

Donkere en lichtende materie in clusters van sterrenstelsels

Het heelal in zichtbaar licht wordt gedomineerd door sterrenstelsels, die vaak in clusters gegroepeerd zijn. Uit de hoeveelheid zichtbaar licht die een sterrenstelsel uitzendt, kunnen we zijn massa schatten. Nauwkeurig onderzoek toont echter aan dat sterrenstelsels de zwaartekracht ondervinden van een grote hoeveelheid onzichtbare materie. Deze materie bevindt zich voornamelijk tussen de sterrenstelsels. Een deel van de onzichtbare materie bestaat uit zeer heet gas, dat röntgenstraling uitzendt. Dit gas bevat veel meer massa dan alle sterren samen. De onzichtbare materie bestaat echter voor het grootste deel uit donkere materie, die van een geheel andere aard is dan de materie waaruit het zichtbare heelal bestaat. Dit artikel beschrijft deze twee onzichtbare, maar belangrijke componenten van het heelal.

Zoek een plek uit aan de hemel waar zo weinig mogelijk sterren te zien zijn, zelfs met een middelgrote telescoop. Richt nu de Hubble-ruimtetelescoop met de nieuwe, geavanceerde camera op deze plek en belicht honderd uur. Het resultaat is te zien in figuur 1: een plaatje tjokvol sterrenstelsels. Elk vlekje op de foto is een sterrenstelsel en elk van die sterrenstelsels bevat miljarden tot honderd miljard sterren.



Frank Verbunt*

* Prof. Verbunt van het Sterrenkundig Instituut te Utrecht werkt voornamelijk aan röntgenbronnen in bolvormige sterhopen, maar in samenwerking met medewerkers van SRON Utrecht ook aan heet gas in clusters van sterrenstelsels. Onlangs verscheen bij Epsilon zijn inleiding tot de sterrenkunde: *Het leven van sterren: van stofwolk tot zwart gat*.

1. Een belichting van honderd uur met de in 2002 in de Hubble-ruimtetelescoop gemonteerde 'Geavanceerde Camera voor Surveys' laat zelfs op een schijnbaar 'lege' plek aan de hemel duizenden sterrenstelsels zien. Met uitzondering van een paar sterren uit ons eigen Melkwegstelsel, herkenbaar aan de kruisvormige uitsteeksels (een artefact van de telescoop), zijn alle objecten op deze foto sterrenstelsels, op afstanden die variëren van enkele tientallen miljoenen tot miljarden lichtjaren.



2. Het nabije sterrenstelsel NGC6946 in zichtbaar licht (links) en op een radiogolflengte van 21 cm (rechts). In het zichtbare licht zien we de sterren, op 21 cm het waterstofgas. De schaal van beide plaatjes is dezelfde en we zien dat het waterstofgas zich veel verder uitstrekt dan de sterren.

Waar we ook maar kijken in het heelal, overal zien we sterrenstelsels: de sterrenstelsels zijn de bouwstenen van het heelal. De sterrenkundige naar wie de ruimtetelescoop vernoemd is, Edwin Hubble, maakte een indeling van de sterrenstelsels in verschillende typen: spiraalstelsels en elliptische stelsels. Ons eigen Melkwegstelsel is een spiraalstelsel en zoals alle spiraalstelsels bevat het sterren van alle leeftijden, van piepjong tot twaalf miljard jaar oud – en ook gas en stof, waaruit nieuwe sterren geboren kunnen worden. Elliptische stelsels bevatten geen (althans weinig) gas en stof, er worden geen nieuwe sterren gevormd en alle sterren zijn er miljarden jaren oud. Er zijn ook nog onregelmatige stelsels, zoals de Magellaanse Wolken; die zijn doorgaans tamelijk klein.

Op een foto van een sterrenstelsel zien we het licht van de sterren. Hoe zwaar zijn die sterren? Om dat te weten te komen beginnen we met een gedachte-experiment. Stel we bestuderen een groep sterren die samen een miljoen keer zoveel zichtbaar licht uitzenden als de zon. Stel verder dat alle sterren net zulke sterren zijn als de zon: dan bestaat de groep blijkbaar uit een miljoen sterren met een totale massa van een miljoen zonsmassa's. De sterrenkundigen drukken dit uit door te zeggen dat de massa/lichtkrachtverhouding in dit geval één is. Een ster van 0,4 zonsmassa zendt duizend keer minder zichtbaar licht uit dan de zon. Stel nu dat elke ster in de groep 0,4 zonsmassa heeft: dan bevat de groep een miljard sterren, met een gezamenlijke massa van vierhonderd miljoen zonsmassa's. De massa/lichtkrachtverhouding is 400. Een ster van tien zonsmassa's zendt duizend keer meer zichtbaar licht uit

dan de zon. Stel dat elke ster in de groep tien zonsmassa's heeft: dan bevat de groep duizend sterren, met een gezamenlijke massa van tienduizend zonsmassa's. De massa/lichtkrachtverhouding is 0,01.

In werkelijkheid bestaat een groep sterren altijd uit een mengsel van sterren met verschillende massa's, en wel zo dat de lichte sterren het talrijkst zijn en de zware sterren zeldzaam. Een zeer jonge sterrenhoop, zoals η Persei, bevat zowel zware als lichte sterren en heeft een lage massa/lichtkrachtverhouding: ongeveer een tiende. Een oude sterrenhoop, zoals de bolvormige sterrenhoop 47 Tucanae, bevat alleen sterren die lichter zijn dan de zon en heeft een hogere massa/lichtkrachtverhouding (ca. 3-5). Spiraalstelsels bestaan uit een mengsel van jonge en oude sterren. Hierboven hebben we gezien dat de massa/lichtkrachtverhouding van een sterrenstelsel ergens tussen de 0,1 en 5 ligt – dichterbij de lage waarde als er veel zware, heldere sterren zijn; dichterbij de hoge waarde als dit niet het geval is.

