



Spectroscopy of the Environments of Long Gamma-ray Bursts and their Progenitors

O.E. Hartoog

Samenvatting in het Nederlands

Lange¹ gammaflitsen (in het Engels *gamma-ray bursts*, afgekort GRBs) zijn, afgezien van de Oerknal, de krachtigste explosies die we kennen in het heelal. Er wordt verondersteld dat deze flitsen ontstaan wanneer bepaalde typen zware sterren hun laatste adem uitblazen. Wanneer dit gebeurt stort de kern van een zware ster ineen, en wordt er materiaal met bijna de lichtsnelheid uitgestoten in de vorm van twee nauwe straalstromen. Als wij een gammaflits zien, kijken we van bovenaf in zo'n straalstroom. Gammaflitsen kunnen zo helder zijn, dat we ze eigenlijk van overal in het universum kunnen zien, zolang hun licht maar tijd heeft gehad om ons te bereiken. Omdat de lichtsnelheid eindig is, betekent 'ver weg' tevens 'lang geleden'. De meest ver weg gelegen gammaflitsen die waargenomen zijn, zijn vele miljarden jaren geleden afgegaan, toen het universum slechts een paar procent van zijn huidige leeftijd (13.8 miljard jaar) had. Het bestuderen van gammaflitsen en hun omgeving maakt het mogelijk te zien hoe het universum er vroeger uitzag, hoe het zich ontwikkeld heeft en hoe deze spectaculaire explosies eigenlijk ontstaan.

Dit proefschrift gaat over de kosmische omgevingen van gammaflitsen, en over de zware sterren die op een dag misschien zullen sterven als gammaflits. In deze samenvatting zal ik een aantal concepten en technieken die in mijn proefschrift aan bod komen in begrijpelijke bewoording uitleggen. Aan het eind van de samenvatting zal ik aangeven wat de essentie is van de verschillende hoofdstukken in dit proefschrift die mijn promotieonderzoek vormen.

Sterren en hun levensloop

Een ster is een ondoorzichtige gasbol die licht uitstraalt vanwege zijn temperatuur. De aard van sterlicht verschilt weinig van dat van een gloeiende draad in een gloeilamp of een witheet gloeiend stuk ijzer: het is een thermisch spectrum. De buitenste laag van een ster, de atmosfeer, bevat atomen en ionen die het licht op zeer specifieke golflengten absorberen. Dit zien wij als absorptielijnen in het thermische sterspectrum. De vorm en sterkte van deze lijnen worden bepaald door onder andere de samenstelling, temperatuur en zwaartekracht van de ster. De temperatuur wordt in stand gehouden door kernfusie in het binnenste van de ster. In een kernfusiereactie smelten atoomkernen samen tot nieuwe, zwaardere kernen. Echter, de nieuw gevormde kern is iets lichter dan de som van de massa's van de atoomkernen vóór de reactie. De ontbrekende massa is omgezet in energie volgens Einsteins beroemde formule $E = mc^2$. De energie E is hier voortgekomen uit de missende massa m vermenigvuldigd met de lichtsnelheid c in het kwadraat. Omdat c^2 een erg groot getal is, levert een klein massaverschil een zeer grote hoeveelheid energie op. In een ster kan het evenwicht van het opwekken van energie en het verlies ervan lang in stand gehouden worden, typisch miljoenen

¹We kennen korte en lange gammaflitsen; dit proefschrift gaat alleen over de lange variant, die te maken heeft met de dood van zware sterren.

tot miljarden jaren, maar je kunt je voorstellen dat de beschikbare brandstof voor de fusie op een gegeven moment opraakt.

