

ISO DATA TULEE TIETEISIIN

Helsingin yliopiston äskettäin nimitetyt professorit pitivät tervetuliaisluennot 29.11.2017. Luento on yleistajuinen professorin tieteenalan keskeisten kysymysten esittely. Tässä kokonaisuudessa on kolme näihin luentoihin perustuvaa kirjoitusta.

Peter Johansson edustaa astrofysiikkaa, Ville Mustonen bioinformatiikkaa ja Krista Lagus digitaalista yhteiskuntatiedettä. Professoreiden aloja yhdistää niin sanottu iso data ja algoritmit.

GALAKSIEN SYNNYN NUMEERINEN MALLINTAMINEN

PETER JOHANSSON

Tässä kirjoituksessa kerron lyhyesti, mikä on nykytietämyksemme galaksien rakenteesta ja miten galaksien synty- ja kehitysprosessia voidaan mallintaa supertietokoneita käyttäen. Lopuksi esitän näkemystäni siitä, kuinka tarkasti nykyiset simulaatiomallit vastaavat havaittuja galakseja.

Tähtien ja planeettojen ohella galaksit ovat maailmankaikkeuden perusrakennepalikoita. Galaksit koostuvat tähdistä, kaasusta, pölystä ja näkymättömästä pimeästä aineesta. Näistä komponenteista tärkein rooli on pimeällä aineella, koska se on kaikissa galakseissa dominoivin massakomponentti. Otetaan esimerkiksi oma kotigalaksimme Linnunrata, jossa on viimeisten havaintojen mukaan noin 100–200 miljardia tähteä (Gaia collaboration, 2016). Tyypillisen tähden massa Linnunradassa on noin 0,3–0,5 kertaa Auringon massa, eli valtaenemistö Linnunradan tähdistä on niin kutsuttuja punaisia kääpiötähtiä. Punaiset kääpiöt ovat erittäin heikkovaloisia, ja suurin osa Linnunradan tähtien valosta tulee kirkkaista A-tyypin tähdistä (esim. Sirius) ja punaisista jättiläistähdistä (esim. Orionin tähdistön Betelgeuse). Hyvin kirkkaat tähdet, kuten siniset ylijättiläiset (esim. Orionin tähdistön Rigel), eivät tuota merkittävää osaa galaksin kokonaisvalosta, koska ne ovat erittäin harvinaisia. Linnunradan kaasun kokonaisuudessa on noin 10 % tähtien yhteenlasketusta massasta, kun taas pölyn massa on vain noin sadasosa kaasun massasta.

Vaikka Linnunradassa onkin siis valtavan suuri määrä tähtiä, on yli 90 % Linnunradan kokonaisuudesta pimeää ainetta. Tämä pimeä aine muodostaa valtavan laajan pallomaisen rakennelman, joka Linnunradan tapauksessa voi ulottua peräti noin 500 000 valovuoden etäisyydelle galaksin keskipisteestä. Sitä vastoin näkyvä tähdistä ja kaasusta koostuva galaksin osa on merkittävästi pienempi ja halkaisijaltaan vain noin 100 000 valovuotta. Emme vielä tiedä, mitä pimeä aine on. Tiedämme vain sen, että sillä on massaa ja että se vuorovaikuttaa painovoiman välityksellä, mut-

ta nimensä mukaisesti ei säteile tai heijasta mitään valoa. Useimmat tutkijat arvelevat pimeään aineeseen olevan jokin vielä tunnistamaton alkeishiukkanen, joka ei kuitenkaan kuuluisi tavallisten jo tunnettujen ainehiukkasten hiukkasperheeseen.

