

Gravitaatioaallot: Synty ja havaitseminen

Kandidutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Fil. yo. Aaron Seppälä
Tarkastaja:
Dos. T. Hovatta

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Seppälä, Aaron Gravitaatioaalto: Synty ja havaitseminen

Kandidatutkielma, 15 s.

Fysiikka

Maaliskuu 2024

Tutkielmassa tutustutaan gravitaatioaaltojen syntymiseen ja niiden havaitsemiseen.

Gravitaatioaaltoja voivat synnyttää systeemit, joissa massiiviset kompaktit kohteet, mustat aukot ja neutronitähdet, kiertävät toisiaan tai yhdistyvät. Varhaisessa universumissa on syntynyt gravitaatioaaltoja, jotka havaitaan nykyään gravitaatioaaltoastaustasäteilynä. Myös neutronitähtien yhdistymisen jälkeen ja tietyissä tapauksissa neutronitähden pyöriessä syntyy gravitaatioaaltoja.

Gravitaatioaaltoja havaitaan kahden erillisen menetelmän, laserinterferometrian ja pulsariajoituksen, avulla. Tällä hetkellä käytettävät laserinterferometrit sijaitsevat maan pinnalla, mutta sellainen on suunnitteilla myös avaruuteen 2030-luvulla. Tutkielmassa on käytetty tärkeinä lähteinä esimerkiksi artikkeleita M. Bailes et al. (2021) ja J. Aasi et al. (2015).

Gravitaatioaaltohavaintoja voidaan käyttää neutronitähtien tutkimiseen ja siten neutronitähdessä suuressa tiheydessä olevan aineen ominaisuuksien tutkimiseen. Gravitaatioaaltojen avulla voidaan tutkia myös pimeää ainetta havaitsemalla pimeän aineen ympäröivien mustien aukkojen ja niitä ohittavien kohteiden synnyttämiä gravitaatioaaltoja.

Asiasanat: gravitaatioaalto, laserinterferometri, musta aukko, neutronitähti, pimeä aine, pulsariajoitus

Sisällys

Johdanto	1
1 Gravitaatioaaltojen syntyminen	2
2 Laserinterferometria	3
2.1 Havaittava taajuusalue	3
2.2 Laserinterferometria Maan pinnalla	4
2.3 Laserinterferometria avaruudessa	6
3 Pulsariajoitus	8
3.1 Havaittava taajuusalue	8
3.2 Teleskoopit	8
4 Gravitaatioaaltojen käyttäminen tutkimuksessa	10
4.1 Neutronitähden rakenteen tutkiminen	10
4.2 Pimeän aineen tutkiminen	11
5 Yhteenveto	13

Johdanto

Gravitaatioaaltojen syntyminen ennustetaan Einsteinin yleisessä suhteellisuusteoriassa, ja niitä havaittiin ensimmäistä kertaa Yhdysvalloissa sijaitsevalla LIGO-laserinterferometrillä vuonna 2015 [1]. Gravitaatioaaltoja syntyy pääasiassa massiivisten kompaktien kohteiden, eli mustien aukkojen tai neutronitähtien kiertäessä toisiaan ja niiden yhdistyessä. Tutkielman luvussa 1 käsitellään gravitaatioaaltojen syntymekanismeja ja massiivisista kompakteista kohteista, eli mustista aukoista ja neutronitähdistä, koostuvia systeemejä ja erityisesti mekanismeja, joilla ne synnyttävät gravitaatioaaltoja.

Luvuissa 2 ja 3 tutustutaan gravitaatioaaltojen havaitsemiseen ja erityisesti gravitaatioaaltohavaintisiin. Kaksi merkittävää tapaa havaita gravitaatioaaltoja tällä hetkellä ovat laserinterferometria ja pulsariajoitus (engl. pulsar timing array). Gravitaatioaalto venyttävät ja puristavat aika-avaruutta edetessään, joten ne vaikuttavat myös sähkömagneettisen säteilyn kulkuun. Gravitaatioaaltojen havaitsemiseen käytetyissä menetelmissä tarkkaillaankin sähkömagneettista säteilyä.

Laserinterferometriassa, jota käsitellään luvussa 2, mittalaitteessa kulkevan laser-säteilyn interferenssiä ja vaihetta havaitsemalla voidaan päätellä gravitaatioaaltojen vaikutus, koska gravitaatioaalto aiheuttaa muutoksia valonsäteiden kulkeman matkan pituudessa. Pulsariajoituksessa, jota käsitellään luvussa 3, havaitaan tunnettuja pulsareita, eli suurella pyörimisnopeudella pyöriviä ja sähkömagneettista säteilyä säteileviä neutronitähtiä, ja mitataan erityisesti niiden lähettämien pulssien saapumisaikoja. Pulssien saapumisaikat voidaan ennustaa hyvin tarkasti, ja kun havaittu saapumisaika poikkeaa ennustetusta, voidaan päätellä gravitaatioaaltojen kulkeneen pulsarin ja Maan välisen aika-avaruuden läpi.

