

Kilonovien ominaisuudet ja niiden havaitseminen

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Fil. yo. Kangas Venla
Tarkastaja:
Prof. Seppo Mattila

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Kangas, Venla Kilonovien ominaisuudet ja niiden havaitseminen

Luk-Tutkielma, 17 s., 3 liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2025

Tutkielmassa esitellään kilonovien muodostumisen prosessi neutronitähdistä tai neutronitähdestä ja mustasta aukosta muodostuvan kaksoistähtijärjestelmän yhteensulautumisen tuloksena sekä käydään läpi sille tyypillisiä ominaisuuksia. Tämän jälkeen esitellään myös mahdollisten kilonovatapahtumien löytämisen ja havaitsemisen prosessi sekä annetaan esimerkkinä 2017 vuoden kilonovahavainto AT 2017gfo.

Kilonovalle, joka on supernovan ja novan kaltainen transientti-ilmiö, ominaista on esimerkiksi r-prosessi ja siihen liittyvä raskaimpien alkuaineiden muodostuminen yhteensulautumisen vapauttamassa aineessa. Muita piirteitä ovat neutronitähdistä tai neutronitähdestä ja mustasta aukosta muodostuvien kaksoistähtien yhdistymisen hetkellä muodostuvat gravitaatioaalto sekä lyhyt gammapurkaus. Tämän lisäksi kohteesta voidaan havaita monen muun aallonpituuden säteilyä.

Kilonovien löytämisessä ja havaitsemisessa gravitaatioaalto ovat tärkeässä asemassa, sillä niiden avulla voidaan löytää taivaalta paikka, jossa mahdollisesti kilonova on tapahtunut. Kilonovien tutkimuksessa käytetään gravitaatioaaltojen lisäksi myös monen eri aallonpituuden säteilyä havaitsevia observatorioita, sillä kilonova säteilee energiaa niin monella eri aallonpituudella. Itse kilonova säteilee suurimmaksi osaksi optisen ja lähi-infrapun aallonpituudella, mutta sen kanssa ilmenevä lyhyen gammapurkauksen jälkihehku koostuu suurimmaksi osaksi radio- ja röntgensäteilystä.

Tutkimusryhmien yhteistyön ja gravitaatioaaltoihin liittyvän tutkimuksen kehityksen ansiosta tutkijat ovat vihdoin löytäneet ensimmäisen, ja tähän mennessä ainoan, vahvistetun kilonovan vuonna 2017. Tutkielmassa käydään läpi tapahtuman havaitsemisen eri vaiheet ja kerrotaan tärkeimpiä tuloksia, joita saatiin tästä omalaatuisesta kilonovahavainnosta.

Asiasanat: kilonova, kaksoistähdet, gravitaatioaalto, r-prosessi, lyhyet gammapurkaukset, laserinterferometria, AT 2017gfo, GW170817

Sisällys

Johdanto	1
1 Kilonovien määritelmä ja muodostuminen	2
2 Kilonoviin liittyvät ominaisuudet	4
2.1 Gravitaatioaallot	4
2.2 R-prosessi ja raskaat alkuaineet	5
2.3 Lyhyet gammapurkaukset	7
3 Kilonovien havaitseminen	8
3.1 Gravitaatioaallot ja interferometria	8
3.2 Yhdistäminen kilonovan säteilyyn	11
4 Ensimmäinen vahvistettu kilonova: AT 2017gfo	12
5 Yhteenveto	15

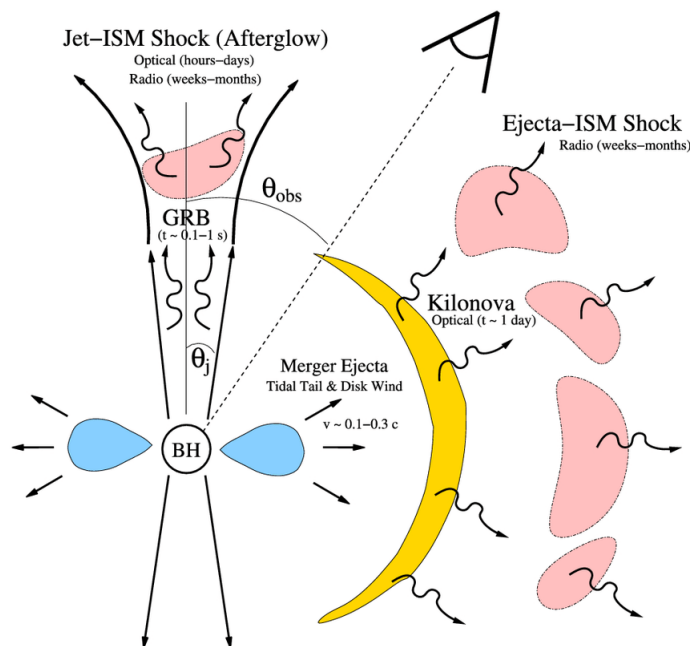
Johdanto

Tutkijoita on pitkään askarruttanut universumin raskaimpien alkuaineiden muodostuminen, sillä niille ei ole voitu löytää varmaa lähdettä. Nykyaikana on kuitenkin kyetty todistamaan melko varmasti teoria siitä, että ne voivat muodostua kilonoviksi kutsutuissa tapahtumissa, joille energian antava erittäin vahva r-prosessi mahdollistaa raskaimpien alkuaineiden, kuten lantanoidien, muodostumisen. Tämä on tehnyt kilonovista kiinnostavan tutkimushaaran tähtitieteilijöiden piirissä. [1]

Kilonoviin kohdistuvan tutkimuksen on mahdollistanut gravitaatioaaltojen havaitsemisen kehittyminen, sillä kilonova itsessään voi olla kestoaltaan erittäin lyhyt. Tämän takia niiden löytäminen vaatii tapahtumaa edeltävien gravitaatioaaltojen havaitsemisen, mikä on mahdollista LIGO:n (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) interferometrillä. Kilonovien tutkiminen esimerkiksi simulaatioiden avulla on myös mahdollistanut tarkemman tutkimuksen liittyen esimerkiksi neutronitähtien rakenteisiin sekä aikaisemmin melko tuntemattomiin lyhyisiin gammaurkauksiin. [1]

Kilonoviin liittyvän tutkimuksen pohjana on ollut vahvasti vuonna 2017 havaittu ensimmäinen varmasti kilonovaksi todettu transienttitapahtuma. Tapahtumassa pystyttiin ensimmäistä kertaa yhdistämään vaadittavat kaksi osapuolta havaintojen todentamiseen, sillä kohteesta mitattiin sekä gravitaatioaaltoja että sähkömagneettista säteilyä. [2] Tässä tutkielmassa esitetään kilonovien muodostumisen prosessi ja niille ominaisia piirteitä. Seuraavaksi käydään myös läpi niiden havaitsemisen pohjaperiaatteet ja lopuksi esitellään esimerkkinä tämä vuoden 2017 tärkeä kilonovatapahtuma.