Waar is de donkere materie?

1. Omgeving van de zon

We mogen dus concluderen dat het héél moeilijk is om aan de hoeveelheid licht af te lezen hoeveel massa er is. Alleen als we precies weten wat de relatieve aantallen lichte en zware sterren zijn, kunnen we een min of meer betrouwbare schatting maken. Precies zo'n onderzoek deed de Leidse sterrenkundige Jan Oort in 1932 voor sterren in de buurt van de zon. Hij telde, aan de hand van foto's, het aantal sterren op verschillende afstanden tot het melkwegvlak. Uit het licht van iedere ster bepaalde hij de

massa en daarmee wist hij hoeveel massa alle sterren samen hebben, op verschillende afstanden van het melkwegvlak.

Vervolgens merkte Oort op dat de sterren die ver van het melkwegvlak staan langzamer van het vlak af bewegen – of naar het vlak toe – dan sterren dichterbij het vlak. Dit is in overeenstemming met de verwachting: een ster die van het vlak wegvliegt wordt afgeremd door de zwaartekracht van alle sterren onder hem. De ster gaat steeds langzamer bewegen en valt vervolgens terug. Oort berekende hoeveel massa er moet zijn om de zwaartekracht te leveren die de waargenomen afremming van de sterren kan verklaren. En daarbij ontdekte hij dat er meer materie moest zijn dan hij als sterren zag!

In een honderd lichtjaar grote kubus om de zon zit, zo stelde Oort vast, ruim 2500 zonsmassa's, waarvan ruim duizend in sterren. In deze kubus is daarom 1500 zonsmassa's onverklaard. Oort redeneerde dat die massa wellicht in erg lichte sterren zit en in uitgebluste sterren, dat wil zeggen witte dwergen. Zulke sterren zenden zo weinig licht uit dat ze op de foto's die Oort gebruikte niet zichtbaar zijn. Oort had dan ook geen enkele reden om te concluderen dat de 'donkere materie' iets exotisch is.

Na de ontdekking van Oort werd ook elders in het heelal materie ontdekt waarvan de zwaartekracht is aangetoond, maar die niet zichtbaar is. We bekijken deze ontdekkingen in toenemend grote stukken van het heelal.

2. Sterrenstelsels

Een waterstofatoom bestaat uit een proton en een elektron. Beide heb-

ben een draaiing (Engels: *spin*) en wanneer beide in dezelfde richting draaien, is de energie iets hoger dan wanneer beide in tegengestelde richting draaien. Als de draairichting van een elektron omklapt, wordt het verschil in energie uitgezonden als radiostraling met een golflengte van 21 centimeter. De in 1970 in gebruik genomen Westerbork Synthese Radio Telescoop kan straling met deze golflengte meten en zo bepalen hoeveel waterstof er in sterrenstelsels te vinden is. De Groningse sterrenkundigen die dit deden, Tjeerd van Albada en de promovendi Kor Beegman en Albert Bosma, kwamen daarbij voor twee flinke verrassingen te staan. In de eerste plaats bleek dat het waterstofgas in een spiraalstelsel zich veel verder uitstrekt dan de sterren. Dit is mooi te zien bij stelsels die we van boven-af waarnemen (fig. 2). Sterrenstelsels roteren. Wanneer we een sterrenstelsel van bovenaf zien, is dat niet te meten, maar als we een sterrenstelsel van de zijkant bekijken, beweegt de ene zijde van ons af en de andere naar ons toe. Door het dopplereffect verschuift de golflengte van de 21-cm lijn van de ene zijde naar een wat langere golflengte en van de andere naar een kortere. Omgekeerd kunnen we door de meting van de golflengte op verschillende plaatsen in een sterrenstelsel de snelheid van de rotatie meten. Daarbij komt de tweede verrassing te voorschijn: tot op grote afstand van het centrum van een spiraalstelsel blijft de snelheid waarmee het gas om het centrum draait vrijwel constant: doorgaans zo'n honderd tot tweehonderd kilometer per seconde tot afstanden van honderdduizend lichtjaar.

Uit de zwaartekrachtswet van Newton volgt dat de snelheid op verschillende afstanden alleen dan constant kan blijven als de massa binnen die afstanden schaalt met de straal. Met andere woorden: op een twee keer grotere afstand van het centrum ondergaat een ster de zwaartekracht van een twee keer zo grote massa. Het probleem is nu dat de massa die we zien in een spiraalstelsel, in de vorm van sterren en waterstofgas, volkomen onvoldoende is om de waargenomen rotatiesnelheid van de buitengebieden te verklaren. Blijkbaar is er een grote hoeveelheid donkere materie aanwezig.

In de pogingen met modellen te berekenen hoeveel donkere materie er is, gaat men er van uit dat de sterren en het gas in een spiraalstelsel zich in een tamelijk platte schijf bevinden (dat zien we immers), maar dat de

donkere materie een meer bolvormige verdeling heeft. De reden hiervoor is dat het experiment van Oort, ook wanneer dit met moderne metingen wordt herhaald, laat zien dat de hoeveelheid donkere materie in de buurt van de zon – dus in de sterrenschijf – onvoldoende is; de meeste donkere materie moet zich buiten de platte schijf bevinden. Voor het spiraalstelsel als geheel, dat wil zeggen tot zover we het op 21 cm kunnen waarnemen, geldt dat er ongeveer vier keer zoveel donkere materie is als materie in sterren en gas.

