

Op jacht naar meteorieten: multi-instrumentele aanpak

De val van de kleine planetoïde 2024-BX1 op 21 januari 2024 was een bijzondere: de inslag was enkele uren voordien voorzien en vond plaats binnen het bereik van het European Fireball Network: het oudste vuurbolnetwerk ter wereld. Het maakt gebruik van de meest nauwkeurige instrumenten (*Zenit* mei 2024, blz. 34-36). Klassieke (simultaan)fotografie is niet meer het enige middel dat ingezet wordt om strooivelden van meteorieten te bepalen. Sterker nog, het is een bijproduct geworden in een multi-instrumentele aanpak die zijn waarde bij de 2024-BX1 val bewezen heeft. Bijna 200 fragmenten werden exact langs de berekende lijnen keurig op massa gerangschikt gevonden dankzij een naadloze samenwerking van fotografie, high-speed video, spectrografie en *high speed*-fotometrie.

Door Hans Betlem (Dutch Meteor Society)

Zodra een meteoroïde op zo'n 15 kilometer hoogte in de atmosfeer is afgeremd tot een snelheid van enkele kilometers per seconde, begint de *dark flight*: een lastig te berekenen traject in de onderste lagen van de atmosfeer. Het deeltje is daarbij onderhevig aan sterke windinvloeden. Dit windveld is gelukkig



Figuur 1. Op 8 oktober 2024 om 20:53:35 uur verscheen een heldere vuurbol boven Noord-Limburg die drie seconden later uitdoofde boven het plaatsje Hummelo in de Achterhoek. De vuurbol werd door 6 stations van het Europees Netwerk vastgelegd. Meer uitleg in de hoofdtekst.

eenvoudig te bepalen; weerdiensten hebben deze gegevens van uur tot uur ter beschikking. De echte complicatie is het in kaart brengen van de fragmentatie van het object. Een deeltje van enkele grammen zal vanaf grote hoogte op een andere manier door het windveld worden meegenomen dan een fragment van enkele kilogrammen. Omdat het lichtgevende traject van een vuurbol tientallen, soms honderden kilometers lang is, is het niet alleen van belang te weten welke massa's zich van het hoofdlichaam hebben afgesplitst, maar ook op welke positie en hoogte in het lichtgevende traject. Ook kennis van de beginmassa van het object is van belang. Deze kan in principe berekend worden uit de vertraging en de helderheid van de vuurbol. Maar in sommige gevallen – 2024-BX1 was zo'n geval – gaat dat nét niet op.

Lichtcurves en spectra

Het vaststellen van de fotometrische helderheid van een vuurbol langs het lichtgevende traject kan met fotografische opnamen of middels door *high speed*-fotometers verkregen lichtcurves. De fotografische methode heeft als voordeel, dat de helderheidsvergelijking met sterren wordt gemaakt waardoor een ijking in magnituden ontstaat. Wanneer echter de spectrale samenstelling van het licht niet bekend is (verdeling van de helderheid over verschillende golflengten), is deze lichtcurve ongekalibreerd. *High speed*-fotometers hebben als voordeel dat ze zeer gedetailleerde lichtcurves opleveren, die de fragmentatie goed in kaart brengen. Echter, deze zijn weer niet in een magnitudeschaal gekalibreerd. De lichtcurves uit de fotometer zijn *real*

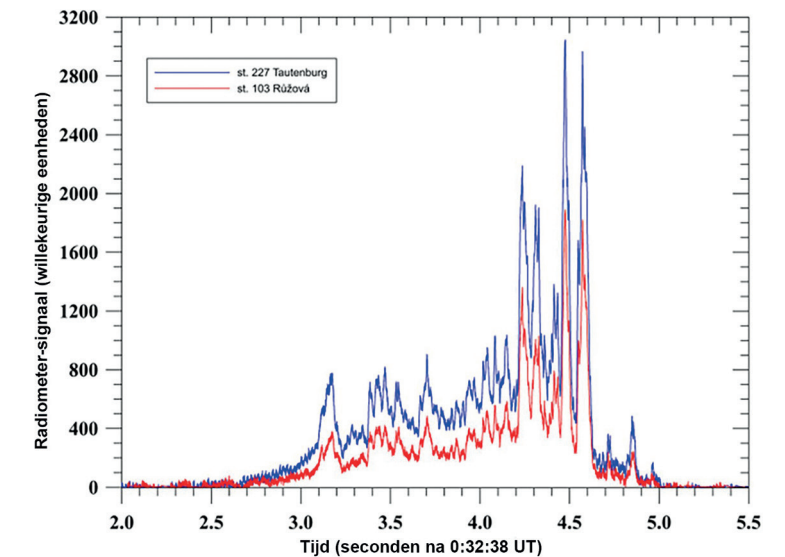


Figuur 2. Twee DAFO-opstellingen op het meteorenobservatorium te Kunzak, Tsjechische republiek. De objectieven zijn overdag met kappen afgesloten. (Hans Betlem)