Tutkielmassa kaikki massat on annettu Auringon massoina, josta on käytetty merkintää M_{\odot} . Tutkielmassa käytetty energian yksikkö on erg, jonka suhde jouleen on $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$. Tutkielman kirjoittamiseen ei ole käytetty tekoälyä.



Kuva 1. Kuvassa esitetään NS-NS/NS-BH yhdistymisessä vapautuvat eri osuudet kilonovasta, kuten sinisellä merkattu purkautuva aine jäännöksen tasossa sekä kartiorajana kuvattu napa-alueilta vapautuvan gamma-säteilyn purkaus (GRB) ja sen jälkihehku. Kuvassa keltaisella on merkitty kilonova itsessään ja punaisella muu säteily, kuten kiihtyvä shokkiaalto (ISM shock). Kuva: [3]

1 Kilonovien määritelmä ja muodostuminen

Kilonova, myös jossain yhteyksissä makronova, on nimitys sähkömagneettiselle säteilylle, jota havaitaan kahdesta neutronitähdestä (neutron star-neutron star, NS-NS) tai neutronitähdestä ja mustasta aukosta (neutron star-black hole, NS-BH) muodostuneen tähtijärjestelmän yhteensulautumisen hetkellä. Ne ovat nimensä mukaisesti supernovan kaltaisia transientteja, joiden kirkkaudessa tapahtuu huomattavia muutoksia lyhyen aikavälin aikana. Kilonovien kesto on yleensä päivistä viikkoihin. [3] Ilmiölle annettu nimi perustuu siihen, että niiden kirkkaus on noin kolme suuruusluokkaa suurempi kuin tavallisen novan [4]. Kilonovat toimivat sähkömagneettisina vastineina toisiaan kiertävien ja lopulta törmäävien kaksoistähtisysteemien aiheuttamille gravitaatioaaltoille, joiden avulla voidaan havaita kilonovatapahtumia ja näin NS-NS tai BH-NS kaksoistähtisysteemien yhdistymisiä. Todennettuja kilonovia on kuitenkin havaittu vasta vain yksi [3].

Kilonovien muodostuminen alkaa, kun kaksoistähtijärjestelmän osapuolet kiertävät toisiaan. Kahden tähden jokainen kierros on aikaisempaa nopeampi niiden säteillä energiaansa gravitaatioaaltoina. Energian väheneminen ja ratojen piene-
 neminen myös johtavat tähtien ajatumiseen kohti toisiaan. [5] NS-BH yhteensulautumisessa neutronitähden massa saattaa siirtyä kokonaan mustaan aukkoon, jolloin kilonovatapahtumaa ei ilmene. Jos NS-NS yhdistymisessä tähtien massasuhde on erittäin suuri, voi materiaa siirtyä myös silloin kevyemmältä painavammalle. Lopulta ne törmäävät toisiinsa, minkä aikana reaktioiden, kuten r-prosessin, vaikutuksesta emittoituu monia eri aallonpituuksia omaavaa säteilyä sekä gammapurkaus. Kilonova on nimitys näiden kaiken sähkömagneettisen säteilyn osien kokonaisuudelle, jota voidaan havaita kohteesta. [6] Tarkempi kuvaus näistä ominaisuuksista ja niiden aiheuttajista esitellään seuraavassa kappaleessa.

Kaksoistähtien törmäyksessä vapautuu myös suuri määrä materiaa, jossa kilonovalle energian antavat prosessit tapahtuvat. Näihin kuuluu napa-alueilla materian purkautuminen kartiomaisena muodostelmana, eli suihkuna (engl. astrophysical jet), ja sen mukana muodostuva jälkihehkuna tunnettu säteily. Prosessin tuottamaa materiaalia leviää ympäröivään avaruuteen myös törmäyksen jäänteen tasossa kiekon kaltaisena muodostelmana, jota kutsutaan myös torukseksi. [7] Kuvassa 1 esitetään nämä eri osuudet kilonovasta vapautuvasta materiasta ja säteilystä niin, että pysytysuunnassa on napa-alueilta vapautuvat suihkut.

Törmäyksen jälkeisille tapahtumille on erilaisia lopputuloksia riippuen kaksoistähtien ominaisuuksista sekä siitä, rakentuuko se vain neutronitähdistä vai onko mukana musta aukko. NS-NS yhdistymisen lopputuloksena on joko kooltansa normaali ja tasapainoiseksi jäävä neutronitähti tai hypermassiivinen neutronitähti, joka luhistuu melkein heti törmäyksen jälkeen mustaksi aukoksi. [3] Lopputulos riippuu sulautumisen jälkeisen jäännöksen (engl. postmerger remnant) massasta sekä pyörimisnopeudesta. Jos massa on kynnyksmassaa ($2,6-3,9 M_{\odot}$ [1]) pienempi, jäännös pyö-

syy stabiilina neutronitähtenä. Massan taas ylittäessä kynnysmassan neutronitähti, joka voi olla myös hypermassiivinen massan ollessa erittäin suuri, luhistuu mustaksi aukoksi. [8] Jos yhdistymisen jompikumpi osapuoli on musta aukko, NS-BH -yhdistymisen lopputulos on aina myös musta aukko [7].

