



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2023

E207 Physicum

**Luento 11: Galaksijoukot ja maailmankaikkeuden
suuren mittakaavan rakenne**

20/11/2023



Tällä luennolla käsitellään

1. Galaksiryhmät ja niiden luokittelu
2. Galaksien väliset vuorovaikutukset ja törmäykset, sekä dynaaminen kitka.
3. Galaksijoukot, niiden luokittelu ja massat.
4. Gravitaatiolinssit ja niiden sovellukset kosmologiassa.
5. Suuren mittakaavan rakenne: havainnot, teoria ja rakenteen havaitseminen.
6. Vastaa soveltuvin osin: **S&G:** luvut 5.6, 6.5, 7.1 (vanha painos)
S&G: luvut 7.1-7.4, 8.1 (uusi painos)



11.1 Galaksiryhmät

- Galaksiryhmissä on tyypillisesti noin ~50-100 jäsentä vajaan 1-2 Mpc alueella, kun taas galaksijoukoissa on ≥ 50 jäsentä, mutta tarkkaa rajaa galaksiryhmän ja -joukon välillä ei ole olemassa.
- Galaksiryhmien suurimmat galaksit ovat yleensä spiraaleja ja niiden lisäksi on myös paljon pieniä epäsäännöllisiä galakseja ja kääpiösferoideaaleja.
- Galaksiryhmien kokonaismassat ovat tyypillisesti noin $M \approx 10^{13} M_{\odot}$, valtaosa massasta on pimeää ainetta.



Ursa Major galaksiryhmä on 3.6 Mpc:n etäisyydellä. M81 keskellä ja M82 sen alapuolella, lisäksi muita ryhmän jäseniä.



Galaksiryhmien luokittelu

- Galaksit liikkuvat ryhmissä tyypillisesti nopeuksilla $\sigma_R \approx 100\text{-}500 \text{ kms}^{-1}$, eli suunnilleen samalla nopeudella kuin tähdet galakseissa.
- Galaksiryhmät luokitellaan:
 - Tavallisiin ryhmiin, kuten esim. meidän oma paikallinen ryhmä.
 - Fossiilisiin ryhmiin, joissa on yleensä vain yksi erittäin kirkas galaksi ja paljon himmeitä kohteita.
 - Kompakteihin ryhmiin, joissa galaksit ovat erittäin lähellä toisiaan.





Galaksiryhmien kaasu

- Galaksiryhmissä on paljon kuumaa ja harvaa kaasua ($T \geq 10^6$ K, huom. galaksijoukoissa kaasu on vielä kuumempaa).
- Galaksit menettävät osan kiekon ulkosissa olevasta kylmästä kaasusta liikkeessaan joukon kuumassa kaasussa.
- Kaasu on sekoitusta aineesta joka ei ole ollut koskaan galakseissa ja aineesta, jossa on tähtien tuottamia metalleja.
- Valo/massa suhde galaksiryhmissä:
 $\sim 100h^{-1} \leq M/L \leq 350h^{-1}$

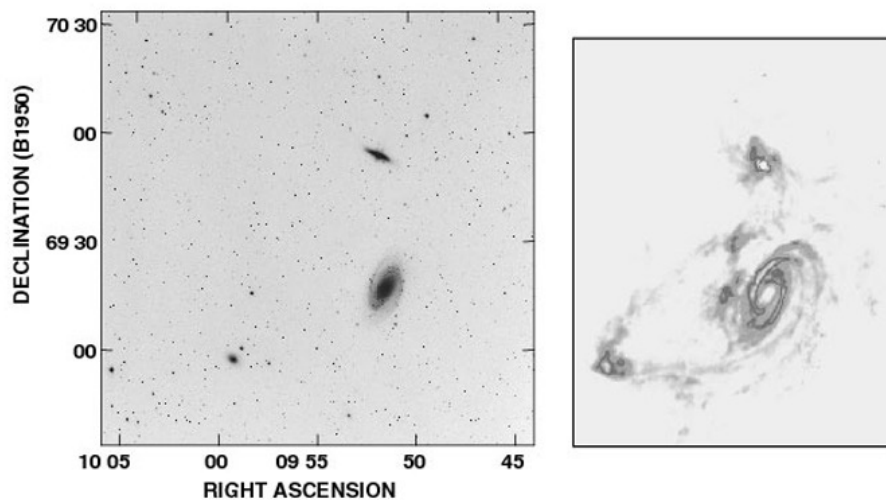


Fig 7.2 (M. Yun) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

M81 galaksin ympäriltä karkaavaa neutraalia vety-kaasua (HI) oikealla.



11.2 Galaksien väliset vuorovaikutukset I

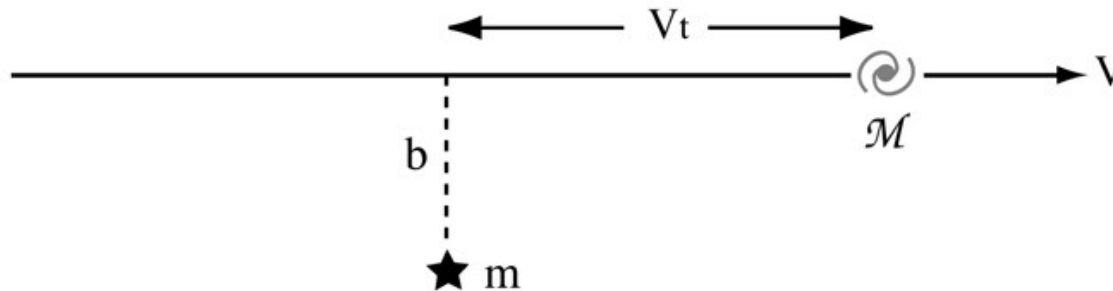


Fig 7.4 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Kun kaksi galaksia ohittaa toisensa, osa galaksien liike-energiasta siirtyy niiden sisältämien tähtien liike-energiaksi.
- Oletetaan että galaksi M ohittaa toisen galaksin, jossa tähti m sijaitsee ja käytetään jälleen impulssiapproksimaatiota (katso myös luento 3).

$$\Delta V_{\perp} = \frac{2Gm}{bV} \quad \& \quad b \gg \frac{2G(M+m)}{V^2} = 2r_s$$



