

Avaruuden näkymätön aine

Hannu Kurki-Suonio

Lawrence Krauss: *Kvintessensi – Puuttuvan massan arvoitus*. Suomentanut Erkki Kauhanen. Art House 2003.

Onko se aine, jonka näemme, kaikki, mitä meitä ympäröivässä maailmassa on? Tätä pohtivat jo antiikin filosofit. Teoksensa *Kvintessensi – Puuttuvan massan arvoitus* ensimmäisessä luvussa, joka sinänsä ei ole kokonaisuuden kannalta tarpeellinen, Lawrence Krauss esittelee näitä antiikin ja valistusajan ajattelijoiden näkemyksiä asiasta. Teoksen varsinainen aihe on kosmologiaksi kutsuttu nykyaikainen luonnontiede ja eräs sen keskeisimmistä löydöistä, joka on samalla eräs sen suurimpia mysteereitä. Kosmologian antama vastaus alussa esitettyyn kysymykseen on nimittäin kielteinen. Havaitsemamme "tavanomainen" atomeista koostuva aine on vain pieni osa maailmankaikkeuden sisältämästä aineesta ja energiasta. Sitä, mitä tämä muu, "pimeä", aine ja energia on, emme kuitenkaan vielä tiedä.

Kosmologian tutkimusaihe on maailmankaikkeus kokonaisuutena, sen rakenne ja kehityshistoria. Siihen liittyvä havaintoaineisto on viimeisen parin vuosikymmenen aikana kasvanut räjähdysmäisesti, ja siksi kosmologiasta on tullut eksakti tiede. Esitettyjen kosmologisten teorioiden on täytettävä laajan havaintoaineiston asettamat tiukat kriteerit.

Vuonna 1965 löytynyt kosminen taustasäteily johti kosmologiassa kvalitatiiviseen vallankumoukseen, kosmologisen maailmankuvamme kiinnittymiseen. Tästä kokonaiskuvasta käytetään nimitystä "alkuräjähdysteoria". Se on looginen seuraus Einsteinin yleisestä suhteellisuusteoriasta ja Edwin Hubble'n 1920-luvulla havaitsemasta kaukaisten galaksien etäätymisestä toisistaan, mutta sitä ei haluttu tähtitieteilijöiden piirissä aluksi hyväksyä.

Paitsi että kosminen taustasäteily ja sen lämpötapaino ovat jo itsessään selkeä signaali alkuräjähdyksestä, säteilyn lämpötilan mittaaminen teki mahdolliseksi laskea varhaisen maailmankaikkeuden kehitys termodynamiikan lakien avulla, erityisesti se, miten keveiden alkuaineiden ytimet muodostuivat alkuräjähdyksessä. Tämän ydinsynteesilaskun tulos sopii vakuuttavalla tavalla yhteen näiden alkuaineiden havaittujen määrien kanssa.

Tällä hetkellä kosmologiassa on käynnissä toinen, kvantitatiivinen, vallankumous. Nopeasti lisääntyvä havaintoaineisto tekee mahdolliseksi määrittää suurella tarkkuudella maailmankaikkeutta kuvaavan mallimme parametrit, kuten sen erilaisten aine- ja energia-komponenttien suhteelliset osuudet. Tämän määrittämisen perusteella maailmankaikkeuden keskimääräisestä energiatiheydestä vain 4-6 % on tavanomaista atomeista koostuvaa ainetta, 0,005 % on sähkömagneettista säteilyä, 0,05-3 % on neutriinoja ja suurin osa on meille tuntemattomia, näkymättömiä, aineen ja energian muotoja, 20-25 % ns. kylmää pimeää ainetta ja 70-75 % ns. pimeää energiaa.

