

Jaan Einasto 95. sünnipäevaks

Peeter Tenjes

Sissejuhatus

Astronoomiast huvitunud I kursuse füüsika üliõpilasena puutusin esmakordselt Jaan Einastoga kokku 1974. aasta suve algul. Mäletan seda kohtumist hästi. Õnneliku juhuse tõttu sattusin Tõraverre just ühe olulise Jaan Einasto poolt juhitud galaktikate füüsika töörühma koosoleku ajal. Noore tudengina pandi mind seal ruumis lihtsalt ühe kapi taha koosoleku lõppu ootama, et siis töörühma juhiga (Jaan Einastoga) rääkida, kuid kuulsin räägitut hästi.

Tagantjärele tean, et see oli just siis, kui äsja oli ajakirja *Nature* vastu võetud Jaan Einasto, Ants Kaasiku ja Enn Saare kuulus artikkel tumeda aine kohta galaktikates ja nende ümber (joonis 1). Ning sellel koosolekul rääkis Jaan, et tegemist on väga tähtsa ja uudse tulemusega ning töörühm peaks enamiku oma tegevustest just sinna suunama. Arutatigi tulevast tööjaotust, mis muutis Tõravere galaktikate uurimises palju. Sellest on möödunud pea täpselt 50 aastat.

Kui Jaan vaataks oma töödele ja tegemistele tagasi, huvitav, mida ja millist aega ta peaks oma elus kõige tähtsamaks ja huvitavamaks? Võib olla ongi see tumeaine loo algus, kuid võib olla on see hoopis Universumi suuremastaabilise struktuuri tundmaõppimine või veel midagi hoopis muud?

[nature](#) > [letters](#) > [article](#)

Published: 26 July 1974

Dynamic evidence on massive coronas of galaxies

JAAN EINASTO, ANTS KAASIK & ENN SAAR

Nature 250, 309–310 (1974) | [Cite this article](#)

Joonis 1. Ajakirjas *Nature* 1974 ilmunud tumeda aine kohta käivat artiklit on astronoomide NASA ADS andmebaasi järgi viidatud üle 270 korra.

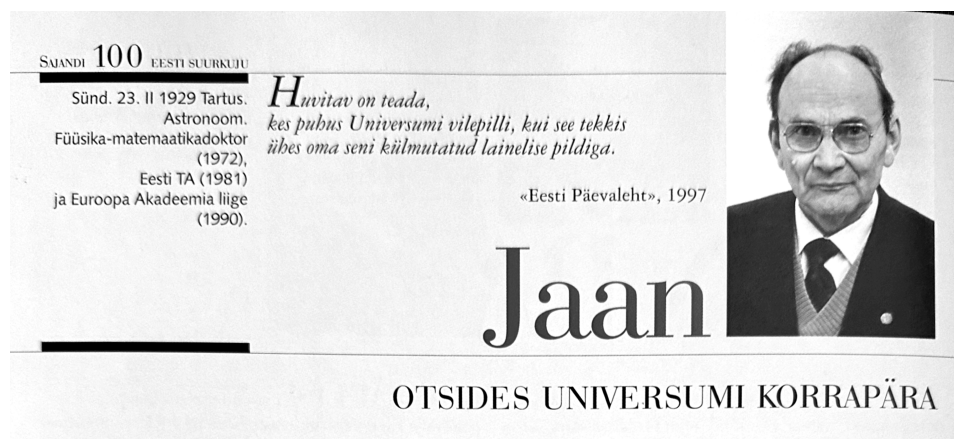
Jaan Einasto teaduslik rada – formaalne lähenemine

Vaatame Jaani senist teadusteed esmalt lihtsalt bürokraadi kombel. Niisiis ...

- NASA ADS andmebaasi järgi 340 teadustööd või populaarsemat kirjutist, mida on tsiteeritud kokku umbes 7250 korda.
- Teaduskraad ja tiitlid: doktor (nn PhD 1955, DSc 1972), Tartu Ülikooli professor, Eesti Teaduste Akadeemia akadeemik (1981).

