Messier 82 | *Actieve stervorming in close-up*

Samenvatting Door nieuwe, gedetailleerde waarnemingen met de *Hubble* ruimtetelescoop van de actieve stervorming in het centrum van M82 te combineren met die van een nabijgelegen gebied waarin de stervorming zo'n 100–200 miljoen jaar geleden is opgehouden, kunnen we voor het eerst een beeld krijgen van de ontwikkeling van populaties sterren binnen hetzelfde sterrenstelsel. Dankzij het grote oplossende vermogen van zulkee waarnemingen kunnen we hopelijk binnenkort ook de stervormingsprocessen die de ontwikkeling van sterrenstelsels bepalen in detail begrijpen.

1 Actieve stervorming toen en nu

Messier 82 (M82) is op het eerste gezicht een gewoon, onregelmatig sterrenstelsel (zie figuur 1). Dat eerste indrukken bedriegelijk kunnen zijn blijkt als we eens wat nauwkeuriger kijken naar met name het centrum van het stelsel.

Waarnemingen in alle golflengtegebieden, van radiogolven tot Röntgenstraling, wijzen erop dat door een (bijna) botsing met een naburig stelsel in de afgelopen paar honderd miljoen jaar grote gasstromingen zijn ontstaan in het centrum van M82. Dit heeft ervoor gezorgd dat er sindsdien zeer actieve stervorming heeft plaatsgevonden, waarschijnlijk gedurende zo'n 50 miljoen jaar. Hoewel een mensenleven, of zelfs een aantal generaties, ons niet meer dan een momentopname van de stervormingsgeschiedenis in een sterrenstelsel kan laten zien, is er een ruime mate aan indirekt bewijs voor handen, die de astronoom in staat stelt dergelijke conclusies te trekken.

Door nieuwe waarnemingen met de Amerikaanse *Hubble* ruimtetelescoop, in zichtbaar licht, maar ook in nabij-infrarode (warmte) straling, zijn in de gebieden met actieve stervorming meer dan honderd zgn. supersterrenhopen ontdekt. Dit zijn waarschijnlijk de jongere broertjes van de zgn. bolvormige sterrenhopen die we in onze eigen Melkweg aantreffen. Deze bolvormige sterrenhopen (of bolhopen) worden over het algemeen gezien als de oudste bouwstenen van de Melkweg; ze zijn waarschijnlijk ontstaan rond de tijd dat de Melkweg zelf begon vorm te krijgen. M82 is het dichtstbijzijnde sterrenstelsel (op ca. 12 miljoen lichtjaar) waarin zulke super-sterrenhopen zijn gevonden in de actieve stervormingsgebieden.

Vlak naast deze actieve stervormingsgebieden vinden we een regio waarvan we denken dat de actieve stervorming ca. 100–200 miljoen jaar geleden is opgehouden. Ter vergelijking, de sterren(-hopen) in de actieve stervormingsgebieden kunnen niet veel ouder dan ca. 5 miljoen jaar zijn. Door nu theoretische modellen voor de ontwikkeling van sterrenstelsels met de waarnemingen te vergelijken, kunnen we afleiden dat de stervormingsgeschiedenis in beide regio's hoogstwaarschijnlijk volledig vergelijkbaar is (geweest).

Er zijn echter ook andere aanwijzingen dat er meerdere stervormingsperiodes hebben plaatsgevonden in M82:

– De interacties tussen M82 en naburige stelsels, zoals bijvoorbeeld Messier 81, hebben minimaal 200 miljoen jaar geduurd. Gedurende die tijd kunnen de gasstromingen in M82 een aantal malen tot actieve stervorming hebben geleid.
– De actieve stervorming wordt voor een deel veroorzaakt supernova-explosies, die weer tot gasstromingen leiden door het hele stelsel. Dergelijke gasstromingen verdrijven het koele gas uit het stervormingsgebied. Dit koele gas is echter het voornaamste bestanddeel voor de vorming van nieuwe sterren, dus op deze manier zal de stervorming worden vertraagd of zelfs geheel worden gestopt. Deze gasstromingen zullen langzamerhand afnemen, waardoor het koele gas weer kan terugvallen en er opnieuw actieve stervorming kan plaatsvinden.

