



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Elementary: the chemical fingerprints of massive galaxy formation over cosmic time

Cheng, C.M.T.

Citation

Cheng, C. M. T. (2026, June 25). *Elementary: the chemical fingerprints of massive galaxy formation over cosmic time*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4307012>

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/1887/4307012>

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

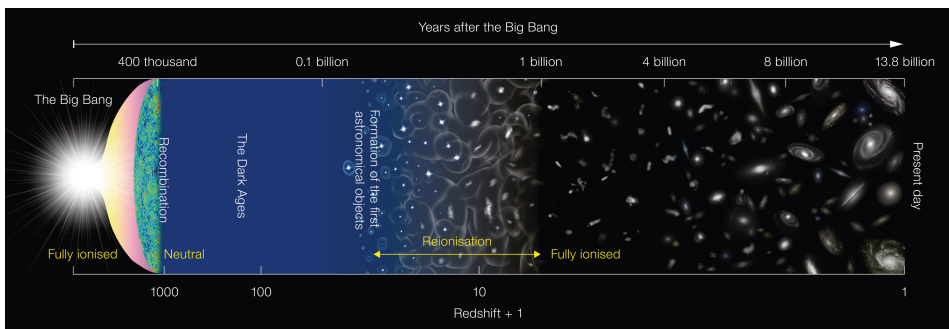
NEDERLANDSE SAMENVATTING

Om de vorming en evolutie van structuur in ons heelal te begrijpen, moeten we eerst de vraag stellen hoe sterrenstelsels en hun omringende halo's van donkere materie — de bouwstenen van het heelal — in de loop van de tijd zijn gegroeid en veranderd. Zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties bieden de antwoorden, aangezien zij tot de meest extreme systemen behoren die bestaan. Deze oude kosmische fossielen, die zijn gestopt met stervorming, bevatten het grootste deel van de stellaire massa in het heelal. Hun eigenschappen dagen theorieën over kosmische structuurvorming uit en maken ze tot unieke laboratoria om de fundamentele fysica te onderzoeken waarop ons heelal berust.

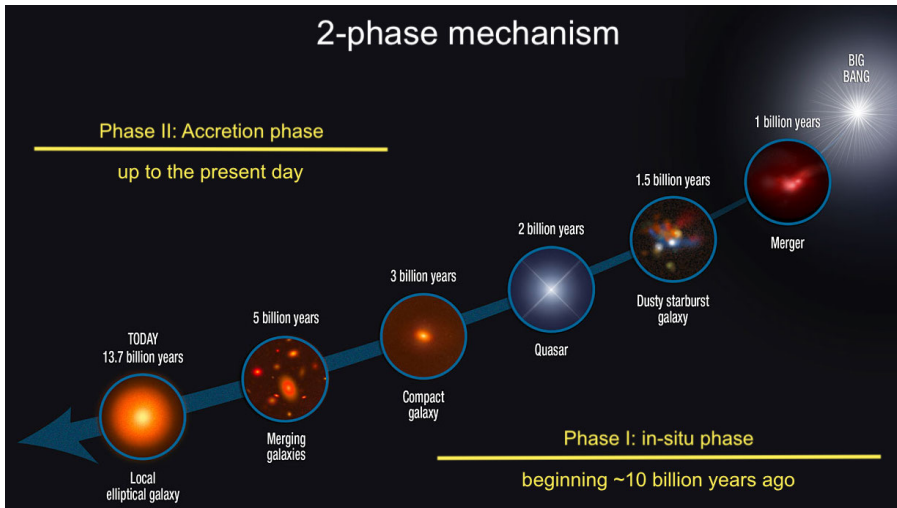
Het dossier van zware sterrenstelselvorming

Het heelal begon ongeveer 13,8 miljard jaar geleden in een extreem hete en dichte toestand, met de oerknal (zie Figuur 1). In een oogwenk begon de ruimte zelf uit te zetten en af te koelen, waarbij zich in de loop van de tijd steeds grotere structuren vormden: van deeltjes naar atomen, naar sterren en sterrenstelsels. Op deze manier vormt structuur in het heelal zich hiërarchisch. Dit model voor de vorming van het heelal wordt de Λ CDM-kosmologie genoemd.

