Downloaded from UvA-DARE, the institutional repository of the University of Amsterdam (UvA)
http://hdl.handle.net/11245/2.143979

File ID	uvapub:143979
Filename	Nederlandse introductie en samenvatting
Version	unknown

SOURCE (OR PART OF THE FOLLOWING SOURCE):

Type	PhD thesis
Title	Non-thermal X-ray emission from Anomalous X-ray Pulsars
Author(s)	P.R. den Hartog
Faculty	FNWI: Astronomical Institute Anton Pannekoek (IAP)
Year	2008

FULL BIBLIOGRAPHIC DETAILS:
http://hdl.handle.net/11245/1.292031

Copyright

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content licence (like Creative Commons).

UvA-DARE is a service provided by the library of the University of Amsterdam (http://dare.uva.nl)
(pagedate: 2014-11-17)

Nederlandse introductie en samenvatting

Het klassieke beeld van een sterrenkundige als iemand die nacht in nacht uit achter een telescoop zit om sterren te bekijken voldoet al lang niet meer aan dat van de moderne astronoom. Tegenwoordig is sterrenkunde natuurkunde op grote afstand, ofwel astrofysica. Het willen begrijpen wat er gebeurt en hoe het allemaal werkt. Het heelal is groot, heel groot, en ook al is het voornamelijk leegte, er vallen onnoemelijk veel dingen te bestuderen, waarvan de locale condities vaak/meestal/nooit te bereiken zijn op aarde. Net als in andere gebieden van wetenschap kent de sterrenkunde vele takken van specialisaties. Die specialisaties kunnen met astronomische objecten te maken hebben, maar je kunt ook gespecialiseerd zijn in een bepaald soort waarnemingen. Natuurlijk gaat het ene vaak niet zonder het andere. De trend van de afgelopen jaren is het bekijken van een object met verschillende instrumenten die verschillende soorten licht kunnen meten om zo een breder/beter beeld te krijgen van wat er echt aan de hand is. De huidige (observationele) sterrenkundige zit veel achter een computer data te kraken, programma's te schrijven voor analyses, meetresultaten te verwerken en te leren begrijpen aan de hand van modellen. Als er dan iets nieuws ontdekt is dan wordt dit opgeschreven in een artikel voor publicatie in een wetenschappelijk tijdschrift. Dit proefschrift bevat vijf van dit soort artikelen.

Waarnemen

Sterrenkunde is een echte observationele wetenschap. In tegenstelling tot de natuurkunde kunnen sterrenkundigen veelal geen experimenten opzetten en daarmee bepalen wat er gebeurt en hoe iets in elkaar zit. Als astronoom kun je niets anders doen dan kijken naar de objecten waarin je geïnteresseerd bent en 'afwachten' of er iets nieuws te zien valt. Invloed op de processen die er in het heelal gebeuren heeft de sterrenkundige (helaas/gelukkig) niet. Het is helaas onmogelijk om het hele heelal continu in de gaten te houden. Bij veel waarnemingen maakt het niet precies uit wanneer je een bepaalde waarneming doet. Soms kun je wel op 'slimme' momenten naar een object kijken, als je redenen hebt om aan te nemen dat er op deze momenten dingen staan te gebeuren die je wilt bestuderen. Je kunt ook snel gaan kijken als er met andere instrumenten interessante dingen gezien zijn, zodat jij ze ook nog kunt zien maar dan in een andere golflengte ofwel in een andere 'kleur' licht.

Licht is het toverwoord in de sterrenkunde. In bijna alle vakgebieden van de observationele sterrenkunde zit alle informatie die verkregen wordt ingebakken in het licht dat op ons af komt. Het licht dat iedereen het beste kent is het voor onze ogen zichtbare (optische) licht. Het zichtbare licht dat wij van de zon krijgen bestaat uit verschillende kleuren (golflengten) van rood tot blauw dat wij een spectrum noemen. Het optische licht is maar een klein stukje van het hele (electro-magnetische) spectrum van licht.

