

Röntgenpulsareiden tutkiminen  
röntgenpolarimetrisillä tekniikoilla

Kandidatutkielma

Turun yliopisto

Fysiikka

2025

Fil. yo. Rasmus Hyvärinen

Tarkastajat:

Doc. Sergey Tsygankov

Prof. Juri Poutanen

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

**Hyvärinen, Rasmus** Röntgenpulsareiden tutkimus röntgenpolarimetrisilla tekniikoilla

Kandidatutkielma, 17

Fysiikka

Huhtikuu 2025

---

Neutronitähdet edustavat maailmankaikkeuden äärimmäisimpiä aineen olomuotoja, joille ovat ominaisia valtava tiheys, voimakkaat gravitaatiokentät ja äärimmäiset magneettikentät. Erityisesti röntgenpulsarit (engl. *X-ray pulsars*, XRP) ovat voimakkaasti magnetoituneita neutronitähtiä kaksoistähtijärjestelmissä, joissa ne keräävät ainetta kumppanitähdestään ja lähettävät röntgensäteilyä. Näiden kohteiden tutkimus tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden tarkastella perustavanlaatuisia fysiikan ilmiöitä, kuten plasman käyttäytymistä voimakkaissa magneettikentissä ja relativistisia gravitaatioilmiöitä.

Keskeinen menetelmä röntgenpulsarien tutkimuksessa on röntgenpolarimetria, joka mahdollistaa röntgensäteilyn polarisaatio-ominaisuuksien mittaamisen. Näiden mitausten avulla voidaan saada tietoa neutronitähtien magneettikentän rakenteesta, säteilyn syntymekanismeista ja kertymisprosessien muodostumisesta. Viimeaikainen kehitys röntgenpolarimetriassa, erityisesti IXPE-satelliitin ansiosta, on merkittävästi laajentanut ymmärrystämme röntgenpulsareista. IXPE:n havainnot ovat kuitenkin paljastaneet merkittäviä ristiriitoja teoreettisten ennusteiden ja havaittujen polarisaatioasteiden välillä, mikä viittaa siihen, että neutronitähtien säteilyprosessit ovat monimutkaisempia kuin aiemmin oletettiin.

Tutkielmassa on käytetty ChatGPT-tekoälyä oikeinkirjoituksen tarkistamiseen, sanonnanmuotoiluun ja joidenkin sanojen kääntämiseen.

Asiasanat: neutronitähdet, röntgenpulsarit, röntgenpolarimetria, kertymä, magneettikentät, polarisaatioaste, polarisaatiokulma

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Neutronitähdet</b>	<b>2</b>
<b>2 Röntgenpulsarit</b>	<b>2</b>
2.1 Kertymä . . . . .	4
2.2 Geometria . . . . .	4
<b>3 Röntgenpolarimetria</b>	<b>5</b>
3.1 Polarisaatio . . . . .	5
3.2 Modernit röntgenpolarimetrit ja IXPE-satelliitti . . . . .	5
3.3 Valosähköiset röntgenpolarimetrit . . . . .	7
3.4 Compton/Thomson-sirontapolarimetrit . . . . .	8
3.5 Bragg-heijastuspolarimetrit . . . . .	9
<b>4 Röntgenpulsareiden polarisaatio</b>	<b>10</b>
4.1 Teoreettiset odotukset . . . . .	10
4.2 IXPE:n havainnot ja mahdolliset selitykset tuloksille . . . . .	11
4.3 Polarisaatiokulman muutokset ja niiden merkitys . . . . .	13
<b>5 Päätelmät</b>	<b>14</b>

## Johdanto

Neutronitähdet ovat tähtien jäänteitä, jotka ovat äärimmäisen tiheitä, voimakkaan magneettikentän omaavia pääosin neutroneista koostuvia kappaleita. Osa niistä lähettää myös paljon korkeaenergistä säteilyä. Ne muodostuvat massiivisten tähtien supernovaräjähdyksen seurauksena, jolloin tähden ydin romahtaa neutroneista koostuvaksi tiiviiksi kappaleeksi. Erityisen kiinnostavia kohteita ovat röntgenpulsarit, jotka ovat voimakkaasti magnetoituneita neutronitähtiä kaksoistähtijärjestelmissä. Näissä järjestelmissä neutronitähti kerää materiaalia kumppanitähdestään, mikä synnyttää röntgensäteilypulseja.

Röntgenpulsareiden tutkimus tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden tarkastella perustavanlaatuisia fysiikan ilmiöitä, kuten äärimmäisiä gravitaatio-olosuhteita ja plasman käyttäytymistä voimakkaiden magneettikenttien vaikutuksesta. Yksi keskeisistä tutkimusmenetelmistä on röntgenpolarimetria, jonka avulla voidaan mitata röntgensäteilyn polarisaatiota. Polarisaatiomittaukset antavat tietoa säteilylähteiden geometriasta, magneettikentän rakenteesta ja neutronitähden pintakerroksista.

Viime vuosina teknologian kehitys on mahdollistanut entistä tarkemmat röntgenpolarimetriset mittaukset, erityisesti Imaging X-ray Polarimetry Explorer -satelliitin ansiosta. Tämä on avannut uusia näkökulmia röntgenpulsareiden tutkimukseen ja haastanut aiemmat teoreettiset mallit, erityisesti koskien odotettua polarisaatioastetta. IXPE:n havainnot ovat osoittaneet, että neutronitähkien säteilyprosessit ja magneettikenttien rakenteet ovat monimutkaisempia kuin aiemmin oletettiin.

Tässä kandidatuksessa käsitellään röntgenpulsareiden ominaisuuksia, niiden säteilymekanismeja sekä röntgenpolarimetriaan perustuvia tutkimusmenetelmiä. Eri-tyistä huomiota kiinnitetään viimeaikaisiin havaintoihin röntgenpulsarien polarisaatiosta ja niiden vaikutuksiin teoreettisiin malleihin.