2 Kilonoviin liittyvät ominaisuudet

2.1 Gravitaatioaalot

Gravitaatioaalot (GW) ovat yleisen suhteellisuusteorian ennustamia informaationkuljettajia, jotka kuljettavat energiaa valonnopeudella. Ne aiheuttavat pieniä häiriöitä materiassa, josta ne kulkevat lävitse. GW:t ovat tärkeä osa kilonovien tutkimuksessa, sillä ne antavat ainutlaatuista tietoa massiivisten kohteiden dynamiikasta, kuten juuri NS-NS/BH-NS -kaksoistähtisysteemien osapuolien massoista ja niiden yhteydestä kilonovan voimakkuuteen. [5] Niiden avulla voidaan myös tutkia NS-NS yhdistymisessä mukana olevien sekä lopputuloksena muodostuneen neutronitähtien rakenteita [9]. Gravitaatioaaltoja muodostuu kaksoistähtisysteemin kaikissa vaiheissa, mutta taajuudeltaan tarpeeksi korkeat havaittavaksi ne ovat vain välittömästi yhteensulautumisen tapahtuessa [5].

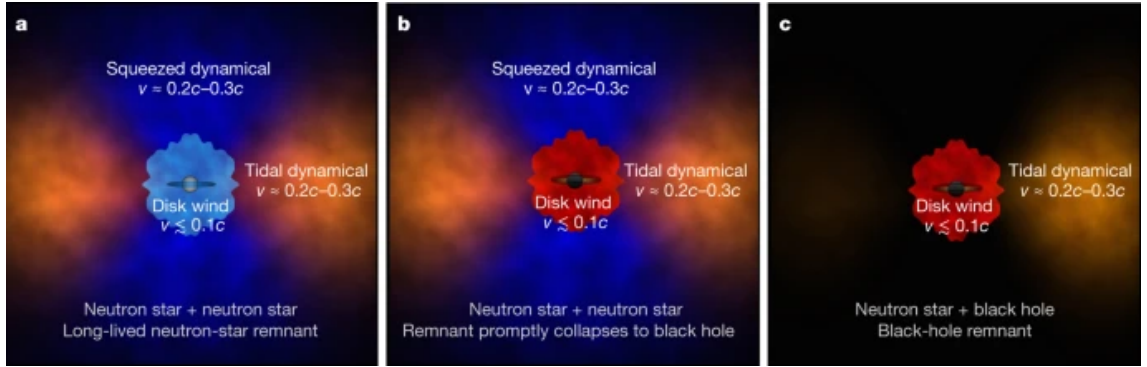
Ennen yhdistymisen tapahtumista gravitaatioaaltojen taajuus sekä amplitudi kasvavat kiertoliikkeen edetessä, kun kaksoistähtisysteemin osapuolet kiertävät toisiaan aina vain nopeammin lähestyen samalla toisiaan. Tämä johtuu siitä, että tähtien menettäessä liike-energiaansa gravitaatiosäteilynä ne lähestyvät toisiaan, jolloin myös niiden kiertoradat pienenevät ja nopeudet kasvavat. Tällöin myös gravitaatioaaltojen säteilyn taajuus kasvaa. Vaikka tämä kiertoliike kestää jopa vuosituhansia, gravitaatioaaltojen taajuus ja voimakkuus ovat tarpeeksi suuria havaittavaksi vasta loppuhetkillä. Tämä hetki voi olla vain alle sekuntin pituinen ennen yhdistymistä. Silloin taajuudet ovat enintään muutamien kilohertsien luokkaa. [4]

NS-NS yhdistymisen jälkeen oletetaan kohteen säteilevän myös yhdistymisen jälkeisiä gravitaatioaaltoja (engl. post-merger gravitational waves), joita syntyy jäljelle jääneen nopeasti pyörivän neutronitähden oskillaatioiden vaikutuksesta. Näitä aaltoja ei ole vielä havaittu, sillä käytettyjen laitteiden herkkyys on vielä liian matala. [9] Tässä vaiheessa gravitaatioaaltojen taajuus on 1500-4000 Hz, mikä on liian suuri LIGO:n detektoreille. Tämä johtuu siitä, että monien kilohertsien ylittävät taajuudet ovat mittalaitteen heikentyvän herkkyyden alueella. [8] Numeeristen simulaatioiden avulla ja neutronitähden tilan yhtälöitä tutkimalla on voitu kuitenkin arvioida minkälaisia nämä aallot olisivat. Ne ovat tunnistettavissa huomattavista piikeistä GW-spektrissä ja niiden avulla voitaisiin tutkia jäljelle jääneen hypermassiivisen neutronitähden rakennetta. Esimerkiksi spektrin pääpiikki on suoraan verrannollinen jäännätähden säteeseen. [9] Jos yhdistyminen on NS-BH-tyyppiä, tuotos on musta aukko ja se aiheuttaa taas nopean gravitaatioaaltojen amplitudin laskun. Silloin yhdistymisen jälkeisiä gravitaatioaaltoja ei havaita. [1]

2.2 R-prosessi ja raskaat alkuaineet

Nopea neutronisieppaus, eli r-prosessi, on kilonovalle päävoiman antava NS-NS/NS-BH yhdistymistilanteessa tapahtuva nukleosynteesi, jossa muodostuu rautaa raskaampia alkuaineita. On esitetty, että juuri NS-NS ja BH-NS yhteensulautumisissa tapahtuu erittäin vahva r-prosessi, ja täten kilonovat olisivat tärkeässä osassa maailmankaikkeuden raskaimpien alkuaineiden muodostamisessa. Prosessi tapahtuu suurimmaksi osaksi yhteensulautumisessa vapautuneessa materiassa paineen laskiessa. Jos materia on erittäin neutronirikasta, prosessissa muodostuu kaikista raskaimpia mahdollisia alkuaineita ($58 < Z < 90$). Jos neutronien määrä on taas alhaisempi, muodostuu vain kevyempiä alkuaineita ($28 < Z < 58$). [7]

Kun nukleosynteesistä muodostuneet nukleonit käyvät läpi radioaktiivisen hajoamisen, reaktio antaa energian sähkömagneettiselle säteilylle, eli kilonovalle. Synte-