Linnunrata on keskikokoinen spiraaligalaksi, joita tyypillisesti löytyy galaksiryhmien keskeltä. Spiraaligalaksit koostuvat laajasta tähti- ja kaasukiekosta, jossa esiintyy nimensä mukaisesti spiraalirakennetta. Sen lisäksi niissä on usein keskuspullostuma, joka koostuu pääsääntöisesti vanhoista tähdistä. Massiivisten galaksien keskipisteessä löytyy usein supermassiivinen musta aukko, jonka massa voi olla miljoonia tai jopa miljardeja kertoja suurempi kuin Auringon massa. Linnunradan naapurigalaksi Andromeda, on myös spiraaligalaksi, ja molempia näitä galakseja ympäröi suuri joukko pieniä kääpiögalakseja, joilla on usein epäsäännöllinen rakenne. Kuuluisimmat Linnunradan pienistä seuralaisgalakseista ovat Magellanin pilvet, jotka näkyvät hyvin kirkkaina eteläisellä taivaanpuoliskolla. Maailmankaikkeudessa on spiraaligalaksien lisäksi myös ellipsigalakseja, joissa on vain niukasti kylmää kaasua ja joiden tähdistä suurin osa on erittäin vanhoja. Muodoltaan ellipsigalaksit muistuttavat hieman amerikkalaista jalkapalloa. Ellipsigalaksit sijaitsevat usein galaksijoukoissa, erityisesti niiden keskialueilla. Kaikki maailmankaikkeuden suurimmat ja massiivisimmat galaksit ovat ellipsigalakseja.

Valon äärellisestä nopeudesta johtuen voimme havaita suoraan suurilla kaukoputkilla galaksien synty- ja kehitysprosessia. Kosmologiset havainnot ovat osoittaneet kiistattomasti, että maailmankaikkeus syntyi alkuräjähdyksessä ja että sen

ikä on noin 13,8 miljardia vuotta (Planck collaboration, 2016). Lähigalaksit sijaitsevat kosmologisessa mittakaavassa varsin lähellä. Esimerkiksi Suuri Magellanin pilvi on noin 160 000 valovuoden etäisyydellä, kun taas Andromedan galaksista havaittava säteily lähti liikkeelle noin 2,5 miljoonaa vuotta sitten. Kaukaisimmissa havaituissa galakseissa havaittu säteily on lähtenyt liikkeelle, kun maailmankaikkeuden ikä oli alle puoli miljardia vuotta (Oesch ym. 2016). Tämä vastaa punasiirtymää $z = 11$, joka ilmoittaa sen, että maailmankaikkeuden koko on kasvanut laajentumisen myötä tekijällä 12 säteilyn lähettämishetken ja havaitsemishetken välillä.

Kun taivasta havaitaan mikroaaltoalueella, huomataan, että kaikista suunnista tulee suhteellisen tasaisesti jakautunutta mikroaaltosäteilyä, joka vastaa lämpötilaltaan noin 2,7 Kelvin-asteen mustan kappaleen säteilyä. Tämä on kosminen mikroaaltotaustasäteily, jonka löytämisestä Arno Penzias ja Robert Wilson jakoivat vuoden 1978 fyysikan Nobelin palkinnon. Kosminen mikroaaltotaustasäteily on kuumen alkuräjähdyksen jälkihiekua ja tämä säteily syntyi noin 380 000 vuotta vanhassa maailmankaikkeudessa, kun ensimmäiset atomit syntyivät vapaiden elektronien rekombinoituessa atomiytimiin. Ennen tätä vapaat elektronit sirottivat voimakkaasti säteilyä estäen sen kulkua maailmankaikkeudessa. Vapaiden elektronien sitoutuessa atomeihin maailmankaikkeus muuttui läpinäkyväksi mahdollistaen täten säteilyn kulun. Maailmankaikkeuden lämpötila oli säteilyn syntyessä noin 3 000 Kelvin-astetta ja maailmankaikkeuden koko oli noin 1 100 kertaa nykyistä pienempi. Maailmankaikkeuden laajetessa säteilyn aallonpituus kasvoi ja lämpötila vastaavasti laski suoraan verrannollisesti maailmankaikkeuden kokoon ja seurauksena oli tänä päivänä havaittu kosminen mikroaaltotaustasäteily, jonka lämpötila on noin 2,7 Kelvin-astetta.

