

Keskikokoisten mustien aukkojen havaitseminen
ELT:llä

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Karmen Koit
Tarkastaja:
Dos. T. Hovatta

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Koit, Karmen Keskikokoisten mustien aukkojen havaitseminen ELT:llä

LuK-tutkielma, 15 s.

Fysiikka

Marraskuu 2025

Tässä tutkielmassa tutustutaan mustiin aukkoihin sekä niiden havaitsemiseen. Mustien aukkojen havaitseminen on vaikeaa. Ne eivät säteile sähkömagneettista säteilyä, joten niitä ei voi suoraan havaita. Mustia aukkoja havaitaan epäsuorasti tähtien liikkeiden avulla, jotka muuttuvat kohdatessaan suuren painovoiman. Keskikokoiset mustat aukot ovat oletettavasti massaltaan $100-10^5$ Auringon massaa sekä löytyvät oletetusti tiheistä pallomaisista tähtijoukoista. Keskikokoisten mustien aukkojen havaitseminen on erittäin vaikeaa, sillä tähdet ovat niin lähekkäin, että niitä on vaikea erottaa toisistaan. Keskikokoisia mustia aukkoja ei ole vielä siis havaittu, vaikka ehdokkaita löytyykin. Tähtijoukon tähtien havaitsemiseen auttaisi parempi erotuskyky. Rakenteilla oleva ELT (Extremely Large Telescope) tulee olemaan suurin maanpäällinen teleskooppi. ELT:n 39-metrinen peili antaa sille paremman erotuskyvyn kuin aiemmilla optisilla teleskoopeilla. Tämän erotuskyvyn avulla ELT:n on tarkoitus tutkia näitä tiheitä pallomaisia tähtijoukkoja, sekä sitä kautta epäsuorasti havaita niissä olevia keskikokoisia mustia aukkoja.

Asiasanat: Mustat aukot, keskikokoiset mustat aukot, ELT, MICADO, nopeushajonta

Sisällys

Johdanto	1
1 Optiset teleskoopit	2
1.1 Merkittäviä optisia teleskooppeja	3
1.2 ELT ja MICADO	5
2 Mustat aukot	6
2.1 Mitä mustat aukot ovat	6
2.2 Miten havaitaan	7
3 Miten ELT mullistaisi mustien aukkojen tutkimisen	11
4 Yhteenveto	13

Johdanto

Mustien aukkojen havaitseminen on yhä tieteelle uutta. Ensimmäiset suorat havainnot mustista aukoista on tehty vasta hiljattain. Esimerkiksi Linnunradan keskellä olevasta supermassiivisesta mustasta aukosta julkaistiin ensimmäiset kuvat vuonna 2022, jolloin EHT teleskoopilla on otettu radioalueen kuva, jossa nähdään mustaa aukkoa kiertävää kuumaa kaasua [1]. Mustia aukkoja voidaan havaita myös epäsuorasti tähtien liikkeiden avulla.

Supermassiivisten sekä tähden massaisten mustien aukkojen lisäksi on olemassa näiden massaluokkien välissä olevat keskikokoiset mustat aukot. Näitä ei ole vielä kyetty havaitsemaan, sillä niiden oletetaan sijaitsevan hyvin tiheissä pallomaisissa tähtijoukoissa. Tähän asti käytöissä olleilla kaukoputkilla ei ole tarpeeksi hyvin kyetty erottamaan tähtijoukon yksittäisiä tähtiä tai niiden liikeratoja, jotta voitaisiin arvioida mustan aukon vaikutus niihin.

Luvussa 1 käydään läpi mitä optiset teleskoopit tarkoittavat, millaisia merkittäviä optisia teleskooppeja on jo käytetty sekä kuvaillaan ELT:n ominaisuuksia. Luvussa myös selitetään mitä erotuskyky tarkoittaa, miksi voidaan käyttää teoreettista erotuskykyä ominaisuuksien arvioinnissa sekä miten se lasketaan.

Luvussa 2 käydään läpi mitä mustat aukot ovat, millaisia mustia aukkoja on sekä miten niitä yleisesti havaitaan tukeutuen Linnunratamme keskustasta löytyneen mustan aukon havaintomenetelmiin. Luvussa myös kerrotaan miten keskikokoiset mustat aukot ovat voineet syntyä sekä mietitään miten juuri keskikokoisia mustia aukkoja voitaisiin havaita.

Luvussa 3 kuvataan ehdokasta keskikokoiselle mustalle aukolle, miten sitä on tutkittu sekä miten ELT tulee keskikokoisia mustia aukkoja havaitsemaan.

1 Optiset teleskoopit

Optiset teleskoopit ovat kaukoputkia, jotka havaitsevat säteilyä infrapuna- sekä optisella eli näkyvän valon alueella. Optisten teleskooppien tarkoitus on kerätä mahdollisimman paljon säteilyä pinnalleen. Tämä säteilyä keräävä pinta voi olla peili, linssi tai näiden yhdistelmä [2]. Tässä tutkielmassa keskitytään optisiin teleskooppeihin, jotka hyödyntävät peilejä. Peilin suuruus vaikuttaa teleskoopin kykyyn havaita kohteita.

