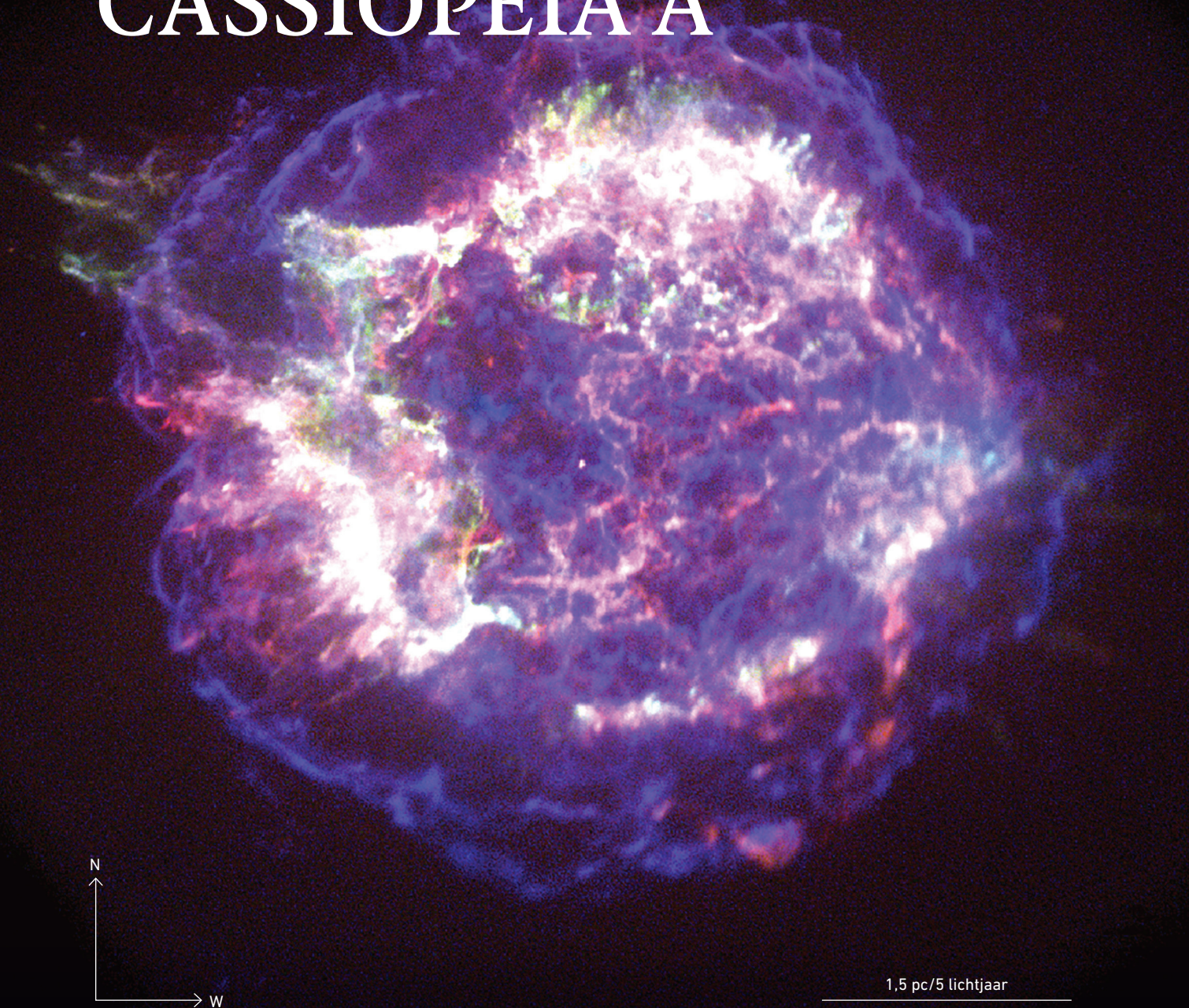


SCHOKKEN EN MAGNEETVELDEN IN SUPERNOVARESTANT CASSIOPEIA A



Cassiopeia A is een van de helderste radiobronnen aan de hemel. Cassiopeia A is veroorzaakt door een krachtige supernova-explosie die een snel uitdijende schil van heet plasma vormde. Twee nieuwe studies werpen een bijzondere blik op de dynamica van de schokgolven, hun rol in de versnelling van relativistische elektronen en op de structuur van de magneetvelden achter de schokfronten.

