

Erittäin tarkka optinen polarimetria mustien  
aukkojen tutkimisessa

LuK-tutkielma  
Turun yliopisto  
Fysiikka  
2026  
LuK Sofia Kemppi  
Tarkastajat:  
Dr. Andrei Berdyugin  
Prof. Juri Poutanen

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

TURUN YLIOPISTO  
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

**Kemppi Sofia** Erittäin tarkka optinen polarimetria mustien aukkojen tutkimisessa

LuK-tutkielma, 21 s., 3 liites.  
Fysiikka  
Maaliskuu 2026

---

Valon eli sähkömagneettisen säteilyn yksi keskeisistä fysikaalisista ominaisuuksista on polarisaatio, joka kuvaa sähkökenttävektorin värähtelysuuntaa ja sen ajallista käyttäytymistä. Polarisaatio voi syntyä useiden fysikaalisten mekanismien seurauksena. Tyypillisiä prosesseja ovat esimerkiksi valon sironta vapaista hiukkasista sekä varattujen hiukkasten kiihtyvä liike magneettikentässä, jolloin syntyy polarisoitunutta synkrotronisäteilyä.

Säteilyn polarisaatiotila kuvataan neljän Stokesin parametrin avulla. Yhdessä ne määrittävät polarisaatioellipsin geometrian, joka esittää sähkövektorin kärjen liikkeen tasossa, joka on kohtisuorassa valon etenemissuuntaa vastaan. Lineaarinen ja ympyräpolarisaatio ovat elliptisen polarisaation erityistapauksia, joissa ellipsi degeneroituu suoraksi janaksi tai ympyräksi.

Erittäin tarkka optinen polarimetria on vakiinnuttanut asemansa keskeisenä havaintomenetelmänä mustien aukkojen tutkimuksessa. Polarimetriset mittaukset tarjoavat ainutlaatuista tietoa säteilyn syntymekanismeista, kertymäkiekon ja mahdollisten relativististen suihkujen geometriasta sekä ympäröivän aineen jakautumisesta. Tällainen informaatio ei ole saavutettavissa pelkän fotometrian tai perinteisen kuvantamisen avulla. Näin ollen polarimetria täydentää olennaisesti muita havaintomenetelmiä ja tarjoaa syvällisemmän käsityksen mustien aukkojen fysikaalisista prosesseista ja rakenteesta.

Asiasanat: polarisaatio, polarimetria, Stokesin parametrit, röntgenkaksoistähti, musta aukko

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Polarisaatio</b>	<b>3</b>
1.1 Sähkömagneettinen säteily . . . . .	3
1.2 Polarisoitunut valo . . . . .	3
1.3 Stokesin parametrit . . . . .	6
<b>2 Polarimetrit</b>	<b>7</b>
2.1 Modulaattorit . . . . .	8
2.2 Analysaattorit . . . . .	10
2.3 Detektorit . . . . .	11
<b>3 Havaintokohteet</b>	<b>12</b>
3.1 V404 Cyg – purkauksen aikainen polarisaatio . . . . .	12
3.2 MAXI J1820+070 – purkaustilojen polarimetria . . . . .	13
3.3 A0620–00 – lepotilan polarisaatio . . . . .	14
<b>4 Optisen polarisaation syntymekanismit</b>	<b>15</b>
4.1 Sironta . . . . .	16
4.1.1 Thomson-sironta . . . . .	16
4.1.2 Sironta ulosvirtauksissa ja tuulissa . . . . .	16
4.2 Synkrotronisäteily . . . . .	16
4.3 Faradayn rotaatio . . . . .	17
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>18</b>

## Johdanto

Mustia aukkoja sisältävät röntgenkaksoistähdet (engl. X-ray binaries, XRB) muodostavat luonnollisia laboratorioita, joissa aineen ja säteilyn välistä vuorovaikutusta voidaan tutkia äärimmäisissä fysikaalisissa olosuhteissa [1]. Näissä järjestelmissä kompakti kohde kerää materiaa seuralaistähdestä, mikä johtaa voimakkaaseen energian vapautumiseen erityisesti purkausvaiheissa [2]. Gravitaatioenergia säteilee laajalla sähkömagneettisella spektrillä radiosta röntgensäteisiin. Purkauksen radiosäteily tulee suihkusta, kun taas röntgensäteet tuotetaan kuumasta kertymävirtauksesta eli koronasta. Optinen ja infrapunasäteily on suihkun, tuulen, säteilytetyn kiekon ja kuuman kertymävirtauksen komponenttien monimutkaisen vuorovaikutuksen tulos. [1]

Optinen polarimetria tarjoaa ainutlaatuisen välineen näiden säteilykomponenttien tutkimiseen. Polarisaatio kantaa informaatiota emittoivan ja sirottavan väliaineen geometrisesta rakenteesta, aineen järjestäytymisestä sekä magneettikenttien voimakkuudesta ja geometriasta [3]. Mustien aukkojen röntgenkaksoistähtien polarimetriset havainnot voivat siten paljastaa yksityiskohtia kertymäkiekosta, suihkuista ja magneettikentistä, joita ei ole mahdollista johtaa pelkistä fotometrisistä tai spektroskooppisista mittauksista [4].

Purkausten fysikaalisten mekanismien ymmärtäminen edellyttää eri spektrikomponenttien tunnistamista ja niiden säteilyominaisuuksien erottamista. Vaikka näitä komponentteja on tutkittu useilla menetelmillä, polarimetria on toistaiseksi jäänyt vähemmälle huomiolle ja sen potentiaali on osin aliarvioitu. Erittäin tarkka optinen polarimetria tarjoaa kuitenkin tehokkaan keinon rajoittaa järjestelmien geometriaa ja magneettikenttärakennetta, ja siten se avaa uuden näkökulman röntgenkaksoistähtien purkausfysiikan tutkimukseen. [1] Viime vuosina instrumentaation kehitys on mahdollistanut erittäin tarkan polarisaatioasteen mittaamisen jopa  $10^{-5}$  tarkkuudella, mikä mahdollistaa äärimmäisen heikkojen sisäisten signaalien havaitsemisen

voimakkaan tähtienvälisen polarisaation takaa [1, 5, 6].

