

# Galactische archeologie: kosmisch kannibalisme en de Melkweg

Tjitske Starkenburg

13 december 2013

## Abstract

Wij zijn allen sterrenstof. Alle elementen zwaarder dan waterstof en helium zijn geproduceerd in sterren en supernova's. Zodoende verrijken de sterren het interstellaire gas waaruit vervolgens weer nieuwe sterren worden geboren die meer zware elementen bevatten. Door middel van spectrografie kunnen we bepalen welke elementen aanwezig zijn in een ster en daaruit leren over vorige generaties die de geboorteomgeving van de ster hebben beïnvloed. Astronomen maken uitvoerig gebruik van deze sporen van de geschiedenis in hun poging de vorming en evolutie van sterrenstelsels te ontrafelen. Zo bedrijven ze galactische archeologie en ontrafelen ze de totstandkoming van onze Melkweg en haar omgeving.

In het kosmologische standaard-model vormen sterrenstelsels van klein naar groot: sterrenstelsels worden ingevangen in elkaars zwaartekrachtsveld en smelten samen tot grotere sterrenstelsels. In onze directe omgeving is meer dan genoeg te zien van dit 'kosmisch kannibalisme': onze eigen Melkweg is op heterdaad betrapt in het verorberen van kleinere buurstelsels. Deze worden langzaam uit elkaar getrokken tot de sterren van het kleinere sterrenstelsel opgaan in de buitenste delen van de Melkweg. Door goed te kijken naar wat elk van deze sterren vertellen over hun voorouders kunnen we hints verzamelen over de opbouw van onze eigen leefomgeving: de Melkweg.

In deze lezing zal ik laten zien hoe galactische archeologie ons helpt een biografie van de Melkweg op te stellen en welke nieuwste ontwikkelingen ons daarbij kunnen helpen. Daarnaast zal ik ingaan op de vele praktische projecten die scholieren kunnen doen met betrekking tot sterrenkunde: van eigen gemaakte satellieten lanceren tot het zelf waarnemen van de spiraalstructuur in onze Melkweg.

# 1 Introductie

Sterrenkundigen proberen het heelal te begrijpen door het licht dat we ontvangen te bestuderen, over de hele breedte van het spectrum. Een grote beperking daarbij is dat we maar één waarnemingspositie in dat hele heelal hebben. We kunnen niet een totaalbeeld krijgen of een object eens vanuit een andere perspectief bekijken. Daarbij heeft licht een eindige snelheid. Daardoor kijken we terug in de tijd als we objecten verder van ons vandaan observeren. De meeste processen in het heelal hebben echter zo'n lange tijdschaal dat we hetzelfde object maar op een enkel ogenblik observeren. De evolutie in het heelal en de fysische processen die daarbij van belang zijn moeten we dus afleiden uit observaties van vergelijkbare objecten die we op net een ander moment in hun evolutie observeren.

Deze waarnemingscondities zijn onder andere belangrijk bij het bestuderen van de vorming en evolutie van sterrenstelsels. Gelukkig kunnen we in dat geval een aantal andere technieken gebruiken om meer te leren over de specifieke geschiedenis van een sterrenstelsel. In deze presentatie komen drie van deze methodes ter sprake. Om meer te leren over de geschiedenis, opbouw en evolutie van sterrenstelsels gaan we eerst beter kijken naar de sterrenstelsels zoals we die tegenwoordig om ons heen zien en wat we uit hun huidige positie en structuur kunnen leren over hun geschiedenis. Vervolgens gaan we een stap verder, of terug, in de geschiedenis en bespreken we populaties van sterren en hoe we daarmee meer kunnen leren over de geschiedenis van een sterrenstelsel. Daarna gaan we nog een stap verder en gaan we graven in de vroege geschiedenis van lokale sterrenstelsels met behulp van de elementen die we observeren in spectra van sterren. Als laatste noem ik een aantal initiatieven die sterrenkundig materiaal voor in de klas en sterrenkundige projecten voor scholieren presenteren alsmede twee projecten waar scholieren zelfs zelf met telescopen kunnen werken en eigen waarnemingen kunnen doen.

