

SYKSY RÄSÄNEN I **KENTIES** **SUURIN MYSTEERI**



PHOTOGRAPH OF THE MILKY WAY IN THE NIGHT SKY OVER BLACK ROCK DESERT, NEVADA TAKEN ON 7/22/2007. PHOTO STEVE JURVETSON

Kaiken alku

Maailmankaikkeuden laajeneminen on yksi kosmologian tärkeimpiä tutkimuskohteita, ja se on mullistanut ajattelua halki viime vuosisadan. Vuonna 1924 huomattiin, että Linnunrata onkin vain yksi galaksi lukemattomien joukossa. Sitä ennen luultiin, että Linnunradan ulkopuolella on vain tyhjää avaruutta. Tämä oli iso siirtymä: **Nikolaus Kopernikus** oli siirtänyt Maapallon pois Aurinkokunnan keskustasta, sitten ymmärrettiin tähtien olevan toisia aurinkoja, ja lopulta kotigalaksimme-kin osoittautui vain yhdeksi kosmisen pölyn hiukaseksi.

Vielä isompi muutos oli tulossa. Vuonna 1929 amerikkalainen tähtitieteilijä **Edwin Hubble** havaitsi, että kaikki galaksit, muutamaa lähintä lukuun ottamatta, etääntyvät meistä. Lisäksi hän osoitti, että galaksien etääntymisnopeus on suoraan verrannollinen niiden etäisyyteen: mitä kauempana galaksi on meistä, sitä nopeammin sen etäisyys

meistä kasvaa. Tämä yhteys on tullut tunnetuksi Hubblen lakina, ja siinä esiintyvä kerroin Hubblen vakiona.

Belgialainen fyysikko **Georges Lemaître** oli selittänyt havainnon merkityksen jo 1927. Lemaître oli lähtenyt liikkeelle havaintojen sijaan **Albert Einsteinin** ja **David Hilbertin** vuonna 1915 löytämästä yleisestä suhteellisuusteoriasta, joka kertoo miten aika-avaruus kehittyy, kun siinä on tietynlaista ainetta. Lemaître osoitti, että jos maailmankaikkeus laajenee, niin tästä seuraa sama laki, jonka Hubble kaksi vuotta myöhemmin löysi teleskoopilla. Lemaître myös määrittä havainnoista laissa olevalle verrannollisuuskertoimelle saman arvon kuin Hubble myöhemmin. Vuonna 2018 kansainvälinen tähtitieteellinen liitto IAU päättikin, että pitäisi käyttää nimeä Hubblen-Lemaîtren laki.

Maailmankaikkeuden laajeneminen mullisti käsityksen ajasta ja avaruudesta. Jos maailmankaikkeus laajenee, aineen tiheys laskee ajan myötä, koska ainetta on sama määrä jakaantuneena isom-

paan tilavuuteen. Niinpä aineen tiheys on ollut ennen isompi. Yleisen suhteellisuusteorian avulla voi päätellä, että äärellisen ajan päässä menneisyydessä aineen tiheys on ollut ääretön. Lemaître totesi, että maailmankaikkeudella on ollut alku, koska tästä ei voi jatkaa enää taaksepäin.

Tätä ennen fyysikot ajattelivat, että vaikka Maapallo ja Aurinkokunta olivat muuttuneet aikojen saatossa, maailmankaikkeus -aika ja avaruus- kokonaisuutena olivat ikuisia ja muuttumattomia. Nyt nekin osoittautuivat kehittyviksi ja äärellisiksi.

Maailmankaikkeuden alkua on suomeksi ruvettu kutsumaan alkuräjähdykseksi. Termi on sikäli harhaanjohtava, että kyse ei ole räjähdyksestä (missä aine muuttuu muotoa energiaa vapauttuen). Se on kuitenkin englanninkielistä termiä "iso pamaus" (*big bang*) osuvampi sikäli, että kyseessä on nimenomaan alku. Yleisen suhteellisuusteorian puitteissa kysymys "Mitä oli ennen alkuräjähdyttä?" on yhtä mieletön kuin "Mitä on pohjoisnavasta pohjoiseen?". Pohjoisnavalla kaikki suunnat ovat

etelään, ja maailmankaikkeuden alussa on vain yksi aikasuunta, eteenpäin. Vastaavasti kysymys ”Mitä on maailmankaikkeuden ulkopuolella?” ei merkitse mitään, koska maailmankaikkeus tarkoittaa kaikkea mitä on.

