

Het zonsonderzoek van SOHO

Dr. R.J. Rutten



SOHO staat voor "Solar and Heliospheric Observatory". Het is een kunstplaneet die met de aarde mee om de zon cirkelt en die de zon van binnen tot buiten waarneemt. SOHO doet dat al vijf jaar, een feit dat op 27 april met tientallen publieksmanifestaties in Europa en de VS werd gevierd. Terecht, want SOHO heeft een grote staat van dienst vergaard met een reeks belangwekkende ontdekkingen.

Geschiedenis

SOHO is nu het vlaggeschip van zonsonderzoek vanuit de ruimte en een groot succes van de Europese ruimtevaart. De missie werd al in 1982 aan ESA voorgesteld, door zes wetenschappers waaronder de Utrechter F. van Beek (later hoogleraar fijnmechanica in Delft), als een samenvoegsel van twee eerdere satellietvoorstellen, GRIST en DISCO. Voor DISCO hadden de Fransen R. Bonnet en Ph. Delache al geopperd die in L1 te positioneren, het eerste Lagrangepunt van het zonnearde systeem dat zich zonwaarts op anderhalf miljoen km van de aarde bevindt, vier maal zo ver als de maan. De aarde en de zon trekken daar even hard zodat een satelliet in dat punt ongestoord met dat punt (en dus met de aarde mee) om de zon beweegt. Een kunstplaneet wordt daar niet zoals een kunstmaan frequent door de aarde verduisterd, kan er de zonnwind ver buiten de aardse magnetosfeer monstere, en maakt daar ook geen baanbewegingen in de gezichtsrichting naar de zon, van groot belang voor preciese meting van de Dopplerverschuivingen van

de spectraallijnen van het zonsoppervlak.

SOHO zit nu inderdaad in L1, niet precies want dan staat hij van ons uit gezien pal voor de zon en is er geen radiocommunicatie mogelijk omdat de zon zelf een sterke ruisbron is. Hij draait in trage lussen om L1, voldoende groot dat hij van hieraf gezien rond de zon lijkt te cirkelen op zo'n twee graden afstand.

Al in 1984 werd SOHO opgenomen in de lange-termijn planning van ESA, als eerste "cornerstone" van ESA's Horizon 2000 programma. Dat kwam in 1983-1984 tot stand onder regie van R. Bonnet, toen inmiddels directeur van ESA's wetenschappelijk programma geworden (en gebleven tot enkele maanden terug) en J. Bleeker, die toen net C. de Jager was opgevolgd als directeur van het Utrechtse Ruimteonderzoek (nu de nationale stichting SRON). De Jager was toen voorzitter van het Science Program Committee, ESA's belangrijkste adviesraad, en nam ook zitting in Bleeker's "survey committee". Die commissie timmerde Horizon-2000 in elkaar als een legpuzzel met netjes gerangschikte

blokken in verschillende kleuren voor grotere en kleinere missies, een aanschouwelijke presentatiestructuur die goed viel omdat ook ministers ooit met blokken speelden. De opzet was om de ESA-lidstaten te bewegen meer geld aan ruimteonderzoek te spenderen dan in de voorgaande jaren en dat lukte met Horizon 2000 uitstekend. SOHO werd daarin de eerste hoeksteen van het dure soort, pas in tweede instantie overigens na politiek touwtrekken waarin de kernfysicus L. van Hove (CERN, maar ook lang aan de Utrechtse fysica verbonden) en de Zweedse zonnonderzoekers K. Fredga (die haar promotieonderzoek in Utrecht verrichtte) en B. Hultqvist een belangrijke rol speelden, en samen met de CLUSTER missie die zou bestaan uit vier identieke aardsatellieten om de aardmagnetosfeer te onderzoeken. Inmiddels was ook NASA er bij betrokken, aanvankelijk met strubbelingen omdat de Amerikanen niet gewend waren slechts een "junior partner" te zijn in plaats van de baas te spelen. Zij bouwden uiteindelijk drie van het dozijn waarnemingsinstrumenten dat een commissie onder C. de Jager als payload selecteerde, leverden de Atlas-raket, en herbergen vanaf de lancering het zenuwcentrum van waaruit SOHO wordt geopereerd in Goddard Space Flight Center bij Washington - dat is jammer want de stroom persberichten daarvandaan geeft SOHO stelselmatig een Amerikaans tint dan het geval zou moeten zijn. De SOHO website (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>) is een prima bron van informatie over SOHO's vondsten (en levert ook een mooie zichzelf verversende screensaver met het nieuwste zonsbeeld, waarmee de site nu meer hits scoort dan Wall Street). Ook de ESA Science website (<http://sci.esa.int/home/soho>) geeft veel informatie.

