

1. De William Herschel-telescoop op La Palma. Dit instrument maakt deel uit van de Isaac Newton Group of Telescopes, een samenwerking tussen Nederland, Spanje en Groot-Brittannië. (Foto: ING)



SAURON – het oog dat alles ziet

Anne-Marie Weijmans en Davor Krajnović*

* Anne-Marie Weijmans werkt aan haar proefschrift aan de universiteit Leiden, Davor Krajnović is werkzaam als postdoc aan de universiteit van Oxford.

Het aantal sterrenstelsels in het heelal overtreft met gemak het aantal sterren in de melkweg. Sommige zijn klein en zijn alleen zichtbaar omdat ze dichtbij staan. Andere hebben grote aantallen sterren, waarvan het licht tot op grote afstanden door ons kan worden waargenomen. Sterrenstelsels verschillen ook in leeftijd van elkaar: sommige hebben oude sterren, andere jonge sterren, en natuurlijk zijn er ook stelsels met een gemengde sterpopulatie. Hoe komt het dat sterrenstelsels in zoveel variaties voorkomen? Hoe zijn ze ontstaan en hoe hebben ze zich ontwikkeld? Met SAURON hopen sterrenkundigen dit soort vragen te kunnen beantwoorden.

Sterren worden geboren uit interstellair gas. Als een sterrenstelsel veel gas bevat, is de kans groot dat het ook veel jonge en dus blauwe sterren herbergt. Zulke stervormende sterrenstelsels zijn kosmologische topattracties. Hun foto's zijn zeer indrukwekkend en leggen gebieden van uiteenlopende kleuren bloot: gebieden waar sterren gevormd worden en sterven. Vaak hebben deze sterrenstelsels complexe spiraalstructu-



ren. Soms vinden (bijna-)botsingen plaats tussen twee naburige stelsels, waarbij gas wordt uitgewisseld en nieuwe golven van stervorming optreden. Maar naast deze stervormende spiraalstelsels komen we in het heelal ook stelsels tegen die een stuk minder fotogeniek zijn. Deze elliptische stelsels lijken op het eerste gezicht 'dood': geen stervorming en geen spiralen, maar juist een uniforme lichtverdeling.

We willen graag begrijpen hoe sterrenstelsels ontstaan zijn en hoe hun evolutie verloopt. Een manier om dit te onderzoeken is door een blik te werpen op het verre heelal. Daar zien we jonge sterrenstelsels die zich zullen ontwikkelen tot het soort stelsels dat we nu in het nabije heelal waarnemen. Door de eigenschappen van deze jonge en oude stelsels met modellen te vergelijken, leren we meer over hun ontwikkeling. Helaas is dit in de praktijk erg moeilijk en soms zelfs onmogelijk. Verre sterrenstelsels zijn vaak lichtzwak en klein: het oplossend vermogen van de meeste telescopen schiet tekort om hun structuur te ontfalen.