- Riiklikud teaduspreemiad: aastapreemiad (1982, 1998), preemia pikaajalise teadustöö eest (2003), paradigma muutmise preemia (2007).
- Välisriikide teaduspreemiad: Marcel Grossmanni auhind (2009), Viktor Ambartsumiani rahvusvaheline auhind (2012), Gruberi kosmoloogiaauhind (2014).
- Eesti Vabariigi riigivapi II klassi teenetemärk (1998).
- Tartu linna aukodanik (2004).
- Tartu Ülikooli audoktor (2010), Turu Ülikooli audoktor (2013).
- Tartu Ülikooli suur medal (2019).
- Eesti Teaduste Akadeemia Harald Kerese medal (2019).

Ning *last but not least*. 1999. aastal, sajandi lõpuaastal korraldasid Eesti Entsüklopeediakirjastus, Rahvusraamatukogu ja mitu meediaettevõtet Eesti 20. sajandi suurkujude valimise. Otsustati, et nende hulka saavad ka 20 teadlast. Tegemist oli suures osas rahva poolt tehtud valikuga. Astronoomidest osutusid valituks Ernst Öpik ja Jaan Einasto (joonis 2).



Joonis 2. Väljavõte raamatust „Sajandi sada Eesti suurkuju“. Koostanud Tiit Kändler, Tallinn, 2002.

Huvitav, et kui suurima mõjukusega astronoomia väljaanne *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* hakkas avaldama oma köidetes ka biograafilisi avartikleid, siis esimesena ilmus seal 1977. aastal Ernst Öpiku artikkel ning 2018. aastal Jaan Einasto artikkel. Rohkem meie astronoomidelt sinna artikleid tellitud ei ole.

Kuid teaduses ei ole bürokraatlik ja formaalne lähenemine kunagi olnud eriti hea.

Jaan Einasto teaduslik rada – sisuline lähenemine

Kui küsida, kas Jaan Einasto on kogu elu tegelenud sama teadusküsimusega, siis see on väga hea küsimus. Ning meenutades, mida on kunagi öelnud Niels Bohr, siis ega vastus sellele ei olegi nii tähtis – vastused võivad muutuda, kuid küsimused jäävad.

Vastates „jah“, sõnastaksin, et läbi aegade Jaani huvitanud peamine küsimus on olnud: kuidas on tekkinud galaktikad ja galaktikate erinevad kooslused.

Vastates „ei“ sõnastaksin eri aegadel Jaani uurimisteemad nii:

- (i) millised on galaktikad,
- (ii) kuidas on galaktikad tekkinud ja arenenud,
- (iii) millised on galaktikate kooslused,
- (iv) kuidas on tekkinud ja arenenud erinevad galaktikate kooslused?

Ehkki kõikides punktides esineb sõna „galaktikad“, on need teemad siiski ka küllalt erinevad. Samas on Jaani erinevatel aegadel uuritavad teemad kõik orgaaniliselt üksteisega seotud ja üksteisest välja kasvanud, nii et huvitav ongi neid vaadelda ajalises järgnevuses.

Lugeja võib lõpus ise proovida vastata kas jah või ei. See, et edasised pealkirjad kannavad „ei“ vastuse alapunkte tuleneb lihtsalt sellest, et kuidagi tuleb ju teksti liigendada.

Millised on galaktikad?

Ma ei tea, kuidas Jaan valis oma kandidaaditöö (tänapäeva PhD) teema ise või pandi see talle ette. Igal juhul uuris ta aastatel 1952–1955 Linnutee erinevat tüüpi tähtede kinemaatikat ehk siis, kuidas mitmesugused tähed Linnutees liiguvad. Kuna liikumiste üldised omadused muutuvad aeglaselt ja teatud kindlal viisil, siis kannavad tähtede liikumised infot sellest, kuidas Linnutee struktuur on kujunenud.

Üsna loomulikult tuli siit vajadus hakata matemaatiliselt kirjeldama nii Linnuteed kui ta teisi galaktikaid. Aga kuidas, millest pihta hakata? Selle küsimusega oli tegelenud ka temast veidi enam kui 10 aastat vanem kolleeg Grigori Kusmin, keda Jaan Einasto peab oma olulisimaks mentoriks. Ning 1960-ndate aastate keskel oligi see ka Jaani teadustööde põhiteema. Loomulikult ei olnud Jaan Einasto maailmas ainus, kes selle küsimusega tegeles. Erinevaid matemaatilisi kirjeldusi oli nii varem kui ka paralleelselt mitmeid. Kuid Jaani jaoks oli oluline hoida kogu aeg silme ees põhiküsimust – kuidas on galaktikad tekkinud. Seetõttu ei tohtinud kirjeldus olla vaid formaal-matemaatiline, vaid pidi kuidagi kajastama ka tähesüsteemi olemust. Ehk siis, esmalt tuli sõnastada arendatava matemaatilise mudeli alused, lähtudes nõudest, et see kirjeldaks ka uuritavate objektide (galaktikate) füüsikalist sisu.

