



Connecting the Coherent and Stochastic X-ray Variability of Accreting  
Millisecond Pulsars

*P.M. Bult*

## Samenvatting

### De koppeling tussen de coherente en stochastische röntgenvariabiliteit van accreterende milliseconde pulsars

Accreterende milliseconde pulsars zijn snel roterende neutronensterren in lage massa röntgendubbelsterren. In dergelijke systemen fungeert de begeleidende ster als massadonor en wordt materie overgedragen van de begeleidende ster naar de neutronenster. Als deze materie richting de neutronenster stroomt, komt het in een baanbeweging rond de ster en vormt zodoende een gasschijf, welke door het vrijkomen van gravitationele energie opwarmt terwijl het materiaal via een spiraal naar binnen beweegt. Het merendeel van de energie die via het accretieproces vrijkomt, is afkomstig uit de nabije omgeving van de neutronenster, waar de schijf een temperatuur heeft ten orde van  $10^7$  Kelvin en de resulterende thermische emissie helder is in de röntgenband.

De schijf is turbulent en vertoont structuren die zich in en via de materiestroom voortbewegen, wat de intensiteit van de thermische emissie moduleert. Dergelijke variabiliteit in de röntgenemissie biedt daarmee de mogelijkheid om neutronensterren en hun directe omgeving te bestuderen. Aangezien de tijdschaal van deze variabiliteit afneemt naargelang materie zich dichterbij de neutronenster bevindt, verdient de snelste milliseconde variabiliteit die van dergelijke objecten kan worden waargenomen speciale aandacht.

In het geval van accreterende milliseconde pulsars levert het magnetische veld van de neutronenster een dynamisch belangrijke bijdrage aan het accretieproces in de directe omgeving van de neutronenster. Als het magnetische veld sterk genoeg is kan het de schijfstructuur van het accreterende materiaal verstoren, de stroomrichting van de materie afbuigen en deze naar de magnetische polen van de ster leiden. De inslag van deze materiestroom creëert een lokaal emissie gebied op het steroppervlak, dat ten gevolge van aspect-variaties een periodieke modulatie van de uitgezonden röntgenstraling veroorzaakt. Aangezien deze periodieke pulsaties strikt coherent zijn en de rotatiesnelheid van de neutronenster weergeven, leveren ze een accuraat signaal waarmee de neutronenster bestudeerd kan worden.

Sinds de ontdekking van de eerste accreterende milliseconde pulsar in 1998 zijn er in totaal 15 van zulke systemen gevonden. De coherente pulsaties van deze objecten zijn uitvoerig bestudeerd, echter de stochastische variabiliteit heeft bij vergelijking veel minder aandacht gekregen. In dit proefschrift bestudeer ik de röntgenvariabiliteit van accreterende milliseconde pulsars, waarbij zowel de coherente pulsaties als de stochas-

tische variabiliteit in aanmerking worden genomen. Aangezien de coherente pulsaties worden gevoed door de variabele accretiestroom, is het redelijk te verwachten dat deze twee componenten van de röntgenvariabiliteit een sterke relatie vertonen. Door de coherente en stochastische variabiliteit te koppelen krijgen we een vollediger beeld van het accretieproces naar deze milliseconde pulsars en kunnen we de nauwkeurigheid van de pulsaties gebruiken om tot een beter begrip te komen van de variabele accretiestroom en de magnetische verbinding met de neutronenster.

In hoofdstuk 2 worden de coherente pulsaties van de klassieke accreterende milliseconde röntgenpulsar (AMXP) SAX J1808.4–3658 tijdens de uitbarsting in 2011 bestudeerd. Dit hoofdstuk vertegenwoordigt de voortzetting van een langere studie naar de coherente pulsaties van deze bron en breidt het tijdspane van de waarnemingen uit naar 14 jaar. In eerder werk is aangetoond dat de pulsaties op lange termijn een stabiele vertraging vertonen en dat de baanbeweging van het dubbelster systeem uitdijt. In deze nieuwe analyse bevestigen we dat de vertraging van de pulsaties stabiel is gebleven en tonen we aan dat de uitdijing van de baanbeweging versnelt. Een dergelijke versnelde uitdijing is moeilijk verklaarbaar in termen van de seculiere evolutie van het dubbelstersysteem, en suggereert dan er een ander mechanisme actief is dat de baanperiode beïnvloedt. We suggereren dat de versnelde uitdijing het gevolg is van kortdurende uitwisseling van impulsmoment tussen de begeleidende ster en de baanbeweging van het dubbelstersysteem, mogelijk via spin-baan koppeling in de massa quadropool van de begeleidende ster.