Tässä tutkielmassa käsitellään optisen polarimetrian fysikaalista perustaa, mitausmenetelmiä sekä sen sovelluksia mustia aukkoja sisältävien röntgenkaksoistähtien tutkimuksessa. Työssä tarkastellaan erityisesti, miten polarimetriset havainnot rajoittavat kertymäkiekkojen, suihkujen ja magneettikenttien ominaisuuksia.

# 1 Polarisaatio

## 1.1 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettisessa aallossa sähkö- ( $\vec{E}$ ) ja magneettikenttä ( $\vec{B}$ ) riippuvat toisistaan. Ajassa muuttuva  $\vec{E}$ -kenttä synnyttää  $\vec{B}$ -kentän, joka on kaikkialla kohtisuorassa  $\vec{E}$ :n muutossuuntaan nähden. Samalla tavalla ajassa muuttuva  $\vec{B}$ -kenttä vaikuttaa  $\vec{E}$ -kenttään. James Clerk Maxwell laski vapaassa tilassa olevien sähkömagneettisten aaltojen ennustetun nopeuden

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s},$$

missä

$$\epsilon_0 \mu_0 \approx 11,12 \cdot 10^{18} \text{ s}^2/\text{m}^2.$$

Aiemmin Fizeaun määrittämä valon nopeus (315300km/s) oli erittäin lähellä teoreettista sähkömagneettisen aallon nopeutta. Tämä sai Maxwellin päättämään, että valo on sähkömagneettinen aalto. [7]

## 1.2 Polarisoitunut valo

Valo on siis poikittaista sähkömagneettista aaltoliikettä. Polarisaatiossa keskitytään tarkastelemaan vain sähkökenttää. Lineaarisesti polarisoituneen valon sähkökentän suunta on vakio, vaikka sen magnitudi ja etumerkki vaihtelevat ajassa  $t$ . Kaksi ortogonaalista lineaarisesti polarisoituneen valon sähkövektoria voidaan esittää muodossa

$$\begin{aligned} \vec{E}_x(z,t) &= \hat{i} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \\ \vec{E}_y(z,t) &= \hat{j} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon), \end{aligned}$$

missä molemmat etenevät  $z$  suuntaan vaihe-erolla  $\epsilon$ . [7]  $\omega$  on värähtelyn kulmanopeus [8]. Jos vaihe-ero on nolla tai  $\pm 2\pi$ :n kokonaislukukerrannainen, aaltojen sanotaan

olevan samassa vaiheessa, jolloin resultantiksi eli summaksi saadaan

$$\overline{E}(z,t) = \overline{E}_x + \overline{E}_y = (\hat{i}E_{0x} + \hat{j}E_{0y}) \cos(kz - \omega t).$$

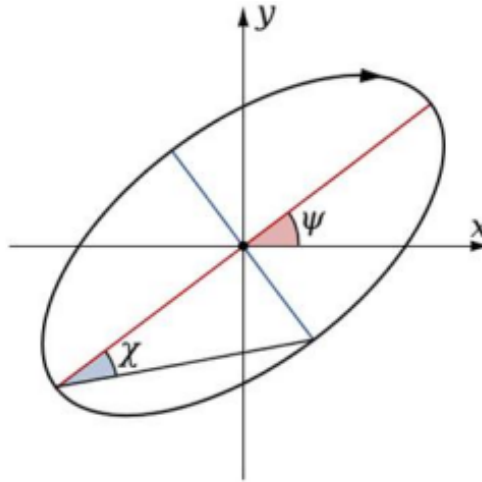
Koska resultantin amplitudi  $(\hat{i}E_{0x} + \hat{j}E_{0y})$  on vakio, se on myös lineaarisesti polarisoitunut. Resultanttivektorin positiokulma määritellään alkuperäisten aaltojen amplitudien suhteen

$$\tan \theta = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}.$$

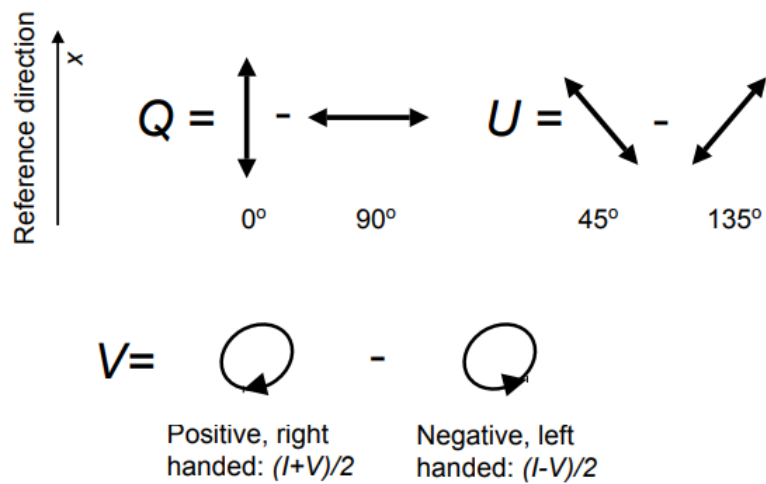
Valo voi olla myös ympyräpolarisoitunutta. Jos molempien aaltojen amplitudit ovat yhtäsuuret ( $E_0 = E_{0x} = E_{0y}$ ) ja niiden vaihe-ero on  $\epsilon = -\pi/2 + 2m\pi$ , missä  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , silloin  $\overline{E}_y$  johtaa  $\overline{E}_x$ :ää  $\pi/2$  verran. Näin syntyvä resultanttisähkövektori kiertää ympyrää myötäpäivään kulmanopeudella  $\omega$ . Tällainen valo on oikeakätisesti ympyräpolarisoitunut. Vastaavasti jos vaihe-ero on  $\epsilon = \pi/2 + 2m\pi$ , missä  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , resultanttivektori kiertää vastapäivään ja on vasenkätisesti ympyräpolarisoitunutta. [7]

Polarisoitunutta valoa kuvataan polarisaatioellipsin (kuva 1.2) avulla. Sähkövektori piirtää ellipsin valon etenemissuuntaan nähden kohtisuorassa tasossa. [3] Sekä lineaarisesti polarisoitunut valo että ympyräpolarisoitunut valo ovat erikoistapauksia elliptisesti polarisoituneesta valosta [7].

