

Galaksiydinten aktiivisuuksien ja morfologioiden polarimetrinen tutkimus

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
Mikko Tuomi
Tarkastaja:
Dos. Alexandra Veledina

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Tuomi, Mikko Galaksiydinten aktiivisuuksien ja morfologioiden polarimetrinen tutkimus

Kandidaatintutkielma, 20 s., 3 liites.
Fysiikka
Helmikuu 2026

Tutkielmassa keskitytään aktiivsten galaksien joukkoon kuuluvien Seyfertin galaksien ydinten lähiympäristön ominaisuuksien ja geometrioiden tutkimiseen käyttäen röntgenpolarimetriaa. Tutkielmassa käydään aluksi läpi aktiivsten galaksien päätyypit ominaisuuksineen, jonka jälkeen keskitytään erityisesti radiohiljaisiin tyypin 1 ja 2 Seyfertin galakseihin, keskittyen niiden ytimissä olevien supermassiivisten mustien aukkojen (engl. supermassive black hole, SMBH) aiheuttamiin säteilyä tuottaviin prosesseihin. Lopuksi kerrotaan viimeaikaisista aktiivisten galaksiydinten (engl. active galactic nuclei, AGN) röntgenpolarimetrisistä tutkimuksista ja verrataan tuloksia kahden aktiivisuudeltaan eroavan galaksiytimen radiopolarimetriisiin havaintoihin.

Asiasanat: Aktiivinen galaksiydin, Seyfertin galaksi, supermassiivinen musta aukko, kertymäkiekko, röntgensäteily, röntgenkorona, polarisaatio

Sisällys

Johdanto	1
1 Galaksiytimet	2
1.1 Aktiiviset galaksiytimet	2
1.1.1 Tyypin 1 Seyfertin galaksit	4
1.1.2 Tyypin 2 Seyfertin galaksit	4
1.2 Ei-aktiiviset galaksiytimet	5
2 Aktiivisten galaksiydinten säteilymekanismit ja ominaisuudet	5
2.1 Radiosäteily	5
2.2 Ultraviolettisäteily	5
2.3 Röntgensäteily ja käänteinen Comptonin sironta	6
2.4 Polarisaatio ja sen syntymekanismit	7
2.4.1 Synkrotronisäteily	8
2.4.2 Sironta	8
3 Röntgenavaruusteleskoopit ja viimeaikainen tutkimus sekä radioin- terferometria	9
3.1 Röntgenavaruusteleskoopit	9
3.1.1 Chandra	10
3.1.2 XMM-Newton	10
3.1.3 NuSTAR	10
3.1.4 IXPE	11
3.2 Event Horizon Telescope ja ensimmäiset kuvat mustista aukoista . . .	12
3.2.1 M87*	13
3.2.2 Sgr A*	13
4 Ensimmäiset AGN-röntgenpolarimetriset tulokset	14

4.1	MCG-05-23-26	14
4.2	IC 4329A	15
4.3	NGC 4151	15
4.4	Circinus-galaksi	15
4.5	NGC 1068	16
5	Johtopäätökset ja avoimet kysymykset	17

Johdanto

Aktiivinen galaksi on sellainen galaksi, jonka luminositeetti ylittää pelkästään sen sisältämien tähtien yhteenlasketun luminositeetin [1]. Huomattava määrä säteilyä havaitaan tulevan tällaisen galaksin ytimeistä, hyvin pieneltä alueelta. Tällaisen galaksin ytimessä oleva supermassiivinen musta aukko tuottaa gravitaatiovetovoimallaan sitä kiertävän, tähtienvälisestä aineesta koostuvan optisesti tiheän, geometrisesti ohuen kertymäkiekon. Tämän emittoima sähkömagneettisen säteilyn spektri noudattaa mustan kappaleen säteilylakia ja sen säteilymaksimi havaitaan ultraviolettisäteilyn aallonpituusalueella [2, 3]. Mustan aukon tapahtumahorisontin läheisyydestä havaitaan lisäksi röntgensäteilyn aallonpituusalueella maksiminsa saavaa, potenssilain mukaista säteilyä, jonka oletetaan syntyvän kertymäkiekon fotonien vuorovaikuttaen tapahtumahorisontin lähellä kiertävien suurienergisten elektronien kanssa [4]. Tällöin käänteisen Comptonin sironnan ansiosta emittoituu röntgenfotoneita koronaksi kutsutulta, tapahtumahorisontin läheiseltä alueelta. Yhdessä nämä säteilymekanismit selittävät ytimeistä havaittavan säteilytehon synnyn. Näiden koronasta sironneiden lineaarisesti polarisoituneiden, sekä kertymäkiekosta heijastuneiden fotonien polarisaatioaste ja -kulma voidaan nykyteknologian ansiosta havaita, mahdollistaen mallien muodostamisen koronan ja kertymäkiekon sisäosien morfologioista [5].

Tässä tutkielmassa keskitytään viiden tyypin 1 ja 2 Seyfertin galaksin, aktiivisten ydinten sisältämien supermassiivisten mustien aukkojen ympärilleen keräämien kertymäkiekkojen ja niitä verhoavien koronoiden röntgenpolarimetrisiin tutkimuksiin. Tutkielmassa kerrotaan lyhyesti aktiivisten galaksiydinten rakenteesta, sekä prosesseista, jotka aiheuttavat emittoituvien fotonien polarisoitumista. Lisäksi verrataan röntgenpolarimetrisia tuloksia radiopolarimetrian avulla tehtyihin havaintoihin kahdesta galaksiytimestä, joista vain toinen on aktiivinen.

1 Galaksiytimet

1.1 Aktiiviset galaksiytimet

Aktiivisen galaksin ytimessä on voimakkaasti koko sähkömagneettisen säteilyn spektrin aallonpituusalueella havaittavaa säteilyä tuottava tiivis alue, jonka keskellä oletetaan oleva supermassiivinen musta aukko. Kuten jo edellä todettiin, tällaisen galaksin luminositeetti ylittää sen sisältämien tähtien yhteenlasketun luminositeetin. Kirkkaimpien aktiivisten galaksien, kvasaarien (engl. quasi-stellar object, QSO, "quasar") tapauksessa peittyy koko emogalaksi näkyvistä. Seyfertin galaksit (nimetty niitä tutkineen amerikkalaisen tähtitieteilijän Carl Keenan Seyfertin mukaan) ovat aktiivisten galaksien alalaji, jotka poikkeavat kvasaareista juuri siten, että itse emogalaksi on myös näkyvissä. Tämä luminositeetin ylimäärä selittyy ytimessä olevan supermassiivisen mustan aukon ympärilleen muodostaman kertymäkiekon (engl. accretion disk) voimakkaasta säteilystä, ja sitä ympäröivän kuumen koronan emittoimasta, suurienergistä röntgenfotoneista, jotka ovat vastuussa valtaosasta AGN:n röntgensäteilystä. Koronan plasman lämpötila voi olla jopa miljardi Kelviniä. Koronan röntgenspektri havaitaan galaksista riippuen energiavälillä 0,3 - 100 keV ja se kattaa viidestä kymmeneen prosenttia AGN:n bolomertrisestä (so. kaikkien aallonpituusalueiden yli integroidun säteilyn) luminositeetista [6].

