

VIRKAANASTUJAJAISESITELMÄ, 12.12.2012

PROFESSORI KIMMO KAINULAINEN

## KVANTTIKOSMOLOGIAA

Arvoisa Dekaan, hyvä yleisö,

Kosmologia on tiede joka tutkii maailmankaikkeutta kokonaisuutena ja sen kehityshistoriaa.

Viimeisen parin vuosikymmenen huima kehitys havainnoivassa tähtitieteessä on tehnyt kosmologista täsmätieteen. Esimerkiksi maailmankaikkeuden iästä puhuttaessa virherajat ovat yhden promillen suuruusluokkaa. Koska varhainen maailmankaikkeus on erittäin kuuma ja tiheä, sen kehitys riippuu hienovaraisella tavalla alkeishiukkasten vuorovaikutuksia kuvaavista laeista. Osoittautuu että näitä lakeja ei voi juurikaan muuttaa ilman merkittäviä seurauksia varhaisen maailmankaikkeuden kehitykselle. Tästä syystä kosmologiasta on tullut hiukkasfysiikan "ylimääräinen" laboratorio josta seuraa hyödyllisiä rajoituksia uusille hiukkasfysiikan teorioille. Kun tässä esitelmässä puhun kvanttikosmologiasta, tarkoitan edellä esitettyä kosmologian ja hiukkasfysiikan keskinäistä riippuvuutta, en painovoiman kvanttiteoriaa.

Sekä kosmologiassa että hiukkasfysiikassa voidaan käytännössä kaikki havainnot selittää melko yksinkertaisten teoriarakenteiden avulla. Hiukkasfysiikan perusteoriaksi kehittyi, 60-70-luvuilla, sähkömagnetismia, heikkoa - ja vahvaa vuorovaikutusta kuvaavaa hiukkasfysiikan standardimalli. Tätä mallia on sittemmin testattu menestyksellä lukemattomissa yhteyksissä. Viimeisin ja ehkä dramaattisin vahvistus tälle teorialle saatiin viime kesänä CERNissä, kun ATLAS ja CMS kokeet ilmoittivat Higgsin hiukkasen todennäköisestä löytymisestä. Minulla oli onni olla tuolloin CERNissä vierailevana tutkijana seuraamassa paikan päällä tätä historiallistakin tapahtumaa.

Standardimallilla on kuitenkin myös ongelmansa. Ehkä tärkein niistä liittyy Higgsin hiukkasen massaun, joka vaatii teorialta tietynlaista hienosäätöä. En kuitenkaan puhu tästä hierarkiaongelmasta tässä sen enempää.

Vuoden 2011 fysiikan Nobelin palkinto jaettiin kosmologialle maailmankaikkeuden kiihtyvän laajenemisen löytämisestä. Ainakin Tukholmassa siis ilmeisesti uskotaan, että myös kosmologian standardimalli on riittävän vakaalla pohjalla. Tosiaan, myös kosmologiassa oleellisesti kaikki havainnot voidaan selittää verraten yksinkertaisen mallin avulla. Malli olettaa 1) että maailmankaikkeus on homogeeninen ja isotrooppinen, eli tasa-aineinen ja kaikkiin suuntiin

katsottaessa samannäköinen, ja 2) että painovoimaa kuvaa Einsteinin suhteellisuusteoria.

Tällä standardimallilla on kuitenkin useita hämmentäviä ominaisuuksia. Niistä hämmentävin on varmasti pimeä energia, mystinen substanssi joka vastaa 74% maailmankaikkeuden energiatiheydestä ja joka aiheuttaa tyhjiöön negatiivisen paineen. Juuri pimeä energia ja sen negatiivinen paine on vastuussa maailmankaikkeuden kiihtyvistä laajenemisesta.

Lisäksi mallissa 22% maailmankaikkeuden aineesta on tuntematonta kylmän pölyn kaltaista pimeää ainetta ja "tavallisen" aineen osuus mallissa on vain noin 4%. Edelleen, standardimalli nojaa oleellisella tavalla kosmisen inflaation teoriaan, jonka mukaan hyvin varhainen maailmankaikkeus kasvoi hetken aikaa tavallaan valoa nopeammin. Inflaatio selittää esimerkiksi miksi maailmankaikkeus on geometrialtaan laakea. Inflaatio synnytti myös rakenteen muodostumiselle välttämättömät, mikroaaltotaustasäteilyssä havaitut tiheysfluktuaatiot.

Vaikka pimeä energia, pimeä aine ja kosminen inflaatio ovat kaikki syvällisesti sidoksissa hiukkasfysiikkaan, mitään niistä ei voida selittää tunnettujen hiukkasfysiikan lakien puitteissa. Kosmologian *standardimalli* on siis, jokseenkin paradoksaalisesti, täysin riippuvainen uusista, hiukkasfysiikan *standardimallin* ulkopuolisista ilmiöistä.

