

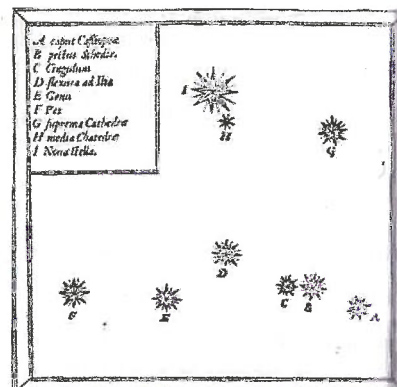
Historische supernova's (1)

Soms verschijnt er een ster aan de hemel die zo helder is dat hij overdag gezien kan worden. Het is in de geschiedenis een aantal keren voorgekomen dat een zogeheten 'nieuwe ster' gedurende meerdere maanden zichtbaar bleef. We weten nu dat dit geen nieuwe sterren zijn, maar sterren die ontploffen, en noemen ze supernovae. Op de plaatsen aan de hemel waar de historische supernovae gezien zijn vinden we met moderne apparatuur de overblijfselen van de ontploffing: de supernovarest.

In dit artikel bespreken we eerst de oude waarnemingen van de historische supernovae en in deel 2 de moderne identificaties van supernovaresten. Vervolgens bespreken we het verschil tussen supernovae van type Ia (witte dwergen die beginnen in te storten en vervolgens exploderen) en type II, Ib en Ic (zware sterren waarin de energie van de instortende kern tot explosieve expansie van de buitenlagen leidt). Ook bespreken we de technieken om historische supernovae te classificeren. Daarbij bijzondere aandacht voor een nieuwe techniek die het mogelijk maakt honderden jaren na de supernova toch nog een spectrum te maken. Op 11 november 1572 geloofde de Deense edelman en sterrenkundige Tycho Brahe zijn ogen niet: pas nadat

Frank Verbunt

Frank Verbunt is hoogleraar aan het Sterrenkundig Instituut Utrecht en doet onderzoek aan dubbelsterren met witte dwergen en/of neutronensterren, en aan de röntgenstraling uit het heelal.



Figuur 1: Een artist impression door Flammarion van de ontdekking. De inzet toont het sterrenbeeld Cassiopeia met de 'nieuwe ster' van 1572 zoals getekend door Tycho Brahe.



zijn bedienden en enkele voorbijgangers hadden bevestigd dat ook zij de nieuwe ster boven het sterrenbeeld Cassiopeia zagen, was hij van de echtheid overtuigd. Op 2 november had Jerome Munoz, wiskundige aan de universiteit van Valencia, op die plek nog niets gezien, maar op 6 november werd de ster waargenomen in Messina (Italië), in Wittenberg (Duitsland) en in Korea. De nieuwe ster benaderde de helderheid van Venus en Brahe merkte op dat iemand met goede ogen hem zelfs midden op de dag kon zien.

Brahe bepaalde de positie van de nieuwe ster zo precies mogelijk; moderne metingen laten zien dat hij er maar twee boogminuten naast zat (een vijftiende deel van de maandoorsnede). Brahe bestudeerde in de volgende maanden de helderheid van de nieuwe ster en vergeleek de magnitude achtereenvolgens met Venus, Jupiter, de helderste sterren van Cassiopeia en een zwakkere ster in hetzelfde sterrenbeeld. Daardoor kunnen we het verzwakken van de ster tamelijk nauwkeurig reconstrueren (zie figuur 2). De ster werd in maart 1574 door Brahe voor het laatst gezien en in China kon de nova tot april van hetzelfde jaar worden waargenomen.

De sterrenkundigen Thomas Digges in Cambridge (U.K.) en Michael Mästlin in Tübingen probeerden de afstand van de nieuwe ster te bepalen. Als de ster dichterbij stond dan de maan, dan zou hij aan het begin van de nacht in een enigszins andere richting staan dan aan het einde, omdat de aarde onder de ster door roteert. Deze verschuiving heet de (dagelijkse) parallax. Met een lineaal (Digges) of een draad (Mästlin) trokken ze lijnen aan de hemel tussen twee sterren, zo gekozen dat de lijnen vlak langs de nieuwe ster liepen (Figuur 3). Ze vonden geen verschuiving tussen de ster en de lijnen en bewezen daarmee dat de ster in ieder geval verder weg stond dan de maan.

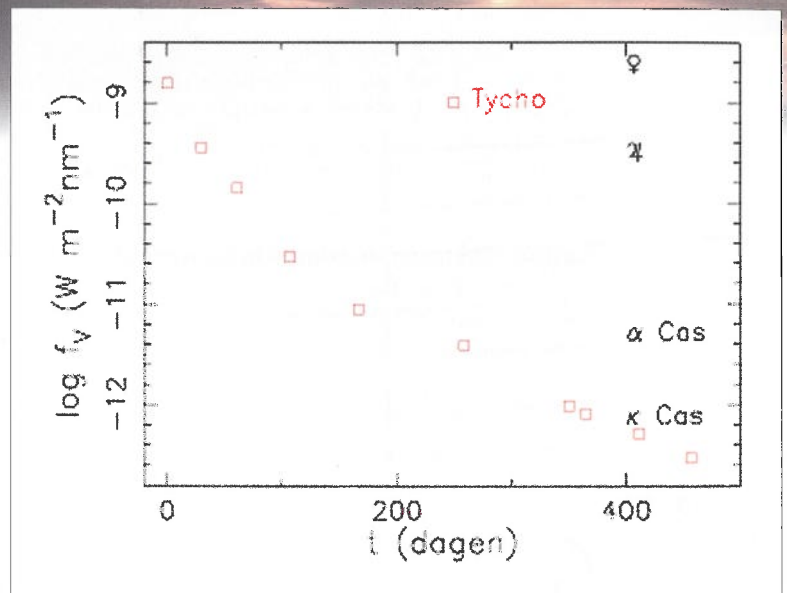
Wankelend wereldbeeld

De constatering dat deze ster verder weg stond dan de maan wekte enige beroering: in het wereldbeeld van de Griekse filosoof Aristoteles vormt de aarde het centrum van het heelal; de maan, de zon, Mercurius, Venus, Mars, Jupiter en Saturnus zitten vast aan kristallen bollen die om de aarde roteren. De maan is het dichtstbij, Saturnus het verst, en nog buiten Saturnus bevindt zich de sfeer (bol) der sterren. De maan en de planeten bewegen in onveranderlijke banen om de aarde en Aristoteles concludeerde dat alleen in het zogeheten 'ondermaanse' (de aarde en de aardatmosfeer) verandering mogelijk is. Het bovenmaanse daarentegen is volmaakt en onveranderlijk. Voor de christelijke godsdienst had Thomas van Aquino dit nog eens aangedikt door de veranderlijkheid van het ondermaanse met zondigheid te verbinden.

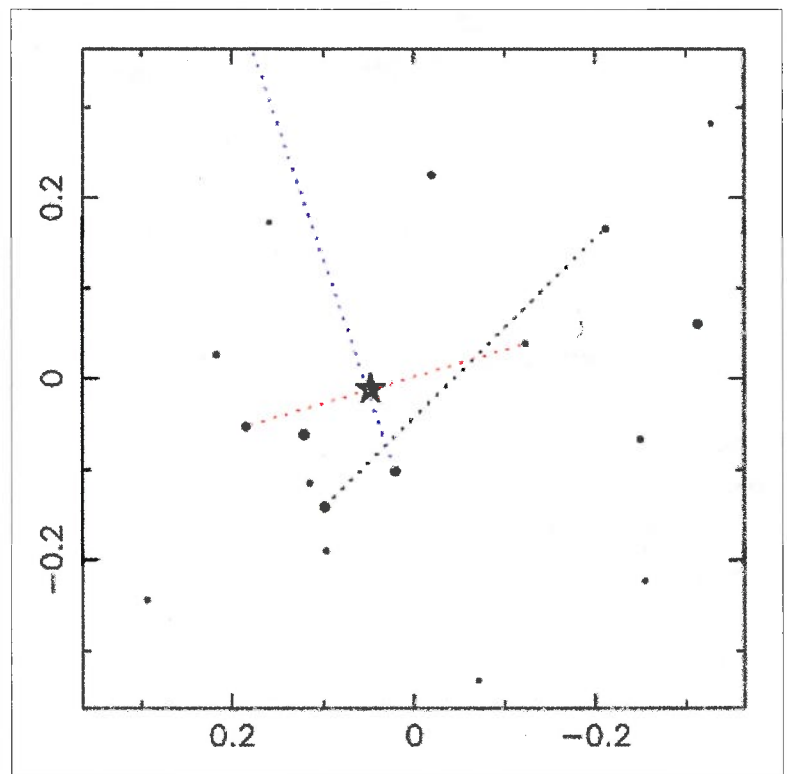
In 1543 gooide Copernicus dit beeld omver en liet zien dat alleen de maan om de aarde draait, maar de aarde en alle andere planeten om de zon. In 1572 was lang niet iedereen hiervan overtuigd. Het bewijs dat de dramatische verandering van een nieuwe ster verder weg had plaatsgevonden dan de maan ondermijnde de geloofwaardigheid van het oude wereldbeeld en steunde daarmee het wereldmodel van Copernicus.

