä läheisen galaksijoukon suuntaan sen gravitaation vaikutuksesta. Oman liikkeemme aiheuttava punasiirtymä z_l saadaan

$$z_l = \frac{\lambda - \lambda_l}{\lambda_l} \Leftrightarrow 1 + z_l = \frac{\lambda}{\lambda_l}, \quad (5)$$

jossa havaittu aallonpituus λ ja lepoaallonpituus λ_l . Kosmologinen punasiirtymä z_c saadaan

$$z_c = \frac{\lambda_l - \lambda_c}{\lambda_c} \Leftrightarrow 1 + z_c = \frac{\lambda_l}{\lambda_c} = \frac{a(t_0)}{a(t)}, \quad (6)$$

jossa λ_c on laajenevassa maailmankaikkeudessa olevan galaksin emittoima aallonpituus, $a(t)$ on skaalatekija ajansuhteen, $a(t_0)$ on tämä hetki jolloin $a(t_0) = 1$. Skaalatekijä liittyy maailmankaikkeuden kokoon hetkellä t .

Kolmas punasiirtymää aiheuttava mekanismi on galaksin oma liike suhteessa avaruuden laajenemisnopeuteen

$$z_p = \frac{\lambda_c - \lambda_p}{\lambda_p} \Leftrightarrow 1 + z_p = \frac{\lambda_c}{\lambda_p}, \quad (7)$$

jossa λ_p on pekuliäärisessä liikkeessä olevan galaksien emittoima aallonpituus. Näistä meidän oma sekä galaksien liike johtuu Doppler-efektistä ja kosmologinen punasiirtymä avaruuden laajenemisesta.

Havaittu punasiirtymä saadaan kolmen punasiirtymän, kaavojen 4, 5, ja 6, tuloksena

$$1 + z = (1 + z_l)(1 + z_c)(1 + z_p), \quad (8)$$

josta saadaan edelleen aproksimaatio havaitulle punasiirtymälle z^*

$$z^* \approx z_c + z_p, \quad (9)$$

jossa oma liikkeemme on jo korjattu, $z_c \ll 1$ ja $z_p \ll 1$. [3]

2 Galaksijoukot ja -ryhmät

2.1 Galaksien synty ja kehitys

Avaruuden rakenteet ovat muodostuneet hierarkkisesti. Rakenteet alkoivat muodostumaan pienistä varhaisista tiheysvaihteluista muodostaen ensin paikallisesti tähtiä ja myöhemmin näiden alueiden kasaantuessa yhteen galakseja. Rakenteiden kehityksessä tiheyskontrasti kasvaa ja alkaa vaikuttaa anisotrooppisesti eli vaikuttaa rakenteisiin suuntariippuvaisesti. Tämä on nähtävissä seinämäisten rakenteiden muodostumisena. Seinämien sisään muodostuu filamentteja ja filamenttien pääty pisteisiin solmukohtia. [8]

Mitä syvemmällä (kauempana) avaruudessa olevaa galaksia katsotaan, sitä aikaisemmin galaksin emittoima valo on lähtenyt liikkeelle. Tämä tarkoittaa, että syvemmälle katsottaessa havaitaan varhaisemman kehityksen vaiheessa olevia galakseja. Galaksien syntyä on tutkittu numeerisilla simulaatioilla, joita verrataan tehtyihin havaintoihin. [1]

Avaruusteleskooppi Hubble otti ensimmäiset syväkuvansa vuonna 1995. Seuraavat havaintonsa Hubble teki vuosina 2004 ja 2014. Kuvien merkitys on suuri, koska yhdestä kuvasta voidaan nähdä lukuisia galaksien eri kehitysvaiheita. Kuva 3 on Hubblen vuonna 2014 ottama kuva, jossa nähdään yli 15 000 galaksia. Pisteinä nähdään galaksit, joiden punasiirtymä $z > 6$ ja muiden selkeämmin erottuvien galaksien punasiirtymät ovat välillä $1 < z < 6$. [9]