Als voorbeeld nemen we ons eigen Melkwegstelsel. De centrale buil, de verdikking in het midden van de schijf, bevat ongeveer tien miljard zonsmassa's. De relatief platte schijf van sterren en gas bevat ongeveer zeven keer zo veel massa. De halo ten slotte bevat binnen een straal van 75.000 lichtjaar ongeveer tweehonderd miljard zonsmassa's, in de vorm van donkere materie.

3. Clusters van sterrenstelsels

De meeste sterrenstelsels zijn gegroepeerd in clusters. Wanneer sterrenstelsels zich onder invloed van elkaars zwaartekracht bewegen, kan zich een evenwicht instellen tussen de snelheden en de zwaartekracht. De onderlinge zwaartekracht probeert de sterrenstelsels bijeen te

trekken, de snelheden voeren de sterrenstelsels van elkaar af. Als de zwaartekracht wint, worden de onderlinge afstanden kleiner; als de snelheden winnen, worden de afstanden groter. In evenwicht is de gemiddelde afstand precies zo, dat zwaartekracht en snelheden elkaar compenseren: we noemen dit het *viriaaltheorema*. Uit een meting van de grootte van een cluster en de snelheden van de sterrenstelsels in de cluster kunnen we de zwaartekracht bepalen en daarmee de hoeveelheid aanwezige massa.

In 1933 paste Fritz Zwicky dit toe op de grote groep van sterrenstelsels in de Coma-cluster. De afmeting van deze cluster is zo'n vijf miljoen lichtjaar en de honderden sterrenstelsels hebben snelheden ten opzichte van elkaar van zo'n 700 km/s. Daaruit volgt een totale massa van vijftigduizend miljard zonsmassa's. Zwicky mat ook de helderheid van de sterrenstelsels en vond dat de totale massa/lichtkracht verhouding van de Coma-cluster 500 is.

We zagen hierboven dat een spiraalstelsel ongeveer vier keer zoveel donkere materie bevat als massa in de vorm van sterren en gas. Zelfs wanneer we, dit in rekening brengen, is de zwaartekracht die de sterrenstelsels op elkaar uitoefenen nog volstrekt onvoldoende om snelhe-



3. Over een optische foto van de Coma-cluster van sterrenstelsels is met rood de intensiteit van de röntgenstraling uit de cluster weergegeven, zoals gemeten met de röntgensatelliet ROSAT. De röntgenstraling is afkomstig van heet gas dat zich tussen de sterrenstelsels bevindt.



4. Opname van het centrale deel van de cluster van sterrenstelsels Abell 2218. Behalve de sterrenstelsels van de cluster zien we langgerekte blauwe en rode bogen. Dit zijn door afbuiging van het licht vervormde beelden van ver achter de cluster gelegen sterrenstelsels. De met een witte lijn omgeven rode boog is de afbeelding van het momenteel verst bekende sterrenstelsel (op $z=7$).

den van 700 km/s te verklaren. Blijkbaar bevindt zich ook tussen de sterrenstelsels een grote hoeveelheid donkere materie.

Op dit punt zal de lezer wellicht het onplezierige gevoel bekruipt dat hier wel zéér verstrekkende conclusies worden getrokken uit niet zo heel veel waarneemgegevens. Zeker is dat veel sterrenkundigen zo'n gevoel hadden, zij het dat ze moesten toegeven dat er geen speld te krijgen is tussen de redenering van Zwicky. Daarom is het mooi dat er twee nieuwe typen metingen zijn gekomen, die de conclusies van Zwicky volkomen onafhankelijk bevestigen. De eerste daarvan betreft de waarneming van röntgenstraling van clusters van sterrenstelsels. De eerste kaarten van de hemel in röntgenstraling werden rond 1970 gemaakt. Onder de heldere bronnen bleken verschillende clusters van sterrenstelsels te zijn, zoals die in Virgo, Coma Berenices en Perseus. Een tiental jaren later bleek dat de röntgenstraling niet van de sterrenstelsels in de cluster afkomstig is, maar van heet gas tussen de stelsels in (fig. 3). Om röntgenstraling te kunnen uitzenden moet gas miljoenen graden heet zijn. Zulk heet gas zou

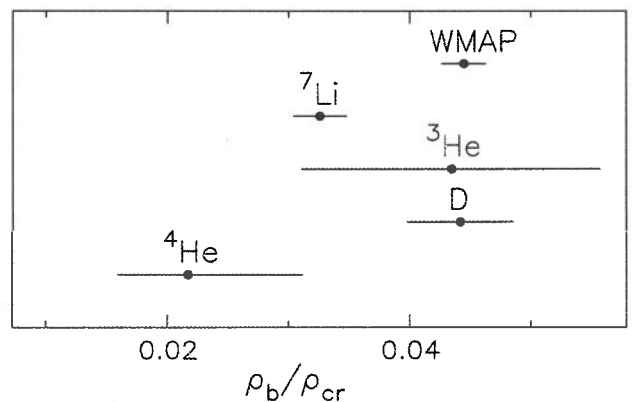
onmiddellijk uit de cluster verdwijnen, als het niet zou worden tegengehouden door de zwaartekracht. De benodigde zwaartekracht is veel groter dan wat de sterrenstelsels leveren en daarmee bevestigt de ontdekking van röntgenstraling uit de clusters de aanwezigheid van een grote hoeveelheid donkere materie. (Verderop komen we op dit hete gas terug.)