Keplers waarnemingen

Begin oktober 1604 stonden Mars en Jupiter dicht bij elkaar aan de hemel. Op 8 oktober namen meerdere sterrenkundigen, onder wie Fabricius, deze samenstand waar, zonder iets vreemds op te merken. De dag erna, op 9 oktober, zagen een arts in Cosenza (Zuid-Italië) en



Figuur 2: het verloop van de helderheid van de nieuwe ster uit 1572. Tycho Brahe vergeleek de Nova Stella eerst met Venus en Jupiter en later met alpha en kappa Cas.



Figuur 3: de verbindingslijnen met behulp waarvan Thomas Digges en Michael Mästlin probeerden de parallax van de nieuwe ster uit 1572 te bepalen. Ze vonden geen verschuiving ten opzichte van de lijnen tussen alpha Cas en beta Cep (zwart), delta Cas en iota Cep (rood), beta Cas en lambda UMa. (blauw). De eerste lijn loopt niet erg dicht langs de nova, en ik vraag me daarom af of een andere ster werd gebruikt.

Ilario Altobelli in Verona nabij de planeten een nieuwe ster: zo helder als Mars volgens de arts, zo helder als Jupiter volgens de waarnemer uit Verona. De dagen daarna nam de helderheid van de nieuwe ster toe. Pas op 17 oktober kon Johannes Kepler door verbeterde weersomstandigheden de nieuwe ster zien en nam deze daarna regelmatig waar. Fabricius en Kepler bepaalden onafhankelijk van elkaar de positie van de nieuwe ster met een nauwkeurigheid van 0,5'!

Kepler hield de helderheid van de ster zorgvuldig bij door vergelijking met planeten en sterren en deed dit met onderbrekingen (door slecht weer en een samenstand met de zon) vanaf ongeveer 20 november 1604 tot

3 januari 1605. Ook van de nova uit 1604 kunnen we het verzwakken goed reconstrueren. De nieuwe ster werd ook in China en Korea opgetekend, maar de gegevens uit die landen zijn veel minder nauwkeurig dan die van de Europese sterrenkundigen.

Europa, China en de Islamitische wereld

Op dit punt is het nuttig om te bekijken hoe wij informatie van sterrenkundigen uit verschillende delen van de wereld hebben verkregen. Europese sterrenkundigen

waren veelal in dienst van universiteiten en soms waren ze rijk genoeg om zelf hun onderzoek te bekostigen, zoals Tycho Brahe deed. Soms waren ze in dienst van zo'n rijke sterrenkundige (zoals Kepler bij Brahe). Zowel Brahe als Kepler gaven boeken uit over de nieuwe ster die ze hadden waargenomen. Iedereen die de boeken gebruikte had dus exact dezelfde informatie, direct van de sterrenkundigen zelf afkomstig. Het is overigens interessant op te merken dat de boeken van Brahe en Kepler grotendeels aan de astrologische duiding van de nieuwe sterren zijn gewijd!

In China waren sterrenkundigen in dienst van de keizer. Ze rapporteerden aan ambtenaren bij de centrale regering en die ambtenaren vatten hun werk samen in de jaarboeken of kronieken. Tegenwoordig hebben we van die boeken alleen kopieën (overgeschreven). Zodoende is onze informatie over de waarnemingen van Chinese sterrenkundigen indirect, gefilterd door leken, altijd onvolledig en soms onjuist. In 1319 verzamelde Ma Duanlin in Hoofdstuk 294 van zijn boek 'Volledige Geschiedenis van de Beschaving' waarnemingen van nieuwe sterren van 134 voor Christus tot 1203 erna. Dit is onze belangrijkste bron voor Chinese waarnemingen aan historische supernovae. De sterrenkundigen in de islamitische wereld waren meestal in dienst van een vorst of van een moskee. In het algemeen hebben we van hun werk alleen latere, handgeschreven kopieën.

Chinese waarnemingen

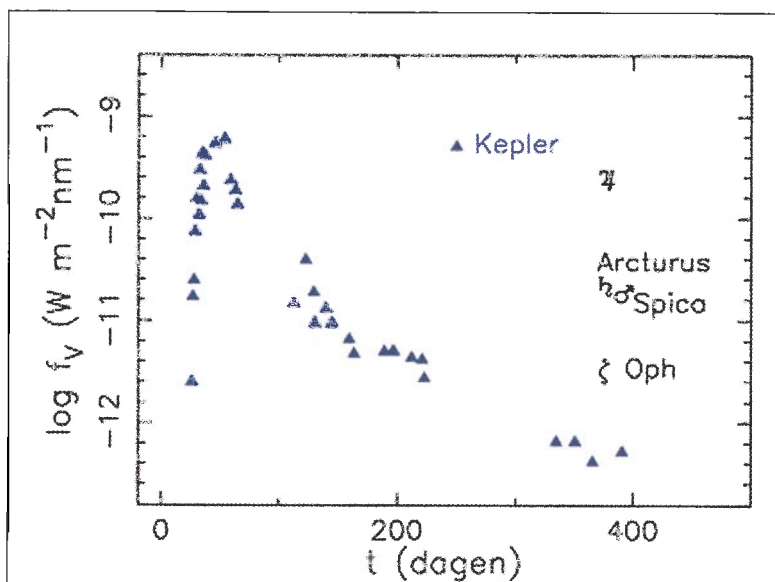
In de geschiedenis van de Soengdynastie in China staan verschillende teksten over een nieuwe ster in 1054; ze werden door de Leidse sinoloog 'Duyvendak op verzoek van de sterrenkundige Jan Oort uit het Chinees in het Engels vertaald. Enkele teksten volgen, voor het gemak met moderne datumaanduidingen:

'Op 4 juli 1054 verscheen een gastster, ongeveer een paar duim ten zuidoosten van T'ien-Kuan (zèta Tauri). Na meer dan een jaar werd de ster geleidelijk onzichtbaar.'

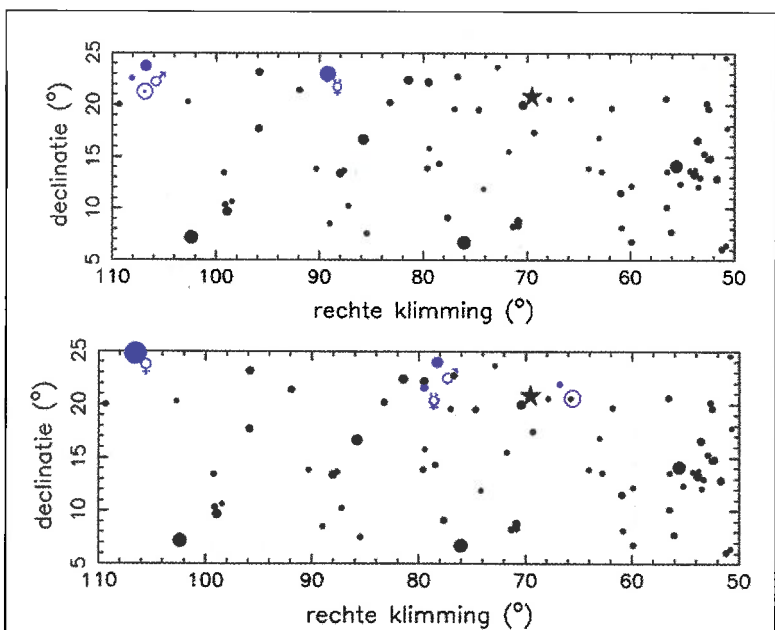
Op 17 april 1056 berichtte de Chef van het Sterrenkundig Bureau dat *'sinds juli 1054 een gast-ster verschenen in de morgen in de oostelijke hemelen, verblijvend in T'ien-Kuan, die pas nu onzichtbaar is geworden. Hij was overdag zichtbaar, net als Venus; en schoot in alle richtingen puntige stralen uit; de kleur was rood-achtig-wit. Alles bijeen was hij 23 dagen zichtbaar.'*

Gezien de eerdere teksten wordt vermoedelijk bedoeld dat de nieuwe ster gedurende 23 dagen overdag zichtbaar was. De nieuwe ster werd ook in Japan opgetekend en in Constantinopel (het huidige Istanboel). De uit Cairo afkomstige arts Ibn Butlun merkte op dat de verschijning van een 'spectaculaire ster in de Tweelingen' met ziekte-epidemieën zowel in Cairo als in Constantinopel gepaard ging.

