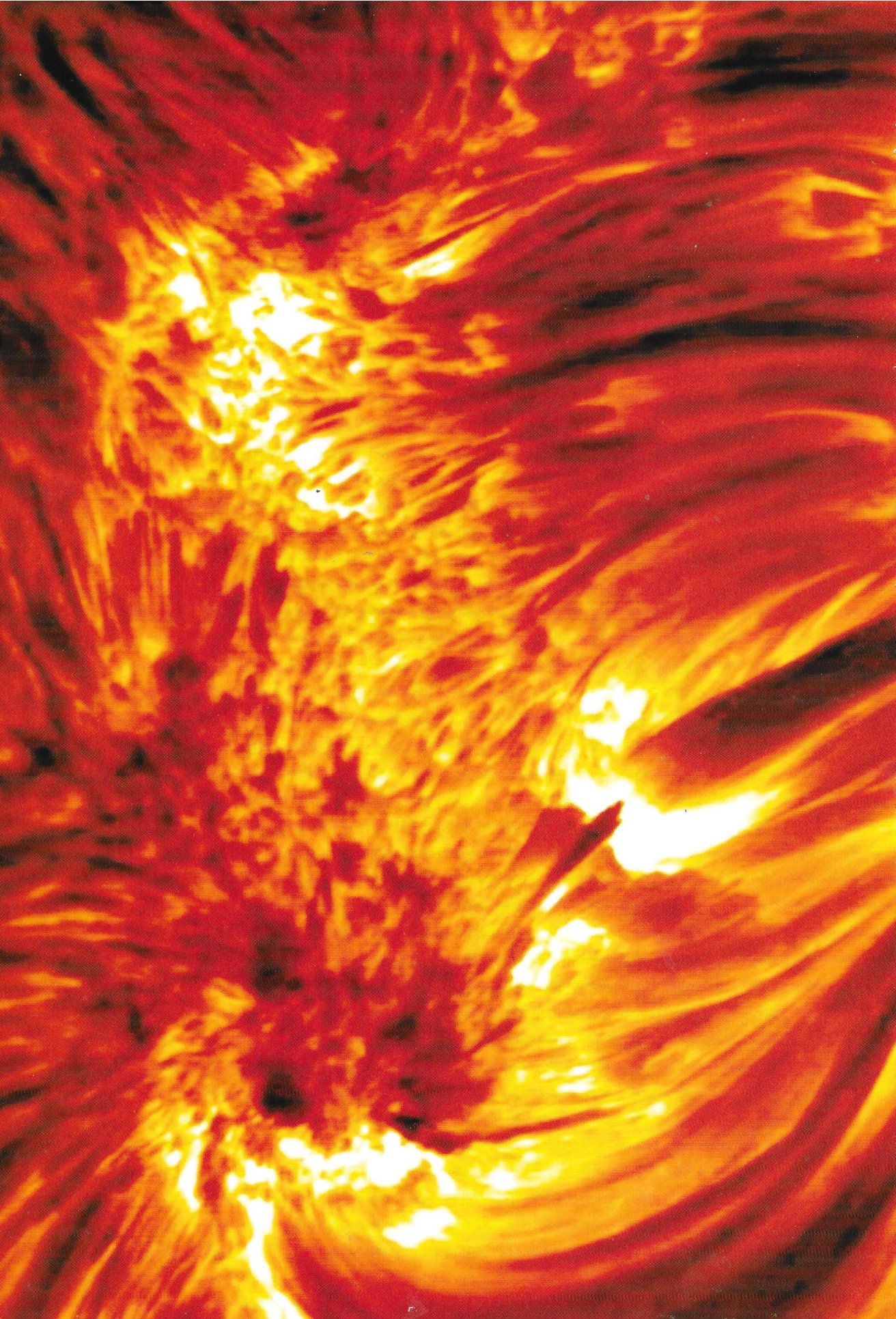
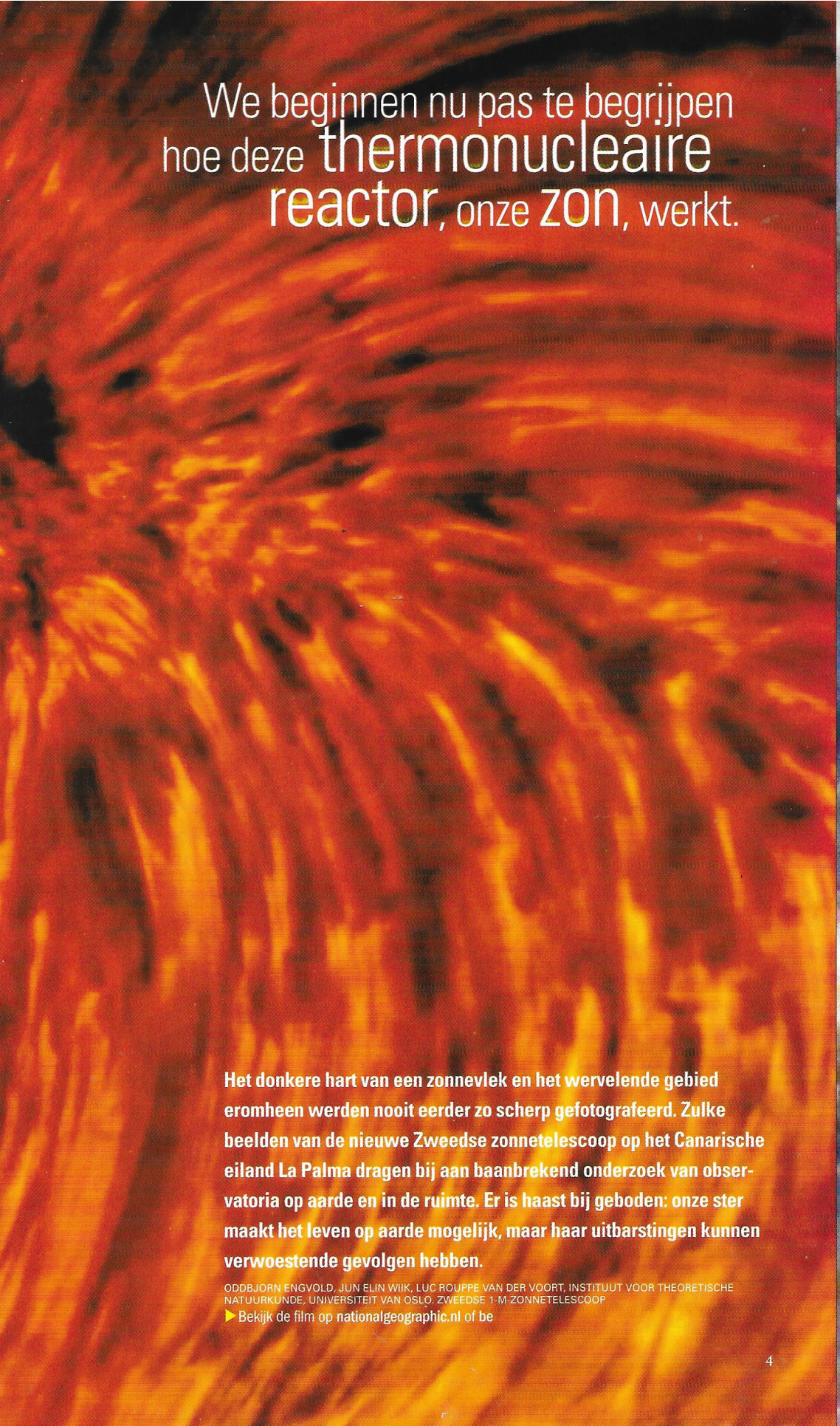


We beginnen nu pas te begrijpen hoe deze thermonucleaire reactor, onze zon, werkt.



Het donkere hart van een zonnevlek en het wervelende gebied eromheen werden nooit eerder zo scherp gefotografeerd. Zulke beelden van de nieuwe Zweedse zonnetelescoop op het Canarische eiland La Palma dragen bij aan baanbrekend onderzoek van observatoria op aarde en in de ruimte. Er is haast bij geboden: onze ster maakt het leven op aarde mogelijk, maar haar uitbarstingen kunnen verwoestende gevolgen hebben.

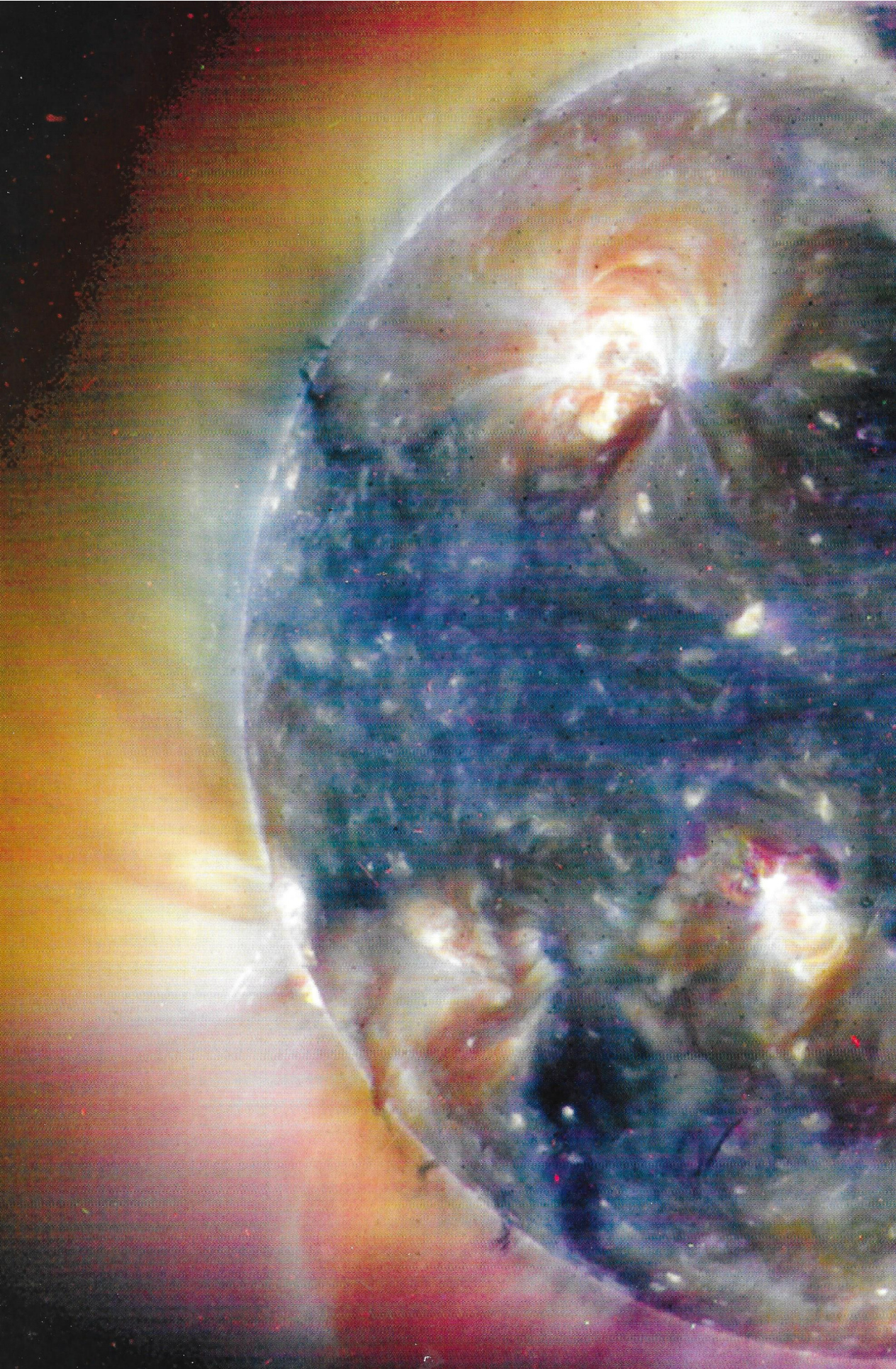
ODDBJORN ENGVOLD, JUN ELIN WIIK, LUC ROUPPE VAN DER VOORT, INSTITUUT VOOR THEORETISCHE NATUURKUNDE, UNIVERSITEIT VAN OSLO. ZWEEDSE 1-M-ZONNETELESCOOP

▶ Bekijk de film op nationalgeographic.nl of be

de zon

Leven met een ster







"Het is geen saaie witte schijf," zegt zonnefysicus Bernhard Fleck. Zeker niet zoals zij werd waargenomen door het SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) dat in 1995 werd gelanceerd. Het SOHO maakte dit beeld in extreem-ultraviolette golflengten, kleurgecodeerd naar temperatuur – rood staat voor de heetste gebieden. Waarom is de corona honderden, zelfs duizenden malen heter dan het oppervlak? Het is één van de vragen waarom wetenschappers de zon blijven bestuderen.

