

Tähden hajoaminen TDE-tapahtumassa mustan
aukon painovoimakentän vaikutuksesta

LuK
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Fil. yo. Joe Korte
Tarkastaja:
Prof. S.Mattila

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Korte, Joe Tähdien hajoaminen TDE-tapahtumassa mustan aukon painovoimakentän vaikutuksesta

LuK, 23 s., 3 liites.

Fysiikka

Kesäkuu 2025

Tässä työssä tarkastellaan Tidal Disruption Event (TDE) -tapahtumia, joissa tähti ajautuu liian lähelle supermassiivista mustaa aukkoa ja repeytyy sen voimakkaiden vuorovesivoimien seurauksena. Osa tähden aineksesta sinkoutuu avaruuteen, kun taas osa jää mustan aukon painovoiman vangiksi ja muodostaa sen ympärille kertymäkiekon. Tämä prosessi synnyttää voimakasta säteilyä eri aallonpituuksilla, mikä tekee TDE-tapahtumista erinomaisen välineen havaita ja tutkia normaalisti passiivisia eli 'nukkuvia' supermassiivisia mustia aukkoja.

Työssä käydään läpi mustien aukkojen perusominaisuudet ja niiden merkitys modernissa fysiikassa ja kosmologiassa. TDE-tapahtumien avulla voidaan tutkia mustien aukkojen massaa, pyörimistä sekä kertymäprosessin eri vaiheita. Esimerkiksi Swift J1644+57 on osoitus tapahtumasta, jossa havaittiin relativistinen suihku – lähes valonnopeudella liikkuva, kapeasti suuntautunut plasmapurkaus.

Erityisesti työssä keskitytään TDE-tapahtumien yhteydessä havaittavaan radiosäteilyyn. Radiosäteily syntyy kolmella päämekanismilla: relativististen suihkujen törmäyksestä ydintä ympäröivään materiaaliin, lievästi relativististen ulosvirtausten vuorovaikutuksesta mustan aukon ympäristöön sekä tähden jäännösaineksen iskeytymisestä galaksin keskustan kaasuun. Nämä prosessit kiihdyttävät hiukkasia ja tuottavat synkrotronisäteilyä, jota voidaan havaita radiotaajuuksilla.

Radiohavainnot tarjoavat ainutlaatuisen mahdollisuuden tutkia TDE-tapahtumien jälkiseurauksia pitkällä aikavälillä. Toisin kuin optinen tai röntgensäteily, radiosäteily voi jatkua useita vuosia, mahdollistaen mustan aukon ja sen ympäristön vuorovaikutuksen tarkkailun pitkäaikaisesti. Lisäksi radiohavainnot auttavat mallien ja simulaatioiden hienosäädössä, kaventaen kuilua teorian ja havaintojen välillä.

TDE-tapahtumat tarjoavat näin monipuolisen ja dynaamisen tutkimusikkunan mustien aukkojen fysikaaliseen luonteeseen, niiden ympäristöön sekä koko galaksien kehitykseen.

Asiasanat: Tähtitiede, Musta aukko, TDE-tapahtuma, Radiosäteily

Sisällys

Johdanto	1
1 Mustat Aukot	2
1.1 Mustien aukkojen perusteet	4
1.2 Miksi mustia aukkoja tutkitaan?	8
2 TDE-tapahtumat	10
2.1 Miksi TDE-tapahtumia tutkitaan?	12
3 Radio säteily TDE-tapahtumissa	17
Yhteenveto	20

Johdanto

Mustat aukot ovat universumin kiehtovimpia ja arvoituksellisimpia asioita. Ne ovat äärimmäisen tiheitä massakeskittymiä, joiden painovoima on niin voimaksas, ettei edes valo pääse pakenemaan niistä. Mustia aukkoja on kolmessa kokoluokassa, tähdenmassaiset, keskimassaiset ja supermassiiviset. Havaintojen perusteella melkein jokaisessa suuren galaksin keskustassa sijaitsee supermassiivinen musta aukko. Näin myös meidän kotigalaksissa. Vaikka mustia aukkoja on tutkittu pitkään, niihin liittyy edelleen paljon asioita joita emme vielä ymmärrä.

Yksi tapa mustien aukkojen havaitsemiselle ja tutkimiselle on Tidal Disruption Event (TDE) -tapahtumien avulla. Nämä syntyvät, kun tähti ajautuu liian lähelle supermassiivista mustaa aukkoa ja repeää mustan aukon painovoiman aiheuttaman vuorovesivoiman takia. Tämä prosessi tuottaa kirkkaan säteilypurkauksen. Säteilypurkaus voi kestää kuukausista jopa vuosiin ja se voidaan havaita eri aallonpituuksilla, kuten röntgen-,UV- ja radio. Tämä tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden havaita ja tutkia mustia aukkoja, joita ei pystytä suoraan havaitsemaan.

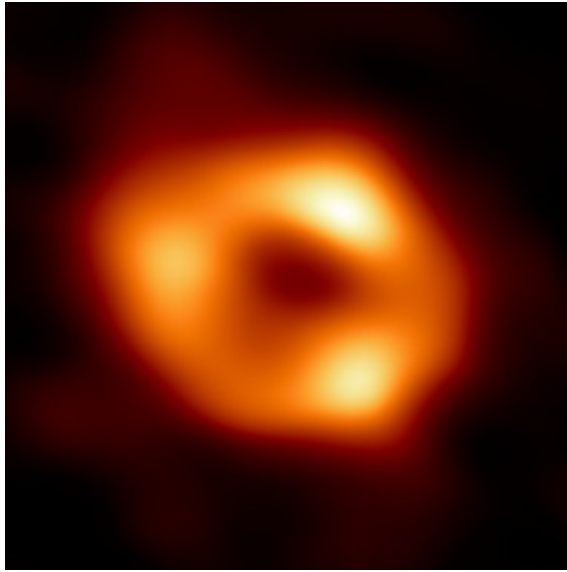
Tämän työn tavoitteena on tarkastella syitä mustien aukkojen tutkimiselle, TDE-tapahtumia sekä niiden merkitystä mustien aukkojen tutkimisessä. Työssä käsitellään myös TDE-tapahtumissa syntyvää radiosäteilyä ja sen hyödyntämistä mustien aukkojen ympäristön analysoimisessa. Mustien aukkojen ja TDE-ilmion ymmärtäminen on keskeistä paitsi tähtitieteen, myös koko kosmologian kannalta, sillä ne antavat tietoa galaksien kehittymisestä ja universumin rakenteesta.