Er is een probleem met de positie van de nieuwe ster die volgens de Chinese teksten ten zuidoosten van zèta Tau ligt, terwijl het overblijfsel (de Krabnevel) ten noordwesten van die ster ligt. Andere teksten zeggen dat de nieuwe ster zeta Tau 'bewaakt'. Richard Stephenson en David Green hebben posities van planeten berekend die door 11e eeuwse Chinese sterrenkundigen zijn aangeduid als 'de planeet bewaakt de ster' en vinden dat in vrijwel alle gevallen de planeet daarbij ten noorden van de ster staat. Om die reden, en omdat er geen andere jonge supernovarest nabij zèta Tau bekend is, mogen we de positie van de nieuwe ster gevoeglijk ten noordwesten van die ster aannemen.



Figuur 4: het verloop van de helderheid van de nieuwe ster uit 1604, volgend uit de vergelijkingen die Kepler en anderen maakten met Jupiter, Saturnus en Mars, en met de sterren Arcturus, Spica en zèta Oph.



Figuur 5: de hemel rondom de positie van de nieuwe ster uit 1054 op 4 juli (bovenste afbeelding) en 40 dagen eerder (onderste afbeelding). Rechts zien we de kop van de Stier (de Hyaden); de nieuwe ster is ingetekend op de plek van de Krabnevel. Mercurius en Mars staan in de Tweelingen, de laatste te dicht bij de zon om zichtbaar te zijn. Veertig dagen eerder stond de zon vlakbij de nieuwe ster die daardoor onzichtbaar was. Mercurius en Mars zijn ook naar rechts verschoven en links is Venus zichtbaar geworden.

Nieuwe sterren in 1181, 185 en 386

In de bovengenoemde compilatie uit 1319 van Ma Duanlin vinden we: 'Op 6 augustus 1181 verscheen een gastster' en 'Op 11 augustus bewaakte de gastster de 5e ster van Chuanshe'. De nauwkeurige aanduiding van de 5e ster laat ondubbelzinnige identificatie toe met de supernovarest 3C58 (de 58e bron in de 3e Cambridge catalogus van bronnen van radiostraling). Figuur 6 laat zien we dat deze nieuwe ster niet ver van de positie van de latere nieuwe ster van 1572 ligt. In meerdere teksten uit China en Japan wordt deze nieuwe ster beschreven. De nieuwe ster wordt omschreven als even helder als de helderste sterren en is dus niet overdag zichtbaar geweest. De laatste waarneming was op 6 februari 1182.

In de officiële 'Geschiedenis van de Handynastie' staat: 'Op 17 dec 185 verscheen een gastster binnen Nanmen (alpha en beta Cen) zo groot als een halve mat. Ze had de vijf kleuren en was zowel aangenaam als boos. Ze werd langzaam zwakker en verdween in de 6e maand van het navolgende jaar.' De Chinese term die hier met navolgend is vertaald kan zowel het nieuwe jaar aanduiden als het jaar daarna. Daarom weten we niet of de nieuwe ster 8 of 20 maanden zichtbaar bleef. Voor deze ster worden ook Romeinse teksten (in het Latijn) aangevoerd, maar die teksten zijn allemaal te vaag om als geloofwaardige beschrijvingen van deze nieuwe ster te worden geaccepteerd.

Tenslotte vinden we in de Geschiedenis van de Song-dynastie: 'In april 386 verscheen een gastster in de westelijke muur van Zigong. Ze duurde tot de 7e maand, toen ze verdween'. Omdat de data van eerste en laatste zichtbaarheid alleen als maand worden gegeven weten we niet of de ster 60 of 120 dagen zichtbaar bleef. Ook de positie is erg onzeker. Het kan zijn dat dit geen supernova was, maar een nova: een veel minder heftig verschijnsel.

De helderste nieuwe ster van allemaal: 1006

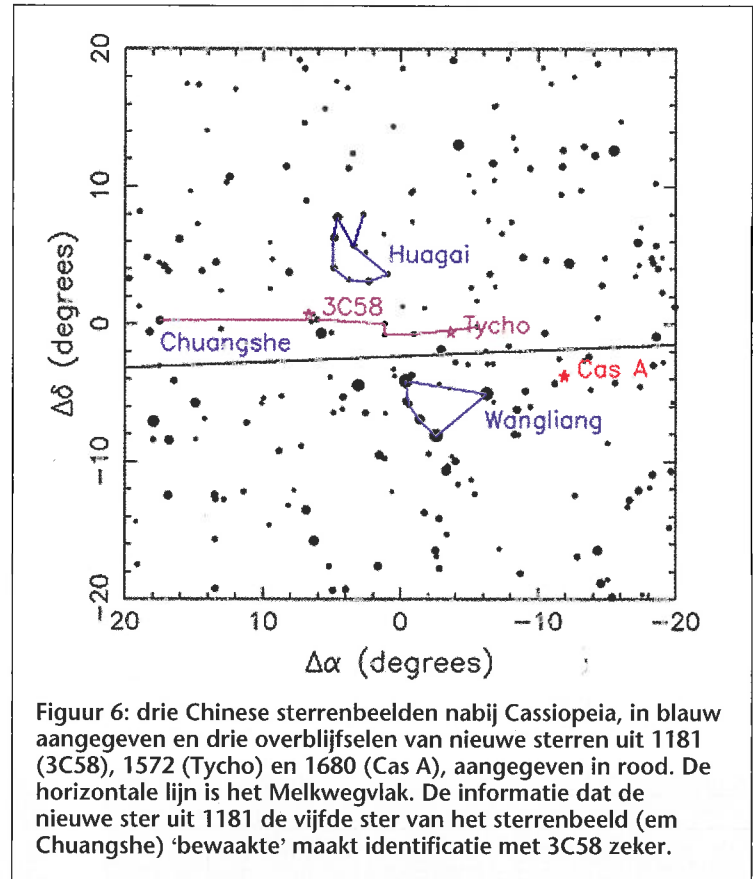
Aan het begin van de nacht van 1 mei 1006 werd zowel in China als in Japan een zeer heldere, geelkleurige nieuwe ster gezien, nabij het sterrenbeeld Di (rond alpha Lib). Later werd de ster nog helderder en op 6 mei 1006 was ze zo helder dat je 's nachts voorwerpen duidelijk kon zien. In september verdween ze achter de horizon om in december op dezelfde plek terug te keren. In september verdween ze opnieuw.

Het dagboek van een Japanse hoveling laat zien wat een nieuwe ster losmaakte: 'Ariyuki zei dat het een gastster was, Morohira dat het geen gastster was, maar het gezamenlijke licht van de sterren van Qichen Jiangjun'. Morohira kreeg meer steun in hun discussie en Ariyuka was zeer kwaad. Er werd voorspeld dat er binnen drie dagen een belangrijke nationale gebeurtenis zou plaatsvinden en in die tijd had de keizer grond voor bezorgdheid. De zeer heldere ster kreeg ook in het westen aandacht. Ali ibn Ridwan, arts in Cairo, schreef een commentaar op de Tetrabiblos (het astrologieboek van Ptolemaios) en merkt daarin op:

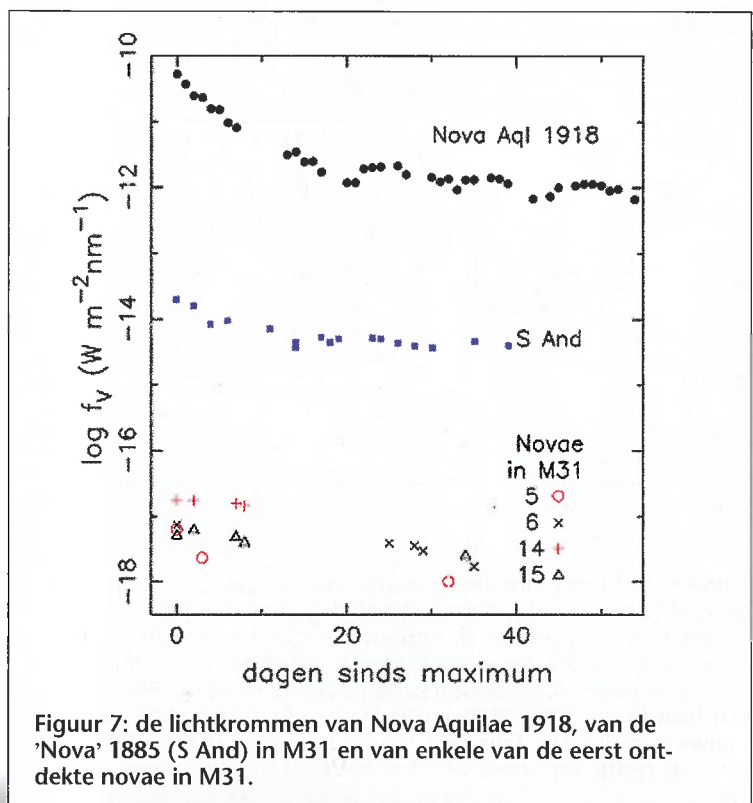
'Ik zal nu een spektakel beschrijven uit het begin van mijn studie. Die dag stond de Zon 15 graden in de Stier en het spektakel 15 graden in de Schorpioen. Het spektakel was een groot cirkelvormig lichaam, tweemaal zo groot als Venus. De hemel glom door haar licht. De intensiteit van haar licht was iets meer dan een kwart van het maanlicht.'