# 1 Neutronitähdet

Neutronitähdet ovat tähtien jäänteitä, jotka koostuvat nimensä mukaan pääosin neutroneista. Ne ovat erittäin tiheitä, yleensä noin 10–20 kilometriä halkaisijaltaan, mutta niiden massa on noin 1–2 Auringon massaa.

Neutronitähdet syntyvät massiivisten O- tai B-tyyppin superjättiläistähtien ytimen romahtaessa supernovaräjähdyksen yhteydessä, kun tähden alkuperäinen massa on yli 8–10 Auringon massaa. [1]

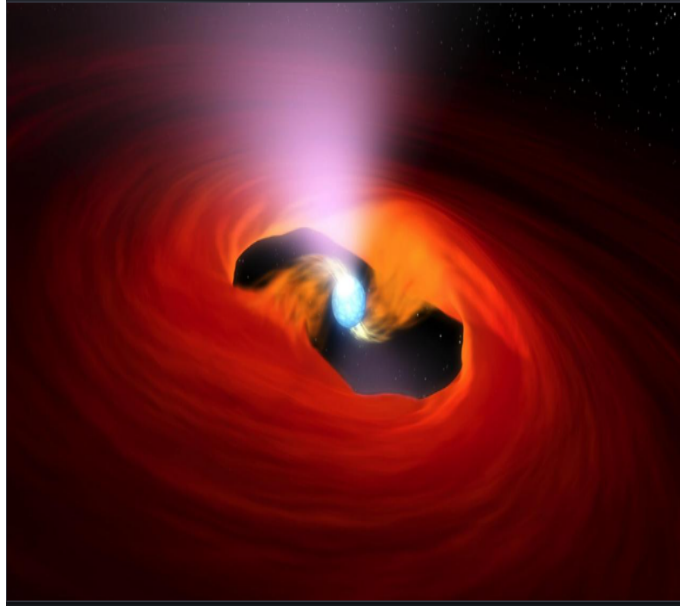
Tämän nopean muutoksen seurauksena osa vanhan tähden energiasta vapautuu supernovaräjähdyksessä, ja loput muuntuvat jäljelle jäävän neutronitähden energiaksi, pääasiassa sen pyörimisenergiaksi. Nopeimmin pyörivät neutronitähdet voivat pyöriä jopa 700 kierrosta sekunnissa. Neutronitähdille tyypillinen vahva magneettikenttä puolestaan syntyy magneettivuon säilymisen vuoksi.

Neutronitähtiä havaitaan pääosin niiden voimakkaan säteilyn kautta. Ne voivat lähettää ulospäin erittäin voimakkaan magneettikenttensä vuoksi kapeita radiopulsseja (pulsarit), jotka havaitaan Maan teleskoopeilla säännöllisinä, nopeasti toistuvina välähdyksinä. Lisäksi neutronitähtiä voidaan havaita röntgensäteilynä, joka syntyy niiden kuumasta pinnasta tai niiden ympärille kertyvästä aineesta. Röntgensäteily syntyy, kun neutronitähteä ympäröivän ionisoituneen kaasun kineettinen energia vapautuu röntgensäteilynä. [2]

Neutronitähdet esiintyvät pääosin yksin tai kaksoistähtijärjestelmässä, jossa neutronitähdellä on massiivinen optinen kumppani, kuten toinen tähti.

# 2 Röntgenpulsarit

Röntgenpulsarit ovat vahvasti magnetoituneita neutronitähtiä, jotka kerryttävät ainetta kaksoistähtijärjestelmissä, joissa niillä on massiivinen optinen kumppani. Pääosin pulsarit ovat nuoria korkean massan kaksoistähtijärjestelmiä, koska nuorien



Kuva 1. Taiteellinen näkemys, siitä miltä neutronitähti kertymäkiekon kanssa näyttää ja miten röntgensäteet purkautuvat tähden magneettisen akselin kautta. [4]

neutronitähtien magneettikenttä on huomattavasti voimakkaampi. Magneettikenttä kuitenkin heikkenee ajan kuluessa, jolloin ne eivät enää mahdollista voimakkaan pulsarin muodostumista. Röntgenpulsarit voivat myös esiintyä matalamassaisissa järjestelmissä, mutta yleensä heikon magneettikentän omaavat neutronitähdet eivät useimmiten ole pulsareita, sillä ne eivät tuota havaittavia pulsseja. [3]

Röntgenpulsareita tutkitaan, koska ne tarjoavat ainutlaatuisen mahdollisuuden tarkastella perustavanlaatuisia fysiikan ilmiöitä äärimmäisissä olosuhteissa, kuten erittäin voimakkaan magneettikentän, korkean lämpötilan ja valtavan massatiheyden alaisuudessa. [1] Erityisesti XRP:n erittäin voimakas magneettikenttä tekee niistä mielenkiintoisia tutkimuskohteita, koska laboratorio-olosuhteissa saadaan aikaiseksi vain noin  $10^6\text{G}$  magneettikenttiä, mutta XRP:n kentät voivat olla jopa luokkaa  $10^{15}\text{G}$ .

## 2.1 Kertymä

Röntgenpulsarien säteily saa energiansa ionisoituneen kaasun kertymisestä voimakkaasti magnetoituneiden pyörivien neutronitähtien pinnalle [3].

Tyypillisesti kertymä muodostuu kaksoistähtijärjestelmässä, kun kumppanitähti luovuttaa materiaalia, joka mahdollistaa kertymisprosessin. Tämä materiaali muodostaa neutronitähden ympärille joko kertymäkiekon tai kertyy tähden tuulen kautta. Kun kertymisvirta saavuttaa tietyn etäisyyden neutronitähdestä, magnetosfäärin säteen kohdalla, neutronitähden voimakas magneettikenttä estää virran liikkumisen magneettikentän viivojen poikki. Magnetosfäärin säteen alueella tapahtuvat epävakaudet ohjaavat virran magneettikentän viivoille, joita pitkin aine virtaa kohti neutronitähden pintaa. Lopulta kertymisvirta saapuu tähden pinnalle pienillä alueilla, jotka sijaitsevat lähellä magneettisia napoja, joissa virran energia vapautuu pääasiassa röntgensäteilynä. [1]

## 2.2 Geometria

Röntgenpulsareiden säteilyalueen geometria oli pitkään tuntematon, ja sen selvittäminen on ollut avainasemassa kohteiden tarkemmassa tutkimuksessa. Tämä oli mahdollista analysoimalla niistä tulevan säteilyn polarisaatiota.