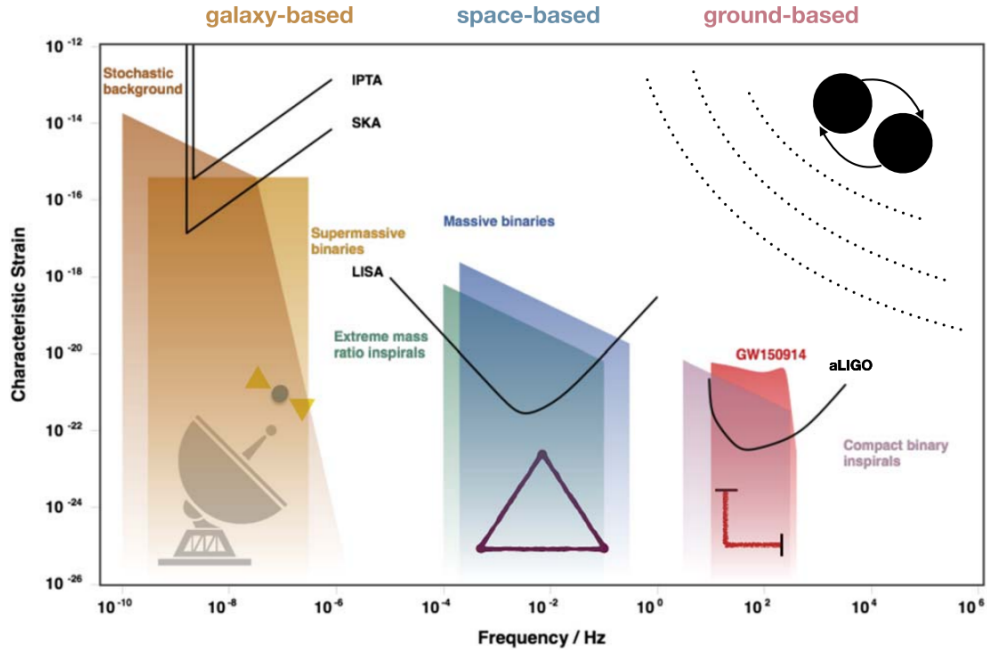
Luvussa 4 käsitellään gravitaatioaaltojen merkitystä tutkimuksessa ja esitellään ilmiöitä, joiden tutkimiseen gravitaatioaaltohavaintoja voidaan käyttää.

1 Gravitaatioaaltojen syntyminen

Gravitaatioaaltojen olemassaolo ennustetaan Einsteinin yleisessä suhteellisuusteoriassa. Niitä syntyy, kun massiiviset kohteet kiertävät toisiaan. Tällaisia systeemejä, jotka emittoivat gravitaatioaaltoja, ovat esimerkiksi toisiaan kiertävät mustat aukot, toisiaan kiertävät neutronitähdet ja systeemit, joissa musta aukko ja neutronitähti kiertävät toisiaan [1]. Gravitaatioaaltoja havainnollistetaan kuvassa 2.

Kun kaksi massiivista kohdetta kiertää toisiaan, ne menettävät energiaa ja säteilevät gravitaatioaaltoja. Energian vähenemisen vuoksi ne lähestyvät toisiaan ja systeemin säteilemien gravitaatioaaltojen taajuus kasvaa, koska kohteiden kiertoaika lyhenee. Aluksi kahden tähdenmassaisen mustan aukon kiertäessä toisiaan systeemi säteilee gravitaatioaaltoja noin 10 mHz:n taajuudella. Supermassiivisista mustista aukoista, eli mustista aukoista massoiltaan $10^5 - 10^{10}$ Auringon massaa koostuva systeemi säteilee nanohertsien taajuudella. [1]

Gravitaatioaaltoja säteilee myös mustien aukkojen tai neutronitähtien yhdistyessä [1, 12]. Mustien aukkojen yhdistyessä säteilevät gravitaatioaalto ovat korkeataajuuksisia, sillä juuri ennen yhdistymistä ne kiertävät jo hyvin lähellä toisiaan. Neutronitähtien, kuten mustien aukkojenkin, tapauksessa taajuus on aluksi 10 mHz:n luokkaa ja kasvaa niiden lähestyessä toisiaan [1]. Neutronitähtien yhdistymisen jälkeen taas emittoituu yhdistymisenjälkeisiä gravitaatioaaltoja (engl. post-merger gravitational waves), joissa erottuu selkeitä amplitudihuippuja erillisillä taajuuksilla [12]. Kuvassa 1 kootaan gravitaatioaaltojen syntymekanismeja ja eritellään niiden havaitsemiseen käytettäviä havaintomenetelmiä.



