

Pimeä aine ja energia

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Sonja Markkanen
Tarkastaja:
Dos. Iiro Vilja

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Markkanen, Sonja Pimeä aine ja energia

LuK-tutkielma, 29 s., 3 liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2024

Pimeä aine ja pimeä energia kattavat yhdessä lähes 95 % maailmankaikkeudesta, mutta niiden luonne on yhä arvoitus. Vaikka niitä ei voi havaita suoraan, niiden olemassaolo on päätelty niiden vaikutuksista näkyvään aineeseen ja gravitaatioon. Kummankin luonteesta on olemassa lukuisia teorioita.

Pimeän aineen olemassaolo on päätelty galaksien pyörimisnopeuksien ja gravitaatiovaikutusten havainnoista. Viimeisimpien mittausten mukaan se kattaa 26,8 % maailmankaikkeuden massaenergiasta. Hallitseva paradigma on, että pimeä aine koostuu jostakin löytämättömästä alkeishiukkasesta, kuten esimerkiksi heikosti vuorovaikuttavista massiivista hiukkasista, jotka voivat muodostua esimerkiksi supersymmetrian kautta.

Pimeä energia on vielä suurempi arvoitus. Kosmisen taustasäteilyn ja supernovaräjähdyksien havainnot viittaavat siihen, että maailmankaikkeus laajenee kiihtyvästi, mikä viittaa pimeän energian olemassaoloon. Sen todellinen luonne ja alkuperä ovat vielä tuntemattomia, mutta uusimpien havaintojen perusteella maailmankaikkeuden massaenergiasta 68,3 % koostuu pimeästä energiasta. Pimeän energian ehdokkaista yksi on kosmologinen vakio.

Vaikka pimeä aine ja pimeä energia ovat vallitsevia teorioita, on myös muita ehdotuksia, jotka pyrkivät selittämään havaittuja ilmiöitä. Yksi vaihtoehto on modifioitujen gravitaatioteorioiden, jotka pyrkivät selittämään havaitut poikkeamat perinteisistä gravitaatioteorioista ilman pimeää ainetta ja energiaa.

Asiasanat: pimeä aine, pimeä energia, kosmologia, kosmologinen vakio, MOND

Sisällys

Johdanto	1
1 Pimeä aine	1
1.1 Historia ja havainnot	1
1.2 Olemassaolon todisteet ja havaintomenetelmät	4
1.3 Luonne ja koostumus	7
1.4 Suora havaitseminen	10
2 Pimeä energia	12
2.1 Historia ja havainnot	13
2.2 Olemassaolon todisteet ja havaintomenetelmät	14
2.3 Luonne	15
3 Pimeän aineen ja pimeän energian yhteys sekä vaihtoehtoiset selitykset	17
3.1 Pimeän aineen ja pimeän energian vuorovaikutus	18
3.2 Mahdolliset vaihtoehtoiset selitykset	20
4 Yhteenveto	22

Johdanto

Ihmiskunta on tutkinut taivasta tuhansien vuosien ajan ja viimeisen sadan vuoden aikana käsityksemme maailmankaikkeuden luonteesta on mullistunut täysin. Maailmankaikkeus ei koostukaan pääosin tavallisesta baryonisesta aineesta, vaan kaikki atomit ja valo muodostavat alle viisi prosenttia siitä [1]. Loput n. 95 % maailmankaikkeuden massaenergiasta koostuu pimeästä aineesta ja energiasta [2], jotka näkymättömyydestään huolimatta hallitsevat maailmankaikkeuden rakenteita ja kehitystä [1].

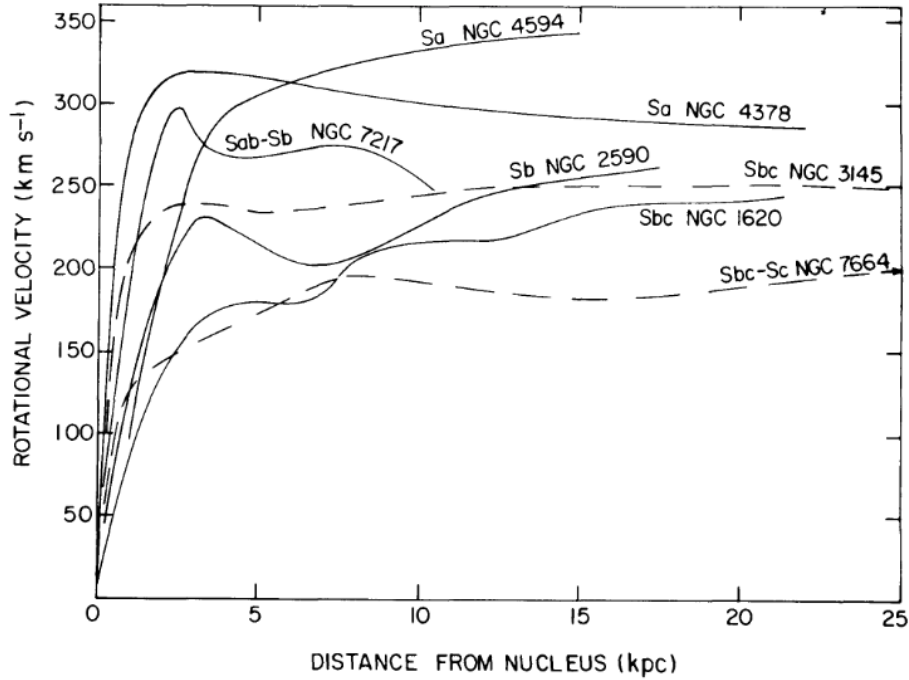
Aluksi pimeä aine oli hyvin kiistanalainen, mutta nykyään se on laajalti hyväksytty osaksi standardia kosmologiaa [3]. Tämä johtuu esimerkiksi kosmisen taustasäteilyn anisotropioiden havainnoista ja galaksijoukkojen röntgenmittauksista. Pimeän energian olemassaolon todisteet liittyvät taas maailmankaikkeuden laajenemiseen. Laajeneminen kiihtyy, ja se on merkki siitä, että jokin tuntematon voima vastustaa gravitaatiota [1].

Kummankin luonteesta on runsaasti ideoita. Tämän tutkielman tarkoituksena on toimia katsauksena pimeän aineen mahdollisiin ehdokkaisiin, ja niiden mahdolliseen havainnointiin, sekä eri pimeän energian malleihin. Lopuksi tarkastellaan vielä erilaisia ehdotuksia yhtenäisistä malleista kuten pimeä fluidi, sekä mahdollisia vaihtoehtoja sekä pimeälle aineelle että pimeälle energialle, kuten modifioidut gravitaatioteoriat.

1 Pimeä aine

1.1 Historia ja havainnot

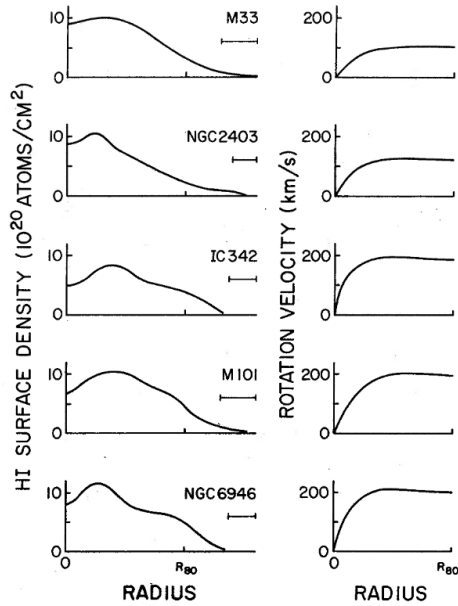
1930-luvulla tähtitieteilijä Fritz Zwicky tutki Coman galaksijoukkoa ja havaitsi, että joukon sisällä valaisevan aineen pyörimisnopeus oli poikkeuksellisen suuri verrattuna laskettuun gravitaatioon. Galaksijoukon galaksit liikkuvat siis liian no-



Kuva 1. Seitsemän galaksin rotaatiokäyrät etäisyyden funktiona ytimestä. [7]

peasti, jotta joukko voisi pysyä koossa sen näkyvän aineen voimalla. Zwicky nimisi puuttuvan massan pimeäksi aineeksi. Hän arvioi, että galaksijoukossa oli noin 400 kertaa enemmän massaa kuin oli havaittavissa, ja vaikka tämä arvio massaluminositeettisuhteesta oli liian korkea, Zwicky päätteli oikein, että isoin osa aineesta oli sitä mitä nykyään kutsumme pimeäksi aineeksi. [4, 5]

Vaikka Zwicky'n alkuperäiset havainnot eivät välittömästi synnyttäneet laajaa hyväksyntää tai mielenkiintoa pimeän aineen tutkimiseen, saivat ne vuosikymmenien kuluttua vahvistusta, kun galaksien rotaatiokäyriä tutkittiin lisää. Vuonna 1980 Vera Rubin ja Kent Ford [6] julkaisivat tutkimuksen, joka osoitti, että suurimmassa osassa galakseissa on noin kuusi kertaa enemmän pimeää ainetta kuin näkyvää ainetta. Kuvassa 1 on esitetty seitsemän spiraaligalaksin rotaatiokäyrät, joista voidaan havaita massan jakautuminen galakseissa. Monissa spiraaligalaksien ulko-osissa rotaatiokäyrä ei riipu säteestä R . Tämä tarkoittaa, että säteen sisäpuolella oleva massa kasvaa suoraan suhteessa säteeseen [7].



