

Blasaarien optisen polarisaation muuttuvuus ja
sen mahdollinen yhteys erittäin korkeaenergisien
gammäsäteilyn muuttuvuuteen

Pro Gradu
Turun yliopisto
Tähtitiede
2024
LuK Ella Toppari
Tarkastajat:
Dos. Elina Lindfors
Prof. Juri Poutanen

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Toppari, Ella Blasaarien optisen polarisaation muuttuvuus ja sen mahdollinen yhteys erittäin korkeaenergisien gammasäteilyn muuttuvuuteen

Pro Gradu, 74 s., 3 liites.
Tähtitiede
Joulukuu 2024

Tässä tutkielmassa tutkittiin blasaarien optisen polarisaation muuttuvuutta ja sen mahdollista yhteyttä aiemmin havaittuihin VHE- eli erittäin korkeaenergisiiin (engl. Very High Energy) purkauksiin. Blasaarien optisen polarisaation muuttuvuus viestii niiden hiukkassuihkun magneettikentässä tapahtuvista muutoksista, joilla voisi olla yhteys myös erittäin korkeaenergisien säteilyn purkausten syntyyn. Blasaareiden hiukkassuihkujen toimintamekaniikkaa ei vielä täysin tunneta, mutta hiukkassuihkujen tiedetään dominoivan blasaareista havaittavaa säteilyä, ja useilla eri aallonpituusalueilla tehtävät havainnot auttavat meitä ymmärtämään blasaareja ja niiden hiukkassuihkuja paremmin.

Polarisaatiodataa kerättiin sekä tutkimusryhmän omasta havainto-ohjelmasta että kirjallisuudesta vuosien 2003-2020 ajalta 38 kohteesta. VHE-datan oli kirjallisuudesta kerännyt Jan Aaltonen Pro Gradu -työssään ja sitä oli kerätty vuosien 2004-2020 ajalta. Havaintodataa yhdistettäessä löydettiin samanaikaista VHE- ja polarisaatiodataa 18 kohteesta, ja nämä valikoituivat tutkielman lopulliseen otokseen.

Joissakin otoksen kohteissa havaittiin samanaikaisuuksia VHE-purkausten ja polarisaatiokäyttäytymisen muutosten välillä, mutta samanaikaisten VHE- ja polarisaatiohavaintojen määrä oli liian vähäinen jotta kohteiden muutoskäyttäytymisestä oltaisiin voitu tehdä yleisiä johtopäätöksiä. Havaintodata oli hajanaista, joten blasaareista havaittavien eri aallonpituusalueiden muuttuvuuskäyttäytymisen laajempi tutkiminen on tarpeen tarkempien johtopäätösten muodostamiseksi.

Asiasanat: Blasaarit, polarisaatio, VHE

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Blasaarit	3
1.1.1	Energiajakaumaspektrit (SED)	5
1.2	VHE-purkaukset	7
1.3	Polarisaatio	9
1.3.1	EVPA-rotaatiot ja polarisaation muuttuvuutta selittävät mallit	11
1.4	Tutkimuskysymys	13
2	Data ja metodit	14
2.1	Otos	14
2.2	VHE-data	17
2.3	NOT-monitorointiohjelma	20
2.4	Täydentävä polarisaatiodata muilta kaukoputkilta	24
2.5	Metodit	25
2.5.1	Polarisaatiokulman mittavälien tasaus ja havaintojaksot	26
2.5.2	Polarisaatiokuvaajien muodostaminen	28
2.5.3	EVPA-rotaatioiden etsiminen	28
2.5.4	Polarisaatioasteen keskiarvojen laskeminen	29
2.5.5	Polarisaatioasteen jakaumien tarkastelu	30
3	Tulokset	31
3.1	Polarisaatioaste VHE-purkausten aikana	32
3.1.1	Polarisaatioasteen jakaumien vertailu	34
3.2	Polarisaatiokulma VHE-purkausten aikana	39
3.2.1	Kuvaajien lähempi tarkastelu	48
3.2.2	EVPA-rotaatiot	51

4	Päätelmät	58
5	Liitteet	64
5.1	Polarisaatiokuvaajat	64
5.1.1	Tarkemmat kuvaajat lähemmin tarkastelluista kohteista	68
5.2	Polarisaatioasteen jakaumien tarkastelu	71

1 Johdanto

Vaikka mustat aukot tunnetaan maailmankaikkeuden kurimuksina jotka vetävät sisään jopa valon ympäriltään, ne ovat myös tärkeä osa kosmoksen kokonaisrakennetta.

Useimmissa galakseissa, mukaanlukien omassamme, vaikuttaa olevan ytimessään massiivinen musta aukko [1]. Mustia aukkoja ei voida suoraan nähdä, mutta niiden painovoiman vaikutus ympäröivään aineeseen voidaan havaita; voimme nähdä kaukaisten galaksien keskustojen ympärille kertyvät keskuspullistumat ja niissä jotakin näkymätöntä mutta painavaa kohdetta kiertävät tähdet ja kirkkaana loistavan kaasun.

Voimme myös katsoa syvemmälle. Voimme yhdistää useita radioteleskooppeja eri puolilla maailmaa toimimaan yhtenä koko maapallon kokoisena radioteleskooppina ja kuvata mustaa aukkoa kiertävän materian. Ensimmäinen tällainen kuva julkaistiin vuonna 2019, kun saimme vuosia kestäneen kansainvälisen yhteistyön tuloksena kuvan Messier 87 -galaksin keskustassa sijaitsevan mustan aukon ympäristöstä [2].

Tämän jälkeen olemme saaneet kuvan myös oman kotigalaksimme keskustassa olevan mustan aukon ympäristöstä [3], joka vuosien ajan oli pelkkä spekulaaation kohde. Nykyään tunnemme naapurustomme paremmin ja tiedämme enemmän siitä, mitä galaksien kirkkaat keskustat pitävät sisällään.

Mustien aukkojen ympärille kertyy materiaa kertymäkiekkoon, joka jää kiertämään mustaa aukkoa ja kiertyy pikkuhiljaa mustan aukon tapahtumahorisonttia kohti [1]. Mustan aukon ympärille kiertyvä kaasu kuumenee ja alkaa loistaa, ja aineen pudotessa mustaan aukkoon vapautuu valtavia määriä potentiaalienergiaa [4]. Useimmat mustat aukot ovat hiljaisia jättiläisiä galaksiydintensä tähtien ja pölyn keskellä, mutta joidenkin galaksien keskustoissa mustat aukot keräävät ympärilleen niin suuria määriä kaasua että ne saavat galaksin ytimen loistamaan kirkkaampana kuin koko muu ympäröivä galaksi yhteensä [4]. Tällaisia kohteita kutsutaan aktiivi-

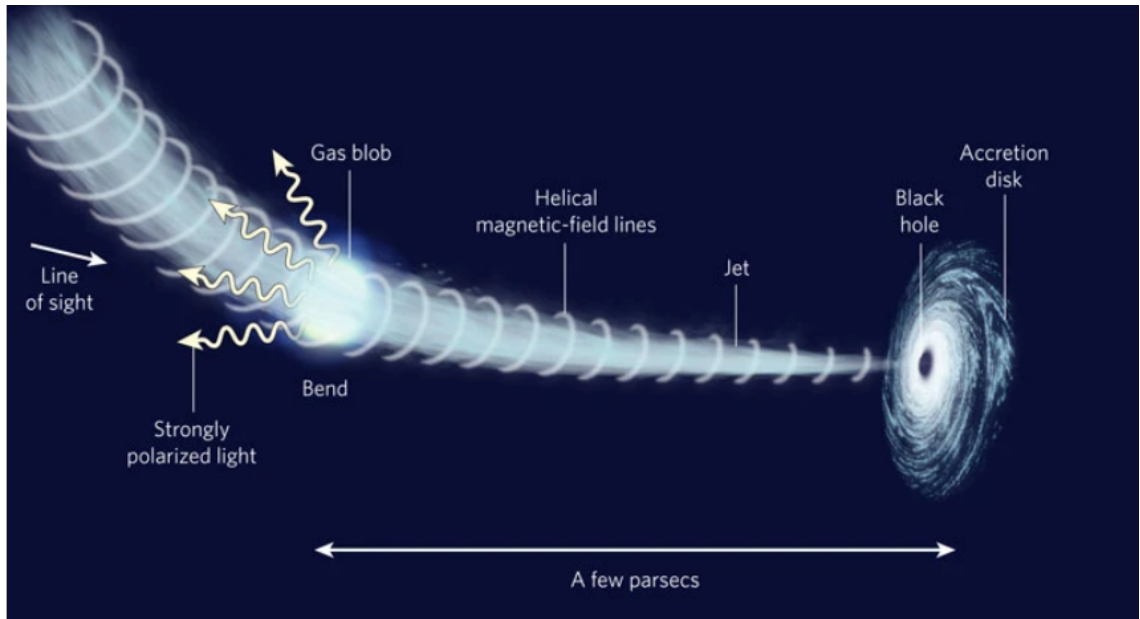
siksi galaksiytimiksi (engl. Active Galactic Nuclei, AGN).

Kirkkaan säteilyn lisäksi aktiiviset galaksiytimet voivat myös muodostaa navoiltaan lähteviä erittäin korkeaenergisia hiukkassuihkuja, joissa hiukkaset liikkuvat lähes valonnopeudella [4] ja ovat kokoluokaltaan astronomisista yksiköistä megaparsekkeihin. Näiden alakategoriana ovat blasaarit, joissa hiukkassuihku osoittaa havaintosuunnassa Maata kohti [1], antaen meille erityislaatuisen mahdollisuuden havainnoida näitä hiukkassuihkuja suoraan.

Blasaarit ovat voimakkaimpia tunnettuja galaksiytimiä [5], niiden olemassaolo on tunnettu pitkään ja niitä havaitaan useilla erilaisilla teleskoopeilla, mutta silti niiden toimintamekaniikkaa ei vielä täysin tunneta. Ei ole vielä täysin selvää, miten blasaarien hiukkassuihkut tarkalleen muodostuvat ja mikä niissä havaittavia vaihteluita aiheuttaa [4]. Teorioiden mukaan hiukkassuihkut syntyvät mustan aukon pyöriessä ja kertymäkiekon ollessa voimakkaasti magnetisoitunut [1], ja hiukkassuihkuissa havaittavat muutokset viestivät muutoksista esimerkiksi magneettikentässä tai muissa hiukkassuihkun parametreissa [6]. Hiukkassuihkujen tiedetään olevan voimakkaiden kierteisten magneettikenttien dominoimia ja kollimoituvan lähellä mustaa aukkoa magneettisen stressin johdosta - tosin vielä ei ole täysin selvää, mikä pitää hiukkassuihkut kollimoituneena [1].

Blasaareista havaittavaa säteilyä dominoi hiukkassuihkun säteily. Tässä tutkielmassa tarkastellaan blasaarien optisessa polarisaatiossa havaittavia vaihteluita ja niiden mahdollista yhteyttä kohteista havaitun erittäin korkeaenergisien gammasäteilyn muuttuvuuteen. Tutkielman alussa esitellään käsitellyt aihealueet (mitä blasaarit ovat, mitä niistä tarkasteltiin ja miksi) sekä selitetään tärkeimmät käytetyt käsitteet. Metodeissa esitellään käytetyn aineiston kerääminen ja käsittely, tuloksissa aineistosta muodostetut kuvaajat sekä niistä ja tilastollisista testeistä saadut tutkielman tulokset ja lopuksi tutkielman tuloksista johdetut päätelmät.

1.1 Blasaarit



Kuva 1. Havainnollistava kuvituskuva blasaarista ja relativistisesta hiukkassuihkusta, kuva lähteestä [4].

Blasaarit ovat aktiivisten galaksiydinten alaluokka, joissa niistä lähtevä voimakas hiukkassuihku osoittaa meitä kohti lähellä havaintosuuntaa. Nimityksellä viitataan siis tila-avaruudelliseen ilmiöön eikä varsinaisesti erilliseen kohdetyyppiin; blasaarit ovat tietyn tyyppisiä aktiivisia galaksiytimiä jotka näemme tietystä suunnasta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 1, jossa on esitetty mustan aukon ympärillä oleva kertymäkiekko (engl. accretion disk) sekä hiukkassuihku (jet) katselukulmaan (line of sight) nähden.

Blasaarit ovat voimakkaimpia tunnettuja aktiivisia galaksiytimiä, ja niiden keskustoissa ovat supermassiiviset mustat aukot keräävät ympärilleen materiaa ja syöksevät navoiltaan hiukkassuihkuissa plasmaa avaruuteen lähes valonnopeudella [5]. Näistä hiukkassuihkuista puhutaan relativistisina ja niiden käytöstä kuvaa paremmin suhteellisuusteoria kuin klassinen mekaniikka. Yksi näistä relativistisistä efekteistä on, että avaruusgeometrisestä katselukulmasta johtuen materia hiukkassuihkussa näyttää liikkuvan valoa nopeammin [1]. Blasaarit hiukkassuihkuineen

saattavat myös olla kosmisten hiukkasten (sekä varattujen hiukkasten että neutriinonjen) lähde [7].

Blasaarit ovat kirkkaita ja voimakkaasti muuttuvia kohteita. Niiden hiukkassuihkujen säteily on hyvin kollimoitunutta (eli suihkun aukeamiskulma on hyvin pieni) ja katselukulmasta havaittajaan nähden seuraa se, että niistä havaittava säteily on voimakkaasti Doppler-vahvistunutta. Doppler-ilmiö tekee kohteista kirkkaita kaikilla aallonpituuksilla radioaalloista gammasäteilyn aallonpituuksiin [6], ja blasaareissa havaittavaa harvinaisen voimakasta muuttuvutta selittää se, että havaintoja tehdessä Doppler-ilmiö vahvistaa kohteen fyysisten olosuhteiden luomia kohteille tyypillisiä jo olemassaolevia vaihteluita (ks. kappale 1.3).

Blasaari-nimitys kehitettiin alunperin yhteiseksi nimeksi BL Lac- ja FSRQ (Flat Spectrum Radio Quasar) -kohteille [6]. BL Lac -kohteet on nimetty luokan ensimmäisen havaitun kohteen mukaan (BL Lac, jota tässäkin tutkielmassa tarkastellaan). Näille kohteille on tyypillistä nopea muuttuvuus kaikilla aallonpituuksilla jopa vain tuntien aikaskaaloilla (tähtitieteellisessä aikaskaalassa siis erittäin nopeasti), sekä optisen spektrin emissioviivojen (engl. emission lines in optical spectra) heikkous tai täydellinen puuttuminen, mikä viittaa mustan aukon kertymäkiekon läheisyydessä olevan materian vähäisyyteen. Jos kohteen optisessa spektrissä näkyy emissioviivoja jotka ovat tyypillisiä kvasaareille, kohde luokitellaan FSRQ-kohteeksi (engl. Flat Spectrum Radio Quasar) eli litteään radiospektrin kvasaariksi [8].

Tässä tutkielmassa keskitytään blasaareista havaittavaan optisen eli näkyvän valon aallonpituusalueen säteilyyn sekä erittäin korkeaaenergiseseen gammasäteilyyn ja yritetään selvittää onko näiden muutoskäyttäytymisten välillä havaittavissa olevaa yhteyttä.

1.1.1 Energiajakaumaspektrit (SED)

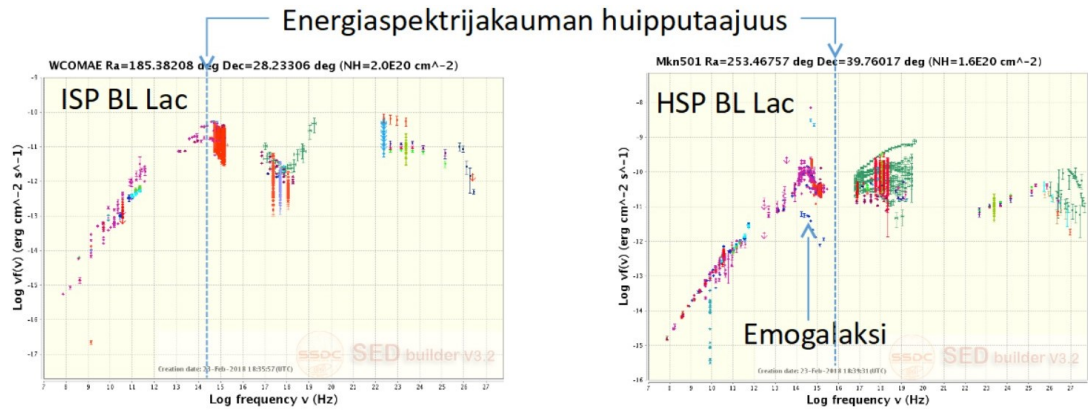
Tähtitieteellisten kohteiden luokittelussa käytetään energiajakaumaspektriä (engl. Spectral Energy Distribution, SED). Energiajakaumaspektrit ovat olleet olennainen työkalu blasaarien luokittelussa blasaaritutkimuksen alkuaajoista asti [6].

Tutkittaessa aktiivisia galaksiytimiä energiajakaumaspektrissä näkyy taajuuksia koko sähkömagneettisen spektrin alueelta, radiosäteilystä korkeaenergiseen tai jopa erittäin korkeaenergiseen gammasäteilyyn. Tavallisissa galakseissa energiajakaumaspektrissä on taajuuksia vain tähtien lämpösäteilystä sekä pölystä joka uudelleenheijastaa tähtien säteilyä kaukoinfrapuna-alueella (engl. far-infrared, far-IR).

Aktiivisissa galakseissa kuuma kertymäkiekko ja sen kuumentama kaasua voivat säteillä kirkkaammin kuin galaksin kaikki tähdet yhteensä. Tämä on hiukkassuihkusta riippumaton termistä eli lämpösäteilyä. Hiukkassuihku säteilee myös ei-termistä säteilyä; aktiivisista galaksiytimistä voidaan havaita synkrotronisäteilyä ja käänteistä Comptonin sirontaa [9]. Hiukkassuihkussa on voimakas magneettikenttä (havainnollistettu kuvassa 1), joka saa relativistiset hiukkaset kierteiseen kiihtyvään liikkeeseen, saaden aikaan synkrotronisäteilyä.

Blasaarit voivat säteillä energiaa radiotaajuuksista erittäin korkeaenergiseen gammasäteilyyn, ja niiden energiajakaumaspektrissä näkyy blasaareille tyypillinen kaksoihuippu. Matalamman energian huippu sijoittuu tyypillisesti infrapuna-, optiselle, tai röntgentaajuuksialueelle ja selittyy hiukkassuihkun relativististen elektronien ei-termisellä synkrotronisäteilyllä. Korkean energian huippu näkyy gamma-alueella ja voidaan tulkita matalaenergisten fotonien käänteisenä Compton -sirontana (engl. Inverse Compton scattering) saman relativististen elektronien populaation aiheuttaessa synkrotronisäteilyä [10]. Synkrotronisäteily on polarisoitunutta, ja polarisaation muutoskäyttäytymistä tutkimalla voidaan tutkia blasaarien hiukkassuihkuissa tapahtuvia muutoksia (ks. 1.3).

Blasaareja voidaan jaotella säteilyominaisuuksiensa (synkrotronisäteilyn huippu-



Kuva 2. Havainnollistava kuva BL Lac -kohteiden ISP- ja HSP -energiajakaumaspektreistä. Kuva modifioitu T. Hovatan AGN-kurssin luentomateriaaleista, data SSDC:n SEDbuilderista, <https://tools.ssdc.asi.it/SED>

taajuuden) mukaan LSP (Low Synchrotron Peak, matala synkrotronisäteilyn huippu), ISP (Intermediate Synchrotron Peak, keskitason synkrotronisäteilyn huippu, ja HSP (High Synchrotron Peak, korkea synkrotronisäteilyn huippu) -kohteiksi. Näiden kohdetyyppien energiajakaumaspektrien eroja on havainnollistettu kuvassa 2. SED-luokitukset eivät ole kohteille kuitenkaan täysin yksinkertaisia, sillä joidenkin kohteiden synkrotronisäteilyn huippu näyttää muuttuvan niiden ollessa aktiivisimmillaan purkausjaksojen aikana [11].

FSRQ:t ovat lähinnä LSP-kohteita, kun taas BL Lac-tyyppin blasaareja on kaikissa SED-luokissa. HSP -kohteet ovat erittäin korkeaenergisien gammataivaan havaituimpia TeVCat -katalogiin kuuluvia TeV-instrumenteilla havaittuja kohteita [11]. TeVCat on internetkatalogi TeV-alueen (teraelektronivoltti, 10^{12} eV) tähtitieteellisille havainnoille, ja tutkielman kirjoitushetkellä TeVCat-katalogissa on yhteensä 85 blasaaria, joista 56 on HSP-kohteita [12]. Näistä erityisen usein havaitaan etenkin ISP- ja HSP-tyyppin BL Lac -kohteita, joilla synkrotronisäteilyn huipputaajuus on korkea. Kohteilla joilla on korkea synkrotronisäteilyn huipputaajuus myös SED-jakauman toinen huippu on korkeammilla energioilla, jolloin niitä on helpompi havaita TeV-instrumenteilla [11]. Tässä tutkielmassa tarkastellun otoksen kohteet, joista oli saa-

tavilla verailukelpoista dataa, ovat BL Lac -kohteita ja niiden SED-luokitukset on merkitty taulukkoon I.

SED-huipun vaikutusta lukuunottamatta on vielä epäselvää, mitkä tekijät vaikuttavat kohteen aktiivisuuteen TeV-alueilla. Yhteyksiä optisen alueen ja GeV-alueen aktiivisuuteen on ehdotettu, mutta toistaiseksi selkeää yhteneväistä selitystä ei ole tiedossa. TeV-aktiivisuuden mahdollinen linkittyminen optisen ja GeV-alueen aktiivisuuteen kuitenkin viittaa siihen, että kaikki ISP ja HSP kohteet saattaisivat olla havaittavissa erittäin korkeilla energioilla mikäli niitä havaitaan korkean vuon aikaan [11], ks. kappale 1.2.

1.2 VHE-purkaukset

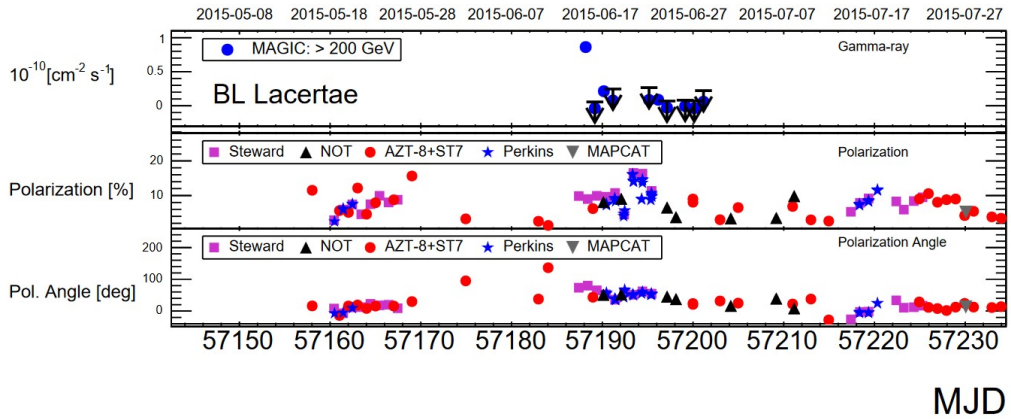
Blasaareille on tyypillistä voimakas ja nopea muuttuvuus sekä yksilöllinen käyttäytyminen kaikilla aallonpituuksilla, myös gamma-aallonpituuksilla. Blasaarien gammasäteilyn nopean muuttuvuuden selittämiseksi on esitetty useita erilaisia malleja, mutta toistaiseksi sen taustalla olevat syyt ovat epäselviä.

Hiukkassuihkun plasman tiedetään olevan turbulenttia, ja blasaarien hiukkassuihkuissa liikkuu erittäin korkeaenergisää hiukkasia suurilla nopeuksilla. Havainnoissa nähtäviä muutoksia voidaan selittää hiukkassuihkuissa ja paikallisissa olosuhteissa tapahtuvilla muutoksilla; esimekiksi hiukkassuihkussa liikkuva shokkiaalto pakottaa edetessään magneettikentän järjestäytymään, ja magneettinen rekonnektio saa hiukkassuihkussa aikaan hiukkaskiihdytystä. Erilaisia malleja havaittujen muutosten selittämiseksi on esitetty tarkemmin kappaleessa 1.3.

Blasaareista havaittava muuttuvuus on nopeinta erittäin korkeaenergisellä VHE-alueella (VHE, engl. Very High Energy). VHE-purkauksilla tarkoitetaan erittäin korkeaenergisien gammasäteilyn purkauksia (engl. VHE flare), ja tässä tutkielmassa on tutkittu tällaisten purkausten mahdollista yhteyttä blasaarien polarisaatiokäyttäytymiseen. Blasaareille tyypillisesti myös kohteiden VHE-aktiivisuus on erittäin voi-

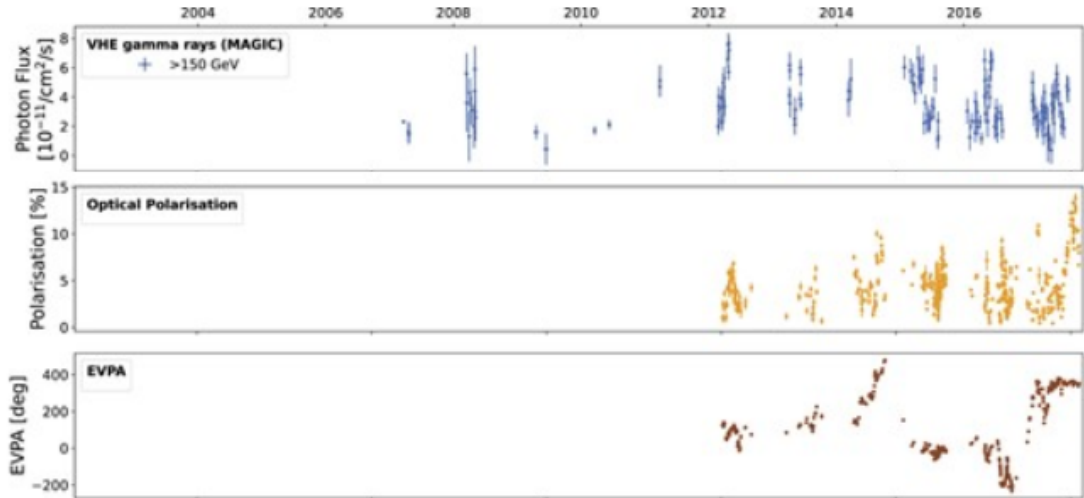
makkaasti muuttuvaa, ja tämän nopean ja kohteille yksilöllisen muuttuvuuden syytä ei vielä täysin ymmärretä [13]. Nykyisten havaintolaitteiden ja -menetelmien puitteissa muuttuvuuden koko skaalaa ja syitä ei täysin tunneta, sillä vaikka blasaareja on tutkittu jo vuosia niistä kerätty havaintodata on hajanaista ja nykylaitteistolla useat blasaarit ovat havaittavissa vain erittäin korkeaeneristen VHE-purkausten aikana.

