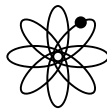


Lisa Randall

TUMEAIN JA DINOSAURUSED

Universumi uskumatud seosed



elav teadus

Originaali tiitel:
DARK MATTER AND THE DINOSAURS
The Astounding Interconnectedness of the Universe
Lisa Randall
The Bodley Head
London

Tõlkija Vahur Lokk
Toimetaja Triin Olvet
Keeletoimetaja Katrin Ringo
Konsultandid Enn Saar ja Jüri Plado
Kujundaja Kaspar Ehlvest
Küljendaja Erje Hakman

DARK MATTER AND THE DINOSAURS
Copyright © 2015, Lisa Randall
All rights reserved

Esikaane fotod
© NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), A. Nota
(ESA/STScI), and the Westerlund 2 Science Team
CC BY 2.0 By Biodiversity Heritage Library (n384_w1150),
via Wikimedia Commons

Tõlge eesti keelde © Vahur Lokk ja kirjastus Argo, 2017
Kõik õigused kaitstud
www.argokirjastus.ee
ISBN 978-9949-527-89-2

Trükitud Tallinna Raamatutrükikojas

SISUKORD

Sissejuhatus 7

I Universumi kujunemine

- 1 Tumeaine salaselts 19
- 2 Tumeaine avastamine 29
- 3 Suured küsimused 41
- 4 Peaaegu päris algus: väga hea koht hakatuseks 51
- 5 Galaktika on sündinud 69

II Aktiivne Päikesesüsteem

- 6 Meteoroidid, meteorid ja meteoriidid 87
- 7 Komeetide lühike ja särav elu 107
- 8 Päikesesüsteemi piirialad 129
 - 9 Ohtlik elu 135
 - 10 Oh õudust 159
 - 11 Väljasuremised 177
 - 12 Dinosauruste lõpp 201
 - 13 Elu elamiskõlblikus tsoonis 229
 - 14 Pendel võngub 114
- 15 Komeetide loopimine Öpik-Oorti pilvest 261

III Tumeaine lahtiharutamine

- 16 Nähtamatu maailma aine 281
- 17 Kuidas pimedas näha 299
- 18 Sotsiaalselt seostatud tumeaine 313
 - 19 Pimeduse kiirus 325
 - 20 Tumeda ketta otsingud 341
- 21 Tumeaine ja komeeditabamused 357

Kokkuvõte: vaatame üles 373

Tänuavaldused 383

Illustratsioonide nimekiri 386

Lisalugemist 388

SISSEJUHATUS

Tumeaine ja dinosaurused on sõnad, mida koos kuuleb harva, välja arvatud ehk mänguväljakul, fantaasiamängude klubis või mõnes Spielbergi veel valmimata filmis. Tumeaine on universumis leiduv saladuslik kraam, mis avaldab gravitatsioonilist vastasmõju nagu tavaline ainegi, kuid see ei kiirga ega neela valgust. Astronoomid tuvastavad küll tumeaine gravitatsioonilist mõju, kuid sõna otseses mõttes ei näe seda. Dinosaurused seevastu ... dinosaurusi ma vist seletama ei pea. Need selgroogsed valitsesid maismaad 231 kuni 66 miljonit aastat tagasi.

Kuigi omaette on nii tumeaine kui dinosaurused väga põnevad, on üsna mõistlik eeldada, et nähtamatu füüsikaline substants ja populaarne bioloogiline kuulsus pole omavahel mitte kuidagi seotud. See võib niimoodi tõepoolest olla. Paraku on universum definitsiooni järgi üks tervik ja põhimõtteliselt on kõik selle komponendid omavahel seotud. Meie raamat uurib spekulatiivset stsenaariumi, milles pakun koos oma kaastöötajatega välja, et dinosauruste väljasuremises võis lõpuks (ja kaudselt) olla süüdi tumeaine.

Paleontoloogid, geoloogid ja füüsikud on tõestanud, et 66 miljonit aastat tagasi tabas Maad vähemalt 10-kilomeetrise läbimõõduga kosmoseobjekt ja hävitas dinosaurused koos kolme neljandikuga maa peal elanud liikidest. See objekt võis olla Päikesesüsteemi kaugematest piirkondadest pärinev komeet, kuid keegi ei tea, mis kallutas komeedi kõrvale selle nõrgalt seotud, kuid stabiilselt orbiidilt.

Meie pakume välja oletuse, et Päikese liikumisel läbi Linnutee (tähtedest ja säravast tolmust triibu, mida selges öötaevas näha võib) kesktaasandi puutus Päikesesüsteem kokku tumeaine kettaga, mis mõjutab kaugelt objekti ning põhjustas sellega kataklüsmilise kokkupõrke. Meie galaktilises naabruses asuv tumeaine ümbritseb meid tohutu sileda ja hajusa kerakujulise halona.

Seda tüüpi tumeaine, mis vallandas dinosauruste hukkumise, jaotub hoopis teistmoodi kui suurem osa universumis leiduvast saladuslikust tumeainest. Uut tüüpi tumeaine jätkaks halo küll puutumata, kuid selle sootuks erinevad vastasmõjud koondaksid tumeaine kettaks otse Linnutee kesktaasandil. Õhuke kettapiirkond võib olla sedavõrd tihe, et kui Päikesesüsteem seda piirkonda läbib ja Päike oma orbiidil läbi meie Galaktika üles-alla võngub, avaldab ketas ebataavaliselt tugevat gravitatsioonilist mõju. Ketta gravitatsiooniline tõmme võib olla piisav, et mõjutada komeete Päikesesüsteemi kaugemates piirkondades, kus Päikese külgetõmbejõud on nende vaos hoidmiseks liiga nõrk. Säärased eksinud komeetid heidetakse siis Päikesesüsteemist välja või – mis on palju vaatamängulisem variant – paisatakse Päikesesüsteemi sisepiirkondadesse, kus neil võib tekkida võimalus Maaga põrkuda.

Ütlen teile ausalt, et ma ei tea veel, kas see hüpotees on õige. See seisneb vaid ootamatut tüüpi tumeaines, mis võiks avaldada mõõdetavat mõju elusolenditele (täpsemalt öeldes küll enam mitte elavatele). Siinne raamat on lugu meie ebaharilikust oletusest säärase üllatavalt mõjuka tumeaine kohta.

Siiski pole niisugused spekulatiivsed ideed, kui provokatiivsed need ka poleks, selle raamatu peamine mõte. Dinosaurusi hävitava komeedi looga vähemalt samavõrra tähtis on raamatus ka selle loo kontekst ja teadus selle ümber, sealhulgas märksa paremini läbi töötatud kosmoloogilised süsteemid ja Päikesesüsteemi uurimine. Mul on tublisti vedanud, et teemad, mida ma sageli uurin, suunavad minu teadustööd suurte küsimuste poole, näiteks millest on tehtud aine, mis on ruum ja aeg ja kuidas universumis arenes kõik just selliseks maailmaks, nagu me seda tänapäeval näeme. Selles raamatus tahan suurt osa sellest kõigest jagada ka teiega.

