

KOSMOLOOGIA UUES EESTIS

Enn Saar ja Jaan Einasto

Tartu Observatoorium

Astronoomia, eriti kosmoloogia, on selgelt rahvusvaheline teadus. Uurimisobjektiks on meil ainult üks Universum, ja seda isegi kõigi galaktikate kõigi planeetide kosmoloogidele. Omariikluse taastamisega muutus loomulikuks teadlaste vahetus, töö teistes maades, kergenes infovahetus. Me osalesime rahvusvahelises koostöös ka NL päevil, kuid siis oli osalemine keeruline ja vint-sutav.

Kaasaegse kosmoloogia omapäraks on samuti see, et praktiliselt kogu vaatlusmaterjal tuleb mahukatest rahvusvahelistest projektidest (kosmoteleskoobid ja spetsialiseeritud ühisprojektid) ja see tehakse kohe kättesaadavaks kõigile astronoomidele. Viimase paari aastakümne infovõrkude arenguta poleks see võimalik olnud, praegu aga komplekteeritakse mitut “virtuaal-observatooriumi” uute andmete saamiseks, samuti luuakse kogu taevast ja kõiki lainepikkusi haaravaid astronoomilisi andmebaase.

Eesti kosmoloogide põhisuunal – Universumi suuremastaabilise struktuuri uurimisel – on põhiliseks infoallikaks galaktikate kauguste (eemaldumiskiiruste) kataloogid. Selleks leitakse sadade tuhandete galaktikate spektrid. Fiiberoptika võimaldab registreerida üheaegselt mitmesaja galaktika spektrid. Spektrijoonte punanihete põhjal leitakse galaktikate kaugused. Kauguste määramise aluseks on eelmise sajandi esimesel poolel kindlaks tehtud maailma paisumine, seejuures on galaktikate eemaldumiskiirused võrdelised nende kaugustega. Kui spekter on määratud, on võimalik teada saada mitte ainult galaktikate kaugused, vaid ka nendes toimuvad protsessid: täheteked, aktiivse tuuma olemasolu jne. Viimane valminud kataloog (2dF Ülevaade Austraaliast) sisaldab andmeid umbes veerand miljoni kauge galaktika kohta. Lähiajal valmiv Sloani Ülevaade (SDSS) USAst on seadnud eesmärgiks üle miljoni galaktika kauguse

mõõtmise. Vaatlusandmete maht on viimase kümnekonna aasta jooksul kasvanud pea tuhat korda, see aga võimaldab esitada hoopis uusi küsimusi ja saada hulga täpsemaid vastuseid.

Galaktikate kaardistamise kõrval on teiseks peamiseks infoallikaks Universumi kohta nn reliktkiirgus, Universumi kuumast algetapist pärinev sentimeeterlaineline raadiokiirgus. Selle mõõtmise annab olulist infot Universumi kauge mineviku kohta. Kuna kiirgus on väga nõrk, mõõdetakse seda enamasti satelliitidelt. Praegu tiirleb kaugel Maa varjus ümber Päikese NASA satelliit WMAP, mille iga-aastaseid mõõtmistulemusi oodatakse suure huviga. Varsti, 2007. aastal, peaks orbiidile saatetama Euroopa satelliit Planck, hulga tundlikum ja parema detailide eristamisvõimega.

Oluline tulevikuprojekt on Gaia – kosmoteleskoop –, mis paneb paika meie Galaktika struktuuri, mõõtes miljardi tähe kaugused, heledused jm. Gaia on plaanitud orbiidile saata 2011. aasta paiku.

Nii galaktikakaardid kui reliktkiirguse andmed on loomulikult ka Eesti kosmoloogide käsutuses, ja meie töö – Universumi mõistmine ja kirjeldamine – põhinebki neil andmetel. Uuemates projektides lööme ka ise kaasa – Plancki missiooni ettevalmistamisel koos kolleegidega Soomest, Tuorla Observatooriumist, ja Gaia projektis mitme rahvusvahelise komisjoni raames. Pea kõik meie kosmoloogid ja galaktikafüüsikud töötavad Tartu Observatooriumis, kuid neid leidub ka Tartu Ülikoolis ja Maaülikoolis. Lisaksime veel, et kaasaegne kosmoloogia on väga kirju. See artikkel kirjeldab nn lähedast (hilisevõitu) kosmoloogiat, Martti Raidali jt ülevaates kirjeldatakse aga väga varast kosmoloogiat.

Sageli küsitakse meie käest, milleks see uurimine hea on? Vastus on lihtne: me tahame teada saada, kuidas maailm meie ümber on ehitatud. See on