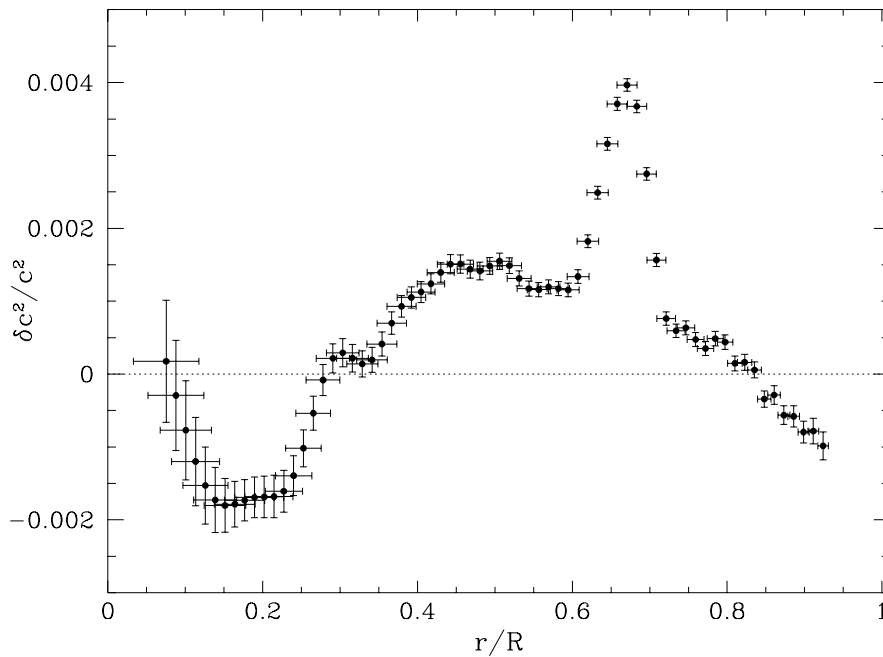
SOHO aan het werk en op vakantie

SOHO werd gelanceerd op 2 december 1995. Succesvol gelukkig, anders dan CLUSTER die mee mocht bij de eerste proeflancering van de Ariane-5 om de kosten te beperken, een dure bezuiniging want die explodeerde door een programmeerfout. SOHO bereikte de omgeving van L1 vijf maanden later en heeft sindsdien de zon vrijwel onafgebroken waargenomen - met als belangrijke uitzondering de SOHO "vakantie" in juli-augustus 1998, ook het gevolg van een programmeerfout (de status van een giro werd veranderd zonder afdoende documentatie). SOHO ging daardoor bij een simpele onderhoudsprocedure letterlijk op tilt zodat de zonnepanelen geen energie meer leverden en de communicatieantenne niet meer op de aarde was gericht, begon te wentelen en raakte volledig zoek. De angst was dat hij er ook nog vandoor ging, maar toen hij een maand later middels radarecho's met de grote radiotelescoop op Arecibo werd gelokaliseerd bleek hij nog netjes bij L1 te zitten, en wel in een zodanige stand dat de zonnepanelen verderop in de baan weer zonlicht zouden vangen. Toen dat gebeurde is de satelliet langzaam ontdooid en stapsgewijs weer tot leven geroepen - een hachelijk avontuur dat bijzonder goed is afgelopen. Sommige instrumenten waren door de zon geroosterd en anderen in de schaduw diepgevroren, maar ze werken allemaal nog steeds.¹ De oorspronkelijke opzet was dat SOHO gedurende vijf jaar zou waarnemen maar het succes bracht financiering tot 2003, en wellicht komt er nog een verlenging.

