

Onko oman galaksimme musta aukko Sagittarius
A* aktiivinen?

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Emma Johtela
Tarkastaja:
Dos. Elina Lindfors

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Johtela, Emma Onko oman galaksimme musta aukko Sagittarius A* aktiivinen?

LuK-tutkielma, 19 s., 3 liites.

Fysiikka

Maaliskuu 2025

Sagittarius A* on Linnunradan keskustan supermassiivinen musta aukko. Se löydettiin radiohavaintojen myötä 1970-luvulla, ja aukko on ollut aktiivisen tutkimuksen kohteena siitä lähtien. Sagittarius A*:n, kuten muidenkin supermassiivisten mustien aukkojen, energiantuotanto toimii aineen kiertymäprosessilla, jossa gravitaatioenergiaa vapautuu säteilyn muodossa. Mustan aukon kiertymävirtaus vaikuttaa Linnunradan keskustan tähtien ja kaasun liikkeisiin, sekä mahdollisesti myös uusien tähtien syntymiseen.

Kiinnostavan tutkimuskohteen Sagittarius A*:stä tekee sen hyvin alhainen luminositeetti ja säteilyn muuttuvuus. Mustan aukon emissiossa havaitaan päivittäisiä muutoksia, joita kutsutaan roihuiksi. Roihuja tapahtuu lähinnä vain röntgen- ja infrapuna-alueilla, mutta vakaata säteilyä havaitaan muillakin aallonpituusalueilla. Lisäksi radiointerferometriian avulla on saatu muodostettua kuvia Sagittarius A*:stä, jotka viittavaat voimakkasiin, valoa polarisoiviin magneettikenttiin aukon ympärillä.

Nykyisten havaintojen valossa Sagittarius A* voidaan luokitella matalan luminositeetin aktiiviseksi galaksiyttimeksi. Aineen kertymätahti mustaan aukkoon on hidas, mikä tekee luminositeetista matalan. Aukon purkauksessa mahdollisesti syntyvää hiukkassuihkua, joka viittaisi suurempaan aktiivisuuteen, ei ole toistaiseksi löydetty. Sagittarius A* osoittaa kuitenkin merkkejä menneestä aktiivisuudesta, viitaten siihen, että nykyinen hiljaisempi vaihe on ohimenevä.

Asiasanat: aktiivinen galaksiydin, supermassiivinen musta aukko, Sagittarius A*, kiertymä, radiointerferometria

Sisällys

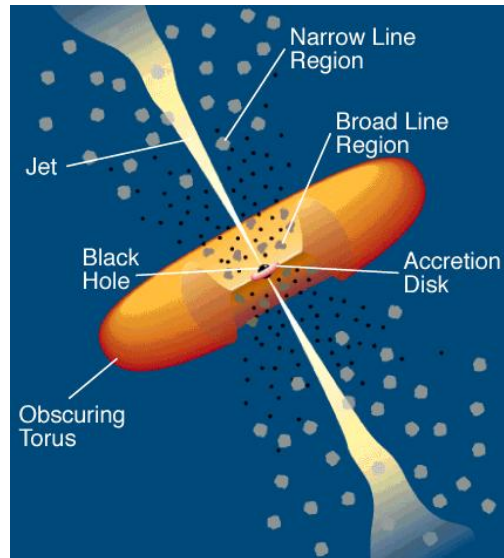
Johdanto	1
1 Aktiiviset galaksiytimet	2
1.1 Mustan aukon aktiivisuus	3
1.2 Sagittarius A*	5
2 Havaintomenetelmät Sagittarius A*:n tutkimuksessa	5
2.1 Radiointerferometria	6
2.2 Kaasun ja tähtien dynamiikka	9
3 Havainnot Sagittarius A*:n aktiivisuudesta	10
3.1 Event Horizon Telescope -havainnot	10
3.2 Röntgen- ja gammahavainnot	11
4 Yhteenveto	13

Johdanto

Sagittarius A* on supermassiivinen musta aukko oman galaksimme, Linnunradan, keskustassa. Ensimmäiset havainnot siitä tehtiin 1970-luvulla, melko alkeellisilla radioteleskoopeilla. Havaintolaitteiden ja -tekniikoiden kehittyessä saatiin selville Sagittarius A*:n massa, etäisyys sekä vaikutus galaksin keskustan tähtien ja kaasun liikkeeseen. Nykyään on selvää, että aukon luminositeetti on alhainen, mutta sen lähettämässä säteilyssä on huomattavaa päivittäistä vaihtelua [1]. Lisäksi valo polarisoituu hyvin vahvasti aukon läheisyydessä, ja muistuttaa näin paljon Messier 87 -galaksin keskustan aktiivista mustaa aukkoa [2]. Voisiko Sagittarius A* olla itse aktiivinen?

Tämä tutkielma pyrkii vastaamaan kysymykseen nykyisten tutkimustulosten perusteella. Ensimmäisessä luvussa käsitellään aktiivisia galaksityimiä, joiden keskustoissa supermassiiviseen mustaan aukkoon kiertyvän aineen säteily dominoi koko ympäristön toimintaa. Lisäksi käydään läpi tapoja, joilla mustan aukon aktiivisuus ilmenee, sekä oman mustan aukkomme ominaisuuksia. Toisessa luvussa perehdytään havaintomenetelmiin, joita käytetään Sagittarius A*:n tutkimuksessa. Näistä erityisesti radiointerferometria on ottanut suuria kehitysaskelia viime vuosikymmeninä, ja sillä saatu ensimmäinen kuva Sagittarius A*:n varjosta oli merkittävä läpimurto. Kolmannessa luvussa käydään läpi tähän mennessä saatuja havaintoja, jotka viittaavat Sagittarius A*:n aktiivisuuteen.

Tutkielman kirjoittamisessa ei ole käytetty tekoälyä.