Lähtealuseks valis Jaan aine tiheduse jaotuse. Sest tiheduse jaotus määrab gravitatsiooni potentsiaali, seal mõjuvad jõud ja liikumised. Aluseks võetav tiheduse jaotus pidi olema ruumtihedus, sest vaid ruumtihedus on alati füüsikaline suurus, mitte pindtihedus. Tõsi, astronoomias me näeme taevafäärile projekteeritud pindtihedust, kuid aluseks tuleb siiski võtta ruumtihedus.

Tihedusjaotuse valem pidi olema selline, et tihedus oleks lõplik ja mittenegatiivne, pidi olema piisavalt paindlik, kuid mitte sisaldama ka liiga palju vabu parameetreid, tihedus pidi väljapoole kahanema. Tihedus ja selle tuletis ei tohtinud sisaldada hüppeid. Jaan fikseeris veel teisi nõudeid. Oma analüüsi tulemusena jõudis Jaan tiheduse valemieni, mis on maailma astronoomide seas saanud tuntuks Einasto tihedusjaotuse valemina. Vastav 1965. aastal ilmunud töö on saanud seni umbes 650 viidet ja kogub ka praegu stabiilselt 45–50 viidet aastas.

Peatselt (1968) sõnastas Jaan ka üldised tähesüsteemide dünaamiliste mudelite koostamise alused. Nende rakendamise näitena valmis 1969–1970 meie suure naabergalaktika, Andromeeda massijaotuse mudel, sealhulgas ka selle galaktika pöörlemise analüüs. Kõik senitehtu võttis Jaan Einasto kokku oma 1972. aasta

füüsika-matemaatikateaduste doktori töös – korrapäraste galaktikate struktuur ja evolutsioon.



Foto 1. Vasakult Sergei Kutuzov, Grigori Kusmin ja Jaan Einasto töisel arutelul 1965. aastal. Foto: TO fotoarhiiv.

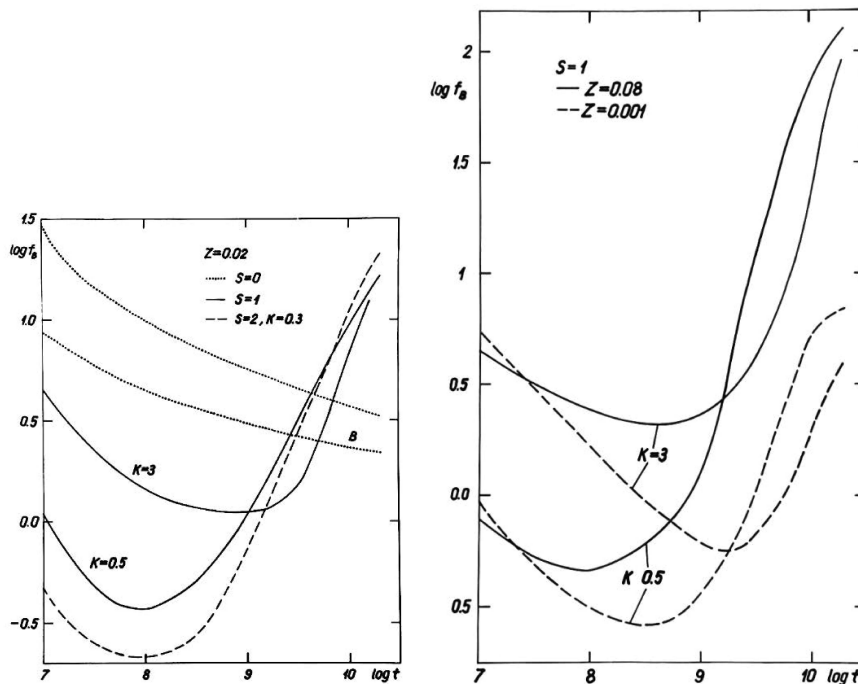
Kuidas on galaktikad tekkinud ja arenenud?