Sterren die even zwaar zijn als de zon hebben een levensduur van grofweg tien miljard (10^{10}) jaar. Deze, en lichtere sterren die nog langer leven, komen veel voor. Je hebt ook sterren die, wanneer ze gevormd worden, zwaarder zijn dan de zon. Vanaf ongeveer acht keer de massa van de zon spreken we van ‘zware sterren’. Zware sterren zijn een stuk zeldzamer. Als er in een gaswolk sterren ontstaan worden er altijd veel meer lichte dan zware gevormd. Daarnaast hebben zware sterren een kortere levensduur dan lichte sterren, hoewel ze meer brandstof beschikbaar hebben. Hierdoor zijn ze in feite nog zeldzamer. Kijk je bijvoorbeeld naar een stercluster van een paar miljard jaar oud, dan zul je alleen nog de lichte sterren zien omdat de zware al aan hun eind gekomen zijn. Het binnenste van een ster is heet en heeft een hoge dichtheid omdat de hele ster erop drukt. Als gevolg van de sterke temperatuurafhankelijkheid van het kernfusieproces in het binnenste van zware sterren, gaan de reacties daar ontzettend snel en raakt de ster veel sneller door zijn brandstof heen dan een lichte ster. Een ster van twintig zonsmassa’s leeft ‘slechts’ tien miljoen (10^7) jaar, duizend keer zo kort als de zon. Het relatief korte leven van een zware ster wordt gekenmerkt door gewelddadige en energetische effecten en uitbarstingen waarmee hij een sterke invloed op zijn omgeving heeft. Ondanks hun zeldzaamheid zijn zware sterren bepalend voor de structuur en levensloop van de sterrenstelsels waarin ze wonen.

De invloed van zware sterren

Sterrenstelsels (ook wel melkwegstelsels genoemd) zijn enorme objecten bestaande uit gas, stof en sterren die bij elkaar gehouden worden door de zwaartekracht. De zwaartekrachtspotentiaal van een sterrenstelsel wordt grotendeels bepaald door de mysterieuze ‘donkere materie’, een belangrijke maar slecht begrepen component. De gemiddelde afstand tussen sterren in een melkwegstelsel is een paar lichtjaar², terwijl de afstand tussen sterrenstelsels in een groep tussen de duizend en miljoenen lichtjaren kan beslaan. De Melkweg, het sterrenstelsel waarin wij wonen, bevat zo’n honderd miljard (10^{11}) sterren, heeft de vorm van een platte pannenkoek en, als je er van bovenaf op zou kijken, een spiraalstructuur. Op een donkere nacht kun je deze pannenkoek waar we in zitten aan de hemel zien als een diffuus lichtgevende band, wat de naam Melkweg verklaart. De Melkweg is onderdeel van de Lokale Groep, samen met het Andromedastelsel (nog zo’n spiraalvormige pannenkoek en het grootste sterrenstelsel in de buurt) en diverse kleinere sterrenstelsels.

De structuur van een sterrenstelsel en hoe het evolueert wordt sterk beïnvloed door de populatie van zware sterren vanwege de volgende effecten. Ten eerste, de sterke straling van zware sterren ioniseert de omringende materie en warmt deze op. Zware sterren zijn over het algemeen heter en lichtkrachtiger dan minder zware sterren, want resulteert in hogere uitstoot van hoog-energetische fotonen. Ten tweede, de sterke sterwind van een zware ster vult het interstellair medium met nieuwe deeltjes, impuls en energie. Alle soorten sterren kunnen sterwinden hebben, maar ze zijn bijzonder sterk in zware (en dus lichtkrachtige) sterren, omdat de deeltjes in de atmosfeer een uitwaardse druk voelen vanwege de straling van de ster. Als een ster opzwelt tijdens zijn levensloop worden sterwinden ook sterker omdat de zwaartekracht aan

²Een lichtjaar is de afstand die het licht in een jaar aflegt; ruim 9 biljoen (9×10^{12}) kilometer.

het oppervlak kleiner wordt. Vooral voor zwaardere elementen ('metalen') zijn de gevolgen van deze stralingsdruk groot. Dit komt door de vele mogelijke energieovergangen die deze deeltjes hebben door hun complexere atoomstructuur: ze kunnen veel kleuren licht absorberen. Dit heeft als gevolg dat de sterkte van sterwinden samenhangt met de concentratie van dit soort elementen in de steratmosfeer: de *metalliciteit*. Astronomen noemen alle elementen zwaarder dan helium metalen. Het aantal 'metaal'-atomen ten opzichte van waterstof- en heliumatomen is maar heel klein. In de sterwind slepen de metalen de rest van het gas met zich mee, waardoor de wind toch voornamelijk uit waterstof en helium bestaat. Het derde effect dat een zware ster op zijn omgeving heeft is de supernova-explosie aan het eind van zijn leven. Hierbij wordt een deel van de fusieproducten van de ster teruggegeven aan het interstellair medium, als mogelijke bouwstenen voor volgende generaties sterren, waarvan sommige met bijbehorende planeten en wellicht levensvormen. Gedurende de supernova zelf worden nog zwaardere en meer exotische elementen gevormd, die niet gemaakt kunnen worden door fusie in sterren. De schokgolf die een supernova produceert kan gas wegblazen zodat plaatselijk nieuwe stervorming onderbroken wordt, maar hij kan er ook juist voor zorgen dat de stervorming elders weer getriggerd wordt.