Kuva 1. Aktiivisen galaksiytimen rakenteen malli. [5]

1 Aktiiviset galaksiytimet

Aktiiviset galaksiytimet (engl. *active galactic nuclei*, *AGN*) ovat universumin kirkkaimpia ei-räjähäviä kohteita, joiden energia on peräisin supermassiivisista mustista aukoista ja niiden kertymäkiekoista. AGN:iä voidaan havaita koko sähkömagneettisen spektrin alueella, ja säteilyn eri aallonpituudet kertovat niiden erilaisista fysikaalisista ominaisuuksista [3]. AGN:ien luokittelu on hieman epämääräistä, sillä usein katselukulmista johtuvat eroavaisuudet tai luminositeettitasot määrittelevät eri luokat. Kuitenkin ytimien pääominaisuudet näyttäisivät olevan kaikille samat, ja AGN:lle onkin saatu muodostettua yhtenäismalli. Mallin mukaan ytimet koostuvat samoista komponenteista, mutta suuriakin eroavaisuuksia voi olla esimerkiksi ytimien ko'oissa, luminositeeteissa tai mustien aukkojen massoissa [4].

Kuvassa 1 nähdään aktiivisen galaksiytimen rakenne [5]. Peittävä pölystä muodostunut torus (engl. *obscuring torus*) ympäröi keskustaa, jossa on musta aukko

(engl. *black hole*) ja sitä kiertävä kertymäkiekko (engl. *accretion disk*). Lähempänä mustaa aukkoa on nopeasti liikkuvien kaasupilvien alue (engl. *broad line region*) ja kauempana hitaampien kaasupilvien alue (engl. *narrow line region*). Alueiden englanninkieliset nimet viittaavat kaasupilvien tuottamiin emissioviivoihin spektreissä; kuumempi kaasu tuottaa leveämpiä emissioviivoja. Lisäksi osalla AGN:istä havaitaan voimakkaita hiukkassuihkuja (engl. *jet*) [6]. Kuten kuvan 1 symmetriakselikeskeisestä mallista voidaan päätellä, ytimistä havaittavat ominaisuudet riippuvat nimenomaan katselukulmasta [4].

Aktiivisten galaksiytimien varsinainen tutkimus sai alkunsa vasta 1950-luvulla, jolloin radioastronomian kehittyessä löydettiin ensimmäiset kvasaarit. Kuitenkin jo aikaisemmin tiedettiin joidenkin galaksien ytimien spektreissä olevan leveitä ja vahvoja emissioviivoja. Käsitys AGN:ien energian tuotannosta aineen kiertymisen avulla hyväksyttiin myöhemmin, erityisesti tutkittujen galaksien keskustoissa olevien supermassiivisten mustien aukkojen löytymisen myötä. Nykyisin AGN:iä tutkitaan kaikilla säteilyalueilla maasta ja avaruudesta käsin. AGN:ien muodostumisessa, toiminnassa ja geometriassa on edelleen paljon avoimia kysymyksiä, jotka tekevät aihepiiristä tärkeän tutkimuskohteen tähtitieteessä. [7]

1.1 Mustan aukon aktiivisuus

Supermassiivinen musta aukko, eli massaltaan noin 10^6 - 10^{10} Auringon massaa oleva musta aukko, on siis galaksin ytimen keskustassa oleva hyvin kompakti kohde [8]. Mustan aukon ympärillä olevalla kertymäkiekolla tarkoitetaan aluetta, jossa kaasu virtaa pyörien kiekon tasossa [9]. Kitkan ja/tai magneettisten prosessien seurauksena kaasu kuumenee kuumentaan samalla ympäristöään [4]. Aineen kiertyessä mustaan aukkoon vapautuu gravitaatioenergiaa säteilyn muodossa, mikä voidaan huomata systeemin tuottamasta korkeaenergisestä emissiosta [1]. Kertymäkiekon säteilyn luoman paineen täytyy olla tasapainossa mustan aukon gravitaatiovetovoiman

kanssa. Tätä ehtoa kuvaa Eddingtonin luminositeetti, jossa mustan aukon massa antaa tietyt rajat sen luminositeetille. Se saadaan kaavasta

$$L_{Edd} = 1.25 \cdot 10^{38} \frac{M_{BH}}{M_{\odot}} \text{erg sec}^{-1}, \quad (1)$$

missä M_{BH} on mustan aukon massa ja M_{\odot} Auringon massa [10]. Kirkkaimmat AGN:t säteilevät lähellä Eddingtonin rajaa, ja mitä massiivisempi musta aukko, sitä suurempi Eddingtonin luminositeetti [11].

Mustien aukkojen laukaisemilla relativistisilla hiukkassuihkuilla ja kertymäkiekojen toiminnalla on havaittu olevan yhteys [12]. Aukon ympärillä olevien magneettisten voimien oletetaan olevan tärkeässä roolissa. Kertymäkiekon sisemmän osan ja/tai mustan aukon magnetosfäärin rotaation uskotaan synnyttävän kierteisen magneettikentän, joka mahdollistaa suihkun syntymisen. Teoreettisten mallien mukaan tämä magneettikenttä kiihdyttää ja auttaa yhteensuuntaistamaan hiukkassuihkun, mutta jonkin ulkoisen osan täytyy vielä rajata suihkun alue [13]. Havainnot hiukkassuihkusta tehdään yleensä radio- ja gammasäteilyalueilla [3].

Galaksin keskustan mustalla aukolla voi olla merkittävä vaikutus koko galaksin keskuspullistuman ympäristöön. Kertymäkiekon synnyttämä energia reagoi emogalaksin kaasun kanssa, kun kiekon tuottamat voimakkaat hiukkasvirtaukset törmäävät mustan aukon ympäristössä olevaan kaasuun. Tämä vuorovaikutus voi vaikuttaa ratkaisevasti keskuspullistuman tähtien muodostumiseen sekä tyhjentää keskusa-alueen kaasusta [14]. Emogalaksin keskuspullistuman luminositeetti sekä keskustan tähtien nopeusdispersio ovat lisäksi ominaisuuksia, jotka korreloivat galaksin mustan aukon massan kanssa. Galaksien muodostumisen tutkimuksessa kaikki korrelaatiot keskustan mustan aukon ominaisuuksien ja itse galaksin välillä tarjoavat tärkeää tietoa. Nykyisin arvellaankin kaikkien galaksien keskustassa olevan massiivinen musta aukko, sillä kaikkien tutkittujen mustien aukkojen massat näyttäisivät olevan sovelsa edellä mainittujen yhteneväisyyksien kanssa [8].

