

# BRAIN-BE : METRO – Banen van meteoren en hun oorsprong

## SAMENVATTING



## **Context :**

De totale massa die meteoroiden in de aardatmosfeer deponeren is van de orde van 100 ton per dag. Deze deeltjes beïnvloeden de chemie in de hoge atmosfeer. Ze laten toe metingen toe van de temperaturen en winden op grote hoogte. Deze deeltjes vormen een bedreiging voor ruimtetuigen en astronauten. Ze laten toe om de evolutie van het interplanetair stof te bestuderen, en ook van bepaalde kometen of asteroïden die de aardbaan kruisen. De natuurkundige processen van meteorablatie tijdens hun hypersonische duik in de atmosfeer zijn van groot belang voor de terugkeer van ruimtetuigen of van ruimteschroot in de hogere luchtlagen. Het METRO project stelde zich tot doel meteoroiden te bestuderen met radiogegevens van BRAMS, een netwerk van Belgische radiostations dat meteoren detecteert en karakteriseert met de techniek van voorwaartse verstrooiing. Dit netwerk bestaat uit één zender en een groot aantal ontvangstations verspreid over het grondgebied. Het project beoogde ook om de modellering van meteoren te verbeteren.

## **Doelstellingen :**

De belangrijkste doelstellingen van het project waren:

- Het bepalen van de banen van meteoren op basis van de BRAMS gegevens.
- Het vergelijken van de radiowaarnemingen met optische waarnemingen door netwerken zoals CAMS-Benelux en FRIPON, die eveneens de hemel boven België bestrijken.
- Het bekomen van het ionisatieprofiel langsheen het meetoortraject uit waarnemingen van een meteor door meerdere ontvangers, en het vergelijken van de resultaten met een ablatiemodel; optimalisatie laat dan toe de initiële massa van het object te schatten.
- Het ontwikkelen van fysische en chemische modellen van het meteorverschijnsel zowel in ijle als in dichtere luchtlagen, met toepassing op radiodetectie. Daarbij willen we de onzekerheden reduceren i) op de input van metalen in de hoge atmosfeer en ii) op de ionisatie-efficiëntie en de plasma-dissipatiesnelheden nodig zijn voor een juiste interpretatie van radiometingen.
- Het berekenen van de flux van meteoroiden, wat uiterst belangrijk is voor ruimtetuigen.

## **Methodologie :**

Eerst werden algoritmes ontwikkeld om de enorme aantallen meteor-echo's te identificeren in de BRAMS data. Verschillende methodes voor trajectbepaling werden uitgetoetst die geometrische factoren, detectietijdstippen, en gegevens van een radio-interferometer benutten. Een vergelijking van BRAMS radiometingen met optische waarnemingen door het CAMS-Benelux netwerk liet een gedetailleerde analyse toe van het elektromagnetisch vermogen van de meetoorecho's, en ook een eerste vergelijking met de modelberekeningen uitgevoerd door het VKI. De studie van de vermogensprofielen van de zgn. "underdense" meetoorecho's (het meest voorkomende type echo's) laat toe om een aantal parameters te bepalen, zoals de ionisatiegraad in het spiegelreflectiepunt (waar het radiosignaal van de zender weerspiegeld wordt naar de ontvanger). Indien meerdere ontvangers dezelfde meteor waarnemen kan een ionisatieprofiel worden bepaald en vergeleken met het ablatiemodel, wat een schatting oplevert van de massa van het object.

Simulaties van meteoren werden uitgevoerd met de computermodellen ontwikkeld op het VKI: een Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) code voor meteoren op grote hoogte waar de atmosfeer zeer ijl is, en een stagnatielijn-vloeistofcode gekoppeld aan een model voor warmteoverdracht door straling voor meteoren op lagere hoogte. Een parameterstudie werd uitgevoerd en de resultaten werden vergeleken met de literatuur. De ontwikkeling van het model voor de interactie tussen de atmosfeer en het oppervlak van de meteoroïde werd ondersteund door experimenten in het VKI Plasmatron, gevolgd door een analyse van het materiaal na blootstelling aan ablatie.

Een eerste stap naar een berekening van meteorfluxen bestaat uit het bepalen van de Observability Function (OF), die rekening houdt met de geometrie van de waarnemingen en de eigenschappen van alle onderdelen van het waarnemingsstelsel om het aantal waargenomen meteoren om te zetten in een gestandaardiseerde flux.

### **Belangrijkste resultaten :**

Een enorme hoeveelheid gegevens werd verzameld en gearchiveerd bij BIRA-IASB, over bijna 10 jaar. Het netwerk werd continu uitgebreid en geüpgraded om gegevens van hoge kwaliteit te produceren. De volgende generatie ontvangstations met een nieuw type ontvangers staat klaar.