Teleskooppien erotuskyky kertoo, kuinka hyvin pieniä yksityiskohtia voidaan havaita. Esimerkiksi lähekkäisistä tähtiryhmistä voidaan hyvällä erotuskyvyllä erottaa yksittäiset ja himmeämmät tähdet. Erotuskyky riippuu peilin halkaisijasta sekä havaittavan säteilyn aallonpituudesta. Suurempi peili tarkoittaa parempaa erotuskykyä. Teoreettinen erotuskyky teleskoopille voidaan laskea kaavalla:

$$\sin \theta \approx \theta = 1,22\lambda/D, \quad (1)$$

jossa θ on erotuskyky, λ on säteilyn aallonpituus ja D on peilin tai linssin halkaisija. Erotuskyky yleisesti esitetään kaarisekunneissa. [2]

Mitä pienempi erotuskyky on, sitä tarkempia yksityiskohtia teleskoopilla voidaan havaita. Optisten teleskooppien sijainti vaikuttaa havaintoihin. Maan pinnalla ilmakehä haittaa havaintoja. Haittaa aiheuttavat esimerkiksi sää, ilmakehän ominaisuudet sekä se, että ilmakehä rajoittaa joidenkin aallonpituuksien pääsyn Maan pinnalle. Ilmakehän rajoitusta voidaan välttää valitsemalla mahdollisimman korkea sekä kuiva sijainti teleskoopille, joka on myös tarpeeksi kaukana asutuksesta. Sijainnin pitäisi olla myös mahdollisimman usein pilvetön. [2]

Ilmakehän vaikutuksia voidaan vähentää myös adaptiivisella optiikalla, jossa käytetään ohutta peiliä. Peilin muotoa muutetaan samalla kun seurataan ilmakehän vaikutuksia vertailutähteen tai lasersäteeseen. Adaptiivista optiikkaa käytetään jo paljon uusissa kaukoputkissa. Kun ilmakehän rajoittaviin tekijöihin ei tarvitse kes-

Taulukko I. Optiset teleskoopit ja niiden ominaisuuksia

Teleskooppi	Havaintoalue	[nm]	Peilin halkaisija [m]	Erotuskyky ["]
HST	Ultravioletti-Infrapuna [3]	115–2500 [3]	2,4 [3]	0,05–0,1 [4]
JWST	Optinen alue-Infrapuna [5]	600–28500 [5]	6,5 [2]	0,023–1,1
VLT	Ultravioletti-Infrapuna [6]	300–25000 [6]	8,2 [2]	0,05 [7]
ELT	Optinen alue-Infrapuna [8]	350–13000 [9]	39 [8]	0,005 [10]

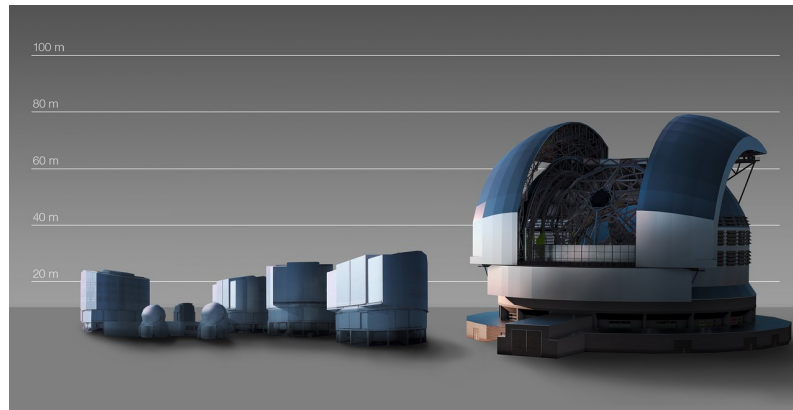
kittyä, voidaan käyttää teoreettista erotuskykyä laskelmiin. [2]

1.1 Merkittäviä optisia teleskooppeja

Monet optiset teleskoopit ovat valmistuessaan saavuttaneet asioita, joita aikaisemmin ei ole pystytty tekemään. Taulukossa I on esitetty eri teleskooppien havaintoalueet, peilin koot ja teoreettinen erotuskyky.

Hubble Space Telescope (HST) on avaruusteleskooppi, joka laukaistiin avaruuteen vuonna 1990 ja aloitti toimintansa samana vuonna [2]. HST havainnoi säteilyä ultravioletista infrapunaa aallonpituuksiin ja sen pääpeilin halkaisija on 2,4 metriä [2, 3]. HST:n erotuskyky on noin 0,05–0,1 kaarisekuntia [4]. 600 nm aallonpituudella HST:n erotuskyky kaavalla (1) laskettuna on 0,069 kaarisekuntia. HST:n avulla on tehty yli miljoona havaintoa 30 vuoden aikana sekä suuri määrä tutkimuksia. Nykyiset tähtitieteen kirjat hyödyntävät HST:n datalla tehtyjen tutkimusten tuloksia [3].