1.2 Sagittarius A*

Sagittarius A* (Sgr A*) on oman kotigalaksimme Linnunradan keskustan supermassiivinen musta aukko. Sgr A*:n (luetaan "Sagittarius A tähden") tutkimus mahdollisena supermassiivisena mustana aukkona alkoi 1970-luvulla galaksimme keskustasta saatujen radiohavaintojen myötä [15]. Erityisesti Sgr A*:n nopea muuttuvuus ja korkea radioluminositeetti tekivät siitä kiinnostavan tutkimuskohteen [1]. Vuoden 2020 fysiikan Nobel-palkinto myönnettiin Reinhard Genzelille ja Andrea M. Ghezille, joiden havaintojen avulla musta aukko löydettiin [16]. Tähän päivään mennessä tehdyt havainnot aukon sekä sitä kiertävien tähtien liikkeestä muodostavat melko selkeän kuvan Sgr A*:stä galaksin keskustaa dominoivana kompaktina objektina. Aukko on massaltaan noin neljä miljoonaa kertaa Auringon massainen, ja sen etäisyys meistä on 8 kpc:n luokkaa [17]. Kohde tarjoaakin meille tärkeän ikkunan kaikkien mustien aukkojen tutkimukseen sekä kuvantamiseen, sillä se on meitä lähimpänä oleva supermassiivinen musta aukko [15].

2 Havaintomenetelmät Sagittarius A*:n tutkimuksessa

Mustien aukkojen olemassaolo ennustettiin alunperin Einsteinin yleisessä suhteellisuusteoriassa. Teorian julkaisun jälkeen Karl Schwarzschild onnistui ratkaisemaan Einsteinin kenttäyhtälöt. Ratkaisu johti Schwarzschildin säteeseen, joka on yhtä suuri kuin mustan aukon tapahtumahorisontti [18]. Tapahtumahorisontiksi kutsutaan rajaa muun avaruuden ja mustan aukon välillä, jonka sisäpuolelta ulkopuolisen havaitsijan on mahdotonta tehdä havaintoja. Alueen sisältä edes valo ei pääse karkaamaan pois [19]. Kaikista massallisista kohteista, joiden säteet muuttuvat luhistuessa pienemmiksi kuin niiden Schwarzschildin säde, tulee mustia aukkoja [18]. Mustan aukon olemassaolon toteamiseksi täytyy sen gravitaation voimakkuus määrittää ta-

pahtumahorisonttiin asti. Käytännössä täytyy siis tutkia tähtien tai tähtienvälisen kaasun kiertoliikettä lähellä aukkoa [20]. Lisäksi nykyisin mustia aukkoja voidaan suoraan kuvantaa radiointerferometriian avulla [15].

2.1 Radiointerferometria

Radioastronomia, eli radiosäteilyä lähettävien tähtitieteellisten kohteiden tutkimus, on tarkin kuvantamismenetelmä mustille aukkoille [21]. Radioastronomiassa havainnot tehdään radioteleskoopeilla, jotka käyttävät paraboloidiantennia. Pääpeili, josta säteily heijastuu, on paraboloidin muotoinen ja kattaa usein suuren pinta-alan. Mitä suurempi peili on, sitä heikompia signaaleja saadaan havaittua [22]. Teleskooppien tarkkuuteen liittyy olennaisesti erotuskyky, joka kertoo, miten hyvin havaitut lähemmäiset kohteet erottuvat erillisinä. Teoreettinen erotuskyky teleskoopille saadaan Rayleigh'n rajan avulla, jonka mukaan havaittujen kohteiden välinen kulma θ noudattaa ehtoa

$$\sin \theta \approx \theta = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

missä λ on havaintoaallonpituus ja D peilin halkaisija [23]. Radiointerferometriasta puhutaan, kun useiden radioteleskooppien signaalit yhdistetään yhdeksi, jolloin kohteista saadaan yksityiskohtaisempia kuvia [22]. Kuvassa 2 on Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) -radioteleskooppiryhmä, joka käyttää interferometriaa ja on myös osana suurempaa Event Horizon Telescope -järjestelmää [24].

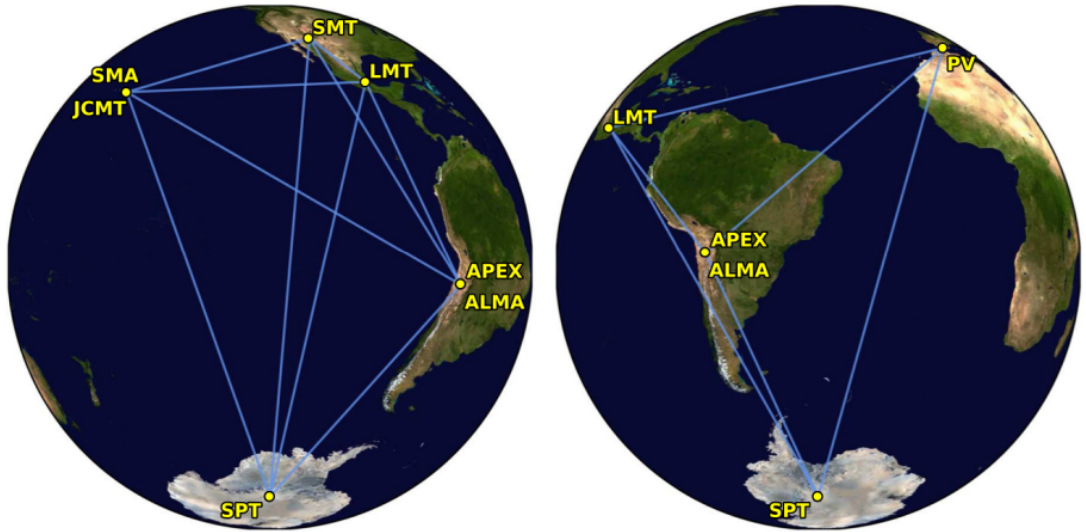
Very Long Baseline Interferometry (VLBI) on radiointerferometriian tekniikka, jossa teleskooppien etäisyydet voivat olla nimensä mukaan hyvin suuria, jopa mantereita ylittäviä. Siinä jokaisen teleskoopin signaali yhdistetään apertuurisynteesi (engl. *aperture synthesis*) -nimisellä käsittelytekniikalla, joka mahdollistaa hyvin korkearesoluutioisen kuvan ottamisen. Kohteesta saadun kuvan erotuskyky on yhtä suuri kuin sellaisen teleskoopin, jonka halkaisija vastaa suurinta kahden teleskoopin



