

Pas op!

Een zonnestorm op komst

“Op 30 januari rond 00:00 UTC werd een zonnestorm geobserveerd door satellieten SOHO en STEREO-A. De snelheid van de zonnestorm wordt geschat op ongeveer 1200 km/s en deze wordt verwacht op de aarde aan te komen rond de middag van 2 februari. We verwachten gematigde geomagnetische stormcondities.” Dit was het ruimteweerbericht dat Space X in het begin van 2022 negeerde toen het besloot de lancering van nieuwe Starlink-satellieten toch door te laten gaan, waardoor 40 van de 49 gelanceerde satellieten verloren gingen. Maar hoe bepalen wetenschappers de aankomst en gevolgen van zo’n zonnestorm eigenlijk?

Het weer in de ruimte

Voor ons op aarde is het weer een doodnormale zaak. Het samenspel van verschillende atmosferische gassen, de temperatuur en de luchtvochtigheid zorgt voor weer dat van dag tot dag varieert. Ook in ons zonnestelsel vinden er interacties tussen verschillende deeltjes plaats. Zo heeft ons zonnestelsel een zonnewind, maar ook ruimtestormen. We refereren hiernaar als het ruimteweer. Onze zon vult het zonnestelsel met een continue stroom van deeltjes die zich voornamelijk langs het magneetveld van de zon voortbewegen. Deze zonnewind waait met snelheden van soms meer dan 500 km/s door de interplanetaire ruimte en op zijn weg komt hij planeten, kometen, satellieten, astronauten en onze aardse atmosfeer tegen. Zonnewind is niet het enige wat de zon voor ons in petto heeft. Op regelmatige basis vinden aan het oppervlak van de zon explosieve uitbarstingen plaats, waarbij hete plasmawolken met hoge snelheden de ruimte ingeslingerd worden. Wetenschappers noemen deze plasmawolken die zich door de ruimte voortbewegen zonnestormen. De interactie van het magneetveld van de zonnestorm en dat van de aarde kan een geomagnetische storm veroorzaken. Zo'n storm kan problemen met telecommunicatie teweegbrengen, maar ook zorgen voor extra stralingsrisico's voor astronauten en piloten of voor een wijziging van satelliettrajecten (Hallo Space X). Een mooi nevenverschijnsel is de prachtige aurora (noorderlicht en zuiderlicht) die je vaak aan de polen van de aarde vindt. Over de hele wereld werken verschillende regionale waarschuwingencentra daarom samen om dagelijks ruimteweerberichten uit te sturen. Zij houden 24/7 toezicht op het ruimteweer en proberen de risico's van de ruimteweereffecten zo veel mogelijk te verminderen. Hiervoor interpreteren ze observaties van de zon en de interplanetaire ruimte. Deze observaties zijn sterk gelimiteerd doordat we bijna alleen observaties vanuit het standpunt van de aarde hebben. Daarbovenop zijn dit tweedimensionale observaties van de driedimensionale ruimte. Door deze observationele beperkingen is het noodzakelijk om ook gebruik te maken van modellen bij het voorspellen van zonnestormen en hun impact.