SOHO's instrumenten

De instrumentatie aan bord van SOHO bestrijkt een breed onderzoeksterrein, letterlijk de zon van binnen tot buiten. Het zonsinwendige wordt "helioseismologisch" onderzocht met drie instrumenten (GOLF, VIRGO, MDI) die uit de bewegingen en helderheidsvariëaties van het zonsoppervlak afleiden hoe

¹<http://sohowww.nascom.nasa.gov/operations/Recovery>



Figuur 1: Resultaten van helioseismologie met MDI. Het verschil tussen de waargenomen en de op grond van gedetailleerde zonsmodellen berekende waarde van de geluidssnelheid (gekwadrateerd) staat uitgezet tegen de afstand tot het zonnecentrum, genormeerd met de zonsstraal. De piek markeert de onderkant van de convectiezone. De verschillen zijn voldoende klein, minder dan een halve procent door de hele zon (alleen de binnenste kern kan zo niet gemeten worden) - maar tegelijkertijd zijn ze veel groter dan de fouten die volgen uit bekende foutbronnen. Je kunt met dit resultaat dus heel tevreden zijn! Het lijkt waarschijnlijk dat de afwijkingen vooral het gevolg zijn van het zonnemagnetisme dat in de modellen tot dusver wordt verwaarloosd: de dynamo waar we nog niet veel van weten.

de zon van binnen in elkaar steekt. Ook de magnetische structuur van het oppervlak wordt door MDI voortdurend in kaart gebracht. De hete corona van de zon en het "overgangsgebied" daar net onder worden afgebeeld en gemeten met een telescoop (EIT) en drie spectrografen (SUMER, UVCS, CDS) voor ultraviolette straling. De buitencorona wordt in gewoon licht afgebeeld met een coronagraaf (LASCO) die met een verduisterend schijfje voor de zon een totale zonsverduistering nabootst (buiten de aardse dampkring kan dat op zo'n eenvoudige manier maar wij hebben de maan er voor nodig omdat onze hemel anders te helder is). De resterende vier instrumenten meten de zonnwind, zowel in verstrooid licht (SWAN, in de Lyman-alpha lijn van waterstof) als "in situ" door deeltjes eruit te pikken op te vangen en te analyseren (CELIAS, COSTEP, ERNE).

SOHO en het zonsinwendige

Er zijn drie helioseismologische instrumenten waarmee men uit de bewegingen en helderheidsvariaties van het oppervlak van de zon afleidt hoe de zon van binnen in elkaar steekt, net zoals aardbevingen informatie geven over het inwendige van de aarde. Bij twee daarvan (GOLF en VIRGO) was de hoop vooral gevestigd op de detectie van g-modes, dat zijn eigentrillingen van de zon die de zwaartekracht als terugdrijvende kracht gebruiken en die volgens de verwachting worden opgewekt in de kern van de zon. Dat is helaas niet gebeurd; SOHO heeft de bovenlimiet fors naar beneden gebracht maar er zijn nog steeds geen g-modes boven het gras van de ruis (vooral afkomstig van de vele andere bewegingen in de zeer dynamische zonnatmosfeer) uit komen steken. Heel anders ligt het bij de p-modes waarin de gasdruk de terugdrijvende kracht is - gewone geluidstrillingen. Daarin trilt de zon voldoende sterk in eigentrillingen net zoals een orgelpijp in de kerk dat doet - maar dan wel in sferische in

plaats van lineaire harmonischen en in heel veel trillholten, een harmonisch akkoord van honderdduizenden grond- en boventonen tegelijk. De frequenties zijn heel laag, rond de 0.03 Hertz; als het geluid ons zou bereiken (dat doet het niet omdat er tussen ons en de zon luchtledig is, dus het zonnegebrom bereikt ons niet) zou het eerder te voelen dan te horen zijn.

