

# Galaktikate parved

*Peeter Tenjes*

## Saateks

Omal ajal üliõpilasena ja veidi hiljem äsja ülikooli lõpetanud teadurina teadsin, et maailm on üsna lihtsalt, korrapäraselt ja sümmeetriliselt üles ehitatud – just nii, nagu õpikutes kirjutatigi. On galaktikad ja kui neid on piisavalt palju lähestikku, siis nimetatakse seda galaktikate grupiks; kui neid on juba väga palju, siis parveks. Parved olid näiteks Virgo parv ja Coma parv, esimene pisut väiksem, sisaldades siis teadaolevalt paar tuhat galaktikat, teine suurem, sisaldades peaaegu kümme tuhat galaktikat<sup>1</sup>. Et oleks võimalik arvutada galaktikate liikumise alusel välja parvede masse, eeldati parved olevat küllaltki sfäärilised. See eeldus kujunes tasapisi hiilides arusaamaks, et nii ongi.

Kuid siis (vast umbes 1980-ndate esimeses pooles) tuli Jaan Einasto tagasi ühelt konverentsilt Ameerikast ja teatas, et uute vaatlusandmete alusel Virgo parv ei ole siiski kaugeltki sfääriline, vaid on tõenäoliselt üsna korrapäratu kujuga, sisaldades mitmeid galaktikate jaotuse klompe ja ahelaid. Ning mõne aja pärast leidis Mihkel Jõeveer, et isegi parvede nii öelda ideaal, Coma parv, ei ole ilus sümmeetriline, vaid koosneb samuti alamsüsteemidest.

Parvede tõelist kuju on otseselt küllaltki raske kindlaks teha, sest me näeme ju kõike vaid taevaskärgile projekteerituna ning galaktikate kauguste hindamise meetodid on liiga ebatäpsed, et saada nende alusel mingi parve tegelik kolmemõõtmeline struktuur. Seda proovis saada vene galaktikate uurija Igor Karatšentsev, kasutades kauguse indikaatorina heledaid üksiktähti ja teatud hinnanguid mõnede lähemate galaktikate gruppide kohta tal ka õnnestus saada, kuid siingi olid kauguste vead suured. Vast seni parim projekt algas umbes viis aastat tagasi mitmete observatooriumite koostöös, “The Fornax3D project” (Sarzi jt, 2018), mille raames uuritakse igakülgset Fornax parve siseehitust. Töö loomulikult alles käib.

Need on näited üksikutest gruppidest ja parvedest. Matemaatiline statistika on aga alati olnud astronoomide võimas abiline. Uurides hästi paljusid galaktikate parvi ja võrreldes saadud tulemusi erinevate statistiliste mudelitega (nt eeldades parvede orientatsioonide juhuslikku jaotust), on võimalik galaktikate parvede kohta üllatavalt palju teada saada.

## Galaktikate parvede üldised omadused

Ligikaudu võib öelda, et galaktikaparv on sadadest või tuhandetest heledatest galaktikatest koosnev struktuur, mida hoiab koos gravitatsioon. Galaktikate grupid

---

<sup>1</sup>Galaktikate arv grupis ja parves sõltub olulisel määral sellest, kui väikesed galaktikaid õnnestub vaadelda. Näiteks kümme aastat tagasi teati meie Lokaalses Grupis olevat Linnutee ja Andromeeda galaktika ümber umbes 30 väiksemat kaaslast, praeguseks on neid teada juba üle 60 ja küllap neid leitakse veel juurde.

on väiksemad, sisaldades kümnekond kuni mõnisada galaktikat. Need numbrid on muidugi ligikaudsed, sest nii grupid kui parved sisaldavad arvukalt ka selliseid galaktikaid, mida meil ei ole veel õnnestunud näha. Ranget piiri grupi ja parve vahel ei ole ning see võib erinevate astronoomide jaoks olla ka erinev. Kuid üldiselt on terminoloogiline konsensus, et grupid on väiksemad ja parved on suuremad. Ehkki grupid on väiksemad, löövad nad Universumis tervikuna parvi oma arvuga ja nii sisaldavadki grupid umbes poole kõikidest galaktikatest ja parved vaid kümnendiku või ülimalt viiendiku.

Galaktikate parvede massid on  $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$  ja läbimõõdud 1–5 Mpc. Need on arvatavasti suurimad teadaolevad gravitatsiooniliselt seotud<sup>2</sup> süsteemid meile teadaolevas Universumis, ehkki on mõeldav, et on olemas ka gravitatsiooniliselt seotud mitmikparvi. Teame, et parved kipuvad kuhjuma, kuid see on omaette lugu.

Lisaks galaktikatele on parvedes hulgaliselt ka kuuma gaasi – see on parvesisene keskkond. See gaas on tõepoolest kuum, temperatuurid on  $10^7 - 10^8$  K, mis tähendab, et gaas on ioniseeritud ja helendub röntgenkiirguses. Gaasi kogumass parves on suurem kui galaktikates olev tähtede mass kokku. Kuid parve kogumassist moodustab suurima osa (~85%) siiski tumeaine.