Selles 1972. aasta doktoritöös olid Jaanil ka paar peatükki galaktikate keemilisest evolutsioonist. Tagantjärele oli idee iseenesest lihtne. Tuleb võtta erineva massiga tähtede keemilise evolutsiooni arvutused ja liita need kokku selliste kaaludega, et kokku tuleks galaktika vaadeldud mass, heledus ja värvusindeksid (heal juhul ka otseselt metallilisus). Kaasproduktina tulevad siis välja ka vanused. Idee praktiline teostus oli vaatlusandmete ja tähtede evolutsiooni mudelite ebakindluse tõttu muidugi ebakindel. Ilmselt sellel põhjusel hakatigi sarnaseid mudeleid arendama valdavalt alles mitmeid aastaid hiljem.

Kuid Jaan sai sellest tööst arusaama, milliseid massi ja heleduste suhteid võib galaktikate erinevate komponentide jaoks üldse oodata. Talle sai selgeks, et näiteks mass-heleduse suhted üle saja (ja isegi üle mõnekümne) ei ole realistlike galaktikate arengu stsenaariumite raames võimalikud (joonis 3). See oli oluline mõistmine, mida läks peatselt tumeda aine olemusest arusaamise juures vaja. Selle teema juurde on Jaan tulnud ka hiljem mitmel korral tagasi.

Millised on galaktikad ja millised on galaktikate kooslused?

Kujutan ette, et umbes samal ajal ehk siis aastatel 1972–1973 hakkasid meie juubilaril tekkima ka unetud ööd – uute vaatluste lisandudes teoreetilised galaktikate mudelid päris hästi enam ei klappinud kõikide vaatlustega. Mõistliku massijaotuse



Joonis 3. Joonis Jaan Einasto 1972. aasta füüsika- ja matemaatikadoktori väitekirja 22. peatükist, kus on toodud Jaani arvutatud tähepopulatsioonide võimalikud massi ja heleduste suhete (joonisel f_B) logaritmid sõltuvana vanuse logaritmist. Massi ja heleduse suhe on Päikese ühikutes, vanus on aastates. S ja K on tähetekke parameetrid. Vasakul on arvutustulemused Päikese metallilisuse jaoks, paremal üsna äärmuslike metallilisuste jaoks. Näeme, et vasakul joonisel küünevad massi ja heleduste suhted umbes 30-ni, paremal ülimalt 100-ni.

mudeli puhul, mis vastaks Andromeeda galaktika heleduse jaotusele, tulid pöörlemise kiirused galaktika välisosades liiga väikesed ehk siis galaktika massijaotus ei olnud selline, nagu oleks võinud nende heledusjaotuse alusel arvata. Siit tuli edasi küsimus, kui suur see vastuolu on ehk siis, kas see on fundamentaalne mure või piisab mingist väiksemast sorti mudelite kohendamisest. Sest galaktikate pöörlemise kiiruste vaatlused ei ulatunud ju kuigi kaugale galaktikate keskosast. Kuid kui Jaan koos kaastöötajatega olid võtnud juurde ka galaktikate gruppide andmed – grupi liikmete kiirused iseloomustasid samuti graviteeruva massi jaotust – siis sai selgeks, et mure on fundamentaalne ja unetud ööd on põhjendatud.

1974. aastal ilmusidki ajakirjas *Nature* Jaan Einasto ja tema kaastöötajate kaks artiklit, milles näidati, et galaktikate ja nende gruppide kinemaatika andmete alusel tuleb järeldada, et galaktikate kogumassid on tunduvalt suuremad, kui tuleneks vaid nende heledusjaotuste alusel. Kaudseid vihjeid sellele oli varemgi, kuid need olid ebamäärased, kus nenditi enamasti vaid andmete ebakindlust. Tõdemusega, et tegemist on fundamentaalse vastuoluga, mis esineb ka üha kasvavates mastaa-pides, tulid välja Jaan Einasto, Ants Kaasik ja Enn Saar ning ameerika astronoomid Jeremiah Ostriker, James Peebles ja Amos Yahil (vt foto 2). Mõlemad tööd olid oma

olemuselt sarnased, kuid Jaani, Antsu ja Ennu töö ilmus mõned kuud varem.