1 Mustat Aukot

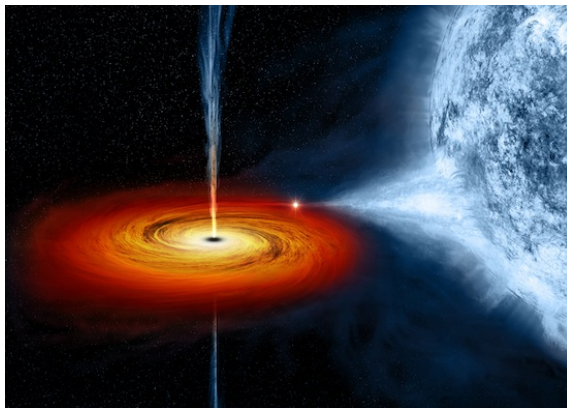
Mustat aukot ovat avaruuden mielenkiintoisimpia ja kummallisimpia asioita [2]. Mustissa aukoissa on singulariteetti, raja, jossa kaikki tunnetut luonnonlait lakkaavat pätemästä [4]. Edes Albert Einstein, yleisen suhteellisuusteorian isä, ei uskonut niiden olemassa oloon [4]. Niiden painovoima on niin suuri ettei edes valo pääse sitä karkuun [2][4]. Linnunradan keskiössä on supermassiivinen musta aukko Sagittarius A* (Sgr A*). Kuvassa 1 EHT:n (Event Horizon Telescope) ottama kuva Sagittarius A*:sta [1][2][4]. Sen massa on noin neljä miljoonaa kertaa suurempi kuin auringon ja on 26 000 valovuoden päässä maapallosta [1][2]. EHT:n onnistuneet kuvat Sagittarius A*:sta paljastivat kirkkaan rengasmaisen rakenteen mustan aukon varjon ympärillä. Renkaan halkaisija on $51.82\mu as$, joka vastaa mustan aukon etäisyyden ja massan perusteella tehtyjä ennusteita. Renkaan epäsymmetrinen kirkkaus johtuu gravitaatiolinssistä, jossa maata kohti liikkuva materiaali vaikuttaa kirkkaamalta sen relativistisen nopeuden takia. Nämä havainnot vahvistavat entisestään sitä, että Sgr A* on pyörivä ns. Kerrin musta aukko.[34]

Einstein ennusti ensimmäisenä mustien aukkojen olemassaolon vuonna 1915 yleisellä suhteellisuusteoriallaan [2][4]. Kymmenen vuotta Einsteinin kuolemasta Iso Britannialainen teoreetikko Roger Penrose osoitti, että mustia aukkoja voi muodostua ja kuvasi niiden ominaisuuksia[4]. Mustat aukot olivat vuosikymmenten ajan olemassa vain teoreettisesti ennen tätä [2]. Ensimmäinen kuva mustasta aukosta saatiin vasta vuonna 2019 EHT:n avulla.[1][2]

Cygnus X-1 on yksi kirkkaimmista maasta havaituista röntgensäteilyn lähteistä. Se löydettiin vuonna 1964 avaruudesta tulevan säteilyn avulla. Myöhemmin tähtitieteilijät päättelivät säteilyn tulevan kirkkaasta sinisestä tähdestä joka kiertää outoa pimeää kohdetta. Ehdotettiin että havaittu säteily olisi seurausta siitä että kirkkaasta tähdestä revittyä materiaalia("Stellar material") päätyi kyseisen pimeän kohteen "nielaisemaksi". Kuva 2 on kuvitelmakehu tästä tilanteesta. Tämän takia Cygnus



Kuva 1. Kuvassa Sagittarius A [39]



Kuva 2. Kuvitelma kuva Cygnus X-1:sta [38]

X-1 luokitellaan ensimmäiseksi löydettyksi mustaksi aukoksi.[3]

Mustat aukot eivät säteile valoa tai heijasta sitä, mikä käytännössä tekee niistä näkymättömiä teleskoopeille [1]. Tieteilijät havaitsivat ja tutkivat niitä pääasiassa sen perusteella miten ne vaikuttavat ympäristöönsä [1]. Mustat aukot voivat olla kaasu ja pöly renkaiden ympäröimänä, näitä kutsutaan kertymäkiekoiksi jotka säteilevät valoa monilla aallonpituuksilla, mukaan lukien röntgen [1]. Supermassiivisen mustan aukon voimakas painovoima voi saada tähdet kiertämään sen ympärillä tietyllä tavalla [1]. Tähtitieteilijät seurasivat useiden tähtien kiertoratoja lähellä Linnunradan keskustaa todistaakseen että, siellä on supermassiivinen musta aukko.[1] Tarpeaksi

kaukaa niiden gravitaatiovaikutukset ovat samanlaiset kuin muiden saman massan omaavien kohteiden. Materian putoamista mustaan aukkoon ei myöskään voida havaita, mutta tutkijat voivat havaita kertymäkiekon joka synnyttää suurienergistä säteilyä.[1][12]

1.1 Mustien aukkojen perusteet

Musta aukko on äärimmäisen tiheä aika-avaruuden massakeskittymä, jonka painovoima estää kaiken, jopa valon, karkaamisen [4]. Rajaa jonka takaa edes valo ei palaa kutsutaan tapahtumahorisontiksi [2]. Mustassa aukossa on singulariteetti. Tätä termiä käytetään kuvaamaan pistettä, joka on äärettömän pieni ja äärettömän tiheä.

Palataan tapahtumahorisonttiin ja singulaarisuuteen myöhemmin. Perehdytään nyt vähän tarkemmin mitkä ovat Mustien aukkojen muita ominaisuuksia. Kuten jo mainittu edes valo ei pysty pakenemaan mustasta aukosta. Sen takia pakonopeuden mustasta aukosta on ylitettävä valonnopeuden. Pakonopeuden kaava on

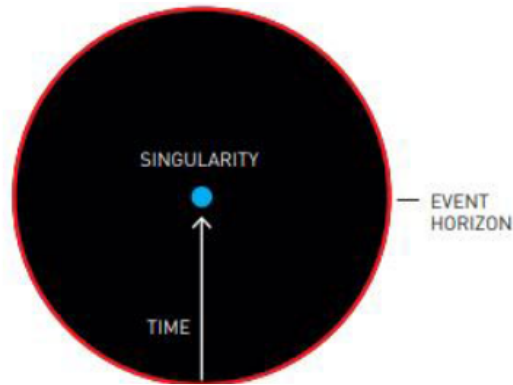
$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}, \quad (1)$$

kun kappale on etäisyydellä r pallomaisesta massasta M ja G on gravitaatiovakio. Kun pakonopeus on valonnopeus c niin etäisyydeksi tulee Schwarzschildin säde[13]

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (2)$$

Mustan aukon tekninen määritelmä on mikä tahansa kohde, jonka massa on pakkautunut säteelle, joka on pienempi kuin sen Schwarzschildin säde [14][36]. Linnunradan Schwarzschildin säde on noin 12 miljoonaa kilometriä [36]. No-hair teoreeman mukaan, sillä on vain kolme fyysistä ominaisuutta: massa, varaus ja pyörimismäärä. Nämä ominaisuudet ovat erityisiä siksi, että ne ovat havaittavissa mustan aukon ulkopuolelta.[15]