Door nu waarnemingen van de actieve stervorming in het centrum van M82 te combineren met die van het gebied waarin de stervorming zo'n 100–200 miljoen jaar geleden is opgehouden, kunnen we voor het eerst een beeld krijgen van de ontwikkeling van populaties sterren binnen *hetzelfde* sterrenstelsel. Dit is een unieke situatie, omdat we tot dusver altijd waarnemingen van verschillende sterrenstelsels hebben moeten combineren om deze ontwikkeling te beschrijven, met alle mogelijke problemen van dien. Bovendien snappen we nog steeds niet precies hoe actieve stervorming in sterrenstelsels nu eigenlijk plaats vindt, maar het lijkt erop dat die supersterrenhopen een belangrijke rol spelen. Tot voor kort was het zelfs niet mogelijk om deze super-sterrenhopen te detecteren, omdat ze te klein zijn om te worden waargenomen vanaf de aarde. Gelukkig heeft de komst van de *Hubble* ruimtetelescoop hierin verandering gebracht, en hopelijk kunnen we daarom straks ook de stervormingsprocessen die de ontwikkeling van sterrenstelsels bepalen in detail begrijpen.

2 Een kijkje in de kraamkamer

De jonge sterrenhopen in de actieve stervormingsgebieden in het centrum van M82 zijn over het algemeen veel helderder dan welke oude, bolvormige sterrenhoop in de Melkweg of in andere stelsels in de Lokale Groep dan ook. Zulke jonge of super-sterrenhopen zijn ook gevonden in andere sterrenstelsels die door de aantrekkingskrachten

