

CCSOM – Beperking van CME's en schokken door observaties en modellering in de hele binnenste heliosfeer

Samenvatting

De zon is de ster die zich het dichtst bij de aarde bevindt en waar veel astrofysische processen kunnen worden bestudeerd. De buitenste laag van de zonneatmosfeer, de corona, is een dynamisch plasmasysteem waar coronale massa-ejecties (CME's), grote hoeveelheden plasma en magnetische flux, door de zon in het interplanetaire medium (heliosfeer) worden uitgestoten. De zonnwind, CME's en CME-aangedreven schokgolven zijn de belangrijkste oorzaken van het ruimteweer op aarde en de oorzaak van geomagnetische stormen die satellietoperaties, navigatiesystemen (GPS) en radiocommunicatie kunnen verstoren. Daarom zijn deze fenomenen het hoofdonderwerp van het CCSOM-project. Waarnemingen alleen volstaan niet om de aankomst van ruimteweerverstoreningen en hun geomagnetische impact op aarde nauwkeurig te voorspellen. Daarvoor moeten we vertrouwen op modellen die in staat zijn de CME-voortplanting te simuleren en hun aankomst op aarde te voorspellen. Het recent ontwikkelde 3D-model EUHFORIA (EUropean Heliospheric FORecasting Information Asset; Pomoell & Poedts, 2018), werd een van de twee meest gebruikte state-of-the-art modellen van zonnwind en CME's. EUHFORIA stond centraal in het CCSOM-project, met als hoofddoel het verbeteren van de kennis over zonnwind, CME's en CME-aangedreven schokgolven en de nauwkeurigheid de voorspellingen.

In het kader van het CCSOM-project werden verschillende methoden gebruikt om de observatie- en modelresultaten te combineren en om EUHFORIA te valideren. Om de 3D-posities van CME's en streamers af te leiden, werden waarnemingen vanuit twee kijkrichtingen gebruikt (twee STEREO-ruimtetuigen of één STEREO-ruimtetuig gecombineerd met SOHO-waarnemingen). De meest gebruikte methode voor de CME-reconstructie was een voorwaartse modellering (Thernisien et al. 2006, 2009). Voor beschrijvingen van verschillende reconstructiemethoden, zie Mierla et al. (2009). De belangrijkste techniek voor het analyseren van radio-observatie was de radio-triangulatiemethode die gebruikmaakt van richtingbepalings-waarnemingen van ten minste twee verschillende ruimtevaartuigen (Krupar et al. 2012; Magdalenic et al. 2014). Dit is de enige techniek waarmee de 3D-positie van de radio-emissie in de interplanetaire ruimte kan worden ingeschat. We hebben ook verschillende statistische methoden gebruikt voor de validatie van EUHFORIA (zie bijv. Hinterreiter et al., 2019; Samara et al., 2021).

De overkoepelende wetenschappelijke vraag van CCSOM was: hoe verspreiden en evolueren CME's zich door de binnenste heliosfeer? Om deze vraag te beantwoorden, hebben we de achtergrondzonnwind en de voortplanting van CME-ICME-structuren gesimuleerd en de modelresultaten vergeleken met waarnemingen. De resultaten hebben ons geholpen om EUHFORIA te verbeteren en de zonnwind en CME's beter te modelleren. De belangrijkste projectresultaten zijn gegroepeerd in drie delen en hieronder samengevat.

Zonnwindmodellering met EUHFORIA: De studie van de zonnwindmodellering met standaard EUHFORIA-model toonde aan dat de verkregen resultaten sterk afhangen van het

eenvoudige coronale model van EUHFORIA (Hinterreiter et al., 2019; Hofmeister et al., 2020; Asvestari et al., 2019). De vergelijking van de in situ waarnemingen op 1 AU met modelresultaten laat zien dat de zonnewindsnelheid gemiddeld wordt onderschat door het model, terwijl de dichtheid wordt overschat. Dit resultaat houdt verband met het punt dat met name kleine, smalle of langwerpige coronale gaten (CH's) niet goed worden gereconstrueerd door het eenvoudige coronale model. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de inherente problemen van het PFSS-model dat de basis is van het standaard coronale model van EUHFORIA (Asvestari et al., 2019). Om de modelleringsresultaten te verbeteren werden enkele andere coronale modellen geïmplementeerd en getest. We hebben met succes het model MULTI-VP (Pinto et al., 2017) in EUHFORIA geïmplementeerd en de eerste validatietests uitgevoerd. EUHFORIA presteert significant beter met MULTI-VP (Samara et al., 2021). Een meer uitgebreide statistische analyse is nodig om het nauwkeurighedsniveau van de zonnwindmodellering preciezer te bepalen en het model beter af te stemmen. Ook kunnen andere, recent ontwikkelde coronale modellen getest worden. Daarnaast is in het kader van CCSOM de nieuwe statistische methode, de zogenaamde DTW (Dynamic Time Warping; Samara et al., 2022) aangepast en getest voor de evaluatie van het nauwkeurighedsniveau waarmee EUHFORIA de achtergrondzonnwind reconstrueert. Om te begrijpen hoe de waargenomen zonnwind afhangt van de CH-kenmerken, hebben we een studie uitgevoerd die de kenmerken van CHs en de bijbehorende snelle zonnwind op aarde in verband brengt (Samara et al., 2022). De studie toonde aan dat het CH-gebied, de longitudinale omvang en de geometrische CHs-kenmerken een sterke invloed hebben op de manier waarop de snelle zonnwind de aarde beïnvloedt. Daarom is het aangeraden om met deze CH-kenmerken rekening te houden in de modellen.