Kuva 3. Hubble Extreme Deep Field[9]

Vuonna 2021 laukaistu James Webb -avaruusteleskooppi (JWST) julkaisi ensimmäiset kuvansa heinäkuussa 2022, jonka jälkeen on saatu nähdä tarkempia kuvia avaruudesta kuin koskaan. JWST pääsee tekniikkansa ansioista havainnoimaan kaukaisia kohteita, joiden valo on niin punasiirtynyt, että se on infrapuna-alueella, kun taas Hubblen havainnot rajoittuvat näkyvän valon aallonpituuksille. Teleskoopin tärkeimpiin tehtäviin on listattu galaksien kehityksen määrittäminen ja ensimmäisten galaksien ja muiden kohteiden etsiminen. [10]

2.2 Galaksijärjestelmät

Galaksit muodostavat avaruudessa eri kokoisia gravitaation sitomia galaksiryhmiä ja -joukkoja. Niiden määritelmät eivät ole tarkkoja, mutta niiden avulla voidaan kuitenkin luokitella galaksijärjestelmiä. Galaksiryhmiksi kutsutaan yleensä muutaman kymmenen galaksin muodostamaa ryhmää, tämä on pieni, mutta tavallisin galaksijärjestelmä. Galaksiryhmien massat vaihtelevat $10^{12,5} - 10^{14} M_{\odot}$ välillä ja niiden nopeusdispersio on 300 km s^{-1} . Galaksijoukoiksi kutsutaan noin yli 50 galaksin ryhmää. Joukkojen massat ovat suuruusluokaltaan $10^{13} - 10^{15} M_{\odot}$ ja nopeusdispersio 1000 km s^{-1} . [11]

Galakseilla on liikettä galaksijoukkojen sisällä ns. pekuliaarinopeutta. Pekuliaariliike galaksijoukoissa tarkoittaa galaksin nopeutta galaksijoukon massakeskipisteen suhteen. Niin ikään galaksijoukoilla on kokonaisuutena liikettä suhteessa muihin joukkoihin. [1]

Galaksien kehitys tapahtuu vuorovaikutuksessa toisten galaksien kanssa. Maailmankaikkeuden alkuaikoina galaksien törmäykset ja kohtaamiset olivat tietyllä tavalla yleisempiä, kun tiheys maailmankaikkeudessa oli suurempi. Nykyisin kun aine on jakautunut laajemmalle, eivät vuorovaikutukset galaksien välillä ole niin toistuvia. On kuitenkin laskettu, että jokainen suurikokoinen galaksi on elinkaarensa aikana kokenut useita kohtaamisia muiden galaksien kanssa. Nämä ovat muokanneet galakseja ja synnyttäneet uusia tähtiä, kun galaksien kaasu- ja pölypilvet ovat kohdanneet. Vuorovaikutuksien seurauksia on nähtävillä avaruudessa galaksien häiriömuotoina kuten häntinä. [1]

