

Kosmisch vuurwerk, masers tussen de sterren

Masers komen ook van nature voor in de ruimte en de heldere straling is waar te nemen met radiotelescopen. Hun aanwezigheid veraadt dat het moleculaire gas tussen de sterren uit balans wordt gebracht, vaak door de astrofysische processen aan het begin of einde van het leven van een ster. Met hun extreme helderheid zijn masers voor de astronoom een uniek stuk gereedschap om die processen onder de loep te nemen.

Huib Jan van Langevelde

De radiotelescoop in Dwingeloo werd in de jaren vijftig gebouwd voor het meten van de straling van de 21cm overgang van atomair waterstof. De rotatie van de Melkweg kan afgeleid worden uit de dopplerverschuiving van atomair waterstof tussen de sterren. Indertijd werd veelal aangenomen dat de ruimte tussen de sterren zeer ijl was en dat er voor moleculaire materie geen plaats was, hoewel er al wel eerder optische absorptielijnen waren waargenomen van een paar moleculen. Dat er altijd ruimte is voor een verrassing bleek toen astronomen in 1963 op zoek gingen naar de lijnen van het hydroxylra-

dicaal (OH), nadat de frequenties van de laagste hyperfijnovergangen bij een golflengte van 18cm in het laboratorium waren gemeten. OH bleek wijd verspreid te zijn in donkere interstellair wolken. Waar men slechts absorptie van de radiostraling had verwacht, bleek dat er ook veelvuldig emissie werd waargenomen.

Kosmische maser

De verklaring van dit fenomeen liet niet lang op zich wachten. Hetzelfde principe dat in de jaren vijftig de ontwikkeling van de maser (en daarna de laser) had mogelijk gemaakt, werkt ook in de ijle ruimte tussen de sterren: de kosmische maser. Dat de heldere spectra alleen maar met gestimuleerde emissie te verklaren waren, werd bewezen door een radio-interferometrie-experiment. Met behulp van Very Long Baseline Interferometry (VLBI) werd aangetoond dat de straling van een heel klein gebiedje aan de hemel afkomstig was, waardoor de helderheid zo groot moest zijn dat de equivalente temperatuur van de straling ver uitging boven temperaturen waarbij moleculen nog kunnen voorkomen.

Terwijl het nog een hele kunst is om in het laboratorium een maser te maken, blijkt hetzelfde proces spontaan tussen de sterren te gebeuren. De verklaring is dat zelfs

in de dichte interstellair wolken de dichtheid zo laag is dat de moleculen langere tijd uit thermisch evenwicht kunnen zijn, omdat ze maar zelden een ander molecuul, meestal H_2 , tegenkomen. Als bijvoorbeeld een molecuul door infraroodstraling geëxciteerd wordt, dan heeft het veel mogelijkheden om terug te vallen naar de grondtoestand via een cascade aan infrarood- en microgolfovergangen. Hierbij kunnen in de moleculaire wolken subtiele, maar wijdverspreide populatie-inversies ontstaan. Als er geen grote snelheidsverschillen zijn in zo'n gaswolk dan kunnen fotonen van de ene kant van de wolk tot aan de andere kant versterkt worden en zo kan de radiostraling in zo'n wolk dus door gestimuleerde emissie aangroeien tot spectaculaire helderheid.

