

Gravitaatioaaltojen astrofysikaaliset lähteet

Helmiukuussa vuonna 2016 vuosikymmeniä kestävä etsintä tuotti vihdoinkin tuloksen: gravitaatioaaltoista oli tehty ensimmäinen suora havainto Yhdysvalloissa sijaitsevalla LIGO laitteella. LIGO onnistui seuraamaan kahden mustan aukon yhteensulautumista galaksissa, joka sijaitsee noin 1.3 miljardin valovuoden etäisyydellä meistä. Kuten **Kari Enqvistin** artikkelissa todettiin, gravitaatioaalto ovat kvadrupolisäteilyä, joka syntyy, kun minkä tahansa massajakauman kvadrupolimomentti muuttuu. Koska gravitaatio on hyvin heikko voima, käytännön havaintojen kannalta kysymykseen tulee vain erittäin massiivisten ja kompaktien kohteiden epäsymmetriset kiihtyvät liikkeet, kuten esimerkiksi kaksoisjärjestelmän kiertoliike. Onneksemme tähtitaivaalta löytyy juuri tällaisia sopivia gravitaatioaaltojen astrofysikaalisia lähteitä, ja tässä kirjoituksessa tarkastelemmekin näiden kohteiden syntyä, kehitystä ja mahdollisuutta toimia gravitaatioaaltojen lähteinä.

Valkoiset kääpiöt: Auringon päätepiste

Oma Aurinkomme tuottaa energiaa fuusioimalla vetyä heliumiksi ytimessään, mikä tulee vielä jatkumaan karkeasti ottaen noin viisi miljardia vuotta. Vedyn loputtua Auringon ytimestä vedyn fuusio käynnistyy ensin ydintä ympäröivässä kuoressa ja myöhemmin myös heliumin fuusio Auringon ytimessä pääsee käyntiin. Koska Aurinko on verrattain kevyt tähti, fuusioreaktiot eivät etene Auringossa tämän pidemmälle ja fuusioprosessin loputtua jäljelle jää Auringon kompakti ydin ja sitä ympäröivä planetaarinen sumu, joka koostuu kaasusta, jonka Aurinko on heittänyt ulos kuolinkouristuksissaan.

Auringon jälkeen jättämä ydin on valkoinen kääpiötähti, jonka massa on noin puolet Auringon nykyisestä massasta, mutta sen säde on vain noin Maapallon säteen luokkaa. Tästä seuraa heti, että tämän kappaleen tiheys on hyvin suuri, tyypillisesti luokkaa $\rho=10^9 \text{ kg/m}^3$.

Toisin kuin tavallisissa tähdissä, valkoisessa kääpiössä gravitaatiota ei vastusta fuusiosta johtuva termien kaasunpaine. Sen sijaan valkoisia kääpiöitä estää luhitumasta elektronien aiheuttama degeneraatiopaine, joka on seurausta Paulin kieltosäännöstä. Tämä kieltää kahta samanlaista fermionia, joita myös elektronit ovat, täyttämästä samaa kvantttilaa samanaikaisesti. Epärelativistisen degeneroituneen kaasun tilanyhtälö on $P=K\rho^{5/3}$, mistä voidaan johtaa seuraavanlainen massasäde relaatio:

$$RM^{1/3} \approx 8.7 \times 10^{-3} R_{\odot} M_{\odot}^{1/3},$$

missä K on vakio, ja R_{\odot} ja M_{\odot} ovat Auringon säde ja massa. Huomiota herättävää tässä relaatiossa on riippuvuus $R \propto M^{-1/3}$, joka tarkoittaa sitä, että mitä massiivisempi valkoinen kääpiö, sitä pienempi sen säde on! Tämä on suora seuraus degeneroituneen kaasun tilanyhtälöstä, jossa paine riippuu tiheydestä, mutta ei lämpötilasta. Kaavasta näemme myös, että Au-

ringon massaisen valkoisen kääpiön säde on noin $R \approx 10^2 R_{\odot}$, joka siis aikalailla vastaa Maapallon sädetä. Degeneroitunut elektronikaasu jaksaa kannatella kompakteja valkoisia kääpiöitä, joiden massat jäävät alle niin kutsutun Chandrasekharin [1] rajan, joka on noin $1.4 M_{\text{CH}} = 1.4 M_{\odot}$.