EUHFORIA

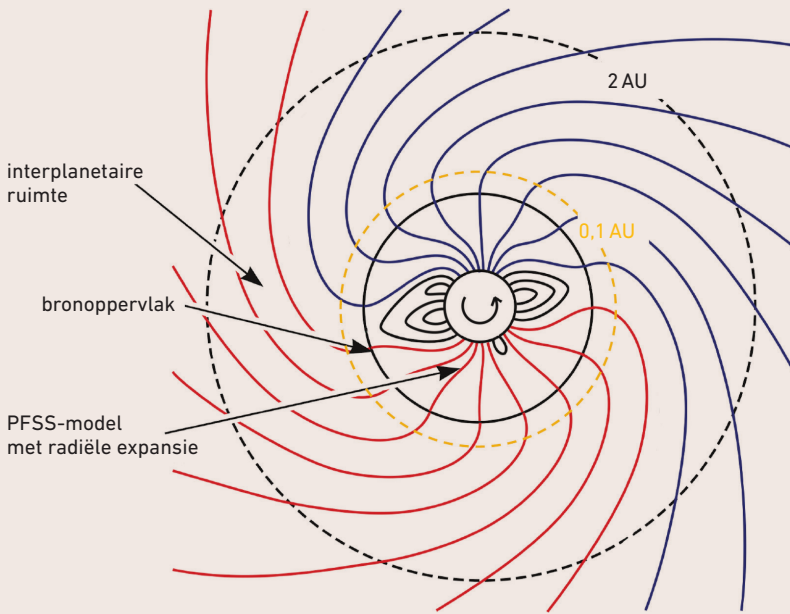
Het EUHFORIA-model, een acroniem voor European Heliospheric FORecasting Information Asset, helpt wetenschappers en ruimteweerspecialisten aan de hand van beperkte satellietobservaties om de propagatie van zonnestormen in de interplanetaire ruimte te voorspellen en beter te begrijpen. Het EUHFORIA-model [1] is een recent ontwikkeld driedimensionaal model dat de ideale magnetohydrodynamische (MHD) vergelijkingen oplost, waarbij wordt aangenomen dat het plasma een hoog Reynoldsgetal heeft. De algemene magnetohydrodynamica beschrijft de beweging van een elektrisch geleidend gas, in dit geval een plasma, in een magnetisch veld. In de ideale magnetohydrodynamica, een vereenvoudiging van de MHD, nemen we bovendien een hoog magnetisch Reynoldsgetal aan ($R_m \gg 1$). Onder deze aanname is het plasma een perfecte geleider. Als resultaat zijn de magnetische veldlijnen 'bevroren' in het plasma. Als het plasma beweegt, dan bewegen de magneetlijnen mee en omgekeerd. Welke van deze twee de andere domineert hangt af van de verhouding van de plasmadruk en de magnetische druk. De vergelijkingen van de ideale MHD bestaan uit de continuïteitsvergelijking, de impulsvergelijking, behoud van energie en de wet van Faraday. De warmtestroom wordt benaderd via een adiabatische vergelijking waarbij er vanuit wordt gegaan dat er geen warmte uitgewisseld wordt met de omgeving. Het model lost deze vergelijkingen op voor de omgeving in de ruimte van ongeveer 0,1 au (astronomische eenheid – de gemiddelde afstand van de zon tot de aarde) tot en met 2 au van de zon.

De zonnewind

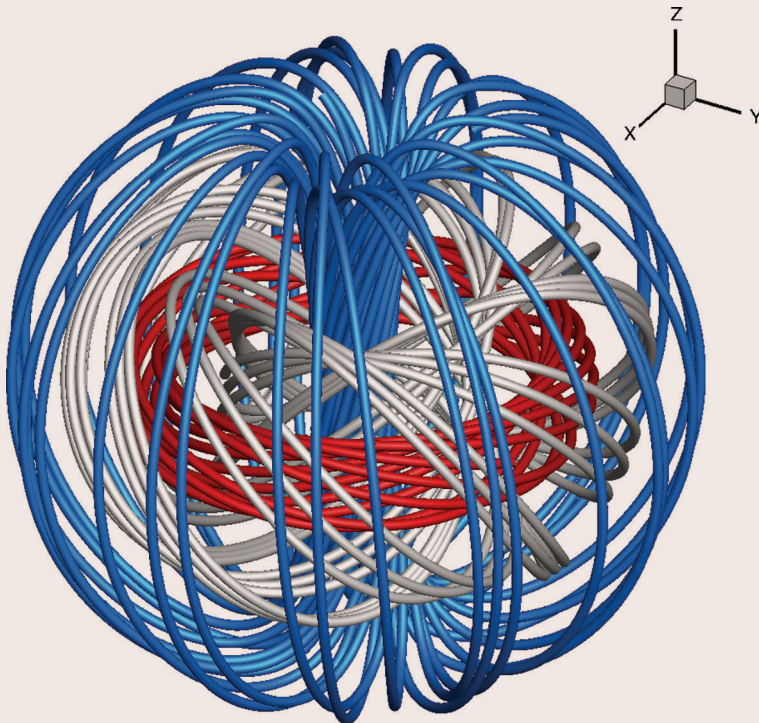
Om de binnenste randvoorwaarden te bepalen die noodzakelijk zijn voor het simuleren van de zonnewind, maakt het model als input gebruik van data verkregen uit een zogenoemd magnetogram, een observatie van de magnetische fluxdichtheid op de oppervlakte van de zon. Met behulp van een magnetogram kan men het potentiaalveldbron-oppervlakmodel [2] gebruiken dat het magneetveld van de zon op grote schaal modelleert (zie figuur 1). Aan zijn buitenste grens forceert dit model radiale veldlijnen, waardoor er een