Klassisen Shakura-Sunyaev -mallin mukaan optisesti tiheä ja geometrisesti ohut kertymäkiekko muodostuu, kun musta aukko vetää painovoimallaan itseään kohti ainetta ympäröivästä avaruudesta [3]. Alunperin tämä malli kehitettiin vakiomassavirrallisia röntgenkaksoistähtisysteemejä (engl. X-ray binary, XRB) varten. Supermassiivisten mustien aukkojen tapauksessa erona on toisen, materiaa luovuttavan kumppanin puutos, sillä materiavirta koostuu tähtienvälisestä aineesta (engl. interstellar medium, ISM). Kuitenkin Shakura-Sunyaev -mallin skaalautuvuuden (mittakaava, keskustähden massa, akkreetionopeus) vuoksi sitä voidaan käyttää myös ar-

vioitaessa aktiivisten galaksiydintenkin tapauksia. Supermassiivisen mustan aukon massa voi olla jopa miljardeja Auringon massoja, sen säteen ollessa jopa satoja astronomisia yksiköitä. Kiloparsekien mittakaavaisissa galakseissa on SMBH kuitenkin erittäin kompakti. SMBH:ta ympäröivän materian joutuessa riittävän lähelle, alkaa se virrata kohti mustan aukon tapahtumahorisonttia (engl. event horizon) spiraalimaisesti, sillä systeemin kulmaliikemäärä estää suoran putoamisen. Kertymäkiekossa materian kulmaliikemäärää siirtyy sisemmiltä radoilta ulospäin monimutkaisen prosessin kautta; magneettisten ja turbulenttisten voimien ansiosta, sekä materian viskositeetista johtuen. Täten kertymäkiekossa aineen gravitaatiopotentiaalienergiaa muuttuu lämpöenergiaksi, sen ratasäde pienenee ja kiertonopeus kasvaa. Ulommat kertymäkiekon osat säteilevät optisella alueella, sisempänä jo ultravioletialueella. Ennen pitkää kiekossa on kaasu kuumentunut niin paljon, että se täysin ionisoitunut plasmaksi. Lopulta materia saapuu viimeiselle stabiilille ympyräradalle (engl. innermost stable circular orbit, ISCO), jonka sisäpuolella ei ole enää vakaita kiertoratoja. Tältä alueelta materiaa ajautuu siis tapahtumahorisontille ja sitä kautta mustaan aukkoon.

Joidenkin aktiivisten galaksiydinten luminositeetissa on havaittu lyhyellä aikavälillä tapahtuvaa muutosta, joka muistuttaa röntgenkaksoistähti järjestelmissä havaittua vastaavaa luminositeetin muutosta. Siinä missä XRB:n tapauksessa luminositeetin muutos selittyy Shakura-Sunyaev -mallin avulla massavirran muutoksella, on aktiivisten galaksiydinten tapauksessa ehdotettu tämän luminositeetin nopean muutoksen johtuvan ISCOssa ja koronassa tapahtuvien nopeiden säteilymuutosten ansiosta [7]. Tällaiset ajallisesti luminositeettiaan muuttavat AGN:t tunnetaan ns. changing-look -nimellä.

1.1.1 Tyypin 1 Seyfertin galaksit

Tyypin 1 Seyfertin galakseja havaitaan suoraan niiden napojen suuntaisesti, jolloin nähdään koko galaksi kertymäkiekkoineen. Tämä tyyppi on suosiollisin koronan röntgenpolarimetriin tutkimuksiin etenkin radiohiljaisten galaksien tapauksessa, joiden synkrotronisäteilyä tuottavat napojen suuntaiset radiosuihkut ovat riittävän heikkoja, mahdollistaen selkeämmät havainnot läheltä tapahtumahorisonttia [8]. Radioäänekkäissä galakseissa navoilta purkautuvat suihkut tuottavat voimakasta röntgensäteilyä synkrotronisäteilyn muodossa, jolloin itse koronan ja kertymäkiekon morfologian tulkitseminen käy hankalammaksi.

Siirtymä tyypistä 1 tyyppiin 2 sisältää alatyyppejä, kuten 1,2, 1,5, 1,8 ja 1,9. Tämä alatyyppeihin jako perustuu galaksien havaittujen optisiin ominaisuuksiin eli niissä havaittaviin leveisiin ja kapeisiin, vetykaasun eri nopeusalueisiin viittaaviin, $H\alpha$ - ja $H\beta$ -emissioviivoihin [9]. Ensiksi mainittua emissiota syntyy, kun vetyatomien elektroni putoaa toiselta viritystilaltaan ensimmäiselle, jälkimmäisessä kolmannelta viritystilalta ensimmäiselle viritystilalle. Molemmissa tapauksissa emittoituu spesifisen aallonpituuden fotoni. Aiemmin mainitut changing-look AGN:t ovat juuri näitä, joissa lyhyelläkin aikavälillä havaitaan alatyypin vaihtumista esim. tyypistä 1,5 tyyppiin 1,8 ja takaisin.

1.1.2 Tyypin 2 Seyfertin galaksit

Tyypin 2 Seyfertin galakseja havaitaan sellaisessa kulmassa, jossa galaksia kiertävä kiekko (ns. kylmä torus) osittain peittää ytimen näkyvistä. Röntgenfotonit kuitenkin suurenergisinä vuorovaikuttavat tämän kylmän toruksen kanssa mahdollistaen sekä toruksen, että peittyneen ytimen ominaisuuksien tutkimisen [8]. Tämä on hyödyllistä, sillä suuri osa Seyfertin galakseista on juuri tätä tyyppiä 2 [10]. Mahdollisest radiosuihkut ovat myös tässä tyypissä hyvin tutkittavissa.

1.2 Ei-aktiiviset galaksiytimet

Nimensä mukaisesti ei-aktiiviset galaksiytimet ovat sellaisten galaksien ytimiä, joiden luminositeetti selittyy sen sisältämien tähtien yhteenlasketulla luminositeetilla. Esimerkiksi kotigalaksimme Linnunrata on ei-aktiivinen galaksi. Sen ytimessä sijaitsee supermassiivinen musta aukko Sagittarius A* (Sgr A*), joka osoittaa ajoittaista, joskin lievää aktiivisuuden muuttumista [11].