Neutronitähtien ja tähtienmassaisten mustien aukkojen synty

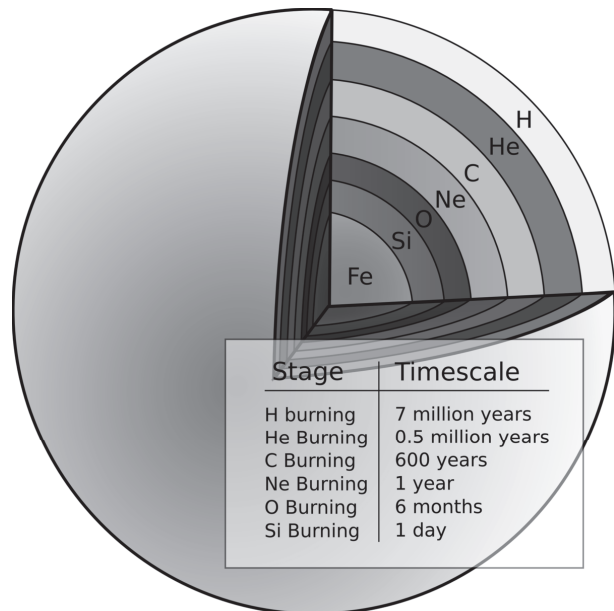
Massiivisilla tähdillä, joiden massat ylittävät noin $>8-9 M_{\odot}$, on hyvin erilainen kehityskaari. Näissä tähdissä suuri massa aiheuttaa Aurinkoa paljon suurempia lämpötiloja, jotka johtavat siihen, että nämä tähdet voivat fuusiodia raskaampia alkuaineita aina rautaan asti. Massiiviset tähdet elävät tyypillisesti vain joitakin miljoonia vuosia, ja tähtitieteellisessä mittakaavassa lyhyen elämänsä ehtopuolella näillä tähdillä on usein sipulimainen rakenne, jossa fuusiota tapahtuu useassa sisäkkäisessä kuoressa (katso kuva 1.) Tällaisessa tähdessä alkuaineet ovat jakautuneet niin, että uloimpana on kevyttä vetyä ja sisäänpäin mentäessä alkuaineiden atomipaino kasvaa, kunnes saavutetaan ydin, joka tässä vaiheessa koostuu pääosin raudasta.

Rauta on stabiilein ja lujimminkin sitoutunut alkuaine, joten rautaa fuusio ei tuota nettoenergiaa. Tähti kohtaa nyt lyhyen elämänsä suurimman henkilökohtaisen kriisin. Painovoima pyrkii jatkuvasti puristamaan sitä kokoon,

mutta nyt yhtäkkiä tähdellä ei ole enää energianlähdettä, jolla ylläpitää termistä painetta. Lisäksi koska ytimen massa ylittää Chandrasekharin massan, on seurauksena ytimen äkillinen romahdus. Romahduksen seurauksena syntyy shokkiaalto, joka yhdessä prosessissa syntyneiden runsaslukuisten neutriinujen kanssa räjäyttää tähden ulko-osat taivaan tuuliin synnyttäen täten supernovaräjähdyksen.

Tähden ydin jatkaa romahdustaan supernovasta välittämättä. Seurauksena on joko neutronitähti tai musta aukko riippuen siitä, ylittääkö ytimen massa niin kutsutun Tolman-Oppenheimer-Volkoffin (TOV) rajan. Tämä raja on analoginen Chandrasekharin rajal-

le, mutta nyt kyseessä on maksimimassa tähdelle, joka koostuu degeneroituneista neutroneista. Emme tällä hetkellä tiedä tarkkaa arvoa tälle rajalle, sillä emme tunne vielä riittävän hyvin erittäin tiheän neutroniaineen tilanyhtälöä [2]. Tyypillisesti arviot TOV-rajasta asettuvat välille $2-3 M_{\odot}$, ja arvio ainakin alarajalle voidaan määrätä havaitsemalla raskaita neutronitähtiä. Tällä hetkellä massaennätystä pitää hallussaan neutronitähti PSR J0348+0432, jonka massaksi on määritetty $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$. Mikäli tähden ytimen massa ylittää TOV-rajaa, romahtaa se suoraan mustaksi aukoksi, koska tällöin edes neutronien degeneraatiopaine ei onnistu kannattelemaan sen suurta massaa.



Kuva 1. Massiivisen tähden sipulimainen rakenne juuri ennen supernovaräjähdystä. Kuvassa olevien eri alkuaineiden fuusioprosessien kestot on arvioitu $25 M_{\odot}$ Auringon massaiselle tähdelle. [3]

Neutronitähdet

Neutronitähdillä on joukko hyvin mielenkiintoisia ominaisuuksia. Hyvin suurissa tiheyksissä elektronit yhtyvät protoneihin ja seurauksena on neutroniainetta, joka nyt toimii degeneroituneen paineen lähteenä. Koska elektronin ja neutronin massojen suhde on luokkaa $(m_e / m_n) \approx 10^{-3}$, voimme karkeasti arvioida, että Auringon massaisen neutronitähden säde on luokkaa $R_{NS} \approx 10^{-5} R_{\odot}$, joka vastaa suuruusluokaltaan noin kymmentä kilometriä.

Todellinen tilanne ei ole ihan näin yksinkertainen, koska neutronitähdissä vallitsevilla olosuhteilla meidän tulisi käyttää relativistista degeneroituneen aineen tilanyhtälöä ja kuten mainittua neutronitähtien yksityiskohtainen sisärakenne on vielä suurilta osilta tuntematon. Suuruusarvioina 15 kilometrin säde yhdistettynä $2 M_{\odot}$ massa antaa keskitiheydeksi noin $\rho = 3 \times 10^{17}$ kg/m³, joka vastaa atomiytimen tiheyttä. Neutronitähdet ovat hyvin kuumia, ja tyypilliset pintalämpötilat ovat luokkaa $T_{NS} = 5 \times 10^5$ K eli kertaluokkia suurempia kuin tavallisilla tähdillä, mutta johtuen niiden erittäin pienestä koosta termiset luminositeetit jäivät silti hyvin pieniksi.

