

University of Groningen

Spectral and timing properties of black-hole low-mass X-ray binaries

Alabarta Jativa, Kevin

DOI:
[10.33612/diss.194779577](https://doi.org/10.33612/diss.194779577)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2021

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
Alabarta Jativa, K. (2021). *Spectral and timing properties of black-hole low-mass X-ray binaries*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.
<https://doi.org/10.33612/diss.194779577>

Copyright

Other than for strictly personal use, 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), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Nederlandse samenvatting

Eén van de meest energetische processen in het universum vindt plaats tijdens de accretie (of aanwas) van materie op compacte objecten. Dit proces kan plaatsvinden op verschillende kosmische schalen. Van actieve galactische kernen (ookwel AGN's genoemd), waarbij de materie wordt geaccreteerd op superzware zwarte gaten, tot accretie op compacte stellaire objecten, zoals neutronensterren of zwarte gaten.

Deze laatste groep van accretie vindt plaats in een zogenoemd röntgendubbelstersysteem. Deze systemen bestaan uit een compact object, dat een zwart gat kan zijn (afgekort als BH, uit het Engels) of een neutronenster (afgekort als NS), en een 'gewone' ster die bekend staat als de begeleidende ster. Als de twee objecten van het systeem dicht genoeg bij elkaar liggen, wordt materie overgedragen van de begeleidende ster naar het compacte object en komt daarbij energie vrij.

Afhankelijk van de massa van de begeleidende ster kunnen twee soorten röntgendubbelstersystemen worden geïdentificeerd: röntgendubbelsterren met hoge massa (HMXB's, als de massa van de begeleidende ster groter is dan 10x die van onze zon) of röntgendubbelsterren met een lage massa begeleidende ster (LMXB's, als de massa van de begeleidende ster kleiner is dan onze zon). Afhankelijk van het type röntgendubbelstersysteem vindt de accretie plaats via twee verschillende processen. In LMXB's wordt de massa van de begeleidende ster overgebracht naar het compacte object via Roche-Lobe overvloeiing, terwijl in HMXB's de massa wordt overgedragen via stellaire winden.

Met onze focus gericht op LMXB's en in het bijzonder die met een zwart gat als compact object (BH LMXBs), begint de accretie wanneer het materiaal van de buitenste delen van de begeleidende ster zijn Roche Lobe vult (dit is het gebied rondom een ster in een dubbelstersysteem waarin het materiaal van de ster door de zwaartekracht aan de ster gebonden is). Via het centrale

punt van deze structuur, liggend tussen de beide objecten, valt de materie afkomstig van de begeleidende ster op het compacte object en vormt daarbij een schijfstructuur rondom het compacte object. Deze schijfstructuur wordt de accretieschijf genoemd. Tijdens de accretie wordt de kinetische energie door viscose spanningen omgezet in straling. Dicht bij het compacte object komt er zoveel energie vrij dat het röntgenstraling uitzendt. In de buitenste delen van de schijf zijn de temperaturen van de emissie echter niet zo hoog als in de binnenste delen, en daarom vindt de emissie ervan plaats in de optische en infrarode golflengten.

De röntgenstraling afkomstig van BH LMXBs kan niet alleen worden verklaard door de accretieschijf. Volgens sommige modellen zou een ander gebied, de zogenoemde corona, het compacte object en de accretieschijf omringen. De corona bestaat uit een heet elektronenplasma met temperaturen van tien tot honderden keV (een eenheid voor energie) die in röntgenstraling wordt uitgezonden. Hoewel de geometrie van de corona ter discussie staat, zijn er aanwijzingen voor dat de fotonen die van de accretieschijf komen zich verstrooien (via inverse Compton verstrooiing) aan de elektronen in de corona en zo nog hogere energetische straling uitzenden. De intensiteit van de röntgenstraling van BH LMXB's varieert met de tijd. We kunnen twee soorten variaties vinden: variaties op korte termijn (van milliseconden tot seconden) en variaties op lange termijn (van dagen tot jaren). Sommige BH LMXB's, bekend als tijdelijke bronnen, vertonen lange perioden van zeer zwakke emissie in röntgenstraling, onderbroken door uitbarstingen van dagen tot jaren. Tijdens deze uitbarstingen neemt de röntgenintensiteit van de BH LMXB's met verschillende ordes van grootte toe. Aan het einde van een uitbarsting wordt het systeem soms opnieuw helderder, waarbij röntgenhelderheden worden bereikt die één of twee orden van grootte lager zijn dan op het hoogtepunt van de uitbarsting. Dit fenomeen staat bekend als de zogenoemde 'reflares'.