time-gegevens met het GPS-tijdsignaal als basis; de fotografische vastgelegde helderheden, van onderbreking tot onderbreking in het meteoorspoor hebben geen absolute tijdsjking, maar zijn gegeven in tijdsintervallen vanaf het beginpunt. Daarbij lopen de shutters (sluiters) in de camera's op de verschillende posten niet synchroon. Spectra zijn nodig voor het bepalen van de werkelijke helderheidsschaal en de beginmassa; de fotometers geven gedetailleerde informatie over de fragmentatie in tijd maar niet in plaats; de fotografie geeft met een nauwkeurigheid van enkele tientallen meters de posities en hoogtes van onderbreking tot onderbreking. Al deze data moeten in elkaar passen!

Fotografie

De pieken in de fotometrische lichtcurves (Figuur 2), gerelateerd aan het afsplitsen van fragmenten, kunnen naar posities in de atmosfeer worden herleid, zodra we ook beschikken over een *real time*-as langs het gefotografeerde meteoorspoor. Positie en hoogtes van elk afsplitsend fragment zijn dan op de milliseconde te herleiden. Deze *real time*-schaal wordt verkregen, door de shutters in de camera's niet langer te bedienen met een onafhankelijk werkende functiegenerator, maar door deze te sturen middels het GPS-signaal. Dat bevat ook een tijdsignaal en de shutter in de camera krijgt de opdracht de onderbreking op de hele seconde over te slaan. Zo ontstaat de gewenste absolute tijdschaal langs het fotografische traject en daaruit kan dan de positie van de pieken



Figuur 3. Met *high speed*-fotometers verkregen lichtcurves van de vuurbol gerelateerd aan de val van 2024-BX1 op 21 januari 2024. De pieken zijn reële opflakkingen; ze zijn vanuit beide aangegeven posten identiek vastgelegd. Vanwege de grotere afstand is de amplitude op post 103 (in rood) kleiner. (Tsjechische Academie van Wetenschappen; bewerking: Mat Drummen)

in de lichtcurves van de fotometer met een nauwkeurigheid van enkele tientallen meters worden vastgelegd. De combinatie fotografie (positiebepaling), *high-speed* fotometrie (vastleggen fragmentatie) en spectrografie (vaststellen samenstelling en beginmassa) levert de uiteindelijke mix van data die nodig is om succesvol met hoge nauwkeurigheid de posities van neergekomen fragmenten vast te stellen.

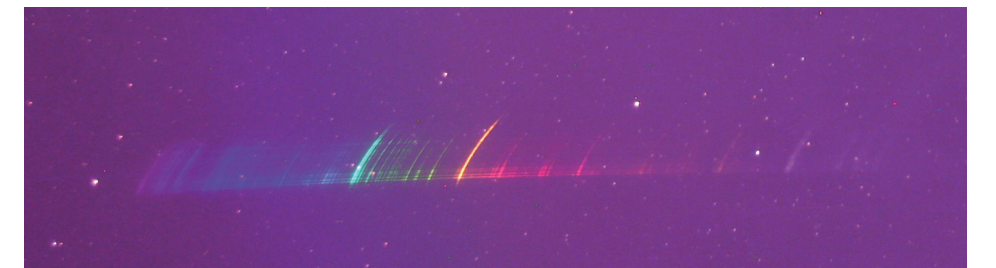
Praktijk

Het Tsjechisch deel van het Europees Netwerk bestaat uit 21 stations, gesitueerd in Tsjechië (15), Slowakije (4), Duitsland (1) en Oostenrijk (1). De basis van elk station is de DAFO (Digital Automatic Fireball Observatory). Een DAFO bestaat uit een systeem van twee automatisch werkende Canon 6D *full frame* DSLR-camera's, voorzien van Sigma 3.5-8 millimeter *fish-eye*-objectieven (Figuur 2). De camera's maken opnamen van één minuut waarbij de ene camera op de hele en de andere op de halve minuut schakelt. Daardoor