Neutronitähdet ovat olennaisesti massiivisten tähtien romahdaneita ytimiä. Neutronitähtien syntyyn johtaneessa romahduksessa ytimen impulssimomentti säilyy ja tästä johtuen vastasynty-

neet neutronitähdet pyörivät erittäin nopeasti. Tyypilliset rotaatio-periodit ovat kymmenien millisekuntien luokkaa. Romahduksen seurauksena alkuperäisen tähden magneettikentän voimakkuus kasvaa myös hyvin suureksi, koska suurin piirtein saman verran magneettisia voimaviivoja kulkee nyt paljon pienemmän pinta-alan läpi. Lisäksi nimestään huolimatta neutronitähdet eivät koostu pelkästään neutroneista, vaan niissä on myös protoneja ja elektroneja, noin 10 % kokonaismassasta kumppaakin. Varatut hiukkaset yhdessä erittäin nopean pyörimisen kanssa pystyvät jossain määrin ylläpitämään hyvin suurta alkuperäistä magneettikenttää. Tyypillisesti magneettikenttien voimakkuudet neutronitähdissä ovat luokkaa 10^{11} - 10^{15} Gaussia.

Kaksoispulsari ja ensimmäiset epäsuorat gravitaatioaalto-havainnot

Marraskuun 28. päivänä vuonna 1967 **Jocelyn Bell Burnell** ja **Anthony Hewish** havaitsivat taivaalla säännöllisen radiopulssin, jonka periodi oli $P = 1.33$ sekuntia. Pähkäiltyään kohteen luonnetta ja nimettyään sen leikkisästi LGM-1:ksi (Little Green Men 1), he julkaisivat havainnon *Nature*ssa [4] ja päättelivät, että ilmiö liittyy joko valkosiini kääpiöihin tai neutronitähtiin, johtuen sen lyhyestä periodista.

Lisähavaintojen myötä ymmärrettiin vähitellen, että kyseinen ilmiö liittyy nimenomaan nopeasti pyöriviin neutronitähti-

in, joissa magneettikentän dipolin akseli ei ole yhdensuuntainen pyörimisakselin kanssa. Neutronitähden pyöriessä magneettikenttä muuttuu ja indusoi vahvan sähkökentän, joka kiihdyttää elektroneja ja protoneja. Magneettikentässä kiihtyvät varatut hiukkaset säteilevät synkrotronisäteilyä, joka voidaan havaita Maassa, kun neutronitähden säteilykeila majakan tavoin osoittaa kerran pyörähdysperiodissa Maata kohden. Nämä säännöllisiä radiopulsseja lähettävät tähdet nimettiin pulsareiksi (pulsar = pulsating radio star), vaikka kyse ei ole siis neutronitähtien sykkiminen. Vuonna 1974 Nobelin fysiikan palkinto myönnettiin **Martin Rylelle** ja **Anthony Hewishille** ansioista radiotähtitieteen kehittämisessä ja pulsareiden löytämisessä. **Jocelyn Bell** jäi ilman palkintoa, mikä on siitä lähtien herättänyt runsaasti polemiikkia.

Vuonna 1974 amerikkalaiset **Russell Hulse** ja **Joseph Taylor** havaitsivat pulsarin PSR 1913+16 Arecibon 305 metrisellä radioteleskoopilla ja mittasivat sille 59 millisekunnin periodin. Jatkettuaan havaintojaan kohteesta Hulse ja Taylor huomasivat, että pulsarin radiopulssien saapumisajoissa oli säännöllistä vaihtelua 7.75 tunnin periodilla. Melko nopeasti paljastui, että vaihtelu johtui toisesta kumppanitähdestä ja että kaksoistähtijärjestelmän kiertoaika oli juuri mainittu 7.75 tuntia. Toinen tähti oli sattumoisin myös neutro-

nitähti, tosin ei pulsari. Tämä voi toki johtua siitä, että tämän toisen neutronitähden orientaatio avaruudessa on sellainen, etteivät sen mahdolliset radiopulssit suuntaudu Maata kohti.

Nyt Hulsella ja Taylorilla oli käsissään täydellinen laboratorio tutkia suhteellisuusteoriaa: kahden neutronitähden järjestelmä, jonka toinen tähti lähetti säännöllistä radiosignaalia, jota tutkimalla pystyttiin hyvin tarkasti laskemaan tähtien radat ja massat. Neutronitähdet kiertävät elliptisellä radalla, jonka eksentrisyys on $e=0.6171334$ (huomaa tarkkuus!) ja radan iso-akselin puolikas on $a=1\,950\,100$ km eli noin 2.8 Auringon sädettä. Pienen rataetäisyyden ja suurten massojen johdosta suhteellisuusteoreettiset efektit ovat tärkeitä, ja voimme ennustaa miten nopeasti radan isoakselin puolikas pienenee systeemin säteillä gravitaatioaaltoja. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi kuuluisaa Petersin ja Mathewsin [5] approksimaatiota:

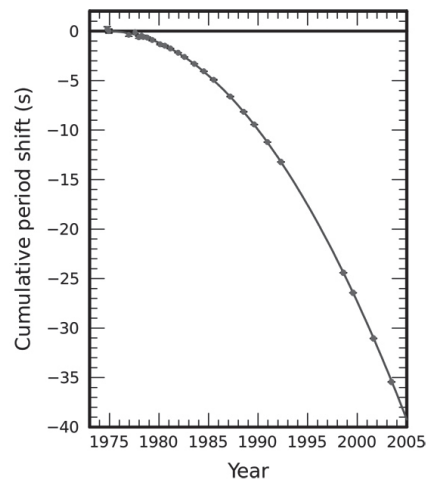
$$\dot{a} = -\frac{64 G^3 M_1 M_2 (M_1 + M_2)}{5 c^5 a^3} \left[1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right] \frac{1}{(1 - e^2)^{7/2}}$$

Kaavan \dot{a} kertoo miten radan iso-akselin puolikas muuttuu ajan funktiona, a on radan isoakselin puolikkaan tämän hetkinen arvo, e on radan eksentrisyys, M_1 ja M_2 ovat kappaleiden massat ja lopuksi G ja c ovat tutut gravitaatiovakio ja valon nopeus tyhjiössä.

