

Hyppysellinen kosmologiaa

Lyhyt katsaus kosmologiaan ja maailmankaikkeuden vaiheisiin
Koonnut Talvisirkus Kosmoksen käsikirjoittaja, kosmologi Syksy Räsänen

Kosmologian historiasta

Kosmologia on fysiikan ala, joka tutkii maailmankaikkeutta kokonaisuutena. Kosmologia eroaa tähtitieteestä siten, että tähtitieteessä ollaan kiinnostuneita Maapallon ulkopuolisista kohteista - kuten planeetoista, tähdistä ja galakseista - sinällään, mutta kosmologiassa niillä on vain väline-arvoa. Tähdillä ja muilla kappaleilla on kosmologiassa merkitystä vain sen kautta, mitä niistä voi päätellä maailmankaikkeuden iästä, koostumuksesta, kehityksestä, alusta ja kohtalosta.

Tähtitiede on kenties vanhin fysiikan ala, kosmologia taas verraten nuori. Kosmologian voidaan katsoa alkaneen sen jälkeen, kun **Albert Einstein** ja **David Hilbert** löysivät *yleisen suhteellisuusteorian* vuonna 1915. Yleinen suhteellisuusteoria on teoria ajasta, avaruudesta ja siitä miten aine vaikuttaa ajan kulkuun ja avaruuden kaartumiseen. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan avaruus, jossa on ainetta, yleisesti ottaen joko laajenee tai supistuu. Ensimmäiset maailmankaikkeuden laajenemista kuvaavat mallit esitettiin vuonna 1922. Tähän aikaan yleinen uskomus oli, että maailmankaikkeus oli ikuinen ja muuttumaton ja että oma galaksimme on kaikki mitä on olemassa. Einstein itsekin oli sitä mieltä, että laajeneminen oli vain matemaattinen mahdollisuus, jota ei kuitenkaan tarvitse ottaa vakavasti.

Kysymystä maailmankaikkeuden laajenemisesta eivät ratkaisseet matemaattiset tai filosofiset argumentit, vaan nopeasti etenevät havainnot. Vuonna 1924 todettiin, että Linnunrata on vain yksi lukuisista galakseista, ja vuonna 1927 havaittiin, että maailmankaikkeus laajenee. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan tämä tarkoitti sitä, että maailmankaikkeus ei myöskään ole ikuinen. Kun seurataan kehitystä ajassa taaksepäin, päädytään äärellisen ajan kuluttua tilanteeseen, jossa aineen tiheys on ääretön eikä ole mahdollista jatkaa taaksepäin: maailmankaikkeudella on ollut alku. Näiden muistavien 1920- ja 1930-luvun löytöjen jälkeen kosmologiassa on pitkä hiljainen kausi, joka päättyi vasta 1980- ja 1990-luvulla.

Kosmologiassa ei juuri voi tehdä kokeita, vain havaintoja. Havaintojenkin suhteen rajoituksena on se, että kosmologisessa mittakaavassa olemme sidottuja yhteen paikkaan ja aikaan. Ei ole mahdollista kulkea ympäri maailmankaikkeutta tekemässä mittauksia, ei voi sytyttää supernovia hallituissa olosuhteissa tai matkata miljardien vuosien päähän menneisyyteen seuraamaan

ensimmäisten tähtien syttymistä. Voi vain kirjoittaa muistiin, mitä taivaalla näkyy ja tulkita sitä. Kun lisäksi havaintojen tekeminen on vaikeaa (esimerkiksi siksi, että kaukaiset kohteet ovat himmeitä), niin kosmologiassa oli pitkään paljon epävarmuutta. Esimerkiksi nähtiin kyllä, että maailmankaikkeus laajenee, mutta laajenemisnopeuden tarkka määrittäminen olikin hankalampi kysymys - ensimmäiset arviot 1920-luvulla olivat seitsemän kertaa liian suuria.

1990-luvulla kuitenkin tapahtui murros. Teknologian kehitys mahdollisti tarkkojen havaintojen tekemisen, ja aiemmat tulkintaongelmat saatiin paljolti ratkaistua. Maailmankaikkeuden laajenemisnopeus, ikä, ainesisältö ja historia yhdestä sekunnista nykypäivään saatiin selvitettyä melko varmasti. Osansa oli myös sillä, että 1970-luvulta ja erityisesti 1980-luvulta alkaen hiukkasfyysikot olivat kiinnostuneet kosmologiasta, ja he toivat tuoreita näkökulmia ja uusia ideoita aiemmin tähtitieteilijöiden ja yleisen suhteellisuusteorian asiantuntijoiden kansoittamalle alalle.