3 Jumalan sormet -ilmiö

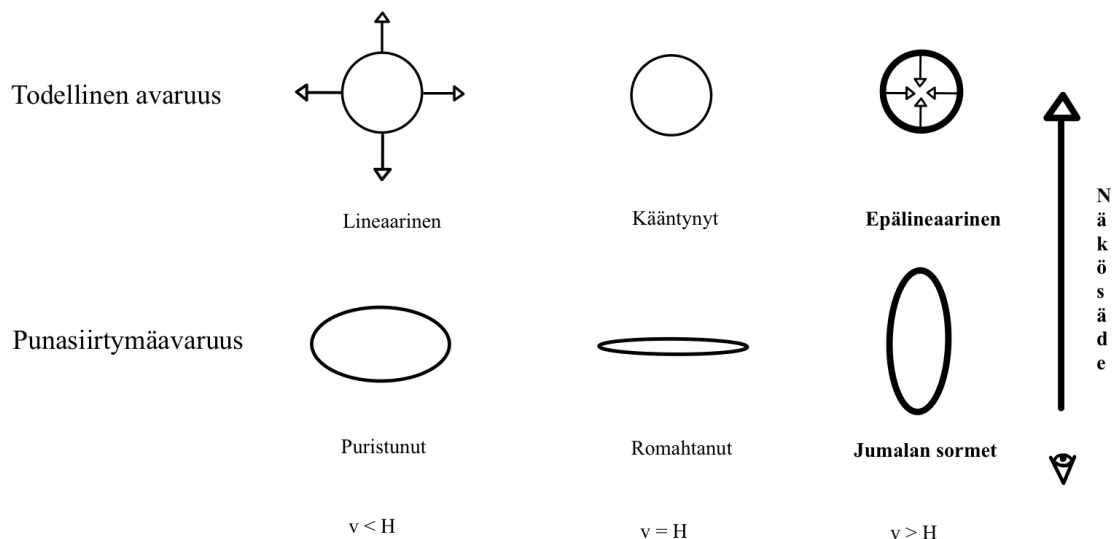
3.1 Punasiirtymäavaruus ja todellinen avaruus

Homogeenisessä laajenevassa punasiirtymäavaruudessa tehdyt etäisyyden mittaukset ja havainnot vastaisivat todellisen avaruuden etäisyyksiä. Avaruuden kuitenkin ollessa epähomogeeninen, ei asia ole näin yksinkertainen. Pienillä skaaloilla (< 1 Mpc/h) paikalliset massakeskittymät, kuten galaksiryhmät ja galaksijoukot, vetävät niihin kuuluvia galakseja puoleensa, jolloin galaksit saavat huomattavia pekuliaarisia nopeuksia (muutamasta sadasta aina 1000km/h). Tämä seurauksena galaksit näyttävät punasiirtymäavaruudessa eri paikassa suhteessa niiden todelliseen avaruussijaintiin. Tämä on otettava huomioon, koska suurimmalle osalle galakseista etäisyys on mitattavissa vain punasiirtymän avulla. [2]

Tunnetuin esimerkki tällaisesta vääristymästä on Jumalan sormet -ilmiö. Ilmiössä tarkastellaan galaksijoukkoja, jonka galaksit ovat suunnilleen samalla etäisyydellä meistä eli pienellä alueella avaruudessa suunnilleen pallon muodossa. Todellisessa avaruudessa tämä näkyisi kolmiulotteisena keskittymänä, mutta nopeuksien hajonnan vuoksi galaksit ulottuvat punasiirtymäavaruudessa laajalle alueelle. [2]

Kuvassa 4 on havainnollistettu jumalan sormet -ilmiötä. Oikealla ylhäällä kuvassa galaksijoukko todellisessa avaruudessa ja oikealla alhaalla punasiirtymäavaruudessa, jollaisena se näyttää havaittajalle. Galaksijoukon massakuorella on nopeutta keskustaa kohti ja tämä nopeus ylittää Hubblen laajenemisnopeuden. Kuori näyttää näkösuunnan suunnassa venyneeltä. Meitä lähimpänä olevat galaksit liikkuvat painovoiman vaikutuksesta kohti joukon keskustaa eli meistä pois päin ja tämän johdosta näiden galaksien punasiirtymä on suurempi kuin niiden todellinen punasiirtymä eli etäisyys on suurempi. Meistä kauimpana olevat galaksit siirtyvät myös kohti joukon keskustaa, jolloin niiden todellinen etäisyys meistä on pienempi kuin oikea punasiirtymäetäisyys. Näiden pekuliaarinopeuksien johdosta pallomaisesta joukosta

tulee litteä ellipsoidi. Ilmiössä siis galaksijoukkojen tiheät keskialueet näyttäytyvät pitkittyneiltä ikään kuin sormen muodossa, joka osoittaa kohti tarkkailijaa. [2]



Kuva 4. Punasiirtymäavaruuden vääristymät.