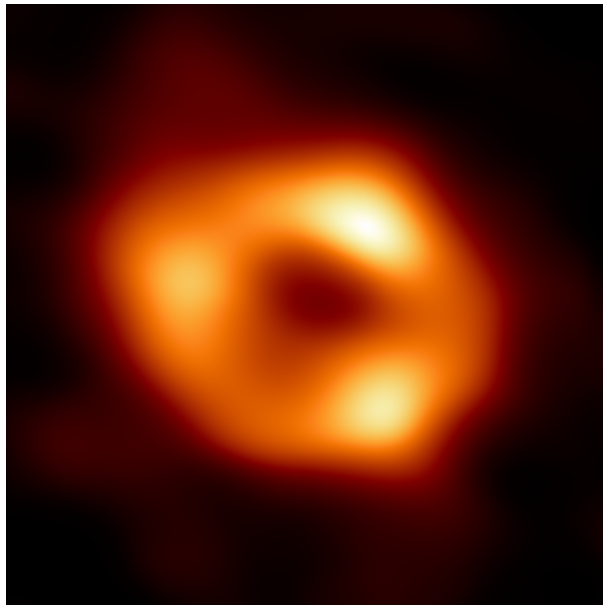
Kuva 2. ALMA -teleskooppiryhmä, joka koostuu 66:sta radioteleskoopista ja sijaitsee Pohjois-Chilessä, Atacaman aavikolla. Teleskoopit ovat aseteltu tarkasti tietyille paikoille, jotta radiointerferometriaa voidaan käyttää. Jokainen paraboloidipeili kerää radiosäteilyä, ja interferometriavun avulla niiden signaalit voidaan yhdistää yhdeksi suureksi kuvaksi. [24]

välillä olevaa etäisyyttä. VLBI:tä käytetään myös Sgr A*ⁿ tutkimuksessa yhä lyhyemmällä aallonpituuksilla. Interferometrialla saadut havainnot ovat olleet mustan aukon tutkimuksen kannalta hyvin tärkeitä. Ne ovat antaneet tietoa muun muassa aukon kompaktin säteilyn vaihtelevuudesta, huomattavasta polarisaatiosta sekä epäsymmetrisyydestä kuvan rakenteessa. [1]

Event Horizon Telescope (EHT) on VLBI:tä käyttävä kansainvälinen yhteistyöprojekti, jonka tavoitteena on mustien aukkojen kuvantaminen sellaisella kulmaerotuskyvyllä, joka on verrannollinen tapahtumahorisonttiin. Kuten kuvasta 3 nähdään, EHT yhdistää radioteleskooppeja ympäri maapalloa luoden yhden valtavan interferometrin. Verkosto ulottuu Chileen, Meksikoon, Espanjaan, Yhdysvaltojen Arizonaan ja Havaijille, sekä Etelämantereelle [25]. EHT:lla on saatu kuvat kahdesta eri mustasta aukosta; oman galaksimme Sgr A*^{stä} ja Messier 87 -galaksin M87*^{stä} [15, 26]. Kuvassa 4 on EHT:lla muodostettu kuva Sgr A*^{stä}. Keskellä olevaa tummaa aluetta kutsutaan aukon varjoksi (engl. *shadow*), ja sitä ympäröi hehkuva kaa-



Kuva 3. Event Horizon Telescope -verkosto, johon kuuluvat Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), Atacama Pathfinder Experiment telescope (APEX), Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano (LMT), IRAM 30 m telescope Pico Veletalla (PV), Submillimeter Telescope Observatory (SMT), James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), Submillimeter Array (SMA) sekä South Pole Telescope (SPT). [15]



Kuva 4. Ensimmäinen kuva Sagittarius A*^{*}:sta Event Horizon Teleskoopilla (EHT) otettuna. [15]

surengas. Renkaan koko antoi tutkijoille tärkeää tietoa suhteellisuusteorian mustien aukkojen gravitaatioon liittyvien ennustuksien paikkaansapitävyydestä [15].

2.2 Kaasun ja tähtien dynamiikka

Havainnot Linnunradan keskustan ionisoituneen kaasun liikkeestä olivat ensimmäisiä dynaamisia todisteita oman galaksimme supermassiivisen mustan aukon olemassaolosta. 1970- ja 80-luvuilla tehdyissä tutkimuksissa ionisoituneen kaasun nopeuden havaittiin kasvavan satoihin kilometreihin sekunnissa lähimpänä keskustaa. Nopeusanalyysit viittasivat galaksin keskustassa olevaan valtavaan massakeskittymään, joka dominoi gravitaatiokenttää. Lisämittaukset kompaktien ionisoituneiden kaasupilvien emissioviivoista infrapuna-alueella keskustan länsiosista indikoivat samaa [27–29]. Aluksi tuloksista oltiin epäileväisiä, ja osa tutkijoista ajatteli voimien, kuten tähtituulen tai magneettikenttien, ajavan kaasun liikettä. Idea keskustan mustasta aukosta kuitenkin vakiintui vähitellen, erityisesti keskustan tähtien dynaamisten havaintojen myötä [30].

Ensimmäiset havainnot, jotka tukivat ionisoidun kaasun liikkeistä saatuja tuloksia, saatiin erilaisten jättiläistähtien liikkeistä lähellä Sgr A*:eä. Spektroskopiset havainnot tähdistä mahdollistivat niiden nopeusdispersioiden mittaamisen [31, 32]. Myöhemmin samanlaiset havainnot vielä lähempänä mustaa aukkoa olevista sinisisistä jättiläisistä vahvistivat galaksin keskustan massakeskittymän olemassaolon [33]. Entistä tarkempi arvio keskittymän massasta saatiin, kun noin 200:n tähden keskittymää jopa 0.1 pc etäisyydellä keskustasta tutkittiin. Jälleen huomattiin tähtien nopeusdispersioiden merkittävä kasvu keskustaa kohti mennessä, ja keskittymän massaksi saatiin arvioitua $2.5 - 3.2 \cdot 10^6$ Auringon massaa [34].