Ei mikään turhan vaatimaton mies

Lawrence Krauss on professori amerikkalaisessa Case Western Reserve -yliopistossa. Hänen nyt suomennettu, vuonna 2000 englanniksi ilmestynyt, teoksensa käsittelee tätä pimeää ainetta ja energiaa: miten olemme päätyneet niiden olemassaoloon, mitä ne voisivat olla ja miten pimeän aineen hiukkasia nyt yritetään havaita laboratorioissa.

Kirja on uudistettu laitos Kraussin kymmenen vuotta aikaisemmin ilmestyneestä teoksesta. Teoksen rakenne on valitettavasti kärsinyt tästä uudistamisesta. Kymmenen vuotta sitten kosmologia tunsu nimittäin vasta pimeän aineen; pimeä energia astui kuvaan vuonna 1998. Pimeää energiaa käsittelevät osat onkin selvästi liimattu tekstiin jälkeenpäin, ja jollei lukija ennestään ole perillä pimeän aineen ja pimeän energian erosta, voi jäädä epäselväksi kummasta on kyse.

Sanalla "kvintessensi" tarkoitetaan nykyään erästä ehdokasta pimeäksi energiaksi, hitaasti muuttuvaa skalaarikenttää. Tämä nimitys on peräisin Caldwellin, Daven ja Steinhardtin artikkelista vuodelta 1998 (nimitystä tosin käytettiin laajemmassa merkityksessä). Krauss oli sitä ennen jo käyttänyt tätä, antiikista periytyvää, nimitystä pimeästä aineesta. Kraussin uuden teoksen nimessä "kvintessensi" on ilmeisesti nyt tarkoitettu kattamaan sekä pimeä aine että energia.

Krauss on kansainvälisesti tunnettu tutkija, joka on itse ollut aktiivisesti mukana kosmologian kehitystyössä ja on tehnyt siihen merkittäviä kontribuutioitakin. Tämä ei jääkään kirjan lukijalle epäselväksi. Suomalaista lukijaa, joka pitää vaatimattomuutta hyveenä, tämä oman hännän nostaminen saattaa oudoksuttaa, mutta epäilemättä se elävöittää kirjan tekstiä.

Vuorovaikutuksia

Nykyfyysikko lähestyy kysymystä näkymättömästä aineesta aloittaen vuorovaikutuksista. Tuntemme neljä perusvuorovaikutusta, painovoima, sähkömagneettinen vuorovaikutus ja ydinfyysiikan heikko ja vahva vuorovaikutus. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan kaikki hiukkaset, kaikki aineen ja energian muodot, tuntevat painovoiman. Muut vuorovaikutukset sen sijaan ovat valikoivia. Atomin osat, ytimet ja elektronit, tuntevat sähkömagneettisen voiman, jota välittävät fotonit, valon kvantit. Tähän perustuu se, että pystymme helposti näkemään atomeista koostuvan aineen.

Eräs tuntemamme hiukkaslaji, neutriino, ei tunne sen paremmin sähkömagneettista kuin vahvaakaan vuorovaikutusta. Se tuntee vain heikon vuorovaikutuksen ja painovoiman. Tämä tekee neutriinoista äärimmäisen vaikeasti havaittavia. Heikko vuorovaikutus on nimittäin nimensä mukaisesti hyvin heikko, miljardisosa sähkömagneettisesta vuorovaikutuksesta. Itse asiassa lävitsemme virtaa jatkuvasti suuria määriä Auringon säteilemiä neutriinoita, emmekä huomaa mitään. Krauss toteaa, ehkä hieman yllättävästi: "Jokainen joka on joskus todella pohtinut asiaa, ymmärtää, että neutriinon vuorovaikutukset tavallisen aineen kanssa voimistuvat neutriinon energian kasvaessa."

