

# Syvyyden ulottuvuudet

Jouni Huhtanen



Mack, Katie. (2021). *Kaiken loppu (tähtitieteellisesti ottaen)* (Kääntänyt Tuukka Perhoniemi). Ursa. 237 sivua.

**Y**hdysvaltalaisen astrofyysikon ja Pohjois-Carolinan valtionyliopiston apulaisprofessorin Katie Mackin (s. 1981) teos *Kaiken loppu* avaa näkyvän maailmankaikkeuden lopun viimeisiin hetkiin. Tutkimusta voi lukea eräänlaisena rinnakkaisteokseksi yhdysvaltalaisen fyysikon Dan Hooperin taannoin julkaistulle selvitykselle *Kaiken alku: Universumin ensimmäiset sekunnit* (2020). Tutkimukset poikkeavat toisistaan kuitenkin keskeisesti ajallisen perspektiivinsä puolesta. Siinä missä maailmankaikkeuden alun suhteen on yleensä riittävää kiinnittää huomiota alkuräjähdykseen ja muutamiin sen jälkeisiin sekunteihin, ovat maailmankaikkeuden lopun vaiheet vaikutuksiltaan huomattavan paljon hitaampia ja pitkäkestoisempia.

Tästä erosta huolimatta maailmankaikkeuden loppua on vaikea, ellei mahdoton ymmärtää ilman alun vaiheiden läpikäyntiä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että Mack joutuu muiden asiaa käsitelneiden tavoin selostamaan työssään jonkin verran maailmankaikkeuden syntyä ja alun perustavia kehitysvaiheita. Tekijä aloittaa tämän selostuksen (luku 2) hahmottamalla maailmankaikkeuden rajoja sekä ajan ja paikan suhteita valon nopeuden avulla ja siirtyy tämän jälkeen tarkastelemaan lähemmin alkuräjähdystä ja kosmista mikroaaltotaustasäteilyä.

Luku vaikuttaa hieman liian pitkältä suhteessa varsinaisiin maailmankaikkeuden loppua käsitteleviin lukuihin, mutta toisaalta lukijan on hyvä tietää ensin perusasiat kosmoksen synnystä ja kehityksestä. Tämä tarkoittaa kriittisiä huomioita muun muassa yhdysvaltalaisen fyysikoiden Arno Penzias'n (s. 1933) ja Robert Wilsonin (s. 1936) tekemistä taustasäteilyn mittauksista, maailmankaikkeuden laajenemisesta sekä termodynaamisesta tasapainosta. Apuna toimivat nykyaikaiset tietokonesimulaatiot, jotka paljastavat miljardien vuosien kehityksen sekunneissa. Näiden perusteella voidaan todeta monet sekä maailmankaikkeuden laajentumisessa että taustasäteilyn lämpötilassa tapahtuneet muutokset.

Tältä osin työn tavoitteena on päästä mahdollisimman lähelle alkuräjähdyksen alkua (singulaariteettia), mikä tarkoittaa käytän-

nössä alun vaiheiden tarkastelua Planckin ajasta (eli  $10^{-34}$  sekunnista) eteenpäin. Nykykäsityksen mukaan kyseistä vaihetta seurasi alkeishiukkasten, sähkömagneettisen voiman sekä vahvan ja heikon ydinvoiman muodostama kokonaisuus. Varsinaisen ongelman fyysikoille on tuottanut vaikeus selittää gravitaatio osaksi tätä kokonaisuutta. Tutkijat ovat etsineet ratkaisua pyrkimällä kehittämään kaikki voimat ja ainehiukkaset yhdistävää Kaiken teoriaa, mutta tulokset ovat olleet tähän saakka vaatimattomia. Nykyiset säieteorioiden ja kvanttigravitaatioteorioiden muodot tarjoavat jonkinlaisia ratkaisuja, mutta niitä on ollut toistaiseksi vaikea todentaa koekallisesti. Lisäksi kvanttigravitaation ongelmana on ollut se, ettei sen avulla ole ollut mahdollista päästä käsiksi maailmankaikkeuden varhaisimpiin vaiheisiin.