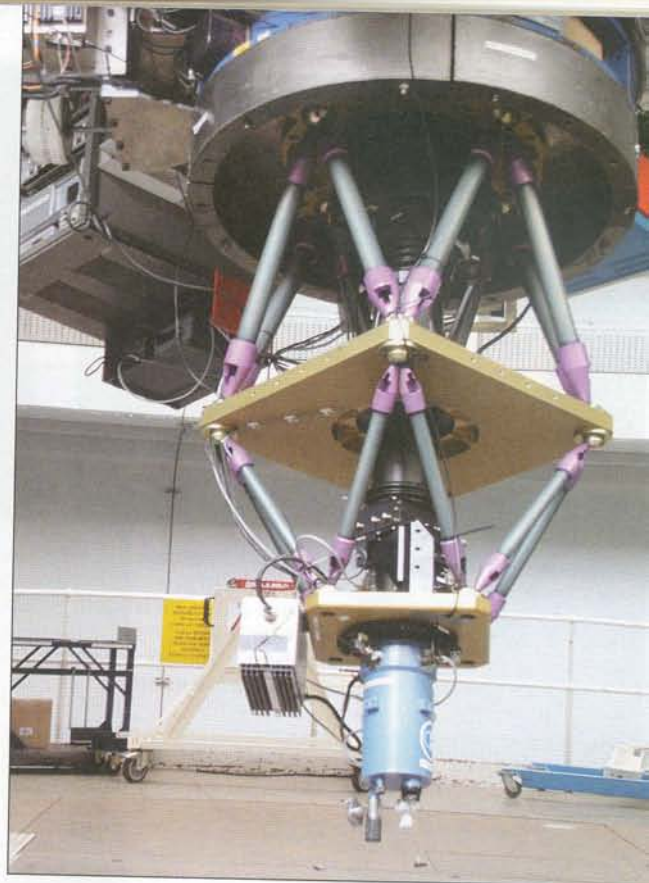
Een andere manier is om juist de nabije sterrenstelsels aan een uitgebreider onderzoek te onderwerpen. Deze stelsels zijn helderder en met de huidige technieken kunnen we hun interne structuur goed bestuderen. We gebruiken de nabije sterrenstelsels eigenlijk als een soort fossielen: aan de hand van gedetailleerde opnamen van hun structuur gaan we na welke processen een rol hebben gespeeld bij hun ontstaan en evolutie. Omdat we processen willen vinden die lange tijd geleden hebben plaatsgevonden, moeten we onze blik richten op stelsels die lange tijd geleden gestopt zijn met evolueren. Bovendien willen we, net als archeologen, dat onze fossielen niet vervuild zijn door latere ontwikkelingen, dus zoeken we stelsels waarin nauwelijks of geen nieuwe

sterren meer worden gevormd. En dan komen we toch uit bij de ogenschijnlijk weinig spectaculaire elliptische sterrenstelsels. In hun interne structuur hebben zij hun ontstaansgeschiedenis het beste bewaard.

De SAURON-spectrograaf

Met dit doel voor ogen hebben sterrenkundigen van de universiteiten van Lyon, Oxford en Leiden een aantal jaren geleden een project opgezet om met een zogeheten 'integral field'-spectrograaf de inwendige structuur van nabije sterrenstelsels te bestuderen. Met zo'n spectrograaf kan in één keer van een groot aantal posities in het sterrenstelsel een spectrum worden opgenomen. Deze spectra verschaffen niet alleen informatie over de bewegingen van sterren en gas in het stelsel (de kinematica), maar ook over hun chemische samenstelling (zie kaderstukje). SAURON, zoals het project en de spectrograaf gedoopt werden, zal zijn licht werpen op kwesties als: Hoe en wanneer zijn sterrenstelsels ontstaan? Wat is de interne structuur van elliptische sterrenstelsels? Hoe en wanneer zijn de verschillende componenten binnen sterrenstelsels gevormd? En wat zijn de leeftijden en samenstellingen van de sterpopulaties van deze sterrenstelsels? Dit zijn geen eenvoudige vragen. Om ons begrip van sterrenstelsels te vergroten, zullen we op een systematische manier te werk moeten gaan, zowel door middel van waarnemingen als door theoretische modellen.

SAURON (*Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae*) wordt gebruikt in combinatie met de 4,2-m William



3. De Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae, kortweg SAURON (een verwijzing naar Tolkien), gemonteerd onder het focus van de William Herschel-telescoop. De ccd bevindt zich aan de onderkant van het instrument en wordt gekoeld met vloeibare stikstof (blauwe fles). SAURON is een betrekkelijk licht instrument: het weegt minder dan 300 kg, terwijl sommige andere instrumenten voor de WHT wel vijf keer zo zwaar zijn. Om te voorkomen dat het systeem door het (te) lichte gewicht uit balans raakt, is de brede zwarte ring als tegenwicht boven de spectrograaf gemonteerd. Een groot voordeel van een 'integral field'-spectrograaf als deze t.o.v. de traditionele 'spleetspectrograaf', is dat elke positie binnen het gezichtsveld van de spectrograaf een eigen spectrum oplevert. Hierdoor kunnen structuren blootgelegd worden, die anders onopgemerkt zouden blijven; zie fig. 7. (Foto: R. McDermid)

Herschel-telescoop op het Canarische eiland La Palma. Met een gezichtsveld van 33 bij 41 boogseconden richt hij zich op de

