

Syklotroniabsorptioviivat röntgenpulsareissa

Kandidaatintyö

Turun yliopisto

Fysiikka

2024

Fil. yo. Vilho Virtanen

Tarkastajat:

Doc. Sergey Tsygankov

Prof. Juri Poutanen

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan laitos

VIRTANEN, VILHO: Syklotroniabsorptioviivat röntgenpulsareissa

Kandidaatintyö, 15 s.
Fysiikka
Helmikuu 2024

Työssä käsitellään röntgenpulsareiden spektreissä esiintyvää syklotroniabsorptiota aiheesta kirjoitettujen tutkimus- ja kokooma-artikkeleiden pohjalta. Ilmiön taustalla oleva teoria kaavoineen esitellään. Käsitellään syklotroniabsorptioviivojen muuttuvuutta sekä mitä muutokset kertovat kohteiden ominaisuuksista.

Asiasanat: neutronitähti, röntgenpulsari, röntgenkaksoistähti, suurenergia-astrofysiikka, syklotroniabsorptioviiva, magneettikenttä, kertymäkiekko

Sisällys

Johdanto	1
1 Röntgenpulsarit	1
2 Syklotroniabsorptio	4
2.1 Magneettikentän laskeminen	5
3 Muutokset syklotroniabsorptioviivoissa	6
3.1 Vaihtelu luminositeetin mukaan	6
3.2 Vaihtelu pulssin vaiheen mukaan	9
3.3 Pitkän aikavälin vaihtelu	10
4 Yhteenveto	13

Johdanto

Neutronitähdet ovat monella tavoin äärimmäisiä kohteita ja röntgenpulsarit ovat äärimmäisiä jopa useimpiin muihin neutronitähtiin verrattuna. Tässä työssä luodaan kirjallisuuteen pohjautuva katsaus röntgenpulsareihin ja erityisesti niiden spektreisissä esiintyviin syklotroniabsorptioviivoihin. Näiden viivojen tarjoaman näkökulman kautta tutustutaan samalla röntgenpulsareiden fysiikkaan.

Aluksi esitellään röntgenpulsareiden luonnetta yleisellä tasolla. Sitten tutustutaan syklotroniabsorption teoriaan ja johdetaan syklotroniabsorptioviivojen energian kaava. Tämän jälkeen käsitellään viivojen energiassa tapahtuvaa vaihtelua. Tärkeimmät vaihtelun lajit saavat omat alalukunsa, jotka sisältävät havainnollistavia kaavioita ja esimerkkejä. Vaihtelun taustalla olevia fysikaalisia prosesseja kuvataan.

1 Röntgenpulsarit

Neutronitähti on taivaankappale, joka syntyy 8-25 kertaa Auringon massaisen tähden räjähtäessä supernovana elinkaarensa lopussa. Kun tällaisen tähden fuusiopolttoaine loppuu, supernovaräjähdyksensä lennättää sen ulkokerrokset pois samalla kun tähden sisäosat luhistuvat kasaan ja muodostavat neutronitähden. Neutronitähden massa on noin 1-2 Auringon massaa, mutta säde vain 10-14 kilometriä. Sen tiheys on siis hyvin suuri, luokkaa $10^{15} \text{ g cm}^{-3}$, mikä on jopa atomiytimien tiheyttä enemmän. Neutronitähtien aine ei koostukaan atomeista, vaan suurin osa siitä on neutronien ja muiden ydinhiukkasten muodostamaa supranestettä. Rakenteen ja koostumuksen yksityiskohdat ovat yhä pitkälti tuntemattomia.[1]

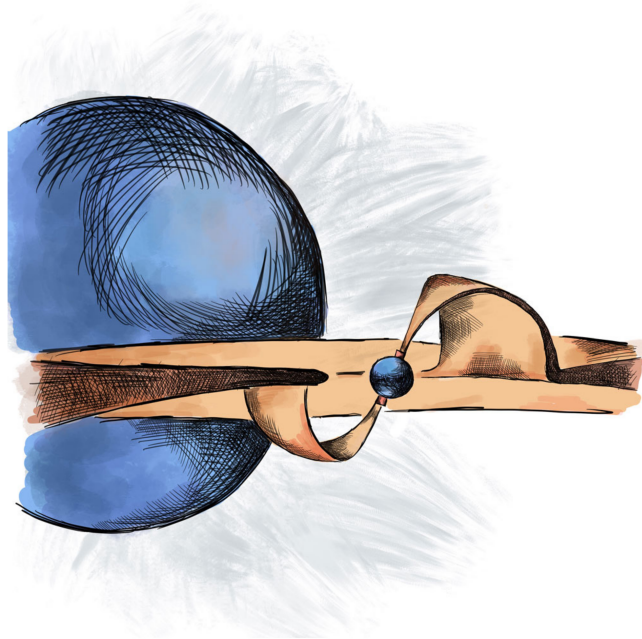
Tyypillistä neutronitähdille on hyvin nopea pyöriminen, jopa satoja kertoja sekunnissa, sekä voimakas magneettikenttä. Kun alkuperäisen tähden ydin luhistuu, syntyvä neutronitähti perii suuren osan sen magneettivuosta ja pyörimismäärästä. Koska neutronitähti on kooltaan paljon alkuperäistä tähteä pienempi, magneetti-