Polarisoimatonta valoa voi polarisoida esimerkiksi ohjaamalla valoalto hilan tai kiteen läpi, jonka raot ovat valon aallonpituuden luokkaa. Tällöin hilan läpi pääsevät vain rakojen suuntaiset valoallon sähkövektorin komponentit. Luonnossa polarisaatiota tapahtuu esimerkiksi magneettikenttien vaikutuksesta ja erilaisista pinnoista heijastumalla tai siroamalla.



Kuva 1. Sähkövektorin kärki piirtää polarisaatioellipsin valon etenemissuuntaa vasten kohtisuorassa tasossa.  $\psi$  kuvaa ellipsin atsimuuttia ja  $\chi$  on sen eksentrisyys. [3]



Kuva 2. Stokesin parametrien geometrinen visualisointi [9].

### 1.3 Stokesin parametrit

Säteilyn polarisaatiotila voidaan kuvata täydellisesti havaittavien intensiteettien avulla. Siihen tarvittavia neljää suuretta kutsutaan Stokesin parametreiksi [9]:

$$\begin{aligned} S_0 &= I_P, \\ S_1 &= Q = I_P \cos(2\psi) \cos(2\chi), \\ S_2 &= U = I_P \sin(2\psi) \cos(2\chi), \\ S_3 &= V = I_P \sin(2\chi). \end{aligned}$$

$I_P$  on osittain polarisoituneen valon kokonaisintensiteetin ( $I$ ) elliptisesti polarisoidun osan intensiteetti.  $\psi$  eli polarisaatiokulma (engl. polarization angle, PA) kuvaa polarisaatioellipsin aksimuuttia, joka mitataan vastapäivään.  $\chi$  on polarisaatioellipsin eksentrisyys. [3]

Parametri  $Q$  on referenssisuuntaan värähtelevien fotonien ja siihen kohtisuoraan värähtelevien fotoneiden intensiteettien erotus.  $U$  on niiden fotonien määrän erotus, joiden sähkökenttä värähtelee  $45^\circ$  ja  $135^\circ$  kulmissa.  $V$  on oikea- ja vasenkätisen ympyräpolarisaation erotus.

Parametrit määritellään usein ideaalisten polarisaatiosuodattimien ja ilmaisimien antaman signaalin  $S$  avulla. Tällöin saadaan yhtälöt:

$$\begin{aligned} I &= k' S, \\ Q &= k' (S_0 + S_{90}), \\ U &= k' (S_{45} - S_{135}), \\ V &= k' (S_+ - S_-). \end{aligned}$$

Numeroidut alaindeksit viittaavat suodattimen läpäisyakselin suuntaan ja alaindeksit  $+$  ja  $-$  viittaavat positiiviseen ja negatiiviseen ympyräpolarisaatioon.  $k'$  on positiivinen vakio, mikä yleensä jätetään huomioimatta kun tarkastellaan normalisoituja

Stokesin parametreja:

$$q = Q/I, \quad u = U/I, \quad v = V/I. \quad [9]$$

Normalisoiduista Stokesin parametreista saadaan lineaarisen polarisaation polarisaatioaste (engl. polarization degree, PD) ja polarisaatiokulma sekä ympyräpolarisaation aste:

$$P_l = \sqrt{q^2 + u^2},$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{u}{q},$$

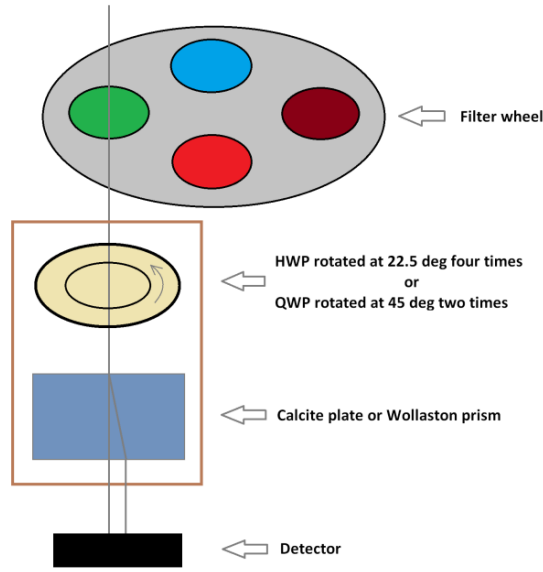
$$P_c = v. \quad [3]$$

Stokesin parametrit kuvaavat elliptisesti polarisoitunutta valoa ja ovat suoraan yhteydessä polarisaatioellipsin geometriaan. Parametrit Q ja U määrittävät ellipsin asennon eli atsimuuttikulman ja parametri V määrittää eksentrisyyden sekä polarisaation kiertosuunnan. Kuvassa 2 on havainnollistettu parametrien riippuvuus säteilyn polarisaatiotilaan. [9]

## 2 Polarimetrit

Optisessa polarimetriassa käytetään useita eri menetelmiä ja laitteita, jotka on suunniteltu muuntamaan valon polarisaatiotila mitattavissa oleviksi intensiteettivaihteiluiksi. Nykytekniikka perustuu kolmeen pääkomponenttiin: modulaattoriin, analysaattoriin ja detektoriin [3]. Polarisaattoreita on saatavilla monissa eri kokoonpanoissa, mutta ne kaikki perustuvat johonkin neljästä fysikaalisesta perusmekanismista: dikroismi, heijastus, sironna ja kahtaistaittavuus [7].