Blasaarit ovat hyvin yksilöllisesti käyttäytyviä kohteita, joiden muuttuvuus on suurta. Kuvissa 3 ja 4 on esitetty blasaarien kohdekohtaisen käyttäytymisen esimerkkinä kohteiden BL Lac ja PG 1553+113 pitkäaikaiset valokäyrät VHE-säteilyn ja optisen polarisaation havaintojen osalta. Kuviin ylimmäksi on merkitty gamma-säteilyn havainnot ja alapuolelle polarisaatiohavainnot.



Kuva 3. Kohteen BL Lac pitkäaikainen valokäyrä gammasäteilyn aallonpituuksille (MAGIC) ja polarisaatiolle. Kuvan ylimmässä paneelissa siniset merkit ovat detektioita ja mustat detektioista laskettuja ylärajoja mahdolliselle gammasäteilyn vuolle. Polarisaatiohavaintojen (polarisaatioaste, Polarization [%], ja polarisaatiokulma Pol. Angle [deg]) paneelissa eri väriset datapisteet ovat eri lähteistä kerättyjä polarisaatiohavaintoja. Muokattu lähteestä [14].

Kohteiden BL Lac ja PG 1553+113 valokäyristä (3, 4) nähdään, että näistä kohteista tehdyt VHE-havainnot poikkeavat toisistaan merkittävästi. Näistä kuvaajista huomataan, että kohteelle PG 1553+113 on tehty gamma-alueen havaintoja pitkä-



Kuva 4. Kohteen PG 1553+113 pitkäaikainen valokäyrä gammasäteilyn aallonpituuksille (MAGIC) ja polarisaatiolle. Muokattu lähteestä [15].

aikaisesti yli kymmenen vuoden ajalta, ja sen valokäyrä on melko jatkuva. Kohteelle BL Lac on kuitenkin vain vähän gamma-havaintoja. Tämä johtuu siitä, että nyky-laitteistolla VHE-purkausaikojen ulkopuolella BL Lac -kohteesta ei saada merkittäviä detektioita erittäin korkeaenergisien gammasäteilyn alueella, vaan havainnoista voidaan arvioida vain yläraja mahdolliselle VHE-gammasäteilyn vuolle.

1.3 Polarisaatio

Polarisoituneella valolla tarkoitetaan valoa, jonka aaltojen amplitudin värähtelysuunta on tietynlainen. Näkyvä valo on sähkömagneettista säteilyä, jolla on magneettikenttävektori ja sähkökenttävektori. Nämä ovat toisiinsa nähden kohtisuorat, ja valon polarisaatiosta puhuttaessa viitataan sähkökenttävektorin suuntaan.

Aktiivisten galaksiydinten matalaenerginen säteily on tyypillisesti voimakkaasti polarisoitunutta. Polarisaatiota on havaittu aiemmin matalaenergisemmillä aallonpituusalueilla (radioalloista optisille aallonpituusalueille) ja hiljattain myös röntgenalueella [16]. Tavallisissa galakseissa optinen polarisaatio tyypillisesti johtuu pölyn aiheuttamasta sironnasta, kun taas blasaareissa hiukkassuihkujen synkrotronisätei-

lystä [6]. synkrotronisäteily on aina polarisoitunutta, ja hiukkassuihkuissa on voimakas magneettikenttä (ks. kuva 1), jonka järjestäytyminen vaikuttaa polarisaation voimakkuuteen.

Blasaarien polarisaatio on voimakkaasti muuttuvaa; sekä optisen polarisaation aste että polarisaatiokulma saattavat muuttua äkillisesti ja huomattavasti. Blasaarien polarisaatiokulman tiedetään olevan samansuuntainen hiukkassuihkun kanssa ja magneettikentän molempia vastaan kohtisuora [6], joten polarisaatiokulman muutoksia tutkimalla saadaan lisätietoa hiukkassuihkuista. Joillakin kohteilla on selkeästi havaittavissa oleva preferenssikulma eli yleisin polarisaatiokulma, jonka ympärille polarisaatiokulman havainnot keskittyvät [10]. Selkeät preferenssikulmat ovat yleisimpiä HSP-kohteilla, joita myös enemmistö havaituista kohteista on.

Muutokset polarisaatioasteessa ja -kulmassa viestivät muutoksista hiukkassuihkussa, esimerkiksi hiukkassuihkussa liikkuvasta shokista tai hiukkassuihkun taipumisesta [4]. Kuvassa 1 on havainnollistettu hiukkassuihkussa liikkuva shokkiaalto (blob) sekä hiukkassuihkun taipuminen katselukulmaan nähden. Kuvaan on merkitty myös hiukkassuihkun kiertäinen magneettikenttä ja voimakkaasti polarisoitunut valo.

Hiukkassuihkut ovat yleensä voimakkaasti lineaarisesti polarisoituneita (joistakin prosenttisyksiköistä kymmeniin prosentteihin, jopa $<50\%$) ja heikommin ympyräpolarisoituneita (yleisesti $<1\%$) [17]. Tämä viittaa epäyhtenäiseen (sekavaan) synkrotronisäteilyyn, jossa relativistiset elektronit liikkuvat pyörteisessä magneettikentässä. Korkeampi polarisaatioaste viittaa järjestäytyneempään magneettikenttään ja matalammat polarisaatioasteet kaoottisempaan magneettikenttään [17]. Hiukkassuihkussa shokkiaallon kulkiessa turbulentin magneettikentän läpi se pakottaa magneettikentän tiiviimmäksi ja järjestäytyneemmäksi, jolloin polarisaatioaste nousee [6].

BL Lac -kohteille, joita tässäkin tutkielmassa tarkastellaan, tyypillistä on voimakas optinen polarisaatio ja sen voimakas muuttuvuus [11], [18]. HSP-kohteiden opti-

set polarisaatioasteet ovat tyypillisesti matalampia kuin LSP- ja ISP-kohteiden, sillä LSP/ISP-kohteissa synkrotronihuippu on optisella alueella, kun taas HSP-kohteilla korkeammilla energioilla.

Blasaarien polarisaatiokäyttäytymisen yhteydestä yleiseen optiseen emissioon on havaittu näyttöä sekä korrelaation puolesta että sitä vastaan [10]. Blasaarien polarisaatiokäyttäytymistä on tutkittu paljon, ja myös gammasäteilyaktiivisuuden mahdollista yhteyttä polarisaatiokäyttäytymiseen on tutkittu aiemmin. Toistaiseksi blasaarit kuitenkin vaikuttavat käyttäytyvän itselleen uniikeilla tavoilla, joten yleisten mallien johtaminen on haastavaa ja blasaarien käytöksen ymmärtämiseksi onkin muodostettu useita erilaisia malleja. Erityisen mielenkiintoinen ja malleille haastavasti selitettävä ominaisuus ovat polarisaatiokulman systemaattiset muutokset, ns. EVPA-rotaatiot, joita käsitellään kappaleessa 1.3.1.

1.3.1 EVPA-rotaatiot ja polarisaation muuttuvuutta selittävät mallit

Blasaarit ovat hyvin voimakkaasti muuttuvia kohteita ja sekä niiden polarisaatioasteessa että polarisaatiokulmassa havaitaan äkillisiäkin muutoksia. Polarisaatiokulman muutoksen ollessa riittävän systemaattinen (yleensä $>90^\circ$) voidaan puhua EVPA-rotaatiosta (engl. Electric Vector Position Angle) eli sähkökenttävektorin suuntakulman kääntymisestä (rotaatiosta).

Blasaareista havaittavien EVPA-rotaatioiden toimintamekanismia ei vielä täysin tunneta, mutta niiden selittämiseksi on kehitetty useita erilaisia teoreettisia malleja. Rotaatokäyttäytymistä on selitetty esimerkiksi shokkiaallolla pyörteisessä magneettikentässä [19], keskenään eri suuntiin kiertyvillä EVPA-komponenteilla muuten tasaisesti polarisoituneessa hiukkassuihkussa (magnetohydrodynaamiset aallot pyörteisessä kentässä) [20], [21], ja yksinkertaisemmilla kahden komponentin malleilla [22], joissa rotaatio aiheutuu kahden eri tavalla polarisoituneen komponentin vuon muutoksista. Toisaalta blasaarien ollessa voimakkaasti muuttuvia kohteita

rotaatioiden on ehdotettu myös olevan vain satunnaisia muutoksia turbulenteissa magneettikentissä [23].

Eri mallien ennusteet polarisaation muuttuvuudelle ovat erilaisia. Erilaisten mallien kautta polarisaation muuttuvuutta voidaan yrittää tulkita eri tavoin; esimerkiksi liikkuva shokkiaalto pyörteisessä magneettikentässä [5] voi selittää polarisaatiossa tapahtuvia muutoksia. Tämän mallin mukaan polarisaatiokulman rotaation pitäisi olla suhteellisen tasainen ja polarisaatioasteen suhteellisen vakaa, ja rotaation pitäisi tapahtua samanaikaisesti optisen purkauksen kanssa. Muissa malleissa hiukkassuihkussa liikkuva shokkiaalto on myös yhdistetty polarisaatioasteen nousuun shokkiaaltoa ympäröivän alueen pakottaessa magneettikentän järjestäytymään.

Toisen mallin mukaan turbulenttinen magneettikenttä aiheuttaa stokastisia muutoksia polarisaatiokulmaan ja -asteeseen [24]. Tämä aiheuttaa mielivaltaisen mittaisia rotaatioita polarisaatiokulmaan (lyhyet rotaatiot tällöin kuitenkin todennäköisempiä). Rotaatio ei välttämättä ole tasainen, eikä aina tapahdu samanaikaisesti optisen vuon kasvun kanssa. Polarisaatioaste tällaisessa tilanteessa pysyy tyypillisesti matalana.

Magneettinen rekonnektio saattaa tuottaa hiukkassuihkussa plasmoidia, joissa hiukkaset kokevat äärimmäistä hiukkaskiihdytystä. Plasmoidit eri rekonnektiota-pauksista voivat yhdistyä, ja nämä yhdistymät voivat esiintyä hyvin stokastisina ja vahvasti riippuvaisina paikallisista plasmaolosuhteista. Polarisaatiomuutokset tietyn yhdistymisen aikana ovat kuitenkin hyvin systemaattisia ja on mahdollista että polarisaatiokulma muuttuu paljonkin, joten magneettisen rekonnektion optinen jälki pitää sisällään sekä tasaisia muutoksia jotka ovat yhden yhdistymisen dominoimia sekä epätasaisempia muutoksia uusien plasmoidien yhdistyessä vanhojen kanssa [25].

Rotaatioiden on havaittu ainakin joskus olevan yhteydessä blasaarien muuhun muutoskäyttäytymiseen [5]. BL Lac -kohteelle on jo aiemmin havaittu EVPA-rotaatio joka tapahtui samanaikaisesti useilla eri aallonpituuksilla tapahtuvan purkauksen

kanssa[5], jolloin tämän rotaation ajateltiin johtuvan kierteisessä magneettikentässä liikkuvasta voimakkaasti polarisoituneesta komponentista (shokista). Fermi-satelliitin laukaisun jälkeen tutkimusdataa kohteiden gamma-alueen aktiivisuudesta on saatu aiempaa enemmän, ja joissakin tutkimuksissa näiden välillä on havaittu olevan yhteyttä [26]. RoboPol-ohjelmassa 2014-2016 havaittiin yhteensä 40 rotaatiota 24 kohteessa, ja näiden kaikkien aikana havaittiin gamma-alueen purkauksia Fermi-satelliitin datassa [6]. Tämä viittaa gammapurkausten ja kohteiden magneettikenttien välillä olevaan yhteyteen, jota tukee aiempi havainto siitä, että gamma-alueella havaituilla kohteilla havaitaan yleisesti korkeampia polarisaatioasteita [27], [28].

BL Lac -kohteille on havaittu EVPA:n keskittyvän usein tietyn polarisaatiokulman arvon läheisyyteen [10]. Eri SED-luokkiin kuuluvien kohteiden on havaittu osoittavan keskenään erilaista käyttäytymistä kohteesta havaittavan yleisimmän polarisaatiokulman (preferenssikulman) suhteen. Varsinkin HSP-kohteissa havaitun sähkökenttävektorin suuntakulman EVPA:n on havaittu olevan vakaa ja samansuuntainen hiukkassuihkun suuntakulman kanssa. EVPA:n pysyminen pitkään vakaana viittaa vakaaseen ja järjestäytyneeseen magneettikenttään [6].

Blasaarien EVPA-rotaatioiden määrittelyyn ei toistaiseksi ole täysin vakiintunut määritelmää, jonka avulla niitä voitaisiin etsiä. Tässä tutkielmassa käytettiin rotaatioille samaa määritelmää kuin artikkelissa "Variability and evolution of the optical polarization of a sample of gamma-ray blazars"[10], jossa taas käytettiin RoboPol-ohjelmasta mukailleen luotua määritelmää. Tässä tutkielmassa käytetty EVPA-rotaatioiden määrittelytapa ja rotaatioiden etsiminen datasta on esitelty kappalessa 2.5.3.

1.4 Tutkimuskysymys

Tässä tutkielmassa yritettiin selvittää, onko blasaarien optisessa polarisaatiossa havaittavissa muutoksissa nähtävissä olevaa yhteyttä aiemmin kerättyyn VHE-dataan,

etenkin VHE-purkauksiin. Tutkielmassa tarkasteltiin VHE-purkausten mahdollista yhteyttä kohteiden polarisaatioasteen ja polarisaatiokulmaan (preferenssikulma, EVPA-rotaatiot, rotaatioita pienemmät äkilliset kulman muutokset). Mikäli näiden välillä esiintyisi selkeä yhteys, voitaisiin uskoa niiden syntymekanismienkin välillä olevan jonkinlainen yhteys, ja tämä auttaisi meitä ymmärtämään blasaarien magneettikenttiä ja VHE-purkauksia paremmin. Koska syyt VHE-aktiivisuuden muutuvuuden taustalla ovat toistaiseksi tuntemattomia, tämänkaltaisten yhteyksien löytäminen kytkisi ne hiukkassuihkun magneettikentän rakenteen tai järjestäytymisen muutoksiin.

2 Data ja metodit

Tässä kappaleessa esitellään tutkielmassa tarkasteltu otos, käytetty data ja sen käsittelyyn ja tarkasteluun käytetyt metodit.

2.1 Otos

Tässä tutkielmassa tutkittiin blasaaripopulaatiota, jonka on havaittu lähettävän erittäin korkeaenergistä gammasäteilyä. Tämä on pieni alajoukko koko tunnetusta blasaaripopulaatiosta.

Roma-BZCAT katalogissa on tutkielman kirjoitushetkellä 1151 BL Lac-kohdetta (joista 92 kandidaattikohteita, joiden optista spektriä ei löytynyt kirjallisuudesta), 274 kohdetta jotka yleisesti luokitellaan BL Lac-kohteiksi mutta joiden SED-jakaumassa nähdään huomattavia merkkejä galaksin säteilystä (engl. galaxy dominated BL Lac). Katalogissa on myös 227 yleisesti blasaareiksi määriteltyä kohdetta, joiden tyyppi on epäselvä, ja 1909 FSRQ-kohdetta [29].

Sellaisten blasaarien määrä, joista havaitaan erittäin korkeaenergistä gammasäteilyä, kasvaa muutamilla kohteilla joka vuosi. Tässä tutkielmassa tarkasteltujen

otosten lista edustaa tilannetta vuonna 2020, jolloin VHE-havaintodata on kerätty tietokannoista (ks. kappale 2.2).

Tätä tutkielmaa varten valikoitiin kohteita, joiden erittäin korkeaenergisien säteilyn muuttuvuus oli suurta. Tällaisia kohteita löytyi 38. Näistä edelleen etsittiin kohteet, joille löytyi samanaikaisia polarisaatio- ja VHE-havaintoja. Tällaisia kohteita löytyi 18, ja ne valikoitiin lopulliseen otokseen. Valitut kohteet on esitelty taulukossa I. Taulukossa on esitelty kohteiden luokitus tyyppin mukaan olemassaolevien luokitusten perusteella [10], ja käyttäen NASA/IPAC tietokantaa (NASA/IPAC Extragalactic database) [30]. SED-luokitukset on etsitty lähteistä [31], [12] ja [32].

Tutkielmaan on kerätty kirjallisuudesta dataa VHE-purkauksista (ks. kappale 2.2) ja optista polarisaatiodataa sekä Suomen ESO-keskuksen blasaaritutkimusryhmän havainto-ohjelmasta (ks. 2.3) että kirjallisuudesta (ks. 2.4). Eri lähteistä kerätty optinen polarisaatiodata yhdistettiin (ks. 2.5) ja optisen polarisaation muuttuvuutta VHE-purkausten aikana tarkasteltiin tilastollisten testien avulla (ks. 2.5.5).

Taulukko I. Valitut kohteet, niiden luokitukset ja käytettävissä olevan VHE-datan määrä.

Kohteen nimi	Blasaarityyppi	SED-tyyppi	VHE-purkaukset	VHE, matalat
1ES 1218+304	BL Lac	HSP	1	0
H 1722+119	BL Lac	HSP	1	0
ON 246	BL Lac	ISP	1	0
ON 325	BL Lac	ISP/HSP	2	1
OT 546	BL Lac	HSP	1	0
S4 0954+65	BL Lac	LSP	1	0
S5 0716+714	BL Lac	LSP	3	0
VER 0521+211	BL Lac	ISP	2	0
1ES 2344+514	Galaxy dom. BL Lac	HSP	1	2
B3 2247+381	BL Lac	HSP	1	0
OJ 287	BL Lac	LSP	1	1
PG 1553+113	BL Lac	HSP	3	11
PKS 2155+304	BL Lac	HSP	1	4
BL Lac	BL Lac	LSP	3	0
1ES 1959+650	BL Lac	HSP	1	0
TXS 0506+056	Candidate BL Lac	ISP	1	0
Mkn 421	BL Lac	HSP	10	2
Mkn 501	Galaxy dom. BL Lac	HSP	4	2

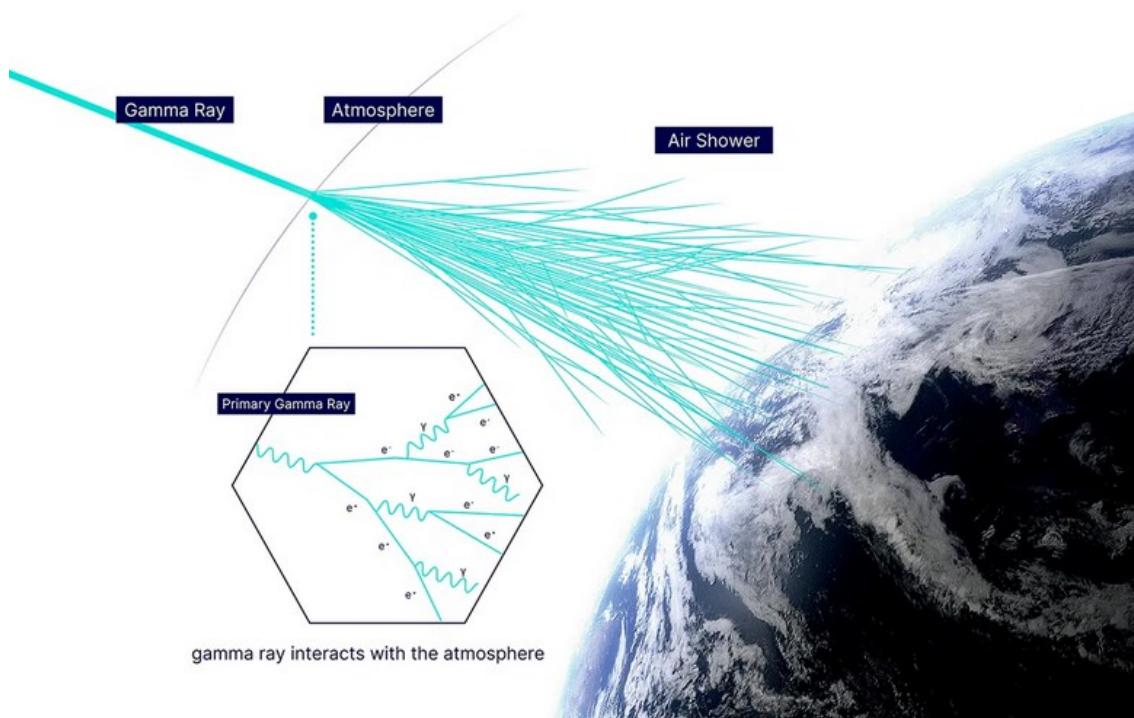
2.2 VHE-data

Erittäin korkeaenergisiiä gammasäteitä havaitaan IACT (engl. Imaging Air Cherenkov Telescope) -kaukoputkilla, jotka kykenevät havaitsemaan gammasäteitä muutamista kymmenistä gigaelektronivolteista (GeV) jopa noin viiteenkymmeneen teraelektronivolttiin (TeV) asti. Kun gammasäde osuu ilmakehään, syntyy hetkellinen Cherenkov-säteilyn välähdys jonka IACT-teleskoopit pystyvät kuvantamaan, kun Maan ilmakehään osuessaan gammasäteily saa aikaan korkeaenergistien hiukkasten ryöpyn (engl. Air Shower), jonka hiukkaset hetkellisesti kulkevat ilmakehässä paikallista valonnopeutta nopeammin. Cherenkov-säteilyn syntyminen on esitetty kuvassa 5. Valo kulkee ilmassa 0.03 prosenttia hitaammin kuin tyhjiössä, ja tämä mahdollistaa Cherenkov-välähdyksen paikallisen valonnopeuden ylityksen; ilmiö on verrattavissa äänivallin rikkomiseen, tässä tapauksessa kyseessä vain on valo. Cherenkov-säteilyn kulkiessa hetkellisesti paikallista valonnopeutta nopeammin IACT-teleskoopit pystyvät havaitsemaan Cherenkov-säteilyn hetkellisen (sekunnin miljardisosia kestävä) sininen välähdyksen [33].

Nykyään havaintoja tehdään useilla IACT-kaukoputkilla. MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) on La Palmalla sijaitseva kahden 17-metrin IACT-kaukoputken systeemi, jossa ensimmäinen (MAGIC I) aloitti toimintansa 2004, ja toinen (MAGIC II) 2009. Nämä ovat keränneet havaintoja käyttöönottaan lähtien vuoden 2012 huoltokatkoa lukuunottamatta. H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) on IACT-kaukoputkien systeemi Namibiassa. H.E.S.S I aloitti toimintansa 2004 neljällä 12-metrillä kaukoputkella, ja systeemiin lisättiin 28-metrinen H.E.S.S II vuonna 2012. VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) on neljän 12-metrin kaukoputken systeemi Fred Lawrence Whipple Observatoriolla Arizonassa, ja on toiminut vuodesta 2007.

Tässä tutkielmassa käytetty VHE-data on peräisin Jan Aaltosen Pro Gradututkielmasta "Investigating the connection between optical and very high energy

gamma-ray emission of BL Lac objects"[34], johon kerättiin dataa seuraavista lähteistä; MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov)-teleskoopeilta, H.E.S.S (High Energy Stereoscopic System), VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System), FACT (First G-APD Cherenkov Telescope), CANGAROO I-III (Collaboration between Australian and Nippon for a Gamma Ray Observatory in the Outback), HEGRA (High-Energy-Gamma-Ray Astronomy)-teleskoopilta, ja Fred Lawrence Whipple Observatorion 10-metriseiltä Whipple-teleskoopilta. Dataa oli kerätty vuosien 2004-2020 aikana, ei kuitenkaan täysin yhtäjaksoisesti. Sekä Jan Aaltosen otoksessa, jota on käytetty tämän tutkielman otoksen pohjana, että tässä tutkielmassa tarkastellussa suppeammassa otoksessa oli kohteita joiden välillä oli merkittävää vaihtelua saatavilla olevan datan määrissä.



Kuva 5. Hiukkasryöpyyn syntyminen gammasäteen osuessa ilmakehään. Törmäyksessä syntyvät hiukkaset säteilevät Cherenkov-säteilyä [35].

Jan Aaltonen määrittä tutkielmassaan [34] joukolle blasaareita VHE-aktiivisuuden korkeita ja matalia jaksoja (eng. high states and low states) seuraavasti; matalan VHE-aktiivisuuden aikana kohteen vuoni oli 50% tai vähemmän korkean VHE-

aktiivisuuden aikana mitatuista vuon arvoista. Tämä määritelmä muodostettiin keilemällä, minkälainen määritelmä tarkastellulle otokselle sopii. Mikäli tarkastelusta kohteesta oli vain yksi detektio, jonka havainnot oli kerätty lyhyen ajan (<3 kuukautta) sisällä, tämä laskettiin VHE-purkaukseksi. Jos kohteesta tehtiin useita korkean vuon havaintoja joiden välinen aikaväli oli alle kaksi viikkoa, nämä katsottiin yhdeksi VHE-purkaukseksi.