Kuva 2. Kuvassa esitetään heikon ja vahvan r-proessin jakautuminen yhdistymisen tuottamassa materiassa riippuen siitä onko lopputulos (a) neutronitähti, (b) heti luhistuva neutronitähti vai (c) NS-BH yhdistymisessä muodostuva musta aukko. Punainen väri kuvaa vahvaa r-prosessia ja sen kautta muodostunutta punaista osuutta kilonovasta, kun taas sininen heikkoa r-prosessia ja sinistä kilonovan osaa. Kuva: [7]

soitujen alkuaineiden massasta riippuu myös kilonovaemission värijakauma, joka on yhdistelmä punaiseksi ja siniseksi nimettyjä osia. Värijakauma ei kerro itse kilonovan väristä vaan ilmoittaa minkä pituista aallonpituutta se suurimmaksi osaksi säteilee. Jos ejektoidussa materiassa protonien määrä nukleoneja kohti on matala, eli suhde on alle 0.25, tapahtuu vahvempi r-prosessi. Sen lopputuloksena syntesoituu raskaimpia alkuaineita, kuten lantanoideja, joille kilonovan emissio on lähi-infrapunan (IR) alueella ja kilonovan värinimike siis punainen. Jos suhde on suurempi kuin 0.25, syntetisoidut kevyemmät alkuaineet aiheuttavat näkyvän valon alueen kirkkaan kilonovan, jota sanotaan kilonovan siniseksi osaksi. Riippuen yhteensulautumisesta ja r-proessin tuloksista kilonova voi olla eri suhteissa yhdistelmä näistä kahdesta osasta. [10]

Heikon ja vahvan r-proessin alueet ovat jakautuneet yhdistymisen lopputuloksen materia-alueitten välillä selkeästi. Kahden neutronitähden törmäyksessä aina kertymäkiekon alueella syntetisoituu raskaampia alkuaineita, kun taas suihkujen alueella syntetisoituu kevyempiä. Jos lopputulos on pitkäikäinen neutronitähti, sen emittoima neutronisäteily heikentää kertymäkiekon protonien suhteen suuruutta. Tällöin kiekon tuuli säteilee kilonovan sinistä aluetta. Jos lopputulos luhistuu nopeasti mus-

taksi aukoksi, neutronisäteily on vähäistä ja kiekon tuulen säteily on punasävyistä. Mustan aukon ollessa toinen osapuoli yhdistymisessä heikon r-proessin kartioita ei muodostu ja kertymäkiekon säteily on suurella todennäköisyydellä enemmän punaisen osapuolen kaltaista. [10] Kuvassa 2 esitetään kilonovan kahden eri värikoodin jakautuminen eri osuuksiin vapautunutta materiaa. Kuvassa myös esitetään jakautuminen kaikissa mahdollisissa NS-NS tai NS-BH yhteensulautumisen lopputuloksista.

2.3 Lyhyet gammapurkaukset

Lyhyet gammapurkaukset, eli SGRB:t (engl. Short Gamma-Ray Bursts), ovat gammapurkauksien alaluokka, jotka ovat maksimissaan kaksi sekuntia kestäviä epäsäännöllisiä pulsseja gammasäteilyä. Ne ovat harvinaisempia kuin pidempään kestävät purkaukset, jotka ovat peräisin suuren massan omaavien tähtien ytimen luhistumisista. Lyhyet gammapurkaukset taas ovat peräisin NS-NS kaksoistähtien yhdistymisistä ja täten ovat yksi kilonovien selkeimmistä ominaisuuksista. [11] Gammapurkaukset saavat energiansa yhdistymisen jälkeisen erittäin tiheän jäänteen vapauttamasta gravitaatio- ja rotaatioenergiasta [1].

Purkauksien säteilemä energia on suuruudeltaan $10^{48} - 10^{52}$ erg, eli ne ovat kaikista energisimpiä räjähdyksiä tunnetussa universumissa, vaikkakin kestoiltaan hyvin lyhyitä. SGRB-alaluokan purkaukset ovat kuitenkin yleensä energioiltaan pienempiä kuin pidemmät purkaukset, joten kilonovien yhteydessä havaitut arvot ovat annettun välin alkuosassa. Ne ovat myös melko harvinaisia, sillä kaikki havaitut GRB:t alaluokkineen ovat peräisin kaukaisista osista universumia läheisten galaksien ulkopuolelta. Tämä tarkoittaa sitä, että uusia lähiaikoina tapahtuneita purkauksia ei juurikaan ole löydetty. [11]

NS-NS tai NS-BH yhteensulautumisen jälkeinen SGRB on havaintotietojen mukaan kollimoitunut kapeaksi suihkuksi, jonka avautumiskulma on 2–10 astetta, mikä

hankaloittaa sen havaitsemista. Tämä johtuu siitä, että kapea suihku voi helposti kulkea maapallosta ohi saapumatta millekkään havaintolaitteelle. Purkaus on myös erittäin relativistinen, eli se etenee melkein valon nopeudella. [11] Suihku muodostuu jäänteen polaarisisillä navoilla, sillä niiden alueella tiheys on pienempi verrattuna muihin jäänteen alueisiin [1]. Kun se vapautuessaan jäänteestä törmää tähtienväliseen kaasuun, syntyy relativistinen shokkiaalto, joka siirtyy ympäröivään avaruuteen. Purkautuneesta aineesta poispäin kulkeutuvan shokin lisäksi yleensä muodostuu myös toinen päinvastainen shokkiaalto, joka kulkeutuu takaisin materiaan. Jäänteen lokaalit magneettikentät kiihdyttävät shokin relativistisia elektroneja, jolloin ne emittoivat synkrotronisäteilyä shokin mukana avaruuteen. [11]

Vaikka itse SGRB on lyhyt, sitä seuraa pitkäikäinen jälkihehkuksi (engl. afterglow) kutsuttu emissio, joka muodostuu synkrotronisäteilyn vaikutuksesta. Jälkihehku muodostuu pidemmän aallonpituuden säteilystä, joka on yleensä yhdistelmä optista, röntgen- ja radiosäteilyä. Sen kesto voi olla pituudeltaan viikkoja tai jopa vuosia itse gammapurkauksen loputtua. Ominaista varsinkin kirkkaille gammapurkauksille on jälkihehkussa päivä purkauksen jälkeen havaittava suihkukatko (engl. jet break), jonka jälkeen kohteen kirkkaus himmenee huomattavasti aikaisempaa nopeammin. Joissain jälkihehkuissa on myös havaittu radiosäteilyn nopeita purkauksia. [11]

