

Röntgensäteilyn polarisaatiohavainnot apuna
röntgenkaksoistähtien rakenteen määrittämisessä

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2023
Valtteri Waenerberg
Tarkastaja:
Alexandra Veledina

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

WAENERBERG, VALTTERI Röntgensäteilyn polarisaatiohavainnot apuna
röntgenkaksoistähtien rakenteen määrittämisessä

Kandidaatintutkielma, 15 s., 3 liites.

Fysiikka

Helmikuu 2023

Tutkielmassa käsitellään röntgenkaksoistähtiä ja niiden säteilyomaisuuksia ja tarkastellaan erityisesti kohteita, joissa toisena kappaleena on musta aukko. Tutkielmassa käydään aluksi läpi päällisin puolin röntgenkaksoistähtien yleistä rakennetta ja erilaisia prosesseja, jotka niissä tuottavat säteilyä. Kohteissa on havaittu esiintyvän ajoittaisia vaihteluja röntgensäteilyn aallonpituudella ja toisistaan selvästi erottuvia tiloja, joilla vaikuttaa olevan yhteys kohteen geometriseen rakenteeseen. Tutkielmassa tutustutaan röntgensäteilyn polarisaation ja kohteiden geometrian väliseen yhteyteen. Lopuksi tutustutaan ajankohtaiseen tutkimukseen röntgensäteilyn polarisaatiohavaintojen käyttämisestä röntgenkaksoistähtien rakenteen määrittämisen apuna.

Asiasanat: röntgenkaksoistähti, musta aukko, röntgensäteily, polarisaatio

Sisällys

Johdanto	1
1 Röntgenkaksoistähtien rakenne	2
2 Säteilyprosessit röntgenkaksoistähdissä	4
3 Röntgenkaksoistähtien erilaiset tilat	7
3.1 Pehmeä tila	7
3.2 Kova tila	9
4 Ajankohtainen tutkimus	11
4.1 Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)	11
4.2 Viimeaikaiset havainnot	12

Johdanto

Röntgenkaksoistähdet ovat kohteita, joissa tähti ja kompakti objekti, kuten musta aukko tai neutronitähti kiertävät toisiaan. Niiden on havaittu tuottavan voimakasta säteilyä lähes koko sähkömagneettisen spektrin alueelta radioaalloista röntgensäteilyyn saakka. Nimensä mukaisesti ne emittoivat voimakkaasti etenkin röntgensäteilyä n. $0,1 - 10^3$ keV:n alueella [1]. Röntgenkaksoistähtiä on kyetty havaitsemaan n. 50 vuoden ajan, mutta niiden tarkan rakenteen selvittäminen on ollut haasteellista suurien etäisyyksien ja kohteiden pienen koon vuoksi. Nykyisen teknologian avulla on mahdollista tutkia röntgenkaksoistähtien säteilyn polarisaatiota ja tehdä sen perusteella päätelmiä niiden rakenteesta.

Tässä tutkielmassa keskitytään röntgenkaksoistähtiin, joiden toisena parina on musta aukko. Tutkielmassa käydään läpi röntgenkaksoistähtien rakennetta ja säteilyominaisuuksia sekä selvitetään periaatteet, joiden avulla röntgensäteilyn polarisaatiosta kyetään päättämään kohteiden geometrisia ominaisuuksia.

1 Röntgenkaksoistähtien rakenne

Röntgenkaksoistähdet ovat kaksoistähtiä, joissa toisena kappaleena on tähti ja toisena musta aukko tai neutronitähti. Kappaleiden välillä tapahtuu massavirtausta, jossa syntyvää säteilyä voidaan havaita eri aallonpituusalueilla radioaalloista röntgensäteilyyn. Tässä katsauksessa keskitytään röntgenkaksoistähtiin, joissa toisena osapuolena on musta aukko (engl. Black Hole Binary). Täytettyään Rochen rajansa alkaa parin tähti luovuttaa ainetta tähtituulena mustalle aukolle. Koska virtaavalla aineella on huomattava kulmaliikemäärä lähtiessään tähdestä, kulmaliikemäärän säilymislain vuoksi se ei virtaa suoraan mustaan aukkoon vaan alkaa kiertää sitä ympyräradalla muodostaen kertymäkiekon kompaktin kappaleen ympärille [2]. Kertymäkiekossa aine kiertää hiljalleen säteeltään pienenevillä ympyräradoilla kohti mustan aukon tapahtumahorisonttia. Lähellä tapahtumahorisonttia hiukkasilla ei kuitenkaan ole enää stabiileja kiertoratoja johtuen mustan aukon aiheuttamasta äärimmäisestä painovoimakentästä. Mustaa aukkoa lähimpänä olevaa stabiilia rataa kutsutaan ISCO:ksi (engl. innermost stable circular orbit). Saavutettuaan ISCO:n hiukkaset alkavat virrata kertymäkiekolta kohti mustaa aukkoa [3].