Palataan nyt tapahtuma horisonttiin ja singulariteettiin. Aloitetaan tapahtumahorisontista. Niin, kuin aiemmin totesimme. Tapahtumahorisontti on mustan aukon



Kuva 3. Yksinkertaistettu kuva mustasta aukosta. [4]

rajapinta, jonka sisäpuolelta mikään, ei edes valo, voi paeta. Tapahtumahorisontti on usein kuvattu rajana, jossa mustan aukon pakonopeus ylittää valonnopeuden. Kuvasssa 3 tämä rajapinta on merkitty punaisella. Horisontin sisällä liikkuminen kohti singulariteettia on riippumatonta hiukkasen suunnasta tai valitusta aika-avaruuden koordinaatistosta. Materia voi ylittää tapahtumahorisontin rajan vain siis yhteen suuntaan. [16][17]

"Fundamental gravitational collapse models" mukaan tapahtumahorisontti muodostuu ennen mustan aukon singulariteettia [18]. Singulariteetti on piste mustan aukon keskellä jossa kaikki fysiikan lait lakkaavat olemasta. Yleinen suhteellisuusteoria ennustaa, että singulariteetti on piste, jossa aine pakkautuu äärettömään tiheyteen. Se on lopullinen määränpää kaikelle, joka putoaa tapahtumahorisonttiin. Singulariteetti voi olla joko fyysinen rakenne tai puhtaasti matemaattinen. Ennuste singulariteetista voi kertoa suhteellisuusteorian rajoista, joissa kvanttiefektit, jotka eivät sisälly teoriaan, ovat tärkeitä painovoiman kokonaisvaltaisemmassa kuvauksessa. Singulariteettia ei siis pystytä selittämään pelkästään yleisen suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan avulla, vaan niiden selittämiseen tarvitaan "quantum gravity".[19][20]

Nykyisen tiedon mukaan mustat aukot syntyvät kahdella eri tavalla. Molemmat syntyvät perustuvat gravitaatiromahdukseen.(Gravitational collapse) Ne voivat

myös kasvaa ajan kuluessa "syöden" kaasua tai jopa muita mustia aukkoja [2][7]. Periaatteessa mustia aukkoja voi myös muodostua korkeaenergisissä törmäyksissä, jotka saavuttavat riittävän tiheyden.[5][21]

Ensimmäisen syntyvän mukaan mustat aukot ovat tähtien raatoja, eli ne syntyvät kun masiiviset tähdet kuolevat. Kaikki tähdet eivät kuitenkaan jätä jälkeensä mustia aukkoja. Jotta näin tapahtuisi, tähden massan on oltava noin 20 kertainen meidän aurinkoon verrattuna. Kun ne ovat käyttäneet kaiken polttoaineen eli vedyn ne räjähtävät ja muodostuvat todella tiheiksi, mustiksi aukoiksi. Kun pienemmän massan omaavat tähdet ovat polttaneet loppuun niiden vedyn niistä tulee neutroni tähtiä tai valkoisia kääpiöitä.[2][4][7][8]

Toinen tapa mustien aukkojen muodostumiselle on kaasun suora romahtaminen. Tämän prosessin uskotaan tuottavan massiivisempia mustia aukkoja, joiden massa vaihtelee tuhannesta Auringon massasta jopa sataan tuhanteen. Tämä tapa ohittaa perinteisen tähden muodostumisen ja sen uskotaan toimineen varhaisessa maailman-kaikkeudessa, luoden massiivisten mustien aukkojen siemeniä. Tätä siemenluokkaa ehdotettiin alun perin teoreetiseksi ratkaisuksi supermassiivisten mustien aukkojen varhaiselle muodostumiselle punasiirtymässä. Mutta supermassiivisten mustien aukkojen muodostuminen on edelleen aktiivinen tutkimuksen kohde. Eli on mahdollista, että on olemassa jokin muu tapa muodostaa musta aukko, jota emme vielä tiedä.[2][5][7]

Mustat aukot jaetaan yleensä kolmeen kategoriaan niiden massojen perusteella: tähden-massa, keskimassa ja supermassiivinen. Kun tähti jonka massa on vähintään kahdeksan kertainen aurinkoon nähden on käyttänyt polttoaineensa loppuun sen ydin romahtaa ja se räjähtää supernovana. Se, mitä jää jäljelle, riippuu tähden massasta ennen räjähdystä. Jos tähden massa oli noin 20 kertainen auringon massa nähden tähden ydin romahtaa tähdenmassaiseksi mustaksi aukoksi. Tähdenmassaiset mustat aukot voivat kerätä massaa törmäyksissä tähtien ja muiden

mustien aukkojen kanssa.[6][7][8][9]

Supermassiiviset mustat aukot ovat mustista aukoista suurimpia. Niiden massa voi olla sadoista tuhannista aina miljooniin tai jopa miljardeihin kertoihin suurempi kuin auringon massa. Melkein jokaisessa suuressa galaksissa mukaan lukien Linnunradalla on keskiössään supermassiivinen musta aukko. Kuten mainittu supermassiivisten mustien aukkojen alkuperä on edelleen mysteeri. Kaukana olevien galaksien havainnot kertovat, että jotkut supermassiiviset mustat aukot muodostuivat ensimmäisten miljardien vuosien aikana universumin syntymisestä. On mahdollista, että kyseiset mustat aukot alkoivat muodostua aikaisessa universumissa supermassiivisten tähtien romahtamisesta, mikä antoi niille etumatkaa. Vaikka niiden alkuperä onkin mysteeri, tutkijat tietävät, että supermassiiviset mustat aukot voivat kasvaa "syömällä" pienempiä kohteita, kuten tähdenmassan suuruisia mustia aukkoja ja neutronitähtiä. Ne voivat myös yhdistyä toisiin supermassiivisiin mustiin aukkoihin galaksien törmätessä toisiinsa. Tämän takia on mahdollista, että supermassiiviset mustat aukot ovat muodostuneet monista pienemmistä mustista aukoista, jotka ovat sulautuneet toisiinsa.[2][22]

Kokoero tähdenmassaisten ja supermassiivisten mustien aukkojen välillä on hämmentävä. Mustien aukkojen pitäisi olla koon suhteen jatkuva sarja, koska kosmisen ajan kuluessa tähdenmassaisten mustien aukkojen välisten törmäysten olisi pitäneet luoda keskimassaisia mustia aukkoja. Näiden tulisi olla kooltaan noin sadasta sataantuhanteen kertaan Auringon massasta – tai kymmenistä tuhansista, riippuen siitä, miten supermassiiviset mustat aukot määritellään. Tutkijat etsivät aktiivisesti esimerkkejä näistä niin sanotuista mustien aukkojen puuttuvista linkeistä. Useita ehdokkaita on tunnistettu, mutta niiden vahvistaminen on osoittautunut vaikeaksi.