3 Kilonovien havaitseminen

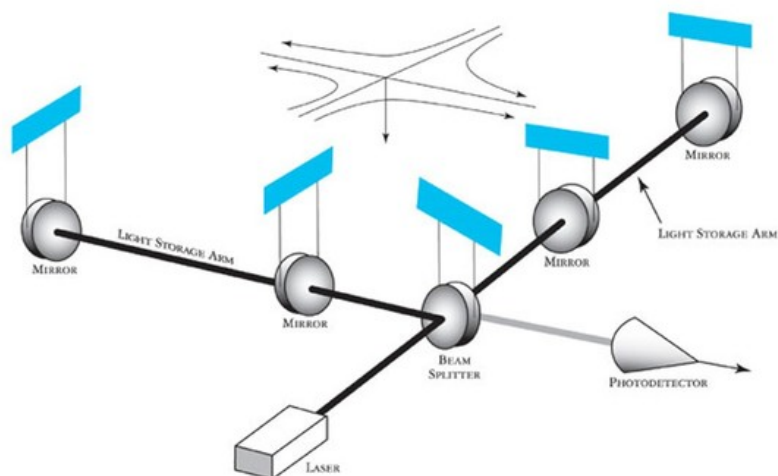
3.1 Gravitaatioaalto ja interferometria

Gravitaatioaaltojen havaitseminen sekä mittaaminen rakentaa pohjan kilonovien tunnistamiseen, sillä niiden avulla voidaan havaita NS-NS tai NS-BH kaksoistähtisysteemin yhdistyminen ennen kuin kilonovan säteily saapuu havaintolaitteille. Näin muut tutkimuslaitteet voidaan kohdistaa haluttuun taivaan osaan etsimään mah-

dollista sähkömagneettisen säteilyn tai gammapurkauksen lähteitä ja näin kilonovan merkkejä. Gravitaatioaaltojen havaitseminen on kuitenkin haastavaa toteuttaa, sillä ne vuorovaikuttavat erittäin heikosti aineen kanssa verrattuna sähkömagneettiseen säteilyyn, joka voi absorboitua, heijastua, sirotta tai taipua. Gravitaatioaalloilla tätä ei tapahdu. Positiivinen puoli kuitenkin on se, että niiden siirtämä informaatio pysyy tämän takia muokkaamattomana, vaikka se kulkisi monien eri aineiden lävitse. [12]

Nykypäivänä gravitaatioaaltoja havaitaan suurikokoisen laserinterferometrin avulla niiden tutkimista varten rakennetussa observatoriossa nimeltään LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory). LIGO:n havaintolaitteisto rakentuu oikeastaan kahdesta tällaisesta identtisestä interferometrasta. Sen kaksi osaa sijaitsevat 3 002 kilometrin etäisyydellä toisistaan, ensimmäinen Louisianan osavaltiossa Livingstonin observatoriossa ja toinen Washingtonin osavaltiossa Hanfordin observatoriossa. Kahta havaintolaitetta käytetään varmistamaan mittauksien todenpitävyys, sillä gravitaatioaalto aiheuttaa molemmissa samanlaisen poikkeaman. Näin voidaan helposti ohittaa mahdollisia virheellisiä havaintoja, jos ne ilmenevät vain toisessa osassa. Samalla tavalla mittauksien varmuus paranee, jos GW-signaalin havaitsee myös Italiassa sijaitseva LIGO:n sisarobservatorio VIRGO. [12]

LIGO:n laserinterferometri rakentuu kahdesta pitkästä L-kirjaimen muodostavasta haarasta, joiden molempien pituus yksistään on 4 km. Sen toiminta perustuu nimensä mukaisesti kahden laservalosäteiden interferenssikuvion mittaamiseen ja analysointiin. Lähteen laservalo lähetetään molempiin haaroihin vastakkaisissa vaiheissa säteenjakajan avulla, joka on kuvassa 3 haarojen leikkauskohdassa. Tämän jälkeen säteet heijastuvat haarojen päissä olevista peileistä ja palaavat takaisin säteenjakajalle, jossa ne muodostavat interferenssikuvion kuvassa 3 kartiona kuvatulle mittalaitteelle. Jos säteet kulkevat yhtä pitkät matkat, ne kohtaavat ja aiheuttavat täysin destruktiivisen interferenssin. Silloin detektorille ei saavu ollenkaan valoa ja



Kuva 3. Kuvassa esitetään esimerkkikuva LIGO:n interferometrasta, jossa laservalo lähetetään kahteen pitkään haaraan ja heijastetaan takaisin detektoreille. Kuvassa myös havainnollistettu saapuva gravitaatioaalto suoraan detektorin yläpuolelta. Kuvan light storage arm -osa kuvaa aluetta, johon rakentuu säteen edestakaisin heijastavat Fabry Perot ontelot kahden peilin välille. Kuva: Caltech/MIT/LIGO

mitään signaalia ei synny. Näin tapahtuu, jos gravitaatioaalto ei vaikuta säteiden matkalla, sillä haarat ovat normaalisti yhtä pitkät. [12]

Gravitaatioaaltojen havaitseminen perustuu siihen, että säteiden kulkiessa eri pituiset matkat ne eivät täysin kumoa toisiaan ja detektorille saapuu lyhyt valon välähdys. Gravitaatioaaltojen erikoisominaisuus mahdollistaa tällaisen tapahtuman, sillä ne aiheuttavat aika-avaruuden värähtelyitä. Värähtely venyttää aika-avaruutta yhteen suuntaan ja taas lyhentää sitä kohtisuorassa suunnassa venymissuuntaa kohtaan. Kun gravitaatioaalto kulkee interferometrin haaran lävitse, se pidentää tai lyhentää laservalon kulkemaa matkaa riippuen venymä/lyhenemä suunnasta, jonka se aiheuttaa. Silloin matka toisessa haarassa on lyhyempi kuin toisessa ja säteet kohtaavat eri vaiheissa aiheuttaen interferenssikuvion muutoksen. Laite ilmoittaa tästä saadusta signaaleista ja mittaa niiden vahvuuden. [12]