Illustraties en figuren van deze lezing zijn te vinden in de bijbehorende powerpoint presentatie die in pdf is bijgevoegd op de CD-ROM.

## 2 Hier en nu: de Melkweg als kannibaal

### 2.1 Wij en Melkweg in context

Als je films als *Powers of 10* [1] of *The known Universe* [2] bekijkt valt het op dat het heelal eigenlijk heel leeg is. *The known Universe* is gebaseerd op waarnemingen van de Spitzer Space Telescope [3] en probeert de ware afstanden en structuren in het heelal weer te geven. Als er wordt uitgezoomd van het zonnestelsel wordt de werkelijke helderheid van de zon in vergelijking met andere sterren weergegeven en ook de gas- en stofwolken in de Melkweg worden zo goed mogelijk gevisualiseerd. Uitzoomend vanaf het zonnestelsel valt het vooral op dat er grote afstanden tussen de afzonderlijke sterren in de Melkweg zitten. Als we een vergelijking maken en daarbij de zon zo groot als een sinaasappel nemen is de volgende ster grofweg te vinden op Cyprus. Deze dichtstbijzijnde ster is Proxima Centauri, één van de 3 sterren die samen het zichtbare "ster"-systeem Alpha Centauri vormen, en staat op een afstand 4.24 lichtjaar.

De zon, en daarmee de Aarde, bevindt zich in een buitenwijk van de Melk-

weg. De Melkweg bestaat uit een schijf van sterren, gas en stof met een diameter van 100.000 lichtjaar en de zon bevindt zich op zo'n 28.000 lichtjaar van het centrum. In het centrum van de schijf bevindt zich een bolvormige verdikking van sterren. Als we nu verder uitzoomen van de Melkweg tot de structuur van het heelal op grote schaal zien we een heleboel meer sterrenstelsels. Al deze sterrenstelsels zitten zo dicht bij elkaar dat ze op grote schaal een soort web-structuur hebben met sterrenstelsels aaneengestreegd in de draden en clusters van sterrenstelsels op de knooppunten. Stel we doen dezelfde vergelijking als eerder, maar nemen nu de Melkweg zo groot als een sinaasappel. Dan ligt het volgende (grote) sterrenstelsel, het sterrenstelsel Andromeda, op een afstand van 2.5 meter. De Melkweg en Andromeda zijn de grootste stelsel in wat we de Lokale Groep van sterrenstelsels noemen en waar ook veel kleinere stelsels bij horen waarvan velen dichter bij de Melkweg of Andromeda staan dan die twee grote sterrenstelsels ten opzichte van elkaar. De Lokale Groep zelf bevindt zich weer aan de rand van een Lokale 'Super'groep. Het heeft geen zeer hoge dichtheid, noch een zeer lage dichtheid aan stelsels.