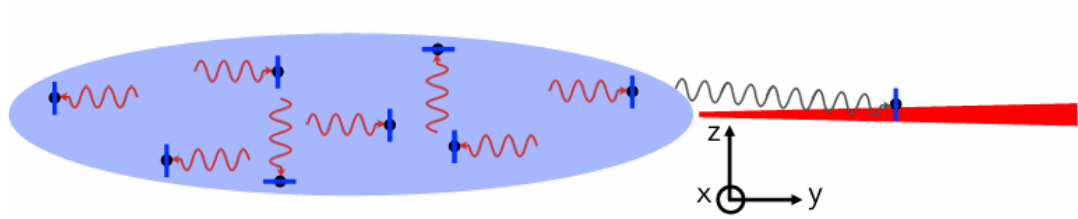
2 Aktiivisten galaksiydinten säteilymekanismit ja ominaisuudet

2.1 Radiosäteily

Radiosäteily on sähkömagneettisen säteilyn matalaenergisintä säteilyä. Sen spektri kattaa likimääräisesti energiat välillä 10 peV - 1 meV. Radiosäteilyä aktiivisissa galaksiytimissä aiheutuu erityisesti synkrotronisäteilyn tuottamana SMBH:n napojen suuntaisten, voimakkaasti magnetoituneiden suihkujen spiraaliliikkeeseen ajamien suurienergisten elektronien ansiosta.

2.2 Ultraviolettisäteily

Kertymäkiekossa sisäkkäisillä radoilla oleva materia kiertää toisistaan poikkeavilla nopeuksilla, sisemmän kiertäen ulompaa nopeammin. Tällöin aineen vuorovaikutuksessa keskenään syntyy viskoottista kitkaa, johtaen lämpötilan kasvuun. Aiemmin selitetyn, materian ratasäteen pienenemiseen johtavien turbulenttisten, magneto-hydrodynaamisten syiden ansiosta, päätyy kiekossa kiertävä, pääosin kaasusta ja pölystä koostuva materia ennen pitkää ISCOlle. Siellä aine on jo kokonaan ionisoitunut plasmaksi, säteillen ultravioletin aallonpituusalueella. Tämä säteily noudattaa mustan kappaleen säteilylakia, kuten Shakura-Sunyaev -malli toteaa [3].

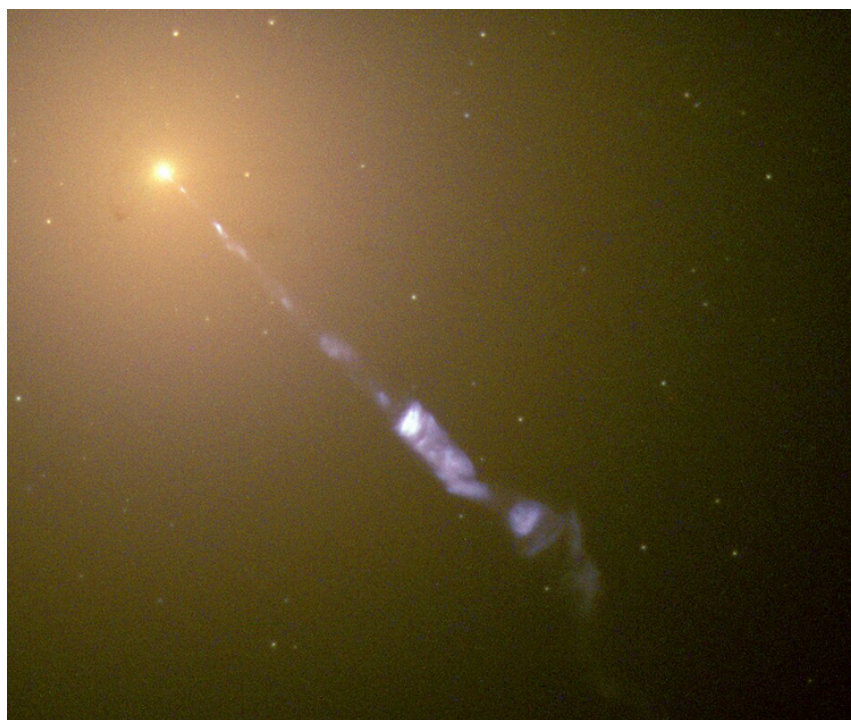


Kuva 1. Lineaarisesti polarisoidun säteilyn synty ja sironta koronassa (sininen ovaali) ja kertymäkiekossa (punainen "kiila"). Punaisina aaltolina piirretyt fotonit vuorovaikuttavat mustina palloina esitettyjen elektronien kanssa, jolloin ne siroavat kohtisuoraan (siniset janat) fotonin alkuperäistä suuntaa vastaan [14].

2.3 Röntgensäteily ja käänteinen Comptonin sironta

Yleisesti on hyväksytty, että röntgensäteily aktiivisen galaksin ytimen lähialueelta on peräisin kertymäkiekon sisäosien ja tapahtumahorisontin välisestä koronasta. Täällä kertymäkiekon sisempien osien termisesti säteilevät ultraviolettifotonit vuorovaikuttavat kuumien, suurienergisten elektronien kanssa, jolloin käänteisen Comptonin sironnan seurauksena emittoituu röntgensäteilyä [12]. Nämä röntgenfotonit voivat joko heijastua suoraan kohti havaitsijaa voimakkaasti polarisoituen, tai taittua relativistisesti kohti kertymäkiekon pintaa, josta ne heijastuvat polarisoitumattomina kohti havaitsijaa.

Heijastuneessa röntgenspektrissä havaitaan fluoresenssiiviivoja, kuten huomattava raudan $K\alpha$ -viiva, sekä leveä "Compton hump", jonka huippu on noin 20-30 keV [5, 13]. $K\alpha$ -fotoni syntyy, kun atomi vuorovaikuttaa suurienergisen fotonin, elektronin tai ionin kanssa, joka irrottaa atomista elektronin sen K-kuorelta. Tällöin syntyy K-kuorelle aukko, jonka lähes välittömästi täyttää L-kuorelta siirtyvä elektroni. Samassa syntyy karakteristinen fotoni, jonka aallonpituus on alkuainekohtainen mahdollistaen emittoivan aineen tunnistamisen. Raudalla tämä fotoni on energialtaan noin 6,4 keV, ionisaatioasteesta riippuen [13].



Kuva 2. Hubble-avaruusteleskoopin ottama kuva M87-galaksin ytimestä sinkoutuvasta hiukkassuihkusta. Suihkun pituus kuvassa on noin 1,5 kpc. Kuva sivulta <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/04/m87-jet-jpg.webp>.