Tarkat havainnot toivat mukanaan suurimman yllätyksen sitten 1920-luvun: osoittautui, että maailmankaikkeuden laajeneminen on kiihtynyt viimeisen muutaman miljardin vuoden aikana. Tästä havainnosta myönnettiin vuonna 2011 fysiikan Nobelin palkinto. Kiihtymisen syytä ei vielä kunnolla ymmärretä, ja asiaa pidetään yhtenä fysiikan suurimmista mysteereistä.

Kosmologian tekemisestä

Ei ole yhtä ainoa tapaa tehdä kosmologiaa. Kosmologia pohjaa nykyään vankasti havaintoihin, joita tulee koko ajan lisää ja tarkempia. Osa tutkimuksesta liittyy havaintoihin ja niiden tulkitsemiseen hyvin tiiviisti, mutta toisaalta on myös paljon spekulatiivista tutkimusta, jolla ei ole suoraa yhteyttä havaintoihin ja jossa leikitellään erilaisilla mahdollisuuksilla. Teoriaakin tehdään niin kynällä ja paperilla kuin tietokoneella laskemallakin. Havaintojen ja teorian ohella tärkeä rooli on simulaatioilla, joissa lasketaan maailmankaikkeuden kehitystä hyvin tarkkaan vuosien ajan. Suurimmat simulaatiot ovat niin isoja, että kaikkea niiden dataa ei mahdu tallentamaan mihinkään, vaan niitä analysoidaan samalla kun ne etenevät, ja simulaation liikkeessä eteenpäin aiempi data hukkuu.

Kosmologialla on läheiset yhteydet hiukkasfysiikkaan ja tähtitieteeseen, ja useimmilla vanhemmilla kosmologeilla on tausta jommalta kummalta alalta (mukana on myös yleisen suhteellisuusteorian asiantuntijoita). 1990-luvulla kosmologit kehittyivätkin omaksi ryhmäkseen, ja kosmologia vakiintui itsenäiseksi alakseen, joka ei ole tähtitieteen tai yleisen suhteellisuusteorian osa-alue.

Tutkimusta ei tehdä niinkään kiinteissä hierarkisissa tutkimusryhmissä kuin tutkijoiden spontaanisti kutakin projektia varten muodostamissa löyhissä joukoissa. (Poikkeuksena ovat isojen havaintoprojektien datan analysointiin kiinteästi liittyvät ryhmät, joissa on tarkka koordinaatio ja määrätty roolit.) Yleensä tutkija työskentelee usean aiheen parissa samaan aikaan, eri henkilöiden kanssa. Tutkimus etenee pienin askelin, aiemmin tunnettua vähän paremmin ymmärtäen, yksi tieteellinen artikkeli kerrallaan. Tyypillisesti artikkelin tekemiseen alusta loppuun menee ehkä puoli vuotta tai vuosi, joskus paljon lyhyemmän aikaa ja joskus paljon pidempään. (Minulla on tainnut mennä lyhimmillään kaksi päivää ja pisimmillään yli neljä vuotta.) Yhtä artikkelia tekemässä on yleensä yhdestä viiteen tutkijaa - jälleen poikkeuksena isot havaintoprojektit, joiden artikkeleissa voi olla mukana satoja ihmisiä.

Helsingin yliopistossa kosmologiaa opiskellaan osana teoreettista fysiikkaa. Lukion pitkä matemaatiikka ja pitkä fysiikka ovat tarpeellinen pohja, ja ohjelmointitaidosta on suuri hyöty.

Kuusi kohtausta maailmankaikkeudesta

Kosmologian skaalat ovat nykypäivänä valtavia. Maailmankaikkeuden ikä on noin 13-14 miljardia vuotta. Koska valon nopeus on äärellinen, näemme vain äärellisen osan maailmankaikkeutta: tämän alueen halkaisija on tällä hetkellä noin 100 miljardia valovuotta. Maailmankaikkeus laajenee eli aineen tiheys pienenee ajan kuluessa: galaksit etääntyvät toisistaan ja kaasupilvet harvenevat. Menneisytydessä maailmankaikkeus oli siis tiheämpi, ja myös kuumempi: maailmankaikkeus jäähtyy koko ajan. Varhaisina aikoina kosmologiset skaalat ovat siis hyvin pieniä, niin pituudessa kuin ajassakin. Varhaisten aikojen kosmologia yhtyy aineen tutkimiseen kaikkein pienimmällä skaalalla, eli hiukkasfysiikkaan. Kaikkein suurin ja kaikkein pienuus ovat läheistä sukua.