vuon tiheydestä ja pyörimisnopeudesta tulee vastaavasti korkeammat. Myös muut tekijät vaikuttavat magneettikenttään ja pyörimiseen, ja niihin liittyy monia avoimia kysymyksiä.[1]

Magneettikenttä on neutronitähtien kiinnostavimpia ominaisuuksia. Se on voimakkuudeltaan jopa $10^{11} - 10^{15}$ G. Vertailun vuoksi arkielämän magneettikentät ovat tyypillisesti alle 1 G ja voimakkain laboratoriossa hetkellisesti luotu kenttä on suuruusluokkaa 10^6 G. Neutronitähteä ympäröivä kenttä on siis jopa miljoonia kertoja voimakkaampi kuin mikään keinotekoisesti aikaansaatuu. Sellainen kenttä mahdollistaa monia eksoottisia ilmiöitä, kuten fotonien jakautumisen sekä yksittäisen fotonin aiheuttaman parinmuodostuksen. Myöskään kemian tavanomaiset laitteet eivät enää päde, sillä magneettikenttä aiheuttaa atomien elektroneihin suuremman voiman kuin atomin ydin.[2]

Neutronitähdet tarjoavat ainutlaatuisen tilaisuuden tutkia aineen ja säteilyn käyttäytymistä äärimmäisessä magneettikentässä. Vaikeutena on, että neutronitähtien magneettikentän voimakkuutta ei yleensä ole mahdollista mitata suoraan vaan siitä voidaan tehdä vain epäsuoria päätelmiä. Röntgenpulsareiden tapauksessa syklotroniabsorptioviivat (engl. cyclotron absorption lines) tarjoavat kuitenkin suoran havaintomenetelmän.[2]

Röntgenpulsarit ovat neutronitähtien alatyyppejä, joka nimensä mukaisesti lähettää voimakkaan röntgensäteilyn pulsseja. Niissä neutronitähti on osa kaksoistähti-järjestelmää, jonka toinen osapuoli on tavanomainen ei-kompakti tähti. Tähtikumppani menettää ainetta, jonka neutronitähtien gravitaatio sieppaa ja joka muodostaa kertymäkiekon neutronitähtien ympärille. Aine voi olla peräisin kumppanin tähtituulesta tai tähteä ympäröivästä kiekosta, tai jos kumppani on lähestymässä elämänsä loppua, se voi laajeta omaa Roche'n pintansa suuremmaksi, jolloin se ei enää pysty pitämään gravitaatiollaan kiinni ulkokerroksistaan ja menettää massaa sitä kautta.[2]



Kuva 1. Kumppanitähdestä (vasemmalla) lähtenyt aine kiertää neutronitähteä ensin kiekkona ja lähempänä liikkuu kenttäviivojen suuntaisesti pudoten lopulta magneettinavoille.[3]

Koska kertymäkiekon aine on ionisoitunutta ja neutronitähden magneettikenttä on hyvin voimakas, lähellä neutronitähteä Lorentzin voima tulee ratkaisevaksi. Lähempänä kuin noin 10^8 cm (1000 km) kertyvä aine ei enää muodosta kiekkoa vaan alkaa liikkua magneettisia kenttäviivoja seuraten. Riippuu magneettikentän voimakkuudesta ja neutronitähden pyörimisnopeudesta, sinkoutuuko aine pois vai jatkaako se alas pinnalle. Jälkimmäisessä tapauksessa tähtikumppanista lähtenyt aine osuu lopulta neutronitähden magneettinapojen alueelle pakonopeuteen verrattavalla nopeudella, joka on noin $\frac{1}{2} c$. Tällä nopeudella tapahtuva törmäys vapauttaa voimakasta säteilyä, joka on lähinnä röntgenalueella. Kuva 1 havainnollistaa kertymisprosessia.[2]

Syntyvä säteily ei ole isotrooppista vaan sitä lähtee joihinkin suuntiin selvästi enemmän. Neutronitähden pyöriessä säteilykeilojen suunta vaihtelee. Kaukainen havaitsija näkee kohteen vilkkuvan säännöllisesti, kun keilat osoittavat vuoroin kohti havaitsijaa ja vuoroin muualle. Tästä johtuvat pulsarien tunnusomaiset pulssit.[2]