Het spectrum loopt van laag energetisch licht (radiostraling) via infrarood, optisch, ultraviolet en röntgenstraling naar extreem energetisch licht (gammastraling). De hoofdmoot van de waarnemingen in dit proefschrift is gedaan in energetisch licht, namelijk röntgenstraling (ook wel X-rays genoemd). Daarin is ook weer een onderscheid in te maken in zogenaamde zachte en harde röntgenstraling. Dit heeft ook met de energie van de lichtdeeltjes te maken. De energiemaat die in de hoge-energie-astrofysica gebruikt wordt is de electronvolt (eV). Een lichtdeeltje zachte röntgenstraling heeft typisch de energie van 200 tot 10000 electronvolt (1000 eV = 1 keV; 0.2–10 keV). Harde röntgenstraling heeft een hogere energie dan 10 keV en kan oplopen tot $\sim$500 keV. Harde röntgenstraling tussen $\sim$100 en 500 keV wordt ook wel zachte gammastraling genoemd. In dit proefschrift zijn waarnemingen gebruikt tot een maximale energie van 30 MeV (mega eV). De waarnemingen van röntgen- en gammastraling worden gedaan met behulp van instrumenten aan boord van ruimtesatellieten. Deze straling wordt namelijk door de atmosfeer van de aarde geabsorbeerd en kan dus niet vanaf de aarde waargenomen worden. Van de röntgen- en gammasatellieten INTEGRAL, XMM-*Newton*, RXTE, *Swift*, BeppoSAX, ASCA en CGRO zijn in dit proefschrift gegevens verwerkt. Er is ook een artikel waarin data gebruikt zijn van laag energetisch licht in de vorm van radiostraling, nabij infrarood en optisch licht. Deze waarnemingen kunnen wel vanaf de aarde gedaan worden. Het heeft niet zozeer met de energie van het licht te maken, maar meer met de samenstelling van de atmosfeer of een bepaald soort licht de aarde bereikt of niet.

Door de spectra van de objecten die je bekijkt te vergelijken met de spectra van fysische processen kun je uitvinden wat er met het object gebeurt. Die fysische processen zijn vaak afhankelijk van bijvoorbeeld temperatuur (thermisch) of versnellingsmechanismen (niet

thermisch). Zo kan een beeld gevormd worden van de locale omstandigheden van het object.

Maar het licht bevat meer informatie dan alleen een spectrum. Het bevat ook tijdsinformatie. Het object zou bijvoorbeeld kunnen knipperen. Dit tijdssignaal kan in het ontvangen licht worden herkend door een tijdsanalyse op de data los te laten. Een knipperend object zou een roterend object kunnen zijn en zo kun je erachter komen hoe snel dit object ronddraait.

Theorie

Natuurlijk bestaat er naast observationele sterrenkunde ook theoretische sterrenkunde. In de wetenschap is de ene tak zonder de andere tak eigenlijk onzinnig. Een theorie is aardig als theorie, maar krijgt pas echte waarde als deze getoetst kan worden aan waarnemingen en andersom geldt hetzelfde. Als een theorie de waarnemingen goed kan beschrijven klopt deze theorie (ervan uitgaande dat de fysica in de theorie goed berekend is) zolang er geen waarnemingen zijn die de theorie onderuit halen. Natuurlijk kunnen er concurrerende theoriën zijn. Betere of specifieke waarnemingen moeten dan uiteindelijk de goede theorie aan kunnen wijzen. Meestal is het zo dat er eerst waarnemingen zijn die niet begrepen kunnen worden met de kennis die op dat moment voorhanden is. Dan gaan theoretici denken hoe deze te verklaren. Maar soms komt het voor dat er al theoretische voorspellingen zijn die pas later observationeel gevonden worden. Dit was het geval met de objecten in dit proefschrift. Al twee jaar na de ontdekking van het neutron (Chadwick 1932) voorspelden Baade & Zwicky (1934) het mogelijke bestaan van kleine zware sterren die overwegend uit neutronen zouden bestaan, neutronensterren. Het zou ruim dertig jaar duren voordat de eerste neutronenster ontdekt zou worden (Hewish et al. 1968). De observationele vondsten in dit proefschrift zijn vooralsnog niet te verklaren met de huidige theoriën. Theoretici zijn bezig modellen te maken om onze waarnemingen mee te kunnen verklaren, maar tot op heden is er geen model dat daaraan voldoet.

Neutronensterren

Neutronensterren zijn de extreemste objecten in het heelal die direct waarneembaar zijn. Ze hebben een diameter van slechts $\sim$20 km, maar zijn wel bijna $\sim$1.4 keer zo zwaar als de zon ($\sim 2.8 \times 10^{30}$ kg)! De gemiddelde dichtheid van een neutronenster is zo groot, dat als je alle $\sim$6 miljard mensen op aarde zou comprimeren tot de dichtheid van een neutronenster ze zouden passen in een knikker (met een diameter) van slechts 1 cm. Het behoeft geen toelichting dat de zwaartekracht nabij zo'n extreem object ook gigantisch is. Daarnaast kunnen neutronensterren ook nog eens een gigantisch magneetveld hebben tot een miljard keer zo sterk als het sterkste stabiele magneetveld dat op aarde tot dusver behaald is.