Christine Verbeke studeerde wis- en natuurkunde aan de Universiteit Utrecht waar zij ook het honoursprogramma voltooide. Daarna behaalde ze een master in de sterrenkunde aan de KU Leuven, België, waar zij ook haar promotieonderzoek uitvoerde op een persoonlijke FWO-beurs. Haar onderzoek richt zich op het modelleren van zonnestormen. Zij werkt ondertussen aan de koninklijke sterrenwacht van België als ruimteweerspecialist. christine.verbeke@oma.be



Figuur 1. Een schematische voorstelling [3] van het EUHFORIA-zonnewindmodel. Het model gebruikt observationele data om de grootschalige magneetstructuur van de zon te berekenen via het PFSS-model. Om de randvoorwaarden op 0,1 au te bepalen, wordt een empirisch model gebruikt. De radiale snelheid, dichtheid en temperatuur zijn gebaseerd op het eerder berekende radiaal magneetveld. Vervolgens volgt een relaxatiefase waarbij de zonnewind door het volledige rekenkundige domein van het EUHFORIA-model wordt gepropageerd. De uiteindelijke zonnewind manifesteert zich als een spiraalvormige structuur door de rotatie van de zon, vergelijkbaar met de spiraal die wordt gegenereerd door een waterslang als je deze in het rond draait.



Figuur 2. Driedimensionale voorstelling van een selectie magnetische veldlijnen voor het lineaire krachtenvrije sferomakmodel. De magnetische veldlijnen zijn begrensd binnen de bol. Credit: C. Scolini.