Om de eigenschappen van BH LMXBs te bestuderen, worden twee hoofdstrategieën gevolgd: de studie van het energiespectrum en de studie van de snelle tijdsvariabiliteit met behulp van het zogenoemde Power-Density Spectrum. Het energiespectrum van LMXB's wordt meestal beschreven door twee hoofdcomponenten: een zachte thermische en een harde component (beschreven door een machtswet). Men denkt dat de zachte thermische component afkomstig is van een geometrisch dunne en optisch dikke accretieschijf en wordt beschreven door een meerkleurige schijf met een zwart lichaam met een piek van 0.1–1.0 keV. De harde component daarentegen heeft zijn oorsprong in de corona en strekt zich uit tot honderden keV. Deze component wordt ook wel de gecomptoniseerde component genoemd.

De bijdrage van de twee verschillende spectrale componenten varieert tijdens

een uitbarsting. Aan het begin van de uitbarsting wordt het energiespectrum van BH LMXB's gedomineerd door de gecomptoniseerde component. Naarmate de röntgenintensiteit van het systeem toeneemt, nemen de bijdragen van de harde component af en wordt de zachte thermische component sterker. Op het hoogtepunt van de uitbarsting wordt het energiespectrum gedomineerd door de zachte component. Zodra de röntgenintensiteit van het systeem begint af te nemen, keert de evolutie om en neemt de bijdrage van de zachte thermische component af naarmate die van de gecomptoniseerde component toeneemt. Op deze wijze stelt de studie van het energiespectrum en zijn componenten ons in staat om de eigenschappen en de geometrie van de verschillende componenten van BH LMXB's te bestuderen.

Om de snelle tijdsvariabiliteit van BH LMXB's te bestuderen, gebruiken we het Power Density Spectrum (PDS). Met het PDS kunnen we de frequenties bestuderen waarop de snelle tijdsvariabiliteit optreedt en kunnen we de amplitude van het signaal meten. Er zijn twee soorten kenmerken te vinden in het PDS van LMXB's. De eerste bestaat uit signalen die een breed frequentiebereik bestrijken dat bekend staat als breedbandruiscomponenten. Het tweede type bestaat uit smalle pieken die bekend staan als quasi-periodieke oscillaties, ofwel QPO's genaamd. Afhankelijk van de eigenschappen van de QPO en de breedbandruis zijn er drie soorten QPO's: typen A, B en C. In dit proefschrift richten we ons op de studie van het type-C QPOs. Deze worden gekenmerkt door een sterke fractionele rms-amplitude (de amplitude op de kwadratisch gemiddelde waarde) tot $\sim 30\%$ en pieken op frequenties van enkele mHz tot ~ 30 Hz. Bovendien verschijnen QPOs van het type-C met een sterke breedbandruiscomponent met een fractionele rms-amplitude van 30% – 50% . Welk dynamisch proces de frequentie van het type-C QPOs veroorzaakt, blijft nog steeds onduidelijk. Er wordt echter wel veronderstelt dat het gerelateerd is aan de fluctuaties in de binnenste delen van de accretieschijf.

Als alternatief hierop, stelt de studie van de energie-afhankelijkheid van de fractionele rms-amplitude en de vertragingen van QPO's ons in staat om meer te weten te komen over de stralingsprocessen die verband houden met deze variabiliteitskenmerken. Over het algemeen neemt de fractionele rms-amplitude van het type-C QPOs toe tot 20 keV en blijft daarna constant boven deze energie. Het feit dat de fractionele rms toeneemt met energie op het moment dat de röntgenstraling wordt gedomineerd door de corona, suggereert dat de stralingsoorsprong van de QPO zich in de corona bevindt.