Oude sterren

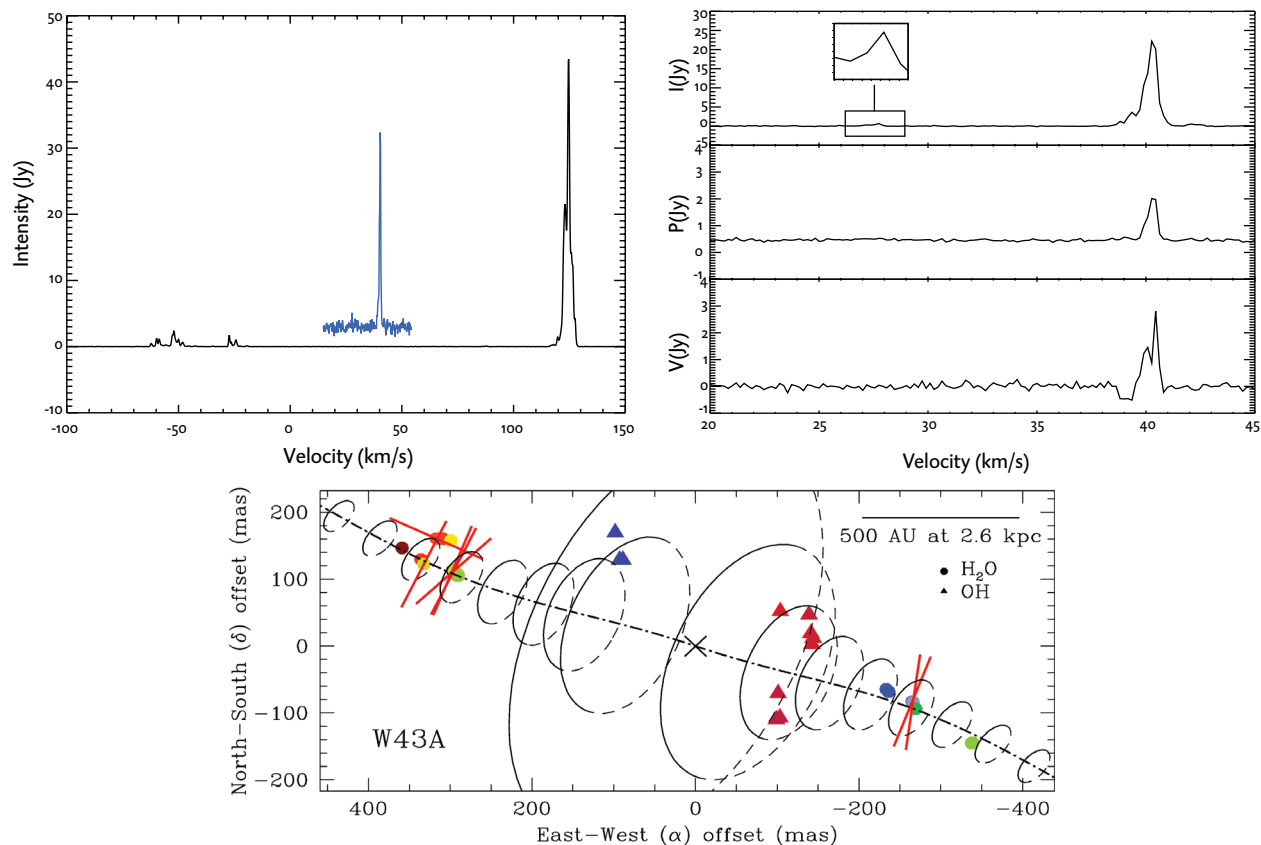
Omdat ook kosmische masers gepompt moeten worden, meestal door infraroodstraling, is het niet verwonderlijk dat ze daar voorkomen waar moleculair gas door de omgeving uit evenwicht wordt gebracht. Zo komen OH-, waterdamp- en SiO-masers veelvuldig voor in de buitenste schillen die door oude sterren worden weggeblazen. Op voldoende afstand van zo'n oude ster is de temperatuur laag genoeg om moleculen te vormen en tegelijkertijd zorgt het sterlicht van de

Huib Jan van Langevelde studeerde sterrenkunde in Leiden en promoveerde daar in 1993 op waarnemingen aan OH-masersterren.

Hij specialiseerde zich in het gebruik van radio- en millimeter-interferometertelescopen voor moleculaire astrofysica en werkte een paar jaar bij het centrum van de Amerikaanse radiosterrenkunde in New Mexico. Terug in Nederland was hij betrokken bij diverse innovatieve projecten van het Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE) te Dwingeloo, waarvan hij sinds 2007 directeur is.



langevelde@jive.nl



Figuur 1 Water- en hydroxyl- (OH) maseremissie van de stervende ster W43A. De spectra (linksboven) laten de scherpe emissielijnen zien die typisch zijn voor maserstraling. De verschillende componenten zijn afkomstig van gaswolken rond de ster die verschillende ge-projecteerde snelheden hebben. Het OH-spectrum rechtsboven laat verschillende polarisatiecomponenten zien, waarbij uit de onderste het magnetisch veld geschat kan worden aan de hand van het Zeeman-effect. In de onderste figuur wordt de distributie van de masers aan de hemel in kaart gebracht, zoals waargenomen met VLBI. De figuur beeldt een extreem klein stukje hemel af, waarbij de schaal wordt uitgedrukt in milli-boogseconden, een 3,6 miljoenste deel van een graad. De nulpositie is de plaats van de oude ster, die zich op een geschatte afstand van 2600 parsec, oftewel 8400 lichtjaar, van ons bevindt. Zelfs op die afstand is te zien dat de ster gas uitstoot in een zogenaamde tweezijdige jet op een schaal van 500 astronomische eenheden, oftewel 500 keer de afstand van de zon tot de aarde. Watermasers (cirkels) komen voor in de jet zelf, terwijl OH-masers (driehoeken) zich vooral ophouden in de originele schil om de ster en in projectie dicht bij de sterpositie liggen. Kleuren geven de snelheid van het gas aan, waarbij de snelheden in het OH veel lager zijn dan die gemeten in de watermaser. Dit onderzoek toont aan dat rond de ster een wijdverbreid magnetisch veld verantwoordelijk is voor de structuur van het gas en de vorming van de bipolaire uitstroom [1].