Talvisirkus Kosmos käy läpi joitakin maailmankaikkeuden keskeisiä aikakausia käänteisessä aikajärjestyksessä, alkaen nykyhetkestä ja päättyen ajan alkuun. Tässä joitain selityksiä näistä aikakausista.

1. Ajan alku ja inflaatio (kohtausta 6)

Maailmankaikkeus alkoi noin 13-14 miljardia vuotta sitten. Ei ole olemassa mitään "ennen" tätä alkua, alussa ainoa aikasuunta on tulevaisuuteen. Samaan tapaan Maapallolla ei ole mitään pohjoisnapaa pohjoisempaa, siellä ainoa suunta on etelään. Emme tiedä mitä tapahtui aivan hyvin lähellä alkua. Varhaisin tapahtuma, josta meillä on minkäänlaista tietoa, on *kosminen inflaatio*, joka sijoittuu jonkin ensimmäisen sekunnin miljardiosan miljardiosan miljardiosan miljardiosan ja miljardiosan kymmenestuhannesosan välille. Nimi inflaatio viittaa siihen, että maailmankaikkeus laajeni kiihtyvällä nopeudella ja sen pituudet venyivät valtavan paljon. Maailmankaikkeus venyi nopeasti, niin että siitä tuli melkein samanlainen kaikkialla. Mutta inflaation aikana avaruudessa tapahtuu sattumanvaraisia *kvanttifluktuaatioita*, ennustamattomia hyppäyksiä, joiden takia maailmankaikkeuden tiheydestä tuli hieman erilainen eri paikoissa, sadastuhannesosan verran. Nämä hyppäykset tapahtuvat hiukkasfysiikan pienen pienellä mittakaavalla, mutta inflaatio venytti nämä pienet rypyt valtaviin mittoihin. Ne toimivat myöhemmin galaksien, planeettojen ja kaiken muun rakenteen alkuna: rakenteen siemenet ovat syntyneet sattumasta.

2. Kevyiden alkuaineiden synty (kohtausta 5)

Inflaation jälkeen maailmankaikkeus on täynnä kuumaa kaasua, joka on melkein samanlaista kaikkialla, sen lämpötilassa on vain pieniä sadastuhannesosa eroja eri paikoissa. Edes atomeita ei ole vielä, saati sitten planeettoja tai muita isoja massakasoja. Kaasu koostuu protoneista, neutroneista ja elektroneista sekä säteilymerestä. Ydinvoima vetää protoneita ja neutroneita yhteen, mutta varhaisina aikoina säteily on niin kuumaa, että se rikkoo protonin ja neutronin siteen ja estää niitä yhtymästä. Kun maailmankaikkeus on noin kolmen minuutin ikäinen, lämpötila on laskenut niin paljon (se on vain miljardi Celsiusastetta) että protonit ja neutronit pääsevät yhdistymään. Ne sitoutuvat yhteen, ja näin muodostuu atomiytimiä. Maailmankaikkeus laajenee ja jäähtyy protonien ja neutronien yhtyessä, ja puolen tunnin kuluttua se on jäähtynyt niin paljon, että ydinreaktiot sammuvat, joten vain kevyiden alkuaineiden ytimiä ehtii syntyä.

3. Atomien synty ja kosmisen mikroaaltotaustan vapaus (kohtausta 4)

Atomiydinten muodostumisen jälkeen maailmankaikkeuden aine on kaasua, joka koostuu atomiytimistä, elektroneista ja säteilystä. Atomiytimillä on positiivinen ja elektroneilla negatiivinen sähkövaraus, joten ne vetävät toisiaan puoleensa. Mutta vaikka säteilyn lämpötila ei enää riitä ydinten rikkomiseen, se estää ydinten ja elektronien liiton, kunnes maailmankaikkeus on noin 400 000 vuotta vanha. Tällöin lämpötila on laskenut niin paljon, että säteily ei enää voi estää elektroneja ja ytimiä syöksymästä yhteen. Kun tämä tapahtuu, niin atomit muodostuvat ensimmäisen kerran maailmankaikkeuden historiassa. Tästä seuraa se, että maailmankaikkeudesta tulee läpinäkyvä.