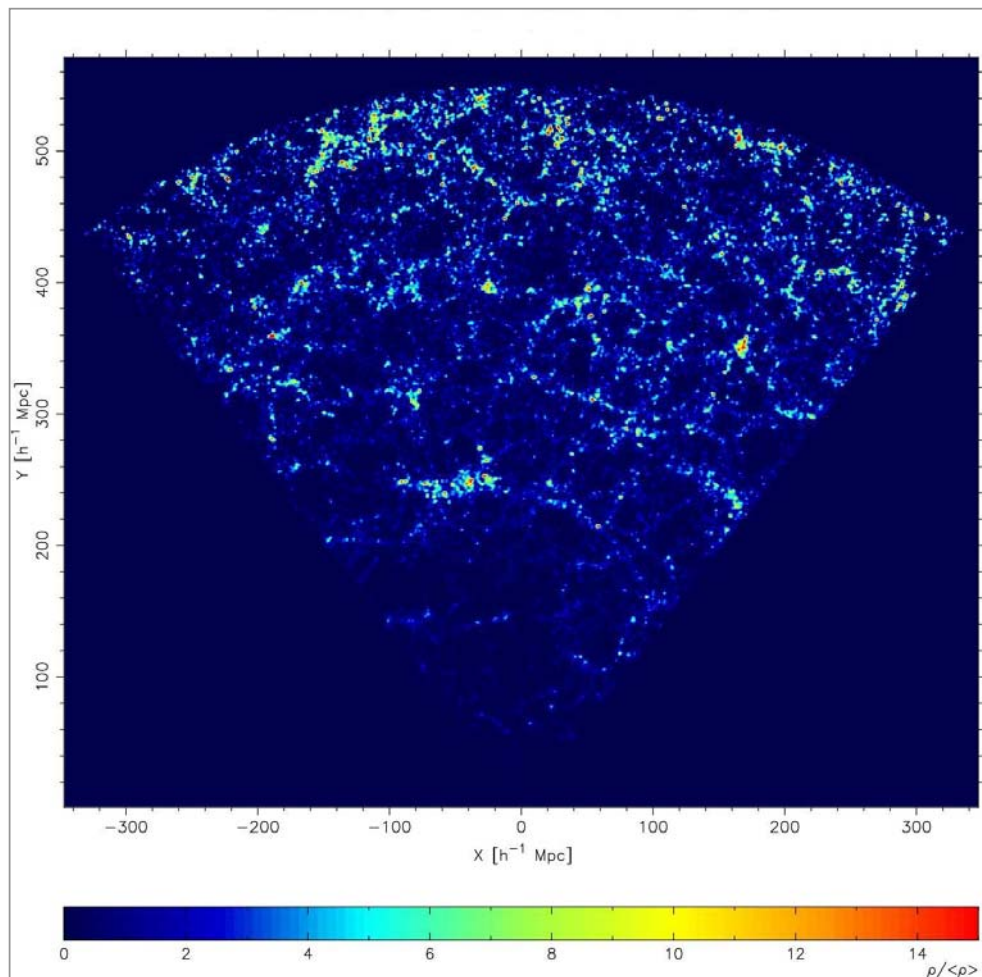
vajalik elus paremaks toimetulekuks, sest vaid looduse omadusi paremini tundes suudame neid kasutada. Tänapäeval pole me ainult teadmiste kasutajad, vaid meil on võimalus osaleda ka kaas-aegse maailmapildi kujundamisel.

SUPERSTRUKTUUR

Meie viimase kümnendi tulemustest on vast kõige enam tuntud Universumi suuremastaabilise ehk superstruktuuri uurimine. See on struktuur, mille tüüpilised mõõtmed on 100 Mpc suurusjärgus; 1 Mpc (megaparsek) on 3 miljonit valgusaastat.

Kaugus lähima hiidgalaktikani (Andromeeda galaktika) on näiteks ainult 0,8 Mpc, vaid sadu kordi väiksem vaadeldava Universumi koguulatusest.

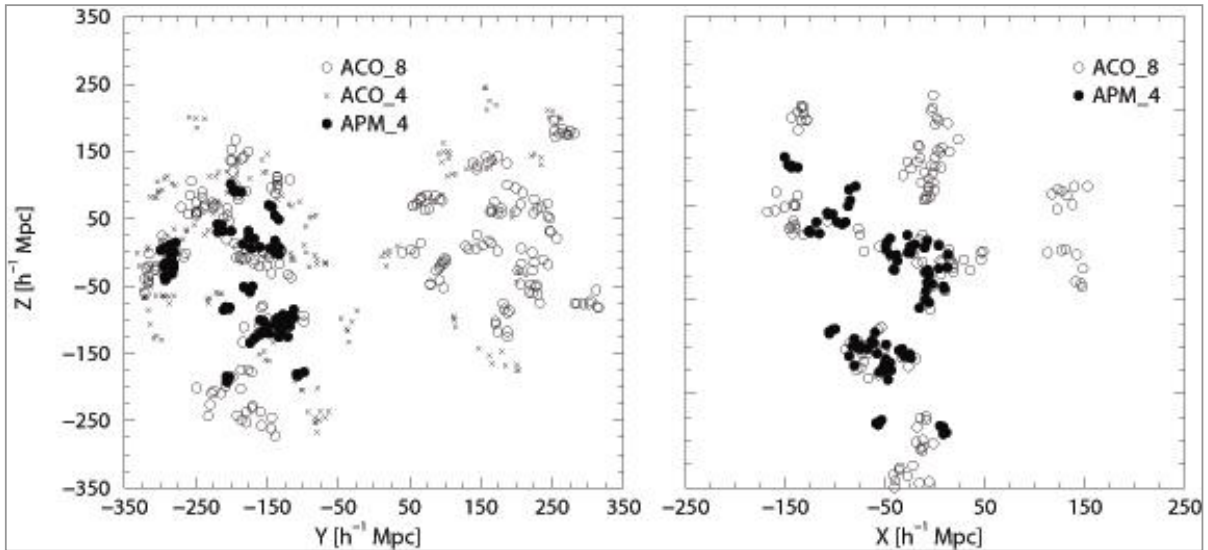
Praeguseks ajaks on kosmoloogid harjunud faktiga, et sellistes skaalades polegi enam isoleeritud objekte, on vaid ühtne suurte tühikute ja pikkade haraliste kettide (galaktikate superparvede) võrgustik. Joonis 1 toob näite sellest võrgustikust – kujutatud on galaktikate asukohad suhteliselt õhukeses, mõne Mpc paksuses kihis. Igale galaktikale vastab vaid punktike.



Joonis 1.
2dF galaktikate ülevaate põhjal arvutatud heleduse jaotus.

Nagu näete, on kujutatud kihis galaktikaid palju ja võrgustik ise üpris amorfne. Selle täpne kirjeldamine on siiani probleemiks ja sellega me tegeleme. Jooniselt on veel näha, et peale kettide leidub galaktikate jaotuses ka kompaktsed kogumeid,

galaktikagruppe ja -parvi. Neid on mitmesuguse suurusega – osa koosneb vaid mõnest galaktikast, aga on ka parvi, milles ligi tuhat galaktikat. Kui me uurime rikaste galaktikaparvede ruumjaotust, näeme hoopis intrigeerivat pilti (joonis 2).



Joonis 2.

Rikaste galaktikaparvede jaotus põhja- ja lõunapoolkeral. Abelli kataloogi andmete põhjal leitud ning rikastesse superparvedesse kuuluvad parved on märgitud tühjade rõngastega, APM kataloogi andmete põhjal leitud ning rikastesse superparvedesse kuuluvad parved on joonistatud täidetud rõngastega.