Nykylaitteistolla blasaarien himmeää gammavuota on hankala havaita muulloin kuin VHE-purkausten aikana ja pitkäkestoisia VHE-valokäyriä on olemassa vain harvoilta kohteilta. Tämän vuoksi kohteiden VHE-aktiivisuuden tutkiminen valokäyriin perustuen ei ole tällä hetkellä mahdollista. Sen sijaan blasaareille pyrittiin vertailun vuoksi määrittämään myös matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja. Osalle kohteista matalan vuon ajanjaksoina ei oltu saatu merkittävää detektiota ($> 5\sigma$ tilastollinen merkittävyys), jolloin voidaan määrittää vain gammavuon yläraja. Tässä työssä ei käytetty ajanjaksoja joille oli määritetty vain vuon yläraja, sillä niiden ja detektioiden vertaaminen systemaattisesti on haastavaa. Tästä johtuen vain osalle blasaareista on määritetty VHE-purkausten lisäksi myös matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja.

Näitä korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja käytettiin tulosten tilastollisessa tarkastelussa ja ne on merkitty kohteiden kuvaajiin. VHE-purkaukset on merkitty punaisilla pystyviivoilla (purkauksen alku ja loppu sekä niiden väliin jäävä alue), ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot on merkitty vaaleansinisellä varjostuksella. Havaintojaksot toisistaan erottaa harmaalla varjostetut alueet, jotka kuvaavat ajanjaksoja joilta polarisaatiodataa ei ole eli taukoja polarisaatiohavainnoissa (ks. 2.5.2).

Tämän otoksen kohteille VHE-purkausjaksot olivat yleisesti lyhyempiä kuin matalan VHE-aktiivisuuden jaksot, mutta myös lyhyitä (yksittäisiä päiviä kestäviä) matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja oltiin havaittu purkausten välissä. Pidemmät,

jopa kuukausia kestävät matalan VHE-aktiivisuuden jaksot eivät olleet lainkaan epätavanomaisia, kun taas VHE-purkausjaksot olivat pääosin yksittäisistä päivistä joihinkin kymmeneen päivään kestäviä. Joissakin tapauksissa korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja oltiin myös havaittu tapahtuvan saumattomasti peräkkäin. Mikäli korkean ja matalan VHE-aktiivisuusjaksot olivat liian lähellä toisiaan (< 2 päivän aikaväli) VHE-purkausjakson aikaikkunan laajentamisen jälkeen, ne hylättiin tilastollisessa tarkastelussa (ks. 2.5.2).

Turun yliopiston blasaaritutkimusryhmällä on MAGIC-teleskoopilla havainto-ohjelma, jonka avulla on kerätty lisää VHE-gamma-alueen havaintoja blasaareista vuosilta 2021-2024, mutta näitä havaintoja ei ole vielä julkaistu joten niitä ei pystytty käyttämään tässä tutkielmassa.

2.3 NOT-monitorointiohjelma

Blasaarien polarisaatiodataa kerättiin yhteispohjoismaalaisen kaukoputken (NOT, engl. Nordic Optical Telescope, yhteispohjoismaalainen kaukoputki) Tuorla -monitorointiohjelmasta. NOT on 2.56 -metrinen kaukoputki joka on Turun yliopiston ja Aarhusin yliopiston yhteisomistuksessa ja sijaitsee La Palmalla Kanarian saarilla.

Turun yliopiston blasaaritutkimuksen alkuaikoina (2002-2004) kirkkauden muutoksia havaittiin Tuorlassa Suomen suurimmalla kaukoputkella (1 m). Tämän jälkeen siirryttiin etäkäyttöiseen KVA:han (60 cm, Kungliga Vetenskaps Akademi), jolla tehtiin vuosina 2009-2012 myös polarisaatiohavaintoja. Nykyisin polarisaatiohavaintoihin käytetään NOT-kaukoputkea, jonka suuremman koon myötä ollaan pystytty havaitsemaan myös himmeämpiä kohteita ja kasvattamaan havaittavien kohteiden otoksen kokoa. Polarisaatiohavaintoja tehdään nykyisin noin kerran viikossa ja noin viidestätoista kohteesta (priv. comm. E. Lindfors).

Tätä tutkielmaa varten kerättiin polarisaatiohavaintoja NOT:ilta vuosilta 2003-



Kuva 6. NOT imaged with the Lyrid meteor, Håkon Dahle, 2009

2023. Alkuperäisen suunnitelman mukaan jo saatavilla olevaa VHE-dataa oli tarkoitus täydentää MAGIC:in datalla vuosilta 2021-2023, mutta nämä uudemmat havainnot ovat toistaiseksi julkaisemattomia, joten niitä ei voitu käyttää tässä tutkielmassa.

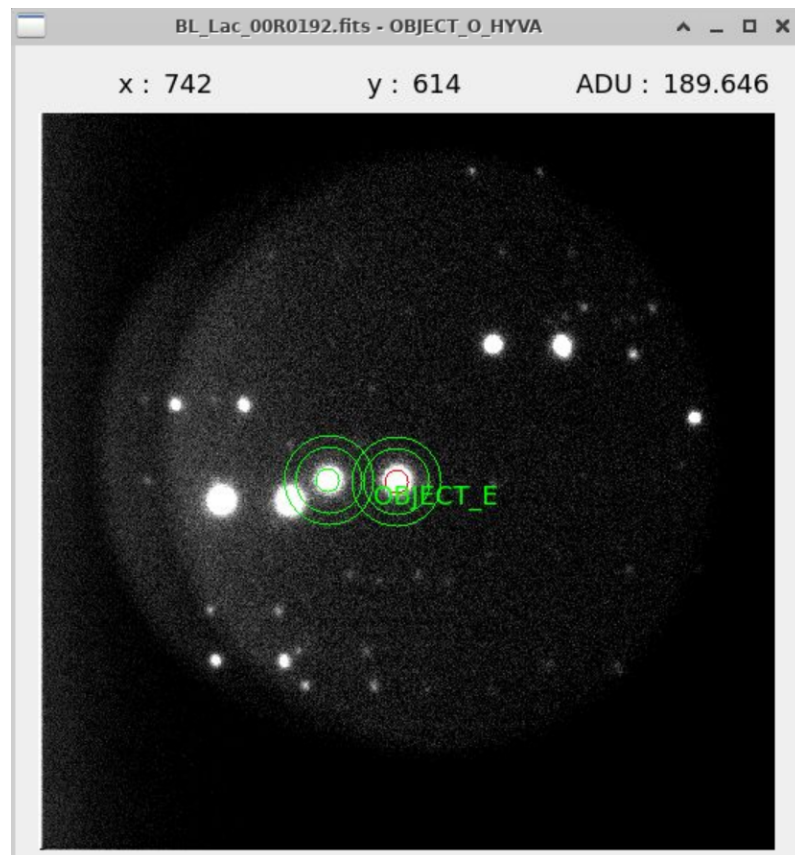
NOT-polarisaatioidatan käsittelyyn käytettiin Kari Nilssonin kirjoittamaa datankäsittelyohjelmistoa, joilla optisista havainnoista eriteltiin polarisaatiodata. Osa tässä tutkielmassa käytetystä datasta käsiteltiin erikseen osana tutkielman tekemistä, osa oli valmiiksi käsiteltyä.

Polarisaatiokulman ja -asteen laskeminen optisten havaintojen pohjalta tapahtui valmiilla datankäsittelyohjelmistolla seuraavasti;

1. Otetaan neljä CCD-kuvaa puolialtolevyn asennoissa 0, 22.5, 45 ja 67.5 astetta. Jokaisessa kuvassa on kaksi kuvaa kohteesta (ks. kuva 7), joita kutsutaan nimillä e ja o (e=extraordinary beam, o=ordinary beam)

2. Mitataan apertuurifotometrisellä ohjelmistolla e- ja o-kuvien intensiteetit (ha-

vainnollistettu kuvassa 7),



Kuva 7. Kuva yhdestä polarisaatiohavainnosta kohteesta BL Lac. Kuvassa on nähtävillä miten polarisaatiohavainnoissa kohteen valo jaetaan kahdeksi pisteeksi (ordinary and extraordinary beam, joille ei ole vakiintunutta suomenkielistä termiä), joiden kirkkaudet mitataan ja joille kirkkauden suhdetta käytetään polarisaation määrittämiseksi (ks. teksti)

3. Lasketaan intensiteettien suhteesta $Q = I_e/I_o$ normalisoidut Stokesin parametrit q ja u ;

$$Q_m = Q_0 + Q_{22,5} + Q_{45} + Q_{67,5}$$

$$q = (Q_0 - Q_{45})/Q_m$$

$$u = (Q_{22,5} - Q_{67,5})/Q_m$$

4. Lasketaan polarisaatioaste PD ja polarisaatiokulma PA (θ);

$$PD = \sqrt{q^2 + u^2} \cdot 100\%$$

$$\theta = 0,5 \cdot \arctan\left(\frac{u}{q}\right)$$

Näin saatu polarisaatiokulman arvo on kaavan arctan -funktion seuraksena 180·n-degeneroitunut, ja arvot voidaan tasata haluttuun havaintoväliin (esim. $[-90, 90^\circ] \rightarrow [0, 180^\circ]$) lisäämällä niihin sopiva 180:n monikerta. Tästä johtuen eri lähteistä kerätty havaintodata oli usein tasattu eri arvoväliin, ja datan yhtenäistämiseksi tässä tutkielmassa datasettejä skaalattiin keskenään samalle arvovälille niissä tapauksissa, joissa ne poikkesivat toisistaan (ks. 2.5.1).

2.4 Täydentävä polarisaatiodata muilta kaukoputkilta

Tuorlan monitorointiohjelman dataa täydennettiin kirjallisuudesta kerätyllä datalla Kanatan, Stewardin ja RoboPolin kaukoputkilta.

Steward-observatorion polarisaatiodata kerättiin lähteestä [36], jossa polarisaatiodata oli vapaasti käytettävissä. Observatoriolla on käytössään SPOL CCD kuvantamis-/spektropolarimetri, 2.3m Bok-teleskooppi (Kitt Peak, Arizona, USA), 1.54m Kuiper-teleskooppi (Mt. Bigelow, Arizona, USA), ja 6.5m MMT -teleskooppi (Mt. Hopkins, Arizona, USA). Havaintoja kerätty vuosilta 2008-2018 [36].

RoboPol on kerännyt polarimetristä dataa 1.3m kaukoputkella Skinakas -observatoriolla Kreetalla Kreikassa vuosilta 2013-2017. Tämä data oli vapaasti käytettävissä lähteessä [37].

VizieR-tietokannasta [38] polarisaatiodataa kerättiin katalogista [39], johon oli kerätty dataa 1.5m Kanata-teleskoopilla (Higashi-Hiroshima, Japani) vuosilta 2008-2014.

Koska lähdedata oli keskenään hieman erimuotoisissa tiedostoissa, näistä kerättiin Pythonilla oleellinen data yksittäisiin kohdekohtaisiin tiedostoihin, joihin oli koottu samasta kohteesta eri lähteistä kerätty data (ks. 2.5).

2.5 Metodit

Tässä kappaleessa esitellään kerätyn datan käsittelyyn ja tulkitsemiseen käytetyt metodit. Ensin käsitellään erikseen polarisaatiokulman ja -asteen datankäsittely ja kuvaajien muodostaminen, sitten polarisaatiokulman systemaattisten muutosten (EVPA-rotaatiot) etsiminen ja lopuksi polarisaatioasteen keskiarvojen ja jakaumien tarkastelu.

Otokseen valituista kohteista muodostettiin Python-koodeja käyttäen kohdekohtaisia tiedostoja, joissa oli jokaisesta kohteesta seuraavat tiedot; havaintoaika (MJD, Modified Julian Date), polarisaatioaste ja sen virhe, polarisaatiokulma ja sen virhe, sekä lähteen nimi. Esimerkki tästä esitetty kuvassa 8.

53084.0602	3.479	0.07	170.1	0.6	NOT
53085.0577	2.742	0.05	169.9	0.5	NOT
53086.04903	0.721	0.05	132.3	1.9	NOT
53088.0521	0.252	0.04	32.1	5.2	NOT
53089.02186	1.59	0.07	86.4	1.2	NOT
53089.0795	1.574	0.08	82.4	1.4	NOT
53357.25078	4.091	0.15	171.1	1.1	NOT
53358.23602	0.707	0.22	149.7	8.9	NOT
53359.16119	1.776	0.47	124.7	7.3	NOT
53359.22747	2.127	0.15	110.7	2.0	NOT
54742.51275	3.31	0.04	114.3	0.4	STEWARD
54743.49888	5.17	0.03	59.6	0.2	STEWARD

Kuva 8. Esimerkkikuva kohteen Mkn 421 datatiedostosta. Sarakkeissa vasemmalta oikealle havainnon MJD-päivämäärä, polarisaatio aste ja sen virhe, polarisaatiokulma ja sen virhe, ja lopuksi lähdekolumni joka kertoo mistä lähteestä data on peräisin.

Tiedostoista poistettiin sellaiset datapisteet, joille mitatun polarisaatioasteen arvon virhe oli yli 33,33% mitatusta arvosta. Havainnoja joille $p/\delta p < 3$, tarkkuus oli alle 3σ , joten näitä mittapisteitä ei pidetty luotettavina.

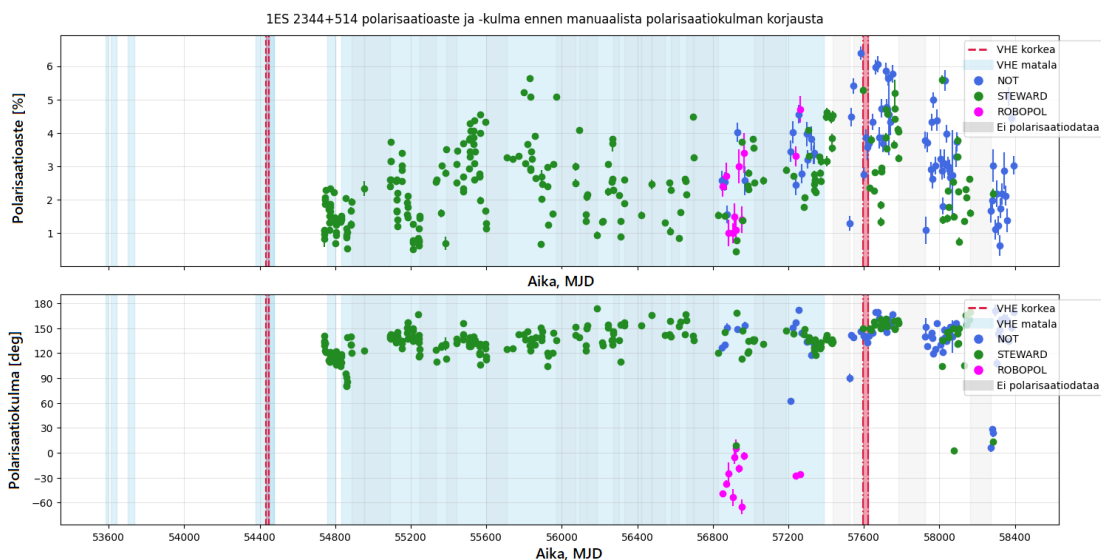
2.5.1 Polarisaatiokulman mittavälien tasaus ja havaintojaksot

Koska polarisaatiodata oli kerätty eri lähteistä ja polarisaatiokulman arvoissa on ominaisuutena 180 asteen degeneraatio, osa mittaapisteistä oli alunperin sijoitettu keskenään eri mittaväliin (esitetty kuvissa 9 ja 10). Polarisaatiodatan 180° -degeneraatiosta johtuvien epäjohdonmukaisuuksien yhtenäistämiseksi polarisaatiokulman arvot tasattiin toisiinsa mahdollisimman hyvin sopiviksi 180-degeneraatiota mukaillen. Tämä toteutettiin siten, että peräkkäisten datapisteiden poiketessa toisistaan >180 astetta trendistä poikkeavat datapisteet muokattiin lähemmäksi muita lisäämällä niihin sopiva 180:n monikerta erotuksen minimoimiseksi. Polarisaatiokulman 180-degeneraation vuoksi arvot jotka ovat toisistaan 180:n kertoimia voidaan tasata samaksi.

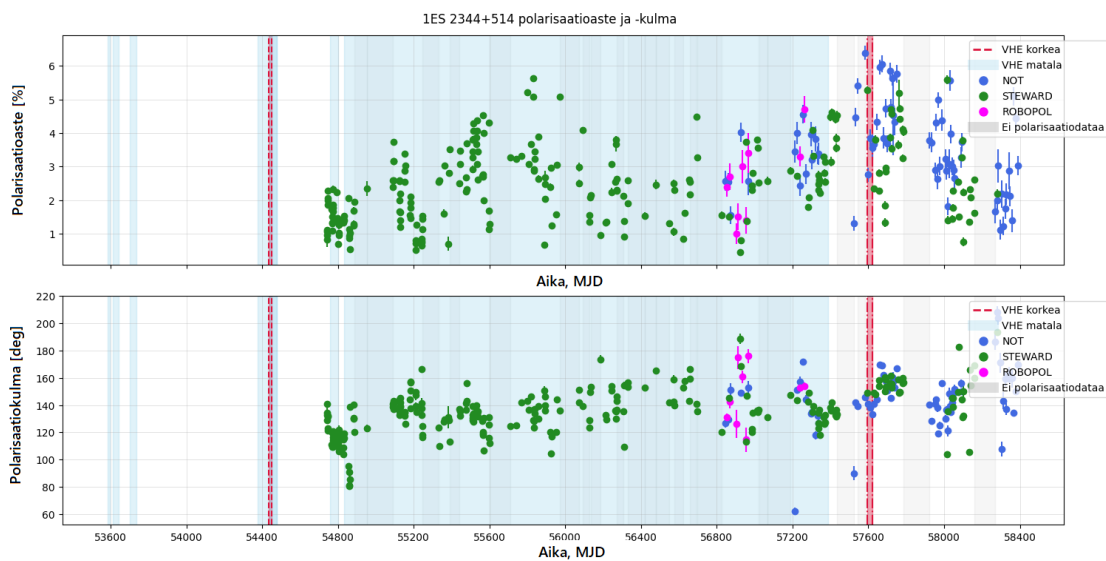
Tätä tasausta ei automaattisesti suoritettu silloin, jos peräkkäisten havaintojen välillä oli yli 30 päivän tauko. Tauko datassa katkaisee polarisaatiomittausten luotettavuuden, sillä polarisaatioarvot saattavat muuttua äkillisestikin ja puuttuvaa dataa ei luotettavasti pystytä ekstrapoloimaan olemassaolevasta datasta. Peräkkäisten havaintojen välillä oleva tauko ja blasaareille tyypillinen nopea muuttuvuus olisi luonut huomattavaa epätarkkuutta korjauksien suorittamiseen.

Erikoistapauksissa tämä 180-degeneraation korjaus suoritettiin yli 30 päivän taukojen yli vain silloin, jos jäljelle jääneet korjaamattomat pisteet merkittävästi ja selkeästi poikkesivat muun datan trendistä niin, että voitiin olettaa kyseessä olevan toisistaan eroavien havaintovälien aiheuttama 180-degeneroitunut poikkeama eikä aito muutos datassa. Eri lähteistä olevat polarisaatiokulman mittapisteet oli joissain tapauksissa tasattu eri havaintoväleihin $[-90, 90]$, $[0, 180]$, ja nämä pisteet tasattiin yhteneviksi muun kohteesta kerätyn datan kanssa. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty esimerkki tällaisesta manuaalisesta korjauksesta polarisaatiokulman arvoon.

Havainnot jaoteltiin havaintojaksoihin niin, että jos havainnoissa oli yli 30 päivän tauko, niin tällöin voitiin katsoa seuraavien havaintojen kuuluvan uuteen havainto-



Kuva 9. Kohteen 1ES 2344+514 polarisaatiokulman kuvaaja ennen manuaalisia korjauksia. Kuvaajasta nähdään, että ROBOPOL-pisteet olivat havaintovälillä $[-90, 90]$, kun taas muista lähteistä kerätyt mittapisteet sijoittuivat välille $[0, 180]$



Kuva 10. Kohteen 1ES 2344+514 kuvaaja manuaalisten korjausten jälkeen. Lisäämällä ROBOPOL-pisteisiin $+180$ astetta ne saadaan samaan linjaan muiden mittapisteiden kanssa.

jaksoon. Havaintojaksojen väliset tauot mittauksissa on merkitty polarisaatiokulman kuvaajiin harmailla alueilla, jotka näkyvät kuvassa 10.

2.5.2 Polarisaatiokuvaajien muodostaminen

Kun datasta oli poistettu ne mittapisteet joille $p/\delta p < 3$, eli joiden tarkkuus oli alle 3σ , ja polarisaatiokulman mittapisteet oli tasattu keskenään samoille havaintoväleille, kohteille luotiin omat polarisaatioasteen ja -kulman funktiot. Kuvaajiin merkittiin kohteelle havaittu VHE-aktiivisuus seuraavasti; VHE-datasta [34] kerättyihin VHE-purkausten aikaväleihin lisättiin sekä alkuun että loppuun seitsemän päivän aikaikkuna, ja näin saatu lopullinen VHE-purkauksen aikaväli merkittiin kuvaajiin punaisilla pystykatkoviivoilla. Matalan VHE-aktiivisuuden jaksot merkittiin kuvaajiin vaaleansinisellä. VHE-purkauksien havaittuja aikaikkunoita laajennettiin, sillä relativistiessa turbulentissa plasmassa tapahtuva hiukkasten kiihdytys ja säteily ovat stokastisia prosesseja, joihin liittyy aikaviiveitä, ja siksi muutokset näkyvän valon ja VHE:n aallonpituusalueilla eivät välttämättä ole täysin samanaikaisia.

2.5.3 EVPA-rotaatioiden etsiminen

Polarisaatiodatasta etsittiin kohteiden polarisaatiokulman EVPA-rotaatioita. Rotaatioiden löytämiseksi käytettiin lähteen [10] määritelmää;

1. Polarisaatiokulman muutoksen $\Delta\theta$ täytyy olla vähintään 90° rotaation aikana.
2. Muutoksen täytyy tapahtua vähintään neljän havainnon yli.
3. Blasaarien nopean muuttuvuuden vuoksi rotaatioon kuuluvien havaintopisteiden välillä ei saa olla yli 30 päivän taukoa vaan havaintojen täytyy kuulua samaan havaintojaksoon.
4. Rotaation alun ja lopun välillä täytyy olla riittävä muutos polarisaatiokulmassa ($\Delta\theta_i/\Delta t_i$) verrattuna aiempiin havaintoihin. Tässä käytettiin merkittävänä muutoksena $> 5^\circ$ tai merkin muutosta rotaation alun tai lopun määrittämiseksi.

Rotaatiot ovat myös silmämääräisesti havaittavissa polarisaatiokulman kuvaajista, ja vahvistettavissa numeerisesti edellä esitellyillä kriteereillä. Tässä tutkielmassa rotaatioita etsittiin ensin silmämääräisesti kohteiden kuvaajista, ja sen jälkeen numeerisesti analysoimalla.

Löydetyt rotaatiot on esitelty kappaleessa 3.2.2 taulukoissa III-VII. Näitä rotaatioita etsittiin tätä käyttötarkoitusta varten muodostetulla Python-koodilla, jolla etsittiin kohteiden polarisaatiokulman mittapisteistä ajanjaksoja, jotka täyttivät EVPA-rotaatiolle määritellyt kriteerit.

2.5.4 Polarisaatioasteen keskiarvojen laskeminen

Kohteille laskettiin polarisaatioasteen keskiarvot sen selvittämiseksi, poikkeavatko polarisaatioasteen arvot yleisesti VHE-purkausten aikana kohteelle muuten tyyppillisistä polarisaatioasteen arvoista.

Kustakin kohteesta määritettiin aritmeettinen keskiarvo polarisaatioasteelle kaikkien datapisteiden yli, ja sitten erikseen VHE-jaksoille. Lopuksi vertailua varten laskettiin myös aritmeettinen keskiarvo matalan aktiivisuuden VHE-jaksoille niille kohteille, joille oli olemassa samanaikaista polarisaatiodataa ja matalan VHE-aktiivisuuden havaintoja.

Nämä polarisaatioasteen keskiarvot on esitetty taulukossa II. Korkean VHE-aktiivisuuden polarisaatioasteiden keskiarvot määritettiin niin, että havaittuihin VHE-purkausjaksoihin lisättiin molempiin päihin 7 päivää VHE-purkauksen laajeman ajanjakson aikaansaamiseksi, ja tältä ajalta laskettiin mitattujen polarisaatioasteiden aritmeettinen keskiarvo. Yleinen polarisaatioasteen keskiarvo (PD avg) laskettiin kaikkien havaittujen polarisaatioasteen arvojen yli. Niille kohteille, joille oli määritetty myös matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja ja kyseisiltä jaksoilta oli myös polarisaatiomittauksia, laskettiin myös matalan VHE-aktiivisuuden ajalle polarisaatioasteen aritmeettinen keskiarvo. Laskuissa jätettiin huomiotta sellaiset tilanteet,

jossa korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot osuivat päällekkäin (kun seitsemän päivän aikaikkunan lisääminen VHE-purkausjaksoon sijoittaa jakson alku- tai loppupään osumisen lomittain matalan VHE-aktiivisuuden jakson kanssa). Myös sellaiset jaksot joissa korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot olivat täysin peräkkäin (alle kahden päivän aikaväli), jätettiin huomiotta laskuissa. Liian lähelle toisiaan ajoittuvat VHE-jaksot aiheuttavat epävarmuutta kohteen käytöksen fyysikaaliseen arviointiin.