Röntgenpulsareiden luminositeetit ovat välillä $10^{32} - 10^{41}$ erg s^{-1} , mikä sijoittaa ne röntgentaivaan kirkkaimpien kohteiden joukkoon. Luminositeetti on yleensä hyvin vaihteleva ja usean kertaluokan vaihtelut samassa kohteessa ovat tavallisia aikaskaloilla sekunneista kuukausiin. Näiden vaihteluiden arvellaan johtuvan muutoksista kertymisprosessissa tai kumppanitähdestä lähtevän aineen massavirrassa.[2]

2 Syklotroniabsorptio

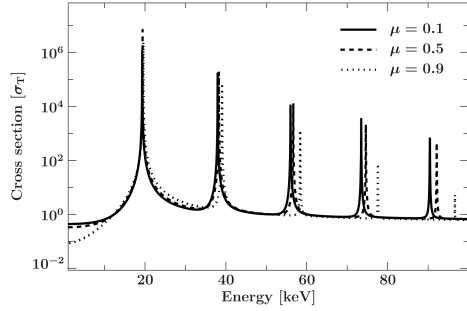
Kuten ylempänä mainittiin, neutronitähteen putoava aine on ionisoitunutta. Vapaat elektronit tekevät gyroliikettä magneettisten kenttäviivojen ympäri. Kun magneettikenttä on yli 10^{11} G, varattujen hiukkasten liike kenttään nähden kohtisuorassa suunnassa kvantittuu ja niiden liike-energia saa vain tiettyjä arvoja. Näitä energiatasoja kutsutaan Landau-tasoina.[2]

Fotoni, jonka energia vastaa kahden Landau-tason eroa, siroaa tällaisessa plasmassa hyvin paljon todennäköisemmin kuin fotoni, jolla on muunlainen energia. Kuvassa 2 on sironnan poikkipinta-ala fotonin energian funktiona.[4]

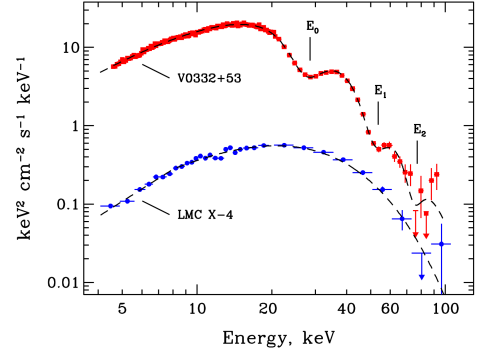
Koska tietyn energiatason fotonit siroavat voimakkaasti, röntgenpulsarin spektrissä havaitaan näiden energioiden kohdalla absorptioviivat, joita kutsutaan syklotroniabsorptioviivoiksi. Kuva 3 esittää, miltä nämä viivat näyttävät pulsarin spektrissä. Viivojen energia on suoraan verrannollinen magneettikenttään ja mahdollistaa kentän voimakkuuden määrittämisen. Alempana esitellään kaava, jolla tämä tapahtuu. Mitään muuta suoraa keinoa magneettikentän mittaamiseen ei ole ja siksi syklotroniabsorptio onkin niin tärkeä tutkimuskohde.[4]

Syklotroniabsorptioviivoja löydettiin ensimmäisen kerran vuonna 1976 röntgenpulsarin Her X-1 spektristä. Vuoteen 2018 mennessä niitä oli havaittu jo 36 eri kohteesta, joista osa oli tosin vielä jossakin määrin epävarmoja.[4]

Elektronien lisäksi muutkin varatut hiukkaset voivat aiheuttaa syklotroniabsorptioviivoja. Joidenkin yksinäisten neutronitähkien spektrissä on havaittu merkkejä



Kuva 2. Sironnan poikkipinta-ala fotonin energian funktiona magneettikentän ollessa $1,7 \cdot 10^{12}$ G. μ on fotonin liikesuunnan ja magneettikentän suunnan välisen kulman kosini.[5]



Kuva 3. Kahden eri röntgenpulsarin spektrit. Pulsarin V0332+53 spektrissä (punainen) näkyy perusviiva ja kaksi yläviivaa, kohteessa LMC X-4 (sininen) puolestaan ei lainkaan absorptioviivoja.[6]

protonien aiheuttamista viivoista. Johtuen protonien suuresta massasta näiden viivojen energia on paljon alhaisempi kuin elektroneista johtuvien. Tämä työ keskittyy elektronien aiheuttamiin viivoihin.[4]

2.1 Magneettikentän laskeminen

Elektronin gyroliikkeen kulmataajuus on

$$\omega = \frac{eB}{m_e c}, \quad (1)$$

missä e on elektronin varaus, B magneettikentän voimakkuus, m_e elektronin massa ja c valon nopeus.[4]