Nagu ka teile kohe silma torkab, näib see võrgustik kenasti regulaarne (ruuduline, ruumis kuubiline) olevat. 1990ndate keskpaiku kutsus see väide esile hulga poleemikat. Jaan Einasto juhtimisel töötanud teadurid, kes võrgustiku leidsid, uurisid seda põhjalikult ja näitasid, et see on reaalne kuubiline struktuur, 120 Mpc perioodiga. Jaan Einasto, Maret Einasto, Erik Tago ja Veikko Saar said töö eest Eesti teaduspreemia. Tulemus on üllatav, sest pole veel pakutud ühtegi Universumi varase ajaloo varianti, mis maailma sihukese hirmsuure kuupvõre tekitaks. Kuid see tulemus pole ainuke viide imelikule regulaarsusele Universumis, neid on leitud teisigi, ja kõik on siiani seletamata. Ootame uusi vaatlusandmeid, et saaksime teada, kuidas Universum tegelikult välja näeb. Siiani tun-

neme hästi ainult oma lähedast ümbrust, vaid 300–600 megaparseki (kahe giga-valgusaasta) kauguseni.

Selliseid suuri galaktikaparvede ja galaktikate kogumeid nimetatakse superparvedeks. Superparved on kõige suuremad seni teadaolevad objektid Universumis, moodustades koos suurte tühikutega ühtse võrgustiku. Selle võrgustiku omaduste uurimine ja võrgustiku tekke kirjeldamine on olnud Tõravere kosmoloogide üks põhiteemasid. Tuntud on Maret Einasto poolt koostatud superparvede kataloog, eraldi töödetsüklil on pühendatud tühikute uurimisele.

Nagu esimesel joonisel näha, on just tühikud kõige paremini isoleeritud, kõige kompaktsed ja seepärast kõige paremini kirjeldatavad struktuuri-

elemendid. Uurides tühikute dünaamikat, leidsime 1990ndate alguses, et kuigi tühikud on hiiglasuurid, annavad nad kogu Universumi tihedusse vaevalt 15% vaadeldavast tihedusest. Siit tuli ka ennustus, et Universumi keskmine tihedus – põhiline suurus, mis Universumi evolutsiooni määrab – on oluliselt alla nn kriitilise. Praegu on see üldtunnustatud fakt. Koos noorte kolleegidega Saksaamaalt uurisime tühikute omadusi ja modelleerisime nende arengut. Tühikud pole päris tühjad, peale tumeaine leidub seal ka galaktikaid ja nõrku galaktikaketten. Nende omadustes on paremini säilinud jäljed kaugest minevikust.

Üks selle töö osalistest oli Mirt Gramann, kes sel ajal andeka noorteadlase stipendiumi saanuna Princetoni töötas. Struktuuri arengu kirjeldamise loomuliku jätkuna avaldas ta artiklid Universumi kiirustevälja arengust, mida tsiteeritakse siiani. Kiirustevälja on oluline mitmes aspektis: dünaamikas on see põhiline mootor, mis vaadeldud struktuuri tekitab, vaatlusandmetesse toovad dünaamilised kiirused aga hulga raskelt kirjeldatavaid muutusi. Üheks näiteks on nn “jumalasõrmed” – nii näevad välja galaktikaparved, mis vaatluskataloogide toorversioonides süüdistavalt meie poole näitavad. Seda, et need sõrmed ei näita galaktikate tegelikke asukohti, rõhutas esimesena Jaan Einasto ja pakkus viisi, kuidas galaktikakaarte parandada. Mirt Gramann kasutas Princetoni ajal juba rafineeritumat viisi noist sõrmedest vabanemiseks. Korraliku, statistiliselt põhjendatud algoritmi sõrmede tegeliku kuju leidmiseks ja reaalsete galaktikakaartide koostamiseks esitas oma magistritöös Lauri Juhan Liivamägi sel aastal.

Peale parvesõrmede moonutavad vaadeldavaid galaktikakaarte ka need liikumised, mis tekitavad superparvi – suuremastaabilised galaktikate ja galaktikaparvede voolud. Mirt Gramann uuris neidki vooge ja esitas retsepti tegelike galaktikakaartide saamiseks. Kuna probleem on oluline, on seda meil hiljemgi uuritud. Väga põhjaliku uurimistöö tegi sel teemal Veikko Saar, kes oma Oxfordi-aastal koostas terve taeva tiheduskaardi vastvalminud PSCz galaktikate punanihete ülevaate põhjal. Töö avaldati küll alles pärast tema surma, kuid on siiani jäänud üheks põhjalikumaks nn Wieneri

filtri meetodika rakenduseks ruumstruktuuri leidmisel. Ta leidis mitmeid uusi superparvi, millest kaks ta sõbrad temanimeleiks ristisid.

Tühikute uurimine viis meie kosmoloogid loogilise jätkuna uurima, kuidas üldse galaktikagrupid ja -parvede asukoht suure struktuuris mõjutab nende omadusi (nn ümbruse mõju problemaatika). Põhivedaja on siin olnud Maret Einasto, kes kaitses sel teemal oma doktoritöö (üks vähestest astronoomiadoktori kraadidest, mille Tartu Ülikool välja andis, enne kui mõisteti, et see ei klapi muu kraadihierarhiaga). Kui Maret Einasto koos kolleegidega (nii Tõraverest kui mujalt ilmast) seda rida alustas, oli oluliseks probleemiks leida galaktikate omaduste sõltuvus ümbruse ruumtihedusest. Praegu uuritakse galaktikagrupid omaduste sõltuvust ümbrusest. Leitud vaatlusseosed on olulised, piiramaks teoreetilisi võimalusi galaktikate ja nende kogumike tekkeks. Ja nagu ikka, on meie põhieesmärgiks kontrollida, ja kui õnnestub, siis ümber lükata kaasaegse välja-teooria poolt pakutavaid Universumi varase arengu versioone. Las füüsikud ehitavad kiirendajaid, ka see töö, mida eestlased Martti Raidali eestvedamisel CERNis teevad, on Universumi mõistmisele äärmiselt oluline. Me kasutame erinevaid teid, eesmärk aga on ühine – maailma mõistmine.