Sterrenstelsels zijn enorme verzamelingen van sterren, gas, stof en donkere materie die door zwaartekracht bij elkaar worden gehouden. Ze groeien via invallend gas, door nieuwe sterren te vormen uit koud gas, en door samen te smelten



Figuur 1: Een diagram dat de geschiedenis van het heelal weergeeft, beginnend met de oerknal. Afbeelding overgenomen van ESO/NAOJ.



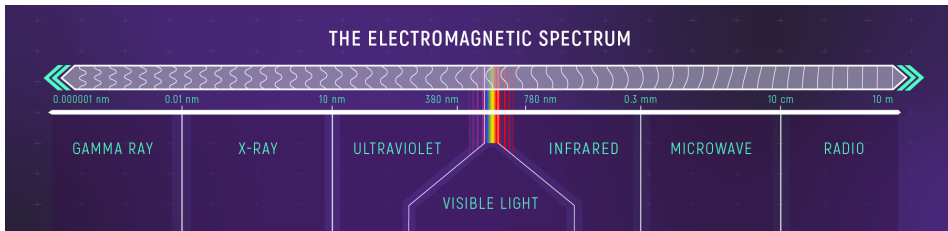
Figuur 2: Een diagram dat het tweefasenmodel van zware sterrenstelselvorming illustreert. Figuur aangepast van NASA/ESA/Sune Toft.

met andere, nabije sterrenstelsels. Uiteindelijk stoppen veel sterrenstelsels met stervorming, een proces dat bekend staat als ‘quenching’. In ons huidige beeld van sterrenstelselvorming hebben sterrenstelsels zich op een hiërarchische manier gevormd, vergelijkbaar met de grotere kosmische structuur van het heelal.

De vorming van zware sterrenstelsels gebeurde waarschijnlijk in twee fasen (zie Figuur 2): hun dichte, compacte centra zijn waarschijnlijk vroeg gevormd, ongeveer 10 miljard jaar geleden, tijdens een periode van snelle stervorming. Nadat de stervorming stopte, zijn ze mogelijk blijven groeien. Dat zou vooral aan de buitenkant gebeurd zijn door botsingen met kleine naburige sterrenstelsels. Dit beeld wordt ondersteund door waarnemingen die laten zien dat verre, passieve sterrenstelsels compacter zijn dan nabije sterrenstelsels.

Er zijn echter ook alternatieve scenario’s mogelijk. Zo kan het zijn dat individuele sterrenstelsels helemaal niet groeien. In plaats daarvan zou de evolutie in afmeting het gevolg kunnen zijn van het feit dat sterrenstelsels die vroeger stoppen met het vormen van sterren kleiner zijn dan stelsel die later stoppen. Bovendien is het nog onduidelijk hoe en waarom sterrenstelsels stoppen met stervorming. Er zijn verschillende processen die dit kunnen veroorzaken, bijvoorbeeld door het koude gas — dat nodig is voor stervorming — te verwijderen, op te gebruiken of te verhitten. In werkelijkheid spelen waarschijnlijk meerdere processen tegelijk een rol. Toch is het cruciaal om de mechanismen te bepalen waarmee het merendeel van de sterrenstelsels zich vormt, ‘quencht’ en vervolgens evolueert, om zo ons bredere begrip van structuurvorming in het heelal te verbeteren.