Spectroscopie

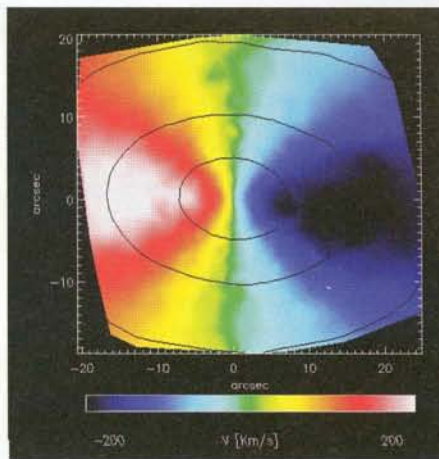
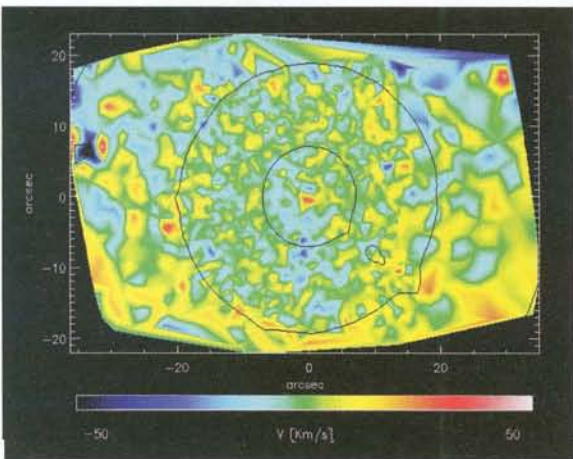
Afbeeldingen van sterrenstelsels geven sterrenkundigen waardevolle informatie over de vorm, helderheidsverdeling en componenten als spiraalarmen en schijven. Maar als we meer willen weten over de samenstelling van sterrenstelsels en de bewegingen van sterren en gas zijn we aangewezen op spectra. Het licht van het sterrenstelsel wordt in een spectrograaf uiteengetrokken in verschillende golflengten (ofwel kleuren) en in een spectrum vastgelegd. Hetzelfde verschijnsel treedt op als bijvoorbeeld een cd licht opvangt en vervolgens alle kleuren van de regenboog laat verschijnen.

Omdat elke atoomsoort (zoals bijvoor-

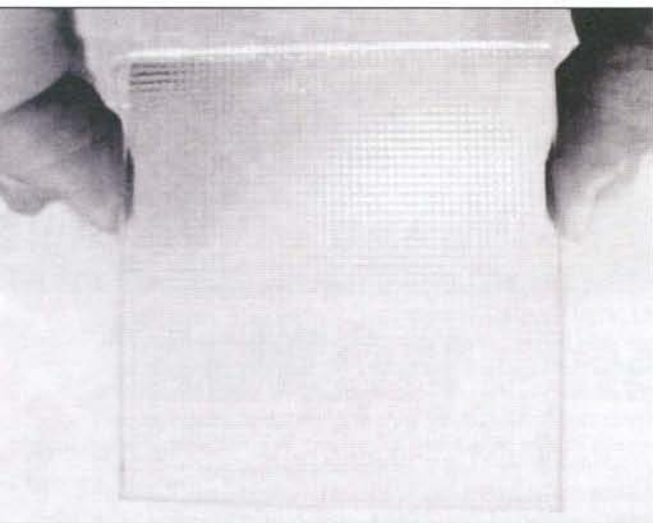
beeld waterstof, zuurstof en stikstof) op specifieke golflengten licht uitzendt, kan aan de hand van een spectrum van emissie- en absorptielijnen bepaald worden welke elementen in een sterrenstelsel aanwezig zijn. Dit zijn belangrijke aanwijzingen voor de leeftijd en ontstaansgeschiedenis van het stelsel. Bovendien kan met behulp van het dopplereffect de beweging binnen het stelsel worden gemeten. Als de sterren op een bepaalde plek in het stelsel gemiddeld van ons af bewegen, zal het spectrum daar naar het rood verschoven zijn; als ze gemiddeld naar ons toe bewegen, juist naar het blauw. Door dit effect te meten kunnen de bewegingen, ofwel de kinematica binnen het sterrenstelsel worden weergegeven. Deze bevat informatie over de massaverdeling binnen het stelsel.