Kuvassa 3 on esitetty yksinkertainen malli CCD-polarimetrin asettelusta. CCD:n ja suodattimen väliin asetetaan polarisaatiokomponentit, yleensä modulaattori ennen analysaattoria. Kokonaisuudessaan nämä osat toimivat yhdessä niin, että modu-



Kuva 3. CCD-polarimetrin asettelu. Polarisaatiokomponentit voidaan asentaa CCD-detektorin ja suodatinpyörän väliin. Kuvassa esitetyn yksinkertaisen kalsiittikiteen sijaan voitaisiin käyttää toistakin analysaattoria, esim. Wollaston prismaa. [3]

laattori vaihtaa polarisaatiotilaa, kalsiittianalyssaattori erottaa komponentit ja CCD-kamera tallentaa ne tarkkaa analyysia varten. [3]

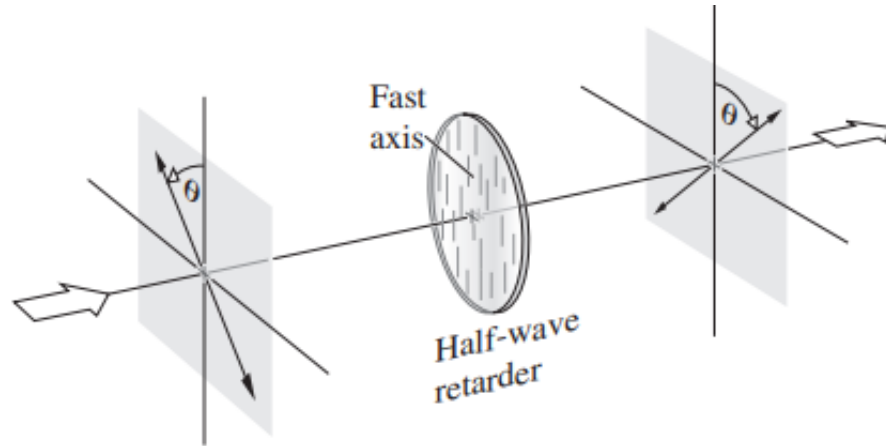
## 2.1 Modulaattorit

Modulaattori muuttaa teleskoopista tulevan valon polarisaatiotilaa tietyllä taajuu-  
della ennen sen analysointia. Tällainen levy aiheuttaa vaihe-eron eli hidastuksen  $\tau$   
valon ortogonaalisesti polarisoitujen komponenttien välille.

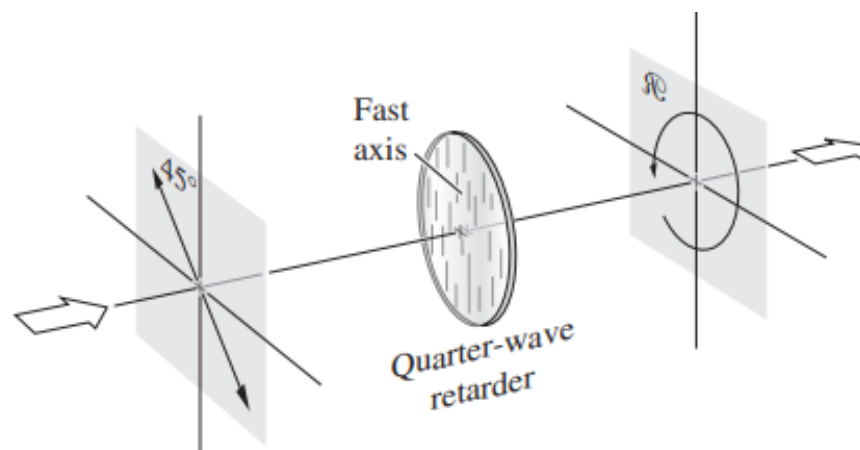
$$\tau = 2\pi\Delta/\lambda \qquad \Delta = (n_e - n_o)s,$$

missä  $s$  on levyn paksuus,  $\lambda$  on aallonpituus ja  $n_e$  ja  $n_o$  ovat kiteen optisen akselin  
suuntaisesti ( $n_e$ ) ja kohtisuorassa ( $n_o$ ) polarisoitujen valokomponenttien taitekerto-  
imet, ja  $\Delta$  on matkaero. [3]

Yleisimpiä modulaattoreita ovat puoli- (engl. half wave plate, HWP) ja neljännesosa-  
aaltolevyt (engl. quarter wave plate, QWP). Aaltolevy on yksiakselisesta kiteestä  
valmistettu yhdensuuntaistasolevy (engl. plane parallel plate), joka on leikattu si-  
ten, että sen optinen akseli on yhdensuuntainen levyn pinnan kanssa. Sähkövektorin



Kuva 4. Puoliaaltolevy kääntää alun perin kulmassa  $\theta$  lineaarisesti polarisoituneen valon kulman  $2\theta$  verran [7].



Kuva 5. Neljännesosa-aaltolevy muuttaa alun perin  $45^\circ$  kulmassa tulevan lineaarisen valon oikeakätisesti ympyräpolarisoituneeksi valoksi [7].

eri komponentit  $E_x$  ja  $E_y$  liikkuvat kiteessä eri nopeuksilla aiheuttaen niiden välille vaihe-eron, jolloin säteilyn polarisaatio kääntyy. [3, 8]

Kuvassa 4 on yksinkertaistettu polarisaation kääntymisen HWP:n läpi. Alun perin kulmassa  $\theta$  lineaarisesti polarisoitunut valo kääntyy puolialtlevyn läpi kulkiessaan kulman  $2\theta$  verran [7]. HWP viivästyttää valoa vaiheen  $\pi$  eli puolen aallonpituuden verran. Sen tehtävä on muuttaa lineaarisen polarisaation tasoa.