Kirjeldatud teadustöös kulgesid minu uuringud mööda rada, kus ma hakkasin kosmoloogiast, astrofüüsikast, geoloogiast ja isegi bioloogiast mõtlema hoopis laiemalt. Kesksel kohal seisis siiski fundamentaalfüüsika. Olles aga tegelenud kogu oma elu konventsionaalsema osakestefüüsikaga – uurides ehitusklotse, millest koosneb meile tuttav aine nagu paber või ekraan, millelt te seda juttu praegu loete –, leidsin, et oleks värskendav kombata ka seda, mida me teame – või peatselt teada saame – tumeda maailma ja selle peamiste mõjude kohta füüsikalistele protsessidele Päikesesüsteemis ja Maa peal.

„Tumeaine ja dinosaurused“ selgitab, millises seisus on meie praegused teadmised universumist, Linnuteest, Päikesesüsteemist ning sellest, mis loob elukõlbliku tsooni ja elu Maa peal. Ma räägin tumeainest ja kosmosest, kuid käsitlen ka komeete, asteroide, elu tekkimist ja väljasuremist, keskendudes põhjalikumalt objektile, mis kukkus Maale ning tappis maismaal elanud dinosaurused ja suure osa muust elustikust. Tahtsin, et see raamat annaks edasi hulga uskumatuid seoseid, mis on meid toonud nii kaugele, et suudame sisukamalt mõista praegu toimuvat. Kui me praegu oma planeedist mõtleme, võiksime ühtlasi paremini mõista konteksti, milles see arenes.

Kui hakkasin keskenduma selle raamatu aluseks olevale hüpoteesile, polnud ma rabatud ja võlutud mitte üksnes meie praegusest teadmiste hulgast oma keskkonna – kohaliku, Päikesesüsteemi, galaktilise ja universumi – kohta, vaid ka sellest, kui palju me loodame oma juhuslikult tillukeselt maapealselt mättalt vaadates lõpuks teada saada. Mind üllatasid ka arvukad seosed nähtuste vahel, mis inimeste olemasolu üldise võimalikuks teevad. Et asi oleks selge, siis minu vaatepunkt pole religioosne. Ma ei tunne vajadust leida eesmärki ega tähendust. Ometi ei saa ma midagi parata, kui hoomates universumi tohutut suurust, meie minevikku ja seda, kuidas kõik kokku klapiib, tekivad minus tunded, mida me nimetame religioosseteks. Igapäevaelu tobedustega tegeldes annab see teatud perspektiivi.

Säärane uuem teadus on pannud mind teistmoodi vaatama nii maailmale kui paljudele universumi killukestele, mis löid Maa ja meid endid. Queensis üles kasvades nägin küll New Yorgi võimsaid hooneid,

kuid mitte kuigi palju loodust. See vähene loodus, millega ma kokku puutusin, oli püगतud parkideks ja muruplatsideks ning inimeste tuleku eelset oli selles säilinud õige vähe. Ent kui jalutate rannas, kõnnite tegelikult ju jahvatatud elusolenditel, õigemini nende kaitsvatel kestadel. Ka rannal või mõnes maanurgas nähtud lubjakivikaljud koosnevad kunagi ammu, miljoneid aastaid tagasi elanud olenditest. Tektooniliste laamade pörkumisel kerkisid mäed ja neid liikuma panev sulamagma pärineb ümber Maa tuuma koondunud radioaktiivsest ainst. Meie energia pärineb Päikese tuumaprotsessidest, ehkki tuumareaktsioonide kunagisest algusest peale on seda muundatud ja teisendatud paljudel erinevatel viisidel. Mitmed meie kasutatavad ressursid on moodustunud avakosmosest pärit raskematest elementidest, mida kandsid Maa pinnale asteroidid või komeedid. Ka mõned aminohapped saabusid siia meteoroididega, mis võisid kanda Maale elu või selle alged. Ent enne kui see juhtus, koondus tumeaine klompideks, mille gravitatsioon tõmbas ligi veel ainet, mis lõpuks moodustas galaktikad, galaktikaparved ja tähed nagu meie Päike. Tavaline aine, kui tähtis see ka meie jaoks pole, ei räägi meile veel kogu lugu.

Ehkki meil võib tekkida illusioon isoleeritud elukeskkonnast, meenutab igapäevane päikesetõus ning igaõine Kuu ja kaugemate tähtede ilmumine, et meie planeet pole üksinda. Tähed ja udukogud on veel üks tõend selle kohta, et elame galaktikas, mis paikneb sootuks suuremas universumis. Tiirleme orbiidil Päikesesüsteemis, kus aastajad meenutavad alati meie orientatsiooni ja asukohta selles. Koguni meie päevadel ja aastatel tuginev ajamõõtmise viis näitab meie seotust ümbritseva keskkonnaga.

Selle raamatuni viinud teadustööst ja lugemisvarast tõuseb minu jaoks esile neli innustavat õppetundi, mida tahaksin teiega jagada. Mulle on südamelähedane rahuldus, mida mulle pakub taipamine, kuidas universumi osad on omavahel nii paljudel olulistel viisidel seotud. Suur, kõige fundamentaalsemal tasemel õppetund on see, kuidas elementaarosakeste füüsika, kosmose füüsika ja elu enese bioloogia omavahel seo-

tud on – mitte mingis New Age'i tähenduses, vaid tähelepanuväärsel ja vägagi mõistmist väärival moel.

Avakosmosest pärit objektid tabavad Maad pidevalt. Ometigi valitseb Maa ja selle ümbruse vahel armastuse ja vihkamise suhe. Osa sellest, mis meid ümbritseb, toob planeedile kasu, väga palju on aga sootuks surmav. Planeedi asukoht tagab õige temperatuuri; välisplaneedid juhvivad kõrvale enamiku asteroididest ja komeetidest, enne kui need jõuavad Maad tabada; Kuu ja Maa vahekaugus on piisav, et stabiliseerida orbiiti ja vältida suuremaid temperatuurikõikumisi ning Päikesesüsteemi välispiirkonnad varjavad meid ohtliku kosmilise kiirguse eest. Maad tabanud meteoroidid võisid siia tuua elu arenemiseks esmavajalikke ressursse, kuid mõjutasid elu arengut planeedil ka mitte nii soodsal moel. Vähemalt üks selline objekt põhjustas 66 miljonit aastat tagasi ränga väljasuremislaine. Kuigi tabamus pühkis minema maismaadinosaurused, sillutas see ühtlasi teed suuremate imetajate, sealhulgas inimeste endi tulekule.