2.4 Polarisaatio ja sen syntymekanismit

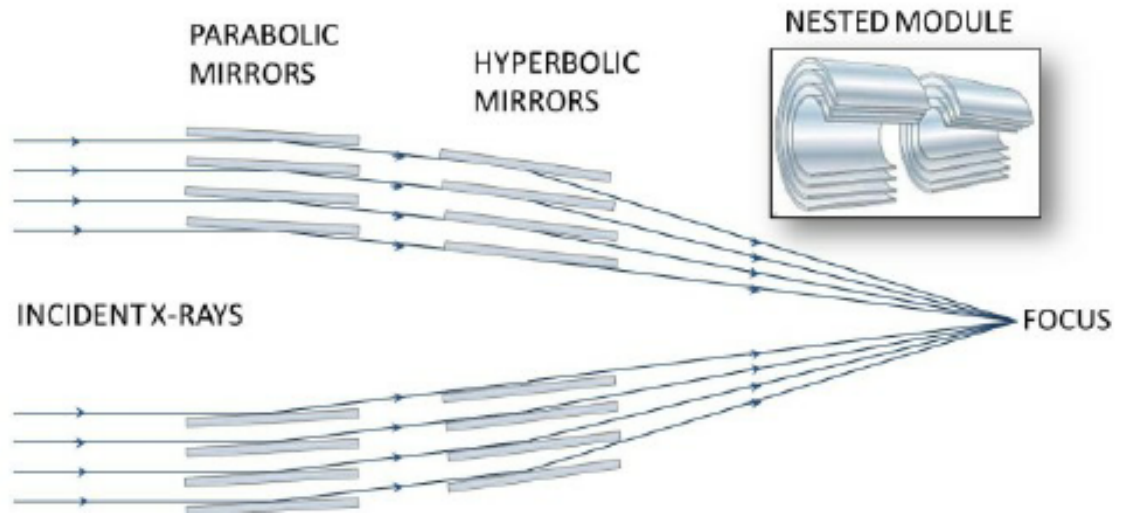
Valo on sähkömagneettista säteilyä, koostuen magneetti- ja sähkökenttävektoreista, jotka värähtelevät sinimuotoisesti kohtisuorasti toisiinsa nähden. Polarisaatiota mitataan yleisesti kuitenkin sähkövektorista. Polarisaatio jakautuu erikseen polarisoitumattomaan, lineaarisesti polarisoituneeseen sekä ympyräpolarisoituneisiin komponentteihin. Esim. tavallinen hehkulamppu emittoituva valo on polarisoitumatonta, eli sen sähkökenttävektori värähtelee joka suuntaan sattumanvaraisesti. Lineaarises- ti polarisoitua valoa voidaan tuottaa ohjaamalla polarisoitumaton valo kulkemaan tiheään hilan läpi, jonka hilojen etäisyys toisistaan on kyseisen valon aallonpituuden luokkaa. Ainoastaan hilan suuntainen komponentti fotonin sähkövektorista pääsee läpi hilan, jolloin tuloksena on lineaarisesti (taso-) polarisoitunutta valoa. Polarisaatiota tapahtuu luonnossa esim. valon heijastuessa pinnasta, tai fotonien vuorovai- kuttaessa elektronien, ionien tai ulkoisen magneettikentän kanssa.

2.4.1 Synkrotronisäteily

Magneettikentän suuntaan liikkuva varattu hiukkanen kokee siihen kohdistuvan voiman, joka saa sen spiraalimaiseen kiertoliikkeeseen magneettikenttäviivan ympäri. Tällöin hiukkanen on jatkuvasti kiihtyvässä liikkeessä, jolloin se emittoi säteilyä. Jos hiukkanen liikkuu relativistisella nopeudella (riittävän suurella prosenttiosuudella valonnopeudesta), syntyvää säteilyä sanotaan synkrotronisäteilyksi, muulloin syklotronisäteilyksi. Aktiivisten galaksiydinten tapauksessa synkrotronisäteilyä syntyy mustan aukon pyörimisakselin suuntaisten, voimakkaasti magnetoituneiden suihkujen mukana pyörivien relativististen elektronien emittoimana. Synkrotronisäteily on voimakkaasti tasopolarisoitunutta. Kuvassa 2 näkyy Hubble-avaruusteleskoopin ottama kuva aktiivisen radiogalaksin M87 ytimeistä lähtevän relativistisista elektroneista sekä muistakin alkeishiukkasista koostuva suihku.

2.4.2 Sironta

Tapahtumahorisontin ulkopuolella, kuumassa koronassa suurienergiset elektronit vuorovaikuttavat fotonien kanssa käänteisen Comptonin sironnan kautta. Fotonin sähkökenttä saa elektronin oskilloimaan edestakaisin sähkökentän suuntaan. Tällöin elektroni on jatkuvasti kiihtyvässä liikkeessä, jolloin emittoituu elektronin värähtelysuuntaan kohtisuorassa värähtelevää, tasopolarisoitunutta valoa. Kuva 1 esittää tätä prosessia. Juuri nämä polarisoituneet fotonit mahdollistavat koronan morfologian tutkimisen, koska nykytekniikan herkkyys mahdollistaa niiden polarisaatioasteen ja -kulman mittaamisen [15].



Kuva 3. Wolter-teleskoopin periaatekuva useine, sisäkkäisine peileineen [16].

3 Röntgenavaruusteleskoopit ja viimeaikainen tutkimus sekä radiointerferometria

3.1 Röntgenavaruusteleskoopit

Koska Maan ilmakehä absorboi avaruudesta saapuvan röntgensäteilyn, on röntgenpektrin havaintoja varten vietävä observatorio itse avaruuteen. Röntgenteleskooppi eroaa rakenteensa perusteella optisen alueen teleskoopista huomattavasti. Röntgensäteily on suurienergisenä erittäin läpituokevaa, joten optisessa tähtitieteessä käytetyt peilit eivät sovellu röntgentähtitieteeseen. Röntgenfotoni voidaan kuitenkin heijastaa, jos se saapuu peilille sopivassa kulmassa, jolloin fotonin kulkusuuntaan lähes samansuuntaisesti radiaalisesti sijoitetut sisäkkäiset peilit, mahdollistavat röntgenfotonien vaiheittaisen heijastamisen polttopisteeseen, jolloin kuva fotonin emittoineesta kohteesta voidaan muodostaa. Tällaista peiliratkaisua kutsutaan keksijänsä mukaisesti Wolter-teleskoopiksi. Kuva 3 esittää tällaista teleskooppia [16].

Kerrotaan seuraavasti lyhyesti muutamasta nykyaikaisesta röntgenobservatorios- ta, jotka yhdessä osallistuivat luvun lopussa kerrottavaan tutkimukseen.