2.5.5 Polarisaatioasteen jakaumien tarkastelu

Keskiarvojen tarkastelun lisäksi haluttiin verrata onko polarisaatioasteen jakaumissa merkittäviä eroja VHE-purkausten ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen välillä.

Jakaumien tilastollinen tarkastelu ja vertailu oli mahdollista vain kohteille, joista oli saatavilla riittävästi samanaikaista polarisaatio- ja VHE-dataa. Merkittävänä määränä dataa pidettiin >5 VHE-purkaushavaintoa sellaisissa havaintojaksoissa joilta oli myös samanaikaista polarisaatiodataa. Näille kohteille etsittiin VHE-datasta ([34]) korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden ajat (engl. low states, high states), joiden aikaisia polarisaatioasteen arvoja verrattiin toisiinsa Kolmogorov-Smirnov ja Anderson-Darling -testeillä (KS-AD -testit). Nämä testit antoivat keskenään yhteneviä tuloksia, joten tuloksissa on esitetty pelkän KS-testin p-arvo (taulukossa II). KS-testi on tyypillinen tilastollinen testi kahden empiirisen jakauman vertailuun, ja tällä tilastollisella tarkastelulla haluttiin selvittää, poikkeavatko polarisaatioasteen arvojen jakaumat toisistaan korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana tilastollisesti merkittävästi vai onko kyseessä otokselle tyypillinen vaihtelu.

Testit suoritettiin python-koodilla joka muodostettiin tätä käyttötarkoitusta varten käyttäen avointa scipy -lähdekoodia. VHE-purkausjaksoja tarkasteltaessa aikaikkunoita laajennettiin samoin kuin polarisaatioasteen keskiarvoja laskettaessa (ks. 2.5.4).

Polarisaatioasteiden jakautumista korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana vertailtiin myös niin, että yhden korkean VHE-aktiivisuuden jakson aikana mitattuja polarisaatioasteen arvoja yritettiin verrata yhden matalan VHE-aktiivisuuden aikana mitattuihin polarisaatioasteen arvoihin. Tämä vertailu suoritettiin kohteille, joilla oli saatavilla polarisaatiodataa sekä korkean että matalan VHE-aktiivisuuden jaksoilta. Näille vertailuille suoritettiin KS-AD -testit ja polarisaatioasteen arvojen jakautumisesta muodostettiin histogrammit. Polarisaatiomittauksia oli kuitenkin vähäisesti näiden yksittäisten jaksoiden aikana, joten verrattavaa dataa oli vähän ja näin suoritettujen tilastollisten tarkastelujen tulokset eivät lopulta olleet mielekkäitä. Joillakin kohteilla yksittäisissä korkean tai matalan VHE-aktiivisuuden jaksoiden aikana oli havaittu vain yksittäisiä polarisaatioasteen arvoja (esim. 1-3 mittapistettä), ja näin pienellä datamäärällä tehty tilastollinen tarkastelu ei anna mielekkäitä tuloksia. Esimerkkihistogrammit yhden korkean VHE-aktiivisuuden ja yhden matalan VHE-aktiivisuuden jaksosta on esitetty liitteissä (5.2). Mahdollisimman mielekkäiden lopputulosten saamiseksi lopullinen tilastollinen tarkastelu suoritettiin vertaamalla kaikkia korkean VHE-aktiivisuuden aikana mitattuja polarisaatioasteen arvoja kaikkiin matalan VHE-aktiivisuuden aikana mitattuihin polarisaatioasteen arvoihin. Histogrammit polarisaatioasteen arvoista korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden aikana on esitetty tuloksissa kappaleessa 3.1 kuvissa 11-16.

3 Tulokset

Tässä kappaleessa esitellään tutkielman tulokset. Tarkoituksena oli vertailla, poikkeako kohteiden polarisaatiokäyttäytyminen VHE-purkausten aikana kohteiden yleisestä polarisaatiokäyttäytymisestä muina aikoina. Kohteille, joille oli saatavilla polarisaatiodataa sekä korkean että matalan VHE-aktiivisuuden jaksoilta luotiin polarisaatioasteen jakauman histogrammit, jotka on esitetty kuvissa 11-16. Kohteiden

mitatut polarisaatioasteet ja KS-testien tulokset on esitetty taulukossa II, ja mitatut polarisaatioasteet ja -kulmat on esitelty kohteiden kuvaajissa kohdassa 3.2. Kuvissa 17 - 26 on esitelty kuvaajat niille kymmenelle kohteelle, joita erikseen käsitellään tässä kappaleessa. Lopuille kahdeksalle otoksen kohteista, joille oli saatavilla vain hyvin vähän dataa, kuvaajat on esitelty liitteissä (5.1).

3.1 Polarisaatioaste VHE-purkausten aikana

Polarisaatioasteen tarkastelun tarkoituksena oli selvittää, onko kohteiden polarisaatioaste VHE-purkausten aikana yleisesti korkeampi tai matalampi kuin muulloin ja poikkeako polarisaatioasteen jakauma VHE-purkausten aikana polarisaatioasteen jakaumasta matalan VHE-aktiivisuuden jaksoilta. Taulukossa II on esitelty otokseen valittujen kohteiden polarisaatioasteen aritmeettiset keskiarvot yleisesti (PD avg) ja VHE-purkausten aikana (PD (purkaus)), sekä matalan VHE-aktiivisuuden aikana (PD (matala)) niille kohteille joille oli saatavilla polarisaatiomittauksia matalan VHE-aktiivisuuden ajalta. Niille kohteille, joille oli saatavilla polarisaatiodataa sekä korkean että matalan VHE-aktiivisuuden ajalta, suoritettiin KS-testit, joiden tulokset on myös esitetty taulukossa II.

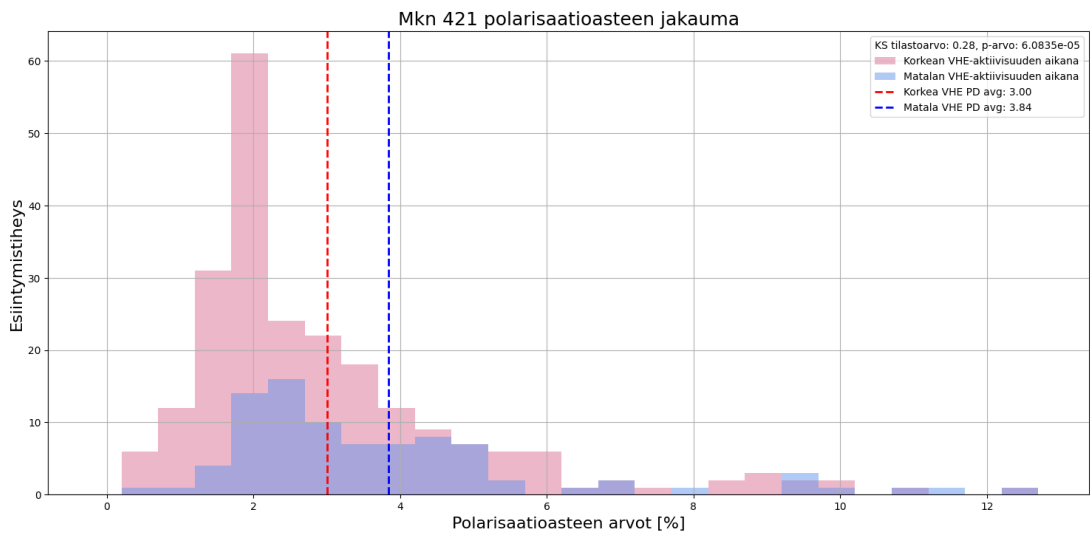
Enimmäkseen erot VHE-purkausjaksojen ja matalan VHE-aktiivisuuden aikaisien polarisaatioasteiden keskiarvojen välillä olivat pieniä. Koko havaintojakson aikana mitattuihin polarisaatioasteen keskiarvoihin verrattuna seitsemälle kohteelle polarisaatioaste VHE-purkausten aikana oli keskimäärin korkeampi, yhdelletoista taas matalampi kuin polarisaatioaste yleisesti. Kohteiden polarisaatioasteiden keskiarvot VHE-purkausten aikana ja yleisesti jakautuivat SED-luokkien mukaan seuraavasti: HSP-kohteille polarisaatioaste VHE-purkausten aikana oli keskimäärin korkeampi seitsemälle kohteelle ja matalampi viidelle kohteelle, ISP-kohteille kahdelle korkeampi ja kahdelle matalampi, ja LSP-kohteista kaikille kolmelle polarisaatioaste VHE-purkausten aikaan oli matalampi kuin polarisaatioaste yleisesti.

Taulukko II. Polarisaatioasteen keskiarvot kullekin kohteelle yleisesti, korkean VHE-aktiivisuuden (VHE-purkausten) aikana ja matalan VHE -aktiivisuuden aikana. Lisäksi taulukossa esitetään jakaumien vertailun tilastollisen testin p-arvo (ks. teksti).

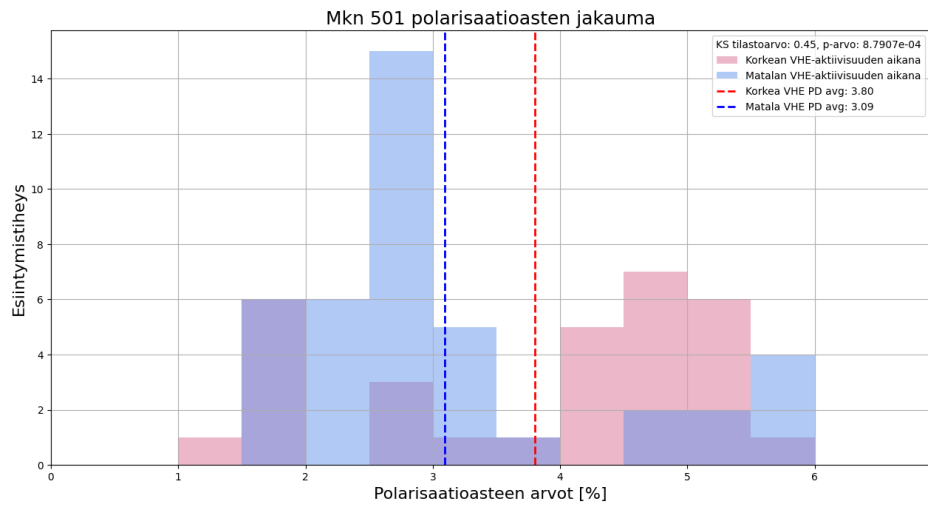
Kohteen nimi	SED-luokka	PD _{avg} [%]	PD _{purkaus} [%]	PD _{matala} [%]	p-arvo
1ES 1218+304	HSP	4.16	5.44		
H 1722+119	HSP	6.54	10.40		
ON 246	ISP	11.13	15.80		
ON 325	ISP/HSP	9.61	8.20	9.93	0.71
OT 546	HSP	2.79	2.68		
S4 0954+65	LSP	12.79	11.88		
S5 0716+714	LSP	9.11	6.18		
VER 0521+211	ISP	7.13	7.35		
1ES 2344+514	HSP	2.69	3.39	2.47	0.11
B3 2247+381	HSP	3.15	5.29		
OJ 287	LSP	15.26	11.36		
PG 1553+113	HSP	4.10	3.78	3.77	0.86
PKS 2155+304	HSP	5.44	4.85	4.39	0.39
BL Lac	ISP	9.16	5.24		
1ES 1959+650	HSP	4.16	5.36		
TXS 0506+056	ISP	8.38	7.40		
Mkn 421	HSP	3.21	3.00	3.48	$6.0 \cdot 10^{-5}$
Mkn 501	HSP	2.52	3.80	3.09	$8.8 \cdot 10^{-4}$

3.1.1 Polarisaatioasteen jakaumien vertailu

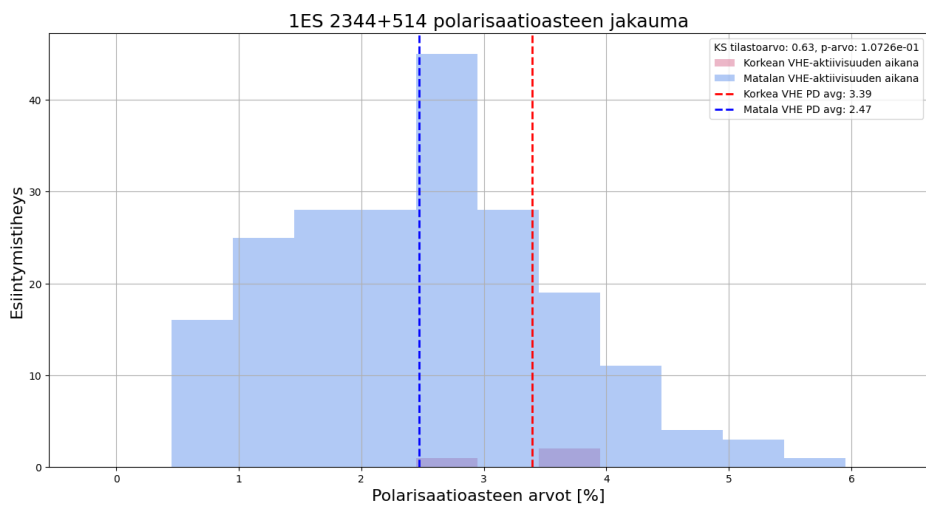
Otoksesta kuudelle kohteelle voitiin suorittaa vertailu korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden aikaisen polarisaatiokäyttäytymisen välillä. Näille kohteille (ON 325, 1ES 2344+514, PG 1553+113, PKS 2155+304, Mkn 421, Mkn 501) korkean ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikaisten polarisaatioasteiden jakaumien histogrammit on esitetty alla kuvissa 11- 16 ja tilastollisten testien tulokset on esitetty taulukossa II.



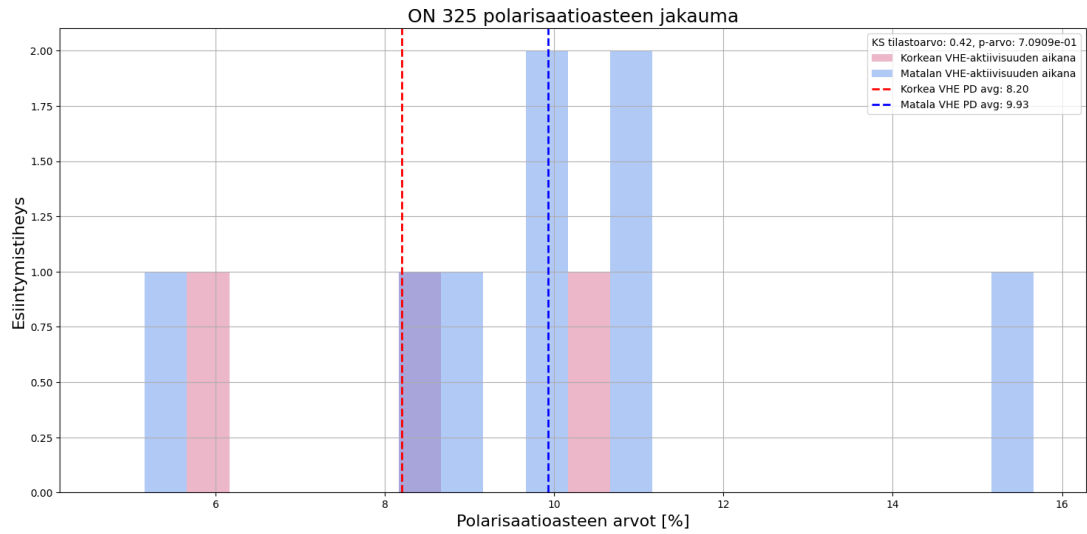
Kuva 11. Histogrammi kohteen Mkn 421 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin. Korkean VHE-aktiivisuuden aikana mitattuja polarisaatioasteen arvoja huomattavasti enemmän kuin matalan VHE-aktiivisuuden aikana mitattuja. Polarisaatioasteen keskiarvovertailun mukaan polarisaatioaste on keskimäärin matalampi VHE-purkauksen aikana kuin matalan VHE-aktiivisuuden aikana ja KS-testin tuloksen mukaan jakaumat poikkeavat merkittävästi toisistaan, p-arvo on hyvin pieni, 6×10^{-5} .



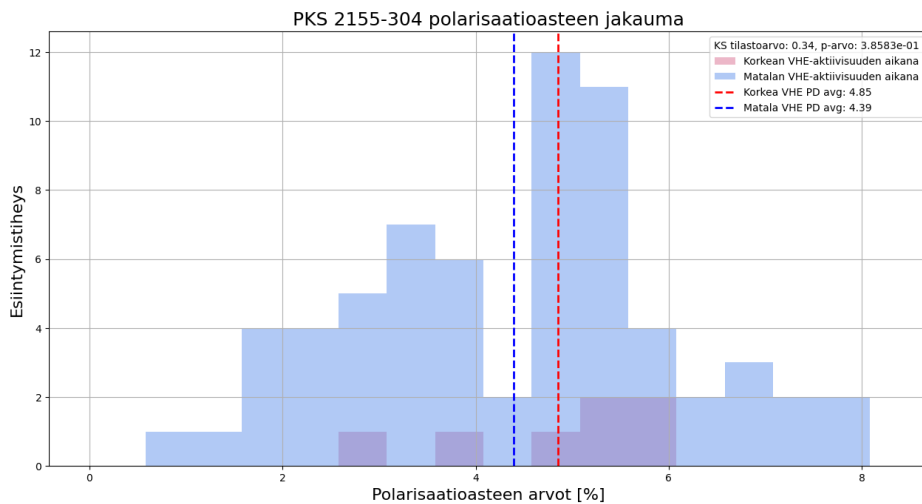
Kuva 12. Histogrammi kohteen Mkn 501 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin. Tälle kohteelle keskiarvovertailun mukaan polarisaatioaste on korkeampi VHE-purkausten aikana kuin matalan VHE-aktiivisuuden aikana ja KS-testin tuloksen mukaan jakaumat poikkeavat merkittävästi toisistaan, p-arvo on hyvin pieni, 8×10^{-4} .



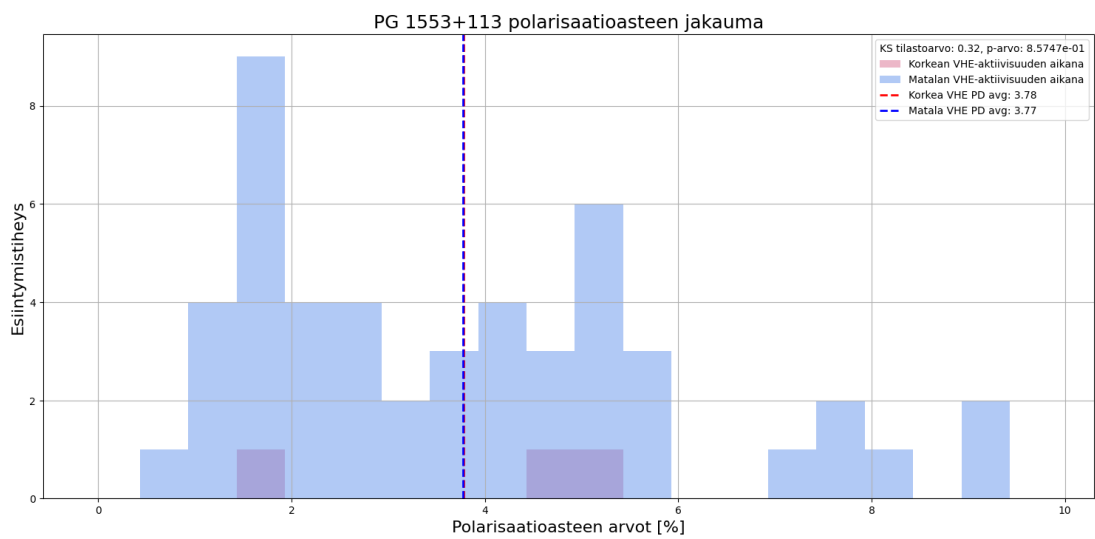
Kuva 13. Histogrammi kohteen 1ES 2344+514 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin. Mittausdataa korkean VHE-aktiivisuuden ajalta erittäin paljon vähemmän kuin matalan VHE-aktiivisuuden ajalta, ja tästä syystä vaikka polarisaatioasteen keskiarvo VHE-purkausten ajalta on korkeampi, ero ei ole tilastollisesti merkittävä. Yksinkertainen tilastollinen tarkastelu ei ole riittävä antamaan luotettavia tuloksia tällaisesta datasetistä, esimerkiksi simulaatiolla voitaisiin saada hyödyllisempiä tuloksia.



Kuva 14. Histogrammi kohteen ON 325 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin. Polarisaatioasteen keskiarvo matalan VHE-aktiivisuuden aikaan korkeampi kuin VHE-purkausjaksojen aikaan, mutta datamäärä on pieni sekä korkean että matalan VHE-aktiivisuuden ajalta joten tilastollisesti tulos ei ole mielekäs.



Kuva 15. Histogrammi kohteen PKS 2155-304 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin. Korkean VHE-aktiivisuuden ajalta huomattavasti vähemmän polarisaatiomittauksia kuin matalan VHE-aktiivisuuden ajalta, joten tilastollisesti merkittävää eroa ei havaittu.



Kuva 16. Histogrammi kohteen PG 1553+113 korkean VHE-aktiivisuuden jaksosten aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin. Korkean VHE-aktiivisuuden ajalta huomattavasti vähemmän polarisaatiomittauksia kuin matalan VHE-aktiivisuuden ajalta. Polarisaatioasteiden keskiarvot osuvat hyvin lähelle toisiaan, mutta mittausdataa VHE-purkausten ajalta on liian vähän mielekkään tilastollisen tarkastelun toteuttamiseen.

Näistä tuloksista nähdään, että tilastolliset testit antavat eri kohteiden kohdalla erilaisia tuloksia. Kohteelle Mkn 421 polarisaatioasteen keskiarvo VHE-purkausten aikana on keskimäärin alempi kuin matalan VHE-aktiivisuuden aikana, kun taas kohteelle Mkn 501 korkeampi. Muidenkaan kohteiden kohdalla ei ollut havaittavissa yleisesti pätevää trendiä; kolmelle kohteista polarisaatioaste oli keskimäärin korkeampi VHE-purkausten aikana kuin matalan VHE-aktiivisuuden aikana, kolmelle taas matalampi. Kohteista joille suoritettiin tilastollinen vertailu, neljälle ero jakaumien välillä ei kuitenkaan ollut merkittävä.

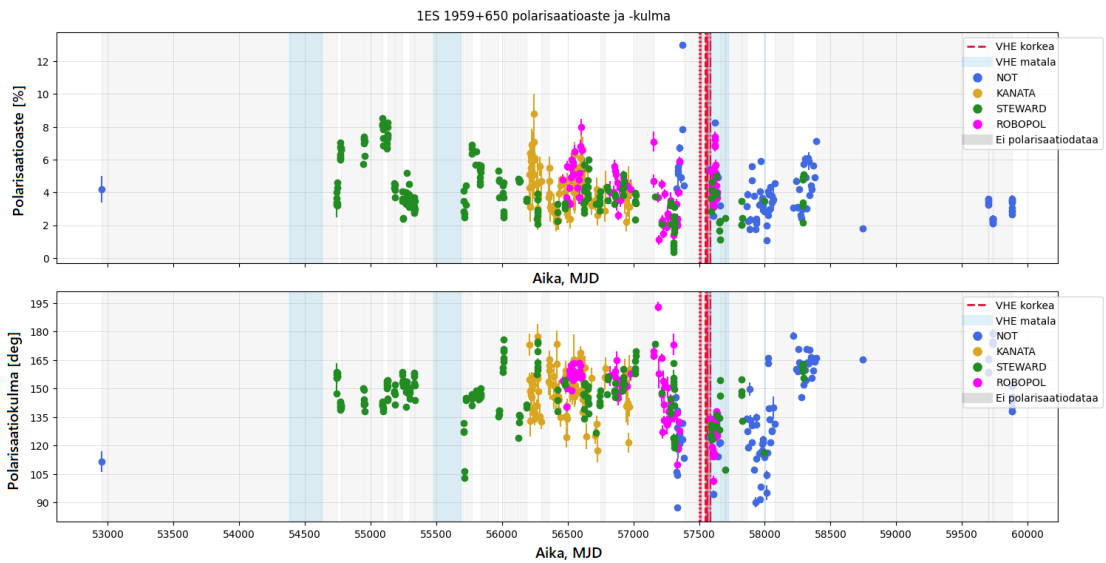
3.2 Polarisaatiokulma VHE-purkausten aikana

Kohteiden polarisaatiokulman muutoksista muodostettiin kuvaajat, joista etsittiin EVPA-rotaatioita sekä kohteen preferenssikulmaa ja tutkittiin polarisaatiokäyttämisen mahdollista yhteyttä VHE-purkauksiin. Tarkastelussa haluttiin selvittää näyttääkö VHE-purkauksilla olevan yhteyttä kohteiden polarisaatiokäyttämiseen ja niissä etsittiin seuraavia ominaisuuksia:

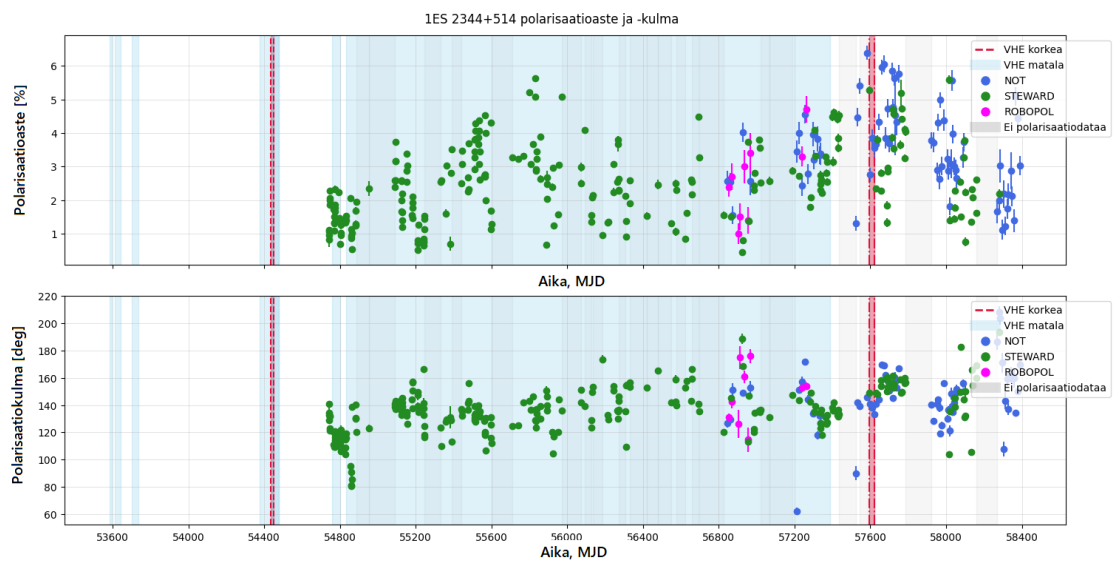
1. Polarisaatiokulma VHE-purkausten aikana (pysyykö preferenssikulman läheisyydessä vai poikkeako merkittävästi). Joillakin tutkituista kohteista on polarisaatiokulmalle selkeästi havaittavissa oleva preferenssikulma (engl. preferred angle), eli yleisin polarisaatiokulma, jonka ympärille polarisaatiokulman havainnot pääosin keskittyvät.
2. EVPA-rotaatiot VHE-purkausten aikana (havaitaanko rotaatioita enemmän VHE-purkausten aikana kuin yleisesti muulloin),
3. EVPA-rotaatioita pienemmät "piikit" polarisaatiokulman kuvaajissa, joissa kulma muuttuu ensin kymmeniä asteita yhteen suuntaan ja sitten muutos vaihtaa äkillisesti suuntaa, mutta kulman muutos ei täytä varsinaisen EVPA-rotaation kriteerejä.