Men zegt wel dat nieuwe sterren in het middeleeuwse Europa genegeerd werden, omdat ze strijdig zouden zijn met de ideologie van de onveranderlijke hemel. De

monniken van het klooster van Sankt Gallen namen de nieuwe ster echter niet alleen waar, maar tekenden hem ook op. Bij het jaar 1006 in de Grote Annalen van dit klooster staat: 'Een nieuwe ster van ongewone grootte verscheen. Ze glinsterde en blonk in de ogen, wat voor onrust zorgde. Op een wonderlijke manier werd ze nu eens kleiner, dan weer breder en verdween bovendien soms. Ze werd nochtans gedurende drie maanden in het uiterste zuiden gezien, zuidelijker dan alle sterrenbeel-



Figuur 6: drie Chinese sterrenbeelden nabij Cassiopeia, in blauw aangegeven en drie overblijfselen van nieuwe sterren uit 1181 (3C58), 1572 (Tycho) en 1680 (Cas A), aangegeven in rood. De horizontale lijn is het Melkwegvlak. De informatie dat de nieuwe ster uit 1181 de vijfde ster van het sterrenbeeld (em Chuangshe) 'bewaakte' maakt identificatie met 3C58 zeker.



Figuur 7: de lichtkrommen van Nova Aquilae 1918, van de 'Nova' 1885 (S And) in M31 en van enkele van de eerst ontdekte novae in M31.

den die we in de hemel zien.' Blijkbaar kwam de nieuwe ster maar net boven de zuidelijke horizon (die in Sankt Gallen door de berg Santis wordt bepaald), en dit verklaart wellicht ook de veranderlijke helderheid.

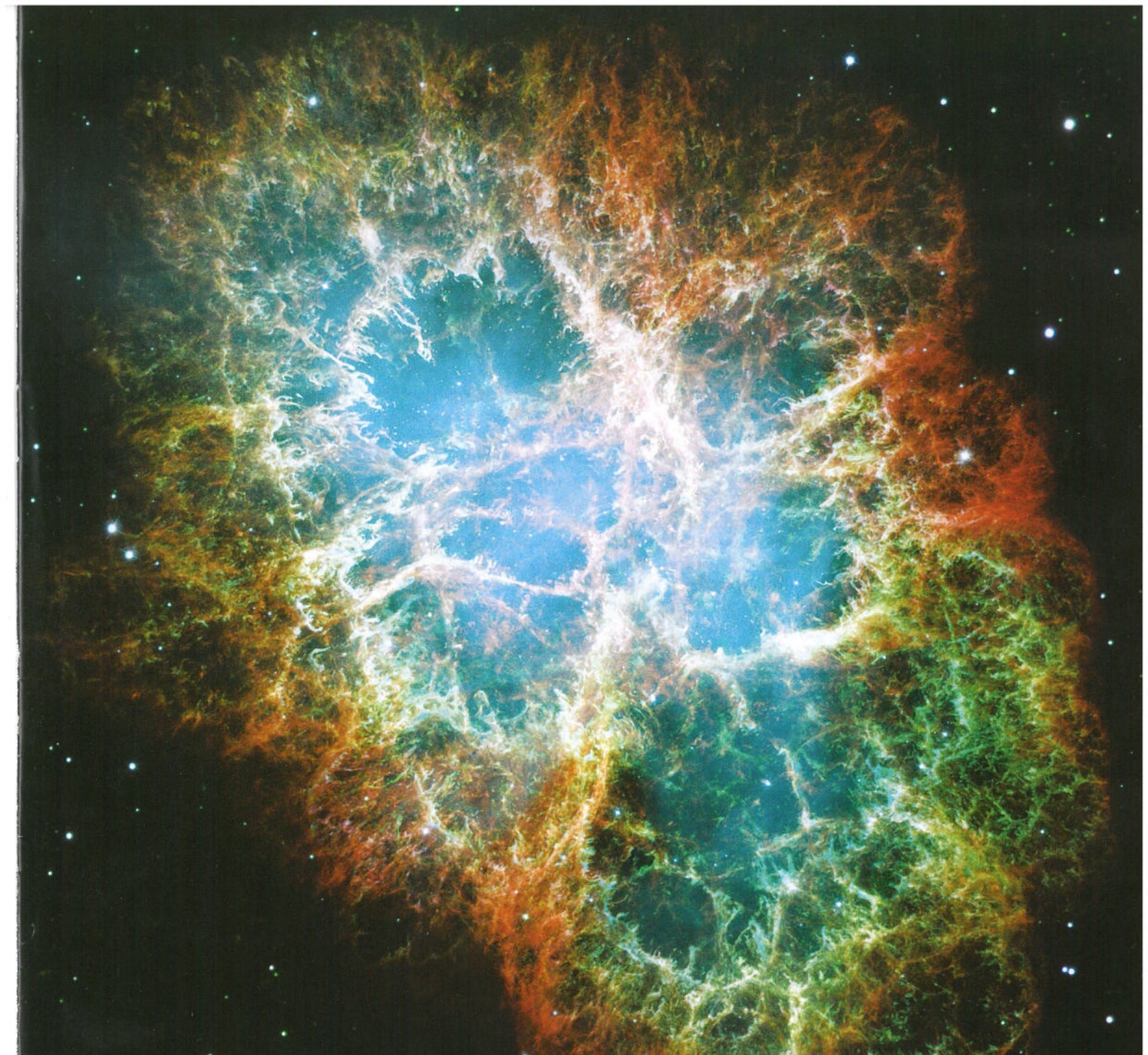
SN1054, de Krabnevel en neutronensterren

Het verschijnen van 'nieuwe sterren' was de sterrenkundigen al lang bekend, maar het zou tot de 20ste eeuw duren voor het duidelijk werd wat de aard van deze objecten is. Daarbij speelt de Krabnevel de hoofdrol. In 1846 vertaalde de Franse sinoloog Edouard Biot Hoofdstuk 249 van Ma Duanlins werk en in 1871 vertaalde de Engelsman John Williams deels dezelfde en deels andere Chinese waarnemingen. Op basis hiervan liet de Zweedse sterrenkundige Knut Lundmark zien dat de door de Chinezen waargenomen novae aan de hemel rond het Melkwegvlak zijn verdeeld, net als moderne novae. Dit bevestigt de betrouwbaarheid van de Chinese waarnemingen. In 1921 was het verschil tussen novae en supernovae nog niet bekend. In hetzelfde jaar vergeleek John Duncan foto's van de Krabnevel uit 1909 en 1921. Hij merkte op dat de nevel groter was geworden en schatte dat de uitdijning zo'n 500 jaar eerder was begonnen. Edwin Hubble verfijnde de leeftijd in 1928 tot zo'n 900 jaar zodat de uitdijning terug te voeren is op de nova uit 1054. Daarmee werd duidelijk dat de nova uit 1054 met de Krabnevel verbonden is, een conclusie die definitief werd na de bovenaangehaalde onderzoekingen uit 1943 van Oort en Duyvendak.

Gaandeweg werd het duidelijk dat er onderscheid moest worden gemaakt tussen novae en supernovae. Dit was het gevolg van de studie aan de Andromedanevel. In 1885 was er een nova in deze nevel ontdekt, die de naam S And. kreeg. Deze nova was bij het maximum ongeveer tienduizend keer zwakker dan bijvoorbeeld de

nova die in 1918 in de Arend was waargenomen en hieruit concludeerde men dat de Andromedanevel ongeveer honderd keer zo ver stond als die nova en een nevel in ons sterrenstelsel is. Vanaf 1910 ontdekte men op opnamen met de nieuwe Lick telescoop echter novae in M31 die nog eens duizend keer zwakker waren, dan S And. (zie figuur 7). Als dat gewone novae waren dan stond M31 drieduizend keer verder dan Nova Aql. 1918, en dan was S And. allesbehalve een gewone nova. De ontdekking door Hubble van variabele sterren van het type delta Cephei bevestigde dit. S And. was meer dan duizend keer helderder dan gewone novae: geen nova maar een supernova! Als de Andromedanevel zo'n grote afstand heeft, moeten de andere spiraalstelsels die we veel kleiner zien nog veel verder weg staan, en de daarin opvlammende en weer verdwijnende sterren zijn allemaal zeer energetische supernovae. Waar komt de energie voor deze ontploffingen vandaan?