Mitmed parved on nimetatud nende tähtkujude nimede järgi, kus nad asuvad – Virgo parv, Fornax, Hercules, Coma, ülejäänud kataloogide numbrite või koordinaatide järgi. Esimese korraliku põhjataeva galaktikate parvede kataloogi avaldas 1958. aastal ameerika astronoom George Abell. See oli tema aasta varem kaitstud doktoritöö sisu. Lõunataeva osa ilmus hiljem, 1989. aastal koos kolleegide Harold Corwini ja Ronald Olowiniga<sup>3</sup>. Kokku sisaldasid need kaks kataloogi üle 4000 parve. Parved eraldati välja, vaadates põhjataevas Palomari taevaülevaate ja lõunataevas ESO Schmidti teleskoobiga tehtud taevaülevaate pilte. Näiteks Coma parv kannab Abelli kataloogis numbrit 1656. Tulenevalt parvede väljaeraldamise meetodist on selge, et see kataloog on kallutatud rikaste ja ilusate sümmeetriliste parvede suunas. Nii et väga oluline on küsimus, milline võiks olla parim ja objektiivseim meetod või kriteerium parvede eristamiseks? Loomulikult on erinevate meetodite arendajad siin eri arvamusel ning erinevaid parvede katalooge on mitmeid. Sama kehtib ka galaktikate gruppide eristamise kohta. Tartu observatooriumis on erinevatel aegadel kasutatud erinevaid meetodeid, viimati kasutati Sloani andmete puhul nn täiustatud “sõbra sõber” meetodit (Tempel jt, 2012, 2014). Mahukaimad kataloogid sisaldavad mõnisada tuhat parve.

Mida kaugemal galaktikaparv on, seda nõrgemad seal olevad galaktikad paistavad ja seda raskem on vastavaid parvi eristada. Seni kaugeim galaktikate parv on CL J1001+0220, mis paikneb punanihkel  $z = 2,5$ , st pärineb ajast 11,1 miljardit aastat tagasi, mil Universum oli vaid 2,7 miljardi aasta vanune (Wang jt, 2016). Nii noores Universumis ei pruukinud parved veel olla välja kujunenudki. Tegelikult, ega parved praegugi veel valmis ei ole, ehk siis nende areng jätkub, ehkki mitte nii tormiliselt kui varem.

## Universumi struktuuri sh galaktikaparvede teke ja areng

Praeguste teadmiste alusel on galaktikad, galaktikate grupid ja galaktikate parved, ühesõnaga kogu Universumi teadaolev mitmekesisus, kasvanud välja väikestest

<sup>2</sup>Termini “gravitatsiooniliselt seotud” all pean silmas, et vaadeldava süsteemi koguenergia on negatiivne, st potentsiaalne energia on absoluutväärtuselt suurem kineetilisest energiast.

<sup>3</sup>Kuus aastat peale George Abelli surma.

kvantfluktuatsioonidest, mis tekkisid Universumi arengu inflatsiooniperioodil. Kogu Universumi edasise 13,8 miljardi aasta jooksul on need tiheduse häiritused gravitatsiooni tõttu pidevalt kasvanud. Gravitatsiooni seisukohalt oli suure struktuuri kujunemisel tegeliku töö tegija tumeaine, nähtava aine mõju oli tagasihoidlikum; kuid nähtav aine on see, mida me näeme ja mis on endale võtnud kõige oleva kauniduse kuulsuse. Kuid kust me seda teame?

Mulle tundub, et kosmoloogia sai tõsiseks täppisteaduseks siis, kui 1965. aastal avastati kosmiline mikrolaineline taustkiirgus. See taustkiirgus pärineb ajast, mil Universum oli vaid 380 tuhande aasta vanune. 1992. aastal mõõdeti satelliit COBE abil taustkiirguse temperatuuri jaotus üle kogu taeva ära ning tulemustest oli näha, et saadud temperatuur ei olnud üle kogu taeva ühtlane, vaid sellel on pisut külmemad ja soojemad kohad. Sõna "pisut" on siin igati kohane, sest vastavad kõikumised olid tõesti vaid kümne- kuni sajatuhandiku osa suurusjärgus. Taustkiirguse külmemad kohad on need, kus oli keskmisest pisut rohkem ainet, mistõttu neist kohtadest lahkunud footonid pidid kaotama gravitatsioonilise punanihke tõttu pisut rohkem energiat. Ja vastupidi, kuumemates kohtades oli ainet vähem ja footonitele jäi rohkem energiat alles. Ehk siis taustkiirguse piltidel külmad (tavaliiselt piltidel sinised) kohad on suurema tihedusega ja soojad (punased) kohad on väiksema tihedusega. Hilisemad mõõtmised kõrgele lennutatud õhupallide ja kosmosesatelliitide abil, millest tähtsaim oli vast Euroopa Kosmoseagentuuri satelliit Planck, võimaldasid juba täpselt arvutada ka temperatuuride kõikumiste jaotuse, ehk siis kui tugevad on erineva mastaabiga häiritused. Seda nimetatakse taustkiirguse fluktuatsioonide spektriks.

Liigume nüüd mõttes ja arvutustes taustkiirgusest veel kaugemasse minevikku. Osutus, et taustkiirguse fluktuatsioonide vaadeldava spektri olemasoluks pidid veel varasemad fluktuatsioonid olema paari protsendi täpsusega üsna spetsiifilised (nõ mastaabitud). Sellised fluktuatsioonid said väga loomulikult moel pärineda Universumi inflatsioonilise ülikiire paisumise ajastust – Universum oli siis täideitud mingi kvantväljaga<sup>4</sup>. Selles väljas pidid kindlasti olema ka kvantfluktuatsioonid (ergastused), mis pidevalt tekkisid ja kohe ka kadusid. Kuid võis juhtuda, et peale mingi sellise virtuaalse fluktuatsioonipaari tekkimist jõudis äsja tekkinud paar ruumi kiire inflatsioonilise paisumise tõttu enne kadumist teineteisest piisavalt kaugemale eralduda ja seetõttu ka säilida. Selline protsess kestis kogu inflatsiooni perioodi kõikidel mastaapidel ja nii tekkiski mainitud spetsiifiline mastaabivaba tiheduse (energia) fluktuatsioonide väli.