Galaksit syntyivät painovoiman vaikutuksesta pienistä tiheyshäiriöistä, joita oli jo varhaisessa maailmankaikkeudessa. Näiden häiriöiden tarkka alkuperä on vielä hämärän peitossa, mutta todennäköisesti häiriöt juontavat juurensa maailmankaikkeuden ensimmäisen sekunnin tapahtumiin, kun maailmankaikkeus kävi läpi inflaatioksi kutsutun erittäin nopean laajenemisprosessin. Mikä-

li maailmankaikkeus olisi ollut täysin tasalaatuinen, vailla tiheyshäiriöitä, galaksien synty ei olisi ollut mahdollista.

Tänä päivänä galaksien sisäosien ylitiehyys on luokkaa miljoona, eli galaksit ovat noin miljoona kertaa tiheämpiä kuin maailmankaikkeus keskimäärin. Tarkat havainnot 1990-luvun alussa käyttäen NASA:n COBE-satelliittia (*Cosmic Background Explorer*, Smoot ym. 1992) osoittivat, että kosmisessa mikroaaltotaustasäteilyssä esiintyy lämpötilavaihteluita eri suunnissa, joiden kokoluokka on noin asteen sadastuhannesosa. Nämä lämpötilavaihtelut voidaan kytkeä suoraan tiheysvaihteluihin, joten voimme päätellä, että kun maailmankaikkeus oli noin 380 000 vuoden ikäinen, eräät sen osat olivat noin sadastuhannesosan verran ylitieheitä ja toiset saman verran alitieheitä keskitiheyteen verrattuna. Jotta galaksien synty olisi mahdollista, täytyy siis tiheyshäiriöiden kasvaa noin 11 kertaluokkaa, sadastuhannesosasta yli miljoonaan.

Galaksien synnyn edellyttämä painovoimaronmahdus on varsin hitaasti etenevä prosessi, koska painovoiman romahdusta on häiritsemässä maailmankaikkeuden yleinen laajeneminen, joka toimii ikään kuin vastavoimana painovoimalle. Staattisessa maailmankaikkeudessa painovoimaronmahdus etenisi hyvin ripeästi eksponentiaalisella aikaskaalalla, mutta laajenevassa maailmankaikkeudessa tiheyshäiriön kasvu on merkittävästi hitaampaa. Yksinkertaisella analyttisellä laskulla voidaankin osoittaa, että tiheyshäiriöt kasvavat suoraan verrannollisena maailmankaikkeuden kokoon niin kauan kun ne ovat pieniä, ja näin ollen niitä voidaan käsitellä lineaarisella teoriassa käyttäen (Longair 2008). Kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn synnystä nykypäivään maailmankaikkeuden koko kasvoi noin tekijällä 1 100, ja tiheyshäiriötkin kasvoivat samalla tekijällä eli noin sadastuhannesosasta sadasosaan. Tämä jää noin kahdeksan kertaluokkaa tarvittavasta miljoonakertaisesta ylitieheydestä. Tämän yksinkertaisen päättelyn perusteella galakseilla ei pitäisi siis olla riittävästi aikaa muodostua maailmankaikkeudessa, ja näin ei galakseja, tähtiä, planeettoja eikä meitä ihmisiäkään tulisi olla olemassa!

Selvästikin maailmankaikkeudessa on yllämainittuja rakenteita, joten mikä meni päättelyssämme vikaan? On totta, että havaitut tiheyshäiriöt