Galaksien väliset vuorovaikutukset II

- Suuren galaksin nopeus muuttuu tekijällä ΔV_{\perp} ja toisessa galaksissa olevan tähden m :n liikemäärä täytyy vastaavasti myös muuttua. Kohtisuoran kineettisen energian kokonaismuutokseksi saadaan:

$$\Delta E_{K\perp} = \frac{M}{2} \left(\frac{2Gm}{bV} \right)^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{2GM}{bV} \right)^2 = \frac{2G^2 m M (M + m)}{b^2 V^2}$$

- Tämä energia tulee etenemisliikkeen suuntaisesta energiasta ja ΔV_{\parallel} muutokselle saadaan, kun oletetaan, että potentiaalienergia kauan ennen ja kauan vuorovaikutuksen jälkeen on nolla:

$$\frac{M}{2} V^2 = \Delta E_{K\perp} + \frac{M}{2} (V + \Delta V_{\parallel})^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{M}{m} \Delta V_{\parallel} \right)^2$$



Galaksien väliset vuorovaikutukset III

- Voidaan olettaa että $\Delta V_{\parallel} \ll V$ ja täten $\Delta V_{\parallel}^2 \approx 0$.

$$-V_{\parallel} \approx \frac{\Delta E_{k\perp}}{MV} = \frac{2G^2 m(M+m)}{b^2 V^3}$$

- Galaksin kineettinen energia vähenee siis $\Delta E_k \propto M^2$, massiivisen galaksin liike hidastuu enemmän. Lisäksi mitä nopeammin ohitus tapahtuu (suuri V , $\Delta E_k \propto V^{-2}$), sitä vähemmän galaksin liike hidastuu.
- Oletetaan seuraavaksi, että galaksi M liikkuu toisen galaksin alueen läpi, jossa on n tähteä joiden massat ovat m .

$$-\frac{dV}{dt} = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} nV \frac{2G^2 m(M+m)}{b^2 V^3} 2\pi b db = \frac{4\pi G^2 (M+m)}{V^2} nm \ln \Lambda$$



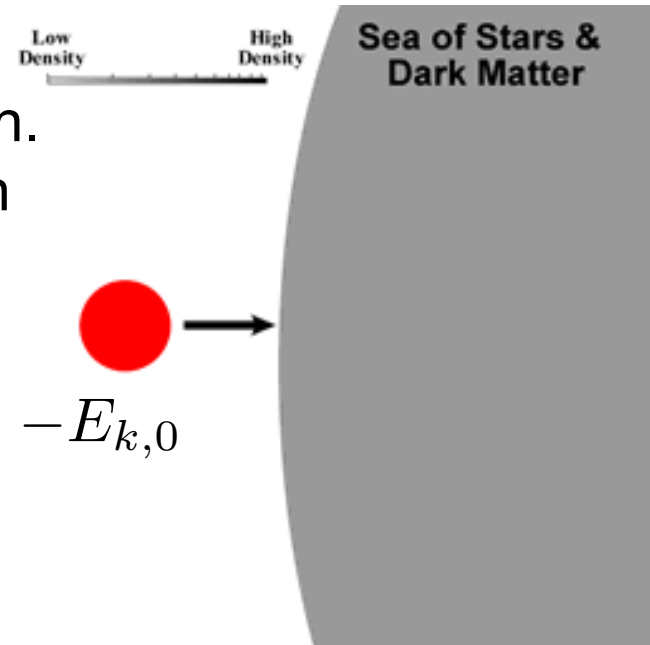
Galaksien väliset vuorovaikutukset IV

- Galaksin hidastumista kun se kulkee toisen galaksin alueen läpi kutsutaan **dynaamiseksi kitkaksi** ja se on verrannollinen toisessa galaksissa olevan aineen massatiheyteen ($\propto \rho$).
- Galaksien ohituksessa osa liike-energiasta siirtyy galaksien tähtien satunnaisiin liikkeisiin. Kauan ohituksen jälkeen galaksit ovat jälleen viriaali-tasapainossa ja systeemin liike-energia on pienempi kuin aikaisemmin.

$$E_0 = E_{k,0} + E_{p,0} \Rightarrow E_{p,0} = -2E_{k,0} \Rightarrow E_0 = -E_{k,0}$$

$$E_1 = -E_{k,0} + \Delta E_k \Rightarrow E_1 = -E_{k,1} \Rightarrow$$

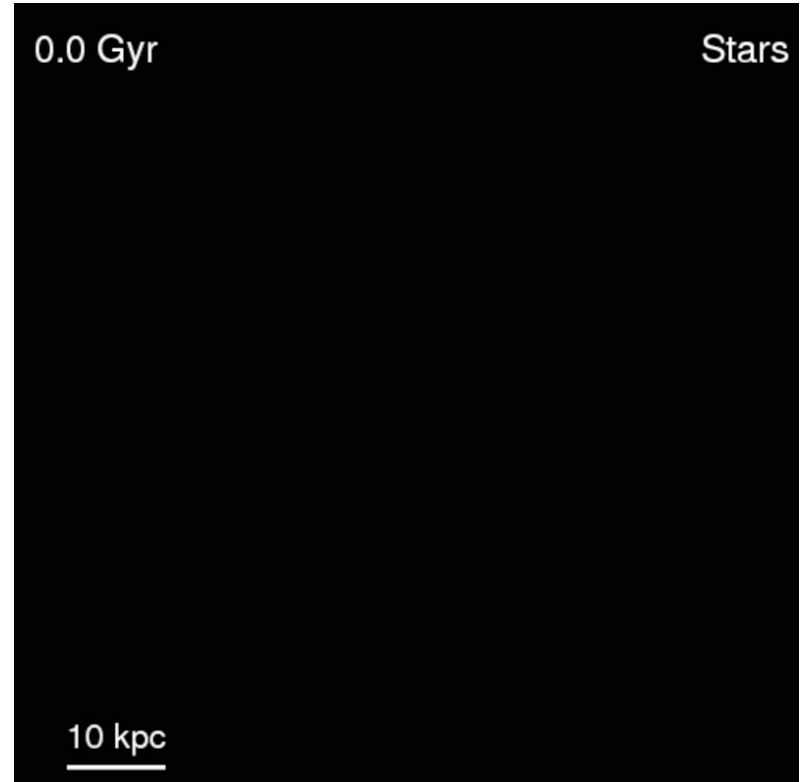
$$E_{k,1} = -(E_0 + \Delta E_k) = E_{k,0} - \Delta E_k$$





Galaksien väliset törmäykset

- Kaksi vuorovaikuttavaa galaksia voivat myös törmätä keskenään, jos ne menettävät vuorovaikutuksen aikana riittävästi liike-energiaa.
- Voimakkain vuorovaikutus saadaan siinä tapauksessa, että molemmat kiekot ovat samassa tasossa ja pyörivät kiertoliikkeen kanssa samaan suuntaan (prograde merger).