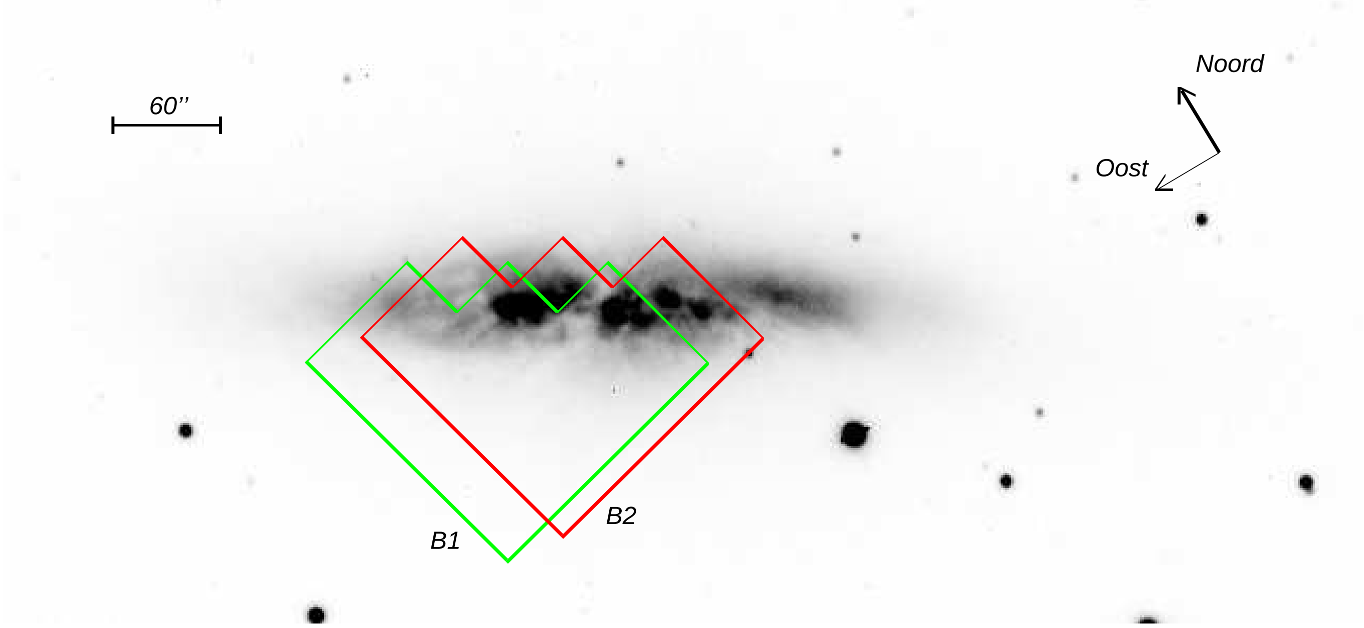

Fig. 1. Messier 82 op een fotografische opname gemaakt met de 5m telescoop op Mount Palomar onder optimale omstandigheden. De door ons met de *Hubble* ruimtetelescoop waargenomen gebieden zijn aangegeven door middel van hun karakteristieke trapvormige contouren; een indicatie van de schaal van de figuur is opgenomen in de linker bovenhoek, door een balkje met een lengte van 1 boogminuut aan de hemel, ofwel ongeveer 1.000 lichtjaar.

van hun buurstelsels worden beïnvloed, zoals bijvoorbeeld de "Antennae" (zie figuur 2), in kleine, onregelmatige sterrenstelsels zoals de Magellaanse Wolken en andere dwergsterrenstelsels, en ten slotte in sterrenstelsels waarin actieve stervorming plaatsvindt, zoals M82.

Misschien komt de meeste actieve stervorming in sterrenstelsels wel voor in dergelijke super-sterrenhopen, maar voor deze veronderstelling hebben we tot nog toe geen sluitend bewijs. De meeste sterrenstelsels die super-sterrenhopen bevatten vertonen een grote verscheidenheid aan leeftijden binnen hun populaties super-sterrenhopen, en staan bovendien vaak zo ver weg, dat we de individuele sterrenhopen niet gedetailleerd genoeg kunnen waarnemen. Als we ervan uit gaan dat in het oudere stervormingsgebied in M82 vergelijkbare stervorming heeft plaatsgehad als in het gebied met de huidige actieve stervormingsprocessen, hopen we nu echter de ontwikkeling van de super-sterrenhopen te kunnen volgen.

Ondanks dat de actieve stervormingsgebieden in het centrum van M82 tot in detail zijn bestudeerd, is er betrekkelijk weinig onderzoek verricht naar de gebieden waarin de stervorming vrijwel tot stilstand is gekomen. Daarom zullen we ons bij de discussie van de evolutie vam M82 in dit artikel met name richten op dat gebied. In figuur 1 zijn de karakteristieke trapvormige contouren van de met de *Hubble* telescoop waargenomen velden ingetekend ("B1" en "B2"; samen vormen ze het gebied "M82 B"). Figuur 3 is een afbeelding in "ware kleuren" van het centrum van de middelste "trede" in gebied B1. Globaal gesproken corresponderen rodere kleuren met grotere hoeveelheden stof in het betreffende gebied, en blauwere kleuren met actieve stervorming. De voornaamste resultaten die we hier zullen bespreken zijn gebaseerd op de waarnemingen in de de middelste "tredes" van beide gebieden, waarvoor het oplossend vermogen het grootst is.