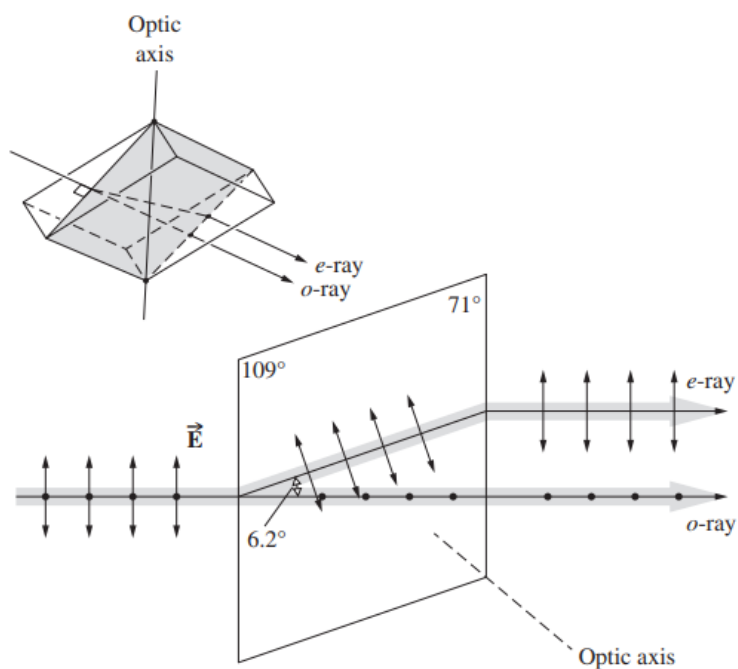
Vastaavasti QWP:n aiheuttama vaihe-ero on  $\pi/2$ . Se muuttaa ympyräpolarisoituneen lineaarisesti polarisoituneeksi ja päinvastoin. [3, 8] Kuvan 5 mukaan neljännesosa-altlevy muuttaa lineaarisen valon ympyräpolarisoituneeksi. Alkuperäisen lineaarisen valon pitää tulla  $45^\circ$  kulmassa kumpaan tahansa QWP:n akseleista nähden, jotta muutos ympyräpolarisoituneeksi voi tapahtua. Tuloksena oleva kätisyys vastaa samaa suuntaa, johon alkuperäinen valo kiertyisi pienimmän kulman verran hitaan akselin (engl. slow axis) suuntaiseksi. [7]

QWP:tä mikä on asetettu analysaattorin eteen ja jolla otetaan kuvia  $90^\circ$  stepeissä, käytetään mittaamaan ympyräpolarisaatiota (Stokes  $v$ ). Stokesin parametrit  $q$  ja  $u$  saadaan HWP:llä kun kuvia otetaan  $22,5^\circ$  stepeissä.  $22,5^\circ$  stepeissä käännettyä QWP:tä voidaan käyttää mittaamaan kaikki Stokesin parametrit  $q, u$  ja  $v$ . [3]

## 2.2 Analysaattorit

Analysaattori erottaa valon kohtisuorat komponentit toisistaan, jotta niiden intensiteetit voidaan mitata. Kaksoissädeanalysaattorit eli polarisaation säteenjakajat ovat suosittuja analysaattoreita optisen polarimetrian tutkimuksissa. Ne jakavat valon kahteen kohtisuoraan polarisoituneeseen säteeseen: ordinaarisäteeseen (o-säde) ja extraordinaarisäteeseen (e-säde), jotka mitataan samanaikaisesti. Tällaiset analysaattorit hyödyntävät joidenkin yksiaksaalisien kiteiden kahtaistaitavuutta. Kahtaistaitavuusaste  $\Delta n$  määritellään e- ja o-säteiden taitekertoimien erona  $n_e - n_o$ .

Yksinkertaisin polarisaation säteenjakaja on kalsiittikide, joka jakaa tähden ku-



Kuva 6. Alun perin polarisoitumaton valo kulkee kalsiittikiteen läpi. Säteitä pitkin piirretyt ympyrät ja nuolet osoittavat, että o-säteen sähkökentän vektori on normaali pääosan kanssa ja e-säteen kenttä on yhdensuuntainen pääosan kanssa. [7]

van kahteen aiheuttamalla e-säteen siirtymän. Yksittäinen kalsiittikide kuitenkin aiheuttaa huomattavasti dispersiota e-säteen tähtikuvaan sinisemmillä aallonpituuksilla. [3] Kalsiittikiteen toimintaa on havainnollistettu kuvassa 6. Kalsiittikiteen pääosan läpi kulkee aluksi polarisoimaton säde. Kide jakaa säteen kahteen ortogonaaliseen komponenttiin. [7]

Savart-levy koostuu kahdesta kalsiittikiteestä ja on siksi parempi kuvantavaan polarimetriaan. Wollaston prisma on kuitenkin paras kaksoissädeanalysointiväline, jos detektorina käytetään valomonistinputkia (engl. photomultiplier tube, PMT). Se antaa suuren erotuskyvyn ja hyötysuhteen. [3]

## 2.3 Detektorit

Optisessa polarimetriassa detektoreina käytetään joko CCD-kameraa, valomonistinputkea tai APD:tä (engl. avalanche photodiode). CCD-kamerat ovat nykyään yleis-

simmin käytettyjä detektoreita optisessa polarimetriassa niiden korkean kvanttihyötysuhteen (eng. quantum efficiency, QE) ja monipuolisuuden vuoksi. CCD:n etuna on kyky rekisteröidä molemmat polarisaatiosuunnat samanaikaisesti samalla laitteella. Tämä menetelmä on ratkaiseva, sillä se eliminoi ilmakehän väreilyä ja läpinäkyvyyden vaihteluista johtuvat virheet, koska molemmat kuvat altistuvat samoille häiriöille yhtä aikaa.

Valomonistinputkia käytetään edelleen optisessa polarimetriassa kirkkailla kohteilla, koska ne tarjoavat välittömän lukeman, laajan dynaamisen alueen ja kyvyn rekisteröidä tarkasti suuria vuovirtoja. APD on puolijohde vastine PMT:lle. Niillä on huomattavasti PMT:tä korkeampi kvanttihyötysuhde varsinkin lähi-infrapuna-alueella. [3]

## 3 Havaintokohteet

### 3.1 V404 Cyg – purkauksen aikainen polarisaatio

V404 Cyg on matalan massan röntgenkaksoistähti (engl. low-mass X-ray binary, LMXB). Sen komponentteja ovat musta aukko ja K-tyypin seuralais tähti. Matalan massan röntgenkaksoistähdissä, kuten V404 Cyg, merkittävä osa optisesta säteilystä syntyy mustaa-aukkoa ympäröivässä kertymäkiekossa. [4, 6]

Polarimetriset mittaukset ovat antaneet tärkeää informaatiota V404 Cyg mustan aukon suihkujen (engl. jet) geometriasta, purkausmekanismeista ja magneettikentästä erityisesti vuonna 2015 tapahtuneen purkauksen aikana. Mittauksissa havaittiin purkauksen ja hiljaisuuden välillä pieni, mutta merkittävä muutos lineaarisessa polarisaatioasteessa. Lepotilassa V404 Cyg ei näytä olevan sisäisesti polarisoitunut, jolloin havaittu polarisoitu valo on peräisin tähtienvälisestä polarisaatiosta. Polarimetriset mittaukset ovat osoittaneet, että purkauksen aikana havaittu sisäinen polarisaatio on noin 1 % luokkaa.