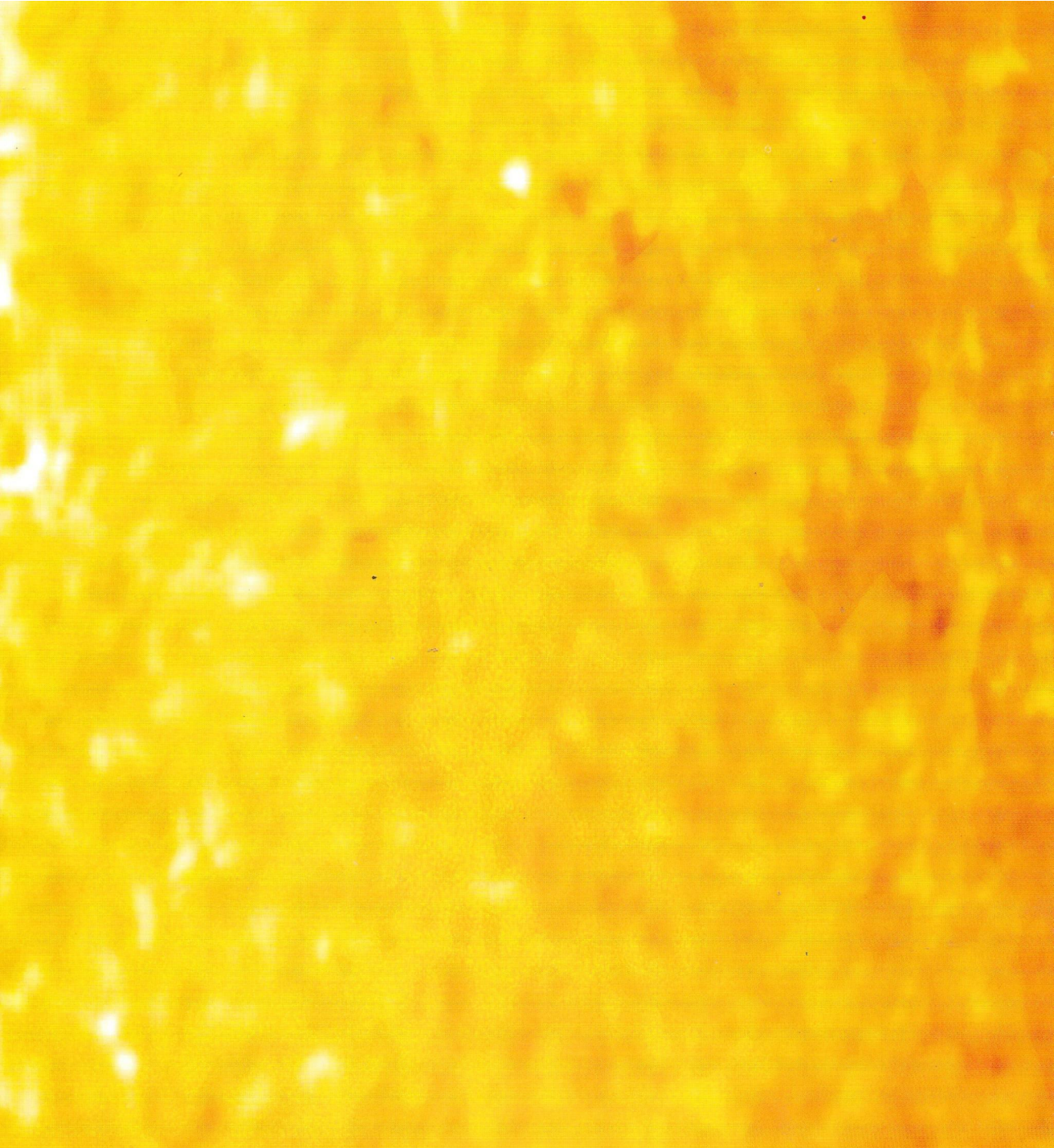
GEHEEL LINKS: FRED ASPENAK (21 JUNI 2001, VERDUISTERING; DIGITALE SAMENSTELLING VAN 22 NEGATIEVEN). SOLAR AND HELIOSPHERIC OBSERVATORY/EXTREME-ULTRAVIOLET IMAGING TELESCOPE (SOHO/EIT), EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) EN NASA





Magnetisme zichtbaar gemaakt: zo kan vrijwel elk aspect van de zon worden beschreven. De zogenoemde lussen bereiken makkelijk een hoogte van tienmaal de aardas (zie pictogram). De energie die door de dynamiek van kleinere lussen wordt geproduceerd, is waarschijnlijk de bron van de hitte in de corona. De superverhitte gassen waaruit de zon bestaat, bevinden zich in een elektrisch geleidende toestand – plasma. Onder het oppervlak kan plasma magnetische veldlijnen beïnvloeden. Als deze lijnen sterk genoeg zijn om een boog te vormen, volgt een zeer sterke elektrische stroom.

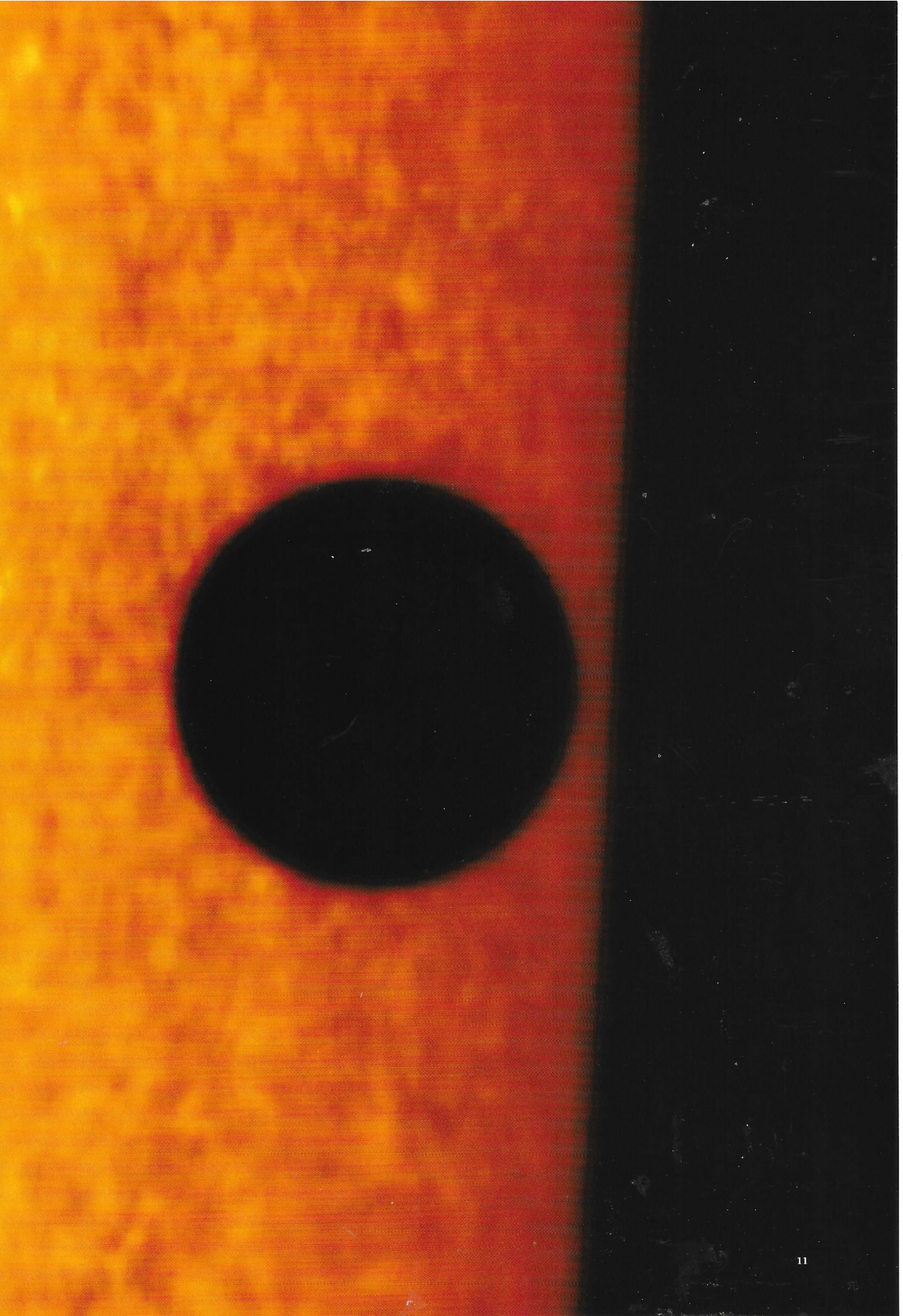
MARKUS J. ASCHWANDEN, LOCKHEED MARTIN SOLAR AND ASTROPHYSICS LABORATORY (LMSAL). OPGENOMEN IN EXTREEM ULTRAVIOLET DOOR NASA'S TRANSITION REGION AND CORONAL EXPLORER (TRACE) SATELLITE

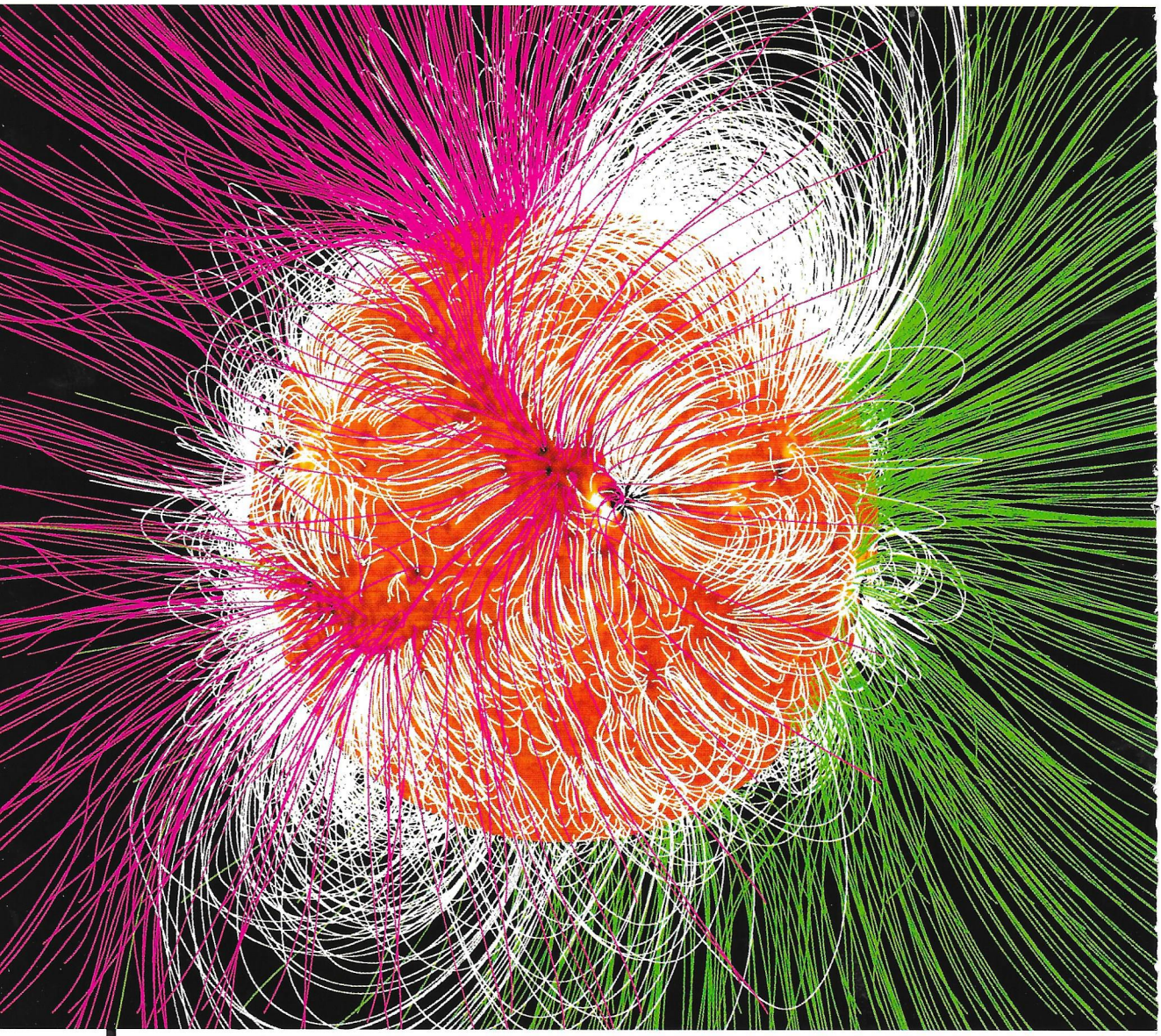


Mercurius stond op 7 mei 2003 op één lijn met de aarde en de zon (rechts), wat elke honderd jaar twaalf of dertien keer voorkomt. Gezien vanaf de aarde schoof Venus vorige maand voor het eerst sinds 1882 voor de zon langs. Tijdens de Venusovergang in 1769 verrichtten waarnemers over de hele wereld metingen om de afstand van de aarde tot de zon te bepalen. Ze zaten er maar drie miljoen kilometer naast. De zon is ongeveer 150 miljoen kilometer ver weg.

MATS LOFDAHL EN PETER DETTORI, INSTITUUT VOOR ZONNEFYSICA VAN DE KONINKLIJKE ZWEEDSE ACADEMIE VAN WETENSCHAPPEN (ISP/RSAS) ZWEEDSE 1-M-ZONNETELESCOOP

▶ Bekijk de film op nationalgeographic.nl of be





Onze ster geeft haar **geheimen** moeizaam **prijs**. De zon bestuderen betekent een wereld betreden die heel curieus is.

TEKST: CURT SUPLEE

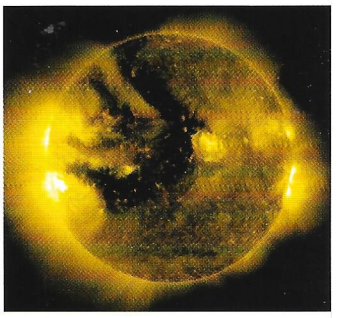
Ze noemen het 'goede seeing'. Ik bevind me op 2400 meter boven de Atlantische Oceaan voor de kust van Afrika en kijk naar de helderblauwe ochtendlucht. Voor astronomen betekent 'goede seeing' dat het mogelijk is een scherp en stabiel beeld te maken van objecten aan de hemel. En inderdaad, de saffierblauwe helderheid boven La Palma, een van de meest westelijk gelegen Canarische eilanden, is bijna surrealistisch.

"Steek je arm uit tot je duim net de zon bedekt," zegt Göran Scharmer van het Instituut voor Zonnefysica van de Koninklijke Zweedse Academie voor Wetenschappen. "Als het tot aan de rand van je duim donkerblauw kleurt, krijgen we een coronale hemel."

Scharmer en zijn team zijn op de rand van een oude caldeira geklommen, bijna een kilometer boven het wolkendek, om het vuur aan de hemel te bestuderen.

Onze zon brandde al voor er een aarde was om zich te warmen aan haar levenonderhoudende gloed – nu 4,6 miljard jaar geleden. Toch beginnen wetenschappers pas sinds twintig jaar te begrijpen hoe deze thermonucleaire reactor werkt.

Naar galactische maatstaven is onze ster vrij onbeduidend. Goed, ze is zo groot dat de aarde er makkelijk een miljoen keer in zou passen, en ze is zo compact dat de zonnestralen die we nu zien nog voor de laatste ijstijd aan hun reis uit de kern van de zon zijn begonnen. Ze hebben er honderdduizenden jaren over gedaan om zich naar buiten te werken, naar de gloeiende fotosfeer, om vervolgens in acht minuten de 150 miljoen kilometer naar onze ogen af te leggen.



HET MAGNETISCHE VELD VAN DE ZON zag er op 14 januari dit jaar zo uit (links). Langs open, gekleurde lijnen stroomt plasma weg dat het zonnestelsel vult met zonnewind die het snelst blaast uit de donkere gebieden (boven) met lagere magnetische intensiteit.

COMPUTERSIMULATIE: KAREL SCHRIJVER EN MARC DEROSA, LMSAL (LINKS); SOHO/EIT, ESA EN NASA

Toch valt onze zon in de stellaire categorie van gele dwergen, type G genoemd, die zo gewoon zijn dat er alleen in de melkweg al miljarden van te vinden zijn.