Teine, samuti väga muljetavaldav õppetund on see, kuivõrd värsked on paljud teadusavastused, mida ma siin käsitlen. Võib-olla saaksid inimesed teha sellise avalduse inimkonna ajaloo igal hetkel, kuid väite kehtivus sellest ei vähene: viimase [siia pane kontekstist sõltuv arv] aasta jooksul on teadmised arenenud tohutult kiiresti. Minu kirjeldatud uurimistöö puhul jääb see arv alla viiekümne. Tegeldes omaenda uurimistööga ja lugedes teiste töid, hämmastas mind alailma, kuivõrd uued ja sügavalt revolutsioonilised on nii paljud hiljutised avastused. Inimeste nutikus ja jäärapäisus ilmutavad end alati, kui teadlased üritavad kokku sobitada sageli üllatavaid, alati põnevaid ja vahel hirmutavaid asju, mida me maailma kohta teada saame. Selles raamatus esitletav teadus on osa pikemast loost – 13,8 või 4,6 miljardist aastast, olenevalt sellest, kas keskenduda universumile või Päikesesüsteemile. Lugu sellest, kuidas inimesed need ideed lahti harutasid, on aga vaevu sajandist vanem.

Dinosaurused surid välja 66 miljonit aastat tagasi, kuid paleontoloogid ja geoloogid taipasid väljasuremise põhjust alles 1970. ja 1980. aastatel. Kui asjakohased hüpoteesid olid kord tekkinud, võttis vaid mõnikümmend aastat, kuni teaduskogukond neid põhjalikumalt hindama hakkas. Ajastus ei olnud päris juhuslik. Väljasuremiste

seostamine maavälise objektiga muutus usutavamaks pärast seda, kui astronautid olid jõudnud Kuule ja näinud lähedalt kraatreid, mis andsid üksikasjalikku tõendusmaterjali Päikesesüsteemi muutlikust olemusest.

Viimase 50 aasta jooksul on osakestefüüsika ja kosmoloogia suured edusammud andnud meile standardmudeli, mis kirjeldab materia põhielemente nii, nagu me neist praegu aru saame. Tumeaine ja tumeenergia hulk universumis sai selgeks alles 20. sajandi viimastel kümnenditel. Samal ajal muutusid ka meie teadmised Päikesesüsteemist. Alles 1990. aastatel avastasid teadlased Kuiperi vöö objektid Pluuto naabruses ning tõestasid, et Pluuto ei tiirle seal üksi. Planeetide arv vähenes, aga ainult seetõttu, et koolis õpitav teadus on nüüd põhjalikum ja keerukam.

Kolmas suur õppetund keskendub muutuste tempole. Looduslik valik võimaldab kohastuda, kui liigil on arenemiseks aega. Kohastumine ei tule aga toime radikaalsete muutustega. Selleks on see kaugelt liiga aeglane. Dinosaurustel polnud võimalust valmistuda 10-kilomeetrise läbimõõduga meteoroidi kukkumiseks Maale. Nad ei saanud kohastuda. Neil, kes elasid maismaal ja olid maa sisse pugemiseks liiga suured, polnud mitte kuskile minna.

Sedamööda, kuidas ilmusid uued ideed ja tehnoloogiad, on suurt rolli mänginud ka vaidlused selle üle, kas muutused olid katastroofilised või järkjärgulised. Võti enamiku uute arengute mõistmiseks, olgu need siis teaduslikud või mõnd muud laadi, peitub kirjeldatud protsesside tempos. Kuulen sageli, kuidas inimesed leiavad, et teatud arengud, näiteks geneetikauuringud või internetist tulenevad edusammud, on enneolematult tähtsad. See pole päris tõi. Põhjalikumad, sadu aastaid tagasi tekkinud teadmised haigustest või vereringest töid kaasa vähemalt sama suuri muutusi, kui tänapäeval toob geneetika. Kirjakeele ja hiljem trükipressi kasutuselevõtt mõjutasid seda, kuidas inimesed teadmisi omandavad ja kuidas mõtleavad, viisil, mis on vähemalt sama tähtis kui internetist tingitud muutus.

Nagu toonaste arengute puhul, on ka praegu väga tähtis tegur muutuste kiirus – see ei puuduta üksnes teadusprotsesse, vaid ka keskkonna ja ühiskonna muutumist. Hukkumine meteoroidi tõttu pole praegu tõenäoliselt kuigi suur mureallikas, kuid keskkonna üha kiire-

nev muutumine ja väljasuremised jällegi on – ja mõju võib olla mitutpidi võrreldav. Selle raamatu üpris varjamatu eesmärk on aidata paremini mõista fantastilist lugu sellest, kuidas me siia sattusime, ja ergutada neid teadmisi paremini kasutama.

Sellegipoolest on neljandaks õppetunniks silmapaistev teadus, mis kirjeldab maailma ja selle arengu sageli varjatud elemente ning seda, mil määral me võime loota, et suudame universumit mõista. Paljusid inimesi ajab põnevile idee multiversumist – teistest, meile kättesaamatutest universumitest. Vähemalt sama põnevad on aga arvukad varjatud maailmad, nii bioloogilised kui füüsikalised, mida meil on võimalus uurida ja lähemalt tundma õppida. Raamatus „Tumeaine ja dinosaurused“ loodan anda teile aimu, kui huvitav võib olla arutleda selle üle, mida me teame – ja selle üle, mida me võiksime välja nuputada tulevikus.

Meie raamat algab kosmoloogiast – teadusest, mis uurib, kuidas universum on oma praeguse olekuni jõudnud. Esimene osa tutvustab Suure Paugu teooriat, kosmoloogilist inflatsiooni ja universumi koostist. See osa selgitab ka, mis on tumeaine, kuidas me tegime kindlaks selle olemasolu ja miks see on universumi struktuuri seisukohalt tähtis.

Tumeaine moodustab 85 protsenti universumi kogumainest, sellal kui tavaline aine – see, millest koosnevad tähed, gaas ja inimesed – ainult 15 protsenti. Ometi on inimesed tegelenud peamiselt tavalise aine olemasolu ja tähtsusega, mis õigupoolest küll avaldab ka palju tugevamat vastasmõju.

Ent täpselt nagu inimkonna puhul, pole mõttekas suunata kogu tähelepanu ainult väikesele osale, mille mõju on ebaproportsionaalselt suur. Valitsev 15 protsenti ainet, mida tunname ja näeme, on ainult osa kogu loost. Selgitan tumeaine tähtsat rolli universumis – nii galaktikate kui galaktikaparvede moodustumises varase universumi amorfsest kosmilisest plasmast kui nende struktuuride stabiilsuse säilitamises.