Auringon neutriinot ovat jo riittävän suurienergisiä, jotta niitä pystytään sopivilla koejärjestelyillä havaitsemaan. Sen sijaan alkuurajähdyksestä peräisin olevat neutriinot, joiden tiedämme olevan olemassa, koska ne ovat osallistuneet keveiden alkuaineiden muodostumisessa tarvittuihin reaktioihin, ovat maailmankaikkeuden laajetessa menettäneet niin paljon energiaansa, että kukaan ei vielä ole keksinyt miten niitä pystyttäisiin havaitsemaan laboratoriossa. Laskujen mukaan niitä kuitenkin on noin 300 kpl jokaista maailmankaikkeuden kuutiokeskimetriä kohden.

On luonnollista ajatella, että saattaisi olla olemassa muitakin, toistaiseksi tuntemattomia,

hiukkaslajeja, jotka myös tuntevat vain heikon vuorovaikutuksen ja painovoiman, tai ehkä vain painovoiman, ja jotka ovat siksi jääneet meiltä havaitsematta. Painovoima on vielä valtavan paljon heikkoa vuorovaikutusta heikompi, eikä sovellu suoriin havaintoihin laboratoriossa. Jos tällaisia tuntemattomia hiukkasia olisi riittävän suuria määriä, voisimme havaita ne galaksien mittakaavassa aiheuttamiensa painovoimavaikutusten kautta.

Kriittinen tiheys

Teoksen II osa (luvut 3 ja 4) kertovat siitä, miten tällaista todistusaineistoa saatiin galaksien liikkeistä ja pyörimisnopeuksista. Ensimmäiset havainnot teki Zwicky vuonna 1930 Bereniken hiusten galaksijoukosta. Galaksit liikkuvat toisiinsa nähden aivan liian suurilla nopeuksilla, jotta galaksijoukon näkyvän aineen perusteella arvioidun massan painovoima riittäisi pitämään joukon koossa. Aluksi puhuttiin "puuttuvasta massasta"; nykyään puhumme "pimeästä aineesta". Galaksien massat ovatkin paljon suuremmat, koska suurin osa massasta on pimeää ainetta. Jakamalla liikkeiden perusteella arvioidut massat maailmankaikkeuden tilavuudella saadaan maailmankaikkeuden aineitiheydeksi 20-30 % ns. kriittisestä tiheydestä.

Kosmologiassa maailmankaikkeuden aine- ja energiatiheyden yksikkönä on tapana käyttää kriittistä tiheyttä. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan maailmankaikkeus on positiivisesti kaareutunut ja geometrialtaan suljettu ja kooltaan äärellinen kuin pallonpinta, jos sen keskitiheys ylittää kriittisen tiheyden, ja negatiivisesti kaareutunut päinvastaisessa tapauksessa. Jos keskitiheys on tasan kriittinen, avaruudella ei ole mitään suuren mittakaavan kaarevuutta, vaan siinä on ainoastaan paikallisia galaksien aiheuttamia muhkuroita. Kriittisen tiheyden arvo riippuu maailmankaikkeuden laajenemisnopeudesta, jota kuvaa ns. Hubblen vakio.

III osassa (luvut 5 ja 6) asetetaan ala- ja ylärajoja kokonaistiheydelle. Varhaisen maailmankaikkeuden ydinsynteessin kulku riippuu tavanomaisen aineen tiheydestä. Vaatimalla yhteensopivuus havaintojen kanssa saadaan määritettyä tavanomaisen aineen määrä välille 1-6 % kriittisestä tiheydestä.

Maailmankaikkeuden geometria voidaan määrittää siitä, missä kulmassa kosmisen taustasäteilyn kuumat ja kylmät alueet näkyvät. WMAP-satelliitin helmikuussa 2003 julkaistu-

jen mittausten perusteella geometria on lähellä laakeata eli keskitiheys on muutaman prosentin tarkkuudella kriittinen tiheys. Tämä tulos tai pari vuotta aikaisempi Boomerang-teleskoopin mittaama samansuuntainen epätarkempi tulos, ei ole ehtinyt Kraussin kirjaan. Vastaava tulos saadaan kuitenkin yhdistämällä galaksien liikkeistä saadut arviot aineen määrälle vuonna 1998 julkaistuihin tuloksiin kaukaisten supernovien kirkkauden ja niiden valon punasiirtymän välisestä yhteydestä, joka riippuu maailmankaikkeuden geometriasta.