Een neutronenster is het eindproduct van de levensloop van een zware ster. Een ster wordt geboren uit een wolk met gas en stof als binnenin de ster de energieproductie in de vorm van kernfusie begint. Kernfusie is het proces waar kerndeeltjes, bijvoorbeeld waterstof,

'samensmelten' tot een zwaarder deeltje, in dit geval een helium deeltje. Bij deze reactie komt energie vrij (Einstein; $E = mc^2$). Tijdens het leven van een ster fuseren lichte elementen naar zwaardere elementen totdat ijzer bereikt is. Als ijzer zou fuseren, dan kost het energie in plaats van dat het energie oplevert en dat is onnatuurlijk. Aan het eind van het leven van een zware ster, die tussen de 8 en 20 keer zo zwaar is als de zon, bevindt zich een zware ijzerkern in de ster. De enorme druk in deze kern wordt veroorzaakt door zogenaamde gedegenereerde elektronen. Dat wil zeggen dat deze elektronen niet in dezelfde kwantumtoestand kunnen zitten, wat beschreven wordt door Pauli's uitsluitingsprincipe. Deze druk valt weg op het moment dat de elektronen protonen invangen die afkomstig zijn uit een fotodesintegratieproces dat snel het ijzer in de ijzerkern afbreekt. Het ijzer wordt helemaal afgebroken tot protonen en neutronen. De protonen worden ingevangen door de elektronen waardoor weer neutronen gemaakt worden. Zodoende ontstaat er een enorme hoeveelheid neutronen. De kern zal ineenstorten totdat er een nieuwe druk ontstaat door hetzelfde Pauli principe, maar nu voor neutronen. De kern die nu ontstaan is wordt uiteindelijk een neutronenster, als de druk de extreme zwaartekracht kan overwinnen. Kan deze dat niet, dan zal de kern imploderen tot een zwart gat. De rest van de ster ontploft op het moment van creatie van de neutronenster. Deze ontploffingen zijn de zogenoemde supernovaexplosies.

Deze vorm van neutronenstercreatie is de enige manier voor geïsoleerde zware sterren. Nog een andere manier is mogelijk voor dubbelstersystemen. De neutronenster wordt dan gevormd via een omweg. Als een lichte ster (lichter dan $\sim$4 keer de zonsmassa) aan het einde van zijn leven is, ontploft deze niet. In het binnenste ontstaat geen neutronenster, maar een witte dwerg, wat een klein overblijfsel is ter grootte van de aarde, maar met een massa tot ongeveer de massa van de zon. Als de begeleidende ster in het dubbelstersysteem massa overdraagt (accretie) naar de witte dwerg, kan deze op een gegeven moment zo zwaar worden dat een kritische massa (Chandrasekhar massa; $\sim$1.4 keer de zonsmassa) bereikt wordt. Dan implodeert de witte dwerg alsnog tot een neutronenster.

Ongeveer 1% van alle sterren wordt uiteindelijk een neutronenster. Dat wil zeggen dat er zich tussen de honderd miljoen en een miljard neutronensterren in ons melkwegstelsel moeten bevinden. Tot op heden zijn er slechts tegen de 2000 ontdekt.

Een neutronenster kan dus geïsoleerd, of een onderdeel van een dubbelstersysteem zijn. In dit proefschrift gaat het voornamelijk over geïsoleerde neutronensterren. Ik laat daarom de dubbelstersystemen in deze samenvatting achterwege (vanaf hier heb ik het uitsluitend over geïsoleerde neutronensterren tenzij anders vermeld). Daarnaast kan een neutronenster een pulsar zijn of niet. Een pulsar is een roterende neutronenster die bundels straling uitzendt, vergelijkbaar met het effect van een vuurtoren. De meeste neutronensterren zijn radiopulsars. Dat zijn pulsars die voornamelijk radiostraling uitzenden. Een klein deel van de pulsars zendt ook röntgenstraling uit, en een nog kleiner deel zelfs gammastraling.

Van de neutronensterren die als pulsar zichtbaar zijn is het betrekkelijk eenvoudig om de tijdsinformatie bij te houden. De meeste neutronensterren hebben een rotatieperiode tussen de 0.1 en 2 seconde. Het blijkt dat ze langzaam trager gaan roteren. Dat komt omdat het magneetveld een beetje weerstand ondervindt van het medium direct rond de neutronenster.

