

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/42923> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Krause-Feldmeier, A.

**Title:** The assembly history of the milky way nuclear star cluster

**Issue Date:** 2016-09-13

---

# Nederlandse samenvatting

---

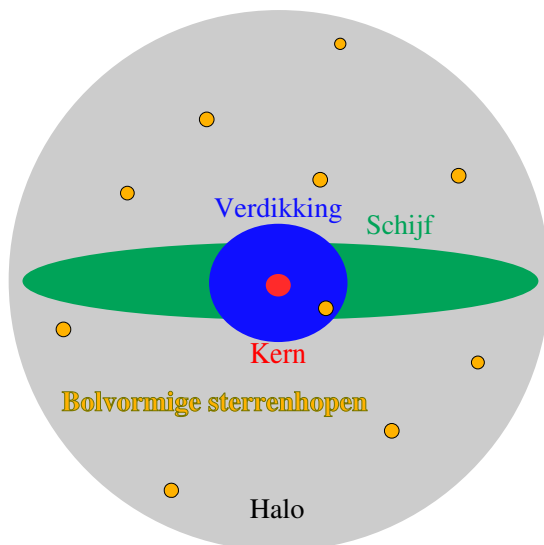
## Sterrenstelsels

Op een heldere, maanloze nacht kan men aan de hemel een vage lichtende band zien, zelfs zonder telescoop. Deze band bestaat uit miljarden sterren en heet de Melkweg. Figuur R1 toont een afbeelding van de Melkweg. Daarnaast zijn er overal nog tal van kleinere nevels te zien (zie bijv. rechtsonder in figuur R1). In de jaren twintig van de vorige eeuw bewees Edwin Hubble dat veel van deze nevels sterrenstelsels zijn. Ze liggen op grote afstanden buiten de Melkweg. De Melkweg is slechts één van de miljarden sterrenstelsels in het heelal.

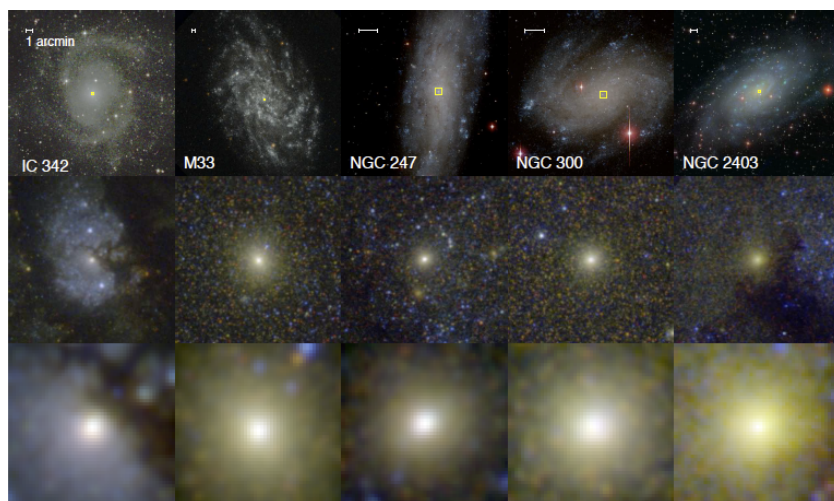


**Figuur R1:** De Melkweg (afbeelding van Serge Brunier).

Sterrenstelsels bestaan uit sterren, planeten, gas, stof en een onzichtbare component, die donkere materie wordt genoemd. Donkere materie vertoont geen wisselwerking met licht, dus het kan niet zonder meer gezien worden met een telescoop. Deze donkere materie in de galactische halo is echter nodig om de bewegingen van sterren en gas in de sterrenstelsels te verklaren. Sterrenstelsels worden omringd door bolvormige sterrenhopen of bolhopen. Deze sterrenhopen zijn ronde, dichtbevolkte voorwerpen in de galactische halo, vooral bestaande uit oude, metaalarme sterren. Veel sterrenstelsels zijn zogeheten spiraalstelsels, zoals de Melkweg. Er bestaan ook stelsels zonder bijzondere eigenschappen; zij worden elliptische sterrenstelsels genoemd. Figuur R2 toont een schematisch zijaanzicht van de Melkweg. Het gas en stof bevinden zich hoofdzakelijk in de galactische schijf en kern. De meeste sterren bevinden zich ook in de schijf en de kern, evenals in de verdikking.