Vierekkäisten Landau-tasojen energioiden erotus on aina $\hbar\omega$, missä \hbar on redusoitu Planckin vakio. Tästä saadaan syklotroniabsorptioviivojen energiaksi

$$E_{cyc} = \frac{n}{1+z} \frac{\hbar e B}{m_e c} \approx \frac{n}{1+z} 11,6 \text{ keV} \cdot B_{12}, \quad (2)$$

missä n on jokin positiivinen kokonaisluku, z on neutronitähden gravitaatiosta aiheutuva punasiirtymä ja B_{12} on magneettikenttä biljoonina gausseina. Arvo $n = 1$ vastaa elektronin siirtymää kahden vierekkäisen Landau-tason välillä, esimerkiksi

perustasolta ensimmäiselle virittyneelle tasolle. Siitä syntyvää syklotroniabsorptioviivaa kutsutaan perusviivaksi (engl. fundamental line). Lisäksi saattaa esiintyä viivoja, joiden energia on perusviivan energian kokonaislukukerrannainen. Nämä vastaavat siirtymää useamman Landau-tason yli ja niitä kutustaan yläviivoiksi (engl. harmonics).[4]

Gravitaatiopunasiirtymän arvo on tavallisesti välillä 1,25-1,4.[7]

3 Muutokset syklotroniabsorptioviivoissa

Lähes kaikissa röntgenpulsareissa, joissa on havaittu syklotroniabsorptiota, viivoissa esiintyy muutoksia. Ennen kaikkea viivojen energia vaihtelee, mutta myös niiden leveydessä ja syvyydessä on todettu systemaattista vaihtelua.[4]

Viivan energian muuttuminen kertoo magneettikentän muutoksesta kaavan 2 mukaisesti. Useimmissa tapauksissa ei kuitenkaan uskota, että neutronitähden magneettikenttä todella muuttuisi. Sen sijaan viivat voivat syntyä eri kohdissa neutronitähden pinnan yläpuolella. Viivan energia kertoo aina sen syntyalueen (engl. line forming region) magneettikentästä, joten jos syntyalue siirtyy, energiakin muuttuu.[4]

Viivojen muutoksista voidaan päätellä monenlaisia asioita kohteiden ominaisuuksista, esimerkiksi kertymäalueen geometriasta ja siinä tapahtuvista prosesseista. Siksi muutokset viivoissa ovat tärkeä tutkimuskohde. Seuraavassa käsitellään kolmea tärkeintä vaihtelun tyyppiä.[4]

3.1 Vaihtelu luminositeetin mukaan

Useissa kohteissa on havaittu korrelaatio luminositeetin ja syklotroniabsorptioviivojen energian välillä. Korrelaatio voi olla positiivista, jolloin viivojen energia kasvaa luminositeetin kasvaessa, tai negatiivista, jolloin käy päinvastoin.[4]

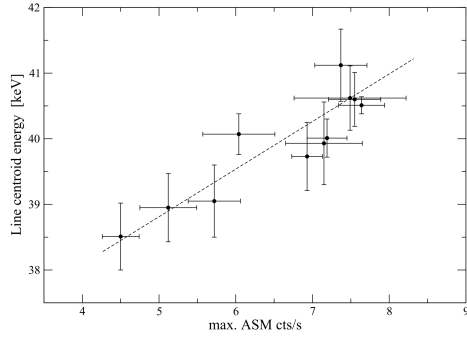
Korrelaation tyyppi riippuu mekanismista, jolla kertyvä aine saavuttaa pulsarin

pinnan. Massavirran ja siten myös luminositeetin ollessa alhainen aine osuu suoraan pulsarin kaasukehään ja pysähtyy siinä. Tämän kaltaisissa kohteissa viivojen energia ei riipu luminositeetista. Suuremman luminositeetin tapauksessa putoava aine hidastuu hiukan pinnan yläpuolella törmäyksettömän šokin kautta (engl. collisionless shock). Tässä tapauksessa šokki ja siten viivojen syntyalue painuu alemmaksi massavirran kasvaessa. Koska pulsarin dipolikenttä on alempana voimakkaampi, nämä mekanismit saavat aikaan positiivisen korrelaation luminositeetin ja viivojen energian välille. Tällainen tilanne on kuvassa 4.[4]

