

De 'Radio Meteor Zoo'

Wereldwijde jacht op meteoren

Stijn Calders en Hervé Lamy

Meteoroïde versus meteor

Volgens de recente definitie van de Internationale Astronomische Unie is een meteoroïde een solide object met een grootte tussen ongeveer 30 micron en 1 meter dat zich in de interplanetaire ruimte voortbeweegt. De meteoroïden draaien in verschillende banen en met snelheden van enkele tientallen km/s rond de zon. Soms kruisen hun banen die van de aarde: dan kunnen ze in onze atmosfeer opbranden. De meeste meteoroïden zijn kleine stofdeeltjes. Een meteor (algemeen bekend als 'vallende ster') is het lichtgevend fenomeen als gevolg van de interactie van de meteoroïde met de atmosfeer van de aarde, gewoonlijk tussen 80 en 120 km hoogte. De meteoroïden kunnen visueel gedetecteerd en onderzocht worden, maar ook door radiowaarnemingen.

Radiowaarnemingen van meteoroïden

Het principe van de detectie van radiometeoren is eenvoudig en wordt geïllustreerd in Figuur 1: een radiobaken zendt een radiogolf uit die een betrekkelijk groot deel van de lucht op 100 km hoogte bestraalt. Als een meteoroïde met supersonische snelheid in de atmosfeer duikt, dan botst het met de deeltjes van de hogere atmosfeer en ioniseert ze (één of meer elektronen ontsnappen). Het geïoniseerde pad dat achter de meteor ontstaat, zal dan de uitgezonden radiogolf tijdelijk weerkaatsen. Het signaal kan vervolgens worden opgepikt door een ontvanger die op dezelfde frequentie is afgesteld: we spreken dan van een 'meteoorecho'. De

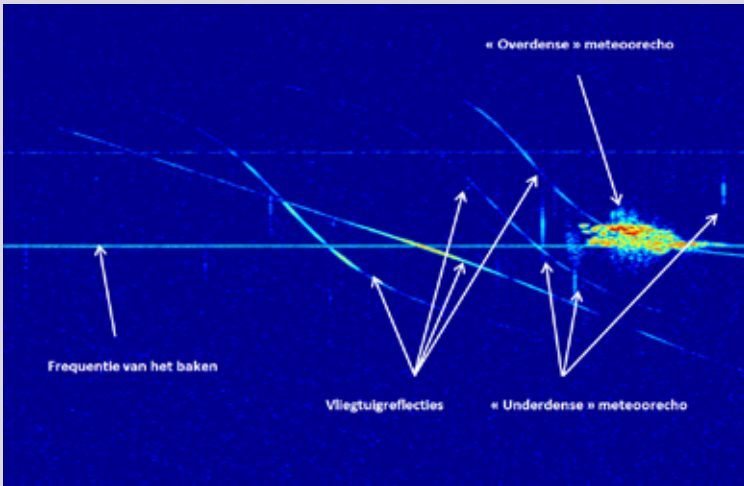
duur kan variëren van een fractie van een seconde tot enkele seconden en is afhankelijk van de grootte en de snelheid van de meteoroïde: hoe groter of hoe sneller, hoe langer het signaal duurt. De meeste meteoorecho's duren slechts een fractie van een seconde. Analyse van het ontvangen signaal geeft ons informatie over het object, zoals het afgelegde traject, de snelheid of de massa.

Radiowaarnemingen hebben twee voordelen ten opzichte van visuele waarnemingen: 1) de waarnemingen gebeuren continu en zijn niet afhankelijk van de weersomstandigheden, 2) ze kunnen objecten met een kleinere massa detecteren: zij produceren geen lichtgevend fenomeen maar komen wel het vaakst voor.