De krachtigste explosies die plaatsvinden in de Melkweg zijn supernova-explosies. Ze ontstaan als de kern van een zware ster ineens stort tot een neutronenster – waarbij de vrijgekomen potentiële energie de explosie van de rest van de ster veroorzaakt – of door de thermonucleaire explosie van een koolstof-zuurstof witte dwerg. De explosie-energie is in beide gevallen ongeveer 10^{44} J. De ontstane schokgolf kan zich honderdduizend jaar lang verspreiden. Het schokgolffront creëert een schil van heet plasma, die zichtbaar is in röntgenstraling. Deze hete schil wordt een supernovarestant genoemd. De naam is enigszins misleidend, want de schil bestaat uit een mix van supernovamateriaal en van voortgestuwd gas afkomstig uit de supernova-omgeving. Supernova's spelen een essentiële rol in de ontwikkeling van sterrenstelsels. De kernfusieproducten die vrijkomen, zoals zuurstof en ijzer, bepalen de chemische samenstelling van interstellair gas en sterren, en vormen de basis voor leven op aarde. De explosie-energie zelf zorgt voor verhitting en compressie van interstellair gas, wat weer helpt bij het vormen van nieuwe sterren. Daarnaast zijn supernovarestanten waarschijnlijk de belangrijkste bron van de energierijke deeltjes, ook wel kosmische straling genoemd, die alomtegenwoordig zijn in de Melkweg en die verantwoordelijk zijn voor de kosmische achtergrondstraling in onze atmosfeer.

Cas A een jonge supernovarestant

Cassiopeia A (kortweg Cas A) is een van de best bestudeerde supernovarestanten. De naam geeft aan dat het

de helderste radiobron ('A') is in het sterrenbeeld Cassiopeia. Cas A staat op een afstand van zo'n 11.000 lichtjaar (3,4 kpc), is relatief jong – ongeveer 350 jaar oud (dat wil zeggen dat pas 350 jaar geleden het eerste signaal van de explosie ons bereikte) – en heeft een diameter van zeventien lichtjaar. Cas A is veroorzaakt door de explosie van een zware ster en het röntgenspectrum laat zien dat er veel, in de explosie gevormde, zuurstof-, silicium-, zwavel-, argon-, calcium- en ijzerionen aanwezig zijn. Deze ionen zijn verhit doordat gas van de explosie op de hete schil botst. Deze hete schil wordt aan de binnenzijde begrensd door wat een *reverse shock* (binnenste schok) genoemd wordt. Deze schok vormt zich snel na de explosie en ondanks de naam beweegt dit schokfront zich lange tijd naar buiten toe.

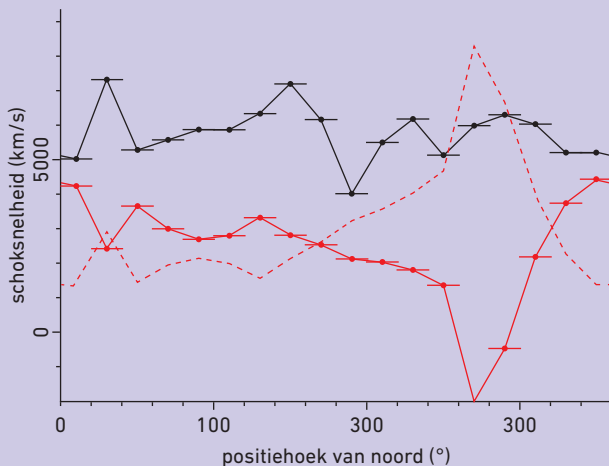
Lichtevo's, sterwinden en de laatste fasen in het leven van een zware ster