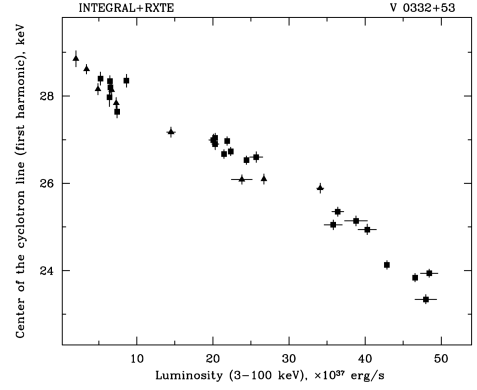
Kertyvän aineen massavirran edelleen kasvaessa saavutetaan lopulta kriittinen luminositeetti (engl. critical luminosity), joka on suuruusluokkaa 10^{37} erg s⁻¹. Sen jälkeen röntgensäteilyn paine on niin suuri, että se riittää hidastamaan putoavan aineen liikkeen jo selvästi pinnan yläpuolella. Seurauksena on kertymäpylväs (engl. accretion column), jota säteilypaine kannattelee neutronitähden painovoimaa vastaan. Tällainen pylväs koostuu optisesti paksusta aineesta, jossa fotonien eteneminen on hidasta ja sironta ympäröivistä elektroneista runsasta. Suuremman luminositeetin tapauksessa pylväästä tulee yhä korkeampi.[8]

Kriittisen luminositeetin yläpuolella korrelaatio luminositeetin ja syklotroniabsorptioviivojen energian välillä on negatiivinen. Kuvassa 5 on esimerkki tästä. Negatiivisen korrelaation syy ei ole täysin selvä, mutta se liittyy joka tapauksessa kertymäpylvään korkeuden vaihteluun. Tavallisesti arvellaan, että viivojen syntyalue on itse pylväässä. Kun pylvään korkeus kasvaa, syntyalue siirtyy ylemmäs ja sen paikallinen magneettikenttä on siten heikompi.[8]

Uudemman teorian mukaan viivat syntyvät röntgensäteilyn heijastuessa neutronitähden pinnasta (heijastumisteoria, engl. reflection model). Huomattava osa kertymäpylvään lähettämästä säteilystä suuntautuu alaspäin johtuen pylväässä olevan aineen relativistisesta liikkeestä. Pylvään ollessa matala tämä säteily osuu melko pienelle alueelle magneettinavan ympäristöön. Dipolikentän voimakkuus on suurim-



Kuva 4. Positiivinen korrelaatio perusviivan keskikohdan energian ja havaitun fotonivuon välillä Hercules X-1:ssä. Kohde oli ensimmäinen röntgenpulsari, jossa havaittiin tämän tyyppin korrelaatio.[9]



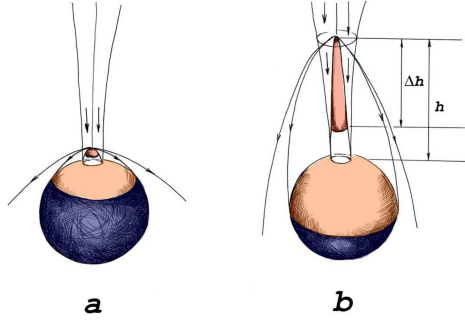
Kuva 5. Negatiivinen korrelaatio perusviivan keskikohdan energian ja luminositeetin välillä kohteessa V0332+53.[10]

millaan navoilla, joten kertymäpylvään valaiseman alueen keskimääräinen magneettikenttä on tällöin korkein. Korkean pylvään säteily leviää suuremmalle osalle neutronitähden pintaa, jolloin alueen keskimääräinen kenttä on heikompi. Kuva 6 havainnollistaa tätä riippuvuutta.[11]

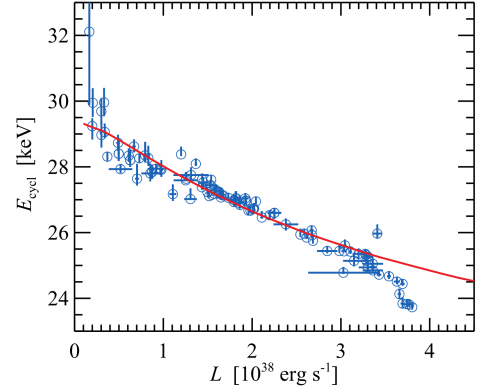
Heijastumisteorian mukaan syklotroniabsorptioviivat syntyvät juuri tällä kertymäpylvään valaisemalla pinnan alueella. Suurempi valaistunut alue johtaa siis heikompaan magneettikenttään syntymäalueella ja alempaan viivojen energiaan, mikä tarjoaa toisen mahdollisen selityksen negatiiviselle korrelaatiolle. Ainakin kohteen V0332+53 tapauksessa heijastumisteorian ennuste vastaa varsin hyvin havaintoja, kuten nähdään kuvassa 7.[11]

Heijastumisteoria selittää hyvin, miksi vaihtelu viivojen energiassa on vain kymmeniä prosentteja, vaikka kertymäpylvään korkeus vaihtelisi paljonkin[11]. Toisaalta on epäselvää, voiko heijastuminen ylipäätään synnyttää syklotroniabsorptioviivoja. Lisähavainnot ovat tarpeen ennen kuin negatiivisen korrelaation alkuperästä voidaan saada täysi selvyys[4].