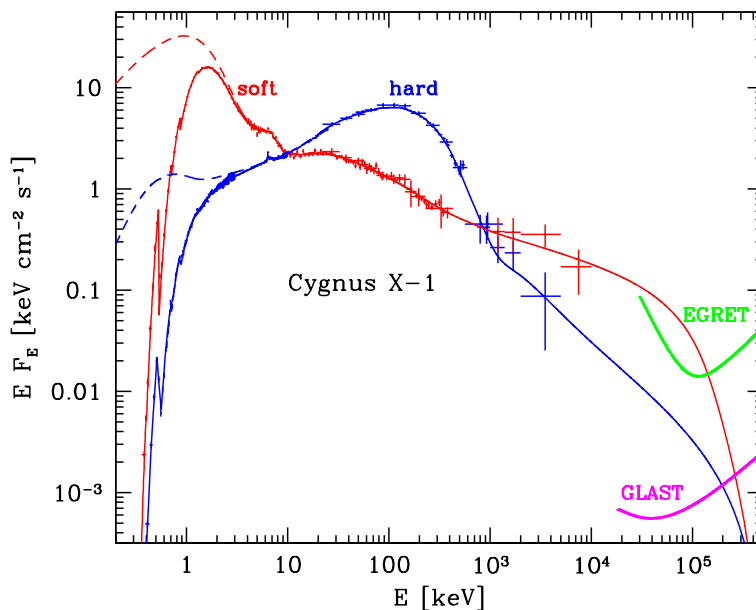
Aineen kiertäessä kertymäkiekossa lähemmäs mustaa aukkoa täytyy kiertävän aineen kulmaliikemäärän pienentyä hiukkasten kiertoradan säteen pienentyessä. Klassisen Shakura-Sunyaev-mallin mukaan kertymäkiekon magneettikenttä sekä hiukkasten turbulenteista liikkeistä aiheutuva kertymäkiekon kerrosten välinen kitka saavat hiukkaset menettämään kulmaliikemääräänsä ja näin lähestymään mustaa aukkoa. Samalla myös hiukkaset menettävät energiaansa. Hiukkasten kulkeutuessa kohti sisempiä kiertoratoja niiden gravitaatiopotentiaalienergia muuttuu kertymäkiekossa lämpösäteilyksi, mikä Shakura-Sunyaev-mallin mukaisesti johtaa kohteen spektrin muistuttamaan mustan kappaleen spektriä [2].

Myöhemmät tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet Shakura-Sunyaev-mallin olevan hyvin yksinkertaistettu malli, joka ei selitä kaikkia röntgenkaksoistähdissä ha-

vaittuja ominaisuuksia, kuten säteilyspektrissä havaittuja vaihteluja. Jo ensimmäisissä röntgenkaksoistähtihaivannoissa Cyg X-1:stä havaittiin kohteen säteilevän kahdella hyvin erilaisella röntgenspektritulalla eri havaintoaikoina. Pehmeäksi tilaksi (engl. soft state) kutsutussa tilassa havaittua spektriä dominoi huipultaan n. 1 keV säteily, jonka spektri muistuttaa muodoltaan mustan kappaleen säteilyä. Toista tilaa taas kutsutaan kovaksi (engl. hard state) ja siinä havaitaan vahvasti potenssilain mukaisesti hallitseva spektri, jonka huippu on n. 100 keV kohdalla. Pehmeän ja kovan tilan energiaspektrit on esitetty kuvassa 1 ja niiden eroja käydään tarkemmin läpi luvussa 3 [1].

Jotta tällaiset erilaiset tilat pystyvät syntyämään röntgenkaksoistähdessä, täytyy sen kertymäkiekossa olla erilaisia virtausalueita, kuten optisesti tiheää ja kylmää sekä optisesti harvaa ja kuumaa plasmavirtausta [1]. Lisäksi röntgenkaksoistähdissä on niiden säteilyominaisuuksien perusteella päätelty olevan kertymäkiekon ulkopuolelle ulottuva kuumasta plasmasta koostuva korona. Röntgenkaksoistähtijärjestelmien geometriasta ei ole vielä täyttä varmuutta, mutta lisätietoa niistä voidaan saada perinteisemmän röntgensäteilyspektrin havainnoinnin lisäksi röntgensäteilyn polarisaatiota tutkimalla [4].

Shakura-Sunyaev-mallin puutteellisuus on myöhemmin havaittu myös siinä, että se olettaa kiekossa massan kertymänopeuden olevan vakio ja kertymäkiekon olevan stabiili. Myöhemmät havainnot kuitenkin osoittavat, että näin ei kuitenkaan aina ole, vaan kertymäkiekon massan kertymisnopeus vaihtelee. Massan kertymisnopeuden vaihteluun liittyy myös kertymäkiekossa havaittuja epävakaussuureita, jotka johtavat röntgenkaksoistähdissä havaittuun purkauksien syklisyyteen. Pienillä kertymänopeuksilla epävakausta aiheuttaa kertymäkiekossa tapahtuva syklinen vedyn ionisaatio ja suurilla kertymänopeuksilla taas on havaittavissa säteilypaineen aiheuttama epävakaussuure [1].