## 2.2 Botsingen van sterrenstelsels

De vergelijkingen op schaal geven een indicatie van relevante fysica in het heelal. Sterren ondervinden weinig krachten direct van elkaar maar sterrenstelsels daarentegen wel. Sterrenstelsels kunnen elkaar aantrekken, met elkaar interacteren en als de krachten groot genoeg zijn vervolgens 'botsen' en uiteindelijk samensmelten tot een groter sterrenstelsel. We kunnen vele voorbeelden vinden van sterrenstelsels die ergens in dit lange proces van botsen zitten op dit moment. Twee zeer fotogenieke en tot de verbeelding sprekende voorbeelden hiervan zijn de botsende sterrenstelsels die 'the Mice' worden genoemd of de sterrenstelsels die 'the Antennae' genoemde worden. In beide voorbeelden is goed te zien dat een botsing veel gevolgen heeft voor de structuur van het uiteindelijke grotere stelsel. De sterren in een sterrenstelsel ondervinden zelfs tijdens een botsing weinig invloed van elkaar en volgen voornamelijk de globale veranderende zwaartekrachtspotentiaal waardoor hun baan verandert. Het gas in sterrenstelsels daarentegen wordt tijdens een botsing krachtig samengeperst door schokgolven. In dit proces kan veel meer gas voldoende dichtheid bereiken om sterren te vormen dan normaal in het oorspronkelijke sterrenstelsel. In een botsing van twee oorspronkelijke schijfstelsels zoals de Melkweg zien we daarvoor veel stervorming tijdens de botsing (wat bijvoorbeeld de mooie kleuren in opnames van 'the Antennae' geeft). Het resultaat is dan een veel groter stelsel dat meer de vorm van een bol of een ellipsoïde heeft in plaats van een schijf en eigenlijk nog maar heel weinig gas over heeft. Uit twee grote schijfstelsels wordt zo een gigantische elliptisch sterrenstelsel gevormd. Deze vinden we veel in regio's van het heelal waar de dichtheid van sterrenstelsels hoog is. Over ongeveer 4 miljard jaar verwachten we dat de Melkweg in botsing komt met het buursterrenstelsel Andromeda en samen een groter elliptische sterrenstelsel zal vormen.

Botsingen van sterrenstelsels vinden echter niet alleen plaats tussen twee grote of zelfs twee evengrote stelsels. Onze Melkweg heeft twee zeer bekende, en met het oog zichtbare, buursterrenstelsels genaamd de Grote Magelhaense Wolk en de Kleine Magelhaense Wolk. Deze twee stelsels zijn een stuk kleiner dan de Melkweg maar toch de grootste van nog veel meer kleine buursterrenstelsels van ons sterrenstelsel. De Grote en Kleine Magelhaense Wolken zijn zichtbaar op het

zuidelijk halfrond (net als het centrum van de Melkweg zelf) en zijn vernoemd naar de Portugese ontdekkingsreiziger Ferdinand Magellaan (Engels: Magellan, Portugees: Magalhaes) die de eerste zeilreis rond de wereld leidde. Observaties van de sterrenstelsels waren al veel eerder genoteerd door Indische en Perzische sterrenkundigen en een aantal andere Europese ontdekkingsreizigers. Voor de vernoeming naar Magellaan werden sterrenstelsels onder andere de Grote en de Kleine Wolken genoemd. Deze twee in relatie tot de Melkweg kleine sterrenstelsel zien er vrij chaotisch uit met veel actieve stervorming, alsof ze recent opgeschud zijn of op dit moment opgeschud worden. Bij observaties van het atomair waterstof (het voornaamste deel van het gas in sterrenstelsels) in deze stelsels valt op dat er een brug van gas lijkt te zitten tussen de Grote Magelhaense Wolk en de Kleine Magelhaense Wolk en een lange staart aan de andere kant van de Kleine Magelhaense Wolk. Ingetekend op een kaart van de gehele hemel en de Melkweg daarop lijkt het alsof de Magelhaense Wolken een baan om de Melkweg volgen en dus ingevangen zijn door het zwaartekrachtsveld van de Melkweg.

Met behulp van computersimulaties kunnen we deze ontmoetingen en botsingen tussen sterrenstelsels proberen te modelleren en beter begrijpen. Een model dat poot de waarnemingen van het atomair  $[\text{Fe}]/[\text{H}]$  waterstof gas in en rond de Grote en Kleine Magelhaense Wolken en de huidige posities en snelheden van de Wolken te reproduceren laat bijvoorbeeld zien dat de Wolken waarschijnlijk nog maar net zijn ingevangen door de Melkweg, op dit moment met hun eerste ronde rond de Melkweg bezig zijn en hoogstwaarschijnlijk zelf al met elkaar in botsing waren voordat ze ingevangen werden door de Melkweg [4]. Zo kunnen we met behulp van dynamische modellen meer leren over de geschiedenis van deze sterrenstelsels en onze eigen Melkweg.