Kertymätavalla on merkitystä myös muille pulsarin ominaisuuksille kuin viivojen energialle. Kun kertymäpylväs on leveytensä nähden korkea, se säteilee eniten



Kuva 6. Mitä suurempi massavirta, sitä korkeampi kertymäpylväs ja sitä suuremman osan neutronitähden pinnasta se valaisee.[11]



Kuva 7. Heijastumisteorian ennuste (punainen) luminositeetin ja viivojen energian välisestä korrelaatiosta V0332+53:ssä vastaa melko hyvin havaintoja (sininen).[11]

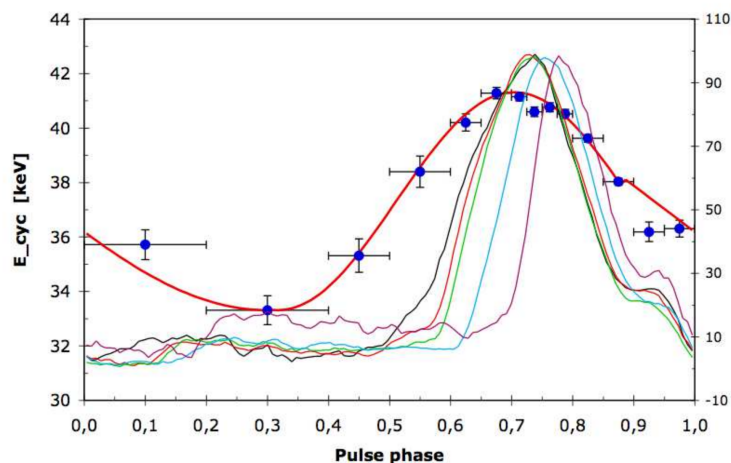
sivusuunnassa, siis neutronitähden pinnan suuntaisesti. Törmäyksetön šokki ja suoraan pinnalle putoava aine tuottavat lähinnä ylöspäin suuntautuvaa säteilyä. Säteilyn suunta taas vaikuttaa pulssien muotoon.[2]

3.2 Vaihtelu pulssin vaiheen mukaan

Useimmissa kohteissa syklotroniabsorptioviivat ovat huomattavan erilaiset pulsarin pulssin eri vaiheissa. Viivojen energia voi vaihdella jopa kymmeniä prosentteja, kuten kuvassa 8. Myös viivojen syvyys riippuu yleensä pulssin vaiheesta, jopa siinä määrin, että viivaa ei välttämättä erotu ollenkaan tietyissä vaiheissa.[4]

Neutronitähden pyöriessä viivojen syntyalue nähdään eri kulmista. Pyörähdysen eri vaiheissa nähdään eri korkeuksilla syntyneitä viivoja, mistä johtuu viivojen energian vaihtelu.[4]

Viivojen syvyyden muuttuminen puolestaan johtuu ilmeisesti niiden täyttymisestä plasman emittoimilla fotoneilla[4]. Kun elektronit ovat virittyneet korkeammille Landau-tasojille, ne eivät jää virittyneiksi vaan niiden energia purkautuu pian. Tällöin elektroni emittoi fotonin, jonka energia vastaa Landau-tasojen eroa. Virityksen purkautuminen tapahtuu yleensä taso kerrallaan, joten useimpien fotonien energia



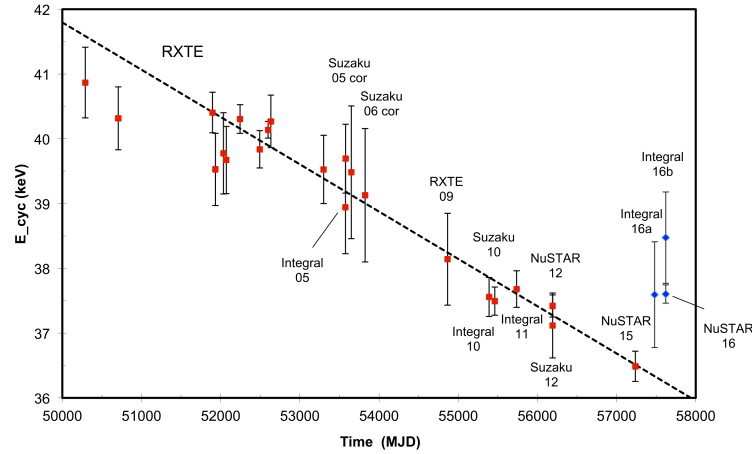
Kuva 8. Her X-1:n perusviivan energian riippuvuus pulssin vaiheesta (punainen viiva). Muut viivat kuvaavat suhteellisen kirkkauden vaihtelua.[12]

on kahden vierekkäisen Landau-tason erotus. Tämä taas on sama kuin syklotroniabsorption perusviivan energia. Näin ollen emissio tapahtuu juuri samassa kohdassa spektriä kuin absorptio ja viiva katoaa näkyvistä[13]. Tämän tulkinnan puolesta puhuu se seikka, että yläviivat pysyvät yleensä näkyvissä silloinkin, kun perusviiva katoaa[4].