Kuva 1. Kohteen Cyg X-1 spektri. Pehmeän tilan spektri (punaisella) havaittuna kesäkuussa 1996 ja keskiarvoinen kovan tilan spektri (sinisellä). Havainnoista (ristit) malliin sovitettu spektriviiva yhtenäisellä viivalla. Mallin mukainen spektri ilman absorptiota katkoviivalla [5].

2 Säteilyprosessit röntgenkaksostähdissä

Röntgenkaksostähtien on siis havaittu tuottavan voimakasta säteilyä röntgenspektreillä kahdessa, toisistaan selvästi erottuvassa tilassa. Röntgenkaksostähtien tuottaman säteilyn syntymekanismeille on esitetty useita eri vaihtoehtoja. Säteilyn synty on liitetty vahvasti kertymäkiekkoon, jossa mustaa aukkoa kohti liikkuvan aineen potentiaalienergia muuttuu säteilyenergiaksi. Suurin osa tämän ionisoituneen aineen painovoimaenergiasta on suurimassaisemmilla ioneilla (protoneilla), jotka luovuttavat energiaa ainevirran elektroneille coulombisten vuorovaikutusten kautta. Osa kertymäkiekon säteilystä syntyy suoraan mustan kappaleen säteilynä, joka nähdään selkeästi yhtenä komponenttina tarkastellessa röntgenkaksostähtien energiaspektrejä [5].

Pelkkä mustan kappaleen säteily ei kuitenkaan selitä muita spektrissä havaittuja komponentteja, joissa havaitaan huomattavasti korkeaaenergisempiä fotoneita kuin

pelkkä lämpösäteily tuottaisi. Säteilevien fotonien energian täytyy siis huomattavasti kasvaa kertymäkiekossa. Kertymäkiekossa fotonien ja elektronien vuorovaikutuksessa tapahtuukin käänteistä Comptonin sirontaa sekä vähäisemmissä määrin syntyy myös jarrutussäteilyä ja synkrotronisäteilyä, mitkä kasvattavat säteilevien fotonien energiaa lämpösäteilyyn verrattuna. Nykytiedon perusteella käänteisellä Comptonin sironnalla on suurin merkitys säteilyenergian kasvamisessa kertymäkiekossa [1].

Jotta kertymäkiekko pystyisi säteilemään käänteisen Comptonin sironnan myötä syntyvää korkeaenergistä säteilyä, täytyy kertymäkiekossa olla optisesti harva säteilyä synnyttävä osa. Tässä optisesti harvassa kertymäkiekon osassa syntyvät fotonit pystyvät vuorovaikuttamaan virtauksen kuumien ja nopeiden elektronien kanssa käänteisen Comptonin ilmiön kautta, jolloin fotonien energia kasvaa. Tällöin syntyy hyvin korkeaenergistä röntgensäteilyä, joka hallitsee röntgenkaksoistähdän kovassa tilassa havaittua spektriä. Tällaista säteilyä synnyttävä kertymäkiekon optisesti harva osa koostuu oletettavasti geometrisesti paksusta ja hyvin kuumasta virtauksesta, joka on optisesti harvaa sekä elektronien ja fotonien että elektronien ja protonien välisille törmäyksille. Tällaisen virtauksen on mallien perusteella todettu tuottavan havaitun kaltaista säteilyä, vaikka optisesti harvan virtauksen kokonaisvaltainen mallintaminen onkin hyvin monimutkaista, etenkin jos hydrodynaamisen mallinnuksen lisäksi huomioidaan vielä kertymäkiekon magneettikenttä [1].

Optisesti harva ja kuuma virtaus selittää siis korkeaenergisien röntgensäteilyn synnyn kertymäkiekossa. Vastaavasti taas matalaenergisen, mustan kappaleen säteilyä muistuttavan säteilykomponentin on päätelty syntyvän optisesti paksussa kertymäkiekon alueessa. Optisesti paksussa aineessa ei tapahdu juurikaan fotonien sirontaa eikä kuumien elektronien puutteen vuoksi käänteistä Comptonin ilmiötä ja tällaiselta kertymäkiekon osalta emittoitua säteilyä noudattaakin spektriltään lähes mustan kappaleen säteilyä [1].

Lisäksi kertymäkiekossa syntyy jonkin verran synkrotronisäteilyä, jolla voi olla

vaikutusta säteilyn profiiliin. Synkrotronisäteilyssä voi syntyä siemenfotoneja (engl. seed photons), joista Comptonin ilmiön kautta syntyy korkeaenergistä säteilyä nk. synkrotronisessa itse-Compton -ilmiössä (engl. synchrotron self-Compton mechanism). Tämä pätee tilanteissa, joissa virtauksessa on myös korkeaenergisia elektroneja, jotka eivät noudata Maxwellin jakaumaa [6].