Säteilyalueen geometrinen rakenne ja vastaava XRP:n säteilykuvio riippuvat voimakkaasti massan kertymisnopeudesta. Erityisesti on teoreettisesti osoitettu, että on olemassa niin sanottu kriittinen kirkkaus, joka määrittää kaksi pääasiallista kertymisen tilaa. Tämän rajan alapuolella säteily syntyy neutronitähden pinnalla sijaitsevista kuumista pisteistä, kun taas rajan yläpuolella säteilypaine kykenee pysäyttämään putoavan aineen ennen kuin se saavuttaa tähden pinnan. Tällöin alkaa muodostua kertymäpylväs, mikä muuttaa säteilyalueen rakennetta merkittävästi. [1]

## 3 Röntgenpolarimetria

### 3.1 Polarisaatio

Polarisaatio on tähtitieteessä käytetty erittäin tärkeä työkalu. Säteilyn polarisaatio auttaa meitä ymmärtämään kappaleen perustavanlaatuisia ominaisuuksia, kuten sen pinnan muotoja, materiaaleja ja magneettikentän voimakkuutta, sekä sitä mahdollisesti ympäröivää pölyä. Röntgenpulsareiden tapauksessa tutkitaan tietenkin röntgensäteiden polarisaatiota.

Röntgensäteilyn polarisaatio tarkoittaa ilmiötä, jossa röntgensäteet värähtelevät tietyssä suunnassa tai tasossa. Luonnollinen röntgensäteily ei yleensä ole polarisoitunutta, mutta se voi polarisoitua esimerkiksi sironnassa tai heijastuksessa. [5]

Tässä tutkimuksessa keskitytään erityisesti magneettikenttään ja kertymäkiekon rakenteeseen. Tämä kaikki pystytään selvittämään röntgenpolarimetrian avulla. Ongelmaksi kuitenkin muodostui se, että ei ollut olemassa riittävän tarkkoja röntgenpolarimetrejä.

### 3.2 Modernit röntgenpolarimetrit ja IXPE-satelliitti

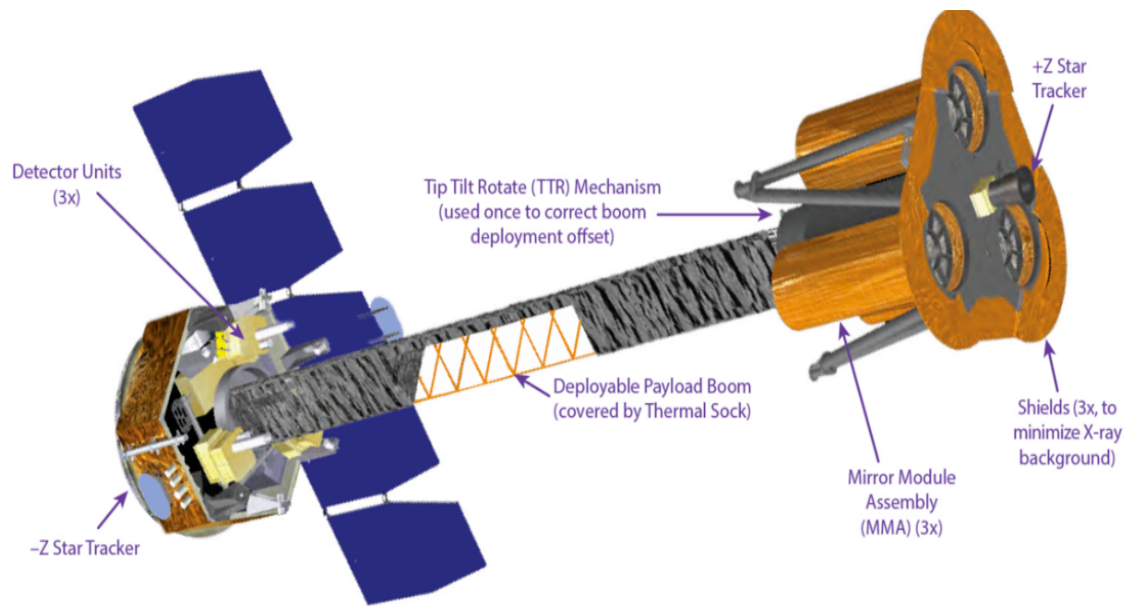
Saatavilla olevat röntgeninstrumentit pystyvät mittaamaan röntgensäteiden intensiteetin, röntgensäteiden energiat sekä röntgensäteiden sijainnit, joissa röntgensäde vapauttaa varausta vuorovaikutusten kautta. Röntgensäteilyn polarisaatiota ei voida mitata suoraan, röntgensäteiden on ensin käytävä läpi vuorovaikutus, joka muuntaa polarisaatitiedon suoraan mitattavaksi suureeksi, kuten intensiteetiksi tai sijainniksi. [5]

Viime vuosina röntgenpolarimetrien kehityksessä on tapahtunut merkittäviä edistysaskelaita, jotka ovat mahdollistaneet aiempaa tarkemmat mittaukset. Uusien detektori- ja optiikkateknologioiden kehitys on mahdollistanut uuden sukupolven astrofysikaalisten röntgenpolarimetrien rakentamisen. Merkittävin edistysaskel on

korkean spatiaalisen resoluution kaasulla täytettyjen röntgendetektorien kehitys ja niiden käyttö polarimetreinä hyödyntämällä fotoelektristä ilmiötä. Tämä teknologia tarjoaa huomattavan tehokkuuden kasvun verrattuna aiempiin laitteisiin ja mahdollistaa polarimetrien käytön laajassa joukossa astrofysikaalisia kohteita. [5]

Röntgenpulsareiden tutkimuksessa käytettävien mittauslaitteiden joukkoon saatiin merkittävä lisäys, kun Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) laukaistiin joulukuussa 2021.