Universumi jahtudes tekkisid kvantväljast osakesed. Me ei tea veel täpselt, millisel arenguetapil tekkisid tumeaine osakesed, kuna me ei tea veel, mis need on. Kuid mingid osakesed pidid tekkima, kuna mikrolainelise taustkiirguse nähtava aine väikeste tiheduse häirituste taustal pidid kindlasti olema ka hoopis suuremad tumeaine osakeste tiheduste häiritused – vastasel juhul ei oleks mingi Universumi vaadeldav struktuur lihtsalt jõudnud praeguseks välja kujuneda.

Kujuneva Universumi suure struktuuri üldpilt sõltub sellest, millised olid tumeaine osakesed. Uurides erinevaid arvutusi jõuti järeldusele, et tumeaine pidi olema külm<sup>5</sup>. Sellise tumeaine puhul tekkisid esimesena üsna väikesed struktuurid. Tu-

---

<sup>4</sup>Selle välja olemust me veel ei tea. Näiteks osa füüsikuid arvab, et see võis olla mingi Higgsi väli, mõned on aga sellele raudselt vastu. Ollakse aga üsnagi ühel meelel, et mingi väli pidi olema.

<sup>5</sup>Sõna "külm" tähendab, et tumeaine osakeste kiirused mingil kokkulepitud ajal (taustkiirguse ajal) olid väikesed.

meaine oli hakanud juba varakult kuhjuma, seda ei takistanud Universumit täitvate footonite väli. Kui Universumi paisudes olid aine ja footonid juba piisavalt jahtunud, siis hakkas ka gaas tugevamalt koonduma tumeaine kuhjumitesse, jahtus ja koondus galaktikateks. See sai selgeks 1990-ndatel aastatel. Kosmoloogilise konstandi järgi esialgu vajadust ei olnud.

Loomulikult on nii teoreetikute kui vaatlejate-astronoomide soov, et neil oleks üha paremaid arvuteid, teleskoope ja aparatuuri teleskoopide taga. Et võrrelda teoreetilisi mudeleid vaatlustega, ei piisanud vaid tumeainega täidetud Universumi mudelitest – vaadeldakse ju ikkagi nähtavat ainet ning tumeaine sisse oli vaja lisada gaasi, et nendest tekitada tähti ja galaktikaid. Seetõttu läksid mudelid palju keerukamateks, sest vaja oli hakata arvestama paljusid erinevaid füüsikalisi protsesse, mille kohta ei olnud aga sugugi teada, kuidas nad igal konkreetsel juhul täpselt toimivad. Mitmeid protsesside parameetreid tuli kokku sobitada vaatluste alusel. See tähendab, et oli vaja üha paremaid ja mahukamaid vaatluseid, näiteks kasvõi galaktikate radiaalkiiruste mõõtmisi, et saada vaadeldavast Universumist kolmemõõtmelist pilti. Kui esimesed radiaalkiiruste mõõtmiste projektid ja Universumi kaardid koostati vaid mõne tuhande mõõtmise alusel, siis juba eelpool mainitud Sloani taevaülevaade sisaldab praeguseks 2,6 miljoni galaktika kauguseid. 4MOST taevaülevaate raames, milles ka Tartu observatoorium osaleb, on plaanis mõõta 8 miljoni galaktika kaugused (radiaalkiirused).

Teoreetiliste mudelite ja taevaülevaadete võrdlemisel sai peatselt selgeks, et Universumi energiabilansi tuleb lisada ka tumeenergia, mida enamasti nimetatakse kosmoloogiliseks konstandiks ja vastavat mudelit tähistatakse tavaliselt  $\Lambda$ CDM, kus  $\Lambda$  tähistab tumeenergiat ja CDM vastavad inglisekeelsetele sõnadele *cold dark matter*<sup>6</sup>. See on praegu üldtunnustatud Universumi massi (energia) jaotuse mudel. Sellel mudelil ei ole praegu teada olulisi probleeme ehk siis vastuolusid vaatlustega.

Niisiis,  $\Lambda$ CDM mudeli alusel kujunevad nähtava ja tumeaine tiheduse häiritusest välja esmalt küllalt väikesed struktuurid, mis sisaldasid tumeainet, gaasi ja ka juba tähti. Massis domineerib muidugi tumeaine, muud ainet on vast umbes kuuendik. Gravitatsiooni toimel ühinevad need süsteemid järk-järgult suuremateks ehk siis ühinemise protsess on hierarhiline, ehk siis nõ “seestpoolt väljapoole” teke. Suuremate süsteemide kujunemisel tuleb tegelikult eristada kahte protsessi: väiksemate süsteemide ühinemist omavahelistel pörgetel ja algsete süsteemide kasvamist hajusa tumeaine pideva pealelangemise tulemusena. Superarvutitega tehtud numbrilisest Millennium II modelleerimisest<sup>7</sup> saadi, et punanihke  $z \sim 8$  juures oli  $\sim 50\%$  tumeainest hajusa ruumjaotusega, punanihke  $z \sim 0$  juures (praegune Universum) oli hajusat tumeainet kõigest  $\sim 20\%$ . Hajusat tumeainet on enim suurtes kosmilistes tühikutes (vt nt Fakhouri ja Ma, 2010). Numbrilistest mudelitest on saadud, et tekkivate tumeaine halode tiheduse jaotust kirjeldab kõige paremini Jaan Einasto poolt 1965. aastal galaktikate ehituse uurimiseks välja pakutud tihedusejaotus, nn Einasto profiil.