Röntgenkaksoistähtien säteilyn on havaittu olevan myös polarisoitunutta. Ensimmäiset röntgensäteilyn polarisaatiohavainnot havaittiin vuonna 1975 Cyg X-1:stä NASAn OSO-8–avaruusteleskoopilla [7]. Polarisaatiota syntyy sekä pehmeässä että kovassa tilassa, vaikkakin eri mekanismeilla. Pehmeässä tilassa säteily polarisoituu fotonien sirotessa elektroneista kertymäkiekossa [8]. Kovassa tilassa taas polarisaatiota synnyttävä sironta tapahtuu kertymäkiekon kuumassa koronassa. Koska röntgensäteilyn polarisaatio riippuu siis kertymäkiekon ja koronan sijoittumisesta toistensa suhteen, voidaan röntgensäteilyn polarisaatiota havaitsemalla tehdä päätelmiä röntgenkaksoistähtien sekä sen kertymäkiekon ja koronan geometriasta [4].

Kertymäkiekon ja sitä ympäröivän koronan lisäksi röntgenkaksoistähdillä on vielä yksi säteilyä synnyttävä komponentti: kertymäkiekkoon nähden kohtisuora säteilysuihku. Säteilysuihkut ovat voimakkaita radiosäteilijöitä ja niissä on havaittu syntyvän myös korkeamman energian säteilyä optisella ja infrapuna-aallonpituudella. Joidenkin mallien mukaan suihkuissa voisi syntyä myös röntgensäteilyäkin. Joitakin yksittäisiä röntgenalueen emissioita röntgenkaksoistähtien suihkuissa onkin havaittu [9]. Nykyisten mallien mukaan kuitenkin Comptonin sironnan myötä syntyvä röntgensäteily emittoituisi kuitenkin lähinnä suihkun tyvestä, mikä sopii myös aikaisempiin malleihin, joissa kova röntgensäteily syntyy kertymäkiekon kuumassa sisäosassa [1].

3 Röntgenkaksoistähtien erilaiset tilat

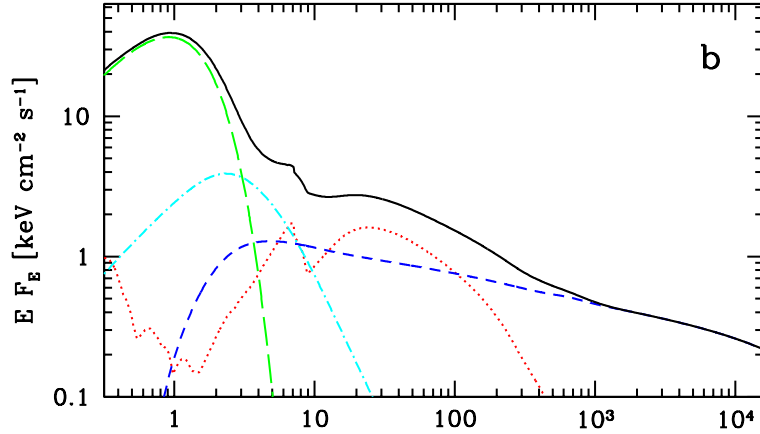
Kuten edellä on mainittu, jo ensimmäisissä röntgenkaksoistähtihavainnoissa havaittiin kaksi spektriltään selvästi toisistaan erottuvaa tilaa, kova (tai matala) tila ja pehmeä (tai korkea) tila. Myöhemmistä havainnoista on kyetty luokittelemaan myös pehmeä ja kova välitila (engl. soft/high intermediate state) ja hyvin korkea (engl. very-high) tila [10]. Tässä tutkielmassa keskitytään kuitenkin tarkemmin vain kovan ja pehmeän tilan eroihin.

Röntgenkaksoistähtien eri tilat voidaan havaita niiden energiaspektriltä (energy spectrum), jota voidaan tarkastella graafisesti EF_E -esityksellä. Esityksessä x-akselilla esitetään röntgenfotonin energia E kiloelektronivolteissa ja y-akselilla fotonin energia E kerrottuna vuolla per energiayksikkö, F_E , jolloin y-akselin yksiköksi tulee $[\text{keVcm}^{-2}\text{s}^{-1}]$. Molemmat akselit on esitetty logaritmisella asteikolla. Tällä esityksellä nähdään selkeästi kuvaajan huipuista, millä energioilla fotonit tuottavat suurimman osan säteilyn energiasta [5].

3.1 Pehmeä tila

Tarkastellaan pehmeän ja kovan tilan energiaspektriä esimerkikohteessa Cyg X-1, jonka spektrin on havaittu olevan hyvin tyypillinen röntgenkaksoistähdille. Kohteen spektri pehmeässä tilassa on esitetty kuvassa 1 punaisella viivalla, jossa katkoviivalla piirretty matalaenergiainen osuus vastaa mallinnettua spektriviivaa ilman absorptiota. Pehmeän tilan spektrin huipun nähdään olevan n. 1 keV:n kohdalla. Huipun lisäksi kuvaajassa nähdään myös häntä, joka laskee fotonien energian kasvaessa. Suurin osa pehmeän tilan röntgensäteilystä syntyy siis n. 1 keV fotoneista. Tämä säteilyhuippu noudattaa muodoltaan mustan kappaleen säteily-spektriä, mikä kertoo, että pehmeässä tilassa suurin osa säteilyvuosta syntyy kertymäkiekon mustan kappaleen säteilystä [5].