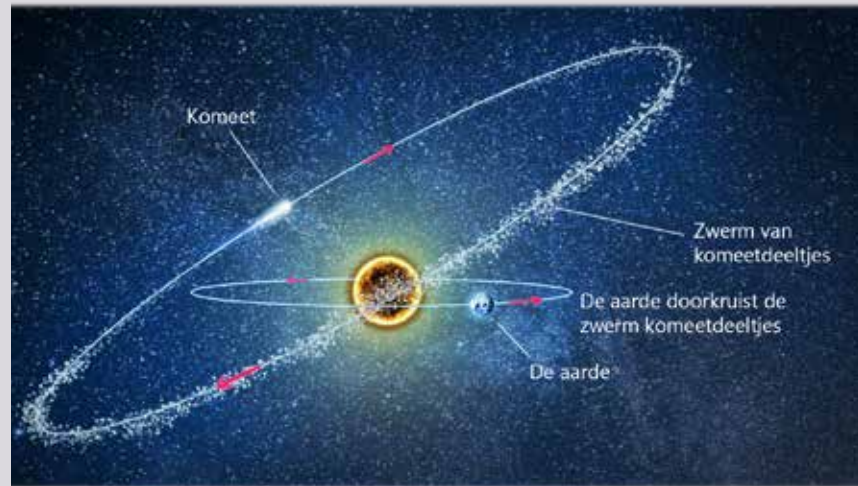
BRAMS

Het BRAMS-netwerk⁽¹⁾ (Belgian RAdio Meteor Stations) is een initiatief van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie sinds 2010. Het is een Belgisch netwerk van radio-ontvangers die de meteoroïden via radiogolven bestuderen. Het bestaat uit een speciale zender die opgesteld staat in het Geofysisch Centrum in Dourbes en een netwerk van +/- 30 ontvangstations verspreid over gans België.

Elke dag wordt er door het BRAMS-netwerk een enorme hoeveelheid data gegenereerd met duizenden geregistreerde meteoorecho's. Om deze te verwerken, worden automatische detectie-algoritmen gebruikt. De BRAMS-data



Figuur 2: Typisch voorbeeld van een spectrogram dat met het BRAMS-netwerk geregistreerd wordt. Er worden verschillende signalen waargenomen.



Figuur 3: Illustratie van de afkomst van zwermmeteoren wanneer de aarde de baan van een komeet kruist.

worden gewoonlijk weergegeven als afbeeldingen (spectrogrammen genoemd) die een visuele representatie zijn van de evolutie van het frequentiespectrum in de tijd. Elke spectrogram duurt 5 minuten en heeft een frequentiebereik van 200 Hz waarin de echo's van meteoren verschijnen. De signaalsterkte wordt weergegeven door een kleurcode: rood stelt een hoog vermogen voor en blauw een zeer laag vermogen (de elektromagnetische ruis opgepikt door de antenne). Een voorbeeld van een spectrogram wordt getoond in Figuur 2.

In dit beeld is het horizontaal signaal (de 'bakenfrequentie') het directe signaal van de zender. Het spectrogram staat gecentreerd rond dit signaal in de frequentieband van 200 Hz. De lange signalen worden veroorzaakt door reflecties op vliegtuigen. Signalen met een zeer korte levensduur (een fractie van een seconde) zijn 'underdense' meteorecho's. Ze verschijnen als verticale lijnen in het spectrogram. Deze meteorecho's worden veroorzaakt door zeer kleine stofdeeltjes en vormen de meerderheid van waarnemingen met het BRAMS-netwerk. 'Overdense' meteorecho's duren veel langer (grootteorde van seconden tot tientallen seconden) en worden geproduceerd door veel grotere meteoroiden (typisch met een diameter tot één centimeter). De vorm van deze echo's in de spectrogrammen zijn zeer complex en variëren sterk, waardoor ze moeilijk automatisch te detecteren zijn.