In deze tabel zijn verschillende magneetveldsterktes van objecten te vergelijken. De sterkte van magneetvelden worden in de sterrenkunde nog traditioneel in Gauss uitgedrukt. In het standaard eenhedenstelsel is de eenheid voor magnetische veldsterkte de Tesla. 1 Tesla is 10^4 *Gauss*

Magneetveld van:	Sterkte (Gauss)
Aarde	$\sim$0.3–0.6
Zon	$\sim$1
Staafmagneet	$\sim$100–1000
Jupiter	$\sim$1000
Zonnevlek	$\sim$1000
MRI scanner	$\sim$5000–30000 = $5 \times 10^3 - 3 \times 10^4$
Magnetische ster	$\sim 10^4$
Wereldrecord (stabiel)	$\sim 10^6$
Wereldrecord (tijdelijk)	$\sim 10^7$
Witte dwerg	$\sim 10^6 - 10^8$
Neutronenster (zwak)	$\sim 10^7 - 10^9$
Neutronenster (standaard)	$\sim 10^{11} - 10^{13}$
Magnetar (neutronenster sterk)	$\sim 10^{14} - 10^{15}$

Het magneetveld van een neutronenster is af te schatten aan de hand van de grootte van de rotatieperiode (P) en de snelheid van het afremmen. Dit is te meten in de periodeafgeleide ($\dot{P}$). Neutronensterren hebben de sterkste magneetvelden in het heelal. In de tabel staat een lijstje met andere magneetvelden ter vergelijking. De meeste neutronensterren hebben een magneetveld tussen de 10^{11} Gauss (G) en 10^{13} G, maar een kleine groep neutronensterren heeft een nog sterker magneetveld, tot zelfs 10^{15} G. In dit proefschrift gaat het voornamelijk over deze laatste groep neutronensterren.

Magnetars

De neutronensterren met de sterkste magneetvelden zijn de zogenaamde magnetars. De magneetvelden van magnetars zijn ongeveer 100 keer zo sterk als die van 'normale' neutronensterren.

De energie die van de pulsars af komt in de vorm van straling moet ergens vandaan komen. De meeste pulsars krijgen deze energie uit de (kinetische) rotatie-energie. Doordat de neutronenster afgeremd wordt komt er energie beschikbaar die gebruikt kan worden voor het uitzenden van straling. Bij magnetars is de hiervoor beschikbare energie bij lange na niet genoeg om de hoeveelheid straling die er vanaf komt te kunnen verklaren. Die energie is namelijk honderden tot duizenden keren meer. Tegenwoordig is algemeen geaccepteerd dat

het magnetische veld de energiebron is die verantwoordelijk is voor de energie die vrij komt uit magnetars.

Tot de groep magnetars horen de zogenoemde Soft Gamma-ray Repeaters (SGR's) en de Anomalous X-ray Pulsars (AXP's). SGR's zijn neutronensterren die in 1979 voor het eerst zijn ontdekt. Deze bronnen vertonen namelijk herhaaldelijk explosieve verschijnselen. Ze werden ontdekt toen er gezocht werd naar zogenoemde 'Gamma-Ray Bursts', ook wel gammaflitsen genoemd. Omdat er nog nooit een gammaflits vanaf dezelfde plek waargenomen was/is, vielen de SGR flitsen op, omdat deze wel steeds vanaf dezelfde plek afkomstig waren. Tijdens een gigantische reuzeflits ('giant flare') werden pulsaties van ongeveer 8 seconden gemeten, hetgeen kon duiden op een roterende neutronenster. Lang bleef het onduidelijk wat deze bronnen nu precies waren. In 1989 werd er een doorbraak bereikt door waarnemingen van Kouveliotou et al. (1998). Zij maten zowel de periode als de periodeafgeleide van SGR 1806-20. Daaruit kwam naar voren dat deze bron een enorm magneetveld had en dat de energie die deze uitzond vele malen groter was dan verklaard kon worden door de energie die beschikbaar was door het afremmen van het object.