Kohteiden kuvaajia tarkasteltiin ensin silmämääräisesti ja sitten numeerisesti sekä mielenkiintoisista kohdista myös lähemmäs rajatuilla kuvaajilla.

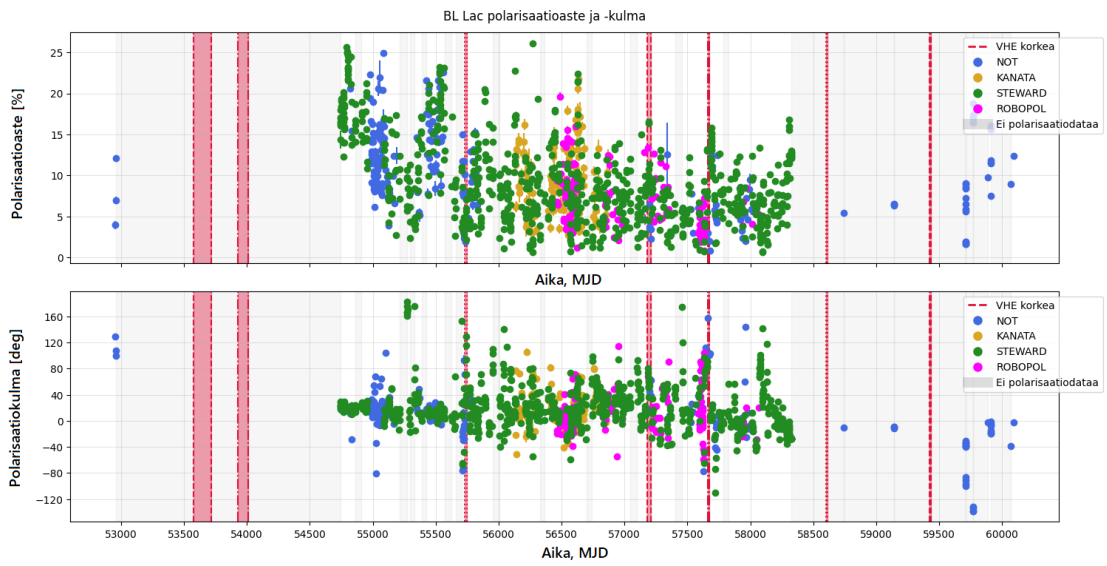
Tämän otoksen niille kohteille, joilta oli vain hyvin vähän samanaikaista polarisaatio- ja VHE-dataa, polarisaatiokuvaajat on esitetty liitteissä (5.1). Näiltä kohteilta oli niin vähän mittausdataa että mielekästä tarkastelua polarisaatiokäyttäytymisestä ei tällä datamäärällä pystytty toteuttamaan. Tällaisia kohteita otoksessa oli kahdeksan. Kuvaajat otoksen lopuille kymmenelle kohteille on esitetty kuvissa 17-26.



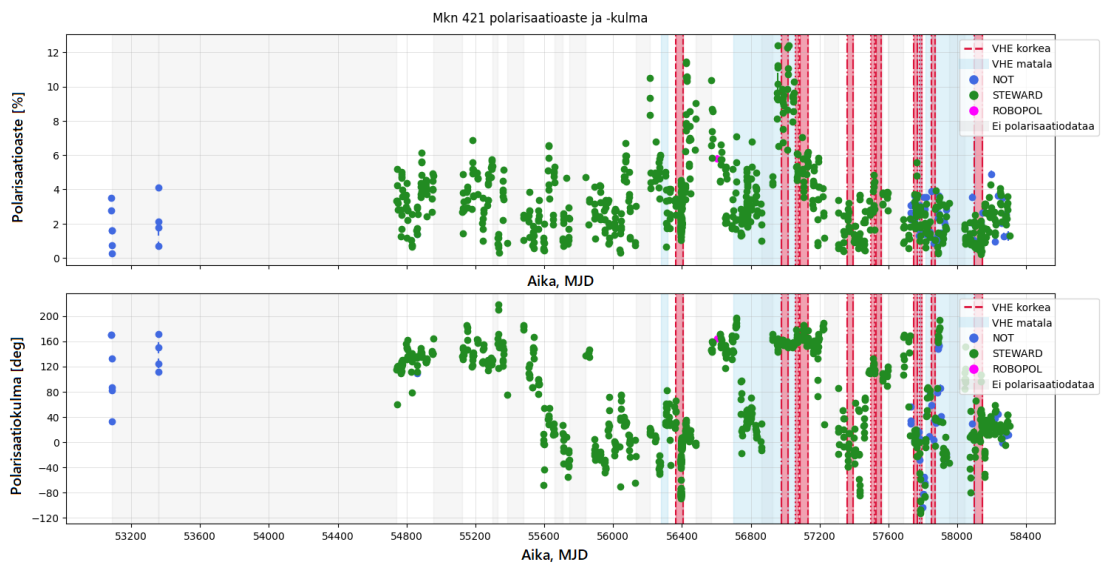
Kuva 17. 1ES 1959+650 Polarisaatioaste ja -kulma, VHE-purkaukset ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot. Kohteella 1ES 1959+650 on havaittu vain yksi VHE-aktiivinen jakso, ja heti tämän jälkeen matalan VHE-aktiivisuuden jakso (ainut jonka ajalta on myös polarisaatiodataa). Kuvaajasta on havaittavissa kohteen preferenssikulma noin 150 asteessa, ja hieman ennen korkeaenergistä VHE-purkausta se näyttää muuttuvan noin 120 asteeseen ja palaavan myöhemmin takaisin aiempaan suuruusluokkaansa (ks. teksti). Muutoin polarisaatiokulman muutokset pieniä, joi-takin kymmeniä asteita.



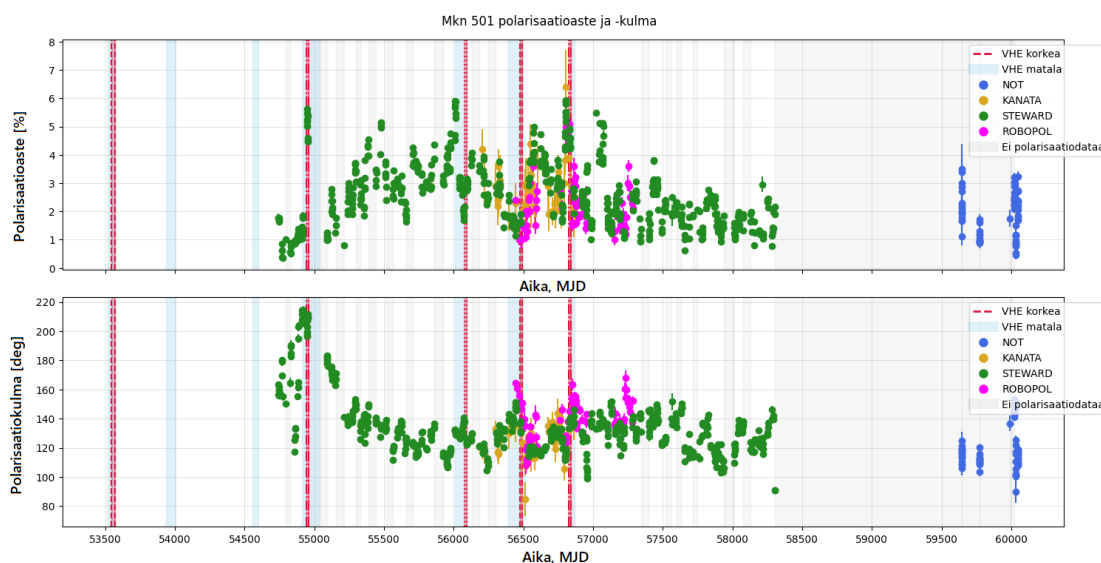
Kuva 18. 1ES 2344+514 Polarisaatioaste ja -kulma, VHE-purkaukset ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot. Kohteelle on havaittu pääosin matalaa VHE-aktiivisuutta. Havaintojen ajanjakson aikana on havaittu kaksi VHE-purkausta, joista vain toisen ajalta on polarisaatiodataa. Kohteella on preferenssikulma noin 130 – 140 asteessa, ja kulma poikkeaa tästä välillä joitakin kymmeniä asteita, mutta ei VHE-purkauksen aikana merkittävästi yleisestä trendistä.



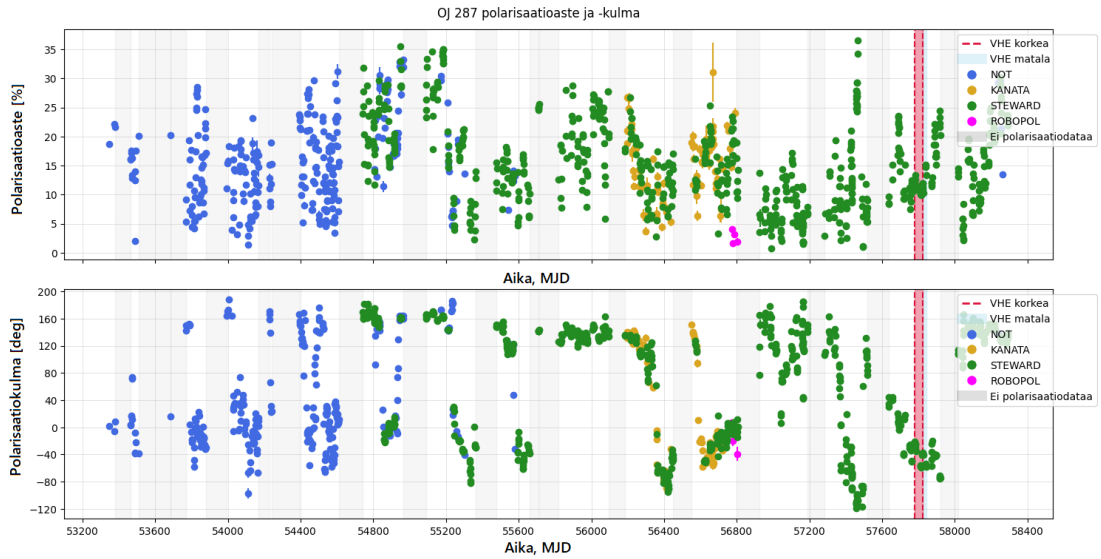
Kuva 19. BL Lac Polarisaatioaste ja -kulma, VHE-purkaukset ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot. Kohteelle havaittu useita VHE-purkauksia, joista kolmen ajalta on myös polarisaatiodataa. Matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana kohdetta ei pystytä nykylaitteistolla merkittävästi detektoimaan, joten matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja ei ole tässä työssä käytetty, ks. kappale 2.2. Kohteelle on paljon polarisaatiodataa ja polarisaatiokulma muuttuu paljon (useasti jopa >100 astetta) ja nopeasti, mutta kohteella on kuitenkin selkeästi havaittava preferenssikulma noin nollassa asteessa. Havaittu 18 EVPA-rotaatiota, joista kaksi VHE-purkauksen aikana (MJD 55740 – 55741, MJD 57188 – 57201), ks. taulukko VI.



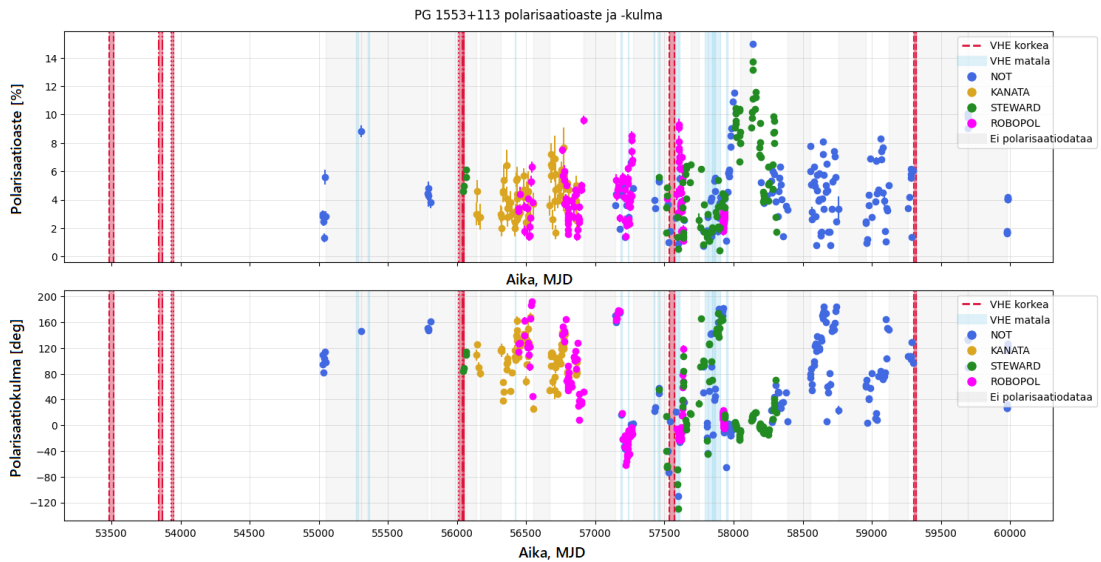
Kuva 20. Mkn 421 Polarisaatioaste ja -kulma. Kohteelle on havaittu useita VHE-purkauksia joiden ajalta on myös polarisaatiodataa, ja joitakin matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja. Voimakkaasti muuttuva ja paljon havaittu kohde, myös paljon polarisaatiodataa. Polarisaatiokulma vaihtelee paljon (useita kymmeniä asteita), preferenssikulma $160 (= -20)$ asteessa. Havaittu 9 EVPA-rotaatiota, joista kolme VHE-purkauksen aikana ja yksi matalan VHE-aktiivisuuden aikana, ks. taulukko VII.



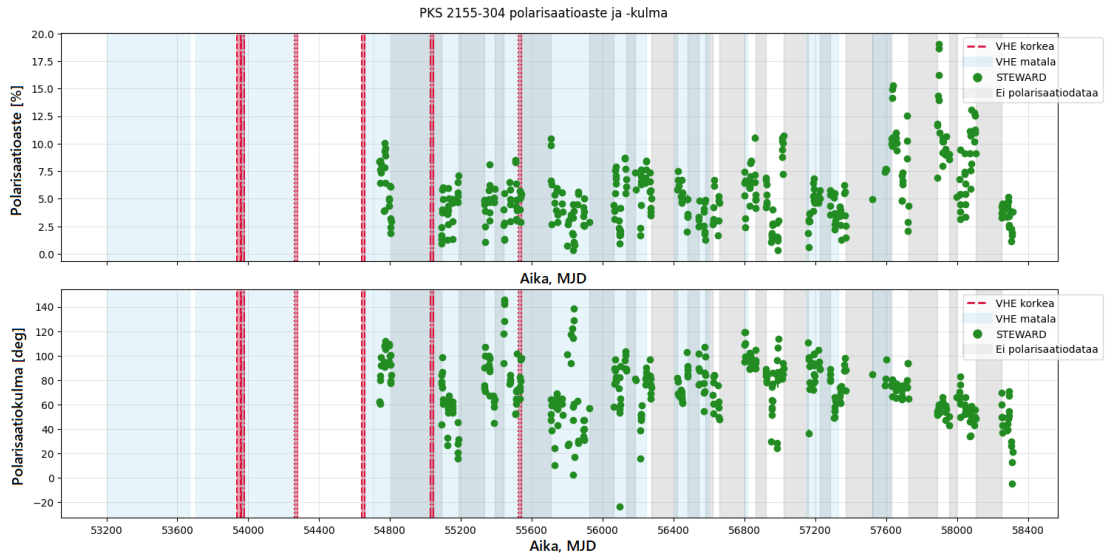
Kuva 21. Mkn 501 Polarisaatioaste ja -kulma. Havaittu sekä VHE-purkauksia että lyhyitä matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja. Preferenssikulma keskittyy pääosin noin 120 asteeseen, mutta poikkeaa tästä merkittävästi havaintojen alkuvaiheessa noustessaan jopa 220 asteeseen (hieman ennen ensimmäistä VHE-purkausta, jonka ajalta on polarisaatiodataa). Tämän jälkeen polarisaatiokulma laskee 100 – 140 asteen välille ja muutokset pysyvät pienempinä (joitakin kymmeniä asteita). Polarisaatiokulma muuttuu myös muiden VHE-purkausten kohdalla usein siten, että muutos on ensin kymmeniä asteita yhteen suuntaan ja sitten muutoksen suunta äkillisesti kääntyy.



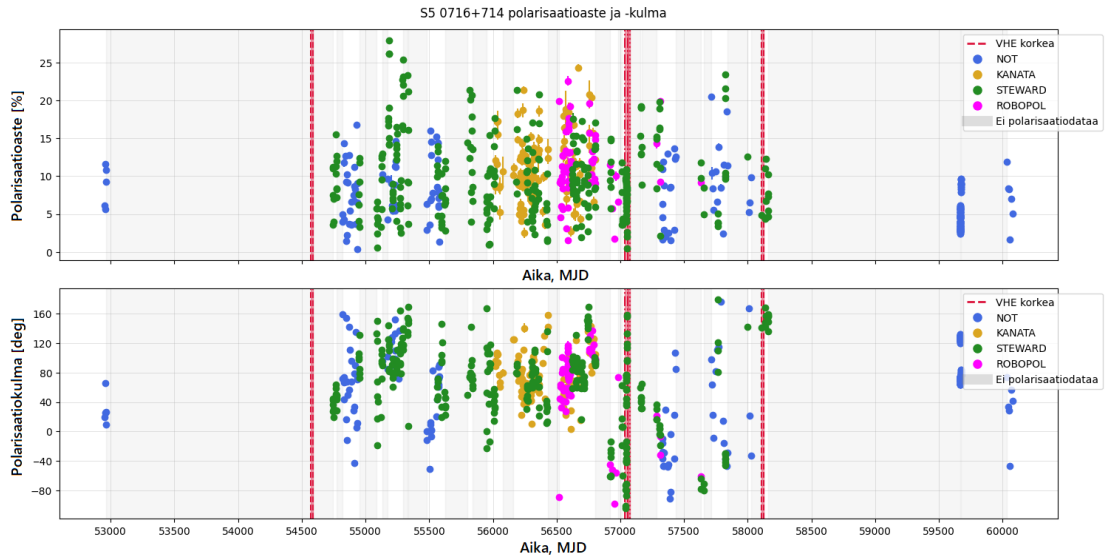
Kuva 22. OJ 287 Polarisaatioaste ja -kulma. Havaittu yksi VHE-purkaus, yksi lyhyt matalan VHE-aktiivisuuden jakso. Polarisaatiokulma näyttää vaihtelevan voimakkaasti (useita kymmeniä asteita), mutta 180-degeneraation vuoksi voidaan katsoa kohteen preferenssikulman olevan noin $-20 (= 160)$ asteessa. Kohteelle havaittu myös 13 EVPA-rotaatiota, joista yksi VHE-purkauksen aikana (MJD 57785 – 57817), ks. taulukko IV.



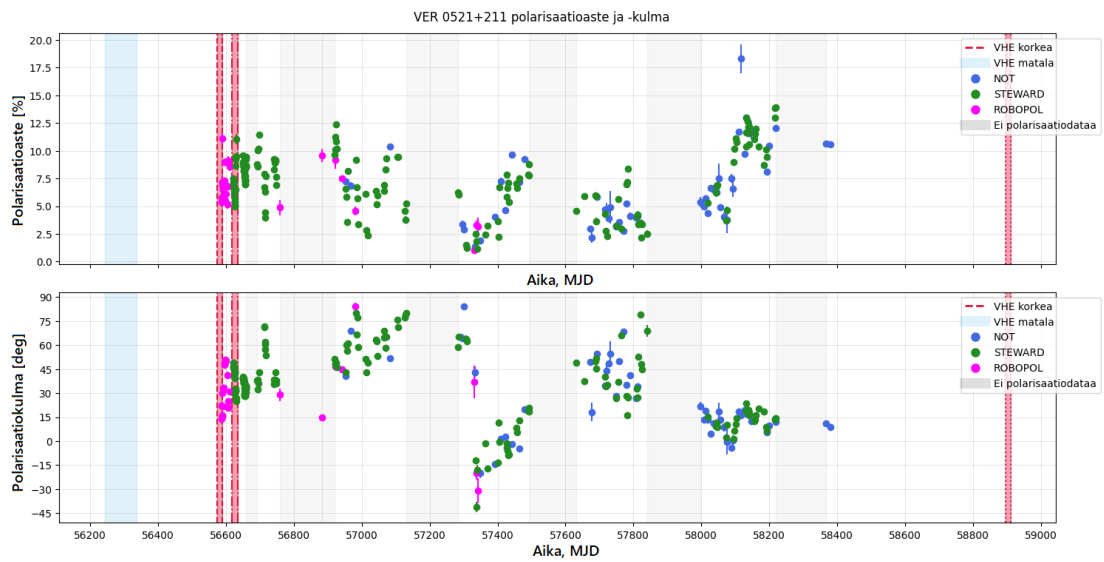
Kuva 23. PG 1553+113 Polarisaatioaste ja -kulma. Havaittu useita VHE-purkauksia ja lyhyitä matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja, joista vain joidenkin ajalta on myös polarisaatiodataa. Ei selkeää preferenssikulmaa, vaan polarisaatiokulma muuttuu jatkuvasti ja polarisaatiokulman muutokset ovat > 100 astetta. Kohteelle havaittu myös neljä EVPA-rotaatiota, mutta yksikään näistä ei osu VHE-purkausten kanssa samaan ajankohtaan (ks. taulukko V).



Kuva 24. PKS 2155-304 Polarisaatioaste ja -kulma. Havaittu neljä VHE-purkausta, joista vain yhden ajalta polarisaatiodataa. Polarisaatiokulma näyttää vaihtelevan hitaasti noin 40 – 100 asteen välillä. Välillä polarisaatiokulmassa havaitaan yksittäisiä suurempia muutoksia. Preferenssikulma noin 80 asteen tienoilla. Matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja havaittu merkittävästi enemmän kuin VHE-purkaujaksoja, eikä tällaisella datamäärä pysty toteuttamaan mielekästä tilastollista tarkastelua.



Kuva 25. S5 0716+714 Polarisaatioaste ja -kulma. Havaintoajalta kolme VHE-purkausta, joista kahden ajalta myös polarisaatiodataa. Matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana kohdetta ei pystytä nykylaitteistolla merkittävästi detektoimaan, joten matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja ei ole tässä työssä käytetty, ks. kappale 2.2. Sekä polarisaatioaste että polarisaatiokulma muuttuvat voimakkaasti ja nopeasti (kulman muutokset > 100 astetta). Seitsemän EVPA-rotatiota, joista yksi VHE-purkauksen aikana (MJD 57040 – 57050, ks. taulukko III).



Kuva 26. VER 0521+211 Polarisaatioaste ja -kulma. Kolme VHE-purkausta, joista vain kahden ajalta polarisaatiodataa. Yksi matalan VHE-aktiivisuuden jakso jonka ajalta ei ole polarisaatiodataa. Yleisesti polarisaatiodataa melko vähän ja polarisaatiokulman arvot vaihtelevat useita kymmeniä asteita, preferenssikulma noin 40 asteessa.

3.2.1 Kuvaajien lähempi tarkastelu

Tässä kappaleessa keskustellaan tarkemmin yksittäisten kohteiden kuvaajista tehdyistä huomioista. Kohteiden kuvaajista etsittiin mahdollista yhteyttä VHE-purkausten ja polarisaatiokäyttäytymisen, esimerkiksi EVPA-rotaatioiden tai preferenssikulman muutosten välillä. Löydetty EVPA-rotaatiot on esitetty kappaleessa 3.2.2 taulukoissa III - VII.