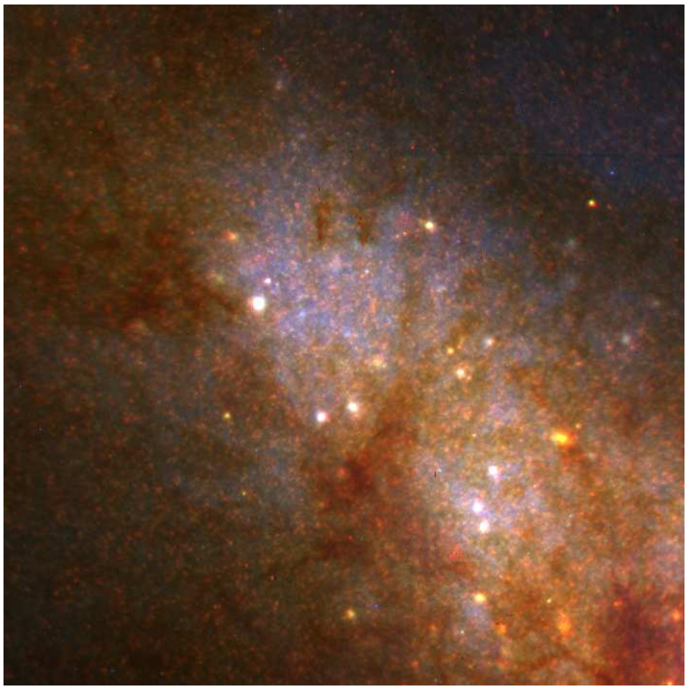

Fig. 3. Close-up in "ware kleuren" van M82 B1, één van de gebieden in het centrum van M82 waar actieve stervorming zo'n 100–200 miljoen jaar geleden is opgehouden.