Mittaamalla radan periodin pienenemistä vuosikymmenien aikana ja vertaamalla sitä suhteellisuusteorian ennusteeseen huomaamme, että järjestelmä menettää juuri suhteellisuusteorian ennustaman määrän energiaa gravitaatioaaltoina. Radan periodin muutos on noin 76.5 mikrosekuntia vuodessa, mikä tarkoittaa, että neutronitähden välinen etäisyys pienenee vuosittain noin 3.5 metriä, ja arvioitu törmäys tulee koittamaan noin 300 miljoonan vuoden kuluttua. Järjestelmän emittoima teho gravitaatioaaltoissa on noin $P=7 \times 10^{24}$ W, kun Aurinkokunnan yhteenlaskettu gravitaatioaalto teho on vain $P=5000$ W. Neutronitähden rata on kallellaan noin 45 astetta näkösuhteeseen

nähdessä, ja suhteellisuusteorian ennusteiden mukaan periastronin (kohta radalla jolloin tähdet ovat lähimmillään toisiaan) kiertyy noin 4.2 astetta vuodessa.

Kuvassa 2. on esitetty kumulatiivinen periastronin epookin muutos sekunneissa kolmenkymmenen vuoden ajalta, minkä päälle on piirretty viivana suhteellisuusteorian antama ennuste. Teorian ja havaintojen yhteensopivuus on erittäin hyvä. Tämä vahvisti, että suhteellisuusteoria toimii myös vahvoissa gravitaatiokentissä ja samalla gravitaatioaalto oli nyt ensimmäistä kertaa havaittu epäsuorasti. Näistä ansioista Russell Hulselle ja Joseph Taylorille myönnettiin vuoden 1993 fysiikan Nobelin palkinto.



Kuva 2: PSR 1936+16 kaksoisneutronitähden periastronin epookin kumulatiivinen muutos sekunneissa kolmenkymmenen vuoden ajan. Punaiset pisteet ovat havaintoja, ja niiden päälle piirretty viiva kuvaa suhteellisuusteorian ennustetta. Yhteensopivuus on erittäin hyvä. [6]

Tähtienmassaiset mustat aukot gravitaatioaaltojen lähteenä

Toistaiseksi gravitaatioaaltoja ei ole havaittu suoraan kaksois-neutronitähtijärjestelmistä. Sen sijaan molemmat tällä hetkellä vahvistetut suorat gravitaatioaaltohavainnot koskevat järjestelmiä, joissa kaksi tähtienmassaista mustaa aukkoa sulautuu toisiinsa. Tähtienmassaisia mustia aukkoja voi siis syntyä, kun riittävän massiivinen tähti romahtaa fuusio-polttoaineen loputtua ja tähden ytimen massa ylittää Tolman-Oppenheimer-Volkoffin rajan. Mutta mikä on riittävän massiivinen tässä tapauksessa?

Tähden kehitys on monimutkainen prosessi, johon vaikuttaa ennen kaikkea tähden syntymä-massa, sekä sen metallipitoisuus. Vain raskaat tähdet, joiden lähtö-massa ylittää noin $20 M_{\odot}$ voivat jättää jälkeensä mustan aukon. Kevyempien tähtien päätepiste on, kuten yllä kuvattiin, neutronitähti tai valkoinen kääpiö. Valtaosa Linnunradan tähdistä on Aurinkoa kevyempiä punaisia kääpiötähtiä. Raskaat tähdet ovat harvinaisia, ja voimmekin karkeasti arvioida, että vain noin joka tuhannes syntyvä tähti Linnunradassa on riittävän massiivinen päätyäkseen mahdollisesti mustaksi aukoksi.

Tähtitieteessä metallipitoisuudella tarkoitetaan tähden kaikkien vetyä ja heliumia raskaampien alkuaineiden yhteenlaskettua osuutta. Koska maailmankaik-

keuden baryoninen aine koostuu lähinnä vedystä ja heliumista, ovat metallipitoisuudet melko pieniä, esim. noin 2 % Auringon tapauksessa. Metallit ovat tärkeitä, koska ne vaikuttavat merkittävästi tähdistä lähteviin ulosvirtauksiin ja täten siihen, paljonko tähdet menettävät massaansa elämänsä aikana. Ensimmäisessä approksimaatiossa tähtiä voidaan pitää mustan kappaleen säteilijöinä, ja tällaiselle kappaleelle säteilypainne on tunnetusti

$$P_{rad} = \frac{4\sigma}{3c} T^4,$$

missä σ on Stefan-Boltzmannin vakio ja T on lämpötila. Auringon atmosfäärissä säteilypainne ei ole kovin tärkeässä roolissa, ja Auringosta havaittu aurinkotuuli johtuukin muutoksista Auringon magneettikentässä.