[2][7]

1.2 Miksi mustia aukkoja tutkitaan?

Mustien aukkojen tutkiminen on avainasemassa, kun pyrimme ymmärtämään universumin perustavanlaatuisia ilmiöitä. Ne tarjoavat ainutlaatuisen testialustan yleiselle suhteellisuusteorialle ja paljastavat tietoa äärimmäisissä olosuhteissa tapahtuvista fysikaalisista ilmiöistä. Lisäksi niiden tutkiminen edistää teknologista kehitystä: uusien havaintomenetelmien ja laskentamallien kehittäminen ei ainoastaan auta avaruustutkimuksessa, vaan voi johtaa myös arkisempien innovaatioiden, kuten parempien kuvantamis- ja tietojenkäsittelytekniikoiden syntyyn. Mustien aukkojen tutkimus voi jopa antaa vihjeitä kvanttigravitaation kaltaisista syvemmistä fysikaalisista laeista, ehkä johdattaen meidät kohti uusia käsityksiä avaruudesta ja ajasta.[2][4][11]

Mustat aukot toimivat laboratorioina suhteellisuusteorian ja kvanttifysiikan testaamiselle siitä miten teorit ovat yhteydessä toisiinsa. Yleinen suhteellisuusteoria ennustaa mustat aukot. Se ei kuitenkaan yksinään pysty selittämään singulariteettia. Singulariteetin selvittäminen on inspiroinut mustien aukkojen kvantti luonteen tutkimista. Tämä on kuitenkin luonut informaatiokadon paradoxin. Paradoxin mahdollinen ratkaisu on avannut oven yhdelle uudelle fysiikan teorialle, joka selittäisi mustiin aukkoihin liittyvän fysiikan yksityiskohtaisesti. Kyseinen teoria on kuitenkin vielä fyysikoilla työn alla. Vaikka mustat aukot tuovat epävarmuutta jo olemassa oleville teorioille, ne voivat toimia alustoina todistaa teorioiden todenmukaisuutta esim. havaitsemalla niiden törmäyksiä todisti Einsteinin teorit siitä miten massa, avaruus ja aika liittyvät toisiinsa.[4][10][23]

Mustien aukkojen tutkiminen on muuttunut vuosien saatossa puhtaasta teoriasta empiiriseen tutkimukseen ja lopulta siitä on tullut pääsuuntautuminen teoreettiselle fysiikalle ja tähtitieteelle. Tämä johtuu suurelta osin 2000-luvun useista teknologisista kehityksistä. Samaan aikaan mustien aukkojen tutkimisen tavoitteiden ja niihin vaadittavat tarpeet ovat edistäneet teknologian kehitystä. Tämä on johtanut moniin

mullistaviin teknologioihin, joilla on suuri arvo modernissa elämässä.[23]

Seuraavaksi kaksi esimerkkiä teknologioista jotka ovat saaneet alkunsa mustien aukkojen tutkimisesta. Datan käsittelymenetelmät lääketieteellisessä kuvantamisessa, jotka johtivat tietokonetomografian ja magneettikuvantamisen keksimiseen suunniteltiin alunperin synteettiseen apertuuri teknologiaan. Kyseinen teknologia kehitettiin radiointerferometriaan, joka ratkaisi yhden antennin huonon resoluution aiheuttamat ongelmat kvasaarien tutkimisessa. Monet mustat aukot säteilevät röntgensäteilyä. Eli mustien aukkojen havaitseminen perustuu osilta röntgensäteilyn vastaanottimien tarkkuuteen. Tarve havaita heikkoja röntgen säteitä on luonut matalan valaistuksen korkean resoluution röntgenkuvaustekniikoita. Kyseistä teknologiaa on myöhemmin käytetty laajasti turvatarkastuksissa, laatu tarkastuksissa ja monilla muilla aloilla.[23]

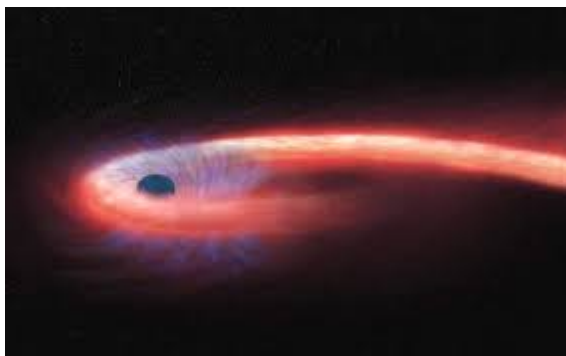
2 TDE-tapahtumat

TDE (Tidal disruption event) tapahtuu, kun tähti ajautuu liian lähelle SMBH:ta (supermassive black hole, supermassiivinen musta aukko). Tällöin tähti repeytyy mustan aukon voimakkaiden vuorovesivoimien takia. Etäisyyttä, jolla SMBH:n vuorovesivoimat ovat yhtä suuria kuin tähden painovoima (self-gravity), kutsutaan tidal disruption radius R_t , joka riippuu tähden säteestä R , massasta M ja SMBH:n massasta M_{BH} .

$$R_t \approx R \left(\frac{M_{BH}}{M} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

Linnunradan keskustan mustan aukon vuorovesisäde, jos kohde tähtenä on aurinko on 110 miljoonaa kilometriä, kun auringon säde on 696 000 kilometriä. Tämän Schwarzschildin säde on 12 miljoonaa kilometriä. 1970-luvulla teorisoitiin, että TDE:t voisivat olla mahdollisia polttoaineen lähteitä AGN:lle (active galactic nuclei). AGN eli aktiiviset galaksiytimet ovat galaksien keskustoja, joissa on erittäin kirkas ja energinen alue. Tämä kirkkaus johtuu siitä, että galaksin ytimessä on supermassiivinen musta aukko. Myöhemmin tuli selväksi, ettei TDE:t yksinään riittäneet ylläpitämään kirkkaiden kvasaarien vaativaa tasaista kertymävirtausta. Sen sijaan TDE:t todettiin hyviksi työkaluiksi SMBH löytämiselle, koska TDE:t tuottavat kirkkaan purkauksen, joka voi kestää jopa muutaman vuoden ajan.[24][25][26][27]

TDE-tapahtumassa tähden materia kokee pystysuuntaista venytystä ja vaakasuoraa puristumista muodostuen ouheksi pitkäksi muodoksi, kuten kuvassa 4. Tämä materia muodostaa kertymäkiekon mustan aukon ympärille. Musta aukko kuluttaa kertymäkiekkoa hiljalleen, kunnes kuukausien tai vuosien jälkeen TDE-tapahtuma on loppunut. Kertymäkiekon avulla TDE-tapahtumat tuottavat sähkömagneettista säteilyä, joka voidaan havaita useilla aallonpituuksilla, kuten röntgen-, UV-, näkyvä valona ja radioaalloilla. Optimaalisissa olosuhteissa TDE:n kertymäkiekot voivat laukaista relativistisia suihkuja ja tuulia. Näiden purkausten ansiosta TDE:t ovat keskeisessä asemassa SMBH tutkimuksessa, sillä ne olisivat muutoin havaitse-