Tarjotakseen mahdollisimman täsmällisen käsityksen maailmankaikkeuden kehityksestä Mack joutuu selostamaan edellä mainittujen tekijöiden lisäksi johdannon jälkeisessä luvussa vielä kosmisen inflaation ideaa suhteellisen laajasti. Kosmologit ovat tarvinneet kyseistä käsitettä korjatakseen alkuräjähdysteoriaa vaivaavat ongelmat. Inflaation tarkoituksena on kuvata maailmankaikkeudessa heti sen alkutilan jälkeen tapahtunut huomattavan voimakas kasvu. Käsityksen mukaan maailmankaikkeus laajeni noin  $10^{34}$  sekunnin aikana biljoona biljoonaa kertaiseksi ( $10^{26}$ ). Samalla kosminen

mikroaaltotaustasäteily alkoi yhdenmukaistua. Inflaatioteoria on tässä suhteessa välttämätön, sillä alkuräjähdysteoria ei kykene selittämään maailmankaikkeuden yhdenmukaisuutta ja lämpötasapainoa sellaisenaan.

Toinen keskeinen syy on se, että teoria selittää edellä mainitun lisäksi suhteellisen hyvin myös pienet vaihtelut taustasäteilyn tiheydessä. Hypoteesin mukaan inflaatiovaiheen nopeaa kasvua ajoi eteenpäin eräänlainen kvanttiheilahtelujen alainen energiakenttä, joka liikkui satunnaisesti ylös ja alas. Kosmisessa mikroaaltotaustasäteilyssä havaittavat pienet muutokset selittyvät tämän teorian avulla suhteellisen hyvin sikäli kuin niiden ajatellaan olevan näiden heilahteluiden luonnollista kehitystä Planckin aikaa seuranneiden satojen tuhansien vuosien ajalta. Teorian avulla on mahdollista selittää kosmoksen nykyinen kehitys inflaatiosta ja kvarkkien ajasta alkuräjähdyksen ydinsynteesin ja kosmisen aamunkoiton kautta aina nykyaikaan eli galaksiryhmien syntyyn saakka.

Tutkimuksen varsinaisen sisällön muodostuvat viisi teoreettista mallia maailmankaikkeuden lopun selittämiseksi. Näistä ensimmäisen (luku 3) muodostaa oletus maailmankaikkeuden kasaan rysähtämisestä. Teorian perusideana on väite, jonka mukaan maailmankaikkeus laajenee hetki hetkeltä, kunnes galaksit ovat lipuneet toistensa lomiin ja sulautuneet toisiinsa. Tällöin suuret galaksit repeytyvät kahtia ja ahmivat pienemmät sisuksiinsa. Tapahtuma vaatii toteutuakseen maailmankaikkeuden supistumista, mutta täysin selvää ei ole se, alkaako tällainen supistuminen jossain vaiheessa vai jatkuuko laajeneminen ikuisesti.

Asiaan on pyritty saamaan jonkinlaista valaistusta tutkimalla ga-

laksien puna- ja sinisiirtymiä. Sinisiirtymässä maata lähestyvän galaksin tai tähden lähettämän valon taajuus kasvaa ja punasiirtymässä valon taajuus laskee havaittavana olevan taivaankappaleen tai galaksin loitontuessa maasta. Sikäli kuin maailmankaikkeuden kohtaloksi koituu kasaan rysähtäminen, havaitsevat tutkijat ilmiön aluksi maata lähellä olevien galaksien sinisiirtymistä. Huonompi uutinen on se, että kaiken aineen tiivistyminen koskee lopulta myös erilaisia säteilylähteitä. Maan olemassaolon suhteen erityisen ongelmallisiksi muodostuvat laajoiksi paisuneiden mustien aukkojen lähettämät suurienergiset hiukkaspurkaukset. Nämä järjestyvät tähtien kaasukehiä, täyttävät avaruuden kuumalla plasmalla ja pyrkivät repimään tähdet kappaleiksi. Maailmankaikkeudessa olevan säteilyn voimakkuus kasvaa tällöin yhtä suureksi kuin aktiivisten galaksiydinten keskustoissa.

Toisen teoreettisen mallin maailmankaikkeuden lopulle tarjoaa ajatus kosmoksen lämpökuolemasta (luku 4). Asian ytimenä on pimeän energian aiheuttama loppu eli tilanne, jossa maailmankaikkeus tuntuu laajenevan ikuisesti. Ajatuksen lähtökohdana toimivat yhdysvaltalaisen fyysikon Edwin Hubblen esittämät laskelmat galaksien punasiirtymistä. Näiden tulosten myötä monet kosmologit ovat alkaneet pitää kosmoksen pitkäkestoista laajenemista ja tämän laajenemisen myötä tapahtuvaa vähittäistä sammumista mahdollisena. Joidenkin tutkijoiden on ollut vaikea tai mahdoton hyväksyä tätä mahdollisuutta ja he ovat yrittäneet korjata asiaa erilaisin laskelmin turvautumalla muun muassa Einsteinin alkuaan muotoilemaan kosmologiseen vakioon.