Mutta Aurinkoa kuumemmissa ja massiivisemmissä tähdissä säteilypainne kasvaa nopeasti tärkeäksi tekijäksi. Mikäli metallia on tähden atmosfäärissä paljon, on olemassa useampia mahdollisia atomisiirtymiä, joiden kanssa säteily voi vuorovaikuttaa johtaen siihen, että suurempi osuus säteilyn liikemäärästä siirtyy kaasuun. Lisäksi ulosvirtaukset voimistuvat merkittävästi tähden myöhemmissä vaiheissa, kun se on paisunut punaiseksi jättiläiseksi, koska kasvaneen säteen johdosta tähden pintagravitaatio on nyt selvästi heikompi. Aurinko menettää aurinkotuulella massaa noin 10^{-14}

M_{\odot}/yr vuosivauhtia. Massiivisilla tähdillä ulosvirtaukset voivat olla miljoonia kertoja suurempia, luokkaa 10^{-9} - $10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$ ja punaisessa jättiläisvaiheessa peräti $10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$.

Helmikuussa julkaistussa ensimmäisessä suorassa gravitaatioaaltohavainnossa (GW150914) nähtiin kuinka $36 M_{\odot}$ ja $29 M_{\odot}$ massaiset mustat aukot yhtyivät $62 M_{\odot}$ massaiseksi mustaksi aukoksi säteillen samalla noin $3 M_{\odot}$ verran edestä gravitaatioaaltoja [7]. Alkuinnostuksen jälkeen tämä havainto aiheutti jonkin verran pääavaivaa tähtitieteilijöille, koska molemmat mustat aukot olivat yllättävän massiivisia. Jotkut tutkijat ehdottivat jopa ehdottamaan, että kyseessä ei ollutkaan tähdistä syntyneiden mustien aukkojen yhteensulautuminen, vaan esimerkki niin kutsuttujen primordiaalisten mustien aukkojen sulautumisesta [8]. Primordiaaliset mustat aukot ovat hypoteettisia mustia aukkoja, joita joissain malleissa voi syntyä hyvin varhain alkuräjähdyksen jälkeen.

Ongelman ydin oli siinä, että massiiviset tähdet, joiden lähtömassat ovat luokkaa 60 - $100 M_{\odot}$, menettävät selvästi yli puolet alkuperäisestä massastaan elämänsä aikana useimmissa tähtituulimalleissa. Tällöin on vaikea ymmärtää, miten voitaisiin synnyttää näinkin raskaita mustia aukkoja, koska vain tähden ydinosat romahtavat lopulta mustaksi aukoksi. Havainto näin massiivisista

mustista aukoista oli selvä merkki siitä, että alkuperäisillä tähdillä oli ollut varsin pienet metallipitoisuudet ja täten heikot tähtituulet, mikä oli mahdollistanut riittävän suuret romahdusmassat.

Lisämausteensa soppaan tuo myös se seikka, että koska kyseessä on kahden mustan aukon järjestelmä ovat myös alkuperäiset tähdet olleet osana kaksoistähti-järjestelmää. Tämä tarkoittaa, että kahden tähden välillä on voinut tapahtua massan siirtoa ennen supernovaräjähdyksiä ja mustiksi aukoiksi romahtamista. Kesällä julkaistiinkin Nature-lehdessä yksityiskohtainen mallinnus [9], joka osoitti miten pienen metallipitoisuuden omaava massiivinen kaksoistähti voi johtaa kahteen massiivisen mustaan aukkoon, joiden yhteensulautuminen sitten myöhemmin havaittiin LIGO:lla.

Toinen suora havainto gravitaatioaaltoista (GW151226), joka oli tehty viime vuoden tapaninpäivänä, oli ensimmäistä signaalia heikompi, ja tässä tapauksessa noin $14.2 M_{\odot}$ ja $7.5 M_{\odot}$ massaiset mustat aukot yhtyivät noin $20.8 M_{\odot}$ massaiseksi mustaksi aukoksi [10]. Tässä tapauksessa LIGO onnistui seuraamaan musta aukko parin 27 viimeistä ratakierrosta viimeisen sekunnin aikana, jolloin rataajuus nousi 35:stä 450:een Hertziin.

Ensimmäisessä havainnossa onnistuttiin seuraamaan vain 0.2 sekunnin aikana viimeiset 10 ratakierrosta, vaikka itse signaalin

amplitudi oli tässä ensimmäisessä sulautumisessa suurempien masojen ansiosta kolme kertaa toista havaintoa suurempi. Pidempi rata-seuranta mahdollistaa tarkemmat suhteellisuusteorian testit. Pienemmät mustien aukkojen massat olivat myös tähtitieteilijöiden kannalta tervetullut ja huojentava uutinen. Useimmat tähtien kehityksen mallit ennustavat tyypillisille mustille aukoille juuri massoja, jotka ovat $5-15 M_{\odot}$ välillä, ja myös Linnunradassa tähän asti löydetty mustat aukot asettuvat tyypillisesti tähän massahaitariin.