Sporadische meteoren versus meteorzwermen

Meteor en vallen continu in de atmosfeer: dit noemen astronomen de sporadische component aangezien deze meteoren op elk moment en uit alle richtingen kunnen komen (hoewel sommige richtingen vaker voorkomen). Er is een tweede populatie van meteoren, namelijk meteorzwermen, die ontstaan door het stof langs de baan van een komeet. Wanneer een komeet de zon nadert, warmt ze op. Hierdoor begint het oppervlak te sublimeren en ontsnappen er stofdeeltjes van de komeet die in het ijs vastzaten. Als de aardbaan die van

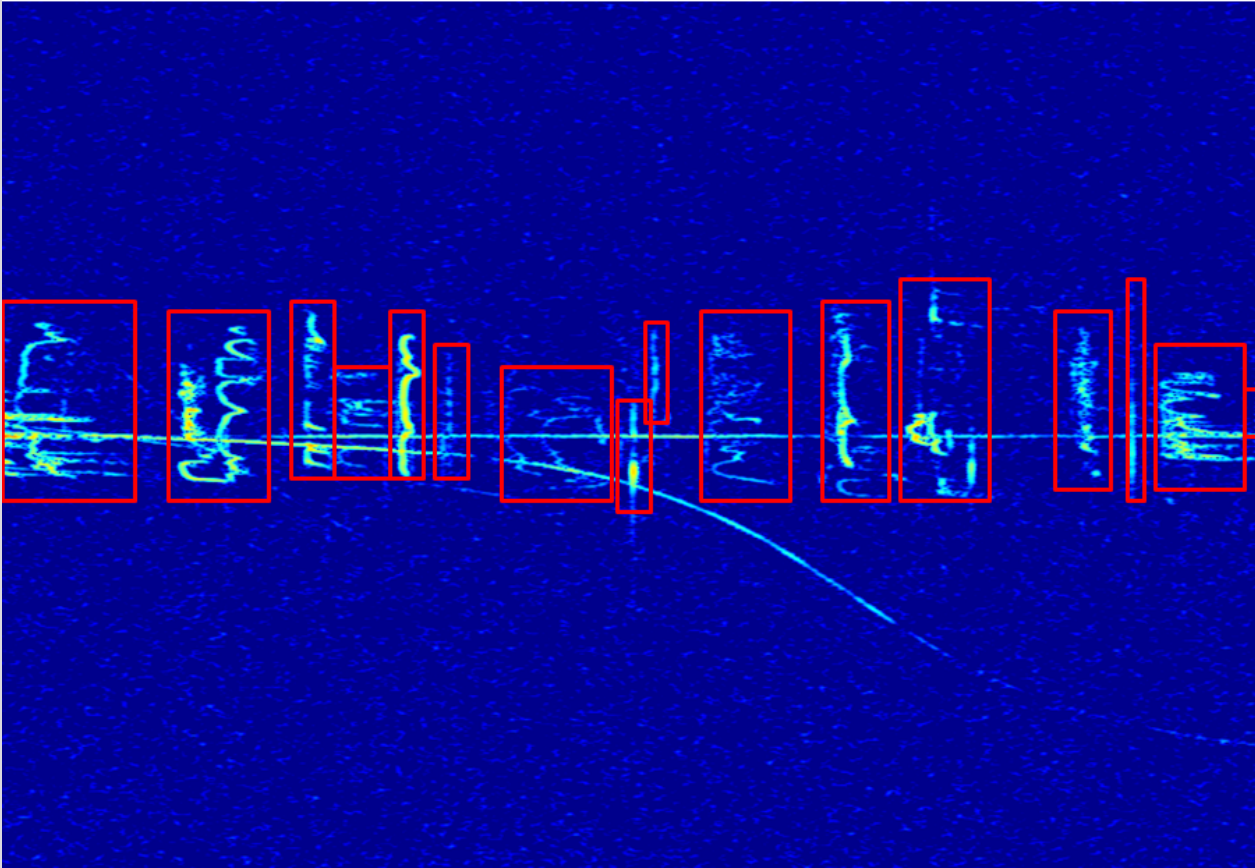
de komeet kruist, dan passeert de aarde elk jaar in dezelfde periode door deze stofwolk die zwermmeteoren produceert (zie Figuur 3). Omwille van een geometrisch effect lijken alle zwermmeteoren uit hetzelfde punt aan de hemel te komen. Dit punt noemen we de radiant en elke meteorenzwerm wordt vernoemd naar de constellatie waarin de radiant zich situeert. Zo bevindt de radiant van de Perseïden (die jaarlijks terugkeren in augustus) zich in de constellatie Perseus.