mikroaaltotaustasäteilyssä ovat hyvin pieniä. Havainnoissa näkyvät häiriöt koskevat kuitenkin vain tavallista, niin kutsuttua baryonista ainetta, josta koostuvat kaikki maailmankaikkeuden näkyvät ja säteilevät rakenteet, kuten tähdet ja planeetat. Mutta tavallisen aineen lisäksi maailmankaikkeudessa on pimeää ainetta. Voidaan osoittaa, että pimeän aineen tiheyshäiriöt kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn syntyaikoina olivat paljon suurempia, luokkaa noin sadasosa, eli tuhat kertaa suurempia kuin tiheyshäiriöt tavallisessa aineessa. Syy tälle suurelle erolle piilee siinä, että tavallinen aine vuorovaikutti voimakkaasti maailmankaikkeudessa vallitsevan säteilykentän kanssa. Kuten edellä mainittiin, säteilykentän fotonit sirosivat vapaita elektroneista aiheuttaen samalla painetta, joka esti tiheyshäiriöiden kasvamisen. Pimeä aine, joka ei vuorovaikuta säteilyn kanssa, pystyi sen sijaan samanaikaisesti kasaantumaan yhä suurempiin ylitihentymiin. Kun kosminen mikroaaltotaustasäteily syntyi 380 000 vuotta vanhassa maailmankaikkeudessa, tavallinen aine oli vihdoinkin vapaa säteilyn vaikutuksesta, koska vapaat elektronit olivat nyt sitoutuneet atomytimiin. Vapautuessaan säteilyn ikeestä tavallinen baryoninen aine ”huomasi” pimeän aineen muodostamat potentiaaliuoppat. Koska pimeän aineen määrä maailmankaikkeudessa on noin viisinkertainen tavalliseen aineeseen verrattuna, tavallinen aine ikään kuin putosi pimeän aineen muodostamiin potentiaaliuoppiin. Tavallisen aineen tiheyshäiriöiden kehitys pystyi lyhyessä ajassa ottamaan kiinni menetetyt ajan, jonka se vietti säteilyn vankina, ja täten myös tavallisen aineen tiheyshäiriöt kasvoivat noin sadasosan suuruisiksi.

Nyt lukija voi oikeutetusti todeta, että sadasosan suuruisista tiheyshäiriöistä on vielä pitkä matka tarvittavaan miljoona-kertaiseen ylitiheyteen, varsinkin kun maailmankaikkeuden koko ja myös tiheyshäiriön koko edelleenkin kasvaa vain tekijällä noin 1 100 taustasäteilyn synnystä nykypäivään tultaessa. Tämän näennäisen ristiriidan selittää rakenteen epälineaarinen kasvu. Eli lineaarinen kasvumalli, jonka mukaan ylitiheyden kasvu on verrannollinen maailmankaikkeuden kokoon, on voimassa vain niin kauan kun tiheyshäiriöt ovat pieniä. Kun tiheyshäiriöt saavuttavat kokoluokan yksi, eli ylitiheys on samaa suuruusluokkaa kuin

maailmankaikkeuden keskitiheys häiriöiden kasvu siirtyy epälineaarisen vaiheeseen. Tiheyshäiriö saavuttaa nyt siis riittävän suuruuden, mikä johtaa painovoimarahdukseen. Kehittyvä galaksialkio kytkeytyy irti maailmankaikkeuden laajenemisesta muodostaen oman erillisen painovoimalla sidotun järjestelmänsä. Koska järjestelmä ei enää osallistu maailmankaikkeuden laajenemiseen tiheyshäiriön kasvu etenee nyt erittäin ripeästi eksponentiaalisella aikaskaalalla. Tiheyshäiriö saavuttaa sitten tarvittavan miljoonan ylitiheyden lyhyessä ajassa.

Galaksien synnyn kannalta suurin ongelma on siis saavuttaa lineaarinen tiheyshäiriö, joka on suuruusluokkaa yksi, koska tämän jälkeen rakenteen epälineaarinen kasvu ottaa vallan. Ylläolevan perusteella voimme siis todeta, että nykyisessä kosmologisessa standardimallissa galaksien, tähtien ja oma syntymämme on riippuvainen pimeän aineen olemassaolosta, koska ilman sitä laajenevassa maailmankaikkeudessa ei olisi yksinkertaisesti ollut riittävästi aikaa galaksien synnylle ja maailmankaikkeus olisi jäänyt vaille rakennetta.