De buitenste schok van Cas A verhit gas dat uitgestoten is door de ster een paar honderdduizend jaar voor de supernova-explosie. Dit gas blijkt een relatief hoge dichtheid te hebben, wat ons vertelt dat de ster relatief veel gas kwijtraakte in de vorm van een sterwind. De schatting is dat Cas A zo'n drie zonsmassa's aan supernovamateriaal bevat, terwijl de schil al zo'n acht zonsmassa's aan opgeveegd materiaal bevat. Het grote massaverlies wordt bevestigd door wel heel bijzondere waarnemingen: van Cas A zijn optische lichtevo's geïdentificeerd – licht dat weerkaatst is door interstellair

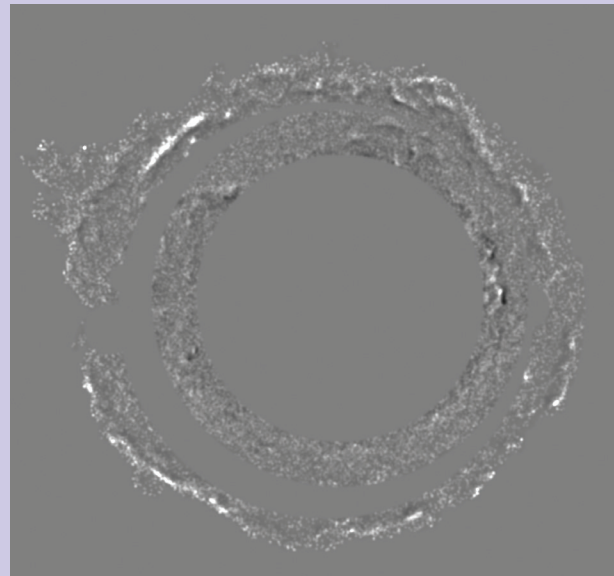
Figuur linkerpagina. Cassiopeia A zoals waargenomen door NASA's Chandra X-ray Telescope. De RGB-kleuren corresponderen respectievelijk met geïoniseerd magnesium en ijzer lijnemissie (rood), silicium lijnemissie (groen) en continuümstraling – grotendeels synchrotronstraling – in blauw. De synchrotronstraling vormt filamenten rond de buitenste schok, maar ook rond delen van de binnenste schokgolf.



Jacco Vink is verbonden aan de UvA. Hij promoveerde in 1999 op onderzoek gedaan bij SRON. Hij onderzoekt gamma- en röntgenstraling van supernovarestanten en pulsarwindniveaus. Hij is auteur van het boek *The Physics and Evolution of Supernova Remnants* (2020) en ontving onder andere een NASA Chandra fellowship, een NWO Vidi- en een NWO-Groot-subsidies. j.vink@uva.nl



Figuur 1. De hoeksnelheidsmetingen omgewerkt naar schokfront-snelheden, voor zowel de buitenste schok (zwart) als de binnenste schok (rood), beide vanuit het perspectief van de waarnemer. De rode stippellijn geeft de schokfrontsnelheid vanuit het perspectief van ongeschokt gas dat botst met het binnenste schokfront. De positiehoek is vanuit het noorden gemeten en is tegen de richting van de klok in. Het westelijk deel is rond 270 graden.



Figuur 2. De expansie gevisualiseerd door een afbeelding uit 2004 af te trekken van een afbeelding uit 2018. Alleen de geanalyseerde delen zijn afgebeeld. Het schaduwpatroon is omgedraaid in de binnenring van het westelijk deel.

stofwolken – en hun spectra laten zien dat het een Type IIb-supernova betrof. Type IIb-explosies laten bijna geen waterstoflijnen zien, wat betekent dat de ster de waterstofrijke buitenkant kwijtgeraakt is. Door het supernovarestant te bestuderen hopen we meer te weten te komen over zowel het materiaal afkomstig van de explosie zelf, alsook het omliggende gas, dat ons informeert over de laatste levensfasen van de ster.