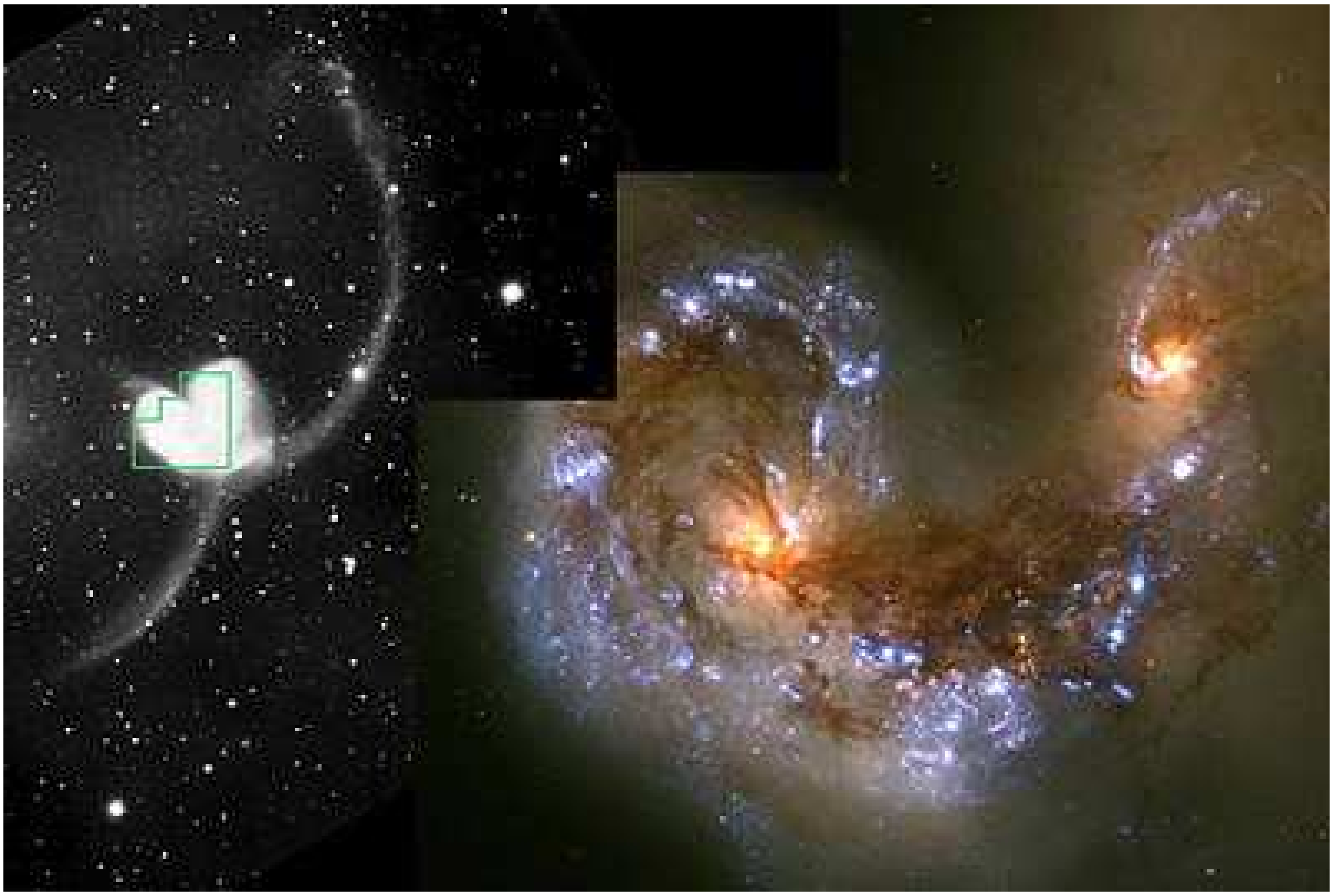

Fig. 2. De "Antennae", twee sterrenstelsels die momenteel op elkaar botsen. Het beeldveld van het met de *Hubble* telescoop waargenomen centrale gebied (rechts, in "ware kleuren") is aangegeven op de overzichtsfoto links. Met behulp van deze waarnemingen heeft men meer dan 1.000 jonge sterrenhopen ontdekt, die zeer waarschijnlijk zijn gevormd als gevolg van de onderlinge aantrekkingskrachten tussen beide botsende stelsels. *(foto's copyright Space Telescope Science Institute/Brad Whitmore)*

3 Een stoffige tijdbalk

Met behulp van onze waarnemingen van de jonge sterrenhopen in het centrum van M82 hopen we nu antwoord te kunnen geven op een aantal intrigerende vragen:

1. Kunnen we de periode van actieve stervorming in M82 B dateren? Wat is het effect van stof op onze resultaten en hoeveel stof bevindt zich in het gebied?
2. Kunnen we deze sterrenhopen vergelijken met de bolvormige sterrenhopen in bijvoorbeeld de Melkweg op jongere leeftijd? Met andere woorden, zouden de jonge (super) sterrenhopen in M82 zich uiteindelijk kunnen ontwikkelen tot oude, bolvormige sterrenhopen?
3. Wat zijn de belangrijkste verschillen tussen de sterrenhopen in M82 enerzijds en, bijvoorbeeld, de Melkweg anderzijds? Op welke manier kunnen de jonge sterrenhopen zich ontwikkelen tot oude bolhopen en welke processen moeten daarbij een belangrijke rol spelen?

Eén van de belangrijkste, en tegelijkertijd eenvoudigste, methodes om de sterrenhopen in verschillende stelsels met elkaar te vergelijken is door simpelweg het aantal sterrenhopen van een gegeven helderheid te tellen, en dit te doen voor alle sterrenhopen, van de lichtzwakste tot de helderste. Dit wordt ook wel de "helderheidsfunctie" genoemd.

Deze helderheidsfunctie is goed bekend voor de populaties oude, bolvormige sterrenhopen in o.a. de Melkweg, de Andromedanevel, Messier 87 (het centrale sterrenstelsel in de Virgo cluster), en oude elliptische stelsels: de helderheidsfunctie vertoont een piek, die voor al deze stelsels op min of meer dezelfde helderheid optreedt, en de vorm is vergelijkbaar met de contouren van een kerkklok (ook wel een "Gaussische functie" genoemd).

Voor de jongere sterrenhopen in bijvoorbeeld de Grote Magellaanse Wolk en andere nabije sterrenstelsels met grote aantallen jonge sterrenhopen, bijv. de "Antennae" stelsels, is de situatie ingewikkelder. In dit soort stelsels neemt het aantal sterrenhopen vaak toe naarmate ze lichtzwakker worden. Het is overtuigend aangetoond dat dit een reëel effect is en niet wordt veroorzaakt door beperkingen van de waarnemingen.

Als we nu naar de helderheidsfunctie van de sterrenhopen in M82 B kijken, zien we dat de hoeveelheid sterrenhopen per gegeven helderheid alsmaar toeneemt naarmate ze lichtzwakker worden, in zowel M82 B1 als B2. Dit is een aanwijzing dat de sterrenhopen in M82 B vergelijkbaar zijn met de jonge sterenhopen in andere nabije stelsels.