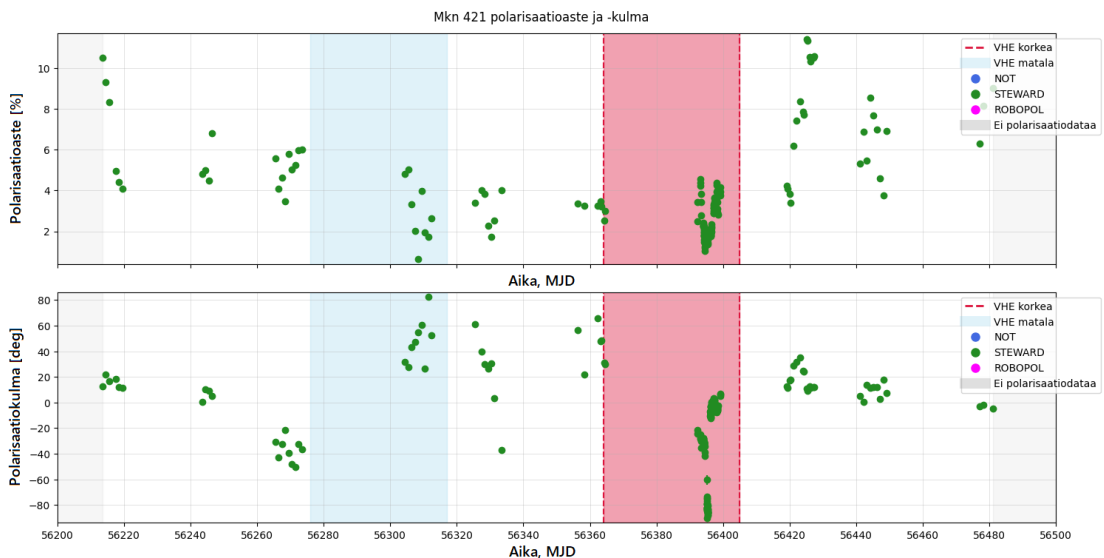
Kohteen 1ES 1959+650 polarisaatiokulman kuvaajasta 17 nähdään, että kohteen preferenssikulma näyttää muuttuvan lähellä VHE-purkausta, ja palaavan myöhemmin takaisin aikaisempaan arvoonsa. Kohteen preferenssikulma on aluksi noin 150 asteessa, ja ennen VHE-purkausta preferenssikulma laskee noin 120 asteeseen ja palaa noin 500 päivän päästä takaisin aikaisempaan arvoonsa. Polarisaatiokulman muutokset muiden havaintojaksojen aikana ovat pieniä. Koska polarisaatiokulman tiedetään olevan yhteydessä blasaarin hiukkassuihkun magneettikentän suuntaan, tämä viittaa hiukkassuihkun magneettikentän suunnassa mahdollisesti tapahtuvaan muutokseen.

Kohteen Mkn 501 kuvaaja on mielenkiintoinen, sillä tämän kohdalla VHE-purkaukset näyttävät osuvan EVPA-rotaatiota pienempiin piikkeihin (ks. 3.2) polarisaatiokulman kuvaajassa 21. Vaikka koko datan kattavassa kuvaajassa VHE-purkaus näyttää osuvan polarisaatiokulmassa tapahtuvan piikin kohdalle, kuvaajan lähemmästä tarkastelusta (kuva 28) nähdään kulman merkittävimmän muutoksen tapahtuvan ennen VHE-purkausta. Polarisaatioaste kasvaa tämän VHE-purkauksen aikana, muiden kohteelle havaittujen VHE-purkausten aikana polarisaatioasteessa ei nähdä merkittävää muutosta (ks. Liitteet, 5.1.1). Muiden kohteelle havaittujen VHE-purkausten lähemmin tarkastelluista kuvaajista (esitetty liitteissä, 5.1.1) myös nähdään VHE-purkausten tapahtuvan aina joko ennen kulman muutosta tai sen jälkeen. Tarkastelussa myös huomataan, että vastaavia piikkejä on myös muulloin kuin VHE-purkausten läheisyydessä, joten on epävarmaa liittyvätkö ilmiöt toisiinsa. Myöskään

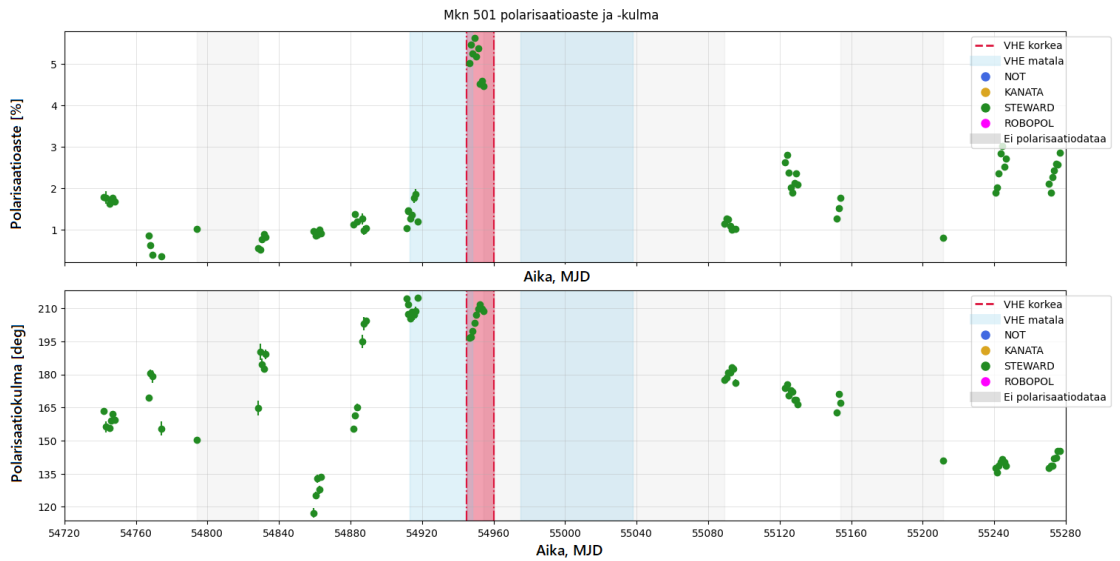
matalan VHE-aktiivisuuden havaintojen kohdalla ei ole havaittavissa selkeää korrelaatiota polarisaatiokäyttäytymiseen.

Myös kohteella PG 1553+113 polarisaatiokulma näyttää koko havaintoajan kattavassa kuvaajassa 23 selkeästi muuttuvan VHE-purkauksen aikana. Lähemmästä tarkastelusta (ks. 29, taulukko V) kuitenkin nähdään, että vaikka koko havaintoajan kattavassa kuvaajassa näyttää siltä että VHE-purkauksen kohdalle osuu EVPA-rotaatio, todellisuudessa rotaatio ei tapahdu samanaaisesti VHE-purkauksen kanssa vaan noin 30 päivää sen jälkeen. Tämän jälkeen tapahtuu myös toinen rotaatio, joka alkaa matalan VHE-aktiivisuuden jakson aikana.

Myös kohteella Mkn 421 näyttää ainakin joidenkin VHE-purkausten aikana tapahtuva merkittävä muutos polarisaatiokulmassa. Kuitenkin vain kolme näistä täyttää EVPA-rotaation kriteerit. Tarkempi kuvaaja lähemmäs erästä näistä rotaatioista on esitetty kuvassa 27. Tässä tapauksessa EVPA-rotaatio tapahtuu VHE-purkauksen aikana, ja kaikkia kohteelta havaittuja VHE-purkauksia ja EVPA-rotaatioita on vertailtu systemaattisesti taulukossa VII. Loppujen VHE-purkausten lähemmäs tarkennetut kuvaajat on esitetty liitteissä, 5.1.1.

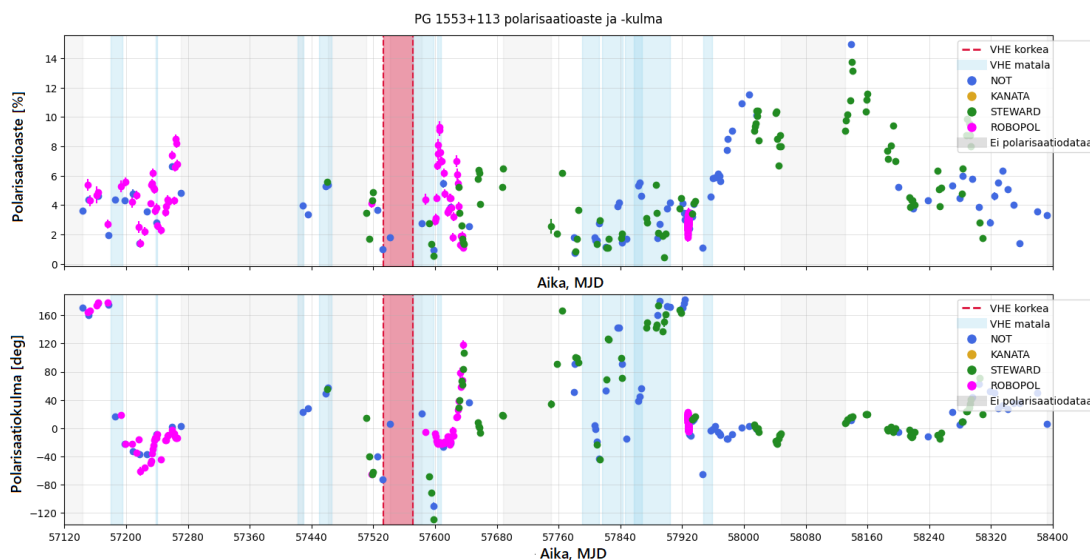


Kuva 27. Kohteen Mkn 421 kuvaaja, tarkennus lähemmäs aikaväliä MJD 56200 – 56500, jossa VHE-purkauksen aikana tapahtuu EVPA-rotaatio ja samanaikaisesti selkeä äkillinen muutos polarisaatioasteessa.



Kuva 28. Kohteen Mkn 501 kuvaaja, tarkennus lähemmäs polarisaatiokuvaajan ensimmäistä piikkiä (MJD 54720 – 55280). Polarisaatiokulma ei merkittävästi muutu VHE-purkauksen aikana, mutta kasvaa ennen VHE-purkausta ja lähtee laskuun tämän jälkeen. Muutos ei kuitenkaan täytä EVPA-rotaation kriteerejä. VHE-purkauksen molemmiin puolin on myös havaittu matalan VHE-aktiivisuuden jaksot. Polarisaatiaste on huomattavasti korkeampi VHE-purkauksen aikana kuin ennen sitä tai sen jälkeen.

Loput kuvaajat, jotka on tarkennettu lähemmäksi VHE-purkauksia kohteille Mkn 421 ja Mkn 501 on esitetty liitteissä, 5.1.1, kuvissa 38-42.



Kuva 29. Kohteen PG 1553+113 kuvaaja, tarkennus lähemmäs MJD-aikaväliä 57120 – 58400, jonka aikana ensin VHE-purkaus, sen jälkeen matalan VHE-aktiivisuuden jakso jonka aikana alkaa EVPA-rotaatio. Koko havaintoajan kuvaajassa 23 tämä rotaatio näyttää tapahtuvan VHE-purkauksen aikana, mutta tapahtuu todellisuudessa sen jälkeen.

3.2.2 EVPA-rotaatiot

Kohteiden polarisaatiotiedatasta etsittiin systemaattisesti EVPA-rotaatioita jotta voitaisiin arvioida osuuko niitä erityisesti VHE-purkausten kohdalle. Tässä kappaleessa esitellään otoksen kohteista löytyneet EVPA-rotaatiot ja VHE-purkaukset kohdekohtaisesti taulukoissa III-VII. Löytyneet rotaatiot on taulukoitu kronologisesti MJD-päivämäärän mukaan, ja taulukoissa on esitetty myös havaitut VHE -purkaukset sekä rotaation aikana tapahtunut kulman muutos (alkukulma, loppukulma, ja kulman muutoksen itseisarvo) sekä kulman muutosnopeus (RoC, engl. Rate of Change) asteina päivää kohden ja kohteen yleisin polarisaatiokulma (preferenssikulma), jos sellainen oli havaittavissa.

Havaintodatasta löytyi 39 EVPA-rotaatiota yhteensä viideltä kohteelta. VHE-purkauksia oli yhteensä 25, joista viidentoista ajalta oli myös polarisaatiodataa. Näistä kahdeksan aikana tapahtui rotaatio;

- Kohteelle S5 0716+714 (LSP) löydettiin seitsemän EVPA-rotaatiota. VHE-purkauksia oli kaksi, joista vain toisen ajalta oli polarisaatiodataa. Tämän VHE-purkauksen aikana havaittiin myös EVPA-rotaatio.
- Kohteelle OJ 287 (LSP) löydettiin 13 EVPA-rotaatiota. VHE-purkauksia oli havaittu yksi, jonka aikana tapahtui EVPA-rotaatio.
- Kohteelle PG 1553+113 (HSP) löydettiin neljä EVPA-rotaatiota. VHE-purkauksia oli kuusi, joista yhdenkään ajalta ei ollut polarisaatiodataa. Yhden rotaation aikana oltiin mitattu matalaa VHE-aktiivisuutta.
- Kohteelle BL Lac (ISP) löydettiin 18 EVPA-rotaatiota. VHE-purkauksia oli seitsemän, joista kahden ajalta oli polarisaatiodataa. Näiden kahden VHE-purkauksen aikana tapahtui myös EVPA-rotaatio.
- Kohteelle Mkn 421 (HSP) löydettiin 9 EVPA-rotaatiota. VHE-purkauksia oli 11, joista kymmenen ajalta oli myös polarisaatiodataa. Kolmen VHE-purkauksen aikana tapahtui myös EVPA-rotaatio, ja lisäksi yhden rotaation aikana oltiin mitattu matalaa VHE-aktiivisuutta.

Kohteille havaittujen rotaatioiden ja VHE-purkausten tarkemmat MJD-päivämäärät ja päällekkäisyydet on taulukoitu alla taulukoissa III-VII. Mikäli kohteelle ei ollut samanaikaista polarisaatio- ja VHE-dataa, taulukossa lukee *ei dataa*. Niissä tapauksissa, joissa VHE-purkauksen ajalta oli vain 1 – 2 polarisaatiomittausta, taulukkoon merkittiin *ei dataa**, sillä tämä ei ole riittävä datamäärä määrittämään rotaatiota tai poissulkemaan sellaisen mahdollisuutta. Taulukosta on varjostettu harmaalla rivit niiltä ajanjaksoilta, joilta on ollut samanaikaista VHE- ja polarisaatiodataa.

Taulukko III. Kohteen S5 0716+714 datasta löytyneet rotaatiot taulukoituna. Taulukossa VHE (VHE₁ ja VHE₂) ovat VHE-purkauksen alku- ja loppupäivämäärät ja Rotaatiot (MJD₁ ja MJD₂) löytyneiden rotaatioiden alku- ja loppupäivämäärät MJD-muodossa, Δ rotaatiossa tapahtunut kulman muutos asteina sekä RoC (Rate of Change) kulman muutosnopeus asteina päivää kohden. Taulukossa *ei dataa** tarkoittaa että jaksolta oli vain 1-2 polarisaatiomittausta, mikä on riittämätön datamäärä polarisaatiokäyttämisen arviointiin.

VHE	Rotaatiot	PA 1	PA 2		
VHE ₁ – VHE ₂	MJD ₁ – MJD ₂			Δ [°]	RoC[°/d]
54578-54581	ei dataa				
ei dataa	54828 - 54909	66.6±1.2	-42.6±0.4	109.2	-1.4
ei dataa	55093 - 55125	-18.9±1.3	71.5±0.1	90.4	-2.9
ei dataa	55952 - 55972	114.5±0.4	-13.9±0.4	128.4	-6.4
ei dataa	56741 - 56921	151.2±0.1	-45.1±1.4	196.3	-1.1
57040 - 57050	57012 - 57047	-18.9±0.1	75.5±0.1	94.4	2.7
57065 - 56070	ei dataa				
ei dataa	57311 - 57427	-32.3±0.8	106.8±0.2	139.1	1.2
ei dataa	57630 - 57716	-61.2±1.2	98.4±0.3	159.6	1.9
58115 - 58116	ei dataa*				

Taulukko IV. Kohteen OJ 287 datasta löytyneet rotaatiot taulukoituna. Taulukossa VHE (VHE₁ ja VHE₂) ovat VHE-purkauksen alku- ja loppupäivämäärät ja Rotaatiot (MJD₁ ja MJD₂) löytyneiden rotaatioiden alku- ja loppupäivämäärät MJD-muodossa, Δ rotaatiossa tapahtunut kulman muutos asteina ja kulman muutosnopeus RoC (Rate of Change) asteina päivää kohden. Kohteen yleisin polarisaatiokulma karkeasti arvioituna on noin $\sim 160/ - 20$ asteessa.

VHE	Rotaatiot	PA 1	PA 2		
VHE ₁ – VHE ₂	MJD ₁ – MJD ₂			$\Delta[o]$	RoC[o/d]
ei dataa	53769 - 53790	142±1.1	3.9 ± 0.8	145.9	–6.6
ei dataa	54028 - 54109	28.9±1.9	–67±6.9	95.9	–1.2
ei dataa	54109 - 54227	–67±6.9	170.8±0.4	237.8	2.0
ei dataa	54227 - 54233	170.8±0.4	65.7±0.8	236.5	–17.5
ei dataa	54417 - 54436	76±0.6	–20.5±0.4	96.5	–5.1
ei dataa	54436 - 54475	–20.5± 0.4	79.2 ±0.2	99.7	2.6
ei dataa	54502 - 54526	176±3.6	4.6±0.6	180.6	–7.2
ei dataa	55237 - 55335	18.7±0.7	–81.8±0.3	100.5	–1.0
ei dataa	55335 - 55476	–81.8±0.3	147.5±0.2	229.3	1.6
ei dataa	55595 - 55707	–48±0.1	141.3±0.1	189.3	1.7
ei dataa	57366 - 57372	45.9±0.2	–56.1± 0.1	102.0	–17.5
ei dataa	57372 -57493	–56.1±0.1	60.9±2.1	117.0	1.0
57785 - 57817	57716 - 58016	–40.3±0.1	113.5±0.1	153.8	0.5

Taulukko V. Kohteen PG 1553+113 datasta löytyneet rotaatiot taulukoituna. Taulukossa VHE (VHE_1 ja VHE_2) ovat VHE-purkauksen alku- ja loppupäivämäärät ja Rotaatiot (MJD_1 ja MJD_2) löytyneiden rotaatioiden alku- ja loppupäivämäärät MJD -muodossa, Δ rotaatiossa tapahtunut kulman muutos asteina ja kulman muutosnopeus RoC (Rate of Change) asteina päivää kohden. Taulukossa *ei dataa** tarkoittaa että jaksolta oli vain 1-2 polarisaatiomittausta ja *VHE matala* tarkoittaa matalan VHE-aktiivisuuden jaksoa, joka osuu kohdakkain rotaation kanssa.

VHE	Rotaatiot	PA 1	PA 2		
$VHE_1 - VHE_2$	$MJD_1 - MJD_2$			$\Delta[o]$	RoC[o/d]
53492 - 53507	ei dataa				
53849 - 53860	ei dataa				
53938 - 53943	ei dataa				
59310 - 59311	ei dataa				
56018 - 56044	ei dataa*				
57540 - 57564	ei dataa*				
ei dataa	57595 - 57627	-91.5 ± 0.7	15.2 ± 1.6	106.7	3.3
ei dataa	57627 - 57636	15.2 ± 1.6	118.2 ± 6.1	133.4	11.6
VHE matala	57780 - 57812	50.9 ± 1.9	-43.1 ± 1.4	94.0	-2.9
ei dataa	59978 - 59984	26.7 ± 1.1	118.4 ± 0.6	145.1	15.3

Taulukko VI. Kohteen BL Lac datasta löytyneet rotaatiot taulukoituna. Taulukossa VHE (VHE₁ ja VHE₂) ovat VHE-purkauksen alku- ja loppupäivämäärät ja Rotaatiot (MJD₁ ja MJD₂) löytyneiden rotaatioiden alku- ja loppupäivämäärät MJD-muodossa, Δ rotaatiossa tapahtunut kulman muutos asteina ja kulman muutosnopeus RoC (Rate of Change) asteina päivää kohden. Kohteen yleisin polarisaatiokulma on noin ~ 0 asteessa. Taulukossa *ei dataa** tarkoittaa että jaksolta oli vain 1-2 polarisaatiomittausta, mikä on riittämätön datamäärä polarisaatiokäyttämisen arviointiin.

VHE	Rotaatiot	PA 1	PA 2		
VHE ₁ – VHE ₂	MJD ₁ – MJD ₂			$\Delta[o]$	RoC[o/d]
53583 - 53708	ei dataa				
53936 - 54002	ei dataa				
ei dataa	55028 - 55039	-81.2 ± 1.4	8.9 ± 1.6	90.1	8.2
ei dataa	55271 - 55291	175.4 ± 0.4	14.7 ± 0.1	190.1	-8.1
ei dataa	55712 - 55716	-67.3 ± 0.3	29.2 ± 4.2	96.5	25.4
ei dataa	55716 - 55721	29.2 ± 4.2	-72.5 ± 0.7	101.7	-20.6
55740 - 55741	55722 - 55741	24.5 ± 0.5	128.8 ± 0.4	153.3	5.4
ei dataa	56040 - 56139	49.8 ± 0.6	-51.5 ± 1.2	101.3	-1.0
ei dataa	56139 - 56165	-51.5 ± 1.2	72.0 ± 2.1	123.5	4.8
ei dataa	56165 - 56218	72 ± 2.1	-24.4 ± 9.0	96.4	-1.8
ei dataa	57101 - 57129	92.9 ± 0.6	-14.1 ± 0.3	107.0	-3.8
ei dataa	57129 - 57188	-14.1 ± 0.3	80 ± 0.2	94.1	1.6
57188 - 57201	57188 - 57217	80 ± 0.2	-26.2 ± 0.4	106.2	-3.7
ei dataa	57217 - 57349	-26.2 ± 0.4	90.9 ± 1.3	117.1	0.9
ei dataa	57349 - 57366	90.9 ± 1.3	-36 ± 2.9	126.9	-7.7
ei dataa	57366 - 57457	-36 ± 2.9	175.1 ± 0.5	211.1	2.3
ei dataa	57458 - 57463	17.3 ± 0.4	120.3 ± 1.1	137.6	20.6
ei dataa	57603 - 57618	90.5 ± 2.5	-10.4 ± 2.4	100.9	-6.8
ei dataa	57618 - 57633	-10.4 ± 2.4	103.8 ± 8.6	114.2	7.6
57666 - 57667	ei dataa*				
ei dataa	57686 - 57723	10.6 ± 0.2	-110.2 ± 0.9	120.8	-3.3
58606 - 58606	ei dataa				
59428 - 59429	ei dataa				

Taulukko VII. Kohteen Mkn 421 datasta löytyneet rotaatiot taulukoituna. Taulukossa VHE (VHE₁ ja VHE₂) ovat VHE-purkauksen alku- ja loppupäivämäärät ja Rotaatiot (MJD₁ ja MJD₂) löytyneiden rotaatioiden alku- ja loppupäivämäärät MJD-muodossa, Δ rotaatiossa tapahtunut kulman muutos asteina ja kulman muutosnopeus RoC (Rate of Change) asteina päivää kohden. Kohteen yleisin polarisaatiokulma on noin $\sim 160/ - 20$ asteessa. Taulukossa *VHE matala* tarkoittaa matalan VHE-aktiivisuuden jaksoa, joka osuu kohdakkain rotaation kanssa.

VHE	Rotaatiot	PA 1	PA 2		
VHE ₁ – VHE ₂	MJD ₁ – MJD ₂			$\Delta[^\circ]$	RoC[$^\circ$ /d]
ei dataa	55334 - 55359	218.5 \pm 1.1	121.0 \pm 0.5	97.5	-3.9
ei dataa	55531 - 55595	86.9 \pm 1.4	-3.3 \pm 0.6	90.2	-1.4
56371 - 56397	56395 - 56396	-90.1 \pm 1.2	0.3 \pm 0.5	90.4	73.0
56986 - 57010					
57065 - 57069					
57091 - 57124					
ei dataa	57187 - 57193	72.0 \pm 1.4	166.8 \pm 0.2	238.8	15.8
57368 - 57388					
ei dataa	57431 - 57456	-80.9 \pm 0.5	24.9 \pm 0.7	105.8	4.23
57505 - 57511					
57533 - 57550	ei dataa				
57755 - 57762	57724 - 57784	10.5 \pm 0.9	-94.9 \pm 1.3	105.4	-1.8
57787 - 57789	57784 - 57813	-94.9 \pm 1.3	2.4 \pm 1.5	97.3	3.4
57856 - 57864					
VHE matala	57887 - 57898	158.7 \pm 5.5	32.7 \pm 1.2	191.4	-11.5
58105 - 58137					
ei dataa	58139 - 58141	106.3 \pm 1.8	15.9 \pm 0.6	122.2	-45.9

Mkn 421:tä lukuunottamatta niille kohteille, joilta havaittiin rotaatioita, kaikkien VHE-purkausten aikana joilta oli myös polarisaatiodataa havaittiin myös EVPA-rotaatio. Kohteelle Mkn 421 oli havaittu myös sellaisia VHE-purkauksia, joiden ajalta polarisaatiodataa oli mutta EVPA-rotaatiota ei oltu havaittu. Muille kohteille niiden VHE-purkausten ajalta joilta oli polarisaatiodataa, oli kaikkien aikana havaittu myös EVPA-rotaatio. Otoksessa oli kuitenkin useita VHE-purkauksia, joiden ajalta ei ollut polarisaatiodataa, ja useita EVPA-rotaatioita, joiden ajalta ei ollut VHE-dataa. Lisäksi rotaatioita havaittiin kaksi matalan VHE-aktiivisuuden aikana.