Emme tosin osaa sanoa, mitä aivan alkuhetkinä on tapahtunut, tai onko alkua edes olemassa. Tiedämme, että jos tuntemamme fysiikan lait pätsivät, niin maailmankaikkeudella olisi alku tietyn ajan päässä menneisyydessä. Mutta tiedämme myös, että hyvin lähellä tätä ounasteltua alkua yleinen suhteellisuusteoria ja muut tuntemamme lait eivät päde. Nykytietomme vie kuitenkin huikkeen varhaisiin aikoihin: yleisen suhteellisuusteorian pätevyysalue saattaa ulottua $10^{(-43)}$ sekunnin päähän mahdollisesta alusta.

Tuosta ennustetusta alusta on kulunut nyt noin 14 miljardia vuotta. Lemaître'n oivallus maailmankaikkeuden laajenemisesta ei rajoittunut alun ennustamiseen, vaan sillä oli isoja seurauksia kaikkeen historialle. Koska aineen tiheys laskee, sen käyttäytyminen muuttuu. Niinpä aineen ja rakenteiden kehitys -ja sitä kautta meidän kehityksemme- nivoutuu maailmankaikkeuden laajenemiseen.

Venäläinen fyysikko **Aleksander Friedmann** oli vuonna 1922 johtanut yleisestä suhteellisuusteoriasta yhtälöt, jotka kertovat miten maailmankaikkeuden laajeneminen liittyy sen ainesisältöön. Ennen Hubblen havaintoja ja Lemaître'n selitystä ajatus maailmankaikkeuden laajenemisesta oli kiistanalainen; niiden jälkeen Friedmannin yhtälöistä tuli kosmologian kulmakivi. Kun Friedmannin yhtälöihin on yhdistetty vuosikymmenten aikana tarkentunut käsitys aineesta, on saatu paljastettua maailmankaikkeuden historiaa aikakausi kerrallaan.

Kun maailmankaikkeus laajenee ja aineen tiheys laskee, aine jäähtyy. Maailmankaikkeuden

tultua noin mikrosekunnin ikään kvarkki-nimiset alkeishiukkaset sitoutuivat protoneiksi ja neutroneiksi. Kolmen minuutin kohdalla lämpötila oli tarpeeksi pieni (noin miljardi astetta), että protonit ja neutronit saattoivat takertua toisiinsa ja muodostaa atomiytimiä hajoamatta heti. 380 000 vuoden iässä lämpötila oli laskenut 3 000 asteeseen, jolloin atomiytimet saattoivat yhtyä elektroneihin muodostaen atomeita. Laajeneminen tahditti jäähtymisen lisäksi myös aineklippien kasvua. Muodostui galakseja sekä tähtiä, joiden ytimissä, törmäyksissä ja räjähdyksissä kaikki litiumia raskaammat alkuaineet ovat syntyneet.

Friedmannin yhtälöitä voi lukea myös toisinpäin: voi mitata miten maailmankaikkeus laajenee ja päätellä siitä, millaista ainetta on olemassa. Tämä johti 90-luvulla isoon yllätykseen.

Paljon melua tyhjistä

Vuonna 1998 kaksi tutkimusryhmää julkaisi supernovamittaustensa tulokset. Supernovat ovat erittäin kirkkaita räjähtäviä tähtiä: yksi supernova voi hohtaa kirkkaammin kuin sen kotigalaksin kaikki muut tähdet yhteensä. Molemmat ryhmät totesivat, että kaukaiset supernovat ovat odotettua himmeämpiä, eli kauempana kuin mitä oli luultu. Tästä ne päättelivät, että ne maailmankaikkeus on laajentunut odotettua enemmän. Itse asiassa ryhmät peräti totesivat, että maailmankaikkeuden laajeneminen on viimeisen muutaman miljardin vuoden aikana kiihtynyt.

Tulos oli sensaatio, josta kohistiin ympäri maailmaa. Kyseessä oli merkittävin käänne kosmologiassa sitten 1920-luvun, jolloin laajeneminen oli havaittu. Friedmannin yhtälöiden mukaan maailmankaikkeuden laajeneminen hidastuu, jos maailmankaikkeus sisältää vain tavallista ainetta. Tämä

on helppo ymmärtää: tavallisen aineen gravitaatio vetää kappaleita kohti toisiaan ja siten hidastaa laajenemista.