De trillingen worden gemeten aan het oppervlak van de zon, door GOLF en VIRGO en vooral door MDI, de "Michelson-Doppler Interferometer" van Stanford University en Lockheed-Martin (waar een voor-aanstaande groep onderzoekers werkt inclusief in Utrecht opgeleide zonnefysici). MDI brengt middels meting van Dopplerverschuivingen voortdurend de bewegingen van het zonsoppervlak over de hele naar ons (en SOHO) gekeerde helft in kaart. Daaruit worden met Fouriertransformatie de inwendige trillingen afgeleid, met hoge resolutie in de frequentiescheiding van de verschillende eigentrillingen omdat de meetduur zo lang is - inmiddels jaren. Dit levert gedetailleerde informatie op over het zonsinwendige, met name de temperatuur van binnen tot buiten omdat die de geluidssnelheid bepaalt, en ook de inwendige draaiingsnelheid van de zon omdat die frequentiesplitsing van de eigentrillingen produceert. De draaiing varieert niet alleen over het oppervlak (de zonswenteling is sneller voor de equatoriale gordel dan bij de polen) maar ook met de diepte, met een intrigerend steil verloop net onder de convectiezone waarin de zonsenergie door borrelen naar buiten wordt getransporteerd. In dezelfde laag verschilt de waargenomen temperatuur ook het meeste van de modelvoorspellingen; de afwijking is maar een half procent maar niettemin heel significant. Het lijkt heel waarschijnlijk dat dit de laag is waar de dynamo gezocht moet worden die verantwoordelijk is voor het complexe magnetisch veld van de zon, inclusief de zonnevlekken, de activiteitscyclus met z'n elfjarige periode, en de

langschaliger variaties daarin (zoals de gemiddelde toename van de zonsactiviteit over de laatste decennia waaraan een deel van de mondiale verwarming wordt toegeschreven). Meer recent is de techniek van "lokale helioseismologie" ontwikkeld waarin verstoringen op het inmiddels goed bekende patroon van eigentrillingen worden gemeten. Daarmee kan de aanwezigheid van een actief gebied onder het zonsoppervlak en zelfs op (of onder) de ook voor SOHO onzichtbare achterkant van de zon worden vastgesteld. De truc is dat de voortplanting van de geluidsgolven in zulke sterk-magnetische gebieden wordt verstoord. Als dat op de achterkant van de zon gebeurt kan de golfverstoring aan de voorkant worden gemeten - zoals een storm zich op grote afstand met oceaandeining aankondigt. Inmiddels wordt de achterkant zo regulier in kaart gebracht - aanklikbaar op de SOHO website. Ook heeft de MDI echte zonnebevingen geregistreerd: na een zonnevlam verspreiden zich rondom golven over het zonsoppervlak alsof er een steen in een vijver is gegooid - maar wel met 18000 km/uur en 3 km hoog.

