

---

# DIALOOGID KOSMILISE VÕRGUSTIKU KUDUMISEST

*Jaan Einasto,  
Gert Hütsi,  
István Szapudi,  
Peeter Tenjes*

*Tõlkinud Jaan Einasto*

## SAATEKS

Kosmoloogia on viimase sajandi jooksul kujunenud teaduseks, mis uurib universumit tervikuna. Tähtede ja galaktikate füüsika ning kosmoloogia arenesid alguses küll paralleelselt, kuid mõnevõrra iseseisvalt. Nende valdkondade lähenemine teineteisele ning vaatlusliku kosmoloogia esiletõus 1950. aastatel tõi kaasa plahvatusliku, hiljem eksponentsiaalse arengu, mida näitab ka joonisel 1 kujutatud teadusartiklite arvu kasv. Viimastel aastatel näib kosmoloogia olevat jõudnud küpsusfaasi:

---

**Dialoogid on osa Jaan Einasto, Gert Hütsi, István Szapudi ja Peeter Tenjese monograafiast *Spinning the Cosmic Web* (Singapore: World Scientific Publishing, 2026). Avaldame autorite ja kirjastuse nõusolekul.**

hoolimata selliste uuringute nagu SDSS,<sup>1</sup> Planck,<sup>2</sup> eBOSS,<sup>3</sup> JWST<sup>4</sup> ja Euclid<sup>5</sup> tohutust andmemahust on artiklite arv stabiliseerunud.

Matemaatiliste, füüsikaliste ja vaatluslike kosmoloogiaharude ühendamise algas 20. sajandi keskel. 1960. aastatel löid Robert Dicke Princetonis, Dennis Sciama Cambridge'is ja Jakov Zeldovitš Moskvas uued teoreetilise kosmoloogia keskused, kus universumi protsesse käsitleti füüsikaliste, mitte pelgalt matemaatiliste nähtustena. Teoreetiline edu tugines suuresti uutele vaatlusmeetoditele ja -seadmetele. 20. sajandi lõpus lisandus hulk 10-meetrise ja suurema läbimõõduga teleskoobe ja kosmoseobservatooriume, mis kiirendasid vaatlusliku kosmoloogia arengut veelgi. Nii tekkisid teadmised, millest said tänapäeva kosmoloogia vaatluslikud nurgakivid: universumi kiirenev paisumine, tumeaine ja kosmilise võrgustiku avastamine, galaktikate varajaste arengu- ja faaside uurimine ning arusaam, et universumi arengus pidi olema inflatsiooniperiood.

---

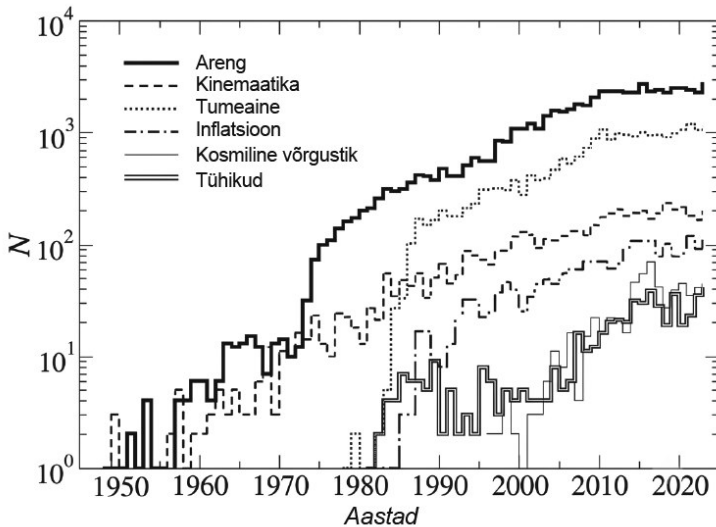
<sup>1</sup>*Sloan Digital Sky Survey* (Sloani digitaalne taevauuring) — pildistamis- ja spektroskoopiline punanihkeuuring 2,5-meetrise lainurkooptilise teleskoobi abil USAs New Mexicos asuvas observatooriumis. Projekt algas 2000. aastal ja sai nime peamise rahastaja Alfred P. Sloani Fondi järgi. *Siin ja edaspidi toimetuse märkused, kui pole öeldud teisiti.*

<sup>2</sup>Euroopa Kosmoseagentuuri hallatud Plancki kosmoseteleskoop tiirles aastatel 2009–2013 Maast umbes 1,5 miljoni kilomeetri kaugusel ning mõõtis suure täpsusega Suure Paugu jäänukkiirgust ehk kosmilist mikrolaine-taustkiirgust. Saadud andmed aitasid määrata universumi vanuseks 13,8 miljardit aastat, täpsustada tavalise aine, tumeaine ja tumeenergia vahet ja kinnitada universumi kiireneva paisumise mudelit.

<sup>3</sup>*Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* (barüonide võnkumise laiendatud spektroskoopiline uuring) — SDSS-uuringu osa, mis toimus aastatel 2014–2020 ja mille käigus tehti kindlaks enam kui nelja miljoni galaktika ja kvasari asukoht.

<sup>4</sup>James Webb Space Telescope (James Webbi kosmoseteleskoop) — 2021. aastal kosmosesse viidud suurim omataoline kosmoseobservatoorium. Töötab infrapunalaanelas ja suudab seepärast näha tunduvalt kaugemale ajas tagasi ning uurida esimeste galaktikate ja tähtede tekkimist ja arengut. Teleskoop nimetati NASA teise peadirektori James E. Webbi järgi.

<sup>5</sup>Euroopa Kosmoseagentuuri eestvedamisel ehitatud kosmoseteleskoop, mis alustas tööd 2023. a. Eesmärk on mõõta universumi paisumist, et selle kaudu paremini mõista tumeenergia ja tumeaine olemust.



Joonis 1. Kosmoloogia teemasid käsitlevate artiklite arv aastast (Einasto 2024).

Kosmoloogia valdkondade osakaal uurimistöös muutus kiiresti. Artiklite arvu poolest tõusis esikohale galaktikate areng, sellele järgnesid tumeaine, kinemaatika ja inflatsioon. Kosmoloogide kogukond võttis omaks mitmed alguses kõrvalise või radikaalsena tundunud ideed, nagu tumeaine, kosmiline võrgustik ja inflatsioon.

Galaktikad sünnivad ja arenevad kosmilises keskkonnas — kosmilises võrgustikus — ning nende arengut mõjutab tumeaine. Seetõttu tuleb galaktikate kujunemist vaadelda koos kosmilise võrgustiku arenguga. Raamat *Spinning the Cosmic Web*, millest allolevad dialoogid on tõlgitud, käsitleb seda keerukat probleemi esmakordselt peamiselt vaatluslikust vaatenurgast, mida täiendavad arvulised simulatsioonid ja teoreetiline analüüs. Vaatlused, simulatsioonid ja teooria annavad küll ebatäiusliku, kuid praegu kõige selgema pildi galaktikate arengust kosmilises võrgustikus. Raamatus keskendume võrgustiku globaalsetele omadustele ning arutleme selle komponentide — galaktikate ja galaktikasüsteemide — arengu üle oma keskkonnas.

Varasemates õpikutes on kosmoloogiat ja galaktikate füüsikat käsitletud eri teadusvaldkondadena. Meie lähenemine on valdavalt em-

piiriline: võrdleme vaatlusandmeid kosmilise võrgustiku ja galaktikate arengu simulatsioonidega. Otsustasime käsitleda galaktikate kujunemist kosmoloogia osana, sest galaktikad tekivad ja arenevad kosmilises võrgustikus. *Spinning the Cosmic Web* on nüüdisaegse kosmoloogia õpik, mis keskendub vaatlusandmetele ning kasutab vaid elementaarset matemaatikat ja statistikat. Erinevalt varasematest bakalaureusetaseme õpikutest käsitleme siin ka mittelineaarseid nähtusi, eriti galaktikaparvede, filamentide ja tühikute võrgustikku. Esmakordselt saavad tervikliku käsitluse protsessid, mis toimuvad väga erinevatel skaaladel — alates universumi suurimast struktuurist kuni galaktikate ja nende populatsioonide kujunemiseni. Vaatluslik lähenemisviis võimaldab esile tõsta sageli alahinnatud seost galaktikate ja tumeaine halode vahel,<sup>6</sup> mis moodustavad kosmilise võrgustiku ning on võtmetähtsusega galaktikate ja tumeaine jaotuse vahelise seose — *bias*'i — mõistmisel.

Pärast lühikest ülevaadet nüüdisaegsest kosmoloogilisest paradigmat ajaloolises kontekstis käsitleme tänapäevaseid vaatlusandmeid universumi ja selle koostisosade kohta. Raamat koosneb kümnest peatükist: esimene pool keskendub kosmilisele võrgustikule, teine pool galaktikatele ja nende arengule võrgustiku sees. Lähtume arusaamast, et tumeaine ja tumeenergia on universumi ainelises ja energeetilises sisus peamised komponendid ning et galaktikad ei paikne juhuslikult, vaid moodustavad kosmilise võrgustiku.

Enamikule peatükkidele oleme lisanud platonlikus vaimus dialoogid, mis eristavad seda raamatut tavapärastest füüsikaõpikutest. Kuigi dialoogide kirjutamine on ajamahukas ja ebatavaline, aitab see hoida lugeja mõtte kosmoloogial. Dialogid täidavad kahekordset eesmärki: nad avavad teemade mitmesuguseid külgi ning lisavad tiheda teadusteksti vahele veidi kergust. Inspiratsiooni saime muu hulgas Douglas Hofstadteri teosest *Gödel, Escher, Bach* (Hofstadter 1999).

Dialogides on kolm tegelast:

Callistus — vanamoeline professor, kellele meeldivad alternatiivsed mudelid ja ladinakeelsed sententsid, kes on pedantne ja akadeemiline, kuid üllatavalt avatud uutele ideedele.

---

<sup>6</sup>Tumeaine halo (ka galaktiline koroona) — hiigelsuur nähtamatu massi piirkond, mis ümbritseb ja läbib galaktikaid. See moodustab kuni 90% galaktika kogumassist.

Rhea — peagi tenuuri saav abiprofessor, kes toetab kooskõlamudelit, eelistab MONDi<sup>7</sup> üldrelatiivsusteooriale ja on salaja Taylor Swifti austaja.

Ariel — sotsiaalselt tundlik doktorant, kelle ees seisavad suured valikud nii teaduses kui ka elus ja kelle keelepruuk on selgelt Z-põlvkonna<sup>8</sup> oma.

Raamatus jälgime, kuidas see kolmik arutab kosmilisi küsimusi, vaidleb, lepib, õpib üksteiselt ning kuidas selle liikmed kasvavad nii teadlaste kui ka inimestena.

