

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/35085> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Fumagalli, Mattia

**Title:** Star formation and aging at cosmic noon : the spectral evolution of galaxies from  $z=2$

**Issue Date:** 2015-09-08

---

## SAMENVATTING

---

Aan het begin van de negentiende eeuw, was het nog onduidelijk of de Melkweg, de zwakke streep van sterren die zichtbaar is aan de hemel op een donkere, heldere nacht, het enige sterrenstelsel in het heelal is. Op 26 april 1920, bediscussieerden twee invloedrijke astronomen van de tijd, Harlow Shapley en Heber Curtis, hun tegengestelde standpunten voor een publiek in het 'Smithsonian Museum of Natural History' in Washington DC. Shapley betoogde dat de Melkweg het gehele heelal is en dat spiraalnevels deel uit maken van ons eigen melkwegstelsel. Aan de andere kant dacht Curtis dat Andromeda en de andere nevels afzonderlijke sterrenstelsels waren oftewel eiland universums (zoals Immanuel Kant ze genoemd heeft honderd jaar eerder).

De standpunten van beide geleerden werden gesteund door verschillende waarnemingen die destijds beschikbaar waren. Echter, de belangrijkste observationele ondersteuning van Shapley's theorie bleek al snel onjuist te zijn. Tegelijkertijd bleek uit nieuwe waarnemingen van Edwin Hubble dat het Andromeda sterrenstelsel een apart eiland universum was, ver buiten de Melkweg. Een paar jaar later in 1927, was het weer Hubble die een ruwe evenredigheid vond tussen de afstand tot sterrenstelsels en hun terugwijkende snelheid: hierna begonnen astronomen te beseffen dat het heelal uitdijt. De waarnemingen van Edwin Hubble markeerden het begin van de moderne observationele kosmologie; het is niet bij toeval geweest dat de meest ambitieuze ruimtetelescoop, die in een baan om de aarde zit, vernoemd is naar hem.

### **De opmerkelijke diversiteit van sterrenstelsels**

Sinds de vroegste waarnemingen is er een grote diversiteit in de morfologie van sterrenstelsels geconstateerd. Het meest gebruikte indelingssysteem vandaag de dag, is voorgesteld door (wederom) Edwin Hubble. Hubble merkte op dat sterrenstelsels ruwweg kunnen worden ingedeeld in twee klassen: elliptische stelsels bestaande uit een ronde of elliptische verdeling van licht, en spiraalstelsels die bestaan uit een platte schijf met spiraalvormige structuur en in het centrum een concentratie van licht (beter bekend als de bulge).

Daaropvolgende studies hebben aangetoond dat de morfologie van huidige stelsels nauw gecorreleerd is met andere eigenschappen, zoals de massa, de kleur en de omgeving van de sterrenstelsels. In het algemeen hebben elliptische sterrenstelsels rodere kleuren dan spiraal stelsels, omdat hun licht wordt gedomineerd door rode oude sterren. Aan de andere kant worden in spiraal stelsels actief nieuwe, jonge sterren gevormd, en daarom lijken ze blauw. Zeer weinig sterrenstelsels liggen tussen die twee categorieën.

Een soortgelijke bimodaliteit in kleur, stervormingssnelheid, en morfologie van sterrenstelsels is ook waargenomen als men terug kijkt in de tijd naar het vroege heelal (m.a.w. bij hoge roodverschuiving).

Voor sterrenstelsels met veel stervorming, zijn de massa en de stervormingssnelheid (d.w.z. het aantal nieuwe sterren gevormd in een jaar) strak gecorreleerd. Meer massieve sterrenstelsels vormen meer sterren per jaar. Als we terug kijken in de tijd, zien we dezelfde relatie voor sterrenstelsels op hoge roodverschuiving. De absolute stervormingssnelheid neemt toe met roodverschuiving: d.w.z. sterrenstelsels van dezelfde massa hadden in het verleden een hogere stervormingssnelheid.

## Problemen bij waarnemingen op hoge roodverschuiving

Ondanks de onvoorstelbare technologische vooruitgang van telescopen en instrumenten in de laatste twintig jaar, zijn metingen van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving nog steeds erg uitdagend. Onze kennis van deze stelsels komt niet in de buurt van onze kennis van de lokale melkwegstelsels. Ten eerste komt dit doordat het licht van sterrenstelsels zwakker wordt naar mate de afstand tot het stelsel toeneemt. Om de fysische parameters van sterrenstelsels nauwkeuriger te meten, verdelen astronomen het licht in meerdere frequenties met een spectrograaf. Een spectrograaf kun je vergelijken met een prisma dat wit licht splitst in verschillende kleuren. Met uitzondering van de helderste bronnen, is spectroscopie van verre, zwakke, sterrenstelsels een buitengewoon tijdrovend proces. Het meest fundamentele probleem als de spectroscopische methode niet toegepast kan worden, is dat afstandsbepalingen erg onzeker worden.