### 2.3 Sterrenstelsel-restjes in de Melkweg

Een ander klein sterrenstelsel dat is ingevangen door de Melkweg is het Sagittarius dwergsterrenstelsel. Dit sterrenstelsel heeft er al meerdere rondes rond de Melkweg op zitten en heeft in die tijd veel van zijn sterren verloren. Die sterren zijn nu rond de baan van het stelsel rond de Melkweg te vinden. Deze sterren zijn te traceren tot onderdeel van dit sterrenstelsel door hun posities, snelheden en specifieke chemische samenstellingen te vergelijken. Bovendien kunnen we de baan van het sterrenstelsel aan de hemel volgen en zo mogelijke nieuwe 'resten' vinden. Ook dit sterrenstelsel kan gemodelleerd worden in diens zelfvernietigende baan rond de Melkweg. Modellen van de vorming en evolutie van sterrenstelsels suggereren dat er vele van dit soort uit elkaar getrokken resten van kleine sterrenstelsels in de Melkweg te vinden moeten zijn. Als we naar waarnemingen kijken zijn een aantal strengen van sterren inderdaad te zien. Deze sterren zouden delen van uit elkaar getrokken kleine sterrenstelsels kunnen zijn. Uit waarnemingen van ongeveer een kwart van de Noordelijke sterrenhemel is met slimme selectietechnieken de afbeelding die nu het "Field of Streams" genoemd wordt gemaakt [5]. Deze waarnemingen laten inderdaad een aantal strengen aan de hemel zien en hoe deze over dit deel van de hemel lopen. Met betere waarnemingen en slimmere zoekmethodes moeten er waarschijnlijk nog veel meer strengen sterren te vinden zijn.

Op 19 december 2013 werd de Gaia-satelliet van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA [6] succesvol gelanceerd. Gaia gaat zeer precieze waarnemingen

doen van de posities en snelheden van ongeveer een miljard sterren in de Melkweg en haar directe omgeving. Dit is ongeveer 1% van het totaal aantal sterren in de Melkweg. Daarnaast wordt er van vele van deze sterren een spectrum genomen waaruit de chemische samenstelling van de ster gehaald kan worden. Hiermee kan een onzettend precieze catalogus en kaart van Melkweg gemaakt worden. Om deze nauwkeurigheid te bereiken neemt Gaia gedurende 5 jaar elk object gemiddeld 70 keer waar. Daarnaast zijn er aanvullende waarnemingen die vanaf aarde gedaan worden. Met deze enorme hoeveelheid nieuwe en zeer precieze dynamische en chemische informatie kunnen we ons een veel beter en completer beeld vormen van de (dynamische) geschiedenis van de Melkweg en haar buurstelsels.

