



Universiteit
Leiden
The Netherlands

High-resolution X-Ray spectral diagnostics of Active Galactic Nuclei

Steenbrugge, K.C.

Citation

Steenbrugge, K. C. (2005, February 2). *High-resolution X-Ray spectral diagnostics of Active Galactic Nuclei*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/577>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/577>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Hoofdstuk 10

Nederlandse samenvatting

10.1 Actieve melkwegstelsels

Melkwegstelsels bestaan uit vele miljarden sterren die door zwaartekracht bijeen gehouden worden. Het licht van de meeste melkwegstelsels is afkomstig van de individuele sterren in het melkwegstelsel. Er bestaan ook melkwegstelsels die meer licht uitstralen dan uitsluitend het licht van de sterren. Uit foto's met een hoge ruimtelijke resolutie blijkt dat het extra licht afkomstig is uit een heel klein gebied in de kern. Deze stelsels worden actieve melkwegstelsels genoemd, en mijn proefschrift gaat over deze stelsels. De extra lichtkracht wordt verklaard door accretie van gas op een zwart gat. Over het algemeen wordt aangenomen dat alle grote melkwegstelsels zo'n actieve fase gehad hebben. Dit wordt afgeleid uit onder andere het feit dat de meeste actieve melkwegstelsels ver van ons verwijderd zijn, wat door de eindige snelheid van het licht betekent dat we ze op jongere leeftijd zien dan de meer nabij gelegen melkwegstelsels. Een ander argument is dat gewone melkwegstelsels, zoals het onze, ook zware zwarte gaten in hun centrum hebben. Ze zijn alleen niet actief doordat er weinig of geen accretie plaats vindt. Aangenomen wordt dat deze zwarte gaten hun huidige massa gekregen hebben door accretie in een vroeger tijdperk.

Algemeen wordt aangenomen dat de lichtkracht van actieve stelsels geproduceerd wordt door de accretie op een zeer zwaar ($10^6 - 10^9$ zonsmassa) zwart gat. Een zwart gat is een object dat zo compact is dat niets, ook geen licht, eruit kan ontsnappen. Gas, of sterren die te dicht langs het zwarte gat passeren, zullen er onherroepelijk in vallen. Indien een ster in vrije val in het zwarte gat valt, zal er maar een zeer beperkte hoeveelheid energie ontsnappen. Indien echter het gas een accretieschijf vormt, doordat het

gas een groot impulsmoment heeft, zullen er enorme hoeveelheden energie vrijkomen. Namelijk, door de constante wrijving in de schijf verliest het gas energie. Dit energieverlies wordt voor een groot deel uitgezonden als hoog-energetische fotonen, maar het kan ook gebruikt worden om jets te vormen.

Quasars en Seyfert melkwegstelsels vormen elk een subgroep binnen de groep van actieve melkwegstelsels. In een quasar zendt de kern zo veel licht uit, dat het licht van het melkwegstelsel waartoe het behoort, overstraald wordt. Op vroegere opnames lijken deze stelsels dan ook op sterren, vandaar de naam quasi stellar radio sources, of kortweg quasars. In dit proefschrift wordt de quasar Ton 1388 bestudeerd.

10.1.1 Seyfert stelsels

Seyfert stelsels zijn een groep van actieve melkwegstelsels, die door Seyfert in 1943 geclassificeerd zijn. Seyfert stelsels hebben een relatief lage lichtkracht in vergelijking met andere actieve melkwegstelsels. Uniek aan Seyfert stelsels zijn de waargenomen verbrede emissielijnen in optische spectra. Deze groep wordt nog onderverdeeld in Seyfert 1 en Seyfert 2 stelsels, al naargelang de breedte van de waargenomen emissielijnen. Seyfert 1 en Seyfert 2 stelsels vertonen “nauwe” lijnen in hun optische spectra, gevormd door gas met snelheden van ongeveer 1000 km s^{-1} . Seyfert 1 stelsels hebben daarnaast ook nog sterk verbrede lijnen, waaruit wordt afgeleid dat het gas snelheden heeft van ongeveer $10\,000 \text{ km s}^{-1}$. Seyfert 2 stelsels hebben deze brede lijnen niet, maar in sommige Seyfert 2 stelsels zijn deze sterk verbrede emissielijnen toch waargenomen in spectra genomen met een optisch polarisatiefilter. Hieruit leidt men af dat de emissie afkomstig van het gas dat de brede lijnen uitstraalt, verstrooid wordt door botsingen met deeltjes die zich tussen de bron en de waarnemer bevinden. De helft van de Seyfert 1 stelsels vertonen in de Röntgenband een absorptiespectrum, met daarnaast enkele smalle en brede emissielijnen. Seyfert 2 stelsels hebben een spectrum met uitsluitend nauwe emissielijnen in het Röntgengebied, en maar een heel zwak continuüm. In dit proefschrift worden de Seyfert 1 stelsel NGC 5548, NGC 4593 en IC 4329A bestudeerd.