*Akadeemia* tarbeks on tõlkimiseks valitud vaid dialoogid, seega on vormiliselt tegemist näidendiga. Tõlkimisel on kasutatud tehisaru abi, mis võimaldas võrrelda erinevaid variante ja arvestada tegelaste iseloomu. Ülevaate kogu raamatust saab Laurits Leedjärve arvustusest eelmise ajakirjanumbri lõpuosas.

Jaan Einasto

## KLASSIKALINE KOSMOLOOGIA PARADIGMA

*Hämar, raamatutest tulvil kabinet. Professor Callistus on mõtetes kaugel. Tema juhendatavad — doktorant Ariel ja abiprofessor Rhea — istuvad tema vastas. Ootavad. Lõpuks kritseldab Callistus märkmikku mõned read ja tõstab pilgu.*

CALLISTUS: Kas te olete kunagi mõelnud, miks öötaevas on pime?

ARIEL: Päike on ju loojunud. Kas me tulime siia arutama tühiasju või tungima universumi saladustesse?

---

<sup>7</sup>*Modified Newtonian dynamics* (modifitseeritud newtonlik dünaamika) — teooria, milles Newtoni seadusi on veidi muudetud, et selgitada mitmesuguseid galaktikate vaadeldud omadusi. Teooria töötas välja ja tutvustas seda 1983. a Iisraeli füüsik Mordehai Milgrom.

<sup>8</sup>Z-põlvkonna hulka kuuluvaks peetakse neid, kelle sünniaasta jääb laias laastus vahemikku 1990. aastate keskpaigast 2010. aastate alguseni.

*Rhea ei suuda enam vaiki olla.*

RHEA: Mõtle tähtedele. Kas need ei peaks öötaevast valgustama?

ARIEL: Valgustavadki, aga tähed on Päikesest palju kaugemal.

Seepärast on nende valgus äärmiselt nõrk, välja arvatud mõned kõige lähemad tähed.

CALLISTUS: Väga hea. Aga kui palju tähti üldse on? Kujutlege universumit, mis on tähti täis.

RHEA: Mõtle Päikese peale. See on täiesti tavaline täht.

ARIEL: Hästi. Kui meie Päike on tüüpiline ja universum on täis Päikese-sarnaseid tähti, siis sfääris kaugusel  $r$  kasvab tähtede arv võrdeliselt  $r^2$ -ga, samal ajal kui nende heledus kahaneb võrdeliselt  $1/r^2$ -ga. Seega...

RHEA: Iga sfääri kogukiirgus peaks olema sama.

CALLISTUS: Just. Tundub, et lõpmatud sfäärid annaksid kokku lõpmatu heleduse.

RHEA: Tähti peotäite kaupa.

ARIEL: Muidugi — kui me vaatame ühte tähte, varjab see enda taga olevate tähtede valguse. Ja ometi viib see mind valesalt, kuid ilmselt valele järeldusele, et öötaevas peaks olema ühtlaselt ere. Kui meie Päike on tüüpiline täht, kas öö peaks siis olema sama ere kui otse Päiksesse vaadates? Hullumeelne mõte.

CALLISTUS: Seda nimetatakse...

RHEA: Olbersi paradoksiks.<sup>9</sup>

CALLISTUS: Just see ongi meie tänase arutelu teema.

*Ta vaatab aknast välja. Päike hakkab loojuma.*

CALLISTUS: Aga ometi on öötaevas pime. Milles asi?

RHEA: Vähemalt üks meie eeldustest peab olema vale. Vähemalt üks.

---

<sup>9</sup>Olbersi paradoks ehk fotomeetriline paradoks ongi siin esitatud astronoomiline küsimus: miks on öine taevast pime, kui universum on lõpmatu ja täis tähti? Saanud nime Saksa astronoomi, arsti ja füüsiku Heinrich Wilhelm Olbersi (1758–1840) järgi.

ARIEL: Ma tean, et universum ei ole tähtedega ühtlaselt täidetud. Meie galaktikal on serv ja tähtede arv seal väheneb.

RHEA: Külm. Sa võid sama argumendi uuesti läbi mängida, asendades tähed galaktikate ja kvasaritega.<sup>10</sup>

ARIEL: See pole vähemalt nii hullumeelne. Öötaevas peaks siis olema sama ere kui lähim galaktika. Aga see ei kõla lahenduse moodi. . . Universum paisub, nii et kaugetelt tähtedelt meieni jõudev valgus nihkub Doppleri efekti<sup>11</sup> tõttu spektri punasesse ossa, väiksema energia poole. Kaugemate kihtide panus on järjest väiksem.

RHEA: Soe.

CALLISTUS: Just, te liigute õiges suunas. Aga mis te ütlete aja kohta?

ARIEL: “Aja kohta”? See tobe ajarännufilm.<sup>12</sup> Vahel ma tõesti tarbin sellist kergemat kraami, aga. . .

RHEA: Kui kaua võtab valgusel aega, et meieni jõuda?

ARIEL: Valguse teekonna kestus on võrdne vahemaa ja valguse kiirusega jagatisega. . .

CALLISTUS: Ja edasi?

ARIEL: “Suure Paugu teooria”!<sup>13</sup> (*Laulab.*) “Kogu meie universum oli kuumas tihkes olekus. . .”.<sup>14</sup> Paisumine algas ligikaudu 14 miljardit aastat tagasi, oodake. . .

---

<sup>10</sup>Kvasarid — massiivsete galaktikate keskmes paiknevad kokkusu-  
rutud alad, mis ümbritsevad sealseid ülimateid musti auke.

<sup>11</sup>Doppleri efekt avaldub selles, et heli- või elektromagnetlainet  
tajuva sagedus sõltub laineallika ja vastuvõtja liikumise kiirusest ja suu-  
nast. Kui allikas ja vastuvõtja lähenevad teineteisele, siis tajutav sagedus  
suureneb ja vastupidi.

<sup>12</sup>Richard Curtise 2013. a film “About Time” linastus meil pealkirja  
all “Ainult aja küsimus”.

<sup>13</sup>USA teleseriaal originaalpealkirjaga “The Big Bang Theory”; oli  
eetris aastatel 2007–2019.

<sup>14</sup>Seriaali tunnuslaulu “The History of Everything” (Kõige ajalugu)  
algussõnad Kanada ansamblist Barenaked Ladies.

RHEA: Pigem umbes 13,7 miljardit. Valgus jõuab meieni ainult lõpliku raadiusega sfäärist, mis vastab universumi vanusele — see ongi universumi nähtav osa.

CALLISTUS: Meie osakeste horisont. Kogu universum võib olla palju suurem. Mina isiklikult oleksin valmis kihla vedama, et ta ongi suurem. . . Me võime seda ette kujutada, eriti kui oleme filosoofid, kuid füüsikutena ei saa me vaadelda midagi, mis jääb horisondi taha.

ARIEL: Aga tahhüonid?<sup>15</sup>

*Rhea vaatab kella.*

RHEA: Aga “Hot Tub Time Machine”?<sup>16</sup>

ARIEL: See film on vähemalt lõbus.

RHEA: Just. Film. Aga tuleme nüüd tagasi reaalsusse ja võtame kokku meie ühiselt juhendatud arutelu, mis kindlasti säästis professor Callistuse aega. . . aga kas mina ikka pean selleks siin olema?

CALLISTUS: Absoluutselt — sinu panus on ülioluline ja sa saad väärtuslikku õpetamiskogemust.

*Rhea pööritab silmi.*

RHEA: Kas me jätkame neid ühiseid arutelusid koos või teeme eraldi?

CALLISTUS: Tunnista üles, et see meeldis sulle. Mulle küll meeldis.

ARIEL: Jummel küll. Missugune pinge! Väga lõbus. Te peaksite selle TikTokki panema. See läheks kohe viraalseks.

CALLISTUS: Mis asi on tik-tok? Mingi millenniumi släng. . . aja kohta?

ARIEL: Eiii, ma olen *Gen. Z.*<sup>17</sup> Ma selgitan TikTokki hiljem.

---

<sup>15</sup>Hüpoteetilised elementaarosakesed, mis liiguvad vaakumis kiiremini kui valgus. Erinevalt tavalistest osakestest tahhüoni kiirus energia vähenedes suureneb, mistõttu ühelgi tahhüonil ei olegi võimalik valgusest aeglasemalt liikuda, sest see nõuaks lõpmatul hulgal energiat.

<sup>16</sup>Steve Pinki 2010. a ulmekomöödiafilm (Kuumaveevannist ajamasin), linastus meil pealkirja all “Mullivanniga minevikku”.

<sup>17</sup>S.t Z-põlvkonna liige.

RHEA: Püsime teemas.

ARIEL: Ma arvan, et peaksime neid sessioone jätkama.

RHEA: Ma mõtlen Olbersi paradoksi.

ARIEL: Täna õppisin, et öötaevas on pime, sest universum paisub ja on lõpliku vanusega. Iga kauge kiht horisondi sees annab punanihke<sup>18</sup> tõttu järjest vähem valgust.

CALLISTUS: Ja ometi — kui te vaatate seda uskumatut James Webbi kosmoseteleskoobi pilti, siis on see peaaegu nagu tapeet täis kauneid galaktikaid. Olbersi unistus. Sain need andmed alles eile õhtul.

*Näitab ekraanil hämmastavat JWST pilti (vt joonis 2).*

ARIEL: Võimas!

RHEA: Tegelikult laadisin mina selle alla. *Meie andmed.*

CALLISTUS: Seda sa tõesti tegid. Täna sind. Peaurijana.

RHEA: Mina kirjutasin taotluse.

CALLISTUS: *Cedo maiori.*<sup>19</sup> Ariel, kas te tahaksite mind andmete töötlemisel abistada?

ARIEL: Hm. Võib-olla. Mõni. Teine. Kord. Tik. Tok.

*Ariel lahkub.*

CALLISTUS: Nii. Mu salajane missioon oligi nad meie tegemistest huvituma panna.

RHEA: Miks sa üldse alustasid Olbersi paradoksist? Kosmoloogiline printsiip<sup>20</sup> on ju palju fundamentaalsem.

CALLISTUS: Olbersi paradoks on käegakatsutav asi. Kosmoloogiline printsiip on nii keeruline. Isegi selle selge defineerimine libiseb mul käest.

---

<sup>18</sup>Kosmoloogiline punanihe — spektrijoonte nihkumine suuremate lainepikkuste poole ruumi paisumise tõttu.

<sup>19</sup>“Annan vanemale (kogenumale) järele” (Martialis). *Tlk.*

<sup>20</sup>Üks nüüdisaegse astrofüüsika aluspostulaate: piisavalt suures mastaabis (alates umbes 100 megaparsekist) on universum igas suunas isotroopne (vaatleja jaoks igas suunas ühesugune) ja homogeenne (kõikjal ruumis ühesuguse keskmise ainejaotusega). Megaparsek (miljon parsekit; tähis Mpc) on pikkusühik, mis võrdub umbes 3,26 miljoni valgusaastaga ehk umbes  $3,086 \times 10^{22}$  meetriga.