Teoreettisista syistä uskotaan, että maailmankaikkeuden keskitiheys on itse asiassa erittäin suurella tarkkuudella juuri kriittinen. Näin ollen tuo aineitiheyden arvio 20-30 % jää vajaaksi. Lopusta käytetään nykyään yleensä nimitystä "pimeä energia".

Pimeä energia jää varjoon

Pimeä energia jää teoksessa varsin vähäiseen rooliin. Pääosa kirjan loppuosasta käsittelee pimeää ainetta. Pimeä aine onkin ollut tiedossamme paljon pitempään, eikä se ole teoreettisesti läheskään niin ongelmallinen kuin pimeä energia. Hiukkasfysiikka tarjoaa näet useita hyviä ehdokkaita pimeän aineen hiukkasiksi.

Vaikka kosmologia ei antaisi pienintäkään vihjettä pimeän aineen olemassaolosta, hiukkasfysikot silti esittäisivät, että tällaisia hiukkasia on todennäköisesti olemassa ja suunnittelisivat koejärjestelyjä niiden havaitsemiseksi. Pimeää energiaa sen sijaan "ei ole kukaan tilannut". Yhä painavammaksi kertynyt kosmologinen havaintoaineisto on vain vähitellen pakottanut siihen vastenmielisesti suhtautuneet teoreetikot ottamaan sen vakavasti.

IV osa kertoo ensimmäisestä pimeän aineen hiukaskandidaatista, neutriinosta, sekä siitä, miten vähitellen lisääntynyt havaintoaineisto maailmankaikkeuden rakenteesta on tarkentanut pimeältä aineelta vaadittuja ominaisuuksia ja työntänyt neutriinot sivurooliin. Rakenteella tarkoitamme aineen keräytymistä galakseihin ja sitä, miten galaksit ovat ryhmittyneet avaruuteen. Jotta rakenne muodostuisi havaitulla tavalla, on pimeän aineen hiukkasten oltava, paitsi heikosti vuorovaikuttavia, myös hitaasti liikkuvia, eli "kylmiä", niin etteivät ne pääse karkaamaan muodostuvista "gravitaatiokaivoista". Tämä oli itselleni kirjan kaikkein hyödyllisin osa – monopolivisen tarinan vaiheet ja täsmälliset syyt olivat aikaisemmin jääneet minulle osittain epäselviksi.

Hiukaskandidaatteja etsimässä

Kirjan V osa kertoo sitten näistä kylmän pimeän aineen hiukaskandidaateista, joita teoreetikot meille tarjoavat. Kandidaatit, ja fyysiset syyt olettaa kunkin olemassaolo, esitetään luvussa 10, ja luvussa 11 selvitetään, miksi kullekin kandidaatille olisi luonnollista ottaa kosmologisen pimeän aineen rooli.

Luvun avausluokittelun "Alkeishiukkas-ehdokkaat joko syntyvät pimeäksi aineeksi, saavuttavat 'pimeän aineuden' tai 'pimeä aineus' pakotetaan niihin" tarkempi merkitys ei kuitenkaan kovin hyvin käy ilmi. Kysymyksen on siitä, millä perusteella kutakin ehdokasta voisimme odottaa olevan maailmankaikkeudessa juuri oikea määrä, 20-25 % kriittisestä tiheydestä.

Vaikka kylmän pimeän aineen kysyntä (kosmologiassa) ja tarjonta (hiukkasfysiikan teorioissa) vastaavatkin hyvin toisiaan, "keiton paras todistus on maistamisessa", kuten Krauss asian ilmaisee. Näitä hiukkasia pitäisi olla kaikkialla. Vakuuttavin osoitus niiden olemassaolosta olisi suora havaitseminen laboratoriossa.