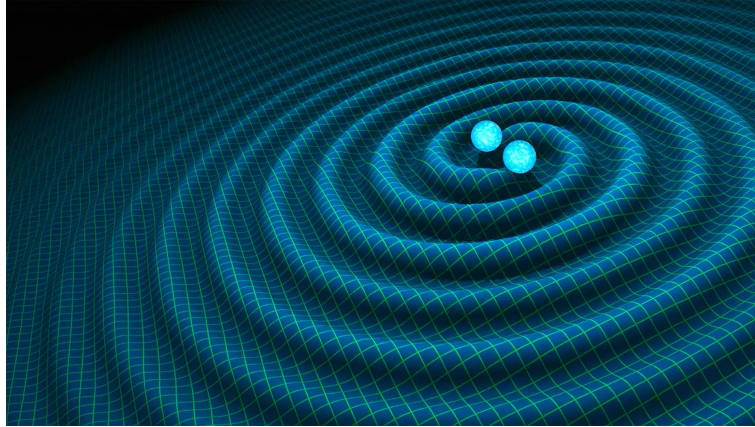
Kuva 1. Kuvan vaakaakselilla on esitetty gravitaatioaaltojen taajuus ja pystyakselilla voimakkuus. Kuvaan on sijoitettu niiden havaitsemiseen käytettäviä menetelmiä havaittavien gravitaatioaaltojen taajuuden mukaan. Vasemmalla on galaksin mittakaavan (galaxy-based) havaintomenetelmä, pulsariajoitus. Keskellä on Maan lähiavaruuteen (space-based) toteutettava LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Oikealla on maassa sijaitseva (ground-based) LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Gravitaatioaaltojen lähteitä on merkitty kuvaan teksteillä: gravitaatioaaltoastausäteily (engl. stochastic background), supermassiiviset toisiaan kiertävät mustat aukot (engl. supermassive binaries), systeemit, joissa kevyt komponentti kiertää selvästi massiivisempaa kohdetta (engl. extreme mass ratio inspirals) ja toisiaan kiertävät kompaktit kohteet (engl. compact binary inspirals). Kuva: [7].

2 Laserinterferometria

2.1 Havaittava taajuusalue

Laserinterferometreillä gravitaatioaaltoja voidaan havaita taajuuksilla, jotka ovat väliltä 10 Hz – 10 kHz. Havaintolaitteiden täytyy olla hyvin tarkkoja ja kyetä havaitsemaan pieniä, noin 10^{-18} metrin pituisia muutoksia mittalaitteen peilien ja testimassojen välimatkassa. [1]

Tällä hetkellä käytössä olevalla Yhdysvalloissa sijaitsevalla LIGO-havaintimella (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) voidaan havaita gravitaatio-



Kuva 2. Kuvassa havainnollistetaan tilannetta, jossa kahden massiivisen kohteen kiertäessä toisiaan syntyy gravitaatioaaltoja, jotka ilmenevät aika-avaruuden venymisenä ja puristumisena. Kuva: Robert Hurt/Caltech-JPL

aaltosäteilyä, joka on taajuudeltaan 10 Hz – 100 Hz [2]. Ilmakuva LIGO-havaintimesta esitetään kuvassa 3. Suunniteilla olevalla Cosmic Explorer -havaintsimella voitaisiin havaita gravitaatioaaltoisäteilyä, jonka taajuus olisi 5 Hz – 5 kHz ja Einstein Telescopella säteilyä taajuudella 1 Hz – 5 kHz [11].

2.2 Laserinterferometria Maan pinnalla

Gravitaatioaaltojen havitsemiseen tarkoitetuista laserinterferometreistä merkittävimpiä ovat Yhdysvalloissa sijaitseva LIGO, Euroopassa sijaitseva VIRGO ja Japanissa sijaitseva KAGRA (Kamioka Gravitational wave detector). Lisäksi Intiaan on valmisteilla LIGO-India-havaintsin ja suunnitteilla ovat Cosmic Explorer ja Einstein Telescope. [1]

Maassa toimivat laserinterferometrit ovat toimintaperiaatteensa mukaan Michelsonin interferometrejä. Niissä valonlähteen synnyttämä säteily ohjataan säteenjakajan avulla kahteen peiliin, joista säteily heijastuu takaisin ja ohjautuu säteenjakajan kautta havaintsimelle. Koska eri peileistä heijastuneet säteet interferoivat keskenään, peilien välimatkan muuttuessa havaintsimelle saapuvan säteilyn amplitudi muuttuu. Tämän vuoksi edellä kuvattua periaatetta voidaan hyödyntää määrittäessä gravi-

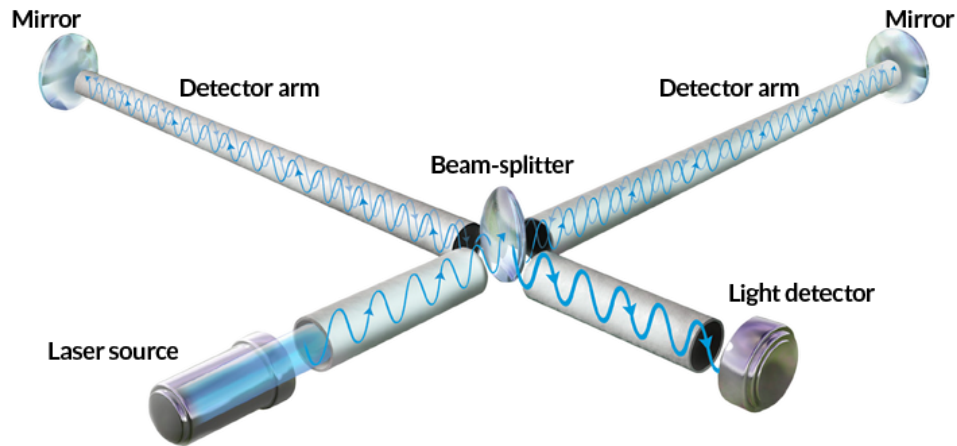


Kuva 3. Kuva on ilmakeku LIGO-havaintsimesta. Erityisesti kuvassa näkyv toinen neljä kilometriä pitkistä onteloista. Kuva: LIGO Laboratory

taatioaaltojen aiheuttamia muutoksia peilien etäisyyksissä [1]. LIGO:ssa säteilynä käytetään laservaloa, jonka aallonpituus on 1064 nm, ja joka heijastuu 4 km pitkien onteloiden päissä olevista testimassoista, kuten kuvassa 4 on esitetty. [2]