Pulssin vaiheesta riippuva vaihtelu syklotroniabsorptioviivoissa voi auttaa päätelemään esimerkiksi neutronitähden magneettinapojen sijainnin suhteessa pyörimisakseliin ja kertymäalueen muodon. Tähän vaadittavat laskelmat ovat kuitenkin mutkikkaita, koska muuttujia on niin paljon; esimerkiksi valon taipuminen neutronitähden gravitaatiokentässä on otettava huomioon.[4]

3.3 Pitkän aikavälin vaihtelu

Parissa kohteessa syklotroniabsorptioviivojen energiassa on havaittu pitkäkestoisia muutoksia, jotka eivät selity pelkästään ylempänä kuvatuilla tavoilla. Ensimmäiset viitteet tähän suuntaan saatiin jo 1990-luvulla, kun huomattiin pulsarin Her X-1 viivojen energian kasvaneen aiempiin havaintoihin verrattuna. Vuonna 2007 kuitenkin

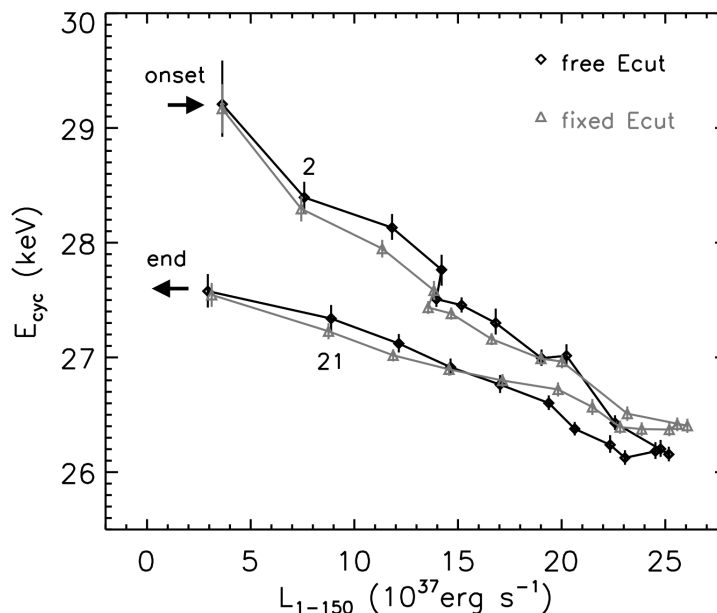


Kuva 9. Her X-1:n perusviivan energian muutos, kun luminositeetin ja pulssin vaiheen vaikutus on poistettu. Aika-akselilla modifioidut juliaaniset päivät; kaavion kuvaama väli vastaa vuosia 1996-2016.[14]

kin tajuttiin, että havaitut energiat korreloivat kohteen kulloisenkin luminositeetin kanssa. Näin tuli löydetyksi ensimmäinen positiivinen korrelaatio luminositeetin ja viivojen energian välillä.[4]

Joitakin vuosia myöhemmin todettiin, että riippuvuus luminositeetista ei riittänyt selittämään havaittuja muutoksia kokonaan. Kun luminositeetin vaikutus oli otettu huomioon, jäljelle jäi vielä pitkäaikainen laskeva suuntaus viivojen energiassa. Uudempien havaintojen mukaan lasku näyttää pysähtyneen vuoden 2016 aikoihin ja energia on nyt mahdollisesti nousemassa jälleen. (Kuva 9.) Myös pulsarissa Vela X-1 on havaittu samantapainen hidas lasku energiassa.[4]

Pulsarin V0332+53 tapaus on hiukan erilainen. Siinä missä Her X-1:ssä ja Vela X-1:ssä muutokset tapahtuvat vuosikymmenten kuluessa, V0332+53:ssa aikaskaalat ovat vain kuukausia ja muutokset vaikuttavat liittyvän pulsarin purkauksiin. Vuonna 2015 tapahtui pari kuukautta kestänyt purkaus, jossa kohde kirkastui monikymmenkertaiseksi. Luminositeetin kohotessa syklotroniabsorptioviivojen energia laski, kuten yleensäkin kyseisessä kohteessa. Kun luminositeetti taas laski, viivojen energia nousi kuitenkin paljon hitaammin. (Kuva 10.) Purkauksen päätyttyä ja luminosi-



Kuva 10. Perusviivan energia luminositeetin funktiona pulsarin V0332+53 vuoden 2015 purkauksessa kahden eri sovituksen mukaan. Nuolet kuvaavat havaintojen aikajärjestystä.[15]

teen palattua alkuperäiselle tasolle viivojen energia oli edelleen alhaisempi kuin se oli ollut ennen purkausta[15]. Vuonna 2016 energia oli taas palannut purkausta edeltäneelle tasolle[16]. Kiinnostavaa kyllä, mitään vastaavaa ei ilmennyt saman kohteen aiemmassa purkauksessa vuosina 2004-2005, vaikka se oli jopa vuoden 2015 purkausta suurempi[15].