GALAKTIKAPARVED JA -GRUPID

Kuigi suured tühikud torkavad vaadeldavates galaktikakaartides kõige enam silma ja objektide ehitus (morfoloogia) on järgmine silmatorkav omadus, on struktuuri põhielementideks siiski galaktikaparved ja -grupid. Galaktikaparvedesse kuulub ligi tuhat nn hiidgalaktikat (nagu meie endi kodugalaktika), peale selle veel hulgi väiksemaid kääbusgalaktikaid, gruppidesse vähem. Galaktikaparved paistavad kaugelt silma ja enamasti on nad hästi näha ka röntgenkiirguses.

Kuna galaktikaparved on nii hästi vaadeldavad, on nad sobivad objektid struktuuri tekke ja arengu uurimiseks. Galaktikaparvi on Tõraveres kaua uurinud Erik Tago, kes koos oma kolleegi Heinz Andernachiga Mehhikost koostas uue ja siiani kõige inforikkama galaktikaparvede kataloogi. Galaktikaparvi vaadeldakse mitme projekti raa-

mes, saadud tulemused on aga tihti eri mõõtesüsteemides. Seetõttu on Tago ja Andernachi koondkataloog parveuurijatele suureks abiks. See on olnud mitme uurimistöö algmaterjaliks nii meil kui mujal. Ja kuna parvede vaatlused pole lõppenud, kestab töö kataloogi täiendamisel edasi.

Üks parvedega seotud uurimissuund, millega mitu aastat tegelesid Mirt Gramann ja Ivan Suhhonenko, on parvede kiiruste uurimine. Kuigi parved on väga massiivsed ja galaktikate tasakaalulised dünaamilised kiirused neis ulatuvad paari tuhande kilomeetri sekundis, liiguvad nad ka tervikuna. Parvede liikumiskiirused on paarisaja km/sek kandis ja need liikumised määravad superparvede arengu. Gramanni ja Suhhonenko töö on seni küll olnud numbriline modelleerimine, sest vaatlusandmeid parvede kiiruste kohta on veel vähe. Mudelite võrdlemine vaatlustega lubab kontrollida Universumi parameetreid, eriti selle keskmist tihedust ja tumeenergia osa.

Järgmine struktuuriühik kosmoloogilises hierarias on galaktikagrupid. Need on parvedest väiksemad, koosnedes mõnest galaktikast kuni sajani, kuid palju levinumad. Seega on gruppide ehitus ja areng ajas tüüpiline kogu struktuuri arengule. Ka on tihti galaktikate ruumjaotuse asemel kasulik uurida gruppide jaotust, sest keskmistamisega kaovad kiirusmoonutused grupi mastaabis. Grupi definitsioon ja grupikataloogi moodustamine on aga keeruline probleem, mille üle vaieldakse tänini. Häda on selles, et kaugemates gruppides näeme ainult heledamaid galaktikaid ja selleks, et kauged grupid lähedastega võrreldavad oleksid, tuleb gruppi kuuluvuse reegleid kaugusega muuta.

Me oleme Tõraveres grupikatalooge varemgi teinud, kuid uute vaatlusprogrammide materjalil saab neid moodustada tunduvalt suurema ruumala jaoks ja täpsemini. Praeguseks on meil paariaastase töö tulemusena leitud arvatavasti parim retsept ja Erik Tago eestvedamisel on valminud parim grupikataloog hiljutise nn kahekraadi ülevaate jaoks (2dFGRS). Grupikataloog uue Sloani ülevaate kohta on meil koostamisel.

Teiste vaatlusmaterjalide põhjal uuritavate gruppide kõrval uurime lähedasi gruppe ka ise. Kuna

need on lähedal, on nende omadused, struktuur ja füüsikalised interaktsiooniprotsessid neis hästi uuritavad. Õppides siinsetest gruppidest, saame ennustada, kuidas kaugemad välja võiksid näha ja mõista gruppide teket ning arengut. Lähedaste gruppide uurimine on olnud pikka aega Jaan Venniku meelisteema. Koos kolleegidega Heidelbergist kasutab ta selleks Euroopa üht suurimat, Hispaanias asuva Calar Alto observatooriumi 3,5 meetrist teleskoopi. Eriti põhjalikult on Jaan Vennik uurinud madala pindheledusega kääbusgalaktikaid. Neid on gruppides palju, aga veidikegi kaugemal neid enam vaadelda ei saa. Peale nende omaduste uurimise on oluline tuvastada, kas nad antud gruppi kuuluvad või mitte. See on lähedaste objektide jaoks keeruline probleem. Kuna objektid on väga nõrgad, pindheledus tihti allpool öötaeva heledusfooni, nõuab vaatlemine hoolikust ja edasist filigraanset andmetöötlust.

STRUKTUURI STATISTILINE KIRJELDAMINE

Struktuuri kartograafia ja selle koostisosade (galaktikaparvede ja -gruppide) füüsika kõrval on kosmoloogias traditsiooniliselt tähtsaks uurimissuunaks struktuuri statistiline kirjeldamine. See avab kõige otsema tee vaatlusmaterjali võrdlemiseks kosmoloogiliste mudelitega ja suuremastaabilise struktuuri arengu teoreetiliste ennustustega. Kuna kosmoloogiline struktuur on kas kahe- (taevakaardid) või kolmemõõtmeline (galaktikaülevaated), on see metodoloogia ruumstatistika osa ja oluline rakendusväli. Nii oluline, et mitmedki meetodid on kosmoloogias arendatud enne kui ametlikus statistikas. Kosmoloogide ja statistikute koostöö on väga tihe.

Selle koostöö hõlbustamiseks avaldasid Vicent Martinez (Valenciast) ja Enn Saar monograafia, kus kirjeldasid kõiki galaktikate ruumstatistikas kasutatavaid meetodeid, andsid ülevaate vajalikust kosmoloogilisest aparatuurist, kirjeldasid vaatlusvalimeid. Raamat on ainuke selleteemaline monograafia. See ilmus aastavahetusel 2002–2003 rahvusvahelises kirjastuses Chapman & Hall/CRC Press ja sai head retsensioonid. Raamatu valmimist toetas ka Eesti Teaduste Akadeemia.