Kuva 2. Keskimääräiset vetytiheydet ja kiertonopeudet viidelle Scd-galaksille. Galaksien nimien alla olevat palkit osoittavat keskimääräiset radiaalisäteiden (radial beam) halkaisijat. R_{80} on säde, jonka sisällä havaitaan 80 prosenttia havaitusta HI:stä. [8]

Samoihin aikoihin radiotähtitieteilijät hyödynsivät uusia radioteleskooppeja, mikä mahdollisti galaksien rotaatiokäyrien mittaamisen. Vuonna 1972 Rogstad ja Shostak julkaisivat Owens Valleyn interferometrillä kartoitetut neutraalin atomaarisen vedyn H_1 muodostaman kaasupilven rotaatiokäyrät, eli HI-rotaatiokäyrät. Tuloksista havaittiin, että kaikki rotaatiokäyrät olivat hyvin litteitä, mikä viittaa siihen, että HI-kiekkojen ulkoreunoilla on erittäin suuret massa-luminositeettisuhteet [8]. Nämä käyrät ovat esitetty kuvassa 2.

Näin ollen noin vuoteen 1980 mennessä pimeän aineen olemassaolon tarve oli laajalti tunnustettu merkittävänä ratkaisemattomana ongelmana. Sitä alettiin havainnoimaan myös esimerkiksi gravitaatiolinsseillä ja kosmisen taustasäteilyn avulla.

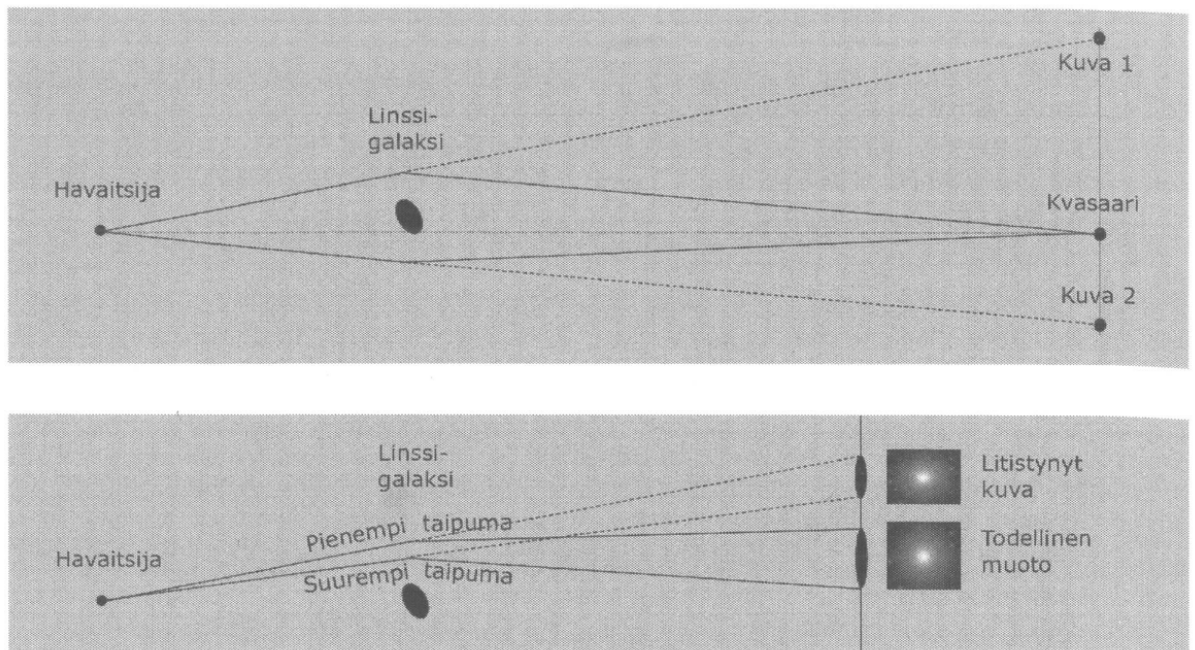
1.2 Olemassaolon todisteet ja havaintomenetelmät

Pimeää ainetta voidaan havaita galaksijoukkojen muodostamissa gravitaatiolinseissä. Einstein ennusti gravitaatiolinssi-ilmiön olemassaolon yleisessä suhteellisuusteoriassa [9], mutta ensimmäiset kokeelliset havainnot tehtiin tutkimalla kvasareja [10]. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan aika ja avaruus muodostavat yhdistetyn suureen, jota kutsutaan aika-avaruudeksi. Teoriassa massiiviset kohteet aiheuttavat aika-avaruuden kaartumista ja gravitaatio on tämän ilmiön seuraus. Kun valo kulkee aika-avaruuden läpi, sen polku kaartuu massan vaikutuksesta. Erittäin massiiviset taivaankappaleet, kuten mainitut galaksijoukot, aiheuttavat merkittävää kaarevuutta aika-avaruudessa ja toimivat siten gravitaatiolinseinä. Kun kaukaisen valonlähteen valo kulkee gravitaatiolinssin ohi, valon polku kaartuu ja vääristynyt kuva etäisestä kohteesta voidaan havaita gravitaatiolinssin ympärillä [11].

Pimeän aineen määrä avaruudessa pystytään määrittämään heikkojen ja vahvojen gravitaatiolinssien avulla. Aiemmin mainittuja systeemejä, joissa galaksijoukon gravitaatiokenttä vääristää etäisemmän galaksin kuvaa keskustaa kiertäväksi kaareksi, kutsutaan vahvoiksi gravitaatiolinseiksi. [11]

Nykyään hyödynnetään kuitenkin enemmän heikkoja gravitaatiolinsejä, sillä vahva gravitaatiolinssi-ilmiö tapahtuu vain suhteellisen harvinaisissa tapauksissa, kun massiiviset taivaankappaleet ovat samassa linjassa. Vahvasta gravitaatiolinssistä poiketen heikolla gravitaatiolinssillä havaitaan huomattavasti pienempää taustalähteen, esimerkiksi galaksin, vääristymää, joten niitä voidaan havaita tilastollisin menetelmin analysoimalla suuria määriä galakseja [11]. Heikko ja vahva gravitaatiolinssi-ilmiö on havainnollistettu yksinkertaistettuna kuvassa 3. Mittaamalla näiden lukuisien kaukaisten galaksien muodot ja suunnat, saadaan määriteltyä linssikentän veynymä missä tahansa alueen paikassa. Massajakauma voidaan siis rekonstruoida eri alueilla ja tätä voidaan käyttää pimeän aineen jakauman havaitsemiseen [12].

Kuvassa 4 esitetään pimeän aineen jakautuminen Abell 901/902 -superjoukossa.



Kuva 3. Yksinkertainen havainnollistus vahvasta (ylempi) ja heikosta (alempi) gravitaatiolinssistä. Vahvassa gravitaatiolinssissä kvasaarista näkyy kaksi kuvaa linssigalaksin eri puolilla, koska kvasaarista tuleva valo taipuu linssigalaksin gravitaatiokentässä. Heikossa gravitaatiolinssissä etäisen galaksin ylä- ja alareunasta tulevat valonsäteet muuttavat hieman eri tavoin suuntaa linssigalaksin kohdalla, joten galaksista muodostuu litistyneempi kuva. [11]



Kuva 4. Näistä kuvista nähdään pimeän aineen jakautumisen Abell 901/902 superjoukossa. Keskellä on kuva koko superjoukosta. Magentan väriset alueet kuvastavat pimeää ainetta joukossa. Kuva on saatu yhdistämällä kuvat näkyvästä valosta ja pimeän aineen jakaumasta joukossa. Kuvasta havaitaan erityisesti neljä aluetta, jossa pimeä aine on yhdistynyt tiiviiksi ryhmiksi. Kuva on osa Space Telescope Abell 901/902 Galaxy Evolution Survey (STAGES) -tutkimusta. [13]

Kuva on koottu yhdistämällä näkyvän valon alueelta otettu kuva ja pimeän aineen jakauma, joka on saatu Hubble-teleskoopin havaintojen avulla. Hubble ei suoraan havaitse pimeää ainetta; sen sijainti on päätelty analysoimalla heikkoa gravitaatiolinssi-ilmiötä. [13]

Tarkin arvo pimeän aineen kokonaismäärälle on saatu satelliiteilla, jotka tutkivat kosmisen taustasäteilyn yksityiskohtia. Taustasäteilyn epäsäännöllisyyksistä voidaan tutkia varhaisen maailmankaikkeuden mittakaavan rakennetta. Taustasäteilyn vaihteluita kartoitti ensin COBE-satelliitti ja sen jälkeen WMAP ja Planck. Planck-satelliitin datan perusteella 26,8 % maailmankaikkeuden energiasta koostuu pimeästä aineesta, ja 4,9 % koostuu tavallisesta aineesta. [2]

1.3 Luonne ja koostumus

Pimeän aineen tiedetään vuorovaikuttavan tavallisen baryonisen aineen tai säteilyn kanssa vain gravitaatiolla. Tämä ominaisuus tekee pimeän aineen havaitsemisesta laboratorio-olosuhteissa vaikeaa. [14]