Joonis 2. James Webbi kosmoseteleskoobiga tehtud foto. Esiplaanil nähtav galaktikaparv SMACS 0723 asub meist nelja miljardi valgusaasta kaugusel, punanihkel 0,39. Parve tumeaine halo moonutab kaugemate galaktikate valgust, muutes need näivalt kaarduvaks (NASA arhiiv).

RHEA: Universum on homogeenne ja isotroopne. Kuidas oleks sellise definitsiooniga?

CALLISTUS: Jah, aga mitte miski meie ümber pole homogeenne ega isotroopne. Vaata seda pilti: galaktikad moodustavad kosmilise võrgustiku — parved, seinad, filamendid, tühi-  
kud...

RHEA: Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus<sup>21</sup> on üsna isotroopne.

CALLISTUS: Kui me fluktuatsioonide eirame.

RHEA: Hästi, universum on statistiliselt homogeenne ja isotroopne. Suures skaalas.

CALLISTUS: Ent iga tühik või parv on tohutu fluktuatsioon. Ja kui suur see “suur skaala” siis olema peab?

RHEA: Enamik meist ütleks, et umbes sada megaparsekit või rohkem. Ma tunnistan, et ka selles skaalas jäävad alles väikesed fluktuatsioonid.

CALLISTUS: Just. Kuidas ma kõiki neid mööndusi tudengitele selgitan? Me vajame konkreetset mudelit — näiteks sinu lemmikut, kooskõlamudelit  $\Lambda$ CDM<sup>22</sup> —, et arutada oodatavaid fluktuatsioonide ja võrrelda neid vaatlustulemustega ning kontrollida homogeensust ja isotroopsust. Isegi eksperdid vaidlevad üksikasjade üle.

RHEA: Aga mis siis, kui me lähtume Kopernikust? See aitab aru saada, et me ei asu universumis mingil erilisel kohal.

CALLISTUS: Tõsi, aga me ei pea erilisel kohal olema ka siis, kui universum on ebahürtlane — nagu näiteks mõnes üldrelatiivsuse Bianchi mudelis<sup>23</sup>. . . Ma nõustun siiski, et kosmoloogiline printsiip kasvas välja Koperniku ideest, isegi kui need kaks pole identsed.

---

<sup>21</sup>Hiljem siin tekstis sageli ka lühendina CMB — *Cosmic Microwave Background*. Tegu on universumit täitva reliktkiirgusega, mis on jäänud Suurest Paugust. Kosmoloogias on CMB-l keskne roll, sest selle temperatuuri- ja polarisatsioonikõikumised annavad infot universumi vanuse, koostise ja tekke kohta.

<sup>22</sup>1990. aastate lõpus välja kujunenud kosmoloogiline mudel, mis kirjeldab universumi arengut alates Suurest Paugust ning mille peamised komponendid on kosmoloogiline konstant  $\Lambda$  (seotud tumeenergiaga), oletatav külm tumeaine (*cold dark matter*) ja tavaaine.

<sup>23</sup>Bianchi kosmoloogilised mudelid, mida on arvult üheksa, kujutavad homogeenset, kuid anisotroopset, s.t igas suunas ise kiirusega paisuvat aegruumi. Nimetatud Itaalia matemaatiku Luigi Bianchi (1856–1928) järgi.

RHEA: Ja kui me juba räägime statistilisest isotroopsusest ja homogeensusest, siis peame mainima ka mittegaussilikust.<sup>24</sup>

CALLISTUS: Näed? Me võime lihtsa Gaussi mudeli põhjal järeldada, et universum on anisotroopne — ja hiljem avastada, et ta on täiesti kooskõlas statistilise isotroopiaga mittegaussiliku mudeli korral, millel on suurem dispersioon.

RHEA: Me võime anisotroopsuse segi ajada mittegaussilikkusega ja vastupidi. Teisisõnu: need ideed võivad alustuseks liiga keerulised olla.

CALLISTUS: Aga ma olen nõus, et kosmoloogiline printsiip on fundamentaalne eeldus, mida peame varakult mainima — isegi kui me ei saa seda täpselt määratleda keerukamaid mõisteid kasutamata.

RHEA: Neid käsitleme hiljem, olgu selleks üldrelatiivsus või kosmoloogiline kooskõlamudel  $\Lambda$ CDM. Algusest peale on oluline rõhutada, et kosmoloogiline printsiip on eeldus, mida tuleb pidevalt kontrollida.

CALLISTUS: Suurepärane plaan. Tutvustame seda vaistlikul tasemel ja tuleme selle juurde tagasi hiljem, kui tudengid on saanud maigu suhu kosmilisest võrgustikust, mittegaussilikkusest, üldrelatiivsusest jne. Sina võid välja töötada detailid.

RHEA: Mis mõttes?

CALLISTUS: Kuna sina selle teema tõstatasid, siis on õiglane, et lasen sul selle ka lahendada.

RHEA: Jah, muidugi. Saan aru. Nüüd aga meie JWST andmete juurde... Ma tean, et pean neid töötleva.

CALLISTUS: Sest sa armastad andmeid töödelda ja oled selles vilunud. Mul oleks hea meel, kui Ariel sind aitaks... aga eks ma teen seda siis ise. Enne kui alustame — ma just tai-

---

<sup>24</sup>Mittegaussilik on jaotus, mis erineb klassikalisest kellukesekujulisest Gaussi ehk normaaljaotusest ja on vahel tugevalt ebasümmeetriline, andes tunnistust haruldastest äärmuslikest sündmustest.

pasin, et me pole arutanud täiuslikku kosmoloogilist printsiipi, mis on ümber lükatud. . .

RHEA: Hakkame pihta! Kohe!

*Callistus ohkab ja istub Rhea kõrvale. Nad hakkavad tööle.*

## UNIVERSUMI TEKE JA ARENG

RHEA: Kas sa suudad uskuda, et mõnele inimesele ei meeldi Suure Paugu teooria?

ARIEL: Ma tean. See on mu lemmiksari.

RHEA: Ei! Ma räägin püsiseisundi teooria<sup>25</sup> pooldajatest.

*Siseneb professor Callistus.*

CALLISTUS: Vabandust hilinemise pärast. Õppejõudude koosolek. Nii igav. . . aga ma näen, et te arutate üht mu läbikukunud lemmikteooriat.

RHEA: Uskumatu.

ARIEL: Ma saan aru, miks telesari pealkirjaga “Püsiseisundi teooria” ei müüks. Nii et ma eeldan, et see pole sari.

RHEA: Universum paisub ja seetõttu selle tihedus väheneb ning temperatuur langeb. Vanasti oli universum kuumem ja tihedam. Kui ekstrapoleerida tagasi lõpmatu tiheduseni. . .

ARIEL: Suure Pauguni!

CALLISTUS: *Kuuma Suure Pauguni.* Mõned ütlesid, et Suur Pauk algab alles pärast inflatsiooni, kui universum uuesti kuumeneb.

RHEA: See on  $10^{-32}$  sekundi detail.

CALLISTUS: Tegu on põhimõttelise erinevusega, aga jätka.

RHEA: Püsiseisundi teooria ütleb — ja see pole tahtlik sõnamäng —, et universumi tihedus ja temperatuur on püsivad.

---

<sup>25</sup>1948. a esitatud kosmoloogiline mudel, mille järgi universum küll paisub pidevalt, kuid säilitab oma keskmise tiheduse, sest ainet tekib kogu aeg spontaanselt juurde. Mudeli aluseks oli nn täiuslik kosmoloogiline printsiip, mis ütleb, et universum on kõigil aegadel olnud ja on ka tulevikus igalt poolt vaadatuna ühesugune. 1960. aastateks olid astronoomilised vaatlused selle teooria kummutanud.

ARIEL: See pole võimalik, välja arvatud juhul kui... ainet eimil-  
lestki juurde luuakse!

CALLISTUS: See polegi nii hullumeelne, kui esmapilgul tundub.  
Kui universum on ruumis ja ajas homogeenne ja isotroop-  
ne, siis ta järgib täiuslikku kosmoloogilist printsiipi...

RHEA: ...ja vesiniku aatomid ilmuvad sõna otseses mõttes ei-  
millestki.

CALLISTUS: Neid ilmub õige vähe. Hermann Bondi ja Thomas  
Goldi (1948) järgi “kõige rohkem üks prootoni massiga  
osake liitri kohta iga  $10^9$  aasta jooksul”! Kas sa suudak-  
sid seda vaadelda?

RHEA: Selle jätan ma sulle. Aga kosmilise mikrolaine-taustkiir-  
guse...

CALLISTUS: Jah. On mitmesuguseid variante, nagu kvaasi-  
püsiseisund<sup>26</sup> ja tsükliline universum<sup>27</sup>...

RHEA: Ja kõik need on arvukate vaatlustega ümber lükatud.  
Meeldib see meile või mitte — universum muutub. Nii ajas  
kui ka ruumis.

CALLISTUS: Õige. Meie valdkonnas võidavad vaatlusandmed  
alati ilu. Aga on intrigeeriv kujutleda, et loomine kulgeb  
tasapisi, peaaegu märkamatult, selle asemel et... PÕMM!

RHEA: Suur Pauk!

ARIEL: Nii et nüüdisaegses Suure Paugu teoorias algas univer-  
sum inflatsiooniga, kuumenes uuesti — ja seda võibki pi-  
dada Suureks Pauguks? Aga mis saab tulevikust? Kuidas  
universum lõpeb?

---

<sup>26</sup>1993. a püstitatud teooria, mille järgi universum on igavene ning  
sel puudub üks ja ainus algus; paisuva universumi keskmine tihedus  
püsib konstantsena, sest ainet luuakse juurde teatud aja järel toimuvates  
lokaalsetes plahvatuslikes sündmustes, nn mini- ehk väikestes pauku-  
des.

<sup>27</sup>Tsüklilise universumi teooria järgi eksisteerib universum tsüklite-  
na, millest igaüks algab suure pauguga ning hõlmab paisumist ja sellele  
järgnevat kokkutõmbumist.

CALLISTUS: Me saame vaadelda universumi minevikku, kuid selle tuleviku üle võime ainult spekuloida. Paistab, et me elame ajastul, mil tumeenergia hakkab tumeainet ületama.

RHEA: Tulevik on helge ja pimestav. Ei. Universum paisub eksponentsiaalselt ja astronoomid kauges tulevikus — kümnete miljardite aastate pärast — ei näe enam ühtegi Galaktika-välist objekti.

ARIEL: Universum algab inflatsiooniga ja lõpeb inflatsiooniga. Päris poeetiline.