Algsed tiheduse häiritused olid jaotunud juhuslikult, mistõttu oli ka neid koh-

<sup>6</sup>Külm tumeaine on pörkevaba aine, mille osakesed interakteeruvad tavalise ainega ainult gravitatsiooni vahendusel.

<sup>7</sup>Millennium II arvutisimulatsioon valmis 2009. aastal ja oli järg sarnasele 2005. a versioonile, kuid simulatsiooni ruumlahutus ja uuritavad väikseimad massid olid juba oluliselt paremad: ruumlahutus oli 1,4 kpc ja masside lahutus oli  $10^7 M_{\odot}$ . 2010. aastal valminud Millennium XXL simulatsioon oli kehvema lahutusega, kuid vaatles see-eest palju suuremat ruumala.

ti, kus nad olid juba algul üsna tihedalt. Galaktikate parvede teke ongi seotud algse tihedusvälja suurimate tiheduse kontrastidega. Parvede kujunemisel on olnud olulised nii gravitatsiooni poolt põhjustatud dünaamilised protsessid kui ka gaasi olemasolust tingitud hüdrodünaamilised protsessid. Gravitatsiooni seisukohalt oli tormilisem aeg just parve kujunemise algne etapp. Gaasi seisukohalt oli algne areng pigem rahulik, gaas lihtsalt tasapisi langes sinna. Kuid mõne aja pärast hakkasid plasmad tekkima lööklained. Gaas oli pörkevaba, kuid plasmalained said levida ja hajuda. Kahjuks me ei tea veel hästi, kuidas lained plasmad energiat transportivad. Parved arenevad veel praegugi.

### **Galaktikate parved oma mitmekesisuses**

Galaktikate parvi on suuremaid ja väiksemaid. Suured parved võivad oma gravitatsiooniga mõjutada ka Universumi lokaalset paisumist.

#### **Optilised vaatlused**

Galaktikate parvede eristamisest oli juba eelpool juttu. Abell koostas oma tuntud parvede kataloogi, eristades Palomari taevaülevalde piltidelt lihtsalt neid kohti, kus galaktikad on tihedamalt. Kuid muidugi oli tal ka täiendavaid kriteeriume, nt parve galaktikad olid üldreeglina vanemad ja punasemad ning teatud mõttes ka sarnasemad üksteisele. Abell postuleeris ka parve ligikaudse suuruse. Selline meetod oli aga siiski tundlik projektsiooniefektidele.

Tänapäeval on meil kasutada ka paljude galaktikate punanihked, kuid ega seegi ei tee parvede eristamist lihtsaks. Punanihkes sisaldub tõesti informatsioon galaktika kauguse kohta, kuid lisaks on seal ka info galaktikate liikumiste kohta parves. Neid kahte ei ole alati kerge eristada ning leida, millised galaktikad on gravitatsiooniliselt seotud ja millised mitte.

Viimase mõnekümne aasta vaatlused parimate teleskoopidega on võimaldanud määrata tumeaine jaotust parvedes täiesti uuel meetodil – gravitatsiooniläätse efekti abil. Üldrelatiivsusteooriast tuleneb, et gravitatsiooniväli painutab valguskiirte trajektoori. Kui kaugest galaktikast tulev valgus peab läbima mingi massiivse parve tekitatud tugevat gravitatsioonivälja, siis valguskiirte trajektoorid painduvad. Kauge galaktika eri osadest tulevad valguskiired painduvad veidi erinevalt ning me näeme pisut moonutatud galaktika kujutist. Galaktikad venituvad välja (ja tunduvalt orienteeruvat) ümber keskse gravitatsioonivälja, mis näib toimivat läätse-na. Kauge galaktika heledus ka võimendub veidi. Analüüsides kaugete galaktikate moonutusi, on võimalik arvutada vahepealse gravitatsioonivälja tugevust ja jaotust.

Nagu märgitud, gravitatsiooniliselt seotud tumeaine halod kujunevad välja hierarhiliselt, kus suuremad süsteemid tekivad väiksemate süsteemide ühinemisel. Seetõttu on loomulik, et suured süsteemid sisaldavad väiksemaid tumeaine klompe. Neid alamstruktuure on võimalik uurida samuti gravitatsiooniläätse efekti abil, kuid seda vaid juhul, kui mingi kauge foonigalaktika on üsna täpselt mingi klombi taga. Muidugi, et uurida sellist massijaotuse peenstruktuuri, oleks hea, kui parve üldine massijaotus on teada (kiiruste jaotusest, röntgenvaatlustest jne), ehkki olemuslikult see ei ole vajalik. Efekti tugevus sõltub sellest, kui massiivne ja kompaktne on klomp. Peatselt nii ESA kui NASA poolt kosmosesse saadetavad satelliidid Euclid ja Nancy Romani Kosmoseteleskoop on mõeldud olulisel määral just tumeaine jaotuse võimalikult täpselt kaardistamiseks.

## Röntgenvaatlused

Parvede kuum gaas kui röntgenkiirguse allikas sai selgeks juba esimeste röntgensatelliitide vaatlustest. Praegu teame, et kuuma gaasi on parves kuni kümme korda rohkem kui tähest massi.