De dood van zware sterren

In de kern van een ster worden waterstofdeeltjes met elkaar gefuseerd tot helium. Daarna, als de kern een beetje in elkaar gedrukt wordt, kan dit helium weer verder fuseren tot zwaardere elementen zoals koolstof, stikstof en zuurstof. In de zwaarste sterren kan dit doorgaan totdat de sterkern helemaal uit ijzer bestaat. Rondom de ijzerkern zitten op dat moment 'schillen' van eerdere reactieproducten, als een soort ui. De buitenste schil bestaat voornamelijk uit waterstof: hier is het nooit heet genoeg geworden voor kernfusie. Ijzer is het meest stabiele element dat we kennen, en fusie van ijzerkernen tot zwaardere elementen levert geen energie meer op, maar kost juist energie. Dus wanneer de kern helemaal uit ijzer bestaat, is er niets meer dat kan voorkomen dat de kern ineens stort onder het gewicht van de ster. In de ineenstorting die volgt komt weer heel veel energie vrij, en het object wordt een aantal dagen tot weken zeer helder. Dit is het fenomeen dat we eerder al noemden: een supernova.

Een supernova wordt geacht een grofweg sferisch symmetrische explosie te zijn: er wordt evenveel materiaal uitgestoten in alle richtingen, en het fenomeen zou er ook van alle kanten even helder uitzien. Als om een of andere reden een aanzienlijk deel van de energie in een beperkte ruimte terecht komt leidt dit tot een juist heel asymmetrische uitbarsting. Dit kan ervoor zorgen dat er materie in zogenaamde *straalstromen* (of *jets*) uitgestoten wordt: twee smalle bundels vanaf de draaias van de ster die met bijna de lichtsnelheid gaan. Als dit gebeurt hebben we te maken met een *gamma-flits*. Zoals blijkt uit waarnemingen kun je ook een gammaflits en een supernova op hetzelfde moment hebben afkomstig van één instortende ster; welke fractie van de energie in de straalstromen gaat zitten kan tussen de gevallen sterk verschillen. Dit samenvallen van deze fenomenen is een van de belangrijkste aanwijzingen geweest voor de conclusie dat gammaflitsen te maken hebben met het levenseinde van zware sterren.

Wat het precieze fysische proces is dat de gammaflits met de krachtige straalstromen produceert staat ter discussie. Er zijn in het algemeen twee zeer plausible modellen hiervoor.

In het ene model stort de sterkern ineem tot een *zwart gat*, waarna de omliggende materie, mits er voldoende ‘draaiing’ in zit, een *accretieschijf* zal vormen waar de materie ronddraait en opgeslokt wordt als in een afvoerputje. Boven en onder de schijf worden de straalstromen gelanceerd. In het andere model wordt er bij het ineenstorten een *neutronenster* gevormd, die de straalstromen aandrijft via een extreem sterk magneetveld. Zwarte gaten en neutronensterren zijn zeer compact, en de enige objecten die extreem genoeg zijn om zoiets energetisch als een gammaflits te veroorzaken.

Welk theoretisch model je ook kiest, in beide gevallen is het noodzakelijk dat de sterkern heel hard moet ronddraaien om een gammaflits te maken. Het zou heel goed kunnen dat dit alleen maar lukt als de stervende ster (oorspronkelijk) in een nauw *dubbelstersysteem* zat: twee of meerdere sterren die zo dicht bij elkaar staan dat er materiaal van de ene ster op de andere overgebracht kan worden. Een op zichzelf staande ster raakt normaal gesproken veel van zijn draaiing kwijt door zijn sterwind, maar in een dubbelstersysteem zou hij eventueel weer ‘opgesponnen’ kunnen worden met hulp van de begeleidende ster. Het kan zelfs gebeuren dat de twee sterren samensmelten. Uit waanemingen weten wedat zware sterren heel vaak in dubbelstersystemen zitten, dus het is niet zo’n gekke gedachte. Maar wat voor soort ster, of dubbelster, precies een gammaflits kan maken is nog altijd een belangrijke open vraag in dit vakgebied.

