



Pimeä aine saa tähdet tanssimaan

Jukka Maalampi

Suurin osa maailmankaikkeuden aineesta on meille tuntematonta. Sen luonteesta ei ole päästy perille, koska se ei lähetä eikä absorboi sähkömagneettista säteilyä. Se ei siis näy - toisin kuin tähdet ja galaksit - kaukoputkilla ja radioteleskoopeilla tai muilla tähtitieteilijöiden tavanomaisilla tutkimusvälineillä. Vaikka tuntematon aine ei paljasta itseään säteilemällä, ei se voi olla avaruudessa täysin *in cognito*. Kuten kaikki aineen ja energian muodot, sekin aiheuttaa gravitaatiota ja vaikuttaa sillä tavalla ympäristönsä elämänmenoon.

Maailmankaikkeuden näkymätöntä ainesta kutsutaan osuvasti pimeäksi aineeksi. Ensimmäiset vihjeet sen olemassaolosta saatiin jo 70 vuotta sitten. Sveitsiläis-amerikkalainen Fritz Zwicky mittasi vuonna 1933 Coman joukkoon kuuluvan kahdeksan galaksin punasiirtymät ja totesi galaksien liikkuvan toistensa suhteen odottamattoman suurella vauhdilla. Hän laski, että niiden esittämä piirileikki onnistuu vain, jos ainetta on 50-kertainen määrä valoisain aineen määrään verrattuna; tarvitaan suuri gravitaatio, jotta tämä villi joukko pysyy yhdessä. Nykyisin pimeästä aineesta on varmat todisteet monien eri kokoluokkien ilmiöissä.

Siitä kertovat galaksien liikkeet galaksiryppäissä sekä tähtien, tähtijoukkojen ja kaasupilvien liikkeet galakseissa ja galaksien ympärillä. Linnunradakin pyörii vinhemmin kuin siinä olevan valoisain aineen perusteella voisi olettaa. Myös koko maailmankaikkeuden syntyä ja kehitystä tutkivat kosmologit pitävät varmana, että taivaalla kirkaana loistava aine on vain pieni osa aineen ja energian kokonaismäärästä universumissa.

Suurien kierregalaksien tapauksessa on mahdollista mitata galaksia kiertävien atomaarisen vedyn muodostamien pilvien ja pienten satelliittigalaksien nopeuksia eri etäisyyksillä galaksin kirkaasta keskuksesta. Jos niiden liikettä hallitsisi pelkästään galaksin valaisevassa osassa olevan aineen painovoima, nopeuksien pitäisi pienentyä galaksin näkyvän osan ulkopuolella etäisyyden neliöjuureen kääntäen verrannollisesti. Tämä lakihan toimii hyvin Aurinkokunnassa: Mitä lähempänä Aurinkoa olevasta planeetasta on kyse sitä suurempi on nopeus. Merkuriuksen nopeus 47,9 km/s on kymmenen kertaa Pluton nopeus, ja Pluton keskimääräinen etäisyys Auringosta on vastaavasti noin satakertainen Merkuriuksen etäisyyteen verrattuna.


Pyörimisnopeuden mittauksia on tehty yli tuhannelle spiraaligalaksille, ja tulokset ovat hyvin yhdensuuntaiset. Nopeudet näyttävät aina olevan galaksien valaisevan osan ulkopuolella etäisyydestä enemmän tai vähemmän riippumattomia, niin pitkälle kun mittauksia on voitu ulottaa (jopa kymmenen valaisevan osan säteen päähän). Taivaan kohteen liikkeeseen vaikuttaa painovoimalla kaikki se aine, joka jää sen kiertoradan sisäpuolelle. Mitatut nopeudet osoittavat, että pimeää ainetta on ainakin koko sillä alueella, jossa mittauksen kohteena olevat vetypilvet ja satelliittigalaksit liikkuvat. Galaksia ympärivää, etäämmälle mentäessä harvenevaa pimeän aineen kehää kutsutaan haloiksi. Haloista on saatu todisteita paitsi kierregalaksien myös elliptisten galaksien tapauksessa.

Linnunradassa pimeää ainetta

Linnunradan rotaatiokäyrän määrittäminen on osoittautunut hankalaksi, koska itse olemme pyörimässä mukana. Mittaukset ulottuvat noin 25 kiloparsekin etäisyydelle eli vain 15 kiloparsekia valaisevan kiekon ulkopuolelle. Havainnoista voidaan joka tapauksessa päätellä, että rotaatiokäyrä on tasainen kierteisgalakseille tyypilliseen tapaan. Nopeus on paikallisen nopeutemme (220 km/s) luokkaa ja tiheys meidän kohdallamme vastaa noin yhtä protonia joka toisessa kuutiosenttimetrissä. Ei ehkä kuulosta paljoilta, mutta tiheys on hyvin suuri verrattuna ns. tyhjän avaruuden tiheyteen. Naapurigalaksiemme Magellanin pilvien uskotaan olevan tämän Linnunradan halon sisällä.