2. **Links:** de indrukwekkende spiraalarmen van M51 (NGC 5194), oftewel de Draaikolknevel. Dit stelsel staat op een afstand van 23 miljoen lichtjaar en kan met een goede verrekijker bekeken worden in het sterrenbeeld Jachthonden. Het kleinere stelsel, NGC 5195, is in interactie met M51. (Foto: NOAO/AURA/NSF)

Rechts: het elliptische sterrenstelsel M87 (NGC 4486), gelegen in de Virgo-cluster op 60 miljoen lichtjaar afstand. Het zijn deze op het eerste gezicht 'saai' elliptische stelsels die voor ons 'archeologische' onderzoek het interessantst zijn. (Foto: CFHT)



4. Twee voorbeelden van snelheidskaarten van elliptische sterrenstelsels, gemaakt met SAURON. Een rode kleur geeft aan dat de sterren op die plek in het stelsel gemiddeld van ons af bewegen, blauw dat ze naar ons toe bewegen en groen dat ze 'stilstaan'. De zwarte contouren volgen de helderheidsverdeling van het sterrenstelsel zelf. **Links:** het niet-roterende sterrenstelsel MS7 (NGC 4486); de sterren bewegen onafhankelijk van elkaar en het netto-effect is dat er geen rotatie zichtbaar is. **Rechts:** het roterende sterrenstelsel NGC 2974; hier is de rotatie rond de groen gekleurde rotatie-as duidelijk te herkennen.



5. Plaatje van gesmolten silicium, waarin de SAURON-lensjes zijn aangebracht. De lensjes, 1577 in totaal, zijn vierkantjes van 1,31 bij 1,31 mm en produceren elk afzonderlijk een spectrum. (Foto: SAURON-team)

centrale regionen van nabije sterrenstelsels. Het sterlicht wordt eerst door een filter geleid, om het goede golflengtegebied te selecteren, en vervolgens naar een raster van 1577 lensjes gestuurd, die elk een apart spectrum opleveren. Met behulp van optische middelen worden deze spectra afgebeeld op een ccd. De spectra worden verwerkt met speciale software en leveren uiteindelijk de gewenste informatie over kinematica en chemische samenstelling van de sterrenstelsels op. De eerste stap van het SAURON-onderzoek was echter het selecteren van sterrenstelsels. Gestreefd werd naar een representatieve verzameling, zodat de conclusies uit het onderzoek algemeen toepasbaar zouden zijn. Daarnaast zocht men naar nabije sterrenstelsels, op

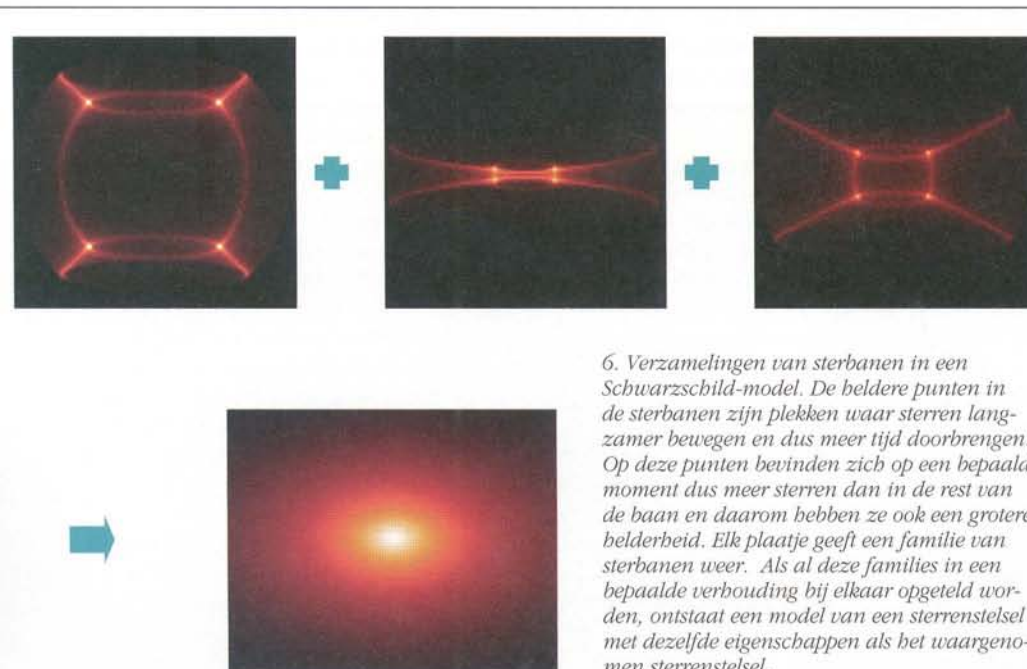
minder dan 120 miljoen lichtjaar afstand, om de interne structuren nog met voldoende resolutie te kunnen waarnemen. Ten slotte moesten de sterrenstelsels op het noordelijk halfrond zichtbaar zijn, zodat ze met SAURON op La Palma waargenomen konden worden. In zeven waarnemingsessies, verspreid over 3,5 jaar, werden de spectra van deze stelsels opgenomen, daarna kon de volgende stap worden gezet: de wetenschappelijke analyse van de gegevens.