We kunnen ons nu afvragen of een dergelijke helderheidsfunctie met toenemende leeftijd kan vernaderen in een helderheidsfunctie zoals die van de bolvormige sterrenhopen in de Melkweg, en welke processen daarbij een rol zouden moeten spelen. Simplistisch gesproken moeten we op de één of andere manier zien te zorgen dat het merendeel van de lichtzwakkere sterrenhopen niet meer als zodanig herkend kan worden of niet meer bestaat tegen de tijd dat ze een vergelijkbare leeftijd hebben als de oude bolvormige sterrenhopen in de Melkweg. Vanuit de theoretische invalshoek is het heel goed mogelijk dat deze lichtzwakke (en vaak ook niet al te zware) sterrenhopen binnen korte tijd uit elkaar vallen door, bijvoorbeeld, wederzijdse aantrekkingskrachten tussen sterrenhopen en de sterren in deze sterrenhopen. Dit soort processen zullen zeker van belang zijn in gebieden waar veel materie aanwezig is, precies zoals in M82 B! Het is daarom inderdaad niet ondenkbaar dat de jonge sterrenhopen die we op dit moment in M82 B zien uiteindelijk zullen eindigen als oude bolvormige sterrenhopen.

We hebben nu dan wel aan de hand van de helderheidsfunctie beweerd dat de sterrenhopen in onze waarnemingen aanmerkelijk jonger zijn dan de oudere bolvormige sterrenhopen in de Melkweg, maar eigenlijk willen we de preciese leeftijden kunnen bepalen. We kunnen dit gelukkig redelijk eenvoudig doen door de "kleuren" van de individuele sterrenhopen met theoretische modellen voor stelselevolutie te vergelijken. Een kleur in de sterrenkundige zin van het woord is het verschil in helderheid tussen de straling in twee golflengtes.

Het eerste wat ons opvalt als we de gemiddelde kleuren en het totale bereik van de kleuren in B1 en B2 met elkaar vergelijken, is dat de kleuren in B2 gemiddeld roder zijn (d.w.z., voor de sterrenhopen in B2 heeft de straling die we waarnemen gemiddeld langere golflengtes, vergeleken met de sterrenhopen in B1), en dat het totale verloop van de kleuren in B2 groter is dan dat in B1. Omdat we het aannemelijk vinden dat de sterrenhopen in zowel B1 als B2 min of meer tegelijkertijd zijn gevormd door dezelfde (bijna) botsing met een naburig stelsel, valt dit verschil in kleur alleen te verklaren door een grotere hoeveelheid stof in gebied B2. Interstellair stof zorgt ervoor dat we een object "roder" zien dan het in werkelijkheid is. Zichtbaar licht bestaat immers uit een combinatie van verschillende kleuren licht, variërend van rood tot blauw, waarbij blauw licht de kortste golflengte heeft. De golflengte van blauw licht is beter in overeenstemming met de afmetingen van de stofdeeltjes, waardoor blauw licht relatief meer zal worden tegengehouden door het stof dan rood licht. Het resultaat is een "verroding" van de kleur. In dit geval is deze verroding gemiddeld een belangrijker effect in M82 B2 dan in B1. Dit betekent niet dat er in M82 B1 geen stof is, maar geeft alleen aan dat er gemiddeld méér stof in B2 aanwezig is dan in B1.

We moeten echter voorzichtig zijn met het trekken van zulke conclusies, omdat een verloop van de leeftijden van de sterrenhopen roet in het eten kan gooien: een oudere populatie sterren zal een vergelijkbaar effect hebben als een stoflaag, nl. een verroding van de kleuren. Dit is een natuurlijk gevolg van het ouderwordingsproces van sterren. Als we naar figuur 3 kijken, zien we echter duidelijk rodere gebieden, verspreid over het gehele beeldveld. Daarom houden we vast aan onze veronderstelling dat de verschillen tussen B1 en B2 met name door interstellair stof worden veroorzaakt. Omdat de stofinvloed verschilt voor verschillende golflengtes, spreekt het voor zich dat naarmate we kunnen beschikken over waarnemingen in meer golflengtes, we de leeftijdsbepaling nauwkeuriger kunnen verrichten.