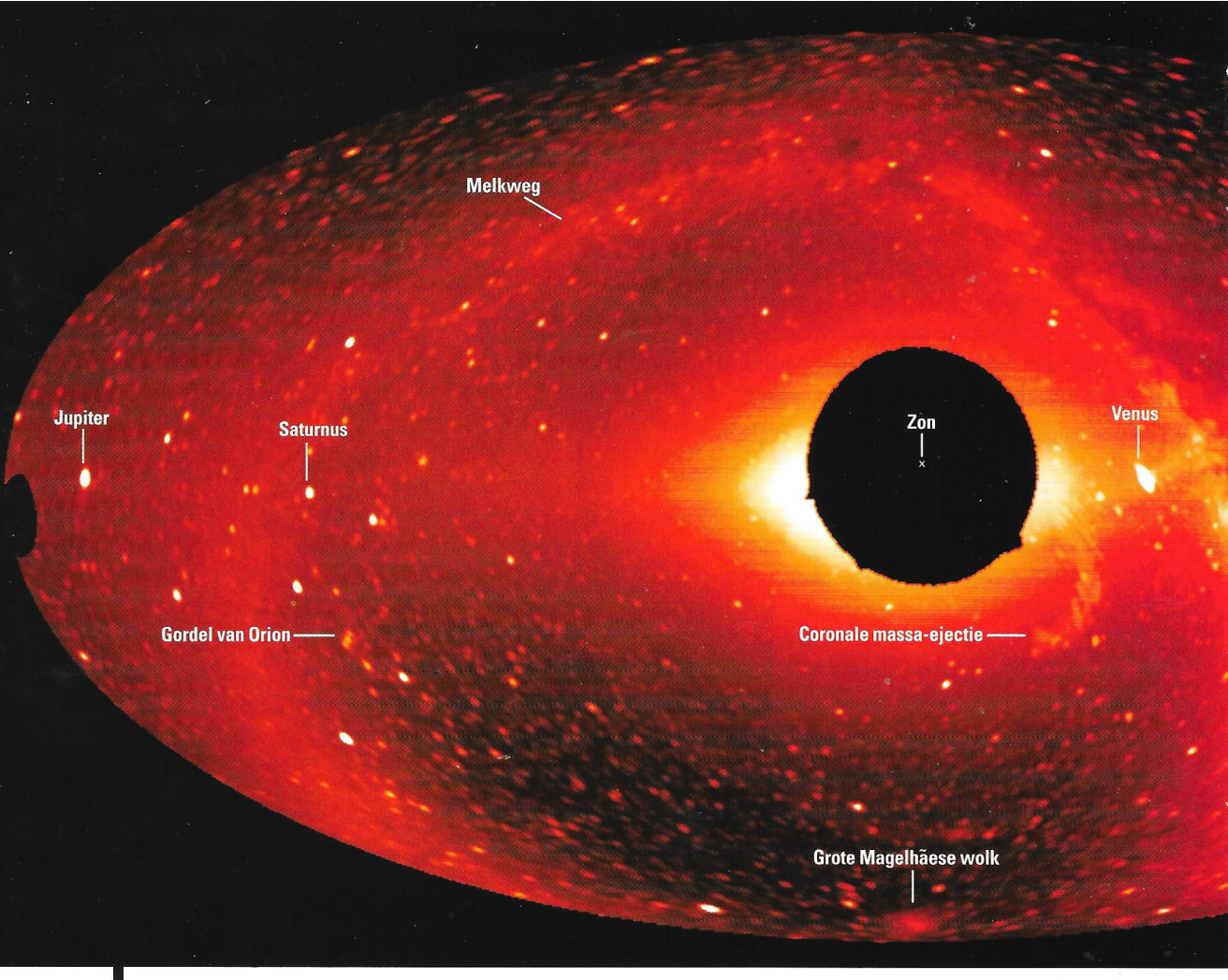
Maar afgezien van onze eigen planeet is er niets in het heelal zo belangrijk voor ons als de zon. Ze is de bron van vrijwel alle energie die leven mogelijk maakt, de motor van ons weer, de bepalende factor voor ons klimaat en, uiteraard, onze dichtstbijzijnde informatiebron over objecten die sterrenstelsels bevolken en processen die de kosmos doen veranderen.

"De zon is de steen van Rosetta van de astrofysica", aldus Scharmer, die met zijn waarnemingen met de Zweedse 1-meter-zonnetelescoop op La Palma steeds weer nieuwe wereldrecords voor hoge resolutie vestigt. "Maar we hebben haar nog niet helemaal kunnen ontcijferen."

Zelfs vier eeuwen nadat Galileo en anderen onthulden dat er vlekken over het zonsoppervlak bewogen, zijn er nog veel vragen over de zon waarop het antwoord in duister is gehuld. Wetenschappers staan nu op het punt antwoorden te vinden dankzij een groeiende internationale samenwerking in de afgelopen twintig jaar en dankzij vooruitgang op het gebied van computermodellen en nieuwe hightech instrumenten. Astronomen kunnen nu aspecten van de werking van de zon bestuderen die eerder onherkenbaar en soms zelfs onvoorstelbaar waren.

"Voorheen was het solaire dermatologie," zegt Scharmer. "Nu is het echt astrofysica."

Maar we hebben nog steeds een veel hoger ruimtelijk scheidend vermogen nodig. Veel wetenschappers denken dat enkele belangrijke structuren op de zon slechts een paar kilometer groot zijn. Het beste scheidend vermogen dat met de Zweedse telescoop kan worden gehaald, is tachtig kilometer, dus het team is druk bezig geweest instrumenten te verbeteren, evenals andere onderzoekers bij de vele observatieposten – van Sunspot in New Mexico tot de bergtoppen van Maui en het grimmige binnenland van Siberië. Sinds halverwege de jaren negentig zijn boven-



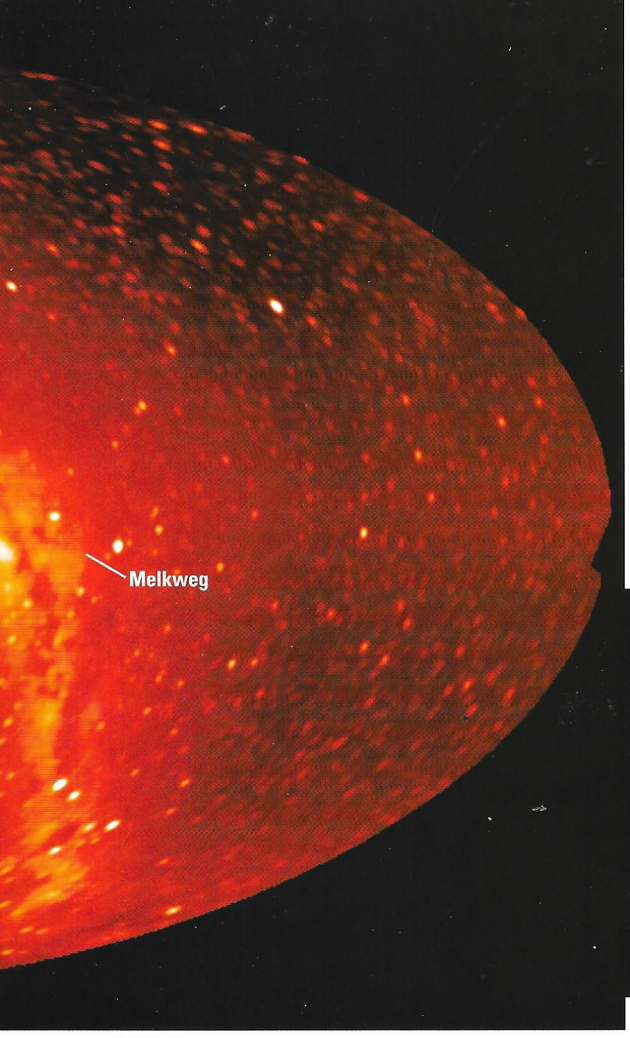
'De zon is onze steen van Rosetta, maar we

dien zo'n tien belangrijke ruimteobservatoria gelanceerd.

Ook zijn de eerste stappen gezet om het 'weer' in de ruimte – veranderingen die worden veroorzaakt door de miljarden tonnen plasma die de zon uitstoot en die magneto-elektrische stormen veroorzaken in het zonnestelsel – te begrijpen en te kunnen voorspellen. Voor diegenen die gevoelige uitzend- en communicatiesystemen beheren, zoals het *global positioning system* (GPS), militaire ruimtevoertuigen en verschillende systemen die van groot belang zijn voor ons dagelijks leven, kan dit niet snel genoeg gaan.

Hoewel vrijwel alles wat er in en op de zon gebeurt, invloed heeft op onze planeet, zijn er twee soorten explosieve gebeurtenissen die aardbewoners hard kunnen treffen. De ene is een zonnevlam, waarbij een klein gebied boven het zonsoppervlak plotseling explodeert en tientallen miljoenen graden heet wordt. Hierbij komt een stralingspuls vrij die communicatie en satellieten kan uitschakelen en, in theorie, een ruimtewandelende astronaut kan doden.

De andere gebeurtenis is een zogeheten coronale massa-ejectie (CME), een massa-uitstoot waarbij met een snelheid van miljoenen kilometers per uur miljarden tonnen geladen deeltjes ontsnappen uit de halo om de zon, de corona. Als deze reusachtige wolken op de beschermende magnetosfeer van de aarde inslaan, drukken ze de magnetische veldlijnen samen en dragen ze biljoenen watt energie over aan de bovenste atmosfeer van de aarde. Hierdoor kunnen hoogspanningskabels overbelast raken, wat grote stroomstoringen tot gevolg heeft, en kunnen gevoelige instrumenten die in een baan om de aarde draaien, worden vernietigd.



maar moeizaam prijs. Geen wonder, want de zon bestuderen betekent een wereld betreden die heel curieus is.

Het grootste deel van de aarde is massief, terwijl de zon geheel uit gas bestaat. De zichtbare buitenlaag heet de fotosfeer, maar eigenlijk heeft de zon geen oppervlak. Haar atmosfeer reikt tot verder dan de aardbaan en wordt steeds dunner.

Bovendien is de zon een gekkenhuis van elektromagnetische activiteit. Op aarde bevindt zich relatief weinig materiaal dat elektriciteit goed geleidt. Op de zon is dat anders, want al het gas is geïoniseerd. Elektronen en positief geladen atoomkernen geleiden elektriciteit uitstekend.

DE NIEUWE SATELLIET CORIOLIS gebruikt zijn Solar Mass Ejection Imager om vanuit een baan om de aarde de kosmische omgeving vast te leggen. Deze satelliet tracht potentieel schadelijke uitbarstingen van plasma, die coronale massa-ejecties (CME) worden genoemd, te vinden en te volgen. Deze werd in mei 2003 waargenomen.

AIR FORCE RESEARCH LABORATORY, HANSCOM AFB, MASSACHUSETTS. SAMENGESTELD BEELD VAN DE HEMEL; OP ANDER MOMENT GEMAAKT BEELD VAN CORONALE MASSA-EJECTIE IS LICHTER GEMAAKT EN OVER DE FOTO HEEN GELEGD

hebben haar nog niet helemaal kunnen ontcijferen.'

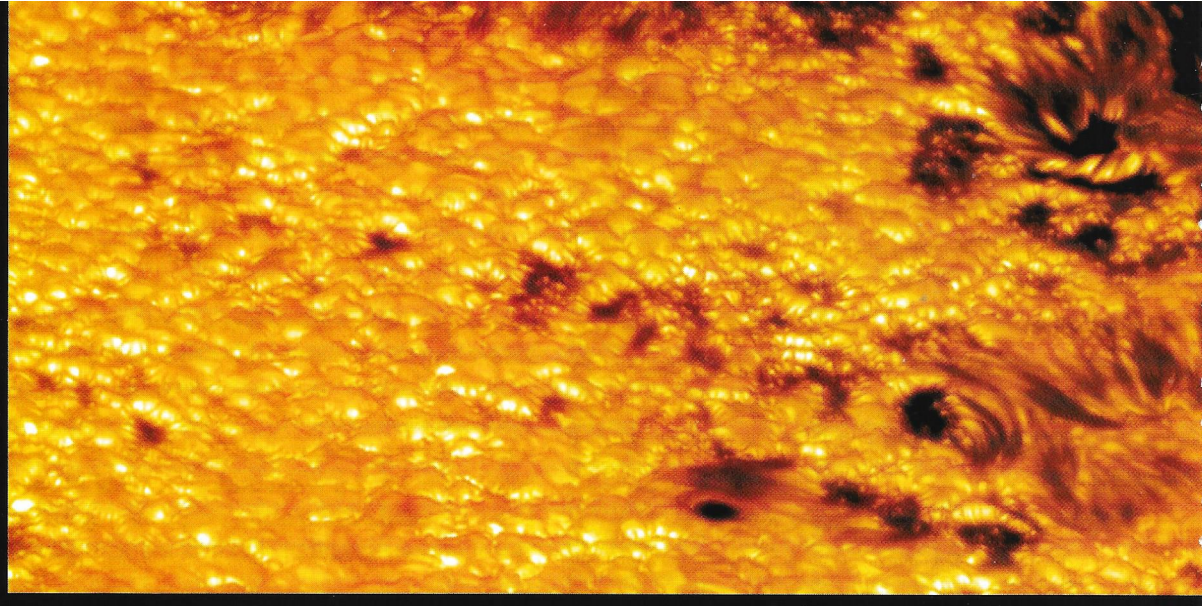
—Göran Scharmer, Institute for Solar Physics

Zonnevlammen en CME's treden vaak samen op, zoals afgelopen oktober toen de op drie na krachtigste zonnevlam ooit waargenomen explodeerde en de aarde gedurende twee dagen werd getroffen door CME's. Dankzij moderne waarschuwingsapparatuur konden we van tevoren maatregelen nemen. De atmosfeer was zo elektrisch geladen dat het noorderlicht tot aan het Middellandse-Zeegebied te zien was, maar de schade bleef beperkt. In 1989 trof een krachtige CME de aarde en stelde het elektriciteitsnet van Hydro-Québec in Canada buiten werking. Bijna zeven miljoen mensen kwamen zonder stroom te zitten en de schade liep in de vele miljoenen euro's.

Het vinden van de oorzaak van zulke explosies is een van de belangrijkste doelstellingen van onderzoekers. Maar onze ster geeft haar geheimen De ionisatie is het gevolg van de overweldigende thermische energie. Elektronen nemen zo veel energie op dat ze van hun atomen afschieten. Zo ontstaat een kokende stoofpot van positief geladen atoomkernen en negatief geladen elektronen – een gasvormig mengsel dat plasma wordt genoemd en dat even goed geleidt als koperdraad.

Zoals elk elektrisch geladen object vormt plasma, als het in beweging is, magnetische velden. Als die velden verschuiven, veroorzaken ze elektrische stromen, die op hun beurt weer meer magnetische velden produceren. Deze wirwar van plasma en magnetische en elektrische effecten bepaalt de vorm van vrijwel alles in of boven de zon. Zoals van de heldere coronale lussen en de donkere gebieden die we zonnevlekken noemen.