Kuva 4. Kuvitelma kuva TDE-tapahtumasta [37]

mattomia. Ne tarjoavat tärkeitä tietoja mustien aukkojen ominaisuuksista, kuten massasta, pyörimisestä ja esiintyvyydestä. Tämä antaa tähtitieteilijöille mahdollisuuden tutkia mustien aukkojen demografiaa kaukasiin punasiirtymiin asti. Tämä on todella tärkeää tietoa selvittääksemme galaksien muodostumisprosessia, joka on tiiviisti sidoksissa SMBH kosmologisen kehityksen kanssa.[25][27]

SMBH havaitsemisen lisäksi TDE:t tarjoavat ainutlaatuisen mahdollisuuden tutkia kertymäkiekonfysiikkaa, relativistisia vaikutuksia ja suihkujen muodostumista eri kertymäkiekontiloissa. Niiden ajasta riippuvat emissiot muodostavat luonnollisen laboratorion, auttaen tähtitieteilijöitä ymmärtämään, miten mustat aukot nielevät materiaa. Viimeisimmät edistysaskeleet avaruuden tutkimuksissa ovat huomattavasti helpottaneet TDE:itten havaitsemista.[24][27]

Vaikka TDE:n alussa tapahtuva tähden hajoaminen on hyvin ymmärretty, niin myöhemmän vaiheen tapahtumat, kuten kertymäkiekon kehitys ja suihkun muodostuminen, ovat edelleen tutkimuksen kohteita. Näiden tutkimisessa käytetään apuna analyyttisiä malleja ja hydrodynaamisia simulaatioita. Lisäksi TDE tapahtumiin voi liittyä myös gravitaatioaaltoja ja shokkeja. [25][26]

2.1 Miksi TDE-tapahtumia tutkitaan?

Monet SMBH:t eivät säteile merkittävästi, jolloin ne ovat vaikeasti havaittavissa. Eli 'nukkuvat' SMBH:t pysyvät näkymättömissä ilman TDE:n kaltaista tapahtumaa. Kuten aiemmin mainitsin TDE-tapahtumissa syntyy kirkas purkaus joka säteilee useilla aallonpituuksilla, mukaan lukien röntgensäteet, UV ja optinen valo. Nämä purkaukset voivat kestää kuukausista vuosiin. Tämä tekee muutoin piilossa olevien SMBH havaitsemisen ja tutkimisen mahdolliseksi.[24][26][27]

Havaitsemalla TDE-tapahtumia on löydetty SMBH sellaisista galakseista joissa ei ole aiemmin ollut mitään todistusaineistoa niiden olemassaolosta. Tutkimuksissa, joissa käytettiin Sloan Digital Sky Survey (SDSS) ja Zwicky Transient Facility (ZTF) teleskooppeja havaittiin TDE:n mukaisia purkauksia, nämä havainnot johdattivat SMBH löytämiseen galakseista, joissa ei tiedetty niitä olevan. Tällä tapaa TDE:t toimivat luonnollisina merkkeinä SMBH löytämiselle kosmisten etäisyyksien halki.[24][26][27]

Mainitsin aikaisemmin vaikeuksista keskimassaisten mustien aukkojen vahvistamisesta. Niitä on vaikea havaita, koska ne eivät ole yhtä yleisiä kuin tähdenmassaiset. Tässä TDE-tapahtumat tulevat avuksi. Keskimassaiset mustat aukot voivat myös aiheuttaa TDE-tapahtumia, jolloin niiden painovoima tuhoaa liian lähelle tulleen tähden. Nämä tapahtumat luovat voimakkaita, lyhyt ikäisiä säteilypurkauksia. Esimerkiksi CSS 161010 säteilyn nopea nousu ja lasku sekä äärimmäinen kirkkaus indikoivat nopeaa ulosvirtausta, joka johtuu materian putoamisesta mustaan aukkoon. Mustan aukon arvioitu massa on 10^3 ja 10^5 auringon massaa, vihjaten keskimassaiseen mustaan aukkoon. Havaittu paluuaianjakso (fallback timescale), joka mittaa kuinka kauan tähtijäänteellä kestää palata mustaan aukkoon, tukee tätä luokitte-
lua. TDE:t, kuten CSS 161010 auttavat vahvistamaan IMBH:den olemassaolon.[35]

TDE:t tarjoavat suoran tavan arvioida SMBH massoja. Tähdien ominaisuudet eivät riipu mustasta aukosta, mutta muodostuva kertymäkiekko ja syntyvä säteily

riippuvat sen massasta ja spinistä. Analysoimalla TDE:n kirkkautta ja spektriä voidaan arvioida mustien aukkojen massoja. Tutkimusten mukaan mustat aukot joiden massa on $10^5 - 10^8 M_\odot$ (M_\odot on auringon massa) ovat todennäköisempiä tuottamaan havaittavissa olevan TDE-tapahtuman.[26]

Mustan aukon spin on tärkeä mutta vaikeasti mitattavissa oleva ominaisuus, mutta tämäkin voidaan päätellä TDE:stä. Se miten tähtijäänteet kiertävät ja kertyvät mustan aukon ympärille voivat paljastaa spin riippuvaisia relativistisia vaikutuksia. Jos TDE tuottaa relativistisen suihkun kuten Swift J1644+57 vihjaa se nopeasti pyörivästä SMBH jolla on vahva magneettikenttä.[24][26][27]

TDE-tapahtuma antaa erinomaisen mahdollisuuden tutkia kertymäkiekon fysiikkaa ja tuulien sekä suihkujen muodostumista. Kertymä on prosessi jossa materia 'putoaa' mustaan aukkoon, muuttaen gravitaationaalisen potentiaalienergian säteilyksi. TDE:t tuottavat luonnollisen laboratorion tutkia kertymää sen eri vaiheissa, super-Eddingtonista aina ala Eddingtoniin. Tähtijäänteen puotamisnopeus mustaan aukkoon vaikuttaa kertymäkiekon kehitykseen.[27]