3.1.1 Chandra

Yhdysvaltain avaruushallinnon NASAn (engl. National Aeronautics and Space Administration) kesäkuussa vuonna 1999 laukaisema Chandra -röntgenobservatorio (engl. Chandra X-Ray Observatory) on vanhin edelleen toiminnassa oleva röntgenteleskooppi. Alunperin sen suunniteltu toiminta-aika oli viisi vuotta, joten se on ylittänyt tavoitteensa jo moninkertaisesti. Sillä on Wolter I -tyypin, iridiumpäällysteinen lasipeilikonstruktio, ja se kykenee puolen kaarisekunnin kulmaresoluutioon. Se operoi 0.08-10 keV:n energiavälillä. Chandra on erittäin elliptisellä radalla, apogeum ja perigeum ovat 140 000 km ja 10 000 km, inklinaatio on 28,5 astetta. Sen ajoaine on loppunut jo kauan sitten, mutta se pysyy radallaan vielä vuosikymmeniä [17, 18].

3.1.2 XMM-Newton

Euroopan avaruusjärjestön ESan (engl. European Space Agency) joulukuussa 1999 laukaisema XMM-Newton (engl. X-Ray Multi-Mirror Mission) on edelleen toiminnassa. Se koostuu kolmesta identtisestä Wolter I -tyypin röntgenteleskoopista, joissa jokaisessa on 58 koaksiaalista, nikkelistä valmistettua kultapäällysteistä peiliä. Säteilyenergiavälillä 1,5-8 kiloelektronivolttia se kykenee 4,2-6,6:n kaarisekunnin kulmaresoluutioon.

XMM-Newtonin periodiltaan 48-tuntinen rata on erittäin elliptinen, perigeum on 7 000 km ja apogeum on 114 000 km, ratainklinaation ollessa noin neljäkymmentä astetta. Sen rata kulkee Van Allenin säteilyvyöhykkeiden läpi, jolloin havaintoja ei voi tehdä säteilykuormasta johtuen [19].

3.1.3 NuSTAR

NASA:n kesäkuussa 2012 ekvatoriaaliselle matalalle Maan kiertoradalle (engl. Low Earth Orbit, LEO) laukaisema NuSTAR (engl. Nuclear Spectroscopic Telescope Array) kykenee operoimaan 3-79 keV:n, eli kovan röntgensäteilyn alueella. Se koostuu

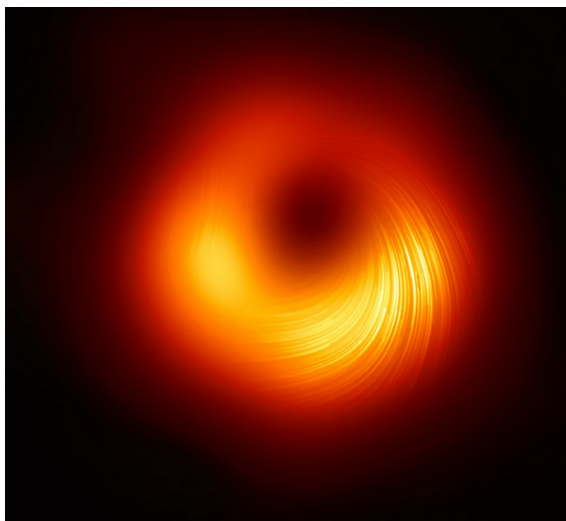
kahdesta identtisestä 133 konsentrista peiliä sisältävästä Wolter I -tyypin röntgen-teleskoopista. Se kykenee kahdeksantoista kaarisekunnin kulmaresoluutioon.

Koska NuSTAR on LEOlla, kokee se yläilmakehän jarruttavan, heikon kitkavoiman, jolloin sen ratanopeus ja -korkeus pienenee jatkuvasti. Sillä ei ole kykyä ratansa muuttamiseen reaktiomootoreiden ja ajoaineen puutteesta johtuen, jolloin ennen pitkää se palaa ilmakehässä. Se on kuitenkin edelleen toiminassa ja on jo ylittänyt sille suunnitellun kymmenen vuoden toiminta-ajan [20].

3.1.4 IXPE

NASAn ja Italian kansallisen avaruusjärjestö ASI:n (it. Agenzia Spaziale Italiana) kollaboraationa joulukuussa 2021 ekvaattoriradalle noin kuudensadan kilometrin korkeuteen laukaistu IXPE (engl. Imaging X-Ray Polarimetry Explorer) on edistynein koskaan valmistettu röntgenobservatorio. Nimensä mukaisesti sen tarkoitus on kuvantaa röntgenpolarimetrian avulla kohteita, joihin aikaisemman teknologian herkkyys ei ole riittänyt. IXPE kykenee vähintään kolmenkymmenen kaarisekunnin kulmaresoluutioon 2-8 keV:n energiavälillä. Erityisen hyvin IXPE soveltuu mm. juuri aktiivsten galaksidydinten tutkimiseen [21].

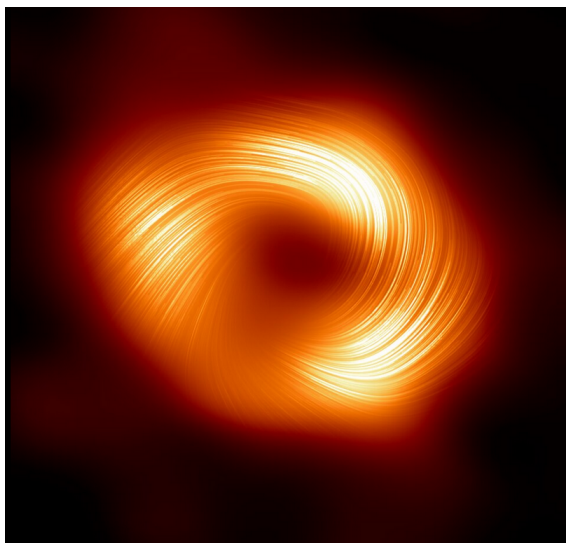
IXPE:n erottaa edellä mainituista röntgenobservatorioista juuri tämä kyky havaita röntgenfotonien polarisaatiota. Tämä onnistuu käytten ns. kaasupikselidetektoreita (engl. gas pixel detector, GPD), joihin IXPE:n kolmen identtisen kahdenkymmenenneljän konsentrisista peileistä koostuvien teleskooppien heijastamat röntgenfotonit keskitetään. Tavallisesta CCD-kameran detektorista poiketen, kulkee fotoni neonpohjaisella kaasulla täytetyn välikerroksen läpi, jolloin kaasu ionisoituu synnyttäen ns. fotoelektronin. Tämän fotoelektronin polarisaatioaste ja -kulma pystytään mittaamaan, jolloin samalla saadaan selville vastaavat arvot alkuperäisen röntgenfotonin lähteelle, sillä syntynyt fotoelektroni säilyttää alkuperäisen fotonin ominaisuudet [22].



