SYSKSY RÄSÄNEN

Kosmologian uusi kriisi

< II ZW 096 ON KAOOTTINEN, PÖLYN PEITTÄMÄ JÄRJESTELMÄ, JOSSA GALAKSIT SULAUTUVAT YHTEEN JA MUODOSTAVAT TÄHTIÄ HURJAA VAUHTIA. TÄLLAISET JÄRJESTELMÄT OSOITTAVAT, KUINKA VOIMAKKAAT GALAKSIEN TÖRMÄYKSET MUOKKASIVAT VARHAISTA MAAILMANKAIKKEUTTA. Kuvakrediitit: Röntgen: NASA/CXC/SAO; Näkyvä valo: NASA/ESA/STScI; Infrapuna: NASA/ESA/CSA/STScI; Kuvankäsittely: NASA/CXC/SAO/L. Frattare ja J. Major

Yksi maailmankaikkeuden tärkeimpiä ominaisuuksia on se, että avaruus laajenee. Laajenemisnopeutta on mitattu jo 99 vuotta, ja viimeisen kymmenen vuoden aikana uudet tulokset ovat johtaneet kriisiin.

Vallankumous 1920-luvulla

1920-luvulla käsityksemme maailmankaikkeudesta ja asemastamme siinä mullistui. Yleinen suhteellisuusteoria oli löydetty vuonna 1915, ja se kertoo miten aine muuttaa aika-avaruutta. Vuonna 1922 venäläinen fyysikko **Aleksander Friedmann** sen perusteella osoitti, että avaruus yleensä laajenee tai supistuu. Teoreetikot kiistelivät tuloksesta, mutta asian ratkaisivat uuden teknologian myötä nopeasti etenevät havainnot.

Vuonna 1927 belgialainen tähtitieteilijä **Georges Lemaître** osoitti, että laajenemisen takia läheiset galaksit etääntyvät toisistaan nopeudella, joka on verrannollinen niiden etäisyyteen. Hän määritti verrannollisuuskertoimen havainnoista ja sai tulokseksi 625 km/s/Mpc. Kosmologien käyttämä etäisyysmitta Mpc eli megaparsek on noin kolme miljoonaa valovuotta. Toisin sanoen, jos kahden galaksin etäisyys toisistaan on kolme miljoonaa valovuotta, se kasvaa 625 kilometriä joka sekunti; jos etäisyys on kuusi miljoonaa valovuotta, niin se kasvaa tuplasti sen verran.

Tuolloin ajatus muista galakseista oli uusi: yhdysvaltalainen tähtitieteilijä **Edwin Hubble** oli vasta vuonna 1924 osoittanut, että Linnunrata ole yksin, vaan monet tähtisumuina pidetyt kappaleet kuten Andromeda ovat omia galaksejaan. Vuonna 1929 Hubble osoitti havainnoista saman kuin Lemaître kaksi vuotta aiemmin: maailmankaikkeus laajenee. Hän sai verrannollisuuskertoimeksi hieman pienemmän arvon kuin Lemaître, 500 km/s/Mpc.

Etäisyyden ja laajenemisnopeuden verrannollisuus tuli sittemmin tunnetuksi Hubblen lakina ja verrannollisuuskerroin Hubblen vakiona. (Vuonna 2018 kansainvälinen tähtitieteellinen liitto päätti, että virallinen nimi on Hubblen-Lemaîtren laki, mutta harva tuntuu suositusta noudattavan.) Fysiikassa onkin tavallista, että asiat nimetään sen henkilön mukaan, joka on löytänyt ne toisena tai kolmantena. Huvittavaa on se, että vaikka Hubble tuli tunnetuksi laajenevan maailmankaikkeuden isänä, hän itse kyseenalaisti avaruuden laajenemisen aina kuolinvuoteensa 1953 asti. Nykyään maailmankaikkeuden laajeneminen on yhtä varmasti todennettu kuin Maapallon pyöreys.

Koska avaruus laajenee, aineen tiheys laskee, eli aiemmin tiheys oli isompi. Yleinen suhteellisuusteoria ennustaa, että 14 miljardin vuoden päässä menneisyydessä aineen tiheys oli ääretön, ja silloin avaruus ja aika alkoivat. Yleinen suhteellisuusteoria ei kuitenkaan päde, kun tiheys on ääretön, eli ennemmin kuin alun, teoria ennustaa oman pätevyysalueensa lopun: emme tiedä mitä alussa tapahtui, tai oliko alkua

lainkaan. Mutta laajenemisesta seuraa monia asioita, joita olemme tarkkaan havainneet.