Tijdens de meteorenzwermen wordt er een veel groter aantal 'overdense' meteorecho's met zeer complexe vormen in de spectrogrammen waargenomen, die het gebruik van automatische detectiealgoritmen onbetrouwbaar maakt. In dit geval is het (getrainde) menselijk oog de beste detector. Zo ontstond het idee van een project voor burgerwetenschap (citizen science) waarbij duizenden vrijwilligers de BRAMS-waarnemingen verkregen tijdens dergelijke meteorzwermen, analyseren.

De Radio Meteor Zoo

In augustus 2016 lanceert het BRAMS-team het citizen science project Radio Meteor Zoo⁽²⁾ (RMZ) in samenwerking met het team van Zooniverse⁽³⁾. Op deze site wordt aan vrijwilligers gevraagd om rechthoeken rond de potentiële meteorecho's in de BRAMS-spectrogrammen te tekenen. Een korte handleiding legt uit wat een spectrogram is en hoe de echo's van meteoren kunnen herkend worden, en geeft daarnaast enkele tips om de meest voor de hand liggende fouten te vermijden. De site bevat ook een pagina die het BRAMS-project in detail toelicht en een forum waar de vrijwilligers worden uitgenodigd om te overleggen met het onderzoeksteam.

Het project start op 12 augustus 2016 met de analyse van de Perseïden, een zeer actieve meteorenzwerm veroorzaakt door meteoroiden uit de komeet Swift-Tuttle. Deze komeet



Figuur 4: Dit spectrogram werd geregistreerd door het BRAMS-netwerk tijdens de activiteitspiek van de Perseïden op 12 augustus. De rode rechthoeken zijn de manuele classificatie van de meteorechós.

maakt elke 130 jaar één toertje rond de zon. De Perseïden duiken in de atmosfeer met een grote relatieve snelheid van 59 km/s: één van de mogelijke redenen van de vele complexe echo's die we waarnemen in de spectrogrammen. Figuur 4 toont een voorbeeld van een spectrogram verkregen tijdens de piek van de Perseïden op 12 augustus 2016. De meteorecho's hebben er uiterst complexe vormen en in sommige gevallen overlappen ze elkaar zelfs. De rode rechthoeken in de figuur komen overeen met de correcte manuele classificatie volgens de regels van de tutorial.

Elk spectrogram wordt naar 10 willekeurige vrijwilligers verzonden. Een punt in het beeld wordt herkend als behorend tot een meteorecho indien ten minste 4 personen op 10 er een rechthoek tekenden. Wanneer één vrijwilliger dus een fout maakt (hetzij een meteorecho vergeet, hetzij foutief een ander signaal als meteor aanduidt) dan is de kans op valse detecties minimaal. De keuze voor deze twee getallen is gebaseerd op een voorstudie op kleinere schaal met 12 spectrogrammen en veertig vrijwilligers. De laatste stap is alle geselecteerde punten met ten minste 4 vrijwilligers te groeperen en de kleinste gemeenschappelijke rechthoek te berekenen.