Käesoleva artikli alguses mainitud koosoleku tulemusena hakkasid galaktikate töörühma uurimissuunad liikuma galaktikate gruppide uurimisele – kui palju ikkagi seda varjatud ainet on ja kus ta on. Tuli koostada gruppide andmebaas ja siis uurida gruppide omadusi.

Ning siin kohtusid taas Jaani varasemad huvid ja uued huvid. Juba 1960-ndatel aastatel olid Grigori Kusmin, Mihkel Jõeveer ja muidugi Jaan Einasto Linnutee tähtede liikumisi uurides püüdnud vastata küsimusele, milline on aine tihedus Päikese ümbruses. Tulemuseks saadi alati, et aine tihedus vastab ligikaudu tähtede tihedusele. Ehk siis, et Päikese ümbruses (tavaliselt peetakse sellisel puhul silmas umbes 0,5 kpc raadiusega ruumala) on tundmatut tumedat ainet üsna vähe. Seega peab tume aine paiknema ulatusliku tumeda halona galaktikate ümber. Tumeda aine tihedus on küllaltki väike, kuid suurte mastaapide tõttu ületab selle mass tähtede massi enam kui kümme korda.

Kuid mis asi see tume aine ikkagi on? Küllalt levinud oli arvamus ja seda arvasid ka Ostriker jt 1974. aasta töös, et arvatavasti on tegemist mingite väikese massiga tähtede populatsiooniga. Jaan sellega ei nõustunud. Ta oli ju oma 1972. aasta doktoritöös toodud galaktikate keemilise evolutsiooni arvutustes saanud, et sellise suure mass-heleduse suhtega tähtede populatsiooni tekkimine oleks pea võimatu (meenutage joonist 3).

Jaanil oli õigus ja peatselt said sellest aru ka teised. Nimelt määrati 1970-ndate ja 1980-ndate aastate vahetusel satelliitidelt tehtud vaatluste alusel Universumis deuteriumi (1977) ja liitiumi (1982) protsentuaalsed kogused. Kõrvutades saadud tulemusi kosmoloogilise Suure Paugu mudeliga, sai selgeks, et barüonainet (st tähed ja gaas) saab Universumis olla vaid umbes 5 protsenti kriitilisest tihedusest (joonis 4). Sellele arusaamisele jõudsid uute andmete valguses kiiresti mitmed väljapaistvad füüsikud ja kosmoloogid: Fred Hoyle, William Fowler, James Peebles, Yakov Zeldovich.