Movie Credits: Phil Hopkins, Caltech



Starburst-galaksit

- Vuorovaikuttavissa ja törmäävissä galakseissa, joissa on paljon kaasua, suuri osa kaasusta voi lyhyessä ajassa ajautua galaksien keskustoihin ja saada aikaiseksi voimakasta tähtien syntyä ($\geq 100 M_{\odot}/\text{yr}$) ja super-massiivisen mustan aukon aktiiviteettia.
- Nämä galaksit ovat erittäin kirkkaita, varsinkin infrapuna-alueella ja törmäyksen lopputuloksena saattaa mahdollisesti syntyä ellipsigalaksi.



Starburst-aktiiviteettia NGC 1569 galaksissa (Arp 210).



11.3 Galaksijoukot

- Noin puolet maailmankaikkeuden galakseista sijaitsevat galaksijoukoissa ja galaksiryhmissä.
- Galaksijoukoissa on yleensä $>100-1000$ kirkasta ($L \geq L_*$) galaksia (aina vähintään ≥ 50) noin $1.5 h^{-1}$ Mpc sisällä ja joukkojen tiheydet ovat galaksiryhmiä suurempia.
- Galaksijoukoissa on tyypillisesti myös paljon ellipsi- ja S0-galakseja, mutta vain vähän spiraaligalakseja.



Neitsyen (Virgo) galaksijoukko on lähin (etäisyys noin 16.5 Mpc) suurempi galaksijoukko.



Galaksijoukkojen luokittelu

- Galaksijoukkoja luokitellaan usein sen mukaan paljonko niissä on galakseja ja kuinka säännöllistä niiden rakenne on.
- Pienimmissä galaksijoukoissa on löyhempi rakenne ja niissä on jonkun verran spiraaleja etenkin joukon ulko-osissa (esim. Virgo).
- Suurimmissa joukoissa on tuhansittain galakseja ja säännöllinen rakenne (esim. Coma ja Perseus).