Muitakin vääristymiä esiintyy, jotka ovat myös esitetty kuvassa 4. Vasemmalta laajan massakeskittymän kuten superjoukon, jossa osalla galakseista nopeus on pienempi kuin Hubblen laajenemisnopeus, näyttäytyy joukko näkösäteen suunnassa puristuneelta. Näillä ns. lineaarisilla skaaloilla galaksit eivät ole gravitaation sitomia kuten galaksijoukoissa. Keskellä kuvassa galaksijoukon massakuoren nopeus on yhtä suuri kuin laajenemisnopeus, jolloin punasiirtymäavaruudessa joukko näyttäytyy romahtaneena. [2]

3.2 Korjaukset havaintoihin

Jumalan sormet -ilmiö pyritään korjaamaan havainnoista, koska korjaamattomana galaksien etäisyydet eivät vastaa niiden oikeata etäisyyttä ja haittaavat näin havainnoista tehtäviä johtopäätöksiä. Edellä esitetään Tempel et al. (2012) menetelmä havaintojen korjaamiseen.

Galaksin korjattu etäisyys d saadaan laskettua

$$d = d_j + (d_a - d_j) \frac{\sigma_r}{\sigma_v / H_0}, \quad (10)$$

jossa d_j on etäisyys joukon keskusta, d_a alkuetäisyys galaksiin, σ_r galaksijoukon neliökeskiarvon neliöjuuren (rms) koko, σ_v rms radiaalinopeus ja H_0 on Hubblen vakio.

Galaksijoukon koko σ_r saadaan laskettua

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2n(1+z_m)^2} \sum_{i=1}^n (r_i)^2, \quad (11)$$

jossa z_m joukon keskimääräinen punasiirtymä, n galaksien lukumäärä, joilla havaittu nopeuksia ryhmän sisällä ja r_i projisoitu etäisyys taivaalla joukon keskipisteestä.

Radiaalinopeus σ_v saadaan laskettua

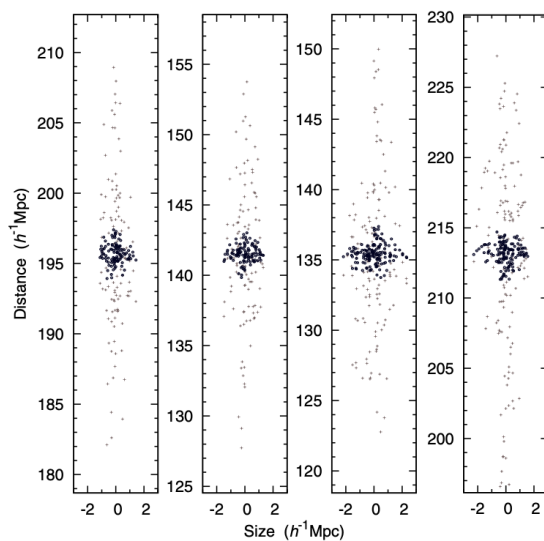
$$\sigma_v^2 = \frac{(1+z_m)^2}{(1+z_m)^2(n-1)} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2, \quad (12)$$

jossa v_m on joukon keskinopeus, v_i yksittäisen joukon jäsenen nopeus.

