



Universiteit
Leiden

The Netherlands

From a biased perspective: quasars, mergers, and planet-forming discs

Pizzati, E.

Citation

Pizzati, E. (2025, October 29). *From a biased perspective: quasars, mergers, and planet-forming discs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4281578>

Version: 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/1887/4281578>

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

NEDERLANDSE SAMENVATTING

Onderzoek in de astrofysica boekt vaak vooruitgang door inzichten uit meerdere domeinen met elkaar te verweven: observaties en theorie, kleinschalige en grootschalige fenomenen, en soms zelfs geheel verschillende deelgebieden. Dit proefschrift is een bescheiden poging om met die breedte om te gaan. Het bundelt zes studies, uitgevoerd in samenwerking met collega's, die onderwerpen bestrijken variërend van de grootschalige clustering van quasars en de groei van superzware zwarte gaten, via de ontdekking van onverwachte populaties kandidaat-actieve galactische kernen (AGN) in het tijdperk van de James Webb-ruimtetelescoop (JWST), tot de uitdagingen van de zwaartekrachtsgolfastronomie en de fysica van planeetvormende (protoplanetaire) schijven. Ondanks hun verscheidenheid delen deze studies een gemeenschappelijke drijfveer: modellen en methoden ontwikkelen die theorie en observatie verbinden, en die inzetten als instrumenten om gegevens te interpreteren die vaak de verwachtingen tarten en ons soms dwingen langgekoesterde aannames te herzien.

De clustering van quasars en de groei van superzware zwarte gaten

Quasars zijn de zichtbare wegwijzers van de groei van superzware zwarte gaten. Aangedreven door gas dat in een spiraal naar de centra van sterrenstelsels valt, waar deze zwarte gaten zich bevinden, stoten zij enorme hoeveelheden energie uit, waardoor ze over miljarden lichtjaren heen waarneembaar zijn. Elke quasar die we observeren toont een zwart gat dat actief materie aan het accreteren is, en biedt ons zo een direct venster op hoe deze reuzen zich vormden en evolueerden toen het heelal nog jong was.

De verdeling van quasars in de ruimte is verre van uniform. Sommige regio's zijn dichtbevolkt, terwijl andere leeg zijn. Deze *clustering* weerspiegelt het onderliggende patroon van donkere-materiehalos en bevat informatie over de omgevingen die de groei van zwarte gaten voeden. Door de abundantie, clustering en lichtkracht van quasars gezamenlijk te bestuderen, kunnen we fundamentele vragen benaderen: Hoe vaak zijn superzware zwarte gaten actief als quasars? Hoe snel groeien zij uit tot reuzen van miljarden zonsmassa's? En hoe hangen quasar-populaties uit verschillende kosmische tijdperken samen in een coherent beeld van de evolutie van zwarte gaten?

De eerste reeks studies in dit proefschrift (*Hoofdstukken 2, 3 en 5*) behandelt deze vragen door modellen te ontwikkelen die quasar-lichtkrachtfuncties en clusteringstatistieken koppelen, en door de groei van zwarte gaten in te bedden in het bredere kader van de vorming van kosmische structuren.

Hoofdstuk 2 gaat in op een oud raadsel: quasars die ongeveer 1,5 miljard jaar na de Oerknal werden waargenomen blijken zich veel sterker te

clusteren dan de theorie voorspelt. Met behulp van grootschalige kosmologische simulaties ontwikkelde ik een raamwerk dat quasar-abundantie en ruimtelijke verdeling koppelt aan de eigenschappen van halos. De resultaten suggereren dat, indien de observaties correct zijn, vrijwel alle quasars in die periode beperkt waren tot de meest massieve halos, met weinig spreiding tussen halomassa en quasar-helderheid. Dit impliceert een ongewoon sterke koppeling tussen superzware zwarte gaten en hun gast-halos van donkere materie — sterker dan later in de kosmische geschiedenis — en roept de vraag op of quasars zich fundamenteel verschillend ontwikkelen doorheen de kosmische tijd.

Hoofdstuk 3 breidt dit raamwerk uit naar nog vroegere tijdperken, toen het heelal jonger was dan één miljard jaar, en neemt naast quasars ook door JWST gedetecteerde sterrenstelsels mee. Door gebruik te maken van een van de grootste kosmologische simulaties ooit uitgevoerd, reproduceerde ik belangrijke observaties van zowel quasars als sterrenstelsels. Het resulterende model toont dat quasars in deze vroege tijdperken slechts gedurende een fractie van de kosmische tijd actief waren. Dit staat in scherp contrast met iets latere perioden, waarin quasars in bijna elke massieve halo lijken te stralen, en versterkt de spanning met de snelle, vrijwel continue groei die nodig is om in het jonge heelal zwarte gaten van miljarden zonsmassa's te vormen. Deze spanning verzoenen blijft een belangrijke uitdaging: zijn zwarte gaten werkelijk zo intermitterend, en zo ja, hoe kan een zulke sporadische activiteit leiden tot de enorme massa's die we observeren?

Hoofdstuk 5 zet een eerste stap om deze vragen direct aan te pakken door een evolutionair model te introduceren dat superzware zwarte gaten doorheen de kosmische geschiedenis volgt. Hier wordt de groei van zwarte gaten rechtstreeks gekoppeld aan de opbouw van hun gast-halos, waarbij accretie en fusies consistent worden bijgehouden. Ondanks zijn eenvoud weet het model observaties te reproduceren van de reïonisatie-epoque tot aan het kosmische middaguur, en benadrukt het de rol van snelle, goed getimede accretie-episoden bij het vormen van de vroegste superzware zwarte gaten. Het biedt bovendien een flexibel uitgangspunt voor het opnemen van nieuwe waarnemingsconstraints in de toekomst.