Snelheidsverdelingen

De spectra van SAURON werden met speciale software omgezet in kaarten waarop de kinematica en chemische samenstelling van de sterrenstelsels zichtbaar werden gemaakt. Deze kaarten kunnen vervolgens worden vergeleken met theoretische modellen van de sterrenstelsels. Maar ook door de kaarten zelf nauwkeurig te bestuderen, kan al veel opgestoken worden over de ontwikkeling van de stelsels. Zo lieten sommige kaarten verrassende structuren zien in de kinematica.

Als voorbeeld kijken we in figuur 7b in wat meer detail naar het elliptische sterrenstelsel NGC 4365. De linker kaart laat een gewone afbeelding van het stelsel zien: een gelijkmatige, elliptische helderheidsverdeling, precies zoals we van een elliptisch stelsel mogen verwachten. Hier is een schematische afbeelding van de lensjes van SAURON overheen gelegd. De rechter kaart toont de snelheden van de sterren: rood geeft aan dat de sterren gemiddeld van ons af bewegen, blauw dat ze juist naar ons toe bewegen. De kern van NGC 4365 roteert dus onafhankelijk van de rest van het stelsel! Meer stelsels bleken zulke ontkoppelde kernen te bezitten. Ook andere substructuren als kronkels in het snelheidsveld, kleine sterschipjes en zelfs dubbele sterschipjes die tegengesteld roteren, duiken in de kaarten op. Sommige van deze substructuren waren al bekend, maar nog nooit eerder in zoveel detail vastgelegd. Andere kwamen nu pas aan het licht.

Wat ook opvalt bij een eerste bestudering van de snelheidsverdelingen is dat de sterrenstelsels in twee categorieën onderverdeeld kunnen worden: met rotatie en zonder rotatie. In de roterende sterrenstelsels bewegen de sterren gemiddeld allemaal in hetzelfde rotatievlak. In de



6. Verzamelingen van sterbanen in een Schwarzschild-model. De heldere punten in de sterbanen zijn plekken waar sterren langzamer bewegen en dus meer tijd doorbrengen. Op deze punten bevinden zich op een bepaald moment dus meer sterren dan in de rest van de baan en daarom hebben ze ook een grotere helderheid. Elk plaatje geeft een familie van sterbanen weer. Als al deze families in een bepaalde verbinding bij elkaar opgeteld worden, ontstaat een model van een sterrenstelsel met dezelfde eigenschappen als het waargenomen sterrenstelsel.

stelsels zonder rotatie bewegen de sterren ook, maar dan elk op eigen manier. Er is geen algemeen rotatievlak, waardoor er netto geen rotatie waarneembaar is. Het is duidelijk dat deze roterende en niet-roterende sterrenstelsels sterk van elkaar verschillen; dit duidt erop dat de stelsels een andere evolutie hebben doorlopen.