In 1932 werd het neutron ontdekt. Walter Baade en Fritz Zwicky lieten zien dat een ster die helemaal uit neutronen bestaat een straal van zo'n tien kilometer zou hebben en rekenden uit dat er een geweldige hoeveelheid energie vrijkomt als de kern van een ster tot zo'n klein bolltje instort. Ze suggereerden dat dit de energiebron van supernovae is, al waren de details nog onduidelijk. De bevestiging van dit idee kwam in 1967, toen er in de Krabnevel een radiobron werd ontdekt die elke seconde 30 keer pulst. Als de pulsperiode de rotatieperiode van de bron is, moet de bron kleiner zijn dan 1500 km, anders zou het oppervlak een rotatiesnelheid hebben die groter is dan de lichtsnelheid. Blijkbaar is de radiopulsar een neutronenster. De Krabnevel speelt zo een belangrijke rol in ons begrip: ze bewijst dat supernovae inderdaad met de vorming van een neutronenster gepaard kunnen gaan.



Historische supernova's (Slot)

In het eerste deel van dit artikel (Zenit maart, pagina 108) bespraken we de oude waarnemingen van de historische supernova en de moderne identificaties met supernovares-ten. In dit tweede deel gaan we in op het verschil tussen een supernovae van type Ia (witte dwergen die beginnen in te storten en vervolgens exploderen) en type II, Ib, en Ic (zwarte sterren waarin de energie van een instortende kern tot explosieve expansie van de buitenlagen leidt), alsmede de technieken om historische supernovae als een van deze typen te classificeren. Daarbij wordt met name een nieuwe techniek besproken die het mogelijk maakt honderden jaren na de supernova toch nog een spectrum te maken.

De Krabnevel, overblijfsel van een supernova-explosie, herbergt een neutronenster. Charles Messier zag de nevel in 1758, maar de werkelijke ontdekking wordt toegeschreven aan de amateurastronoom John Bevis die de nevel 27 jaar eerder vond. (Foto: NASA/ESA)

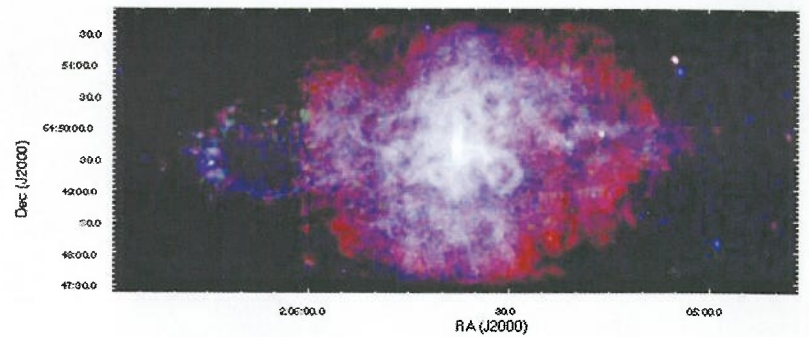
Frank Verbunt

Frank Verbunt is hoogleraar aan het Sterrenkundig Instituut Utrecht. Hij doet onderzoek aan dubbelsterren met witte dwergen en/of neutronensterren, en aan de röntgenstraling uit het heelal.

Na de ontdekking van het verband tussen SN1054 en de Krabnevel ging men naarstig op zoek naar de resten van andere historische supernovae. Dat viel niet mee, omdat de beschrijving van de positie aan de hemel vaak erg vaag is. Toch zijn er inmiddels enkele successen geboekt. Het makkelijkst was dit voor de resten van de door Tycho en Kepler waargenomen supernovae; de posities waren met een hoge nauwkeurigheid opgetekend. Op die posities werden in 1952 respectievelijk 1957 ringvormige bronnen van radiostraling gevonden (figuur 1). We interpreteren deze ringen als projecties van een bolvormige schil. Ook optisch werden (stukken van) de schillen waargenomen. De resten van SN1572 en SN1604 worden tegenwoordig kort aangeduid als Tycho en Kepler. Hun holle schillen vormen een opmerkelijk contrast met de gevulde Krabnevel. De afwezigheid van straling uit het centrum wijst erop dat Tycho en Kepler geen neutronenster bevatten of dat beide neutronensterren op zijn best niet erg actief zijn.

Langzamere uitdijning

In 1999 ontdekten Richard Stephenson en David Green een oude Chinese tekst die SN1181 naast de vijfde ster van het sterrenbeeld Chuanse plaatst: dat valt precies samen met een uitdijende nevel die een sterke bron van radio- en röntgenstraling is. In de nevel bevindt zich een pulsar (figuur 2). Identificatie met de supernova uit 1181 lijkt daarom zeker, maar de meting van de uitdijingssnelheid van de nevel geeft een langzamere uitdijning (en



Figuur 2: Het overblijfsel van supernova 1181, met in het midden de onverwacht koude neutronenster.

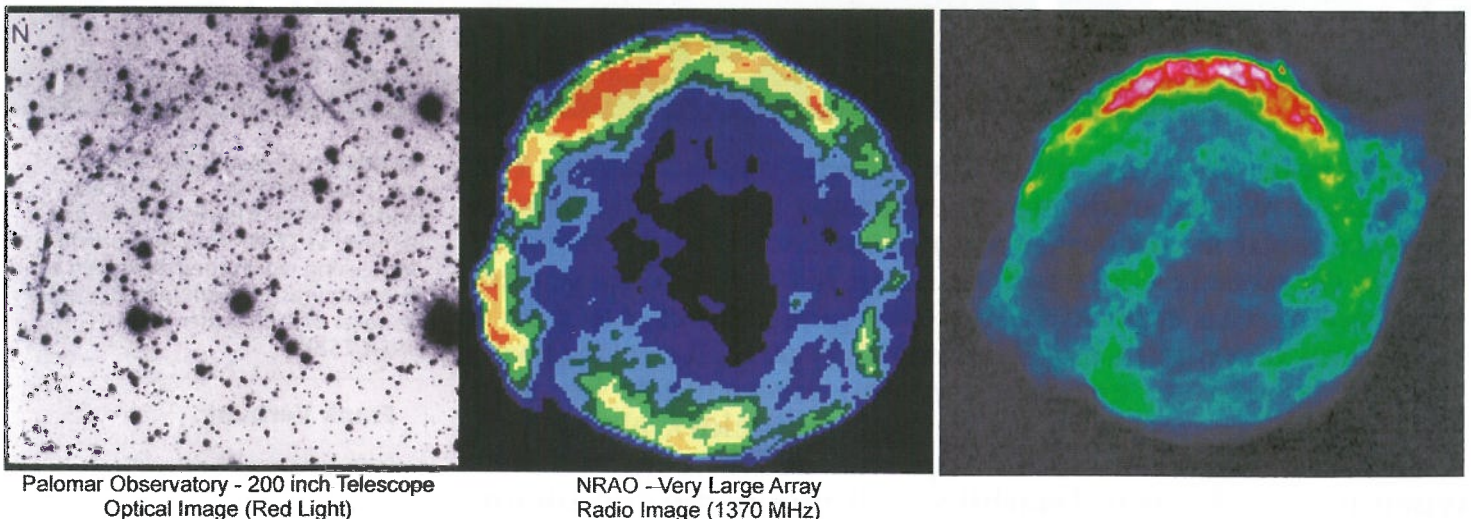
duis een oudere leeftijd) dan verwacht mag worden voor een ontploffing uit 1181. De meningen over de geloofwaardigheid van de identificatie zijn daarom verdeeld. Als de identificatie correct is, verschaft ze zeer interessante informatie over de afkoeling van neutronensterren. De röntgenstraling die van het oppervlak van de neutronenster komt, heeft een temperatuur van minder dan een miljoen graden. Neutronensterren zijn onmiddellijk na hun vorming extreem heet en ze koelen voornamelijk af door de uitzending van neutrino's; extreem lichte deeltjes die vrijkomen als een elektron en een proton samensmelten tot een neutron, en ook weer als het neutron uiteenvalt in een proton en een elektron.