Samalla kun aineen tiheys laskee, aine jäähtyy ja käy siksi läpi muodonmuutoksia: protonit ja neutronit syntyvät kymmenen mikrosekunnin iässä, ne yhtyvät atomiytimiksi kolmen minuutin iässä, jotka yhtyvät elektronien kanssa atomeiksi maailmankaikkeuden ollessa 380 000 vuotta vanha. Maailmankaikkeuden historia on tarina jäähtymisestä ja monimutkaisuuden kasvusta.

Kosmologia on kehittynyt paljon Lemaîtren ja Hubblen ajoista, mutta yksi keskeinen kysymys on pysynyt: kuinka nopeasti maailmankaikkeus nykyään laajenee, eli mikä on Hubblen vakio?

Tikapuiden kiipeäminen

Hubblen vakion arvoa on haarukoitu kohta vuosisadan ajan. Koska avaruuden laajeneminen vaikuttaa moniin kosmologisiin havaintoihin, laajenemisnopeutta voi määrittää useilla eri tavoilla. Suoraviivaisin tapa Hubblen vakion määrittämiseksi on mitata, miten nopeasti galaksi etääntyy meistä ja kuinka kaukana se on. Etääntymisnopeus on helppo määrittää mittaamalla galaksin punasiirtymä, eli kuinka paljon sen lähettämän valon aallonpituus on venynyt. Etäisyyden määrittäminen on vaikeampaa.

Mistä tietää, onko kohde iso ja lähellä vai pieni ja kaukana? Jos näkee taivaalla pieneltä näyttävän lentokoneen, voi päätellä, että se on kilometrien päässä, koska tietää että lentokoneet ovat kymmenien metrien mittaisia. Samaa päättelyä voi soveltaa tähtien kirkkauteen: mitä kauempana tähti on, sitä himmeämmältä se näyttää. Vertaamalla kahden samanlaisen tähden kirkkautta saa siis selville niiden etäisyyden suhteen. Jos yksi tähti on tarpeeksi lähellä meitä, että pystymme mittaamaan sen etäisyyden suoraan, niin saamme selville toisenkin tähden etäisyyden, ja samalla myös etäisyyden sen kotigalaksiin. Voimme sitten verrata tässä galaksissa olevia tähtiä vielä kauempana oleviin tähtiin selvittääksemme niiden etäisyyden. Tätä menetelmää, missä edetään puolalta toiselle, kutsutaan etäisyystikapuiksi.

Tikapuiden askelmien suhteuttaminen toisiinsa vaatii kohteiden tarkkaa tuntemista. Lemaître ja Hubble eivät tienneet, että etäisyysmittauksissa käytetyt muiden galaksien tähdet olivat luonnostaan Linnunradan tähtiä kirkkaampia. Tämän takia etäisyys niihin oli aliarvioitu, joten he yliarvioivat Hubblen vakion arvon. Tämän virheen korjaamisen jälkeenkin Hubblen vakion arvosta on kiistelty. Pitkään oli kaksi kilpailevaa koulukuntaa, joista yksi kannatti arvoa 50 km/s/Mpc ja toinen piti kiinni arvosta 100 km/s/Mpc. 1990-luvulla tämä kiista ratkesi.

Täsmäkosmologian sopusointu

Vuonna 1992 Yhdysvaltojen avaruusjärjestö NASAn COBE-satelliitti sai mitattua kosmisen mikroaaltotaustan epätasaisuudet. Kosminen mikroaaltotausta on maailmankaikkeuden vanhinta valoa. Se lähti liikkeelle maailmankaikkeuden ollessa 380 000 vuoden ikäinen. Sitä ennen aine oli niin kuumaa, että atomiytimet ja elektronit eivät pysyneet yhdessä – valo poukkoili elektroneista ja rikkoi niiden ja ydinten siteen, eikä päässyt kulkemaan suoraan. Mutta kun valo ja aine laajenemisen myötä jäähtyivät, atomit muodostuivat eikä valo enää törmäillyt irrallisiin elektroneihin vaan pääsi kulkemaan vapaasti.