is er geen 'dode' tijd tussen de opnamen waarin een vuurbol er doorheen kan glippen. Elke DAFO is voorzien van een *high speed*-fotometer (5000 metingen per seconde) en heeft verder voorzieningen als automatisch sluitende cameradeksels bij daglicht, en neerslag- en wolkendetectie. Alle camera's zijn voorzien van GPS gestuurde LCD-shutters met seconde-markering. Alle 21 DAFO's worden in de ochtend automatisch uitgelezen op het centrale coördinatiepunt van het Europees Netwerk, gelokaliseerd in de sterrenwacht te Ondřejov. Elke ochtend komen hier zo'n 40.000 opnamen binnen die volledig geautomatiseerd worden doorzocht op vuurbollen. Een aantal stations is voorzien van twee DAFO's, in totaal dus vier camera's, waarvan er twee voorzien zijn van 15 mm optiek en tralies voor het vastleggen van meteoor spectra. Naast de DAFO's en de fotometers zorgen nauwkeurige videocamera's en *fast tracking*-camera's, die binnen een fractie van een seconde op een vuurbol gericht kunnen worden, voor aanvullende data van de fragmentatie.

Ultieme test case

De val van 2024-BX1 werd door alle mogelijke instrumenten vastgelegd: *high speed*-fotometrie, fotografie, video en spectrografie. Nooit eerder kon niet alleen de dynamica van het object in de atmosfeer bepaald worden en de valposities van de fragmenten



Figuur 4. Het spectrum van de vuurbol van 2024-BX1 op 21 januari 2024. De heldere lijnen in het groen behoren toe aan magnesium; de heldere oranje lijn is natrium. IJzerlijnen zijn niet of nauwelijks zichtbaar. De gebogen vorm van het spectrum wordt veroorzaakt door de afbeelding van de *fish-eye*-lens. (Tsjechische Academie van Wetenschappen)



Figuur 5. Overzicht van de huidige 13 stations van het EN in West-Europa. (Kaart: Google Earth)

binnen honderden meters nauwkeurig worden vastgelegd, het bood ook de unieke mogelijkheid de multi-instrumentele samenwerking te testen. De lichtcurven (Figuur 3) laten veel details van fragmentatie zien. De realiteit van elk detail wordt bevestigd door het exacte verloop van beide curves (rood en blauw) op de twee verschillende posten. Er is slechts een verschil in amplitude, veroorzaakt door de verschillen in afstand tot de beide stations.

Het spectrum van de vuurbol (Figuur 4) toont nauwelijks ijzerlijnen maar wel de aanwezigheid van magnesium. Niet alleen was al vóór de eerste vondst bekend welke fragmenten waar zouden liggen, maar ook uit welk materiaal ze bestaan. Zo moest er niet gezocht worden naar standaard chondrieten (zwarte stenen). De spectrale samenstelling maakt het uiteindelijk ook mogelijk de initiële massa van het object te kunnen bepalen. Van begin af aan was al duidelijk dat de val van deze meteoriet veel minder spectaculair was dan de val van 2023-CX1 in februari 2023 in Frankrijk: magnitude -14 (Zenit mei 2023, blz.18-21). Met een berekende initiële diameter van een kleine halve meter is 2024-BX1 zelfs het kleinste hemellichaam dat ooit vanaf de aarde is waargenomen. Deze vuurbol maakte het ook mogelijk om de baan van het object in het zonnestelsel op twee manieren te berekenen. In het algemeen levert een baanberekening aan een object dat gedurende langere tijd aan de hemel gevolgd kan worden, een nauwkeuriger berekende baan op, dan die berekend

uit een vuurbol langs de hemel, die immers maar een zeer kort deel van de baan laat zien. In dit geval leverden beide baanbepalingen exact dezelfde baanelementen, waarmee de gebruikte algoritmes voor baanberekeningen uit meteorobanen gevalideerd konden worden.