Nopeusdispersio σ_v arvioidaan käyttämällä joukon näkösäteen suunnan nopeuksia, jolloin tulos on yksi ulotteinen. Yksi dimensionaalinen nopeusdispersio voidaan approksimoida kolme dimensionaaliseksi nopeusdispersioksi kaavalla. [12]

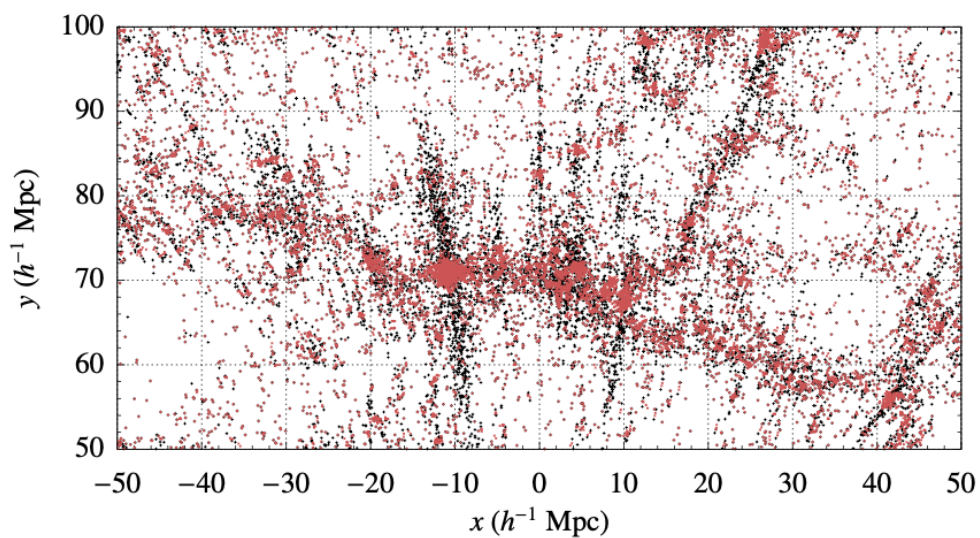
$$\sigma_{v3D} = \sqrt{3}\sigma_v \quad (13)$$

Kaavan 9 avulla tehdyt punasiirtymäavaruuden vääristymien korjaukset nähdään kuvassa 5. Harmaina pisteinä ryhmän galaksien etäisyydet punasiirtymäavaruudessa ja mustina pisteinä korjatut etäisyydet. Korjaukset tehty neljälle eli galaksiryhmälle ja kaikissa näkyy selkeästi kuinka punasiirtymäavaruudessa etäisyydet venyvät näkösäteen suunnassa. Venymät ovat hyvin suuria ja haittaavat korjaamattomana galaksijoukkojen ja rakenteiden tutkimista. [13]



Kuva 5. Jumalan sormet -ilmiön vääristymien korjaus neljälle ryhmälle.[13]

Kuvassa 6 tehty samainen korjaus taivaan alueelle, joka sisältää useampia galaksiryhmiä ja -joukkoja. Mustina pisteinä punasiirtymäavaruuden etäisyydet ja punaisina pisteinä korjatut etäisyydet. [3]



Kuva 6. Jumalan sormet -ilmiön vääristymien korjaus.[3]

4 Yhteenveto

Jumalan sormet -ilmiö aiheuttaa vääristymiä galaksien etäisyyksiin galaksiryhmissä ja -joukoissa. Nopeusdispersio kertoo joukon jäsenten nopeuksien tilastollisesta hajonnasta ryhmän keskinopeudesta. Mitä enemmän nopeuksia mitataan, sitä tarkempi hajonta saadaan. Tarkemman hajonnan myötä edellisessä kappaleessa esitetty korjaus on tarkempi mitä suuremmasta ryhmästä on kyse. Ryhmän koon pienentyessä virheet kasvavat. Toisaalta pienemmissä ryhmissä jäseniä yhdessä pitävä gravitaatio on pienempi, jolloin pekuliaariset nopeudetkin ovat. Suurissa joukoissa jäsenten nopeudet kasvavat, jolloin mittavirhe kasvaa.