Ottaen huomioon, että hyvin massiivisten musta aukko parien havaitseminen on tällä hetkellä helpompaa, ei ehkä ollutkaan niin yllättävää, että ensimmäiseksi havaittiin juuri todennäköisesti epätyypillinen hyvin raskaiden mustien aukkojen kaksoisjärjestelmä. Kun havaintoja tulee lisää, voimme pikkuhiljaa saada selvemmän kuvan siitä, millaisia mustia aukkoja maailman-kaikkeudessa on. Vähän samaan tyyliin olemme eksoplaneetatutkimuksessa edenneet muutamasta havaitusta planeetasta tuhansiin eksoihin, joiden avulla voimme jo sanoa jotain tilastollisesti merkittävää Linnunradan planeetta populaatiosta.

Supermassiiviset mustat aukot gravitaatioaaltojen lähteenä

Tutkitaan vielä lopuksi supermassiivisten mustien aukkojen kehitystä, ja miten niiden törmä-

yksissä syntyviä gravitaatioaaltoja voitaisiin mahdollisesti havaita tulevaisuuden havaintolaitteilla. Supermassiiviset mustat aukot ovat nimensä mukaisesti hyvin massiivisia, ja ne sijaitsevat tyypillisesti galaksien keskustoissa. Esimerkiksi oman Linnunrata-galaksimme keskustassa lymyää musta aukko, jonka massa on noin 4.3 miljoonaa Auringon massaa.

Lisäksi on olemassa havaittu korrelaatio galaksien massojen ja niiden keskustojen mustien aukkojen välillä, siten että massiivisimmat mustat aukot sijaitsevat massiivisimmissa galakseissa. Kuten kaikissa empiirisissä korrelaatioissa, tässäkin on hajontaa, mutta olisimme hyvinkin yllättyneitä, mikäli jättiläisgalaksin ytimestä löytyisi hyvin pieni musta aukko ja toisin päin. Supermassiivisten mustien aukkojen massat vaihtelevat pienien galaksien noin $10^5 M_{\odot}$ massaisista aina noin yli $10^{10} M_{\odot}$ massaansa, kuten esim. suomalaistenkin hellimässä OJ 287-kvasaarissa, jossa tätä äärimmäisen massiivista mustaa aukkoa kaiken lisäksi kiertää vielä toinen noin $10^8 M_{\odot}$ massainen musta aukko kiertoradalla, jonka periodi on noin 12 vuotta [11].

Havainnot suurilta punasiirtymiltä eli varhaisesta maailman-kaikkeudesta ovat myös osoittaneet, että hyvin massiivisia mustia aukkoja, joiden massat ylittivät $10^9 M_{\odot}$, oli olemassa jo noin 800 miljoonaa vuotta alkuräjähdyksen jälkeen [12]. Tämä on jossain mää-

rin yllättävää ja vaikeasti selitettävissä. Standardiselytyksen mukaan ensimmäiset mustat aukot syntyivät, kun varhaiset tähdet romahtivat supernovaräjähdyksissä, minkä seurauksena syntyi 100 Auringon massan luokkaa olevia mustia aukkoja (ensimmäiset tähdet olivat todennäköisesti keskimäärin massiivisempia kuin nykyiset tähdet).

Seuraavaksi mustien aukkojen pitää kasvattaa massojaan, mikä onnistuu parhaiten syömällä kaasua, jota oli runsain mitoin varhaisissa galakseissa, joissa ensimmäiset tähdet syntyivät. Kun kaasu syöksyy kohti mustaa aukkoa, se samalla kuumenee hyvin voimakkaasti. Tämä kuuma kaasu säteilee voimakkaasti ja osa säteilystä kytkeytyy takana tulevaan kaasuun aiheuttaen säteilypainetta, joka estää kaasun putoamisen mustaan aukkoon. Kansanomaisesti sanottuna mustia aukkoja ei voi pakko-syöttää, koska liian suuri putoava kaasun määrä aiheuttaa voimakkaan säteilyryöpyä, joka puskee kaasua takaisin. Tasapainotilassa, musta aukko syö kaasua pallomaisesta pilvestä maksiminopeudella kuitenkin puhaltamatta kaikkea pois. Tasapainotilan maksimiluminositeettia kutsutaan Eddingtonin luminositeetiksi ja se riippuu vain luonnonvakioista ja mustan aukon massasta:

$$L_{edd} = \frac{4\pi GM_{BH}m_p c}{\sigma_T} = 3.2 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) L_\odot$$

Kaava on seuraus siitä, että gravitaatiolla ja säteilypainella on sama $\propto r^{-2}$ riippuvuus. Painovoima vaikuttaa ensisijaisesti proto-neihin, kun taas säteilypainee vaikuttaa elektroneihin vapaiden elektronien Thomsonin sironnan vaikutuspinta-alan σ_T kautta. Elektrostaattisesta voimasta johtuen protonit kuitenkin seuraavat elektroneja ja saadaan yllä oleva kaava Eddingtonin luminositeetille.

Mikäli yhden Auringon massainen musta aukko säteilisi sen maksimiluminositeetilla, olisi sen luminositeetti huimat 32000 kertaa suurempi kuin Auringon luminositeetti. Tämä valtava valovoima ei luonnollisesti tule suoraan mustasta aukosta, vaan sitä ympäröivästä kertymäkiekosta, jossa on hyvin kuumaa kaasua. Ehkä hieman paradoksaalista, mutta mustien aukkojen ympäristössä kuumeneva kaasu on maailmankaikkeuden selvästi tehokkain tapa tuottaa energiaa. Parhaimmillaan jopa 42 % kaasun lepomassasta voi muuttua energiaksi, ja tyypillinen arvo on noin 10 %. Verrattuna tähdissä tapahtuvaan vety-helium fuusioon tämä on huima luku, koska fuusioprosessin hyötysuhde on vain 0.7 %.