Algemeen wordt aangenomen dat het verschil tussen Seyfert 1 en Seyfert 2 stelsels, wordt veroorzaakt door een verschil in de hoek waaronder het melkwegstelsel wordt waargenomen. In Seyfert 2 stelsels kijken we door een dikke laag stof en koud gas, die de Röntgenstraling volledig absorbeert. In Seyfert 1 stelsels kijken we direct naar de kern waardoor we de straling die uitgezonden wordt door de accretieschijf en het gas vlakbij het zwarte gat waarnemen. Er is soms een dunne laag van gas tussen de waarnemer en de accretieschijf dat die straling op bepaalde golflengtes absorbeert.

Er zijn twee modellen die verschillende aspecten over de kern van een melkwegstelsel beschrijven. Beide modellen verklaren de verbreding van de emissielijnen door

Doppler verbreding: het gas dat naar de waarnemer toedraait is blauw verschoven, het gas dat van ons wegdraait is rood verschoven. Hoe sneller het gas draait, hoe groter de verschuiving en dus hoe breder de lijn. Keplers derde wet geeft een relatie tussen de afstand van het gas en de snelheid waarmee het ronddraait. Hoe kleiner de afstand tot het zwarte gat, hoe sneller het gas ronddraait. In het ene model ziet de waarnemer het oppervlak van de accretieschijf als een Seyfert 1 stelsel wordt waargenomen. In een Seyfert 2 stelsel zouden we de zijkant van de accretieschijf zien, indien deze niet geabsorbeerd was. Het absorberende, koude gas ligt in een band rond de accretieschijf voor beide soorten melkwegstelsels. De absorptie waargenomen in dit model wordt de Röntgenspectra van Seyfert 1 stelsels niet direct verklaard. We kunnen aannemen dat het absorberende gas zich in wolken vrij ver van het zwarte gat bevindt, op de afstand waar ook de nauwere emissielijnen worden uitgezonden.

In het andere model zien we een Seyfert 1 stelsel zonder absorptie als we het oppervlak van de de accretieschijf waarnemen, en een Seyfert 1 stelsel met absorptie als we de accretieschijf onder een grotere hoek waarnemen. De absorptie waargenomen in Seyfert 2 stelsels wordt veroorzaakt door enkele wolken koud gas, welke niet noodzakelijk als een band rond de accretieschijf liggen. De absorptielijnen waargenomen in Röntgenspectra worden gecreëerd door wolken in een uitstromende wind. De wind wordt door stralingsdruk omgebogen. In deze wind bevinden zich ook de wolken die de brede emissielijnen uitstralen. Uit de verschillen tussen beide modellen is het duidelijk dat het gas dat zich in de onmiddellijke omgeving van het zwarte gat bevindt nog niet goed begrepen is.

10.2 Röntgenspectra van actieve melkwegstelsels

In dit proefschrift gebruiken we de eerste generatie Röntgen instrumenten met hoge spectrale resolutie aan boord van de *Chandra* en *XMM-Newton* satellieten om actieve melkwegstelsels en in het bijzonder Seyfert 1 stelsels te bestuderen. De accretieschijf straalt een continuüm van laag-energetisch Röntgenfotonen en extreme UV-fotonen uit. De extreme UV-fotonen worden door ons Melkwegstelsel geabsorbeerd. Röntgenspectroscopie is dus de ideale manier om de onmiddellijke omgeving van het zwarte gat te bestuderen.

10.2.1 Conclusies voor het Seyfert 1 stelsel NGC 5548

Drie hoofdstukken in dit proefschrift behandelen het Seyfert 1 stelsel NGC 5548. Dit is één van de Seyfert 1 stelsels die goed bestudeerd zijn en waarvan hoge kwaliteit optische en UV-spectra bestaan. Voor dit stelsel hebben we verscheidene Röntgenspectra

van zeer hoge kwaliteit. Door combinatie van de nieuwe gegevens verkregen uit Röntgen-spectra en de kennis over dit stelsel uit al dan niet gelijktijdige UV-spectra, zijn de meeste conclusies in dit proefschrift gebaseerd op de studie van dit melkwegstelsel.

Overeenkomst tussen absorptie waargenomen in UV- en Röntgenspectra

Een belangrijke vraag is of de absorptie waargenomen in Röntgen- en UV-spectra, afkomstig is van hetzelfde medium, of van verschillende gaslagen. Het verschil gemeten in de kolomdichtheden uit beide spectra is een belangrijke reden om aan te nemen dat beide absorptiecomponenten van een verschillend gas afkomstig zijn. De kolomdichtheid is een maat voor de hoeveelheid ionen in een kolom tussen de waarnemer en de emissiebron. De kolomdichtheden gemeten in UV-spectra zijn ongeveer een factor tien kleiner dan deze gemeten in Röntgenspectra.