Ontsnappende neutrino's

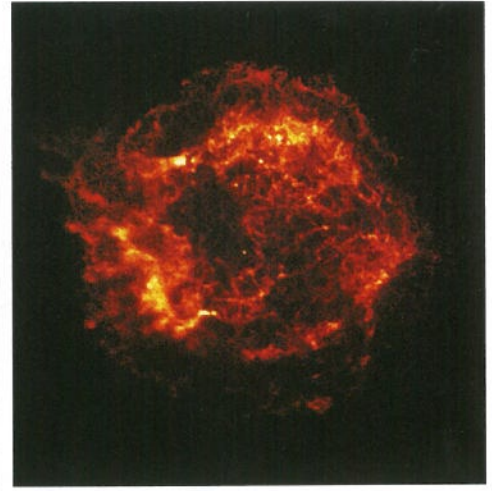
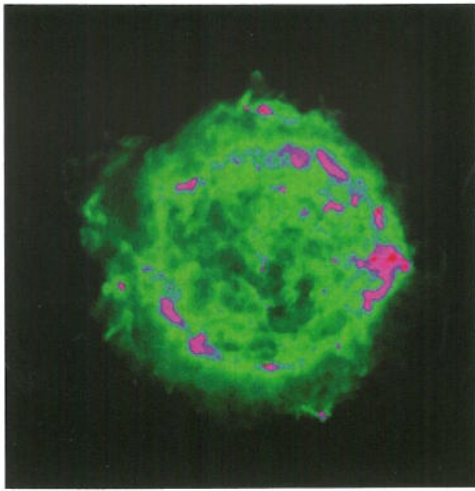
In de jonge, hete neutronenster worden voortdurend neutronen gevormd die uiteenvallen. De daarbij vrijkomende neutrino's ontsnappen vrijwel direct uit de neutronenster. De energie die ze daarbij meenemen leidt tot een snelle afkoeling

van de neutronenster tot de temperatuur zo laag wordt dat de neutronen niet meer uiteen kunnen vallen. Daarna kan, zo dacht men, een neutronenster alleen nog via straling van het oppervlak afkoelen en omdat het oppervlak zo klein is, is dit een erg inefficiënt proces. Het oppervlak van een neutronenster zou na duizend jaar nog altijd vijf miljoen graden heet moeten zijn – zoals in de Krabpulsar. Een mogelijke verklaring voor de lage temperatuur van de pulsar in SN1181 is dat deze neutronenster wat zwaarder is dan de Krabpulsar; daardoor zou een neutron bij een botsing met een ander neutron voldoende energie kunnen krijgen om toch weer uiteen te vallen in een proton en een elektron. Het daarbij vrijkomende neutrino ontsnapt en neemt energie mee, evenals het neutrino dat vrijkomt als het proton en elektron weer combineren tot een neutron. Dit werd door George Gamov het URCA-proces genoemd, naar een casino in Rio de Janeiro, 'Omdat energie net zo snel verdwijnt uit de kern van neutronensterren als geld van de rou-

3C 10 - TYCHO'S SUPERNOVA REMNANT



Figuur 1: Overblijfselen van de supernovae uit 1572 (Tycho) en 1604 (Kepler). Links een optisch plaatje van Tycho, midden en rechts radio-plaatjes van Tycho en Kepler.



lette-tafels'. Helaas is het tot nog toe niet mogelijk om de massa van de pulsar in SN1181 te meten en daarmee deze theorie te onderzoeken.

Kosmische straling

Een andere interessante identificatie is die van de radio- en röntgennevel RCW86 met de supernova uit 185. Deze identificatie volgt vooral uit de meting van de uitdijning. Ook deze bron is zeer interessant, omdat ze ons de oorsprong van kosmische straling laat zien. Kosmische straling is de naam die we geven aan de extreem energetische deeltjes die de aarde vanuit het heelal voortdurend treffen en die gelukkig door de aardatmosfeer grotendeels worden tegengehouden. We denken dat veel van deze deeltjes hun hoge energie krijgen uit de snelle expansie van resten van supernovae. Het gas van de ontplofte ster beweegt met een snelheid van ruim tienduizend km/s door de ruimte, botst op het ijle aanwezige interstellair gas en veegt dit op. Daarbij ontstaat een schokfront, een scherpe overgang tussen het met hoge snelheid aanvliegende gas en het al eerder aangekomen, sterk afgeremde gas. De plotselinge afremming veroorzaakt een verhitting van het gas, waarbij de temperatuur kan oplopen tot miljoenen graden. In de schok ontstaat ook een sterk magneetveld dat geladen deeltjes – de van hun elektronen beroofde atoomkernen en de elektronen zelf – tot enorme snelheden kan versnellen; daarmee wordt de schok een bron van kosmische straling. De Utrechtse sterrenkundigen Jacco Vink en Eveline Helder hebben in een recent onderzoek laten zien dat die kosmische straling veel energie uit de schok meeneemt, zodat het afgeremde gas koeler is dan men zonder dit verlies zou berekenen.

Figuur 3: Het overblijfsel van de ongeziene supernova rond 1680 in radiostraling (links), optische straling (midden) en röntgenstraling (rechts). Het puntje in het centrum van het röntgenplaatje is de neutronenster die onzichtbaar is in radiostraling en zichtbaar licht.

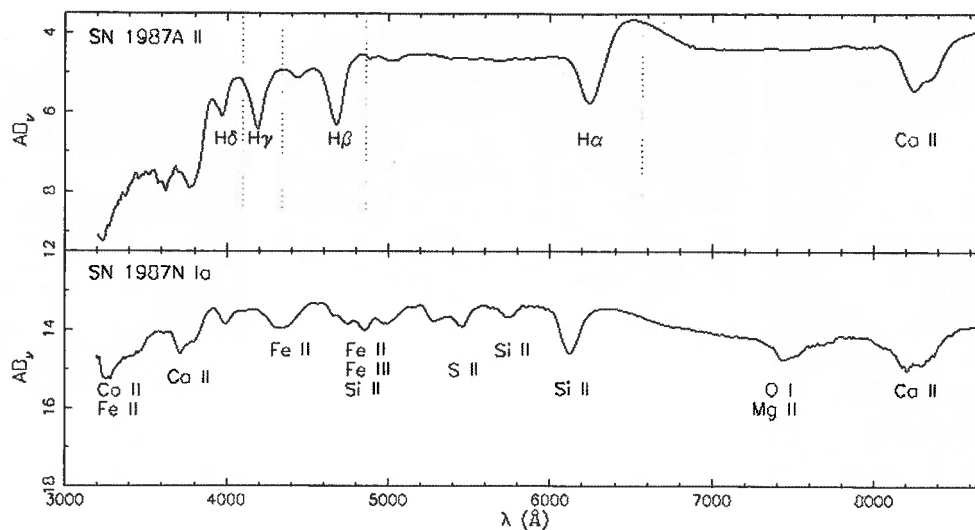
Supernovarest zonder supernova?

De helderste radiobron aan de hemel is Cas A; de naam geeft aan dat het de helderste radiobron in het sterrenbeeld Cassiopeia is. Deze radiobron blijkt een expanderende wolk gas die er precies zo uitziet als een rest van een supernova (figuur 3).

Door aan de hand van de snelle uitdijning terug te rekenen kan men vrij nauwkeurig bepalen dat de ontploffing omstreeks 1680 moet hebben plaatsgevonden. Maar de supernova is op aarde niet gezien en ook al staat Cas A niet verder weg dan andere supernovae die wel zijn waargenomen.



Figuur 4: Voorbeeld van een supernova in een spiraalstelsel: linksonder zien we SN1994D (de 4e in 1994 ontdekte supernova) in het spiraalstelsel NGC4526.



Figuur 5: Optische spectra van twee supernovae. Het bovenste spectrum, van type II SN1987A, toont sterke lijnen van waterstof (H). Het onderste spectrum, van type Ia SN1987N, vertoont vooral lijnen van zwaardere elementen zoals ijzer (Fe) en kiezal (Si).

De allereerste foto van de röntgensatelliet Chandra liet zien dat er in het centrum van de expanderende nevel een zwakke röntgenbron aanwezig is. Uit de energie van de röntgenstraling kan de temperatuur van de bron worden bepaald. Uit de totale hoeveelheid röntgenstraling volgt dan de straal van de bron en deze is 400 meter: dat is veel kleiner dan we voor een neutronenster verwachten en geeft ons een fikse puzzel. Een mogelijke verklaring is dat de neutronenster geen atmosfeer heeft, maar een vast oppervlak: bij dezelfde temperatuur zendt een vast oppervlak minder straling uit dan een atmosfeer. Deze oplossing werpt echter meteen een andere vraag op: waarom zou de ene neutronenster (Cas A) geen atmosfeer hebben en andere neutronensterren (zoals de Krabpulsar) wel? We weten het niet.

Twee typen supernovae en hun natuurkunde

Na de ontdekking dat de Andromedanevel een compleet sterrenstelsel is, net zoals ons eigen Melkwegstelsel, begreep men dat veel objecten die we met kijkers als spiraalstelsels of als elliptische stelsels waarnemen, op enorme afstanden van ons staan. En dat de in deze nevels opvlammende en weer verdwijnende sterren allemaal supernovae zijn (zie figuur 4). Een studie van deze extragalactische supernovae laat zien dat er twee typen zijn, zoals voor het eerst opgemerkt door Minkowski in 1943. In eerste instantie onderscheiden de typen zich door de snelheid waarmee ze na de ontploffing weer verdwijnen: supernovae van type I zijn na honderd dagen ongeveer honderd keer zwakker geworden, en die van type II tien tot dertig keer zwakker. In optische spectra zien we bij type II sterke lijnen van waterstof,

met een naar het blauw verschoven absorptie en een naar het rood verschoven emissie; bij type Ia zien we geen waterstof, maar zuurstof, ijzer, kiezal en magnesium (figuur 5). Tegenwoordig onderscheiden we de verschillende types op basis van de onderliggende natuurkundige processen.