## 3 Geschiedenis: populaties van sterren

### 3.1 Het leven van sterren

Als we verder willen graven in de specifieke levensgeschiedenis van een sterrenstelsel moeten we eerst meer leren over het leven van sterren. Sterren worden geboren in zeer dichte gas- en stofwolken waarvan delen ineenstorten onder het eigen gewicht. Het grootste deel van hun leven fuseren sterren waterstof tot helium, en vervolgens eventueel tot zwaardere elementen, in een stabiele situatie. Voor lichte sterren geldt dat ze geen zwaardere elementen kunnen produceren na deze levensfase, ze zetten uit en worden rode reuzen die zo groot worden dat ze uiteindelijk hun eigen buitenste lagen niet meer vast kunnen houden. Een rode reus stoot dan zijn buitenste lagen af in een planetaire nevel waarna een kern overblijft die voornamelijk bestaat uit helium of koostof en zuurstof. We noemen dit een witte dwerg. Zwaardere sterren kunnen wel een hoog genoeg druk en temperatuur in hun binnenste bereiken om zwaardere elementen te produceren. Aan het eind van deze stabiele periode zwellen ze op tot superreuzen. Deze superreuzen ontploffen uiteindelijk in supernova's waarna een neutronenster of zwart gat overblijft. De geproduceerde zwaardere elementen worden in de supernova-explosie teruggebracht in het interstellair gas. We denken dat sterren voornamelijk geboren worden in groepen. Daardoor spreken we van sterpopulaties: groepen van sterren die op grofweg hetzelfde moment geboren zijn. Deze sterren kunnen echter heel verschillende eigenschappen hebben. De fysische eigenschappen van een ster worden met name bepaald door zijn massa. Zwarte sterren zijn helderder, blauwer en hoewel ze meer brandstof hebben leven ze korter. Licht sterren zijn lichtzwakker, roder en leven langer. Dit kunnen we goed zien in wat een Hertzsprung-Russell diagram wordt genoemd. In dit diagram wordt helderheid tegen kleur of oppervlaktetemperatuur van een ster uitgezet. Voor sterren die in hun stabiele fase van waterstofverbranding zitten bestaat dit diagram uit grofweg één lijn: van heldere, blauwe, zware sterren tot zwakkere, rode, lichte sterren. Dit noemen we de hoofdreeks. Als we er vanuit gaan dat sterren in groepen worden geboren met een bepaalde verdeling over verschillende massa's kunnen we een stergroep dus zien als een hoofdreeks in een kleur-helderheid diagram of het Hertzsprung-Russell diagram. De evolutie van sterren kun je ook laten zien in zo'n Hertzsprung-Russell diagram. De zon zal bijvoorbeeld aan het eind van haar leven, over 5 miljard jaar (de zon heeft een totale levenslengte van zo'n 10 miljard jaar), een rode reus worden en groeien

tot ongeveer 200 maal haar huidige omvang (ter vergelijking: als de zon nu de grootte heeft van een sinaasappel dan zal ze als rode reus een diameter hebben van ongeveer 20 meter). Als rode reus zal de zon ook helderder zijn dan ze nu is. Uiteindelijk zal ze haar buitenste lagen afstoten waarna een zeer lichtzwakke witte dwerg overblijft.

### 3.2 Leeftijden van sterpopulaties

Omdat we een populatie van sterren kunnen weergeven als hoofdreeks in een Hertzsprung-Russell diagram kunnen we dit diagram ook gebruiken om leeftijden van populaties van sterren te bepalen  $[Fe]/[H]$ . We weten al dat zware sterren die aan de heldere en blauwe kant van de hoofdreeks te vinden zijn kort leven: een ster met een massa van 20 maal de zon leeft ongeveer 10 miljoen jaar. Aan de andere kant leven lichtere sterren langer. Die zijn te vinden aan de lichtzwakke, rode kant van de hoofdreeks. Een ster als de zon leeft ongeveer 10 miljard jaar en een ster met de helft van de massa van de zon leeft ongeveer 100 miljard jaar. Het resultaat van dit verschil in levensverwachting is dat als een sterpopulatie ouder wordt de zware sterren langzaam verdwijnen van de hoofdreeks terwijl de lichtere sterren daarop zichtbaar blijven. Als we dus voor een sterpopulatie die we waarnemen helderheid van elke ster uitzetten tegen diens kleur en zo de hoofdreeks van die populatie construeren kunnen we aan de hand van welke sterren nog net op de hoofdreeks staan een inschatting maken van de leeftijd van de gehele sterpopulatie. Hierbij is het cruciaal dat de groep sterren die we observeren inderdaad dezelfde leeftijd heeft. Gelukkig zijn er in de Melkweg open clusters van sterren, zoals bijvoorbeeld de Pleiaden, en zogenoemde bolhopen, zeer dichte clusters van sterren, waarvan we zeker weten dat alle sterren uit dezelfde geboortegolf komen. Als we voor twee van deze clusters, M67 en NGC188 de lengte van de hoofdreeks vergelijken in een diagram van helderheid tegen kleur zien we dat M67 jonger is dan NGC188 omdat de hoofdreeks van de eerste langer is en dus meer zwaardere, jongere sterren bevat. Bij dit soort vergelijkingen is het natuurlijk wel belangrijk dat je de helderheden en kleuren op dezelfde manier meet. De helderheid hangt bijvoorbeeld ook sterk af van de afstand waarop het cluster van sterren staat en deze afhankelijkheid moet er natuurlijk uit gehaald worden voordat twee clusters van sterren die op verschillende afstanden van ons staan met elkaar vergeleken kunnen worden. Deze zelfde techniek kunnen we gebruiken om te proberen te ontcijferen hoe oud de dominante sterpopulaties in sterrenstelsels zijn en dus hoe actief een sterrenstelsel sterren vormde op elk punt in zijn leven. Voor een sterrenstelsel is dit proces een stuk ingewikkelder dan voor een cluster van sterren; een sterrenstelsel bestaat uit vele verschillende populaties van sterren door elkaar. Daarom maken sterrenkundigen bij dit onderzoek uitgebreid gebruik van modellen van sterpopulaties en gebruiken ze numerieke technieken om uit de waarnemingen de leeftijden van de afzonderlijke populaties te halen. Op dit moment kunnen sterrenkundigen ontcijferen hoe oud de meest dominante populaties van sterren in dichtbijzijnde sterrenstelsels zijn maar de onzekerheid wordt groter naarmate de populatie ouder is. Voor relatief jonge sterpopulaties is het onderscheid tussen 1 en 2 miljard jaar oud of tussen 0.5 en 1 miljard jaar oud wel met enige zekerheid te maken, maar het is vaak niet te zeggen of een oude populatie nu 8 miljard jaar oud is of 6 of 10. Toch hebben we met behulp van deze technieken een goed inzicht wanneer sterrenstelsels het grootste gedeelte van hun sterren