Enkele jaren hiervoor vroegen de theoretici Duncan & Thompson (1992) zich af waarom de meeste neutronensterren ongeveer hetzelfde magneetveld hadden. Zij leidden af dat het mogelijk was om neutronensterren te creëren met veel hogere magneetvelden en dat het mogelijk was hiermee de verschijnselen van SGR's mee te verklaren. Deze vondst zou uitgroeien tot het magnetar model. Het basisidee achter de magnetar is dat deze een intern energiereservoir heeft waaruit de grote hoeveelheid energie geput kan worden die van magnetars waargenomen wordt. Dit energiereservoir bevindt zich in het magneetveld binnenin de neutronenster. Dit magneetveld is als het ware opgewonden en heeft een soort van helix (spiraal) structuur. Deze magnetische configuratie bevat meer energie dan een magneetveld dat niet opgewonden is. De energie die in zo'n opgewonden magneetveld opgeslagen zit is genoeg om een magnetar minstens 10 000 jaar van energie te voorzien. Dit komt overeen met de karakeristieke leeftijd van de magnetars (die geschat kan worden uit de periode en periodeafgeleide). Thompson et al. (2002) breidden het model verder uit met het idee dat het interne magneetveld zo sterk was dat het ook invloed heeft op het magneetveld buiten de neutronenster. Deze blijkt ook een twist te krijgen, wat invloed heeft op waargenomen eigenschappen, zoals de grote periodeafgeleide ($\dot{P}$) en het persistente spectrum (stabiele uitgezonden straling, dus niet van bijvoorbeeld flitsen).

Naast de SGR's zijn de AXP's ook magnetars. AXP's zijn het hoofdonderwerp van dit proefschrift. AXP's zijn zo'n 30 jaar geleden ontdekt als relatief heldere röntgenbronnen. Ze vielen op door hun helderheid en als pulsars die roteerden in een smal tijdsinterval tussen $\sim$5 en 12 seconden. Daarmee pastten ze bij geen van de destijds bekende astronomische objecten en vandaar dat ze de naam 'abnormale' röntgenpulsars kregen. In feite zijn AXP's te vergelijken met SGR's, alleen vertonen ze minder activiteit in de vorm van flitsen. Het heeft jaren geduurd voordat AXP's en SRG's definitief als zelfde klasse gezien werden. Pas toen voor het eerst een flits van een AXP waargenomen werd was het duidelijk dat ze feitelijk hetzelfde zijn als SGR's. Het verschil in activiteit zou er op kunnen duiden dat ze zich ieder

in een andere evolutionaire fase bevinden. Naast dat AXP's minder flitsen vertonen is het spectrum ook wat anders dan SGR's. Bij AXP's is naast een niet-thermische ook een redelijke thermische component aanwezig in het röntgenspectrum.

De figuren in dit proefschrift met spectra zijn zogenoemde E^2F figuren. In deze figuren is de hoeveelheid straling (F) vermenigvuldigd met de energie van de fotonen in het kwadraat (E^2). In een logaritmische presentatie heeft dat als voordeel dat de spectra die beschreven worden met een machtswet ($F \propto E^{-\Gamma}$) met index $\Gamma = 2$ een horizontale lijn geven in zo'n figuur. In zo'n spectrum is de energie per decade even groot. Een zacht spectrum heeft een index groter dan 2. Zo'n spectrum vertoond een zakkende lijn in een E^2F figuur en heeft meer energie per decade bij lage energieën dan bij hoge energieën. Een hard spectrum heeft een index kleiner dan 2. Zo'n spectrum loopt omhoog in een E^2F figuur en heeft dus per decade meer energie bij hogere energieën dan bij lage energieën. In dit proefschrift lopen de termen 'harde en zachte röntgenstraling' en 'harde en zachte spectra' door elkaar. De eerste term heeft met de energieband te maken en de tweede met de vorm van het spectrum. (Een spectrum in de harde röntgen kan net zo goed hard als zacht zijn.)

Doordat AXP's gedurende $\sim$30 jaar alleen als zachte röntgenbronnen bekend waren, was het des te opmerkelijker en volledig onverwacht dat INTEGRAL op twee locaties van AXP's harde röntgenstraling detecteerde. De vraag was of deze straling echt van de AXP's afkomstig was. Kuiper et al. (2004a) toonden aan dat het signaal in de harde röntgenband gemeten met de satelliet RXTE (2–250 keV) een gepulste component had met dezelfde periode als in de zachte röntgenband. Daarmee was definitief aangetoond dat AXP's ook bronnen van harde röntgenstraling zijn en dat het ook harde röntgenpulsars zijn. Waren eerst AXP's tot ongeveer 10 keV gedetecteerd, nu was opeens 150 keV de maximaal gemeten energie. Daarbovenop bleek het spectrum niet zacht, maar hard te zijn. In tegenstelling tot een zacht spectrum beneden de 10 keV is het het spectrum boven de 10 keV hard met een index van $\Gamma \sim 1.5$. Het spectrum vertoont dus een drastische verandering rond 10 keV. Het gepulste spectrum (dus zonder de ongepulste fotonen) is zelfs nog harder dan het totale (gepulste + ongepulste) spectrum met een index van $\Gamma \sim 1$. Dat wil dus zeggen dat bij hogere energie de fractie van gepulste fotonen groter wordt, totdat mogelijk alle straling op een gegeven moment gepulst is.