Teine osa raamatust koondab tähelepanu Päikesesüsteemile. Loomulikult saaks ainuüksi Päikesesüsteemist kirjutada terve raamatu, kui

mitte entsüklopeedia. Seega keskendun objektidele, mis võisid puudutada dinosaurusi – meteoroididele, asteroididele ja komeetidele. See osa kirjeldab objekte, mille kohta on teada, et need tabasid Maad ja eeldatavasti tabavad seda ka tulevikus; samuti nappidele, kuid siiski mitte niisama lihtsalt kõrvale heidetavatele tõenditele väljasuremistest või meteoroiditabamustest, mida esineb regulaarselt umbes iga 30 miljoni aasta tagant. Selles käsitlen nii elu teket kui hävimist, vaadates üle, mida me teame umbkaudu viiest massilisest väljasuremisest, sealhulgas dinosaurused hävitanud laastavast sündmusest.

Raamatu kolmas ja viimane osa paneb kokku kahe esimese osa ideed ja algab käsitlusega tumeaine mudelitest. Juttu tuleb tuttavamate mudelitest tumeaine olemuse kohta, samuti uuematest hüpoteesidest tumeaine vastasmõjude teemal, millele eespool vihjasin.

Praegusel hetkel teame ainult seda, et tumeaine ja tavaline aine mõjutavad teineteist gravitatsiooni kaudu. Gravitatsioon avaldub üldjuhul nii nõrgalt, et suudame selle mõju registreerida üksnes tohutu massiga taevakehade, näiteks Maa või Päikese puhul – ja ka siis on see üpris tagasihoidlik. Lõppude lõpuks võite ju kirjaklambri magnetiga üles tõsta ja see konkureerib edukalt kogu Maa gravitatsioonilise mõjuga.

Tumeaine võib aga tunda ka teisi jõude. Meie uus mudel paneb kahtluse alla eelduse (ja eelarvamuse), et inimestele tuttava aine ainulaadsus tuleneb jõududest – elektromagnetismist, nõrgast ja tugevast vastasmõjust –, mille kaudu see avaldab vastasmõju. Gravitatsioonist palju tugevamad jõud ehk fundamentaalsed vastasmõjud seisavad maailma paljude huvitavate omaduste taga. Aga mis siis, kui osa tumeainest avaldab ka tugevat mittegravitatsioonilist vastasmõju? Kui see on nii, siis võiksid tumeaine jõud anda olulisi tõendeid elementaarosakeste ja makroskoopiliste nähtuste vaheliste seoste ulatumisest palju kaugemale, kui meile siiani teada on.

Kuigi põhimõtteliselt võivad kõik universumi objektid olla omavahel vastasmõjus, on suurem osa sellistest vastasmõjudest mõõtmiseks liiga väikesed. Vaadelda saab ainult selliseid objekte, mis meid tuvasataval määral mõjutavad. Kui miski avaldab ainult väikest mõju, võib see küll olla otse nina all, kuid siiski märkamata jääda. Tõenäoliselt ongi see põhjus, miks üksikud tumeaine osakesed, mida leidub oletatavasti kõikjal meie ümber, on seniajani avastamata jäänud.

Kolmas osa raamatust näitab, kuidas avaram vaatenurk tumeainele ja küsimus, miks peaks tume universum olema lihtne, kui meie oma on samas nii keerukas, sunnivad meid kaaluma mõningaid uudseid võimalusi. Ei saa välistada, et osa tumeainest tunneb omaenda jõudu – tumedat valgust, kui soovite. Kui suurem osa tumeainest loetakse tavaliselt suhteliselt vähemõjusa 85 protsendi hulka, võiksime äsja välja pakutud tumeainetüüpi liigitada tõusvaks keskklassiks, mille vastasmõjud matkivad meile tuttava aine omi. Need täiendavad vastasmõjud mõjutaksid Galaktika ehitust ja võimaldaksid sellel osal tumeainest mõjutada ka tähtede ja teiste objektide liikumist tavaainemaailmas.

Järgmise viie aasta jooksul mõõdavad satelliidivaatlused Galaktika kuju, koostist ja omadusi detailsemalt kui eales varem. Need räägivad meie galaktilisest keskkonnast palju uut ja testivad, kas selle raamatu ideed peavad paika või mitte. Selliste vaadeldavate mõjude leidmine teeks tumeainest ja meie mudelist tõelise teaduse, mis väärrib uurimist ka siis, kui tumeaine polegi see ehitusklots, millest teie ja mina tehtud oleme. Kõnealuste mõjude tagajärgede sekka võivad kuuluda ka meteoroiditabamused, mis omakorda võiksid olla raamatu pealkirjas viidatud seoseks tumeaine ja dinosauruste kadumise vahel.

Neid nähtusi ühendavad taust ja mõisted annavad meile universumist põhjaliku kolmemõõtmelise pildi. Minu eesmärk selle raamatu kirjutamisel oli neid ideid jagada ning julgustada teid uurima, hindama ja kaitsma meie maailma tähelepanuväärset rikkust.

PEAAEGU PÄRIS ALGUS: VÄGA HEA KOHT HAKATUSEKS

Hiljuti üllatas üks naljakas ja jutukas Vene teoreetiline füüsik kohvilauas kõiki, kui kirjeldas kollokviumi, mida ta järgmiseks nädalaks kavandas. Füüsikakollokvium on üldine jututuba, mis on suunatud tudengitele, järeldoktoritele ja professoritele, kel kõigil on füüsika-taust, ehkki mitte tingimata sama fookusega kui kõneleja kitsam eriala. Selle konkreetse füüsiku kirjeldus tema väljapakutud kollokviumi kohta kõlas: „Ma räägin kosmoloogiast.“ Kui ma märkisin, et teema võib olla laiavõitu – kosmoloogia on lõppude lõpuks terve eraldi teadus –, väitis ta, et kosmoloogias on ainult mõned ideed ja mõõtmist väärivad suurused ning ta võib need – koos omaenda panusega – tunnipikkuse ettekande jooksul läbi käia.

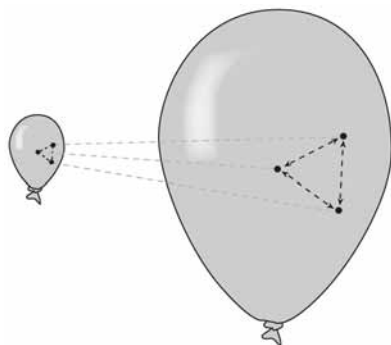
Jätan teie hinnata, kas selline äärmuslik ettekujutus kosmoloogiast on tegelikult tõene – omalt poolt julgen selles kahelda. Uurida ja mõista on meil veel paljugi. Ent tõepoolest, osa universumi varase arengu ilust peitub asjaolus, et see on mitmes mõttes üllatavalt lihtne. Vaadates ühtainust taevast, mida astronoomid ja füüsikud tänapäeval uurivad, võime tuletada fakte universumi miljardite aastate taguse koostise ja tollal toimunu kohta. Selles peatükis tegeleme erakordse arenguga meie teadmistes universumi ajaloo kohta, mida möödunud sajandi kaunid teooriad ja mõõtmised meile tõid.