S-tähdiksi kutsutaan nuorta tähtiryhmää, jonka etäisyys Sgr A*:een on vielä aikaisempia havaintotähtiä pienempi. Ensin ryhmästä tehtiin havaintoja lähi-infrapuna-alueella, jotka todistivat tähtien kiertävän yhtä massiivista pisteen kal-

taista aluetta [34, 35]. Kun yksittäisten tähtien liikkeiden tutkimus tuli mahdolliseksi, saatiin mitattua kolmen eri S-tähden kiihtyvyydet [36]. Monien vuosien havainnot tähdistä mahdollistivat niiden tarkkojen kiertoratojen kartoittamisen ja lopulta Sgr A*ⁿ massaksi saatiin arvioitua nykyisesti oikeana pidettyä kokoluokkaa oleva $(4.15 \pm 0.13) \cdot 10^6$ Auringon massaa. S-tähtien liikkeiden tutkimus tarjoaa erityisen hyvän mahdollisuuden suhteellisuusteorian ennustusten testaamiseen mustan aukon ympärillä [37].

3 Havainnot Sagittarius A*ⁿ aktiivisuudesta

Sgr A*ⁿ tutkimus vuosien varrelta on osoittanut, että aukon luminositeetti on alhainen. Havaittu luminositeetti on monta suuruusluokkaa aukon Eddingtonin luminositeettia pienempi. Syynä on kertymävirtauksen hidas tahti sekä alhainen säteilytehokkuus [38]. Sgr A* on siis niin sanotussa "uinuvassa tilassa" (engl. *quiescent state*), mutta kuitenkin muutamia kertoja päivässä voidaan havaita suuriakin muutoksia aukon emissiossa, erityisesti röntgen- ja infrapuna-alueilla. Muutoksia kutsutaan roihuiksi (engl. *flares*), eikä niiden syntyprosessia tunneta vielä kunnolla [9]. Sgr A*ⁿ lähettämän radiosäteilyn uskotaan tulevan pääasiassa kertyvästä materiaasta mustan aukon läheisyydessä, mutta on myös mahdollista, että säteily on peräisin aukon laukaisemasta hiukkassuihkusta. Sgr A*ⁿ kertymävirtaukselle ja mahdolliselle hiukkassuihkulle kehitellään jatkuvasti yhä tarkempia malleja [39].

3.1 Event Horizon Telescope -havainnot

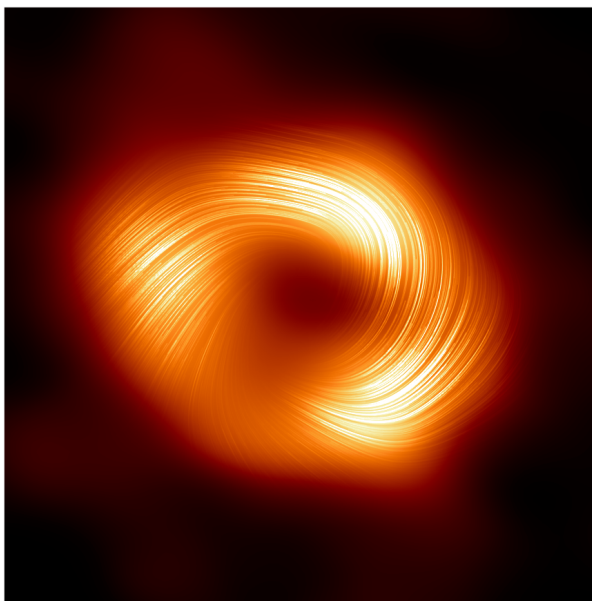
Vuonna 2022 EHT:lla saatu kuva Sgr A*ⁿstä, eli kuva 4, herätti tutkijoiden mielenkiinnon mustan aukon mahdollisesta aktiivisuudesta. Kuvan kirkas emissiorengas sekä keskellä oleva tumma varjo muistuttivat paljon aktiivisena pidetyn Messier 87 -galaksin keskustan supermassiivisen mustan aukon M87*ⁿ kuvaa [2, 26]. Emissio-

renkaan säteily on synkrotronisäteilyä, jota syntyy, kun varatut hiukkaset kiihtyvät magneettikentän vaikutuksesta. Hiukkasten nopeudet lähenevät valonnopeutta, ja syntynyt säteily kattaa laajan kaistan sähkömagneettisen säteilyn spektristä. Synkrotronisäteily on erityisen voimakkaasti polarisoitunutta [40]. M87*:eä on tutkittu polarisoituneessa valossa, ja vuonna 2021 aukon tapahtumahorisontin välittömästä läheisyydestä tulevasta synkrotronisäteilystä saatiin muodostettua kuva [41]. Polarimetrinen analyysi mustan aukon lähettämästä synkrotronisäteilystä antaa merkittävää tietoa magneettikentistä aukon ympärillä, ja sitä kautta kertymäkiekon fysiikasta. Näin ollen haluttiin siis selvittää, muistuttaisiko Sgr A* M87*:eä myös polarisoituneessa valossa [2].

Mustan aukon ympärillä olevat voimakkaat ja kiertyvät magneettikentät siis polarisoivat valoa, sillä kenttäviivojen ympäri pyöriville hiukkasille aiheutuu polarisatiota kohtisuorassa suunnassa kenttää vasten. Nämä kentät vaikuttavat kertymäkiekossa virtaavan materian liikkeeseen ja saattavat synnyttää purkautuvat hiukkassuihkut. Kuvassa 5, joka saatiin otettua vuonna 2024, on Sgr A* polarisoidussa valossa. Rakenteesta nähdään heti voimakkaasti polarisoitunut synkrotronisäteily aukon varjon ympärillä. Tutkijoiden mukaan kuva muistutti jälleen paljon M87*:eä, vaikka M87* on huomattavasti massaltaan suurempi ja voimakkaampi kuin Sgr A*. Kuvien yhdenmukaisuus on hyvin merkittävää, sillä se viittaa mustien aukkojen kertymäprosessien ja hiukkassuihkupurkausten universaalisuuteen. Tämä tarkoittaisi sitä, että kertymätahdin ja hiukkassuihkujen laukaisun määräävät tekijät olisivat samat kaikille mustille aukoille, massasta ja aukon ympäristöstä riippumatta. [2]

