

Kosmologia - uusi täsmätiede

Keijo Kajantie

Big Bangin eli alkuräjähdyksen maailmankuva on yleisesti tunnettu: maailmankaikkeus on lähtenyt liikkeelle - ihmisen mitoilla mitattuna - suunnattoman kuumasta ja suunnattoman pienestä tilasta ja on siitä lähtien jatkuvasti laajentunut ja jäähtynyt. Mutta mitkä ovat tarkalleen maailmankaikkeuden mitat? Kuinka iso ja kuinka vanha se on, mikä on sen tulevaisuus, mitkä ovat sen aineosat?

Maapallon mitat tunnetaan tietysti tavattoman tarkasti; säde on 6378 km, tiheys 5500 kg/m³, jne. Pallonmuotoisuus on päivänseivää kun katselee satelliitista otettua valokuvaa. On kuitenkin hyvä muistaa, ettei tästä ollut aavistustakaan ennen kuin Eratosthenes määrsi vanhassa Egyptissä paikallisilla mittauksilla maan säteen pari vuosisataa ennen ajanlaskumme alkua. Aurinko taas on tähti, kuuma pääasiassa vedyn ja heliumin täyttämä kaasupallo, jonka säde on 696 000 km, massa 1.989•10³⁰ kg, ikä 4.52 miljardia vuotta ja jonka säteilyteho on 3.846•10²⁶ W niin että maapallolle joka hetki tulee 1368 W/m² elämää ylläpitämään.

Mutta voitaisiinko samaan prosentin tarkkuuteen päästä koko maailmankaikkeutta tarkasteltaessa? Kyllä, alle kymmenen vuoden kuluessa, katsomalla kosmisen taustasäteilyn välityksellä noin 300 000 vuotta vanhaan maailmankaikkeuteen. Ja tärkeintä on, että kyse ei ole vain epäoleellisesta tarkkuuden lisäämisestä, vaan todella suuresta käsitteellisen ymmärryksen kasvusta.

Mitkä tarkemmin olisivat maailmankaikkeuden mittoja luonnehtivat suureet? Ensimmäinen on laajenemisnopeus: jos galaksi on tietyllä etäisyydellä r , näyttää se etääntyvän nopeudella $v=Hr$, jossa H on Hubblen vakio. Luvut ovat sellaiset, että kun r on luokkaa 10 miljardia valovuotta, alkaa v olla luokkaa valon nopeus eli se ei voi suuremmaksi tulla. Alamme olla maailmankaikkeuden reunoilla eli sen ikä on noin 10 miljardia vuotta.

Laajeneminen taas havaitaan siitä, että spektriviivat ovat siirtyneet kohti punaista ja *punasiirtymä* $z =$ (havaittu aallonpituus - alkuperäinen aallonpituus)/alkuperäinen aallonpituus) on positiivinen. Koska z on mitattava suure, käytetään sitä yksikäsitteisenä etäisyyden mittana: kun $z \ll 1$ ollaan lähiympäristössämme ja pakonopeudet ovat satoja, tuhansia km/s. Kaukaisimmat tähdet on nähty punasiirtymällä 1 ja kaukaisimmat galaksit punasiirtymällä 5. Niiden pakonopeudet lähestyvät valonnopeutta, eli ne ovat todella kosmologisilla etäisyyksillä.

Voimme kuvitella, että kun katsomme taivaankannella yhteen suuntaan tarkemmin ja tarkemmin, näemme yhä kauempana ja kauempana olevia objekteja yhä suuremmalla ja suuremmalla punasiirtymällä ja erityisesti sen että nämä objektit ovat yhä lähempänä ja lähempänä maailmankaikkeuden alkua. Emme tietysti voi nähdä Auringon syntyä, mutta jossain kaukana on galaksi, jossa on tähti, jolla on planeetta, jolta juuri nyt katsotaan meidän Aurinkomme syntyä! Jos me siis pyrimme tutkimaan maailmankaikkeutta kokonaisuutena, on pyrittävä katsomaan mahdollisimman suurelle punasiirtymälle.

Toinen joukko maailmankaikkeutta luonnehtivia suureita liittyy sen koostumukseen. Emme ole kiinnostuneita joistain mitättömistä alkuainemääristä vaan todella eri aineityyppien perusluokista. Näitä on ensinnäkin tavallinen, "baryoninen" aine, jota näemme ympärillämme ja josta myös näkyvät tähdet on pääasiassa tehty. Nyt on todella merkittävää, että monet tähtitieteessä havaittavat painovoimaefektit viittaavat siihen että maailmankaikkeudessa on ainakin kymmenkertainen määrä "kylmää pimeää ainetta", *cold dark matter*, CDM. Se on sähköisesti neutraalia eikä millään näy tavallisissa mittauslaitteissa, vaikka kovasti yritetäänkin. Se vain näkyy painovoimavaikutustensa kautta, erityisesti maailmankaikkeuden laajenemisessa.