Toisin kuin rakenteen lineaarista kasvua, epälineaarista kasvua ei voi kuvata analyttisesti, vaan avuksi kaivataan supertietokonesimulaatioita. Numeerisissa simulaatioissa maailmankaikkeuden rakennetta, eli pimeää ainetta, kaasua ja tähtiä kuvataan massiivisilla hiukkasilla. Simulaatio jaetaan tiettyyn määrään aika-askelia ja jokaisella aika-askeleella lasketaan newtonilainen painovoima jokaisesta hiukkasesta jokaiseen toiseen hiukkaseen, jonka jälkeen hiukkasia liikutetaan nopeuksilla, jotka juontavat juurensa painovoiman aiheuttamista kiihtyvyyksistä. Käytännön soveluksissa jokainen simulaation massapiste kuvaa suurta määrää massaa, esim. tyypillisen simulaatiossa olevan pimeän aineen hiukkasen massa voi olla 10 miljoonaa Auringon massaa. Syy tähän on luonnollisesti laskentatehossa, sillä nykyisillä supertietokoneilla voimme tyypillisesti suorittaa laskuja, joissa on korkeintaan noin miljoona hiukkasista. Tämä jää luonnollisesti hyvin kauaksi todellisen maailmankaikkeuden tähtimäärästä. Myös painovoiman laskussa tehdään usein useita yksinkertaisuuksia paremman laskentatehokkuuden toivossa, eli painovoimaa esimerkiksi ei lasketa tarkasti jokaisesta hiukkasesta jokaiseen hiukkaseen. Sen sijaan kaukaisista hiukkasista lasketaan vain yksi yh-

teisvoima, joka kuvaa hyvin kaukaisten kohteiden keskimääräistä painovoimavaikutusta.

Toistaiseksi on ollut puhetta etupäässä vain pimeästä aineesta ja painovoimasta, mutta galaksin näkyvä osa koostuu säteilevistä tähdistä ja kaasusta. Simulaatiokoodissa painovoimalaskua selvästi suurempi ja vaativampi osuus kuluu kaasufysiikan mallintamiseen. Toisin kuin pimeän aineen ja tähtien tapauksessa, kaasussa voi esiintyä myös sokki-ilmiöitä ja, mikä tärkeintä, kaasu voi jäähtyä säteilemällä energiaa pois, mikä samalla johtaa kaasun romahtamiseen pienempään tilaan. Tämä yksinkertainen toteamus pitkälti selittää sen, miksi galaksien näkyvät osat ovat verrattain pieniä ja pimeä aine on jakautunut selvästi laajemmalle alueelle. Kaasun viilenemisprosessin mallintaminen vaatii tarkan mallin kaasun jäähtymiselle eri lämpötiloissa ja erilaisille kemiallisille koostumuksille. Tähtien synty on hyvin vaikea ja huonosti tunnettu prosessi, ja myös tätä varten täytyy galaksisimulaatiokoodissa olla malli. Tähdet eivät myöskään ole ikuisia, vaan ne syntyvät, kehittyvät ja kuolevat. Erityisesti massiiviset tähdet, jotka räjähtävät supernovina kosmisessa mittakaavassa lyhyen elämänsä lopuksi ovat tärkeitä galaksin synnyn kannalta, koska ne estävät kaasua viilenemästä liian tehokkaasti. Galaksien keskustoissa olevat supermassiiviset mustat aukot täytyy myös ottaa mukaan malliin, koska niillä on suuri merkitys galaksin energiatasapainon kannalta, ja ne voivatkin asettaa massiivisissa galakseissa jopa ylärajan galaksin tähtimassalle. Kaikki vetyä ja heliumia raskaammat alkuaineet ovat syntyneet erilaisissa tähtiprosesseissa ja myös tämä alkuainejakauman muutos ajan funktiona täytyy huomioida galaksisimulaatiossa.

Pitkälti galaksisimulaatiossa on siis kyse siitä, että yhdistämme painovoimalaskun mutkikkaisiin astrofysikaalisiin mallinnuksiin, jotka pyrkivät esittämään parhaan tietämyksemme mukaan koko sen epälineaarisen prosessin, jossa galaksi syntyy. Nykyiset supertietokoneet ovat mahdollistaneet merkittäviä edistymisasiäskelleitä tällä saralla viimeisten vuosien aikana, koska tänä päivänä on mahdollista suorittaa simulaatioita, joissa jopa sadattuhannet laskentaytimet mallintavat rinnakkain galaksien syntyprosessia. Galaksisimulaatioissa käytetään yleensä kahta päämenetelmää: joko