De bron van al deze energie is kernfusie. Zoals alle sterren ontstond de zon toen gas en stof –



BELLEN MET EEN OPPERVLAKTE van bijna zeventien keer Nederland bedekken het zonsoppervlak (boven) in dit bijzonder scherpe beeld van de Zweedse zonnetelescoop die als eerste driedimensionale structuren kan laten zien. Het opzwellen en inzakken van deze zogenoemde granula brengt geluidsgolven voort die de zon elke vijf minuten doen bonzen als een trommel. "We kunnen ons nu een veel beter beeld vormen van de turbulente dalen tussen de granula [illustratie, rechts]," zegt zonnefysicus Tom Berger. De observaties met de telescoop en computermodellen (onder) bevestigen eerdere theorieën: er ontstaan lichte vlekken, of fakkelgebieden, wanneer de magnetische intensiteit in de dalen toeneemt. Fakkelgebieden zijn in overvloed aanwezig in de buurt van sterke zonnevlekken. Daarom is de zon het helderst als er veel donkere zonnevlekken (boven, rechtsboven) zijn. "Maar we begrijpen fakkelgebieden niet helemaal," aldus Berger.

GÖRAN SCHARMER EN MATS LOFDAHL, ISP/RSAS (BOVEN); AKE NORDLUND, NIELS BOHR INSTITUTE FOR ASTRONOMY, PHYSICS, AND GEOPHYSICS EN ROBERT STEIN, MICHIGAN STATE UNIVERSITY (ONDER); ILLUSTRATIES: KENNETH EWARD



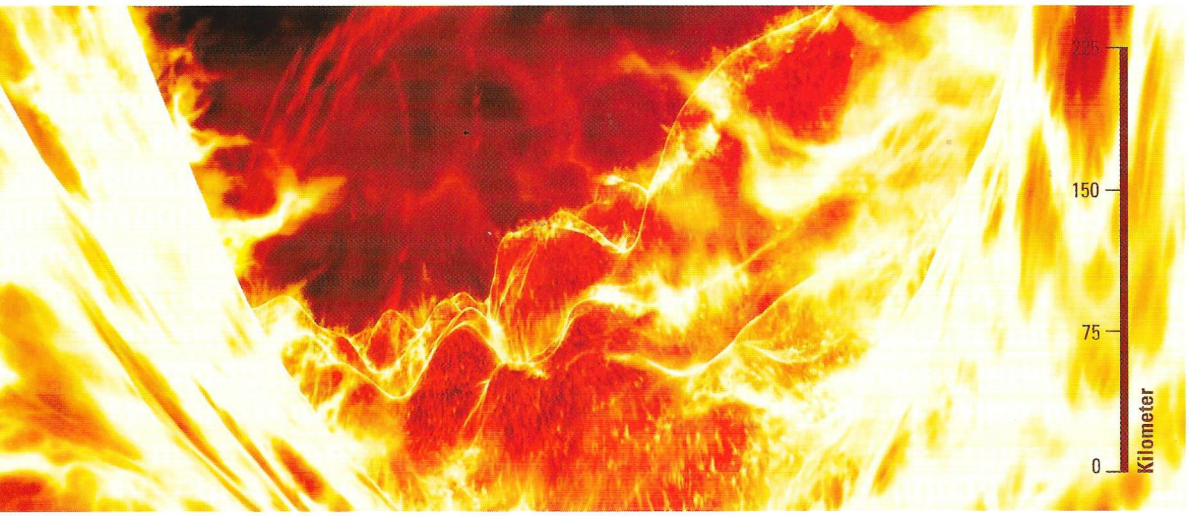
De zon **brandt** nu 4,6 miljard jaar, dus al voor er

onder invloed van zwaartekracht – naar elkaar toe dreven en een kolkende bol vormden. Naarmate de massa groter werd, werd de waterstof in het midden door de enorme druk op elkaar geduwd, wat uiteindelijk resulteerde in een fusiereactie waarbij waterstofkernen samensmelten tot heliumkernen. Die kernen zijn iets minder zwaar dan de waterstofkernen waaruit ze steeds worden gevormd. Het verschil wordt omgezet in energie volgens Einsteins beroemde formule $E=mc^2$.

Een groot deel van die energie wordt afgevoerd als licht in de vorm van gammastraling – de golflengte van elektromagnetische straling met de hoogst mogelijke energie. De kern van de zon is echter zo dicht dat een enkel foton, een licht'deeltje', zich nog geen fractie van een millimeter kan bewegen zonder op een subatomair deeltje te botsen, waar het wordt weggeschoten of geabsorbeerd en weer uitgestraald. Zo kan het honderdduizenden jaren duren voordat een foton zich al kaatsend een weg heeft gebaand naar het zonsoppervlak, zevenhonderdduizend kilometer naar boven. Tegen die tijd is de energie van het foton zo sterk afgenomen dat het grootste deel tevoorschijn komt als de tamelijk laagenergetische straling die wij zichtbaar licht noemen.

Het duurde tientallen jaren voor we een natuurkundige verklaring hadden voor dit proces, dat werd bespot toen het in de jaren twintig werd geopperd door de vooraanstaande Britse astronoom Sir Arthur Eddington en anderen. Zij waren ervan overtuigd dat de energiebron van de zon een subatomair verschijnsel moest zijn waarvoor enorme hitte nodig was.

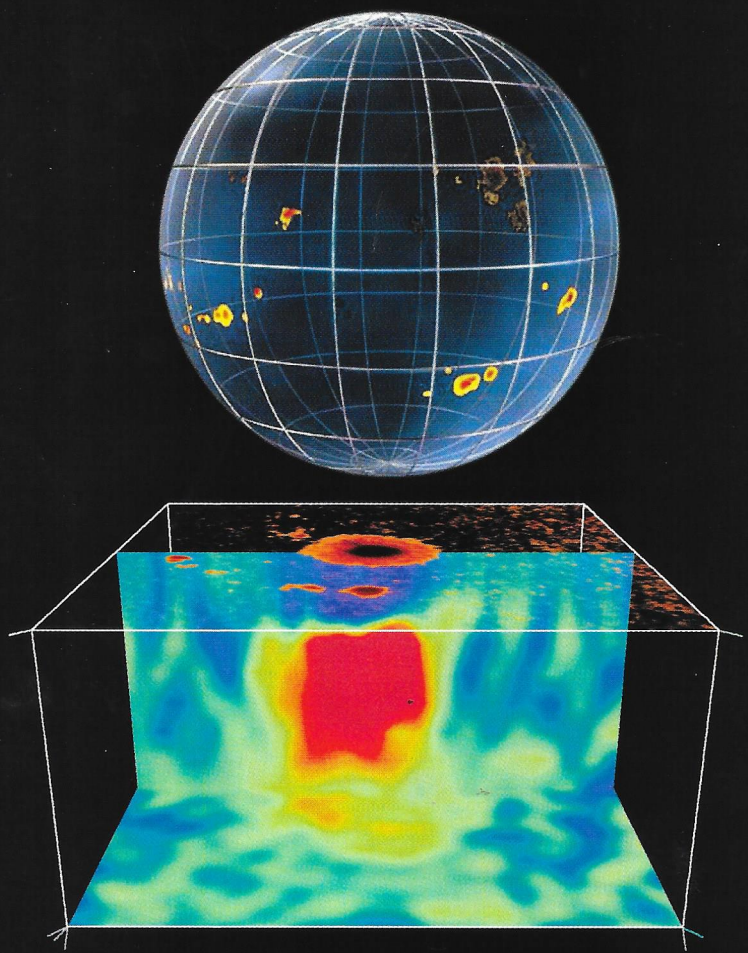
In de jaren vijftig was het fusiemodel echter al overtuigend geverifieerd, op één mysterie na: de uitstoot van deeltjes die neutrino's worden genoemd en die ontstaan tijdens het fusieproces. Ondanks tientallen jaren zorgvuldig zoeken, konden wetenschappers slechts een derde van alle neutrino's vinden die in theorie de aarde dagelijks zouden moeten treffen.



Uiteindelijk werd het probleem drie jaar geleden opgelost door een opmerkelijke internationale samenwerking tussen onderzoekscentra in Japan en Canada. De onderzoekers toonden aan dat de 'ontbrekende' neutrino's waren veranderd in verschillende andere typen die niet waarneembaar waren tot de nieuwste instrumenten beschikbaar kwamen.

Wetenschappers zijn opgetogen over wat het hedendaagse onderzoek toevoegt aan onze kennis van de zon. Peter Gilman, een zononderzoeker

een aarde was om zich aan haar te warmen.



SONOGRAM VAN DE ZON: wetenschappers kijken onder het zonsoppervlak door middel van helioseismologie. Via het dopplereffect meten instrumenten geluidsgolven die door de zon bewegen. Veranderingen in voortplantingssnelheid wijzen op inwendige structuren. De techniek bevestigt dat het magnetisme van een zonnevlek (linksonder) het plasma eronder koel houdt (paars) en heet opstijgend plasma (rood) tegenhoudt. Het kan zelfs zonnevlekken aan de andere kant van de zon zien (linksboven). Voorts wordt duidelijk dat de convectiezone en de stralingszone met verschillende snelheden draaien, waardoor het grootste magnetische veld wordt opgewekt. Verder

'Niemand had gedacht dat het mogelijk zou zijn om

van het High Altitude Observatory van het National Center for Atmospheric Research, vat het zo samen: "Dit is de gouden eeuw van de zonnewetenschap."

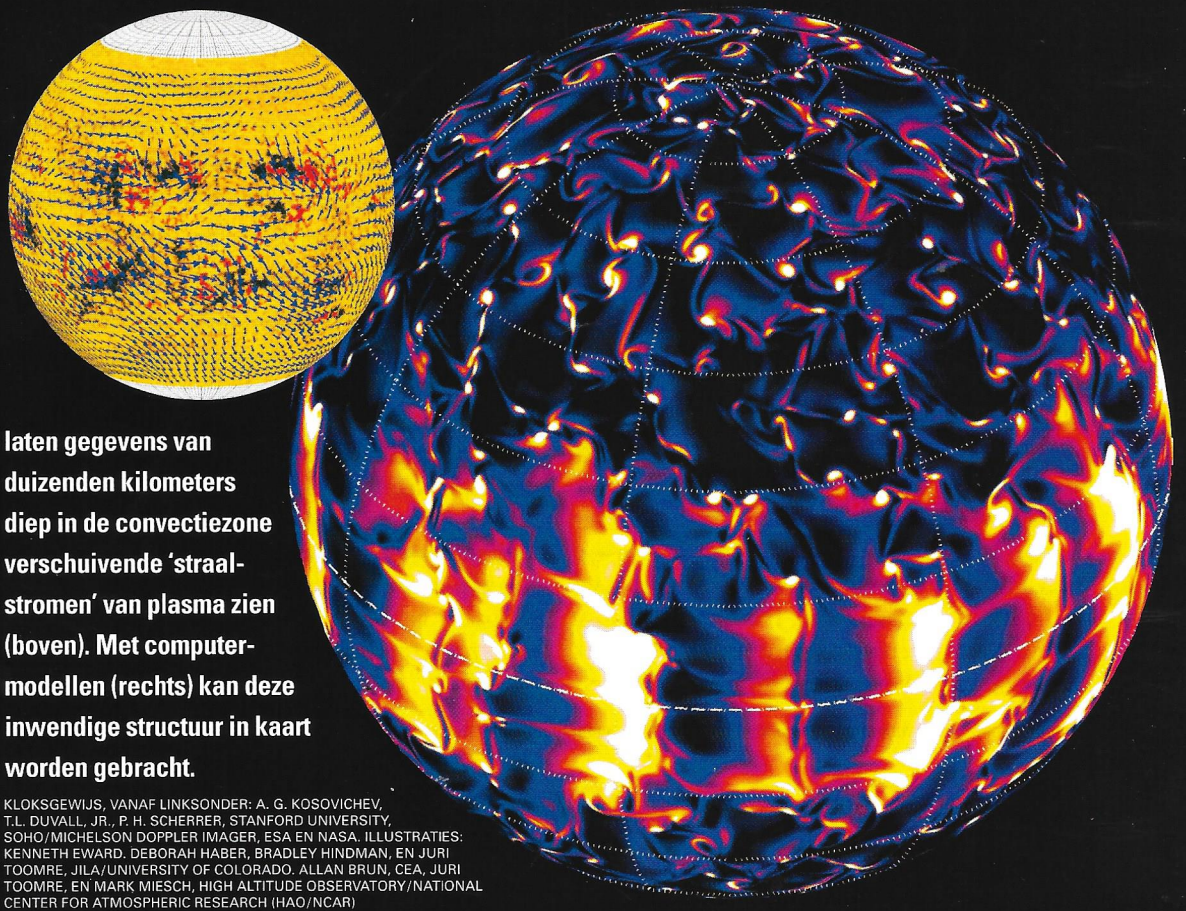
De oplossing van het neutrinoprobleem toont aan dat het onderzoek een internationale inspanning is. Het werkpaard van de ruimtevloot die zich bezighoudt met zonneonderzoek, het Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), is een samenwerkingsproject van de European Space Agency (ESA) en de Amerikaanse ruimtevaartorganisatie NASA. De satelliet, die in 1995 werd gelanceerd, heeft met zijn arsenaal aan instrumenten over de hele wereld bijgedragen aan het wetenschappelijk onderzoek.

Maar elk moeizaam verkregen antwoord roept nieuwe vragen op: de eindeloze dans van plasma en magnetische velden maakt het vreselijk ingewikkeld om oorzaak en gevolg uit elkaar te houden. Elk belangrijk zonnefenomeen wordt weer beïnvloed door andere, en geen ervan begrijpen we volledig. Aangezien de behoefte aan het kunnen voorspellen van ruimteweer steeds groter wordt, zal het zoeken naar oplossingen voor wat zonnefysici beschouwen als 'de grote vragen' onverminderd doorgaan. Bovendien, stelt astronoom John Harvey van het National Solar Observatory, 'is de zon het enige astronomische object dat van essentieel belang is voor de mens'.

Enkele grote vragen (in willekeurige volgorde) zijn:

Welke inwendige mechanismen veroorzaken de reusachtige magnetische 'dynamo' van de zon?

Het magnetisch veld is de drijvende kracht achter de zon. Onze ster heeft een allesomvattend magnetisch veld dat net als dat van de aarde een



laten gegevens van duizenden kilometers diep in de convectiezone verschuivende 'straalstromen' van plasma zien (boven). Met computermodellen (rechts) kan deze inwendige structuur in kaart worden gebracht.