Deze ontdekking was zoals gezegd geheel onverwacht, want de magnetartheorie voorspelde a priori geen persistente harde röntgenstraling. Uitgaande van het model met het extreem sterke, getwiste magneetveld buiten de neutronenster hebben Thompson & Beloborodov (2005) het coronamodel ontwikkeld. Met dit model is het mogelijk om semipersistente harde straling van magnetars te krijgen, maar het is onder andere moeilijk om het verschil in totale- en gepulste spectra te verklaren.

Dit was de status van het AXP onderzoek bij harde röntgenenergiën voordat het onderzoek voor dit proefschrift begon. Het proefschrift gaat voornamelijk over de niet-thermische röntgenstraling van AXP's. Het doel is uiteindelijk om een beter begrip te krijgen van de fysische processen die onder extreme condities verantwoordelijk zijn voor deze straling en waar deze processen plaatsvinden in de magnetosfeer rond de AXP.

Inhoud van dit proefschrift

Hoofdstuk 1: Engelstalige introductie – Deze Nederlandstalige introductie is een ingekorte en vereenvoudigde versie van de Engelstalige introductie. Ook de niet wetenschappelijk geleerde lezer zal een groot deel van dit hoofdstuk begrijpen. Het begint met een historische introductie en daarna zal het niveau langzaam opgevoerd worden met steeds meer details.

Hoofdstuk 2: INTEGRAL – Dit hoofdstuk intoduceert een satelliet van de Europese ruimtevaart organisatie ESA, INTEGRAL, met aan boord telescopen die gevoelig zijn voor harde röntgenstraling. Het hele onderzoek in dit proefschrift is gestimuleerd door verrassende resultaten uit waarnemingen met deze satelliet, maar er zijn ook gegevens van andere röntgensatellieten gebruikt zoals RXTE, BeppoSAX en XMM-*Newton*. Het zal blijken in dit proefschrift dat als je de meeste informatie over het te bestuderen object wil verkrijgen, je data over een zo breed mogelijk energiebereik moet analyseren.

Hoofdstuk 3: Een studie van een groot veld met INTEGRAL – In dit hoofdstuk zijn de resultaten gepresenteerd van een lange waarmening van het sterrenbeeld Cassiopeia met INTEGRAL(20–300 keV). Het beeldveld van INTEGRAL is zeer groot waardoor een groot aantal bronnen tergelijkertijd bestudeerd kan worden en waardoor de kans om iets onverwachts te ontdekken ook groot is. De goede beeldkwaliteit van de detector IBIS is hier benut om vanuit 'foto's' bij verschillende energiebanden spectrale informatie te halen. De spectra van alle bronnen in het veld zijn geanalyseerd. Onder de gedetecteerde bronnen bevinden zich röntgendubbelsterren waarvan er twee nieuwe harde röntgenbronnen zijn. Het meest in het oog springende resultaat in dit werk is de ontdekking van harde röntgenstraling van de AXP 4U 0142+61. Harde röntgenstraling is gedetecteerd tot 150 keV met een machtswetspectrum met een index $\Gamma = 0.73 \pm 0.17$. Vergeleken met het hele zachte spectrum ($\Gamma \sim 3.6$) beneden 10 keV betekent dit een drastische spectrale verandering. AXP's blijken harde röntgenbronnen te zijn. Bovendien tonen we aan dat de meeste energie die de AXP uitzendt uitgezonden wordt boven de 10 keV. De uitgezonden energie in de 20–100 keV is 5.9×10^{34} erg s^{-1} (aannemende een afstand van 3 kpc; ongeveer 10 000 lichtjaar), wat meer dan 100 keer zoveel is als wat mogelijk is uit het afremmen van de neutronenster. Daarnaast hebben we de gegevens opnieuw geanalyseerd van de telescoop COMPTEL aan boord van de satelliet CGRO (1991–2000), gevoelig tussen 750 keV en 3 MeV in het gebied van de gammastraling. We hebben geen detectie gevonden van 4U 0142+61, maar alleen bovenlimieten vast kunnen stellen. Deze limieten hebben wel de implicatie dat het spectrum moet breken. Dat wil zeggen dat het spectrum van hard weer naar een zacht spectrum moet ombuigen, anders hadden we met COMPTEL de AXP wel kunnen meten.