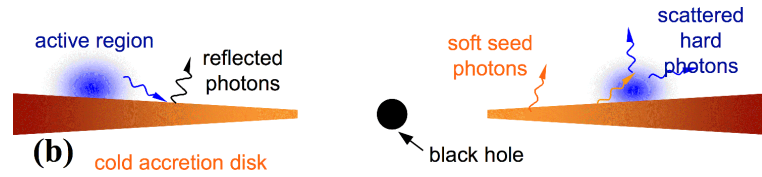
Ilmiö havaitaan myös kuvasta 2, jossa pehmeän tilan säteily-spektri on esitetty



Kuva 2. Cyg X-1:n havaittu energiaspektri (mustalla) pehmeässä tilassa komponentteihin (värilliset viivat) jaettuna. Vihreällä katkoviivalla siroamaton mustan kappaleen säteily, sinisellä Comptonin sironnassa syntyvän säteilyn komponentti. Turkoosilla muualla kuin kuumassa plasmassa tapahtuvasta Comptonin sironnasta syntyvä komponentti, punaisella Fe $K\alpha$ fluoresenssiiviivan ja sen jatkuvan heijastusspektrin synnyttämä komponentti [5].

komponentteittain. Energiaspektrin jako komponentteihin on tehty mallintamalla eri säteilytyyppien spektrien muotoja ja sovittamalla ne havaittuun energiaspektriin, joten kuvaajan komponenttien osuus on siis suuntaa-antava. Siitä voidaan kuitenkin nähdä selkeästi pehmeässä tilassa matalilla energioilla (0,1 – 4 keV) mustan kappaleen säteilyn hallitsevan energiaspektriä. Pehmeälle tilalle ominainen häntä taas syntyy käänteisen Comptonin sironnan myötä. Energiaspektrin komponenteissa on myös huomioitu Fe $K\alpha$ -fluoresenssi ja muualla kuin kuumassa plasmassa tapahtuva Comptonin sironna, jotka myös muuttavat hieman spektrikuvaajan muotoa [5].

Kuten edellä todettiin, pehmeän ja kovan tilan erilaiset säteilyominaisuudet syntyvät erilaisista virtausolosuhteista kertymäkiekossa. Tämän vuoksi myös kertymäkiekon ja mustan aukon välisen geometrian on päätelty eroavan toisistaan röntgenkaksostähden eri tiloissa [1]. Yksinkertaistettu kaaviokuva pehmeän tilan geometriasta on esitetty kuvassa 3. Kuvasta nähdään kertymäkiekon ulottuvan suhteellisen lähelle ISCO:a ja suurimman osan säteilystä emittoittuvan suoraan kertymäkiekosta. Vähäistä siroamista ja heijastumista tapahtuu kertymäkiekon aktiivisilla flare-



Kuva 3. Kaaviokuva mustan aukon ja kertymäkiekon geometriasta pehmeässä tilassa. Pehmeä röntgensäteily emittoituu pääosin kylmästä ja lähelle ISCO:a ulottuvasta kertymäkiekosta (oranssilla) ja heijastuu sekä siroaa vähäisissä määrin kuumassa koronassa (sinisellä) [5].

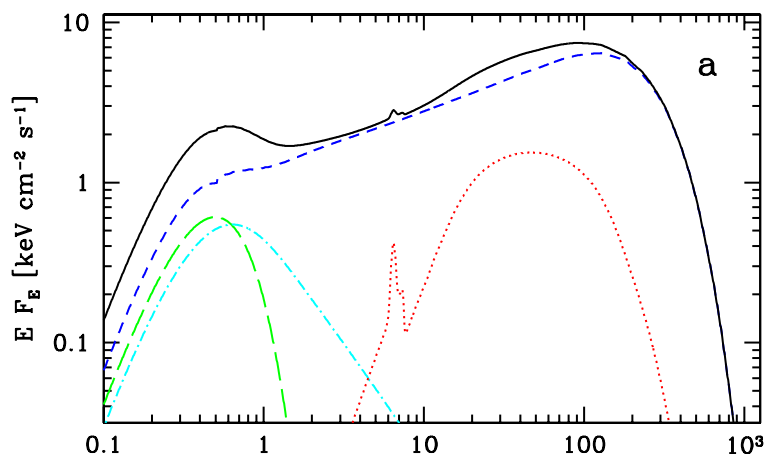
alueilla, minkä vaikutus jää kuitenkin vähäiseksi [5]. Käänteistä Comptonin siron-
taa ei juurikaan tapahdu, sillä kertymäkiekon ulottuessa lähelle ISCO:a jää sisem-
pi virtaus suhteessa kylmemmäksi, jolloin fotonit eivät pääse siroamaan kuumista
elektroneista [1].