vormden en daarmee of het sterrenstelsels bijvoorbeeld botsingen met andere sterrenstelsels heeft meegemaakt waarin het plotseling veel sterren vormde en wanneer dat was.

## 4 Archeologie: graven met elementen

Als we een gedetailleerder beeld willen hebben van de voorgeschiedenis in de sterrenstelsels die we om ons heen zien is het mogelijk om meer informatie te krijgen uit de specifieke samenstellingen van de sterren die we waarnemen. Een lichte ster kan, zoals eerder genoemd, tientallen tot honderden miljarden jaren leven en kan dus informatie bij zich dragen over de situatie in zijn directe omgeving binnen het sterrenstelsel ten tijde van zijn geboorte als ster.

In het begin was er bijna niets. De voor ons zichtbare materie in het heelal bestond uit atomaire waterstof, wat helium en een heel klein beetje lithium. Alle andere elementen die we kennen zijn gemaakt in sterren. Lichte sterren produceren vooral helium in hun kern. Sterren die ongeveer tweemaal zo zwaar zijn als de zon kunnen ook koolstof, stikstof en zuurstof maken. Zwaardere sterren maken tijdens hun leven vooral de elementen die opeenstapelingen van  $\alpha$ -deeltjes (heliumkernen) zijn: koolstof, zuurstof, neon, magnesium enzovoort. De zware sterren kunnen elementen tot ijzer en soms zelfs zink produceren tijdens hun leven. Alle zwaardere elementen worden gevormd aan het eind van het leven van een ster, bijvoorbeeld in supernova explosies, waarschijnlijk door het invangen van neutronen en opeenvolgende vervalreacties. In supernova's van zware sterren wordt de omgeving vooral verrijkt met de elementen die worden geproduceerd door zware sterren:  $\alpha$ -elementen en een kleine hoeveelheid ijzer-piek elementen. Lichte sterren geven weinig door hun geproduceerde elementen terug aan hun omgeving maar op het oppervlak van witte dwergen kunnen wel thermonucleaire supernova's ontstaan die voornamelijk ijzer-piek elementen produceren. Hier zien we dus een groot verschil tussen verrijking van de omgeving met elementen door lichte en door zware sterren. Zware sterren leven kort en hun omgeving zal dus vrij snel verrijkt worden met zowel  $\alpha$ -elementen als ijzer-piek elementen. Een vaste tijd later (zo'n 100 miljoen tot 1 miljard jaar) zullen echter de thermonucleaire supernova's ook "afgaan" en alleen ijzer-piek elementen bijdragen aan de omgeving. Rond die tijd zal de verhouding tussen de hoeveelheid  $\alpha$ -elementen en ijzer-piek-elementen in die omgeving veranderen. Als we nu verwachten dat in deze omgeving constant nieuwe sterren worden gevormd uit het gereproduceerde materiaal van ontplofte sterren dan kunnen we door de verhoudingen van elementen in de atmosferen van die sterren te meten een idee krijgen van hoe actief de stervorming was in die specifieke omgeving tussen het afgaan van de eerste supernova's van zware sterren en de eerst thermonucleaire supernova's van witte dwergen.