SUURE PAUGU TEOORIA

Meil puuduvad vahendid, millega päris algust usaldusväärsetl kirjeldada. Et me ei tea, kuidas universum alguse sai, ei tähenda siiski, nagu me ei teaks juba päris paljut. Erinevalt päris algushetkest, mida ei seleta ükski tuntud teooria, said füüsikaseadused alguse vaid sekundi murdosa jooksul pärast universumi sünni. Rakendades relatiivsusevõrrandeid ja kasutades lihtsustatud eeldusi universumi koostise kohta, saavad füüsikud universumi käitumise kohta vaid hetk pärast selle sünni – vahest ehk 10^{-36} sekundit – päris palju välja arvutada ning sellest hetkest alates kirjeldab universumi paisumist Suure Paugu teooria. Sel varajasel hetkel täitsid universumit aine ja kiirgus, mis olid ühetalised ja isotroopsed – ühesugused kõigis kohtades ja suundades –, seega piisab nende varajaste füüsikaliste omaduste kirjeldamiseks vaid vähestest näitajatest. See teeb universumi varajase arengu lihtsaks, ennustatavaks ja mõistetavaks.

Suure Paugu teoorias on kesksel kohal universumi paisumise idee. 1920. ja 1930. aastatel lahendasid Vene meteoroloog Aleksander Friedmann, Belgia preester ja füüsik Geoffrey Lemaitre, Ameerika matemaatik ja füüsik Howard Percy Robertson ja Briti matemaatik Alexander Geoffrey Walker – viimased kaks töötasid koos – Einsteini üldrelatiivsusevõrrandid ja tuletasid neist, et universum peab ajas kasvama või kokku tõmbuma. Lisaks sellele arvutasid nad välja, kuidas ruumi paisumiskiirus reageerib gravitatsioonilisele mõjule, mida avaldavad aine ja kiirgus, mille mõlema energiatihedus universumi arengu jooksul samuti muutub.

Universumi paisumine võib tunduda veider mõte, arvestades, et üsna tõenäoliselt on universum olnud alati lõpmatu. See on aga ruum ise, mis paisub, mis tähendab, et vahemaa objektide, näiteks galaktikate vahel aja jooksul kasvab. Minult küsitakse sageli: „Kui universum paisub, kuhu ta siis paisub?“ Vastus on, et see ei paisu mitte millessegi. Ruum ise kasvab. Kui kujutlete universumit õhupalli pinnana, siis õhupall ise venib (vt joonis 4). Kui märgite õhupalli pinnale kaks punkti, liiguvad need punktid teineteisest eemale, täpselt nagu galaktikad paisuvas universumis üksteisest eemalduvad. Analoogia pole täielik, sest õhupalli pind on ainult kahemõõtmeline ja see paisub



Joonis 4. Galaktikad liiguvad universumi paisudes üksteisest eemale samamoodi, nagu õhupalli täispuhumisel liiguvad teineteisest eemale sellel olevad punktid.

tegelikult kolmemõõtmelises ruumis. Analoogia töötab üksnes juhul, kui kujutleda, et peale õhupalli midagi muud ei olegi olemas, et see ongi ruum ise. Kui see oleks tõsi; kui poleks midagi muud, millesse paisuda, liiguksid märgitud punktid ikkagi teineteisest kaugemale.

ÕHUPALLIVERSUM

Et analoogia oleks veelgi täpsem, peaks paisuma üksnes märgistatud punktide vaheline ruum, mitte aga punktid ise. Isegi paisuvas universumis ei avalda galaktikaid üksteisest eemale tõukav paisumine mõju tähtedele, planeetidele ega millelegi muule, mida hoiavad piisavalt tihedalt koos teised jõud või tugevam gravitatsiooniline mõju. Tänu elektromagnetjõududele lähestikku püsivast tuumast ja elektronidest koosnevad aatomid suuremaks ei kasva. Samuti ei kasva suhteliselt tugevalt seotud struktuurid, nt galaktikad, ega ka meie endi kehad, mille tihedus ületab universumi keskmist tihedust enam kui triljon korda. Paisumist põhjustav jõud mõjub ka kõigile neile tihedalt koos püsivatele kehadele, kuid kuna teiste jõudude mõju on sedavõrd palju suurem, ei kasva kehad ega galaktikad koos universumi paisumisega, või kui kasvavadki, siis sedavõrd tühisel määral, et me ei suuda seda mõju kunagi märgata ega mõõta. Aine, mida koos hoidvad jõud on

paisumisjõust tugevamad, hulk jääb samaks. Kasvab ainult kaugus objektide vahel, kui ruumi laienemine neid lahku veab.

Einstein oli esimene, kes oma relatiivsusevõrranditest universumi paisumise tuletas. Tema tegi seda aga enne, kui mistahes paisumise mõõtmise võimalikuks muutus, mistõttu ta selle tulemusega ei leppinud ega propageerinud seda. Püüdes oma teooria ennustusi staatilise universumiga lepitada, võttis Einstein kasutusele uue energiaallika, mis tema meelest võinuks ennustatud paisumist kõrvaldada. Selle nipi ekslikkust tõestas 1929. aastal Edwin Hubble, kui ta avastas, et universum tõepoolest paisub ja galaktikad üksteisest aja jooksul eemalduvad (ehkki, kui uskumatu see ka poleks, ei nõustunud ka tema kui vaatleja, kes ühtegi konkreetset teooriat ei usaldanud, oma tulemuste tõlgendusega). Einstein loobus kergel käel oma eksitusest ja ta olevat (vahest küll apokrüüfiliselt) nimetanud seda „oma suurimaks äparduseks“.

Siiski polnud see muudatus päriselt vigane, kuna Einsteini välja pakutud energia on tõepoolest olemas. Hilisemad mõõtmised on näidanud, et tema lisatud uut laadi energia, mida me nüüd nimetame tumeenergiaks, pole küll nii võimas ega seda tüüpi, mis takistaks universumi paisumist, kuid on siiski vajalik, et seletada viimaseid vaatlusi hoopis vastupidise efekti, universumi kiireneva paisumise osas. Mina arvan, et Einstein pidas oma äparduseks (kui ta seda tõesti nii nimetas) võimetust taibata algse paisumisennustuse, mida võinuks pidada tema teooria tähtsaimaks ennustuseks, õigsust ja tähendust.