KLOKSGEWIJS, VANAF LINKSONDER: A. G. KOSOVICHEV, T.L. DUVALL, JR., P. H. SCHERRER, STANFORD UNIVERSITY, SOHO/MICHELSON DOPPLER IMAGER, ESA EN NASA. ILLUSTRATIES: KENNETH EWARD. DEBORAH HABER, BRADLEY HINDMAN, EN JURI TOOMRE, JILA/UNIVERSITY OF COLORADO. ALLAN BRUN, CEA, JURI TOOMRE, EN MARK MIESCH, HIGH ALTITUDE OBSERVATORY/NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (HAO/NCAR)

▶ Bekijk de film op **nationalgeographic.nl** of **be**

onder een steroppervlak te kijken.'

—John Leibacher, Global Oscillation Group

magnetische noord- en zuidpool kent. Geofysici denken dat het veld van de aarde onstaat door de beweging van gesmolten ijzer in het buitenste deel van de ultrahete kern. Het magnetisch veld van de zon lijkt te worden veroorzaakt door de beweging van plasma in het binnenste.

Tot voor kort was het onmogelijk ook maar iets te zien van wat zich onder de fel brandende fotosfeer bevindt. Maar begin jaren tachtig ontwikkelden wetenschappers een techniek die ze helioseismologie noemen – een soort echoscopie van het binnenste van de zon waarmee onderzoekers de voortplanting van geluidsgolven door de zon konden analyseren. Ze maken gebruik van technieken die geologen gebruiken om inzicht te krijgen in de inwendige structuur van de aarde.

"Dertig jaar geleden had niemand gedacht dat het ooit mogelijk zou zijn om onder een steroppervlak te kijken," zegt John Leibacher van de Global Oscillation Network Group (GONG), onderling verbonden automatisch bestuurde observatoria gefinancierd door de National Science Foundation, die op ongeveer zestig graden van elkaar rond de aarde zijn geplaatst om de zon 24 uur per dag te kunnen waarnemen.

Het idee om geluidsgolven te analyseren ontstond in de jaren zestig toen de natuurkundige Robert Leighton de dopplertechniek gebruikte om aan te tonen dat het zonsoppervlak ritmisch trilde als een trommelvel, met een frequentie van ongeveer één slag per vijf minuten. Astronomen vonden later verschillende andere golven die over heel de zon resoneren, en in de jaren negentig begonnen ze deze akoestische wetenschap toe te passen op gegevens van GONG en instrumenten in de ruimte, zoals het SOHO. Nu zien we 'structuren binnen in de zon

die niemand had verwacht', aldus zonnefysicus Craig DeForest.

De grootste verrassing is misschien wel de wijze waarop de binnenste lagen ronddraaien – vooral als deze vergeleken worden met de merkwaardige rotatie van de buitenste lagen. Het duurt zo'n 26 dagen voordat de zichtbare fotosfeer en de convectiezone die er vlak onder ligt bij de evenaar – met een snelheid van ongeveer 7150 kilometer per uur – een volledige omwenteling hebben gemaakt. Maar bij de polen duurt het liefst 36 dagen, met slechts 875 kilometer per uur.

Veel wetenschappers hadden al lang het vermoeden dat de binnenste lagen van de zon – de kern en de enorme stralingszone – sneller draaiden dan de buitenste lagen. Dit bleek deels juist. De binnenste lagen draaien rond alsof ze een vast object zijn, met één omwenteling per 27 dagen – langzamer dan de bovenste lagen bij de evenaar, maar sneller dan bij de polaire gebieden. Dit houdt in dat de stralingszone en de convectiezone met verschillende snelheden ronddraaien wanneer ze langs elkaar glijden. Veel experts denken nu dat dit wrijvingsgebied, dat bekendstaat als de tachocline, de dynamo vormt die het magnetisch veld van de zon veroorzaakt.

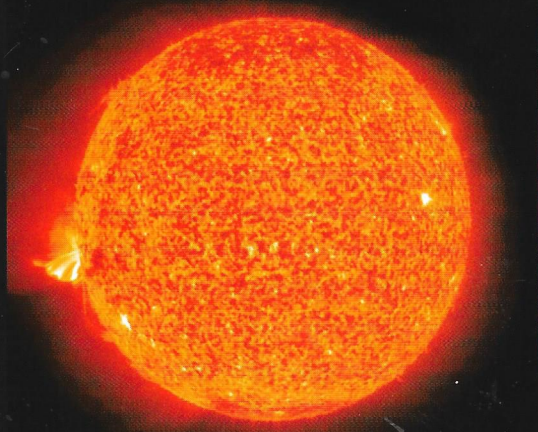
De inwendige schuifbeweging rekt en vervormt de magnetische veldlijnen die van noord naar zuid lopen, en zo wikkelen ze zich om de zon. Hierdoor krijgen ze steeds meer energie, vergelijkbaar met een elastiek dat in uitgerekte toestand energie opslaat. Soms ontstaan hierdoor touwen van veldlijnen die voldoende veerkrachtig zijn om uit te stulpen. Ze steken dan uit de fotosfeer als lussen, zonnevlammen en die raadselachtige tekenen voor zonneactiviteit – zonnevlekken.

Zonnecycli Omkeringen

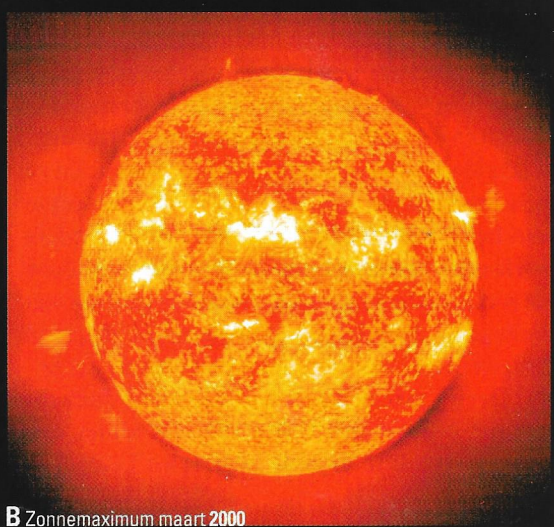
ZONNEVLEKKENACTIVITEIT bereikt in een tijdsbestek van gemiddeld elf jaar een minimum, een maximum en weer een minumum, hoewel dit ook acht tot vijftien jaar kan duren. Gedurende deze periode draait het magnetische veld om: de noordpool wordt de zuidpool en andersom. Zonnevlekken ontstaan wanneer reusachtige bundels magnetische veldlijnen door het oppervlak van de zon breken en zo aangeven waar het magnetische veld het sterkst is. Computermodellen van de omkering van het veld (rechts, onder) helpen bij het oplossen van de vragen: waarom varieert de tijd tussen de omkeringen? En waarom produceren sommige cycli veel zonnevlekken en andere heel weinig (grafiek)?

SOHO/EIT, ESA EN NASA (ONDER); GEGEVENS GRAFIEK VAN NASA; MODEL MAGNETISCH VELD DOOR MAUSUMI DIKPATI, HAO/NCAR

▶ Bekijk de film op nationalgeographic.nl of be



A Zonneminimum maart **1996**



B Zonnemaximum maart **2000**

Waarom verandert het aantal zonnevlekken in cycli van elf jaar, en welk effect heeft dit op het aardse klimaat?

Wanneer deze bundels magnetische velden opzwellen en uitpuilen in de fotosfeer, kunnen ze een diameter bereiken van 2500 kilometer tot meerdere malen de grootte van de aarde. Zonnevlekken zijn zichtbaar doordat de gebundelde veldlijnen de convectiestromen blokkeren. Het midden van de vlek lijkt donker, doordat het duizend of meer graden koeler is dan de omringende fotosfeer die een temperatuur heeft van 5700 °C.

De eerste eenduidige toespelingen op het voorkomen van zonnevlekken dateren uit het China van de eerste eeuw voor Christus. In het begin van de zeventiende eeuw werden ze waargenomen met een telescoop, maar de Duitse astronoom Samuel Heinrich Schwabe was in 1826 de eerste die ze systematisch begon te tellen. In 1843 was hij zeker genoeg van zijn zaak om bekend te maken dat het aantal zonnevlekken in een periode van tien jaar schommelt tussen een minimum en een maximum.

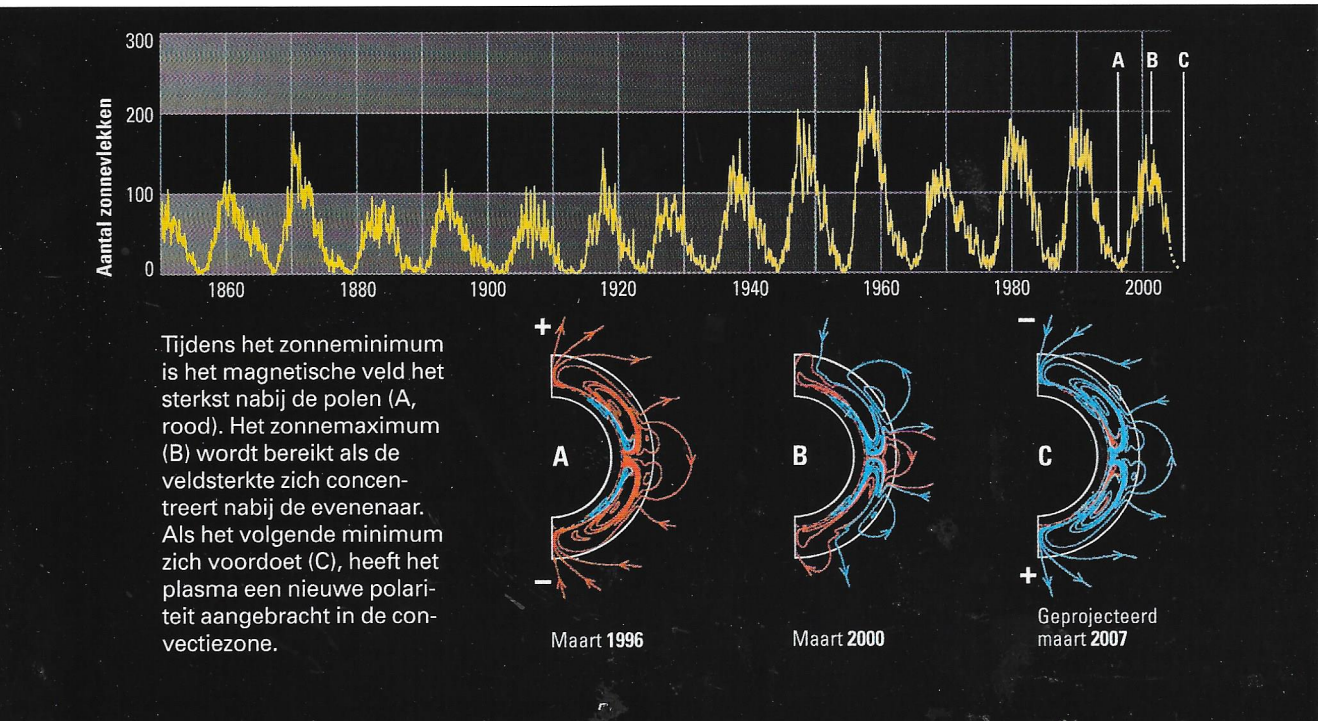
In 1915 hadden de Amerikaanse astronoom George Ellery Hale en zijn collega's van het Mount Wilson Observatory in Californië aangetoond dat de vlekken meestal in paren verschijnen, op een lijn ongeveer parallel aan de evenaar van de zon, en dat de twee gepaarde zonnevlekken een tegengestelde magnetische polariteit hebben. Verder stelden ze vast dat alle vlekkenparen op het noordelijk halfrond van de zon dezelfde oriëntatie hebben, en dat alle paren op het zuidelijk halfrond de tegenovergestelde oriëntatie hebben. De rangschikking van zonnevlekken wordt kennelijk direct beïnvloed door het grote magnetisch veld dat loopt van noord naar zuid.

Gemiddeld vindt er elke elf jaar een omkering van de magnetische polariteit van de zon plaats: de magnetische noordpool wordt de zuidpool en andersom. Een volledige magnetische zonnecyclus – de terugkeer naar de uitgangspositie – duurt dus gemiddeld 22 jaar. Niemand begrijpt het hele proces.

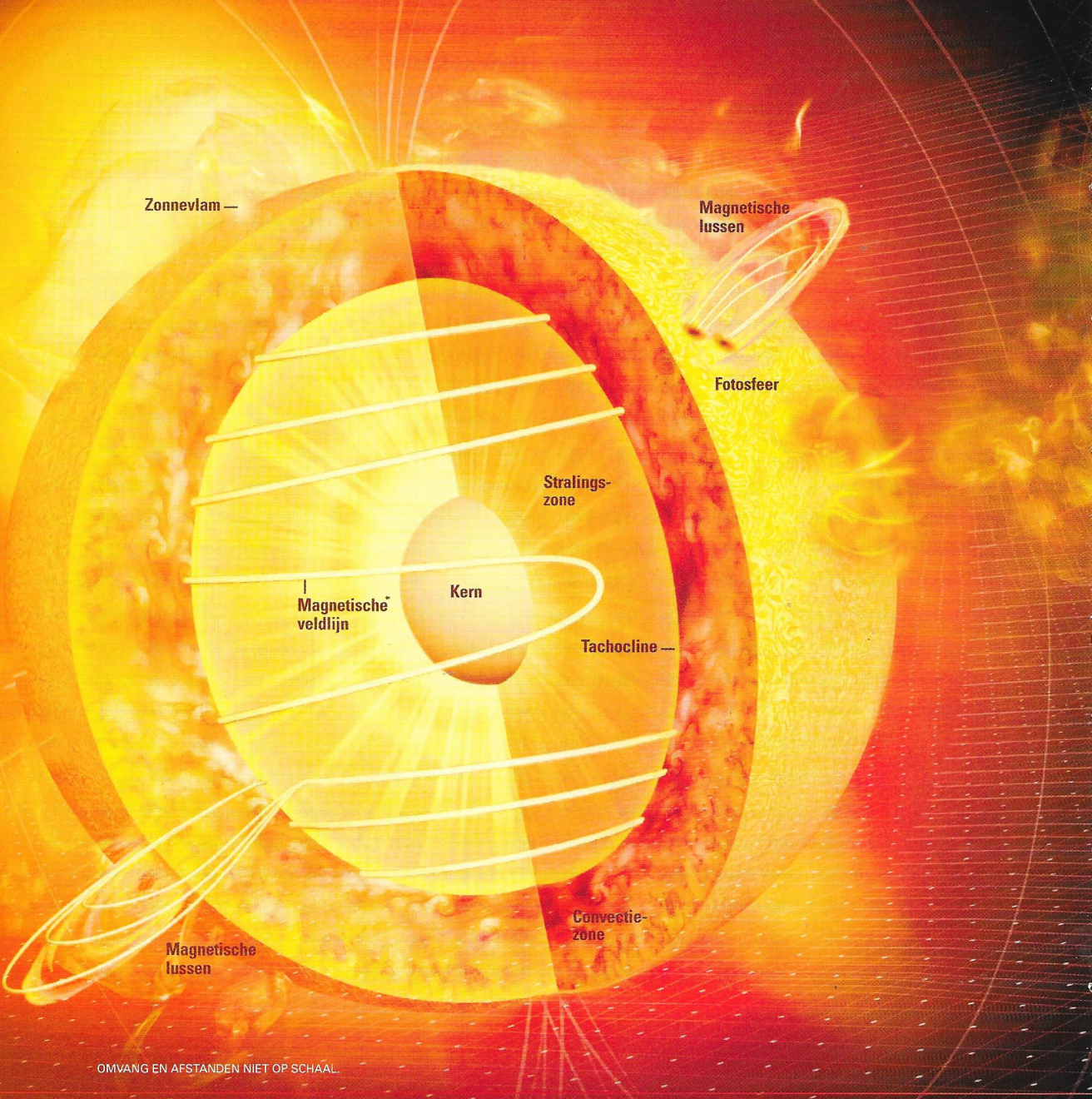
Dat is jammer, want er is bewijs dat zonnevlekkencycli directe gevolgen hebben voor het menselijk leven. Denk aan het Maunder Minimum, de griezelig lange, koude periode tussen 1645 en 1715 waarin volgens historische gegevens vrijwel geen zonnevlekken voorkwamen op het zonsoppervlak. De periode werd genoemd naar de Britse astronoom E. Walter Maunder die in de jaren tachtig van de negentiende eeuw vergeefs om aandacht vroeg voor deze afwijking.