Kuva 4. EHT:n ottama kuva aktiivisen galaksin M87:n ytimen mustan aukon varjosta ja ympäröivästä kertymäkiekosta radiopolaritmetriaa käyttäen, jolla kertymäkiekon magneettikenttien vaikutus näkyy selvästi spiraalimaisena. Kuva: European Southern Observatory, EHT Collaboration.

3.2 Event Horizon Telescope ja ensimmäiset kuvat mustista aukoista

Event Horizon Telescope (EHT) on monikansallinen radioastronominen projekti, joka koostuu useasta eripuolille maailmaa sijoitetuista radioteleskoopeista. Yhdistämällä näiden radioteleskooppien vastaanottama data vaihe-ero huomioiden saadaan muodostettua ikäänkuin yksi suuri, käytännössä maapallon kokoinen teleskooppi. Tämä konsepti tunnetaan erittäin pitkän kantaviivan interferometriana (engl. very-long baseline interferometry, VLBI). Koska resoluutio, eli havaittavan kohteen kulmaläpimitta, on funktio säteilyn aallonpituudesta jaettuna teleskoopin halkaisijalla (kaukaisimpien yksittäisten radioteleskooppien välimatka), saadaan interferometrialla erittäin tarkka resoluutio: EHT:n tapauksessa jopa luokkaa 50 mikrokaarisekuntia. Radioastronomian etuna on myös ilmakehän lähes täydellinen läpinäkyvyys radiosäteilylle, mahdollistaen käytännössä jatkuvan havainnoinin, pienin poikkeuksin.



Kuva 5. EHT:n radiopolarisaatiota hyväksikäyttäen ottama kuva Linnunradan keskustähden, supermassiivisen mustan aukon Sagittarius A* varjosta ja sen ympärilleen keräämästä kertymäkiekosta, jonka spiraalimaisten magneettikenttien vaikutus kiekossa näkyy selvästi. Kuva: European Southern Observatory, EHT Collaboration.

3.2.1 M87*

EHT onnistui kuvantamaan aktiivisen elliptisen ylijättiläisgalaksin M87 ytimessä sijaitsevan SMBH:n, M87*:n, varjon vuonna 2021, muutamaa vuotta myöhemmin julkaistiin sen magneettikenttää visualisoiva, radiopolarisaation datan avulla käsitelty kuva. Kuvassa 4 nähdään selvästi kuinka ydintä kiertävä magnetoituneesta plasmasta koostuva kertymäkiekon sisäosien paksusta, kuumasta ja voimakkaasti magnetoituneesta osasta säteilee juuri sen magneettikentälle kohtisuoraa polarisoidua radiosäteilyä.

3.2.2 Sgr A*

Ei-aktiivisen kotigalaksimme, Linnunradan ytimessä, reilun kahdeksan kiloparsekin etäisyydellä oleva SMBH, Sagittarius A* (Sgr A*), on myös kuvannettu EHT:lla. Polarisaatiohavainnot hyödyntämällä myös tälle kuvalle (kuva 5) saatiin magneettikentälle visualisaatio (julkaistu 2024), lopputuloksen ollessa samankaltainen kuin M87-galaksinkin tapauksessa. Huomionarvoista on Sgr A*:n huomattavasti pienem-

pi koko verrattuna M87*:een, sillä jälkimmäinen on tuhansia kertoja suurempi. Koska kohde on pieni, on viidenkymmen mikromaarisekunnin resoluutioon päästämiseksi käytettävä millimetriaallonpituutta, silloin kun kantaviivana on maapallon kokoluokka. Millimetrialueella ilmakehän häiriöt vaikeuttavat havaintointia. Pienempi koko yhdistettynä Linnunradan tasossa, suoraan näkösaiteella olevien lukemattomien tähtien, kaasun ja pölyn kanssa tekee Sgr A*:sta haastavan havaittavan. Sgr A* osoittaa myös ajoittain nopeallakin aikavälillä tapahtuvaa luminositeetin muutosta, tuoden lisähaastetta kuvantamiseen [23]. Lisäksi jo itse radiointerferometria on haastavaa, johtuen maapallon pyörimisestä ja antennien vastaanottaman säteilyn Fourier-synteesiä vaativasta yhteensovittamisesta [11].

4 Ensimmäiset AGN-röntgenpolarimetriset tulokset

Ensimmäinen radiohiljaisten Seyfertin galaksien IXPE:n röntgenpolarimetriset havainnot saatiin valmiiksi 2021-2024, ja Marin *et al.* kokosivat viiden AGN:n tulokset yhteen tulkintoineen [8]. Kuvassa 6 on esitetty tulokset graafisesti.

4.1 MCG-05-23-26

Noin 42,2 megaparsekin etäisyydellä olevaa tyyppin 1,9 Seyfertin galaksia MCG-05-23-16:ta havaittiin IXPE:llä touko- ja marraskuussa 2022 yhteensä 1,13 Ms:n ajan. Havaintoihin osallistuivat myös XMM-Newton ja NuSTAR [24, 25]. Observatorioiden yhteishavaintojen perustellaan vahvistettiin säteilyspketrin jakautuvan kolmeen eri osaan: relativistisesti ionisoituneeseen heijastukseen kertymäkiekosta, neutraaliin heijastukseen kaukaisemmasta materiasta, sekä potenssilakia noudattavasta osasta, jonka osuus koko 2-8 keV:n vuosta on noin 95 prosenttia. Tämän lisäksi IXPE havaitsi röntgensäteilyn polarisaatioasteen ylärajaksi 3,2 prosenttia 99 prosentin luotamustasolla [8].