Onafhankelijk van de precieze *centrale motor* en het soort ster dat een gammaflits kan maken, kunnen we de fysica van de flits en zijn *nagloeier* goed beschrijven met een bal van hete, geïoniseerde materie (*plasma*) die met bijna de lichtsnelheid op ons afkomt. Materiaal wordt in hompen uitgestoten, maar door de hoge snelheden worden dit een soort schillen. Botsingen tussen deze schillen van verschillende snelheden veroorzaken een krachtige flits van hoog-energetische gammastraling: de gammaflits zelf. Wanneer de materie botst met het al aanwezige omliggende medium gaat het daar als een soort sneeuwschuiver doorheen. De straling die de opgeveegde materie produceert noemen we de nagloeier.

Deze nagloeier staat los van de supernova die we eerder noemden. Omdat de nagloeier ontstaat doordat smalle de straalstroom door het interstellare medium ploegt, is de nagloeier, net als de gammaflits zelf, voornamelijk naar ons toe gericht³. Hierdoor kan hij nog veel helderder zijn dan een supernova, die immers naar alle kanten tegelijk straalt. Observaties aan de nagloeier geven veel meer informatie over het proces, en de omgeving van de gammaflits, dan alleen de gammaflits zelf.

Spectroscopie van de nagloeier van een gammaflits

De nagloeier van een gammaflits kan over een breed golflengtebereik worden waargenomen: van röntgenstraling, ultraviolet tot zichtbaar licht, infrarood en radiostraling. Deze straling is allemaal licht, alleen de energie per foton (lichtdeeltje), of equivalent de golflengte, of frequentie, verschilt. De initiële gammastraling van de flits wordt waargenomen door speciale satellieten die voortdurend de hemel afspeuren naar veranderlijke, plotselinge bronnen van gammastralen. Gammastraling komt (gelukkig!) niet door de aardse dampkring heen. De

³Er zijn natuurlijk heel veel gammaflitsen die *niet* in onze richting wijzen, zo’n 99% van het totaal. Hiervan zien we noch de flits van gammastraling, noch de nagloeier. Het zou kunnen dat wel de supernova zien, maar deze zullen moeilijk te onderscheiden zijn van supernovae die überhaupt geen gammaflits hadden.

optische nagloeier kan daarentegen worden waargenomen vanuit binnen de dampkring, met telescopen op aarde.

Gammaflitsen en hun nagloeiers worden razendsnel zwakker: na een dag is de helderheid vergeleken met die van een half uur na de flits al een factor honderd lager geworden. Om toch bruikbare waarnemingen te doen, of soms om zelfs maar de nagloeier überhaupt te detecteren, moet je snel zijn. Tegenwoordig zijn er wereldwijde netwerken en samenwerkingsverbanden die dit zo efficiënt mogelijk maken. Het hangt namelijk van de tijd en de plaats van de flits aan de hemel af vanuit waar op aarde en wanneer we zouden kunnen waarnemen.

In het bijzonder is het interessant om een spectrum te nemen van een nagloeier; hiervoor hebben we de grootste optische telescopen nodig. Met spectroscopie worden de lichtdeeltjes verdeeld in golflengte-intervallen, en vervolgens wordt geteld hoeveel je er hebt van elke golflengte. Het resultaat is de helderheid van de bron als functie van golflengte: een spectrum. Hoe kleiner de intervallen, hoe beter de spectrale resolutie, maar je hebt wel steeds meer licht nodig voor een bruikbaar spectrum met een hogere resolutie.