De ionisatiegraad van de absorptie waargenomen in UV-spectra werd geacht lager te zijn dan de ionisatiegraad gemeten in lage spectrale resolutie Röntgenspectra. We hebben, gebruikmakend van hoge resolutie spectra van NGC 5548 ook laag-geïoniseerde ionen gedetecteerd, zoals O VI, C IV en N V. Lijnen van deze ionen worden ook in UV-spectra waargenomen. We hebben verder aangetoond dat de snelheidsstructuur van de absorptie waargenomen in UV- en Röntgenspectra dezelfde is, ondanks de soms grote verschillen in ionisatiegraad. We concluderen dat de absorptie waargenomen in UV- en Röntgenspectra dus van hetzelfde gas afkomstig is.

Ionisatieverdeling van het waargenomen gas

We hebben aangetoond dat het overgrote deel van het gas hoog-geïoniseerd is. We hebben geprobeerd de verdeling van de ionisatiegraad van het absorberende gas te bepalen. Zijn er enkele verschillende absorptiecomponenten met ieder een eigen ionisatiegraad, of is er een continue verdeling van ionisatietoestanden? Aangezien we van laag-geïoniseerd tot bijna volledig geïoniseerd ijzer waarnemen, kunnen we uitsluiten dat er maar één ionisatiegraad is. Beide modellen besproken in 10.1.1 voorspellen dat de ionisatieverdeling discontinu is, één ionisatiegraad per wolk. Componenten met een verschillende ionisatiegraad zijn in deze modellen in drukevenwicht met elkaar. Het hoogst geïoniseerde gas vormt de wind, terwijl de lager geïoniseerde componenten als wolken in deze wind bestaan. Door het drukevenwicht zijn de wolken stabiel en hebben een lange levensduur. In hoofdstuk 5 concluderen we dat de absorptie evengoed gemodelleerd kan worden met een continue ionisatieverdeling. In hetzelfde hoofdstuk verklaren we de continue ionisatieverdeling met een wind die een dichtheidstratificatie heeft loodrecht op de uitstroomrichting.

Op grond van onze hoge-kwaliteit spectra besluiten we dat de laagst geïoniseerde component niet in drukevenwicht kan zijn met de andere ionisatiecomponenten. We tonen in hetzelfde hoofdstuk ook aan dat de snelheidsstructuur voor alle ionisatieparameters hetzelfde is. Dit toont duidelijk een verwantschap aan tussen het laag- en hoog-geïoniseerde gas, en is een reden om het continue ionisatieverdeling model te prefereren.

Geometrie van de wind

Een verschil tussen beide modellen, is de openingshoek van de wind. Een model voorspelt een grote openingshoek van ongeveer 60° , waarin er enkele kleinere wolken zijn. De grote openingshoek is nodig om het aantal Seyfert 1 stelsels waar we absorptie waarnemen te verklaren. Het andere model voorspelt een nauwe wind, met een openingshoek van slechts 6° . Het aantal Seyfert 1 stelsels met absorptie wordt verklaard door een wind die afbuigt. In hoofdstuk 4 tonen we aan, dat onder de aanname dat de accretie in een evenwichtstoestand gebeurt, de wind een kleine openingshoek heeft. Dit resultaat preferereert duidelijk het tweede model.

Kan het gas ontsnappen?

Uit de gemeten blauwverschuiving van de absorptielijnen weten we dat het gas wegstroomt van het zwarte gat. In Hoofdstuk 5 berekenen we de afstand die het gas moet hebben om te kunnen ontsnappen aan de zwaartekracht van het zwarte gat. Deze afstand is voor het gas met de grootste uitstroomsnelheid ongeveer 0.58 pc of 1.9 lichtjaar, een erg kleine afstand tot het zwarte gat. Indien het gas kan ontsnappen uit het gravitatieveld van het zwarte gat, zijn er twee mogelijkheden. Het verlaat het melkwegstelsel en verrijkt het intergalactisch medium. De wind is verrijkt met metalen, elementen die in het oorspronkelijke gas van het intergalactisch medium niet voorkomen. De wind komt door wrijving tot stilstand in het melkwegstelsel en zal zijn energie overdragen op het interstellair gas. De overdracht van energie leidt mogelijk tot sterforming.