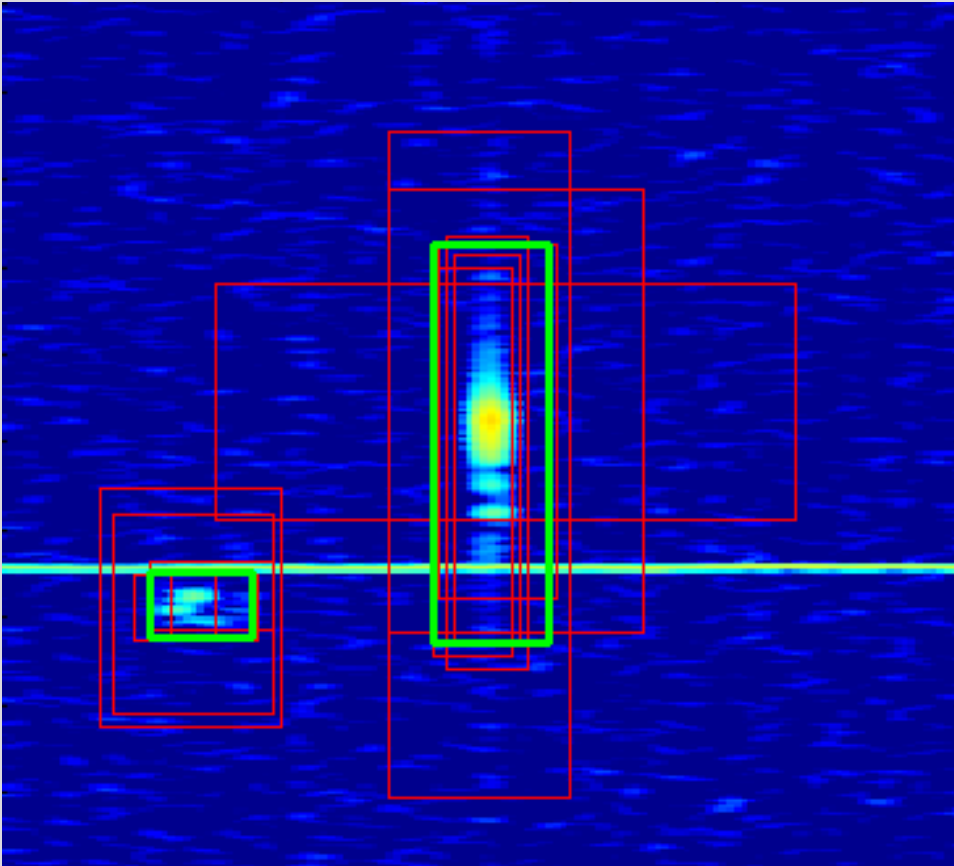
Figuur 5 toont een voorbeeld van het resultaat: het zoomt in op een gebied van een spectrogram waarin u de rechthoeken (rood) kan zien die door de 10 vrijwilligers werden

getekend en kandidaat-meteorecho's (groene rechthoeken) geselecteerd door de hierboven beschreven werkwijze. De twee meteorecho's worden correct gedetecteerd (omgeven door groene rechthoeken) ondanks het feit dat sommige individuele rechthoeken (rood) te groot zijn getekend. Met deze methode worden de meeste meteorecho's correct gedetecteerd. Toch worden enkele zeer nauwe meteorecho's gecombineerd in één enkele detectie (groene rechthoek). Bepaalde zwakke meteorecho's worden door minder dan 4 vrijwilligers aangeduid, en daarom gemist. Nieuwe methoden van analyse, rekening houdend met een 'kwaliteitsfactor' voor elke vrijwilliger, zijn gepland om deze punten te verbeteren.

Voorlopige resultaten

De analyses zijn nog niet definitief, maar de classificaties kunnen al gebruikt worden om een activiteitscurve van de meteorenzwerm te maken. Dit is een grafiek van het aantal meteoren per uur. Figuur 6 toont de activiteit van de Perseïden tussen 10 en 14 augustus 2016 gemeten door het ontvangststation in Humain.

De rode curve toont alle meteorecho's die werden bekomen met de classificatie van de Radio Meteor Zoo. Het stelt de totale activiteit voor: deze bestaat enerzijds uit zwermmeteoren, en anderzijds uit sporadische meteoren. De zwarte punten zijn de metingen per uur van de spo-



Figuur 5 : Een detailopname van een deel van een spectrogram dat door 10 verschillende vrijwilligers werd doorgestuurd. De rode rechthoeken werden door de vrijwilligers getekend. De groene rechthoeken zijn het resultaat van het selectie criterium dat in de tekst beschreven is. In dit voorbeeld passen de meteorecho's perfect binnen de groene rechthoeken.