3.2 Kova tila

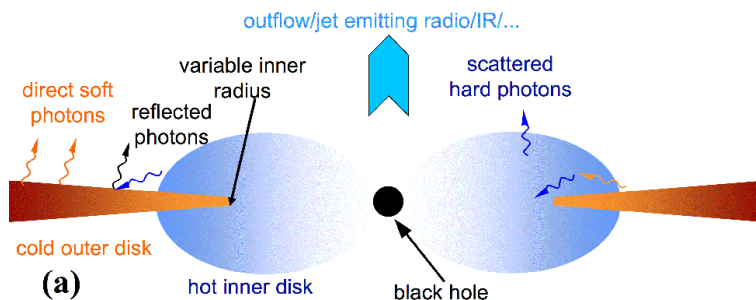
Kuvasta 1 nähdään myös Cyg X-1:n energiaspektri kovassa tilassa. Kovan tilan
spektrin huippu nähdään korkeammilla, n. 100 keV fotonien energioilla. Huippu ei
myöskään ole niin terävä kuin pehmeässä tilassa, vaan nousee n. 1 keV alkaen nou-
dattaen potenssilakia (logaritmisessa esityksessä lähes lineaarinen muoto). Kovassa
tilassa korkeaenergistien fotonien osuus myös tippuu nopeasti yli 100 keV energioilla,
eikä energiaspektriin muodostu samanlaista häntää kuin pehmessä tilassa [5].

Kuvassa 4 on esitetty kovan tilan spektri komponentteihin jaettuna. Kuvaajasta
nähdään mustan kappaleen säteilyn aiheuttavan pienen huipun 0,1 – 1 keV fotoneil-
la myös kovassa tilassa, mutta tämän vaikutus jää vähäiseksi verrattuna käänteisen
Comptonin ilmiön aiheuttamaan huippuun korkeilla n. 100 keV fotoneilla. Kovan ti-
lan korkeilla energioilla lähes koko energiaspektri syntyykin käänteisessä Comptonin
sironnassa [5].

Kovan tilan geometria on esitetty yksinkertaistettuna kaaviokuvana kuvassa 5.
Kuvasta nähdään kertymäkiekon sisäreunan olevan kauempana ISCO:sta kuin peh-



Kuva 4. Cyg X-1 energiaspektri kovassa tilassa komponentteihin (värilliset viivat) jaettuna. Värillisiä viivoja vastaavat komponentit ovat samat kuin kuvassa 2 [5].



Kuva 5. Kaaviokuva mustan aukon ja kertymäkiekon geometriasta kovassa tilassa. Kertymäkiekko on tyypistynyt suhteessa pehmeään tilaan. Suuri osa kertymäkiekosta (oranssilla) emittoituvasta säteilystä vuorovaikuttaa käänteisessä Comptonin sironnassa kuuman sisemmän virtauksen kanssa (sinisellä) [5].

meässä tilassa. Kertymäkiekon sisäreunan ja mustan aukon välille syntyykin tällöin hyvin kuuma sisempi virtaus (korona), jossa kertymäkiekon sisäosista emittoituva säteily pääsee siroutumaan käänteisessä Comptonin sironnassa, mikä johtaa fotonien energian kasvamiseen. Osa säteilystä emittoittuu edelleen suorana mustan kappaleen säteilynä kertymäkiekon ulko-osista, mutta sironneiden kovien fotonien osuus dominoi energiaspektriä [5].

4 Ajankohtainen tutkimus

Röntgenkaksoistähtien rakenteen ja geometrian selvittäminen on siis hyvin haastavaa, sillä vaikka kohteet itsessään ovatkin hyvin massiivisia, sijaitsevat lähimätkin havaitut kohteet kiloparsekien päässä [3]. Röntgenkaksoistähtien rakenteen suora havaitseminen onkin siis mahdotonta nykyisellä teknologialla, minkä vuoksi niiden röntgensäteilyn ja sen polarisaation havainnointi on tällä hetkellä lupaavin tapa tutkia niiden geometriaa. Viime vuosina röntgenkaksoistähdistä on tehty polarisaatiohavaintoja 2021 laukaistulla Imaging X-ray Polarimetry Explorer – avaruusteleskoopilla (IXPE) [11].

4.1 Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)

IXPE on NASAn ja Italian avaruusjärjestö ASI:n vuonna 2017 yhteistyönä käynnistämä projekti, jonka tarkoituksena on ollut olla ensimmäinen keino havaita kirkkaimpien kosmisten röntgensäteilijöiden polarisaatiominaisuuksia. IXPE laukaistiin 2021 etukäteen suunnitellulla kaksivuotisella ohjelmalla, jonka jälkeen on siirrytty hakemusohjaiseen kohteiden havainnointiin [11].