Õigust öelda teati enne Hubble'i tulemuste avaldamist universumi kohta üsna vähe. Harlow Shapley oli mõõtnud Linnutee läbimõõduks 300 000 valgusaastat, kuid tema oli kindel, et Linnutee ongi kogu universum. 1920. aastatel taipas Hubble, et see pole tõsi, kui avastas, et paljud udukogud, mida Shapley oli pidanud tolmutpilvedeks ja mis seetõttu said nõnda labase nime, olid tegelikult teised, miljonite valgusaastate kaugusel asuvad galaktikad. Aastakümne lõpupoole tegi Hubble veel tähtsama avastuse – *galaktikate punanihke*, valguse sageduse nihke, mis ütles teadlastele, et universum paisub. Galaktikate punanihe – nagu kiirabiauto sireeni madalamaks muutumine, mis näitab, et masin liigub eemale – ütles, et teised galaktikad eemalduvad

meie omast ja see tähendab, et elame universumis, kus galaktikate vahemaa kasvab.

Tänapäeval räägime vahel Hubble'i konstandist, mis on universumi praegune paisumiskiirus. Konstant on paisumiskiirus selles mõttes, et praegusel hetkel on selle väärtus kõikjal ühesugune. Tegelikult aga pole Hubble'i parameeter konstant. See muutub ajas. Universumi alguses, mil kõik oli tihedam ja gravitatsiooniline mõju tugevam, paisus universum praegusest palju kiiremini.

Veel üsna hiljuti tähendas praegust paisumiskiirust näitava Hubble'i parameetri „möödetud“ väärtuste küllalt lai vahemik, et me ei osanud universumi vanust täpselt paika panna. Universumi eluiga sõltub Hubble'i parameetri pöördväärtusest ja kui selle mõõtmistulemuse ebakindlus on kahekordne, kehtib samasugune ebakindlus ka universumi vanuse kohta.

Mäletan, kuidas lugesin lapsena ajalehest, et mingi hiljutine mõõtmine põhjustas universumi vanuse ülevaatamist just sellisel määral. Teadmata, et tegu oli paisumiskiiruse mõõtmisega, mäletan oma hämmastust nii suure muutuse üle. Kuidas sai nii vabalt muutuda miski sedavõrd tähtis nagu universumi vanus? Tuleb välja, et isegi universumi täpselt vanust teadmata saame selle arengust kvalitatiivsel tasandil teada päris palju. Siiski soodustab vanuse teadmine ka universumi koostise ja selle aluseks olevate füüsikaliste protsesside paremat mõistmist.

Nüüdseks on see ebakindlus igatahes märksa paremini kontrolli all. Wendy Freedman, toonane Carnegie observatooriumi töötaja, mõötis koos kolleegidega universumi paisumiskiirust ja pani vaidlusele punkti. Õigupoolest, kuna Hubble'i parameeter on kosmoloogias sedavõrd tähtis, tehti selle suurima võimaliku täpsuse tagamiseks kontsentreeritud jõupingutus. Kasutades Hubble'i kosmoseteleskoopi (nime arvestades igati õiglaselt), said astronoomid mõõtetulemuseks 72 km/s/Mpc (mis tähendab, et megaparseki kaugusel asuv objekt eemaldub kiirusega 72 km/s) täpsusega 11 protsenti – hoopis teine tase võrreldes Hubble'i algse, väga ebatäpse tulemusega 500 km/s/Mpc.

Megaparsek (Mpc) on miljon parsekit ja, nagu paljud astronoomilised ühikud, ajalooline jäänuk kauguste mõõtmise vanematest

meetoditest. See on lühendatud versioon parallaxisekundist ja selles sisaldub nurgäühik, kuna mõõtühik on seotud taevase objekti nurkliikumisega. Kuigi hulk astronoomie kasutab neid, nagu teisi mitteintuitiivseid, ajaloolistel põhjustel käibel olevaid ühikuid tänini, eelistab suurem osa parsekeid vältida. Selle teisendamisel pisut tuttavamaks mõõtühikuks võtame aluseks, et parsek on umbkaudu 3,3 valgusaastat. On üsna õnnelik kokkulangevus, et nii saladuslikul mõõtühikul on olemas lihtsamini tõlgendatav ekvivalent.

Hubble'i teleskoobiga palju täpsemalt mõõdetud Hubble'i parameetri potentsiaalne ebakindlus võis olla 10–15 protsenti, kuid enam mitte kahekordne. Hilisemad, kosmilise mikrolainefooni kiirgusandmete mõõtmisel põhinevad tulemused on veelgi täpsemad. Universumi vanus on nüüd teada täpsusega paarsada miljonit aastat, ja mõõtmistulemused lähevad üha täpsemaks. Kui kirjutasin oma esimest raamatut, peeti universumi vanuseks 13,7 miljardit aastat, kuid nüüd arvatakse, et see on pisut vanem – 13,8 miljardit aastat nn Suurest Paugust. Pange tähele, et tulemuse täpsustumine ei tulene üksnes Hubble'i parameetri muutumisest, vaid ka 1. peatükis mainitud tumeenergia avastamisest, kuna universumi vanus sõltub mõlemast.

SUURE PAUGU ENNUSTUSED

Suure Paugu teooria kohaselt sai varajane universum alguse 13,8 miljardit aastat tagasi kuuma tiheda tulekerana temperatuuriga enam kui triljon triljonit kraadi, mis koosnes paljudest vastasmõjus osakestest. Kõik tuntud (ja ilmselt ka senitundmatud) osakesed vihisesid ringi valguse kiirusele lähedase kiirusega, pidevalt üksteist mõjutades, annihileerudes ja, nagu ütleb Einsteini teooria, energiast tekkides. Kõigil materia tüüpidel, mis olid omavahel piisavalt tugevas vastasmõjus, oli ühesugune temperatuur.

Kuumat tihedat gaasi, mis universumit selle varastes faasides täitis, nimetavad füüsikud *kiirguseks*. Kosmoloogilises mõttes defineeritakse kiirgusena kõik, mis liigub relativistlikel kiirustel ehk siis valguse või sellele väga lähedasel kiirusel. Et objekti loetaks kiirguseks, peab liikumishulk ehk impulss olema sedavõrd suur, et selle energia ületab

kaugelt objekti massis salvestunud energia. Varajane universum oli nii pööraselt kuum ja energiline, et seda moodustav fundamentaaloskestest koosnev gaas vastas kriteeriumile erilise vaevata.

Universumis olid olemas ainult fundamentaalosakesed, mitte aga näiteks aatomid, mis koosnevad tuumadest, mis on seotud elektronide või prootonitega, viimased omakorda koosnevad aga veelgi fundamentaalsematest osaketest – kvarkidest. Kuna kuumus ja energia olid sedavõrd suured, ei saanud ükski objekt koos püsida.