Tällä hetkellä hallitseva paradigma pimeän aineen luonteesta on, että se koostuu jostakin toistaiseksi löytämättömästä alkeishiukkasesta, kuten esimerkiksi heikosti vuorovaikuttavista massiivisista hiukkasista (engl. Weakly Interacting Massive Particle, WIMP) tai aksioneista. Pimeä aine luokitellaan kylmäksi, kuumaksi tai lämpimäksi. Nämä kuvaavat sitä, miten nopeasti hiukkaset liikkuvat ja millainen vaikutus niillä on eri mittakaavan rakenteisiin. Hiukkasia kutsutaan kuumiksi, kun ne liikkuvat hyvin nopeasti, ja vastaavasti kylmiksi kun ne liikkuvat hitaasti, ja lämpimät hiukkaset ovat jotain tältä väliltä. [14]

Potentiaalinen kuuman pimeän aineen hiukkanen voisi olla neutriino johtuen sen suhteellisesta nopeudesta varhaisessa maailmankaikkeudessa. Kuitenkin kosmologiset simulaatiot ovat osoittaneet, että neutriinot eivät yksinään kykene tuottamaan sellaista rakennetta ja järjestäytymistä galaksien välillä, jonka havaitsemme nykyi-

sessä maailmankaikkeudessa [15]. Lisäksi neutriinot ovat fermioneja, eli niiden esiintymismäärää rajoittaa Fermi-Dirac-jakauma. Tämän seurauksena neutriinot eivät pysty selittämään havaittua pimeän aineen tiheyttä galaksien haloissa. Neutriinoiden arvioidaan kattavan vain noin 0,5 % koko maailmankaikkeuden energiasta. Näin ollen kylmän pimeän aineen osuus olisi arviolta 26,3 %. Esimerkiksi näiden syiden takia kuumen pimeän aineen teoria on jäänyt nykyään taka-alalle. Kylmä pimeä aine tarjoaa tätä yksinkertaisemman selityksen monille havainnoille, kuten galaksien ja galaksijoukkojen muodostumiselle [14].

Kylmän pimeän aineen ehdokkaita ovat muun muassa massiiviset kompaktit halo-objektit (engl. massive compact halo object, MACHO), eli esimerkiksi mustat aukot, tai täysin uudet hiukkaset kuten WIMPit.

Pimeä aine ei välttämättä koostu uudeltaisesta alkeishiukkasesta, vaan se voi osittain olla tavallista baryonista ainetta, eli protoneja ja neutroneja. Tuttuja aineen muotoja ovat esimerkiksi mustat aukot, ruskeat kääpiöt ja neutronitähdet, ja nämä tunnetaan yhdessä nimellä MACHOt. MACHOja voidaan havaita esimerkiksi gravitaatiolinssien avulla. Monet tähtitieteilijät uskoivat, että tämä yksinkertainen ratkaisu olisi uskottavin, mutta viime vuosina nämä ehdokkaat ovat osoittautuneet hyvin pieneksi osaksi pimeän aineen kokonaisuutta, eli havaintojen selittämiseksi tarvitaan ei-baryonista pimeää ainetta. [16]

Ei-baryonisia pimeän aineen vaihtoehtoja on useita, joista suurin osa on hypoteettisia hiukkasia, esimerkiksi WIMPit, aksionit, supersymmetriset hiukkaset ja steriilit neutriinot. Toisin kuin tavallinen baryoninen aine, ei-baryoninen aine ei vaikuta varhaisen maailmankaikkeuden elementtien muodostukseen, joten sen olemassaolo on havaittavissa vain sen gravitaatiovaikutuksista. Lisäksi jos tällainen aine koostuu supersymmetrisistä hiukkasista, voi se kokea itsensä kanssa annihilaatioreaktion, joka voi tuottaa havaittavia sivutuotteita, kuten gammasäteilyä. [17]

Steriili neutriino on hypoteettinen hiukkanen, joka muistuttaa aikaisemmin mai-

nittua standardimallin neutriinoa, mutta poikkeaa siitä heikkojen vuorovaikutusten osalta. Dodelson ja Widrow esittivät sen pimeään aineen ehdokkaaksi vuonna 1993 [18]. Steriilien neutriinujen massasta ei ole tunnettuja rajoituksia, joten toisin kuin aktiivisten neutriinujen kohdalla, mahdollisuutta että pimeä aine koostuu niistä, ei ole suljettu vielä pois, mutta kuten muidenkin ehdotettujen pimeään aineen hiukkasten kohdalla, niiden olemassaoloa ei ole vielä vahvistettu. Ne voisivat olla joko kylmää tai lämmintä pimeää ainetta, riippuen siitä miten ne syntyvät tai miten niitä tuotetaan. Steriilien neutriinujen massan olisi oltava kiloelektronivolttien koluokassa, jotta ne voisivat selittää nykyisen maailmankaikkeuden rakenteen, ja hiukkasten eliniän on oltava pidempi kuin maailmankaikkeuden ikä [17].

Tällä hetkellä suosituin selitys pimeälle aineelle tulee hiukkasfysiikan standardimallia täydentävästä teoriasta, supersymmetriasta. Siinä jokaiselle tunnetulle hiukkaselle on supersymmetrinen pari, joka eroaa spin-arvoltaan puoliluvun verran. Tämä teoria tarjoaa myös käsitteen nimeltä R-pariteetti (engl. R-parity), kvanttiluku, joka määritellään näiden supersymmetristen parien perusteella. R-pariteetti voi olla joko parillinen tai pariton. Jos se säilyy hiukkasten vuorovaikutuksissa, se tekee kevyimmästä supersymmetrisestä hiukkasesta (engl. Lightest supersymmetric particle, LSP) stabiilin. Tämä stabiilius tekee LSP:stä mahdollisen pimeään aineen hiukkasen ehdokkaan. Käytännössä tämä stabiilisuus tarkoittaa sitä, että LSP ei voi hajota [17, 19]. Tämä hiukkanen on yksi ehdokas heikosti vuorovaikuttavaksi massiiviseksi hiukkaseksi eli WIMPiksi. Jotta tämä hiukkanen sopisi havaintoihin, oletetaan, että sillä on massa välillä $100 \text{ GeV}/c^2$ ja $1 \text{ TeV}/c^2$, ja että se nimensä mukaan vuorovaikuttaa vain heikkojen vuorovaikutusten ja gravitaation kautta [19].

On olemassa myös muita mahdollisia hypoteettisia ehdokkaita pimeäksi aineeksi, jotka eivät sovi aiemmin kuvailtuihin malleihin. Näistä suosituin vaihtoehto on aksionit, jotka alun perin syntyivät yrityksistä selittää, miksi vahva vuorovaikutus näyttää noudattavan varauskonjugaatiopariteettisymmetriaa eli CP-symmetriaa. Aksioni on

neutraali hiukkanen, joka vuorovaikuttaa erittäin heikosti muiden hiukkasten kanssa. Viime vuosina aksioneista on tullut yksiä lupaavimmista kylmän pimeän aineen ehdokkaista. Aksionit ovat kevyempi vastine WIMPeille ja niiden teoreettinen etu on se, että niiden olemassaolo ratkaisisi myös vahvan CP-ongelman kvanttikromodynamiikassa. [20]

Steriilit neutriinot, WIMPit ja aksionit eivät ole ainoat ehdotetut pimeän aineen hiukkaset. Ne juontavat juurensa malleista, jotka eivät ole alun perin tarkoitettu selittämään pimeää ainetta ja perustuvat erilaisiin ratkaisemattomiin havaintoihin. Tämä vahvistaa ennustetun pimeän aineen ehdokkaan tärkeyttä, koska se ei pelkästään täydentäisi ja vahvistaisi nykyisiä tieteellisiä teorioita, vaan myös antaisi mahdollisuuden uusille löydöille. [14]

1.4 Suora havaitseminen

Pimeän aineen hiukkasmallin hypoteesin tutkimiseksi on erilaisia lähestymistapoja. Pimeän aineen hiukkasia voidaan esimerkiksi yrittää tuottaa hiukkaskiihdyttimissä, voidaan epäsuorasti etsiä merkkejä niiden annihilaation tuotteista, tai suoraan havainnoida niiden vuorovaikutusta kohdeytimien kanssa [14]. Tässä osiossa käsitellään muutama menetelmä, joilla nykyään pyritään suoraan havaitsemaan pimeän aineen hiukkasia, erityisesti WIMPejä.