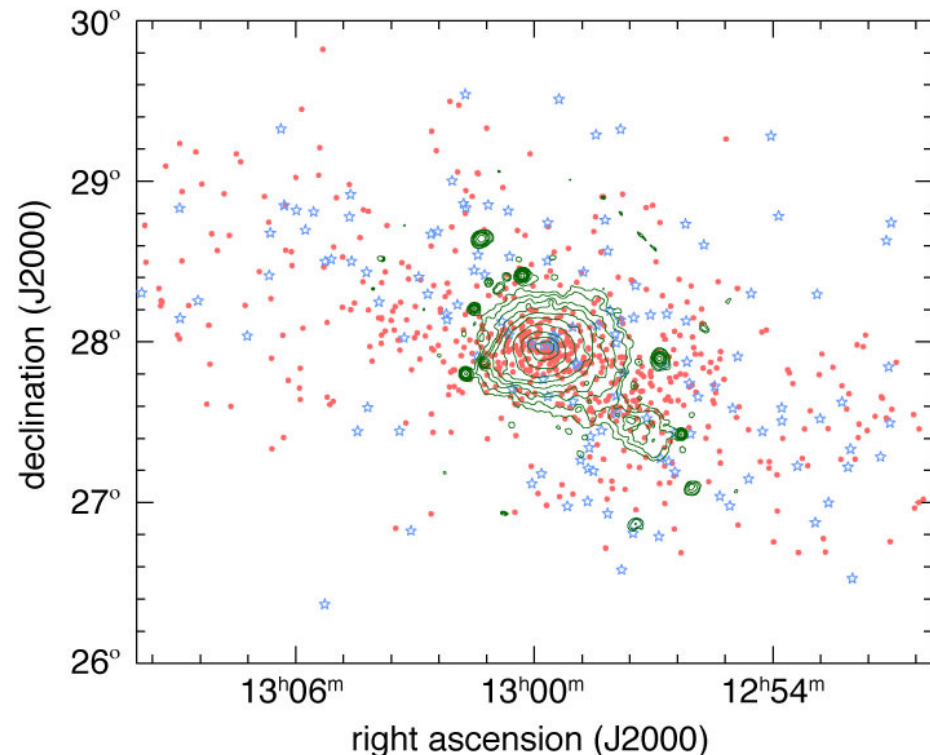


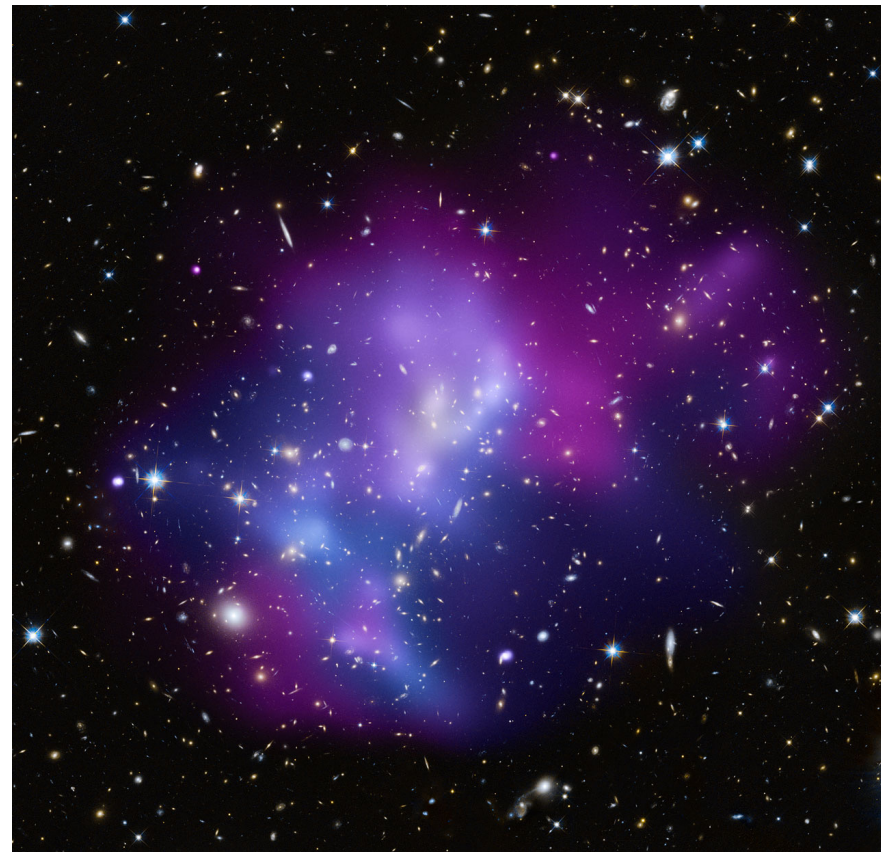
Fig 7.10 (M. van Haarlem) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Coma-galaksijoukko



Galaksijoukkojen kaasu

- Galaksijoukkojen galaksit liikkuvat tyypillisesti nopeuksilla 300-1000 kms^{-1} (jonkun verran nopeammin kuin ryhmissä).
- Suurin osa galaksijoukkojen baryonisesta massasta on kuumassa kaasussa. Kaasun lämpötila on $T \approx 3 \times 10^7 - 10^8 \text{ K}$ ja sen galaksien tuottama metallipitoisuus on varsin korkea ($Z = 1/3 Z_{\odot}$).
- Liikkuessaan kuumassa kaasussa galaksit menettävät myös omaa kylmää kaasuaan (eng. ram-pressure stripping).



Kuumaa kaasua MACS J0717.5+3745



Galaksijoukkojen kokonaismassojen arviointi

1. Galaksien liikkeistä galaksijoukkojen sisällä voimme arvioida galaksijoukkojen massoja, esim. Virgo-galaksijoukossa ulko-osien spiraaligalaksit putoavat keskustaa kohti nopeudella, josta voidaan päätellä, että galaksijoukon massa on noin $M \approx 4.5 \times 10^{14} M_{\odot}$ ja täten $M/L \approx 350$.
2. Havaitsemalla kuumaa kaasua ja olettamalla että se on hydrostaattisessa tasapainossa voimme arvioida, että Virgo-galaksijoukon massa on noin $M \approx 2-5 \times 10^{14} M_{\odot}$ ja täten $M/L \approx 100-250$.
3. Tehokas tapa arvioida galaksijoukon kokonaismassaa (näkyvää + pimeää ainetta) on käyttää hyväksi gravitaatiolinssi-ilmiötä. Tämä onkin usein tarkin ja jossain tapauksissa ainut tapa selvittää kokonaismassan jakauma galaksijoukoissa.



11.4 Gravitaatiolinssit

- Yleisen Suhteellisuusteorian mukaan maailmankaikkeuden massa-energia kaareuttaa aika-avaruutta jossa valo kulkee kulman α verran (b impakti-parametri):

$$\alpha = \frac{4GM}{bc^2}$$

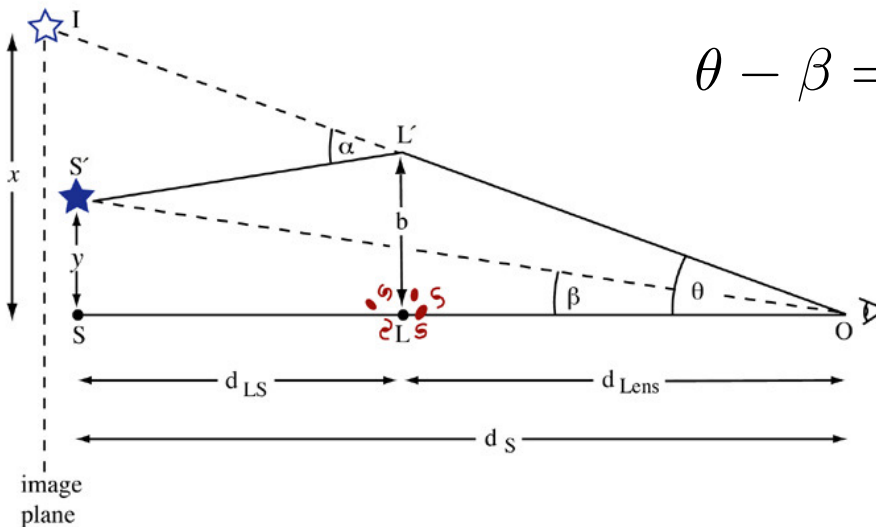
- Voimme lisäksi osoittaa että taittuminen riippuu vain sylinterin pinnalle projisoituvan aineen pintatiheydestä:

$$\alpha(b) = \frac{4G}{bc^2} \int_0^b \Sigma(R) 2\pi R dR = \frac{4G}{c^2} \frac{M(< b)}{b}$$

- Gravitaatiolinssettä havaitsemalla saadaan siis hyvä arvio kaksiulotteisesta kokonaismassan jakautumisesta jonkun säteen sisäpuolella.



