



Een (on)gelukkig huwelijk?

JETS EN NEUTRONEN- STERREN

In de linkerkant van de W van het sterrenbeeld Cassiopeia verscheen in de herfst van 2017 plotseling een nieuw lichtpuntje. Niet dat ook maar één enkel mens dit, naar boven turend, heeft kunnen zien: het ging om radiostraling, uitgezonden door een straal van gas en plasma, reizend met bijna de lichtsnelheid en gelanceerd door een kanibalistische neutronenster. Deze jet heeft een onderzoeksgebied van een eeuw oud op haar kop gezet: volgens onze heersende natuurkundige theorieën is ze namelijk onmogelijk.

Honderd jaar geleden richtte de Amerikaanse astronoom Heber Curtis de telescoop in het Californische Lick Observatorium op het sterrenstelsel M87. Hij ontdekte daar een “curious straight ray”, oftewel een ‘merkwaardige rechte straal’ (figuur 2). Kijkend naar modernere afbeeldingen van M87, zoals bijvoorbeeld de afbeelding op de pagina hiernaast gemaakt door de Hubble Space Telescope, zien we duidelijk wat hij bedoelde: uit het sterrenstelsel, linksboven te zien in geel, schiet een enorme straal van gas de duisternis in. Ten tijde van deze ontdekking kon Curtis niet weten wat hij had gezien: sterrenstelsels waren bijvoorbeeld nog niet ontdekt en het idee van een zwart gat was pas één jaar eerder verzonnen door de Duitse natuurkundige Karl Schwarzschild [1].

Universum vol scherpschutters

Waarom is het bestaan van zwarte gaten relevant voor Curtis’ waarneming? We weten tegenwoordig dat deze straal, of jet in het vakjargon, bestaat uit geladen deeltjes (protonen, elektronen en waarschijnlijk ook positronen) die door een enorm zwart gat in het centrum van M87 met bijna de lichtsnelheid worden gelanceerd. Daarbij wordt niet alleen de aanvoer tot het zwarte gat flink verminderd – deze geladen deeltjes werden namelijk oorspronkelijk gevangen door de zwaartekracht van het zwarte gat en leken daardoor op weg naar een schier onvermijdelijk lot – ook belemmert deze jet een deel van het gas dat langzaam het sterrenstelsel in valt om daar nieuwe sterren te vormen. Hoe indrukwekkend de jet van M87 er misschien ook uitziet, ze is allesbehalve uniek. De afgelopen honderd jaar zijn jets in elke uithoek van het heelal gevonden: van de kleine (astronomisch beschouwd) schaal van vormende sterren tot die van clusters van sterrenstelsels. Eén ding

hebben al deze jets gemeen: ze zijn alle onlosmakelijk verbonden met ‘accretie’, het proces waarin een object materiaal uit de omgeving aantrekt via zwaartekracht. Voor het zwarte gat van M87 is dit materiaal interstellair gas uit het centrum van het sterrenstelsel; voor een vormende ster wordt dit aangeleverd door de grote gasschijf waar de ster en bijbehorende planeten uit ontstaan.