Useimmat suorat havainnointikokeet hyödyntävät joko fononien, varauksen tai valon signaalia, tai näiden yhdistelmää. Suoran havainnoinnin päähaasteet liittyvät matalaan energiakynnykseen, mikä mahdollistaa pienten rekyylienergioiden havaitsemisen, vähäiseen taustakohinaan, joka parantaa signaalin merkitsevyyttä, sekä suureen ilmaisimen massaan, joka lisää vuorovaikutusmahdollisuuksia kohteessa. Lisäksi tavoitteena on säilyttää ilmaisimen vakaa suorituskyky useiden vuosien ajaksi, jolloin kaikista yksinkertaisimmat ilmaisimet voivat olla eduksi. [14]

Tuikeilmaisimien on suosittu hiukkasfysiikan tutkimuksessa käytettävä havaintolai-

te, jolla havainnoidaan korkeaenergistä säteilyä. Sen toiminta perustuu siihen, että säteilyn energia muutetaan valoa emittoivaksi välähdykseksi, joka generoi jännitepulssein. Tämä havaitaan valomonistinputkella. Pimeän aineen havaitsemiseen tarkoitetuissa tuikeilmaisimissa käytetään erityisesti jalokaasuja, kuten nestemäistä ksenonia. Ksenon on erinomainen jalokaasu tähän tarkoitukseen, koska sen käyttö minimoi ylimääräistä taustakohinaa. Jalokaasut eivät tavallisesti muodosta kemiallisia sidoksia minkään muun alkuaineen tai toisten omien atomiensa kanssa. Tämä on tärkeä ominaisuus, sillä aina kun kemiallinen sidos muodostuu ja myöhemmin purkautuu, syntyy fotoneja, jotka herkäät ilmaisimet havaitsevat. On siis toivottua, että vain pimeän aineen törmäys ksenonatomien ytimeen synnyttää havaittavia fotoneja. Ilmaisimia on mahdotonta eristää ympäristöstä täysin, mutta sijoittamalla ilmaisimet syvälle maan alle vähennetään taustakohinaa [14]. Tällaisia jalokaasuja hyödynnettäviä tuikeilmaisimia käytetään useissa tutkimusprojekteissa, kuten XENON1T [21] ja PandaX [22].

Kuplakammioita käytetään sähköisesti varautuneiden hiukkasten havaitsemiseen. 1980-luvun jälkeen niiden käyttö väistyi tarkempien ilmaisimien tieltä, mutta viime vuosina käyttöä on uudelleenaktivoitu pimeän aineen tutkimuksessa [14]. Kuplakammio on säiliö, joka on täytetty ylikuumentuneella nesteellä, ja kun tutkittava hiukkanen kulkee sen läpi, syntyy hiukkasen reitille ioni-elektroni-pareja. Nesteeseen syntyy pieniä kuplia energian siirtyessä siihen, ja kuplat jatkavat laajenemistaan nopeasti, kun painetta kammiossa lasketaan. Hiukkasen kulkema reitti nähdään näistä kuplien muodostamista jonoista, joiden avulla voidaan päätellä hiukkasen energia ja muut ominaisuudet. Tämä mahdollistaa hiukkasten käyttäytymisen tutkimisen ja analysoinnin. Kuplakammiota hyödyntävät muun muassa PICO [23] ja COUPP [24].

Näiden menetelmien lisäksi on kuitenkin mahdollista hyödyntää lähestymistapaa, joka keskittyy suoraan mittaamaan pimeän aineen vuorovaikutuksen aiheutta-

maa rekyylirataa (engl. recoil track). Tällaisissa ilmaisimissa käytetään kohdemateriaalina matalapaineista kaasua, joka tarkoittaa, että vuorovaikutus ilmaisimen sisällä aiheuttaa pidemmän mitattavan ionisaatoradan, kuin muissa ilmaisimissa. Näitä ionisaatoratoja voidaan rekonstruoida kolmessa ulottuvuudessa, jotta saadaan määriteltyä radan aiheuttaman hiukkasen tyyppi, ja se mistä suunnasta se on tullut [25]. Alhainen paine johtaa kohdemateriaalin matalaan massaan, sillä alhaisessa paineessa materiaalin kanssa vuorovaikuttaa vähemmän hiukkasia. Tämän vuoksi ilmaisimien on oltava hyvin suuria saavuttaakseen herkkyydet, jotka ovat vertailukelpoisia aikaisemmin mainittujen menetelmien kanssa [14]. Merkittävin tällainen suuntaillmaisoin on DRIFT-II [25].

Muita suoria menetelmiä havaita WIMPejä ovat muun muassa tuikeilmaisimet, joissa käytetään nesteen sijaan kiteitä, ja bolometrit [14]. Kuten edellisessä alaluvussa kerrotaan, pimeän aineen hiukkanen voisi olla myös aksioni. ADMX (Axion dark matter experimet) on koe, joka on suunniteltu havaitsemaan pimeän aineen aksionien heikkoa muuntumista mikroaaltofotoneiksi voimakkaassa magneettikentässä. Havaitsemiseen käytetään mikroaalto-onteloresonaattoria (engl. resonant microwave cavity) suprajohtavassa magneetissa. ADMX poikkeaa monista muista pimeän aineen ilmaisimista siten, että se ei sijaitse syvällä maan alla [26].

2 Pimeä energia

Edellisessä luvussa kerrottiin, että Planck-satelliitin datan perusteella maailmankaikkeuden massaenergiasta 26,8 % on pimeää ainetta ja 4,9 % tavallista ainetta, ja tässä luvussa kerrotaan mistä loput 68,3 % koostuu.

2.1 Historia ja havainnot

Albert Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian mallit osoittivat alun perin, että maailmankaikkeus on dynaaminen ja sen sisältämä aine ei laajene, vaan pikemminkin kääntyy gravitaation vaikutuksesta kutistumaan. Tämä aiheutti ristiriidan, sillä tuohon aikaan vallinneen käsityksen mukaan maailmankaikkeus oli staattinen [27]. Einsteinin ensimmäinen ehdotus tämän ongelman ratkaisuksi oli lisätä kosmologinen vakio Λ hänen teoriaansa, jolloin vakio kumoaisi kutistumisen ja saisi aikaan staattisen maailmankaikkeuden [28]. Tämä vakio kuitenkin hylättiin, kun vuonna 1929 Edwin Hubble vahvisti, että maailmankaikkeus ei olekaan staattinen, vaan se laajenee [29].

1980-luvulla suurin osa kosmologisesta tutkimuksesta keskittyi malleihin, joissa kriittinen tiheys koski pääasiassa ainetta. Kriittinen tiheys on teoreettinen raja-arvo, jossa maailmankaikkeuden laajeneminen voi joko hidastua ja kääntyä kutistumiseen tai jatkaa laajenemistaan ikuisesti [11]. Tämä tarkoitti yleensä sitä, että noin 95 % maailmankaikkeuden massasta muodostui kylmästä pimeästä aineesta ja 5 % tavallisesta aineesta [30]. Näissä malleissa voitiin luoda realistisia galakseja ja galaksijoukkoja, mutta niiden Hubble-vakion arvo oli havaintoja alhaisempi, ja ne aliarvioivat suurten mittakaavojen galaksijoukkojen havainnot [31, 32]. Vuonna 1992 COBE-satelliitti havaitsi kosmisen taustasäteilyn anisotropian, mikä vahvisti näitä ongelmia. 1990-luvun puoliväliin mennessä alkoi ilmetä useita modifioituja kylmän pimeän aineen malleja, joita kutsutaan CDM-malleiksi (engl. cold dark matter -model) [30].

Samoihin aikoihin kaksi tutkimusryhmää, joista toista johti Saul Perlmutter [33] ja toista Adam Riess [34], havainnoivat Ia-tyypin supernovia. He odottivat havaitsevansa supernovien hidastuvan gravitaation vaikutuksesta Einsteinin gravitaatioteorian mukaisesti, mutta he huomasivatkin, että supernovat loittonivat kiihtyvästi. Vuonna 1998 molemmat ryhmät julkaisivat nämä yllättävät tulokset, jotka viittasivat siihen, että maailmankaikkeus laajenee kiihtyvästi. Tämä tarkoitti, että tarvit-

tiin jälleen kosmologista vakiota Λ selittämään kiihtyvyys, ja se palautettiin takaisin yleiseen suhteellisuusteoriaan. Näiden havaintojen jälkeen kosmologi Michael Turner keksi ilmiölle nimen ”pimeä energia” [35, 36].

2.2 Olemassaolon todisteet ja havaintomenetelmät

Pimeä energia havaitaan vain epäsuorasti erilaisten kosmologisten ilmiöiden avulla [37]. Tässä alaluvussa käsitellään tarkemmin aikaisemmin mainittuja Ia-tyyppin supernovahavaintoja, baryonien akustisia oskillaatiomittauksia (engl. Baryon Acoustic Oscillations, BAO) sekä kosmisen taustasäteilyn mittauksia.