Jopa galaksien haloita vakuuttavampia todisteita pimeästä aineesta on saatu galaksiryppäistä. Yksittäisten galaksien






nopeudet saattavat suurissa ryppäissä olla jopa 1500 km/h. Tämä kertoo hyvin suuresta pimeän aineen määrästä. Monissa galaksiryppäissä on havaittu olevan kaasua, jonka lämpötila on hyvin korkea. Sekin voidaan selittää suurella pimeän aineen määrällä. Samasta asiasta kertova kolmas havainto on galaksiryppäiden aiheuttama gravitaatiolinssi-ilmiö.

Gravitaatiolinssit




Sitten Einsteinin päivien on tiedetty, että painovoima vaikuttaa myös valoon, sillä massa ja energia ovat gravitaation kannalta samanarvoisia. Kun valo kulkee läheltä suurta massakeskittymää, kuten galaksiryppästä, se taipuu. Sopivasti galaksiryppään taakse jäävästä kohteesta tulee valoa silmiimme ryppään eri kautta kiertäen. Tämän takia kohteesta syntyy saman aikaisesti useita kuvia, jotka ovat asettuneen rengasmaisesti ryppään ympärille. Galaksiryppään ympärillä oleva pimeän aineen halo suurine massoineen tietenkin voimistaa linssi-ilmiötä, ja tämän ansiosta linssihavainnoista saadaan tietoa pimeän aineen olemassaolosta ja määrästä.




Pimeän aineen määräksi on tällaisten havaintojen perusteella saatu 33-35 % ns. kriittisestä tiheydestä eli Ω (pimeä aine) = 0.30-0.35 kuten kosmologien on tapana ilmaista asia. Kosmologisen inflaatioteorian mukaan maailmankaikkeuden kokonaisenergiatiheys on hyvin tarkasti nimenomaan kriittisen tiheyden suuruisen, ja viimeaikaiset havainnot tukevat tätä hypoteesia, kuten myöhemmin kerron. Tavallisen aineen, eli lähinnä protonien ja neutronien, tiheydeksi on saatu 4 % (+/- 1 %) kriittisestä tiheydestä eli Ω (tavallinen aine) = 0.04. Tämä tulos seuraa kevyiden alkuaineiden vedyn, heliumin, deuteriumin ja litiumin pitoisuussuhteista nykymaailmankaikkeudessa; nämä suhteet määräytyivät varhaisen maailmankaikkeuden tapahtumissa, ja ne riippuvat voimakkaasti tavallisen aineen tiheydestä. Varsinainen tähtitaivas eli kirkkaana loistavat tähdet vastaavat vain muutamaa promillea kaikesta aineesta ja energiasta. Pieni osa pimeästä aineesta on siis tavallista ainetta, sammuneiden "oikeiden" tähtien jäänteitä (valkoiset kääpiöt, neutronitähdet ja yksinäiset mustat aukot) tai alunperin pimeiksi syntyneitä pieniä tähtiä. Meille tuntematonta ainetta on kuitenkin noin 30 % kaikesta aineesta ja energiasta.


Mitä pimeä aine on?




Pimeän aineen tutkimiseen on olemassa luontaiset edellytykset, sillä sitähan on omassa galaksissammekin, joka puolella ympärillämme. Suosituimmat ehdokkaat pimeäksi aineeksi ovat tavallisesta aineesta rakentuneet pimeät kohteet eli *machot* ja heikosti vuorovaikuttavat painavat alkeishiukkaset eli *wimpit*. Myös kevyet neutriinot voivat muodostaa ainakin osan pimeästä aineesta.



Machoilla tarkoitetaan sammuneiden tähtien jäänteitä ja tähtiä, jotka ovat liian pieniä, jotta niiden ydinosa olisi voinut tapahtua merkittävästi vedyn fuusioitumista heliumiksi. Machot ovat ns. baryonista pimeää ainetta, koska valtaosaa niiden massasta vastaa atomiytimet, ts. protonit ja neutronit, jotka kuuluvat baryonishiukkasten luokkaan.



Machoja on etsitty jo runsaan kymmenen vuoden ajan mikrolinssausta käyttäen. Jos gravitaatiolinssinä toimiva kappale on pienikokoinen, se voi fokusoida tähdestä tulevaa valoa polttolasin tapaan. Puolalainen Bohdan Paczynski keksi 1986, kuinka tätä ilmiötä voidaan käyttää machojen etsimiseen Linnunradan halosta. Kun macho ohittaa näkölinjamme johonkin kaukaiseen tähteen, se fokusoi tähden valoa ja saa tähden näyttämään hetken aikaa normaalia kirkkaammalta.