Kolmas "aine"tyyppi on tyhjiön energiasisältö. Tässä on jälleen kyse jostain aivan perustavasta asiasta: kuinka tyhjiöllä voi olla energiaa? Itse asiassa voi, jos sillä samalla paradoksaalisesti on negatiivinen paine. Tyhjiön energiatihyettä kutsutaan myös kosmologiseksi vakioksi Λ ja se ilman muuta vaikuttaa koko maailmankaikkeuden laajenemisominaisuuksiin. Vertaamalla maailmankaikkeuden kriittiseen tiheyteen - jos kokonaistiheys olisi suurempi kuin tämä, laajenisi maailmankaikkeus ikuisesti - voimme määritellä kolme suhteellista tiheyttä, Ω_b , Ω_{CDM} , Ω_Λ . Voimme nyt sanoa, että kosmologia on täsmätiedettä, kun tunnemme nämä tiheydet ja Hubblen vakion h yhden prosentin tarkkuudella. Itse asiassa muutama muukin perussuure voidaan määritellä. Tuntuu ensi näkemältä mahdottomalta ajatella, että voisi antaa nämä koko maailmankaikkeuden fysikaaliset dimensiot muutaman desimaalin tarkkuudella erityisesti koska oleellinen osa tästä luonnehdinnasta on aika, sekä kuumaan menneisyyteen että loputtomaan tulevaisuuteen suunnattuna. Näköpiirissä on kuitenkin sellaisia mittauksia, jotka tekevät tämän tarkkojen kvantitatiivisten mittojen antamisen mahdolliseksi ensi vuosituhaten alussa: kosmologiasta on tulossa täsmätiede. Idea on katsoa kosmisen taustasäteilyn välityksellä punasiirtymään $z=1100$, noin 300 000 vuotta vanhaan maailmankaikkeuteen.

Kosminen taustasäteily

CBR Hiukkasten lukumäärää ajatellen maailmankaikkeuden vallitseva komponentti on tällä hetkellä kosminen taustasäteily, *cosmic background radiation*, CBR. Tämä on radiosäteilyä eli sähkömagneettista säteilyä lämpötilassa 2.738 K, joka vastaa tiheyttä 413 fotonia/cm³; kaikkiaan fotoneita on noin 10³⁰. Se, että lämpötila on noin tarkasti määrittely tarkoittaa sitä, että vaikka säteilyssä onkin eri aallonpituuksia- mittauksia on suoritettu alueella 0.03 cm ... 100 cm- ovat nämä täysin määrättyllä tavalla jakaantuneita. Kvantitatiivisen kosmologian kannalta oleellista kosmisessa taustasäteilyssä on se, että se on lähtenyt liikkeelle punasiirtymän $z=1100$ aikaan. Tällöin maailmankaikkeus jäähtyi alle lämpötilan 3000 K ja siinä olleet elektronit yhtyivät pääasiassa protoneihin ja heliumytimiin muodostaen neutraaleja atomeja. Fotonit pääsivät sen jälkeen liikkumaan vapaasti ja ovatkin sen jälkeen kiittäneet 10 miljardia vuotta mihinkään törmäämättä. Katsomalla niitä saadaan tietoa suoraan hyvin varhaisesta maailmankaikkeudesta: kun punasiirtymä on 1100, oli maailmankaikkeus kooltaan vain 1100-osa nykyisestä ja sen ikä oli vain noin 300 000 vuotta. Sana "noin" liittyy nykyiseen tietouteen, 10 vuoden päästä tämäkin luku tiedetään paljon tarkemmin. Kun nyt katsomme punasiirtymään 5 saakka, näemme maailmankaikkeudessa tähtiä ja galakseja, siis selkeää rakennetta. Mutta kun katsomme näiden ohitse mahdollisimman kauas, näemme kosmisen taustasäteilyn synnyn punasiirtymällä 1100, näemme "viimeisen sirontapinnan", *last scattering surface*, LSS:n. Se vastaa auringon pintaa, Auringon säteilykin on peräisin sen pinnalta. LSS on vaan todella kaukana, 10 miljardin valovuoden päässä. Sitä kauemmaksi ei sähkömagneettisella säteilyllä voikaan nähdä. Päinvastoin kun tähdet, jotka vastaavat hyvin suurta epätasaisuutta aineen jakaantumisessa, on LSS erittäin tasainen, muttei kuitenkaan aivan tasainen. Eräs viime vuosikymmenen suurimmista tieteellisistä saavutuksista oli COBE-satelliitin mittauksista 1992 saatu tieto, että kosmisessa taustasäteilyssä on suhteellista suuruusluokkaa 10⁻⁵ olevia epätasaisuuksia. Nämä epätasaisuudet eivät itse asiassa ole mitään muuta kuin kaikkien galaksien siemeniä, galaksit ovat niistä kehittyneet painovoiman vaikutuksesta, aivan kuten aurinkokunta joskus kehittyi kaasupilvestä. Tätä maailmankaikkeuden rakenteen muodostumista simuloidaan nykyään aktiivisesti tietokoneilla ja myös varsin menestyksellisesti, havaitun rakenteen oleelliset piirteet voidaan ymmärtää.