Gravitaatioaaltojen havaintolaitteiden kohina on tärkeää saada mahdollisimman pieneksi, koska niitä havaittaessa havaitaan hyvin pieniä etäisyyksiä. Laseinterferometreissä kohinan synnyttävät pääasiassa testimassojen ja niiden kannattimien lämpöliike, onteloiresonaattorin jäännöskaasu, kvantti-ilmiöistä seuraava kohina (engl. quantum noise), kuten säteilypainne ja tyhjiön fluktuaatio, sekä maassa sijaitsevilla mittalaitteissa maan seisminen värähtely [1, 2].

Tyhjiön fluktuaatio havaintsimella rajoittaa havaittavan valonsäteen vaiheen havaitsemisen resoluutiota, ja koska kyseessä on fundamentaalista fysikaalisesta ilmiöstä seuraavaa kohinaa, laitteiden parantaminen ei pienennä sitä [1]. Maan seismisen värähtelyn vuoksi maan kuoren tiheys ei pysy täsmälleen samana, minkä vuoksi testimassoihin vaikuttavan painovoiman suuruus vaihtelee [2]. Testimassoihin ja niiden kannattimiin vaikuttaa myös lämpöliike, joka aiheuttaa kannattimien värähtelyä. Lämpöliikkeen vaikutusta kannattimiin LIGO:ssa pienennetään muotoilemalla kannattimet niin, että ne ovat keskeltä kapeita ja päistä noin kaksi kertaa leveämpiä [2]. Onteloiresonaattorin sisälle jää myös jäännöskaasua, joka yhtäältä vaikuttaa



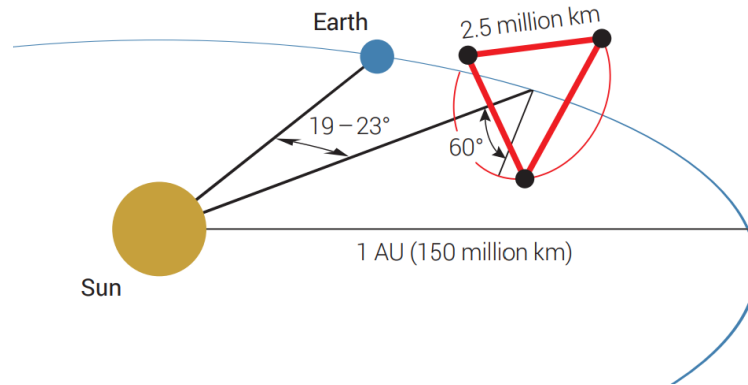
Kuva 4. Kuvassa on LIGO:n kaavakuva, jossa tärkeimpinä näkyvät laserlähde (engl. laser source), säteenjakaja (engl. beam splitter), ontelot, joissa säde etenee (kuvassa detector arm), testimassojen peilit (engl. mirror), joista lasersäde heijastuu ja fotodetektor (kuvassa light detector). Kuva: Nicolle Rager Fuller, ScienceNews

valonsäteen etenemiseen ja toisaalta törmäilemällä kannattimiin lisää niiden lämpöliikettä [2]. Edellä lueteltujen lisäksi mittauksissa virhettä aiheuttavat tekniset virhelähteet, kuten käytetyn laserin taajuuden ja amplitudin vaihtelu sekä fotodetektorin pimeä virta (engl. dark current) [2].

2.3 Laserinterferometria avaruudessa

Tällä hetkellä gravitaatioaaltoja havaitaan Maasta käsin, mutta suunnitteilla on päästä havaitsemaan gravitaatioaaltoja myös avaruudessa. Suunnitteilla on avaruuteen rakennettava laserinterferometri LISA (Laser Interferometer Space Antenna), jonka on tarkoitus valmistua 2030-luvun alussa. Sillä voitaisiin havaita gravitaatioaaltoja, joiden taajuus on matalampi kuin niillä, joita havaitaan maan pinnalla sijaitsevilla laserinterferometreillä. [1, 16]

LISA:n on tarkoitus sijaita Maan kiertoradalla noin 50 – 65 miljoonan kilometrin päässä Maasta. LISA:n sijaintia ja rakennetta havainnollistetaan kuvassa 5. LISA:n toimintaperiaate olisi sama kuin maan pinnalla sijaitsevilla laserinterferometreillä, mutta sen kokoluokka olisi selkeästi suurempi. Testimassat ja niiden peilit sijaitsi-