Een tweede fundamentele probleem voor waarnemingen op hoge roodverschuiving is dat het licht sterk roodverschoven is door de uitdijning van het heelal. Dit fenomeen is verwant aan de frequentie van geluid dat naar een lagere toonhoogte gaat als de bron van ons af beweegt. Licht van oude sterren (die het merendeel van de totale massa beslaan in de meeste sterrenstelsels) wordt verplaatst naar het infrarood voor sterrenstelsels die op een afstand staan van meer dan een paar miljard lichtjaar. Op die golflengtes is de atmosfeer niet transparant. Waarnemingen met telescopen vanaf de grond (in plaats van telescopen op satellieten) zijn alleen mogelijk in bepaalde bereiken van golflengtes.

Onze kennis van leeftijden, stervormingssnelheden en metaalgehalten van sterrenstelsels is vaak gebaseerd op spectrale indicatoren uit optische golflengtes. Het is uitdagend en tijdrovend om deze te meten op hoge roodverschuiving wanneer ze verschoven zijn naar het infrarood. Bijvoorbeeld, een goed gekalibreerde standaard indicator van de stervormingssnelheid is de waterstof emissie lijn: alleen jonge sterren hebben licht met genoeg energie om een belangrijke bijdrage leveren aan de ionisatie van het waterstof in hun directe omgeving: waterstof lijnen bieden een bijna directe meting van de stervormingssnelheid. Als gevolg van de verschuiving van het licht naar het (nabije) infrarood voor stelsels die ouder zijn dan 8 miljard jaar, maken studies van de evolutie van stervormingssnelheden met een breed roodverschuivingsbereik gebruik van een reeks van indicatoren voor de stervormingssnelheid die gebaseerd zijn op een verschillende veronderstellingen en inter-kalibraties. Voor elke indicator, een flux die overeenkomt met een stervormingssnelheid van

10-20 zonsmassa's per jaar is een uitdaging, zo niet onmogelijk voor afzonderlijke bronnen.

De identificatie van collecties van sterrenstelsels met lage stervormingssnelheden op hoge roodverschuiving is daarom in het algemeen uitsluitend gebaseerd op de kleuren van het stelsel. Dit wordt gedaan door het selecteren van sterrenstelsels waarvan het optische en nabij-infrarode licht wordt gedomineerd door een oude sterren.

Een extra complicatie voor spectroscopie van de grond is dat spectroscopische collecties geoptimaliseerd zijn voor waarnemingen in specifieke bandbreedtes. Over het algemeen bestaan ze daarom slechts uit blauwe objecten die veel stervorming bevatten. Aan de andere kant kunnen waarnemingen die niet gebaseerd zijn op emissie lijnen, maar op het continuüm van het licht, slechts toegepast worden op kleine collecties van heldere objecten. Deze biases beperken ons kennis van de fysische eigenschappen van sterrenstelsels zoals leeftijd en metaalgehalte. Bovendien beperken ze ons begrip van de vormingsgeschiedenis en de evolutie van sterrenstelsels.

## Dit proefschrift

Dit proefschrift richt zich op een aantal van de eerder beschreven problemen. In het bijzonder maken wij gebruik van een nieuwe reeks waarnemingen met de Wide Field Camera 3 (WFC3) grism (tralie prisma) aan boord van de Hubble Space Telescope (HST), in het kader van het 3D-HST onderzoek. Dit onderzoek richt zich op de evolutie van de stervormingssnelheden, de sterke van emissie lijnen en eigenschappen van groepen sterren van zowel stervormings- als passieve sterrenstelsels, in collecties van sterrenstelsels tot 10 miljard jaar geleden, toen de stervormingssnelheid van het heelal op zijn piek was en de structurele regelmaat die we vandaag de dag zien in sterrenstelsels ontstaan moet zijn. Omdat de WFC3 grism gelijktijdig alle objecten in een veld waarneemt, zijn de waarnemingen niet beïnvloed door de biases voor spectroscopie vanaf de grond, en bieden ze een mogelijkheid om afstanden te meten voor zowel stervormingsgebieden als passieve sterrenstelsels.

In hoofdstuk 2, combineren we de eerste gegevens van het 3D-HST onderzoek met die van waarnemingen vanaf de grond op lagere roodverschuiving, om de evolutie van de helderste waterstof lijn ( $H\alpha$ ) te bestuderen. In het bijzonder meten we de equivalente breedte van de  $H\alpha$ -lijn ( $EW(H\alpha)$ ). Dat is de verhouding van de helderheid van  $H\alpha$  en de onderliggende stellaire helderheid. De equivalente breedte is een maat voor de verhouding tussen de huidige stervormingssnelheid en die in het verleden. We vinden dat op elk cosmisch tijdstip  $EW(H\alpha)$  afneemt met de massa van het sterrenstelsel, en dat bij constante massa  $EW(H\alpha)$  toeneemt met roodverschuiving (m.a.w. verder terug in de tijd). Deze evolutie is onafhankelijk van de massa in sterren, en het hangt sterker af van roodverschuiving dat tot nu toe aangenomen werd en voorspeld werd door theoretische modellen van de evolutie van sterrenstelsels. Daarnaast voorspellen we de evolutie van  $EW(H\alpha)$  op

hoge roodverschuiving; bijdrage van emissie lijnen voor sterrenstelsels op roodverschuivingen van  $z = 4 - 8$  blijft toenemen. Dit heeft belangrijke consequenties voor spectroscopie en fotometrie van bronnen die waargenomen zullen worden met de James Webb Space Telescope.