Planck-satelliitti

European Space Agencyn toimesta on tarkoitus lähettää vuonna 2005 lähettää Maan ja Auringon väliseen avaruuteen Planck-satelliitti. Sen tarkoituksena on uusia COBE-satelliitin mittaukset, mutta paljon suuremmalla tarkkuudella. Yhdysvalloissa on NASAlla vastaava MAP-satelliitti, joka laukaistaisiin radalleen jo muutamaa vuotta aikaisemmin mutta jonka erotuskyky olisi hieman Planckia huonompi. Kun COBE-satelliitti näki taivaankannen yli ulottuvalla LSS-pinnalla rakenteita, jotka olivat yksi tuhannesosa taivaankannen pinta-alasta, näkee Planck-satelliitti rakenteita, jotka ovat yksi miljoonasosa siitä, paljon pienempiä kuin esimerkiksi kuun pinta-ala. Tällä tavoin aivan kirjaimellisesti nähdään ne primordiaaliset tiheysvaihtelut, joista kaikki nykyään nähtävä rakenne on kehittynyt. Ja koska niistä lähtenyt säteily on kokenut niin suuren osan maailmankaikkeuden koko eliniäst. riippuvat havaitut pinnan tiheysvaihtelut herkästi alussa

mainituista kosmologisista parametreista. Havainnoista voidaan päätellä kosmologisten vakioiden arvot prosentin tarkkuudella. Jonkinlainen analogia tässä on seismologia: maan pinnan värähtelystä päätellään laskennallisesti mitä maan sisässä on. Suomalaiset osallistuvat Planck-satelliitin ympärillä tapahtuvaan toimintaan monella tavalla. Millilab (VTT:n ja TKK:n yhteinen laboratorio ja ESAn osaamiskeskus) ja Insinööritoimisto Ylinen Oy rakentavat satelliittiin 70 GHz:n vastaanottimen. Kokonaiskustannukset ovat pari kymmentä miljoonaa markkaa. Tähtitieteilijät (TKK/Metsähovi, Turun yliopisto, Helsingin yliopisto) ovat kiinnostuneita mittaustuloksista tavallaan sivutuotteena tulevista pienien punasiirtymän ilmiöiden tiedoista, hiukkasfysiikkoja (Helsingin yliopisto) taas kiinnostaa tieto primordiaalisista tiheysvaihteluista suunnattomasti.

Hiukkasfysiikka ja kosmologia

Ydinfysiikalla ja astrofysiikalla on erittäin läheinen yhteys: tähtien ja erityisesti auringon energian tulee niiden sisällä tapahtuvista ydinreaktioista. Lämpötilat tähdissä ovat sellaisia, että ydinreaktiot pääsevät niissä käyntiin. Kosmologialla on aivan vastaavanlainen yhteys hiukkasfysiikkaan: missään muualla luonnossa ei esiinny (oikeastaan ei ole esiintynyt) niin korkeita lämpötiloja kuin hyvin varhaisessa maailmankaikkeudessa. Korkeat lämpötilat aiheutuvat siitä, että lämpötila kasvaa kääntäen verrannollisena kokoon. Oheisen kaavamaisen kuvan on tarkoitus valaista hiukkasfysiikan ja Planck-satelliitin tulosten välistä yhteyttä. Kuten todettiin, näkee Planck punasiirtymään 1100- kuvan hetkien Now ja Decoupling välillä - ja tämä on tavattoman kaukana verrattuna kaukaisimpiin galakseihin punasiirtymällä 5. Mutta jos nyt kysytään, mistä hiukkasfysiikan ideoiden mukaan havaitut primordiaaliset tiheysvaihtelut ovat peräisin, joudutaan menemään ajassa yli 40 kertalukua kohti alkua, nykyisestä 10 miljardia vuotta vanhasta maailmankaikkeudesta vain 10^{-35} sekuntia vanhaan maailmankaikkeuteen. Tällöin maailmankaikkeuden säde kasvoi yhtäkkiä eksponentiaalisesti tavattoman nopeasti ja tämän kasvun yhteydessä syntyivät ne primordiaaliset tiheysvaihtelut, jotka nyt nähdään kosmisen taustasäteilyn epätasaisuuksina ja joista galaksit ovat syntyneet.