4.2 IC 4329A

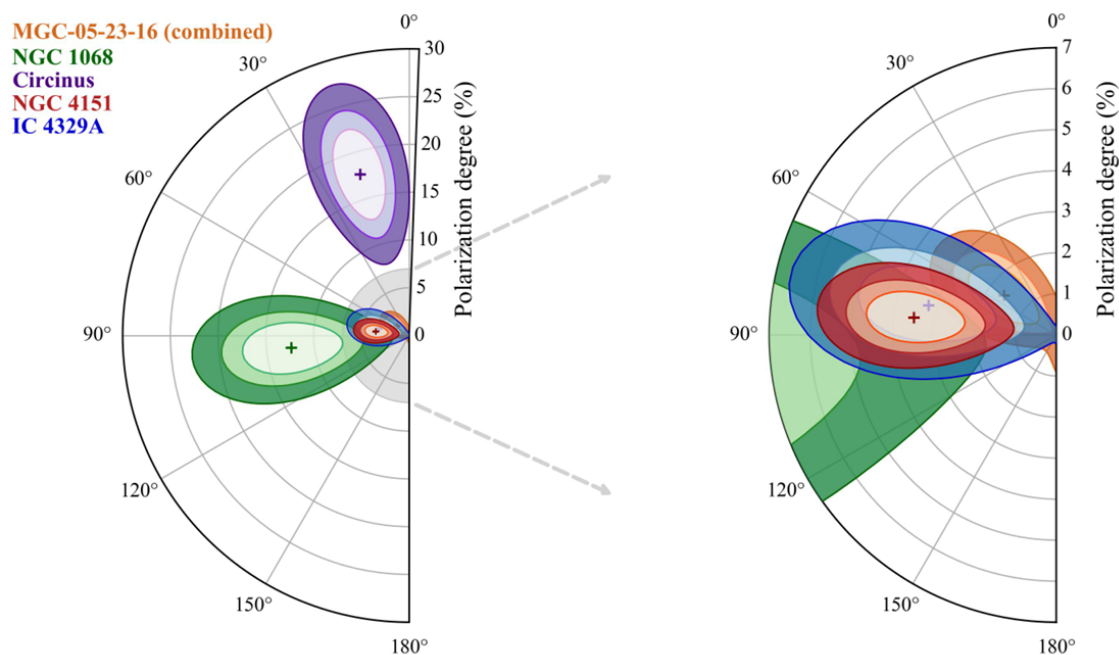
IXPE havaitsi noin 74,9 megaparsekin etäisyydellä olevaa tyypin 1,2 Seyfertin galaksia IC 4329A tammikuussa 2023 yhteensä 458 kilosekunnin ajan, XMM-Newtonin ja NuSTAR:n osallistuessa havaintoineen. IXPE havaitsi polarisaatioasteeksi 2-8 keV:n kaistalla $3,3\% \pm 1,1\%$ ja -kulmaksi $78^\circ \pm 10^\circ$. Tarkka spektrianalyysi vahvisti säteilyn jakautuvan koronan (noin 2/3), kertymäkiekon relativistisen heijastuksen (noin 1/3) ja kaukaisen heijastuksen osiin (noin yhden prosentin osuudella). Lisäksi koronan polarisoituneen röntgensäteilyn avulla pääteltiin koronan olevan kertymäkiekon suuntaisesti sijoittunut [8].

4.3 NGC 4151

NGC 4151 on 18,4 megaparsekin etäisyydellä sijaitseva changing-look AGN (sen tyypin tiedetään vaihtelevan välillä 1,5-1,8), jota sekä IXPE, XMM-Newton sekä NuSTAR havaitsivat yhdessä joulukuussa 2022. IXPE:n havaintojen perusteella polarisaatioasteeksi mitattiin $4,9\% \pm 1,1\%$ ja -kulmaksi $86^\circ \pm 7^\circ$ koko 2-8 keV:n alueella. Aikaisempiin VLBI-havaintoihin hyvin vertautuvan primäärin röntgenstäteilyn polarisaation avulla pääteltiin koronan olevan joko liuska- tai kiilamainen, ja kertymäkiekon suuntainen [8].

4.4 Circinus-galaksi

Circinus-galaksi on 8,6 megaparsekin etäisyydellä oleva tyypin 2 Seyfertin galaksi, jolloin näkösaiteella ydintä ympäröivä torus estää suoran ytimen tarkastelun. Sen röntgenspektrin tiedetään koostuvan lämpimästä heijastuksesta ionisoituneesta, optisesti ohuesta materiasta, sekä optisesti tiheään tiheään toruksen kylmästä heijastuksesta. Mm. voimakasta raudan $K\alpha$ -emissiota tiedetään havaittavan [26–28]. IXPE havaitsi galaksia yhteensä 771,5 kilosekunnin ajan alkaen heinäkuussa 2022. 2-6 keV:n välillä polarisaatioasteeksi mitattiin $20,0\% \pm 3,8\%$ ja -kulmaksi $19,1^\circ \pm 5,5^\circ$.



Kuva 6. IXPE:n viiden ensimmäisen radiohiljaisen AGN:n polarimetriset tulokset. Polarisaatioaste (pysty akseli) ja -kulma (kehä) integroituna 2-8 keV:n alueella, 68-90-99 prosentin luottamusvälit sisäkkäisinä ellipseinä. Oikealla suurennos vasemman kuvan keskustasta [8].

6-8 keV:n välillä merkittävää polarisaatiota ei kuitenkaan havaittu, johtuen todennäköisesti polarisoimattomien raudan fluoresenssihiivojen laimentaman vaikutuksen ansiosta. Chandra osallistui myös havaintoihin kahdessa 10 kilosekunnin jaksossa.

4.5 NGC 1068

NGC 1068 on, kuten Circinus-galaksikin, tyypin 2 Seyfertin galaksi. Se sijaitsee 13,5 megaparsekin päässä. IXPE havaitsi tätä galaksia tammikuussa 2024 yhteensä 1,15 Ms:n ajan, Chandran tukien jälleen kahdessa noin 10 kilosekunnin jaksossa omilla havainnoillaan. IXPE mittasi 2-8 keV:n välillä polarisaatioasteeksi $12,4\% \pm 3,6\%$ ja -kulmaksi $100,7^\circ \pm 8,3^\circ$. Röntgensäteilyn polarisaatiokulman havaittiin olevan kohtisuorassa navoilta emittoituviin radiosuihkuihin, joka viittaa röntgensäteilyä polarisoivan sironnan olevan peräisin huomattavasti galaksin ekvaattoritason yläpuolelta [8].

5 Johtopäätökset ja avoimet kysymykset

Röntgenpolaritmeria aktiivisten galaksiydinten tutkimuksessa on vasta alkuvaiheessa, sillä riittävän tarkkoja havaintoja on kyetty tekemään vasta muutaman vuoden ajan. Edellä käytyjen viiden AGN:n tapauksen perusteella tutkijat ovat kuitenkin päätyneet toteamaan tyyppin 1 Seyfertin galaksien tapauksessa koronan morfologian noudattelevan ohutta kertymäkiekkoa sekä ylä-, että alapuolelta, sisäänpäin paksuuntuen, verhoavaksi alueeksi [8]. Polarisatiohavainnot näin ollen viittaavat geometrisesti tapahtumahorisontin ympärille kehittyneen koronan olevan hyvin epäto- dennäköinen. Tämä on sopusoinnussa aiemmin pääteltyyn, kovassa tilassa säteilevän röntgenkaksoistähtijärjestelmän vastaavan koronamallin kanssa [29].