Het type II correspondeert met de ontploffing van een zware ster of preciezer: de kern van een zware ster stort in tot een neutronenster en de daarbij vrijkomende energie werpt de buitenste lagen van de zware ster af. De buitenste lagen van de ster bestaan uit dezelfde elementen als de zon: voornamelijk waterstof en helium. De lijnen van die elementen zien we in optische spectra van zulke supernovae terug. De lagen die net buiten de imploderende kern liggen bestaan onder meer uit zuurstof, neon en magnesium. Deze elementen zien we in de röntgenspectra zoals waargenomen met de in 1999 gelanceerde grote observatoria voor röntgenstraling Chandra en XMM-Newton. Daardoor weten we dat de supernovarest die Cas A achterliet van dit type moet zijn geweest. De zware buitenlagen worden pas na meer dan honderd dagen doorzichtig voor zichtbaar licht en daarom blijft een supernova van type II lang zichtbaar. De snelle verdwijning van een supernova van type I wijst op een veel minder zware expanderende buitenlaag.

Drie types I

Er zijn drie types I: een zware ster in een dubbelster kan zijn buitenlagen aan een begeleider kwijtraken voordat hij ontploft. De atmosfeer van zo'n ster vlak voor de ontploffing bestaat voornamelijk uit helium en het optische spectrum van de supernova vertoont geen waterstof, maar he-

lium. Dit type wordt Ib genoemd. Een nog zwaardere ster blaast zijn buitenste lagen weg voordat de kern implodeert, zodat ten tijde van de ontploffing zowel waterstof als helium al zijn weggeblazen. Zo'n type wordt Ic genoemd en de kern van zulke (aanvankelijk) enorm zware sterren stort vermoedelijk in tot een zwart gat. Dat de types Ib en Ic met zware sterren corresponderen zien we aan de elementen neon en magnesium die met behulp van röntgenwaarnemingen in de supernovaresten worden gevonden.

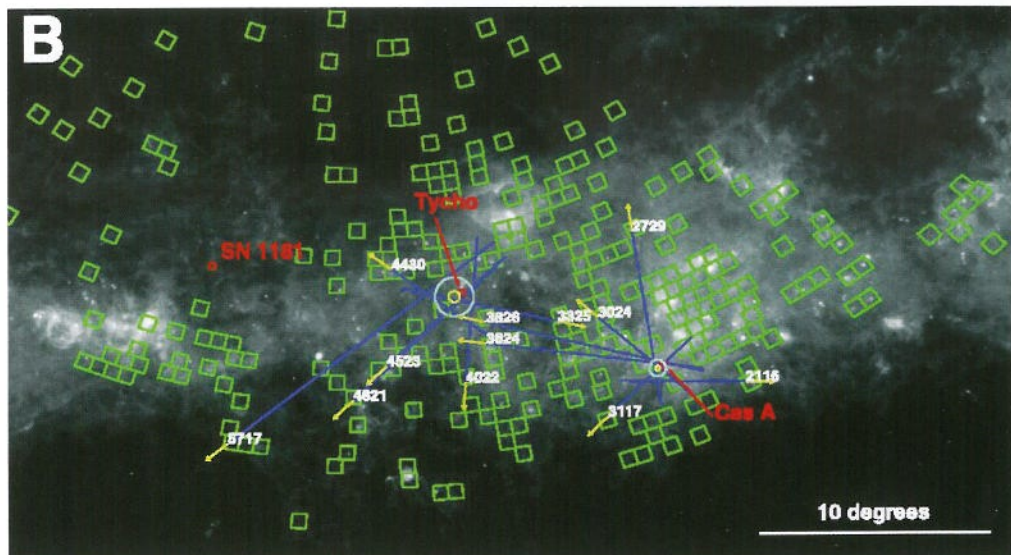
De supernova van type Ia is heel anders. De voorloper van dit type is een witte dwerg die materie van zijn begeleider vangt. Die ingevangen materie vormt een laagje bovenop de witte dwerg, en als de laag dik genoeg is kan de waterstof in de laag gaan fuseren tot helium. In veel gevallen fuseert de hele laag waterstof in een keer en daarbij komt voldoende energie vrij om de hele atmosfeer van de witte dwerg enorm te laten opzwellen. De witte dwerg wordt daarbij heel helder en dit verschijnsel nemen we waar als een nova. Nadat de uitgedijde atmosfeer is afgeworpen begint de materieoverdracht van begeleider naar witte dwerg opnieuw en moeten we wachten tot de nieuwe laag weer voldoende dik is.

Uit de theorie van kernfusie kunnen we afleiden dat in bijzondere omstandigheden, met name in geval van een voldoende tempo van materie-overdracht, de kernfusie permanent en stabiel is. In zo'n geval wordt de ingevangen materie niet afgeworpen, maar blijft op de witte dwerg. De witte dwerg wordt dan alsmaar zwaarder tot de maximaal mogelijke massa wordt bereikt van iets minder dan anderhalf maal die van de zon. Op dat moment stort de

ster in. Tijdens deze implosie komt kernfusie op gang en wel met een zodanige efficiëntie dat de hierbij vrijkomende energie de implosie omzet in een explosie: de hele witte dwerg wordt uiteengereten. De enorme helderheidtoename zien we als een supernova van het type Ia. De explosieve kernfusie leidt er toe dat de rest van zo'n supernova vooral uit nikkel en ijzer bestaat.

De aard van historische supernovae

De supernovaresten van historische supernovae zijn onder andere interessant omdat we hun precieze leeftijd kennen. We zagen al dat dit informatie verschaft over de snelheid waarmee een neutronenster kan afkoelen. De leeftijd is ook interessant voor de studie van de uitdijning van de supernovarest. Klopt ons idee dat neutronensterren alleen in supernovae van type II en Ib worden gevormd? En dat zwarte gaten uit type Ic komen? Om deze vragen te beantwoorden zoeken we ijverig naar neutronensterren in de centra van de historische supernovaresten en proberen we vast te stellen van welk type de historische supernovae waren. De eerst toegepaste methode is gebaseerd op het tempo van de verandering van helderheid. Helaas

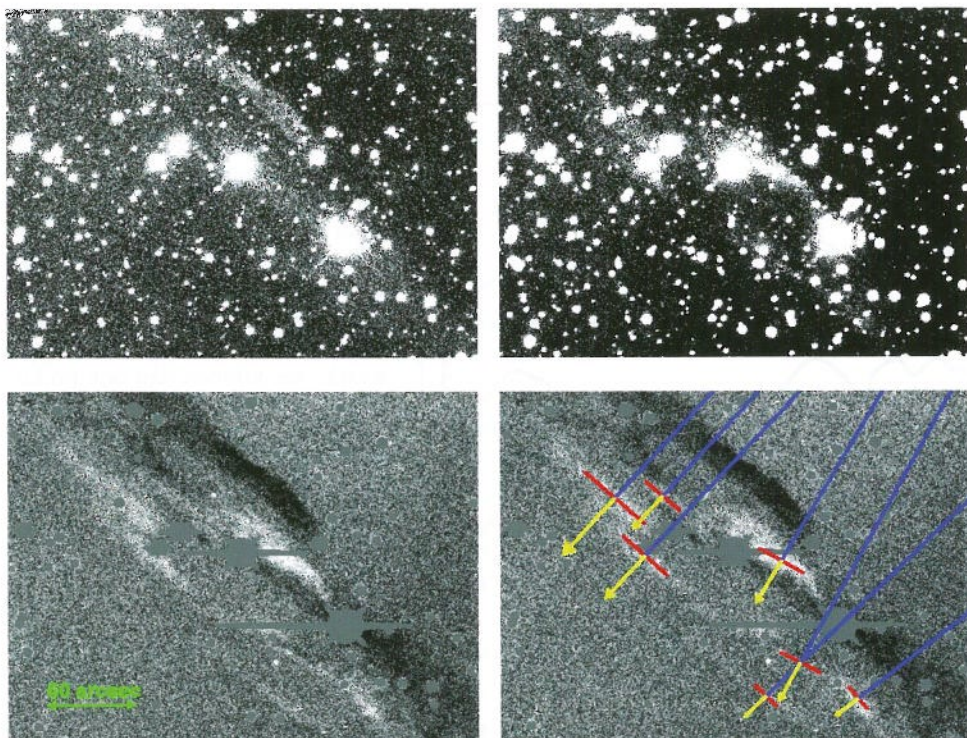


Figuur 7: In elk groen vierkantje op deze plaat is naar lichtecho's gezocht. De gele pijlen geven aan in welke richting het licht reist, en de blauwe lijnen waar het licht vandaan komt. We zien dat er twee bronnen van licht zijn: Cas A en Tycho. Omdat supernovae uit zware sterren komen en alle zware sterren in het Melkwegvlak liggen, verwachten we dat de supernovaresten ook in het Melkwegvlak liggen. Voor drie historische supernovae is in dit plaatje mooi te zien dat dat klopt.