**Figuur R2:** Schematisch zijaanzicht van de Melkweg. De onderdelen zijn niet op schaal getekend.



**Figuur R3:** Afbeeldingen van spiraalstelsels met een centrale sterrenhoop, overgenomen van Carson et al. (2015). De bovenste rij toont de volledige sterrenstelsels, de middelste rij zoomt in op de binnenste delen (ca.  $500 \times 500$  vierkante lichtjaar) en de onderste rij toont de centrale sterrenhopen in het midden van elk stelsel (ca.  $80 \times 80$  vierkante lichtjaar). De schaallijnen bovenin geven  $1'$  weer (ca. 2400 lichtjaar).

## Centrale sterrenhopen

In de jaren negentig hebben sterrenkundigen de binnenste delen van sterrenstelsels in kaart gebracht met de ruimtetelescoop *Hubble* en met telescopen op aarde met spiegels van 8 tot 10 meter in doorsnee. Veel stelsels zijn in het centrum zeer helder vanwege een dichtbevolkte sterrenhoop, ook wel een centrale sterrenhoop genoemd. Enkele afbeeldingen van sterrenstelsels met een centrale sterrenhoop zijn te zien in figuur R3. Centrale sterrenhopen bevatten vele miljoenen sterren met een gezamenlijke massa van ongeveer één miljoen tot honderd miljoen maal de massa van de zon. Zo'n 50 tot 75% van alle sterrenstelsels, waaronder de Melkweg, hebben een centrale sterrenhoop. Dit soort sterrenhopen komen vooral voor in stelsels van lage tot gemiddelde massa. Zware, heldere stelsels bevatten geen centrale sterrenhoop. Sterrenkundigen willen onderzoeken hoe centrale sterrenhopen ontstaan en waarom ze niet in alle sterrenstelsels voorkomen.

Hoe zwaarder of helderder een sterrenstelsel is, des te zwaarder is ook de centrale sterrenhoop in dat stelsel. Zulke correlaties zijn interessant, want ze geven mogelijk inzicht in de gezamenlijke evolutie van het sterrenstelsel en zijn kern. De sterrenhopen hebben stralen van 3 tot 30 lichtjaar, terwijl de bijbehorende stelsels ruwweg 1000 tot 100.000 lichtjaar groot zijn. De correlaties kunnen iets zeggen over de natuurlijke processen die de vorm bepalen van de binnenste delen van sterrenstelsels. Sterrenkundigen hebben twee verschillende theorieën voorgesteld voor het ontstaan van centrale sterrenhopen: (a) gas uit het sterrenstelsel hoopt zich in het centrum op en sterren ontstaan ter plaatse in de kern van het stelsel; of (b) sterren ontstaan in dichtbevolkte hopen elders in het stelsel, bijv. in bolvormige sterrenhopen. Deze bolhopen bewegen vervolgens naar binnen toe en worden de centrale sterrenhoop. Het is ook mogelijk dat beide processen bijdragen aan de vorming van centrale sterrenhopen.

De sterren in een centrale sterrenhoop zijn niet allemaal even oud. De leeftijden variëren van slechts een paar miljoen jaar tot tien miljard jaar. De hopen bevatten dus meerdere "sterpopulaties". Sterpopulaties kunnen verschillen qua leeftijd, maar ook qua chemische samenstelling, want de sterren zijn niet op hetzelfde moment en uit hetzelfde materiaal ontstaan. De sterpopulaties kunnen een karakteristieke ruimtelijke verdeling hebben of op een bepaalde manier bewegen. Onderzoek naar de eigenschappen van verschillende populaties is zinvol om het ontstaan en de ontwikkeling van centrale sterrenhopen te ontrafelen.

## Superzware zwarte gaten

Het is moeilijk om je een zwart gat voor te stellen: een voorwerp zó zwaar dat niets eruit kan ontsnappen. Zwarte gaten zijn onzichtbaar; alle materie of straling die erin terecht komt, kan nooit meer weg. Een zwart gat beïnvloedt de omringende sterren en gas via de zwaartekracht. Uit de bewegingen van de sterren in omloopbanen rond een zwart gat kunnen we de aanwezigheid van dat zwarte gat afleiden.

Superzware zwarte gaten zijn tienduizend tot tien miljard maal zo zwaar als de zon. Zij bevinden zich in het midden van de meeste sterrenstelsels, met name in zware stelsels. Er is nog altijd onduidelijkheid over hoe superzware zwarte gaten ontstaan en hoe ze groeien.