James Webb Space Telescope (JWST) on vuonna 2021 laukaistu ja 2022 toimintansa aloittanut avaruusteleskooppi [5]. JWST havainnoi optisella ja infrapuna-alueella. Sen pääpeilin halkaisija on 6,5 metriä [2]. JWST:n teoreettinen erotuskyky on 0,023 kaarisekuntia 600 nm aallonpituudella. Samalla aallonpituusalueella JWST:n erotuskyky on HST:n vastaavaan arvoon verrattuna pienempi. JWST:n paremman erotuskyvyn johdosta aikaisemmin HST:llä havaituista kohteista on myö-

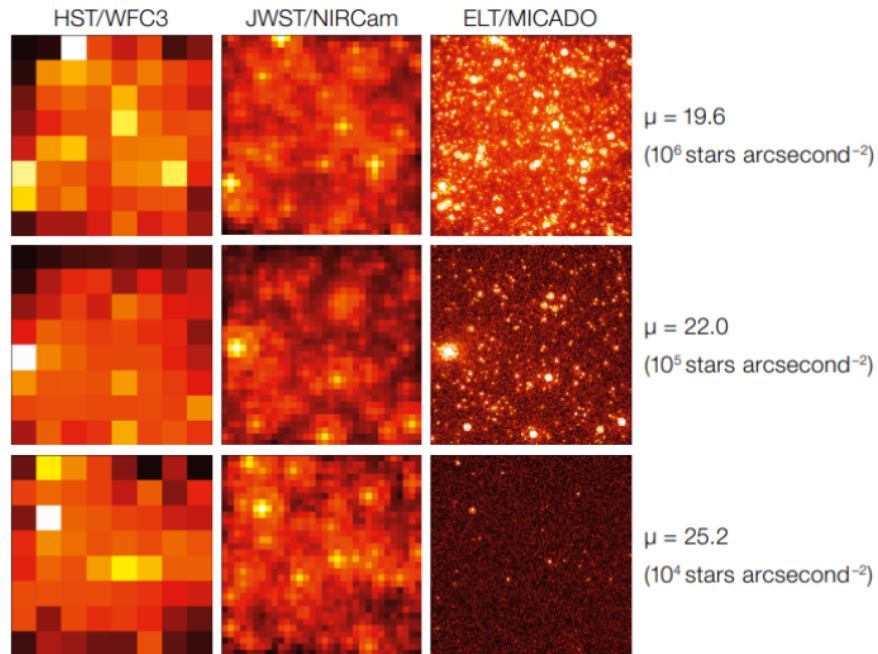


Kuva 1. Kuvitus ELT:n (oikealla) sekä VLT:n (vasemmalla) kokoerosta. Kuva: ESO

hemmin saatu tarkempia kuvia. JWST:n tehtäviin kuuluu esimerkiksi eksoplaneettojen sekä galaksien ja tähtien kehityksen seuraaminen [11]. Koska JWST:tä hyödynnetään monipuolisesti, sen vaikutukset tieteelle ovat laajat.

Very Large Telescope (VLT) on ESO:n (European Southern Observatory) optinen kaukoputkijärjestelmä, joka koostuu neljästä yhtä suuresta peilistä. Yhden VLT:n peilin halkaisija on 8,2 metriä. VLT sijaitsee Pohjois-Chilen Cerro Paranalissa. VLT:n teleskoopit aloittivat toimintansa vuosina 1998 – 2000 [2]. 25 vuoden aikana VLT:n datasta on tehty yli 10000 julkaisua. VLT:n havaintojen avulla on esimerkiksi varmistettu supermassiivisen mustan aukon olemassaolo Linnunradan keskellä. VLT:llä onnistuttiin myös saamaan ensimmäinen suora havainto eksoplaneetasta [12].

Avaruusteleskoopit kuten HST ja JWST välttävät ilmakehän aiheuttamat häiriöt, jolloin niiden havaittua aallonpituusaluetta voidaan laajentaa. Tästä johtuen teoreettinen erotuskyky riittää kuvaamaan näitä laitteita. Osa infrapuna- ja ultravioletialueesta on läpinäkymätöntä suurimmalle osalle Maan päällisistä optisista teleskoopeista. Infrapunaa pidemmällä radioaallonpituuksilla pitää hyödyntää erilaiseen tekniikkaan perustuvia radioteleskooppeja. [2]



Kuva 2. Kuvassa näkyy, miten HST, JWST ja ELT kykenevät erottamaan samoja tiheitä tähtijoukkoja. Tämä havainnollistaa miten ELT:n erotuskyky eroaa muista merkittävistä jo olemassa olevista teleskoopeista. [13, s.17]