Gravitaatiolinssit II



$$\theta - \beta = \alpha(\theta) \frac{d_{LS}}{d_S} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{4GM(< b)}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_L d_S}$$

$$\Rightarrow \beta = \theta \left[1 - \frac{1}{\Sigma_{\text{crit}}} \frac{M(< b)}{\pi b^2} \right]$$

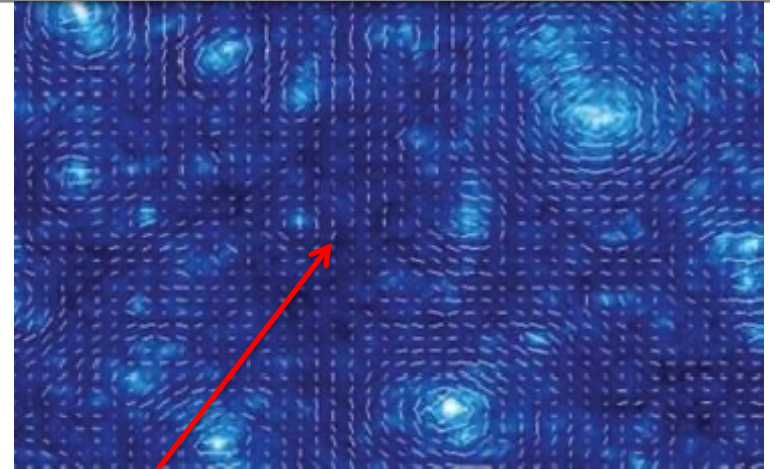
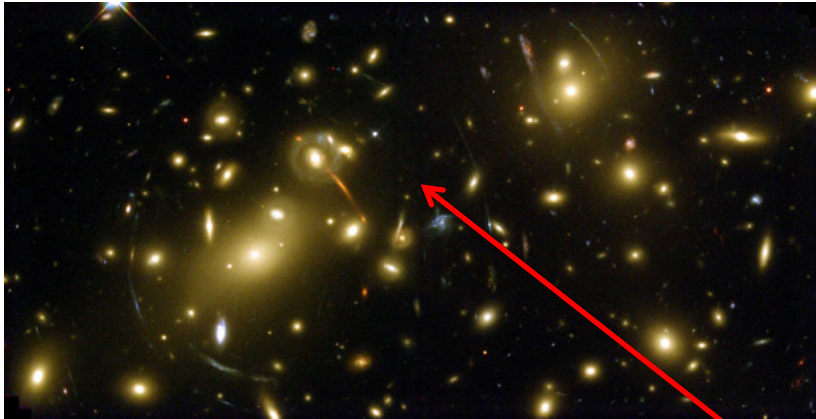
$$\Sigma_{\text{crit}} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{d_S}{d_L d_{LS}}$$

Fig 7.14 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

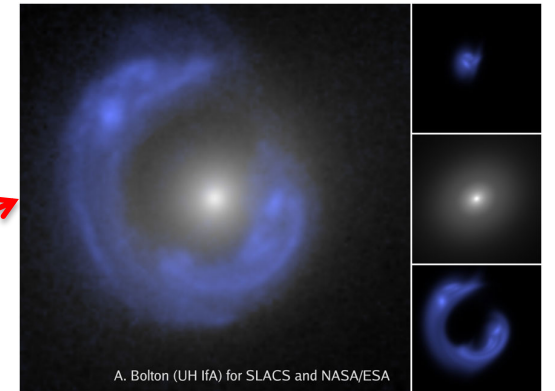
- Kulma johon kohteen valo taittuu riippuu linssin massasta, sekä havaitsijan, linssin sekä taustakohteen välisistä etäisyyksistä.
- Yksityiskohtaisia kaavanjohtoja ei tarvitse hallita, mutta yleinen periaate tulee ymmärtää.



Esimerkkejä gravitaatiolinssi-ilmiöistä



1. Vahvoissa gravitaatiolinssissä on selviä kaarimaisia rakenteita taustan galakseista.
2. Heikoissa gravitaatiolinssissä galaksien vääristymiä voidaan tutkia tilastollisessa mielessä.
3. Einsteinin renkaissa kohde ja linssi ovat melkein täsmälleen samalla näkösaiteella.





Gravitaatiolinssien sovelluksia

1. Gravitaatiolinssien avulla voidaan saada selville galaksijoukkojen massajakauma vertaamalla eri linssikuvien kokoja ja kulmia.
2. Gravitaatiolinssit vahvistavat linssikuvien galaksien valoa ja mahdollistaa sellaistenkin galaksien tutkimisen, mikä ei muuten olisi mahdollista.
3. Tutkimalla muuttuvan kvasaarin eri "linssikuvien" muutosta voimme arvioida Hubblen vakiota, koska valolla kestää eripituinen aika kulkea eri reittejä kohteesta meille.

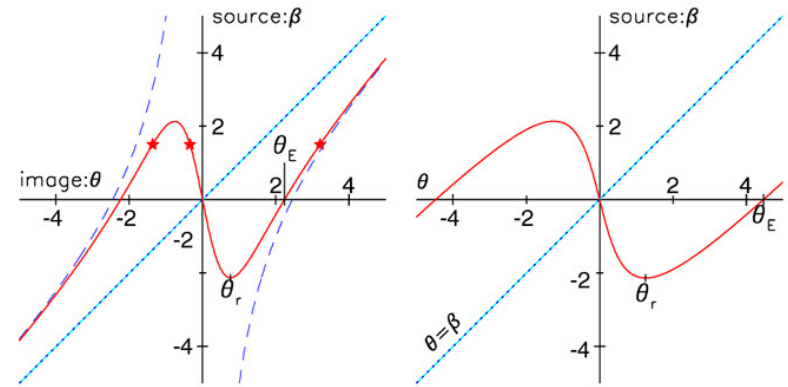
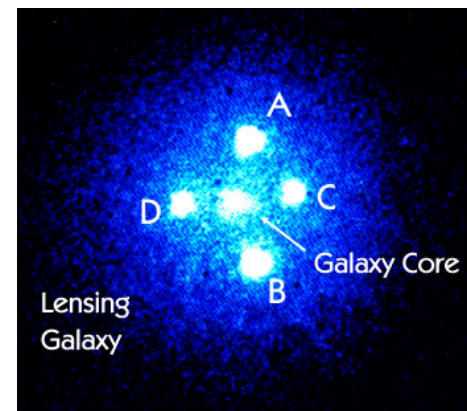