Eenzijds zouden zwarte gaten het eindproduct kunnen zijn van de levenscyclus van sterren, anderzijds zouden ze ook direct kunnen ontstaan uit ineenslopende gaswolken in het jonge heelal. Deze kleine zwarte gaten zouden dan snel groter moeten zijn geworden, anders is er geen verklaring voor de aanwezigheid van superzware zwarte gaten toen het heelal nog maar een miljard jaar oud was.

De Melkweg bevat ook een superzwaar zwart gat, gelegen binnenin de centrale sterrenhoop. De sterren aldaar worden al meer dan tien jaar nauwlettend in de gaten gehouden. Het is inmiddels duidelijk dat ze elliptische banen beschrijven rond een onzichtbaar voorwerp. Op basis van deze omloopbanen is de massa van het zwarte gat bepaald op vier miljoen zonsmassa's.

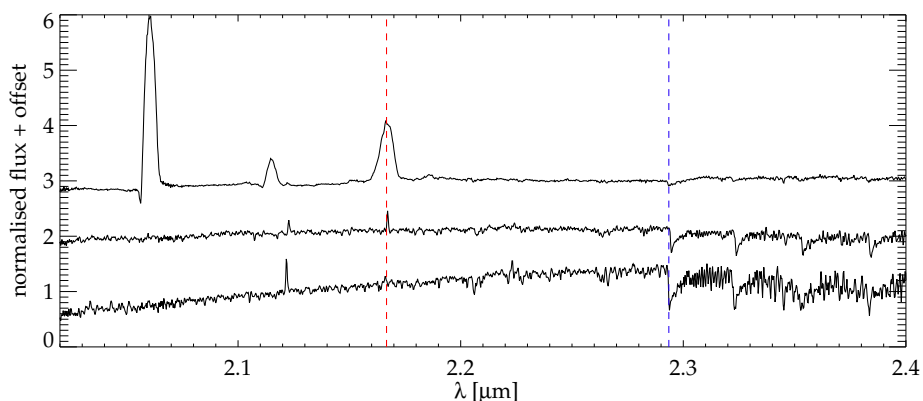
Het direct meten van de omloopbanen van de sterren rond een zwart gat is vooral nog alleen mogelijk in de Melkweg. Er bestaan een aantal alternatieve methodes om superzware zwarte gaten in andere sterrenstelsels te vinden. Eén zo'n methode is het gebruik van dynamische modellen om de totale massaverdeling van een bepaalde groep sterren te bepalen. Dit soort modellen bootsen de waarnemingen en de gemeten bewegingen van de zichtbare sterren na. Aangezien de individuele omloopbanen beïnvloed worden door de zwaartekracht van het gehele stelsel, geven de dynamische modellen als resultaat de volledige massaverdeling, inclusief de massa van onzichtbare onderdelen zoals zwarte gaten en donkere materie.

## Spectroscopie

Een spectrograaf splitst licht op in een spectrum, oftewel een grafiek van de lichtsterkte als functie van de golflengte. Spectra bevatten een schat aan informatie over de lichtbron. Er kunnen lijnen zichtbaar zijn in een spectrum, ofwel helder tegen een donkere achtergrond (emissie), ofwel donker tegen een heldere achtergrond (absorptie). Deze lijnen zijn het gevolg van wisselwerkingen tussen elektromagnetische straling en materie. De golflengte, sterkte en breedte van de lijnen zeggen iets over de eigenschappen van de lichtbron. Figuur R4 toont de spectra van drie sterren. De rode en blauwe streepjeslijnen geven respectievelijk een emissie- en een absorptielijn aan.

Elke lijn in een spectrum wordt veroorzaakt door een bepaald soort materie, zoals een atoom of een molecuul. De sterkte of intensiteit van de lijn hangt af van het aantal atomen of moleculen in de ster. Een ijzerlijn wordt bijvoorbeeld sterker als de ster meer ijzer bevat. De lijnsterkte hangt ook af van de oppervlaktetemperatuur van de ster. Sommige lijnen zijn alleen zichtbaar boven of onder een bepaalde temperatuur. Door de sterktes van alle lijnen in een spectrum te meten, kunnen we dus het metaalgehalte en de effectieve temperatuur van de ster bepalen. De sterkte van de absorptielijnen in figuur R4 verschilt per ster. Bovendien bevat het bovenste spectrum enkele emissielijnen die niet in de andere spectra zichtbaar zijn, omdat die van koudere sterren komen.