Hoofdstuk 4: Gepulste emissie van AXP's – Kuiper et al. (2004a) hebben voor het eerst aangetoond dat AXP 1E 1841-045 gepulste emissie uitzendt in de harde röntgenband boven 10 keV. In dit hoofdstuk presenteren we van nog drie AXP's de ontdekking van gepulste harde röntgenstraling, namelijk van 4U 0142+61, 1RXS J1708-40 en 1E 2259+586 met behulp van RXTE en INTEGRAL data. Alleen de laatste bron is te zwak om gedetecteerd te worden met INTEGRAL. Ook voor deze AXP's is geen detectie gerealiseerd met COMPTEL.

Hoofdstuk 5: Een breedbandige studie van 4U 0142+61 – Het meeste van de uitgezonden energie van een AXP is in de harde- ($\sim$10–250 keV) en zachte ($\sim$0.5–10 keV) röntgenband, maar belangrijke aanwijzingen voor de aard van de niet-thermische emissieprocessen zouden gevonden kunnen worden in het radio-, optische- of nabij-infrarode energiegebied. In dit hoofdstuk presenteren we de resultaten van een (quasi) simultane waarneemcampagne in al deze golflengtegebieden voor 4U 0142+61. Tijdens een INTEGRAL-waarneming van 1 miljoen seconden zijn er ook waarnemingen gedaan met *Swift* in de zachte röntgenband, met *Gemini* in het zichtbare en nabij-infrarode licht en met de Westerbork radiotelescoop. Net als in de voorgaande hoofdstukken is hetzelfde harde röntgenspectrum gemeten met INTEGRAL. Dit bevestigt dat de bron persistent harde röntgenstraling uitzendt. Nu is de bron tot nog hogere energiën (230 keV) gemeten dankzij de langere waarneming. Het spectrum kon beschreven worden met een machtswet met een index $\Gamma = 0.79 \pm 0.10$ zonder indicatie voor een spectrale breuk bij hoge energieën. De optische en nabij-infrarode metingen liggen twee tot drie orden van grootte ($\sim 10^2 - 10^3$) boven de extrapolatie van de INTEGRAL en *Swift* spectra. Waarom dit zo is blijft tot dusver onopgelost. Helaas is er geen radiodetectie verkregen tijdens een twaalf uur lange waarneming met de Westerbork radiotelescoop.

Hoofdstuk 6: Gedetailleerde röntgeneigenschappen van 4U 0142+61 – Voor de modellering van fysische processen die verantwoordelijk kunnen zijn voor de niet-thermische emissie van AXP's is het bepalen van gedetailleerde observationele eigenschappen voor de hele röntgenband van groot belang. Om deze eigenschappen te bepalen hebben we gebruik gemaakt van 4.5 Ms aan INTEGRAL waarnemingen die genomen zijn gedurende drie jaar, drie sets XMM-*Newton* waarnemingen en 7.5 jaar aan regelmatige monitorwaarnemingen met RXTE. Deze uitgebreide studie resulteerde in het INTEGRAL energiebereik tot een tijdsgemiddeld spectrum dat beschreven kan worden met een machtswet met index $\Gamma = 0.93 \pm 0.06$, gedetecteerd tot 230 keV. Dankzij bovenlimieten gemeten voor energieën boven de 230 keV met INTEGRAL-SPI is het voor het eerst mogelijk om een significante afwijking (spectrale breuk) te meten van deze machtswet. De maximale helderheid van 4U 0142+61 ligt rond de 280 keV. Binnen de meetnauwkeurigheid hebben we in het INTEGRAL energiedomein geen tijdsvariaties gemeten voor zowel de spectrale vorm als de hoeveelheid uitgezonden energie. We hebben een tijdsanalyse uitgevoerd op de INTEGRAL data en gepulste emissie gemeten tot een energie van 160 keV. Het gepulste spectrum is erg hard en kan beschreven worden met een machtswet met een index $\Gamma = 0.40 \pm 0.15$. Een tijdsanalyse is ook uitgevoerd op waarnemingen uitgevoerd met XMM-*Newton*, RXTE en ASCA. We hebben gevonden dat de pulsprofielen in de ASCA data significant verschillen van de profielen gemeten met XMM-*Newton*. Dit verschil kan te maken hebben met een mogelijke 'glitch', wat een snelle verandering is in het rotatiegedrag van de neutronenster, die over het algemeen tijdelijk van aard is. Gebruik makend van consistente tijdsanalyses voor alle instrumenten hebben we een breedbandige analyse gedaan als functie van pulsarfase in het energiedomein tussen 0.8 keV en 300 keV. Dat wil zeggen dat als de neutronenster ronddraait we telkens een kort tijdsinterval kiezen waarin de neutronenster met dezelfde oriëntatie naar ons toe staat. Zo kunnen we onderzoeken of de gepulste spectra variëren als de oriëntatie van de neutronenster anders