Vertragingen daarentegen worden gedefinieerd als de vertraging tussen fotonen die uit twee verschillende energiebanden komen. Harde vertragingen worden gedefinieerd als de vertraging tussen fotonen afkomstig van hoge energieën ten opzichte van fotonen afkomstig van lage energieën. Zachte vertragingen

daarentegen worden veroorzaakt door de vertraging van zachte fotonen ten opzichte van harde fotonen. Type-C QPOs van LMXB's vertonen zowel harde als zachte vertragingen. Hoewel er verschillende modellen zijn voorgesteld om beide typen vertragingen te verklaren, richten we ons in dit proefschrift op de Comptonisatiemodellen.

Tijdens een uitbarsting in BH LMXB's variëren zowel het energiespectrum als het PDS-spectrum. Afhankelijk van de eigenschappen van beide spectra kunnen verschillende spectrale toestanden worden gedefinieerd. De twee belangrijkste spectrale toestanden zijn de lage/harde toestand (LHS) en de hoge/zachte toestand (HSS). Tijdens de LHS wordt het energiespectrum van de bron gedomineerd door de gecomptoniseerde component, en het PDS van het systeem vertoont een sterke breedbandruiscomponent, met een fractionele rms-amplitude van 30-50%. Type-C QPOs kunnen ook in deze staat worden waargenomen. In de HSS daarentegen domineert de zachte thermische component het energiespectrum en is de fractionele rms-amplitude van de breedbandruiscomponent minder dan 5%. In deze toestand is het mogelijk om QPOs bij lage frequenties waar te nemen. Tussen de LHS en de HSS in worden vaak nog eens twee spectrale toestanden gedefinieerd, namelijk de harde/tussenliggende toestand (HIMS) en de zachte/tussenliggende toestand (SIMS), met eigenschappen die tussen die van LHS en de HSS liggen.

Tijdens sommige uitbarstingen evolueren BH-systemen door alle spectrale toestanden in de volgende volgorde: $LHS \rightarrow HIMS \rightarrow SIMS \rightarrow HSS \rightarrow SIMS \rightarrow HIMS \rightarrow LHS$. In dit proefschrift worden deze uitbarstingen volledige uitbarstingen genoemd. In het verleden werd gedacht dat deze evolutie werd gevolgd door alle BH LMXB's tijdens een uitbarsting, maar zoals we nu weten bereiken sommige BH LMXBs de HSS echter niet. Deze uitbarstingen worden in dit proefschrift Failed-Transition uitbarstingen genoemd, omdat ze geen toestandsovergang naar de HSS kunnen maken. Het fysieke mechanisme dat verklaart waarom BH LMXB's soms de HSS niet bereiken, blijft onduidelijk.

Het bovenstaande maakt het duidelijk dat de studie van de evolutie van de spectrale- en tijdsvariabele eigenschappen van BH LMXB's ons in staat stelt de eigenschappen en de geometrie van het systeem op verschillende momenten van de uitbarsting te kennen. Hieruit kunnen we dan weer de eigenschappen van het compacte object en het accretieproces zelf afleiden. Rekening houdend met de sterke zwaartekracht die in de buurt van het compacte object aanwezig is, vormen deze systemen een uitstekend laboratorium om de algemene relativiteitstheorie onder extreme omstandigheden te testen.