Johtuen Eddingtonin luminositeetin asettamista rajoituksista on viimeisten vuosien aikana kehitetty myös vaihtoehtoinen malli supermassiivisten mustien aukkojen synnyttämiseksi varhaisessa

maailmankaikkeudessa. Tässä niin kutsutussa ”direct collapse black hole” (DCBH) mallissa suuret 10^4 - $10^5 M_\odot$ massaiset kaasupilvet romahtavat suoraan verrattain massiivisiksi mustiksi aukkoiksi. Tutkitaan seuraavaksi miten tämä voisi olla mahdollista.

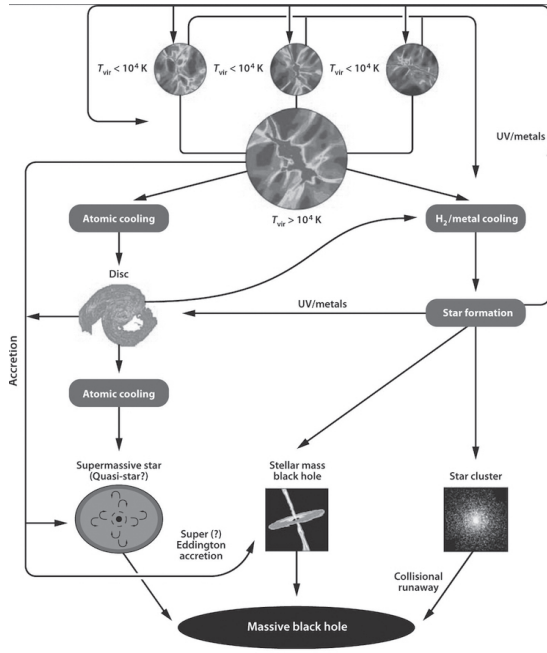
Mikäli otamme tämän päivän Linnunradasta suuren kaasupilven ja aiheutamme siihen häiriön niin että se lähtee romahtamaan, on seurauksena suuri tähti joukko, joka koostuu sadoista tai tuhansista tähdistä. Tämä johtuu siitä, että kaasun jäähtyminen on hyvin tehokasta, minkä seurauksena kaasu fragmentoituu useaan eri osapilveen, jotka kaikki sitten erikseen romahtavat omiksi tähtijärjestelmikseen.

Varhaisessa maailmankaikkeudessa jäähtyminen ei ole tehokasta varsinkaan matalilla alle 10 000 K lämpötiloilla, jotka ovat tärkeitä tähtien synnyn kannalta. Syynä on se, että varhaisessa maailmankaikkeudessa ei ole vielä metalleja, koska niitä ei ole ehtinyt muodostua tähdissä. Maailmankaikkeus koostuu siis yksinomaan vedystä, heliumista ja tietenkin pimeästä aineesta. Vety ja helium ovat hyvin tehotomia kaasun jäähdytyksessä erityisesti matalilla lämpötiloilla, koska näillä alkuaineilla on olennaisesti rajoitettu määrä atomisiirtymiä. Monimutkaisilla alkuaineilla (eli metalleilla) on puolestaan useampia siirtymiä, joita hyväksi käyttäen kaasu voi jäähtyä.

Varhaisessa maailmankaikkeudessa ainut tapa jäädyttää kaasua matalilla lämpötiloilla on molekulaarinen vety, joka on tosin varsin tehoton säteilijä. Tästä huolimatta se onnistuu jäädyttämään kaasua ja täten kättilöimään ensimmäisten tähtien syntyä. Mutta mikäli kaasupilvessä ei ole molekulaarista vetyä, koska se on tuhoutunut esimerkiksi ulkoisen säteilykentän vaikutuksesta, ei kaasussa ole kuin atomaarista vetyä.

Teoreettiset laskelmat ja myös yksityiskohtaiset hydrodynaamiset simulaatiot ovat osoittaneet, että tässä tapauksessa kaasua jäähtyy pelkästään atomaarisen vedyn toimesta, mikä johtaa hyvin suurten kaasupilvien romahtamiseen ilman fragmentaatioita täten synnyttäen mahdollisesti suoraan 10^4 - $10^5 M_{\odot}$ massaisia mustia aukkoja. Nyt kun syntyneet mustat aukot ovat saaneet jo tekijällä 100 tai 1000 etumatkaa tähdistä syntyneisiin mustiin aukkoihin nähden, on paljon helpompi selittää miten ne ehtivät kasvaa miljardin Auringon massaisiksi muutamassa sadassa miljoonassa vuodessa. Kuvassa 3. esitetään havainnollisesti kaasupilvien kehitysvaihtoehdot varhaisessa maailmankaikkeudessa.