Kosminen mikroaaltotausta on kirjaimellisesti valokuva maailmankaikkeudesta 14 miljardin vuoden takaa. Kuvassa näkyy kirkkaampia ja

himmeämpiä täpliä sen mukaan, miten paljon ainetta eri paikoissa oli sen muodostumisen aikaan. Täplien koko taivaalla riippuu siitä, kuinka kaukaa valo on matkannut, kuten vaikkapa auringonpilkkujen koko taivaalla riippuu siitä, kuinka kaukana Aurinko on. Valon kulkema etäisyys puolestaan riippuu siitä, miten maailmankaikkeus on laajentunut. Niinpä kosmisen mikroaaltotaustan täplien koosta voi määrittää Hubblen vakion arvon.

COBEn mittaustarkkuus ei vielä riittänyt Hubblen vakion määrittämiseen, mutta vuonna 2003 NASAn WMAP-satelliitin havainnoista saatiin Hubblen vakion arvoksi 71 ± 4 km/s/ Mpc.

Tällä välin etäisyystikapuita oli petrattu. Mittaustarkkuus läheisten galaksien kohteista oli parantunut merkittävästi ja ymmärrys tikapuiden askelmista oli kasvanut. Kanadalaisen tähtitieteilijä **Wendy Freedmanin** johtama projekti käytti erityisesti Hubblen mukaan nimetyn avaruusteleskoopin mittauksia tyypin Ia supernovista etäisyyden määrittämiseen. Vuonna 2001 se julkaisi tuloksensa: 72 ± 8 km/s/Mpc.

Sekä kosmisen mikroaaltotaustan että tikapuiden tulokset osuivat sattumalta aiempien ryhmien tulosten keskelle. Mikä tärkeämpää, se että kahden täysin erilaisen menetelmän tulokset sopivat yhteen oli vahva osoitus siitä, että käsityksemme maailmankaikkeudesta on oikeilla raiteilla, ja alettiin puhua täsmäkosmologian aikakaudesta. Mutta havaintojen tarkentuessa ja täsmällisyyden kasvaessa sopuun tuli säröjä.

Vallankumous 2020-luvulla?

Vuonna 2009 Euroopan avaruusjärjestö ESAn Planck-satelliitti teki toistaiseksi täsmällisimmät mittaukset mikroaaltotaustan täplistä koko taivaankannella. Planckin tulos Hubblen vakiolle on 67.4 ± 0.5 km/s/Mpc.

Samalla tikapuumenetelmää oli hiottu tarkemmaksi. Yksi alan johtaja on yhdysvaltalainen astrofyysikko **Adam Riess**. Hän sai vuonna 2011 Nobelin palkinnon maailmankaikkeuden kiihtyvän laajenemisen löytämisestä juurikin tyypin Ia supernovien avulla, ja kosmologit vitsailevat hänen tavoittelevan toista Nobelin palkintoa. Riessin johtaman ryhmän uusin arvo Hubblen vakiolle on 73.50 ± 0.81 km/s/Mpc.

Tarkkuuden parantuminen on paljastanut ristiriidan: mikroaaltotaustasta ja tikapuista määritettyjen arvojen ero on paljon isompi kuin virherajat. Todennäköisyys sille, että kyse on sattumasta on vain viisi miljardisosan sadastuhannesosaa. Jossain on siis virhe: joko jompikumpi (tai molemmat) havainnoista on väärin tai sitten teoriassa on jotain pielessä.

Tikapuumenetelmän hyvä puoli on se, että sillä voi mitata laajenemisnopeuden suoraan lähigalakseista. Ei tarvitse tehdä oletuksia siitä, miten maailmankaikkeus on aiemmin laajentunut tai muista kosmologian yksityiskohdista. Huono puoli on se, että tikapuun askelmat pitää ymmärtää oikein. On helppo keksiä asioita mitkä voivat mennä pieleen: galaksit ovat erilaisia, joten niiden tähdillä on erilainen koostumus ja erilaiset ominaisuudet. Mutta kun teoriaa ja havaintoja on syynätty tarkemmin, ero kosmisen mikroaaltotaustaan arvoon vain kasvanut. Lisäksi on käytetty useita erilaisia askelmia samaan kohteeseen ja todettu että tulokset pitävät yhtä.