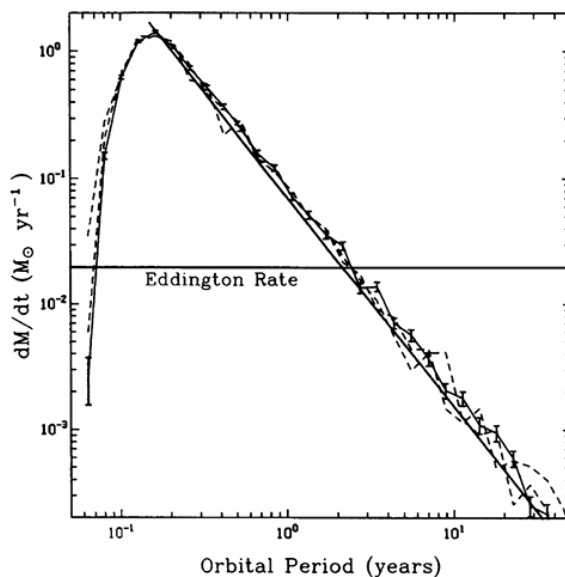
Eddingtonin luminositeetti on teoreettinen maksimi tähden tai kertymäkiekon kirkkaudelle kun ulospäin suuntautuva säteilyvoima ja sisäänpäin suuntautuva gravitaatiovoima ovat tasapainossa. Kertymäkiekon sisäosan kaikki vetyatomit ovat ionisoituneet koska lämpötila on yli $10^5 K$. Eddingtonin luminositeetti mustalle aukolle on

$$\mathbf{L}_{Edd} = \frac{4\pi c G M_{BH}}{k_{es}} \approx 1.26 \times 10^{44} \left(\frac{M_{BH}}{10^6 M_\odot} \right) \text{erg s}^{-1}, \quad (4)$$

k_{es} on Thomsonin sironnan opasiteetti. Vedylle $k_{es} = \frac{\sigma_T}{m_p} = 0.4 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$ jossa m_p on protonin massa ja σ_T on Thomsonin vaikutusala. Tätä vastaava Eddingtonin raja kertymä määrälle on

$$\mathbf{M}_{Edd} = \frac{L_{Edd}}{nc^2} \approx 0.022 \left(\frac{n}{0.1} \right)^{-1} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot} \right) M_\odot \text{ yr}^{-1}, \quad (5)$$

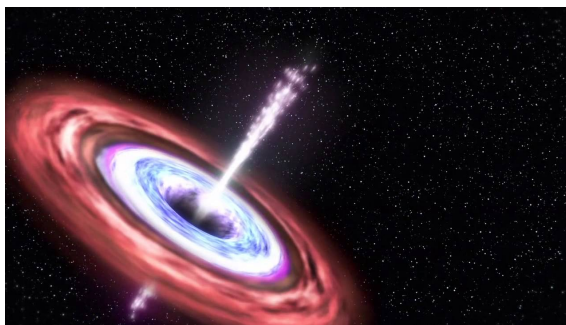
jossa $n \equiv \frac{L}{(Mc^2)}$ on kertymän säteilytehokkuudenkerroin. Kirjallisuudessa n arvo on yleensä 10 %. [27]



Kuva 5. Kuvaajassa materia kertymäärä ajan funktiona. Eddington Rate tarkoittaa Eddingtonin rajaa [27]

TDE:n kertymäkiekko käy läpi eri vaiheita. Super-Eddington on TDE:n aikaisessa vaiheessa oleva kertymäkiekon olomuoto. Materia putoamisnopeus mustaan aukkoon voi ylittää Eddingtonin rajan, johtaen geometrisesti ja optisesti paksuun kiekkoon. Tämä vaihe tuottaa vahvoja ulosvirtauksia ja säteily paineen ajamia tuulia. Ohut kiekko vaihe tulee ala Eddingtonia myöhemmin. Kun kertymä aste pienee, kiekko muodostuu ohueammaksi rakenteeksi, muistuttaen AGN:issä havaittuja tavallisia kertymäkiekkoja. ADAF (Advection-Dominated Accretion Flow) vaihe esiintyy todella matalilla kertymä asteilla. Kiekosta tulee säteilyn suhteen tehoton, suurin osa energiasta ohjautuu mustaan aukkoon säteilyn sijaan.[27]

TDE:n kertymäkiekot usein tuottavat vahvoja tuulia, jotka voivat syntyä eri tavoilla. Yksi näistä tavoista on säteilypaineen aiheuttama. Tällöin voimakas säteily kertymäkiekosta super-Eddington vaiheessa voi sylkeä materiaa ulospäin muodostaen tiheitä, optisesti paksuja tuulia. MHD (Magnetohydrodynaamiikka) prosessit voivat myös aiheuttaa tuulia, tällöin magneettikentät siirtävät pyörimismäärää ulospäin, päästään materiaalin karkaamaan. Lisäksi kertymäkiekon muodostuessa,



Kuva 6. Kuvitelma kuva Swift J1644 +57 TDE-tapahtumasta [40]

törmäykset tähtijäännevirtauksissa voivat luoda shokkeja jotka lämmittävät kaasua ja muodostavat voimakkaita virtauksia ulospäin. Kertymäkiekko kuvattuna oranssina renkaana mustan aukon ympärillä kuvassa 6. TDE:itä tarkkailtaessa, kuten ASASSN-14li on löydetty erittäin nopeita tuulia, jotka liikkuvat merkittäväillä murto-osilla valonnopeudesta. Nämä tuulet vaikuttavat korkea energisen röntgen säteilyn jälleenkäsittelyyn optiseksi ja UV-valoksi. Tämä selittää miksi jotkin TDE:t näkyvät kirkkaina UV/optisilla aallonpituuksilla, mutta himmeiltä röntgen aallonpituuksilla.[27]

Tuulet ovat suhteellisen yleisiä TDE-tapahtumissa, kun taas relativistiset suihkut syntyvät vain tietyissä olosuhteissa. Suihkut ovat erittäin kollimoituneita plasmasäteitä, jotka kulkevat lähes valonnopeudella ja ne liittyvät usein vahvoihin magneettikenttiin [24][26][27][28]. Kuvassa 6 suihku on mustan aukon keskeltä tuleva valkoinen säde. Kaksi päämekanismia suihkujen syntymiseen on:

- Blandford-Znajek prosessi - Tämä mekanismi ottaa energiaa pyörivän mustan aukon magneettikentästä tuottaen voimakkaan suihkun. Suihkun voimakkuus saadaan kaavasta

$$P_{BZ} \propto a^2 \Phi_B^2, \quad (6)$$

jossa a on mustan aukon spin parametri ja Φ_B^2 on mustaa aukkoa kiertävä magneettivuon tiheys.

- Säteilyn synnyttämät suihkut - Joissakin tapauksissa kertymäkiekon voimakas

säteilypainne voi nopeuttaa relativistista ulosvirtausta.