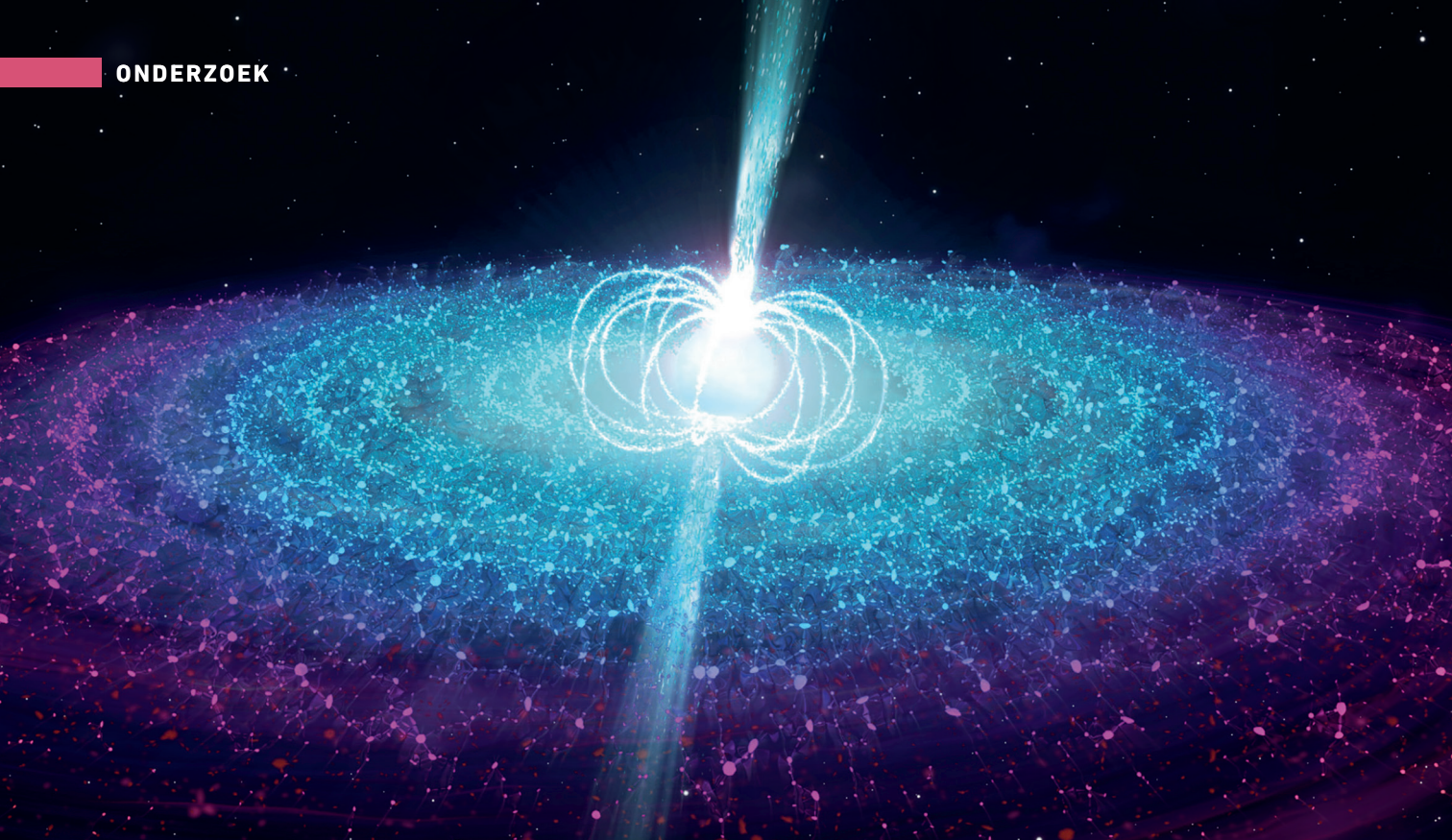
Maar ondanks hun alomtegenwoordigheid begrijpen sterrenkundigen maar weinig van hun ontstaan en hun eigenschappen, bijvoorbeeld hoe het materiaal in de jet tot bijna de lichtsnelheid versneld wordt of hoe het kan dat jets zo gefocuseerd zijn. Dit vormt een veelvoorkomend probleem in de sterrenkunde: je kunt een fenomeen wel waarnemen, maar zonder laboratorium of experiment om het na te bootsen, is het lastig om het volledig te doorgronden. In plaats daarvan zijn sterrenkundigen veroordeeld tot een truc: observeer het fenomeen in zo veel mogelijk uiteenlopende omstandigheden en probeer daaruit af te leiden hoe het werkt.

Neutronensterren: natuurkunde in extremis

Dat is waar neutronensterren om de hoek komen kijken: als het gaat om uiteenlopende omstandigheden zijn deze exotische objecten uitermate geschikt. Neutronensterren ontstaan in een supernova, de explosie aan het einde van het leven van een zware ster, waarbij de buitenste gaslagen worden weggeblazen. De kern krimpt tegelijkertijd in elkaar, waardoor, afhankelijk van de oorspronkelijke massa, een neutronenster of een zwart gat overblijft als erfenis van de ster. Daardoor zit in een neutronenster de massa van de Zon samengedrukt in een bol ter grootte van Texel, met een dichtheid groter dan die van een atoomkern. Niet alleen massa is samengeperst in een



Jakob van den Eijnden (1993) is promovendus aan het Anton Pannekoek Instituut voor Sterrenkunde en bestudeert alle facetten van accretie en jets rondom zwarte gaten en neutronensterren. Hij deed zijn bachelorstudie sterrenkunde aan de RUG, waarna hij zijn masterstudie volgde aan de UvA.