Kõige levinum galaktikajaotuse statistika on korrelatsioonifunktsioon, mis iseloomustab kuhjumist punktjaotustes. Selle hindamisega olime juba ammu tegelenud, neil aastatel otsisime aga korrelatsioonifunktsioonis jälgi ruumilistest perioodilisustest. Veikko Saar arendas uue meetodi korrelatsioonifunktsiooni võngete uurimiseks ja näitas, et võnked suurtel skaaladel on reaalsed. Abelli galaktikaparvede jaoks näitasid seda veidi hiljem teised meie kosmoloogid eesotsas Erik Tagoga. Praegu on neid nn barüonvõnkeid avastatud ka galaktikate jaotuses. Nad on näha väga suurtel galaktikate omavahelistel kaugustel, kus kuhjumissignaal juba nõrk, nõudes loomulikult suuri vaatlusruumalasid.

Korrelatsioonifunktsiooni kõrval on teiseks populaarseks kirjeldusfunktsiooniks võimsusspekter, mis näitab eri skaaladega struktuuri amplituudide suhet kosmoloogilistes tihedusväljades. Seda saab otse seostada teoreetiliste ennustustega, mistõttu selle funktsiooni vaatluslik määramine on väga oluline.

Üks varasemaid töid galaktikajaotuse võimsusspektri määramise kohta on pärit Mirt Gramanni ja Jaan Einasto sulest. Praeguseks ajaks on see tegevus muutunud pea omaette tööstusharuks. Jaan Einasto osavõtul ilmus rahvusvahelises koostöös mitu artiklit võimsusspektri määramisest uute andmete põhjal. Need näitasid veenvalt, et spekter pole nii sile, nagu kalduti arvama, vaid selles on olemas teravad detailid, mis vastavad eelisskaaladele ruumstruktuuris.

Nimetatud tööd põhinesid galaktikaparvede kataloogidel. Need katavad küll suuri ruumalasid, kuid kuna parvi pole palju, on ka saadud tulemused küllaltki ebatäpsed. Praeguse kõige täielikuma, Sloani heledate galaktikate ülevaate materjalidele tuginedes, leidis Gert Hütsi nn barüonvõnkumised galaktikate võimsusspektris, mille olemasolu oli siiani kaheldav. Need võnkumised on määratud algtingimuste poolt. Hütsi tulemus näitab, et struktuuri areng ei kustuta täielikult esialgset olekut, infot algsetest kiirus- ja tihedusväljadest.

Kuna vaadeldavas ruumstruktuuri mustris on näha korruga väga paljusid skaalasid, on selle kirjeldamiseks tarvis erilist matemaatilist aparatuuri. Enn Saar ja Jaan Einasto koos kolleegidega mujalt olid esimesed, kes pakkusid välja struktuuri multifraktaalset kirjeldamist. Nad katsetasid seda mudelitel ja uurisid vaatlusvalimite fraktaalsete omadusi. Need tööd leidsid laialdast vastukaja ja tekitasid tõsist huvi isegi fraktaalide isas B. Mandelbrotis. Töid sel suunal ilmub siiani. Fraktaalide rakendamist takistab vaid fakt, et meie poolt vaadeldav heledusvahemik on veel liiga väike ja fraktaalsust näeme liiga väikeses skaalavahemikus. Kui tulevikus massiliselt kääbusgalaktikaid vaatlema hakkame, võivad fraktaalid kosmoloogias jälle populaarseks muutuda.

Teine matemaatiline uuendus, mida Vicent Martinez ja Enn Saar kosmoloogiliste vaatluste uurimisel kasutasid, olid nn lainikud, lokaalne sagedusanalüüs. Standardne sagedusanalüüs, nn Fourier teisendus, kirjeldab jaotusi eri lainepikkustega lainete summana, mis aga pole seotud konkreetse asukohaga ruumis. Lainikud on lokaliseeritud nii ruumis kui sagedustes ja seepärast väga sobivad mustrite analüüsiks. Martinez ja Saar rakendasid neid ainejaotuse maksimumide tüüpide uurimiseks, praegu rakendab neid Juhan Liivamägi parvesõrmede eraldamiseks galaktikakaartidest. Ka Martinez ja Saar on lainikute juurde tagasi tulnud, rakendades neid tihedusväljade morfoloogia uurimisel.

Tihedusvälja morfoloogia ehk mustri uurimine lubab määrata selle päritolu. Osutub, et hüpotees, mille järgi esialgne tihedusväli on Gaussi väli, ennustab ka tihedusjaotuse mustri, tühikute ja tihendite võrgustiku iseloomu.

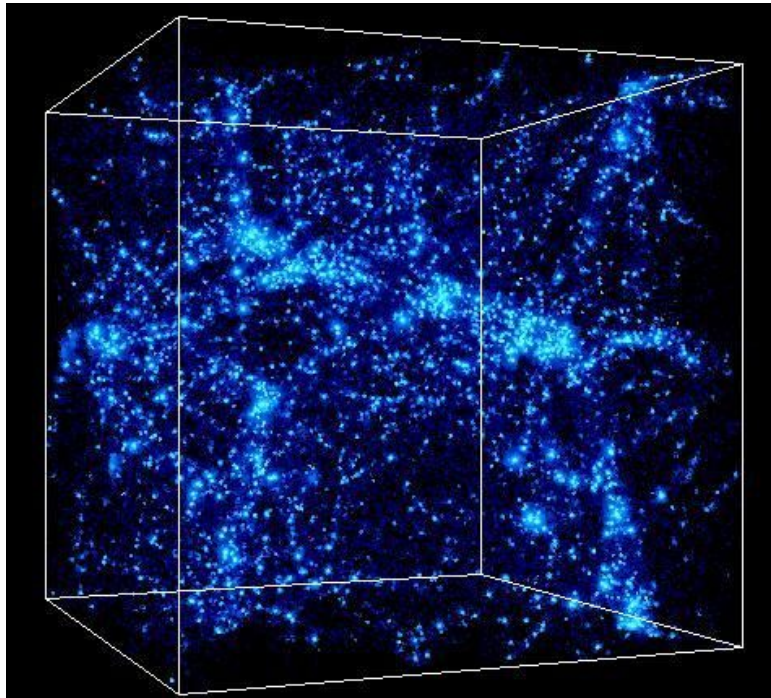
Levinuim kirjeldusviis on nn topoloogiline geenus, mis määrab samatiheduspinna topoloogia (sangade arvu). Ka selle määramisel olime me ühed esimestest. Praegu on Enn Saar selle juurde tagasi tulnud, uurides uute vaatlusvalimite morfoloogiat. Maret Einasto kasutab morfoloogilisi meetodeid (Minkowski funktsionaale) galaktikate superparvede kirjeldamiseks.