Cas A een kosmische deeltjesversneller

Als jong supernovarestant heeft Cas A een relatief snel buitenste schokfront, zo'n 5000–6000 km/s. Bij deze hoge schokfrontsnelheden worden elektronen, protonen en andere geladen deeltjes tot relativistische energieën versneld. Cas A is dus een bron van kosmische straling. De elektronen met GeV-energieën zijn verantwoordelijk voor de radiostraling van Cas A: door de magnetevelden in de schil beschrijven de elektronen spiraalvormige paden, waardoor ze

synchrotronstraling uitzenden. Cas A behoort tot een kleine groep van supernovarestanten die ook röntgensynchrotronstraling uitzenden. Dit vereist elektronen met energieën van zo'n 10 TeV, vergelijkbaar met de protonenergieën die bereikt worden in de Large Hadron Collider. Het is verre van triviaal dat elektronen deze hoge energieën kunnen bereiken. Hoge-energie-elektronen verliezen snel hun energie door synchrotronstraling, veroorzaakt door de aanwezigheid van een zwak magnetveld. Het versnellingsmechanisme moet snel genoeg zijn om de stralingsverliezen te compenseren, in formulevorm:

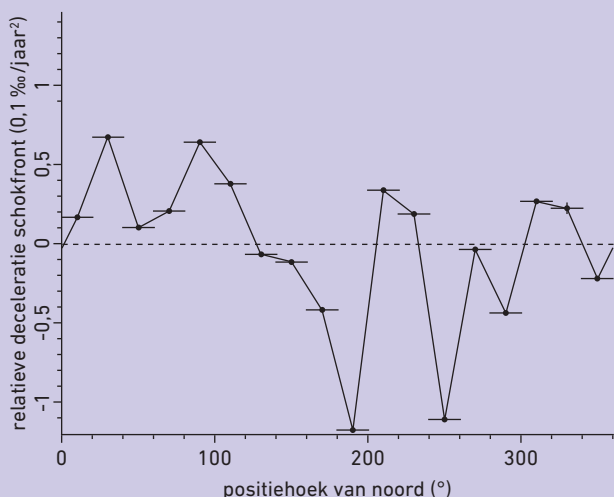
$$\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)_{\text{versnelling}} > -\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)_{\text{straling}}$$

Het versnellingsmechanisme is in dit geval de zogenoemde Fermi-schokfrontversnelling. Deeltjes met voldoende energie kunnen het schokfront herhaaldelijk passeren. De geladen deeltjes bewegen enigszins

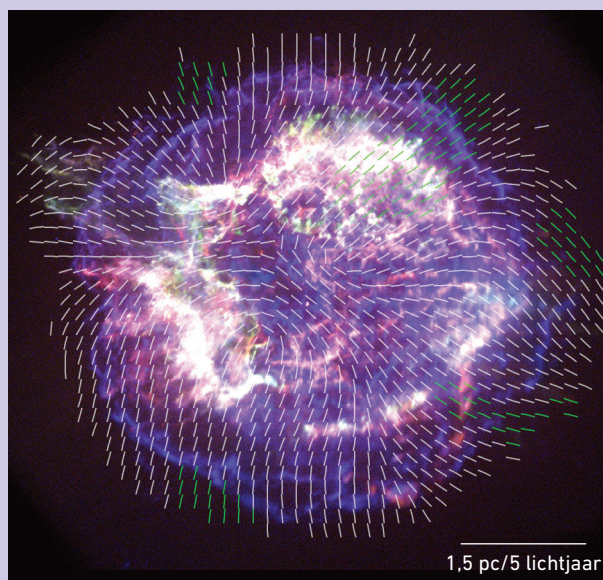
chaotisch doordat de magnetevelden turbulent zijn. Iedere schokfrontpassage zorgt voor een kleine Lorentzboost, met een energietoename van