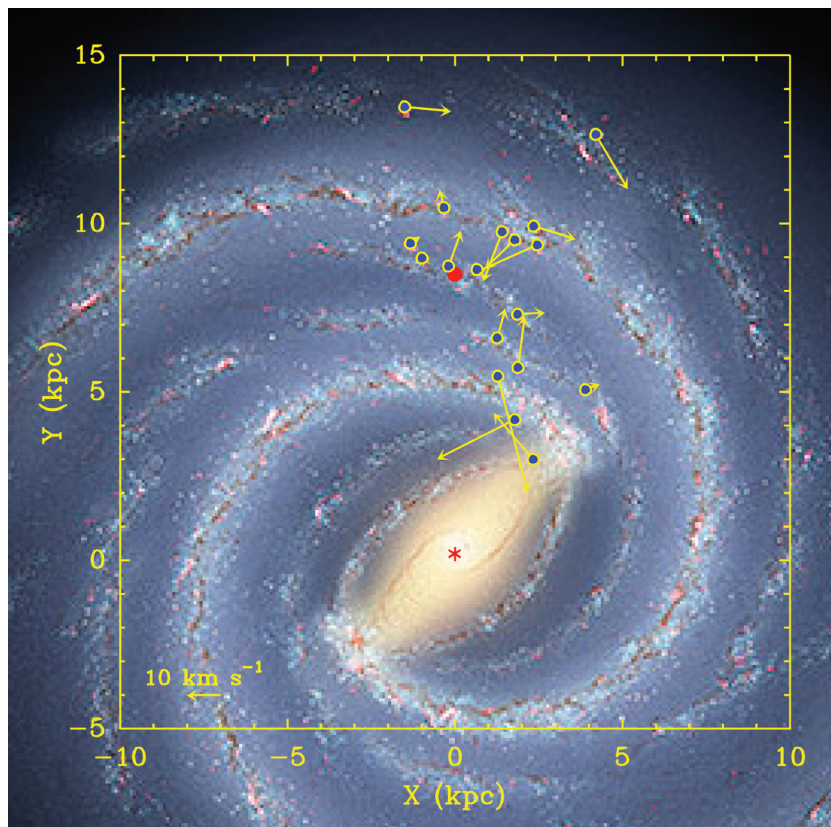


Figuur 2 De Dwingelo-telescoop en het instituut van ASTRON, waar ook JIVE is gehuisvest.

oude, rode ster voor voldoende straling om de spontane maser-emissie te exciteren (zie bijvoorbeeld figuur 1).

Jonge sterren

Ook op plekken waar juist nieuwe sterren zich vormen zijn de condities prima voor kosmische masers. Het koele interstellair gas en stof hoopt zich hier op en op de meest dichte plekken vormt zich een ster. Zonder op de details van stervorming in te gaan, mag het wel duidelijk zijn dat de infraroodstraling van de nieuwe ster verantwoordelijk kan zijn voor maserstraling in de overgebleven moleculaire wolk. In de omgeving van jonge sterren zijn ook schokprocessen belangrijk, zowel voor de excitatie van de maser als ook voor de chemie, omdat daardoor andere moleculen die oorspronkelijk op stofdeeltjes waren gevormd in de ruimte gebracht worden. Zo komen in stervormingsgebieden



Figuur 3 Schematisch 'bovenaanzicht' van de Melkweg, waarbij de locatie van de zon is aangegeven met een rode stip. Voor een aantal stervormingsgebieden zijn de afstand en snelheden van methanolmasers aangegeven met gele pijlen. De metingen laten zien waar de spiraalarmen zich bevinden, hoe snel de Melkweg draait als functie van de afstand tot het centrum (rode asterisk) en wat de specifieke snelheden zijn van de spiraalarmen [2].

ook heel heldere methanol (CH_3OH) masers voor. Er zijn zelfs zogenaamde megamasers, waarbij maserstraling zo sterk kan worden dat deze zelfs uit zeer verre melkwegstelsels waargenomen kan worden.