STRUKTUURI TEKE KOSMOLOOGIAS

Kosmoloogilise suuremastaabilise struktuuri tekke kirjeldamine pole lihtne. Teame enam-vähem täpselt vaid seda, kuidas see algab, kui häiritused on veel väikesed. Edaspidi muutub areng keeruliseks, mittelineaarseks ja kirjeldus ligikaudseks. Mirt Gramann arendas oma Princetoni aastatel struktuuri tekke dünaamika lähendkirjeldust teise järgu ni kiirustes. Need tööd leidsid kasutust kiiruste välja uurimisel ja neid tsiteeritakse siiani.

Omapärase lähenduse, nn adhesioonimudeli, mis kirjeldab täpselt struktuuri tekke algust ja lähendab selle lõppfaase kleepumismehhanismiga, arendasid koos Moskva kolleegidega välja Lev Kofman ja Dmitri Pogosjan, tollased Tõravere töötajad. Mudel ja selle järeldused selgitasid oluliselt struktuuri tekkeprotsessi. "Natures" avaldatud töö filamentide tekke põhjustest on siiani üks olulisemaid struktuuri tekke mõistmisel. Nad põhjendasid, kuidas gravitatsioon deformeerib koherentset esialgset kaost (juhuslikke alghäiritusi), tekitades nii vaadeldava suuremastaabilise struktuuri.

Kuigi analüütilised lähendid on kasulikud, on nende rakenduspiirkond piiratud. Kus analüütika enam ei tööta, astuvad mängu numbrilised mudelid. Kosmoloogia pole erand, numbrilised struktuuri arengu mudelid on siin ammu kasutusel. Väljafüüsika teoreetikutele võib probleem lihtsana näida, sest tegemist on Newtoni dünaamikaga laienevas ruumis. Probleemi muudavad keeruliseks algtingimused, mis tekitavad üheaegse arengu kõikides mastaapides, ning eri mastaapide omavaheline vastasmõju. Seetõttu on süsteemi kui terviku areng väga keeruline ja raskesti mõistetav. Numbriline modelleerimine on tihti ainuke väljapääs. Kuigi meie arvutusbaas oli, eriti varem, viletsam kui lääne pool, oli Mirt Gramann esimene, kes modelleeris struktuuri teket Universumis, kus toimub kiire laienemine. Sellal ei uskunud paljud, et nn vaakumenergia, mis kiirenevat laienemist põhjustaks, olemas on. Praegu on see üldtunnustatud võimalus. Joonis 3 esitab näite struktuurist, mida ennustavad numbrilised mudelid. Võrreldes vaatlustega joonisel 1 näete, et ennustamine õnnestub.



Joonis 3.
Numbriliselt ennustatud galaktika-
te ruumjaotus 100 Mpc küljega
kuubis.

Ivar Suisalul valmis pikaajase töö tulemusena maailmas esimene adaptiivne N-keha programm, mille põhjal ta kaitses doktoritöö. Praegu jätkab sellesuunalist arendustööd Enn Saar, kes koos Saksa ja Soome kolleegidega järgmise põlvkonna programmisüsteemi arendab. Suuremastaabilisi N-keha mudeleid kasutame me pidevalt nii struktuuri arengu põhimõteteliste küsimuste uurimisel kui vaatlusvalimitega võrdlemisel. Praegu on meie peamine mudelispetsialist Ivan Suhhonenko, kes hiljuti kaitses doktoritöö. Üks levinumaid mudelite rakendusi on numbriliste vaatlusvalimite genereerimine. Neid saab arvutada palju ja Monte-Carlo meetodil hinnata modelleeritavate vaatlusvalimite statistikute jaotusi.

GALAKTIKAD

Tõraveres on olnud pikaajaseks traditsiooniks galaktikate dünaamika uurimine ja nende dünaamiliste mudelite koostamine, lähtudes vaatlusandmetest (Grigori Kuzmin, Jaan Einasto). Praegu jätkab seda suunda Peeter Tenjes, kes on modelleerinud lähedasi hästi vaadeldud galaktikaid. Olemasolevate galaktikamudelite puuduseks oli see, et need ei arvestanud tumeaine halosid galaktikate ümber. Koos Jaan Einastoga koostas Peeter Tenjes mitmeid mudeleid lähedaste hiidgalaktikate kohta. Koos kolleegidega Itaaliast koostas Tenjes galaktiliste kiirusväljade kataloogid, mis on väga vajalikud vaatluste interpreteerimisel. Üks huvitavaid galaktikamudelite rakendusi oli praegu kiiresti Galaktikast kaduva tähe sünnikoha ennustamine. See lubas hinnata ka põhjust, miks vahetevahel tähed Galaktikast välja visatakse.

Galaktikate evolutsioonis on olulisel kohal nende keemiline evolutsioon – kuidas aja jooksul vahetuvad tähtede põlvkonnad ja kuidas rikastub galaktiline aine raskemate keemiliste elementidega (kosmoloogia ennustab, et alustasime praktiliselt ainult vesiniku ja heeliumiga). Et vaatlustest evolutsiooni kohta järeldusi teha, on vaja galaktikate mudeleid, mille üheks oluliseks lähtepunktiks on vaadeldud ja modelleeritud tähtede arengulood, nn trekid. Selliste mudelite koostamine, nende võrdlemine vaatlustega ja galaktikate varase arengu jälgimine on olnud Peeter Traadi põhitegevuseks.

Traadi mudelid kuuluvad praegu galaktikate evolutsiooni rahvusvahelisse standardsesse andmebaasi.

Galaktikate evolutsiooni saame viimasel ajal ka vaatluslikult jälgida, eriti tänu Hubble kosmoseteleskoobile, mis lubab vaadelda kaugeid ja seega palju nooremaid galaktikaid kui me lähedal näeme. Peeter Tenjes ja Antti Tamm on selleks tööks kasutanud Hubble arhiivi ja uurinud paljusid kaugeid galaktikaid. Ka see andmetöötlus on hell, kuna objektid on väga nõrgad. Näited mõnest tüüpilisest kaugest galaktikast on toodud joonisel 4. Määrates nende galaktikate omadusi ja võrreldes neid praeguste galaktikatega, saamegi teada, kuidas galaktikate areng tegelikult toimub, ja kontrollida arenguteooriaid.