In de jaren zeventig van de vorige eeuw bekeek de Amerikaanse zonnefysicus Jack Eddy het werk van Maunders opnieuw en merkte hij op dat het Minimum 'een goede testcase was voor het bepalen van de invloed van de zon op het klimaat'. Net als de meeste zonnewetenschappers uit die tijd was Eddy er niet van overtuigd dat de variatie in het aantal zonnevlekken – de meest zichtbare indicator voor zonneactiviteit – enig verband hield met het aardse klimaat. Hij onderzocht gegevens over de jaarringen van bomen uit het

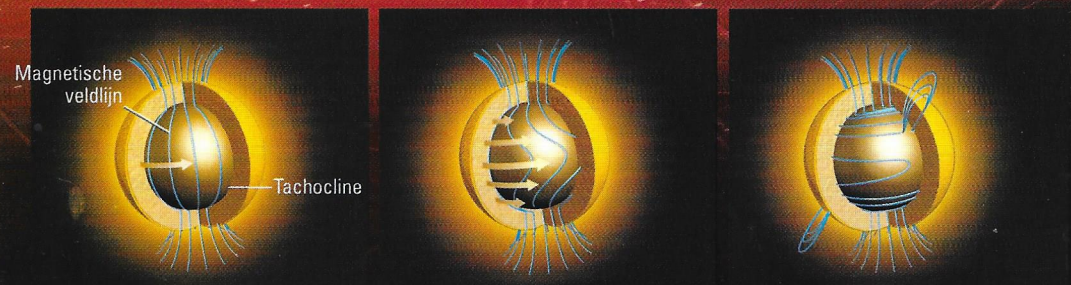
(Vervolg op pagina 28)



Tijdens het zonneminimum is het magnetische veld het sterkst nabij de polen (A, rood). Het zonnemaximum (B) wordt bereikt als de veldsterkte zich concentreert nabij de evenenaar. Als het volgende minimum zich voordoet (C), heeft het plasma een nieuwe polariteit aangebracht in de convectiezone.



OMVANG EN AFSTANDEN NIET OP SCHAAL

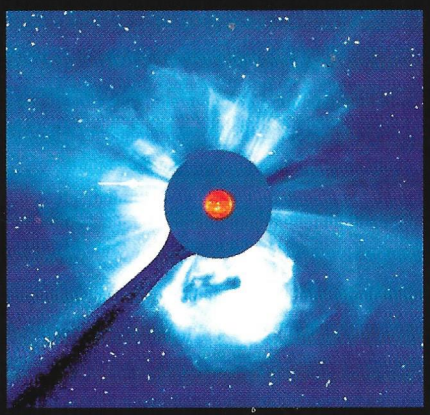


De zon draait

De cyclus begint met magnetische veldlijnen die van pool naar pool lopen. Dit is het veld dat wordt opgewekt in de tachocline, waar de stralings- en de convectiezones langs elkaar schuiven. De buitenste lagen draaien sneller bij de evenaar dan bij de polen, waardoor de lijnen worden uitgerekt. Terwijl het plasma kolkt en stroomt, worden de lijnen nog verder gerekt en vervormd, en krijgen ze meer energie. Als veldlijnen worden gedraaid, krijgen ze veerkracht en stulpen ze uit. Vervolgens breken ze in diverse vormen door het oppervlak.

De aarde krijgt de volle laag

Solaire stormen

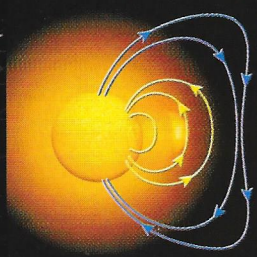


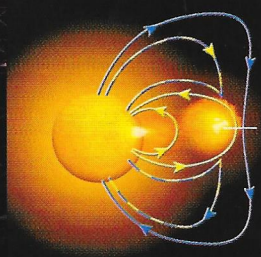
Het hoogtepunt van de zonnevlekkencyclus is verwant aan het orkaanseizoen op aarde: de omstandigheden zijn ideaal voor grote stormen. Het magnetische veld van de zon is dan het meest verward en turbulent. Energie wordt opgeslagen in de magnetische veldlijnen die breken en exploderen als zonnevlammen en die röntgenstraling de ruimte in slingeren. Het wordt nog heftiger wanneer een plasmawolk – een coronale massa-ejectie of CME (boven) – met de energie van tweehonderd miljoen keer de bom van Hiroshima de ruimte inschiet. De magnetosfeer van de aarde beschermt ons tegen fysieke schade van deze zonnesalvo's, maar ze kunnen niettemin een enorm effect hebben op de werking van onze technologie. Zonnevlammen kunnen radio- en GPS-signalen verstoren en CME's kunnen satellieten uitschakelen. De schok van een CME kan het elektriciteitsnet overbelasten en massale stroomuitval veroorzaken.

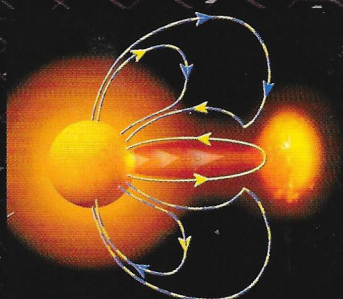
Schokgolf zonnewind

Schokgolf coronale massa-ejectie

Coronale massa-ejectie



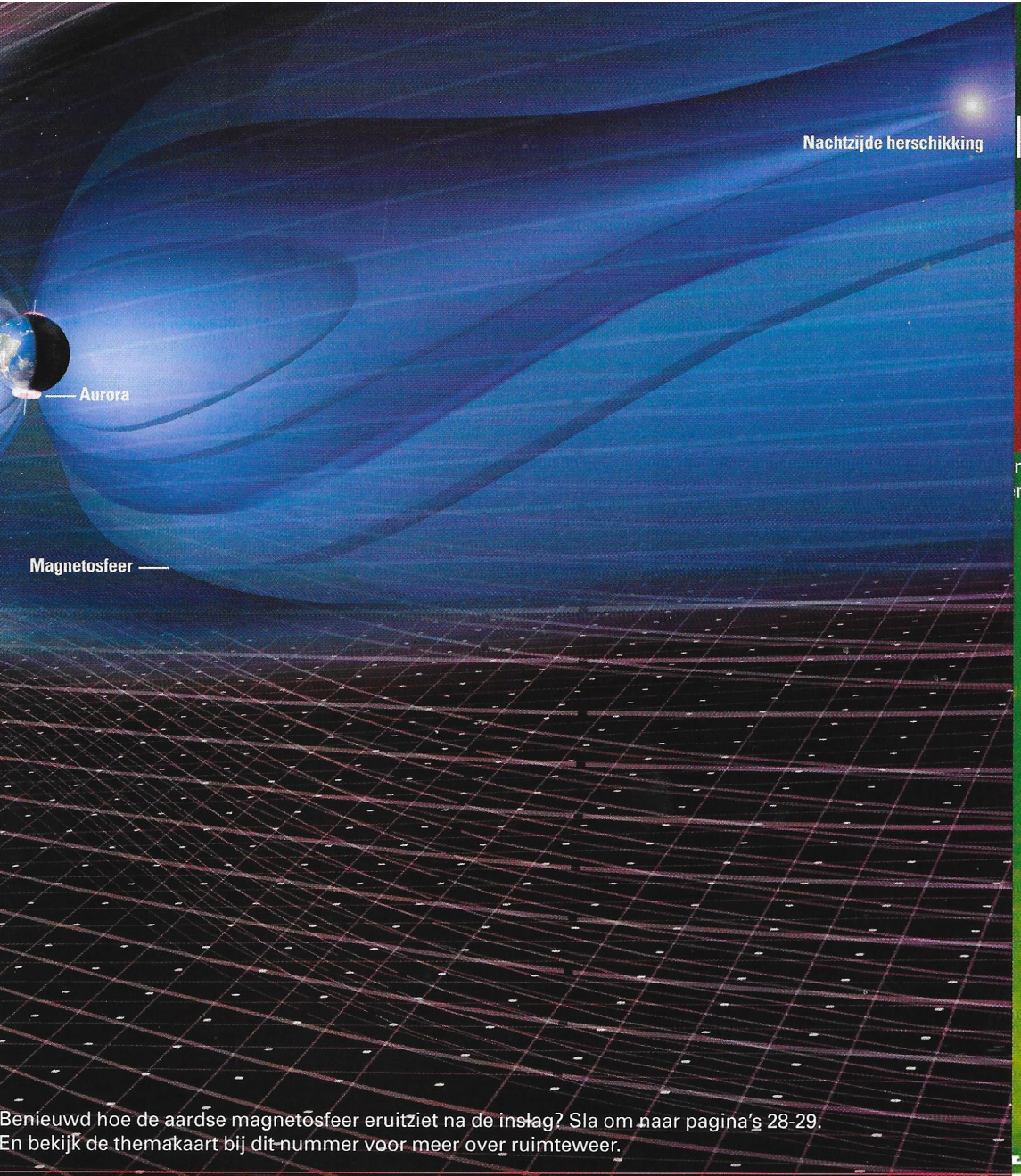




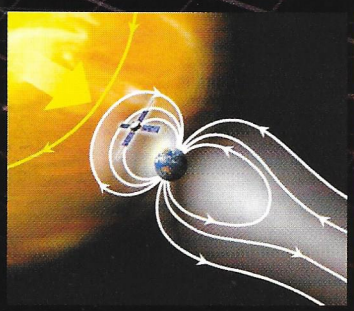
Een storm steekt op

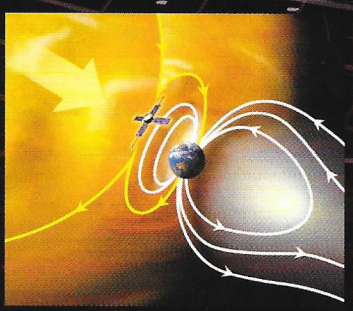
Hoe wordt een CME opgewekt? Volgens één theorie gedragen de coronale lussen (blauw en geel) zich als een net dat krachtige magnetische velden die proberen uit te stulpen, in bedwang houdt, waardoor de druk toeneemt. Lussen zijn voortdurend in beweging en kunnen samensmelten in een proces waarbij het net scheurt. Er ontsnapt een miljoen ton plasma, met snelheden van 1,5 tot 8 miljoen km/h, dat uitgroeit tot een wolk van tientallen miljoenen kilometers breed. Op zijn tocht door de tragere zonnewind veroorzaakt de CME een zeer energierijke schokgolf.

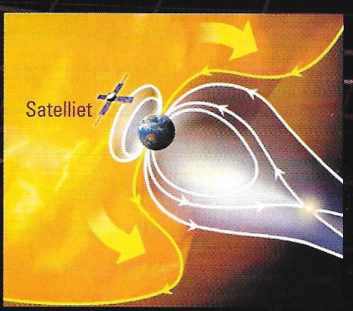
ILLUSTRATIES DOOR MOONRUNNER DESIGN. ADVISEURS: SPIRO K. ANTIOCHOS, NAVAL RESEARCH LABORATORY (NRL); PAL BREKKE, ESA; BENHARD FLECK ESA; PE
SPACE WEATHER MODELING; STEELE HILL, SOHO/NASA; JAMES A. KLIMCHUK, NRL; GARETH R. LAWRENCE, ROYAL OBSERVATORY OF BELGIUM; JANET G. LUHMAN



Benieuwd hoe de aardse magnetosfeer eruitziet na de inslag? Sla om naar pagina's 28-29.
En bekijk de themakaart bij dit nummer voor meer over ruimteweer.





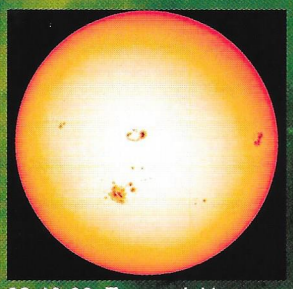


De aarde onder vuur

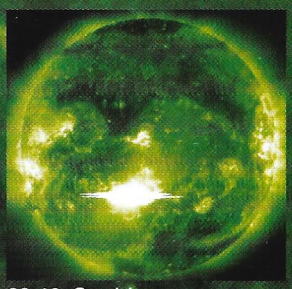
Het duurt één tot drie dagen voordat een CME ons bereikt. Pas ongeveer een uur voor de inslag weten we hoe ernstig die zal zijn. In het ergste geval (boven) draagt een CME een zuidelijke magnetische oriëntatie, tegenovergesteld aan die van de aarde. Zo'n CME drukt onze beschermende magnetosfeer in elkaar, en koppelt met het magnetische veld aan de dagzijde en trekt veldlijnen terug. Aan de rand van de nachtzijde verbinden de lijnen van de aarde zich opnieuw waarbij miljarden watts aan vermogen in de hogere atmosfeer terechtkomen.