3.2 Röntgen- ja gammahavainnot

Vuonna 2001 julkaistiin Chandra X-ray -teleskoopilla saadut tulokset, joissa raportoitiin Sgr A*:n sijainnin kanssa yhtäpitävästä röntgensäteilyn lähteestä [42]. Siitä lähtien röntgenalueella tehdyt havainnot aukosta ovat osoittaneet päivittäi-



Kuva 5. Sagittarius A* polarisoituneessa valossa Event Horizon Teleskoopilla muodostetussa kuvassa. [2]

siä vaihtelevuuksia aukon emissiossa. Näiden roihujen aiheuttajiksi ollaan ehdotettu esimerkiksi uuden lisämaterian kertymistä mustaan aukkoon tai läheltä aukkoa ohittavien asteroidien aiheuttamaa muutosta relativististen hiukkasten jakaumassa [43, 44]. Kiinnostavaa on, että jokaisen röntgenroihun mukana voidaan havaita myös lähi-infrapunaroihu, eikä tällekkään tiedetä tarkkaa syytä vielä [20]. Röntgenroihujen esiintymistiheyttä ollaan tutkittu 2010-luvulta lähtien. Tutkimusten mukaan roihut, joilla on suuri luminositeetti ja energia, ovat lisääntyneet. Sgr A*:n röntgenaktiivisuus on siis kasvanut, mutta jälleen mustan aukon tilan kartoittaminen kokonaisvaltaisesti vaatisi enemmän havaintoja jokaisella aallonpituusalueella [43].

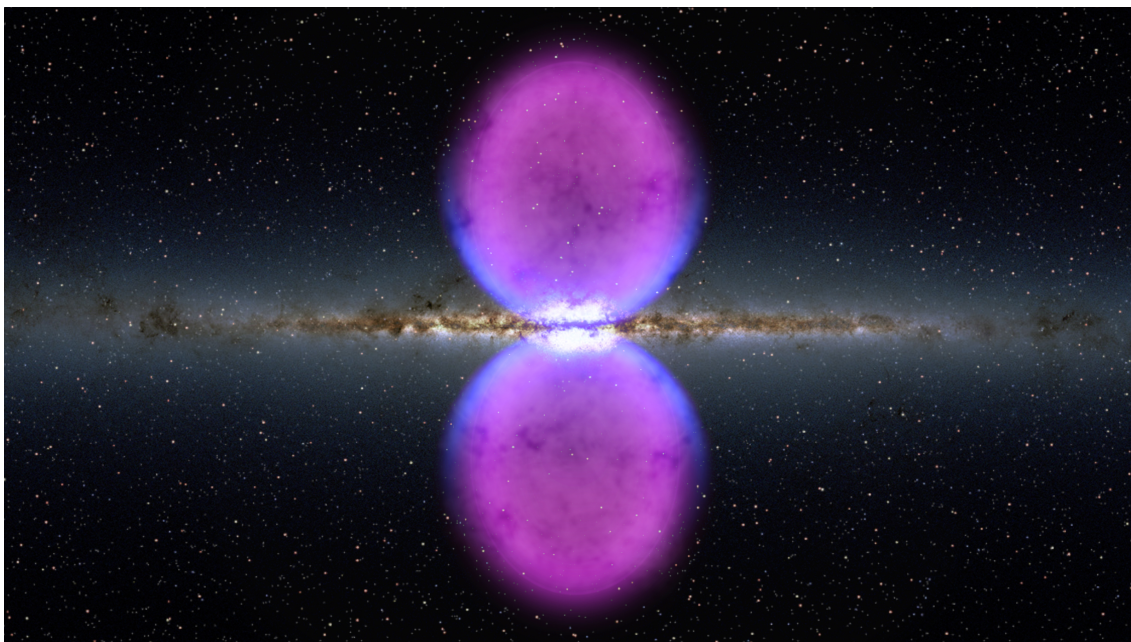
Sgr A* emittoi mahdollisesti myös gammasäteilyä. Vuonna 2021 julkaistussa artikkelissa raportoidaan yli 10 vuotta kestäneiden Fermi Large Area Telescope (Fermi LAT) -havaintojen analyysistä, joiden mukaan galaksin keskustasta tulevan gammasäteilyn pistelähde olisi hyvin todennäköisesti Sgr A*. Aukon lähettämä gammasäteily ei ole muuttuvaa niin kuin röntgensäteily, toisin sanoen gamma-alueella ei siis nähdä roihuja. Gammasäteilyn säteilymekanismi on vielä arvoitus, sillä jälleen täl-

laisia havaintoja on hyvin vaikea tehdä galaksin keskustasta. Gammasäteilyn alkuperäksi on ehdotettu esimerkiksi Sgr A*ⁿ tapahtumahorisontin läheistä aluetta tai kertymävirtauksen sisimpiä osia, joissa kiihtyneet protonit tuottaisivat gammasäteitä synkrotoni- ja syklotronisäteilyn myötä. Tulevaisuudessa tarkempia gammahavaintoja Sgr A*^{:stä} saadaan uuden Cherenkov Telescope Array Observatoryn (CTAO) avulla. [45]

Röntgenroihujen ja suoran gammasäteilyn lisäksi Sgr A*^{:n} epäillään synnyttäneen niin sanotut gamma- ja röntgenkuplat [46]. Fermi-kuplat (engl. *Fermi bubbles*) löydettiin vuonna 2010 Fermi LAT:n havaintojen myötä. Havainnot paljastivat kaksi massiivista gammasäteilyn muodostamaa kuplaa, jotka sijaitsevat Linnunradan keskustan ylä- ja alapuolella. Näiden alkuperäksi ollaan ehdotettu menneitä kertymä-tapahtumia Sgr A*^{:een}, joissa suuri määrä energiaa olisi päätynyt aukkoon [47]. Jo 1990-luvulla löydettiin myös röntgensäteilyä galaksimme keskustan molemminpuolin ROSAT-satelliitin havaintojen myötä [48]. Kuvassa 6 nähdään Fermi LAT:n ja ROSAT:n havaitsemat kuplat, joiden sijainnit selkeästi korreloivat toistensa kanssa [49]. Lisäksi vuonna 2020 havaittiin eRosita -teleskoopin avulla galaksimme keskustan molemminpuoliset vielä suuremmat röntgenkuplat. Vaikka ROSAT:n havaintojen perusteella röntgensäteilyn ajateltiin olevan peräisin supernovajäänteistä, on nyt eROSITA:n havaintojen myötä todennäköisempää, että säteily on peräisin keskustan mustan aukon lähimenneisyyden aktiivisuudesta [50].