Twee algoritmen werden ontwikkeld voor automatische detectie van meteoroecho's. Binnenkort zullen deze gebruikt worden om dagelijkse activiteitscurven te produceren voor elk BRAMS-station. Dank zij de Radio Meteor Zoo, een "citizen science" project dat in 2016 is gestart, konden we de activiteit bepalen van de belangrijkste meteorregens gedurende meerdere jaren op rij.

Het probleem van trajectbepaling bleek moeilijker dan gedacht, omdat het nauw verbonden is met de ruimtelijke organisatie van het waarnemingsnetwerk. Er werden drie methoden ontwikkeld. Binnenkort zal een meteorradar, in ontwikkeling in Dourbes, een vierde methode opleveren om trajecten te reconstrueren. De vergelijking van BRAMS-trajecten met trajecten van CAMS-Benelux of FRIPON zal eenvoudig zijn omdat we actief samenwerken met deze netwerken.

Er werd een studie uitgevoerd die optische CAMS-Benelux- en BRAMS radio-gegevens combineert. Technieken werden ontwikkeld om de energieprofielen van meteoroecho's te verkrijgen uit de BRAMS-gegevens. Uit de metingen van het piekvermogen kan de ionisatie op de spiegelreflectiepunten worden verkregen.

We hebben een gedetailleerde beschrijving opgesteld van het afbraakproces van de meteoroïde en van de fysisch-chemische verschijnselen die het gedrag van de ablatieproducten rond een meteoroïde en in zijn plasmaspoor bepalen. De ionisatie-efficiëntie, helderheid en dissipatiesnelheden bekomen met het rekenmodel werden vergeleken met waarnemingen en met de literatuur. Er werden thermodynamische, transport- en kinetische gegevens berekend die relevant zijn voor de ablatie van meteoroïden; ze zijn beschikbaar in de Mutation ++ -bibliotheek. We hebben bijzondere aandacht besteed aan de interacties tussen het gas en het oppervlak van de meteoroïde. Dit onderzoek werd ondersteund door experimenten in de VKI Plasmatron-windtunnel

en in faciliteiten van NASA Ames. De vergelijking met de experimenten heeft geleid tot een validatie van de ontwikkelde modellen en een verbeterd inzicht in de betrokken verschijnselen.

Het geometrische deel van de OF is bijna klaar. Alle technische parameters, zoals antenneversterking, de gevoeligheid van de ontvangers, enz., zijn beschikbaar.

### **Besluit :**

Mede dankzij het METRO-project is het BRAMS-systeem een internationaal erkende onderzoeksfaciliteit geworden. Het project heeft op vier gebieden een stimulans gegeven:

- Verbeteringen in de BRAMS-hardware: betere kalibratie, aanbevelingen voor de beste keuze van nieuwe observatiesites
- Verbeteringen in de gegevensverwerking door middel van geautomatiseerde technieken
- Verbeteringen in de wetenschappelijke interpretatie van de gegevens
- Samenwerkingen met de optische netwerken in België zoals CAMS-Benelux en FRIPON.

Tegelijkertijd hebben de simulaties en de uitgevoerde laboratoriumexperimenten geleid tot een verdere versterking van de Belgische expertise op het gebied van hypersonische re-entry, een onderwerp dat sterk in de belangstelling staat in de ruimtevaart.

Het METRO-project heeft een aantal nevenresultaten opgeleverd:

- Versterking van de samenwerking tussen professionelen en amateurs, waarbij openbare observatoria en amateurastronomen worden betrokken in het BRAMS-netwerk; deze zijn allemaal betrokken bij het promoten van STEM-onderwijs.
- Stimuleren van de ontwikkeling van de Radio Meteor Zoo, een burgerwetenschappelijk project, dat de geïnteresseerde burger en belastingbetaler de mogelijkheid biedt om rechtstreeks betrokken te zijn bij de onderzoeksactiviteiten.
- METRO bood 6 studenten de kans om een BRAMS-gerelateerd project uit te voeren, en leidde ook tot 1 masterproef en 2 doctorale proefschriften.

Dit project heeft de fundamenteen gelegd voor een bredere en meer ambitieuze modelleringsinspanning die astronomen zal helpen om de onzekerheden bij de interpretatie van radio-echo's te verminderen, wat de weg vrijmaakt voor de invoering van meer geavanceerde computersimulaties op het gebied van de meteorwetenschap.

### **Aanbevelingen :**

- Het BRAMS-netwerk continu uitbreiden en verbeteren.
- Onderhouden en versterken van de samenwerking tussen beroeps- en amateurastronomen.
- Afronden van efficiënte en betrouwbare reconstructietechnieken voor meteoortrajecten.
- Toepassen van de OF op meteorregen. Berekenen van meteorfluxen op lange termijn.
- Gebruiken van informatie uit het energieprofiel van meteoorecho's om mesosferische temperaturen en winden boven België te bepalen, in een meer globale (Europese) context.
- Doorgaan met het vergelijken van vuurbalgegevens verkregen met FRIPON en BRAMS.