Vaikka VHE-purkaukset ja polarisaatiokulman muutokset näyttävät usein osuvan kohdakkain, ne eivät aina ole täysin samanaikaisia. VHE-purkaukset tapahtuvat usein joko ennen polarisaatiokulman muutosta tai sen jälkeen, eivät kuitenkaan konsistentisti aina samalla tavalla. Merkittäviä polarisaatiokulman muutoksia on havaittu myös silloin, kun VHE-purkausta ei olla havaittu. Tämän otoksen saatavilla olevan datan perusteella ei siis voida sanoa polarisaatiokulman muutoskäytöksen olevan yleisellä tasolla selkeästi yhteydessä VHE-käyttäytymiseen.

4 Päätelmät

Tässä tutkielmassa tutkittiin blasaarien optisen polarisaation yhteyttä kohteiden VHE-purkauskäyttäytymiseen. Tarkastellussa otoksessa oli 18 blasaaria joille tarkasteltiin havaintodataa vuosilta 2003-2023. Polarisaatiodataa oli saatavilla pidemmältä aikaväliltä kuin VHE-dataa. VHE-dataa oli saatavilla katkonaisesti vuosilta 2004-2020 ja useilta kohteista vain VHE-purkausten ajalta. Polarisaatiodataa oli saatavilla myös vuosilta 2003 ja 2021-2023. Havaintodataa oli saatavilla hajanaisesti; kaikkien kohteiden kohdalla oli katkoksia polarisaatiodatassa, ja useilla kohteista datasetissä oli enemmän aikaa jolloin havainnot ei oltu tehty kuin aikaa jolta havainnot oli. Vaikka tarkasteltu aikaväli on pitkä, havainnot eivät olleet yhtäjaksoisia ja joillekin kohteista oli saatavilla vain muutamia havainnot ja VHE- että polari-

saatiodatassa. Toisille kohteista havaintodataa oli useita satoja mittapisteitä, toisille vain joitakin kymmeniä, ja myös samanaikaisten VHE- ja polarisaatiohavaintojen määrä oli vaihtelevaa. Tämän seurauksena mielekästä tarkastelua ei pystytty suorittamaan kaikille otoksen kohteille. Voimakkaasti muuttuvien blasaarien tapauksessa vähäinen datamäärä ja saatavilla olevan datasetin katkonaisuus hankaloittavat havainnoissa olevien trendien havaitsemista ja muutoskäyttäytymisen arviointia.

Joillakin kohteista oli polarisaatiokäyttäytymisessä havaittavissa mielenkiintoisia trendejä, esimerkiksi selkeä preferenssikulma tai sen muutos, EVPA-rotaatioita, tai polarisaatiokulman tai -asteen muutoksia VHE-purkausten aikana. Kaikilla kohteilla tällaista ei kuitenkaan havaittu, ja kaikkien VHE-purkausten aikana ei myöskään oltu havaittu merkittävää polarisaatiokäyttäytymisen muutosta. Tästä otoksesta ja tällä datamäärällä ei voida suoraan päätellä, että polarisaatiokäyttäytyminen yleisesti olisi selkeällä tavalla yhteydessä VHE-purkauksiin, sillä tähän viittaavat havainnot ovat yksittäisiä ja joissain tapauksissa vastaavaa polarisaatiokäyttäytymistä on havaittu myös matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana ja silloinkin, kun VHE-havaintoja ei oltu tehty.

Aiemmin on havaittu joidenkin aktiivisten galaksiydinten EVPA-rotaatioiden korreloivan gammasäteilyn purkausten kanssa [5], [1]. Tässäkin tutkielmassa havaittiin joitakin samanaikaisia VHE-purkauksia ja EVPA-rotaatioita, mutta lisähavainnot ovat tarpeen paremman yleiskäsityksen saavuttamiseksi. Tämän otoksen niille kohteille, joilta rotaatioita löydettiin, niitä tapahtui sekä VHE-purkausten että matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana (kuitenkin selkeästi useammin VHE-purkausten aikana). Kohteista joille havaittiin rotaatioita muille kuin Mkn 421:lle kaikkien VHE-purkausten aikana joilta oli polarisaatiodataa oli havaittu myös EVPA-rotaatio.

Niille kolmelle LSP/ISP kohteelle joille oli saatavilla samanaikaista VHE- ja polarisaatiodataa (BL Lac, S50716+714 ja OJ287) löydettiin VHE-purkauksen aikana

aina myös EVPA-rotaatio silloin kun VHE-purkauksen aikaista polarisaatiodataa oli saatavilla. LSP/ISP-kohteista saadaan nykylaitteistolla gamma-alueella merkittäviä detektioita vain VHE-purkausten aikana, joten purkausten ajoittuminen rotaatioiden kanssa samanaikaisesti ei vaikuta täysin satunnaiselta. Havaittu samanaikaisen VHE- ja polarisaatiodatan määrä on kuitenkin pieni, ja tarkempien johtopäätösten muodostamiseksi tärkeää olisi saada kohteista jatkuvampaa VHE-havaintodataa herkemmillä instrumenteilla. Mikäli VHE-purkausten ja EVPA-rotaatioiden välillä osoittautuisi olevan yhteys myös laajemmin tarkasteltuna, voisi tämä viitata fyysikaaliseen yhteyteen VHE-purkausten ja EVPA-rotaatioiden syntymekanismien välillä.

Loput kaksi kohdetta, joille havaittiin EVPA-rotaatioita (Mkn 421, PG1553+113) ovat HSP-kohteita. Näistä Mkn 421:lle oltiin havaittu VHE-purkausten aikaisia EVPA-rotaatioita, PG1553+113:lle ei ollut VHE-purkausten aikaista polarisaatiodataa. Näille kohteille oltiin havaittu myös matalan VHE-aktiivisuuden jaksoja, joiden aikana kaksi havaituista rotaatioista tapahtui. Kohteelle Mkn 421 oltiin havaittu myös sellaisia VHE-purkauksia, joiden ajalta oli polarisaatiohavaintoja mutta rotaatiota ei oltu havaittu.

Hajanaisessa datassa oli koko tarkastellulle otokselle useita VHE-purkauksia, joiden ajalta polarisaatiodataa ei ollut, ja havaittuja VHE-purkauksia joiden aikana tapahtui rotaatio oli kullekin kohteelle vain yksittäisiä (1-3 kappaletta). Tarkastellun datan laaja aikaskaala huomioonottaen on kuitenkin mielenkiintoista, että Mkn 421:tä lukuunottamatta niille kohteista joille rotaatioita havaittiin (etenkin kaikki LSP/ISP-kohteet), kaikkien sellaisten VHE-purkausten aikana joilta oli polarisaatiodataa havaittiin aina myös EVPA-rotaatio.

Kohteelle Mkn 501 havaittiin VHE-purkausten aikaisia varsinaisia EVPA-rotaatioita pienempiä polarisaatiokulman äkillisiä muutoksia, joissa kulma muuttuu nopeasti ja systemaattisesti ensin toiseen suuntaan ja sitten äkillisesti toiseen suuntaan. Vaikka nämä eivät täytä EVPA-rotaation varsinaista määritelmää, ne viestivät selkeästi

muutoksesta polarisaatiokulmassa. Nämä muutokset eivät aina osu täysin päällekkäin VHE-purkausten kanssa, mutta koko kerätyn havaintodatan skaalassa näyttävät ajoittuvan hyvinkin lähekkäin. Yhden tällaisen lähellä VHE-purkausta tapahtuvan polarisaatiokulman muutoksen aikana havaitaan myös hetkellistä polarisaatioasteen kasvua.

Kohteelle 1ES 1959+650 havaittiin selkeä preferenssikulman muutos VHE-purkauksen aikana (ja polarisaatiokulma jäi uuden preferenssikulman tienoille VHE-purkauksen loputtua, kunnes palasi alkuperäiseen preferenssikulmaansa matalan VHE-aktiivisuuden jakson jälkeen noin 500 päivää myöhemmin). Polarisaatiodatassa on katkos juuri ennen VHE-purkausta, mutta olemassaolevista havainnoista nähdään polarisaatioasteen kasvavan ennen VHE-purkausta ja laskevan välittömästi sen jälkeen; ennen katkosta polarisaatiohavainnoissa on havaittu koko havaintojakson korkein polarisaatioaste, $> 12\%$. Korkeampi polarisaatioaste viittaa järjestäytyneempään magneettikenttään, jonka voisi aiheuttaa hiukkassuihkussa etenevä shokkikohta, joka edetessään pakottaa magneettikentän järjestäytymään. Koska BL Lac-kohteilla EVPA:n tiedetään olevan samansuuntainen hiukkassuihkujen kanssa, preferenssikulman muutos viittaa myös fysikaaliseen muutokseen koko hiukkassuihkussa.

Optisen polarisaatioasteen muuttumisesta ja VHE-purkausten yhteydestä ei tälle otokselle löydetty johdonmukaista kaavaa; joillekin kohteille polarisaatioaste oli korkeampi VHE-purkausten aikana kuin yleisesti ja toisille taas matalampi. VHE-purkausten aikainen polarisaatioaste oli yleistä polarisaatioastetta korkeampi kahdeksalle otoksen kohteista ja matalampi kymmenelle kohteista. VHE-purkausten ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikaisia polarisaatioasteen arvoja verratessa saatiin myös eri kohteille keskenään päinvastaisia tuloksia.

Kohteelle Mkn 501 polarisaatioaste oli korkeampi VHE-purkausten aikana kuin matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana. Tämä viittaa järjestäytyneempään magneettikenttään hiukkassuihkussa VHE-purkausten aikana. Tämä voisi selittyä esi-

merkiksi hiukkassuihkussa etenevällä shokkiaallolla, joka pakottaa magneettikentän järjestäytymään, nostaen havaittua polarisaatioastetta.

Kohteelle Mkn 421 polarisaatioaste oli matalampi VHE-purkausten aikana kuin matalan VHE-aktiivisuuden aikana. Kohteen polarisaatioaste oli myös matalampi matalan VHE-aktiivisuuden aikana kuin yleisesti koko havaintojen ajalta. Matalampi polarisaatioaste viittaa epäjärjestäytyneeseen (turbulenttiin) magneettikenttään hiukkassuihkussa.

Muille kohteille, joiden VHE-purkausten ja matalan VHE-aktiivisuuden aikaisia polarisaatioasteita vertailtiin, datamäärä oli riittämätön mielekkään tilastollisen tarkastelun toteuttamiseen.

Havaintodataa oli saatavilla hyvin puutteellisesti (joillekin kohteille vain muutamia mittapisteitä), joten tuloksista ei voida myöskään päätellä, että polarisaatiokäyttäytymisellä ja VHE-purkauksilla ei olisi yhteyttä toisiinsa. Osalle otoksen kohteista havaittiin mielenkiintoista polarisaatiokäyttäytymistä VHE-purkausten aikana, mutta selkeiden johtopäätösten vetämiseksi suuntaan tai toiseen hyödyllistä olisi suurempi datamäärä ja säännöllisemmät havainnot, joita kerättäisiin samanaikaisesti optisen polarisaation ja VHE-gammasäteilyn aallonpituusalueilla. Tätä varten on jo käynnissä oleva havainto-ohjelma NOT- ja MAGIC-kaukoputkilla, mutta näitä havaintoja ei pystytty vielä hyödyntämään tässä tutkielmassa sillä MAGIC-teleskoopin havaintoja ei ole vielä julkaistu.

Kattavammat useilta eri aallonpituusalueilta samanaikaisesti kerätyt havainnot auttavat meitä blasaarien muutoskäyttäytymisen ymmärtämisessä ja näiden universumin kirkkaiden jättiläisten salaisuuksien selvittämisessä.

Kiitokset

Kiitos Elina Lindforsille tämän tutkielman ohjaamisesta ja Jan Aaltoselle VHE datasta, joka mahdollisti tässä tutkielmassa suoritettun vertailun toteuttamisen.

Based on observations made with the Nordic Optical Telescope, owned in collaboration by the University of Turku and Aarhus University, and operated jointly by Aarhus University, the University of Turku and the University of Oslo, representing Denmark, Finland and Norway, the University of Iceland and Stockholm University at the Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma, Spain, of the Instituto de Astrofísica de Canarias.

This research has made use of the VizieR catalogue access tool, CDS, Strasbourg, France (DOI : 10.26093/cds/vizieR). The original description of the VizieR service was published in 2000, *A&AS* 143, 23

Data from the Steward Observatory spectropolarimetric monitoring project were used. This program is supported by Fermi Guest Investigator grants NNX08AW56G, NNX09AU10G, NNX12AO93G, and NNX15AU81G

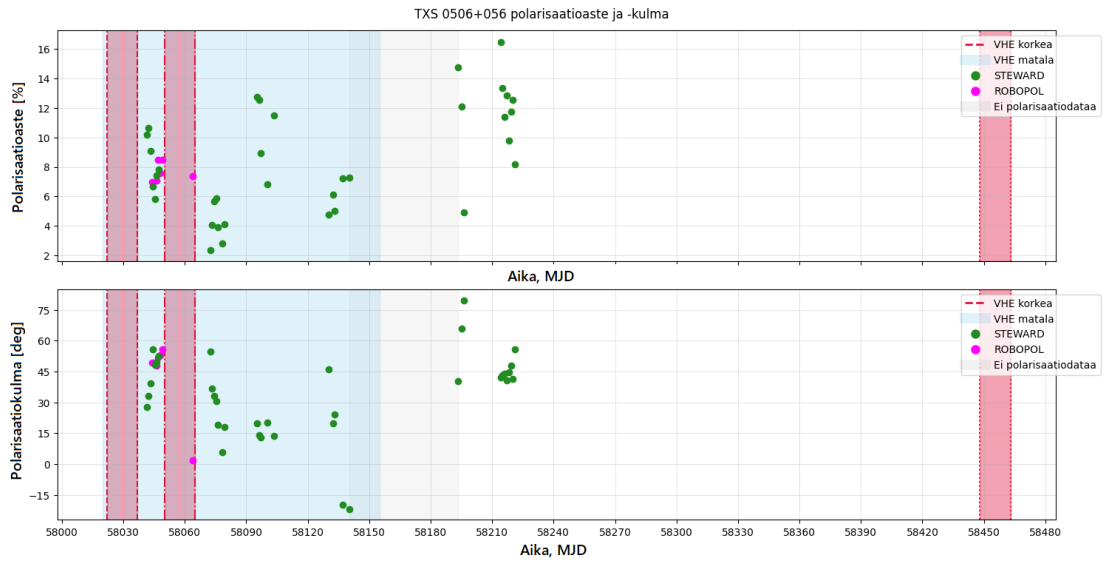
This research has made use of data from the RoboPol programme, a collaboration between Caltech, the University of Crete, IA-FORTH, IUCAA, the MPIfR, and the Nicolaus Copernicus University, which was conducted at Skinakas Observatory in Crete, Greece.

This research has made use of the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), which is funded by the National Aeronautics and Space Administration and operated by the California Institute of Technology.

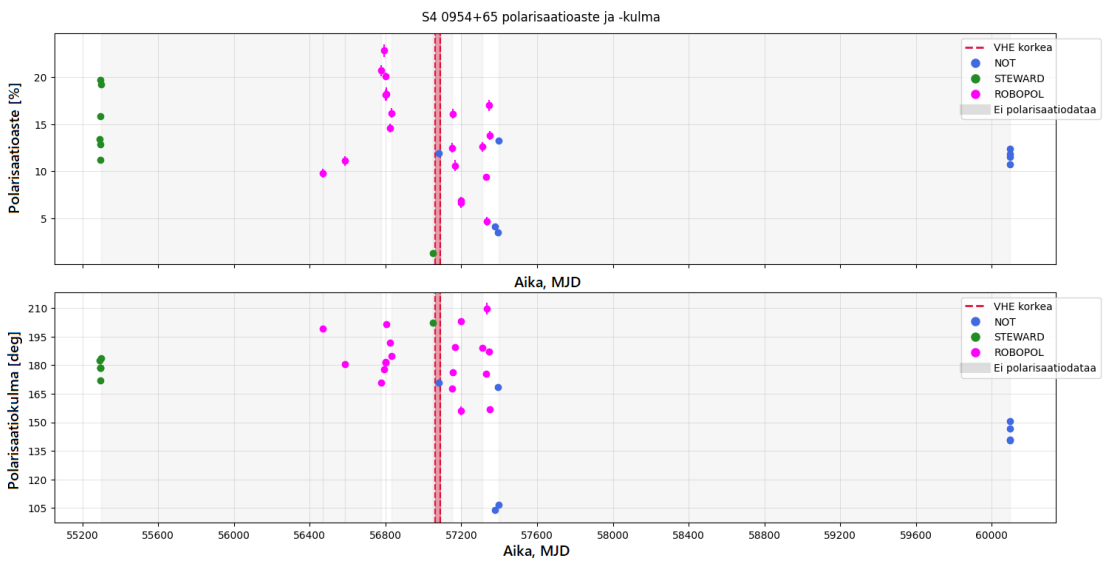
5 Liitteet

5.1 Polarisaatiokuvaajat

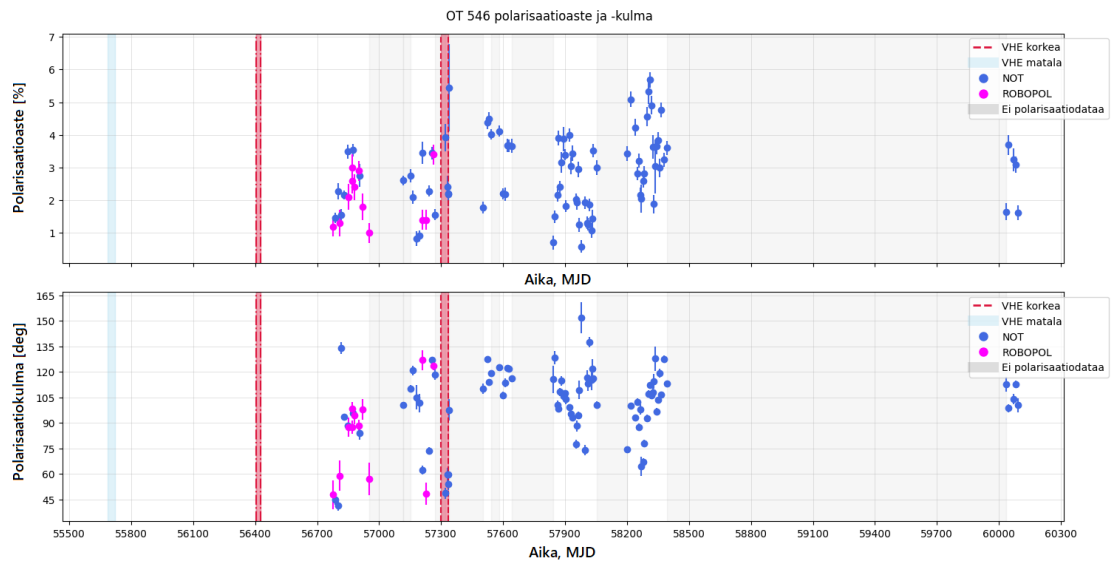
Polarisaatiokuvaajat niille otoksen kohteista, joita ei ole esitelty tutkielman tuloksissa.



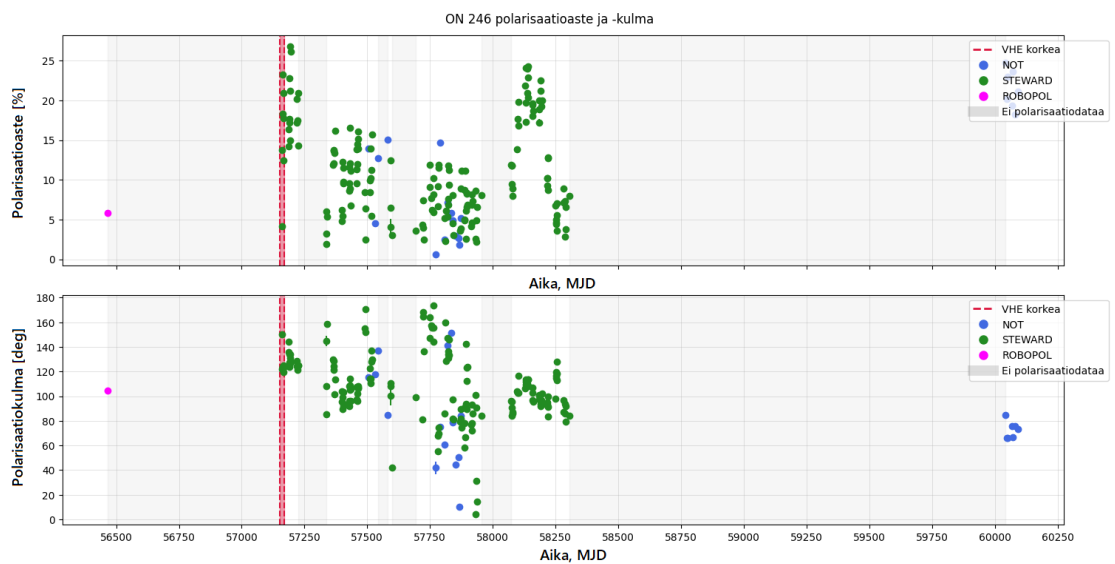
Kuva 30. TXS 0506+056 polarisaatioaste ja -kulma, havaitut VHE-purkaukset ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot.



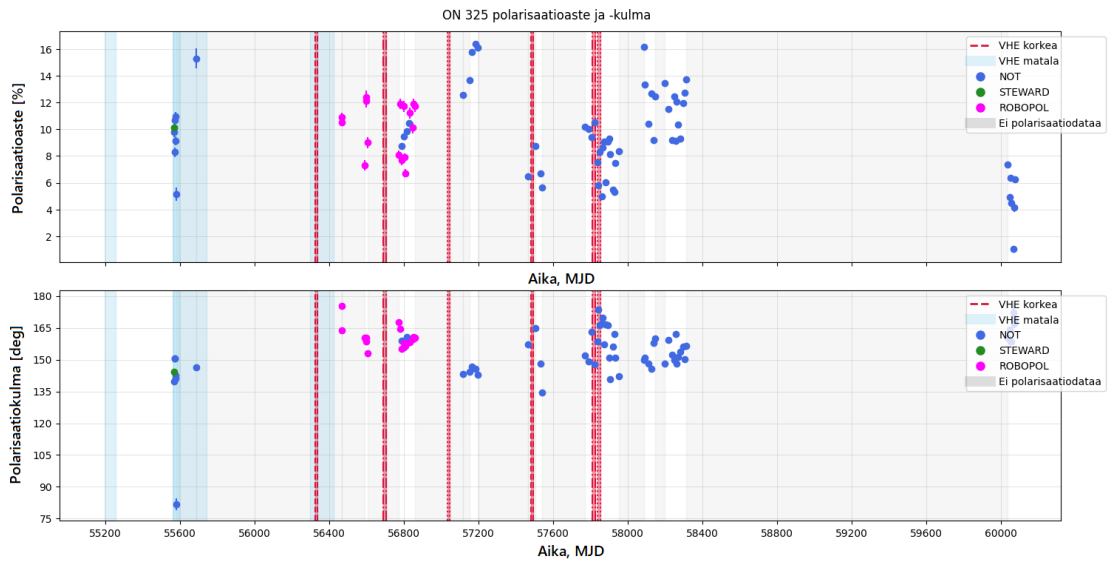
Kuva 31. S4 0954+65 Polarisaatioaste ja -kulma sekä havaittu VHE-purkaus.



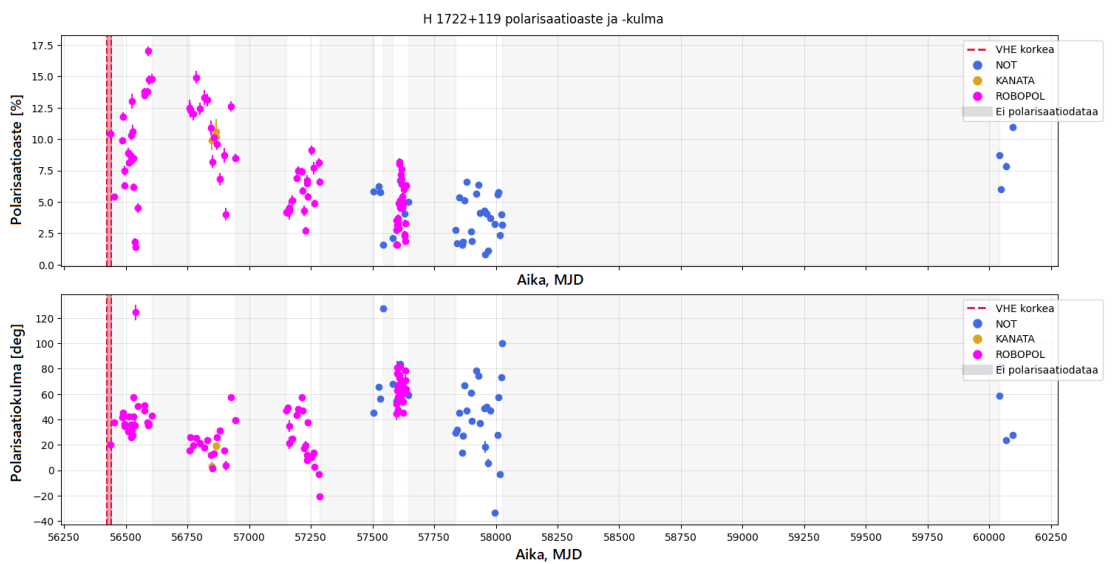
Kuva 32. OT 546 Polarisaatioaste ja -kulma, havaitut VHE-purkaukset ja matalan VHE-aktiivisuuden jakso.