Ia-tyyppin supernovien havainnoista saatiin ensimmäinen data, joka viittasi vahvasti siihen, että maailmankaikkeus laajenee kiihtyvästi. Nämä havainnot kartoittivat supernovien valokäyrää ja spektriä. Ia supernova syntyy, kun kaksoistähtijärjestelmässä on valkoinen kääpiö. Normaalisti tähdestä siirtyy ainetta valkoiseen kääpiöön, kunnes valkoinen kääpiö saavuttaa Chandrasekharin rajan, eli sen kriittisen massan, ja kokee fuusioräjähdyksen [11]. Valkoisten kääpiöiden kriittinen massa on aina sama ennen räjähdystä, joten räjähdysten tapahtuessa ne saavuttavat myös saman luminositeetin, eli niitä voidaan käyttää ns. standardikynttilöinä (engl. Standard candle) havainnoissa. Standardikynttilä tarkoittaa objektia, jonka luminositeetti on tunnettu ja vakio. Niitä käytetään etäisyyksien mittaamiseen maailmankaikkeudessa, koska kun tunnetaan niiden todellinen luminositeetti, voidaan havaittu kirkkaus muuntaa etäisyydeksi, mikä auttaa ymmärtämään maailmankaikkeuden rakennetta ja laajenemista [38]. Kun etäisyys Ia-supernoviin on tiedossa, tiedetään myös, milloin ne tapahtuivat. Supernovan valo on myös punasiirtynyt maailmankaikkeuden laajentumisen seurauksena, ja kun punasiirtymä mitataan supernovan spektristä, voidaan määrittää, kuinka paljon maailmankaikkeus on laajentunut räjähdysten jälkeen. [11]

Lisäksi kosmisen taustasäteilyn mittaukset osoittavat, että havaittavissa oleva

maailmankaikkeus on suurilla mittakaavoilla litteä. Maailmankaikkeudessa ei kuitenkaan ole tällaiseen litteyteen tarpeeksi ainetta, sisältäen pimeän aineen ja baryonit, vaan aineen kokonaismäärä vastaa vain noin 30 % kriittisestä tiheydestä. Jäljelle jäävä 70 % on selitettävä jollakin ylimääräisellä energiamuodolla, eli pimeällä energialla [1]. Kuten edellisessä luvussa mainittiin, tällä hetkellä tarkin arvio maailmankaikkeuden massaenergiasta perustuu Planck-satelliitin keräämään dataan, jonka mukaan pimeä energia kattaa siitä 63,3 % [2].

BAO-mittaukset perustuvat varhaisen maailmankaikkeuden tiheyssignaaleihin, ja niitä käytetään myös etäisyyksien mittauksiin. Nämä tiheyssignaalit syntyivät varhaisen maailmankaikkeuden plasmassa olevien akustisten tiheysaaltojen seurauksena [39]. Kosmologiassa näitä värähtelyjä käytetään ns. standardiviivaimina (engl. standard ruler) pituusasteikoille, koska niiden pituus voidaan määrittää kartoittamalla suurten mittakaavojen rakenteita. Standardiviivain on akustisten aaltojen matkaama maksimietäisyys [38]. Myös siis näistä havainnoista voidaan päätellä maailmankaikkeuden laajenemisen historiaa ja siten pimeän energian vaikutusta. BAO-mittauksia on viime aikoina suorittanut esimerkiksi Dark Energy Survey (DES) [39].

Huomataan, että näiden mittausten avulla saadut viitteet pimeän energian olemassaoloon tulee etäisyysmittauksista ja niiden suhteesta punasiirtymään. Supernovat, kosmisen taustasäteilyn anisotropiat ja BAO-havainnot kertovat meille vain, että havaittu etäisyys tietylle punasiirtymälle on suurempi kuin etäisyys Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) -maailmankaikkeudessa [37]. FLRW-maailmankaikkeus on kosmologinen malli, jossa oletetaan, että maailmankaikkeus on homogeeninen, isotrooppinen ja täynnä ideaalifluidia [40].

2.3 Luonne

Vaikka pimeää energiaa on siis havaittu epäsuorasti, perinteiset havaintolaitteet eivät ole pystyneet havaitsemaan sitä suoraan, joten sen luonne on tällä hetkellä täy-

sin hypoteettinen [37]. Perusvuorovaikutuksista sen tiedetään vuorovaikuttavan vain gravitaation kautta, ja sen ajatellaan olevan homogeenistä ja epätiheää. Myös riippumatta pimeän energian todellisesta luonteesta, sillä tulee olla voimakas negatiivinen paine, jotta se selittää maailmankaikkeuden kiihtyvän laajenemisen [41]. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan aineen sisäinen paine vaikuttaa sen muihin kappaleisiin kohdistamaan gravitaatiovaikutukseen [42]. Tämä johtuu energiaimpulssitensorista, joka sisältää aineen energiatiheyden ja paineen. FLRW-metriikassa voidaan osoittaa, että jatkuva suuri alipaine maailmankaikkeudessa aiheuttaa kiihtyvän laajenemisen [43].

Yksinkertaisin selitys pimeälle energialle on, että se on avaruuden luontainen perusenergia, eli aikaisemmin mainittu kosmologinen vakio Λ . Yleisen suhteellisuusteorian mukaan energialla on gravitaatiovaikutus, jota kutsutaan vakuumienergiaksi, sillä energia ja massa liittyvät toisiinsa yhtälön $E = mc^2$ mukaisesti, jossa E on energia, m on massa ja c on valonnopeus. Havaintojen mukaan kosmologisen vakion tilanyhtälön parametri on lähes -1, mikä tarkoittaa, että paine on tällöin tiheyden vastaluku. Ongelmana on, että kokeet ennustavat erittäin suurta kosmologista vakiota, joka tulisi melkein kumota yhtä suurella vastakkaismerkkisellä termillä, ja tämänhetkiset teoriat eivät selitä mistä Casimirin ilmiön aiheuttaman tyhjiöenergian ja kosmologisista havainnoista lasketun kiihdyttävän voiman välinen suuri ero johtuu [41, 44]. Osa supersymmetriateorioista taas vaatii, että Λ on tasan 0 [41].

Kvintessenssi (engl. Quintessence) on myös hypoteettinen pimeän energian muoto. Se on skalaarikenttä, jonka myös oletetaan selittävän maailmankaikkeuden kiihtyvän laajenemisen havaintoja. Ensimmäisen kerran ilmiön esitti Peebles ja Ratra vuonna 1988 [45], ja teoriaa on sen jälkeen laajennettu. Ilmiön nimesi Caldwell, Davé ja Steinhardt vuonna 1998 [46]. Kvintessenssi eroaa kosmologisesta vakiosta siinä, että se on dynaaminen, eli se muuttuu ajan myötä, toisin kuin kosmologinen vakio, joka määritelmän mukaan ei muutu [46]. Vuonna 2021 ryhmä tutkijoita

suoritti Hubblen vakion mittauksia, jotka heidän mukaansa viittasivat siihen, että vain kvintessenssimallit joiden kytkentävakio on erisuuri kuin nolla, ovat käyttökelpoisia selittämään maailmankaikkeuden kiihtyvää laajenemista [47]. Kvintessenssin erikoistapauksia ovat esimerkiksi phantom-energia ja kineettinen kvintessenssi eli k-essenssi [1]. K-essenssi eroaa tavallisesta kvintessenssistä siten, että sillä on epästandardi liike-energian muoto [48].

Phantom-energian liike-energia on negatiivinen ja se kasvaa maailmankaikkeuden laajentuessa. Tämän ominaisuuden takia laajeneminen voi teoriassa kiihtyä niin nopeasti, että se johtaa maailmankaikkeuden suureen repeämiseen (engl. Big Rip). Suuressa repeämisessä maailmankaikkeuden kaikki aine, sekä aika-avaruus, repeytyy asteittain maailmankaikkeuden laajentuessa, kunnes hiukkasten väliset etäisyydet kasvavat äärettömästi. [1]

3 Pimeän aineen ja pimeän energian yhteys sekä vaihtoehtoiset selitykset

Tällä hetkellä pimeää ainetta ja pimeää energiaa ajatellaan erillisinä kokonaisuuksina, ja ei tiedetä ovatko ne saman ilmiön eri puolia vai täysin erillisiä asioita. Ero niiden vaikutuksissa on kuitenkin selvä: pimeä aine tunnistetaan sen gravitaatiovaikutusten kautta, kun taas pimeä energia liittyy maailmankaikkeuden laajenemiseen. Yksinkertaisesti siis pimeä aine muodostaa ja pitää koossa suurimpia sidottuja rakenteita, mutta pimeä energia työntää yksittäisiä rakenteita kauemmaksi toisistaan. Suurin niiden välillä oleva ero on niiden aiheuttama paine. Pimeän aineen paine on positiivista, kuten tavallisenkin aineen, ja pimeän energian paineen on oltava negatiivista. [1]

3.1 Pimeän aineen ja pimeän energian vuorovaikutus

Teoreettiset mallit ovat ehdottaneet mahdollisia tapoja, joilla pimeä aine ja pimeä energia voisivat vaikuttaa toisiinsa, mutta konkreettisia havaintoja niistä ei vielä ole. Tässä alaluvussa käsitellään muutamia esimerkkejä näistä teoreettisista malleista.