Puolenkymmentä tutkimusryhmää on monitoroinut miljoonia Magellanin pilvien tähtiä kirkkausvaihteluita löytääkseen. Mitään pitävää todistetta machojen olemassaolosta ei ole löytynyt. Tulosten perusteella voi sanoa, että Linnunradassa on sellaisia machoja, joiden massa on välillä noin miljoonasosasta kymmenesosaan Auringon massasta, korkeintaan kymmenen prosenttia kriittisestä tiheydestä eli enintään kolmannes kaikesta Linnunradan pimeästä aineesta. Jos niitä siellä on, niin niillä on siis oltava seuranaan jotain toisenkin tyyppistä pimeää ainetta.

Wimpit



Wimpit ovat alkuräjähdyksen ajoilta peräisin olevia hypoteettisia raskaan sarjan hiukkasia. Kuumassa alkuplasmassa oli kaikkia mahdollisia hiukkaslajeja termisessä tasapainossa keskenään. Kun plasma jäähdyi, raskaita hiukkasia alkoi olla vaikeampi synnyttää hiukkastörmäyksissä. Näin wimpien määrä pieneni eksponentiaalisesti, koska ne itse toisalta edelleen muuttuivat kevyemmiksi hiukkasiksi annihiloituessaan omien antihiihukkastensa kanssa. Jossain vaiheessa nämä reaktiot kuitenkin loppuivat, koska maailmankaikkeuden laajenemisen takia wimpien ei ollut enää mahdollista päästä tarpeeksi lähelle toisiaan annihiloituaakseen; väliin syntyi liian nopeasti uutta avaruutta.



Jos wimpit ovat stabiileja, hajoamattomia hiukkasia, niitä pitäisi siis ajelehtia avaruudessa tänäkin päivänä. Niitä on pimeään aineen ongelman kannalta riittävä määrä, jos annihilaatiot ovat olleet nimenomaan heikon vuorovaikutuksen aiheuttamia. Koska wimpeillä on massaa, painovoiman voi olettaa vetäneen niitä tiivistymiksi galaksien ympärille.



Wimpeistä tulevat ensimmäisinä mieleen neutriinon kaltaiset, mutta näitä painavimmat hiukkaset. Ne ovat kuitenkin lähes aukottomasti suljettu pois joko suorilla tai välillisillä mittauksilla. Normaalit kevyet neutriinot eivät kelpaa galaksihalojen raaka-aineeksi, koska ne eivät muodostaisi kyllin tiivistä ainekeskittymää. Maailmankaikkeuden tiedetään olevan pullollaan kevyitä neutriinoja alkuräjähdyksen perintönä, mutta niiden massat ovat hyvin pieniä, joten niillä ei ole kovin suurta merkitystä pimeään aineen ongelman kannalta; niiden osuus kriittisestä tiheydestä lienee 0.3%:n paikkeilla.



Hiukkasteoreetikoilla on pöytälaatikossaan myös muita wimpiehdokkaita. Lupaavampi kandidaatti pimeään aineen hiukkaseksi tulee supersymmetriasta, joka on hiukkasten perusvuorovaikutuksiin liitetty, mutta toistaiseksi kokeellisesti varmistamaton symmetria. Supersymmetria tuo mukanaan uusia hiukkasia, joista kevyin, neutraaliino, on pysyvä hiukkanen. Se on sopiva kandidaatti halon pimeäksi aineeksi.



Neutraaliinon havaitsemisen ongelmana on luonnollinen radioaktiivisuus ja avaruudesta tuleva kosminen säteily, jotka saattavat antaa virhesignaaleja. Tämä ongelma voidaan kiertää vertaamalla signaalien määrää eri aikoina vuotta, sillä ilmaisimeen osuvien wimpien määrä riippuu siitä kulkeeko Maa kiertoradallaan Auringon ympäri samaan suuntaan vai eri suuntaan kuin koko Aurinkokunta Linnunradan mukana pyöriessään. Linnunrata muodostui pyörivästä kaasupilvestä. Kun pilvi romahti, sen pöyriminen nopeutui pyörimismäärän säilymislain takia. Wimpien muodostama pilvi ei sen sijaan voinut romahtaa, koska sillä ei ollut keinoa päästä eroon romahduksessa vapautuvasta potentiaalienergiastaan, se kun ei säteile. Siksi wimpien pilvi pysyy kohtalaisen paikallaan, ja me paineemme sen läpi. Eniten wimpejä pitäisi tulla vastaamme kesäkuussa ja vähiten joulukuussa, vuon vaihtelun ollessa noin 7%:n luokkaa. Yksi tutkimusryhmä (DAMA Gran Sasso tutkimuslaboratoriossa Italiassa) on vakuuttunut siitä, että se on nähnyt juuri tällä tavalla vaihtelevan signaalin. Tulosta ei ole kuitenkaan vielä varmistettu muilla mittauksilla.