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{V_s}{c} \approx 2\%,$$

met V_s de schokfrontsnelheid en c de deeltjessnelheid (ongeveer de lichtsnelheid). Met ongeveer 1200 schokfrontpassages kan een elektron met een beginenergie van 1 keV versneld worden tot 10 TeV. Daarvoor is nodig dat het magnetveld onregelmatig is, zodat de deeltjes een willekeurig pad beschrijven, en genoeg sterkte heeft om de deeltjes dicht bij het schokfront te houden. Het feit dat we röntgensynchrotronstraling detecteren impliceert een zeer variabel en relatief sterk magnetveld (zo'n 25 nT), vergeleken met de magnetveldsterkte in de Melkweg (~0,5 nT). Theoretische argumenten geven aan dat schokfrontsnelheden van minimaal 3000 km/s nodig zijn om röntgensynchrotronstraling te krijgen – alleen bij deze snelheden



Figuur 3. De relatieve afgeleide van de snelheid (deceleratie/acceleratie) van de buitenste schok. Delen van de schok in het (zuid)westelijk deel (tussen de 180 en 300 graden) versnellen, terwijl de schok afremt in het noordelijk deel.



Figuur 4. Zelfde als de openingsfiguur, maar hier geven lijnen de magnetveldrichtingen aan zoals gemeten door IXPE, een nieuwe röntgensatelliet van NASA en ASI. De lijnen zijn afgeleid van de Stokes Q- en U-parameters, maar alleen in de groene delen is de significantie van polarisatiedetectie boven de drie sigma.

compenseert de deeltjesversneling de stralingsverliezen van 10 TeV elektronen.

Niets rustig aan het westelijk schokfront

De röntgensynchrotronstraling van Cas A is bijzonder, omdat deze niet alleen met het buitenste schokfront is geassocieerd (blauw/paarse gebieden in openingsfiguur), maar ook met meer naar binnen gelegen delen: ze blijken geassocieerd met het binnenste schokfront, met name in het westelijk deel. Computerberekeningen voor de evolutie van Cas A gaven aan dat de binnenste schok naar buiten moet bewegen met zo'n 1500 km/s. Het materiaal van de supernova dat het schokfront bereikt gaat zelf met zo'n 4000 km/s, dus de schokfrontsnelheid is lager dan ~2500 km/s. Er is dus iets bijzonders aan de hand in het westelijk deel. Dat uitvinden was een van de doelen van een nieuwe studie naar de schokfrontdynamica van Cas A die onlangs is gepubliceerd [1].

Een nieuwe studie van de schokfrontdynamica

Cas A is een veel bestudeerde bron in alle golflengtegebieden. Zo was de eerste waarneming van het NASA Röntgen Observatorium Chandra in 1999 aan Cas A gewijd. Chandra heeft de scherpste röntgenresolutie ooit gerealiseerd, zo'n 0,5 boogseconde. Sinds 1999 heeft Chandra Cas A vele malen waargenomen. In een nieuwe studie hebben we achttien waarnemingen geselecteerd van 2000 tot 2019 om de hoeksnelheid [2] van de schokken te meten. Een lange waarneming in 2004 werd daarbij als referentie gebruikt. Omdat we specifiek de schokgolven wilden volgen, selecteerden we fotonenergieën van 4 keV tot 6 keV, gedomineerd door synchrotronstraling. Röntgensynchrotronstraling vindt men alleen rond de schokgolven, want zodra de elektronen te ver van het schokfront verwijderd zijn worden ze niet meer versneld, en verliezen ze in ongeveer tien jaar hun energie. Dit verklaart dat röntgensynchrotronstraling