Fig 7.18 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

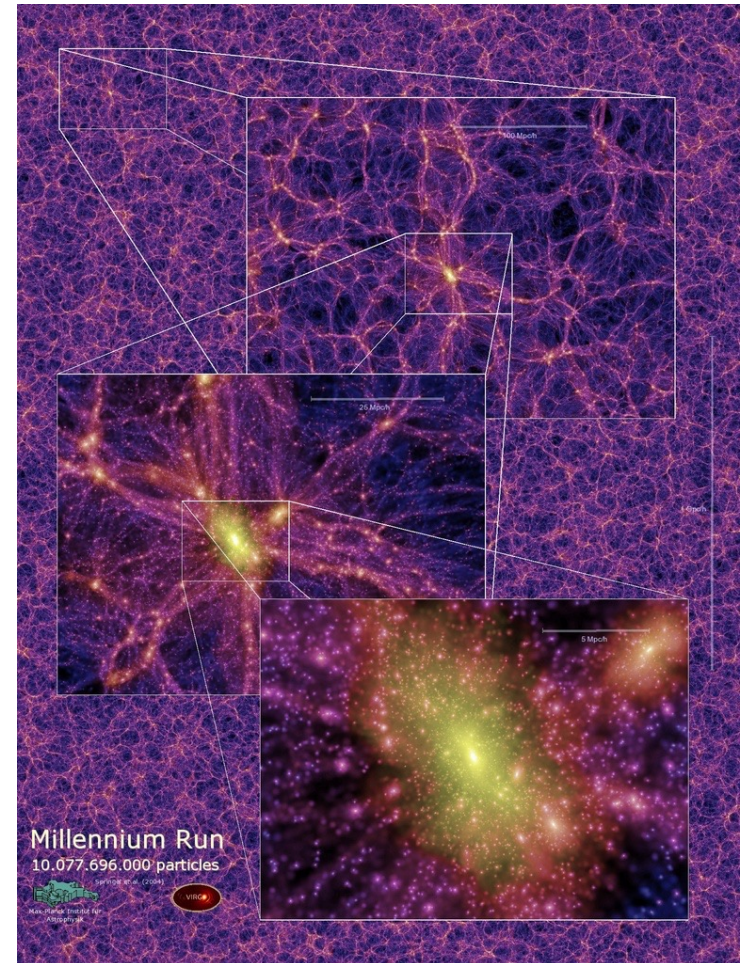


Einsteinin risti kvasaari.



11.5 Suuren mittakaavan rakenne

- Galaksit ovat jakautuneet maailmankaikkeudessa kosmisen rihmaston (cosmic web) seinille ja niiden väliin jää isoja lähes tyhjiä void-alueita.
- Suuret galaksijoukot sijaitsevat useamman filamentin risteyskohdassa.
- Kosminen filamenttirakenne on edelleen muodostumassa, keskitiheys näillä alueilla on vain 10-100 kertaa suurempi kuin maailmankaikkeuden tämän hetkinen keskitiheys.





Suuren mittakaavan havaintoja

- Lähiavaruuden suuren mittakaavan rakennetta voidaan havaita tekemällä galaksilaskentoja, eli havaitsemalla kaikki galaksit tietyn rajamagnitudin alapuolella.
- Suurimmat läheiset galaksijoukko-keskittymät kuten Virgo, Fornax jne. näkyvät hyvin kuvissa.
- Suhteellisen pienillä pituus-skaaloilla aine ei ole selvästikin tasaisesti jakautunutta.

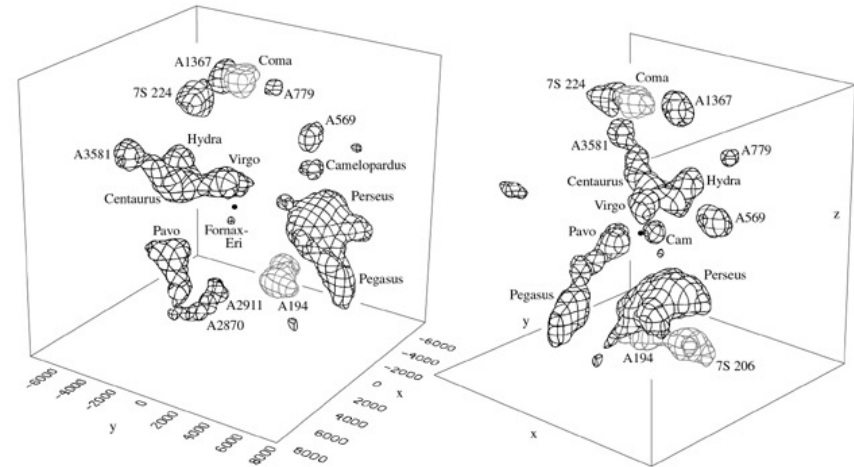
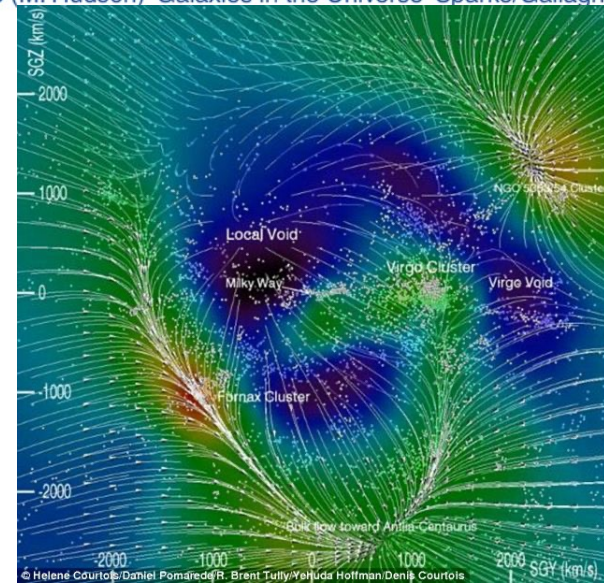


Fig 4.3 (M. Hudson) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007





Supergalaktinen koordinaatisto

- Kuvatessamme lähiavaruuden galaksien paikkoja voimme ottaa käyttöön supergalaktisen koordinaatiston, joka kulkee paikallisen galaksiryhmän läpi (0,0).
- Supergalaktinen taso kulkee lähimpien galaksijoukkojen läpi (Virgo, Perseus, ja Fornax).
- Suurin osa läheisistä galaksijoukoista (<100 Mpc) sijaitsevat ellipsoidin sisällä, joka on suunnilleen kohtisuorassa Linnunradan tasoon nähden.