hebben we daarover alleen voldoende informatie bij de in Europa waargenomen supernovae van 1572 en 1604. Beide werden ongeveer honderd keer zwakker in honderd dagen en dit wijst op type I. Verdere informatie krijgen we uit de röntgenspectra van de historische supernovae. Dankzij Chandra en

XMM-Newton kunnen we de aanwezigheid van een aantal elementen vaststellen. Toch blijkt het moeilijk om de precieze hoeveelheden van de verschillende elementen te bepalen. Dit komt vooral doordat de 'zichtbaarheid' in het röntgenspectrum van verschillende elementen sterk afhangt van de temperatuur: als

het gas te koud is zendt het geen röntgenstraling uit, en als het gas te heet is komt de röntgenstraling vooral van vrije elektronen en geeft ze geen informatie over de aanwezige atoomkernen. We menen te kunnen concluderen dat Cas A het overblijfsel is van een supernova van type II en Tycho van een type Ia. Een derde methode is het zoeken naar een neutronenster in het midden van de supernovarest. Is dat het geval, dan hebben we met een type II of Ib te maken. Als we geen neutronenster zien, dan kan dat betekenen dat er geen is, of dat hij te zwak is om waargenomen te worden. In Kepler en Tycho is tot nog toe geen neutronenster gevonden;



Figuur 6: Lichtecho's van een supernova en de richting waar het licht vandaan komt. Linksboven een opname van 20 oktober 2006 van een stuk van ongeveer 5' x 4'. Rechtsboven een opname van 13 december 2007. Als we het eerste plaatje van het tweede plaatje aftrekken, krijgen we het plaatje linksonder, waar de eerder verlichte wolken donker zijn en de later verlichte wolken helder. Blijkbaar beweegt het licht naar linksonder, zoals in het plaatje rechtsonder met gele pijlen aangegeven. Dat licht komt dan uit de met blauw aangegeven richting.



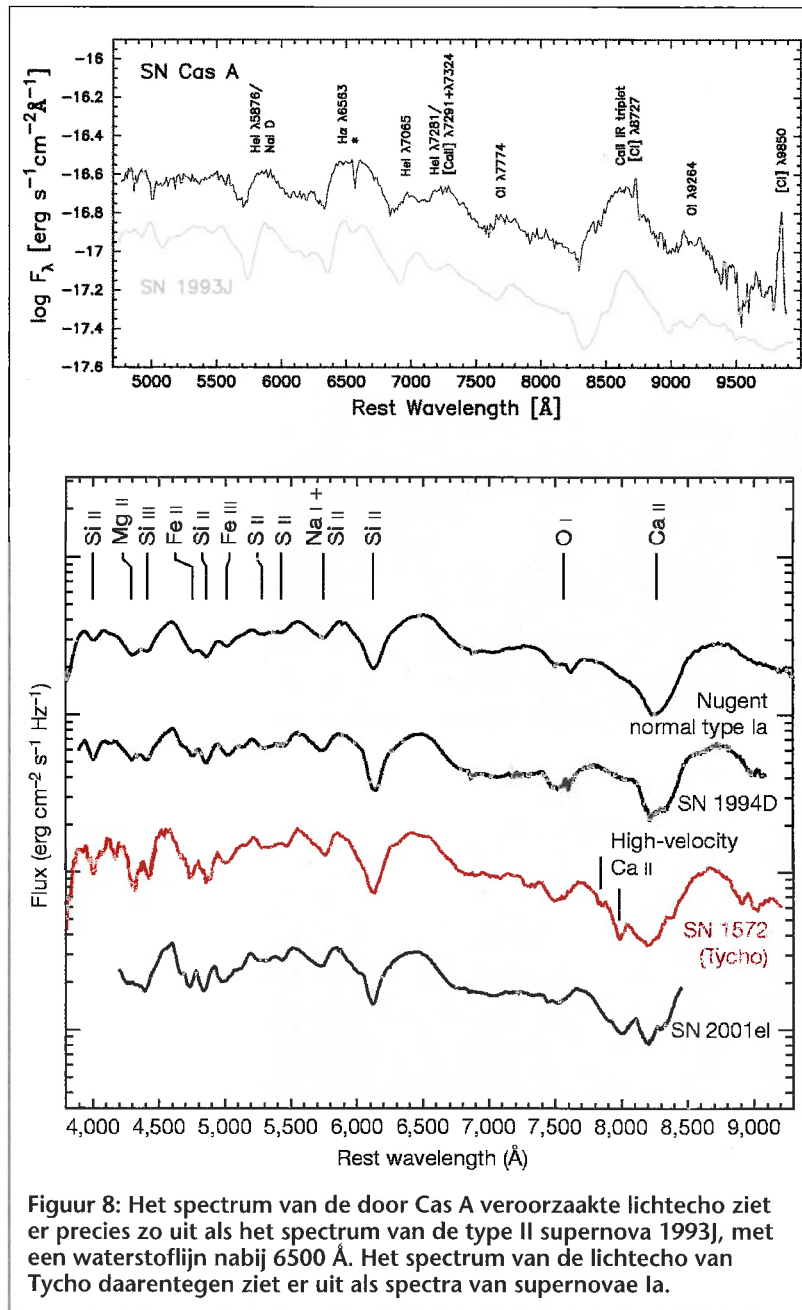
dat klopt, want uit de lichtkrommen maakte men al op dat deze supernova's van type Ia zijn. In Cas A en SN1181 zijn wel neutronensterren gevonden en deze zouden dus van type II of Ib moeten zijn.

Een nieuwe methode!

Het afgelopen jaar is er een vierde, zeer spectaculaire methode bijgekomen: het opnemen van spectra van de supernova, honderden jaren na dato! Hoe kan dit? Het begon met de ontdekking van plots oplichtende wolken en het inzicht dat deze wolken oplichten door het licht van een ontploffende supernova (figuur 6). De waarneming van een serie wolken die achtereenvolgens oplicht geeft aan waar de straling vandaan komt; een uitgebreid onderzoek

door de Amerikaanse sterrenkundige Armin Rest en collegae in de richting van het sterrenbeeld Cassiopeia en omgeving liet zien dat sommige wolken door de supernova van Tycho, en andere door de supernova Cas A zijn aangestraald (figuur 7). Dat deze wolken nu pas oplichten komt doordat het licht een omweg heeft gemaakt! Als de supernova ontploft zendt ze in alle richtingen licht uit. Cas A staat op ongeveer tienduizend lichtjaar van de aarde en het licht van de ontploffende supernova bereikte ons dus na tienduizend jaar. Nu kan het gebeuren dat licht, dat aanvankelijk in de richting van een wolk werd uitgezonden, door deze wolk alsnog in de richting van de aarde wordt weerkaatst. Dit licht komt dan later op de aarde aan: we zien de betreffende wolk oplichten met enige vertraging ten opzichte van de supernova. We kunnen eenvoudig uitrekenen waar de wolken staan die met een bepaalde tijdsvertraging overeenkomen: dat is een ellips met Cas A in het ene brandpunt en de zon in het andere.

Dankzij de nieuwe grote telescopen en de snelle data-analyse met nieuwe computers is het mogelijk om snel te ontdekken of er wolken oplichten en dan een spectrum van de oplichtende wolk te nemen voor hij weer verdwijnt. Duitse en Japanse sterrenkundigen onder leiding van Oliver Krause gebruikten de 8 meter telescoop Subaru op Hawaii om op deze manier spectra te maken van door wolken weerkaatst licht van Tycho, 436 jaar na de supernova en van Cas A, 328 jaar na de supernova. Door vergelijking van deze spectra met die van andere supernovae zien we meteen dat het oplichten van de wolken inderdaad door weerkaatsen van supernovalicht veroorzaakt wordt; we kunnen dan ook ondubbelzinnig vaststellen dat Tycho een supernova Ia was en Cas A een supernova II (figuur 8).



Figuur 8: Het spectrum van de door Cas A veroorzaakte lichtecho ziet er precies zo uit als het spectrum van de type II supernova 1993J, met een waterstoflijn nabij 6500 Å. Het spectrum van de lichtecho van Tycho daarentegen ziet er uit als spectra van supernovae Ia.