In hoofdstuk 3, onderzoeken we de stervormingssnelheden van passieve sterrenstelsels die geselecteerd zijn op basis van hun optische en nabij infrarode spectrale energie verdeling, die wijzen op een oude stellaire populatie. Voorgaande metingen van de spectrale energie verdeling voor optisch geselecteerde passieve stelsels, wijzen op nog lagere stervormingssnelheden dan verwacht op basis van het hergebruiken van gas (onder de aanname dat sterren gevormd worden uit massa verloren door geëvolueerde sterren). Echter, deze meting mist stervorming als deze verborgen wordt door door extinctie door stof. Hierdoor wordt de optische straling niet waargenomen, maar verschuift de straling naar het mid-infrarood. In hoofdstuk 3, selecteren we daarom spectroscopisch bevestigde passieve sterrenstelsels in het 3D-HST onderzoek, en meten hun extinctie door stof stervormingssnelheid door gestapelde mid-infrarode fluxes van *Spitzer-24* $\mu\text{m}$  voor verschillende cosmische tijdstippen. We tonen aan dat, voor elk kosmisch tijdstip, de stervormingssnelheid van passieve sterrenstelsels 20-40 keer lager ligt dan voor sterrenstelsels die nog actief sterren vormen op dezelfde roodverschuiving. Dit geeft aan dat het uitdoven van stervorming erg efficiënt is, zelfs in het jonge heelal waar de typische stervormingssnelheden honderden zonsmassa's per jaar bereiken, in vergelijking met 1-4 zonsmassa per jaar voor de Melkweg. De daadwerkelijke stervormingssnelheid van passieve sterrenstelsels kan zelfs nog lager zijn, omdat we laten zien dat de mid-infrarode flux ook van andere processen dan stervorming kan afkomen, zoals bv. circumstellair stof and opwarming van stof door oude stellaire populaties.

Hoofdstuk 4 richt zich op de spectra van passieve en actieve sterrenstelsels op roodverschuivingen van  $z = 0.5$  tot  $z = 2$  met als doel de stellaire leeftijden te bepalen. We stapelen spectra van stervormings- and passieve stelsels, die geselecteerd zijn op basis van een kleur-kleur techniek, en vergelijken ze met veelgebruikte modellen van synthetische stellaire populaties. We vinden dat stellaire populatie modellen goed passen bij waarnemingen op golflengtes lager dan  $6500\text{\AA}$ , terwijl ze systematische afwijkingen op rodere golflengtes. Wij bevestigen dat passieve sterrenstelsels zwakke emissie lijnen hebben. Dit is in overeenstemming met metingen van de stervormingssnelheden in het mid-infrarood. De leeftijden van passieve sterrenstelsels hangen af van het gebruikte model, maar in het algemeen zijn passieve sterrenstelsels jong, m.a.w. jonger dan de helft van de leeftijd van het heelal op elk kosmisch tijdstip. Voor stervormings-stelsels hangt de gemeten leeftijd sterk af van het gebruikte stellaire populatie model en de evolutie van de stervorming.

In hoofdstuk 5 maken we gebruik van de volledige 3D-HST data om te analyseren hoe waterstof emissie afhangt van de eigenschappen van sterrenstelsels, in het bijzonder de optische en nabij infrarode spectrale energie verdeling van het licht, in het bereik van roodverschuiving waar  $\text{H}\alpha$  kan worden waargenomen met de HST

en WFC3 grism ( $0.7 < z < 1.5$ ). We laten zien dat sterrenstelsels met sterke en zwakke  $H\alpha$  goed van elkaar te scheiden zijn in een kleur-kleur diagram. Voor sterrenstelsels met actieve stervorming, onderzoeken we hoe  $H\alpha$  afhangt van de kleuren van het sterrenstelsel en de specifieke stervormingssnelheid (stervormingssnelheid per totale stellaire massa), gemeten in het ultraviolet en mid-infrarood. Bij constante massa van het sterrenstelsel, hebben rode stervormings stelsels een lagere  $EW(H\alpha)$  dan blauwe stervormings stelsels. We tonen ook aan dat bij constante massa, de mediaan van de specifieke stervormingssnelheid afneemt als de U-V kleuren roder worden, en dat absorptie door stof toeneemt voor rodere kleuren. We laten zien dat in het algemeen de kleur-afhankelijkheid van  $EW(H\alpha)$  verklaard kan worden door zowel een lagere specifieke stervormingssnelheid als een hogere mate van absorptie door stof in sterrenstelsels met rodere kleuren.