CALLISTUS: See on Suur Rebenemine — ja ma pean seda samuti kõige tõenäolisemaks. Suur Kokkutõmme, vastupidine võimalus, kus universum kokku kukub, ei tundu eriti usutav.

RHEA: Lõpp on ilmselt lihtsalt üksik galaktika, kus tähed hääbuvad ja jahtuvad. Suur Rebenemine koos soojussurmaga. . . või Suur Jahtumine.

ARIEL: See on päris ilus.

CALLISTUS: Võiks hullem olla. Me võiksime kogeda vaakumi lagunemist ükskõik mis hetkel ja see faasisiire pühiks minema kogu universumi. *Causa mortis*.<sup>28</sup>

ARIEL: Ladina keeles ütlemine ei tee asja paremaks. Nagu mul poleks juba kliimamuutuse pärast piisavalt muret, nüüd võib ka kogu universum jalge alt kaduda.

CALLISTUS: Ühtki jalga teil alles ei jääks. Higgsi vaakum võib olla metastabiilne,<sup>29</sup> nii et see võib alata ükskõik kus ja ükskõik millal. Aga ärge muretsege, tõenäoliselt ei juhtu seda enne teie doktoriväitekirja kaitsmist.

---

<sup>28</sup>Lad “surma põhjus”. *Tlk*.

<sup>29</sup>Higgsi vaakum viitab universumit täitvale nähtamatule Higgsi väljale. Füüsikas ei ole vaakum mitte tühi ruum, vaid väikseima võimaliku energiaga olek. Universum võib teoreetiliselt asuda nn valevaakumis. See on stabiilne olek, kuid mitte väikseima võimaliku energiaga, s.t tegemist on metastabiilse olekuga. Teatud kvantprotsesside tulemusena võib Higgsi väli langeda nn tõelisse, väikseima energiaga vaakumisse, vallandades hävitava kosmilise laine, mis muudaks füüsikaseadusi ja teeks elu võimatuks.

RHEA: Ja kui juhtub, siis ei saa sa nagunii midagi teha.

ARIEL: Aitäh. Tundub, et peaksin ikkagi kliima soojenemisele keskenduma.

## TUMEAINE

RHEA: Ma tulin just oma elu kõige kurvemalt konverentsilt.

CALLISTUS: See suusakonverents, millest sa vaimustunult rääkisid?

ARIEL: Suusakonverents? Mul tekkis järsku tohutu soov kosmoloogiks hakata.

RHEA: See tähendab hommikusi ettekandeid, suusatamist, teadusjuttu tõstukis ja siis veel õhtusi ettekandeid. Kurnav, usu mind.

ARIEL: Keegi peab ju seda tegema. Ja mina olen täiesti valmis.

RHEA: Need paar tundi suusatamist olid küll suurepärased. Aga ettekanded... kõik tumeaine kindlakstegemisest. Või mittekindlakstegemisest. Üks geniaalne teadlane teise järel kirjeldab geniaalset eksperimenti, millega tuvastatakse...

CALLISTUS: Eimidagi. Aga kui keegi tuvastab, siis on see Nobel.

RHEA: Lühidalt — ma jäin ellu. Aga rohkem ma seda kaasa ei tee.

ARIEL: Järgmisel korral võid minu kaasa kutsuda.

CALLISTUS: Rhea norib alati mu kallal, et mul on kerge kaldumus alternatiivsete teooriate poole, aga tumeaine puhul on tal endal üsna ebatraditsiooniline maitse.

RHEA: Mitte päriselt, aga mulle meeldib MOND. Modifitseeritud newtonlik dünaamika.

ARIEL: Mis üldrelatiivsusteoorial viga on?

CALLISTUS: Teoorial, mis valitseb kõike!

RHEA: Seda kõike ei saa kvantida. Selleks on vaja igasuguseid fantaasiarikkaid lisandeid, nagu näiteks tumeaine ja tumeenergia — et üldse maailma seletada. Tumeaine? Meil on tõesti mingid kandidaadid, aga me ei tea, mis see on. Tume-

energia? Negatiivse rõhuga, käitub enam-vähem nagu vaakumienergia, ainult et umbes  $10^{-120}$  korda väiksema väärtusega. Meil pole aimugi, mis see on, ega isegi mitte õrna lootust seda otseselt tuvastada. Rääkimata inflatonist, hüpoteetilisest skalaarväljast.<sup>30</sup> Kõik need baroksed terminid moodustavad kokku... teadmatus grammatika.

CALLISTUS: Need on ka kõige põnevamad teaduse valdkonnad, kus saab päriselt midagi uut avastada.

ARIEL: Mis MONDis siis nii suurepärase on?

RHEA: See on lihtne ja intuiitiivne Newtoni gravitatsiooniseaduse modifikatsioon nendeks puhkudeks, kus kiirendus on väga väike.

CALLISTUS: Umbes  $10^{-20}$  m/s<sup>2</sup> — väga väike tõesti.

RHEA: Kas oled valmis? MOND seletab galaktikate pöörlemiskõverad ära ainult barüon- ehk tavalise ainega. Me ei pea eeldama mingit tundmatut ainet. Mõned suured elliptilised galaktikad sobivad MONDiga isegi paremini kokku kui  $\Lambda$ CDM-kosmoloogiaga.

CALLISTUS: Ma ei taha su entusiasmi jahutada, aga kuidas on lood Bulleti parvega?<sup>31</sup>

ARIEL: Ma olen lugenud, et selle nähtav ja gravitatsiooniline mass on teineteise suhtes nihkes. Kuidas me seda teame?

CALLISTUS: Taustvalgus paindub veidi suure massi lähedalt möödudes. Mass käitub nagu lääts — me nimetamegi seda

---

<sup>30</sup>Inflaton — hüpoteetiline elementaarosake, skalaarse inflatonvälja kvant, mis arvatakse olevat väga varases universumis põhjustanud kosmilise inflatsiooni ehk universumi paisumise. Skalaarväli on väli, mille igal punktil on üksainus konkreetne arvuline väärtus (erinevalt nt vektorväljast, mille iga punkti iseloomustab peale suuruse ka suund).

<sup>31</sup>Bulleti parv (ingl *bullet* — (püssi)kuul) — kahe pörkuva galaktika-parve süsteem, mis asub Maast umbes 3,7 miljardi valgusaasta kaugusel. Seda peetakse üheks kaalukaimaks vaatluslikuks tõendiks tumeaine olemasolu kohta, sest kokkupõrkel läksid tavalise aine (kuum gaas) ja tumeaine teed lahku: kuum gaas aeglustus ja jäi keskele lõksu, tumeaine läbis aga pörke peaaegu takistamatult ja jätkas liikumist. Parv sai nime oma väliskuju järgi, mis meenutab lendavat püssikuuli.

gravitatsiooniliseks läätseks. Läätsede tekitatud moonutuste põhjal saame rekonstrueerida massijaotuse. Bulleti parve puhul ei lange rekonstrueeritud ja nähtav massijaotus kokku. MOND ei suuda seda seletada. *Locus desperatus*.<sup>32</sup>

RHEA: Või vähemalt on selle seletamine väga keeruline. Mul on MONDi vastu siiski nõrkus.

CALLISTUS: Ja peabki olema. Eriti kui sa leiaksid laienduse, mis oleks kooskõlas Einsteini üldrelatiivsusega. Sellesse suhtuksin ma palju avatuma meelega.

ARIEL: Ma arvan, et seni peame elama tumeainega.

RHEA: Ja lootma, et keegi selle lõpuks avastab!

CALLISTUS: *Dum spiro, spero*.<sup>33</sup>

## INFLATSIOON

ARIEL: Professor, teie kiindumus alternatiivsetesse teooriatesse on hästi teada. Kas inflatsioonile on ka mõni alternatiiv?

CALLISTUS: Ma pakuksin välja... pörkuvad braanid?<sup>34</sup>

RHEA: Nüüd tabasid ta nõrka kohta. Inflatsioonile alternatiivi ei ole — see lahendab ära neli probleemi...

---

<sup>32</sup>Lad “lootusetu (kirja)koht” — tekstiosa käsikirjas, mida ei suudeta mõista ega parandada, sest originaaltekst on rikutud.

<sup>33</sup>Lad “Kuni hingam, loodan.” *Tlk*.

<sup>34</sup>Braan (sõnast ‘membraan’) ehk *p*-braan — stringiteoorias hüpoteetiline füüsiline objekt, mille mõõde *p* on väiksem kui selle ruumi mõõde, kus ta paikneb. Braan on punktosakese üldistus enamamõõtmeteliseks objektideks: punktosake on 0-braan, string 1-braan, membraan 2-braan.

ARIEL: Tasasusprobleemi,<sup>35</sup> horisondiprobleemi<sup>36</sup> ja monopooliprobleemi<sup>37</sup> ning annab algtingimused!<sup>38</sup>

CALLISTUS: Väga tubli, Ariel! Te olete oma kodutöö tõesti ära teinud. Ja Rheal on õigus: põrkuvad braanid — mingid hämarad kõrgemate dimensioonide pinnad stringiteooriast — ei asenda inflatsioonilist kosmoloogiat niipea. Kõigele lisaks polegi nad sellest nii erinevad, kui hakata võrrandeid kirjutama. Aga...

RHEA: Oota! Las ma naudin seda hetke. Mu naeratus on nagu inimesel, kes on võistluse võitnud.

*Callistus naeratab.*

CALLISTUS: Ma näen, et uus põlvkond on inflatsiooni suhtes üsna dogmaatiline. Kooskõlamudel on peaaegu ideaalne; seda toetavad paljud vaatlusandmed või lausa enamik neist.

---

<sup>35</sup>Tasasusprobleem viitab Suure Paugu teooria kitsaskohale: universumi püsimiseks stabiilse ja tasasena pidi algenergia tihedusel olema täpselt kindel väärtus ning väikseimgi kõrvalekalle oleks pidanud universumi viima tagasi kiire kollapsini või lõputu paisumiseni, kus energia tihedus oleks muutunud liialt väikseks, et saanuksid tekkida galaktikad jt suured kosmoloogilised struktuurid. Tasasus tähendab siin alustumist Eukleidese geomeetriaile: paralleelsed jooned ei lõiku ja ruumi kõverus on null.

<sup>36</sup>Horisondiprobleem ehk homogeensusprobleem on kosmoloogias küsimus sellest, miks universumi eri paigus — ka neis, mis jäävad üksteise suhtes  $n$ -õ horisondi taha, s.t kättesaamatusse kaugusse — on kosmiline taustkiirgus ühesuguse temperatuuriga, kuigi Suure Paugu algusest möödunud aeg ei tohiks olla piisav, et nende vahel oleks valguse kiirust arvestades saanud kunagi toimuda mingeid põhjuslikke interaktsioone. Esimesena juhtis sellele 1956. a tähelepanu Austria füüsikateoreetik Wolfgang Rindler (1924–2019).