Kun Aurinko kytää läpi wimpien muodostaman pilven, siinä oleva aine aika ajoin reagoi wimpien kanssa. Jos wimpin nopeus tällaisen reaktion jälkeen on pienempi kuin sen pakonopeus Auringosta, se jää Auringon painovoimakentän vangiksi. Tällä tavalla Auringon ydinosaan - ja samoin Maan - pitäisi olla kertynyt melkoinen wimpien varasto. Kun varasto tulee kyllin tiiviiksi, wimpit alkavat annihiloitua keskenään muuttuen tavallisiksi hiukkasiksi, kuten kvarkeiksi. Kun nämä puolestaan hajoavat, saattaa syntyä neutriinoja, jotka hyvin epäaktiivisina hiukkasina pääsevät suhteellisen helposti pakenemaan Auringon ja Maan sisästä.



Auringon ja Maan sisästä tuleva ylimääräinen neutriinosäteily saattaisi siis olla epäsuora osoitus wimpien olemassaolosta. Monet avaruudesta tulevan neutriinosäteilyn mittaamiseen rakennetut neutriinoteleskoopit etsivät myös näitä signaaleja. Tälläkään menetelmällä ei ole kuitenkaan vielä saatu pitkäjänteisiä todisteita wimpien olemassaolosta.




Kosmologia kertoo pimeästä aineesta



Kosmologit joutuivat kolmisen vuotta sitten tekemään suuren luokan u-käännöksen: kaukaisissa kohteissa tapahtuneita





supernovaräjähdyksiä koskeneet mittaukset paljastivat silloin heidän yllätyksekseen, että maailmankaikkeuden laajeneminen onkin kiihtyvää, ei hidastuvaa, kuten he olivat luulleet ja vakuutelleet. Tämä oli ehdottomasti tieteellinen sensaation, ja arvovaltainen *Science*-lehti julistikin löydön vuoden 1998 läpimurroksi. Kosmologit eivät näyttäneet olevan moksiskaan tästä käsityksiensä radikaalista uudelleen arvioinnista, joka ulkopuolisen silmissä saattoi vaikuttaa jopa pahanpäiväiseltä nöyryytykseltä. Entinen *Standardi kosmologia* korvattiin nopeasti *Uudella standardilla kosmologialla*.

Aiemmin vallalla ollut käsitys hidastuvasta laajenemisesta perustuu siihen, että avaruudessa oleva aine jarruttaa painovoimallaan laajenemista. Kiihtyvä laajeneminen vaatii maailmankaikkeuteen uuden elementin, jolla on ainetta erilleen työntävä vaikutus. Sitä kutsutaan pimeäksi energiaksi tai kosmologiseksi vakioiksi, jonka jo vanha kunnan Einstein lanseerasi yleisen suhteellisuusteorian yhtälöissään. Pimeän energian osuudeksi kriittisestä tiheydestä arvioidaan nykyisin noin 65 %.

Toinen suuri edistysaskel kosmologiassa viime vuosien ajalta on kosmisessa taustasäteilyssä olevien lämpötilavaihteluiden tarkka mittaaminen. Tulokset vahvistavat inflaatioteorian ennustuksen, että maailmankaikkeuden tiheys on kriittisen tiheyden suurin. Juuri se supernovahavaintoihin yhdistettynä johtaa edellä mainittuun tulokseen pimeän energian määrästä.

Kosmologien leivontaohjeet ovat siis kokeneet merkittäviä muutoksia viime aikoina. Nykyisin uskotaan seuraavaan reseptiin:

Pimeä energia 65 %
Pimeä aine 30 %
Tavallinen aine 3-5 %
Neutriinot 0,3 %

Tähän ovat aikaisempaa tarkemmat mittaukset nyt johtaneet. Tulevaisuudessa tehtävät vielä tarkemmat mittaukset tuskin saavat enää kovin suuria mullistuksia aikaan. Pimeä aine ja pimeä energiat ovat tulleet jäädäkseen. Ne määräävät maailmankaikkeuden koreografian.

Kirjoittaja on fysiikan professori Jyväskylän yliopistossa. Kirjoitus perustuu Turun kirjamesseilla 6.10. pidettyyn esitelmään. Teemaa käsitellään myös hänen toimittamassaan teoksessa "Minne menet maailmankaikkeus? Kirjoituksia kosmoksesta" (Fysiikan Kustannus 2000).