Galaktikate tekke mõistmiseks on oluline teada, kuidas tekkis meie Galaktika, milline on selle täpne ehitus ja leida, kas Galaktikas on veel jälgi tema tekkeperioodist. Kuigi üldine tihedusjaotus Galaktikas paistab keskeltläbi üpris sile olevat, on viimasel ajal leitud erinevaid struktuure tähtede kiirusjaotuses (tähevooge). Suuri lootusi nende uurimiseks pannakse kosmosemissioonile Gaia, mis peaks mõõtma pea miljardi tähe kaugused ja kiirused. Selle missiooni ettevalmistamisel on pikka aega töötanud Valeri Maljut, kes tegeleb täheklassifikatsioonimeetoditega. Gaiaiga on tegevad ka meie tähefüüsikud.

Peale tähtede on galaktikate oluliseks komponendiks galaktiline gaas, millest tähed tekivad. Gaasi on massina küll palju vähem kui tähti, aga vaadeldav on see hästi. Galaktilise gaasi kiiruste ja ruumjaotuse uurimisega tegeleb Urmas Haud. See töö algab vaatlusülevaadete hoolika töötlemisega, nn komponentide eraldamisega, mõistmisega, kust raadiosignaal pärit on ja Galaktika ehituse kirjeldamisega – gaas jälgib väga hästi Galaktika gravitatsioonivälja. Üks gaasimõistatusi, millega Urmas tegelenud on, on kiired vesinikupilved, mis näivad kaugelt Galaktikasse kukkuvat, ja nende grupid, mis moodustavad kette Galaktilises taevaotuses. Urmas Haud on leidnud mitmeid selliseid kette, jäänukeid lagunevatest kaaslasgalaktikatest, näidates, et Galaktika varane areng on olnud tormiline.

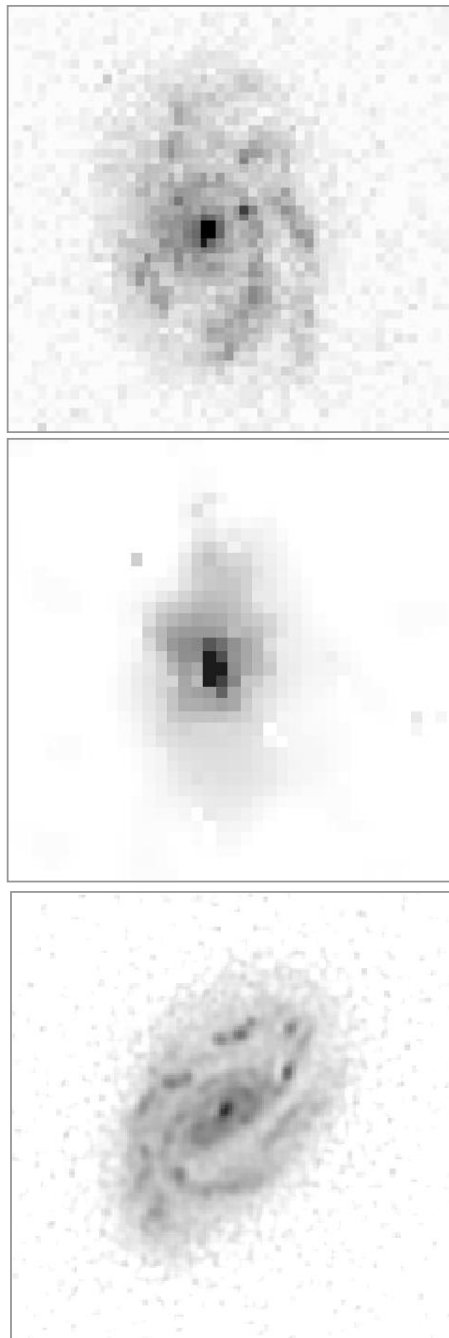
Meie Galaktika kuulub nn hiidgalaktikate hulka. Need on galaktikad, mis on hästi vaadeldavad ja moodustavad põhilise osa ka kaugetest galaktika-kataloogidest ja suuremastaabilisest struktuurist. Kui aga galaktikaid kokku lugema hakata, leiame, et hiidgalaktikatest palju enam on oluliselt väiksemaid, kääbusgalaktikaid. Osa neist on kompaktsed ja hästi uuritavad, kuigi ainult lähedal, sest kaugel näivad nad meie teleskoopide jaoks juba liiga tuhmid. Suur osa kääbusgalaktikatest on aga ka lähedal halvasti vaadeldavad, sest nende pindheledus on väga väike, enamasti alla öötaeva fooni. Nende ehitus ja evolutsiooniline staatus on paljuski mõistatuslik ja ei taha veel hästi mahtuda standardse struktuuri arengupildi raamidesse. Selliseid galaktikaid on vaadelnud ja nende omadusi uurinud Jaan Vennik.

Jaan Vennik on eraldi uurinud ka galaktikaid, mis paiknevad tühikutes. Kuigi suuremastaabilises struktuuris vaadeldavad tühikud on väga tühjad, leiab seal siiski nõrku galaktikakette ja galaktikaid. Kuna nende galaktikate tekkelugu pidi olema oluliselt erinev harilike galaktikate tekkeloost, mis elavad gruppides ja parvedes, on huvitav teada, millised need galaktikad on ja võrrelda neid ülejäänutega.

Üks erinevustest on kindlasti omavahelise vastasmõju puudumine. Grupigalaktikates on tihti näha struktuuri moonutusi, mis viitavad sellele, et galaktikad on omavahel pörkunud. Põrkeks piisab ka lähedasest möödalennust. Uurides nende galaktikate omadusi, saab leida, mis protsesse pörked edendavad. Enamasti viivad need tähetekke kiirenemisele. Interakteeruvate galaktikate kõrval on Jaan Venniku meelisteemaks ka aktiivsed galaktikad, kus galaktika tuumas asuv mootor (arvatavasti must auk) ainet kütab ja seeläbi kiirgust tekitab.