Tämä maailman suurin interferometri ei kuitenkaan yksistään ole tarpeeksi tarkka gravitaatioaaltojen havaitsemiseen, sillä gravitaatioaaltojen aiheuttamat muutokset haarojen pituuksissa ovat erittäin pieniä. Muutoksen suuruusluokka on pie-

nimmillään kymmenentuhannesosa protonin leveydestä. Mittalaitteen tarkkuutta on parannettu esimerkiksi asettamalla haarojen alkuun toiset peilit. Ne muodostavat päiden peilien kanssa Fabry Perot ontelot, joissa säde kulkee edestakaisin 300 kertaa haaran 4 kilometrin matkan ennen palaamista säteenjakajalle. Mittauksien tarkkuus paranee huomattavasti, sillä säteen efektiivinen pituus kasvaa 4 kilometristä 1200 kilometriin ja laservalon määrä haaroissa on suurempi. Tällöin gravitaatioaalton aiheuttama pieni muutos lasersäteessä saadaan mitattua. Tarkkuutta parannetaan myös pitämällä kaikki muu ylimääräinen värähtely interferometrin ulkopuolella eristämällä haarat voimakkaasti ympäristöstä. [12]

LIGO:n laitteet pystyvät havaitsemaan kohteita noin 200 Mpc:n etäisyyksillä. Havaintojen pohjalta kohteen paikka taivaalla määritetään pääasiassa kolmiomittauksen avulla, mutta signaalin ja kohinan suhde saattaa heikentää paikannuksen tarkkuutta. [1] Kolmiomittaukseen astuu mukaan taas LIGO:n kaksi eri observatoriota sekä VIRGO. LIGO:n kahdella interferometrillä kohteen paikka voidaan määrittää melko tarkasti, mutta mitä suurempi määrä interferometrejä havaitsee signaalin, sitä tarkemmin kohteen paikka voidaan määrittää. [12] Tarkkuus tällä paikannustavalla voi olla huonoimmillaan kuitenkin kymmeniä tai satoja neliöasteita. Silloin kohteen löytäminen taivaalta vaatii pidempää etsintäprosessia sähkömagneettisen säteilyn mittaamisen aikana. [1]

3.2 Yhdistäminen kilonovan säteilyyn

Jos LIGO:lla havaitaan yhdistyvälle NS-NS/NS-BH kaksoistähtisysteemille ominaisia gravitaatioaaltoja, voidaan sähkömagneettista säteilyä havaitsevat mittalaitteet kohdistaa tähän osaan taivasta. Näillä paljon tarkemmilla laitteilla voidaan paikantaa kohde kaarisekunnin tarkkuudella, jos kohteen tarkkuus on ollut heikko gravitaatioaaltohavaintojen pohjalta. Kohteen transientti-luonteen takia löytöhetken jälkeen järjestetään erittäin aktiivinen havaintokampanja, jonka aikana tapahtuneesta

mahdollisesta kilonovasta pyritään keräämään kaikki tarpeellinen tieto. Kohteesta pyritään havaitsemaan kilonoville ominaista säteilyä, kuten sen omaa optista ja lähi-IR säteilyä sekä gammapurkauksen jälkeistä pidemmän aallonpituuden jälkihehkuä. Myös itse gammapurkaus pyritään havaitsemaan. [2]

NASA:n Swift ja Fermi -avaruusteleskoopit antavat melkein kokoaikaisen näkyyden taivaasta kovien röntgen- ja gammasäteiden osalta suuren kuvakentän koksia takia. Niiden avulla voidaan havaita kilonovasta lähtevä gammapurkauksen suihku sen mahdollisesti osuessa mittalaitteelle. [2] Toinen gammapurkauksia havaitseva teleskooppi on ESA:n INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) [13] Kilonovan gammapurkauksen jälkihehku voidaan havaita röntgensäteiden aallonpituuksilla, sillä se rakentuu pidemmän aallonpituuden säteilystä. Jälkihehkun osuuksia voidaan havaita myös radiosäteilyn alueella, johon voidaan käyttää esimerkiksi LOFAR-teleskooppia (LOW Frequency ARray). [1] Toinen röntgensäteiden havaitsemiseen sopiva teleskooppi on NASA:n Chandra X-ray Observatory. [2]

Optisen ja lähi-infrapunan osuudelta havaintolaitteita on monia ja ne ovat tärkeässä asemassa itse kilonovan havaitsemiseen. Tämä johtuu siitä, että kuten aikaisemmin esitettiin, kilonovan punainen osuus on aallonpituudeltaan lähi-IR:n alueella ja sininen osuus optisella alueella. Mittauksiin voidaan käyttää esimerkiksi Hubble-avaruusteleskooppia. [1]

4 Ensimmäinen vahvistettu kilonova: AT 2017gfo

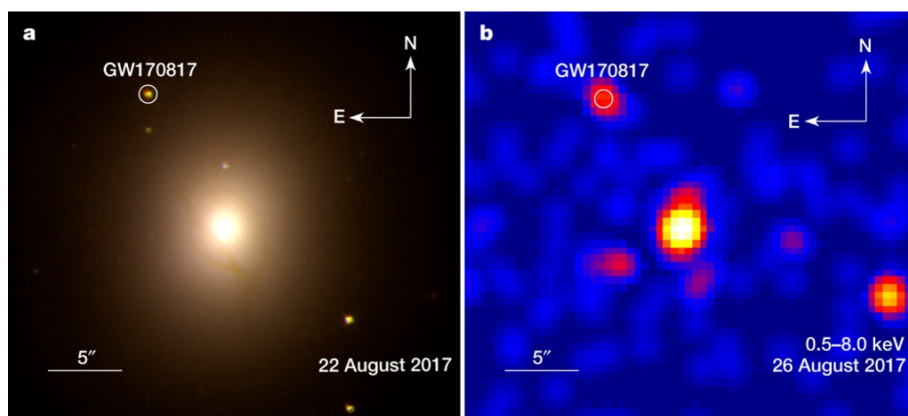
Melkein kaikki teorit kilonovien ominaisuuksista sekä niiden aikana tapahtuvista reaktioista on voitu todistaa, kun vuonna 2017 havaittiin ensimmäistä kertaa historiassa gravitaatioaaltojen ja sähkömagneettisen säteilyn yhdistävä AT 2017gfo-niminen kilonova. Havainto on tähän mennessä myös ainoa löydetty ja varmistettu kilonovatapahtuma. Myös suurin osa tilanyhtälöiden tarkemmasta määrittämisestä

