

## DELPHFI

### Deep Learning Voorspelling en Post-event analyse van het Ontstaan van Zonnevlammen

#### (DEep Learning Prediction and Hindsight of Flare Initiation)

*Contract - B2/202/P1/DELPHI*

### 1. CONTEXT: DE UITDAGINGEN VAN HET RUIMTEWEER

De zon heeft een directe en diepgaande invloed op het moderne leven en de hedendaagse infrastructuur. Zonnevlammen (plotselinge uitbarstingen van energie uit "actieve gebieden" in de zonnecorona) zenden straling uit over het gehele elektromagnetische spectrum. Ze gaan vaak gepaard met andere eruptieve verschijnselen zoals coronale massa-uitstoten (CME's) en energetische zonnedeeltjes (SEP). Binnen enkele uren na de initiële uitbarsting, kan dit ruimteweer GNSS-signalen, satellietelektronica, radiocommunicatie en elektriciteitsnetten op aarde verstoren, en de blootstelling aan straling verhogen voor astronauten en op vliegroutes op grote hoogte.

Ondanks decennia van onderzoek blijven de precieze fysieke mechanismen die leiden tot de opbouw van magnetische energie en de plotselinge vrijgave ervan via reconnectie een langdurig probleem in de zonnefysica. Historisch gezien vertrouwde de voorspelling van zonnevlammen sterk op menselijke interpretatie van de complexiteit van zonnevlekken. Het DELPHFI-project werd opgezet om de overgang te maken van deze empirische methoden met menselijke tussenkomst naar geautomatiseerde, uiterst nauwkeurige systemen die gebruikmaken van Machine Learning (ML) en Deep Learning (DL).

### 2. PROJECTDOELSTELLINGEN

Het DELPHFI-project, een samenwerking tussen de Koninklijke Sterrenwacht van België (KSB) en de KU Leuven, streefde drie primaire strategische doelen na:

1. **Wetenschappelijk begrip:** Het fundamentele begrip van mechanismen die zonnevlammen initiëren verbeteren door "interpreteerbare" ML-technieken te gebruiken om kritieke fysieke kenmerken in zonnegegevens te identificeren.
2. **Operationele demonstratie:** Bewijzen dat geautomatiseerde extractie van kenmerken uit hogedefinitie-satellietbeelden consistent beter kan presteren dan traditionele menselijke voorspellingen en bestaande geautomatiseerde instrumenten.
3. **Technische capaciteitsopbouw:** Robuuste DL-expertise opbouwen bij de KSB, als basis voor een nieuwe generatie operationele ruimteweerdiensten en autonome monitoringtools.

### 3. ONDERZOEKSMETHODOLOGIE

Het project maakte gebruik van meer dan tien jaar aan gegevens met een hoge tijdsfrequentie (2010–2021) van het Solar Dynamics Observatory (SDO), met de focus op magnetogrammen (SDO/HMI) en extreem ultraviolette (EUV) beelden (SDO/AIA). Er werd ook gebruikgemaakt van metingen van röntgenstraling door de GOES-satellieten.

#### 3.1 Voorspelling van de capaciteit voor zonnevlammen van actieve gebieden met CNN's

Een kernbijdrage op technisch vlak was de vergelijking van twee benaderingen met convolutionele neurale netwerken (CNN):

- **Trad-CNN:** Een traditionele architectuur die invoer van vaste grootte vereist. Dit dwingt tot het herschalen van beelden, wat vaak kleinschalige fysieke kenmerken die cruciaal zijn voor voorspellingen vervormt of verwijdert.
- **SPP-CNN:** De implementatie van een Spatial Pyramid Pooling (SPP) module. Deze innovatie stelt het netwerk in staat om beelden van elke grootte te accepteren, waarbij de originele fysieke schaal en de integriteit van magnetische structuren behouden blijven.

### 3.2 Variationale auto-encoders ( $\beta$ -VAE) voor parametrisatie

Het project gebruikte  $\beta$ -VAE's (probabilistische encoder-decoder netwerken) om compacte, informatierijke "latente" representaties van actieve gebieden op de zon te leren.

- **Latente ruimte:** In tegenstelling tot deterministische modellen brengen VAE's de invoer in verband met een distributie, waardoor de inherente onzekerheid van magnetische morfologieën wordt gevat.
- **Disentanglement (Ontwarren):** Door de  $\beta$ -hyperparameter te wegen, "ontwart" het model latente kenmerken, waardoor onderzoekers individuele fysieke eigenschappen (bijv. compactheid, fluxconcentratie) op een voor mensen interpreteerbare manier kunnen volgen.