1.2 ELT ja MICADO

ELT on maailman suurin rakenteilla oleva teleskooppi, jota rakentaa ESO. Sen suunnitellaan valmistuvan vuonna 2029. ELT:n sijainti on lähellä VLT:tä, Pohjois-Chilen Cerro Armazonessa. ELT tulee havaitsemaan optisella sekä lähi-infrapuna-alueella [8]. Sen pääpeilin halkaisija on 39 metriä, mikä on paljon ELT:n varsinaisen edeltäjän VLT:n pääpeiliä suurempi [2]. Kuvassa 1 voidaan nähdä VLT:n ja ELT:n kokoero. ELT:n erotuskyky tulee olemaan pienimmillään 0,005 kaarisekuntia, mikä on paljon tarkempi kuin edellä mainittujen teleskooppien erotuskyvyt. Tätä eroa on havainnollistettu kuvassa 2, jossa esitetään kuinka tarkasti HST, JWST sekä ELT kykenevät erottamaan yksittäisiä tähtiä samasta tiheästä pallomaisesta tähtijoukosta [10].

MICADO (The Multi-Adaptive Optics Camera for Deep Observations) on yksi ELT:n pääinstrumenteista. MICADO:n päätavoitteina on seurata galaksien evoluutiota, galaksien keskellä olevia mustia aukkoja, pallomaisia tähtijoukkoja, eksopla-

neettoja sekä meidän aurinkokuntaamme [13]. Tässä tutkielmassa keskitytään mustien aukkojen tutkimiseen sekä siihen, kuinka MICADO:a voisi siinä hyödyntää.

2 Mustat aukot

Mustat aukot ovat yleisiä taivaankappaleita universumissamme. Niitä löytyy galaksien keskustoista sekä kuolleiden tähtien jäljiltä. Niistä ei kuitenkaan ymmärretä läheskään kaikkea. Emme esimerkiksi osaa selittää supermassiivisten ja keskikokoisten mustien aukkojen syntymekanismeja tai evoluutiota.

2.1 Mitä mustat aukot ovat

Mustat aukot ovat hyvin tiiviitä kappaleita avaruudessa. Niiden aiheuttama painovoima on niin suuri, ettei mikään materia pääse sitä pakoon. Mustien aukkojen massa voi olla jopa miljoonia kertoja oman aurinkomme massa [2]. Mustat aukot luokitellaan eri luokkiin niiden massan perusteella. Nämä luokat ovat: tähden massaiset, supermassiiviset sekä keskikokoiset. Tähden massaisten mustien aukkojen oletetaan syntyvän suurien tähtien luhistumisista. Niiden massat voivat olla jopa 10 Auringon massaa.

Supermassiiviset mustat aukot löytyvät yleensä galaksien keskustoista ja ovat kooltaan noin 10^6 - 10^{10} Auringon massaa. Tähän asti vain supermassiivisia ja tähden massaisia mustia aukkoja on kyetty havaitsemaan. Keskikokoiset mustat aukot, jotka ovat edellä mainittujen massaluokkien välissä, ovat vielä jääneet havaitsematta, vaikka monta ehdokasta onkin löydetty. Keskikokoisten mustien aukkojen massan oletetaan olevan noin $100 - 10^5$ Auringon massaa. Niiden ajatellaan esimerkiksi selittävän supermassiivisten mustien aukkojen syntymekanismeja. Keskikokoisten mustien aukkojen oletetaan löytyvän esimerkiksi tiheistä pallomaisista tähtijoukoista, joiden yksittäisiä tähtiä emme kykene tällä hetkellä käytössä olevilla kaukoputkilla

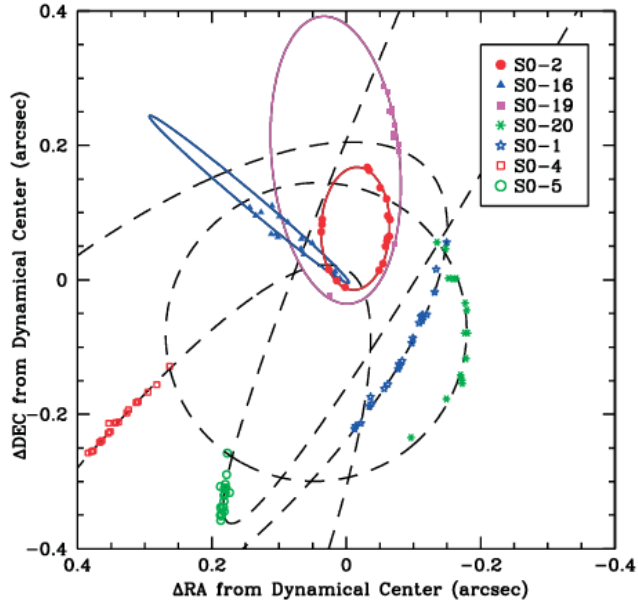
erottamaan kunnolla. [14]