erillisiä galakseja törmäytetään hallitusti yhteen eristyksessä muista galakseista tai sitten vaihtoehtoisesti mallinnetaan galaksien synty ja kehitys kosmologisessa simulaatiossa, joka lähtee liikkeelle varhaisesta maailmankaikkeudesta. Molemmissa simulaatiotekniikoissa on omat hyvät puolensa. Törmäyssimulaatioissa on helpompi tutkia jotain tiettyä yksittäistä prosessia, kun taas kosmologinen simulaatio on selvästi realistisempi, koska siinä otetaan huomioon kaikkien eri galaksien väliset törmäykset ja vuorovaikutukset. Kosmologiset simulaatiot ovat laskennallisesti selvästi raskaampia ja niissä joudutaan usein käyttämään alhaisempaa massa- ja paikkaresoluutiota kuin törmäyssimulaatioissa. Numeerisen astrofysiikan ja muunkin numeerisen tutkimuksen kannalta Suomi on erittäin otollinen maa, koska CSC – Tieteen tietotekniikan keskuksen tarjoama supertietokonekapasiteetti on maailmanlaajuisestikin katsoen erittäin kilpailukykyistä.

Ensimmäiset numeeriset galaksisimulaatiot suoritettiin 1970-luvulla ja jo näiden simulaatioiden avulla onnistuttiin selittämään pääpiirteisään vuorovaikuttavien ja törmäävien galaksien ominaisuuksia. Ensimmäiset pimeää ainetta sisältävät simulaatiot 1980- ja 1990-luvulla vakuuttivat enemmistön maailman tähtitieteilijöistä siitä, että pimeän aineen avulla voidaan ymmärtää maailmankaikkeuden suuren mittakaavan rakennetta. Tietokoneiden nopea kehitys mahdollisti 2000-luvulla ensimmäiset biljoonan hiukkasen pimeän aineen simulaatiot, joissa mallinnettiin jo huomattavan isoa osaa koko havaittavasta maailmankaikkeudesta. Viimeisten viiden vuoden aikana vastaavan kokoluokan simulaatioita on tehty ottaen huomioon myös kaasu ja liuta astrofysikaalisia prosesseja, kuten kaasun viileneminen ja tähtien synty.

Nykyiset simulaatiot ovat jo kehittyneet niin pitkälle, että maallikon voi olla jopa joskus hankalaa erottaa havaittuja galakseja simuloituista vastinpareista. Uusien tulevien suurten avaruus- ja maanpäällisten kaukoputkien myötä tulemme saamaan merkittävästi uutta tietoa galaksien hyvin varhaisista kehitysvaiheista suurilla punasiirtymillä. Jatkuvasti kehittyvien laskenta-algoritmien ja uusien entistä tehokkaampien supertietokone-resurssien myötä numeeriset astrofysikot ovat hy-

vin valmistautuneita käyttämään hyväksi näitä havaintotuloksia ja mallintamaan, miten galaksit tarkalleen kehittyivät sellaisiksi näyttäviksi spiraali- ja elliptisgalakseiksi, joita voimme havaita paikallisessa maailmankaikkeudessa. Helsingin yliopistossa tavoitteena on erityisesti ymmärtää massiivisten elliptisgalaksien syntyä ja niiden ytimissä olevien supermassiivisten mustien aukkojen vaikutusta kehittyviin galakseihin.

Kirjallisuutta

- Gaia Collaboration; Brown, A.G.A. ym., 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 595, 2. "Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties".
- Longair, M.S., 2008. *Galaxy formation*, Berlin: Springer, 2008.
- Oesch, P.A. ym., 2016, *Astrophysical Journal*, 819, 129. "A Remarkably Luminous Galaxy at $z=11.1$ Measured with Hubble Space Telescope Grism Spectroscopy".
- Planck Collaboration; Ade, P.A.R. ym., 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 594, 13. "Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters".
- Smoot, G.F., ym., 1992, *Astrophysical Journal*, 396, 1. "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps".

Kirjoittaja on Helsingin yliopiston astrofysiikan professori.