We kunnen nu de waargenomen kleuren en helderheden in verschillende golflengtes vergelijken met theoretische modellen voor de ontwikkeling van populaties sterren in een sterrenstelsel. Dit leidt tot leeftijdsbepalingen van de jonge sterrenhopen in M82 B variërend van ca. 200 miljoen tot 1 miljard jaar, waarbij het merendeel van de sterrenhopen rond 1 miljard jaar oud blijkt te zijn (zie figuur 4). We spreken hier dus met recht van "fossiele stervormingsactiviteit"!

4 Zware jongens of ranke meisjes?

Voor een goede analyse van onze waarnemingen willen we natuurlijk niet alleen weten hoe de helderheden en leeftijden van de sterrenhopen in M82 B zich verhouden met die van de bolvormige sterrenhopen in de Melkweg, maar ook of hun uiterlijke kenmerken, zoals hun massa's en afmetingen, met elkaar overeen komen.

Om de massaverdeling van de sterrenhopen in M82 B af te leiden uit de waargenomen helderheidsfunctie moeten we een aantal aannames maken over met name de verhouding tussen massa en helderheid voor deze sterrenhopen, de zgn. "massa-lichtkracht (M/L) verhouding". De resulterende massaverdeling is afhankelijk van de leeftijdsverdeling van de sterrenhopen, omdat de M/L verhouding sterk afhangt van de ouderdom van de sterren in de sterrenhopen.

We hebben afgeleid dat de gemiddelde leeftijd van de sterrenhopen in M82 rond de 1 miljard jaar ligt; dit betekend dat M/L ongeveer 1 is voor optische straling, en dus kunnen we de waargenomen helderheidsfunctie rechtstreeks omzetten in een massaverdeling. Het blijkt nu dat de sterrenhopen in M82 B massa's hebben tussen 10- en 100-duizend zonsmassa's, waarbij het merendeel rond 10-duizend zonsmassa's weegt; door effecten die veroorzaakt worden door het interstellaire stof in het gebied (absorptie van de straling) zou deze piek in de massaverdeling nog tot 30 duizend zonsmassa's verhoogd kunnen worden.

Hoewel deze massa's vergelijkbaar of aan de lage kant zijn vergeleken met die van jonge super-sterrenhopen in