is. We hebben drie faseintervallen gekozen en daarvan de gepulste spectra bepaald. De spectra die gevonden werden waren zeer verschillend. Onze hoofdconclusie is dat er minstens drie verschillende gepulste componenten zijn geïdentificeerd die verschillende spectra vertonen. Omdat de onderlinge spectra, genomen met vier satellieten op verschillende tijdstippen, opmerkelijk stabiel zijn toont dit aan dat de algemene geometrie van verschillende gebieden in de magnetosfeer van de AXP waarin de straling geproduceerd wordt erg stabiel moeten zijn. Tot slot bespreken we onze resultaten in vergelijking met theoretische modellen die voorgesteld zijn om de harde niet-thermische röntgenstraling van AXP's mee te verklaren.
Hoofdstuk 7: De bizarre AXP 1RXS J1708-40 – Om uit te vinden of voor deze AXP ook verschillende gepulste componenten met verschillende spectra aangetoond kunnen worden hebben we voor 1RXS J1708-40 dezelfde benadering toegepast als voor 4U 0142+61 in het vorige hoofdstuk. Ook deze keer hebben we alle beschikbare INTEGRAL data gebruikt, deze keer 12 Ms, een XMM-*Newton* waarneming en alle beschikbare RXTE data genomen over een periode van 9 jaar. Net als voor 4U 0142+61 vinden we voor 1RXS J1708-40 een stabiel INTEGRAL spectrum over een periode van vier jaar. Het tijdsgemiddelde totale spectrum kan beschreven worden met een machtswet met index $\Gamma = 1.13 \pm 0.06$ wat gemeten is tot $\sim$175 keV. Met behulp van INTEGRAL-SPI waarnemingen konden we deze keer geen beperkende bovenlimieten bepalen en daardoor is er geen bewijs voor een spectrale breuk gevonden. Verrassenderwijs is het gepulste signaal meetbaar tot een energie van 270 keV. Het INTEGRAL gepulste spectrum kan worden beschreven met een machtswet met index $\Gamma = 0.98 \pm 0.31$. De faseafhankelijke spectra vertonen spectaculaire variaties in vorm. Eerst hebben we drie brede faseintervallen gekozen voor alle data van INTEGRAL, RXTE en XMM-*Newton*. Ook hier zijn de onderlinge spectra weer consistent met elkaar in de overlappende gedeelten van het energiebereik tussen de verschillende instrumenten gemeten op verschillende tijdstippen. Ook dit is weer indicatief voor een zeer stabiele configuratie van de gebieden in de magnetosfeer van de AXP waar de straling geproduceerd wordt. De drie faseafhankelijke spectra van gepulste emissie volgen niet het totale spectrum (gepulste + niet gepulste emissie) en ze zijn veel complexer qua vorm. Daarom hebben we ook faseafhankelijke spectra gemaakt voor 10 smalle faseïntervallen met de data van INTEGRAL en RXTE. Deze analyse leidt tot de identificatie van drie spectraal verschillende componenten. Deze componenten hebben de volgende spectrale vormen: een zachte machtswet met een index $\Gamma = 3.58 \pm 0.34$, een harde machtswet met index $\Gamma = 1.00 \pm 0.09$ en een gekromde component die beschreven kan worden met de som van twee 'logparabolische' functies. Met een som van deze spectra kunnen alle faseafhankelijke spectra beschreven worden. De bijdrage van iedere component als functie van fase beschrijft een volledig ontkoppeld pulsprofiel. Daarmee is een volledige ontkoppeling van de spectrale componenten voor het hele röntgendomein van 2.8 keV tot 300 keV bepaald voor 1RXS J1708-40. Deze gedetailleerde spectrale- en tijdskarakteristieken geven stringente voorwaarden voor de interpretatie met mogelijke fysische stralingsmechanismen en de geometrie in de magnetosfeer van de AXP.