Verbrede emissielijnen

In hoofdstuk 5 en 6 tonen we aan dat ook in Röntgenspectra verbrede emissielijnen worden waargenomen. Deze verbrede lijnen lijken op de verbrede emissielijnen waargenomen in optische en UV-spectra. In Röntgenspectra zijn deze lijnen echter erg zwak en moeilijk te detecteren. Uit modellering van deze lijnen concluderen we, dat ze dezelfde ionisatieparameter en verbreding hebben als de gelijktijdig waargenomen

verbrede UV lijnen. Dit betekent dat de verbrede lijnen waargenomen in Röntgen- en UV-spectra uitgestraald worden door hetzelfde gas, en dus eenzelfde afstand hebben tot het zwarte gat. Uit lichtkrachtvariaties waargenomen in optische en UV-spectra leidt men een afstand tussen de 2 en 20 lichtdagen af. Indien deze emissie over al deze afstanden uitgestraald wordt, dan heeft het gas dezelfde ionisatiegraad op alle afstanden. Dit betekent dat de dichtheid van het gas verandert met de afstand tot het zwarte gat. Uit de modellen vinden we verder dat de fractie van het gas dat de accretieschijf bedekt en de kolomdichtheid groter moeten zijn voor een kleinere afstand. Uit deze twee feiten concluderen we dat we door de rand van een door rotatie afgeplatte wolk kijken.

10.2.2 Conclusies voor de overige bestudeerde melkwegstelsels

NGC 4593

In Röntgenspectra van het Seyfert 1 stelsel NGC 4593 detecteren we enkel zeer hoog- en zeer laag-geïoniseerd gas (Hoofdstuk 3). NGC 4593 is een uitzondering op andere Seyfert 1 stelsels, waar middelmatig- tot hoog-geïoniseerd gas een belangrijke absorptiecomponent is. Uit de lichtkromme blijkt dat het hoog-energetische Röntgencontinuüm veranderlijker is dan het laag-energetische Röntgencontinuüm. Dit is in tegenstelling tot de theorie waarin de hoog-energetische Röntgenfotonen het resultaat van invers-Compton verstrooiing zijn. Door de verstrooiing verkrijgen de laag-energetische fotonen, uitgestraald door de accretieschijf, een hogere energie. Uit de vervaltijd van een waargenomen lichtkrachtflits leiden we af dat magnetische reconnectie verantwoordelijk kan zijn voor het veranderlijke hoog-energetische Röntgencontinuüm.

IC 4329A

In de Röntgenspectra van het Seyfert 1 stelsel IC 4329A (Hoofdstuk 7) detecteren we absorptie van zowel gas dat zich nabij het zwarte gat bevindt, als neutraal gas dat zich in de schijf van het stelsel bevindt. Het neutrale gas bevindt zich op enkele duizenden lichtjaar van het zwarte gat. In het spectrum detecteren we ook niet verschoven absorptielijnen van geïoniseerd gas. Dit betekent dat het gas zich in ons Melkwegstelsel of in de onmiddellijke omgeving ervan bevindt, en dus niet afkomstig is van IC 4329A. We tonen aan dat met hoge spectrale resolutiespectroscopie het mogelijk is om de absorptie gegenereerd door deze verschillende media te onderscheiden.

Het gas dat zich in de nabijheid van het zwarte gat bevindt, heeft dezelfde eigenschappen als het gas gedetecteerd in andere Seyfert 1 stelsels, zoals NGC 5548. Dit weerlegt de conclusie uit een vergelijkend breedband UV studie, dat dit stelsel enkel ab-

sorptie vertoont van een stoflaan in de schijf van het melkwegstelsel. In Röntgenspectra detecteren we ook enkele verbrede lijnen. Echter, door de verschillende absorptiecomponenten, is het spectrum te complex om te kunnen concluderen of deze lijnen van hetzelfde gebied komen als de verbrede lijnen gedetecteerd in UV-spectra, of relativistisch verbreed zijn.

Ton 1388

In het Röntgenspectrum van de quasar Ton 1388, bestudeerd in Hoofdstuk 8, detecteren we geen absorptie van gas dat zich nabij het zwarte gat of in het melkwegstelsel bevindt. Er zijn echter enkele absorptielijnen in het spectrum, geproduceerd door hoog-geïoniseerd gas dat tussen ons en de quasar ligt. Kosmologische modellen voorspellen dat een groot deel van de baryonische massa (de deeltjes waaruit de Aarde en mensen bestaan) opgeslagen is in filamenten tussen melkwegstelsels en clusters van melkwegstelsels. Dit gas is bij hoge roodverschuiving (dus in het jonge heelal) te zien als neutraal waterstof gas. Echter, lokaal (dus in het huidige heelal) wordt er veel minder neutraal waterstof gedetecteerd. Het gas wordt in de filamenten nog steeds verhit, en is nu deels hoog-geïoniseerd. Dit hoog-geïoniseerde gas is alleen te detecteren met Röntgenspectrometers, en kan dan ook nu pas voor het eerst bestudeerd worden.