TDE:t kuten Swift J1644+57 ovat osoittaneet voimakasta röntgen- ja radiosäteilyä, mikä osoittaa relativisten suihkujen läsnäolon.[27]

Kaiken lisäksi, TDE:stä syntyvät ulosvirtaukset vaikuttavat tähtien muodostumiseen sen emogalaksissa injektoimalla energiaa tähtienväliseen aineeseen. Tämä kiertomekanismi, joka on samanlainen kuin AGN-kierto, voi säädellä galaksien kasvua.[24][26][27]

3 Radio säteily TDE-tapahtumissa

Radio säteily TDE-tapahtumissa johtuu pääasiassa siitä, kun tähtijäänteet vuorovaikuttavat ympäristön kanssa. Näitä säteilyä tuottaa yleisimmin synkrotonisäteily, joka syntyy, kun relativistiset elektronit kiertävät magneettikentän kenttäviivoja [29][31]. Seuraavaksi kolme päämekanismia jotka aiheuttavat radiosäteilyä.[29]

1. Etenevä shokki, joka syntyy relativistisesta suihkusta, vuorovaikutuksessa galaksin ydintä ympäröivän aineen kanssa.
 - Joissakin TDE-tapahtumissa syntyy relativistisia suihkuja, jotka ovat voimakkaita kollimoituneita plasmasäteilyitä. Nämä suihkut tuottavat radioaaltoja synkrotonisäteilyn kautta, kun ne vuorovaikuttavat galaksin ydintä ympäröivän aineen kanssa. Radiosignaalin kirkkaus riippuu suihkun energiasta ja sitä ympäröivän kaasun tiheydestä [29][31][33]. Esimerkki tästä, Swift J1644+57, tuotti kirkasta ja pitkäkestoista radiosäteilyä, koska sen relativistisen suihku törmäsi ympäröivään väliaineeseen.[29][30]
2. Lievästi relativistinen ulosvirtaus vuorovaikutuksessa galaksin ydintä ympäröivän aineen kanssa.
 - Relativistisen suihkun puuttuessa jotkin TDE:t voivat luoda lievästi relativistisia tuulia. Nämä ulosvirtaukset, jotka ovat vähempi energisiä kuin suihkut, voivat tuottaa radiosäteilyä, kun ne vuorovaikuttavat CNM kanssa. Nämä ovat isotrooppisia tai lievästi kollimoituneita, johtaen heikompiin, mutta silti havaittavissa oleviin radiosignaaleihin [29]. Esimerkki tästä, ASASSN-14li, lähetti heikkoja havaittavissa olevia radiosäteitä, jotka olivat peräisin hitaasti liikkuvan ulosvirtauksen vuorovaikutuksesta CNM kanssa.[29][31]
3. Sitoutumattoman tähtijäänteen vuorovaikutus galaksin ydintä ympäröivän ai-

neen kanssa.

- Kun tähti on kohdannut mustan aukon vuorovesivoimat, osa sen jäänteistä vapaana ja ne lentävät pois suurilla nopeuksilla. Tämä vapaa materiaali törmää lopulta galaksin ydintä ympäröivän aineen kanssa aiheuttaen shokkeja jotka kiihdyttävät elektroneja ja tuottavat synkrotroni säteilyä radiotaajuuksilla. Signaalin kirkkaus riippuu ympäröivän väliaineen tiheydestä ja jäänteiden nopeudesta. Joten säteily voi olla viivästynyttä ja ilmaantua kuukasista vuosiin alkuperäisen häiriön jälkeen, kun jäänteet leviää ulospäin ja vuorovaikuttavat galaksin ydintä ympäröivän aineen kanssa.[29]

Olipa kyse relativististen suihkujen, lievästi relativististen ulosvirtausten tai vapaan tähtijäänteen vuorovaikutuksista, nämä radioaallot tarjoavat tärkeää tietoa TDE:iden fysiikasta, ympäröivän väliaineen tiheydestä ja mustien aukkojen kertymästä [29]. Tulevaisuuden radiohavainnot, etenkin teleskooppien kuten Square Kilometre Array (SKA) avulla, tulevat auttamaan paljastamaan lisää tietoa näistä voimakkaista kosmisista tapahtumista.[29][30][31]

Radiosäteily TDE-tapahtumissa tarjoavat tärkeän havainnointityökalun niiden tutkimiseen. TDE-tapahtumissa syntyy säteilyä useilla aallonpituuksilla, joista jokainen paljastaa siitä eri asioita. Toisin kuin optisen tai röntgensäteily, radiosäteily tarjoaa syvemmän tarkastelun mustan aukon ulosvirtausten dynamiikasta, shokki-vuorovaikutuksista ja sitä ympäröivästä väliaineesta. Tämä tekee radiohavainnoista oleellisen työkalun ymmärtämään TDE:itten kokonaiskuvaa.[29][31][32]

Yksi radiohavaintojen tärkeistä hyödyntämisistä on ulosvirtausten havainnointi ja analysointi. Tapauksissa, joissa syntyy relativistinen suihku havainnoidaan synkrotronisäteilyä radiotaajuuksilla. Tämän avulla tähtitieteilijät voivat varmistaa suihkun läsnäolon ja tutkia niiden ominaisuuksia, kuten nopeus, suunta ja energian tuotto [29][31][32]. Swift J1644+57 havaittiin ensin röntgen aallonpituuksilla, mutta

myöhemmät radiohavainnot varmistivat vahvan relativistisen ulosvirtauksen läsnäolon[30]. Nämä löydökset auttavat tutkijoita ymmärtämään fysikaalisia olosuhteita, joiden ansiosta jotkut mustat aukot voivat tuottaa suihkuja, kun toiset eivät voi.[29][31]

Radiohavainnoilla on myös tärkeä rooli mustien aukkojen ympäristöjen luotamiseen. Galaksin ydintä ympäröivän aineen tiheys ja rakenne vaikuttavat TDE:stä lähtevien radiosäteilyiden vahvuuteen ja keston. Tiheä väliaine tehostaa shokkien vuorovaikutusta, johtaen kirkkaampiin ja pitkäaikaisempiin signaaleihin, kun taas harvempi johtaa heikompiin. Tutkimalla näitä säteilyitä tähtitieteilijät voivat selvittää galaksin ydintä ympäröivän aineen tiheyden ja rakeneteen saaden lisätietoa siitä, miten mustat aukot vaikuttavat niiden emogalakseihin ajan myötä. Tässä radiosäteilyn pitkäaikaisuus on hyödyksi. Optinen ja röntgensäteily heikentyvät viikon tai kuukauden sisällä, kun radiosäteily kestää vuosia. Tämä mahdollistaa TDE:itten pitkäaikaisen tarkkailun.[29]

Radiosäteilyn tärkeyttä TDE:itten tulkimissessa ei voi liioitella. Ne tarjoavat uniikin perspektiivin ulosvirtauksiin ja suihkuihin, paljastaen yksityiskohtia siitä, miten mustat aukot siirtävät energiaa ympäristöönsä. Lisäksi radiohavainnot auttavat mustan aukon kertymän ja kierron teoreettisten mallien hienosäädössä, kaventamalla simulaatioiden ja oikean maailman datan välistä kuilua.[29][31][32]

Yhteenveto

Tässä työssä käsiteltiin TDE-tapahtumia, joissa tähti repeytyy supermassiivisen mustan aukon painovoimakentässä. Osa tähden materiasta muodostaa mustan aukon ympärille kertymäkiekon ja osa sinkoutuu pois. Työssä tarkasteltiin TDE-ilmion fysikaalisia perusteita, havaittavaia seurauksia ja merkitystä mustien aukkojen tutkimuksessa.