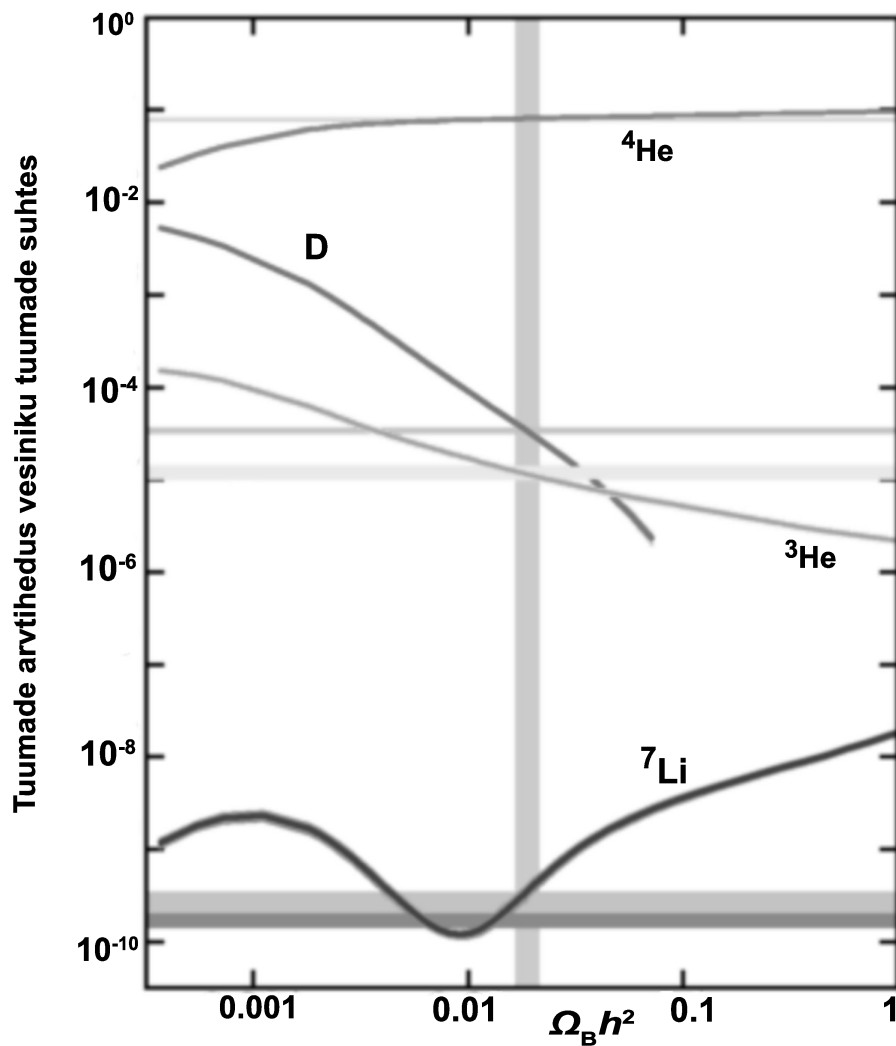
Kuid ainet kokku pidi olema tunduvalt rohkem. Seega, tume aine ei saa olla tavaline täheaine, ükskõik kui väikeseid tähti me ka ei vaataks. See peab olema midagi muud ehk tumeaine peab olema seotud füüsilise maailma fundamentaalsete omadustega.

Intermezzo

Teaduses tekib osakonna juhatajatel nii mõnigi kord küsimus, kuhu osakonna uurimissuundadega edasi liikuda, kuhu jõud kontsentreerida? Sellele on võimalik vastata järgmiselt: vaatame, milleks meie olud on kõige sobivamad ja sinna suunamegi oma jõud. Pole midagi öelda, igati ratsionaalne lähenemine.

Kuid mulle tundub, et Jaan Einasto mõtles teisiti: lähtuda tuleks hoopis sellest, millised küsimused on maailmas kõige aktuaalsemad ehk siis, mis on praegu teaduse esilehel. Ning kui meie olud ei ole nende teemade uurimiseks päris sobivad, siis tuleb otsida võimalusi, kuidas sellest üle saada.

Aktuaalseimaks teemaks välisgalaktilises astronoomias oligi neil aastatel tundmatu tume aine, selle mõju nii astrofüüsikale kui ka üldisemalt füüsikale. Tumeaine jaotuse uurimine võis aidata vastata küsimusele, mis see aine on? Lisaks ka, kuidas Universum ja selle objektid on kõige eelneva valguses välja kujunenud. Need teemad olid kõik omavahel seotud. Kuid et neile vastata, oli vaja häid vaatlusandmeid galaktikate ja isegi väga paljude galaktikate kohta.



Joonis 4. Universumi globaalne barüonaine tihedus (horisontaalteljel) sõltuvalt keskmistest ^4He , D, ^3He ja Li kogustest vesiniku suhtes (vertikaalteljel). Horisontaalsed jooned on vaatlused, joonte paksus iseloomustab statistilist viga. Kõverjooned on teoreetilised arvutused erinevate barüonaine tiheduste jaoks. Hall vertikaalne riba vastab barüonaine tihedusele, mis on vaatlustega parimas kooskõlas. Kuid näeme, et liitiumi kogused on väikeses vastuolus teiste elementide alusel saadud tulemustega. See on nn kosmoloogiline liitiumi probleem. Kuid liitiumi kogused on ka kõige ebakindlamad ja võivad sisaldada süstemaatilisi vigu. Kindel on aga, et barüonainet on universumis üsna piiratud koguses.

On selge, et Eesti kliima ei olnud nende nõrkade objektide vaatlusteks sobilik. Kas jätta seetõttu kõik pooleli? Ei! Tuleb otsida rahvusvahelist koostööd ülikoolide ja observatooriumitega, kus neid vaatluseid tehakse, ja mitte loobuda. Nii Jaan Einasto ka toimis.