Esimeses lähenduses võib eeldada, et see kuum gaas on hüdrostaatilises tasakaalus parve gravitatsiooniväljaga. See võimaldab arvutada parvede massi ja teatud täpsusega isegi massi jaotust parves. Arvutustest tulenes, et parvede massid on ~6 korda suuremad kui neis sisalduvate tähtede ja gaasi massid. Saadud tulemus langes küllalt hästi kokku galaktikate kiiruste jaotusest saadud massidega. Parvede massifunktsioon ehk siis sõltuvus, kui palju on mingi antud massiga parvi on oluline test võimalikele kosmoloogilistele teooriatele. Massifunktsiooni sõltuvus kaugusest on oluline test hierarhilise kuhjumise teooriale.

Kuid röntgensatelliidi Chandra detailsetel vaatlustel selgus ka, et mitmetes parvedes on lisaks parve üldisele röntgenkiirgusele samuti alamstruktuure. Taas, arvestades parvede kujunemist hierarhilise kuhjumise teel ei ole see üllatav. Kahetsusväärset tähendab selliste alamstruktuuride olemasolu aga, et eeldus parve gaasi tasakaalust parve gravitatsiooniväljaga ei pruugi olla hea, parved on alles jätkuvalt kujunevad ning nii mõnegi parve massi hinnangud on seetõttu ebakindlad.

Nii mõnigi kord on röntgenvaatlusest leitud, et parve tihedates osades gaasi temperatuur on langenud. Iseenesest nii peabki olema, sest jahtumine kiirguskadude tõttu on tihedamates kohtades suurem. Kuna madalama temperatuuri tõttu on tihedates kohtades ka gaasi rõhk väiksem, siis langeb ümbritsevast keskkonnast sinna gaasi sisse. Arvutuste järgi on parvedes gaasimasside sissevoolud umbes 100–300  $M_{\odot}$  aastas, mis 10 miljardi aastaga annab sisselangeva gaasi kogumassiks  $\sim 10^{12} M_{\odot}$ . See tähendab, et osa parve gaasist on pidevalt sisselangev gaas, osa peab olema jäänuk parve formeerumise ajast.

Parve kuum gaas mõjutab parve galaktikaid. Kõik galaktikad on oma elu mingil etapil sisaldanud gaasi. Kui selline galaktika liigub suure kiirusega parve kuumas gaasis, siis mõjub galaktika gaasile parve gaasi poolt hüdrodünaamikast tuntud rammrõhk, mis võib pühkida galaktika gaasi galaktikast eemale. Ning tõepoolest seda on ka leitud – parvede siseosades olevates galaktikates on neutraalse vesiniku sisaldus väiksem kui mujal. Ning mida tugevam on parve röntgenkiirgus, seda vähem on galaktikates vesiniku. Külma gaasi vajakajäämine pärsib galaktikates täheteket, ehk siis galaktikate tähetekte sõltub ka keskkonnast, kus galaktikad paiknevad. Parvede keskkond mõjutab galaktikate omadusi veel mitmel moel – tihedamas keskkonnas on näiteks galaktikate omavahelisi pörkeid rohkem. Kuid see on omaette väga lai teema.

## Sunyaev–Zeldovitši efekt

Algselt ei olnud efekti avastajatel eesmärgiks “avastada” seda efekti. Eesmärk oli uurida mikrolainelise taustkiirguse kosmoloogilisi fluktuatsioone, mis tähendas, et igasugusest muust müra-st tuli eelnevalt vabaneda. Üks võimalik müra allikas oli, et galaktikate parvede kuuma gaasi elektronid hajutavad taustkiirguse footoneid (Comptoni pöördhajutamine), mistõttu footonite energia pisut suureneb ja taustkiirguse mõõdetavas osas kiirguse intensiivsus pisut kahaneks. Vene astrofüüsikute Rashid Sunyaevi ja Jakov Zeldovitši (1970) arvutuste järgi pidi see tõesti nii olema. Tõsi, efekt oli nõrk (suhteline muutus vaid  $10^{-4} - 10^{-5}$ ), kuid tegemist oli korrigeerimist vajava müra allikaga.

Teaduses on nii mõnigi kord, et mis ühe eksperimendi jaoks müra, see teise eksperimendi jaoks signaal. Ehkki esmakordselt registreeriti taustkiirguse väike kaanemine galaktikaparve suunas alles 1984. aastal, on praeguseks erinevate teleskoopide ja Planck satelliidi abil registreeritud juba enam kui 400 parves Sunyaev–Zeldovitši efekt. Oluline on, et selle efekti mõõtmine võimaldab arvutada gaasi rõhku parvedes. Teades röntgenvaatlustest gaasi kiirguse temperatuuri ja intensiivsust, on võimalik arvutada parve gaasipilve mõõtmeid sõltumata kaugusest ja määrata nii Hubble'i konstanti. Oluline on ka, et efekt on sõltumatu punanihkkest, st selle abil on võimalik leida kaugeid parvi. Sunyaev–Zeldovitši efekti miinuseks on, et vastavad hüdrodünaamilised arvutused on küllalt keerukad.