Mustat aukot ovat avaruuden äärimmäisiä kohteita, niiden painovoimakenttä on niin voimakas, että se voi repiä liian lähelle ajautuvan tähden. Mustien aukkojen tutkiminen on tärkeää, koska ne tarjoavat ainutlaatuisen laboratorion kokeilla suhteellisuusteorian pitävyyttä ja niistä saama tiedot auttavat ymmärtämään galaksien kehitystä ja syntyä. Mustien aukkojen tutkimista varten kehitetty teknologia on myös toiminut edelläkävijänä monissa nykyajan arkipäiväisissä asioissa.

TDE-tapahtumat ovat erittäin hyödyllisiä 'nukkuvien' SMBH löytämisessä, koska jos havaitset TDE-tapahtuman, niin havaitset myös mustan aukon. TDE-tapahtumassa syntyvä säteily tekee mahdolliseksi mustien aukkojen massan, spinin ja niitä ympäröivän aineen tutkimisen. Ne antavat myös mahdollisuuden tutkia mustan aukon kertymäprosessia, suihkujen ja tuulien muodostumista sekä niihin liittyviä relativistisia vaikutuksia.

Lisäksi työssä tarkasteltiin TDE-tapahtumissa radiosäteilyä, joka voi muodostua kolmella tavalla: relativistisista suihkuista, lievästi relativistisista ulosvirtauksista ja tähtijäänteen vuorovaikutuksesta ympäristön kanssa. Radiosäteilyn tutkiminen on tärkeää mustien aukkojen ja niiden emogalaksien ymmärtämiseksi, koska se tarjoaa pitkäaikaisia havaintoja mustan aukon ja sen ympäristön vuorovaikutuksesta.

Viitteet

- [1] <https://science.nasa.gov/universe/black-holes/> (13.3.2025.)
- [2] <https://www.space.com/15421-black-holes-facts-formation-discovery-sdcmp.html> (13.3.2025.)
- [3] <https://science.nasa.gov/resource/first-image-of-a-black-hole/> (13.3.2025.)
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/> (13.3.2025.)
- [5] <https://www.skyatnightmagazine.com/space-science/how-black-holes-formed> (13.3.2025.)
- [6] <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/black-hole-may-have-formed-by-direct-collapse/> (13.3.2025.)
- [7] <https://science.nasa.gov/universe/black-holes/types/> (13.3.2025.)
- [8] <https://www.nasa.gov/image-article/stellar-mass-black-hole/> (13.3.2025.)
- [9] <https://www.astronomy.com/science/what-are-stellar-mass-black-holes/> (13.3.2025.)
- [10] <https://eventhorizontelescope.org/faq/why-it-important-study-black-holes-what-there-be-learned-ehl-observations> (13.3.2025.)
- [11] <https://phys.org/news/2024-05-black-holes-fascinating.html> (13.3.2025.)
- [12] Mann, Robert B.; Murk, Sebastian; Terno, Daniel R. Black holes and their horizons in semiclassical and modified theories of gravity. *Int. J. Mod. Phys* (2022)
- [13] Susskind, Leonard. *The black hole war: my battle with Stephen Hawking to make the world safe for quantum mechanics* (1st ed.) (2008).
- [14] Zee, Anthony. *Einstein Gravity in a Nutshell*. In a Nutshell Series (1st ed.) (2013).
- [15] Heusler, M. *Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond*. *Living Reviews in Relativity* (2012).
- [16] Hawking, S. W.; Ellis, G. F. R. *Large Scale Structure of space time* (1973).
- [17] Wald, Robert M. *General Relativity* (1984).
- [18] Penrose, R. Gravitational Collapse and Space-Time Singularities. *Phys. Rev. Lett* 14,57 (1965).
- [19] Earman, John. *Bangs, crunches, whimpers, and shrieks: Singularities and acausalities in relativistic spacetimes*. Oxford University Press (1995).

- [20] Curiel, Erik. Singularities and Black Holes. Stanford Encyclopedia of Philosophy (2010).
- [21] Giddings, S. B.; Thomas, S. High energy colliders as black hole factories: The end of short distance physics. *Physical Review Journals*. (2002).
- [22] Kormendy, John; Richstone, Douglas. Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei. *Annu. Rev. Astron. Astrophys* (1995).
- [23] Chen, Xian. Why do we study black holes?. *Chinese Science Bulletin* 67, 27 (2022)
- [24] Gezari, Suvi. Tidal Disruption Events. *Annu. Rev. Astron. Astrophys* 59 (2021)
- [25] Jonker, P.G., Arcavi, I., Sterl Phinney, E. et al. Editorial to the Topical Collection: The Tidal Disruption of Stars by Massive Black Holes. *Space Sci Rev* 217, 62 (2021).
- [26] Rossi, E.M., Stone, N.C., Law-Smith, J.A.P. et al. The Process of Stellar Tidal Disruption by Supermassive Black Holes. *Space Sci Rev* 217, 40 (2021)
- [27] Dai, J.L., Lodato, G. Cheng, R. The Physics of Accretion Discs, Winds and Jets in Tidal Disruption Events. *Space Sci Rev* 217, 12 (2021).
- [28] T.Ryu, J.Krolik, T.Piran, Measuring Stellar and Black Hole Masses of Tidal Disruption Events. *The Astrophysical Journal* 904, 1 (2020).
- [29] Roth, N., Rossi, E.M., Krolik, J. et al. Radiative Emission Mechanisms. *Space Sci Rev* 216, 114 (2020)
- [30] Zauderer, B., Berger, E., Soderberg, A. et al. Birth of a relativistic outflow in the unusual -ray transient Swift J164449.3+573451. *Nature* 476, 425–428 (2011)
- [31] Alexander, K.D., van Velzen, S., Horesh, A. et al. Radio Properties of Tidal Disruption Events. *Space Sci Rev* 216, 81 (2020)
- [32] A.Spaulding, P.Chang. Radio emission from simulated tidal disruption events. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 515, 2 (2022).
- [33] Sjoert van Velzen, Elmar Körding, Heino Falcke, Radio jets from stellar tidal disruptions, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 417, Issue 1, October 2011
- [34] Event Horizon Telescope Collaboration et al. First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters* 930, 2 (2022)
- [35] Claudia P. Gutiérrez et al. CSS 161010: A Luminous Fast Blue Optical Transient with Broad Blueshifted Hydrogen Lines. *The Astrophysical Journal* 977, 2 (2024)

- [36] <https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschildradius>
- [37] <https://www.transients.science/tidal-disruption-events> (16.4.2025.)
- [38] <https://imagine.gsfc.nasa.gov/features> (16.4.2025.)
- [39] <https://www.space.com/sagittarius-a> (16.4.2025.)
- [40] <https://svs.gsfc.nasa.gov/10807/>