Eikä tässä vielä kaikki; neljäs kosmologian keskeinen ongelma koskee loppua neljää prosenttia "tavallista" ainetta. \* Tämä baryoninen materia kun on tosiaan lähes kokonaan ainetta. Jostakin syystä antiaineen määrä maailmankaikkeudessa on häviävän pieni. Koska inflaation aikana nopea laajeneminen hävittää kaiken aiemmin olemassa olleen materian, on tämän aineen ja antiaineen epäsymmetrian täytynyt syntyä mikrofysikaalisten prosessien seurauksena inflaation jälkeen. Valitettavasti tämäkään ei onnistu hiukkasfysiikan standardimallin puitteissa.

Millaisia ratkaisuja näihin ongelmiin sitten voi olla olemassa?

Aloitan pimeästä aineesta. Se voi koostua esimerkiksi uusista, raskaista ja varauksettomista hiukkasista, joita löytyy tietyissä luontevissa hiukkasfysiikan standardimallin laajennuksissa. Hyväksyttävän teorian on tietenkin oltava sopusoinnussa kaikkien kokeellisten ja astrofysiikaalisten havaintojen kanssa. Urani alkupuolella osoitimme mm. että standardimalliin helpoimmin liitettävä pimeän aineen hiukkanen, eli raskas neljännen perheen neutriino ei kelpaa, koska sen energiatiheys ei voi olla riittävän suuri. Kaikki ehdot täyttäviä, mielekkäitä malleja on kuitenkin olemassa. Esimerkiksi kevein supersymmetrinen hiukkanen ja tietyt teknivärimallien (TVM) pimeän aineen hiukkaset, joista jälkimmäisiä tutkimme myös Jyväskylässä. Sekä supersymmetria että teknivärimallit on alunperin keksitty korjaamaan

hiukkasfysiikan standardimallin hierarkiaongelma. On mielenkiintoista, että pimeää ainetta etsivien kokeiden herkkyyks on juuri nyt saavuttamassa tason, millä suurin osa näiden mallien ennustamista hiukkasista voidaan havaita!

Hyvä esimerkki kosmologiasta hiukkasfysiikan laboratoriona liittyy neutriino-oskillaatioihin varhaisessa maailmankaikkeudessa. Neutriinot ovat varauksettomia standardimallin heikoimmin vuorovaikuttavia hiukkasia. Tänä päivänä tiedämme että neutriinot sekoittuvat. Eri vuorovaikutuksissa syntyvät eri lajiset neutriinot oskilloivat, eli muuttuvat periodisesti toisikseen tyhjiössä tai väliaineessa edetessään. Esimerkiksi elektronin neutriinon muuttuminen myöskin neutriinoksi on tärkein syy sille miksi auringosta saapuvassa neutriinovuossa havaitaan vähemmän elektronin neutriinoita kuin aurinkomalli ennustaa.

Neutriinot voivat sekoittua myös uusien, standardimallin ulkopuolisten, steriilien neutriinon kanssa. Tällöin tavallisista, eli aktiivisista ja steriileistä neutriinoista tulee väliaineen kanssa vuorovaikuttava kvanttimekaanisesti oskilloiva systeemi. Varhaisessa maailmankaikkeudessa tämä mekanismi voi lisätä steriilien neutriinon lukumäärää ja muuttaa olosuhteita nukleosynteesin aikana, eli silloin kun keveät alkuaineet syntyivät lämpötilan ollessa noin 10 miljardia astetta. Suuria muutoksia esimerkiksi näin syntyneen Heliumin määrässä ei voida kuitenkaan sallia ja tästä seuraa rajoituksia neutriinon sekoittumiselle.

Näytän tässä esimerkkinä kuvan elektronin neutriinon ja steriilin neutriinon sekoitukselle saatavista rajoituksista. Vaaka-akselilla on sekoituksen suuruutta kuvaava parametri, sekoituskulma, ja pystyakselilla neutriinon massojen neliö sopivissa yksiköissä. Käyrien yläpuolella oleva alue on suljettu pois koska näillä parametreilla mallissa syntyy liikaa Heliumia. Huomatkaa että tämä tulos sulkee pois myös steriilien ja aktiivisten neutriinon ratkaisun aurinkoneutriino-ongelmalle, eli kirjaimilla LMA merkityn alueen. Tätä analyysiä varten tarvittiin erityisiä, *neutriinon sekoittumisen kvanttimekaanisen luonteen* huomioivia menetelmiä ja niiden kehittäminen olikin tämän tutkimuksen tärkeä sivutuote.

Aine-alkuaine-asymmetrian, syntyminen mikrofysikaalisissa prosesseissa on mahdollista vain jos teoria sisältää seuraavat elementit: 1) teoria rikkoo baryonilukua, eli se sisältää vuorovaikutuksia jotka muuttavat hiukkasia antihhiukkasiksi ja päinvastoin, 2) hiukkasten ja antihhiukkasten vuorovaikutukset ovat hieman erilaiset ja teoria rikkoo myös pariteettia eli peilisyymmetriaa ja 3) asymmetriaa synnyttävä prosessi on poissa tasapainosta, eli se tapahtuu riittävän nopeasti. On mielenkiintoista todeta että kaikki nämä elementit voisivat olla voimassa jo hiukkasfysiikan standardimallissa.