Kuva 5. Kuvassa on suunnitteilla olevan LISA-havaintimen havainnekuva. Havaintin olisi 60 asteen kulmassa ekliptikaan eli Maan ratatasoon nähden. Se kiertäisi Maan radalla 50 – 65 miljoonan kilometrin ja Auringosta nähtynä 19 – 23 asteen etäisyydellä Maasta. Kuva: Muokattu lähteestä [16]

vat kolmessa erillisessä avaruusaluksessa 2,5 miljoonan kilometrin päässä toisistaan kolmion muodossa. Jokaisen aluksen sijaintia ja asentoa hallittaisiin vakauttimilla ja niiden keskinäistä etäisyyttä mitattaisiin laserinterferometriavulla. [16]

LISA:lla olisi mahdollista havaita gravitaatioaaltoja, joiden taajuus on 0,1 mHz:stä yli 100 mHz:iin. Tällaisten gravitaatioaaltojen avulla voitaisiin tutkia galaksien keskustoissa olevia mustia aukkoja ja varhaisessa maailmankaikkeudessa syntyneitä gravitaatioaaltoaustasäteilyä. LISA:n avulla olisi mahdollista tutkia myös gravitaatioaaltojen etenemistä ja siten myös esimerkiksi gravitonin eli painovoiman välittäjähiukkasen ominaisuuksia. LISA:lla olisi mahdollista myös havaita gravitaatioaaltoja, joiden taajuus kasvaisi LISA:n havainnoista muutamien viikkojen tai kuukausien kuluessa sellaiseksi, että ne olisi mahdollista havaita lopulta maan pinnalla sijaitsevilla laserinterferometreillä. Näin olisi siis mahdollista havaita samoja kohteita usealla eri taajuuskaistalla. [16]

3 Pulsariajoitus

3.1 Havaittava taajuusalue

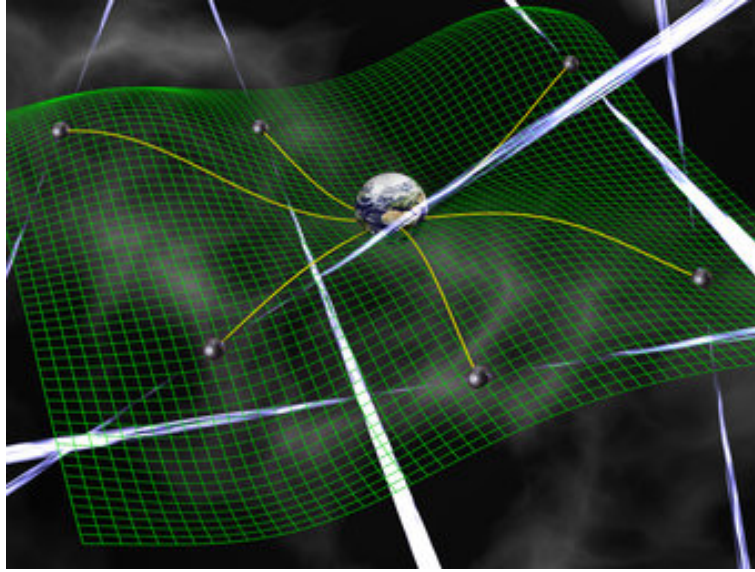
Pulsariajoitus on toinen merkittävä tapa havaita gravitaatioaaltoja. Pulsariajoituksessa havaitaan hyvin tunnettuja millisekuntipulsareita eli pulsareita, joiden pyörimisen jaksonaika on millisekunnin luokkaa, ja erityisesti seurataan niistä tulevien radiotaajuuksisten pulssien saapumisaikoja. Pulsarit sopivat tähän tarkoitukseen erityisen hyvin, koska niiden pyöriminen ja siten pulssien saapuminen on hyvin tarkkaa ja ennustettavaa. Pulssien saapumista voidaan ennustaa mikrosekuntien tarkkuudella kymmenien vuosien päähän. Pulsariajoituksen avulla havaitaan matalataajuuksisia gravitaatioaaltoja. Havaittavat taajuudet ovat 10^{-9} Hz – 10^{-6} Hz [4]. [1]

Pulssien havaittua ja ennustettua saapumisaikaa vertaamalla voidaan selvittää, vaikuttavatko gravitaatioaalto pulssien kulkuun. Aikaero voidaan havaita, koska gravitaatioaalto aiheuttavat muutoksia tässä tapauksessa erityisesti pulsarin ja Maan välisessä aika-avaruudessa ja siten vaikuttavat pulssien etenemiseen. Tätä havainnollistetaan kuvassa 6. [1]

Havaittavien pulsareiden suunnilla Maasta katsottuna on myös merkitystä gravitaatioaaltoja havaittaessa, sillä gravitaatioaalto aiheuttaa pulssien saapumisaikaan erilaisia muutoksia eri suunnissa oleville pulsareille. Aikaerojen riippuvuutta pulsarien suunnista kuvataan Hellingsin ja Downsin käyrällä (engl. Hellings and Downs curve), joka on esitetty kuvassa 7. [1]

3.2 Teleskoopit

Pulsariajoitukseen osallistuu pääasiassa kolme erillistä yhteenliittymää: The Parkes Pulsar Timing Array Australiassa [1], The European Pulsar Timing Array (EPTA) Euroopassa [4] ja The North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav) Pohjois-Amerikassa [3]. Yhdessä ne muodostavat International