Figuur 1. Een artistieke impressie van een gasschijf van geaccreteerd gas rond een neutronenster. Ook de *jet* en het magneteveld van de neutronenster zijn afgebeeld. Het gas is afkomstig van een ster die rond de neutronenster draait en bezit daardoor impulsmoment. Doordat dit behouden blijft, vormt het materiaal een draaiende schijf. Wrijving in deze schijf zorgt er echter voor dat het impulsmoment afneemt, waardoor het materiaal langzaam naar de neutronenster beweegt. Tegelijk warmt deze wrijving het gas op, waardoor het warmtestraling uitzendt met optische, uv-, en röntgengolflengten. Hoe dichterbij de neutronenster, hoe heter het gas, zoals aangegeven met de kleurgradiënt in de afbeelding. Illustratie: ICRAR/Universiteit van Amsterdam.

neutronenster. Ook het impulsmoment van de enorme oorspronkelijke ster is behouden in dit kleine restant, dat daardoor enkele tot honderden keren per seconde rond haar as kan draaien (impulsmoment schaalt immers met afstand, waardoor een kleiner object sneller draait). Op vergelijkbare wijze wordt het stellaire magneteveld geconcentreerd, waardoor neutronensterren met afstand de sterkste magneten in het heelal vormen.

Met zo veel extreme eigenschappen – rotatiesnelheid, magneteveld, dichtheid – zijn neutronensterren perfecte laboratoria om jets te bestuderen. Maar

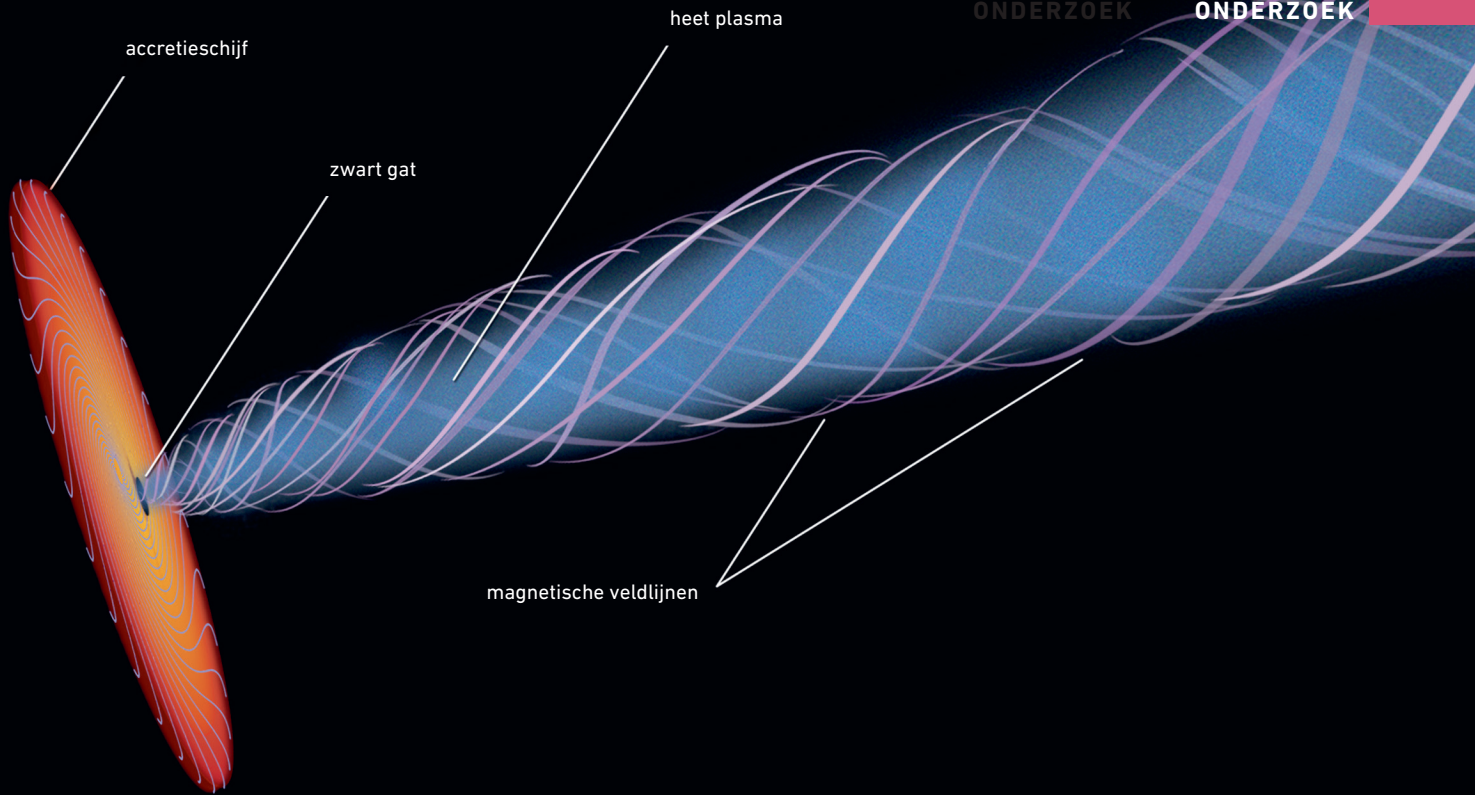
om die te lanceren is er, net als bij zwarte gaten en jonge sterren, wel eerst accretie nodig. Natuurlijk zouden neutronensterren interstellair gas uit hun omgeving kunnen aantrekken, maar die accretie kan ook een stuk efficiënter, omdat ze vaak een dubbelstersysteem vormen met een normale ster. Met hun buitengewone dichtheid en daardoor immense zwaartekracht kunnen neutronensterren de buitenste lagen van hun binaire partner afsnoepen. Deze stroom van gestolen gas vormt vervolgens een draaiende schijf, zoals te zien in figuur 1, en daarmee het perfecte reservoir voor de vorming van jets.