Interpretatie

Moleculaire straling is voor de sterrenkundigen een heel belangrijke diagnostische techniek geworden om de fysische processen in de donkere en koele gebieden van de interstellair ruimte te begrijpen. Hoe snel en vaak sterren gevormd worden en wat de cyclus is van verschillende elementen in de interstellair ruimte, zijn essentiële elementen in ons begrip van de evolutie van het universum en de vorming van planeten en daarmee het leven. Wanneer een astronoom radiostraling van de hemel meet, kan die geïnterpreteerd worden als een resultaat van de combinatie van de hoeveelheid gas en de temperatuur. Voor zogenaamde thermische straling volstaat vaak een intuïtief eenvoudige interpretatie, voor masers is dit lastiger. Omdat de maser zichzelf steeds versterkt, is de resulterende helderheid een niet-

lineaire combinatie van temperatuur, dichtheid en achtergrondstraling, waarbij de padlengte van de maser vaak bepaalt hoe het spectrum eruit ziet. De helderste straling komt niet van het gebied met de hoogste temperatuur of de hoogste dichtheid, maar vaak van de gezichtslijn waarlangs de langste kolom gas ligt met dezelfde snelheid.

Maar hoewel de fysische condities van de maser hierdoor niet altijd makkelijk te schatten zijn, levert hij op een heel andere manier unieke informatie over sterrenkundige fenomenen. Door exponentiële versterking produceren masers straling met een extreem hoge helderheid: veel straling uit een kleine hoekmaat aan de hemel. Door deze hoge helderheid functioneren de masers als bakens aan de hemel; ze geven bijvoorbeeld aan waar sterrenkundigen jonge sterren kunnen vinden. Ook kunnen de heldere, scherpe lijnen gebruikt worden om subtiele effecten te meten, zoals bijvoorbeeld het Zeeman-effect waarmee het interstellair magneetveld geschat kan worden (figuur 1).

Bovendien is het mogelijk om met

VLBI-technieken metingen te doen met heel hoge resolutie, oftewel een extreem hoge vergroting. Doordat de resolutie van dit soort metingen vaak duizendmaal groter is dan bij thermische straling, is het mogelijk de masers te gebruiken om direct bewegingen aan de hemel te meten. Zo kunnen masers gebruikt worden om het volledige driedimensionale snelheidsveld van het gas rond sterren te meten, en soms ook tegelijkertijd magnetische veldsterkte. Dit geeft astronomen de kans om de dynamiek van vormende sterren te ontrafelen.

Afstanden meten

Eén van de meest fundamentele metingen die met behulp van kosmische masers gedaan kan worden, is het direct bepalen van afstanden in de Melkweg. Omdat de aarde rond de zon draait, vertonen de sterren die relatief dicht bij ons staan een parallax, een jaarlijkse verschuiving, ten opzichte van de achtergrond. Met behulp van VLBI kan van methanolmasers in stervormingsgebieden de eigenbeweging aan de hemel en de afstand bepaald worden. Omdat die stervormingsgebieden altijd in de spiraalarmen van de Melkweg liggen, kan zo de structuur van de Melkweg in detail worden gemeten. In een studie van een aantal van dit soort methanolmasers is recentelijk aangetoond dat de Melkweg iets sneller draait dan vroeger was bepaald op grond van waarnemingen van atomair waterstof, waarbij de afstand tot de waterstofwolken ruw geschat moest worden (figuur 3).

Op deze manier zijn kosmische masers niet alleen intrigerende astrofysische verschijnselen, maar vormen ze ook een onmisbaar instrument om de evolutie van de Melkweg en het heelal te begrijpen. Met de verdere ontwikkeling van de radio-sterrenkunde, zoals bijvoorbeeld de voorgestelde mega-telescoop (de Square Kilometer Array), zal het belang van masers om het verre heelal op de kleinste schaal te bestuderen in de toekomst alleen maar toenemen.

Referenties

- 1 Amiri, Vlemmings en van Langevelde, *The magnetic field of the evolved star W43A* *Astronomy & Astrophysics* **509** A26 (2010).
- 2 Reid et al., *Trigonometric Parallaxes of Massive Star-forming Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters, and Noncircular Motions*, **700** 137 (2009).