Als de lichtbron zich ten opzichte van de waarnemer beweegt, verschuiven de spectraallijnen naar een andere golflengte. Dit heet het dopplereffect. Door de golflengte van een bepaalde lijn te meten, kunnen we dus de snelheid uitrekenen waarmee de ster naar ons toe



**Figuur R4:** Spectra van drie verschillende sterren zoals gemeten met de instrumenten ISAAC en KMOS op de *Very Large Telescope* in Chili. De lichtsterkte (*flux*) is uitgezet tegen de golflengte ( $\lambda$ ) in het nabije infrarood. De rode en blauwe streepjeslijnen geven aan waar zich respectievelijk een emissie- en een absorptielijn bevinden. Het bovenste spectrum komt van een hetere ster dan de onderste twee spectra.

of van ons af beweegt. De spectra in figuur R4 zijn onderling iets verschoven in golflengte, omdat ze afkomstig zijn van sterren met verschillende snelheden.

In ver van ons verwijderde sterrenstelsels zijn de sterren te zwak om individuele spectra te kunnen meten. We kunnen wel het gezamenlijke spectrum van een groep sterren waarnemen. Zo'n spectrum bevat het licht van vele sterren naar rato van hun onderlinge helderheid. De gemeten snelheid, effectieve temperatuur en metaalgehalte zijn dus een gewogen gemiddelde van de sterren die bijdragen aan het spectrum. Aangezien echter niet alle sterren dezelfde snelheid hebben, zijn de spectraallijnen van de hele groep breder dan die van individuele sterren. Deze lijnverbreding is beperkt als alle sterren min of meer even snel en in dezelfde richting bewegen, maar het effect is groter als de mate van willekeurige bewegingen (oftewel de snelheidsspreiding) van de sterren groot is. De snelheidsspreiding hangt af van de totale massaverdeling (lichte en donkere materie) en is dus van groot belang voor de eerder genoemde dynamische modellen.

## Dit proefschrift

In dit proefschrift bestuderen we de ontstaansgeschiedenis van de centrale sterrenhoop in de Melkweg. De afmetingen van de sterrenhoop zijn vrij typisch voor een centrale sterrenhoop, met een straal van ongeveer 14 lichtjaar. De centrale sterrenhoop van de Melkweg bevindt zich op zo'n 26.000 lichtjaar van de aarde. Daarmee is hij de dichtstbijzijnde centrale sterrenhoop in het heelal en kan hij in meer detail bestudeerd worden dan de centrale sterrenhopen



**Figuur R5:** Afbeelding van de binnenste  $45 \times 30$  vierkante lichtjaar van de Melkweg, waar de centrale sterrenhoop zich bevindt (uit het VVV-project, Saito et al. 2012).

in andere sterrenstelsels. We tonen een afbeelding van onze centrale sterrenhoop in figuur R5.

In **hoofdstuk 2** bekijken we de bewegingen en massaverdeling van de centrale sterrenhoop van de Melkweg. We gebruiken de spectrograaf ISAAC (werkend in het nabije infrarood, met een lange waarneemsleuf) op de *Very Large Telescope* (VLT) in Chili om een groot gebied van 640 vierkante lichtjaar van de centrale sterrenhoop in kaart te brengen. We nemen ook zes kleinere gebieden waar tot een maximale straal van 62 lichtjaar langs het galactische vlak. De data omvatten het volledige zwaartekrachtsbereik van ongeveer negen lichtjaar (straal) van het superzware zwarte gat. We meten de snelheid langs de gezichtslijn en de intensiteit van de absorptielijn van CO in 1375 spectra van individuele sterren. Met behulp van spectra van het geïntegreerde licht van de rode reuzensterren maken we kaarten van de snelheden en snelheidsspreidingen. De snelheidskaart toont de draaiing van de centrale sterrenhoop en andere, complexere patronen. In het bijzonder ontdekken we dat de draaias  $9^\circ$  is gekanteld ten opzichte van de fotometrische korte as, en we vinden aanwijzingen voor een draaiende substructuur die op een straal van ongeveer 2,6 lichtjaar loodrecht op het galactisch vlak staat. Deze structuren kunnen het gevolg zijn van specifieke momenten van accretie in het verleden. Naast de bewegingskaarten gebruiken we ook fotometrie van de ruimtetelscoop *Spitzer* en het NACO-instrument op de VLT om anisotrope, axisymmetrische dynamische Jeans-modellen op te zetten. Hieruit leiden we de massaverdeling van de centrale sterrenhoop af en berekenen we de massa van het zwarte gat. Deze massa is de helft van wat er is berekend op basis van de waarnemingen van de omloopbanen van individuele sterren vlakbij het zwarte gat.