zulke dunne filamenten vormt (openingsfiguur). De binnenste schok is niet helemaal concentrisch met de buitenste schok en enigszins naar het westen opgeschoven. Het gebied rond het binnenste schokfront en buitenste schokfront werd opgedeeld in achttien sectoren, en in iedere sector werd zowel de beweging van het binnenste schokfront als het buitenste schokfront gemeten. Dit leidde tot hoeksnelheidsmetingen met een nauwkeurigheid van zo'n 1% (figuur 1). De veranderingen over de tijd kunnen mooi gevisualiseerd worden door twee afbeeldingen van elkaar af te trekken (figuur 2). Voor het buitenste schokfront konden we zelfs de afgeleide van de snelheid bepalen (acceleratie/deceleratie), maar met grotere onzekerheden (figuur 3).

Asferische schillen of bellen?

We vonden dat het binnenste schokfront zich anders gedraagt dan theoretische modellen: het binnenste schokfront beweegt in het westen naar binnen toe met snelheden tot

2000 km/s. De onderzoeksgroep in Palermo rond Salvatore Orlando bedacht een verklaring. Dit naar aanleiding van een voorlopig resultaat dat ondergetekende presenteerde op een conferentie in 2019. Zij gaan ervan uit dat de ster veel massaverlies leed en eenzijdig een dichte schil uitblies. Computersimulaties laten zien dat in zo'n situatie het buitenste schokfront afremt zodra deze botst met de schil. De drukopbouw die dat veroorzaakt zorgt voor een sterke reactie in het binnenste schokfront, die begint terug te bewegen. Maar zodra het buitenste schokfront door de schil heen is gebroken versnelt deze weer. Dit laatste was een opmerkelijke voorspelling. De resultaten die in 2019 getoond werden, betroffen alleen de schokfronthoeksnelheden, nog niet de acceleratie-/deceleratiemetingen. De nieuwe metingen laten inderdaad zien dat het buitenste schokfront in het westen accelereert. Hiermee is het pleit nog niet helemaal beslecht voor het Palermo-model. Een alternatieve verklaring is dat er een relatief lage dichtheid is in het supernovamateriaal in het westelijk deel. Zulke 'bellen' in het materiaal worden voorspeld voor delen die rijk zijn aan radioactieve atomen. De veroorzaakte verhitte resulteert in een uitdijning van dit gas ten opzichte van het omliggende supernovamateriaal. Deze belLEN kunnen echter niet de acceleratie verklaren. Aan de andere kant verklaart het Palermo-model nog niet waarom er een sterker-dan-verwachte afremming van de schok in het noorden plaatsvindt. Misschien was de schil niet zo zeer eenzijdig, maar onregelmatig gevormd. Afgezien van het feit dat de metingen iets zeggen over de voorgeschiedenis van de exploderende ster, geven ze ook inzicht in de reden waarom röntgensynchrotronstraling voornamelijk met het westelijk deel geassocieerd wordt. Zoals de gebroken lijn in figuur 2 laat zien is alleen in het westelijk deel de snelheid van de binnenste schok sneller dan 3000 km/s. Die 3000 km/s correspondeert met de theoretische limiet voor de emissie van röntgensynchrotronstraling.

Maar behalve snelle schokken is voor röntgensynchrotronstraling ook een turbulent magneetveld nodig...

Hoe chaotisch is het magneetveld?

Synchrotronstraling is intrinsiek gepolariseerd tot zo'n 70%. De polarisatierichting van de straling is loodrecht op de richting van het magneetveld. Al sinds de jaren zestig van de vorige eeuw kan de polarisatie van radiostraling gemeten worden. Voor Cas A en andere jonge supernovarestanten zijn die metingen nogal verrassend: de polarisatiefraction is verrassend laag – 5% voor Cas A – en de magneetvelden zijn radiëel georiënteerd, zoals de spaken van een wiel. De lage polarisatiefraction vertaalt zich in een turbulent magneetveld, waardoor de polarisatierichtingen door elkaar gehusseld worden. Maar de radiële richting is verrassend en nog steeds niet goed verklaard. Immers de schok versterkt dat deel van het magneetveld dat parallel aan het schokfront loopt. Je verwacht dus een tangentieel magneetveld. Mogelijke verklaringen voor een radiëel magneetveld richten zich op hydrodynamische instabiliteiten, maar die bevinden zich vooral binnen in de schil en niet zo zeer bij de schokfronten.