<sup>37</sup>Monopooliprobleem seisneb selles, et suure ühendteooria kohaselt, mis kirjeldab ühtse skeemi järgi tugevat, nõrka ja elektromagnetilist vastastikmõju, pidanuks universumi alguses ülikõrgel temperatuuril tekkima tohutul hulgal massiivseid magnetmonopole (üheainsa magnetpoolusega osakesi), kuid seni pole ainsatki neist leitud.

<sup>38</sup>Algtingimusteks nimetatakse kosmoloogias universumi omadusi vahetult pärast Suurt Pauku. Need määrasid universumi hilisema kuju, aine jaotuse ja paisumise.

Aga mina kasvasin üles ajal, mil ringles palju rohkem mudeleid ja ideid. . .

RHEA: Ma ei ole dogmaatiline, ma lihtsalt ei raiska aega hulludele ideedele.

CALLISTUS: Välja arvatud siis, kui see on MOND — mis polegi nii hull idee. Ma olen lihtsalt avatud meelega. Kummalisel kombel on meie rollid vahetunud: mina peaksin olema to risev vana konservatiiv ja sina. . .

RHEA: Sa torised juba niigi.

ARIEL: Oo jaa. Paistab, et inflatsioon jääb siiski püsima.

### KOOSKÕLAKOSMOLOOGIA

CALLISTUS: Sa oled varajane!

RHEA: Tahtsin enne Arieli kohale jõuda, et me teda järgmise sessiooni ajal segadusse ei ajaks.

*Callistus muigab.*

CALLISTUS: Sa mõtled, et ei mingit Einsteini-Cartani gravitatsiooni,<sup>39</sup> ei mingit teleparalleelset gravitatsiooni. . .<sup>40</sup> aga kuidas jääb. . .

RHEA: Isegi mitte MONDi. Kuigi jah. . . MOND võib isegi veel talutav olla.

---

<sup>39</sup>Üks paljudest alternatiividest üldrelatiivsusteooriale. Aegruumi kõverus on selles peale massi seotud ka aine sisemise spinniga. See võimaldab vältida matemaatilisi lõpmatusi (singulaarsusi) mustade aukude keskmes. Teooria sõnastas 1922. a Prantsuse matemaatik Élie Cartan (1869–1951).

<sup>40</sup>1920. aastatel Albert Einsteini loodud üldine gravitatsiooniteooria, mille eesmärk oli ühendada omavahel elektromagnetism ja üldrelatiivsusteooria. Erinevalt viimati nimetatud teooriast, milles gravitatsiooni kirjeldab aegruumi kõverus, eeldatakse teleparalleelses gravitatsioonis nullilähedast kõverust. Gravitatsiooni põhjustajaks peetakse siin aegruumi väänet, milles geomeetrilised objektid säilitavad ruumis liikudes oma paralleelsuse.

CALLISTUS: Ma armastan üldrelatiivsust sama palju kui sina, aga kas sa ei arva, et oluline on tunda ka laiendusi, mis suudavad gravitatsiooninähtusi sama hästi kirjeldada?

RHEA: Ma kutsun appi Occami habemenoa!<sup>41</sup>

CALLISTUS: Kutsu pealegi, aga mina leian, et kalibratsiooni-teooriad<sup>42</sup> on lihtsamad ja paremini põhjendatud, nii et pelgalt lihtsusest mulle ei piisa.

RHEA: 99% kosmoloogidest kasutab üldrelatiivsust, ülejäänud kaaluvad lihtsamaid laiendusi, nagu MOND või modifitseeritud gravitatsiooniteooriad. Ainult mõned...

CALLISTUS: Minusugused valged varesed...

RHEA: Ei. Noh, tegelikult jah. Sina oled kastist-väljas-mõtleva, aga mina pidasin silmas matemaatilise hoiakuga inimesi...

ARIEL: Mis matemaatilise hoiakuga inimestel viga on? Kas nad polegi ägedad?

CALLISTUS: On või?

*Paus.*

RHEA: Mõnikord on matemaatika kiusatus, mis võib segama hakata. Oluline on keskenduda põhialustele.

CALLISTUS: Mis ongi meie tänane teema. Millised on looduse fundamentaalsed vastastikmõjud?

ARIEL: Tugev, elektromagnetiline, nõrk ja gravitatsioon.

RHEA: Ja sa panid need ritta tugevuse järgi kahanevas järjekorras: vastavalt 1,  $1/137$ ,  $10^{-4}$  ja  $10^{-38}$ .

ARIEL: Vau, gravitatsioon on ikka uskumatult nõrk, kui seda nii vaadata.

---

<sup>41</sup>Inglise frantsiskaani munga William Ockhami (ka Occam, u 1288–1347/1348) järgi nimetatud ökonoomsusprintsip, mille kohaselt võrdse seletusjõuga hüpoteeside vahel valides tuleks eelistada lihtsaimat.

<sup>42</sup>Need ütlevad, et füüsikaseadused ei muutu, kui süsteemi kirjeldavates matemaatilistes võrrandites teha teatud lokaalseid ehk koordinaatidest sõltuvaid sümmeetria- ehk kalibratsiooni teisendusi. Kalibratsiooni teooria on aluseks elementaarosakeste standardmudelile, kirjeldades osakeste interaktsioone tugeva, nõrga ja elektromagnetilise vastastikmõju toimetel.

CALLISTUS: Nii et millised neist jõududest on kosmoloogias olulised?

ARIEL: Ärge püüdkegi mind ninapidi vedada. Tugev ja nõrk jõud on lühikese mõjuraadiusega, seega ei saa nad kosmoloogilises skaalas olulised olla.

CALLISTUS: Elektromagnetiline jõud on ülim. Tänu sellele ei kuku me põrandast läbi.

RHEA: Väga naljakas. See on tõesti tugev, aga universum on...

ARIEL: Neutraalne! Positiivsed ja negatiivsed laengud tühistavad üksteise mõju. Seega valitseb suures skaalas kõige nõrgem jõud — gravitatsioon!

RHEA: Nojah, sest see on gravitatsioon.

CALLISTUS: *Ubi concordia, ibi victoria*.<sup>43</sup> Ja gravitatsiooni-teooria on...

RHEA: MOND... Ma tean, sa tahad, et ütleksin Einsteini üldrelatiivsust!

CALLISTUS: ...geomeetria ülim ilu, koos... mõningate laiendustega, millest räägime mõni teine kord.

ARIEL: Aegruum on kõver ja aine järgib geodeetilisi jooni. Aine tekitab kõveruse. Ma võtsin läbi üldrelatiivsuskursuse.

CALLISTUS: Nagu peabki, enne kui asuda kosmoloogiat õppima.

RHEA: Kuigi me saame paisuva universumi dünaamika tuletada ka Newtoni vaadetest.

CALLISTUS: Friedmanni võrrandid<sup>44</sup> saab õigesti tuletada üldrelatiivsusest. Newtonlik tuletus on parimal juhul meelespea.

---

<sup>43</sup>Lad "Kus üksmeel, seal võit." *Tlk.*

<sup>44</sup>Einsteini üldrelatiivsusteooriast tuletatud kosmoloogilised võrrandid, mis kirjeldavad ruumi paisumist ja kokkutõmbumist. Võrrandite aluseks on eeldus, et universum on ühesugune igas suunas (isotroopne) ja igas punktis (homogeenne). Need tuletas Vene matemaatik ja füüsik Aleksandr Fridman (ka Alexander Friedmann; 1888–1925) 1922. aastal.

RHEA: Newtonlik tuletus annab siiski selge füüsikalise pildi kõverusest: universumi koguenergia on võrdeline negatiivse kõverusega.

ARIEL: See on ilus. Selle taga peab midagi olema.

CALLISTUS: Hakkame siis tööle.

*Nad hakkavad tahvlile võrrandeid kirjutama.*

## PUNANIHE<sup>45</sup>

ARIEL: Professor, kas kosmoloogiline punanihe on Doppleri nihe?

CALLISTUS: Selle ümber on palju segadust, isegi mõnes õpikus.

ARIEL: Me vaidlesime selle üle sõpradega varaste hommikutundideni.

RHEA: See on semantiline küsimus. Me teame, kuidas seda arutada. Kas on vahet, kas ütleme, et see tuleneb ruumi paisumisest või galaktikate liikumisest?

ARIEL: Eile õhtul vaatasin meie tuletuskäigu uuesti üle ja jõudsin järeldusele, et punanihke põhjustab ruumi laienemine meie ja galaktika vahel.

RHEA: Täpselt nii.

CALLISTUS: *A contrario*<sup>46</sup> — ka vastupidine vaatenurk on õige.

ARIEL: Mina väitsin, et punanihked üle  $z^{47} > 1$  tähendaksid kiirust, mis ületab valguse kiiruse. Ilmselge absurd. Aga meil on James Webbi kosmoseteleskoobi kinnitatud punanihked...

RHEA: ... üle 10! Kas sa lugesid meie artiklit?

ARIEL: Muidugi lugessin.

---

<sup>45</sup>See dialoog on pühendatud hiljuti meie hulgast lahkunud Inglise kosmoloogile Nick Kaiserile (1954–2023), kes eriti nautis selliseid vaidlusi. *Tlk.*

<sup>46</sup>Lad (siin) “teisest küljest”.

<sup>47</sup>Punanihke tähis  $z$  on astronoomias arvutuslik suurus, mis näitab valguse lainepikkuse kasvu.

CALLISTUS: Pange oma TikTok korraks kinni. Eirelatiivsusteoorias ehk Minkowski aegruumis<sup>48</sup> võiks öelda “ilmselge absurd”. Aga me elame Friedmanni universumis — või milleski sellele väga lähedases. . .

ARIEL: Ja FLRW<sup>49</sup> koordinaatkiirused võivad ületada  $c$ -d.

RHEA: Sa võid lugeda Emory Bunni ja David Hoggi 2009. a artiklit “Kosmoloogilise punanihke kinemaatiline päritolu”, kui vajalikuks pead.

CALLISTUS: See on lõbus.

ARIEL: Olen nõus.

CALLISTUS: Nad tõlgendavad punanihet kui väikseid järjestikusi Doppleri nihkeid Minkowski aegruumi kattuvates piirkondades.

ARIEL: Ma loen selle läbi!

RHEA: Hmm. Need on lihtsalt sõnad. Mõõda ja arvuta — see on kõik, mis sa vajad.

## HUBBLE’I KONSTANT

ARIEL: Hubble’i konstandi<sup>50</sup> ühikud on imelikud.

*Kirjutab tahvlile.*

---

<sup>48</sup>Minkowski neljamõõtmeline aegruum kirjeldab ideaalset tasast universumit, kus puuduvad gravitatsiooniväljad ja massiivsete kehade tekitatud ruumikõverused. 1908. a töötas selle välja Saksa matemaatik Hermann Minkowski (1864–1909), pakkudes seda Einsteini 1905. a loodud eirelatiivsusteooria matemaatiliseks aluseks.