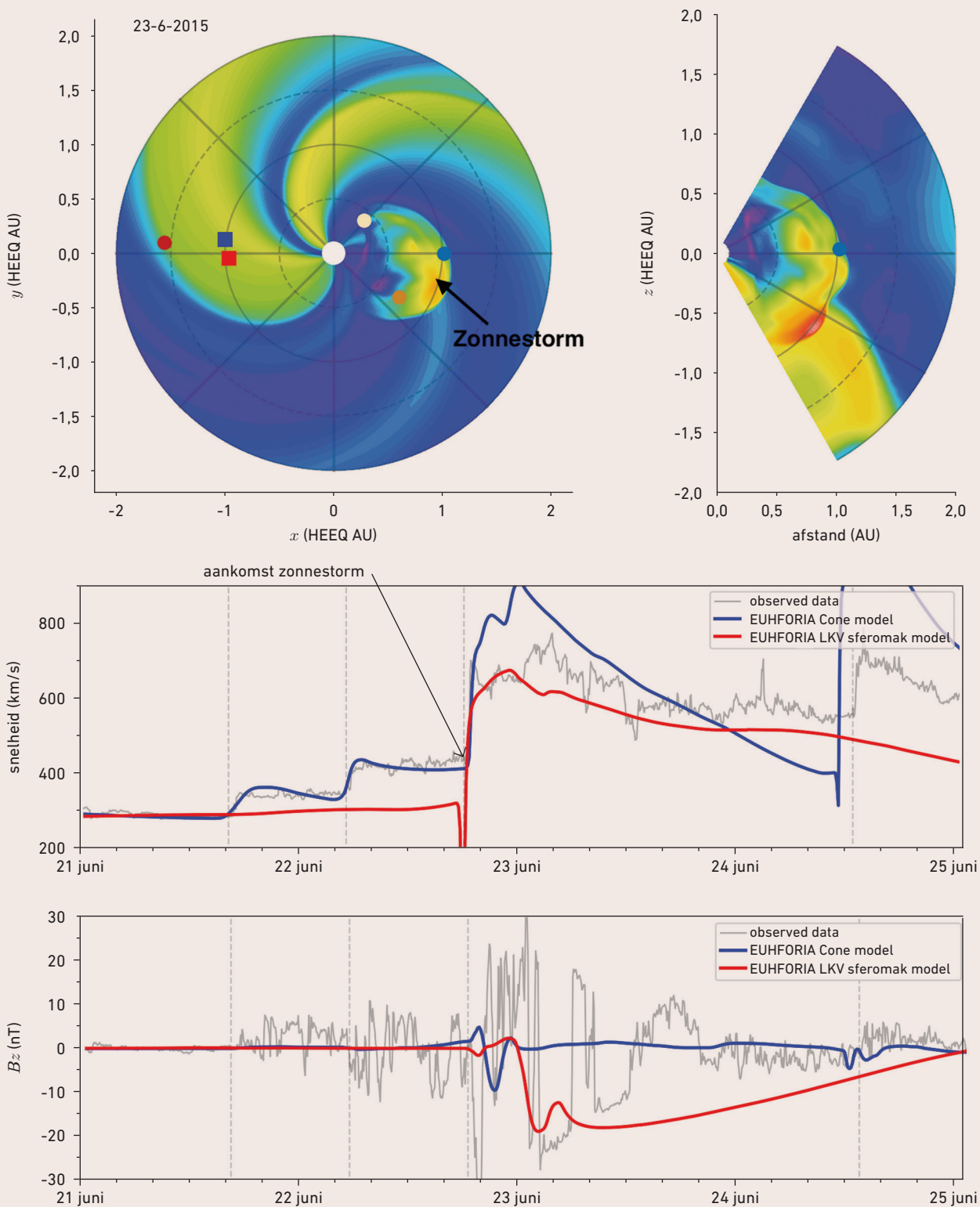
zonnewind ontstaat. Om de uiteindelijke randvoorwaarden voor het driedimensionale model te verkrijgen, wordt een empirisch model toegepast dat de snelheid, dichtheid en temperatuur van het plasma op 0,1 au bepaalt op basis van het gemodelleerde magneetveld. Deze binnenste randvoorwaarden roteren in de tijd met de hoeksnelheid van de zon. Om de uiteindelijke zonnewind te modelleren, ondergaat het model eerst een fase waarin de zonnewind wordt berekend over het hele simulatiedomein. De uiteindelijke zonnewind ziet eruit als een spiraalvorm, gelijkaardig aan de spiraal die je krijgt als je met een tuinslag in het ronddraait (zie figuur 1).

De zonnestorm

Wanneer de zonnewind over het hele simulatiedomein berekend is, is het ook mogelijk om zonnestormen te introduceren. Het initiële zonnestormmodel dat geïmplementeerd werd, is een simpel model dat bestaat uit een hydrodynamische puls: een verhoging van de snelheid, dichtheid en temperatuur, zonder de toevoeging van een magneetveld. Dit zogenaamde *cone*-model wordt gekenmerkt door een richting (lengte- en breedtegraad), een spanwijdte en een snelheid. Deze puls betreft het simulatiedomein door de randvoorwaarden van de zonnewind op 0,1 au (zie eerder) te vervangen met de informatie van het zonnestormmodel. Hierbij beweegt de zonnestorm zich voort met een snelheid die enkel radiaal is. Ondanks dat dit zonnestormmodel het voorbijge decennium veelvuldig is gebruikt bij het voorspellen van ruimteweerstormen, heeft het één grote beperking: het *cone*-model heeft geen intrinsiek magneetveld waardoor het moeilijk is om te bepalen hoe de zonnestorm interacteert met het magneetveld van de aarde. En laat dit nu net de cruciale parameter zijn voor het voorspellen van zijn impact op aarde en op de satellieten.