Een geheel nieuwe röntgensatelliet gewijd aan polarisatiemetingen, NASA/ASI's Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE gelanceerd op 9 december 2021) moest nieuwe inzichten verschaffen. Immers röntgensynchrotronstraling komt van dichtbij de schokfronten (zo'n 10¹² km) dan de radio-emissie. De eerste waarneming van IXPE was van Cas A [3] en ondergetekende viel de eer te beurt de analyse te coördineren. Het was na de waarneming al snel duidelijk dat het polarisatiesignaal zeer zwak was. Voor enkele individuele pixels kon polarisatie aangetoond worden op het drie sigma signaal-ruisniveau, met polarisatiefractionen van zo'n 5-10%. Dat lijkt significant, met een kans van 0,3% dat het om een toevalstreffer gaat. Het probleem is alleen dat er metingen in ongeveer tweehonderd

pixels zijn gedaan, en de kans op een drie sigma fluctuatie in één van die pixels is dan zo'n 45%. Een drie sigma detectie op pixelniveau is dus niet significant genoeg. Een impressie van de resultaten is te zien in figuur 3. Met een truc konden we polarisatie wel significant detecteren. Gebruikmakend van de min of meer sferische symmetrie van Cas A, herdefinieerden we Stokesparameters in polaire coördinaten en konden zo de polarisatiesignalen over grotere gebieden optellen. Op deze manier toonden we polarisatie aan met een polarisatiefraction van slechts 2-3% en een, netto, radiëel georiënteerd magneetveld. Dit is verrassend, want dicht bij de schokken verwachten we juist een tangentieel magneetveld. Omdat de synchrotronfilamenten dun zijn, betekent dit dat de magneetvelden al vrij snel achter het schokfront in radiële richting gedraaid moeten worden. Het mechanisme dat hiervoor verantwoordelijk is, is nog onbekend.

Bovenstaande resultaten werden min of meer los van elkaar uitgevoerd, één in klein teamverband, en het ander als onderdeel van een groot team, maar beide geven verrassende en nog niet volledig begrepen inzichten in de ontwikkeling van schokfronten, de kosmische stralingsversnelling die ze veroorzaken en de nogal raadselachtige eigenschappen van de magneetvelden achter die schokken.

REFERENTIES

- 1 J. Vink et al., *Astrophysical Journal* **929**, 57, *The Forward and Reverse Shock Dynamics of Cassiopeia A*, (2022) doi:10.3847/1538-4357/ac590f.
- 2 Wat gemeten is, is een verplaatsing aan de hemel, dus een hoeksnelheid, θ . De echte snelheid loodrecht op onze gezichtslijn is voor kleine hoeksnelheden in radialen, $v_{\perp} = \theta d$, met d afstand tot het object. Cassiopeia A staat op 11.000 ± 1000 lichtjaar afstand. Een snelheid van 5000 km/s correspondeert in dit geval met een hoeksnelheid van 0,31 boogseconde per jaar.
- 3 J. Vink et al., *X-ray polarization detection of Cassiopeia A with IXPE*, *Astrophysical Journal* **938**, 40 (2022) doi:10.3847/1538-4357/ac8b7b.
- 4 M. Weisskopf et al., *The Imaging X-Ray Polarimetry Explorer (IXPE): Pre-Launch*, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **8**, 026002, (2022) doi:10.1177/1. JATIS.8.2.026002
- 5 S. Orlando et al., *Evidence for past interaction with an asymmetric circumstellar shell in the young SNR Cassiopeia A*, *Astronomy & Astrophysics* **666**, A2 (2022) doi:10.1051/0004-6361/202243258.