IXPE koostuu kolmesta rinnakkaisesta röntgenteleskoopista, joista kukin koostuu röntgenpeiliyksiköistä ja lineaariseen polarisaatioon herkistä pikselöidyistä kaasupikselidetektoreista. Nämä mahdollistavat polarimetriset mittaukset 2–8 keV:n energiakaistalla. [6]



Kuva 2. Kuvassa on esitetty IXPE-satelliitin tärkeimmät komponentit. Satelliitti koostuu kolmesta röntgenpeiliyksiköstä (Mirror Module Assembly, MMA) ja niihin liittyvistä suojuuksista, jotka vähentävät röntgen-taustasäteilyä. Pitkä, lämpösuojaalla päällystetty teleskooppipuomi (Deployable Payload Boom) erottaa peiliyksiköt ja ilmaisimet, mikä mahdollistaa tarkan mittaustarkkuuden. Ilmaisinyksiköt (Detector Units) sijaitsevat satelliitin rungossa, ja tähtiseurantakamerat (Star Trackers) auttavat kohdistamaan satelliitin tarkasti avaruudessa. Lisäksi Tip Tilt Rotate (TTR)-mekanismia on käytetty korjaamaan puomin käyttöönottoon liittyviä poikkeamia. [7]

### 3.3 Valosähköiset röntgenpolarimetrit

Fotoelektronipolarimetria perustuu röntgenfotonien ja atomien väliseen vuorovaikutukseen, jossa fotoni ionisoi atomin ja vapauttaa elektronin sisäkuorelta, niin sanottu fotoelektronin. Vapautuvan fotoelektronin lähtösuunta määräytyy fotonin sähkökentän suunnan mukaan, mikä tekee tästä ilmiöstä erityisen soveltuvan polarisaation analysointiin. [5]

Menetelmän toimintaperiaatteena on, että fotoelektronien lähtösuunta on ensisijaisesti yhdensuuntainen fotonin sähkökentän kanssa. Tämä riippuvuus mahdollistaa polarisaation määrittämisen analysoimalla vapautuneiden fotoelektronien kulkuun. Lisäksi fotoelektronin jättämät ionisoituneet atomit muodostavat jäljen,

jonka alkuosan tarkka analysointi on avainasemassa polarisaation määrittämisessä. [8] Yleisimmin käytetään kaasupohjaisia ilmaisimia, kuten Gas Pixel Detector -ilmaisimia, sillä kaasu mahdollistaa riittävän pitkien fotoelektroniratojen muodostumisen. [9]

Fotoelektronipolarimetrialla on useita etuja, joista merkittävimpiä ovat suuri herkkyys erityisesti energioilla 2–10 keV. Haasteita aiheuttavat kuitenkin jälkien tarkka uudelleenrakentaminen sekä ionisaation hajonnasta ja elektronien diffuusion johtuvat mittaustarkkuuden heikkenemiset. Menetelmää sovelletaan erityisesti mustien aukkojen ja neutronitähtien säteilyn polarisaation tutkimiseen, sillä näiden kohteiden voimakkaat magneettikentät ja äärimmäiset olosuhteet voivat aiheuttaa merkittäviä polarisaatioilmiöitä. [5]

### 3.4 Compton/Thomson-sirontapolarimetrit

Compton-sirontamenetelmä perustuu fotonien sirontaan elektroneista. Röntgen- tai gammasäteen sirontakulma ja intensiteetti riippuvat fotonin polarisaatiosta, minkä ansiosta ilmiötä voidaan hyödyntää polarimetrisissä mittauksissa. Sirontaprosessissa fotoni menettää energiaa siirtäessään liikemäärää elektronille, ja sirontakulma määrää fotonin lopullisen energian. Polarisaatio puolestaan aiheuttaa asymmetrian sironneiden fotonien kulmajakaumassa. [5]

Matalilla energioilla muutamien keV:ien alueella ilmiö lähestyy Thomson-rajatilaa, jossa 90 asteen sironnalla saavutetaan suurin mahdollinen polarisaatiomoduulaatio, jopa 100 prosenttia. Röntgensäteily ollessa korkeaenergisempää, se voi muodostaa heijastuvan elektronin, jolloin sekä sironneet fotonit että elektroni voidaan havaita. [5]

Compton-sironta soveltuu erityisen hyvin korkeiden energioiden alueelle, 10 keV – 1 MeV, mutta menetelmän haasteisiin kuuluvat taustakohinan hallinta ja sirontaprosessin monimutkaisuus, mikä edellyttää tarkkaa datan analyysiä. Menetelmää

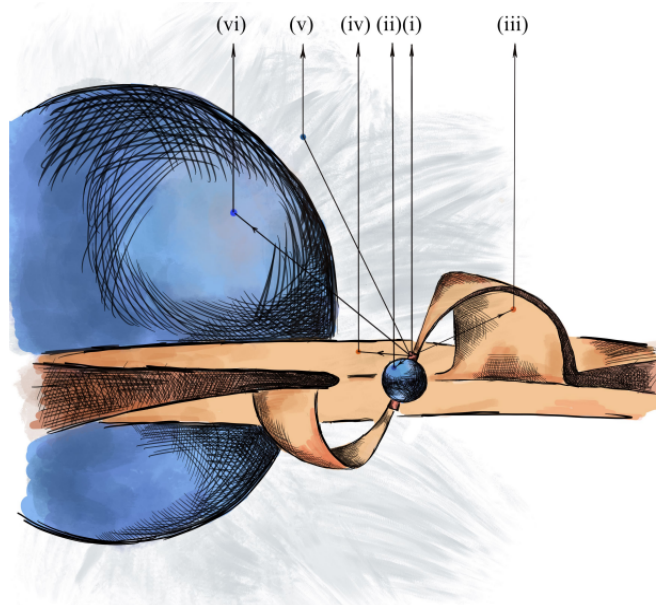
hyödynnetään erityisesti korkeaenergisten astrofysikaalisten ilmiöiden, kuten gammapurkausten, tutkimuksessa. Polarisaation muutokset näissä ilmiöissä voivat tarjota arvokasta tietoa suihkumekanismeista ja magneettikentistä. [5]