Oma tutkimusryhmäni Helsingissä on tutkinut tätä aihetta tiivistä tekemällä hydrodynaamisia simulaatioita, jotka sisältävät myös mallin säteilynkuljetukselle. Olemme osoittaneet, että skena-



Kuva 3: Skemaattinen kuvaus kaasupilven vaihtoehtoisista kehityskuluista varhaisessa maailmankaikkeudessa. Mikäli pilvessä on molekulaarista vetyä, seurauksena on tähtijoukko, mutta mikäli jokin prosessi tuhoaa molekulaarisen vedyn voi lopputuloksena olla suora romahdus supermassiiviseksi mustaksi aukoksi. [15]

rio missä syntyy kaksi galaksia lähes samanaikaisesti voi johtaa siihen, että ensimmäisen galaksien tähtien säteily tuhoaa molekulaarisen vedyn juuri sopivasti toisesta syntyvästä galaksista. Täten toiseen muodostuvaan galaksiin voi syntyä suuri musta aukko kaasupilven suorassa romahduksessa [13].

Mikä parasta, meidän ja muiden ryhmien tekemät simulaatiot ovat saaneet hiljattain tukea havainnoista, jotka viime vuonna osoittivat ensimmäistä kertaa, että tällaisia kohteita saattaa olla

olemassa maailmankaikkeudessa. Havaittu kohde CR7 (virallisesti Cosmos Redshift 7, mutta julkaisun portugalilaisen päätekijän mukaan oikeammin Cristiano Ronaldo 7 [14]) sijaitsee punasiirtymällä $z=6.604$. Kohteen vedyn ja heliumin spektriviivojen suhteelliset voimakkuudet sekä se ettei kohteessa ole minkäänlaisia merkkejä metalleista, viittaavat siihen, että kyseessä voisi tosiaankin olla suorasta romahduksesta syntynyt supermassiivinen musta aukko.

Nykyisillä maanpäällisillä havaintomenetelmillä, kuten LIGO,

emme voi havaita supermassiivisten mustien aukkojen törmäyksestä johtuvia gravitaatioaaltoja, koska suurempien massojen ja pitempien kiertoaikojen johdosta niistä tulevien gravitaatioaaltojen taajuudet on aivan liian pieniä nykyinstrumenteille. Mutta seuraavan sukupolven avaruusinterferometriä kuten ESA:n eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna), joka on tarkoitettu laukaista avaruuteen vuonna 2034, on optimoitu juuri supermassiivisten mustien aukkojen havaitsemiseen. Tässä laitteessa havaintointerferometriä kantojen etäisyydet olisivat 5 miljoonaa kilometriä LIGO:n 4 kilometrin sijaan.

Tarvittavaa teknologiaa testataan jo, ja viime vuoden lopulla ESA:n laukaisema LISA Pathfinder-satelliitti on ylittänyt kaikki odotukset mittaustarkkuudellaan, mikä lupaa hyvää varsinaisen avaruusinstrumentin kannalta. Supermassiivisten mustien aukkojen yhdistymiseen liittyvä loppuanssi voi kestää vuosia, ja näitä tansseja pitäisi olla useita käynnissä samanaikaisesti eLISAN mitausalueella, joka ulottuu satojen miljoonien valovuosien päähän. Mikäli laite saadaan toimimaan

moitteettomasti voikin edessä olla surkuhupaisa tilanne, gravitaatioaalto-signaalia tulee aivan ”liikaa” joka suunnasta ja voi olla vaikeata tunnistaa oikeat signaalit kakofonian keskeltä. Toistaiseksi olemme kuulleet vain muutamat kaikkien äänekkäimmät gravitaatioaalto-signaalit. Nyt kun uusi havaintoikkuna maailmankaikkeuteen on vihdoinkin avattu, on mahdollista, että tulemme löytämään jotain täysin uutta, jota kukaan ei ole osannut edes aavistaa.

Viitteet

- [1] S. Chandrasekhar, "An introduction to the study of stellar structure", (University of Chicago press 1939)
- [2] Kurkela, A. & Vuorinen, A., 2016, Physical Review Letters, 117, 042501
- [3] A.C. Phillips, "The Physics of Stars", 2nd Edition (Wiley, 1999)
- [4] Hewish, A., Bell, S.J., Pilkington, J.D.H., Scott, P.F., Collins, R.A., 1968, Nature, 217, 709
- [5] Peters, P.C. & Mathews, J., 1963, Physical Review, 131, 435
- [6] Weisberg, J.M. & Taylor, J.H., 2005, Conference proceedings in Stars. Binary Radio Pulsars. ASP Conference Series, Astronomical Society of the Pacific, page 25: Arxiv: astro-ph/0407149
- [7] LIGO, Abbott et al., 2016, Physical Review Letters, 116, 1102

- [8] Kashlinsky, A., 2016, Astrophysical Journal, 823, 25
- [9] Belczynski, K., Holz, D.E., Bulik, T. O'Shaughnessey, 2016, Nature, 534, 512
- [10] LIGO, Abbott et al., 2016, Physical Review Letters, 116, 1103
- [11] Valtonen, M. et al., 2008, Nature, 452, 851
- [12] Mortlock, D.J. et al., 2011, Nature, 474, 616
- [13] Regan, J.A., Johansson, P.H., Wise, J.H., 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 461, 111
- [14] Katsokaa internetistä, mikäli ette ole kuulleet Cristiano Ronaldosta.
- [15] Regan, J.A. & Haehnelt, M., 2009, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 396, 343

Kirjoittaja Peter Johansson on astrofysiikan apulaisprofessori Helsingin yliopistossa.