### Kokkuvõte

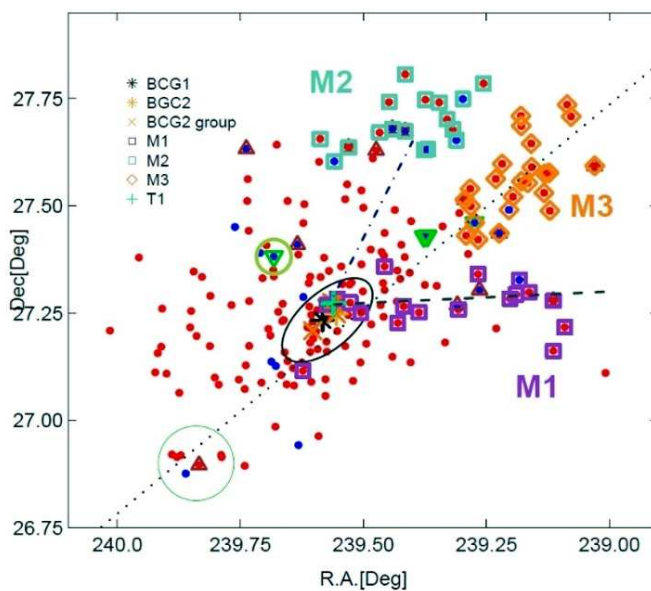
Astronoomi jaoks on galaktikad sageli nagu inimesed – galaktikaid tõmbab kokku ja inimesi ka. Grupeerumine võimaldab galaktikatel halastamatus gravitatsioonilises konkurentsis kergemini ellu jääda. Enamik parvi on oma nooruses elanud tormilist elu, mis nii mõnigi kord on jätnud neile ka märgid – kasvõi näiteks väljanägemises. Vanaduses on nende elu muutunud rahulikumaks, kuid neid ei saa siiski veel maha kanda – nad on valmis jätkuvalt mõjutama neid (galaktikaid), mis neile (parvedele) lähenevad.

### Kasutatud kirjandus

- Abell, G.O. (1958). The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. The Astrophysical Journal Supplement, vol 3, 211.
- Abell, G.O.; Corwin Jr. H.G.; Olowin, R.P. (1989). A Catalog of Rich Clusters of Galaxies. The Astrophysical Journal Supplement, vol 50, 1.
- Einasto, J. (1965). Kinematics and Dynamics of Stellar Systems, Trudy Inst. Astrofiz. Alma-Ata, vol 5, 87.
- Einasto, M.; Deshev, B.; Lietzen, H. jt (2018). Infalling groups and galaxy transformations in the cluster A2142. Astronomy and Astrophysics, vol 610, A82.
- Fakhouri, O.; Ma, C-P. (2010). Dark matter halo growth. II. Diffuse accretion and its environmental dependence. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol 401, 2245.
- Sarzi, M.; Iodice, I.; Coccato, L. jt (2018). Fornax3D project: Overall goals, galaxy sample, MUSE data analysis, and initial results. Astronomy and Astrophysics, vol 616, A121.
- Tempel, E.; Tago, E.; Liivamägi, L.J. (2012). Groups and clusters of galaxies in the SDSS DR8. Value-added catalogues. Astronomy and Astrophysics, vol 540, A106.
- Tempel, E.; Tamm, A.; Gramann, M. jt (2014). Flux- and volume-limited groups/clusters for SDSS galaxies: catalogues and mass estimation. Astronomy and Astrophysics, vol 566, A1.
- Wang, T.; Elbaz, D.; Daddi, E. jt (2016). Discovery of a galaxy cluster with a violently starbursting core at  $z = 2.506$ . The Astrophysical Journal, vol 828, 56.

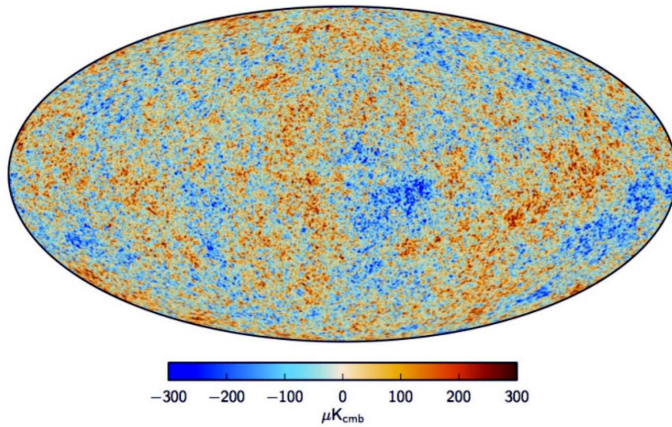


*P. Tenjes:* Foto 1. Coma parv. Peaaegu iga objekt siin pildil on galaktika. Kaks suurimat on elliptilised galaktikad NGC 4874 ja NGC 4889. Autorid: R. Carroll, R. Gendler, B. Franke.  
<https://apod.nasa.gov/apod/ap180326.html>



*P. Tenjes:* Foto 2. Väga heledate galaktikate jaotus massiivses galaktika parves A2142 ja sinna langevates väiksemates parvedes. Pildi keskel oleva ellipsi sees on parv A2142, tähistega M1 - M3 on sinna langevad väiksemad parved. Pilt on koostatud Maret Einasto jt uurimistöö tulemusena (2018).