Ennen atomien muodostumista valo poukkoilee irrallisten elektronien ja ydinten sähkövarauksista, eikä pääse matkaamaan vapaasti, joten maailmankaikkeus on läpinäkyvä. (Nykypäivänä Aurinko on läpinäkyvä samasta syystä: Aurinko on niin kuuma, että siellä ei ole atomeita, ainoastaan irrallisia sähkövarauksia, joten valo ei pääse kulkemaan sen läpi.) Mutta atomeilla ei ole sähkövarausta, joten niihin valo ei törmäile samalla tavalla, joten niiden muodostuttua valo irtoaa aineesta, ja matkaa koko maailmankaikkeuden loppuhistorian vapaasti irrallaan kaikkeasta. (Planeettoihin tms. törmääminen on aniharvinaista.) Tämän muinaisen valon voi vieläkin nähdä taivaalla mikroaaltopituudella, se on valokuva maailmankaikkeudesta 13 miljardin vuoden takaa, nimeltään *kosminen mikroaaltotausta*.

4. Pimeät aikakaudet (kohtausta 3)

Kun maailmankaikkeus laajenee, valon aallonpituus venyy. Atomien muodostumisen jälkeen valo venyy pian niin paljon, että se muuttuu näkyvästä valosta infrapunasäteilyksi (ja sen jälkeen mikroaalloiksi). Kun tämä tapahtuu, maailmankaikkeudesta tulee täysin pimeä. Ei ole vielä tähtiä eikä mitään muutakaan antamassa valoa: maailmankaikkeus on pimeä ja kylmä. Pimeydessä valtavat massat liikkuvat hitaasti, kun inflaatiosta peräisin olevat epätasaisuudet kasvavat verkkaisesti painovoimansa ajamina. Alueet, joissa on enemmän massaa kuin ympäristössä vetävät massaa puoleensa, kunnes lopulta romahtavat oman painonsa alla. Jossain tapauksissa romahduksen takia tiheys kasvaa niin paljon, että miljoonia vuosia sammuksissa olleet ydinreaktiot käynnistyvät uudelleen pienissä osassa avaruutta, eli tähdet syttyvät. Tämä tapahtuu maailmankaikkeuden ollessa noin 20 miljoonan vuoden ikäinen.

Näissä tapahtumissa on *pimeällä aineella* (kohtausta 2) tärkeä rooli. Pimeä aine on ainetta, joka havaitaan vain sen painovoiman kautta. Sitä ei voi nähdä eikä koskettaa, ja sitä on kaikkialla maailmankaikkeudessa. Se koostuu joistakin toistaiseksi tuntemattomista hiukkasista. Maailmankaikkeuden aineesta noin 20% on tavallista ainetta ja 80% pimeää ainetta. Pimeä aine muodostaa rakenteita kuten tavallinenkin aine: Linnunradan näkyvää osaa ympäröi noin kymmenen kertaa isompi galaksin pimeä osa, jonka vaikuttaa näkyvien tähtien liikkeisiin painollaan, mutta jota ei muuten näe.

5. Rakenteiden muodostuminen ja pimeä energia (kohtausta 1)

Ensin muodostuu pieniä massaklumppeja, sitten niistä kasaantuu isompia rakenteita: lopulta muodostuu galakseja, ja niistä muodostuu galaksiryppäitä ja isompia kokonaisuuksia. Maailmankaikkeuden rakenne muodostuu hierarkisesti, pienestä isoon ajan kuluessa. Rakenteiden muodostumisen pysäyttää myöhäisinä aikoina se, että laajeneminen alkaa taas kiihtyä, noin kahdeksan miljardin vuoden iässä. Galaksit etääntyvät toisistaan kasvavalla nopeudella ja jäävät lopulta aivan yksin, tai yhteen muutaman samaan galaksiryppäeseen painovoiman kautta sitoutuneen toverin kanssa. Tästä kiihtymisestä on vastuussa *pimeä energia*, aineen muoto, jonka gravitaatio on luotaantyöntävää eikä puoleensavetävää. Se saa avaruuden eri osat hylkimään toisiaan: ei tarkkaan tiedetä mitä pimeä energia on. (Se on aivan eri asia kuin pimeä aine, vaikka nimi on samankaltainen.)

Lukemistoksi:

Kari Enqvist: Kosmoksen hahmo. WSOY 2003.

Syksy Räsänen blogi tähtitieteellisen yhdistyksen URSA:n sivuilla:
<https://www.ursa.fi/blogit/kosmokseen-kirjoitettua.html>