4 Yhteenveto

Sgr A* on galaksimme keskustan supermassiivinen musta aukko, joka saa energiansa aineen kertymäprosessista, jossa gravitaatioenergiaa vapautuu säteilyn muodossa [15]. Mustan aukon hitaan kertymävirtauksen vuoksi sen luminositeetti on alhainen, ja eniten emissiota havaitaan radioalueella [38]. Sgr A*^{:n} on havaittu tuottavan päivittäisiä säteilyn muutoksia, eli roihuja, erityisesti röntgen- ja infrapuna-alueilla. Li-



Kuva 6. Linnunradan keskustan molemminpuoliset Fermi- ja röntgenkuplat. Gammäsäteily näkyy vaaleanpunaisena ja röntgensäteily sinisenä. [49]

säksi aukko saattaa olla Linnunradan keskustan molemminpuolisten suurien Fermi- ja röntgenkuplien aiheuttaja. Sgr A*ⁿ tutkimuksessa pyritään jatkuvasti selvittämään, millaisissa prosesseissa nämä eri aallonpituiset säteilyt syntyvät [20]. Huomattavia läpimurtoja tutkimuksessa ollaan jo kuitenkin lähivuosina tehty, erityisesti EHT:lla saatujen havaintojen myötä [2, 15].

Edellä mainittujen hitaan kertymän ja heikon säteilytehokkuuden vuoksi Sgr A* voidaan luokitella matalan luminositeetin aktiiviseksi galaksiyttimeksi (engl. *low-luminosity active galactic nuclei, LLAGN*) [51]. On kuitenkin mahdollista, että musta aukko on ollut aktiivisempi aikaisemmin, noin muutama sata vuotta sitten. Havaitut röntgenroihut saattavat olla todisteita Sgr A*ⁿ huomattavasti voimakkaammasta aktiivisuusvaiheesta, sillä entisen röntgenemission uskotaan heijastuvan galaksin keskustan molekyylipilvistä [20]. Mallien mukaan Sgr A* on menneisyydessään tuottanut ainakin kaksi kirkasta purkausta nostaen luminositeettitasoaan, ja voidaan arvioida, että aukko on ollut 10^3 kertaa aktiivisempi parin viime vuosisadan aikana

[45]. Aktiivisuusvaiheiden uskotaan siis vaihtelevan, eli mustan aukon kertymätahti sekä luminositeetti voivat muuttua ajan kuluessa [20].

Tulevaisuus Sgr A*:n tutkimuksessa näyttää lupaavalta. VLBI -tekniikan kehityessä radiohavaintojen erotuskyky paranee entisestään, jolloin mustien aukkojen kuvantaminen helpottuu. Sgr A*:n mahdollisen hiukkassuihkun etsintä jatkuu edelleen, ja erityisesti EHT:n tulevien parannuksien myötä sen havaitseminen näyttää todennäköiseltä [39]. Myös muiden säteilyalueiden havaintoinstrumenttien kehittyessä saadaan yhä parempi käsitys Sgr A*:n tilasta ja ylipäätään mustien aukkojen fysiikasta. Koko Linnunradan keskustan tutkimus on tärkeää paitsi mustien aukkojen toiminnan, mutta myös galaksien evoluution tutkimuksen kannalta [1]. Tulevaisuudessa tutkimus saattaa paljastaa meille kaoottiset prosessit, jotka kontrolloivat mustien aukkojen aktiivisuutta [20].

Viitteet

- [1] M. d. Laurentis, I. D. Martino ja R. D. Monica, *Reports on Progress in Physics* **86**, 104901 (2023).
- [2] The Event Horizon Telescope Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters* **964**, L25 (2024).
- [3] P. Padovani, D. M. Alexander, R. J. Assef, B. De Marco, P. Giommi, R. C. Hickox, G. T. Richards, V. Smolčić, E. Hatziminaoglou, V. Mainieri ja M. Salvato, *The Astronomy and Astrophysics Review* **25**, 2 (2017).
- [4] P. Hall ja G. Richards, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **116**, 593 (2004).
- [5] C. M. Urry ja P. Padovani, *Radio-loud AGN model*, 1995.
- [6] C. M. Urry ja P. Padovani, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **107**, 803 (1995).
- [7] G. Shields, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **111**, 661 (1999).
- [8] A. Marconi, G. Risaliti, R. Gilli, L. K. Hunt, R. Maiolino ja M. Salvati, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **351**, 169 (2004).
- [9] F. Yuan ja R. Narayan, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **52**, 529 (2014).
- [10] J.-H. Woo ja C. M. Urry, *The Astrophysical Journal* **579**, 530 (2002).
- [11] J. A. Kollmeier, C. A. Onken, C. S. Kochanek, A. Gould, D. H. Weinberg, M. Dietrich, R. Cool, A. Dey, D. J. Eisenstein, B. T. Jannuzi, E. L. Floc'h ja D. Stern, *The Astrophysical Journal* **648**, 128 (2006).
- [12] A. Merloni, S. Heinz ja T. D. Matteo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **345**, 1057 (2003).
- [13] S. P. O'Sullivan ja D. C. Gabuzda, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **400**, 26 (2009).
- [14] A. C. Fabian, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **50**, 455 (2012).
- [15] Event Horizon Telescope Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters* **930**, L12 (2022).
- [16] The Nobel Prize, *Nobel Prize in Physics 2020*, 2025.
- [17] A. Vachher ja S. G. Ghosh, *Strong Gravitational Lensing by Rotating Quantum-Corrected Black Holes: Insights and Constraints from EHT Observations of M87* and Sgr A**, 2024, arXiv:2410.11332 [gr-qc].