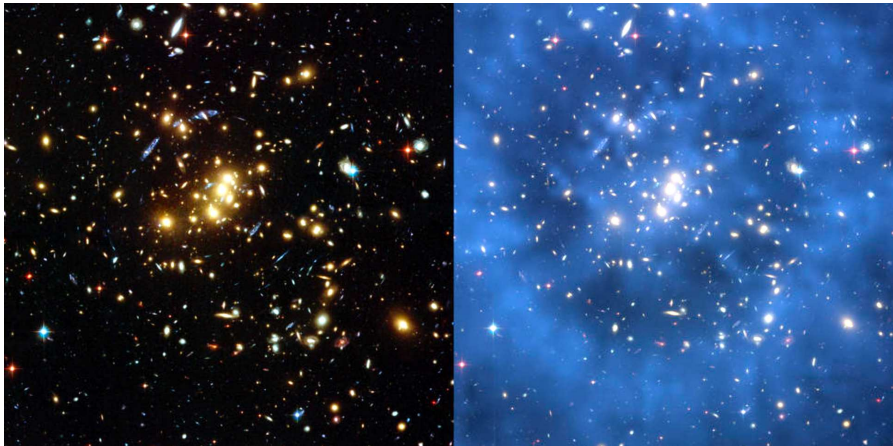




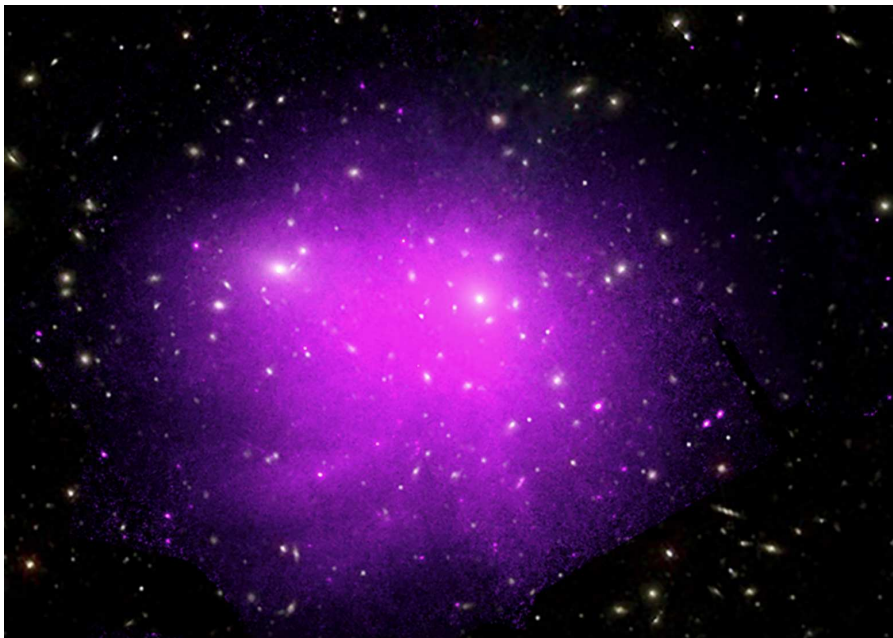
*P. Tenjes:* Foto 3. Kosmosesatelliit Planck poolt mõõdetud mikrolainelise taustkiirguse temperatuuri kõikumiste jaotus üle taeva. Pildi all olev värviriba iseloomustab temperatuuri kõrvalekaldeid musta keha kiirgusjaotusest mikrokelvinites.  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2019/06/The\\_Cosmic\\_Microwave\\_Background\\_temperature\\_and\\_polarisation](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/06/The_Cosmic_Microwave_Background_temperature_and_polarisation)



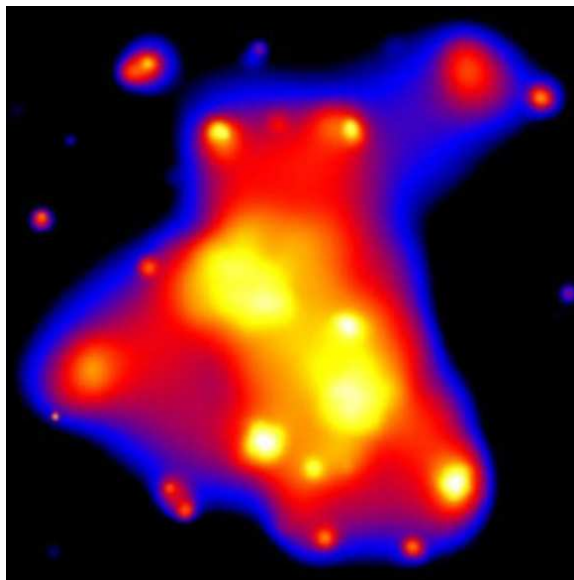
*P. Tenjes:* Foto 4. Tumea aine jaotus Millennium II simulatsiooni alusel piirkonnas mõõtmetega umbes 3 Mpc. Heledam värv tähendab suuremat tihedust. On näha mitmeid tumeaine halosid, kuid ka nõrka hajusat fooni.  
[https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium-II/Images/halo0\\_67\\_new\\_0005.jpg](https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium-II/Images/halo0_67_new_0005.jpg)



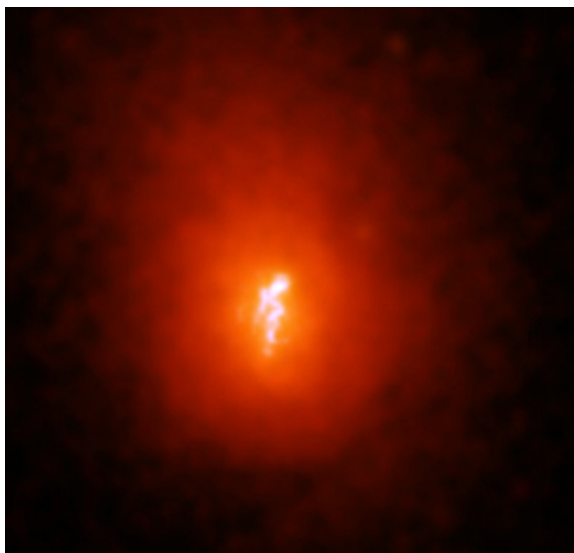
*P. Tenjes:* Foto 5. Vasakul: Hubble'i kosmoseteleskoobiga saadud pildil parve ZwCl 0024+1652 ümbrusest on näha kaugete galaktikate kujude eelistatud orientatsioon ringi ümber lähemal asuva keskse parve. Paremal: Analüüsisid galaktikate kujude orientatsioone, on võimalik arvutada välja parve tumeaine jaotus (sinise värviga). Lisaks tumeaine kontsentratsioonile parve keskosasse on üllatuslikult tumeaine jaotunud ka ringikujuliselt. Ringikujuline jaotus on arvatavasti tingitud kahe parve põrkest minevikus.  
<https://www.nasa.gov/content/discoveries-highlights-shining-a-light-on-dark-matter>