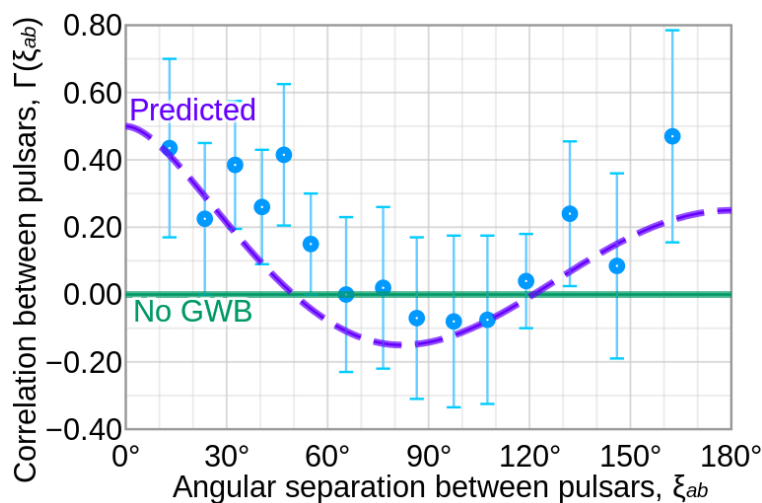


Kuva 6. Pulsareiden pulssien saapumisaika Maahan muuttuu gravitaatioaallon kulkiessa pulsarin ja Maan välisen aika-avaruuden läpi, koska gravitaatioaalto venyttää ja puristaa aika-avaruutta. Kuva: David Champion, Max Planck Institute for Radio Astronomy.

Pulsar Timing Array:n (IPTA) [1].

EPTA:ssa kehitetään tarkempia havaintomenetelmiä ja etsitään uusia pulsariajoitukseen käytettäviä pulsareita nimenomaan gravitaatioaaltohavaintoja varten. Havaintoihin hyödynnetään dataa viideltä suurelta teleskoopilta, joita ovat Effelsberg Saksassa, Lovell Isossa-Britanniassa, Nancay Ranskassa, Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) Alankomaissa ja Sardinia Italiassa. [4]

NANOGrav:issa gravitaatioaaltojen havaitsemisessa keskitytään havaitsemaan gravitaatioaaltoastausäteilyä ja erottelemaan siitä tietoa sen synnyttävästä toisiaan kiertävien supermassiivisten mustien aukkojen populaatiosta. Kuvassa 7 esitetyt havainnot on saatu, kun on havaittu 67 pulsaria 15 vuoden ajan. Näistä 67 pulsarista on muodostettu 2211 erillistä paria, joiden avulla kulmaetäisyysriippuvuus on laskettu. Tulosten perusteella gravitaatioaaltoastausäteilyä ei kuitenkaan voida varmuudella todeta löytyneen, vaan havaintoja tarvitaan suuremmasta määrästä pulsareita ja laajemmalla taajuusalueella [8]. Myös pulsareiden pidempi seuranta parantaa tulosten luotettavuutta [8]. Tavoitteena on myös kyetä havaitsemaan yksittäistä kahden



Kuva 7. Kuvassa katkoviivalla näkyy ennustettu Hellingsin ja Downsian käyrä, joka kuvaa eri pulsareista saapuvien pulssien saapumisajan ja ennusteen välisen eron riippuvuutta pulsareiden välisestä kulmaetäisyydestä. Kuvaan on merkitty sinisellä NANOGravin havainto 15 vuoden ajalta. Vihreällä yhtenäisellä viivalla merkitty riippuvuus kuvaa tilannetta, jossa gravitaatioaaltoa ei ole. [1, 8] Kuva: Wikimedia Commons, alunperin The NANOGrav Collaboration.

supermassiivisen mustan aukon systeemiä. NANOGrav:in havaintoihin on käytetty Green Bank Telescopea ja Arecibo. [3]

4 Gravitaatioaaltojen käyttäminen tutkimuksessa

4.1 Neutronitähden rakenteen tutkiminen

Neutronitähdet ovat erityisen kiinnostava tutkimuksen kohde, sillä niiden avulla voidaan päästä tutkimaan aineen tilanyhtälöä erittäin suurissa tiheyksissä [14]. Neutronitähtien yhteydessä voi syntyä gravitaatioaaltoja usealla eri mekanismilla. Gravitaatioaaltoja syntyy sekä neutronitähtien kiertäessä toisiaan, kuten tutkielmassa on todettu, että yhdistyessä ja yhdistymisen jälkeen [12]. Myös aineen olomuodon muutokset neutronitähden sisällä synnyttävät gravitaatioaaltoja, koska muutoksissa vapautuu energiaa, joka säteilee gravitaatioaaltoisäteilynä [5]. Myös itse neutronitähden pyöriminen voi synnyttää gravitaatioaaltoja [15].