simulaatioita varten perustuu tapahtumasta kerättyyn dataan. Tilanyhtälöillä tarkoitetaan simulaatioita varten muodostettuja tarkkoja matemaattisia yhtälöitä ja kaavoja, joilla pyritään kuvamaan tässä tilanteessa varsinkin neutronitähtien rakennetta sekä niiden välisiä reaktioita. [13]

Havainto sai alkunsa, kun LIGO ja Advanced VIRGO interferometrit yhdessä havaitsivat gravitaatioaalto-signaalin 17. päivä elokuuta 2017. Signaalin nimeksi annettiin GW170817 ja siitä havaittiin kompaktille NS-NS kaksoistähtisysteemille ominainen gravitaatioaaltojen taajuuden kasvu. 1,74 sekunnin kuluttua GW-signaalin saapumisesta Fermi ja INTEGRAL -satelliitit havaitsivat kohteesta lyhyen gamma-purkauksen, joka nimettiin GRB 170817A. Molempien signaalien todettiin saapuneen samasta kohteesta ja NS-NS kaksoistähtisysteemin sulautumistapahtuman sijainniksi todettiin NGC 4993 galaksin reuna-alue noin 40 Mpc:n etäisyydellä Maasta. Kuusi eri tutkijaryhmää havaitsi optisen vastakohtan näille signaaleille noin 11 tunnin kuluttua ensimmäisestä GW-havainnosta ja tälle varmistetulle kilonovalle annettiin nimi AT 2017gfo. Observaatioiden jatkuessa ryhmät havaitsivat röntgen- ja radiosäteilyn alueelta kilonovan jälkihehkun muutama päivä GW-havaintojen jälkeen. [13]

GW-havaintojen avulla tutkijat pystyivät määrittämään neutronitähtien massoiksi $m_1 \in (0.36, 1.60)M_\odot$ ja $m_2 \in (1.16, 1.36)M_\odot$, yhteisen massan ollessa noin $2.73M_\odot$. Havaitun GRB 170817A SGRB:n kesto oli noin 0.5 sekuntia ja sitä seurasi muutaman sekunnin kestänyt heikompi emissiohäntä. Purkauksen energiaksi määritettiin $3.6 \pm 0.9 \cdot 10^{46}$ erg, joka asettaa sen SGRB:n luokassa melko alhaisen energian omaavaksi purkaukseksi. Tämä ei kuitenkaan ole yllättävää, sillä koko purkausta ei saatu mitattua havaitsemiskulman suihkuun ollessa liian suuri. [13] Aikaisemmin esitettyssä kuvassa 1 näkee, miten tämä kulma voi hankaloittaa suihkun havainnointia. Kuvassa havaintokulman merkki on θ_{obs} .

Kilonova-kohteesta havaittiin kasvava emissio radio- sekä röntgenaaltoja 26.8.2017



Kuva 4. Kuvassa on esitetty miltä GW-lähde GW170817 näytti (a) Hubble teleskoopilla viisi päivää havaitsemisen jälkeen optisen aallonpituuden alueella ja (b) Chandra-teleskoopilla yhdeksän päivää havaitsemisen jälkeen röntgenaaltojen alueella. Kuvista voidaan huomata, että kilonovan optinen säteily on erittäin vahvaa ja sen röntgenaalto-jälkihehku on myös huomattava. Kuva: [2]

yhdeksän päivää gravitaatioaaltohavaintojen jälkeen Chandra X-ray Observatory -teleskoopilla. Mitatut arvot vastaavat uskotulla etäisyydellä isotrooppista luminositeettia $9 \cdot 10^{38} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. Tämä kilonovan jälkeiseksi säteilyksi tunnistettu säteily vastaa havaitun SGRB:n suurimmaksi osaksi synkrotronisäteilystä muodostuvaa jälkihehkuä. Jälkihehkuän myöhäinen saapumisaika sekä SGRB:n heikkous yhdessä viittaa tutkijoiden mukaan huomattavaan NS-NS kaksoistähtisysteemin ratatason akselin poikkeamaan suhteessa havaittsijaan. [2]

Kilonovan jatkuva tarkkailu antoi tietoa myös optisen ja lähi-IR:n säteilystä, jonka pohjalta todettiin kilonovan sinisen osuuden olleen ensin dominoiva sen hiljalleen siirtyen kohti lähi-IR:n punaista osuutta. Kilonovan absoluuttinen magnitudihuippu oli -16. [2] Verrattuna esimerkiksi supernovaan, jonka absoluuttisen magnitudin huippu on -19 ja -20, AT 2017gfo on selvästi himmeämpi. Se on kuitenkin kirkkaampi kuin normaali nova, jolle magnitudihuippu on kirkkaimmillaan -9 alueella. [14] Havaittu transientti siis oli selkeästi kirkkaampi kuin nova, mutta himmeämpi kuin supernova, joka on ominaista kilonoville.

Kuten kuvassa 4 näkee, optinen ja röntgenaalto säteily oli niin voimakasta, että purkauksessa tapahtui varmasti kilonovalle sen energian antava vahva r-prosessi.