Om de vorming van zware sterrenstelsels te begrijpen, kunnen we gebruikmaken van geavanceerde observatoria zoals de James Webb Space Telescope (*JWST*). In 2021 begon *JWST* het heelal waar te nemen, na een van de meest uitdagende lanceringen ooit. De *JWST* vormt een ongeëvenaarde internationale samenwerking



Figuur 3: Een illustratie van het elektromagnetische spectrum van licht. We kunnen dit licht opsplitsen in brede kleuren (fotometrie) of in individuele golflengten (spectroscopie). Afbeelding overgenomen van NASA/ESA/Leah Hustak (STScI).

tussen de VS, Europa en Canada. Met een kostprijs van \$10 miljard en operationele kosten van \$10.000 per uur heeft deze investering de wetenschap al ingrijpend veranderd. *JWST* heeft met name de ontdekking mogelijk gemaakt van zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties op veel vroegere tijdstippen dan verwacht, toen het heelal ongeveer 2 miljard jaar oud was. Deze resultaten suggereren dat sterrenstelsels veel sneller en eerder met stervorming begonnen en stopten dan voorspeld door de Λ CDM-kosmologie, wat problemen veroorzaakt voor theorieën over sterrenstelselvorming en ons kosmologisch raamwerk.

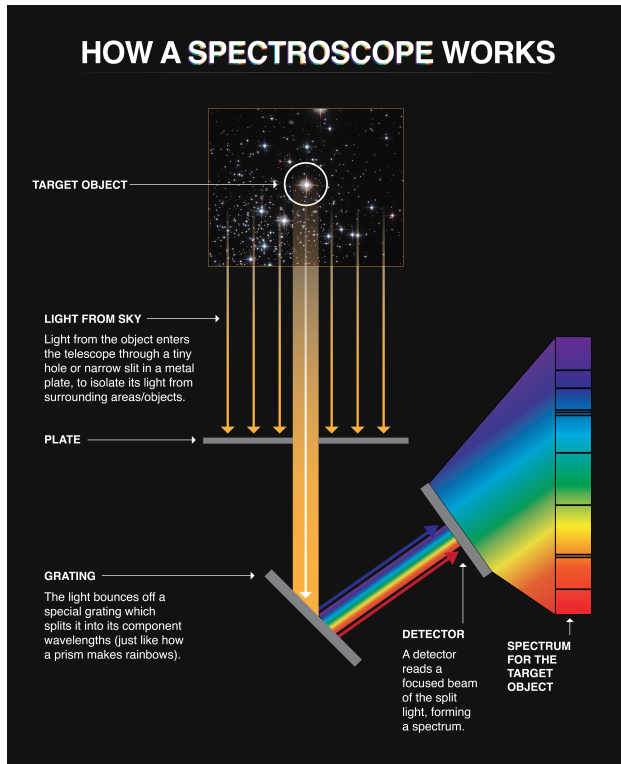
Deze interpretatie is echter gebaseerd op beperkte data en modellen. Dit werk is met name gebaseerd op het fitten van sterpopulatiemodellen aan een klein aantal fotometrische datapunten. Deze modellen kunnen vertekende eigenschappen voorspellen door brede aannames over de onderliggende chemische samenstelling en fysica van sterrenstelsels. Bovendien zijn onze data beperkt: ze tonen slechts ongeveer 2% van de sterren (de helderste en meest zware) die we in deze zeer verre sterrenstelsels kunnen waarnemen. Ten slotte gaat het om kleine steekproeven. Hierdoor kunnen belangrijke conclusies over sterrenstelselvorming onjuist zijn. In het tijdperk van *JWST* schieten traditionele methoden tekort.

Onze speurderskit voor het ontrafelen van de geschiedenis van sterrenstelsels

De componenten van een sterrenstelsel, inclusief de eigenschappen van zijn sterpopulaties, geven aanwijzingen over zijn evolutie. Deze informatie ligt opgeslagen in de chemische samenstelling van de sterren. Hoewel we de volledige geschiedenis van een sterrenstelsel nooit direct kunnen observeren, kunnen we het verleden indirect bestuderen via het licht van de sterren.

Door de totale helderheid van een sterrenstelsel in een klein aantal brede kleuren te meten, krijgen we een eerste indruk van de sterinhoud. Door het licht verder op te splitsen in individuele golflengten, kunnen we de opbouwgeschiedenis van sterrenstelsels ontleden (zie Figuren 3 en 4).