Pitkän aikavälin vaihtelussa saattaa olla kyse neutronitähden magneettikentän todellisesta muutoksesta, ainakin paikallisella joskaan ei globaalilla tasolla. Muutoksen syy liittyy neutronitähteen kertyvän aineen käyttäytymiseen sen päädyttyä pinnalle. Alas satava plasma muodostaa magneettinavalle kertymäkummun (engl. accretion mound), jonka aine vaihtuu jatkuvasti. Kertyminen tuo sitä lisää ja samaan aikaan ainetta valuu pois kummusta muualle neutronitähden pinnalle tai sulautuu osaksi tähden kuorta. Jos kumpu menettää ainetta hitaammin kuin saa uutta, se kasvaa massiivisemmaksi ja voi vääristää paikallista magneettikenttää diamagnetismin kautta. Toisen teorian mukaan kenttä ei muutu, vaan tässäkin on kyse viivojen

syntyalueen siirtymisestä.[4]

4 Yhteenveto

Syklotroniabsorptioviivat ovat korvaamaton ikkuna röntgenpulsareiden maailmaan. Niiden tutkiminen on tuonut paljon lisää ymmärrystä kohteiden ominaisuuksista, joita olisi vaikeaa tai mahdotonta saada selville muilla keinoin. Tämä työ on pelkkä nopea katsaus alan perusteisiin ja tärkeimpiin löytöihin.

Vaikka paljon uutta tietoa onkin saatu syklotroniabsorptiota tutkimalla, ala on kaikkea muuta kuin loppuun koluttu. Avoimia kysymyksiä on runsaasti. Tehtävää riittää tulevaisuudessakin sekä havaitsijoille, jotka keräävät uutta aineistoa näistä kiinnostavista kohteista, että teoreetikoille, jotka yrittävät mallintaa niitä ja selittää havainnot.

Viitteet

- [1] A. Potekhin, The physics of neutron stars, 2011 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1102.5735.pdf>
- [2] A. Mushtukov, S. Tsygankov, Accreting strongly magnetised neutron stars: X-ray Pulsars, 2023 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/2204.14185.pdf>
- [3] S. Tsygankov et al, The X-ray polarimetry view of the accreting pulsar Cen X-3, 2022 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/2209.02447.pdf>
- [4] R. Staubert et al, Cyclotron lines in highly magnetized neutron stars, 2018 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1812.03461.pdf>
- [5] F.-W. Schwarm et al, Cyclotron resonant scattering feature simulations: I. Thermally averaged cyclotron scattering cross sections, mean free photon-path tables, and electron momentum sampling, 2016 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1609.05030.pdf>
- [6] R. Walter et al, High-mass X-ray binaries in the Milky Way, 2015 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1505.03651.pdf>
- [7] I. Caballero, J. Wilms, X-ray pulsars: a review, 2012 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1206.3124.pdf>
- [8] P. Becker et al, Spectral formation in accreting X-ray pulsars: bimodal variation of the cyclotron energy with luminosity, 2012 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1205.5316.pdf>
- [9] R. Staubert et al, Discovery of a flux-related change of the cyclotron line energy in Her X-1, 2007 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0702490.pdf>
- [10] S. Tsygankov et al, V0332+53 in the outburst of 2004–2005: luminosity dependence of the cyclotron line and pulse profile, 2006 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0511237.pdf>
- [11] J. Poutanen et al, A reflection model for the cyclotron lines in the spectra of X-ray pulsars, 2013 [viitattu 11.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1304.2633.pdf>
- [12] R. Staubert et al, Long-term change in the cyclotron line energy in Hercules X-1, 2014 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1410.3647.pdf>
- [13] F.-W. Schwarm et al, Cyclotron resonant scattering feature simulations: II. Description of the CRSF simulation process, 2017 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1701.07669.pdf>

- [14] R. Staubert et al, Inversion of the decay of the cyclotron line energy in Her X-1, 2017 [viitattu 10.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1710.05150.pdf>
- [15] G. Cusumano et al, An unexpected drop in the magnetic field of the X-ray pulsar V0332+53 after the bright outburst occurred in 2015, 2016 [viitattu 7.2.2024]. <https://arxiv.org/pdf/1604.07831.pdf>
- [16] V. Vybornov et al, Changes in the cyclotron line energy on short and long timescales in V 0332+53, A&A, 610, 2018 [viitattu 7.2.2024]. <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2018/02/aa31750-17.pdf>