Millised on galaktikate kooslused ning kuidas nad on tekkinud ja arenenud?

Et hakata uurima tumeaine olemust, tuli kusagilt pihta hakata. Üsna loomulik oli jõuda avaramale küsimusele: kuidas on tumeaine suuremates mastaapides jaotunud ning sealt edasi, mis need suuremad skaalad üldse on. See teema tekkis tegelikult juba veidi varem. Jaan Einasto on rääkinud, et selle tõstatas tolle aja üks väljapaistvamaid füüsikuid Yakov Zeldovich, kes oli hakanud uurima struktuuri väljakujunemist Universumis ja oli küsinud kord Jaanilt, kas ja kuivõrd oleks võimalik tema teooriaid kontrollida vaatlustega.

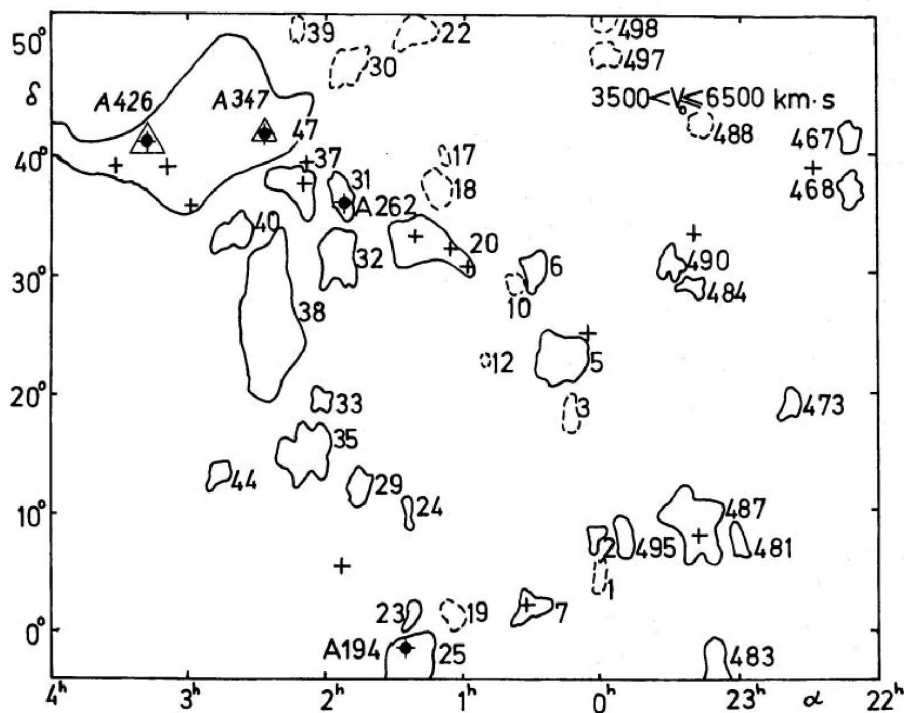
Universumi suuremastaabiline struktuur, praegu täiesti tavapärane termin, juurdus astronoomide seas vist alates 1977. aasta septembris Tallinnas toimunud Rahvusvahelise Astronoomialiidu sümpoosionist. See oli ka selle konverentsi pealkirjaks, ehkki konverentsi ettevalmistamise ajal ei olnud isegi veel teada, kas suuremastaabiline struktuur on üldse olemas. Konverentsi korraldamisega seotud tegevused võtsid Jaanil üsna palju aega. Sellel murrangulisel konverentsil selguski mitmetest sõltumatutest uuringutest (sh Jaan Einasto), et suuremastaabiline struktuur on olemas. Siiski, mitmed väljapaistvad uurijad olid ka ettevaatlikud, sest galaktikate ja nende parvede jaotuse 3D pilti oli keeruline saada. Tulemusi võisid mõjutada näiteks projektsiooniefektid, tõlgendaja subjektiivsus, galaktikatevaheline neeldumine. Jaan oli nii oma tööühma kui ka teiste tulemuste alusel siiski veendunud, et Universumi struktuur ei ole juhuslik. Suur struktuur koosneb parvedest, superparvedest, filamentidest ja erineva suurusega tühikutest (joonis 5). Praegu on see üldiselt aktsepteeritud seisukoht. Sellega seoses väärrib väljatoomist ajakirjas *Nature* ilmunud pikem ülevaateartikkel „Giant voids in the Universe“ (1982, autorid Yakov Zeldovich, Jaan Einasto, Sergei Shandarin). Artiklile on üle 400 viite ja neid lisandub jätkuvalt umbes kümnekond igal aastal.