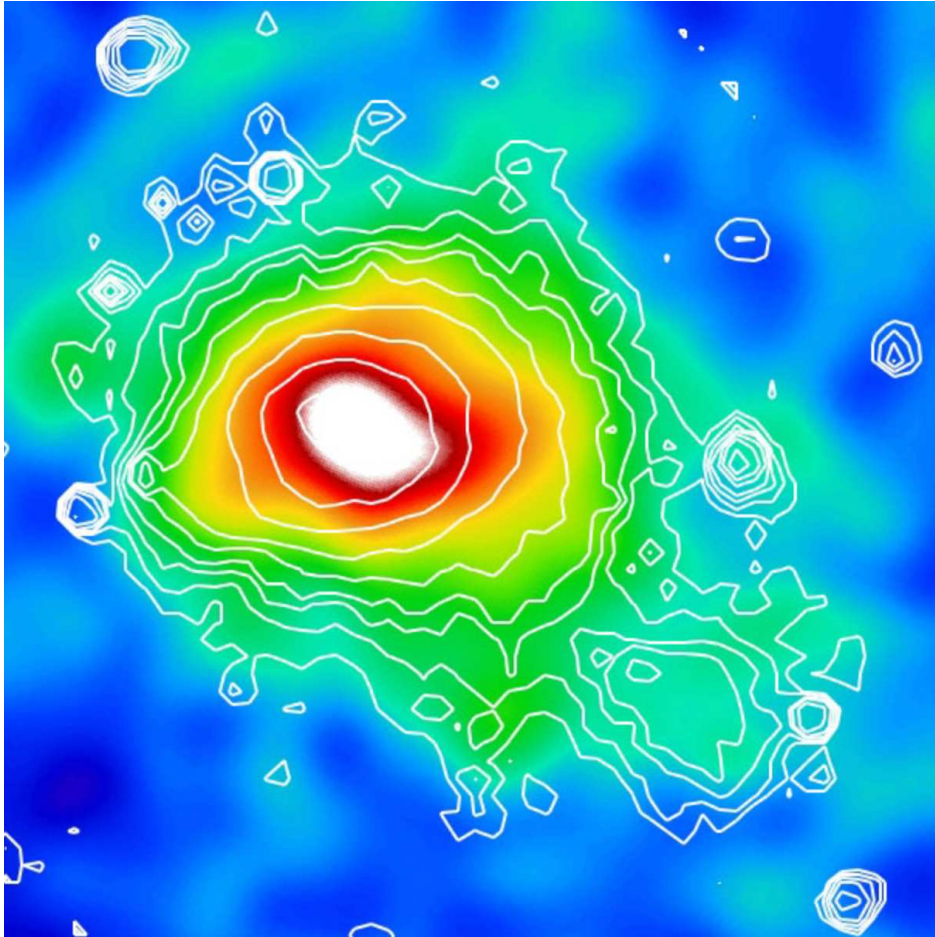
*P. Tenjes:* Foto 6. Coma parve kujutis röntgensatelliidi Chandra vaatlustest (lilla helendus) koos optilise parve pildiga. Ehkki röntgenkiirgus on üldjoontes ühtlane ja ligikaudu sfääriline, on siiski näha, et gaasi omadused väiksemates mastaapides varieeruvad.



*P. Tenjes:* Foto 7. Kauge parv ClJ0152.7-1357. Röntgensatelliidiga XMM saadud pilt kaugest galaktikaparvest ( $z = 0,83$ ). Parv on tegelikult kaks ühinevat väiksemat parve. Pildi värv vastab röntgenheledusele – kollakas-valge on heledaim ja sinine-must on nõrgim kiirgus.



*P. Tenjes:* Foto 8. Gaasivool parves A1795. Chandra röntgensatelliidi pilt parvest A1795. Massiivne elliptiline galaktika (heledaim koht pildil) on tõmmanud gaasi ümbritsevast parve keskkonnast. Gaasi filament on jälg elliptilise galaktika trajektooriga parves. Heledas filamendis on gaasi temperatuur 30 miljonit kelvinit, ümbritsevas parves 50 miljonit kelvinit. Filamendis on gaas palju tihedam kui ümbritsevas parves.  
<https://chandra.harvard.edu/photo/2000/0163/>



*P. Tenjes:* Foto 9. Coma parv mikrolainelises kiirguses. Planck satelliit mõõtis mõnesajas parves Sunyaev-Zeldovitši efekti. Värvikood joonisel iseloomustab efekti tugevust. Valged kontuurjooned on ROSATi poolt mõõdetud röntgenkiirguse samahedusjooned. On näha, et mõlemad vaatlused on omavahel kooskõlas.