### 3.3 Zelf-gesuperviseerde pre-training en segmentatie

- **Generatief Model:** Het team gebruikte zelf-gesuperviseerde pre-training, waarbij het model leert om kunstmatig vervormde zonnebeelden te reconstrueren. Deze "pre-initialisatie" verbeterde de gegevensefficiëntie met 65% en versnelde de convergentie van de training.
- **Segmentatiekaders:** U-Net-architecturen met hoge precisie werden gebruikt voor de segmentatie van coronale structuren, samen met lichtgewicht framework ontworpen voor de beperkte hardware aan boord van ruimtevaartuigen.

## 4. BELANGRIJKSTE WETENSCHAPPELIJKE RESULTATEN

Het DELPHFI-project leverde verschillende baanbrekende bevindingen op:

- **Superioriteit van SPP-CNN:** De SPP-CNN-architectuur bereikte sterke voorspellende prestaties binnen een venster van 24 uur, vooral voor zonnevlammen met een hoge intensiteit. Deze architectuur presteerde significant beter dan traditionele modellen door de negatieve effecten van het herschalen van beelden te vermijden.
- **XAI-validatie:** Met behulp van Grad-CAM-heatmaps is bewezen dat de "aandacht" van de AI correct is gericht op polariteitsinversielijnen (PIL's) — dezelfde gebieden waar zonnefysici prioriteit aan geven. Dit toont aan dat het model fysica aanleert, geen ruis.
- **Impact van schaling:** De studie kwantificeerde dat de standaard herschaling en uitrekking die courant zijn in computer vision, de voorspellingsprestaties drastisch verslechteren door kenmerken die een nakende uitbarsting kunnen signaleren (zoals PIL-lengte), te vervormen.
- **Voorspelling van de evolutie van de morfologie van een actief gebied:** Een LSTM-tijdreeksmodel met twee LSTM (Long Short-Term Memory)-lagen voorspelde de tijdsevolutie van de latente dimensies van de VAE, die de belangrijkste aspecten van de morfologie van een actief gebied beschrijven. Deze aanpak biedt een gegevensgestuurde manier om veranderingen in de structuur van actieve gebieden te voorspellen en op te volgen, en om mogelijke vroege signalen van zonnevlammen in de veranderende morfologie te onderzoeken.

- **Haalbaarheid aan boord:** Het project toonde aan dat modellen getraind op gegevens op de grond hoge prestaties behouden op ruwe satellietgegevens (Level-0), wat de levensvatbaarheid van autonome AI-operaties voor toekomstige zonnemissies aantoont.

## 5. BELANGRIJKSTE CONCLUSIES

Het project toonde succesvol aan dat Deep Learning een transformatief pad biedt voor ruimteweerdiensten wanneer het wordt aangepast om de fysieke beperkingen van zonnegegevens te respecteren (zoals gezien met de SPP en VAE architectuur).

Interdisciplinaire samenwerking bewees dat ML-modellen geen "black boxes" hoeven te zijn, maar interpreteerbaar kunnen worden gemaakt, om zo automatische resultaten in lijn te brengen met de gevestigde zonnefysica. Bovendien bevestigt de ontwikkeling van lichte, robuuste segmentatie-pipelines dat deze high-level AI-tools uitgerold kunnen worden op de beperkte hardware in ruimte-omgevingen, waardoor de autonomy voor toekomstige missies verzekerd wordt.

## 6. AANBEVELINGEN

Op basis van de bevindingen worden de volgende stappen aanbevolen om een volledig operationeel systeem te bekomen:

1. **Integratie van temporele dynamica:** Toekomstige modellen moeten overstappen van statische beeldanalyse naar LSTM-netwerken om de tijdsevolutie en energieopbouw te integreren.
2. **Overgang naar regressie:** Modellen moeten de specifieke intensiteit van de röntgenflux voorspellen in plaats van een eenvoudige "wel/geen vlam" classificatie, wat meer gedetailleerde en nuggere waarschuwingen toelaat.
3. **Uitbreiding van gegevensintegratie:** Vectormagnetogrammen en EUV-gegevens met meerdere golflengten toevoegen om de modellen diepgaandere 3D-informatie over de magnetische topologie te verschaffen.
4. **Hardware-optimalisatie:** Finalisatie van de implementatie van lichtgewicht segmentatie-frameworks op FPGA/CPU-hardware typisch voor deep-space-missies, om realtime en autonome voorspellingen aan boord mogelijk te maken.
5. **Operationele implementatie:** De meest succesvolle modellen moeten verder ontwikkeld worden tot operationele voorspellingssystemen die in staat zijn real-time ruimteweermonitoring en diensten voor vroegtijdige waarschuwingen te ondersteunen.

**Trefwoorden:** Zonne- uitbarstingen; magnetogrammen; Extreem Ultraviolet; Machine Learning; Deep Learning.