Een uitbreiding

Daarom besloten we het model een hoognodige uitbreiding te geven: een zonnestormmodel mét een magneetveld zodat we niet enkel het tijdstip van



Figuur 3. Resultaten van een zonnestormsimulatie. Boven: de radiale snelheid in het equatoriaal vlak (links) en het meridionale vlak door de positie van de aarde (rechts). De zonnestorm wordt gekenmerkt door een hogere snelheid dan de omliggende zonnewind. Onder: tijdslijn die de voorspelling van de radiale snelheid en de magnetische z-component op aarde weergeeft.

de impact op aarde kunnen voorspellen, maar ook de magnetische impact. We kozen hiervoor voor een lineair krachtenvrij (LKV-)sferomak-model [4]. In een axisymmetrische sferomak kunnen we het magneetveld uitdrukken aan de hand van twee scalaire potentiaalfuncties A & Q , die afhankelijk zijn van de radiale en breedtegraadrichtingen [5]. Bij een krachtenvrije magneetconfiguratie verdwijnt de Lorentzkracht en domineert de magnetische druk over de plasmadruk ($\mathbf{J} \cdot \mathbf{B} = 0$). Na enige wiskunde blijkt dat de potentiaal Q , dat zorgt voor het toroïdaal magneetveld, een functie moet zijn van de poloïdaal potentiaal A ($Q = Q(A)$). Door aan te nemen dat de potentiaal Q een lineaire relatie heeft met potentiaal A creëren we een lineaire en krachtenvrije oplossing die we krijgen na het oplossen van de corresponderende krachtenvrije vergelijkingen voor het magneetveld. In figuur 2 tonen we een voorbeeld van deze lineaire krachtenvrije sferomak. In tegenstelling tot het simpelere cone-model, bevat het LKV-sferomakmodel extra parameters die het magneetveld beschrijven: de sterkte en draairichting van het magneetveld alsook in welke richting de symmetrie-as van het model zich bevindt. Het LKV-model betreedt het simulatiedomein door de randvoorwaarden van de zonnewind op 0,1 au te vervangen met de informatie van het zonnestormmodel, net als in het cone-model.

Simuleren, simuleren, simuleren

Om een simulatie van het EUHFORIA-model te draaien, maken wetenschappers gebruik van een supercomputer. Deze supercomputers maken het mogelijk om het complexe probleem op te splitsen in verschillende kleinere problemen die elk tegelijkertijd door een apart proces kunnen worden berekend – ook wel *parallel computing* genoemd. Deze processen wisselen onderling de nodige informatie uit zodat elk deelprobleem over de juiste informatie van de andere deelproblemen beschikt. Op een laptop neemt deze rekenpartij meer dan twee dagen in beslag, maar op een supercomputer minder dan

twee uur. Dat is nodig, want voor extreem snelle CME's hebben we geen twee dagen de tijd om op het antwoord van het EUHFORIA-model te wachten, dan zijn we te laat...