Het spectrum van een nagloeier in het zichtbare licht is ‘glad’ en zonder pieken en putten, maar omdat het door het gas van het sterrenstelsel van de stervende ster heenschijnt, wordt het licht op zeer specifieke golflengten geabsorbeerd, wat zorgt voor een ‘vingerafdruk’ van absorptielijnen. Dit lijkt een beetje op wat er in een steratmosfeer gebeurt. Vanuit het laboratorium weten we precies welke absorptielijnen bij welke energie- overgangen in welk atoom of ion horen, en dus ook waar in het spectrum ze precies zouden moeten zitten in hun eigen rust-referentiefraam. Echter, gammaflitsen vinden op grote afstanden van ons plaats. Zo ver, dan we het effect van de expansie van het universum merken: hoe verder weg een bron, hoe sneller deze van ons af beweegt. Dit vertaalt zich in het *Doppler effect*: het hele spectrum inclusief alle absorptielijnen verschuift naar langere (rodere) golflengtes. Bij licht spreken we over *roodverschuiving*. In het dagelijks leven komen we dit tegen in het geluid van een langsscheurende ambulance: het geluid van de sirene klinkt lager als de ambulance van ons af beweegt. De geluidsgolven worden uitgerekt terwijl ze uitgezonden worden (lagere frequentie: lagere toonhoogte); hetzelfde gebeurt met een lichtgolf die wordt uitgezonden door verre, van ons af bewegende lichtbron (lagere frequentie, roder). Omdat verder weg gelegen bronnen harder van ons af bewegen is de roodverschuiving een maat voor de afstand en tegelijk voor de kosmische tijd dat het is uitgezonden, omdat zelfs het licht tijd nodig heeft om ons te bereiken.

Het meten van de verschuiving van de spectraallijnen in een nagloeierspectrum is de meest precieze en betrouwbare manier om de roodverschuiving (en dus de afstand) tot een gammaflits te bepalen. Dit lukt ook met een spectrum met een betrekkelijk lage resolutie, bruikbaar voor zwakkere nagloeiers, of voor als je niet zo’n hele grote telescoop tot je beschikking hebt. Met een goed spectrum (dat wil zeggen: redelijke resolutie en een duidelijk signaal met weinig ruis) kun je echter nog veel meer eigenschappen afleiden. De sterkte van een absorptielijn die van een bepaald atoom of ion komt is afhankelijk van de concentratie van dit atoom of ion in het gas van het sterrenstelsel waar deze gammaflits afging. Op deze manier kunnen we de verhouding van waterstof en metalen bepalen in dit gas: de metalliciteit. Zoals we al eerder duidelijk maakten is dit een zeer belangrijke parameter voor sterwind, die op zijn beurt weer een bepalende rol speelt in de levensloop van een zware ster, en in wat voor soort explosie deze zijn leven gaat eindigen. Ook speelt de metalliciteit een grote rol in interstellair stof en hoe sterren en hun planeten vormen. De vorm en breedte van absorptielijnen bevat informatie over de structuur en dynamica in het absorberende gas, en dus van het verre sterrenstelsel

waarin de gammaflits afging.

Al deze informatie in het spectrum onthult eigenschappen van het gastheer-stelsel van een ster die een gammaflits veroorzaakte. We weten de precieze aard van dit soort sterren nog niet, noch de exacte omstandigheden die er moeten zijn om een gammaflits te maken. Om deze redenen zijn deze sterrenstelsels natuurlijk al enorm interessant om te bestuderen, maar er is nog een belangrijke reden. Astronomen kunnen sterrenstelsels ook direct bestuderen, dus via licht dat door de stelsels zelf wordt uitgezonden, maar op deze manier moet je je altijd beperken tot de meest heldere stelsels. Als je met behulp van een heldere bron, zoals een nagloeier, naar een stelsel in absorptie kijkt, pik je sterrenstelsels van iedere helderheid mee. Op deze manier komen we meer te weten over de gehele sterrenstelselpopulatie, ook die in eerdere kosmologische tijdvakken, en niet alleen die stelsels die toevallig erg helder zijn en/of dichtbij staan.