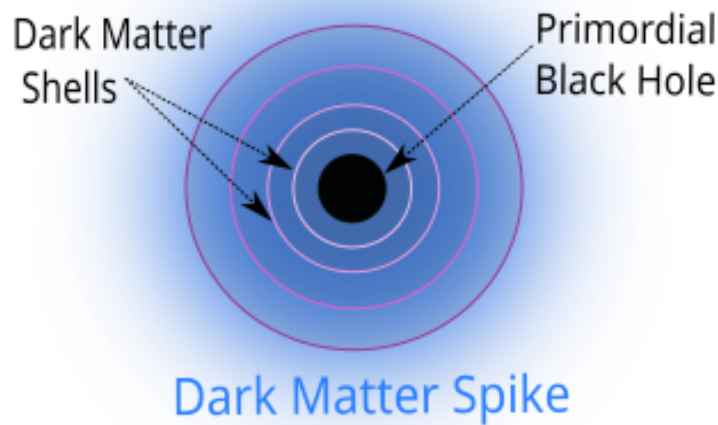
Neutronitähden pyöriessä gravitaatioaaltoja voi emittoitua, jos tähden pyörimisakseli prekessoi, eikä siis pysy täysin vakaana. Pyöriessä gravitaatioaaltoja voi syntyä myös, jos neutronitähden magneettikentän navat eivät vastaa tähden pyörimisakselin napoja. Pulsari voi synnyttää gravitaatioaaltoja siis myös itse pyöriessään. Emittoituneiden gravitaatioaaltojen taajuus tällaisessa tapauksessa on kaksinkertainen neutronitähden pyörimistaajuuteen nähden [15]. Hitaasti pyörivä neutronitähti saa aikaan gravitaatioaaltoja laajalla taajuusalueella kun taas nopeasti pyörivä synnyttää selkeitä huippuja erillisillä taajuuksilla [13].

Kahden neutronitähden yhdistyttyä emittoituu yhdistymisenjälkeisiä gravitaatioaaltoja. Myös tämäntyyppisessä gravitaatioaaltojen säteilyssä erottuu selkeitä, erillisiä amplitudihuippuja. [12]

4.2 Pimeän aineen tutkiminen

Pimeän energian osuuden maailmankaikkeuden massaenergiasta arvellaan olevan noin 65 %, pimeän aineen noin 30 % ja tavallisen aineen vain noin 5 % [17]. Pimeää ainetta on kuitenkin hankalaa havaita, sillä se ei vuorovaikuta sähkömagneettisen säteilyn kanssa. Pimeä aine kuitenkin vuorovaikuttaa tavallisen aineen kanssa gravitaation välityksellä. Siispä gravitaatioaaltojen avulla voidaan tutkia myös pimeää ainetta ja erityisesti pimeän aineen kertymiä (engl. dark matter spikes) mustien aukkojen ympärillä [1]. Jos pimeä aine on kylmää ja törmäyksetöntä, sitä kertyy mustien aukkojen ympärille painovoiman vaikutuksesta [11]. Pimeän aineen kertymä esitetään kuvassa 8.

Jos mustaa aukkoa kiertää tai sen ohittaa jokin sitä paljon pienempi kohde, voi systeemin synnyttämän gravitaatioaalto-signaalin avulla tutkia mahdollisen pimeän aineen rakennetta, sillä pimeä aine vaikuttaa kiertävän tai ohittavan kohteen radan ominaisuuksiin [1, 10]. Tavallisesti tyhjiössä, tilanteessa jossa kohteeseen vaikuttaa ainoastaan mustan aukon vetovoima, mustan aukon ohittaessaan kohde kulkee hy-



Kuva 8. Kuvassa on alkuperäinen tai primordiaalinen, siis varhaisessa maailmankaikkeudessa syntynyt musta aukko (engl. primordial black hole), jota ympäröi sinisellä esitetty pimeän aineen kertymä (engl. dark matter spike). Pimeän aineen kertymän eritiheyksisiä alueita kuvataan kuvassa kuorten avulla (engl. dark matter shells). Kuva: [9]

perbolista rataa, jonka eksentrisyys ohituksen aikana pysyy vakiona. Jos mustan aukon ympärillä kuitenkin on pimeän aineen kertymä, sen vaikutus voidaan havaita ohittavan kohteen radan muutoksista. Kun kohde kulkee pimeän aineen kertymän läpi, pimeä aine aiheuttaa siihen jarruttavan voiman, minkä vuoksi kohde ajautuu lähemmäksi mustaa aukkoa. Kohteen kulkeman radan eksentrisyys siis pienenee ja vapautuu energiaa, joka säteilee gravitaatioaaltoina. [10]

Gravitaatioaaltojen taajuudesta voidaan päätellä ohittavan kohteen radan muutos, sillä gravitaatioaaltojen taajuus kasvaa radan pienentyessä. Voidaan siis verrata havaittuja gravitaatioaalto-signaaleja sellaisiin malleihin, joiden syntymiseen pimeä aine on vaikuttanut, ja sellaisiin, joita syntyisi ilman pimeän aineen vaikutusta. Näin pystytään saamaan arvioita pimeän aineen ominaisuuksista. Pimeän aineen vaikutus syntyyiin gravitaatioaaltoihin voitaisiin havaita sekä jo nykyisillä maan pinnalla sijaitsevilla laserinterferometreillä että kehitteillä olevilla Cosmic Explorerilla ja

Einstein Telescopella. [11]

5 Yhteenveto

Gravitaatioaaltoähtitieteen alalla saatiin tärkeä vahvistus vuonna 2015, kun LIGO:n avulla ensimmäistä kertaa havaittiin gravitaatioaaltoja. Nykyisten maassa sijaitsevien gravitaatioaaltohavaintsimien havaintoja tullaan lisäksi yhdistämään radioaalto- ja optisiin havaintoihin gravitaatioaaltoja synnyttävistä systeemeistä. Tuleva LISA mahdollistaa 2030-luvulla entistä matalataajuuksisempien gravitaatioaaltojen havaitsemisen laserinterferometrialla ja samojen systeemien havaitsemisen niiden kehityksen eri vaiheissa, kun LISA:n havaintoja kyetään yhdistämään maassa sijaitsevien laserinterferometrien havaintoihin.