Näiden havaintojen avulla on voitu todeta simulaatioiden ennustama kilonovien ja raskaiden alkuaineiden välinen yhteys, sillä kilonovan havaittu säteily vastasi materiaa, jossa tapahtuu r-prosessi, jonka tuloksena muodostuu raskaimpia alkuaineita. Alkuaineiden muodostumisen lisäksi voitiin todeta, että kilonovan yhteydessä ilmenee myös lyhyt gammapurkaus, sillä sellainen havaittiin samasta kohteesta kuin optinen transientti. Samalla ensimmäinen havainto kilonovatapahtumasta on myös ajanut kiinnostusta moneen tiedonkuljettajaan perustuviin (engl. multi-messenger) havaintotapoihin, joissa yhdistetään sähkömagneettisen säteilyn kuljettamiin tietoihin muun informaatiokuljettajan antamia tietoja. Kilonovien tutkimuksessa tämä toinen osapuoli on juuri niiden löytämiseen käytettävät gravitaatioaalto. [2]

5 Yhteenveto

Kilonovan ominaisuudet ja sen yhteys raskaimpiin alkuaineisiin on pitkään ollut erilaisten simulaatioiden pohjalta rakennettu teoria. Tämän ilmiön tarkka ymmärtäminen auttaisi esimerkiksi NS-NS kaksoistähtisysteemien osapuolten ja niiden yhdistymisen jäänteiden rakenteen tarkempaan tuntemukseen. Varma yhteys r-prosessin kautta muodostuviin raskaimpiin alkuaineisiin antaisi vihdoin myös selityksen niiden muodostumistavasta universumissamme, kun aikaisemmin se on ollut suuri mysteeri.

Teorioiden tueksi onnistuttiin vuonna 2017 havaitsemaan vahvistettu kilonova-ilmiö, jonka avulla teoria raskaista alkuaineista on voitu todeta oikeaksi. Saadun datan avulla myös kilonoviin liittyviä simulaatiotietoja sekä neutronitähtien tilanyhtälöitä on voitu tarkentaa ja parantaa. Tämän löydön on mahdollistanut käytettyjen teleskooppien kehitys sekä varsinkin gravitaatioaaltoihin keskittyvän tutkimuksen edistyminen. Kilonovien löytämisen pohjana toimiikin LIGO:n gravitaatioaaltojen havaitsemiseen erikoistunut interferometri, jonka tarkkuuden kasvaessa kilonovia voidaan mahdollisesti löytää suurempia määriä.

Kilonoviin keskittyvä tutkimus täten kehittää eteenpäin uutta havaintosyste-

miä, jossa sähkömagneettisen säteilyn lisäksi havaintoja tehdään muillakin tiedonkuljettajilla. Kilonovien yhteydessä tämä toinen osa on juuri gravitaatioaalto, joilla on muutenkin jo suuri merkitys nykyajan tähtitieteen tutkimuksessa. Mahdollisesti LIGO:n herkkyuden parantuessa suurempi määrä gravitaatioaaltoilähteitä pystytään yhdistämään saman kohteen sähkömagneettiseen säteilyyn, jolloin ymmärryksemme kilonovista sekä niihin johtavista tapahtumista, kuten NS-NS tai jopa NS-BH kaksoistähtisysteemien dynamiikasta, paranee.

Viitteet

- [1] R. Fernández ja B. D. Metzger, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **66**, 23 (2016).
- [2] E. Troja, L. Piro, H. van Eerten, R. T. Wollaeger, M. Im, O. D. Fox, N. R. Butler, S. B. Cenko, T. Sakamoto, C. L. Fryer, R. Ricci, A. Lien, R. E. Ryan, O. Korobkin, S.-K. Lee, J. M. Burgess, W. H. Lee, A. M. Watson, C. Choi, S. Covino, P. D’Avanzo, C. J. Fontes, J. B. González, H. G. Khandrika, J. Kim, S.-L. Kim, C.-U. Lee, H. M. Lee, A. Kuttyrev, G. Lim, R. Sánchez-Ramírez, S. Veilleux, M. H. Wieringa ja Y. Yoon, *Nature* **551**, 71 (2017).
- [3] B. D. Metzger, *Living Reviews in Relativity* **20**, (2017).
- [4] L. Baiotti, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **109**, 103714 (2019).
- [5] M. Bailes, B. K. Berger, P. R. Brady, M. Branchesi, K. Danzmann, M. Evans, K. Holley-Bockelmann, B. R. Iyer, T. Kajita, S. Katsanevas, M. Kramer, A. Lazzarini, L. Lehner, G. Losurdo, H. Lück, D. E. McClelland, M. A. McLaughlin, M. Punturo, S. Ransom, S. Raychaudhury, D. H. Reitze, F. Ricci, S. Rowan, Y. Saito, G. H. Sanders, B. S. Sathyaprakash, B. F. Schutz, A. Sesana, H. Shin-kai, X. Siemens, D. H. Shoemaker, J. Thorpe, J. F. J. van den Brand ja S. Vitale, *Nature Reviews Physics* **3**, 344 (2021).
- [6] S. Bernuzzi, M. Breschi, B. Daszuta, A. Endrizzi, D. Logoteta, V. Nedora, A. Perego, F. Schianchi, D. Radice, F. Zappa, I. Bombaci ja N. Ortiz, arXiv.org (2020).
- [7] D. Kasen, B. Metzger, J. Barnes, E. Quataert ja E. Ramirez-Ruiz, *Nature* **551**, 80 (2017).
- [8] J. Bamber, A. Tsokaros, M. Ruiz ja S. L. Shapiro, arXiv.org (2024).
- [9] C. A. Raithel ja E. R. Most, *The Astrophysical Journal Letters* **933**, L39 (2022).
- [10] N. Domoto, M. Tanaka, S. Wanajo ja K. Kawaguchi, *The Astrophysical Journal* **913**, 26 (2021).
- [11] P. Kumar ja B. Zhang, *Physics Reports* **561**, 1 (2015).
- [12] Caltech/MIT/LIGO, LIGO technology and gravitational waves, <https://www.ligo.caltech.edu/page/learn-more>, haettu 10.1.2025.
- [13] R. Margutti ja R. Chornock, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **59**, 155 (2021).
- [14] H. Karttunen, K. J. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen, *Tähtitieteen perusteet* (Tähtitieteen yhdistys Ursa, 6. laitoksen lisäpainos, 2020).