De tweede nieuwe meting is de ontdekking van afbuiging van licht door de massa in clusters van sterrenstelsels. In een knap technisch staaltje slaagden de Amerikaanse sterrenkundigen Lynds en Petrosian er in 1986 in zulke afbuiging aan te tonen. Met de Hubble-ruimtetelescoop is de afbuiging eenvoudig te meten (fig. 4). Uit de mate van afbuiging kan met gebruik van de algemene relativiteitstheorie de hoeveelheid in de cluster aanwezige materie worden geschat. (Strikt genomen bepaalt men hoeveel meer materie er per kubieke lichtjaar in de cluster is dan er buiten.) Het antwoord bevestigt zowel kwalitatief als kwantitatief de conclusie van Zwicky dat een cluster van sterrenstelsels veel meer materie bevat dan in de sterrenstelsels zelf gevonden wordt.

4. Elders in het heelal

Uit metingen aan supernovae enerzijds en aan het restlicht van de oerknal (de kosmische achtergrondstraling) anderzijds, kan worden afgeleid hoeveel materie er in het heelal op de grootste gemeten schalen aanwezig is. Daarbij duikt wederom een verrassing op. Maar liefst driekwart van de dichtheid van het heelal blijkt voor rekening te komen van de zogeheten donkere energie! Slechts een kwart bestaat uit (voornamelijk donkere) materie. En slechts een vijfde deel van de materie, ongeveer vier procent van de totale dichtheid, bestaat uit gewone materie, in de vorm van gas en sterren. (De waarnemingen die tot deze conclusies leidden en de (mogelijke) aard van de donkere energie en materie, liggen buiten het bestek van dit artikel; de geïnteresseerde lezer kan hiervoor de artikelen lezen van John Heise in *Zenit*, juli/augustus 2005 en oktober 2005.)

Voor ons verhaal is wel nog van belang dat de meeste donkere materie geen gewone materie kan zijn, en daarom bekijken we kort de redenering die dit aantoont. Deze redenering is gebaseerd op het standaardmodel voor de vorming van ons heelal, het oerknalmodel, waarin het hele heelal aanvankelijk uit energie bestaat. Pas bij afkoeling door de uitdijning kan energie samenballen tot gewone materie, d.w.z. protonen, neutronen en elektronen. Bij de enorme dichtheden en temperaturen in het vroege heelal smelten protonen samen tot zwaardere atoomkernen, met name deuterium (een kern die



5. Uit elk van de gemeten hoeveelheden deuterium, helium en lithium kan met behulp van de oerknaltheorie en de theorie voor kernfusie worden berekend welke fractie van de totale dichtheid van het heelal uit gewone materie bestaat. De meeste antwoorden liggen in de buurt van 4,4%, de waarde die volgt uit de metingen aan de kosmische achtergrondstraling (WMAP). Kleine afwijkingen komen vermoedelijk voort uit onnauwkeurige metingen van de huidige hoeveelheden helium en lithium of uit onnauwkeurig berekende veranderingen na het einde van de kernfusie tijdens de oerknal.

6. De drie sterrenkundigen (v.l.n.r.) Rolf Mewe, Jelle Kaastra en Duane Liedahl die de meest gebruikte computercode schreven voor de berekening van het spectrum van een ijl heet gas.



bestaat uit een proton en een neutron), helium (twee protonen, twee neutronen) en lithium (drie protonen, vier neutronen). Deze fusie is slechts gedurende korte tijd effectief: bij te hoge temperaturen worden de fusieproducten weer onmiddellijk opgebroken, bij te lage temperaturen en dichtheden treedt fusie niet meer op. Uit de evolutie van het vroege heelal kan worden berekend hoeveel fusieproducten er na afloop van de kernfusie zijn. Wanneer we nu aannemen dat alle materie in het begin in de vorm van protonen, neutronen en elektronen was, berekenen we veel grotere hoeveelheden deuterium, helium en lithium dan we in het heelal vinden. Alleen als we aannemen dat de aanvankelijk gevormde protonen, neutronen en elektronen slechts ongeveer vier procent van de totale dichtheid (materie plus energie) uitmaakten, kunnen we de huidige hoeveelheden fusieproducten verklaren (fig. 5).

We moeten concluderen dat slechts vier procent van de totale dichtheid (materie plus energie) in het heelal

uit sterren en/of gas bestaat. De grote massa/lichtkrachtverhouding van clusters van sterrenstelsels en van het heelal als geheel, kan niet verklaard worden door te onderstellen dat er zeer veel lage-massa sterren tussen de sterrenstelsels in bewegen. Het overgrote deel van de massa in het heelal is exotisch.

SRON Utrecht: expertisecentrum van röntgenspectroscopie

De röntgenstraling van clusters van sterrenstelsels laat een grote hoeveelheid heet gas zien. Om te kunnen bestuderen hoeveel gas er precies is en wat de samenstelling ervan is, moeten we eerst iets meer van de theorie en experimenten in de röntgensterrenkunde weten. Bij beide speelt het SRON te Utrecht een leidinggevende rol.

Röntgenstraling van heet gas: de MeKaL-code

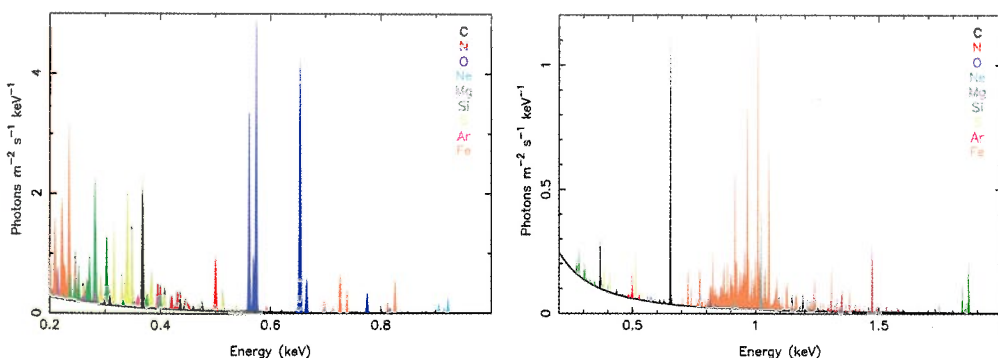
In een gas kunnen bij botsingen tussen de atomen elektronen in een wijdere baan om de atoomkern worden getild (excitatie) of zelfs geheel van