Schwarzschild-modellen

Zoals eerder opgemerkt, willen we de kaarten van SAURON vergelijken met theoretische modellen. Zo kunnen we controleren in hoeverre onze modellen in staat zijn de werkelijkheid te reconstrueren. We willen de interne structuur van de stelsels bestuderen en onderzoeken wat hun massa is: hoeveel sterren draaien mee in de tegen-roterende kernen of schijven, hoe zwaar zijn de centrale zwarte gaten, hoeveel donkere materie¹ bevindt zich in de binnenste gedeelten van de stelsels? Het maken van een theoretisch model van een sterrenstelsel kan op verschillende manieren gebeuren. Een veel gebruikte methode is de 'N-deeltjes simulatie'. Hierbij wordt een groot aantal (meestal een miljard) deeltjes aangemaakt die de bewegingen van de sterren binnen een sterrenstelsel nabootsen. Sterrenstelsels bestaan echter uit honderden miljarden sterren, zodat een model van 'slechts' een miljard deeltjes geen volledige beschrijving van het stelsel kan geven. Meer deeltjes aan het model toevoegen vergt meer rekenkracht van de computer, waardoor het doorrekenen van het model (te) veel tijd in beslag neemt.

Daarom hebben we bij ons onderzoek gebruik gemaakt van *Schwarzschild-modellen*² (zie fig.6). In plaats van sterren modelleren we sterbanen. Aan elke baan wordt vervolgens een aantal sterren toegekend. Door het samenvoegen van deze banen wordt het sterrenstelsel opgebouwd. Omdat een sterrenstelsel veel meer sterren heeft dan sterbanen (meerdere sterren delen de

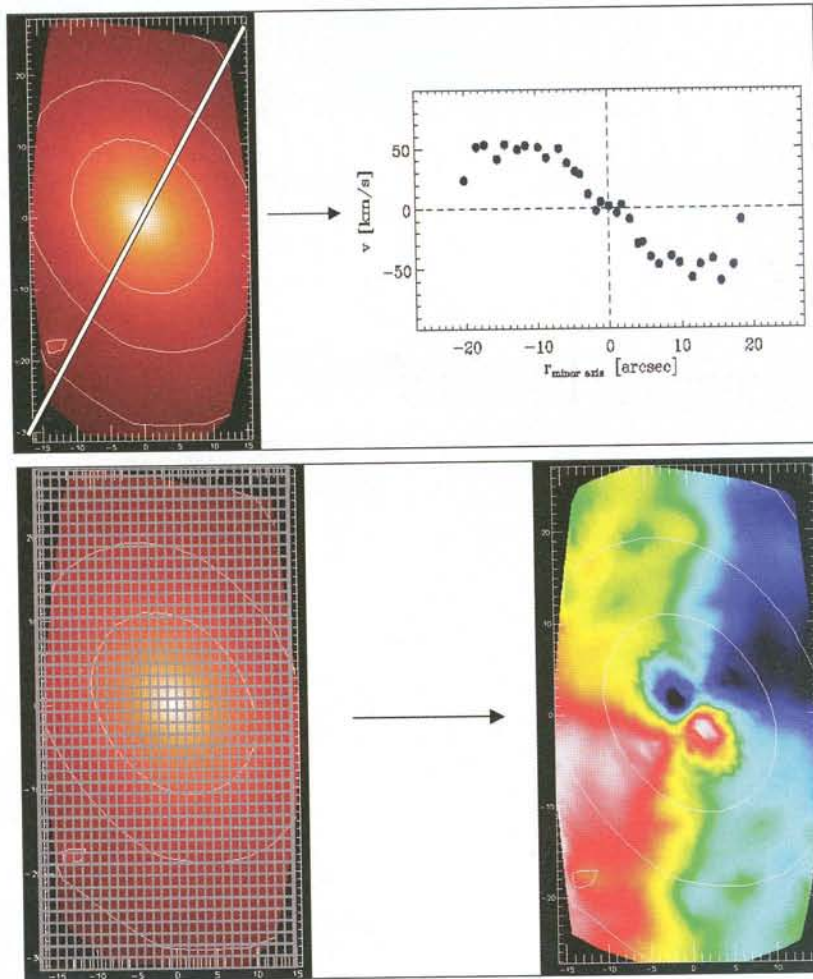
zelfde baan), heeft het model 'slechts' 10.000 sterbanen nodig. Dat levert een aanzienlijke besparing in rekenkracht op.