radische meteorenactiviteit. Hiervoor werd de meteorenactiviteit tussen 17 en 19 augustus 2016 gebruikt, toen de Perseïden (of enige andere) meteorenzwerm niet meer actief was. De zwarte curve is een sinus die het best aansluit bij deze zwarte punten. Het is immers geweten dat de sporadische meteorenactiviteit een periode van 24 uur heeft ten gevolge van de dagelijkse beweging van de aarde. De activiteit is het hoogst in de ochtend rond 6 uur: dan staan wij aan dezelfde kant van de aarde als de richting waarin ze zich beweegt in haar jaarlijkse baan rond de zon (dit wordt apex genoemd door astronomen). Niet enkel de meteoroiden die naar de aarde vallen, komen in de atmosfeer terecht, maar ook zij die zich trager dan ongeveer 30 km/s (de snelheid van de aarde rond de zon) verplaatsen. Het omgekeerde fenomeen doet zich voor om 18 uur, waardoor men een minimum aantal sporadische meteoren waarneemt. Er wordt aangenomen dat de variatie min of meer sinusvorming is.

De blauwe curve is het verschil tussen de totale (rood) en de sporadische (zwart) activiteitscurve. Ze komt bij benadering overeen met de zwermactiviteit van de Perseïden. Op de onderste grafiek stellen de groene punten de elevatie (hoek met de horizon) van de radiant van de Perseïden voor. Door de dagelijkse beweging verplaatst de radiant zich immers gedurende de nacht. Wanneer de radiant laag staat, dan wordt er geen zwermactiviteit door het BRAMS-netwerk gedetecteerd. Wanneer de radiant hoog aan de hemel staat, dan

zijn de condities voor de reflectie van radiogolven ook niet ideaal. Daarom zien we dagelijks een terugval in de blauwe curve wanneer de radiant op zijn maximale hoogte staat.

De activiteitspiek van de Perseïden werd op 12 augustus waargenomen, net na middernacht UT. Dit komt overeen met de visuele waarnemingen. De volgende stap bestaat uit het corrigeren van de activiteitscurve met de zogenaamde Observability Function. Deze functie houdt rekening met de geometrie van het systeem (positie van de zender en de ontvanger, positie van de radiant aan de hemel) en de gevoeligheid van zender en ontvanger. Ze berekent een correctiefactor die het verband geeft tussen de ruwe tellingen en het werkelijk aantal meteoren.

De Perseïdenzwerm kan veel duidelijker onderscheiden worden van de sporadische component wanneer we ons richten op de 'overdense' meteoren. In Figuur 7 zijn dezelfde grootheden weergegeven als in Figuur 6, maar enkel voor meteorecho's van minstens 10 seconden. Het aantal meteoren is logischerwijze veel kleiner, maar ook de contaminatie van Perseïden door sporadische meteoren is veel kleiner (en dus makkelijker te corrigeren). De twee activiteitspieken (de bovengenoemde hoofdpijk op 12 augustus en de secundaire piek waargenomen op 13 augustus) zijn nu beter zichtbaar. Het feit dat de Perseïden meer uitgesproken voorkomen als alleen de 'overdense' meteoren beschouwd worden, is gere-

lateerd aan de massa-index van de zwerm. De massa-index van een meteoroidenpopulatie beschrijft hoe de massa verdeeld is over de deeltjes: een hoge massa-index geeft aan dat de zwerm hoofdzakelijk uit lichte deeltjes bestaat, terwijl een lage massa-index onthult dat de zwerm voornamelijk zwaardere deeltjes telt.

Conclusie en vooruitzichten

De Radio Meteor Zoo kent sinds zijn lancering in augustus 2016 een enorm succes. Bijna 5000 vrijwilligers zijn reeds geregistreerd, waardoor we meer dan 24.000 spectrogrammen hebben kunnen analyseren. De gegevens van verschillende zwermen worden op dit moment geanalyseerd: de Quadrantiden 2016 en 2017, de Geminiden 2016 en de Lyriden 2017. Deze resultaten zullen gebruikt worden om de activiteit en de massadistributie van de zwermen te bestuderen. Maar ze zullen ook gebruikt worden in het