het atoom losgeslagen (ionisatie). Na enige tijd vallen de elektronen weer naar de nauwere baan terug of worden ze opnieuw ingevangen en daarbij zenden ze fotonen uit. De energie van het foton hangt af van de energie die tijdens de botsing aan het elektron wordt gegeven en die hangt weer af van de snelheden waarmee de atomen bewegen, d.w.z. van de temperatuur van het gas. In een voldoende heet gas kan de bewegingsenergie van de atomen via botsingen worden uitgestraald in de vorm van röntgenfotonen. Daarbij koelt het gas af.

Om uit te rekenen welke fotonen worden uitgezonden, moeten we de waarschijnlijkheden uitrekenen dat de atomen botsen en de tijd die het duurt voor een geëxciteerd of geïoniseerd elektron terugvalt of wordt ingevangen. Deze berekening moet voor alle typen atomen gemaakt worden, zowel voor de atomen die alle elektronen nog hebben, als voor de atomen die al enkele elektronen door ionisatie kwijt zijn. Zulke berekeningen maken gebruik van de quantummechanica en zijn buitengewoon ingewikkeld voor atomen met meerdere elektronen. De berekening van de röntgenstraling van een heet gas kan daarom alleen in benadering worden gedaan en is ook dan zeer moeilijk.

De benodigde kennis werd in SRON vanaf 1970 voornamelijk opgebouwd door één man: Rolf Mewe. Naast het uitvoeren van de berekeningen verzamelde hij ook waarnemingen waaraan de berekeningen getoetst kunnen worden. Dit werk resulteerde vervolgens in een gebruikersvriendelijke computercode die het röntgenspectrum voorspelt voor een gas met opgegeven chemische samenstelling, dichtheid en temperatuur.

Bij het schrijven van die code kreeg Mewe later hulp van Jelle Kaastra (SRON) en van Duane Liedahl (Berkeley, Californië), zodat de uiteindelijke versie internationaal bekendstaat als de *MeKaL-code*. Bijna alle sterrenkundigen die een röntgenspectrum van een ijl gas willen berekenen gebruiken tegenwoordig deze code. Als voorbeeld laat figuur 7 de spectra zien van een gas met dezelfde samenstelling als de zon, bij temperaturen van twee en tien miljoen kelvin, zoals berekend met de *MeKaL-code*. Bij de lage temperatuur zien we lijnen van verschillende elementen, bij de hoge temperatuur zijn deze elementen vrijwel volledig geïoniseerd en zien we voornamelijk ijzerlijnen.



7. Aantallen fotonen als functie van de energie (uitgedrukt in kilo-elektronvolt) uitgezonden door een ijl heet gas met dezelfde samenstelling als de zon, links bij een temperatuur van twee miljoen en rechts voor tien miljoen kelvin. De lijnen van verschillende elementen zijn met aparte kleuren weergegeven. Bij de lage temperatuur zien we lijnen van vele elementen, bij de hoge temperatuur voornamelijk ijzerlijnen.



8. Impressie van XMM-Newton in zijn baan om de aarde; de lengte van de satelliet bedraagt ruim tien meter. Röntgenstraling valt langs drie openingen binnen; achter twee hiervan bevindt zich een telescoop met tralie, zoals getoond in de opengewerkte tekening (inzet). Het licht valt van links op twee sets van in elkaar gemonteerde spiegels, die het licht focuseren. De helft van de fotonen vormt een afbeelding van de bron op de detector rechts. De andere helft wordt door tralies weerkaatst naar een andere detector. Omdat de hoek van weerkaatsing afhankelijk is van de golflengte van het foton, vormen deze fotonen een spectrum van de bron.

Als we nu een ander gas op twee miljoen graden zouden waarnemen, waarin bijvoorbeeld twee keer zoveel zuurstof zou zitten, zouden de zuurstoflijnen (ongeveer) dubbel zo sterk zijn terwijl de overige lijnen hetzelfde bleven. Omgekeerd kunnen we uit de waargenomen sterkten van de lijnen de verhoudingen van de aantallen atomen van verschillende elementen bepalen.

Röntgenspectrografen op XMM-Newton

Om de lijnen in de röntgenstraling afzonderlijk te kunnen meten, moeten we de energieën van de röntgenfotonen zeer nauwkeurig bepalen. Er zijn verschillende technieken om dit te doen. Een ervan is het gebruik van tralies. Men kan de straling door een tralie leiden of aan een tralie laten reflecteren. Alle ooit in een satelliet gebruikte röntgenspectrografen met een tralie zijn onder leiding van Bert Brinkman van SRON Utrecht ontworpen en gebouwd: in de Einstein-satelliet uit 1978, in EXOSAT uit 1983 en in Chandra (een transmissietralie) en XMM-Newton (een reflectietralie), beide in 1999 gelanceerd. Behalve bij de bouw speelt SRON Utrecht ook een dominante rol bij het ijken van deze meetinstrumenten. Voor ons verhaal zijn de instrumenten van XMM-Newton het belangrijkste (zie fig. 8).