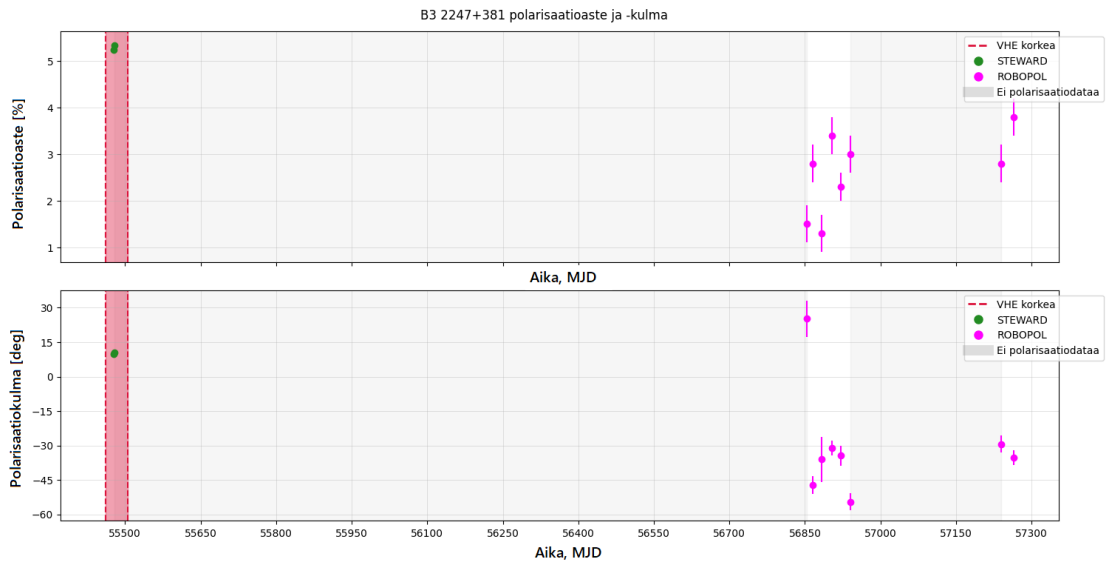
Kuva 33. ON 246 Polarisaatioaste ja -kulma sekä havaittu VHE-purkaus.



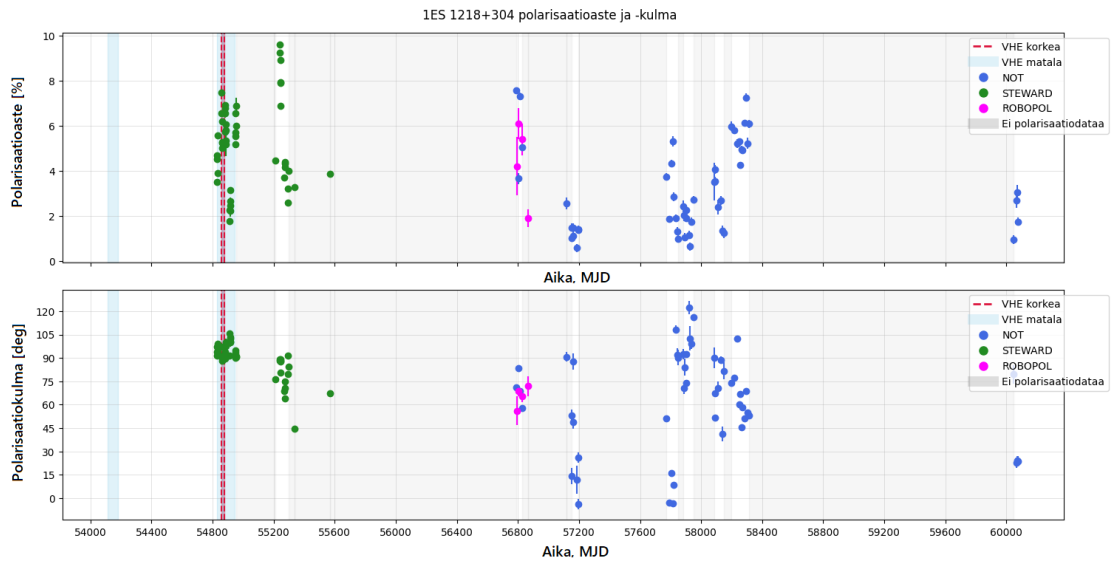
Kuva 34. ON 325 Polarisaatioaste ja -kulma, havaitut VHE-purkaukset ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot.



Kuva 35. H 1722+119 Polarisaatioaste ja -kulma sekä havaittu VHE-purkaus.



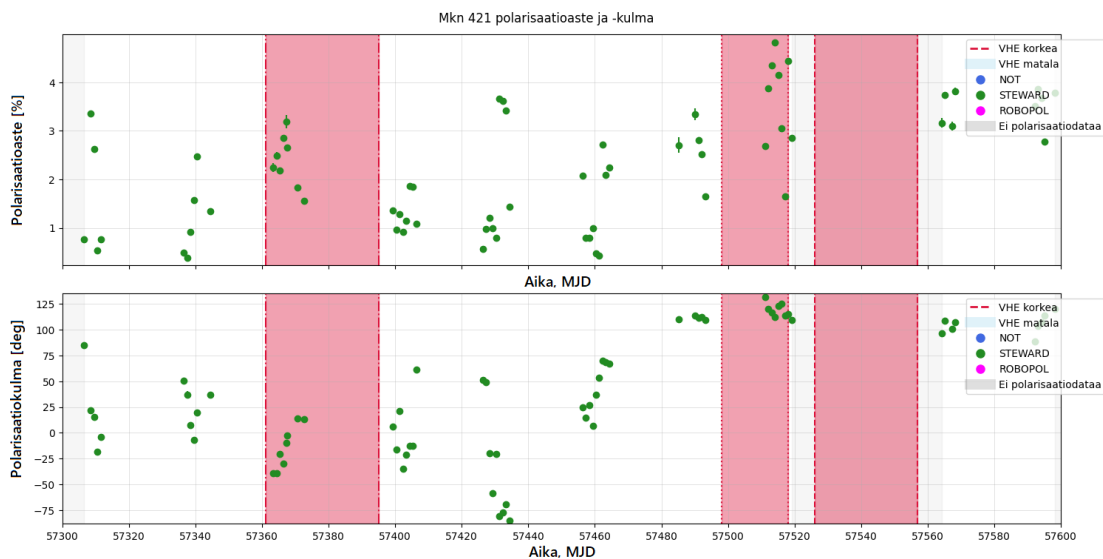
Kuva 36. B3 2247+381 polarisaatioaste ja -kulma sekä havaittu VHE-purkaus.



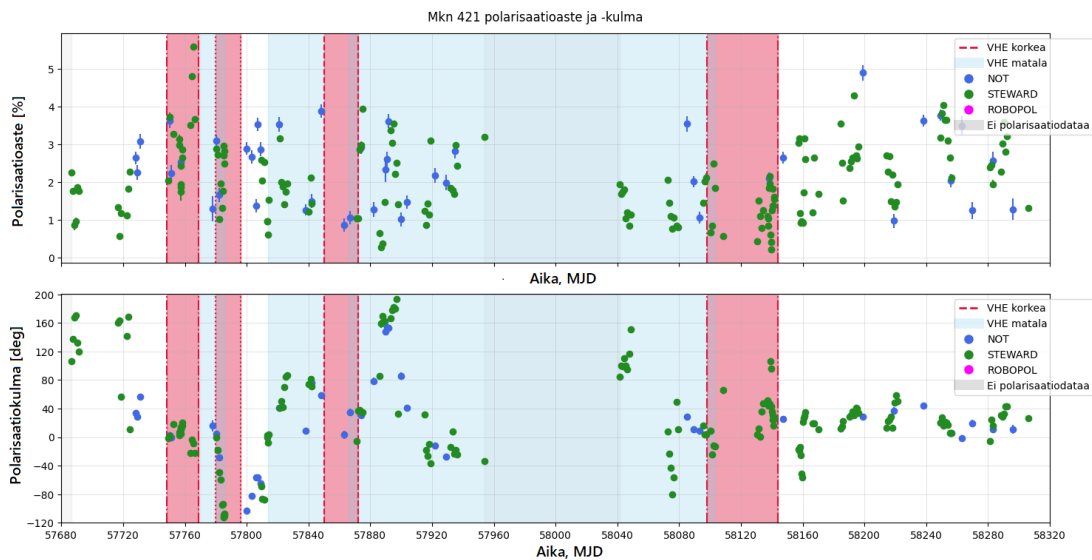
Kuva 37. 1ES 1218+304 Polarisaatioaste ja -kulma sekä havaittu VHE-purkaus ja matalan VHE-aktiivisuuden jaksot.

5.1.1 Tarkemmat kuvaajat lähemmin tarkastelluista kohteista

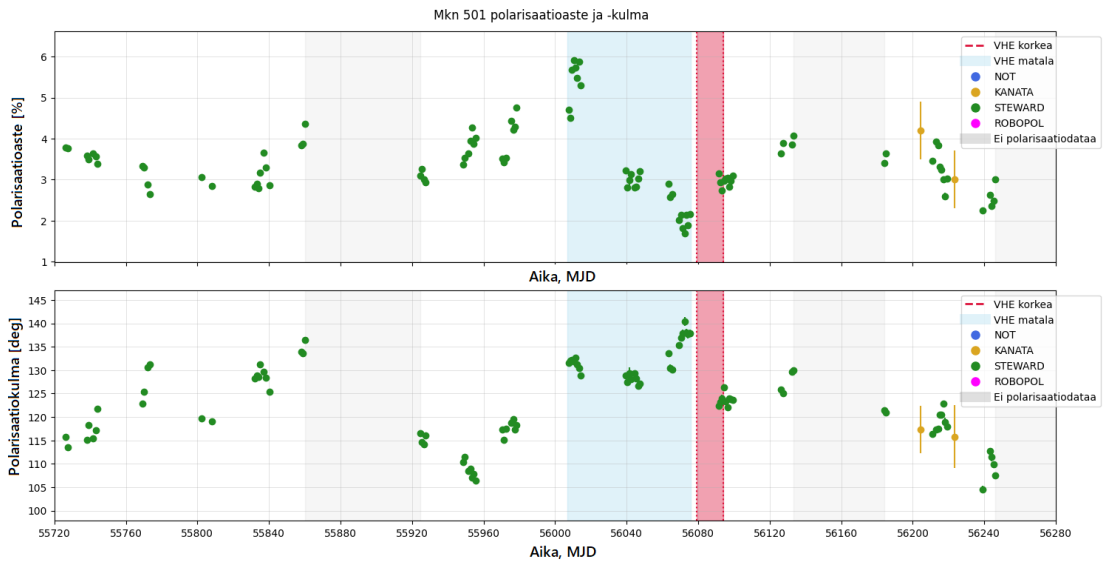
Tässä on esitelty lähemmäs VHE-purkauksia tarkennetut kuvaajat kohteille Mkn 421 ja Mkn 501.



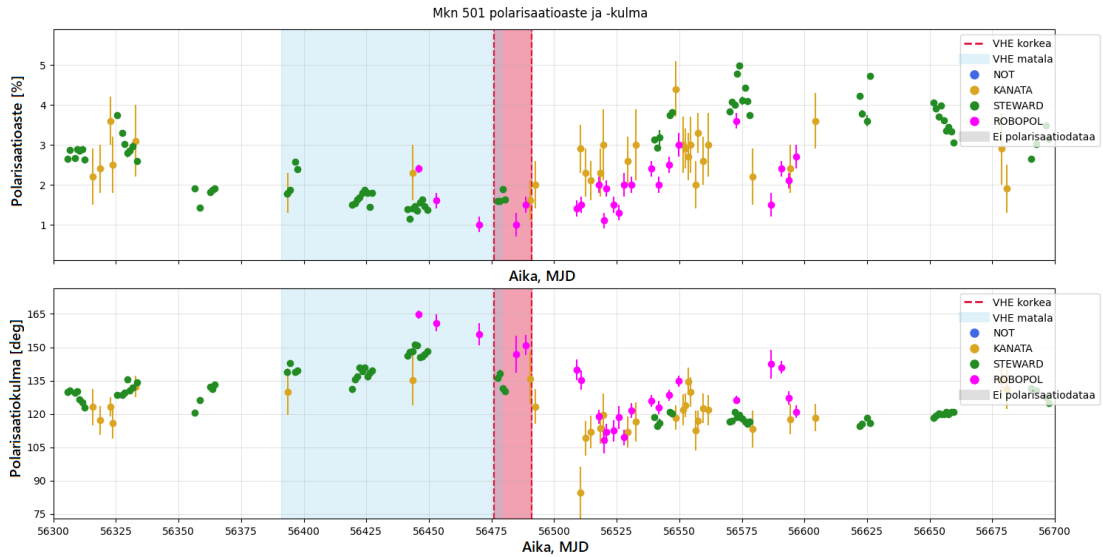
Kuva 38. Kohteen Mkn 421 kuvaaja, tarkennus lähemmäs aikaväliä MJD 57300 – 57600, jonka aikana havaittu kolme VHE-purkausta.



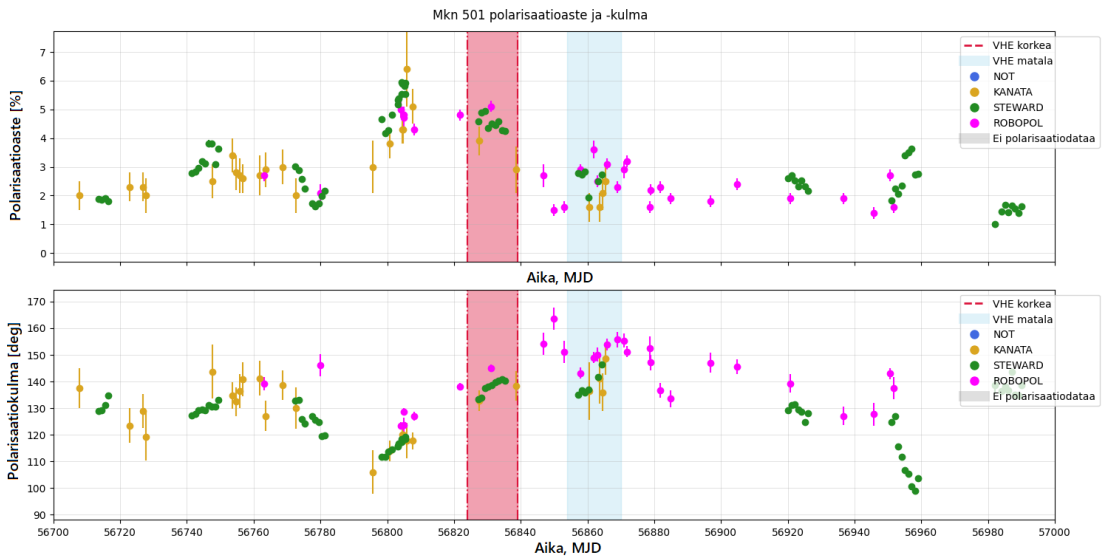
Kuva 39. Kohteen Mkn 421 kuvaaja, tarkennus lähemmäs aikaväliä MJD 57680 – 58320, jonka aikana havaittu neljä VHE-purkausta.



Kuva 40. Kohteen Mkn 501 kuvaaja, tarkennus lähemmäs polarisaatiokuvaajan toista piikkiä, aikavälillä MJD 55720 – 56280, jonka aikana tapahtuu ensin matalan VHE-aktiivisuuden jakso ja pian tämän jälkeen VHE-purkaus.



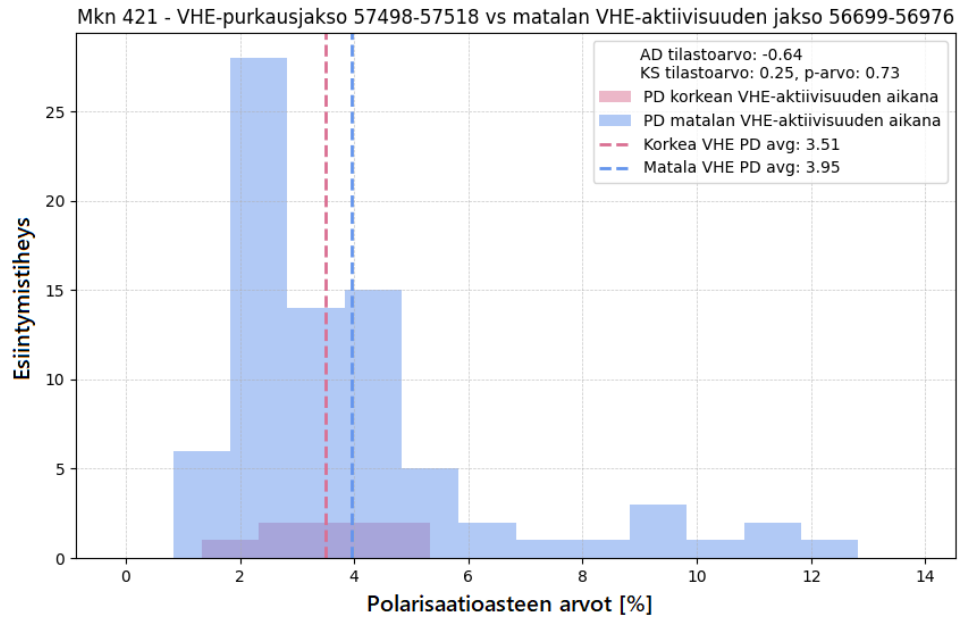
Kuva 41. Kohteen Mkn 501 kuvaaja, tarkennus lähemmäs aikaväliä MJD 56300 – 56700, jonka aikana tapahtuu ensin matalan VHE-aktiivisuuden jakso ja heti tämän jälkeen VHE-purkaus.



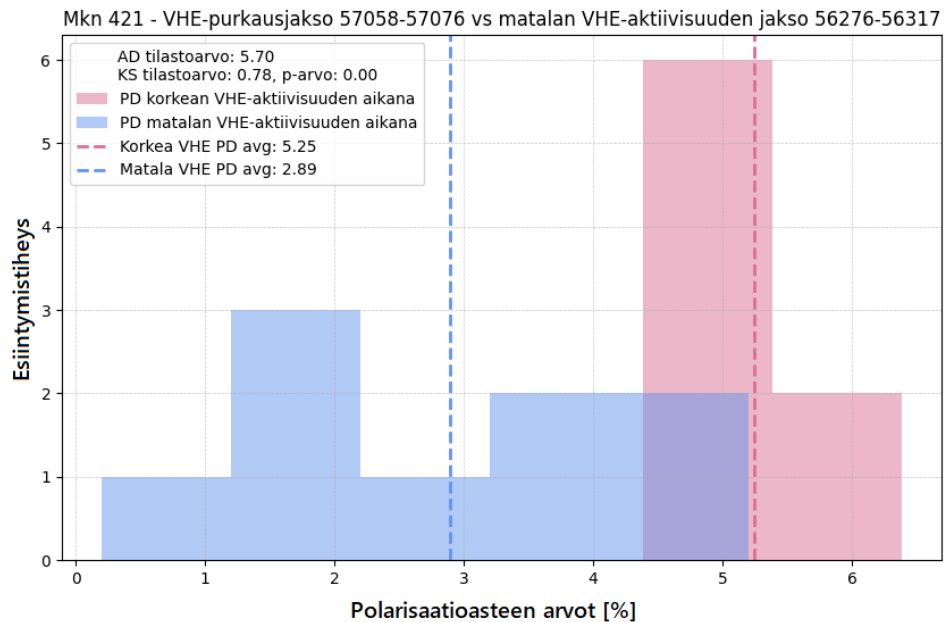
Kuva 42. Kohteen Mkn 501 kuvaaja, tarkennus lähemmäs aikaväliä MJD 56700 – 57000, jonka aikana tapahtuu VHE-purkaus ja hieman tämän jälkeen matalan VHE-aktiivisuuden jakso.

5.2 Polarisaatioasteen jakaumien tarkastelu

Kohteita tarkasteltiin ensin tilastollisesti KS-AD (Kolmogorov-Smirnov ja Anderson-Darling) -testeillä, verraten VHE jaksoja muuhun kohteesta kerättyyn dataan. Testit antoivat tulokseksi, että jakaumat poikkesivat toisistaan erittäin merkittävästi, myös silloin kuin jakaumien histogrammit olivat silmämääräisesti katsoen samankaltaiset ja jakaumien keskiarvot hyvin lähellä toisiaan. Tämän jälkeen tilastollisten testien asetelmaa muokattiin niin, että kohteilta verrattiin korkeaenergistien jaksojen mittaustuloksia tunnettuihin matalan VHE-aktiivisuuden jaksojen (eli niiden jaksojen, jolloin VHE-purkauksia ei havaittu) mittauksiin. Nämä vertailut tehtiin vain niille kohteille, joille oli varmistetusti mitattu matalaenergiisiä jaksoja (eli tiedettiin, että VHE-purkauksia ei ollut sinä aikana havaittu). Kun verrattiin yhden VHE-purkausjakson aikana mitattuja polarisaatioasteen arvoja yhden matalan VHE-aktiivisuuden jakson aikana mitattuihin polarisaatioasteen arvoihin, saatiin toisistaan merkittävästi poikkeavia tuloksia jaksoista riippuen. Esimerkkihistogrammit tästä on esitetty alla kuvissa 43 ja 44. Datamäärä oli eri kohteille ja eri ajanjaksoille hyvin vaihtelevaa, ja joidenkin jaksojen aikana oli suoritettu vain joitakin polarisaatiomittauksia (1 – 3 datapistettä). Tällainen tarkastelu ei siis antanut mielekkäitä tuloksia, joten lopullinen tilastollinen tarkastelu suoritettiin niin, että kaikkia matalan VHE-aktiivisuuden aikana mitattuja polarisaatioasteen arvoja verrattiin kaikkiin korkean VHE-aktiivisuuden aikana mitattuihin polarisaatioasteen arvoihin.



Kuva 43. Histogrammi kohteen Mkn 421 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin.



Kuva 44. Histogrammi kohteen Mkn 421 korkean VHE-aktiivisuuden jaksojen aikana mitatuista polarisaatioasteen arvoista verrattuna matalan VHE-aktiivisuuden havaintojaksojen aikana tehtyihin polarisaatioasteen arvojen mittauksiin.

Viitteet

- [1] R. Blandford, D. Meier ja A. Readhead, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **57**, 467–509 (2019).
- [2] The Event Horizon Telescope Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters* **875**, L1 (2019).
- [3] Event Horizon Telescope Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters* **930**, L12 (2022).
- [4] A. Young, *Nature* **463**, 886 (2010).
- [5] A. P Marscher *et al.*, *Nature* **452**, 966 (2008).
- [6] T. Hovatta ja E. Lindfors, *New Astronomy Reviews* **87**, 101541 (2019).
- [7] S. Ansoldi *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters* **863**, L10 (2018).
- [8] G. E. Romero *et al.*, *Space Science Reviews* **207**, 5–61 (2017).
- [9] J. Krolik ja T. Matteo, *American Journal of Physics* **68**, 489 (2000).
- [10] J. Otero-Santos *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **523**, 4504–4519 (2023).
- [11] T. Hovatta *et al.*, *Astronomy and Astrophysics* **596**, A78 (2016).
- [12] S. P. Wakely ja D. Horan, kirjassa *International Cosmic Ray Conference*, Vol. 3 of *International Cosmic Ray Conference* (PUBLISHER, 2008), pp. 1341–1344.
- [13] J. Jormanainen *et al.*, kirjassa *37th International Cosmic Ray Conference* (PUBLISHER, 2022), p. 867.
- [14] MAGIC Collaboration and V. A. Acciari *et al.*, *Astronomy and Astrophysics* **623**, A175 (2019).
- [15] H. Abe *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **529**, 3894–3911 (2024).
- [16] Y. Liodakis, *Bulletin of the AAS* **54**, (2022).
- [17] A. P. Marscher, kirjassa *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, toimittanut T. Belloni (Springer Berlin Heidelberg, 2010), Vol. 794, p. 173.
- [18] J. T. Stocke *et al.*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **76**, 813 (1991).
- [19] A. Konigl and A. R. Choudhuri, *The Astrophysical Journal* **289**, 188 (1985).
- [20] M. Nakamura and D. Garofalo and D. L. Meier, *The Astrophysical Journal* **721**, 1783 (2010).

- [21] M. Nakamura and D. L. Meier, *The Astrophysical Journal* **785**, 152 (2014).
- [22] C. I. Bjornsson, *The Astrophysical Journal* **260**, 855 (1982).
- [23] T. W. Jones *et al.*, *The Astrophysical Journal* **290**, 627 (1985).
- [24] A. P. Marscher, *The Astrophysical Journal* **780**, 87 (2014).
- [25] H. Zhang *et al.*, *The Astrophysical Journal* **862**, L25 (2018).
- [26] A. P. Marscher *et al.*, *The Astrophysical Journal* **710**, L126 (2010).
- [27] V. Pavlidou *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **442**, 1693 (2014).
- [28] E. Angelakis *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **463**, 3365 (2016).
- [29] E. Massaro *et al.*, *Astrophysics and Space Science* **357**, 75 (2015).
- [30] G. Helou *et al.*, kirjassa *The NASA/IPAC Extragalactic Database, Information & On-Line Data in Astronomy*, toimittanut D. Egret ja M. A. Albrecht (PUBLISHER, 1995), Vol. 203, p. 95.
- [31] K. Nilsson *et al.*, *Astronomy and Astrophysics* **620**, A185 (2018).
- [32] M. Ajello *et al.*, *The Astrophysical Journal* **892**, 105 (2020).
- [33] M. Actis *et al.*, *Experimental Astronomy* **32**, 193 (2011).
- [34] J. Aaltonen, Master's thesis, University of Turku, 2023.
- [35] CTAO, <https://www.ctao.org>, 18.9.2024.
- [36] P. S. Smith *et al.*, arXiv e-prints arXiv:0912.3621 (2009).
- [37] D. Blinov *et al.*, RoboPol: AGN polarimetric monitoring data, 2020.
- [38] F. Ochsenbein *et al.*, The VizieR database of astronomical catalogues.
- [39] R. Itoh *et al.*, *The Astrophysical Journal* **833**, 77 (2016).