In **hoofdstuk 3** bestuderen we de massaverdeling en omloopbanen van de centrale sterrenhoop in de Melkweg in meer detail. We construeren triaxiale dynamische Schwarzschild-modellen op basis van de omloopbanen en passen deze toe op de spectroscopische kaarten en fotometrische data van *Spitzer* uit hoofdstuk 2. We gebruiken de modellen om de triaxiale vorm van de sterrenhoop te bepalen, alsmede de dynamische verhouding tussen massa en licht ( $Y$ ) en de massa van het superzwarte zwarte gat ( $M_{\bullet}$ ). Deze massa is nu wel in overeenstemming met de massa die bepaald is uit de individuele omloopbanen vlakbij het zwarte gat. Het model dat het beste overeenkomt met de data reproduceert de complexe substructuren die we zien in de snelheidskaarten.

In **hoofdstuk 4** richten we ons op de jonge sterpopulatie in de binnenste 43 vierkante lichtjaar van de centrale sterrenhoop in de Melkweg. We hebben spectra in het nabije infrarood (genomen met KMOS op de VLT) van 114 hete, jonge sterren die slechts 3–8 Myr geleden zijn ontstaan. We classificeren deze sterren in een aantal subgroepen. De jonge sterren bevinden zich vooral in het binnenste van het bestudeerde gebied, in tegenstelling tot de koudere sterren, die verspreid over het hele gebied voorkomen. Deze sterke concentratie van hete, jonge sterren geeft aan dat ze ter plekke in het centrum van de sterrenhoop zijn gevormd. In het geval van radiële verplaatsing hadden we namelijk meer jonge sterren op grotere afstanden moeten zien.

In **hoofdstuk 5** analyseren we de verdeling van metaalgehalten in de populatie van sterren met een laat spectraaltipe in de centrale sterrenhoop van de Melkweg. We gebruiken de KMOS-spectra uit hoofdstuk 4. De sterren met een laat spectraaltipe hebben sterkere lijnen van Na I dan vergelijkbare sterren in catalogi. We vergelijken de volledige spectra van meer dan 700 sterren met een collectie kunstmatige spectra. Zodoende bepalen we voor elke ster de effectieve temperatuur, het metaalgehalte, de zwaartekracht aan het oppervlak en de radiële snelheid. De meeste sterren zijn koude rode reuzen met temperaturen van 3000–5000 K. We zien een vlakke verdeling van metaalgehalten, variërend van  $[M/H] < -1$  dex (tien keer lager dan de zon) tot  $\gtrsim +0.3$  dex (twee keer hoger dan de zon). Slechts zo'n vijf procent van de sterren gelden als metaalarm ( $[M/H] \leq -0.5$  dex, drie keer lager dan de zon). Sterren met  $[M/H] \leq 0.0$  dex (gelijk aan de zon) hebben wellicht hun oorsprong in invallende bolhopen. De meeste sterren (ong. 75%) zijn meer metaalrijk dan de zon; voor deze sterren kunnen we het scenario van een invallende bolhoop uitsluiten.

## Conclusies en vooruitblik

We hebben aanwijzingen gevonden voor twee verschillende ontstaansmethoden voor de centrale sterrenhoop van de Melkweg. Snelheidskaarten van de populatie van oude rode reuzen vertonen complexe structuren. Dit betekent dat de centrale sterrenhoop een aantal bolhopen heeft opgeslokt. De ontdekking van metaalarme sterren is een andere aanwijzing voor het scenario van invallende bolhopen, aangezien bolhopen uit zulke sterren bestaan. Metaalarme sterren zijn echter ook gezien in de galactische schijf en de verdikking, en kunnen daar zijn



gevormd. Gezien het kleine percentage aan metaalarme sterren kan het invallen van bolhopen niet de belangrijkste manier zijn waarop de centrale sterrenhoop van de Melkweg is ontstaan.