Chaplygin kaasumalli yhdistää pimeän energian ja pimeän aineen siten, että se kuvaa näitä kahta pimeää komponenttia yhtenäisenä fysikaalisena ilmiönä, joka ohjaa maailmankaikkeuden laajenemista. Tämä tapahtuu mallin epätavallisen käyttäytymisen kautta, jossa kaasun paine riippuu sen tiheydestä käänteisesti. Tavallisessa kaasumallissa, kuten ideaalikaasussa, paine ja tiheys ovat suoraan riippuvia toisistaan, eli kun tiheys kasvaa, myös paine kasvaa. Chaplygin kaasumallissa kuitenkin kaasun paine laskee, kun sen tiheys kasvaa. [1, 49, 50]

Dietericin kaasumalli tarjoaa myös yhden lähestymistavan pimeän aineen ja energian yhdistämiseen. Mallissa kaasun tiheys ja paine ovat yhteydessä Dieterici-yhtälön mukaisella tavalla, eli

$$P = \frac{RT}{V - b} \exp\left(-\frac{a}{RTV}\right), \quad (1)$$

missä P on kaasun paine, T on kaasun lämpötila, V on kaasun tilavuus, R on kaasuvakio, ja a ja b ovat Dieterici-parametrit, jotka riippuvat kaasun ominaisuuksista. Yhtälö osoittaa, että kaasun paine riippuu sekä tilavuudesta että lämpötilasta, ja se sisältää kaksi lisätermiä, $\frac{a}{V^2}$ ja b , jotka ottavat huomioon kaasumolekyylien väliset vuorovaikutukset. Tämä riippuvuus tiheyden ja paineen välillä voi tarjota tarkemman kuvauksen kaasun käyttäytymisestä erityisesti korkeapaine- ja matalalämpötilatilanteissa verrattuna yksinkertaisempaan ideaalikaasumalliin, joten se voi tarjota yhden mahdollisuuden pimeän energian ja aineen mallintamiseen. [51]

Kumpikin edellä mainituista kaasumalleista voivat olla esimerkkejä erilaisista pimeän fluidin teorioista. Pimeän fluidin teoria ehdottaa siis, että pimeä aine ja pimeä energia liittyvät vahvasti toisiinsa. Galaksien suuruusluokassa pimeä fluidi käyttäytyy kuin pimeä aine, ja suuremmissa mittakaavoissa sen käyttäytyminen muistuttaa

pimeää energiaa [50]. Vuonna 2018 Jamie Farnes [52] ehdotti, että pimeällä fluidilla, jolla on negatiivinen massa, olisi ominaisuudet, jotka vaaditaan selittämään sekä pimeää aine että energia. Tämä malli on modifioitu Λ CDM-malli, joka osoittaa, että jatkuvasti luodut negatiiviset massat voivat muistuttaa kosmologista vakiota ja täten litistää galaksien rotaatiokäyriä. Farnesin mukaan tämä ehdotettu malli ennustaa galakseissa havaitun pimeän aineen jakauman, ja että malli esittää useita ennusteita, joita pystytään kokeellisesti testaamaan. Malli vaikuttaa siltä, että se on yhdenmukainen havaintojen kanssa, joita on tehty galaksijoukoista, kaukaisista supernovista ja kosmisesta taustasäteilystä. Farnesin tutkimuksessa tehdyt havainnot voivat viitata korvaavan teorian olemassaoloon, joka voidaan mallintaa negatiivisilla massoilla, tai vaihtoehtoisesti jopa siihen, että negatiiviset massat ovat maailmankaikkeuden todellinen osa. Nämä molemmat tapaukset päätyvät lopulta väitteeseen, että teoria pimeästä energiasta ja pimeästä aineesta on voinut johtua yksinkertaisesta merkkivirheestä [52]. Farnesin kehittämä malli on spekulatiivinen, ja on edelleen epäselvää, onko se johdonmukainen aikaisempien pimeän aineen havaintojen ja kokeiden kanssa. Pimeän fluidin teoria on yhä suhteellisen tuore ja kiistanalainen, ja sen kosmologisista vaikutuksista on edelleen monia kysymyksiä. Teoriaan suhtaudutaan varautuneesti erityisesti siksi, että negatiivisen massan hiukkasista ei ole tehty suoria kokeellisia havaintoja [53]. Myös rakenteiden vakaus negatiivisen massan hallitsemassa maailmankaikkeudessa aiheuttaa huolta, sillä se voi johtaa epävakaisiin gravitaatiovuorovaikutuksiin, mikä aiheuttaa puolestaan ristiriidan galakseissa ja galaksijoukoissa havaitun vakauden kanssa. Teoria kaipaa siis lisätutkimusta, jotta voidaan määrittää, onko pimeän fluidin hypoteesi mahdollinen pimeän aineen ja energian yhdistelmävaihtoehto [54].

3.2 Mahdolliset vaihtoehtoiset selitykset

Mikäli tulevat kokeelliset hankkeet eivät anna viitteitä pimeään aineen olemassaolosta, on mahdollista harkita vaihtoehtoisia teorioita, kuten modifioituja gravitaatio-teorioita. Nämä mallit eivät ole täydellisiä ja tämänhetkisissä teorioissa tarvitaan yhä tietty määrä pimeää ainetta selittämään osaa havainnoista. [1]

Modifioitu Newtonilainen dynamiikka (engl. Modified Newtonian Dynamics, MOND) on vaihtoehtoinen lähestymistapa perinteiseen Newtonin mekaniikkaan, joka perustuu siihen, että Newtonin gravitaatiolakia ei olla kokeellisesti vahvistettu hyvin pienissä gravitaatiokentissä. Tämä viittaa siihen, että gravitaatio saattaa toimia eri tavalla näissä olosuhteissa. MONDin esitti alun perin Mordechai Milgrom vuonna 1983 [55]. Milgrom tarjosi näin mahdollista selitystä pimeään aineen ongelmaan. Tässä mallissa Newtonin toinen laki $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, jossa \mathbf{F} on voima, m on massa ja \mathbf{a} on kiihtyvyys, on muutettu muotoon

$$\mathbf{F} = m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)\mathbf{a} \quad (2)$$

missä \mathbf{F} on Newtonilainen voima, m on massa, \mathbf{a} on kiihtyvyys, $a = |\mathbf{a}|$, $a_0 \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$ on Milgromin johtama kiihtyvyyssvakio ja $\mu(x)$, jossa $x = \frac{a}{a_0}$, on interpolaatiofunktio joka toteuttaa ehdon

$$\mu(x \gg 1) \approx 1, \quad \mu(x \ll 1) \approx x,$$

On mainittava, että alkuperäisessä julkaisussa Milgrom kertoo, ettei $\mu(x)$ valinnalla ole merkittävää vaikutusta mallin tuloksiin, ja MOND-malli ei otakaan kantaa itse $\mu(x)$ -funktioon, kunhan se toteuttaa mainitun raja-arvoehdon. Yhtälöstä (2), jota kutsutaan joskus myös Milgromin laiksi, huomataan, että jos kiihtyvyyden suuruus $a \gg a_0$, MOND tuottaa samoja tuloksia kuin tavallinen Newtonilainen mekaniikka, eli jos a_0 on tarpeeksi pieni, eroa Newtonilaiseen mekaniikkaan

ei havaita. Huomattakoon myös, että vaikka a_0 osoittautuu olevan lähellä tulos-
ta $cH_0 = 5 \cdot 10^{-8} (H_0/50 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}) \text{ cm s}^{-1}$, missä c on valonnopeus ja H_0
Hubblen vakio, kyseiselle yhteensattumalle ei ole esitetty perustetta [55].

Vaikka MOND-malli on saanut paljon huomiota, se ei ole päätenyt hallitsevaksi paradigmatoksi [3]. MOND selittää pimeää ainetta tehokkaammin galaksien tasaiset rotaatiokäyrät, mutta se ei toimi suurissa galaksijoukoissa, joissa tarvitaan jokin tapauksessa jonkin verran pimeää ainetta. MOND-mallin ilmeisin ongelma on, että se ei ole yhteensopiva yleisen suhteellisuusteorian kanssa [56]. Malli on kuitenkin tarkoitukseltaan efektiivinen, eli se kuvaa jotakin yleisemmin pätevää teoriaa riittävällä tarkkuudella. Mikäli MOND-mallista tai jostakin muusta uudesta gravitaatioteoriasta halutaan luoda sellainen, että se selittää kaikki havainnot, joita tässäkin tutkielmassa on käsitelty, mutta ei vaatisi pimeän aineen olemassaoloa, tulisi mallin sisältää yleinen suhteellisuusteoria [1]. Jacob Bekenstein [57] kehitti vuonna 2004 relativistisen yleistyksen MOND-mallista, jota kutsutaan tensorivektori-skalaarimalliksi (engl. Tensor-vector-scalar model, TeVeS). Bekensteinin mukaan MOND-mallin tavoin TeVeS huomioi galaksien litteät rotaatiokäyrät, ja lisäksi se on myös johdonmukainen gravitaatiolinssien ja muiden kosmologisten havaintojen kanssa [57]. TeVeS-malli ei kuitenkaan selitä kaikkia kosmisen taustasäteilyn ominaisuuksia eikä siis myöskään maailmankaikkeuden suuren mittakaavan rakenteiden muodostumista. Tämä tarkoittaa, että pimeää ainetta tarvittaisiin jonkin verran selittämään osa havainnoista [1]. Mallia on myös haastettu esimerkiksi osoittamalla, että tähdet olisivat erittäin epävakaita mallin olosuhteissa [58], ja on myös kyseenalaistettu teorian kyky ylipäänsä ottaa samanaikaisesti huomioon galaksien dynamiikka ja gravitaatiolinssi-ilmiö [59].

MOND- ja TeVeS-mallit ovat tunnetuimmat modifoidut gravitaatioteoriat, mutta lisäksi on olemassa myös muita teorioita kuten esimerkiksi $f(R)$ -gravitaatio, joka voidaan tulkita ekvivalentiksi kvintessenssin kanssa [60, 61]. Nämä kuitenkin ylittä-

vät tämän katsauksen laajuuden.