Keskikokoisten mustien aukkojen syntymälle on monta teoriaa. Yhden teorian mukaan keskikokoiset mustat aukot olisivat muodostuneet universumimme ensimmäisistä supermassiivisista tähdistä. Nämä tähdet (Pop-III) olisivat teorian mukaan olleet niin suuria, että ne jättäisivät luhistuessaan noin 100 Auringon massaisia mustia aukkoja jälkeensä. Kyseinen teoria olettaa näiden tähtien olevan harvinaisia, jolloin niiden muodostamien mustien aukkojen määrä olisi sama kuin supermassiivisten mustien aukkojen arvioitu määrä nykypäivänä. Tämä viittaisi siihen, että keskikokoiset mustat aukot ovat kasvaneet supermassiivisiksi mustiksi aukoiksi. Ongelmana olisi miten nämä mustat aukot ovat kasvaneet niin nopeasti hyvin suuriksi, sillä se vaatisi paljon polttoainetta. [14]

Toisen teorian mukaan keskikokoiset mustat aukot voisivat syntyä kaasupilvien luhistumisista. Kaasupilven luhistuminen loisi suurimassaisen mustan aukon ilman, että se kävisi läpi tähden elämänvaiheita. Tämä muodostaisi 10^4 - 10^6 auringon massaisia mustia aukkoja. Se vaatisi hyvin paljon lämpöä ja painetta, mutta ongelmana on kaasupilvien jäähtyminen sekä jakautuminen pienemmiksi osiksi, mikä avaruudessa tapahtuu usein. Pienemmistä osista muodostuu pienempiä tähtiä. Silloin ei saavuteta tarpeeksi suuria mustia aukkoja, jotta ne voitaisiin laskea keskikokoisiksi mustiksi aukoiksi. [14]

2.2 Miten havaitaan

Mustia aukkoja on vaikea havaita, sillä ne eivät säteile sähkömagneettista säteilyä. Yksi tapa havaita mustia aukkoja on tähtien liikkeiden seuranta. Se tarkoittaa tähtien nopeuksien ja ratojen seuraamista mahdollisten mustien aukkojen ympärillä [15]. Mustan aukon lähellä tähdet kohtaavat aukon aiheuttaman painovoiman, jolloin tähden liikerata muuttuu. Tähdien epätyypillisen liikeradan voi siis usein selittää massiivinen kappale kuten musta aukko. Tähtien liikkeiden seuraamisella ha-



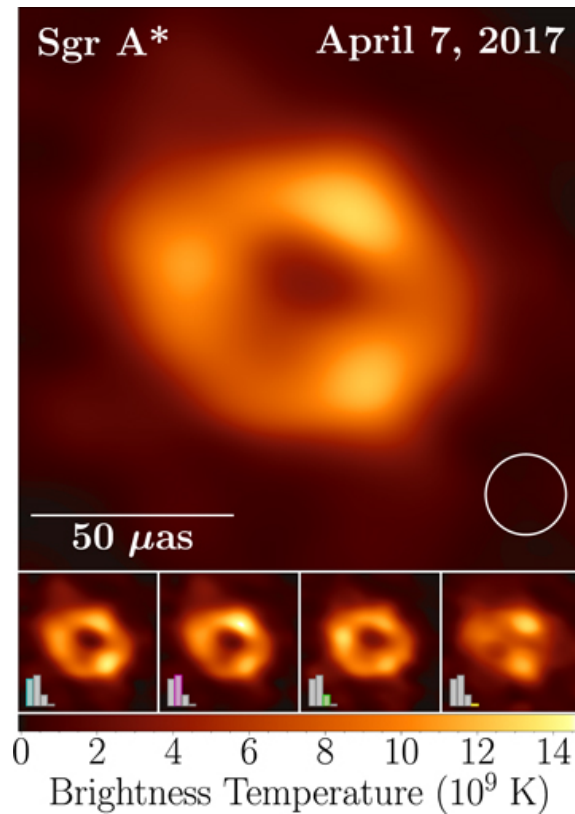
Kuva 3. Sgr A* lähellä seuratut tähdet, jotka johtivat Linnunradan keskellä olevan supermassiivisen mustan aukon toteamiseen. Eri väriset pisteet ovat eri tähtiä havaittuina eri ajankohtina. Värilliset viivat ovat havaittuja kiertoratoja. Mustat viivat ovat tähtien paikkojen avulla laskettuja ennustettuja kiertoratoja. Akselit viittaavat etäisyyden dynaamisesta keskustasta, Y-akseli on deklinaatio ja X-akseli on rektaskensio. [16, s.6]

vainnointiin myös Linnunradan keskustassa oleva musta aukko Sagittarius A* [16].

Kuvassa 3 voidaan nähdä miltä tähtien liikerata näyttää mustan aukon lähistöllä.