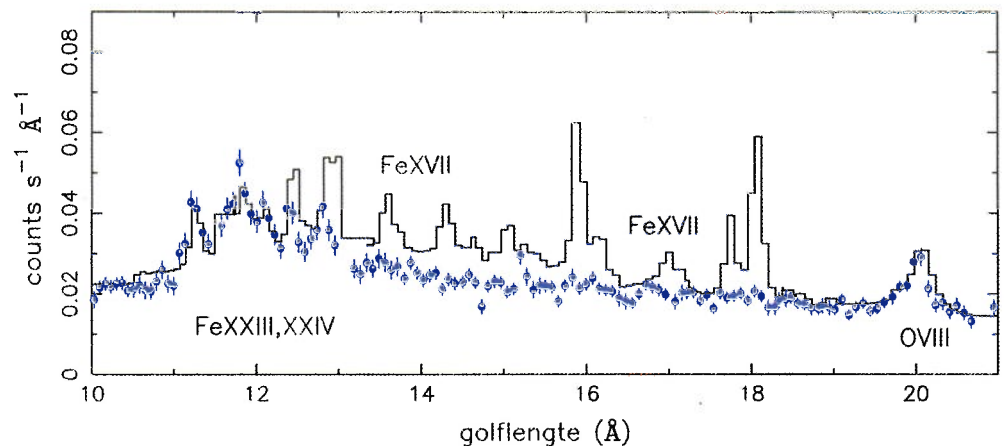
Clusters van sterrenstelsels

De voornaamste eigenschap van XMM-Newton is dat het een groot instrument is: er zijn maar liefst drie camera's en elk van die drie heeft al een grote gevoeligheid vergeleken met eerdere satellieten. Hiervan maakten Jelle Kaastra en medewerkers gebruik door een nieuw onderzoek te doen van het hete gas in clusters van sterrenstelsels. Drie belangrijke resultaten van dit onderzoek zijn: 1. het gas koelt maar er

wordt minder koud gas waargenomen dan voorspeld; 2. de totale massa heet gas schaalte met de totale massa van de donkere materie en 3. de hoeveelheid ijzer is in het centrum van de cluster groter dan aan de rand.

Het gas koelt en stroomt naar het centrum toe

Uit de metingen met satellieten als Einstein en ROSAT was een voorlopig model afgeleid voor het gas in de



9. Het voorspelde spectrum van de koelende gasstroom in de cluster van sterrenstelsels Sérsic 159-03 (zwart) bevat lijnen van ijzer bij zeer verschillende temperaturen. Het met het reflectietralie van XMM-Newton waargenomen spectrum is met blauw weergegeven. De lijnen van het hete gas rond 12 Å (van ijzer dat 22 of 23 elektronen kwijt is) en bij 20 Å (van zuurstof dat zeven elektronen kwijt is) worden inderdaad waargenomen, maar de lijnen van het koelere gas tussen 13 en 18 Å (van ijzer dat zestien elektronen kwijt is) zijn afwezig. (De sterrenkundige noteert een lijn met een Romeins cijfer dat één hoger is dan het aantal geïoniseerde elektronen.) Dit betekent dat er veel minder koel gas is dan verwacht.

clusters. Zoals in het zwaartekrachtsveld van de aarde de atmosfeer naar buiten toe steeds ijeler wordt, zo heeft het gas in de clusters nabij het centrum een grotere dichtheid dan verder naar buiten. In een dicht gas zijn botsingen frequenter, worden elektronen vaker geëxciteerd of geïoniseerd en wordt meer straling uitgezonden: een dicht gas koelt sneller. In het centrum van de cluster zal het gas dus sneller koelen en daardoor wordt de gasdruk in het centrum lager. Het gevolg is dat gas van buiten naar het centrum gaat stromen. Met dit model van de koelende gasstroom (Engels: *cooling flow*) kan men berekenen hoeveel gas er bij verschillende temperaturen in de cluster is. Men moet zich de stroom overigens niet al te heftig voorstellen: de tijd die het gas nodig heeft om vanaf de rand van een cluster het centrum te bereiken is vergelijkbaar met de leeftijd van het heelal!

Met de MeKaL-code kan voor elke temperatuur en dichtheid van het gas worden berekend hoe snel het gas koelt. Daarbij blijkt dat heet gas bij sommige temperaturen sneller koelt dan bij andere, omdat het aantal elektronen dat geëxciteerd of geïoniseerd wordt, afhangt van de temperatuur. Wanneer we naar gas in een cluster kijken, verwachten we relatief veel gas te zien bij temperaturen waar koeling inefficiënt is en relatief weinig bij temperaturen waar het gas snel koelt. Uit het model voor de koelende gasstroom kan het röntgenspectrum van al het gas samen wor-

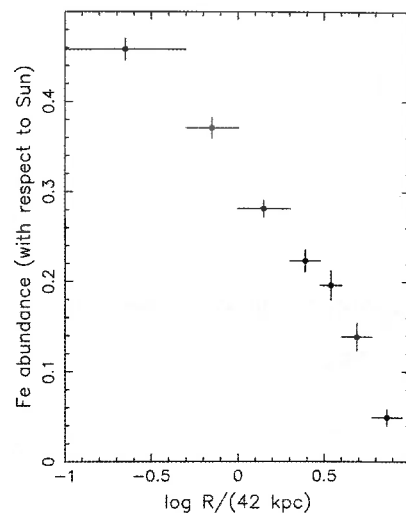
den berekend – wederom met de MeKaL-code.

Een voorbeeld is getoond in figuur 9: in het getoonde stukje van het spectrum verwachten we lijnen van het hete gas (van dertig miljoen graden) rond 12 en 20 Å, en van het koelere gas (nog altijd 5 miljoen graden!) tussen 13 en 18 Å. De waarneming met de röntgenspectrograaf van XMM-Newton liet als verwacht de lijnen van het hete gas zien, maar de lijnen van het koelere gas zijn afwezig. Hieruit kan berekend worden dat de hoeveelheid koel gas minder dan twee procent bedraagt van wat het model van de koelende gasstroom voorspelt. Blijkbaar wordt het koelende gas bij de lagere temperaturen opnieuw verhit, maar het is momenteel niet duidelijk hoe. De lijn bij 20 Å van zuurstof is zwak ten opzichte van de ijzerlijnen bij 12 Å: daaruit concluderen we dat er in het hete gas van Sérsic 159-03 minder zuurstof is ten opzichte van ijzer dan in de zon.