In dit proefschrift richten we ons op de studie van de spectrale- en tijdsvariabele eigenschappen van BH LMXBs. In Hoofdstuk 2 onderzoeken we de waarne-

mingsverschillen tussen volledige en Failed-Transition (FT) uitbarstingen in röntgenstraling en in optische en infrarode golflengten. Het belangrijkste doel van dit project is om te bepalen of we kunnen voorspellen of een uitbarsting een volledige of een FT-uitbarsting zal zijn tijdens de eerste dagen van de uitbarsting. Om ze te kunnen vergelijken in röntgenstraling hebben we alle beschikbare gegevens van drie röntgenmissies gebruikt. Dit zijn de zogeheten *Rossi X-ray Timing Explorer*, *Swift* en *Monitor of All-sky X-ray Image* missies. We ontdekten dat volledige en FT-uitbarstingen niet kunnen worden onderscheiden van hun gegevens in röntgenstraling alleen. We hebben daarnaast ook de optische en infrarood waarnemingen bestudeerd van één van de meest archetypische BH LMXBs, GX 339-4 genaamd, aangezien dit systeem verschillende volledige én FT-uitbarstingen vertoont. We ontdekten dat GX 339-4 helderder is vóór het begin van een FT-uitbarsting dan vóór een volledige uitbarsting. Op basis van dit resultaat kunnen we speculeren dat de accretiesnelheid van het systeem hoger is vóór het begin van een FT-uitbarsting. Als alternatief hebben we ontdekt dat de optische en infrarode lichtkrommen van de FT-uitbarstingen van de GX 339-4 vergelijkbaar zijn met die welke worden verwacht voor de zogenaamde inside-out uitbarstingen.

In Hoofdstuk 3 hebben we de evolutie van de spectrale- en tijdsvariabele eigenschappen van het systeem MAXI J1727-203 tijdens zijn uitbarsting in 2018 bestudeerd gebruik makend van *Neutron star Interior Composition ExploreR* (*NICER*) waarnemingen. We ontdekten dat de energiespectra kunnen worden beschreven door de twee belangrijkste spectrale componenten: de hierboven beschreven zachte thermische- en de harde gecomptoniseerde componenten. Hierbij konden we ook de zachte thermische component bijna tot het einde van de uitbarsting detecteren met lage temperaturen van ongeveer 0.1 keV dankzij de eigenschappen van de *NICER* detectoren. Door de PDS te bestuderen, ontdekten we dat de bron breedbandruis tot 20 Hz vertoont zonder de aanwezigheid van QPOs. Daarnaast hebben we de energieafhankelijkheid van de fractionele rms-amplitude van de breedbandruiscomponent bestudeerd, waarbij we vonden dat deze toeneemt met energie. We concludeerden dat de evolutie van de spectrale- en tijdsvariabele eigenschappen van MAXI J1727-203 tijdens de uitbarsting van 2018 vergelijkbaar is met die van andere BH LMXBs, wat suggereert dat het compacte object in dit systeem een zwart gat is.

In hoofdstuk 4 hebben we de spectrale- en tijdsvariabele eigenschappen van de reflares van het systeem MAXI J1535-571 tijdens zijn uitbarsting in 2017 bestudeerd met behulp van *NICER* waarnemingen. We ontdekten dat dit systeem evolueerde door de verschillende spectrale toestanden tijdens zijn zogenaamde reflaring fase, vergelijkbaar met de evolutie die het systeem volgde tijdens een eerdere uitbarsting. Bovendien vonden de toestandsovergangen plaats bij de laagste lichtsterkten die ooit voor een toestandsovergang zijn ver-

meld. De overeenkomsten tussen de evolutie van de spectrale- en tijdsvariabele eigenschappen van het systeem tijdens een uitbarsting en de reflaring fase suggereren dat zowel de uitbarstingen als de reflares worden aangedreven door dezelfde fysieke eigenschappen.

Ten slotte hebben we in hoofdstuk 5 de eigenschappen bestudeerd van de type-C QPO die werd waargenomen tijdens de uitbarsting van 2019 en zijn eerste reflare van de bron MAXI J1348–630. We bestudeerden voor het eerst de evolutie van de eigenschappen van een QPO tijdens een reflare. We ontdekten dat de eigenschappen van de type-C QPO tijdens de reflare vergelijkbaar zijn met die van QPOs die werden waargenomen tijdens uitbarstingen in andere BH LMXBs. We ontdekten ook dat zowel de fractionele rms-amplitude als de vertragingen die overeenkomen met de type-C QPO toenemen met energie. We hebben dit gedrag uitgelegd in termen van Comptonisatieprocessen.