Toinen tapa havaita mustia aukkoja on suorat havainnot. Tämä tarkoittaa suoraan kappaletta havaitsemalla saatua dataa kuten kuvia. Koska mustat aukot eivät itse säteile, suoria havaintoja on vaikea tehdä teleskoopeilla, jotka käyttävät valoa tai muuta sähkömagneettista säteilyä havainnoimiseen [2]. Siitä huolimatta lähes suoria havaintoja voidaan tehdä koska kaasu ja pöly kiihtyvät ja kuumenevat mustan aukon painovoiman takia, jolloin alue näyttää kirkkaalta mustan aukon ympärillä [17].

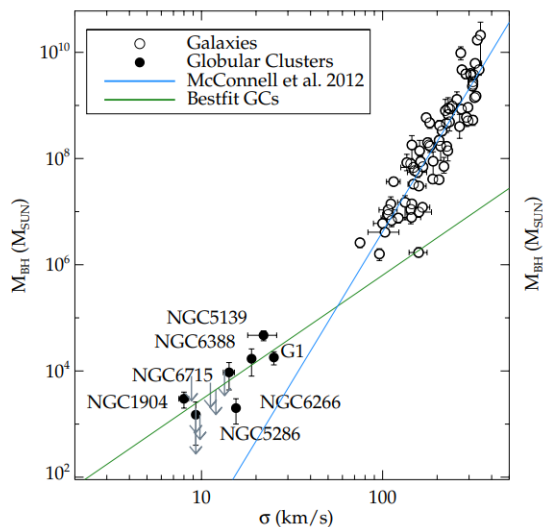
Radioalueen havainnoilla on saatu Sgr A* supermassiivisesta mustasta aukosta kuvia, joiden keskiarvoistettu versio on esitetty kuvassa 4. Kuvassa näkyy kuinka edellä mainittu kaasun ja pölyn kuumeneminen näkyy havainnoissa mustan aukon



Kuva 4. Kuva Sgr A*:sta. Ylempänä oleva suuri kuva on alempien kuvien keskiarvo. Väriskaalan suure on kirkkauslämpötila, joka kuvaa kohteen intensiteettiä. Jokainen alempi paneeli on keskiarvoistettu kuva mustan aukon eri kuvantamismenetelmiä ja malleja käyttäen. [1, s.21]

ympärillä. Radioalueen havainnot tehtiin yhdistämällä monta radioteleskooppia interferometrian avulla suureksi teleskoopiksi, jonka erotuskyky on parempi kuin yksittäisten teleskooppien. [1]

Kolmas tapa havaita mustia aukkoja on erilaisten approksimaatioiden avulla, joita on monta erilaista. Yksi niistä on m-sigma relaatio, joka on tähtien nopeushajonnan σ sekä mustan aukon massan välinen korrelaatio [18, 19]. Nopeushajonta on ilmiö, jossa seurataan galaksien spektriviivojen leveyksistä kuinka nopeasti kappale liikkuu. Galaksia havaittaessa seurataan monia tähtiä ja näiden tähtien spektrien summa muodostaa galaksin yhteisspektrin. Spektrin leveys riippuu siitä, kuinka nopeasti kappale kulkee lähemmäs tai kauemmas havaitsijasta. Jos tähtien liikkeeseen vaikuttaa musta aukko, vaikuttaa se tähtien nopeuden kautta galaksin spektrin le-



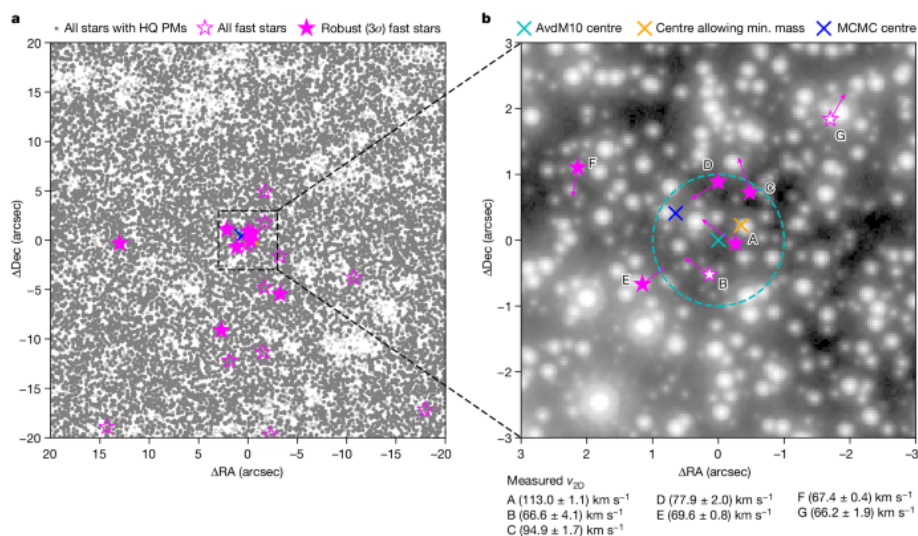
Kuva 5. Kuvassa esitetään m-sigma relaatiosta tehty kuvaaja. Kuvassa näkyvät pisteet ovat galaksien supermassiiviset mustat aukot sekä tähtijoukot, joissa oletetaan olevan keskikokoisia mustia aukkoja. Sininen viiva kuvastaa toisessa tutkimuksessa tehtyä sovitusta supermassiivisten mustien aukkojen massojen sekä nopeushajonnan välillä. Vihreä viiva kuvastaa Lützgendorfin sovitusta tähtijoukkojen massojen ja nopeushajonnan välillä. X-akselissa on nopeushajonta sekä Y-akselissa mustan aukon massa. [19, s.16]

veyteen eli nopeushajontaan [2].