De hoeveelheid en samenstelling van het hete gas

Met behulp van de MeKaL-code kunnen we niet alleen de temperatuur van het gas bepalen aan de hand van de waargenomen spectraallijnen, maar ook de hoeveelheid gas: voor een voldoende ijel gas geldt dat twee keer zo veel gas ook twee keer zo veel straling uitzendt. Uit waarnemingen met XMM-Newton is zo voor dertien clusters van sterrenstelsels de totale massa van het hete gas bepaald, binnen de straal tot waar het wordt gedetecteerd.

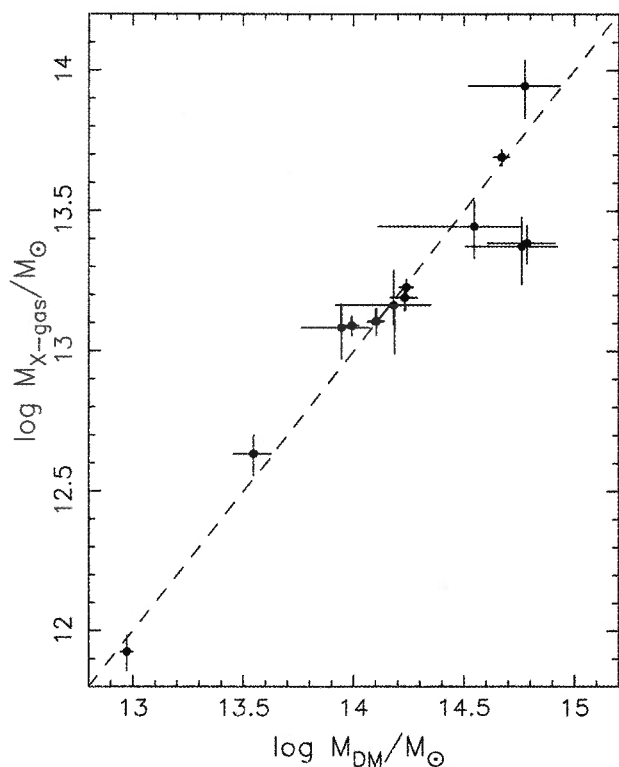
De met XMM-Newton gemaakte afbeelding van een cluster van sterrenstelsels kan worden gebruikt om te zien hoe het spectrum van het gas varieert over de cluster. In het centrum van de cluster zijn dichtheid en temperatuur van het gas het hoogst en naar buiten toe nemen beide af. Dat betekent dat de druk naar buiten toe afneemt. Als de zwaartekracht niet groot genoeg is, zou dit tot uitstroming van het gas leiden. Wanneer we aannemen dat het gas (vrijwel) in rust is, kunnen we de benodigde zwaartekracht bepalen en daarmee de totale hoeveelheid massa in de cluster. Deze massa blijkt veel groter dan de massa van het hete gas en de massa van het hete gas is weer veel groter dan de massa van alle sterrenstelsels samen (inclusief de donkere materie in die stelsels). Het hete gas kan worden gedetecteerd ruwweg tot een afstand waar de dichtheid van de totale massa vijfhonderd keer groter is dan



11. De verhouding van de aantallen ijzer- en waterstofatomen, vergeleken met de verhouding in de zon, op verschillende afstanden van het centrum van de cluster Sérsic 159-03.

de gemiddelde dichtheid in het heelal. Binnen dit gebied geldt dat ongeveer negentig procent van de totale massa uit donkere materie bestaat en tien procent uit heet gas (fig. 10). Het hete gas heeft weer tien keer zo veel massa als de sterrenstelsels. In het centrum van de cluster Sérsic 159-03 is de verhouding van het aantal ijzeratomen tot het aantal waterstofatomen ongeveer de helft van de waarde in de zon. (In de zon is de verhouding 1 op 30.000.) Verder naar buiten neemt deze verhouding gestaag af, tot ongeveer een twintigste van de waarde in de zon op de grootste afstand waar dit nog kan worden gemeten (fig. 11). Deze variatie geldt ook voor andere elementen die met XMM-Newton kunnen worden gemeten, zoals zuurstof, magnesium en nikkel. Blijkbaar worden al deze elementen vooral in het centrum van de cluster toegevoegd aan het gas tussen de sterrenstelsels. Deze elementen zijn allemaal het resultaat van kernfusie in het centrum van sterren en komen in de interstellaire en intergalactische ruimte terecht wanneer die sterren ontploffen als supernovae. Elementen als zuurstof en magnesium komen voornamelijk van gewone supernovae (type II genoemd) die het resultaat zijn van de evolutie van zware sterren. De zwaardere elementen ijzer en nikkel komen van ongewone supernovae (type I) die optreden als een witte dwerg bij het invangen van materie te zwaar wordt en ontploft. De analyse van het hete gas van 2A0355+096 en van Sérsic 159-03 laat zien dat er in elke cluster enkele miljarden supernovae moeten hebben plaatsgevonden en wel twee à drie keer zo veel gewone (type II) als on-

10. De massa van het hete gas als functie van de massa van de donkere materie, zoals bepaald voor dertien clusters van sterrenstelsels met behulp van XMM-Newton.