Gezamenlijk gebruiken deze studies quasars als krachtige tracers van de accretie op superzware zwarte gaten en hun verbinding met grootschalige structuur. Ze laten zowel vooruitgang als open vragen zien: quasars bieden een direct venster op de vroege groei van zwarte gaten, maar hun activiteitspatronen en clustering blijven een uitdaging vormen voor ons begrip van de evolutie van zwarte gaten in het heelal.

Nieuwe zwartegatpopulaties in het JWST-tijdperk?

De lancering van JWST heeft een nieuw venster geopend op het vroege heelal. Dankzij zijn vermogen om zwakke sterrenstelsels op grote afstanden

te detecteren, heeft de telescoop bronnen onthuld die voorheen onzichtbaar waren voor eerdere telescopen. Tot de meest opvallende ontdekkingen behoort een populatie van compacte, rode objecten, waarvan vele brede emissielijnen vertonen die typisch worden geassocieerd met actieve zwarte gaten. Vanwege hun uiterlijk worden deze bronnen “little red dots” genoemd.

Wat deze objecten opmerkelijk maakt, is niet alleen hun verschijning, maar ook hun overvloed. Na correctie voor verduistering blijken veel van hen net zo lichtkrachtig te zijn als traditionele quasars, maar ze worden gevonden in onderzoeken die slechts veel kleinere delen van de hemel bestrijken. Dit impliceert dat ze veel talrijker moeten zijn dan quasars met een vergelijkbare helderheid — een observatie die, indien bevestigd, het heersende beeld van de frequentie van zwarte gaten in het vroege heelal volledig zou omgooien.

In mijn werk heb ik deze nieuwe bronnen vergeleken met de goed bestudeerde populatie van ultraviolet-heldere quasars. De resultaten tonen aan dat little red dots quasars in aantal ruimschoots overtreffen, met een factor die snel toeneemt bij hogere redshift. Hun clustering wijst bovendien op een duidelijk verschil: terwijl quasars zich bevinden in zeer massieve halos en sterke ruimtelijke correlaties vertonen, clusteren little red dots als gewone stervormende sterrenstelsels. Dit suggereert sterk dat little red dots niet simpelweg verduisterde quasars zijn, maar eerder een afzonderlijke fase in de groei van zwarte gaten markeren — of, in sommige gevallen, misschien helemaal niet door zwarte gaten worden aangedreven.

Vorbij quasars: overlappende zwaartekrachtsgolfsignalen en de fysica van protoplanetaire schijven

De laatste twee studies in dit proefschrift vallen buiten het domein van quasars. *Hoofdstuk 6* richt zich op zwaartekrachtsgolven. Toekomstige detectoren, zoals de geplande Cosmic Explorer en Einstein Telescope, zullen samensmeltende zwarte gaten en neutronensterren met buitengewone gevoeligheid kunnen detecteren. Dit opent nieuwe mogelijkheden om het heelal te bestuderen, maar brengt ook nieuwe uitdagingen met zich mee. Eén daarvan is dat er zoveel gebeurtenissen zullen worden waargenomen dat hun signalen soms in de tijd overlappen. Wanneer dat gebeurt, kunnen standaard data-analysemethoden niet goed meer werken, wat leidt tot vertekeningen in de afgeleide eigenschappen van de bronnen.

Met behulp van gedetailleerde simulaties heb ik onderzocht hoe overlappende signalen ons vermogen beïnvloeden om de massa's en andere eigenschappen van samensmeltende dubbelsterren te meten. De resultaten laten zien dat, als de fusies binnen minder dan ongeveer een halve seconde van elkaar plaatsvinden, de overlap de resultaten aanzienlijk kan vertekenen. Vinden ze daarentegen meer dan een seconde uit elkaar plaats, en wordt informatie uit detectiepijplijnen verstandig gebruikt, dan kunnen de signalen nog steeds betrouwbaar van elkaar worden gescheiden. Deze bevindingen

benadrukken de noodzaak van nieuwe analysemethoden die de complexe gegevens van detectoren van de derde generatie aankunnen.

Hoofdstuk 7 keert terug naar een meer vertrouwde astrofysische omgeving: schijven van gas en stof rond jonge sterren, de geboorteplaatsen van planeten. Een kernvraag in dit vakgebied is de rol van turbulentie, die alles beïnvloedt van de manier waarop gas op de ster accreteert tot hoe stofdeeltjes samenklonteren om planeten te vormen. Turbulentie direct meten is moeilijk, maar een veelbelovende methode is om die af te leiden uit de verticale dikte van de stoflaag in de schijven.

Met hogeresolutie-waarnemingen van de Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array (ALMA) heb ik modellen ontwikkeld om de stofdikte af te leiden door te vergelijken hoe gaten in de schijven verschijnen onder verschillende kijkhoeken. Waar beperkingen mogelijk zijn, wijzen de resultaten erop dat het stof opgesloten zit in dunne lagen, wat duidt op lage niveaus van turbulentie en belangrijke vragen oproept over de rol van turbulentie in de langetermijnevolutie van protoplanetaire schijven.