VI osassa Krauss kuvailee niitä kokeita, joita on jo käynnissä tai suunnitellaan niiden löytämiseksi. Vaikka osa on otsikoitu "Kylmän pimeän aineen epätoivoinen etsintä", Krauss on kuitenkin optimistinen sen suhteen, että ratkaiseva havainto voi tulla lähitulevaisuudessa.

Tämä olisikin dramaattinen, ja kipeästi käivetty, nykykosmologian vahvistus. Vaikka kosmologinen teoriaamme on nopeasti tarkentunut ja selittää maailmankaikkeuden tärkeimmät havaitut piirteet hyvin, on kiusallista, että teorian keskeisten pelurien olemassaolo perustuu vain epäsuoraan päättelyyn. Niin kauan kun kylmän pimeän aineen hiukkasia ei ole suoraan havaittu, joutuvat kosmologit sietämään epäileviä ääniä, jotka arvelevat kylmää pimeää ainetta vain teorian epäonnistumisen paikkaamiseksi.

Toisen pimeän komponentin, "pimeän energian", tilanne on huolestuttavampi. Sen olemassaolo näkyy vain maailmankaikkeutemme laajenemislaissa ja siinä, että maailmankaikkeuden geometria on laakea, vaikka galakseissa ja galaksijoukoissa olevan aineen määrä on alle kolmasosa siihen vaadittavasta energiatiheydestä. Kumpikin päättely perustuu yleiseen suhteellisuusteoriaan. Jälkimmäinen vaatii, että loppu energiatiheys ei ole kerääntynyt galaksijoukkoihin, vaan on avaruuteen tasaisesti jakautunut, ja edellinen, että siihen liittyy negatiivinen paine. Hiukkasista muodostuneen aineen tai energian paine on aina positiivinen,

mutta pimeää energiaa saattaisi olla jokin avaruuden täyttävä tuntematon kenttä.

Kyseessä voi myös olla itse tyhjiön energia. Tämä mahdollisuus esitellään luvussa 2 (ei kylläkään kovin selkeästi). Kvanttikentäteoreettisten tarkastelujen perusteella ei nimitäin ole lainkaan itsestään selvää, että tyhjiön energiatiheys on nolla. Ongelmallista on, että kosmologian vaatima pimeään energian tiheys ei ole kvanttikentäteorian kannalta lainkaan järkevää suurusluokkaa.

Pimeään energian olemassaolo on päätelty yleisen suhteellisuusteorian koko maailmankaikkeutta kuvaavista yhtälöistä. Pimeään energian oletamisen sijasta sama lopputulos saataisiin lisäämällä yleisen suhteellisuusteorian perusyhtälöihin ylimääräinen vakio, ns. kosmologinen vakio. Näin ollen ei ole varmaa, että "pimeä energia" on oikeaan osuva nimi havaitulle ilmiölle. Tämän päivän teoreetikot kuitenkin mieluummin olettavat ylimääräisen energiakomponentin kuin rumentavat teoriaa ylimääräisellä vakiolla. Kosmologista vakiota ja tyhjiöenergiaa ei periaatteessa voi erottaa havainnoilla toisistaan, paitsi siinä onnettomassa tapauksessa, että se, mitä nyt luulemme tyhjiöksi, ei olekaan "oikea tyhjiö", vaan että oikea perustila on vielä alempi. (Tällöin on mahdollista, että maailmankaikkeus joskus siirtyy tähän uuteen perustilaan, meidän kannaltamme tuhoisin seurauksin.) Sen sijaan jos pimeä energia johtuu jostain hitaasti muuttuvasta kentästä, voimme tämän muutoksen ehkä havaita tulevasta tarkemmista kosmologisista havainnoista.