Universumi struktuuri ja nn kosmilise võrgustiku omaduste uurimine on Jaan Einastol jätkunud seniajani. Esmajoones, kuivõrd mõjutab galaktikate arengut kosmilise võrgustiku suurem või väiksem keskkond ja kuivõrd see, milliste algtingimustega ja lähiümbrusega nad tekkisid? Sarnane sõnastus on paljudele erineva valdkonna teadlastele huvipakkuv küsimus – kuivõrd mõjutavad nende uurimisobjekti arengut algtingimused (nt geenid) ja kuivõrd keskkond (naabertaimed, laiem populatsioon, koolikeskkond jne).

Kokkuvõtteks

Nüüd võib lugeja proovida taas vastata küsimusele, kas Jaan Einasto on tegelenud kogu elu sama teemaga või on tegelenud erinevate teemadega?

Nagu kõikidel teadlastel ei ole ka Jaanil (ega ka mitte ühelgi teisel kosmoloogil) tumeda aine ja Universumi struktuuri uurimisel läinud kõik sujuvalt. Paratamatult on alati olemas tagantjärele tarkusega nii õigeid suundi kui ka tupikuid. See lihtsalt on astrofüüsika ja kogu teaduse olemus. Näiteks oli aeg, mil arvati, et tumeda aine osakesed on neutriinod. Kuid see ei ühtinud hästi vaatlustega ning võis küsida, kes eksib? Praegu teame, et tumeda aine osakesed on nn külmad osakesed. Pidevad



Joonis 5. Joonis 1980. aastal ilmunud artiklist (autorid Jaan Einasto, Mihkel Jõeveer, Enn Saar). Joonisel on kujutatud galaktikate parvede jaotus Perseuse taevapiirkonnas kitsas radiaalkiiruste (st kauguste) vahemikus. Kitsas radiaalkiiruste vahemik on vajalik, et kaugemad parved ei projekteeruks uuritavatele parvedele peale. On näha, et parvede jaotus on ebahühtlane, näha on parvede suuremaid koondumisi, ahelaid, aga ka tühikuid.

otsingud ja ekslemised on olnud selle ümber, millised matemaatilised meetodid on sobivaimad struktuuri otsimiseks ja kirjeldamiseks. Oli ka küsimus, kui palju seda tumedat ainet globaalselt on. Kuna 1980-ndate aastate keskpaigaks oli teada, et Universum on tasane (inflatsiooniline paisumine oli juba aktsepteeritud), siis pidi kogutihedus olema üsna võrdne kriitilise tihedusega ning tumedale ainele jäi 95%. Sellest lähtuti, kuid nii suurt kogust tumeainet oli raske siduda vaatlustega. Taas tekkis küsimus, kes eksib? Praegu teame, et aine-energia bilansis tuleb tervelt 70% eraldada hoopis tumedale energiale. Selliseid ekslevaid rännakuid on teaduses palju ning kohati see ongi ka teaduse võlu. Nii et vaevalt on sellised ekslemised Jaan Einastole suurt meelehärmi teinud.

Sissejuhatuses kirjutasin, et huvitav, mida ja millist aega peab Jaan Einasto oma elus ise kõige tähtsamaks ja huvitavamaks. Võib olla ta kirjutab sellest millalgi Tähetorni Kalendrisse.

Õnnitleme Jaan Einastot tema 95. sünnipäeva puhul ja meenutame rõõmuga ka 50 aastat ajakirjas *Nature* tumeaine artikli ilmumisest!



P. Tenjes: Foto 2. Jaan Einasto ja James Peebles 2014. aasta sügisel Yale'i Ülikoolis Gruberi auhinna tseremoonial. Teemaks nagu ikka galaktikad, nende teke ja Universumi struktuur. Foto: Maret Einasto.



P. Tenjes: Foto 3. Jaan Einasto 25. augustil 2023. aastal Tartu Ülikooli rektori Toomas Asseri inaugureerimispeol. Foto: Andres Tennus/Tartu Ülikool.