Edessä oli siis kaksi vaihtoehtoa. Joko maailmankaikkeus sisältää jotakin eksoottista ainetta, jonka gravitaatio hylkii sen sijaan, että vetäisi puoleensa – tai sitten Friedmannin yhtälöt eivät päde. Friedmannin yhtälöjen pohjalla on kaksi oletusta: yleinen suhteellisuusteoria pätee ja aineen klippiytymisen vaikutuksen laajenemiseen voi jättää huomiotta, eli voi olettaa, että laajeneminen on samanlaista kaikkialla.

Tiedetään, että aine on maailmankaikkeudessa kerääntynyt galakseiksi ja niiden muodostamiksi ryppäiksi, rihmoiksi ja seinämiksi, joiden väliin jää onkaloita, joissa on vain vähän galakseja. Periaatteessa tämä aineen epätasainen jakautuminen voisi selittää kiihtyvän laajenemisen, mutta vuosien selvitysten jälkeen tämä vaikuttaa epätodennäköiseltä. (Tämä oli pitkään pääasiallinen tutkimuskohteeni.)

Entäpä jos yleinen suhteellisuusteoria ei päde? Se on testattu sadastuhannesosan tarkkuudella Aurinkokunnassa. Mutta Aurinkokunnan koko on joitakin valopäiviä, ja kiihtyvä laajeneminen on havaittu miljardien valovuosien mittakaavassa. Jos yleinen suhteellisuusteoria ei päde, periaatteessa gravitaatio voisi olla puoleensa vetävää pienillä etäisyyksillä ja hylkivää isoilla. On kuitenkin osoittautunut vaikeaksi rakentaa toimivaa gravitaatioteoriaa, joka toteuttaisi tämän idean ja sopisi kaikkiin tarkkoihin havaintoihin. Vaikka joitakin ehdokkaita on, suurin osa tutkijoista kallistuu sen kannalle, että kiihtyvistä laajenemisesta on vastuussa jokin eksoottinen aine, jolle on annettu nimi pimeä energia.

On kiiruhdettava sanomaan, että pimeällä energialla ei ole tietyvästi mitään tekemistä pimeän

aineen kanssa, nimen samankaltaisuudesta huolimatta. Pimeän aineen gravitaatio on puoleensa vetävää, ja se on kasautunut galakseihin, ryppäisiin ja muihin rakenteisiin aivan kuten näkyvä aine. Pimeä aine eroaa näkyvästä aineesta vain siten, että se on näkymätöntä eikä sitä voi koskea. Pimeä energia käyttäytyy aivan eri tavalla.

Pimeä energia ei klippiidy, vaan on jakaantunut tasaisesti maailmankaikkeuteen. Sitä on yhtä paljon kaikkialla. Pimeän energian gravitaatio on hylkivää, eli se puskee maailmankaikkeuden eri osia pois toisistaan, mikä johtaa siihen, että laajeneminen kiihtyy. Mikä kummallisempaa, pimeän energian energiatiheys säilyy samana maailmankaikkeuden laajetessa. Kun vaikkapa kuutiometri maailmankaikkeutta laajenee kahden kuutiometrin kokoiseksi, sen sisältämä tavallisen aineen energiatiheys laskee puoleen: energia säilyy ja tilavuus tuplaantuu. Pimeän energian energiatiheys on sen sijaan vakio, eli sen energia tuplaantuu tilavuuden kaksinkertaistuessaa.

Pimeä energia on kosmologeista kummallista. Kun vuoden 1998 supernovahavainnoista myönnettiin vuonna 2011 fysiikan Nobelin palkinto toista tutkimusryhmää johtaneelle **Saul Perlmutterille** ja toisen ryhmän johtajalle **Brian Schmidtille** ja siinä tärkeässä roolissa olleelle **Adam Riessille**, Ruotsin kuninkaallinen tiedeakatemia sanoi, että pimeää energiaa on "mysteeri, kenties isoin fysiikassa nykyään".

Kun teorian ja havaintojen yhdistäminen vie oudoille teille, on hyvä pysähtyä ja varmistaa onko jossain kohtaa voitu mennä harhaan. Kosmologi **Andrew Liddle** antoi kerran minulle ohjenuoran, että jos johtopäätökset muuttuvat siitä, että heitetään pois joku yksi kosmologinen havainto ilman mitään syytä, ne eivät ole vakaalla pohjalla. Johtopäätös maailmankaikkeuden kiihtyvistä laajene-

misesta selviää tällaisesta kokeesta: supernovien lisäksi on koko joukko riippumattomia havaintoja, jotka tukevat kiihtyvää laajenemista.