Einsteinin alkuperäisenä ajatuksena oli pelastaa maailman-

kaikkeus kosmologisen vakion avulla kasaan romahtamiselta. Nykykäsityksen mukaan kaikkeus on kuitenkin laajentunut alkuräjähdyksestä lähtien eikä tälle laajenemiselle näy loppua. Graviitaatio saattaa hidastaa laajenemista ja jopa kääntää sen suunnan, mutta alkusysäys ja laajenemisen jatkuminen antavat sille helposti elinaikaa miljardeja vuosia. Tämä on kuitenkin vain tilapäistä, sillä laajenemisen raja tulee jossain vaiheessa vastaan ja kaikkien galaksien kohtaloksi muodostuu lopulta poishiipuminen ja kuolema. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa maailmankaikkeuden lämpötila on päässyt nousemaan laajenemisen seurauksena huomattavan korkeaksi ja aloittanut samalla alkeishiukkasten sekasortoisen toisiinsa sulautumisen.

Tämän jälkeen Mack siirtyy kolmanteen teoreettiseen ideaan esittämällä ajatuksen maailmankaikkeuden loppurepeytymisestä (luku 5). Lähtökohdana on yritys selittää maailmankaikkeuden loppu vetoamalla pimeän energian kykyyn laajentua loputtomasti aina siihen saakka, kunnes laajeneminen lakkaa ja pimeä energia repii kosmoksen kappaleiksi. Ilmiön selittää aineen tiheyden (energiatiheyden) ja paineen välisessä suhteessa tapahtuva kielteinen kehitys. Toisin sanoen pimeän energian negatiivinen paine synnyttää tilanteen, jossa kosmos pyrkii laajenemaan kiihtyvällä tahdilla minkään voiman kykenemättä vakioimaan olosuhteita.

Kysymyksessä on eräänlainen tapauksen kaksi variaatio sillä erotuksella, että lämpökuolemassa maailmankaikkeus laajenee ikuisesti ja tyhjenee vähitellen. Loppurepeytymisessä universumi puolestaan repii itsensä kirjaimellisesti kappaleiksi. Muutokset alkavat näkyä ensin suurissa ga-

laksijoukoissa niiden alkaessa erkaantua hitaasti toisistaan. Miljardien vuosien kuluessa galaksien välimatkat kasvavat ja joukkojen reunamilla ne ajelehtivat vähitellen pois kadoten laajeneviin kosmisiin tyhjiyksiin. Lopulta jopa tiheimmät galaksijoukot hajoavat vääjäämättä, koska kosmoksen perusvoimat eivät kykene pitämään niitä yhdessä.

*Kaiken lopun* neljännen selityksen maailmankaikkeuden päätymiselle muodostaa käsitys tyhjiön hajoamisesta (luku 6). Tämän vääjäämättömän perusidea alkoi voimistua varsinkin vuonna 2008 yhdysvaltalaisen ydinturvallisuusasiantuntijan Walter Wagnerin huolestuttua Cernin hadronitörmäyttimen turvallisuudesta. Pelko perustui törmäyttimen mahdolliseen kykyyn tuottaa maailmankaikkeudessa muutamia nanosekunteja alkuräjähdyksen jälkeen vallinneet olosuhteet jonkinlaisessa muodossa uudelleen.

Asia on hypoteettinen, mutta ei täysin mahdollon. Mackin mukaan Cernin löytämä Higgsin bosoni ja varsinkin siihen liittyvä Higgsin kenttä tarjoavat standardimallille mahdollisuuden ennustaa maailmankaikkeudelle eräänlainen valetyhjiö, jossa olemassaolevat luonnonlait (kuten hiukkasten olemassaolo) voivat kumoutua yllättäen. Sikäli kuin näin käy, edessä on tyhjiön hajoaminen ja lopulta nopea ja vääjäämätön kaiken tuhoutuminen. Ilmiön selittää kentässä tapahtuva radikaali sähköheikon symmetrian hajoaminen avaruuden halki valon nopeudella kiitävien hiukkasten saadessa massan ja joutuessa vuorovaikutukseen Higgsin kentän kanssa. Tällaisen tapahtuman saattaisi sopivissa olosuhteissa laukaista esimerkiksi pieni hiukkaskoon musta aukko.