Het enige wat we wél begrijpen...

Maar waarom zijn al die extreme eigenschappen van neutronensterren relevant voor de vorming van jets? Om dat te begrijpen, moeten we kort kijken naar de bestaande verklaringen van jets. Hoewel deze, zoals eerder genoemd, zeker niet compleet zijn, gaan de twee meest geaccepteerde modellen uit van hetzelfde principe: magnetische velden dicht bij het accreterende object, of dit nu een zwart gat, neutronenster of jonge ster is, worden opgesponnen tot een ‘magnetische springveer’, die heet

4486 12 25.8 +12 57 Exceedingly bright; the sharp nucleus shows well in 5^m exposure. The brighter central portion is about 0.5 in diameter, and the total diameter about 2'; nearly round. No spiral structure is discernible. A curious straight ray lies in a gap in the nebulosity in p.a. 20°, apparently connected with the nucleus by a thin line of matter. The ray is brightest at its inner end, which is 11" from the nucleus. 20 s.n.

Figuur 2. De oorspronkelijke ontdekking van jets door Heber Curtis in 1918, verstoppt in een overzicht van 762 nebulae [3].



Figuur 3. Een artistieke impressie van de vorming van een *jet*. De draaiing van het zwarte gat dat het gas (oranje) accreteert of de draaiing van het gas zelf creëert een helische structuur van magnetische veldlijnen. Heet, geïoniseerd gas wordt hierdoor loodrecht op de schijf gelanceerd. Illustratie: NASA, ESA, en A. Feild (STScI).

geïoniseerd materiaal vanuit de accretieschijf kan lanceren (zie figuur 3). Het grote verschil tussen de twee modellen is de reden waardoor de magneetvelden worden opgesponnen: bij de een wordt dit veroorzaakt door de rotatie van het accreterende object, terwijl bij de ander de draaiing van de accretieschijf hiervoor verantwoordelijk is. Voor beide modellen voor de lancering van jets zijn twee eigenschappen van de neutronenster zeer relevant: ten eerste laten neutronensterren vaak pulsaties zien, doordat hun rotatie- en magnetische assen scheef staan.

Hierdoor zien we bij iedere rotatie van de neutronenster eenmaal haar noord- of zuidpool, die veel licht uitzendt. Via deze pulsaties kunnen we dus – in tegenstelling tot bijvoorbeeld bij zwarte gaten – precies meten hoe snel de neutronenster ronddraait. Zo kunnen we zoeken naar een mogelijke connectie tussen de rotatiesnelheid en de jet, die te verwachten is als de magnetische springveer inderdaad ontstaat door de rotatie van het accreterende object. Maar belangrijker is het magneetveld van de neutronenster. Zoals beschreven kan dit extreem sterk zijn; zo sterk

zelfs, dat zowel het accreterende materiaal als de draaiing van de neutronenster het niet kan opspinnen tot een springveer. Met andere woorden, voor neutronensterren met zo'n supersterk magneetveld [2], voorspellen beide modellen dat de lancering van jets niet kan plaatsvinden. En inderdaad: hoewel jets overal voor lijken te komen, werden ze in een decennialange zoektocht alleen gezien als neutronensterren een (relatief) zwak magneetveld hadden – niet bij hogere veldsterktes! Een mooie match met de theorie dus en niet slecht voor een proces dat we eigenlijk maar slecht begrijpen.