In figuur 3 tonen we resultaten van een zonnestormsimulatie. Het bovenste paneel correspondeert met een doorsnede van de driedimensionale data in het equatoriaal vlak van de zon (links) en het meridiaanvlak door de locatie van de aarde (rechts). We merken op dat in het coördinatenstelsel dat hier gebruikt wordt, een stelsel dat draait rond de rotatie-as van de zon, de projectie van de aarde (blauw punt) in het equatoriaalvlak zich steeds op dezelfde lengtegraad bevindt, maar in het meridiaanvlak in breedtegraad kan variëren. Dit komt omdat de aarde zich voortbeweegt in het ecliptisch vlak. In de onderste twee panelen worden tijdslijnen weergegeven die de snelheid en de magnetische z -component representeren op de locatie van de aarde. De tijdslijnen van het cone-model (blauw) tonen weinig variatie in de magneetveldcomponent, terwijl de tijdslijn van het LKV-sferomakmodel (rood) over een duidelijke negatieve z -component beschikt. De negatieve z -component is cruciaal voor het voorspellen van de impact van een zonnestorm op aarde, omdat de interactie van een langdurig negatieve z -component met het magneetveld van de aarde zorgt dat de deeltjes van de zonnestorm zich tot op onze aarde kunnen voortbewegen om zo een geomagnetische storm te veroorzaken.

De toekomst

Net zoals bij het voorspellen van het weer op aarde – denk hierbij bijvoorbeeld aan het voorspellen van het pad van een orkaan – kan ook het ruimteweerbericht wel eens de mist in gaan [6]. De redenen zijn tweevoudig: allereerst zijn onze modellen, ondanks hun complexiteit, nog steeds een vereenvoudiging van de werkelijkheid, die we beetje bij beetje realistischer en beter voorspellend proberen te maken. Ten tweede zijn wetenschappers afhankelijk van de observationele data die beschikbaar zijn om de ini-

EUHFORIA-MODEL

Het EUHFORIA-model is geïmplementeerd in het ESA Virtuele Ruimtetweer Modeller Centrum waar ook u het model kunt draaien en de resultaten kunt raadplegen (<https://swe.ssa.esa.int/kul-cmpa-federated>). Hiervoor dient u eerst een account aan te vragen bij het ESA-ruimtetweerportaal (<https://swe.ssa.esa.int/registration>).

tiële parameters van het zonnestorm model te kunnen bepalen, en deze zijn helaas gelimiteerd. Tijdens de beschikbaarheid van de STEREO-A- en B-satellieten hadden we observaties van zonnestormen vanuit drie verschillende hoeken in ons zonnestelsel, maar nu we met de STEREO-B-satelliet het contact kwijt zijn en STEREO-A zich steeds dichterbij de aarde toe beweegt, naderen we een punt waarop we de zonnestormen maar vanuit één standpunt kunnen observeren en dit maakt het extreem moeilijk om de parameters voor het cone- en LKV-sferomakmodel nauwkeurig te bepalen. Gelukkig voorzien de recent gelanceerde Parker Solar Probe- en Solar Orbiter-satellieten ons sinds kort van nieuwe data en zullen zij zonnestormen observeren vanuit nieuwe hoeken en vanaf afstanden dicht bij de zon, observaties die we nog nooit eerder gezien hebben. Met het stijgende aantal satellieten rondom de aarde en in de ruimte is het belangrijker dan ooit dat onze voorspellingen nauwkeuriger worden om de kans op schade aan deze satellieten maximaal te beperken...

REFERENTIES

- 1 J. Pomoell en S. Poedts, EUHFORIA: European Heliospheric Forecasting Information Asset, *JWSWC* 8, A35 (2018).
- 2 G. Newkirk en M. Altschuler, Magnetic fields and the structure of the Solar Corona, *Bulletin of the Am. Astr. Soc.* 1, 288 (1969).
- 3 M. Owens en J. Forsyth, The Heliospheric magnetic field, *Liv. Reviews in Sol. Phys.* 10, 1 (5) (2013).
- 4 C. Verbeke et al., The evolution of coronal mass ejections in the inner heliosphere: Implementing the sferomak model with EUHFORIA, *A&A* 627, A111 (2019).
- 5 S. Chandrasekhar, On force-free magnetic fields, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 42, 1 (1956).
- 6 Riley et al., Forecasting the arrival time of coronal mass ejections: analysis of the CCMC CME scoreboard, *Space Weather* 16, 9 (2018).