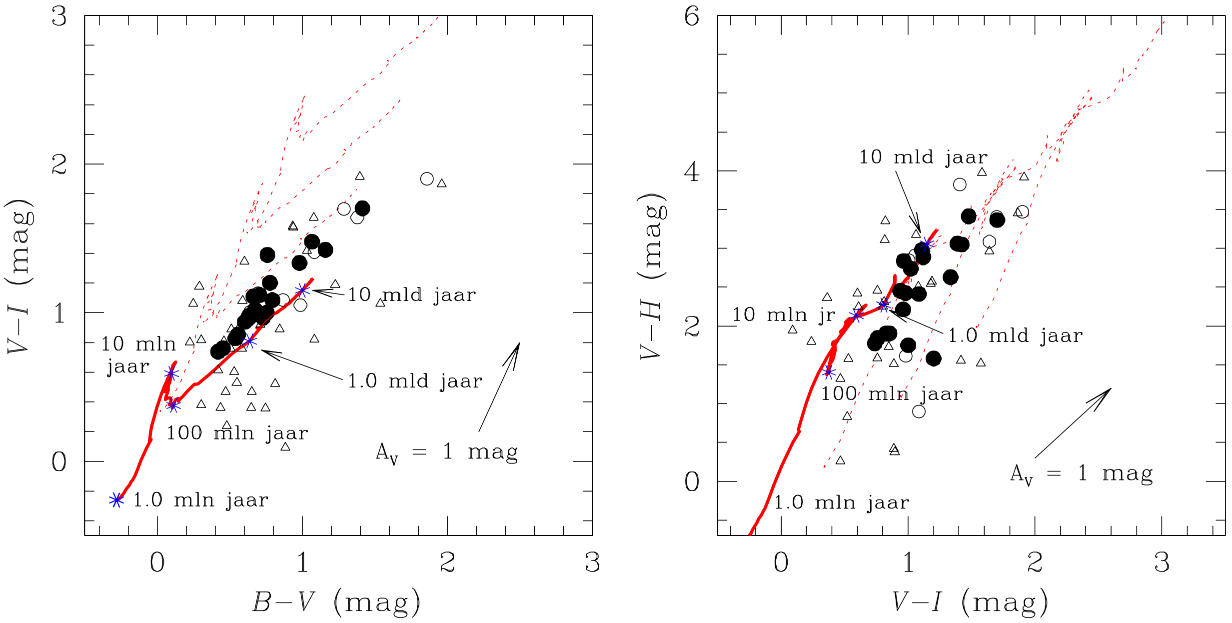

Fig. 4. Kleur-kleur diagrammen voor de sterrenhopen in M82 B1. In beide figuren is de kleur langs de horizontale as blauwer dan de kleur langs de vertikale as. De linkerfiguur is een vergelijking tussen twee optische kleuren; de rechterfiguur vergelijkt een optische kleur (horizontaal) met een nabij-infrarode kleur (vertikaal). De getrokken lijnen stellen theoretische evolutiemodellen voor voor sterpopulaties; de stippellijnen zijn voorbeelden van wat er gebeurt als we stof toevoegen; de verplaatsing vindt plaats in de richting van de pijl. De kwaliteit van onze waarnemingen is aangegeven door verschillende symbolen: de gevulde cirkels zijn de meest nauwkeurige waarnemingen, gevolgd door de open cirkels en de open driehoekjes. Als we de locaties van de individuele sterrenhopen met de theoretische modellen vergelijken kunnen we zowel de leeftijdsverdeling afleiden als de invloed van het interstellaire stof afschatten.

andere sterrenstelsels, zijn hun massa's volledig vergelijkbaar met die van de oudere bolvormige sterrenhopen in de Melkweg. In de praktijk betekent dit dat, als de sterrenhopen in M82 B zijn geëvolueerd van super-sterrenhopen vlak na hun geboorte tot hun huidige (kleinere) massa, ze een belangrijk deel van hun massa verloren moeten hebben in de afgelopen paar honderd miljoen jaar, bijvoorbeeld door interacties met de omringende materie of door botsingen tussen sterren in de sterrenhopen onderling.

Ten slotte geeft een vergelijking tussen de groottes van de sterrenhopen in M82 B, en die van bolvormige en open sterrenhopen in de Melkweg ons een goed idee van de soort objecten waarnaar we kijken. Over het algemeen neemt men aan dat bolvormige sterrenhopen door de onderlinge aantrekkingskrachten van hun sterren bij elkaar worden gehouden, terwijl open sterrenhopen minder sterk aan elkaar gebonden zijn en daarom in enige miljoenen jaren uit elkaar kunnen vallen. Als deze objecten niet door de onderlinge aantrekkingskrachten van hun sterren bij elkaar worden gehouden, verwachten we dat hun groottes tot zo'n 600 tot 3.000 lichtjaar zijn uitgegroeid, terwijl we in het geval van bolvormige sterrenhopen groottes voorspellen ter grootte van ca. 25 lichtjaar. De sterrenhopen in M82 B blijken groottes te hebben die volledig vergelijkbaar zijn met die van bolvormige sterrenhopen; met andere woorden, deze jonge sterrenhopen worden zeer waarschijnlijk door hun onderlinge aantrekkingskrachten bij elkaar gehouden.

Als we alle informatie die we in de voorgaande paragrafen hebben afgeleid met elkaar combineren, is de meest voor de hand liggende conclusie dat de compacte sterrenhopen in het gebied in het centrum van M82 waar actieve stervorming 100–200 miljoen jaar geleden is opgehouden vergelijkbaar zijn met de oude bolvormige sterrenhopen in de Melkweg op jongere leeftijd. We hebben laten zien dat de super-sterrenhopen die waarschijnlijk naar aanleiding van botsingen tussen naburige sterrenstelsels zijn gevormd uiteindelijk kunnen eindigen als bolvormige sterrenhopen, afhankelijk van de omstandigheden in de hun omringende materie.

Richard de Grijs (University of Virginia, USA)

Literatuur

de Grijs, R., O'Connell, R.W., Gallagher III, J.S., Becker, G.D., 1999, "The Fossil Starburst in M82", The Astrophysical Journal, in druk