12. De 'Kogel-cluster' (1E 0657-56): twee clusters van sterrenstelsels, gedomineerd door de met blauw aangegeven donkere materie, zijn met elkaar gebotst en door elkaar heen gevlogen. De donkere materie is niet vertraagd door de botsing, maar de verzamelingen heet gas in de beide clusters (roze), die ongeveer 10% van de totale massa uitmaken, zijn met een schok afgeremd. Hierdoor heeft het hete gas een achterstand opgelopen ten opzichte van de donkere materie en zijn de beide componenten van elkaar gescheiden. De verdeling van het hete gas is gemeten met de röntgensatelliet Chandra. De afzonderlijke sterrenstelsels, te zien op de onderliggende foto's van de Hubble-ruimtetelescoop en de Magellan-telescoop, maken een verwaarloosbaar deel van de totale massa uit, maar geven wel aan waar de meeste materie geconcentreerd is.

gewone (type I). Deze aantallen zijn in overeenstemming met onze kennis over aantallen en typen supernovae in afzonderlijke sterrenstelsels, gecombineerd met de aantallen sterrenstelsels in deze clusters.

Scheiding van donkere en lichtende materie

Wanneer twee clusters van sterrenstelsels op elkaar botsen, kan het hete gas deels van de donkere materie worden gescheiden. De donkere materie volgt gedurende de botsing een baan die helemaal door de zwaartekracht wordt bepaald. Het hete gas daarentegen kan met elektromagnetische krachten wisselwerken: als het hete gas van de ene cluster op dat van de andere cluster botst, ontstaat daarvoor een schok, die de beweging van het hete gas afremt. Daardoor blijft de beweging van het hete gas achter bij de beweging van de donkere materie. Zo'n scheiding is met de Amerikaanse röntgensatelliet Chandra inderdaad waargenomen bij de 'Kogel-cluster' (fig. 12).

Overzicht van donkere en baryonische materie

We vatten nu enkele resultaten uit het voorgaande samen (zie tabel 1). De totale dichtheid in het heelal, de som van gewone (baryonische) materie,

donkere materie en donkere energie, is zodanig dat een honderd lichtjaar grote kubus buiten alle clusters van sterrenstelsels ongeveer 0,04 zonsmassa materie bevat. Hiervan is ongeveer 0,03 zonsmassa donkere energie, 0,008 zonsmassa donkere materie en 0,002 zonsmassa baryonische materie. Binnen een cluster van sterrenstelsels, maar buiten de sterrenstelsels, bevat zo'n kubus ongeveer twee zonsmassa's. Het meeste hiervan is donkere materie; ongeveer tien procent baryonische materie in de vorm van een heet gas. Binnen een sterrenstelsel bevat de kubus ongeveer 120 zonsmassa's: honderd zonsmassa's donkere materie en twintig zonsmassa's baryonische materie. Al deze waarden zijn gemiddelden: clusters en sterrenstelsels komen in allerlei grootten voor, en bovendien geldt zowel binnen een cluster als binnen een sterrenstelsel dat de dichtheid in het centrum het hoogst is en naar buiten toe afneemt.

Wanneer we het heelal in zichtbaar licht bezien, constateren we dat de zichtbare materie gecondenseerd is in clusters van sterrenstelsels en binnen deze clusters in de sterrenstelsels zelf. In tabel 1 zien we dat dit ook geldt voor de donkere materie: de dichtheid van donkere materie is groter in clusters dan in het gemid-

delde heelal en groter in sterrenstelsels dan in de gemiddelde cluster. Zowel in clusters als in afzonderlijke sterrenstelsels domineert de donkere materie.

De conclusie die hieruit volgt is dat de donkere materie een dominante rol speelt in het ontstaan van de structuur in het heelal. Ruwweg kan dat als volgt worden beschreven. In een oorspronkelijk gladde materieverdeling vormden zich zeer vroeg in het heelal vlakken van hogere dichtheid. Waar twee vlakken elkaar snijden, in de filamenten, is de dichtheid groter. Waar filamenten elkaar snijden zijn de clusters van sterrenstelsels en de dichtheid daar is nog groter. Van de donkere energie is zelfs op de schaal van een cluster van sterrenstelsels vrijwel niets te merken en op kleinere schalen helemaal niets. Dit is de reden dat de donkere energie pas in de laatste jaren is ontdekt.

Van de donkere materie is alleen op schalen van sterrenstelsels en groter wat te merken. Op kleinere schalen merken we er niets van. Zo is de totale hoeveelheid donkere materie binnen de baan van Pluto minder dan een miljardste deel van de massa van de zon. Ook in bolvormige sterrenhopen kan de beweging van de sterren helemaal op de zwaartekracht van de sterren zelf worden teruggevoerd. Misschien moeten we hier maar blij om zijn. Stel dat de donkere materie in ons zonnestelsel wél belangrijk was: dan zou het zeer de vraag zijn geweest of Kepler en Newton de eigenschappen van de zwaartekracht hadden kunnen ontrafelen...

De auteur is Piet van der Kruit, Jelle Kaastra, Jelle de Plaa en Norbert Werner erkentelijk voor hulp bij het schrijven van dit artikel.

Tabel 1. De gemiddelde dichtheid, uitgedrukt als aantal zonsmassa's in een kubus met een ribbe van honderd lichtjaar, op verschillende schalen in het heelal. Voor de cluster is de Coma-cluster gekozen, voor het sterrenstelsel ons Melkwegstelsel.

object	diameter (lichtjaar)	massa (zonsmassa's)	dichtheid (zonsmassa's per miljoen kubieke lichtjaar)	
			totaal	baryonisch
heelal			0,04	0,002
cluster	$5,2 \times 10^6$	$1,5 \times 10^{14}$	2	0,2
sterrenstelsel	$1,6 \times 10^5$	$2,6 \times 10^{11}$	120	20