R T. GALLAGHER, L-3 COMMUNICATIONS GSI; PETER A. GILMAN, HAO/NCAR; CHARLES C. GOODRICH, BOSTON UNIVERSITY, CENTER FOR INTEGRATED SPACE SCIENCES LABORATORY, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY; JURI TOOMRE; MICHAEL WILTBERGER, HAO/NCAR

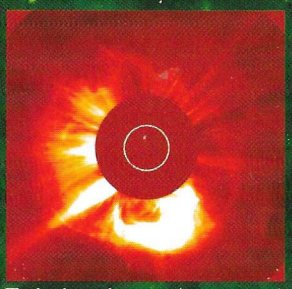
Afgelopen herfst explodeerden twee van de sterkste



28-10-03: Zonnevlekken verschijnen – de onderste is de grootste in dertien jaar.



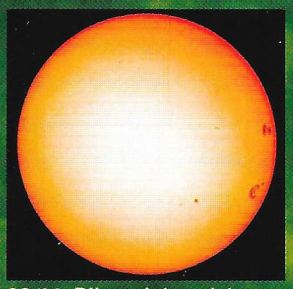
28-10: Op drie na grootste zonnevlam ooit waargenomen explodeert (onder vergroot).



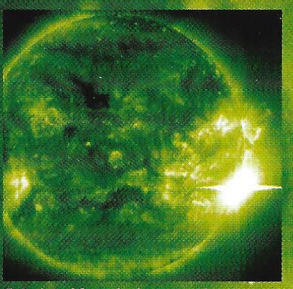
Twintig minuten later wordt met de SOHO-satelliet een CME waargenomen.

OP 21 OKTOBER 2003 werd gewaarschuwd dat er zeer actieve gebieden op de zon zouden verschijnen. In de twee weken daarna volgden meer grote zonnevlammen en op aarde gerichte CME's dan er het hele jaar daarvoor waren gezien. Vliegtuigen kozen zuidelijkere routes, een kleine stroomuitval trof Zweden, en tientallen satellieten kregen problemen. Het grootste salvo kwam op de 28ste: de op drie na grootste zonnevlam ooit gezien, gevolgd door een CME die vijf keer zo snel bewoog als normaal. Maar de CME, met een noordelijk georiënteerd magnetisch veld, bleek relatief klein. En net op het moment dat de zonnevlekken wegdraaiden van de aarde, explodeerde de grootste zonnevlam ooit

zonnevlammen ooit waargenomen.



02-11: Bijna uit het zicht vuren de zonnevlekken nog steeds vlammen en CME's af.



04-11: Krachtigste vlam ooit gemeten explodeert uit dezelfde zonnevlek (onder).

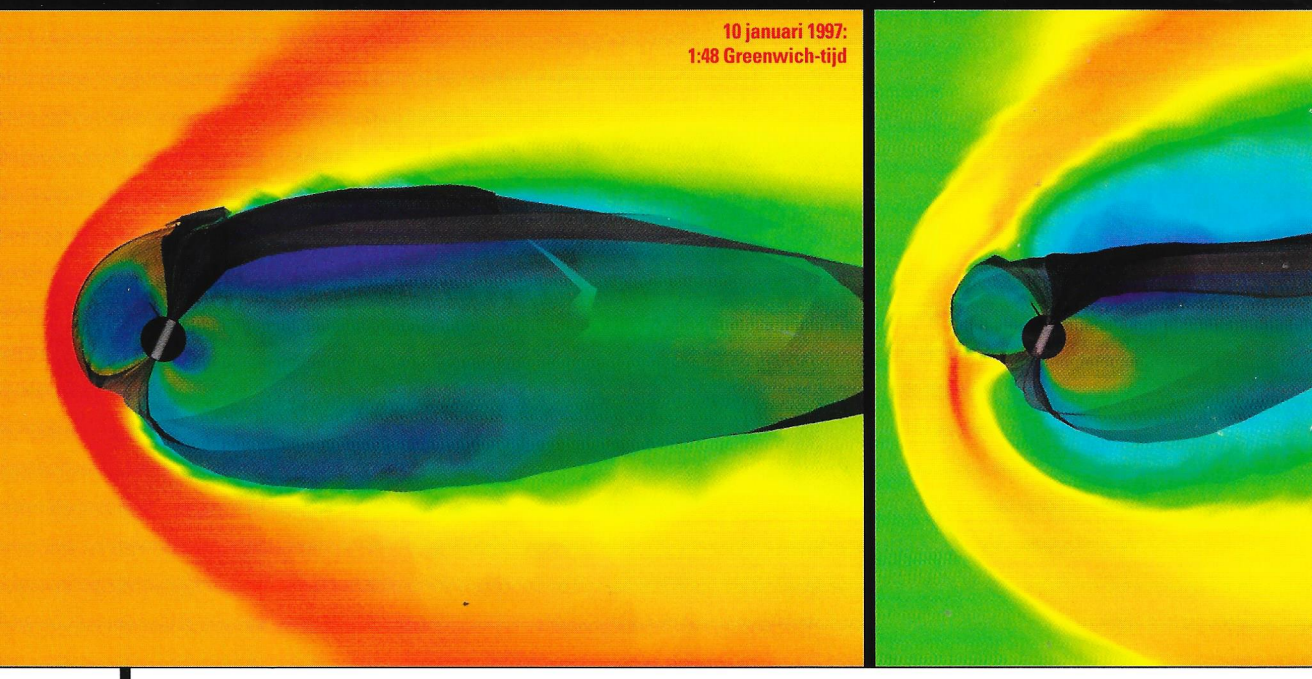


Een snelbewegende CME volgt, maar deze schampt de aarde slechts.

gemeten. Gelukkig schampten de zonnevlam en de volgende CME slechts langs onze planeet. Stormen na een zonnemaximum zijn niet ongewoon. Toch stonden wetenschappers versteld. Een van de satellieten die bij de uitbarsting in oktober werd getroffen, was de Mars Odyssey. De satelliet verloor een instrument dat ironisch genoeg net metingen had voltooid van het stralingsniveau waar een bemande Marsvlucht aan zal worden blootgesteld. Zonnefysicus Pål Brekke waarschuwt: "Als de mens de magnetosfeer wil verlaten, moeten we eerst het ruimteweer begrijpen."

SOHO/ESA EN NASA (ALLE)

▶ Bekijk de film op nationalgeographic.nl of be



Zonnestormen kunnen enorme stroomstoringen

zeventig jaar durende minimum. Deze bleken aanzienlijk meer koolstof-14 te bevatten dan bomen voor en na die periode. Dat betekende dat in die periode grotere hoeveelheden kosmische straling de aarde hadden bereikt. (Een magnetisch actieve zon zorgt ervoor dat we minder kosmische straling ontvangen.) Dus concludeerde Eddy dat er toch een verband bestond.

Zijn onderzoek vestigde ook de aandacht op een andere periode waarin er weinig zonnevlekken waren, tussen 1460 en 1550. Toen wetenschappers deze gebeurtenis vergeleken met het Maunder Minimum, realiseerden ze zich dat de lange periode samenviel met het midden van de Kleine IJstijd (1400-1850). Toen bevroren de Theems in Londen en de lagune in Venetië regelmatig.

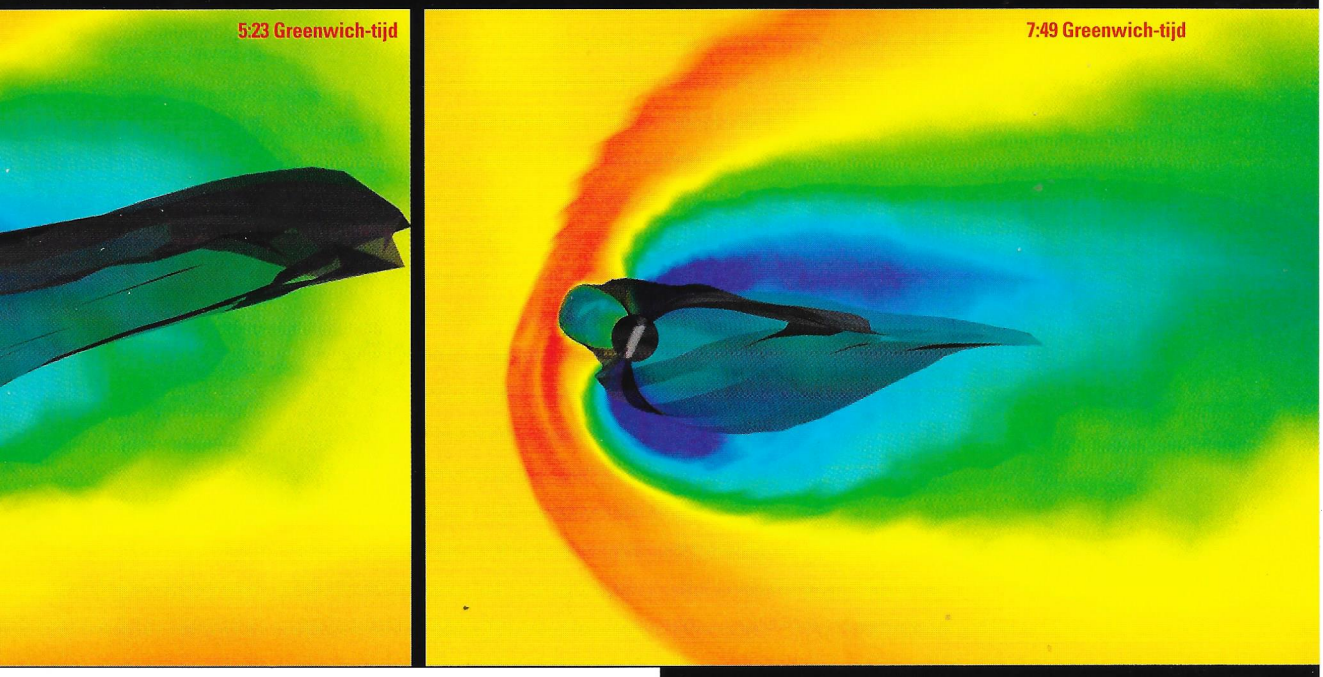
Minder zonnevlekken betekent een helderdere zon, zou je kunnen denken. Maar de helderheid van de zon is juist groter wanneer er meer zonnevlekken zijn omdat hun magnetische activiteit zorgt voor extra lichte plekken, die fakkelgebieden worden genoemd (pagina 16).

De zonnevlekkenactiviteit was de afgelopen eeuw inderdaad groter. Maar volgens een recent rapport van de NASA lijkt grotere helderheid slechts verantwoordelijk te zijn voor de helft van de wereldwijde temperatuurstijging voor 1940, en voor nog minder dan dat in latere jaren, toen de uitstoot van broeikasgassen almaar toenam. Schommelingen in de zonneactiviteit zijn dus maar een deel van de puzzel.

Daar komt bij dat onze kennis over die schommelingen beperkt is. Onze beste helioseismologische studies en observaties door geavanceerde ruimtevaartuigen geven slechts een beeld van de laatste vijftien jaar. En, zoals natuurkundige Joel B. Mozer laat weten: "Sinds het begin van het ruimtevaarttijdperk in de jaren vijftig hebben we pas vier zonnecycli meegemaakt. Al onze kennis is daarop gebaseerd. Maar er is genoeg bewijs dat ze niet de extreme situaties vertegenwoordigen."

Dankzij computersimulaties hebben wetenschappers inmiddels een redelijk idee van hoe zonnevlekken ontstaan en weer verdwijnen. Toch zijn er nog te weinig zeer gedetailleerde waarnemingen om de theorie te toetsen.

"We hopen dat de helioseismologie zal leiden tot betere observaties van het magnetisch veld op belangrijke diepten," zegt Spiro Antiochos van het Naval Research Laboratory in Washington, D.C.



VOOR DE STORM wordt de magnetosfeer van de aarde in de zonnewind geleidelijk kleiner (links). Kleuren geven de plasmadichtheid aan (rood, hoogste; paars, laagste). Een CME-inslag (midden) vervormt het schild en verwijdt het boven de polen. Geladen deeltjes komen binnen en vormen prachtig poollicht.

MICHAEL WILTBERGER EN CHARLES C. GOODRICH (ALLE)

▶ Bekijk de film op nationalgeographic.nl of be

veroorzaken.

Hoe is het mogelijk dat de corona – de extreem ijle halo van ionen die zich miljoenen kilometers uitstrekt in de ruimte – honderden malen heter is dan het zonsoppervlak?

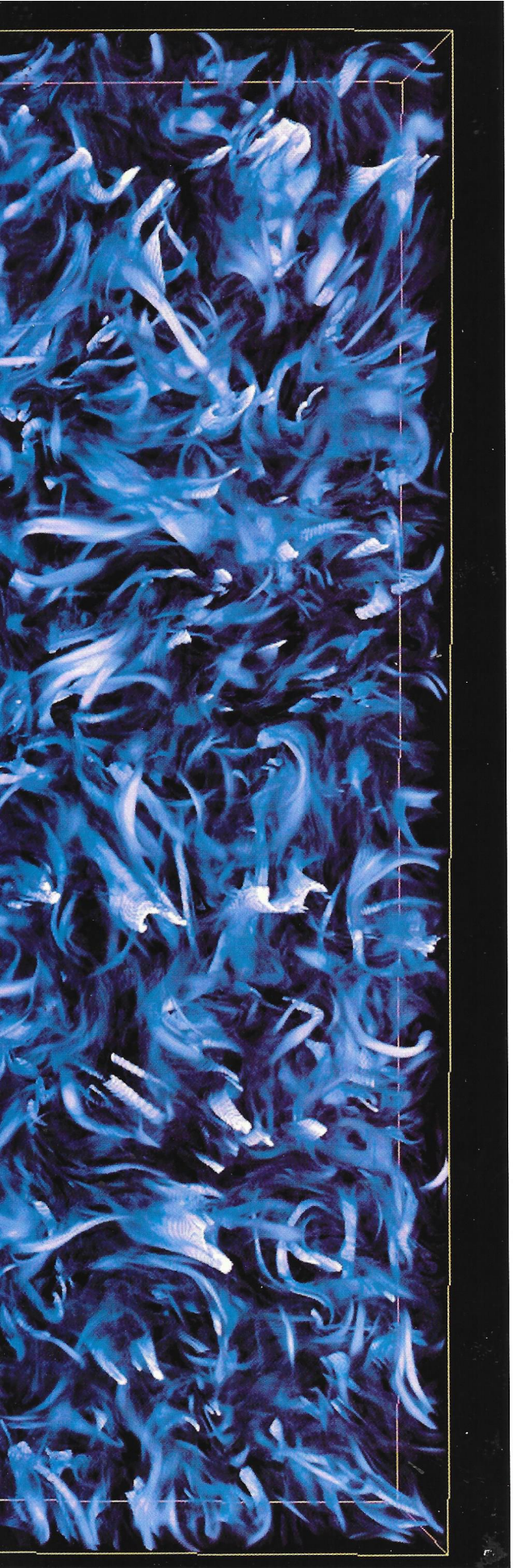
Voor de indrukwekkendste extremen van de zon kijken wetenschappers naar het meest onbegrepen gebied: de corona. Die is onzichtbaar, behalve tijdens een totale zonsverduistering. De corona en de chromosfeer – een 2500 kilometer dikke schil van plasma net boven de zichtbare fotosfeer – weerspreken de veronderstelling dat dingen koeler worden als ze zich verder van het zonsoppervlak bevinden.