Polarisaation positiokulman on havaittu olevan noin  $-7^\circ \dots -9^\circ$ , mikä on lähes samansuuntainen järjestelmän suihkun kanssa. Tämä viittaa siihen, että sironnan aiheuttama polarisaatio on kohtisuorassa kertymäkiekon tasoa vastaan, mikä tukee mallia, jossa säteily siroaa kiekon yläpuolisissa napavirtauksissa tai ekvatoriaalisessa tuulessa. [6]

Havaitun polarisaation aallonpituusriippuvuus, jossa polarisaatioaste on korkeimmillaan V-kaistalla ja laskee kohti R-kaistaa, viittaa siihen, että polarisaatio syntyy elektronisironnasta (Thomson-sironta) ja absorptiosta litistyneessä plasmavaipassa tai ulosvirtauksessa, joka ympäröi säteilylähdettä [6]. Vuoden 2015 purkauksen laskaisi viskoosi-termäinen epävakaus lähellä katkaistun (engl. truncated) kertymäkiekon sisäreunaa. Polarimetriset havainnot aktiivisen vaiheen aikana ovat auttaneet ymmärtämään näitä dynaamisia muutoksia ja erottamaan kiekon termisen säteilyn suihkun ei-termisestä synkrotronisäteilystä. [4]

### 3.2 MAXI J1820+070 – purkaustilojen polarimetria

MAXI J1820+070 on mustan aukon röntgenkaksoistähti-järjestelmä (engl. black hole X-ray binary, BHXB). Vuoden 2018 purkauksen ja sitä seuranneen lepotilan polarimetriset mittaukset paljastivat merkittävää tietoa järjestelmän geometriasta ja säteilymekanismeista. [1, 5]

Nousevan kovan tilan (engl. rising hard state, RHS) aikana havaittiin noin 0,3 – 0,5 %:n suuruinen sisäinen polarisaatio, jonka positiokulma ( $\sim 25^\circ$ ) oli samansuuntainen järjestelmän radio- ja röntgensuihkujen kanssa. Tämä polarisaatio ajoittui samaan hetkeen kuin spektroskooppisesti havaitut tuulet, mikä viittaa siihen, että polarisoitunut valo syntyy ei-termisen säteilyn sirotessa suihkun tai kuuman virtauksen tyvessä olevassa ekvatoriaalisessa tuulessa.

Pehmeässä tilassa (engl. soft state, SS) sisäinen polarisaatio laski noin 0,15 %:iin B- ja V-kaistoilla. Tämän vaiheen polarisaation arvioidaan olevan peräisin säteily-

tetystä kertymäkiekosta. [5]

Laskevan kovan tilan (engl. decaying hard state, DHS) aikana sisäinen polarisaatio oli lähes nolla, mikä osoittaa, että hallitseva ei-terminen säteilykomponentti on itsessään polarisoitumatonta [5]. Tämä viittaa joko kaoottiseen (epäjärjestyneeseen) magneettikenttään tai voimakkaaseen Faradayn depolarisaatioon lähellä mustaa aukkoa [5, 10].

Järjestelmän siirryttyä lepotilaan sen sisäinen lineaarinen polarisaatioaste kasvoi peräti 5–10-kertaiseksi verrattuna purkausvaiheeseen. B-kaistalla polarisaatioaste oli korkein, vaihdellen 1,5 % ja 5 % välillä, kun taas R-kaistalla se oli matalampi, noin 0,4–2 %. Polarisaation asentokulma asettui lepotilassa keskimäärin arvoon  $-19,7^\circ \pm 1,2^\circ$ , eikä se osoittanut merkittävää riippuvuutta järjestelmän orbitaalista vaiheesta.

PA:n stabiilius orbitaalivaiheen yli viittaa siihen, että polarisaatio on suhteessa orbitaaliakseliin, joko yhdensuuntainen tai kohtisuorassa sen kanssa. Näin ollen havaittu PA antaa tietoa orbitaaliakselin sijaintikulmasta. Suihkun ja polarisaation asentokulmien välinen noin 45 asteen ero osoittaa, että mustan aukon spin on vääristynyt (engl. misaligned) vähintään 40 astetta suhteessa radan akseliin. Havaitun polarisaation ominaisuudet, erityisesti korkea aste ja sininen spektri, viittaavat siihen, että polarisoitunut valo syntyy kertymäkiekon säteilyn sirotessa kuumassa, optisesti ohuessa kertymävirtauksessa lähellä mustaa aukkoa. [11]

### 3.3 A0620–00 – lepotilan polarisaatio

A0620–00 mustan aukon polarimetrinen mittausten analysointiin käytetään lähteen [12] mittauksia.

A0620–00 on prototyyppinen mustan aukon matalamassainen röntgenkaksoistähti (LMXB), joka on ollut lepotilassa vuoden 1975 purkauksensa jälkeen. Kohteen optiset polarimetriamittaukset ovat auttaneet selvittämään sen kertymäkiekon ra-

kennetta, magneettikenttiä ja järjestelmän geometriaa erityisesti paljastamalla polarisaation positiokulman aallonpituusriippuvuuden ja orbitaalisen vaihtelun.

Korkean tarkkuuden lineaariset polarisaatiomittaukset tehtiin DIPol-UF-polarimetrillä, joka oli asennettuna 2,56 metrin Nordic Optical Telescope (NOT) -kaukoputkeen La Palmalla. Mittauksia tehtiin B-, V- ja R-kaistoilla. Lähiympäristön kenttätähtiä mitattiin DIPol-2-polarimetrillä Haleakalan T60-kaukoputkella, jotta kohteen sisäinen polarisaatio voitiin erottaa tähtienvälisestä pölystä.