Kui ruum paisus, hakkasid universumi täitvad kiirgus ja osakesed lahjenema ja jahtusid. Need käitusid nagu õhupallis olev kuum õhk, mis jahtub ja mille tihedus õhupalli paisudes väheneb. Kuna iga energiakomponendi gravitatsiooniline mõju mõjutab paisumist erinevalt, võimaldab universumi ajas paisumise uurimine astronoomidel kiirguse, aine ja tumeenergia panused ühekaupa lahti harutada. Aine ja kiirgus lahjenevad paisumisega, kuid kiirgus, mis liigub punanihkega madalamale energiatasemele (nagu väheneb eemalduva sireeni sagedus), lahjeneb mateeriast veel kiiremini. Tumeenergia seevastu ei lahjene üldse.

Sedamööda kuidas universum jahtus ning selle temperatuurist ja energiatihedusest ei piisanud enam mingi konkreetse osakese loomiseks, hakkas toimuma märkimisväärseid sündmusi. Need juhtusid siis, kui osakese kineetiline energia ei ületanud enam mc^2 , kus m on osakese mass ja c on valguse kiirus. Ükshaaval osutusid massiivsed osakesed jahtuva universumi jaoks liiga raskeks. Antiosakestega ühinedes rasked osakesed annihileerusid, muundudes energiaks, mis omakorda kuumutas allesjäänud kergemaid osakesi. Sel moel toimus raskete osakeste lahtisidestamine ja kadumine.

Kuigi universumi sisu teiseses, ei juhtunud midagi vaadeldavat enne, kui mõni minut pärast Suurt Pauku. Nõnda hüppamegi ajas edasi hetke, mil universumi koostises toimus oluline muutus – ja see toimus tõestatavalt. Ülalmainitud Hubble'i paisumine oli üks Suure Paugu teooriat tõestavaid argumente. Kaks olulist mõõtmistulemust, mis mõlemad olid seotud universumi koostisega, kinnitasid veelgi füüsikute veendumust, et teooria on õige. Esmalt vaatame lähemalt ennustusi väga varajases universumis moodustunud erinevat tüüpi

tuumade suhtelistest osakaaludest, mis päris hästi klapivad vaadeldud tihedustega.

Mõni minut pärast Suurt Pauku lõpetasid prootonid ja neutronid omaette ringilendamise. Temperatuur langes piisavalt, et osakesed said ühineda tuumadeks, milles neid hoidsid koos tugevad tuumajõud. Selleks ajaks ei toiminud enam ka materia vastasmõjud, mis esialgu olid hoidnud prootonite ja neutronite arvu võrdsena. Kuna neutronid said nõrga tuumajõu mõjul endiselt laguneda prootoniteks, hakkas nende suhteline kogus vähenema.

Kuna neutronite lagunemine toimub küllaltki aeglaselt, jäi oluline osa neutroneid alles piisavalt kauaks, et neelduda tuumadesse koos olemasolevate prootonitega. Moodustusid heeliumi, deuteeriumi ja liitiumi tuumad ja tekkis nende elementide, aga ka vesiniku (mille tihedus heeliumi moodustumisel vähenes) kosmiline reliktkogus. Erinevate elementide jääkkoguse määras ära ühelt poolt prootonite ja neutronite suhteline hulk, teiselt poolt kiirus, millega vajalikud füüsikalised protsessid võrreldes universumi paisumise kiirusega toimusid. Nõnda võimaldavad *nukleosünteesi* (nagu seda protsessi nimetatakse) ennustused panna proovile nii tuumafüüsika teooria kui Suure Paugu paisumise üksikasjad. Kinnitades ühtaegu Suure Paugu teooriat kui tuumafüüsikat, langevad vaatlused ennustustega kokku päris tähelepanuväärsel määral.

Need mõõtmistulemused ei kinnitanud üksnes olemasolevaid teooriaid, vaid piiritlesid ka uusi. Põhjus on selles, et tuumade külluse määrava ajamomendi paisumiskiirus oli tingitud peamiselt meile juba tuntud ainetüüpides sisalduvast energiast. Millist uut ainet tollal ka ei eksisteerinud, ei saanud see anda kuigi palju energiat, vastasel juhul olnuks paisumiskiirus liiga suur. See piirang on mulle ja mu kolleegidele tähtis, kui kaalume spekulatiivsemaid ideid sellest, mille eksisteerimine universumis üldse võimalik on. Ainult väike kogus aine uudsetest vormidest saanuks nukleosünteesi käigus olla tasakaalus ja samal temperatuuril kui tuntud aine.

Nende ennustuste edu ütleb meile ka seda, et isegi praegusel ajal ei saa tavalise aine hulk olla vaadeldust palju suurem. Liiga palju tavalist ainet – ja tuumafüüsika ennustused ei klapiks enam raskete elemen-

tide vaadeldava küllusega universumis. Koos eelmises peatükis kirjeldatud mõõtmistulemustega, mille kohaselt helendavast ainest vaatluste selgitamiseks ei piisa, ütlevad nukleosünteesi edukad ennustused, et kogu universumis vaadeldud aine ei saa olla tavaline aine, mis suuresti kustutab lootused, et aine on nähtamatu ainult seetõttu, et ei põle ega peegelda piisavalt. Kui tavalist ainet oleks palju rohkem kui vaadeldud helendavat ainet, ei saaks edukad tuumafüüsika ennustused ilma mõne uue koostisosata enam kehtida. Kui tavaline aine ei saa nukleosünteesi käigus just kuidagi peitu pugada, tuleb järeldada, et tumeaine peab eksisteerima.

Vahest ehk kõige tähtsam teetähis universumi arengus, vähemalt kosmoloogiliste ennustuste üksikasjaliku testimise seisukohast, tuli pisut hiljem, 380 000 aastat pärast Suurt Pauku. Algselt oli universum täis nii laetud kui laenguta osakesi. Sel hilisemal ajahetkel aga oli universum jahtunud piisavalt, et positiivselt laetud tuumad said ühineda negatiivselt laetud elektronidega ja moodustada neutraalsed aatomid. Sellest hetkest peale koosnes universum neutraalsest ainest – ainest, millel puudub elektriline laeng.

Footonite, elektromagnetjõudu kandvate osakeste jaoks oli selline laetud osakeste kogunemine aatomiteks tähtis muutus. Kuni puudusid footoneid kõrvale kallutavad laetud osakesed, said footonid universumis liikuda takistamatult. See tähendab, et varajasest universumist pärinev kiirgus ja valgus saavad meieni jõuda otse, sisuliselt sõltumata igasugusest keerukamast edasisest arengust, mis universumis edaspidi võis toimuda. Foonkiirgus, mida me tänapäeval näeme, on kiirgus, mis eksisteeris 380 000 aastat pärast universumi tekkimist.