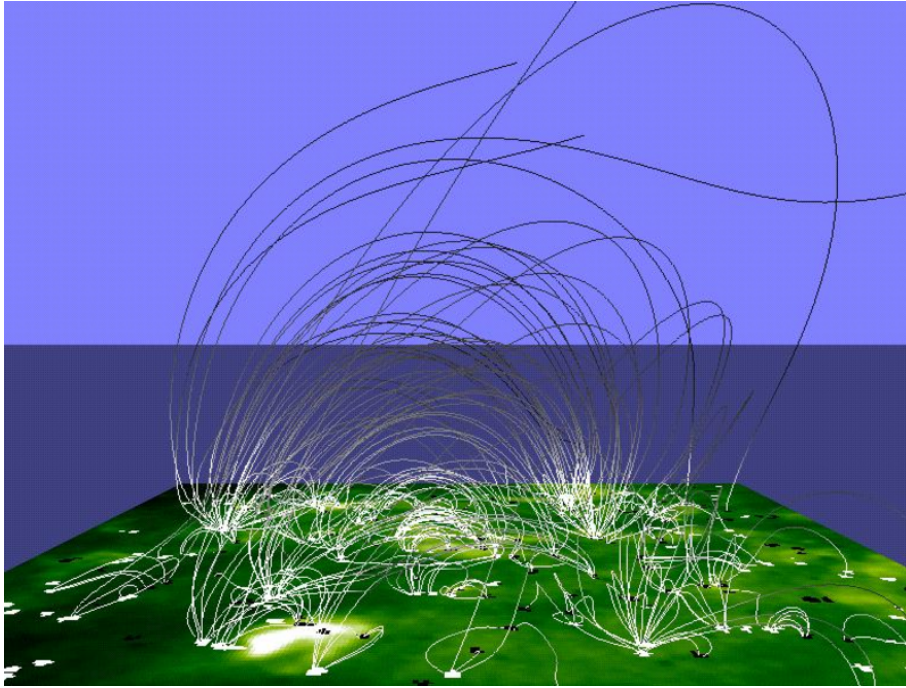
SOHO en de corona

De corona van de zon is het best bekend als het zilveren schijnsel om de zon tijdens een totale zonsverduistering, maar dat is niet anders dan door electronen verstrooid zonlicht afkomstig van het oppervlak. De eigen straling van de corona bestaat uit talrijke ultraviolette en Röntgenlijnen die alleen vanuit de ruimte kunnen worden waargenomen. De kunst is om dat met voldoende beeldscherpte en spectrale resolutie te doen. EIT, SUMER en CDS zijn daarin belangrijke stappen vooruit - kantje boord want de ontwikkeling van de oorspronkelijk geplande detectoren van de twee spectrografen stagneerde; ze zijn op het laatste nippertje vervangen door een ander type dat wel net op tijd af kwam. (SUMER bezuurt dat nu omdat deze detectoren niet tegen de combinatie van deeltjes

en fotonen blijken te kunnen - SUMER is alleen nog bruikbaar voor metingen die weinig licht gebruiken, zoals buiten de zonsrand.) Zulke hoge resoluties zijn nodig omdat de corona op uitermate fijne schaal door het magnetische veld in lussen en waaiers is gestructureerd. Heel anders dan het bijna homogene magnetisme van de aarde dat primair een dipoolvorm toont - het veld van de zon is een wirwar van dunne veldbuisjes die door het oppervlak prikken en waarvan de veldlijnen in de corona grootschalig worden kromgesloten in enorme lussen of zelfs uitwaaiers in streamers die pas ver voorbij de planeten sluiten. De vele EIT beelden en films op de SOHO website tonen deze ingewikkeldheid ten volle. Het lijkt geen twijfel meer dat de hoge temperatuur van de corona (1-2 miljoen K) het gevolg is van dissipatie in en/of reconnectie van deze magnetisch structuren, maar het is ook wel duidelijk dat het plasmafysische onderzoek naar de verantwoordelijke processen nog in de kinderschoenen staat. De groep van J. Goedbloed en R. Keppens van het Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen houdt zich daar mee bezig. In feite kan de zonnecorona worden beschouwd als een plasmafysisch laboratorium op kosmische schaal maar voldoende dichtbij om waar te nemen.

SOHO en de zonnwind

De samenstelling van de zonnwind die langs SOHO strijkt is nu in detail gemeten met CELIAS. Een groot raadsel is het feit dat sommige elementen (degene met grotere ionisatie-energie dan waterstof) daarin sterk verrijkt zijn ten opzichte van de zon zelf, terwijl de veel snellere zonnwind uit de magnetisch open gebieden (waaronder doorgaans de poolkappen) het zonder zulke elementverrijking stelt. De snelle zonnwind lijkt in UVCS metingen door resonante ion-cyclotron versnelling te worden aangedreven, terwijl de langzame zonnwind die meestentijds in de ecliptica waait



Figuur 2: Het magnetisch tapijt, een figuur van ex-Utrechter C. Schrijver (Lockheed-Martin). Het groene vlak is een stukje zonsoppervlak met in zwart en wit plekken met verhoogd magnetisch veld (plus en min polariteit) zoals gemeten met MDI. De lijnen erboven zijn een computermodel van de bijbehorende veldstructuur in de corona. Dit "hoogpolige tapijt" bestaat uit dicht-geknoopte magnetische lussen. Er duikt voortdurend nieuw veld op van onder het zonsoppervlak; Schrijver's schatting is dat al het veld zo elke 40 uur wordt ververs. De coronale topologie dient zich daar aan aan te passen; dat maakt de corona zo fijn gestructureerd, dynamisch, en heet. Omdat de coronale materie door de hoge temperatuur tot een plasma van geladen deeltjes is geïoniseerd volgt de materieverdeling de veldverdeling.