M-sigma relaation kehitti Ferrarese tutkimalla kirjallisuudesta löytyviä mustien aukkojen massoja sekä nopeushajontoja ja vertailemalla niitä toisiinsa. Ferrarese totesi kirjallisuuden pohjalta tehdyn kuvaajan avulla nopeushajontojen korreloituvan hyvin galaksien keskustoissa olevien supermassiivisten mustien aukkojen massojen kanssa. [18]

Lützgendorfin tutkimuksessa vertailtiin m-sigma relaatiota erimassaisille mustille aukkoille. Kuva 5 on tästä tutkimuksesta ja se esittää nopeushajontojen korrelaatiota mustien aukkojen massojen kanssa. Kuvassa nähdään, että galakseissa olevien supermassiivisten mustien aukkojen kulmakerroin on selkeästi erilainen tähtiryhmissä oleviin keskikokoisiin mustiin aukkoihin verrattuna. [19]

M-sigma relaatio vaatii paljon suoria havaintoja. Jotta voitaisiin varmistua siitä,



Kuva 6. Kuva seuratuista tähdistä Omega Centaurin alueella. Kuvassa a: Harmaat pisteet ovat kaikki datasta valitut tähdet. Molemmat pinkit tähdet tarkoittavat nopeasti liikkuvia tähtiä. Akselit kuvaavat sijaintia, Y-akseli on deklinaatio ja X-akseli rektaskensio. Kuvassa b: Kuva on suurennos kuvan a laatikosta, joka on keskellä Omega Centauria. Pinkkeinä vektoreina on nopeiden tähtien liikkeet tutkimuksen mukaan arvioidun sadan vuoden aikana. Kuvan alla on erikseen yksittäisten tähtien kiihtyvyydet. Vaalean sininen risti kuvaa kuvan keskusta ja tumman sininen risti kuvaa MCMC analyysillä arvioitua keskikokoisen mustan aukon sijaintia. Y-akseli ja X-akseli ovat samoja kuin kuvassa a. [15, s.2]

että sovitusten kulmakertoimet ovat tosiaankin erilaisia, tarvitaan toisella havaintomenetelmällä arvioita näiden mustien aukkojen massoista. Tämä onnistuu esimerkiksi havaitsemalla yksittäisten tähtien ratoja kuten Sgr A* tapauksessa. Tarvitaan mahdollisimman hyvä erotuskyky erottamaan näitä yksittäisiä tähtiä pallomaisista tähtijoukoista, joiden avulla voitaisiin laskea mahdollisen mustan aukon massa. [19]

3 Miten ELT mullistaisi mustien aukkojen tutkimisen

Monet tutkimukset ovat väittäneet löytäneensä keskikokoisen mustan aukon Omega Centaurista, joka on Linnunradan suurin pallomainen tähtijoukko. Näitä tutkimuksia on kyseenalaistettu, sillä on vaikea erottaa tähtiä, joihin musta aukko vaikuttaisi.

Sopivia nopeasti liikkuvia tähtiä ei ole myöskään löytynyt tarpeeksi. Tästä johtuen on liian aikaista todeta kyseisen mustan aukon löytyneen.

Häberlen tutkimuksessa seurattiin tähtien liikkeitä Omega Centaurissa 500 HST:n ottaman kuvan avulla. Nämä 500 kuvaa HST on ottanut 20 vuoden ajalta. Näiden avulla löydettiin ja seurattiin seitsemää nopeasti liikkuvaa tähteä Omega Centaurissa. Kuvasta 6 nähdään, miten tähtiä on seurattu. Valittujen seitsemän tähden nopeudet ovat suurempia kuin muiden tähtien keskimääräiset nopeudet. Tähtien liikeradat viittaisivat siis mustaan aukkoon samalla tavalla kuten Sgr A* tapauksessa. Tähtien nopeuksien avulla saadaan arvioitua mustan aukon mahdolliseksi massaksi 8200 Auringon massaa. Havaintojen ongelmana on ollut Linnunradan muut tähdet, jotka ovat voineet mennä havaittavan tähtijoukon eteen. Nämä tähdet voivat näyttää käyttäytyvän samalla tavalla kuin seurattavat nopeat tähdet. [15]

Suurin ongelma tähtiryhmien havaitsemisessa on juuri se, miten lähekkäin tähdet ovat. Huonossa erotuskyvyssä kirkkaampi tähti voi ylivaloittaa koko kuvan, jolloin himmeämpiä tähtiä ei kuvasta voida havainnoida [20]. Verrattaessa kuvan 2 erotuskykyä HST:n ja ELT:n välillä voidaankin todeta, että jos Omega Centaurin alueen tähtiä seurattaisiin ELT:llä, voitaisiin nähdä moninkertaisesti enemmän tähtiä kuin HST:llä. Voidaan siis myös olettaa sen johtavan siihen, että ELT:llä voitaisiin löytää moninkertainen määrä nopeita tähtiä nykyiseen määrään nähden. Näin ollen siis saataisiin paljon lisää havaintoja tiheistä pallomaisista tähtijoukoista. Näiden havaintojen avulla pystytään mahdollisesti löytämään useita keskikokoisia mustia aukkoja eri tähtijoukoista.