IXPE kiertää maapalloa 600 km korkeudella ekvaattoriradalla ja kykenee havaitsemaan kohteita keskimäärin 50 päivän havaintoikkunoissa kahdesti vuodessa vähintään 57 minuutin yhtäjaksoisina havaintoina. Satelliitin kuormana on kolme identtistä röntgenteleskooppia peilimooduleineen ja havaintoyksikköineen. IXPE kykenee havaitusta säteilyn energiasta riippuen kulmaresoluutioltaan n. 23 – 30 kaarisekunnin tarkkuuteen, ja sillä kyetään havaitsemaan fotoneja 2–8 keV alueella [11].

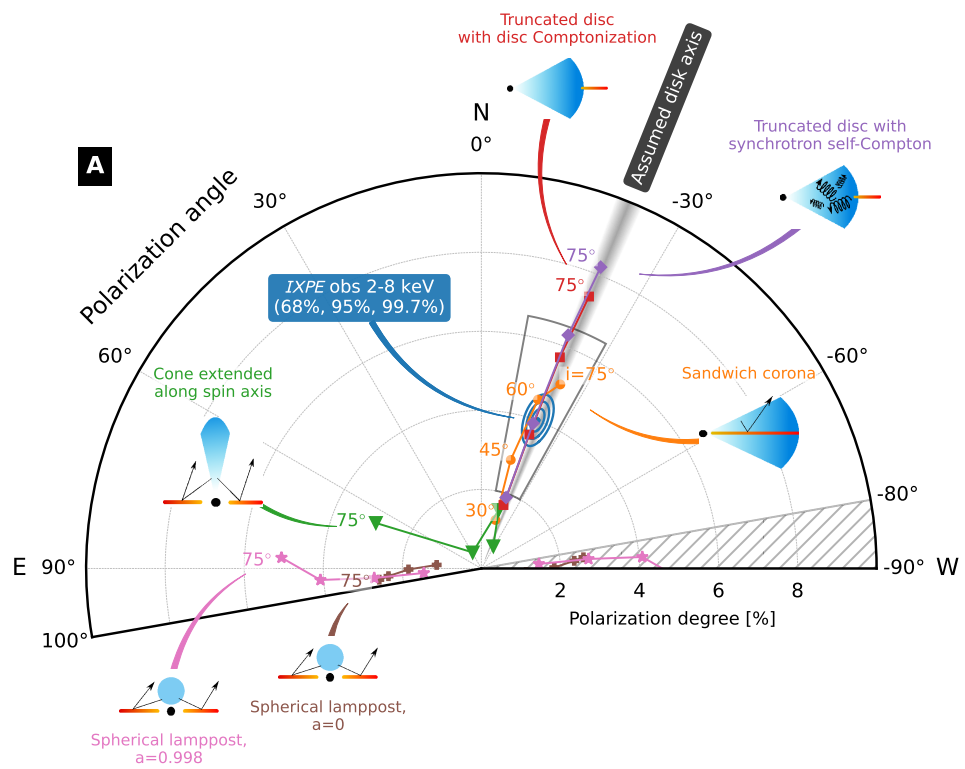
IXPE:llä kyetään havaitsemaan röntgensäteilyn polarisaatiota useista erilaisista kohteista. Erityisesti havainnoissa painotetaan kohteita, joiden muoto pystytään havaitsemaan, kuten supernovajäänteitä, mistä juontuu myös teleskoopin nimen sana 'Imaging'. Muita mahdollisia kohteita ovat aktiiviset galaksitytimet, magnetarit sekä mustat aukot, mukaan lukien röntgenkaksoistähdet [11]. Kahden ensimmäisen käyt-

tövuotensa aikana IXPE:llä onkin tehty röntgenkaksoistähdistä useita havaintoja, jotka antavat viitteitä niiden rakenteesta.

4.2 Viimeaikaiset havainnot

Edellä käytiin läpi Cyg X-1:n energiaspektriä esimerkkinä tyypillisestä röntgenkaksoistähdestä. Vuoden 2023 tutkimuksessaan Krawczynski et al. [4] analysoivat IXPE-havaintoja Cyg X-1:n röntgensäteilyn polarisaatiosta ja sen yhteydestä kohteen geometriaan. Tutkimuksen polarisaatiohavainnot suoritettiin IXPE:llä toukuussa 2022 ja havaintoaikaa IXPE:llä kertyi n. 242 000 sekuntia. IXPE:n havainnot suoritettiin 2–8 keV energia-alueella ja samanaikaisesti kohdetta havainnoittiin myös muilla röntgen- ja gammasädeteleskoopeilla kattaen kaikkiaan n. 0,2 – 250 keV energia-alueen. Havaintojen aikana kohde oli kovassa tilassa. Kohteen röntgensäteilyn havaittiin olevan 2–8 keV:n alueella lineaarisesti polarisoitunutta polarisaatioasteen ollessa $4,01 \pm 0,20$ % ja polarisaatiokulman $-20,7^\circ \pm 1,4^\circ$. Polarisaatiokulman havaittiin olevan lähes yhdensuuntainen kohteen säteilysuihkun kanssa [4].