### 3.5 Bragg-heijastuspolarimetrit

Bragg-heijastusmenetelmä perustuu johdonmukaiseen sirontaan jaksollisessa väliaineessa, kuten atomikiteessä tai monikerroksisessa rakenteessa, jossa röntgensäteet heijastuvat kiderakenteen tasoista tietyllä kulmalla. Ilmiö noudattaa Braggin lakia, jonka mukaan heijastus on tehokasta, kun säteen aallonpituus on verrannollinen kiteen tasojen väliseen etäisyyteen. [5]

Tämä menetelmä toimii tehokkaimmin matalilla energioilla, alle 10 keV:n alueella, ja hyödyntää kiteiden heijastavuutta, joka riippuu fotonien polarisaatiosta. Heijastuvuuden voimakas riippuvuus heijastuskulmasta mahdollistaa suuren polarisaatiomoduulaation, jopa yli 99 prosenttia. Käytössä voi olla joko luonnonkiteitä, kuten grafiittia, tai monikerrosrakenteita, jotka tarjoavat joustavuutta energiara-jauksen hallintaan. [5]

Bragg-heijastusmenetelmä tarjoaa poikkeuksellisen tarkkuuden ja suuren modu-lointikertoimen, mutta sen käyttö on rajattu kapeisiin energiakaistoihin. Monikerrosrakenteiden hyödyntäminen mahdollistaa kuitenkin energiara-jauksen optimoinnin ja heijastuvuuden parantamisen. Sovelluskohteina Bragg-heijastusta on käytetty muun muassa Crab-sumun röntgenpolarisaation mittaamiseen. Se on erityisen hyödyllinen tarkkuusmittauksissa, joissa energiara-jaus ei ole ongelma. [5]

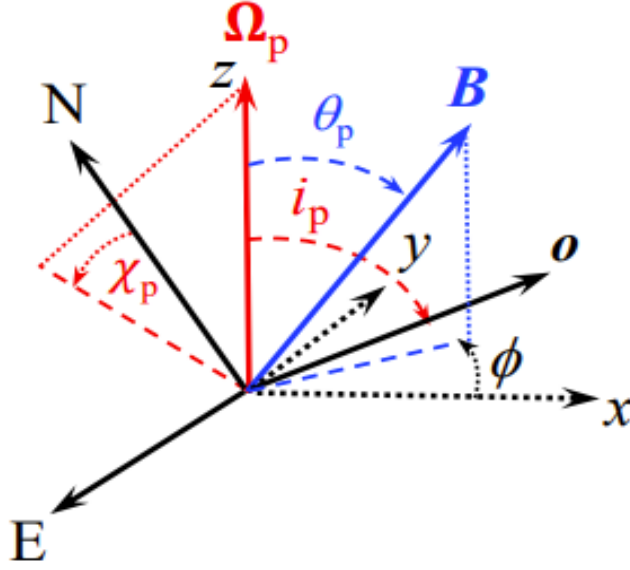


Kuva 3. Mahdolliset polarisoidun säteilyn lähteet XRP:ssä: (i) kuumapisteen synnynnäinen polarisaatio, (ii) heijastus neutronitähden pinnasta, (iii) heijastus kertymäverhosta, (iv) heijastus kertymäkiekosta (ja kertymäkiekon tuulesta), (v) sironta tähtituulella, ja (vi) heijastus optisesta kumppanitähdestä. [10]

## 4 Röntgenpulsareiden polarisaatio

### 4.1 Teoreettiset odotukset

Teoreettisten mallien perusteella röntgenpulsarien röntgensäteilyn odotettiin olevan voimakkaasti polarisoitunutta, jopa 80 % tasolla. Tämä johtuu neutronitähden voimakkaan magneettikentän aiheuttamasta väliaineen kahtaistaittumisesta (engl. *birefringence*). Kahtaistaittuminen tarkoittaa säteilyn hajoamista kahdeksi säteeksi, kun se kulkee aineen läpi. Fotonien kulkua tällaisessa väliaineessa voidaan tarkastella kahden normaalin polarisaatiotilan kautta. Röntgensäteilyssä niitä kutsutaan tavallisiksi O- ja epätavallisiksi X-fotoneiksi. Eri tiloissa fotonien sähkökenttävektori värähtelee eri suuntiin suhteessa tasoon, joka määräytyy magneettikentän ja fotonin liikemäärän suunnista. Tämän seurauksena fotonien ja aineen vuorovaikutuksen poikkipinta-ala vaihtelee merkittävästi polarisaatiotilasta riippuen. Erityisesti syklotronitaajuuden alapuolella X-tilan säteilyn Compton-sironnan poikkipinta-ala



Kuva 4. Pulsarin geometria RVM-mallissa pulsarin kulmaliike-impulssi  $\Omega_p$  muodostaa kulman  $i_p$  havaitsijan suuntaan (o). Magneettinen vinouskulma  $\theta_p$  on kulma magneettisen dipolin B ja pyörimisakselin välillä. Pulsarin vaihe  $\phi$  on vektorin B atsimuuttikulma tasossa kohtisuorassa  $\Omega_p$ :n suhteen. Asentokulma  $\chi_p$  mitataan pohjoisen (N) ja  $\Omega_p$ :n projektoiden välissä taivaan tasolla. [11]

on huomattavasti suurempi kuin O-tilan. [11]