MOND- ja TeVeS-malleja tutkitaan ja kehitetään yhä jonkin verran, vaikka ne eivät selitä tällä hetkellä kosmisen taustasäteilyn havaittuja ominaisuuksia ilman pimeää ainetta. MOND-mallia on esitetty testattavaksi esimerkiksi radiaalikiihtyvyyden punasiirtymäriippuvuuden avulla. Vuoden 2018 julkaisussaan, Sabine Hosenfelder ja Tobias Mistele [62] ehdottavat parametritonta MOND-mallia, jota he nimittävät kovariantiksi emergentiksi gravitaatioksi (engl. Covariant Emergent Gravity, CEG), ja esittävät, että mitä tarkemmaksi radiaalikiihtyvyyden mittaukset parantuvat, voivat erilaiset MOND-mallit ja hiukkaista koostuva pimeä aine erottua toisistaan. Tämä johtuu siitä, että MOND ennustaa huomattavasti pienemmän punasiirtymäriippuvuuden [62].

Vuonna 2017 LIGO-observatorion havainnot gravitaatioaaltoista asettivat uuden rajoituksen modifioituille gravitaatioteorioille. Nämä havainnot olivat esimerkiksi epäjohdonmukaisia Bekensteinin TeVeS-teorian kanssa, ja vaikka ne eivät falsifioi kaikkia modifioituja gravitaatioteorioita, asettavat ne rajoituksia sille, miten tällaisia malleja voidaan muodostaa. Rajoitus johtuu siitä, että linearisoitujen gravitaatioaaltojen on hyvin suurella tarkkuudella kytkeydyttävä tavallisen aineen kanssa samaan metriikkaan [63]. Tämän vaatimuksen täyttää esimerkiksi Milgromin bimetrinen MOND-teoria, eli BIMOND, joka ehdottaa, että on olemassa kaksi erillistä metriikkaa, jotka hallitsevat gravitaatiovuorovaikutuksia eri tavoin eri mittakaavoissa [64].

4 Yhteenveto

Vuosien tutkimuksen jälkeen pimeä aine ja pimeä energia ovat yhä arvoituksia. Minä luulimme olevan yksinkertainen, aineesta ja säteilystä koostuva maailmankaikkeus on paljastunut monimutkaisemmaksi ja tuntemattommaksi kuin on osattu odottaa. Omaamme vain vähän tietoa kosmisesta evoluutiosta, esimerkiksi kosmisen

taustasäteilyn kautta, mutta emme tarpeeksi, jotta saisimme kattavan kokonaiskäsitelmän. [1]

Tässä tutkielmassa on esitetty laajasti nykykäsitelmä pimeästä aineesta ja energiasta, ja lisäksi esitetty vaihtoehtoisia teorioita. Tällä hetkellä ainoa havaintoihin perustuva näyttö pimeän aineen olemassaolosta on se, että sitä tarvitaan jonkin verran tutkielmassa esitettyjen havaintojen selittämiseen, mutta emme vielä ymmärrä sen luonnetta. Se voi koostua joistain uusista alkeishiukkasista kuten WIMPeistä tai aksioneista, tai se voi olla jotain aivan muuta.

Pimeä energia on osoittautunut pimeää ainetta mystisemmäksi ilmiöksi, josta tiedetään vielä vähemmän. Mahdollisia pimeän energian malleja ovat esimerkiksi kosmologinen vakio ja kvintessenssi. Tämänhetkiset kokeelliset havainnot ovat johdonmukaisia kosmologisen vakion kanssa. Mallit eivät kuitenkaan selitä sen luonnetta, eikä kerro miksi se kattaa lähemmäs 70 % maailmankaikkeuden energiasisällöstä.

Tutkielmassa käsiteltiin myös teorioita, jotka yrittävät yhdistää pimeän aineen ja energian yhdeksi ilmiöksi, kuten pimeäksi fluidiksi, sekä täysin vaihtoehtoisia teorioita. Kun eri teorioiden vahvuuksia ja heikkouksia verrataan, huomataan, että ne eivät vielä selitä havaintoja yhtä hyvin kuin hiukkasmuotoinen pimeä aine [58, 59, 63].

Tämän tutkimusalueen tulevaisuus on täysin avoin. Uudet havainnot, kuten esimerkiksi gravitaatioaallot, muokkaavat jatkuvasti käsitystämme maailmankaikkeudesta ja se mikä lopulta selittää maailmankaikkeuden luonteen voi olla jokin näistä esitetyistä vaihtoehdoista, jokin niiden iteraatio tai jotain aivan uutta [1].

Viitteet

- [1] Kenath Arun, S.B. Gudennavar, and C. Sivaram. Dark matter, dark energy, and alternate models: A review. *Advances in Space Research*, 60(1):166–186, July 2017.
- [2] Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, and J. Aumont et al. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 594:A13, 2016. arXiv:1502.01589 [astro-ph].
- [3] Gianfranco Bertone and Dan Hooper. A History of Dark Matter. *Reviews of Modern Physics*, 90(4):045002, October 2018. arXiv:1605.04909 [astro-ph, physics:hep-ph].
- [4] F. Zwicky. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *The Astrophysical Journal*, 86:217, October 1937.
- [5] Heinz Andernach and Fritz Zwicky. English and Spanish Translation of Zwicky's (1933) The Redshift of Extragalactic Nebulae. November 2017. arXiv:1711.01693 [astro-ph].
- [6] V. C. Rubin, N. Thonnard, and W. K. Ford, Jr. Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 /R = 4kpc/ to UGC 2885 /R = 122 kpc/. *The Astrophysical Journal*, 238:471, June 1980.
- [7] Vera C Rubin, W. K. Ford, Jr., and N. Thonnard. EXTENDED ROTATION CURVES OF HIGH-LUMINOSITY SPIRAL GALAXIES. IV. SYSTEMATIC DYNAMICAL PROPERTIES, Sa⁺Sc. *ApJ*. . . , 225:L107–L111, November 1978.
- [8] D. H. Rogstad and G. S. Shostak. Gross Properties of Five Scd Galaxies as Determined from 21-CENTIMETER Observations. *The Astrophysical Journal*, 176:315, September 1972.
- [9] Albert Einstein. "Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field. *Science*, (84):506–507, 1936.
- [10] D. Walsh, R. F. Carswell[†], and R. J. Weymann[‡]. 0957 + 561 A, B: twin quasistellar objects or gravitational lens? *Nature*, 279(5712):381–384, May 1979.
- [11] Hannu Karttunen, Pekka Kröger, Karl Johan Donner, Heikki Oja, and Markku Poutanen. *Tähtitieteen perusteet*. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry, Helsinki, 6 edition, 2021.
- [12] Priyamvada Natarajan, Urmila Chadayammuri, Mathilde Jauzac, Johan Richard, Jean-Paul Kneib, and Harald Ebeling. Mapping substructure in the HST Frontier Fields cluster lenses and in cosmological simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(2):1962–1980, June 2017.

- [13] C Heymans, M Gray, and M Barden. "Hubble maps dark matter web in a large galaxy cluster, November 2008.
- [14] Teresa Marrodan Undagoitia and Ludwig Rauch. Dark matter direct-detection experiments. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 43(1):013001, January 2016. arXiv:1509.08767 [astro-ph, physics:hep-ph, physics:physics].
- [15] Steen Hannestad, Alessandro Mirizzi, Georg G. Raffelt, and Yvonne Y. Y. Wong. Neutrino and axion hot dark matter bounds after WMAP-7. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2010(08):001–001, August 2010. arXiv:1004.0695 [astro-ph, physics:hep-ph].
- [16] Katherine Freese, Brian Fields, and David Graff. Limits on Stellar Objects as the Dark Matter of Our Halo: Nonbaryonic Dark Matter Seems to be Required. In *19th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology*. December 1998. arXiv:astro-ph/9904401.
- [17] Gianfranco Bertone, Dan Hooper, and Joseph Silk. Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints. *Physics Reports*, 405(5-6):279–390, January 2005. arXiv:hep-ph/0404175.
- [18] Scott Dodelson and Lawrence M. Widrow. Sterile Neutrinos as Dark Matter. *Physical Review Letters*, 72(1):17–20, January 1994. arXiv:hep-ph/9303287.
- [19] Marc Kamionkowski and Kim Griest. Supersymmetric dark matter. *Physics Reports*, 1996.
- [20] R. D. Peccei. The Strong CP Problem and Axions. In Raffelt G. Beltrán B. Kuster, M., editor, *Lecture Notes in Physics*, volume 741, pages 3–17. Springer Berlin Heidelberg, 2008. arXiv:hep-ph/0607268.
- [21] E. Aprile, M. L. Benabderrahmane, T. Berger, P. A. Breur, A. Brown, and A. Brown et al. Dark Matter Search Results from a One Tonne \times Year Exposure of XENON1T. *Physical Review Letters*, 121(11):111302, September 2018. arXiv:1805.12562 [astro-ph, physics:hep-ex, physics:hep-ph, physics:physics].
- [22] Shuaijie Li, Mengmeng Wu, Abdusalam Abdukerim, Zihao Bo, and Wei Chen et al. Search for Light Dark Matter with Ionization Signals in the PandaX-4T Experiment. *Physical Review Letters*, 130(26):261001, June 2023.
- [23] E. Adams, B. Ali, I. J. Arnquist, D. Baxter, E. Behnke, and M. Bressler et al. Search for inelastic dark matter-nucleus scattering with the PICO-60 CF₃I and C₃F₈ bubble chambers, January 2023. arXiv:2301.08993 [astro-ph, physics:hep-ex, physics:hep-ph].
- [24] W J Bolte, J I Collar, M Crisler, J Hall, J Krider, K Crum, D Holmgren, C M Lei, D Nakazawa, H Nguyen, B Odom, K O’Sullivan, R Plunkett, E Ramberg, A Raskin, J Rasmussen, R Schmitt, A Sonnenschein, M Szydagis, and J D Vieira. A bubble chamber for dark matter detection (the COUPP project status). *Journal of Physics: Conference Series*, 39:126–128, May 2006.