Koska edellä käsitellyt havaitut kohteet ovat, Sgr A* poislukien, ekstragalaksi- sia ja koska havaittavan röntgensäteilyn valtaosa tulee hyvin läheltä mustan aukon tapahtumahorisonttia ja sitä verhoavaa koronaa, eikä nykyisten röntgenteleskoop- pien erotuskyky ole riittävän hyvä, ei tarkkoja havaintoja yksinomaan röntgenillä voi tehdä. Kohteiden kokonaiskuvan muodostamiseksi tarvitaan siis havaintoja kaikil- la sähkömagneettisen säteilyn spektrin alueelta. Hyvänä esimerkkinä on tästä juuri edellä mainitut havainnot M87-galaksin ja Linnunradan ytimien supermassiivisten mustien aukkojen tapauksissa, sillä eri aallonpituusalueella suoritettavat havainnot an- tavat toisiaan tukevia tuloksia. Jokseenkin uutena työkaluna röntgenpolarimetria kuitenkin raottaa aktiivisten galaksiydinten salaisuuksien verhoa ja tarjoaa työka- lun näin ollen myös yleisesti galaksien ja koko maailmankaikkeuden kehityksen pa- rempaan ymmärrykseen.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tätä tutkielmaa tehdessä ei ole käytetty tekoälyä.

Viitteet

- [1] K. Brecher, *Frontiers of Astrophysics* 438 (1976).
- [2] E. E. Salpeter, **140**, 796 (1964) [doi:10.1086/147973](https://doi.org/10.1086/147973).
- [3] N. I. Shakura ja R. A. Sunyaev, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 24, p. 337-355 **24**, 337 (1973).
- [4] G. S. Vaiana ja R. Rosner, In: *Annual review of astronomy and astrophysics*. Volume 16.(A79-14551 03-88) Palo Alto, Calif., Annual Reviews, Inc., 1978, p. 393-428. **16**, 393 (1978).
- [5] G. Matt, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **260**, 663 (1993).
- [6] M. Elvis, B. Wilkes, J. McDowell, R. F. Green, J. Bechtold, S. Willner, M. Oey, E. Polowski ja R. Cutri, (1994).
- [7] S. Hagen, C. Done ja R. Edelson, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **530**, 4850 (2024).
- [8] F. Marin, V. E. Gianolli, A. Ingram, D. E. Kim, A. Marinucci, D. Tagliacozzo ja F. Ursini, *Galaxies* **12**, 35 (2024).
- [9] B. M. Peterson, *An introduction to active galactic nuclei* (Cambridge University Press, 1997).
- [10] S. Bianchi, R. Maiolino ja G. Risaliti, *Advances in Astronomy* **2012**, 782030 (2012).
- [11] E. H. T. Collaboration *et al.*, arXiv preprint arXiv:2311.08679 (2023).
- [12] F. Haardt ja L. Maraschi, *Astrophysical Journal, Part 2-Letters* (ISSN 0004-637X), vol. 380, Oct. 20, 1991, p. L51-L54. **380**, L51 (1991).
- [13] C. Ricci, Y. Ueda, S. Paltani, K. Ichikawa, P. Gandhi ja H. Awaki, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **441**, 3622 (2014).
- [14] A. Ingram, M. Ewing, A. Marinucci, D. Tagliacozzo, D. Rosario, A. Veledina, D. Kim, F. Marin, S. Bianchi, J. Poutanen *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **525**, 5437 (2023).
- [15] A. Compton, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **14**, 549 (1928).
- [16] J. Gaskin, R. Elsner, B. Ramsey, C. Wilson-Hodge, A. Tennant, S. Christe, A. Shih, K. Kilaru, D. Swartz, p. seller, M. Wilson, D. Stuchlik ja b. weddendorf, kirjassa *SuperHERO: Design of a new hard-X-ray focusing telescope* (PUBLISHER, 2015), Vol. 2015 [doi:10.1109/AERO.2015.7119097](https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119097).
- [17] M. C. Weisskopf, H. D. Tananbaum, L. P. Van Speybroeck ja S. L. O'Dell, *X-ray optics, instruments, and missions iii* **4012**, 2 (2000).

- [18] M. Weisskopf, B. Brinkman, C. Canizares, G. Garmire, S. Murray ja L. Van Speybroeck, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **114**, 1 (2002).
- [19] F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri, J. Clavel, M. Ehle, C. Erd, C. Gabriel, M. Guainazzi, P. Gondoin, R. Much *et al.*, *Astronomy & Astrophysics* **365**, L1 (2001).
- [20] F. A. Harrison, W. W. Craig, F. E. Christensen, C. J. Hailey, W. W. Zhang, S. E. Boggs, D. Stern, W. R. Cook, K. Forster, P. Giommi *et al.*, *The Astrophysical Journal* **770**, 103 (2013).
- [21] M. C. Weisskopf, B. Ramsey, S. L. O'Dell, A. Tennant, R. Elsner, P. Soffitta, R. Bellazzini, E. Costa, J. Kolodziejczak, V. Kaspi *et al.*, *Results in Physics* **6**, 1179 (2016).
- [22] P. Soffitta, E. Costa, G. Di Persio, E. Morelli, A. Rubini, R. Bellazzini, A. Brez, R. Raffo, G. Spandre ja D. Joy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **469**, 164 (2001).
- [23] R.-S. Lu, T. Krichbaum, A. Eckart, S. König, D. Kunneriath, G. Witzel, A. Witzel ja J. Zensus, *Astronomy & Astrophysics* **525**, A76 (2011).
- [24] A. Marinucci, F. Muleri, M. Dovciak, S. Bianchi, F. Marin, G. Matt, F. Ursini, R. Middei, H. Marshall, L. Baldini *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **516**, 5907 (2022).
- [25] D. Tagliacozzo, A. Marinucci, F. Ursini, G. Matt, S. Bianchi, L. Baldini, T. Barnouin, N. Cavero Rodriguez, A. De Rosa, L. Di Gesu *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **525**, 4735 (2023).
- [26] G. Matt, F. Fiore, G. Perola, L. Piro, H. Fink, P. Grandi, M. Matsuoka, E. Oliva ja M. Salvati, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **281**, L69 (1996).
- [27] S. Bianchi, G. Matt ja K. Iwasawa, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **322**, 669 (2001).
- [28] A. Marinucci, G. Miniutti, S. Bianchi, G. Matt ja G. Risaliti, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **436**, 2500 (2013).
- [29] H. Krawczynski, F. Muleri, M. Dovčiak, A. Veledina, N. Rodriguez Cavero, J. Svoboda, A. Ingram, G. Matt, J. A. Garcia, V. Loktev *et al.*, *Science* **378**, 650 (2022).