A0620–00:n sisäinen polarisaatioaste on noin 1 % koko spektrialueella lähi-infrapunasta siniseen valoon. Positiokulma kääntyy jatkuvasti aallonpituuden funktiona, se muuttuu noin 53 astetta infrapunasta siniseen. Polarisaatioaste vaihtelee orbitaalisen jakson (7,75 h) mukaan noin 0,3 prosentin amplitudilla.

Orbitaalinen vaihtelu vahvistaa, että osa polarisaatiosta syntyy seuralaistähden valon Thomson-sironnasta aineessa, joka seuraa mustaa aukkoa sen rataliikkeessä. positiokulman kääntyminen voidaan selittää joko Faradayn rotaatiolla, mikä viittaa noin 5 Gaussin suuruiseen magneettikenttään kertymäkiekkoa ympäröivässä plasmassa, tai kahden polarisoidun komponentin vuorovaikutuksella. Vuorovaikuttavat komponentit olisivat tähden valon sironta kiekosta ja toinen, mahdollisesti UV-alueen ylimäärään liittyvä komponentti (kuten Compton-sironta kuumassa kertymävirtauksessa). [12]

## 4 Optisen polarisaation syntymekanismit

Mustien aukkojen kertymäkiekot vaikuttavat optiseen polarisaatioon useiden fyysikaalisten mekanismien kautta, joista keskeisimpiä ovat sironnat, geometriset tekijät ja magneettikentät.

## 4.1 Sironta

### 4.1.1 Thomson-sironta

Kertymäkiekon lämpösäteily on alun perin polarisoitumatonta, mutta se polarisoi-  
tuu kiekon ilmakehän vapaista elektroneista tapahtuvan Thomson-sironnan seurauk-  
sena [4]. Puhtaassa elektronisironnassa polarisaatioaste riippuu suoraan kiekon inkli-  
naatiosta eli katselukulmasta [1]. Optisesti paksussa tapauksessa polarisaatio on  
yleensä alle 12 % ja se on suuntautunut kiekon tason suuntaisesti [10]. Jos kiekossa  
tapahtuu sironnan lisäksi merkittävää absorptiota, polarisaatioaste laskee ja polari-  
saatiotaso voi kääntyä 90 astetta (kohtisuoraan kiekkoa vastaan). Tämä tunnetaan  
Nagirner-ilmiönä. [6, 10]

### 4.1.2 Sironta ulosvirtauksissa ja tuulissa

Kertymäkiekosta tuleva säteily voi myös sirota kiekkoa ympäröivässä plasmavaipas-  
sa tai tuulessa [6, 10]. Esimerkiksi MAXI J1820+070 -kohteessa havaittu polari-  
saatio selittyy ei-termisen säteilyn sironnalla ekvatoriaalisessa tuulessa. Tällaisessa  
geometrisessä mallissa polarisaatioaste voidaan laskea analyttisesti kaavalla

$$P = \frac{1 - \cos^2 i}{3 - \cos^2 i},$$

mikä osoittaa, että polarisaatioaste  $P$  riippuu ainoastaan inkliinaatiosta  $i$ . [5]

## 4.2 Synkrotronisäteily

Mustien aukkojen röntgenkaksoistähdissä synkrotronisäteily on pääasiallinen meka-  
nismi, jolla selitetään suihkuista tulevaa polarisoitunutta valoa [4]. Synkrotronisä-  
teily on luonnostaan lineaarisesti polarisoitunutta [4]. Se syntyy, kun kiihtyvissä no-  
peuksissa liikkuvat varatut hiukkaset, kuten elektronit, joutuvat magneettikenttään  
ja alkavat liikkua siellä kaarevia tai spiraalimaisia ratoja pitkin [3, 7].

Vapaa varattu hiukkanen säteilee liikkeessaan millä tahansa kaarevalla radalla. Kun hiukkasen nopeus lähestyy valonnopeutta, säteily keskittyy kapeaan keilaan hiukkasen liikkeen suuntaisesti, ja se on voimakkaasti polarisoitunutta liikkeen tasossa. [7]

Synkrotronisäteilyn polarisaatioaste riippuu suoraan säteilyalueen magneettikentän geometriasta ja järjestyneisyydestä. Teoreettisesti synkrotronisäteily voi olla erittäin voimakkaasti polarisoitunutta (jopa 70 – 80 %), jos magneettikenttä on täysin järjestäytynyt. Jos magneettikenttä on kaoottinen, eri suunnista tulevat polarisaatiot kumoavat toisensa, jolloin keskimääräinen havaittu polarisaatio laskee lähelle nollaa [4, 10]

### 4.3 Faradayn rotaatio

Magnetisoitunut kertymäkiekko aiheuttaa Faradayn rotaatiota, jossa polarisaatio-  
 taso kiertyy säteilyn kulkiessa magnetisoituneen plasman läpi [13]. Tämä kiertyminen on keskeinen työkalu magneettikenttien tutkimuksessa, koska kääntymiskulma riippuu suoraan magneettikentän voimakkuudesta, elektronitiheydestä ja käytetystä aallonpituudesta. Faradayn rotaatio on verrannollinen aallonpituuden neliöön. Havaitun polarisaation positiokulman ( $\theta$ ) muutos eri aallonpituuksilla ( $\lambda$ ) voidaan kuvata kaavalla

$$\theta(\lambda) = \theta_0 + RM\lambda^2,$$

missä rotaatiomitta (engl. Rotation Measure, RM) on integraali magneettikentän voimakkuudesta ja elektronitiheydestä näkölinjalla. Mittaamalla positiokulma usealla eri kaistalla (esim. B, V ja R) tutkijat voivat määrittää RM-arvon ja sen avulla laskea arvion magneettikentän voimakkuudelle. Esimerkiksi A0620–00 mustan aukon tapauksessa positiokulman kääntymisen infrapunasta siniseen aallonpituuteen viittasi noin 5 Gaussin suuruiseen magneettikenttään kertymäkiekkoa ympäröivässä plasmassa. [12]

Faradayn rotaatio ei muuta vain polarisaation suuntaa, vaan se voi myös vaikuttaa polarisaatioasteeseen. Voimakkaat tai turbulentit magneettikentät voivat aiheuttaa depolarisaatiota. Jos säteily kulkee paksun ja magnetisoituneen plasman läpi, eri kerroksista tulevat aallot kiertyvät eri määriä, mikä johtaa signaalien kumoutumiseen ja havaitun polarisaatioasteen laskuun [10, 13].