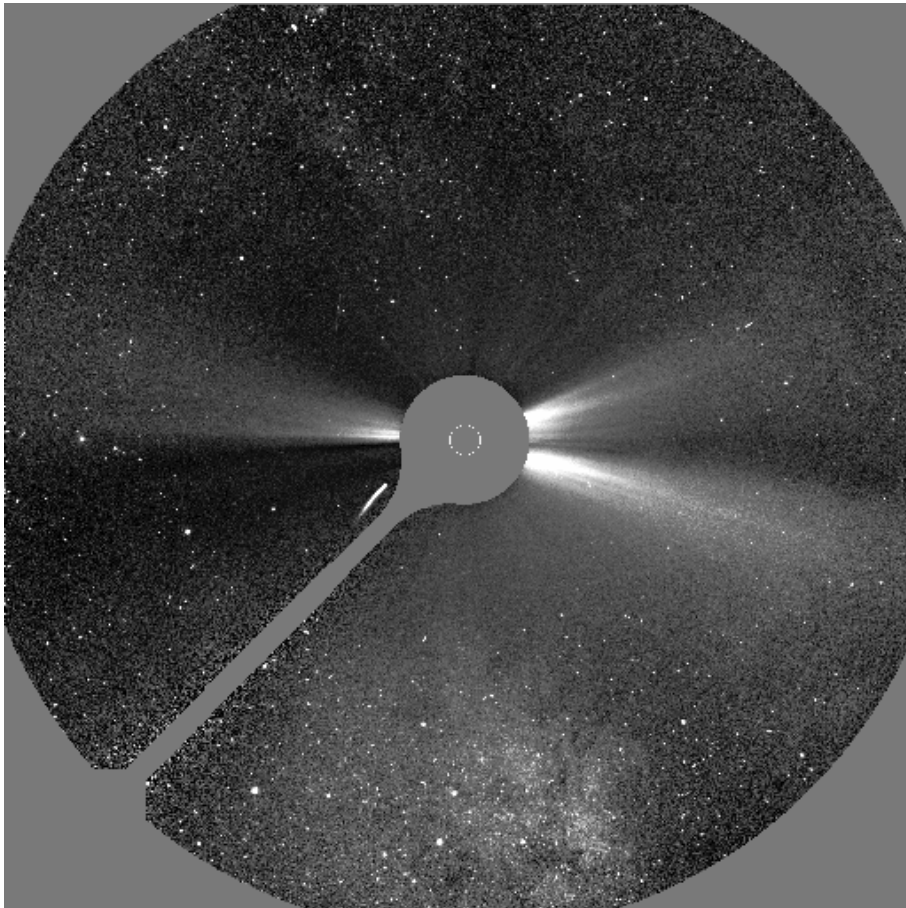
ontstaat door verdamping van de hete corona (LASCO waarnemingen van coronale materie-uitstotingen). Maar ook hier is het laatste woord nog lang niet gezegd.

SOHO's kometen

Een onverwacht aspect van SOHO is dat LASCO de beste kometenjager uit de geschiedenis is geworden, met al meer dan 200 nieuwe kometen. Ze worden meestal gevonden door amateursterrenkundigen die de dagelijkse LASCO beelden op de SOHO website inspecteren (en omdat Europeanen eerder opstaan dan Amerikanen scoren de Europese amateurs hoger). De meeste zijn kamikaze-kometen die niet meer van achter de zon te voorschijn komen. De komeetfilms op <http://sohowww.nascom.nasa.gov>

zijn vaak heel spectaculair!

Tenslotte: hoewel Utrechters nauw betrokken waren bij de geboorte van SOHO is er momenteel geen SOHO-onderzoek in Nederland. Utrechtse promovendus Mandy Hagenaar schreef een proefschrift over MDI gegevens maar zij werkt nu (bij Lockheed-Martin in Palo Alto) aan ultraviolette waarnemingen met de Amerikaanse TRACE satelliet, net zoals mijn huidige promovendus Thijs Krijger in Utrecht. TRACE is een verbeterde versie van SOHO's EIT en een belangrijke missie voor gelijktijdig waarnemen met onze eigen Dutch Open Telescope op La Palma - de scherpste zonnetlescopen op de grond en in de ruimte samen aan het werk - maar dat is een ander verhaal.



Figuur 3: Opname van de zonnecorona door LASCO op 23 december 1996. Het gezichtsveld is 23 zonsdiameters, tot halverwege Mercurius. De grootte van de zon zelf is aangegeven door het cirkeltje op de verduisteringsschijf. De opname toont het centrum van de Melkweg, de uitgestrekte corona en komeet SOHO-6 die komt binnenvallen (en dat niet overleeft).