Dit proefschrift

In dit proefschrift neem ik je mee langs de levensloop van een zware ster tot aan zijn dramatische en gewelddadige einde, door middel van waarneemhoogtepunten. Na een wat uitgebreidere introductie in hoofdstuk 1 (een aanrader voor wie graag meer wil leren na deze samenvatting), beginnen we in hoofdstuk 2 met de waarnemingen aan een zware-ster-kandidaat in een sterrenstelsel niet zo ver van onze Melkweg, maar toch al op de grens van waar we nog spectra van individuele sterren kunnen nemen. We vinden trouwens dat dit helemaal geen individuele ster is, maar een clustertje ‘normale’ zware sterren, en minstens één zeer hete, verder geëvolueerde en waarschijnlijk zeer zware ster. Deze waarnemingen waren een van de eerste die genomen zijn met de X-shooter spectrograaf op de Very Large Telescope in Chili. Dit instrument komt terug in alle hoofdstukken, omdat het zeer geschikt is voor waarnemingen aan zowel zware sterren als gammaflitsnagloeiers. Nederland heeft meegebouwd aan X-shooter, en in ruil daarvoor hebben we ‘gegarandeerde waarneemtijd’ gekregen voor beide onderzoeksthema’s.

In hoofdstuk 3 onderzoeken we de aard en de omgeving van een zogenaamde Wolf-Rayet ster, een meer geëvolueerd type zware ster, en een mogelijke kandidaat voor het produceren van een gammaflits. Dit deelonderzoek is grotendeels uitgevoerd door Frank Tramper, maar ik heb me ontfermd over de analyse van het gas dat deze zeer hete ster omringt en dat door zijn sterke straling wordt geïoniseerd.

In hoofdstuk 4 volgt een onderzoek aan sterrenstelsels in absorptie tegen het licht van *quasars*. Quasars zijn superzware zwarte gaten die in de kern van een ver weg gelegen sterrenstelsel gas aan het opslokken zijn, en zijn zeker een studie op zichzelf waard. Ik gebruik deze objecten echter slechts als achtergrondlampje om de sterrenstelsels te bestuderen die er vóór liggen. In dit project zochten we naar de emissie die hoort bij de sterrenstelsels waarvan de aanwezigheid afgeleid wordt uit de absorptie in het quasarspectrum. Bij één van de drie bronnen hebben we deze emissie ook gevonden. Dit hoofdstuk lijkt een beetje een vreemde eend in de bijt, maar het vormt een soort prelude voor de technieken die in de hoofdstukken hierna aan de orde komen.

In hoofdstuk 5 komen we de eerste gammaflits tegen. Van de nagloeier van deze flits konden we maar liefst vier spectra nemen, verspreid over een week. Het bleek dat de sterkte

van sommige absorptielijnen in de tijd veranderde, als een gevolg van de straling van de nagloeier. Hieruit hebben we de afstand tussen de gammaflits en het absorberende gas kunnen bepalen, wat ons inzicht heeft verschaft in de structuur van het gastheer-sterrenstelsel.

Hoofdstukken 6 en 7 zijn ook gebaseerd op optische spectra van nagloeiers, maar nu van veel verder weg gelegen gammaflitsen. Beide zijn meer dan twaalf miljard jaar geleden afgegaan. Deze spectra zijn de beste die er nu beschikbaar zijn voor gammaflitsen op deze enorme afstanden. Ik voel mij als promovendus behoorlijk bevoorrecht om aan deze magnifieke data-sets te mogen werken. We hebben de metalliciteit van de gastheer-sterrenstelsels van beide gammaflitsen kunnen bepalen, wat een bijzonder interessante parameter is in het zo vroege universum. Tevens hebben we conclusies kunnen trekken over het al dan niet aanwezig zijn van interstellair stof. De gammaflits van hoofdstuk 7 is zelfs zo lang geleden afgegaan dat we in dit spectrum bepaalde effecten uit de begintijd van het universum kunnen zien.

Als laatste hoofdstuk (8) omschrijf ik een nieuw idee voor een project dat de resultaten van de nieuwste kosmologische computersimulaties gebruikt om onder andere de metalliciteit van gammaflits-sterrenstelsels te verklaren, waaronder die uit hoofdstukken 6 en 7. Onderzoek op het grensvlak van verschillende sub-vakgebieden, zoals ik in dit project voorstel, zou wel eens cruciaal kunnen zijn voor het begrijpen van het ontstaan van gammaflitsen en de bruikbaarheid van hun nagloeiers om sterrenstelsels te identificeren en onderzoeken.