Maailmankaikkeuden koko yli sen koko historian, 60 kertalukua ajassa. Vaaka-akselin nollakohta vastaa Planckin aikaa, 10^{-43} sekuntia, piste 60 nykyhetkeä 10 miljardia vuotta. Käyrä $R=R(t)$ kertoo kuinka nykyinen maailmankaikkeus venyi avaruuden laajenemisen takia aikaisempina hetkinä, käyrä ct antaa matkan, jonka valonsäde on ehtinyt kulkea hetkenä t . Tilanne on mahdollinen vain jos jonain hyvin varhaisena hetkenä $R(t)$ kasvoi eksponentiaalisesti, "inflatorisesti", c:t:n ohi. Kosmisella taustasäteilyllä nähdään hetkestä Nowhetkeen Decoupling, "vain" 3...4 kertalukua ajassa. Luonnonlait hetkestä Nowhetkeen EW (Electroweak) on testattu laboratoriossa, kosmisen taustasäteilyn mittaukset testaavat luonnonlakeja inflaation aikana.

Tuo suunnaton hyppy ajassa tuntuu ensi näkemältä epäilyttävältä. Onko tässä mitään järkeä, onko mielekästä puhua maailmankaikkeudesta, joka on pienempi kuin pieninkin nykyään tunnettu alkeishiukkanen? Oleellista tässä on, että empiirisen luonnontieteen paradigmasta ei millään tavalla poiketa: ajatustyö eli teoria antaa ymmärtää, että inflaatio on mahdollinen ja näitä teorioita voidaan kokeellisesti testata kosmisen taustasäteilyn mittauksilla. Kysymys pimeän aineen todellisesta luonteesta on myös puhtaasti hiukkasfysiikallinen. Mitä ovat nämä hiukkaset, joiden kokonaismassa muodostaa suurimman osan maailmankaikkeuden koko massasta, mutta joita kukaan ei vielä ole pystynyt näkemään?

Tulevaisuuden näkymät

Tieteen lopun, erityisesti perustutkimusfysiikan lopun saamaa riittää. "Suurten visioiden ja läpimurtojen aika on ohi" väittää esimerkiksi J. Horgan kirjassaan *The end of science*. Edellä olevan valossa tällaiset mielipiteet ovat ällistyttäviä. Mikä onkaan suurempi visio kuin odotus siitä, että ymmärretään maailmankaikkeus kokonaisuudessaan, laidasta laitaan, alkupisteestä nykyisyyteen ja tulevaisuuteen, ilman että millään lailla luovutaan empiirisen luonnontieteen perusperiaatteista? Mitä uusia kysymyksiä avautuu sen jälkeen kun tämä on ymmärretty? * Tämän esityksen olisi voinut panna kokoon yhdistelemällä selittävin välilausein joukon web-osoitteita. Liitän tähän vain sopivaksi lähtöpisteeksi Max Tegmarkin sivun

<http://www.sns.ias.edu/~max/cmb/pipeline.html>

Tämän linkeistä pääsee eteenpäin moniin selkeisiin yleisesityksiin kosmisen taustasäteilyn fysiikan alalla. Suomalaisen toiminnan kotisivuja ovat Helsingin hiukkaskosmologian ryhmän kotisivu

<http://www.physics.helsinki.fi/~engqvist/cosmo.html>

ja Millilabin kotisivu

<http://www.vtt.fi/Millilab/>

Kirjoittaja on teoreettisen fysiikan professori Helsingin yliopistossa. Hän työskentelee tällä hetkellä Euroopan ydintutkimuskeskuksessa CERNissä. Kirjoitus perustuu esitelmään Fysiikan päivillä 19.3.1998.

TAKAISIN LEHDEN SISÄLLYSLUETTELOON