Jos maailmankaikkeuden laajeneminen ei olisi kiihtynyt, niin galaksiryppäitä pitäisi olla tiheimässä kuin mitä taivaalla havaitaan. Myös suorat mittaukset Hubblen vakiosta -eli maailmankaikkeuden laajenemisnopeudesta- kosmisilla lähitienoilla (eli muutaman sadan miljoonan valovuoden säteellä) osoittavat, että se on odotettua suurempi. Kosmisesta mikroaaltotaustasta voidaan päätellä, miten maailmankaikkeus on viimeisen 14 miljardin vuoden aikana laajentunut, ja sekin viittaa kiihtyvään laajenemiseen.

Listaa voisi jatkaa. Usein tieteellisissä läpimuroissa ei ole kyse yksittäisestä ratkaisevasta havainnosta, vaan kasvavasta verkosta havaintoja ja päätelmiä, jotka tukevat toisiaan. 1990-luvulla oli jo ennen supernovatuloksia kertynyt vihjeitä kiihtyvistä laajenemisistä, ja siksi idea hyväksyttiin melko nopeasti.

Pimeälle energiallekin oli valmis selitys. Tämänhetkisen parhaan ainetta kuvaavan teorian, kvanttikenttäteorian, mukaan tyhjän tilaan liittyy tietty määrä energiaa per tilavuus, ja tämä määrä on sama kaikkialla. Yhdessä kuutiometrissä Maan päällä on tismalleen saman verran tyhjän tilan energiaa kuin yhdessä kuutiometrissä Androme-

dan galaksissa. Tyhjän energia siis käyttäytyy juuri kuten havainnot pimeältä energialta vaativat: sen energiatiheys on vakio ajassa ja paikassa.

Ongelmana on vain se, että kiihtyvän laajenemiseen selittämiseen vaadittava energiamäärä on niin pieni. Havaintojen mukaan yhdessä kuutiometrissä on tyhjän energiaa noin 10^{-9} joulea. Tämä energiatiheys on arkisellakin mittakaavalla pieni, ja hiukkasfysiikan korkeisiin energioihin verrattuna se on kerrassaan mitätön. Kvanttikenttäteoriasta ei osata laskea tyhjän energian arvoa, mutta odotetaan, että se olisi paljon isompi, koska sen pitäisi liittyä korkeaenergistien alkeishiukkasien käytökseen.

Niinpä on kehitetty kymmeniä tai satoja toinen toistaan oudompia ehdotuksia sille, mitä pimeä energia oikein on, jos ei sitten tyhjän energiaa. Yli kahden vuosikymmenen ajan tyhjän energia on kuitenkin sopinut kaikkiin havaintoihin, eikä mitään monimutkaisempaa ole tarvittu. Uusimmat yksityiskohtaiset havainnot tosin viittaavat siihen, että lähimittaukset laajenemisnopeudesta eivät sovi-kaan yhteen muiden havaintojen kanssa, jos pimeä energia on tyhjän energiaa. Parhaillaan setvitään, mikä on havaintojen oikea tulkinta, ja ongelman ratkaisu voikin löytyä jostain muualta. Kyseessä voi olla pimeän energian mysteerin avain, tai ovi voi avautua aivan muualle.



SYKSY RÄSÄNEN

ON YLIOPISTOTUTKIJA HELSINGIN YLIOPISTON FYSIIKAN LAITOKSELLA. HÄNEN TUTKIMUSALANSA ON KOSMOLOGIA. HÄN PITÄÄ URSAN SIVUILLA HIUKKASFYSIIKAN JA KOSMOLOGIAN TIIMOILTA POPULAARIA BLOGIA KOSMOKSEEN KIRJOITETTUA.



RAPUSUMU, ON
SUPERNOVAJÄÄNNE HÄRÄN
TÄHTIKUVIOSSA, JOSSA
HAVAITTIIN RÄJÄHTÄVÄ TÄHTI
4. HEINÄKUUTA 1054.

PHOTO NASA, ESA, J. HESTER AND A. LOLL
(ARIZONA STATE UNIVERSITY)