Viittaa tässä sähköheikon olomuodon muutoksessa tapahtuvaan sähköheikkoon baryogeneesiin, joka on ollut aktiivisen tutkimuksen kohteena 90-luvulta saakka. Valitettavasti tarkat laskut ovat osoittaneet että sähköheikko olomuodon muutos ei standardimallissa ole sopivaa tyyppiä.

Epäsymmetriaa synnyttävien prosessien aikana siihen osallistuva hiukkakeitos on siis poissa tasapainosta. Tämän lisäksi se on yleensä kvanttimekaanisesti korreloitu, eli koherentti. Tällaiset systeemit ovat erittäin vaativia mallinnettavia, ja ehkäpä tärkeimmät työni liittyvät juuri tähän tarkoitukseen tarvittavien kvanttikuljetusteorioiden kehittämiseen. Esimerkiksi 2000 luvun taitteessa kehittämämme semiklassinen menetelmä on nykyisin yleisesti hyväksytty standardi.

Standardimallissa pimeää energiaa siis tarvitaan selittämään maailmankaikkeuden kiihtyvä laajeneminen. Siihen liittyy kuitenkin merkittäviä teoreettisia ongelmia; puhumme hiukkasfysiikan "tyhjiön energian katastrofista" ja kosmologian "miksi nyt"-ongelmasta. Nämä molemmat tavallaan kertovat että pimeän energian havaitulle määrälle ei ole luontevaa selitystä, vaan se vaatii tavattoman tarkkaa hienosäätöä. Ongelman vakavuudesta kertoo se, että viimeisen kymmenen vuoden kuluessa on julkaistu tietääkseni tuhansia tieteellisiä artikkeleita jotka pyrkivät löytämään vaihtoehtoja kosmologiselle vakiolle.

Myös minun ryhmässäni on näitä vaihtoehtoja tutkittu, mukaanlukien standardimallin perustana olevan Einsteinin painovoiman teorian laajennukset, ja suuren mittakaavan rakenteitten vaikutus kosmologisiin havaintoihin. Einsteinia ei kuitenkaan niin vain peitota. Olemme osoittaneet, että vaikka Einsteinin teorian muuttaminen niin, että kosmologisesta vakioista päästään, on mahdollista, niin näin muunnetut teoriat ovat tyypillisesti jyrkässä ristiriidassa esimerkiksi aurinkokunnassa tehtyjen painovoimakentän tarkkuusmittausten kanssa.

Siitä että maailmankaikkeus olisi epähomogeeninen ei sen sijaan ole pienintäkään epäilystä. Toisaalta senhän arvellaan olevankin homogeeninen vain keskiarvoitetussa mielessä riittävän suurilla, yli 500 miljoonan valovuoden etäisyyksillä. Kuitenkin suuret massatihentymät vaikuttavat valon kulkuun ja sitä kautta kosmologisten havaintojen tulkintaan esimerkiksi gravitaatiolinssiefektin kautta. Edelleen epähomogeeninen maailmankaikkeus ei välttämättä laajene samalla tavoin kuin vastaavan keskimääräisen tiheyden homogeeninen maailmankaikkeus. Näistä argumenteista seuraa että pimeä energia voikin olla illuusio joka syntyy suuren mittakaavan rakenteitten puutteellisesta huomioiduista vaikutuksesta havaintoaineistoon. On kuitenkin myönnettävä, myös omien tutkimusteni perusteella, että havainnot tällä hetkellä puhuvat melko vahvasti standardimallin ja kosmologisen vakion puolesta.

Tässä esitelmässä mainitsemani kosmologian alkuperäongelmat: mitä on pimeä aine, mikä aiheuttaa maailmankaikkeuden näennäisen kiihtyvän laajenemisen ja mikä on aine-alkuaine-epäsymmetrian alkuperä, esiintyvät tyypillisesti kärkipäässä aina kun listataan modernin fysiikan tärkeimpiä avoimia ongelmia. Sen vuoksi ne ovat myös erittäin vaativia, eikä ilmeisiä ratkaisuja ole välittömästi näköpiirissä. Työtä on kuitenkin tehtävä nöyrästi, pala palalta ja kaikilla rintamilla.

Onneksi jo lähivuosina tulemme saamaan valtavan määrän uutta kokeellista tietoa monista hiukkas- ja neutriinofysiikan kokeista, pimeän aineen etsinnöistä ja useista tähtitieteen havainnoista. Toivoa sopii että näistä lähteistä löytyy riittävästi uusia apuvälineitä työn jatkamiselle. Joka tapauksessa nyt jos koskaan on mielestäni oikeutettua sanoa että elämme erittäin mielenkiintoisia aikoja.