Om deze data te interpreteren, moeten we begrijpen hoe sterpopulaties zijn opgebouwd. Elke ster wordt geboren met een bepaalde massa, en we moeten de



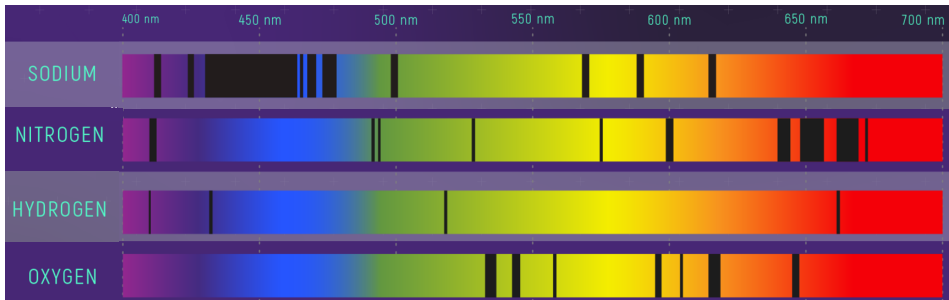
Figuur 4: Een diagram dat laat zien hoe we spectra van sterrenstelsels verkrijgen met een spectrograaf op een telescoop. Afbeelding overgenomen van NASA Goddard/Shireen Dooling.

verdeling van deze massa's kennen (de initiële massafunctie) om sterpopulaties te beschrijven. Deze kan variëren met omgeving, maar dit is nog een belangrijk open vraagstuk. Daarnaast moeten we begrijpen hoe sterren met verschillende massa's en chemische samenstellingen evolueren. Ook moeten we weten welke spectra verschillende typen sterren produceren, omdat zij zowel de vorm van het spectrum als de aanwezigheid van spectrale lijnen beïnvloeden.

Door atomen in het laboratorium te bestuderen, hebben wetenschappers berekend hoe elk element licht absorbeert op specifieke golflengten — elk element heeft zijn eigen spectrale vingerafdruk. Zo absorbeert waterstof licht op bepaalde golflengten (zie Figuur 5), waardoor we bij het zien van deze lijnen in een spectrum weten dat waterstof aanwezig is.

Door deze ingrediënten te begrijpen, kunnen we leeftijden en gedetailleerde chemie afleiden, wat inzicht geeft in de evolutie van sterrenstelsels. Verschillende typen sterren produceren verschillende elementen op uiteenlopende tijdschalen, waardoor elementverhoudingen informatie geven over chemische evolutie en sterformingsgeschiedenis.

Het interpreteren van spectra is echter complex, omdat verschillende eigen-



Figuur 5: Absorptiespectra voor verschillende elementen. Afbeelding aangepast van NASA/ESA/Leah Hustak (STScI).

schappen vergelijkbare effecten kunnen hebben. Zo kunnen leeftijd en chemische samenstelling bijna identieke spectrale veranderingen veroorzaken (de leeftijd-metalliciteit degeneratie). Ook variaties in de initiële massafunctie kunnen lijken op chemische variaties. Het correct ontleden van deze effecten is daarom bijzonder uitdagend.

We kunnen deze fysische principes toepassen op echte data door modellen te fitten aan spectra. Individuele spectrale kenmerken zijn gevoelig voor specifieke eigenschappen: waterstoflijnen voor leeftijd en ijzerlijnen voor zowel leeftijd als het ijzergehalte.

In de praktijk dragen echter alle eigenschappen bij aan het volledige spectrum. Door het hele spectrum tegelijk te modelleren, verkrijgen we meer informatie en robuustere resultaten, inclusief subtiele bepalingen van de initiële massafunctie.