- [18] K. Schwarzschild, On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory, 1999, arXiv:physics/9905030.
- [19] D. Finkelstein, Physical Review **110**, 965 (1958).
- [20] R. Genzel, F. Eisenhauer ja S. Gillessen, Reviews of Modern Physics **82**, 3121 (2010).
- [21] National Radio Astronomy Observatory, Radio Astronomy Archive, 2025.
- [22] National Radio Astronomy Observatory, The Technology of Radio Astronomy, 2025.
- [23] K. Nilsson, L. Takalo, J. Piironen ja k. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, *Havaitseva tähtitiede, Ursan julkaisuja, 91*, kolmas, korjattu laitos. ed. (Tähtitieteellinen yhdistys UrsaHelsinki, 2006), publication Title: Havaitseva tähtitiede.
- [24] National Radio Astronomy Observatory, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, 2025.
- [25] Harvard University, About | Event Horizon Telescope, 2025.
- [26] T. E. H. T. Collaboration, The Astrophysical Journal Letters **875**, L1 (2019).
- [27] E. R. Wollman, T. R. Geballe, J. H. Lacy ja C. H. Townes, Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 218, p. L103-L107 (1977).
- [28] J. H. Lacy, C. H. Townes, T. R. Geballe ja D. J. Hollenbach, The Astrophysical Journal **241**, 132 (1980).
- [29] J. H. Lacy, C. H. Townes ja D. J. Hollenbach, The Astrophysical Journal **262**, 120 (1982).
- [30] F. Melia ja H. Falcke, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **39**, 309 (2001).
- [31] G. H. Rieke ja M. J. Rieke, The Astrophysical Journal **330**, L33 (1988).
- [32] K. Sellgren, M. T. McGinn, E. E. Becklin ja D. N. Hall, The Astrophysical Journal **359**, 112 (1990).
- [33] A. Krabbe, R. Genzel, S. Drapatz ja V. Rotaciuc, The Astrophysical Journal, 382:L19-L22 (1991).
- [34] R. Genzel, N. Thatte, A. Krabbe, H. Kroker ja L. E. Tacconi-Garman, The Astrophysical Journal **472**, 153 (1996).
- [35] A. M. Ghez, B. L. Klein, M. Morris ja E. E. Becklin, The Astrophysical Journal **509**, 678 (1998).
- [36] A. Eckart, R. Genzel, T. Ott ja R. Schodel, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **331**, 917 (2002).

- [37] M. Parsa, A. Eckart, B. Shahzamanian, V. Karas, M. Zajacek, J. A. Zensus ja C. Straubmeier, *The Astrophysical Journal* **845**, 22 (2017).
- [38] A. Eckart, R. Schoedel, F. K. Baganoff, M. Morris, T. Bertram, M. Dovciak, D. Downes, W. J. Duschl, V. Karas, S. Koenig, T. Krichbaum, M. Krips, D. Kunneriath, R.-S. Lu, S. Markoff, J. Mauerhan, L. Meyer, J. Moultaqa, K. Muzic, F. Najarro, K. Schuster, L. Sjouwerman, C. Straubmeier, C. Thum, S. Vogel, H. Wiesemeyer, G. Witzel, M. Zamaninasab ja A. Zensus, *Journal of Physics: Conference Series* **131**, 012002 (2008).
- [39] E. Chavez, S. Issaoun, M. D. Johnson, P. Tiede, C. Fromm ja Y. Mizuno, *Prospects of Detecting a Jet in Sagittarius A* with VLBI*, 2024, arXiv:2405.06029 [astro-ph].
- [40] National Institute of Standards and Technology (NIST), *What is synchrotron radiation?*, 2024.
- [41] T. E. H. T. Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters* **910**, L12 (2021).
- [42] F. K. Baganoff, Y. Maeda, M. Morris, M. W. Bautz, W. N. Brandt, W. Cui, J. P. Doty, E. D. Feigelson, G. P. Garmire, S. H. Pravdo, G. R. Ricker ja L. K. Townsley, *The Astrophysical Journal* **591**, 891 (2003).
- [43] E. Mossoux, B. Finocietty, J.-M. Beckers ja F. H. Vincent, *Astronomy & Astrophysics* **636**, A25 (2020).
- [44] A. Čadež, U. Kostić, M. Calvani, R. Ruffini ja G. Vereshchagin, *kirjassa Tidal effects in the vicinity of a black hole* (PUBLISHERMinsk, Belarus, 2010), pp. 30–40.
- [45] F. Cafardo ja R. Nemmen, *The Astrophysical Journal* **918**, 30 (2021).
- [46] T. Scheffler, M. M. Schulreich, D. P. P. R. Schurer ja D. Breitschwerdt, *Tidal disruption events as origin of the eROSITA and Fermi bubbles*, 2025, arXiv:2501.18713 [astro-ph].
- [47] M. Su, T. R. Slatyer ja D. P. Finkbeiner, *The Astrophysical Journal* **724**, 1044 (2010).
- [48] R. J. Egger, B. Aschenbach, M. P. E. Garching ja GERMANY, *Interaction of the Loop I Supershell with the Local Hot Bubble*, 1994, arXiv:astro-ph/9412086.
- [49] T. C. a. F. Reddy, *NASA Scientific Visualization Studio | Fermi discovers giant gamma-ray bubbles in the Milky Way*, 2010.
- [50] P. Predehl, R. A. Sunyaev, W. Becker, H. Brunner, R. Burenin, A. Bykov, A. Cherepashchuk, N. Chugai, E. Churazov, V. Doroshenko, N. Eismont, M. Freyberg, M. Gilfanov, F. Haberl, I. Khabibullin, R. Krivonos, C. Maitra, P. Medvedev, A. Merloni, K. Nandra, V. Nazarov, M. Pavlinsky, G. Ponti, J. S. Sanders, M. Sasaki, S. Sazonov, A. W. Strong ja J. Wilms, *Nature* **588**, 227 (2020).

- [51] R. d. Menezes, R. Nemmen, J. D. Finke, I. Almeida ja B. Rani, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **492**, 4120 (2020).