Waarnemingen van de verhoudingen tussen twee  $\alpha$ -elementen, calcium en magnesium, en ijzer uitgezet tegen waarnemingen van de verhouding tussen ijzer en waterstof in dezelfde sterren uit verschillende kleine sterrenstelsels rond de Melkweg (de Fornax, Sculptor, Sagittarius en Carina dwergsterrenstelsels) en de Melkweg zelf geeft een indicatie van de verschillen in evolutie tussen deze sterrenstelsels. Omdat er maar weinig metingen zijn aan sterren in kleine sterrenstelsels kunnen we weinig concluderen over de stervormingsgeschiedenis van individuele dwergsterrenstelsels. We kunnen echter wel waarnemingen van

alle dwergsterrenstelsels samenenvoegen en die vervolgens vergelijkingen met waarnemingen van sterren in de Melkweg. De verwachting is dat er een relatie is tussen de  $[\alpha]/[\text{Fe}]$ -ratios en de ratio  $[\text{Fe}]/[\text{H}]$ . Zowel voor de metingen aan sterren binnen de Melkweg als voor metingen aan sterren in de dwergsterrenstelsels lijkt de helling van de relatie te veranderen. De verandering van de helling voor de relatie tussen  $[\text{Ca}]/[\text{Fe}]$  of  $[\text{Mg}]/[\text{Fe}]$  en  $[\text{Fe}]/[\text{H}]$  ligt echter bij lagere  $[\text{Fe}]/[\text{H}]$ -waarden voor de dwergsterrenstelsels dan voor de Melkweg. Dit is een indicatie dat deze kleine sterrenstelsels een minder actieve stervormingsfase hebben gehad in hun zeer vroege geschiedenis dan de sterrenstelsels die de Melkweg hebben gevormd.

## 5 Conclusie

In deze lezing heb ik voorbeelden gegeven van hoe sterrenkundigen proberen de opbouw en evolutie van onze Melkweg en andere sterrenstelsels te bepalen. Door het gebruik van dynamische modellen, fysische eigenschappen van sterren en de aanwezigheid van elementen in sterren en dit allemaal te vergelijken met modellen en simulaties van sterrenstelsels, sterren en stervolutie, kunnen we stapje voor stapje de levensgeschiedenis van een sterrenstelsel ontrafelen.

## 6 Praktische sterrenkunde voor scholieren

Er zijn vele activiteiten te vinden die in de klas of in kleine projectgroepen te doen zijn met scholieren met betrekking tot sterrenkunde. Bij de werkgroepen tijdens de conferentie zijn al een aantal voorbeelden te vinden zoals:

- Mobile planetaria (Kapteyn Instituut Groningen, [www.rug.nl/planetarium](http://www.rug.nl/planetarium); NOVA, [www.astronomie.nl](http://www.astronomie.nl))
- Citizen Science ([www.galaxyzoo.org](http://www.galaxyzoo.org), [www.zooniverse.org](http://www.zooniverse.org))
- CanSat ([www.cansat.nl](http://www.cansat.nl))
- GO-LAB ([www.go-lab-project.eu](http://www.go-lab-project.eu))

Naast deze voorbeelden wil ik graag nog een aantal websites noemen die interessant kunnen zijn voor op sterrenkunde gerichte projecten en/of experimenten in de klas:

- Portal of the Universe ([www.portaloftheuniverse.org](http://www.portaloftheuniverse.org))
- European Space Agency ([www.esa.int/Education](http://www.esa.int/Education))
- Science in School ([www.scienceinschool.org](http://www.scienceinschool.org))
- Europees virtueel observatorium ([wwwas.oats.inaf.it/aidawp5](http://wwwas.oats.inaf.it/aidawp5))
- Galileo Teachers (resultaat van het Internationale Jaar van de Astronomie; [www.galileoteachers.org](http://www.galileoteachers.org))
- ESA/ESO exercises serie [www.astroex.org](http://www.astroex.org)
- Discover the Cosmos [dicoverthecosmos.eu](http://dicoverthecosmos.eu)



- Discoveryspace (ook experimentele fysica; [www.discoveryspace.net](http://www.discoveryspace.net))

In bijvoorbeeld de *ESA/ESO exercises series* doen leerlingen praktische opdrachten met echte sterrenkundige waarnemingen. Mijn favoriet is exercise 6 (niet te vinden op het Nederlandse deel van de website dus kijk vooral op het Engelse deel) waar leerlingen bepalen hoe zwaar het zwarte gat in het centrum van de Melkweg is met behulp van de Keplerbanen van sterren dichtbij het zwarte gat. De te gebruiken waarnemingen van de posities van de desbetreffende sterren zijn gedaan over een tijdsschaal van 15 jaar. De uiteindelijke massa die gevonden wordt is ongeveer 4 miljoen maal de massa van de zon. Als extra uitbreiding zou ook nog uitgerekend kunnen worden wat dan de horizon is van dit zwarte gat: wat is de straal van een object met een massa van  $4 \times 10^6$  zonsmassa's zodat de ontsnappingssnelheid van het object gelijk is aan de lichtsnelheid?

Twee projecten die ik graag nog apart wil noemen zijn projecten waar leerlingen of klassen echt zelf waarnemingen kunnen doen. Zelf kiezen wat waar te nemen, zelf de telescoop bedienen en zelf de data-analyse doen. Voor optische sterrenkunde kan dit gedaan worden met de Faulkes telescopen ([www.faulkes-telescope.com](http://www.faulkes-telescope.com)). Dit zijn twee telescopen (een op Hawaii en een in Australië) die voornamelijk gericht zijn op educatie-doeleinden. Een ander project waar leerlingen ook zelf waarnemingen kunnen doen is het European Hands On Universe: EU-HOU ([www.eu-hou.net](http://www.eu-hou.net); [www.globalhou.net](http://www.globalhou.net)). Dit projecten heeft meerdere onderzoeksvoorstellen maar een van de mogelijkheden is het in kaart brengen van het atomair waterstof in (een deel van) de Melkweg. De waarnemingen worden in dit geval gedaan door kleine radiotelescopen die in heel Europa staan. Nederland is tot nu toe geen onderdeel van dit project geweest maar docenten zijn altijd welkom. Voor beide projecten geldt dat er meer tijd in gaat zitten voor het regelen en voorbereiden maar dat het ook een unieke ervaring is voor leerlingen.

## References

- [1] *Powers of 10*, Charles and Ray Eames, <http://www.youtube.com/watch?v=0fKBhvDjuy0>
- [2] *The known Universe*, The American Museum of Natural History, <http://www.youtube.com/watch?v=17jymDn0W6U>
- [3] *Roadmap to the Milky Way*, Spitzer Space Telescope team, <http://www.spitzer.caltech.edu/images/1925-ssc2008-10b-A-Roadmap-to-the-Milky-Way-Annotated->
- [4] *The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars*, Besla, G., Kallivayalil, N., Hernquist, L., et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, Volume 421, Issue 3, pp. 2109-2138
- [5] *The Field of Streams: Sagittarius and Its Siblings*, Belokurov, V., Zucker, D.B., Evans, N.W., et al., 2006, The Astrophysical Journal, Volume 642, Issue 2, pp. L137-L140
- [6] *Gaia*, [www.esa.org/gaia](http://www.esa.org/gaia)