## 4.2 IXPE:n havainnot ja mahdolliset selitykset tuloksille

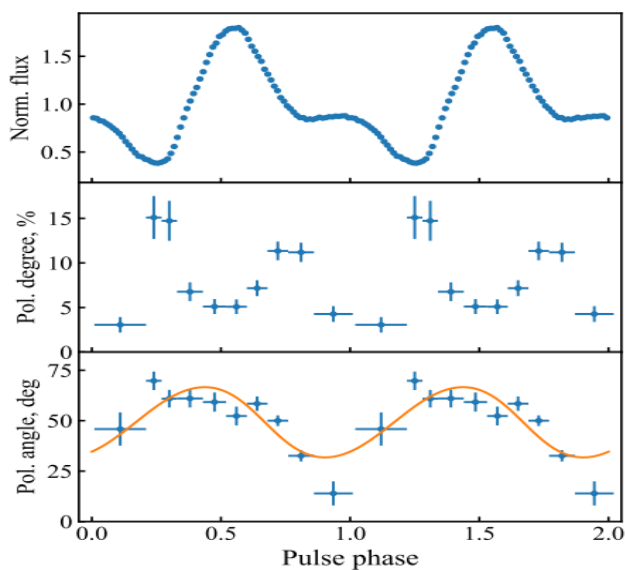
IXPE:n tekemät havainnot eivät kuitenkaan vastanneet teoriaa, koska havaitut polarisaatioasteet olivat noin 5–20 % väliltä. [11]

Polarisaatiokulman pulssivaiheesta johtuva muutos on täysin geometrinen ilmiö, jolloin polarisaatioasteen tai virtauksen muutokset eivät vaikuta siihen. Polarisaatiokulman muutosta kuvaa kaava [12]:

$$\tan(\chi - \chi_p) = \frac{-\sin \theta_p \sin \phi}{\sin i_p \cos \theta_p - \cos i_p \sin \theta_p \cos \phi}. \quad (1)$$

Missä  $\chi_p$  on pulsarin kulmaliikemäärän asentokulma,  $i_p$  on pulsarin pyörimisakselin kaltevuuskulma näkösuuntaan nähden, ja  $\theta_p$  on magneettinen vinous. [13]

Miksi polarisaatioaste on huomattavasti alempi kuin oletettiin? Kuten kuvasta 3



Kuva 5. Yläosa: Cen X-3:n normalisoidun vuon riippuvuus pulseille vaiheesta 2–8 keV:n energiakaistalla. Keskiosa: Polarisaatioasteen riippuvuus vaiheesta spektropolarimetrinen analyysin perusteella. Alaosa: Polarisaatiokulman riippuvuus pulssi-vaiheesta. Oranssi viiva vastaa parhaiten sovitettua pyörivän vektorimallia (RVM). [10]

nähdään. Polarisoituneen säteilyn lähteitä on useita, jolloin polarisaatioasteen alhaisuudelle on useita mahdollisia selityksiä. Ensinnäkin neutronitähden ilmakehä voi muodostaa monikerroksisen lämpörakenteen, jossa syvempi kerros vaikuttaa havaittuun polarisaatioon. Pintakerroksen lämpötila voi olla korkeampi kuin odotettiin, mikä voi hajottaa polarisaatiota. Toiseksi säteilyn sironta neutronitähden magneettosfäärissä voi vähentää polarisaatiota. Tämä johtuu siitä, että fotonit voivat resonoida neutronitähden magnetosfäärissä, mikä vaikuttaa niiden polarisaatioon. Tämän lisäksi kertymäprosessin ja ympäristön monimutkaisuus voi hajottaa polarisaatiota. Kertymäpylvään rakenne voi olla odotettua monimutkaisempi, mikä vaikuttaa säteilyn polarisaatioon, ja lisäksi kertymäkiekon ja neutronitähden magneettikentän vuorovaikutus voi lisätä sirontaa, mikä vähentää polarisaatiota. [10]

Tutkimuksessa havaittiin, että pulsarien säteilyn polarisaatio vaihtelee niiden rotaation mukana. Polarisaatioaste muuttuu sen mukaan, suuntautuuko pulsarin mag-

neettinäpa havaintolaitetta kohti vai siitä pois päin. Tämä havainto on merkittävä pulsarien geometrian ymmärtämisen kannalta, sillä se osoittaa, että polarisaatiolla on useita mahdollisia lähteitä. Kuvan 5 alin paneeli esittää, kuinka polarisaatiokulma vaihtelee pulssivaiheen funktiona. Lisäksi pyörivän vektorin malli (RVM) on sovitettu havaintoihin, ja sen mukainen ratkaisu on merkitty kuvaan oranssilla viivalla. Tämä analyysi tukee ajatusta siitä, että pulsareilla on monimutkainen magneettikenttärakenne, joka vaikuttaa niiden säteilyn polarisaatioon. [1]

### 4.3 Polarisaatiokulman muutokset ja niiden merkitys

Polarisaatiota voidaan pitää tarkimpana ja helpoimpana tapana tutkia voimakkaasti magnetoitujen neutronitähtien geometrista rakennetta. Näitä geometrisiä rakenteita ovat esimerkiksi pyörimisakselin kallistuskulma, dipolimagneettikentän mahdolliset epäsymmetriat, sekä kulma pyörimisakselin ja magneettikentän akselin välillä. [11]

Havaittu matala polarisaatioaste osoittaa, että neutronitähtien säteilyprosessit ovat monimutkaisempia kuin aiemmin oletettiin. Säteilyn polarisaatio on dynaaminen ja riippuu neutronitähden pyörimisvaiheesta, mikä vahvistaa, että säteily tulee magneettinäpojen ympäriltä. Magneettikentän topologia voi olla monimutkaisempi kuin yksinkertainen dipolikenttä, mikä voi selittää havainnot. Tulokset myös osoittavat, että neutronitähtien säteilymekanismeja ja magneettikentän geometriaa on tarkennettava. IXPE:n tulevat havainnot voivat tarjota lisätietoa magneettikentän rakenteesta ja kertymäprosessin vaikutuksista polarisaatioon. Tarkemmat simulatiot ja teorit voivat tulevaisuudessa auttaa selittämään, miksi polarisaatioaste on havaittua matalampi. Kysymys matalan polarisaatioasteen syistä on edelleen avoin ja odottaa ratkaisua. [1]

## 5 Päätelmät

IXPE:n tekemät havainnot ovat osoittaneet merkittävän ristiriidan teoreettisten ennusteiden ja havaintojen välillä. Alun perin odotettiin, että röntgenpulsarien polarisaatioaste olisi jopa 80%, mutta havaintojen mukaan polarisaatioaste jää huomattavasti alhaisemmaksi, tyypillisesti vain 5–15% välille. Tämä havainto haastaa aiemmat teoriat ja viittaa siihen, että neutronitähtien säteilymekanismit ja magneettikentän rakenne ovat monimutkaisempia kuin aiemmin oletettiin.