- [25] E. Daw, J.R. Fox, J.-L. Gauvreau, C. Ghag, L.J. Harmon, M. Gold, E.R. Lee, D. Loomba, E.H. Miller, A.St.J. Murphy, S.M. Paling, J.M. Landers, M. Pipe, K. Pushkin, M. Robinson, D.P. Snowden-Ifft, N.J.C. Spooner, and D. Walker. Spin-dependent limits from the DRIFT-IIId directional dark matter detector. *Astroparticle Physics*, 35(7):397–401, February 2012.
- [26] Gianpaolo Carosi, Gray Rybka, and Karl Van Bibber, editors. *Microwave Cavities and Detectors for Axion Research: Proceedings of the 2nd International Workshop*, volume 211 of *Springer Proceedings in Physics*. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [27] P. J. E. Peebles and Bharat Ratra. The Cosmological Constant and Dark Energy. *Reviews of Modern Physics*, 75(2):559–606, April 2003. arXiv:astro-ph/0207347.
- [28] Albert Einstein. Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity. trans. Alfred Engel, *The collected papers of Albert Einstein: writings, 1914-1917, English translation of selected texts*. Princeton: Princeton university press, 1997.
- [29] Edwin Hubble. A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3):168–173, March 1929.
- [30] Scott Dodelson, Evalyn Gates, and Michael S. Turner. Cold Dark Matter Models. *Science*, 274(5284):69–75, October 1996. arXiv:astro-ph/9603081.
- [31] Carlos S. Frenk, Simon D. M. White, George Efstathiou, and Marc Davis. Cold dark matter, the structure of galactic haloes and the origin of the Hubble sequence. *Nature*, 317(6038):595–597, October 1985.
- [32] Simon D. M. White, Marc Davist, George Efstathioui, and Carlos S. Frenk. Galaxy distribution in a cold dark matter universe. *Nature*, 330(6147):451–453, December 1987.
- [33] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, and P. G. Castro et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2):565–586, June 1999. arXiv:astro-ph/9812133.
- [34] Adam G. Riess, Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiattia, Alan Diercks, and Peter M. Garnavich et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, 116(3):1009–1038, September 1998. arXiv:astro-ph/9805201.
- [35] Michael S. Turner. Dark Matter and Dark Energy in the Universe. In Brad K. Gibson, Rim S. Axelrod, and Mary E. Putman, editors, *The Third Stromlo Symposium: The Galactic Halo*, volume 165 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 431. arXiv, January 1999. arXiv:astro-ph/9811454.

- [36] Saul Perlmutter, Michael S. Turner, and Martin White. Constraining dark energy with SNe Ia and large-scale structure. *Physical Review Letters*, 83(4):670–673, July 1999. arXiv:astro-ph/9901052.
- [37] Ruth Durrer. What do we really know about Dark Energy? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1957):5102–5114, December 2011. arXiv:1103.5331 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph].
- [38] Paul Shah, Pablo Lemos, and Ofer Lahav. A buyer’s guide to the Hubble Constant. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 29(1):9, December 2021. arXiv:2109.01161 [astro-ph].
- [39] DES Collaboration. Dark Energy Survey Year 3 Results: A 2.7% measurement of Baryon Acoustic Oscillation distance scale at redshift 0.835. *Physical Review D*, 105(4):043512, February 2022. arXiv:2107.04646 [astro-ph].
- [40] R. Kantowski, J. K. Kao, and R. C. Thomas. Distance-Redshift Relations in Inhomogeneous Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker Cosmology. *The Astrophysical Journal*, 545(2):549–560, December 2000.
- [41] Sean M. Carroll. The Cosmological Constant. *Living Reviews in Relativity*, 4(1):1, December 2001. arXiv:astro-ph/0004075.
- [42] Shagun Sengupta. Theory on Presence of Anti-Gravitational Field. 7. International Journal of Science and Research 7, 2319–7064, 2016.
- [43] Husin Alatas, Ahmad K Falah, Trio Wibowo, Muhammad A Qohhar, and Bobby E Gunara. On the Lapse Function of FLRW Accelerated Expanding Universe in dRGT Massive Gravity Theory. January 2019. arXiv:1901.03967.
- [44] Eugenio Bianchi and Carlo Rovelli. Why all these prejudices against a constant?, April 2010. arXiv:1002.3966 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-th, physics:physics].
- [45] Bharat Ratra and P. J. E. Peebles. Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field. *Physical Review D*, 37(12):3406–3427, June 1988.
- [46] R. R. Caldwell, Rahul Dave, and Paul J. Steinhardt. Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State. *Physical Review Letters*, 80(8):1582–1585, February 1998. arXiv:astro-ph/9708069.
- [47] Chethan Krishnan, Roya Mohayaee, Eoin Ó Colgáin, M. M. Sheikh-Jabbari, and Lu Yin. Does Hubble Tension Signal a Breakdown in FLRW Cosmology? *Classical and Quantum Gravity*, 38(18):184001, September 2021. arXiv:2105.09790 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th].
- [48] Alberto Rozas-Fernandez. Kinetic k-essence ghost dark energy model. *Physics Letters B*, 709(4-5):313–321, March 2012. arXiv:1106.0056 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-th].

- [49] M. C. Bento, O. Bertolami, and A. A. Sen. Generalized Chaplygin Gas, Accelerated Expansion and Dark Energy-Matter Unification. *Physical Review D*, 66(4):043507, August 2002. arXiv:gr-qc/0202064.
- [50] G. M. Kremer. Dark energy interacting with neutrinos and dark matter: a phenomenological theory. *General Relativity and Gravitation*, 39(7):965–972, June 2007.
- [51] C. Sivaram, Kenath Arun, and R. Nagaraja. Dieterici gas as a unified model for dark matter and dark energy. *Astrophysics and Space Science*, 335(2):599–602, October 2011.
- [52] J. S. Farnes. A Unifying Theory of Dark Energy and Dark Matter: Negative Masses and Matter Creation within a Modified Λ CDM Framework. *Astronomy & Astrophysics*, 620:A92, December 2018. arXiv:1712.07962 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics].
- [53] Faical Barzi. A look into the possibility of negative mass, June 2021. arXiv:2106.06464 [quant-ph].
- [54] Hector Socas-Navarro. Can a negative-mass cosmology explain dark matter and dark energy? *Astronomy & Astrophysics*, 626:A5, June 2019. arXiv:1902.08287 [astro-ph, physics:gr-qc].
- [55] M. Milgrom. A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *The Astrophysical Journal*, 270:365, July 1983.
- [56] Stacy S. McGaugh. A Tale of Two Paradigms: the Mutual Incommensurability of Λ CDM and MOND. *Canadian Journal of Physics*, 93(2):250–259, February 2015. arXiv:1404.7525 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:physics].
- [57] Jacob D. Bekenstein. Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm. *Physical Review D*, 71(6):069901, March 2005. arXiv:astro-ph/0403694.
- [58] Michael D. Seifert. Stability of spherically symmetric solutions in modified theories of gravity. *Physical Review D*, 76(6):064002, September 2007. arXiv:gr-qc/0703060.
- [59] Nick E. Mavromatos, Mairi Sakellariadou, and Muhammad Furqaan Yusaf. Can TeVeS avoid Dark Matter on galactic scales? *Physical Review D*, 79(8):081301, April 2009. arXiv:0901.3932 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th].
- [60] Thomas P. Sotiriou and Valerio Faraoni. $f(R)$ Theories Of Gravity. *Reviews of Modern Physics*, 82(1):451–497, March 2010. arXiv:0805.1726 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-th].

- [61] C. Wetterich. Modified gravity and coupled quintessence. *Lecture notes in Physics*, 892:57–95, 2015. arXiv:1402.5031 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-th].
- [62] Sabine Hossenfelder and Tobias Mistele. The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter. *International Journal of Modern Physics D*, 27(14):1847010, October 2018. arXiv:1803.08683 [astro-ph, physics:gr-qc].
- [63] Sibel Boran, Shantanu Desai, Emre Kahya, and Richard Woodard. GW170817 Falsifies Dark Matter Emulators. *Physical Review D*, 97(4):041501, February 2018. arXiv:1710.06168 [astro-ph, physics:gr-qc].
- [64] Mordehai Milgrom. Bimetric MOND gravity. *Physical Review D*, 80(12):123536, December 2009. arXiv:0912.0790 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th].