Het EN in West-Europa

Op het moment dat dit artikel wordt geschreven, maart 2024, bestaat het West-Europese deel van het EN uit 13 stations met drie stations in aanbouw. De werkende posten zijn gesitueerd in Nederland (9), België (3) en Duitsland (1) (Figuur 5). Langzaam aan krijgt de transitie naar een multi-instrumenteel netwerk vorm. Sinds het voorjaar van 2023 staat een *high speed*-fotometer van de Tsjechische Academie van Wetenschappen op het meteorobservatorium te Winterswijk-Woold; een tweede station wordt in de loop van dit jaar aan het netwerk toegevoegd. In Dwingeloo draait sinds een half jaar een meteor spectrograaf mee in het netwerk, een tweede komt komende zomer in bedrijf in Winterswijk-Woold. Inmiddels dekken videocamera's de oostelijke horizon van noord naar zuid geheel af, waarmee een overlap met het Tsjechisch netwerk wordt gerealiseerd. Nu al zijn er regelmatig simultaan gebeurtenissen tussen onze beide netwerken geregistreerd. Ook de GPS gestuurde LCD-shutters met secondemarkering zijn inmiddels



Figuur 6. Kijkje in de kast van de *high speed*-fotometer te Winterswijk-Woold. Linksboven de fotomultiplier, rechts de videocamera. Computers en randapparatuur vinden hun plekje in het onderste deel van de kast. Rechtsboven de GPS-antenne. (Hans Betlem)

ontwikkeld en gaan op korte termijn de oude functiegeneratoren vervangen. Figuur 1 toont de vuurbol van 8 oktober 2024, vastgelegd met de camera van Winterswijk-Woold. Die is voorzien van een GPS gestuurde shutter. In het *fish-eye*-objectief is een LCD-plaatje gemonteerd waarop een 16 Hz blokspanning wordt gezet. Het plaatje wordt 16 maal per seconde donker waardoor er 16 onderbrekingen per seconde in het meteorspoor ontstaan. Op de hele seconde slaat het systeem één onderbreking over. De lange 'lichtmoten' markeren de hele seconde. Hiermee is van elke lichtmoot het exacte tijdstip *real time* bekend.

Met deze uitbreidingen, grotendeels gedragen en bekostigd door amateurs, samenwerkend binnen de Dutch Meteor Society, wordt een stuk professionalisering in het vuurbolnetwerk gerealiseerd. En dat kan niet vroeg genoeg zijn: de volgende superbolide laat zich niet voorspellen en zou zo maar boven ons land kunnen verschijnen. ●

Verder lezen

'Atmospheric entry and fragmentation of small asteroid 2024 BX1: Bolide trajectory, orbit, dynamics, light curve and spectrum' P. Spurný, J. Borovicka, L. Shrbený, M. Hankey en R. Neubert. *Astronomy and Astrophysics*, 686, A67 (2024). www.aanda.org/articles/aa/full_html/2024/06/aa49735-24/aa49735-24.html

Opnieuw 'eerste' planeet bij de Ster van Barnard ontdekt

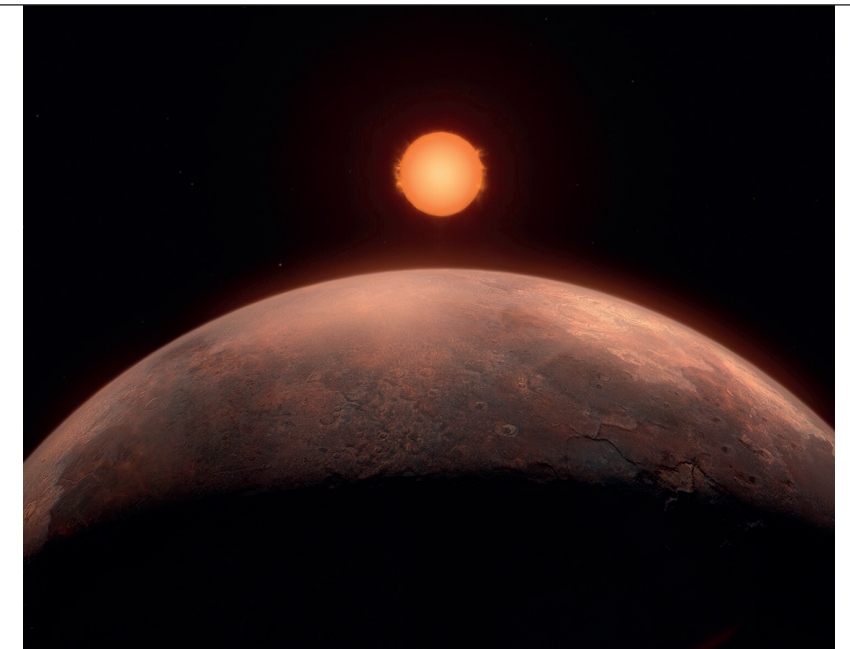
Astronomen hebben opnieuw voor het eerst een planeet ontdekt bij de Ster van Barnard, de ster die op het trio Alfa Centauri na de meest nabije sterrenbuur is.