IXPE:n tulokset ovat erityisen merkittäviä, koska ne ovat ensimmäistä kertaa mahdollistaneet systemaattisen X-ray-polarimetrian käytön röntgenpulsarien geometrian ja säteilymekanismien tutkimuksessa. Polarisaatiokulman muutokset pulssivaiheen aikana osoittavat selkeän yhteyden neutronitähtien magneettikentän rakenteeseen ja sen dipolikokoonpanoon. Tämä tukee kvanttielektrodynamiikan ennustuksia siitä, että tyhjiön kahtaistaittuminen muokkaa polarisaatiota neutronitähtien magnetosfäärissä. [11]

Huomionarvoista on, että polarisaatioasteen vaihtelu on epäsäännöllistä, erityisesti joidenkin pulsareiden, kuten Cen X-3, tapauksessa. Tästä huolimatta polarisaatiokulma noudattaa suhteellisen säännöllistä kehitystä, mikä mahdollistaa RVM-mallin käytön röntgenpulsarien geometrian määrittämisessä. Tämä mahdollistaa neutronitähtien magneettikentän rakenteen tarkemman mallintamisen ja tarjoaa uuden tavan tutkia näiden äärimmäisten objektien fysikaalisia ominaisuuksia.

Toinen merkittävä havainto on se, että polarisoitunut säteily ei välttämättä synny ainoastaan neutronitähtien magneettinapojen läheisyydessä, vaan osa säteilystä voi olla peräisin kertymäkiekon tai tähtituulen sironnasta. Tämä voi selittää osaltaan havaittuja polarisaatioasteen poikkeamia teoreettisista ennusteista. Mahdollisesti röntgenpulsarit eivät toimi yksinkertaisina dipolimagneettikenttinä, vaan niiden säteilyalue voi olla huomattavasti dynaamisempi ja monimutkaisempi kuin aiemmin oletettiin.

Tulevaisuudessa röntgenpolarimetrian kehittyminen, sekä uusien avaruusteleskooppien ja IXPE:n avulla, mahdollistaa yhä tarkemmat havainnot polarisoidusta röntgensäteilystä. Näiden havaintojen avulla voidaan selvittää, ovatko matalat polarisaatioasteet seurausta säteilyn siroonnasta neutronitähden ympäristöön, vai onko kyseessä syvempi rakenteellinen tai säteilyfysikaalinen ominaisuus.

Näiden havaintojen pohjalta on selvää, että röntgenpolarimetria on avannut uusia ovia neutronitähtien ja niiden voimakkaiden magneettikenttien tutkimukseen. Seuraavat vuodet tulevat olemaan kriittisiä tämän tutkimusalan kehitykselle, ja tulevat havainnot voivat ratkaista edelleen avoinna olevia kysymyksiä röntgenpulsarien säteilyprosessien ja niiden geometrian suhteen.

## Viitteet

- [1] A. Mushtukov ja S. Tsygankov, *Accreting strongly magnetised neutron stars: X-ray Pulsars*, 2023, arXiv:2204.14185 [astro-ph].
- [2] A. A. Mushtukov, S. S. Tsygankov, J. Poutanen, V. Doroshenko, A. Salganik, E. Costa, A. D. Marco, J. Heyl, F. L. Monaca, A. A. Lutovinov, I. A. Mereminsky, A. Papitto, A. N. Semena, A. E. Shtykovsky, V. F. Suleimanov, S. V. Forsblom, D. González-Caniulef, C. Malacaria, R. A. Sunyaev, I. Agudo, L. A. Antonelli, M. Bachetti, L. Baldini, W. H. Baumgartner, R. Bellazzini, S. Bianchi, S. D. Bongiorno, R. Bonino, A. Brez, N. Bucciantini, F. Capitanio, S. Castellano, E. Cavazzuti, C.-T. Chen, S. Ciprini, A. De Rosa, E. Del Monte, L. D. Gesu, N. D. Lalla, I. Donnarumma, M. Dovčiak, S. R. Ehlert, T. Enoto, Y. Evangelista, S. Fabiani, R. Ferrazzoli, J. A. Garcia, S. Gunji, K. Hayashida, W. Iwakiri, S. G. Jorstad, P. Kaaret, V. Karas, F. Kislat, T. Kitaguchi, J. J. Kolodziejczak, H. Krawczynski, L. Latronico, I. Liodakis, S. Maldera, A. Manfreda, F. Marin, A. P. Marscher, H. L. Marshall, F. Massaro, G. Matt, I. Mitsuishi, T. Mizuno, F. Muleri, M. Negro, C.-Y. Ng, S. L. O'Dell, N. Omodei, C. Oppedisano, G. G. Pavlov, A. L. Peirson, M. Perri, M. Pesce-Rollins, P.-O. Petrucci, M. Pilia, A. Possenti, S. Puccetti, B. D. Ramsey, J. Rankin, A. Ratheesh, O. J. Roberts, R. W. Romani, C. Sgrò, P. Slane, P. Soffitta, G. Spandre, D. A. Swartz, T. Tamagawa, F. Tavecchio, R. Taverna, Y. Tawara, A. F. Tennant, N. E. Thomas, F. Tombesi, A. Trois, R. Turolla, J. Vink, M. C. Weisskopf, K. Wu, F. Xie ja S. Zane, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **524**, 2004 (2023).
- [3] A. Santangelo, S. Zane, H. Feng, R. Xu, V. Doroshenko, E. Bozzo, I. Caiazzo, F. C. Zelati, P. Esposito, D. González-Caniulef, J. Heyl, D. Huppenkothen, G. Israel, Z. Li, L. Lin, R. Mignani, N. Rea, M. Orlandini, R. Taverna, H. Tong, R. Turolla, C. Baglio, F. Bernardini, N. Bucciantini, M. Feroci, F. Fürst, E. Göğüş, C. Güngör, L. Ji, F. Lu, A. Manousakis, S. Mereghetti, R. Mikusincova, B. Paul, C. Prescod-Weinstein, G. Younes, A. Tiengo, Y. Xu, A. Watts, S. Zhang ja S.-N. Zhan, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* **62**, 29505 (2019).
- [4] Nasa kuva, <https://images.nasa.gov/details/PIA18845>, 2014.
- [5] P. Kaaret, *X-Ray Polarimetry*, 2016, arXiv:1408.5899 [astro-ph].
- [6] V. Doroshenko, J. Poutanen, S. S. Tsygankov, V. F. Suleimanov, M. Bachetti, I. Caiazzo, E. Costa, A. D. Marco, J. Heyl, F. L. Monaca, F. Muleri, A. A. Mushtukov, G. G. Pavlov, B. D. Ramsey, J. Rankin, A. Santangelo, P. Soffitta, R. Staubert, M. C. Weisskopf, S. Zane, I. Agudo, L. A. Antonelli, L. Baldini, W. H. Baumgartner, R. Bellazzini, S. Bianchi, S. D. Bongiorno, R. Bonino, A. Brez, N. Bucciantini, F. Capitanio, S. Castellano, E. Cavazzuti, S. Ciprini, A. D. Rosa, E. D. Monte, L. D. Gesu, N. D. Lalla, I. Donnarumma, M. Dovciak, S. R. Ehlert, T. Enoto, Y. Evangelista, S. Fabiani, R. Ferrazzoli, J. A. Garcia, S. Gunji, K. Hayashida, W. Iwakiri, S. G. Jorstad, V. Karas, T. Kitaguchi, J. J. Kolodziejczak, H. Krawczynski, L. Latronico, I. Liodakis, S. Maldera, A.