## 5 Yhteenveto

Tässä työssä käsiteltiin erittäin tarkan optisen polarimetrian sovelluksia mustia aukkoja sisältävien röntgenkaksoistähtien tutkimisessa. Polarimetria antaa ainutlaatuisen ymmärryksen mustien aukkojen ominaisuuksista. Siitä saadaan tarkkaa informaatiota säteilyn synty- ja vuorovaikutusmekanismeista, joita ei voida johtaa pelkistä intensiteettihavainnoista.

Työssä esitettiin polarisaation keskeisimmät käsitteet: Stokesin parametrit sekä polarisaatiotilat. Polarimetrin instrumentaatio esiteltiin tiiviisti keskittyen vain yleisimpiin komponentteihin. Havaintoesimerkit V404 Cyg-, MAXI J1820+070- ja A0620–00 -järjestelmistä osoittavat, että optinen polarimetria on herkkä järjestelmän tilamuutoksille ja eri säteilykomponenttien vaihtumiselle.

Polarisaation syntymekanismeista keskeisiä ovat elektronisirona kertymäkiekossa ja ulosvirtauksissa, synkrotronisäteily relativistisissa suihkuissa sekä Faradayn rotaatio magnetisoituneessa plasmassa. Näiden mekanismien yhteisvaikutus määrää havaitun polarisaation asteen ja suunnan, ja erittäin tarkka optinen polarimetria on välttämätön näiden vaikutusten erottamiseksi.

## Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielmassani olen hyödyntänyt tekoälyohjelmaa NotebookLM englanninkielisten lähteiden kääntämiseen sekä oleellisen tiedon poimimiseen. En ole ottanut suoraan tekoälyn kirjoittamaa tekstiä, vaan olen kirjoittanut sen omin sanoin ja tarkistanut sisällön aina lähteestä.

## Viitteet

- [1] V. Kravtsov, A. V. Berdyugin, I. A. Kosenkov, A. Veledina, V. Piirola, Y. A. Qadir, S. V. Berdyugina, T. Sakanoi, M. Kagitani ja J. Poutanen, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **514**, 2479 (2022) [doi:10.1093/mnras/stac1470](https://doi.org/10.1093/mnras/stac1470).
- [2] K. I. I. Koljonen, K. S. Long, J. H. Matthews ja C. Knigge, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **521**, 4190 (2023) [doi:10.1093/mnras/stad809](https://doi.org/10.1093/mnras/stad809).
- [3] A. Berdyugin, V. Piirola ja J. Poutanen, kirjassa *Astronomical Polarisation from the Infrared to Gamma Rays*, toimittanut R. Mignani, A. Shearer, A. Słowikowska ja S. Zane (Springer International Publishing Cham, 2019), Vol. 460, pp. 33–65, series Title: Astrophysics and Space Science Library [doi:10.1007/978-3-030-19715-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19715-5_3).
- [4] T. Shahbaz, D. M. Russell, S. Covino, K. Mooley, R. P. Fender ja C. Rumsey, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **463**, 1822 (2016) [doi:10.1093/mnras/stw2171](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2171).
- [5] I. A. Kosenkov, A. Veledina, A. V. Berdyugin, V. Kravtsov, V. Piirola, S. V. Berdyugina, T. Sakanoi, M. Kagitani ja J. Poutanen, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* **496**, L96 (2020) [doi:10.1093/mnrasl/slaa096](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa096).
- [6] I. A. Kosenkov, A. V. Berdyugin, V. Piirola, S. S. Tsygankov, E. Pallé, P. A. Miles-Páez ja J. Poutanen, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **468**, 4362 (2017) [doi:10.1093/mnras/stx779](https://doi.org/10.1093/mnras/stx779).
- [7] E. Hecht, *Optics*, 5 edition. global edition ed. (Pearson Education, Inc Boston, 2017).
- [8] K. Nilsson, L. Takalo ja J. Piironen, *Havaitseva tähtitiede*, 3 ed. (Ursa, YEAR).
- [9] E. L. Degl’Innocenti, S. Bagnulo ja L. Fossati, *Polarimetric Standardization*, 2006, arXiv:astro-ph/0610262.
- [10] A. Veledina, A. V. Berdyugin, I. A. Kosenkov, J. J. E. Kajava, S. S. Tsygankov, V. Piirola, S. V. Berdyugina, T. Sakanoi, M. Kagitani, V. Kravtsov ja J. Poutanen, *Astronomy & Astrophysics* **623**, A75 (2019) [doi:10.1051/0004-6361/201834140](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834140).
- [11] J. Poutanen, A. Veledina, A. V. Berdyugin, S. V. Berdyugina, H. Jermak, P. G. Jonker, J. J. E. Kajava, I. A. Kosenkov, V. Kravtsov, V. Piirola, M. Shrestha, M. A. P. Torres ja S. S. Tsygankov, *Science* **375**, 874 (2022) [doi:10.1126/science.abl4679](https://doi.org/10.1126/science.abl4679).
- [12] V. Kravtsov, A. Veledina, A. V. Berdyugin, J. Poutanen, S. S. Tsygankov, T. Shahbaz, M. A. P. Torres, H. E. Jermak, C. McCall, I. A. Steele, J. J. E. Kajava, V. Piirola, T. Sakanoi, M. Kagitani ja S. V. Berdyugina, *Astronomy & Astrophysics* **703**, A14 (2025) [doi:10.1051/0004-6361/202451446](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202451446).

- [13] N. A. Silant'ev, M. Y. Piotrovich, Y. N. Gnedin ja T. M. Natsvlishvili, *Astronomy & Astrophysics* **507**, 171 (2009) [doi:10.1051/0004-6361/200810892](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810892).