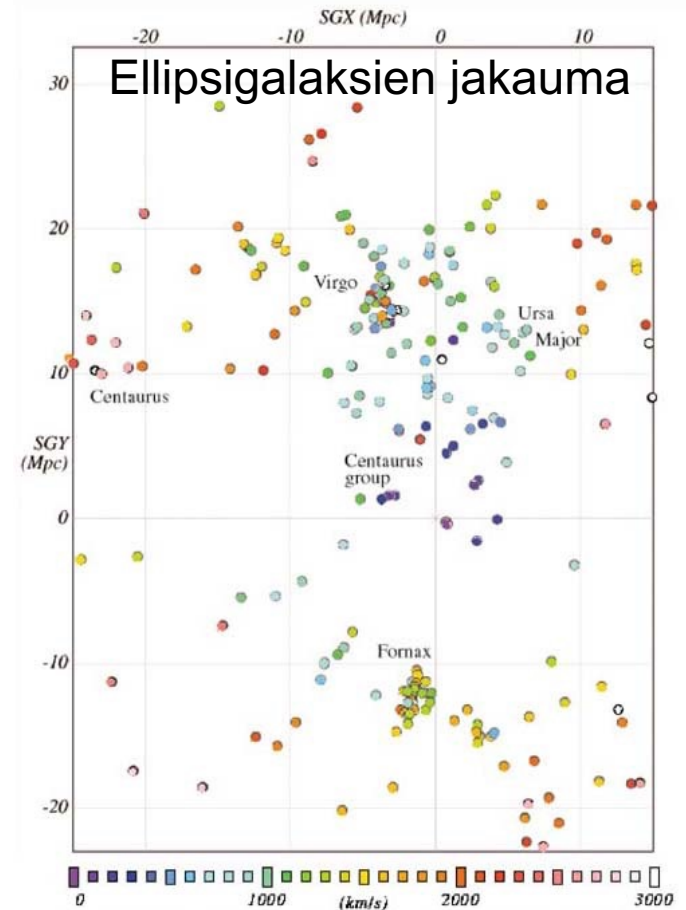


Fig 8.2 (J. Tonry) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Suuremman mittakaavan havaintoja

- Tekemällä havaintoja suuremmilla punasiirtymillä huomataan, että galaksit keskittyvät suuriin seinämäisiin rakenteisiin: Great Attractor ($d \sim 50$ Mpc) ja Great Wall, ($d \sim 70$ Mpc), sekä vielä suurempia rakenteita.
- Suuret rakenteet ovat edelleen romahtamassa ja vetävät puoleensa lisää galakseja.
- Suurten rakenteiden väliin jää $>50h^{-1}$ Mpc kokoisia lähes tyhjiä onkaloita (void-alueita).

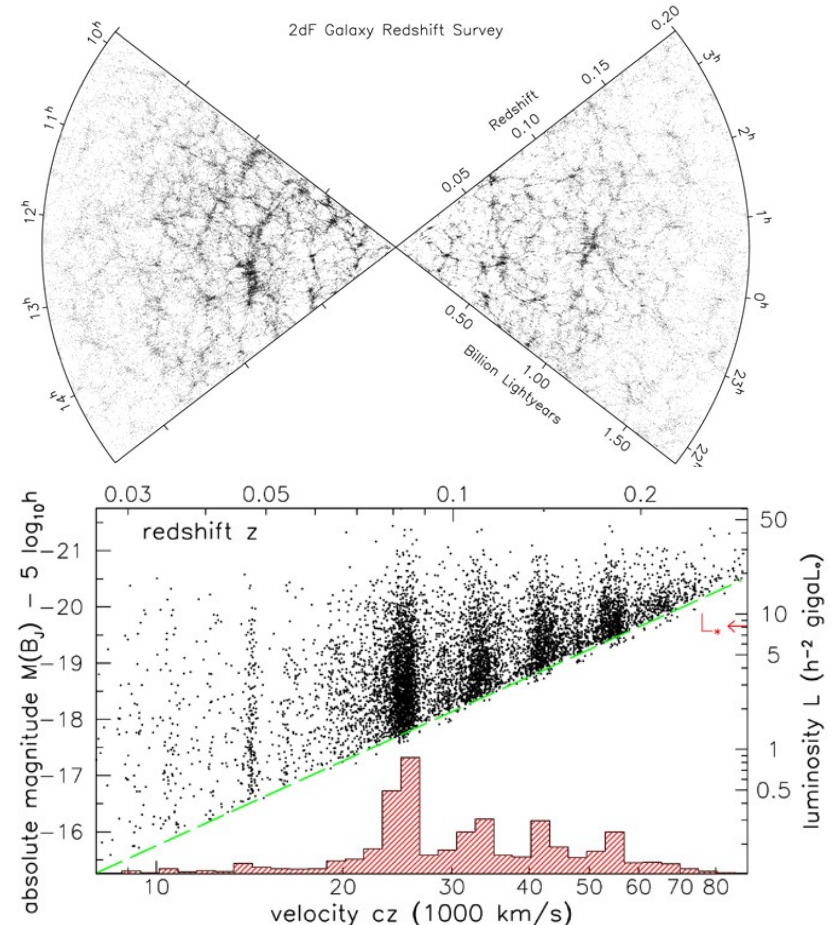


Fig 8.4 (2dF) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Suuremman mittakaavan havaintoja II

- Galaksijoukoissa galaksit kiertävät joukon keskustaa, kaikki ovat suunnilleen samassa suunnassa, mutta nopeudet ovat hieman erilaisia. Tuloksena on pitkiä viivamaisia rakenteita ("fingers of God").
- Punaiset ja siniset galaksit mittaavat suuren mittakaavan rakennetta erilailla, punaiset (ellipsit) ovat yleensä enemmän keskittyneitä kuin siniset (spiraalit) galaksit.