In hoofdstuk 3 wordt wederom de pulsar SAX J1808.4–3658 bestudeerd, echter nu in termen van de aperiodieke variabiliteit. In dit hoofdstuk presenteren we de ontdekking van een opmerkelijk *flaring* fenomeen, dat wordt waargenomen in de uitbarstingen van 2008 en 2011 bij een hoge röntgenlichtkracht. Dit flaring-verschijnsel wordt gedurende enkele dagen waargenomen in deze twee uitbarstingen, maar is niet te zien in eerdere waarnemingen van deze bron. Het vertoont sterke overeenkomsten met een ander soort flaring-variabiliteit, die alleen in de staart van de uitbarstingen wordt waargenomen, bij een orde van grootte kleinere lichtkracht. Een aanwijzing voor de oorsprong van deze nieuwe hoge lichtkracht flaring-variabiliteit komt voort uit de relatie met de coherente pulsaties. We tonen aan dat de pulsamplitude correleert met de flaring, zodanig dat de fractionele amplitude van de pulsaties constant is tijdens de flaring-varianties. Volgens onze interpretatie betekent deze correlatie dat de flaring wordt veroorzaakt door een modulatie van de massa-accretiesnelheid, waarvan we suggereren dat die gerelateerd is aan de magnetosfeer. Indien dit soort flaring in andere lage massa röntgendubbelster systemen wordt waargenomen, dan levert dat bewijs voor het bestaan van een magnetosfeer, zelfs in de afwezigheid van pulsaties.

In hoofdstuk 4 wordt de aperiodieke variabiliteit van SAX J1808.4–3658 bestudeerd. In dit hoofdstuk presenteren we een gedetailleerd overzicht van de rijke fenomenologie van deze bron. Twee nieuwe waarnemingen van dubbele kilohertz quasi-periodieke oscillaties (kHz QPOs) worden gerapporteerd, waardoor, voor het eerst voor dit systeem,

---

hun relatieve frequentieverandering kan worden gemeten. Verder bestuderen we de verscheidene componenten van de aperiodieke variabiliteit en vergelijken we hun onderlinge relaties. We besteden uitgebreid aandacht aan de mysterieuze 410 Hz QPO, welke tot nu toe alleen in deze bron is waargenomen. Zo tonen we aan dat deze QPO alleen verschijnt voor een nauwe regio van lichtkracht en kHz QPO frequentie, wat een aanwijzing geeft over hoe er naar een dergelijke QPO gezocht kan worden in toekomstige uitbarstingen of observaties van andere systemen. Door deze QPO te interpreteren als een zijband van de 401 Hz pulsafrequentie, suggereren we dat de onderliggende 9 Hz component door hetzelfde mechanisme wordt veroorzaakt als de lage-frequentie QPO, welke dan retrograad ten aanzien van de pulsar moet bewegen.

In hoofdstuk 5 presenteren we de ontdekking van een directe relatie tussen de kHz QPOs en de milliseconde pulsaties. Aan de hand van de SAX J1808.4–3658 data tonen we aan dat elke keer dat de hogere kHz QPO frequentie door de spinfrequentie heen gaat, de amplitude van de pulsaties een systematische sprong laat zien. Dit resultaat geeft aan dat de binnenste accretiestroom anders is, afhankelijk van of de QPO frequentie sneller of trager is dan de rotatie van de neutronenster en de daaraan gekoppelde magnetosfeer. Dit resultaat levert een sterk bewijs dat de QPO ontstaat in een azimutale beweging van de accretiestroom. De meest voor de hand liggende verklaring is dan dat de QPO direct gegeven wordt door de baansnelheid aan de binnenrand van de accretieschijf en dat de centrifugaalkracht die relevant wordt wanneer die beweging trager is dan de rotatie van de ster de kwalitatieve verandering van de accretiestroom naar de neutronenster veroorzaakt.

In hoofdstuk 6 analyseren we de coherente pulsaties van de accreterende milliseconde pulsar NGC 6440 X-2. In vergelijking met de AMXP-populatie vertoont deze bolhoop-geassocieerde bron een uniek uitbarstingspatroon. De uitbarstingen zijn lichtzwak en, met een duur van enkele dagen, uitzonderlijk kort. De tijd tussen uitbarstingen is met één tot enkele maanden ook kort. Aan de hand van de coherente pulsaties bepalen we de baanevolutie van het dubbelstersysteem. We bestuderen tevens of de fase van de pulsaties tussen verschillende uitbarsten coherent verbonden kan worden, om zodoende de spin en baan evolutie van deze pulsar in een enkele oplossing uit te drukken. We vinden, echter, dat gegeven de systematische onzekerheden in de coherente analyse er geen unieke tijdsoplossing gevonden kan worden.

Ten slotte wordt in hoofdstuk 7 de populatie van accreterende milliseconde pulsars onderzocht. Een van de basiseigenschappen van een neutronenster is de sterkte van het magnetisch veld. Voor accreterende milliseconde pulsars is deze eigenschap echter lastig te meten; alle beschikbare methoden zijn indirect en bevatten verscheidene systematische onzekerheden. Dit is problematisch voor studies waarin de veldsterkte tussen systemen in de vergeleken moet worden, of de gehele populatie wordt vergeleken met andere soorten pulsars. In dit hoofdstuk schatten we de sterkte van het magnetische veld voor een AMXP aan de hand van de detectie van pulsaties. Door het bereik van lichtkracht waarvoor pulsaties waargenomen worden te associëren met het bereik van de binnenste

straal van de accretieschijf waarvoor pulsaties verwacht worden, kunnen we onder- en bovenlimieten op de veldsterkte afleiden. Deze methode wordt op elk van accreterende milliseconde pulsars die met met de *Rossi X-ray Timing Explorer* zijn waargenomen toegepast, om zodoende tot een systematische studie te komen van de magnetische veldsterkte in AMXPs.