Op zoek naar de vingerafdrukken van sterrenstelselvorming

Met deze technieken hebben we geleerd dat zware sterrenstelsels in het nabije heelal ook tot de oudste objecten behoren en rijk zijn aan elementen zoals ijzer en magnesium. Dit suggereert dat zij hun sterren snel vormden en vroeg hun stervorming eindigden. Daarnaast hebben nabijgelegen zware sterrenstelsels in hun centra een overschot aan lage-massa sterren ten opzichte van de Melkweg, wat wijst op een andere initiële massafunctie.

Door ook de ruimtelijke verdeling van sterpopulaties mee te nemen, verkrijgen we meer detail. Gradiënten in sterpopulaties geven informatie over massa-opbouw en helpen verschillende vormingsmechanismen te onderscheiden. Nabije zware sterrenstelsels hebben vaak rodere centra en blauwere buitengebieden, veroorzaakt door hogere ijzergehaltes in de centra — in lijn met hiërarchische vorming.

Om de vorming van zware oude sterrenstelsels echt te begrijpen, moeten we echter terugkijken in de tijd en hun jongere fasen bestuderen. Door de eindige lichtsnelheid zien we verre sterrenstelsels zoals ze vroeger waren. Dit wordt gekwantificeerd met roodverschuiving: hoe hoger de roodverschuiving, hoe vroeger

de kosmische tijd.

Het observeren van deze verre sterrenstelsels met hoge roodverschuiving is uitdagender dan het bestuderen van nabije sterrenstelsels, omdat ze door hun enorme afstand veel zwakker zijn. Bovendien zijn hun elementgevoelige absorptiekenmerken zeer zwak en verschoven naar golflengtegebieden waarin onze telescopen minder gevoelig zijn. Daarom moeten we individuele verre sterrenstelsels tientallen tot honderden uren observeren om gedetailleerde leeftijden en chemische samenstellingen te meten.

Dankzij innovatieve technologische vooruitgang in de astronomische waarnemingen in de afgelopen ~ 15 jaar zijn we begonnen zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties tot zeer vroege tijden te onderzoeken. Verrassend genoeg wordt ons beeld van sterrenstelselvorming juist minder duidelijk naarmate we dichter bij het begin van het heelal komen. Het is bijvoorbeeld onduidelijk hoe deze oude sterrenstelsels evolueren tot de sterrenstelsels die we in het nabije heelal zien (als ze al verwant zijn). Zoals hierboven besproken heeft *JWST* de ontdekking mogelijk gemaakt van zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties op veel vroegere tijden dan voorspeld door Λ CDM-simulaties. De vorming en evolutie van zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties blijft daarom een open vraag. Om vooruitgang te boeken in het identificeren van de dominante mechanismen van ster-massa-opbouw en het stoppen van stervorming, en om de vondsten van “onmogelijk vroege” sterrenstelsels te bevestigen, hebben we een groter aantal nodig van verre, zware sterrenstelsels met diepe en hoge ruimtelijke resolutie waarnemingen.

Dit proefschrift: het identificeren van de ouders

In dit proefschrift presenteren we enkele van de meest gedetailleerde metingen tot nu toe van sterrenstelselvorming tot ~ 10 miljard jaar geleden. Met de flexibele modellering van hoogwaardige geïntegreerde en ruimtelijk opgeloste spectra presenteren we nieuwe metingen van leeftijds- en chemische gradiënten in verre sterrenstelsels, onthullen we discrepanties in modelvoorspellingen, en voeren we de eerste robuuste metingen uit van de initiële massafunctie in het vroege heelal.

In **Hoofdstuk 2** meten we gradiënten in een grote steekproef van verre zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties met data van de LEGA-C survey. Deze sterrenstelsels bestonden ~ 7 miljard jaar geleden, toen het heelal ongeveer half zo oud was als nu. We vinden dat de sterren in de centra dezelfde leeftijd en hetzelfde magnesiumgehalte hebben als in de buitengebieden, maar hogere ijzergehalten. Onze resultaten zijn consistent met een scenario waarin deze sterrenstelsels eerst intense stervorming in hun centra ondergingen voordat zij hun stervorming eindigden, waarna hun buitengebieden werden opgebouwd door fusies met kleine, naburige sterrenstelsels met lagere ijzergehalten. Alternatieve scenario's kunnen onze resultaten echter ook verklaren.