Pulsariajoituksesta on hyötyä erityisesti varhaisessa maailmankaikkeudessa syntyneitä gravitaatioaaltoastausäteilyä ja universumin kehitystä tutkittaessa. Kuten luvussa 2.3 todetaan, gravitaatioaaltojen etenemisen tutkimisen avulla on mahdollista saada tietoa myös kvanttifysiikan ilmiöistä, kuten juuri gravitonin ominaisuuksista. Gravitaatioaaltojen havaitseminen auttaa toisessakin osin kvanttifysiikkaan liittyvässä ongelmassa, nimittäin aineen tilanyhtälön tutkimisessa erittäin suurissa tiheyksissä, esimerkiksi neutronitähdessä, kuten luvussa 4.1 todetaan. Gravitaatioaaltoähtitieteen tutkimus ja kehittäminen auttaa siis ymmärtämään ja ratkaisemaan fyysikan alan ongelmia myös laajemmin kuin pelkästään tähtitieteessä.

Viitteet

- [1] M. Bailes et al. *Gravitational-wave physics and astronomy in the 2020s and 2030s*. Nature Reviews Physics 3.5 (2021): 344-366.
- [2] J. Aasi et al. *Advanced ligo*. Classical and quantum gravity 32.7 (2015): 074001.
- [3] S. Ransom et al. *The NANOGrav program for gravitational waves and fundamental physics*. Bulletin of the American Astronomical Society 51.7 (2019): 195.
- [4] R.D. Ferdman et al. *The European Pulsar Timing Array: current efforts and a LEAP toward the future*. Classical and Quantum Gravity 27.8 (2010): 084014.
- [5] F.G. Marranghello, C.A. Vasconcellos, and J. A. de Freitas Pacheco. *Phase transitions in neutron stars and gravitational wave emission*. Physical Review D 66.6 (2002): 064027.
- [6] Guo, Xiao, Youjun Lu, and Qingjuan Yu. *On Detecting Nearby Nanohertz Gravitational Wave Sources via Pulsar Timing Arrays*. The Astrophysical Journal 939.1 (2022): 55.
- [7] Mingarelli, C. M., Mingarelli, A. B. (2018). *Proving the short-wavelength approximation in Pulsar Timing Array gravitational-wave background searches*. Journal of Physics Communications, 2(10), 105002.
- [8] Agazie, G. et al, NANOGrav Collaboration. (2023). *The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background*. The Astrophysical Journal Letters, 951(1), L8.
- [9] Jangra, P., Kavanagh, B. J., & Diego, J. M. (2023). *Impact of dark matter spikes on the merger rates of Primordial Black Holes*. arXiv preprint arXiv:2304.05892.
- [10] Chowdhuri, A., Singh, R. K., Kangsabanik, K., & Bhattacharyya, A. (2023). *Gravitational Radiation from hyperbolic encounters in the presence of dark matter*. arXiv preprint arXiv:2306.11787.
- [11] Cole, P. S., Coogan, A., Kavanagh, B. J., & Bertone, G. (2023). *Measuring dark matter spikes around primordial black holes with Einstein Telescope and Cosmic Explorer*. Physical Review D, 107(8), 083006.
- [12] Raithel, C. A., & Most, E. R. (2022). *Characterizing the Breakdown of Quasi-universality in Postmerger Gravitational Waves from Binary Neutron Star Mergers*. The Astrophysical Journal Letters, 933(2), L39.
- [13] Raynaud, R., Cerdá-Durán, P., & Guilet, J. (2022). *Gravitational wave signature of proto-neutron star convection: I. MHD numerical simulations*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 509(3), 3410-3426.

- [14] Al-Mamun, M., Steiner, A. W., Nättilä, J., Lange, J., O’Shaughnessy, R., Tews, I., ... & Han, S. (2021). *Combining electromagnetic and gravitational-wave constraints on neutron-star masses and radii*. Physical Review Letters, 126(6), 061101.
- [15] Krastev, P. G., & Li, B. A. (2010). *Nuclear limits on properties of pulsars and gravitational waves*. arXiv preprint arXiv:1001.0353.
- [16] Amaro-Seoane, P., Audley, H., Babak, S., Baker, J., Barausse, E., Bender, P., ... & Zweifel, P. (2017). *Laser interferometer space antenna*. arXiv preprint arXiv:1702.00786.
- [17] Silk, J. (2006). *Dark matter and galaxy formation*. Annalen der Physik, 518(1-2), 75-83.