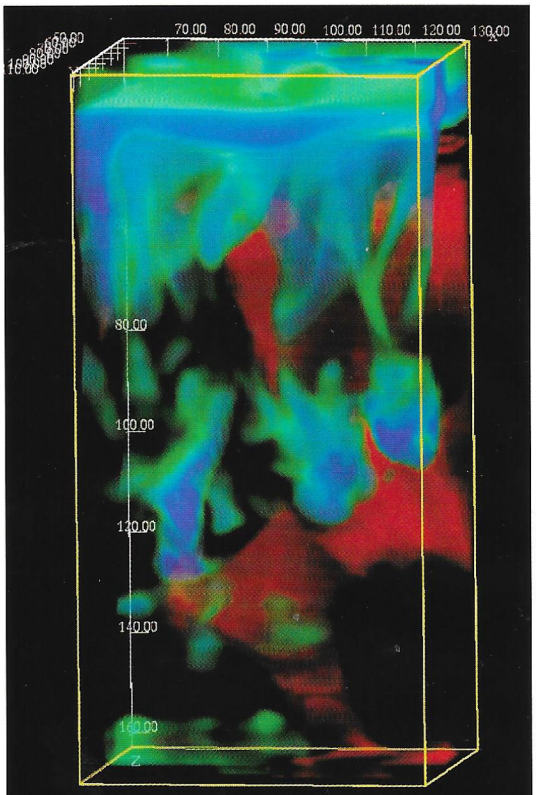
De dichtheid van de chromosfeer bedraagt slechts één miljoenste van die van de fotosfeer. De dichtheid van de corona is nog eens honderd keer zo klein. En toch, om het met aardse temperatuurverschillen te vergelijken: tussen de fotosfeer en de corona ' is het alsof je met je voeten in vloeibaar helium en met je hoofd in een hoogoven staat', aldus fysicus Craig DeForest. In de fotosfeer bedraagt de temperatuur ongeveer 5700 °C, in de chromosfeer schommelt zij rond de 10.000 °C, en de temperatuur in de corona schiet vaak omhoog tot boven de twee miljoen °C.

Waar komt die ontzagwekkende hitte vandaan? De hoofdverdachte is een proces dat magnetische herschikking wordt genoemd – het splitsen van magnetische veldlijnen waardoor energie vrijkomt.

"Een van de belangrijkste ontdekkingen van het SOHO was dat er over de hele zon, net onder het oppervlak, voortdurend kleine magnetische velden ontstaan," zegt de Amerikaan Joseph Gurman, als projectwetenschapper verbonden aan het SOHO. Dit 'magnetische tapijt' bestaat uit kleine lussen die vanuit de fotosfeer een boog vormen. De onderkant van deze lussen wordt rondgeduwd door het plasma. Wanneer twee lijnen tegen elkaar worden gedrukt, stijgt hun opgeslagen energie tot een onhoudbaar hoog niveau. De lijnen breken en maken een nieuwe verbinding met elkaar om een stelsel te vormen met een lager energieniveau. De overtollige energie – soms miljarden kilowatturen – wordt bijna onmiddellijk losgelaten.



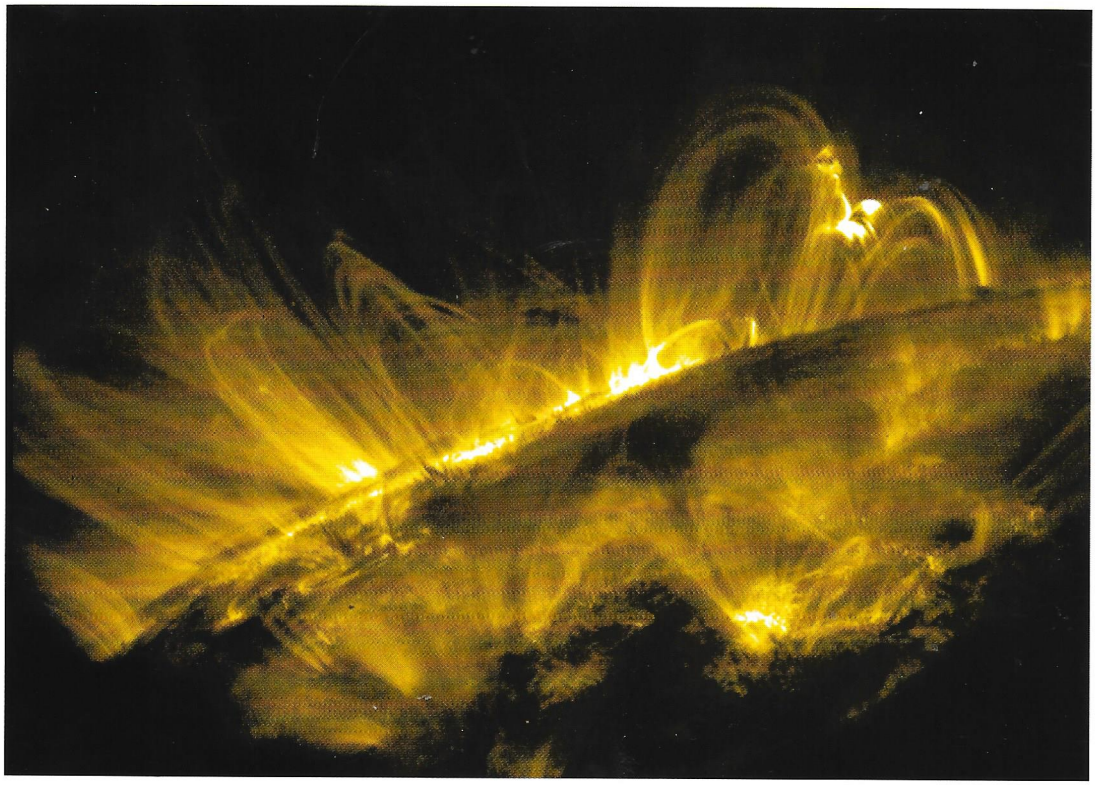


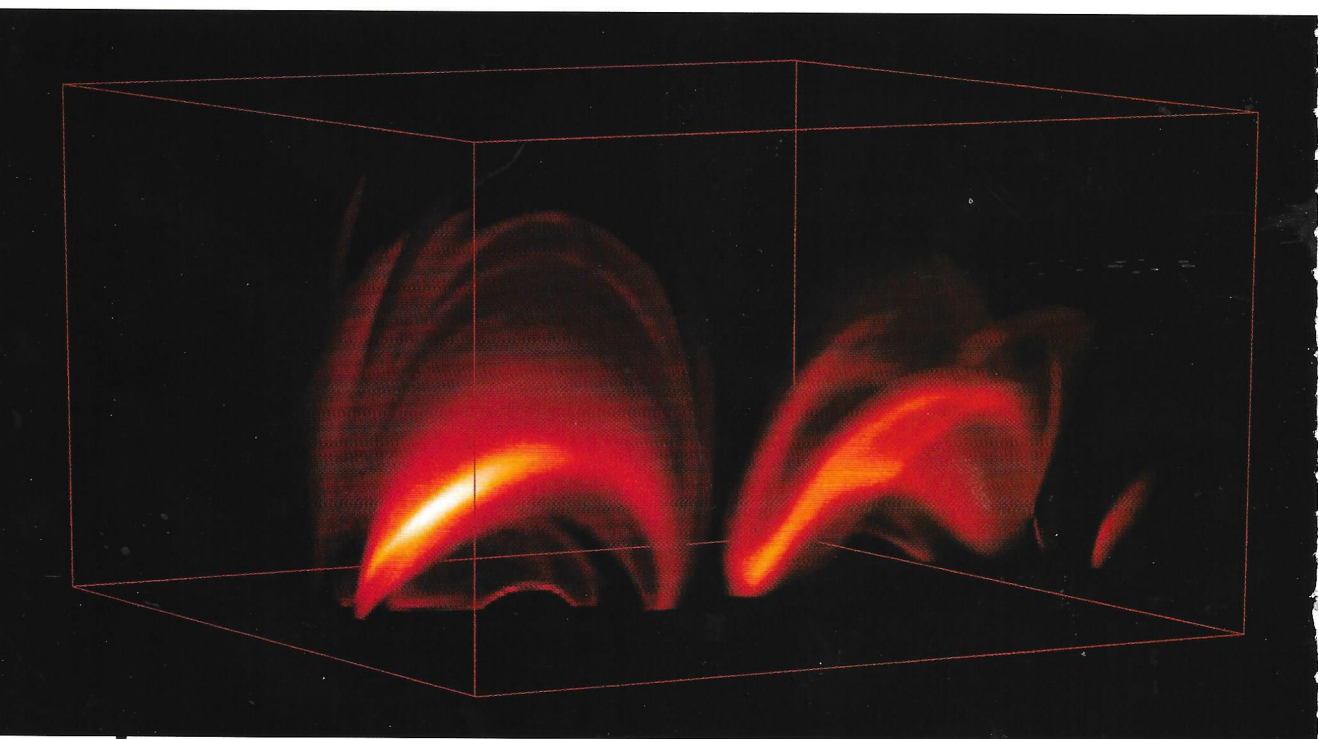


MEESTERWERKEN op het gebied van computersimulatie zijn zeker zo belangrijk bij het doorgronden van het gedrag van de zon als satellieten en telescopen op aarde. Directe beelden en gegevens 'vertellen ons wat er is, maar niet waarom het er is', legt astrofysicus Robert Stein uit. Steins model van de stijgende en dalende convectiestromen (boven; rood is het heetste plasma, blauw het koelste) stelt een gebied voor dat ongeveer half zo groot is als de aarde. In dit gedachte-experiment (links) van de wiskundige Fausto Cattaneo kijken we net onder het zonsoppervlak. De gekleurde vezels stellen kleinschalige magnetische velden voor die kunnen worden gevormd door plasmaturbulentie, zelfs wanneer de zon rustig lijkt.

FAUSTO CATTANEO, UNIVERSITY OF CHICAGO (LINKS); ROBERT STEIN EN AKE NORDLUND

▶ Bekijk de film op nationalgeographic.nl of be





'De zon is het enige astronomische object

Wat verklaart de zonnevlammen en de coronale massa-ejecties die verantwoordelijk zijn voor elektrische stormen op aarde? Hoe kunnen deze stormen worden voorspeld?

De corona kan, aldus Robert Lin, hoogleraar natuurkunde aan de University of California in Berkeley, de krachtigste deeltjesversnellers in het zonnestelsel – zonnevlammen en CME's – produceren: "De energie in de grootste vlammen is gelijk aan miljarden megatonnen TNT."

Zonnevlammen stoten veel energie uit in de vorm van röntgenstraling en ontstaan waarschijnlijk wanneer elektrische stromen plotseling vrijkomen als één of meer magnetische lussen in de corona het breekpunt bereiken en een nieuwe vorm aannemen. De röntgenstraling verplaatst zich met de snelheid van het licht en bereikt de aarde in acht minuten, waar het radiocommunicatie- en navigatiesystemen kan verstoren. Een klein percentage vlammen slingert bovendien snelbewegende, energierijke protonen de ruimte in die satellieten kunnen beschadigen.

Maar ruimtemeteorologen maken zich het meest zorgen over CME's en hun spervuur van deeltjes. Hoewel CME's vaak volgen op zonnevlammen, komen deze enorme plasma-uitbarstingen ook zelfstandig voor. Normaalgesproken hebben ze één tot drie dagen nodig om de aarde te bereiken, waar ze in de magnetosfeer van de planeet slaan, deze vervormen en – onder de juiste omstandigheden – een vele miljoenen ampère sterke kringstroom veroorzaken in de uit geladen deeltjes bestaande gordels die voortdurend om de aarde draaien. CME's, die een nog grotere bedreiging vormen voor communicatiesatellieten dan zonnevlammen, kunnen op aarde voor stroomstoringen zorgen en ons letterlijk in het duister hullen.

Het is nog niet mogelijk te voorspellen wanneer en of een CME zal uitbarsten. Maar nu het SOHO en andere satellieten voortdurend de zonneactiviteit volgen, zegt Joseph Kunches van het Space Environment Center in Boulder, Colorado, 'weten we voor 80 procent nauwkeurig of ze de aarde wel of niet zullen raken'.

Daarnaast krijgen ruimtemeteorologen in elk geval enige waarschuwing wat betreft de snelheid en de magnetische richting van de uitstoot. De magnetische polariteit van een CME kan onderweg veranderen. Als de polariteit tegengesteld is aan die van de aarde, veroorzaakt dat bij inslag de meeste schade, omdat bij de botsing van in tegengestelde richting georiënteerde veldlijnen enorme ladingen vrijkomen. Wetenschappers krijgen die gegevens pas een uur of korter voordat een CME inslaat, wanneer deze de satelliet Advanced Composition Explorer (ACE) passeert. Net als het SOHO draait de ACE rond een vast punt in de ruimte op ruim anderhalf miljoen kilometer van de aarde.

Vaak komen de ergste stormen voor in de jaren na het zonnemaximum. Het meest recente zonnemaximum eindigde in 2001, en van alle zonnevlammen die werden waargenomen, werd in november 2003 de sterkste ooit geregistreerd.

Wetenschappers meten zonnevlammen pas sinds enkele tientallen jaren, en CME's werden tot de jaren zeventig niet eens herkend. Hebben we werkelijk alles gezien wat de zon kan voortbrengen? Dat weten we niet zeker. Maar bij het volgende zonnemaximum, over ongeveer zeven jaar, zal een nieuwe generatie zonneobservatoria onze ster bestuderen en daarbij voortbouwen op een tijdperk waarin zonnefysici al twintig jaar 'goede seeing' hebben. □

DE TOEKOMST van het voorspellen van ruimteweer ziet er sinds vorig jaar rooskleuriger uit. Astrofysici Boris Gudiksen en Ake Nordlund slaagden erin simulaties (links) van coronale lussen (boven) te maken. Wetenschappers hopen dat de voorspellende modellen ooit even snel zijn als de werkelijkheid.

TRACE, NASA (BOVEN); BORIS GUDIKSEN, ISP, EN AKE NORDLUND

▶ Bekijk de film op **nationalgeographic.nl** of **be**

ONLINE Wat voor weer is het vandaag in de ruimte? Bezoek voor een dagelijks online ruimteweerbericht en meer foto's en films van de zon onze website **nationalgeographic.nl** of **be**.

dat voor de mens van essentieel belang is.'

—John Harvey, National Solar Observatory