Krawczynskin et al. tutkimuksessa saatuja tuloksia verrattiin erilaisista mahdollisista geometrioista muodostettuihin emissiomalleihin ja näin pystyttiin päättämään, millainen geometria kohteella todennäköisimmin on. Polarisaatiohavaintojen vertailu geometriamalleihin on esitelty kuvassa 6. Kuvasta nähdään 2-8 keV havaintojen polarisaation olevan n. -21° ja polarisaatioasteen n. 4 %. Kuvassa on esitetty myös erilaisten emissiomallien polarisaatiokulmat ja -asteet. Havaintojen nähdään sopivan parhaiten malleihin, joissa kuuma korona sijaitsee yhdensuuntaisesti kertymäkiekon kanssa (ns. voileipämallit ja typistyneen kertymäkiekon mallit). Nähdään myös, että havaittu polarisaatio ei sovi malleihin, joissa korona on kertynyt kiekon akselin suuntaisesti (ns. lyhtypylväs-mallit), sillä näissä polarisaatiokulman täytyisi olla selvästi jyrkempi. Tutkimuksen perusteella siis Cyg X-1:n korona levittyy todennäköisimmin kertymäkiekon suuntaisesti [4].



Kuva 6. Krawczynskin et al. polarisaatiohavainnot Cyg X-1:stä sekä erilaisista emissiomalleista muodostetut ennusteet polarisaatiolle. Kertymäkiekon akseli harmaalla viivalla, IXPE-havainnot sinisen ellipsin sisällä [4].

Toisessa vuoden 2023 tutkimuksessa Veledina et al. analysoivat röntgenkaksois-
 tähden Swift J1727.8–1613 äkillisen purkauksen aikana IXPE:llä tehtyjä röntgenpo-
 larisaatioavaintoja [12]. Kohteessa havaittiin kirkas äkillinen purkaus elokuun 2023
 lopulla ja IXPE-havainnot suoritettiin 7.-8.9.2023. Kohdetta havainnoitiin purkauk-
 sen jälkeen ja sen huomattiin seuranta-aikana siirtyvän todennäköisesti kovasti tilas-
 ta kohti pehmeää. IXPE-havaintojen aikaan kohde oli vielä kovassa tilassa. IXPE-
 havaintojen datasta määritettiin 2–8 keV alueella kohteen röntgensäteilyn polari-
 saatioasteeksi $4,1 \pm 0,2$ % ja polarisaatiokulmaksi $2,2^\circ \pm 1,3^\circ$. Vertailemalla polari-
 saatioastetta aiempiin röntgenkaksoistähtihavaintoihin sekä sovittamalla löydöksiä
 eri geometriamalleihin pääteltiin Swift J1727.8–1613:n olevan kovassa tilassa geo-
 metrialtaan samankaltainen edellä esitellyn Cygnus X-1:n kanssa. Kohteessa ei ole
 aiemmin suoraan havaittu säteilysuihkua, mutta alimillimetrisäteilyn alueella teh-
 dyistä polarisaatiohavainnoista säteilysuihkun suunnan on päätelty olevan suunnal-
 taan hyvin lähellä röntgensäteilyn polarisaation suuntaa. Matala polarisaatioaste ja
 säteilysuihkun suuntainen polarisaatiokulma viittaavat kohteessa koronan jakautu-
 van kertymäkiekon suuntaisesti, kuten Cyg X-1:ssä [12].

Röntgensäteilyn polarisaatiohavainnoilla voidaan siis saada lisätietoa muutoin
 vaikeasti havaittavien kohteiden rakenteista ja tähän mennessä IXPE-havainnoista
 on saatu jo lupaavia tuloksia. Tulevaisuudessa polarisaatiohavainnoilla voidaan saa-
 da entistä enemmän tietoa kohteista uusien IXPE-havaintojen ja myöhemmin myös
 uusien havaintosatelliittien myötä.

Viitteet

- [1] C. Done *et al.*, The Astronomy and Astrophysics Review **15**, 1 (2007).
- [2] N. I. Shakura ja R. A. Sunyaev, Astronomy and Astrophysics **24**, 337 (1973).
- [3] J. E. McClintock ja R. A. Remillard, Black Hole Binaries, 2004, arXiv:astro-ph/0306213.
- [4] H. Krawczynski *et al.*, Science **378**, 650 (2022).
- [5] A. A. Zdziarski ja M. Gierlinski, Progress of Theoretical Physics Supplement **155**, 99 (2004).
- [6] J. Poutanen *et al.*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **445**, 3987 (2014).
- [7] M. C. Weisskopf *et al.*, The Astrophysical Journal **215**, L65 (1977).
- [8] M. J. Rees, Annals of the New York Academy of Sciences **262**, 367 (1975).
- [9] S. Corbel *et al.*, The Astrophysical Journal **632**, 504 (2005).
- [10] T. M. Belloni, Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag **794**, 53 (2010).
- [11] M. C. Weisskopf *et al.*, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems **8**, (2022).
- [12] A. Veledina *et al.*, The Astrophysical Journal **958**, L16 (2023).