Kosmisen mikroaaltotaustan puolesta puhuu se, että sen fysiikka ymmärretään paljon paremmin kuin tikapuumenetelmässä käytetyt tähdet ja muut mittarit. Mikroaaltotaustan synnyn aikaan aine on ytimien, elektronien ja valon lähes tasaista keittoa, jota on helppo käsitellä, ja

> YKSITYISKOHTAINEN, KOKO TAIVAAN KATTAVA KUVA 13,7 MILJARDIA VUOTTA VANHASTA VARHAISVAIHEEN MAAILMANKAIKKEUDESTA. LÄMPÖTILAN VAIHTELUT NÄKYVÄT VÄRIEROINA JA VASTAAVAT NIITÄ ALKUSIEMENIÄ, JOISTA KEHITTYI GALAKSEJA. Kuva: WMAP:n havaintoaineisto tukee alkuräjähdys- ja inflaatiomalleja, ja kosminen taustasäteily sijaitsee havaittavan maailmankaikkeuden äärirajoilla. NASA

valon sironta elektroneista ja ytimistä tunnetaan erittäin hyvin. Heikkoutena on se, että mikroaaltotaustasta ei voi mitata Hubblen vakiota suoraan, vaan pitää tietää miten maailmankaikkeus on laajentunut kun valo ovat matkannut avaruuden halki.

Tästä tulee heti mieleen, että ongelman voisi ratkaista rukkaamalla maailmankaikkeuden laajenemishistoriaa. On kuitenkin olemassa lähigalaksien ja kosmisen mikroaaltotaustan lisäksi paljon muitakin havaintoja, eivätkä ne jätä paljon säätämisen varaa siihen, miten maailmankaikkeus laajenee. Ehkäpä sitten paikallinen kosminen ympäristömme vain on maailmankaikkeudessa poikkeuksellinen: jospa se laajenee sattumalta paljon keskivertoa nopeammin, ja siksi tikapuut antavat liian suuren arvon? Laajenemisnopeus on tosiaan erilainen eri puolilla maailmankaikkeutta, mutta näin suuren eron aikaansaaminen sopivassa mittakaavassa on hyvin epätodennäköistä – jos paikallinen laajenemisnopeus olisi paljon keskivertoa isompi, niin paikallisen tiheyden pitäisi vastaavasti olla paljon keskivertoa pienempi, mutta näin ei näytä olevan.

Ero kahden mittausmenetelmän välillä on viimeisten kymmenen vuoden aikana noussut kosmologian isoimmaksi ristiriidaksi teorian ja havaintojen välillä. Mitä tarkemmin ongelmaa on katsottu, sitä pahemmaksi se on kasvanut. Erityisen outoa on se, että ristiriidalle ei ole esitetty ainuttakaan teoreettista selitystä, joka olisi saanut ison osan kosmologien yhteisöä taakseen. Kyse ei ole yrityksen puutteesta, aiheesta on julkaistu satoja tieteellisiä artikkeleita, mutta lähitikkaiden sovittaminen mikroaaltotaustaan ei ole onnistunut. Tämä johtaa arvelemaan, että ehkä ongelma on havainnoissa, kuten Lemaîtren ja Hubblen aikaan. Kosminen mikroaaltotausta on kuitenkin hyvin ymmärretty ja helppo tulkita, ja askelmien tähtien tuntemuksessa pitäisi olla paljon isompi virhe kuin mitä alan tuntijat pitävät mahdollisena.

Maailmankaikkeuden laajenemista voi mitata monilla muillakin tavoilla, ja ne saattavat piakkoin ainakin kertoa kumpi tulos on oikein – mutta ei sitä, miksi toinen olisi väärin, sen voi tehdä vain virheen löytäminen tai teoreettinen läpimurto.

Tapaus valaisee sitä, miksi on tärkeää mitata tunnettuja asioita yhä tarkemmin. Fyysikoita ei kiinnosta se onko jonkin vakion arvo 67 vai 73, vaan mitä se paljastaa maailmankaikkeudesta. Se, mitkä havainnot ovat rutiinia ja mitkä läpimurtoja on selvää vasta jälkikäteen. Jos osoittautuu, että kyseessä on virhe havainnoissa, tämä kriisi kosmologiassa on tieteenhistoriassa vain sivuhuomio. Mutta jos ristiriita on merkki uudesta fysiikasta, edessä on vallankumous.

SYKSY RÄSÄNEN

ON KOSMOLOGI HELSINGIN YLIOPISTOLLA. HÄN KIRJOITTAA URSAN SIVUILLA HIUKKASFYSIIKAN JA KOSMOLOGIAN TIIMOILTA BLOGISSA KOSMOKSEEN KIRJOITETTUA.