4 Yhteenveto

Mustilla aukoilla on suuri merkitys universumissamme ja niiden tutkiminen kertoo meille paljon siitä, miten universumimme toimii. On kuitenkin paljon, mitä ei vielä tiedetä. Keskikokoisten mustien aukkojen tutkiminen kertoisi meille enemmän siitä, miten esimerkiksi supermassiiviset mustat aukot syntyvät. Mustia aukkoja on vaikea havaita koska ne eivät säteile sähkömagneettista säteilyä. On siis seurattava niitä ympäröiviä tähtiä, joiden liikerata muuttuu mustan aukon painovoiman vaikutuksesta. Vaikka havaintoja supermassiivisista ja tähdenmassaisista mustista aukoista on saatu eri tavoin, on keskikokoisten mustien aukkojen havaitseminen silti hankalaa. Keskikokoisten mustien aukkojen oletetaan löytyvän tiheistä pallomaisista tähtijoukoista. Tämä on yksi tärkeimmistä syistä, miksi keskikokoisten mustien aukkojen havaitseminen on vaikeaa. Tähtien ollessa niin lähellä toisiaan, tarvitaan hyvä erotuskyky erottamaan mahdollisimman montaa yksittäistä tähteä, etteivät himmeät tähdet jää kirkkaampien peittoon. Liikeratojen seuraaminen on siis paljon vaikeampaa. ELT tulee olemaan suurin maanpäällinen teleskooppi, jonka erotuskyky tulee riittämään yksittäisten tähtien erottamiseen tiheissä tähtijoukoissa. Siten ELT tulee auttamaan juuri keskikokoisten mustien aukkojen havaitsemisessa.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tässä työssä ei ole käytetty tekoälyä apuna kielenhuollossa ja tekstin selkeyttämisessä. Tekoälyä ei ole käytetty lähteiden analyysiin, datan tulkintaan tai sisällön tuottamiseen itsenäisesti.

Viitteet

- [1] Event Horizon Telescope Collaboration, K. Akiyama *et al.*, The Astrophysical Journal Letters **930**, L14 (2022).
- [2] H. Karttunen, K. J. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen, *Tähtitieteen Perusteet - 6.laitos* (Ursa, 2022).
- [3] NASA Hubble Facts, <https://science.nasa.gov/mission/hubble/overview/about-hubble/>, accessed: 2024-01-15.
- [4] ESA Hubble Facts, <https://esahubble.org/about/general/instruments/>, accessed: 2024-01-16.
- [5] James Webb Telescope, Stats, <https://webbtelescope.org/contents/articles/webb-stats>, accessed: 2025-06-12.
- [6] Very Large Telescope, <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>, accessed: 2024-06-03.
- [7] E. S. Observatory, *The VLT White Book* (ESO, 1998).
- [8] ESO ELT Facts, <https://elt.eso.org/about/facts/>, accessed: 2024-01-05.
- [9] Instruments, ELT, <https://elt.eso.org/instrument/>, accessed: 2025-10-01.
- [10] ESO ELT FAQ, <https://elt.eso.org/about/faq/>, accessed: 2024-01-16.
- [11] James Webb Telescope, Articles, <https://webbtelescope.org/resource-gallery/articles>, accessed: 2025-07-23.
- [12] I. De Gregorio-Monsalvo, M. Hilker ja B. Leibundgut, Published in The Messenger vol. 191 **pp. 47-49**, 3 pages (2023).
- [13] R. Davies *et al.*, Published in The Messenger vol. 182 **pp. 17-21**, 5 pages (2021).
- [14] J. E. Greene, J. Strader ja L. C. Ho, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **58**, 257 (2020).
- [15] M. Häberle *et al.*, Nature **631**, 285 (2024).
- [16] A. M. Ghez *et al.*, The Astrophysical Journal **620**, 744 (2005).
- [17] NASA Black Holes, <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes/>, accessed: 2024-01-16.
- [18] L. Ferrarese ja D. Merritt, The Astrophysical Journal **539**, L9 (2000).
- [19] N. Lützgendorf *et al.*, Astronomy & Astrophysics **555**, A26 (2013).
- [20] R. Davies *et al.*, The MICADO first light imager for the ELT: overview, operation, simulation, 2018.