De meeste sterren hebben een metaalgehalte gelijk aan of hoger dan die van de zon, wat niet rijmt met een oorsprong in bolhopen. Deze sterren moeten zijn ontstaan uit verrijkt materiaal, ofwel ter plaatse in de kern van de Melkweg, ofwel elders gevolgd door migratie richting de kern. De jonge sterren zijn beslist gevormd in het binnenste lichtjaar van de Melkweg. Ze zijn sterk centraal geconcentreerd, in tegenstelling tot wat men kan verwachten in het geval van migratie.

Vergeleken met eerdere onderzoeken hebben we in een significant groter gebied de sterpopulaties bestudeerd. Niettemin omvatten onze data slechts een klein deel van de centrale sterrenhoop. We zouden meer kunnen leren over het ontstaan van de centrale sterrenhoop door de sterpopulaties in een groter gebied te analyseren en te zoeken naar gradiënten in leeftijd en metaalgehalte. We hebben aangetoond dat het binnenste deel van de centrale sterrenhoop van de Melkweg slechts enkele metaalarme sterren bevat. Mogelijk bevinden zich in de buitendelen meer van zulke sterren, in het bijzonder als deze afkomstig waren uit een invallende bolhoop. Er zouden op grotere afstanden ook nog losse jonge sterren kunnen voorkomen, die tot nu toe niet zijn ontdekt. Deze jonge sterren zouden bewijs vormen voor recente momenten van accretie.

Een verloop in de sterpopulaties betekent ook dat de verhouding tussen massa en licht niet constant is, hoewel we dat wel hebben aangenomen. Dit zou gevolgen hebben voor de massaverdeling die we voor het sterrencluster hebben berekend. Waarnemingen met hogere resolutie zijn nodig om onze metingen van het metaalgehalte te bevestigen en om de elementaire abundanties van koude sterren te bepalen. Spectra met hogere resolutie zijn ook nodig om het spectraaltype en de leeftijd van de ontdekte jonge sterren vast te stellen. In dit proefschrift hebben we aangenomen dat ze even oud zijn als al bekende jonge sterren, maar dat moet gecontroleerd worden.

Er is ook ruimte voor verbetering in de analyse van de bewegingen in de centrale sterrenhoop. Onze bewegingskaart beslaat niet de hele sterrenhoop. De rotatiekromme van het binnenste deel van de Melkweg en de galactische potentiaal aldaar zijn nog steeds grotendeels onbekend. Om dit soort tekortkomingen op te lossen hebben we meer waarnemingen verricht met KMOS (VLT) en FLAMINGOS-2 (*Gemini South Telescope*). Deze twee datasets kunnen worden samengevoegd en gebruikt voor dynamische modellen. De modellen kunnen worden uitgebreid door een gasschijf als extra onderdeel toe te voegen en door de eigenbewegingen van de sterren in te voeren. Het gebruik van modellen die de bewegingsdata niet hoeven te middelen zou een verdere verbetering betekenen.

De toekomst biedt vele mogelijkheden voor waarnemingen van de kernen van sterrenstelsels. Nieuwe telescopen worden momenteel gepland en gebouwd. In 2018 wordt bijvoorbeeld de *James Webb Space Telescope* (JWST) gelanceerd. Dankzij zijn hoge gevoeligheid en ruimtelijke resolutie zullen we de gelegenheid hebben om gradiënten te bestuderen in de sterpopulaties in centrale sterrenhopen in andere sterrenstelsels dan de Melkweg. Daarnaast wordt er een nieuwe generatie telescopen op aarde gebouwd. Deze extreem grote telescopen hebben spiegels met diameters van meer dan twintig meter: de *Giant Magellan Telescope*

(GMT,  $d = 24.5$  m), de *Thirty Meter Telescope* (TMT,  $d = 30$  m) en de *European Extremely Large Telescope* (E-ELT,  $d = 39.3$  m). De instrumenten met hoge spectrale en ruimtelijke resolutie zullen van pas komen in de zoektocht naar superzware zwarte gaten in de centrale sterrenhopen van andere sterrenstelsels. In de centrale sterrenhoop van de Melkweg zullen deze gevoelige telescopen zwakkere sterren kunnen waarnemen dan momenteel mogelijk is, waaronder dwergsterren van spectraaltype A of F. Nieuwe telescopen en modellen zullen bijdragen aan een beter begrip van het ontstaan en de ontwikkeling van sterrenstelsels en in het bijzonder van hun kernen. We verwachten een heldere toekomst voor dit onderzoeksgebied.