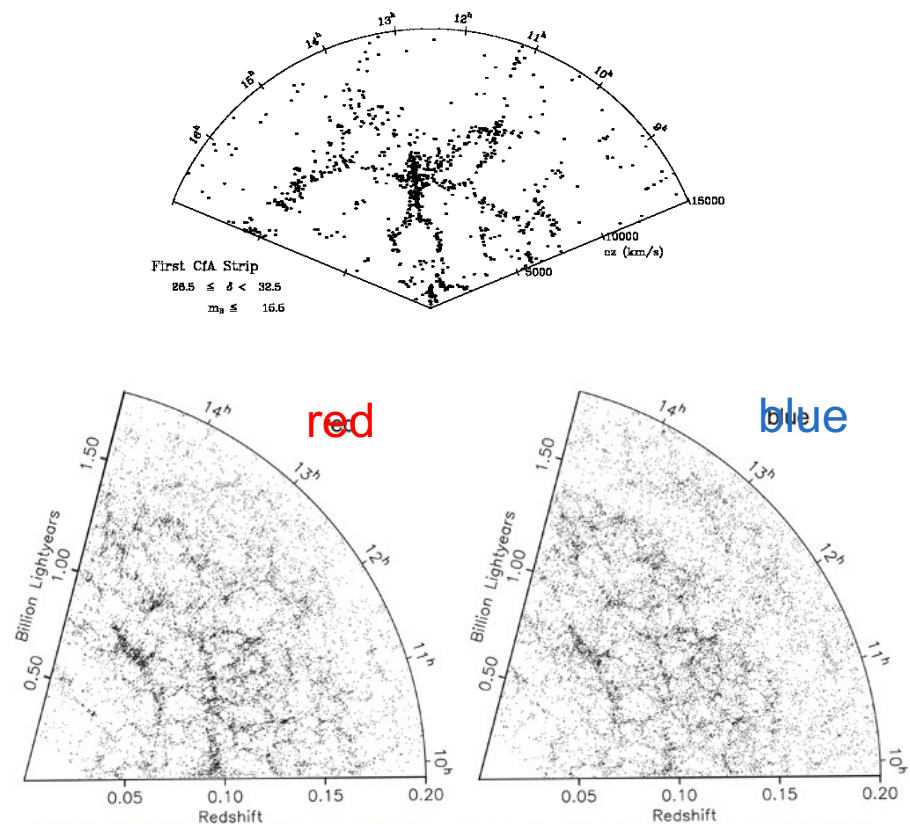


Fig 8.5 (2dF) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Rakenteen mittaaminen I

- Voimme arvioida miten galaksit ryhmittyvät yhteen, laskemalla niiden kaksi-piste korrelaatiofunktio, joka kertoo mikä on todennäköisyys sille, että kaksi galaksia joiden numerotiheys on n löytyvät kahdesta tilavuudesta ΔV_1 ja ΔV_2 .

$$\Delta P = n^2 [1 + \xi(r_{12})] \Delta V_1 \Delta V_2$$

- Mikäli $\xi(r) > 0$ pienillä r galaksien paikat ovat korreloituneita ja mikäli $\xi(r) < 0$ galaksit välttelevät toisiaan. Korrelaatiofunktioita voidaan mitata havaituista punasiirtymistä ja se on muotoa:

$$\xi(r) \approx (r/r_0)^{-\gamma}$$

- Korrelaatiopituus $r_0 = 5h^{-1}$ Mpc ja $\gamma = 1.8$, eli pienillä etäisyyksillä $r < r_0$ galaksit ovat voimakkaasti korreloituneita.



Rakenteen mittaaminen II

- Kaksi-piste korrelaatiofunktion Fourier-muunnoksesta saamme tehospektrin (power spectrum), joka kuvaa tiheysfluktuaatioiden voimakkuutta eri skaaloilla.
- Gaussisesti jakautuneet satunnais-fluktuaatiot ovat riippumattomia eri kokoluokkien välillä:

$$\langle \delta_R^2 \rangle \approx \frac{k^3 P(k)}{2\pi^2} = \Delta_k^2$$

- Fluktuaatioiden voimakkuutta arvioidaan niiden varianssista, σ_R :sta.

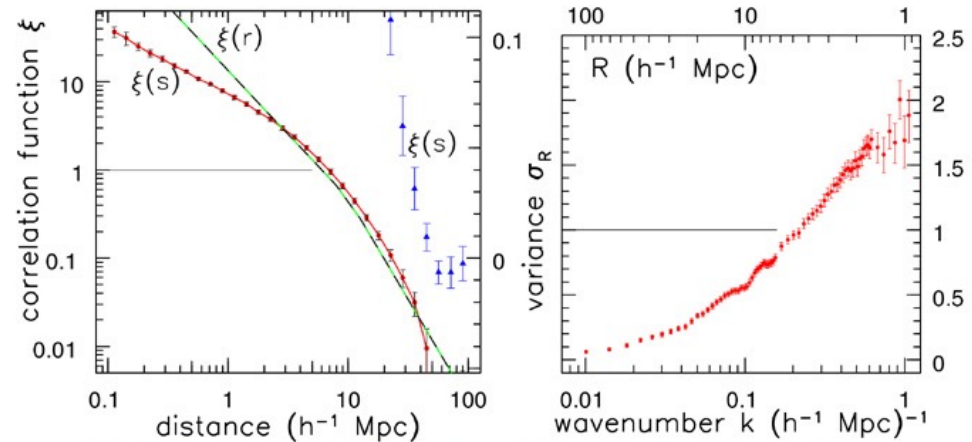


Fig 8.6 (Maddox, Cole) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

σ_8 -termi kertoo kuinka suuret fluktuaatiot ovat 8 Mpc kokoisilla alueilla. Kosmologiset havainnot ja teoria ennustavat kuinka suuria rakenteita maailmankaikkeuteen tulisi muodostua milläkin punasiirtymällä.



Mitä opimme?

1. Galaksiryhmissä on noin ≤ 50 jäsentä ja niissä on pääasiassa spiraaligalakseja ja pieniä epäsäännöllisiä galakseja.
2. Dynaaminen kitka vaikuttaa galaksien välisiin vuorovaikutuksiin ja vuorovaikutus riippuu toisen galaksin tähtien massatiheydestä. Kitka hidastaa galaksien liikettä ja saa ne vajoamaan toisiaan kohti.
3. Galaksijoukoissa voi olla tuhansia galakseja ja niissä on erittäin paljon kuumaa kaasua.
4. Galaksit ovat jakautuneet maailmankaikkeudessa kosmisen rihmaston (cosmic web) seinille ja niiden väliin jää isoja lähes tyhjiä onkaloita, eli niin kutsuttuja void-alueita.