<sup>49</sup>Friedmanni-Lemaître’i-Robertsoni-Walkeri meetrika on matemaatiline mudel, mis kirjeldab Einsteini üldrelatiivsusteooria abil homogeenset, isotroopset ja paisuvat või kokkutõmbuvat universumit. See on teoreetiliseks aluseks praegusaja kosmoloogia standard- ehk  $\Lambda$ CDM-mudelile.

<sup>50</sup>USA astronoomi Edwin Hubble’i (1889–1953) järgi nime saanud konstant, üks kosmoloogia põhisuurusi. Kirjeldab universumi praegust paisumiskiirust, mis selle sajandi alguses tehtud mõõtmiste järgi jääb vahemikku 68–74 km/s/Mpc.

CALLISTUS: Astronoomid on üsna konservatiivne seltskond. . .

RHEA: Hakkab jälle pihta. . .

CALLISTUS: *Quid novi?*<sup>51</sup> Aga selles on oma loogika. Kui mõõtmised olid palju ebatäpsemad kui praegu, aitas väike  $h$ <sup>52</sup> simulatsioone ja vaatlusi võrrelda, viies need samale skaalale.

ARIEL: Aga km/s ja Mpc? Miks kilomeeter koos megaparsekiga välja ei taandu? Mõlemad on ju pikkusühikud.

CALLISTUS: Astronoomid mõõdavad punanihet  $cz$  km/s-ühikutest samuti kui eemaldumiskiirust. Jagades selle otse Hubble'i konstandiga, saamegi kauguse Mpc/ $h$ -ühikutest.

RHEA: Peale selle võid ühikud läbi taandada ja saad Hubble'i aja:<sup>53</sup>  $9,78 h^{-1}$  miljardit aastat. Hea rusikareegel on meelest pidada, et aasta on  $\pi \times 10^7$  sekundit.

ARIEL: Kui panen  $h = 0,7$ , saan universumi vanuse!

CALLISTUS: Just. Ja Hubble'i kauguse<sup>54</sup> saad, kui korrutatud Hubble'i aja valguse kiirusega.

*Arvutab.*

ARIEL:  $3000h^{-1}$  Mpc — universumi raadius! Aga ma ei saa aru, miks me ikka veel  $h$ -d kasutame, kui mõõtmised on nii täpsed.

CALLISTUS: Nii on lihtsalt. . . kergem vanade artiklitega võrrelda. . .

RHEA: Keegi ei loe ju neid. Me peaksime selle ära lõpetama.

---

<sup>51</sup>Lad "Mida uut?". *Tlk.*

<sup>52</sup>Suur  $H$  on Hubble'i konstant ühikutes km/s/Mpc. Väike  $h$  on sama konstant suhtelistes ühikutes 100 km/s/Mpc kohta. *Tlk.*

<sup>53</sup>Hubble'i aeg näitab, kui vana oleks universum, kui see oleks algusest peale paisunud püsiva kiirusega. Tänapäevaste mõõtmiste järgi on see u 14,4 miljardit aastat.

<sup>54</sup>Hubble'i kaugus ehk Hubble'i sfääri raadius (u 14,4 miljardit valgusaastat) on vaatlejat ümbritseva universumi sfääriline piirkond, millest kaugemale jäävad objektid eemalduvad vaatlejast universumi paisumise tõttu valguse kiirusest suurema kiirusega. Seda ei tohi segi ajada vaadeldava universumiga, mille raadius on praegu u 46,5 miljardit valgusaastat.

CALLISTUS: Mõned kasutavad nüüd  $h_{70}$ , mis renormaliseerib Hubble'i konstandi väärtusele 70 km/s/Mpc.

ARIEL: Öök.

CALLISTUS: Jumalateotus.

RHEA: Neetud olgu see väike  $h$ ! Lihtsalt tsiteerin üht artiklit.<sup>55</sup>

## TASASUSPROBLEEM

ARIEL: Mul on raske mõista tasasusprobleemi. . . tähtsust.<sup>56</sup> Välja arvatud siis, kui me räägime minu jalgratta rehvidest.

CALLISTUS: Mäletan, et tundsin kunagi sedasama. Aga harjusin ära.

RHEA: Minuga oli pigem nii, et mõne asjaga harjusin ära, aga seetõttu hakkasid hoopis teised asjad imelikuna tunduma.

CALLISTUS: Just. Asjad, mis enne nende teiste asjadega harjumist polnud üldse imelikud tundunud.

ARIEL: Uhh. Võib-olla oskate mind veel rohkem segadusse ajada?

RHEA: Probleem on selles kohutavalt väikeses arvus  $10^{-67}$ . Raske on ette kujutada, kust võiks tulla nii väike algne kõverus.

ARIEL: Aga miks?

CALLISTUS: Meil pole teooriaid, mis annaksid nii väikese arvu.

ARIEL: Oodake, te suudate ette kujutada suuri arve, näiteks neid, mis iseloomustavad universumi mõõtmeid. Aga väikest arvu ei suuda?

CALLISTUS: Me räägime algsest ehk ürgsest kõverusest. Me tahame lihtsaid algingimusi.

RHEA: Vaistlikult on selge, et füüsika kasutab looduse fundamentaalseid konstante. . .

CALLISTUS: Ja võib-olla kombineerib neid mõne matemaatilise konstandiga, nagu  $\pi$  või  $e$ , korrutades neid täisarvudega. Nii ei saa tavaliselt väga väikseid arve.

---

<sup>55</sup>Vt Croton 2013, kus on rohkelt ajalugu ja detaile. *Aut.*

<sup>56</sup>Inglise *gravity* tähendab nii 'tähtsust, kaalukust, tõsidust' kui ka 'gravitatsiooni'.

*Ariel arvutab.*

ARIEL:  $e^{\{-\frac{\pi^5}{2}\}}$  on peaaegu  $10^{-67}$ . See vastab kõigile teie tingimustele. Ma lihtsalt ei usu, et see võiks mingi probleem olla.

CALLISTUS: Teil on õigus. Tasasusprobleem on lõppkokkuvõttes lihtsalt eelarvamus, mis põhineb meie füüsikalisel intuitsioonil.

RHEA: Viimases hädas kasutame Occami habemenuga. Null on lihtsam kui mingi *ad hoc*  $\pi$ -astmete kombinatsioon.

CALLISTUS: Kui see just teooriast ei tulene.

ARIEL: Ma ei saa sellest päris lõpuni aru, aga võib-olla harjun ära. . .

CALLISTUS: Parem ärge harjuge.

RHEA: Jah. Kui muutud liiga mugavaks kõige veidra suhtes, võib see takistada uute asjade avastamist. Me toetame sind.

ARIEL: Liiga hilja, ma olengi sellega juba ära harjunud. . .

*Rhea ja Callistuse meeleheitlikud pilgud.*

ARIEL: See oli nali.

## NUMBRILISED SIMULATSIOONID

ARIEL: Kas universum on lõputu?

RHEA: Me saame uurida vaid lõplikku osa sellest.

CALLISTUS: Tegelikult me ei tea seda. . . isegi põhimõtteliselt mitte. Niikaua kui universum järgib Einsteini üldrelatiivsusteooriat, näeme ainult horisondini.

ARIEL: Kauguseni, mille valgus on läbinud universumi sünnist alates.

RHEA: Horisont on siiski kaugemal. Kujuta ette punkti, kust valguskiir horisondi lähedalt lähtus. See punkt on nüüd meist kaugemal, sest universum paisus selle aja jooksul, mis footon meie poole liikus.

ARIEL: Kurb. Me ei saa kunagi teada, mis on horisondi taga.

CALLISTUS: Lihtsaim mõistlik oletus oleks, et seal on kõik samamoodi nagu horisondi sees.

RHEA: Aga see jääb alati oletuseks. Nii nagu me ei saa piiluda musta augu sisse, ei saa me piiluda ka horisondi taha.

ARIEL: Kui universum on lõpmatu ja arvutid lõplikud, kuidas me siis üldse universumit simuleerime?

CALLISTUS: Nutikas küsimus — ja tõepoolest, me peame olema nutikad, et universum arvutimällu ära mahutada.

RHEA: Kosmoloogilised  $N$ -keha simulatsioonid jälgivad tumeaine osakesi, mis on vastastikmõjus gravitatsiooni kaudu, kasutades perioodilisi ääritingimusi.<sup>57</sup>

CALLISTUS: See on ekvivalentne kolmemõõtmelise toori topoloogiaga. Kujutage ette oma auto rehvi — ainult ühe lisamõõtmega.

ARIEL: Mul ei ole autot. Ma sõidan rattaga, et vältida kliimat kahjustavaid süsinikuheitmeid.

RHEA: Perioodilisest ääritingimusest võib mõelda nii, et kui osake lahkub kuubist vasakult küljelt, ilmub ta tagasi paremalt. Sama kehtib üles-alla- ja ette-taha-suuna kohta.

CALLISTUS: Või siis võime mõelda nii, et seesama kuup kordub lõpmatult üle kogu universumi — mis ongi kolmemõõtmelise toori definitsioon. Nagu rehvid keskkonnasõbralikul kolmemõõtmelisel jalgrattal.

ARIEL: Või kolmerattalisel? See kõik tekitab minus ebamugavust — ja mitte ainult elektrikulu pärast. Päris universumis on iga kuup mingi kosmoloogilise statistika juhuslik realiseering, aga simulatsioonis kordame täpselt sama mustrit. See tähendab tohutuid korrelatsioone väga suurtes mastaa-pides.

RHEA: Sul on õigus. Kui me summeerime osakesele mõjuvaid gravitatsioonijõude, siis lisame tavaliselt ka iga osakese “peegelpildi” panuse. Seda nimetatakse Ewaldi sum-

---

<sup>57</sup>Perioodiliste ääritingimuste kasutamine on matemaatilise modelleerimise võtte suurte või lõpmatute süsteemide jälgendamisel väikeste, kuid representatiivsete ja korduvate kogumite abil. Niipea kui objekt või osake ühel äärel piiri ületab, ilmub ta samal hetkel täpselt samade füüsikaliste omadustega uuesti välja vastasküljel.

maks<sup>58</sup> ja see on kosmoloogilistes simulatsioonides tavaline.

ARIEL: Oleme tagasi lõpmatuse probleemi juures: me ei saa ju lisada lõpmatut hulka sama osakese koopiaid.

CALLISTUS: Õnneks nõrgeneb gravitatsioonijõud pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga  $\frac{1}{r^2}$ , nii et me peame arvestama ainult mõne osakese pildiga, enne kui nende mõju üha väiksema panuse tõttu tühiseks muutub.