Nopeusdispersio voidaan mitata vain näkösäteen suunnassa ja on approksimoitu kolmiulotteiseksi, myös tämä aiheuttaa virhettä havaintoihin. Galaksiryhmien jatkuva tutkimus tuo uutta tietoa galaksien synnystä ja kehityksestä sekä maailman-kaikkeuden rakenteista, jotka auttavat luomaan parempia menetelmiä ja korjauksia havaittuihin ilmiöihin. Kosmologiset simulaatiot ovat tärkeässä roolissa verrattaessa havaintoja teorioaan.

Viitteet

- [1] H. Karttunen, K. J. Donner, P. Kröger, H. Oja ja Potanen Markku, *Tähtitieteen perusteet* (UrsaHelsinki, 2020), Vol. 6.
- [2] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology* (Springer, 2015), pp. 392–408.
- [3] L. J. Liivamägi, *Properties and spatial distribution of galaxy superclusters* (University of Tartu press, 2017), pp. 11–22.
- [4] H. Oja, *Galaksit* (Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ryHelsinki, 2017).
- [5] D. J. Eisenstein, I. Zehavi, D. W. Hogg, R. Scoccimarro, M. R. Blanton, R. C. Nichol, R. Scranton, H. Seo, M. Tegmark, Z. Zheng, S. F. Anderson, J. Annis, N. Bahcall, J. Brinkmann, S. Burles, F. J. Castander, A. Connolly, I. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, J. A. Frieman, K. Glazebrook, J. E. Gunn, J. S. Hendry, G. Hennessy, Z. Ivezić, S. Kent, G. R. Knapp, H. Lin, Y. Loh, R. H. Lupton, B. Margon, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, A. Pope, M. W. Richmond, D. Schlegel, D. P. Schneider, K. Shimasaku, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, D. L. Tucker, B. Yanny ja D. G. York, *The Astrophysical Journal* **633**, 560 (2005).
- [6] SDSS, Sloan Digital Sky Surveys, 2014.
- [7] ESA Science & Technology - Measurements of the Hubble constant.
- [8] T. Kuutma, *Galaxies and non-galactic baryons in cosmic filaments* (University of Tartu press, 2021), pp. 13–20.
- [9] N. Goddard, NASA Image library, 2017.
- [10] M. Suominen, Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry 12 (2021).
- [11] F. G. Becker, M. Cleary, R. M. Team, H. Holtermann, D. The, N. Agenda, P. Science, S. K. Sk, R. Hinnebusch, R. Hinnebusch A, I. Rabinovich, Y. Olmert, D. Q. G. L. Q. Uld, W. K. H. U. Ri, V. Lq, W. K. H. Frxqwu, E. Zklfk, L. V. Edvhg, R. Q. Wkh, F. G. Becker, N. Aboueldahab, R. Khalaf, L. R. De Elvira, T. Zintl, R. Hinnebusch, M. Karimi, S. M. Mousavi Shafae, D. O 'driscoll, S. Watts, J. Kavanagh, B. Frederick, T. Norlen, A. O'Mahony, P. Voorhies, T. Szayna, N. Spalding, M. O. Jackson, M. Morelli, B. Satpathy, B. Muniapan, M. Dass, P. Katsamunsk, Y. Pamuk, A. Stahn, E. Commission, T. E. D. Piccone, M. K. Annan, S. Djankov, M. Reynal-Querol, M. Couttenier, R. Soubeyran, P. Vym, E. Prague, World Bank, C. Bodea, N. Sambanis, A. Florea, A. Florea, M. Karimi, S. M. Mousavi Shafae, N. Spalding, N. Sambanis ja , *Syria Studies* (PUBLISHER, 2015), No. 1, pp. 37–72.
- [12] E. Tempel, A. Tamm, M. Gramann, T. Tuvikene, L. J. Liivamägi, I. Suhhonenko, R. Kipper, M. Einasto ja E. Saar, *Astronomy and Astrophysics* **566**, 1 (2014).

- [13] E. Tempel, E. Tago ja L. J. Liivamägi, *Astronomy and Astrophysics* **540**, 1 (2012).