Implementatie en testen van magnetische CME-modellen: Een van de doelstellingen van het CCSOM-project was de implementatie en het testen van de CME-modellen met een intern magneeveld. De CME-modellering werd voornamelijk uitgevoerd met behulp van de gebeurtenissen uit de CCSOM-gebeurtenislijst die aan het begin van het project was opgesteld. We hebben verschillende magnetische CME-modellen geanalyseerd en zijn we erachter gekomen dat het spheromak CME-model gemakkelijker te implementeren is in EUHFORIA dan het Gibson-Low flux-rope CME-model. Om te begrijpen hoe goed het spheromak-model kan presteren, zijn gedetailleerde casestudies uitgevoerd (Verbeke et al., 2019; Scollini et al., 2019, 2020a, 2021). De modellering van CME's met het spheromak-model geeft goede resultaten wanneer de CME recht op de aarde afkomt. Goede resultaten werden ook behaald in het geval van interagerende CME's (Kilpua et al., 2019; Scollini et al., 2020b). Het spheromak CME-model heeft echter een beperkte toepasbaarheid voor CME-flankontmoetingen (Asvestari et al., 2021). Het belangrijkste nadeel van de spheromak is het ontbreken van de 'CME-poten', die in het geval van een zijdelingse botsing met de aarde erg belangrijk zijn. De aanbeveling is om het spheromak-model te gebruiken, maar rekening houdend met de beperking ervan. Aan het einde van het project implementeerden we het FRi3D-model (A. Isavnin, 2016) in EUHFORIA. Dit "Flux-Rope in 3D" CME-model heeft de volledige croissantvorm en is daarom meer geschikt voor het modelleren van de CME-flankontmoetingen. De eerste validatietests werden gepubliceerd (Maharana et al., 2022) en een meer diepgaande validatie is klaar voor indiening.

Een statistische studie van het modelleren van CME's uit de CCSOM-lijst werd ook uitgevoerd met behulp van het CME-kegelmodel (Magdalenic et al, in voorbereiding). We hebben ook nieuwe methoden ontwikkeld en getest om de CME-parameters te verkrijgen die nodig zijn als input voor EUHFORIA (beschreven in de verschillende CCSOM publicaties).

CME's en schokgolven: Het modelleren van de schokgolven met EUHFORIA was een zeer uitdagende taak. Alle CME-modellen die momenteel in EUHFORIA zijn geïmplementeerd, hebben namelijk de CME-insertie pas ter hoogte van 0.1 AE, wanneer de door CME aangedreven schok in de meeste gevallen al is gevormd (Kouloumvakos et al., 2021). Zo werden voorstudies gedaan voor het implementeren van verschillende coronale modellen waarmee we de schok al in de lage corona zouden kunnen modelleren. Onze resultaten laten zien dat de CME-aangedreven schokgolven kunnen worden gemodelleerd door EUHFORIA, maar de exacte stand-of-afstand tussen de CME en de schokgolf wordt nauwkeurig gemodelleerd op bijna 1 AE-afstanden. Het bestuderen van de schokgolven met behulp van radiowaarnemingen (Palmerio et al., 2019; Magdalenic et al., 2020; Morosan et al., 2020; Mann et al., 2022) en het volgen ervan met behulp van radiotriangulatie bleek zeer lonend te zijn met belangrijke wetenschappelijke bevindingen (Jebaraj et al., 2020). Modelleren van de CME-aangedreven schokgolf en bijbehorende radio-emissie in 3D met behulp van het MAS-model (Magneto-Hydrodynamic Around a Sphere Thermodynamic model; Lionello et al. 2009; Riley et al. 2011) werd besproken in Kouloumvakos et al., 2020 en Jebaraj et al., 2021. De aanbeveling is om in EUHFORIA coronale modellen te implementeren die de CME-insertie in de lage corona bevatten.

Om het modelleren van schokken te verbeteren en de simulaties te versnellen, hebben we ICARUS ontwikkeld, een nieuw heliosferisch windmodel voor EUHFORIA. ICARUS (Verbeke et al., 2022) combineert radiale grid stretching met Adaptive Mesh Refinement (AMR). Een tweede paper gericht op de combinatie van radiale grid stretching en verschillende AMR-strategieën werd ingediend. We merken op dat het combineren van AMR-strategieën een versnelling van de wandkloktijd tot 28 oplevert.

Het nieuwe globale corona MHD-model COCONUT is mede met CCSOM-ondersteuning ontwikkeld. Het eerste COCONUT artikel is geaccepteerd voor publicatie en een tweede en derde artikel over validatie van het nieuwe model zijn ingediend. Een ander artikel, over het belang van het ongestructureerde raster dat wordt gebruikt in COCONUT, werd onlangs gepubliceerd (Brchnelova et al., 2022). Bovendien hebben we het aangepaste Titov-Démoulin CME-model in COCONUT geïmplementeerd en konden we de evolutie ervan simuleren. Deze modellering kost veel CPU-tijd en we werken momenteel aan de optimalisatie ervan (het benutten en verfijnen van de impliciete rekentechniek).

Concluderend was CCSOM een zeer succesvol project, aangezien het resulteerde in meer dan 40 wetenschappelijke publicaties in internationale gerefereerde tijdschriften en een significante verbetering van EUHFORIA. De CCSOM heeft ook de weg vrijgemaakt voor andere, momenteel lopende projecten (bijv. BRAIN-project SWiM en H2020-project EUHFORIA 2.0) die gericht zijn op verdere verbeteringen van het EUHFORIA-model.