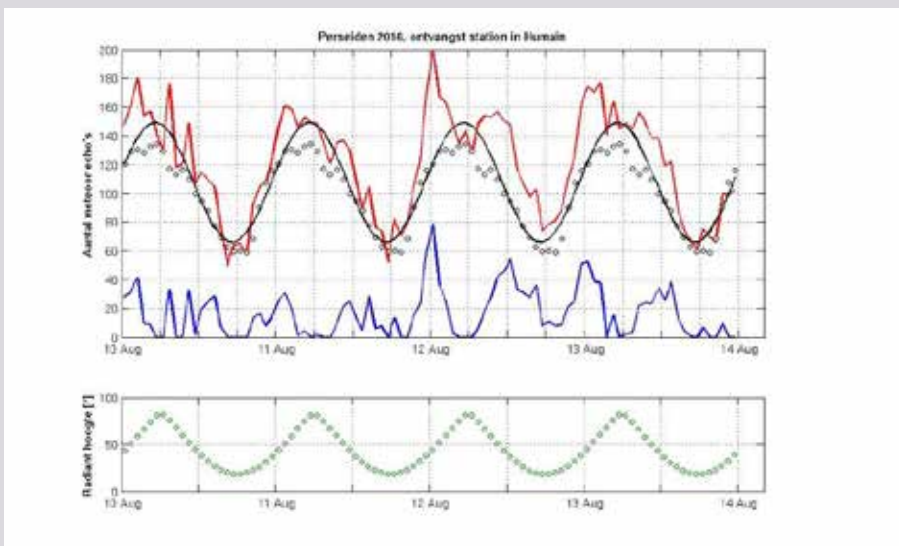
BRAMS-project om bijvoorbeeld de effectiviteit van de automatische detectiemethodes te evalueren of om de algoritmes voor de reconstructie van de banen te testen.

Noten

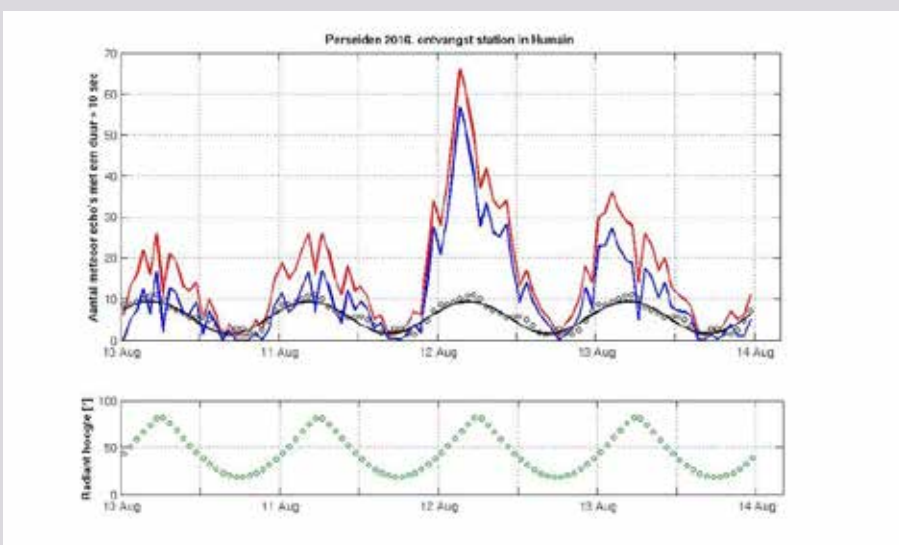
- (1) <http://brams.aeronomie.be>
- (2) <http://www.radiometeorzoo.be>
- (3) <http://www.zooniverse.org>

De auteurs

Stijn Calders en Hervé Lamy zijn vaste onderzoekers binnen de divisie 'Ruimtefysica' van het BIRA. Hervé Lamy is ook projectleider voor BRAMS.



Figuur 6: De activiteitscurve van de Perseïden meteorenzwerm in 2016 op basis van de resultaten van de Radio Meteor Zoo. De tijd wordt uitgedrukt in Universele Tijd (UT = lokale zomertijd + 2 uur).



Figuur 7: De activiteitscurve van de Perseïden 2016 voor de meteorecho's met een duurtijd van minstens 10 seconden.