ARIEL: Aga kuidas on horisondiga?

RHEA: Enamik kosmoloogilisi simulatsioone kasutab Newtoni gravitatsiooni, mis on suurepärase lähendus mustade aukude skaalast ülespoole ja horisondist allapoole. Ainus üldrelatiivsuse sisend on Friedmanni võrrand, mis juhib meie simuleeritud universumi paisumist.

ARIEL: Arvutusvigade piires on selline simulatsioon täiuslik kujutis meie universumi fluktuatsioonide evolutsioonist.

CALLISTUS: Mitte päris. Kuup ei ole sfääriliselt sümmeetriline.

RHEA: Perioodilised simulatsioonid rikuvad universumi eeldatud isotroopsust, kuigi see efekt on imeväike.

CALLISTUS: Sellel on mõõdetavad tagajärjed. Selle asemel et olla statistiliselt invariantne pöörete rühma  $SO(3)$  suhtes,<sup>59</sup> allub kuubiline simulatsioon  $O_h$  oktaeedrilisele rühmale<sup>60</sup> (Rácz jt 2021). Seega on gravitatsioon perioodilistes simulatsioonides anisotroopne, lisades gravitatsiooni-dünaamikasse ja kollapsisse anisotroopia.

---

<sup>58</sup>Saksa kristallograafi ja füüsiku Paul Peter Ewaldi (1888–1985) järgi.

<sup>59</sup> $SO(3)$  ehk kolmemõõtmeline eriline ortogonaalrühm kirjeldab geomeetrias kõiki selliseid kolmemõõtmelises ruumis võimalikke jääkade kehade pöörded ümber fikseeritud punkti, milles säilivad vektorite pikkus ja nendevaheline nurk. See on üks fundamentaalsemaid sümmeetriarühmi nii klassikalises kui ka kvantmehaanikas.

<sup>60</sup>Oktaeedriline rühm on korrapärase oktaeedri (kaheksatahuka) sümmeetriarühm, mis kirjeldab kõiki ruumipöörded ja peegeldusi, milles oktaeder jääb muutumatuks. Rühm sisaldab 48 sümmeetriaelementi ja on samaväärne kuubi sümmeetriarühmaga.

RHEA: Õnneks on nii, et kui simulatsiooni mõõt on  $L \geq 300h^{-1}$  Mpc,<sup>61</sup> on efekt alla ühe protsendi. Me võime kuubilisi simulatsioone julgelt kasutada enamikus kosmoloogilistes rakendustes.

CALLISTUS: On veel üks lahendus: selle asemel et kujutada universumit kordumas, võime laenata idee stringiteooriast ja lõpmatu universumi kompaktifitseerida (Rácz jt 2018).<sup>62</sup> Stereograafiliselt projitseeritud simulatsioonide (StePS) puhul<sup>63</sup> projitseeritakse lõpmatu universum lõplikule Riemanni sfäärile.<sup>64</sup> Sellises simulatsioonis on gravitatsioonijõud isotroopsed.

RHEA: Stereograafilist projektsiooni võib ette kujutada kui läbi paistvat kuuli, mille põhjapoolusel on lambipirn ja mis seisab lõpmatul laual. Valguskiired lõikavad nii kuuli kui ka tasandit. Me samastame punktid, mis asuvad samal kiirel. Selle tagajärjel on tasandi kujutis kuulil moonutatud.

CALLISTUS: Stereograafilise projektsiooni leiutasid kartograafid. Lõunapooluse lähedal on moonutus tühine, kuid kaugemal muutub märkimisväärseks — eriti kuuli põhjapoolkeral.

RHEA: Täpselt. Selle tulemusena on StePS-simulatsioonid mitme lahutusvõimega.

---

<sup>61</sup> $L$  tähendab siin kosmoloogilises arvutisimulatsioonis kasutatava vaatlusruumi ehk kuubikujulise kasti külje pikkust. Vähemalt 300-megaparsekine  $L$  (skaleerituna Hubble'i parameetriga  $h$ ) tagab universumi suuremahulise struktuuri realistliku modelleerimise.

<sup>62</sup>S.t kompaktseks muuta. Heine-Boreli teoreemi järgi on ruum (hulk) kompaktne siis, kui see on kinnine (sisaldab kõiki oma piiripunkte) ja tõkestatud (mahub täielikult kindla raadiusega kera sisse).

<sup>63</sup>S.t selliste puhul, milles kolmemõõtmelised objektid on kuvatud tasapinnale niiviisi, et on säilinud nende vahelised nurgad.

<sup>64</sup>Riemanni sfäär on mudel, milles tavalisele kompleksarvude tasandile on lisatud üksainus lõpmata kaugel asuv punkt, nii et on moodustunud ühinenud lõpmatu kompleksarvude tasand. Seda sfääri saab esitada kolmemõõtmelise ruumi ühiksfäärina, kus tasand projitseeritakse stereograafiliselt sfääri pinnale nii, et põhjapoolus tähistab lõpmatust.

CALLISTUS: Nagu suunitavad simulatsioonid, kus järjest väiksemaid alamkuupe jooksutatakse üha suurema lahutusega, et saavutada suur dünaamiline ulatus. Kompaktifitseeritud simulatsioonid teevad sama asja sujuvalt.

ARIEL: Mul hakkab pea ringi käima.

RHEA: Ja me rääkisime alles kosmoloogiliste simulatsioonide ääretungimustest.

CALLISTUS: On ka muid võimalusi: peegelsimulatsioonid, teised kuupi täitvad kompaktsed ruumitopoloogiad — näiteks Platoni tahukad.<sup>65</sup>

RHEA: Rääkimata mitmekomponendilistest simulatsioonidest, kus lisaks tumeainele on sees ka barüonid, neutriinod ja muud osakesed.

CALLISTUS: Ja minu lemmikud: üldrelatiivsuse simulatsioonid!

RHEA: Enamiku eesmärkide tarbeks on perioodiline Newtoni tumeaine simulatsioon täiesti piisav. Ja kuna need simuleerivad lõpmatut universumit lõpliku energiaga, siis läheneb nende süsinikuemissioon simuleeritud ruumala kohta nullile.

ARIEL: See on pettus. Interneti järgi kasutati Millennium-XXLis<sup>66</sup> 12 000 protsessorituuma ja arvutus kestis ekvivalendina 300 aastat. Kui ma olen helde ja võtan eelduseks viievärsed tuumad ning 0,8 naela süsinikku kilovatt-tunni kohta, saan 4,8 tonni — umbes sama palju kui ühe tavalise auto aastane süsinikuheide — 4,6 tonni.<sup>67</sup>

---

<sup>65</sup>Ka 'platoonilised kehad' — ruumilised kujundid, mille kõik tahud on ühesugused korrapärased hulknurgad ja igas tipus kokku saavate tahkude arv on sama. Selliseid kehi on viis: tetraeder (nelitahukas), heksaeder (kuustahukas ehk kuup), oktaeder (kaheksatahukas), dodekaeder (12-tahukas) ja ikosaeder (20-tahukas).

<sup>66</sup>Millennium-XXL — üks maailma suurimaid ja detailsemaid kosmoloogilisi arvutisimulatsioone, millega modelleeriti universumi ja galaktikate arengut. 2010. a projekti eesmärk oli uurida tumeenergia mõju universumi struktuurile.

<sup>67</sup>Vt [www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle](http://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle). *Aut*.

CALLISTUS: Minu meelest suurepärase diil. Eriti võrreldes Bitcoin'i 23-megatonnise süsinikuheitmega aastast.

ARIEL: Hm. Ma mõtlen selle üle järele, kui rattaga koju sõidan.

### HIERARHILINE KUHJUMINE

CALLISTUS: Kas ülalt alla või alt üles — selles on küsimus. Või vähemalt oli... mõnda aega.

RHEA: Ah, Peeblesi ja Zeldovitši legendaarne vaidlus.<sup>68</sup> Suurte mõtlejate sügav erimeelsus.

ARIEL: Teadus põhineb faktidel. Kuidas saavad suured teadlased üksteisega eri meelt olla?

CALLISTUS: Nad olid seda ainult ajutiselt. See oli teine ajastu: vähem andmeid, see-eest rohkem kujutlusvõimet. Kas teie praegu muretsete selle üle, kas Hubble'i konstant on 68 või 72 km/s/Mpc? Tol ajal sai Vaucouleurs<sup>69</sup> vastuseks 100 km/s/Mpc, samal ajal kui Sandage<sup>70</sup> ja Tammann<sup>71</sup> väitsid, et see on 50 km/s/Mpc. Lõpuks selgus, et asi on meetodis ja süstemaatilistes vigades. Kui ajalugu praeguse Hubble'i mõistatuse kohta midagi ütleb...

RHEA: Mul on hea meel elada täppiskosmoloogia ajastul. See pidi stressirohke periood olema.

---

<sup>68</sup>Kanada-USA astrofüüsik, astronoom ja kosmoseteoreetik, 2019. a nobelist James Peebles (sünd 1935) ja Nõukogude füüsik, keemik ja kosmoloog, üks aatomi- ja vesinikupommi loojaid NSV Liidus Jakov Zeldovitš (1914–1987) vaidlesid 1970.–1980. aastatel selle üle, kas kõigepealt tekivad suured kosmilised struktuurid, mis siis väiksemateks lagunevad (ülalt alla), või vastupidi.

<sup>69</sup>Gérard de Vaucouleurs (1918–1995), Prantsuse astronoom ja galaktikate uurija, töötas 1960. aastast elu lõpuni USAs Texase ülikoolis Austinis.

<sup>70</sup>Allan Sandage (1926–2010), USA astronoom ja kosmoloog, Edwin Hubble'i kunagine abiline, määras esimesena enam-vähem täpselt Hubble'i konstandi väärtuse ja universumi vanuse.

<sup>71</sup>Gustav Andreas Tammann (1932–2019), Šveitsi-Saksa astronoom, baltisaksa keemiku ja füüsiku Gustav Heinrich Tammanni (1861–1938) lapselaps, Hamburgi ja Baseli ülikooli professor, töötas ka USAs koos Allan Sandage'iga.

CALLISTUS: Mõnes mõttes oligi. Aga ka palju lõbusam. Zeldovitš arvas alguses, et tumeaine koosneb neutriinodest. Need kerged osakesed kipuvad potentsiaaliaukudest<sup>72</sup> välja voolama ja kustutavad väikeses skaalas toimuvad fluktuatsioonid. Kõigepealt tekivad seega suured struktuurid — nn pannkoogid —, mis hiljem lagunevad (*ülalt alla*). Peebles soovastu arvas, et tõenäolisem on külm tumeaine. Kui väikeseskaalalist võimsust on piisavalt, kollabeeruvad esmalt väikesed objektid ja seejärel suuremad (*alt üles*).