Asiantuntevaa joskin kuivakkaa

Kirjan ehdottomia ansioita on, että teksti on asiantuntevaa ja tunkeutuu syvälle. Kun moni seikka on muissa populaariesityksissä kuitattu pinnallisella yksinkertaistuksella, Krauss lähtee rohkeasti selittämään asioita niin kuin ne oikeasti ovat. Lopputulos ei sitten olekaan mitään kevyttä ajanvietelukemista. Krauss ei kuitenkaan käytä kaavoja; nehan tunnetusti säilyttävät suuren osan lukijoista pois. Joidenkin asioiden sanallinen selittäminen meneekin sitten niin monimutkaiseksi, että kaavoihin tottunut saisi kyllä kaavoista paljon helpommin tolkkua.

Teoksen tyyli on kuivakkaa verrattuna esimerkiksi Kari Enqvistin populaariteosten luistavaan ilmaisuun. Tekstiä onneksi ryydittävät anekdootit ja "sisäpiirin tieto" kosmoliogi yhteisöstä.

Kirjassa on suuri määrä materiaalia, 384

sivua pienellä prantilla. Asioiden kokonaisuuden hahmottamiseksi olisi kaivattu jonkinlaista apuneuvoa, yhteenvedo-osa, kokoavia kaavioita tms. Olenkin edellä yrittänyt tehdä tällaista yhteenvedoa.

Joitakin pieniä asiavirheitä on pujahtanut mukaan. Sivulla 140 väitetään, että deuteriumin sidosenergia on paljon pienempi kuin neutronin ja protonin massaero; todellisuudessa se on yli puolitoistakertainen. Sivulla 202 esitetään, että neutriinoiden lukumäärätiheys on kymmenesosa fotonien lukumäärätiheydestä, kun lukumäärien suhde oikeasti on 9/11. Sivulla 370 määritellään, että yhden parsekin etäisyydellä oleva tähti näkyy yhden asteen (po. kahden kaarisekunnin) verran eri kulmassa kun sitä katsotaan maasta puolen vuoden välein. Sivun 91 kuvassa "valovuosia" po. "tuhansia valovuosia" ja sivulla 151 $\omega_b = 0,19$ po. 0,019.

Käännöstyö on pääosin asiantuntevaa. Kääntäjä on lisännyt alaviitteiksi huomautuksia kirjan kirjoittamisen jälkeen tapahtuneesta kehityksestä. Joitakin sanoja on kuitenkin käytetty oudosti. Erityisesti häiritsee liikemäärän (engl. momentum) kutsuminen momentiksi. Englanninkieliset fraasit on käännetty sellaisenaan: "hiukkaset, jotka tunnemme ja joita rakastamme", "kullalla päällystetty monopoli-signaali", "juuri sitä mitä tohtori määräsi".

Ilmeisesti kustannussyistä suomenkielinen kirja on painettu halvalla paperilla. Kirjan runsas kuvitus kärsii tästä pahasti. Alkuperäisteoksessa kuvitus on voinut olla upea; nyt tuhruisista kuvista on vaikea saada selvää.

Teos on ehdottomasti suositeltava tarmokkaalle lukijalle, jolla jo on jonkinlaiset perustiedot fysiikassa ja joka haluaa oikeasti ymmärtää mistä kosmologiassa on kysymys. Se soveltuu myös kosmologiasta kiinnostuneille fysiikan opiskelijoille ja kosmologian kurssin oheislukemistoksi.

En tiedä, mistä muualta löytyisi yhtä hyvä katsaus pimeään aineen historiaan kosmologiassa. Kirjaa lukiessa tulee kuitenkin mieleen, että se olisi voinut olla paremminkin kirjoitettu. Paikoitellen vaikean asian selkeä selittäminen epäonnistuu ja kokonaisuus hahmottuu huonosti. Mutta kaikkea ei kai voi saada. Kirjan vahvuudet ovat asiantuntevuus, laajuus ja syvyys.

Kirjoittaja on teoreettisen fysiikan dosentti sekä kosmologian ja yleisen suhteellisuusteorian yliopistonlehtori Helsingin yliopistossa.