Door George Beekman

De Ster van Barnard is een rode dwerg op slechts zes lichtjaar van de zon en daardoor al vele decennia een belangrijk doelwit voor het zoeken naar exoplaneten. In 2018 werd door een groep astronomen onder leiding van Ignasi Ribas ook al enthousiast de ontdekking van de eerste planeet bij deze ster aangekondigd (*Zenit*, februari 2019, blz. 30-31). Het bestaan van deze super-aarde werd echter door anderen betwijfeld, mede omdat de hij zich slechts tijdelijk manifesteerde.

De nieuwe planeet heeft veel betere papieren. Hij werd ontdekt door een groep astronomen onder leiding van opnieuw een Spaans astronoom, Gonzalez Hernandez. De astronomen analyseerden 156 spectra die tussen 2019 en 2023 verkregen waren met de Very Large Telescope van de Europese Zuidelijke Sterrenwacht in Chili. Die telescoop beschikt onder andere over ESPRESSO, een spectrograaf waarmee extreem nauwkeurig de radiële snelheid van een ster (langs de gezichtslijn) kan worden gemeten. Een periodieke variatie van deze snelheid kan een aanwijzing zijn van een planeet die de ster tijdens zijn omloop een beetje heen en weer trekt. Deze schommeling verradt zich dan door een geringe verschuiving van de lijnen in het sterspectrum. Die dopplerverschuiving kan echter op allerlei manieren worden verstoord of vervaagd en vooral door de activiteit en de aswenteling van de betreffende ster zelf. Deze twee effecten, met perioden van ongeveer 3200 en 140 dagen, konden nu echter door de astronomen in het spectrum van de Ster van Barnard worden geïdentificeerd en verwijderd. En zo werd uiteindelijk gevonden dat deze rode dwerg in 3,15 dagen met een snelheid van 55 centimeter (!) per seconde heen en weer wordt getrokken. Metingen met twee andere spectrografen bevestigden dit resultaat.

De schommeling wordt veroorzaakt door een planeet met een massa van minstens 0,4 maal die van de aarde, dus ongeveer drie maal zo zwaar als Mars of half zo zwaar als Venus. Deze sub-aarde, die nu Barnard b wordt genoemd, zou in een baan op slechts drie miljoen kilometer – één twintigste van de afstand van Mercurius tot de zon – om de ster moeten



Impressie van Barnard b, de planeet die in ruim drie dagen om de Ster van Barnard draait. Het is er zo heet dat er geen vloeibaar water kan bestaan. (ESO/M. Kornmesser)

draaien. Hoewel de Ster van Barnard een koele ster is, zo'n 2500 graden kouder dan de zon, is het aan het oppervlak van de planeet nog altijd ongeveer 125 graden heet. Vloeibaar water zal er dus niet (meer) zijn, evenmin als leven.

Met de ESPRESSO kon ondanks naarstig zoeken geen signaal van de in 2018 gemelde super-aarde met een omlooptijd van 233 dagen worden gevonden. Die had dan een schommeling van 120 centimeter per seconde moeten veroorzaken. Wel werden in de metingen nog vier kleinere variaties gesignaleerd die op nog lichtere planeten zouden kunnen wijzen. De kleinste variatie, 20 centimeter per seconde, zou op een planeet met een massa van minstens 0,17 maal die van de aarde kunnen wijzen, dus slechts iets zwaarder dan Mars. Deze mogelijke kandidaten zouden dan in cirkelvormige banen net buiten die van Barnard b om de ster moeten draaien. Dat is altijd nog te dicht bij de ster om aan hun oppervlak vloeibaar water te kunnen hebben.

Als ook dit compacte viertal echt blijkt te bestaan, zou de Ster van Barnard zich kunnen voegen bij de klasse van sterren met meerdere planeten die

soms (qua omlooptijd) onderling gekoppelde banen hebben. Maar voor het zover is zullen met de 'Espresso-machine' nog vele metingen moeten worden verricht. ●



De Ster van Barnard heeft door zijn relatief geringe afstand de grootste eigenbeweging van alle sterren. Tussen 1975 (onder) en 1979 (boven) verplaatste hij zich over een hoekje van 41 boogseconden, vergelijkbaar met de maximale schijnbare diameter van Saturnus. (Wikipedia/ Science Photo Library)