- Manfreda, F. Marin, A. Marinucci, A. P. Marscher, H. L. Marshall, G. Matt, I. Mitsuishi, T. Mizuno, C.-Y. Ng, S. L. O'Dell, N. Omodei, C. Oppedisano, A. Papitto, A. L. Peirson, M. Perri, M. Pesce-Rollins, M. Pilia, A. Possenti, S. Puccetti, A. Ratheesh, R. W. Romani, C. Sgrò, P. Slane, G. Spandre, R. A. Sunyaev, T. Tamagawa, F. Tavecchio, R. Taverna, Y. Tawara, A. F. Tennant, N. E. Thomas, F. Tombesi, A. Trois, R. Turolla, J. Vink, K. Wu ja F. Xie, *Nature Astronomy* **6**, 1433 (2022).
- [7] M. C. Weisskopf, *The Imaging X-ray Polarimetry Explorer*.
- [8] E. Costa, P. Soffitta, R. Bellazzini, A. Brez, N. Lumb ja G. Spandre, *Nature* **411**, 662 (2001).
- [9] R. Bellazzini, F. Angelini, L. Baldini, F. Bitti, A. Brez, L. Latronico, M. M. Massai, M. Minuti, N. Omodei, M. Razzano, C. Sgro, G. Spandre, E. Costa ja P. Soffitta, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **535**, 477 (2004).
- [10] S. S. Tsygankov, V. Doroshenko, J. Poutanen, J. Heyl, A. A. Mushtukov, I. Caiazzo, A. D. Marco, S. V. Forsblom, D. González-Caniulef, M. Klawin, F. L. Monaca, C. Malacaria, H. L. Marshall, F. Muleri, M. Ng, V. F. Suleimanov, R. A. Sunyaev, R. Turolla, I. Agudo, L. A. Antonelli, M. Bachetti, L. Baldini, W. H. Baumgartner, R. Bellazzini, S. Bianchi, S. D. Bongiorno, R. Bonino, A. Brez, N. Bucciantini, F. Capitanio, S. Castellano, E. Cavazzuti, S. Ciprini, E. Costa, A. D. Rosa, E. D. Monte, L. D. Gesu, N. D. Lalla, I. Donnarumma, M. Dovčiak, S. R. Ehlert, T. Enoto, Y. Evangelista, S. Fabiani, R. Ferrazzoli, J. A. Garcia, S. Gunji, K. Hayashida, W. Iwakiri, S. G. Jorstad, V. Karas, T. Kitaguchi, J. J. Kolodziejczak, H. Krawczynski, L. Latronico, I. Liodakis, S. Maldera, A. Manfreda, F. Marin, A. Marinucci, A. P. Marscher, G. Matt, I. Mitsuishi, T. Mizuno, C.-Y. Ng, S. L. O'Dell, N. Omodei, C. Oppedisano, A. Papitto, G. G. Pavlov, A. L. Peirson, M. Perri, M. Pesce-Rollins, P.-O. Petrucci, M. Pilia, A. Possenti, S. Puccetti, B. D. Ramsey, J. Rankin, A. Ratheesh, R. W. Romani, C. Sgrò, P. Slane, P. Soffitta, G. Spandre, T. Tamagawa, F. Tavecchio, R. Taverna, Y. Tawara, A. F. Tennant, N. E. Thomas, F. Tombesi, A. Trois, J. Vink, M. C. Weisskopf, K. Wu, F. Xie ja S. Zane, *The Astrophysical Journal Letters* **941**, L14 (2022).
- [11] J. Poutanen, S. S. Tsygankov ja S. V. Forsblom, *X-ray Polarimetry of X-ray Pulsars*, 2024, arXiv:2408.04431.
- [12] M. M. Komesaroff, *Nature* **225**, 612 (1970).
- [13] J. Poutanen, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A166 (2020).