Viidentenä ja viimeisenä mahdollisuutena maailmankaikkeuden hajoamiselle *Kaiken loppu* esittää ajatuksen oman kosmoksemme pyyhkiytymisestä olemattomiin törmätessään johonkin rinnakkaismaailmankaikkeuteen (luku 7). Lähtökohtana on ajatus erottaa oma kolmiulotteinen maailmamme (braanimme) muista vastaavista ja ajatella maailmankaikkeutemme (tai oman braanimaailmamme) ulkopuolen ulottuvan syklistesti toisiin maailmankaikkeuksiin. Malli olettaa braanien olevan ennen törmäystä valtavien kokoisia ja yhdensuuntaisia, jolloin törmäys voi tapahtua kaikkialla samaan aikaan ja samalla tavalla.

Sikäli kuin tämä teoria kuvaa maailmankaikkeuttamme todenmukaisesti, tulevat havainnot osoittamaan perustavanlaatuisia muutoksia kaukana sijaitseissa galakseissa. Keskeisin muutos on se, että galaksien etäantyminen pysähtyy ja ne alkavat vähitellen lähestyä omaa galaksiamme. Samalla taustasäteilyn lämpötila alkaa vähitellen nousta ja maailmankaikkeus vaikuttaa aineellisesti täydemmältä. Lopulta edessä on väistämätön: skalaarikentän energia muuttuu rajusti säteilyksi ja tuhoaa maan täysin yllättäen. Tämän jälkeen seuraava alkuräjähdyks aloittaa maailmankaikkeuden uuden syklin. Teoria selittää sekä alkuräjähdyksen tapahtumat että kosmoksen ikuisen kierron hienolla tavalla, mutta täysin selvää ei ole se, mitä tapahtuu yhteentörmäyksen aikana. Sykliä välissä saattaa vaikuttaa singulariteetti tai törmäys tapahtuu ilman aineen äärimmäistä tiheyttä, jolloin jonkinlaisen inflaation on mahdollista siirtyä syklistä toiseen.

*Kaiken loppu* tarjoaa huomattavan paljon yksityiskohtia edellä mainituista teorioista, mutta

tämän lisäksi se sisältää hyvät tiedot modernin kosmologian kehityksestä unohtamatta mainita avaruuden kaareutumista, entropiaa, kvanttihyppyä, kvanttitunneloimista ja muita vastaavia tekijöitä. Paikoin näiden asioiden luetteleminen vaikuttaa oppineisuuden osoittamiselta, mutta paikoin taas Mack onnistuu yhdistämään yksityiskohtat perustavalla tavalla osaksi käsittelemäänsä aihetta, jolloin ne syventävät työn sisältöä ja auttavat ymmärtämään maailmankaikkeuden lopun teorioita. Yksityiskohtat ovat pääosin hyvin kohdallaan, mutta jonkinlaista tiivistämisen varaa olisi saattanut olla esimerkiksi loppupuolen selostuksessa fysikaalisista symmetrioista.

*Kaiken loppu* ei sisällä samalaista täydellistä selostusta standardimallin ongelmista kuin esimerkiksi Sean Carrollin *Maailmanlopun hiukkanen* (2015) eikä se paneudu kosmoksen kokonaisrakenteen kehitykseen aivan yhtä syvällisesti kuin esimerkiksi Paul Daviesin erinomainen *Kultakutrini arvoitus* (2007), mutta se tarjoaa hyvän käsityksen kosmologien keskuudessa tällä hetkellä vallalla olevista maailmankaikkeuden lopun teorioista. Monet kosmologian ideat saattavat vaikuttaa paikoin hypoteettisilta, mutta Mackin työtä täytyy kiittää siitä, ettei se sisällä perusteettomia metafysisiä oletuksia, vaan pyrkii tarjoamaan esittämilleen väitteille aina ainakin jonkinlaisen kokeellisen tai teoreettisen perustan. Työ täydentää tässä suhteessa hyvin Ursan aikaisemmin kosmologiasta ja sen kehityksestä julkaisemien teosten sarjaa. ■