“Stop nooit met zoeken, wat de theorie ook zegt.”

... of is het toch ingewikkelder?

Maar als je iets niet ziet, wil dat niet automatisch zeggen dat het niet bestaat – misschien zoek je niet goed genoeg of kijk je op de verkeerde manier. Precies dat bleek ook hier het geval: in de herfst van 2017 keken we meerdere



Figuur 4. Een aantal schotels van de Very Large Array in New Mexico in de Verenigde Staten. In totaal bestaat de telescoop uit 27 schotels, ieder met een doorsnede van 25 meter, die alle tegelijk een enkel object aan de sterrenhemel observeren. De sterrenhemel laat de Melkweg zien. Foto: NRAO/AUI/NSF, Jeff Hellerman.

keren met de Very Large Array (zie figuur 4) naar een sterk magnetische accreterende neutronenster in het sterrenbeeld Cassiopeia, met de niet heel poëtische naam Swift J0243.6+6124. De Very Large Array telescoop is perfect om jets mee te zoeken: jets lichten op doordat vrije elektronen rond de magnetische veldlijnen draaien en daarbij, zoals elke versnellende lading, straling uitzenden. Bij de fysische omstandigheden in een jet piekt deze straling bij radiogolflengten – precies waar de Very Large Array gevoelig voor is. En omdat deze telescoop recentelijk een grote upgrade had gekregen, konden we nauwkeuriger zoeken dan ooit. Wat bleek: ook Swift J0243.6+6124 lanceert een jet, ondanks de theorie die zegt dat dit niet mogelijk is bij zo'n sterk magneetveld. Deze jet lijkt in elk opzicht op de jets die we op andere plekken al decennia eerder hadden ontdekt, met één groot verschil: ze is honderden keren minder helder dan de jets die we al kenden. Dáárom was zo'n jet, bij een sterk magnetische neutronenster, nooit eerder gezien: niet

omdat ze niet bestonden, niet omdat ze theoretisch niet mogelijk waren, maar simpelweg omdat we niet goed genoeg konden zoeken. Deze ontdekking leert ons een aantal zaken: onze bestaande theorieën waren incorrect of op zijn minst incompleet. Het herinnert ons eraan dat iedere theorie slechts 'klopt' als, en zolang, deze overeenkomt met waarnemingen van de natuur. Maar net zo belangrijk is wat het ons nog niet leert: we snappen niet hoe deze onmogelijke jet toch kan bestaan. Het is wachten op andere sterrenkundigen die de theorie verbeteren, verklaren wat we gezien hebben en vooral ook nieuwe voorspellingen doen – die dan door de waarnemers weer getest kunnen worden tot ze ontkracht zijn. Maar totdat dat gebeurt, zoeken we ondertussen door naar meer 'onmogelijke' jets om hun eigenschappen zo veel mogelijk te categoriseren. Misschien wel het belangrijkste dat ik hier als waarnemer van leer, is om nooit te stoppen met zoeken, wat de theorie ook zegt. Honderd jaar geleden

voorspelde geen enkele theorie het bestaan van jets en had niemand verwacht dat Heber Curtis een "curious straight ray" zou zien toen hij zijn telescoop op M87 richtte. Hij deed het toch en ontdekte een, zoals we nu weten, alomtegenwoordig fenomeen. Op dezelfde manier dachten wij niets te gaan zien toen we de Very Large Array op Cassiopeia richtten, maar ontdekten we een onmogelijke jet. Wat – boven alles – vooral laat zien dat we na honderd jaar nog steeds maar weinig begrijpen van jets.

REFERENTIES EN NOTEN

- 1 Dit betrof het eerste zwarte gat voorspeld uit de algemene relativiteitstheorie van Albert Einstein. De zwaartekrachttheorie van Newton was eind 18^e eeuw al gebruikt om het bestaan van zogenoemde zwarte sterren te voorspellen.
- 2 We praten dan over ongeveer 10^{12} gauss. Dit is een miljoen keer sterker dan de sterkste magneet ooit gecreëerd op Aarde. De Aarde zelf heeft een magneetveld van gemiddeld een halve Gauss.
- 3 Blandford & Payne, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **199**, 883 (1982).
- 4 Curtis, *Publications of Lick Observatory* **13**, 31 (1918).
- 5 Massi en Kaufman Bernadó, *Astronomy & Astrophysics* **477**, 1 (2008).
- 6 Van den Eijnden et al., *Nature* **562**, 233 (2018).