Steeds wordt gezocht naar een combinatie van sterbanen, die opgeteld een sterrenstelsel vormen dat qua helderheidsverdeling en kinematica het beste overeenkomt met het waargenomen stelsel. De banen in dit best passende model verschaffen ons een dieper inzicht in de interne structuur en massaverdeling van het sterrenstelsel.

De Schwarzschild-modellen laten zien dat er inderdaad grote verschillen zijn tussen de roterende en niet-roterende sterrenstelsels. Dit is een aanwijzing dat deze onderverdeling een stap in de goede richting is. Ook duiden de eerste resultaten erop dat een aanzienlijk deel van de materie in de binnenste regionen van sterrenstelsels donkere materie is: tot 30% in de grootste stelsels, maar minder in de kleinere stelsels. De voor de hand liggende, maar nog onbeantwoorde vraag is dan: waarom zijn er verschillen in de hoeveelheid donkere materie in sterrenstelsels en hoe is dat zo gekomen?

Het beantwoorden van vragen levert altijd weer nieuwe vragen op. We zijn weer een stapje verder in ons begrip van de vorming en evolutie van sterrenstelsels, maar nieuwe mogelijkheden liggen alweer voor ons open. Hoewel de eerste ontdekkingen van SAURON spectaculair te noemen zijn, is er voor het

² Schwarzschild-modellen zijn in 1979 ontwikkeld door Martin Schwarzschild, die ook veel werk heeft verricht op het gebied van de sterevolutie. Zijn vader, Karl Schwarzschild, is ook een bekende naam in de sterrenkunde: naar hem is de Schwarzschild-straal van zwarte gaten vernoemd.



Boven: 7a. Een voorbeeld van traditionele 'lange-spleetspectrografie'. De spectrograaf wordt over de lange as van een sterrenstelsel, in dit geval NGC 4365, gelegd en produceert een snelheidscurve. Een voor de hand liggende conclusie hieruit is dat we te maken hebben met een roterend stelsel. **Onder: 7b.** Hetzelfde sterrenstelsel als hierboven, maar nu bekeken met een 'integral field'-spectrograaf. De vele lensjes van de spectrograaf maken het mogelijk een tweedimensionale kaart te maken van het snelheidsveld in het stelsel. Rood op deze kaart betekent dat de sterren gemiddeld van ons af bewegen, blauw dat ze naar ons toe komen. De witte contouren volgen de lichtverdeling van het stelsel. NGC 4365 is een sterrenstelsel met een ontkoppelde kern, die onafhankelijk van de rest van het stelsel lijkt te roteren.

SAURON-team nog genoeg werk te verrichten alvorens het project af te sluiten. De huidige resultaten laten zien dat SAURON het juiste instrument is om de geheimen van de sterrenstelsels te ontsluiten.

We danken het SAURON-team en de staf van de Isaac Newton Group op La Palma voor hun inzet en bijdragen aan dit project. Het SAURON-team is een internationaal team van sterrenkundigen dat met behulp van SAURON vragen over de vorming en evolutie van sterrenstelsels probeert te beantwoorden. Ook Nederlandse sterrenkundigen zijn hierbij vertegenwoordigd. In Leiden zijn dit prof. dr. P.T. de Zeeuw, drs. R. van den Bosch, C. Bovée, dr. M. Cappellari, M. Damen, dr. R. McDermid, dr. J. Falcón-Barroso, S. Toonen, drs. G. van de Ven en drs. A. Weijmans en in Groningen prof. dr. R.F. Peletier en drs. K. Ganda.

Meer informatie:
<http://www.strw.leidenuniv.nl/sauron> (over het SAURON-project)
<http://www.ing.iac.es> (over de William Herschel-telescoop op La Palma)

¹ Donkere materie is materie die geen licht uitstraalt en voor een groot deel van niet-baryonische oorsprong is. Dat wil zeggen dat de materie niet uit alledaagse protonen en elektronen bestaat, maar van een tot nu toe onbekende samenstelling is. Hoewel we de aanwezigheid van donkere materie in sterrenstelsels uit de bewegingen van sterren en gas kunnen afleiden, is haar precieze aard nog een groot raadsel. Zie voor meer informatie het artikel van John Heise in het vorige nummer van Zenit.