KOKKUVÕTE, PERSPEKTIIVID

Meil pole olnud kombeks teha nii pikaajalisi kokkuvõtteid oma tegevusest. Lugesdes kokku nende viieteistkümnede aasta jooksul ilmunud raamatud, artiklid ja saadud tulemused, üllatusime isegi. Tööd on tehtud palju, mitmed tulemused saadud maailmas esimesena ja kosmoloogia arengut on



Joonis 4. Kauged galaktikad Hubble'i kosmoseteleskoobi arhiivist.

mõjutatud päris tublisti. Vast on põhjus ka selles, et kosmoloogid olid varem oluliselt vähem kui nüüd. Tänu uutele vaatlusvõimalustele on kosmoloogia, eriti selle vaatluslik osa, muutumas suuresti inseriteaduseks, kus meetodika on paljuski fikseeritud ja oluline on põhiparameetrite täpsustamine. Me oleme suutnud ka uute muutustega kaasa minna, osaledes nii uute vaatlusandmete mõtestamisel (viimase aja tööd 2dFGRS ja SDSS ülevaadete kohta) kui uute vaatlusprojektide ettevalmistamisel (Gaia, Planck). Kuna meie kontaktid kolleegidega muudest riikidest on jätkuvalt tugevad, garanteerib see ka Eesti kosmoloogia liikumise samas frondis muu maailmaga. Oluline on noorte magistrite ja doktorite pidev teke, mis kindlustab järjepidevuse. Rõõm on tõdeda, et andekaid noori on. Suuremate projektide rahastamiseks pole meil vahendeid, kuid nendes osaleme rahvusvahelise koostöö raames. Kokkuvõtteks – Eesti kosmoloogia on päris korralikul järjel, heade traditsioonidega ja arenemisvõimeline.

VIITED

- Andernach, H., Tago, E., Stengler-Larrea, E. 1995. A compilation of measured redshifts of ACO Clusters. *Astrophys. J. Lett.*, 31, 27.
- Bond, J. R., Kofman, L., Pogosyan, D. 1996. How filaments of galaxies are woven into the cosmic web. *Nature*, 380, 603.
- Einasto, J., Einasto, M., Gottloeber, S., Mueller, V., Saar, V., Starobinsky, A. A., Tago, E., Tucker, D., Andernach, H., Frisch, P. 1997. A 120 Mpc periodicity in the three-dimensional distribution of galaxy superclusters. *Nature*, 385, 139.
- Einasto, J., Einasto, M., Tago, E., Starobinsky, A. A., Atrio-Barandela, F., Müller, V., Knebe, A., Cen, R. 1999. Steps toward the Power Spectrum of Matter. III. The Primordial Spectrum. *Astrophys. J.*, 519, 469.
- Einasto, J., Hütsi, G., Einasto, M., Saar, E., Tucker, D. L., Müller, V., Heinämäki, P., Allam, S. S. 2003. Clusters and superclusters in the Sloan Digital Sky Survey. *Astr. Astrophys.*, 405, 425.
- Einasto, J., Saar, E., Einasto, M., Freudling, W., Gramann, M. 1994. The fraction of matter in voids. *Astrophys. J.*, 429, 465.
- Einasto, M., Einasto, J., Müller, V., Heinämäki, P., Tucker, D. L. 2003. Environmental enhancement of loose groups around rich clusters of galaxies. *Astr. Astrophys.*, 401, 851.
- Einasto, M., Einasto, J., Tago, E., Dalton, G. B., Andernach, H. 1994. The structure of the universe traced by rich clusters of galaxies. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 269, 301.
- Einasto, M., Tago, E., Jaaniste, J., Einasto, J., Andernach, H. 1997. The supercluster-void network. I. The supercluster catalogue and large-scale distribution. *Astr. Astrophys.*, 123, 119.
- Gramann, M. 1993. An improved reconstruction method for cosmological density fields. *Astrophys. J.*, 405, 449.
- Gramann, M., Bahcall, N. A., Cen, R., Gott, J. R. 1995. Large-scale motions in the universe: Using clusters of galaxies as tracers. *Astrophys. J.*, 441, 49.
- Haud, U. 2000. Gaussian decomposition of the Leiden/Dwingeloo survey. I. Decomposition algorithm. *Astr. Astrophys.*, 364, 530.
- Hütsi, G. 2005. Acoustic oscillations in the SDSS DR4 Luminous Red Galaxy sample power spectrum. *Astr. Astrophys.* (accepted)
- Jones, B. J., Martinez, V. J., Saar, E., Trimble, V. 2005. Scaling laws in the distribution of galaxies. *Rev. Mod. Phys.*, 76, 1211.
- Martinez, V. J., Saar, E. 2003. Statistics of the galaxy distribution. Chapman & Hall/CRC Press.
- Schmoldt, I. M., Saar, V., Saha, P., Branchini, E., Efstathiou, G.P., Frenk, C. S., Keeble, O., Maddox, S., McMahon, R., Oliver, S., Rowan-Robinson, M., Saunders, W., Sutherland, W. J., Tadros, H., White, S. D. M. 1999. On density and velocity fields and beta from the IRAS PSCZ survey. *Astron. J.*, 118, 1146.

Suisalu, I., Saar, E. 1995. An adaptive multigrid solver for high-resolution cosmological simulations. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 274, 287.

Tenjes, P., Haud, U., Einasto, J. 1994. Galactic models with massive coronae. IV. The Andromeda galaxy, M 31. *Astr. Astrophys.*, 286, 753.

Tenjes, P., Einasto, J., Maitzen, H. M., Zinnecker, H. 2001. Origin and possible birthplace of the extreme runaway star HIP 60350. *Astr. Astrophys.*, 369, 530.

Tucker, D. L., Oemler, A., Jr., Kirshner, R. P., Lin, H., Shectman, S. A., Landy, S. D., Schechter, P. L., Muller, V., Gottlober, S., Einasto, J. 1997. The Las Campanas Redshift Survey galaxy-galaxy autocorrelation function. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 285, 5.

Vennik, J., Hopp, U., Popescu, C. C. 2000. Surface photometry of emission-line galaxies in low density regions. *Astr. Astrophys.*, 142, 399.