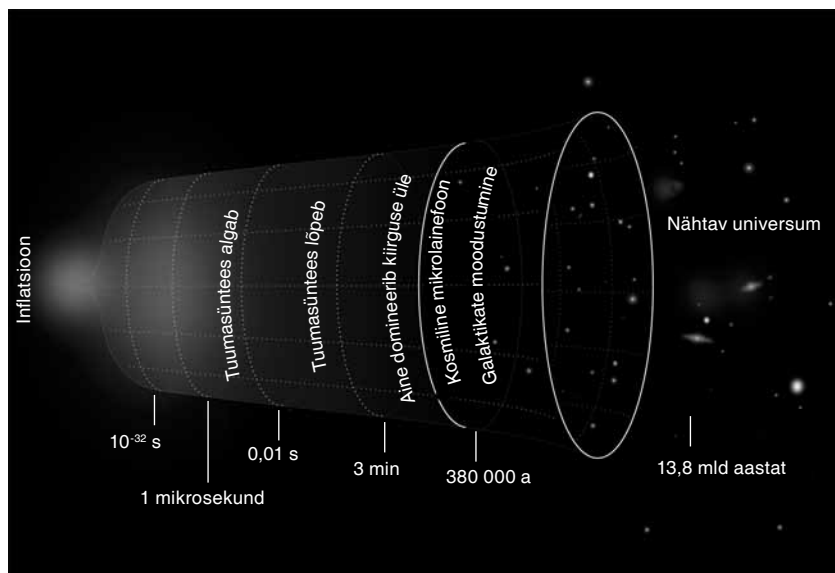
See kiirgus on sama kiirgus, mis oli olemas kohe pärast seda, kui universum alustas oma Suure Paugu järgset paisumist, kuid nüüd on selle temperatuur palju madalam. Footonid jahtusid, kuid ei kadunud. Kiirguse praegune temperatuur on 2,73 kelvinit*, mis on väga külm. Kiirguse temperatuur on vaid mõni kraad soojem kui null kelvinit – mida tuntakse ka absoluutse nullina, kõige külmema temperatuurina, mis saab eksisteerida.

* Temperatuurierinevused kelvinites on samad kui Celsiuse kraadides, kuid minimaalne võimalik temperatuur on 0 kraadi, mitte aga -273,15 kraadi nagu Celsiuse skaalal või -459,67 kraadi nagu Fahrenheiti skaalal. (*Autori märkus*)

Mõnes mõttes oli selle kiirguse avastamine Suure Paugu teooria „suitsev püssitoru“, vahest ehk kõige veenvam tõend võrrandite õigsuse kohta. Saksamaal sündinud astronoom Arno Penzias ja ameeriklane Robert Wilson avastasid kosmilise mikrolainefooni juhuslikult 1963. aastal New Jersey Bell Labsi teleskoobi abil. Penzias ja Wilson ei otsinud üldse kosmoloogilisi jäänukeid. Neid huvitasid raadioantennid kui astronoomia uurimise vahend. Loomulikult oli raadiolainetest huvitatud ka telefonifirmaga seotud Bell Labs.

Kui aga Penzias ja Wilson üritasid oma teleskoopi kaliibrida, jäädvustasid nad ühtlase taustamüra (nagu staatiline müra), mis tuli kõigist suundadest ega muutunud koos aastaaegadega. See ei kadunud kunagi, seega teadsid nad, et ei saa seda eirata. Kuna taustamüral puudus eelostatud suund, ei saanud see pärineda lähedalasuvast New Yorgi linnast, Päikeselt ega aastatagustest tuumarelvakatsetustest. Pärast teleskoobis pesitsenud tuvide sõnniku koristamist järeldasid nad, et põhjuseks ei saanud olla ka tuvide „valge dielektriline materjal“, nagu Penzias seda viisakalt nimetas.

Robert Wilson rääkis mulle loo, kuidas neil oma avastuse ajastamisega vedas. Nemad ei teadnud Suurest Paugust midagi, küll aga teadsid sellest lähedalasuva Princetoni ülikooli teoreetilised füüsikud Robert Dicke ja Jim Peebles. Princetoni füüsikud tegelesid parajasti eksperimendi kavandamisega, et mõõta foonkiirgust, mis nende meelest pidi olema Suure Paugu teooria üks tähtsamaid järeldusi, kui nad avastasid, et neist on ette jõutud – nimelt said sellega hakkama Bell Labsi teadlased, kes ise polnud veel taibanud, mida nad leidsid. Penziase ja Wilsoni õnneks teadis Massachusettsi tehnoloogiainstituudi astronoom Bernie Burke, keda Robert Wilson kirjeldas mulle kui oma isiklikku varajast internetti, nii Princetoni uuringutest kui Penziase ja Wilsoni saladuslikust leiust. Burke pani kaks ja kaks kokku ning viis asjasse puutuvad inimesed omavahel kokku. Pärast teoreetilise füüsiku Robert Dickega konsulteerimist said Penzias ja Wilson aru oma avastuse tähtsusest ja väärtusest. Koos palju varasema avastusega Hubble'i paisumise kohta kinnitas foonkiirguse avastamine, mis 1978. aastal tõi kahele Bell Labsi füüsikule Nobeli preemia, Suure Paugu teooriat jahtuvast, paisuvast universumist.



Joonis 5. Universumi ajalugu inflatsiooni ja Suure Pauguga, sh aatomituumade moodustumine, struktuuri kujunemise algus, taevasse jäädvustatud kosmiline mikrolainefoon, ja praegune universum, kus on tekkinud galaktikad ja galaktikaparved.

See oli armas näide sellest, kuidas teadus toimib. Uurimistööga tegeldi ühel konkreetsel teaduslikul eesmärgil, kuid see andis täiendavaid tehnoloogilisi ja teaduslikke tulemusi. Astronoomid ei otsinud seda, mida nad lõpuks leidsid, kuid tänu väga kõrgele tehnoloogilisele ja teaduslikule tasemele ei heitnud nad oma leide kõrvale. Uurimistöö, mille eesmärgiks oli suhteliselt väike avastus, tõi kaasa ääretult suure tähendusega avastuse, millega nad said hakkama tänu sellele, et ka teised teadlased vaatasid samal ajal „suurt pilti“. Bell Labsi teadlaste avastus oli juhuslik, kuid muutis kosmoloogiat kui teadust igaveseks.

Enam veel, mõne aastakümne jooksul pärast seda avastust aitas foonkiirgus kosmoloogiat veelgi tublisti edasi viia. Märkimisväärse saavutusena aitas selle kiirguse üksikasjalik mõõtmine kinnitada ennustust *kosmoloogilisest inflatsioonist*, mille käigus toimus väga varajases järgus plahvatuslik paisumine.