In **Hoofdstuk 3** combineren we onze gedetailleerde spectroscopische metingen met onafhankelijke fotometrische kleuren om voorspellingen van sterpopulatiemodellen te testen. We meten leeftijden en chemische samenstellingen van een grote steekproef van zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties, opnieuw afkomstig

uit de LEGA-C survey. We vergelijken de gemeten kleuren van onze sterrenstelsels met de voorspelde kleuren op basis van onze gemeten leeftijden en chemische samenstellingen. We vinden dat sterpopulatiemodellen de leeftijd-kleur- en leeftijd-chemische-samenstelling-relaties die we in de data vinden niet kunnen reproduceren. Onze resultaten tonen aan dat veelgebruikte sterpopulatiemodellen onjuist zijn en laten zien dat de onderliggende fysische aannames waarop deze modellen zijn gebaseerd dringend opnieuw moeten worden geëvalueerd.

In **Hoofdstuk 4** meten we leeftijds- en chemische gradiënten in 8 zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties die ~ 10 miljard jaar geleden bestonden, dicht bij het tijdperk waarin deze sterrenstelsels gevormd werden en hun stervorming eindigden. Met behulp van data van het *JWST*-SUSPENSE-programma vinden we dat de sterren in de centra van deze sterrenstelsels ouder zijn en rijker aan magnesium dan in de buitengebieden, maar dezelfde hoeveelheid ijzer bevatten. Deze resultaten suggereren een scenario waarin de centra van sterrenstelsels eerst stopten met stervorming, gevolgd door de buitengebieden. In de richting van het huidige tijdperk zouden deze sterrenstelsels hun buitengebieden kunnen hebben opgebouwd door fusies met kleine, naburige sterrenstelsels, wat heeft geleid tot de gradiënten die we in Hoofdstuk 2 hebben gevonden. Aan de andere kant is het mogelijk dat verschillende quenching-mechanismen op verschillende tijdstippen optreden en leiden tot verschillende gradiënten.

Ten slotte presenteren we in **Hoofdstuk 5** de eerste robuuste metingen van de initiële massafunctie, in een steekproef van 9 zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties buiten het nabije heelal. Deze studie is gebaseerd op data van ons *JWST*-IMFERNO-programma. We vinden dat de meest zware, verre sterrenstelsels een overschot aan lage-massa sterren hebben ten opzichte van de Melkweg. In combinatie met eerdere bevindingen dat de centra van nabije zware sterrenstelsels met oude sterpopulaties ook een overschot aan lage-massa sterren bevatten, zijn onze resultaten consistent met het tweefasenmodel. Ons oudste en meest zware sterrenstelsel is waarschijnlijk een afstammeling van de verre, zware, “onmogelijk vroege” sterrenstelsels die met *JWST* zijn ontdekt, wat impliceert dat zij mogelijk ook dit overschot aan lage-massa sterren hadden. Onze beperkingen suggereren dat hun stellaire massa’s nog groter zijn dan oorspronkelijk gerapporteerd, wat de spanning tussen waarnemingen van zware, vroege sterrenstelsels en huidige modellen voor sterrenstelselvorming verder vergroot.

Het dossier gaat verder...

Hoewel dit werk ons begrip van sterrenstelselvorming in de afgelopen ~ 10 miljard jaar aanzienlijk heeft verbeterd, blijven er belangrijke vragen bestaan. Om de dominante vormingsroutes te identificeren, moeten we grotere steekproeven bestuderen met nog hogere ruimtelijke resolutie, gebruikmakend van de volgende generatie telescopen (zoals de *Extremely Large Telescope*), en tegelijkertijd geavanceerdere modelleringstechnieken ontwikkelen. Deze stappen zullen ons in staat stellen een completer beeld te schetsen van sterrenstelselvorming door de kosmische tijd heen.