RHEA: Tundub, et Peebles võitis. Praegused andmed osutavad külmale tumeainele ja hierarhilisele kuhjumisele.

CALLISTUS: Teadmiste otsing ei ole võistlus. Zeldovitš ja Peebles kohtusid viimast korda 1987. aastal IAU<sup>73</sup> sümpoosionil Ungaris Balatonfüredis. Selleks ajaks oli selge, et neutriinode mass pole pannkoogimudeliks piisav, aga see ei muutnud midagi. Nad olid jälleenägemise üle ikka sama rõõmsad nagu vanad sõbrad kunagi. See oli Zeldovitši viimane konverents enne lõplikku lahkumist.

RHEA: Jim Peebles sai Nobeli preemia 32 aastat hiljem!

CALLISTUS: Lõpuks. *Palmam qui meruit ferat*.<sup>74</sup>

ARIEL: Ma arvasin, et sellise kaliibriga inimesed ei eksi kunagi.

RHEA: Teaduses valitsevad andmed. Neil on igas vaidluses viimane sõna.

CALLISTUS: Ja ometi ei eksinud ka Zeldovitš. Tänapäeval teame, et neutriinodel on väike mass siiski olemas — murdosa elektronvoldist — ja neil on tõenäoliselt mõõdetav mõju galaktikate võimsusspektrile. Nad ei ole peategelased, aga etendavad sellegipoolest huvitavat osa.

RHEA: Meie arusaam hierarhilisest struktuuride tekkest on samuti muutunud nüansirikkamaks. Parvede, filamentide, seinte

---

<sup>72</sup>Nii nimetatakse piirkonda, kus osakestel on väiksem potentsiaalne energia kui neid ümbritseval alal, mistõttu nad ei suuda sellest ruumiosast lahkuda ja jäävad sinna lõksu.

<sup>73</sup>International Astronomical Union — Rahvusvaheline Astronoomia Liit.

<sup>74</sup>Lad “Palmioksa (s.t võidupärga) kandku see, kes on selle ära teeninud.”

ja tühikute kosmiline võrgustik sisaldab ka pannkoogitaolisi struktuure.

ARIEL: Saan aru. Sellise kaliibriga inimesed ei pane kunagi täiesti mööda.

## KOSMILINE VÕRGUSTIK

ARIEL: Kosmiline võrgustik näeb hämmastav välja. Nagu abstraktne ekspressionistlik maal.

RHEA: Tõenäoliselt seetõttu, et paljudes skaalades on see fraktaalne (Taylor jt 1999).

CALLISTUS: Mul on hea meel näha, et sa hakkad  $f$ -sõnaga harjuma.

ARIEL: Aga see näeb välja ka nagu ajukoore läbilõige. Oled sa kunagi mõelnud, miks?

RHEA: See on lihtsalt pealiskaudne sarnasus; ma ei teeks sellest mingeid järeldusi.

ARIEL: Sa oled pahane!

RHEA: See pole pahameel, lihtsalt ükskõiksus.

CALLISTUS: On üks artikkel (Kleinmann 2016), mis väidab, et bioloogiliste ja kosmoloogiliste süsteemide sünnil ja arengul on sarnasusi. Seda nimetatakse darvinistlikuks kosmoloogiaks.

RHEA: Mina ütlen, et see on täielik jama. Mis mõttes on see darvinistlik? Kuidas *kõige kohasem* galaktika oma DNAd paljundab? Ja mis on üldse DNA selles analoogias?

CALLISTUS: Nad väidavad, et DNA vastab ainele. Aga ma olen skeptiline. Paralleelid on veenvad ainult pealiskaudselt, kui sedagi.

ARIEL: Kas “sünd” on siis Suur Pauk?

CALLISTUS: Inflatsiooniline paisumine ühtlase tihedusega ruumis sarnaneb vaid ähmaselt organismi eksponentsiaalse kasvuga ühest rakust.

RHEA: Rakk kasutab tihendatud informatsiooni, et võtta keskkonnast energiat ja ainet kasvuks. Universum on suletud

süsteem ega sisalda mingit tihendatud koodi — vähemalt meie teada mitte.

CALLISTUS: Ma olen ideedele avatud ja märkan ähmaseid sarnasusi, aga nad kaotavad mu poolehoidu kohe, kui jutt läheb *kosmilisele viljastamisele ning isastele ja emastele galaktikatele*.

RHEA: Ma olen üsna kindel, et galaktikad on mittebinaarsed. Annaks bioloogidele vastulöögi — rakendaks hoopis Einsteini üldrelatiivsusteooriat bioloogiale?

ARIEL: Muidugi. Kõik on suhteline. Ma kujutan juba ette *Nature* artiklit ja sellele järgnevat meediatormi. Kas lööte kaasa?

CALLISTUS: Olgu, lõpetame sarkasmi. See, et selline artikkel üldse avaldati, näitab meie kogukonna avatud mõtlemist. Leidsin veel ühe artikli (Vazza, Feletti 2020), mis kinnitab teie visuaalset muljet statistiliselt: aju närvisõlmede võimsusspekter on kõrglahutusega simulatsioonides häirivalt sarnane tumeaine võimsusspektriga. Samas erineb see teiste looduslike protsesside võimsusspektrist — pilvede, puude, MHD<sup>75</sup> ja veeturbulentsi omast —, mis näitavad tavaliselt lihtsamat, astmeseadusele<sup>76</sup> vastavat korrelatsioonifunktsiooni, mida seostatakse fraktaalidega.

RHEA: Ja Pollocki<sup>77</sup> maalide omast.

ARIEL: Aga kas me võime sellistest statistilistest sarnasustest midagi kindlat järeldada?

CALLISTUS: Tõenäoliselt mitte. Fraktaalid ja multifraktaalid on keerukates süsteemides kõikjal. Kui sa ei leia usutavaid paralleele gravitatsioonilise evolutsiooni dünaamika ja aju

---

<sup>75</sup>Magnetohüdrodünaamika (MHD) uurib elektrit juhtivate vedelike (plasma, vedelad metallid) liikumist magnetväljade sees. See ühendab Maxwelli elektromagnetismi ja vedelikudünaamika. *Tlk.*

<sup>76</sup>Astmeseadus kirjeldab niisugust matemaatilist seost kahe suuruse vahel, kus ühe suuruse muutumine on võrdeline teise suuruse astmega (nt ruudu külje pikenemisel kaks korda suureneb ruudu pindala  $2^2$  korda, küljepikkuse kolmekordistumisel  $3^2$  korda jne). Muutus on mastaabivaba, s.t sõltumatu nende suuruste algsest väärtusest.

<sup>77</sup>USA maalikunstnik Jackson Pollock (1912–1956) oli üks tuntumaid abstraktse ekspressionismi esindajaid.

närvivõrgu arengu vahel, on vormilised sarnasused väga nõrk tõend.

RHEA: Pealegi sõltuvad visuaalsed muljed ja sarnasused sellest, kuidas sa andmeid kuvad ja analüüsid.

ARIEL: Ma arvan, et ilutaju peab olema meie loomusesse juurdunud evolutsioonilise psühholoogia tõttu. Me leiame, et keerukate loodusprotsesside kaardid on ilusad — olgu see universum või aju, pilved või puud. Arvestades bioloogiliste süsteemide tohutut mitmekesisust, võib vabalt olla puhas juhus, et mõni neist sarnaneb universumiga.

### PERKOLATSIOONIFUNKTSIOON

ARIEL: Perkolatsioon<sup>78</sup> on... huvitav. Eriti kui ma kohvi teen. Aga kosmoloogias on sel üllatuslik kõrvalroll.

RHEA: Vahel levivad meetodid ilma igasuguse põhjuseta. Teinekord on lihtsalt nii, et mida rohkem, seda uhkem.

ARIEL: Me uurisime võimsusspektrit, siis korrelatsioonifunktsioone. Need kannavad peaaegu sama infot. Ja nüüd perkolatsioon. Kus see kõik lõpeb?

CALLISTUS: Vahel on raske vahet teha, kas miski on päriselt vajalik või lihtsalt mugav — nagu kohvi või perkolatsiooni näide. Aga ma näen küll põhjust, miks meil on vaja terve arsenaliga kõikvõimalikke meetodeid: universum on tugevalt mittegaussilik. Võimsusspekter kirjeldab ideaalselt just Gaussi jaotust; see annab iga lainemoodi dispersiooni, kus keskmine väärtus on null.

RHEA: Režiimid on homogeenses ruumilises Gaussi jaotuses korrelatsioonitud — isegi sõltumatud.

ARIEL: Nagu varajases universumis.

CALLISTUS: Vähemalt väga hea lähendusega. Kosmilise mikrolaine-taustkiirguse mõõtmised piiravad algset mittegaus-

---

<sup>78</sup>Läbinõristamine (-nõrgumine), kurnamine, filtreerimine, vedeliku aeglane liikumine läbi poorse aine.

silikkust nii tugevalt, et see on enamiku rakenduste puhul tühiselt väike.

RHEA: Aga siis tuleb mängu gravitatsioon. See võimendab fluktuatsioone esmalt lineaarselt ja seejärel mittelineaarselt.

ARIEL: Nagu kitarrivõimendi, mis hakkab moonutama.

*Ariel imiteerib rokk-kitarristi.*

RHEA: Täpselt. Sama kitarr, mida ma alati mänginud olen. Moonutus tekitab mittegaussilikkust. Tolstoid parafraseerides: kõik Gaussi jaotused sarnanevad üksteisega, kuid iga mittegaussilik jaotus on mittegaussilik isemoodi.<sup>79</sup>

CALLISTUS: Seega ei tea me *a priori*, millised statistilised tööriistad on nende iseloomustamisel kõige tõhusamad. Iga meetod kirjeldab kosmilise võrgustiku teatud omadusi. Perkolatsioonianalüüs on üks neist — suurepärane tehnoloogiaülekanne tahkisefüüsikast kosmoloogiasse.

RHEA: Pärast kogu seda perkolatsioonijuttu tahan ma kohvi. Kes ühineb?

CALLISTUS: Mina olen alati poolt, kui saab kofeiini mõneks teadusteooriaks muuta.

ARIEL: Matemaatik Erdős<sup>80</sup> oli ka kuulus selle poolest, et muutis kohvi matemaatilisteks teoreemideks. Hiljem läks ta üle amfetamiinidele ja tootis veel rohkem artikleid. See on tõsi!

RHEA: Häh, ära usu kõike, mida internetist loed. Lähme kohvile.

*(Järgneb)*

---

<sup>79</sup>“Kõik õnnelikud perekonnad sarnanevad üksteisega; iga õnnetu perekond on õnnetu isemoodi.” Seda tuntakse ka Anna Karenina printsiibina. *Aut.*

<sup>80</sup>Pál Erdős (1913–1996), Ungari matemaatik, Londoni Kuningliku Seltsi välisliige.